

有源滤波器 的快速实用设计

[美] D·E 约翰逊

J·L 希尔伯恩 著

潘秋明 译

人民邮电出版社

RAPID PRACTICAL DESIGNS OF ACTIVE FILTERS

David E. Johnson, John L. Hilburn

John Wiley & Sons, Inc. 1975

内 容 提 要

本书是一种工程设计手册，介绍各种常用的有源滤波器的基本理论、电路形式和响应曲线，分析了它们的优缺点，详尽给出了用图表快速进行设计的实用方法和设计实例。在每章末尾总结有设计程序、设计图表及设计建议。可供电子线路设计初学者和专业人员、大专院校电子技术专业师生以及研制集成电路的生产部门参考使用。

有源滤波器的快速实用设计

[美] D. E. 约翰逊

J. L. 希尔伯恩

著

潘秋明译

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1980年6月第 一 版

印张：8 页数：128 1980年6月河北第一次印刷

字数：183千字 印数：1—10,500册

统一书号：15045·总2361—有5149

定价：0.65元

前 言

本书介绍有源滤波器的简化快速设计方法，即通过查表的方法完成实用滤波器的全部设计。本书希望适用于从初学者到专家的所有有源滤波器设计人员。滤波器电路所用的元件是集成电路运算放大器、电阻和电容。所有的设计表都是按标准的常用电容值编制的。

利用这些表可以构成下面几种型式的滤波器：

1. 低通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
2. 高通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
3. 带通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
4. 带阻滤波器（或陷波器）（二阶或四阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
5. 相移或全通滤波器（二阶）。
6. 恒时延滤波器或贝塞尔滤波器（二阶、三阶或四阶）。
7. 全通恒时延滤波器（二阶）。

对于切比雪夫响应，几乎所有的滤波器都给出了0.1、0.5、1、2和3dB波纹宽度的设计数据。

每种滤波器在本书分别专设一章加以讨论。在每章末尾概括了设计程序并给出了适当的设计表。对于所考虑的每种电路都给出了实用的设计建议。每章都包含最常用的滤波器，如压控电压源(VCVS)、无限增益多路反馈和双二次电路的设计。此外，在低通、高通、带通和时延电路里，还包括作者自己设

计的几种多路反馈滤波器，它们都具有优良的工作性能。第六章讨论一种新型滤波器，它既具有贝塞尔型又具有全通型的滤波器特性。

对于所讨论的大多数型式的滤波器都给出了许多详细的例子，而且还附有所得响应的实际照片。例如，2.5节给出了压控电压源低通滤波器的详细设计，这可用为总的设计指导。然而，使用本书却无需通读各章，因为在每章末尾的摘要里都已给出了全部必需的知识。

本书是我们合著的这类题材的第二本书；由于各人对每本书所做的贡献相同，因此，在本书我们互换了署名的次序。

D. E. 约翰逊

J. L. 希尔伯恩

译 者 序

滤波器是除放大器以外使用最广泛的模拟电路部件。滤波器的小型化在电子线路的小型化中起着非常重要的作用。在低频范围，普通的 LC 滤波器由于需要很大的电容和电感，产生了体积、重量、感应、失真和干扰等一系列问题。多少年来，人们总是想利用其他器件代替它们，特别是取代电感。有源滤波器就是其中一个很重要的方法。

运算放大器的应用，特别是集成电路运算放大器的广泛应用及其性能的提高和价格的降低，为有源滤波器的广泛使用创造了非常有利的条件。在低频和超低频范围，原来的 LC 滤波器将越来越多地为有源滤波器所代替，这是毫无疑问的。

近年来，有源滤波器的理论研究工作 and 实际设计制作技术的研究工作非常活跃，有关这方面内容的书籍和论文很多。在这本书中，作者介绍了各种常用的有源滤波器的基本理论和电路形式，分析了它们的优缺点，给出了详尽的用图表进行设计的方法。和别的著作不同的是，作者在本书中对各种电路的设计全部采用标准电容值，使用起来非常方便。本书按滤波器的种类分章，各章自成体系，读者只需查阅各章末尾的设计程序摘要就可以进行滤波器设计，确实是一本“快速”和“实用”的设计手册。

原书中有些明显的差错和提法不妥的地方我们作了更正，有几个地方还加了译者注，以便于初学者参考。

本书译稿承成都电讯工程学院卢铁城同志和1020所邱致和同志校阅，谨此致谢。

译 者

1979年4月

目 录

1. 绪论	(1)
1.1 滤波器理论基础	(1)
1.2 运算放大器	(3)
1.3 电阻和电容	(4)
2. 低通滤波器	(6)
2.1 基本理论	(6)
2.2 巴特沃斯低通滤波器	(7)
2.3 切比雪夫低通滤波器	(9)
2.4 设计表	(10)
2.5 压控电压源低通滤波器	(12)
2.6 无限增益多路反馈低通滤波器	(14)
2.7 双二次低通滤波器	(15)
2.8 多路反馈低通滤波器	(16)
2.9 多路反馈低通滤波器设计实例	(26)
2.10 压控电压源低通滤波器设计程序摘要	(29)
2.11 无限增益多路反馈低通滤波器设计程序摘要	(48)
2.12 双二次低通滤波器设计程序摘要	(63)
2.13 多路反馈低通滤波器设计程序摘要	(68)
3. 高通滤波器	(74)
3.1 基本理论	(74)
3.2 压控电压源高通滤波器	(76)
3.3 无限增益多路反馈高通滤波器	(79)
3.4 双二次高通滤波器	(80)
3.5 多路反馈高通滤波器	(81)

3.6	多路反馈高通滤波器设计实例	(89)
3.7	压控电压源高通滤波器设计程序摘要	(91)
3.8	无限增益多路反馈高通滤波器设计程序摘要	(109)
3.9	双二次高通滤波器设计程序摘要	(121)
3.10	多路反馈高通滤波器设计程序摘要	(124)
4.	带通滤波器	(133)
4.1	基本理论	(133)
4.2	二阶节的级联	(135)
4.3	压控电压源带通滤波器	(136)
4.4	无限增益多路反馈带通滤波器	(138)
4.5	正反馈带通滤波器	(139)
4.6	双二次带通滤波器	(140)
4.7	多路反馈带通滤波器	(143)
4.8	多级谐振器型带通滤波器	(145)
4.9	压控电压源带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(149)
4.10	无限增益多路反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(153)
4.11	正反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 50$)	(153)
4.12	双二次带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 100$)	(163)
4.13	四阶多路反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(169)
4.14	多级谐振器型带通滤波器设计程序摘要(阶数 $n = 4, 6, 8$)	(183)
5.	带阻滤波器	(195)
5.1	基本理论	(195)
5.2	压控电压源带阻滤波器	(197)
5.3	多路反馈带阻滤波器	(198)
5.4	双二次带阻滤波器	(199)
5.5	压控电压源带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(202)
5.6	多路反馈带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 25$)	(205)

5.7	双二次带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 50$)	(207)
6.	相移和时延滤波器	(215)
6.1	全通滤波器	(215)
6.2	二阶单运算放大器全通滤波器	(217)
6.3	双二次全通滤波器	(218)
6.4	恒时延或贝塞尔滤波器	(219)
6.5	贝塞尔滤波器的实现	(220)
6.6	全通恒时延滤波器	(222)
6.7	单运算放大器全通滤波器设计程序摘要	(224)
6.8	双二次全通滤波器设计程序摘要	(230)
6.9	贝塞尔(恒时延)滤波器设计程序摘要	(235)
6.10	全通恒时延滤波器设计程序摘要	(241)
	参考文献	(243)
	附录A	(245)
	附录B	(247)

1. 绪 论

1.1 滤波器理论基础

滤波器是一种通过一定频率的信号而阻止或衰减其他频率信号的部件。能通过的频率构成通带，而被衰减的频率则构成滤波器的阻带。按通带和阻带在频域内的位置，滤波器分为低通、高通、带通、带阻和全通等类。这些型式以及恒时延滤波器将在以后分别以一章的篇幅进行讨论。

滤波器的性能可用其幅度响应来衡量，它是滤波器传递函数 $H(s)$ 的幅度 $|H(j\omega)|$ 对角频率 ω ($\omega=2\pi f$, rad/sec)或频率 f (赫)的响应曲线。在所有情况下，我们取 $H(s)=V_2(s)/V_1(s)$ ，其中 V_2 和 V_1 分别为滤波器的输出和输入电压。对于每种滤波器，其理想幅度响应和逼近于理想情况的在物理上可实现的响应的例子将在相应的章节里加以介绍。

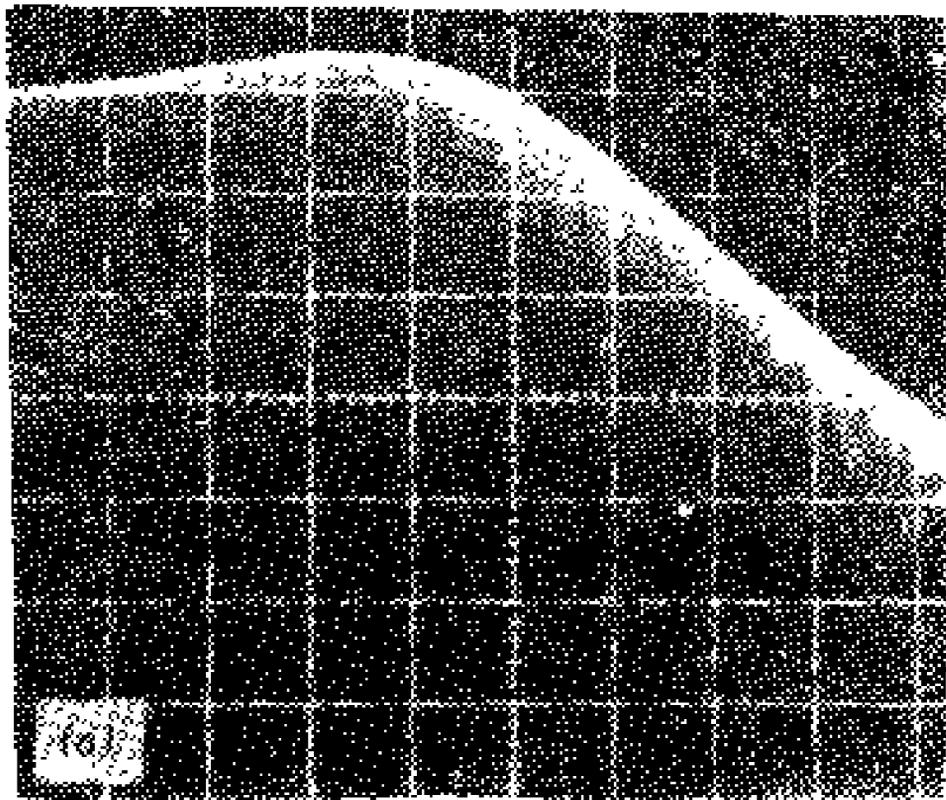
除幅度响应以外，滤波器的另一重要特性是它的相位响应，即 $\phi(\omega)$ 对 ω 所构成的曲线，这里 $\phi(\omega)$ 由下式定义：

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (1.1)$$

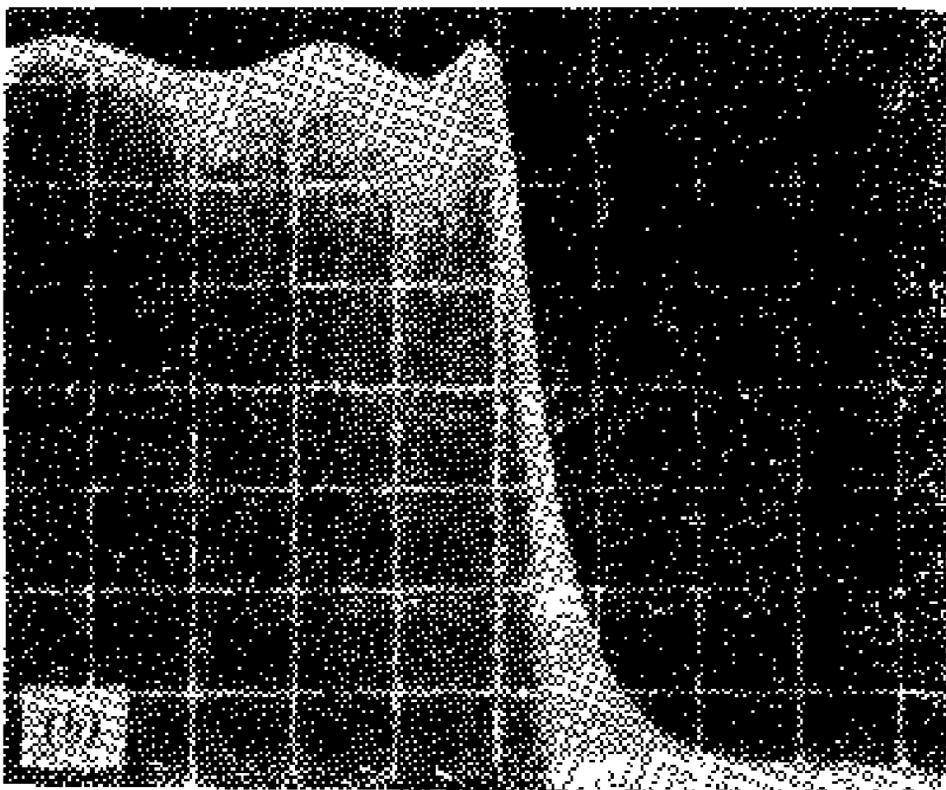
在某些滤波器设计中，如第六章要讨论的全通和贝塞尔滤波器，相位响应就是我们所关心的特性。

在早期的著作中〔1〕*，作者讨论了低阶，主要是二阶和四阶有源滤波器的快速设计方法（对于各种滤波器，“阶”这

* 引用的参考文献列于书末的文献目录中。



(a) 二阶



(b) 六阶

图 1—1 低通滤波器幅度响应

个术语将在以后给出定义，今后将可看到，阶数越高则通带和阻带的分界越陡，因而滤波器越好)。高阶滤波器比低阶滤波器优越，如图 1—1 所示。其中，(a) 为二阶低通滤波器的幅度响应，(b) 为同种类型的六阶低通滤波器的幅度响应。这些是实际电路的响应，其结构将在第二章里叙述。

无源滤波器由电感、电容和电阻构成，在一定频率范围内是很适用的。然而，在低频范围，由于电感尺寸和性能的限制，无源滤波器是不理想的。因而多少年来，设计师们力求

用模拟电感特性的有源器件来代替电感。近年来，小型化的进展使有源元件在价格上可以和电感相竞争，而且通常还比电感便宜，这就加速了用有源器件代替电感的趋势。

用有源部件代替电感以得到滤波器的方法有许多种（参考文献〔2〕到〔8〕）。本书用的有源部件为集成电路运算放大器，这将在下一节简单地加以叙述。我们介绍的大多数设计都是制作

有源滤波器时通用的。此外，对于大多数型式的滤波器，我们还介绍了一种由作者自己设计的新电路。给出了每种型式滤波器的设计表，设计人员根据技术指标可以简单地选择相应的表格并得出电路元件值。本书所列参考文献对每种滤波器都提供了若干参考资料，供对理论细节感兴趣的读者使用。然而，为了使用本书介绍的设计程序制作滤波器，读者只需参考每章末尾设计表前设计摘要的内容。

1.2 运算放大器

我们用的主要的有源部件是运算放大器，其符号示于图 1—2。运算放大器为一多端部件，为简单起见，我们只画出三个端点，即反相输入

端(—)，同相输入端(+)和输出端。输出电压决定于输入端的电压差，因而图 1—2 所示的运算放大器经常被认为是一个差分

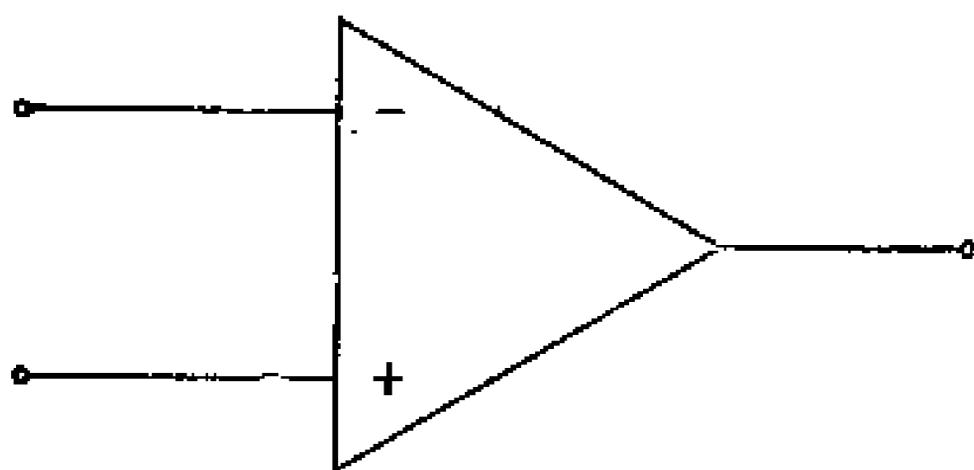


图 1—2 差分运算放大器

运算放大器。其他未画出的端子的用途在产品说明书里有说明，通常包括电源输入端、频率补偿端和调零端。

在推导下面几章的设计公式时，我们假定运算放大器两个输入端的电位差为零，它们的输入电流也为零。对理想运算放大器来说，这是对的；如果按照产品说明书正确使用运算放大器，实际的运算放大器也很接近这种理想情况。理想运算放大器的其余特性是具有无限大的输入阻抗而输出阻抗为零，实际的运算放大器也接近于这样的特性。这就允许人们可以将两个

或更多的电路级联起来而不会明显地影响它们各自的工作。

有许多出版物对市售的运算放大器的特性和使用作了详细的说明(如参考文献〔2〕、〔4〕和〔9〕至〔18〕)。此外,大多数制造厂都出版了包含具体运算放大器性能指标的详细产品目录。参考文献〔9〕给出了大量的产品目录。

一般说来,为了稳定地工作,集成电路运算放大器需要频率补偿。一些运算放大器为内部补偿式,如741、536、107、5556、740和747(双741)。为了区分不同的制造厂家,使用了不同的表示符号,如 μ A741、AD741、MC1741、LM741、RC741、SN72741、CA3056A等等都是741型运算放大器。其他的运算放大器要求外部补偿,其补偿情况由产品目录说明,通常在很高的频率和增益时这种补偿是很有用的。如709、748、101和531型就是这类运算放大器的例子。

为了使下面几章给出的电路获得最好的结果,设计人员应当使用有足够的增益和带宽的运算放大器。例如,制造厂给出的开环增益至少应是滤波器增益的50倍^{〔11〕}。其他的要求在每章末尾摘要中给出。

1.3 电阻和电容

常用的三种电阻为炭质合成电阻,金属膜电阻和线绕电阻。其中,炭质合成电阻最便宜,大量地用于设计要求不太严格的滤波器中。特别是用于在室温下使用的滤波器中。在我们的例子里,使用容差为5%的炭质合成电阻来构成二阶、三阶

* 一些著名的制造厂为伯尔—布朗研究公司、费尔柴尔德半导体公司、莫托罗拉公司、国家半导体公司、RCA公司、西格涅梯克斯(Signetics)公司和德克萨斯仪器公司。

和四阶滤波器。当性能要求高，或者温度因素较重要时，应采用金属膜或线绕电阻。对于五阶、六阶滤波器，设计要求比较严格，需采用容差约为2%的元件。七阶和八阶设计要求更加严格，应当使用容差为1%的元件。在我们的例子中，五到八阶滤波器使用容差为1%的金属膜和线绕电阻。

至于电容，陶瓷圆片电容是很通用和经济的。但是它只应用在要求非常不高的情况下。比较可取的是聚酯树脂电容，我们在许多设计例子中都使用这类电容。对应用条件严格和性能要求高的滤波器，在大多数情况下，最好选用聚苯乙烯或聚四氟乙烯电容。要更好地了解电阻和电容，读者可以参考文献(2)第317~319页。

最后还需指出，构成高阶滤波器，比如七阶和八阶，只有在有经验的设计人员通过测试设备对电路元件检测以后才能进行。

2. 低通滤波器

2.1 基本理论

低通滤波器是一个通过低频信号而衰减或抑制高频信号的部件。理想的低通滤波器幅度响应如图2—1虚线所示，可以实

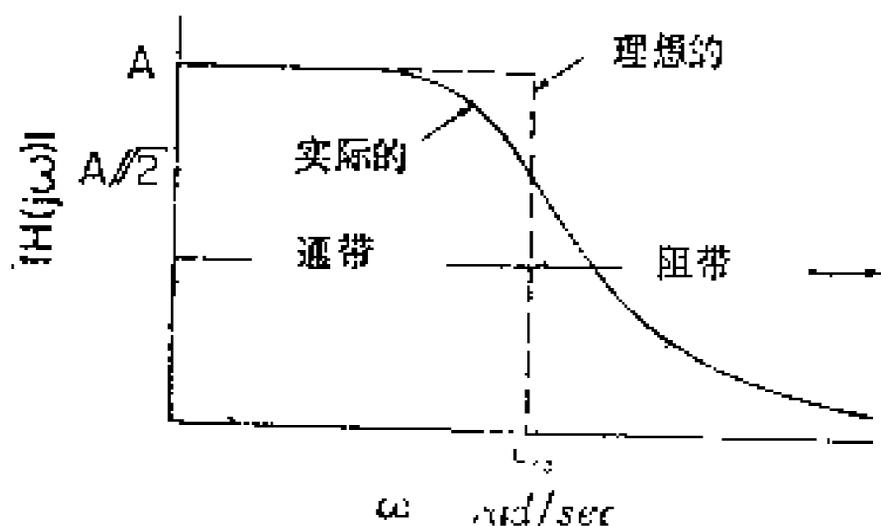


图 2—1 低通滤波器幅度响应

现的近似于理想特性的幅度响应如实线所示。在理想情况下，可以清楚地指明通带 ($0 < \omega < \omega_c$) 和阻带 ($\omega > \omega_c$)；但在实际情况下，必须定义截止角频率 ω_c (或 $f_c = \omega_c / 2\pi$, 以 Hz 为单位)。通常，

ω_c 的定义是当 $|H(j\omega)|$ 下降为最大值 (在图2—1中用 A 表示) 的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 时的频率。

有些作者认为阻带开始于 $\omega_1 > \omega_c$ 点，这里 $|H(j\omega_1)|$ 远低于 $A/\sqrt{2}$ ，并在 ω_c 和 ω_1 之间定义一个过渡带 ($\omega_c < \omega < \omega_1$)。对我们来说，这种精确的划分没有必要，我们只简单地认为阻带就是 $\omega > \omega_c$ 的区间。

幅度响应也可按分贝 (dB) 数画成曲线，并用 a 表示，它的定义为：

$$a = 20 \log_{10} |H(j\omega)| \quad (2.1)$$

这样，在截频点， α 低于最大值 $20 \log_{10} \sqrt{2} = 3 \text{ dB}$ 。

当然，理想的低通幅度响应不可能在物理上加以实现；然而，可用下面的传递函数对理想特性加以逼近

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \quad (2.2)$$

其中， G, b_0, b_1, \dots, b_n 为适当选择的常数。(2.2) 式表示一个 n 阶全极点近似式，其所以这样称呼是因为它的分母多项式为 n 次幂而分子为常数（因而它没有有限零点，只有有限极点）*。低通滤波器的增益是传递函数在 $s=0$ 时的值，很明显，在 (2.2) 式里，增益就是 G 。

我们将把讨论限定在全极点函数，故 (2.2) 式将表示各种 n 值时的一般情况。关于其他类型的近似以及对低通滤波器理论的完备的叙述，读者可参阅典型的滤波器和电路理论书籍，如参考文献 (19) 至 (22)，最近的书籍如 (23)、(24)。

有许多种低通滤波器，最通用的也许是巴特沃斯和切比雪夫型。它们的传递函数都为 (2.2) 式的类型，差别仅仅在于常数 b_0, b_1, \dots, b_{n-1} 的选择。在本章中，我们将简略地讨论巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器的性能并给出简单快速的设计方法。

2.2 巴特沃斯低通滤波器

一种用所谓最平通带特性去逼近理想低通特性的滤波器叫巴特沃斯滤波器 (21)、(22)。其幅度响应为

$$|H(j\omega)| = \frac{G}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}, \quad n=1, 2, 3 \dots \quad (2.3)$$

* 零点是当传递函数为零时的 s 值，而极点是当传递函数为无穷大时的 s 值。

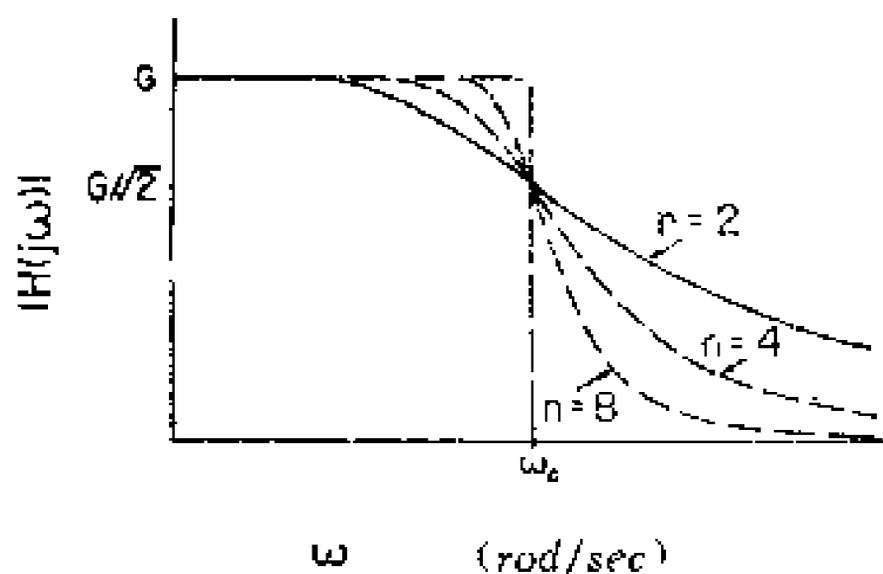


图 2—2 巴特沃斯滤波器幅度响应

这里 n 为滤波器的阶。从图 2—2 (图中表示了 n 为几种不同值的情况) 可见, 随着 n 的增长, 响应更加接近理想特性。

巴特沃斯滤波器在 $\omega = 0$ 附近有很好的幅度特性, 但它的截止特性

(在 $\omega = \omega_c$ 附近) 和它进入阻带以后的衰减速率一样, 也较差。下一节将要介绍一种牺牲一些巴特沃斯低频特性但在其他区域的幅度特性很好的滤波器, 这就是切比雪夫滤波器。例如, 在较高的频率, 巴特沃斯响应的衰减速率约为 $-20n\text{dB}/十倍频$ (“十倍频”表示频率变化十倍), 它显然低于切比雪夫滤波器的相应的衰减速率*(21)。

理想的相位响应是斜率为 $-\tau$ 的直线, 这里 τ 为时延, 将在第 6 章讨论。从相位响应的观点来看, 巴特沃斯滤波器优于切比雪夫滤波器, 这就是说, 在整个通带内, 前者的相位响应更接近于直线(21)。一般说来, 滤波器幅度响应越好, 则其相位响应越差, 反之亦然。图 2—2 给出的巴特沃斯滤波器的相位响应示于图 2—3。

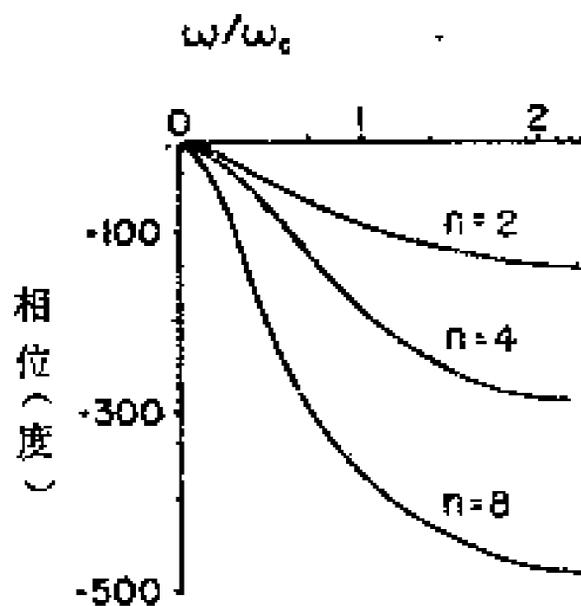


图 2—3 巴特沃斯滤波器相位响应

*这句话是不准确的。可以证明, 在远大于截止频率的区域, 所有全极型滤波器的衰减率都是 $-20n\text{dB}/十倍频$, 只是在截止频率附近, 巴特沃斯滤波器衰减下降率近似于 $-20n\text{dB}/十倍频$, 而切比雪夫滤波器则可能远大于 $-20n\text{dB}/十倍频$ 。因此这句话应该是“在截止区, 切比雪夫滤波器比巴特沃斯滤波器具有更大的衰减”。

——译者

2.3 切比雪夫低通滤波器

切比雪夫低通滤波器的幅度响应^[22]由下式给出

$$|H(j\omega)| = \frac{K_1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega/\omega_c)}}; \quad n=1, 2, \dots \quad (2.4)$$

这里， ε 和 K_1 为常数， C_n 是第一类 n 阶切比雪夫多项式。图2—4表示了 ε 值相同而 n 值不同的几个实例。由图可见，在通带内，具有幅度相等的波纹。随着 n 的增加，波纹数目增加，同时阻带内的衰减也增加。由此得出，在通带内波纹幅

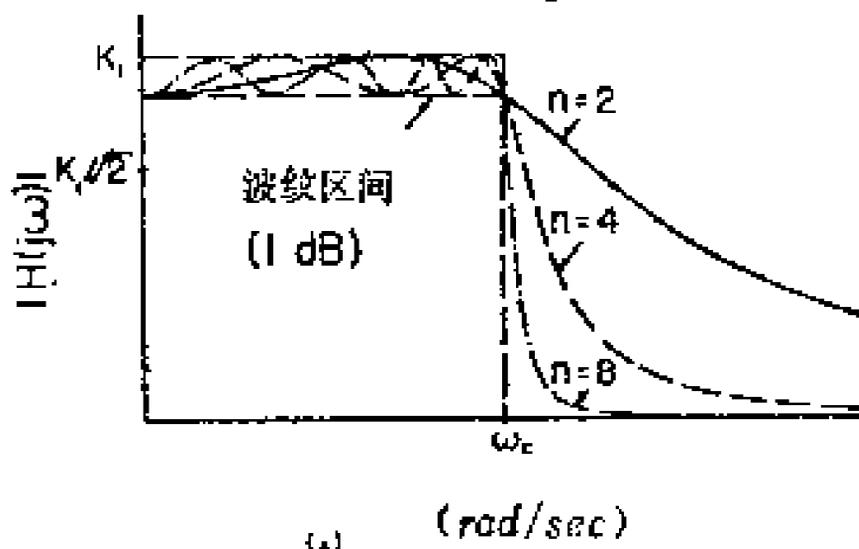


图 2—4 切比雪夫滤波器幅度响应

度一定时，随着 n 值的增加，对理想特性的近似越好。

当 $K_1 = 1$ 时，波纹幅度为 $RW = 1 - 1/\sqrt{1 + \varepsilon^2}$ ，而用分贝定义时为

$$RW_{dB} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2} = 10 \log(1 + \varepsilon^2)$$

此值决定于 ε 的选择，它可以用来表征滤波器的性能。例如，1dB切比雪夫低通滤波器，其幅度响应（用dB表示）具有1dB的通带波纹宽度*。由图2—4显然可见，这里所定义的 ω_c 为等波纹区间的边缘而不是通常的3dB截频点（3dB波纹的滤波器除外）。在我们讨论的切比雪夫滤波器中，我们将把 ω_c 看作是截频点，该点就是等波纹区间的终止频率。对于各种 n 值和波纹幅度（分贝）， ω_c 值与通常的3dB截频的关系可由表2—1查

*这里按原文字面意义译为波纹宽度，实质上是指波纹幅度。——译者

得。

表 2-1 切比雪夫低通滤波器3dB截止点 f_{3dB} 与波纹区间截止频率 f_c 的比值

dB \ n	f_{3dB}/f_c						
	2	3	4	5	6	7	8
0.1	1.943	1.389	1.213	1.135	1.093	1.068	1.052
0.5	1.390	1.168	1.093	1.059	1.041	1.030	1.023
1	1.218	1.095	1.053	1.034	1.023	1.017	1.013
2	1.074	1.033	1.018	1.012	1.008	1.006	1.005
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

在不允许通带内有波纹的应用中，显然，巴特沃斯型比切比雪夫型更可取。然而，当给定 n 值和通带内允许的偏差时，切比雪夫滤波器是所有全极型滤波器中最好的，因为它由通带到阻带内给定衰减值所需的过渡带最小^[25]。例如，在阻带内，切比雪夫幅度响应的衰减约比巴特沃斯型大 $6(n-1) + 20 \log e$ 分贝*^[21]。

正如前一节所述，切比雪夫滤波器的相位响应比巴特沃斯滤波器差。高阶切比雪夫滤波器幅度响应较好，但相位响应更坏。为了说明上述特性，在图2—5中给出了几种切比雪夫滤波器的相位响应。

2.4 设计表

(2.2)式中的系数 b_0, b_1, b_2, \dots ，对于巴特沃斯滤波器可用(2.3)式计算，而切比雪夫滤波器用(2.4)式计算，这已经有人计算出来了（例如，参考文献^[22]）。为方便读者，在附

*原文误为 $3(n-1) + 20 \log e$ 分贝——译者

录 *A* 和 *B* 中给出了巴特沃斯和切比雪夫函数 $n = 1, 2, \dots, 8$ 的通用的 n 阶多项式系数和它们的二阶因式的系数。在每种情况下，截频 ω_c 都归一化为 1 弧度/秒。

按给定截频 f_c (赫) 设计滤波器时，我们可以使用归一化系数并对所获得的网络进行标定。有许多种方法可以达到这一目的，我们选用下面的方法。我们用归一化电容，

如 $C = 1F$ ，设计归一化网络。然后用电容 C 的实际标称值来代替归一化的 $1F$ 电容，再将归一化电阻值乘以系数

$$k = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (2.5)$$

其余的电容值是将其归一化值乘以 C 值即得。

在本书以后讨论的滤波器电路里，可以利用每章末尾所附的设计表来完成标定。标定系数 k 可以被分解为两个因子，其中一个因子合并到表中，另一个因子为参数 K ，它由下式给出

$$K = \frac{100}{f_c C'} \quad (2.6)$$

这里 C' 是以微法为单位的 C 值。这就是说，如果所选的 C 为 $0.01\mu F$ ，于是 $C' = 0.01$ 等等。表中参数是当 $K = 1$ 时的电阻值，以千欧为单位。标定的方法是将表中电阻值乘以由 (2.6) 式算出的 K 值。

另外，为设计人员方便，每章还包括了一些曲线，当给定了 f_c 并选定了电容 C' 时，利用这些曲线可以代替 (2.6) 式以求出 K 值。对于高阶滤波器，要求较高的精度，用 (2.6) 式

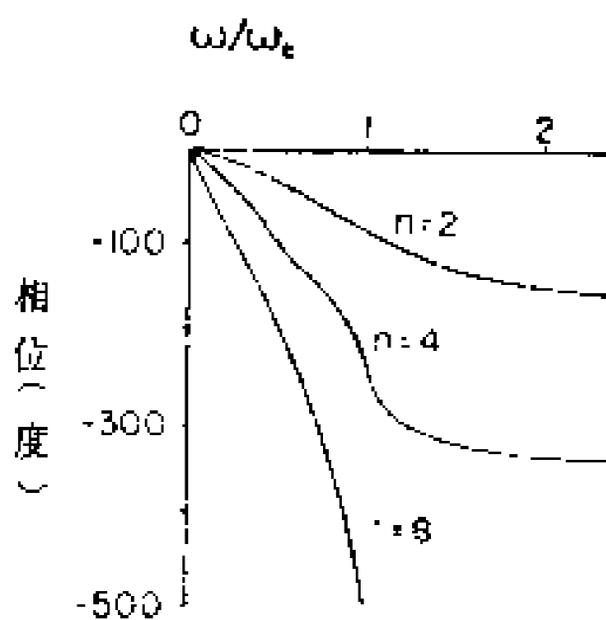


图 2—5 切比雪夫滤波器相位响应

而不用曲线求 K 也许要好一些。

2.5 压控电压源低通滤波器

用运算放大器、电阻和电容构成低通滤波器的方法有许多种。在本章下面的部分我们将讨论几种目前比较通用的方法以及作者自己设计的一种新方法。一种广泛应用的通用电路是萨伦-基 (Sallen-Key) 电路^[26]。我们把萨伦-基电路看作是压控电压源低通滤波器，因为它是一个运算放大器和适当连接的两个电阻构成一个压控电压源。

在二阶低通滤波器的情况下，传递函数(2.2)式变为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{s^2 + b_1s + b_0} \quad (2.7)$$

实现这种传递函数的萨伦-基电路示于图 2—6，这里运算放大器

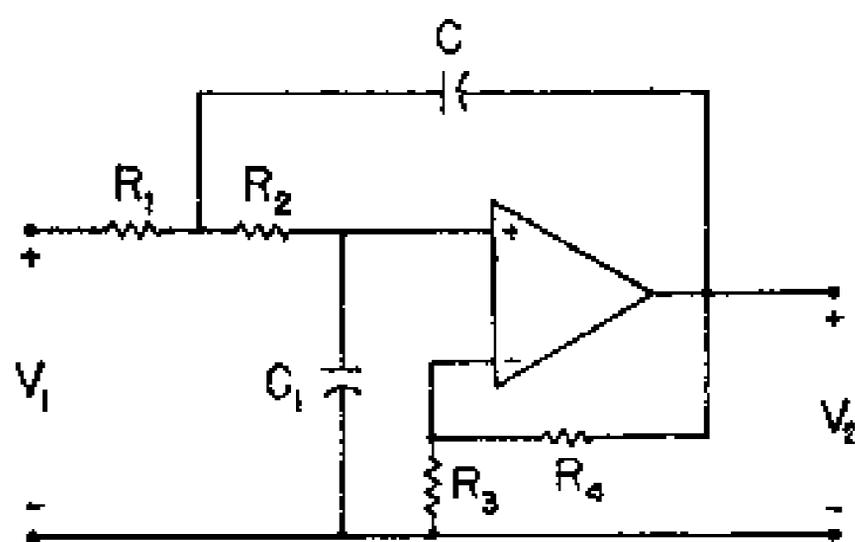


图 2—6 二阶压控电压源低通滤波器

器和电阻 R_3 及 R_4 构成压控电压源。高阶偶次滤波器可由两个或多个二阶滤波器级联组成。在这种情况下，传递函数必须被因式分解为如(2.7)式所示的二阶函数的乘积。那么，每一级都可用如图 2—6 的

电路来实现 (例如(27))。

分析图 2—6 可见，得到(2.7)式的条件是

$$b_0 = \frac{1}{R_1 R_2 C C_1}$$

$$b_1 = \frac{1}{R_2 C_1} (1 - \mu) + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C} \quad (2.8)$$

$$G = \mu = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

这里 μ 是压控电压源的增益，它也是滤波器的增益。

为设计二阶压控电压源低通滤波器或高阶滤波器的二阶节，我们采用图2—6的电路。对于给定的增益 G 和系数 b_0 和 b_1 ，电容 C 和 C_1 及电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 实际值的选定一定要满足(2.8)式。

为了简化设计程序，我们在后面作出了一些设计表，用这些设计表可以得到电阻和电容的值，其方法如下。给定了要求的截频 f_c 、增益 G 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应等)，我们选择一个电容 C 的标称值，从(2.6)式或图2-16a~2-16c之一求出参数 K 。利用这个 K 值，然后从表2-2~2-25中选择适当的一张表，查出 C_1 和对应于 $K=1$ 时的电阻值。再将这些电阻值乘以 K 就得到滤波器设计所要求的实际电阻值。

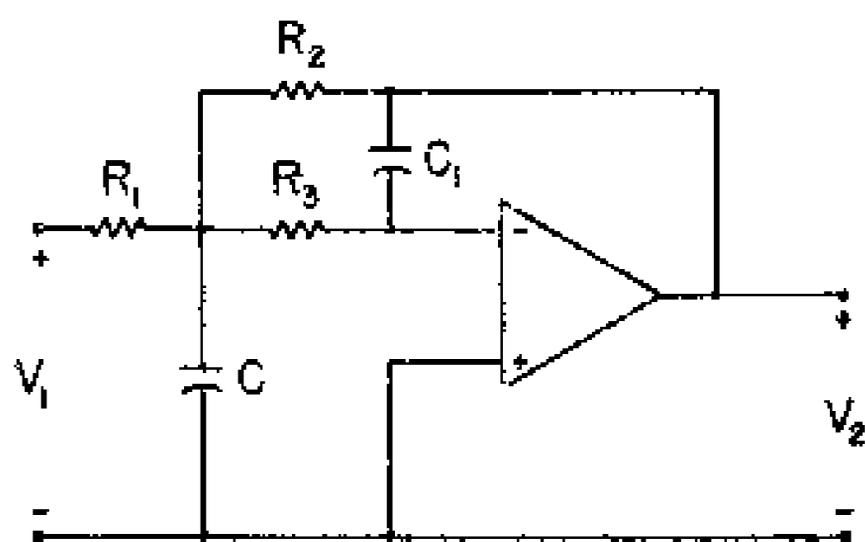
实例：假定我们要求一个二阶压控电压源0.5dB的切比雪夫低通滤波器，增益 $G=2$ ，截频(波纹区间的终止频率) $f_c=2000\text{Hz}$ 。选择电容 $C=0.01\mu\text{F}$ 。从图2—16b查得参数 K 为5。或者，参数 K 也可以从(2.6)式求出。从表2—4找出 C_1 和 $K=1$ 时的电阻值。将电阻值乘以5，结果得到网络元件值为 $R_1=5.580$ ， $R_2=7.485$ ， $R_3=R_4=26.130$ (均为 $\text{k}\Omega$)，又 $C_1=C=0.01\mu\text{F}$ 。然后，按照图2—6制作滤波器。其幅度响应如图1—1a所示。在参考文献〔1〕中用实例构成了许多二阶滤波器，并且具有实际电路元件值和响应曲线。所用的电阻尽可能接近计算值。

压控电压源滤波器是具有同相(正)增益的最常用的低通滤

波器之一。它的优点是用的网络元件少，特性容易调整，输出阻抗低，元件值分布范围小，能够获得较高的增益^[28]。一个明显的优点是可以通过一个电位器调整压控电压源的增益以精确地调整滤波器的增益。这个办法将在2.10节压控电压源滤波器完整的设计程序中加以说明。

2.6 无限增益多路反馈低通滤波器

一种能实现(2.7)式又比萨伦-基网络少用一个电阻的电路是如图2—7所示的多路反馈电路^[2]。我们称这种滤波器为无限增益多路反馈低通滤波器，因为它有通过 C_1 和 R_2 的两个反馈支路，又因为在这里运算放大器是作为无限增益部件用的，而不像萨伦-基电路作有限增益压控电压源用。此外，“无限增益”这个形容词可把这种滤波器与2.8节要讨论的多路反馈滤波器区别开来。



此外，“无限增益”这个形容词可把这种滤波器与2.8节要讨论的多路反馈滤波器区别开来。

分析图2—7可见，无限增益多路反馈滤波器得到(2.7)式的条件是

$$b_0 = \frac{1}{R_2 R_3 C C_1}$$

$$b_1 = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (2.9)$$

$$G = -\frac{R_2}{R_1}$$

我们注意到滤波器有反相(负)增益 R_2/R_1 ，因而适用于在 $\omega=0$ 附近要求有 180° 相移的场合。

无限增益多路反馈滤波器是一种非常通用的具有倒相增益型式的滤波器。它的优点是所用的网络元件少(每节比上一节讲述的压控电压源电路少用一个电阻)，特性稳定，输出阻抗低^[28]。

为了快速设计无限增益多路反馈低通滤波器，读者应首先选定一个 C 值，并由(2.6)式计算参数 K ，或者从图2—16 a、b或c之一查出 K 值，再由本章末尾表2—26~2—49中适当的一个表查出电路元件参数。设计程序摘要，包括实际建议和电路，在2.11节中给出。

2.7 双二次低通滤波器

如图2—8所示的电路就是所谓双二次电路^[29]，与前面两节讲到的压控电压源或无限增益多路反馈滤波器相比，它要用更多的元件，但却便于调整并具有很好的稳定性。当 C 和 R_4 都归一化为1时，这个电路满足(2.7)式的条件是：

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{R_3} \\ b_1 &= \frac{1}{R_2} \\ G &= \frac{R_3}{R_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

如果输出电压 V_2 从图2—8上的 a 点取出，也可以得到相同的结果，只是增益是反相的。

与压控电压源和无限增益多路反馈滤波器相比，尽管双二

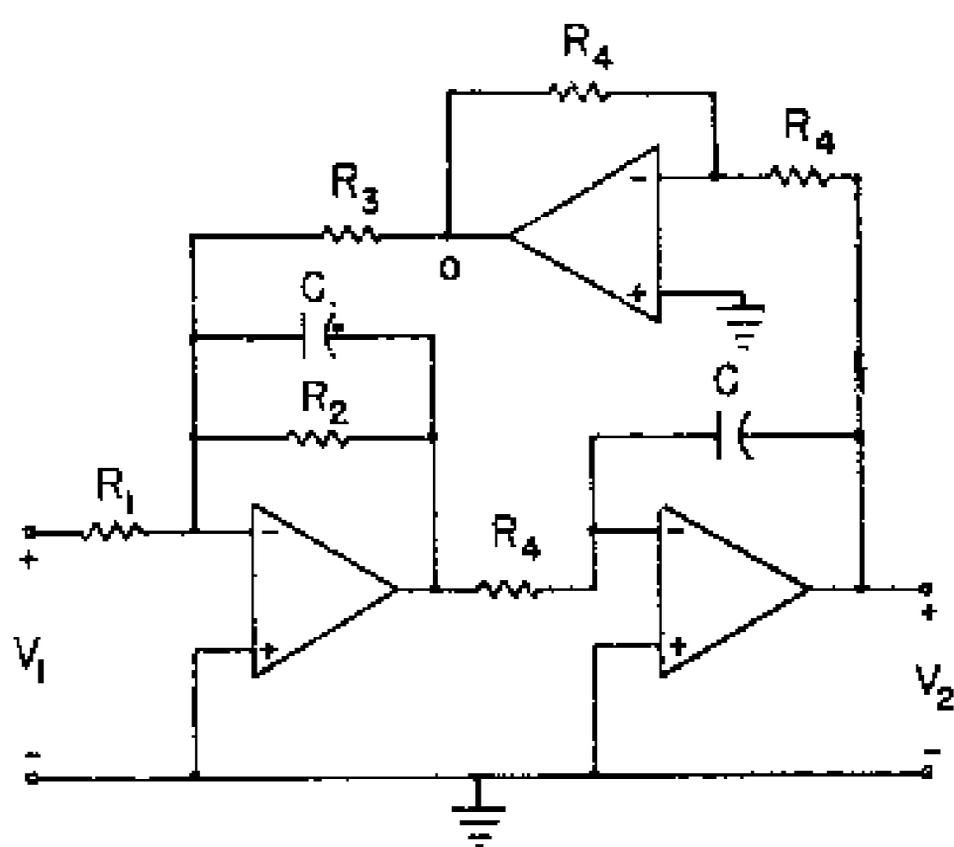


图 2—8 二阶双二次低通滤波器

次滤波器要用更多的元件，但它仍是应用很广的电路。这主要是因为它有非常好的调整特性和稳定性，这些在几节电路级联时是非常重要的〔30〕。

双二次低通滤波器的一般设计程序在2.12节给出。确定元件值的设计表见表2—50~2—53。

2.8 多路反馈低通滤波器

作者自己设计的低通滤波器〔31〕类似于级联的压控电压源滤波器，其特点在于从每级运算放大器的输出端通过电容引进了反馈。我们把这种电路称为多路反馈低通滤波器，这一节汇总了三到八阶的电路。将电路的电容 C 和截频 f_c 都归一化为1，利用下面的公式可以获得(2.2)式的传递函数。为得到归一化的电路元件值，将这些方程送入数字计算机加以计算。

$n = 3$ 的电路示于图2—9，得到(2.2)式的条件是

$$b_0 = \frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}$$

$$b_1 = A \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_2} - \frac{1}{R_2^2 C_1} \quad (2.11)$$

$$b_2 = A + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$G = \mu$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (2.12)$$

$$A = \left[\frac{C_1}{R_3} (1 - \mu) + C_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \right] / C_1 C_2$$

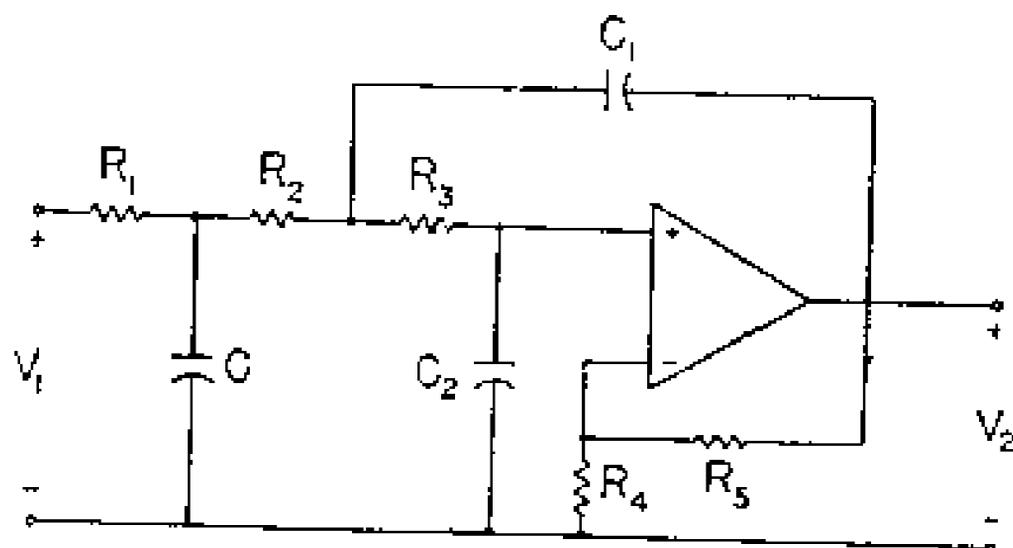


图 2-9 三阶多路反馈低通滤波器

$n = 4$ 时，我们用图 2-10；这时

$$b_0 = \frac{1}{2R_1 R_2 R_3 R_4}$$

$$b_1 = \frac{A}{2R_3 R_4} + \frac{B}{2R_1 R_2} - \frac{\mu}{2R_2 R_3 R_4}$$

$$b_2 = \frac{1}{R_3 R_4} + \frac{1}{2R_1 R_2} + \frac{AB}{2} \quad (2.13)$$

$$b_3 = \frac{A}{2} + B$$

$$G = \mu$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_6}{R_5}$$

$$A = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} \quad (2.14)$$

$$B = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} (2 - \mu)$$

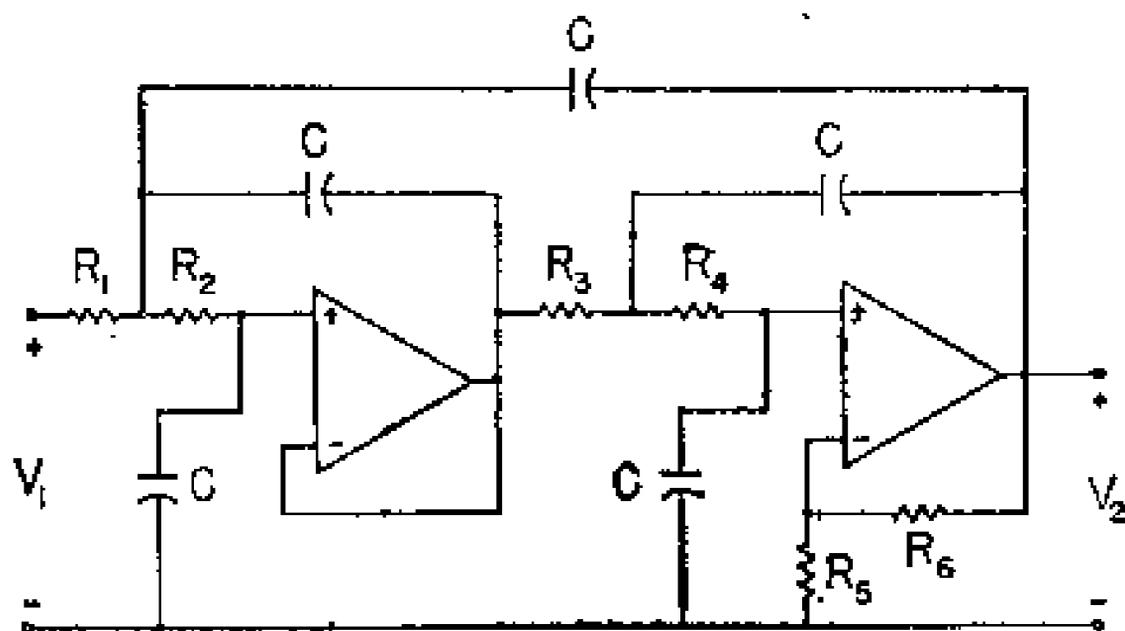


图 2-10 四阶多路反馈低通滤波器

$n = 5$ 时，我们用图2-11；这时

$$b_0 = \frac{1}{16R_1R_2R_3R_4R_5}$$

$$b_1 = \frac{D}{16R_4R_5} + \frac{EF}{16} - \frac{\mu}{4R_2R_3R_4R_5}$$

$$- \frac{1}{16R_1^2} \left(\frac{1}{R_1R_2} + \frac{A}{R_5} \right)$$

$$b_2 = \frac{B}{16R_4R_5} + \frac{DF}{16} + \frac{E}{8} - \frac{1}{16R_1^2} \left(A + \frac{4}{R_5} \right)$$

(2.15)

$$b_3 = \frac{1}{2R_4R_5} + \frac{BF}{16} + \frac{D}{8} - \frac{1}{4R_1^2}$$

$$b_4 = \frac{F}{2} + \frac{B}{8}$$

$$G = 2\mu$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_7}{R_6}$$

$$A = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} (5 - 2\mu)$$

$$B = 2A + 4 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)$$

$$D = \frac{2}{R_1 R_2} + A \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \quad (2.16)$$

$$E = \frac{1}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)$$

$$F = \frac{1}{R_4} - \frac{1}{R_5}$$

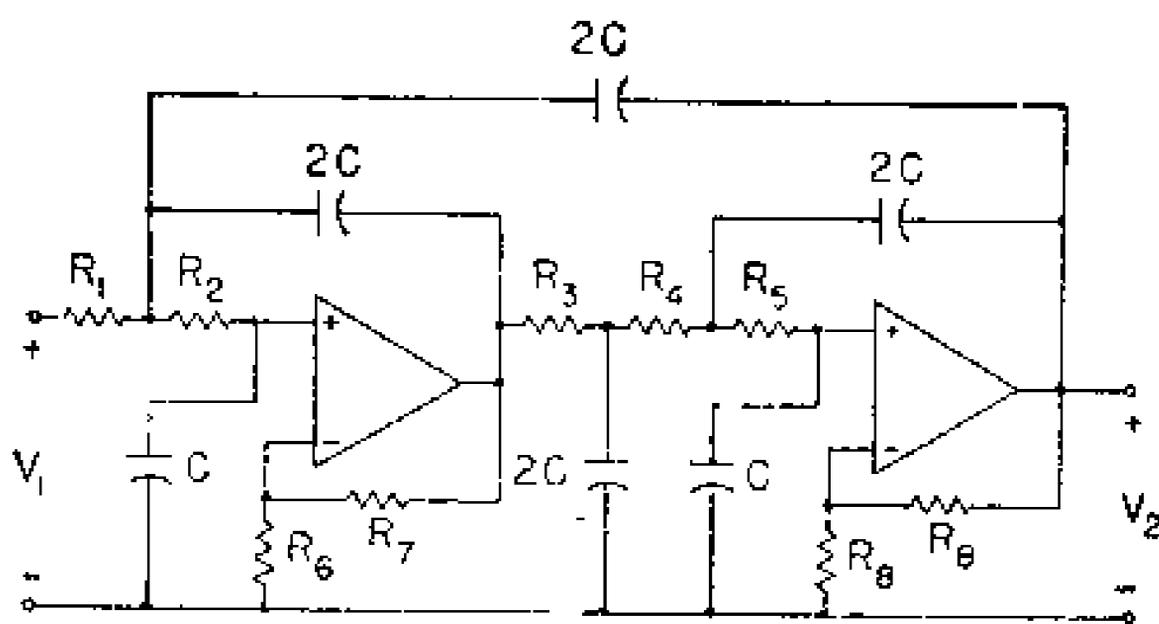


图 2—11 五阶多路反馈低通滤波器

$n = 6$ 时，我们用图 2—12；这时

$$\begin{aligned}
b_0 &= \frac{1}{R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 AC_1^2} \\
b_1 &= \frac{1}{AC_1^2} \left[\left(\frac{B}{R_3 R_4} + \frac{D}{R_1 R_2} \right) \frac{1}{R_5 R_6} \right. \\
&\quad \left. + \frac{E}{R_1 R_2 R_3 R_4} \right] \\
b_2 &= -\frac{1}{AC_1^2} \left[\left(\frac{A}{R_3 R_4} + BD + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) \frac{1}{R_5 R_6} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{B}{R_3 R_4} + \frac{D}{R_1 R_2} \right) E \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{R_2 R_3 R_4} \left(\frac{C_1}{R_1} - 2C_2 \mu_1 E \right) \right] \quad (2.17) \\
b_3 &= \frac{1}{AC_1^2} \left[(AD + BC_1) \frac{1}{R_5 R_6} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{A}{R_3 R_4} + BD + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) E \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{B}{R_3 R_4} + \frac{D}{R_1 R_2} \right) C_1 - \frac{2C_1 C_2 \mu_1}{R_2 R_3 R_4} \right] \\
b_4 &= \frac{1}{A_1 C_1^2} \left[\frac{AC_1}{R_5 R_6} + (AD + BC_1) E \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{A}{R_3 R_4} + BD + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) C_1 \right] \\
b_5 &= \frac{1}{AC_1^2} (AC_1 E + (AD + BC_1) C_1)
\end{aligned}$$

$$G = 2\mu_1 \mu_2$$

其中

$$\mu_1 = 1 + \frac{R_8}{R_7}$$

$$\mu_2 = 1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}$$

$$A = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.18)$$

$$B = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} (A + 1 - C_1 \mu_1)$$

$$D = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} (1 - C_1)$$

$$E = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} (1 + C_1 (1 - \mu_2))$$

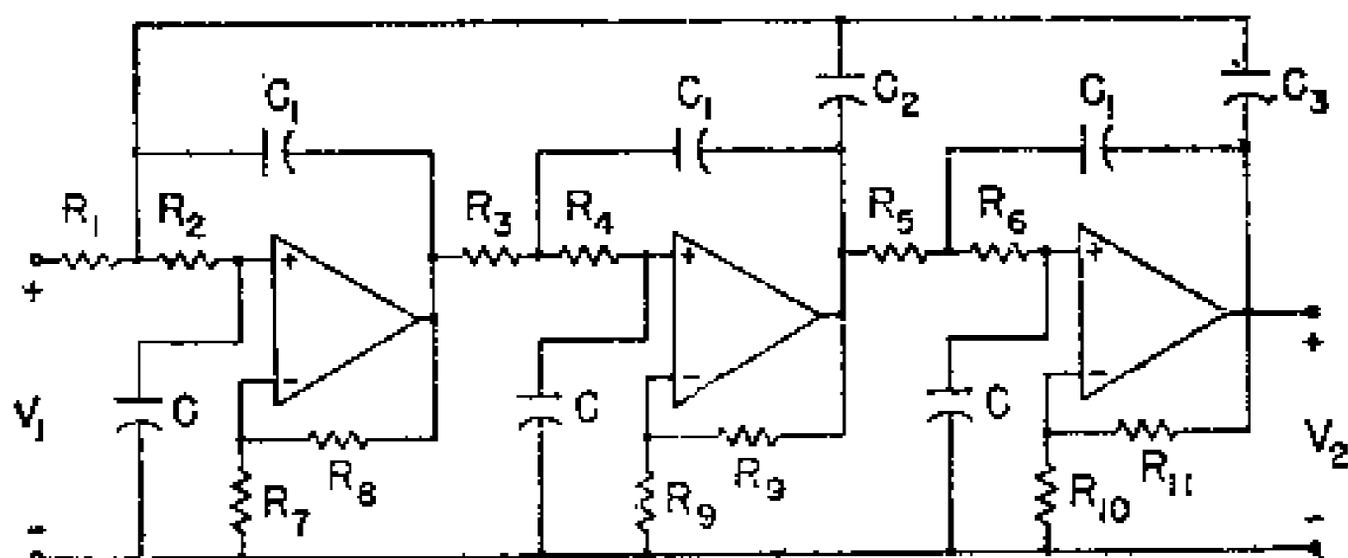


图 2-12 六阶多路反馈低通滤波器

$n = 7$ 时，我们用图 2-13：这时

$$b_0 = \frac{E}{BC_1^2 C_4 R_1 R_2 R_3 R_4}$$

$$b_1 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} \left[E \left(\frac{L}{R_3 R_4} + \frac{F}{R_1 R_2} \right) + \frac{D}{R_1 R_2 R_3 R_4} - \frac{\mu_1 \mu_2}{R_2 R_3 R_4} \left(-\frac{\mu_3 C_3}{R_5 R_6 R_7} + C_2 E \right) \right]$$

$$b_2 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} \left[E \left(\frac{B}{R_3 R_4} + LF + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) + D \left(\frac{L}{R_3 R_4} + \frac{F}{R_1 R_2} \right) + \frac{H}{R_1 R_2 R_3 R_4} - \frac{C_2 \mu_1 \mu_2 D}{R_2 R_3 R_4} \right] \quad (2.19)$$

$$b_3 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} \left[E(BF + LC_1) + D \left(\frac{B}{R_3 R_4} + LF + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) + H \left(\frac{L}{R_3 R_4} + \frac{F}{R_1 R_2} \right) + \frac{C_1 C_4}{R_1 R_2 R_3 R_4} - \frac{C_2 \mu_1 \mu_2 H}{R_2 R_3 R_4} \right]$$

$$b_4 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} \left[BC_1 E + D(BF + LC_1) + H \left(\frac{B}{R_3 R_4} + LF + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) + C_1 C_4 \left(\frac{L}{R_3 R_4} + \frac{F}{R_1 R_2} \right) - \frac{C_1 C_2 C_4 \mu_1 \mu_2}{R_2 R_3 R_4} \right]$$

$$b_5 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} \left[BC_1 D + H(BF + LC_1) + C_1 C_4 \left(\frac{B}{R_3 R_4} + LF + \frac{C_1}{R_1 R_2} \right) \right]$$

$$b_6 = \frac{1}{BC_1^2 C_4} (BC_1 H + C_1 C_4 (BF + LC_1))$$

$$G = \mu_1 \mu_2 \mu_3$$

其中

$$\mu_1 = 1 + \frac{R_8}{R_3}$$

$$\mu_2 = 1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}$$

$$\mu_3 = 1 + \frac{R_{13}}{R_{12}}$$

$$A = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} (1 + C_1 (1 - \mu_3))$$

$$B = C_1 + C_2 + C_3$$

$$D = \frac{C_4}{R_6 R_7} + A \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} \right) - \frac{1}{R_6^2}$$

$$E = \frac{1}{R_6 R_7} \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} \right) - \frac{1}{R_6^2 R_7} \quad (2.20)$$

$$F = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} (1 + C_1 (1 - \mu_2))$$

$$H = C_1 \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} \right) + AC_4$$

$$L = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} (1 + B - C_1 \mu_1)$$

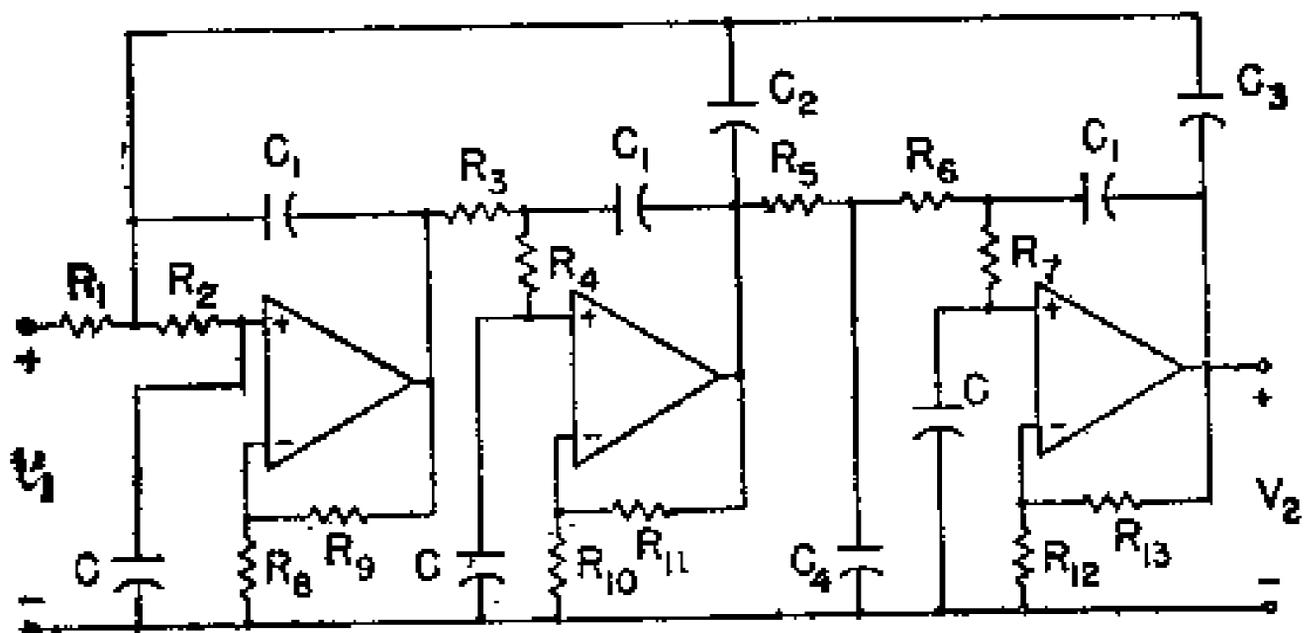


图 2-13 七阶多路反馈低通滤波器

$n = 8$ 时, 我们用图2-14, 这时

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{TR_1R_2R_3R_4R_5R_6R_7R_8} \\
 b_1 &= \frac{1}{T} \left[\frac{M}{R_5R_6R_7R_8} + \frac{Q}{R_1R_2R_3R_4} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\mu_1\mu_2}{R_2R_3R_4R_5R_6R_7R_8} (C_2 + C_3 + 2C_4) \right] \\
 b_2 &= \frac{1}{T} \left[\frac{L}{R_5R_6R_7R_8} + MQ + \frac{P}{R_1R_2R_3R_4} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\mu_1\mu_2}{R_2R_3R_4} \left(C_2Q + \frac{C_3A}{R_5R_6} \right) \right] \\
 b_3 &= \frac{1}{T} \left[\frac{H}{R_5R_6R_7R_8} + LQ + MP + \frac{N}{R_1R_2R_3R_4} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\mu_1\mu_2}{R_2R_3R_4} \left(C_2P + \frac{C_1C_3C_7}{R_5R_6} \right) \right] \quad (2.21) \\
 b_4 &= \frac{1}{T} \left(\frac{EC_1C_6}{R_5R_6R_7R_8} + HQ + LP + MN \right. \\
 &\quad \left. + \frac{C_1^2C_5C_7}{R_1R_2R_3R_4} - \frac{\mu_1\mu_2C_2N}{R_2R_3R_4} \right) \\
 b_5 &= \frac{1}{T} \left(EC_1C_6Q + HP + LN + C_1^2C_5C_7M \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\mu_1\mu_2C_1^2C_2C_5C_7}{R_2R_3R_4} \right) \\
 b_6 &= \frac{1}{T} (EC_1C_6P + HN + C_1^2C_5C_7L) \\
 b_7 &= \frac{1}{T} (EC_1C_6N + C_1^2C_5C_7H)
 \end{aligned}$$

$$G = 2\mu_1\mu_2$$

其中

$$\mu_1 = 1 + \frac{R_{10}}{R_9}$$

$$\mu_2 = 1 + \frac{R_{12}}{R_{11}}$$

$$A = C_7 \left(\frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) - \frac{C_1}{R_8}$$

$$B = C_5 \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right)$$

$$D = C_6 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) + \frac{C_1}{R_4} (-\mu_2)$$

$$E = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$F = \frac{1}{R_2} (1 + E - C_1\mu_1) + \frac{1}{R_1} \quad (2.22)$$

$$H = ED + FC_1C_6$$

$$L = \frac{E}{R_3R_4} + FD + \frac{C_1C_5}{R_1R_2}$$

$$M = \frac{F}{R_3R_4} + \frac{D}{R_1R_2}$$

$$N = AC_1C_5 + BC_1C_7$$

$$P = \frac{C_1C_5}{R_7R_8} + AB + \frac{C_1C_7}{R_5R_6}$$

$$Q = \frac{B}{R_7R_8} + \frac{A}{R_5R_6}$$

$$L = EC_1^3C_5C_6C_7$$

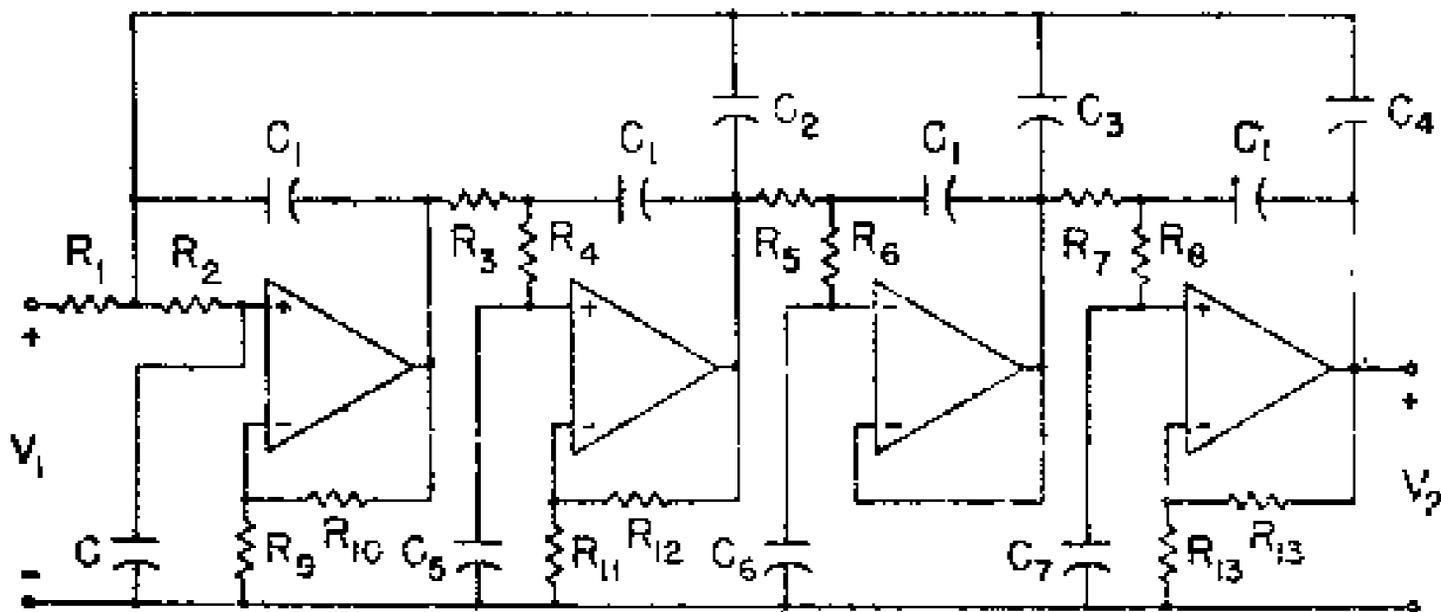


图 2—14 八阶多路反馈低通滤波器

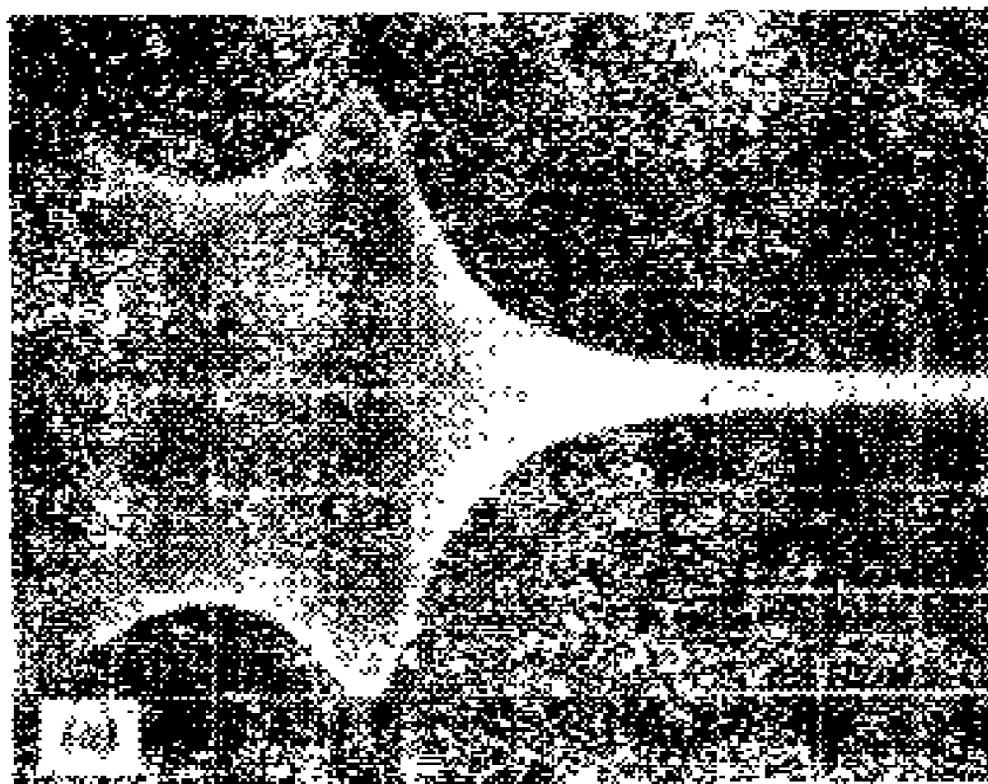
本节所述的多路反馈电路的一个明显的困难是对每种滤波器不同的方程组求解十分复杂。对我们给出的电路，已经用数字计算机最佳程序求出了它们的解。多路反馈电路与级联的结构相比具有好些优点。其部分优点如下，多路反馈结构的传递函数对于网络的变化不灵敏，从不同的级反馈，可以得到更好的稳定性，电路较容易调整到所要求的响应，特别是当包括压控电压源的元件时更是如此[31]，[32]。作者花费了许多时间，在实验室制作了多路反馈滤波器和级联的高阶滤波器的试验电路模型。作者深信，多路反馈电路具有更大的优越性。

多路反馈低通滤波器的一般设计程序在2.13节给出。电路元件值可由紧接在设计程序后的表2—54~2—61查得。下一节给出滤波器设计实例。

2.9 多路反馈低通滤波器设计实例

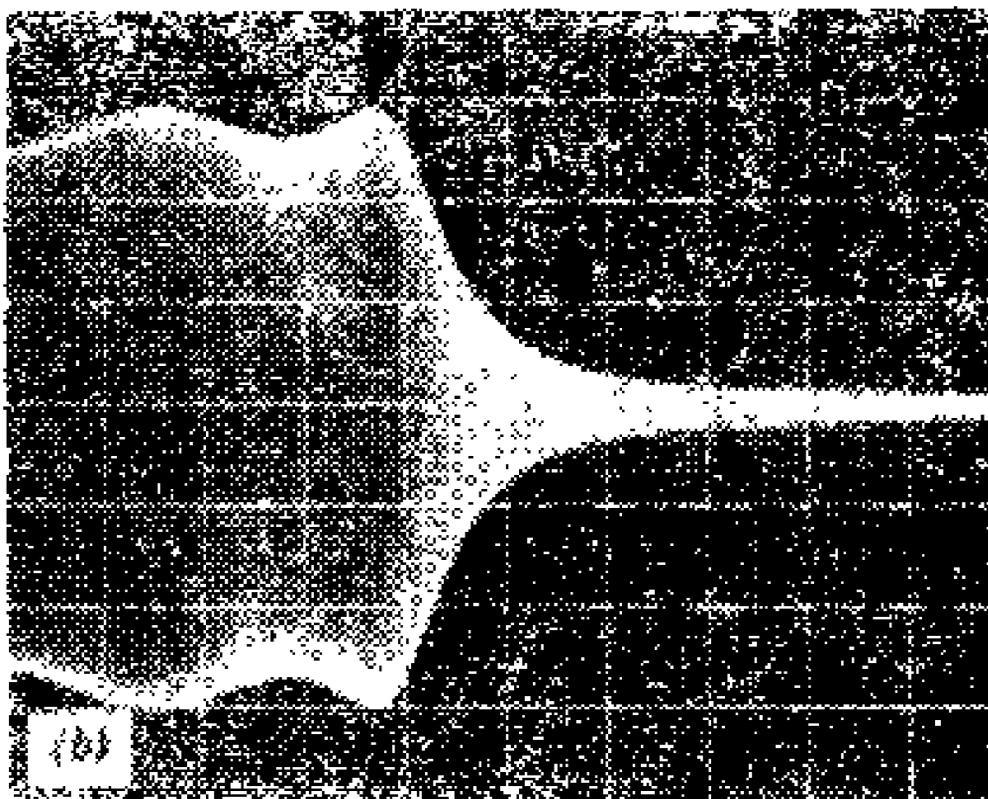
下面用一个例子来说明上节所述多路反馈低通滤波器的设计方法。假定要求设计一个六阶 $1/2\text{dB}$ 切比雪夫低通滤波器， $f_c=2000\text{Hz}$ ， $G=2$ 。在图2—12中，选择 C 为 $0.01\mu\text{F}$ ，从

(2.6)式(或从图2—16b)得到参数 K 为5。由表2—59可查得电路元件值,表中电阻是当 $K=1$ 时的值,因而应乘以5。结果是: $R_1=7.06$, $R_2=8.55$, $R_3=9.17$, $R_4=2.21$, $R_5=23.25$, $R_6=12.53$, $R_7=R_{10}=\text{开路}$, $R_8=R_{11}=0$, $R_9=22.70$ (均为 $K\Omega$),又 $C_1=C_2=1.5C=0.015\mu\text{F}$, $C_3=0.33C=0.0033\mu\text{F}$ 。使用这些电容,而所用电阻应尽可能接近计算值,这样作成的电路,其幅度响应如图2—15d所示。响应的上半部早已在图1—1b中给出。实际结果为 $G=2$ (通过调整第二个压控电压源的增益获得), $f_c=1927\text{Hz}$, 波纹 0.54dB 。

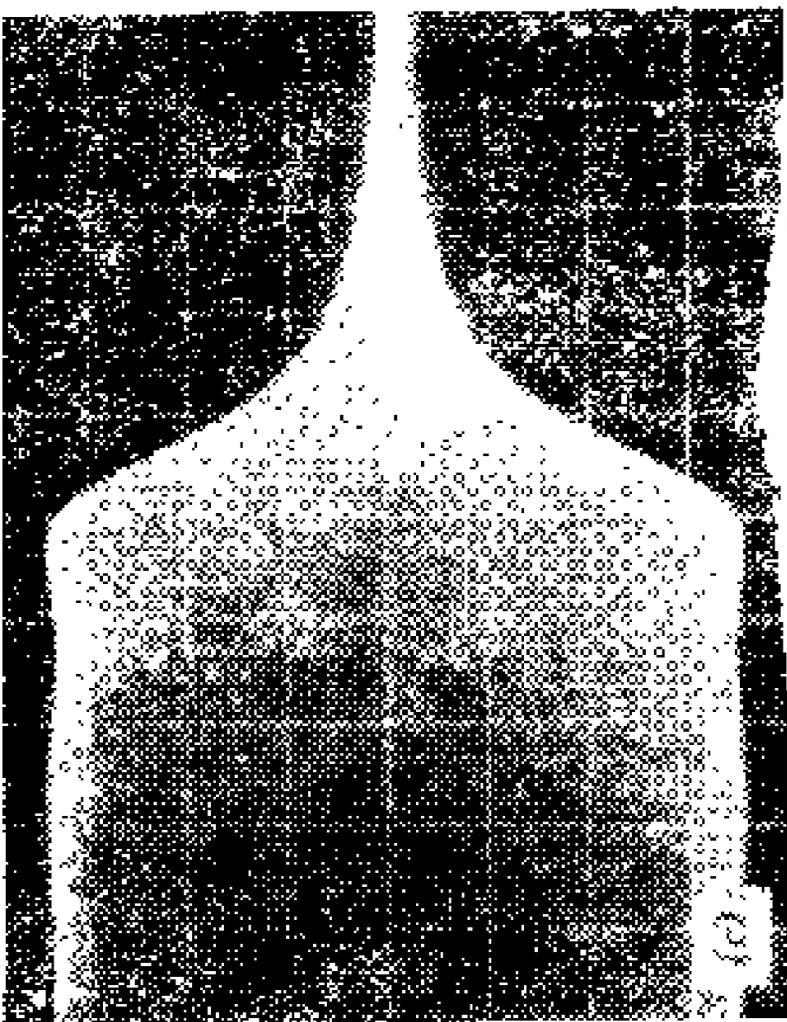


(a) 三阶3dB切比雪夫响应

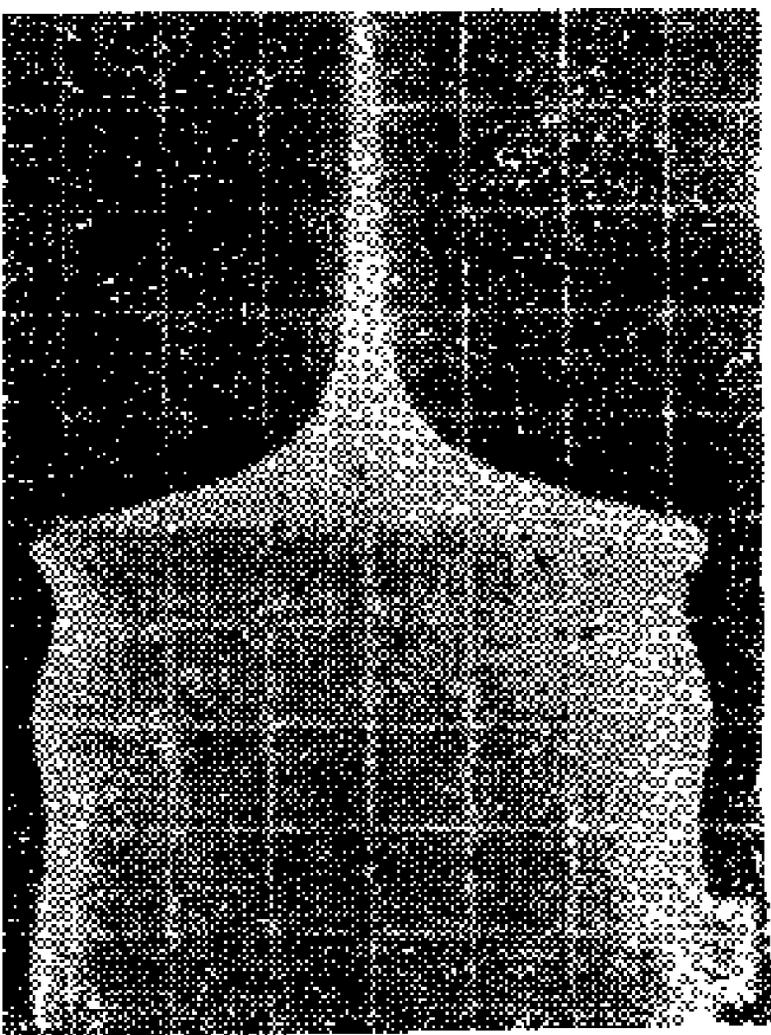
为了说明阶数增加时幅度响应改善的情况,在图2—15中汇集了 $n=3, 4, 5, 6, 7$ 和8六种低通响应。这些特性也说明了切比雪夫滤波器的截止特性比巴特沃斯滤波器优越。除了图2—15d为六阶切比雪夫响应外,所示的



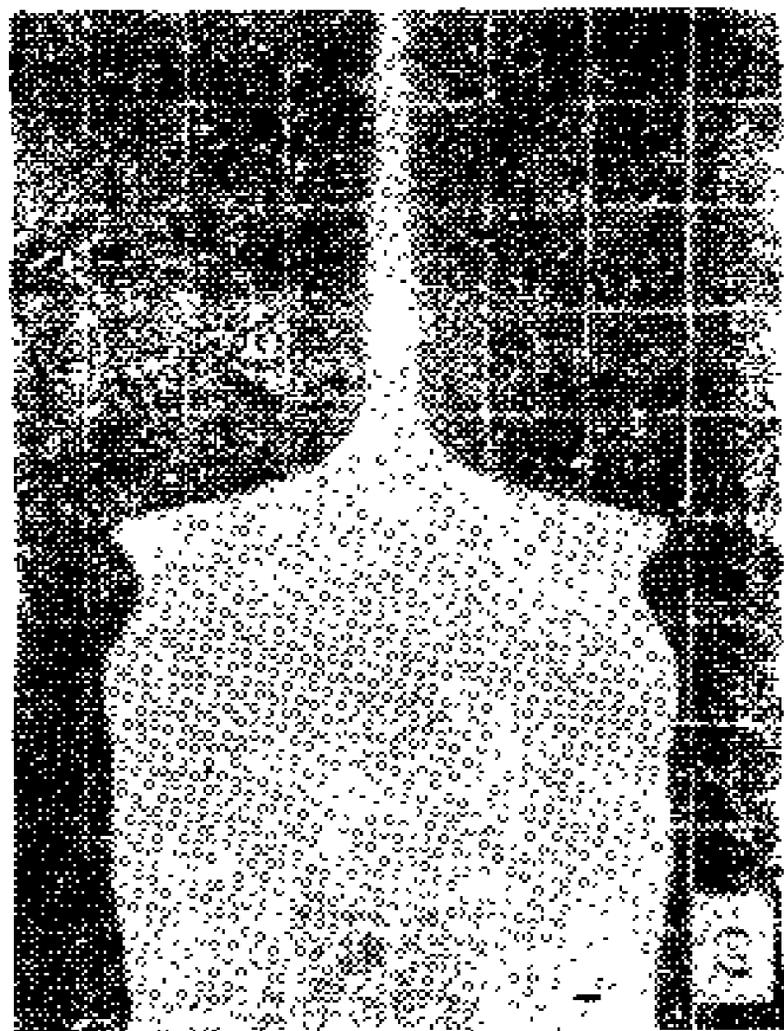
(b) 四阶1dB切比雪夫响应



(c) 五阶 $0.1dB$ 切比雪夫响应



(d) 六阶 $0.5dB$ 切比雪夫响应



(e) 七阶 $0.5dB$ 切比雪夫响应



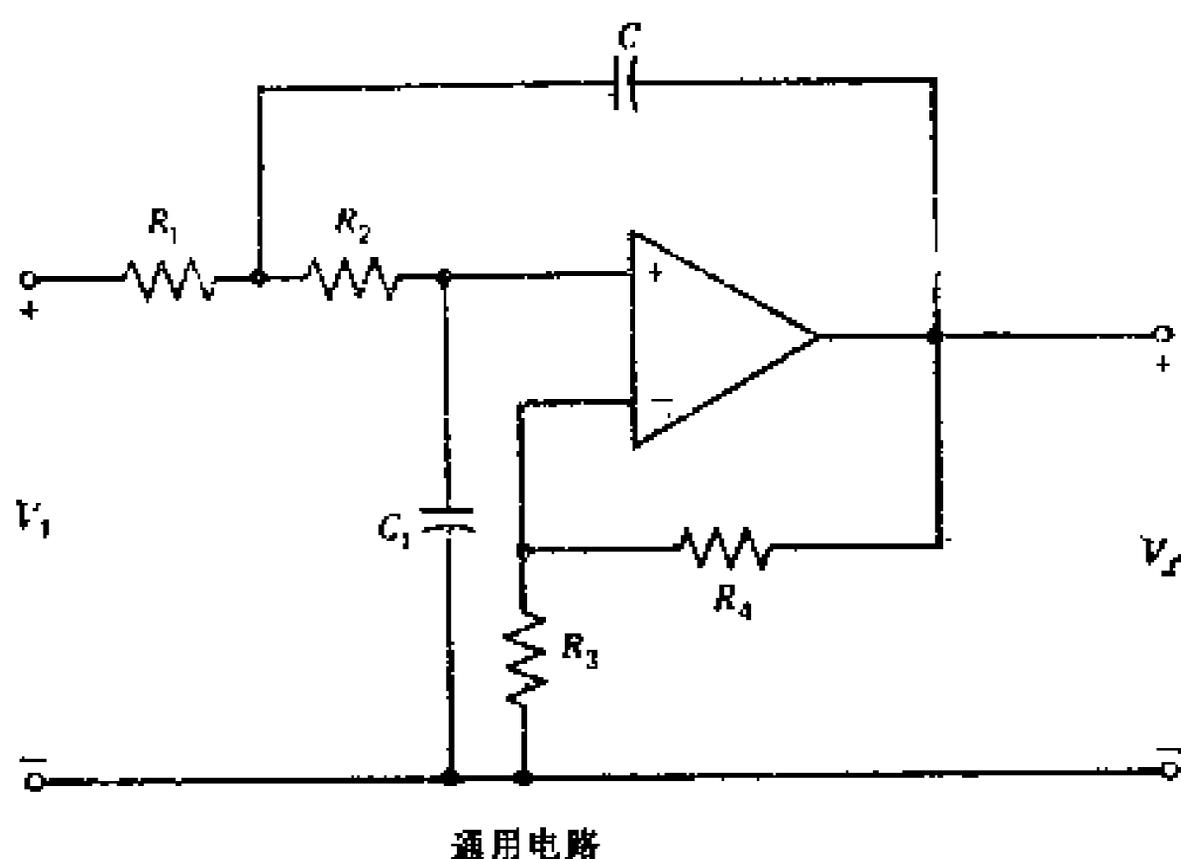
(f) 八阶巴特沃斯低通响应

图 2-15 低通滤波器幅度响应

其他响应为(a)三阶3dB切比雪夫响应, $f_c=1000\text{Hz}$, $G=2$;
 (b)四阶1dB切比雪夫响应, $f_c=2000\text{Hz}$, $G=3$; (c)五阶
 0.1dB 切比雪夫响应, $f_c=2000\text{Hz}$, $G=4$; (e)七阶 0.5dB
 切比雪夫响应, $f_c=1000\text{Hz}$, $G=2$; (f)八阶巴特沃斯响
 应, $f_c=1000\text{Hz}$, $G=4$ 。

2.10 压控电压源低通滤波器

设计程序摘要



设计程序

给定截频 $f_c(\text{Hz})$ 、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应), 对于二阶滤波器或级联高阶滤波器($n=4, 6, 8$)的每一节, 按下面步骤进行设计:

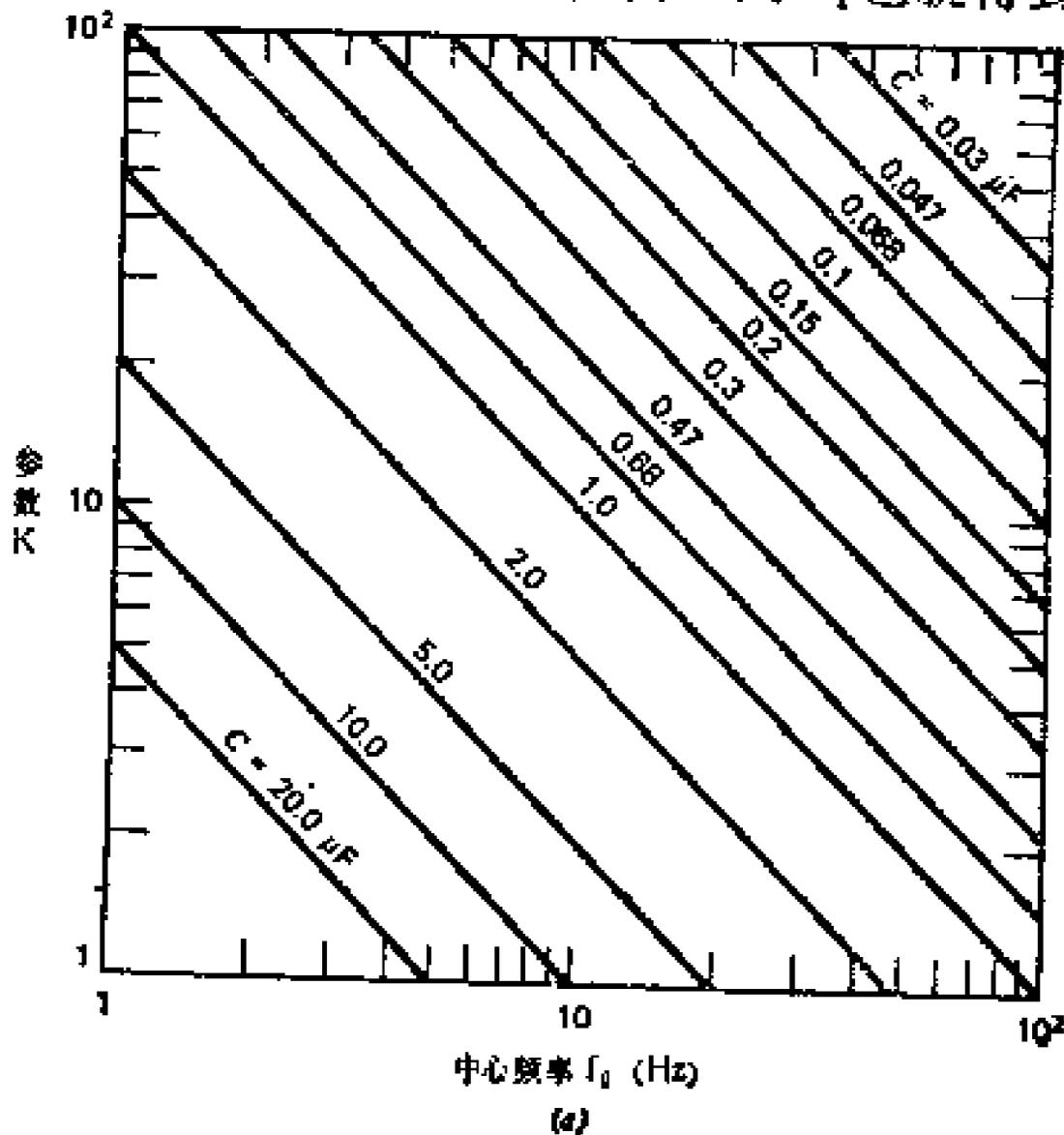
1. 选择电容 C 的值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可由图 2—16a, b, 或 c 查出。对于高阶滤波器 (比如说 $n > 4$) 设计, 因为要求较高的精度, 用公式计算较好。

2. 从下面表 2—2~2—25 适当的一个表中查出其余元件值。 C_1 的值直接由选定的 C 值和表中查出的数值确定。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况, 因而必须把这些值乘以由第一步得到的参数 K , 才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值, 这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。在表中 C_1 是 C 的某一个倍数, 如 0.47 等等。因此, 如果 C 值选择为 $10\mu F$ 的某一次幂 (即 0.1, 1, 10 等等), 则 C_1 也就得到标称电容值。



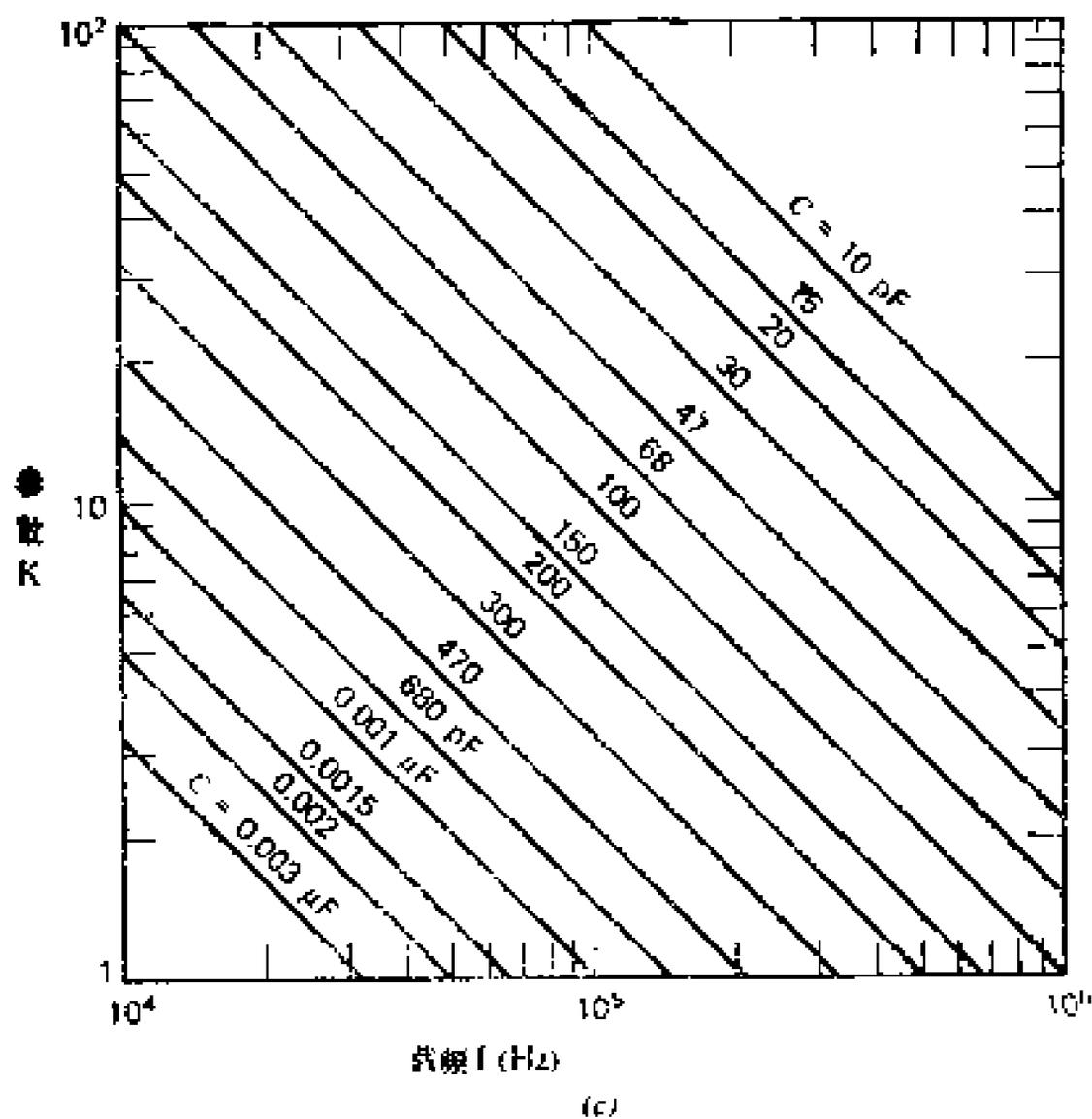
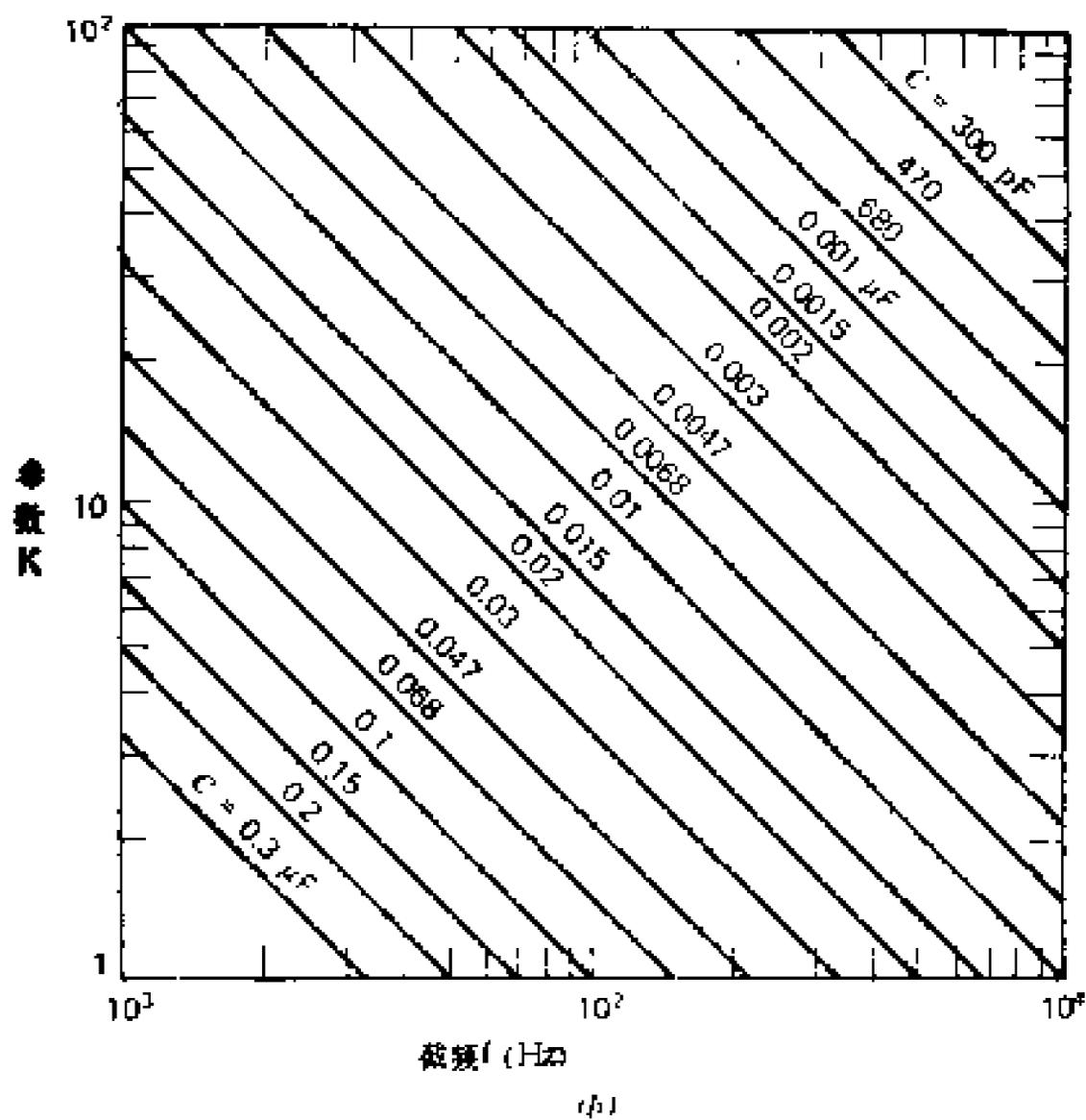


图 2-16 参数 K 和频率的关系

注 释 和 建 议

(a)在多节滤波器 ($n > 2$) 中, 每节的参数 K 不必取相同的值。这就是说, 每一节可以选择不同的 C 值, 并用给定的整个滤波器截频 f_c 来计算每节的参数 K 。每节的电阻值就是由表中查出的数值乘以该节的参数 K 。

(b)为了获得最佳的电路性能, 运算放大器的输入电阻至少应是 $R_{e2} = R_1 + R_2$ 的10倍。对于给定的运算放大器, 通过适当选择 C 值以得到适宜的 K 值, 通常可以满足上述条件。

(c)表中 R_3 和 R_4 值的选定是为了把运算放大器的直流失调减到最小。只要使比值 R_4/R_3 与表中的数值相同, R_3 和 R_4 也可以选用其他阻值。

(d)在低阶时, 通常用容差为5%的标称值电阻就能得到满意的结果。对于五阶和六阶, 大概应用容差为2%的电阻, 对七阶和八阶则多半应用容差为1%的电阻。为了获得最佳的性能, 在所有情况下都应选用和表中查得的数值尽可能接近的电阻值。

至于电容, 为获得最佳的结果, 其百分容差应和上面给出的电阻容差相当。因为精密电容价格较贵, 总是希望使用容差较大的电容, 这时通常需要进行调整。在低阶 ($n \leq 4$) 情况下, 容差为10%的电容常常就满足要求了。

(e)滤波器每节的增益为 $1 + R_4/R_3$, 用一个电位器代替 R_3 和 R_4 , 可把增益调整到正确的值。为此将电位器中心抽头连接到运算放大器的反相输入端。这些增益的调节在调整滤波器总响应时是非常有用的。

(f)最后, 在滤波器的输入端到地必须有一直流通路: 在截频 f_c 点, 运算放大器的开环增益至少应是滤波器的增益的50

倍；而且在 f_c 处所要求的峰-峰电压值不应超过运算放大器的压摆率的 $10^6/\pi f_c$ 倍。因而，当 f_c 值较高时，可能要用外部补偿的运算放大器。

2.5节给出了一个具体的二阶压控电压源低通滤波器设计例子。

表 2—2 二阶压控电压源巴特沃斯低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.422	1.126	0.824	0.617	0.521	0.462
R_2	5.399	2.250	1.537	2.051	2.429	2.742
R_3	开路	6.752	3.148	3.203	3.372	3.560
R_4	0	6.752	9.444	16.012	23.602	32.038
C_1	0.33C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—3 二阶0.1dB压控电压源切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	0.912	0.671	0.474	0.349	0.293	0.259
R_2	2.541	1.139	0.807	1.094	1.303	1.476
R_3	开路	3.621	1.707	1.732	1.824	1.928
R_4	0	3.621	5.122	8.660	12.771	17.351
C_1	0.33C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—4 二阶0.5dB压控电压源切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.407	1.116	0.613	0.537	0.447	0.393
R_2	5.398	1.497	2.724	1.555	1.867	2.125
R_3	开路	5.226	4.450	2.510	2.645	2.798
R_4	0	5.226	13.349	12.552	18.517	25.179
C_1	0.22C	C	C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—5 二阶1dB压控电压源切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	2.010	1.449	0.918	0.650	0.538	0.471
R_2	5.198	1.586	1.252	1.768	2.137	2.441
R_3	开路	6.071	2.893	2.902	3.057	3.235
R_4	0	6.071	8.680	14.508	21.400	29.117
C_1	0.22C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—6 二阶2dB压控电压源切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	2.328	1.980	1.141	0.786	0.644	0.561
R_2	13.220	1.555	1.348	1.957	2.388	2.742
R_3	开路	7.069	3.320	3.292	3.466	3.670
R_4	0	7.069	9.959	16.460	24.261	33.031
C_1	0.1C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—7 二阶3dB压控电压源切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	3.153	2.468	1.301	0.877	0.713	0.619
R_2	11.346	1.450	1.375	2.040	2.508	2.891
R_3	开路	7.835	3.568	3.500	3.682	3.900
R_4	0	7.835	10.704	17.502	25.771	35.096
C_1	0.1C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—8 四阶压控电压源巴特沃斯级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	2.661	2.079	1.095	0.738	0.738	0.521	
R_2	9.521	1.218	2.313	3.432	1.716	2.432	
R_3	开路	6.595	5.112	5.213	2.945	3.281	1
R_4	0	6.595	10.225	20.851	14.725	29.527	
C_1	0.1C	C	C	C	2C	2C	
R_1	1.048	1.048	0.861	0.861	0.551	0.427	
R_2	4.833	4.833	2.941	2.941	2.297	2.965	
R_3	开路	开路	7.604	7.604	3.418	3.769	2
R_4	0	0	7.604	7.604	17.092	33.924	
C_1	0.5C	0.5C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—9 四阶0.1dB压控电压源切比霍夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	4.555	3.013	1.100	0.698	0.698	0.478	
R_2	8.897	0.632	1.732	2.727	1.364	1.991	
R_3	开路	7.290	4.248	4.282	2.475	2.743	1
R_4	0	7.290	8.495	17.129	12.373	24.691	
C_1	0.047C	C	C	C	2C	2C	
R_1	1.632	1.632	1.248	1.248	0.742	0.564	
R_2	5.302	5.302	3.259	3.259	2.742	3.604	2
R_3	开路	开路	9.014	9.014	4.180	4.632	
R_4	0	0	9.014	9.014	20.901	41.684	
C_1	0.47C	0.47C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

表 2—10 四阶0.5dB压控电压源切比霍夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	7.220	4.538	1.303	0.808	0.808	0.547	
R_2	12.219	0.525	1.828	2.948	1.474	2.177	
R_3	开路	10.126	4.696	4.695	2.738	3.027	1
R_4	0	10.126	9.393	18.781	13.692	27.240	
C_1	0.027C	C	C	C	2C	2C	
R_1	2.994	2.994	1.880	1.880	1.033	0.773	
R_2	5.050	0.050	3.781	3.781	3.440	4.596	
R_3	开路	开路	11.321	11.321	5.368	5.966	2
R_4	0	0	11.321	11.321	26.838	53.695	
C_1	0.47C	0.47C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

表 2—11 四阶1dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值 [*]						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	7.656	1.800	1.507	0.853	0.853	0.574	
R_2	22.360	2.761	4.401	3.010	1.505	2.235	
R_3	开路	9.242	8.352	4.829	2.830	3.122	1
R_4	0	9.242	16.708	19.314	14.148	28.097	
C_1	0.015C	0.5C	0.5C	C	2C	2C	
R_1	3.297	3.297	2.362	2.362	1.100	0.896	
R_2	8.333	8.333	3.838	3.838	8.239	5.057	
R_3	开路	开路	12.400	12.400	11.208	6.614	2
R_4	0	0	12.400	12.400	56.038	59.530	
C_1	0.33C	0.33C	C	C	C	2C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—12 四阶2dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值 [*]						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	10.879	2.604	1.234	0.895	0.895	0.599	
R_2	25.072	2.723	4.421	3.046	1.523	2.277	
R_3	开路	9.453	8.482	4.927	2.902	3.195	1
R_4	0	9.453	16.964	19.707	14.511	28.756	
C_1	0.01C	0.5C	0.5C	C	2C	2C	
R_1	4.219	4.219	3.143	3.143	1.438	1.044	
R_2	12.316	12.316	3.638	3.638	3.976	5.474	
R_3	开路	开路	13.561	13.561	6.496	7.242	2
R_4	0	0	13.561	13.561	32.480	65.181	
C_1	0.22C	0.22C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—13 四阶3dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	11.575	2.087	1.271	0.918	0.918	0.612	
R_2	48.465	2.688	4.414	3.055	1.527	2.292	
R_3	开路	9.550	8.527	4.966	2.935	3.226	1
R_4	0	9.550	17.054	10.865	14.673	29.038	
C_1	0.005C	0.5C	0.5C	C	2C	2C	
R_1	6.094	6.094	3.870	3.870	1.592	1.141	
R_2	10.604	10.604	3.340	3.340	4.058	5.654	
R_3	开路	开路	14.420	14.420	6.731	7.561	2
R_4	0	0	14.420	14.420	33.905	68.046	
C_1	0.2C	0.2C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—14 六阶压控电压源巴特沃斯级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	4.090	3.075	1.573	0.792	0.792	0.546	
R_2	12.387	0.824	1.610	3.199	3.199	2.321	
R_3	开路	7.797	5.306	4.989	4.989	3.186	1
R_4	0	7.797	7.958	19.955	19.955	28.670	
C_1	0.05C	C	C	C	C	2C	
R_1	1.808	1.125	1.125	0.696	0.696	0.462	
R_2	2.981	2.251	2.251	1.821	1.821	2.742	
R_3	开路	6.752	6.752	3.146	3.146	3.560	2
R_4	0	6.752	6.752	12.582	12.582	32.039	
C_1	0.47C	C	C	2C	2C	2C	
R_1	0.980	0.980	0.824	0.824	0.675	0.594	
R_2	5.169	5.169	3.075	3.075	1.875	2.132	
R_3	开路	开路	7.797	7.797	3.401	3.407	3
R_4	0	0	7.797	7.797	10.202	13.623	
C_1	0.5C	0.5C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—15 六阶0.1dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	10.083	1.819	1.345	0.812	0.812	0.543	
R_2	22.240	2.466	3.336	2.760	2.760	2.063	
R_3	开路	8.569	7.800	4.466	4.466	2.897	1
R_4	0	8.569	11.701	17.864	17.864	26.069	
C_1	0.01C	0.5C	0.5C	C	C	2C	
R_1	3.300	2.539	2.539	1.037	1.037	0.626	
R_2	11.023	1.432	1.432	1.753	1.753	2.906	
R_3	开路	7.943	7.943	3.488	3.488	3.924	2
R_4	0	7.943	7.943	13.952	13.952	35.319	
C_1	0.1C	C	C	2C	2C	2C	
R_1	2.429	2.429	1.859	1.859	1.252	1.125	
R_2	7.917	7.917	5.173	5.173	7.678	8.548	
R_3	开路	开路	14.064	14.064	11.908	12.092	3
R_4	0	0	14.064	14.064	35.723	48.366	
C_1	0.5C	0.5C	C	C	C	C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—16 六阶0.5dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	14.752	1.997	1.457	1.054	1.054	0.578	
R_2	33.569	2.480	3.398	1.175	1.175	2.143	
R_3	开路	8.954	8.092	2.786	2.786	3.023	1
R_4	0	8.954	12.138	11.143	11.143	27.206	
C_1	0.005C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	4.727	4.727	3.751	1.021	1.021	0.706	
R_2	18.163	1.145	1.145	4.206	4.206	3.042	
R_3	开路	9.791	9.791	6.534	6.534	4.164	2
R_4	0	9.791	9.791	26.135	26.135	37.477	
C_1	0.05C	C	C	C	C	2C	
R_1	4.374	4.374	2.746	2.746	1.729	1.538	
R_2	7.377	7.377	5.876	5.876	9.333	10.490	
R_3	开路	开路	17.243	17.243	14.749	15.035	3
R_4	0	0	17.243	17.243	44.247	60.139	
C_1	0.5C	0.5C	C	C	C	C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—17 六阶1dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

电路元件值							
增益	1	4	10	50	100	500	节
R_1	18.375	2.070	1.502	0.890	0.890	0.590	
R_2	42.164	2.470	3.404	2.871	2.871	2.166	
R_3	开路	9.080	8.177	4.702	4.702	3.062	1
R_4	0	9.080	12.265	18.808	18.808	27.560	
C_1	0.0033C	0.5C	0.5C	C	C	2C	
R_1	7.191	4.684	4.684	1.284	1.284	0.739	
R_2	13.438	0.970	0.970	1.769	1.769	3.072	
R_3	开路	11.308	11.308	3.816	3.816	4.235	2
R_4	0	11.308	11.308	15.263	15.263	38.112	
C_1	0.047C	C	C	2C	2C	2C	
R_1	4.616	4.616	3.429	3.429	2.033	1.796	
R_2	13.333	13.333	5.923	5.923	9.990	11.311	
R_3	开路	开路	18.705	18.705	16.031	16.383	3
R_4	0	0	18.705	18.705	48.092	65.533	
C_1	0.33C	0.33C	C	C	C	C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—18 六阶2dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

电路元件值*							
增益	1	4	10	50	100	500	节
R_1	25.047	2.141	1.544	1.107	1.107	0.601	
R_2	52.349	2.450	3.397	1.184	1.184	2.181	
R_3	开路	9.181	8.235	2.864	2.864	3.092	1
R_4	0	9.181	12.353	11.457	11.457	27.824	
C_1	0.002C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	9.150	2.411	2.411	1.137	1.137	0.771	
R_2	19.239	3.944	3.944	4.179	4.179	3.082	
R_3	开路	12.708	12.708	6.645	6.645	4.281	2
R_4	0	12.708	12.708	26.581	26.581	38.531	
C_1	0.027C	0.5C	0.5C	C	C	2C	
R_1	6.728	6.728	4.539	4.539	2.965	2.428	
R_2	13.955	13.955	5.584	5.584	4.275	5.220	3
R_3	开路	开路	20.247	20.247	9.653	9.560	
R_4	0	0	20.247	20.247	28.959	38.241	
C_1	0.27C	0.27C	C	2C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—19 六阶3dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	元件值						行
	1	4	10	50	100	500	
R_1	28.422	2.179	1.566	0.919	0.919	0.607	
R_2	77.782	2.434	3.387	2.886	2.886	2.187	
R_3	开路	9.228	8.256	4.756	4.756	3.104	1
R_4	0	9.228	12.384	19.025	19.025	27.933	
C_1	0.0012C	0.5C	0.5C	C	C	2C	
R_1	12.613	2.543	2.543	1.170	1.170	0.788	
R_2	19.243	3.817	3.817	4.148	4.148	3.078	
R_3	开路	12.721	12.721	6.648	6.648	4.296	2
R_4	0	12.721	12.721	26.591	26.591	38.667	
C_1	0.02C	0.5C	0.5C	C	C	2C	
R_1	8.220	8.220	5.578	5.578	3.364	2.709	
R_2	17.350	17.350	5.114	5.114	4.239	5.266	
R_3	开路	开路	21.383	21.383	10.138	9.968	3
R_4	0	0	21.383	21.383	30.414	39.870	
C_1	0.2C	0.2C	C	C	2C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—20 八阶压控电压源巴特沃斯级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	5.978	1.714	1.311	0.981	0.981	0.981	1
R_2	12.840	2.956	3.864	1.291	1.291	1.291	
R_3	开路	9.340	8.625	2.840	2.840	2.840	
R_4	0	9.340	12.938	11.361	11.361	11.361	
C_1	0.033C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	1.865	1.432	1.432	0.767	0.767	0.767	2
R_2	6.173	1.768	1.768	1.651	1.651	1.651	
R_3	开路	6.402	6.402	3.023	3.023	3.023	
R_4	0	6.402	6.402	12.091	12.091	12.091	
C_1	0.22C	C	C	2C	2C	2C	
R_1	1.254	1.254	0.957	0.957	0.957	0.644	3
R_2	4.039	4.039	2.647	2.647	2.647	1.967	
R_3	开路	开路	7.207	7.207	7.207	3.264	
R_4	0	0	7.207	7.207	7.207	13.055	
C_1	0.5C	0.5C	C	C	C	2C	
R_1	0.959	0.959	0.959	0.959	0.811	0.668	4
R_2	5.285	5.285	5.285	5.285	3.122	1.895	
R_3	开路	开路	开路	开路	7.867	3.418	
R_4	0	0	0	0	7.867	10.254	
C_1	0.5C	0.5C	0.5C	0.5C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—21 八阶0.1dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						N
	1	4	10	50	100	500	
R_1	18.140	1.994	1.994	0.857	0.857	0.857	
R_2	39.560	2.375	1.188	2.762	2.762	2.762	
R_3	开路	8.738	5.303	4.524	4.524	4.524	1
R_4	0	8.738	7.954	18.098	18.098	18.098	
C_1	0.0033C	0.5C	C	C	C	C	
R_1	6.009	1.895	1.895	1.091	1.091	1.091	
R_2	15.989	3.346	3.346	1.454	1.454	1.454	
R_3	开路	10.482	10.482	3.180	3.180	3.180	2
R_4	0	10.482	10.482	12.720	12.720	12.720	
C_1	0.033C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	4.167	4.167	2.918	2.918	2.918	1.299	
R_2	9.734	9.734	2.085	2.085	2.085	2.342	
R_3	开路	开路	10.007	10.067	10.007	4.551	3
R_4	0	0	10.007	10.007	10.007	18.205	
C_1	0.15C	0.15C	C	C	C	2C	
R_1	3.204	3.204	3.204	3.204	2.474	1.939	
R_2	10.858	10.858	10.858	10.858	7.031	4.485	
R_3	开路	开路	开路	开路	19.009	8.565	4
R_4	0	0	0	0	19.009	25.696	
C_1	0.5C	0.5C	0.5C	0.5C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2-22 八阶0.5dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	25.168	2.104	2.104	1.085	1.085	1.085	1
R_2	66.305	2.379	1.189	1.154	1.154	1.154	
R_3	开路	8.967	5.490	2.798	2.798	2.798	
R_4	0	8.967	8.235	11.193	11.193	11.193	
C_1	0.0015C	0.5C	C	2C	2C	2C	
R_1	8.382	2.135	2.135	1.181	1.181	1.181	2
R_2	27.176	3.201	3.201	1.447	1.447	1.447	
R_3	开路	10.672	10.672	3.285	3.285	3.285	
R_4	0	10.672	10.672	13.139	13.139	13.139	
C_1	0.015C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	5.550	5.550	4.280	4.280	4.280	1.284	3
R_2	18.714	18.714	1.650	1.650	1.650	5.501	
R_3	开路	开路	11.861	11.861	11.861	8.481	
R_4	0	0	11.861	11.861	11.861	33.926	
C_1	0.068C	0.068C	C	C	C	C	
R_1	5.623	5.623	5.623	5.623	3.629	2.705	4
R_2	10.232	10.232	10.232	10.232	7.927	5.316	
R_3	开路	开路	开路	开路	23.117	10.656	
R_4	0	0	0	0	23.113	32.088	
C_1	0.5C	0.5C	0.5C	0.5C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2-23 八阶 1dB 压控电压源切比雷夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	31.691	2.148	2.148	1.101	1.101	1.101	1
R_2	80.400	2.372	1.186	1.157	1.157	1.157	
R_3	开路	9.041	5.557	2.823	2.823	2.823	
R_4	0	9.041	8.336	11.291	11.291	11.291	
C_1	0.001C	0.5C	C	2C	2C	2C	
R_1	11.777	2.244	2.244	1.218	1.218	1.218	2
R_2	24.772	3.121	3.121	1.437	1.437	1.437	
R_3	开路	10.729	10.729	3.319	3.319	3.319	
R_4	0	10.729	10.729	13.276	13.276	13.276	
C_1	0.012C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	7.187	7.187	5.333	5.333	5.333	1.610	3
R_2	20.680	20.680	1.393	1.393	1.393	2.307	
R_3	开路	开路	13.454	13.454	13.454	4.897	
R_4	0	0	13.454	13.454	13.454	19.588	
C_1	0.05C	0.05C	C	C	C	2C	
R_1	6.023	6.023	6.023	6.023	4.521	3.221	4
R_2	18.139	18.139	18.139	18.139	7.973	5.597	
R_3	开路	开路	开路	开路	24.990	11.757	
R_4	0	0	0	0	24.990	35.270	
C_1	0.33C	0.33C	0.33C	0.33C	C	2C	

* 电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—24 八阶2dB压控电压源切比奎夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	49.085	2.189	2.189	1.115	1.115	1.115	1
R_2	77.409	2.361	1.180	1.158	1.158	1.158	
R_3	开路	9.099	5.615	2.842	2.842	2.842	
R_4	0	9.099	8.423	11.368	11.368	11.368	
C_1	0.00068C	0.5C	C	2C	2C	2C	
R_1	15.178	2.355	2.355	1.254	1.254	1.254	2
R_2	34.578	3.031	3.031	1.423	1.423	1.423	
R_3	开路	10.772	10.772	3.346	3.346	3.346	
R_4	0	10.772	10.772	13.385	13.385	13.385	
C_1	0.0068C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	10.130	10.130	7.048	7.048	7.048	1.712	3
R_2	23.166	23.166	1.099	1.099	1.099	2.262	
R_3	开路	开路	16.293	16.293	16.293	4.967	
R_4	0	0	16.293	16.293	16.293	19.868	
C_1	0.033C	0.033C	C	C	C	2C	
R_1	9.869	9.869	9.869	9.869	5.975	3.923	4
R_2	15.142	15.142	15.142	15.142	7.503	5.713	
R_3	开路	开路	开路	开路	26.957	12.849	
R_4	0	0	0	0	26.957	38.547	
C_1	0.3C	0.3C	0.3C	0.3C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

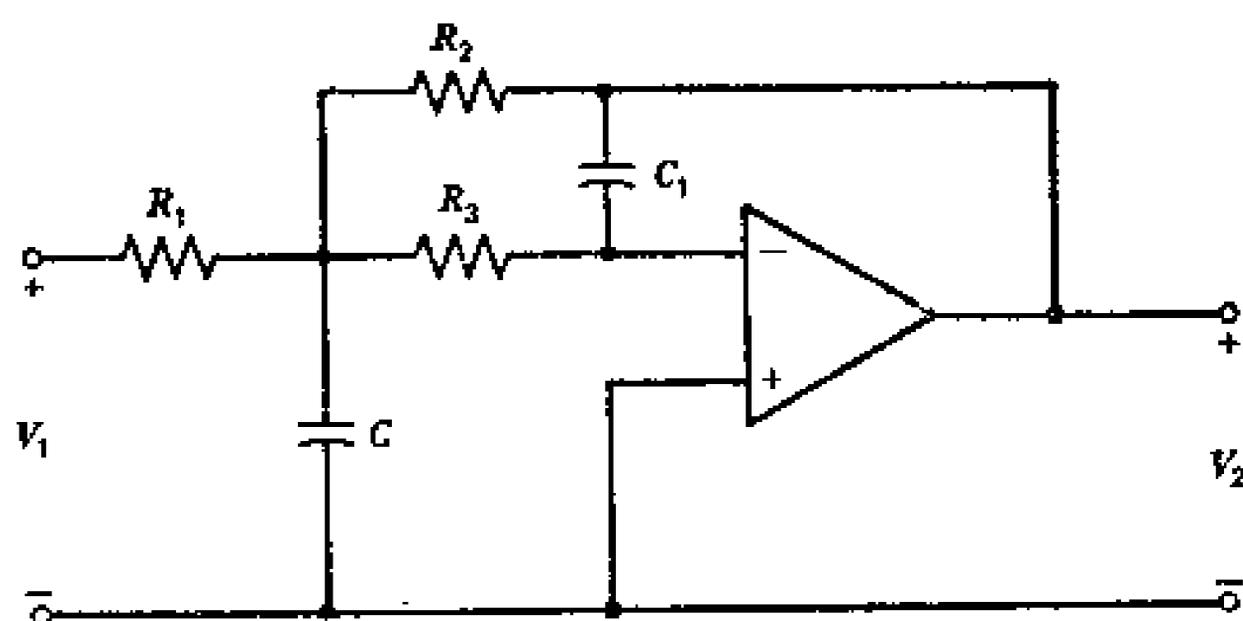
表 2—25 八阶3dB压控电压源切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	65.326	2.211	2.211	1.123	1.123	1.123	
R_2	84.688	2.352	1.176	1.158	1.158	1.158	
R_3	开路	9.126	5.645	2.851	2.851	2.851	1
R_4	0	9.126	8.468	11.404	11.404	11.404	
C_1	0.00047C	0.5C	C	2C	2C	2C	
R_1	20.532	2.420	2.420	1.274	1.274	1.274	
R_2	35.070	2.976	2.976	1.413	1.413	1.413	
R_3	开路	10.791	10.791	3.359	3.359	3.359	2
R_4	0	10.791	10.791	13.435	13.435	13.435	
C_1	0.005C	0.5C	0.5C	2C	2C	2C	
R_1	12.304	12.304	3.164	3.164	3.164	1.477	
R_2	29.162	29.162	4.989	4.989	4.989	5.344	
R_3	开路	开路	16.307	16.307	16.307	8.526	3
R_4	0	0	16.307	16.307	16.307	34.105	
C_1	0.022C	0.022C	0.5C	0.5C	0.5C	C	
R_1	11.789	11.789	11.789	11.789	7.336	4.451	
R_2	19.419	19.419	19.419	19.419	6.866	5.658	
R_3	开路	开路	开路	开路	28.403	13.478	4
R_4	0	0	0	0	28.403	40.435	
C_1	0.22C	0.22C	0.22C	0.22C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

2.11 无限增益多路反馈低通滤波器

设计程序摘要



通用电路

设计程序

给定截频 f_c (Hz)、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应),对于二阶滤波器或级联高阶滤波器($n=4,6,8$)的每一节按下面的步骤进行设计:

1. 选择电容 C 值,由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图2—16a、b或c查出。对于高阶滤波器(例如 $n > 4$)设计,因为要求较高的精度,用公式计算较好。

2. 从下面表2—26~2—49适当的一个表中查出其余的元件值。 C_1 的值直接由选定的 C 值和表中的数值确定。表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况,因而必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ,才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用的电阻值, 这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。在表中 C_1 是 C 的某一倍数, 如0.47等等。因此, 如果 C 值选择为10 μF 的某一次幂(即0.1, 1, 10等等), 则 C_1 也就得到标称电容值。

注 释 和 建 议

2.10节对压控电压源低通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下:

(a) a和d条可直接应用。

(b) c和e条不适用。

(c) b条适用, 但这里的 $R_{12} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 。

(d) f条适用, 不过这里到地的直流通路已由 R_2 和 R_3 完成。此外, 还需应用下面几条:

(e) 滤波器每节的反相增益为 R_2/R_1 。用一个电位器代替 R_2 可以实现增益调节。

(f) 为把直流失调减到最小, 在同相输入端与地之间接一个等于c条 R_{12} 值的电阻。

无限增益多路反馈低通滤波器已在2.6节讨论过了。

表 2—26 二阶无限增益多路反馈巴特沃斯低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	3.111	2.565	1.697	1.625
R_2	3.111	5.130	10.180	16.252
R_3	4.072	3.292	4.977	4.723
C_1	0.2C	0.15C	0.05C	0.033C

* 电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—27 二阶0.1dB 无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	2.163	1.306	1.103	1.069
R_2	2.163	2.611	6.619	10.690
R_3	1.767	2.928	2.310	2.167
C_1	0.2C	0.1C	0.05C	0.033C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—28 二阶0.5dB 无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	3.374	2.530	1.673	1.608
R_2	3.374	5.060	10.036	16.083
R_3	3.301	3.301	5.045	4.722
C_1	0.15C	0.1C	0.033C	0.022C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—29 二阶1dB 无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	3.821	2.602	2.284	2.213
R_2	3.821	5.204	13.705	22.128
R_3	6.013	8.830	5.588	5.191
C_1	0.1C	0.05C	0.03C	0.02C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—30 二阶2dB 无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	4.658	3.999	3.009	3.113
R_2	4.658	7.997	18.053	31.133
R_3	13.216	7.697	8.524	6.591
C_1	0.05C	0.05C	0.02C	0.015C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—31 二阶3dB 无限增益多路反馈切比雪夫低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	6.308	6.170	3.754	3.617
R_2	6.308	12.341	22.524	36.171
R_3	11.344	6.169	10.590	9.892
C_1	0.05C	0.047C	0.015C	0.01C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—32 四阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	5.321	5.230	3.167	3.052	1
R_2	5.321	10.460	19.003	30.522	
R_3	9.521	5.153	8.886	8.299	
C_1	0.05C	0.047C	0.015C	0.01C	
R_1	2.334	1.750	1.411	1.187	2
R_2	2.334	3.501	8.467	11.871	
R_3	3.289	3.289	2.992	4.268	
C_1	0.33C	0.22C	0.1C	0.05C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—33 四阶0.1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	8.102	6.563	4.458	4.262	1
R_2	8.102	13.126	26.747	42.623	
R_3	11.755	9.675	14.243	13.542	
C_1	0.02C	0.015C	0.005C	0.0033C	
R_1	3.886	2.914	1.732	1.965	2
R_2	3.886	5.829	10.392	19.653	
R_3	3.489	3.489	7.827	4.139	
C_1	0.3C	0.2C	0.05C	0.05C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—34 四阶0.5dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	11.672	9.821	7.311	7.112	1
R_2	11.672	19.643	43.866	71.125	
R_3	20.405	14.787	16.453	15.221	
C_1	0.01C	0.0082C	0.0033C	0.0022C	
R_1	5.178	3.449	2.827	2.990	2
R_2	5.178	6.898	16.964	29.898	
R_3	6.863	10.304	8.379	6.095	
C_1	0.2C	0.1C	0.05C	0.039C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—35 四阶 1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	16.165	11.483	9.060	8.930	1
R_2	16.165	22.967	54.361	89.302	
R_3	19.371	22.360	21.470	19.168	
C_1	0.0082C	0.005C	0.0022C	0.0015C	
R_1	6.252	4.689	4.018	3.919	2
R_2	6.252	9.379	24.107	39.193	
R_3	9.667	9.667	7.521	7.010	
C_1	0.15C	0.1C	0.05C	0.033C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—36 四阶 2dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	21.758	16.196	13.240	13.171	1
R_2	21.758	32.392	79.438	131.710	
R_3	25.072	25.517	22.591	20.709	
C_1	0.005C	0.0033C	0.0015C	0.001C	
R_1	8.080	6.796	5.060	4.922	2
R_2	8.080	13.592	30.359	49.219	
R_3	14.149	10.257	11.411	10.558	
C_1	0.1C	0.082C	0.033C	0.022C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—37 四阶3dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	26.277	19.708	16.048	16.285	1
R_2	26.277	39.415	96.266	162.846	
R_3	32.346	32.346	29.130	25.329	
C_1	0.0033C	0.0022C	0.001C	0.00068C	
R_1	12.189	7.481	6.679	5.734	2
R_2	12.189	14.262	40.075	57.338	
R_3	10.604	17.277	11.945	15.028	
C_1	0.1C	0.05C	0.027C	0.015C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$

表 2—38 六阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	9.296	6.972	5.205	4.753	1
R_2	9.296	13.944	31.230	47.534	
R_3	9.083	9.083	9.891	10.658	
C_1	0.03C	0.02C	0.0062C	0.005C	
R_1	3.343	2.565	2.154	2.154	2
R_2	3.343	5.130	12.924	12.924	
R_3	3.444	3.292	2.882	2.882	
C_1	0.22C	0.15C	0.068C	0.068C	
R_1	2.139	2.139	2.139	2.129	3
R_2	2.139	2.139	2.139	3.548	
R_3	3.589	3.589	3.589	2.163	
C_1	0.33C	0.33C	0.33C	0.33C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—39 六阶0.1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	20.167	15.002	12.321	12.351	1
R_2	20.167	30.005	73.926	123.511	
R_3	22.240	22.648	20.223	18.157	
C_1	0.005C	0.0033C	0.0015C	0.001C	
R_1	8.548	4.928	3.936	3.936	2
R_2	8.548	9.857	23.618	23.618	
R_3	6.257	11.181	10.266	10.266	
C_1	0.068C	0.033C	0.015C	0.015C	
R_1	5.424	5.424	5.424	4.262	3
R_2	5.424	5.424	5.424	7.103	
R_3	5.910	5.910	5.910	6.154	
C_1	0.3C	0.3C	0.3C	0.22C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—40 六阶0.5dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	31.791	20.685	16.622	17.915	1
R_2	31.791	41.371	99.732	179.150	
R_3	28.846	39.900	36.510	27.642	
C_1	0.0027C	0.0015C	0.00068C	0.0005C	
R_1	10.976	8.232	6.801	6.801	2
R_2	10.976	16.463	40.808	40.808	
R_3	11.853	11.853	10.521	10.521	
C_1	0.033C	0.022C	0.01C	0.01C	
R_1	7.728	7.728	7.728	5.849	3
R_2	7.728	7.728	7.728	9.749	
R_3	9.489	9.489	9.489	11.033	
C_1	0.22C	0.22C	0.22C	0.15C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—41 六阶1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	34.567	25.925	22.602	22.269	1
R_2	34.567	51.850	135.610	222.690	
R_3	49.310	49.310	37.707	34.791	
C_1	0.0015C	0.001C	0.0005C	0.00033C	
R_1	13.510	10.325	8.519	8.519	2
R_2	13.510	20.650	51.112	51.112	
R_3	15.281	14.663	13.067	13.067	
C_1	0.022C	0.015C	0.0068C	0.0068C	
R_1	10.787	10.787	10.787	8.630	3
R_2	10.787	10.787	10.787	14.383	
R_3	9.415	9.415	9.415	9.415	
C_1	0.2C	0.2C	0.2C	0.15C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—42 六阶2dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	50.093	38.299	30.786	24.408	1
R_2	50.093	76.598	184.713	244.085	
R_3	52.349	50.345	47.322	71.623	
C_1	0.001C	0.00068C	0.0003C	0.00015C	
R_1	21.182	12.815	10.786	10.786	2
R_2	21.182	25.630	64.715	64.715	
R_3	14.959	22.615	18.832	18.832	
C_1	0.015C	0.0082C	0.0039C	0.0039C	
R_1	15.698	15.698	15.698	10.645	3
R_2	15.698	15.698	15.698	17.741	
R_3	10.765	10.765	10.765	14.288	
C_1	0.15C	0.15C	0.15C	0.1C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—43 六阶3dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

电路元件值*					
增益	1	4	36	100	节
R_1	62.421	54.708	37.589	33.403	1
R_2	62.421	109.416	225.533	334.033	
R_3	62.499	48.491	58.813	66.183	
C_1	0.00068C	0.0005C	0.0002C	0.00012C	
R_1	25.227	14.925	11.289	11.289	2
R_2	25.227	29.850	67.737	67.737	
R_3	19.243	32.525	35.832	35.832	
C_1	0.01C	0.005C	0.002C	0.002C	
R_1	16.440	16.440	16.440	14.694	3
R_2	16.440	16.440	16.440	24.491	
R_3	17.350	17.350	17.350	14.203	
C_1	0.1C	0.1C	0.1C	0.082C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—44 八阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联低通滤波器设计表

电路元件值*					
增益	1	4	36	100	节
R_1	11.174	8.380	7.415	7.415	1
R_2	11.174	16.761	44.490	44.490	
R_3	15.113	15.113	11.387	11.387	
C_1	0.015C	0.01C	0.005C	0.005C	
R_1	4.907	3.681	2.494	2.494	2
R_2	4.907	7.361	14.966	14.966	
R_3	3.441	3.441	4.340	4.340	
C_1	0.15C	0.1C	0.039C	0.039C	
R_1	2.808	2.808	2.808	1.827	3
R_2	2.808	2.808	2.808	5.076	
R_3	3.007	3.007	3.007	3.327	
C_1	0.3C	0.3C	0.3C	0.15C	
R_1	2.820	2.820	2.820	2.820	4
R_2	2.820	2.820	2.820	2.820	
R_3	1.911	1.911	1.911	1.911	
C_1	0.47C	0.47C	0.47C	0.47C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—45 八阶0.1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	33.958	25.469	22.452	22.452	1
R_2	33.958	50.938	134.713	134.713	
R_3	46.490	46.490	35.158	35.158	
C_1	0.0015C	0.001C	0.0005C	0.0005C	
R_1	11.438	9.594	7.294	7.294	2
R_2	11.438	19.189	43.763	43.763	
R_3	18.478	13.768	14.488	14.488	
C_1	0.015C	0.012C	0.005C	0.005C	
R_1	9.074	9.074	9.074	7.362	3
R_2	9.074	9.074	9.074	20.449	
R_3	8.178	8.178	8.178	6.331	
C_1	0.082C	0.082C	0.082C	0.047C	
R_1	7.097	7.097	7.097	7.097	4
R_2	7.097	7.097	7.097	7.097	
R_3	8.170	8.170	8.170	8.170	
C_1	0.3C	0.3C	0.3C	0.3C	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—46 八阶0.5dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	53.757	37.752	28.277	28.277	1
R_2	53.757	75.504	169.660	169.660	
R_3	56.786	66.305	73.770	73.770	
C_1	0.00082C	0.0005C	0.0002C	0.0002C	
R_1	21.393	12.573	11.469	11.469	2
R_2	21.393	25.146	68.816	68.816	
R_3	15.972	27.176	18.390	18.390	
C_1	0.01C	0.005C	0.0027C	0.0027C	
R_1	14.803	14.803	14.803	7.949	3
R_2	14.803	14.803	14.803	22.081	
R_3	10.152	10.152	10.152	15.993	
C_1	0.047C	0.047C	0.047C	0.02C	
R_1	9.567	9.567	9.567	9.567	4
R_2	9.567	9.567	9.567	9.567	
R_3	15.035	15.035	15.035	15.035	
C_1	0.2C	0.2C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2--47 八阶1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	63.382	55.636	38.294	38.294	1
R_2	63.382	111.273	229.761	229.761	
R_3	80.400	58.714	73.931	73.931	
C_1	0.0005C	0.00039C	0.00015C	0.00015C	
R_1	20.984	17.289	12.539	12.539	2
R_2	20.984	34.578	75.231	75.231	
R_3	33.367	25.960	31.023	31.023	
C_1	0.005C	0.0039C	0.0015C	0.0015C	
R_1	16.600	16.600	16.600	10.637	3
R_2	16.600	16.600	16.600	29.548	
R_3	14.922	14.922	14.922	16.767	
C_1	0.03C	0.03C	0.03C	0.015C	
R_1	14.473	14.473	14.473	14.473	4
R_2	14.473	14.473	14.473	14.473	
R_3	12.052	12.052	12.052	12.052	
C_1	0.2C	0.2C	0.2C	0.2C	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—48 八阶2dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	93.911	64.259	61.000	61.000	1
R_2	93.911	128.518	365.997	365.997	
R_3	83.371	100.520	70.594	70.594	
C_1	0.00033C	0.0002C	0.0001C	0.0001C	
R_1	28.094	21.071	18.144	18.144	2
R_2	28.094	42.142	108.863	108.863	
R_3	42.342	42.342	32.782	32.782	
C_1	0.003C	0.002C	0.001C	0.001C	
R_1	19.050	19.050	19.050	16.312	3
R_2	19.050	19.050	19.050	45.310	
R_3	27.100	27.100	27.100	17.091	
C_1	0.015C	0.015C	0.015C	0.01C	
R_1	20.934	20.934	20.934	20.934	4
R_2	20.934	20.934	20.934	20.934	
R_3	21.416	21.416	21.416	21.416	
C_1	0.1C	0.1C	0.1C	0.1C	

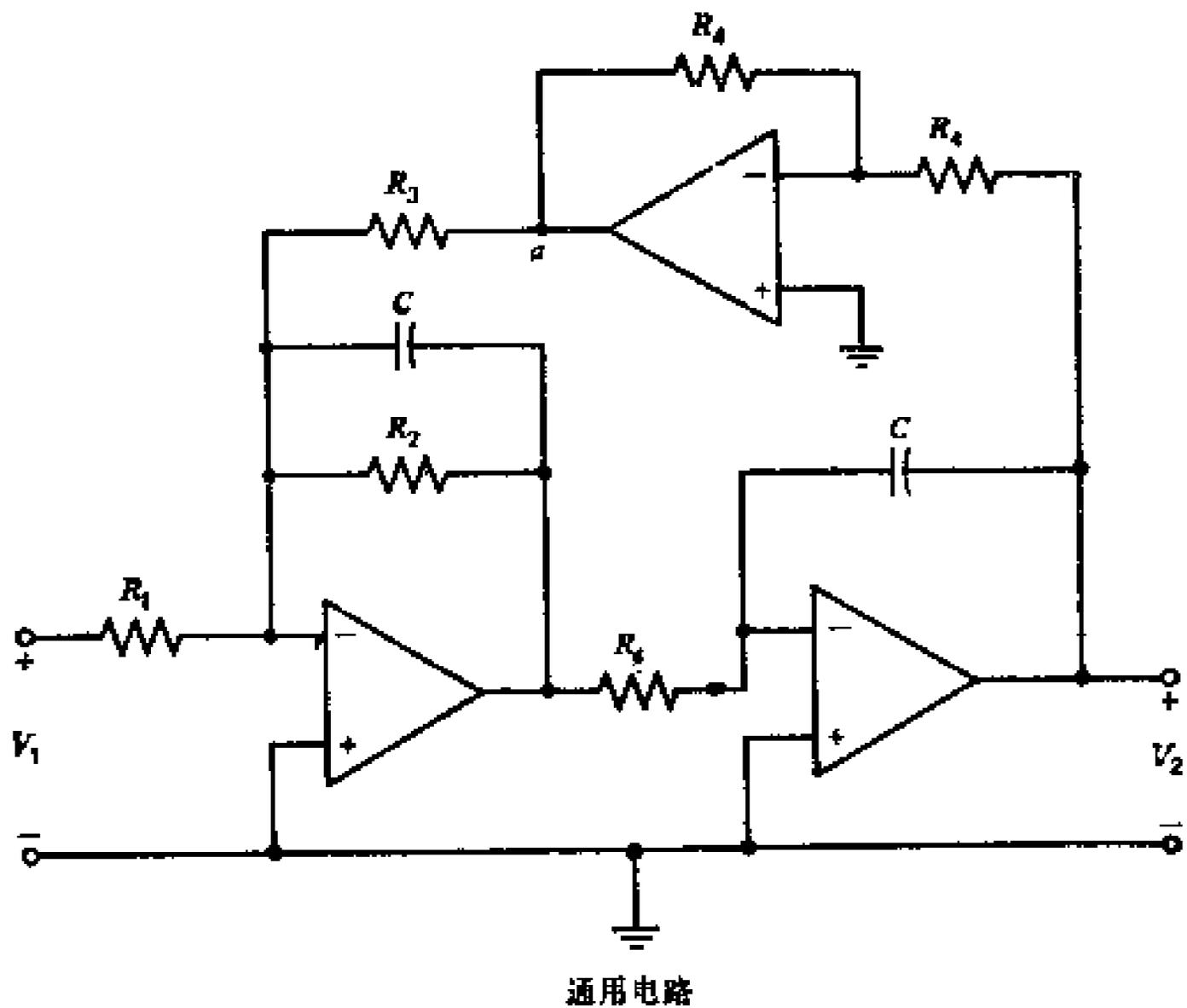
* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—49 八阶3dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联低通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	36	100	
R_1	105.077	89.088	56.708	56.708	1
R_2	105.077	178.175	340.249	340.249	
R_3	123.728	97.289	152.840	152.840	
C_1	0.0002C	0.00015C	0.00005C	0.00005C	
R_1	36.365	27.712	19.007	19.007	2
R_2	36.365	55.425	114.041	114.041	
R_3	45.001	43.305	63.139	63.139	
C_1	0.0022C	0.0015C	0.0005C	0.0005C	
R_1	23.212	23.212	23.212	15.360	3
R_2	23.212	23.212	23.212	42.667	
R_3	34.007	34.007	34.007	37.002	
C_1	0.01C	0.01C	0.01C	0.005C	
R_1	21.246	21.246	21.246	21.246	4
R_2	21.246	21.246	21.246	21.246	
R_3	23.706	23.706	23.706	23.706	
C_1	0.1C	0.1C	0.1C	0.1C	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

2.12 双二次低通滤波器设计程序摘要



设计程序

给定截频 f_c (Hz)、滤波器增益 G 、阶数 n 和滤波器类型 (巴特沃斯或切比雪夫响应), 对于二阶滤波器或级联高阶滤波器 ($n = 4, 6, 8$) 中的每一节按下面步骤进行设计:

1. 选择电容 C 值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图2-16a、b或c查出。对于高阶滤波器 (例如 $n > 4$) 设计, 因为要求较

高的精度，用公式计算较好。

2. 从表2—50~2—53适当的一个表中查出电阻值。表中电阻值对应于 $K=1$ 的情况，因此，必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。表中的 G 是单节的增益，当 $n>2$ 时，滤波器的增益等于各节增益的乘积。各节的增益不必相等，这可由设计人员选择。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。

注 释 和 建 议

2.10节对压控电压源低通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) a和d条可直接应用。

(b) c和e条不适用。

(c) b条适用，但这里的 $R_{eq}=R_1$ 或 R_4 ，因为 R_1 或 R_4 是接到运算放大器反相输入端的电阻。

(d) 在f条中，除了到地的直流通路已由 R_2 和 R_3 实现外，其余都可应用。

此外，还需应用下面几条：

(e) 单节的增益为 R_3/R_1 。如果要得到相同大小的反相增益，则可从a点输出。

(f) 滤波器的响应可通过改变 R_1 、 R_2 和 R_3 方便地加以调整。改变 R_1 影响增益；改变 R_2 影响通带响应；改变 R_3 则改变 f_c 。

双二次低通滤波器已在2.7节讨论过了。

表 2—50 二阶双二次低通滤波器设计表

电路元件值*						
		切比雪夫				
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
R_1	$1.592/G$	$0.480/G$	$1.050/G$	$1.444/G$	$1.934/G$	$2.248/G$
R_2	1.125	0.671	1.116	1.450	1.980	2.468
R_3	1.592	0.480	1.050	1.444	1.934	2.248
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

* 电阻为 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。 $G =$ 增益。

表 2—51 四阶双二次级联低通滤波器设计表

电路元件值*							
		切比雪夫					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	节
R_1	$1.592/G$	$1.197/G$	$1.496/G$	$1.613/G$	$1.714/G$	$1.762/G$	1
R_2	2.079	3.013	4.538	5.703	7.587	9.343	
R_3	1.592	1.197	1.496	1.613	1.714	1.762	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$2.555/G$	$4.465/G$	$5.696/G$	$7.183/G$	$8.121/G$	2
R_2	0.861	1.248	1.880	2.362	3.143	3.870	
R_3	1.592	2.555	4.465	5.696	7.183	8.121	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ ， $G =$ 单级增益

表 2—52 六阶双二次级联低通滤波器设计表

电路元件值*							
	巴特沃斯	切比雪夫					节
		0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	
R_1	$1.592/G$	$1.409/G$	$1.566/G$	$1.606/G$	$1.648/G$	$1.667/G$	1
R_2	3.075	6.938	10.248	12.798	16.941	20.816	
R_3	1.592	1.409	1.556	1.606	1.648	1.667	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$2.285/G$	$2.697/G$	$2.854/G$	$2.986/G$	$3.050/G$	2
R_2	1.125	2.539	3.751	4.684	6.201	7.619	
R_3	1.592	2.285	2.697	2.854	2.986	3.050	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$6.042/G$	$10.137/G$	$12.762/G$	$15.927/G$	$17.922/G$	3
R_2	0.824	1.859	2.746	3.429	4.539	5.578	
R_3	1.592	6.042	10.137	12.762	15.927	17.922	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ ， $G =$ 单级增益

表 2-53 八阶双二次级联低通滤波器设计表

		电路元件值*					
		衰减量					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	节
R_1	$1.592/G$	$1.488/G$	$1.573/G$	$1.601/G$	$1.623/G$	$1.634/G$	1
R_2	4.079	12.437	18.243	22.731	30.038	36.879	
R_3	1.592	1.488	1.573	1.601	1.623	1.634	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$1.992/G$	$2.147/G$	$2.200/G$	$2.242/G$	$2.262/G$	2
R_2	1.432	4.367	6.406	7.982	10.548	12.950	
R_3	1.592	1.992	2.147	2.200	2.242	2.262	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$3.823/G$	$4.438/G$	$4.669/G$	$4.866/G$	$4.960/G$	3
R_2	0.957	2.918	4.280	5.333	7.048	8.653	
R_3	1.592	3.823	4.438	4.669	4.866	4.960	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	$1.592/G$	$10.929/G$	$18.075/G$	$22.652/G$	$28.169/G$	$31.645/G$	4
R_2	0.811	2.474	3.629	4.521	5.975	7.336	
R_3	1.592	10.929	18.075	22.652	28.169	31.645	
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ ， $G =$ 单级增益

2.13 多路反馈低通滤波器设计程序摘要

$n = 3 \sim 8$ 的多路反馈低通滤波器的通用电路已分别在图2—9~2—14给出。

设计程序

给定截频 f_c (Hz)、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应),按下面步骤进行设计:

1. 选择电容 C 值,由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图2—16a、b或c查出。对于高阶滤波器(例如 $n > 4$)设计,因为要求较高的精度,用公式计算较好。

2. 从下面表2—54~2—61适当的一个表中查出其余元件值。除 C 以外的电容值可直接由所选定的 C 值和表中查得的数值确定。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况,因此,必须把这些数值乘以由第一步得到的参数 K ,才能获得电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用的电阻值,这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器。表中其余的电容值都是 C 的倍数,如0.47等等。因此,如果电容 C 值选择为 $10\mu\text{F}$ 的某一次幂(即0.1, 1, 10等),则得到的也是标称电容值。

注释和建议

2.10节对压控电压源低通滤波器的注释和建议在这里的适

用情况如下:

(a) d和f条可直接应用。

(b) a条不适用。

(c) b条适用, 但在这里每个运算放大器的 R_{in} 等于连接到同相输入端的几个电阻之和。

(d) c条适用于每个运算放大器, 但这时的 R_3 和 R_4 应由连接到反相输入端的两个电阻代替。

(e) e条适用于每个有增益调整电阻的压控电压源。在每种情况下, R_3 和 R_4 由这些增益调整电阻所代替。

不同阶数的多路反馈低通滤波器的具体例子已在2.9节中给出。

表 2-54 三阶多路反馈低通滤波器设计表

电路元件值*

切比雪夫

元件	0.1 dB		0.5 dB		1 dB		2 dB		3 dB			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2		
R_1	1.639	2.491	1.661	2.122	2.556	2.987	3.345	3.621	4.351	4.647	5.338	5.612
R_2	11.697	2.339	14.515	2.678	23.994	4.421	10.624	5.800	25.033	8.051	48.310	10.149
R_3	2.103	0.692	1.702	0.433	2.041	0.427	3.977	0.391	2.580	0.330	2.079	0.283
R_4	开路	11.043	开路	10.465	开路	15.668	开路	19.623	开路	26.056	开路	32.087
R_5	0	11.043	0	10.465	0	15.668	0	19.623	0	26.056	0	32.087
C_1	C	C	1.2C	C	1.5C	C	1.5C	C	2.2C	C	3C	C
C_2	0.1C	C	0.05C	C	0.03C	C	0.039C	C	0.02C	C	0.01C	C

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—55 四阶多路反馈低通滤波器设计表(巴特沃斯响应和 0.1dB 切比雪夫响应)

电路元件值*						
增益	巴特沃斯			切比雪夫 (0.1 dB)		
	2	6	10	2	6	10
R_1	0.531	0.431	0.390	0.727	0.540	0.477
R_2	3.439	5.476	7.026	3.641	6.003	7.751
R_3	2.441	0.535	0.367	5.850	0.540	0.365
R_4	0.719	2.544	3.190	0.250	2.210	2.872
R_5	6.321	3.695	3.952	12.199	3.300	3.597
R_6	6.321	18.474	35.567	12.199	16.501	32.371

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—56 四阶多路反馈低通滤波器设计表 (0.5dB 和 1dB 切比雪夫响应)

电路元件值*						
增益	切比雪夫 (0.5 dB)			切比雪夫 (1 dB)		
	3	6	10	3	6	10
R_1	0.916	0.735	0.635	1.099	0.855	0.729
R_2	5.197	7.345	9.582	5.463	7.902	10.401
R_3	1.321	0.639	0.429	1.431	0.681	0.456
R_4	1.346	2.455	3.240	1.355	2.530	3.366
R_5	4.000	3.712	4.076	4.179	3.853	4.247
R_6	8.000	18.561	36.686	8.357	19.267	38.224

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—57 四阶多路反馈低通滤波器设计表(2dB和3dB切比雪夫响应)

电路元件值*						
增益	切比雪夫 (2 dB)			切比雪夫 (3 dB)		
	3	6	0	3	6	10
R_1	1.357	1.008	0.843	1.559	1.116	0.920
R_2	5.558	8.337	11.129	5.490	8.486	11.456
R_3	1.543	0.721	0.481	1.608	0.742	0.493
R_4	1.340	2.575	3.458	1.317	2.582	3.488
R_5	4.324	3.955	4.376	4.387	3.988	4.423
R_6	8.649	19.773	39.382	8.775	19.941	39.811

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—58 五阶多路反馈低通滤波器设计表

电路元件值*									
增益	切比雪夫								
	巴特沃斯		0.1 dB		0.5 dB		1 dB	2 dB	3 dB
	4	10	4	10	4	10	4	4	6
R_1	0.169	0.107	0.300	0.162	0.443	0.208	0.562	0.856	0.447
R_2	1.631	2.190	1.597	2.629	1.469	2.932	1.277	0.868	1.997
R_3	4.980	5.992	6.558	7.520	8.929	9.606	10.858	14.851	14.915
R_4	0.836	0.869	0.982	1.007	1.143	1.158	1.222	1.316	1.322
R_5	0.557	0.521	0.505	0.484	0.538	0.525	0.546	0.538	0.579
R_6	3.600	2.870	3.800	3.490	3.800	3.930	3.680	3.460	3.670
R_7	3.600	11.490	3.800	13.950	3.800	15.700	3.680	3.460	7.340
R_8	12.800	14.760	16.200	18.000	21.200	22.600	25.260	33.400	33.600

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 2—59 六阶多路反馈低通滤波器设计表

电路元件值*									
切比雪夫									
巴特沃斯		0.1 dB		0.5 dB		1 dB	2 dB	3 dB	
增益	2	4	2	4	2	4	4	4	4
R_1	0.251	0.358	0.156	0.150	1.411	1.151	1.139	0.948	0.635
R_2	4.194	4.914	5.474	6.017	1.709	2.277	2.361	2.569	2.821
R_3	0.894	1.076	0.144	0.131	1.834	1.835	1.968	2.091	2.128
R_4	1.302	1.295	1.599	2.130	0.442	0.692	0.611	0.499	0.423
R_5	0.859	5.718	0.425	0.151	4.650	2.443	3.177	4.177	4.676
R_6	0.973	0.465	0.770	1.711	2.505	4.782	4.685	4.607	4.658
R_7	开路	开路	开路	开路	开路	7.000	7.000	7.040	6.860
R_8	0	0	0	0	0	7.000	7.000	7.040	6.860
R_9	4.440	4.740	3.500	4.460	4.540	5.100	5.160	5.200	5.100
R_{10}	开路	12.340	开路	3.700	开路	开路	开路	开路	开路
R_{11}	0	12.340	0	3.700	0	0	0	0	0
C_1	2C	C	10C	10C	1.5C	1.5C	1.5C	1.5C	1.5C
C_2	C	C	C	C	1.5C	0.22C	0.33C	0.68C	1.5C
C_3	C	0.5C	C	C	0.33C	0.22C	0.33C	0.68C	1.5C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 2—60 七阶多路反馈低通滤波器设计表

电路元件值*									
切比雪夫									
巴特沃斯		0.1 dB		0.5 dB		1 dB	2 dB	3 dB	
增益	2	4	2	4	2	4	4	4	4
R_1	1.091	0.360	0.449	1.304	0.539	0.727	0.236	1.317	0.520
R_2	1.018	2.326	0.582	1.048	1.594	0.512	2.580	3.545	4.142
R_3	0.695	0.813	1.136	2.685	0.435	0.550	0.354	4.993	4.158
R_4	0.767	0.831	0.895	1.111	0.671	2.991	0.812	0.454	0.343
R_5	2.096	1.940	0.996	3.232	0.867	0.941	1.729	1.061	0.980
R_6	1.920	2.932	2.028	0.907	1.997	0.885	1.305	2.943	3.886
R_7	0.610	0.501	0.664	0.742	0.809	1.375	0.984	0.682	0.972
R_8	开路	5.372	2.062	4.700	开路	2.500	5.600	开路	开路
R_9	0	5.372	2.062	4.700	0	2.500	5.600	0	0
R_{10}	2.925	3.288	开路	Open	2.212	Open	2.330	10.900	9.100
R_{11}	2.925	3.288	0	0	2.212	0	2.330	10.900	9.100
R_{12}	开路	开路	开路	9.762	开路	6.440	开路	9.360	11.740
R_{13}	0	0	0	9.762	0	6.440	0	9.360	11.740
C_1	2.2C	2C	4.7C	2C	3.9C	3.3C	5C	1.2C	1.2C
C_2	C	C	C	0.2C	4.7C	0.33C	3.3C	1.8C	5C
C_3	0.47C	C	C	0.2C	2.2C	1.5C	4.7C	0.33C	0.68C
C_4	C	C	4.7C	3C	10C	13C	6.8C	12C	15C

表 2—61 八阶多路反馈低通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	巴特沃斯	切比雪夫		
		4	0.1 dB	0.5 dB
			4	4
R_1	0.772	1.020	1.377	
R_2	5.164	1.259	0.110	
R_3	4.581	0.577	2.013	
R_4	2.099	2.253	0.270	
R_5	2.083	0.943	2.208	
R_6	1.874	2.398	0.673	
R_7	1.933	1.262	0.628	
R_8	2.474	0.205	0.138	
R_9	开路	开路	2.974	
R_{10}	0	0	2.974	
R_{11}	13.360	5.660	开路	
R_{12}	13.360	5.660	0	
R_{13}	8.814	2.934	1.532	
C_1	0.68C	5C	5.6C	
C_2	0.22C	2C	3.3C	
C_3	0.3C	0.82C	0.22C	
C_4	0.25C	0.56C	0.56C	
C_5	0.5C	0.47C	4.7C	
C_6	0.5C	3.9C	4.7C	
C_7	0.5C	2.7C	4.7C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

3. 高通滤波器

3.1 基本理论

高通滤波器通过高频信号而衰减低频信号。理想的高通幅度响应如图3—1虚线所示；可以实现的近似于理想特性的幅度

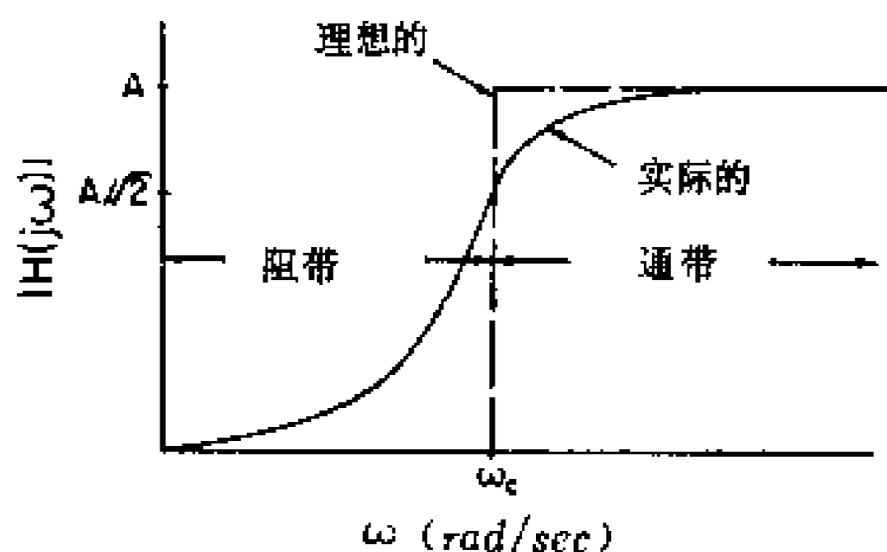


图 3—1 高通滤波器幅度响应

响应如实线所示。阻带是区间 $0 < \omega < \omega_c$ ，而通带是 $\omega > \omega_c$ 。和低通滤波器一样，截频点 $\omega_c = 2\pi f_c$ 是当幅度下降为最大值的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率。和低通滤波器情况一样，幅度响应也可以用分贝标绘，在

这种情况下，在 ω_c 处的幅度比最大值低 3dB。

为获得高通滤波器的传递函数，只需将低通滤波器传递函数中的 s 用 $1/S$ 代换即可^[21]。因此，从全极型低通滤波器方程 (2.2) 式导出 n 阶高通传递函数的过程为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \Bigg|_{s = \frac{1}{S}} \quad (3.1)$$

进行上述代换并经简化后得

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gs^n}{S^n + a_{n-1}S^{n-1} + \dots + a_1S + a_0} \quad (3.2)$$

注意到 $b_n=1$, 则有

$$a_{n-i} = \frac{b_i}{b_0}; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

高通滤波器的增益是当 S 趋于无穷大时的传递函数值。在 (3.2) 式中, 这个增益显然就是 G , 它也是进行 $S=1/S$ 代换前由 (3.1) 式给出的低通“原型”的增益。

当低通原型为巴特沃斯或切比雪夫滤波器时, 由 (3.2) 式所表示的高通滤波器也是巴特沃斯或切比雪夫 (具有给定分贝数的通带波纹) 滤波器。在两种情况下, (3.3) 式给出的归一化 ($\omega_c=1$) 系数 a_i 均由低通原型的归一化系数 b_i 求得。和低通滤波器一样, ω_c 就是巴特沃斯高通滤波器按习惯定义的截频点, 也是切比雪夫高通滤波器通带波纹区间的起始点 (当然, 在 3dB 情况下, ω_c 也就是按习惯定义的截频点)。为得出切比雪夫滤波器的 ω_c (或 f_c) 和按习惯定义的截频点的关系, 读者可根据各种不同的 n 值和波纹宽度查表 3.1。

表 3-1 切比雪夫高通滤波器通常的 3dB 截频点 f_{3dB} 与波纹区间起点频率 f_c 的关系

dB \ n	f_{3dB}/f_c							
	2	3	4	5	6	7	8	
0.1	0.515	0.720	0.824	0.881	0.915	0.936	0.951	
0.5	0.720	0.857	0.915	0.944	0.961	0.971	0.978	
1	0.821	0.913	0.950	0.967	0.977	0.983	0.987	
2	0.931	0.968	0.982	0.988	0.992	0.994	0.995	
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	

第二章2.2和2.3节关于切比雪夫和巴特沃斯低通滤波器的优点和缺点的评价也适用于高通滤波器。切比雪夫滤波器有较好的截止特性，通带有波纹，而巴特沃斯滤波器有较好的相位响应和单调的幅度响应。当然，随着阶数 n 的增加，每种滤波器的幅度响应都将得到改善，但随之而来的是相位响应变坏。为了进行比较，图3—2和图3—3分别给出了二阶切比雪夫和巴特沃斯两种滤波器的幅度响应和相位响应。

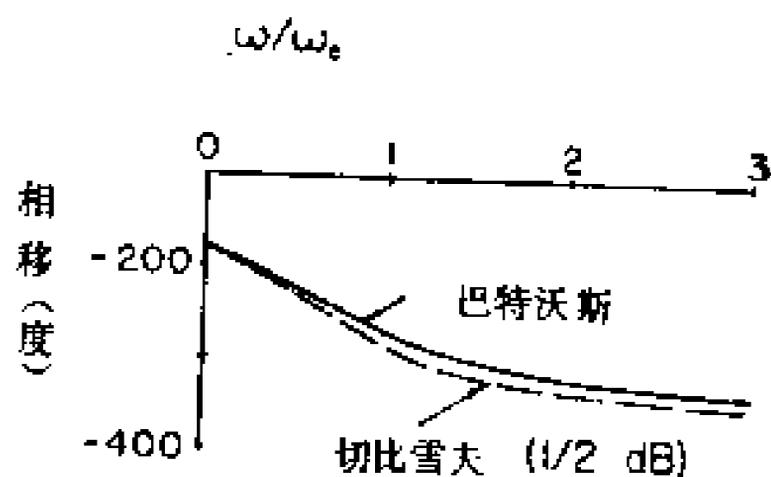
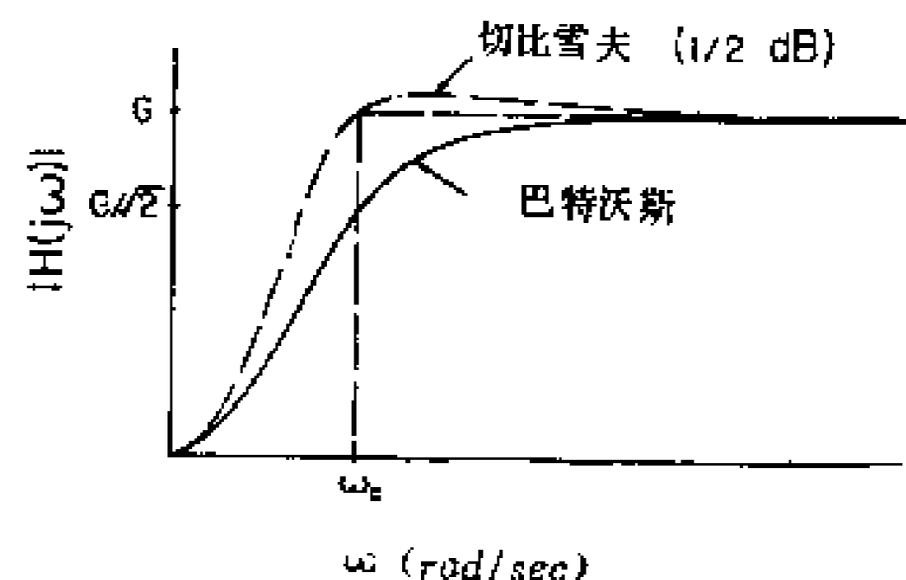


图 3—2 二阶高通滤波器的幅度响应

图 3—3 二阶高通滤波器的相位响应

和低通滤波器一样，我们作出了设计表，以便快速设计巴特沃斯和切比雪夫高通滤波器。设计表附在本章末尾，电阻值是按 $K=1$ 设计的。设计表对各种高通滤波器电路的用法将在本章下面几节说明。我们讨论的电路都是人们熟悉的广泛使用的高通滤波器电路。此外，还有一种作者自己设计的新电路。

3.2 压控电压源高通滤波器

当 $n=2$ 时，(3.2)式成为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GS^2}{S^2 + a_1S + a_0} \quad (3.4)$$

这是二阶高通滤波器或高阶高通滤波器的二阶节的传递函数。

一个能实现这种函数并获得广泛使用的电路是压控电压源高通滤波器，如图3—4所示，它是由萨伦-基首先提出的〔26〕。它是将图2—6的压控电压源低通电路的电阻和电容（ R_3 和 R_4 除外）交换位置得到的，它也包含了一个由运算放大器和 R_3 、 R_4 组成的压控电压源。

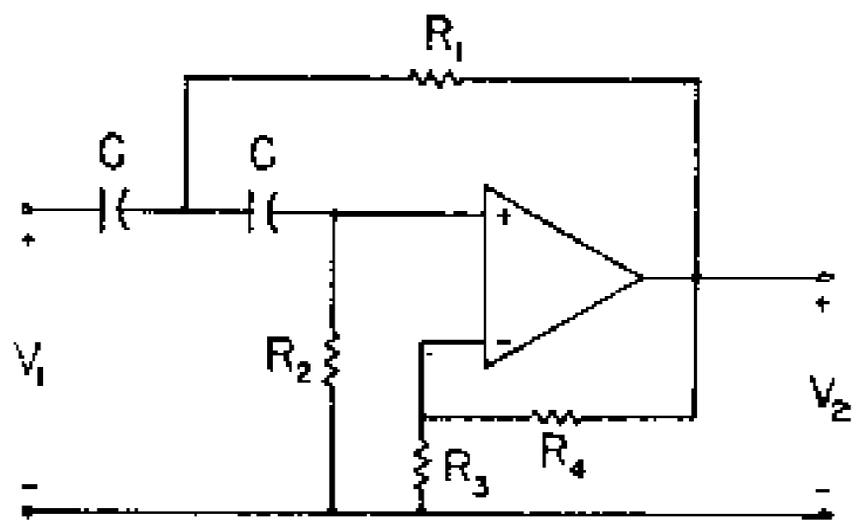


图 3—4 二阶压控电压源高通滤波器

分析图3—4可证明，得到（3.4）式的条件是

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \\
 a_1 &= \frac{1}{R_1 C} (1 - \mu) + \frac{2}{R_2 C} \quad (3.5) \\
 G = \mu &= 1 + \frac{R_4}{R_3}
 \end{aligned}$$

这里 μ 是压控电压源的增益，也是滤波器的增益。实现更高阶数的偶阶高通滤波器的程序是，将（3.2）式的传递函数分解成（3.4）式那样的二阶因式，再用如图3—4那样的一级电路实现每一个二阶因式，然后将这些电路级联起来。

二阶高通滤波器或高阶高通滤波器的二阶节的设计程序和第2章2.5节讲到的低通滤波器设计程序非常相似。设计程序汇总于3.7节，在那里画出通用电路，接着给出压控电压源高通滤波器的设计表即表3—2~3—25。和低通滤波器一样，和设计表一起使用的参数 K 可以由下式计算

$$K = \frac{100}{f_c C'} \quad (3.6)$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 的值。或者， K 值也可以从图3—15 a、b或c查出。

实例：例定我们要求一个四阶1/2dB切比雪夫高通滤波器，其 $f_c=500\text{Hz}$ ，增益为2。如果选择电容 $C=0.1\mu\text{F}$ ，于是，由(3.6)式可得参数 K 为2。表3—10给出的是对应于 $K=1$ 时的电阻值，因而，对于所述情况，必须将这些值乘以2。所得结果是，第一级为 $R_1=1.80$ ， $R_2=5.99$ ， $R_3=20.45$ ， $R_4=8.47$ ；第二级为 $R_1=1.77$ ， $R_2=2.04$ ， $R_3=6.97$ ， $R_4=2.89$ ，电阻值均以 $\text{k}\Omega$ 为单位。然后按图3—4组成滤波器的两节。其所用的电阻应尽可能接近由查表得出的数值。上述电路用的是容差为5%的电阻，其值分别为1.8、6.2、20、8.2、1.8、2.0、6.8和3.0 $\text{k}\Omega$ ，所得结果为 $f_c=496\text{Hz}$ ，增益2.04dB，波纹非常接近于0.5dB。所得幅度响应的照片示于图3—5，水平刻度为每格500Hz。

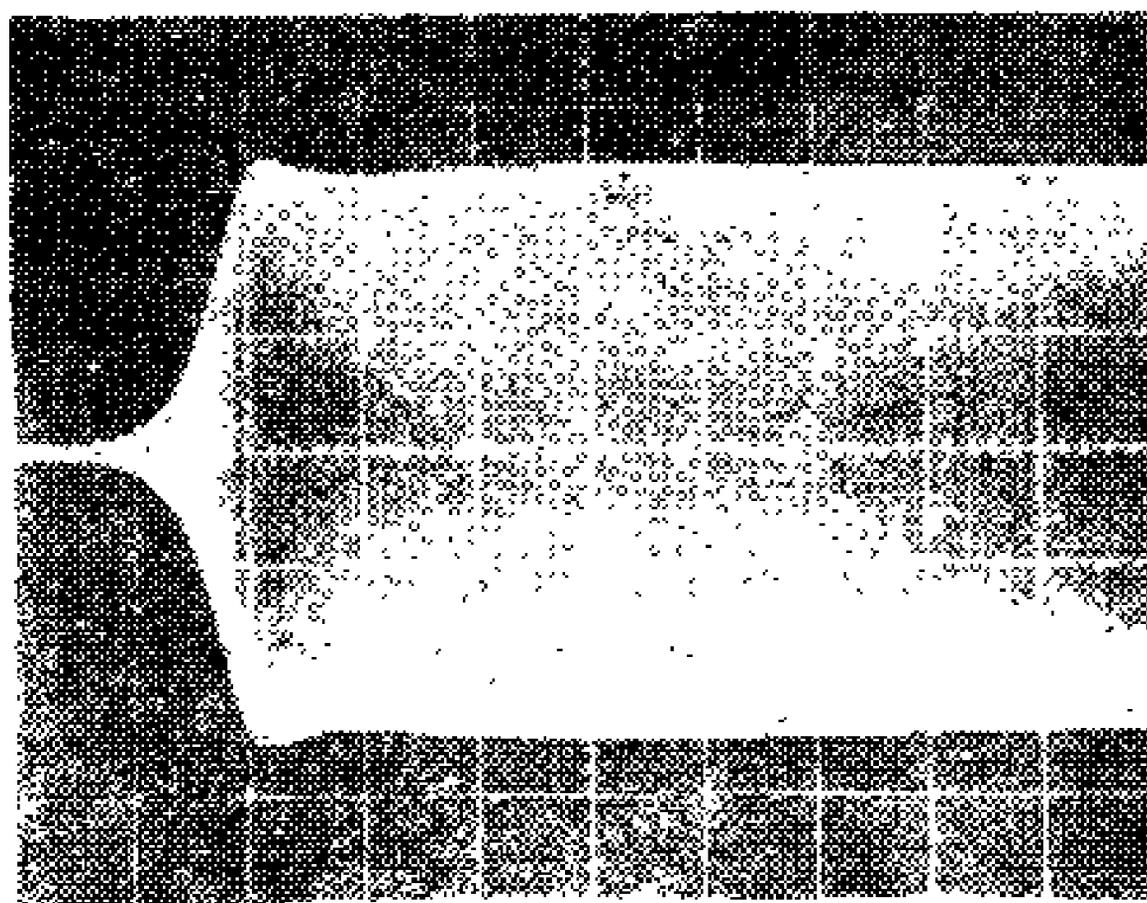
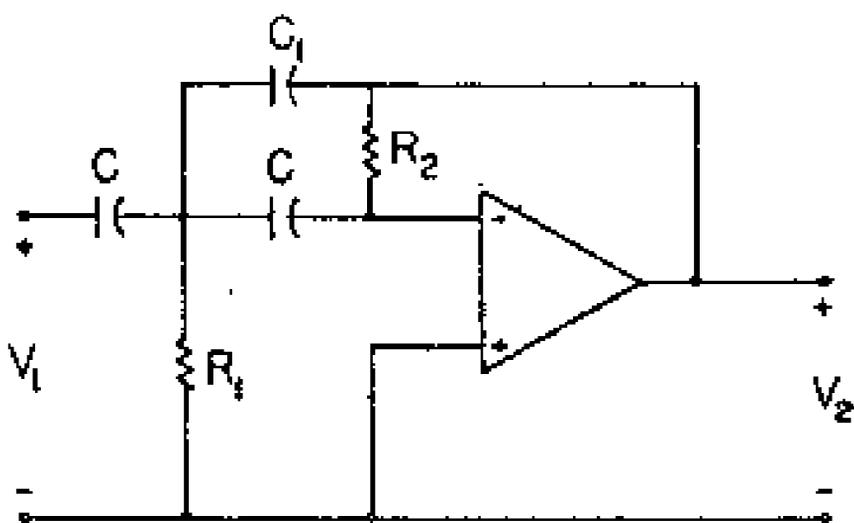


图 3—5 四阶1/2dB切比雪夫高通滤波器幅度响应

压控电压源高通滤波器的优点和2.5节所述的压控电压源低通滤波器的优点相同。

3.3 无限增益多路反馈高通滤波器

图3—6所示为无限增益多路反馈高通滤波器，它和2.6节讨论的无限增益多路反馈低通滤波器相似。它的优点是用的无源元件较少，但它不能像上节所述的压控电压源滤波器那样容易调整到给定的增益。



分析图3—6可证明，得到(3.4)式的条件是

图 3—6 二阶无限增益多路反馈高通滤波器

$$a_0 = \frac{1}{R_1 R_2 C C_1}$$

$$a_1 = \frac{1}{R_2 C C_1} (2C + C_1) \quad (3.7)$$

$$G = -\frac{C}{C_1}$$

因此，和对应的低通滤波器一样，无限增益多路反馈高通滤波器具有反相的增益。

无限增益多路反馈高通滤波器的优点和2.6节对应的低通滤波器的优点相同。

无限增益多路反馈高通滤波器设计程序汇总在3.8节中。该节包括通用电路、实用建议和适当的设计表(表3—26~3—49)。

3.4 双二次高通滤波器

和2.7节中低通双二次电路相似的高通双二次电路如图3—7所示〔33〕。和低通一样，双二次高通电路要求较多的元件，然

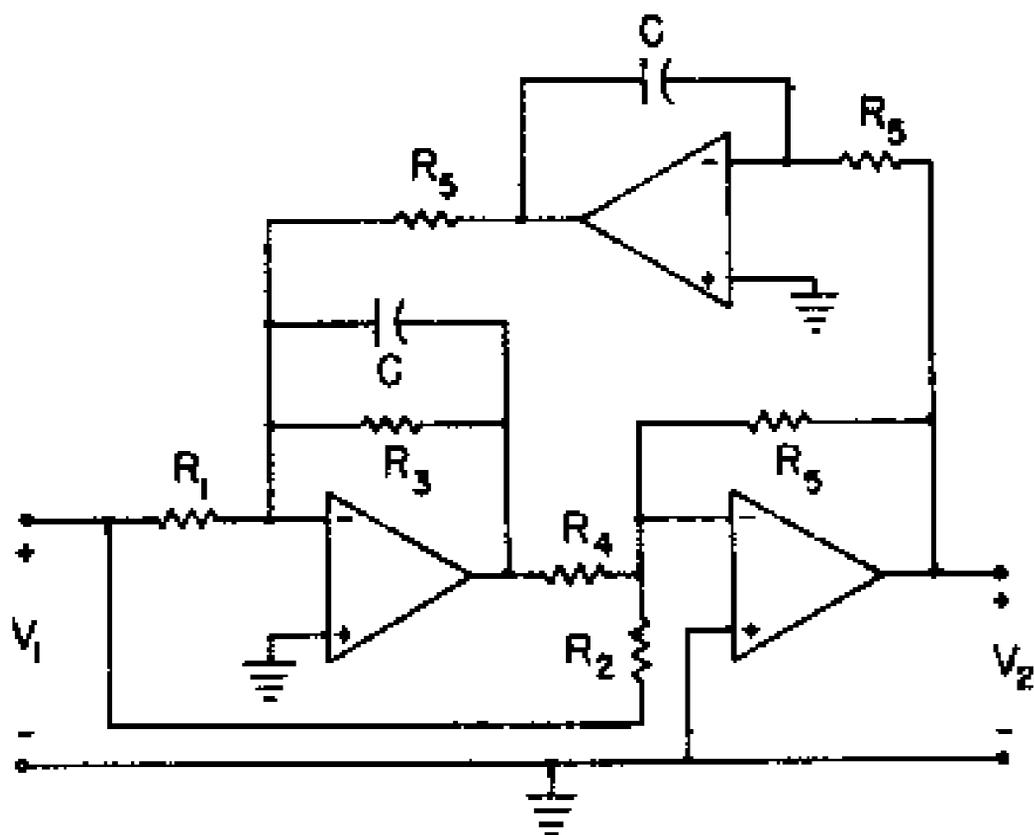


图 3—7 二阶双二次高通滤波器

而它具有很好的调整性能和稳定性，这就弥补了上述缺点。在 C 和 R_5 均归一化为1，反相增益为 $-G$ ($G > 0$) 的前提下，双二次电路得到 (3.4) 式的条件是

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{R_4} \\ a_1 &= \frac{1}{R_3} \\ G &= \frac{1}{R_2} = \frac{a_0}{a_1 R_1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

进行归一化以得到要求的截频和实际元件值的方法和 2.4 节所述相同。

双二次高通滤波器的优点和2.7节所列举的双二次低通滤波器的优点相同。

实际设计双二次高通滤波器的一般程序由3.9节给出。相应的设计表为表3—50~3—53。

3.5 多路反馈高通滤波器

这里汇集了作者自己设计的 $n = 3 \sim 8$ 阶的多路反馈高通滤波器^[31]。这些电路是具有反馈通路的压控电压源型电路，其反馈通路是由一组电阻提供的。相应地，我们把此类滤波器称为多路反馈高通滤波器。当电路的电容 C 和截频 ω_c 都归一化为 1 时，对于不同的 n 值为实现 (3.2) 式的传递函数，可以利用下面给出的公式。为

了得到归一化的电路元件值，要利用数字计算机对这些方程式加以计算。然后按2.4节讲述的方法完成归一化。

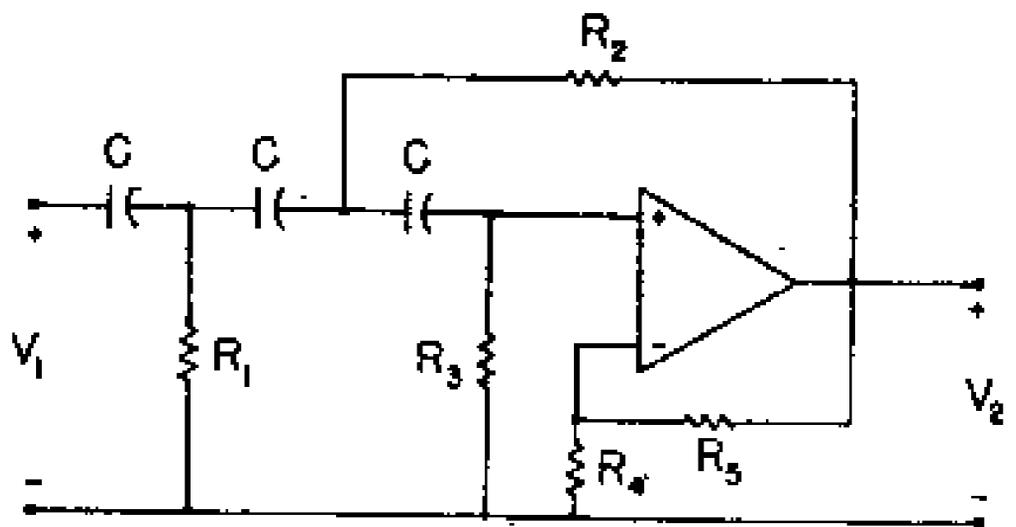


图 3—8 三阶多路反馈高通滤波器

$n = 3$ 的电路示于图3—8；得到 (3.2) 式的条件是

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \\
 a_1 &= \frac{2}{R_2 R_3} + \frac{A}{R_1} \\
 a_2 &= 2A + \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_3} \\
 G &= \mu
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_5}{R_4}$$

$$A = \frac{2}{R_3} + \frac{1 - \mu}{R_2} \quad (3.10)$$

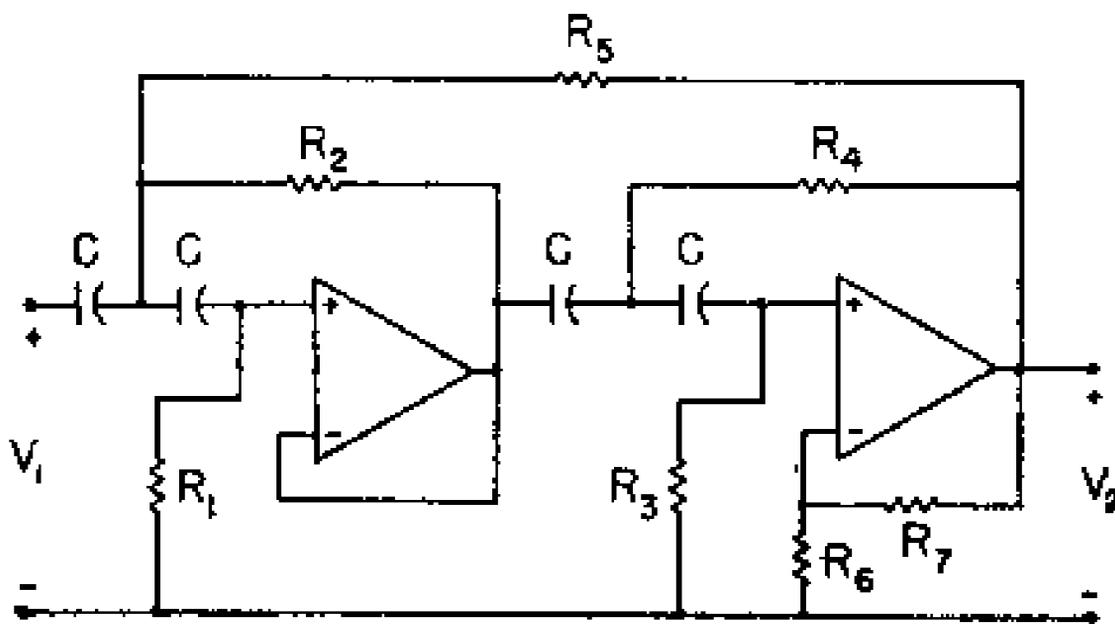


图 3—9 四阶多路反馈高通滤波器

$n = 4$ 时，我们用图3—9；这时

$$a_0 = \frac{A}{R_3 R_4}$$

$$a_1 = \frac{B}{R_3 R_4} + AD$$

$$a_2 = BD + A + \frac{1}{R_3 R_4} \quad (3.11)$$

$$a_3 = B + D - \frac{\mu}{R_5}$$

$$G = \mu$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_7}{R_6}$$

$$A = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) \quad (3.12)$$

$$B = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_5}$$

$$D = \frac{2}{R_3} + \frac{1 - \mu}{R_4}$$

$n = 5$ 时, 我们用图3—10; 这时

$$a_0 = AB$$

$$a_1 = AE + BD$$

$$a_2 = A + DE + BF$$

$$a_3 = B + D + EF$$

(3.13)

$$a_4 = E + F - \frac{\mu}{R_6}$$

$$G = \mu$$

其中

$$\mu = 1 + \frac{R_3}{R_7}$$

$$A = \frac{1}{R_2 R_4 R_5}$$

$$B = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right)$$

$$D = \frac{2}{R_3} \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) + \frac{1 - \mu}{R_3 R_5} \quad (3.14)$$

$$E = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_5}$$

$$F = \frac{1}{R_3} + \frac{3}{R_4} + \frac{2(1 - \mu)}{R_5}$$

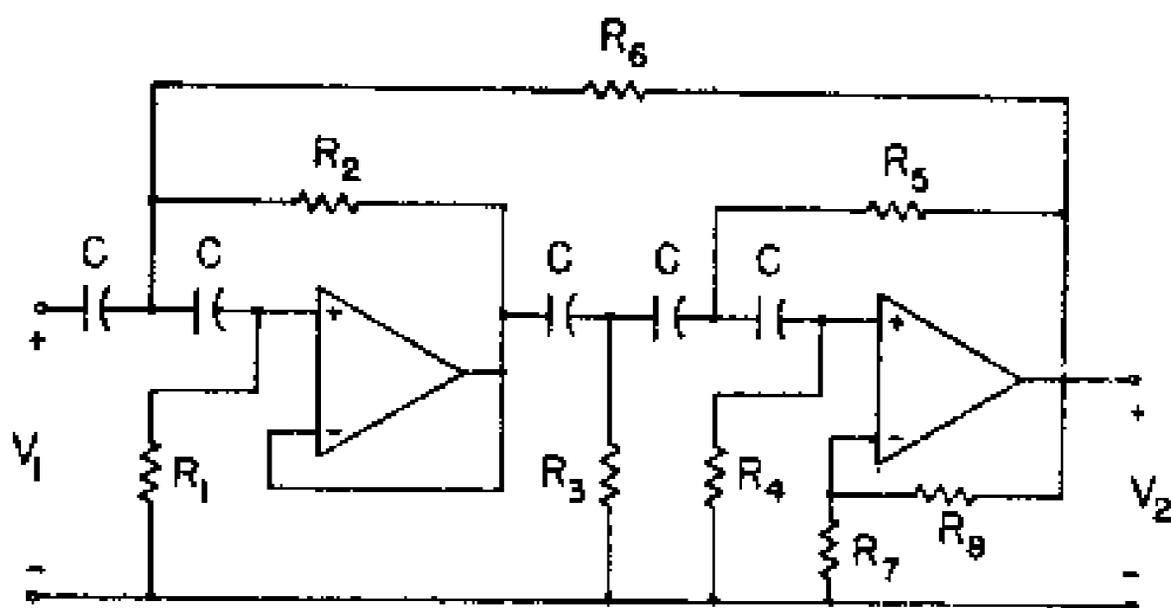


图 3—10 五阶多路反馈高通滤波器

$n = 6$ 时，我们用图3—11；这时

$$a_0 = ABD$$

$$a_1 = AED + BDF + \frac{2AB}{R_3}$$

$$a_2 = AD + DEF + AB + BD + \frac{2(AE + BF)}{R_3}$$

$$a_3 = DF + DE + AE + BF + \frac{2(A + EF + B)}{R_3} - \frac{2D}{R_7} \quad (3.15)$$

$$a_4 = A + D + B + EF + \frac{2\left(E + F - \frac{2}{R_7}\right)}{R_3}$$

$$a_5 = E + F + 2\left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_8} - \frac{1}{R_7}\right)$$

$$G = 2$$

其中

$$A = \frac{1}{R_2 R_3}$$

$$B = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right)$$

$$D = \frac{1}{R_3 R_6} \quad (3.16)$$

$$E = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}$$

$$F = \frac{2}{R_2} - \frac{1}{R_5}$$

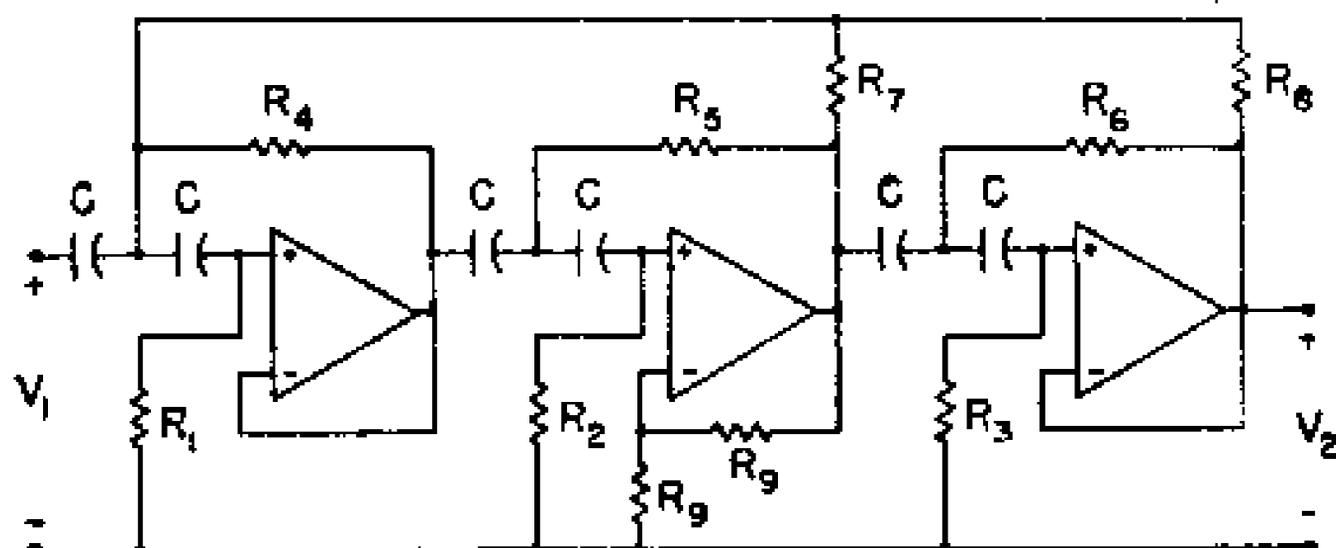


图 3-11 六阶多路反馈高通滤波器

$n = 7$ 时，我们用图3-12；这时

$$a_0 = ABD$$

$$a_1 = ABL + D(BE + AF)$$

$$a_2 = D(A + B + EF) + L(AF + BE) + ABH$$

$$a_3 = D(E + F) + L(A + B + EF)$$

$$+ H(AF + BE) + AB - \frac{2D}{R_8} \quad (3.17)$$

$$a_4 = D + L(E + F) + H(A + B + EF)$$

$$+ BE + AF - \frac{2L}{R_8}$$

$$a_5 = L + H(E + F) + A + B + EF - \frac{2H}{R_8}$$

$$a_6 = H + E + F - 2\left(\frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9}\right)$$

$$G = 2$$

其中

$$A = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} \right)$$

$$B = \frac{1}{R_3 R_4}$$

$$D = \frac{1}{R_5 R_6 R_7}$$

$$E = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_8} + \frac{1}{R_9} \quad (3.18)$$

$$F = \frac{2}{R_9} - \frac{1}{R_4}$$

$$H = \frac{3}{R_6} + \frac{1}{R_8}$$

$$L = \frac{2}{R_6 R_6} + \frac{2}{R_6 R_7}$$

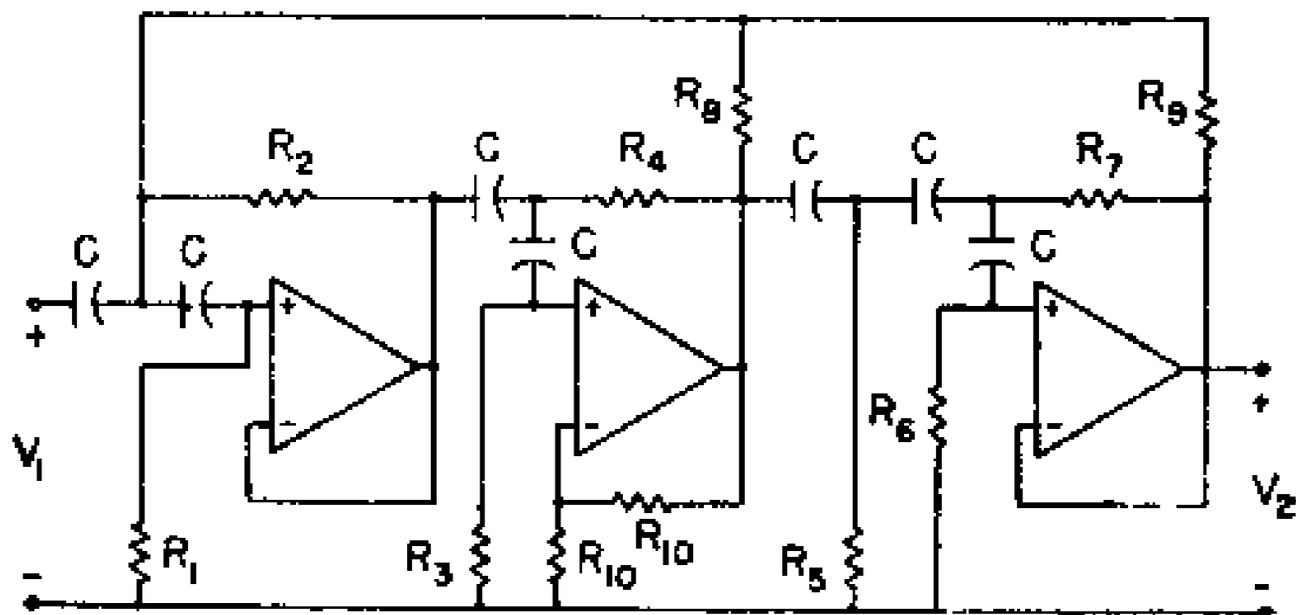


图 3—12 七阶多路反馈高通滤波器

$n = 8$ 时, 我们用图3—13; 这时

$$a_0 = ABDE$$

$$a_1 = AD(EF + BH) + BEL$$

$$a_2 = ADM + L(EF + BH) + BEN$$

$$a_3 = AD(F + H) + LM + N(BH + EF)$$

$$+ BEP - \frac{2AD}{R_9}$$

$$a_4 = AD + L(F + H) + MN + P(BH + EF)$$

$$+ BE - \frac{2L}{R_9} \quad (3.19)$$

$$a_5 = L + N(F + H) + MP + BH + EF - \frac{2N}{R_9} - \frac{2A}{R_{10}}$$

$$a_6 = N + P(F + H) + M - \frac{2P}{R_8} - \frac{4}{R_7 R_{10}}$$

$$a_7 = F + H + P - 2 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} + \frac{1}{R_{11}} \right)$$

$$G = 2$$

其中

$$A = \frac{1}{R_7 R_8}$$

$$B = \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} + \frac{1}{R_{11}} \right)$$

$$D = \frac{1}{R_5 R_6}$$

$$E = \frac{1}{R_3 R_4}$$

$$F = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} + \frac{1}{R_{11}} \quad (3.20)$$

$$H = \frac{2}{R_3} - \frac{1}{R_4}$$

$$L = \frac{2A}{R_5} + \frac{2D}{R_7}$$

$$M = B + E + FH$$

$$N = A + D + \frac{4}{R_6 R_7}$$

$$P = 2 \left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_7} \right)$$

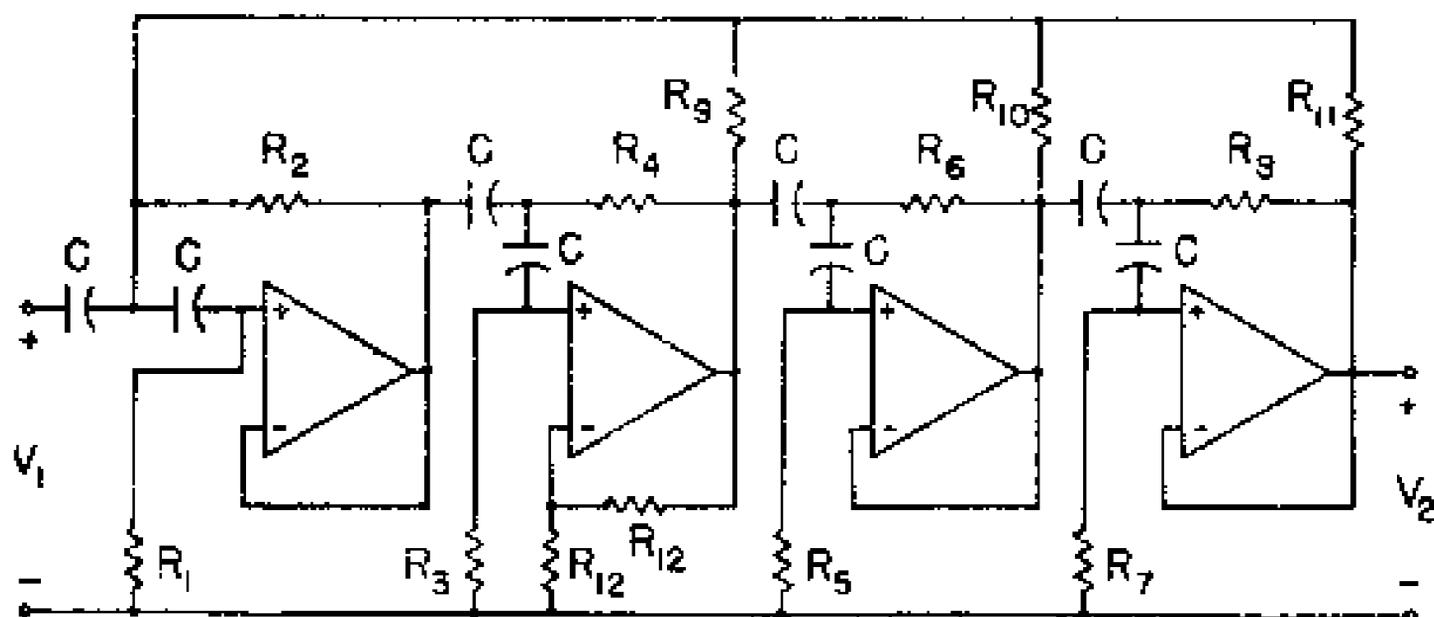


图 3-13 八阶多路反馈高通滤波器

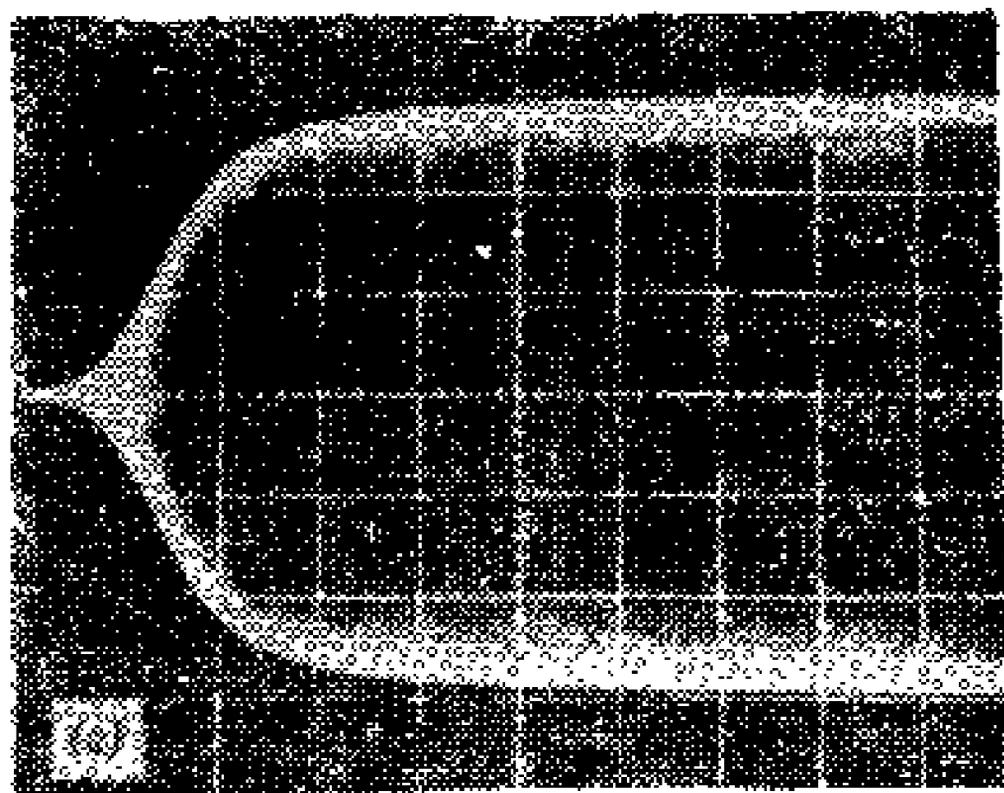
和低通一样，多路反馈高通电路从数学上看存在着对每阶电路求解不同方程组的困难。与级联结构相比，多路反馈结构的优点已扼要叙述于2.8节。

3.10节给出了多路反馈高通滤波器的一般设计程序。用于设计程序的有关的表为表3-54~3-69。下节将给出实际的设计例子。

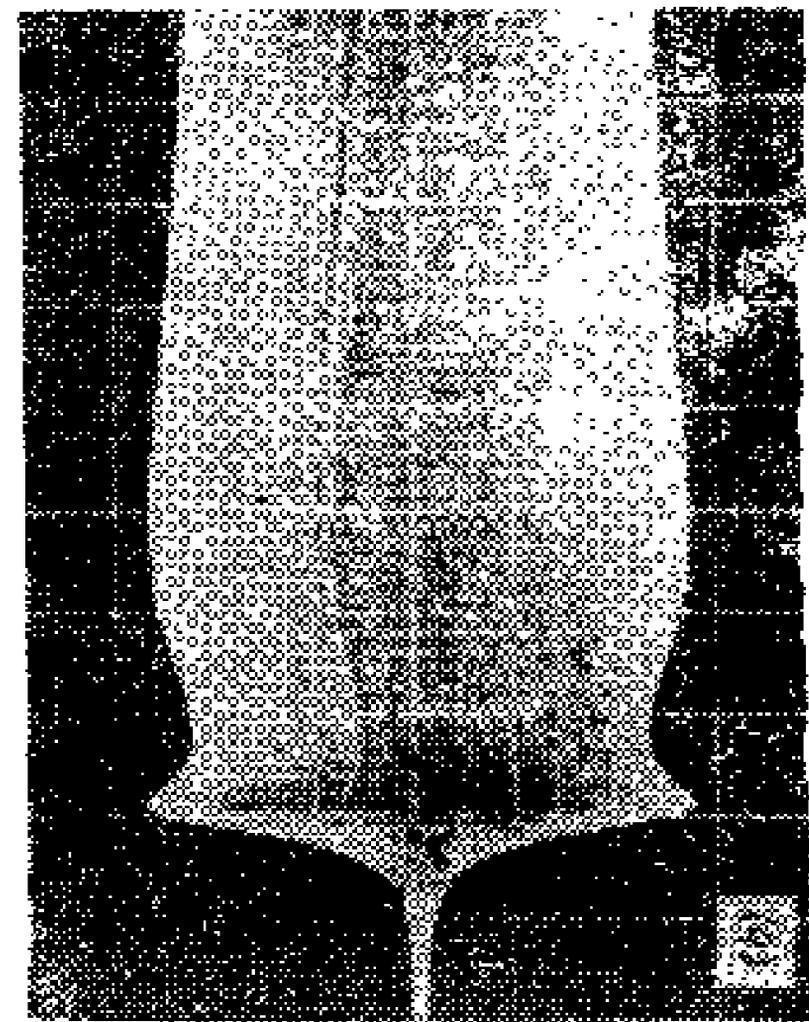
3.6 多路反馈高通滤波器设计实例

下面举例说明上节所述多路反馈高通滤波器的设计程序。假定需要设计一个七阶1/2dB切比雪夫高通滤波器，其 $f_c=1000\text{Hz}$ ， $G=2$ 。在图3—12中，选择 $C=0.01\mu\text{F}$ ，由(3.6)式得到参数 K 为10。将由表3—68中0.5dB一栏查得的电阻值乘以10，得到滤波器电阻值为 $R_1=28.97$ ， $R_2=4.07$ ， $R_3=33.48$ ， $R_4=12.85$ ， $R_5=3.31$ ， $R_6=26.40$ ， $R_7=3.35$ ， $R_8=20.87$ ， $R_9=44.95$ ， $R_{10}=67.00$ (单位均为 $\text{k}\Omega$)。所用电阻的实际测量值分别为28.7，4.0，33.6，13.0，3.32，26.3，3.32，20.5，45和67 $\text{k}\Omega$ 。所得结果是 $f_c=990\text{Hz}$ ， $G=1.96$ ，波纹0.53dB。所得幅度响应示于图3—14e。

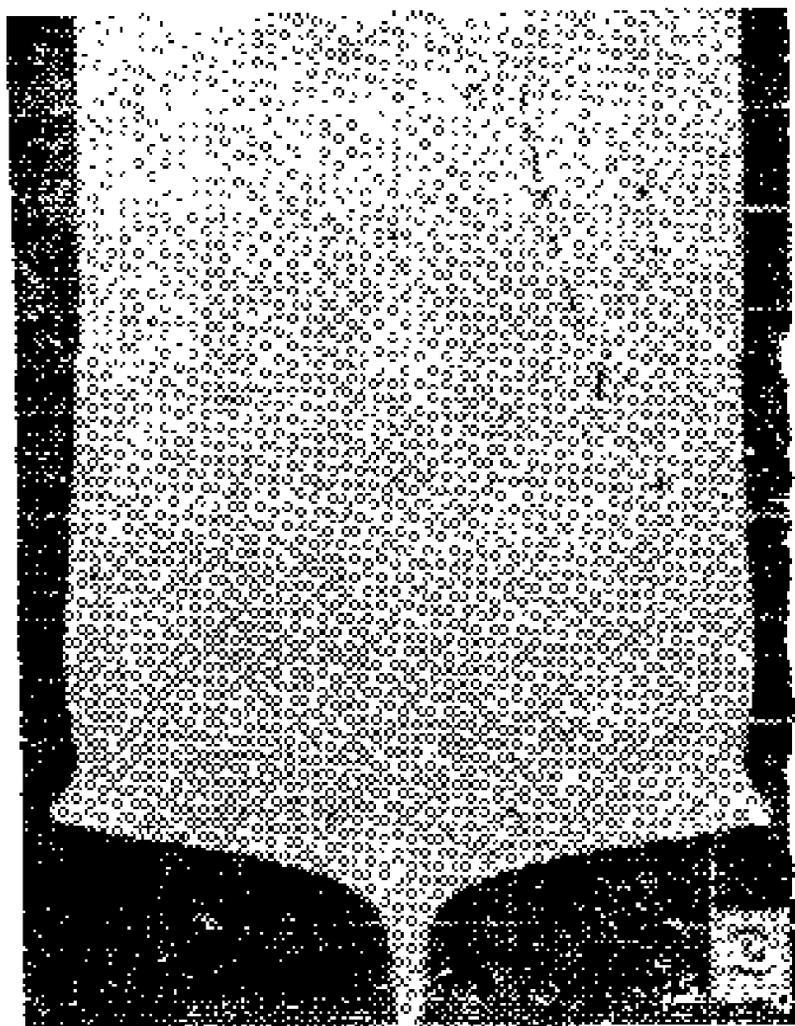
作为比较，图3—14还示出了其他高通滤波器的幅度响应，它们是：(a)三阶巴特沃斯滤波器， $f_c=10000\text{Hz}$ ， $G=1$ ；(b)四阶2dB切比雪夫滤波器， $f_c=10000\text{Hz}$ ， $G=2$ ；(c)五阶0.5dB切比雪夫滤波器， $f_c=200\text{Hz}$ ， $G=2$ ；(d)六阶



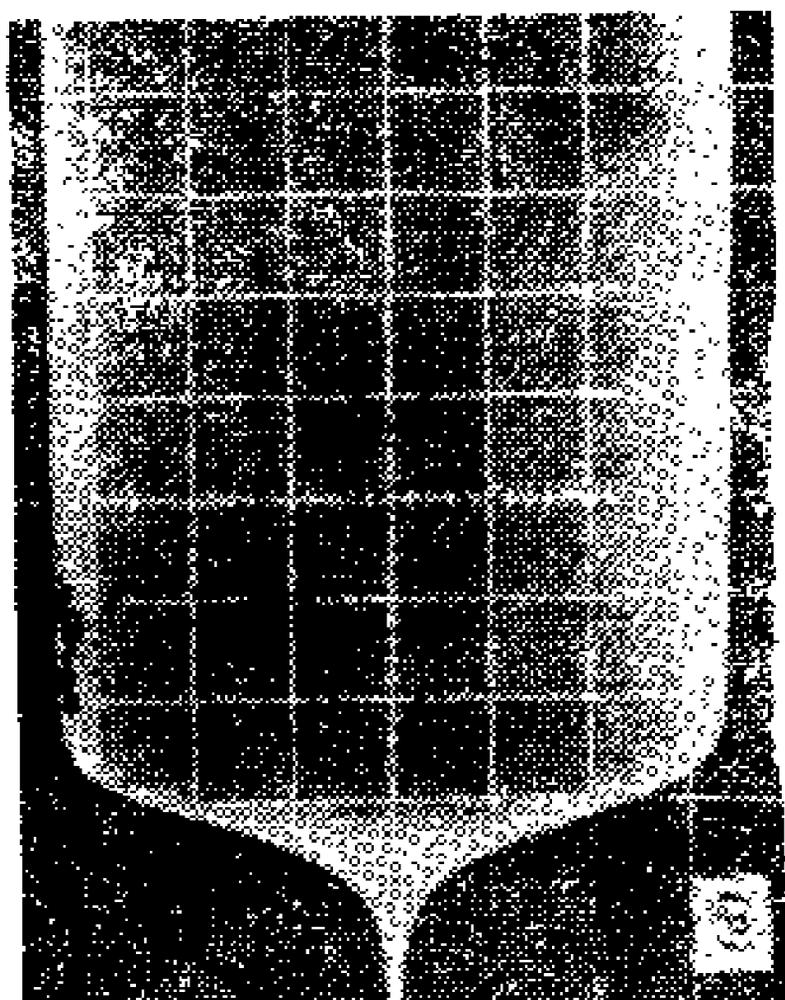
(a)三阶巴特沃斯响应



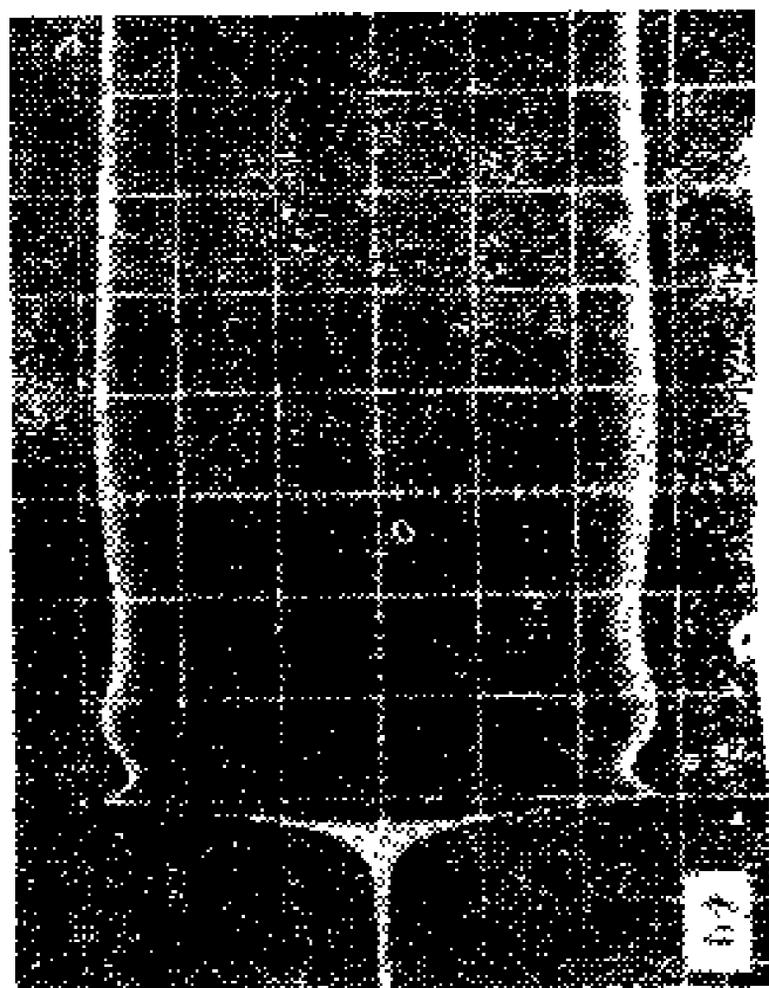
(b) 四阶2dB切比雪夫响应



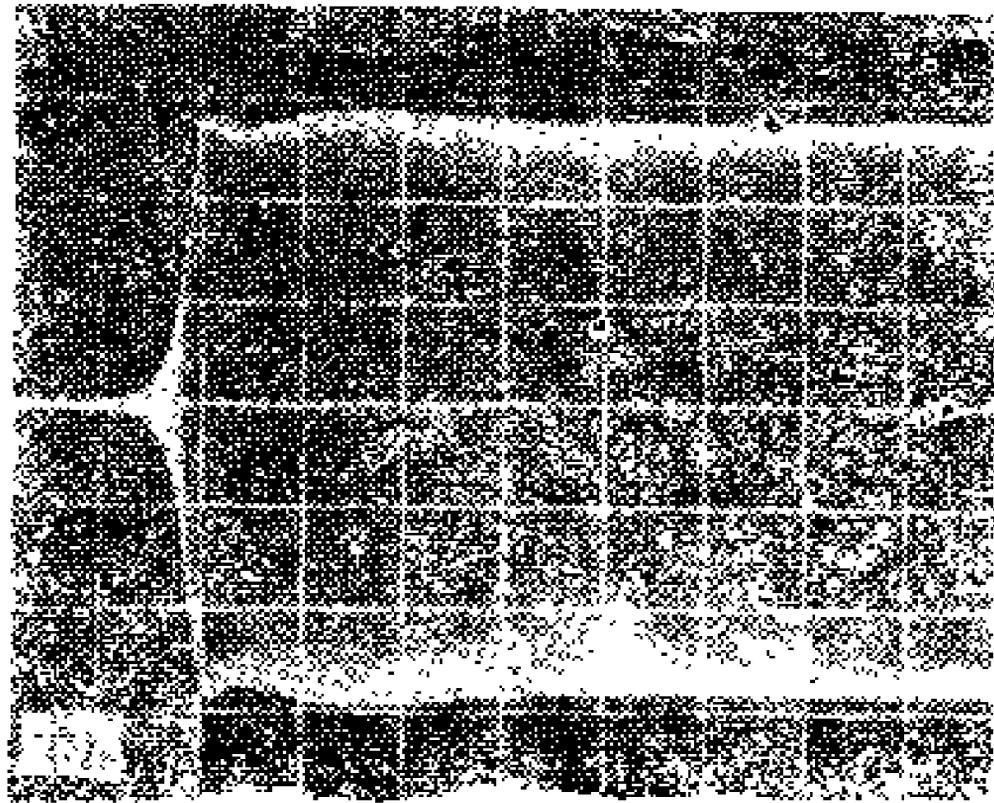
(c) 五阶0.5dB切比雪夫响应



(d) 六阶巴特沃斯响应



(e) 七阶0.5dB切比雪夫响应



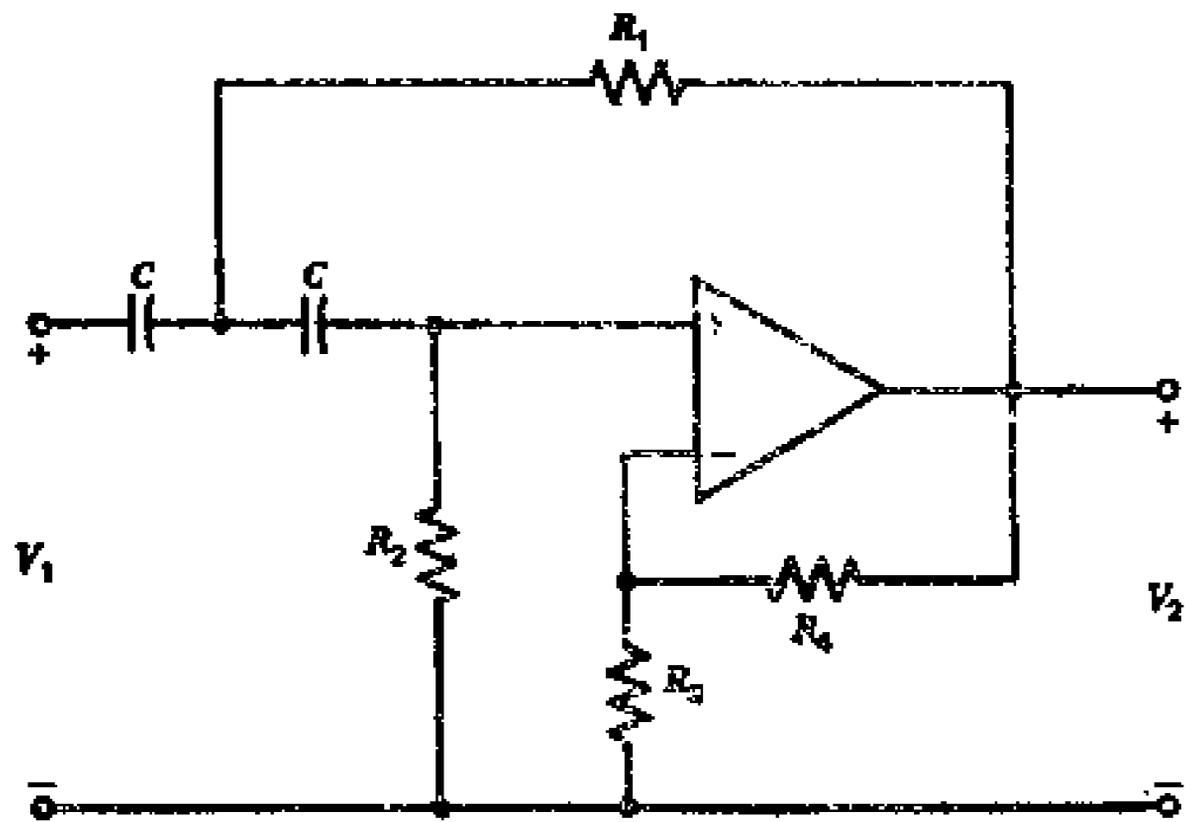
(f) 八阶0.1dB切比雪夫响应

图 3-11 高通滤波器幅频响应

巴特沃斯滤波器, $f_c = 1000\text{Hz}$, $G = 2$; 以及(f)八阶0.1dB切比雪夫滤波器, $f_c = 1000\text{Hz}$, $G = 2$ 。

3.7 压控电压源高通

滤波器设计程序摘要



通用电路

设计程序

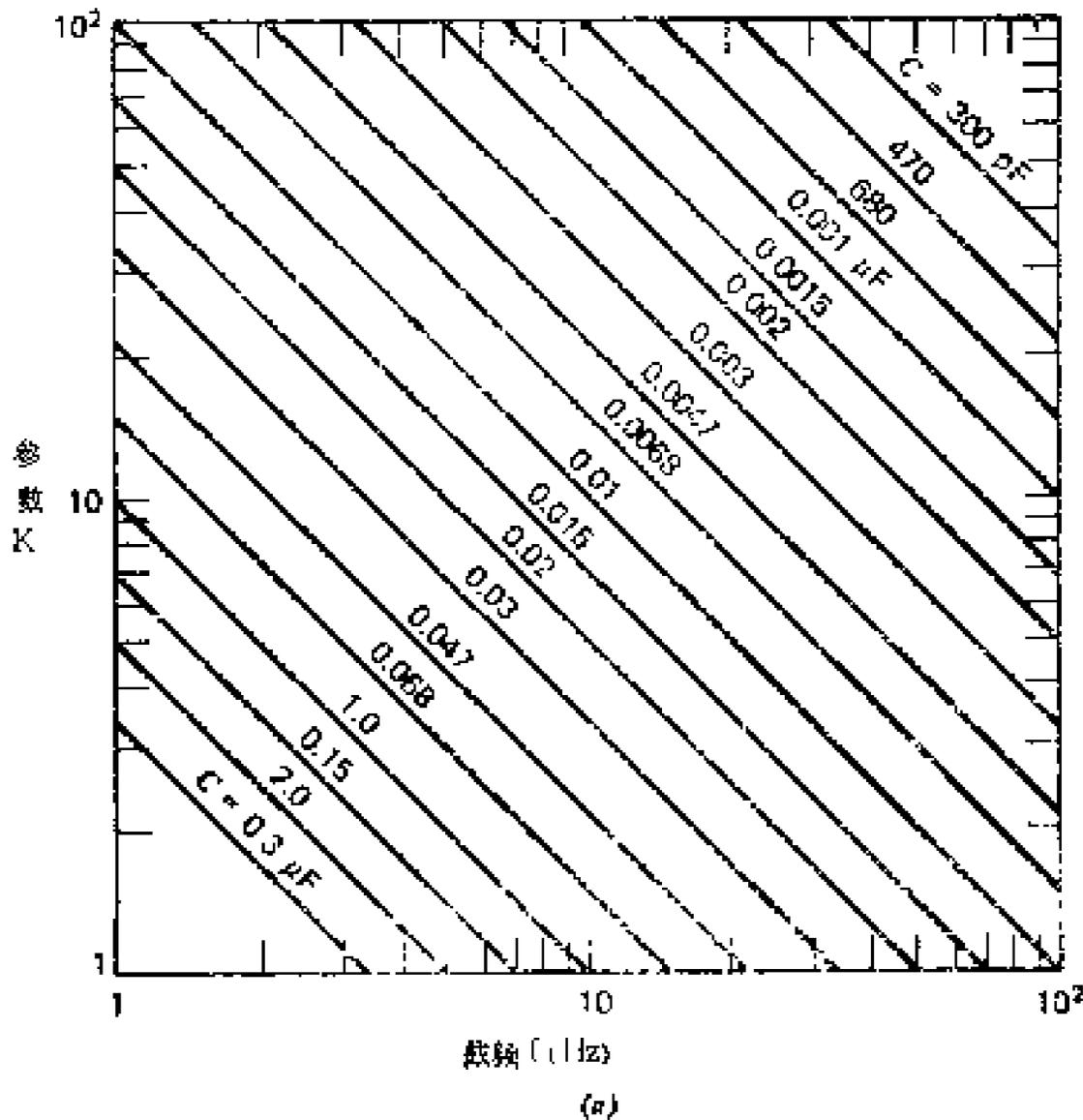
给定截频 f_c (Hz)、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应),对于二阶滤波器或级联高阶($n=4, 6, 8$)滤波器的每一节,按下面步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值,由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图3—15a、b或c中查出。对于高阶滤波器(例如 $n > 4$)设计,因为要求较高的精度,用公式计算较好。

2. 从表3—2~3—25适当的一个表中查出其余元件值。表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况,因而,必须把这些数值乘以由第一步得到的参数 K ,才能得到电路的实际电阻值。



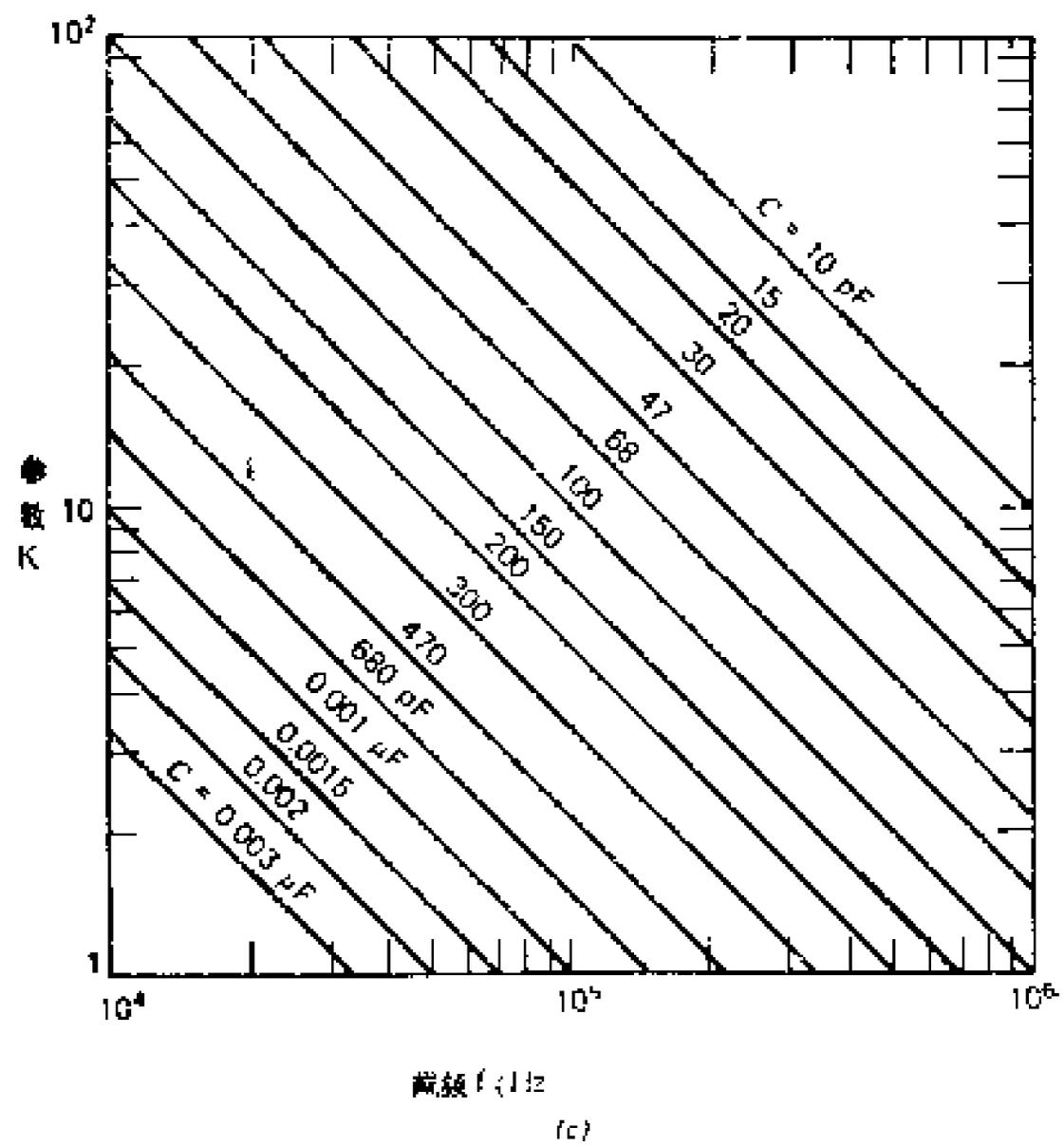
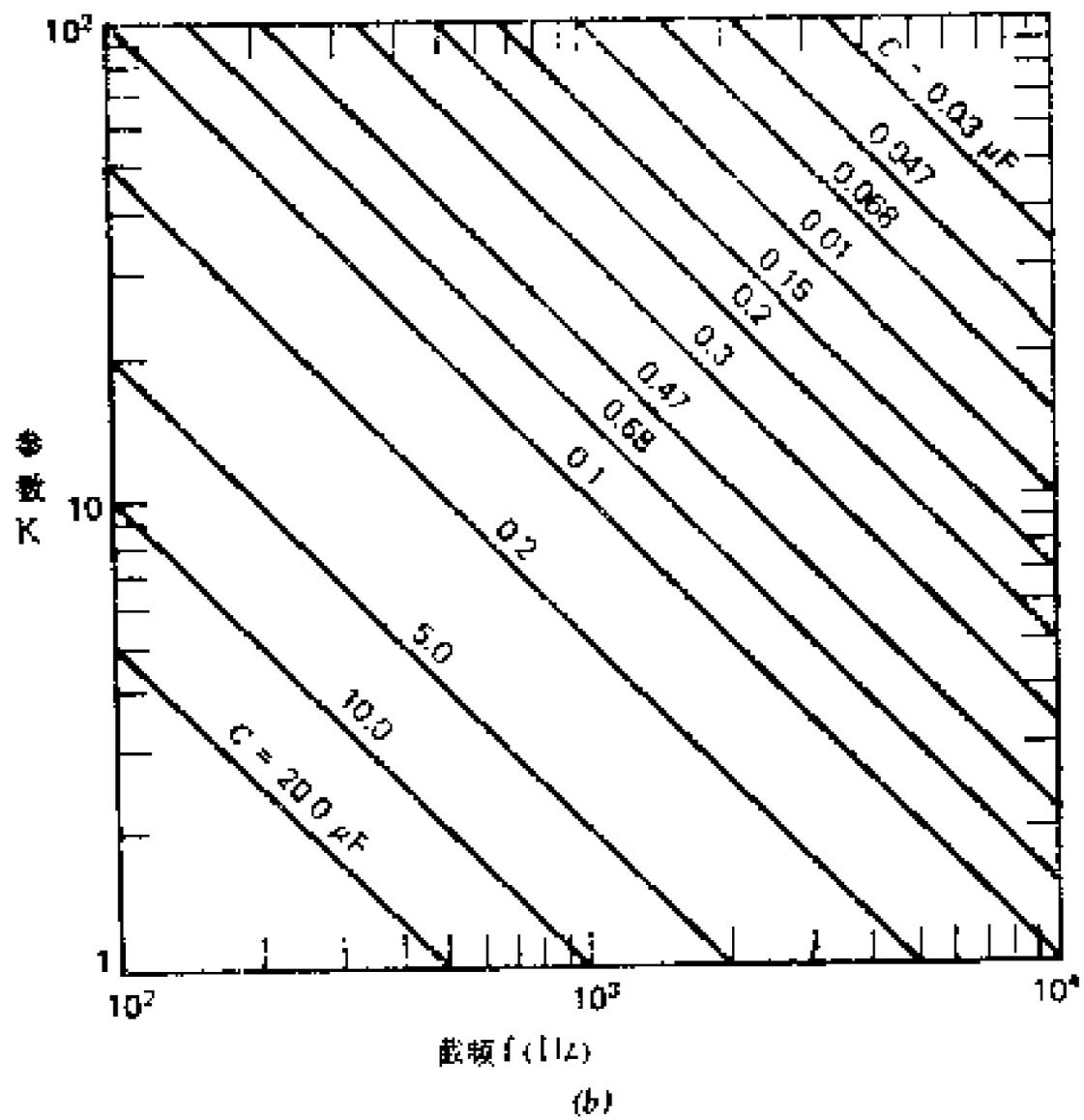


图 3—15 参数 K 和频率的关系

3. 按标准选择所用的电阻值, 这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。

注释和建议

(a) 在多节滤波器 ($n > 2$) 中, 各节的参数 K 可以取不同的值。这就是说, 每节可以选择不同的 C 值, 并用给定的整个滤波器截频 f_c 来计算每节的参数 K 。每节的电阻值就是由表中查出的数值乘以该节的参数 K 。

(b) 为获得最佳的电路性能, 运算放大器的输入电阻至少应是 $R_{eq} = R_2$ 的 10 倍。对于给定的运算放大器, 通过适当选择 C 的值以获得合适的 K 值, 通常就可以满足上述条件。

(c) 表中的 R_3 和 R_4 值的选定是为了把运算放大器的直流失调减到最小。只要比值 R_4/R_3 和表中数值相同, R_3 和 R_4 也可以选用其他阻值。

(d) 在低阶电路中, 通常用容差为 5% 的标称值电阻就能得到满意的结果。对于五阶和六阶, 大概应用容差为 2% 的电阻, 而七阶和八阶则多半应用容差为 1% 的电阻。为获得最佳的性能, 在所有情况下都应选用和表中查得的数值尽可能接近的电阻值。

至于电容, 为获得最佳的结果, 其百分容差应和上面给出的电阻容差相当。由于精密电容价格较贵, 总是希望使用容差较大的电容, 这时通常需要进行调整。在低阶 ($n \leq 4$) 情况下, 容差为 10% 的电容常常就满足要求了。

(e) 滤波器每节的增益为 $1 + R_4/R_3$, 用一个电位器代替 R_3 和 R_4 , 可把增益调整到正确的值。为此将电位器中心抽头连接到运算放大器的反相输入端。这些增益调节在调整滤波器的总响应时是非常有用的。

(f_c)最后, 运算放大器的开环增益至少应是滤波器在 f_c 点的增益的50倍, 而且在 f_c 点, 要求的峰—峰电压值不能超过运算放大器压摆率和 $\frac{10^6}{\pi f_c}$ 的乘积, 其中, f_c 是通带中要求的最高频率。因而, 对于较高的 f_c 值, 可能要用具有外部补偿的运算放大器。

3.2节给出了一个具体的四阶压控电压源高通滤波器的设计例子。

表 3—2 二阶压控电压源巴特沃斯高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.125	1.821	2.592	3.141	3.593	3.985
R_2	2.251	1.391	0.977	0.806	0.705	0.636
R_3	开路	2.782	1.303	0.968	0.806	0.706
R_4	0	2.782	3.910	4.838	5.640	6.356

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 3—3 二阶0.1dB 压控电压源切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.888	3.199	4.615	5.621	6.445	7.161
R_2	4.446	2.623	1.818	1.493	1.302	1.172
R_3	开路	5.247	2.425	1.792	1.488	1.302
R_4	0	5.247	7.274	8.959	10.417	11.719

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 3—4 二阶 0.5dB 压控电压源切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.134	2.065	3.034	3.717	4.277	4.763
R_2	3.385	1.860	1.266	1.033	0.898	0.806
R_3	开路	3.720	1.688	1.240	1.026	0.896
R_4	0	3.720	5.064	6.199	7.183	8.063

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—5 二阶 1dB 压控电压源切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	0.874	1.697	2.530	3.115	3.594	4.009
R_2	3.197	1.646	1.104	0.897	0.777	0.697
R_3	开路	3.292	1.472	1.076	0.688	0.774
R_4	0	3.292	4.416	5.379	6.217	6.967

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—6 二阶 2dB 压控电压源切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	0.640	1.390	2.117	2.625	3.040	3.399
R_2	3.259	1.500	0.985	0.794	0.686	0.613
R_3	开路	3.000	1.313	0.953	0.784	0.681
R_4	0	3.000	3.939	4.765	5.486	6.133

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—7 二阶3dB 压控电压源切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	0.513	1.238	1.917	2.389	2.775	3.109
R_2	3.494	1.449	0.936	0.750	0.646	0.577
R_3	开路	2.898	1.248	0.901	0.739	0.641
R_4	0	2.898	3.743	4.503	5.170	5.768

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—8 四阶压控电压源巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.609	1.090	1.693	1.987	2.839	3.694	1
R_2	4.159	2.323	1.496	1.275	0.892	0.686	
R_3	开路	7.933	2.528	1.864	1.071	0.762	
R_4	0	3.286	3.664	4.031	5.353	6.856	
R_1	1.470	1.767	2.277	2.546	3.357	4.191	2
R_2	1.723	1.433	1.113	0.995	0.755	0.604	
R_3	开路	4.894	1.880	1.455	0.905	0.672	
R_4	0	2.027	2.725	3.146	4.528	6.045	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—9 四阶0.1dB 压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.420	1.071	1.787	2.130	3.120	4.109	1
R_2	8.013	3.144	1.885	1.581	1.080	0.820	
R_3	开路	10.734	3.186	2.313	1.296	0.911	
R_4	0	4.445	4.618	5.001	6.478	8.197	
R_1	1.015	1.272	1.691	1.909	2.557	3.220	2
R_2	1.554	1.240	0.933	0.827	0.617	0.490	
R_3	开路	4.235	1.577	1.209	0.740	0.544	
R_4	0	1.754	2.285	2.614	3.702	4.900	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—10 四阶0.5dB 压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.279	0.899	1.544	1.852	2.738	3.624	1
R_2	9.653	2.995	1.745	1.455	0.984	0.743	
R_3	开路	10.227	2.949	2.127	1.180	0.826	
R_4	0	4.236	4.274	4.600	5.902	7.433	
R_1	0.674	0.885	1.213	1.381	1.877	2.380	2
R_2	1.340	1.020	0.744	0.654	0.481	0.379	
R_3	开路	3.483	1.258	0.956	0.577	0.421	
R_4	0	1.443	1.823	2.068	2.887	3.793	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—11 四阶1dB 压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.222	0.839	1.461	1.758	2.613	3.466	1
R_2	11.252	2.979	1.710	1.421	0.956	0.721	
R_3	开路	10.170	2.890	2.078	1.148	0.801	
R_4	0	4.212	4.189	4.494	5.738	7.209	
R_1	0.536	0.735	1.033	1.183	1.625	2.073	2
R_2	1.320	0.962	0.685	0.598	0.436	0.341	
R_3	开路	3.286	1.158	0.875	0.523	0.379	
R_4	0	1.361	1.679	1.892	2.613	3.415	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—12 四阶2dB 压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.167	0.786	1.392	1.680	2.510	3.338	1
R_2	14.092	2.991	1.690	1.400	0.937	0.705	
R_3	开路	10.213	2.856	2.047	1.125	0.783	
R_4	0	4.230	4.140	4.427	5.623	7.047	
R_1	0.403	0.598	0.870	1.005	1.403	1.803	2
R_2	1.393	0.939	0.645	0.558	0.400	0.311	
R_3	开路	3.207	1.090	0.816	0.480	0.346	
R_4	0	1.328	1.580	1.754	2.400	3.112	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—13 四阶3dB 压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.136	0.759	1.357	1.642	2.460	3.277	1
R_2	16.876	3.012	1.686	1.393	0.930	0.698	
R_3	开路	10.285	2.848	2.038	1.116	0.776	
R_4	0	4.260	4.129	4.406	5.579	6.981	
R_1	0.327	0.524	0.785	0.914	1.290	1.667	2
R_2	1.517	0.948	0.632	0.543	0.385	0.298	
R_3	开路	3.237	1.068	0.794	0.462	0.331	
R_4	0	1.341	1.548	1.717	2.310	2.978	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—14 六阶压控电压源巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.412	1.093	1.433	2.061	2.363	3.177	1
R_2	6.149	2.318	1.768	1.229	1.072	0.797	
R_3	开路	6.264	3.300	1.687	1.366	0.912	
R_4	0	3.680	3.809	4.527	4.975	6.328	
R_1	1.125	1.593	1.896	2.490	2.783	3.580	2
R_2	2.251	1.591	1.336	1.017	0.910	0.708	
R_3	开路	4.298	2.493	1.396	1.160	0.810	
R_4	0	2.525	2.878	3.747	4.225	5.616	
R_1	1.537	1.924	2.201	2.766	3.050	3.831	3
R_2	1.648	1.317	1.151	0.916	0.831	0.661	
R_3	开路	3.558	2.147	1.257	1.059	0.757	
R_4	0	2.090	2.479	3.373	3.855	5.248	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—15 六阶0.1dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.183	1.012	1.380	2.053	2.376	3.243	1
R_2	15.673	2.826	2.074	1.394	1.204	0.882	
R_3	开路	7.637	3.870	1.913	1.535	1.009	
R_4	0	4.486	4.468	5.134	5.590	7.003	
R_1	0.499	1.011	1.289	1.808	2.059	2.736	2
R_2	3.537	1.745	1.369	0.976	0.857	0.645	
R_3	开路	4.715	2.555	1.339	1.092	0.738	
R_4	0	2.770	2.949	3.594	3.977	5.119	
R_1	0.681	0.899	1.049	1.346	1.494	1.900	3
R_2	0.979	0.742	0.636	0.496	0.446	0.351	
R_3	开路	2.005	1.187	0.680	0.569	0.402	
R_4	0	1.178	1.371	1.826	2.072	2.788	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—16 六阶0.5dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.124	0.936	1.286	1.928	2.235	3.060	1
R_2	20.968	2.767	2.014	1.344	1.160	0.847	
R_3	开路	7.479	3.760	1.845	1.478	0.969	
R_4	0	4.393	4.340	4.942	5.382	6.720	
R_1	0.338	0.853	1.113	1.595	1.827	2.452	2
R_2	4.426	1.753	1.343	0.937	0.818	0.610	
R_3	π 路	4.738	2.506	1.286	1.043	0.697	
R_4	0	2.783	2.893	3.452	3.797	4.838	
R_1	0.461	0.643	0.762	0.997	1.112	1.427	3
R_2	0.862	0.619	0.522	0.399	0.358	0.279	
R_3	π 路	1.672	0.974	0.548	0.456	0.319	
R_4	0	0.982	1.124	1.470	1.660	2.211	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—17 六阶1dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.099	0.909	1.254	1.885	2.188	3.000	1
R_2	25.358	2.759	2.001	1.331	1.147	0.836	
R_3	开路	7.457	3.735	1.827	1.462	0.957	
R_4	0	4.380	4.311	4.904	5.325	6.639	
R_1	0.270	0.793	1.048	1.519	1.745	2.353	2
R_2	5.225	1.781	1.348	0.930	0.810	0.600	
R_3	开路	4.812	2.515	1.277	1.032	0.687	
R_4	0	2.827	2.903	3.427	3.758	4.765	
R_1	0.369	0.541	0.650	0.861	0.965	1.248	3
R_2	0.855	0.584	0.486	0.367	0.327	0.253	
R_3	开路	1.578	0.907	0.503	0.417	0.290	
R_4	0	0.927	1.047	1.351	1.519	2.010	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—18 六阶2dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

电路元件值*							
增益	1	4	10	50	100	500	节
R_1	0.075	0.886	1.226	1.850	2.148	2.951	1
R_2	32.728	2.762	1.995	1.323	1.139	0.829	
R_3	开路	7.464	3.723	1.816	1.452	0.949	
R_4	0	4.384	4.298	4.873	5.286	6.591	
R_1	0.204	0.740	0.991	1.432	1.673	2.268	2
R_2	6.609	1.824	1.363	0.930	0.807	0.595	
R_3	开路	4.930	2.543	1.276	1.028	0.681	
R_4	0	2.895	2.936	3.425	3.745	4.723	
R_1	0.279	0.446	0.546	0.739	0.833	1.087	3
R_2	0.907	0.568	0.453	0.343	0.304	0.233	
R_3	开路	1.534	0.865	0.470	0.388	0.266	
R_4	0	0.901	0.998	1.262	1.411	1.849	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—19 六阶3dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

电路元件值*							
增益	1	4	10	50	100	500	节
R_1	0.061	0.874	1.212	1.832	2.129	2.927	1
R_2	39.751	2.768	1.995	1.320	1.136	0.826	
R_3	开路	7.480	3.723	1.812	1.448	0.945	
R_4	0	4.394	4.298	4.863	5.273	6.559	
R_1	0.166	0.712	0.961	1.418	1.637	2.226	2
R_2	7.952	1.857	1.376	0.932	0.808	0.594	
R_3	开路	5.019	2.568	1.280	1.029	0.679	
R_4	0	2.948	2.965	3.435	3.749	4.713	
R_1	0.227	0.395	0.491	0.675	0.764	1.004	3
R_2	0.991	0.570	0.458	0.333	0.295	0.224	
R_3	开路	1.541	0.854	0.458	0.376	0.256	
R_4	0	0.905	0.986	1.228	1.367	1.778	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—20 八阶压控电压源巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.310	0.896	1.160	1.613	1.817	2.334	1
R_2	8.158	2.827	2.183	1.570	1.394	1.085	
R_3	开路	9.653	4.989	2.517	2.038	1.376	
R_4	0	3.998	3.883	4.176	4.408	5.132	
R_1	0.884	1.291	1.529	1.958	2.155	2.660	2
R_2	2.865	1.963	1.657	1.294	1.175	0.952	
R_3	开路	6.701	3.785	2.074	1.719	1.208	
R_4	0	2.775	2.946	3.441	3.717	4.503	
R_1	1.323	1.643	1.855	2.255	2.444	2.933	3
R_2	1.914	1.542	1.366	1.123	1.036	0.864	
R_3	开路	5.265	3.120	1.800	1.516	1.095	
R_4	0	2.181	2.429	2.987	3.278	4.083	
R_1	1.561	1.845	2.043	2.427	2.610	3.090	4
R_2	1.623	1.373	1.240	1.044	0.970	0.820	
R_3	开路	4.687	2.832	1.673	1.419	1.040	
R_4	0	1.941	2.204	2.775	3.069	3.877	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—21 八阶0.1dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						n
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.102	0.802	1.079	1.551	1.763	2.299	1
R_2	26.606	3.379	2.511	1.747	1.537	1.179	
R_3	开路	11.539	5.737	2.800	2.247	1.495	
R_4	0	4.779	4.465	4.645	4.859	5.573	
R_1	0.290	0.808	1.044	1.449	1.631	2.093	2
R_2	6.979	2.503	1.938	1.397	1.241	0.967	
R_3	开路	8.547	4.428	2.239	1.814	1.226	
R_4	0	3.540	3.447	3.715	3.923	4.573	
R_1	0.434	0.732	0.893	1.177	1.307	1.636	3
R_2	2.429	1.440	1.180	0.896	0.807	0.645	
R_3	开路	4.917	2.697	1.436	1.180	0.817	
R_4	0	2.036	2.099	2.382	2.552	3.048	
R_1	0.512	0.633	0.713	0.866	0.937	1.124	4
R_2	0.721	0.583	0.517	0.426	0.394	0.328	
R_3	开路	1.991	1.182	0.683	0.576	0.416	
R_4	0	0.825	0.920	1.133	1.244	1.552	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—22 八阶0.5dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.069	0.764	1.034	1.493	1.700	2.221	1
R_2	36.922	3.354	2.479	1.716	1.508	1.154	
R_3	开路	11.453	5.664	2.751	2.205	1.464	
R_4	0	4.744	4.408	4.564	4.769	5.457	
R_1	0.198	0.730	0.959	1.351	1.527	1.973	2
R_2	9.498	2.571	1.957	1.390	1.230	0.952	
R_3	开路	8.780	4.472	2.228	1.798	1.207	
R_4	0	3.637	3.481	3.696	3.888	4.502	
R_1	0.296	0.606	0.761	1.029	1.150	1.458	3
R_2	3.070	1.499	1.194	0.883	0.790	0.623	
R_3	开路	5.117	2.729	1.416	1.155	0.790	
R_4	0	2.119	2.124	2.349	2.498	2.947	
R_1	0.349	0.451	0.517	0.639	0.696	0.843	4
R_2	0.639	0.494	0.431	0.349	0.321	0.265	
R_3	开路	1.687	0.986	0.560	0.469	0.336	
R_4	0	0.699	0.767	0.929	1.014	1.252	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—23 八阶1dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*					节	
	4	10	50	100	500		
R_1	0.056	0.751	1.018	1.473	1.678	2.195	1
R_2	45.196	3.355	2.473	1.709	1.501	1.147	
R_3	开路	11.455	5.651	2.739	2.195	1.455	
R_4	0	4.745	4.398	4.545	4.745	5.425	
R_1	0.159	0.701	0.928	1.315	1.489	1.930	2
R_2	11.551	2.616	1.976	1.394	1.231	0.950	
R_3	开路	8.933	4.515	2.234	1.860	1.205	
R_4	0	3.700	3.514	3.706	3.892	4.492	
R_1	0.237	0.558	0.710	0.973	1.092	1.393	3
R_2	3.636	1.547	1.215	0.887	0.791	0.620	
R_3	开路	5.284	2.777	1.422	1.156	0.786	
R_4	0	2.188	2.161	2.359	2.500	2.931	
R_1	0.280	0.378	0.438	0.549	0.601	0.733	4
R_2	0.635	0.471	0.406	0.324	0.226	0.243	
R_3	开路	1.609	0.928	0.520	0.433	0.308	
R_4	0	0.666	0.722	0.662	0.937	1.148	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—24 八阶2dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.042	0.739	1.004	1.457	1.660	2.173	1
R_2	58.897	3.363	2.473	1.705	1.495	1.143	
R_3	开路	11.481	5.649	2.733	2.188	1.449	
R_4	0	3.755	4.397	4.534	4.731	5.404	
R_1	0.120	0.673	0.899	1.283	1.456	1.892	2
R_2	14.973	2.671	2.001	1.402	1.235	0.950	
R_3	开路	9.119	4.571	2.246	1.806	1.205	
R_4	0	3.777	3.558	3.727	3.905	4.494	
R_1	0.180	0.514	0.655	0.924	1.041	1.336	3
R_2	4.611	1.613	1.246	0.897	0.796	0.620	
R_3	开路	5.507	2.848	1.438	1.164	0.787	
R_4	0	2.281	2.217	2.385	2.518	2.933	
R_1	0.212	0.308	0.365	0.466	0.513	0.633	4
R_2	0.675	0.464	0.392	0.307	0.279	0.226	
R_3	开路	1.586	0.897	0.492	0.408	0.287	
R_4	0	0.657	0.698	0.816	0.882	1.069	

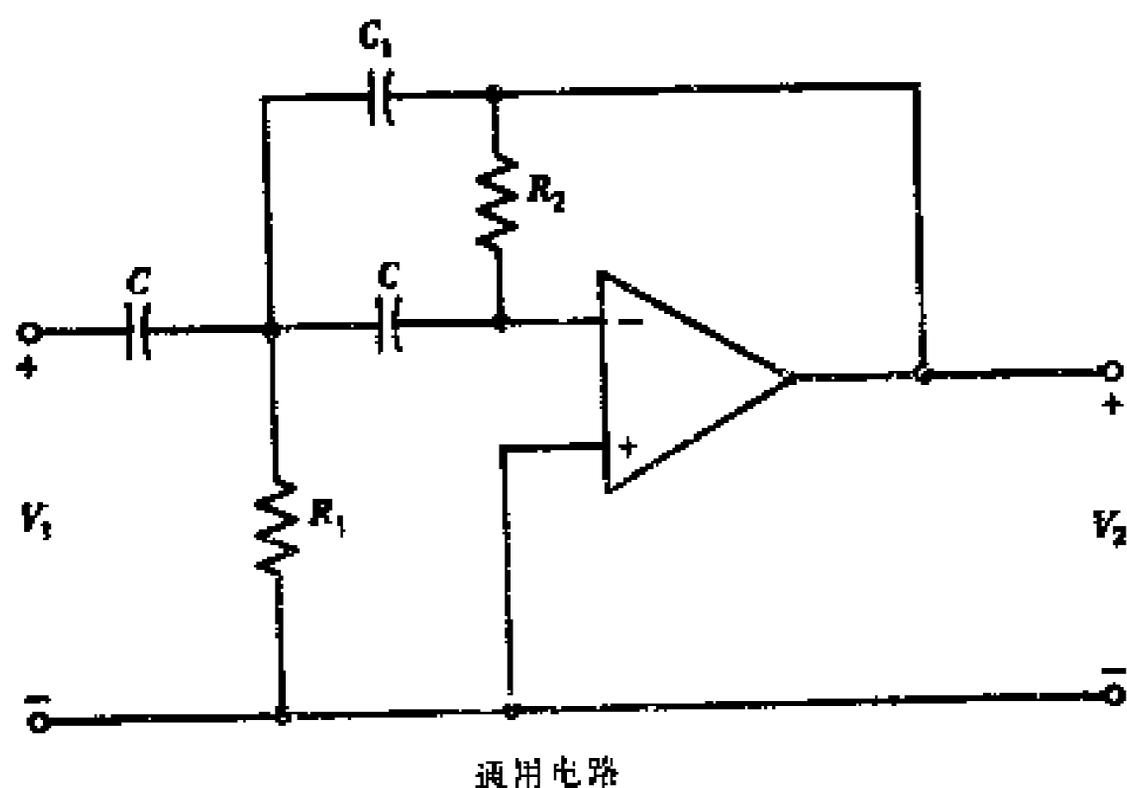
*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—25 八阶3dB压控电压源切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*						阶
	1	4	10	50	100	500	
R_1	0.034	0.732	0.997	1.448	1.651	2.162	1
R_2	71.852	3.370	2.474	1.704	1.495	1.141	
R_3	开路	11.506	5.654	2.731	2.186	1.447	
R_4	0	4.766	4.400	4.531	4.728	5.397	
R_1	0.098	0.658	0.883	1.266	1.438	1.872	2
R_2	18.223	2.707	2.018	1.408	1.239	0.952	
R_3	开路	9.242	4.611	2.257	1.813	1.207	
R_4	0	3.828	3.589	3.744	3.920	4.501	
R_1	0.146	0.490	0.640	0.898	1.013	1.306	3
R_2	5.553	1.659	1.259	0.906	0.802	0.622	
R_3	开路	5.664	2.900	1.451	1.173	0.789	
R_4	0	2.346	2.257	2.408	2.536	2.942	
R_1	0.173	0.270	0.325	0.423	0.467	0.581	4
R_2	0.738	0.471	0.392	0.301	0.273	0.219	
R_3	开路	1.609	0.895	0.483	0.399	0.278	
R_4	0	0.667	0.697	0.801	0.862	1.036	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

3.8 无限增益多路反馈高通滤波器 设计程序摘要



设计程序

给定截频 f_c Hz、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型（巴特沃斯或切比雪夫响应），对于二阶滤波器或级联高阶滤波器（ $n = 4, 6, 8$ ）的每一节，按下面的步骤进行设计：

1. 选择电容 C 的值，由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可以从图3—15a、b或c中查出。对于高阶滤波器（例如 $n > 4$ ）设计，因为要求较高的精度，用公式计算较好。

2. 从下面表3—26~3—49适当的一个表中查出其余的元

件值。 C_1 的值直接由选定的 C 值和表中的数值确定。表中电阻值对应于 $K=1$ 的情况，因而必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。在表中 C_1 是 C 的某一倍数，如0.47等等。因此，如果 C 值选择为10 μF 的某一次幂（即0.1，1，10等），则 C_1 也就得到标称电容值。

注 释 和 建 议

3.7节对压控电压源高通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) a、b、d和f条可直接应用。

(b) c和e条不适用。

另外，还需应用下面两条：

(c) 滤波器每节的反相增益为 C/C_1 。对增益的调整可由微调 C 或 C_1 实现。

(d) 为把直流失调减到最小，在同相输入端和地之间接一个等于 R_2 值的电阻。

无限增益多路反馈高通滤波器已在3.3节讨论过了。

表 3—26 二阶无限增益多路反馈巴特沃斯高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	0.750	0.900	1.023	1.072
R_2	3.376	5.627	12.379	23.634
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—27 二阶0.1dB无限增益多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	1.258	1.510	1.716	1.798
R_2	6.669	11.115	24.453	46.684
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—28 二阶0.5dB无限增益多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	0.756	0.908	1.031	1.080
R_2	5.078	8.463	18.619	35.546
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—29 二阶1dB无限增益多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	0.582	0.699	0.794	0.832
R_2	4.795	7.992	17.583	33.568
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—30 二阶2dB无限增益多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	0.426	0.512	0.581	0.609
R_2	4.889	8.148	17.925	34.221
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—31 二阶 3dB 无限增益多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	5	10
R_1	0.342	0.411	0.467	0.489
R_2	5.241	8.736	19.219	36.690
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—32 四阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.406	0.487	0.554	0.589	1
R_2	6.238	10.397	22.874	43.669	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_3	0.980	1.176	1.337	1.400	2
R_4	2.584	4.307	9.475	18.088	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—33 四阶 0.1dB 无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.260	0.336	0.382	0.400	1
R_2	12.019	20.032	44.070	84.134	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_3	0.677	0.812	0.923	0.967	2
R_4	2.332	3.886	8.550	16.322	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—34 四阶0.5dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.186	0.223	0.254	0.266	
R_2	14.479	24.132	53.090	101.354	1
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_1	0.449	0.539	0.613	0.642	
R_2	2.010	3.350	7.370	14.069	2
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—35 四阶1dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.148	0.178	0.202	0.212	
R_2	16.878	28.130	61.886	118.147	1
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_1	0.357	0.429	0.487	0.511	
R_2	1.980	3.300	7.260	13.860	2
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—36 四阶2dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.111	0.134	0.152	0.159	
R_2	21.137	35.229	77.504	147.962	1
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_1	0.269	0.322	0.366	0.384	
R_2	2.089	3.482	7.659	14.622	2
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—37 四阶3dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.090	0.108	0.123	0.129	1
R_2	25.314	42.189	92.816	177.195	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	
R_1	0.218	0.262	0.298	0.312	2
R_2	2.275	3.792	8.343	15.928	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.1C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—38 六阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.275	0.275	0.275	0.366	1
R_2	9.224	9.224	9.224	27.672	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.750	0.900	1.023	1.023	2
R_2	3.376	5.627	12.379	12.379	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	1.025	1.230	1.398	1.398	3
R_2	2.472	4.119	9.062	9.062	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—39 六阶0.1dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.122	0.122	0.122	0.162	3
R_2	23.509	23.509	23.509	70.526	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.332	0.399	0.453	0.453	2
R_2	5.306	8.843	19.455	19.455	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	0.454	0.545	0.619	0.619	3
R_2	1.469	2.448	5.386	5.386	
C_2	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—40 六阶0.5dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.082	0.082	0.082	0.110	1
R_2	31.452	31.452	31.452	94.357	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.225	0.270	0.307	0.307	2
R_2	6.640	11.066	24.345	24.345	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	0.307	0.369	0.419	0.419	3
R_2	1.293	2.156	4.742	4.742	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—41 六阶1dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.066	0.066	0.066	0.088	1
R_2	38.037	38.037	38.037	114.112	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.180	0.216	0.246	0.246	2
R_2	7.838	13.063	28.738	28.738	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	0.246	0.295	0.336	0.336	3
R_2	1.283	2.138	4.704	4.704	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—42 六阶2dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.050	0.050	0.050	0.066	1
R_2	49.093	49.093	49.093	147.278	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.136	0.163	0.186	0.186	2
R_2	9.914	16.523	36.351	36.351	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	0.186	0.223	0.254	0.254	3
R_2	1.351	2.268	4.990	4.990	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—43 六阶3dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	25	100	
R_1	0.041	0.041	0.041	0.054	1
R_2	59.626	59.626	59.626	178.880	
C_1	C	C	C	0.25C	
R_1	0.111	0.133	0.151	0.151	2
R_2	11.927	19.879	43.733	43.733	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	
R_1	0.151	0.182	0.206	0.206	3
R_2	1.486	2.477	5.448	6.448	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—44 八阶无限增益多路反馈巴特沃斯级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.207	0.207	0.248	0.248	1
R_2	12.237	12.237	20.395	20.395	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.589	0.589	0.707	0.707	2
R_2	4.297	4.297	7.162	7.162	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.882	1.059	1.059	1.203	3
R_2	2.871	4.785	4.785	10.528	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	1.041	1.249	1.419	1.419	4
R_2	2.434	4.057	8.925	8.925	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—45 八阶0.1dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.068	0.068	0.081	0.091	1
R_2	39.909	39.909	66.516	66.516	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.193	0.193	0.232	0.232	2
R_2	19.463	19.463	17.447	17.447	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.289	0.347	0.347	0.395	3
R_2	3.644	6.074	6.074	13.362	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	0.341	0.410	0.465	0.465	4
R_2	1.081	1.801	3.963	3.963	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—46 八阶0.5dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.046	0.046	0.056	0.056	1
R_2	55.383	55.383	92.305	92.305	
C_1	C	C	0.5	0.5C	
R_1	0.132	0.132	0.158	0.158	2
R_2	14.247	14.247	23.746	23.746	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.197	0.237	0.237	0.269	3
R_2	4.606	7.676	7.676	16.887	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	0.233	0.279	0.317	0.317	4
R_2	0.959	1.598	3.515	3.515	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—47 八阶1dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.037	0.037	0.045	0.045	1
R_2	67.794	67.794	112.990	112.990	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.106	0.106	0.127	0.127	2
R_2	17.326	17.326	28.877	28.877	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.158	0.190	0.190	0.216	3
R_2	5.454	9.090	9.090	19.998	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	0.187	0.224	0.255	0.255	4
R_2	0.959	1.588	3.495	3.495	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—48 八阶2dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.028	0.028	0.034	0.034	1
R_2	88.346	88.346	147.243	147.243	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.080	0.080	0.096	0.096	2
R_2	22.460	22.460	37.434	37.434	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.120	0.144	0.144	0.163	3
R_2	6.916	11.527	11.527	25.359	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	0.141	0.170	0.193	0.193	4
R_2	1.013	1.688	3.713	3.713	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

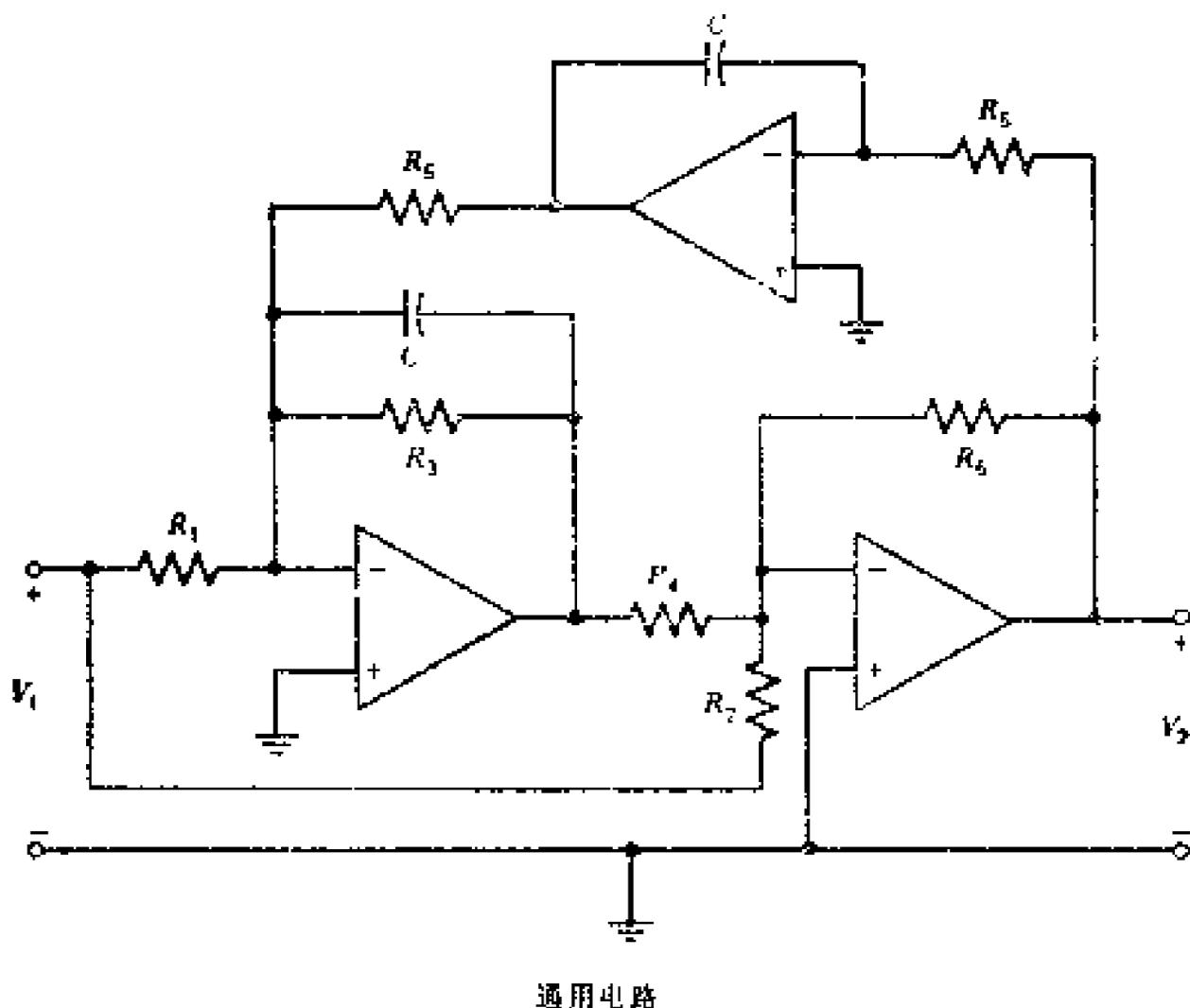


表 3—49 八阶3dB无限增益多路反馈切比雪夫级联高通滤波器设计表

增益	电路元件值*				节
	1	4	40	100	
R_1	0.023	0.023	0.027	0.027	1
R_2	107.779	107.779	179.631	179.631	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.065	0.065	0.078	0.078	2
R_2	27.334	27.334	45.557	45.557	
C_1	C	C	0.5C	0.5C	
R_1	0.098	0.117	0.117	0.133	3
R_2	8.330	13.883	13.883	30.543	
C_1	C	0.5C	0.5C	0.2C	
R_1	0.115	0.138	0.157	0.157	4
R_2	1.107	1.845	4.058	4.058	
C_1	C	0.5C	0.2C	0.2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

3.9 双二次高通滤波器设计程序摘要



设计程序

给定截频 f_c (Hz)、滤波器增益、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应),对于二阶滤波器或级联高阶滤波器($n = 4, 6, 8$)的每一节按下面的步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值,由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图3—15a、b或c查出。对于高阶滤波器(如 $n > 4$)设计,因为要求较高的精度,用公式计算较好。

2. 从表3—50~3—53适当的一个表中查出电阻值。表中

电阻值对应于 $K = 1$ 的情况，因此，必须把这些数值乘以由第一步得到的 K 值，才能得到电路的实际电阻值。表中的 G 是单节的增益。当 $n > 2$ 时，滤波器的增益等于各节增益的乘积。各节的增益不必相等，这可由设计人员选择。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近查表得到的数值。按通用电路制作滤波器或它的各个单节。

注 释 和 建 议

3.7节对压控电压源高通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) a、d和f条可直接应用。

(b) c和e条不适用。

(c) b条适用，但这里 R_{11} 是连接到运算放大器反相输入端的电阻。

此外，还需应用下面两条：

(d) 该节的增益与 $1/R_2$ 成正比。

(e) 滤波器的响应可通过改变 R_2 、 R_3 和 R_4 方便地加以调整。改变 R_2 影响增益，改变 R_3 影响通带响应，改变 R_4 则改变 f_c 。

关于双二次高通滤波器的讨论已在3.4节叙述过了。

表 3—50 二阶双二次高通滤波器设计表

电路元件值*						
		切比雪夫				
巴特沃斯		0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
R_1	$1.125/G$	$0.671/G$	$1.116/G$	$1.450/G$	$1.980/G$	$2.468/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	1.125	2.223	1.693	1.598	1.630	1.747
R_4	1.592	5.273	2.413	1.755	1.310	1.127
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

表 3—51 四阶双二次级联高通滤波器设计表

电路元件值*						
巴特沃斯	切比雪夫					节
	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	
R_1	$2.079/G$	$3.013/G$	$4.538/G$	$5.703/G$	$7.587/G$	$9.343/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	2.079	4.006	4.826	5.626	7.046	8.438
R_4	1.592	2.116	1.693	1.570	1.478	1.437
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592
R_1	$0.861/G$	$1.248/G$	$1.880/G$	$2.362/G$	$3.143/G$	$3.870/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	0.861	0.777	0.670	0.660	0.696	0.758
R_4	1.592	0.991	0.567	0.445	0.353	0.312
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。 $G =$ 单节的增益，
滤波器增益 = 各节增益的积。

表 3—52 六阶双二次级联高通滤波器设计表

电路元件值*						
巴特沃斯	切比雪夫					节
	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	
R_1	$3.075/G$	$6.938/G$	$10.248/G$	$12.798/G$	$16.941/G$	$20.816/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	3.075	7.837	10.484	12.679	16.364	19.875
R_4	1.592	1.798	1.628	1.577	1.537	1.520
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592
R_1	$1.125/G$	$2.539/G$	$3.751/G$	$4.684/G$	$6.201/G$	$7.619/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	1.125	1.769	2.213	2.613	3.305	3.976
R_4	1.592	1.108	0.939	0.888	0.848	0.830
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592
R_1	$0.824/G$	$1.859/G$	$2.746/G$	$3.429/G$	$4.539/G$	$5.578/G$
R_2	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$	$1.592/G$
R_3	0.824	0.490	0.431	0.428	0.454	0.495
R_4	1.592	0.419	0.250	0.198	0.159	0.141
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。 $G =$ 单节的增益，
滤波器增益 = 各节增益的积。

表 3—53 八阶双二次函数级联高通滤波器设计表

		电路元件值*					
		切比雪夫					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	节
R_1	4.079/G	12.437/G	18.243/G	22.731/G	30.038/G	36.879/G	
R_2	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	
R_3	4.079	13.303	18.461	22.598	29.448	35.927	1
R_4	1.592	1.702	1.611	1.582	1.560	1.550	
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	1.432/G	4.367/G	6.406/G	7.982/G	10.548/G	12.950/G	
R_2	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	
R_3	1.432	3.489	4.749	5.775	7.487	9.111	2
R_4	1.592	1.272	1.180	1.152	1.130	1.120	
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	0.957/G	2.918/G	4.280/G	5.333/G	7.048/G	8.653/G	
R_2	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	
R_3	0.957	1.215	1.535	1.818	2.305	2.777	3
R_4	1.592	0.663	0.571	0.542	0.521	0.511	
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	
R_1	0.811/G	2.474/G	3.629/G	4.521/G	5.975/G	7.336/G	
R_2	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	
R_3	0.811	0.360	0.320	0.318	0.338	0.369	4
R_4	1.592	0.232	0.140	0.112	0.090	0.080	
R_5	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。 $G =$ 单节的增益，
滤波器增益 = 各节增益的积。

3.10 多路反馈高通滤波器设计程序摘要

$n = 3 \sim 8$ 的多路反馈高通滤波器的通用电路已分别在图 3—8~3—13 给出。

设计程序

给定截频 f_c (Hz)、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型 (巴特沃斯或切比雪夫响应), 按下面的步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_c C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图 3—15a、b 或 c 查出。对于高阶滤波器 (例如 $n > 4$) 设计, 因要求较高的精度, 用公式计算较好。

2. 从下面表 3—54~3—69 适当的一个表中查出其余的元件值。除 C 以外的电容值可直接由所选定的 C 值和表中查得的数值确定。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况。因此, 必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K , 才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值, 这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器。表中其余的电容值都是 C 的倍数, 如 0.47 等等。因此, 如果电容 C 的值选择为 $10\mu\text{F}$ 的某一次幂 (即 0.1, 1, 10 等), 则其余的电容也就得到标称电容值。

注释和建议

3.7 节对于压控电压源高通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下:

- (a) d 和 f 条可直接应用。
- (b) a 条不适用。
- (c) b 条适用, 但这里每个运算放大器的 R_{ii} 就是连接到同

相输入端的电阻。

(d)c条适用于每个运算放大器，但这时的 R_3 和 R_4 应由连接到反相输入端的两个电阻代替。

(e)e条适用于每个具有增益调整电阻的压控电压源。在每种情况下， R_3 、 R_4 由这些增益调整电阻代替。

不同阶数的多路反馈高通滤波器的具体例子已在3.6节给出。

表 3—54 三阶多路反馈巴特沃斯高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.143	0.933	0.722	0.635
R_2	0.449	1.836	4.197	5.844
R_3	7.861	2.354	1.331	1.086
R_4	开路	4.708	1.597	1.207
R_5	0	4.708	7.984	10.862

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—55 三阶0.1dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.211	1.001	0.802	0.716
R_2	0.332	2.108	4.922	6.861
R_3	16.423	3.131	1.673	1.342
R_4	开路	6.262	2.007	1.491
R_5	0	6.262	10.035	13.415

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—56 三阶0.5dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	0.831	0.694	0.570	0.515
R_2	0.166	1.601	3.780	5.270
R_3	20.880	2.597	1.341	1.064
R_4	开路	5.193	1.609	1.182
R_5	0	5.193	8.044	10.639

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—57 三阶1dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	0.679	0.572	0.476	0.434
R_2	0.108	1.427	3.383	4.714
R_3	27.107	2.426	1.229	0.969
R_4	开路	4.852	1.475	1.077
R_5	0	4.852	7.374	9.691

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—58 三阶2dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	0.528	0.451	0.383	0.352
R_2	0.059	1.278	3.036	4.224
R_3	42.253	2.285	1.133	0.886
R_4	开路	4.570	1.360	0.985
R_5	0	4.570	6.797	8.865

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—59 三阶3dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	0.439	0.379	0.327	0.302
R_2	0.037	1.203	2.855	3.965
R_3	62.823	2.214	1.083	0.843
R_4	开路	4.428	1.299	0.936
R_5	0	4.428	6.496	8.427

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—60 四阶多路反馈巴特沃斯高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.663	1.536	1.206	1.011
R_2	1.538	1.557	1.648	1.734
R_3	4.557	1.906	1.093	0.899
R_4	0.604	1.546	3.262	4.513
R_5	15.915	15.915	15.915	15.915
R_6	开路	3.812	1.311	0.999
R_7	0	3.812	6.556	8.992

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—61 四阶0.1dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.524	1.431	1.166	0.994
R_2	1.063	1.095	1.204	1.294
R_3	8.948	2.353	1.223	0.974
R_4	0.391	1.541	3.331	4.586
R_5	15.915	15.915	15.915	15.915
R_6	开路	4.706	1.467	1.083
R_7	0	4.706	7.335	9.744

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—62 四阶0.5dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.321	1.254	1.049	0.909
R_2	0.698	0.722	0.803	0.870
R_3	10.746	2.147	1.069	0.838
R_4	0.256	1.308	2.836	3.874
R_5	15.915	15.915	15.915	15.915
R_6	开路	4.294	1.283	0.931
R_7	0	4.294	6.415	8.377

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—63 四阶1dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.304	1.239	1.041	1.055
R_2	0.553	0.574	0.646	0.628
R_3	12.580	2.094	1.023	0.759
R_4	0.202	1.230	2.675	3.550
R_5	15.915	15.915	5.915	31.830
R_6	开路	4.189	1.228	0.844
R_7	0	4.189	6.138	7.595

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—64 四阶2dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.377	1.348	1.090	1.325
R_2	0.414	0.418	0.497	0.420
R_3	15.956	2.036	0.989	0.710
R_4	0.149	1.167	2.544	3.345
R_5	15.915	31.830	15.915	159.155
R_6	开路	4.072	1.186	0.789
R_7	0	4.072	5.932	7.103

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—65 四阶3dB多路反馈切比雪夫高通滤波器设计表

电路元件值*				
增益	1	2	6	10
R_1	1.499	1.506	1.167	1.477
R_2	0.335	0.330	0.413	0.335
R_3	19.405	2.012	0.974	0.700
R_4	0.119	1.138	2.480	3.279
R_5	15.915	159.155	15.915	318.310
R_6	开路	4.025	1.169	0.778
R_7	0	4.025	5.844	7.004

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—66 五阶多路反馈高通滤波器设计表

电路元件值*									
		切比雪夫							
巴特沃斯		0.1 dB		0.5 dB		1 dB	2 dB	3 dB	
增益	2	10	2	10	2	10	2	2	2
R_1	5.323	2.670	4.240	2.766	4.349	2.812	5.096	7.284	6.160
R_2	1.816	1.939	0.861	1.111	0.499	0.697	0.347	0.200	0.184
R_3	0.432	0.425	0.394	0.323	0.328	0.272	0.289	0.242	0.227
R_4	2.752	1.018	2.858	1.008	2.561	0.900	2.442	2.327	2.299
R_5	1.395	4.826	1.294	4.470	1.159	3.983	1.113	1.079	1.115
R_6	3.183	15.915	3.183	15.915	3.183	15.915	3.183	3.183	6.366
R_7	5.503	1.132	5.715	1.120	5.122	1.000	4.883	4.654	4.600
R_8	5.503	10.184	5.715	10.080	5.122	9.000	4.883	4.654	4.600

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—67 六阶多路反馈高通滤波器设计表

电路元件值*						
增益	切比雪夫					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
	2	2	2	2	2	2
R_1	4.005	3.426	2.290	2.241	2.123	2.470
R_2	2.976	3.376	3.319	3.399	3.405	3.546
R_3	0.822	0.675	0.707	0.696	0.768	0.734
R_4	1.100	0.543	0.592	0.554	0.529	0.441
R_5	1.608	1.413	1.315	1.290	1.259	1.257
R_6	1.512	0.775	0.516	0.424	0.318	0.290
R_7	4.135	2.622	2.005	1.716	1.615	1.416
R_8	3.183	3.183	5.551	5.064	6.615	3.600
R_9	5.960	6.760	6.640	6.800	6.810	7.100

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—68 七阶多路反馈高通滤波器设计表

电路元件值*						
增益	切比雪夫					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
	2	2	2	2	2	2
R_1	9.137	5.241	2.897	3.080	1.991	3.442
R_2	0.398	0.279	0.407	0.343	0.290	0.308
R_3	2.139	2.882	3.348	3.578	3.859	3.350
R_4	1.294	1.290	1.285	1.285	1.292	1.231
R_5	0.668	0.454	0.331	0.259	0.253	0.178
R_6	2.383	2.236	2.640	2.675	1.988	4.653
R_7	1.815	0.533	0.335	0.321	0.480	0.139
R_8	13.455	5.209	2.087	1.499	1.024	2.028
R_9	4.160	4.906	4.495	2.645	8.725	3.570
R_{10}	4.280	5.760	6.700	7.160	7.720	6.700

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 3—69 八阶多路反馈高通滤波器设计表

电路元件值*						
增益	切比雪夫					
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
	2	2	2	2	2	2
R_1	6.294	3.339	2.204	1.923	1.773	1.677
R_2	0.235	0.305	0.454	0.677	0.537	0.596
R_3	5.715	4.339	3.932	4.298	3.956	4.197
R_4	1.904	1.409	1.307	1.357	1.276	1.298
R_5	0.402	0.408	0.433	0.368	0.461	0.455
R_6	1.090	0.605	0.423	0.389	0.280	0.252
R_7	3.505	3.200	4.426	6.516	6.549	6.371
R_8	2.623	0.685	0.412	0.277	0.262	0.266
R_9	0.760	0.873	0.891	0.600	0.728	0.613
R_{10}	1.879	3.399	3.515	1.290	6.574	7.820
R_{11}	1.608	2.118	3.602	6.164	2.703	2.228
R_{12}	11.430	8.680	7.860	8.600	7.910	8.390

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

4. 带通滤波器

4.1 基本理论

带通滤波器能通过大致以中心频率 ω_0 ($\omega_0 \neq 0$)为中心, 带宽为 B 的一个频带内的信号, 而衰减所有其他频率的信号。 B 和 ω_0 都可用 rad/sec 为单位, 当中心频率用 $f_0 = \omega_0 / 2\pi Hz$ 表示时, B 也可用 Hz 为单位。比值 $Q = \omega_0 / B$, 或 $Q = f_0 / B$ (当 B 以 Hz 为单位时), 叫做滤波器的品质因数, 可用来衡量滤波器的选择性。例如, 高 Q 值表示选择性很高的滤波器, 因为这时能通过的频带与中心频率比起来很窄。滤波器的增益定义为传递函数在中心频率处的幅值。

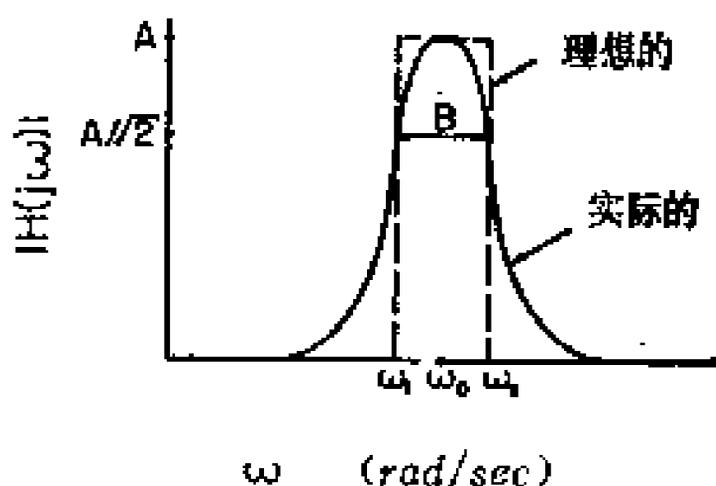


图 4-1 带通滤波器幅度响应

理想带通滤波器的幅度响应如图4-1虚线所示。一个近似于理想特性的可以实现的响应如实线所示。图上有两个截频点 ω_1 和 ω_2 。和低通或高通一样, 截频定义为 $|H(j\omega)|$ 下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 处的频率。这样, 对于可以实现的近似响应, 带宽定义为 $B = \omega_2 - \omega_1$ 。

和高通滤波器一样, 带通滤波器的传递函数也可通过变换低通原型的传递函数求得。用这种办法求得的带通传递函数在

• 原文误为 $B = \omega_1 - \omega_2$ ——译者

一般情况下可以由下式给出〔22〕

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{S^n + b_{n-1}S^{n-1} + \dots + b_1S + b_0} \bigg|_{S = \frac{(s^2 + \omega_0^2)}{Bs}} \quad (4.1)$$

这里，代换前的传递函数就是(2.2)式所示的 n 阶低通滤波器的传递函数。很明显， $2n$ 阶带通传递函数是由 n 阶低通传递函数得出的，和低通时一样，它的增益为 G ($s = j\omega_0$ 对应于 $S = 0$)。另外，当低通原型为巴特沃斯或切比雪夫响应时，带通滤波器也是巴特沃斯或切比雪夫响应。

巴特沃斯带通滤波器具有最平通带的单调频率响应。切比雪夫带通滤波器及其对应的低通一样，通带有波纹，在截频点的衰减率比巴特沃斯型的大得多。另外，在切比雪夫滤波器中，除3dB波纹情况外，角频率 ω_1 和 ω_2 是通带波纹区间的终止角频率；而在巴特沃斯滤波器中， ω_1 和 ω_2 就是通常定义的截频点。一般说来，对于(4.1)式，中心频率就是 ω_1 和 ω_2 的几何平均值，即 $\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2}$ ，或者

$$f_0 = \sqrt{f_1f_2} \quad (\text{以 Hz 为单位})。$$

因为一阶巴特沃斯和一阶切比雪夫低通幅度响应函数是具有相同的形式(只是比例系数不同)，不论哪一种情况下，其二阶带通的传递函数可由(4.1)式令 $b_0 = 1$ 和 $n = 1$ 得到。结果为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{GBs}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (4.2)$$

令 $n = 2, 3, \dots$ ，由(4.1)式可得出更高阶的响应，这时巴特沃斯和切比雪夫滤波器是不同的。

为进行比较，将四阶切比雪夫滤波器和四阶巴特沃斯滤波器的幅度和相位响应示于图4—2和图4—3。

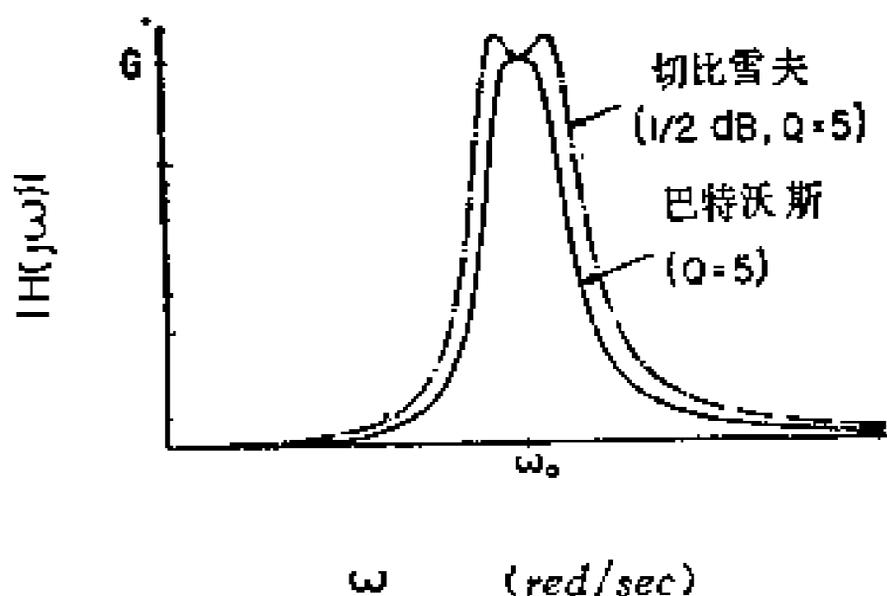


图 4—2 四阶带通滤波器的幅度响应

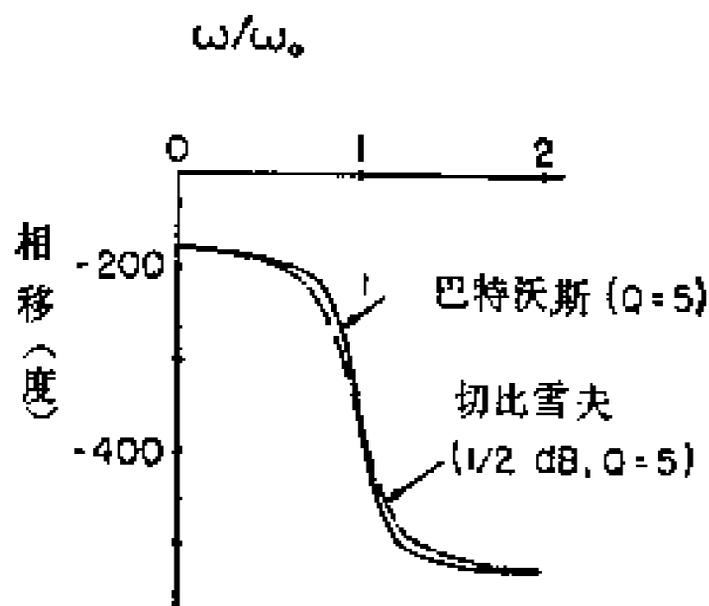


图 4—3 四阶带通滤波器的相位响应

在这一章里，将讨论若干种带通滤波器的实现方案，并给出它们的快速设计方法。设计程序和低通及高通滤波器相同，对于每种滤波器的设计程序将在本章后面部分扼要给出。

4.2 二阶节的级联

从(4.1)式可以看出，一个 $2n$ 阶带通滤波器的传递函数是一个常数乘以 s^2 再与 s 的 $2n$ 次多项式的比，因而它可以分解成象(4.2)式那样的 n 个因式。这样，更高阶的滤波器可由二阶节的级联得到。后面在 4.6 节讨论双二次带通滤波器设计程序时我们将叙述这个方法。

我们注意到四阶带通传递函数具有两个二阶带通传递函数之积的形式。但是它也可以分解为一个低通传递函数和一个高通传递函数的积。因此，一种获得各式各样四阶带通滤波器（尽管它既不是巴特沃斯型也不是切比雪夫型）的快速方法是将一个截频为 f_2 的低通滤波器和一个截频为 f_1 ($f_1 < f_2$) 的高通滤波器级联起来，此时可以利用第 2、3 两章所得的各项成果。这样得到的滤波器的中心频率约为 $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$ （如果级联的两个滤波器均为巴特沃斯型，这个式子是准确的〔1〕），通带 B

近似等于 $f_2 - f_1$ 。随着差值 $f_2 - f_1$ 的增加，因此，也就是随着 Q 值降低，近似程度得到改善。当 f_2 和 f_1 至少间隔一个倍频程*，即 Q 值大约不超过 $\sqrt{2}$ 时，可获得最好的效果^[34]。更陡峭的截止特性可由级联四阶高通和低通获得；当然，所得到的滤波器既不是八阶巴特沃斯型，也不是八阶切比雪夫型滤波器。

在所级联的低通和高通滤波器两者都是巴特沃斯滤波器的情况下，如果 $f_1 = f_2$ ，则 f_0 也是这个值，而 $Q = 1.1$ 。如果 $f_2 = 2f_1$ （间隔一个倍频程），则 $f_0 = \sqrt{2}f_1$ **， $Q = 0.912$ ^[1]。

非常陡峭的带通滤波器可由级联两个相同的带通滤波器获得。

表 4—1 n 节相同的带通滤波器级联后的 Q 值

n	带 宽	Q
1	B_1	Q_1
2	$0.644 B_1$	$1.55 Q_1$
3	$0.510 B_1$	$1.96 Q_1$
4	$0.435 B_1$	$2.30 Q_1$
5	$0.386 B_1$	$2.60 Q_1$

然而，这样得到的滤波器也不再是四阶巴特沃斯型或四阶切比雪夫型滤波器。

如果 Q_1 是每一节的品质因数，又共有 n 节，则滤波器的 Q 值为 $Q_1 / \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}$ ^[1]。

对于 $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ，而且每级带宽为 B_1 时，上述 Q 值和相应的带宽列于表4.1。

4.3 压控电压源带通滤波器

图4—4的压控电压源电路是一种可以实现(4.2)式的电路，它是由克尔温(Kerwin)和许尔斯曼(Huelsman)提出的^[35]，我们将用它来得到二阶带通滤波器。分析电路可知，如果

- * 一个倍频程表示两个频率中，一个频率为另外一个的两倍。
- ** 原文误为 $f_0 = \sqrt{2}f_1$ ——译者

$$B = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} + \frac{1-\mu}{R_3} \right]$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_2 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (4.3)$$

$$G = \frac{\mu}{R_1 C B}$$

式中

$$\mu = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (4.4)$$

则可实现(4.2)式。

压控电压源带通滤波器当 $Q \leq 10$ 时工作得最好^[2]。它的优点和前面 2.5 节低通情况下讨论过的相同。由(4.3)式可以看出它有一个独特的优点，即带宽 B 可由改变 μ 来调整而不影响中心角频率 ω_0 。通过调整 R_2 达到所要求的 ω_0 ，再通过调整 μ 获得所要求的 B ，这样就可完成所需的调整。

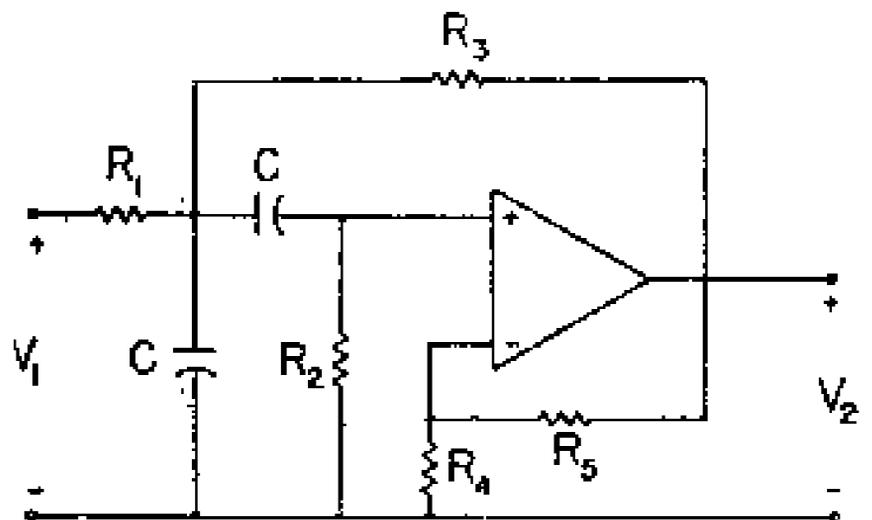


图 4—4 二阶压控电压源带通滤波器

实现压控电压源带通滤波器的程序与第 2 章 2.5 节所述低通滤波器的情况非常相似。设计程序在 4.9 节摘要给出，在那里给出了通用电路和设计表。对于压控电压源带通滤波器，相应的设计表为表 4—2~4—9。和表一起使用的参数 K 可由下式计算

$$K = \frac{100}{f_0 C'} \quad (4.5)$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可以从图 4—14a、

b或C相应的曲线上查出。

实例：假定我们要求一个压控电压源带通滤波器，其中心频率 $f_0=1000\text{Hz}$ ，增益 $G=2$ ， $Q=10$ 。选择 $C=0.01\mu\text{F}$ ，则从(4.5)式计算出 $K=10$ 。表4—9给出的电阻值对应于 $K=1$ 的情况，我们这里必须把查得的数值乘以10。结果是 $R_1=159.15$ ， $R_2=23.32$ ， $R_3=11.66$ ， $R_4=R_5=46.64$ （以 $\text{k}\Omega$ 为单位）。在图4—4的电路中使用标称值电阻160，22，12和47 $\text{k}\Omega$ ，所得结果为 $f_1=974\text{Hz}$ ， $f_2=1074\text{Hz}$ （因而 $f_0=1023\text{Hz}$ ， $Q=10.23$ ），又 $G=2$ 。其幅度响应示于图4—5。

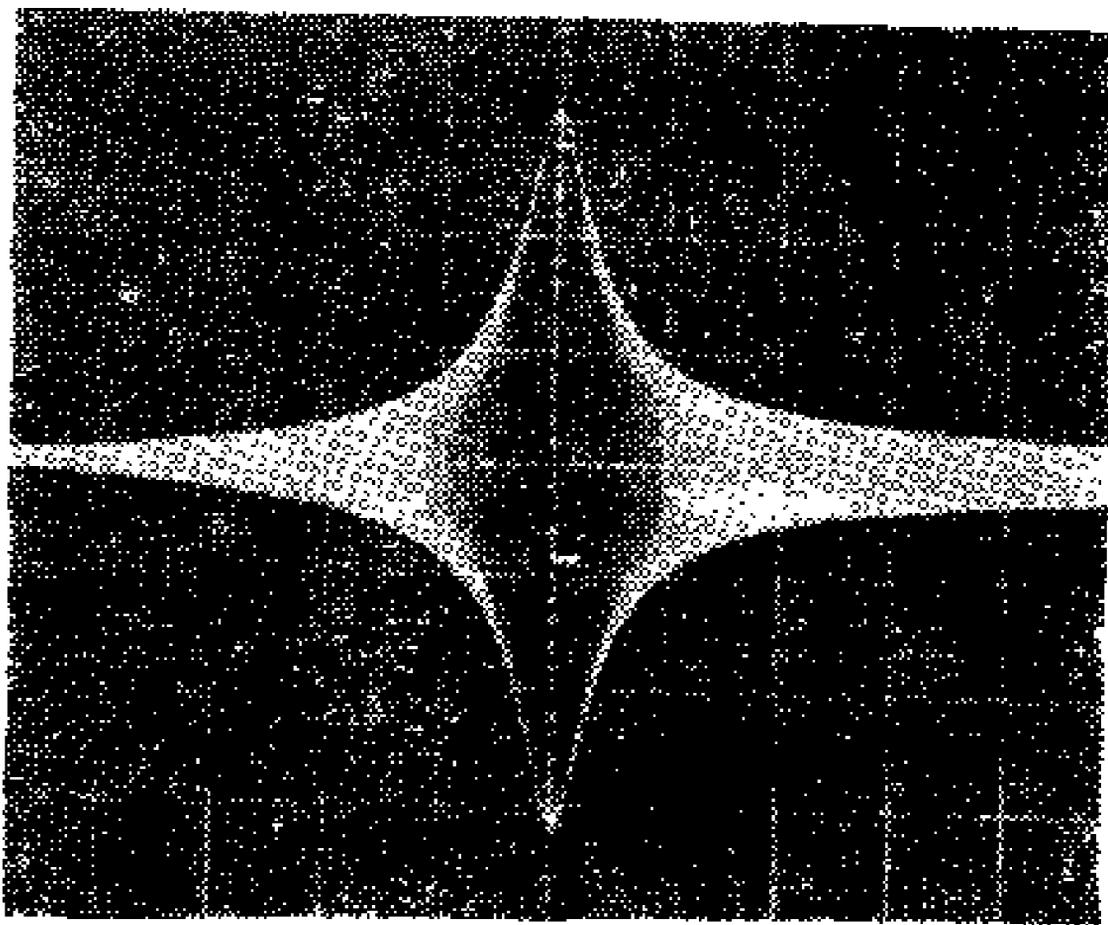


图 4—5 二阶压控电压源带通滤波器幅度响应

4.4 无限增益多路反馈带通滤波器

另一种可以实现二阶带通滤波器传递函数的电路是如图4—6所示的无限增益多路反馈滤波器^[36]。这种滤波器类似于2.6节的无限增益多路反馈低通滤波器，而且同样地也具有反相的增益。分析指出，如果

$$G = -\frac{R_3}{2R_1}$$

$$B = \frac{2}{R_3 C} \quad (4.6)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_3 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

则可满足(4.2)式。

无限增益多路反馈带通滤波器的优点是比压控电压源带通滤波器用的元件少，其他还具有如2.6节相应低通所引证的优点。但高Q时，图4—6网络元件值的分布范围大，而且Q值的灵敏度高〔2〕。由于这个原因，对于这种电路，Q值大致应限制在 ≤ 10 。

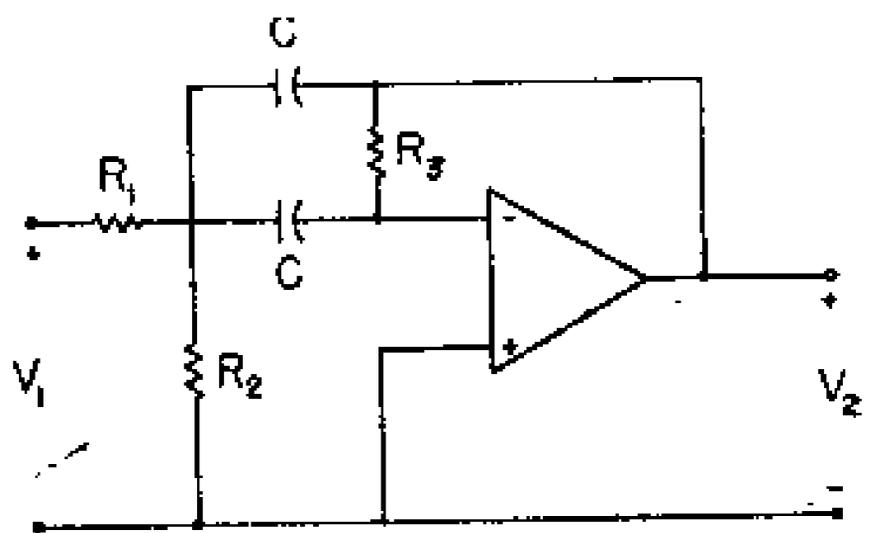


图 4—6 二阶无限增益多路反馈带通滤波器

利用4.10节摘要中所叙述的设计程序可以获得网络元件的实际值。有关的设计表为表4—10~4—17。

4.5 正反馈带通滤波器

为获得最好的结果，上面两节讲到的二阶带通滤波器的Q值大约要限制在10左右，且具有中等增益。一种用两个运算放大器可获得Q值高达50的电路是图4—7所示的正反馈电路〔2〕。正反馈意味着在该电路中通过 R_3 反馈的信号在频率为 ω_0 时是同相的信号。

分析图4—7指出，当C和 ω_0 都归一化为1时，满足(4.2)

式的条件是

$$G = \frac{QR_4}{R_1^2}$$

$$B = \frac{1}{Q} = \frac{2 - \frac{R_4}{R_3}}{R_1} \quad (4.7)$$

$$\omega_0^2 = 1 = \frac{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3}{R_1}$$

进行归一化以获得所要求的中心频率和实际元件值的方法和

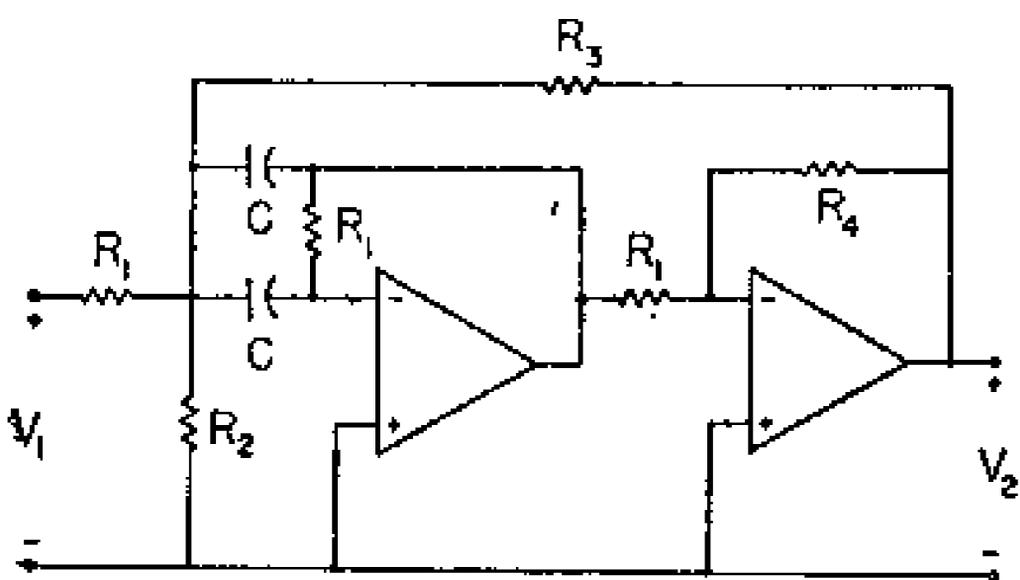


图 4—7 二阶正反馈带通滤波器

2.4 节所述的一样，只是这时 f_c 要用 f_0 代替。

改变 R_4 可在一定限度内使品质因数 Q ，因而也就使带宽改变，而不会使 f_0 有明显的变化。从(4.7)来看，这一点是很明

白的，因为 ω_0 和 R_4 无关。在参考文献[1]给出的一个例子中，用一个电位器改变 R_4 ， Q 值可从 43.3 增加到 102。增益从 4.2 增加到 12.5，而此时 f_0 仅仅从 2037Hz 变化到 2035Hz。

使用表 4—18~4—27 可以进行正反馈带通滤波器的实用设计。一般的设计程序在 4.11 节讲述。

4.6 双二次带通滤波器

和 2.7 节低通的情况非常相似，实现二阶带通传递函数的

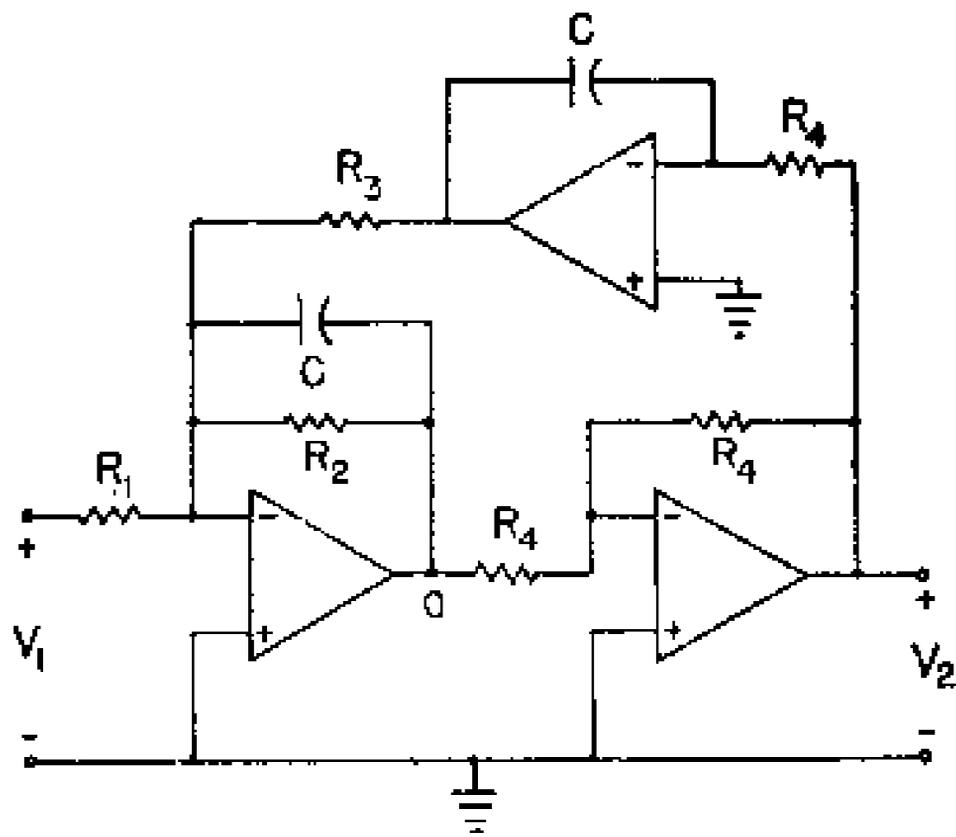


图 4—8 二阶双二次带通滤波器

双二次电路示于图4—8。我们研究的双二次电路型式就是布蓝特 (Brandt) 所讨论的那种电路〔37〕，它和陶 (Tow) 提出的电路非常相似〔29〕。分析电路可以证明，得到(4.2)式的条件是

$$G = \frac{R_2}{R_1}$$

$$B = \frac{1}{R_2 C} \quad (4.8)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_3 R_4 C^2}$$

如果要求反相增益，输出 V_2 可从 a 点取出，这时(4.8)式依然成立，只是增益 G 改变了符号。

虽然双二次电路比本章介绍的其他电路要用更多的元件，但是因为它有非常好的调整性能，它是一种应用很广的电路。而且，双二次带通滤波器可以达到的 Q 值在100以上。总之，它超过了我们讨论过的其他电路的能力。另外，双二次电路具

有良好的稳定性，用级联几节的方法以获得高阶巴特沃斯或切比雪夫响应较为容易。

二阶双二次带通滤波器的调整过程十分简单。增益由改变 R_1 调整， Q 由改变 R_2 调节，而改变 R_3 则影响中心频率。

双二次带通滤波器的设计程序由4.12节给出。二阶电路设计利用表4—28完成，而四阶电路设计（两个双二次电路的级联）则由表4—29~4—34给出。

实例：假定我们要求一个二阶双二次带通滤波器，其 $f_o=1000\text{Hz}$ ， $Q=100$ ， $G=10$ 。选用电容 $C=0.1\mu\text{F}$ ，从(4.5)式得出参数 K 为1。从表4—28得到电路其他的元件值为 $R_1=15.92$ ， $R_2=159.2$ ， $R_3=R_4=1.592$ （均为 $\text{k}\Omega$ ）。电路中所用的实际值分别为15.9，160和1.6 $\text{k}\Omega$ ，得到的幅度响应如图4—9所示。实际结果为 $f_o=1000\text{Hz}$ ， $Q=92$ ， $G=9.4$ 。

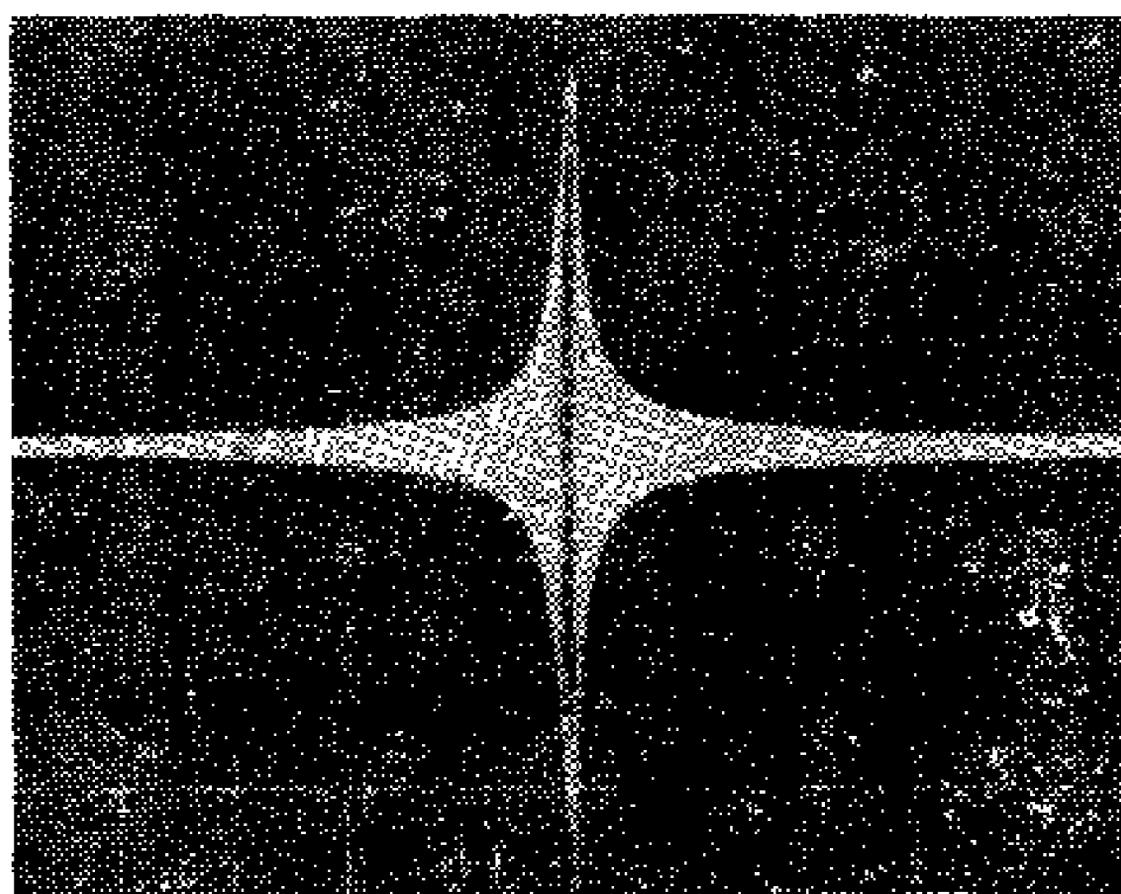


图 4—9 二阶双二次带通滤波器幅度响应

4.7 多路反馈带通滤波器

作者自己设计的，当 $n = 2$ 时实现 (4.1) 式的电路 [28] 是四阶多路反馈带通滤波器，如图 4—10 所示。分析电路可以证明，当 ω_0 和 C 都归一化为 1 时，实现四阶带通传递函数的条件为

$$\begin{aligned} \frac{A}{C_1} + \frac{D}{C_2} &= \frac{b_1}{Q} \\ \frac{C_1 E + AD + C_2 F + \frac{H \mu_2 R_1}{R_7}}{C_1 C_2} &= 2 + \frac{b_0}{Q^2} \\ \frac{AE + FD}{C_1 C_2} &= \frac{b_1}{Q} \\ \frac{EF}{C_1 C_2} &= 1 \\ \frac{H}{C_1 C_2} &= \frac{Gb_0}{Q^2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

其中

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1 + \frac{R_{10}}{R_9} \\ \mu_2 &= -\frac{R_{12}}{R_{11}} \\ A &= C_1 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_7} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{R_3} (1 - \mu_1) \right] + \frac{1}{R_2} \end{aligned}$$

$$D = \frac{1}{R_6} + C_2 \left(\frac{1}{R_8} + \frac{\mu_2}{R_8} \right) \quad (4.10)$$

$$E = \frac{1}{R_6} \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} \right)$$

$$F = \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_7} \right)$$

$$H = \frac{\mu_1 C_1 C_2}{R_1 R_4}$$

和低通及高通的情况一样，多路反馈带通滤波器存在着不同的情况下从数学上求解方程组(4.9)和(4.10)的困难。它的优点和2.8节中所引证的多路反馈低通相同。图4—10的结构和图4—8双二次滤波器相似，只是前者多用了几个元件。然而，多路反馈结构为四阶滤波器，而双二次电路只是二阶滤波器。

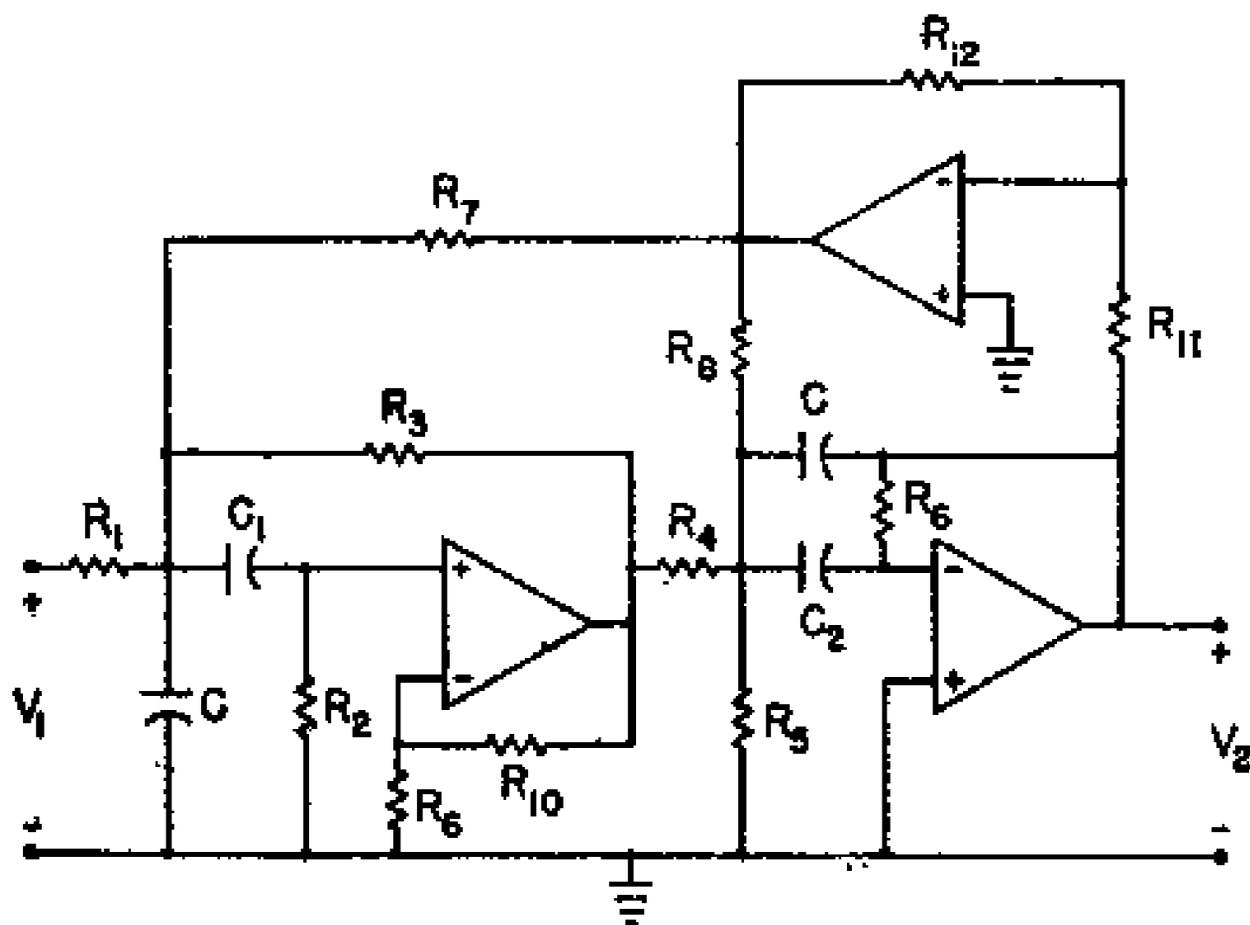


图 4—10 四阶多路反馈带通滤波器

多路反馈带通滤波器的设计程序在4.13节给出。有关的设计表为表4—35~4—58。

实例：假定我们要求一个四阶1/2dB切比雪夫带通滤波器，它的 $f_0=1000\text{Hz}$ ， $Q=5$ ， $G=2$ 。选用 $C=0.01\mu\text{F}$ ，从(4.5)式得到参数 K 为10。从表4—51查得的其他元件值为 $R_1=58.65$ ， $R_2=53.83$ ， $R_3=18.05$ ， $R_4=75.35$ ， $R_5=2.62$ ， $R_6=22.77$ ， $R_7=68.17$ ， $R_8=118.67$ ， $R_9=102.06$ ， $R_{10}=113.9$ ， $R_{11}=100$ ， $R_{12}=758.7$ ，均为 $\text{K}\Omega$ ， $C_1=C=0.01\mu\text{F}$ ， $C_2=2C=0.02\mu\text{F}$ （由表中查得的所有的电阻值都乘以参数 $K=10$ ）。用尽可能接近计算值的电路元件制作滤波器电路。实际结果为 $f_0=971\text{Hz}$ ， $Q=5.2$ ， $G=2.2$ ，波纹0.7dB。其幅度响应示于图4—11。

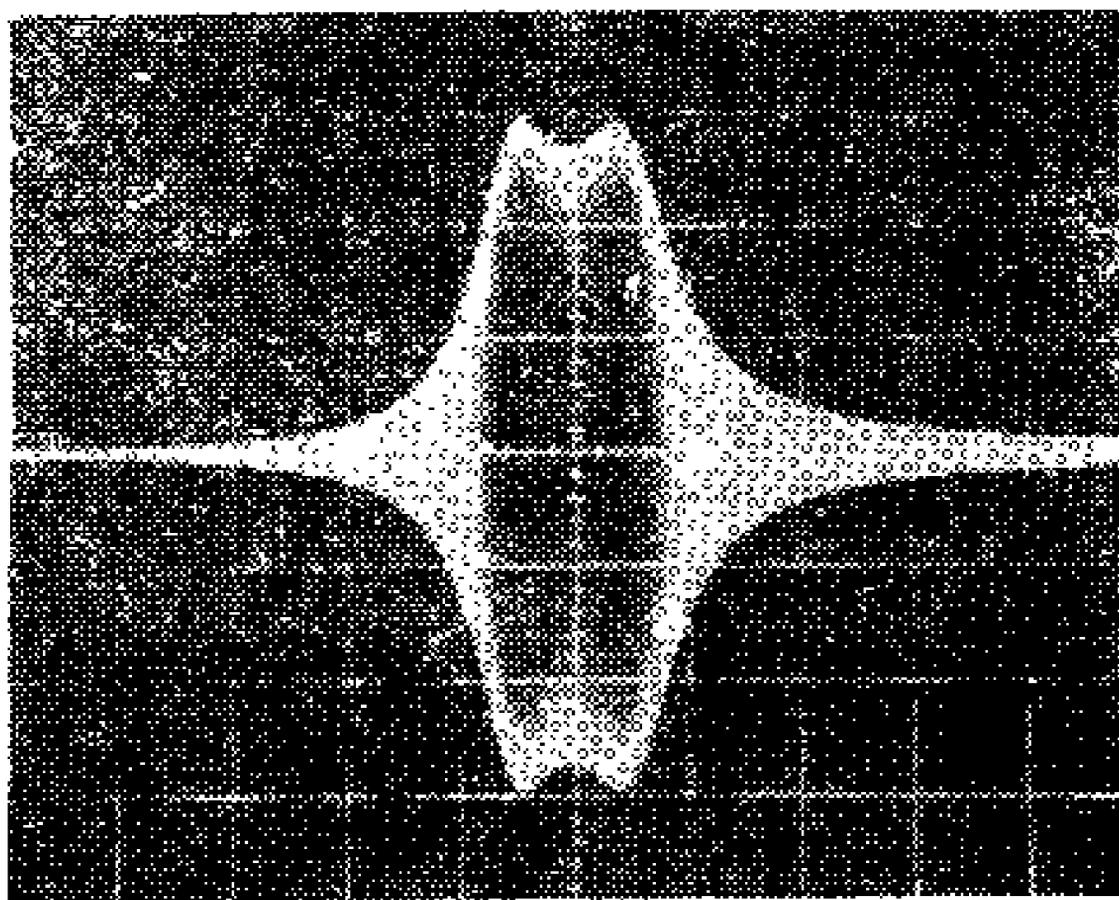


图 4—11 四阶0.5dB切比雪夫带通滤波器幅度响应

4.8 多级谐振器型带通滤波器

一种按照赫蒂格(Hurtig)提出的方法(40)发展起来的实现2、4、6……阶多路反馈带通滤波器的电路如图4—12所示(39)。标上 N 的网络是相同的二阶带通谐振器(节)；为了和

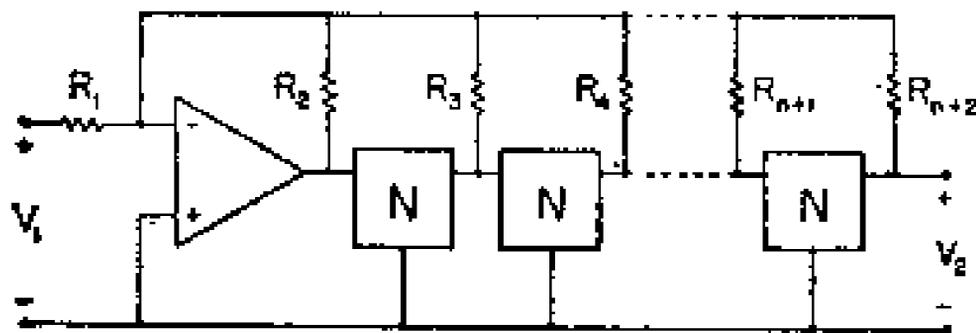


图 4-12 多级谐振器型带通滤波器

上一节讲到的滤波器相区别，我们称它为多级谐振器型带通滤波器。

如果谐振器的数目为 n ，则图4-12的

电路构成一个 $2n$ 阶带通滤波器，其传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-a_0 H^n}{1 + a_1 H + a_2 H^2 + \dots + a_n H^n} \quad (4.11)$$

其中

$$a_0 = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.12)$$

$$a_i = \frac{R_2}{R_{i+2}}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

又 $H = V_{\text{出}}/V_{\text{入}}$ 是谐振器 N 的传递函数。

在归一化 ($\omega_0 = 1$) 的情况下，指定了带通滤波器的阶数和类型就决定了(4.1)式的系数 b_0, b_1, \dots, b_{n-1} ($b_n = 1$)。给定增益 G 和品质因数 Q 时，满足(4.11)和(4.12)式的条件是^[39]

$$a_0 = b_0 G$$

$$a_i = \sum_{k=0}^i \binom{n-k}{i-k} (-K_1)^{i-k} b_{n-k}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.13)$$

这里 K_1 是每个谐振器的增益，由下式给出

$$K_1 = \frac{2n}{b_{n-1}} \quad (4.14)$$

而谐振器的品质因数由下式给出

$$Q_1 = \frac{2nQ}{b_{n-1}} \quad (4.15)$$

这些谐振器也要归一化到中心频率 $\omega_0 = 1$ ，按2—4节讲的方法归一化到所需中心频率。

滤波器的中心频率和 Q 由谐振器决定，而滤波器的类型（巴特沃斯或切比雪夫响应）和增益由电阻反馈网络决定。这种滤波器具有在2.8节里讲过的多路反馈电路的那些优点。它也具有级联网络的优点，在这里每个谐振器（即节）可分别调整到滤波器要求的中心频率 f_0 ，以及由(4.14)式和(4.15)式要求的谐振器增益 K_1 和品质因数 Q_1 。此外，从(4.13)和(4.12)两式的第一式可以看出，通过调节 R_1 可以调整滤波器的增益。

多级谐振器型带通滤波器的快速设计方法将在4—14节介绍，有关的设计表为表4—59~4—61。对于每种类型和阶数（4，6和8）的滤波器，表中给出了反馈电阻以及所要求的谐振器增益 K_1 和品质因数 Q_1 的值。因为 R_2 为任意值，给出的电阻值可乘以任何适当的比例系数。每个谐振器都必须按给定的 K_1 、 Q_1 和要求的中心频率 f_0 进行设计。这用4.12节所述的双二次电路设计程序很容易实现。如果由给定的 Q 、滤波器类型和阶数从(4—15)式算出的 Q_1 值可用一种较简单的谐振器来实现，则设计人员可从本章前面介绍的几种形式中任选一种。但不管怎样，所选择的电路必须具有同相增益，例如像压控电压源、双二次电路和正反馈带通滤波器情况那样。为了方便使用者，表4—62~4—79给出了正反馈带通谐振器的设计。这些表可用于 Q 值接近60或更低一些的谐振器。

实例：假定要求设计一个八阶1dB切比雪夫带通滤波器，其 $Q = 5$ ， $G = 1$ ， $f_0 = 1000\text{Hz}$ 。电路如图4—12所示，这里取 $n = 4$ 。根据表4—61得 $R_1 = 36.281$ ， $R_2 = 10$ ， $R_3 = 20.991$ ， $R_4 = 8.343$ ， $R_5 = 23.251$ ， $R_6 = 48.451(\text{K}\Omega)$ 。此外，每个谐振器必须具有的增益为 $K_1 = 8.396$ 和 $Q_1 = 8.396Q = 41.98$ 。因而

用图4—7的正反馈谐振器就足够了。对应的设计表是表4.77，从这里得出的谐振器电阻(对应于 $K=1$ 的情况)为 $R_1=5.033$ ， $R_2=0.845$ ， $R_3=1.654$ ， $R_4=3.183$ ($K\Omega$)。选用 $C=0.01\mu F$ ，从(4.1)式得参数 K 为10。于是谐振器电阻必须乘以10。反馈电阻不包含参数 K ，因而可以保留它们原来的数值或都乘以一个适当的比例系数。使用经过测量的，尽可能接近计算值的容差为1%的电阻制作电路，得到的结果为 $f_0=1005\text{Hz}$ ， $G=1.1$ ， $Q=5.1$ ，在 f_0 附近的波纹为1dB。幅度响应如图4—13所示。

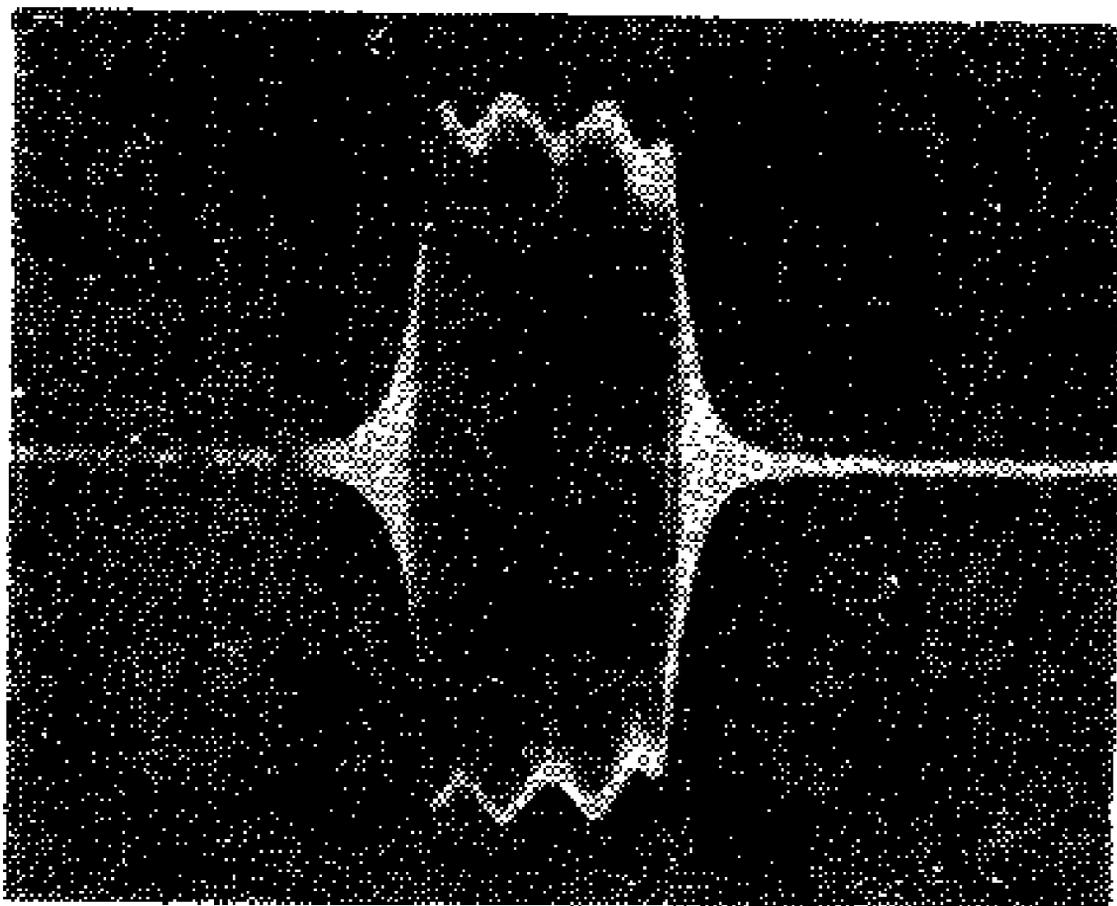
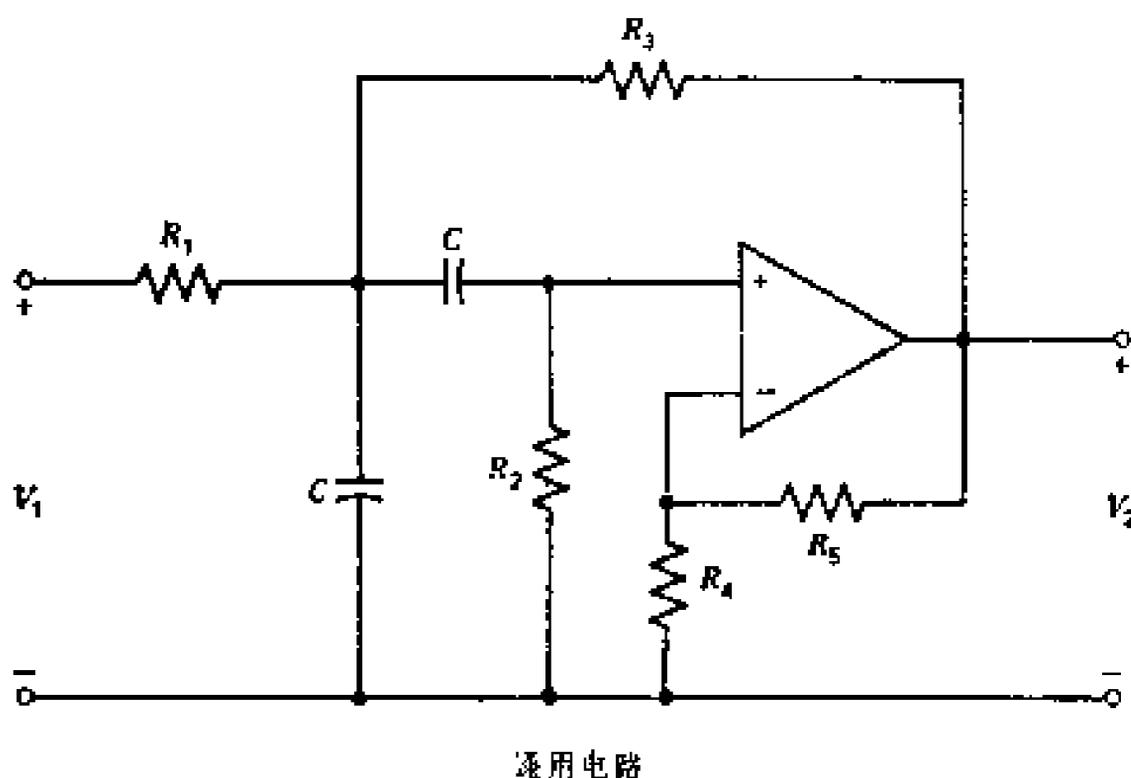


图 4—13 八阶1dB切比雪夫带通滤波器幅度响应

4.9 压控电压源带通滤波器设计

程序摘要 ($Q \leq 10$)



设计程序

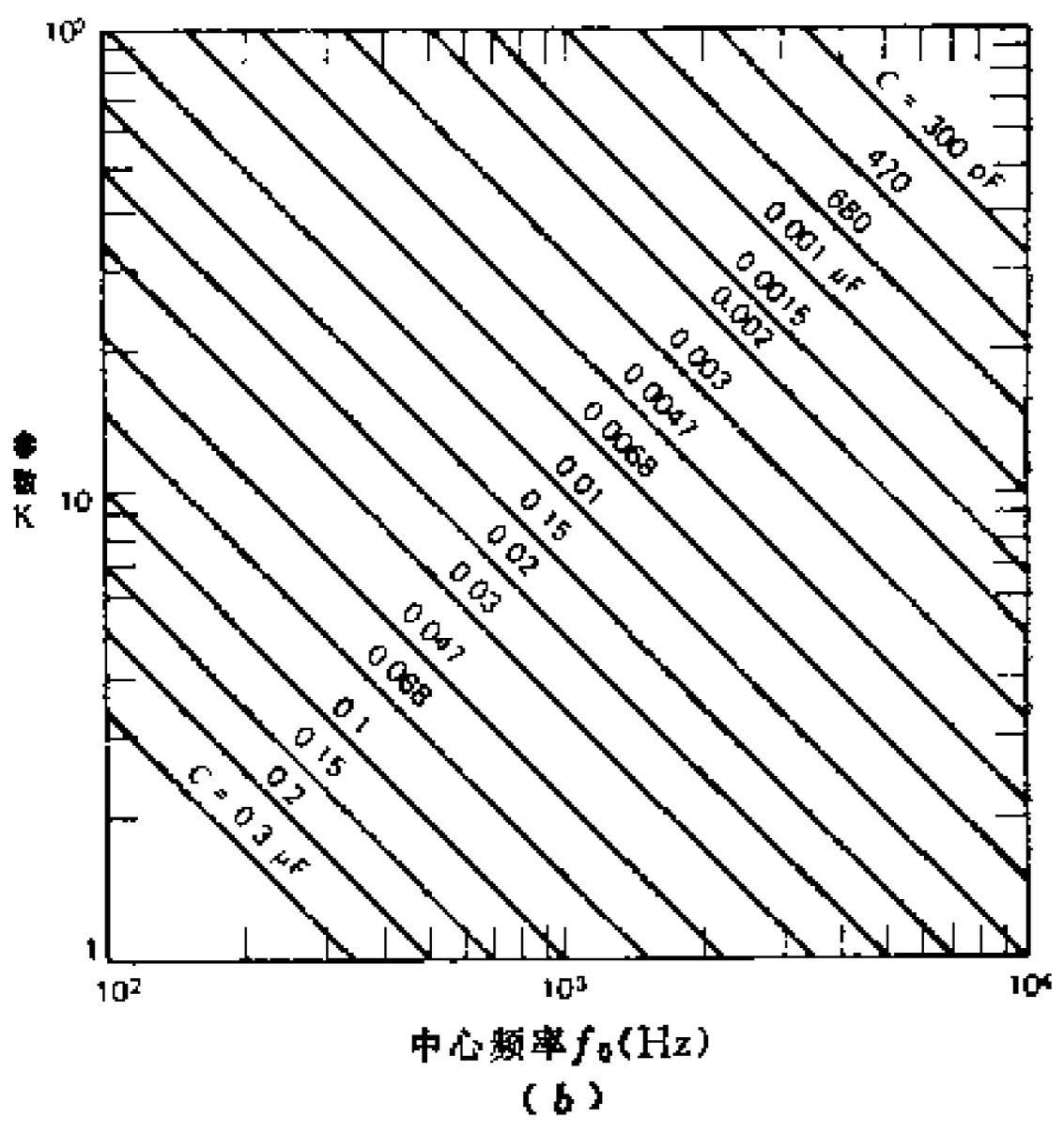
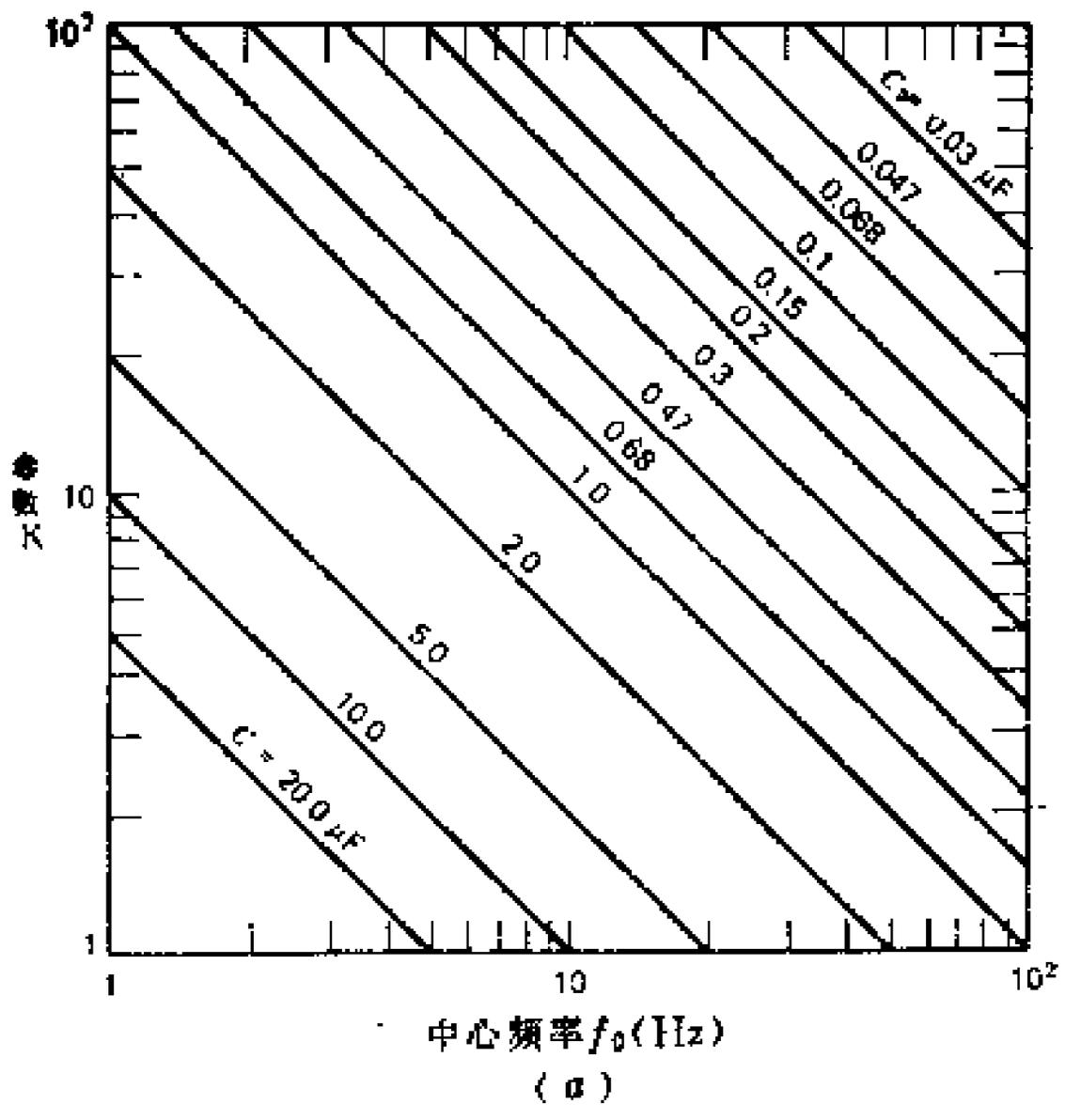
给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 和 Q (或带宽 $B=f_0/Q$)，对于二阶滤波器或级联高阶滤波器相同的每一节，按下面步骤进行设计：

1. 选择电容 C 的值，由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可以从图4—14a、b或c查得。

2. 从表4—2~4—9适当的一个表中查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况，因此必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。



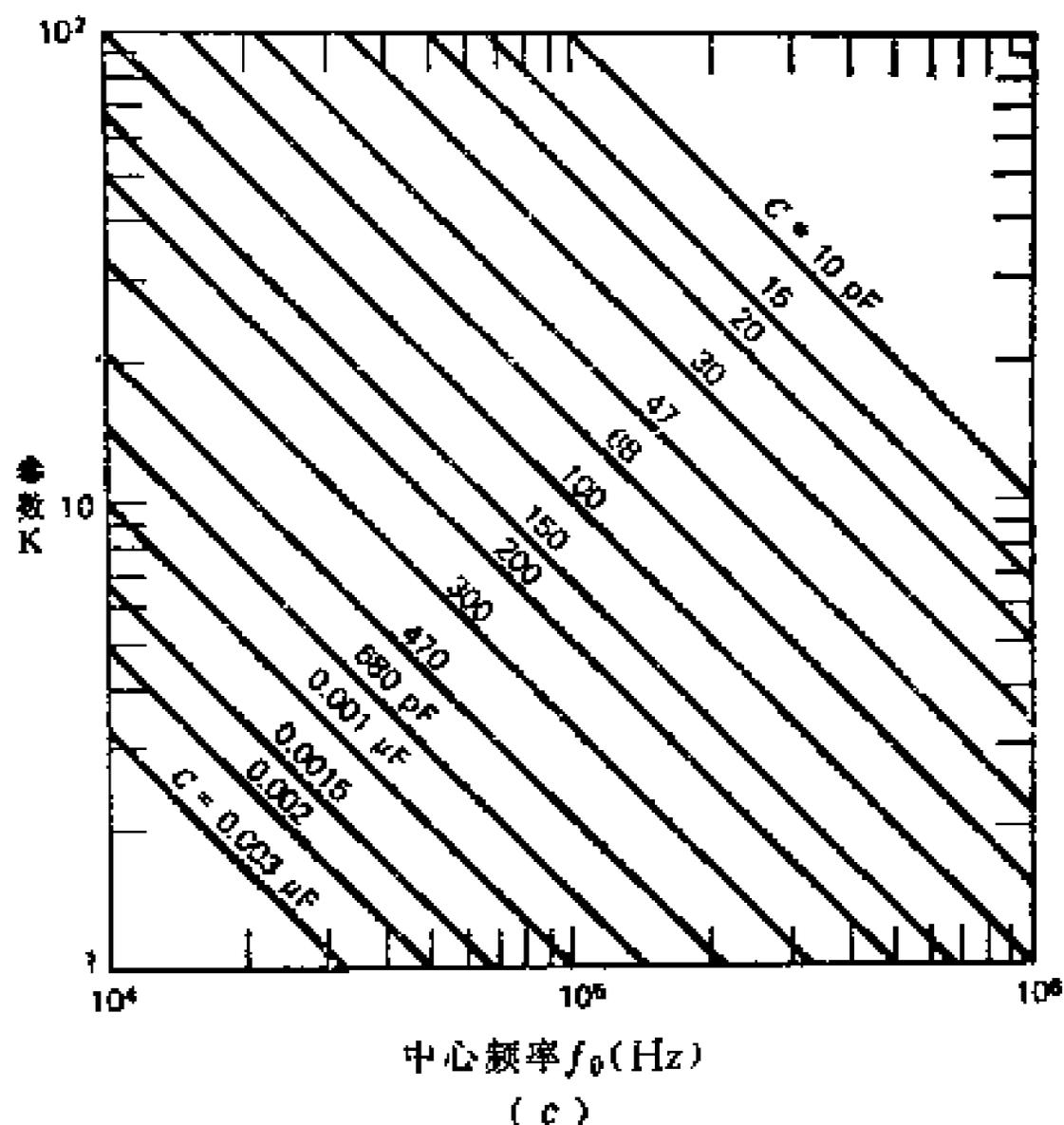


图 4-14 参数 K 和频率的关系

3. 按标准选择所用的电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值，按通用电路制作滤波器或它的每一节。

注 释 和 建 议

(a) 表中 R_4 和 R_5 值的选定，是为了把运算放大器的直流失调减到最小。只要保持比值 R_5/R_4 和表中得出的数值相同， R_4 和 R_5 也可以选用其他的阻值。

(b) 通常使用容差为 5% 的标称值电阻就可以获得满意的结果。在所有情况下，为获得最佳的性能，都应选用和表中查得的数值尽可能接近的电阻。

就电容而论，为得到最佳的结果，应当用容差为 5% 的电容。因为精密电容价格较贵，总是希望使用容差较大的电容，这时通常需要进行调整。在大多数情况下，用容差为 10% 的电

容常常就满足要求了。

(c) 用一个电位器代替电阻 R_4 和 R_5 可将滤波器的增益调整到正确的值。为此将电位器中心抽头接到运算放大器反相输入端。用这种调节方法可以使中心频率 f_0 固定不变而改变带宽 (或 Q)。

(d) 运算放大器的开环增益至少应是滤波器在通带最高频率 f_0 处的增益的 50 倍, 而且, 在 f_0 处要求的峰-峰电压值不应超过运算放大器压摆率和 $10^6/\pi f_0$ 的乘积。因而, 当 f_0 较高时, 可能要用外部补偿的运算放大器。

(e) n 个相同节级联后的 Q 值和带宽由表 4-1 给出 ($n = 1, 2, 3, 4, 5$)。

具体的二阶压控电压源的设计例子已在 4.3 节给出。

表 4-2 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 1$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	3.183	1.592	0.796	0.531	0.398	0.318
R_2	2.251	3.183	5.668	8.550	11.578	14.669
R_3	1.741	1.592	1.019	0.671	0.486	0.377
R_4, R_5	4.502	6.366	11.336	17.110	23.156	29.338

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4-3 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 2$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	6.366	3.183	1.592	1.061	0.796	0.637
R_2	2.251	2.684	3.741	4.993	6.366	7.811
R_3	1.367	1.342	1.178	0.972	0.796	0.661
R_4, R_5	4.501	5.368	7.482	9.986	12.732	15.622

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—4 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 3$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	9.549	4.775	2.387	1.592	1.194	0.955
R_2	2.251	2.532	3.183	3.939	4.775	5.668
R_3	1.276	1.266	1.194	1.079	0.955	0.840
R_4, R_5	4.502	5.064	6.366	7.878	9.550	11.336

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—5 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 4$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	12.732	6.366	3.183	2.122	1.592	1.273
R_2	2.251	2.459	2.925	3.456	4.039	4.667
R_3	1.235	1.229	1.189	1.120	1.035	0.946
R_4, R_5	4.502	4.918	5.850	6.912	8.078	9.334

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—6 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 5$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	15.915	7.958	3.979	2.653	1.989	1.592
R_2	2.251	2.416	2.778	3.183	3.626	4.100
R_3	1.211	1.208	1.183	1.137	1.077	1.010
R_4, R_5	4.502	4.832	5.556	6.366	7.252	8.200

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4-7 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 6$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	19.099	9.549	4.775	3.183	2.387	1.910
R_2	2.251	2.387	2.684	3.010	3.363	3.741
R_3	1.196	1.194	1.176	1.144	1.100	1.049
R_4, R_5	4.502	4.774	5.368	6.020	6.726	7.482

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4-8 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 8$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	25.465	12.732	6.366	4.244	3.183	2.546
R_2	2.251	2.352	2.569	2.802	3.052	3.318
R_3	1.177	1.176	1.167	1.148	1.123	1.090
R_4, R_5	4.502	4.704	5.138	5.604	6.104	6.636

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

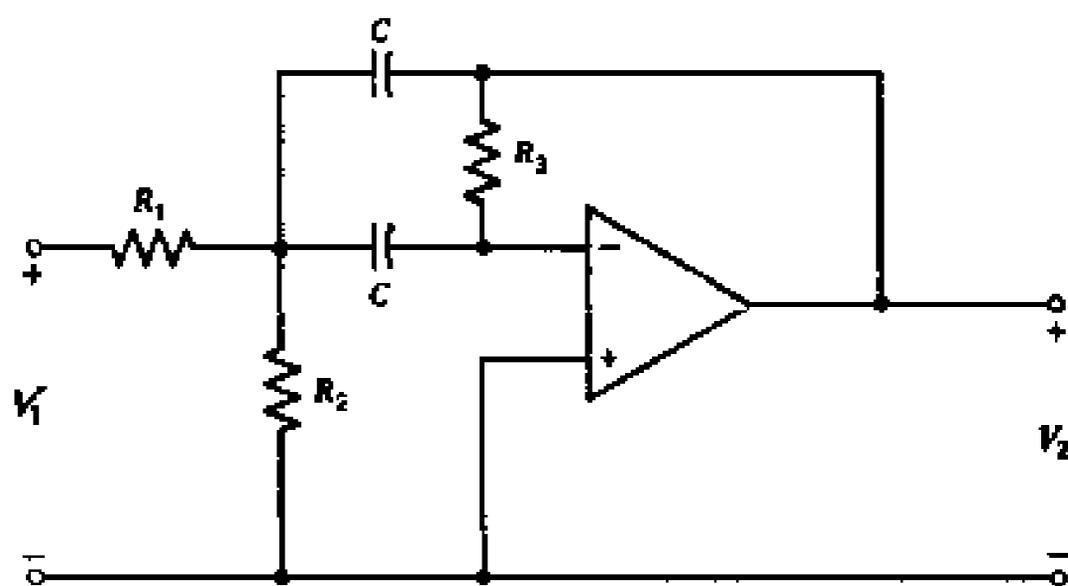
表 4-9 二阶压控电压源带通滤波器设计表 ($Q = 10$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	31.831	15.915	7.958	5.305	3.979	3.183
R_2	2.251	2.332	2.502	2.684	2.876	3.078
R_3	1.167	1.166	1.160 [†]	1.148	1.131	1.110
R_4, R_5	4.502	4.664	5.004	5.368	5.752	6.156

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

4.10 无限增益多路反馈带通滤波器

设计程序摘要 ($Q \leq 10$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz), 增益 G 和 Q (或带宽 $B=f_0/Q$), 对于二阶滤波器或级联高阶滤波器相同的每一节, 按下面的步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图4—14a、b或c查出。

2. 从表4—10~4—17适当的一个表中查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况, 因此, 必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K , 才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用的电阻值, 这些值应尽可能接近由查

表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的每一节。

注 释 和 建 议

4.9节对于压控电压源带通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) b、d和e条可直接应用。

(b) a和c条不适用。

另外，还需应用下面两条：

(c) 滤波器的反相增益是 $R_3/2R_1$ 。用一个电位器代替 R_1 即可调整增益。不过，这将影响 f_0 。改变 R_3 将影响 Q (或 B)。

(d) 为了把直流失调减到最小，在同相输入端和地之间接一个等于 R_3 的电阻。

表 4—10 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 2$)

增益	电路元件值*					
	1	2	3	6	8	
R_1	3.183	1.592	1.061	0.796	0.531	0.398
R_2	0.455	0.531	0.637	0.796	1.592	Open
R_3	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—11 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 3$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	4.775	2.387	1.194	0.796	0.597	0.477
R_2	0.281	0.298	0.341	0.398	0.477	0.597
R_3	9.549	9.549	9.549	9.549	9.549	9.549

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—12 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 4$)

		电路元件值*					
增益		1	2	4	6	8	10
R_1		6.366	3.183	1.592	1.061	0.796	0.637
R_2		0.205	0.212	0.227	0.245	0.265	0.289
R_3		12.732	12.732	12.732	12.732	12.732	12.732

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—13 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 5$)

		电路元件值*					
增益		1	2	4	6	8	10
R_1		7.958	3.979	1.989	1.326	0.995	0.796
R_2		0.162	0.166	0.173	0.181	0.189	0.199
R_3		15.915	15.915	15.915	15.915	15.915	15.915

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—14 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 6$)

		电路元件值*					
增益		1	2	4	6	8	10
R_1		9.549	4.775	2.387	1.592	1.194	0.955
R_2		0.134	0.136	0.140	0.145	0.149	0.154
R_3		19.099	19.099	19.099	19.099	19.099	19.099

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—15 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 7$)

		电路元件值*					
增益		1	2	4	6	8	10
R_1		11.141	5.570	2.785	1.857	1.393	1.114
R_2		0.115	0.116	0.119	0.121	0.124	0.127
R_3		22.282	22.282	22.282	22.282	22.282	22.282

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—16 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 8$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	12.732	6.336	3.183	2.122	1.592	1.273
R_2	0.100	0.101	0.103	0.104	0.106	0.108
R_3	25.465	25.465	25.465	25.465	25.465	25.465

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

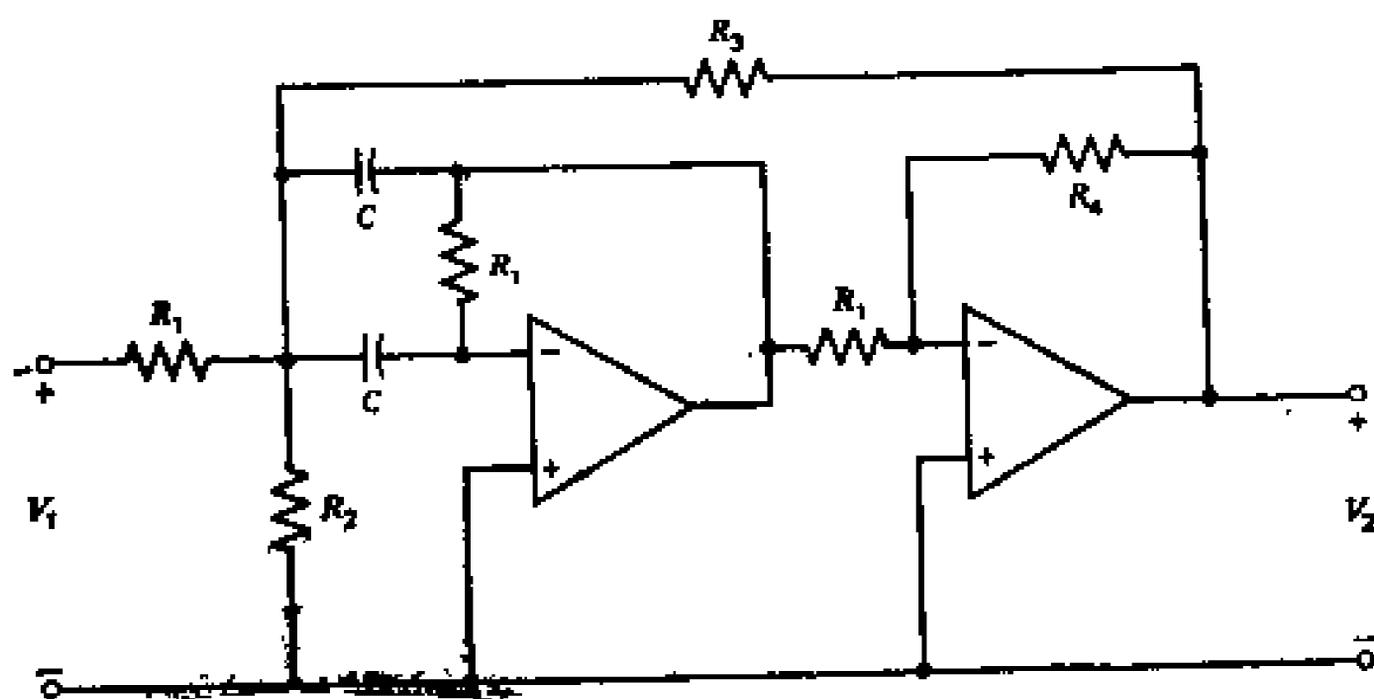
表 4—17 二阶无限增益多路反馈带通滤波器设计表 ($Q = 10$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	15.915	7.958	3.979	2.653	1.989	1.592
R_2	0.080	0.080	0.081	0.082	0.083	0.084
R_3	31.831	31.831	31.831	31.831	31.831	31.831

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

4.11 正反馈带通滤波器设计程序

摘要 ($Q \leq 50$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 和 Q (或带宽 $B=f_0/Q$)，对于二阶滤波器或级联高阶滤波器相同的每一节，按下面步骤进行设计：

1. 选择电容 C 的值，按下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可从图4—14a、b或c中查出。

2. 从表4—18~4—27适当的一个表中查出电阻值，表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况，因此必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的每一节。

注释和建议

4.9节对压控电压源带通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) b、d和e条可直接应用。

(b) a和c条不适用。

另外，还需应用下面两条：

(c) 改变 R_3 或 R_4 时，可使 Q 值(因而也即 B)在一定的范围变化，而不致对 f_0 有明显的影晌。

(d) 为了把直流失调减到最小，可用分别等于 R_1 和 $R_1 R_4 / (R_1 + R_4)$ 的电阻连接在相应的运算放大器同相输入端到地之间。

关于正反馈带通滤波器的讨论已在4.5节给出。

表 4—18 二阶正反馈带通滤波器设计表($Q = 5$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	3.559	3.559	2.516	2.906	2.516	2.251
R_2	6.742	1.572	14.903	1.831	3.016	5.729
R_3	1.025	2.050	1.890	3.894	3.781	3.707
R_4	1.592	3.183	3.183	6.366	6.366	6.366

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—19 二阶正反馈带通滤波器设计表($Q = 10$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	5.033	5.033	3.559	2.906	3.559	3.183
R_2	1.369	0.794	1.767	4.310	1.184	1.516
R_3	0.945	1.890	1.792	1.751	3.584	3.537
R_4	1.592	3.183	3.183	3.183	6.366	6.366

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—20 二阶正反馈带通滤波器设计表($Q = 15$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	6.164	4.359	4.359	3.559	3.082	2.757
R_2	0.850	2.862	1.087	1.843	3.284	7.492
R_3	0.914	0.876	1.751	1.720	1.701	1.689
R_4	1.592	1.592	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—21 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 20$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	7.118	5.033	5.033	4.109	3.559	3.183
R_2	0.644	1.585	0.827	1.264	1.884	2.894
R_3	0.896	0.864	1.728	1.701	1.686	1.675
R_4	1.592	1.592	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—22 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 25$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	7.958	5.627	5.627	4.594	3.979	3.559
R_2	0.531	1.142	0.685	0.996	1.384	1.909
R_3	0.884	0.856	1.713	1.689	1.675	1.666
R_4	1.592	1.592	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—23 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 30$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	7.797	5.513	6.164	5.033	4.359	3.898
R_2	0.663	1.941	0.594	0.838	1.122	1.471
R_3	0.693	0.676	1.701	1.680	1.668	1.659
R_4	1.273	1.273	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—24 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 35$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	7.688	5.436	6.658	5.436	4.708	4.211
R_2	0.869	5.911	0.530	0.733	0.957	1.219
R_3	0.570	0.558	1.693	1.673	1.662	1.654
R_4	1.061	1.061	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—25 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 40$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	8.219	5.812	5.033	5.812	5.033	4.502
R_2	0.735	3.093	1.720	0.657	0.844	1.054
R_3	0.567	0.556	0.829	1.668	1.657	1.650
R_4	1.061	1.061	1.592	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—26 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 45$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	8.071	7.549	5.338	4.359	5.338	4.775
R_2	1.013	0.603	1.408	3.664	0.760	0.936
R_3	0.482	0.840	0.827	0.821	1.653	1.646
R_4	0.909	1.592	1.592	1.592	3.183	3.183

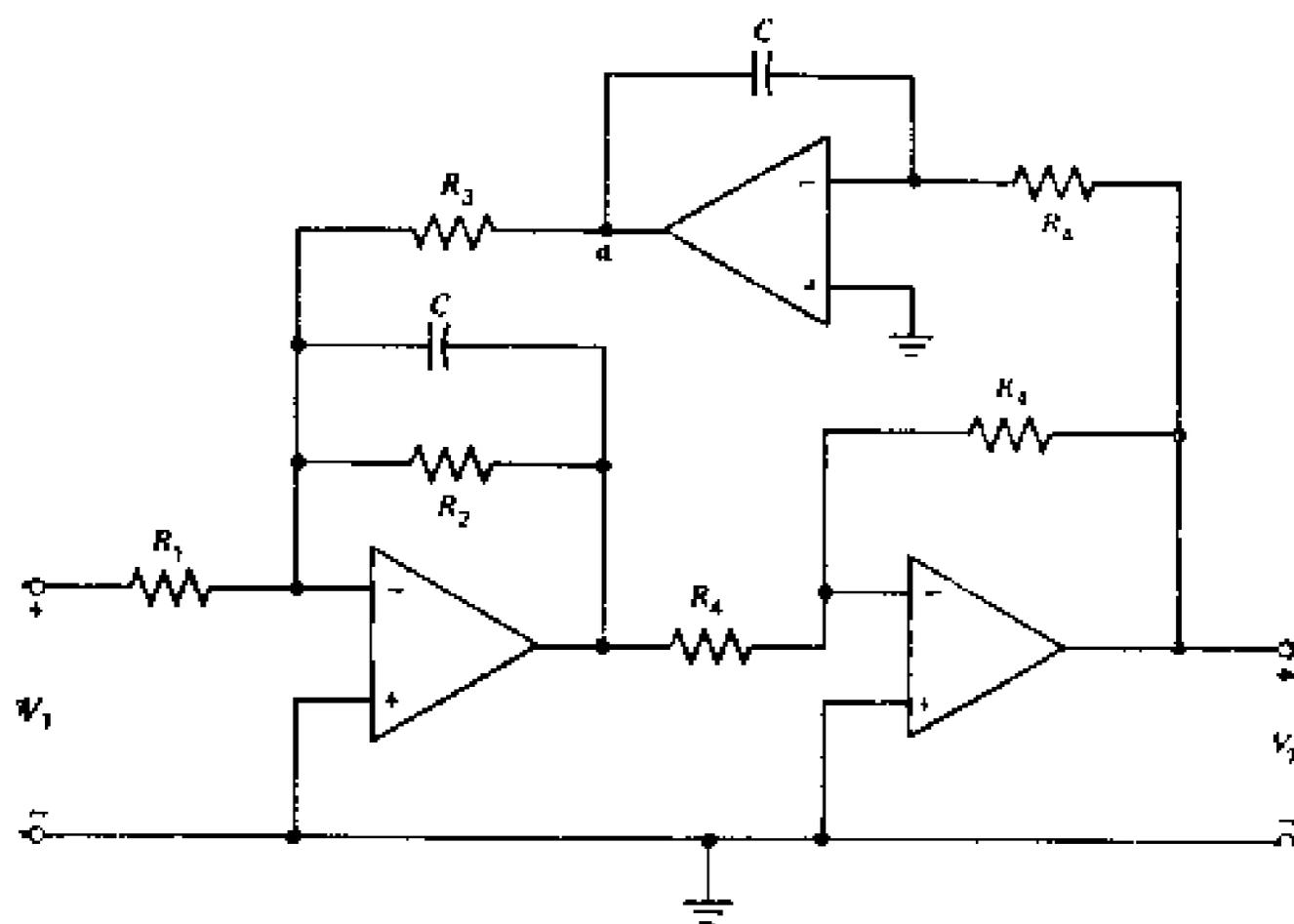
*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4-27 二阶正反馈带通滤波器设计表 ($Q = 50$)

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	8.507	7.958	5.627	4.594	5.627	5.033
R_2	0.863	0.549	1.203	2.661	0.696	0.848
R_3	0.480	0.838	0.825	0.819	1.650	1.644
R_4	0.909	1.592	1.592	1.592	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

4.12 双二次带通滤波器设计程序 摘要 ($Q \leq 100$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 、阶数 n 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应),对二阶滤波器或四阶级联滤波器的每一节,按下面步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值,由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图4—14a、b或c中查出。对于四阶滤波器设计,因为要求较高的精度,用公式计算较好。

2. 从表4—28~4—34适当的一个表中查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K=1$ 的情况,因此必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ,才能得到电路的实际电阻值。表中的 G 是单节的增益。对于四阶滤波器,它的增益是两级增益的积;两级的增益不必相等,这可由设计人员选择。

3. 按标准选择所用电阻值,这些值应尽可能接近由查表得到的数值。按通用电路制作滤波器或它的每一节。

注释和建议

4.9节对压控电压源带通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下:

(a) a和c条不适用。

(b) b条适用。但在四阶时,电阻应该用容差为2%的,电容容差最大不应超过5%。

(c) 除有关运算放大器开环增益的说明不是必须满足的以外,d条也适用。

此外，还需应用下面两条：

(d) 单节增益为 R_2/R_1 。如果要求相同大小的反相增益，则输出可从 a 点取出。

(e) 滤波器的响应可以方便地通过改变 R_1 、 R_2 和 R_3 加以调整。改变 R_1 影响增益，改变 R_2 影响 Q ，改变 R_3 则使 f_0 发生变化。

具体的例子已于 4.6 节给出。

表 4—28 二阶双二次带通
滤波器设计表

电 路 元 件 值*	
R_1	$1.592Q/G$
R_2	$1.592Q$
R_3, R_4	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。 G = 增益， Q = 滤波器品质因数

表 4-29 四阶双二次巴特沃斯级联带通滤波器设计表

电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	3.183/G	6.366/G	9.549/G	12.732/G	15.915/G	31.831/G	47.746/G	63.662/G	79.577/G	1
R_2	3.826	8.272	12.753	17.244	21.739	44.234	66.351	89.243	111.750	
R_3, R_4	1.114	1.333	1.414	1.457	1.483	1.536	1.536	1.564	1.569	
R_1	3.183/G	6.366/G	9.549/G	12.732/G	15.915/G	31.831/G	47.746/G	63.662/G	79.577/G	2
R_2	5.468	9.876	14.350	18.839	23.333	45.826	68.739	90.835	113.341	
R_3, R_4	2.275	1.900	1.791	1.739	1.708	1.649	1.649	1.620	1.614	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益之积。

表 4-30 四阶0.1dB双二次切比雪夫级联带通滤波器设计表

电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	1.749/G	3.497/G	5.246/G	6.995/G	8.744/G	17.487/G	26.231/G	34.974/G	43.718/G	1
R_2	2.005	4.580	7.222	9.883	12.553	25.943	39.351	52.765	66.181	
R_3, R_4	0.787	1.125	1.264	1.339	1.386	1.485	1.520	1.538	1.548	
R_1	1.749/G	3.497/G	5.246/G	6.995/G	8.744/G	17.487/G	26.231/G	34.974/G	43.718/G	2
R_2	4.056	6.482	9.096	11.748	14.413	27.797	41.205	54.619	68.034	
R_3, R_4	3.219	2.252	2.005	1.892	1.827	1.705	1.667	1.647	1.636	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益的积。

表 4-31 四阶0.5dB双二次切比雷夫级联带通滤波器设计表

电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	2.585/G	5.170/G	7.755/G	10.340/G	12.925/G	25.851/G	38.776/G	51.701/G	64.627/G	1
R_2	3.581	7.939	12.364	16.808	21.261	43.562	65.881	88.204	110.529	
R_3, R_4	0.961	1.238	1.346	1.404	1.439	1.514	1.539	1.552	1.560	
R_1	2.585/G	5.170/G	7.755/G	10.340/G	12.925/G	25.851/G	38.776/G	51.701/G	64.627/G	2
R_2	5.930	10.207	14.618	19.057	23.507	45.805	68.123	90.446	112.771	
R_3, R_4	2.635	2.046	1.882	1.804	1.760	1.673	1.646	1.632	1.624	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益之积。

表 4-32 四阶1dB双二次切比雷夫级联带通滤波器设计表

电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	3.032/G	6.063/G	9.095/G	12.126/G	15.158/G	30.315/G	45.473/G	60.630/G	75.788/G	1
R_2	4.753	10.436	16.192	21.970	27.756	56.725	85.712	114.705	143.699	
R_3, R_4	1.017	1.272	1.371	1.423	1.455	1.522	1.545	1.556	1.563	
R_1	3.032/G	6.063/G	9.095/G	12.126/G	15.158/G	30.315/G	45.473/G	60.630/G	75.788/G	2
R_2	7.438	13.054	18.798	24.571	30.355	59.321	88.308	117.300	146.295	
R_3, R_4	2.491	1.991	1.848	1.780	1.741	1.664	1.640	1.628	1.620	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益之积。

表 4-33 四阶2dB双二次切比雪夫级联带通滤波器设计表

电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	3.509/G	7.017/G	10.526/G	14.035/G	17.544/G	35.087/G	52.631/G	70.175/G	87.718/G	1
R_2	6.599	14.383	22.254	30.149	38.053	77.621	117.210	156.805	196.401	
R_3, R_4	1.061	1.299	1.390	1.438	1.467	1.528	1.549	1.560	1.566	
R_1	3.509/G	7.017/G	10.526/G	14.035/G	17.544/G	35.087/G	52.631/G	70.175/G	87.718/G	2
R_2	9.902	17.625	25.484	33.375	41.277	80.843	120.431	160.025	199.622	
R_3, R_4	2.388	1.950	1.823	1.762	1.726	1.658	1.635	1.624	1.618	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益之积。

表 4-34 四阶3dB双二次切比雪夫级联带通滤波器设计表

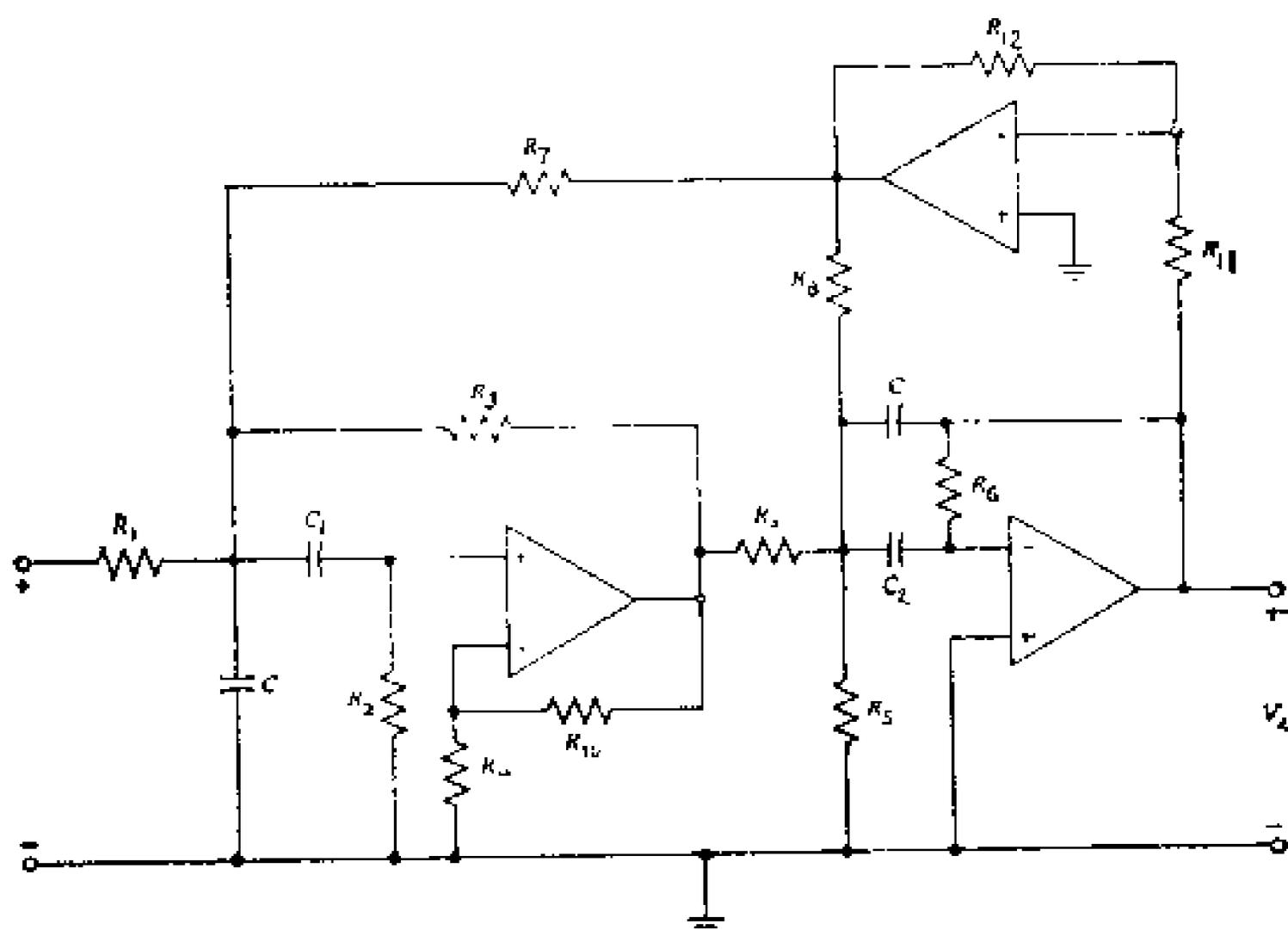
电路元件值*

Q	2	4	6	8	10	20	30	40	50	节
R_1	3.783/G	7.566/G	11.349/G	15.132/G	18.916/G	37.831/G	56.747/G	75.662/G	94.578/G	1
R_2	8.286	18.001	27.816	37.659	47.513	96.835	146.181	195.532	244.886	
R_3, R_4	1.080	1.311	1.398	1.444	1.473	1.531	1.551	1.561	1.567	
R_1	3.783/G	7.566/G	11.349/G	15.132/G	18.916/G	37.831/G	56.747/G	75.662/G	94.578/G	2
R_2	12.207	21.858	31.662	41.500	51.352	100.672	150.017	199.369	248.724	
R_3, R_4	2.345	1.933	1.812	1.754	1.720	1.655	1.633	1.623	1.616	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 在滤波器中心频率的单节增益。总增益是各节增益之积。

4.13 四阶多路反馈带通滤波器

设计程序摘要 ($Q \leq 10$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 Hz、增益 G 和滤波器类型（巴特沃斯或切比雪夫响应），按下面步骤进行设计：

1. 选择电容 C 的值，由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。

2. 从下面表 4—35~4—58 适当的一个表中查出其余元件值。除 C 以外的其他电容值，可利用选定的 C 值由设计表直接得出。表中的电阻值是对应于 $K=1$ 的情况，因此必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器。表中其余的电容值都是 C 的某一个倍数，如 0.47 等。因此，如果 C 选择为 $10\mu\text{F}$ 的某一次幂（即 0.1, 1, 10 等），则得出的也是标称电容值。

注释和建议

4.9 节对压控电压源带通滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) a 条和 c 条适用，只是 R_4 和 R_5 应改为 R_9 和 R_{10} 。

(b) b 条适用，但这时电阻必须使用容差为 2% 的，而且电容最大容差不应超过 5%。

(c) 除有关运算放大器开环增益的说明外，d 条也适用。

(d) e 条不适用。

具体的例子已在 4.7 节给出。

表 4—35 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 1$)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	4.522	4.862	5.160	3.113
R_2	9.115	11.021	12.802	18.977
R_3	3.404	4.168	5.155	4.048
R_4	1.347	0.680	0.268	0.236
R_5	0.269	0.223	0.526	0.392
R_6	2.142	2.040	1.769	1.709
R_7	9.773	10.211	5.481	8.563
R_8	40.135	29.378	3.283	6.313
R_9	15.603	17.865	18.416	28.974
R_{10}	21.922	28.771	42.000	54.999
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	70.271	55.942	10.902	22.502
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—36 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 2$)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	12.285	6.215	3.200	2.419
R_2	8.021	9.756	11.835	13.898
R_3	2.749	2.505	2.910	2.958
R_4	1.743	1.720	1.383	1.215
R_5	0.263	0.259	0.246	0.237
R_6	2.267	2.265	2.259	2.278
R_7	6.944	6.851	7.119	6.760
R_8	15.040	14.998	11.280	9.179
R_9	15.222	18.548	19.134	21.209
R_{10}	16.954	20.581	31.022	40.321
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	76.349	76.125	57.064	45.562
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—37 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 3$)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	25.898	13.648	6.059	3.656
R_2	8.310	8.680	8.885	11.625
R_3	2.421	2.459	3.111	2.659
R_4	1.701	1.669	1.591	1.544
R_5	0.260	0.259	0.253	0.238
R_6	2.272	2.272	2.300	2.335
R_7	6.591	6.748	6.694	6.523
R_8	12.867	12.565	9.683	10.123
R_9	17.224	17.376	14.665	19.505
R_{10}	16.057	17.346	22.540	28.775
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	81.087	79.145	59.914	61.174
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—38 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 4$)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	28.801	25.064	8.148	5.970
R_2	7.773	7.502	9.806	9.805
R_3	1.910	2.658	2.253	2.685
R_4	2.499	1.707	1.648	1.566
R_5	0.340	0.269	0.262	0.262
R_6	2.233	2.283	2.271	2.210
R_7	6.403	6.803	6.825	6.734
R_8	12.354	10.725	11.495	9.458
R_9	17.790	14.254	19.729	17.311
R_{10}	13.803	15.839	19.495	22.612
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	88.402	73.947	79.663	67.763
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—39 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 5$)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	61.539	31.580	12.534	9.025
R_2	7.779	7.903	8.784	8.558
R_3	2.196	2.268	2.354	2.792
R_4	1.907	1.924	1.684	1.609
R_5	0.285	0.272	0.266	0.266
R_6	2.272	2.335	2.272	2.224
R_7	6.904	6.673	6.886	6.858
R_8	12.082	11.874	10.959	9.251
R_9	16.895	16.506	17.571	15.178
R_{10}	14.416	15.165	17.564	19.620
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	88.456	84.109	80.046	69.293
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—40 四阶多路反馈巴特沃斯带通滤波器设计表 ($Q = 10$)

增益	电路元件值*		
	2	6	10
R_1	584.854	199.060	78.575
R_2	17.249	17.396	15.143
R_3	3.530	3.417	2.711
R_4	0.449	0.436	0.633
R_5	0.375	0.432	0.670
R_6	2.265	2.231	2.204
R_7	17.470	16.373	16.345
R_8	10.394	8.835	7.744
R_9	33.352	33.894	30.837
R_{10}	35.725	35.737	29.753
R_{11}	10.000	10.000	10.000
R_{12}	61.708	53.624	47.641
C_1	0.3C	0.3C	0.3C
C_2	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—41 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(0.1dB, Q = 1)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	2.758	2.109	1.952	1.872
R_2	4.852	6.751	10.539	13.735
R_3	2.611	2.400	2.599	2.717
R_4	0.633	0.425	0.164	0.107
R_5	0.225	0.211	0.198	0.189
R_6	2.288	2.268	2.239	2.240
R_7	17.513	16.561	18.216	18.732
R_8	7.060	7.124	7.381	7.428
R_9	8.629	11.780	17.504	22.181
R_{10}	11.083	15.812	16.490	36.073
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	40.933	39.725	37.478	35.811
C_1	3C	3C	3C	3C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—42 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(0.1dB, Q = 2)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	15.784	7.352	3.810	3.242
R_2	2.943	3.310	4.877	6.391
R_3	2.342	2.239	2.387	2.463
R_4	0.405	0.433	0.295	0.212
R_5	0.367	0.373	0.332	0.294
R_6	2.268	2.267	2.235	2.229
R_7	15.831	15.738	15.759	15.896
R_8	5.931	5.906	5.727	5.764
R_9	5.648	6.371	8.917	11.528
R_{10}	6.145	6.891	10.765	14.343
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	44.384	44.493	42.383	41.701
C_1	3C	3C	3C	3C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—43 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.1dB, Q = 3)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	75.960	35.919	7.233	7.126
R_2	4.423	4.477	4.772	6.032
R_3	3.438	3.362	2.664	3.120
R_4	0.204	0.216	0.346	0.217
R_5	0.335	0.346	0.423	0.346
R_6	2.255	2.213	2.214	2.214
R_7	16.034	16.073	15.824	15.985
R_8	5.933	5.922	5.924	5.919
R_9	7.949	8.048	8.807	10.874
R_{10}	9.969	10.092	10.414	13.550
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	41.810	41.890	43.067	41.852
C_1	2C	2C	2C	2C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—44 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.1dB, Q = 4)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	188.432	66.373	23.131	16.567
R_2	5.064	4.480	4.939	5.627
R_3	3.828	3.309	3.335	3.547
R_4	0.148	0.206	0.198	0.167
R_5	0.293	0.353	0.347	0.316
R_6	2.212	2.212	2.212	2.213
R_7	16.060	16.019	16.043	16.070
R_8	5.533	5.572	5.567	5.546
R_9	9.023	8.101	8.920	10.076
R_{10}	11.543	10.025	11.069	12.743
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	41.355	42.134	42.031	41.601
C_1	2C	2C	2C	2C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—45 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.1dB, Q = 5)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	162.467	125.704	45.556	27.218
R_2	3.986	4.806	5.175	5.421
R_3	2.949	3.510	3.632	3.599
R_4	0.259	0.171	0.158	0.159
R_5	0.411	0.330	0.316	0.315
R_6	2.212	2.212	2.211	2.212
R_7	16.052	16.114	16.141	16.120
R_8	5.392	5.357	5.330	5.342
R_9	7.299	8.658	9.263	9.722
R_{10}	8.782	10.800	11.725	12.254
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	42.704	41.892	41.603	41.685
C_1	2C	2C	2C	2C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—46 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.1dB, Q = 10)

增益	电路元件值*		
	2	6	10
R_1	415.648	20.759	76.788
R_2	4.494	2.617	4.521
R_3	3.141	1.656	3.012
R_4	0.202	1.258	0.216
R_5	0.362	0.760	0.372
R_6	2.231	2.234	2.230
R_7	16.681	16.461	16.702
R_8	5.308	5.575	5.403
R_9	8.251	5.109	8.383
R_{10}	9.868	5.363	9.812
R_{11}	10.000	10.000	10.000
R_{12}	44.450	48.442	45.307
C_1	2C	2C	2C
C_2	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—47 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.5dB, Q = 1)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	1.049	1.231	7.484	3.898
R_2	13.935	12.851	7.285	15.171
R_3	1.581	1.546	7.867	5.913
R_4	3.965	1.491	0.161	0.140
R_5	0.107	0.108	3.792	1.722
R_6	3.829	3.857	1.783	1.678
R_7	9.805	17.427	36.967	19.948
R_8	5.334	6.191	11.229	8.882
R_9	23.292	23.580	9.474	21.893
R_{10}	34.686	28.243	31.532	49.405
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	10.710	11.830	10.658	10.723
C_1	C	C	0.5C	0.5C
C_2	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—48 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.5dB, Q = 2)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	2.440	3.028	3.319	3.492
R_2	7.293	6.655	6.921	9.338
R_3	1.344	1.432	1.488	1.651
R_4	5.149	1.959	0.566	0.330
R_5	0.190	0.173	0.184	0.113
R_6	3.364	3.567	3.470	3.903
R_7	5.787	10.547	37.653	22.441
R_8	3.886	4.896	10.254	11.716
R_9	15.576	15.240	16.988	22.228
R_{10}	13.713	11.814	11.679	16.103
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	16.464	18.642	37.220	31.231
C_1	C	C	C	C
C_2	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—49 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.5dB, Q = 3)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	2.741	2.411	2.267	2.024
R_2	6.422	7.441	8.360	10.592
R_3	1.427	1.357	1.469	1.482
R_4	11.936	6.658	2.366	1.646
R_5	0.277	0.255	0.215	0.180
R_6	2.799	2.771	2.778	2.761
R_7	3.168	3.333	4.764	4.314
R_8	2.517	2.666	2.976	3.024
R_9	11.885	13.995	15.696	19.300
R_{10}	13.971	15.891	17.886	23.476
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	13.970	14.365	15.045	14.748
C_1	C	C	C	C
C_2	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—50 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (0.5dB, Q = 4)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	5.908	4.336	2.975	2.238
R_2	6.370	5.637	6.205	6.749
R_3	1.554	1.639	1.899	2.075
R_4	10.301	6.891	3.735	3.329
R_5	0.278	0.289	0.256	0.247
R_6	2.597	2.556	2.565	2.562
R_7	2.214	3.546	4.458	4.755
R_8	2.704	2.870	2.809	2.681
R_9	11.358	10.198	10.360	10.526
R_{10}	14.505	12.603	15.475	18.809
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	15.647	16.885	15.987	15.165
C_1	C	C	C	C
C_2	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—51 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(0.5dB, Q = 5)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	14.871	5.865	3.190	2.169
R_2	5.298	5.383	5.927	6.733
R_3	1.727	1.805	1.986	2.136
R_4	6.064	7.535	5.727	5.717
R_5	0.271	0.262	0.270	0.261
R_6	2.456	2.277	2.464	2.461
R_7	3.269	6.817	4.063	4.166
R_8	3.578	11.867	3.492	3.481
R_9	9.867	10.206	9.577	10.153
R_{10}	11.440	11.390	15.555	19.990
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	21.494	75.870	20.898	20.752
C_1	C	C	C	C
C_2	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—52 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(0.5dB, Q = 10)

增益	电路元件值*		
	2	6	10
R_1	406.471	132.119	66.445
R_2	17.542	17.627	15.790
R_3	3.577	3.409	3.005
R_4	0.426	0.432	0.512
R_5	0.371	0.431	0.631
R_6	2.266	2.232	2.209
R_7	17.587	16.383	16.409
R_8	10.345	8.867	7.402
R_9	33.917	34.429	31.027
R_{10}	36.336	36.118	32.153
R_{11}	10.000	10.000	10.000
R_{12}	61.134	53.596	45.324
C_1	0.3C	0.3C	0.3C
C_2	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—53 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (1dB, Q = 1)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	7.534	5.221	4.713	4.784
R_2	6.095	7.697	11.119	13.699
R_3	5.212	3.306	4.147	4.799
R_4	0.699	0.514	0.207	0.128
R_5	0.444	0.435	0.464	0.622
R_6	2.199	2.170	2.171	2.152
R_7	16.484	16.795	19.382	20.470
R_8	11.968	11.760	11.957	11.438
R_9	10.816	13.451	18.317	21.876
R_{10}	13.963	17.995	28.294	36.655
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	40.625	39.775	36.167	33.652
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—54 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (1dB, Q = 2)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	78.639	40.658	12.875	8.019
R_2	6.431	6.854	7.866	9.211
R_3	3.803	3.827	3.655	3.539
R_4	0.270	0.259	0.273	0.262
R_5	0.413	0.401	0.409	0.400
R_6	2.212	2.212	2.212	2.211
R_7	16.328	16.251	16.185	16.117
R_8	6.811	6.866	6.851	6.856
R_9	11.339	12.142	13.958	16.354
R_{10}	14.857	15.736	18.023	21.091
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	40.856	41.100	41.105	41.069
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—55 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(1dB, Q = 3)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	270.356	124.860	43.315	22.242
R_2	8.411	7.751	8.370	8.298
R_3	4.166	4.167	4.194	3.827
R_4	0.167	0.189	0.181	0.208
R_5	0.329	0.350	0.342	0.399
R_6	2.213	2.211	2.211	2.202
R_7	16.064	16.075	16.056	16.524
R_8	6.179	5.930	5.941	5.998
R_9	15.512	13.808	14.938	15.003
R_{10}	18.375	17.668	19.035	18.567
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	42.840	41.272	41.311	42.072
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—56 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表(1dB, Q = 4)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	560.326	284.742	77.921	57.394
R_2	8.660	8.741	8.379	9.226
R_3	4.544	4.540	4.079	4.529
R_4	0.147	0.147	0.174	0.146
R_5	0.305	0.305	0.354	0.304
R_6	2.211	2.211	2.206	2.211
R_7	16.086	16.075	16.282	16.076
R_8	5.540	5.544	5.662	5.529
R_9	15.425	15.585	15.276	16.417
R_{10}	19.744	19.905	18.557	21.062
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	41.290	41.319	42.433	41.208
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—57 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (1dB, Q = 5)

增益	电路元件值*			
	1	2	6	10
R_1	864.692	419.459	138.962	86.747
R_2	8.591	8.522	8.666	8.951
R_3	4.449	4.388	4.367	4.436
R_4	0.151	0.155	0.156	0.150
R_5	0.312	0.318	0.318	0.311
R_6	2.212	2.212	2.212	2.211
R_7	16.155	16.155	16.118	16.113
R_8	5.360	5.369	5.366	5.344
R_9	15.366	15.267	15.535	15.999
R_{10}	19.487	19.289	19.601	20.319
R_{11}	10.000	10.000	10.000	10.000
R_{12}	41.655	41.731	41.713	41.538
C_1	C	C	C	C
C_2	C	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

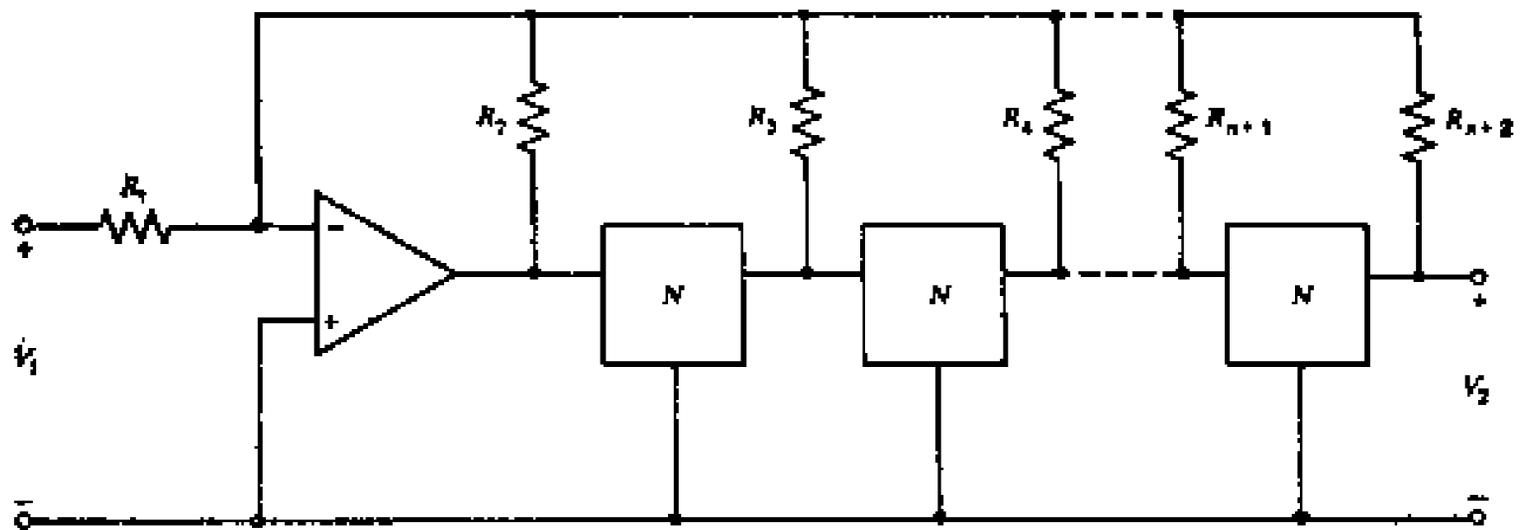
表 4—58 四阶多路反馈切比雪夫带通滤波器设计表 (1dB, Q = 10)

增益	电路元件值*		
	6	10	20
R_1	295.988	232.683	143.686
R_2	7.041	7.711	8.248
R_3	3.260	3.612	4.019
R_4	0.272	0.212	0.178
R_5	0.392	0.368	0.345
R_6	2.251	2.237	2.214
R_7	17.104	16.781	16.292
R_8	5.948	5.530	5.110
R_9	13.437	14.459	14.984
R_{10}	14.794	16.521	18.348
R_{11}	10.000	10.000	10.000
R_{12}	49.229	46.011	42.953
C_1	C	C	C
C_2	C	C	C

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

4.14 多级谐振器型带通滤波器设计程

序摘要 (阶数 = 4, 6, 8)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 、阶数 $2n$ 和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应)，按下面步骤进行设计：

1. 从表4—59~4—61适当的一个表中查出反馈电路的电阻 R_1 、 R_2 、 \dots 、 R_{n+2} 的值和对 n 个相同的谐振器 N 中的每一个所要求的增益 K_1 和品质因素 Q_1 （须知此滤波器的阶数为 $2n$ ）。

2. 按同相增益 K_1 、品质因数 Q_1 和中心频率 f_0 设计谐振器 N 。这很容易用4—12节所述双二次带通滤波器的设计来实现。如果 $Q \leq 10$ ，在多数情况下，4.11节所述正反馈带通滤波器设计是一种合适的谐振器。在后一种情况下，使用表4—62~4—79进行谐振器设计而不用表4—18~4—27。

注释和建议

(a) 电阻 R_1, R_2, \dots, R_{n+2} 可乘以任何方便的比例系数。计算这些电阻值时不包含参数 K 。

(b) 每个谐振器可独立调整到滤波器所希望的 f_0 和所要求的 K_1 及 Q_1 值。

(c) 改变 R_1 可以调整滤波器的增益。

(d) 改变反馈电阻 R_2, R_3, \dots, R_{n+2} 可以调整通带响应。

(e) 对于四阶、六阶和八阶滤波器，电阻的容差应分别为 5%、2% 和 1%。至于电容，其百分容差应和电阻相当。

4.8 节已给出多级谐振器型带通滤波器的具体例子。

表 4-59 四阶多级谐振器型带通滤波器设计表

		电路元件值*				
		切比雪夫				
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
R_1	$10.000/G$	$3.018/G$	$6.595/G$	$9.070/G$	$12.151/G$	$14.125/G$
R_2	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
R_3	14.142	8.431	14.029	18.219	24.881	31.013
R_4	16.000	4.428	8.810	11.408	14.248	15.874
K_1	2.828	1.686	2.806	3.644	4.976	6.203
Q_1	$2.828Q$	$1.686Q$	$2.806Q$	$3.644Q$	$4.976Q$	$6.203Q$

* 电阻值单位为 $k\Omega$ ，都可乘以一个方便的比例系数。 G 和 Q 为滤波器的增益和品质因数，而 K_1 和 Q_1 是对每个谐振器要求的增益和品质因数。

表 4—60 六阶多级谐振器型带通滤波器设计表

		电路元件值*				
		切比雪夫				
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
R_1	10.000/ G	6.105/ G	13.972/ G	20.354/ G	30.591/ G	39.905/ G
R_2	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
R_3	10.000	10.316	15.963	20.236	27.107	33.487
R_4	10.000	5.918	8.753	10.058	11.285	11.916
R_5	19.286	10.448	22.691	32.294	47.508	61.305
K_1	3.000	3.095	4.789	6.071	8.132	10.046
Q_1	3.000 Q	3.095 Q	4.789 Q	6.071 Q	8.132 Q	10.046 Q

*电阻值单位为 $k\Omega$ ，都可乘以一个方便的比例系数。 G 和 Q 为滤波器的增益和品质因数，而 K_1 和 Q_1 是对每个谐振器要求的增益和品质因数。

表 4—61 八阶多级谐振器型带通滤波器设计表

		电路元件值*				
		切比雪夫				
	巴特沃斯	0.1 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB
R_1	10.000/ G	12.070/ G	26.382/ G	36.281/ G	48.599/ G	56.501/ G
R_2	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
R_3	7.654	11.088	16.703	20.991	27.925	34.389
R_4	6.695	5.842	7.612	8.343	8.991	9.311
R_5	9.262	9.344	17.284	23.251	32.661	41.243
R_6	23.200	20.523	38.385	48.451	59.130	65.128
K_1	3.061	4.435	6.681	8.396	11.170	13.756
Q_1	3.061 Q	4.435 Q	6.681 Q	8.396 Q	11.170 Q	13.756 Q

*电阻值单位为 $k\Omega$ ，都可乘以一个方便的比例系数。 G 和 Q 为滤波器的增益和品质因数，而 K_1 和 Q_1 是对每个谐振器要求的增益和品质因数。

表 4—62 四阶多级谐振器型巴特沃斯带通滤波器的正反馈谐振器设计表

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	2.828	2.828	2.828	2.828	2.828	2.828
Q_1	2.828	5.656	11.312	16.968	22.624	28.280
R_1	3.183	4.502	7.118	8.717	4.502	5.033
R_2	1.352	0.758	0.405	0.321	2.653	1.662
R_3	4.924	4.244	4.959	4.745	0.849	0.843
R_4	6.366	6.366	7.958	7.958	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—63 四阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表 (0.1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	1.686	1.686	1.686	1.686	1.686	1.686
Q_1	1.686	3.372	6.744	10.116	13.488	16.860
R_1	3.183	4.502	6.366	7.797	9.003	10.066
R_2	1.228	0.729	0.468	0.369	0.313	0.276
R_3	7.823	5.482	4.525	4.200	4.028	3.918
R_4	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—64 四阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(0.5dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	2.806	2.806	2.806	2.806	2.806	2.806
Q_1	2.806	5.612	11.224	16.836	22.448	28.060
R_1	3.183	4.502	6.366	7.797	9.003	10.066
R_2	1.351	0.758	0.477	0.373	0.316	0.278
R_3	4.946	4.255	3.873	3.725	3.642	3.587
R_4	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—65 四阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	3.644	3.644	3.644	3.644	3.644	3.644
Q_1	3.644	7.288	14.576	21.864	29.152	36.440
R_1	3.183	4.502	6.366	7.797	9.003	10.066
R_2	1.400	0.768	0.480	0.374	0.317	0.279
R_3	4.387	3.949	3.689	3.585	3.525	3.486
R_4	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366	6.366

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4--66 四阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(2dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	4.976	4.976	4.976	4.976	4.976	4.976
Q_1	4.976	9.952	19.904	29.856	39.808	49.760
R_1	3.183	4.502	4.502	3.898	4.502	5.033
R_2	1.446	0.778	1.030	12.910	2.915	1.750
R_3	3.984	3.710	1.713	0.830	0.825	0.822
R_4	6.366	6.366	3.183	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—67 四阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(3dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	6.203	6.203	6.203	6.203	6.203	6.203
Q_1	6.203	12.406	24.812	37.218	49.624	62.030
R_1	3.183	3.183	4.502	5.513	4.502	7.118
R_2	1.473	2.741	1.039	0.716	2.992	0.485
R_3	3.795	1.731	1.688	1.669	0.819	1.651
R_4	6.366	3.183	3.183	3.183	1.592	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—68 六阶多级谐振器型巴特沃斯带通滤波器的正反馈谐振器设计表

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Q_1	3.000	6.000	12.000	18.000	24.000	30.000
R_1	3.183	3.183	4.502	5.513	5.198	5.812
R_2	1.364	2.387	0.999	0.701	1.019	0.808
R_3	4.775	1.910	1.804	1.761	1.138	1.130
R_4	6.366	3.183	3.183	3.183	2.122	2.122

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—69 六阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(0.1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	3.095	3.095	3.095	3.095	3.095	3.095
Q_1	3.095	6.190	12.380	18.570	24.760	30.950
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	6.366	7.118
R_2	1.370	0.762	1.002	0.702	0.562	0.479
R_3	4.702	4.126	1.797	1.755	1.731	1.715
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—70 六阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(0.5dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	4.789	4.789	4.789	4.789	4.789	4.789
Q_1	4.789	9.578	19.156	28.734	38.312	47.890
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	6.366	7.118
R_2	1.441	0.777	1.028	0.712	0.568	0.483
R_3	4.023	3.735	1.718	1.694	1.679	1.670
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—71 六阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	6.071	6.071	6.071	6.071	6.071	6.071
Q_1	6.071	12.142	24.284	36.426	48.568	60.710
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	6.366	5.033
R_2	1.470	0.783	1.038	0.716	0.570	1.772
R_3	3.811	3.603	1.690	1.671	1.660	0.817
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	3.183	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—72 六阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(2dB)

Q	电路元件值*				
	1	2	4	6	8
K_1	8.132	8.132	8.132	8.132	8.132
Q_1	8.132	16.264	32.528	48.792	65.056
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	6.366
R_2	1.499	0.789	1.048	0.720	0.572
R_3	3.629	3.486	1.664	1.650	1.642
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4—73 六阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(3dB)

Q	电路元件值*			
	1	2	4	6
K_1	10.046	10.046	10.046	10.046
Q_1	10.046	20.092	40.184	60.276
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513
R_2	1.516	0.792	1.054	0.722
R_3	3.535	3.424	1.650	1.639
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。

表 4-74 八阶多级谐振器型巴特沃斯带通滤波器的正反馈谐振器设计表

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	3.061	3.061	3.061	3.061	3.061	3.061
Q_1	3.061	6.122	12.244	18.366	24.488	30.610
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	4.502	5.033
R_2	1.368	0.761	1.001	0.701	2.696	1.676
R_3	4.728	4.139	1.799	1.757	0.845	0.839
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4-75 八阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(0.1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	4.435	4.435	4.435	4.435	4.435	4.435
Q_1	4.435	8.870	17.740	26.610	35.480	44.350
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	4.502	5.033
R_2	1.430	0.775	1.024	0.710	2.870	1.735
R_3	4.110	3.787	1.729	1.702	0.829	0.825
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 4—76 八阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(0.5dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
K_1	6.681	6.681	6.681	6.681	6.681	6.681
Q_1	6.681	13.362	26.724	40.086	53.448	66.810
R_1	3.183	4.502	4.502	5.513	4.502	5.033
R_2	1.481	0.785	1.042	0.717	3.015	1.781
R_3	3.743	3.560	1.680	1.663	0.817	0.815
R_4	6.366	6.366	3.183	3.183	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

表 4—77 八阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(1dB)

Q	电路元件值*					
	1	2	3	4	5	6
K_1	8.396	8.396	8.396	8.396	8.396	8.396
Q_1	8.396	16.792	25.188	33.584	41.980	50.376
R_1	5.033	7.118	3.898	4.502	5.033	5.513
R_2	0.593	0.191	1.460	1.049	0.845	0.720
R_3	9.804	9.180	1.673	1.662	1.654	1.648
R_4	15.915	15.915	3.183	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

表 4—78 八阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(2dB)

Q	电路元件值*				
	1	2	3	4	5
K_1	11.170	11.170	11.170	11.170	11.170
Q_1	11.170	22.340	33.510	44.680	55.850
R_1	5.033	7.118	3.898	4.502	5.033
R_2	0.595	0.391	1.477	1.056	0.849
R_3	9.270	8.843	1.652	1.644	1.638
R_4	15.915	15.915	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

表 4—79 八阶多级谐振器型切比雪夫带通滤波器的正反馈谐振器设计表(3dB)

Q	电路元件值*				
	1	2	3	4	5
K_1	13.756	13.756	13.756	13.756	13.756
Q_1	13.756	27.512	41.268	55.024	68.780
R_1	5.033	5.033	3.898	4.502	5.033
R_2	0.596	0.645	1.486	1.061	0.852
R_3	8.991	4.221	1.640	1.634	1.629
R_4	15.915	7.958	3.183	3.183	3.183

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。

5. 带阻滤波器

5.1 基本理论

带阻滤波器(也叫带除滤波器或陷波器)是能通过除一个频带外的所有其他频率信号的一种滤波器。带阻滤波器的幅度响应如图5—1所示,这里虚线表示理想响应而实线代表近似于理想特性的可以实现的响应。被阻止的频带大致以 ω_0 为中心,其宽度为 B , B 可以用 rad/sec 或 Hz 为单位,并把中心频率规定为 $\omega_0 rad/sec$ 或 $f_0 = \omega_0/2\pi Hz$ 。和带通滤波器一样,我们定义 $Q = \omega_0/B$ (或当 B 以 Hz 为单位时, $Q = f_0/B$)。因而,高 Q 表示阻带窄而低 Q 表示阻带宽。阻带就是被衰减的频带,而频谱中其余部分就是通带。增益 G 是在零频率或无穷大频率时传递函数的幅值。

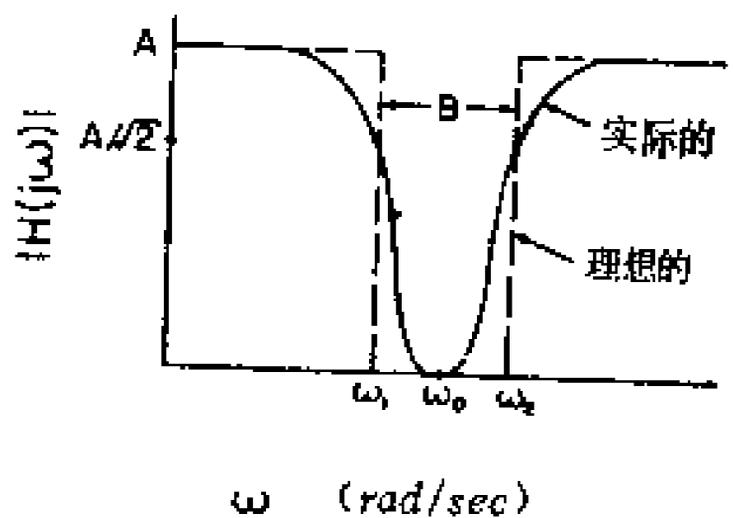


图 5—1 带阻滤波器幅度响应

和带通滤波器相似,带阻滤波器也可以用两个截频点 ω_1 和 ω_2 来表征,如图5—1所示。截频点定义为 $|H(j\omega)|$ 下降到其最大值 $1/\sqrt{2}$ 处的频率。对于可实现的近似响应,带宽为 $B = \omega_2 - \omega_1$ 。

和高通、带通滤波器一样,带阻滤波器的传递函数可以通过变换低通原型的传递函数求得。用这种办法求得的带阻传递

函数在一般情况下可以由下式给出〔22〕

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{S^n + b_{n-1}S^{n-1} + \dots + b_1S + b_0} \Bigg|_{S = \frac{Bs}{(s^2 + \omega_0^2)}} \quad (5.1)$$

代换前的传递函数就是(2.2)式所示的 n 阶低通滤波器的传递函数。很明显, $2n$ 阶带阻传递函数系由 n 阶低通传递函数得出的, 和低通时一样, 它的增益为 G ($s = 0$ 对应于 $S = 0$)。

当低通原型为巴特沃斯或切比雪夫响应时, 带阻滤波器也是巴特沃斯或切比雪夫响应。巴特沃斯带阻滤波器具有最平通带的单调幅度响应。切比雪夫带阻滤波器和其对应的低通一样, 通带有波纹, 而且在截频点的衰减率比巴特沃斯型大得多。另外, 在切比雪夫滤波器中, 除 3dB 波纹情况外, 角频率 ω_1 和 ω_2 是通带*波纹区间的终止角频率, 在巴特沃斯滤波器中, 这就是通常定义的截频点。一般说来, 在(5.1)式中, 中心频率就是截频的几何平均值, 即 $\omega_0 = \sqrt{\omega_1\omega_2}$, 或者 $f_0 = \sqrt{f_1f_2}$ (以 Hz 为单位)。四阶巴特沃斯和切比雪夫带阻滤波器的幅度和相位响应分别示于图 5—2 和图 5—3。

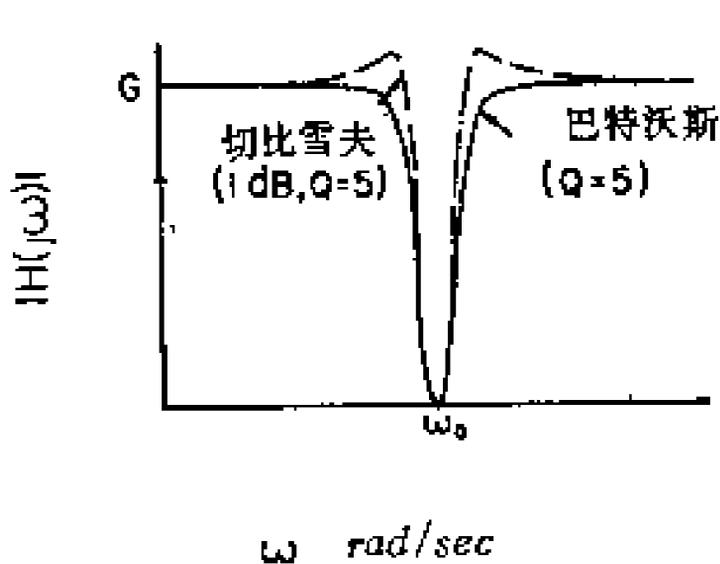


图 5—2 四阶带阻滤波器幅度响应

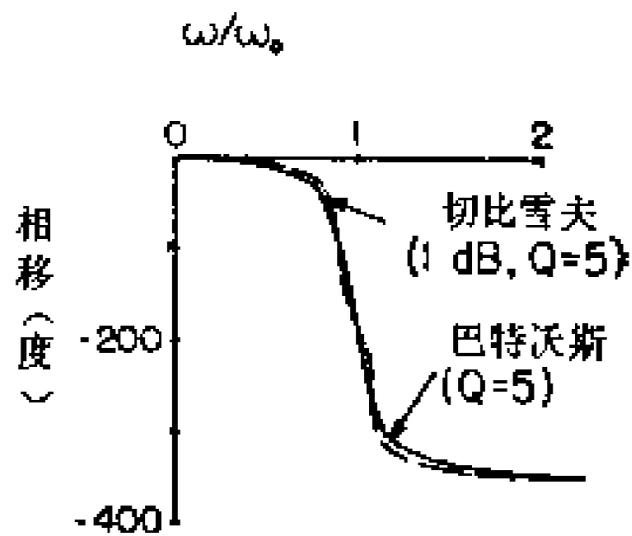


图 5—3 四阶带阻滤波器相位响应

* 原文误为阻带——译者

因为一阶巴特沃斯和切比雪夫低通幅度响应具有相同的形式（只是比例系数不同），因此对这两种情况的二阶带阻传递函数均由（5.1）式导出，此时令 $b_0 = 1$ 和 $n = 1$ 。结果为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{G(s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (5.2)$$

更高阶的响应由（5.1）式令 $n = 2, 3, \dots$ 得到，此时对巴特沃斯和切比雪夫滤波器而言，它们是不相同的。

5.2 压控电压源带阻滤波器

一种由英尼戈(Inigo)^[41]提出的可实现（5.2）式二阶带阻传递函数的电路如图5—4所示，它只用了一个运算放大器。带有100%反馈的运算放大器构成增益为1的压控电压源。分析电路证明，得到（5.2）式的条件是

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5.3)$$

和

$$B = \frac{2}{R_2 C}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \quad (5.4)$$

$$G = 1$$

图5.4电路的优点是，它要求的元件数目少，用这几个元件可以达到相当高的Q值，而且具有同相增益。改变 R_1 可在一定范围内调整中心频率 f_0 ，而保持 B （或 Q ）不变。缺点是增益限制为1。

图5-4带阻滤波器的快速设计程序和前面几章讲过的滤波器

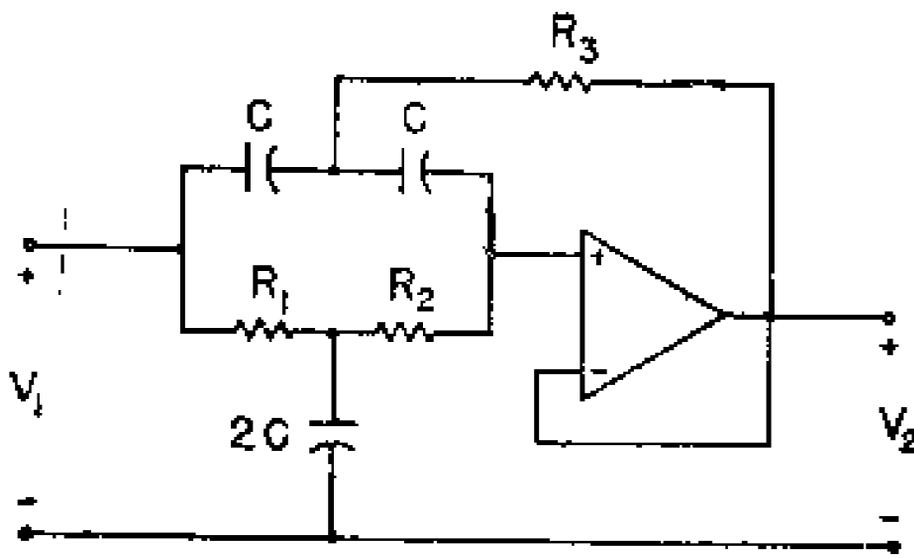


图 5—4 二阶压控电压源带阻滤波器

的设计程序非常相似。设计程序在5.5节摘要给出，那里给出了通用电路和设计表5—1。在给定中心频率 f_0 和带宽 B (或 Q) 时，利用这个表可以读出实际电路元件值 (在所有情况下增益都等于 1)。和表一

起使用的参数 K 可由下式求得

$$K = \frac{100}{f_0 C'} \quad (5.5)$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可以从图5—8a、b或c适当的一个图中读出。

5.3 多路反馈带阻滤波器

另一种可实现(5.2)式的电路示于图5—5〔7〕，我们称它为多路反馈带阻滤波器。分析电路可证明，实现(5.2)式的条件是

$$R_3 R_4 = 2R_1 R_6 \quad (5.6)$$

以及

$$B = \frac{2}{R_4 C}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_4 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.7)$$

$$G = -\frac{R_6}{R_3}$$

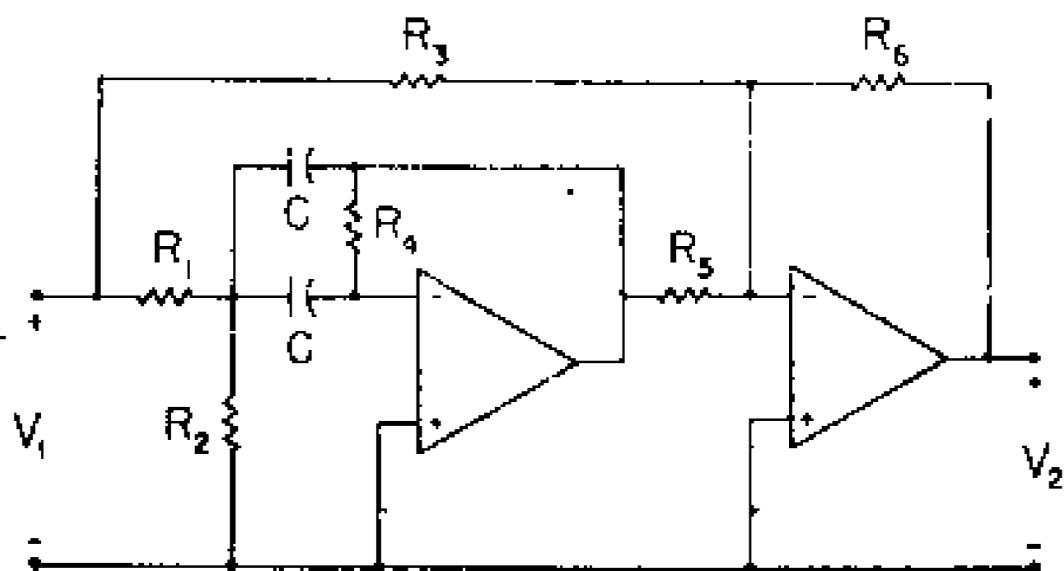


图 5—5 二阶多路反馈带阻滤波器

这个电路具有2—8节讲到的多路反馈结构的优点。它比上节的电路具有更大的灵活性，因为它的增益是可以指定的，而且可得到较高的 Q 值。增益是反相的，并可通过改变 R_6 进行调整。改变 R_4 可在一定限度内改变带宽 B （因而改变 Q ）而不影响 f_0 。

有关图5—5带阻滤波器的实用设计方法将在5—6节中摘要给出，那里还给出一个适宜的设计表即表5—2。参考文献〔1〕中详尽地给出了一个设计例子，同时还给出了一个60Hz陷波器的实际幅度响应。

5.4 双二次带阻滤波器

由弗莱谢尔（Fleischer）和陶（Tow）〔33〕提出的一种可实现带阻传递函数的双二次电路示于图5—6。分析电路可证明，得到（5.2）式的条件是

$$B = \frac{1}{R_2 C}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_3 R_5 C^2} \quad (5.8)$$

$$G = -\frac{R_2}{R_1}$$

而且规定

$$\begin{aligned} R_2 R_6 &= R_1 R_4 \\ R_4 R_7 &= R_5 R_8 \end{aligned} \quad (5.9)$$

虽然双二次电路比本章讲到的其他电路要用更多的元件，

但是因为它有优良的调整性能，因而是一种非常有用的电路。

与我们已经讨论过的其他电路相比，它可以达到非常高的 Q 值，它的稳定性较好，使我们有可能用两节或更多节级联起来以得到高阶巴特沃斯或切比雪夫响应。在二

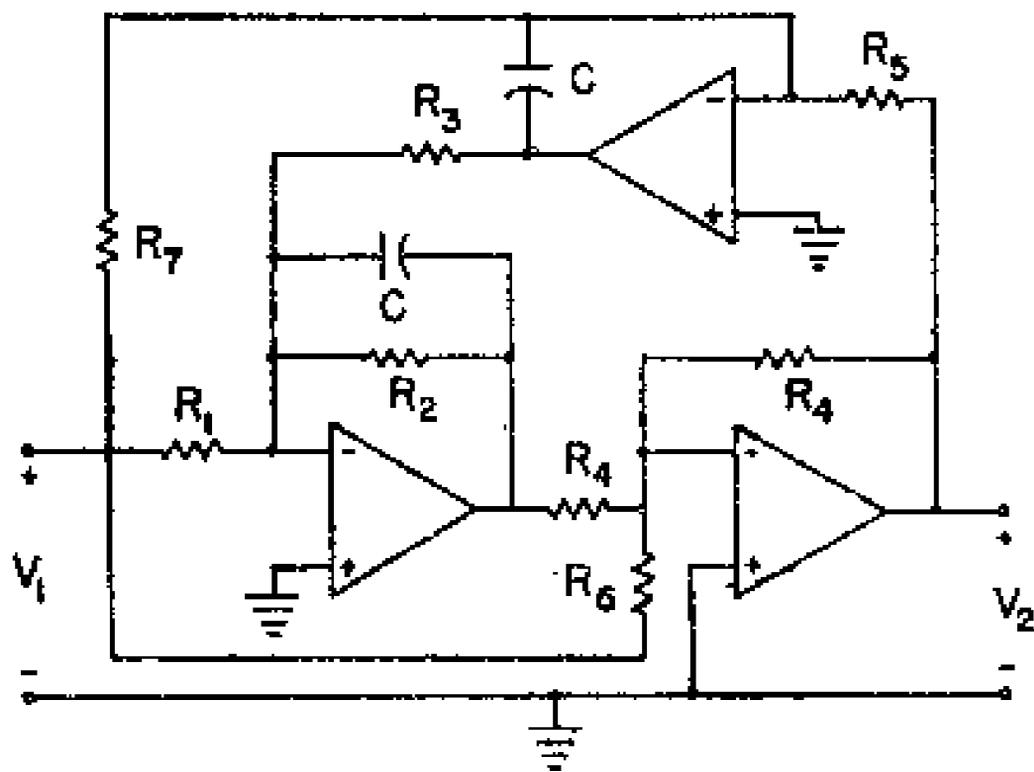


图 5—6 二阶双二次带阻滤波器

阶双二次带阻滤波器的情况下，调整过程很简单。在一定范围内，改变 R_1 可以调节增益，改变 R_2 可以调节带宽（因而调节 Q ），改变 R_3 可调节中心频率。当用两节级联来获得四阶响应时，改变 R_7 可以调整通带特性。

双二次带阻滤波器设计程序将在 5.7 节给出。利用表 5-3 可以完成二阶设计，而表 5—4~5—9 给出级联的四阶设计。

实例：假定我们要求一个四阶 1dB 切比雪夫带阻滤波器，其增益为 100， $f_0 = 1000\text{Hz}$ ， $Q = 10$ 。选择 $C = 0.01\mu\text{F}$ ，从 (5.5) 式可以得到参数 K 等于 10。滤波器由两节图 5—6 那样的节组成，相应的设计表为表 5—7。选择每节的增益为 10，对于第一节从

表中可得出 $R_1=33.32$, $R_2=333.21$, $R_3=R_5=16.57$, $R_4=15.92$, $R_6=1.59$, $R_7=1.53$ (均为 $K\Omega$)；对于第二级可得出 $R_1=30.72$, $R_2=307.23$, $R_3=R_5=15.28$, $R_4=15.92$, $R_6=1.59$, $R_7=1.66$ (均为 $K\Omega$)。这些数值是将表中值乘以参数 $K=10$ 后得到的。实际使用的是容差为 1% 的尽可能接近计算值的标称值电阻。所得结果是 $Q=11.8$, $f_0=1004\text{Hz}$, $G=100$, 波纹 1.1dB 。实际响应如图 5.7 所示。

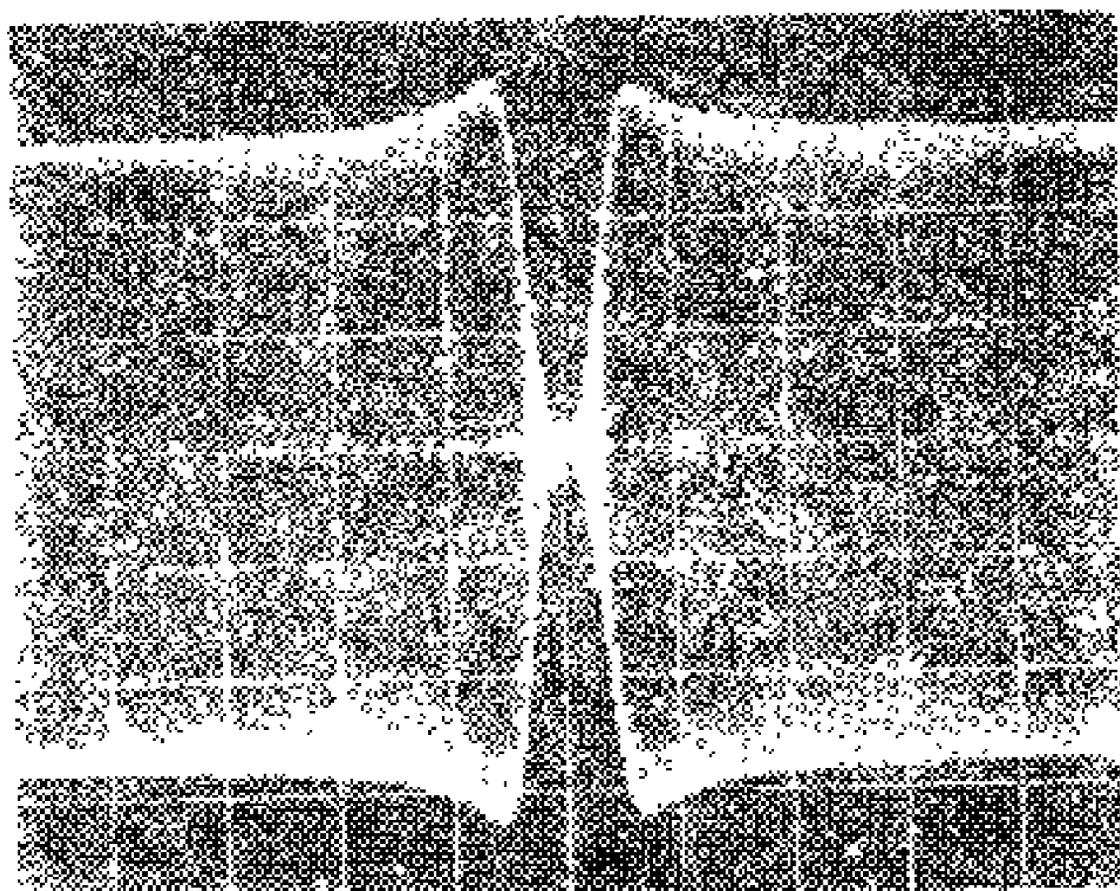
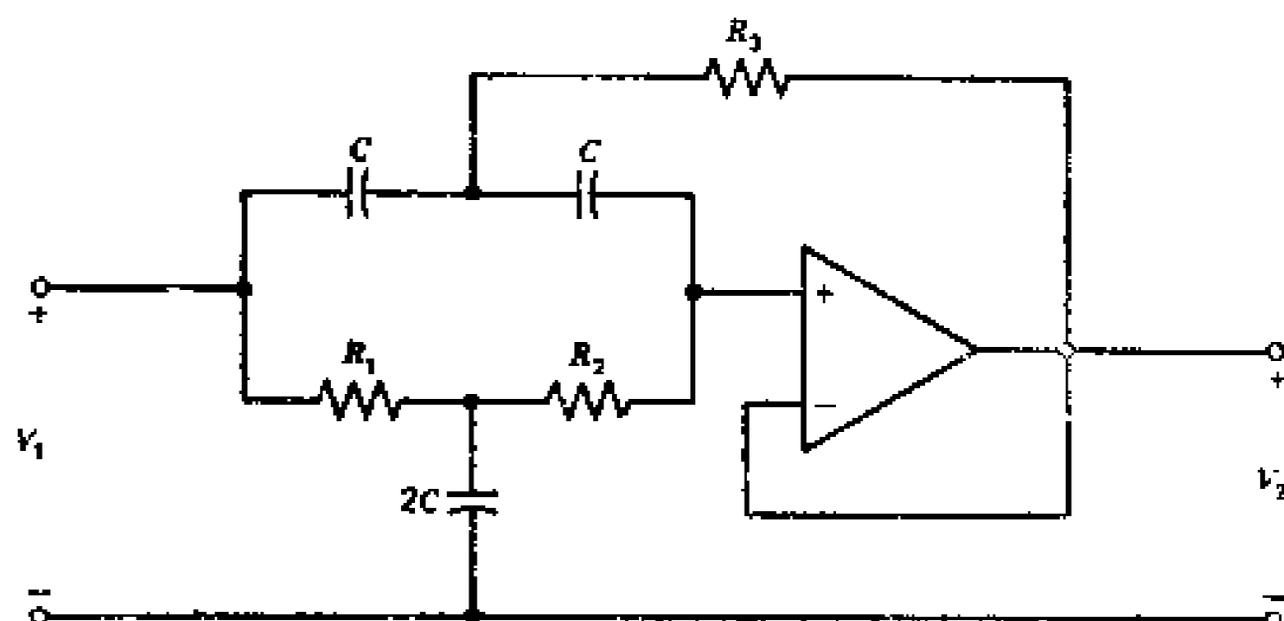


图 5—7 四阶 1dB 切比雪夫带阻滤波器响应

5.5 压控电压源带阻滤波器设计

程序摘要 ($Q \leq 10$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)，增益 $G = 1$ 和 Q 值 (或带宽 $B = f_0/Q$)，按下面步骤进行设计：

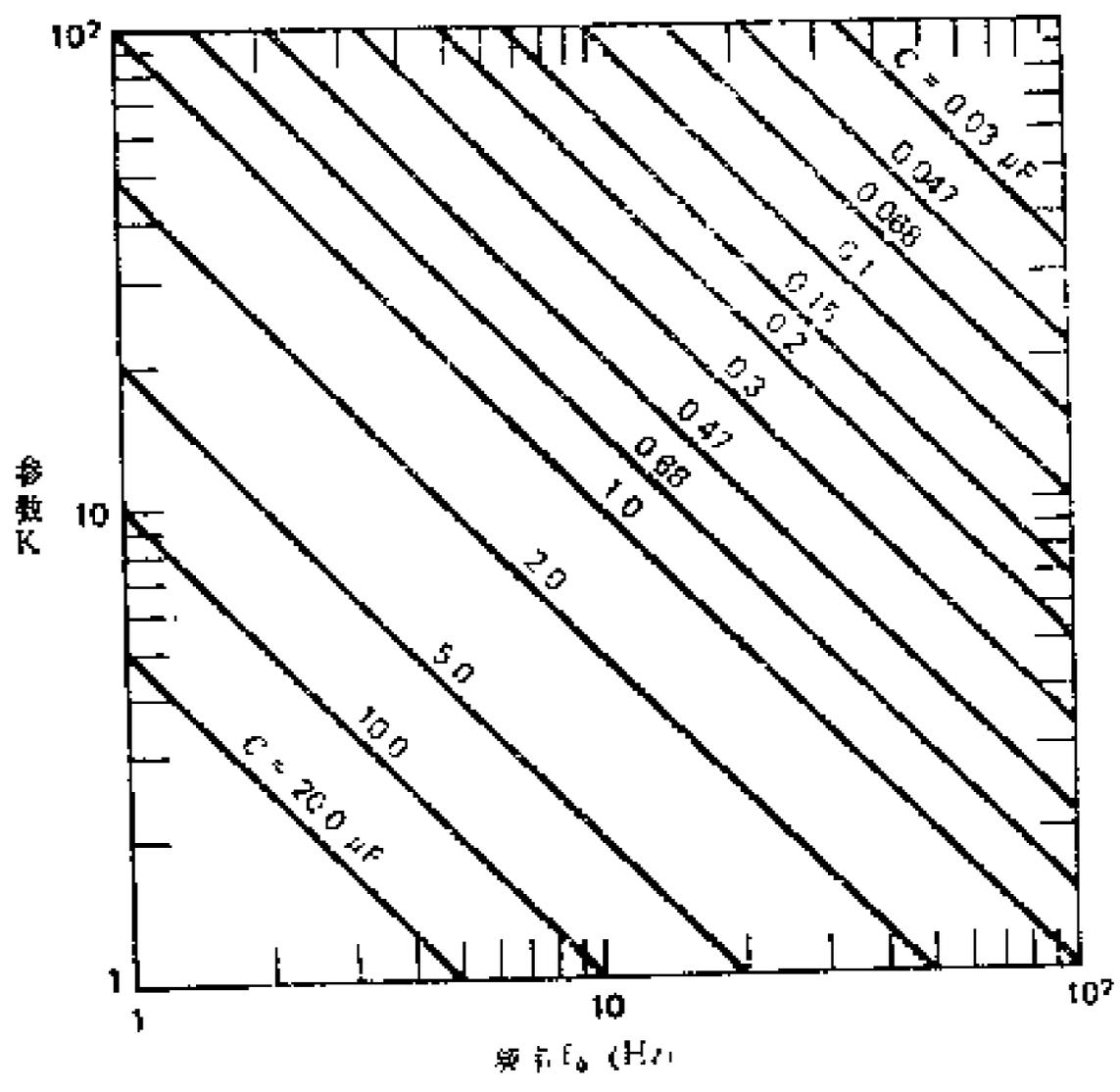
1. 选择电容 C 的值，由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

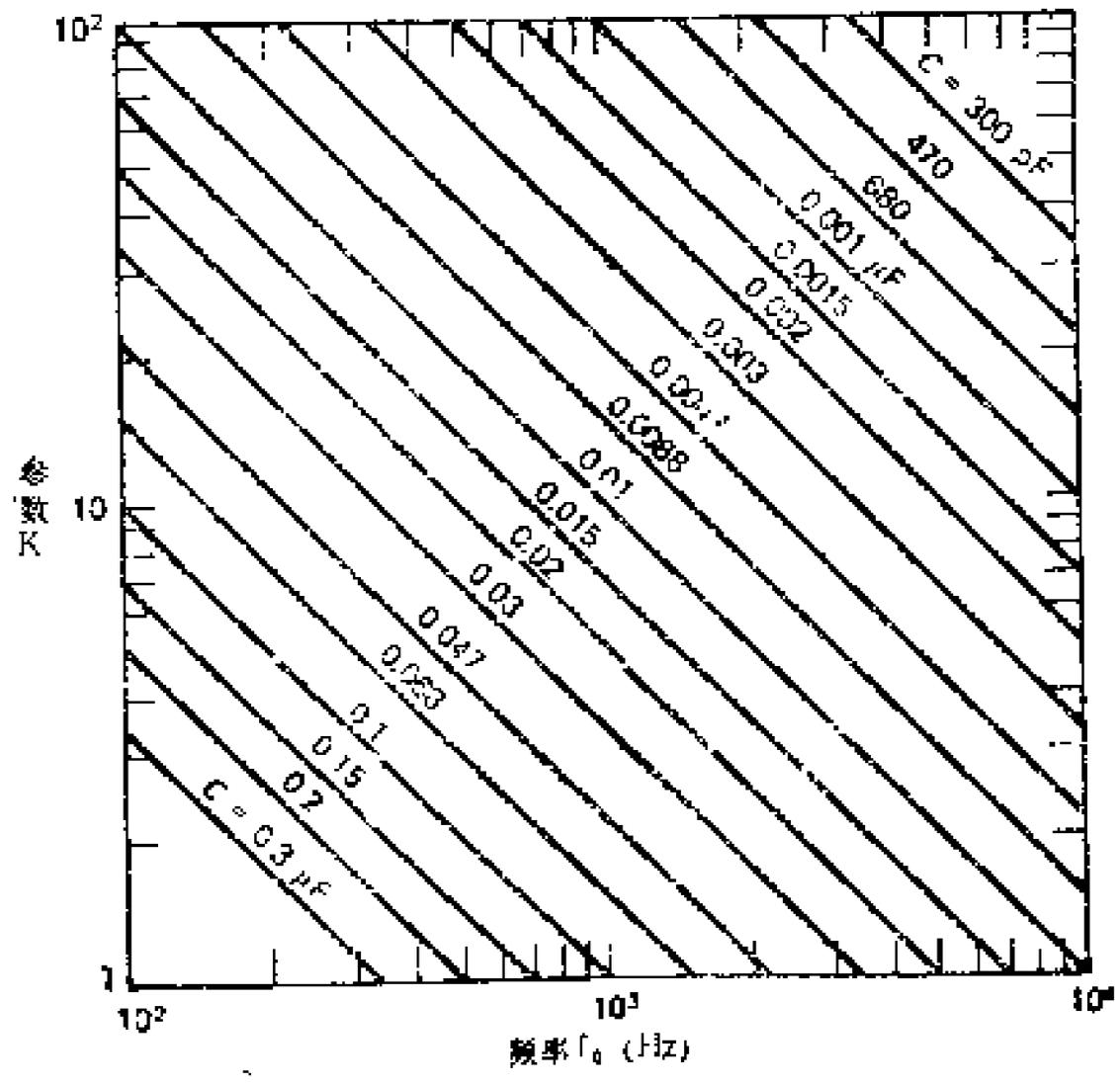
这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可从图 5—8a、b 或 c 中查出。

2. 从表 5—1 查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况，因此必须把这些数值乘以由第一步得出的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表



(a)



(b)

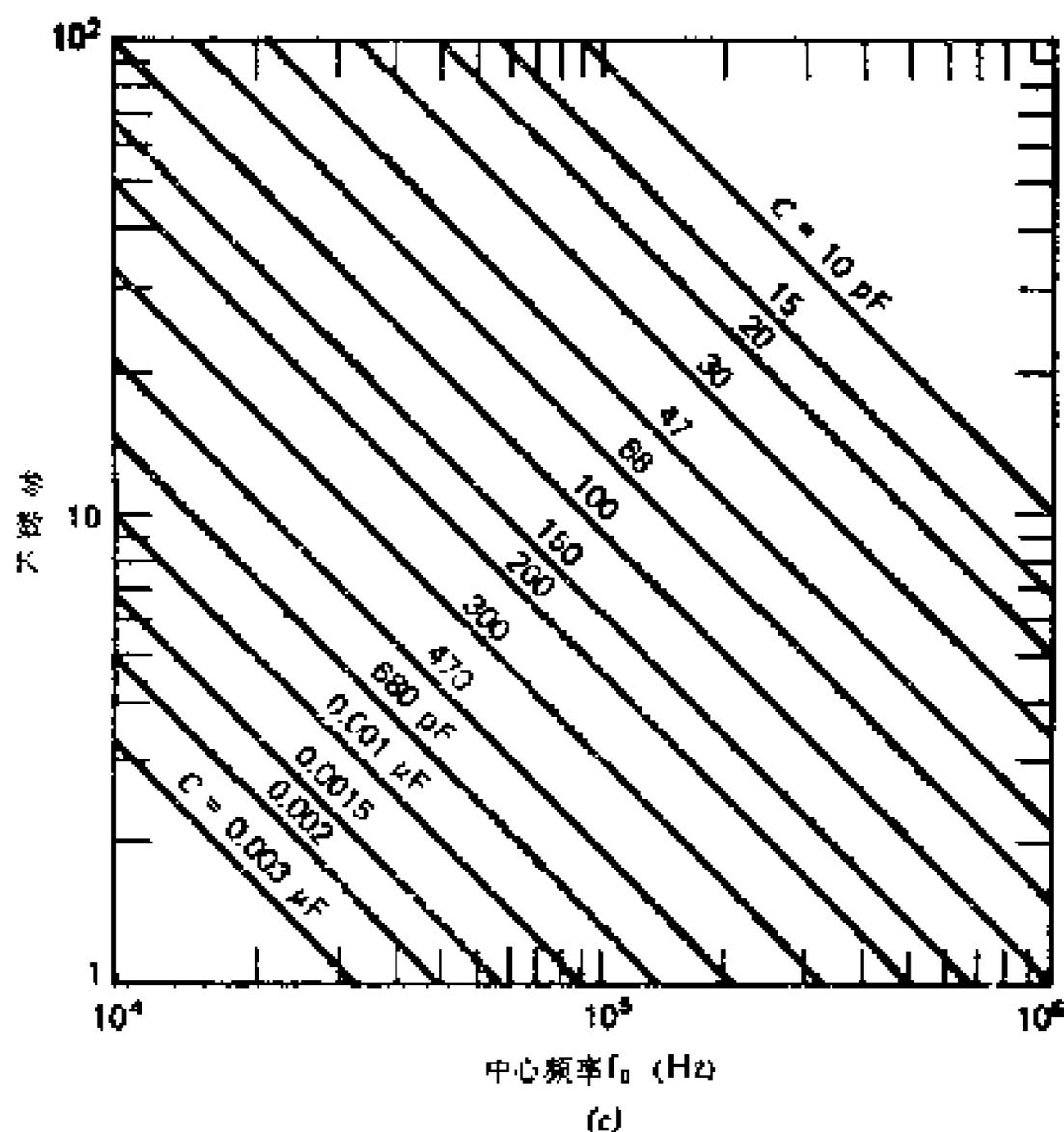


图 5—8 参数 K 和频率的关系

得出的数值，按通用电路制作滤波器。

注释和建议

(a) 为了得到最佳的性能，运算放大器的输入电阻至少应为 $R_{eq} = R_1 + R_2$ 的 10 倍。给定的运算放大器要满足这个条件，一般是通过适当选择 C 值以得到合适的参数 K 的办法。

(b) 通常，用容差为 5% 的标称值电阻就可以得到满意的结果。为了得到最好的性能，所用电阻值应尽可能接近查表得到的数值。

至于电容，为得到最佳的结果，必须用容差为 5% 的电容。由于精密电容价格较贵，可能希望使用容差较大的电容，这时，通常需要进行调整。在多数情况下，用 10% 的电容常常就

满足要求了。

(c) 在滤波器输入端到地必须有一个直流通路。运算放大器的开环增益至少应是滤波器在 f_c 处增益的 50 倍 (f_c 是通带中要求的最高频率), 而且, f_c 处要求的峰-峰电压值不应超过运算放大器压摆率和 $10^6/\pi f_c$ 的乘积。因而, 当 f_c 较高时, 可能要用外部补偿的运算放大器。

(d) 改变 R_1 可在一定范围内调整中心频率 f_c , 但使 B (因而使 Q) 仍能保持不变。

压控电压源带阻滤波器已在 5.2 节讨论过了。

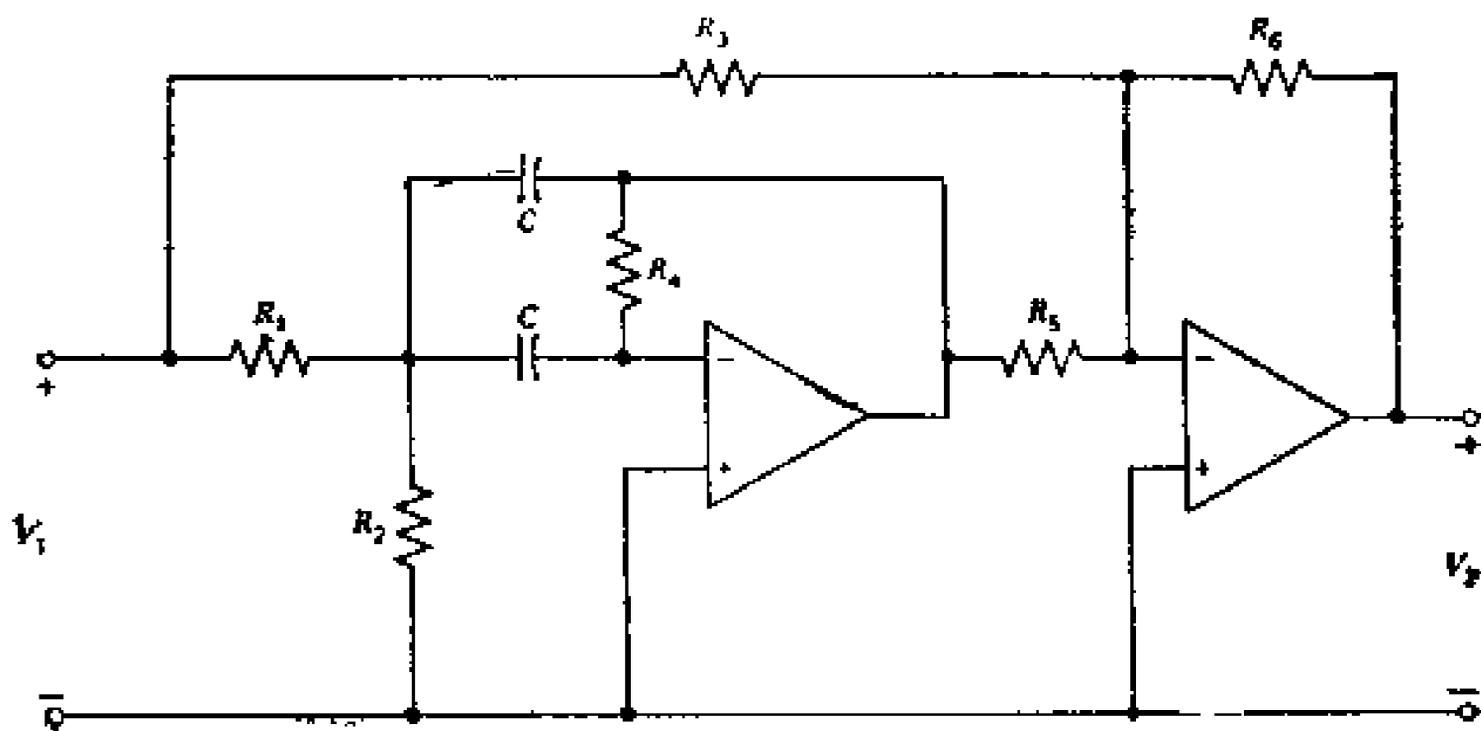
表 5-1 二阶压控电压源带阻滤波器设计表

电 路 元 件 值*	
R_1	$0.796/Q$
R_2	$3.183Q$
R_3	$R_2/(4Q^2 + 1)$

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。增益为 1; 品质因数为 Q 。

5.6 多路反馈带阻滤波器设计

程序摘要 ($Q \leq 25$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 和 Q (或带宽 $B = f_0/Q$)，按下面步骤进行设计：

1. 选择电容 C 的值，由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可从图5—8a、b或c查出。

表 5—2 二阶多路反馈带阻滤波器设计表

电 路 元 件 值 [*]	电 路 元 件 值 [*]
R_1	$0.796 Q$
R_2	$R_1 / (Q^2 - 1)$
R_3	1.0
R_4	$4 R_1$
R_5	2.0
R_6	G

^{*} 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。增益为 G (反相)；品质因数为 Q 。

2. 从表5—2查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况，因而必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近查表得出的数值，按通用电路制作滤波器。

注释和建议

5.5节对压控电压源带阻滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) b 条可直接应用。

(b) c 条适用，只是到地的直流通路已由 R_4 完成。

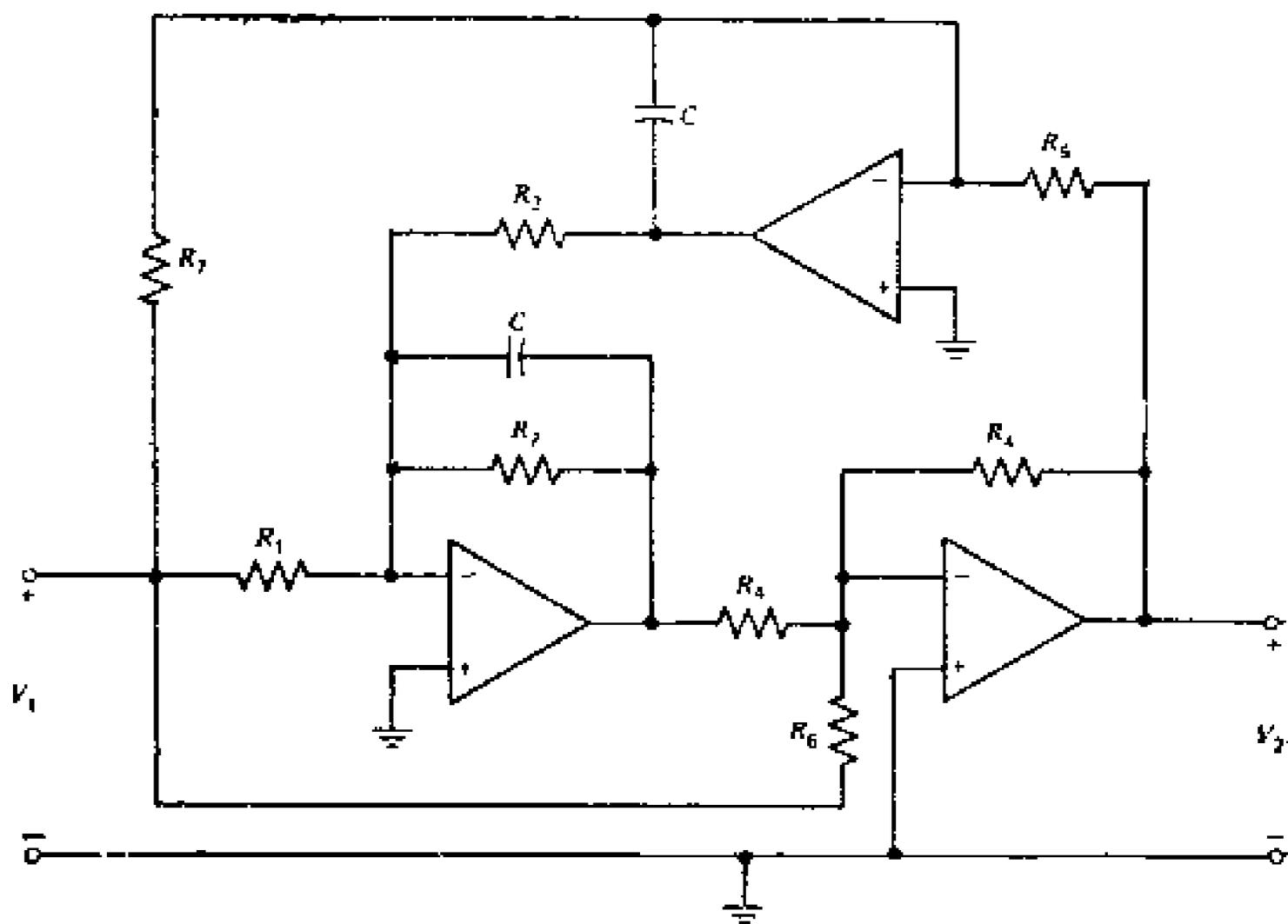
另外，还需应用下面一条：

(c) 滤波器的反相增益为 R_6/R_5 。用电位器代替 R_6 可调节增益。带宽 B 可由 R_4 微调而不影响 f_0 。

多路反馈带阻滤波器已在5.3节讨论过了。

5.7 双二次带阻滤波器

设计程序摘要 ($Q \leq 50$)



通用电路

设计程序

给定中心频率 f_0 (Hz)、增益 G 、阶数和滤波器类型(巴特沃斯或切比雪夫响应), 对于二阶滤波器或级联四阶滤波器的每一节按下列步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可以从图5-8a、

b或c中查出。对于四阶滤波器设计，因为要求较高的精度，用公式计算较好。

表 5—3 二阶双二次电路带阻滤波器设计表

电 路 元 件	值
R_1	$1.592 Q/G$
R_2	$1.592 Q$
R_3, R_4, R_5	1.592
R_6, R_7	$1.592/G$

电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。Q和G分别为品质因数和增益。

2. 从表5—3查出二阶滤波器的电阻值；从表5—4~5—9适当的一个表中查出四阶滤波器的电阻值。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况，因此必须把这些数值乘以由第一步求得的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。表中的 G 是单节增益，

对于四阶情况，滤波器的增益是两节增益之积。各节增益不必相等，可由设计人员选择。

3. 按标准选择所用的电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值。按通用电路制作滤波器或它的每一节。

注 释 和 建 议

5.5节对压控电压源带阻滤波器的注释和建议在这里的适用情况如下：

(a) b条适用于二阶电路。对于四阶，应该用容差为 2% 的电阻和容差为 5% 的电容。

(b) c条适用，只是到地的直流通路已由 R_2 和 R_3 实现。

此外，还需应用下面一条：

(c) 单节的反相增益为 R_2/R_1 。改变 R_1 影响增益，改变 R_2 影响 Q ，改变 R_3 则改变 f_0 。此外，在四阶电路中，改变 R_7 则可改变通带响应。

5.4节已经给出了四阶滤波器的设计实例。

表 5-4 四阶双二次级联巴特沃斯带阻滤波器设计表

		电路元件值*										节
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50		
R_1		3.467/G	5.468/G	7.654/G	9.876/G	12.110/G	14.350/G	18.839/G	23.333/G	113.341/G		
R_2		3.467	5.468	7.654	9.876	12.110	14.350	18.839	23.333	113.341		
R_3		2.296	1.903	1.792	1.739	1.708	1.688	1.664	1.649	1.603		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1	
R_5		2.296	1.903	1.792	1.739	1.708	1.688	1.664	1.649	1.603		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		1.103/G	1.331/G	1.414/G	1.457/G	1.483/G	1.500/G	1.523/G	1.536/G	1.580/G		
R_1		1.666/G	3.826/G	6.041/G	8.272/G	10.511/G	12.753/G	17.244/G	21.739/G	111.750/G		
R_2		1.666	3.826	6.041	8.272	10.511	12.753	17.244	21.739	111.750		
R_3		1.103	1.331	1.414	1.457	1.483	1.500	1.523	1.536	1.580		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592		
R_5		1.103	1.331	1.414	1.457	1.483	1.500	1.523	1.536	1.580	2	
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		2.296/G	1.903/G	1.792/G	1.739/G	1.708/G	1.688/G	1.664/G	1.649/G	1.603/G		

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。G = 单节增益，滤波器增益 = 各节增益之积。

表 5—5 四阶双二次级联切比雪夫带阻滤波器设计表(0.1dB)

		中频元件值*										ω
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50	ω	
R_1	5.607/G	9.925/G	14.333/G	18.761/G	23.197/G	27.636/G	36.520/G	45.407/G	223.235/G			
R_2	5.607	9.925	14.333	18.761	23.197	27.636	36.520	45.407	223.235			
R_3	1.964	1.767	1.706	1.677	1.659	1.648	1.634	1.625	1.598			
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1		
R_5	1.964	1.767	1.706	1.677	1.659	1.648	1.634	1.625	1.598			
R_6	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G			
R_7	1.290/G	1.434/G	1.485/G	1.511/G	1.527/G	1.537/G	1.551/G	1.559/G	1.585/G			
R_1	3.683/G	8.054/G	12.473/G	16.904/G	21.341/G	25.781/G	34.666/G	43.553/G	221.382/G			
R_2	3.683	8.054	12.473	16.904	21.341	25.781	34.666	43.553	221.382			
R_3	1.290	1.434	1.485	1.511	1.527	1.537	1.551	1.559	1.585			
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	2		
R_5	1.290	1.434	1.485	1.511	1.527	1.537	1.551	1.559	1.585			
R_6	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G			
R_7	1.963/G	1.767/G	1.706/G	1.677/G	1.659/G	1.648/G	1.634/G	1.625/G	1.598/G			

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为k Ω , G = 单节增益, 滤波器增益 = 各节增益之积。

表 5—6 四阶双二次级联切比雪夫带阻滤波器设计表(0.5dB)

		电路元件值*										节
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50		
R_1		4.990/G	8.103/G	11.412/G	14.761/G	18.126/G	21.497/G	28.251/G	35.012/G	170.396/G		
R_2		4.9990	8.103	11.412	14.761	18.126	21.497	28.251	35.012	170.396		
R_3		2.221	1.879	1.777	1.729	1.701	1.682	1.659	1.645	1.602		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1	
R_5		2.221	1.879	1.777	1.729	1.701	1.682	1.659	1.645	1.602		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		1.140/G	1.348/G	1.425/G	1.465/G	1.490/G	1.506/G	1.527/G	1.540/G	1.581/G		
R_1		2.562/G	5.815/G	9.149/G	12.508/G	15.876/G	19.251/G	26.007/G	32.769/G	168.153/G		
R_2		2.562	5.815	9.149	12.508	15.876	19.251	26.007	32.769	168.153		
R_3		1.140	1.348	1.425	1.465	1.490	1.506	1.527	1.540	1.581		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	2	
R_5		1.140	1.348	1.425	1.465	1.490	1.506	1.527	1.540	1.581		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		2.221/G	1.879/G	1.777/G	1.729/G	1.701/G	1.682/G	1.659/G	1.645/G	1.602/G		

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$, G =单节增益,滤波器增益=各节增益之积。

表 5-7 四阶双二次级联切比耳夫带阻滤波器设计表 (1dB)

		电路元件值*										节
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50		
R_1		5.198/G	7.996/G	11.082/G	14.227/G	17.394/G	20.572/G	26.942/G	33.321/G	161.156/G		
R_2		5.189	7.996	11.082	14.227	17.394	20.572	26.942	33.321	161.156		
R_3		2.388	1.950	1.822	1.726	1.726	1.703	1.674	1.657	1.605		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1	
R_5		2.388	1.950	1.822	1.762	1.726	1.703	1.674	1.657	1.605		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		1.061/G	1.299/G	1.390/G	1.438/G	1.467/G	1.487/G	1.513/G	1.528/G	1.579/G		
R_1		2.308/G	5.327/G	8.453/G	11.613/G	14.787/G	17.968/G	24.341/G	30.723/G	158.560/G		
R_2		2.308	5.327	8.453	11.613	14.787	17.968	24.341	30.723	158.560		
R_3		1.061	1.299	1.390	1.438	1.467	1.487	1.513	1.528	1.579		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.599	2	
R_5		1.061	1.299	1.390	1.438	1.467	1.487	1.513	1.528	1.579		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		2.388/G	1.950/G	1.822/G	1.762/G	1.726/G	1.703/G	1.674/G	1.657/G	1.605/G		

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 单节增益, 滤波器增益 = 各节增益之积。

表 5-8 四阶双二次级联切比霍夫带阻滤波器设计表(2dB)

		电路元件值*										节
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50		
R_1	5.944/G	8.593/G	11.682/G	14.862/G	18.075/G	21.305/G	27.787/G	34.284/G	164.583/G			
R_2	5.944	8.593	11.682	14.862	17.075	21.305	27.787	34.284	164.583			
R_3	2.590	2.036	1.876	1.801	1.757	1.728	1.693	1.672	1.607			
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592		1	
R_5	2.590	2.036	1.876	1.801	1.757	1.728	1.693	1.672	1.607			
R_6	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G			
R_7	0.978/G	1.244/G	1.350/G	1.407/G	1.442/G	1.466/G	1.496/G	1.515/G	1.576/G			
R_1	2.245/G	5.261/G	8.407/G	11.611/G	14.835/G	18.070/G	24.558/G	31.058/G	161.262/G			
R_2	2.245	5.251	8.407	11.611	14.835	18.070	24.558	31.058	161.362			
R_3	0.978	1.244	1.350	1.407	1.442	1.466	1.496	1.515	1.576			
R_4	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592		2	
R_5	0.978	1.244	1.350	1.407	1.442	1.466	1.496	1.515	1.576			
R_6	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G			
R_7	2.590/G	2.036/G	1.876/G	1.801/G	1.757/G	1.728/G	1.693/G	1.672/G	1.607/G			

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。G = 单节增益, 滤波器增益 = 各节增益之积。

表 5—9 四阶双二次级联切比雪夫带阻滤波器设计表 (3dB)

		电阻元件值*										节
Q		1	2	3	4	5	6	8	10	50		
R_1		6.833/G	9.523/G	12.791/G	16.180/G	19.614/G	23.069/G	30.009/G	36.970/G	176.654/G		
R_2		6.833	9.523	12.791	16.180	19.614	23.069	30.009	36.970	176.654		
R_3		2.715	2.091	1.910	1.825	1.776	1.744	1.705	1.681	1.609		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	I	
R_5		2.715	2.091	1.910	1.825	1.776	1.744	1.705	1.681	1.609		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		0.933/G	1.212/G	1.326/G	1.388/G	1.426/G	1.453/G	1.486/G	1.507/G	1.574/G		
R_1		2.347/G	5.520/G	8.880/G	12.302/G	15.751/G	19.214/G	26.163/G	33.127/G	172.818/G		
R_2		2.347	5.520	8.880	12.302	15.751	19.214	26.163	33.127	172.818		
R_3		0.933	1.212	1.326	1.388	1.426	1.453	1.486	1.507	1.574		
R_4		1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	2	
R_5		0.933	1.212	1.326	1.388	1.426	1.453	1.486	1.507	1.574		
R_6		1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G	1.592/G		
R_7		2.715/G	2.091/G	1.910/G	1.825/G	1.776/G	1.744/G	1.705/G	1.681/G	1.609/G		

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$, $G =$ 单节增益, 滤波器增益 = 各节增益之积。

6 相移和时延滤波器

6.1 全通滤波器

全通（或相移）滤波器是这样一种电路，它能均等地通过所有频率的信号，同时又使它们的相位改变或移动某一给定的量。换句话说，幅度响应为理想的恒定值，而相位响应随频率而变化。全通滤波器的典型的相位响应 $\phi(\omega)$ 如图6—1所示，从图上可以看出相移随 ω 而变化。因为使某一频率分量相移一个负值，就等效于这个频率分量通过滤波器后延迟了一个正的时间，所以也可以认为全通滤波器是一种时延电路。

我们讨论的传递函数为输出电压和输入电压之比 V_2/V_1 。于是，如果在 ω_0 （或 f_0 Hz）处其相位为负值，比如说 $\phi(\omega_0) = -\phi_0$ 度（ $\phi_0 > 0$ ），则在 ω_0 处，输入 V_1 的相位大于输出 V_2 的相位 ϕ_0 度。如果两个波形都是正弦波，并对它们同时观察，则输入波形到达波峰或波谷比输出波形到达峰或谷早 ϕ_0 度。因此，输入信号超前输出信号 ϕ_0 度。当画出输入、输出信号的幅度对时间的曲线时，输入波形的峰或谷和紧接着的输出波形的峰或谷之间的时间差（sec）就是时延。很明显，相移 $-\phi_0$ 等效于相移 $360^\circ - \phi_0$ 。例如，如果输入波形超前输出 270° （ $\phi = -\phi_0 = -270^\circ$ ），这时也可以说输入超前 -90° ，或者等效地说输出超前 $+90^\circ$ 。图6—2示出的是输出波形滞后输入波形（或者说输入超前输出）一个量 ϕ_0 。如果水平轴用秒刻度，则相邻两个峰值

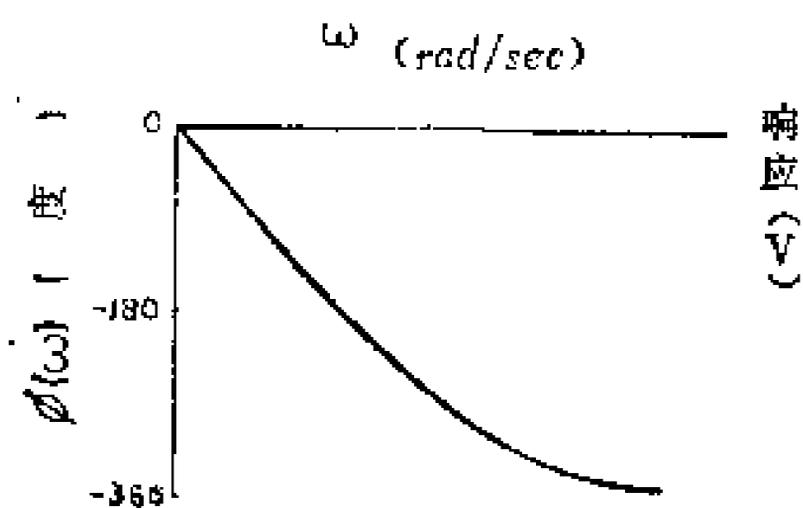


图 6—1 典型的相位响应

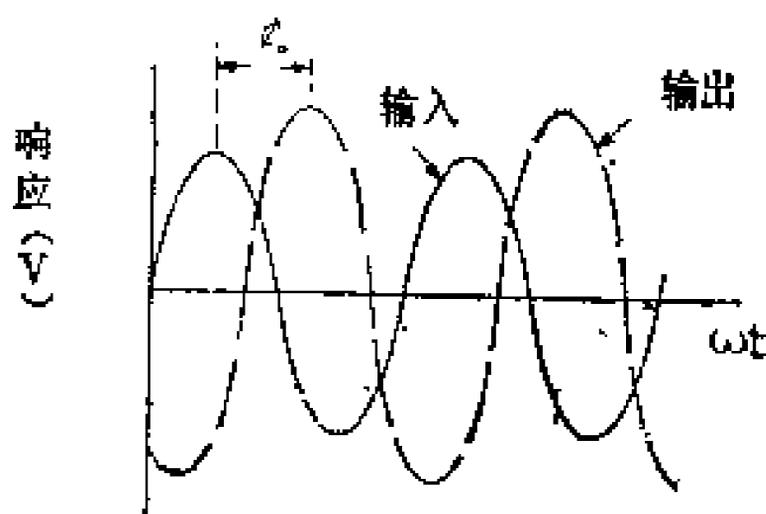


图 6—2 具有不同相位的两个波

之间的时间差就是以秒为单位的时延。

这里我们可以注意到，如果输出波只是在时间上延迟了一定量 T_d 的输入波（其幅度可能被放大），那么， T_d 可由下式给出

$$T_d = -\frac{d}{d\omega} \phi(\omega) \quad (6.1)$$

这和前面2—2节定义的时延 τ 相同。后面在6.4节中我们将用（6.1）式作为时延的定义，在那里讲的贝塞尔（Bessel）滤波器里时延是很重要的。

二阶全通滤波器的传递函数由下式给出

$$H(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{G(s^2 - as + b)}{s^2 + as + b} \quad (6.2)$$

其中 a 和 b 为常数。这点也可以通过计算幅度，即 $|H(j\omega)| = G$ ，看出来，这里 G 也定义为滤波器的增益。相位响应由下式给出：

$$\phi(\omega) = -2 \arctan\left(\frac{a\omega}{b - \omega^2}\right) \quad (6.3)$$

也可以用 $f = \omega/2\pi$ Hz 来表示。这样，可以改变 a 和 b 以便在给定的频率得到预定的相位移，而同时使幅度保持恒定。

6.2 二阶单运算放大器全通滤波器

用单个运算放大器实现(6.2)式的全通网络示于图6.3[42]。分析电路证明, 得到(6.2)式的条件是

$$\begin{aligned} a &= \frac{2}{R_2 C} \\ b &= \frac{1}{R_1 R_2 C^2} \\ G &= \frac{R_4}{R_3 + R_4} \end{aligned} \quad (6.4)$$

这里规定

$$R_2 R_3 = 4 R_1 R_4 \quad (6.5)$$

设计人员用图6—3设计全通滤波器时可以指定在给定频率点上所希望的相移, 并按6.7节摘要中所述方法获得实际元件值。和前面几章讲述的滤波器一样, 首先从下式求出参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'} \quad (6.6)$$

这里 C' 是图6—3中以 μF 为单位的 C 值, f_0 是要求得到给定相移 ϕ_0 的频率, 或者, K 值也可根据 f_0 由图6—8a、b或c中查出。

图6—3电路的主要优点是只需少量的元件就能得到全通响应。改变 R_2 可在一定范围内改变相移, 改变 R_4 可使增益变化。然而, 增益

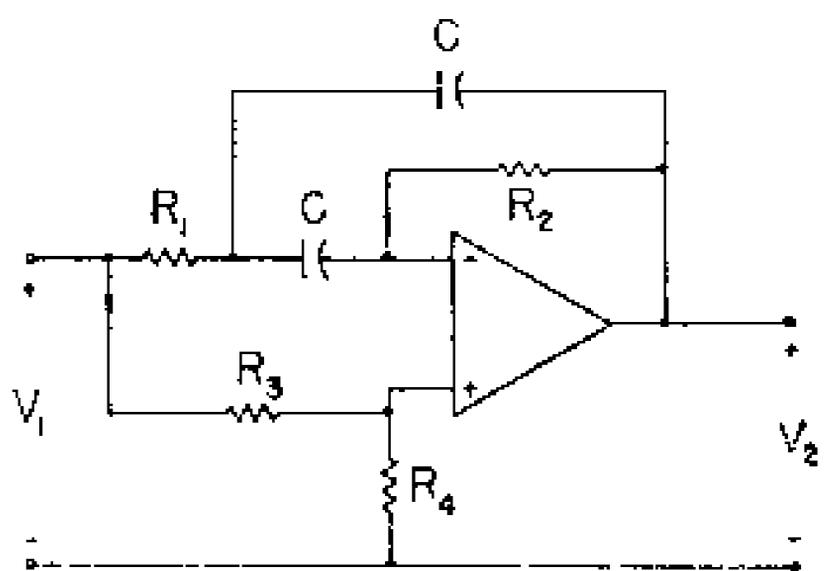


图 6—3 二阶全通滤波器

值限制在小于 1 的范围内。在表 6—1~6—12 适当的一个表中给出参数 K 为 1 时的电路电阻值，因此，必须乘以由 (6.6) 式求出的 K 值。全部设计表是按相移从 $\pm 5^\circ$ 到 $\pm 175^\circ$ ，每次增加 5° 的间隔列出的，各表中每一种情况下给出的增益均为 0.5。

6.3 双二次全通滤波器

实现 (6.2) 式的双二次电路^[27]如图 6—4 所示。分析电路得到

$$a = \frac{1}{R_1 C}$$

$$b = \frac{1}{R_2 R_3 C^2} \quad (6.7)$$

$$G = -\frac{R_5}{R_6}$$

这里规定

$$R_1 = 2R_4 \quad (6.8)$$

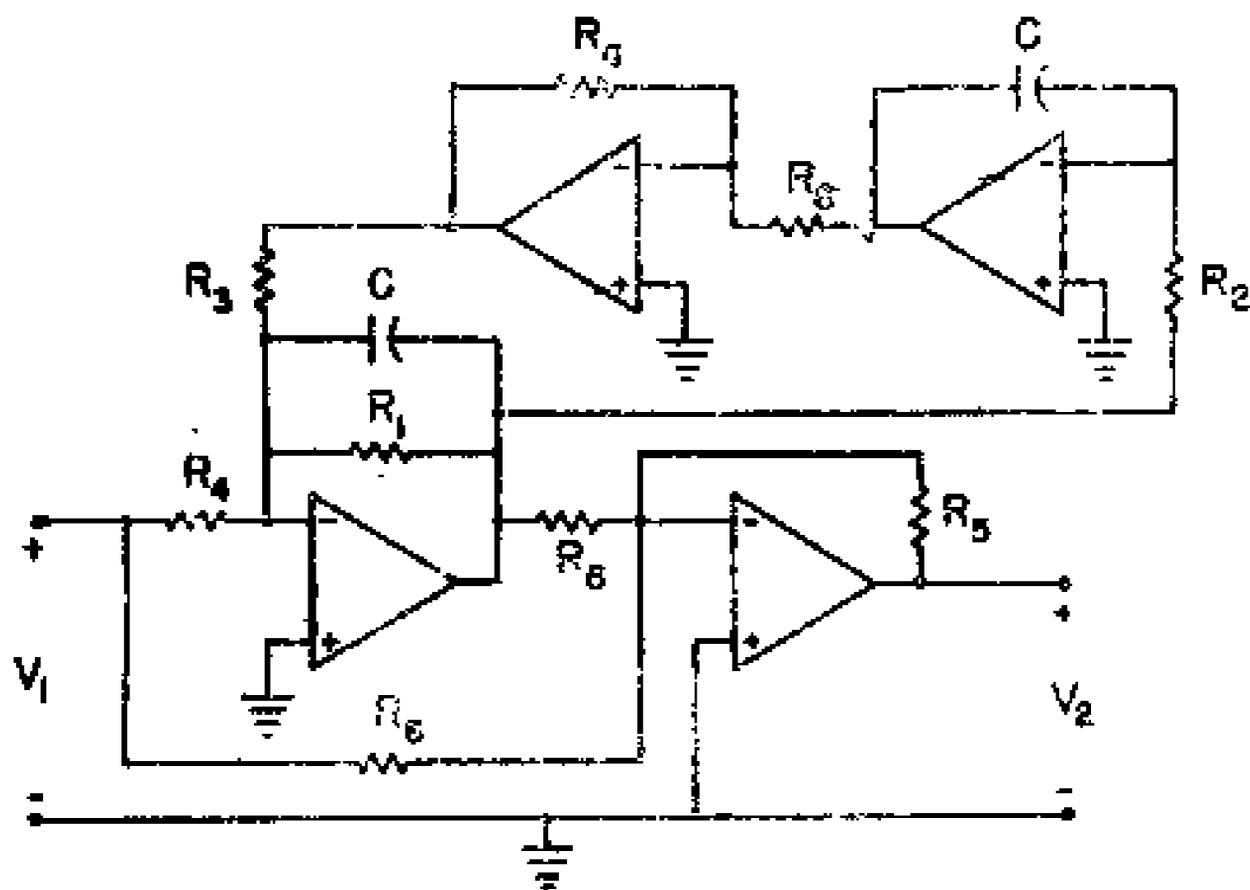


图 6—4 双二次全通电路

双二次电路与前一节讲到的电路相比，要用较多的元件，但它更稳定而且非常容易调整。改变 R_5 可以调整增益，改变 R_1 影响参数 a ，改变 R_3 影响参数 b ，因而都会改变相位移。

双二次全通滤波器的快速设计程序将在6.8节给出，有关的设计表为表6-13~6-24。按相移从 $\pm 5^\circ$ 到 $\pm 175^\circ$ ，每次增加 5° 的间隔列出全部设计表，各表中每一种情况下给出的反相增益均为1。

6.4 恒时延或贝塞尔滤波器

一种相位响应是一条向右下方倾斜直线（如图6-1所示）的滤波器叫线性相移或恒时延滤波器。从(6.1)式可以很清楚地看出这一点，因为此时相移和频率成正比，即 $\varphi(\omega) = -k\omega$ ，而 $T_d = -d(-k\omega)/d\omega = R$ ，所以 T_d 对所有频率都是一个常数。

全极型滤波器（见2.1节）中对恒时延电路近似程度最好的是贝塞尔滤波器^[43]。在二阶情况下，它的传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{3\omega_0^2 G}{s^2 + 3\omega_0 s + 3\omega_0^2} \quad (6.9)$$

在三阶情况下，传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{15\omega_0^3 G}{s^3 + 6\omega_0 s^2 + 15\omega_0^2 s + 15\omega_0^3} \quad (6.10)$$

在四阶情况下，传递函数为

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{105\omega_0^4 G}{s^4 + 10\omega_0 s^3 + 45\omega_0^2 s^2 + 105\omega_0^3 s + 105\omega_0^4} \quad (6.11)$$

在每种情况下，增益均为 G ，相移近似于线性，在从0到 $f_0 = \omega_0/2\pi$ Hz的频率范围内，时延近似为 $\frac{1}{\omega_0}$ 。阶数增加时，近似程度也随之改善。例如，每种情况下，在 $\omega = 0$ 处的时延均

为 $T_d = 1/\omega_0$ 秒。在 $\omega = \omega_0$ 处, 对于二阶, $T_d = 12/13\omega_0$; 对于三阶, $T_d = 276/277\omega_0$; 对于四阶, $T_d = \frac{12745}{12746\omega_0}$ 。(6.9)、(6.10)

和(6.11)式是从总的连分式展开式导出的特殊情况, 它们可以

很容易地推广到高阶情况 [22]。

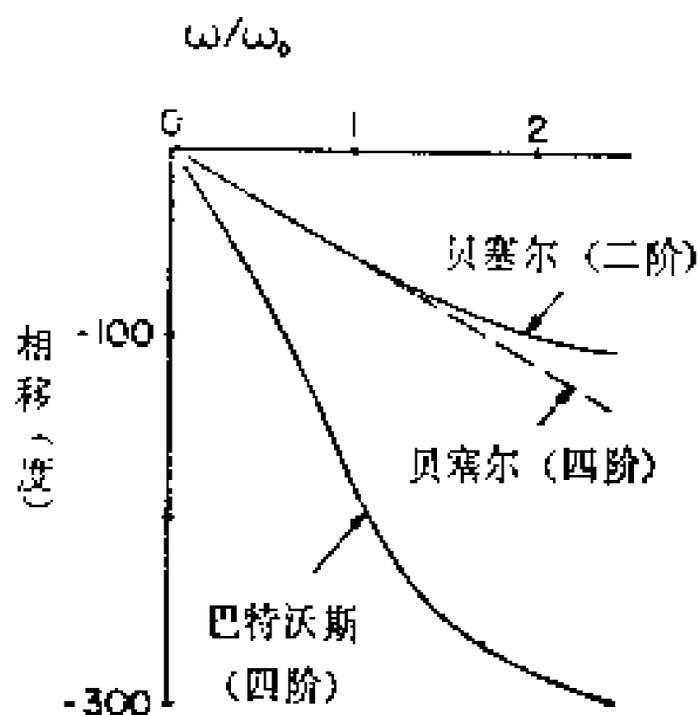


图 6—5 贝塞尔和巴特沃斯相位响应

为了说明贝塞尔滤波器的质量和它随阶数增加而改善的情况, 图6-5中绘出了二阶和四阶贝塞尔滤波器的相位响应。为了作比较, 还给出四阶巴特沃斯滤波器的相位响应。显然, 两种贝塞尔响应大大优于巴特沃斯响

应, 而四阶贝塞尔滤波器的相位响应又比二阶贝塞尔滤波器好。

贝塞尔滤波器的幅度响应除了从零频处的最大值缓慢而单调地下降外, 在某种程度上类似于全通滤波器。这是可以预料得到的, 因为每种情况的传递函数都类似于低通滤波器。

6.5 贝塞尔滤波器的实现

因为贝塞尔滤波器的传递函数在形式上和低通滤波器传递函数相同, 因而它可以用第二章讲到的任何电路来实现。在6.9节所总结的设计程序也和第2章相同, 只是现在我们不是对截频 f_c 感兴趣, 而是关心和时延有关的频率 f_0 。在零频率, 时延为 $T_d = 1/\omega_0$, 因此, 如果 T_d 以秒为单位, 则得到

$$f_0 = \frac{0.15915}{T_d} \text{ Hz} \quad (6.12)$$

这对于所有的阶数都是正确的。对于从零到 f_0 Hz的频率, T_d 近似于常数, 近似的程度随阶数增加而改善。

我们首先需要找出 f_0 , 这样才能根据选择的电路电容 C 值, 从(6.6)式计算参数 K 。我们可以按照所要求的 T_d 值从(6.12)式计算 f_0 , 或者从图6-9a、b或c中适当的一个曲线上读出 f_0 。其余的设计程序和第二章所述相同。

我们给出了二阶和四阶贝塞尔滤波器的元件值表。当利用2.5节压控电压源电路时, 设计表为表6-25~6-26; 当利用2.6节无限增益多路反馈电路时, 设计表为表6-27~6-28。另外, 还给出了利用2-8节多路反馈电路的三阶和四阶设计表, 即表6-29和表2-30。

实例: 让我们设计一个四阶多路反馈贝塞尔滤波器, 其恒时延 T_d 为 $159.15\mu\text{s}$, 增益为4。由(6.12)式得到 $f_0=1000\text{Hz}$, 这也可以从图6-9b查出。选择 $C=0.01\mu\text{F}$, 从(6.6)式得到的参数 K 为10。采用图2-10所示的通用电路, 对应的设计表为表6-30。表中查得的电阻值乘以 $K=10$ 后得到 $R_1=1.35$, $R_2=15.83$, $R_3=2.07$, $R_4=6.92$, $R_5=11.98$ 和 $R_6=35.95$, 均为 $\text{K}\Omega$ 。实际结果是在 1000Hz 和 2000Hz 处 $T_d=160\mu\text{s}$, 增益为4。和低通一样, 增益是在零频率时传递函数的幅度的函数; 在 1000Hz , 其值为3.8, 而在 2000Hz , 则为2.9。幅度响应和输入、输出波形示于图6-6。幅度响应从0扫掠到 2000Hz , 波形水平轴标度为 $200\mu\text{s}/\text{格}$ 。

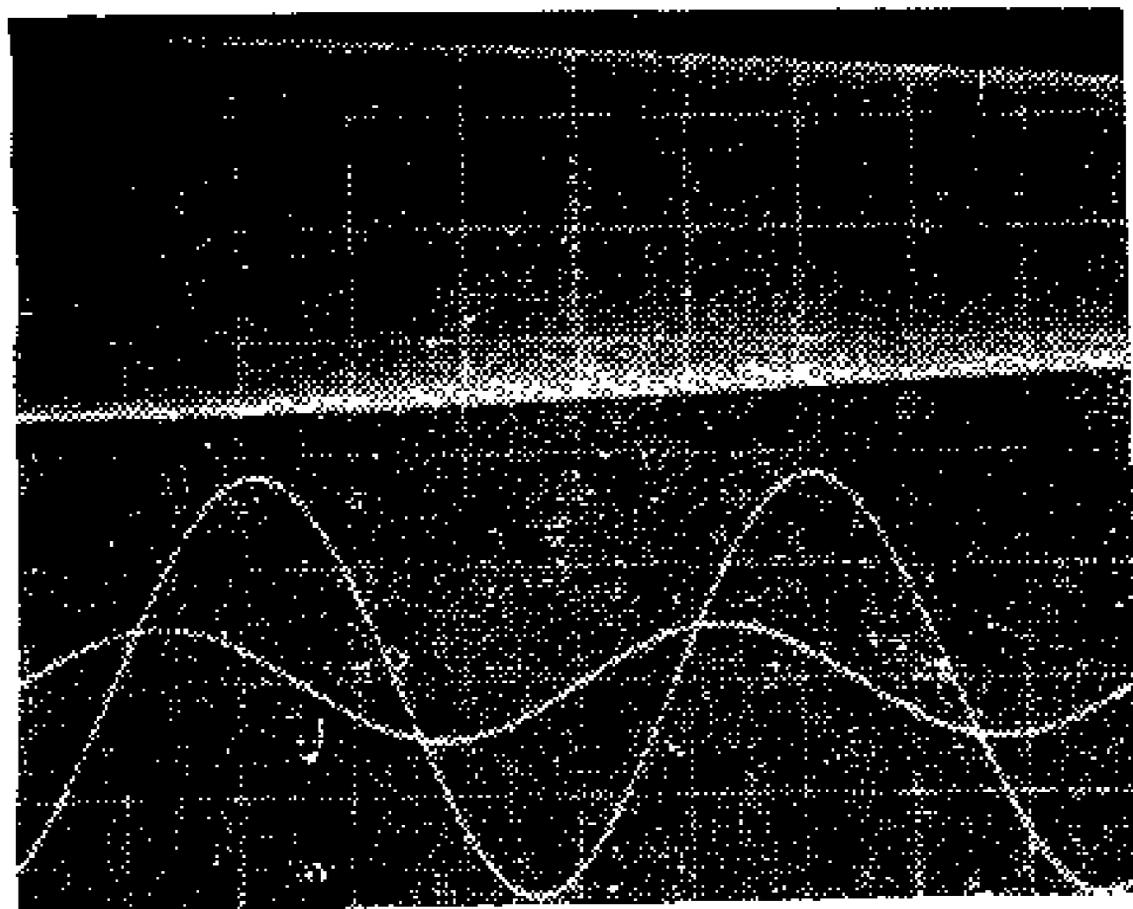


图 6—6 四阶贝塞尔滤波器的幅度响应和波形

6.6 全通恒时延滤波器

将贝塞尔滤波器的传递函数写成

$$H(s) = \frac{K}{P(s)} \quad (6.13)$$

其中， K 为常数，而 $P(s)$ 是分母多项式，在(6.9)、(6.10)和(6.11)式内分别给出二、三和四阶时的情况。由此，函数

$$\frac{V_2}{V_1} = G \frac{P(-s/2)}{P(s/2)} \quad (6.14)$$

就是同时具有全通和恒时延特性的滤波器电路的传递函数〔44〕。

全通恒时延滤波器的一个优点是频率增加时幅度响应不衰减，这和贝塞尔滤波器一样。另外，文献〔44〕指出，其时延保持恒定值的频率范围是贝塞尔滤波器的两倍以上。

对于二阶贝塞尔滤波器, (6.14)式成为:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{G(s^2 - 6\omega_0 s + 12\omega_0^2)}{s^2 + 6\omega_0 s + 12\omega_0^2} \quad (6.15)$$

因此, 可用本章讲过的三种全通电路的任一种来实现这个传递函数。在这一节里, 我们讨论一个实用设计, 它采用6.2节所述的单运算放大器电路。这时(6.4)和(6.5)式仍然成立, 但 $a = 6\omega_0$ 和 $b = 12\omega_0^2$ 。通用电路和设计程序将在6.10节给出, 和它有关的设计表为表6-31, 其增益为0.25。

实例: 假定我们要求一个二阶全通恒时延滤波器, 其 $T_d = 100\mu\text{s}$ 。从(6.12)式得 $f_0 = 1592\text{Hz}$ 。选择 $C = 0.01\mu\text{F}$, 从(6.6)式得参数 K 为6.28。将由表6-31查得的电阻值乘以6.28得 $R_1 = 2.5$, $R_2 = 3.33$, $R_3 = 13.33$, $R_4 = 4.44$ (均为 $\text{K}\Omega$), 实际使用2.5, 3.32, 13和4.7 $\text{K}\Omega$ 的电阻组成电路。所得结果是在1000、1592和2000 Hz 处的 $T_d = 100\mu\text{s}$, 恒定的增益为4。图6-7示出全通幅度响应和1000 Hz 时的输入和输出波形。

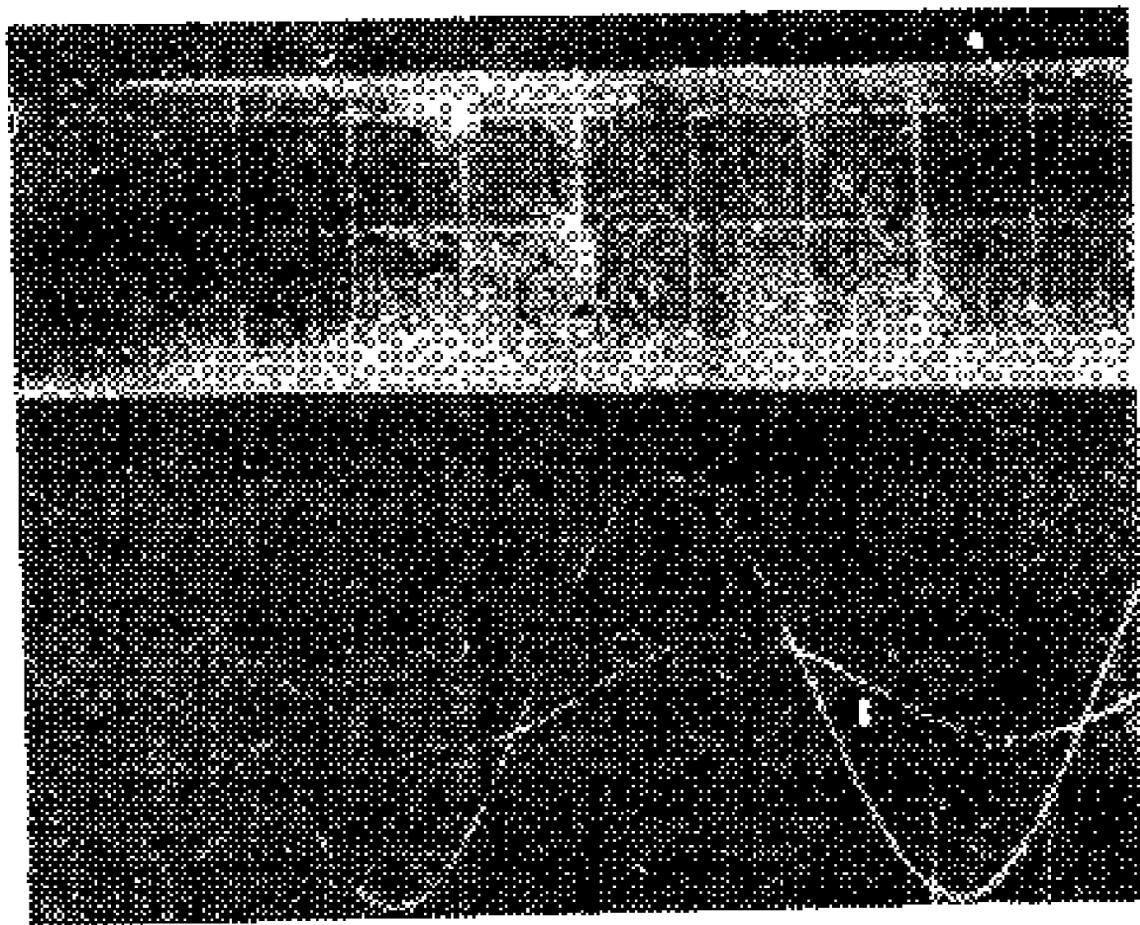
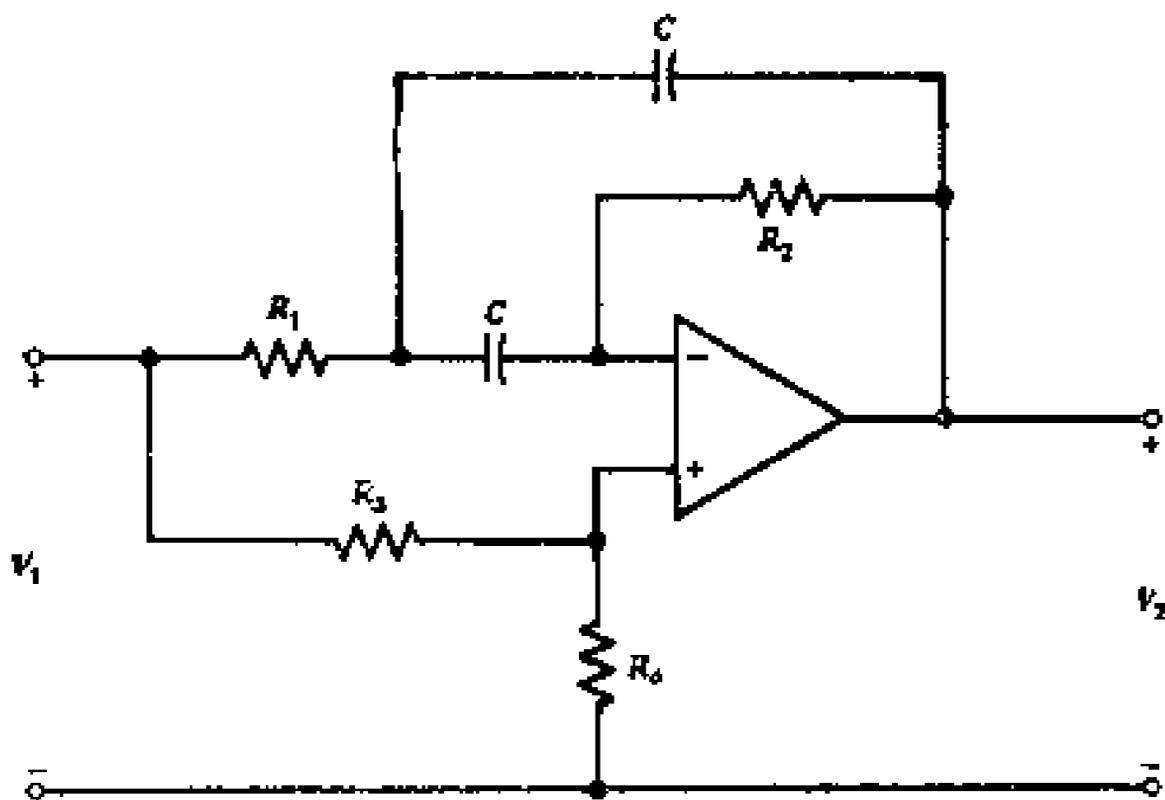


图 6—7 全通恒时延滤波器的幅度响应和波形

6.7 单运算放大器全通滤波器设计程序摘要



通用电路

设计程序

给定 f_0 (Hz) 和在 f_0 处要求的相移 ϕ , 按下列步骤进行设计:

1. 选择电容 C 的值, 由下式决定参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可由图 6-8a、b 或 C 查出。

2. 根据 ϕ 值, 从表 6-1~6-12 适当的一个表中查出电阻值。表中电阻值对应于 $K=1$ 的情况, 因而必须乘以由第一步获得的 K 值, 才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值, 这些值应尽可能接近由查表得出的数值, 按通用电路制作滤波器。

注 释 和 建 议

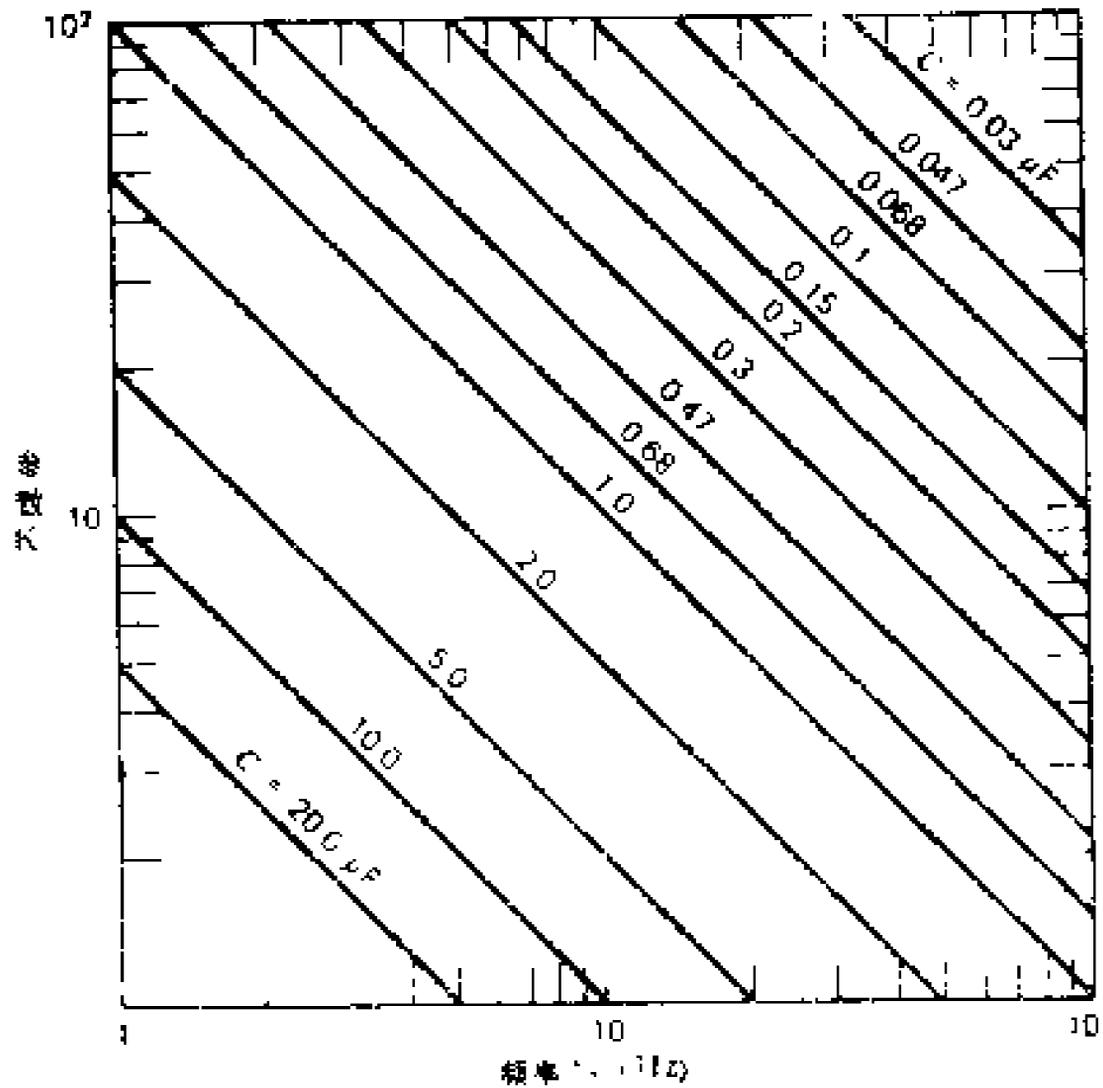
(a) 通常用容差为5%的标称值电阻就可以得到满意的结果。为获得最佳的性能，应选用和查表得出的数值尽可能接近的电阻。

就电容而论，为得到最好的效果，应用容差为5%的电容。因为精密电容价格较贵，可能希望使用容差较大的电容，这时通常需要进行调整。在多数情况下，用容差为10%的电容常常就满足要求了。

(b) 运算放大器的开环增益至少应是滤波器在 f_0 处的增益的50倍。在 f_0 处，要求的峰—峰电压值不应超过运算放大器压摆率和 $\frac{10^6}{\pi f_0}$ 的乘积。因此，当 f_0 较高时，可能要用外部补偿的运算放大器。

(c) 相移和增益可分别由改变 R_2 和 R_4 进行调整。

单运算放大器全通滤波器已在6.2节讨论过了。



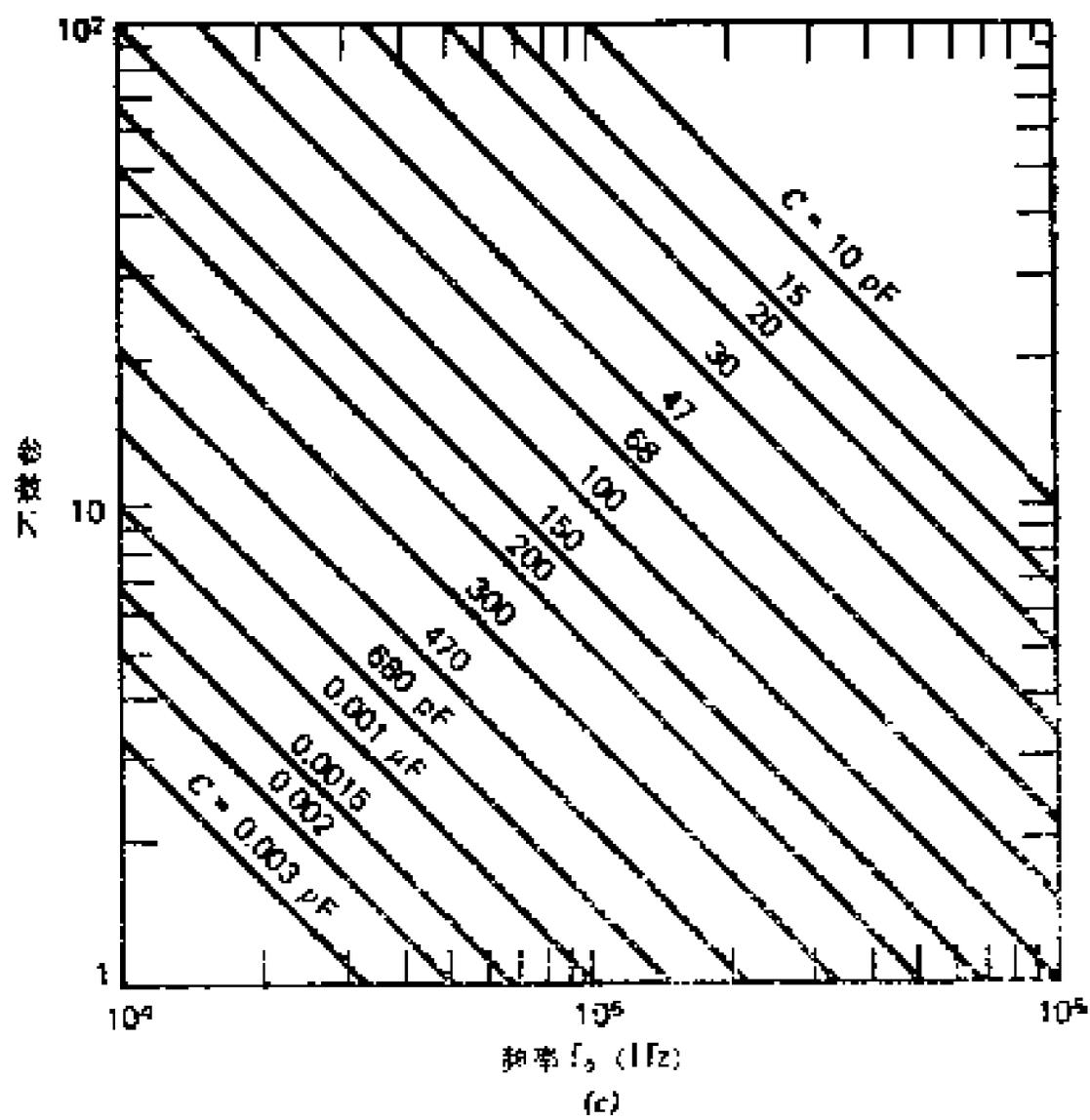
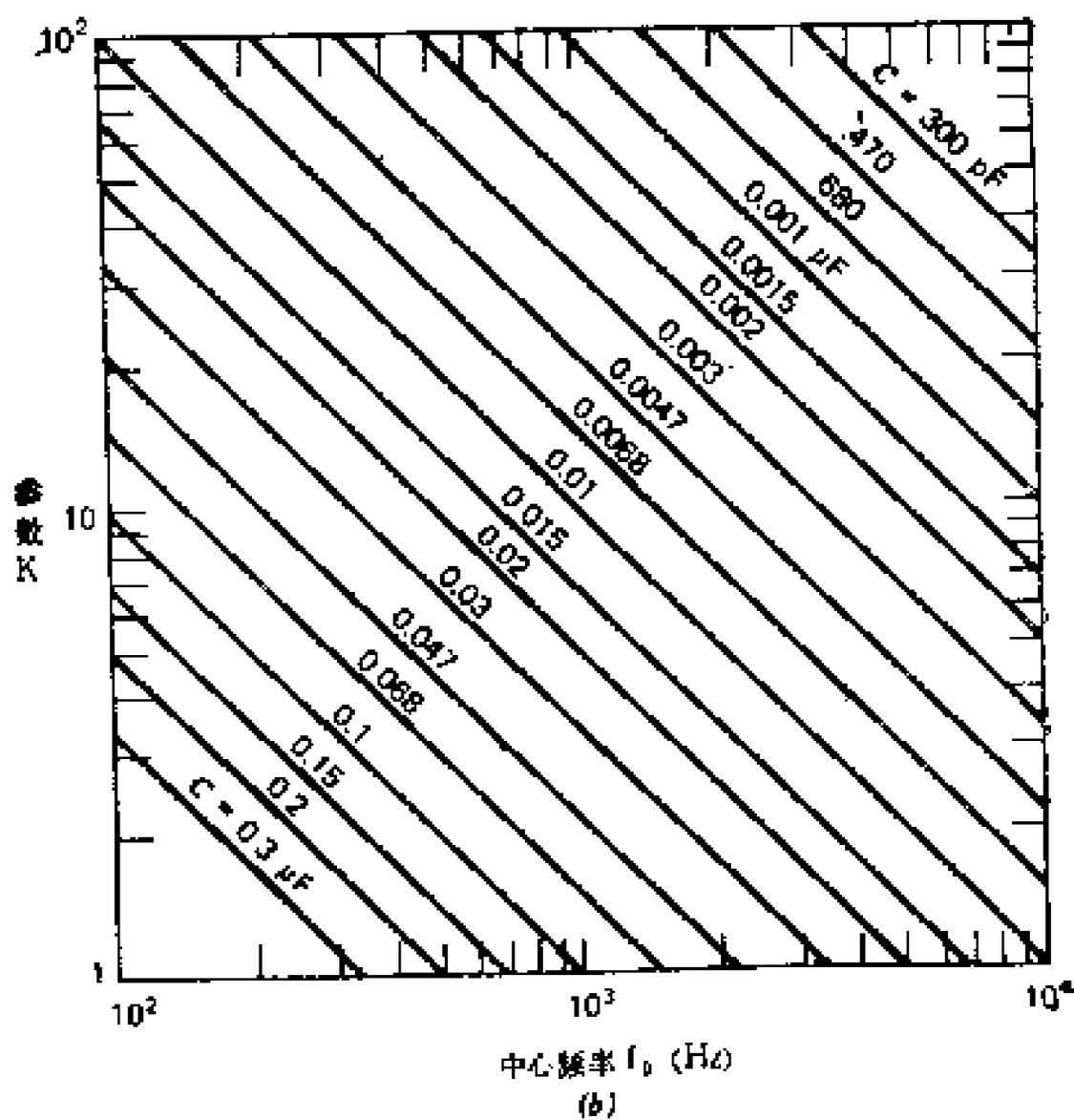


图 6-8 参数 K 和频率的关系

表 6—1 单运放全通(相移)滤波器设计表(5°~30°)

相移	电路元件值*					
	5°	10°	15°	20°	25°	30°
R_1	18.261	9.165	6.148	4.649	3.758	3.170
R_2	73.044	36.659	24.490	18.597	15.032	12.679
R_3, R_4	146.087	73.319	49.180	37.194	30.064	25.357

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—2 单运放全通(相移)滤波器设计表(35°~60°)

相移	电路元件值*					
	35°	40°	45°	50°	55°	60°
R_1	2.754	2.445	2.208	2.020	1.868	1.742
R_2	11.015	9.781	8.832	8.080	7.471	6.967
R_3, R_4	22.031	19.563	17.664	16.160	14.942	13.935

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—3 单运放全通(相移)滤波器设计表(65°~80°)

相移	电路元件值*					
	65°	70°	75°	80°	85°	90°
R_1	1.636	1.546	1.468	1.401	1.341	1.288
R_2	6.545	6.184	5.873	5.602	5.363	5.150
R_3, R_4	13.089	12.369	11.747	11.204	10.726	10.301

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—4 单运放全通(相移)滤波器设计表(95°~120°)

相移	电路元件值*					
	95°	100°	105°	110°	115°	120°
R_1	1.240	1.197	1.158	1.122	1.089	1.058
R_2	4.960	4.787	4.631	4.487	4.355	4.232
R_3, R_4	9.919	9.575	9.261	8.974	8.709	8.464

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—5 单运放全通(相移)滤波器设计表(125°~150°)

相移	电路元件值*					
	125°	130°	135°	140°	145°	150°
R_1	1.029	1.003	0.977	0.954	0.931	0.909
R_2	4.118	4.011	3.910	3.815	3.724	3.638
R_3, R_4	8.255	8.021	7.820	7.629	7.448	7.276

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—6 单运放全通(相移)滤波器设计表(155°~175°)

相移	电路元件值*				
	155°	160°	165°	170°	175°
R_1	0.889	0.869	0.850	0.831	0.813
R_2	3.555	3.476	3.400	3.325	3.253
R_3, R_4	7.111	6.952	6.799	6.651	6.507

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—7 单运放全通(相移)滤波器设计表(-5°~-30°)

相移	电路元件值*					
	-5°	-10°	-15°	-20°	-25°	-30°
R_1	0.035	0.069	0.103	0.136	0.169	0.200
R_2	0.139	0.276	0.412	0.545	0.674	0.799
R_3, R_4	0.277	0.553	0.824	1.090	1.348	1.598

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—8 单运放全通(相移)滤波器设计表(-35°~-60°)

相移	电路元件值*					
	-35°	-40°	-45°	-50°	-55°	-60°
R_1	0.230	0.259	0.287	0.313	0.339	0.364
R_2	0.920	1.036	1.147	1.254	1.356	1.454
R_3, R_4	1.340	2.072	2.294	2.508	2.712	2.908

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—9 单运放全通(相移)滤波器设计表($-65^{\circ} \sim -90^{\circ}$)

相移	电路元件值*					
	-65°	-70°	-75°	-80°	-85°	-90°
R_1	0.387	0.410	0.431	0.452	0.472	0.492
R_2	1.548	1.638	1.725	1.809	1.889	1.967
R_3, R_4	3.096	3.277	3.450	3.617	3.779	3.935

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—10 单运放全通(相移)滤波器设计表($-95^{\circ} \sim -120^{\circ}$)

相移	电路元件值*					
	-95°	-100°	-105°	-110°	-115°	-120°
R_1	0.511	0.529	0.547	0.565	0.582	0.599
R_2	2.043	2.116	2.188	2.258	2.327	2.394
R_3, R_4	4.086	4.233	4.376	4.516	4.654	4.788

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—11 单运放全通(相移)滤波器设计表($-125^{\circ} \sim -150^{\circ}$)

相移	电路元件值*					
	-125°	-130°	-135°	-140°	-145°	-150°
R_1	0.615	0.632	0.648	0.664	0.680	0.696
R_2	2.461	2.526	2.591	2.656	2.721	2.785
R_3, R_4	4.921	5.053	5.183	5.312	5.441	5.570

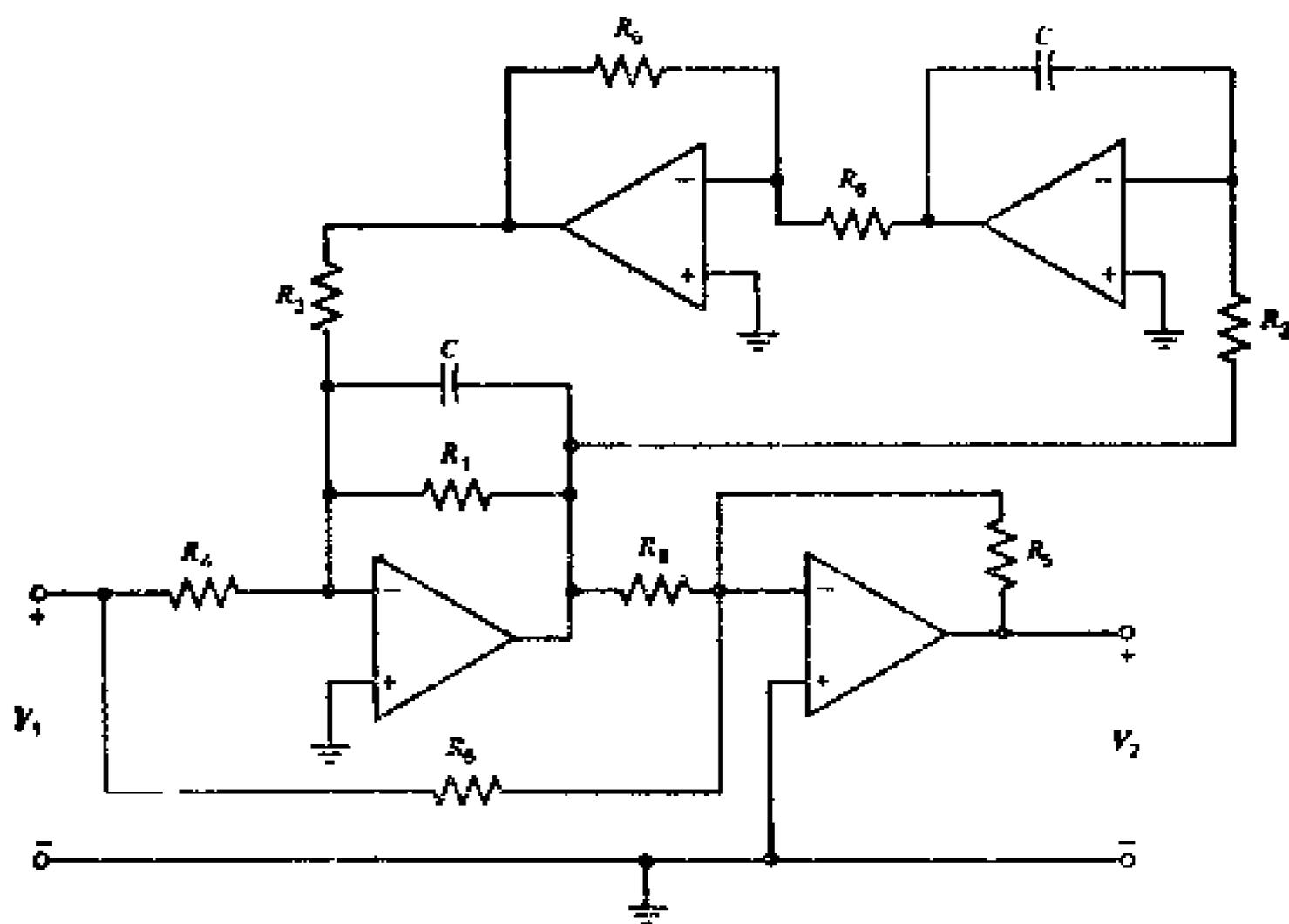
*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

表 6—12 单运放全通(相移)滤波器设计表($-155^{\circ} \sim -175^{\circ}$)

相移	电路元件值*				
	-155°	-160°	-165°	-170°	-175°
R_1	0.712	0.729	0.745	0.762	0.779
R_2	2.850	2.915	2.980	3.047	3.114
R_3, R_4	5.700	5.830	5.961	6.094	6.229

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。增益为0.5。

6.8 双二次全通滤波器设计程序摘要



通用电路

设计程序

给定 f_0 (Hz) 和在 f_0 处要求的相移, 按下列步骤进行设计,

1. 选择电容 C 的值, 由下式计算参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可由图 6-8a、b 或 c 查出。

2. 从表 6-13~6-24 适当的一个表中查出电阻值。表中的电阻值对应于 $K = 1$ 的情况, 因此, 必须乘以由第一步获得的

参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

3. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得到的数值，按通用电路制作滤波器。

注 释 和 建 议

(a) 6.7节对单运算放大器全通滤波器的注释和建议的a和b条在这里可直接应用。

(b) 此外，通过改变 R_1 、 R_3 和 R_5 能方便地调整滤波器的响应。改变 R_1 和 R_3 可以调整相移。改变 R_5 可调整增益。

双二次全通滤波器已在6.3节讨论过了。

表 6—13 双二次全通(相移)滤波器设计表($5^\circ \sim 30^\circ$)

相移	电路元件值*					
	5°	10°	15°	20°	25°	30°
R_1, R_2, R_3	36.522	18.330	12.295	9.299	7.516	6.339
R_4	18.261	9.165	6.148	4.649	3.758	3.170
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—14 双二次全通(相移)滤波器设计表($35^\circ \sim 60^\circ$)

相移	电路元件值*					
	35°	40°	45°	50°	55°	60°
R_1, R_2, R_3	5.508	4.891	4.416	4.040	3.735	3.484
R_4	2.754	2.445	2.208	2.020	1.868	1.742
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—15 双二次全通(相移)滤波器设计表(65°~90°)

相移	电路元件值*					
	65°	70°	75°	80°	85°	90°
R_1, R_2, R_3	3.272	3.092	2.931	2.801	2.682	2.575
R_4	1.636	1.546	1.468	1.401	1.341	1.288
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1

表 6—16 双二次全通(相移)滤波器设计表(95°~120°)

相移	电路元件值*					
	95°	100°	105°	110°	115°	120°
R_1, R_2, R_3	2.480	2.394	2.315	2.243	2.177	2.116
R_4	1.240	1.197	1.158	1.122	1.089	1.058
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1

表 6—17 双二次全通(相移)滤波器设计表(125°~150°)

相移	电路元件值*					
	125°	130°	135°	140°	145°	150°
R_1, R_2, R_3	2.059	2.005	1.955	1.907	1.862	1.819
R_4	1.029	1.003	0.977	0.954	0.931	0.909
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1

表 6—18 双二次全通(相移)滤波器设计表($155^\circ \sim 175^\circ$)

相移	电路元件值*				
	155°	160°	165°	170°	175°
R_1, R_2, R_3	1.778	1.738	1.700	1.663	1.627
R_4	0.889	0.869	0.850	0.831	0.813
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—19 双二次全通(相移)滤波器设计表($-5^\circ \sim -30^\circ$)

相移	电路元件值*					
	-5°	-10°	-15°	-20°	-25°	-30°
R_1, R_2, R_3	0.069	0.138	0.206	0.272	0.337	0.400
R_4	0.035	0.069	0.103	0.136	0.169	0.200
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—20 双二次全通(相移)滤波器设计表($-35^\circ \sim -60^\circ$)

相移	电路元件值*					
	-35°	-40°	-45°	-50°	-55°	-60°
R_1, R_2, R_3	0.460	0.518	0.574	0.627	0.678	0.727
R_4	0.230	0.259	0.287	0.313	0.339	0.364
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—21 双二次全通(相移)滤波器设计表($-65^\circ \sim -90^\circ$)

相移	电路元件值*					
	-65°	-70°	-75°	-80°	-85°	-90°
R_1, R_2, R_3	0.774	0.819	0.863	0.904	0.945	0.984
R_4	0.387	0.410	0.431	0.452	0.472	0.492
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—22 双二次全通(相移)滤波器设计表($-95^\circ \sim -120^\circ$)

相移	电路元件值*					
	-95°	-100°	-105°	-110°	-115°	-120°
R_1, R_2, R_3	1.021	1.058	1.094	1.129	1.163	1.197
R_4	0.511	0.529	0.547	0.565	0.582	0.599
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6—23 双二次全通(相移)滤波器设计表($-125^\circ \sim -150^\circ$)

相移	电路元件值*					
	-125°	-130°	-135°	-140°	-145°	-150°
R_1, R_2, R_3	1.230	1.263	1.296	1.328	1.360	1.393
R_4	0.615	0.632	0.648	0.664	0.680	0.696
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K=1$ 时的值,单位为 $k\Omega$ 。反相增益为1。

表 6-24 双二次全通(相移)滤波器设计表($-155^\circ \sim -175^\circ$)

相移	电路元件值*				
	-155°	-160°	-165°	-170°	-175°
R_1, R_2, R_3	1.425	1.457	1.490	1.523	1.557
R_4	0.712	0.729	0.745	0.762	0.779
R_5, R_6	1.592	1.592	1.592	1.592	1.592

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。反相增益为 1。

6.9 贝塞尔(恒时延)滤波器设计程序摘要

设计程序

给定时延 T_d 、阶数(二、三或四阶)和增益, 按下列步骤进行设计:

1. 由下式根据 $T_d(s)$ 计算 f_0 (Hz)

$$f_0 = \frac{0.15915}{T_d}$$

或者从图 6-9a、b 或 c 适当的一个图中查出 f_0 (注: 也可指定 f_0 , 在这一步求出 T_d)。

2. 选择电容 C 的值, 由下式求参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 为以 μF 为单位的 C 值。或者, K 值也可由图 6-8a、b 或 c 中查出, 但对于四阶, 因为要求较高的精度, 用公式计算较好。

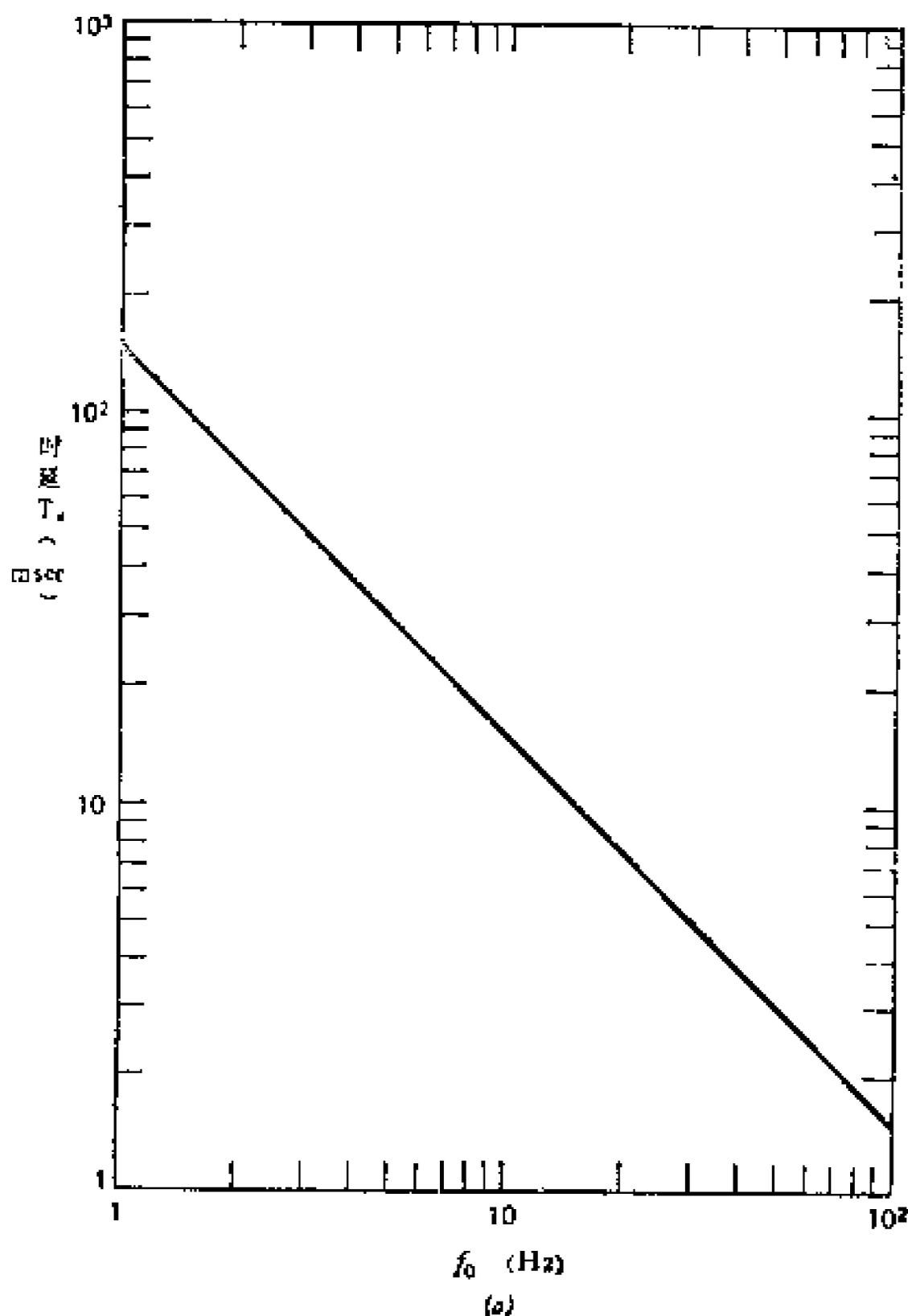
3. 从压控电压源、无限增益多路反馈或多路反馈等低通滤波器(见 6.5 节)中选择一种电路来构成滤波器。利用第二

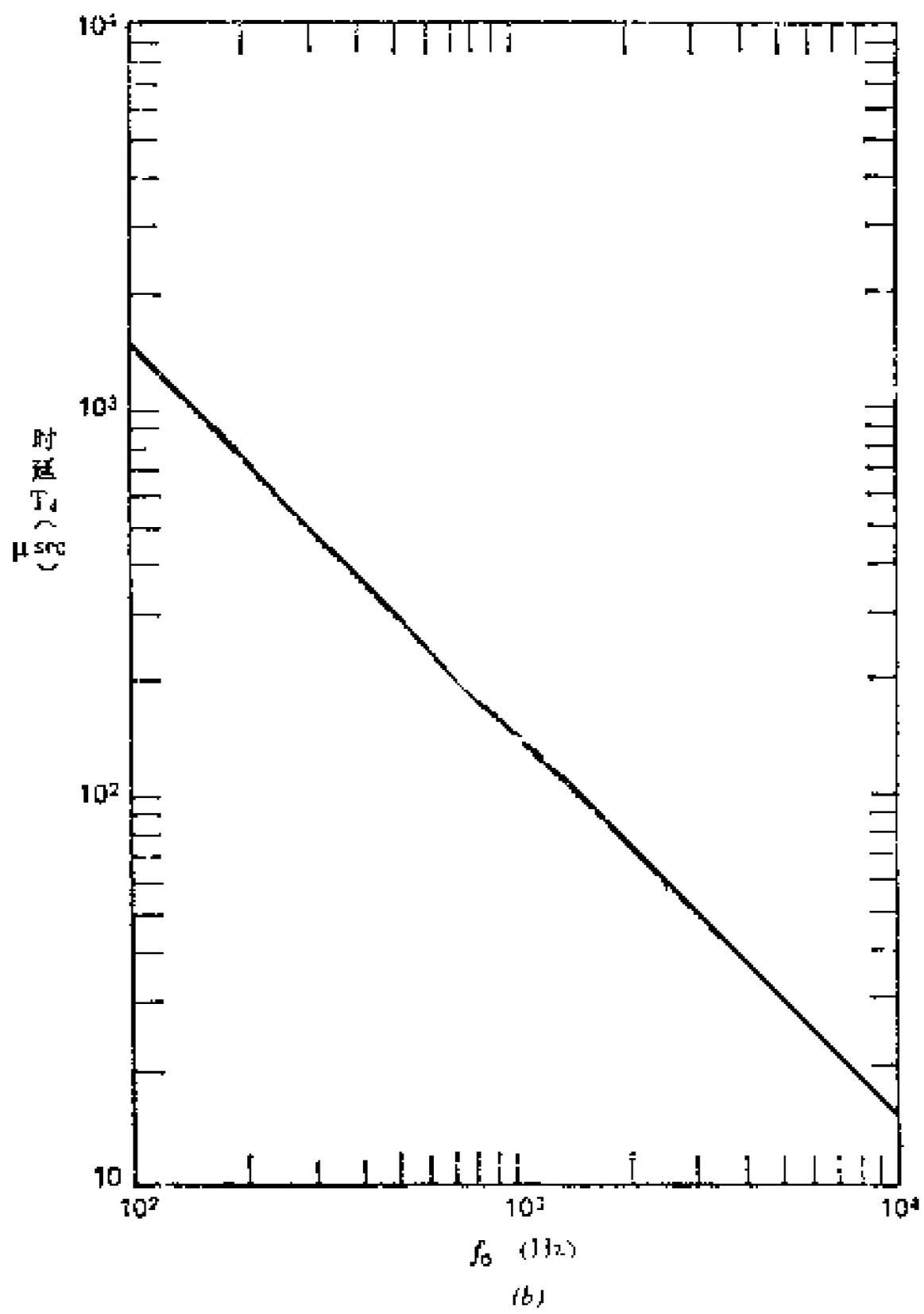
步求得的 K 值，按下面的办法从适当的表中求出电阻值：

(a)如果选用压控电压源电路，通用电路及其注释和建议由2.10节给出，相应于二阶和四阶的设计表分别为表2-25和表2-26。

(b)如果选用无限增益多路反馈电路，通用电路及其注释和建议由2.11节给出，相应于二阶和四阶的设计表分别为表6-27和表6-28。

(c)如果选用多路反馈电路，三阶和四阶的通用电路图分别为图2-9和图2-10。注释和建议由2-13节给出。相应于二阶和四阶的设计表分别为表6-29和表6-30。





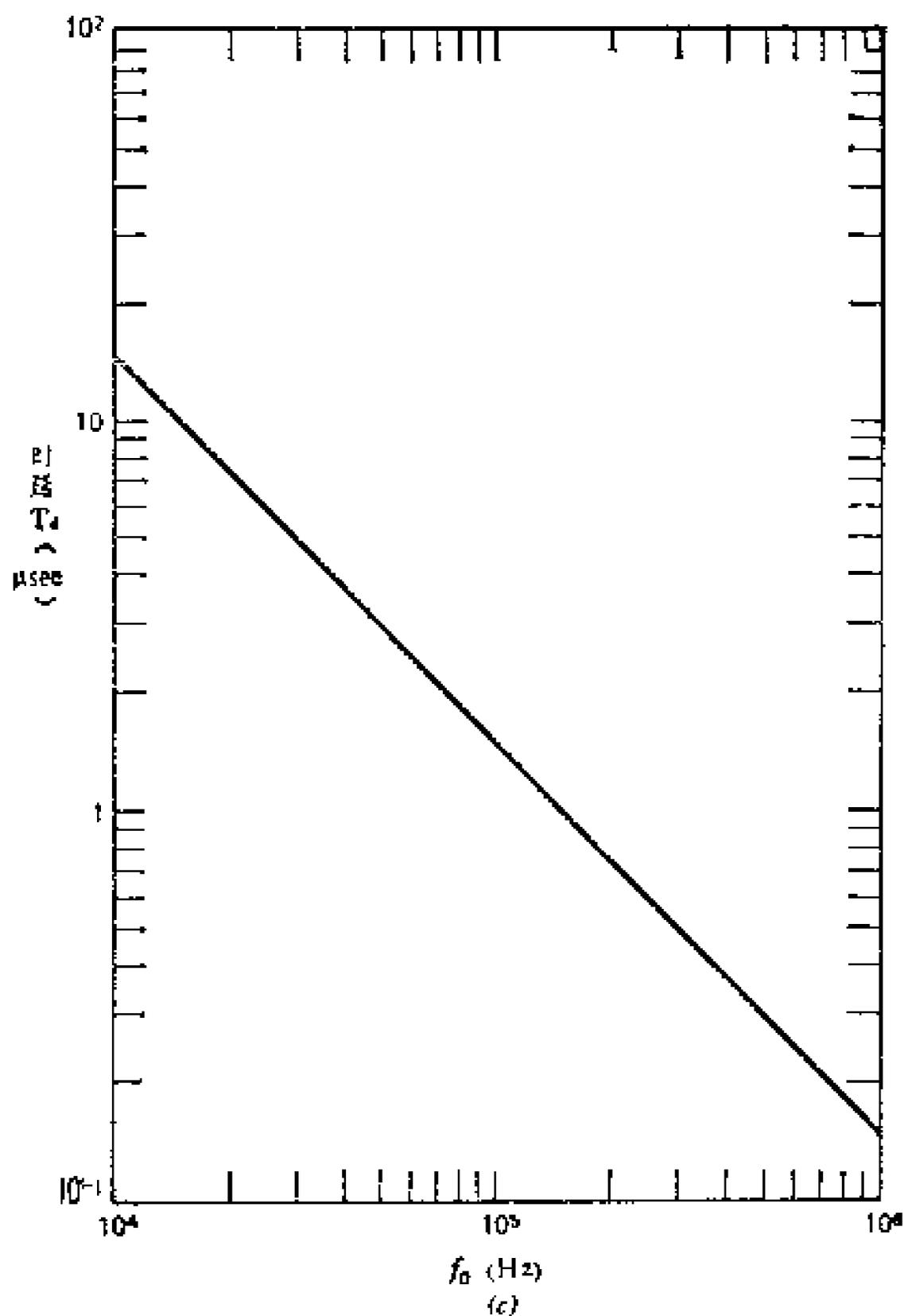


图 6—9 时延和频率的关系

注 释 和 建 议

对于上面(a)、(b)和(c)中选择的三种电路来说，第2章的注释和建议中的 f_c 在这里应改为 f_0 。

6.5节已经给出了一个四阶多路反馈贝塞尔滤波器的实例。

表 6-25 二阶压控电压源贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	0.673	0.531	0.420	0.328	0.282	0.252
R_2	2.510	1.592	1.006	1.288	1.500	1.677
R_3	开路	4.244	1.901	1.939	2.035	2.143
R_4	0	4.244	5.702	9.693	14.249	19.287
C_1	0.5C	C	2C	2C	2C	2C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 6-26 四阶压控电压源级联贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.328	0.275	0.225	0.179	0.179	0.140	1
R_2	1.689	1.009	1.233	1.546	0.773	0.993	
R_3	开路	2.567	2.187	2.157	1.143	1.258	
R_4	0	2.567	4.374	8.628	5.714	11.324	
C_1	0.5C	C	C	C	2C	2C	
R_1	0.407	0.407	0.378	0.378	0.173	0.141	2
R_2	5.423	5.423	0.583	0.583	1.275	0.784	
R_3	开路	开路	1.922	1.922	1.737	1.027	
R_4	0	0	1.922	1.922	8.687	9.244	
C_1	0.1C	0.1C	C	C	C	2C	

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 6-27 二阶无限增益多路反馈贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*					
	1	2	4	6	8	10
R_1	1.466	1.100	0.841	0.984	0.731	0.770
R_2	1.466	2.199	3.363	5.903	5.850	7.697
R_3	1.919	1.919	2.510	1.430	2.887	2.194
C_1	0.3C	0.2C	0.1C	0.1C	0.05C	0.05C

*电阻为参数 $K=1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 6—28 四阶无限增益多路反馈级联贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*						节
	1	2	6	10	36	100	
R_1	0.692	0.519	0.539	0.415	0.431	0.370	1
R_2	0.692	1.038	1.618	2.076	2.587	3.702	
R_3	1.335	1.335	0.856	1.335	1.071	1.497	
C_1	0.3C	0.2C	0.2C	0.1C	0.1C	0.05C	
R_1	1.029	1.029	0.772	0.772	0.678	0.604	2
R_2	1.029	1.029	1.543	1.543	4.065	6.036	
R_3	1.429	1.429	1.429	1.429	1.085	1.218	
C_1	0.15C	0.15C	0.1C	0.1C	0.05C	0.03C	

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 6—29 三阶多路反馈贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*
	2
R_1	1.277
R_2	0.670
R_3	0.314
R_4	4.522

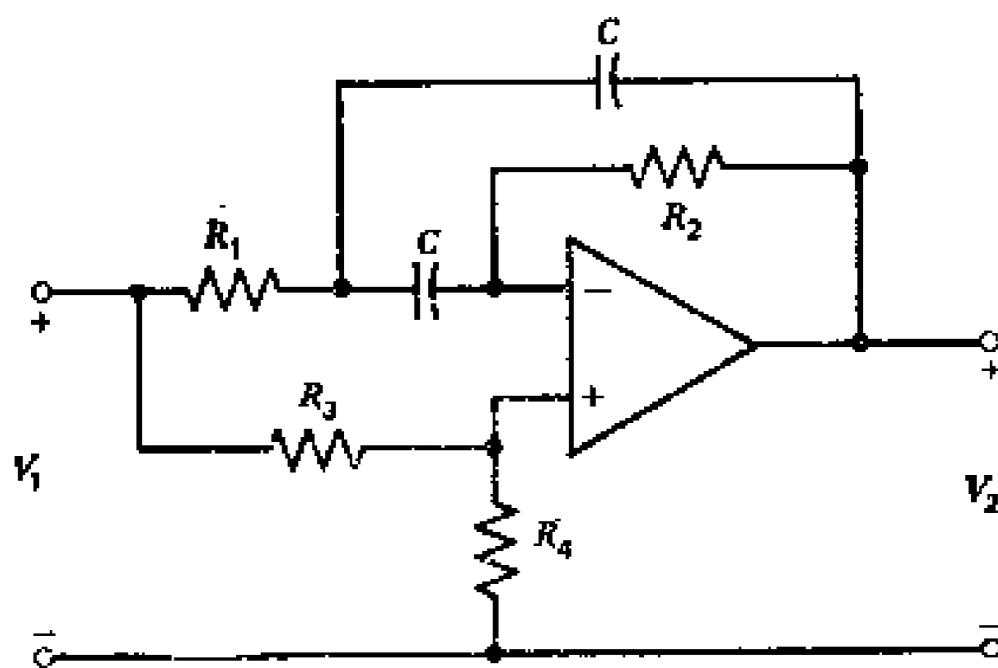
*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

表 6—30 四阶多路反馈贝塞尔(恒时延)滤波器设计表

增益	电路元件值*				
	2	4	6	8	10
R_1	0.152	0.135	0.126	0.119	0.114
R_2	1.236	1.583	1.863	2.111	2.338
R_3	0.458	0.207	0.154	0.127	0.109
R_4	0.355	0.692	0.847	0.957	1.044
R_5	1.626	1.198	1.202	1.239	1.282
R_6	1.626	3.595	6.008	8.672	11.537

*电阻为参数 $K = 1$ 时的值, 单位为 $k\Omega$ 。

6.10 全通恒时延滤波器设计程序摘要



通用电路

设计程序

给定时延 T_d ，按下列步骤进行设计：

1. 由下式根据 $T_d(s)$ 计算 f_0 (Hz)

$$f_0 = \frac{0.15915}{T_d}$$

或者从图6-9a、b或c适当的一个图中查出 f_0 。（注：也可指定 f_0 ，在这一步求出 T_d ）。

2. 选择电容 C 的值，由下式求参数 K

$$K = \frac{100}{f_0 C'}$$

这里 C' 是以 μF 为单位的 C 值。或者， K 值也可由图6-8a、b或c中查出。

3. 从表6-31查出对应于 $K = 1$ 时的电阻值，把这些数值

表 6-31 二阶全通恒时延滤波器设计表

电 路 元 件 值*	
R_1	0.398
R_2	0.531
R_3	0.838
R_4	0.279

* 电阻为参数 $K = 1$ 时的值，单位为 $k\Omega$ 。增益为 0.25。

乘以由第二步求出的参数 K ，才能得到电路的实际电阻值。

4. 按标准选择所用电阻值，这些值应尽可能接近由查表得出的数值，按通用电路制作滤波器。

注 释 和 建 议

6.7节的a、b和c条在这里可直接应用。

设计表中确定电阻 R_3 和 R_4 的依据是将直流失调电压减至最小。只要保持比值 $R_3/R_4 = 3$ ，也可以用其他的电阻值。

6.6节已给出了具体的设计例子。

参 考 文 献

1. J. L. Hilburn and D. E. Johnson, *Manual of Active Filter Design*, McGraw-Hill, New York, 1973.
2. J. G. Graeme, G. F. Tobey, and L. P. Huelsman (eds.), *Operational Amplifiers: Design and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1971.
3. S. K. Mitra (ed.) *Active Inductorless Filters*, IEEE Press, New York, 1971.
4. S. K. Mitra, *Analysis and Synthesis of Linear Active Networks*, John Wiley, New York, 1969.
5. S. S. Haykin, *Active Network Theory*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1970.
6. L. P. Huelsman, *Theory and Design of Active RC Circuits*, McGraw-Hill, New York, 1968.
7. L. P. Huelsman, *Active Filters: Lumped, Distributed, Integrated, Digital, and Parametric*, McGraw-Hill, New York, 1970.
8. K. L. Su, *Active Network Synthesis*, McGraw-Hill, New York, 1965.
9. *Linear Integrated Circuit D.A.T.A. Book*, Derivation and Tabulation Associates, Orange, N.J., Spring 1974.
10. *RCA Linear Integrated Circuits*, RCA Solid State Division, Somerville, N.J., 1970.
11. R. Melen and H. Garland, *Understanding IC Operational Amplifiers*, Howard W. Sams, Indianapolis, 1971.
12. *Radio Electronics* (monthly publication), Gernsback Publications, New York.
13. F. C. Fitchen, *Electronic Integrated Circuits and Systems*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1970.
14. A. B. Grebene, *Analog Integrated Circuit Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1972.
15. *Popular Electronics* (monthly periodical), Ziff-Davis, New York.
16. *Electronics* (biweekly periodical), McGraw-Hill, New York.
17. G. S. Moschytz and R. W. Wyndrum Jr., "Applying the operational amplifier," *Electronics*, December 9, 1968, pp. 98-106.
18. *Electronics Circuit Designers Casebook*, Electronics, New York, 1972.
19. E. A. Guillemin, *Synthesis of Passive Networks*, John Wiley, New York, 1957.
20. N. Balabanian, *Network Synthesis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1958.
21. M. E. Van Valkenburg, *Introduction to Modern Network Synthesis*, John Wiley, New York, 1960.
22. L. Weinberg, *Network Analysis and Synthesis*, McGraw-Hill, New York, 1962.
23. G. C. Temes and S. K. Mitra, *Modern Filter Theory and Design*, John Wiley, New York, 1973.
24. A. Budak, *Passive and Active Network Analysis and Synthesis*, Houghton Mifflin, Boston, 1974.
25. A. Papoulis, "On the approximation problem in filter design," *IRE National Convention Record*, vol. 5, pt. 2, pp. 175-185, 1957.

26. R. P. Sallen and E. L. Key, "A practical method of designing RC active filters," *IRE Transactions on Circuit Theory*, CT-2, pp. 74-85, March 1955.
27. J. Tow, "A step-by-step active filter design," *IEEE Spectrum*, pp. 64-68, December 1969.
28. *Handbook of Operational Amplifier Active RC Networks*, Burr-Brown Research Corporation, Tucson, 1966.
29. J. Tow, "Design formulas for active RC filters using operational amplifier biquad," *Electron. Letters*, pp. 339-341, July 24, 1969.
30. L. C. Thomas, "The Biquad: Part I—Some practical design considerations," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-18, pp. 350-357, May 1971.
31. J. L. Hilburn, D. E. Johnson, and A. Eskandar, "Low-pass and high-pass designs for higher-order active filters," *Proc. 1974 IEEE Region 3 Conference and Exhibit*, April 1974.
32. G. Szentirmai, "Synthesis of multiple-feedback active filters," *BSTJ*, pp. 527-555, April 1973.
33. P. E. Felscher and J. Tow, "Design formulas for biquad active filters using three operational amplifiers," *Proc. IEEE*, vol. 61, no. 5, pp. 662-663, May 1973.
34. P. R. Geffe, *Simplified Modern Filter Design*, Hayden, New York, 1963.
35. W. J. Kerwin and L. P. Huelsman, "The design of high performance active RC band-pass filters," *IEEE International Convention Record* vol. 14, pt. 10, pp. 74-80, 1960.
36. L. P. Huelsman, *Theory and Design of Active RC Circuits*, McGraw-Hill, New York, 1968.
37. R. Brandt, "Active resonators save steps in designing active filters," *Electronics* April 24, 1972, pp. 106-110.
38. J. L. Hilburn and D. E. Johnson, "A fourth-order bandpass filter," *Proc. 17th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, September 1974.
39. D. E. Johnson, J. L. Hilburn, and F. H. Irons, "Multiple-feedback higher-order active filters," *Proc. 1974 IEEE Region 3 Conference and Exhibit*, April 1974.
40. G. Hurlig III, "The primary resonator block technique of filter synthesis," *Proc. International Filter Symposium*, p. 84, April 1972.
41. R. M. Inigo, "Active filter realization using finite-gain voltage amplifiers," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-17, pp. 445-448, Aug. 1970.
42. T. Delyannis, "RC active allpass sections," *Electron Letters*, vol. 5, pp. 59-60, February 1969.
43. L. Storch, "Synthesis of constant-time-delay ladder networks using Bessel polynomials," *Proc. of the IRE*, vol. 42, no. 11, pp. 1666-1675, November 1954.
44. A. H. Marshak, D. E. Johnson, and J. R. Johnson, "A Bessel rational filter," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. CAS-22, November 1974.

附录 A

巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器传递函数当截频归一化为
1 rad/sec 时分母多项式

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_2s^2 + b_1s + b_0$$

的系数

表 A-1 巴特沃斯滤波器: $s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_2s + b_0$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	1.00000							
2	1.00000	1.41421						
3	1.00000	2.00000	2.00000					
4	1.00000	2.61313	3.41421	2.61313				
5	1.00000	3.23607	5.23607	5.23607	3.23607			
6	1.00000	3.86370	7.46410	9.14162	7.46410	3.86370		
7	1.00000	4.49396	10.09783	14.59179	14.59179	10.09783	4.49396	
8	1.00000	5.12583	13.13707	21.84615	25.68836	21.84615	13.13707	5.12583

表 A-2 0.1 dB 切比雪夫滤波器 ($\epsilon = 0.15262$):

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0$$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	6.55222							
2	3.31329	2.37209						
3	1.63809	2.62953	1.93883					
4	0.82851	2.02550	2.62680	1.80377				
5	0.40951	1.43556	2.39696	2.77071	1.74396			
6	0.20713	0.90176	2.04784	2.77908	2.96575	1.71217		
7	0.10238	0.56179	1.48293	2.70514	3.16925	3.18350	1.69322	
8	0.05179	0.32645	1.06667	2.15932	3.41855	3.56485	3.41297	1.58104

表A-3 0.5 dB 切比雪夫滤波器 ($\epsilon = 0.34931$):

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0$$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	2.86278							
2	1.51620	1.42552						
3	0.71569	1.53490	1.25291					
4	0.37905	1.02546	1.71687	1.19739				
5	0.17892	0.75252	1.30957	1.93737	1.17249			
6	0.09476	0.43237	1.17186	1.58976	2.17184	1.15918		
7	0.04473	0.28207	0.75565	1.64790	1.86941	2.41265	1.15122	
8	0.02369	0.15254	0.57356	1.14859	2.18402	2.14922	2.65675	1.14608

表A-4 1 dB 切比雪夫滤波器 ($\epsilon = 0.50885$):

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0$$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	1.96523							
2	1.10251	1.09773						
3	0.49131	1.23841	0.98834					
4	0.27563	0.74262	1.45392	0.95281				
5	0.12283	0.58053	0.97440	1.68882	0.93682			
6	0.06891	0.30708	0.93935	1.20214	1.93083	0.92825		
7	0.03071	0.21367	0.54862	1.35754	1.42879	2.17608	0.92312	
8	0.01723	0.10723	0.44783	0.84682	1.83690	1.65516	2.42303	0.91981

表A-5 2 dB 切比雪夫滤波器 ($\epsilon = 0.76478$):

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0$$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	1.30756							
2	0.82325	0.80382						
3	0.32689	1.02219	0.73782					
4	0.20577	0.51680	1.25648	0.71622				
5	0.08172	0.45935	0.69348	1.49954	1.70646			
6	0.05144	0.21027	0.77146	0.86701	1.74586	0.70123		
7	0.02042	0.16609	0.38251	1.14444	1.03922	1.99353	0.69789	
8	0.01286	0.07294	0.35870	0.59822	1.57958	1.21171	2.24225	0.69606

表A-6 3 dB 切比雪夫滤波器 ($\epsilon = 0.99763$):

$$s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0$$

n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
1	1.00238							
2	0.70795	0.64490						
3	0.25059	0.92835	0.59724					
4	0.17699	0.40477	1.16912	0.58158				
5	0.06264	0.40794	0.54886	1.41498	0.57443			
6	0.04425	0.16343	0.69910	0.69061	1.66285	0.57070		
7	0.01566	0.14615	0.30002	1.05184	0.83144	1.91155	0.56842	
8	0.01106	0.05648	0.32076	0.47190	1.46670	0.97195	2.16071	0.56695

附录 B

巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器传递函数当截频归一化为
1 rad/sec 时分母多项式二阶因式

$$\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$$

的系数

表B-1 巴特沃斯滤波器 $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	1.41421	1.00000						
2	0.76537	1.00000	1.84776	1.00000				
3	1.51764	1.00000	1.41421	1.00000	1.93185	1.00000		
4	0.39018	1.00000	1.11114	1.00000	1.66294	1.00000	1.96157	1.00000

表B-2 0.1 dB 切比雪夫滤波器 $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	2.37209	3.31329						
2	0.52827	1.32981	1.27536	0.62282				
3	0.22940	1.12953	0.62674	0.69646	0.85614	0.26339		
4	0.12797	1.06964	0.36443	0.79901	0.54540	0.41627	0.64334	0.1456

表B-3 0.5 dB 切比雪夫滤波器 : $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	1.42562	1.51620						
2	0.35071	1.06352	0.84668	0.35641				
3	0.15530	1.02302	0.42429	0.59001	0.57959	0.15700		
4	0.08724	1.01193	0.24844	0.74133	0.37182	0.35865	0.43859	0.08805

表B-4 1 dB 切比雪夫滤波器 : $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	1.09773	1.10251						
2	0.27907	0.98650	0.67374	0.27940				
3	0.12436	0.99073	0.33976	0.55772	0.46413	0.12471		
4	0.07002	0.99414	0.19939	0.72354	0.29841	0.34086	0.35200	0.07026

表B-5 2 dB 切比雪夫滤波器 : $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	0.80382	0.82325						
2	0.20977	0.92868	0.50644	0.22157				
3	0.09395	0.96595	0.25667	0.53294	0.35061	0.09993		
4	0.05298	0.98038	0.15089	0.70978	0.22582	0.32710	0.26637	0.05650

表B-6 3 dB 切比雪夫滤波器 : $\prod_{i=1}^n (s^2 + a_i s + b_i)$

n	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
1	0.64490	0.70795						
2	0.17034	0.90309	0.41124	0.19598				
3	0.07646	0.95483	0.20890	0.52182	0.28535	0.08880		
4	0.04316	0.97417	0.12290	0.70358	0.18393	0.32089	0.21696	0.05029

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 有源滤波器的快速实用设计

作者 =

页数 = 2 4 8

SS号 = 0

出版日期 =

1 . 绪论	
1 . 1	滤波器理论基础
1 . 2	运算放大器
1 . 3	电阻和电容
2 . 低通滤波器	
2 . 1	基本理论
2 . 2	巴特沃斯低通滤波器
2 . 3	切比雪夫低通滤波器
2 . 4	设计表
2 . 5	压控电压源低通滤波器
2 . 6	无限增益多路反馈低通滤波器
2 . 7	双二次低通滤波器
2 . 8	多路反馈低通滤波器
2 . 9	多路反馈低通滤波器设计实例
2 . 1 0	压控电压源低通滤波器设计程序摘要
2 . 1 1	无限增益多路反馈低通滤波器设计程序摘要
2 . 1 2	双二次低通滤波器设计程序摘要
2 . 1 3	多路反馈低通滤波器设计程序摘要
3 . 高通滤波器	
3 . 1	基本理论
3 . 2	压控电压源高通滤波器
3 . 3	无限增益多路反馈高通滤波器
3 . 4	双二次高通滤波器
3 . 5	多路反馈高通滤波器
3 . 6	多路反馈高通滤波器设计实例
3 . 7	压控电压源高通滤波器设计程序摘要
3 . 8	无限增益多路反馈高通滤波器设计程序摘要
3 . 9	双二次高通滤波器设计程序摘要
3 . 1 0	多路反馈高通滤波器设计程序摘要
4 . 带通滤波器	
4 . 1	基本理论
4 . 2	二阶节的级联
4 . 3	压控电压源带通滤波器
4 . 4	无限增益多路反馈带通滤波器
4 . 5	正反馈带通滤波器
4 . 6	双二次带通滤波器
4 . 7	多路反馈带通滤波器
4 . 8	多级谐振器型带通滤波器
4 . 9	压控电压源带通滤波器设计程序摘要 ($Q = 10$)
4 . 1 0	无限增益多路反馈带通滤波器设计程序摘要 ($Q = 10$)
4 . 1 1	正反馈带通滤波器设计程序摘要 ($Q = 50$)
4 . 1 2	双二次带通滤波器设计程序摘要 ($Q = 100$)
4 . 1 3	四阶多路反馈带通滤波器设计程序摘要 ($Q = 10$)
4 . 1 4	多级谐振器型带通滤波器设计程序摘要 (阶数 = 4、6、8)
5 . 带阻滤波器	
5 . 1	基本理论
5 . 2	压控电压源带阻滤波器
5 . 3	多路反馈带阻滤波器
5 . 4	双二次带阻滤波器
5 . 5	压控电压源带阻滤波器设计程序摘要 ($Q = 10$)
5 . 6	多路反馈带阻滤波器设计程序摘要 ($Q = 25$)
5 . 7	双二次带阻滤波器设计程序摘要 ($Q = 50$)
6 . 相移和时延滤波器	
6 . 1	全通滤波器
6 . 2	二阶单运算放大器全通滤波器
6 . 3	双二次全通滤波器
6 . 4	恒时延或贝塞尔滤波器
6 . 5	贝塞尔滤波器的实现
6 . 6	全通恒时延滤波器
6 . 7	单运算放大器全通滤波器设计程序摘要
6 . 8	双二次全通滤波器设计程序摘要
6 . 9	贝塞尔 (恒时延) 滤波器设计程序摘要
6 . 1 0	全通恒时延滤波器设计程序摘要
参考文献	
附录 A	
附录 B	