直直开关变换器
稳定性分析与频率特性测量

陈新
航空电源重点实验室

内容

- 稳定性相关原理
- 闭环设计与测试原理
- 稳定性测量方法
- 总结

内容

➢稳定性相关原理
- 重要性
- 频率特性基本概念
- 电源稳定性原理
- 稳定性测量工具

➢闭环设计与测试原理
- 控制-输出传函
- K factor案例
- 小信号测量机理

➢稳定性测量方法
- 仪器设置
- 测试方法
- (HP4395 & V3120)

结论

内容

- 稳定性相关原理
- 闭环设计与测试原理
- 稳定性测量方法
- 总结

内容

- 稳定性相关原理
  - 稳定性分析重要性
  - 频率特性基本概念
  - 电源稳定性原理
  - 稳定性测量工具

内容

- 稳定性相关原理
  - 稳定性分析重要性
  - 频率特性基本概念
  - 电源稳定性原理
  - 稳定性测量工具

控制系统分析

- 电源的要求：输出直流恒定，具有一定的稳态和动态性能
  - 稳态性能：输入变化或输出负载变化时，输出电压的稳压精度
  - 动态性能：输入或输出条件突变时，输出电压的超调大小和恢复时间
- 控制系统的设计关系到电源系统的稳定性
- 控制系统的设计关系到电源系统的动态性

闭环反馈电路设计

- 如果响应速度慢，电源动态性能差
- 如果响应速度快，可能造成系统出现振荡
- 闭环控制的目的：在完成稳压控制的条件下，加速电源响应速度，不会出现振荡

闭环分析的必要性

- 需要补偿环等专业公式，具有一定难度
- 实际设计中，经常是通过电路实验调试
- 缺乏理论根据，效率低
- 从理论上掌握闭环设计方法和准则对设计和产品很有必要

内容

- 稳定性相关原理
  - 稳定性分析重要性
  - 频率特性基本概念
  - 电源稳定性原理
  - 稳定性测量工具

拉普拉斯变换

- 拉普拉斯变换THE LAPLACE TRANSFORM
- 系统分析中，需要掌握输入与输出之间的关系，多以微分或微积分的时域数学表达式表示
- 可以用拉普拉斯变换（Laplace Transform）将时域(time domain)变换到频域(time domain)，方便处理
- 同理频域通过反拉普斯变换可以从频域变回时域

拉普拉斯变换

- 定义f(t)是时间的任意函数，
  当t<0时，f(t)=0；且积分 $\int_0^\infty f(t)e^{-st}dt$ 为有限值
  则可以通过拉普拉斯变换：f(t) -> f(s)
- 拉普拉斯变换表达式： $f(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st}\,dt$
- 其中s为拉普拉斯算子 $s = \sigma + j\omega$
- 拉普拉斯反变换表达式： $f(t) = \frac{1}{2\pi j}\int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} f(s)e^{st}\,ds$

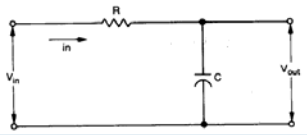
拉普拉斯变换

- 以单位阶跃响应拉普拉斯变换为例：
- 阶跃函数：f(t)=1 (当t>0时)
- 变换过程： $f(s) = \int_0^\infty 1e^{-st}\,dt = -\frac{1}{s}e^{-st}\Big|_0^\infty = -\frac{1}{s}(e^{-\infty} - e^0)$
- 因此阶跃函数的拉普拉斯变换表达式：

$$f(s) = \frac{1}{s}$$

传递函数

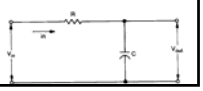
- 如何将拉普拉斯变换用到稳定度分析？
- 首先需要推导出系统的输入信号与输出响应之间的传递函数
- 以简单RC电路为例



传递函数

- 由基尔霍夫定律： $V_{in} = iR + \frac{1}{C}\int i\,dt$ $\quad V_{out} = \frac{1}{C}\int i\,dt$
- 代入 $q=\int i\,dt$ 后： $V_{in} = R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{C}$ $\quad V_{out} = \frac{q}{C}$
- 进行拉氏变换： $V_{in}(s) = \left(sR + \frac{1}{C}\right)q(s)$ $\quad V_{out}(s) = \frac{q(s)}{C}$
- 两式相除，即得传递函数：

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{sRC + 1}$$



传递函数

- 任何系统都可以用传递函数来描述

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \qquad \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)\cdots(1+s\tau_n)}{(1+s\tau_a)(1+s\tau_b)\cdots(1+s\tau_m)}$$

- 由上式N(S)=0的根即为系统零点；而D(S)＝0的根即为系统极点
- 传递函数通常为频域表达式，结合了增益(gain)和相位（phase）特性

幅频特性和相频特性

- 若把输出的稳态响应和输入正弦信号用复数表示，并求它们的复数比，则得

  G（jω）=A（ω）Φ（ω）
- G（jω）称为频率特性
- A（ω）是输出信号的幅值与输入信号幅值之比，称为幅频特性
- Φ（ω）是输出信号的相角与输入信号的相角之差，称为相频特性

波特图分析工具

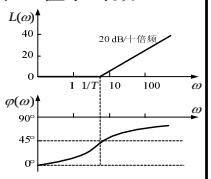
- 常用波特图进行反馈系统的分析
- 当系统的输入为正弦信号时，则输出的稳态响应也是一个正弦信号
- 其频率和输入信号的频率相同，但幅度和相位发生了变化，而变化取决于角频率ω
- 包括：
  - 幅频特性
  - 相频特性

波特图的几个概念

- 幅频特性：
  大小以分贝表示，输出大小与输入大小比值求对数

$$L(\omega) = 20\lg A(\omega)$$

若 $A = 100$， $L(\omega) = 20\lg 100 = 40$ dB



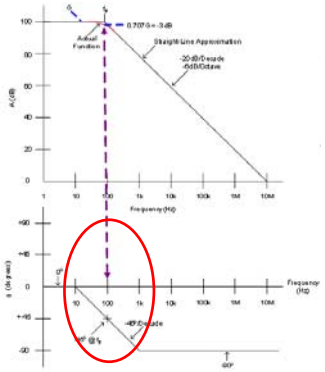
- 相频特性：
  大小以相角度表示，输出与输入相位差

- 幅频特性与相频特性的参变量均为频率，一般采用对数坐标

波特图的几个概念

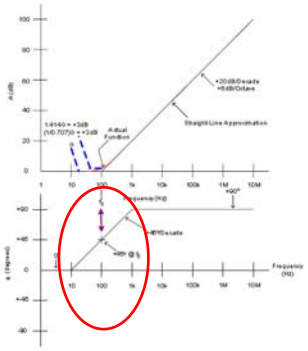
- 转折频率：对应传递函数的零点或极点
- 对于电路的频率分析，即双端口电路输出电压与输入电压的增益和相位
- 对于多个电路的串联，可将对应的波特图相加

器件的频率特性分析



Note： 请注意极点相位是如何影响直到高于（或低于）极点频率10倍频程处的频率的。

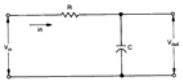
器件的频率特性分析

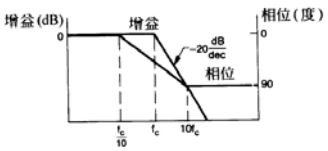


Note： 请注意零点相位是如何影响直到高于（或低于）零点频率10倍频程处的频率的。

波特图（单极点）

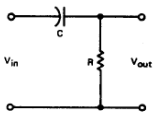
- 以RC电路为例：$\dfrac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \dfrac{1}{sRC+1}$
- 单极点频率为： $f_c = \dfrac{1}{2\pi RC}$
- 绘出波特图：
  （注意极点作用规律）

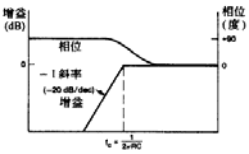




波特图（单零点-单极点）

- 同理可得其它几种电路传递函数的波特图





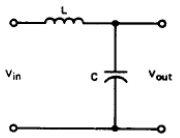
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{sRC}{sRC+1}$$

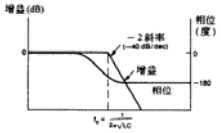
- 在原点处有一零点；
- 单极点频率为：$f_c = \dfrac{1}{2\pi RC}$

(Power supply cookbook, P198有错误)

波特图（双极点）

- LC滤波电路传递函数的波特图



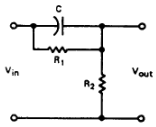


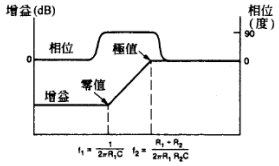
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=\frac{1}{s^2LC+1}$$

- 双极点频率为： $f_c=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

波特图（单零点 单极点）

- 单零点 单极点传递函数的波特图



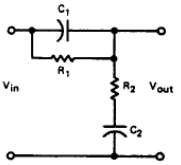


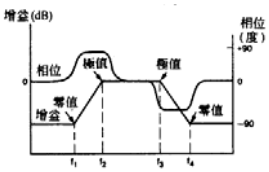
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=\frac{R_2}{R_1+R_2}\times\frac{sR_1C+1}{s\frac{R_1R_2C}{R_1+R_2}+1}$$

- 单零点对应频率为： $f_1=\frac{1}{2\pi R_1C}$
- 单极点对应频率为： $f_2=\frac{R_1+R_2}{2\pi R_1R_2C}$

波特图（双零点 双极点）

- 双零点 双极点传递函数的波特图

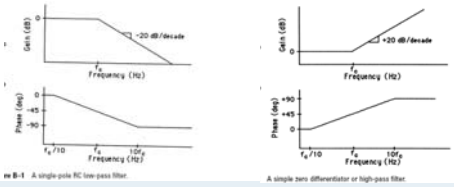




- 双零点 双极点波特图规律

器件的频率特性分析

- 相位在转折频率±10倍频处受到相应极点和零点的影响
- 幅值在转折频率处以20db/dec速度上升或下降（根据极点或零点影响）
- 对于多极点和零点，可以叠加处理

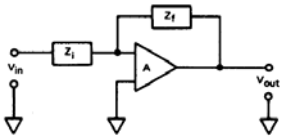


误差放大器的频率特性分析

- 以拉普拉斯的形式表现传移函数
- 由于电路传递函数为输出电压与输入电压之比，因此对放大器而言，其传递函数为：

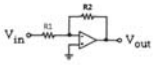
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=-\frac{Z_f}{Z_i}$$

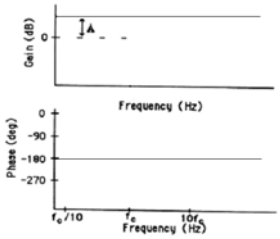
$$\frac{V_{out}}{V_{in}}=\frac{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}{(\tau_3 s)(\tau_4 s+1)}$$



误差放大器的频率特性分析—比例放大

- 比例放大运算放大器构成与频率特性



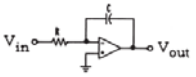


$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}=-\frac{R_2}{R_1}$$

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

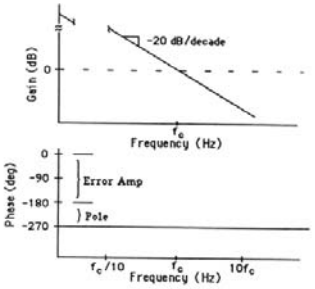
误差放大器的频率特性分析—单极点

➢ 单极点运算放大器构成与频率特性



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{1}{sCR}$$

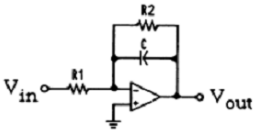
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

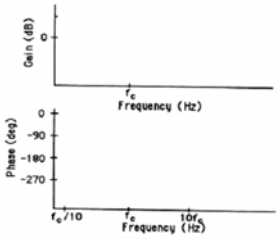


误差放大器的频率特性分析

➢ 单极点运算放大器构成与频率特性

➢ 带增益限制的有源单极点滤波器

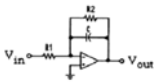




误差放大器的频率特性分析—增益限制单极点

➢ 单极点运算放大器构成与频率特性

➢ 带增益限制的有源单极点滤波器



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{R_2 // \frac{1}{sC}}{R_1}$$

$$= -\frac{R_2}{R_1}\frac{1}{sCR_2+1}$$

$$A = \frac{R_2}{R_1} \qquad f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

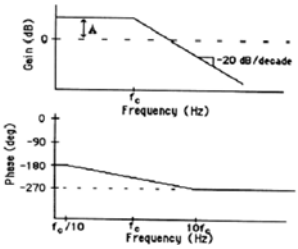
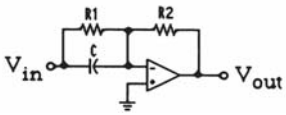


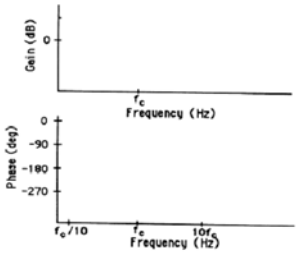
Figure 8-6 An active single-pole filter with flat high- and low-frequency responses.

(Power supply cookbook P199有错误) $f_c = \frac{1}{2\pi R1 \cdot C}$

误差放大器的频率特性分析

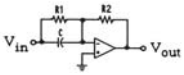
➢ 单零点运算放大器





误差放大器的频率特性分析—单零点

➢ 单零点运算放大器



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{R_2}{R_1 // \frac{1}{sC}}$$

$$= -\frac{R_2}{R_1}(sR_1C+1)$$

$$A = \frac{R_2}{R_1} \qquad f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C}$$

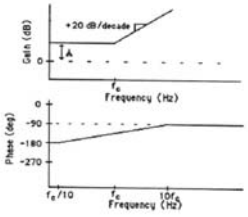
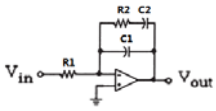


Figure 8-7 An active high-pass filter (single zero) with flat high- and low-frequency responses.

单极点/单零点补偿器

➢ 单极点/单零点补偿器



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{1}{R_1}\frac{(R_2+\frac{1}{sC_2})\times\frac{1}{sC_1}}{(R_2+\frac{1}{sC_2})+\frac{1}{sC_1}}$$

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

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

$$f_2 = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2 C_1 C_2} \approx \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

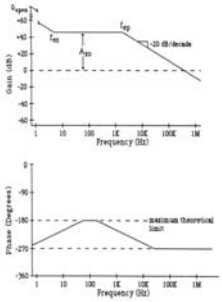
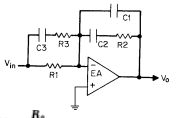


Figure 8-20 The pole-zero compensation method.

双极点/双零点补偿器

➢ 双极点/双零点补偿器



$$AV_1 = \frac{R_2}{R_1}$$

$$AV_2 = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1R_3} \approx \frac{R_2}{R_3}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_2C_2}$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_3)C_3} \approx \frac{1}{2\pi R_1C_3}$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi R_3C_3}$$

$$f_4 = \frac{C_1 + C_2}{2\pi R_2C_1C_2} \approx \frac{1}{2\pi R_2C_1}$$

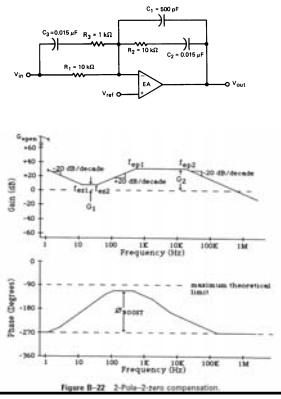


Figure 8–22 2-Pole–2-zero compensation.

闭环回路分析

➢ 典型闭环系统如图

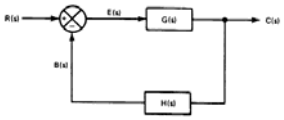
➢ 关系式：

$$C(s) = G(s)E(s)$$
$$B(s) = H(s)C(s)$$
$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s)$$

➢ 将式1和2代入3式，$C(s) = G(s)R(s) - H(s)G(s)C(s)$

➢ 闭环传递函数：

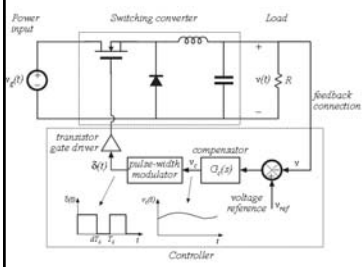
$$f(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$



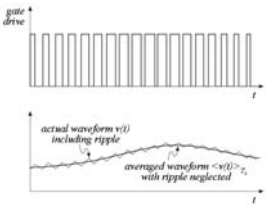
➢ 式中 G（S）为开环增益
G(S)H(S)开环传递函数

开关电源的频率分析

➢ **What——什么是开关变换器频率特性？**

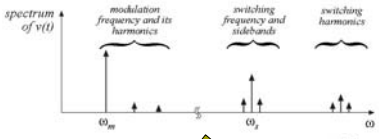


$$d(t) = D + D_m \cos \omega_m t$$

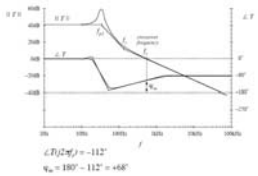


开关电源的频率分析

➢ **What——什么是开关变换器频率特性？**



截止频率、相位裕度、
幅值裕度



开关电源的频率分析

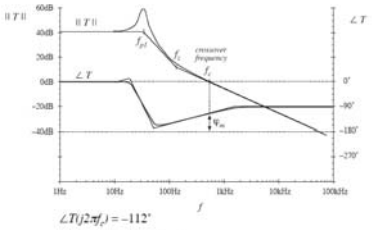
The crossover frequency f_c is defined as the frequency where

$$\| T(j2\pi f_c) \| = 1 \Rightarrow 0\text{dB}$$

The phase margin φ_m is determined from the phase of $T(s)$ at f_c, as follows:

$$\varphi_m = 180^\circ + \angle T(j2\pi f_c)$$

Buck类变换器
不考虑幅值裕度



$$\angle T(j2\pi f_c) = -112^\circ$$
$$\varphi_m = 180^\circ - 112^\circ = +68^\circ$$

内容

- 稳定性相关原理
  - 稳定性分析重要性
  - 频率特性基本概念
  - 电源稳定性原理
  - 国内外研究现况

隔离变换器系统电路

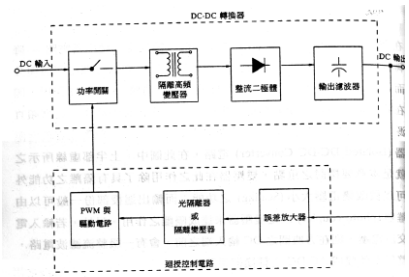
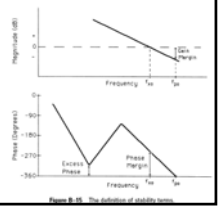


圖 3-1 具有隔離型之高頻 DC-DC 電源轉換器電路

稳定性的几个术语

- 系统零增益处（G=0db）频率为穿越频率
- 相位裕度：闭环系统中增益穿越频率所对应的相位值
- 增益裕度：相位在-360度时对应增益值
- 相位余量：在所有增益大于1(0db)时，相频特性最靠近-360度的点



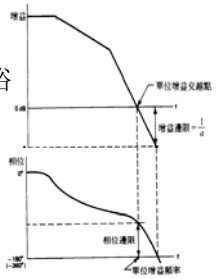
设计参考准则！

Design criterion:

- 1st criterion is that at crossover frequency, the total open-loop phase shift of all elements involved must be less than 360 degree
- 2nd criterion is that the open-loop gain-frequency curve of the entire circuit as it passes through crossover frequency should be -20dB/dec
- 3rd criterion is that to provide the desired phase margin , which will be set at 45 degree herein.

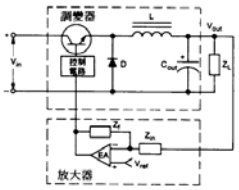
设计参考准则！

- 1. 闭环系统稳定需要在穿越频率处相移小于360度
- 2. 为了达到较好稳定度和相位裕度，通常在穿越频率处幅值曲线以－20db/dec斜率下降
- 3. 保证足够的幅值裕度和相位裕度（45度）



BUCK闭环分析

- 以一BUCK电路作为闭环调节系统实例
- 闭环包括控制电路、功率电路构成调压器（modulator），以及起到反馈控制的误差放大器（err amplifier）



稳定性分析过程！

- 首先画出为了调压器的传递函数波特图
- 决定单位增益穿越频率，考虑系统动态和稳态特性，可大致选择在调压器的开关频率的1/5处
- 决定闭环系统相位裕度，至少有30度，最好能在60度左右
- 设计误差放大器，使其穿越频率条件下的增益等于调压器增益的倒数
- 根据相位裕度设计误差放大器的类型和参数（保证在穿越频率处闭环增益为零，增益下降斜率为－20db/dec；穿越频率处相位裕度达到要求）

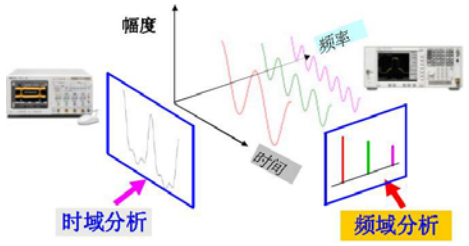
内容

- 稳定性相关原理
  - 稳定性分析重要性
  - 频率特性基本概念
  - 电源稳定性原理
  - 稳定性测量工具

引言

➢How——怎样研究开关变换器频率特性？

信号的基本分析方法



引言

➢How——怎样研究开关变换器频率特性？

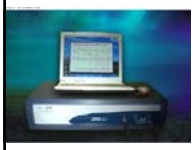
Venable3120

HP4395A

AP200

引言

➢How——怎样研究开关变换器频率特性？



Venable3120

K factor

H. Dean Venable
Founder of Venable Industries

AP200

Current Mode Control

Dr . Ray Ridley
Founder of Ridley Engineering

引言

➢How——怎样研究开关变换器频率特性？

学校	公司	主流仪器制造商		
		Agilent(HP)	Venable	Ridley
VT		HP4194A		
Colorado		HP3577		
RPI	Power one, NASA,TI, INTEL Apple Computer, IBM, Boeing,		Venable 3120 / Venable350	
浙江大学	Delta , MPS			AP200
北京交通大学	Artesyn,Astec, Emerson	HP4395A		
南航APSC、振动所		HP4395A, HP35670		

Agilent 4395A

Agilent 4395A 网络/频谱/阻抗分析仪

➢提供矢量网络、频谱和可选的阻抗测量

➢首先可以提供宽频域、高精度的频谱分析

➢可测量电源系统在不同激励下的频率响应

Agilent 4395A

Agilent 4395A 网络/频谱/阻抗分析仪

- 作为矢量网络分析仪，Agilent 4395A工作于10Hz至500MHz频率，具有1mHz的分辨率
- 与测试装置一起使用时，Agilent 4395A可提供回波损耗、SWR和S参数这类反射测量。
- 可完成包括电源在内的网络特性测量，即频域分析

Agilent 4395A

Agilent 4395A 网络/频谱/阻抗分析仪

- 选配阻抗分析软件包后，能完成阻抗分析功能
- 与阻抗测量组件配合使用，4395A可完成阻抗参数的精确测量，即可完成电感、变压器、电容等参数或寄生参数测量
- 只要有一台这样的仪器，就能进行通常评估元件和电路所需要的增益、相位、群时延、失真、寄生、CN和噪声测量

频率响应分析仪VENABLE 3120

1. 美國專業的頻率響應分析儀廠商
2. 特別專注於電源供應器，零件的頻域測試領域
3. 技術導向，善長於建立系統模型，穩定度分析，控制迴路，阻抗測試

FRA Model 3120 主機規格:

Generator Frequency Range : 0.01Hz – 2.2MHz
- **Amplitude : 10mVac – 10Vac**
- **DC bias : ±10Vdc**
- **Isolation : Referenced to chassis ground**

Measurement Channel : 2, isolated, floating
- **Range : 10mV - 500V rms, in 11 ranges**
- **Accuracy : ±0.05dB, ±0.25° typical @ 10KHz**
- **Isolation : ±500V to ground**
- **CMRR : > 110dB at 100V, 1KHz**

PC Interface : IEEE-488 (GPIB)

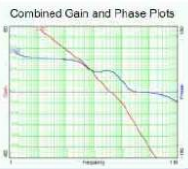
频率响应分析仪3120

工作原理

藉由輸入一個頻率變化的掃描訊號，並於特定點量測所造成的影響，藉此導出待測物在不同頻率的響應特性.

目的

1. 了解系統的頻率響應特性
2. 評估系統的穩定性(**Phase margin,Gain margin,Nyquist plot**)
3. 協助控制線路的設計
4. 測試元件在頻譜上的電阻，電容和電感特性



频率响应分析仪3120

主機

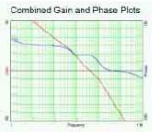
含一個**Generator**可送出頻率變化的掃描信號，另有兩個**Measurement**頻道來量測訊號的變化量

控制及分析軟件

1. 透過**GPIB**介面，控制主機的送出訊號，並擷取量測資料
2. 將資料處理，畫出頻率響應波德圖，藉此了解穩定性
3. 內建控制線路設計輔助，可模擬並評估新線路的特性

附件: **Bode Box**

訊號輸入變壓器，讓掃描訊號進入不同電壓準位



频率响应分析仪3120

提供三個應用範例:

應用一: 測試**Power supply**的波德圖，來觀察整個系統的頻域特性，並由**Phase margin**了解穩定度狀況.

應用二: 經由**FRA**的量測，得到**Power stage**模型. 再由分析軟件，設定設計目標 (**Cross Frequency, Phase Margin**)，選擇控制線路種類，自動演算出線路的最佳電阻電容值，再加以驗證.

應用三: 量測一個元件(電容)的頻域特性，觀察在不同頻率表現出電容性，電阻性及電感性.

内容

- 稳定性相关原理
- 闭环设计与测试原理
- 稳定性测量方法
- 总结

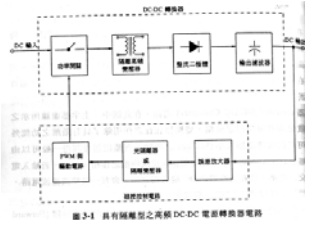
内容

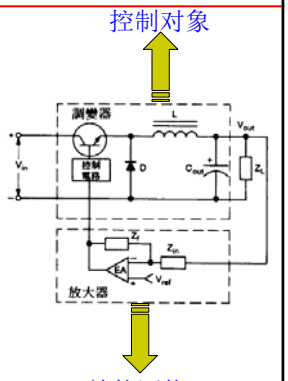
- 闭环设计与测试原理
  - 控制-输出传函
  - K factor案例
  - 小信号测量机理

内容

- 闭环设计与测试原理
  - 控制-输出传函
  - K factor案例
  - 小信号测量机理

隔离变换器系统电路



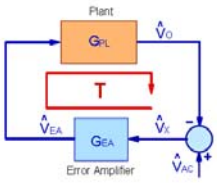


测试原理 I

? 变换器调试、优化设计 =

✓测量出控制对象的小信号频率特性

✓设计合适的补偿网络

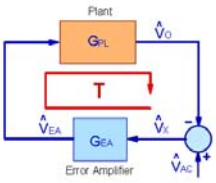


测试原理 I

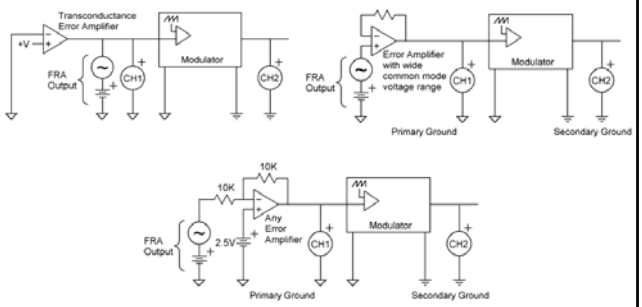
? 变换器调试、优化设计 =

✓测量出控制对象的小信号频率特性

✓设计合适的补偿网络

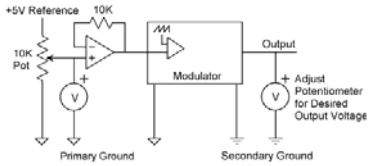


测试原理 I



FIRST STEP: control-output set-up

测试原理 I



Adjusting operating point with pot across 5V reference of PWM chip.

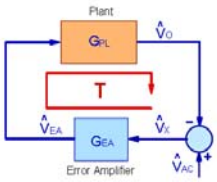
NEXT STEP: adjust the DC voltage for the desired output of the system

测试原理 I

? 变换器调试、优化设计 =

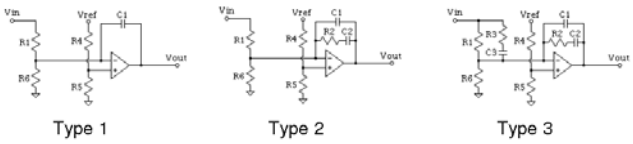
✓测量出plant的小信号频率特性

✓设计合适的补偿网络



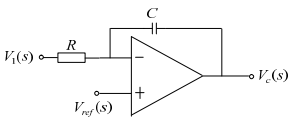
测试原理 I

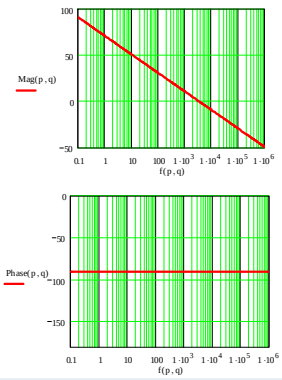
***K* factors: Buck、Boost、Buck/Boost**



Using CAE/CAT tools to evaluate power supply parasitics——H. Dean Venable,1989

测试原理 I

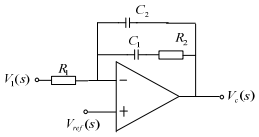


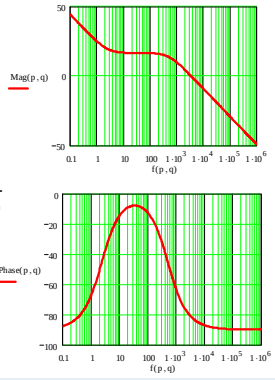


$$\frac{V_c(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{R \cdot Cs}$$

One pole

测试原理 I



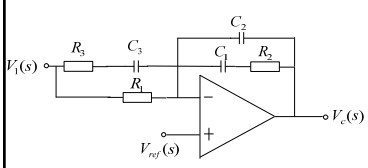


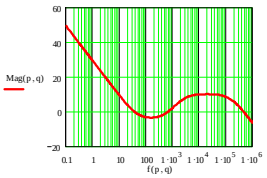
$$\frac{V_c(s)}{V_i(s)} = \frac{R_2 \cdot C_1 \cdot s + 1}{R_1 \cdot C_1 \cdot s \cdot (R_2 \cdot C_2 \cdot s + 1)}$$

Two poles, one zero

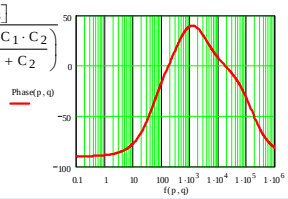
Single-Pole Single-Zero compensation

测试原理 I





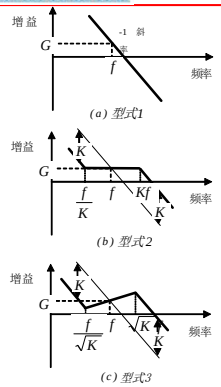
$$\frac{V_c(s)}{V_i(s)} = \frac{(1+s\cdot R_2\cdot C_1)\cdot[1+s\cdot(R_1+R_3)\cdot C_3]}{(s\cdot R_1)\cdot(C_1+C_2)(1+s\cdot R_3\cdot C_3)\left(1+s\cdot\frac{R_2\cdot C_1\cdot C_2}{C_1+C_2}\right)}$$

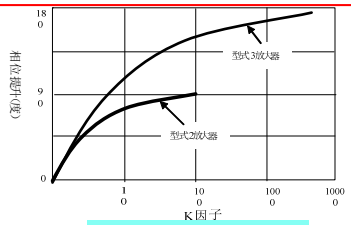


Three poles, two zeros

Double-Poles Double-Zeros compensation

测试原理 I





Type 2

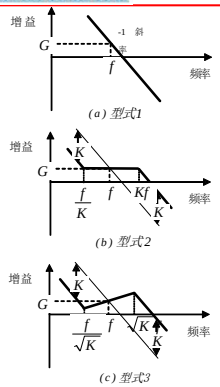
$$Boost = M - P - 90$$

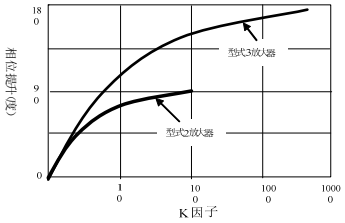
$$Boost = \arg tg K - \arg tg\left(\frac{1}{K}\right)$$

$$K = tg\left[\left(\frac{Boost}{2}\right) + 45\right]$$

M=所期望的相位裕量　*P*=变换器开环传函的相移

测试原理 I





Type 3

$$Boost = M - P - 90$$

$$Boost = 2\arg tg(K) - 2\arg tg\left(\frac{1}{K}\right)$$

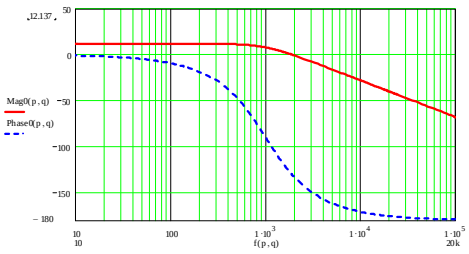
$$K = \left\{tg\left[\left(\frac{Boost}{4}\right) + 45\right]\right\}^2$$

内容

- 闭环设计与测试原理
  - 控制-输出传函
  - K factor案例
  - 小信号测量机理

测试原理 I

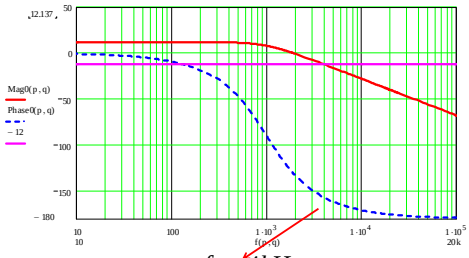
***K* factors step1：画出变换器的开环传递函数波德图。**



未补偿前的开环特性：　穿越频率：2KHz　相角裕度：50度

测试原理 I

***K* factors step2：选择穿越频率（4kHz）**



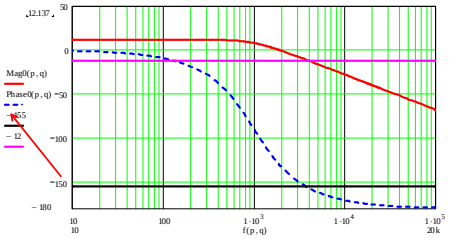
$f_c = 4kHz$

在4kHz处，开环增益为-12db

测试原理 I

K factors step3：选择所期望相位裕量

它为在单位增益时所期望之相位。一般相位裕量的范围在30°至90°，在60°较佳。



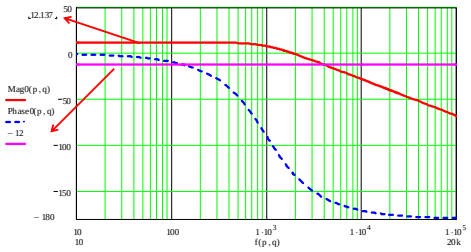
在4kHz处，开环相位为-155度

$$M = 60\,\mathrm{deg}\,ree$$

测试原理 I

K factors step4：决定放大器的增益。

在穿越频率时补偿放大器的增益G就是负的变换器增益，即补偿放大器增益=1/变换器增益。

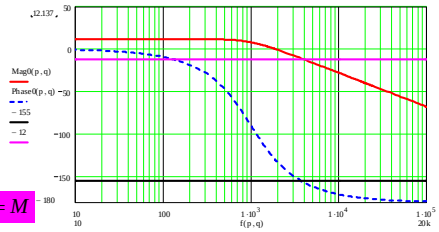


$$G = -(-12)$$

测试原理 I

K factors step5：计算所需的相位提升。

Boost=*M*-*P*-90,在此*M*=所期望的相位裕量，单位为度。 *P*=变换器开环传函的相移，单位为度。



$$P + \varphi(f_c) = M$$

$$Boost = \varphi(f_c) - 90$$

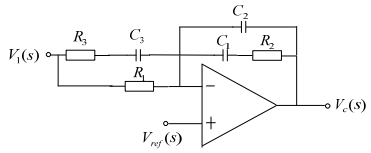
$$Boost = M - P - 90$$

$$Boost = 60 - (-155) - 90 = 125^\circ$$

测试原理 I

K factors step6：选择放大器的型式。

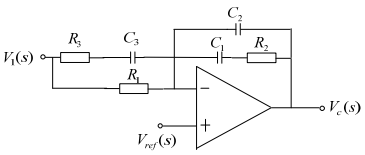
- 若不需要提升相位时，则选择型式1放大器
- 若所提升的相位小于90°时，则选择型式2放大器
- 若所提升的相位小于180°时，则选择型式3放大器



由于此处提升相位为125度，所以选择第3种放大器类型！

测试原理 I

K factors step7：计算K因子。



$$K = \left\{\tan\left[\left(\frac{boost}{4}\right) + 45\right]\right\}^2 = 16$$

$$C_1 = C_2(K-1)$$

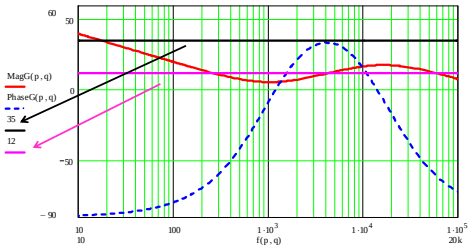
$$R_2 = \frac{\sqrt{K}}{2\pi f C_1}$$

$$R_3 = \frac{R_1}{K-1}$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f\sqrt{K}R_3}$$

测试原理 I

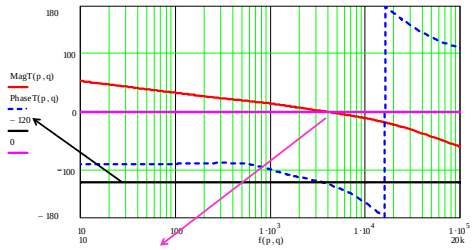
K factors step8:校核（补偿器的校核）



$$G = -(-12) \qquad Boost = 60 - (-155) - 90 = 125^\circ$$

测试原理 I

***K* factors step8:校核（闭环验证）。**



$f_c = 4kHz$ $M = 60\deg ree$

内容

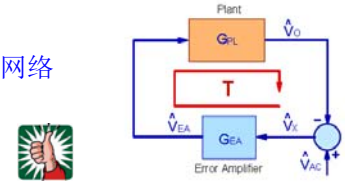
- 闭环设计与测试原理
  - 控制-输出传函
  - K factor案例
  - 小信号测量机理

测试原理 II

? 变换器调试、优化设计 =

✓直接测量出系统闭环工作时开环传函的小信号频率特性

✓调整合适的补偿网络



测试原理 II

✓ **正确，但有一定难度**

➢测量不能影响变换器正常工作

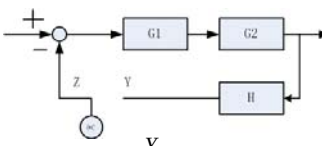
——不破坏稳态工作点

——闭合回路测试，还是打开回路测试?

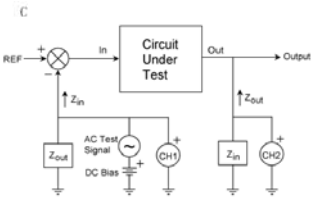
——测试原理正确么?

测试原理 II

打开回路测试



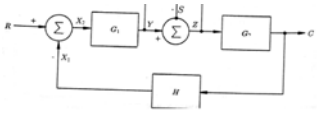
$$-\frac{Y}{Z} = +G_1G_2H$$



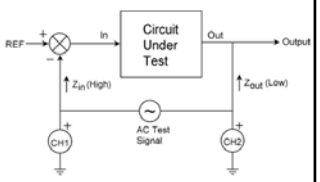
➢ 必须置入等效闭环环路阻抗（难以确定）
➢ 回路零漂导致变换器饱和

测试原理 II

闭合回路测试



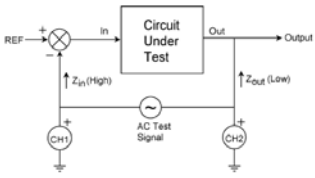
$$A_{actual} = \frac{A_{measured} + \frac{Z_{out}}{Z_{in}}}{1 + \frac{Z_{out}}{Z_{in}}}$$



➢ 信号注入回路必须限制为单一路径
➢ 信号注入点后，必须满足$Z_{out} << Z_{in}$

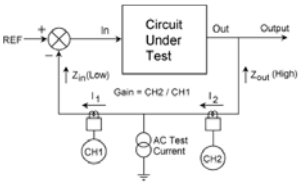
测试原理 II

电压注入模式



Voltage Mode Injection
Use when Zin >> Zout
Gain = CH2/CH1
This is the normal injection method

电流注入模式



Current Mode Injection
Use when Zin << Zout
Gain = CH2/CH1
"Dual" of normal method

内容

- 稳定性相关原理
- 闭环设计与测试原理
- 稳定性测量方法
- 总结

内容

- 开环传函测量设置
  - HP4395测试方法
  - V3120测试方法

内容

- 开环传函测量设置
  - HP4395测试方法
  - V3120测试方法

测试步骤

Agilent 4395/6A
网络/频谱/阻抗综合分析仪

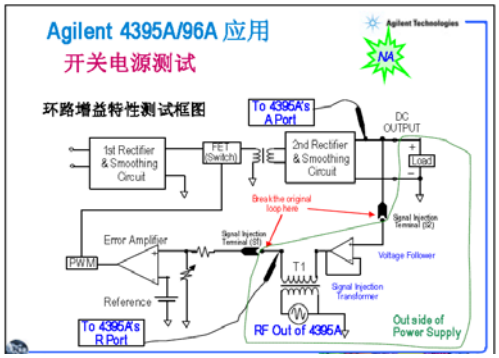
Agilent Technologies

测试步骤

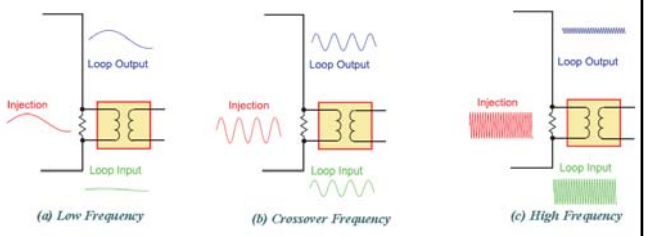
测试步骤

测试步骤

测试步骤

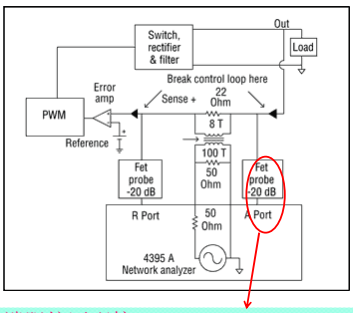


测试步骤



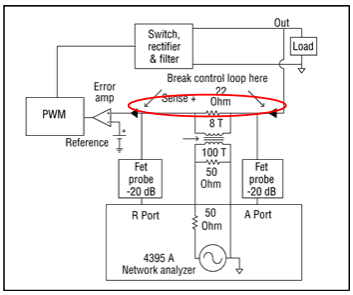
1.测试信号电平必须足够低 (ex. -20 dB)，使得控制环不至于超出线性工作区域

测试技巧



3.测试端阻抗匹配接口impedance buffer(ex. a FET probe)，确保50Ohm匹配，并限制输入电压<50V

测试技巧



4.为了精确测量，有必要测试前进行thru校正

内容

- 开环传函测量设置
  - HP4395测试方法
  - V3120测试方法

测试方法

VENABLE 3120测试

VENABLE 3120 測量过程

提供三個應用範例:

應用一: 測試Power supply的波德圖, 來觀察整個系統的頻域特性, 並由Phase margin了解穩定度狀況.

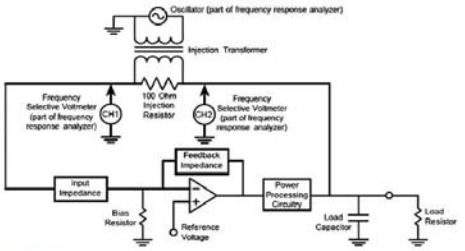
應用二 : 經由FRA的量測, 得到Power stage模型. 再由分析軟件, 設定設計目標 (Cross Frequency, Phase Margin) , 選擇控制線路種類, 自動演算出線路的最佳電阻電容值, 再加以驗證.

應用三: 量測一個元件(電容)的頻域特性, 觀察在不同頻率表現出電容性, 電阻性及電感性.

VENABLE 3120 測量过程

應 用 一 : 波 德 圖 測 試 方 式

測試連接線示意圖: 串接一10-100 歐姆的電阻於Loop上



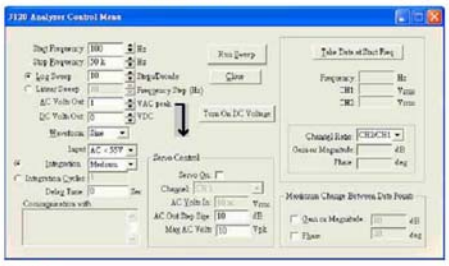
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

應 用 一 : 輸 出 及 量 測 設 定

頻率響應分析儀的控制Menu:



Chroma

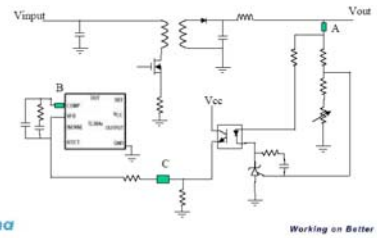
Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

信號注入點 (Injection Point) 的影響:

A(actual) = [A(measured) + Zo/Zi] / (1+Zo/Zi)

輸出阻抗越低越好, A 最好, B其次, C再其次.



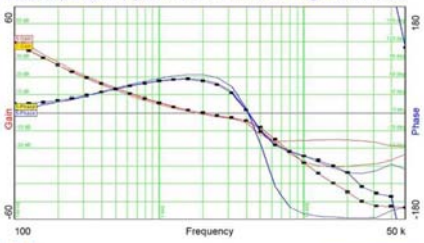
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

信號注入點 (Injection Point) 的影響:

注入點阻抗不同，造成不同結果. (尤其高頻部分)
但在低頻(交越頻率)差異不多，Phase Margin影響不大

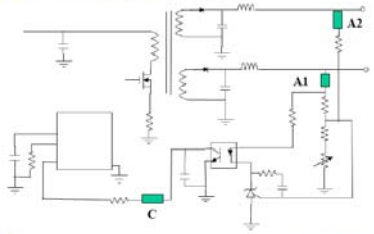


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

信號注入點 (Injection Point) 的影響:

當待測物為Multi-output, 且C 點 Zo 太大, 無法量得正確波德圖時,
則可先在 A1和 A2 兩點分別量測結果 (接下頁)

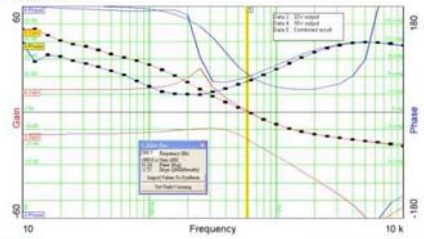


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

信號注入點 (Injection Point) 的影響:

再用Math Menu中的Double to Single Loop功能來合成
最終波德圖

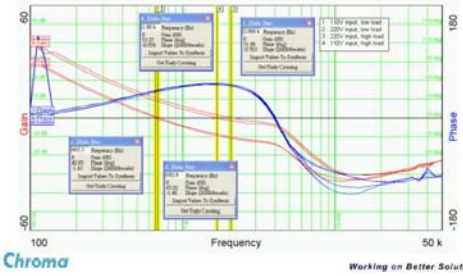


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

建議穩定度測試結果報告

系統的波德圖 含輕載 / 重載, 110V / 220V 輸入

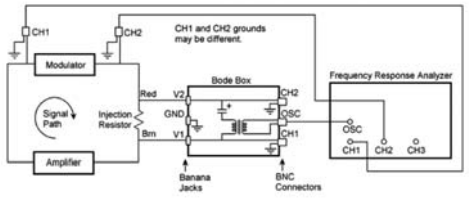


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

應用二：輔助設計測試方式

對Modulator測試連接線示意圖:

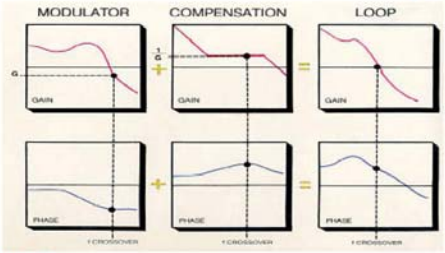


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計原理

系統的波德圖

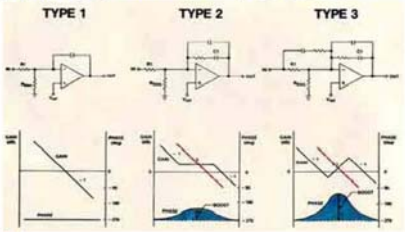


Chroma — Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

設計目標設定

選定Phase Margin和Cross Frequency, 再選擇適合此線路的控制器 (Error Amplifier), 進行模擬測試



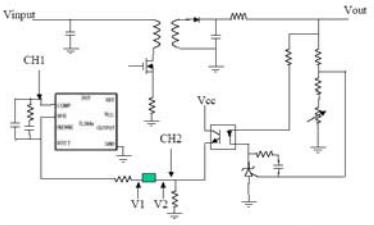
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 1

量測Modulator的接法:



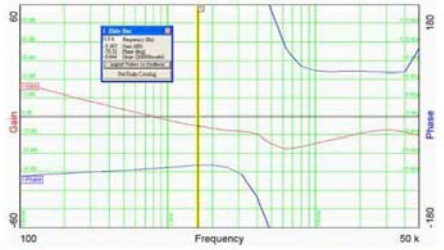
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 1

量測到Modulator的波德圖, 並設定cross frequency:



Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 2

設定Phase Margin和線路參數, 選擇Error Amplifier:

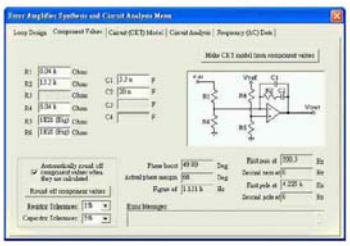
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 3

自動演算出Error Amplifier的電阻, 電容值:



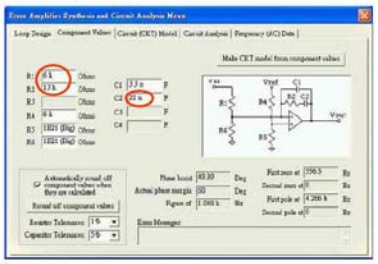
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 4

修正Error Amplifier的電阻, 電容值:



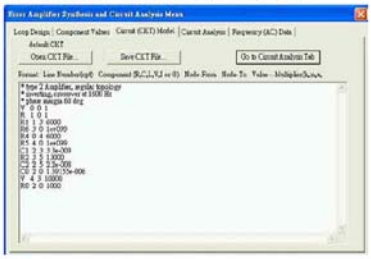
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 5

顯示Error Amplifier的SPICE-like Net List：



Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 6

計算Error Amplifier頻率響應的設定：

Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 7

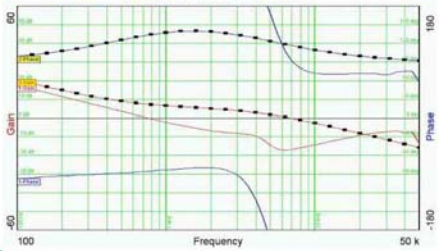
Error Amplifier頻率響應的計算結果：

Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 8

Error Amplifier響應的結果畫成波德圖：

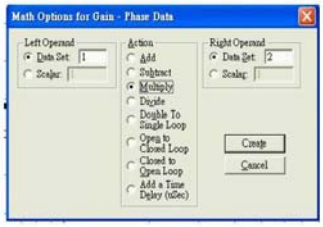


Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 9

將Modulator和Error Amplifier響應做乘法計算，以得到整個迴路的響應：

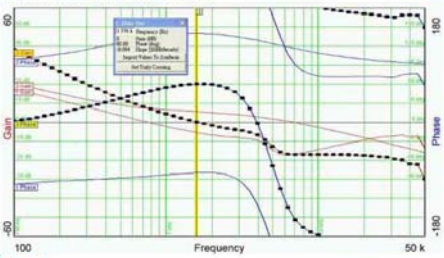


Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 測量过程

輔助設計步驟 10

模擬出整個迴路響應的結果：

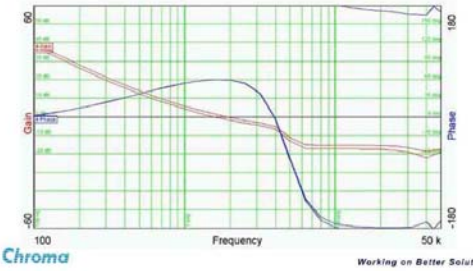


Chroma　Working on Better Solutions

VENABLE 3120 测量过程

輔助設計步驟 11

模擬結果和實際量測結果：



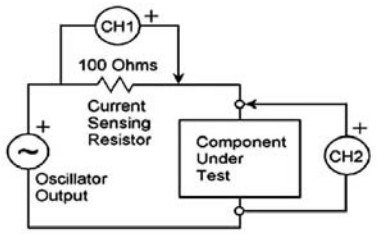
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 测量过程

應用三：元件阻抗測試方式

對Component Impedance 測試連接線示意圖:



Chroma

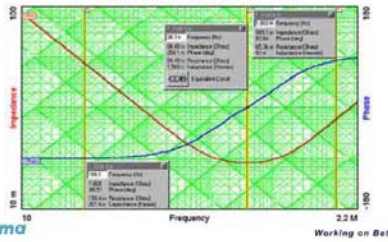
Working on Better Solutions

VENABLE 3120 测量过程

元件阻抗測試結果

Component的Impedance與頻率關係圖

Measurement of 200 uF Capacitor
C = 207.4u, R = 84.5m, L = 93n



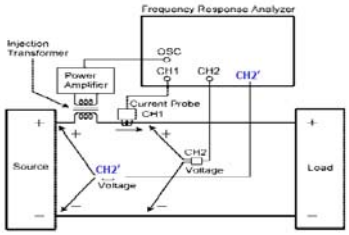
Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 测量过程

Power Supply 輸入/輸出阻抗量測

Load輸入阻抗: CH2/CH1，Source輸出阻抗: CH2'/CH1



Chroma

Working on Better Solutions

VENABLE 3120 测量过程

Power Supply 阻抗量測所需附件

Linear Power Amplifier : Model VLA1000
20Hz – 20KHz with 0.1% THD
Slew Rate: > 13V / uS

Injection Transformer
30Hz – 250KHz
Secondary DC 100A
Turns Ratio 2 : 1

Chroma

Working on Better Solutions

内容

- 稳定性相关原理
- 闭环设计与测试原理
- 稳定性测量方法
- 总结

结论

- 研发、测试工程师不仅需要使用源或负载效应时时域测试，还需根据频率域分析确定稳定性
- 对控制电路和参数进行快速设计，节省研发、验证时间，符合客户对电源规格的多样性，及交货时间短要求
- 验证产品具有足够相位裕度，保证量产后不会因零件差异性出现不稳定情况

参考书目

- Switch power supply design, Abraham I . Pressman著 P427 Ch12 Feedback Loop Stabilization
- power supply cookbook(2nd edition), Marty Brown著 P196 Appendix B: Feedback Loop Compensation
- 实用开关电源设计 2006 Ron Lenk 著
- 电力电子系统建模及控制 2006 徐德鸿 著
- 开关变换器的建模与控制 2006 张卫平 著