

## 电阻电桥基础：第一部分

供稿：美信

**摘要：**利用电桥电路精确测量电阻及其它模拟量的历史已经很久远。本文讲述电桥电路的基础并演示如何在实际环境中利用电桥电路进行精确测量，文章详细介绍了电桥电路应用中的一些关键问题，比如噪声、失调电压和失调电压漂移、共模电压以及激励电压，还介绍了如何连接电桥与高精度模/数转换器(ADC)以及获得最高ADC性能的技巧。

### 概述

惠斯通电桥在电子学发展的早期用来精确测量电阻值，无需精确的电压基准或高阻仪表。实际应用中，电阻电桥很少按照最初的目的使用，而是广泛用于传感器检测领域。本文分析了电桥电路受欢迎的原因，并讨论在测量电桥输出时的一些关键因素。

注意：本文分两部分，第一部分回顾了基本的电桥架构，并将重点放在低输出信号的电桥电路，比如导线或金属箔应变计。第二部分，介绍使用硅应变仪的高输出信号电桥。

### 基本的电桥配置

图 1 是基本的惠斯通电桥，图中电桥输出  $V_o$  是  $V_{o+}$  和  $V_{o-}$  之间的差分电压。使用传感器时，随着待测参数的不同，一个或多个电阻的阻值会发生改变。阻值的变化会引起输出电压的变化，式 1 给出了输出电压  $V_o$ ，它是激励电压和电桥所有电阻的函数。

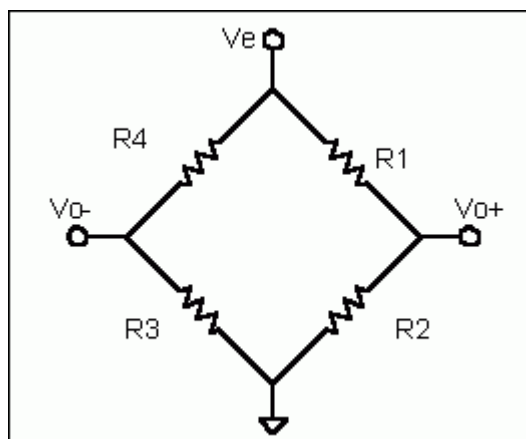


图 1. 基本惠斯通电桥框图

$$\text{式 1: } V_o = V_e (R_2 / (R_1 + R_2) - R_3 / (R_3 + R_4))$$

式 1 看起来比较复杂，但对于大部分电桥应用可以简化。当  $V_{o+}$  和  $V_{o-}$  等于  $V_e$  的  $1/2$  时，电桥输出对电阻的改变非常敏感。所有四个电阻采用同样的标称值  $R$ ，可以大大简化上述公式。待测量引起的阻值变化由  $R$  的增量或  $dR$  表示。带  $dR$  项的电阻称为“有源”电阻。在下面四种情况下，所有电阻具有同样的标称值  $R$ ，1 个、2 个或 4 个电阻为有源电阻或带有  $dR$  项的电阻。推导这些公式时， $dR$  假定为正值。如果实际阻值减小，则用  $-dR$  表示。在下列特殊情况下，所有有源电阻具有相同的  $dR$  值。

## 四个有源元件

第一种情况是所有四个电桥电阻都是有源元件， $R_2$  和  $R_4$  的阻值随着待测量的增大而增大， $R_1$  和  $R_3$  的阻值则相应减小。这种情况常见于采用四个应变计的压力检测。施加压力时，应变计的物理方向决定数值的增加或减少，式 2 给出了这种配置下可以得到的输出电压 ( $V_o$ ) 与电阻变化量 ( $dR$ ) 的关系，呈线性关系。这种配置能够提供最大的输出信号，值得注意的是：输出电压不仅与  $dR$  呈线性关系，还与  $dR/R$  呈线性关系。这一细微的差别非常重要，因为大部分传感器单元的电阻变化与电阻的体积成正比。

$$\text{式 2: } V_o = V_e (dR/R) \text{ 带四个有源元件的电桥}$$

## 一个有源元件

第二种情况仅采用一个有源元件 (式 3)，当成本或布线比信号幅度更重要时，通常采用这种方式。

$$\text{式 3: } V_o = V_e (dR / (4R + 2dR)) \text{ 带一个有源元件的电桥}$$

正如所料，带一个有源元件的电桥输出信号幅度只有带四个有源元件的电桥输出幅度的  $1/4$ 。这种配置的关键是在分母中出现了  $dR$  项，所以会导致非线性输出。这种非线性很小而且可以预测，必要时可以通过软件校准。

## 两个具有相反响应特性的有源元件

第三种情况如式 4 所示，包含两个有源元件，但阻值变化特性相反 ( $dR$  和  $-dR$ )。两个电阻放置在电桥的同一侧 ( $R_1$  和  $R_2$ ，或  $R_3$  和  $R_4$ )。正如所料，此时的灵敏度是单有源元件电桥的两倍，是四有源元件电桥的一半。这种配置下，输出是  $dR$  和  $dR/R$  的线性函数，分母中没有  $dR$  项。

式 4:  $V_o = V_e(dR/(2R))$  具有相反响应特性的两个有源元件

在上述第二种和第三种情况下, 只有一半电桥处于有效的工作状态。另一半仅仅提供基准电压, 电压值为  $V_e$  电压的一半。因此, 四个电阻实际上并不一定具有相同的标称值。重要的是电桥左侧的两个电阻间匹配以及电桥右侧的两个电阻间匹配。

## 两个相同的有源元件

第四种情况同样采用两个有源元件, 但这两个元件具有相同的响应特性, 它们的阻值同时增大或减小。为了有效工作, 这些电阻必须位于电桥的对角位置( $R_1$  和  $R_3$ , 或  $R_2$  和  $R_4$ )。这种配置的明显优势是将同样类型的有源元件用在两个位置, 缺点是存在非线性输出, 式 5 中的分母中含有  $dR$  项。

式 5:  $V_o = V_e(dR/(2R+dR))$  在电压驱动的电桥中有两个相同的有源元件

这个非线性是可以预测的, 而且, 可以通过软件或通过电流源(而不是电压源)驱动电桥来消除非线性特性。式 6 中,  $I_e$  是激励电流, 值得注意的是: 式 6 中的  $V_o$  仅仅是  $dR$  的函数, 而不是上面提到的与  $dR/R$  成比例。

式 6:  $V_o = I_e(dR/2)$  在电流驱动的电桥中有两个相同的有源元件

了解上述四种不同检测元件配置下的结构非常重要。但很多时候传感器内部可能存在配置未知的电桥。这种情况下, 了解具体的配置不是很重要。制造商会提供相关信息, 比如灵敏度的线性误差、共模电压等。为什么将电桥作为首选方案? 通过下面的例子可以很容易地回答这个问题。

## 测压元件

电阻桥的一个常用例子是带有四个有源元件的测压单元。四个应力计按照电桥方式配置并固定在一个刚性结构上, 在该结构上施加压力时会发生轻微变形。有负荷时, 两个应力计的值会增加, 而另外两个应力计的值会减小。这个阻值的改变很小, 在 1V 激励电压下, 测压单元的满幅输出是 2mV。从式 2 我们可以看出相当于阻值满幅变化的 0.2%。如果测压单元的输出要求 12 位的测量精度, 则必须能够精确检测到  $1/2\text{ppm}$  的阻值变化。直接测量  $1/2\text{ppm}$  变化阻值需要 21 位的 ADC。除了需要高精度的 ADC, ADC 的基准还要非常稳定, 它随温度的改变不能够超过  $1/2\text{ppm}$ 。这两个原因是驱动使用电桥结构的主要原因, 但驱动电桥的使用还有一个更重要的原因。

测压单元的电阻不仅仅会对施加的压力产生响应, 固定测压元件装置的热膨胀和压力计材料本身的 TCR 都会引起阻值变化。这些不可预测的阻值变化因素可能会

比实际压力引起的阻值变化更大。但是，如果这些不可预测的变化量同样发生在所有电桥电阻上，它们的影响就可以忽略或消除。例如，如果不可预测变化量为 200ppm，相当于满幅的 10%。式 2 中，200ppm 的阻值  $R$  的变化对于 12 位测量来说低于 1 个 LSB。很多情况下，阻值  $dR$  的变化与  $R$  的变化成正比。即  $dR/R$  的比值保持不变，因此  $R$  值的 200ppm 变化不会产生影响。 $R$  值可以加倍，但输出电压不受影响，因为  $dR$  也会加倍。

上述例子表明采用电桥可以简化电阻值微小改变时的测量工作。以下讲述电桥测量电路的主要考虑因素。

## 电桥电路的五个关键因素

在测量低输出信号的电桥时，需要考虑很多因素。其中最主要的五个因素是：

1. 激励电压
2. 共模电压
3. 失调电压
4. 失调漂移
5. 噪声

### 激励电压

式 1 表明任何桥路的输出都直接与其供电电压成正比。因此，电路必须在测量期间保持桥路的供电电压恒定(稳压精度与测量精度相一致)，必须能够补偿电源电压的变化。补偿供电电压变化的最简单方法是从电桥激励获取 ADC 的基准电压。图 2 中，ADC 的基准电压由桥路电源分压后得到。这会抑制电源电压的变化，因为 ADC 的电压分辨率会随着电桥的灵敏度而改变。

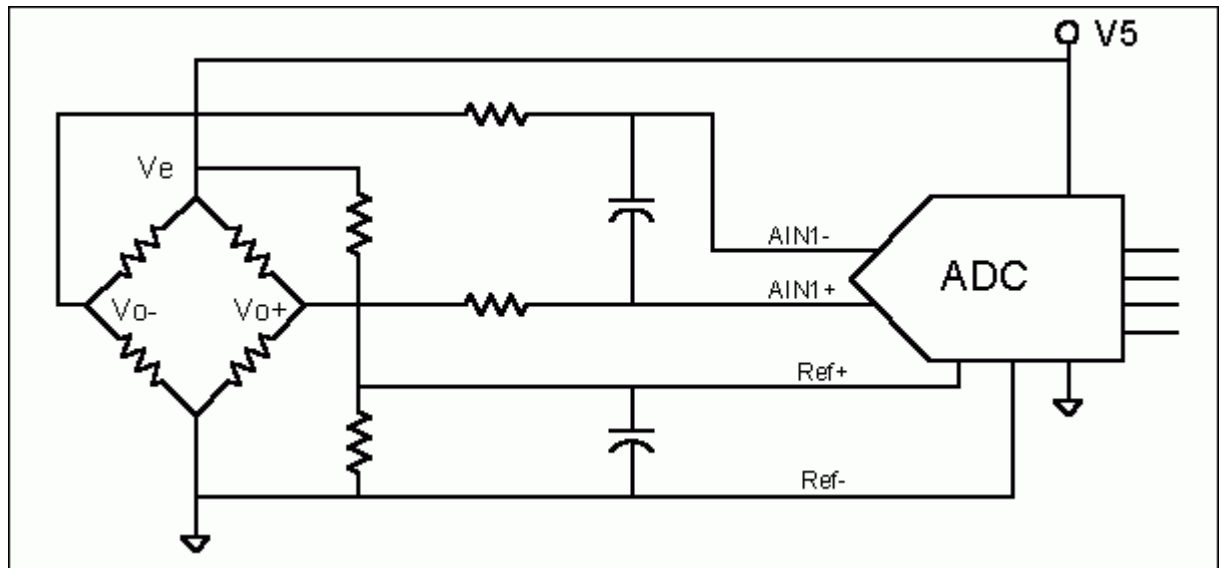


图2. 与  $V_e$  成比例的 ADC 基准电压可以消除由于  $V_e$  变化而引起的增益误差

另外一种方法是使用 ADC 的一个额外通道测量电桥的供电电压，通过软件补偿电桥电压的变化。式 7 所示为修正后的输出电压 ( $V_{oc}$ )，它是测量输出电压 ( $V_{om}$ )、测量的激励电压 ( $V_{em}$ ) 以及校准时激励电压 ( $V_{eo}$ ) 的函数。

$$\text{式 7: } V_{oc} = V_{om} V_{eo} / V_{em}$$

## 共模电压

电桥电路的一个缺点是它的输出是差分信号和电压等于电源电压一半的共模电压。通常，差分信号在进入 ADC 前必须经过电平转换，使其成为以地为参考的信号。如果这一步是必须的，则需注意系统的共模抑制比以及共模电压受  $V_e$  变化的影响。对于上述测压单元的例子，如果用仪表放大器将电桥的差分信号转换为单端信号，需要考虑  $V_e$  变化的影响。如果  $V_e$  容许的变化范围是 2%，电桥输出端的共模电压将改变  $V_e$  的 1%。如果共模电压偏差限定在精度指标的 1/4，那么放大器的共模抑制必须等于或高于 98.3dB。( $20 \log[0.01V_e / (0.002V_e / (40964))] = 98.27$ )。这样的指标虽然可以实现，但却超出了很多低成本或分立式仪表放大器的能力范围。

## 失调电压

电桥和测量设备的失调电压会将实际信号拉高或拉低。只要信号保持在有效测量范围，对这些漂移的校准将很容易。如果电桥差分信号转换为以地为参考的信号，电桥和放大器的失调很容易产生低于地电位的输出。这种情况发生时，将会产生一个死点。在电桥输出变为正信号并足以抵消系统的负失调电压之前，ADC 输出

保持在零电位。为了防止出现这种情况，电路内部必须提供一个正偏置。该偏置电压保证即使电桥和设备出现负失调电压时，输出也在有效范围内。偏置带来的一个问题是降低了动态范围。如果系统不能接受这一缺点，可能需要更高质量的元件或失调调节措施。失调调整可以通过机械电位器、数字电位器，或在 ADC 的 GPIO 外接电阻实现。

## 失调漂移

失调漂移和噪声是电桥电路需要解决的重要问题。上述测压单元中，电桥的满幅输出是 2mV/V，要求精度是 12 位。如果测压单元的供电电压是 5V，则满幅输出为 10mV，测量精度必须是 2.5 $\mu$ V 或更高。简而言之，一个只有 2.5 $\mu$ V 的失调漂移会引起 12 位转换器的 1 LSB 误差。对于传统运放，实现这个指标存在很大的挑战性。比如 OP07，其最大失调 TC 为 1.3 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C，最大长期漂移是每月 1.5 $\mu$ V。为了维持电桥所需的低失调漂移，需要一些有效的失调调整。可以通过硬件、软件或两者结合实现调整。

**硬件失调调整：**斩波稳定或自动归零放大器是纯粹的硬件方案，是集成在放大器内部的特殊电路，它会连续采样并调整输入，使输入引脚间的电压保持在最小差值。由于这些调整是连续的，所以随时间和温度变化产生的漂移成为校准电路的函数，并非放大器的实际漂移。MAX4238 和 MAX4239 的典型失调漂移是 10nV/ $^{\circ}$ C 和 50nV/1000 小时。

**软件失调调整：**零校准或皮重测量是软件失调校准的例子。在电桥的某种状态下，比如没有载荷的情况，测量电桥的输出，然后在测压单元加入负荷，再次读取数值。两次读数间的差值与激励源有关，取两次读数的差值不仅消除了设备的失调，还消除了电桥的失调。这是个非常有效的测量方法，但只有当实际结果基于电桥输出的变化时才可以使用。如果需要读取电桥输出的绝对值，这个方法将无法使用。

**硬件/软件失调调整：**在电路中加入一个双刀模拟开关可以在应用中使用软件校准。图 3 中，开关用于断开电桥一侧与放大器的连接，并短路放大器的输入。保留电桥的另一侧与放大器输入连接可以维持共模输入电压，由此消除由共模电压变化引起的误差。短路放大器输入可以测量系统的失调，从随后的读数中减去系统失调，即可消除所有的设备失调。但这种方法不能消除电桥的失调。

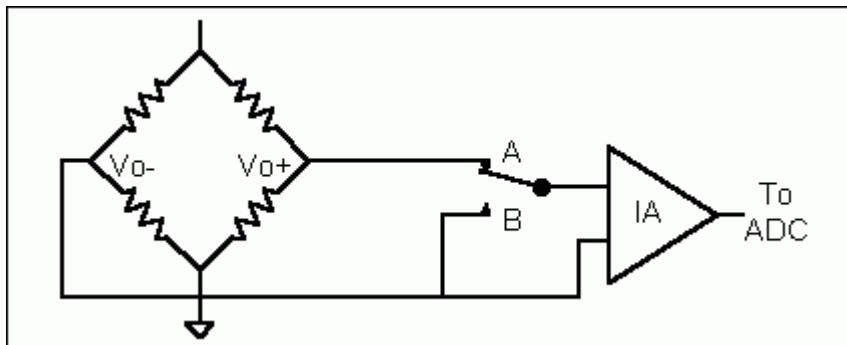


图 3. 增加一个开关实现软件校准

这种自动归零校准已广泛用于当前的 ADC，对于消除 ADC 失调特别有效。但是，它不能消除电桥失调或电桥与 ADC 之间任何电路的失调。

一种形式稍微复杂的失调校准电路是在电桥和电路之间增加一个双刀双掷开关（图 4）。将开关从 A 点切换至 B 点，将反向连接电桥与放大器的极性。如果将开关在 A 点时的 ADC 读数减去开关在 B 点时的 ADC 读数，结果将是  $2V_o\text{Gain}$ ，此时没有失调项。这种方法不仅可以消除电路的失调，还可以将信噪比提高两倍。

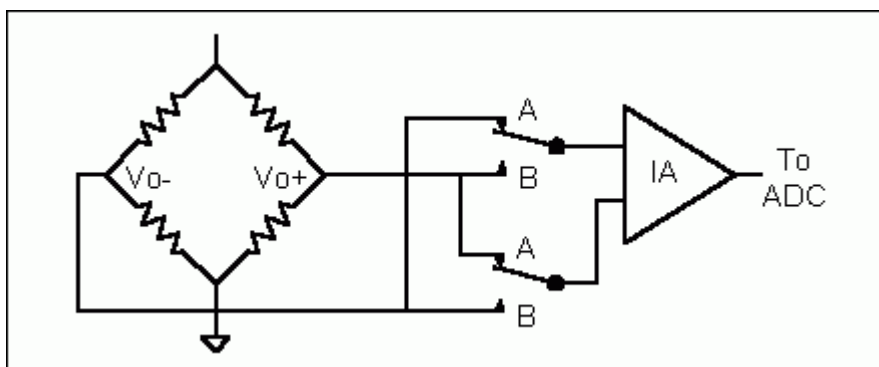


图 4. 增加一个双刀、双掷开关，增强软件校准功能

**交流电桥激励：**这种方式不常使用，但在传统设计中，电阻电桥交流激励是在电路中消除直流失调误差的常用、并且有效的方法。如果电桥由交流电压驱动，电桥的输出将是交流信号。这个信号经过电容耦合、放大、偏置电路等，最终信号的交流幅度与电路的任何直流失调无关。通过标准的交流测量技术可以得到交流信号的幅度。采用交流激励时，通过减小电桥的共模电压变化就可以完成测量，大大降低了电路对共模抑制的要求。

## 噪声

如上所述，在处理小信号输出的电桥时，噪声是个很大的难题。另外，许多电桥应用的低频特性意味着必须考虑“闪烁”或  $1/f$  噪声。对噪声的详细讨论超出了本

文的范围，而且目前已经有更多关于这个主题的文章。本文将主要列出设计中需要考虑的四个噪声源抑制。

1. 将噪声阻挡在系统之外(良好接地、屏蔽及布线技术)
2. 减少系统内部噪声(结构、元件选择和偏置电平)
3. 降低电噪声(模拟滤波、共模抑制)
4. 软件补偿或 DSP(利用多次测量提高有效信号、降低干扰信号)

近几年发展起来的高精度  $\Sigma-\Delta$  转换器很大程度上简化了电桥信号数字化的工作。下面将介绍这些转换器解决上述五个问题的有效措施。

## 高精度 $\Sigma-\Delta$ 转换器(ADC)

目前，具有低噪声 PGA 的 24 位和 16 位  $\Sigma-\Delta$  ADC 对于低速应用中的电阻电桥测量提供了一个完美的方案，解决了量化电桥模拟输出时的主要问题(见上述讨论，图 2 及后续内容)。

## 激励电压的变化， $V_e$

缓冲基准电压输入简化了比例系统的构建。得到一个跟随  $V_e$  的基准电压，只需一个电阻分压器和噪声滤波电容(见图 2)。比例系统中，输出对  $V_e$  的微小变化不敏感，无需高精度的电压基准。

如果没有采用比例系统，可以选择多通道 ADC。利用一个 ADC 通道测量电桥输出，另一个输入通道用来测量电桥的激励电压，利用式 7 可以校准  $V_e$  的变化。

## 共模电压

如果电桥和 ADC 由同一电源供电，电桥输出信号将会是偏置在  $1/2V_{DD}$  的差分信号。这些输入对于大部分高精度  $\Sigma-\Delta$  转换器来讲都很理想。另外，由于它们极高的共模抑制(高于 100dB)，无需担心较小的共模电压变化。

## 失调电压

当电压精度在亚微伏级时，电桥输出可以直接与 ADC 输入对接。假定没有热耦合效应，唯一的失调误差来源是 ADC 本身。为了降低失调误差，大部分转换器具有内部开关，利用开关可以在输入端施加零电压并进行测量。从后续的电桥测量数值中减去这个零电压测量值，就可以消除 ADC 的失调。许多 ADC 可以自动完成这个归零校准过程，否则，需要用户控制 ADC 的失调校准。失调校准可以把失调误差降低到 ADC 的噪底，小于  $1\mu V_{P-P}$ 。



## 失调漂移

对 ADC 进行连续地或频繁地校准，使校准间隔中温度不会有显著改变，即可有效消除由于温度变化或长期漂移产生的失调变化。需要注意的，失调读数的变化可能等于 ADC 的噪声峰值。如果目的是检测电桥输出在较短时间内的微小变化，最好关闭自动校准功能，因为这会减少一个噪声源。

## 噪声

处理噪声有三种方法，比较显著的方法是内部数字滤波器。这个滤波器可以消除高频噪声的影响，还可以抑制电源的低频噪声，电源抑制比的典型值可以达到 100dB 以上。降低噪声的第二种方法依赖于高共模抑制比，典型值高于 100dB。高共模抑制比可以减小电桥引线产生的噪声，并降低电桥激励电压的噪声影响。最后，连续的零校准能够降低校准更新频率以下的闪烁噪声或 1/F 噪声。

## 实用的技巧

将电桥的输出与高精度的  $\Sigma-\Delta$  ADC 输入直接相连并不能解决所有问题。有些应用中，需要在电桥输出和 ADC 输入之间加入匹配的信号调理器，信号调理器主要完成三项任务：放大、电平转换以及差分到单端的转换。性能优异的仪表放大器能够完成所有三项功能，但价格可能很昂贵，并可能缺少对失调漂移的处理措施。下面电路可以提供有效的信号调理，其成本低于仪表放大器。

## 单运算放大器

如果只需要放大功能，图 5 所示简单电路即可满足要求。该电路看起来似乎不是最好的选择，因为它不对称，并对电桥增加了负载。但是，对于电桥来说这一负荷并不存在问题(虽然不鼓励这样做)。许多电桥为低阻输出，通常为  $350\ \Omega$ 。每路输出电阻是它的一半或  $150\ \Omega$ 。增加电阻 R1 后， $150\ \Omega$  电阻只会轻微降低增益。当然，考虑  $150\ \Omega$  电阻的容限和电阻的温度系数(TCR)，电阻 R1 和 R2 的 TCR 并不能精确地与之匹配。补偿这个额外电阻的很简单，只要选择 R1 的阻值远远高于  $150\ \Omega$  即可。图 5 包括了一个用于零校准的开关。

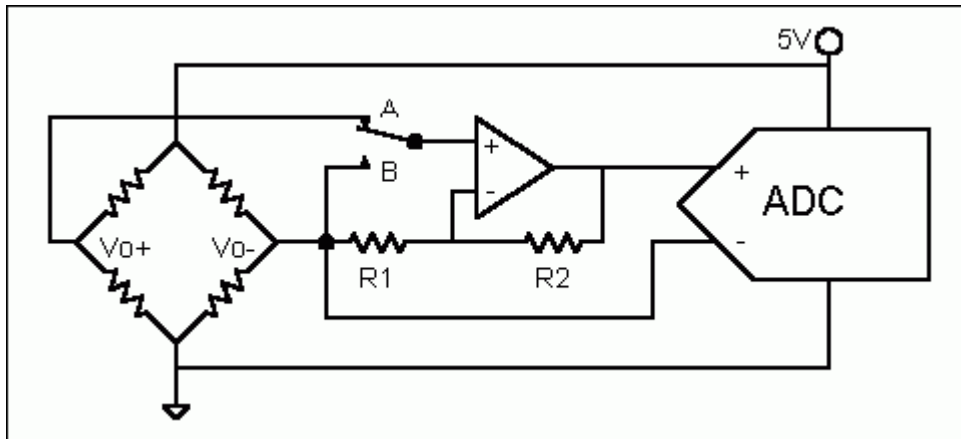


图 5. 连接低阻电桥的例子

差分与仪表：对于很多应用，可以用差分放大器取代仪表放大器。不仅可以降低成本，还可以减少噪声源和失调漂移的来源。对于上述放大器，必须考虑电桥阻值和 TRC。

## 双电源供电

图 6 电路结构非常简单，电桥输出只用了两个运算放大器和两个电阻即完成了放大、电平转换，并输出以地为参考的信号。另外，电路还使电桥电源电压加倍，使输出信号也加倍。但这个电路的缺点是需要一个负电源，并在采用有源电桥时具有一定的非线性。如果只有某一侧电桥使用有源元件时，将电桥的非有源侧置于反馈回路可以产生  $-V_e$ ，从而避免线性误差。

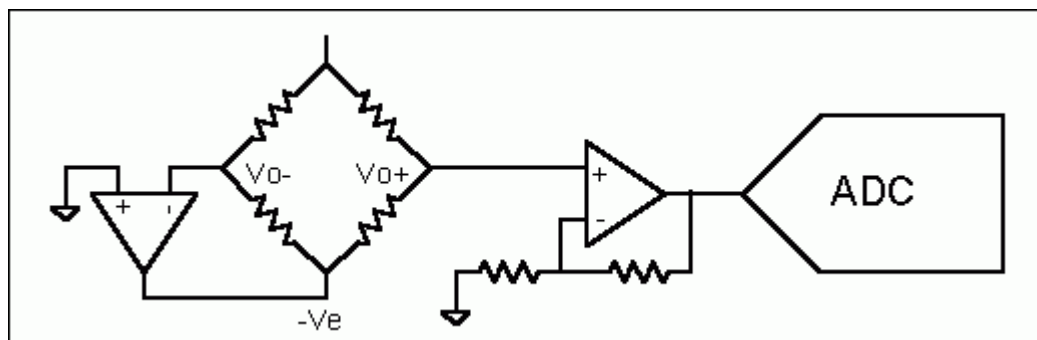


图 6. 与低阻电桥连接的替代电路

## 总结

电阻电桥对于检测阻值的微小变化并抑制干扰源造成的阻值变化非常有效。新型模/数转换器 (ADC) 大大简化了电桥的测量。增加一个此类 ADC 即可获得桥路检测 ADC 的主要功能：差分输入、内置放大器、自动零校准、高共模抑制比以及数字噪声滤波器，有助于解决电桥电路的关键问题。