

电阻式传感器

电阻式传感器是输出电阻值受被测量控制,且输出与被测量呈一定比例关系的传感器类的总称。

5.1 应变计

5.1.1 应变与应力

1. 形变与弹性形变

1) 定义

物体在受到外力作用时,会改变原来的形状与尺寸,这种现象称为形变。如果在外力撤销后,物体完全恢复原来的形状,则这种形变称为弹性形变。

2) 弹性元件的机械特性

由弹性材料制成的部件就是弹性元件。弹性元件具有如下机械特性。

(1) 刚度。

刚度是弹性元件抵抗外力保持原型的能力,其定义为单位形变所需外力,用胡克定律表示为 $K = dF/dx$ 。式中: K 为劲度系数,其值越大,则其抵抗外力而避免形变的能力就越强。

(2) 灵敏度。

灵敏度是指弹性元件在单位作用力下产生变形的大小。在弹性力学中称为柔度。灵敏度与刚度正好互成倒数关系,即 $S = dx/dF$ 。

(3) 弹性滞后。

弹性滞后是指实际弹性元件在循环行程中加载和卸载曲线不重合的现象。滞后是我们不希望的。参见第3章滞后部分内容。

(4) 线热膨胀系数。

线热膨胀系数是指物体在一定的压力下,单位温度变化所导致的某一方向上的尺度的变化和它在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即标准实验室环境)时的尺度值的比值。

大多数情况下,此系数为正值。也就是说,温度变化与尺度变化成正比,温度升高时

体积扩大。但是也有例外,如水在 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,会出现负膨胀。而一些陶瓷材料在温度升高情况下几乎不发生几何特性变化,其热膨胀系数接近 0。

热膨胀系数有线膨胀系数 α 、面膨胀系数 β 和体膨胀系数 γ 。

对于可近似看作一维的物体,长度就是衡量其体积的决定因素,这时的热膨胀系数可简化定义为:单位温度改变下长度的增加量与其原长度的比值就是线膨胀系数。

各物体的线膨胀系数不同,一般金属及其合金的线膨胀系数都很小,单位选用 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

弹性元件的机械特性是设计应变式传感器的基础。部分金属及合金电阻丝材料的机械、电学特性如表 5-1 所示。

表 5-1 部分金属及合金电阻丝材料的机械、电学特性

材料	成分		应变系数 K_0	电阻率 $/\mu\Omega \cdot \text{m}$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	0~100 °C 的 电阻温度系 数/ $(10^{-6}/\text{K})$	最高使用 温度/ $^{\circ}\text{C}$	对铜的 热电势/ $(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	线膨胀 系数/ $(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
	元素	占比/%						
康铜	Ni	45	1.9~2.1	0.45~0.52	20	静态 300 动态 400	43	15
	Cu	55						
镍铬合金	Ni	80	2.1~2.3	0.9~1.1	110~130	静态 450 动态 800	3.8	14
	Cr	20						
镍铬 铝 合金 6J22	Ni	74	2.4~2.6	1.24~1.42	20	静态 450 动态 800	3	13.3
	Cr	20						
	Al	3						
	Fe	3						
镍铬 铝 合金	Ni	75	2.8					
	Cr	20						
	Al	3						
	Cu	2						
铁铬 铝 合金	Fe	70	1.3~1.5	1.3~1.5	30~40	静态 700 动态 1000	2~4	14
	Cr	25						
	Al	5						
铂	Pt	100	4~6	0.09~0.11	3900	静态 800 动态 1000	7.6	8.9
铂钨 合金	Pt	92	3.5	0.68	227		6.1	8.3~9.2
	W	8						

2. 应力与应变

物体由于外因(受力、湿度、温度场变化等)而变形时,在物体内部各部分之间产生相互作用的内力,以抵抗这种外因的作用,并试图使物体从变形后的位置恢复到变形前的位置。

在所考察的截面某一点单位面积上的内力称为应力,单位为 N/m^2 。同截面垂直的称为正应力或法向应力,同截面相切的称为剪应力或切应力。

物体在应力作用下的形变称为应变。

5.1.2 应变计工作原理

应变计(片)是基于导体或半导体元件在应变时其体电阻随之变化的压阻效应制成的力传感器。

1. 金属应变计工作原理

1856年,开尔文(Lord Kelvin)推导了长度为 l 、截面积为 A 、电阻率为 ρ 的导线的电阻的数学表达式,后人称之为电阻定律,即

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5-1)$$

当导线受到如图5-1所示的纵向应力作用时,影响 R 的三个量都要发生变化,即

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dA}{A} \quad (5-2)$$

当力 F 作用于导线时,在弹性限度内所引起的长度变化由胡克定律给出:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (5-3)$$

式中:第一个等式是应力的定义式;第二个等式是胡克定律数学形式。 ε 是应变(相对形变),无量纲。但是,由于在弹性限度内 ε 值都很小,所以常用“微应变”作为其“单位”。(1微应变=1 $\mu\varepsilon$ =10 $^{-6}$ m/m)。

在弹性限度内,应变与应力成正比;在弹性区以外,称为塑性区,此时形变称为塑性形变。塑性形变是不可逆的,即在应力撤销后,形变依然存在。

弹性形变时,除纵向外,还有横向尺寸 r 的导线,纵向应力使导线在纵向和横向方向均发生变化,如图5-1所示。根据泊松定律有

$$\nu = -\frac{dr/r}{dl/l} \quad (5-4)$$

式中: ν 是泊松比;负号的含义是纵向伸长导致横向压缩。通常,0 $<\nu<0.5$ 。例如,铁的 ν 值为0.17,钢的 ν 值为0.303,而铝和铜的 ν 值均为0.33等。

综合以上讨论,设圆形截面电阻丝半径为 r ,则由式(5-2)得此电阻丝电阻相对变化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{d(\pi r^2)}{\pi r^2} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{2d(r)}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} \left(1 - \frac{2d(r)}{r}\right)$$

整理得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) \quad (5-5)$$

2. 金属材料的压电效应

接着讨论式(5-5)中 $d\rho/\rho$ 项。机械应力引起电阻率变化的现象称为压阻效应。对金属来说,这个效应来源于金属内晶格振动幅度的变化。布利奇曼(P. W. Bridgman)证明:

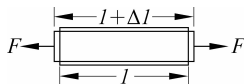


图5-1 泊松比的作用:纵向拉伸与横向压缩相对应

在金属中,电阻率和体积百分比的变化成正比,即

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (5-6)$$

式中: C 是布利奇曼常数。对用于制作应变计的常用合金材料, C 在 1.13~1.15 之间。

应用式(5-6)有

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C \frac{d(\pi r^2 l)}{\pi r^2 l} = C \left(\frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} \right) = C(1 - 2\nu) \frac{dl}{l}$$

将此推导结论代入式(5-5)中,有

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) = \frac{dl}{l} [1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)] = K_0 \frac{dl}{l} = K_0 \epsilon \quad (5-7)$$

式中: K_0 称为应变系数。各种单质金属及合金的应变系数见表 5-1。

对于微小形变的电阻丝而言,其电阻值与应变的关系为

$$R = R_0 + dR = R_0 \left(1 + \frac{dR}{R} \right) \approx R_0 (1 + K_0 \epsilon) \quad (5-8)$$

式中: R_0 为无加应力时金属导线的电阻值。通常 $K_0 \epsilon < 0.02$ 。

3. 制作应变计敏感元件的金属材料性能要求

(1) K_0 要大,并在尽可能大的范围内保持常数。

(2) 电阻率 ρ 要大。因为金属材料的电阻率偏小,而元件的体电阻不易做大。在一定电阻值要求下,同样线径或片的厚度,电阻率大的金属所需电阻丝长度短,有利于元件向小型化发展。

(3) 电阻温度系数小。高温使用时,还要求耐高温氧化性能好。

(4) 材料的线膨胀系数要小,同时还要注意材料间的相对热电势值,尽可能避免附加的干扰电信号叠加在有用的信号上。

(5) 具有良好的加工焊接性能。

[例 5-1] 一个 $K_0 = 2.0$,阻值为 350Ω 的应变片被粘在 $E = 73 \text{ GPa}$ 的铝支柱上,支柱的外径为 50 mm ,内径为 45 mm 。试计算当支柱承受 1000 kg 的负荷时,应变片电阻的变化量及电阻值的相对变化。

解: 由式(5-7)和(5-3)知

$$\Delta R = RK_0 \epsilon = RK_0 \frac{F/A}{E}$$

而

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(50^2 - 45^2)}{4} = \frac{\pi \times 95 \times 5}{4} = 373 (\text{mm}^2)$$

于是

$$\Delta R = RK_0 \frac{F/A}{E} = 350 \times 2 \times \frac{1000 \times 9.8 / (373 \times 10^{-6})}{73 \times 10^9} = 0.25 (\Omega)$$

电阻值的相对变化率为 $\Delta R/R = 100 \times 0.25/350 = 0.71\%$ 。

4. 半导体压阻效应

1954 年,史密斯(C. S. Smith)研究了硅和锗的压阻效应。这是科学史上对半导体压

阻效应研究的最早报道。

当半导体受到应力作用时,除尺寸变化外,载流子数及其迁移率均将改变。与金属不同,半导体在应力作用下其电阻率的变化明显超过尺寸变化对体电阻的贡献。

压阻效应的大小和符号取决于特定的半导体材料、半导体载流子浓度和相对于应力的晶向。对简单的拉伸或压缩,若电子沿应力轴线流动,则电阻率的相对变化与应力成正比:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_L \sigma \quad (5-9)$$

式中: π_L 是纵向压阻系数; ρ_0 是未受应力时材料的电阻率。由式(5-7)直接用电阻的相对变化表示半导体应变系数

$$K_0 = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} \quad (5-10)$$

式中: R_0 为未受应力时元件的电阻。

半导体应变系数在 40~200 之间,是金属材料的 50~100 倍。载流子数相当少的半导体材料具有大的应变系数,但对温度非常敏感(载流子数受温度控制)且与应力变化(即应变系数)呈非线性。载流子浓度相当高的半导体材料应变系数较小,但对温度与应力变化的依赖性小。

结论:金属及半导体元件的电阻的变化都与应变相关。当应变与引起应变的应力之间的关系为已知时,则通过元件的电阻的测量便可推出应变或应力的大小,从而实现被测非电量的电测量。应变计就此而生。使用应变计应注意的几个重要问题:

(1) 所测量的应力不可超过应变计的弹性极限。一般而言,应变不应超过应变计测量范围,短时间的超载值请具体查阅产品数据手册。对系统设计者来说,选择应变计应留有测量余量。

(2) 只有应力全部传到应变计上,测量才会准确。这需要通过细心用弹性黏合剂粘贴应变计来实现,这一点对生产厂家和爱好者个人都适用。黏合剂的性质应不随时间和温度而变化。

(3) 应变计多采用二次传感结构,即将应变计粘贴在各种专用金属或合金材料弹性体上,这些弹性体因其结构特点,需专业设计使不同类型的应力实现有效的应变响应,此应变再使应变计产生应变,产品性能的一致性才能保证。应变计元件与弹性体间须进行绝缘处理。

5.1.3 应变计分类

为提高应变计的应变系数,除选择 K_0 大的敏感材料外,在应变元件有限的面积上提高应变率最容易提高应变计的应变系数,环绕金属丝或片的结构设计就不难想象了。金属应变计的结构示意如图 5-2 所示。

应变计有很多品种系列。从尺寸上讲,长的有几百毫米,短的仅 0.2 mm;从结构形式上分,有单片、双片、应变花和各种特殊形状的图

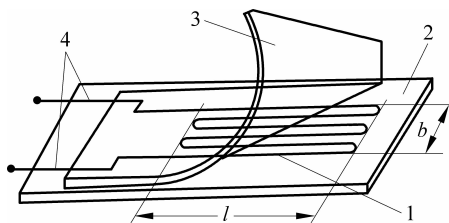


图 5-2 电阻应变片结构示意图

1—敏感栅; 2—基片; 3—保护片; 4—引线

案;根据使用环境又分高温、低温、液体、核辐射、高压、磁场等;黏接形式又有粘贴、非粘贴型、焊接型等。

应变计的主要分类方法是根据敏感元件材料的不同,将应变计分为金属式和半导体式两大类。两种应变计的典型特性如表 5-2 所示。

表 5-2 金属和半导体应变计的典型特性

特性参数	金属应变计	半导体应变计
测量范围/ $\mu\epsilon$	0.1~50 000	0.01~3000
应变系数	1.8~4.5	40~200
标称电阻/ Ω	120、250、350、600、...、5000	1000~5000
电阻容差/%	0.1~0.35	1~2
有效栅长度/mm	0.4~150	1~5

从敏感元件的形态又可进一步分类如下:

半导体式体型、薄膜型、扩散型、外延型、PN 结型等。金属电阻应变计常见的形式有丝式、箔式、薄膜式等。丝式应变计是最早应用的品种。箔式金属应变计的结构如图 5-3 所示。

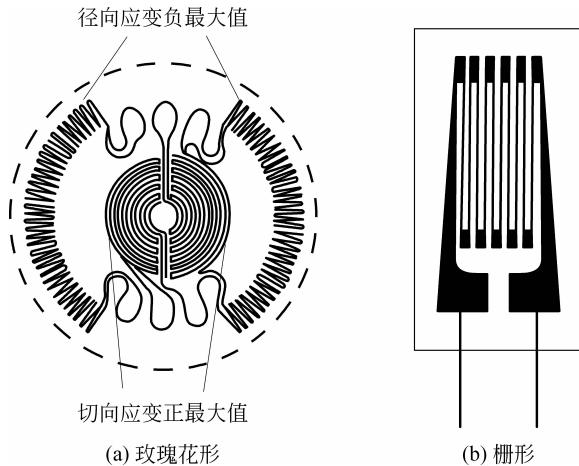


图 5-3 箔式应变平面计结构示意图

粘贴型箔式应变计采用时下流行的塑料基片上光刻金属箔制成。图 5-3(a)所示的玫瑰花形箔式金属应变计,可用于膜盒、转矩式应变计,也可以用于确定最小和最大应力及其方向的应变计。

用金属丝制成的应变计,弯曲部分可做成圆弧、锐角或直角。弯曲部分做成圆弧(U)形是最早常用的一种形式,制作简单,但横向效应(将电阻丝绕成敏感栅后,虽然长度不变,但其直线段和圆弧段的应变状态不同,其灵敏系数 K 较整长电阻丝的灵敏系数 K 小,该现象称为横向效应)较大。直角(H)形两端用较粗的镀银铜线焊接,横向效应相对较小,但制作工艺复杂,已被横向效应小、其他方面性能更优越的箔式应变计所代替。

5.1.4 应变计应用举例

应变计与弹性体相结合,可以制成力、扭矩、压力等传感器。

1. 柱式力传感器

柱式力传感器用于诸如汽车衡等载荷传感器,其结构特征及转换电路如图 5-4 所示。当荷重产生的重力 F 作用到柱形弹性体时,弹性体因压缩而发生形变,柱上的四个应变计随之发生变形,导致其体电阻发生变化,图中 R_4 、 R_2 减小, R_3 、 R_1 增加。将这四个电阻按图示连接,即为全桥测量电路,给测量电路加以电压或电流驱动,便可以测量电路的输出端得到与荷重 F 成正比的输出电压信号 U_o ,全桥测量电路具有灵敏度高、抗共模干扰力强、线性度好、受温度影响小的特点。电路优点往往可以弥补器件的缺陷,为此用四个同样的应变计换得一个优质的传感器是值得的。

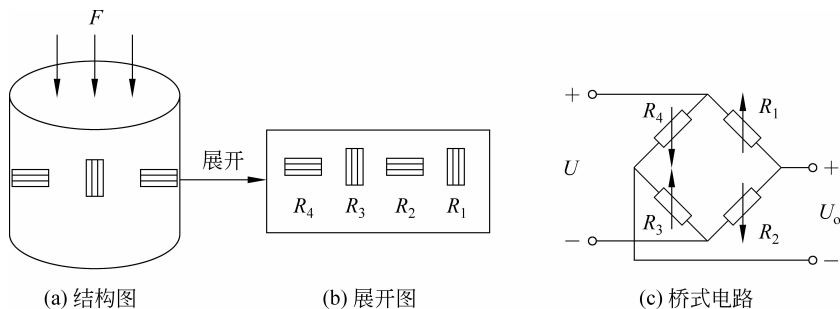


图 5-4 柱式力传感器结构与转换电路

2. 梁式力传感器

梁式力传感器也称悬臂梁式力传感器。梁有多种形式,如等截面梁、等强度梁、双孔梁、S形梁等。等强度梁力传感器的结构与转换电路示意如图 5-5 所示。

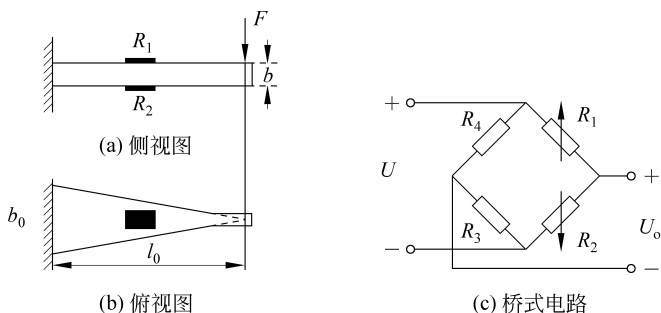


图 5-5 等强度梁力传感器结构与转换电路

当力 F 集中作用于等强度(悬臂)梁三角形顶点(图中延长线交点)处时,梁内各断面产生的应力是相等的,表面上的应变也是相等的,与 l 方向上的贴片位置无关。

如果梁上贴两个应变片,则在结构上要求在应变发生时,两片应变计的电阻变化大小相等,方向相反。这样等效的电路称为半桥。半桥的灵敏度是全桥的 $1/2$ 。电阻值一般取 $R_3=R_4=R$ 。 R 是应变片没有应变时的电阻值。为叙述方便, R_3 、 R_4 可称为匹配电阻。

匹配电阻应选用与应变片温度特性相同或接近的材料制成,否则,电路的温度稳定性将变差。

3. 应变式扭矩传感器

应变式扭矩传感器采用在专门设计的弹性轴上贴上应变片而制成。粘贴时,应使应变片敏感方向与轴母线方向成 45° ,因为在这个方向上轴表面主应力最大,而且数值上等于最大剪切力。应变式扭矩传感器的结构与转换电路示意如图5-6所示。

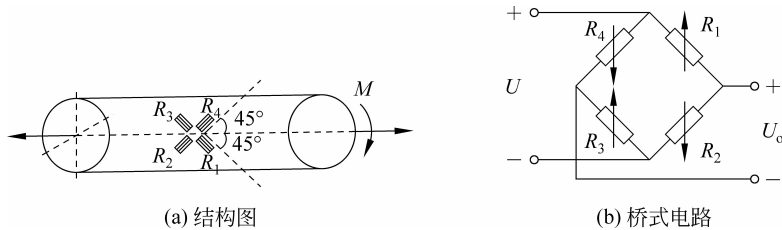


图5-6 应变式扭矩传感器结构与转换电路

4. 扩散硅压力传感器

扩散硅压力传感器以单晶硅片上扩散而成的惠斯通电桥为转换电路,单晶硅片与基座(称为硅杯)合为一体,用不锈钢壳体将传感器空间分为高、低压两个腔室。通过特殊焊接工艺将硅膜片的敏感桥输入、输出引出,与金丝相联,合成引线引出体外,最后密封成型。使用时,通过高、低压腔室的导压接口,分别加入压力,即可测出两个腔室的压力差。

扩散硅压力传感器的结构示意图如图5-7所示。(a)是传感器的结构示意图;(b)是一种压力传感器产品外观图;(c)是输出标准信号($4\sim 20\text{ mA}/0\sim 5\text{ VDC}/0\sim 10\text{ VDC}$)的某压力变送器产品的外观图。



图5-7 扩散硅压力传感器结构实物

不加处理地直接用腔室测量压力,既对硅杯的安全不利,使用起来也不方便。市场上扩散硅压力传感器及系列产品,都是将高、低压腔室抽成真空后,填满体温度系统很小的液体(通常是硅油)后,再用金属(通常是 316 不锈钢)膜密封。如此处理后的传感器产品使用寿命明显加长。当低压腔室与大气相通时,两腔室的压力差就是表压;当低压腔室为真空时,测得的压力差即为绝压值;当低压腔室通以任意压力时,此传感器即可当差压传感器用。

5.1.5 电阻式传感器输出信号调理电路之直流电桥

为什么传感器的输出信号要进行调理?原因有如下几条。

(1) 虽然传感器的输出已是电参数,但相当一部分传感器(如电阻式、电容式等)的输出形式与转换的目标(电压、电流、周期电信号)还有一步之遥,我们需要用调理电路将电参数转换为电压、电流或周期信号,以便后续电路对信号的传输和处理。

(2) 传感器输出的电信号往往要经过整流、滤波、整形、限幅、放大、线性化、电平转换等多种形式的功能转换和计算,才能达到测量的要求,这些工作均由调理电路完成。

电阻式传感器形式多样,被测量更是种类繁多,它们的共同特点是自身电阻值随被测量而变。更进一步,可将所有的电阻式传感器抽象为输出为受(被测量)控电阻器(可用可变电阻器符号表示,见图 5-6),掌握这个要点,电阻式传感器输出信号的调理就成为电阻电路的应用问题。在某些情况下,还可以用可变电阻器构成的电路模拟电阻式传感器的输出信号,用来调试电阻式传感器的调理电路。

1. 电阻到直流电压的转换电路

无论从什么角度考虑,直流电压都是信号中最简单、使用最方便的信号形式。从电阻变化到直流电压变化的电路是容易设计的,但什么样的电压信号是后续测量电路所要求的?考虑图 5-8 的几种电路,图中 R_x 代表电阻式传感器的输出电阻值; R 为传感器在被测量为零时的桥臂电阻值,本书将称之为静态电阻值,以便于叙述方便。

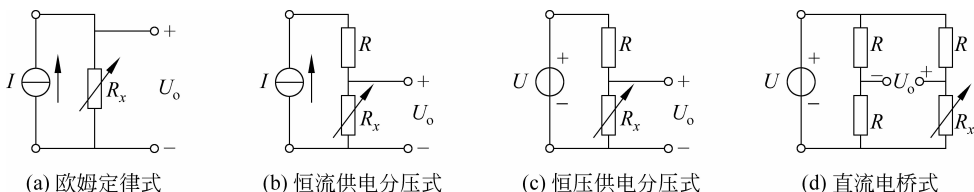


图 5-8 几种电阻式传感器的转换调理电路

图 5-8(a)的电路直接利用欧姆定律实现转换,电路最简单,但只能用恒流源供电;图 5-8(b)、图 5-8(c)分别是恒流、恒压源供电的分压式电路,相对图 5-8(a)的电路,进步之处在于转换电路既可用恒流源也可用恒压源供电,而且输出信号 U_o 的大小可方便地通过改变 R 值进行调整,对信号处理电路来说,信号的可调、易调节的功能是非常重要的。前三个电路的共同缺点是:输出信号的零点与我们日常习惯不一致。例如,将应变计电阻转换为电压信号时,我们习惯于在应变为 0 时,转换电路的输出也为 0,显然,前三个电路

是不具备此功能的。图 5-8(d) 的电路解决了这个问题,其核心在于电路的输出参考从电路的零电位变成了应变为 0 时传感器的输出电位值。为此,电路增加了一个分压支路得到了这个电位,它是固定的,其值可以根据我们的要求调整,于是,电路的输出自然就取在传感器受控电阻 R_x 与这个电位之间了。

图 5-8(a)、图 5-8(b)、图 5-8(c) 电路的输出只有一端是非零电位的,称之为单端输出(形式);图 5-8(d) 电路的两个输出端均不是零电位端,称之为差动输出。

图 5-8(d) 电路的形式是传感器信号调理中常用的电路。

2. 惠斯通电桥的平衡测量

将图 5-8(d) 的电路画成图 5-9 的布局形式,我们立刻就能认出,这就是惠斯通电桥。1858 年惠斯通公布了用此电路测量小电阻的报告,为精确测量电阻值提供了一种新方法。利用戴维南等效定律得

$$U_0 = \frac{R_4 R_2 - R_1 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U$$

戴维南等效电阻

$$R = (R_1 // R_2) + (R_3 // R_4)$$

$U_0 = 0$ 的状态称为电桥平衡,此时桥臂电阻之间的关系称为电桥平衡条件,即

$$R_1 R_2 = R_1 R_3 \quad \text{或} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = n \quad (5-11)$$

式中: n 称为桥臂比。

利用惠斯通电桥的平衡进行测量的方法称为零示法。设计桥路参数时,适当选择桥臂电阻值,使它们尽可能地接近传感器的静态电阻值,即 $R_1 = R_4 = R$; R_3 可用一个阻值为 R 的固定电阻加一个小阻值电位器或电阻箱组成,这样可以减小测量系统误差。

人工测量时,通过观察电位差计的指针偏转判断电桥的平衡状态,当电位差计的指针无偏转时,电桥平衡。电位差计非常灵敏,微小的电位差就会使其指针发生偏转;而零点附近的偏转是最敏感的,因为此点是两个指针偏转方向中的极小偏转点,容易准确识别。

调节 R_3 的阻值,使电桥平衡,此时 $R_2 = R_3$, 测量结果即已得出。

人工零示法适用于传感器静态性能指标的离线静态测量,如传感器的标定等;零示法还可以用于自动测量,此时测量系统除应具备检测功能,还应具有零点自动跟踪的闭环控制功能,称之为伺服系统也不为过。

3. 非平衡电桥

非平衡电桥是自动测量常用的电路。根据桥臂中电阻传感器的数量,可分为单臂桥、差动桥(或半差动桥)和全(差动)桥几种,如图 5-10 所示。

1) 单臂桥

设在以上各图中电阻式传感器未受作用时,电桥处于平衡状态,即桥臂电阻之间满足 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 关系。对图 5-10(a) 所示的恒压供电的单臂桥,当传感器受被测量作用

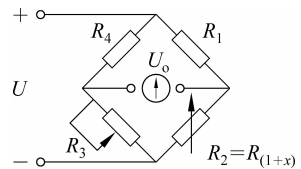


图 5-9 惠斯通电桥