

电 工 测 试 系 统

——原 理 与 使 用

王鸿钰 解明芳 何 鸣 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书从使用角度出发,介绍电工测试系统的基本工作原理、系统结构和应用实例。全书共九章:第一章传感器;第二章信号调节技术和使用的元器件;第三章~第八章介绍各种测试系统的系统结构、规范、典型产品和应用情况;第九章作为系统应用的一个重要方面,较详细地介绍电能表检定和电力负荷监控系统。书中收编了大量很有参考价值的图表和应用实例。

本书读者对象为使用仪器仪表的技术人员、高中级电工和电气测试工人,亦可作为大专院校和成人高校仪器仪表专业的教材和参考书。

电 工 测 试 系 统

——原理与使用

王鸿钰 解明芳 何 鸣 编著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所经销 常熟第七印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.75 字数 411,000

1994年2月第1版 1994年2月第1本印刷

印数 1-5,000

ISBN 7-5323-3315-9/TM·86

定价 13.40元

(沪)新登字 108 号

前 言

最近十多年来,仪器仪表技术发展很快,其中的一个重要方面是各种电工测试系统的开发成功并投入实际应用。仪器仪表的数字化、智能化、小型化和接口的规范化,加速了测试系统的发展。为了适应形势的发展和读者的需要,我们对 1981 年出版的《电工仪器仪表与应用》进行了改编,将仅作知识性介绍的仪器系统等章节扩编成本书,作为改编后的《电工仪器仪表——原理与使用》的姊妹篇。

最近这些年,我们曾参加部分系统的组建和总调工作,收集和翻译了大量有关资料,积累了一些经验。现将这些心得体会和积累的资料汇编成书,奉献给读者。编写本书时,我们尽量保持原著深受欢迎的深入浅出和实用的特点,让读者阅后能对测试系统、功能插件和有关规范有个比较全面的了解,以便能根据实际应用要求,选择合适的或比较合适的功能插件和仪器仪表来组建系统,正确地使用和维护系统,充分发挥系统的功能。

本书共九章,前二章介绍传感器、信号调节技术和使用的元器件;第三章概述电工测试系统;第四~第八章介绍目前正在使用的 GPIB、CAMAC、PC、STD、VXI 等五种仪器系统的系统结构、规范、典型产品和应用实例。第九章作为系统应用实例,介绍电能表检定和电力负荷监控系统。

本书以王鸿钰为主编写,解明芳、何鸣编写了第一、第三、第六、第八等章的部分章节。编写过程中,同济大学的有关老师、上海仪器仪表研究所的有关同志曾给予我们很大鼓励与支持,许多生产厂、研究和开发单位为本书提供了宝贵资料,作者在此表示衷心感谢。

作 者

1992 年 12 月

目 录

第一章 传感器	1
§ 1-1 变阻式传感器	1
§ 1-2 变抗式传感器	10
§ 1-3 半导体传感器	14
§ 1-4 发电传感器	18
§ 1-5 数字传感器	22
第二章 信号调节	25
§ 2-1 阻抗影响和阻抗匹配	25
§ 2-2 电压变换	27
§ 2-3 电流变换	31
§ 2-4 衰减器	34
§ 2-5 模拟处理	36
§ 2-6 滤波器	47
§ 2-7 调制和采样	53
§ 2-8 模数和数模转换	56
第三章 测试系统概述	64
§ 3-1 自动化程度不同的三种系统	64
§ 3-2 按用途划分的系统	67
§ 3-3 电工测试系统实例	69
第四章 GPIB 仪器系统	84
§ 4-1 GPIB 接口系统	84
§ 4-2 接口功能和接口功能的实现	98
§ 4-3 GPIB 仪器系统的应用	110
第五章 CAMAC 仪器系统	126
§ 5-1 CAMAC 系统的基本情况	126
§ 5-2 产品实例	140
§ 5-3 CAMAC 系统的应用	153
第六章 个人仪器系统	160

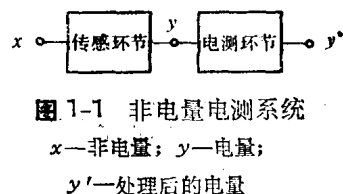
§ 6-1 个人计算机和 PC 总线	160
§ 6-2 测控插件'	168
§ 6-3 个人仪器系统的应用	184
第七章 STD 总线规范与 STD 测控系统	192
§ 7-1 STD 总线规范	193
§ 7-2 STD 模板	197
§ 7-3 STD 测控系统	205
第八章 VXI 总线与应用系统	211
§ 8-1 VXI 总线标准的基本情况	211
§ 8-2 VXI 模块	221
§ 8-3 VXI 总线系统的应用	221
第九章 电能表检定和电力负荷监控系统	229
§ 9-1 电能的测量和交流电能表	229
§ 9-2 交流电能表的检定和检定装置	230
§ 9-3 电力负荷监控仪器	244
§ 9-4 电力负荷监控系统	247
附录一 IBM 个人计算机和 PC 总线	253
附录二 RS232C 引脚定义和逻辑电平	269

第一章 传 感 器

传感器是将各种非电的物理量转换成电量的器件，它是非电量电测系统中的一个重要组成部分。

非电量电测系统的基本框图如图 1-1 所示。电测仪表之前接若干传感器，以其将温度、压力、应变、振幅、流量、转速等被测的非电量转换成电量。

传感器的品种规格很多，大致可以按工作原理、用途、能量如何传递等不同方式进行分类。为避免名目过于繁多，并有利于读者学习、分析与归纳，本书按工作原理不同将各种传感器分成变阻式、变抗式、半导体式、发电式、数字式等五类。



§ 1-1 变阻式传感器

通过阻值变化进行非电量/电量的转换也许最容易理解，因此，先讨论这种传感器。

一、电位器式传感器

图 1-2 是电位器式传感器的原理电路图。电位器以恒流源供电，它的输出(电压)用高阻抗电压表进行测量。为了使测量仪表对电位器工作状态的影响尽可能小，使用高阻抗电压表很有必要。因为滑动触头相对电位器下端的位移量可用输出电压的大小表示，因此，只要在滑动触头和被测对象之间接入一个能将非电量转换成位移的转换器，就可以用这种固定参考端的电位器式传感器测量液面、流量、力、压力等非电量。图 1-3 给出了一些将非电量转换成电位器上的滑动触头位移的方法。

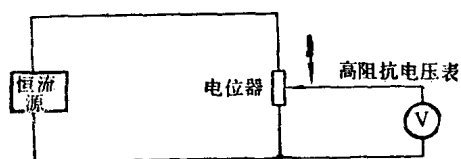


图 1-2 电位器位置传感器的工作原理图

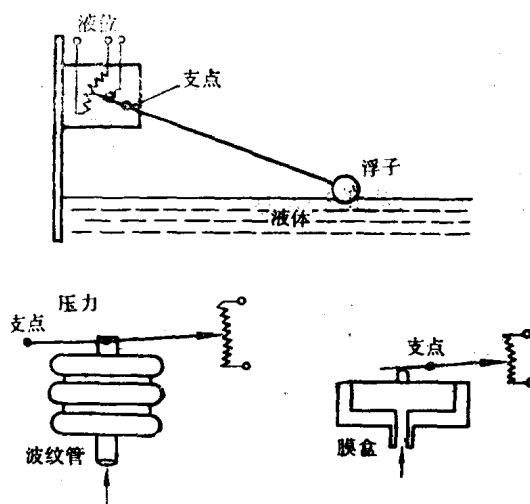


图 1-3 一些传感器的执行机构

使用这种电位器式传感器测量速度和加速度时,需要对与位移成正比的输出进行微分:微分一次得速度,微分两次得加速度(与加速度成正比的电信号)。当然,与加速度成正比的信号也可以直接由测震式电位器传感器测得。

电位器式传感器的电阻元件既可以是线绕的、碳膜的或铂膜的,也可以是电阻化合物,例如导电塑料电位器。传感器的工作频率不高,仅限于每秒几周的位移。因为,传感器工作时,滑动触头在电阻元件上滑动,所以,它们的寿命与接触处的磨损有关。导电塑料电位器耐磨,故寿命很长;而精密线绕电位器的寿命则较短。这种传感器比较便宜,使用的电路也不复杂,但必须考虑仪表加载的影响。

二、电阻应变片

1. 电阻应变片的工作原理 一根长度为 l 的电阻丝受拉力的作用,长度将增加 δl 。只要不超过材料的弹性极限,长度的变化将与外力成正比。外力移走后,电阻丝仍将恢复到它原来的长度。当电阻丝的长度增加时,其横截面必然减小。因为导线的电阻:

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

式中, ρ 为电阻丝的电阻率; l 为电阻丝的长度; S 为电阻丝的横截面面积。

所以,长度的增加和截面积的减小都将使被拉伸的电阻丝的电阻增加。注意:在外力的作用下,电阻丝的电阻率也会改变,这种现象称为压阻效应。

对式(1-1)取对微分得:

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

式中, $\frac{dR}{R}$ 为电阻的相对变化; $\frac{dl}{l}$ 为电阻丝长度的相对变化,即应变,用符号 ϵ 表示, $\epsilon = \frac{dl}{l}$ 。若 l 以 m 为单位, dl 以 μm 为单位,则应变的单位为 $\mu\text{m}/\text{m}$,即微应变($\mu\epsilon$), $\frac{d\rho}{\rho}$

为电阻率的相对变化,由材料的压阻效应产生; $\frac{dS}{S}$ 为截面面积的相对变化。因为 $S = \pi r^2$,其中 r 为电阻丝的半径。所以, $dS = 2\pi r dr$, $\frac{dS}{S} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}$ 。由力学原理知,轴的径向应变 $\epsilon_r = \frac{dr}{r}$ 与轴向应变 $\epsilon = \frac{dl}{l}$ 之间的关系为:

$$\epsilon_r = \frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} = -\mu \epsilon$$

式中, μ 为材料的泊松比。

$$\therefore \frac{dS}{S} = -2\mu \epsilon \quad (1-3)$$

将式(1-3)和 ϵ 代入式(1-2)得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon + 2\mu \epsilon \quad (1-4)$$

这就是电阻丝阻值的相对变化与应变 ϵ 之间的关系式。

通常,将 $\frac{dR}{R} / \frac{dl}{l}$ 定义为灵敏度系数,并用 K 表示。

$$K = \frac{dR}{R} \bigg/ \frac{dl}{l} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho \cdot \varepsilon} \quad (1-5)$$

由上式知, K 由 $(1+2\mu)$ 和 $\frac{d\rho}{\rho \cdot \varepsilon}$ 两部分组成。对于确定的材料, 它们是常数。对于最常用的康铜合金而言, $K \approx 2$ 。为了获得更高的灵敏度系数, 可以使用镍铬铁等合金, 它们的 $K \approx 2.8 \sim 3.5$ 。若使用铂铱合金, 则 $K \approx 4 \sim 4.5$ 。

显然, 将很长的电阻丝直接粘贴在试件上是不方便的, 因而, 在普通应变片结构中, 都将电阻丝弯折成栅状, 然后, 将它粘贴在纸基或由酚醛塑料等制成的基底上。箔式应变片(图 1-4)是由丝式应变片发展而来的, 它的制作工艺与制作印刷电路相似。这种工艺适于制作各种形状的专用应变片。应变片的尺寸与具体应用有关, 成品电阻应变片有各种长度, 如 3~150mm, 最长可达 200mm, 最小可小于 1mm。应变片的标称阻值由测量电阻相对变化的仪器定, 通常有 60、120、200、350、500、600 Ω 及 1000 Ω 等各种规格, 不过, 最常用的为 120 Ω 。

当把电阻丝弯折成栅状制成应变片时, 各弯折处的一段短线对平行于应变片轴线方向的应变不起作用。应变片上的这部分电阻称为“无效电阻”。无效电阻与应变片总阻之比依赖于弯折的形状和应变片的长度。

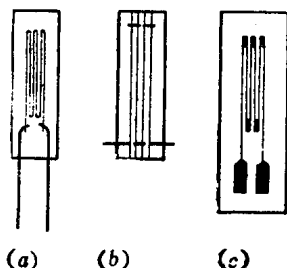


图 1-4 电阻应变片

(a) 栅状丝片; (b) 短接式丝片; (c) 箔片

将应变片粘贴在试件上, 当试件受到平行于应变片轴线方向的作用力时, 应变片将感受两种应变: ① 平行于应变片轴向的主应变或纵向应变; ② 垂直于应变片轴向的横向应变。应变片的无效电阻较大, 横向应变灵敏度系数也较大, 其典型值约为纵向灵敏度系数的 1%~2%。因为横向应变和纵向应变对输出的作用相反, 所以, 横向应变使应变片的总灵敏度系数降低。在箔式应变片中, 增大弯曲段的宽度(见图 1-4)可以减小横向影响。

除横向影响小外, 箔式应变片还具有下列优点:

- ① 箔片比较薄, 比较容易产生形变;
- ② 相对而言, 箔比丝的表面积大得多, 因此, 散热性能比较好;
- ③ 箔能比丝更牢固地粘附在基底上;
- ④ 提供大面积的终端连接端容易;
- ⑤ 光刻制造技术能保证产品的一致性;
- ⑥ 尺寸可以做得很小, 便于测量局部应变和曲面应变。

2. 动态响应 当应变片用于动态测试时, 例如用来检测振动所产生的应变时, 必须考虑应变片的频率响应。因为应变片所感受的应变变量是其有效长度之内应变量的平均值, 所以, 当应变振动波长和应变片的有效长度为同一数量级时, 将会产生相当大的测量误差。在最坏情况下, 即当应变片的有效长度等于振动波长时, 有效的平均应变将为零, 因而输出为零(图 1-5)。

利用描述频率、波长和声速三者之间关系的表达式, $fl = v$, 可以确定输出为零时的振动频率。 v 是声音在试件中(应变片粘贴在该试件上)的传播速度; f 是试件的振动频率; l 为应变片的有效长度。通常, 应变片粘贴在钢件上。因为钢的传播速度 $v \approx 5 \times 10^3 \text{ m/s}$, 所以, 零输出时的频率 $f = 5 \times 10^3 / l \text{ Hz}$, 若 $l = 5 \text{ mm}$, 则 $f = 1 \text{ MHz}$; $l = 150 \text{ mm}$, 则 $f =$

33kHz。

上面算出的频率为理论值,实际的零输出频率值因粘贴等影响而大大下降。为了使输出误差不大于1%,应将理论值除以20。因此,

对5mm和150mm的应变片,其实际的频率上限分别为50kHz和1.6kHz。许多仪器的技术指标中,常用-3dB点(由最大值下降30%)规定它的频带宽 B_2 。对于应变片,3dB点的频率值可由 $f \approx v/4l$ 求得。对上述两种应变片,带宽 B_1 分别为250kHz和8kHz。将应变片和仪表连接后,整个测量系统的带宽 B 可以由经验公式求得:

$$B = \frac{B_1 \times B_2}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2}}$$

注意:为了保证测量误差在1%左右,应该在 $1/5 \times$ 系统频带的频段内进行测量。

3. 温度影响 温度也是影响电阻应变片性能的一个重要因素。温度对它的影响主要表现在三个方面。

- ① 电阻丝的阻值随温度而变。例如,康铜合金丝具有 $\pm 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的温度系数。
- ② 在应变片结构中,引线和应变丝系不同的金属。引线常为镀锡铜线,而应变丝可能是康铜,也可能是镍铬铁合金等。铜引线与这些不同的应变丝连接时,将产生大约 $2 \sim 47 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 的热电势。例如:铜对康铜产生 $43 \sim 47 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 的热电势。

③ 因试件材料和应变电阻丝的线膨胀系数不同而引起误差。例如,当试件的膨胀系数比应变丝的膨胀系数大时,温度升高,应变丝将被拉长。从测量仪表的指示来看,试件好像处在受拉状态。

为了对温度影响进行补偿,测量线路中常常接入补偿应变片。补偿应变片和工作应变片的标称特性完全相同,它们分别粘贴在用同一材料制成的两个相同试件上,并置于相同的环境中,使它们具有相同温度。不过,一个试件受力作用,而另一个试件不受力作用。因两片应变片已按补偿方式连接。于是,由温度变化引起的两片应变片电阻的变化就能互相抵消。

采用温度自补偿片也是常用的温度补偿法。这种方法对应变片本身采取了某种措施使它在规定的试件和规定的温度变化范围内工作时,能自动对温度影响进行补偿。自补偿片有多种不同的形式,如:单丝自补偿应变片、双丝组合式自补偿应变片、热电偶补偿应变片、双丝半桥式自补偿应变片等。

以双丝组合式为例,自补偿应变片由两种合金丝串接而成。两种丝的电阻温度系数不同,一种为正值,一种为负值。于是,温度变化时,电阻丝阻值能基本不变,甚至,通过适当组合还能补偿因应变片与试件的线膨胀系数不同所造成的误差。

三、测量电路

测量应变片电阻阻值变化的电路通常为某种形式的直流惠斯登桥路。电桥的输出与工

作应变片电阻的变化成正比。为了提高灵敏度,可以使用两片或四片工作应变片。

下面是一个计算电桥输出电压的例子。

已知图 1-6 (a) 不平衡惠斯登电桥的两个相邻臂各接一片 120Ω 的工作应变片, 另外两个相邻臂各接一只 120Ω 的电阻器。设应变片的灵敏度系数为 2, 受到 $100\mu\varepsilon$, 外加的直流电源电压 10V 。求电桥的输出电压。

因为应变灵敏系数 $\Delta R/R\varepsilon = 2$, 所以, $\Delta R = 2\varepsilon R = 2 \times 100 \times 120 \times 10^{-6} = 0.024 (\Omega)$ 。两片应变片以图 6-6(a) 方式连接, ΔR 必然为一正一负。设下面一片工作应变片的 ΔR 为正。

$$\begin{aligned} \therefore U_{BC} &= \frac{U_{in}}{R + \Delta R + R - \Delta R} (R + \Delta R) \\ &= \frac{U_{in}}{2R} (R + \Delta R) \end{aligned}$$

$$U_{AC} = \frac{U_{in}}{2R} \cdot R$$

$$\therefore U_{out} = U_{BC} - U_{AC}$$

$$= U_{in} \left[\frac{R + \Delta R}{2R} - \frac{R}{2R} \right] = U_{in} \frac{\Delta R}{2R}$$

代入已知数据, 则输出电压为:

$$U_{out} = \frac{10 \times 0.024}{2 \times 120} = 1 (\text{mV})$$

因安装时桥路中的应变片可能出现不同的应变, 加上其阻值不可能完全相同, 所以, 初始状态 (无载状态) 下电桥可能不平衡。为了使电桥在无载状态下平衡, 桥路中总接有调零元件。图 1-6 给出了几种调零电路。串联电阻平衡法常用于接有一片或两片应变片的电桥, 顶点电阻平衡法和并联臂平衡法常用于接有两片或四片工作应变片的电桥。顶点电阻平衡电路中, R_P 应当小些, 大概是应变片电阻的 $10\% \sim 25\%$ 。而在并联平衡电路中, $2R + R_{RP}$ 不能太小, 以免使电桥灵敏度明显降低。为了提高灵敏度, 同时又能解决初始平衡问题,

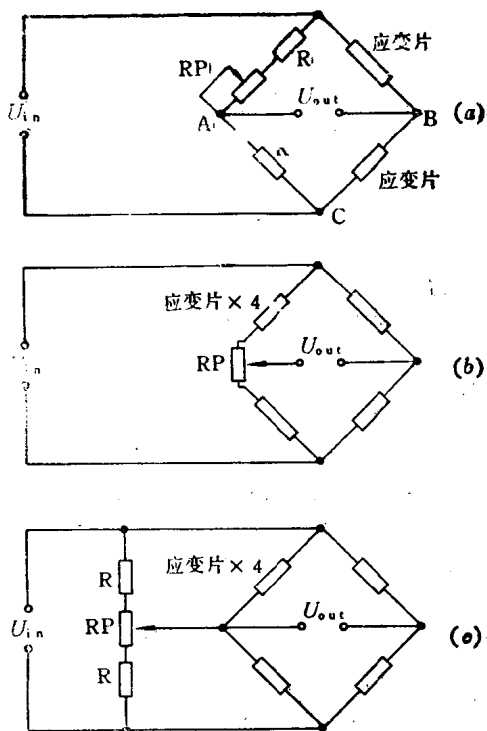


图 1-6 应变电桥的平衡调节

(a) 串联电阻平衡; (b) 顶点电阻平衡;
(c) 并联臂平衡

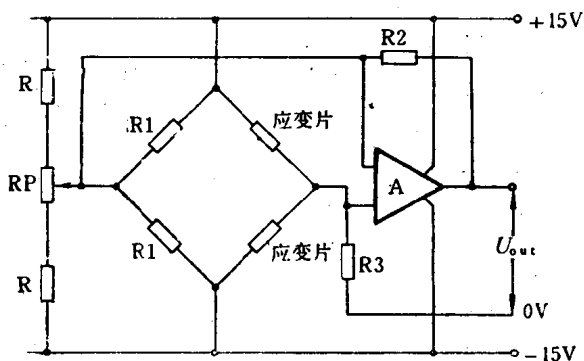


图 1-7 具有初始平衡电路和放大器的双工作臂应变片电桥

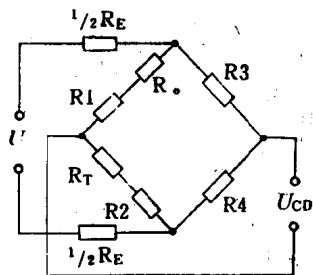


图 1-8 具有补偿电阻的电桥电路

可使用图 1-7 所示电路, 在并联平衡桥路的输出端增加一只运算放大器, 对输出的小信号进行放大。

图 1-8 给出了一个完整的电桥电路。图中 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为应变片电阻, R_0 为桥路零点补偿电阻。如前所述, 电桥初始状态下很可能不平衡, $R_2R_3 \neq R_1R_4$ 。设 $R_2R_3 > R_1R_4$, 若在 R_1 桥臂内串入一个适当大小的锰铜电阻 R_0 后, 就有可能满足 $R_2R_3 - (R_1 + R_0)R_4 = 0$ 。

经过零点补偿后, 桥路在初始状态下达到了平衡。但随着温度的变化, 零点仍会发生漂移。为了克服温度影响, 桥路中串入一个温度系数较大的金属电阻 R_T 。调整 R_T , 可使应变片适应具有不同线膨胀系数的试件。

图 1-8 中 R_E 为弹性元件弹性模量的温度补偿电阻。就一般金属材料而言, 温度上升时, 弹性模量减小。由力学原理知, 弹性模量减小将使应变增大, 因而桥路的输出电压增大。为了克服这种影响, 在电桥的输入回路中接了由电阻率高、电阻温度系数大的纯铜丝或镍丝制作的电阻 R_E 。温度升高时, R_E 的阻值增大, 其两端的压降增大, 加在桥路两端的输入电压减小, 因而, 桥路输出电压减小, 以此补偿因弹性模量减小而造成的输出电压增大。实际使用时, 为了减小热电势, 常把 R_E 分成两半, 分别接在输入电压的两端, 而且, 使它们具有相近的温度。

实际桥路中, 还常常在输入端接传感器灵敏度校准电阻, 在输出端接输出阻抗校准电阻。

应变片使用时, 通常需要用某种粘结剂把应变片贴到试件上。粘结剂的胶层应当很薄, 以便使试件的形变能正确地传递到应变片上。粘贴时, 可轻轻地使胶瓶里挤出少量胶液, 在应变片基底面上抹上薄薄的一层。待溶剂部分挥发, 粘结剂粘附力最强时, 将应变片对准试件待测方位贴平, 垫以不粘胶薄膜, 用手指按应变片基底挤出多余的胶和气泡, 然后再在室温下晾干聚合。粘贴也可以用压板、弓形金属板、橡胶垫片和不粘胶薄膜进行压固, 把多余的胶液从应变片中心的下面挤出来。应变片贴到试件上后, 为了防止潮湿环境的影响, 应在应变片上涂一层防潮剂。

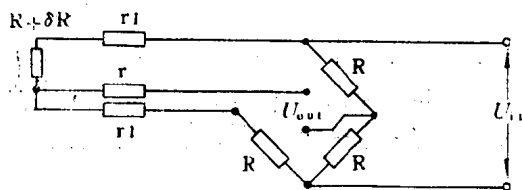


图 1-9 单工作应变片的引线电阻自补偿电路

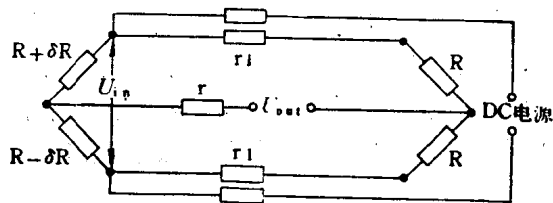


图 1-10 双工作应变片的引线电阻自补偿电路

许多应用中, 测量、显示仪器远离工作应变片。这时, 在工作应变片与测量电路的其余部分就需要用导线进行连接。这相当于在它们之间串联了一个小电阻, 而这种引线电阻的阻值随温度的变化而变化。为了减小这种影响, 可如图 1-9、图 1-10 所示, 接入辅助连线, 使引线电阻的温度影响在相邻两臂内基本抵消。图 1-9 的输出为 $U_{out} = U_{in} \delta R / [4(R + r_1) + 2\delta R]$, 图 1-10 的输出为 $U_{out} = U_{in} \delta R / 2R$ 。

电阻应变片的应用范围很广, 不过, 直接用途可概括为测量桥梁、飞行器、铁路、吊车、车辆、钢筋混凝土、建筑物等结构中的应力和应变。因为通常要对试件上的大量部位进行测量, 所以, 易于粘贴和连接是一种重要特性。除上述直接应用外, 应变片还广泛用于测控

系统之中,作为传感器中的敏感器件。

四、电阻应变式传感器

电阻应变片可以将试件表面的应变转换为电阻的相对变化,然后,通过测量电阻的相对变化即可测出试件的应变。因此,任何物理量只要能设法转换成某种弹性元件的应变,就可以利用电阻应变片进行间接测量。这种包括电阻应变片在内的弹性元件及其附件构成的测量器件就叫做电阻应变式传感器。

传感器结构中使用的应变片既可以是非粘贴式的,也可以是粘贴式的。如果作用在弹性元件上的力比较小,例如:测量小的压力差,则可采用非粘贴应变式传感器。这时,应变丝本身起着弹性元件的作用。

电阻应变式传感器按用途可分为拉压力传感器、荷重传感器、位移传感器、扭矩传感器和加速度传感器等。下面介绍几种传感器的工作原理。

1. 荷重传感器 图 1-11 为电阻应变式荷重传感器的测力原理图。钢质弹性元件的圆柱体上成对地于纵向和横向贴上应变片 R1、R2、R3、R4。当弹性元件受被测力 P 作用时,轴向受压缩、径向受拉伸,粘贴在其表面上的应变片也随着变形而改变电阻值。R1、R4 受压缩,阻值减小;R2、R3 受拉伸,阻值增加。

由力学原理知,弹性元件在弹性范围内的应变 ε 与引起变形的力成正比:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{P}{SE}$$

式中, P 为作用力; S 为弹性元件的横截面积; E 为弹性元件材料的弹性模量。

此时 R1 和 R4 的电阻相对变化为:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = k\varepsilon = k \frac{P}{ES}$$

而 R2 和 R3 的电阻相对变化为:

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\mu k \frac{P}{ES}$$

即, R1~R4 的电阻相对变化与被测力 P 成正比。

以把应变片 R1、R2、R3 和 R4 组成等臂电桥,则电桥的输出电压也将与被测力 P 成正比。

2. 扭矩传感器 为了测量旋转轴的扭矩,可在被测旋转轴上布置应变片,也可把专门的扭矩传感器安装在轴上进行测量。扭矩传感器的弹性元件采用实心或空心圆轴,应变片按与轴线成 45° 的方向粘贴,通常粘贴四片应变片组成全桥(见图 1-12)。这样既可以提高灵敏度,又消除了弯曲产生的影响。

由力学原理知,应变与扭矩之间的关系为:

$$\varepsilon = \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{M_T}{W_T}$$

式中, M_T 为扭矩; W_T 为圆轴抗扭截面模数,对于实心圆轴 $W_T = \frac{\pi}{16} D^3$, D 是圆轴外

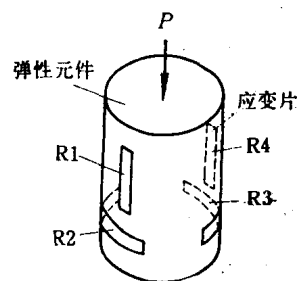


图 1-11 应变式荷重传感器测力原理图

径, 对于空心圆轴 $W_T = \frac{\pi}{16} D^3 (1 - \alpha^4)$, 其中 $\alpha = \frac{d}{D}$, d 是空心圆轴内径, D 是外径; E 、 μ

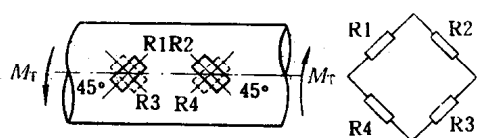


图 1-12 扭矩传感器的原理示意图

分别是材料弹性模量和泊松比。

因此, 由应变 ε 可间接测量扭矩 M_T 。

扭矩传感器中的电阻应变片与试件一起旋转, 而测量仪器静止不动。为了既能在应变片与测量仪器之间传递应变信号, 又不使连接导线

被绞断, 因此, 传感器中装有集流器。

集流器主要由两部分组成: 一部分与应变片引出线连接, 跟试件一起旋转; 另一部分与测量仪器的导线连接, 静止不动, 因此, 能有效地引出应变信号。

3. 位移传感器 位移传感器用来把位移转换成弹性元件的变形。应变片粘贴在弹性元件上。弹性元件有梁式和弓形等。为了测量快速变化的位移, 元件本身的固有频率应远大于被测信号的频率。位移传感器的标定可用螺旋测微仪进行, 它的量程由百分之几毫米到几十毫米。

图 1-13 是悬臂梁式位移传感器的示意图, 梁的截面为矩形。由材料力学原理知, 梁端点挠度 f 与梁的表面应变 ε_0 有下列关系:

$$f = \frac{2}{3} \frac{l^2}{hx} \varepsilon_0$$

式中, l 为梁的跨度; h 为梁的厚度; x 为粘贴应变片处到端点的距离。

因此, 根据应变值大小即可得到作用于梁端点的位移。

利用此原理制成的双臂梁式位移传感器已广泛应用于断裂力学中测量裂纹张开位移。

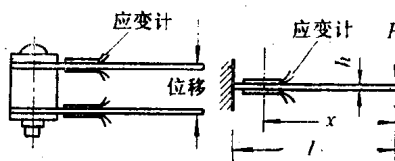


图 1-13 悬臂梁式位移传感器示意图

五、其他变阻传感器

1. 热电阻传感器 有些材料具有比较高的电阻温度系数。热电阻传感器就是利用这种随温度明显变化的特性来测量温度的。常用的热电阻有用铜丝、铂丝制作的铜热电阻和铂热电阻。铜热电阻主要用在 $-50 \sim +150^\circ\text{C}$ 温度范围内, 电阻值与温度的关系为:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (1-6)$$

式中, R_t 为工业铜热电阻在 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值 (Ω); R_0 为工业铜热电阻在 0°C 时的电阻值 (Ω), $R_0 = 50\Omega$ 或 $R_0 = 100\Omega$; t 为被测温度 ($^\circ\text{C}$); A 为常数, 其值为 $4.28899 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$; B 为常数, 其值为 $-2.133 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$; C 为常数, 其值为 $1.233 \times 10^{-9}/^\circ\text{C}^3$ 。

近似公式为:

$$R_t = R_0 (1 + at) \quad (1-7)$$

式中, a 为电阻丝的温度系数。

铂热电阻的电阻值与温度具有如下关系:

对于 $-200 \sim 0^\circ\text{C}$ 的温度范围,

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (1-8)$$

对于 $0 \sim 850^\circ\text{C}$ 的温度范围,

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-9)$$

式中, R_t 、 R_0 为铂热电阻在温度为 t 和 0°C 时的电阻值 (Ω), $R_0 = 100\Omega$ 或 $R_0 = 10\Omega$; t 为被测温度 ($^\circ\text{C}$); A 为常数, 其值为 $3.90802 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$; B 为常数, 其值为 $-5.80195 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$; C 为常数, 其值为 $-4.27350 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^4$ 。

当温度从 0°C 升高到 100°C 时, 铂电阻大约增加 39%, 而铜电阻大约增加 42.8%。铂热电阻具有很高的准确度和稳定度, 主要用来精密测量温度。铂电阻的不足之处为: 比较脆弱, 价格贵; 与热电偶相比, 响应时间比较长 ($0.5 \sim 1\text{s}$)。铜热电阻的准确度也较高, 而且便宜。这些热电阻常密封在图 1-14、图 1-15 所示的套管中。常用热电阻的特点和用途见表 1-1。

表 1-1 常用热电阻的特点和用途

名称	分度号	特 点	用 途
铜热电阻	Cu50 ($R_0=50\Omega$)	物理、化学性能较稳定, 特别在 $-30 \sim +100^\circ\text{C}$ 温度范围内使用性能很好; 精度较高(相当于 $0.5\% \sim 1.0\%$); 灵敏度较铂热电阻高; 提纯容易、价格便宜	测量 $-50 \sim +150^\circ\text{C}$ 温度范围内的化工、电站的管道温度; 测量旋转机械的轴承温度; 其他简易温度的测量, 如粮仓温度等
	Cu100 ($R_0=100\Omega$)		
铂热电阻	Pt10 ($R_0=10\Omega$)	物理、化学性能极为稳定, 复现性好; 精度高(相当于 0.5%), 可用于精密温度测量; 测量温度范围宽 ($-200 \sim +650^\circ\text{C}$, 若以陶瓷作骨架, 则可至 $+1000^\circ\text{C}$)	要求精度高的测量对象; 测量化工、电站等的管道温度; 测量固体表面温度; 测量电机定子温度; 作一、二等标准热电阻
	Pt100 ($R_0=100\Omega$)		

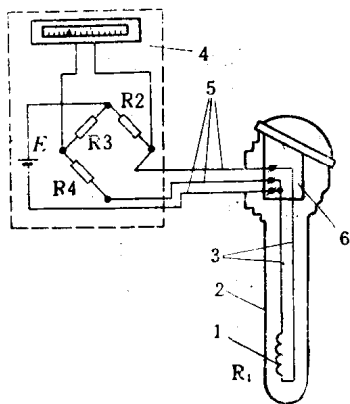


图 1-14 二线制热电阻的三线制接法

1—热电阻感温元件; 2—套管; 3—内导线;
4—显示仪表; 5—外导线; 6—接线座

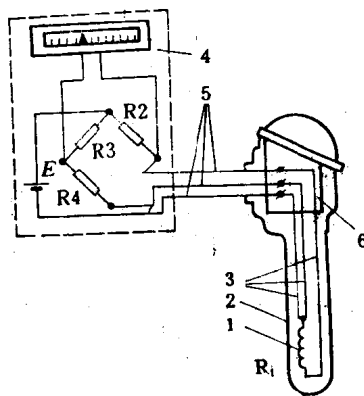


图 1-15 三线制热电阻的接法

1—热电阻感温元件; 2—套管; 3—内导线;
4—显示仪表; 5—外导线; 6—接线座

对热电阻中的阻值变化常用下列方法进行测量:

- ① 使用以平衡方式工作或以不平衡方式工作的惠斯登电桥测量;
- ② 使用专用的测温电桥测量;
- ③ 使用感应耦合比例臂电桥测量。

②和③的电桥中, 使用的都是一些精密器件, 电桥的温度分辨力可达 0.0001°C 。这两种方法主要在标准实验室中使用, 测量铂热电阻的阻值。

实际测量热电阻时,须消除由连接导线电阻引起的测量误差。采用的方法也是三线制接线法,把连接导线的电阻分别加到相邻的两个桥臂上去。

图 1-14 为二线制热电阻以三根外导线连接到测量仪表的接线示意图。两根外导线的电阻分别加入 R_1 桥臂和 R_4 桥臂,第三根外导线的电阻串入供电电源回路。图 1-15 为三线制热电阻的三线制接线法示意图。三线制热电阻是具有三根内导线的热电阻,它也用三根外导线连接到测量仪表。采用三线制热电阻,不仅消除了外导线引起的测量误差,而且还避免了由内导线引起的测量误差。注意:为了减少保护套管的热传导所造成的测量误差,必须按照规定的插入深度安装好热电阻。

若采用四线制热电阻,并按图 1-16 接法,以恒流源供电,以测量放大器 A 测量热电阻两端电压的变化,那么,这样测量不仅能消除连接导线误差,而且还能克服电桥测量法的非线性误差。

2. 湿度传感器 湿度是气体中水蒸气含量的量度,它有许多不同的描述方法。其中最常用的是相对湿度。在测量温度下,气体中所含水蒸气的压强与同一温度下该气体中所含饱和水蒸气的压强之比称为相对湿度。这个比值通常用百分比表示。相对湿度与温度有关。

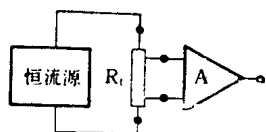


图 1-16 热电阻的
恒流测量原理图

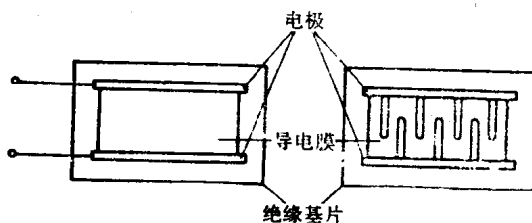


图 1-17 阻敏湿度传感器

变阻湿度传感器可以分成两种类型。一种具有阻性感湿元件。感湿元件的材料通常是某些吸湿盐的混合剂,例如氯化锂和炭粉。将这种混合剂涂布在金属电极之间的绝缘基片上,就构成了图 1-17 所示的湿度传感器。在这种传感器中,当周围湿度较大时,涂布在绝缘基片上的氯化锂水溶液吸湿变稀,电导率升高;反之,蒸发变浓,电导率下降。电阻随湿度变化而变。另一种类型的变阻湿度传感器利用了某些材料的长度随湿度而变的特性。然后,用电位器或应变片位移传感器将这种长度的变化转换成电信号的变化。

§ 1-2 变抗式传感器

变抗传感器是通过位移来改变电容的容抗或电感的感抗的传感器。因为电抗的变化只能用交流测量,所以,变抗传感器的激励源必须为交流。这可能与测量系统中的其余部分不协调。为解决此问题,许多变抗传感器中都装有 DC-AC 变换电路和输出解调电路,使传感器的输入和输出为直流,而其内部激励为交流。

一、变容传感器

变容传感器是将被测的物理量变化转换为电容器的电容量变化的传感器。以平板电容

器为例,其电容量:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1-10)$$

式中, ε 为极板间所填介质的介电常数; S 为极板面积; d 为极板间距。

改变这三个量中的任一量,都将使电容量改变。同轴电容器也有类似特性。变容传感器就是利用这种性质制成的。

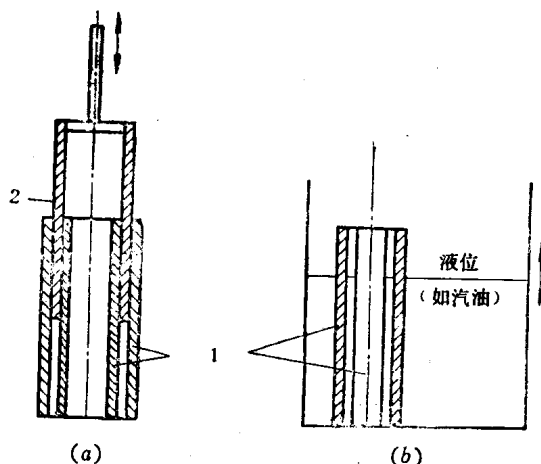


图 1-18 可变电容传感器

(a) 位移传感器; (b) 液位传感器

1—同轴圆柱电容器极板; 2—固体介质套筒

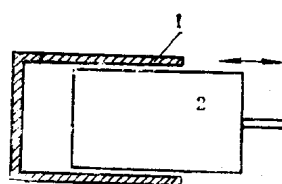


图 1-19 改变极板面积的电容传感器

1—定极板(圆筒);

2—动极板(圆筒)

图 1-18 示出了两种改变介质的传感器。一种用来测量位移,一种用来测量液位。在位移传感器中,同轴电容器的极板间装有可滑动的介质套筒。套筒移动时,电容量随之改变。在液位传感器中,容器中液面高度变化也将使电容量改变。这两种传感器都是通过改变介电常数使电容量改变的。因此,极板间材料的介电常数应与空气的介电常数有很大差异。这样,当介质移动时,才能使电容量发生明显的改变。

通过改变电容器极板的有效面积,也可将位移转换成电容量的变化,如图 1-19 所示。传动机构的直线运动或转动,带动电容器的极板移动,从而改变了传感器的电容量。

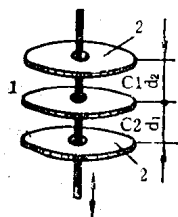


图 1-20 改变极板间距的电容传感器

1—动极板; 2—定极板; 3—膜片(动极板)

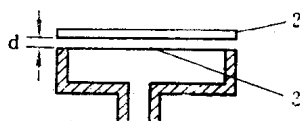


图 1-21 差动螺管式传感器

1—线圈架; 2—铁芯;

3—线圈; 4—外壳

第三种方式是改变极板间距离(见图 1-20)。这种形式在电容传感器中用得最多。它的结构比较简单,动板相对定板运动所需的力很小,而且,固定部分和运动部分之间的机械配合也不像前面两种传感器那样苛刻。

变容传感器采用的测量线路通常是某种形式的电桥。如具有两个电阻臂和两个电容臂的电桥,或者,采用单边变压器电桥。电桥既可以工作于平衡状态,也可以工作于不平衡状态。以后一方式工作时,电桥的失衡应小于10%。

有些变容传感器内装有信号调节设备,一方面由振荡器将直流输入转变成交流信号源,供电容电桥工作;另一方面将电桥输出的交流信号转变成直流。变容传感器的电容也可以接入振荡器的振荡回路,当电容变化时,使输出信号的频率随之变化。

二、变感传感器

变感传感器是把被测量的变化转换成电感元件的电感变化的传感器。因为它具有结构简单、灵敏度高、输出功率比较大、精度比较高等优点,因此,应用广泛。

下面是两种改变电感量常用的方式:

① 通过移动衔铁,改变磁路的磁阻,从而使电感量改变。衔铁的位移可以是线位移,也可以是角位移。将这种敏感元件装入传感器,就能测量诸如压力、加速度、力或位移。

② 移动高导磁率铁芯,使它在差动螺管式传感器(图1-21)中运动,使电感量改变。差动螺管是有中心抽头的线圈。当铁芯在线圈中心时,抽头两边线圈的电感相等,当铁芯靠近某一边时,这边的电感量增加,而另一边的电感量减小。反之,另一边的电感量增加。

将传感器的电感接入电桥或振荡回路,测量电桥在平衡点附近幅度的变化或振荡回路谐振频率的变化就可确定电感量的变化(图1-22)。图1-22(b)是以频率输出的电路,图1-22(a)是以电压输出的电路。图1-22(a)中,传感器的两个线圈作为电桥的两个臂,电桥的另外两个臂为两个电阻(或电感、电容)。测量电路中还有一个检相器。通过检相,使输出的直流电压极性与位移的方向相对应。

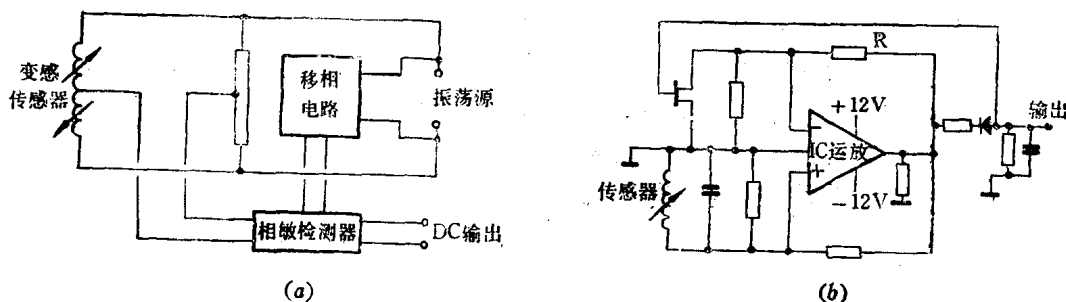


图 1-22 变感传感器的测量电路

(a) 直流输出; (b) 频率输出

图1-23是又一种测量差动电感的电桥电路。电桥由交流电源E供电。为了满足对传感器动态响应频率的要求,电源的频率约为位移变化频率的10倍或更高。

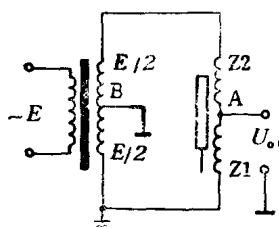


图1-23 电桥电路

电桥的两臂 Z_1 和 Z_2 为传感器中的电感线圈的阻抗。另两臂各为电源变压器次级线圈的一半(每一半的电势为 $E/2$)。电桥对角线上 A、B 两点的电位差为输出电压 U_{out} 。A 点的电位为:

$$U_A = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} E$$

B 点的电位为: