

全国高等职业院校通用教材

传感器 检测技术实验教程

CHUANGANQI JIANCE JISHU
SHIYAN JIAOCHENG

主编 孔令宇



山东科学技术出版社
www.lkj.com.cn

传感器实验教程

主编 孔令宇

 山东科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器实验教程 / 孔令宇主编. — 济南: 山东科学技术出版社, 2007. 12
ISBN 978-7-5331-4829-4

I. 传... II. 孔 III. 传感器—职业教育—教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 145820 号

传感器实验教程

孔令宇 主编

出版者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531) 82098088

网址: www.lkj.com.cn

电子邮件: sdkj@sdpress.com.cn

发行者: 山东科学技术出版社

地址: 济南市玉函路 16 号

邮编: 250002 电话: (0531) 82098071

印刷者: 山东新华印刷厂

地址: 济南市胜利大街 56 号

邮编: 250001 电话: (0531) 82079112

开本: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 10

版次: 2007 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-5331-4829-4

定价: 17.00 元

本书以普及传感器基础知识、指导应用传感器为主线,在讲述传感器的工作原理、特性、测量电路的基础上,详细讲解了电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器和霍尔式传感器以及其他类型传感器的综合技能实训,重点对读者检测和应用各种传感器的技能进行实训指导。

本书用简明的语言阐明了传感器的工作原理,通俗易懂,减少了原理中复杂公式的推导,加强了实用性,能使读者结合实际即学即用。本书可作为高职、中职电子技术应用专业、数控及自动化专业、仪器仪表专业、机电一体化专业等课程的实验实训教材,也可作为电子企业和机电工程技术人员及广大电子爱好者学习的参考和自学用书。

随着社会的进步,科学技术的发展,特别是近 20 年来,电子技术日新月异,计算机的普及和应用把人类带到了信息时代,各种电器设备充满了人们生产和生活的各个领域,相当大一部分的电器设备都应用到了传感器件,传感器技术是现代信息技术中主要技术之一,在国民经济建设中占有极其重要的地位。

在工农业生产领域,工厂的自动流水生产线、全自动加工设备、许多智能化的检测仪器设备,都大量地采用了各种各样的传感器,它们在合理化地进行生产、减轻人们的劳动强度、避免有害的作业方面发挥了巨大的作用。在家用电器领域,像全自动洗衣机、电饭煲和微波炉等都离不开传感器。医疗卫生领域,电子脉搏仪、体温计、医用呼吸机、超声波诊断仪、断层扫描(CT)及核磁共振诊断设备,都大量地使用了各种各样的传感技术。这些对改善人们的生活水平、提高生活质量和健康水平起到了重要的作用。在军事国防领域,各种侦测设备、红外夜视探测、雷达跟踪和武器的精确制导,没有传感器是难以实现的。在航空航天领域,空中管制和导航、飞机的飞行管理和自动驾驶、仪表着陆盲降系统,都需要传感器。人造卫星的遥感遥测都与传感器紧密相关。没有传感器,要实现这样的功能那是不可能的。

CSY 系列传感器与检测技术实验台,主要用于各大、中专院校及职业院校开设的“传感器原理与技术”、“自动化检测技术”、“非电量电测技术”、“工业自动化仪表与控制”、“机械量电测”等课程的实验教学。

CSY998 型系列传感器与检测技术实验台上采用的大部分传感器虽然是教学传感器(透明结构便于教学),但其结构与线路是工业应用的基础,通过实验,可以帮助广大学生加强对书本知识的理解,并在实验的进行过程中,通过信号的拾取、转换和分析,掌握作为一个科技工作者应具有的基本的操作技能与动手能力。

CSY2000 系列传感器与检测技术实验台是在 CSY998 的基础上,为适应不同类别、不同层次的专业需要,最新推出的模块化的新产品。其优点在于:能适应不同专业的需要,不同专业可以有不同的实验模板。能适应不断发展的形势,作为信息拾取的工具,传感器发展很快,可以不断补充新型的传感器模板。可以利用主控台的共用源用于学生课程设计、毕业设计和自制装置。

本书用简明通俗的语言阐明了传感器的工作原理,注重实际动手能力的培养,能使读者结合实际即学即用,具有较强的实用性。

本书由孔令宇主编,张黎、蒋丽丽参编,王蕴珊主审。

本书在编写过程中参阅了许多兄弟院校的有关教材,吸取了宝贵经验,谨此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,本书难免有疏漏谬误之处,希望同行和同学们提出宝贵意见。

第一部分 传感器与检测技术的理论基础

第一章 电阻式传感器	1
第一节 电阻应变式传感器	1
第二节 湿敏电阻传感器	8
第三节 气敏电阻传感器	9
第二章 电感式传感器	11
第一节 差动变压器	11
第二节 自感式电感传感器	13
第三节 电涡流传感器	15
第三章 电容传感器	18
第四章 压电传感器	23
第五章 霍尔传感器	28

第二部分 传感器实验指导

第一章 CSY998 型传感器实验仪简介	30
第二章 CSY998 型传感器实验	34
实验一 A 金属箔式应变片性能——单臂电桥	34
实验一 B 金属箔式应变片性能——单臂电桥	35
实验二 A 金属箔式应变片: 单臂、半桥、全桥比较	36
实验二 B 金属箔式应变片: 单臂、半桥、全桥比较	37
实验三 A 应变片的温度效应及补偿	38
实验三 B 应变片的温度影响	38
实验四 A 热电偶原理及现象	39
实验四 B 热电偶原理及现象	40
实验五 移相器实验	41
实验六 相敏检波器实验	42
实验七 A 金属箔式应变片——交流全桥	44
实验七 B 金属箔式应变片——交流全桥	45
实验八 交流全桥的应用——振幅测量	45
实验九 A 交流全桥的应用——电子秤之一	46
实验九 B 交流全桥的应用——电子秤之一	47

实验十 差动变压器性能	48
实验十一 差动变压器零点残余电压的补偿	49
实验十二 差动变压器的标定(静态位移性能)	49
实验十三 差动变压器的应用——振动测量	50
实验十四 差动变压器的作用——电子秤之二	51
实验十五 差动螺管式电感传感器的静态位移性能	52
实验十六 差动螺管式电感传感器振动时的动态性能	52
实验十七 电涡流式传感器的静态标定	53
实验十八 被测体材料对电涡流传感器特性的影响	54
实验十九 电涡流式传感器的应用——振幅测量	55
实验二十 电涡流传感器应用——电子秤之三	56
实验二十一 霍尔式传感器的特性——直流激励	56
实验二十二 霍尔式传感器的应用——电子秤之四	57
实验二十三 霍尔式传感器的特性——交流激励	58
实验二十四 霍尔式传感器的应用——振幅测量	58
实验二十五 磁电式传感器的性能	59
实验二十六 压电传感器的动态响应实验	60
实验二十七 压电传感器的引线电容对电压放大器的影响、电荷放大器	61
实验二十八 差动变面积式电容传感器的静态及动态特性	62
实验二十九 扩散硅压阻式压力传感器实验	63
实验三十 光纤位移传感器静态实验	64
实验三十一 光纤位移传感器的动态测量一	65
实验三十二 光纤位移传感器的动态测量二	66
实验三十三 PN 结温度传感器测温实验	66
实验三十四 热敏电阻演示实验	67
实验三十五 气敏传感器(MQ-3)实验	68
实验三十六 湿敏电阻(R_H)实验	70
实验三十七 光电传感器(反射型)测转速实验	71
第三章 CSY2000 型传感器与检测技术实验台简介	72
第四章 CSY2000 型传感器实验	84
实验一 金属箔式应变片——高精度单臂电桥性能实验	84
实验二 金属箔式应变片——半桥性能实验	85
实验三 金属箔式应变片——高精度、高灵敏度全桥性能实验	87
实验四 金属箔式应变片单臂、半桥、全桥性能比较	88
实验五 直流全桥的应用——电子秤实验	89
实验六 金属箔式应变片的温度影响实验	90
实验七 交流全桥的应用——振动测量实验	90
实验八 压阻式压力传感器的压力测量实验	92
实验九 差动变压器的性能实验	94
实验十 激励频率对差动变压器特性的影响	96

实验十一	差动变压器的应用——振动测量实验	97
实验十二	电容式传感器的位移实验	98
实验十三	直流激励时霍尔式传感器位移特性实验	99
实验十四	交流激励时霍尔式传感器的位移实验	100
实验十五	霍尔测速实验	102
实验十六	磁电式转速传感器测速实验	102
实验十七	压电式传感器测振动实验	103
实验十八	电涡流传感器位移实验	104
实验十九	被测体面积大小对电涡流传感器的特性影响实验	105
实验二十	光纤传感器的位移特性实验	106
实验二十一	光电转速传感器测速实验	107
实验二十二	利用光电传感器控制电机转速	108
实验二十三	温度源的温度控制调节实验	110
实验二十四 A	Pt100 铂电阻测温特性实验	114
实验二十四 B	Pt100 铂电阻测温特性实验	116
实验二十五 A	铜热电阻测温特性实验	117
实验二十五 B	铜热电阻测温特性实验	118
实验二十六 A	K 型热电偶测温性能实验	119
实验二十六 B	K 型热电偶测温性能实验	121
实验二十七 A	K 型热电偶冷端温度补偿实验	124
实验二十七 B	K 型热电偶冷端温度补偿实验	125
实验二十八 A	E 型热电偶测温性能实验	127
实验二十八 B	E 型热电偶测温性能实验	128
实验二十九 A	集成温度传感器(AD590) 温度特性实验	129
实验二十九 B	集成温度传感器(AD590) 温度特性实验	131
实验三十	气敏传感器实验	132
实验三十一	湿敏传感器实验	133
实验三十二	数据采集系统实验——静态采集举例	135
实验三十三	数据采集系统实验——动态采集举例	135
实验三十四	发光二极管(光源) 的照度标定实验	136
实验三十五	光敏电阻特性实验	137
实验三十六	光敏二极管的特性实验	139
实验三十七	光敏三极管特性实验	141
实验三十八	硅光电池特性实验	142
实验三十九	光电开关实验	143
附表: 常用热电阻、热电偶分度表		144
参考文献		149

第一部分 传感器与检测技术的理论基础

第一章 电阻式传感器

第一节 电阻应变式传感器

一、应变片的类型和材料

应变片可分为金属电阻应变片及半导体应变片两大类。这里以金属电阻应变片为例。金属电阻应变片分金属丝式、金属箔式和金属薄膜式三种。

1. 金属丝式应变片

金属丝式应变片有回线式和短接式两种。图 1-1 所示为回线式应变片，它的敏感栅丝的直径为 0.012 ~ 0.05 mm，以 0.025 mm 左右为最常用，丝线的曲率半径 r 为 0.1 ~ 0.3 mm，基片用厚度为 0.03 mm 左右的薄纸(称纸基)，用黏结剂和有机树脂基膜制成(称胶基)，粘贴性能好，能保证有效地传递变形。引线多用 0.15 ~ 0.30 mm 直径的镀锡铜线与敏感栅相接。因制作简单，性能稳定，成本低，易粘贴，所以最为常用。但因弯曲部的变形使其横向效应较大。

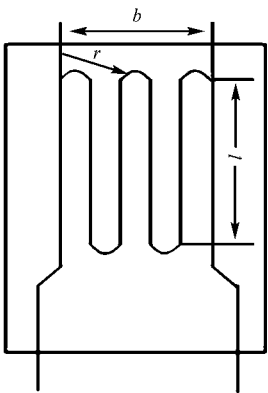


图 1-1 丝式应变片

为了克服横向效应，出现了短接式应变片。两端用直径比栅丝直径粗 5 ~ 10 倍的镀银丝短接而成。但由于焊点多，易在焊点处出现疲劳损坏，制造工艺要求高，使用较少。

丝式应变片敏感栅的材料要求是：灵敏系数高，电阻率高，稳定性好，温度系数小，机械强度高，抗氧化，耐腐蚀。常用的材料有康铜、镍铬合金、镍铬铝合金、铁镍铬合金以及贵金属(铂、铂钨合金)等。

2. 金属箔式应变片

图 1-2 为金属箔式应变片。金属箔式应变片是在绝缘基底上，将厚度为 0.003 ~ 0.01 mm 的电阻箔材，利用照相制版或光刻腐蚀的方法，制成适用于各种需要的形状，它的优点是：①可制成多种形状复杂尺寸准确的敏感栅，栅长最小可做到 0.2 mm，以适应不同的测量要求。②与被测试件接触面积大，黏结性能好。散热条件好，允许电流大，提高了输

出灵敏度。③横向效应可以忽略。④蠕变、机械滞后小,疲劳寿命长。它的主要缺点是电阻值的分散性大,有的能相差几十欧姆,故需要作阻值调整。

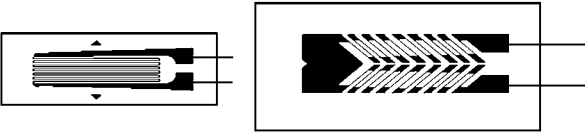


图 1-2 金属箔式应变片

3. 金属薄膜应变片

金属薄膜应变片是薄膜技术发展的产物。它是采用真空蒸发或真空沉积等方法在薄的绝缘基片上形成厚度在 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下的金属电阻材料薄膜敏感栅,最后再加上保护层,易实现工业化批量生产。它的优点是应变灵敏系数大,允许电流密度大,可在 $-197\sim 317^\circ\text{C}$ 温度下工作。主要问题是,尚难控制其电阻与温度和时间的变化关系。

二、应变片的工作原理

当金属丝在外力作用下发生机械变形时,其电阻值将发生变化,这种现象称为金属的电阻应变效应。

设有一根长度为 L 、截面积为 S 、电阻率为 ρ 的金属丝,在未受力时,原始电阻为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \tag{1-1}$$

当金属电阻丝受到轴向拉力 F 作用时,将伸长 ΔL ,横截面积相应减小 ΔS ,电阻率因晶格变化等因素的影响而改变 $\Delta\rho$,故引起电阻值变化 ΔR 。对式(1-1)全微分,并用相对变化量来表示,则有:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{1-2}$$

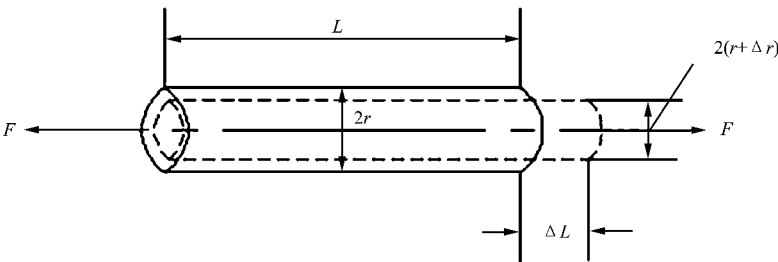


图 1-3 电阻丝拉伸应变示意图

式中的 $\Delta L/L$ 为电阻丝的轴向应变,用 ε 表示。若径向应变为 $\Delta r/r$,电阻丝的纵向伸长和横向收缩的关系用泊松比 μ 表示为: $\Delta r/r = -\mu\Delta L/L$,因为 $\Delta S/S = 2(\Delta r/r)$,则(1-2)式可以写成:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L}) \frac{\Delta L}{L} = K_0 \frac{\Delta L}{L} \tag{1-3}$$

公式(1-3)为“应变效应”的表达式。 K_0 称为金属电阻的灵敏度系数,由式(1-3)可见, K_0 受两个因素影响,一个是 $(1 + 2\mu)$,它是材料的几何尺寸变化引起的,另一个是 $\Delta\rho/(\rho \cdot \varepsilon)$,是材料的电阻率 ρ 随应变引起的(称“压阻效应”)。对于金属材料而言,以前

者为主,则 $K_0 \approx 1 + 2\mu$,对半导体, K_0 值主要是由电阻率相对变化所决定。实验也表明,在金属电阻丝拉伸比例极限内,电阻相对变化与轴向应变成正比。通常金属丝的灵敏度系数 $K_0 = 2 \sim 7$ 。

三、应变片的常用材料及粘贴技术

1. 常用材料

(1) 4YC3:4YC3 是 Fe-Cr-Al 系 550℃ 高温应变电阻合金,其电阻率高、电阻温度系数低、热稳定性好,主要用于工作温度 $\leq 550^\circ\text{C}$ 的电阻应变计。

(2) 4YC4:4YC4 是 Fe-Cr-Al 系 750℃ 高温应变电阻合金,其电阻率高、电阻温度系数低,尤其是在 600℃ 以上有较好的热输入和重现性低的零飘。合金主要用作工作温度 $\leq 750^\circ\text{C}$ 的电阻应变计,用于大型汽轮机、航空、原子反应堆等领域中静态和准静态测量。

(3) 4YC8:4YC8 铜镍锰钴合金精密箔材,专用于高精度箔式电阻应变计,其温度自补偿性能及其他技术指标符合《电阻应变计》标准规定的 A 级产品质量要求。箔材平均热输出系数 $C_t < 1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$,用它制成箔式应变计,可以在钛合金、普通钢、不锈钢、铝合金、镁合金等多种材料制成的试件上达到良好的温度自补偿效果,优于国外同类合金箔材,技术性能达到国外先进水平。

(4) 4YC9:4YC9 是 Ni-Mo 系 500℃ 自补偿应变电阻合金,它的 ρ 值高,电阻温度系数小,热输出、热稳定性好,适用于制作在 $\leq 500^\circ\text{C}$ 工作的自补偿电阻应变计。

2. 应变片的粘贴工艺步骤

(1) 应变片的检查与选择。首先要对采用的应变片进行外观检查,观察应变片的敏感栅是否整齐、均匀,是否有锈斑以及短路和折弯等现象。其次要对选用的应变片的阻值进行测量,阻值选取合适将对传感器的平衡调整带来方便。

(2) 试件的表面处理。为了获得良好的黏合强度,必须对试件表面进行处理,清除试件表面杂质、油污及疏松层等。一般的处理办法可采用砂纸打磨,较好的处理方法是采用无油喷砂法,这样不但能得到比抛光更大的表面积,而且可以获得质量均匀的结果。为了表面的清洁,可用化学清洗剂如氯化碳、丙酮、甲苯等进行反复清洗,也可采用超声波清洗。值得注意的是,为避免氧化,应变片的粘贴应尽快进行。如果不立刻贴片,可涂上一层凡士林暂作保护。

(3) 底层处理。为了保证应变片能牢固地贴在试件上,并具有足够的绝缘电阻,改善胶接性能,可在粘贴位置涂上一层底胶。

(4) 贴片。将应变片底面用清洁剂清洗干净,然后在试件表面和应变片底面各涂上一层薄而均匀的黏合剂。待稍干后,将应变片对准划线位置迅速贴上,然后盖一层玻璃纸,用手指或胶辊加压,挤出气泡及多余的胶水,保证胶层尽可能薄而均匀。

(5) 固化。黏合剂的固化是否完全,直接影响到胶的物理机械性能。关键是要掌握好温度、时间和循环周期。无论是自然干燥还是加热固化都要严格按照工艺规范进行。为了防止强度降低、绝缘破坏以及电化腐蚀,在固化后的应变片上应涂上防潮保护层,防潮层一般可采用稀释的粘合胶。

(6) 粘贴质量检查。首先是从外观上检查粘贴位置是否正确,粘合层是否有气泡、漏粘、破损等。然后是测量应变片敏感栅是否有断路或短路现象以及测量敏感栅的绝缘电

阻。

(7) 引线焊接与组桥连线。检查合格后即可焊接引出导线,引线应适当加以固定。应变片之间通过粗细合适的漆包线连接组成桥路。连接长度应尽量一致,且不宜过多。

四、测量电路

应变片测量应变是通过敏感栅的电阻相对变化而得到的。通常金属电阻应变片灵敏度系数 K 很小,机械应变一般在 $10 \times 10^{-6} \sim 3\,000 \times 10^{-6}$ 之间,可见,电阻相对变化是很小的。例如:某传感器弹性元件在额定载荷下产生应变 $\varepsilon = 1\,000 \times 10^{-6}$,应变片的电阻值为 $120\ \Omega$,灵敏度系数 $K = 2$,则电阻的相对变化量为 $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon = 2 \times 1\,000 \times 10^{-6} = 0.002$,电阻变化率只有 0.2% 。这样小的电阻变化,用一般测量电阻的仪表很难直接测出来,必须用专门的电路来测量这种微弱的电阻变化。最常用的电路为电桥电路。

(一) 直流电桥

如图 1-4 所示,电桥各臂的电阻分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 , U 为电桥的直流电源电压。当四臂电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时,称为等臂电桥;当 $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = R_4 = R$ ($R \neq R$) 时,称为输出对称电桥;当 $R_1 = R_4 = R$, $R_2 = R_3 = R$ ($R \neq R$) 时,称为电源对称电桥。

电阻应变片接入电桥电路通常有以下接法:如果电桥一个臂接入应变片,其他三个臂采用固定电阻,称为单臂工作电桥;如果电桥两个臂接入应变片称为双臂工作电桥,又称半桥形式;如果四个臂都接入应变片称为全桥形式。

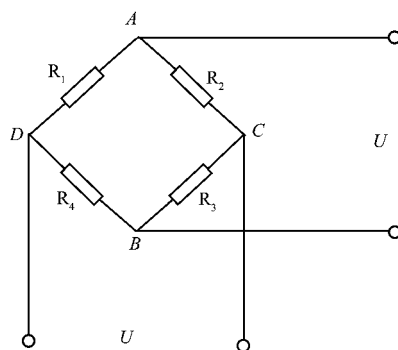


图 1-4 直流电桥

1. 直流电桥的电流输出

当电桥的输出信号较大,输出端又接入电阻值较小的负载如检流计或光线示波器进行测量时,电桥将以电流形式输出,如图 1-5a 所示,负载电阻为 R_g 。由图中可以看出:

$$U_{AC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U$$

$$U_{BC} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U$$

所以,电桥输出端的开路电压 U_{AB} 为:

$$U_{AB} = U_{BC} - U_{AC} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1-4)$$

应用有源一端口网络定理,电流输出电桥可以简化成图 1-5b 所示的电路。图中 E' 相当于电桥输出端开路电压, R' 为网络的入端电阻:

$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-5)$$

由图 1-5b 可以知道,流过负载 R_g 的电流为:

$$I_g = \frac{U_{AB}}{R' + R_g} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_g (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (1-6)$$

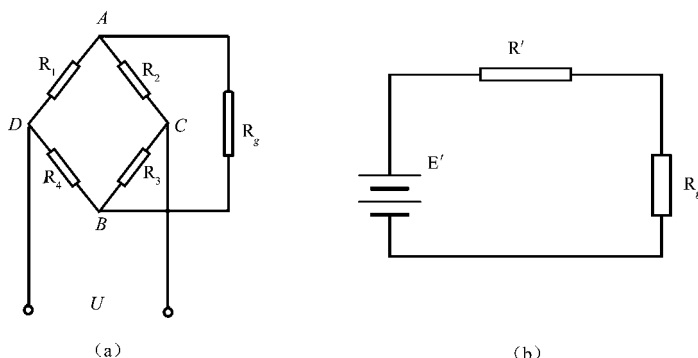


图 1-5 直流电桥的电流输出

当 $I_g = 0$ 时,电桥平衡。故电桥平衡条件为:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ 或 } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

当电桥负载电阻 R_g 等于电桥输出电阻时,即阻抗匹配时,有:

$$R_g = R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

这时电桥输出功率最大,电桥输出电流为:

$$I_g = \frac{U}{2} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (1-7)$$

输出电压为:

$$U_g = I_g R_g = \frac{U}{2} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1-8)$$

当桥臂 R_1 为电阻应变片且有电阻增量 ΔR 时,略去分母中的 ΔR 项,则对于输出对称电桥, $R_1 = R_2 = R, R_3 = R_4 = R' (R \neq R')$, 则有:

$$\Delta I_g = \frac{U}{4} \frac{1}{R + R'} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} \frac{K\varepsilon}{R + R'}$$

对于电源对称电桥, $R_1 = R_4 = R, R_2 = R_3 = R' (R \neq R')$, 则有:

$$\Delta I_g = \frac{U}{4} \frac{1}{R + R'} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} \frac{K\varepsilon}{R + R'}$$

对于等臂电桥, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 则有:

$$\Delta I_g = \frac{U}{8R} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{8R} K\varepsilon$$

由以上结果可以看出,三种形式的电桥,当 $\Delta R \ll R$ 时,其输出电流都与应变片的电阻变化率即应变成正比,它们之间呈线性关系。

2. 直流电桥的电压输出

当电桥输出端接有放大器时,由于放大器的输入阻抗很高,所以,可以认为电桥的负载电阻为无穷大,这时电桥以电压的形式输出。输出电压即为电桥输出端的开路电压,其表达式为:

$$U_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1-9)$$

设电桥为单臂工作状态,即 R_1 为应变片,其余桥臂均为固定电阻。当 R_1 感受应变产生电阻增量 ΔR_1 时,由初始平衡条件 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 得 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$,代入式(1-9),则电桥由于 ΔR_1 产生不平衡引起的输出电压为:

$$U_o = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1 U = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) U \quad (1-10)$$

对于输出对称电桥,此时, $R_1 = R_2 = R, R_3 = R_4 = R'$,当 R_1 臂的电阻产生变化 $\Delta R_1 = \Delta R$ 时,根据式(1-10)可得到输出电压为:

$$U_o = U \frac{RR}{(R + R')^2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} K \varepsilon \quad (1-11)$$

对于电源对称电桥, $R_1 = R_4 = R, R_2 = R_3 = R'$,当 R_1 臂产生电阻增量 $\Delta R_1 = \Delta R$ 时,由式(1-10)得:

$$U_o = U \frac{RR'}{(R + R')^2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = U \frac{RR'}{(R + R')^2} K \varepsilon \quad (1-12)$$

对于等臂电桥, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$,当 R_1 的电阻增量 $\Delta R_1 = \Delta R$ 时,由式(1-10)可得输出电压为:

$$U_o = U \frac{RR}{(R + R)^2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = \frac{U}{4} K \varepsilon \quad (1-13)$$

由上面三种结果可以看出,当桥臂应变片的电阻发生变化时,电桥的输出电压也随着变化。当 $\Delta R \ll R$ 时,电桥的输出电压与应变成线性关系。还可以看出,在桥臂电阻产生相同变化的情况下,等臂电桥以及输出对称电桥的输出电压要比电源对称电桥的输出电压大,即它们的灵敏度要高。因此,在使用中多采用等臂电桥或输出对称电桥。

在实际使用中,为了进一步提高灵敏度,常采用等臂电桥,四个应变片接成两个差动对的全桥工作形式,如图1-6所示。

由图1-6可见 $R_1 = R + \Delta R, R_2 = R - \Delta R, R_3 = R + \Delta R, R_4 = R - \Delta R$,将上述条件代入式(1-9)得:

$$U_o = 4 \left[\frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \right] = 4 \left(\frac{U}{4} K \varepsilon \right) = UK \varepsilon \quad (1-14)$$

由式(1-14)看出,由于充分利用了双差动作用,它的输出电压为单臂工作的4倍,所以大大提高了测量的灵敏度。

(二) 交流电桥

交流电桥通常是采用正弦交流电压供电,在频率较高的情况下需要考虑分布电容的影响。

1. 交流电桥的平衡条件

设交流电桥的电源电压为:

$$U = U_m \sin \omega t \quad (1-15)$$

式中, U_m 为电源电压的幅值; ω 为电源电压的角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为电源电压的频率,

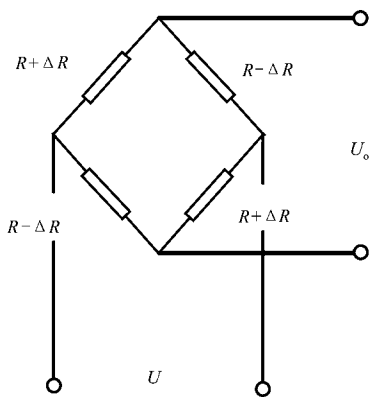


图 1-6 等臂电桥

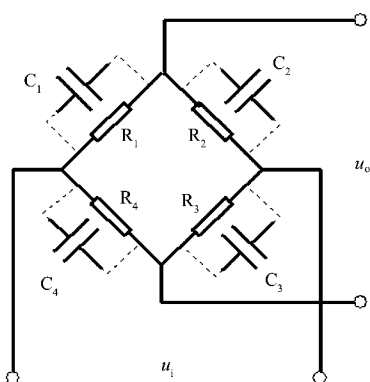


图 1-7 应变片等臂交流电桥

一般取被测应变最高频率的 5 ~ 10 倍。

在测量中,电桥的桥臂由应变片或固定无感精密电阻组成。由于分布电容的影响(分布电感的影响很小,可不予考虑),当四个桥臂均为应变片时,电桥如图 1-7 所示。此时交流电桥的输出电压为:

$$u_o = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} u = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} U_m \sin \omega t \quad (1-16)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } Z_1 &= \frac{1}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1}, Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2}, Z_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_3}, Z_4 \\ &= \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4} \end{aligned}$$

电桥平衡的条件则为:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (1-17)$$

2. 交流电桥的输出电压

由于电桥是交流电压,因此它的输出电压也是交流电压,电压的幅值和应变的大小成正比。可见,可以通过电桥输出电压的幅值来测量应变的大小,但无法通过输出电压来判断应变的方向。

例如,一个单臂接入应变片的等臂电桥,即 $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z$,其中 Z_1 为电阻应变片, $Z_1 = Z + \Delta Z$,当 $\Delta Z \ll Z$ 时,忽略分母中的 ΔZ 的影响,根据式(1-16)可以得到:

$$u_o = \frac{1}{4} \frac{\Delta Z}{Z} u = \frac{1}{4} K \varepsilon U_m \sin \omega t \quad (1-18)$$

对于一个相邻两个桥臂接入差动变化的应变片的等臂桥,其中, Z_1, Z_2 为电阻应变片,即:

$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4 = Z, Z_1 = Z + \Delta Z, Z_2 = Z - \Delta Z$ 时,根据式(1-16)得:

$$u_o = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z}{Z} u = \frac{1}{2} K \varepsilon U_m \sin \omega t \quad (1-19)$$

式(1-19)与式(1-18)比较,灵敏度提高了一倍,即双臂差动比单臂工作效率提高一倍。

(三) 电桥的线路补偿

1. 零点补偿

电桥的电阻应变片虽经挑选,但要求四个应变片阻值绝对相等是不可能的。即使原来阻值相等,经过贴片后将产生变化,这样就使电桥不能满足初始平衡条件,即电桥有一个零位输出($u_o \neq 0$)。

为了解决这一问题,可以在一对桥臂电阻乘积较小的任一桥臂中串联一个小电阻进行补偿,如图 1-8 所示。

例如,当 $R_1 R_3 < R_2 R_4$ 时,初始不平衡输出电压 u_o 为负,这时可在 R_1 桥臂上接入 R_0 ,使电桥输出达到平衡。

2. 温度补偿

环境温度的变化也会引起电桥的零点漂移。产生漂移的原因有: 电阻应变片的电阻温度系数不一致; 应变片材料与被测试件材料间的膨胀率不一致; 电阻应变片的粘贴情况不一致。

温度补偿的方法一般采取用补偿片法和热敏元件法。

所谓补偿片法, 即用一个应变片作工作片, 贴在试件上测应变。在另一块和被测试件结构材料相同而不受应力的补偿块上贴上和工作片规格完全相同的补偿片, 使补偿块和被测试件处于相同的温度环境, 工作片和补偿片分别接入电桥的相邻两臂, 如图 1-9 所示。由于工作片和补偿片所受温度相同, 则两者所产生的热应变相等, 因为是处于电桥的相邻两臂, 所以不影响电桥的输出。

对于温度所引起的零漂移也可认为是由四个桥臂电阻的温度系数不一致所引起的, 因此可以在某一桥臂中连接一个温度系数较大的金属电阻。如图 1-10 所示, 在桥臂 R_2 中串入一个铜电阻 R_T 。

3. 弹性模量补偿

弹性元件承受一定载荷且温度升高时, 弹性模量要减小, 因此导致了传感器输出灵敏度变大, 使电桥输出增大。补偿的方法可使电桥的输出随温度升高而减小。通常将 $R_E /$

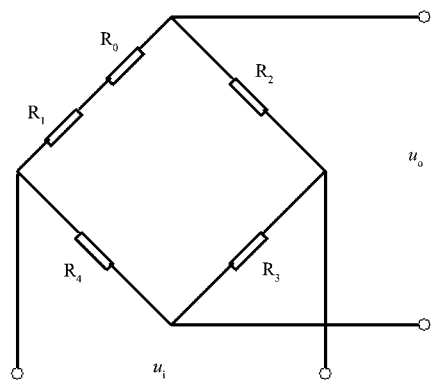


图 1-8 零点补偿电路

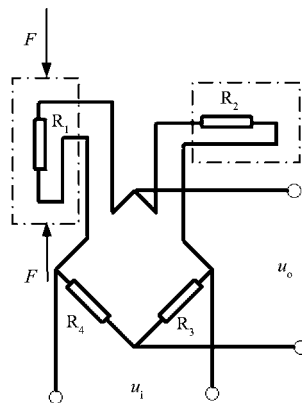


图 1-9 温度补偿电路

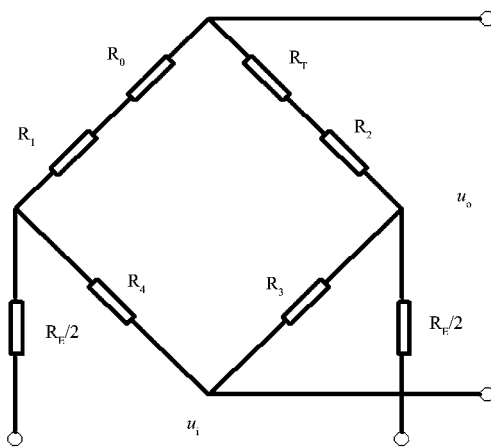


图 1-10 零漂移补偿电路

2 分别接入桥路两个输入端, 以保证桥路对称, 见图 1-10 所示。

第二节 湿敏电阻传感器

湿敏电阻是利用湿敏材料吸收空气中的水分而导致本身电阻值发生变化这一原理而制成的。

氯化锂湿敏电阻(图 1-11) 即电解质湿敏电阻,利用物质吸收水分子而使导电率变化检测湿度。在氯化锂(LiCl) 溶液中, Li 和 Cl 以正负离子的形式存在, 锂离子(Li^+) 对水分子的吸收力强, 离子水合成度高。溶液中的离子导电能力与溶液浓度成正比, 溶液浓度增加, 导电率上升。当溶液置于一定湿度场中, 若环境 RH 上升, 溶液吸收水分子使浓度下降, 电阻率 ρ 上升, 反之 RH 下降, 溶液失去水分子使浓度上升, 电阻率 ρ 下降(如图 1-12) 。通过测量溶液电阻值 R 实现对湿度的测量。

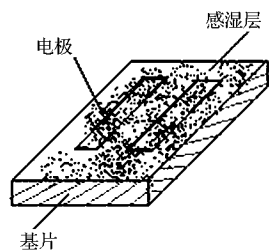


图 1-11 氯化锂湿敏电阻

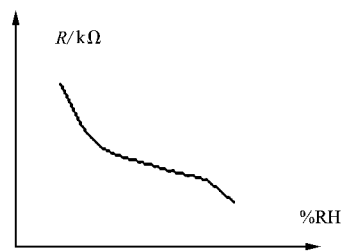


图 1-12 电阻率 ρ 与 RH 关系

半导体陶瓷湿敏电阻通常用两种以上的金属—氧化物—半导体烧结成多孔陶瓷, 材料有正温度系数和负温度系数两种。

负特性半导体瓷湿敏电阻(如 $\text{ZnO-Li-V}_2\text{O}_5$) , 电阻随温度增加而下降。由于水分子中氢原子具有很强的正电场, 当水分子在半导体瓷表面吸附时可能从半导体瓷表面俘获电子, 使半导体表面带负电, 相当于表面电势变负(P 型半导体电势下降, N 型半导体出现反型层) , 电阻率随湿度增加而下降。

正特性半导体瓷湿敏电阻(如 Fe_3O_4) , 材料结构、电子能量状态与负特性不同, 总的电阻值升高没有负特性阻值下降的明显。

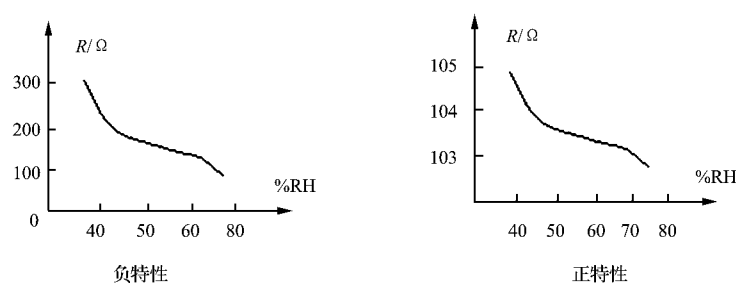


图 1-13 正、负特性图

第三节 气敏电阻传感器

在现代社会的生产和生活中, 人们往往会接触到各种各样的气体, 需要对它们进行检