



高等学校应用基础型人才培养规划教材

实验实训

传感器系统实验教程

梁慧斌 时连君 魏绍亮 王京生 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



高等学校应用基础型人才培养规划教材

实验实训

传感器系统实验教程

编著 梁慧斌 时连君 魏绍亮 王京生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为高等学校应用基础型人才培养规划教材。本书配合高等教育工程测试与信号处理、测试技术与信号处理、测试与传感技术、传感器与检测技术、传感器原理、非电量电测技术、自动检测技术和机械工程测试技术等基础课程而编写。本书包括压阻式压力传感器、电容传感器、差动变压器、电涡流传感器、压电传感器、温度传感器、霍尔式传感器、磁电式传感器、光电转速传感器、光纤位移传感器等相关实验。每个实验按实验目的、基本原理、需用器件与单元和实验步骤,进行了详细地讲述和指导,部分实验配有思考题,并附有实验结果记录和处理用表,在训练基本实验技能的同时,突出了综合性实验能力的培养。

本书为普通高等院校机械类本科相关专业工程测试与信号处理、测试技术与信号处理、测试与传感技术、传感器与检测技术等课程的配套实验教材,供实验课程选用。

图书在版编目(CIP)数据

传感器系统实验教程 / 梁慧斌等编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.4

高等学校应用基础型人才培养规划教材. 实验实训

ISBN 978-7-5123-7289-4

I. ①传… II. ①梁… III. ①传感器—实验—高等学校—教材 IV. ①TP212-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 040446 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 4 月第一版 2015 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 176 千字

定价 15.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 任 魏绍亮

副主任 韩宝坤 时连君 孙 静

委 员 万殿茂 郭春芬 梁慧斌

陈庆光 李志敏 王京生

邓 昱 刘 梅 高 峰

序

山东特色名校工程，是山东省为解决省内高等学校面临的办学模式单一、同质化倾向明显、学科专业结构不能够适应经济社会发展等问题而实施的教育改革，即在省内地方高校中遴选一批不同类型的人才培养特色名校，进行重点建设。山东特色名校工程被誉为“山东省版 211 工程”或“鲁版 211 工程”。名校工程突出“分类指导、内涵发展、强化特色、提高质量”的主题，推动高校科学发展，建设一批在深化教育教学改革、创新人才培养模式、提高人才培养质量、增强社会服务能力等方面发挥示范带动作用的高校，形成层次类别清晰、具有山东特色的高等教育体系。

山东科技大学作为第一批重点建设的应用基础型特色名校之一，紧紧把握机遇，全面启动名校建设工作。机械设计制造及其自动化、土木工程、采矿工程等专业是特色名校建设的重点专业，学校计划通过 3 年名校工程重点专业建设，将重点建设的专业建设成为在工程领域中专业特色鲜明、办学优势突出，人才培养、科学研究、社会服务、管理水平和毕业生质量均达到国内先进水平，且具有较高知名度的特色专业。要培养具有“宽口径、厚基础、强能力、高素质”特征的具有创新意识的人才。要培养具有创新意识的人才，实践教学所占的地位十分重要。众多发明创造都来自于实验。因此，营造一个较好的实验、实践环境，建立一套完善的实践体系，因此编写一套高质量的实验、实践教材是基本的保证。

按照山东省特色名校建设的要求，学校组织以实验室教师为主，任课教师积极参与，制订了一套具有创新意识的实验、实践教改方案。经过有关专家论证，结合一线实验教师、任课教师的多年实践教学经验，组织编写了这套高等学校应用基础型人才培养规划教材·实验实训系列教材，包括流体力学实验教程、机械原理实验教程、传感器系统实验教程、汇编语言与接口技术实验教程、互换性与测量技术实验教程。

该套教材主要特点如下：

(1) 注重学生动手能力培养，加强实践、培养兴趣、积极创新的理念。

(2) 符合教学规律，实现了循序渐进，实验分为验证性实验、综合性实验、创新性实验和设计性实验 4 个层次。

(3) 实现了内容的优化组合，突出了先进性和实用性。

该套教材可以作为本校或者外校相同、相近专业学生的实验指导教材，也可以作为教师和工程技术人员的设计参考书。

2014 年 12 月

前 言

本书配合高等教育工程测试与信号处理、测试技术与信号处理、测试与传感技术、传感器与检测技术、传感器原理、非电量电测技术、自动检测技术和机械工程测试技术等基础课程而编写。本书包括压阻式压力传感器、电容传感器、差动变压器、电涡流传感器、压电传感器、温度传感器、霍尔式传感器、磁电式传感器、光电转速传感器、光纤位移传感器等相关实验。按实验目的、基本原理、需用器件与单元和实验步骤,对每一个实验进行了详细地讲述和指导,部分实验配有思考题,并附有实验结果记录和处理用表,在训练基本实验技能的同时,突出了综合性实验能力培养的内容。题材方面,在训练基本实验技能的同时,突出了综合性实验能力的培养。

本书在参考原实验系统材料的基础上,内容编排便于学生独立操作,加强动手能力培养。希望学生通过实验有助于深入理解课本知识。

本书由山东科技大学组织编写,由梁慧斌、时连君、魏绍亮、王京生编著。

由于编写者时间、水平所限,难免有疏漏谬误之处,热切期望读者的赐教!

编 者

2014.12

目 录

序
前言

CSY-9XX 型传感器实验仪说明	1
0.1 实验仪组成	1
0.2 主要技术参数、性能及说明	2
实验 1 应变片单臂特性实验	5
1.1 实验目的	5
1.2 基本原理	5
1.3 需用器件与单元	8
1.4 需用器件与单元介绍	8
1.5 实验步骤	10
实验 2 应变片半桥特性实验	13
2.1 实验目的	13
2.2 基本原理	13
2.3 需用器件与单元	13
2.4 实验步骤	13
实验 3 应变片全桥特性实验	15
3.1 实验目的	15
3.2 基本原理	15
3.3 需用器件与单元	15
3.4 实验步骤	15
实验 4 应变片的温度影响实验	17
4.1 实验目的	17
4.2 基本原理	17
4.3 需用器件与单元	17
4.4 实验步骤	17
实验 5 应变片温度补偿实验	19
5.1 实验目的	19
5.2 基本原理	19
5.3 需用器件与单元	19

5.4 实验步骤	19
实验 6 应变直流全桥的应用——电子秤实验	20
6.1 实验目的	20
6.2 基本原理	20
6.3 需用器件与单元	20
6.4 实验步骤	20
实验 7 移相器、相敏检波器实验	22
7.1 实验目的	22
7.2 基本原理	22
7.3 需用器件与单元	23
7.4 实验步骤	24
实验 8 应变片交流全桥的应用（应变仪）——振动测量实验	26
8.1 实验目的	26
8.2 基本原理	26
8.3 需用器件与单元	26
8.4 实验步骤	27
实验 9 压阻式压力传感器的压力测量实验	29
9.1 实验目的	29
9.2 基本原理	29
9.3 需用器件与单元	29
9.4 实验步骤	29
实验 10 电容传感器的位移实验	32
10.1 实验目的	32
10.2 基本原理	32
10.3 需用器件与单元	33
10.4 实验步骤	34
实验 11 差动变压器的性能实验	36
11.1 实验目的	36
11.2 基本原理	36
11.3 需用器件与单元	38
11.4 实验步骤	38
实验 12 激励频率对差动变压器特性的影响实验	40
12.1 实验目的	40
12.2 基本原理	40
12.3 需用器件与单元	40
12.4 实验步骤	40

实验 13	差动变压器零点残余电压补偿实验	41
13.1	实验目的	41
13.2	基本原理	41
13.3	需用器件与单元	41
13.4	实验步骤	41
实验 14	差动变压器测位移实验	43
14.1	实验目的	43
14.2	基本原理	43
14.3	需用器件与单元	43
14.4	实验步骤	43
实验 15	差动变压器振动测量实验	45
15.1	实验目的	45
15.2	基本原理	45
15.3	需用器件与单元	45
15.4	实验步骤	45
实验 16	电涡流传感器位移特性实验	47
16.1	实验目的	47
16.2	基本原理	47
16.3	需用器件与单元	49
16.4	实验步骤	49
实验 17	被测体材质对电涡流传感器特性影响	51
17.1	实验目的	51
17.2	基本原理	51
17.3	需用器件与单元	51
17.4	实验步骤	51
实验 18	电涡流传感器测振动实验	52
18.1	实验目的	52
18.2	基本原理	52
18.3	需用器件与单元	52
18.4	实验步骤	52
实验 19	压电传感器测振动实验	54
19.1	实验目的	54
19.2	基本原理	54
19.3	需用器件与单元	57
19.4	实验步骤	57
实验 20	热电偶的原理及现象实验	58
20.1	实验目的	58

20.2	基本原理	58
20.3	需用器件与单元	58
20.4	实验步骤	58
实验 21	NTC 热敏电阻温度特性实验	61
20.1	实验目的	61
20.2	实验原理	61
20.3	需用器件与单元	61
20.4	实验步骤	62
实验 22	PN 结温度传感器温度特性实验	64
22.1	实验目的	64
22.2	基本原理	64
22.3	需用器件与单元	64
22.4	实验步骤	64
实验 23	线性霍尔式传感器位移特性实验	67
23.1	实验目的	67
23.2	基本原理	67
23.3	需用器件与单元	68
23.4	实验步骤	68
实验 24	磁电式传感器特性实验	71
24.1	实验目的	71
24.2	基本原理	71
24.3	需用器件与单元	71
24.4	实验步骤	71
实验 25	光电转速传感器测转速实验	73
25.1	实验目的	73
25.2	基本原理	73
25.3	需用器件与单元	73
25.4	实验步骤	73
实验 26	光纤位移传感器测位移特性实验	75
26.1	实验目的	75
26.2	基本原理	75
26.3	需用器件与单元	76
26.4	实验步骤	76
附录	传感器系统实验报告	79

CSY-9XX 型传感器实验仪说明

0.1 实验仪组成

CSY-9XX 传感器实验仪主要由机壳、机头（传感器安装平台）、显示面板、调理电路面板（传感器输出单元、传感器转换放大处理电路单元）等组成。

1. 机壳

机壳内部装有直流稳压电源、振荡信号板等。

2. 机头（传感器安装平台）

机头由悬臂双平行梁和振动台组成，如图 0-1 所示。

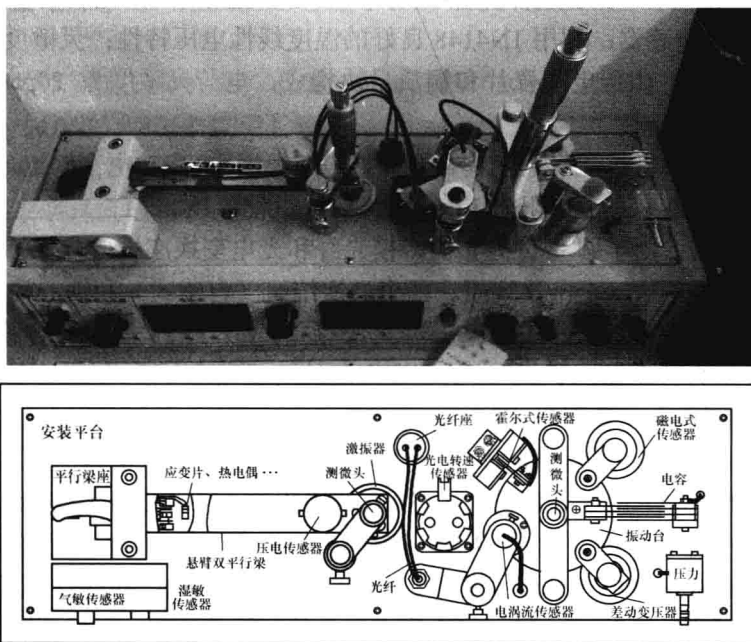


图 0-1 机头

(1) 悬臂双平行梁（应变梁）。在双平行梁的上、下梁片表面粘贴了应变片，封装了 PN 结、NTC 热敏电阻 R_T 、热电偶、加热器。在梁的自由端安装了压电传感器、测微头和激振器（磁钢、激振线圈）。调节测微头可产生力和位移，做静态实验。激振器用于激励双平行梁振动，做动态实验。

(2) 振动台。在振动台的周围安装了光电转速传感器、电涡流传感器、光纤传感器、差动变压器、压阻式压力传感器、电容式传感器、磁电式传感器、霍尔式传感器。在振动台的下方安装了激振器（磁钢、激振线圈）。在振动台的上方安装了测微头。

3. 显示面板

显示面板由主电源单元、电机控制单元、直流稳压电源单元、F/V 表（电压表）单元、PC 接口单元、电流表（频率/转速表）单元、音频振荡器单元、低频振荡器单元、±15V 电源单元等组成。

4. 调理电路面板

调理电路面板由传感器输出单元、副电源、电桥、差动放大器、电容变换器、电压放大器、移相器、相敏检波器、电荷放大器、低通滤波器、涡流变换器等组成。

0.2 主要技术参数、性能及说明

0.2.1 传感器（机头）部分

- (1) 电阻应变片：电阻值 350Ω 左右，应变系数为 2。
- (2) 热电偶：直流电阻 10Ω 左右（由两个串接而成），分度号为 T，冷端为环境温度。
- (3) 热敏电阻：NTC 半导体热敏电阻， 25°C 时电阻值为 $10\text{k}\Omega$ 左右。
- (4) PN 结温度传感器：利用 1N4148 良好的温度线性电压特性；灵敏度为 $-2.1\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。
- (5) 压电传感器：由压电陶瓷片和铜质量块构成，电荷灵敏度为 20pc/g ($1\text{pc}\approx 3.0857\times 10^{16}\text{m}$)。
- (6) 光电转速传感器：透射式光耦合器（光电断续器），TTL 电平输出。
- (7) 电涡流传感器：直流电阻为 $1.6\sim 2\Omega$ ，位移量程 $\geq 1\text{mm}$ 。
- (8) 光纤传感器：由半圆双 D 分布的多模光纤和光电变换座构成，位移量程 $\geq 1\text{mm}$ 。
- (9) 差动变压器：由一个一次绕组、两个二次绕组（自感式）和铁心构成；每个绕组的直流电阻为 $5\sim 10\Omega$ ；音频为 $3\sim 5\text{kHz}$ ，电压峰峰值 ($V_{\text{p-p}}$) 为 2V 激励；位移量程 $\geq \pm 4\text{mm}$ 。
- (10) 压阻式压力传感器： $V_s^+-V_s^-$ 端的直流电阻约为 $4.7\text{k}\Omega$ ， $V_o^+-V_o^-$ 端的直流电阻约为 $7\text{k}\Omega$ 左右；4V 直流电源供电；量程为 20kPa 。
- (11) 电容式传感器：由两组定片和一组动片构成差动变面积电容，位移量程 $\geq \pm 2\text{mm}$ 。
- (12) 磁电式传感器：由线圈和动铁构成，直流电阻为 $30\sim 40\Omega$ ，灵敏度为 $500\text{mV}/(\text{m/s})$ 。
- (13) 霍尔式传感器：霍尔片置于环形磁钢产生的梯度磁场中构成位移传感器；传感器激励端口的直流电阻为 $800\Omega\sim 1.5\text{k}\Omega$ ，输出端口的直流电阻为 $400\sim 600\Omega$ ；位移量程 $\geq 1\text{mm}$ 。
- (14) 气敏传感器：酒精敏感型，TP-3 集成半导体气敏传感器，测量范围为 $50\sim 500\text{ppm}$ 。
- (15) 湿敏传感器：电阻型，阻值变化为几千欧至几兆欧不等，测量范围为 $30\%\sim 90\%$ 相对湿度。
- (16) 激振线圈：振动激振器，直流电阻为 $30\sim 40\Omega$ 。
- (17) 光电变换座：由红外发射、接收管构成，是光纤传感器的组件之一。
- (18) 其他：25mm 测微头、加热器、光源、光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管、硅光电池、光电开关。

0.2.2 显示面板部分

显示面板如图 0-2 所示。

1. 线性直流稳压电源

- (1) $\pm 2\sim \pm 10\text{V}$ 分五挡步进调节输出，最大输出电流为 1A，纹波 $\leq 5\text{mV}$ 。

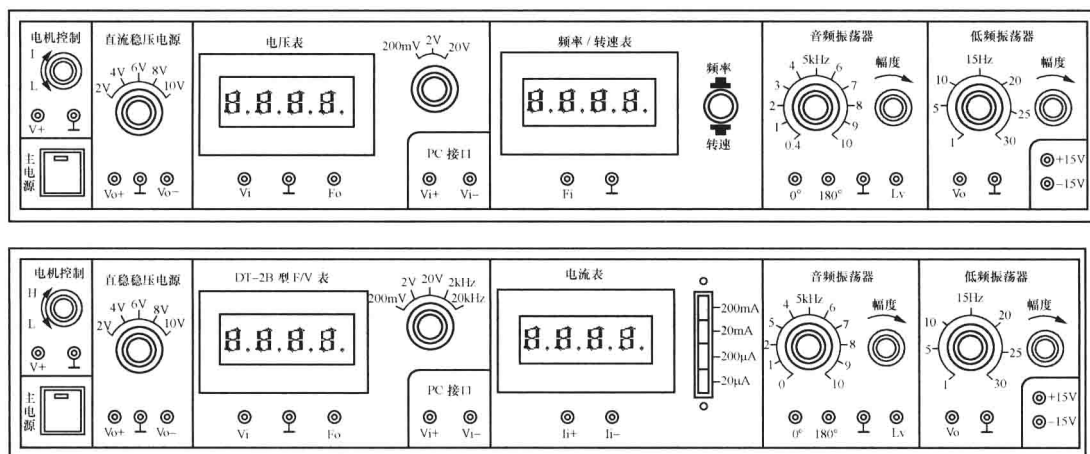


图 0-2 显示面板

(2) $\pm 15\text{V}$ 定电压输出，最大输出电流为 1A ，纹波 $\leq 10\text{mV}$ 。

2. 显示表

(1) 三位半数字直流 F/V (频率/电压) 表：五挡 (200mV 、 2V 、 20V 、 2kHz 、 20kHz) 切换，精度为 $\pm [(0.2\%) + 2 \text{ 个数字}]$ 。

(2) 四位频率/转速表：频率/转速切换，频率量程为 9999Hz ，转速量程为 5000r/min 。

(3) 三位半数字直流电流表：四挡量程 (200mA 、 20mA 、 $200\mu\text{A}$ 、 $20\mu\text{A}$) 切换，精度为 $\pm [(0.2\%) + 2 \text{ 个数字}]$ 。

3. 振荡信号

(1) 音频振荡器：频率 $0.4 \sim 10\text{kHz}$ 连续可调输出，幅度 $20V_{\text{p-p}}$ 连续可调输出，两个输出相位 0° (L_v 端)、 180° ， L_v 端最大输出电流为 0.5A 。

(2) 低频振荡器：频率 $3 \sim 30\text{Hz}$ 连续可调输出，幅度 $20V_{\text{p-p}}$ 连续可调输出，最大输出电流为 0.5A 。

0.2.3 调理电路面板

调理电路面板如图 0-3 所示。

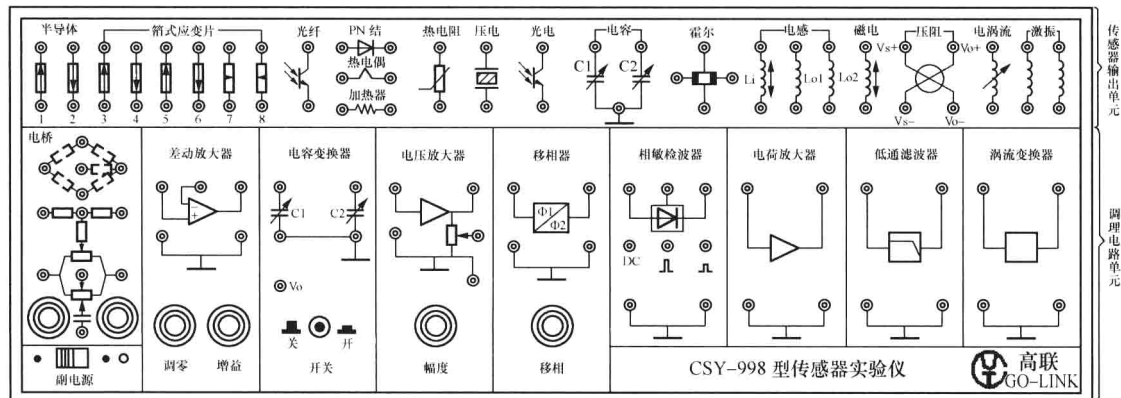


图 0-3 调理电路面板

(1) 传感器输出单元。传感器输出单元如图 0-3 所示。注意, 根据型号不同有差异, 以具体型号的实物为准。

(2) 调理电路单元。调理电路单元如图 0-3 所示。

1) 电桥: 由电桥模型、电桥调平衡网络组成。组成直流电桥时, 该部分作为应变片、热电阻的变换电路; 组成交流电桥时, 该部分作为调制器。

2) 差动放大器: 可接成同相、反相、差分放大器, 通频带为 $0\sim 10\text{kHz}$, 增益为 $1\sim 101$ 倍可调。

3) 电容变换器: 差动式电容传感器的调理电路, 由高频振荡器、放大器、二极管环形充放电电路组成。

4) 电压放大器: 同相输入放大器, 通频带为 $0\sim 10\text{kHz}$, 幅度最大时增益约为 6 倍。

5) 移相器: 移相 $\geq 20^\circ$, 允许最大输入电压峰峰值 V_{p-p} 为 10V , 在解调电路中用于补偿信号的相位。

6) 相敏检波器: 由整形电路与电子开关电路构成的检波电路, 允许最大输入检波信号峰峰值 V_{p-p} 为 10V , 通频带为 $0\sim 10\text{kHz}$ 。

7) 电荷放大器: 电容反馈型放大器, 用于放大压电传感器的输出信号。

8) 低通滤波器: 由 50Hz 的陷波器与低通 RC 滤波器构成。转折频率为 35Hz 左右。

9) 涡流变换器: 是涡流传感器的调理电路, 涡流线圈是振荡电路中的电感元件之一, 变频调幅式电路。

0.2.4 实验仪供电与尺寸

供电: $\text{AC}220\text{V}$, 50Hz , 功率 0.2kW 。

实验仪尺寸: $520\text{mm}\times 400\text{mm}\times 400\text{mm}$ 。

实验 1 应变片单臂特性实验

1.1 实验目的

- (1) 了解电阻应变片的工作原理与应用。
- (2) 掌握应变片测量电路。

1.2 基本原理

电阻应变式传感器是在弹性元件上通过特定工艺粘贴电阻应变片而组成的，是一种利用电阻材料的应变效应将工程结构件的内部变形转换为电阻变化的传感器。此类传感器主要通过一定的机械装置将被测量转化成弹性元件的变形，然后由电阻应变片将变形转换成电阻的变化，再通过测量电路将电阻的变化转换成电压或电流变化信号输出。此类传感器可用于能转化成变形的各种非电物理量的检测，如力、压力、加速度、力矩、重力等，在机械加工、计量、建筑测量等行业应用十分广泛。

1.2.1 应变片的电阻应变效应

具有规则外形的金属导体或半导体材料在外力作用下产生应变，而其电阻值也会产生相应的改变，这一物理现象称为电阻应变效应。以圆柱形导体为例，设其长为 L ，半径为 r ，材料的电阻率为 ρ ，根据电阻的定义式得

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{1}{\pi r^2} \quad (1-1)$$

当导体因某种原因产生应变时，其长度 L 、断面面积 A 和电阻率 ρ 的变化分别为 dL 、 dA 、 $d\rho$ ，相应的电阻变化为 dR 。对式 (1-1) 进行全微分运算得电阻变化率 dR/R 为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - 2\frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-2)$$

式中 dL/L ——导体的轴向应变变量 ε_L ；

dr/r ——导体的横向应变变量 ε_r 。

由材料力学知

$$\varepsilon_L = -\mu\varepsilon_r \quad (1-3)$$

式中 μ ——材料的泊松比，大多数金属材料的泊松比为 0.3~0.5。

负号表示两者的变化方向相反。

将式 (1-3) 代入式 (1-2)，得

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

式 (1-4) 说明电阻应变效应主要取决于其几何应变（几何效应）和本身特有的导电性能（压阻效应）。

1.2.2 应变灵敏度

应变灵敏度指电阻应变片在单位应变作用下所产生的电阻的相对变化量。

1. 金属导体的应变灵敏度

金属导体的应变灵敏度 K 主要取决于其几何效应，可取

$$\frac{dR}{R} \approx (1 + 2\mu)\epsilon_L \tag{1-5}$$

其灵敏度系数为

$$K = \frac{dR}{\epsilon_L} = 1 + 2\mu$$

金属导体受到应变作用产生电阻的变化，拉伸时电阻增大，压缩时电阻减小，且与其轴向应变成正比。金属导体的电阻应变灵敏度一般为 2 左右。

2. 半导体的应变灵敏度

半导体的应变灵敏度主要取决于其压阻效应，有

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{d\rho}{\rho}$$

半导体材料之所以具有较大的电阻变化率，是因为它具有比金属导体显著得多的压阻效应。当半导体受力变形时，晶体结构的对称性暂时改变，导致半导体的导电机理改变，使得它的电阻率发生变化，这种物理现象称为半导体的压阻效应。不同材质的半导体材料在不同受力条件下产生的压阻效应不同，可以是正（使电阻增大）的或负（使电阻减小）的压阻效应。也就是说，同样是拉伸变形，不同材质的半导体的电阻变化效果不同。

半导体材料的电阻应变效应主要体现为压阻效应，可正可负，与材料性质和应变方向有关，其灵敏度系数较大，一般为 100~200。

3. 应变片结构

(1) 贴片式应变片。贴片式半导体应变片（温漂，稳定性、线性度不好且易损坏）很少应用。一般半导体应变片采用 N 型单晶硅做为传感器的弹性元件，在它上面直接蒸镀扩散出半导体电阻应变薄膜（敏感栅），制成扩散型压阻式（压阻效应）传感器。

(2) 金属箔式应变片。贴片式工艺的传感器普遍应用金属箔式应变片。应变片是在苯酚、环氧树脂等绝缘材料的基板上，粘贴直径为 0.025mm 左右的金属丝或金属箔制成的，如图 1-1 所示。

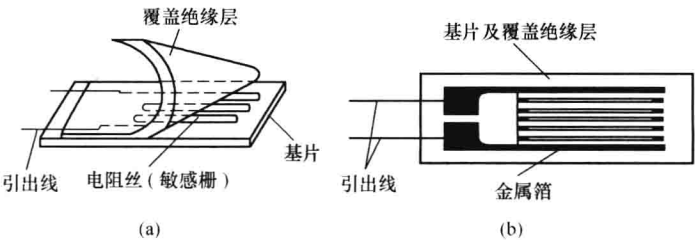


图 1-1 应变片结构图

(a) 丝式应变片；(b) 箔式应变片

金属箔式应变片是通过光刻、腐蚀等工艺制成的应变敏感元件，与丝式应变片的工作原理相同。电阻丝在外力作用下发生机械变形时，其电阻值发生变化，即电阻应变效应，描述

电阻应变效应的关系式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$$

式中 $\Delta R/R$ ——电阻丝电阻相对变化;

K ——应变灵敏度系数;

ε ——电阻丝长度相对变化, $\varepsilon = \Delta L/L$ 。

4. 测量电路

为了将电阻应变式传感器的电阻变化转换成电压或电流信号, 在应用中一般采用电桥电路作为其测量电路。电桥电路具有结构简单、灵敏度高、测量范围宽、线性度好且易实现温度补偿等优点, 能较好地满足各种应变测量要求, 因此在应变测量中得到广泛的应用。

电桥电路按其工作方式分单臂、半桥(又称双臂)和全桥三种。其中, 单臂电桥电路的输出信号最小, 线性、稳定性较差; 半桥电桥电路的输出信号是单臂电桥电路的两倍, 性能比单臂电桥电路有所改善; 全桥电桥电路的输出信号是单臂电桥电路的四倍, 性能最好。因此, 为了得到较大的输出信号, 一般采用半桥电桥电路或全桥电桥电路。基本电路如图 1-2 所示。

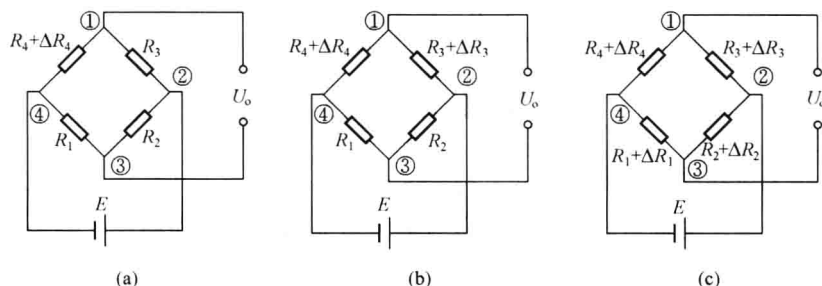


图 1-2 应变片测量电路

(a) 单臂电桥电路; (b) 半桥电桥电路; (c) 全桥电桥电路

下面以图 1-2 所示的电路为例分析测量电路。

(1) 单臂电桥电路。如图 1-2 (a) 所示, 有

$$\begin{aligned} U_o &= U_1 - U_3 \\ &= \left(\frac{R_4 + \Delta R_4}{R_4 + \Delta R_4 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) E \\ &= \frac{(R_1 + R_2)(R_4 + \Delta R_4) - R_1(R_3 + R_4 + \Delta R_4)}{(R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_1 + R_2)} E \end{aligned} \quad (1-6)$$

设 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 且 $\Delta R_4/R_4 = \Delta R/R \ll 1$, $\Delta R/R = K\varepsilon$, 则

$$U_o \approx \frac{\Delta R_4 E}{4R_4} = \frac{\Delta R E}{4R} = \frac{K\varepsilon E}{4} \quad (1-7)$$

(2) 半桥(双臂)电桥电路。如图 1-2 (b) 所示, 同理有

$$U_o \approx \frac{\Delta R E}{2R} = \frac{K\varepsilon E}{2}$$

(3) 全桥电桥电路。如图 1-2 (c) 所示, 同理有

$$U_o \approx \frac{\Delta R E}{R} = K\varepsilon E \quad (1-8)$$