



普通高等教育“十三五”规划教材
“十三五”江苏省高等学校重点教材

Practical Training Course of Sensor
and Detection Technology

传感器与检测技术 实践训练教程

◎ 张青春 李洪海 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2018-2-052）

传感器与检测技术实践训练教程

张青春 李洪海 主编
段卫平 纪剑祥 参编

机械工业出版社

本书针对应用型本科教育和新工科的特点,结合测控技术与仪器专业工程教育认证标准,适应社会对专业人才的需求,以提升学生实践应用能力为目标,精心组织教材内容。本书共分4篇12章,第1篇(第1~6章)为传感器技术、光电检测技术和无损检测技术等相关课程的基础性实验;第2篇(第7~8章)为工业传感器与自动化仪器仪表生产实习实践教学内容;第3篇(第9~10章)为创意性与综合性设计实践教学内容;第4篇(第11~12章)为测控系统与仪器设计案例。

本书编写体系新颖,内容组织合理,内容安排符合学习规律,将基础性实验、生产实习、课程综合设计训练等主要实践性教学环节融于一体,强化工程意识,培养问题分析、设计开发、科学研究和解决复杂工程问题的能力。本书可作为测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、电气工程及其自动化、物联网工程等应用型本科专业的实践训练教材,也可作为相关专业技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术实践训练教程/张青春,李洪海主编. —北京:机械工业出版社,2019.5

“十三五”江苏省高等学校重点教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-62500-1

I. ①传… II. ①张…②李… III. ①传感器-检测-高等学校-教材
IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第070509号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王康

责任校对:潘蕊 封面设计:张静

责任印制:李昂

唐山三艺印务有限公司印刷

2019年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.75印张·314千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62500-1

定价:32.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前言

传感器是实现物理环境或人类社会信息获取的基本工具，是检测系统的首要环节，是信息技术和物联网的源头，是智能检测技术与应用的基础。工业和信息化部、科技部、财政部、国家标准化委员会于2013年3月联合印发了《加快推进传感器及智能化仪器仪表产业发展行动计划》，实施期为2013年至2025年。《中国制造2025》中明确把研制智能传感器、高端仪表标准作为研究的重点项目。

本书包含测控技术与仪器专业部分课程的基础性实验、工业传感器与自动化仪器仪表生产实习、创意性和综合性设计、测控系统与仪器设计案例四大模块，在保证基础性实验的前提下，注重学生的工程实践训练和创新实践训练，融入仪器仪表学科前沿新技术和应用成果，突出应用性和实用性，具有一定的学术价值。本书主要特色与创新体现在如下几个方面。

(1) 精选实训教学内容，强化知识、能力和素质的综合培养。基础性实验部分选取信息检测类课程实验，加大了综合性和设计性的实验项目；工业传感器与自动化仪器仪表生产实习部分重点介绍了合作共建的实践教学基地部分产品的技术性能及应用领域，培养学生的工程意识、职业素养和沟通能力；创意性与综合性设计部分主要针对测控专业课程综合设计、创新实践综合设计等主要实践性教学环节，根据本专业的课程设置和专业发展，编写创意性与综合性实践训练课题及设计要求，培养学生的创新意识，问题分析、设计开发和科学研究能力，以及团队合作精神；测控系统与仪器设计案例部分精选了编者团队科研成果、学生创新实践成果，开拓学生的视野，培养学生的创新创业实践能力。

(2) 采用模块化结构，思路清晰，易于实训教学。本书共分为四大模块：第1~6章为基础性实验模块，分别介绍传感器技术、光电检测技术和无损检测技术等信息检测类课程的基础实验，为进行测控系统设计奠定基础；第7、8章为工业传感器与自动化仪器仪表生产实习模块，主要为培养方案中生产实习环节提供技术支撑；第9、10章为创意性与综合性实践教学模块，为课程综合设计、创新实践综合设计提供技术及标准支撑；第11、12章为测控系统与仪器设计案例模块，分别介绍智能仪器与机器人设计、无线传感器网络与物联网系统设计，为学生进行测控系统与仪器设计提供范例和技术支撑。

(3) 贯彻“以学生为中心、成果为导向”的新工科教学理念。本书按照工程教育认证标准、仪器类专业教学质量国家标准和新工科建设要求，内容选取兼顾知识、能力和素质的综合培养；通过传感器与检测技术的综合实践训练，培养学生解决测控系统与仪器复杂工程问题的能力，并形成创新成果。

本书可作为测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、电气工程及其自动化、物联网工程等应用型本科专业实践训练教材，也可作为相关专业技术人员的参考资料。

本书内容体系是编者团队承担2018年教育部高等学校仪器类专业新工科建设项目

(2018C012) 的研究成果。

本书由张青春、李洪海主编，段卫平、纪剑祥参编。其中第1~4、6章由李洪海编写，第5章由纪剑祥编写，第9、10章由段卫平编写，第7、8、11、12章由张青春编写，张青春负责全书统稿工作。江苏苏仪集团陈云副总经理、崔善超工程师为第7、8章的编写提供了重要的资料，本书参考文献中所列出的各位作者以及众多未能一一列出的作者为编者提供了宝贵而丰富的参考资料，在此表示诚挚的谢意。同时，对机械工业出版社的大力支持和帮助表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，恳请各位专家和读者不吝赐教，以利于不断完善。

编者邮箱：1524668968@qq.com。

编 者

目 录 Contents

前 言

第 1 篇 基础性实验

第 1 章 力、压力传感器实验	2	第 2 章 位移、振动传感器实验	18
1.1 应变片桥路特性实验	2	2.1 电容式传感器位移测量实验	18
1.1.1 实验目的	2	2.1.1 实验目的	18
1.1.2 基本原理	2	2.1.2 基本原理	18
1.1.3 需用器件与单元	5	2.1.3 需用器件与单元	20
1.1.4 实验步骤	6	2.1.4 实验步骤	20
1.1.5 思考题	8	2.2 差动变压器的性能实验与振动测量	22
1.2 应变片数字电子秤实验	8	2.2.1 实验目的	22
1.2.1 实验目的	8	2.2.2 基本原理	22
1.2.2 基本原理	8	2.2.3 需用器件与单元	24
1.2.3 需用器件与单元	9	2.2.4 实验步骤	24
1.2.4 实验步骤	9	2.2.5 思考题	27
1.3 应变片温度特性及补偿实验	10	2.3 电涡流传感器特性实验	27
1.3.1 实验目的	10	2.3.1 实验目的	27
1.3.2 基本原理	10	2.3.2 基本原理	27
1.3.3 需用器件与单元	10	2.3.3 需用器件与单元	30
1.3.4 实验步骤	10	2.3.4 实验步骤	30
1.4 应变片振动测量实验	11	2.4 电涡流和压电式传感器测量振动 实验	31
1.4.1 实验目的	11	2.4.1 实验目的	31
1.4.2 基本原理	12	2.4.2 基本原理	32
1.4.3 需用器件与单元	12	2.4.3 需用器件与单元	34
1.4.4 实验步骤	12	2.4.4 实验步骤	34
1.5 压阻式传感器压力测量实验	13	第 3 章 温度传感器实验	37
1.5.1 实验目的	13	3.1 温度源的温度控制调节实验	37
1.5.2 基本原理	14	3.1.1 实验目的	37
1.5.3 需用器件与单元	14	3.1.2 基本原理	37
1.5.4 实验步骤	14	3.1.3 需用器件与单元	37
1.6 CSY-XS-01 传感器系统实验箱 说明	15	3.1.4 实验步骤	37
1.6.1 实验箱简介	15	3.2 K 型热电偶测温特性实验	40
1.6.2 实验箱组成	16	3.2.1 实验目的	40
1.6.3 实验箱参数	17	3.2.2 基本原理	40

3.2.3 需用器件与单元	41	5.1.1 实验目的	63
3.2.4 实验步骤	41	5.1.2 需用器件与单元	63
3.3 Pt100 铂电阻测温特性实验	45	5.1.3 实验步骤	63
3.3.1 实验目的	45	5.2 光电二极管特性及光照灵敏度测量	
3.3.2 基本原理	45	实验	65
3.3.3 需用器件与单元	45	5.2.1 实验目的	65
3.3.4 实验步骤	46	5.2.2 需用器件与单元	65
3.3.5 思考题	48	5.2.3 实验步骤	65
3.4 集成温度传感器 (AD590) 温度特性		5.3 热敏器件与热释电探测器实验	69
实验	49	5.3.1 实验目的	69
3.4.1 实验目的	49	5.3.2 需用器件与单元	69
3.4.2 基本原理	49	5.3.3 实验步骤	69
3.4.3 需用器件与单元	49	5.4 PSD 位置传感器特性参数测量实验	71
3.4.4 实验步骤	49	5.4.1 实验目的	71
3.5 NTC 热敏电阻温度特性实验	50	5.4.2 需用器件与单元	71
3.5.1 实验目的	50	5.4.3 实验步骤	71
3.5.2 基本原理	50	5.5 四象限光电传感器特性参数测量	
3.5.3 需用器件与单元	51	实验	73
3.5.4 实验步骤	51	5.5.1 实验目的	73
3.6 PN 结温度传感器温度特性实验	52	5.5.2 需用器件与单元	73
3.6.1 实验目的	52	5.5.3 实验步骤	73
3.6.2 基本原理	53	5.6 光电传感器电机转速测量与控制	
3.6.3 需用器件与单元	53	实验	74
3.6.4 实验步骤	53	5.6.1 实验目的	74
第 4 章 磁敏、气敏和湿敏传感器		5.6.2 基本原理	75
实验	55	5.6.3 需用器件与单元	75
4.1 线性霍尔式传感器位移特性实验	55	5.6.4 实验步骤	75
4.1.1 实验目的	55	5.7 光纤传感器位移特性实验	77
4.1.2 基本原理	55	5.7.1 实验目的	77
4.1.3 需用器件与单元	56	5.7.2 基本原理	77
4.1.4 实验步骤	56	5.7.3 需用器件与单元	78
4.2 霍尔和磁电式传感器测量转速实验	57	5.7.4 实验步骤	78
4.2.1 实验目的	57	第 6 章 无损检测技术实验	80
4.2.2 基本原理	57	6.1 电磁波测厚实验	80
4.2.3 需用器件与单元	58	6.1.1 实验目的	80
4.2.4 实验步骤	58	6.1.2 基本原理	80
4.2.5 思考题	59	6.1.3 实验设备	80
4.3 气敏和湿敏传感器实验	60	6.1.4 实验步骤	80
4.3.1 实验目的	60	6.2 钢筋直径和保护层厚度检测实验	81
4.3.2 基本原理	60	6.2.1 实验目的	81
4.3.3 需用器件与单元	61	6.2.2 基本原理	81
4.3.4 实验步骤	61	6.2.3 实验设备	82
第 5 章 光电传感器实验	63	6.2.4 实验步骤	82
5.1 光敏电阻特性参数测量实验	63	6.3 钢筋扫描探测实验	83

6.3.1 实验目的	83	6.4.1 实验目的	84
6.3.2 基本原理	83	6.4.2 基本原理	85
6.3.3 实验设备	83	6.4.3 实验设备	86
6.3.4 实验步骤	83	6.4.4 实验步骤	86
6.4 混凝土裂缝检测实验	84		

第 2 篇 工业传感器与自动化仪器仪表生产实习

第 7 章 工业传感器	88	第 8 章 自动化仪器仪表	107
7.1 金属热电阻系列	88	8.1 气体检测仪表	107
7.1.1 WZ 系列装配式热电阻	88	8.1.1 SY-QT-2000NDIR 红外气体 检测仪	107
7.1.2 WZ 系列铠装热电阻	89	8.1.2 SY-QT-2000VOC 探测仪	108
7.1.3 WZCM、WZPM 系列端面 热电阻	90	8.1.3 泵吸便携式可燃气体检测 报警仪	109
7.2 热电偶系列	90	8.1.4 CCZ-1000 全自动粉尘检测仪	110
7.2.1 WR 系列装配式热电偶	90	8.2 校验 (标定) 仪表	111
7.2.2 WR 系列铠装热电偶	91	8.2.1 HG2000 压力仪表自动校验 系统	111
7.2.3 防爆热电偶	91	8.2.2 HG2000-RZJ 热工全自动检定 系统	112
7.3 物位计	92	8.2.3 CPC2000Ⅲ-A 压力校验仪	114
7.3.1 ULM-SY21A1 系列超高频微波物 位计	92	8.2.4 HG-S301 热电偶校验仪	114
7.3.2 SYLW3X 系列导波雷达物 位计	93	8.2.5 HG 系列压力发生装置	115
7.3.3 Level-Ease 智能开关式射频导纳物 位计	93	8.3 显示调节仪表	115
7.3.4 SY-CDQLS23001 型干熄焦炉红焦 高温料位计	95	8.3.1 XMTA-9000 系列智能数字显示 调节仪	115
7.3.5 LHDG700 系列电感式液位 变送器	95	8.3.2 XMGA-9000 智能光柱显示 调节仪	116
7.3.6 SYCW 系列超声波物 (液) 位仪	96	8.3.3 XMPA-9000 智能 PID 调节仪	116
7.4 流量计	97	8.3.4 XMYA 智能电接点液位显示 控制仪	117
7.4.1 SY-FLU2000 超声波流量计	97	8.4 无线仪表	118
7.4.2 LD 系列电磁流量计	99	8.4.1 SY-SPRM-W 智能无线网关	118
7.4.3 LUGB 系列涡街流量计	100	8.4.2 SY-SPRM-IO 智能无线转换 设备	118
7.4.4 YRTGY 涡轮流量计	101	8.4.3 SY-SPRM-P 智能无线压力 变送器	119
7.4.5 SYLWQ 系列气体涡轮 流量计	102	8.4.4 SY-SPRM-T 智能无线温度 变送器	119
7.4.6 SYB 靶式智能流量计	102	8.4.5 SY-SPRM-TP 智能无线温压仪	120
7.5 压力 (差压) 变送器	103	8.4.6 SY-SPRM-P 系列智能无线压力 变送器	120
7.5.1 LH 系列压力 (差压) 变送器	104	8.4.7 SY-SPRM-M 系列智能无线执行 机构	121
7.5.2 LH-3851/1851GP 型压力含负压 变送器	105		
7.5.3 LH-3851/1851DR 型微差压 变送器	105		

第3篇 创意性与综合性设计

第9章 创意性设计	124	9.11.1 设计要求	132
9.1 人体智能电子秤	124	9.11.2 系统功能及主要技术指标	132
9.1.1 设计要求	124	9.11.3 参考文献	133
9.1.2 系统功能及主要技术指标	124	9.12 风速风向测试仪	133
9.1.3 参考文献	125	9.12.1 设计要求	133
9.2 金属厚度测量仪	125	9.12.2 系统功能及主要技术指标	133
9.2.1 设计要求	125	9.12.3 参考文献	133
9.2.2 系统功能及主要技术指标	125	第10章 综合性设计	134
9.2.3 参考文献	126	10.1 火灾探测报警与联动系统	134
9.3 电子罗盘	126	10.1.1 设计要求	134
9.3.1 设计要求	126	10.1.2 系统功能及主要技术指标	134
9.3.2 系统功能及主要技术指标	126	10.1.3 参考文献	135
9.3.3 参考文献	126	10.2 小型气象站系统	135
9.4 PM2.5 测量仪	127	10.2.1 设计要求	135
9.4.1 设计要求	127	10.2.2 系统功能及主要技术指标	135
9.4.2 系统功能及主要技术指标	127	10.2.3 参考文献	136
9.4.3 参考文献	127	10.3 智能家居系统	136
9.5 无线防盗报警器	127	10.3.1 设计要求	136
9.5.1 设计要求	127	10.3.2 系统功能及主要技术指标	136
9.5.2 系统功能及主要技术指标	128	10.3.3 参考文献	137
9.5.3 参考文献	128	10.4 智能路灯控制系统	137
9.6 智能语音导盲杖	128	10.4.1 设计要求	137
9.6.1 设计要求	128	10.4.2 系统功能及主要技术指标	137
9.6.2 系统功能及主要技术指标	129	10.4.3 参考文献	138
9.6.3 参考文献	129	10.5 智能停车场管理系统	138
9.7 心率测量仪	129	10.5.1 设计要求	138
9.7.1 设计要求	129	10.5.2 系统功能及主要技术指标	138
9.7.2 系统功能及主要技术指标	129	10.5.3 参考文献	139
9.7.3 参考文献	130	10.6 车辆追踪定位系统	139
9.8 肺活量检测仪	130	10.6.1 设计要求	139
9.8.1 设计要求	130	10.6.2 系统功能及主要技术指标	139
9.8.2 系统功能及主要技术指标	130	10.6.3 参考文献	140
9.8.3 参考文献	130	10.7 智能农业大棚控制系统	140
9.9 水质检测仪	131	10.7.1 设计要求	140
9.9.1 设计要求	131	10.7.2 系统功能及主要技术指标	140
9.9.2 系统功能及主要技术指标	131	10.7.3 参考文献	141
9.9.3 参考文献	131	10.8 住宅小区安防系统	141
9.10 太阳墙采暖控制器	131	10.8.1 设计要求	141
9.10.1 设计要求	131	10.8.2 系统功能及主要技术指标	141
9.10.2 系统功能及主要技术指标	132	10.8.3 参考文献	142
9.10.3 参考文献	132	10.9 酒店传菜机器人系统	142
9.11 电动车速度测量仪	132	10.9.1 设计要求	142

10.9.2 系统功能及主要技术指标	142	10.10.1 设计要求	143
10.9.3 参考文献	143	10.10.2 系统功能及主要技术指标	143
10.10 住宅小区巡逻机器人系统	143	10.10.3 参考文献	144

第 4 篇 测控系统与仪器设计案例

第 11 章 智能仪器与机器人设计	146	12.1 基于 WSN 的火灾探测报警系统	167
11.1 汽车智能防撞防盗报警系统	146	12.1.1 设计要求	167
11.1.1 设计要求	146	12.1.2 系统硬件设计	167
11.1.2 系统方案设计	146	12.1.3 系统软件设计	169
11.1.3 硬件电路设计	147	12.1.4 系统测试	169
11.1.4 系统软件设计	149	12.1.5 结论	170
11.2 太阳能光伏转换智能控制器	149	12.2 基于 WSN 和 GPRS 技术的扬尘及 噪声远程监测系统	170
11.2.1 设计要求	149	12.2.1 设计要求	170
11.2.2 系统方案设计	149	12.2.2 系统方案设计	170
11.2.3 系统硬件设计	150	12.2.3 数据采集模块	172
11.2.4 系统软件设计	151	12.2.4 远程监控平台设计	173
11.3 基于虚拟仪器和 USB 接口的数据 采集器	151	12.2.5 系统测试	173
11.3.1 设计要求	151	12.2.6 结论	174
11.3.2 系统方案设计	151	12.3 基于物联网技术的太阳能路灯远程 智能控制系统	174
11.3.3 系统硬件设计	152	12.3.1 设计要求	174
11.3.4 系统软件设计	154	12.3.2 系统方案设计	174
11.4 基于虚拟仪器的电动机性能综合 测试平台	156	12.3.3 无线传感器节点硬件设计	175
11.4.1 设计要求	156	12.3.4 系统软件设计	176
11.4.2 系统方案设计	156	12.3.5 系统调试	178
11.4.3 系统硬件设计	157	12.4 桥梁健康状态远程在线监测系统	179
11.4.4 系统软件设计	158	12.4.1 设计要求	179
11.5 引导机械手抓取棒料的定位测量	159	12.4.2 系统方案设计	180
11.5.1 设计要求	159	12.4.3 系统关键技术	181
11.5.2 建立机械手结构与棒料数学 关系模型	160	12.4.4 系统硬件设计	181
11.5.3 图像处理	160	12.4.5 物联网云平台配置与数据 上传	182
11.5.4 测量结果分析	162	12.4.6 NB-IoT 通信	183
11.6 环境监测遥控机器人	162	12.4.7 GPRS 与 NB-IoT 通信测试 对比	185
11.6.1 设计要求	162	12.4.8 Android APP 开发	186
11.6.2 系统方案设计	162	12.4.9 远程计算机监测软件开发	189
11.6.3 系统硬件设计	163	12.4.10 神经网络数据分析算法设计	190
11.6.4 系统软件设计	165	12.4.11 结论	193
11.6.5 实物制作及实验	166	参考文献	194
第 12 章 无线传感器网络与物联网 系统设计	167		

第1篇

基础性实验

本篇针对测控技术与仪器专业和其他相近工科专业开设的传感器技术、自动检测技术、光电检测技术、无损检测技术等课程，依据课程教学大纲安排的实践性教学环节，整合部分专业基础性实验项目，分别介绍力学量传感器实验，振动量传感器实验，温度传感器实验，磁敏、气敏和湿敏传感器实验，光电传感器实验、无损检测技术实验。

在实验项目设置和内容编写时，充分考虑理论课程与实践课程内容的统一、专业基础课和专业课内容的衔接、多学科技术的有机融合，加大了综合型、设计型和应用型实验项目的比例，注重学生自主实验，培养学生分析问题和解决问题的能力。

第1~4章实验项目主要以CSY-XS-01传感器系统实验箱为实验平台（详见1.6节）进行相关实验；第5章实验项目主要在光电检测综合实验仪平台上完成，部分项目在传感器技术实验平台上完成；第6章无损检测技术实验项目主要利用专用的无损检测仪器设备，采用超声波、电磁波等方法进行金属及非金属缺陷诊断。

1.1 应变片桥路特性实验

1.1.1 实验目的

- (1) 通过电阻应变片工作原理与应用的学习, 掌握应变片单臂、半桥(双臂)和全桥测量电路的工作特点及性能。
- (2) 比较单臂、半桥、全桥输出时的灵敏度和非线性度, 得出相应的结论。
- (3) 通过应变片桥路特性实验, 培养学生实验设计、实施、调试、测试和数据分析的能力。

1.1.2 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, 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。此类传感器主要是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, 再通过测量电路进一步将电阻的改变转换成电压或电流信号输出。其可用于能转化成变形的各种非物理量的检测, 如力、压力、加速度、力矩、质量等, 在机械加工、计量、建筑测量等行业应用十分广泛。

1. 应变片的电阻应变效应

所谓电阻应变效应是指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改变的物理现象。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

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

当导体因某种原因产生应变时, 其长度 L 、截面积 A 和电阻率 ρ 的变化为 dL 、 dA 、 $d\rho$, 相应的电阻变化为 dR 。经推导, 电阻变化率 dR/R 为

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

式中, μ 为材料的泊松比, 大多数金属材料的泊松比为 $0.3 \sim 0.5$; ε 为导体的轴向应变变量。式 (1-2) 说明电阻应变效应主要取决于它的几何应变(几何效应)和本身特有的导电性能

(压阻效应)。

2. 应变灵敏度

应变灵敏度是指电阻应变片在单位应变作用下所产生的电阻相对变化量。

(1) 金属导体的应变灵敏度：主要取决于其几何效应；可取

$$\frac{dR}{R} \approx (1+2\mu)\varepsilon \quad (1-3)$$

其灵敏度为

$$K = \frac{dR/R}{\varepsilon} \approx 1+2\mu \quad (1-4)$$

金属导体在受到应变作用时将产生电阻的变化，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在 2~6 之间。

(2) 半导体的应变灵敏度：主要取决于其压阻效应； $dR/R \approx dp/\rho$ 。半导体材料之所以具有较大的电阻变化率，是因为它有远比金属导体显著得多的压阻效应。在半导体受力变形时会暂时改变晶体结构的对称性，因而改变了半导体的导电机理，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。而且，不同材质的半导体材料在相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，不同材质的半导体将得到完全相反的电阻变化效果。

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，其灵敏度较大，一般在 100~200 之间。

3. 贴片式应变片应用

在贴片式工艺的传感器上普遍应用金属箔式应变片，贴片式半导体应变片（温漂、稳定性、线性度不好而且易损坏）很少应用。一般半导体应变采用 N 型单晶硅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（扩散出敏感栅），制成扩散型压阻式（压阻效应）传感器。

* 本实验以金属箔式应变片为研究对象。

4. 箔式应变片的基本结构

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。

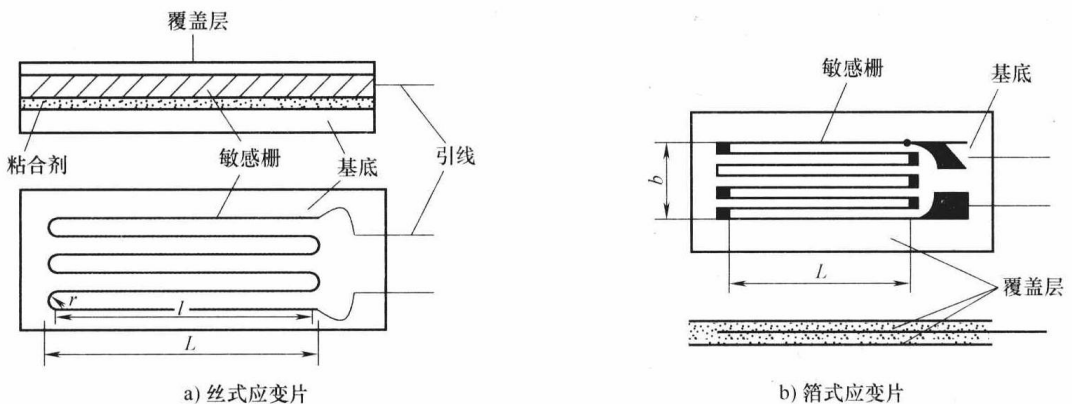


图 1-1 应变片结构图

金属箔式应变片就是通过光刻、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，这就是电阻应变效应。描述电阻应变效应的关系式为 $\Delta R/R = K\varepsilon$ 。式中， $\Delta R/R$ 为电阻丝电阻相对变化， K 为应变灵敏度， $\varepsilon = \Delta L/L$ 为电阻丝长度相对变化。

5. 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了广泛的应用。

电桥电路按其工作方式分，有单臂、双臂和全桥三种。单臂工作输出信号最小，线性、稳定性较差；双臂输出是单臂的 2 倍，性能比单臂有所改善；全桥工作时的输出是单臂时的 4 倍，性能最好。因此，为了得到较大的输出电压或电流信号一般都采用双臂或全桥工作。电桥电路如图 1-2a、b、c 所示。

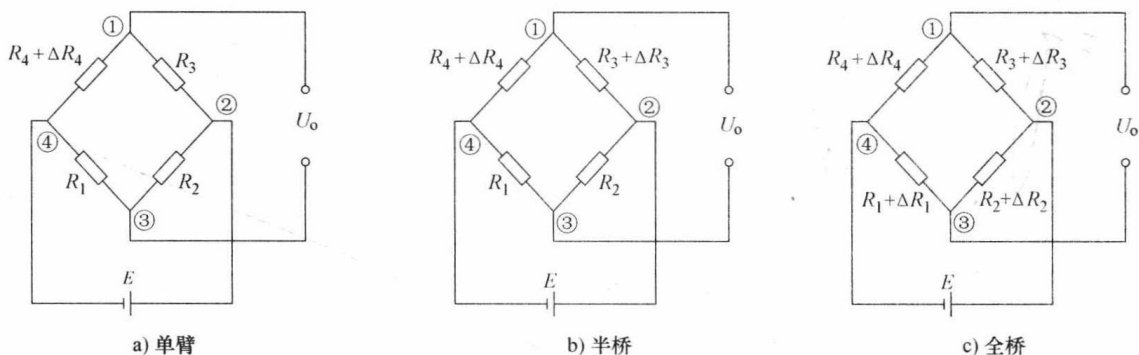


图 1-2 应变片测量电路

(1) 单臂：

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

$$U_o \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{4} K\varepsilon E \quad (1-5)$$

(2) 双臂（半桥）：

$$U_o \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} E = \frac{1}{2} K\varepsilon E \quad (1-6)$$

(3) 全桥：

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

6. 箔式应变片单臂电桥实验原理（见图 1-3）

图 1-3 中， R_1 、 R_2 、 R_3 为 350Ω 固定电阻， R_4 为应变片；RP1 和 r 组成电桥调平衡网络，供桥电源直流 $\pm 4V$ 。

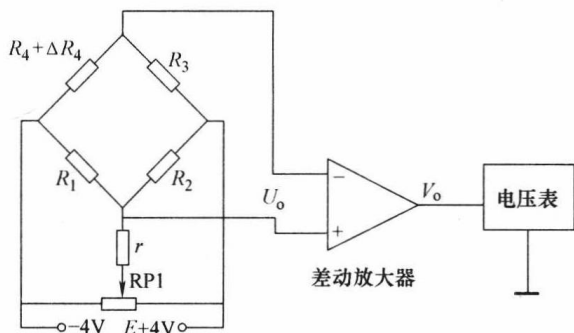


图 1-3 应变片单臂电桥实验原理图

1.1.3 需用器件与单元

机头中的应变梁、振动台；主板中的箔式应变片、电桥、±4V 电源、差动放大器、F/V（频率/电压）表、砝码。熟悉需用器件与单元在传感器箱中机头与主板的布置位置。

1. 主板中的电桥单元

图 1-4 为主板中的电桥单元，其中：

- (1) 菱形虚框为无实体的电桥模型（为实验者组桥参考而设，无其他实际意义）。
- (2) $R_1 = R_2 = R_3 = 350\Omega$ 是固定电阻，为组成单臂应变和半桥应变而配备的其他桥臂电阻。
- (3) 电位器 RP1、电阻 r 为电桥直流调节平衡网络，电位器 RP2、电容 C 为电桥交流调节平衡网络。

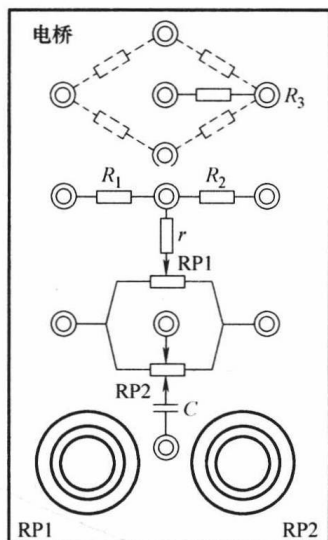
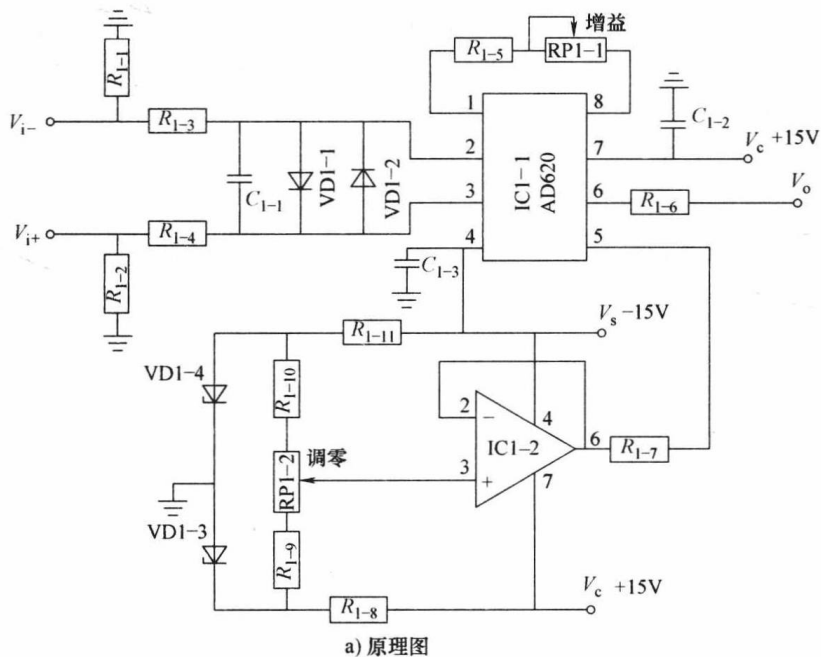


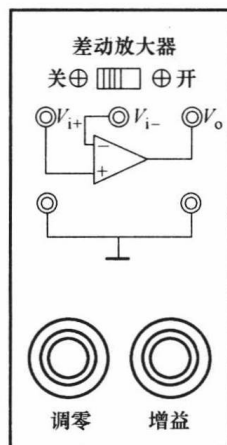
图 1-4 电桥单元

2. 主板中的差动放大器单元

主板中的差动放大器单元如图 1-5 所示，其中 IC1-1 AD620 为差动输入的测量放大器（仪



a) 原理图



b) 面板图

图 1-5 差动放大器原理与面板图

用放大器), IC1-2 为调零跟随器。

1.1.4 实验步骤

1. 差动放大器调零点

按图 1-6 接线。将 F/V 表的量程切换开关切换到 2V 档, 合上实验箱主电源开关, 将差动放大器的拨动开关拨到“开”位置, 将差动放大器的增益电位器按顺时针方向轻轻转到底后再逆向回转 1/4 圈, 调节调零电位器, 使电压表显示电压为 0。差动放大器的零点调节完成, 拆除连线, 关闭主电源。

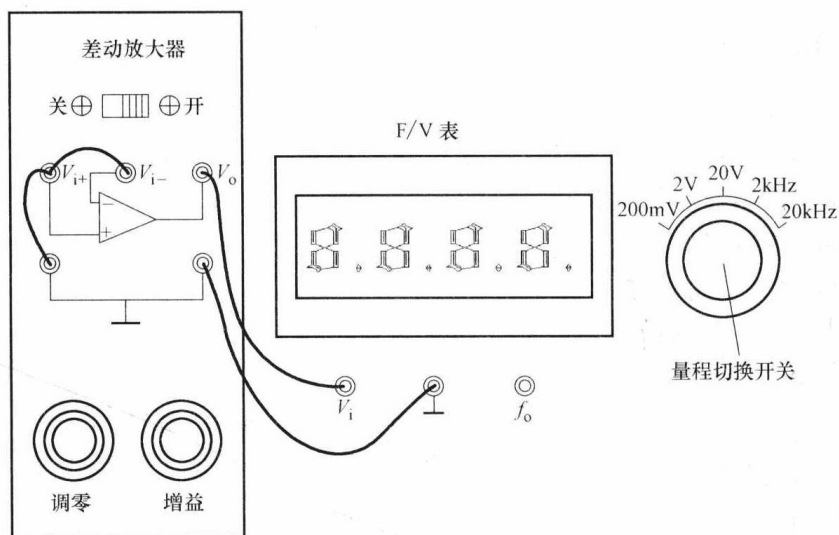


图 1-6 差动放大器调零接线图

2. 应变片单臂电桥特性实验

(1) 将主板上传感器输出单元中的箔式应变片 (标有上下箭头的 4 片应变片中任意一片为工作片) 与电桥单元中的 R_1 、 R_2 、 R_3 组成电桥电路, 电桥的一对角接 $\pm 4V$ 直流电源, 另一对角作为电桥的输出接差动放大器的二输入端, 将电位器 RP1、电阻 r 直流调节平衡网络接入电桥中 (电位器 RP1 二固定端接电桥的 $\pm 4V$ 电源端、RP1 的活动端电阻 r 接电桥的输出端), 如图 1-7 所示 (粗细曲线为连接线)。

(2) 检查接线无误后合上主电源开关, 在机头上应变梁的振动台无砝码时调节电桥的直流调节平衡网络电位器 RP1, 使电压表显示为 0 或接近 0 (有小的起始电压也无所谓, 不影响应变片特性与实验)。

(3) 在应变梁的振动台中心点上放置一只砝码 (20g/只), 读取数显表数值, 依次增加砝码和读取相应的数显表值, 记下实验数据填入表 1-1 中。

表 1-1 应变片单臂电桥特性实验数据

质量/g									
电压/mV									

(4) 根据表 1-1 数据计算系统灵敏度 $S = \Delta V / \Delta W$ (ΔV 为输出电压变化量, ΔW 为质量变

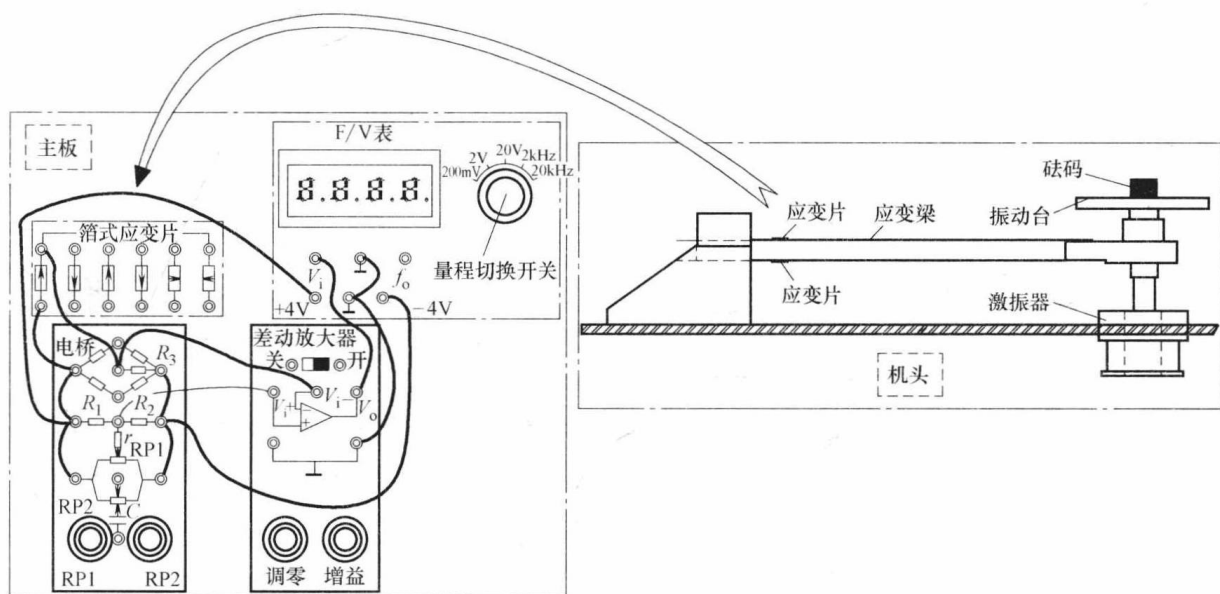


图 1-7 应变片单臂电桥特性实验接线示意图

化量) 和非线性误差 $\delta = \Delta m / y_{FS} \times 100\%$ (Δm 为输出值 (多次测量时为平均值) 与拟合直线的最大偏差, y_{FS} 为满量程输出平均值, 此处为 200g 所对应的最大电压输出值)。实验完毕, 关闭电源。

3. 应变片双臂电桥特性实验

除实验接线按图 1-8 接线, 即电桥单元中 R_1 、 R_2 与相邻的两片应变片组成电桥电路外, 实验步骤和实验数据处理方法与单臂电桥实验完全相同。实验完毕, 关闭电源。

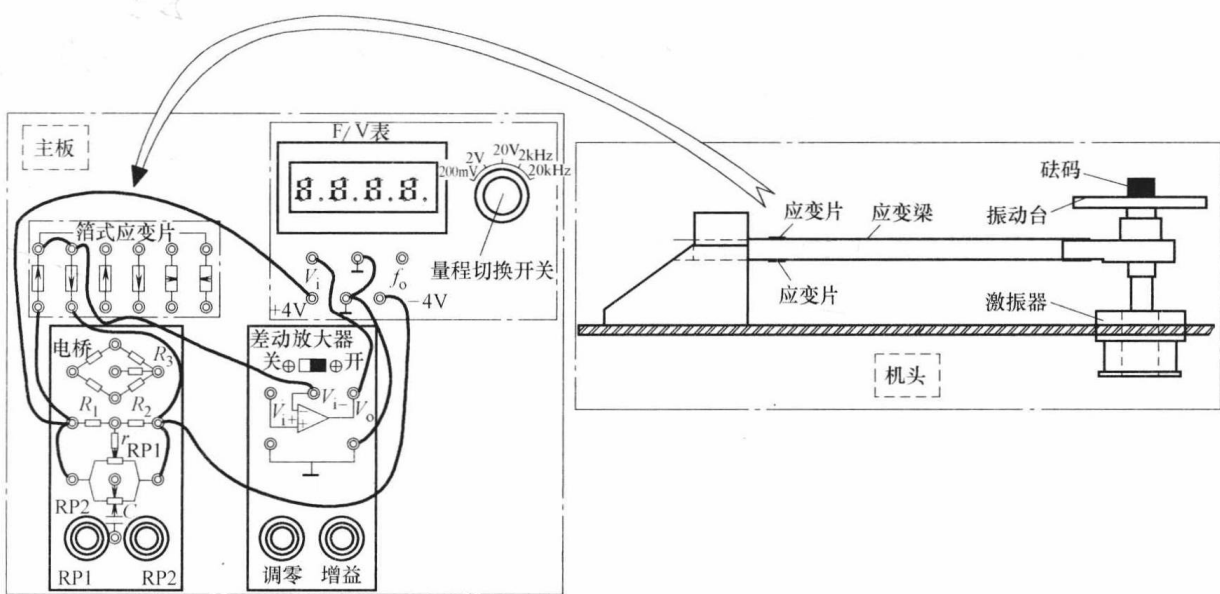


图 1-8 应变片双臂电桥特性实验接线示意图