

国家双高“铁路机车专业群” 立体化教材
——铁道车辆技术专业

车辆检测技术

主 编 ◎ 时 蕾 智雷勇 李 伟

副主编 ◎ 王 洋 张龙华 罗剑强

主 审 ◎ 张 翀

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书是高等职业教育校企合作系列教材之一。针对高等职业院校技能型人才培养的特点，以车辆检测的各项任务、项目过程为导向，培养学生面向岗位的实际认知能力、合作能力、职业能力。全书内容分为3部分，共7个项目20个任务。第一部分为传感器基础，具体内容包括：传感器基础知识、电阻应变式传感器、霍尔式传感器、压电式传感器、温度传感器、超声波传感器、光电传感器；第二部分为无损检测，具体内容包括：磁粉探伤和超声波探伤；第三部分为5T检测系统，具体内容包括：车辆轴温智能探测系统、车辆滚动轴承故障轨边声学诊断系统、车辆运行品质轨边动态监测系统、货车故障轨旁图像检测系统及客车运行状态安全检测系统等内容。

本书集铁道车辆检测理论知识和检修知识于一体，可作为高等职业院校铁道车辆专业学生用书，也可作为相关铁路职工培训教材以及现场岗位作业人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

车辆检测技术 / 时蕾, 智雷勇, 李伟主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2022.5
ISBN 978-7-5643-8565-1

I. ①车… II. ①时… ②智… ③李… III. ①铁路车
辆—检修—高等职业教育—教材 IV. ①U279.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第281453号

Cheliang Jiance Jishu

车辆检测技术

责任编辑 / 王 旻
主 编 时 蕾 智雷勇 李 伟 特邀编辑 / 孟苏成
封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行
(四川省成都市金牛区二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)
发行部电话: 028-87600564 028-87600533
网址: <http://www.xnjdcbs.com>
印刷: 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 20.25 字数 507 千
版次 2022年5月第1版
印次 2022年5月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-8565-1
定价 56.00 元

课件咨询电话: 028-81435775
图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

PREFACE

本书为高等职业教育校企合作系列教材之一。随着铁路的飞速发展，铁路运输安全压力日益增加，针对铁路车辆的检测与监测工作也越来越重要了，这就需要先进的技术装备来支撑，以保障铁路运输的安全。

本书根据高职铁道车辆专业培养目标，重点阐述传感器基础知识、车辆无损检测技术和车辆 5T 检测系统 3 部分内容。传感器技术是测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术和材料科学等众多学科相互交叉的综合性和高新技术密集型前沿技术，是现代新技术革命和信息社会的重要基础，是自动检测和自动控制技术不可缺少的重要组成部分。在车辆运行安全防范预警及铁路其他装备上也使用了大量的不同种类的传感器，传感器技术已成为我国铁路发展不可缺少的一部分，因此掌握传感器技术越来越重要。无损检测技术是在工件无损的条件下，检查工件宏观缺陷或测量工件特征的各种技术方法的统称。无损检测的意义在于保障零件、组件的安全使用，节约材料，在零件无损的条件下检测零件、部件、组件、设备、材料和大型工程项目，使之安全有效地生产和工作。铁路无损检测工作大体分为两部分，一部分是工务产品的检测，包括钢轨、道岔和钢轨焊缝等，主要由工务段负责探伤；另一部分是机车车辆零部件的检测，包括车轴、车轮、摇枕侧架和轴承等，以发现使用中所产生的疲劳裂纹等缺陷，防止设备在继续使用中发生灾害性事故。本书重点介绍磁粉探伤、超声波探伤技术。5T 系统是我国铁路车辆部门为适应我国铁路快速发展的需求、提升我国铁路技术装备现代化水平而建立的一整套车辆安全防范系统。5T 系统采用智能化、网络化、信息化技术，实现地面设备对客、货车运行安全状态的动态检测、数据集中、联网运行、远程监控、信息共享，提高了铁路的运输安全防范能力。主要包括：车辆轴温智能探测系统（THDS）、货车运行状态地面安全监测系统（TPDS）、货车滚动轴承早期故障轨边声学诊断系统（TADS）、货车运行故障动态图像检测系统（TFDS）、客车运行状态安全监测系统（TCDS）。如今，5T 系统已经扩充出动车组运行故障图像检测系统（TEDS）、客车故障轨边图像检测系统（TVDS）、轮对尺寸动态检测系统（TWDS）等。本书重点阐述 5T 系统的功能、原理、运用管理、设备维修等内容。

本教材在编写过程中，得到了中国铁路郑州局集团有限公司焦作车辆段、郑州北车辆段、郑州车辆段的大力支持，这些车辆段的职教科、技术科的技术员及工程师参与了本书的编写及审稿工作，在此一并表示感谢。

全书由郑州铁路职业技术学院时蕾、智雷勇，中国铁路郑州局集团有限公司焦作车辆段教育科长李伟担任主编，郑州铁路职业技术学院王洋、张龙华，中国铁路郑州局集团有限公司郑州北车辆段教育科长罗剑强担任副主编；中国铁路郑州局集团有限公司郑州车辆段教育科长张翀主审。参加编写的还有郑州铁路职业技术学院牛小伟，郑州动车段李建华，焦作车

辆段李喆。编写分工如下：时蕾编写项目一的任务一至任务六、项目二的任务一；张龙华编写项目二的任务二、项目五的任务一；智雷勇编写项目一的任务七、项目三；王洋编写项目四的任务一、项目七；李建华编写项目四的任务二；罗剑强编写项目五的任务二；李喆编写项目六的任务一；李伟编写项目六的任务二。

由于作者水平所限，加之编写时间仓促，本书难免有疏漏和不当之处，恳请读者批评指正。

编 者
2021年11月

数字资源目录

序号	项 目	名 称	数字资源类型	页码
1	项目一 传感器技术	1-1 传感器基础知识	视频	3
2		1-2 电阻应变式传感器	视频	8
3		1-3 认识霍尔传感器	视频	18
4		1-4 霍尔传感器的测量电路及应用	视频	20
5		1-5 压电式传感器	视频	24
6		1-6 温度传感器	视频	31
7		1-7 超声波传感器	视频	46
8		1-8 光电式传感器	视频	53
9	项目二 无损探伤	2-1 无损检测概述	视频	60
10		2-2 磁粉探伤的原理及方法	视频	62
11		2-3 实作：轮对荧光磁粉探伤机日常校验	视频	77
12		2-4 实作：轮对荧光磁粉探伤	视频	80
13		2-5 超声波探伤在铁道车辆上的应用	视频	89
14		2-6 实作：客车轮对超声波探伤日常性能校验	视频	101
15		2-7 作业内容及标准	PDF	102
16		2-8 轮轴手工超声波探伤	PDF	102
17	项目三 车辆轴温智能探测系统 (THDS)	3-1 THDS 系统构成及功能	视频	105
18		3-2 实作：THDS 探头标定检查	视频	125
19		3-3 THDS 热轴预报及处置流程	视频	131
20		3-4 认知车号自动识别系统	视频	143
21	项目四 车辆滚动轴承故障轨边声学诊断系统 (TADS)	4-1 认知 TADS 系统	视频	156
22		4-2 实作：TADS 阵列箱检查	视频	190
23		4-3 TADS 故障预报及反馈	视频	197

续表

序号	项 目	名 称	数字资源类型	页码
24	项目五 车辆运行 品质轨边动态检测 系统 (TPDS)	5-1 TPDS 探测站的组成及功能	视频	209
25		5-2 实作：检查电源防雷箱	视频	237
26		5-3 实作：TPDS 预警处置	视频	245
27	项目六 货车运行 故障动态图像检测 系统 (TFDS)	6-1 TFDS 系统的构成及功能	视频	256
28		6-2 实作：TFDS 底侧箱、补偿光源、摄像机检查	视频	262
29		6-3 实作：TFDS 转向架侧架部检查	视频	274
30		6-4 实作：TFDS 制动梁部检查	视频	275
31		6-5 实作：TFDS 车钩钩缓部检查	视频	280
32		6-6 实作：TFDS 中间部侧部检查	视频	282
33		6-7 实作：TFDS 动态检查整列作业过程	视频	284
34		6-8 作业程序、标准及示范	PDF	285
35	项目七 客车运行 安全监控系统 (TCDS)	7-1 TCDS 系统概述	视频	289

目录

CONTENTS

项目一 传感器基础	1
任务一 传感器基础知识	3
任务二 电阻应变式传感器	8
任务三 霍尔式传感器	18
任务四 压电式传感器	24
任务五 温度传感器	31
任务六 超声波传感器	46
任务七 光电式传感器	53
项目二 无损检测技术	60
任务一 磁粉探伤	62
任务二 超声波探伤	89
项目三 车辆轴温智能探测系统（THDS）	103
任务一 THDS 红外轴温探测系统	105
任务二 THDS 系统运用与管理	128
拓展任务 铁路车号自动识别系统	143
项目四 车辆滚动轴承故障轨旁声学诊断系统（TADS）	154
任务一 TADS 系统基础知识	155
任务二 TADS 系统运用与管理	196
项目五 车辆运行品质轨边动态监测系统（TPDS）	205
任务一 TPDS 系统基础知识	206
任务二 TPDS 系统运用与管理	238
项目六 货车故障轨旁图像检测系统（TFDS）	253
任务一 TFDS 系统基础知识	254
任务二 TFDS 系统运用与管理	270

项目七	客车运行状态安全监测系统（TCDS）	287
任务一	TCDS 系统基础知识	288
任务二	TCDS 系统运用与管理	308
参考文献		316



项目一 传感器基础

【思政课堂】从一线学徒到“现代鲁班”——鲁勇

鲁勇，现任牡丹江电务段车载设备车间检修工区工长。学徒工出身的他，干出了“现代鲁班”的业绩。多年来，鲁勇带领团队完成技术革新100多项，研制各类试验台30多个，多项发明填补了国内铁路系统车载专业技术空白。

鲁勇出生在铁路世家。20世纪70年代，鲁勇的父母响应国家号召奔赴黑龙江扎根铁路。鲁勇的父亲是一名蒸汽机车电焊工，母亲是一名列车乘务员。受父母影响，鲁勇自幼就对火车有着特殊的感情。别的孩子嫌弃“油包”脏兮兮，鲁勇却整天围着父亲转，看一次火车能高兴好几天。

一次，父亲带领技术革新小组成员发明了“自动化焊接”技术，大大提高了轮对检修效率，在单位小有名气。“母亲也跟着骄傲，我当时就想，要成为像父亲一样的人。”鲁勇说。

1982年，正在读高中的鲁勇向着梦想迈出了关键一步。得知铁路招收学徒工，他果断报名并在选拔中脱颖而出。这次来之不易的机会，鲁勇格外珍惜，上班跟师傅学，下班缠着父亲“开小灶”。水滴石穿。3年的学徒期，鲁勇仅用一年半就提前出徒，并实现两级跳，顺利考上了三级工，在同期入路的青工中崭露头角。谁家的收音机、电视机坏了，他都能修。就连一些刁钻的技术难题，鲁勇也能“手到病除”。

1994年，随着生产力布局调整，鲁勇所在车间整建制划归牡丹江电务段。钳工变身信号工，鲁勇钻研技术的热情依旧。当时，铁路技术装备还不完善，他就自己动手，优化、改造了扳手、螺丝刀等检修工具，工友们用起来事半功倍。他还下功夫探索提高车载设备检修质量、效率的方法。在别人学徒的年纪，鲁勇已成为车间技术“大咖”。因善于钻研、业务过硬，2008年，鲁勇成为牡丹江电务段车载设备车间检修工区工长。工区负责被司机视为“保命”设备的车载设备检修任务，新职工多、素质不均衡，青工提素尤为重要。

从蒸汽机车、内燃机车到电力机车，铁路技术装备水平大幅提升，安全保障能力全面提高。随着智能化新技术的广泛应用，鲁勇的创新之路也朝着高精尖发力。“第一代‘测试台’控制面板上的40多个孔都是我一个个手工钻出来锉平的。现在根本不用动手了，智能化硬件支撑有了翻天覆地的变化，创新想法也更容易实现了。”回忆起10多年来的工装变化，鲁勇言语中透着铁路人的自豪。

截至目前，鲁勇完成各类技术革新100多项，设计研制的各类试验台30多个，有的已更新换代10次以上。鲁勇说：“每当看到自己研发的设备投入应用取得良好成效后，都会有满

满的成就感。但冷静后，我会默默告诫自己，创新无止境，自己还得加把劲。只要单位有需要，我会一直努力下去。”

汗水与掌声如影随形。随着车载设备领域一个个技术瓶颈的打破，鲁勇先后获得了火车头奖章、黑龙江省五一劳动奖章等荣誉，并被评为“十大龙江工匠”。2020年，鲁勇摘取职业生涯最高荣誉——全国劳动模范。以鲁勇名字命名的“劳模创新工作室”先后被授予黑龙江省工人先锋号、火车头劳模创新工作室、黑龙江省劳模和工匠人才创新工作室、全国工人先锋号等荣誉称号。

心心在一艺，其艺必工；心心在一职，其职必举。鲁勇近40年的创新实践中处处都有“用心”的痕迹，他用心磨砺自己、用心探索技术高地创造了一个个常人眼里的“不可能”。

21世纪是信息化的时代，而测控技术、通信技术和计算机技术三大技术是信息技术发展的基础，其中传感器技术是测控技术的基础，也是现代科技的前沿技术，是国内外公认的最具有发展前途的高技术产业。曾有专家指出，传感器技术直接关系到我国自动化产业的发展形势，认为“传感器技术强，则自动化产业强”。由此可见传感器技术对自动化产业乃至整个国家工业建设的重要性。

传感器技术是一项综合性很强的技术学科，包含了材料学、力学、电学、磁学、微电子学、光学、声学、化学、生物学、精密机械、仿生学、测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术，乃至系统科学、人工智能、自动化技术等众多技术科学。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节，它的特点包括：微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化及网络化，是获取自然领域中信息的主要途径与手段。目前被广泛应用于航空航天、兵器、信息产业、机械、电力、能源、交通、冶金、石油、建筑、机器人、医学、家电、公共安全等领域，可以毫不夸张地说，从茫茫的太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化、智能化项目都离不开各种各样的传感器。铁路发展同样需要先进的技术装备作保障，在车辆运行安全防范预警及铁路其他装备上也使用了大量的不同种类的传感器，传感器技术已成为我国铁路发展不可缺少的一部分，传感器在工业部门的应用普及率已被国际社会作为衡量一个国家智能化、数字化、网络化的重要标志。因此，掌握传感器技术越来越重要。

【项目描述】

通过本项目学习，使学生掌握传感器基础知识，包括铁路常用传感器的工作原理、结构及特点。熟悉传感器的特性，分析传感器的测量电路，能根据测量目标正确选择传感器。

【知识目标】

- (1) 掌握传感器的基本概念、分类方法、作用及基本特性；
- (2) 掌握铁路常用传感器的工作原理、结构组成及特性。

【能力目标】

- (1) 能准确分析传感器测量电路的特点；

- (2) 能根据测量目标选用合适的传感器，并正确使用；
- (3) 具备实用传感器的应用和电路制作技能。

任务一 传感器基础知识



1-1 传感器
基础知识

【任务描述】

- (1) 掌握传感器的基本概念，学习传感器的组成及分类；
- (2) 分析传感器组成部分的作用及相互之间的关系；
- (3) 掌握传感器的静态特性，理解传感器的动态特性；
- (4) 熟悉传感器的标定方法。

【背景知识】

传感器实际上是一种功能块，其作用是将从外界的各种信号转换成电信号。它模仿人的五官（视、听、嗅、味、触）接受外界的信息，用计算机代替人脑控制自动化装置来代替人的劳动。因此可以说，传感器是人类五官的延长，又称之为“电五官”，如图 1-1 所示。

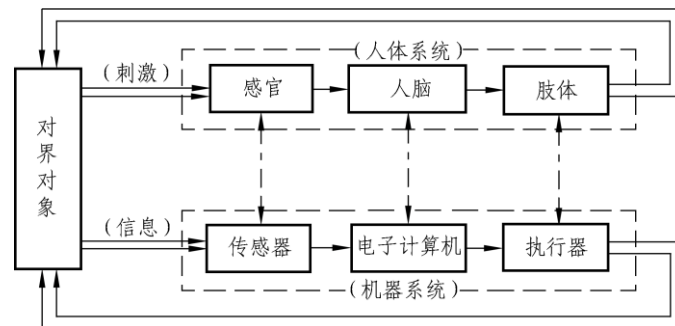


图 1-1 人体与机器人的对应关系

传感器所检测的信号近来显著地增加，因而其品种也极其繁多。为了对各种各样的信号进行检测、控制，就必须获得尽量简单易于处理的信号，这样的要求只有电信号能够满足。电信号能较容易地进行放大、反馈、滤波、微分、存贮、远距离操作等。因此，作为一种功能块的传感器可狭义地定义为：“将外界的输入信号变换为电信号的一类元件。”

一、传感器的定义及组成

1. 传感器的定义

传感器是一种检测装置，根据中华人民共和国国家标准，它的定义是：能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器是一种以一定的精确度把

被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。其包含以下几个方面的意思：

- (1) 传感器是测量装置，能完成检测任务。
- (2) 输入与输出之间有对应关系，且有一定的精确度。
- (3) 它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等。
- (4) 它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，其可以是气、光、电量，但主要是电量。

2. 传感器的组成

如图 1-2 所示，传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 部分组成。

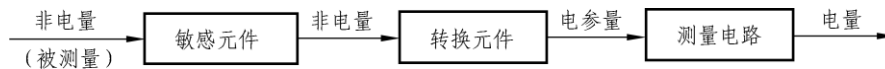


图 1-2 传感器组成框图

- (1) 敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量呈确定关系的某一物理量的元件。
- (2) 转换元件：以敏感元件的输出为输入，把输入转换成电路参数。
- (3) 测量电路：上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，仅由一个敏感元件（兼作转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有测量电路，如压电式加速度传感器。有些传感器，转换元件不止一个，要经过若干次转换。需要指出的是，并非所有的传感器都能包括敏感元件和转换元件，如热敏电阻、光电器件无敏感元件。

二、传感器的分类及要求

1. 传感器的分类

传感器种类繁多，主要有以下几种：

- (1) 按被测量分类：可分为位移、力、力矩、转速、振动、加速度、温度、压力、流量、流速等传感器。
- (2) 按测量原理分类：可分为电阻、电容、电感、光栅、热电偶、超声波、红外等传感器。
- (3) 按传感器输出信号的性质分类：
 - ① 模拟传感器：将被测量的非电学量转换成模拟电信号。
 - ② 数字传感器：将被测量的非电量转换成数字输出信号（包括直接和间接转换）。
 - ③ 膺数字传感器：将被测量的信号量转换成频率信号或短周期信号的输出（包括直接或间接转换）。
 - ④ 开关传感器：当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时，传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

2. 传感器的一般要求

由于各种传感器的原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，其技术指标也不可能相同，但是一般要求却基本上是共同的：

(1) 足够的容量——传感器的工作范围或量程足够大；具有一定的过载能力。

(2) 灵敏度高，精度适当——即要求其输出信号与被测信号呈确定的关系（通常为线性），且比值要大；传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。

(3) 响应速度快，工作稳定，可靠性好。

(4) 使用性和适应性强——体积小，质量轻，动作能量小，对被测对象的状态影响小；内部噪声小而又不易受外界干扰的影响；其输出力求采用通用或标准形式，以便与系统对接。

(5) 使用经济——成本低，寿命长，且便于使用、维修和校准。

当然，能完全满足上述性能要求的传感器是很少的。我们应根据应用的目的、使用环境、被测对象状况、精度要求和原理等具体条件做全面综合考虑。

三、传感器的特性

传感器所测量的物理量基本上分为两种形式：一种是静态（或准静态）的形式，这种形式的信号不随时间变化（或变化很缓慢）；另一种是动态（周期变化或瞬态）的形式，这种形式的信号是随时间而变化的。

由于输入物理量形式不同，传感器所表现出来的输出-输入特性也不同，因此存在静态特性和动态特性。不同传感器有着不同的内部参数，它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点，对测量结果的影响也各不相同。一个高精度传感器，必须同时具有良好的静态特性和动态特性，这样它才能完成对信号（或能量）无失真的转换。

以一定等级的仪器设备为依据，对传感器的动、静态特性进行实验检测，这个过程称为传感器的动、静态标定。

1. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时，传感器的输出量与输入量之间的关系。衡量传感器静态特性的重要指标包括：线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨率、漂移和阈值。因为这时输入量和输出量都和时间无关，所以它们之间的关系，即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程，或以输入量作横坐标，把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。

1) 线性度

传感器的线性度又称非线性误差，是指传感器实际特性曲线与拟合直线（有时也称理论直线）之间的最大偏差与传感器量程范围内的输出之百分比。如式（1-1）所示，且多取其正值。

$$\gamma_L = \frac{\Delta_{L\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 $\Delta_{L\max}$ ——最大非线性误差；

$y_{\max} - y_{\min}$ ——输出范围。

传感器在设计和使用过程中，我们希望非线性误差越小越好，即输出-输入关系接近一条直线，这是因为线性仪表的刻度是均匀的，容易标定，不容易引起读数误差。但实际使用中大多数传感器是非线性的，为了得到线性关系，常引入各种非线性补偿环节。现在多采用计算机来纠正检测系统的非线性误差。

2) 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下的输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入量变化 Δx 之比, 用 K 表示, 即

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中 K ——传感器对输入量变化的反应能力。

对于线性传感器, 灵敏度就是其静态特性的斜率, 即 $K = \frac{y}{x}$ 为常数, 而非线性传感器的灵敏度为一变量, 用 $K = \frac{dy}{dx}$ 表示。一般希望传感器的灵敏度高, 在满量程范围内是恒定的, 即传感器的输出-输入特性为直线。如位移传感器, 当位移量 Δx 为 1 mm, 输出量 Δy 为 0.3 mV 时, 灵敏度 K 为 0.3 mV/mm。

3) 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输出量减小)行程中输出输入曲线不重合称为迟滞, 如图 1-3 所示。也就是说对应于同一大小的输入信号, 传感器的输出信号大小不相等。一般由试验室方法测得迟滞误差, 并以满量程输出的百分数表示, 即

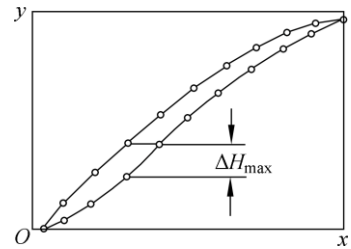


图 1-3 迟滞特性

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 ΔH_{\max} ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差也称回程误差, 回程误差常用绝对误差表示。它反映了传感器的机械部分和结构材料方面不可避免的弱点, 如轴承摩擦、间隙等。

4) 重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向做全量程连续多次变动时所得曲线不一致的程度。图 1-4 所示为校正曲线的重复特性。

正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$, 反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性偏差取这两个最大偏差中之较大者为 ΔR_{\max} , 再以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示, 即

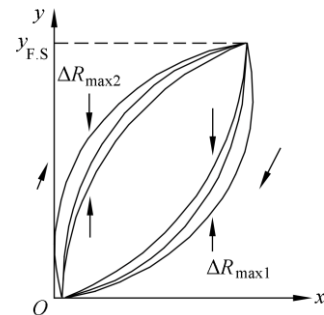


图 1-4 重复特性

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

5) 分辨力和阈值

分辨力是指传感器能检测到的最小的输入增量。分辨力可用绝对值表示, 也可用于满量程的百分数表示。

阈值: 当一个传感器的输入从零开始极缓慢地增加, 只有达到了某一最小值后, 才测得出输出变化, 这个最小值就称为传感器的阈值。事实上阈值是传感器在零点附近的分辨力。分辨力说明了传感器的最小的可测出的输入变量, 而阈值则说明了传感器的最小可测出的输

入量。阈值大的传感器其迟滞误差一定大，而分辨力未必差。

6) 稳定性和温度稳定性

稳定性是指传感器在长时间工作的情况下输出量发生的变化。有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。测试时先将传感器输出调至零点或某一特定点，相隔 4 h、8 h 或一定的工作次数后，再读出输出值，前后两次输出值之差即为稳定性误差。温度稳定性也称为温度漂移，是指传感器在外界温度变化下输出量发生的变化。测试时先将传感器置于一定的温度下（如室温），将其输出调至零点或某一特定点，使温度上升或下降一定的度数（如 5 °C 或 10 °C）再读出输出值，前后两次输出值之差即为温度稳定性误差。

7) 漂 移

漂移指在一定时间间隔内，传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移（时漂）和温度漂移（温漂）。时漂是指在规定条件下，零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温漂为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

2. 传感器的动态特性

在实际测量中，大量的被测量是随时间变化的动态信号，这就要求传感器的输出不仅能精确地反映被测量的大小，还要正确地再现被测量随时间变化的规律。

动态特性是指传感器的输出对随时间变化的输入量的响应特性。一个动态特性好的传感器，其输出将再现输入量的变化规律，即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性的环节外，由于传感器固有因素的影响，输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数，这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。研究传感器的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施。

由于绝大多数传感器都可以简化为一阶或二阶系统，因此一阶和二阶传感器是最基本的。研究传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面，采用瞬态响应法和频率响应法分析。对于加速度等动态测量的传感器必须进行动态特性的研究。这里不再详细讲解。

3. 传感器的标定

传感器的标定是通过试验建立传感器输入量与输出量之间的关系。同时，确定出不同使用条件下的误差关系。传感器的标定工作可分为静态标定和动态标定。

1) 静态标定

(1) 静态标准条件。没有加速度、振动、冲击（除非这些参数本身就是被测物理量），环境温度一般为室温（ 20 ± 5 ）°C、相对湿度不大于 85%，大气压力为（ 101 ± 7 ）kPa 的情况。

(2) 标定仪器设备精度等级的确定。对传感器进行标定，是根据试验数据确定传感器的各项性能指标，实际上也是确定传感器的测量精度。所用的测量仪器的精度至少要比被标定的传感器的精度高一个等级。这样，通过标定确定的传感器的静态性能指标才是可靠的，所确定的精度才是可信的。

(3) 静态指标系统一般由以下几部分组成：

- ① 被测物理量标准发生器，如测力机。
- ② 被测物理量标准测试系统。如标准力传感器、压力传感器、标准长度——量规等。
- ③ 被标定传感器所配接的信号调节器和显示、记录器等。所配接的仪器精度应是已知的，

也作为标准测试设备。

(4) 各种传感器的标定方法不同,常用力、压力、位移传感器标定。具体标定步骤如下:

- ① 将传感器测量范围分成若干等间距点。
- ② 根据传感器量程分点情况,输入量由小到大逐渐变化,并记录各输入输出值。
- ③ 再将输入值由大到小慢慢减少,同时记录各输入输出值。
- ④ 重复上述两步,对传感器进行正反行程多次重复测量,将得到的测量数据用表格列出或绘制曲线。

⑤ 进行测量数据处理,根据处理结果确定传感器的线性度、灵敏度、滞后和重复性等静态特性指标。

2) 动态标定

一些传感器除了静态特性必须满足要求外,其动态特性也需要满足要求。因此,在进行静态校准和标定后还需要进行动态标定,以便确定它们的动态灵敏度、固有频率和频响范围等。传感器进行动态标定时,需有一标准信号对它激励,常用的标准信号有二类:一是周期函数,如正弦波等;另一是瞬变函数,如阶跃波等。用标准信号激励后得到传感器的输出信号,经分析计算、数据处理、便可决定其频率特性,即幅频特性、阻尼和动态灵敏度等。

【任务自检】

1. 什么是传感器?它由哪几部分组成?分析各部分的作用及相互间的关系。
2. 分析传感器技术迅速发展的原因。
3. 分小组讨论目前铁道车辆上传感器的使用情况。
4. 传感器的静态特性指什么?衡量它的性能指标主要有哪些?
5. 传感器的动态特性指什么?常用的分析方法有几种?
6. 传感器的标定有几种?为什么要对传感器进行标定?

任务二 电阻应变式传感器

【任务描述】

- (1) 掌握电阻应变式传感器的工作原理、结构组成;
- (2) 分析讨论电阻应变式传感器不同测量电路的特点;
- (3) 能独立分析电阻应变式传感器的应用实例。



1-2 电阻应变式
传感器

【背景知识】

电阻应变式传感器是利用测量材料的电阻应变效应制造的一种测量微小变化量(机械)的传感器。它的基本原理是将被测量的变化转换成传感器元件电阻值的变化,再经过转换电

路变成电信号输出。其类型很多，常用来测量力、压力、位移、应变、扭矩、加速度等，是目前使用最广泛的传感器之一。

电阻应变式传感器主要由弹性敏感元件、电阻应变片及测量转换电路等组成。弹性敏感元件在感受被测量时发生变形，其表面产生应变。粘结在其表面上的电阻应变片将随着弹性敏感元件产生应变，因此电阻应变片的电阻值产生相应的变化。通过测量电阻应变片的电阻值变化，就可以确定被测量的大小了。其中，弹性敏感元件的作用就是传感器组成中的敏感元件，要根据被测参数来设计或选择它的结构形式。电阻应变片的作用就是传感器中的转换元件，是电阻应变式传感器的核心元件。

应变片具有体积小、价格便宜、准确度高、频率响应好等优点，被广泛应用于工程测量及科学实验中。

一、应变片的工作原理

导电材料的电阻与材料的电阻率、几何尺寸（长度与截面面积）有关，在外力作用下发生机械变形，引起该导电材料的电阻值发生变化，这种现象称为电阻应变效应。

设有一段长为 L ，截面面积为 A ，半径为 r ，电阻率为 ρ 的导体（如金属丝），它的电阻值 R 可表示为

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{\pi r^2} \quad (1-5)$$

当沿金属丝的长度方向作用均匀拉力（或压力）时，上式中 ρ 、 r 、 L 都将发生变化（如图 1-5 所示），从而导致电阻值 R 发生变化。例如金属丝受拉时， L 将变长、 r 将变小，均导致 R 变大；又如，某些半导体受拉时， ρ 将变大，导致 R 变大。通过对式（1-5）两边取对数后再作微分，即可求得其电阻相对变化：

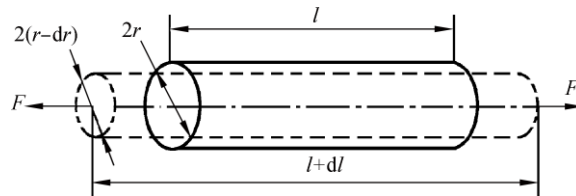


图 1-5 导体受拉伸后的参数变化

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-6)$$

式中 μ ——金属材料的泊松系数；

ε_x ——材料的轴向应变。

对于金属导体或半导体，上式中右末项电阻率相对变化的受力效应是不一样的，分别讨论如下：

1. 金属材料的电阻应变效应

勃底特兹明通过实验研究发现，金属材料的电阻率相对变化与其体积相对变化之间有如下关系：

$$\frac{dR}{R} = [(1+2\mu) + C(1-2\mu)]\varepsilon_x = K_m \varepsilon_x \quad (1-7)$$

式中 $K_m = (1+2\mu) + C(1-2\mu)$ ——金属丝材的应变灵敏系数（简称灵敏系数）。

上式表明：金属材料的电阻相对变化与其线应变成正比。这就是金属材料的应变电阻效应。

对于金属材料， $K_0 = K_m = (1+2\mu) + C(1-2\mu)$ 。可见它由两部分组成：前部分为受力后金属丝几何尺寸变化所致，一般金属 $\mu \approx 0.3$ ，因此 $(1+2\mu) \approx 1.6$ ；后部分为电阻率随应变而变的部分。以康铜为例， $C \approx 1$ ， $C(1-2\mu) \approx 0.4$ ，所以此时 $K_0 = K_m \approx 2.0$ 。显然，金属丝材的应变电阻效应以结构尺寸变化为主，对其他金属或合金， $K_m = 1.8 \sim 4.8$ 。

2. 半导体材料的电阻应变效应

史密兹等学者很早发现，锗、硅等单晶半导体材料受到应力作用时，其电阻率会发生变化，这种现象就称为压阻效应。半导体材料的压阻效应：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi \cdot E\varepsilon_x \quad (1-8)$$

式中 σ ——作用于材料的轴向应力；

π ——半导体材料在受力方向的压阻系数；

E ——半导体材料的弹性模量。

同样，将式（1-8）代入式（1-6），并写成增量形式可得

$$\frac{\Delta R}{R} = [(1+2\mu) + E\pi]\varepsilon_x = K_m \varepsilon_x \quad (1-9)$$

式中 $K_m = 1+2\mu + \pi E$ ——半导体材料的应变灵敏系数。

实际情况并非如此简单。当硅膜片承受外应力时，必须同时考虑其纵向（扩散电阻长度方向）压阻效应和横向（扩散电阻宽度方向）压阻效应。由于扩散型力敏传感器的扩散电阻厚度（即扩散深度）只有几微米，其垂直于膜片方向的应力远比其他两个分量小而可忽略。

综合式（1-7）和式（1-9）可得半导体丝材的应变电阻效应为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon_x \quad (1-10)$$

式中 K_0 ——半导体丝材的灵敏系数。

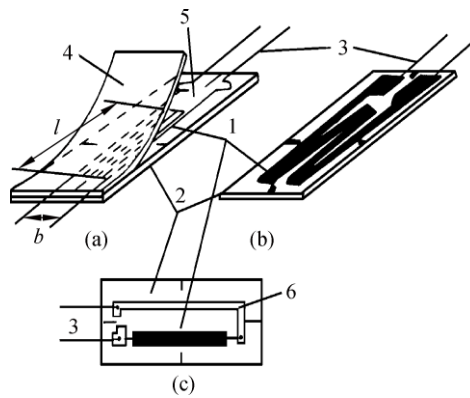
对于半导体材料 $K_0 = K_s = (1+2\mu) + \pi E$ 。它也由两部分组成：前部分同样为尺寸变化所致；后部分为半导体材料的压阻效应所致，而且 $\pi E \gg (1+2\mu)$ ，因此半导体丝材的 $K_0 = K_s \approx \pi E$ 。可见，半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。通常 $K_s = (50 \sim 80) K_m$ 。

二、应变片的结构种类与粘贴

1. 电阻应变片的结构

电阻应变片的结构形式很多，但其主要组成部分基本相同。图 1-6 给出了丝式、箔式和

半导体 3 种典型应变片的结构形式及其组成。



(a) 丝式；(b) 箔式；(c) 半导体

1—敏感栅；2—基底；3—引线；4—盖层；5—粘结剂；6—电极。

图 1-6 典型应变计的结构及组成

电阻丝应变片是用直径为 0.025 mm 具有高电阻率的电阻丝制成的。为了获得高的阻值，将电阻丝排列成栅网状，称为敏感栅，并粘贴在绝缘的基片上，电阻丝的两端焊接引线。敏感栅上面粘贴有保护用的覆盖层。如图 1-6 所示。

(1) 敏感栅：应变计中实现应变-电阻转换的敏感元件。它通常由直径为 0.015 ~ 0.05 mm 的金属丝绕成栅状，或用金属箔腐蚀成栅状。图中 l 表示栅长， b 表示栅宽。其电阻值一般在 100 Ω 以上。

(2) 基底：为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置，通常用粘结剂将其固结在纸质或胶质的基底上。应变计工作时，基底起着把试件应变准确地传递给敏感栅的作用。为此，基底必须很薄，一般为 0.02 ~ 0.04 mm。有用专门的薄纸制成的基片称为纸基。有用粘结剂和有机树脂薄膜制成的胶基。

(3) 引线：它起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径 0.1 ~ 0.15 mm 的低阻镀锡铜线，并用钎焊与敏感栅端连接。

(4) 盖层：用纸、胶做成覆盖在敏感栅上的保护层；起着防潮、防蚀、防损等作用。

(5) 粘结剂：在制造应变计时，用它分别把盖层和敏感栅固结于基底；在使用应变计时，用它把应变计基底再粘贴在试件表面的被测部位。因此它也起着传递应变的作用。

2. 电阻应变片的种类

1) 金属丝式应变片

金属丝式应变片有回线式和短接式二种，如图 1-7 所示。

回线式应变片是将电阻丝绕制成敏感栅粘结在各种绝缘基底上而制成的，它是一种常用的应变片。其敏感栅材料直径在 0.012 ~ 0.05 mm，以 0.025 mm 左右为最常用。其基底很薄（一般在 0.03 mm 左右），粘贴性能好，能保证有效的传递应变。引线多用 0.15 ~ 0.30 mm 直径的镀锡铜线与敏感栅相连接。其制作简单，性能稳定，成本低，易粘贴，但其应变横向效应较大。常见的回线式应变片构造如图 1-7 (a) 所示。

短接式应变片两端用直径比栅线直径大 5~10 倍的镀银丝短接起来而构成。优点是克服了横向效应，但制造工艺复杂。常用材料：康铜、镍铬铝合金、铁铬铝合金以及铂、铂钨合金等。短接式应变片构造如图 1-7 (b)(c) 所示。

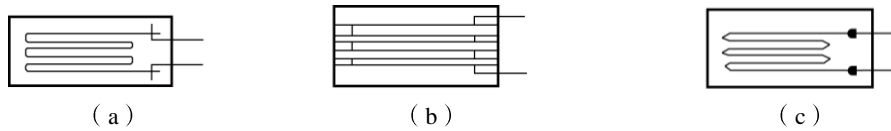


图 1-7 丝式应变片结构

2) 金属箔式应变片

它是利用照相制版或光刻技术将厚 0.003~0.01 mm 的金属箔片制成所需图形的敏感栅，也称为应变花，如图 1-8 所示。它具有很多优点：

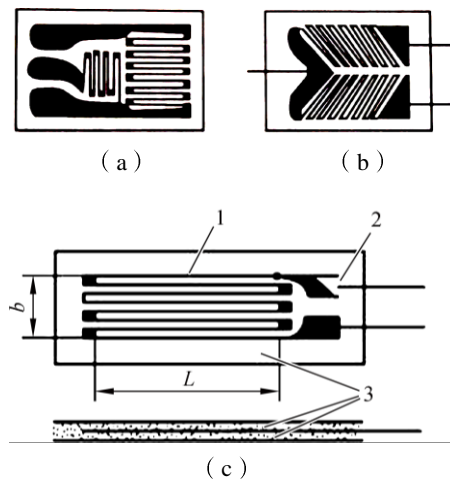


图 1-8 金属箔式应变片

- ① 可制成多种复杂形状尺寸准确的敏感栅，其栅长 l 可做到 0.2 mm，以适应不同要求；
- ② 与被测件粘贴面积大；
- ③ 散热条件好，允许电流大，提高了输出灵敏度；
- ④ 横向效应小，可以忽略。
- ⑤ 蠕变和机械滞后小，疲劳寿命长。

缺点：电阻值的分散性比金属丝的大，有的相差几十欧姆，需做阻值调整。在常温下，金属箔式应变片已逐步取代了金属丝式应变片。

3) 金属薄膜应变片

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 μm 以下的金属电阻材料薄膜的敏感栅，最后加上保护层。

优点：应变灵敏系数大，允许电流密度大，工作范围广，可达 $-197 \sim 317\text{ }^\circ\text{C}$ 。

缺点：难于控制电阻与温度和时间的变化关系。

4) 半导体应变片

半导体应变片的工作原理是基于半导体材料的电阻率随作用应力而变化的所谓“压阻效

应”。所有材料在某种程度上都呈现压阻效应，但半导体的这种效应特别显著，能直接反映出很微小的应变。

常见的半导体应变片是用锗和硅半导体材料作为敏感栅，一般为单根状。根据压阻效应，半导体和金属丝一样可以把应变转换成电阻的变化。

半导体应变片的优点是尺寸、横向效应、机械滞后都很小，灵敏系数极大，因而输出也大，可以不需放大器直接与记录仪器连接，使得测量系统简化。它的缺点是电阻值和灵敏系数随温度稳定性差，测量较大应变时非线性严重；灵敏系数随受拉或压而变，且分散度大，一般在 3% ~ 5%，因而使得测量结果有 \pm (3% ~ 5%) 的误差。

3. 电阻应变片的粘贴

应变片是用粘结剂粘贴到被测件上的，粘结剂形成的胶层必须迅速地将被测件的应变传递到敏感栅上。粘结剂的性能及粘贴工艺的质量直接影响着应变片的工作特性，如零漂、蠕变、滞后、灵敏系数等。可见选择粘结剂和正确的粘结工艺与应变片的测量精度有着极其重要的关系。

1) 粘结剂的选择

粘结剂的主要功能是要在切向准确传递试件的应变。因此，它应具备：与试件表面有很高的粘结强度，一般抗剪强度应大于 9.8×10^6 Pa；弹性模量大，蠕变、滞后小，温度和力学性能参数要尽量与试件匹配；抗腐蚀，涂刷性好，固化工艺简单，变形小，使用简便，可长期贮存；电绝缘性能、耐老化与耐温耐湿性能均良好。一般情况下，粘贴与制作应变计的粘结剂是可以通用的。但是，粘贴应变计时受到现场加温、加压条件的限制。通常在室温工作的应变计多采用常温、指压固化条件的粘结剂；非金属基应变计若用在高温工作时，可将其先粘贴在金属基底上，然后再焊接在试件上。

2) 应变片的粘贴

准备：试件——在粘贴部位的表面，用砂布在与轴向成 45° 的方向交叉打磨至 R_a 为 $6.3 \mu\text{m}$ → 清洗净打磨面 → 划线，确定贴片坐标线 → 均匀涂一薄层粘结剂作底；应变计——外表和阻值检查 → 刻划轴向标记 → 清洗。

涂胶：在准备好的试件表面和应变计基底上均匀涂一薄层粘结剂。

贴片：将涂好胶的应变计与试件，按坐标线对准贴上 → 用手指顺轴向滚压，去除气泡和多余胶液 → 按固化条件固化处理。

复查：贴片偏差应在许可范围内；阻值变化应在测量仪器预调平范围内；引线和试件间的绝缘电阻应大于 $200 \text{ M}\Omega$ 。

接线：根据工作条件选择好导线，然后通过中介接线片（柱）把应变计引线和导线焊接，并加以固定。

防护：在安装好的应变计和引线上涂以中性凡士林油、石蜡（短期防潮），或石蜡-松香-黄油的混合剂（长期防潮），或环氧树脂、氯丁橡胶、清漆等（防机械划伤）作防护用，以保证应变计工作性能稳定可靠。常用的粘结剂类型：硝化纤维素型、氰基丙烯酸型、聚酯树脂型、环氧树脂类和酚醛树脂类等。

粘贴工艺：被测件粘贴表面处理，贴片位置的确定、贴片、干燥固化、贴片质量检查、引线的焊接与固定，以及防护与屏蔽等。

三、应变片的测量转换电路

应变片的电阻变化值很微弱，用万用表无法测量，为了便于显示和控制需将变化的阻值转换成电信号输出，所以通常采用电桥作为测量电路，如图 1-9 所示。

$$\begin{aligned}
 U_o &= I_1 R_1 - I_2 R_4 \\
 &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_i - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i \\
 &= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (1-11)
 \end{aligned}$$

测量前，应将电桥调平衡，在电桥输出端 A 和 C 之间接一检流计调桥臂电阻使检流计指示为 0，输出电压 $U_o = 0$ ，电桥达到平衡状态。

电桥的平衡条件为 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

1. 单臂电桥

单臂电桥的电路形式如图 1-10 所示， R_1 为应变片。初始时刻， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，电桥平衡， $U_o = 0 \text{ V}$ ，当应变片 R_1 受力所产生的应变变化为 ΔR ，根据式 (1-11)，其输出电压为

$$\begin{aligned}
 U_o &= \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_i \\
 &= \frac{R \Delta R}{2R(2R + \Delta R)} U_i
 \end{aligned}$$

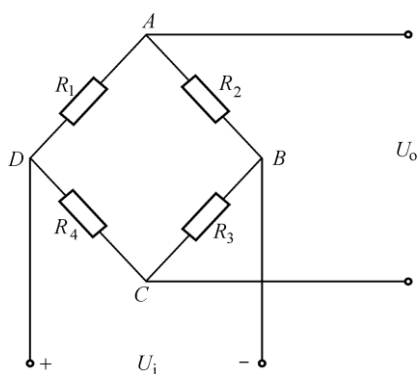


图 1-9 桥式测量电路

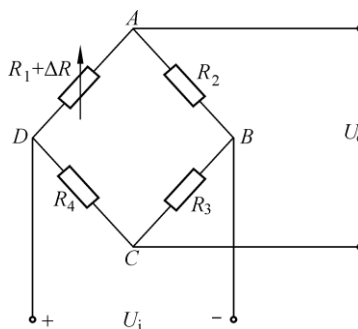


图 1-10 单臂电桥

通常情况下， $\Delta R \ll R$ ，所以 $U_o = \frac{U_i}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$ 。

因此，单臂电桥的灵敏度 $K = \frac{U_i}{4}$ 。

2. 双臂半桥

双臂半桥的电路形式如图 1-11 所示， R_1 和 R_2 为相同规格的应变片。 R_1 和 R_2 接成差动形式，即 R_1 和 R_2 电阻变化相同但方向相反。根据式 (1-11)，输出电压为

$$U_o = \frac{U_i}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

因此，双臂半桥的灵敏度 $K = \frac{U_i}{2}$ 。

3. 全桥电路

全桥电路的形式如图 1-12 所示， R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 为相同规格的应变片，并接成差动形式，即 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 电阻变化大小相同，但是 R_1 、 R_3 与 R_2 、 R_4 的变化方向相反。根据式 (1-11)，输出电压：

$$U_o = U_i \frac{\Delta R}{R}$$

因此，全桥电路的灵敏度 $K = U_i$ 。

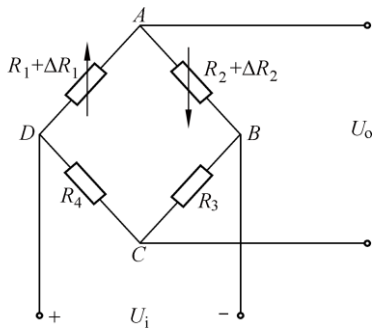


图 1-11 双臂半桥

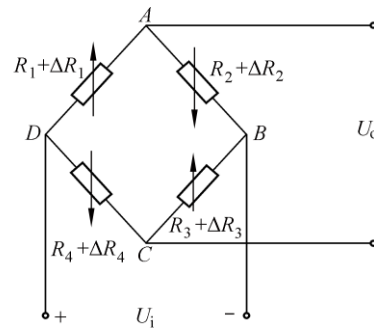


图 1-12 全桥电路

综上所述，通过对比 3 种测量电路，我们得出如下结论：

- (1) 直流电桥的输出电压与被测应变呈线性关系。
- (2) $K_{\text{全桥}} = 2K_{\text{半桥}} = 4K_{\text{单臂}}$ 。
- (3) 半桥与全桥电路能够较好地克服温漂信号。

【任务实施】

应变片的应用十分广泛。它除了可以测量应变外，还可以测量应力、弯矩、扭矩、加速度及位移等物理量。电阻应变片的应用分为两大类：第一类是将应变片粘贴于某些弹性体上，并将其接到测量转换电路，这样就构成测量各种物理量的专用应变式传感器。第二类是将应变片贴于被测试件上，然后将其接到应变仪上就可直接从应变仪上读取被测试件的应变。

1. 应变式传感器

1) 应变式测力传感器

如图 1-13 所示为应变式测力传感器的几种形式。

悬臂梁是一端固定，一端自由的弹性敏感元件。它的特点是灵敏度比较高，所以多用于较小力的测量。例如，民用电子秤就多采用悬臂梁。当悬臂梁末端受力时，悬臂梁上产生剪力应变，上表面靠近固定端的 R_1 以及下表面靠近自由端的 R_3 产生拉应变；反之， R_2 、 R_4 产

生压应变，4个应变片的应变大小相等，符号依此相同，测量电桥的输出与力 F 成正比。

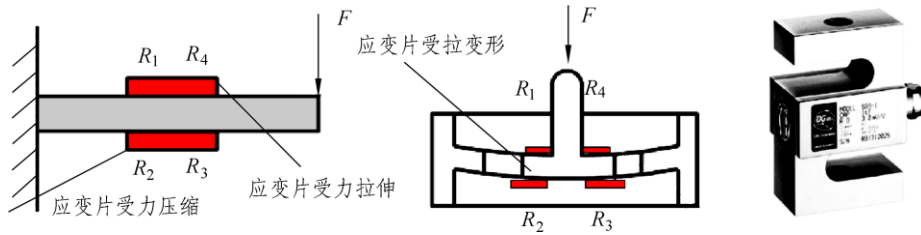


图 1-13 应变式测力传感器

2) 应变式荷重传感器

测力和称重传感器有较大一部分采用应变式荷重传感器，如图 1-14 所示。

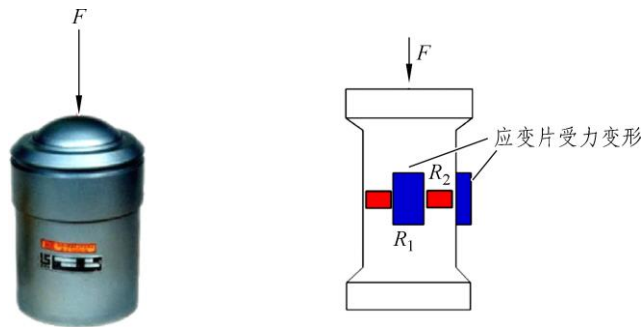


图 1-14 荷重传感器

荷重传感器是应力计中最具有代表性的压力传感器，它可以用来测量车辆的压力（或重量）等。应变片粘贴在钢制圆柱（称为等截面轴，可以是实心圆柱，也可以是空心薄壁圆筒）的表面。在力的作用下，等截面轴产生应变，可获得较大的输出电压。

例如，车辆运行品质轨旁动态监测系统（TPDS）是集列车运行状态监测、超偏载监测、踏面擦伤监测等功能为一体的列车运行状态地面安全监测系统，可实时在线监测运行中列车轮轨间动力学参数。系统以列车运行过程中轮对与钢轨之间的动力学关系为依据，将钢轨作为传递力的弹性体，通过传感器内置的应变片感应钢轨的形变，引起应变片电阻变化导致惠斯通电桥失衡，传感器产生电压信号输出，依据传感器的测量值与钢轨形变的对应关系，精确地测量钢轨相应位置所受垂向力和横向力的大小，进而计算出货物列车的轮重、轴重、脱轨系数、超偏载信息以及踏面损伤程度等列车状态信息。

3) 压阻式传感器

压阻式传感器是利用半导体材料的压阻效应和集成电路工艺制成的传感器。由于它没有可动部分，所以有时也称为固态传感器。它具有灵敏度高、动态响应快、测量精度高、稳定性好、工作温度范围宽、体积小和便于批量生产等特点，因此得到了广泛的应用。它在工业中多用于与应变有关的力、重力、压力、压差、真空度等物理量的测量。经过适当的换算，也可用于液位、流量、加速度、振动等参量的测量。

(1) 压力测量。

固态压阻式压力传感器的结构如图 1-15 所示。传感器硅膜片两边有两个压力腔。一个是和被测压力相连接的高压腔，另一个是低压腔，通常和大气相通。当膜片两边存在压力差时，

膜片上各点存在应力。膜片上的 4 个电阻在应力作用下，阻值发生变化，电桥失去平衡，其输出的电压与膜片两边压力差成正比。

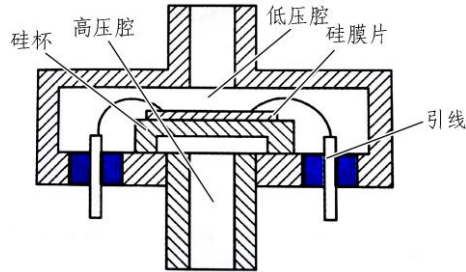


图 1-15 固态压阻式压力传感器结构

(2) 液位测量。

如图 1-16 所示，压阻式压力传感器安装在不锈钢壳体内，并由不锈钢支架固定放置在液体底部，传感器的高压侧进气孔与液体相通。安装高度 h_0 处的水压 $p_1 = \rho gh_1$ 。传感器的低压侧进气口通过一根橡胶“背压管”与外界仪表接口相连接。这种压阻式液位传感器安装方便，适用于几米到几十米混有大量污物、杂质的水或其他液体的液位测量。

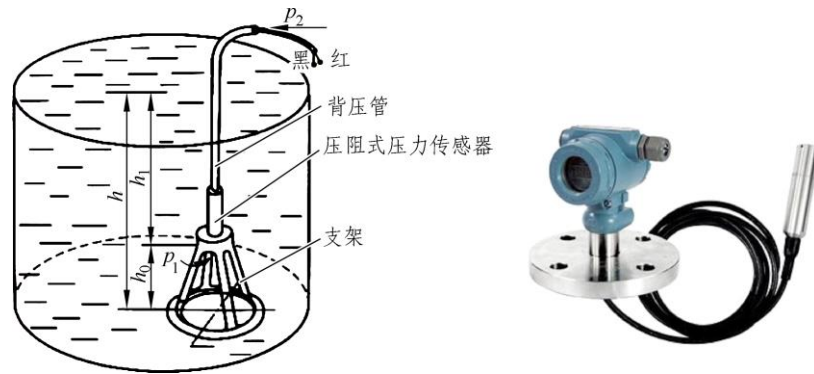


图 1-16 压阻式液位传感器

2. 电阻应变仪

电阻应变仪是专门用来测量电阻应变片应变量的仪器。当被测量是被测试件的应变、应力等物理量时，可以将应变片粘贴在被测物的被测点上，然后用引线将其接到应变仪的接线端子上。读取应变仪的读数，就可以直接得到被测点的应变，经适当换算，还可以得到应力等参数。例如，斜拉桥上的斜拉绳应变测试；人体骨盆和下肢受力、应变测试，为运动员训练、骨折预防和治疗提供了科学依据。

【任务自检】

1. 什么是应变效应？利用应变效应解释金属电阻应变片的工作原理。
2. 分析比较金属电阻应变效应和半导体压阻效应特点。
3. 什么是直流桥式电路？该类型电路分为几种？每种类型各有什么不同？

4. 有一金属应变片，初始电阻为 $R = 100 \Omega$ ，其灵敏度 $K = 2.5$ ，设工作时其应变为 $1\ 200 \mu\epsilon$ ，则 ΔR 为多少？

任务三 霍尔式传感器



1-3 认识霍尔传感器

【任务描述】

- (1) 掌握霍尔式传感器的工作原理，基本结构及主要技术参数；
- (2) 分析霍尔式传感器的基本测量电路及补偿方法；
- (3) 分析霍尔式传感器的应用实例。

【背景知识】

霍尔式传感器简称霍尔元件，是目前国内外应用最为广泛的一种磁敏传感器，它是利用半导体材料的霍尔效应制成的，可以做得很小（几个平方毫米），用于测量地球磁场，制成电罗盘；它还用来制作特斯拉计、钳形电流表、接近开关、无刷直流电动机等；这种传感器广泛应用于自动控制 and 电磁检测等各个领域。它的最大特点是非接触测量。

一、霍尔效应及霍尔元件

1. 霍尔效应

半导体薄片置于磁感应强度为 B 的磁场中，磁场方向垂直于薄片，当有电流 I 流过薄片时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势 E_H ，这种现象称为霍尔效应，该电动势称为霍尔电动势，半导体薄片称为霍尔元件，如图 1-17 (a) 所示。作用在半导体薄片上的磁场强度 B 越强，霍尔电势也就越高。

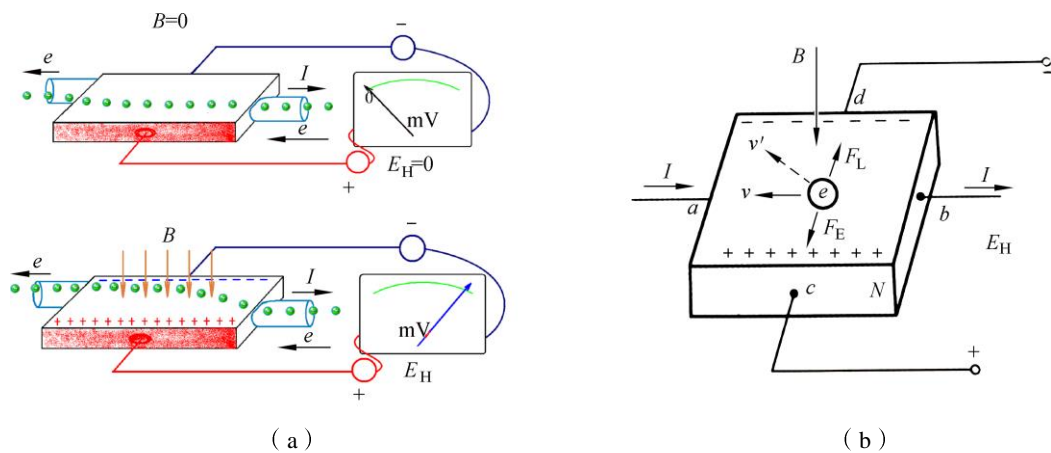


图 1-17 霍尔效应原理图

霍尔元件的工作原理见图 1-17 (b)，在激励电流端通入电流 I ，并将薄片置于磁场中。设该磁场垂直于薄片，磁感应强度为 B ，这时电子（运动方向与电流方向相反）将受到洛伦兹力 F_L 的作用，向内侧偏移，该侧形成电子的堆积，从而在薄片的 c 、 d 产生电场 E 。从图 1-17 (b) 可以看出，这两种力的方向恰好相反。电子积累越多， F_E 也越大，而洛伦兹力保持不变。最后当 $|F_L| = |F_E|$ 时，电子的积累达到动态平衡。这时，在半导体薄片 c 、 d 方向的断面之间建立的电动势 E_H 就是霍尔电动势（简称霍尔电势）。

霍尔电势 E_H 可用下式表示：

$$E_H = \frac{R_H IB}{d} = K_H IB \quad (1-12)$$

其中， $R_H = \frac{1}{ne} = \rho\mu$ 为霍尔常数，霍尔元件的灵敏度 $K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{1}{ned}$ （ n ——电子浓度； d ——薄片厚度； e ——电子的电荷量； ρ ——电阻率； μ ——电子迁移率）。

从式 (1-12) 中可知，霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率的乘积。若要霍尔效应强，则希望有较大的霍尔系数 R_H ，因此，要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。一般金属材料载流子迁移率很高，但电阻率很小；而绝缘材料电阻率极高，但载流子迁移率极低，故只有半导体材料适合制造霍尔片。

2. 霍尔元件

霍尔元件的结构很简单，它是由霍尔片、4 根引线和壳体组成的一块半导体单晶薄片（一般为 $4\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ ），如图 1-18 (a) 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，引出 4 根引线：1、1' 两根引线加激励电压或电流，称激励电极（控制电极）；2、2' 引线为霍尔输出引线，称霍尔电极。电极宽度与基片长度之比要小于 0.1，否则影响输出。霍尔元件的壳体是用非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装的。在电路中，霍尔元件一般可用两种符号表示，如图 1-18 (b) 所示。

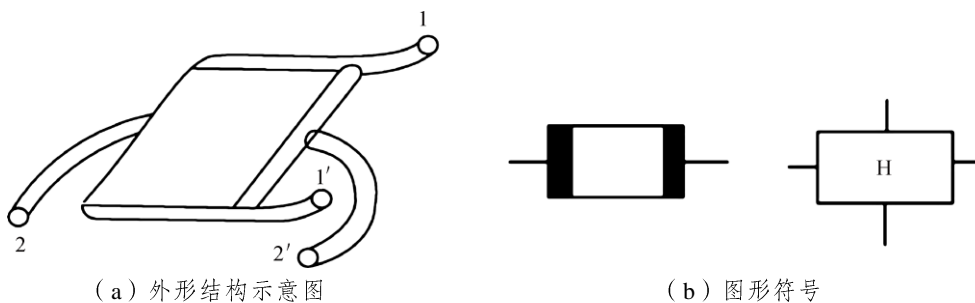


图 1-18 霍尔元件结构图

目前常用的霍尔元件材料有锗、硅、砷化钢、铋化钢等半导体材料。其中 N 型锗易于加工制造，其霍尔系数、温度性能和线性度都很好。N 型硅的线性度最好，其霍尔系数、温度性能同 N 型锗。铋化钢对温度最敏感，尤其是低温范围内温度系数大，但在室温时其霍尔系数较大。砷化钢的霍尔系数较小，温度系数也较小，输出特性线性度好。

结论：

(1) 普通霍尔元件为四端子器件，两组端子分别为霍尔电势输出端和输入电流控制端，集成霍尔元件为三端子器件。

- (2) 不能用导体或绝缘材料做成霍尔元件。
- (3) 霍尔元件不能做得太薄，否则会降低机械强度。
- (4) P型半导体材料与N型半导体材料做成的霍尔元件，其霍尔输出电势极性相反。
- (5) 当磁场与半导体薄片平面法线方向的夹角为 β 时，霍尔输出电势 $E_H = K_H IB \cos\beta$ 。

二、霍尔传感器的技术参数

1. 额定控制电流 I_c 与最大控制电流 I_{cm}

霍尔元件在空气中产生 10°C 的温升时所施加的控制电流值称为额定控制电流 I_c 。在相同的磁场感应强度下， I_c 值较大则可获得较大的输出电压。在霍尔元件做好之后，限制 I_c 的主要因素是散热条件。一般锗元件最大允许温升为 $\Delta T_m < 80^\circ\text{C}$ ，硅元件 $\Delta T_m < 175^\circ\text{C}$ 。当霍尔元件的温升达到 ΔT_m 时的 I_c 就是最大控制电流 I_{cm} 。

2. 灵敏度 K_H

霍尔元件的灵敏度定义为单位控制电流和单位磁感应强度下，霍尔电势输出端开路时的电势值，其单位为 $\text{mV}/(\text{mA}\cdot\text{T})$ ，它反映了霍尔元件本身所具有的磁电转换能力，一般希望它越大越好。公式如下：

$$K_H = \frac{E_H}{IB} \quad (1-13)$$

除 K_H 以外，霍尔元件还有磁灵敏度、电路灵敏度和电势灵敏度等技术指标。

3. 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

霍尔片中两个控制电极间的电阻称为输入电阻 R_i ，两个霍尔电极间的电阻称为输出电阻 R_o 。一般 R_o 、 R_i 为几欧姆到几百欧姆，通常 $R_o > R_i$ ，但二者相差不大，使用时不能搞错。

4. 不等位电势 E_M 和不等位电阻 R_M

当 $I \neq 0$ 而 $B = 0$ 时，理论上应有 $E_H = 0$ 。但在实际中由于两个霍尔电极安装位置不对称或不在同一等电位面上，半导体材料的电阻率不均匀或几何尺寸不均匀，以及控制电极接触不良等原因，使得当 $I \neq 0$ 、 $B = 0$ 时， $E_H \neq 0$ 。此时的 E_H 值为不等位电势 E_M 。

不等位电势 E_M 与额定控制电流 I_c 之比，称为不等位电阻 R_M ，即

$$R_M = \frac{U_M}{I_c} \quad (1-14)$$

三、测量电路和误差分析

1. 霍尔传感器的测量电路

霍尔元件的基本测量电路如图 1-19 所示。控制电流 I 由电源 E 提供， R 是调节电阻，用以根据要求改变 I 的大小，霍尔电势输出的负载电阻 R_L ，可以是放大器的输入电阻或表头内阻等。所施加的外电场 B 一般与霍尔元件的平面垂直。控制电流也可以是交流量。由于建立霍尔效应所需的时间短，所以控制电流的频率可高达 10^9 Hz 以上。



1-4 霍尔传感器的测量电路及应用

2. 霍尔传感器电路的误差分析

霍尔元件对温度的变化很敏感，因此，霍尔元件的输入电阻、输出电阻、灵敏度等将受到温度变化的影响，从而给测量带来较大的误差。为了减少测量中的温度误差，除了选用温度系数小的霍尔元件或采取一些恒温措施外，也可使用以下的温度补偿办法。

1) 恒流源供电

恒流源补偿电路如图 1-20 所示。

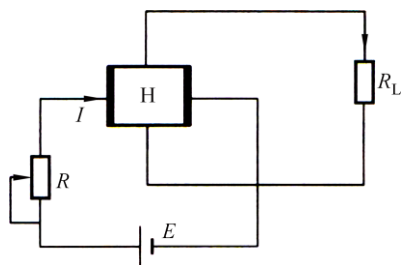


图 1-19 霍尔元件的基本测量电路

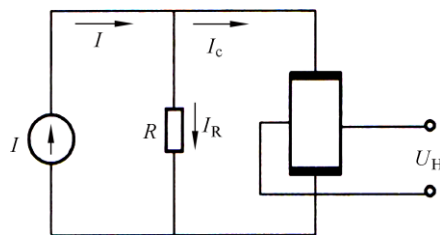


图 1-20 恒流源温度补偿电路

2) 采用热敏元件

对于由温度系数较大的半导体材料制成的霍尔元件，采用图 1-21 所示的温度补偿电路，图中 R_t 是热敏元件（热电阻或热敏电阻）。图 1-21 (a) 是在输入回路进行温度补偿的电路，即当温度变化时：用 R_t 的变化来抵消霍尔元件的乘积灵敏度 K_H 和输入电阻 R_i 变化对霍尔输出电势的 E_H 影响；图 1-21 (b) 则是在输出回路进行温度补偿的电路，即当温度变化时，用 R_t 的变化来抵消霍尔电势 E_H 和输出电阻 R_o 变化对负载电阻 R_L 上的电压 E_L 的影响。在安装测量电路时，热敏元件最好和霍尔元件封装在一起或尽量靠近，以使二者的温度变化一致。

3) 不等位电势的补偿

在分析不等位电势时，可将霍尔元件等效为一个电桥，如图 1-22 所示。既然产生 U_M 的原因可归结为等效电桥的 4 个桥臂电阻不相等，则任何能够使电桥达到平衡的方法都可作为不等位电势的补偿方法。

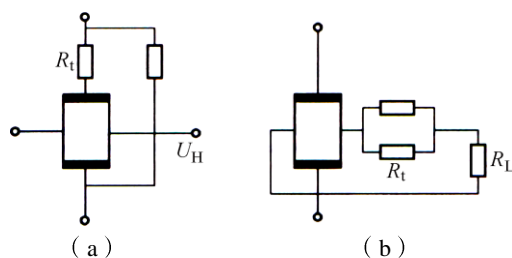


图 1-21 采用热敏元件的温度补偿电路

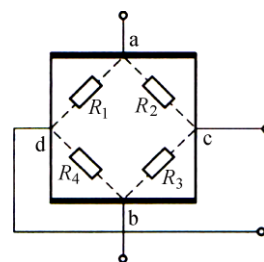


图 1-22 霍尔元件等效为一个电桥

(1) 基本补偿电路。

霍尔元件的不等位电势补偿电路有多种形式，图 1-23 为两种常见电路，其中 R_P 是调节电阻。图 1-23 (a) 是在造成电桥不平衡的电阻值较大的一个桥臂上并联 R_P ，通过调节 R_P 使电桥达到平衡状态，称为不对称补偿电路；图 1-23 (b) 则相当于在两个电桥臂上并联调节电阻，称为对称补偿电路。

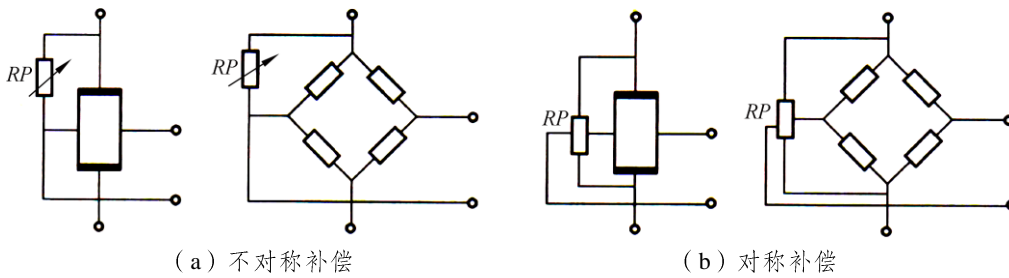


图 1-23 不等位电势的基本补偿电路

(2) 具有温度补偿的补偿电路。

图 1-24 是一种常见的具有温度补偿的不等位电势补偿电路。其中一个桥臂为热敏电阻 R_t ，并且 R_t 与霍尔元件的等效电阻的温度特性相同。在磁感应强度 B 为零时调节 RP_1 和 RP_2 ，使补偿电压抵消霍尔元件，从而 $B = 0$ 时的总输出电压为零。

在霍尔元件的工作温度下限 T_1 时，通过调节电位器 RP_1 来调节补偿电桥的工作电压 E_{ML} 。当工作温度由 T_1 升高到 $T_1 + \Delta T$ 时，热敏电阻的阻值为 $R_t(T_1 + \Delta T)$ 。 RP_1 保持不变，通过调节 RP_2 ，使补偿电压抵消此时的不等位电势 $E_{ML} + \Delta M$ 。

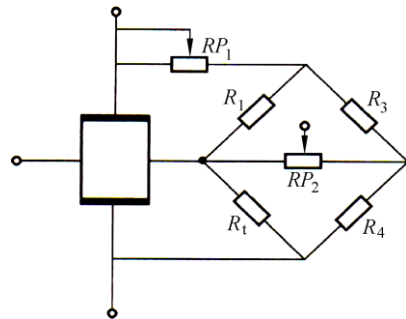


图 1-24 不等位电势的桥式补偿电路

【任务实施】

霍尔电动势是关于 I 、 B 、 θ 3 个变量的函数，即 $E_H = K_H IB \cos \theta$ ，利用这个关系可以使其中两个量不变，将第三个量作为变量，或者固定其中一个量、其余两个量都作为变量。3 个变量的多种组合使得霍尔传感器具有非常广阔的应用。归纳起来，霍尔传感器主要有下列 3 个方面的用途：

(1) 维持 I 、 θ 不变，则 $E_H = f(B)$ ，这方面的应用有：测量磁感应强度的特斯拉计、测量转速的霍尔转速表、磁性产品计数器、霍尔式角编码器以及基于微小位移测量原理的霍尔式加速度计、微压力计、汽车无触点电子点火装置等。

(2) 维持 I 、 B 不变，则 $E_H = f(\theta)$ ，这方面的应用有角位移测量仪等。

(3) 维持 θ 不变，则 $E_H = f(IB)$ ，即传感器的输出 E_H 与 I 、 B 的乘积成正比，这方面的应用有模拟乘法器、霍尔式功率计等。

1. 霍尔式特斯拉计

特斯拉计（又称高斯计）用于测量和显示被测量物体在空间上一个点的静态或动态（交变）磁感应强度。其工作原理是基于霍尔效应，由霍尔探头和放大显示器、计算机通信接口等构成。测量结果可换算成单位面积平均磁通密度、磁积能、剩余磁通密度、剩余磁化强度即气隙磁场等，能够判别磁场方向。

在使用中，如图 1-25 所示霍尔探头被放置于被测磁场中，磁力线的垂直分量穿过霍尔元件的测量平面，从而产生与被测



图 1-25 霍尔式特斯拉计

磁感应强度成正比的霍尔电动势，再根据设置的转换系数，通过显示屏显示出 B 值。

2. 霍尔接近开关

图 1-26 所示为常见霍尔接近开关的实物图。

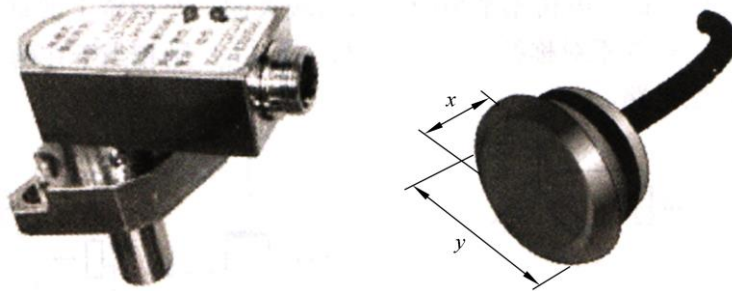


图 1-26 常见霍尔接近开关实物图

霍尔接近开关电路如图 1-27 所示。它是一个无接触磁控开关。当磁铁靠近时，开关接通，当磁铁离开后，开关断开。

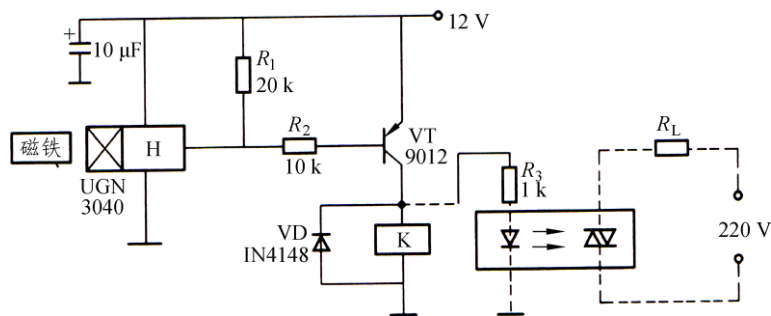


图 1-27 霍尔接近开关

3. 霍尔式转速传感器

图 1-28 所示是几种不同结构的霍尔式转速传感器。转盘的输入轴与被测转轴相连，当被测转轴转动时，转盘随之转动，固定在转盘附近的霍尔传感器便可在每一个小磁铁通过时产生一个相应的脉冲，检测出单位时间的脉冲数，便可知道被测转速。根据磁性转盘上小磁铁的数目就可确定传感器测量转速的分辨率。

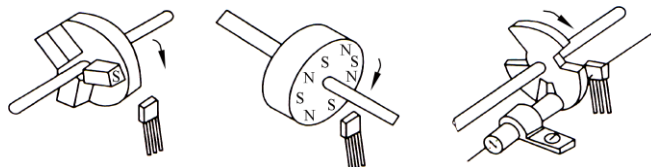


图 1-28 霍尔式转速传感器

4. 电动机停转报警器

电动机停转报警电路如图 1-29 所示，该电路主要由霍尔检测、报警电路两大部分组成。

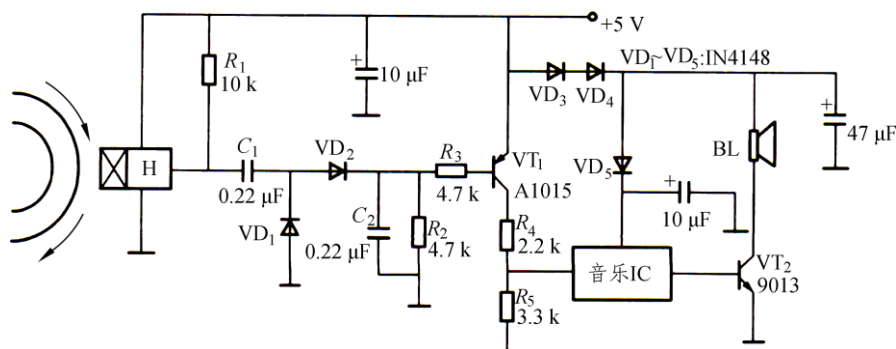


图 1-29 电动机停转报警电路

当电动机转动时，安装在电动机转轴上的磁铁以一定的频率经过霍尔传感器，霍尔传感器不断地输出脉冲信号，该信号经 C_1 耦合，二极管 VD_1 、 VD_2 整流，在 C_2 上形成直流高电平，晶体管 VT_1 截止，音乐 IC 无触发信号，无声音输出。当电动机停止转动时，霍尔传感器无脉冲信号输出。 C_2 为低电平， VT_1 导通，音乐 IC 触发，扬声器 BL 发出声音。 $VD_3 \sim VD_5$ 起降压作用（因为音乐 IC 的电源电压一般为 3 V）。

【任务自检】

1. 什么是霍尔效应？霍尔电势与哪些因素有关？
2. 影响霍尔元件输出零点的因素有哪些？怎样补偿？
3. 温度变化对霍尔元件输出电势有什么影响？如何补偿？
4. 属于四端元件的是（ ）。
 - A. 应变片
 - B. 压电晶体
 - C. 霍尔元件
 - D. 热敏电阻
5. 减少霍尔元件的输出不等位电动势的办法是（ ）。
 - A. 减小激励电流
 - B. 减小磁感应强度
 - C. 使用电桥调零电位器

任务四 压电式传感器

【任务描述】

- (1) 掌握压电式传感器的工作原理及压电材料的特性；
- (2) 掌握压电式传感器的测量电路；
- (3) 能独立分析压电式传感器的应用实例。



1-5 压电式传感器

【背景知识】

压电式传感器是以某些电介质（如石英晶体或压电陶瓷、高分子材料）的压电效应为基

础而工作的。在外力作用下，在电介质表面产生电荷，从而实现非电量电测的目的。因此，压电式传感器是一种典型的自发电式传感器。压电传感元件是力敏感元件，它可以测量最终能转换为力的那些非电物理量，例如动态力、动态压力、振动加速度等。

压电传感器具有体积小、质量轻、频响高、信噪比大等优点，但某些压电材料需要防潮措施，而且输出的直流响应差，需要采用高输入阻抗电路或电荷放大器来克服这一缺点。由于它没有运动部件，因此结构坚固，可靠性、稳定性高。

一、压电传感器的工作原理

1. 压电效应

某些电介质在沿一定方向上受到外力作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电的状态，这种现象称为压电效应。反之，在电介质的极化方向上施加交变电场或电压，它会产生机械变形。当去掉外加电场时，电介质变形随之消失，这种现象称为逆压电效应（电致伸缩效应）。

在晶体的弹性限度内，压电材料受动态力后，其表面产生的电荷 Q 与所施加的动态力 F 成正比，即

$$Q = dF \quad (1-15)$$

式中 d ——压电常数。

图 1-30 是压电效应的示意图。生活中与压电效应有关的现象很多。例如在电子打火机中，当压电材料受到敲击，产生很高的电压，通过尖端放电，而点燃可燃气体；音乐贺卡中的压电片则是利用逆压电效应而发声的。

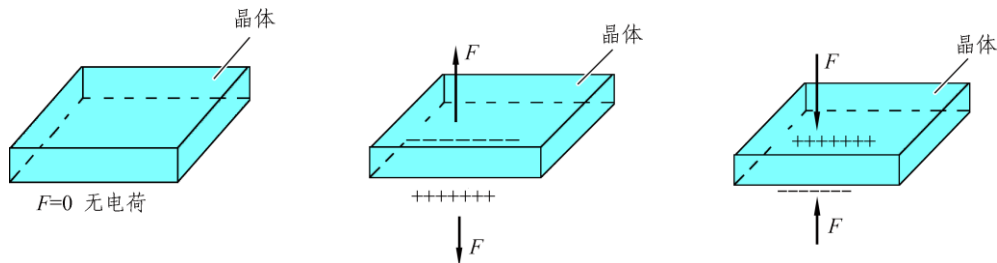


图 1-30 压电效应示意图

压电效应是压电式传感器的主要工作原理，由于外力作用在压电元件上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存，这实际上是不可能的，因此压电式传感器不能用于静态测量。压电元件在交变力的作用下，电荷可以不断补充，可以供给测量回路以一定的电流，故只适用于动态测量。所以这决定了压电传感器只能够测量动态的应力。

2. 压电材料的分类及特性

压电传感器中的压电元件材料一般有 3 类：第一类是压电晶体（单晶体），它包括压电石英晶体和其他压电单晶体；第二类是经过极化处理的压电陶瓷（多晶体）；第三类是高分子压电材料。

1) 石英晶体

石英晶体俗称水晶，有天然和人工之分，是一种性能良好的压电晶体，它的突出特点是性能非常稳定。在 $20 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内压电常数的变化率只有 $-0.000\text{ }1/^{\circ}\text{C}$ 。此外，它还具有自振频率高、动态响应好、机械强度高、绝缘性能好、迟滞小、重复性好、线性范围宽等优点。石英晶体的不足之处是压电常数较小 ($d = 2.31 \times 10^{-12}\text{C/N}$)。因此石英晶体大多只在标准传感器、高准确度测量或环境温度较高的场合中使用，而在一般要求的测量中，基本上采用压电陶瓷。

2) 压电陶瓷

压电陶瓷是一种经极化处理的人工多晶铁电体。所谓“多晶”，它是由无数细微的单晶组成；所谓“铁电体”，它具有类似铁磁材料磁畴的“电畴”结构。每个单晶形成一单个电畴，无数单晶电畴的无规则排列，致使原始的压电陶瓷呈现各向同性而不具有压电性（如图 1-31 所示）。要使之具有压电性，必须作极化处理，即在一定温度下对其施加强直流电场，迫使“电畴”趋向外电场方向作规则排列，如图 1-31 (b) 所示；极化电场去除后，趋向电畴基本保持不变，形成很强的剩余极化，从而呈现出压电性，如图 1-31 (c) 所示。

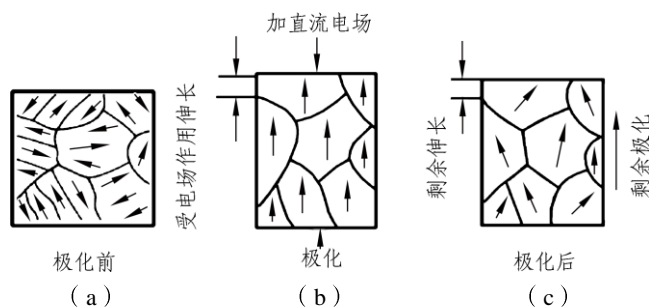


图 1-31 BaTiO₃ 压电陶瓷的极化

压电陶瓷的制造工艺成熟，通过改变配方或掺杂微量元素可使材料的技术性能有较大改变，以适应各种要求。它还具有良好的工艺性，可以方便地加工成各种需要的形状，在通常情况下，它比石英晶体的压电系数高得多，而且制造成本较低，因此目前国内外生产的压电元件绝大多数都采用压电陶瓷。

常用的压电陶瓷材料主要有以下几种：

(1) 锆钛酸铅系列压电陶瓷 (PZT)。

锆钛酸铅压电陶瓷是由钛酸铅和锆酸铅组成的固溶体。它有较高的压电常数， $d = (200 \sim 500) \times 10^{-12}\text{C/N}$ ，和较高的居里点 ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)，是目前经常采用的一种压电材料。在上述材料中加入微量的镧 (La)、铌 (Nb) 和锑 (Sb) 等，可以得到不同性能的 PZT 材料。PZT 是工业中应用较多的压电陶瓷。

(2) 非铅系压电陶瓷。

为减少铅对环境的污染，人们正积极研制非铅系压电陶瓷。目前非铅系压电铁电陶瓷体系主要有：**BaTiO₃** 基无铅压电陶瓷、**BNT** 基无铅压电陶瓷、铌酸盐基无铅压电陶瓷和钛酸铋钠钾无铅压电陶瓷等，它们的各项性能多已超过含铅系列压电陶瓷，是今后压电铁电陶瓷的发展方向。

3) 高分子压电材料

高分子压电材料是近年来发展很快的一种新型材料。典型的高分子压电材料有聚偏二氟乙烯 (PVF₂ 或 PVDF)、聚氟乙烯 (PVF)、改性聚氯乙烯 (PVC) 等。其中以 PVDF 的压电常数最高, 有的材料可比压电陶瓷还要高十几倍。其输出脉冲电压有的可以直接驱动 CMOS 集成门电路。

高分子压电材料是一种柔软的压电材料, 可根据需要制成薄膜或电缆套管等形状。经极化处理后就显现出电压特性。它不易破碎, 具有防水性, 可以大量连续拉制, 制成较大面积或较长的尺度, 因此价格便宜。其测量动态范围可达 80 dB, 频率响应范围可从 0.1 Hz 直至 10⁹ Hz。这些优点都是其他压电材料所不具备的。因此, 在一些不要求测量准确度的场合, 例如水声测量, 防盗、振动测量等领域中获得应用。它的声阻抗与空气的声阻抗有较好的匹配, 因而是很有希望的电声材料。例如在它的两侧面施加高压音频信号时, 可以制成特大口径的壁挂式低音喇叭。

高分子压电材料的工作温度一般低于 100 °C。温度升高时, 灵敏度将降低。它的机械强度不够高, 耐紫外线能力较差, 不宜暴晒, 以免老化。

二、压电传感器的测量电路

1. 压电传感器的等效电路

由压电元件的工作原理可知, 压电式传感器可以看作是一个电荷发生器。同时, 它也是一个电容器, 晶体上聚集正负电荷的两表面相当于电容的两个极板, 极板间物质等效于一种介质, 则电容量为

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} \quad (1-16)$$

式中 S ——压电片的面积;

d ——压电片的厚度;

ϵ_r ——压电材料的相对介电常数。

因此, 压电传感器可以等效为一个与电容相并联的电压源, 如图 1-32 (a) 所示。也可以等效为一个电荷源, 如图 1-32 (b) 所示。

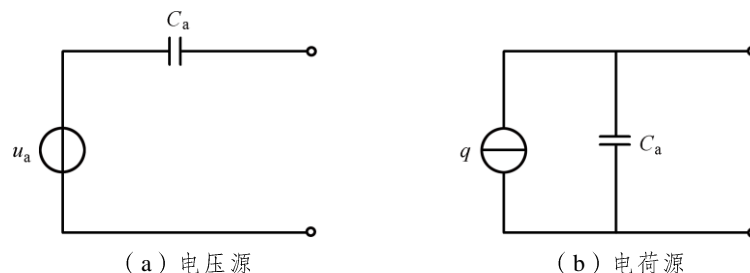


图 1-32 压电传感器的等效电路

2. 压电传感器的测量电路

压电传感器本身的内阻抗很高, 而输出能量较小, 因此它的测量电路通常需要接入一个

高输入阻抗的前置放大器。压电传感器的输出可以是电压信号，也可以是电荷信号，因此前置放大器也有两种形式：电压放大器和电荷放大器。

1) 电压放大器（阻抗变换器）

图 1-33 所示是电压放大器电路原理图及其等效电路。

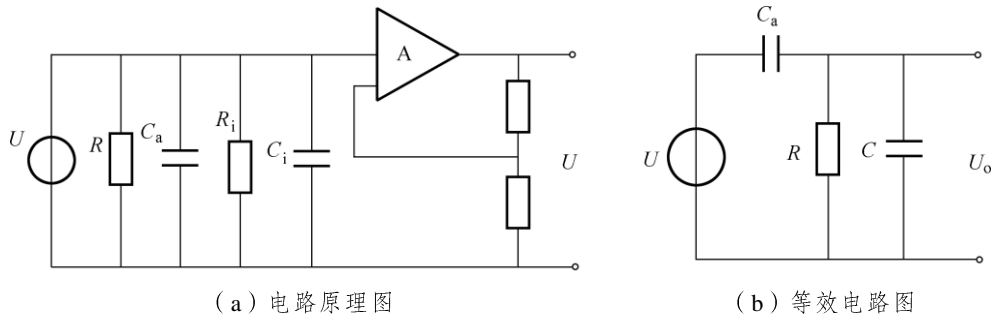


图 1-33 电压放大器电路原理图及其等效电路图

注： C_a —连接电缆的等级电容； C_i 、 R_i —放大器的输入电容和输入电阻； R —压电传感器的泄漏电阻。

若压电元件受正弦力 $f = F_m \sin \omega t$ 的作用，则放大器输入端电压 U_i 的大小为

$$U_i = \frac{dF_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_i + C_a + C_c)^2}} \quad (1-17)$$

在理想情况下，传感器的电阻值 R_a 与前置放大器输入电阻 R_i 都为无穷大，即 $\omega R(C_i + C_a + C_c) \gg 1$ ，理想情况下输出电压幅值 U_m 为

$$U_m = \frac{dF_m}{C_i + C_a + C_c} \quad (1-18)$$

2) 电荷放大器

电荷放大器常作为压电传感器的输入电路，由一个反馈电容 C_f 和高增益运算放大器构成，当略去 R_a 和 R_i 并联电阻后，电荷放大器等效电路如图 1-34 所示，图中 A 为运算放大器。由运算放大器特性，得到电荷放大器的输出电压：

$$U_o = \frac{K_q}{C_a + C_c + C_i + (1 + K)C_f} \quad (1-19)$$

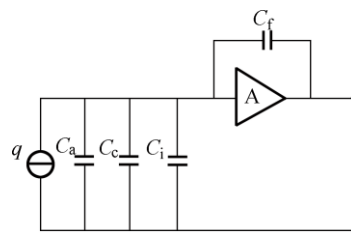


图 1-34 电荷放大器等效电路

式中 K —放大器增益。

由于 $K = 10^4 \sim 10^6$ ，此若满足 $(1 + K) C_f \gg C_i + C_a + C_c$ 时，上式可表示为

$$U_o = \frac{q}{C_f} \quad (1-20)$$

【任务实施】

压电传感器主要用于脉动力、冲击力、振动等动态参数的测量。压电材料有石英晶体、压电陶瓷和高分子压电材料等，其特性不尽相同，所以用途也不一样。

石英晶体主要用于精密测量，多作为实验室基准传感器；压电陶瓷灵敏度较高，机械强度稍低，多用作测力和振动传感器；而高分子压电材料多用作定性测量。下面介绍几种典型的应用。

1. 压电式动态力传感器

压电式动态力传感器主要用于测量变化频率不太高的动态力，如车床动态切削力的测试。被测力通过传力上盖使压电片在沿轴方向受压力作用而产生电荷，两块压电片沿轴反方向叠在一起，中间是一个片形电极，它收集负电荷。两压电片正电荷侧分别与传感器的传力上盖及底座相连。因此两块压电片被并联起来，提高了传感器的灵敏度。片形电极通过电极引出插头将电荷输出。电荷 Q 与所受的动态力成正比。只要用电荷放大器测出 ΔQ ，就可以测知 ΔF 。其结构如图 1-35 所示。

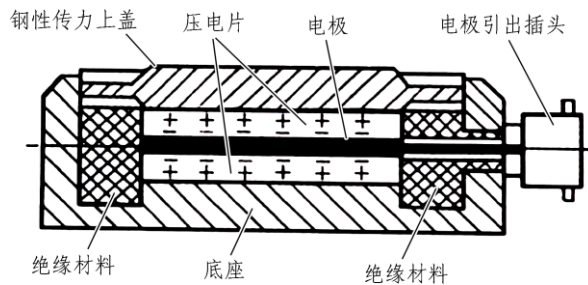


图 1-35 压电式单向动态传感器

压电式单向动态力传感器的测力范围与压电片的尺寸有关。例如一片直径为 18 mm、厚度为 7 mm 的压电片可承受 5 kN 的力，固有振动频率可达数十千赫兹。

图 1-36 是利用单向动态力传感器测量刀具切削力的示意图，压电动态力传感器位于车刀前端的下方。

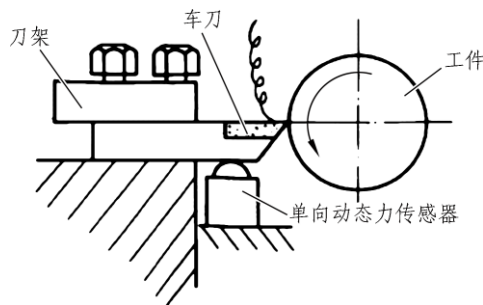


图 1-36 刀具切削力测量示意图

切削前，虽然车刀紧压在传感器上，压电片在压紧的瞬间也曾产生出很大的电荷，但几秒后，电荷就通过电路的泄漏电阻中和掉了。

切削过程中，车刀在切削力的作用下，上下剧烈颤动，将脉动力传递给单向动态力传感器。传感器的电荷变化量由电荷放大器转换成电压，再用记录仪记录下切削力的变化量。

2. 压电式玻璃破碎报警装置

玻璃破碎时会发出几千赫兹甚至超声波（高于 20 kHz）的振动。将高分子压电薄膜粘贴在玻璃上，可以感受到这一振动，并将电压信号传送给集中报警系统。图 1-37 示出了高分子压电薄膜振动感应片示意图。高分子薄膜厚约 0.2 mm，用聚偏二氟乙烯（PVDF）薄膜裁制成 10 mm × 20 mm 大小。在它的正反两面各喷涂透明的二氧化锡导电电极，也可以用热印制工艺制作高薄膜电极，再用超声波焊接上两根柔软的电极引线，并用保护膜覆盖。

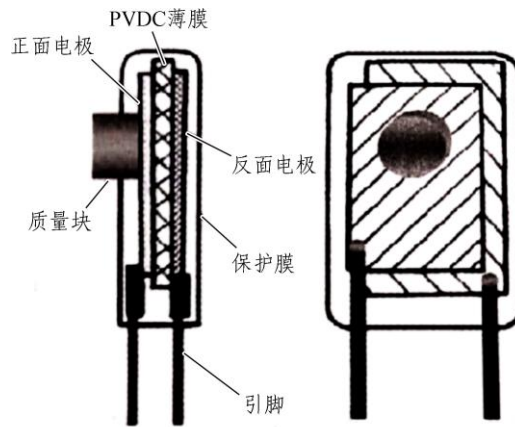


图 1-37 高分子压电薄膜振动感应片

使用时，用瞬干胶（502 等）将高分子压电薄膜粘贴在玻璃上。当玻璃遭暴力打碎的瞬间，压电薄膜感受到剧烈振动，表面产生电荷 Q 。在两个输出引脚之间产生窄脉冲电压 $U_0 = \frac{Q}{C_a}$ ，式中 C_a 是两极之间的电容，脉冲信号经放大后，用电缆输送到集中报警装置，产生报警信号。

由于感应片很小且透明，不易察觉，所以可安装于贵重物品柜台、展览橱窗、博物馆及家庭等玻璃窗角落处。

【任务自检】

1. 什么叫正压电效应和逆压电效应？
2. 为什么说压电式传感器只适用于动态测量而不能用于静态测量？
3. 画出压电元件的两种等效电路。
4. 压电式传感器测量电路的作用是什么？其核心是解决什么问题？

任务五 温度传感器



1-6 温度传感器

【任务描述】

- (1) 掌握温度传感器的工作原理；
- (2) 辨识不同温度传感器的分类、结构及特点；
- (3) 能独立分析温度传感器的应用实例。

【背景知识】

温度是表征物体冷热程度的物理量，是生产生活中一个很重要而普遍的参数，很多控制都要依靠温度来实现。由于温度测量的普遍性，温度传感器的数量在各种传感器中居首位。温度传感器按其与被测介质的接触方式可分为接触式和非接触式两种类型：

(1) 接触式温度传感器需要与被测介质保持热接触，使两者进行充分的热交换而达到同一温度。这一类传感器主要有电阻式、热电偶、PN 结温度传感器等。

(2) 非接触式温度传感器无须与被测介质接触，而是通过被测介质的热辐射或对流将温度传给传感器，以达到测温目的。这一类传感器主要有红外温度传感器。

自然界的不少材料、元件的特性都随温度的变化而变化，如随温度变化的物理参数有：膨胀、电阻、电容、电动势、磁性能、频率、光学特性及热噪声等，温度传感器就是通过物体的特性随温度变化而改变的特点进行测量的。常用材料的温度传感器的类型、测温范围和特点如表 1-1 所示。

表 1-1 温度传感器的种类及特点

所利用的物理现象	传感器类型	测温范围/ $^{\circ}\text{C}$	特点
体 积 热膨胀	气体温度计	-250~1 000	不需要电源，耐用，但感温部分体积较大
	液体压力温度计	-200~350	
	玻璃水银温度计	-50~350	
	双金属片温度计	-50~300	
接触热电势	钨铼热电偶	1 000~2 100	自发电型，标准化程度高，品种多，可根据需要选择；需注意冷端温度补偿
	铂铑热电偶	200~1 800	
	其他热电偶	-200~1 200	
电阻的变化	铂热电阻	-200~900	标准化程度高；但需要接入桥路才能得到电压输出
	热敏电阻	-50~300	
温度-颜色	示温涂料	-50~1 300	面积大，可得到温度图像；但易衰老，精度低
	液 晶	0~100	
光辐射 热辐射	红外辐射温度计	-50~1 500	非接触式测量，反应快；但易受环境及被测体表面状态影响，标定困难
	光学高温温度计	500~3 000	
	热释电温度计	0~1 000	
	光子探测器	0~3 500	

温度传感器应用极其广泛，家用的空调系统、冰箱、电饭煲、电风扇等产品都要用到温度传感器，工业上也广泛使用温度传感器，汽车上也用到温度传感器，另外航空航天、海洋开发、生物制药都需要温度传感器。如：医学上利用温度传感器实现非接触式温度测量，铁路上利用温度传感器测量轴箱温度，排查热轴故障等。

一、热电偶传感器

测量温度的传感器品种繁多，所依据的工作原理也各不相同。把温度变化转换成电势的热电式传感器称为热电偶。热电偶传感器（以下简称热电偶）是众多测温传感器中，已形成系列化、标准化的一种，它能将温度信号转换成电动势。目前在工业生产和科学研究中已得到广泛应用，并且可以选用标准的显示仪表和记录仪表来进行显示和记录。

热电偶测温的主要优点有：

- (1) 它属于自发电型传感器，因此测量时可以不要外加电源，可直接驱动动圈式仪表。
- (2) 结构简单，使用方便，热电偶的电极不受大小和形状的限制，可按需要选择。
- (3) 测温范围广，高温热电偶可达 1800°C 以上，低温热电偶可达 -260°C 。
- (4) 测量准确度较高，各温区中的误差均符合国际计量委员会的标准。

1. 热电偶的工作原理

1821年，德国物理学家赛贝克（T.J. Seebeck）用两种不同金属组成闭合回路，并用酒精灯加热其中一个接触点（称为结点），发现放在回路中的电流表指针发生偏转。如果用两盏酒精灯对两个结点同时加热，指针的偏转角反而减小。显然，指针的偏转说明回路中有电动势产生并有电流在回路中流动，电流的强弱与两个结点的温差有关。

据此，赛贝克发现和证明了将两种不同性质的导体 A、B 组成闭合回路，如图 1-38 所示，若结点 (1)、(2) 处于不同的温度 ($T \neq T_0$) 时，两者之间将产生一热电势，在回路中形成一定大小的电流，这种现象称为热电效应。两种不同材料的导体所组成的回路称为“热电偶”，组成热电偶的导体称为“热电极”，热电偶所产生的电动势称为热电动势。热电偶的两个结点中，置于温度为 T 的被测对象中的结点称之为测量端，又称为工作端或热端；而置于参考温度为 T_0 的另一结点称之为参考端，又称自由端或冷端。其电势由接触电势（珀尔帖电势）和温差电势（汤姆逊电势）两部分组成。

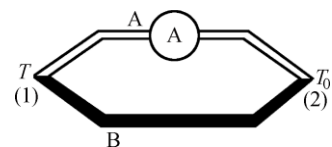


图 1-38 热电效应示意图

1) 接触电势

当两种金属接触在一起时，由于不同导体的自由电子密度不同，在结点处就会发生电子迁移扩散。失去自由电子的金属呈正电位，得到自由电子的金属呈负电位。当扩散达到平衡时，在两种金属的接触处形成电势，称为接触电势。其大小除与两种金属的性质有关外，还与结点温度有关。在温度为 T 时的接触电势：

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (1-21)$$

式中 $E_{AB}(T)$ —— A、B 两种金属在温度 T 时的接触电势；

k ——波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K);

e ——电子电荷, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ (C);

N_A 、 N_B ——金属 A、B 的自由电子密度;

T ——结点处的绝对温度。

2) 温差电势

热电回路各电势示意图如图 1-38 所示。对于单一金属, 如果两端的温度不同, 则温度高端的自由电子向低端迁移, 使单一金属两端产生不同的电位, 形成电势, 称为温差电势。其大小与金属材料的性质和两端的温差有关, 可表示为

$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad (1-22)$$

式中 $E_A(T, T_0)$ ——金属 A 两端温度分别为 T 与 T_0 时的温差电势;

σ_A ——温差系数;

T 、 T_0 ——高、低温端的绝对温度。

对于图 1-39 所示 A、B 两种导体构成的闭合回路, 总的温差电势为

$$E_A(T, T_0) - E_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (1-23)$$

于是, 回路的总热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (1-24)$$

由此可以得出如下结论:

(1) 如果热电偶两电极的材料相同, 即 $N_A = N_B$, $\sigma_A = \sigma_B$, 虽然两端温度不同, 但闭合回路的总热电势仍为零。因此, 热电偶必须用两种不同材料作热电极。

(2) 如果热电偶两电极材料不同, 而热电偶两端的温度相同, 即 $T = T_0$, 闭合回路中也不产生热电势。

(3) 在实际测温时, 必须在热电偶闭合回路中引入连接导线和仪表。

2. 热电偶基本定律

1) 中间导体定律

设在图 1-40 的 T_0 处断开, 接入第三种导体 C, 如图 1-41 所示。若 3 个结点温度均为 T_0 , 则回路中的总热电势为

$$E_{AB}(T_0) + E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) = 0 \quad (1-25)$$

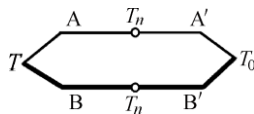


图 1-40 热电偶连接导线示意图

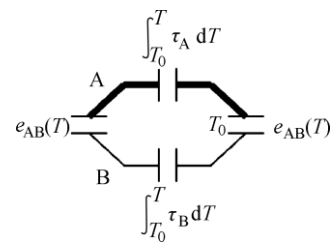


图 1-39 热电回路各电势

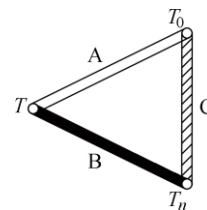


图 1-41 三导体热电回路

若 A、B 结点温度为 T ，其余结点温度为 T_0 ，而且 $T > T_0$ ，则回路中的总热电势为

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, 0) + E_{BC}(T_0, 0) + E_{CA}(T_0, 0) \quad (1-26)$$

由式 (1-25) 可得

$$-E_{AB}(T_0) = E_{BC}(T_0) + E_{CA}(T_0) \quad (1-27)$$

将式 (1-27) 代入式 (1-26) 可得

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, 0) - E_{AB}(T_0, 0) \quad (1-28)$$

结论：导体 A、B 组成的热电偶，当引入第三导体时，只要保持其两端温度相同，则对回路总热电势无影响，这就是中间导体定律。利用这个定律可以将第三导体换成毫伏表，只要保证两个结点温度一致，就可以完成热电势的测量而不影响热电偶的输出。根据这一定律，可以将热电偶的一个接点断开接入第三种导体，也可以将热电偶的一种导体断开接入第三种导体，只要每一种导体的两端温度相同，均不影响回路的总热电动势。在实际测温电路中，必须有连接导线和显示仪器，若把连接导线和显示仪器看成第三种导体，只要它们的两端温度相同，则不影响总热电动势。若在热电偶回路中接入多种导体，只要每种导体两端的温度相同，也可以得到相同的结论。

2) 连接导体定律与中间温度定律

在热电偶回路中，如图 1-40 所示，若导体 A、B 分别与连接导线 A'、B' 相接，结点温度分别为 T 、 T_n 、 T_0 ，则回路的总热电势为

$$E_{ABB'A'}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{B'A'}(T_n, T_0) \quad (1-29)$$

连接导体定律：回路的总电势等于热电偶电势 $E_{AB}(T, T_n)$ 与连接导线电势 $E_{B'A'}(T_n, T_0)$ 的代数和。连接导体定律是工业上运用补偿导线进行温度测量的理论基础。

中间温度定律：当导体 A 与 A'、B 与 B' 材料分别相同时，则式 (1-29) 可写为

$$E_{AB}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (1-30)$$

$E_{AB}(T, T_0)$ 回路的总热电势等于 $E_{AB}(T, T_n)$ 与 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 的代数和。 T_n 称为中间温度。中间温度定律为制定分度表奠定了理论基础。热电偶的热电势只取决于构成热电偶的两个电极 A、B 的材料性质以及 A、B 两个结点的温度值 T 、 T_0 ，而与温度热电极的分布以及热电极的尺寸和形状无关。

中间温度定律在热电偶测温中应用极为广泛。根据该定律，我们可以在冷端温度为任一恒定值时，利用热电偶分度表求出工作端的被测温度值。

例如，用镍铬-镍硅热电偶测量炉温时，当冷端温度 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 时，测得热电势 $E(T, T_0) = 39.17\text{ mV}$ ，求实际炉温。

由 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 查分度表得 $E(30, 0) = 1.2\text{ mV}$ ，根据中间温度定律得：

$E(T, 0) = E(T, 30) + E(30, 0) = 39.17 + 1.2 = 40.37\text{ (mV)}$ 。则查表得炉温 $T = 946^\circ\text{C}$ 。

3) 标准电极定律

图 1-42 为标准电极定律示意图。图中 C 为标准电极，接在热电偶 A、B 之间，形成 3 个热电偶组成的回路。经过推导得

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (1-31)$$

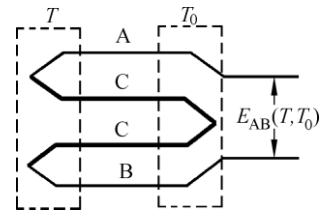


图 1-42 标准电极定律示意图

表明标准电极 C 与各种电极配对时的总热电势为两电极 A、B 配对后的电势之差。由于铂的物理和化学性能稳定，熔点高，易提纯，通常采用纯铂丝制成标准电极 C。由此可见，只要知道两种导体分别与标准电极组成热电偶时的热电动势，就可以依据标准电极定律计算出任意两种导体组成热电偶时的热电动势。从而简化了热电偶的选配工作。

3. 热电偶的种类及结构

1) 热电偶的种类

热电极和热电偶的种类繁多，我国从 1991 年开始采用国际计量委员会规定的“1990 年国际温标”（简称 ITS-90）的新标准。按此标准，共有 8 种标准化了的通用热电偶，如表 1-2 所示。表中所列热电偶中，写在前面的热极为正极，写在后面的为负极。对于每一种热电偶，还制定了相应的分度表，并且有相应的线性化集成电路与之对应。所谓分度表，就是热电偶自由端（冷端）温度为 0℃ 时，反映热电偶工作端（热端）温度与输出热电势之间的对应关系的表格（具体数值可上网查找）。国际电工委员会向世界各国推荐 8 种热电偶作为标准化热电偶。

表 1-2 8 种国际通用热电偶特性表

名称	分度号	测温范围/°C	100°C 时的热电势/mV	1000°C 时的热电势/mV	特点
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B	50~1820	0.033	4.834	熔点高，测温上限高，性能稳定，准确度高，100℃ 以下热电势极小，所以可不必考虑冷端温度补偿；价格昂贵，线性差；只适用于高温域的测量
铂铑 ₁₃ -铂	R	-50~1768	0.647	10.506	使用上限较高，准确度高，性能稳定，复现性好；但热电动势较小，不能在金属蒸气和还原性气氛中使用，在高温下连续使用时特性会逐渐变坏，价格昂贵；多用于精密测量
铂铑 ₁₀ -铂	S	-50~1768	0.646	9.587	优点同上；但性能不如 R 热电偶；长期以来曾经作为国际温标的法定标准热电偶
镍铬-镍硅	K	-270~1370	4.096	41.276	热电势大，线性好，稳定性好，价廉；但材质较硬，在 1000℃ 以上长期使用会引起热电动势漂移；多用于工业测量
镍铬硅-镍硅	N	-270~1300	2.744	36.256	是一种新型热电偶，各项性能均比 K 热电偶好，适宜于工业测量
镍铬-铜镍（康铜）	E	-270~800	6.319	—	热电动势比 K 热电偶大 50% 左右，线性好，耐高湿度，价廉；但不能用于还原性气氛；多用于工业测量
铁-铜镍（康铜）	J	-210~760	5.269	—	价格低廉，在还原性气体中较稳定；但纯铁易被腐蚀和氧化；多用于工业测量
铜-铜镍（康铜）	T	-270~400	4.279	—	价廉，加工性能好，离散性小，性能稳定，线性好，准确度高；铜在高温时易被氧化，测温上限低；多用于低温域测量。可作 -200~0℃ 温域的计量标准

注：铂铑₃₀表示该合金含 70% 的铂及 30% 的铑，以下类推。

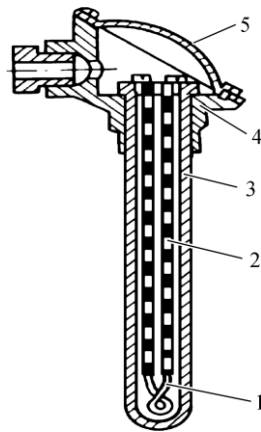
2) 热电偶的结构形式

热电偶的基本结构是热电极、绝缘材料和保护管。热电偶简单分为装配式热电偶，铠装式热电偶和特殊形式热电偶；按使用环境细分有耐高温热电偶，耐磨热电偶，耐腐热电偶，耐高压热电偶，隔爆热电偶，铝液测温用热电偶，循环硫化床用热电偶，水泥回转窑炉用热电偶，阳极焙烧炉用热电偶，高温热风炉用热电偶，汽化炉用热电偶，渗碳炉用热电偶，高温盐浴炉用热电偶，铜、铁及钢水用热电偶，抗氧化钨铼热电偶，真空炉用热电偶，铂铑热电偶等。

工业热电偶作为测量温度的传感器，通常与显示仪表、记录仪表或计算机等配套使用。可以直接测量各种生产过程中气体、液体、熔体及固体表面的温度。

(1) 普通热电偶。

普通工业装配式热电偶作为测量温度的感应元件，通常和显示仪表、记录仪表和计算机控制系统配套使用。它可以直接测量各种生产过程中从 0°C 到 1800°C 范围的液体、蒸气和气体介质温度。热电偶通常由热电极、绝缘管、保护套管和接线盒等几个主要部分组成，其常见外形结构如图 1-43 所示。



1—热电极；2—绝缘套管；3—保护管；4—接线盒；5—接线盒盖。

图 1-43 普通热电偶结构示意图

① 热电极。又称偶丝，它是热电偶的基本组成部分。普通金属做成的偶丝，其直径一般为 $0.5 \sim 3.2 \text{ mm}$ ，贵金属做成的偶丝，直径一般为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。偶丝的长度则由使用情况、安装条件，特别是工作端在被测介质中插入的深度来决定，通常为 $300 \sim 1000 \text{ mm}$ ，常用的长度为 350 mm 。

② 绝缘管。又称绝缘子，它是用于热电极之间及热电极与保护套管之间进行绝缘保护的零件。形状一般为圆形或椭圆形，中间开有 2 个、4 个或 6 个孔。偶丝穿孔而过。材料为黏土质、高铝质、刚玉质等，材料选用视使用的热电偶而定。在室温下，绝缘管的绝缘电阻应在 $5 \text{ M}\Omega$ 以上。

③ 保护套管。它是用来保护热电偶感温元件免受被测介质化学腐蚀和机械损伤的装置。保护套管应具有耐高温、耐腐蚀的性能，要求导热性能好，气密性好。其材料有金属、非金属以及金属陶瓷三大类。保护套管的材料选择主要是依据被测介质和使用的环境条件。金属材料有铝、黄铜、碳钢、不锈钢等。

④ 接线盒。它是用来固定接线座和作为连接补偿导线的装置。根据被测量温度的对象及现场环境条件，设计有普通式、防溅式、防水式和接插座式等 4 种结构形式。

普通式接线盒无盖，仅由箱体构成，其接线座用螺钉固定在箱体上，适用于环境条件良好、无腐蚀性气体的现场。防溅式、防水式接线盒有盖，且盖与箱体是由密封圈压紧密封，适用于雨水能溅到的现场或露天设备现场。插座式接线盒结构简单、安装所占空间小，接线方便，适用于需要快速拆卸的环境。

(2) 铠装热电偶。

铠装热电偶如图 1-44 所示，国际上又称之为无机物绝缘热电偶，是由不锈钢保护管、氧化镁绝缘粉、热电偶丝材组合，经模具压实的坚实整体，具有耐压、抗震、可挠、小型化、热响应时间快、安装方便、使用寿命长、机械强度高等优点，广泛应用于航空航天、原子能、石油、化工、冶金、机械、电力能源等工业部门和科研教学领域。铠装热电偶具有能弯曲、耐高压、热响应时间快和坚固耐用等许多优点，它和工业用装配式热电偶一样，作为测量温度的变送器，通常和显示仪表、记录仪表和计算机控制系统配套使用，同时亦可作为装配式热电偶的感温元件。它可以直接测量各种生产过程中从 $0 \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的液体、蒸气和气体介质以及固体表面的温度。

(3) 薄膜热电偶。

它是由两种金属薄膜制成的一种特殊结构的热电偶，如图 1-45 所示。薄膜的制作方法有许多种，如真空蒸镀、化学涂层和电泳等。测量端既小又薄，约为数百埃到数千埃 ($1\text{ }\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m} = 10^{-4}\text{ }\mu\text{m}$)。由于测量端的热容量很小，可以用于微小面积上的温度测量，且响应快，其时间常数可达微秒级，因而可测瞬变的表面温度。其次，它的尺寸小，不会造成被测流体通路的堵塞。薄膜热电偶的结构有 3 种：片状与针状热电偶，以及将热电极材料直接蒸镀在被测表面的热电偶。

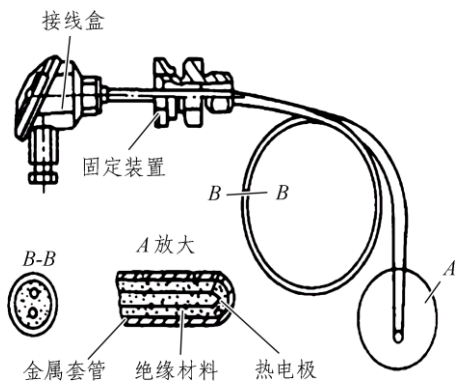


图 1-44 铠装热电偶

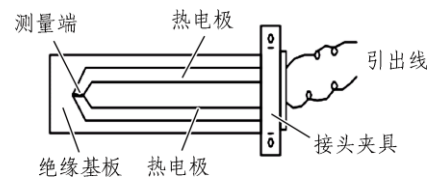


图 1-45 薄膜热电偶

4. 热电偶的冷端温度补偿

热电偶的冷端温度补偿常用的方法有 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温法、冷端温度修正法、仪表机械零点调整法、冷端温度电桥补偿法和软件补偿法。

1) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温法

将热电偶的冷端置于装有冰水混合物的恒温容器中，使冷端的温度保持 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不变。这种

方法又称为冰浴法，它消除了 t_0 不等于 0°C 而引入的误差，由于冰融化较快，所以一般只适用于实验室中。

2) 冷端温度修正法

当热电偶的冷端温度 $t_0 \neq 0^\circ\text{C}$ 时，由于热端与冷端的温差随冷端的变化而变化，所以测得的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 与冷端为 0°C 时所测得的热电势 $E_{AB}(t, 0^\circ\text{C})$ 不等。若冷端温度高于 0°C ，则 $E_{AB}(t, t_0) < E_{AB}(t, 0^\circ\text{C})$ 。可以利用式 (1-32) 计算并修正测量误差：

$$E_{AB}(t, 0^\circ\text{C}) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0^\circ\text{C}) \quad (1-32)$$

式中， $E_{AB}(t, t_0)$ 是用毫伏表直接测得的热电势毫伏数。修正时，先测出冷端温度 t_0 ，然后从该热电偶分度表中查出 $E_{AB}(t_0, 0^\circ\text{C})$ ，并把它加到所测得的 $E_{AB}(t, t_0)$ 上，根据式 (1-32) 求出 $E_{AB}(t, 0^\circ\text{C})$ ，根据此值再在分度表中查出相应的温度值。计算修正法共需要查分度表两次。如果冷端温度低于 0°C ，由于查出的 $E_{AB}(t_0, 0^\circ\text{C})$ 是负值，所以仍可用式 (1-32) 计算修正。

例：用镍铬-镍硅 (K) 热电偶测量加热炉温度。已知冷端温度 $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ，测得热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 为 38.505 mV，求加热炉温度。

解：查镍铬-镍硅 (K) 热电偶分度表，得到 $E_{AB}(30^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 1.203 \text{ mV}$ 。根据式 (1-32) 有

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, 0^\circ\text{C}) &= E_{AB}(t, 30^\circ\text{C}) + E_{AB}(30^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) \\ &= 38.505 \text{ mV} + 1.203 \text{ mV} \\ &= 39.708 \text{ mV} \end{aligned}$$

反查 K 分度表，求得 $t = 960^\circ\text{C}$ 。

该方法适用于热电偶冷端温度较恒定的情况。在智能化仪表中，查表及运算过程均可由计算机完成。

3) 仪表机械零点调整法

当热电偶与动圈式仪表配套使用时，若热电偶的冷端温度比较恒定，对测量精度要求又不太高时，可将动圈仪表的机械零点调整至热电偶冷端所处的 t_0 处，这相当于在输入热电偶的热电势前就给仪表输入一个热电势 $E(t_0, 0^\circ\text{C})$ 。这样，仪表在使用时所指示的值约为 $E(t_0, 0^\circ\text{C}) + E(t, t_0)$ 。进行仪表机械零点调整时，首先必须将仪表的电源及输入信号切断，然后用螺钉旋具调节仪表面板上的螺钉使指针指到 t_0 的刻度上。

当气温变化时，应及时修正指针的位置。此法虽有一定的误差，但非常简便，在工业上经常采用。

4) 冷端温度电桥补偿法

用电桥在温度变化时的不平衡电压（补偿电压）去消除冷端温度变化对热电偶热电势的影响，这种装置称为冷端温度补偿器。

补偿电桥的工作原理如图 1-46 所示，它由 3 个电阻温度系数较小的锰铜丝绕制的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 及电阻温度系数较大的铜丝绕制的电阻 R_{Cu} 和稳压电源组成。补偿电桥与热电偶冷端处在同一环境温度，当冷端温度变化引起的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 变化时，由于 R_{Cu} 的阻值随冷端温度变化而变化，适当选择桥臂电阻和桥路电流，就可以使电桥产生的不平衡电压 U_{ab} 补偿由于冷端温度 t_0 变化引起的热电势变化量，从而达到自动补偿的目的。

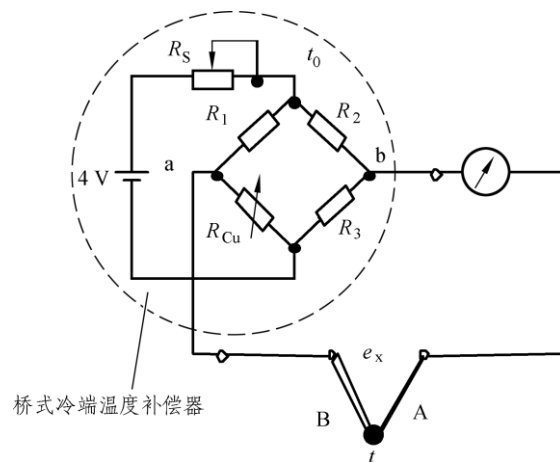


图 1-46 冷端温度电桥补偿器原理图

5) 软件补偿法

利用计算机的软件优势实施补偿，可节省硬件成本，在智能传感器中应用广泛。

二、热电阻传感器

热电阻传感器是利用导体的电阻随温度变化而变化的特性测量温度的。热电阻传感器可分为金属热电阻式和半导体热电阻式两大类，前者简称热电阻，而后者的灵敏度可以比前者高 10 倍以上，所以又简称热敏电阻。

1. 金属热电阻

金属热电阻是基于电阻的热效应进行温度测量的，即电阻体的阻值随温度的变化而变化的特性。因此，只要测量出感温热电阻的组织变化，就可以测量出温度。它被广泛用来测量 $-200 \sim 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。其特点如下：

- (1) 电阻值与温度变化具有良好的线性关系。
- (2) 电阻温度系数大，以便对温度变化敏感，便于精确测量。
- (3) 电阻率高，热容量小，从而具有较快的响应速度。
- (4) 在测量范围内具有稳定的物理、化学性质。
- (5) 容易加工，价格尽量便宜。

金属热电阻大多是由纯金属材料制成，目前应用最多的是铂和铜，其中铂热电阻的测量精确度高，它不仅广泛应用于工业测温，而且被制成标准的测温仪。

1) 铂热电阻

由于铂 (Pt) 的物理、化学性能非常稳定 (尤其在高温和氧化性介质中)，是目前制造热电阻的最好材料。除用作工业测温外，还作为标准电阻温度计。按国际温标 IPTS-68 规定，在 $-59.34 \sim 630.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温域内，以铂电阻温度计作基准器。但是铂热电阻价格较贵，温度系数偏小，受磁场影响较大。按 IEC 标准，铂电阻的测温范围为 $-200 \sim 960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。铂电阻的阻值与温度之间的关系：当温度 t 在 $-200 \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，其关系式为

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (1-33)$$

当温度在 0 ~ 650 °C 之间时关系式为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1-34)$$

式中 R_0 、 R_t ——分别为 0 °C 和 t °C 的电阻值；

A ——常数 ($3.968\ 47 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$)；

B ——常数 ($-5.847 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)；

C ——常数 ($-4.22 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}$)。

在 0 ~ 100 °C 范围内 R_t 的表达式可近似线性为

$$R_t = R_0(1 + At) \quad (1-35)$$

式中 A ——温度系数，近似为 $3.85 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ，Pt100 铂电阻的阻值在 0 °C 时， $R_t = 100\ \Omega$ ；而在 100 °C 时， $R_t = 138.5\ \Omega$ 。

要确定电阻 R_t 与温度 t 的关系，首先要确定 R_0 的数值， R_0 不同时， R_t 与 t 的关系不同。在工业上将相应于 $R_0 = 50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ （即分度号 Pt50、Pt100）的 R_t-t 关系制成分度表，称为热电阻分度表，供使用者查阅。薄膜式铂热电阻有 $100\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$ 等数种。表 1-3 为 Pt100 的分度表的一部分。

表 1-3 铂电阻 Pt100 分度表（部分）

工作端温度/ $^{\circ}\text{C}$	Pt100	工作端温度/ $^{\circ}\text{C}$	Pt100	工作端温度/ $^{\circ}\text{C}$	Pt100
-50	80.31	100	138.51	250	194.10
-40	84.27	110	142.29	260	197.71
-30	88.22	120	146.07	270	201.31
-20	92.16	130	149.83	280	204.90
-10	96.09	140	153.58	290	208.48
0	100.00	150	157.33	300	212.05
10	103.90	160	161.05	310	215.61
20	107.79	170	164.77	320	219.15
30	111.67	180	168.48	330	222.68
40	115.54	190	172.17	340	226.21
50	119.40	200	175.86	350	229.72
60	123.24	210	179.53	360	233.21
70	127.08	220	183.19	370	236.70
80	130.90	230	186.84	380	240.18

90	134.71	240	190.47	390	243.64
----	--------	-----	--------	-----	--------

2) 铜热电阻 (Cu)

在测量精度不太高, 测温范围不大的情况下, 可以采用铜电阻来代替铂电阻, 铜热电阻灵敏度比铂电阻高, 价格便宜, 也能达到精度要求, 铜热电阻外观形式如图 1-47 所示。在 $-50 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 铜电阻与温度接近线性关系, 可用下式表示:



图 1-47 铜热电阻外观形式

$$R_t = R_0(1 + at) \quad (1-36)$$

式中 R_t ——温度为 $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

R_0 ——温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值;

a ——铜电阻温度系数, $a = 4.25 \times 10^{-3} \sim 4.28 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。

铜电阻的缺点是电阻率较低, 电阻体的体积较大, 热惯性也较大, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上易氧化, 因此只能用于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下低温以及无水分、无腐蚀性的介质中。

我国以 R_0 值在 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ (分度号 Cu50、Cu100) 条件下, 制成相应分度表作为标准, 供使用者查阅。

3) 其他热电阻

上述两种热电阻对于低温和超低温测量性能不理想, 而钢、锰、碳等热电阻材料却是测量低温和超低温的理想材料。

(1) 钢电阻: 用 99.999% 高纯度的钢丝绕成电阻, 可在室温至 4.2 K 温度范围内使用。实验证明: 在 $4.2 \sim 15\text{ K}$ 温度范围内, 灵敏度比铂电阻高 10 倍; 其缺点是材料软, 复制性差。

(2) 锰电阻: 在 $2 \sim 63\text{ K}$ 温度范围内, 电阻随温度变化大, 灵敏度高。缺点是材料脆, 难拉成丝。

(3) 碳电阻: 适合用液氢温域 (4.2 K) 的温度测量, 价廉, 对磁场不敏感, 但热稳定性较差。

2. 热敏电阻

热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度显著变化这一特性制成的一种热敏元件, 其特点是电阻率随温度显著变化。它是由某些金属氧化物, 采用不同比例配方, 经高温烧结而成的。它主要由敏感元件、引线和壳体组成。热敏电阻的外形多样, 它的形状可以根据实际的控制制成珠状、片状、杆状、垫圈状等各种形状, 其直径或厚度约为 1 mm , 长度不超过 3 mm , 如图 1-48 所示。

热敏电阻与金属热电阻相比，具有电阻值和电阻温度系数大、灵敏度高；体积小、结构简单；热惯性小、响应速度快；使用方便、寿命长，易于实现远距离测量等优点，得到广泛的应用。它主要的缺点：互换性较差，同一型号的产品特性参数有较大差别；稳定性较差；非线性严重，且不能在高温下使用。但随着技术的发展和工艺的成熟，热敏电阻的缺点将逐渐得到改进。

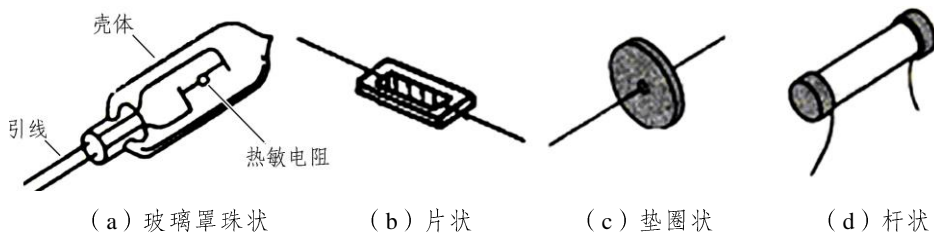


图 1-48 热敏电阻的结构形式

热敏电阻的测温范围一般在 $-50 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可用于液体、气体、固体、高空气象等方面的温度相关量的测量。

1) 热敏电阻的工作原理

半导体热敏电阻按温度特性可分为两类，一类是随温度上升电阻增加的正温度系数热敏电阻，另一类是随温度上升电阻下降的负温度系数热敏电阻。其温度曲线图如图 1-49 所示。

(1) 正温度系数热敏电阻 (PTC)。

此种热敏电阻以钛酸钡 (BaTiO_3) 为基本材料，再掺入适量的稀土元素，利用陶瓷工艺高温烧结而成。纯钛酸钡是一种绝缘材料，但掺入适量的稀土元素以后，变成了半导体材料。正温度系数的热敏电阻温度达到居里点时，阻值会发生急剧变化。居里点即临界温度，阻值发生急剧变化的那个温度，一般钛酸钡的居里点为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

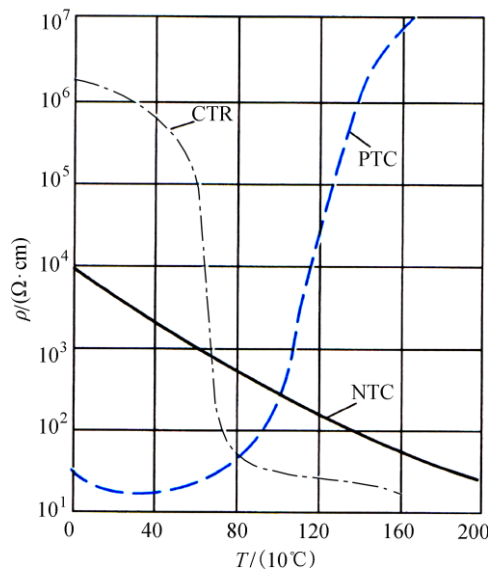


图 1-49 热敏电阻阻值温度曲线

(2) 负温度系数热敏电阻 (NTC)。

负温度系数热敏电阻是以氧化锰、氧化钴和氧化铝等金属氧化物为主要原料，采用陶瓷工艺制造而成。这些金属氧化物材料都具有半导体性质，有灵敏度高、稳定性好、响应快、寿命长、价格低等优点，广泛应用于需要定点测温的自动控制电路中，如冰箱、空调等。

(3) 临界温度系数热敏电阻 (CTR)。

还有一类热敏电阻叫临界温度系数热敏电阻 (CTR)，其特性是在某一特定温度下电阻值会发生突变，也属于负温度系数，主要用于温度开关类的控制。

2) 热敏电阻的主要参数

热敏电阻的参数有许多，常见的有以下 7 个。

(1) 电阻温度系数 α ：热敏电阻在温度变化 1°C 时阻值的变化率 ($\%/^\circ\text{C}$)。

(2) 标称电阻值 R_H ：在环境温度为 $(25 \pm 0.2^\circ\text{C})$ 时的电阻值，又称冷电阻。

阻值区别以阿拉伯数字表示，如 5k、10k 等直接标在热敏电阻上。还有一种是用数字表示，共三位，最后一位为零的个数，例：103 表示 $10 \times 10^3 \Omega$ 。

(3) B 值：是反映热敏电阻阻值随温度变化快慢的参数。

(4) 耗散系数 H ：热敏电阻器温度变化 1°C 所耗散的功率变化量。

(5) 热容 C ：热敏电阻温度变化 1°C 时所需吸收或释放的热量 ($\text{J}/^\circ\text{C}$)。

(6) 时间常数 τ ：温度为 T_0 的热敏电阻突然置于温度为 T 的介质中，热敏电阻的温度增量 $\Delta T = 0.632 (T - T_0)$ 时所需的时间 (s)。

(7) 额定功率 P_E ：热敏电阻器在规定的条件下，长期连续带负荷工作所允许的消耗功率。

三、红外传感器

把红外辐射转换成电量变化的装置，称为红外传感器。红外传感器主要是利用被测物体热辐射而发出红外线来测量物体的温度，可进行遥测。其制造成本较高，测量精度却较低。优点是：不从被测物体上吸收热量；不会干扰被测对象的温度场；连续测量不会产生消耗；反应快等。

1. 红外传感器的分类

红外传感器主要分为光电型和热敏型。光电型是利用红外辐射的光电效应制成的，其核心是光电元件，这类传感器主要有红外二极管、三极管等。热敏型主要制作红外温度传感器，它是利用红外辐射的热效应制成的，其核心是热敏元件。热敏元件吸收红外线的辐射能后引起温度升高，进而使得有关物理参数发生变化，通过测量这些变化的参数即可确定吸收的红外辐射，从而也测出物体当时的温度。另外，在热敏元件温度升高的过程中，不管什么波长的红外线，只要功率相同，其加热效果就是相同的，假如热敏元件对各种波长的红外线都能全部吸收的话，那么热敏探测器对各种波长基本上都具有相同的响应。热探测器的种类主要分 4 类：热释电型、热敏电阻型、热电阻型和气体型。

2. 红外传感器的原理与基本结构

自然界一切温度高于绝对零度 (-273.15°C) 的物体，由于分子的热运动，都在不停地向周围空间辐射包括红外波段在内的电磁波，其辐射能量密度与物体本身的温度关系符合普朗克 (Planck) 定律。其辐射能量与其温度及光谱波长遵循以下的规律：物体的温度越高，各

个光谱波段上的辐射强度就越大；随物体温度的增加，最高辐射峰值所在的波长向短波方向移动；短波长的辐射能量随温度的变化比长波长的变化快，测量灵敏度高；红外辐射的物理本质是热辐射，一个物体向外辐射的能力大部分是通过红外线辐射出来的，物体温度越高，辐射出来的红外线越多，辐射能量就越强。红外测温仪就是基于以上原理实现测量温度的。红外传感器测量时不与被测物体直接接触，因而不存在摩擦，并且有灵敏度高、响应快等优点。

红外传感器包括光学系统、检测元件和转换电路。光学系统按结构不同可分为透射式和反射式两类。检测元件按工作原理可分为热敏检测元件和光电检测元件。热敏元件应用最多的是热敏电阻。热敏电阻受到红外线辐射时温度升高，电阻发生变化，通过转换电路变成电信号输出，如图 1-50 所示。

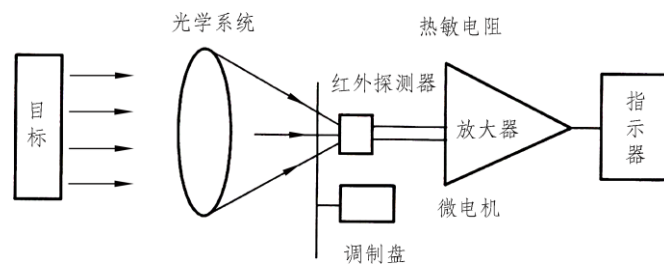


图 1-50 红外传感器测温原理图

【任务实施】

1. 热电偶金属表面温度的测量

对于机械、冶金、能源及国防等部门来说，金属表面温度的测量是非常普遍而复杂的问题。例如，热处理工作中锻件、铸件以及各种余热利用的热交换器表面、气体蒸汽管道、炉壁面等表面温度的测量。根据对象特点，测温范围从几百摄氏度到一千多摄氏度，而测量方法通常采用直接接触测量法。

直接接触测温法是指采用各种型号及规格的热电偶，用粘接剂或焊接的方法，将热电偶与被测金属表面（或去掉表面后的浅槽）直接接触，然后把热电偶接到显示仪表上组成测温系统。热电偶的应用如图 1-51 所示。

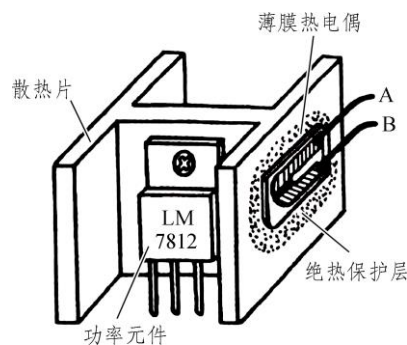


图 1-51 热电偶的应用

2. NTC 热敏电阻温度控制电路

NTC 热敏电阻广泛应用于温度测量，常用电桥接法，将电阻信号转换成电压信号来测量。如图 1-52 所示为 NTC 热敏电阻实现单点温度控制电路，当温度升高时，热敏电阻 R_t 的阻值降低，a 点的电位 U_a 升高到 $U_a > U_b$ ，比较器输出变为低电平， VT_1 导通，使 VT_2 也导通，继电器通电，常闭触点 K 断开，加热器断电停止加热。反之，当温度降低时，继电器失电，常闭触点 K 闭合，加热器通电加热。

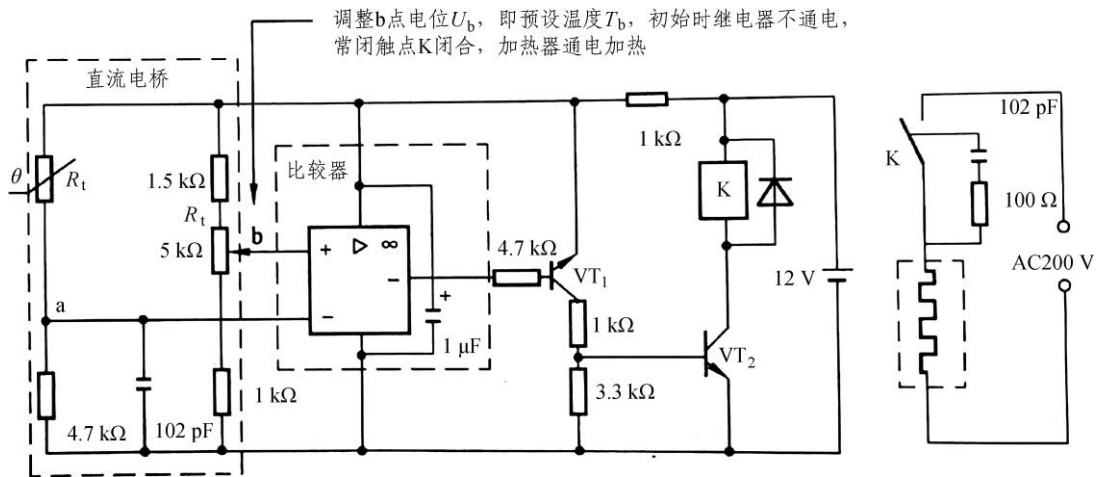


图 1-52 NTC 热敏电阻实现单点温度控制电路

3. 管道的流量检测

热敏电阻不仅能测量管道的温度，还能检测管道内气体或液体等介质的流量，如图 1-53 所示。图中 R_{t1} 和 R_{t2} 为热敏电阻， R_{t1} 置于管道中央， R_{t2} 置于温度与介质相同且不受介质流速影响的小室中， R_1 和 R_2 为普通电阻， R_{t1} 、 R_{t2} 、 R_1 和 R_2 这 4 个电阻组成电桥结构。当介质处于静止状态时，电桥处于平衡状态，流量计指示为零；当介质流动时，由于介质流动带走热量，温度的变化引起阻值的变化，电桥失去平衡而有输出，电流计指示值直接反映出流量的大小。

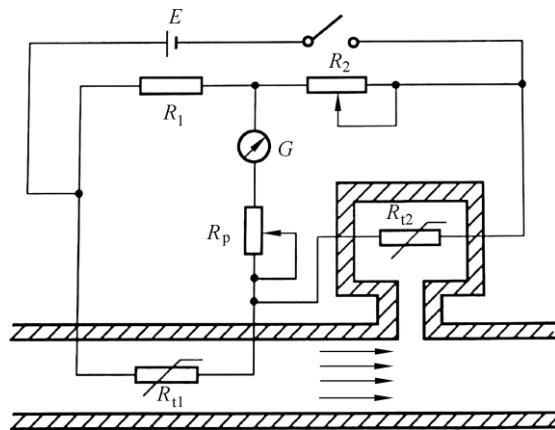


图 1-53 热敏电阻式流量计电路原理图

4. 红外线辐射温度计测人体温度

人体主要辐射波长为 $9 \sim 10 \mu\text{m}$ 的红外线，通过对人体自身辐射红外能量的测量，便能准确地测定人体表面温度。由于该波长范围内的光线不被空气所吸收，因而可利用人体辐射的红外能量精确地测量人体表面温度。红外温度测量技术的最大优点是测试速度快，1 s 内可测试完毕。由于它只接收人体对外发射的红外辐射，没有任何其他物理和化学因素作用于人体，所以对人体无任何害处。如果采用红外线传感器远距离测量人体表面温度的热像图，可以发现温度异常的部位，及时对疾病进行诊断治疗。国产 TH-IR101F 红外测温仪由红外传感器和显示报警系统两部分组成，它们之间通过专用的五芯电缆连接。安装时将红外传感器用支架固定在通道旁边或大门旁边等地方，使得被测人与红外传感器之间的距离相距 35 cm。在其旁边摆放一张桌子，放置显示报警系统。只要被测人在指定位置站立 1 s 以上，红外快速检测仪就可准确测量出人员体温。一旦受测者体温超过 38°C ，测温仪的红灯就会闪亮，同时发出蜂鸣声提醒检查人员。红外温度快速检测仪可广泛用于机场、海关、车站、宾馆、商场、影院、写字楼、学校等人流量较大的公共场所，对体温超过 38°C 的人员进行有效筛选，如图 1-54 所示。



图 1-54 测量人体温度示意图

【任务自检】

1. 什么是金属导体的热电效应？试说明热电偶的测温原理。
2. 试分析金属导体产生接触电动势和温差电动势的原因。
3. 简述热电偶的中间导体定律，并分别说明它们的实用价值。
4. 试述热电偶冷端温度补偿的几种主要方法和补偿原理。
5. 用镍铬-镍硅（K）热电偶测量温度，已知冷端温度为 40°C ，用高精度毫伏表测得这时的热电动势为 29.188 mV ，求被测点的温度。
6. 红外线分为几种类型？我们在什么地方可以用到它们。

任务六 超声波传感器

【任务描述】

- (1) 掌握超声波传感器的工作原理、结构组成；



1-7 超声波传感器

- (2) 掌握超声波传感器的探头及耦合技术；
- (3) 能独立分析电阻应变式传感器的应用实例。

【背景知识】

20 世纪中叶，人们发现某些介质的晶体，例如石英晶体、酒石酸钾钠晶体、PZT 晶体等，在高电压窄脉冲作用下，能产生较大功率的超声波。它与可闻声波不同，可以被聚焦，能用于集成电路的焊接，玻璃管内部的清洗；在检测方面，利用超声波有类似于光波的折射、反射的特性，制作超声波声纳探测器，可以用于探测海底沉船、潜艇等。现在，超声波已渗透到我们生活中的许多领域，例如 B 超、遥控、防盗、无损探伤等。

一、超声波基础知识

1. 声波的分类

声波是一种机械波。按照频率可分为次声波、可闻声波及超声波 3 种形式。声波频类的分布如图 1-55 所示。

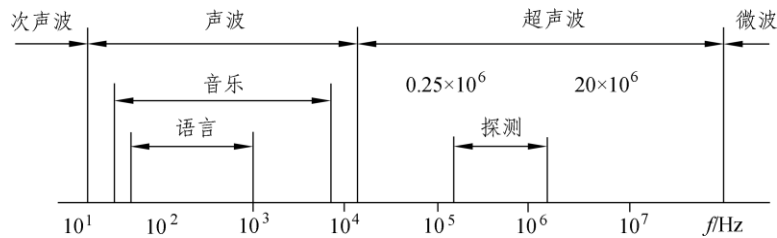


图 1-55 声波的频率分布

(1) 次声波。次声波是频率低于 20 Hz 的声波，人耳听不到，但可与人体器官发生共振，7 ~ 8 Hz 的次声波会引起人的恐怖感，动作不协调，甚至导致心脏停止跳动。

(2) 可闻声波。可闻声波的频率为 20 Hz ~ 20 kHz，人说话的频率范围一般在 20 Hz ~ 8 kHz。

(3) 超声波。超声波是指频率高于 20 kHz 的声波。直线传播方式，穿透力强，能量损失小。在遇到两种介质的分界面（例如钢板与空气的交界面）时，能产生明显的反射和折射现象，超声波的频率越高，其声场指向性就越好、绕射能力就越弱。

2. 超声波的传播方式

超声波的传播波形主要可分为纵波、横波、表面波等几种。

(1) 纵波。质点的振动方向与波的传播方向一致，这种波称为纵波，又称压缩波。纵波能够在固体、液体、气体中传播。人讲话时产生的声波就属于纵波。

(2) 横波。质点的振动方向与波的传播方向相垂直，这种波称为横波。它是固体介质受到交变剪切应力作用时产生的剪切形变，所以又称为剪切波，它只能在固体中传播。

(3) 表面波。固体的质点在固体表面的平衡位置附近做椭圆轨迹的振动，使振动波只沿着固体的表面向前传播，这种波称为表面波。

3. 声速、波长与指向性

1) 声 速

声波的传播速度取决于介质的弹性系数、介质的密度以及声阻抗。介质的声阻抗 Z 等于介质的密度 ρ 和声速 c 的乘积，即 $Z = \rho c$ 。常用介质材料的密度、声阻抗与声速如表 1-4 所示。

表 1-4 几种常用材料的声速与密度、声阻抗的关系（环境温度为 0 °C）

材料	密度 $\rho/10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	声阻抗 $Z/\text{MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	纵波声速 $c_L/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	横波声速 $c_S/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
钢	7.7	460	5.9	3.2
铜	8.9	420	4.7	2.2
铝	2.7	170	6.3	3.1
有机玻璃	1.18	32	2.7	1.2
甘油	1.27	24	1.9	—
水 (20 °C)	1.0	14.8	1.48	—
机油	0.9	12.8	1.4	—
空气	0.001 2	4×10^{-3}	0.34	—

固体的横波声速约为纵波声速的一半，且与频率关系不大。而表面波的声速约为横波声速的 90%，故又称表面波为慢波。温度越高，声速越慢。

2) 波 长

超声波的波长 λ 与频率 f 的乘积恒等于声速 c ，即

$$\lambda f = c \quad (1-37)$$

3) 指向性

超声波生源发出的超声波束以一定的角度逐渐向外扩散，指向角 θ 与超声源的直径 D 以及波长 λ 之间的关系为

$$\sin \theta = 1.22 \lambda / D \quad (1-38)$$

4. 超声波的反射与折射

1) 倾斜入射时的反射与折射

超声波以一定的入射角从一种介质传播到另一种介质的分界面上时，一部分能量反射回原介质，称为反射波；另一部分能量则透过分界面，在另一介质内继续传播，称为折射波或透射波，如图 1-56 所示。

如果入射声波的入射角 α 足够大时，将导致折射角 $\beta = 90^\circ$ ，则折射声波只能在介质分界面传播，折射波形将转换为表面波，这时的入射角称为临界

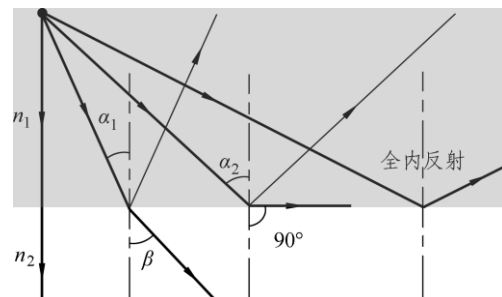


图 1-56 超声波的反射与折射

角。如果入射声波的入射角 α 大于临界角，将导致声波的全反射。

2) 垂直入射时的反射与透射

我们将反射波声压与入射波声压之比称为声压反射率 r 。与此对应，透射波声压与入射波声压之比称为声压透射率 d 。

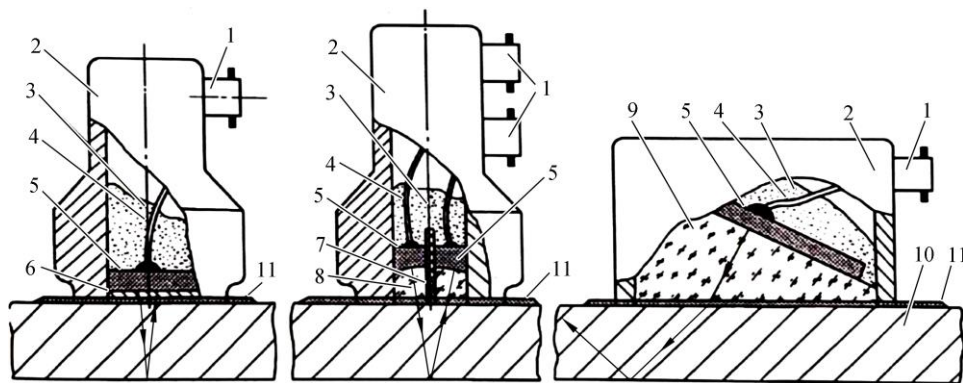
(1) 当介质 1 和介质 2 的声阻抗相等或十分接近时， $r=0$ ， $d=1$ ，即不产生反射波，可视为全透射。

(2) 当超声波从密度小的介质（例如水）射向密度大的介质（例如钢）时，反射率 r 和透射率 d 均较大。例如超声波从水中入射到钢中时，透射率高达 93.8%。

(3) 当超声波从密度大的介质射向密度小的介质时，反射率 r 较大，而透射率 d 却较小。例如在上例中，超声波进入钢板并传播一段距离后到达钢板底面时，若底部是钢、水界面，则声压的大部分被反射，反射率高达 93.8%，而只有一小部分泄露出来。

二、超声波探头及耦合技术

超声波探头又称为超声波换能器。它的工作原理有压电式、磁致伸缩式及电磁式等，在检测技术中主要采用压电式。探头分为直探头、斜探头、双探头、聚焦探头、表面波探头、冲水探头、水浸探头、空气传导探头以及其他专用探头等，如图 1-57 所示。



(a) 单晶直探头 (b) 双晶直探头 (c) 斜探头
1—接插件；2—外壳；3—阻尼吸收块；4—引线；5—压电片；6—保护膜；7—隔离层；8—延迟块；
9—有机玻璃斜楔块；10—试件；11—耦合剂。

图 1-57 超声波探头结构示意图

1. 以固体为传导介质的超声探头

1) 单晶直探头

用于固体介质的单晶直探头（俗称直探头）的结构如图 1-57 (a) 所示。压电片采用压电陶瓷材料制作，外壳用金属制作，保护膜用于防止压电片磨损。保护膜可以用三氧化二铝、碳化硼等硬度很高的耐磨材料制作。阻尼吸收块用于吸收压电片背面的超声脉冲能量，防止杂乱反射波产生，提高分辨力。阻尼吸收块用钨粉、环氧树脂等混合体浇注。

发射超声波时，将 500 V 以上的高压电脉冲加到压电片 5 上，利用逆压电效应，使压电片发射出一束频率落在超声范围内、持续时间很短的超声振动波。向上发射的超声振动波被阻尼块所吸收，而向下发射的超声波垂直透射到图 1-57 (a) 中的试件 10 内。假设该试件为

钢板，而其底面与空气交界，到达钢板底部的超声波的绝大部分能量被底部界面所反射。反射波经过一短暂的传播时间回到压电片 5。利用压电效应，压电片将机械振动波转换成同频率的交变电荷和电压。由于衰减等原因，该电压通常只有几十毫伏，还要加以放大，才能在显示器上显示出反射脉冲的波形和幅值。

从以上分析可知，超声波的发射和接收虽然均是利用同一块压电片，但时间上有先后之分，所以单晶直探头是处于分时工作状态，必须用电子开关来切换这两种不同的状态。

2) 双晶直探头

双晶直探头的结构如图 1-57 (b) 所示。它由两个单晶探头组合而成，装配在同一壳体内，其中一片压电片发射超声波，另一片压电片接收超声波。两压电片之间用一片吸声性能强绝缘性能好的薄片加以隔离，使超声波的发射和接收互不干扰。略有倾斜的压电片下方还设置延迟块，它用有机玻璃或环氧树脂制作，它能使超声波延迟一段时间后才入射到试件中，可减小试件接近表面处的盲区，提高分辨能力。双晶探头的结构虽然复杂些，但检测准确度比单晶直探头高，且超声信号的反射和接收的控制电路较单晶直探头简单。

3) 斜探头

有时为了使超声波能倾斜入射到被测介质中，可选用斜探头，如图 1-57 (c) 所示。压电片粘贴在与底面成一定角度（如 30°、45°等）的有机玻璃斜楔块上，压电片的上方用吸声性强的阻尼吸收覆盖。当斜楔块与不同材料的被测介质（试件）接触时，超声波产生一定角度的折射，倾斜入射到试件中去，折射角可通过计算求得。

斜探头根据声速入射角的不同，会在工件中产生横波、纵波和表面波。通常所说的斜探头是指横波斜探头，它的标称方式有 3 种：

- (1) 以纵波入射角作为标称，有 30°、45°、50°和 55°。
- (2) 以钢中的横波折射角作为标称，有 40°、45°、50°、60°和 70°等。
- (3) 以钢中的折射角正切值 (K) 作为标称，常用探头的 K 值有 1、1.5、2、2.5 和 3。

有机玻璃斜探头的入射角与在钢中的横波折射角的关系见表 1-5, K 值与折射角的关系见表 1-6。

表 1-5 有机玻璃斜探头的入射角与在钢中的横波折射角的关系

入射角	30°	45°	50°	55°
折射角	36°	57°	65°	76°

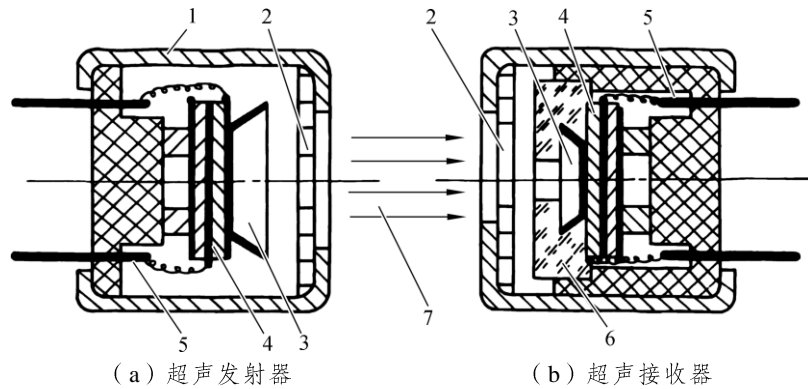
表 1-6 K 值与钢中的横波折射角的关系

K	1	1.5	2	2.5	3
折射角	45°	56°	63°	68°	72°

2. 以空气为传导介质的超声探头

以空气为传导介质的超声探头由于空气的声阻抗是固体声阻抗的几千分之一，所以空气超声探头的结构与固体传导探头有很大的差别。此类超声探头的发射换能器和接收换能器一般是分开设置的，两者结构也略有不同，图 1-58 是空气传导用的超声波发射换能器和

接收换能器（简称为发射器和接收器或超声探头）的结构示意图。发射器的压电片上粘贴了一只锥形共振盘，以提高发射效率和方向性。接收器在共振盘上还增加了一只阻抗匹配器，以滤除噪声、提高接收效率。配套的空气传导超声发射器和接收器的有效工作范围可达几米至几十米。



1—外壳；2—金属丝网罩；3—锥形共振盘；4—压电片；5—引脚；6—阻抗匹配器；7—超声波束。

图 1-58 空气传导型超声发射器和接收器的结构

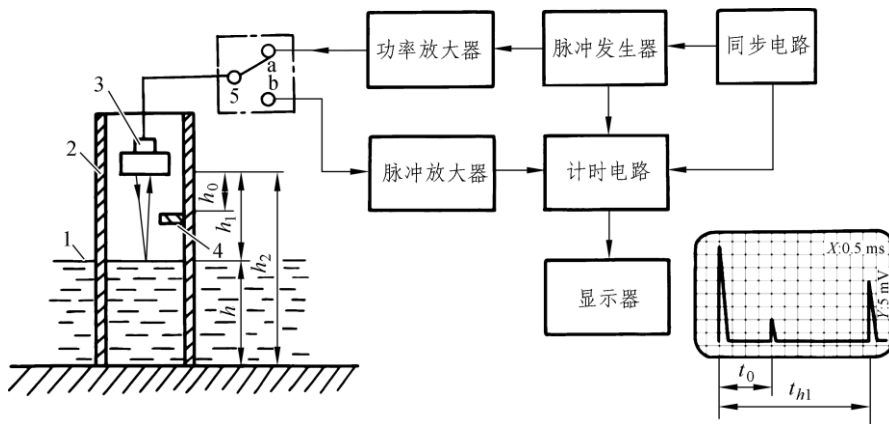
3. 耦合剂

在图 1-57 中，一般不能直接将探头放在被测介质（特别是粗糙金属）表面来回移动，以防磨损。更重要的是，由于超声探头与被测物体接触时，在工件表面不平整的情况下，探头与被测物体表面间必然存在一层空气薄层。空气的密度很小，将引起 3 个界面间强烈的杂乱反射波，造成干扰，而且空气也将对超声波造成很大的衰减。为此，必须将接触面之间的空气排挤掉，使超声波能顺利地入射到被测介质中。在工业中，经常使用一种称为耦合剂的液体物质，使之充满在接触层中，起到传递超声波的作用。常用的耦合剂有水、机油、甘油、水玻璃、胶水、化学糨糊等，耦合剂的厚度应尽量薄一些，以减小耦合损耗。

【任务实施】

1. 超声波测液位和物位

超声波液位（物位）传感器是一种非接触式的物位传感器，应用领域十分广泛。其工作原理是：工作时向液面或物体表面发射一束超声波，当超声波被其反射后，传感器再接收此反射波。设声速一定，根据声波往返的时间就可以计算出传感器到液面（物体表面）的距离，即测量出液面（物体表面）位置，如图 1-59 所示。



1—液面；2—直管；3—空气超声探头；4—反射小板；5—电子开关。

图 1-59 超声波液位计原理图

例：超声波液位计原理如图 1-59 所示，从显示屏上测得 $t_0 = 2 \text{ ms}$ ， $t_{h1} = 5.6 \text{ ms}$ 。已知水底与超声探头的间距为 10 m ，反射小板与探头的间距为 0.34 m ，求液位 h 。

解：由于

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{h_1}{t_{h1}}$$

所以有

$$h_1 = \frac{t_{h1}}{t_0} h_0 = \frac{5.6 \times 0.34}{2} = 0.95 \text{ m}$$

所以液位 h 为

$$h = h_2 - h_1 = (10 - 0.95) \text{ m} = 9.05 \text{ m}$$

由于空气中的声速随温度改变会造成温漂，所以在传送路径中还设置了一个反射性良好的小板作标准参照物，以便计算修正。上述方法除了可以测量液位外，也可以测量粉体和粒状体的物位。

2. 超声防盗报警器

图 1-60 所示为超声报警电路，上半部分为发射部分，下半部分为接收部分的电原理框图。它们装在同一块线路板上。发射器发射出频率 $f = 40 \text{ kHz}$ 左右的连续超声波（空气超声探头选用 40 kHz 工作频率可获得较高灵敏度，并可避开环境噪声干扰）。如果有人进入信号的有效区域，相对速度为 v ，从人体反射回接收器的超声波将由于多普勒效应，而发生频率偏移 Δf 。

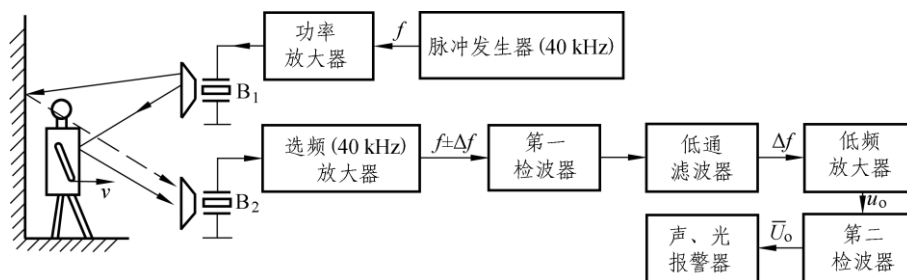


图 1-60 超声防盗报警器原理图

多普勒效应：当超声波源与传播介质之间存在相对运动时，接收器接收到的频率与超声波源发射的频率将有所不同。产生的频偏 $\pm \Delta f$ 与相对速度的大小及方向有关。

举例：当高速行驶的火车向你逼近和掠过时，所产生的变调声就是多普勒效应引起的。接收器收到两个不同频率所组成的差拍信号（40 kHz 以及偏移的频率 $40 \text{ kHz} \pm \Delta f$ ）。这些信号由 40 kHz 选频放大器放大，并经检波器检波后，由低通滤波器滤去 40 kHz 信号，而留下 Δf 的多普勒信号。此信号经低频放大器放大后，由检波器转换为直流电压，去控制报警扬声器或指示器。

利用多普勒原理的好处：可以排除墙壁、家具的影响（它们不会产生 Δf ），只对运动的物体起作用。由于振动和气流也会产生多普勒效应，故该防盗报警器多用于室内。

【任务自检】

1. 简述超声波传感器的结构与工作原理。
2. 简述超声波探头种类及各自的特点。
3. 什么是多普勒效应？请举例分析其工作原理。
4. 超声波传感器探测工件时，为什么要在探头与被测介质之间涂抹一层耦合剂？

任务七 光电式传感器

【任务描述】

- (1) 掌握光电式传感器的基本知识；
- (2) 熟悉常用光电器件的工作原理、结构及特点；
- (3) 分析光电式传感器的应用电路。



1-8 光电式传感器

【背景知识】

光照射在物体上会产生一系列的物理或化学效应，例如植物的光合作用，化学反应中的

催化作用，人眼的感光效应，取暖时的光热效应以及光照射在光电元件上的光电效应等。光电传感器是将光信号转换为电信号的一种传感器。使用这种传感器测量其他非电量（如转速、浊度、二维码等）时，只要将这些非电量转换为光信号的变化即可。此种测量方法具有反应快、非接触等优点，故在非电量检测中应用较广。

一、光电式传感器的基础知识

光电式传感器的理论基础是光电效应。用光照射某一物体，可以看作物体受到一连串能量为 hf 的光子的轰击，组成该物体的材料吸收光子能量而发生相应电效应的物理现象称为光电效应。通常把光电效应分为 3 类：

(1) 在光线的作用下，能使电子逸出物体表面的现象称为外光电效应，基于外光电效应的光电元件有光电管、光电倍增管等。

(2) 在光线的作用下，能使物体的电阻率改变的现象称为内光电效应，基于内光电效应的光电元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管及光敏晶闸管等。

(3) 在光线的作用下，半导体材料产生一定方向电动势的现象称为光生伏特效应，基于光生伏特效应的光电元件有光电池等。

第一类光电元件属于玻璃真空管元件，第二、三类属于半导体元件。

二、光电式传感器的光电器件

1. 光敏电阻

以 CdS 为主要成分的光敏电阻是应用广泛的一种光敏电阻。图 1-61 所示为该类型光敏电阻实物图、结构图与代表符号。为了吸收更多的光线，光敏电阻通常都是制成薄膜结构，电阻增强光电导体的受光面积，获得更高的灵敏度，光敏电阻的光电导体常做成梳状。为了防止光电导体受潮而影响光敏电阻的灵敏度，因此要将光电导体严密封装在带有玻璃的壳体中。

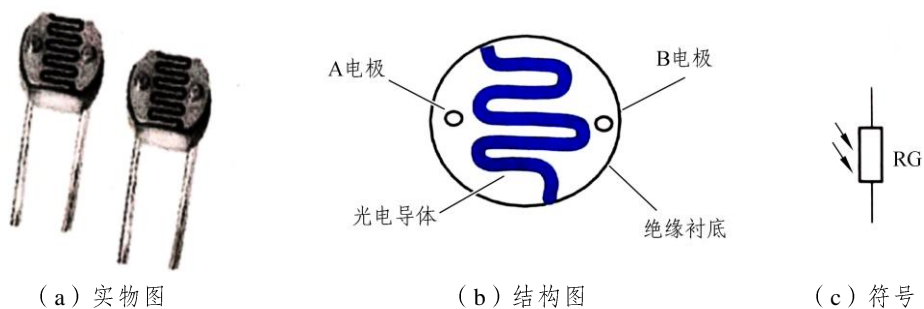


图 1-61 光敏电阻实物图、结构图与代表符号

1) 工作原理

光敏电阻的核心器件为光电导体，它是由半导体制成的。光敏电阻又称光导管，它没有极性，纯粹是一个电阻器件，使用时可以加直流电压，也可以加交流电压。如图 1-62 所示，在室温时，没有光照射光敏电阻的时候，阻值变大，电流变弱，流过回路的电流称为暗电流。相同条件下，有光照射光敏电阻的时候，阻值变小，电流变强。

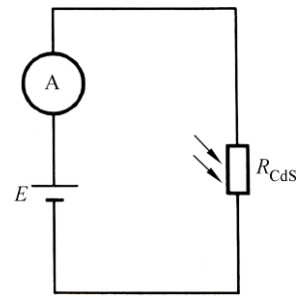


图 1-62 光敏电阻工作原理图

2) 主要参数

(1) 亮电阻与暗电阻。

光敏电阻受光照射时的电阻，称为亮电阻，此时，图 1-62 所示回路流过的电流为亮电流。光敏电阻没有光照射时的电阻，称为暗电阻，此时，图 1-62 所示回路流过的电流为暗电流。对于同一个光敏电阻而言，暗电阻一定大于亮电阻，同一回路中的暗电流一定小于亮电流。

(2) 灵敏度。

灵敏度是指光敏电阻的暗电阻与亮电阻的变化值。同一个光敏电阻的暗电阻与亮电阻相差越大，该光敏电阻的灵敏度就越高。

(3) 光谱灵敏度。

光谱灵敏度又称光谱效应，它是指光敏电阻在不同波长单色光照射下的灵敏度。图 1-63 所示为不同材料光敏电阻的光谱效应图。

(4) 光照特性。

光敏电阻输出的电信号随光照强度而变化的特性称为光照特性。如图 1-64 所示为光敏电阻光照特性曲线图，通过光照特性曲线图可以看出，光敏电阻的光照特性在多数情况下是非线性的，只有在微小区域内呈现出线性。

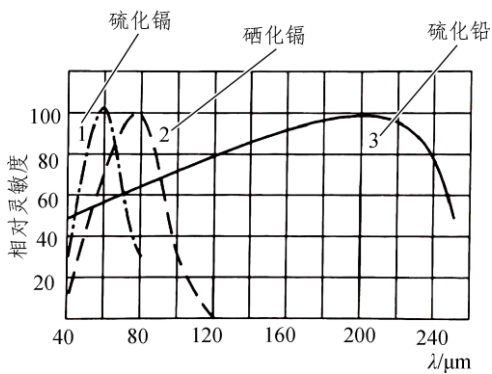


图 1-63 不同材料光敏电阻光谱效应图

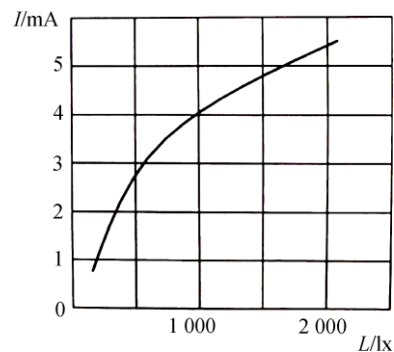


图 1-64 光敏电阻光谱特性曲线图

(5) 伏安特性曲线。

伏安特性曲线是描述光敏电阻的外加电压和流过光电流的关系，如图 1-65 所示其光电流随着外加电压的增大而增大。CdS 材料的光敏电阻在规定的极限电压下，其伏安特性具有较好的线性度。

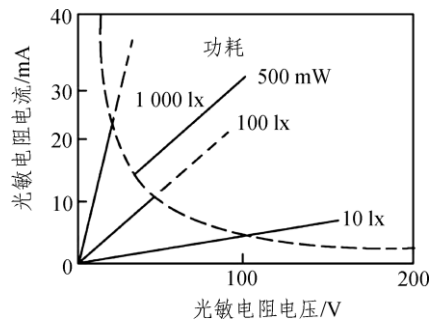


图 1-65 伏安特性曲线图

(6) 温度系数。

光敏电阻的光电效应受温度的影响很大，一般的光敏电阻的灵敏度在低温时要比高温时高，但 CdS 材料的光敏电阻的灵敏度与温度的关系则比较复杂。

2. 光敏二极管

光敏二极管是一种将光能转变为电能的敏感性二极管，它广泛地应用于各种自动控制系统中，其表示符号及实物如图 1-66 所示。

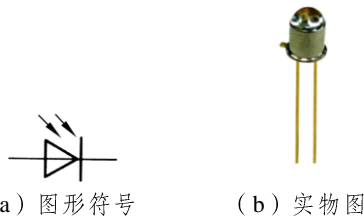


图 1-66 光敏二极管电路图形符号与实物图

光敏二极管常用的 3 种类型有：

(1) 普通光敏二极管：可以作为光电转换器、近红外光探测器及激光接收器，也可用在光纤通信中的光信号接收。

(2) 红外光敏二极管：可将红外发光二极管等发射的红外光转为电信号，用于遥控接收系统以及自动控制系统中。

(3) 视觉光敏二极管：对人眼可见光敏感，对红外光无反应，即接收红外光时完全截止。

1) 工作原理

当没有光照射到 VD 时，反向电阻很大，VD 不导通。当有光照射到 VD 时，反向电阻减小，VD 导通。其接线图如图 1-67 所示。（注：光敏二极管的接法与普通二极管相反）

2) 主要参数

光敏二极管反向直流电阻在无光照射时，可达到几兆欧；有光照时下降到几百欧姆。

(1) 最高工作电压。无光照时，光敏二极管允许的最高反向电压为 10 ~ 50 V。最高工作电压又称最高反向工作电压。

(2) 光电流 I_L 。在受到一定光照及最高工作电压下流过管子

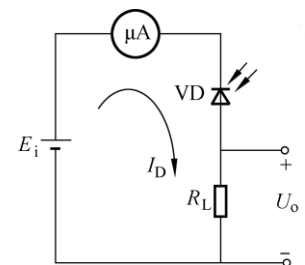


图 1-67 光敏二极管接线图

的反向电流。光电流一般为几十微安，并且与照度呈线性关系，光电流越大越好。

(3) 暗电流 I_B 。在无光照时，加一定反向电压时流过管子的反向电流，暗电流越小越好。

(4) 光谱响应特性。不同类型的光敏二极管，其光谱特性和峰值波长均不同。

3. 光敏三极管

光敏三极管又称光电三极管，是具有放大功能的光电转换三极管，广泛应用在各种自动光控系统中，其结构、符号及实物如图 1-68 所示。

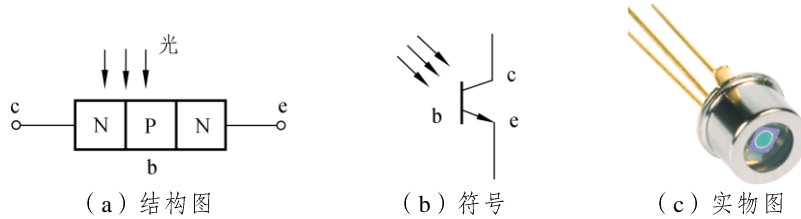


图 1-68 光敏三极管结构、电路符号与实物图

光敏三极管的结构和普通三极管相似，也分为 NPN 和 PNP 两种类型，根据光敏三极管的工作特性，可以将光敏三极管等价成一个普通三极管和一个发光二极管连接的形式，其等效电路如图 1-69 所示。为了增大管子的驱动功率，可以采用达林顿结构的连接方式，其管子的电路符号与等效电路如图 1-70 所示。

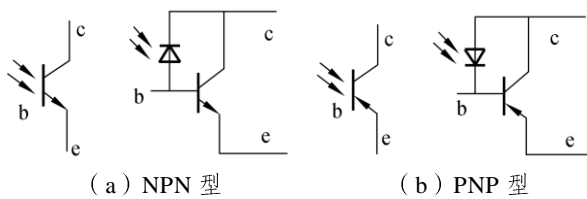


图 1-69 光敏三极管电路符号与等效电路

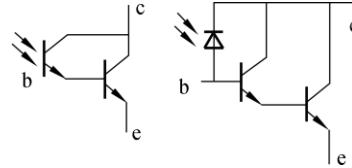


图 1-70 达林顿管符号与等效电路

光敏三极管有 3 个引脚的，也有 2 个引脚的，在 3 个引脚的结构中，基极是可以利用的，在 2 个引脚的结构中，光窗口就是管子的基极。

光敏三极管在无光照时和普通的三极管一样，处于截止状态，当光信号照射到基极时，形成的光电流从基极输入三极管，电流被放大 β 倍输出。

4. 热释电红外传感器

凡是自然界的物体，例如人体、冰、火焰等都会发出不同波形的红外线。热释电传感器就是一种能检测这些物体发射的红外线而输出电信号的传感器。检测红外线要比检测可见光方便。具体原因：

- (1) 红外线不受可见光的影响，可不分昼夜进行检测。
- (2) 被测对象自身发射红外线，不必另设光源。
- (3) 大气对某些特定波长的红外线吸收甚少，这些波长的红外线非常容易被检测出来。

例如：2~2.6 μm ，3~5 μm ，8~14 μm 这 3 个波段，它们被称为大气窗口。

1) 热释电红外传感器的分类

热释电红外传感器分为热型和量子型两种类型。

- (1) 热型，又称热释电或被动式红外传感器，其响应红外线波长范围宽、价格便宜，适

合常温使用。但其灵敏度低、响应速度慢。安全、报警、防盗等领域以热型红外传感器应用得比较广泛。

(2) 量子型。响应红外线波长范围窄，价格相对较贵，要求冷却在一定温度下使用。但其灵敏度高、响应速度快。

2) 热释电红外传感器的结构

热释电红外传感器 (PIR) 是由高热电系数材料配合滤光镜片窗口组成的，它能够以非接触的形式检测出人体或其他物体所发射出的红外线变化量，并且将其转化成电信号输出。其结构如图 1-71 所示。

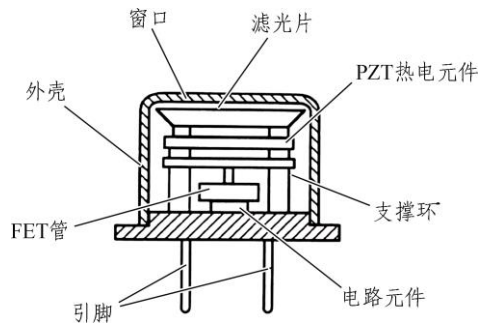


图 1-71 热释电红外传感器的结构

在使用热释电红外传感器时，除了要装菲涅尔透镜提高灵敏度外，还需要配备必需的电阻，才能组成完整的检测电路。菲涅尔透镜是一种精密的光学系统，对红外光的透过率达到了 65% 以上，安装在红外传感器外壳上，要调整透镜与传感器窗口间的焦距。常见的透镜类型有“半球状”“长方形”“水平薄片型”“光束型”以及“抗灯光干扰型”5 种。

实验证明：不加菲涅尔透镜的传感器检测距离为 2 m 左右，加透镜后，有效的检测距离可以达到 12 ~ 15 m。

【任务实施】

1. 亮光报警器

图 1-72 所示是利用光敏电阻制成的亮光报警器，当有光照射 R_{CdS} 时， VT_1 导通， VT_2 导通， VT_3 导通，铃 B 响；当无光照射 R_{CdS} 时， VT_1 截止， VT_2 截止， VT_3 截止，铃 B 不响。

V_Z 为稳压管，电容 C 为旁路电容，它主要是保证放大电路放大倍数不变。

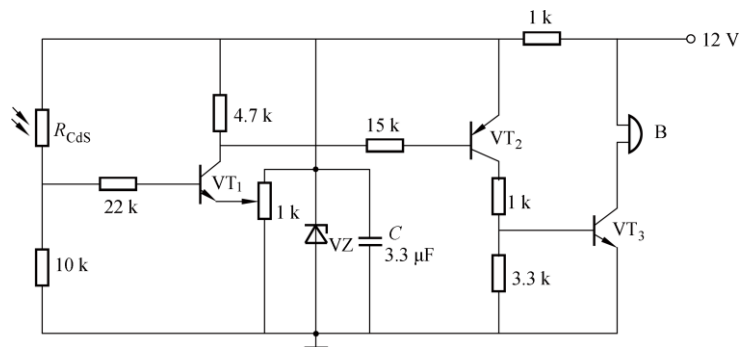


图 1-72 亮光报警电路

2. 光开关电路

由光敏二极管构成的光开关电路如图 1-73 所示,由 VT_1 和 VT_2 将光电流处理后驱动继电器 K 工作。

(1) 有自然光照射 VD_1 时, VD_1 呈现低阻抗, VT_1 导通, VT_2 导通, 继电器 K 得电, 常开触点 $K-1$ 闭合, 负载工作。

(2) 无自然光照射 VD_1 时, VD_1 呈现高阻抗, VT_1 、 VT_2 截止, 继电器 K 失电, 负载不工作。

(3) 二极管 VD_2 为续流二极管, 用来保护三极管 VT_2 , 三极管 VT_2 相当于开关, 工作时状态为饱和。

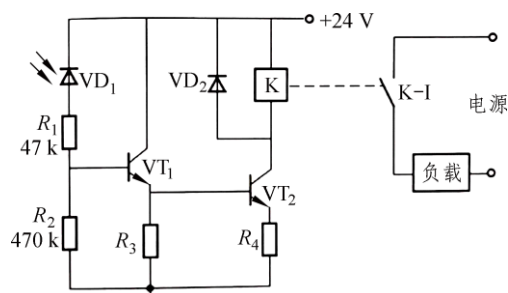
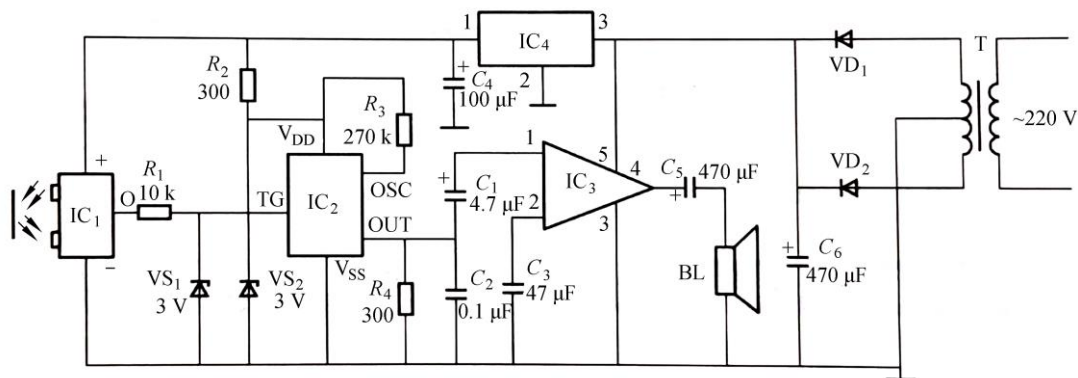


图 1-73 光开关电路图

3. 红外线反射式防盗报警器

红外线反射式防盗报警器, 采用反射式红外探测组件(其最大探测距离可达 12 m)来触发报警器, 当检测到入侵时, 报警器会发出逼真的狗叫声, 提醒用户有“外人入侵”。其电路如图 1-74 所示。该红外线反射式防盗报警器电路由电源电路、红外线探测电路、语音发生器和音频放大输出电路组成。电源电路由电源变压器 T 、整流二极管 VD_1 、 VD_2 、滤波电容器 C_4 、 C_6 和三端稳压集成电路 IC_4 组成; 红外线探测电路由红外线反射式探测模块 IC_1 、电阻器 R_1 、稳压二极管 VS_2 组成; 音效发生器由音效集成电路 IC_2 、电阻器 R_2 、 R_3 和稳压二极管 VS_2 组成; 音频放大输出电路由音频功率放大集成电路 IC_3 、电容器 $C_1 \sim C_3$ 、 C_5 和扬声器 BL 组成。

交流 220 V 电压经 T 降压、 VD_1 和 VD_2 整流、 C_6 滤波后, 一路为 IC_3 提供 15 V 脉动直流电压; 另一路经 IC_4 稳压后, 为 IC_1 提供 +12 V 工作电压。该 +12 V 电压还经 R_2 限流及 VS_2 稳压后, 为 IC_2 提供 +3 V 工作电压。平时, IC_1 输出低电平, IC_2 不能触发工作, BL 不发声。当有外人进入 IC_1 的探测区域, IC_1 发射的红外线信号经人体反射回来, IC_1 接收到人体反射回来的红外信号并对该信号进行处理后, 输出高电平触发信号, 使 IC_2 受触发工作, 输出音效电信号。该电信号经 IC_3 放大后, 驱动 BL 发出响亮的狗叫声, 通知用户有“情况”。



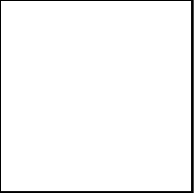


图 1-74 红外线反射式防盗报警电路

【任务自检】

1. 简述光敏电阻的结构，应用哪些参数和特性来衡量它的性能。
2. 什么是光电效应？请分别解释光电效应的种类，并列举出常用的光电器件。
3. 自学光电池的使用方法。
4. 根据图 1-73，分析光开关电路的工作过程。
5. 根据图 1-74，分析红外线反射式防盗报警电路的工作原理。