



工业和信息化部“十四五”规划教材

传感器与智能检测 技术

沈燕卿 主 编

庾 奎 王 丽 邱 宇 副主编

窦作成 杨 乐 邓 皓 庄建兵 参 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为工业和信息化部“十四五”规划教材。

本书通过精选内容、归类编排的方法增强传感器课程教学的系统性,在编写过程中力求突出共性基础,以传感器功用为主线,着眼于传感器的选型、装调、测量数据分析等解决智能制造业中信息采集与转换等实际问题的知识和技能。

全书分为7个项目,采用模块化、任务式编排,分别介绍传感器与智能检测技术基础,典型物理传感器、化学传感器和生物传感器,着重介绍典型传感器的工作原理、特性及其在工程中的应用。

本书主要适宜作为高职、中职、职业本科院校自动化类、电气类、机电类、电子类等专业的教材,也可作为相关工程技术人员的培训教材及自学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与智能检测技术 / 沈燕卿主编. —北京: 电子工业出版社, 2023.7

ISBN 978-7-121-45759-3

I. ①传… II. ①沈… III. ①传感器—高等学校—教材②自动检测—高等学校—教材 IV. ①TP212②TP274

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 103768 号

责任编辑: 王昭松 特约编辑: 田学清

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 17.5 字数: 448 千字

版 次: 2023 年 7 月第 1 版

印 次: 2023 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254015, wangzs@phei.com.cn, QQ83169290。

PREFACE

前言

党的二十大报告提出,“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑。必须坚持科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力,深入实施科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,开辟发展新领域新赛道,不断塑造发展新动能新优势。”

传感器是机器系统的“感官”,其应用涉及机械制造、工业过程控制、汽车电子、通信电子、消费电子、起居生活、生物医药等国民经济的各个领域。传感器技术是现代信息技术的三大支柱之一,是现代科学技术的基础和关键。

本书根据高等职业院校装备制造大类的自动化类、机电设备类等专业的教学标准,参照“检测技术”“传感器技术”等课程的教学大纲,基于产教融合、校企合作的职教理念,通过开展广泛的行业、企业调研,结合编者多年的教学和工程实践经验编写而成,由中国特色高水平高职学校与多个智能制造领域头部企业合作完成。

针对传感器种类繁多、原理复杂、特性各异的情况,本书通过精选内容、归类编排的方法增强传感器课程教学的系统性,在编写过程中力求突出共性基础,以传感器功用为主线,着眼于传感器的选型、装调、测量数据分析等解决智能制造业中信息采集与转换等实际问题的知识和技能。

全书由7个项目组成,采用模块化、任务式编排,项目1介绍了传感器的基本特性与技术指标、安装与调试、测量数据处理等基础知识;项目2~项目6重点介绍了典型物理传感器、化学传感器和生物传感器的工作原理、特性及其在工程中的典型应用,每个项目均设置了典型传感器的应用及特性测试环节,使学生在掌握常用传感器的特性、装调、数据分析和维护等工程应用技能的同时,学会利用传感器技术解决工程实际问题的思路及方法;项目7介绍了传感器在智能家居、现代汽车、机器人等领域的应用。

每个项目选材力求通俗、简明、实用、可操作性强,每个项目后面均有习题,以期学生通过这些习题对所学的知识和技能进行巩固、加深理解;同时还有部分知识拓展应用题,要求学生灵活运用所学的知识和查找网络资源来解决实际工程问题,引导学生思考、自学和讨论,提升学生的工程实践能力。

基于“双高计划”装备制造类专业群的数字资源课程建设,本书将提供丰富的配套数字化教学资料,包括电子课件、微课、在线试题、实验指导书等,并于智慧职教等互联网平台开展课程信息化教学,充分满足教师、学生、企业和社会学习者等不同对象、不同阶段、不同场合的学习需求。

本书由重庆工业职业技术学院的沈燕卿担任主编，重庆华数机器人有限公司的庾奎和重庆工业职业技术学院的王丽、邱宇担任副主编，重庆工业职业技术学院的窦作成、杨乐、邓皓和联合汽车电子有限公司的庄建兵参编本书。其中，沈燕卿负责项目 1、项目 2、项目 5 内容的编写及统稿，王丽、窦作成、杨乐编写了项目 3、项目 6，邱宇、邓皓编写了项目 4，庾奎、庄建兵编写了项目 7 并负责全书工程应用及测试案例的选择与审核。感谢重庆工业职业技术学院的张晓琴教授、郭艳萍教授，中国四联仪器仪表集团有限公司的刘裴高级工程师，联合汽车电子有限公司的陈实高级工程师等的大力支持。

由于编者水平有限，书中若有疏漏和不妥之处，敬请广大读者提出宝贵意见，以利于本书在今后做进一步完善。

电子工业出版社版权所有
盗版必究

CONTENTS

目录

项目 1

传感器与智能检测技术基础 /1

任务 1.1 传感器技术概述 /1

- 1.1.1 检测仪表与传感器 /1
- 1.1.2 传感器技术的地位及应用 /2
- 1.1.3 传感器的作用 /3
- 1.1.4 自动检测与控制系统 /4
- 1.1.5 传感器技术发展的历史、现状及发展趋势 /5

任务 1.2 传感器的概念及命名 /8

- 1.2.1 传感器的定义及典型组成 /9
- 1.2.2 传感器的输出与仪器仪表 /9
- 1.2.3 传感器的分类 /10
- 1.2.4 传感器的命名及表示 /13

任务 1.3 传感器的基本特性及技术指标 /14

- 1.3.1 传感器的静态特性技术指标 /15
- 1.3.2 传感器的稳定性及可靠性技术指标 /18
- 1.3.3 传感器的动态特性技术指标 /19
- 1.3.4 传感器的其他技术指标 /20

任务 1.4 测量误差与测量结果表示 /21

- 1.4.1 真值 /21
- 1.4.2 测量误差的概念及分类 /22
- 1.4.3 测量结果的定性表示 /23
- 1.4.4 测量结果的定量表示 /24

任务 1.5 测量误差分析和数据处理 /26

- 1.5.1 随机误差的统计特征和正态分布 /27
- 1.5.2 随机误差和测量值的数字特征 /28
- 1.5.3 随机误差的处理 /30
- 1.5.4 粗大误差的发现和um理 /31
- 1.5.5 系统误差的发现和um理 /33
- 1.5.6 直接测量数据的处理 /34

任务 1.6 传感器的典型转换电路 /36

1.6.1 电桥电路 /36

1.6.2 放大电路 /37

1.6.3 滤波器 /39

1.6.4 振荡电路 /39

1.6.5 调制与解调电路 /40

任务 1.7 传感器的安装与调试 /41

1.7.1 传感器的输出形式 /42

1.7.2 传感器的连接 /42

1.7.3 传感器的标定与校准 /44

1.7.4 传感器的通信 /46

任务 1.8 智能传感器 /47

1.8.1 智能传感器的概念与发展历程 /48

1.8.2 智能传感器的构成及功能 /48

1.8.3 智能传感器的实现途径 /49

1.8.4 智能传感器案例 /51

习题 /53

项目 2

热学量传感器 /56

任务 2.1 温标及测温方法 /56

2.1.1 温标 /57

2.1.2 温度的检测方法及分类 /58

任务 2.2 热膨胀式温度计 /60

2.2.1 液体膨胀式温度计 /60

2.2.2 固体膨胀式温度计 /61

2.2.3 压力式温度计 /62

任务 2.3 电阻式温度传感器 /63

2.3.1 金属热电阻传感器 /63

2.3.2 半导体热敏电阻传感器 /66

2.3.3 电阻式温度传感器的应用 /67

任务 2.4 热电偶传感器 /70

2.4.1 热电偶传感器的工作原理 /71

2.4.2 热电偶工作的基本定律 /72

2.4.3 热电偶的种类、结构形式和特点 /74

2.4.4 热电偶传感器的冷端延长 /77

2.4.5 热电偶传感器的冷端补偿 /78

2.4.6 热电偶传感器的应用 /80

任务 2.5 辐射式温度传感器 /83

- 2.5.1 辐射式测温的基本原理 /83
- 2.5.2 辐射式温度传感器的典型组成 /84
- 2.5.3 常见的辐射式温度传感器 /84
- 2.5.4 辐射式温度传感器的应用 /85

任务 2.6 其他温度传感器 /86

- 2.6.1 PN 结型温度传感器 /86
- 2.6.2 电容式温度传感器 /86
- 2.6.3 谐振式温度传感器 /87
- 2.6.4 热色式温度传感器 /87
- 2.6.5 超声波式温度传感器 /87
- 2.6.6 微波式温度传感器 /87
- 2.6.7 光纤式温度传感器 /88
- 2.6.8 测温方法总结 /88

任务 2.7 智能温度控制系统与温度传感器的特性测试 /88

- 2.7.1 智能温度控制系统的调试 /89
- 2.7.2 电阻式温度传感器的特性测试 /90
- 2.7.3 热电偶式温度传感器的特性测试 /92
- 2.7.4 PN 结型温度传感器的特性测试 /92

习题 /94

项目 3

光、磁与电学量传感器 /97

任务 3.1 光学量传感器 /97

- 3.1.1 光电效应及光敏元件 /98
- 3.1.2 光敏元件的基本应用电路 /107
- 3.1.3 光学量传感器的应用 /109

任务 3.2 磁学量传感器 /112

- 3.2.1 电磁感应式传感器 /113
- 3.2.2 霍尔传感器 /115
- 3.2.3 磁阻传感器 /119
- 3.2.4 结型磁敏传感器 /121
- 3.2.5 磁学量传感器的应用 /121

任务 3.3 电学量传感器 /122

- 3.3.1 电流传感器 /122
- 3.3.2 电压传感器 /125
- 3.3.3 功率传感器 /127
- 3.3.4 频率传感器 /129

3.3.5 电学量传感器的应用	/130
任务 3.4 光纤传感器	/131
3.4.1 传光型光纤传感器	/131
3.4.2 传感型光纤传感器	/133
3.4.3 光纤传感器的应用	/134
任务 3.5 光、磁学量传感器的应用及特性测试	/136
3.5.1 光学量传感器的特性测试	/136
3.5.2 光电式转速控制系统调试	/137
3.5.3 霍尔传感器测位移	/138
3.5.4 霍尔传感器测转速	/138
3.5.5 电磁感应式传感器测转速	/139
3.5.6 光纤传感器测位移	/139
3.5.7 光纤传感器测转速	/140
习题	/141

项目 4

位移传感器与物位传感器 /144

任务 4.1 电位器式传感器	/145
4.1.1 电位器式传感器的结构及工作原理	/145
4.1.2 电位器式传感器的应用	/146
任务 4.2 电感式传感器	/146
4.2.1 自感式传感器	/147
4.2.2 差动变压器式位移传感器	/152
4.2.3 自感式与差动变压器式传感器的应用	/154
4.2.4 电涡流式传感器及其应用	/157
任务 4.3 电容式传感器	/161
4.3.1 电容式传感器的工作原理和特性	/161
4.3.2 电容式传感器的转换电路	/166
4.3.3 电容式传感器的应用	/168
任务 4.4 超声波传感器	/171
4.4.1 超声波及其物理性质	/172
4.4.2 超声波传感器的结构及分类	/173
4.4.3 超声波传感器的发射和接收电路	/174
4.4.4 超声波传感器的应用	/175
任务 4.5 数字式位移传感器	/181
4.5.1 编码器及其应用	/181
4.5.2 光栅传感器及其应用	/184
4.5.3 磁栅传感器	/187

- 4.5.4 其他电磁感应式位移传感器 /188
- 任务 4.6 物位传感器 /189
 - 4.6.1 接触式物位传感器 /190
 - 4.6.2 接近开关的类型及工作原理 /190
 - 4.6.3 接近开关的特点及主要性能指标 /193
 - 4.6.4 接近开关的选型及应用 /193
- 任务 4.7 位移传感器的应用及特性测试 /194
 - 4.7.1 差动螺线管式传感器的标定及频率特性测试 /194
 - 4.7.2 差动变压器式传感器的标定及频率特性测试 /195
 - 4.7.3 电涡流式传感器的标定及频率特性测试 /196
 - 4.7.4 电容式传感器的标定及位移特性测试 /197
 - 4.7.5 超声波传感器的标定及位移特性测试 /198
- 习题 /198

项目 5

力学量传感器 /202

- 任务 5.1 电阻应变式传感器 /202
 - 5.1.1 应变片的构成及工作原理 /203
 - 5.1.2 应变片的布片和组桥形式 /204
 - 5.1.3 温漂及其补偿 /206
 - 5.1.4 应变片的选用与粘贴 /207
 - 5.1.5 电阻应变式传感器的应用 /207
- 任务 5.2 压电式传感器 /209
 - 5.2.1 压电式传感器的工作原理 /210
 - 5.2.2 压电材料 /210
 - 5.2.3 压电式传感器的转换电路 /211
 - 5.2.4 压电式传感器的应用 /214
- 任务 5.3 其他力敏传感器 /216
 - 5.3.1 谐振式力敏传感器 /216
 - 5.3.2 压磁式力敏传感器 /217
 - 5.3.3 差动变压器式力敏传感器 /217
 - 5.3.4 电容式力敏传感器 /218
- 任务 5.4 力学量传感器的应用及特性测试 /218
 - 5.4.1 金属箔式应变式传感器称重 /219
 - 5.4.2 半导体压阻式传感器测压力 /220
 - 5.4.3 压电式传感器的标定 /220
- 习题 /221

项目 6

化学传感器与生物传感器 /224

任务 6.1 气体传感器 /225

6.1.1 气体传感器的分类 /225

6.1.2 电阻式气体传感器 /226

6.1.3 气体传感器的应用 /227

任务 6.2 湿度传感器 /229

6.2.1 湿度及其表示 /229

6.2.2 湿度的测量 /230

6.2.3 湿度传感器的应用 /231

任务 6.3 离子传感器 /233

6.3.1 离子传感器的结构与分类 /233

6.3.2 电极型离子传感器 /234

6.3.3 场效应晶体管型离子传感器 /234

6.3.4 离子传感器的应用 /234

任务 6.4 生物传感器 /235

6.4.1 生物传感器概述 /236

6.4.2 生物传感器的发展历程 /236

6.4.3 生物传感器的特点 /237

6.4.4 典型生物传感器及其应用 /238

6.4.5 生物传感器的发展趋势 /239

任务 6.5 气体传感器与湿度传感器的特性测试 /239

6.5.1 气体传感器的特性测试 /240

6.5.2 电阻式湿度传感器的特性测试 /240

习题 /241

项目 7

传感器技术综合应用 /243

任务 7.1 传感器与智能家居 /243

7.1.1 智能家居的发展历程 /244

7.1.2 基于物联网的智能家居 /244

7.1.3 智能家居中的传感器 /246

7.1.4 智能家居的发展趋势 /248

任务 7.2 传感器与现代汽车 /248

7.2.1 传感器在汽车发动机中的作用 /249

7.2.2 传感器在底盘控制中的应用 /251

7.2.3 传感器在车身控制中的应用 /251

7.2.4	传感器在汽车环境感知中的应用	/252
7.2.5	传感器在汽车自动驾驶中的应用	/252
7.2.6	汽车传感器的发展趋势	/253
任务 7.3	传感器与机器人	/254
7.3.1	机器人的概念、构成及分类	/254
7.3.2	机器人中的传感器	/256
7.3.3	机器人内部传感器	/257
7.3.4	机器人外部传感器	/258
7.3.5	机器人及其传感器的发展	/262
习题		/262

附录		/265
----	--	------

电子工业出版社版权所有
盗版必究

项目 1

传感器与智能检测技术基础

以传感器为核心的检测系统就像人的神经和感官一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息，成为人们认识自然、改造自然的有力工具。传感器是打开自然科学中未知宝库的一把钥匙，没有传感器，就没有现代科学技术。在本项目中，我们将学习检测仪表与传感器、传感器的基本特性及技术指标、测量误差分析和数据处理、典型转换电路、安装与调试等内容。

任务 1.1 传感器技术概述

检测是指按照规定程序，由确定给定产品的一种或多种特性，进行处理或提供服务所组成的技术操作（GB/T 27025—2019、ISO/IEC 17025: 2005），是一种利用各种物理、化学或生物效应，选择合适的方法与装置，将生产、生活、科研等各方面的有关信息通过检查与测量的方法，赋予定性或定量结果的过程。在本任务中，我们将学习检测仪表与传感器、自动检测与控制系统组成等内容。

知识目标：

- （1）掌握检测、检测仪表的概念及传感器的作用。
- （2）结合工程案例，能说明自动检测与控制系统的组成、结构和工作原理。
- （3）了解传感器技术的地位、作用和发展趋势。

技能目标：

- （1）具备查阅传感器及其相关知识的能力。
- （2）能结合系统框图分析自动检测与控制系统的工作原理。

1.1.1 检测仪表与传感器

检测仪表是能确定所感受的被测量大小的仪表，它可以是传感器、变送器或自身兼有检出元件和显示装置的仪表。根据《传感器通用术语》（GB/T 7665—2005）

可知, 传感器 (Sensor/Transducer) 是能感受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。当输出为规定的标准信号时, 则称为变送器 (Transmitter)。标准信号, 是指变化范围的上下限已经标准化的信号。

传感器可以独立存在, 也可以与其他设备以一体方式呈现, 是系统感知与获取信息的窗口。无论是在现代生活、生产活动中, 还是在工业监控和科学研究等领域, 都离不开检测与传感器这个重要环节。若没有传感器对原始的各种参数进行精确且可靠的自动检测, 那么信号转换、信息处理、数据显示、最优控制等, 都是无法进行和实现的。

1.1.2 传感器技术的地位及应用

传感器技术是现代科技的前沿技术, 是现代信息技术的三大支柱之一, 其水平的高低是衡量一个国家科技发展水平的重要标准。在利用信息的过程中, 首先要解决获取准确可靠的信息的问题, 而传感器是获取信息的主要途径和手段。传感器产业是国内外公认的具有发展前途的高技术产业, 它以技术含量高、经济效益好、渗透能力强、市场前景广等特点被世人瞩目。

随着现代科学技术的高速发展和人们生活水平的迅速提高, 传感器技术受到越来越多的国家的普遍重视, 它的应用已渗透到机械制造、工业过程控制、汽车电子、通信电子、消费电子、起居生活、生物医疗等国民经济的各个领域。

(1) 在环境监测方面的应用。

随着各国经济的迅速发展, 环境污染问题日益凸显, 保护环境并实现可持续发展逐渐成为当今的热门话题。人们迫切希望拥有一种能对大气、水质等进行连续、快速、在线监测的仪器, 而环境质量传感器满足了人们的需求。目前, 已有相当一部分传感器应用于环境监测, 如对海岛鸟类生活规律的观测、对气象现象的观测、对森林火警的观测、洪灾预警等。

(2) 在工业监测和控制中的应用。

在工业生产过程中, 必须对温度、压力、流量、液位和气体成分等参数进行检测, 从而实现对工作状态的监控, 形成稳定、可靠、响应快速的生产制造环境, 降低生产运营成本, 提高产品的质量, 提升生产效率, 进而提升企业的综合竞争力。如果没有传感器, 现代工业生产的自动化和智能化程度将会大大降低。

以汽车工业为例, 随着人们生活水平的提高, 汽车已逐渐走进千家万户, 汽车的安全、舒适、节能、环保和智能化是其发展趋势。汽车上装有大量的传感器, 它们在汽车中充当其感官, 主要分布在发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统中, 通过对车辆行驶距离、发动机转速、燃料剩余量等汽车工作状态信息进行检测, 形成了气囊系统、防盗系统、防滑控制系统、防抱死装置、电子变速装置等, 为车辆的正常运行和人员安全提供保障。

(3) 在智慧人居系统中的应用。

智慧人居是智能家居发展的新形态, 代表了人与空间的智慧演进过程。随着物联网和人工智能技术的发展, 各种特色智能终端通过系统集成, 实现了互联、互通、互控, 智能家居逐渐走进千家万户。智慧人居系统通常包括智能门锁、智能安防、

智能窗帘、智能灯光、智能影音、智能新风、智能关怀、AI 交互等系统。比如，通过布置于房间内的温度、湿度、光照、空气成分等无线传感器，智慧人居系统可感知居室不同部分的微观状况，从而对空调、门窗以及其他家电进行控制，提供给人们安全、舒适的居住环境；通过布置于建筑物内的图像、声音、气体、温度、压力、辐射等传感器，系统可及时发现异常事件，并自动启动报警等应急措施。

(4) 在现代医学领域的应用。

人体生理信息有电信息和非电信息两大类；从分布来说，人体生理信息有体内的（如血压等各类压力），也有体表的（如心电等各类生物电）和体外的（如红外、生物磁等）。医学传感器作为获取生命体征信息的“电五官”，需要测取人体的温度、血压、呼吸信号、心脑电波等来辅助医生或系统判断人体状态，它的作用日益显著，并得到了广泛应用。例如，在图像处理、临床化学检验、生命体征参数的监护监测，以及呼吸、神经、心血管疾病的诊断与治疗等方面，医学传感器已无处不在。

(5) 在科学技术方面的应用。

科学技术的不断发展，产生了许多新的学科领域，无论是宏观的宇宙，还是微观的粒子世界，对许多未知现象和规律的研究均需获取大量人类感官无法感知的信息，没有相应的传感器是不可能实现的。

1.1.3 传感器的作用

传感器技术学科是一门综合性很强的学科，它利用传感器敏感材料的力、热、声、电、光、磁等物理“效应”和“现象”，以研究传感器的材料、设计、制作和应用为主要内容，综合了物理学、微电子学、化学、材料学、生物学等各学科的知识，涉及知识面广，且与生产、科研实践联系紧密。传感器的种类繁多，常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器，以及近年来兴起的智能传感器、图像传感器等。

人体与机器系统的比较如图 1.1 所示。在人体系统中，人的体力和脑力劳动通过感觉器官接收外界信息，将这些信息传送给大脑，大脑对信息分析处理后传递控制信息给肌体；在机器系统中，传感器就相当于人体的感觉器官，可用于感受有关外界环境及自身状态的各种物理量、化学量或生物量（如力、位移、速度、位置等）的状态信息，并将这些信息转换成电参数等，然后通过相应的变换、放大、调制与解调、滤波、运算等数据处理装置将有用的信息提取出来，由执行机构对信息进行显示、存储或控制等。

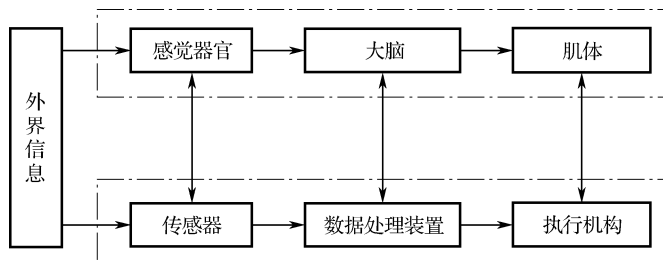


图 1.1 人体与机器系统的比较

具体而言，传感器的作用主要有以下两个方面。

(1) 信息数据的采集。传感器能感受到规定的被测量信息。典型的应用场合如下。

- ✓ 目标物的存在状态检测：传感器感应其存在状态并将信息转换为数据输出。
- ✓ 系统或装置的运行状态检测：传感器检测其运行状态并输出信息，发现异常情况时，发出警告信号并启动保护电路工作。
- ✓ 内部控制信息的采集：传感器检测控制系统处于某种状态的信息，并由此控制系统的状态，或者跟踪系统变化的目标值。基于传感器采集的信息，操作人员或智能管理系统可实现对生产系统或装置的正常运行与安全的管理。此外，产品质量检测、物体的缺陷或异常诊断、产品制造与销售中所需的计量等，都需由传感器的信息采集来完成。

(2) 信息数据的转换。传感器能将感受到的信息，按一定规律转换成电信号或其他所需形式的信息输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。典型的应用如下。

- ✓ 将以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据。
- ✓ 读出各种媒体上的信息并进行转换，如读出磁盘与光盘中的信息的磁头就是一种传感器。

1.1.4 自动检测与控制系统

传感器是实现自动检测与控制的首要环节，它的出现和不断更新，让物体有了触觉、味觉、嗅觉、视觉等感官，让物体更形象，让感知更生动。实现上述功能的传感器、相应的信号处理电路、显示存储装置、控制器、执行器和对象（被控设备或过程），构成了自动检测与控制系统。典型的单闭环负反馈控制系统结构如图 1.2 所示。

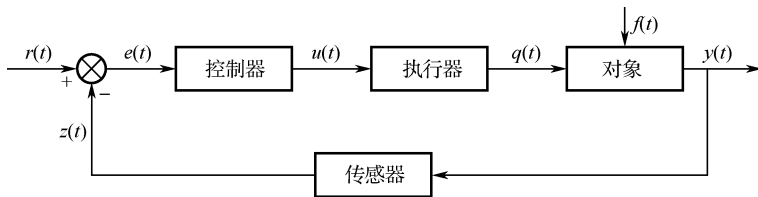


图 1.2 典型的单闭环负反馈控制系统结构

其中， $r(t)$ 为给定信号； $z(t)$ 是反馈信号，来自传感器的关于被控参数 $y(t)$ 的测量值； $e(t)$ 为绝对误差， $e(t)=r(t)-z(t)$ ； $u(t)$ 是控制信号，是关于绝对误差 $e(t)$ 的函数，通常采用 PID 控制； $q(t)$ 为控制参数； $y(t)$ 是被控参数，反映对象的被控质量或效果；连线箭头“→”表示信号作用方向或介质流量的流向。

对象即被控设备或过程，又称系统或过程，指从被控参数检测点至调节阀之间的管道或设备。扰动作用于过程且使被控参数变化，根据扰动的来源，其分为内部扰动和外部扰动。其中，内部扰动来自控制参数 $q(t)$ 的作用；外部扰动 $f(t)$ 会使控制值偏离给定值。

以空调温度控制为例，该系统主要由温度控制器、装在回风管内的温度传感器、冷热电动调节二通阀门及驱动器等组成。装在回风管内的温度传感器检测获得环境

温度 $z(t)$ ，控制器把环境温度 $z(t)$ 与设定的温度 $r(t)$ 相比较，并根据比较的结果 $e(t)$ 输出相应的控制信号 $u(t)$ 来控制冷热电动调节二通阀门的动作，从而使送风温度保持在所需要的范围内。

传感器是实现自动检测与控制的关键环节，传感器技术也是机器系统不可缺少的关键技术之一，其水平的高低在很大程度上影响和决定着系统的功能；其水平越高，系统的自动化和智能化程度就越高。在一套完整的机器系统中，如果不能利用传感器技术对被控对象的各项参数进行及时准确的检测并转换成易于传输和处理的信号，我们所需要的用于系统控制的信息就无法获得，整个系统就无法正常有效地工作。

1.1.5 传感器技术发展的历史、现状及发展趋势

1.1.5.1 传感器技术发展的历史

传感器技术的发展大体可分为三代。

第一代是结构型传感器，它利用结构参量变化来感受和转化信号。例如，电阻应变式传感器，它利用金属材料发生弹性形变时电阻的变化来反映力或压力等相关被测量的作用。

第二代是 20 世纪 70 年代发展起来的固体型传感器，这种传感器由半导体、电介质、磁性材料等固体元件构成，是利用材料的某些特性制成的。例如，利用热电效应制成热电偶传感器，利用霍尔效应制成霍尔传感器，利用光电效应制成光敏（光电）传感器。

第三代传感器是自 20 世纪 80 年代发展起来的智能型传感器，它是微型计算机技术与检测技术相结合的产物，使传感器具有一定的人工智能，如对外界信息具有一定的检测、自诊断、数据处理及自适应能力等。

1.1.5.2 传感器技术发展的现状

自 20 世纪 80 年代初，美、日、德、法、英等国家相继确立了加速传感器技术发展的方针，视之为涉及科技进步、经济发展和国家安全的关键技术，纷纷将其列入长远发展规划和重点计划之中，并采取严格的保密规定进行技术封锁和控制。尽管我国现在的传感器制造行业取得了长足进步，但与发达国家相比仍存在明显差距。这种差距表现在计算、模拟和设计方法，微机械加工技术与设备，封装技术与设备，可靠性技术研究等方面。当前，美国、日本、德国占据了全球传感器市场近七成份额，而我国仅占到 11% 左右。

近年来，国家陆续发布相关政策文件，对传感器产业的发展提出明确要求，即着力研发拥有自主知识产权的高端智能传感器，助力工业互联网平台建设，为实现智能制造打下坚实基础。

从应用领域来看，工业、汽车电子、通信电子、消费电子四个领域是传感器最大的市场。国内工业和汽车电子领域的传感器占比约为 42%，而发展最快的是汽车电子和通信电子应用市场。

智能汽车和无人驾驶技术是驱动微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System，

MEMS) 传感器发展的重要动力。在智能汽车时代, 将会使用大量的 MEMS 运动传感器实现主动安全技术; 语音将成为人与智能汽车的重要交互方式, MEMS 麦克风将迎来发展新机遇。自动驾驶技术的兴起, 进一步推动了 MEMS 传感器进入汽车领域。

此外, MEMS 传感器也是智能工厂的“心脏”, 从这个层面上讲, 它是工业机器人变得“神通广大”的利器。它让产品生产流程持续运行, 并让工作人员远离生产线和设备, 保证人身安全和健康。

1.1.5.3 传感器技术的发展趋势

随着物联网、云计算、大数据、人工智能、机器人、3D 打印等新技术的不断涌现, 21 世纪的工业将以崭新的姿态向前发展。智能制造已成为未来制造业变革的方向, 也是各国提升国力、抢占世界经济先机的必由之路。要实现智能制造, 要万物互联, 就需要传感器。近几十年来, 传感器技术的内涵发展主要体现在两个方面: 一是引入差动技术、平均技术、补偿修正技术、隔离抗干扰抑制技术、稳定性处理技术等, 提高与改善传感器的技术指标; 二是利用原有或新发现的原理、材料和工艺等, 开发新型传感器。传感器技术在新效应、新材料、新工艺方面的发展, 具体如下。

(1) 新效应(New Effect)。传感器的工作机理通常基于各种效应和定律, 目前应用的效应很多, 如压电效应、压阻效应等, 还有一些效应是人们未知的。发现新效应, 并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器, 是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。

结构型传感器发展得较早, 目前日趋成熟。通常而言, 结构型传感器具有结构复杂、体积偏大、价格偏高等不足; 物性型传感器则大致与之相反, 具有不少诱人的优点。当前世界各国都在物性型传感器方面投入了大量人力、物力加强研究, 它已成为一个值得注意的发展动向。

(2) 新材料(New Material)。传感器材料是传感器技术的基础, 也是传感器技术升级的重要支撑。在敏感材料中, 陶瓷材料、有机材料发展很快, 可采用不同的配方混合原料, 在精密调配化学成分的基础上, 经过高准确度成型烧结, 得到对某一种或某几种气体具有识别功能的敏感材料, 用于制成新型气体传感器。石墨烯传感器是由石墨烯制成的用途广泛的高光敏度传感器, 由于使用了“滞留光线”的纳米结构, 能够用比传统传感器更长的时间来捕获产生光线的电子微粒, 从而产生更强的电信号, 并将这种电信号转换成图像。此外, 高分子有机敏感材料是近几年人们极为关注的具有应用潜力的新型材料, 可制成热敏、光敏、气敏、湿敏、力敏、离子敏和生物敏等传感器。随着科学技术的不断进步, 将有更多的新型材料诞生。

(3) 新工艺(New Technology)。新工艺的含义范围很广, 这里主要指与发展新型传感器联系特别密切的微细加工技术。该技术又称微机电系统技术, 是近年来随着集成电路工艺发展起来的, 它是离子束、电子束、分子束、激光束和化学刻蚀等用于微电子加工的技术, 目前已越来越多地用于传感器领域。例如, 利用半导体技术制造出压阻式传感器, 利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏传感器、湿敏传感器, 利用各向异性腐蚀技术制作出全硅谐振式压力传感器。

从传感器发展的外延表现来看, 随着新效应、新材料、新工艺等的发现和发展,

传感器系统正向着微型化、集成化、网络化和智能化的方向发展,从而实现传感器的节能降耗,提高其敏感性、选择性、响应速度、动态范围、准确度、稳定性,以及在恶劣环境条件下工作的能力。

(1) 微型化 (Micromation)。计算机辅助设计技术和微机电系统技术的发展使传感器的研发与制造进入微型化时代。在当前技术水平下,微切削加工技术已经可以生产出具有不同层次的 3D 微型结构,从而生产出体积非常微小的微型传感器敏感元件,如毒气传感器、离子传感器、光电探测器等以硅为主要构成材料的传感器都装有极小的敏感元件。

终端设备的小型化、种类多样化进一步推动了微电子加工技术特别是纳米加工技术的快速发展,NEMS (Nano-Electro-Mechanical System) 技术应运而生。MEMS/NEMS 技术的广泛应用,将会促使微米甚至纳米级别的微型器件出现,在促进传感器微型化、降低其运行功耗的同时,推动传感器向集成化、智能化方向发展。

(2) 集成化 (Integration)。集成化是指在单个传感器上集成多种相似或完全不同的功能,并产生稳定可靠的信号输出。基于 MEMS 技术,可将同一功能的多个元件并列化,即将同一类型的传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来,如 CCD 图像传感器;亦可将传感器与放大、运算及温度补偿等环节一体化,组装成一个器件,即实现多功能一体化,例如,集成压力传感器就是将硅膜片、压阻电桥、放大器和温度补偿电阻集成为一个器件制成的,称为热敏晶闸管器件。

在通常情况下,一个传感器只能用来探测一种物理量,但在许多应用领域中,以智能化压力传感器为例,为了能够准确地反映客观事物和环境,往往需要同时测量温度、湿度和压力等多个物理量。由若干种敏感元件组成的多功能传感器是一种体积小且多种功能兼备的新一代探测系统,它可以借助敏感元件不同的物理结构、化学物质及表征方式,用单独一个传感器系统来同时实现多种传感器的功能,同时还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价,进而反映被测系统的整体状态。

多功能传感器无疑是当前传感器技术发展中一个全新的研究方向,目前有许多学者正在积极从事于该领域的研究工作。有的将某些类型的传感器进行适当组合而使之成为新的传感器,如用来测量压差和静压的组合传感器。又如,为了能够以较高的灵敏度和较小的粒度同时探测多种信号,微型数字式三端口传感器可以同时采用热敏元件、光敏元件和磁敏元件,这种组配方式的传感器不但能够输出模拟信号,而且能够输出频率信号和数字信号。

从实用的角度考虑,多功能传感器中应用较多的是各种类型的多功能触觉传感器,譬如,哈尔滨工业大学和香港城市大学联合团队提出了一种基于压电薄膜的、具有行列式电极结构的触觉传感器阵列,可以实时感测和区分各种外部刺激的大小、位置和模式,包括轻微触碰、按压和弯曲。

(3) 网络化 (Networking)。传感器网络是当前国际上备受关注的新兴前沿研究热点领域之一。传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协作,实时地监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,并通过嵌入式系统对信息进行处理,然后通过随机自组织无线网络以多中继方式将所感知的信息传送到用户终端,真正实现“无处不在的计算”理念。传感器网络的研究采用系统发展模式,因

而必须将现代的先进微电子技术、微细加工技术、SOC (System On Chip) 设计技术、纳米材料技术、现代信息通信技术、计算机网络技术等融合, 特别是要实现传感器网络特有的超低功耗系统设计。如果把传感器网络按其功能抽象成五个层次, 则包括基础层 (传感器集合)、网络层 (通信网络)、中间件层、数据处理和管理层及应用开发层。其中, 基础层以研究新型传感器和传感系统为核心, 包括应用新的传感原理、使用新的材料及采用新的结构设计等。

(4) 智能化 (Intelligent)。智能传感器是指那些装有微处理器的, 不但能够进行信息处理和信息存储, 而且能够进行逻辑思考和结论判断的传感器, 如对非线性信号进行线性化处理, 借助软件滤波器对数字信号进行滤波, 通过对环境等的检测实施自诊断和自校正等。

智能传感器以微机等数据处理装置为核心, 其主要组成部分包括主传感器、辅助传感器及微型机的硬件设备等。例如, 智能化压力传感器, 主传感器为压力传感器, 用来探测压力参数; 辅助传感器通常为温度传感器和环境压力传感器, 用来测量环境的温度和压力变化; 硬件设备除了能够对传感器的弱输出信号进行放大、处理和存储, 还执行与计算机之间的通信联络。采用智能化技术后, 可以方便地调节和校正由于温度、压力的变化而导致的测量误差。

借助于半导体集成化技术把传感器部分与信号预处理电路、输入/输出接口、微处理器等制作在同一块芯片上, 就制成了大规模集成智能传感器。可以说, 智能传感器是传感器技术与大规模集成电路技术相结合的产物, 它的实现取决于传感器技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展。这类传感器具有多功能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点。

目前, 智能传感器技术正处于蓬勃发展时期, 多用于压力、力、振动冲击加速度、流量、温/湿度的测量, 如霍尼韦尔公司的 ST3000 系列智能变送器和斯特曼公司的二维加速度传感器等。与此同时, 基于模糊理论和神经网络技术的智能传感器系统的研究也日益受到相关研究人员的重视。

随着 CAD 技术、MEMS 技术、信息理论及数据分析算法的发展, 未来的传感器系统必将变得更加微型化、集成化、网络化和智能化。除此之外, 低功耗传感器和无源传感器, 以及用于地震灾害、海啸灾害检测和预警的传感器也是未来的发展方向。

任务 1.2 传感器的概念及命名

走到便利店门前, 大门自动打开; 想知道明天会不会有台风, 看一下天气预报就能知道台风走到了哪里; 想解锁手机, 无须输入密码, 用指纹或者脸部就能轻松解锁……这些我们生活中早已习以为常的小事情, 它们都是智能化的体现。而这些智能化, 都离不开一个关键的器件——传感器。

人可以通过耳、目、鼻、唇、舌了解这个世界, 而传感器就相当于机器的五官, 能够让机器感知这个世界。传感器直接与被测对象发生联系, 采集并获取被测对象的信息, 以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测与控制的首要环节。在本任务中, 我们将学习传感器的定义及典型组成、输出与仪器仪表分类、命名及表示等内容。

知识目标:

- (1) 能说明传感器的定义、典型组成及作用。
- (2) 结合实际应用,能总结归纳传感器的分类、命名及表示。
- (3) 能说明传感器与检测仪器的联系与区别。

技能目标:

具备识别传感器代号和图形表示的技能。



扫码看微课

1.2.1 传感器的定义及典型组成

传感器的定义及典型组成

根据《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)可知,传感器是能感受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。当输出为规定的标准信号时,则称为变送器。从广义传感器角度而言,其输出的可用信号包括机械指示信号、电信号、气压信号、光信号、颜色、声音、字符等;从狭义传感器(一般意义上的传感器)角度而言,其输出主要指电信号。

传感器通常由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成,其组成如图 1.3 所示。

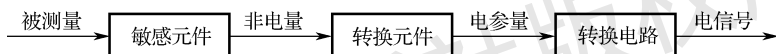


图 1.3 传感器的组成

其中,敏感元件是感受或响应被测量的变化量(包括物理量、化学量、生物量等,大多为非电量),并输出与被测量成确定关系的其他更易于转换的非电量的元件。例如,在电位器式压力传感器中,弹簧管等弹性敏感元件将压力转换为位移,且压力与位移之间保持一定的函数关系。

转换元件也称为传感元件。通常它不直接感受被测量,而是将敏感元件的输出量转换为电阻、电容、电感等电参量再输出。例如,电位器式压力传感器中的电位器将弹性敏感元件的位移变化转换成电阻的变化。

转换电路也称为信号处理电路,将转换元件输出的电参量转换成电压、电流或频率等电信号。典型的转换电路有电桥、放大器、振荡器、电荷放大器等。

需要指出的是,并不是所有的传感器都必须同时包括敏感元件、转换元件和转换电路三部分。如果敏感元件直接输出的是电参量,它就同时兼为转换元件,如热电阻等;在特殊情况下,如热电偶等,它能将被测温度变化直接转换为电压输出,此时它就兼具转换元件和部分转换电路的功能。

1.2.2 传感器的输出与仪器仪表

新的国家标准规定传感器的标准输出电流为 4~20mA,标准输出电压为 1~5V(旧国标中为 0~10mA 和 0~2V)。当传感器的输出为规定的标准信号时,其被称为变送器。

在传感器网络通信中,当前广泛采用可寻址远程传感器高速通道(Highway Addressable Remote Transducer, HART)协议。这是一种适用于智能传感器的通信协议,与目前使用 4~20mA 模拟信号的系統完全兼容,模拟信号和数字信号可以同时进行通信,从而使不同生产厂家的产品具有通用性。

在工程中，往往按转换能次数来定性地称呼测量仪表，能量转换一次的称为一次仪表，转换两次及以上的称为二次仪表。以热电偶测量温度为例，热电偶本身将热能转换成电能，故称一次仪表；若再将电能用电位计（或毫伏计）转换成指针移动的机械能，则进行了第二次能量转换，就称为二次仪表。

一次仪表通常带有敏感元件，用以感受被测介质参数的变化；或具有标尺，指示读数；或没有标尺，本身不指示读数。一次仪表通常直接安装在工艺管道或设备上，或者安装在测量点附近但与被测介质有接触，是一种测量并显示过程工艺参数或者发送参数信号至二次仪表的仪表。

二次仪表常安装在仪表盘上，是一种接收由变送器、转换器、传感器（包括热电偶、热电阻）等送来的电或气信号，并指示、记录或计算来自一次仪表所检测的过程工艺参数值的仪表。二次仪表接收的标准信号一般有三种：气动信号（20~100kPa 或 0.02~0.1MPa）；II型电动单元仪表信号（0~10mA，DC）；III型电动单元仪表信号（4~20mA，DC）。也有个别的仪表不用标准信号，一次仪表发出电信号，二次仪表直接指示，如远传压力表等。

在工程中，根据距离测量现场的远近，检测仪表又可分为就地仪表和远传仪表。就地仪表就是与化工设备就近在工艺区域内安装的仪表，典型例子是压力表、玻璃管液位计等；远传仪表就是安装在现场能够将现场信号以电或者气的形式从现场变送远传至控制室的仪表，比如一体化的压力变送器等。现在很多传统意义上的就地仪表也具有了远传功能，既可用于现场指示工艺参数，又可用于信号的远距离传输。

1.2.3 传感器的分类

传感器的种类很多，常见的分类方法有两种：一种是按被测量进行分类；另一种是按传感器的工作原理进行分类。此外，还可以按转换能量供给形式、工作机理、输出信号类型、材料类型、制造工艺进行分类。

（1）按被测量进行分类。传感器按被测量进行分类如表 1.1 所示。根据被测量的不同，传感器可分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器等。采用这种分类方法表明了传感器的用途，便于使用者选用。



扫码看微课

传感器的分类及表示

表 1.1 传感器按被测量进行分类

传感器名称	基本被测量		派生被测量
位移传感器	位 移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度
		角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度传感器	速 度	线速度	流速、流量、动量
		角速度	转速、角振动
加速度传感器	加速度	线加速度	振动、冲击
		角加速度	角振动、扭矩、转动惯量
力传感器	力	压力	静态压力、动态压力、表压、差压、绝压、微型压力
		力矩	扭矩、转矩
时间传感器	时间		频率、周期、计数

续表

传感器名称	基本被测量	派生被测量
热传感器	温度	热流、热容、热导率、比热容
磁传感器	磁场强度	磁通量、磁感应强度、磁场梯度
光传感器	光照度	光通量、光谱、颜色、位置
电传感器	电学量（电压、电流、电荷量）	功率、能量
声传感器	声压	声强、声功率、声场均匀度
湿度传感器	湿度	绝对湿度、露点温度、混合比

(2) 按传感器的工作原理进行分类。根据工作原理的不同, 国标制定的传感器分类体系表将传感器分为物理传感器、化学传感器、生物传感器三大类。其中, 物理传感器是利用被测量物质的某些物理性质发生明显变化的特性制成的, 如压电效应, 磁致伸缩现象, 离子化、极化、热电、光电、磁电等效应, 被测信号量的微小变化都将转换成电信号。化学传感器是以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系, 利用能把化学物质的成分、浓度等化学量转化成电学量的敏感元件制成的。生物传感器是利用各种生物或生物物质的特性制成的, 用以检测与识别生物体内化学成分的传感器。这种分类方法表明了传感器的工作原理, 有利于传感器的设计和应用。例如, 电感式传感器将被测量转换成电感值的变化。

大多数传感器是以物理原理为基础制成的。化学传感器的技术问题较多, 如可靠性问题、规模生产的可能性问题、价格问题等, 解决了这类难题, 化学传感器的应用将会有巨大增长。常见物理传感器的工作原理及应用领域如表 1.2 所示。

表 1.2 常见物理传感器的工作原理及应用领域

传感器分类		转 换 原 理	传感器名称	典 型 应 用
转 换 形 式	中 间 参 量			
电 参 数	电阻	移动电势器触点改变电阻	电势器式传感器	位移
		应变效应	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		热效应	热丝式传感器	气流速度、液体流量
			电阻式温度传感器	温度、辐射热
		光电导效应	光敏电阻传感器	光强
		湿敏效应	电阻式湿敏传感器	湿度
	电容	变几何尺寸	电容式传感器	力、压力、负荷、位移
		变介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	自感式传感器	位移
		电涡流效应	电涡流传感器	位移、厚度、转速
		压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器式传感器	位移
			自整角机	角位移
			旋转变压器	位移

续表

传感器分类		转 换 原 理	传感器名称	典 型 应 用
转 换 形 式	中 间 参 量			
电 参 数	频率	改变谐振回路中的 固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	莫尔条纹	光栅传感器	大角位移、大直线位移
		互感随位置变化	感应同步器	
		磁电转换	磁栅传感器	
	数字	光电效应、磁电效应	角度编码器	大角位移
电 能 量	电动势	热电效应	热电偶传感器	温度
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	电磁感应式传感器	速度、加速度
		光电效应	光学量传感器	光强、光照度
	电荷	辐射电离	电离式传感器	离子数量、放射性强度
		压电效应	压电式传感器	动态力、加速度

在工程应用中，我们通常把工作原理和用途结合起来命名传感器，如电容式压力传感器、电感式位移传感器等。

(3) 按转换能量供给形式进行分类。传感器按转化能量供给形式可分为能量变换型（发电型）传感器和能量控制型（参量型）传感器两种。能量变换型传感器在进行信号转换时不需额外提供能量，就可将输入信号能量变换为另一种形式的能量输出，如热电偶传感器、压电式传感器等；能量控制型传感器在进行信号转换时，需要先供给传感器能量，并将检测到的能量变化作为输出信号，如电阻应变式传感器、光电管等。

(4) 按工作机理进行分类。传感器按工作机理可分为结构型传感器和物性型传感器两种。结构型传感器利用机械构件（如金属膜片等）的变形检测被测量，即被测量变化引起了传感器结构发生改变，从而引起输出电量变化。例如，当外加压力变化时，电容式压力传感器的电容极板发生位移，结构改变引起电容值变化，在转换电路的作用下其输出电压随之发生变化。物性型传感器利用材料的物理特性及其各种物理、化学效应检测被测量，一般没有可动结构部分，具有响应快、易小型化等特点。例如，当外界作用力发生改变时，压电片基于压电效应产生电荷，在转换电路的作用下，压电式传感器的输出电压发生改变。

(5) 按输出信号类型进行分类。按输出信号类型可将传感器分为模拟式传感器、数字式传感器和开关式传感器。模拟式传感器是输出信号为模拟量的传感器；数字式传感器是输出信号为数字量或数字编码的传感器；当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时，开关式传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

(6) 按材料类型进行分类。在外界因素的作用下，所有材料都会做出具有特征性的反应。通常利用那些对外界作用最敏感的材料，即那些具有功能特性的材料来制作传感器的敏感元件。例如，所用材料可分为金属、聚合物、陶瓷、混合物等；

按材料的物理性质分为导体、绝缘体、半导体、磁性材料等；按材料的晶体结构分为单晶材料、多晶材料、非晶材料等。

(7) 按制造工艺进行分类。按照制造工艺的不同, 可以将传感器分为集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器、陶瓷传感器等。其中, 集成传感器是用标准的生产硅基半导体集成电路的工艺技术制造的, 通常还将敏感元件连同转换电路集成在一起; 薄膜传感器则是通过沉积在介质衬底(基板)上的相应敏感材料的薄膜制成的, 使用混合工艺时, 同样可将部分电路制造在此基板上; 厚膜传感器是利用相应材料的浆料, 涂覆在陶瓷基片上制成的, 基片通常是由 Al_2O_3 制成的, 然后进行热处理, 使厚膜成型; 陶瓷传感器采用标准的陶瓷工艺或其某种变种工艺(溶胶-凝胶等)生产, 完成适当的预备性操作之后, 已成型的元件在高温中进行烧结。

1.2.4 传感器的命名及表示

国标《传感器命名法及代码》(GB/T 7666—2005) 规定了传感器的命名方法、代号标记方法, 该标准适用于传感器的生产、科学研究、教学及其他有关领域。

1.2.4.1 传感器的命名方法

在有关传感器的统计表格、图书索引、检索及计算机汉字处理等特殊场合, 传感器产品的名称应由主题词加四级修饰语构成。主题词为传感器; 第一级修饰语为被测量, 包括修饰被测量的定语; 第二级修饰语为转换原理, 一般可后续以“式”字; 第三级修饰语为特征描述, 指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征, 一般可后续以“型”字; 第四级修饰语为主要技术指标, 比如量程、测量范围、准确度等。例如“传感器, 加速度, 压电式, $\pm 20\text{g}$ ”“传感器, 差压, 谐振式, 智能型, 35kPa ”等。

在技术文件、产品样本、学术论文、教材及书刊的陈述句子中, 产品名称应采用与命名法相反的顺序, 如“ $\pm 20\text{g}$ 压电式加速度传感器”“ 35kPa 智能型谐振式差压传感器”等。

当对传感器的产品命名时, 除第一级修饰语外, 其他各级修饰语可视产品的具体情况任选或省略, 如“订购 100mm 位移传感器 10 只”。

1.2.4.2 传感器的代号标记方法

根据国标规定, 传感器的代号由大写汉语拼音字母(或国际通用标志)和阿拉伯数字构成。传感器的完整代号应依次包括以下四部分: 主称、被测量、转换原理、序号。其中, 主称(传感器), 用汉语拼音字母“C”标记。被测量用一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记, 当这组代号与该部分的另一个代号重复时, 则用其汉语拼音的第二个大写字母作代号, 以此类推; 若有国际通用标志, 则应采用国际通用标志。转换原理用一个或两个汉语拼音的第一个大写字母标记, 有重复时同样用后续拼音字母替换。序号用阿拉伯数字标记, 可表征产品设计特征、性能参数、产品系列等, 具体内涵可由传感器生产厂家自行决定; 若产品性能参数不变, 仅在局部有改动或变动时, 其序号可在原序号后面顺序地加注大写字母 A、B、C 等(其中 I、Q 不用)。如某霍尔式电流传感器代号为 CDL-HE-1200, 某电容式加速度传感器代号为 CA-DR-5。

1.2.4.3 传感器的编码方法及代码

国标《传感器分类与代码 第1部分：物理量传感器》(GB/T 36378.1—2018)给出了物理传感器的分类方法、编码方法、具体的代码及说明，其代码采用组合码，由3段共11位数字组成。电阻应变式扭矩传感器的代码说明如表1.3所示。传感器代码第1段1位数字表示传感器类型(“1”表示物理传感器)；第2段6位数字表示被测量，代码第2、3位表示被测量的类别，第4、5位表示具体的被测量，第6、7位表示被测量的详细划分；第3段4位数字表示转换原理，代码第8、9位表示转换原理的类别，第10、11位表示具体的转换原理，此第3段可以为空(取值为“0000”)。例如，10106010102表示电阻应变式扭矩传感器。

表 1.3 电阻应变式扭矩传感器的代码说明

1	01	06	01	01	02
第1位数字表示传感器类型	第2~7位数字表示被测量			第8~11位数字表示转换原理	
1表示物理传感器	第2、3位表示被测量的类别，01表示力学量	第4、5位表示具体的被测量，06表示力矩	第6、7位表示被测量的详细划分，01表示扭矩	第8、9位表示转换原理的类别，01表示电阻式	第10、11位表示具体的转换原理，02表示应变式

1.2.4.4 传感器的图形表示方法

国标《传感器图用图形符号》(GB/T 14479—1993)规定了传感器的图用图形符号和表示规则，适用于传感器电气测量、控制系统图设计及有关技术文件。传感器的图形表示示例如图1.4所示。传感器的一般符号由符号要素正三角形和正方形构成，其中，三角形轮廓符号表示敏感元件，内填表示被测量的限定符号，如图1.4(a)所示的电容式压力传感器；正方形轮廓符号表示转换元件，内填表示转换原理的限定符号。在无须强调具体的转换原理时，传感器的图形符号也可以简化形式，在正方形符号中用斜线分隔符表示内在能量转换功能，如图1.4(b)所示的力矩传感器。

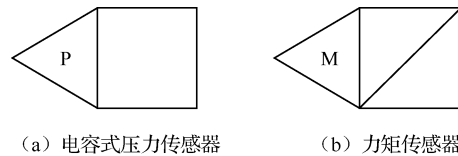


图 1.4 传感器的图形表示示例

任务 1.3 传感器的基本特性及技术指标



传感器的基本特性是关于传感器的输入与输出的关系特性，传感器的基本特性是传感器内部结构参数作用关系的外部表现。传感器的技术指标通常包括静态特性技术指标、稳定性及可靠性技术指标、动态特性技术指标等。

对于一个理想传感器，它应具备以下三个特点：传感器只敏感特定输入量，输出只对应特定输入；传感器的输出量与输入量呈唯一、稳定的对应关系，最好为线性关系；传感器的输出量可实时反映输入量的变化。但是在实际应用中，传感器在特定的、具体的环境中使用，其结构、元器件、电路系统、温度、供电、电磁场、

冲击振动等各种环境因素均可能影响传感器的整体性能, 导致其不能实现信号(或能量)的无失真转换, 因此我们需要考查传感器的工作特性并通过特定技术指标评价其性能, 进而实现传感器的正确选型和应用。

知识目标:

(1) 能识记和总结归纳传感器的静、动态特性技术指标, 并应用技术指标判断传感器性能。

(2) 能描述和说明传感器的稳定性及可靠性技术指标, 并应用技术指标判断传感器性能。

技能目标:

(1) 具备阅读和总结归纳与传感器相关的国家标准及行业规范的能力。

(2) 结合传感器的性能指标, 能根据工程需求进行传感器选型。

(3) 能够规范编写传感器的相关技术文档。



扫码看微课

1.3.1 传感器的静态特性技术指标

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与输入的关系。表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、重复性、迟滞等。

(1) 线性度。输入与输出之间呈线性比例关系, 称为线性关系。线性是传感器的理想输入输出特性。然而理想线性关系的传感器极少, 实际上的传感器大多具有非线性关系。由于实际静态特性曲线不是直线, 在处理中把它当作直线进行线性化, 由此产生的误差称为线性化误差。在实际应用中, 通常用实际特性曲线与理想曲线(拟合直线)之间的最大偏差 $\Delta L_{\max}$ 和满量程输出值 Y_{FS} 之比来表示线性度 γ_L , 即

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (1.1)$$

线性度应尽可能小。传感器都有一定的线性工作范围, 范围越宽, 量程越大。

(2) 灵敏度、信噪比及误码率。选用传感器首先要考虑的是灵敏度。如果达不到测量所要求的灵敏度, 传感器的输出将不能反映被测参数的实际状态, 检测将失去意义。

灵敏度表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化, 反映了仪表对被测参数变化的灵敏程度, 即对被测量变化的反应能力。在稳态下, 灵敏度可表示为输出变化增量 Δy 对输入变化增量 Δx 的比值:

$$S = dy/dx \approx \Delta y / \Delta x \quad (1.2)$$

图 1.5 所示为传感器实际特性曲线和理论特性直线。实际特性曲线以输入量 x 为横坐标, 输出量 y 为纵坐标, 其输出量和输入量与时间无关。

S 为常数时, 特性曲线是一条直线, 表明不同输入值时传感器的灵敏度不变, 是线性检测装置; S 不为常数时, 特性曲线是一条曲线, 表明不同输入值对应的灵敏度不同。

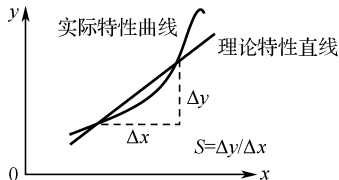


图 1.5 传感器实际特性曲线和理论特性直线

灵敏度高的传感器不一定是最好的传感器。灵敏度越高, 传感器越易受环境、自身等的噪声影响, 测量范围相对越窄, 稳定性越差, 因此要合理选择灵敏度, 必

须用信号与噪声的相互关系来全面衡量传感器的使用性能。

在信号传输中,通常模拟信号用信噪比、数字信号用误码率来衡量传感器的抗干扰性能。

传感器输出信号中信号的平均功率和噪声的平均功率之比,称为信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),即

$$\text{SNR} = 10\lg(P_S/P_N) = 20\lg(U_S/U_N) \quad (1.3)$$

信噪比的计量单位是 dB。若信噪比小,则信号与噪声就难以分清;若 $\text{SNR}=0\text{dB}$,就会完全分辨不出信号与噪声。一般情况下,信噪比要求大于 10。传感器的信噪比越大,其输出越不易受外界干扰。

误码率(Error Rate, ER)是衡量数据在规定时间内传输精确性的指标,表示码元被错误接收的概率,即所接收的码元中出现的误码数占传输总码数的比例。

$$\text{ER} = \text{传输中的误码数} / \text{所传输的总码数} \times 100\% \quad (1.4)$$

通常数传电台的误码率应为 $\text{ER} \leq 10^{-6}$ 。另外,也有将误码率定义为用来衡量误码出现的频率。IEEE 802.3 标准为 1000Base-T 网络制定的可接受的最高限度误码率为 10^{-10} 。这个误码率标准是针对脉冲振幅调制(PAM-5)编码而设定的,也就是千兆以太网的编码方式。

总体而言,灵敏度一般越高越好,即被测量有微小变化而输出量有较大变化,有利于信号处理。但灵敏度很高时,与被测量无关的噪声也会同时被检测到,并通过传感器输出,从而干扰被测信号,影响检测系统稳定性。

传感器的灵敏度是有方向性的。当被测量是单向量,而且对其方向性要求较高时,应选择其他方向灵敏度小的传感器;如果被测量是多维向量,则要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

(3) 分辨力和阈值。传感器能检测到输入量最小变化量的能力称为分辨力。对于某些传感器,如电位器式传感器,当输入量连续变化时,输出量只做阶梯变化,则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。对于数字式仪表,如果没有其他附加说明,分辨力就是指仪表指示值的最后一位数字所代表的值,例如,某温度传感器的分辨力为 0.1°C 。当被测量的变化量小于分辨力时,数字式仪表的最后一位数不变,仍指示原值。分辨力以满量程输出的百分数表示时,称为分辨率。分辨率常以百分比或几分之一表示,是量纲为 1 的数。

阈值是指能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性,形成“死区”,则将死区的大小作为阈值;在更多情况下,阈值主要取决于传感器噪声的大小,因而有的传感器只给出噪声电平。

(4) 测量范围与量程。传感器所能测量到的最小输入量与最大输入量之间的范围称为传感器的测量范围。传感器测量范围的上限值与下限值的代数差,称为量程。

传感器量程的选择视具体情况而定,要考虑诸多方面的因素,确保传感器的安全和寿命。以电子秤/称重传感器为例,一般应使传感器工作在其 30%~70%量程内,但对于一些在使用过程中存在较大冲击力的衡器,如动态轨道衡、动态汽车衡、钢材秤等,在选用传感器时,一般要扩大其量程,使传感器工作在其量程的 20%~30%,以保证传感器的使用安全和寿命。

(5) 准确度与准确度等级。准确度俗称精度(该称法已被取消),是评价仪表质量优劣的重要指标之一。它表征随机误差趋于零时获得的测量结果与真值的一致程度,取决于系统误差的大小。

在工业测量中,为了便于表示检测仪表的质量,通常用准确度等级来表示仪表测量所能达到的准确程度。准确度等级 c_A 是指检测装置在符合一定的计量要求情况下,保持其误差在规定的极限范围内的等别、级别,其计算式为

$$c_A = \left| \frac{e_{\max}}{X_{FS}} \right| \times 100\% = \left| \frac{e_{\max}}{A_{\max} - A_{\min}} \right| \times 100\% = \max(|r_m|) \times 100\% \quad (1.5)$$

式中, $e_{\max}$ 为最大测量误差; X_{FS} 为仪表满量程; $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 分别为仪表按规定准确度进行测量的被测量的最大值和最小值,即测量范围的上限值和下限值。

为了便于量值传递,国家统一规定了仪表的准确度等级系列。目前我国生产的仪表常用的准确度等级有 0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0 等。根据国标 GB/T 13283—2008 可知,工业过程测量和控制所用检测仪表和显示仪表的准确度等级共有 16 个: 0.01、0.02、(0.03)、0.05、0.1、0.2、(0.25)、(0.3)、(0.4)、0.5、1.0、1.5、(2.0)、2.5、4.0、5.0, 其中括号里的 5 个不推荐使用。科学实验所用仪表的准确度等级在 0.05 级以上;工业检测所用仪表的准确度等级多为 0.1~4.0 级,其中校验所用标准表的准确度等级多为 0.1 或 0.2 级,现场所用仪表的准确度等级多为 0.5~4.0 级。

(6) 精密度。精密度是指在一定测量条件下,进行等准确度测量所得的测量值和随机误差的分散程度,取决于测量时随机误差的大小。因绝大多数随机误差服从正态分布,因此工程上通常采用测量列标准差 σ 来反映测量的精密度。

对于有限次等准确度测量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 对标准差 σ 做出估计 s , 即贝塞尔公式为

$$\sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.6)$$

式中, $\bar{x}$ 为多次测量的平均值, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

(7) 重复性。重复性与迟滞曲线如图 1.6 所示。重复性是指传感器在输入量按同一方向做全程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度。由于传感器内部和外部不可避免地存在各种各样的随机干扰,所以传感器的最终测量结果表现为随机变量的特性,因此传感器的重复性表征了传感器测量结果的分散性和随机性。重复性误差,也称为重复误差、再现误差等,常用标准差 σ 和输出满量程 Y_{FS} 之比来表示,即

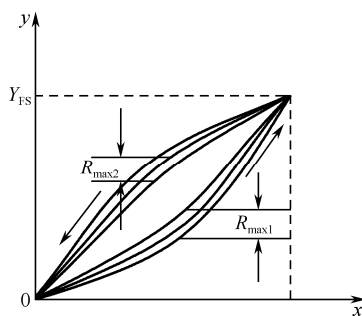


图 1.6 重复性与迟滞曲线

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.7)$$

也可用正、反行程中最大重复差值 $\Delta R_{\max}$ 计算,即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{\max(R_{\max 1}, R_{\max 2})}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.8)$$

(8) 迟滞。传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)

变化期间,其输入输出特性曲线不重合的现象称为迟滞。迟滞可表示为在全部测量范围内的差值 e_H 的最大值和输出满量程 Y_{FS} 之比,即

$$\gamma_H = \frac{\max(e_H)}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.9)$$

迟滞描述的是传感器正向特性和反向特性的不一致程度。迟滞产生的主要原因是仪表传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件滞后或电滞后等。选用传感器时,要尽量选用迟滞小的传感器。

(9) 电磁兼容性。电磁兼容性包括两方面的要求:一方面是指设备在正常运行过程中对所在环境产生的电磁干扰不能超过一定的限值;另一方面是指设备对所在环境中存在的电磁干扰具有一定程度的抗扰能力。



扫码看微课

1.3.2 传感器的稳定性及可靠性技术指标

传感器的稳定性及
可靠性技术指标

(1) 稳定性。稳定性表示传感器经长期使用后输出特性不发生变化的能力。实际上,随着时间的推移,大多数传感器的特性都会发生改变。

在输入量不变的情况下,传感器输出量随着时间变化,此现象称为漂移。产生漂移的原因:一是传感器的自身结构参数;二是周围环境的温度、气压、湿度、振动、电源电压及频率等因素。环境影响因素中对传感器影响最大的是温度。

漂移包括零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移是指传感器在长时间工作的情况下,输入量不变($x=0$)而输出量发生变化的现象。灵敏度漂移是指灵敏度随时间而产生变化的现象。

漂移又可分为时间漂移和温度漂移,即时漂和温漂。时漂是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间而变化;温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

目前,很多传感器材料采用灵敏度高且信号易处理的半导体。然而,半导体对温度最敏感,实际应用时要特别注意。此外,除传感器本身的温漂外,还有安装传感器的机构的温漂,以及电子电路的温漂。

在实际使用中,要根据环境条件选择合适的传感器,同时要创造和保持良好的工作环境,使传感器工作在不需要经常更换和校正的情况下。

(2) 可靠性。元器件、装置失去规定的功能称为失效。可靠性是指元器件、装置在规定的时间、条件下,具有规定功能的概率。可靠性的定义着重强调故障概率、性能要求、使用条件和工作时间四个方面。

故障概率:元器件、装置的特性变化具有随机性,只能根据大量实验和实际应用进行统计分析。

性能要求:指技术判据。性能变化是绝对的,关键是允许变化范围的大小。

使用条件:包括环境条件(如温度、湿度、振动、冲击等)和工作状态(如负载的轻重)。

工作时间:其他条件不变,时间越长,可靠性越低。

可靠性的衡量指标通常有可靠度、失效率、失效密度、故障率等。

在实际使用中,工业上通常引入“老化试验”以提高传感器的可靠性。老化试验(测试)项目是指对模拟产品在现实使用条件下涉及的各种因素使产品产生老化的情况进行相应因素加强试验的过程,常见的老化主要有光照老化、湿热老化、热风老化等。



扫码看微课

1.3.3 传感器的动态特性技术指标

动态特性是指当检测系统的输入为随时间变化的信号时, 系统的输出与输入之间的关系, 它反映传感器对随时间变化的激励 (输入) 的响应 (输出) 特性。通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小, 而且还能复现被测量随时间变化的规律, 这也是传感器的重要特性之一。传感器常见的动态输入形式有正弦、阶跃、脉冲和任意输入, 其中经常使用的是前两种。动态特性研究可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应法 (阶跃输入信号) 和频率响应法 (正弦输入信号) 来分析, 相应的有时域 (阶跃响应) 性能指标和频域 (频率特性) 性能指标两类。

(1) 时域性能指标。对于阶跃输入信号, 传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应, 它是指传感器在瞬变的非周期信号作用下的响应特性。这对传感器来说是一种最严峻的状态, 如果传感器能复现这种信号, 那么就能很容易地复现其他种类的输入信号, 其动态性能指标也必定能达到测量要求。

虽然传感器的种类和形式很多, 但它们一般可以简化为一阶或二阶环节的传感器 (高阶可以分解成若干个低阶环节), 因此一阶和二阶传感器是最基本的。

零阶传感器, 其输入、输出间的关系可用线性方程进行描述, 它的动态特性指标就是静态特性指标。在实际应用中, 有的高阶传感器在输入变化缓慢、频率不高时, 都可以近似为零阶传感器处理。

一阶传感器的动态特性指标有静态灵敏度 s 和时间常数 τ 。时间常数 τ 指一阶传感器的输出上升到稳态值的 63.2% 所需的时间, 表征传感器响应速度的快慢。一阶传感器的时间常数 τ 越小越好。时间常数 τ 越小, 系统的频率特性就越好。典型的一阶传感器有热电偶传感器、液柱式温度计等。

二阶传感器阶跃响应曲线如图 1.7 所示。在阶跃输入信号作用下, 二阶传感器的动态特性指标有上升时间 t_r 、响应时间 t_s 、峰值时间 t_p 、超调量 σ 等。上升时间 t_r 指传感器的输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所用的时间; 响应时间 t_s 指系统从阶跃输入开始到输出值进入稳态值所规定的范围内所需要的时间; 峰值时间 t_p 指阶跃响应曲线到达第一个峰值所需的时间; 超调量 σ 指传感器的输出超过稳态值的最大值 M_p 相对于稳态值的百分比。典型的二阶传感器有磁电式传感器、压电式传感器等。

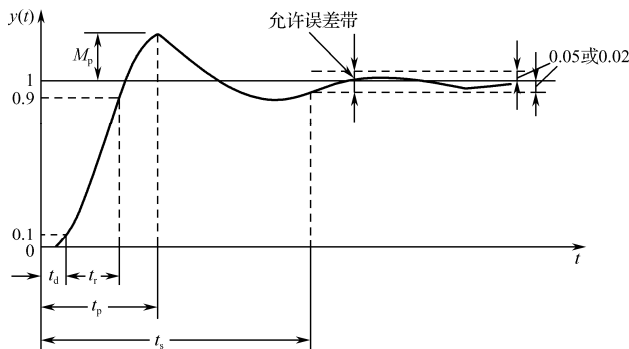


图 1.7 二阶传感器阶跃响应曲线

(2) 频域性能指标。频率响应又称稳态响应, 是指传感器在振幅稳定不变的正弦输入信号作用下的响应特性。根据用于表示输出的参数不同, 传感器的频域特性

可分为幅频特性和相频特性。输出信号与输入信号之间的频率响应函数为 $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A(j\omega)\angle\phi(j\omega)$ ，其模 $A(j\omega) = |H(j\omega)|$ 的特性就是幅频特性，幅角 $\phi(j\omega) = \arctan[\text{Im}(j\omega)/\text{Re}(j\omega)]$ 的特性为相频特性。

幅频特性 $A(\omega)$ 反映了系统的动态灵敏度，即当输入信号频率变化时，系统输出信号 y 的幅值与输入信号 x 的幅值之比。传感器只有在平直区才能工作，否则就会产生误差，即频率失真。典型的幅频特性指标有固有频率 ω_n 、阻尼比 ζ 、频带等。固有频率为由传感器材料、结构决定的频率，是可使传感器产生共振现象的频率；频带指对数幅频特性曲线上幅值衰减 3dB 时所对应的频率范围。

相频特性 $\phi(\omega)$ 反映了传感器的输出相位和输入信号频率的关系。

零阶传感器的输出与输入呈确定的比例关系，不受时间影响，幅角等于零，动态特性理想。

在动态检测中，输出量的变化不仅受被测对象动态特性的影响，也受检测装置动态特性的影响。动态测量时，要求传感器能迅速、准确和无失真地再现被测信号随时间变化的波形，使输出与输入随时间的变化一致，即良好的动态特性。实际上，传感器的响应总有一定延迟，延迟时间越短越好。传感器的频率响应好，可测的信号频率范围就宽。

一般而言，物性型传感器（利用光电效应、压力效应等）响应快，工作频率范围宽；结构型传感器（电感、电容、磁电等）受结构、惯性、固有频率等影响，工作频率范围相对要窄。在动态测量中，应考虑信号的特点（稳态、瞬态、随机等）和传感器的响应特性，以免产生过大的误差。

1.3.4 传感器的其他技术指标

传感器的静、动态特性和可靠性并不能完全描述传感器的性能，在选用时，还应考虑电源特性、环境特性等与传感器及被测量有关的一些其他特性。传感器的其他特性指标如表 1.4 所示。

表 1.4 传感器的其他特性指标

待 测 量	输 出 特 性	电 源 特 性	环 境 特 性	其 他 特 性
间隔 目标精确度 分辨率 稳定度 带宽 响应时间 输出阻抗 干扰量 变更量	本底噪声 信号类型（模拟式、 数字式或开关式） 阻抗 接线方式	电压 电流 有效功率 频率（交流电 源） 稳定度	环境温度 热冲击 温度循环 湿度 振动、冲击 化学试剂 爆炸危险 灰尘 电磁环境 静电放电 电离辐射 传输距离	互换性 过载保护 购置费用 质量、尺寸 适用性 电缆敷设要求 连接器类型 装配要求 安装时间 出现故障时的状态 校准和测试费用 维护费用 更换费用

在实际测量工作中,要根据被测量的特点和传感器的使用条件合理选择传感器类型,主要应考虑以下一些具体问题:量程的大小;被测位置对传感器体积的要求;测量方式为接触式还是非接触式;信号的引出方法采用有线还是无线;传感器的来源、价格能否承受。在确定选用何种类型的传感器之后,再考虑传感器的具体性能指标。

在使用传感器时,除关注传感器特性外,测量方法也应适合于应用。例如,流量计的插入会引起流量测量误差。

任务 1.4 测量误差与测量结果表示

测量的目的在于获取被测量的真实量值,但受种种因素的影响,测量结果总是与被测量的真实量值不一致,即存在测量误差。

《易》曰:“君子慎始,差若毫厘,缪以千里”。误差的存在使我们对客观事物的认识受到不同程度的歪曲,若不能正确认识并修正,就会产生巨大的偏差,因此必须进行误差分析。为了减小和消除测量误差对测量结果的影响,我们需要研究和理解真值、测量误差、测量不确定度及测量结果的表示。

知识目标:

- (1) 掌握真值与误差的概念、分类及计算方法。
- (2) 能说明测量结果的定量和定性表示方法。

技能目标:

- (1) 具备阅读和总结归纳与传感器相关的国家标准及行业规范的能力。
- (2) 能够根据国标完成测量结果的规范表示。



扫码看微课

1.4.1 真值

真值是指在一定的时间和空间条件下,能够准确反映某一被测量真实状态和属性的量值。它通常分为理论真值、约定真值和相对真值。

(1) 理论真值。理论真值是在理想情况下表征某一被测量真实状态和属性的量值。理论真值是客观存在的,或者是根据一定的理论所定义的。例如,三角形的三个内角之和为 180° 。

由于测量误差的普遍存在,一般情况下,被测量的理论真值是不可能通过测量得到的,但却是实际存在的,所以在计算误差时,一般用约定真值或相对真值来代替理论真值。

(2) 约定真值。约定真值就是指人们为了达到某种目的,按照约定的办法所确定的量值。约定真值是人们定义的、得到国际上公认的某个物理量的标准量值。

获得约定真值的方法通常有以下几种:由计量基准、标准复现新赋予该特定量的值;采用权威组织推荐的值,如由国际数据委员会(CODATA)推荐的真空光速、阿伏伽德罗常数等;用某量的多次测量结果的算术平均值来确定该量的约定真值。

(3) 相对真值。相对真值是指由某一行业或领域内的权威机构严格按标准方法获得的测量值,如中国食品药品检定研究院派发的标准参考物质,应用范围有一定的局限性。工程上,当上一级标准仪器的误差小于或等于下一级检测仪表的 $1/3$ (一

般测量)或 1/10(精密测量)时,可认为前者所测结果是后者的相对真值。相对真值在误差测量中的应用最为广泛。

1.4.2 测量误差的概念及分类

在测量过程中,实验原理和实验方法的不完善,所采用的测量装置性能指标的局限,环境中存在着各种干扰因素,以及操作人员技术水平的限制等,都将使测量值与被测量的真实量值之间存在差异。测量结果与被测量的真实量值之间的差异,称为测量误差,简称误差。误差的存在具有必然性和普遍性。

测量误差的来源很多,根据研究目的的不同,测量误差可从不同的角度进行分类。

1.4.2.1 绝对误差和相对误差

按照表示方法的不同,误差可分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差。绝对误差 e 的定义为被测量的测量值 A_x 与真值 A_0 之差,即

$$e = A_x - A_0 \quad (1.10)$$

绝对误差具有与被测量相同的单位,其值可为正,亦可为负。

在用于仪表校准和对测量结果进行修正时,常使用修正值。修正值用来对测量值进行修正,修正值 C 定义为

$$C = A_0 - A_x = -e \quad (1.11)$$

修正值的值为绝对误差的负值。测量值加上修正值等于实际值,通过修正可以得到更准确的测量结果。

采用绝对误差来表示测量误差往往不能确切地表明测量质量的好坏。例如,某温度传感器工作时的绝对误差 $e = \pm 1^\circ\text{C}$,如果用于炼钢炉的钢水温度测量,就是非常理想的情况了;但如果用于人的体温测量,这是不合适的。

(2) 相对误差。相对误差能够较确切地表明测量的精确程度。相对误差通常可分为实际相对误差、示值相对误差和满度(引用)相对误差等。

① 实际相对误差 r_A 用绝对误差 e 和被测量真值 A_0 之比来表示,即

$$\gamma_A = \frac{e}{A_0} \times 100\% \quad (1.12)$$

② 示值(标称)相对误差 r_x 用绝对误差和被测量的测量值之比来表示,即

$$\gamma_x = \frac{e}{A_x} \times 100\% \quad (1.13)$$

③ 满度相对误差 r_m ,又称引用误差,用绝对误差和仪表的量程之比来表示,即

$$\gamma_m = \frac{e}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1.14)$$

测量装置在测量范围内的最大引用误差,称为引用误差限或满度相对误差限,它等于测量装置测量范围内最大的绝对误差与量程之比的绝对值。

测量装置应保证在规定的使用条件下,其引用误差限不超过某个规定值,这个规定值称为仪表的允许误差。允许误差可用引用误差的形式表示。允许误差去掉百分号、正负号后的数字称为仪表的准确度等级,如 0.1、0.2、0.5 等。允许误差能够很好地表征测量装置的测量精确程度,它是测量装置最主要的质量指标之一。

1.4.2.2 粗大误差、系统误差和随机误差

根据测量误差的性质和表现形式的不同,误差可分为粗大误差、系统误差和随机误差。

(1) 粗大误差。明显地偏离被测量真值的测量值所对应的误差,称为粗大误差。粗大误差根据产生的原因主要分为人为误差和环境误差等。

人为误差指由于测量操作人员的操作经验、知识水平、素质条件的差异,操作人员的责任感不强、操作不规范和疏忽大意等原因产生的测量误差。

任何测量都有一定的环境条件,如温度、湿度、大气压、机械振动、电源波动、电磁干扰等。测量时,由于实际的环境条件与所使用的测量装置要求的环境条件不一致,就会产生测量误差,这种测量误差就是环境误差。

(2) 系统误差。在相同的条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号都保持不变的误差,或者在条件改变时,按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。系统误差的主要特性是规律性。

系统误差通常包括定义误差、理论和方法误差、仪器误差、安装误差、操作误差及部分环境误差。

(3) 随机误差。在相同的条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号都以不可预知的方式变化的误差,称为随机误差。随机误差的主要特性是随机性。

在实际测量中,系统误差和随机误差之间不存在明显的界限,两者在一定条件下可以相互转化。某项具体误差,在一定条件下为随机误差,而在另一条件下可为系统误差,反之亦然。

1.4.2.3 基本误差和附加误差

任何测量装置都有一个正常的使用环境要求,这就是测量装置的规定使用条件。根据测量装置实际工作的条件不同,测量所产生的误差可分为基本误差和附加误差。

(1) 基本误差。测量装置在规定使用条件下工作时所产生的误差,称为基本误差,又称固有误差。

(2) 附加误差。在实际工作中,由于外界条件变动,使测量装置不在规定使用条件下工作,这将产生额外的误差,这个额外的误差称为附加误差。

1.4.2.4 静态误差和动态误差

根据被测量随时间变化的速度不同,误差可分为静态误差和动态误差。

(1) 静态误差。在测量过程中,被测量稳定不变,所产生的误差称为静态误差。

(2) 动态误差。在测量过程中,被测量随时间发生变化,所产生的误差称为动态误差。

在实际的测量过程中,被测量往往是在不断地变化的。当被测量随时间的变化很缓慢时,这时所产生的误差也可认为是静态误差。

1.4.3 测量结果的定性表示

为了定性地描述测量结果与真值的接近程度和各个测量值分布的密集程度,实

际应用中通常引入准确度、精密度和精确度这三个概念。

1.4.3.1 准确度

准确度表征了测量值和被测量真值的接近程度，反映了测量结果中系统误差的大小程度。准确度越高，表征测量值越接近真值，系统误差越小。

1.4.3.2 精密度

精密度表征了多次重复对同一被测量进行测量时，各个测量值分布的密集程度。精密度越高，表征各测量值彼此越接近，即越密集。精密度反映了测量结果中随机误差的大小程度，精密度越高，则表示随机误差越小。

1.4.3.3 精确度

测量的精确度是准确度和精密度的综合，反映了系统误差和随机误差对测量结果的综合影响。精确度高，表征准确度和精密度都高，即测量结果中的系统误差和随机误差都小。

对于具体的测量，精密度高的准确度不一定高；准确度高的，精密度也不一定高；但是精确度高的，精密度和准确度都高。

下面以图 1.8 所示的射击打靶结果为例来阐释准确度、精密度和精确度的概念。在图 1.8 中，每个圆圈代表弹着点，相当于测量值；圆心位置代表靶心，相当于被测量真值。图 1.8 (a) 所示的弹着点分散，但比较接近靶心，相当于测量值分散性大，但比较接近被测量真值，表明随机误差大，精密度低；系统误差小，准确度高。图 1.8 (b) 所示的弹着点密集，但偏离靶心较远，相当于测量值密集，但偏离被测量真值较大，表明随机误差小，测量精密度高；系统误差大，准确度低。图 1.8 (c) 所示的弹着点密集且比较接近靶心，相当于测量值密集且比较接近被测量真值，表明系统误差和随机误差都小，精确度高。

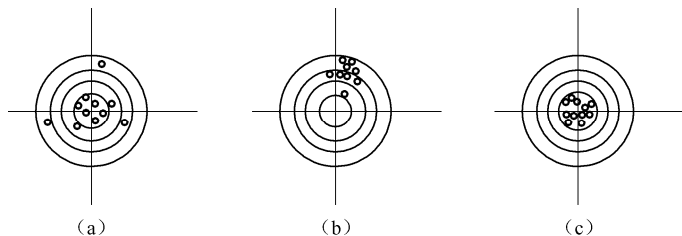


图 1.8 射击打靶结果

在应用准确度、精密度和精确度时，应注意：它们都是定性的概念，不能用数值做定量表示。

1.4.4 测量结果的定量表示

不确定度指利用可获得的信息，表征赋予被测量量值分散性的非负参数，包括标准不确定度和扩展不确定度。不确定度是一种表征被测量值所处范围的评定，真值以一定置信概率落在测量平均值附近的一个范围内。

国标《测量不确定度评定和表示》(GB/T 27418—2017) 规定了测量不确定度评

定和表示的通用规则,适用于从生产车间到基础研究等很多领域的各种仪器仪表测量准确度水平的测量。测量不确定度一般由若干分量组成。其中一些分量可根据一系列测量值的统计分布,按测量不确定度的 A 类评定进行评定,并可用标准差表征;而另一些分量则可根据经验或其他信息所获得的概率密度函数,按测量不确定度的 B 类评定进行评定,也用标准差表征。

1.4.4.1 标准不确定度

标准不确定度是以标准差表示的测量不确定度,包括 A 类标准不确定度、B 类标准不确定度和合成不确定度三种类型。

(1) A 类标准不确定度 u_A 。它指对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定,即

$$u_A = \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \approx s_{\bar{x}} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / [n(n-1)]} \quad (1.15)$$

式中, $\bar{x}$ 是多次测量值 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的平均值, $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$ 。

(2) B 类标准不确定度 u_B 。它指用不同于测量 A 类标准不确定度评定的方法对测量不确定度分量进行的评定。

B 类标准不确定度在测量范围内无法用统计方法评定,一般可根据经验或其他有关信息(如测定数据、说明书中的技术指标、检定证书提供的数据、手册中的参考数据)进行估计,判断被测量的可能值区间。对于多次测量,假设被测量值的概率分布,根据概率分布和要求的概率 p 确定置信因子 k ,则 B 类标准不确定度可由 $u_B = a/k$ 确定。其中, a 是被测量可能值区间的半宽度。

(3) 合成不确定度 u_C 。在很多情况下,被测量 Z 不能直接测得,而是由 N 个其他量 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 通过函数关系 f 来确定,即

$$Z = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1.16)$$

此时,合成不确定度 u_C 指根据一个测量模型中各输入量 X_i 的标准测量不确定度获得的被测量 Z 的标准测量不确定度 $u_C(z)$ 。当 z 是被测量 Z 的估计值即测量结果时,若输入量独立不相关,则 z 的标准不确定度由输入量的估计值 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 的标准不确定度 $u(x_i) (i=1, 2, \dots, N)$ 经适当合成得到,即

$$u_C(z) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2} \quad (1.17)$$

式中, f 是式 (1.16) 给出的函数;每个 $u(x_i)$ 是按 A 类或 B 类所评定的标准不确定度; $\partial f / \partial x_i$ 是在 $X_i = x_i$ 时输出的偏导值,它通过计算或实验确定。合成不确定度 $u_C(z)$ 是一个估计标准差,表征可合理赋予被测量 Z 的值的分散性。

对于大多数工程测量,由于对测量没有要求给出误差的确切值,因此一般只进行单次测量。对于部分精确测量,根据实际需要对测量结果的精确度要求不是很高,且一定测量条件下的标准差已知,往往也只进行单次测量。工程上通常用测量极限误差 3σ 作为总不确定度(合成不确定度);若均方根误差 σ 未知,则用仪器误差 e_Y 作为总不确定度(合成不确定度)。

1.4.4.2 扩展不确定度

尽管合成不确定度 u_C 可以广泛用于表示测量结果的不确定度，但在某些商业、工业和法规的应用中，以及涉及健康和安全时，常有必要提供不确定度量，也就是给出测量结果值的区间，并期望该区间包含了能合理赋予被测量值分布的大部分。因此扩展不确定度 U 由合成不确定度 u_C 乘以置信因子 k 得到，即 $U = ku_C$ 。如表 1.5 和表 1.6 所示，当被测量服从不同概率分布时，置信因子 k 选取不同值，一般大于 1。

表 1.5 正态分布置信因子 k 与概率 p 的关系

k	1.00	1.64	1.96	2.00	2.58	3.00
p	0.683	0.90	0.95	0.9545	0.99	0.9973

表 1.6 几种概率分布的置信因子 k 值

概率分布	均匀	反正弦	三角	梯形	注： β 为梯形上底半宽与下底半宽之比， $0 < \beta < 1$
k	$\sqrt{3}$	$\sqrt{2}$	$\sqrt{6}$	$\sqrt{6} / \sqrt{1 + \beta^2}$	

1.4.4.3 测量结果的报告和表示

若用不确定度表征测量结果的可靠程度，则测量结果通常可写成下列标准形式

$$X = (\bar{x} \pm u) \quad (1.18)$$

式中， $\bar{x}$ 为多次测量的平均值（单次测量时用测量值代替）； u 为测量不确定度（合成不确定度或扩展不确定度）。意味着被测量 X 的最佳估计值为 $\bar{x}$ ，被测量的真值 X 以置信概率 p （一般取 0.95）落在区间 $[\bar{x} - u, \bar{x} + u]$ 内。

在测量结果中，测量值与不确定度的取位与舍入规则包括以下三点。

(1) 不确定度一般保留 1~2 位数字，当首位数字等于或大于 3 时，取 1 位；小于 3 时，则取 2 位，其后面的数字采用进位法舍去。相对不确定度的取位也采用相同规则。

(2) 对于不确定度的尾数一律只进不舍，主要考虑的是不要估计不足。例如，算得不确定度为 0.32mm，可以化为 0.4mm。

(3) 测得值取几位，由不确定度位数来决定，即测量值的保留位数要与不确定度的保留位数相对应，后面的尾数则采用“四舍六入五凑偶”的原则取舍。例如测量结果为 $x = (46.18 \pm 0.25) \times 10^{-3} \text{m}$ 。

任务 1.5 测量误差分析和数据处理

求真是务实的前提，务实是求真的基础，求真与务实互相联系，互动发展。弘扬求真务实精神，是坚持辩证唯物主义和历史唯物主义的必然要求。受人为、环境、仪器等因素的影响，被测量的真值和测量所得值间总存在一定的差异，为使测量值尽可能地接近于真实值，需要进行误差分析。

此外，一般原始的测试技术参差不齐，需运用数学方法加以精选、加工，以求获得可靠、真正反映事物内在本质的结论，这就要进行数据处理。

由此可见，我们将引入误差分析和数据处理来提升科学实验和科学测试结果的

质量和水平。

知识目标:

- (1) 能陈述随机误差的统计特征和正态分布的概念。
- (2) 能归纳和应用随机误差、粗大误差和系统误差的发现和处理方法。
- (3) 能描述和应用直接测量数据的处理方法。

技能目标:

- (1) 具备利用数据统计方法处理传感器测量数据的能力。
- (2) 能够进行基于误差的分析计算及其相关的检测仪表选型。
- (3) 能够规范编写传感器测量的相关技术文档。

1.5.1 随机误差的统计特征和正态分布

单个随机误差的出现具有随机性。但是,当重复测量次数足够多时,随机误差的出现遵循统计规律,可借助概率论和数理统计的原理对随机误差进行处理,做出恰当的评价,并设法减小随机误差对测量结果的影响。

1.5.1.1 随机误差的统计特征

对同一个被测量进行多次等准确度的重复测量时,可得到一系列不同的测量值,通常把进行多次测量得到的一组数据称为测量列。若测量列不包含系统误差和粗大误差,则该测量列及其随机误差具有一定的统计特征。

实践表明,在绝大多数情况下,测量值及随机误差是服从或近似服从正态分布的。

1.5.1.2 随机误差与正态分布

当随机变量或随机误差 δ 服从正态分布时,它的概率密度函数 $f(\delta)$ 为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} \quad (1.19)$$

式中, σ 称为标准差,代表数据集离散性大小或波动性大小。

按正态分布概率密度函数所得的曲线称为正态分布曲线,随机误差的正态分布曲线如图 1.9 所示,它具有四个基本特征。

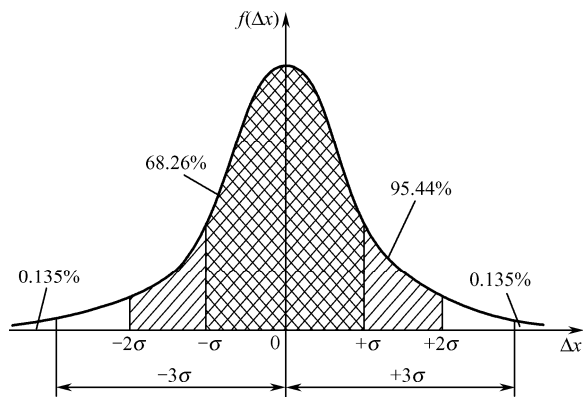


图 1.9 随机误差的正态分布曲线

- (1) 对称性: 随机误差可正可负, 绝对值相等的正、负误差出现的概率相等,

其概率密度分布曲线以纵轴为对称轴。

(2) 单峰性：又称集中性，大量重复测量所得的数值，均集中于均值附近；绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率要大，误差值越小出现的概率越大，其概率密度分布曲线在 $\delta=0$ 处有一峰值。

(3) 有界性：若误差 $|\delta| \rightarrow \infty$ ，则误差出现的概率趋于零。可见，在一定的测量条件下，误差的绝对值一般不会超过一定的界限。

(4) 抵偿性：正误差和负误差可相互抵消，随着测量次数 $n \rightarrow \infty$ ，随机误差的代数和趋于零，即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$ 。

应该指出，随机误差的上述统计特征是在造成随机误差的随机影响因素很多，且测量次数足够多的情况下归纳出来的，但并不是所有的随机误差都具有上述特征。当造成随机误差的随机影响因素不多，或某种随机影响因素的影响特别显著时，随机误差可能不呈现上述特征。

1.5.2 随机误差和测量值的数字特征

测量值和随机误差都是随机变量，有关随机变量的一些概念和处理方法可直接用于对测量值和随机误差的分析和处理。

1.5.2.1 算术平均值

n 次等准确度测量获得的测量值 x_i 的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.20)$$

根据误差的抵偿性可知，当测量次数 $n \rightarrow \infty$ 时，测量值的算术平均值会收敛于被测量的真值，即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x} = \mu$ 。

在实际测量中，进行无限次测量是不可能的，只能进行有限次测量。只要测量次数足够多，随着测量次数的增加，算术平均值就趋于真值，因此我们可以认为测量值的算术平均值是最接近于真值的近似值。

1.5.2.2 残余误差

测量值与算术平均值的差称为残余误差 v_i ，简称残差，即

$$v_i = x_i - \bar{x}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.21)$$

残余误差具有抵偿性，即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n v_i = 0$ 。

1.5.2.3 测量列的方差、标准差

对一被测量进行无限多次等准确度测量，各次测量的测量值组成无限测量列。其方差用 σ^2 表示，有

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n} \quad (1.22)$$

无限测量列的标准差，又称均方根偏差，其计算式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1.23)$$

测量列的标准差表征了测量值和随机误差的分散程度,它决定了测量值和随机误差概率密度分布曲线的形状。概率密度分布曲线如图 1.10 所示,标准差 σ 的数值愈小,概率密度分布曲线的形状愈陡峭,说明测量值和随机误差的分散性小,测量的精密度高;反之, σ 的数值愈大,概率密度分布曲线的形状愈平坦,说明测量值和随机误差的分散性大,测量的精密度低。

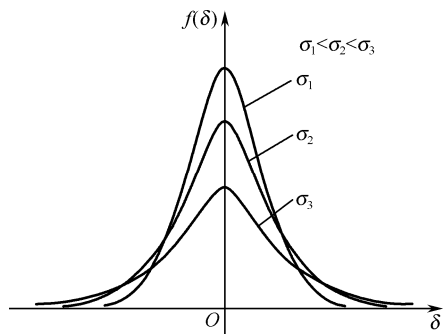


图 1.10 概率密度分布曲线

在实际测量中,我们只能进行有限次测量,也不可能得到被测量的真值 μ_i ,因此不能求出测量列的标准差。

对于有限次等准确度测量,可用算术平均值 $\bar{x}$ 来代替真值 μ ,对标准差 σ 做出估计 s ,即贝塞尔公式

$$\sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1.24)$$

1.5.2.4 测量列算术平均值的标准差

有限次等准确度测量以测量列算术平均值作为真值的最佳估计值,也就是以测量列算术平均值作为测量结果。若对某一个量进行 n 次重复测量,则可以得到一个测量列,求出其算术平均值 $\bar{x}$ 。如果重复上述过程 m 次,就可以得到 m 个测量列,求出 m 个算术平均值 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ 。由于随机误差的存在,这 m 个算术平均值都不可能完全相同。它们围绕着被测量的真值有一定的分散性,因此有必要研究测量列算术平均值的标准差。

可以证明,测量列算术平均值标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \quad (1.25)$$

在实际测量中往往只能得到 σ 的估计值 s ,因此只能用 s 代替 σ 来计算 $\sigma_{\bar{x}}$,因而只能得到 $\sigma_{\bar{x}}$ 的估计值 $s_{\bar{x}}$,即

$$\sigma_{\bar{x}} \approx s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1.26)$$

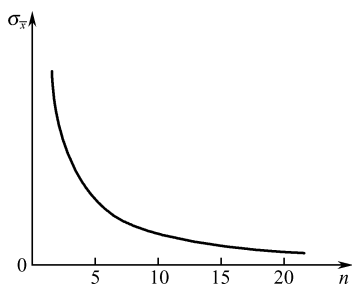


图 1.11 标准差变化曲线

由式 (1.26) 可知,由于算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 与测量次数 n 的平方根 $\sqrt{n}$ 成反比,因此 $\sigma_{\bar{x}}$ 随着 n 增大而减小的速度越来越小。标准差变化曲线如图 1.11 所示。当 $n > 10$ 后, n 再增加时, $\sigma_{\bar{x}}$ 的减小效果已不明显。同时,当测量次数过多时也不能保证测量条件不改变;另外,测量次数增加以后,计算量和时间也增加了。鉴于以上原因,一般等准确度测量的测量次数 n 略大于 10 即可。

1.5.2.5 置信度和极限误差

(1) 置信概率和置信区间。在一组等准确度的测量值中, 大小为 x 的测量值落入指定区间 $[x_a, x_b]$ 内的概率称为置信概率, 而该指定区间 $[x_a, x_b]$ 称为置信区间。

对于服从正态分布的随机误差, 当概率密度函数确定后, 其概率密度分布曲线也就确定了。若给定一个概率值 $p(0 < p < 1)$, 则能确定一个对称的误差区间 $(-a, a)$, 满足 $P\{-a \leq \delta \leq a\} = p$ 。误差区间 $(-a, a)$ 称为置信区间, 所对应的概率值 p 称为置信概率。置信区间表征随机误差的变化范围, 置信概率表征随机误差出现的可能程度。置信区间越宽, 相应的置信概率就越大。置信区间和置信概率共同表明了随机误差的可信赖程度。把置信区间和置信概率两者结合起来, 统称为置信度。

(2) 单次测量的极限误差。单次测量的极限误差定义为在给定的置信概率条件下, 误差出现的极限范围。显然, 置信区间取得宽, 置信概率就大, 反之则小。正态分布曲线与置信概率如图 1.12 所示, 当置信区间宽为 $\pm\sigma$ 时, 测量值落入区间 $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ 内的概率 p 为 68.2%, 也就是说, 进行 100 次测量, 大约有 68 次的值是落在指定区间范围内的; 当置信区间宽为 $\pm 2\sigma$ 时, 对应概率为 95.4%; 当置信区间宽为 $\pm 3\sigma$ 时, 对应概率为 99.6%。因此可认为绝对值大于 3σ 的误差几乎不可能出现, 所以通常把 3σ 的误差称为单次测量极限误差, 常用 δ_{lim} 表示。

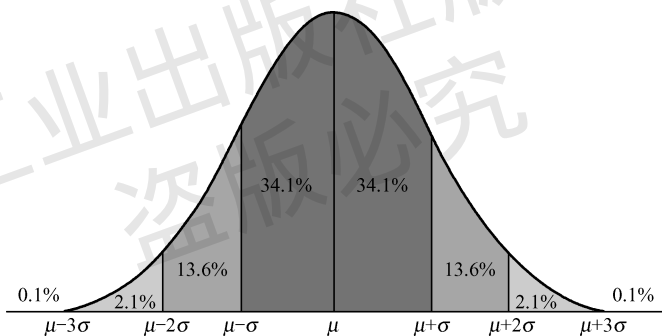


图 1.12 正态分布曲线与置信概率



扫码看微课

1.5.3 随机误差的处理

随机误差与粗大误差的处理

减小随机误差的方法主要是平滑法和滤波法。除硬件模拟滤波器以外, 智能仪器还可借助内置处理器进行数字滤波。数字滤波法具有以下几个主要优点。

(1) 数字滤波只是一个计算过程, 基本没有元器件品质劣化的问题; 不受环境温度的影响; 不存在阻抗匹配、非一致性问题; 可靠性高, 可以达到很高的准确度。

(2) 有些滤波特性, 硬件模拟滤波器无法或难以实现, 而对于数字滤波器则不成问题。

(3) 只要适当改变数字滤波程序的有关参数, 就能方便地改变滤波特性, 因此数字滤波方便灵活, 适应性强。

针对噪声情况的不同, 减小随机误差应采用不同的数字滤波法, 常见的有算术平均滤波法、加权平均滤波法、限幅滤波法、中值滤波法等。

1.5.3.1 克服偶然误差的数字滤波法

由外部环境偶然因素引起的突变性扰动,或仪器内部不稳定引起误码等导致的尖脉冲干扰,都属于偶然误差。判别或消除偶然误差是仪器数据处理的第一步,通常采用简单的非线性滤波法。

(1) 限幅滤波法。该法又称程序判别法,通过程序判断被测信号的变化幅度,从而消除缓变信号中的尖脉冲干扰。具体方法是,依赖已有的时域采样结果,将本次采样值与上次采样值进行比较,若它们的差值超出允许范围,则认为本次采样值受到了干扰,应予剔除。

(2) 中值滤波法。中值滤波器是一种典型的非线性滤波器,它运算简单,在滤除脉冲噪声的同时可以很好地保护信号的细节信息。中值滤波法是指对某一被测参数连续采样 n 次(一般 n 应为奇数),将这些采样值按照大小排序,选取中间值为本次采样值(即所谓的排序法)。对于温度、管道压力、液位等变化缓慢的被测参数,中值滤波法一般能收到良好的滤波效果。

1.5.3.2 抑制小幅度高频噪声的平均滤波法

电子器件的热噪声、A/D 量化噪声等都属于小幅度的高频噪声。通常采用具有低通特性的 FIR 滤波器滤除高频噪声,平均滤波法包括算数平均滤波法和加权平均滤波法。

(1) 算数平均滤波法。FIR 滤波器各个抽头的加权系数相同,滤波器输出的是 N 个连续采样值的算术平均值。 N 值越大,消噪效果越好,但是灵敏度(时间分辨率)下降,只适用于对缓变信号进行处理。例如,视频监控摄像机所采用的帧累积技术。

(2) 加权平均滤波法。具体方法是,增加最新采样数据在取平均过程中的比重,以提高当前采样值的灵敏度,不同时刻的数据权值不同。越接近当前时刻的数据,权值越大, FIR 滤波器的抽头系数 C_i 不再是常数。

1.5.3.3 复合滤波法

在实际应用中,有时既要消除大幅度的脉冲干扰,又要进行数据平滑。因此常把两种以上的方法结合起来使用,形成复合滤波法。例如,去极值平均滤波法是先使用中值滤波法滤除采样值中的脉冲性干扰,然后把剩余的各采样值进行平均滤波。连续采样 N 次,剔除其中的一个最大值和一个最小值,再求余下 $N-2$ 个采样的平均值。显然,这种方法既能抑制随机干扰,又能滤除明显的脉冲干扰。

1.5.4 粗大误差的发现和處理

粗大误差的产生,有测量操作人员的主观原因,如读错数、记错数、计算错误等,也有客观外界条件的原因,如外界环境的突然变化等。含有粗大误差的测量值称为坏值,测量列或样本数据中如果混有坏值,必然会歪曲测量结果。

为了避免或消除测量中产生的粗大误差,首先要保证测量条件的稳定,增强测量人员的责任心并以严谨的作风对待测量任务。

对粗大误差的处理原则:若在实验进行中发现异常数据,应立即停止实验,分析原因并及时纠正错误;若在实验结束后发现异常数据,应先找出原因,再对数据进行取舍。

1.5.4.1 坏值判别准则

对于坏值的判断一般有两种方法：物理判别法和统计判别法。物理判别法基于人们对客观事物已有的认识，判别由于外界干扰、人为误差等原因造成的实测数据值偏离正常结果，在实验过程中随时判别，随时剔除。

当物理识别不易判断时，一般采用统计识别法，它是建立在数理统计原理基础上的。常用的坏值判别准则有拉依达准则和格拉布斯准则，还有如狄克松准则、肖维勒准则、 t 检验法、 F 检验法等。这些坏值判别准则都是在某些特定条件下建立的，都有一定的局限性，因此不是绝对可靠的。下面介绍三个最常用的坏值判别准则。

(1) 拉依达准则。拉依达准则又称 3σ 准则，它的理论基础是正态分布理论。如 1.5.2 节所述，绝对值大于 3σ 的误差概率仅为 0.4%，因此凡残余误差 v_i 大于三倍标准差 (3σ) 的误差就可认为是粗大误差，相应的测量值 x_i 就是坏值，应予以剔除。其数学表达式为

$$v_i = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma \quad (1.27)$$

式中， $\bar{x}$ 为包括坏值在内的全部测量值的算术平均值； σ 为测量列的标准差，可用估计值 s 来代替。

拉依达准则方法简单，它不需要查表，便于应用，但在理论上不够严谨，不能检验样本量较小的情况，此时通常采用格拉布斯准则。

(2) 格拉布斯准则。格拉布斯准则同样以误差服从正态分布为前提，凡残余误差 v_i 大于格拉布斯鉴别值 $[G(n, P_\alpha)]\sigma$ 的误差就是粗大误差，相应的测量值 x_i 就是坏值，应予以剔除。其数学表达式为

$$v_i = |x_i - \bar{x}| > [G(n, P_\alpha)]\sigma \quad (1.28)$$

式中， $G(n, P_\alpha)$ 为格拉布斯临界系数，如表 1.7 所示，其值取决于测量次数 n 和取定的置信概率 P_α 。

表 1.7 格拉布斯临界系数 $G(n, P_\alpha)$

n		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P_α	0.95	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.28	2.33	2.37	2.41	2.44
	0.99	1.16	1.49	1.75	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55	2.61	2.66	2.70	2.75
n		17	18	19	20	21	22	23	24	25	30	35	40	50	100
P_α	0.95	2.48	2.50	2.53	2.56	2.58	2.60	2.62	2.64	2.66	2.74	2.81	2.87	2.96	3.17
	0.99	2.78	2.82	2.85	2.88	2.91	2.94	2.96	2.99	3.01	3.10	3.18	3.27	3.34	3.59

格拉布斯准则在理论上比较严谨，它不仅考虑了测量次数的影响，而且还考虑了标准差本身存在误差的影响，被认为是较为科学和合理的，可靠性高，适用于测量次数比较少而要求较高的测量列。格拉布斯准则的计算量较大。

(3) 肖维勒准则。凡残余误差大于肖维勒鉴别值 $[Z_c(n)]\sigma$ 的误差就是粗大误差，相应的测量值就是坏值，应予以剔除。其数学表达式为

$$v_i = |x_i - \bar{x}| > [Z_c(n)]\sigma \quad (1.29)$$

式中， $Z_c(n)$ 为肖维勒临界系数，它与测量次数 n 有关，如表 1.8 所示。

表 1.8 肖维勒临界系数 $Z_c(n)$

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Z_c(n)$	1.38	1.54	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.00	2.03
n	13	14	15	16	18	20	25	30	40	50
$Z_c(n)$	2.07	2.10	2.13	2.15	2.20	2.24	2.33	2.39	2.49	2.58

肖维勒准则的理论基础也是正态分布理论，但较拉依达准则细化，准确性较高。肖维勒准则的可靠性和准确性没有格拉布斯准则高，但比格拉布斯准则简单。

1.5.4.2 坏值的判别与剔除

应用上述坏值判别准则，每次只能剔除一个最大的坏值，剔除坏值后需重新计算测量列的算术平均值和标准差，再进行判别，直至无坏值为止。

1.5.5 系统误差的发现和處理

如 1.4.2 节所述，系统误差是按一定规律变化的误差，主要包括定义误差、理论和方法误差、仪器误差、安装误差、操作误差及部分环境误差等。系统误差的产生原因是比较复杂的，它可能是一个原因在起作用，也可能是多个原因同时在起作用。

分析产生系统误差的根源，一般可从以下五个方面着手：所采用的测量装置是否准确可靠；所应用的测量方法是否完善；测量装置的安装、调整、放置等是否正确合理；测量装置的工作环境条件是否符合规定条件；测量操作人员的操作是否正确。

目前还未有一种能查明所有系统误差的方法，因而只能根据已有的经验，归纳和总结出一些发现系统误差的一般方法。

按系统误差出现的特点及对测量结果的影响，系统误差可分为恒定系统误差和可变系统误差两类。

1.5.5.1 系统误差的发现和判定

(1) 恒定系统误差的发现。在测量过程中，恒定系统误差的大小和符号是不变的。比如，某量块的公称尺寸为 10mm，实际尺寸为 10.001mm，误差为 0.001mm，若按公称尺寸使用，则始终会存在 0.001mm 的系统误差。

恒定系统误差的发现方法有对比检定法（单组测量）、均值与标准差比较法（多组测量）、 t 检验法（多组测量）、秩和校验法（多组测量）等。

(2) 可变系统误差的发现。在测量过程中，可变系统误差的大小和方向随测量的某一个或几个因素按确定的函数规律变化。由于它对算术平均值和残差均产生影响，所以应在处理测量数据的过程中，同时设法找出该误差的变化规律，进而消除其对测量结果的影响。

可变系统误差的发现方法有残余误差观察法、残余误差校核法、统计准则校验法等。

1.5.5.2 消除或削弱系统误差的方法

(1) 从产生系统误差的根源上消除系统误差。这是最根本的方法。在测量之前，测量人员要详细检查测量装置，正确安装测量装置，并把测量装置调整到最佳状态。



扫码看微课

系统误差的处理

在测量过程中,应防止外界干扰的影响,尽可能减少产生系统误差的环节,如选择好观测位置以消除视差,在环境条件较稳定时进行测量等。

(2) 在测量结果中利用修正值消除系统误差。对于已知的恒定系统误差,通过对测量装置的标定,事先求出修正值,在实际测量时,将测量值加上相应的修正值就可以得到被测量的实际值,以消除或减小系统误差。对于可变系统误差,设法找出系统误差的变化规律,给出修正曲线或修正公式,在实际测量时,用修正曲线或修正公式对测量结果进行修正。此种方法不能完全消除系统误差,因为修正值也存在一定的小误差,但系统误差可以被大大削弱。

(3) 采用能消除系统误差的典型测量方法。找出系统误差的变化规律后,在测量过程中采用某些能消除或减小系统误差的方法进行测量,可以避免或减小系统误差引入测量结果。

1.5.6 直接测量数据的处理

在对被测量进行等准确度测量后,为了得到合理的测量结果,应按前述的方法对各种误差进行分析处理。

等准确度测量的数据处理可按以下步骤进行:

(1) 计算测量列的算术平均值 $\bar{x}$ 。

(2) 计算各测量值的残余误差 v_i 。

(3) 计算测量列的标准差 σ 估计值 s , $\sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$ 。

(4) 判别是否存在系统误差。利用系统误差判定方法判定测量结果中是否存在系统误差。若存在系统误差则应对测量值进行修正,若无修正值,则设法消除产生系统误差的根源或改进测量方法,重新进行测量。

(5) 判别是否存在粗大误差。利用坏值判别准则判定是否存在坏值,若有坏值,应将坏值剔除,重新计算算术平均值和标准偏差。

(6) 计算算术平均值的标准差 $s_{\bar{x}}$ 。

(7) 取定置信概率 p , 确定置信因子 k , 计算不确定度 u 。

(8) 写出测量结果表达式

$$X = \bar{x} \pm u$$

例 1.1 多次重复测量某工件的厚度,得测量列: 39.44mm、39.27mm、39.94mm、39.44mm、38.91mm、39.69mm、39.48mm、40.56mm、39.78mm、39.68mm、39.35mm、39.71mm、39.46mm、40.12mm、39.76mm、39.39mm, 试判别该测量列是否存在坏值,若有坏值,则将其剔除。

解: 应用格拉布斯准则来判别数据中是否存在粗大误差。例 1.1 数据运算表如表 1.9 所示。

表 1.9 例 1.1 数据运算表

i	x_i	v_i	v_i^2	v_i'	$v_i'^2$
1	39.44	-0.184	0.033856	-0.121	0.014641
2	39.27	-0.354	0.125316	-0.291	0.084681

续表

i	x_i	v_i	v_i^2	v'_i	$v_i'^2$
3	39.94	+0.316	0.099856	+0.379	0.143641
4	39.44	-0.184	0.033856	-0.121	0.014641
5	38.91	-0.714	0.509796	-0.651	0.423801
6	39.69	+0.066	0.004356	+0.129	0.016641
7	39.48	-0.144	0.020736	-0.081	0.006561
8	40.56	+0.936	0.876096	—	—
9	39.78	+0.156	0.024336	+0.219	0.047961
10	39.68	+0.056	0.003136	+0.119	0.014161
11	39.35	-0.274	0.075076	-0.211	0.044521
12	39.71	+0.086	0.007396	+0.149	0.022201
13	39.46	-0.164	0.026896	-0.101	0.010201
14	40.12	+0.496	0.246016	+0.559	0.312481
15	39.76	+0.136	0.018496	+0.199	0.039601
16	39.39	-0.234	0.054756	-0.171	0.029241
Σ	633.98	-0.004	2.159976		1.224975

(1) 计算算术平均值

$$\sum_{i=1}^n x_i / n = 633.98 / 16 \approx 39.624$$

(2) 计算各测量值的残余误差 v_i 及 v_i^2 ，如表 1.9 所示。

(3) 计算标准差

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n-1)} = \sqrt{\frac{2.159976}{16-1}} \approx 0.38$$

(4) 取定置信概率 $P_\alpha=0.95$ ，根据测量次数 $n=16$ 查出相应的格拉布斯临界系数 $G(n, P_\alpha)=2.44$ ，计算格拉布斯鉴别值

$$[G(n, P_\alpha)]s = 2.44 \times 0.38 \approx 0.93$$

(5) 将各测量值绝对值最大的残余误差与格拉布斯鉴别值相比较，有 $|v_8|=0.936 > 0.93$ ，故可判定 v_8 为粗大误差，即 x_8 为坏值应予以剔除。

(6) 剔除 x_8 后，重新计算测量列的算术平均值

$$\sum_{i=1}^n x_i / n = 593.42 / 15 \approx 39.561$$

(7) 重新计算各测量值的残余误差 v'_i 及 $v_i'^2$ ，并填入表 1.9 中。

(8) 重新计算标准差

$$s' = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i'^2 / (n-1)} = \sqrt{\frac{1.224975}{15-1}} \approx 0.296$$

(9) 取定置信概率 $P_\alpha=0.95$ ，根据测量次数 $n=15$ 查出相应的格拉布斯临界系数 $G(n, P_\alpha)=2.41$ ，计算格拉布斯鉴别值

$$[G(n, P_\alpha)]s = 2.41 \times 0.296 \approx 0.71$$

(10) 将各测量值的残余误差的绝对值与格拉布斯鉴别值相比较，所有残余误差

v_i 的绝对值均小于格拉布斯鉴别值, 故已无坏值。

至此, 判别结束, 全部测量值中仅有 x_8 为坏值, 予以剔除。

应用肖维勒准则判别的过程与上面类似。

任务 1.6 传感器的典型转换电路

受传感器工作原理、特性上的局限性及环境等因素的影响, 传感器输出的信号通常都很微弱, 且其输出阻抗较大, 很容易被噪声或其他测量仪器干扰, 所以传感器输出的信号一般不能被直接利用, 需要进行调理, 以满足测量仪器所需要的信号。

在检测装置中, 传感器的转换电路把来自敏感(传感)元件的信号转换为易于由后续控制器、执行器等装置处理的电压、电流、频率等信号。转换电路的种类和构成通常由传感器所需要转换的信号类型及环境影响因素等决定。在本任务中, 我们将学习传感器中常用的电桥电路、放大电路、滤波器、振荡电路、调制与解调电路等转换电路。

知识目标:

(1) 能陈述常见的传感器转换电路的原理、结构和工作原理。

(2) 能说明电桥电路、放大电路、滤波器、振荡电路、调制与解调电路等转换电路的基本原理和应用场景。

技能目标:

(1) 知道电子仪器仪表装配工国家职业标准。

(2) 能够设计和搭建适用于特定传感器的转换电路。

(3) 能够根据工程需求, 使用测试设备和仪器进行转换电路的调试、校准和优化。

1.6.1 电桥电路

基于不同的结构形式, 电桥电路可将传感器工作过程中和被测参数相关的电阻、电感、电容等电参数转化为电压或电流信号输出。

1.6.1.1 直流电桥

电桥电路如图 1.13 所示, 设电源 E 为理想电源, 其内阻为零, 可求出电桥 BD 端输出 U_g 与电桥各参数之间的关系为

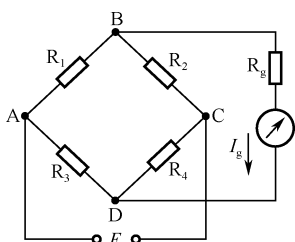


图 1.13 电桥电路

$$U_g = E \times \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1.30)$$

电桥电路的平衡条件 ($E \neq 0, U_g = 0$) 为

$$R_1/R_2 = R_3/R_4 \quad (1.31)$$

当电桥各桥臂均有相应的电阻增量 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ 时, BD 端输出为

$$U_g = E \times \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \quad (1.32)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时, 电路称为等臂电桥, 此时电桥输出可写为

$$U_g = E \times \frac{R(\Delta R_1 - \Delta R_2 - \Delta R_3 + \Delta R_4) + \Delta R_1 \Delta R_4 - \Delta R_2 \Delta R_3}{(2R + \Delta R_1 + \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \quad (1.33)$$

一般情况下, $\Delta R_i (i=1, 2, 3, 4)$ 很小, 即 $R \gg \Delta R_i$, 故可以略去上式中的高阶微量, 如果各桥臂电阻的灵敏度 K 相同, 可利用 $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$ 得到

$$U_g = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (1.34)$$

直流电桥的典型结构形式有单臂电桥、双臂电桥和四臂全桥, 其灵敏度依次递增为 $E/4$ 、 $E/2$ 和 E 。

直流电桥的优点: 所需的高稳定直流电源较易获得; 电桥输出电压是直流, 可以用直流仪表测量; 对从传感器到测量仪表的连接导线要求较低, 电桥的平衡电路简单。直流电桥的缺点主要是, 直流放大器比较复杂, 易受零点漂移和接地电位的影响。因此, 在应变电阻电桥中, 一般采用交流供电, 而非直流。

1.6.1.2 交流电桥

交流电桥是在直流电桥的结构上发展而来的, 电桥的四个臂 $\tilde{Z}_1$ 、 $\tilde{Z}_2$ 、 $\tilde{Z}_3$ 、 $\tilde{Z}_4$ 通常是复阻抗 (可以是电阻、电容、电感或它们的组合), ab 间接交流电源 E , cd 间接交流平衡指示器 G 。

电桥平衡时, c 、 d 两点等电位, 由此得到交流电桥的平衡条件:

$$\tilde{Z}_1 \tilde{Z}_3 = \tilde{Z}_2 \tilde{Z}_4 \quad (1.35)$$

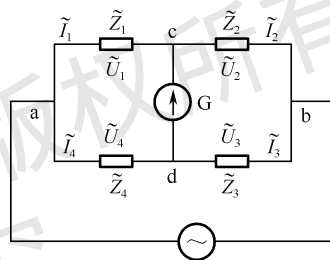


图 1.14 交流电桥

当处于平衡点时, 需要设计交流电桥使式 (1.35) 成立。一般来说, $\tilde{Z}_x$ 包含两个未知分量, 实际上按复阻抗形式给出的平衡条件相当于两个实数平衡条件, 电桥平衡时它们应同时得到满足, 这意味着要测量被测参数带来的变化 $\tilde{Z}_x$ (可为桥臂任一阻抗), 电桥各桥臂阻抗参数至少要有两个可调, 而且各桥臂必须按电桥的两个平衡条件做适当配置。

常用的交流电桥有电容电桥、电感电桥、相敏整流电桥等。其中, 电容电桥主要用来测量电容器的电容量及损耗角, 利用已知电容测量未知电容; 电感电桥是利用已知电感或电容来测量未知电感的电桥。

1.6.2 放大电路

在传感器电路中, 放大电路通常用于实现前级电路微弱信号的放大、产生特定周期/频率的波形等。

1.6.2.1 基本放大电路

放大电路在放大信号时, 总有两个电极作为信号的输入端, 同时也应有两个电极作为输出端。根据半导体三极管 (BJT) 三个电极与输入、输出端子的连接方式, 基本放大电路可归纳为三种: 共发射极放大电路、共基极放大电路及共集电极放大电路。

其中, 共发射极放大电路如图 1.15 (a) 所示, 共发射极放大电路的信号由基极进入, 集电极输出。它既具有电流放大特性, 也具有电压放大特性, 电压增益 $\dot{A}_v = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta(R_c // R_L)i_b}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}}$, 属于反相放大电路, 在三种电路中, 输出电阻

较大, 通频带是三种电路中最小的, 适用于低频电路, 常用作低频电压放大的单元电路或多级放大电路的中间级。

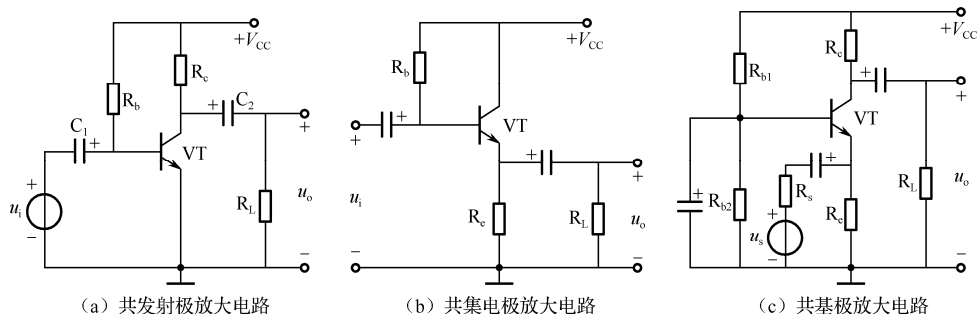


图 1.15 基本放大电路

共集电极放大电路如图 1.15 (b) 所示, 共集电极放大电路的信号从基极输入、发射极输出, 又称射极输出器。其电压增益接近于 1; 没有电压放大作用, 只有电流放大作用 ($I_c = \beta I_b$), 属于同相放大电路, 是三种电路中输入电阻最大、输出电阻最小的电路, 具有电压跟随的特点, 频率特性较好, 常用作电压放大电路的输入级、输出级和缓冲级。

共基极放大电路如图 1.15 (c) 所示, 共基极放大电路的信号由发射极输入、集电极输出。它没有电流放大作用, 只有电压放大作用, 电压增益 $A_v = -\beta(R_L // R_c) / r_{be}$, 且具有电流跟随作用, 输入电阻最小, 电压放大倍数、输出电阻与共发射极放大电路相当, 属同相放大电路, 是三种电路中高频特性最好的电路, 常用于高频或宽频带低输入阻抗的场合。

1.6.2.2 集成运算放大器

集成运算放大器由多级直接耦合放大电路组成, 是一种具有高电压放大倍数、带深度负反馈的直接耦合放大器, 其输入网络和反馈网络由线性或非线性元件组成, 可对输入信号进行多种数学运算和处理。

集成运算放大器是一种具有高电压放大倍数的直接耦合放大器, 主要由输入、中间、输出三部分组成。输入部分是差动放大电路, 有同相和反相两个输入端; 前者的电压变化和输出端的电压变化方向一致, 后者则相反。中间部分提供高电压放大倍数, 经输出部分传到负载。集成运算放大电路如图 1.16 所示, 常见的集成运算放大器有直流同相比比例放大器 [$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$]、直流反相比比例放大器 ($u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$)、交流放大器 [$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i$]、加/减法运放电路等。

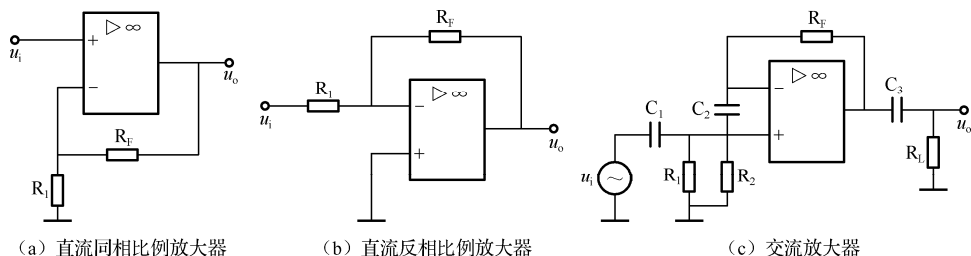


图 1.16 集成运算放大电路