



普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

传感器及工程应用

宋德杰 主 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

传感器及工程应用

Sensor and Engineering Application

主 编 宋德杰

副主编 刘国柱 宿元斌

参 编 姜 李 宋美春 王 玮

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了工程检测中使用的各种传感器的原理、结构、特性及工程应用案例。全书共 15 章:第 1 章介绍测量及数据处理技术;第 2 章介绍传感器的基本特性及工程应用等有关内容;第 3~14 章分别介绍温度传感器、压力传感器、流量传感器、光敏传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、测振传感器、界位传感器、气敏传感器、湿敏传感器及数字式传感器的工作原理、基本结构及工程应用案例等;第 15 章介绍传感器新技术及传感器的综合应用案例。本书内容全面,具有较强的工程实用性,是我国高等教育工程应用型人才培养的案例化教材。

本书可作为电子信息、电气工程、电子科学与技术、应用电子、机电工程、机械自动化、化工自动化、自动化及计算机应用等专业的工程应用型人才培养教材或本科生及工程硕士的教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

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

传感器及工程应用 /宋德杰主编. — 北京:电子工业出版社, 2016. 7
电气工程、自动化专业规划教材
ISBN 978-7-121-29144-9

I. ①传… II. ①宋… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140330 号

策划编辑:凌 毅 责任编辑:凌 毅

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:18.25 字数:490 千字

版 次:2016 年 7 月第 1 版

印 次:2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价:39.80 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)88254528, lingyi@phei.com.cn。

前言

随着我国高等教育事业的蓬勃发展,高等院校星罗棋布,但高等教育的培养目标和我国的经济发展却不大适应。为此,教育部于2010年制定了《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》和《国家中长期人才发展规划纲要(2010—2020年)》,为我国普通高校今后的培养目标指明了方向,对我国高等教育持续、健康发展具有重大指导意义。

这两个纲要明确指出了今后我国高等教育的主要任务是提高教学质量,为社会培养急需的工程应用型人才,以适应我国现在和将来发展的需要。为适应社会需求,教育部也提出了今后一段时期要大力发展专业硕士研究生教育的号召。许多院校举办了卓越工程师班、校企联合班、CDIO班及创新试验班等。但这些教育所用教材大多都是直接选用以前的教材,难以体现工程应用型人才的培养特点,无法有效地满足工程应用型人才培养的实际教学需求。针对目前我国高等教育应用型人才培养中存在的问题,结合本人多年的实践教学经验,特为专业硕士研究生和本科生编写了《传感器及工程应用》教材。

本书具有以下特色:

1. 在编写指导思想上,以应用型人才培养为主要授课对象,以培养工程应用型人才为基本目标。既注重基本理论的讲述,又注意与工程应用的结合,体现了学以致用的指导思想。同时,结合实际应用案例系统,把实际应用案例精简版搬进了教材,力争实现理论与实践相结合。

2. 在教材的编写上,采用按工程参数分类方法进行章节编排,使工程应用线条更加清晰,贴近实际。在内容上既有基本概念、基本原理和基本结构的阐述,又有各种各样传感器在工程中具体应用的案例,从而做到重点突出、由浅入深、由易到难、循序渐进、逐步提高。

3. 在理论教学与实验教学的处理上,本教材采用三位一体的创新教学模式——将理论教学与实验教学融为一体、理论教学与工程应用案例融为一体、实验教学与工程应用案例融为一体,实现了传感器理论教学、实验教学及工程应用教学同步完成。

4. 本教材的主要目的是克服过去那种重理论、轻应用的传统教学模式,把传感器理论和工程应用、工程设计及工程测量控制开发等内容通过典型案例贯穿于教学过程中。教学直观,典型应用案例真实可见,让读者在书本上就能学到、看到传感器的工程应用案例,与工程应用实现零接触。

5. 本教材叙述简洁,易教易学,各章自成体系,建议48~56学时。各专业可根据教学计划对教材内容适当取舍。

本书作者多年从事传感器、电子技术及自动控制系统等教学科研工作,不但具有丰富的教学科研经验,而且还具有传感器及自动控制系统在工程应用中的开发经历,了解社会对工程应用型人才的需求情况和传感器的工程应用案例。在内容编排和论述上作了较大改进,既注重了理论阐述,又强调了工程实际应用和动手能力的培养,以适应目前高等教育应用型人才的培养特点。

全书共15章,分为3部分:第1部分为第1~2章,介绍了测量及数据处理技术、传感器的基本概念和基本特性等有关内容;第2部分为第3~14章,分别介绍了温度传感器、压力传感器、流量传感器、光敏传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、测振传感器、界位传感器、气敏传感器、湿敏传感器及数字式传感器的工作原理、基本结构及工程应用案例等;第3部分为第15章,介绍了目前传感器发展的新技术及其综合应用案例,各章将传感器与工程监测和控制有机地

结合起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,学会将这些知识应用到工程监测和控制系统中,以解决工程监测、控制中的具体问题。

本书可作为电子信息、电气工程、电子科学与技术、应用电子、机电工程、机械自动化、化工自动化、自动化及计算机应用等专业的工程应用型人才培养教材或本科生及工程硕士的教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

为了方便教师使用和读者学习,本书提供免费电子课件,请登录华信教育资源网 www.hxedu.com.cn 注册下载。

本书由山东理工大学宋德杰教授任主编,刘国柱、宿元斌任副主编,姜李、宋美春、王玮参编,最后由宋德杰教授统稿定稿。在编写过程中,得到了淄博耐思电子科技有限公司和杭州赛特传感器技术公司的大力支持和帮助,一些同行专家们提出了许多宝贵意见,同时还参阅了许多书籍和文献,在此向这些单位、书籍和文献的作者们表示致谢。

传感技术涉及的知识面非常广泛,而且技术发展迅速,在编写过程中,由于作者的水平和知识有限,难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者不吝赐教。

作者

2016年6月

目 录

第 1 章 测量及数据处理技术	1	2.5.1 测量显示系统的结构	31
1.1 测量概论	1	2.5.2 监测控制系统的结构	32
1.1.1 测量值的表示方法	1	思考题及习题 2	33
1.1.2 测量方法及分类	1	第 3 章 温度传感器及工程应用	34
1.1.3 测量误差	3	3.1 温度测量概述	34
1.2 测量数据的估计与处理	4	3.1.1 温度与温标	34
1.2.1 随机误差的估计与处理	5	3.1.2 温度测量方法和分类	34
1.2.2 系统误差的处理方法	8	3.2 热电阻传感器	35
1.2.3 粗大误差的辨别与处理	10	3.2.1 热电阻的测温原理	36
1.2.4 测量不确定度	12	3.2.2 常用热电阻	36
1.2.5 间接测量中的数据处理	13	3.2.3 常用热电阻的结构	37
1.2.6 组合测量中的数据处理	14	3.2.4 热电阻测温转换电路	38
1.2.7 实验数据中的数据处理	15	3.2.5 热电阻使用注意事项	40
1.3 动态测量数字滤波技术	16	3.3 热敏电阻传感器	41
1.3.1 中值滤波	16	3.3.1 热敏电阻的测温原理	41
1.3.2 平均滤波	17	3.3.2 热敏电阻的分类及特性	41
1.3.3 低通数字滤波	17	3.3.3 热敏电阻的结构及符号	42
1.3.4 高通数字滤波	18	3.3.4 热敏电阻的主要参数	43
思考题及习题 1	18	3.3.5 热敏电阻的线性化网络	44
第 2 章 传感器及工程应用概述	20	3.3.6 热敏电阻的温度补偿	44
2.1 传感器概述	20	3.3.7 热敏电阻使用注意事项	44
2.1.1 传感器的定义	20	3.4 热电偶传感器	45
2.1.2 传感器的组成	20	3.4.1 热电偶的测温原理	45
2.1.3 传感器的分类	20	3.4.2 热电偶的基本定律及符号	47
2.2 传感器的特性	21	3.4.3 热电偶的常用类型及特点	48
2.2.1 传感器的静态特性	21	3.4.4 热电偶传感器的结构形式	52
2.2.2 传感器的动态特性	23	3.4.5 热电偶的冷端处理方法	53
2.3 传感器的标定	29	3.4.6 热电偶测温线路	55
2.3.1 传感器的静态特性标定	29	3.5 集成温度传感器	56
2.3.2 传感器的动态特性标定	29	3.5.1 测温原理及电路结构	56
2.4 传感器及工程应用的发展方向	30	3.5.2 常见集成温度传感器及应用	57
2.4.1 传感器的发展方向	30	3.6 辐射式温度传感器	60
2.4.2 传感器工程应用的发展方向	31	3.6.1 热辐射基本定律	60
2.5 传感器工程应用系统		3.6.2 辐射式温度传感器的应用	61
典型结构	31	3.7 温度传感器工程应用案例	63

3.7.1 温度测量显示系统案例	63	第5章 流量传感器及工程应用	106
3.7.2 温度监测控制系统案例	65	5.1 流量测量概述	106
思考题及习题3	66	5.1.1 流量测量的基本概念	106
第4章 压力传感器及工程应用	68	5.1.2 流量检测方法分类	106
4.1 压力测量概述	68	5.2 差压流量传感器	107
4.2 应变式压力传感器	68	5.2.1 节流式差压流量传感器	
4.2.1 金属电阻应变片	69	测量原理	107
4.2.2 电阻应变片测量转换电路	73	5.2.2 常见差压流量传感器的	
4.2.3 常见应变式(压)力		结构	109
传感器及应用	77	5.3 电磁流量传感器	110
4.3 压阻式压力传感器	80	5.3.1 电磁流量传感器的	
4.3.1 半导体电阻应变片	80	工作原理	110
4.3.2 常见扩散硅压力		5.3.2 电磁流量传感器的种类	110
传感器及应用	82	5.4 涡轮流量传感器	111
4.4 压电式压力传感器	84	5.4.1 涡轮流量传感器的结构	111
4.4.1 压电效应	84	5.4.2 涡轮流量传感器的	
4.4.2 压电元件的等效电路	87	工作原理	111
4.4.3 压电式传感器的组成	87	5.5 漩涡流量传感器	112
4.4.4 压电式传感器的测量电路	88	5.5.1 涡街流量传感器的	
4.4.5 常见压电式压力传感器		工作原理	112
及其应用	89	5.5.2 涡街流量传感器的结构	113
4.5 电容式压力传感器	89	5.6 质量流量传感器	114
4.5.1 单电容压力传感器	89	5.6.1 单一式质量流量传感器	114
4.5.2 差动电容压力传感器	90	5.6.2 组合式质量流量传感器	115
4.5.3 电容压力传感器测量电路	91	5.7 流量传感器工程应用案例	115
4.5.4 常见电容式压力传感器		5.7.1 流量传感器的选用原则	116
及应用	94	5.7.2 流量测量显示系统案例	116
4.6 电感式压力传感器	95	5.7.3 液体流量监控系统案例	116
4.6.1 单电感压力传感器	95	5.7.4 气体流量监控系统案例	117
4.6.2 差动电感压力传感器	97	思考题及习题5	119
4.6.3 电感式传感器测量电路	97	第6章 光敏传感器及工程应用	120
4.6.4 常见电感式压力传感器		6.1 光的基本知识	120
及应用	99	6.1.1 光的基本特性	120
4.7 压力传感器工程应用案例	100	6.1.2 光电效应	120
4.7.1 压力传感器的使用		6.2 常见光电元件	121
注意事项	100	6.2.1 光电管	121
4.7.2 压力测量显示系统案例	101	6.2.2 光电倍增管	121
4.7.3 压力监测控制系统案例	103	6.2.3 光敏电阻	122
思考题及习题4	105	6.2.4 光敏二极管和光敏三极管	124

6.2.5 光电池	126	7.4.2 霍尔元件	163
6.2.6 电荷耦合器	128	7.4.3 霍尔集成电路	166
6.3 光电传感器	131	7.4.4 常见霍尔式位移传感器 及应用	167
6.3.1 光电传感器结构及 工作原理	132	7.5 位移传感器工程应用案例	169
6.3.2 光电耦合器	132	7.5.1 金属板厚度监测系统案例	169
6.3.3 光电开关	132	7.5.2 生产线自动计数系统案例	169
6.4 光纤传感器	133	思考题及习题 7	170
6.4.1 光纤的结构及传光原理	134	第 8 章 速度传感器及工程应用	172
6.4.2 光纤的主要参数	135	8.1 磁电式速度传感器	172
6.4.3 光纤的分类	136	8.1.1 恒磁通式磁电速度传感器	172
6.4.4 光纤传感器结构及 工作原理	137	8.1.2 变磁通式磁电转速传感器	173
6.4.5 光纤传感器的分类	137	8.1.3 测速发电机	173
6.4.6 常见光纤传感器	138	8.1.4 常见磁电式速度 传感器及应用	176
6.5 光敏传感器工程应用案例	139	8.2 霍尔式转速传感器	178
6.5.1 火灾监测报警系统案例	139	8.2.1 常见结构	178
6.5.2 物体尺寸测量系统案例	139	8.2.2 测速原理	178
思考题及习题 6	140	8.2.3 霍尔式转速传感器的应用	178
第 7 章 位移传感器及工程应用	141	8.3 涡流式转速传感器	179
7.1 电位器式位移传感器	141	8.3.1 基本结构	179
7.1.1 线性电位器	141	8.3.2 测速原理	179
7.1.2 非线性电位器	142	8.3.3 涡流式转速传感器的应用	179
7.1.3 绕线式电位器的材料	143	8.4 超声波流速传感器	180
7.1.4 线绕式电位器的应用	144	8.4.1 超声波的基本特性	180
7.2 电感式位移传感器	144	8.4.2 超声波传感器	181
7.2.1 自感式位移传感器	144	8.4.3 超声波流速传感器	185
7.2.2 互感式位移传感器	149	8.4.4 超声波流速传感器的应用	186
7.2.3 涡流式位移传感器	151	8.5 光电式转速传感器	186
7.2.4 常见电感式位移传感器 及应用	155	8.5.1 基本结构	186
7.3 电容式位移传感器	156	8.5.2 测速原理	187
7.3.1 单电容式位移传感器	156	8.5.3 光电式转速传感器的应用	187
7.3.2 差动电容式位移传感器	158	8.6 转速传感器工程应用案例	188
7.3.3 电容式位移传感器 测量电路	159	8.6.1 转速测量显示系统案例	188
7.3.4 常见电容式位移传感器 及应用	162	8.6.2 转速监测控制系统案例	189
7.4 霍尔式位移传感器	162	思考题及习题 8	190
7.4.1 霍尔效应	162	第 9 章 加速度传感器及工程应用	191
7.4.2 霍尔元件	163	9.1 应变式加速度传感器	191
7.4.3 霍尔集成电路	166	9.1.1 基本结构	191
7.4.4 常见霍尔式位移传感器 及应用	167		
7.5 位移传感器工程应用案例	169		
7.5.1 金属板厚度监测系统案例	169		
7.5.2 生产线自动计数系统案例	169		
思考题及习题 7	170		

9.1.2 测量原理	191	11.3.1 电容式料位传感器	214
9.2 压电式加速度传感器	192	11.3.2 超声波料位传感器	215
9.2.1 基本结构	192	11.4 物位传感器及其应用	216
9.2.2 测量原理	192	11.4.1 超声波物位传感器	216
9.3 电容式加速度传感器	192	11.4.2 超声波探头的使用 注意事项	216
9.3.1 基本结构	192	11.5 界位传感器工程应用案例	217
9.3.2 测量原理	193	11.5.1 液位测量显示系统案例	217
9.4 差动变压器式加速度传感器	193	11.5.2 物位测量显示系统案例	218
9.4.1 基本结构	193	思考题及习题 11	221
9.4.2 测量原理	193		
9.5 光纤加速度传感器	194	第 12 章 气敏传感器及工程应用	222
9.5.1 基本结构	194	12.1 热传导式气敏传感器	222
9.5.2 测量原理	194	12.1.1 热传导检测原理	222
思考题及习题 9	194	12.1.2 热传导检测器	223
第 10 章 测振传感器及工程应用	195	12.1.3 测量电路	223
10.1 振动测量概述	195	12.2 接触燃烧式气敏传感器	224
10.1.1 振动的基本参数	195	12.2.1 接触燃烧传感器结构	224
10.1.2 振动测量的内容及 测量方法	196	12.2.2 接触燃烧检测原理	225
10.2 测振传感器	197	12.2.3 测量电路	225
10.2.1 测振传感器的分类	197	12.2.4 接触燃烧传感器的特点	226
10.2.2 测振传感器介绍	197	12.3 氧化锆氧气传感器	226
10.2.3 测振传感器的选择原则	202	12.3.1 氧化锆检测原理	226
10.3 激振器	202	12.3.2 氧化锆氧气传感器结构	227
10.3.1 激振方式	202	12.4 恒电位电解式气敏传感器	227
10.3.2 常用激振器介绍	203	12.4.1 恒电位电解检测原理	228
10.4 振动参数的测量与估计	205	12.4.2 恒电位电解传感器结构	228
10.4.1 自由振动法	205	12.5 伽伐尼电池式气敏传感器	228
10.4.2 共振法	206	12.5.1 伽伐尼电池检测原理	228
10.5 测振传感器工程应用案例	207	12.5.2 伽伐尼电池传感器结构	229
思考题及习题 10	208	12.6 半导体气敏传感器	229
第 11 章 界位传感器及工程应用	209	12.6.1 电阻型半导体气敏传感器	230
11.1 界位测量概述	209	12.6.2 非电阻型半导体气敏 传感器	232
11.2 液位传感器及工程应用	209	12.6.3 半导体气敏传感器的 应用范围	233
11.2.1 浮力式液位传感器	209	12.7 气敏传感器工程应用案例	233
11.2.2 静压式液位传感器	211	12.7.1 酒精含量检测显示 系统案例	233
11.2.3 应变式液位传感器	212	12.7.2 有害气体监测控制 系统案例	234
11.2.4 电容式液位传感器	213		
11.3 料位传感器及工程应用	214		

思考题及习题 12	235	14.5.1 数字式线位移监测 系统案例	258
第 13 章 湿敏传感器及工程应用	236	14.5.2 数字式转速测量系统 案例	259
13.1 湿度检测概述	236	思考题及习题 14	259
13.1.1 湿度的描述方法	236	第 15 章 传感器新技术及工程应用	261
13.1.2 湿度的测量方法	236	15.1 智能传感器	261
13.1.3 湿敏传感器及分类	236	15.1.1 智能传感器的典型结构	261
13.2 电阻式湿敏传感器	237	15.1.2 智能传感器的主要功能	262
13.2.1 氯化锂湿敏电阻	237	15.1.3 智能传感器的主要特点	262
13.2.2 陶瓷湿敏电阻	237	15.2 模糊传感器	262
13.2.3 结露传感器	239	15.2.1 模糊传感器概念及特点	262
13.3 电容式湿敏传感器	240	15.2.2 模糊传感器的基本功能	263
13.3.1 陶瓷湿敏电容	240	15.2.3 模糊传感器的结构	263
13.3.2 高分子湿敏电容	241	15.3 网络传感器	265
13.4 集成湿敏传感器	241	15.3.1 网络传感器的概念	265
13.4.1 IH3605 集成湿敏传感器	242	15.3.2 网络传感器的类型	266
13.4.2 IH3605 使用注意事项	242	15.3.3 基于 IEEE 1451 标准的网络 传感器	266
13.5 湿敏传感器工程应用案例	243	15.3.4 网络传感器所在网络的 体系结构	270
13.5.1 湿度检测显示系统案例	243	15.4 多传感器数据融合	271
13.5.2 湿度监测控制系统案例	244	15.4.1 多传感器数据融合的概念	271
思考题及习题 13	244	15.4.2 多传感器数据融合技术	271
第 14 章 数字式传感器及工程应用	245	15.4.3 多传感器数据融合技术的 应用	272
14.1 数字式传感器概述	245	15.5 虚拟仪器	272
14.2 编码器	245	15.5.1 虚拟仪器概述	272
14.2.1 增量编码器	245	15.5.2 虚拟仪器的组成	273
14.2.2 码盘式编码器	247	15.5.3 虚拟仪器的特点	274
14.3 数字式温度传感器	249	15.5.4 软件开发工具 LabVIEW 简介	274
14.3.1 DS18B20 的内部结构	249	15.6 物联网	276
14.3.2 DS18B20 芯片指令介绍	251	15.6.1 物联网的基本概念	276
14.3.3 DS18B20 与微控制器的 连接电路	253	15.6.2 物联网的关键技术	276
14.3.4 DS18B20 的读/写时间隙	253	15.6.3 物联网的应用模式	277
14.3.5 单片机控制 DS18B20 的 操作流程	254	15.6.4 物联网的应用案例	277
14.3.6 DS18B20 使用注意事项	255	思考题及习题 15	277
14.4 光栅传感器	255	参考文献	279
14.4.1 光栅的结构及测量原理	255		
14.4.2 光栅传感器的结构	256		
14.4.3 光栅传感器的精度	258		
14.5 数字式传感器工程 应用案例	258		

第1章 测量及数据处理技术

1.1 测量概论

众所周知,一切科学实验和生产过程中的信息,特别是在自动监测控制系统中获取的原始信息,都要通过传感器转换为容易传输与处理的电信号。但能否正确及时地获得这些信息,除了正确使用传感器之外,还必须有正确的数据测量方法和数据处理技术。为了更好地掌握测量方法和处理技术,需要对测量的基本概念、测量误差及数据处理技术等方面的理论及工程应用方法进行研究。只有了解和掌握了这些理论和应用方法,才能正确及时地获得被测数据,才能高效地完成测量任务。

1.1.1 测量值的表示方法

测量值是将被测量与同种性质的标准量进行比较的结果,其数值等于被测量与标准量的比值。它通常用下式表示为

$$x = nu \quad (1-1)$$

式中, x 为测量值; u 为标准量,即测量单位; n 为比值。

由式(1-1)可知,测量结果包括比值和测量单位两个量,缺一不可。

1.1.2 测量方法及分类

实现被测量与标准量比较得出比值的方法,称为测量方法。测量方法有多种,若按获取测量值的方法分类,可分为直接测量、间接测量和组合测量三种;若按测量方式分类,可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量三种;若按测量条件分类,可分为等精度测量与不等精度测量两种;若根据被测量变化快慢分类,可分为静态测量与动态测量两种;若按测量敏感元件是否与被测介质接触分类,可分为接触式测量与非接触式测量两类。下面简要介绍这几种测量方法。

1. 直接测量、间接测量和组合测量

1) 直接测量

在使用仪表或传感器进行测量时,人们通常把被测量的测量值直接作为测量结果的方法称为直接测量。被测量 y 与测量值 x 之间的关系可用下式表示为

$$y = x \quad (1-2)$$

例如,用磁电式电流表测量电路的某一支路电流、用弹簧管压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而又迅速,缺点是测量精度不很高。

2) 间接测量

在使用仪表或传感器进行测量时,若被测量不能直接测量,而只能通过对与被测量有确定函数关系的一个量或几个量进行直接测量,然后将直接测量值代入函数关系式。经过计算得到被测量的结果,这种测量方法称为间接测量。间接测量与直接测量的不同是被测量 y 与一个测量值 x 或几个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 有函数关系,即

$$y = f(x) \quad (1-3)$$

或

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-4)$$

并且被测量 y 不能直接测量, 必须通过测量值 x 或 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 及其函数关系求出。比如: 要测量某电器的功率 P , 但没有功率表, 我们可用万用表直接测量该用电器的电流 I 和电阻 R , 根据 $P=I^2 R$ 计算出功率 P , 这就是间接测量的实例。这种测量方法与直接测量相比, 手续较多, 花费时间较长, 而且还需要一定的计算才能获得测量结果。但它可以对不能直接测量的被测量实现测量。

3) 组合测量

若不能直接测量的被测量不止一个, 就必须通过求解联立方程组, 才能获得测量结果, 这种测量方法称为组合测量。组合测量的关键是列出包含不能直接测量的被测量 $y_1, y_2, \dots, y_m$ 的联立方程组。在进行组合测量时, 一般需要通过改变测量条件来获得这个联立方程组。比如, 已知铂热电阻的电阻值在 $0 \sim 850^\circ\text{C}$ 范围内与温度 t 的关系为

$$R(t)=R_0(1+At+Bt^2) \quad (1-5)$$

式中, $R(t)$ 、 R_0 为铂热电阻分别在 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的电阻值; A 、 B 为铂热电阻的温度系数。

要确定它的温度系数 A 、 B 及 R_0 的数值, 显然不能直接测量。我们可以在 $0 \sim 850^\circ\text{C}$ 范围内任意取 3 个不同温度点 t_1 、 t_2 和 t_3 , 测量出 $R(t_1)$ 、 $R(t_2)$ 和 $R(t_3)$, 得到 3 个方程, 把这 3 个方程联立求解, 就可求出温度系数 A 、 B 及 R_0 的值。这就是组合测量。组合测量是一种特殊的测量方法, 操作手续复杂, 花费时间长, 多适应于科学实验或特殊场合。

2. 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

1) 偏差式测量

用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的数值, 这种测量方法称为偏差式测量。应用这种方法测量时, 仪表刻度事先用标准器具分度好。测量时, 按照仪表指针在标尺上的示值, 决定被测量的数值。偏差式测量的测量过程简单、迅速, 但测量结果的精度较低。

2) 零位式测量

用指零仪表的零位反映测量系统的平衡状态, 在测量系统平衡时, 用已知的标准量决定被测量的数值, 这种测量方法称为零位式测量。在零位式测量时, 标准量直接与被测量相比较, 当指零仪表指零时, 被测量就与已知标准量相等。例如, 天平测量物体的质量、电位差计测量电压等都属于零位式测量。零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度, 但测量过程比较复杂, 费时较长, 不适用于测量变化迅速的信号。

3) 微差式测量

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量相比较, 取得差值后, 再用偏差法测得此差值。应用这种方法测量时, 不需要调整标准量, 而只需测量两者的差值。假设: N 为标准量, x 为被测量, Δ 为二者之差, 则 $x=N+\Delta$ 。由于 N 是标准量, 其误差很小, 且 $\Delta \ll N$, 因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ , 即使测量 Δ 的精度不高, 但因 $\Delta \ll x$, 故总的测量精度仍很高。微差式测量的优点是反应快, 而且测量精度高, 特别适用于在线控制参数的测量。

3. 等精度测量和非等精度测量

1) 等精度测量

在多次重复测量的过程中, 若影响和决定误差大小的全部因素始终保持不变, 即多次重复测量中的每一个测量值, 都是在相同的测量条件下获得的, 这样的测量就称作等精度测量。比如由同一个测量者, 用同一台仪器, 用同样的方法, 在同样的环境条件下, 对同一被测量进行多次重复测量, 就可以看作是等精度测量。

2) 非等精度测量

若测量条件部分或全部改变,则各测得值的精度或可信度就不一样,这种测量就称作非等精度测量。比如在科学研究或高精度测量中,往往要在不同的测量条件下,用不同精度的仪表,不同的测量方法,不同的测量次数以及不同的测量者进行测量结果的对比,这就是非等精度测量。

严格地讲,所有的测量都是非等精度测量。但是,当影响和决定误差大小的测量条件差别不大时,实际中都可把它当作等精度测量对待。

4. 静态测量与动态测量

1) 静态测量

被测量在测量过程中是固定不变的,对这种被测量进行的测量称为静态测量。静态测量不需要考虑时间因素对测量的影响。

2) 动态测量

被测量在测量过程中是随时间不断变化的,对这种被测量进行的测量称为动态测量。

1.1.3 测量误差

一般情况下被测量的真值是未知的,测量的目的是希望获取被测量的真值。但由于种种原因,例如,传感器本身性能不十分优良、测量仪器不够精确、测量方法不十分完善、外界干扰影响等,造成被测量的测量值与真值不一致,这个偏差就是测量误差。为了描述测量误差的大小和测量值的精确程度,需要对测量误差进行严格的数学定义。

1. 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法很多,常用的主要有以下几种。

1) 绝对误差

被测量的测量值与其真值之间的差称作绝对误差,其数学表达式为

$$\Delta = x - X \quad (1-6)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为测量值; X 为真值(未知)。

绝对误差说明了测量值偏离真值的大小,它可正可负,并且和被测量有相同的量纲。为了叙述方便,通常人们又把它简称为误差。

在实际测量中,有时要用到修正值,修正值 c 是与绝对误差大小相等、符号相反的值,即

$$c = -\Delta \quad (1-7)$$

通常修正值 c 是用高一等级的测量标准或标准仪器获得的。利用修正值可对测量值进行修正,从而得到比较准确的测量值,修正后的实际测量值 x' 为

$$x' = x + c = x - \Delta \quad (1-8)$$

修正值给出的方式,可以是具体的数值,也可以是一条曲线或一个公式。

2) 相对误差

采用绝对误差表示测量误差时,人们发现它不能很好地反映测量质量的好坏。例如,在温度测量时,绝对误差 $\Delta = 1^\circ\text{C}$,对体温测量来说这个误差太大,但对钢水温度测量来说则是极好的测量结果。为了能客观地反映测量的准确性,又引入了相对误差的概念。相对误差定义为绝对误差与被测量真值的比值,常用百分数表示,即

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中, δ 为相对误差; Δ 为绝对误差; X 为真值。

一般来说,被测量的真值 X 是未知的。为了计算绝对误差和相对误差的数值,在工程上常用精度高一级的标准器具值或等精度多次测量的算术平均值来代替真值 X 。

3) 引用误差

相对误差虽然能说明测量的准确度,但不能反映测量仪表的准确度。为此引入引用相对误差的概念,引用相对误差简称为引用误差,它是仪表中通用的一种相对误差表示方法。其定义是绝对误差与仪表满量程的百分比,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, γ 为引用误差; Δ 为绝对误差; X_{FS} 为仪表的满量程(=测量范围上限-测量范围下限)。

在规定的条件下,仪表全量程范围内最大绝对误差 Δ_{max} 与满量程 X_{FS} 的百分比称作仪表的最大引用误差 γ_{max} 。即

$$\gamma_{max} = \frac{\Delta_{max}}{X_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

为了描述仪表的测量精度,引入了仪表精度等级的概念,它是根据最大引用误差来定义的。国家标准规定仪表的最大引用误差不得超过该仪表精度等级的百分数。我国的电工仪表精度等级共分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七个等级。例如,0.5 级表的最大引用误差值不超过 $\pm 0.5\%$;1.0 级表的最大引用误差值不超过 $\pm 1\%$ 。

2. 测量误差的分类

根据测量数据中的误差所呈现的规律及产生的原因,可将它分为随机误差、系统误差和粗大误差 3 类。

1) 随机误差

在同一测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,其误差的大小和符号以不可预测的方式变化,这种误差称为随机误差。

由于引起随机误差的因素非常复杂,所以随机误差不可预测,也不可避免。但当测量次数足够多时,随机误差服从一定的统计规律,通过对测量数据的统计处理可以计算随机误差出现的可能性大小。

2) 系统误差

在同一测量条件下,对同一被测量进行多次测量时,如果误差的大小和符号保持不变,或在测量条件改变时,误差按一定规律(如线性、多项式、周期性等函数规律)变化,这种误差称为系统误差。前者称为恒值系统误差,后者称为变值系统误差。

引起系统误差的原因很多,主要有材料、零部件及工艺的缺陷,环境温度、湿度、压力的变化,测量方法不完善、零点未调整、采用近似的计算公式及测量者的经验不足等。

3) 粗大误差

在测量过程中,如果误差超出规定条件下预期的结果,这个误差称为粗大误差,又称疏忽误差。

产生粗大误差的原因主要是由于测量者疏忽大意,测错、读错或环境条件的突然变化等引起的。

1.2 测量数据的估计与处理

从工程测量实践中可知,测量数据中含有随机误差和系统误差,有时还含有粗大误差。它们的性质不同,对测量结果的影响及处理方法也不同。对于不同情况的测量数据,首先要加以分析研究、判断情况、分别处理,再经综合整理,得出合乎科学性的测量结果。

1.2.1 随机误差的估计与处理

大量的实验数据表明, 单次测量的随机误差无规律可寻, 但对多次重复测量的大量的测量数据进行统计发现, 随机误差 $\Delta = x - X$ 具有如下特征。

- ① 对称性, 即在多次的重复测量中, 绝对值相等的正、负误差出现的次数大致相等。
- ② 有界性, 即在一定测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的界限。
- ③ 单峰性, 即绝对值小的误差出现的次数比绝对值大的误差出现的次数多。
- ④ 抵偿性, 即对同一被测量进行多次重复测量时, 其随机误差的算数平均值随着测量次数的增加趋向于零。抵偿性是随机误差的一个重要特征, 凡是具有抵偿性的, 原则上都可以按随机误差来处理。

这些特征表明, 随机误差服从正态分布, 因而测量值 x 也服从正态分布, 所以正态分布理论就成为研究测量数据及随机误差的基础。下面首先介绍正态分布的有关知识。

1. 正态分布

由概率统计知识可知, 正态分布概率密度函数为

$$y = f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-12)$$

式中, x 为随机变量(即测量值); X 为随机变量的数学期望(即真值); σ 为随机变量的标准差。

由式(1-12)可知, 正态分布由它的数学期望 X 和标准差 σ 唯一确定。概率密度函数 $f(x)$ 的图像如图 1-1 所示, 它具有如下特性:

- ① $f(x)$ 是一条钟形的曲线, 关于均值 $x = X$ 对称;
- ② 当 $x = X$ 时, $f(x)$ 达到最大值, 并且 x 离 X 越远, $f(x)$ 的值就越小;
- ③ $f(x)$ 的曲线在 $x = X \pm \sigma$ 处有拐点, 并且以 x 轴为水平渐近线;

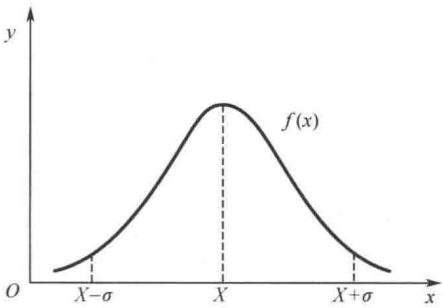


图 1-1 正态分布密度函数图像

④ 若固定 σ , 改变 X 值, 则 $f(x)$ 曲线沿 x 轴平行移动, 但不改变其形状, 见图 1-2(a); 若固定 X , 改变 σ , 则曲线形状如图 1-2(b) 所示。由图 1-2(b) 可知, σ 值愈大, 曲线愈平坦, 即随机变量 x 的分散性愈大; 反之, σ 愈小, 曲线愈尖锐, 说明随机变量的分散性愈小, 也就是说随机变量落在 X 附近的概率就越大, 故常用 σ 来评价测量值的可靠程度。

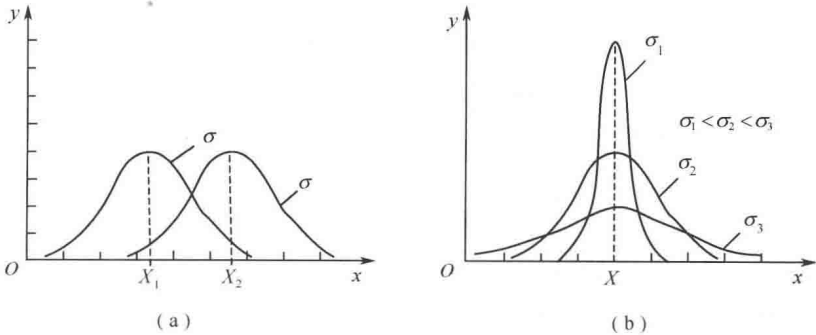


图 1-2 不同 X 及 σ 时的概率密度曲线

2. 正态随机变量的概率计算

由概率统计知识可知,正态随机变量 x 落在区间 $(X-k\sigma, X+k\sigma)$ 的概率为

$$P = P\{X-k\sigma < x < X+k\sigma\} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{X-k\sigma}^{X+k\sigma} e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-13)$$

式中, k 为置信系数; P 为置信概率或置信度。

由式(1-13)计算可知,当 $k=1$ 时, $P=0.6827$; $k=2$ 时, $P=0.9545$; $k=3$ 时, $P=0.9973$ 。此结果说明:测量值出现在 $(X-\sigma, X+\sigma)$ 范围内的置信概率为 68.27%; 出现在 $(X-2\sigma, X+2\sigma)$ 范围内的置信概率为 95.45%, 出现在 $(X-3\sigma, X+3\sigma)$ 范围内的置信概率为 99.73%。因此,可以认为单次测量的误差绝对值大于 3σ 的情况是不可能出现的,通常把这个误差称为极限误差 Δ_{lim} , 即单次测量的极限误差 $\Delta_{\text{lim}}=3\sigma$ 。

3. 随机变量数字特征的估计

1) 被测量的真值 X 的估计

对于正态分布来说,通常 X 是未知的。为了获得 X 的具体数值,一般都是通过测量来实现的。由于测量过程中不可避免地存在随机误差,所以我们无法通过一次测量精确地获得被测量的真值 X 。若对被测量进行等精度的 n 次测量,得到 n 个测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则这 n 次测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-14)$$

由概率统计理论可以证明:对真值 X 来说,算术平均值是真值 X 的一个最佳估计,或者说算术平均值是诸测量值中最可信赖的。即

$$X \approx \bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-15)$$

2) 被测量的标准差 σ 的估计

标准差又称均方根误差。它是评价随机变量分散程度的一个指标。为了估算该指标,人们引入了样本标准差 σ_s

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-16)$$

式中, x_i 为第 i 次测量值; $\bar{x}$ 为 n 次测量值的算术平均值; v_i 为残余误差, 即 $v_i = x_i - \bar{x}$ 。

由于残余误差 v_i 很小,残余误差的平方 v_i^2 就更小,容易产生计算误差。为此将式(1-16)变形得

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (1-17)$$

式(1-17)称作贝塞尔公式。它是计算样本标准差 σ_s 的常用公式。

由概率统计理论可以证明:样本标准差 σ_s 是总体标准差 σ 的无偏估计。即

$$\sigma \approx \sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (1-18)$$

并且它们与测量值 x_i 具有相同的量纲。

3) 算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 的计算

对被测量 x 进行 n 次等精度测量,若这些测得值里,只含有随机误差,则它们的算术平均值 $\bar{x}$ 也是正态随机变量,并且比测量值更接近于期望值。算术平均值 $\bar{x}$ 的可靠性指标可用算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 来评定。由概率统计知识可知,它与标准差 σ 的关系为

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-19)$$

由式(1-19)可见,在测量条件一定的情况下,算术平均值的标准差 σ_x 随着测量次数 n 的增加而减小。即当测量次数 n 越大时,算术平均值 $\bar{x}$ 越接近期望值 X ,也就是测量精度越高。图1-3为 σ_x/σ 与 n 的关系曲线。从图中可以看出,当测量次数 n 增加到一定数值(例如10)以后, σ_x 的减小就变得缓慢,所以不能单靠无限制地增加测量次数来提高测量精度。实际上测量次数愈多,愈难保证测量条件的稳定,从而带来新的误差。

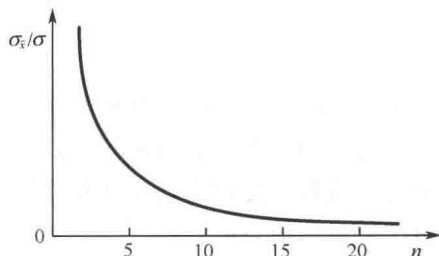


图1-3 σ_x/σ 与 n 的关系曲线

所以在一般精密测量中,重复测量的次数 n 一般少于10,若要进一步提高测量精度,应采取其他措施(如提高仪器精度,改进测量方法,改善环境条件等)来解决。

4. 非等精度测量的数据处理

前面讲述的内容都是在等精度测量条件下得出的。但在科学研究或高精度测量中,为了获得足够的信息,有时会有意改变测量条件,比如用不同精度的仪表,或是用不同的测量方法等进行测量,这样的测量属于非等精度测量。

对于非等精度的测量,测量数据的分析和综合不能套用前面等精度测量的数据处理公式,而需推导出新的计算公式。

1) “权”的概念

在等精度测量中,多次重复测量得到的各个测量值都具有相同的精度。或者说各个测得值都具有相同的可信程度,并用所有测量值的算术平均值作为测量结果。在非等精度测量时,对同一被测量进行 m 组的测量,得到 m 组的测量结果及其误差。由于各组测量条件不同,各组测量结果的可靠程度也不一样,因而不能简单地取各测量结果的算术平均值作为最后的测量结果。一般来说,应该让可靠程度大的测量结果在最后结果中占的比重大一些,可靠程度小的占比重小一些。各测量结果的可靠程度可用一个数值来表示,这个数值就称作该测量结果的“权”,记为 p 。

“权”可理解为该测量结果和其他测量结果比较时对它的可信赖程度。一般来说,测量次数多,测量方法完善,测量仪表精度高,测量的环境条件好,测量人员的水平高,测量误差小,其测量结果的可靠性就大,其权值也应该大。

2) 加权平均值 $\bar{x}_p$ 的计算

在等精度测量时,测量结果的最佳估计值用算术平均值表示;而在不等精度测量时,测量结果的最佳估计值要用加权平均值表示。一般来说,若对同一被测量进行 m 组不等精度测量,得到 m 组测量值的算术平均值为 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$,相应各组的权分别为 $p_1, p_2, \dots, p_m$,则各组的加权平均值定义为

$$\bar{x}_p = \frac{\bar{x}_1 p_1 + \bar{x}_2 p_2 + \dots + \bar{x}_m p_m}{p_1 + p_2 + \dots + p_m} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x}_i p_i}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad (1-20)$$

由式(1-20)可知,如果 $p_1 = p_2 = \dots = p_m$,则各组的加权平均值就变成了各组的算术平均值了。从式(1-20)可以看出,计算加权平均值的关键是确定各组的权,它是衡量加权平均值可靠程度的重要指标。理论可以证明,当各组的权值取各组算术平均值的方差倒数时,加权平均值的