



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

Detection
Technology

检测技术

第2版

◎ 郑华耀 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

检测技术

第2版

主 编 郑华耀

副主编 赖申江 张莉萍

主 审 郎文鹏



机械工业出版社

本教材根据应用型本科规划教材大纲编写,分三个部分,共12章。主要从测量误差分析、非电量的检测方法和传感器测量原理及应用、信号处理和检测系统的设计等方面来介绍检测技术的应用和实践知识。

本教材内容丰富,深浅适度,既注重了机电知识的融合,同时又侧重反映了传感器新技术应用和智能检测新动向。

这次修订,对于第12章的内容作了较大的增补。在原先的基础上,增加了智能温度传感器的单片机实时检测系统设计实例,加深学生对理论知识的理解,达到提升学生知识综合运用能力的目的。

本书可作为高等院校本科及专科检测技术、仪器仪表、工业自动化、电气工程、信息电子等专业的教材,也可以作为从事自动控制和机电一体化领域相关科技人员的参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 wangyaxin1993@sohu.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术/郑华耀主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2010.8
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-30993-2

I. ①检… II. ①郑… III. ①技术测量—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第111289号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:王雅新 责任校对:李秋荣

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2010年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·395千字

标准书号:ISBN 978-7-111-30993-2

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面防伪标均为盗版

前言

本教材编写之初,在编审委员会组织下,由国内十余所工科院校的教师根据课程教学大纲,对教材的基本内容进行了认真的研讨。教材在取材和体系编排上较好地处理了各类知识的过渡与衔接,注重理论与实际应用相结合,着重反映传感器新技术和智能检测新动向。该书自2004年7月出版以来,得到许多院校的选用,使用效果较好,已多次重印。

当前,我国高等教育正面临新时期的发展需求。培养应用型技术人才是工科教育的一个重要教学目标。为了满足在应用能力培养实施过程中对教材的同步需求,在编委会和出版社的建议和组织下,我们修订编写了《检测技术》(第2版)。

本书综述了检测技术的主要理论知识和应用技术,简要阐述了检测系统综合设计的原则和方法。全书共12章,分为三个部分:第一部分(第一、二章)为共性部分,介绍检测原理、误差来源以及传感器的数学模型与特性。第二部分(第三~十章)为参数检测部分,针对温度、压力、流量、物位、转速、加速度、物性参数、磁参数等各种非电量参数分析和综合了传感器的测量原理及测量方法,特别注重了新知识的融合,包括智能传感器和一些具有实用价值的新技术的介绍。第三部分(第十一、十二章)为检测信号处理和系统的综合设计部分,介绍了检测信号变换和数据采集的常用方法、线性化技术、检测系统的硬件和软件设计、干扰及其抑制措施等内容。参数检测的各章具有相对独立性,可根据教学课时和不同专业的教学需要选用。

《检测技术》(第2版)着重突出了以下几方面特点:

(1)面向应用型本科人才培养。本书作为普通高等教育应用型本科教材编写的,重点突出了知识的应用性。书中许多章节中有面向工程实践的详细举例。为突出对应用能力的培养,书中不仅在误差处理、参数检测、信号变换等内容上注意介绍知识的具体应用,而且在第12章中专门讨论了检测系统的干扰和保护,给出了微机化检测系统完整设计的实例,对课程设计或相关专业的综合性教学也有参考价值。本版附有与教材对应的电子课件。

这次修订,对于第十二章的内容作了较大的增补。在原有的基础上,增加了一个使用智能温度传感器的单片机实时温度检测系统设计实例。实例中详细介绍了系统硬件设计以及软件开发过程,力求通过一些应用项目的整体设计介绍,加深学生对理论知识的理解,达到提升学生知识综合运用能力的目的。

(2)适合实验教学。书中大部分章节都有具体的实例,许多非电量参数检测都可以在常规传感器实验仪上实现。

(3)习题内容丰富。为了便于巩固知识,书中的每一章都附有一定类型和数量的习题。

本书的参考学时为50学时(含实验),各院校可根据各自的教学安排对书中的内容作适当取舍。

本书由郑华耀主编,赖申江、张莉萍为副主编,上海大学郎文鹏担任主审。郑华耀编写了第一、二、六、八、九、十、十一章;张莉萍编写了第二、四章以及第七章的原理部分;赖申江编写了第十二章和第七章的应用部分;何敏编写了第五章。赖申江对第1版的文字作了多次修改校正,从实际教学的需求出发制作了与教材对应的电子课件,并根据出版社的建议进行了修

绪。

本书可作为高等院校本科及专科检测技术、仪器仪表、工业自动化、电气工程等专业的教材,也可以作为相关科技人员的参考书。

在本书的编写过程中参阅了多种同类教材和著作,在此向其作者致谢。

编者

目 录

前言

第一章 检测技术理论基础 1

第一节 绪言 1

一、检测的基本知识 1

二、被测参数的分类 1

三、检测设备的基本性能 2

第二节 测量与误差 2

一、测量、量值、约定真值 2

二、测量误差的性质与分类 4

三、测量误差的来源 6

第三节 测量误差的处理 7

一、系统误差的处理 7

二、随机误差的处理 9

三、粗大误差的处理 11

四、函数误差和测量结果的处理 12

五、测量曲线的拟合 14

第四节 检测系统的构成与发展 15

一、典型的检测系统 15

二、检测技术的发展 15

小结 16

习题与思考题 16

第二章 传感器技术基础 18

第一节 传感器概论 18

一、传感器及其组成 18

二、传感器的作用与地位 18

三、传感器的分类 19

四、传感器的发展趋势 20

第二节 传感器的特性 21

一、传感器的静态特性与指标 21

二、传感器的动态特性与指标 25

第三节 系统相似与机电模拟 29

一、系统相似 29

二、机电模拟 30

三、机械阻抗 30

小结 33

习题与思考题 33

第三章 温度的测量 34

第一节 温标及其传递 34

一、温标 34

二、温度量值的传递 35

三、温度传感器的种类 35

第二节 常用温度传感器 36

一、膨胀式温度传感器 36

二、热电偶温度传感器 39

三、热电阻温度计 44

四、热敏电阻温度传感器 46

第三节 晶体管与集成温度传感器 50

一、晶体管温度传感器 50

二、集成温度传感器 52

第四节 辐射式温度计 57

一、辐射温度计 57

二、光学高温计 57

三、红外辐射温度计 58

第五节 其他温度传感器 60

一、电容温度传感器 60

二、光纤温度传感器 60

第六节 某些温度测量的方式 61

一、表面温度的测量 61

二、流管内介质温度的测量 61

三、气体温度的测量 62

小结 62

习题与思考题 63

第四章 压力的测量 64

第一节 压力的基本概念 64

一、压力和差压的概念 64

二、压力的单位 64

第二节 传统压力测量方法 65

一、液柱式压力计 65

二、弹性式压力表 66

三、差动变压器 67

第三节 压力传感器 68

一、电阻应变式传感器 68

二、压电式传感器 77

三、电容式传感器 83

四、扩散硅压阻式传感器	89	小结	119
小结	91	习题与思考题	120
习题与思考题	92	第七章 机械量的测量	121
第五章 流量的测量	93	第一节 位移的测量	121
第一节 流量及流量计的分类	93	一、概述	121
一、流量的概念	93	二、电涡流式传感器	122
二、流量计的分类	93	三、光栅传感器	127
第二节 差压式流量计	94	第二节 转速的测量	130
一、概述	94	一、概述	130
二、差压式流量计的测量原理	95	二、光电式传感器	131
三、节流装置	96	三、霍尔式传感器	135
四、其他差压式流量计	97	第三节 加速度的测量	138
第三节 电磁流量计	98	一、概述	138
一、概述	98	二、电感式传感器	139
二、测量原理	99	三、压电式加速度传感器	142
三、电磁流量计的结构	99	小结	144
四、电磁流量计的选用和安装	100	习题与思考题	144
第四节 其他流量计	101	第八章 物质的成分分析与物性检测	145
一、转子流量计	101	第一节 气体成分的分析与检测	145
二、涡街流量计	102	一、热导式气体的分析与检测	145
三、涡轮流量计	103	二、氧气的检测与分析	147
四、超声流量计	103	三、红外线气体分析	149
小结	105	四、气相色谱仪检测分析	149
习题与思考题	105	五、可燃性气体的检测	150
第六章 物位的测量	106	第二节 物性的测量	153
第一节 概述	106	一、溶液浓度及酸碱度的检测	153
第二节 压力法测量液位	107	二、湿度的测量	154
一、压力的测量方法	107	三、粘度的测量	158
二、差压式液位计	108	小结	159
第三节 浮力法测量液位	108	习题与思考题	160
一、钢带浮子式液位计	108	第九章 磁参数的测量	161
二、浮球式液位计	109	第一节 电磁感应法测量磁场	162
三、浮筒式液位计	110	一、旋转线圈法	162
四、磁性浮子式液位计	110	二、交变感应法	163
第四节 电磁法测量液位	111	三、冲击检流计法	163
一、电阻式液位计	111	第二节 磁效应元件测磁	164
二、电感式液位计	111	一、霍尔元件测量磁场	164
三、电容式液位计	112	二、磁敏电阻	166
第五节 其他液位检测方式	115	三、磁敏晶体管	167
一、超声波法测液位	115	四、核磁共振法	169
二、光学法测液位	116	五、磁光效应	170
三、核辐射法测液位	117		
四、微波法测液位	118		

六、约瑟夫逊效应	171	四、隔离放大器	196
第三节 磁传感器应用实例	172	五、电桥放大器	197
一、霍尔无刷直流电动机	172	第三节 非线性系统的校正	198
二、功率测量仪——霍尔功率变换器	172	一、非线性校正的模拟方法	199
三、磁场法测厚度	173	二、数字量线性化技术	202
小结	174	第四节 微弱信号的检测技术与电路	203
习题与思考题	174	一、概述	203
第十章 智能传感器	175	二、有源滤波器电路	203
第一节 概述	175	三、高精度运算放大器的应用	206
一、智能式传感器的概念与形式	175	四、微弱信号检测技术	208
二、智能式传感器的构成与特点	175	小结	208
三、传感器的智能化实例	176	习题与思考题	208
第二节 智能传感器概述和实例	178	第十二章 信号检测系统的综合设计	210
一、智能传感器概述	178	第一节 检测系统的综合设计基础	210
二、智能传感器实例	178	一、组建原则	210
第三节 智能结构	181	二、总体方案的确定	210
一、智能结构的概念和作用	181	三、进程与规划	211
二、智能结构的组成	182	第二节 抑制干扰的基本方法	212
三、光纤型智能结构实例	183	一、噪声及噪声源	212
小结	183	二、干扰的耦合方式	213
习题与思考题	184	三、差模干扰和共模干扰	215
第十一章 检测信号的处理	185	四、干扰的抑制技术	216
第一节 测量电桥与转换电路	185	第三节 微机化检测系统的设计	223
一、测量电桥的应用	185	一、现代检测系统的结构类型	223
二、实用变换电路	188	二、微机化检测系统的设计方法	227
第二节 测量放大器	192	三、检测系统的设计实例	234
一、基本测量放大器	192	小结	246
二、数据放大器	194	习题与思考题	247
三、可编程增益放大器	195	参考文献	248

第一章 检测技术理论基础

第一节 绪 言

一、检测的基本知识

测量是人类认识客观世界的最基本的方法，也是人类改造客观世界能力的重要标志。广义地说，它是对被测量进行检测、变换、分析处理、判断、控制的综合认识过程。在测量技术的发展过程中，由于技术的进步，被测对象和范畴不断扩大，出现了不同性质的测量过程，如计量、检测、测试，其内涵各不相同。计量通常指用精度等级较高的标准量具或仪器对被测样机、样品或仪表进行考核性质的测量；检测则是指生产、实验现场利用某种合适的检测仪器或系统对被测对象进行在线实时的测量；测试一般指试验与测量的整个过程，可以是定量的，也可以是定性的。一些指示性的测量也称为测试，如器件工作状态的导通与截止，电平的高与低。未定标的产品检验都需要进行测试。

与一般的测量相比，检测技术含义更广泛，它包括：寻找与自然信息具有对应关系的种种表现形式的信号，确定被测量与显示量两者间的定性、定量关系，并为进一步提高测量精度、改进实验方法及测量装置性能提供可行依据的整个过程。

测量的结果包括数值大小和测量单位两部分。数值的大小可以用数字表示，也可以是曲线或者图形。无论表现形式如何，在测量结果中必须注明单位，否则测量结果是没有意义的。测量过程的核心是比较，但被测量能直接与标准量比较的场合并不多，在大多数情况下，是将被测量和标准量变换成双方易于比较的某个中间变量来进行比较的。例如用弹簧称重，被测重量通过弹簧按比例伸长，转换为指针位移，而标准重量转换成标尺刻度，被测量和标准量都转换成位移这一中间变量，才可以进行直接比较。为了提高测量精度，并且能够对变化快、持续时间短的动态量进行测量，通常将被测量转换为电压或电流信号，利用电子装置完成比较、示差、平衡和读数的测量过程。因此，转换是实现测量的必要手段，也是非电量电测的核心。

二、被测参数的分类

被测参数主要有电工量、热工量、机械量、物性和成分量、状态量等。其中，电工量包括：电压、电流、电功率、电阻、电感、电容、频率、磁场强度、磁通密度等被测量；热工量包括：温度、热量、比热容、热流、热分布，压力、压差、真空度，流量、流速、风速，物位、液位、界面等被测量；机械量包括：位移、形状，力、应力、力矩，重量、质量，转速、线速度，振动、加速度、噪声等被测量；物性和成分量包括：气体成分、液体成分、固体成分，酸碱度、盐度、浓度、粘度、密度等被测量；状态量包括：颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面粗糙度等被测量。工业生产过程中需要测控的大多数是非电量，其种类和数量远多于电量。然而这些涉及不同领域的量有大有小、有静有变、有连续有离散，若要对它们分别进行控制、变换、存储、记录与显示十分困难。在实践中，通常的做法是采用电测技

术对非电量进行测量,即首先通过传感器将其转换为电学量,进而使用丰富、成熟的电子测量手段对传感器输出的电信号进行各种处理和显示记录。非电学量电测法构成了检测技术中最重要的内容,利用它几乎可以测量各种非电学量参数。电子技术的发展及其在检测中的应用大大促进了检测技术的发展,并为计算机技术进入检测领域创造了条件。

非电学量电测法便于对被测量进行连续测量、记录和远距离集中控制;便于实现测量过程的自动化。电测装置具有精度高、频率响应高、人机交互性好等优点。

检测系统的电参数测量在电工和电子学的相关书中已有阐述,本书以非电量的检测为主,同时也介绍了磁参数的检测技术。

三、检测设备的基本性能

评价检测设备性能的指标主要有以下几个方面。

1. 精确度

日常描述精确度的指标有精密度、准确度和精确度。精密度描述仪表和设备指示值的分散性,准确度描述检测设备指示值与真值的偏离程度,精确度则是精密度和准确度的综合反映。精确度通常以测量误差的相对值表示。

2. 稳定性

检测设备的稳定性指标有两个:一是设备指示值随时间的稳定性,以稳定度表示,如某仪表电压指示值变化为 0.1mV/h ;二是设备外部环境和条件变化(如温度、湿度、气压、振动、电源波动)影响到设备指示值的稳定性,用影响量表示。说明影响量时必须将影响量与示值偏差同时表示,若某仪表由于电源电压变化 $\pm 10\%$ 而引起其示值变化 0.03mA ,则应写成 $0.03\text{mA}/(U \pm 10\% U)$ 。

3. 输入输出特性

检测设备的输入与输出特性有静态特性和动态特性两大类。所谓静态特性是指检测设备的输入量(被测参数)不随时间变化或随时间变化很缓慢时输出与输入的关系。讨论静态特性时,输出与输入的关系式是不含时间变量的代数方程。动态特性是指当输入量随时间快速变化时检测设备输出与输入的关系,此时的关系式是含有时间变量的微分方程。

静态特性和动态特性相互牵制,当静态特性显示出非线性和随机性时,静态特性会影响动态条件下的测量结果,工程上要做近似处理。

由于非电量的检测元件和设备大多是将非电量转换为电量进行处理的,它们都存在着产生电磁干扰和受电磁干扰影响的问题,工业发达国家越来越重视仪器设备的电磁兼容性研究,并订立了相应法规。电磁兼容性将是今后检测设备一个重要的性能指标。

第二节 测量与误差

一、测量、量值、约定真值

(一) 测量方法及分类

测量是以确定被测物属性量值为目的的一组操作,这种测量操作是一个比较过程,是将被测参数的量值与同性质标准量进行比较,比出的倍数即为测量的结果。测量单位、测量方

法、测量仪器与设备是测量的“三要素”。

测量方法按测量的方式(测量路径)分有:直接测量、间接测量、联立测量;按测量方法(度量器参与形式)分有:偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法;按被测参量变化快慢分有:静态测量、动态测量;按被测量在变化过程中被测情况分有:在线测量、离线测量;按测量敏感元件与被测介质接触形式分有:接触式测量与非接触式测量。

1. 按测量的方式分类

(1) 直接测量 用预先按已标定的测量仪器对某一未知量进行测量,测量结果可以直接从实验数据获得的方法称为直接测量。直接测量不等同于用直读式仪表进行测量,许多比较式仪器(例如电桥和电位差计)虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量值,但因参与测量的对象就是被测量本身,故仍属直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,在工程中广为使用。

(2) 间接测量 通过与被测量有确切函数关系的量(一个或几个)的直接测量结果,运用函数解析式、函数曲线或表格求出该被测量值的方法,称为间接测量。例如,由公式 $R = \rho l / S$ 可以间接测量电阻率 ρ 。间接测量存在误差的合成问题,这类测量大多数用在科学实验中,在工程上如缺乏直接测量的仪器时也可采用此方法。

(3) 联立测量 又称组合测量。在测量中,使各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件来获得不同的组合),根据直接测量和间接测量所得到的数据,经过联立方程而求解出未知量的数值,此方法称为联立测量。

例如,在研究导体的电阻 R_t 随温度变化的规律时,发现有如下的关系式

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中, α 、 β 是电阻的温度系数; R_{20} 是电阻在 20°C 时的电阻值; t 是测试时的温度。

为了测出电阻的 α 、 β 与 R_{20} 值,采用在三种温度 t_1 、 t_2 及 t_3 下分别测出对应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} 与 R_{t3} , 然后代入上述公式,得到一组联立方程

$$R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2$$

$$R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2$$

$$R_{t3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2$$

解此联立方程组,可以求得 α 、 β 和 R_{20} 。

由上例可见,组合测量的测量过程比较复杂,较费时间,但能够得到较高的精度,因此它是一种特殊的精密测量方法,一般适用于科学实验或特殊场合。

应该指出,在满足测量精度等目的和要求的条件下,应尽量采用直接测量方式,以提高测量的准确度。如果考虑过多的而且完全可以忽略的次要因素,期望通过繁复、严密的运算来提高最终准确度是不切合实际的。

2. 按测量的方法分类

(1) 偏差式测量法 测量过程中,用仪表指针的位移(偏差)表示被测量的测量方法,称为偏差式测量法。该方法是事先采用标准量具对仪表刻度进行校准,然后以间接方式实现被测量与标准量的比较,弹簧压力表检测压力就是采用此法。工程上广泛使用偏差式测量,它的测量准确度较低,但过程简单、迅速。

(2) 零位式测量法 又称平衡法或零值法。它采用指零仪表的零位来检测测量系统是否处于平衡状态。应用时标准量具装在仪表内,测量过程中标准量直接与被测量相比较,并不

停地进行调整(平衡操作),直到指零仪表回零。电桥和电位差计都是运用零位式测量法的典型例子。该方法准确度较高,但测量的过程比较繁复,只适用于缓慢变化的信号,在实验室中应用很普遍。

(3) 微差式测量法 在零位式测量法中,标准量不可能都是连续可调的,因而难以与被测量完全平衡,实际测量时必定存在着差值。微差式测量法只要求标准量与被测量相近,而用指示仪表测量标准量和被测量的差值。微差式测量的标准量具装在仪表内并直接参与比较,不需要调整标准量,它综合了偏差式测量和零位式测量的优点:反应快、测量精度高,适合于在线控制参数的测量。

在计算机控制的连续轧钢生产线上,参与控制过程工作的X射线测厚仪就是采用微差式测量法工作的。此时,在线板料的厚度是被测量,厚度的设定值是已知的标准值,测厚仪只显示偏差,整个轧钢系统是根据板厚的微小偏差值进行闭环控制的。微差式测量法是一种很有前途的测量方法。

在测量之前要综合考虑被测量的本身特点、所要求的精度和灵敏度以及测量的环境要求,应该力求测量方法简便可靠、测量原理科学,并尽量减少原理性误差。

(二) 量值的概念

1. 量和量值

量是指物体和物质可以定性区别和定量确定的一种属性。由一个数和合适的计量单位表示的量称为量值。例如:体温 37°C 、蒸汽压力 0.69MPa 等,是分别由数值为37和计量单位为 $^{\circ}\text{C}$ 及数值为0.69、计量单位为 MPa 两部分组成的量。

2. 真值、约定真值和实际值

真值是在理想情况下表征一个物理量真实的值,它客观存在却不能测量得到。随着科技的发展,测量结果的数值会不断接近真值,因而在实际工作中,经常使用的是“约定真值”和“相对真值”。

约定真值是按照国际公认的单位定义,利用科技发展的最高水平所复现的单位基准约定,与真值相近似并可供使用的值。相对真值也称实际值,是在满足规定准确度时用以代替真值使用的值。

3. 标称值和指示值

标称值是计量或测量器具上标注的量值,如标准砝码上标出的 1kg 。因受制造、测量及环境条件变化的影响,标称值并不一定等于它的实际值,通常在给出标称值的同时也应给出它的误差范围或精度等级。指示值是测量仪表或量具给出或提供的量值,也称测量值。

二、测量误差的性质与分类

(一) 误差的概念

“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验的过程之中”。任何测量结果与被测物理量的真值之间都存在误差。任何一个描述和表征测量结果的数据,若不知其可信程度,则该数据是无价值和无意义的。通过研究误差的来源、性质和传递规律,掌握如何消除、减小、固定和估计误差对测量结果的影响,得到可靠的、真实反映事物本质的结果,这就是误差理论研究的目的。

(二) 误差的表示

1. 绝对误差

被检测参数的测量值 x 与真值 x_0 的差值称为绝对误差 Δx ，其表示式为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

由于真值的不可知性，常用约定真值或相对真值代替。在实际测量中，常用某一被测量多次测量的平均值或上一级标准仪器测得的示值作约定真值，代替真值 x_0 。绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量。绝对误差一般只适用标准量具或标准仪表的校准。

2. 相对误差

(1) 相对误差 相对误差是用绝对误差 Δx 与真值 x_0 之比的百分数表示的，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

当分母 x_0 为被测量约定真值代替时，该误差称为实际相对误差。相对误差较绝对误差更能说明测量的精确程度。

(2) 示值相对误差 示值相对误差是用绝对误差 Δx 与示值 x 之比的百分数表示的，即

$$r = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3) 引用误差 (满度相对误差) 引用误差是一种简化、实用的相对误差表示方法，用来表示仪器仪表的准确程度。此时，分母为仪器量程满度值 x_m ，即

$$r = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

引用误差是为评价测量仪表的精确度等级而引入的，用于客观、正确地反映测量仪表的精确度高低。国际上规定，电测仪表的精度等级指数分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。

例 1-1 一个 0.5 级的电压表，量程为 0 ~ 300V，当测量值分别为 $u_1 = 300\text{V}$ ， $u_2 = 200\text{V}$ ， $u_3 = 100\text{V}$ 时，试求测量值的最大绝对误差和示值相对误差。

解 测量值的绝对误差： $\Delta u_1 = \Delta u_2 = \Delta u_3 = \pm (300 \times 0.5\%) \text{ V} = \pm 1.5 \text{ V}$

$$r_{u1} = (\Delta u_1 / u_1) \times 100\% = (\pm 1.5 / 300) \times 100\% = \pm 0.50\%$$

$$r_{u2} = (\Delta u_2 / u_2) \times 100\% = (\pm 1.5 / 200) \times 100\% = \pm 0.75\%$$

$$r_{u3} = (\Delta u_3 / u_3) \times 100\% = (\pm 1.5 / 100) \times 100\% = \pm 1.5\%$$

可见，测量中的示值相对误差，不仅与仪表的等级有关，且与所选仪表量程有关。被测量值与量程 x_m 相差越小，则测量精确度越高。选量程时应尽可能将测量值接近仪表满度值，一般不小于满度值的 2/3 (线性刻度仪表)。

(三) 误差的分类

检测过程是一个转换、放大、比较及显示功能的综合作用过程，其中被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会毫无例外地受到各种变动因素的影响，从而造成检测结果与被测量的客观真值之间存在一定的差别，即测量误差。任何实验结果都是有误差的，但是改进检测工具和实验手段、通过对检测数据的误差分析和处理，可以使测量误差处在允许的范围之内，达到一定的测量精度，得到合理、可信的测量结果。

在解决实际测量任务时，辨别清楚误差的规律、性质及其特点十分重要。测量的误差按其规律性分，有以下几种：

1. 系统误差

系统误差是指在一定的条件下,其数值遵循某一确切函数规律的误差。在相同条件下多次测量同一物理量时,其误差的绝对值和符号保持恒定;当条件改变时,它又按某一确定的规律变化。了解系统误差的成因即其规律性,可以帮助消除和减少它,如不平衡的零电位、温湿度、电磁干扰引起的误差。系统误差按变化规律分为:定值系统误差与变值系统误差。系统误差的发现和處理、归纳和总结,一般属于技术上的问题。由于其涉及具体测量对象及原理的分析,能否处理得当则取决于测量人员的经验、学识和技巧。

2. 随机误差

在极力消除或改正一切明显的系统误差的因素之后,相同条件下多次重复测量同一物理量时,测量结果仍出现一些时大时小、杂乱变化的误差,这种随机性的无规律变化归因于随机误差。随机误差表观上的无规律性,加上产生原因的复杂性(如元器件性能的不稳定以及外界温度、湿度、振动、电磁干扰、电网波动等许多细小的、相互独立的影响因素),使之不能采用经典方法予以逐个处理。然而随机误差服从统计规律,如正态分布、均匀分布、离散双值分布等,因此随机误差可通过概率论的理论和统计学的一些方法来发现和处理。

3. 粗大误差

粗大误差是指显然与事实不符、无规律的误差。由于它明显超出预期的误差,也称为粗差。它往往是由外界重大干扰或仪器故障、不正确的操作等造成的,对这类误差必须采取剔除的方法。

三类误差的定义是科学而严谨的。但在测量实践中,对测量误差的划分是人为的、有条件的。三种误差之间是辩证统一的关系,在一定的条件下,它们的性质可以相互转化。例如,随着人们对误差来源及其变化规律认识的加深,往往有可能把以往认识不到、把握不住而归为随机误差的某项误差予以澄清,从而明确为系统误差,并给予技术上的处理。反之,当认识不足或虽有所认识,但由于其规律性过分复杂时,也常会把这样的一些系统误差当作随机误差,经过数据统计分析加以处理。

又如,指示仪表面板的刻度误差,在厂方制造时具有随机性;但用户利用一个特定的仪表来测量时,其造成的误差是系统误差。经常使用此仪表而累积了一定经验的技术员则能克服此系统误差。

再如,由一个仪表测量某一被测参数时会产生系统误差,但若使用多个不同的仪表测量此参数,则由于各仪表误差的随机性使各测量值具有随机性,可采用对测量值进行平均的方法削弱其误差。

三、测量误差的来源

按产生误差的原因,测量误差可分为:

(1) 原理性误差 又称方法误差。它是由于测量原理、方法的不完善(如多变量因素的影响没有考虑周到等)或对理论特性方程中的某些参数做了近似引起的误差等。

(2) 构造误差 又称设备误差。它是仪器仪表制造、调试、计量定时已限定的精度。要取得可靠有效、高精度的数据,必须综合考虑上述两种误差。

(3) 环境误差 设备外部环境和条件变化(如温度、湿度、振动、电源波动)引起的误差。

(4) 人员误差 是指人员的心理素质、固有习惯、工作责任心以及测量的技术水平等

引起的误差。

第三节 测量误差的处理

一、系统误差的处理

(一) 系统误差的发现

系统误差的产生原因有构造误差、方法误差、环境误差和人员误差等。一般的检测设备投入使用后,都会对测量的结果产生系统误差。以最简单的指针式电工仪表为例,其机械偏转的能量来源于被测电路,于是电表接入前后,被测电路的工作状态显然就不同了。

例 1-2 如图 1-1 所示, $R_1 = 40\text{k}\Omega$, $R_2 = 60\text{k}\Omega$, $U = 100\text{V}$, 采用内阻 $R_V = 50\text{k}\Omega$ 的电压表测量电阻 R_2 两端的压降,试计算测量的相对误差。

解 R_2 两端压降的测量值 U_X 为

$$\begin{aligned} U_X &= \frac{R_2 // R_V}{R_1 + R_2 // R_V} U \\ &= \frac{60 // 50}{40 + 60 // 50} \times 100 \text{ V} = 40.54 \text{ V} \end{aligned}$$

而 R_2 两端压降的实际值 $U_N = 60\text{V}$, 因此

$$\gamma_U = \frac{U_X - U_N}{U_N} = \frac{(40.54 - 60) \text{ V}}{60 \text{ V}} \times 100\% = -32.4\%$$

可见,电压表内阻的存在,使得测量结果明显偏小。

系统误差可以通过一些简单的实验方法来发现:① 用仪器对一已知量进行多次测量,如其均值与标准值有差异,可以肯定是系统误差;② 如测量数据残余误差的大小呈现有规律性的变化,说明有系统误差;③ 改变测量条件,观察测量数列残余误差的变化,根据经验可以分析系统误差的存在。

(二) 系统误差的一般处理原则

系统误差不能依靠概率统计的方法来消除和减弱,它的处理没有通用的方法,很大程度上取决于观测者的经验与技巧。测量前尽可能预见到系统误差的来源,设法予以消除或减弱;实际测量中,可采用一些有效的测量方法,克服系统误差对测量结果的影响;数据处理时,可设法检查是否存在变值系统误差,并估计出残余的系统误差的数值范围。消除或减弱系统误差的典型测量技术如下。

1. 替代法

替代法是在测量条件不变的情况下,选择一个同种的已知量(通常为可调的标准量)代替被测量,并通过调节使两者对测量仪器的效应相同的方法。

由于测量装置的状态和示值在替换前后保持不变,测量装置只起辨别两者有无差异的作用,所以测量装置本身的误差和其他造成系统误差的因素对测量结果基本上没有影响。但替代法要求测量

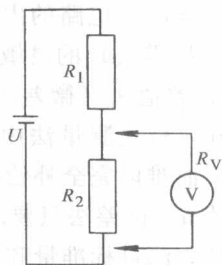


图 1-1 检测仪表引入系统误差

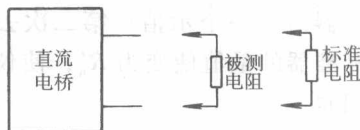


图 1-2 替代测量法原理图

装置具有相应的灵敏度和短时的稳定性。图 1-2 所示为替代法测量电阻的原理图，其中直流电桥测量装置的误差基本上不影响对电阻的测量精度。

2. 零位式测量法

零位式测量又称平衡测量方法。测量时，将被测量 X 与同种的已知标准量 A 进行比较，调节标准量使两者的效应互相抵消。在总效应为零时，系统达到平衡，此时 $A - X = 0$ ，因而获得被测值 $X = A$ ，此测量方法可用于消除因指示仪表不准而造成的误差。

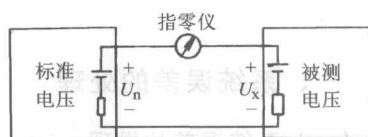


图 1-3 零位式测量电压原理图

图 1-3 所示为用零位式方法测量电压 U_x 的电路，图中 U_n 为标准电池。测量过程中只需判断检流计是否指向零，而不需要读数。当指零仪指零时， $U_x = U_n$ ，电路的内阻对测量结果无影响。测量结果只取决于 U_n 的准确度、稳定性和检流计（指零仪）的灵敏度。

3. 差值法（微差法）

在零位式测量法中，标准量 A 不可能都是连续可调，因而难以完全补偿被测量 X ，实际测量时必定存在着差值 a 。微差法只要求标准量 A 与被测量相近，而用指示仪表测量标准量和被测量的差值 a 。被测量可通过 $X = A + a$ 得到。此法称差值法。

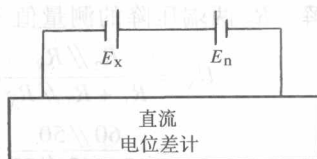


图 1-4 差值法测量原理图

图 1-4 所示为差值法测量某电池电动势 E_x 的原理图。令它与另一标准电池电动势 E_n 相比较，并用直流电位差计测量其差值 ΔU ，则得到 $E_x = E_n + \Delta U$ 。

对于差值法的误差分析如下，根据 $X = A + a$ ，因此有下式

$$\Delta X = \Delta A + \Delta a$$

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta A}{x} + \frac{\Delta a}{x} = \frac{\Delta A}{x} + \frac{a}{X} \cdot \frac{\Delta a}{a}$$

式中， $\Delta A/A$ 为标准量具的相对误差； $\Delta a/a$ 为测量差值的相对误差，且 $\Delta a/a$ 以 a/x 为倍数影响测量结果。 X 与 A 差值越小，测量差值的误差带给测量结果的影响越小。可见使用微差法测量，指示仪表的误差对测量的影响会大大减弱。

4. 补偿法

补偿法是替代法的一种特殊形式，其测量原理如图 1-5 所示。在两次测量中，第一次令标准器的量值 R_n 与被测量 R_x 相加，在 $R_n + R_x$ 的作用下，仪器给出一个示值；第二次去掉被测量，并改变标准器的量值使变为 R'_n ，使仪器的示值与第一次相同。

$$\text{于是得到 } R_x = R'_n - R_n$$

在最后测量结果中，标准器所含恒定的系统误差也会由于相减而被消除。

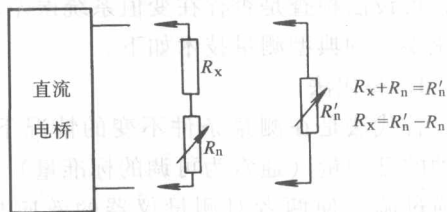


图 1-5 补偿法测量原理图

5. 引入修正值法

如果测量仪表经过校正,已经获得了仪表的修正值,则将测量结果的指示值加上修正值,就得到被测量的实际值。由于修正值本身存在误差,系统误差不能说完全消除,而是大大被削弱了。修正值法也可用于削弱环境误差。

6. 其他方法

(1) 对称观测法 在测量时设法获得对称数据,并利用测量数据的对称关系进行适当处理,从而消除系统误差的方法。例如,等时距对称观测; LC 谐振曲线谐振频率的测量。

(2) 正负误差补偿法 在不同的实验条件下进行两次测量,使系统误差对读数的影响一次为正、一次为负,则两次读数的平均值可将系统误差消除掉。例如,可用此法消除测量环境中恒定直流磁场的影响。

二、随机误差的处理

随机误差难以采用经典方法逐个处理,然而随机误差服从统计规律,运用统计学方法可以处理测量数据,减弱随机误差对测量结果的影响,并估计出其最终残余误差的大小。

(一) 随机误差的正态分布特性

大量的实际统计表明:随机因素对测量结果的综合影响所构成的随机误差遵循正态分布规律,所以绝大多数随机误差及在随机误差影响下的测量数据都可以用正态分布来描述。

设在一定条件下对一个量(真值为 X_0)进行 N 次等精度测量,得到一组测量值 $X_1, X_2, \dots, X_N$ 。则各值出现的概率密度分布为

$$p(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X - X_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-5)$$

式(1-5)称为正态分布函数或高斯曲线方程。 X_0 和 σ 为分布曲线的两个特征参数,其中 X_0 表示测得值分布的集中位置,称为位置特性,如图1-6b所示。设测得值 X 与真值 X_0 的偏差为 δ ,即 $\delta = X - X_0$,经过坐标变换后得到图1-6a。于是,概率密度分布可用函数 $p(\delta)$ 来表示。

$$p(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right]$$

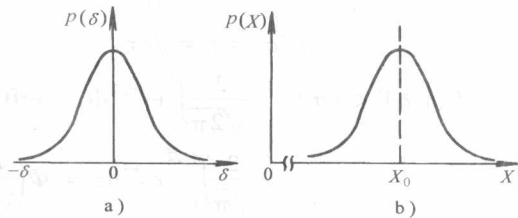


图 1-6 随机误差的概率分布曲线

σ 则表征测量数据的分散程度,称为离散特

性。当 σ 改变时,分布曲线位置不变,但形状改变。由图1-7可见, σ 越小,曲线越尖锐,表示测得值的离散性小,小误差出现的概率大,这表明测量精度高;反之, σ 大,曲线平坦,表示测得值分散。当 N 趋无穷大时, σ 即为各测量值随机误差的方均根值,也称标准偏差

$$\sigma = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \delta_n^2} \quad (1-6)$$

对正态分布规律分析可知,随机误差具有四种特性:

(1) 集中性(Centrality) 大量重复测量时得到的数值,均集中在其平均值附近,换言之,在平均值 $\bar{x}$ 附近出现的机会最多,较小的误差出现的概率大。随机误差的分布具有