



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

2009年普通高等教育 **国家精品教材**

传感器与检测技术 (第3版)

徐科军 主 编

马修水 李晓林 等副主编

王化祥 主 审



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

传感器与检测技术 (第3版)

徐科军 主 编
马修水 李晓林 李文涛 李 莲 副主编
王化祥 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书包括自动检测技术的基础知识、传感器原理与应用、过程检测仪表和自动检测中的共性技术及其新进展四个部分的内容。第一部分介绍传感器与检测技术的基本概念、测量误差与数据处理以及传感器的静态特性和标定方法。第二部分介绍电阻式传感器、变电抗式传感器、光电式传感器和电动势式传感器的工作原理与应用。第三部分介绍温度检测、流量检测和成分检测。第四部分介绍误差修正技术、MEMS技术与微型传感器、虚拟仪器、无线传感器网络、多传感器数据融合和软测量技术。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和2009年普通高等教育国家精品教材,可以作为自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业本科生的教材,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

传感器与检测技术/徐科军主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2011.9
电气工程、自动化专业规划教材
ISBN 978-7-121-14653-4

I. ①传… II. ①徐… III. ①传感器—检测—高等学校—教材 IV. ①TP212
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第192676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:涿州市桃园装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:19 字数:486千字

印次:2011年9月第1次印刷

印数:8000册 定价:35.00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。

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。

服务热线:(010)88258888。

第 3 版前言

在工农业生产、科学研究、国防建设和日常生活中,人们需要测量外部世界的一些非电量,例如,位移、速度、加速度、力、力矩、温度、压力、流量和成分等,以便及时、准确地获得信息,这就必须合理选择和善于应用各种传感器和检测仪表。对于电气信息类专业和自动化专业,信息是基础,而传感器是获取信息的器件;控制是核心,而自动检测是实现控制的前提和条件;立足于系统,而检测系统是系统的反馈环节。在过程控制中,需要检测温度、压力、物位、流量和成分;在运动控制中,需要检测位置、转速和力矩;所以,有“无传感器,就无控制”之说。本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和 2009 年普通高等教育国家精品教材,是作者在多年从事传感器及仪器仪表教学和科学研究的基础上编写的。本书在讲清基本概念、基本理论的基础上,强调工程的概念,从工程的角度出发来编写教材,而不仅仅作为知识点的介绍,同时注重近年来本领域理论和技术的发展,根据本科教学的需要,有选择性地将部分新方法和新技术编入本教材中。

全书内容分 4 个部分。第一部分介绍自动检测技术的基本知识,包括测量误差和数据处理的基本知识、传感器静态特性及标定知识;第二部分系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用,目的在于培养学生使用各类传感器的能力;第三部分介绍传感器在工程检测中的应用,将传感器和工程检测方面的知识有机地结合起来,以温度检测、流量检测和成分检测为例,使学生能够进一步应用传感器方面的知识解决工程检测中的具体问题;第四部分介绍自动检测中的共性技术和新发展。

本书的第 1 版作为“新编电气与电子信息类本科规划教材”之一于 2004 年出版。天津大学检测技术与自动化装置国家重点学科带头人、博士生导师王化祥教授担任主审。王化祥教授仔细审阅了书稿,并提出了许多宝贵的指导意见。在第 1 版编写中,合肥工业大学陈荣保副教授和王文博讲师以及安徽大学孙伟副教授对本书提出了许多好的建议。本书第 1 版和第 2 版出版后,被国内很多高校选作教材,使用情况及效果良好,受到同行和专家好评。为了适应传感器与检测技术发展形势的需要,以及适应新形势下本科教育的需求,我们对第 2 版进行了修订,从有利于学生系统地掌握传感器与检测技术的理论知识和提高实际动手能力出发,较大篇幅地修改了“电荷耦合器件”、“热电偶传感器”、“超声流量计”、“质量流量计”部分,使其内容更加准确和更容易理解;删除了“压磁传感器”和“磁性氧量分析仪”部分;增加了“测量不确定度”;将“变阻抗式传感器”改为“变电抗式传感器”,考虑到电涡流传感器也是基于互感原理的,所以将电涡流传感器放在电感式传感器后面介绍;增加了“测量不确定度”。在此次修订中,合肥工业大学鲁照权教授和内蒙古科技大学杨立清副教授提出了许多宝贵的建议和意见。

本书由合肥工业大学徐科军担任主编,浙江大学宁波理工学院马修水、太原理工大学李晓林、内蒙古科技大学李文涛和天津理工大学李莲担任副主编。马修水编写 1.1~1.3 节、3.1~3.2 节、3.4 节和第 8 章;李晓林编写第 5 章、6.3 节和 7.1~7.3 节、7.5~7.7 节;李文涛编写 1.4~1.5 节、第 2 章、6.2 节和 9.2 节;李莲编写 3.3 节和第 4 章;徐科军编写 6.1 节、6.4 节、7.4 节、9.1 节和 9.3~9.6 节。全书由合肥工业大学徐科军统稿。

在本书编写的过程中,参阅了许多专家的教材、著作和论文,还得到国内外有关企业和同

行的支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书提供配套的电子课件,可登录电子工业出版社的华信教育资源网: [www. hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn),注册后免费下载。

对于本版中存在的错误和不妥之处,继续恳请广大读者批评指正。

编者

2011年8月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.2.5 测量桥路及温度补偿	51
1.1 自动检测技术概述	1	思考题与习题	52
1.1.1 自动检测技术的重要性	1	第 3 章 变电抗式传感器原理与应用	54
1.1.2 自动检测系统的组成	2	3.1 自感式传感器	54
1.1.3 自动检测技术的发展趋势	2	3.1.1 工作原理	54
1.2 传感器概述	3	3.1.2 变气隙式自感传感器	55
1.2.1 传感器的定义	3	3.1.3 变面积式自感传感器	57
1.2.2 传感器的组成	3	3.1.4 螺线管式自感传感器	57
1.2.3 传感器分类	4	3.1.5 自感式传感器测量电路	59
1.3 测量误差与数据处理	4	3.1.6 自感式传感器应用举例	63
1.3.1 测量误差的概念和分类	4	3.2 差动变压器	64
1.3.2 精度	5	3.2.1 变隙式差动变压器	64
1.3.3 测量误差的表示方法	5	3.2.2 螺线管式差动变压器	66
1.3.4 随机误差	7	3.2.3 差动变压器应用	72
1.3.5 系统误差	11	3.3 电涡流式传感器	74
1.3.6 粗大误差	13	3.3.1 电涡流式传感器的工作 原理	74
1.3.7 测量不确定度	13	3.3.2 电涡流式传感器的类型	76
1.3.8 数据处理的基本方法	15	3.3.3 电涡流式传感器的应用	79
1.4 传感器的一般特性	16	3.4 电容传感器	81
1.4.1 传感器的静态特性	16	3.4.1 电容传感器的工作原理	81
1.4.2 传感器的动态特性	19	3.4.2 电容传感器的主要性能	84
1.5 传感器的标定和校准	24	3.4.3 电容传感器的特点 和设计要点	85
1.5.1 传感器的静态标定	24	3.4.4 电容传感器等效电路	87
1.5.2 传感器的动态标定	26	3.4.5 电容传感器测量电路	87
思考题与习题	31	3.4.6 电容传感器的应用	91
第 2 章 电阻式传感器原理与应用	33	思考题与习题	96
2.1 应变式传感器	33	第 4 章 光电式传感器原理与应用	97
2.1.1 金属电阻应变片的工作 原理	33	4.1 光电效应和光电器件	97
2.1.2 电阻应变片的特性	35	4.1.1 光电管	97
2.1.3 电阻应变片的测量电路	38	4.1.2 光电倍增管	97
2.1.4 电阻应变式传感器的应用	40	4.1.3 光敏电阻	98
2.2 压阻式传感器	48	4.1.4 光敏二极管和光敏晶体管	101
2.2.1 半导体的压阻效应	48	4.1.5 光电池	104
2.2.2 体型半导体电阻应变片	49	4.1.6 光电式传感器的应用	106
2.2.3 扩散型压阻式压力传感器	49	4.2 光电码盘	107
2.2.4 压阻式加速度传感器	51		

4.2.1	工作原理	107	思考题与习题	155
4.2.2	码盘和码制	107	第6章 温度检测	156
4.2.3	二进制码与循环码的转换	109	6.1 概述	156
4.2.4	光电码盘的应用	110	6.1.1 温度的基本概念和测量方法	156
4.3	电荷耦合器件	111	6.1.2 温标	157
4.3.1	电荷耦合器件的结构和工作原理	111	6.2 热电阻式传感器	158
4.3.2	CCD 图像传感器	115	6.2.1 金属热电阻	158
4.3.3	图像传感器的应用	117	6.2.2 半导体热敏电阻	161
4.4	光纤传感器	118	6.2.3 热电阻式传感器的应用	165
4.4.1	光导纤维的结构和导光原理	118	6.3 热电偶传感器	168
4.4.2	光导纤维的主要参数	121	6.3.1 热电偶测温原理	168
4.4.3	光纤传感器的结构原理	121	6.3.2 热电偶的基本定律	170
4.4.4	光纤传感器的分类	122	6.3.3 热电偶的冷端处理和补偿	171
4.4.5	光纤传感器的特点	124	6.3.4 标准化热电偶	173
4.4.6	光纤传感器的应用	124	6.3.5 非标准化热电偶	175
4.5	光栅传感器	127	6.3.6 热电偶结构形式	176
4.5.1	光栅传感器的结构	128	6.3.7 热电偶安装注意事项	177
4.5.2	莫尔条纹形成的原理	128	6.3.8 热电偶非线性补偿与应用	177
4.5.3	莫尔条纹技术的特点	129	6.4 非接触式测温	179
4.5.4	光栅的光路	130	6.4.1 热辐射基本定理	180
4.5.5	辨向原理	131	6.4.2 光学高温计	183
4.5.6	细分技术	131	6.4.3 光电高温计	184
	思考题与习题	134	6.4.4 辐射温度计	186
			6.4.5 比色温度计	188
			思考题与习题	190
第5章 电动势式传感器原理与应用		136	第7章 流量检测	191
5.1 磁电式传感器		136	7.1 流量的基本概念	191
5.1.1 磁电式传感器的工作原理		136	7.1.1 流量测量的基本概念	191
5.1.2 动圈式磁电传感器		137	7.1.2 流量检测的方法和分类	191
5.1.3 磁阻式磁电传感器		137	7.2 差压式流量计	192
5.1.4 磁电式传感器的动态特性		138	7.2.1 差压式流量计组成及测量原理	193
5.2 霍尔传感器		140	7.2.2 节流装置	195
5.2.1 霍尔传感器的工作原理		140	7.2.3 安装注意事项	198
5.2.2 霍尔元件的结构和基本电路		141	7.3 电磁流量计	199
5.2.3 霍尔元件的主要特性参数		142	7.3.1 电磁流量计结构与原理	199
5.2.4 霍尔元件的误差及补偿		143	7.3.2 选用与安装注意事项	201
5.2.5 霍尔式传感器的应用		145	7.4 涡轮流量计	203
5.3 压电式传感器		146	7.4.1 结构和工作原理	203
5.3.1 压电式传感器的工作原理		146	7.4.2 特点和应用	205
5.3.2 压电元件的等效电路及信号变换电路		149	7.4.3 安装注意事项	205
5.3.3 压电式传感器的应用		153	7.5 涡街流量计	206
			7.5.1 工作原理与结构	206

7.5.2 安装使用注意事项	209	思考题与习题	249
7.6 超声流量计	211	第9章 自动检测的共性技术及新	
7.6.1 工作原理及组成	211	发展	250
7.6.2 选用与安装注意事项	213	9.1 误差修正技术	250
7.7 质量流量计	215	9.1.1 系统误差的数字修正方法	250
7.7.1 直接式质量流量计	215	9.1.2 随机误差的数字滤波方法	253
7.7.2 间接式质量流量计	221	9.1.3 动态补偿方法与实现	256
思考题与习题	222	9.2 MEMS技术与微型传感器	259
第8章 成分检测	223	9.2.1 MEMS技术	260
8.1 概述	223	9.2.2 微型传感器	261
8.1.1 成分分析仪器简介	223	9.3 虚拟仪器	266
8.1.2 成分分析仪器的分类	223	9.3.1 定义和特点	266
8.1.3 成分分析仪器的组成	224	9.3.2 产生和分类	267
8.1.4 成分分析仪器的		9.3.3 体系结构	268
主要性能指标	225	9.4 无线传感器网络	272
8.2 热导式气体分析仪	226	9.4.1 定义和组成	272
8.2.1 基本原理	226	9.4.2 特点和局限	272
8.2.2 热导池(检测器)	228	9.4.3 路由协议	274
8.2.3 测量电路	231	9.4.4 传感器的应用	275
8.2.4 热导式气体分析仪的应用	232	9.5 多传感器数据融合	276
8.3 氧化锆氧量分析仪	232	9.5.1 基本概念	276
8.3.1 工作原理	232	9.5.2 融合方法	277
8.3.2 氧化锆探头	233	9.5.3 应用举例	280
8.3.3 氧化锆氧量分析仪的		9.6 软测量技术	282
应用	233	9.6.1 辅助变量的选取	282
8.4 红外线气体分析仪	234	9.6.2 测量数据的处理	283
8.4.1 测量原理	234	9.6.3 软测量模型的建立	284
8.4.2 红外线气体分析仪结构	236	9.6.4 软仪表的在线校正	285
8.4.3 红外线分析仪的应用	239	9.6.5 软测量的工业应用	285
8.5 气相色谱仪	239	思考题与习题	286
8.5.1 色谱分析方法的由来	239	附录A 常用铂铑 ₁₀ -铂热电偶	
8.5.2 气相色谱法的分离原理	240	(S型) $E(t)$ 分度表	287
8.5.3 定性分析和定量分析	243	附录B 铂热电阻(Pt100型) $R(t)$	
8.5.4 工业气相色谱仪的		分度表	292
基本组成	245	参考文献	295
8.5.5 气相色谱仪的新发展	248		

第1章 绪 论

本章简要介绍自动检测技术和传感器的基本知识,重点介绍误差分析和数据处理、传感器静动态特性和标定方法。

1.1 自动检测技术概述

1.1.1 自动检测技术的重要性

在科学研究过程中,一些研究成果,必须要通过实验证实,这就需要一定的测试手段完成;在工农业生产中,为了保证能正常、高效地生产,要有一定的测试手段进行生产过程的检查和监视。这些测试手段就是仪器仪表。

关于仪器仪表,最早得到广泛应用的是机械式仪器仪表,以后发展到光学的、电学的仪器仪表等。仪器仪表也是随着科学技术的发展而发展的,每当科学技术前进一步,就要求能够提供新的测试手段,从而促进了仪器仪表的发展,而科学技术的成果也为发展新型的仪器仪表提供了条件。

由于微电子技术、计算机技术、通信技术及网络技术的迅速发展,对电量的测量技术相应地得到提高,如准确度高、灵敏度高、反应速度快、能够连续进行测量、自动记录、远距离传输和组成测控网络等。可是,在工程上所要测量的参数大多数为非电量,如机械量(位移、尺寸、力、振动、速度等)、热工量(温度、压力、流量、物位等)、成分量(化学成分、浓度等)和状态量(颜色、透明度、磨损量等),因而促使人们用电测的方法研究非电量,即研究用电测的方法测量非电量的仪器仪表,研究如何能正确和快速地测得非电量的技术。

非电量电测量技术具有测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量、可进行遥测、便于自动记录、可与计算机连接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等优点,在国民经济各部门得到广泛应用。

在机械制造业中,需要测量位移、尺寸、力、振动、速度、加速度等机械量参数,利用非电量电测仪器,监视刀具的磨损和工件表面质量的变化,防止机床过载,控制加工过程的稳定性。此外,还可用非电量电测单元部件作为自动控制系统中测量反馈量的敏感元件(如光栅尺、容栅尺等)控制机床的行程、启动、停止和换向。在化工行业需要在线检测生产过程的温度、压力、流量、物位等热工量参数,实现对工艺过程的有效控制,确保生产过程能正常高效地进行,确保生产安全,防止事故发生。在烟草行业,如卷烟包装等自动化生产线,利用非电量电测技术监控产品质量,剔除废品,并在线统计产品的产量、合格率等管理信息,为生产自动化、管理现代化提供可靠的技术保障。在环境保护等部门需要检测物质的化学成分、浓度等成分量。在现代物流行业,如在控制搬运机器人作业过程中,需要实时地检测工件安放的位置参数,以便准确地控制执行机构工作,可靠地安放货物。在科学研究和产品开发中,将非电量电测技术应用于逆向设计和逆向加工,可缩短产品设计和开发的周期。甚至在文物保护领域,研究人员已开始用非电量电测技术进行文物的保护和修复。

综上所述,自动检测技术与人们的生产、生活密切相关,它是自动化领域的重要组成部分,尤其在自动控制中,如果对控制参数不能有效准确地检测,控制就成为无源之水、无本之木。

1.1.2 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,各组成部分常以信息流的过程来划分,一般可分为:信息的获取、转换、处理和输出几部分。它首先要获取被检测的信息,把它转换成电量,然后把已转换成电量的信息进行放大、整形等转换处理,再通过输出单元(如指示仪和记录仪)把信息显示出来,或者通过输出单元把已处理的信息送到控制系统其他单元使用,成为控制系统的一部分等,其组成框图如图 1.1.1 所示。

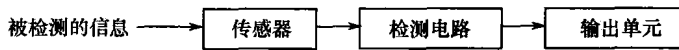


图 1.1.1 检测系统的组成

在检测系统中,传感器是把被测非电量转换成为与之有确定对应关系,且便于应用的某些物理量(通常为电量)的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度,如果传感器的误差很大,即使后续检测电路等环节精度很高,也难以提高检测系统的精度。

检测电路的作用是把传感器输出的变量转换成电压或电流信号,使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录;或者能够作为控制系统的检测或反馈信号。检测电路的种类通常由传感器类型而定,如电阻式传感器需用一个电桥电路把电阻值转换成电流或电压输出,由于电桥输出信号一般比较微弱,常常要将电桥输出信号加以放大,所以在测量电路中一般还带有放大器。

输出单元可以是指示仪、记录仪、累加器、报警器、数据处理电路等。若输出单元是显示器或记录器,则该测试系统为自动检测系统;若输出单元是计数器或累加器,则该测试系统为自动计量系统;若输出单元是报警器,则该测试系统为自动保护系统或自动诊断系统;若输出单元是数据处理电路,则该测试系统为部分数据分析系统,或部分自动管理系统或部分自动控制系统。

1.1.3 自动检测技术的发展趋势

随着微电子技术、通信技术、计算机网络技术的发展,对自动检测技术也提出了越来越高的要求,并进一步推动了自动检测技术的发展,其发展趋势主要有以下几个方面。

① 不断提高仪器的性能、可靠性,扩大应用范围。随着科学技术的发展,对仪器仪表的性能要求也相应地提高,如提高其分辨率、测量精度,提高系统的线性度、增大测量范围等,使其技术性能指标不断提高,应用领域不断扩大。

② 开发新型传感器。开发新型传感器主要包括:利用新的物理效应、化学反应和生物功能研发新型传感器,采用新技术、新工艺填补传感器空白,开发微型传感器,仿照生物的感觉功能研究仿生传感器等。

③ 开发传感器的新型敏感元件材料和采用新的加工工艺。新型敏感元件材料的开发和应用是非电量电测技术中的一项重要任务,其发展趋势为:从单晶体到多晶体、非晶体,从单一型材料到复合型材料、原子(分子)型材料的人工合成。其中,半导体敏感材料在传感器技术中具有较大的技术优势,陶瓷敏感材料具有较大的技术潜力,磁性材料向非晶体化、薄膜化方向发展,智能材料的探索在不断地深入。智能材料指具备对环境的判断和自适应功能、自诊断功能、自修复功能和自增强功能的材料,如形状记忆合金、形状记忆陶瓷等。

在开发新型传感器时,离不开新工艺的采用。如把集成电路制造工艺技术应用于微机电系统中微型传感器的制造。

④ 微电子技术、微型计算机技术、现场总线技术与仪器仪表和传感器的结合,构成新一代智能化测试系统,使测量精度、自动化水平进一步提高。

⑤ 研究集成化、多功能和智能化传感器或测试系统。传感器集成化主要有两层含义,一是同一功能的多元件并列化,即将同一类型的单个传感元件在同一平面上排列起来,排成一维构成线型传感器,排成二维构成面型传感器(如 CCD)。另一层含义是功能一体化,即将传感器与放大、运算及误差补偿、信号输出等环节一体化,组装成一个器件(如容栅传感器动栅数显单元)。

传感器多功能化是指一器多能,即用一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。多功能化不仅可以降低生产成本、减小体积,而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等性能指标。

传感器的智能化就是把传感器与微处理器相结合,使之不仅具有检测功能,还具有信息处理、逻辑判断、自动诊断等功能。

1.2 传感器概述

1.2.1 传感器的定义

传感器是一种以一定精确度把被测量(主要是非电量)转换为与之有确定关系、便于应用的某种物理量(主要是电量)的测量装置。这一定义包含了以下几方面的含义:① 传感器是测量装置,能完成检测任务;② 它的输入量是某一被测量,如物理量、化学量、生物量等;③ 它的输出是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电量,但主要是电量;④ 输出与输入间有对应关系,且有一定的精确度。

在有些学科领域,传感器又称为敏感元件、检测器、转换器、发讯器等。这些不同提法,反映了在不同的技术领域中,只是根据器件的用途,对同一类型的器件使用着不同的术语而已,它们的内含是相同或相似的。

1.2.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 部分组成,组成框图如图 1.2.1 所示。

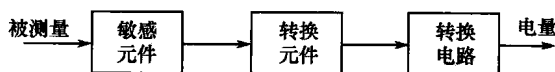


图 1.2.1 传感器组成框图

- ① 敏感元件,它是直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- ② 转换元件,敏感元件的输出就是它的输入,它把输入转换成电路参数。
- ③ 转换电路,将上述电路参数接入转换电路,便可转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,有些则较为复杂,大多数是开环系统,也有些是带反馈的闭环系统。最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如压电式加速度传感器。有些传感器,转换元件不止一个,需要经过若干次转换。

1.2.3 传感器分类

传感器是一门知识密集型技术。传感器的原理各种各样,它与许多学科有关,种类繁多,分类方法也很多,目前广泛采用的分类方法有以下几种。

① 按照传感器的工作机理,可分为物理型、化学型、生物型等。

② 按构成原理,可分为结构型和物性型两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的,包括力场的运动定律,电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大关系,如差动变压器。

物性型传感器是利用物质定律构成的,如欧姆定律等。物性型传感器的性能随材料的不同而异,如光电管、半导体传感器等。

③ 按传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

能量控制型传感器在信息变换过程中,其能量需外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。

能量转换型传感器,主要是由能量变换元件构成,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电效应、霍尔效应等原理构成的传感器属于此类传感器。

④ 按照物理原理分类,可分为电参量式传感器(包括电阻式、电感式、电容式等基本形式)、磁电式传感器(包括电磁感应式、霍尔式、磁栅式等)、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器、波式传感器(包括超声波式、微波式等)、射线式传感器、半导体式传感器、其他原理的传感器(如振弦式和振筒式传感器等)。

⑤ 按照传感器的使用分类,可分为位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等。

1.3 测量误差与数据处理

1.3.1 测量误差的概念和分类

1. 有关测量技术中的部分名词

① 等精度测量,在同一条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量。

② 非等精度测量,在多次测量中,如对测量结果精确度有影响的一切条件不能完全维持不变的测量称为非等精度测量。

③ 真值,被测量本身所具有的真正值称为真值。真值是一个理想的概念,一般是不知道的,但在某些特定情况下,真值又是可知的,如一个整圆圆周角为 360° 等。

④ 实际值,误差理论指出,在排除系统误差的前提下,对于精密测量,当测量次数无限多时,测量结果的算术平均值极接近于真值,因而可将它视为被测量的真值。但是测量次数是有限的,故按有限测量次数得到的算术平均值,只是统计平均值的近似值,而且由于系统误差不可能完全被排除,因此通常只能把精度更高一级的标准器具所测得的值作为真值。为了强调它并非是真的真值,故把它称为实际值。

⑤ 标称值,测量器具上所标出来的数值。

⑥ 示值,由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

⑦ 测量误差,用测量器具进行测量时,所测量出来的数值与被测量的实际值(或真值)之间的差值。

2. 误差的分类

按照误差出现的规律,可把误差分为系统误差、随机误差(也称为偶然误差)和粗大误差3类。

(1) 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量值时绝对值和符号保持不变,或在条件改变时按一定规律变化的误差称为系统误差,简称系差。

引起系统误差的主要因素有:材料、零部件及工艺的缺陷,标准量值、仪器刻度的不准确,环境温度、压力的变化,其他外界干扰。

(2) 随机误差

在同一测量条件下,多次测量同一量值时,绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和引起的,如仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接件的弹性变形、电子元器件的老化等。随机误差具有随机变量的一切特点,在一定条件下服从统计规律,可以用统计规律描述,从理论上估计对测量结果的影响。

(3) 粗大误差

超出规定条件下预期的误差称为粗大误差,简称粗差,或称寄生误差。

粗大误差值明显歪曲测量结果。在测量或数据处理中,如果发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时,应判断是否属于粗大误差,如属粗差,此值应舍去不用。

1.3.2 精度

反映测量结果与真值接近程度的量,称为精度。精度可分为:

① 准确度,反映测量结果中系统误差的影响程度;

② 精密度,反映测量结果中随机误差的影响程度;

③ 精确度,反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度,其定量特征可用测量的不确定度(或极限误差)表示。

对于具体的测量,精密度高的准确度不一定高,准确度高的精密度不一定高,但精确度高,则精密度和准确度都高。

1.3.3 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有以下几种。

1. 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 A_0 ,器具的标称值或示值为 x ,则绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.3.1)$$

由于一般无法求得真值 A_0 ,在实际应用时,常用精度高一级的标准器具的示值,即实际值 A 代替真值 A_0 。 x 与 A 之差称为测量器具的示值误差,记为

$$\Delta x = x - A \quad (1.3.2)$$

通常以此值代表绝对误差。

在实际工作中,经常使用修正值。为了消除系统误差用代数法加到测量结果上的值称为修正值,常用 C 表示。将测得示值加上修正值后可得到真值的近似值,即

$$A_0 = x + C \quad (1.3.3)$$

由此得

$$C = A_0 - x \quad (1.3.4)$$

在实际工作中,可以用实际值 A 近似真值 A_0 ,则式(1.3.4)变为

$$C = A - x = -\Delta x \quad (1.3.5)$$

修正值与误差值大小相等、符号相反,测得值加修正值可以消除该误差的影响,但必须注意,一般情况下难以得到真值,而用实际值 A 近似真值 A_0 ,因此,修正值本身也有误差,修正后只能得到较测量值更为准确的结果。

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是曲线、公式或数表。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比。相对误差有以下几种表现形式。

(1) 实际相对误差

实际相对误差 γ_A 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.3.6)$$

(2) 示值相对误差

示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δx 与被测量的示值 x 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

(3) 满度(引用)相对误差

相对误差可用以说明测量的准确度,但不能评价指示仪表的准确度。对一个指示仪表的某一量限来说,标尺上各点的绝对误差相近,指针指在不同刻度上读数不同,所以各指示值的示值相对误差差异很大,无法用示值相对误差评价该仪表。为了划分指示仪表的准确度级别,选择仪表的测量上限,即满度值作为基准,由满度相对误差评价指示仪表的准确度。

满度相对误差 γ_n 又称满度误差或引用误差,是用绝对误差 Δx 与器具的满度值 x_n 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \times 100\% \quad (1.3.8)$$

由于仪表各指示值的绝对误差大小不等,其值有正有负,因此,国家标准规定仪表的准确度等级 a 是用最大允许误差确定的。指示仪表的最大满度误差不准超过该仪表准确度等级的百分数,即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_n} \times 100\% \leq a\% \quad (1.3.9)$$

式中, γ_{nm} 为仪表的最大满度误差(最大引用误差); Δx_m 为仪表示值中的最大绝对误差的绝对值; x_n 为仪表的测量上限; a 为准确度的等级指数。式(1.3.9)是判别指示仪表是否超差,以及应属于哪个准确度级别的主要依据。

从使用仪表的角度出发,只有仪表示值恰好为仪表上限时,测量结果的准确度才等于该仪表准确度等级的百分数。在其他示值时,测量结果的准确度均低于仪表准确度等级的百分数,因为

$$\Delta x_m \leq a\% x_n \quad (1.3.10)$$

当示值为 x 时,可能产生的最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \leq a\% \frac{x_n}{x} \quad (1.3.11)$$

式(1.3.11)表明,用仪表测量示值为 x 的被测量时,比值 x_n/x 越大,测量结果的相对误差越大。由此可见,选用仪表时要考虑被测量的大小越接近仪表上限越好。为了充分利用仪表的准确度,选用仪表前要对被测量有所了解,其被测量的值应大于其测量上限的 $2/3$ 。

1.3.4 随机误差

1. 正态分布

随机误差是以不可预定的方式变化着的误差,但在一定条件下服从统计规律,可以用统计规律描述。对随机误差做概率统计处理,是在完全排除系统误差的前提下进行的。在实际工作中,随机误差大部分是按正态分布的,其正态分布的概率密度 $f(\delta)$ 曲线如图 1.3.1 所示,其数学表达式为

$$y = f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3.12)$$

式中, y 为概率密度, δ 为随机误差, σ 为标准差(均方根误差), e 为自然对数的底。

其分布函数 $F(\delta)$ 为

$$F(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1.3.13)$$

数学期望为

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (1.3.14)$$

方差为

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta \quad (1.3.15)$$

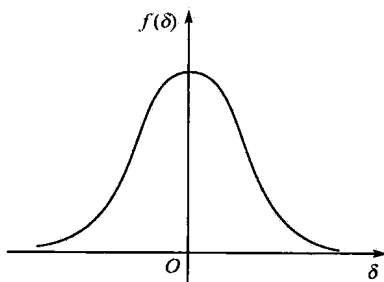


图 1.3.1 正态分布概率密度曲线

分析图 1.3.1 所示的曲线,可以发现正态分布的随机误差分布规律具有以下特点:

- ① 对称性,绝对值相等的正误差和负误差出现的次数相等;
- ② 单峰性,绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多;
- ③ 有界性,在一定的测量条件下,随机误差的绝对值不会超过一定界限;
- ④ 抵偿性,随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋于零。

2. 随机误差的评价指标

由于随机误差大部分是按正态分布规律出现的,具有统计意义,故通常以正态分布曲线的两个参数算术平均值 \bar{x} 和均方根误差 σ 作为评价指标。

(1) 算术平均值 \bar{x}

对某一量进行一系列等精度测量,由于存在随机误差,其测量值皆不相同,应以全部测得值的算术平均值作为最后测量结果。

设对某一量做一系列等精度测量,得到一系列不同的测量值 x_1, x_2, \dots, x_n , 这些测量值的算术平均值 \bar{x} 定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1.3.16)$$

并设各测量值与真值的随机误差为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, 则

$$\delta_1 = x_1 - A_0, \delta_2 = x_2 - A_0, \dots, \delta_n = x_n - A_0$$

即

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nA_0$$

由随机误差的对称性规律可以推出,当 $n \rightarrow \infty$ 时,有

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

所以

$$\sum_{i=1}^n x_i = nA_0$$

即

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x} \quad (1.3.17)$$

式(1.3.17)表明,当测量次数为无限次时,所有测量值的算术平均值即等于真值,事实上不可能达到无限次测量,即真值难以达到。但是,随着测量次数的增加,算术平均值也就越接近真值。因此,以算术平均值作为真值是既可靠又合理的。

(2) 标准差 σ

① 测量列中单次测量的标准差。由于随机误差的存在,等精度测量列中各个测量值一般不相同,它们围绕着该测量列的算术平均值有一定的分散,此分散度说明了测量列中单次测量值的不可靠性,必须用一个数值作为其不可靠性的评定标准。

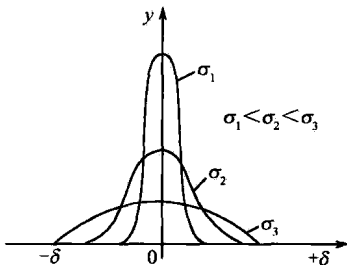


图 1.3.2 3 种不同 σ 值的正态分布曲线

的 n 次测量的测量值分散性的参数,可作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

在等精度测量列中,单次测量的标准差可按下式计算

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (1.3.18)$$

式中, n 为测量次数; δ_i 为每次测量中相应各测量值的随机误差, 且

$$\delta_i = x_i - A_0$$

式中, x_i 为各测得值; A_0 为被测量真值。

在实际工作中, 一般情况下, 被测量的真值为未知, 这时可用被测量的算术平均值代替被测量的真值进行计算, 则有

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

式中, x_i 为第 i 个测量值; \bar{x} 为测量列的算术平均值; v_i 为 x_i 的残余误差(简称残差), 即用残差来近似代替随机误差求标准差的估计值, 则式(1.3.18)变为

$$\sigma = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1.3.19)$$

式(1.3.19)称为贝塞尔(Bessel)公式, 根据此式可由残余误差求得单次测量列标准差的估计值。

② 测量列算术平均值的标准差。在多次测量的测量列中, 通常以算术平均值作为测量结果, 因此, 必须研究算术平均值不可靠的评定标准。而算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 可作为算术平均值不可靠性的评定标准

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.3.20)$$

式中, $\sigma_{\bar{x}}$ 为算术平均值标准差(均方根误差); σ 为测量列中单次测量的标准差; n 为测量次数。

由式(1.3.20)可知, 在 n 次等精度测量中, 算术平均值的标准差为单次测量的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, 当测量次数 n 越大时, 算术平均值越接近被测量的真值, 测量精度也越高。

3. 测量的极限误差

测量的极限误差是极端误差, 检测测量结果的误差不超过该极端误差的概率 P , 并使出现超过的概率为 $1 - P$, 误差超过该极端误差的检测量的测量结果可以忽略。

(1) 单次测量的极限误差

测量列的测量次数足够多和单次测量误差为正态分布时, 随机误差正态分布曲线下的全部面积相当于全部误差出现的概率, 即

$$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1 \quad (1.3.21)$$

而随机误差在 $-\delta$ 至 δ 范围内的概率为

$$P(\pm \delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\delta}^{\delta} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} d\delta = \frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\delta} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1.3.22)$$

引入新的变量 t

$$t = \frac{\delta}{\sigma}, \delta = t\sigma$$

经变换, 式(1.3.22)变为