




教育部高等职业教育示范专业规划教材

生产过程自动化技术专业

检测技术及仪表

JIAN CE JI SHU JI YI BIAO

毛徐辛 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电子 课件

教育部高等职业教育示范专业规划教材
(生产过程自动化技术专业)

检测技术及仪表

主 编 毛徐辛
参 编 李 京 杨莉荣
 张 伟 冯建录
主 审 张力军



机械工业出版社

全书包括两大部分：第一部分(绪论、第1章)主要介绍了检测技术及仪表的发展状况，测量和测量误差的基本概念以及检测仪表的基础知识；第二部分(第2章~第7章)主要介绍了流程工业主要参数(压力、温度、液位、流量、成分及物性参数)的检测方法，并介绍了相应传感器和仪表的基本组成、工作原理、类型特点及实际应用，另外还介绍了位移、振动的检测方法以及常用传感器的结构类型、工作原理及应用特点。

本书可作为高等职业教育、成人教育等院校生产过程自动化技术、检测技术及应用等相关专业的教材，也可作为石油、化工、油气储运、轻工、冶金、水利、电力、食品等企业职业技能培训的教材，对从事仪表、自动化方面工作的工程技术人员和技术工人亦具有一定的参考价值。

为方便教学，本书备有免费电子课件，凡选用本书作为教材的教师和学校均可来电索取。咨询电话：010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术及仪表/毛徐辛主编. —北京：机械工业出版社，2010.7

教育部高等职业教育示范专业规划教材. 生产过程自动化技术专业

ISBN 978-7-111-30936-9

I. ①检… II. ①毛… III. ①自动检测—高等学校：技术学校—教材②检测仪表—高等学校：技术学校—教材
IV. ①TP274②TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第106707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：于宁 责任编辑：曹雪伟 版式设计：张世琴
责任校对：刘志文 封面设计：鞠杨 责任印制：乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 16.25印张·399千字

0001—4000册

标准书号：ISBN 978-7-111-30936-9

定价：28.00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

封面无防伪标均为盗版

前 言

PREFACE

根据教育部全面提高高等职业教育教学质量、大力推行工学结合、突出实践能力培养、改革人才培养模式的指示精神,本书以理论知识够用为度、突出应用性和针对性为原则,从“检测技术及仪表”这门课程的知识、能力和应用结构出发,按照2008年7月高等职业教育示范专业规划教材建设研讨及大纲审定会上通过的该课程编写大纲而编写。

全书包括两大部分:第一部分(绪论、第1章)主要介绍了检测技术及仪表的发展状况,测量和测量误差的基本概念以及检测仪表的基础知识;第二部分(第2章~第7章)主要介绍了流程工业的主要参数(压力、温度、物位、流量、成分及物性参数)的检测方法,并介绍了相应传感器和仪表的基本组成、工作原理、类型特点及实际应用,另外还介绍了位移、振动的检测方法以及常用传感器的结构类型、工作原理及应用特点。在内容的组织安排上,力求突出针对性、实用性和先进性,强调应用性。在介绍传统检测技术及仪表的同时,也介绍了目前工业生产中参数检测的一些新技术和新仪表,有助于学生开阔思路,了解当今检测技术及仪表的发展动向。

为便于学生学习,增强他们对不同类型仪表的感性认识,在编写过程中力求做到图文并茂,为此给出了各种参数典型传感器和仪表的结构图和实物外形图。为加强实践能力培养,书中增加了实训内容,学生可结合相关知识的学习,完成仪表的结构认识、选型、安装使用及调校等方面的技能训练。

本书由毛徐辛任主编,其中绪论、第3章的3.3和3.5~3.7节、第5章的5.1~5.6和5.9节、第6章由毛徐辛编写;第1章、第4章、第5章的5.7和5.8节由李京编写;第2章、第3章的3.1、3.2和3.4节、第7章由杨莉荣编写;张伟参与了第1章初稿中部分内容的编写;附录部分由冯建录整理。全书由毛徐辛负责统稿与修改,由张力军主审。

在编写过程中,还参考了部分制造厂的产品说明及选型资料,书中部分插图亦来源于有关制造厂的产品说明书,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中存在不妥及错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

CONTENTS

前言	
绪论	1
第1章 检测技术及仪表基础知识	4
1.1 测量及测量误差	4
1.1.1 测量及测量方法	4
1.1.2 测量误差及分类	5
1.1.3 测量误差的消除及减小方法	8
1.2 检测仪表基本特性及性能指标	9
1.2.1 静态特性及性能指标	9
1.2.2 动态特性及性能指标	11
1.3 检测仪表组成与分类	12
1.3.1 检测仪表组成及结构形式	12
1.3.2 检测仪表分类	14
本章小结	14
习题与思考题	15
第2章 压力检测	16
2.1 压力检测的方法	16
2.1.1 压力与压力的表示方法	16
2.1.2 测压仪表的类型	17
2.2 压力检测仪表	18
2.2.1 弹性式压力计	18
2.2.2 应变式压力传感器	22
2.2.3 电感式压力传感器	25
2.2.4 电容式压力变送器	28
2.2.5 智能压力变送器	31
2.3 压力仪表的选用、校验与安装	34
2.3.1 压力表的选用	34
2.3.2 压力表的校验	36
2.3.3 压力表的安装	37
2.4 实训	38
2.4.1 弹簧管压力表的拆装与校验	38
2.4.2 压力开关的校验与调整	39
2.4.3 电容式压力变送器调校	40
本章小结	41
习题与思考题	42
第3章 温度检测	43
3.1 温度检测方法	43
3.1.1 温标	43
3.1.2 温度检测的方法	44
3.1.3 测温仪表的分类	44
3.2 膨胀式温度计	45
3.2.1 玻璃管液体温度计	45
3.2.2 双金属温度计	46
3.2.3 压力式温度计	48
3.3 热电偶温度计	49
3.3.1 测温原理	50
3.3.2 常用热电偶的类型与结构	52
3.3.3 热电偶冷端的处理方法	55
3.3.4 热电偶常用的测温电路	58
3.3.5 一体化式热电偶温度变送器	59
3.4 热电阻温度计	60
3.4.1 测温原理	61
3.4.2 常用热电阻类型与结构	61
3.4.3 热电阻连接方式	63
3.4.4 一体化式热电阻温度变送器	65
3.5 非接触式温度计	65
3.5.1 非接触式温度计测温原理	65
3.5.2 辐射式测温的基本方法	66
3.5.3 全辐射高温计	67
3.6 接触式温度计的安装	67

3.6.1 测温元件的安装	68	5.1.2 计量标准参比条件	108
3.6.2 连接导线的安装	69	5.1.3 流量检测方法 & 仪表分类	108
3.7 实训	69	5.2 节流式流量计	109
3.7.1 热电偶/热电阻校验	69	5.2.1 基本组成 & 检测原理	109
3.7.2 一体化式热电偶/热电阻温度 变送器校验	72	5.2.2 标准节流装置	113
本章小结	73	5.2.3 非标准节流装置	117
习题与思考题	73	5.2.4 节流式流量计的特点 & 应用	117
第4章 物位检测	75	5.3 容积式流量计	120
4.1 物位检测简介	75	5.3.1 检测原理	120
4.1.1 物位 & 物位检测目的	75	5.3.2 容积式流量计的类型	121
4.1.2 物位检测方法	75	5.3.3 容积式流量计的工作特性	123
4.2 直读式液位计	76	5.3.4 容积式流量计的特点 & 应用	124
4.2.1 检测原理	76	5.4 转子流量计	126
4.2.2 直读式液位计结构类型	76	5.4.1 检测原理	126
4.3 浮力式液位计	78	5.4.2 转子流量计的工作特性 & 结构类型	127
4.3.1 恒浮力式液位计	78	5.4.3 转子流量计的指示值修正	131
4.3.2 变浮力式液位计	82	5.4.4 转子流量计的应用	134
4.4 静压式液位计	84	5.5 涡轮流量计	136
4.4.1 检测原理	85	5.5.1 基本结构 & 工作原理	136
4.4.2 静压式液位计类型	85	5.5.2 涡轮流量计类型 & 特性	138
4.4.3 零点迁移问题	88	5.5.3 涡轮流量计的特点 & 应用	140
4.5 电容式物位计	90	5.6 超声波流量计	142
4.5.1 检测原理	90	5.6.1 检测原理	142
4.5.2 电容式物位传感器	90	5.6.2 超声波流量计的结构 & 类型	145
4.5.3 电容式物位计的应用	94	5.6.3 超声波流量计的特点 & 应用	147
4.6 雷达液位计	94	5.7 其他流量计	148
4.6.1 检测原理	94	5.7.1 电磁流量计	148
4.6.2 雷达液位计的构成 & 类型	96	5.7.2 涡街流量计	153
4.6.3 雷达液位计的特点 & 应用	98	5.7.3 质量流量计	158
4.7 其他物位计	99	5.8 流量计的校验	163
4.7.1 超声波物位计	99	5.8.1 流量计标准装置	163
4.7.2 磁致伸缩液位计	102	5.8.2 流量计的校验	166
4.8 实训——电容式液位计调校	104	5.9 实训	167
本章小结	104	5.9.1 常用流量计认识	167
习题与思考题	105	5.9.2 超声波流量计的安装 & 使用	168
第5章 流量检测	107	本章小结	168
5.1 流量检测的方法	107	习题与思考题	169
5.1.1 流量 & 流量的表示方法	107	第6章 成分 & 物性分析	171

6.1 工业分析仪表概述	171	6.6.4 可燃气体检测报警器的安装 与应用	210
6.1.1 工业分析仪表的基本组成	171	6.7 密度计	211
6.1.2 工业分析仪表的分类	172	6.7.1 振动式密度计	212
6.1.3 工业分析仪表的应用	172	6.7.2 核辐射式密度计	215
6.2 热导式气体分析仪	173	6.7.3 压力式密度计	217
6.2.1 热导分析原理	173	6.8 实训——可燃气体检测器的应用 与调校	218
6.2.2 热导式气体分析仪的组成及 工作原理	174	本章小结	219
6.2.3 热导式气体分析仪的应用	178	习题与思考题	220
6.3 氧化锆氧分析仪	179	第7章 位移、振动检测	221
6.3.1 氧化锆检测氧含量的原理	179	7.1 位移传感器	221
6.3.2 氧化锆氧分析仪的基本结构	181	7.1.1 电位器式位移传感器	221
6.3.3 氧化锆氧分析仪的应用	184	7.1.2 电容式位移传感器	223
6.4 工业气相色谱仪	185	7.1.3 电感式位移传感器	224
6.4.1 气相色谱基本原理	186	7.1.4 电涡流式位移传感器	225
6.4.2 工业气相色谱仪的组成	188	7.1.5 光栅位移传感器	227
6.4.3 气相色谱的定性和定量分析	192	7.2 振动传感器	229
6.4.4 工业气相色谱仪的应用	194	7.2.1 相对振动传感器	229
6.5 水分分析仪	195	7.2.2 绝对振动传感器	230
6.5.1 湿度和水的定义及表示 方法	195	本章小结	232
6.5.2 微量水过程分析仪	196	习题与思考题	233
6.5.3 原油含水分析仪	201	附录	234
6.6 可燃气体检测报警器	207	附录 A 常用热电偶分度表	234
6.6.1 可燃气体检测报警器组成	207	附录 B 常用热电阻分度表	246
6.6.2 常用检测器及工作原理	207	附录 C 最短直管段长度	250
6.6.3 可燃气体检测报警器的 类型	209	参考文献	252

绪 论

在国民经济的各个领域，利用自然科学中的定律、原理和各种物理效应，选择合适的方法，将工业生产、科学实验乃至日常生活中的有关信息通过测量的方法取得定性和定量的结果，这就是检测。能够完成整个检测过程的技术称为检测技术，而检测仪表则是专门用于检测的手段或工具。

随着科学技术的突飞猛进，工业生产水平的不断提高和发展，为检测技术提供了新的理论基础和检测方法，也对检测技术和仪表提出了更新、更高的要求，而检测技术的进步和新型仪表的不断涌现又进一步推动了各领域科研和技术水平的发展，因此，检测技术在很大程度上决定了科学技术及生产的发展水平。

1. 检测技术及仪表的地位与作用

检测技术及仪表在生产、科研等各个领域中所起的作用主要体现在以下几个方面。

(1) 科学技术的发展突破方面 科学技术的发展与突破是以检测技术及仪表的发展为基础的。例如，光学显微镜使人们得以观察细胞，从而推动了生物学的发展；电子显微镜让人们观察到微观世界，又进一步推动了生物科学、电子科学、材料科学的发展。检测技术的发展及检测仪表的开发与应用，为人类认识未知世界、探索各领域奥秘提供了必要的条件，在科学技术与研究中起到重要的作用。

(2) 工业生产自动化方面 保证工业生产平稳、正常地进行，提高工业自动化水平，首先需要从生产现场获取各种参数，再据此进行分析判断，通过自动控制手段，使每个生产环节得以正常进行。

不同的生产过程类型，要求采用不同的检测方法和检测仪表来获取工艺参数，而及时准确地获取工艺参数是保证自动化系统正常发挥作用和确保生产设备安全高效运行的关键。因此，检测仪表作为工业生产中的“眼睛”，起着把关和指导的作用。

(3) 产品检验和质量控制方面 无论是工业产品还是民用产品，对产品质量的评价和检验需要借助检测仪表作为工具来进行。另外，在传统检测技术基础上发展起来的自动检测技术，使检测与生产可以同时进行，并能及时利用检测结果对生产过程进行控制，在控制生产过程的同时达到质量控制的目的，使之生产出合格的产品。

(4) 生产设备安全运行监测方面 在工业生产中，生产设备的安全、高效运行是各生产环节正常进行的前提。通常可针对生产设备设置相应的状态检测系统，长期动态地监测反映其运行状态的各种参数，一旦发现异常情况，及时发出报警，并采取必要的连锁保护措施。这样，可以避免严重的突发事件，保障设备和人身安全。

此外，在军事、航空、航天等领域，新型武器装备、火箭、导弹和卫星等的研制都离不开现代检测技术及仪表，且它们对检测的需求更多，要求也更高。在医疗卫生领域，各种先进的医疗检测仪器可大大提高疾病检查、诊断的速度和准确性。而随着人民生活水平的提高，检测技术与人们日常生活也愈来愈密切。如新型建筑装饰材料理化性能和安全性能的检测，居民家庭室内温度、湿度、防火、防盗及家用电器的安全监测等，这些都反映出检测技

术对人们日常生活的影响和作用越来越大。

在信息化时代已经到来的今天,作为信息技术三大核心技术之一的检测技术,是信息时代信息获取—处理—传输链条中的源头技术,是信息技术的关键和基础,起着不可或缺的作用。目前,世界各国十分重视检测技术的发展,都在致力于研究新技术、新材料和开发新型传感器和仪表。

2. 检测技术及仪表的发展

对各类参数检测时所应用的检测理论和检测方法与物理学、化学、电子学、光学、材料学、信息学等学科密切相关,随着这些学科的发展,检测技术已发展到相当水平。如随着信息类学科的发展而发展起来的软测量技术,其基本原理是:选择一组既与被测变量(常称为主导变量)密切相关,又容易测量的变量(常称为辅助变量),依据这些可测变量与被测变量之间的关系,建立某种以可测变量为输入、被测变量为输出的数学模型,用计算机进行模型的数值计算,从而得到被测变量的估计值。软测量技术不仅应用于自动控制系统中被控变量或扰动不可测的场合,而且已渗透到需要实现难测参数在线测量的各个工业领域。又如虚拟仪器的出现是现代计算机软、硬件技术和检测技术相结合的产物,它突破了传统仪器以硬件为主体的模式,主要以计算机为核心,最大限度地利用计算机系统的软硬件资源,实现用软件去代替传统仪器的某些硬件功能,直接产生激励信号或实现所需要的各项测量功能。

随着科学技术的不断发展、生产规模的不断扩大、新工艺新设备的不断涌现以及人们生活水平的不断提高,新的检测对象和检测领域不断出现。如生产过程中的参数检测已由表征生产过程的间接参数(温度、压力、物位、流量)转向表征生产过程本质的直接参数(成分、物性参数、能量等);医学诊断中已由生理指标检测发展到心理指标检测等。

近年来,随着高新科学技术研究成果的广泛应用,跨学科的综合设计、制造技术的发展以及新技术的不断涌现,特别是大规模集成电路技术、微型计算机技术、网络技术、微机械和新材料技术的不断进步和发展,使得检测技术及仪表发生了革命性的变革。现代检测仪表已成为典型的高科技产品,它向着高性能、多功能化、微型化、数字化、集成化、智能化、网络化等方向发展,其发展趋势大致可归纳为以下几个方面。

(1) 不断提高仪表性能 随着科学技术的发展,对检测技术及仪表的要求越来越高。就传统检测仪表而言,要求其不断扩大测量范围,不断提高测量准确性、可靠性和稳定性,不断增强仪表的适应性和延长其使用寿命。

(2) 研究新技术、开发新材料 目前,各发达国家正致力于研究应用新检测技术和新材料的新型传感器。例如利用约瑟夫逊效应开发出的超低温温度传感器;应用硅材料和其他派生物开发出的各种微型传感器;应用陶瓷材料和高分子材料开发出的各种气敏、热敏、湿敏、光敏传感器;等等。

(3) 发展集成化、一体化、多功能化的传感器 随着微电子技术的迅速发展,将检测敏感元件和信号处理电路集成在一起,构成一体化式的传感器,直接输出电信号供显示输出单元使用。集成化使传感器体积大大缩小,性能更可靠、更稳定。而将两种或两种以上检测敏感元件、信号处理电路集成于一体,可以使传感器实现多种功能。例如半导体温湿敏传感器是将热敏元件、湿敏元件和信号处理电路集成在一起,一个传感器可同时完成温度和湿度的测量;多功能气体传感器是将多个不同材料制成的气敏元件集成在一起,根据其针对不同气体响应的灵敏度差异,同时测量多种气体。

(4) 发展智能化传感器和仪表 利用微处理器技术进行信号处理,使传统传感器和仪表智能化。智能传感器和仪表除具备基本的测量功能外,还可完成数据处理、自动补偿、故障诊断和报警、自动调零、自动校准、数字通信等功能,具有高准确度、高可靠性、高稳定性、高分辨力、适应性强、性价比高等特点,使用也更加灵活方便。

(5) 发展网络化传感器和仪表 将计算机技术和网络技术相结合,在智能传感器和仪表的基础上嵌入网络协议,使其具有网络接口功能。这种网络化传感器和仪表就像计算机一样成为测控网络上的一个节点,并具有网络节点的组态性和互操作性。处在网络中的传感器和仪表将测控参数加以必要的处理后发布到网络,联网的其他设备便可获取这些参数,进而对其进行分析和处理。目前已进入生产现场的现场总线传感器和仪表就是网络化传感器和仪表的典型代表,由于它具有符合一定总线标准的通信接口,所以改变了常规的连接模式,可直接连接在工业测控系统的总线上使用,信号的传递由数字信号取代了模拟信号,从而大大提高了整个系统的性能,简化了系统的复杂程度,降低了成本。

3. 本课程内容、性质及任务

本课程是高等职业教育“生产过程自动化技术”专业的一门专业课程,主要介绍石油、化工、炼油、油气储运、冶金、电力、食品、制药等行业过程参数的检测方法,常用检测仪表的检测原理、基本特性和应用问题。

本课程涉及电子技术、计算机技术、物理学、热力学、流体力学等多学科的知识,其学科综合性较强。学习的目的在于正确选择和应用各类参数的检测仪表,所以它的实际应用性又较强。理论联系实际、注重实践环节是学好本课程的关键。

通过本课程的学习,学生应具备以下知识和能力。

- 1) 掌握检测基本知识及检测仪表的基本构成和基本性能指标。
- 2) 掌握工业现场常见过程参数的主要检测方法。
- 3) 掌握常用检测仪表的基本结构、工作原理、基本特性和应用知识。
- 4) 掌握常用检测仪表选型、安装使用、日常维护的基本技能。
- 5) 掌握对常用检测仪表进行校验的基本技能,了解仪表的检定方法。
- 6) 具备对仪表简单故障进行判断和处理的能力。
- 7) 了解各类参数检测仪表发展新动向。

第 1 章 检测技术及仪表基础知识

温度、压力、流量、物位、成分及物性等是工业生产过程中的重要参数，过程检测的基本任务就是对这些参数进行及时、准确的检测，这对正确指导生产操作、确保安全生产、提高产品产量和质量、实现生产过程自动化等都是十分重要的。不同的工艺参数，其检测方法 & 仪表的结构原理也不尽相同，但就检测目标而言，都是要尽可能地获得被测参数的真实值。作为检测工艺参数的专用技术工具——检测仪表，则必须具备相应的特性才能满足工业生产过程对参数检测的要求。

1.1 测量及测量误差

1.1.1 测量及测量方法

测量是指用专门的技术工具，依靠实验和计算找到被测量的量值(量值由数值和单位组合而成)，即把被测量与相应的测量单位(标准)进行比较，确定出被测量的大小和单位。因此，测量是以确定量值为目的的一组操作。通过测量可以掌握被测对象的真实状态。

每一种测量都要依据自然科学中的定律、定理和得到充分理论和实践证实的科学原理，正确运用测量原理是保证测量结果准确可靠的科学基础。例如测量温度时应用的热电效应、热阻效应，测量流量时应用的能量守恒定律和质量守恒定律等。

测量方法有多种，按取得测量结果的方法可分为直接测量、间接测量和混合测量。

(1) 直接测量 把被测量与作为测量标准的量直接进行比较，直接得到被测量的大小和单位，可表示为

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

式中， y 是被测量的量值； x 是作为标准的器具所给出的量值。

例如，用量筒测量液体体积，用米尺测量长度，用天平测量物体质量等均属于直接测量方法。

直接测量又可采用偏差法、零位法和微差法三种基本测量方法。

1) 偏差法是在测量过程中，用检测仪表指针的位移(即偏差)来表示被测量的大小的方法。其中仪表的刻度通过标准仪器校准确定。这种方法简单迅速，但准确度较差。

2) 零位法是在测量过程中，将被测量与已知的标准量进行比较，当调节标准量使之等于被测量时，标准量的值即代表了被测量的大小。这种方法准确度高，但测量过程费时较多。

3) 微差法是将偏差法和零位法组合使用的一种测量方法。在测量过程中，用量值接近被测量的标准量与被测量进行比较，得到差值，再用偏差法测出此差值，而被测量的量值为标准量与差值之和。这种方法简单、迅速，且准确度较高。

(2) 间接测量 被测量无法进行直接测量，而是通过测量与它有已知函数关系的其他

量, 再按函数关系求得被测量的量值, 可表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-2)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_n 是影响 y 的各影响量。

例如, 通过直接测量矩形的长(a)和宽(b), 就可求出矩形的面积 $A(A = ab)$ 。通过直接测量圆形管道的内径(D)和长度(L), 就可求出管道的容积 $V(V = \pi D^2 L/4)$ 。

(3) 混合测量 在直接测量和间接测量中, 被测量只有一个。而当被测量有数个时, 则要通过直接测量的测得值或间接测量的测得值建立一个方程组, 再通过求解方程组得到被测量的量值, 这就是混合测量方法。

1.1.2 测量误差及分类

在对被测量进行测量时, 人们最为关心的是测量结果是否能反映被测量的真实状态, 并总是希望测得被测量的真实值。然而, 由于测量方法的局限性、测量设备的准确性、周围环境的影响以及人为因素等原因, 使得测量结果与真实值之间总是存在一定差异, 这种差异即为测量误差。随着科学水平的提高、技术的进步, 人们的专业知识、经验及技巧的丰富, 测量误差会越来越小, 但却无法使其降低为零。

1. 测量误差

测量误差是指测量值(测量结果)与被测量的真实值(真值)之间的差异。任何测量过程都不可避免地存在测量误差, 测量误差的表示方法主要有以下几种。

(1) 绝对误差 被测量的测量值与被测量的真值之差, 即上述的测量误差, 它可表示为

$$\Delta = y - Y_0 \quad (1-3)$$

式中, Δ 是绝对误差; y 是被测量的测量值, 也称仪表示值; Y_0 是被测量的真值。

真值是在一定条件下被测量的客观实际值, 它是一个理想的概念, 往往无法确定。因此, 实际测量过程中会采用一个特定的值作为真值, 这个特定的值一般有: ①约定真值, 即把国际公认的某些基准量作为真值, 如 1K 等于水的三相点温度的 $1/273.16$ 就是约定真值, 也可用被测量的多次测量结果来确定约定真值; ②相对真值, 即把准确度较高的标准仪表(或仪器)的测量值作为真值, 要求高一级标准仪表的误差与低一级标准仪表或普通仪表的误差相比为 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/10$); ③理论真值, 即把同一量值自身之差为零自身之比为 1 的值作为真值, 如三角形内角和为 180° 。

工程上常用相对真值代替真值, 因此式(1-3)可改写为

$$\Delta = y - y_0 \quad (1-4)$$

式中, y 是低一级标准仪表或普通仪表的测量值; y_0 是相对真值, 即高一级标准仪表的测量值。

绝对误差的大小表示了测量值偏离真值的程度。注意: 绝对误差是有正、负号并有量纲的, 不要与误差的绝对值相混淆。

(2) 相对误差 对于同等大小的被测量, 测量结果的绝对误差越小, 说明其测量准确度越高。但是对于不同大小的被测量, 却不能只凭绝对误差来评定其测量准确度。此时, 应采用相对误差来表明测量准确度的高低。相对误差为绝对误差与被测量的真值或测量值之比, 常用百分数表示, 它表示了绝对误差占真值或测量值的百分比, 即

$$E_Y = \frac{\Delta}{Y_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

$$E_y = \frac{\Delta}{y} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, E_Y 是实际相对误差; E_y 是标称相对误差(或示值相对误差)。

(3) 引用误差 引用误差是绝对误差与仪表量程之比的百分数, 可表示为

$$\delta = \frac{\Delta}{R_S} \times 100\% \text{ FS} \quad (1-7)$$

式中, δ 是引用误差; R_S 是仪表量程, 为仪表的测量上限 y_{\max} 与测量下限 y_{\min} 之差, 即 $R_S = y_{\max} - y_{\min}$; FS 是满量程符号。

引用误差的大小表示了仪表在其量程范围内的测量误差大小。

在仪表的量程范围内, 各示值的绝对误差会有差别。于是, 把仪表量程范围内出现的最大绝对误差 Δ_{\max} 与该仪表量程 R_S 之比的百分数称为最大引用误差 δ_{\max} , 即

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{R_S} \times 100\% \text{ FS} \quad (1-8)$$

仪表在出厂检验时, 最大引用误差 δ_{\max} 不得超过其允许值。

2. 测量误差的分类

测量误差除了按表示方法不同分为绝对误差、相对误差和引用误差外, 还可以按其他方法进行分类。如按仪表工作条件不同可分为基本误差和附加误差; 按测量误差的成因和特性可分为系统误差、随机误差和粗大误差; 等等。

(1) 基本误差和附加误差 基本误差是指仪表在规定的工作条件(或参比条件)下工作, 其本身所具有的误差, 它是仪表固有的误差, 通常用引用误差表示, 其最大值不得超过仪表的允许误差。附加误差是指仪表在偏离规定工作条件下工作时所增加的误差, 它是由于影响因素(如温度、湿度、振动、电源电压或频率等)的存在和变化而引起的。如果基本误差和附加误差同时存在, 则仪表的实际误差应包括基本误差与附加误差两部分。

(2) 系统误差、随机误差和粗大误差

1) 系统误差。系统误差是指在相同测量条件下对同一被测量进行多次重复测量时, 测量误差是固定的或按一定规律变化的误差。系统误差 e 随测量过程变化的特征如图 1-1 所示。引起系统误差的原因有仪表结构上存在问题, 仪表本身材料、零部件、工艺上存在的缺陷, 测量过程中仪表使用方法不正确, 观测者有不良的读数习惯、测量条件不符合要求等等。

系统误差包括恒定系统误差和变值系统误差。在图 1-1 中, 直线 a 为恒定系统误差, 在整个测量过程中这类误差的大小和符号固定不变。如仪表零点未校准导致使用时所产生的零点误差, 观测者读数时的角度不正确(对指针式仪表而言)所引起的误差均属恒定系统误差。直线 b 、曲线 c 、 d 、 e 为变值系统误差, 这类误差在测量过程中按照一定的规律变化。根据变化的特点又分为线性变化系统误差(直线 b)、非线性变化系统误差(曲线 c)、周期性

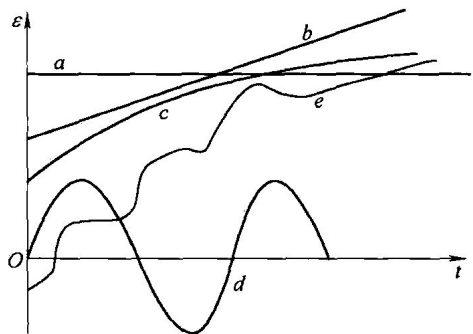


图 1-1 系统误差特征曲线

变化系统误差(曲线 d)、复杂规律变化系统误差(曲线 e)等。如仪表测量值随温度变化所产生的误差; 仪表元器件老化、磨损等引起的误差; 测量现场电磁场干扰引起的误差均属变值系统误差。

由于实际工作中重复测量只能进行有限次, 因此系统误差也只能是一个近似的估计值。

2) 随机误差。随机误差是指在相同测量条件下对同一被测量进行多次重复测量时, 每次测量误差以不可预知的方式变化的误差。这类误差其数值大小和性质都不固定, 以随机方式出现, 就其个体而言是没有规律的, 但就总体而言服从一定的统计规律, 如正态分布、均匀分布、泊松分布等, 其中大多数服从正态分布。正态分布的数学表达式为

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-9)$$

式中, $f(\Delta)$ 是随机误差出现的次数; Δ 是随机误差, $\Delta = y - Y_0$; σ 是标准误差, 也称方均根误差。

式(1-9)中的标准误差 σ 是指对被测量进行无限多次测量时, 所得随机误差的方均根值, 即

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (1-10)$$

式中, n 是测量次数。

实际测量中, 测量次数为有限次, 且被测量的真值 Y_0 无法知道, 故标准误差 σ 的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1-11)$$

式中, y_i 是第 i 次测量值; \bar{y} 是 n 次测量值的算术平均值。

随机误差的正态分布曲线如图 1-2 所示, 从中可得出随机误差分布的几个特征。

① 对称性: 大小相等、符号相反的随机误差出现的概率相同。

② 单峰性: 绝对值小的误差出现的概率大, 绝对值大的误差出现的概率小, 零误差出现的概率比任何其他数值的误差出现的概率都大。

③ 有界性: 绝对值很大的误差出现的概率接近于零, 即误差的绝对值有一定的实际界限。

④ 抵偿性: 在相同测量条件下对同一被测量进行测量, 误差的算术平均值随测量次数的增加而趋于零, 即正、负误差是相互抵消的。

对式(1-9)在某一区间 $[-a, +a]$ 内进行积分(a 常以 σ 的倍数表示, 即 $a = C\sigma$), 可得随机误差在该区间(称“置信区间”)内出现的概率, 该概率称为“置信概率”, 常用百分数表示。当 C 为 1(C 称为置信系数)时, 随机误差在置信区间 $[-\sigma, +\sigma]$ 内出现的置信概率为 68.27%; 当 C 为 2 和 3 时, 随机误差在置信区间 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 和 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 内出现的置信概率分别为 95.45% 和 99.73%。由此可见, 随机误差在 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 以外出现的概率非常非常小, 因此通常认为 3σ 是正态分布随机误差的极限值。

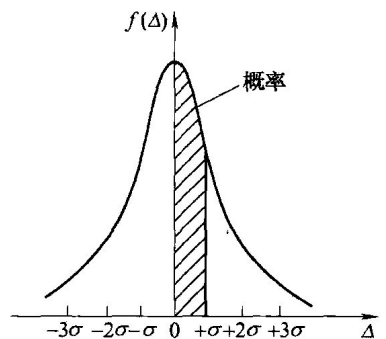


图 1-2 随机误差的正态分布曲线

随机误差是由于某些人们尚未认识的原因,目前尚无法控制的随机因素(如电子热噪声、摩擦、间隙等),或某些偶然因素所引起的。

3) 粗大误差。粗大误差是指明显歪曲了测量结果的误差。这类误差是由于测量者在测量过程中疏忽大意、操作不当、测量方案错误以及测量失控等引起的。含有粗大误差的测量值称为异常值或坏值,应予以剔除。

1.1.3 测量误差的消除及减小方法

为了提高检测系统及仪表的测量准确性,必须设法消除或减小测量误差,下面将消除或减小系统误差、随机误差和粗大误差的常用方法作一简单介绍。

1. 系统误差的消除及减小

测量过程中存在系统误差时,可从以下几个方面设法消除或减小其影响。

(1) 消除产生系统误差的根源 系统误差产生的根源主要来自于测量设备、测量方法、测量条件和测量人员四个环节,因此可从误差产生的根源上进行分析研究,找出原因并设法消除。如选择合适的测量方法和测量设备;保证正常的测量条件;正确安装和使用检测仪表;采取必要的屏蔽防护措施减小干扰等。

(2) 对测量结果进行修正 对仪表进行定期的校准或检定,确定其示值与标准仪表测量值的差异,将该差异作为修正值修正测量结果。

需要指出,修正值不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、公式或数表。在某些检测仪表中,已将修正值预先编制成相应的软件存入存储器中,以实现测量结果中的某些系统误差进行自动修正。

(3) 采用特殊测量方法 在测量过程中采用一些特殊的测量方法,可使系统误差抵消而不带入到测量结果中去。对恒定系统误差常用的方法有替代法、交换法、抵消法等;对变值系统误差常用的方法有对称观测法、半周期偶数观测法等。

1) 替代法。对被测量进行测量后,在测量条件不变的情况下,用标准量(可调节的)代替进行同样测量,并使测量仪表与测量被测量时状态一致,则标准量即为被测量。

2) 交换法。将测量中的某些条件相互交换,使产生系统误差的原因对测量结果起相反的作用,然后取交换前后测量结果的平均值,从而抵消系统误差。

3) 抵消法。除被测量外,让产生系统误差的影响因素同时作用在检测元件的两侧,这样影响因素的作用就可以相互抵消。

4) 对称观测法。将测量以某时刻为中心对称地安排,取各对称点两次测量值的算术平均值作为测量结果,这种方法可有效地消除随时间变化的线性系统误差。

5) 半周期偶数观测法。对周期性变化的系统误差,在测得一个数据后,相隔半个周期再测量一次,取两次测量值的平均值作为测量结果,即可消除周期性系统误差。

6) 对于按除线性和周期性以外其他规律变化的系统误差,可求出其变化函数关系,再进行修正。

2. 随机误差的消除或减小

由随机误差的对称性和抵偿性可知,当无限次增加测量次数时,测量误差的算术平均值趋于零。因此,只要测量次数无限多,其测量结果的算术平均值就不存在随机误差。虽然实际测量时不可能无限次地增加测量次数,但尽可能地多测几次并以其多次测量结果的算术平

均值作为最终测量值(智能仪表因内置微处理器,实现多次测量和自动求取平均值十分方便),可达到减小或消除随机误差的目的。

此外,改进仪表结构、提高仪表零部件的工艺质量、采取必要的防护措施,可减少因摩擦、间隙、噪声等引起的随机误差。

3. 粗大误差的消除

当在测量数据中发现某个测量值可能是异常值时,要认真分析、正确判断该数据是否存在粗大误差,若存在则将其剔除。

判断粗大误差可从定性分析和定量判断两个方面考虑。

1) 定性分析是对测量设备、测量条件、测量步骤等进行分析,看是否有测量设备本身瞬时损坏或测量条件存在突变情况;测量操作是否有差错或存在其他可能引发粗大误差的因素。也可再次重复进行测量,将两组测量数据进行比较,以分析判断是否存在粗大误差。

2) 定量判断是应用工程中常用的粗大误差判断准则,对测量数据中异常值的“异常程度”进行定量计算,以确定其是否应该剔除。常用的判断准则有拉依达准则和格鲁布斯准则。

拉依达准则以 $[\bar{y} - 3\sigma, \bar{y} + 3\sigma]$ 为置信区间,把位于置信区间以外的测量值当做异常值。也就是说,如果被测量的测量数据列中,某一测得值 y_i 的残差 $(y_i - \bar{y})$ 的绝对值满足式(1-12),则认为 y_i 是含有粗大误差的异常值,应将其剔除。

$$|y_i - \bar{y}| > 3\sigma \quad (1-12)$$

格鲁布斯准则认为,若被测量的测量数据列中,某一测得值 y_i 的残差 $(y_i - \bar{y})$ 的绝对值满足式(1-13),则认为 y_i 是含有粗大误差的异常值,应将其剔除。

$$|y_i - \bar{y}| > K_c(n, \alpha)\sigma \quad (1-13)$$

式中, $K_c(n, \alpha)$ 是和测量次数 n 、超差概率 α (指置信区间以外测量值的概率)相关的数值,可通过相关数值表查得。

需要说明,拉依达准则虽然比较简便,但当测量次数较少时不适用,它只适用于测量次数大于等于25的情况。而格鲁布斯准则在理论上比较严谨,是较好的判别粗大误差的准则,在实际工程中应用较广泛。

1.2 检测仪表基本特性及性能指标

检测仪表的基本特性是指在测量过程中仪表与其输入、输出的关系,根据被测量的不同情况可分为静态特性和动态特性。

1.2.1 静态特性及性能指标

静态特性是指在静态测量(即测量过程中被测量不随时间变化或随时间变化很缓慢的测量)中仪表的基本特性。描述检测仪表静态特性的性能指标主要有准确度、灵敏度、分辨力、线性度、迟滞和稳定性等。

1. 准确度

准确度是指测量结果与被测量真值之间的一致程度。习惯上又称准确度为精确度或精度。准确度高意味着系统误差和随机误差都很小。

按准确度高低可将仪表分成不同的准确度等级。准确度等级决定了仪表在参比条件下的基本误差限,也就是仪表基本误差的最大允许值(即允许误差)。准确度等级一般按约定以数字或符号形式表示。

在以引用误差形式给出仪表允许误差的情况下,准确度等级用引用误差去掉“±”号和“%”号后的数值表示级别。这时,通过级别的数值可直接得知仪表的允许误差,如准确度等级为0.5的仪表其允许误差为±0.5%。

必须说明,仪表的准确度等级应符合国家标准规定所划分的等级。如国家标准 GB/T 13283—2008 规定了工业仪表的准确度等级,其中常见的准确度等级为:0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 5.0。

在以绝对误差形式给出仪表允许误差的情况下,准确度等级用拉丁字母 A、B、C、… , 罗马数字 I、II、…等符号表示级别。如热电偶、热电阻准确度等级就采用该形式表示。

例 某压力表的测量范围为0~6MPa,已知其最大绝对误差为0.1MPa,求该压力表的准确度等级。

解: 根据测量范围和最大绝对误差,由式(1-8)可求得压力表的 δ_{\max} 为

$$\delta_{\max} = \frac{0.1}{6-0} \times 100\% \approx 1.67\%$$

由于最大引用误差大于1.5%,小于2.5%,按照仪表准确度等级划分,该压力表的准确度等级为2.5级。

2. 灵敏度

灵敏度是指静态测量时,仪表输出变化量与输入变化量之比,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-14)$$

式中, S 是仪表的灵敏度; Δy 是仪表输出变化量; Δx 是输入变化量,即被测量的变化量。

灵敏度大小表征了仪表对被测量变化的灵敏程度,一般用于模拟式仪表。对于指针式仪表,其输出变化量为指针的位移。

显然,具有线性特性的仪表,在仪表测量范围内灵敏度均相同。对于非线性特性的仪表,其灵敏度将随被测量的大小而变。

3. 分辨力

分辨力是指能引起仪表输出量发生变化时输入量的最小变化量。它说明了仪表分辨输入信号最小变化的能力。对于模拟指针式仪表,其分辨力一般规定为最小刻度分格值的一半。对于数字式仪表,其分辨力是指最后一位有效数字变化1时所代表的输入信号变化量。

数字式仪表往往用最高分辨力来表示其灵敏度的大小,最高分辨力相应于仪表最低量程时的分辨力。

4. 线性度

线性度是指仪表输入、输出之间的实际关系偏离线性的程度,如图1-3所示。线性度又称非线性误差,通常用实际测得的输入、输出特性曲线与理论直线之间的最大偏差与仪表量程之比的百分数来表示,即

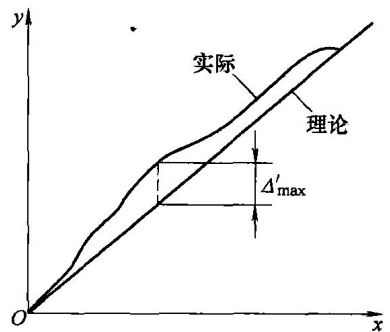


图 1-3 仪表的线性度