



高职高专“十一五”规划教材

GUOCHENG JIANCE YIBIAO

过程检测仪表

第二版

王永红 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

过程检测仪表

第二版

王永红 主 编
张 泉 李留格 副主编
林锦国 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书针对工业过程检测仪表与检测系统,进行了比较系统的叙述。在仪表的种类上,以目前常用的主流仪表为主。

全书共分八章,第一章,检测技术基础完整介绍了测量及测量误差的基本概念,过程检测系统的基础知识。第二章到第六章,详细讲述了压力、物位、流量、温度、成分等工业过程检测仪表的工作原理、结构性能、基本技术参数及仪表的安装使用和基本维护。在第七章,通过对过程检测系统的讲述,明确工业过程检测参数的显示方式和显示装置的结构、使用特点等,并对工业过程检测系统应用中的抗干扰问题进行了分析。通过第八章的检测仪表与系统的实践,学习检测仪表的调校,检测系统的构建与调试。

本书每章均有习题与思考题,书后附有相应的实训实验内容,以方便教学实践。

本书可作为高职高专及中等专业学校的工业仪表及自动化专业教材,也可供从事工业仪表及自动化工作的工程技术人员和仪表工参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程检测仪表/王永红主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2010.2
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-07575-8

I. 过… II. 王… III. 自动化仪表-高等学校:技术学院-教材 IV. TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 004467 号

责任编辑: 张建茹
责任校对: 吴 静

装帧设计: 周 遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 519 千字 2010 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 33.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

自动化检测技术和仪表系统，是实现现代化生产自动控制的基础。随着先进检测传感技术、通讯网络技术、计算机信息处理技术、多媒体显示技术等不断涌现，为传统的自动控制系统带来了新的发展。

本书是在第一版的基础上，根据检测技术和仪表的应用发展的需要，对部分内容进行了修改和补充、调整。在保持原书风格的基础上，突出了自动检测系统的概念，使自动化检测技术和仪表的应用更加完整。

本书第二版共分八章，第一章，检测技术基础完整介绍了测量及测量误差的基本概念，过程检测系统的基础知识。第二章到第六章，详细讲述了压力、物位、流量、温度、成分等工业过程检测仪表的工作原理、结构性能、基本技术参数及仪表的安装使用和基本维护。在第七章，通过对过程检测系统的讲述，明确工业过程检测参数的显示方式和显示装置的结构、使用特点等，并对工业过程检测系统应用中的抗干扰问题进行了分析。通过第八章的检测仪表与系统的实践，学习检测仪表的调校，检测系统的构建与调试。

本书第二版每章均有习题与思考题，以方便教学实践。

本书由王永红任主编，张泉、李留格任副主编。由王永红进行全书的统稿与修改，并编写绪论，第一章到第四章，第六章第一、六节，附录一、二、五；贾清水编写第五章，附录三、四；张泉编写第七章；李留格编写第二章第三节部分、第三章第四节；郝富春编写第六章第二、三、四、五、七节；朱玉奇编写第八章。全书由林锦国主审。

本书在第二版的编写修改中，得到了编审人员所在单位的支持，对此表示衷心的感谢。

本书第二版将更好地为高职高专及中等职业学校的自动化专业学生提供学习的需求，为教师提供教学参考的依据，为相关自动化领域的工程技术人员提供工作的帮助。

编者

2009年11月

第一版前言

本教材从培养生产第一线的工程技术应用型专门人才的前提出发，以反映典型性、针对性、实用性的原则，按仪表功能组织教材，介绍目前国内常用的过程检测仪表，同时兼顾国外最新技术动态。

本书系统地阐述了过程检测仪表的工作原理、结构性能、基本技术参数及产品的安装使用和维护，对在检测过程中出现的误差问题也做了相应的分析说明。仪表调校的部分，已编入配套教材《工业仪表及自动化实验》。在对教材深广度处理上，对部分公式的繁琐推导过程和电子线路工作过程的分析进行了简化，删除了陈旧内容，重点增加了近几年发展起来的新型仪表。本教材使用了我国近年来相继颁布的一些新的国家标准及行业设计标准（如国家标准 GB/T 2624—93 流量测量装置用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量；HG/T 21581—95 自控安装图册）。书中仪表均执行国家法定计量单位。

本教材内容力求深入浅出，着眼于为实际应用服务，叙述简明易懂，为便于学习，每章末附有本章小结及丰富的习题与思考题，书后列有相关图表，以帮助读者学习时练习与参考。

本书由王永红主编并编写绪论，第一章，第二章第三节，第三章，第四章，第七章第一、六节，附录一、二、五；贾清水参编第五章，第六章，附录三、四；郝富春参编第二章第一、二、四节，第七章第二、三、四、五、七节。全书由吕廉克主审，乔志平、张丽文、夏洪如、陈永刚、慕东周等教师参加了审稿。

在本书的编、审过程中，得到了尹廷金同志的热情指导和帮助，同时参加编审人员所在学校有关领导也给予了大力支持并提供了很多方便条件，对此谨表衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中缺点、错误难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

1998年3月

目 录

绪论	1	第四节 压力仪表的使用	35
一、过程检测仪表在工业生产过程中 的作用	1	一、压力表的选用	35
二、过程检测的内容	2	二、压力表的校验	37
三、检测仪表的发展	2	三、压力表的安装	37
四、本课程的特点及学习方法	2	本章小结	38
第一章 检测技术基础	3	习题与思考题	39
第一节 测量的基本概念	3	第三章 物位检测及仪表	41
一、测量的定义	3	第一节 概述	41
二、测量方法及分类	3	一、物位检测的内容	41
第二节 测量误差	5	二、物位检测的特点	41
一、误差的概念	5	三、物位检测的方法及仪表的 分类	41
二、误差的分类	5	第二节 静压式液位仪表	42
三、误差的分析与数据处理	7	一、工作原理	42
第三节 检测仪表的基础知识	9	二、吹气式液位测量装置	42
一、检测仪表的组成	9	三、差压式液位计	43
二、检测仪表的分类	10	第三节 浮力式液位仪表	48
三、检测仪表的基本技术指标	11	一、恒浮力式液位计	48
四、仪表精度与测量精度	14	二、浮筒式液位变送器	50
本章小结	14	第四节 其他物位仪表	54
习题与思考题	15	一、电极式水位计	54
第二章 压力检测及仪表	17	二、电容式液位计	54
第一节 概述	17	三、核辐射式液位计	59
一、压力的基本概念	17	四、雷达式液位计	60
二、压力量值的传递	18	五、超声波式液位计	63
三、压力检测的基本原理	19	第五节 物位仪表的选用	65
第二节 弹性式压力表	19	本章小结	66
一、弹簧管式压力表	20	习题与思考题	67
二、电接点压力表	21	第四章 流量检测及仪表	68
第三节 电测式压力仪表	22	第一节 概述	68
一、应变式压力传感器	22	一、流量的概念	68
二、霍尔式压力传感器	25	二、流量检测仪表的分类	69
三、电容式差压（压力）变送器	27	第二节 差压式流量计	70
四、扩散硅式压力变送器	30	一、流量检测原理	70
五、膜盒式压力（差压）变送器	31	二、流量方程式	71
六、智能式差压变送器	31	三、标准节流装置	73

四、差压的检测	76	本章小结	113
五、差压式流量计的温度、压力 补偿	78	习题与思考题	115
六、差压式流量计的安装	79	第五章 温度检测及仪表	117
第三节 转子流量计	83	第一节 概述	117
一、工作原理	83	一、温度的概念	117
二、流量方程式	84	二、温标及温度标准的传递	117
三、转子流量计的刻度校正与改 量程	85	三、温度的检测方法及分类	119
四、转子流量计的安装与使用	87	第二节 膨胀式温度计	120
第四节 微动流量计	88	一、液体膨胀式温度计	120
一、构成及组合方式	88	二、固体膨胀式温度计	121
二、工作原理	90	三、压力式温度计	122
三、主要性能	92	第三节 热电偶温度传感器	123
四、安装和调整	93	一、热电偶测温原理	124
第五节 容积式流量计	93	二、热电极材料及常用热电偶	127
一、检测原理	94	三、热电偶的结构形式	130
二、容积式流量计的种类及工作 过程	94	四、热电偶冷端温度补偿	134
三、容积式流量计的特性及使用 要求	95	五、一体化热电偶温度变送器	138
第六节 电磁流量计	97	六、热电偶温度传感器的应用	139
一、工作原理	97	第四节 热电阻温度传感器	143
二、电磁流量计的分类	97	一、热电阻测温原理	144
三、电磁流量计的选择	99	二、热电阻材料及常用热电阻	145
四、电磁流量计的特点和应注意的 问题	99	三、热电阻温度传感器的结构	146
第七节 漩涡流量计	100	四、一体化热电阻温度传感器	147
一、检测原理及组成	101	五、热电阻温度传感器的应用	147
二、频率的检测	102	本章小结	148
三、漩涡流量计的应用	104	习题与思考题	149
第八节 涡轮流量计	105	第六章 自动成分分析仪表	151
一、涡轮流量变送器的结构及工作 过程	106	第一节 概述	151
二、涡轮流量计的特点及使用注意 事项	108	一、作用及特点	151
第九节 靶式流量计	108	二、分类	152
一、工作原理	109	三、组成	152
二、靶式流量变送器的选型	110	四、主要性能指标	153
三、应用	112	五、发展趋势	153
第十节 流量仪表的选择与标定	112	第二节 热导式气体分析仪	154
一、流量仪表的选择	112	一、基本原理	154
二、流量仪表的标定	112	二、热导式气体分析仪的检测器	155
		三、热导式气体分析仪的测量 电路	158
		四、RD型热导式气体分析仪	159
		第三节 氧化锆氧分析仪	162
		一、氧化锆固体电解质导电机理	163
		二、氧化锆氧分析仪的工作 原理	163

三、氧化锆氧分析仪的构成·····	165	本章小结·····	240
四、DH-6 型氧化锆氧分析仪·····	167	习题与思考题·····	241
第四节 红外线气体分析仪·····	169	第八章 检测仪表与系统的实践 ·····	243
一、红外线的基本知识·····	169	第一节 检测仪表的认识与调校·····	243
二、红外线气体分析仪的结构形式 及工作原理·····	171	实践一 弹簧管压力表的识别及 调校·····	243
三、红外线气体分析仪的主要 部件·····	174	实践二 差压变送器的认识与 调校·····	245
四、QGS-08 型红外线分析器·····	177	实践三 浮筒式液位变送器的 拆装·····	247
第五节 工业气相色谱仪·····	179	实践四 温度变送器的认识与 调校·····	248
一、气相色谱分析原理·····	181	实践五 数字式显示仪表的认识 与调校·····	251
二、色谱柱·····	184	实践六 无纸记录仪的认识与 调校·····	253
三、柱切技术·····	185	实践七 气相色谱分析仪的认识 与调校·····	255
四、检测器·····	187	第二节 检测系统的构建与调试·····	256
五、取样阀·····	189	实践八 压力检测系统的构建与 调试·····	256
六、SQG 系列工业气相色谱仪·····	190	实践九 液位/流量检测系统的 构建与调试·····	258
第六节 工业 pH 计·····	196	实践十 温度检测系统的构建 与调试·····	260
一、pH 计的测量原理·····	196	附录 ·····	263
二、电极的结构·····	199	附录一 压力单位换算表·····	263
三、PHG-21B 型工业 pH 计·····	203	附录二 国标 GB/T 2624—93 流量 测量节流装置常用数据表及 计算示例 (附录 A~附录 G)·····	263
第七节 工业电导仪·····	206	附录三 常用热电偶、热电阻分 度表·····	281
一、工业电导仪的测量原理·····	206	附录四 自动成分分析仪表预处理系统 示例·····	299
二、电导检测器·····	209	参考文献 ·····	302
三、DDD-32B 型工业电导仪·····	211		
本章小结·····	215		
习题与思考题·····	216		
第七章 自动检测系统 ·····	217		
第一节 检测信号的显示·····	217		
一、模拟式显示·····	218		
二、数字式显示·····	220		
三、图像显示·····	223		
第二节 检测信号的处理·····	229		
一、检测信号转换与接口技术·····	229		
二、信号报警与联锁系统·····	233		
第三节 检测系统的抗干扰·····	236		
一、干扰来源·····	236		
二、抗干扰措施·····	238		

绪 论

一、过程检测仪表在工业生产过程中的作用

检测是指利用各种物理和化学效应，将物质世界的有关信息通过测量的方法赋予定性或定量结果的过程。在生产过程中，完成工艺参数检测处理的仪表称为过程检测仪表。检测是生产过程自动化的一个重要组成部分。科学技术的不断进步推动了自动化技术的发展。

检测控制技术、计算机技术、通讯技术、图形显示技术是反应信息社会的四项要素，由检测控制技术构成的自动化系统是现代化的重要标志之一。自动化是用各种技术工具与方法完成检测、分析、判断和控制工作的。在工业生产方面，当前生产设备不断向大型化、高效化方向发展，大规模综合型自动化系统不断建立，工业生产过程和企业管理调度一体化的要求，更促进了自动化技术不断发展。

在自动化系统中，所用的检测仪表是自动控制系统的“感觉器官”。只有感知生产过程的状态和工艺参数，才能由控制仪表进行自动控制。

下面以两个实例说明检测在自动控制系统中的作用和地位。

如图 0-1 所示液位控制系统，该系统的作用是保证锅炉汽包液位为定值，满足生产用蒸汽量的要求。通过差压式液位仪表将液位的高低检测出来，液位信号作为系统主被控变量送入调节器（控制器），调节器根据事先确定好的方式控制执行器，调节给水流量，达到稳定液位的目的。同时为克服负荷变化时产生的“虚假液位”及给水系统出现的扰动，又引入了蒸汽流量和给水流量两个辅助被控变量，构成三冲量控制系统。这里，过程检测仪表代替了人工观察，精确及时地将主变量液位信号和辅助变量蒸汽流量、给水流量检测出来，并转换成标准电信号，通过运算器及控制器的处理控制，达到稳定汽包液位的目的。使整个装置正常工作，系统安全运转。

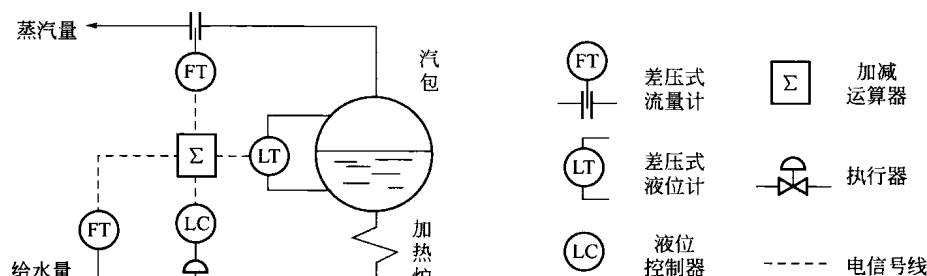


图 0-1 锅炉汽包水位三冲量控制系统

如图 0-2 所示的计算机控制系统。在该系统中，需要解决大量工艺参数的检测和数字量的转换问题。利用计算机的强大计算功能进行巡回检测和数据处理，使之具有很强的实时性和更强功能。

自动化系统分为过程变量的自动检测和过程变量的启动控制两种系统。若在系统中，对变量没有控制要求，则该系统为自动检测系统，用于对生产设备和工艺过程进行自动监视。

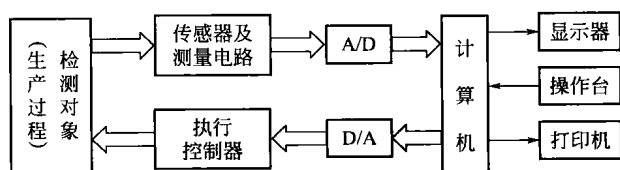


图 0-2 计算机控制系统

从上述可知，过程检测仪表是自动化系统中不可缺少的组成部分；生产过程变量和自动检测是实现自动控制的前提条件；自动控制系统的控制精度在很大程度上取决于检测系统的精度，通过检测获取生产过程中的各种信息，方可控制和研究生产过程。

二、过程检测的内容

工业过程检测涉及的内容广泛，一般分为：热工量（温度、压力、流量、物位等），机械量（重量、尺寸、力、速度、加速度等），物位和成分量（介质的成分浓度、密度、黏度、湿度、酸度等），电工量（电压、电流、功率、电阻等）。本书主要介绍在工业生产过程中的热工量和成分量的测量方法及仪表。

三、检测仪表的发展

随着生产的发展，不断地提出新的检测任务，而科学技术的发展，特别是新材料、新技术的出现，以及微处理机的广泛应用，极大地加快了检测仪表的发展，在提高检测系统的测量精度、扩大测量范围、延长使用寿命、提高可靠性的同时，使检测技术向智能化的方向发展，检测仪表的应用领域得到拓展。

四、本课程的特点及学习方法

过程检测仪表是工业仪表及自动化专业的一门重要的专业课。涉及到多门课程的内容，物理概念是讨论各种检测变换的基础，熟悉和掌握相应的物理现象，分析有关物理效应是对检测仪表工作原理和结构进行讨论的前提。电工电子及计算机技术，在完成信号转换、数据处理和显示的基本方法上起着重要的作用。

本课程是与生产过程密切相关的实践性较强的课程，强调工程技术和实践技能的训练，只有理论与实际的结合才能学好本课程。

第一章 检测技术基础

为了完成工业生产中提出的检测任务，并且尽可能地获得被测变量的真实值，需要对检测方法、检测系统的特性、测量误差及测量数据处理等方面的问题及方法进行学习和讨论。只有了解和掌握了这些基本技术基础，才能有效地实施测量。

第一节 测量的基本概念

一、测量的定义

测量是人们用以获得数据信息的过程，是定量观察、分析、研究事物发展过程时必需的重要方式。因此，测量就是借助于专用技术工具将研究对象的被测变量与同性质的标准量进行比较并确定出测量结果准确程度的过程，该过程的数学描述为

$$K \approx \frac{X}{X_0}$$

式中 X ——被测量；

X_0 ——标准量（基准单位）；

K ——被测量所包含的基准单位数。

显然，基准单位确定后，被测变量 X 在数值上约等于对比时包含的基准单位数 K 。其结果可表示为

$$X = K X_0$$

例如：用精度为 0.5%，量程为 0~500mm 的直尺以 mm 为基准单位测量容器中液位的高度，得到 $X = 350\text{mm}$ ，则表示液位 X 的高度约为 350mm，相应的误差不超过 2.5mm。

以上表明，测量过程包含三个含义：确定基准单位；将被测变量与基准单位比较；估计测量结果的误差。测量仪表就是比较过程中使用的专门技术工具。

实际上，大多数被测对象中的被测变量是无法直接借助于通常的测量仪表进行比较的，这时，必须将被测变量进行变换，将其转换成有确定函数关系，又可以比较的另一个物理量，这就是信号的检测。如：温度的测量，利用水银热胀冷缩的原理制成的水银温度计，将温度的变化转换为水银柱高度的变化，同时将温度基准单位用刻度表示出来，这样水银柱高度对应的刻度就是包含基准单位的个数，即测量出来当时的温度。因此，检测是一个更广泛的测量概念，它包括信息转换、确定基准单位和对比三个基本内容。

二、测量方法及分类

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。按被测变量变化速度分为静态测量和动态测量；按测量敏感元件是否与被测介质接触，可分为接触式测量和非接触式测量；按比较方式分直接测量和间接测量；按测量原理分偏差法、零位法、微差法等。

（一）按比较方式分

1. 直接测量

直接测量是指用事先标定好的测量仪表对某被测变量直接进行比较，从而得到测量结果的过程。如弹簧秤、游标卡尺等。

2. 间接测量

间接测量是指由多个仪表（或称环节）所组成的一个测量系统。它包含了被测变量的测量、变换、传输、显示、记录和数据处理等过程。这种测量方法在工程中应用广泛。如用电子皮带秤测量煤的输送量，可通过荷重传感器测出检测点处有效称量段 L_0 上的煤的重量 W ，通过测速传感器测出检测点处煤的传送速度 u ，经信息处理单元对 W/L_0 及 u 进行合成处理后送入显示单元显示瞬时输送量，送入比例积算器显示输送总量。

一般来说，间接测量比直接测量要复杂一些。但随着计算机的应用，仪表功能加强，间接测量方法的应用也正在扩大，测量过程中的数据处理完全可以由计算机快速而准确地完成，使间接测量方法变得比较直观而简单。

(二) 按测量原理分

1. 偏差法

用测量仪表的指针相对于刻度初始点的位移（偏差）来直接表示被测量的大小。指针式仪表是最为常用的一种类型。如图 1-1 所示弹簧秤。

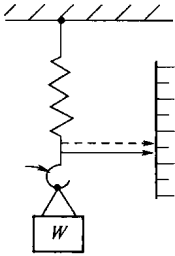


图 1-1 弹簧秤

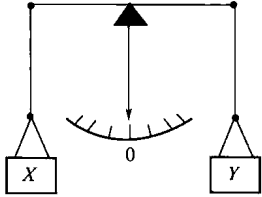


图 1-2 天平

在用此种方法测量的仪表中，分度是预先用标准仪器标定的，如弹簧秤用砝码标定。这种方法的优点是直观、简便，相应的仪表结构比较简单；缺点是精度较低、量程窄。

2. 零位法

将被测量与标准量进行比较，二者的差值为零时，标准量的读数就是被测量的大小。这

就要有一灵敏度很高的指零机构。如天平称重及电位差计测量电势就是用这个原理。如图 1-2 所示。

零位法具有很高的测量精度，但响应慢，测量时间长，不能测量快速变化的信号。

3. 微差法

是将偏差法和零位法组合起来的一种测量方法。测量过程中将被测变量的大部分用标准信号去平衡，而剩余部分采用偏差法测量。

微差法的特点是：准确度高，不需要微进程的可变标准量，测量速度快，指零机构用一个有刻度可指示偏差量的指示机构所代替。

利用不平衡电桥测量电阻的变化量，是检测仪表中使用最多的微差法测量的典型例子。桥路中被测电阻的基本部分（静态电阻）使电桥处于平衡，而变化的电阻将使电桥失去平衡产生相应的输出电压。这样，桥路输出电压的变化，只反应电阻的变化，被测电阻将是基本部分及输出电压决定的电阻变化部分之和。

这种方法可以使测量精度大大提高。这是因为电阻的主要部分采用了零位法测量，具有很高的测量精度，尽管偏差法测量剩余部分时造成了一定的误差，但这部分误差相对于整个被测量而言，将是非常微小的。

例如， $R_x = 101\Omega$ ，基本部分是 100Ω ，变化部分是 1Ω ，如果变化部分用偏差法测量的误差是 1% ，则为 $\pm 0.01\Omega$ ，相对于 101Ω 的整个电阻而言，相对误差约为 0.01% ，如果再考虑基本部分用零位法测量时的相对误差是 0.01% ，总的相对误差将为 0.02% 。可见微差法测量过程比绝对用零位法测量时简便、迅速（因零位法测量时需要用标准量反复地与被量相平衡），所以它在工程测量中得到大量应用。

第二节 测量误差

一、误差的概念

在检测过程中，由于环境中存在着各种各样的干扰因素，以及所选用的仪表精度有限，实验手段不够完善，检测技术水平的限制等原因，必然使测量值和真实值之间存在着一定的差值，这个差值称为测量误差。表示为

$$\Delta = X - T$$

式中 X ——测量值，即被测变量的仪表示值；

T ——真实值，在一定条件下，被测变量实际应有的数值。

真实值是一个理想的概念，因为任何可以得到的数据都是通过测量得到的，它受到测量条件、人员素质、测量方法和测量仪表的影响。

一个测量结果，只有当知道它的测量误差的大小及误差的范围时，这种结果才有意义，因此，必须确定真实值。在实际应用中，常把以下几种情况定为真实值。

1. 计量学约定的真值

即测量过程中所选定的国际上公认的某些基准量。例如 1982 年国际计量局米定义咨询委员会提出新的米定义为“米等于光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒时间间隔内所经路径的长度”。这个米基准就当作计量长度的约定真值。又如：在一个物理大气压下，水沸腾的温度为 100°C ，即为约定真值。

2. 标准仪器的相对真值

可以用高一级标准仪器的测量值作为低一级仪表测量值的相对真值，在这种情况下真值 T 又称为实际值或标准值。如：对同一个被测量变量，标准压力表示值为 16MPa ，普通压力表示值为 16.01MPa ，则该被测压力表测量值 X 是 16.01MPa ，相对真值（实际值） 16MPa ，用普通压力表测量后产生的误差为

$$\begin{aligned}\Delta &= X - T \\ &= 16.01 - 16 \\ &= 0.01\text{MPa}\end{aligned}$$

3. 理论真值

如：平面三角形的内角之和恒为 180° 。

二、误差的分类

（一）根据误差的表示方式分

1. 绝对误差

被测变量的测量值与实际值之间的差值称为绝对误差。即

$$\Delta = X - T \quad (1-1)$$

绝对误差直接说明了仪表显示值（测量值）偏离实际值的大小。对同一个实际值来说，测量产生的绝对误差小，则直观地说明了测量结果准确。但绝对误差不能作为不同量程的同类仪表和不同类型仪表之间测量质量好坏的比较尺度，且不同量纲的绝对误差无法比较。

为了更准确地描述测量质量的好坏，明确测量结果的可信程度，通常将绝对误差与被测值的大小做一比较，从而引入相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差是被测变量的绝对误差与实际值（或测量值）比较的百分数。

$$\delta = \frac{\Delta}{T} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{X} \times 100\% \quad (1-2)$$

例如，用电阻式温度计测量 200℃ 温度时，产生的绝对误差是 ±0.5℃，由式(1-2)得到，相对误差 δ 是 ±0.25%。用热电偶温度计测量 800℃ 温度时，产生的绝对误差是 ±1℃。由式(1-2)得到相对误差 δ 是 ±0.125%。可见，用绝对误差比较则电阻式温度计测量的准确度高，但用相对误差比较则发现，热电偶温度计相对于测量的实际值而言，测量结果的准确度高。

又如，测量范围为 0~1000℃ 的热电偶温度计，测量各温度点时，产生的绝对误差均为 ±1℃，因此，在测量 200℃ 时，产生的相对误差为 $\delta_1 = \frac{\pm 1}{200} \times 100\% = \pm 0.5\%$ ，在测量 800℃ 时，产生的相对误差为 $\delta_2 = \frac{\pm 1}{800} \times 100\% = \pm 0.125\%$ 。由此可见，在仪表的整个测量范围内，靠近下限值附近，测量的实际值小，产生的相对误差就大，说明测量结果不够准确；而在上限附近，测量的实际值高，产生的相对误差小，测量结果的准确度随之得到提高。

3. 引用误差

绝对误差与仪表量程比值的百分数称为引用误差，表示为

$$\delta_{引} = \frac{\Delta}{X_{max} - X_{min}} \times 100\% = \frac{\Delta}{M} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 X_{max} ——仪表标尺上限刻度值；

X_{min} ——仪表标尺下限刻度值；

M ——仪表的量程。

在实际应用时，通常采用最大引用误差来描述仪表实际测量的质量，并把它定义为确定仪表精度的基准。表达式为

$$\delta_{引M} = \frac{\Delta_M}{M} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 Δ_M ——在测量范围内产生的绝对误差的最大值。

(二) 根据误差的测试条件来分

1. 基本误差

在规定的工作条件下（如温度、湿度、电源电压、频率等一定），仪表本身具有的误差叫基本误差。可用最大引用误差的计算方法来表示基本误差的大小。

2. 附加误差

当仪表的工作条件偏离正常范围时所引起的误差就是附加误差。

(三) 根据误差出现的规律来分

1. 系统误差

在同一条件下多次测量同一值时，误差的大小和符号保持不变或按一定规律变化的误差叫系统误差。误差的大小和符号已确定的系统误差称已定系统误差；误差的大小和符号按一定规律变化的系统误差称未定系统误差，根据它不同的变化规律，有线性变化的、周期变化的以及按复杂规律变化的，等等。

系统误差主要是由于测量装置本身在使用中变形、未调到理想状态或电源电压波动等原因造成的。

系统误差的特征是误差出现的规律和产生原因是可知的。因此可以通过分析、预测加以消除。

$$T = X + C$$

式中 C ——测量结果的修正值或测量系统中的修正环节。

当测量值 X 通过修正后，就可获得具有一定准确度的实际值（真实值）。

系统误差的大小体现了测量结果偏离真实值的程度。

2. 随机误差

在相同条件下多次测量某一值时，误差的大小和符号以不可预定的方式变化，称为随机误差。随机误差是由于许多偶然的因素所引起的综合结果。它既不能用实验方法消去，也不能简单加以修正。单次测量的随机误差没有规律，但在多次测量时，总体上服从统计规律，通过统计学的数学分析，来研究和估计测量结果的准确可信的程度，并通过统计处理，减少影响。

随机误差的大小表明对同一测量值多次重复测量的结果的分散程度。

3. 粗大误差

明显歪曲测量结果的误差，称为粗大误差。产生的原因有测量方法不当、工作条件不符合要求等原因，但更多的是人为的原因。含有粗大误差的测量结果称为坏值或异常值，应予以删除。

（四）动态误差与静态误差

1. 静态误差

仪表进入到一种新的平衡状态后具有的误差。这时仪表的示值是稳定的。一般仪表的精度都由静态误差决定。

2. 动态误差

被测信号变化时，由于仪表惯性而不能准确跟踪信号变化，使示值产生滞后误差，即为动态误差。当信号稳定下来后，动态误差最终会消失。但在动态测试、系统环节多、惯性时间长时，必须充分考虑其影响。

三、误差的分析与数据处理

（一）系统误差分析

系统误差是一种恒定不变或按一定规律变化的误差。它具有确定性、重现性和修正性。通过实验对比，用高精度的测量仪表校验普通仪表时，可以发现已定系统误差；通过对误差大小及符号变化的分析，来判断未定系统误差。但是未定系统误差常常不容易从测量结果中发现并认识它的规律，因此，只能是具体问题具体分析，这在很大程度上取决于测量者的知识水平、经验和技巧。

为使测量结果正确，应尽可能消除系统误差，常采用以下几种方法。

① 消除系统误差产生的根源。合理选择测量方法、测量仪表、保证测量的环境条件。

② 在测量结果中加修正值以消除误差。通过机械调零、应用修正公式（或图表）、在系统中增加自动补偿环节等来消除误差，修正测量结果。

应当明确，系统误差是不可能完全消除的，只能减弱到对测量结果的影响忽略不计的程度。此时可认为已消除了系统误差。

（二）随机误差分析

在测量中，当系统误差被减小到可以忽略的程度，且剔除了粗大误差后，对同一被测量进行多次测量时如果仍然会出现读数不稳定现象，这就说明存在着随机误差。随机误差的统计分布可用正态分布曲线描述，如图 1-3。

图中，横坐标为随机误差，用 $\delta = X - T$ 表示；纵坐标为随机误差出现的概率 $P(\delta)$ 。

对于随机误差 δ 来说，它对测量结果的影响可用均方根误差来表示。

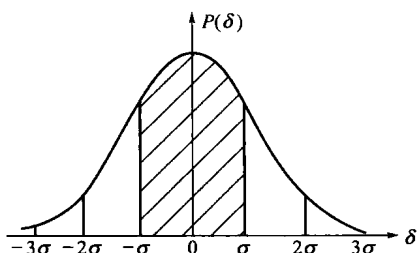


图 1-3 正态分布曲线

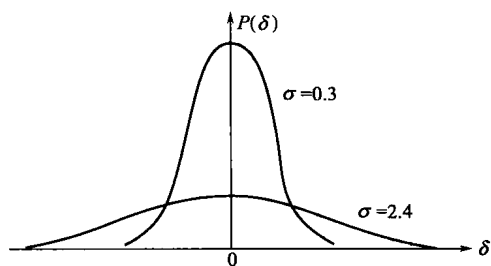


图 1-4 不同 σ 值的正态分布

均方根误差 σ 又称标准误差，由下式计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - T)^2}{n}} \quad (1-5)$$

式中 n ——测量某值的次数（趋于无限）；

δ_i —— $\delta_i = X_i - T$ 第 i 次测量所产生的误差；

X_i ——第 i 次测量所得到的数值；

T ——真实值。

由前述可知，实际操作时，测量次数是有限的，且被测变量的真实值又无法获得，因而实际分析随机误差对测量结果的影响时， σ 表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1-6)$$

式中 n ——有限的测量次数，一般 $n=10$ 次以上；

$\bar{X}$ ——用算术平均值表示的真实值。

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \cdots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1-7)$$

随机误差的大小反映测量结果的分散程度，均方根误差是理想的特征量。它对测量危害大的误差充分反映，对小误差影响也很敏感。

需明确的是， σ 值并不是某次测量中的具体误差值，在一系列等精度测量中（无系统误差且测量条件相同），随机误差 δ 出现的概率密度分布情况如图 1-4。 σ 小的分布曲线尖锐，小误差值出现的概率大，而 σ 大的分布曲线平坦，大误差和小误差出现的概率相差不大。

图 1-3 中带斜线部分，表示误差在该区间出现的次数与总次数的比值，即概率值。当随机误差 δ 在某一区间内（如 $-K\sigma \sim +K\sigma$ ）的概率足够大时，该测量误差 δ 的估计值 $\pm K\sigma$ 就具有一定的可信程度，此时测量结果 X 落在该区间的可信程度也大。

对测量值来说， $[-K\sigma, +K\sigma]$ 区间就叫置信区间，相应的概率值叫置信概率，结合起来就表明测量结果的可信程度。测量结果表示为

$$X = \bar{X} \pm K\sigma \quad (1-8)$$

当取 $\pm 3\sigma$ 为置信区间时，此时的置信概率为 99.7%，说明测量结果的可信程度达到 99.7%。即对某一被测量进行同等精度的 100 次测量，可信真实的测量结果将达 99.7 次，相对于每一次测量，不可信的大误差几乎不出现。 3σ 称单次测量的极限误差。

当取 $\pm 2\sigma$ 为置信区间时，置信概率则达 95.45%，说明测量结果的可信程度是

95.45%，即对某一被测量进行同等精度的 100 次测量，可信真实的测量结果达 95.45 次，不可信的大误差仅出现 4.55 次。

然而，要达到 99.7% 的置信概率，采用的测试方法、测量仪表、测量条件均要求很高，只在计量工作中才可达到。一般的工程测量中，只要有 95% 的可信程度就可满足要求，则置信区间在 $\pm 2\sigma$ 即可。例如，日常测量温度、长度等被测变量时，仅测 1~2 次就可确定测量结果，而不需要进行反复测量就是基于上述原理。

(三) 粗大误差的处理

粗大误差会显著歪曲测量结果，因此，必须加以剔除。

目前常用的方法是统计判别法之一的“莱伊特准则”。它以 $\pm 3\sigma$ 为置信区间，凡超过此值的剩余误差均做粗大误差处理，予以消除，该准则的表达式为

$$|X_i - \bar{X}| > 3\sigma \tag{1-9}$$

满足上式的 X_i 值就是坏值，相应产生的误差为粗大误差，必须删除。

(四) 自动检测系统的误差确定

无论是单变量的检测系统或多变量、多环节的检测系统，考虑整个系统误差时，是系统中各环节误差的叠加，因为各环节误差不可能同时按相同的符号出现最大值，有时会互相抵消。因此必须按照概率统计的方法求取。即按各项误差的均方根求得的误差来估计系统的误差。

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum \sigma_i^2} \tag{1-10}$$

【例 1-1】 有一测温点，采用 WREV-210 型镍铬-镍硅热电偶，基本误差 $\sigma_1 = \pm 4^\circ\text{C}$ ，采用铜-康铜补偿导线，基本误差 $\sigma_2 = \pm 4^\circ\text{C}$ ，采用温度记录仪为 XWC-300 型，EU 电子电位差计。记录基本误差 $\sigma_3 = \pm 6^\circ\text{C}$ ，由于线路老化，接触电阻、热电偶冷端温度补偿不完善，仪表电桥电阻变化，仪表工作环境电磁场干扰等原因引起的附加误差 $\sigma_4 = \pm 6^\circ\text{C}$ ，试计算这一测温系统的误差为多少？

解 $E_X = \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = \pm \sqrt{4^2 + 4^2 + 6^2 + 6^2} = 10.2^\circ\text{C}$

第三节 检测仪表的基础知识

一、检测仪表的组成

检测仪表的结构虽因功能和用途各异，但通常包括三个基本部分，如图 1-5 所示。



图 1-5 检测仪表的组成

(一) 检测部分

检测部分一般直接与被测介质相关联，通过它感受被测变量的变化，并变换成便于测量的相应的位移、电量或其他物理量。这部分包括以下两种情况。

1. 敏感元件

敏感元件是能够灵敏地感受被测变量并作响应的元件。例如弹性膜盒能感受压力的大小而引起形变，因此弹性膜盒是一种压力敏感元件。当然敏感元件的输入输出关系应是稳定的单值函数关系，如能是线性或近似线性更理想。

2. 传感器