

高 职 高 专 规 划 教 材

环境工程仪表及自动化

李留格 刘慧敏 主编

化学工业出版社

高 职 高 专 规 划 教 材

环境工程仪表及自动化

李留格 刘慧敏 主编



化学工业出版社
· 北京 ·

本书紧密配合“工学结合”的思路,用“任务驱动法”的教学模式编写,针对环境工程中的仪表及自动控制系统进行了比较系统的叙述。在内容上,本书以目前工程中常用的主流仪表为主,并讲述了现代工程中的先进仪表及先进的控制系统。

全书共分十二个项目,第一个项目至第五个项目,主要讲述了压力、物位、流量、温度、成分等环境工程中检测仪表的工作原理、结构性能、仪表的安装使用和基本维护。第六个项目至第十二个项目,详细讲述了环境工程中自动控制系统的基本知识。本书注重高等职业教育的特色,强调以能力为本,理论与实践训练一体化。

本书为高职高专环境类专业及相关专业的教材,也可作为成人教育、企业培训的相关专业教材,并可供从事连续生产过程的工艺技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程仪表及自动化/李留格,刘慧敏主编. —北京:化学工业出版社,2013.2

高职高专规划教材

ISBN 978-7-122-16117-8

I. ①环… II. ①李…②刘… III. ①环境工程-检测仪表-高等教育-教材②环境工程-自动化-高等职业教育-教材 IV. ①X85

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第304365号

责任编辑:王文峡

文字编辑:郑直

责任校对:陈静

装帧设计:尹琳琳

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张19¼ 字数487千字 2013年3月北京第1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:39.00元

版权所有 违者必究

编审委员会

主任委员 周立雪

副主任委员 李倦生 王世娟 季剑波 刘建秋

委员 (按姓名笔画排序)

王世娟 王晓玲 王 雨 刘建秋 孙 蕾

李 庄 李倦生 李留格 吴国旭 张 雷

张 欣 张小广 张玉健 张慧俐 陈 忠

钟 飞 邹明亮 林桂炽 季剑波 周立雪

郝 屏 袁秋生 黄从国 龚 野 蒙桂娥

前 言

为适应职业教育的发展，满足培养应用型、技能型人才的需要，我们编写了这本专业核心知识和技能一体化的教材。编写人员均为教学经验丰富、实践能力强的一线教师、高级工程师。

本书在编写思路，积极配合新的课程教学模式，以知识的应用为目的，融合最新的技术和知识，强调知识、能力、素质结构整体优化，强调工程应用能力训练和技术综合一体化能力的培养。

本书在编写模式上，采用项目化教学法编写，每个项目都包含有理论知识、实践知识及职业态度等内容，以环境工程中仪表及自动化的应用为主线，用“任务驱动”的教学模式编写，打破了传统教材的编写模式。本书在项目或任务的设置上，充分考虑了学生的个体发展，保留了学生的自主选择空间，兼顾学生的职业方向。

本书在内容安排上，除介绍通用主流仪表之外，还专门介绍了环境工程中所用到的水质分析仪、气体检测仪等；对于反映当前自动化水平的新内容，如智能差压变送器、C3000 数字控制器、新型显示仪表、智能控制阀、集散控制系统等内容，加大了篇幅进行介绍，力求简明扼要、深入浅出，使环境工程类专业人员对自动化的新发展、新技术有比较全面的了解，以满足培养新世纪专业技术人才的需要。

本书分为环境工程检测仪表与传感器和环境工程自动控制系统两个单元，建议全书学时60~72个。教师在教学中可根据学时安排和学生情况选择授课内容，灵活掌握。

环境工程检测仪表与传感器单元由项目一至项目五组成，完整介绍了测量及测量误差的基本概念，过程检测系统的基本知识；详细讲述了压力、物位、流量、温度、成分等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等知识；尤其对现代工程中用到的智能仪表、数字仪表等先进仪表的结构、原理、组态操作进行了详细的讲述。环境工程自动控制系统由项目六到项目十二组成，主要对过程控制系统的基本组成、操作和维护等知识技能进行了深入浅出的讲述，并重点讲述了集散控制系统的操作和维护知识，以更好地满足环境类专业学生学习的需要。

本书每个项目后均设有思考题，以方便教学。

本书由河南化工职业学院的李留格、河北化工医药职业技术学院的刘慧敏担任主编。参加编写的还有：四川化工职业技术学院的胡乃清，杨凌职业技术学院的朱海波，河北化工医药职业技术学院高级工程师程普。其中李留格编写项目一至项目三、项目六、项目七、附录一，并负责全书的统稿与修改；刘慧敏编写项目四、项目九、附录二到附录六；朱海波编写项目五；程普编写项目八；胡乃清编写项目十至项目十二。

本书在编写过程中，得到了许多老师的支持。徐州工业职业技术学院的周立雪院长和季剑波、河北工业职业学院刘建秋、河南化工职业学院的张慧俐等提出了许多宝贵的意见；同时也得到了化学工业出版社编辑的大力支持，在此一并对他们的支持和帮助表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者
2013年1月

目 录

单元一 环境工程检测仪表与传感器	1
项目一 压力检测仪表的认识、安装与维护	2
任务一 弹簧管压力表的认识与校验	2
一、过程检测技术基础	2
二、压力检测的基本知识	12
三、弹性式压力计	14
四、压力表的选择与校验	17
【任务实施】	20
【学习讨论】	21
任务二 压力表的安装	21
一、取压口的选择	21
二、导压管的安装	21
三、压力表的安装	22
【任务实施】	23
【学习讨论】	24
任务三 智能差压变送器的安装与组态	24
一、智能差压变送器的结构原理	24
二、智能变送器的特点	24
三、智能变送器的典型产品介绍	25
【任务实施】	26
【学习讨论】	34
【知识拓展】 电气式压力仪表	34
一、霍尔片式压力传感器	34
二、应变片式压力传感器	35
三、电容式差压变送器	36
思考题	39
项目二 物位检测仪表的认识、安装与维护	42
任务一 差压式液位计的安装与维护	42
一、物位检测的基本知识	42
二、差压式液位计	43
【任务实施】	47
【学习讨论】	50
任务二 浮力式液位计的安装及调试	53
一、恒浮力式液位计	53
二、变浮力式液位计	56
【任务实施】	59
【学习讨论】	61
【知识拓展】 其他物位仪表	61
一、电容式液位计	61
二、超声波液位计	64
三、物位仪表的选用	66
思考题	67
项目三 流量检测仪表的认识、安装与维护	69
任务一 差压式流量计的安装与维护	69
一、流量检测的基本知识	69
二、差压式流量计	70
【任务实施】	76
【学习讨论】	78
任务二 电磁流量计的安装及调试	78
一、电磁流量计的工作原理	79
二、电磁流量计的结构类型与特点	80
三、电磁流量计的安装与应用	81
【任务实施】	82
【学习讨论】	83
【知识拓展】 其他流量仪表	84
一、转子流量计	84
二、超声波流量计	90
三、靶式流量计	92
四、椭圆齿轮流量计	95
五、涡轮流量计	96
思考题	99
项目四 温度检测仪表的认识、安装与维护	101
任务一 热电偶(阻)的认识及安装	101
一、温度检测的基本知识	101
二、热电偶传感器	103
三、热电阻传感器	106
四、热电偶、热电阻的选用	107
【任务实施】	108
【学习讨论】	109
任务二 一体化温度变送器的认识与校验	109

一、一体化热电偶温度变送器	109	一、成分分析仪器的基本知识	138
二、一体化热电阻温度变送器	110	二、工业 pH 计	139
【任务实施】	110	【任务实施】	146
【学习讨论】	112	【学习讨论】	146
任务三 常用温度显示仪表的认识与 使用	112	任务二 工业气相色谱仪的认识与调校	147
一、自动平衡式显示仪表	113	一、气相色谱仪的分析原理	149
二、数字式显示仪表	117	二、色谱柱	152
三、新型显示仪表	119	三、检测器	153
【任务实施】	131	四、SQG 系列工业气相色谱仪	155
一、数字式显示仪表的认识与校验	131	【任务实施】	159
二、无纸记录仪的认识、组态和操作	132	【学习讨论】	160
【学习讨论】	135	【知识拓展】 其他成分分析仪表	160
思考题	136	一、水质分析仪	160
项目五 污染物成分自动分析仪器的认识	138	二、气体检测仪	167
任务一 工业 pH 计的认识与调校	138	三、噪声检测仪	170
		思考题	172
单元二 环境工程自动控制系统	173		
项目六 简单控制系统的组成	174	【任务实施】	198
任务一 液位控制系统的组成分析	174	【学习讨论】	200
一、环境工程自动化的概念	174	任务二 C3000 数字式控制器的认识与 使用	201
二、自动控制系统的组成及方块图	175	一、数字式控制器的主要特点	201
三、自动控制系统的分类	177	二、数字式控制器的基本构成	201
【任务实施】	178	三、C3000 数字控制器	204
【学习讨论】	178	【任务实施】	213
任务二 带控制点工艺流程图的识读	178	【学习讨论】	215
一、图形符号的识读	179	思考题	215
二、字母代号	180	项目九 执行器的使用	217
三、仪表位号的表示方法	180	任务 气动执行器的使用	217
【任务实施】	181	一、气动薄膜控制阀	217
【学习讨论】	181	二、阀门定位器	228
思考题	182	三、电动执行器	233
项目七 生产过程对象的认知	183	四、数字阀与智能控制阀	234
任务 生产过程对象（水槽）的认知	183	【任务实施】	235
一、与对象有关的两个基本概念	184	【学习讨论】	237
二、描述对象特性的三个参数	184	思考题	238
三、扰动通道特性对控制质量的影响	186	项目十 控制系统的投运及参数整定	240
四、控制通道特性对控制质量的影响	186	任务 液位定值控制系统的投运与操作	240
【任务实施】	187	一、自动控制系统的过渡过程与品质 指标	240
【学习讨论】	188	二、控制方案的确定	244
思考题	188	三、控制器参数的工程整定	247
项目八 环境工程控制仪表的认识与使用	189	四、简单控制系统的投运及操作中常见的 问题	248
任务一 PID 调节器的认识与使用	189		
一、常见控制规律	189		
二、模拟式控制仪表	196		

【任务实施】	249	一、集散控制系统概述	267
思考题	250	二、JX-300XP 集散控制系统	268
【学习讨论】	251	【任务实施】	281
项目十一 复杂控制系统的操作	252	【学习讨论】	281
任务 污水处理加药串级控制系统的		任务二 JX-300XP 集散控制系统的软件	
操作	252	组态	281
一、串级控制系统概述	252	一、组态软件应用流程	282
二、串级控制系统的特点及应用	254	二、系统组态的主要过程	282
三、主、副控制器控制规律的选择	255	【任务实施】	286
四、主、副控制器正反作用的选择	255	【学习讨论】	286
五、控制器参数整定与系统投运	255	任务三 集散控制系统的操作	286
【任务实施】	256	一、集散控制系统的调试	286
【学习讨论】	257	二、集散控制系统的投运	287
【知识拓展】 其他复杂控制系统	257	三、集散控制系统的维护	288
一、均匀控制系统	257	【任务实施】	289
二、比值控制系统	259	【学习讨论】	290
三、前馈控制系统	260	【知识拓展】 污水处理集散控制系统的应用	
四、分程控制系统	262	案例	290
五、多冲量控制系统	263	一、污水处理系统概述	290
思考题	265	二、集散控制系统在污水处理中的	
项目十二 集散控制系统的组态与操作	267	应用	290
任务一 JX-300XP 集散控制系统的安装与		思考题	291
硬件认识	267		
附录	293		
附表 1 常用压力表规格及型号	293	为 K) 分度表	294
附表 2 铂铑 ₁₀ -铂热电偶 (分度号为 S)		附表 5 工业用铂热电阻 (分度号为 Pt100)	
分度表	294	分度表	295
附表 3 镍铬-铜镍合金 (康铜) 热电偶		附表 6 工业用铜热电阻 (分度号为 Cu100)	
(分度号为 E) 分度表	294	分度表	296
附表 4 镍铬-镍硅 (镍铝) 热电偶 (分度号			
参考文献	297		

特異已發突，點片位界對應愈式武——目錄

（發行部編）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

（本報記者採訪）

单元一

环境工程检测仪表与传感器

环境工程检测仪表与传感器是环境工程的重要组成部分。随着工业化和城市化的快速发展，环境问题日益突出，对环境质量的监测和评价显得尤为重要。检测仪表和传感器作为环境监测的“眼睛”，承担着采集、传输和处理环境数据的重要任务。本单元将详细介绍环境工程检测仪表与传感器的基本原理、分类、应用及发展趋势。

检测仪表与传感器的分类

检测仪表与传感器按照不同的分类标准可以分为多种类型。按照被测物理量的性质，可分为温度传感器、压力传感器、流量传感器、液位传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器、重量传感器、湿度传感器、气体传感器、光学传感器、声学传感器、生物传感器等。按照传感器的结构形式，可分为接触式传感器和非接触式传感器。按照传感器的输出信号形式，可分为模拟式传感器和数字式传感器。按照传感器的应用范围，可分为工业用传感器、民用传感器、军用传感器等。随着科技的不断进步，新型传感器不断涌现，传感器的性能也在不断提高，为环境工程的检测与评价提供了更加准确、可靠的数据支持。

项目一 压力检测仪器的认识、安装与维护

★ 知识目标

- 了解测量误差及处理方法
- 熟悉检测仪器的性能指标
- 掌握压力的定义，表压力、绝对压力、负压力（真空度）之间关系
- 掌握常用压力表的组成、工作原理
- 掌握压力仪器的选择方法及校验方法
- 了解智能型仪器的发展概况

★ 能力目标

- 会校验弹簧管压力表
- 能正确填写压力表校验单
- 能根据要求选择合适的压力测量方法和压力仪器
- 能正确连接导压管路和安装压力仪器
- 能对压力检测仪器的常见故障进行判断和处理
- 能对智能差压变送器进行正确组态

压力是环境工程中的重要工艺参数之一，如水处理工程中水泵进口真空度和出口压力；滤池及冲洗水泵的压力，滤池水头损失；出厂干管压力，管网压力；鼓风机出口风压，真空泵状态等，都需要严格遵守工艺操作规程，保持一定的压力。另外，还有一些其他过程参数，如流量、液位等往往可以通过压力来间接测量。所以，压力的测量在环境工程中具有特殊的地位。

检测压力的仪器称为压力表或压力计。本项目主要学习压力检测仪器的结构、原理、选择、校验、安装、组态、操作及维护等知识与技能。

任务一 弹簧管压力仪器的认识与校验

在工程中需要在现场显示压力的仪器，选用就地显示压力表。了解过程检测的基本知识，掌握仪器的品质指标，根据工艺要求选用合适的压力表来完成压力的检测，认识和掌握压力仪器的结构原理、安装调试等，对工程的安全运行至关重要。

一、过程检测技术基础

在环境工程中，为了有效地进行操作和自动控制，需要对“三废”处理过程中的一些主要参数进行自动检测。用来检测这些参数的仪器称为检测仪器。检测仪器在现代化水处理生产过程中起着重要作用，是自控系统的“眼睛”、“触角”和“神经”，与生产过程有着紧密的联系。

目前人们一般把污水处理过程中的检测仪器分为两大类。一类是检测温度、压力、液位、流量等物理量的仪器，称为热工仪器。另一类是测量水的 pH 值、溶氧值、浊度、COD 值等水质指标的仪器，称之为水质分析仪器。

（一）测量的概念

1. 测量的定义

测量就是用实验的方法，借助专门仪器或设备把被测变量 x 与同性质的单位标准量 v 进行比较，得到被测量相对于标准量的倍数 x_m ，从而确定被测量数值的过程。用数学公式表示为：

$$x = x_m v \quad (1-1)$$

测量结果包括被测量的大小 x_m 、符号（正或负）及测量单位 v ，也就是测量单位 v 与倍数 x_m 的乘积。

例如，要测量一个物体的长度，可以将一把测量单位为 mm 的直尺与被测物体的两端比较，看物体两端对应于直尺所包含的 mm 刻度格的数量，如 500，则表明物体有 500mm 长。更为直接的方法是让直尺的 0mm 线（零位）对准物体一端，则物体另一端所对应的直尺的读数就是物体长度所包含的 mm 的倍数，乘以测量单位 mm 即为测量值。

实际工程中，绝大多数被测变量是无法借助于像直尺这样的测量工具直接进行比较而完成测量的，往往需要将被测变量进行转换，将其转换成另外一个便于比较的量，并与被测量成正比或具有确定的函数关系。例如，玻璃体温计是利用下端玻璃温包里水银的热膨胀效应，将温度转换成体积，膨胀的水银在温度计上方连通的毛细管里被转换成水银柱高度，与同时被转换成高度的温度测量单位——温度刻度值比较，就可以得到被测温度值。

一般指示型测量仪表，都必须利用某些物理、化学效应，将被测量转换为便于比较的信号形式（如指针位移），并把单位标准量转换成标尺刻度，指针位置对应的刻度值就是包含单位标准量的倍数，即为测量值。

所以说，测量就是建立某种单位基准之后，借助于一些专用工具将研究对象与基准单位进行比较的过程。测量过程的实质就是将测量与体现测量单位的标准量比较，对被测参数信号形式转换的过程，而检测仪表就是实现这种比较的工具。

2. 测量方法

实现测量的方法很多，对于不同的测量参数和检测系统需采用最适合的测量方法，才能取得最佳的测量结果。如果按测量敏感元件是否与被测介质接触，可以将测量方法分为接触式测量和非接触式测量；如果按被测变量的变化速度，可分为静态测量和动态测量；按比较方式分类，可以分为直接测量和间接测量；按测量原理分类，可分为偏差法、零位法、微差法测量；按检测系统的结构分类，可分为开环式测量、反馈型闭环式测量等。以下仅介绍按测量原理分类的几种测量方法。

（1）偏差法 偏差法是用检测仪器的指针相对于仪表刻度零位的位移（偏差）量直接表示被测量大小，如弹簧秤、压力表、体温计等指示式仪表。偏差法测量方式属于开环测量方式，仪表刻度是预先用标准仪器标定好的，测量结果的好坏取决于测量元件和转换放大环节的性能。偏差法测量的特点是直观、简便、速度快，相应的仪表结构简单，测量精度较低，测量范围小。

（2）零位法 零位法是将被测量与已知标准量进行比较，当二者差值为零时，由标准量的值即可确定被测量的大小。零位法属于反馈型闭环检测方法，如用天平测量物体质量的方法就是零位法。在现代仪表中，零位法的平衡操作已经可完全自动完成了，如电子电位差计等就是如此。零位法测量具有测量精度高、测量过程复杂等特点，不适用于测量快速变化的参数。

（3）微差法 微差法是将偏差法和零位法结合使用的一种测量方法。测量过程中将被测

量的大部分用标准量平衡，而剩余部分采用偏差法测量。利用不平衡电桥测量热电阻的变化即是如此，桥路中被测电阻的静态电阻使电桥处于平衡状态，而热电阻的电阻变化量使电桥失去平衡，产生相应的电压输出，被测热电阻的大小等于其静态电阻与用电桥输出电压确定的电阻变化量之和。微差法具有测量精度高、反应速度快等特点。

(二) 测量误差及处理

测量的目的是希望能正确地反映被测参数的真实值。但是，由于所使用的仪表精度有限、实验手段不够完善、观察者的主观性和周围环境的影响等原因，使测量值和被测参数的真实值之间，总是存在一定的差值，这个差值称为测量误差。要在测量数据中消除测量误差，甄选出真实结果，需要对测量数据进行处理。

一个测量结果，只有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。

1. 测量误差的表示形式

(1) 绝对误差 绝对误差是指仪表指示值和被测量的真实值之间的差值。但是，工程上的真实值往往是不可知的。真实值是一个理想的概念，因为测量值不能绝对准确地反映被测参数的真实值。实际测量过程中，一般是把以下值作为真实值。

① 约定真值 约定真值是把国际公认的某些基准量（如长度、质量、时间等）作为真实值。例如规定在一个物理大气压下，水沸腾的温度为 100°C ，所指的就是约定真值。

② 相对真值 利用准确度较高的标准仪表的指示值作为被测参数的真实值，称为相对真值。而测量误差通常就是检测仪表的指示值与标准仪表的指示值之差。

③ 理论真值 理论设计和理论公式的表达值，如平面三角形的三个内角之和恒等于 180° 。

因此，所谓检测仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差，一般是指检测仪表（准确度较低）和标准仪表（准确度较高）同时对同一参数测量所得到的两个读数之差，可用下式表示：

$$e_a = x - x_t \quad (1-2)$$

式中 e_a ——绝对误差；

x ——被测变量的仪表指示值；

x_t ——真实值（用标准表的指示值代替）。

绝对误差可以直观地说明检测仪表测量结果的准确程度，但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依据，且不同量纲的绝对误差是无法比较的。

(2) 相对误差 相对误差是被测变量的绝对误差 e_a 与其真实值 x_t 之比，可用下式表示：

$$E_r = \frac{e_a}{x_t} = \frac{x - x_t}{x_t} \quad (1-3)$$

式中 E_r ——仪表在 x_t 处的相对误差。

其他符号意义同前。

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，产生的相对误差大，测量结果不够准确；而在上限值附近，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 引用误差是仪表的绝对误差与仪表量程比值的百分数，表示为：

$$E_q = \frac{e_a}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100\% = \frac{e_a}{S_p} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 E_q ——仪表在 x_t 处的引用误差；

X_{\max} ——仪表标尺上限刻度值；

X_{\min} ——仪表标尺下限刻度值；

S_p ——仪表的量程， $S_p = X_{\max} - X_{\min}$ 。

在实际应用中，仪表的绝对误差在测量范围内的各点上是不相同的。因此，常说的“绝对误差”指的是绝对误差的最大允许值 e_{\max} 。通常采用最大引用误差来描述仪表实际测量的质量，称为仪表的满度误差，一般在误差值后标注字母 $F \cdot S$ 表示，即

$$E_{q\max} = \frac{e_{\max}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100\% = \frac{e_{\max}}{S_p} \times 100\% (F \cdot S) \quad (1-5)$$

式中 e_{\max} ——仪表在测量范围内产生的绝对误差的最大允许值，称为允许最大绝对误差。

2. 误差的分类

(1) 根据误差的产生原因来分

① 系统误差 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。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。这种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。

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。这种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。单次测量时没有规律，但多次测量时服从统计规律，因此可采用多次测量求平均值的方法减小随机误差。随机误差的大小反映了测量过程的精度。

③ 粗大误差 明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差。这种误差的产生是由于测量方法不当、工作条件不符合要求等原因，但更多的是人为的原因，因此它容易被发现，并可从测量结果中去掉。

(2) 根据误差的测试条件来分

① 基本误差 基本误差是指仪表在规定的工作条件（如温度、湿度、电源电压、频率等）下，仪表本身具有的误差。其最大值不超过允许最大绝对误差。

② 附加误差 附加误差是指仪表偏离规定工作条件时所产生的误差。

仪表所产生的总误差为基本误差与附加误差之和。

3. 测量误差的分析与处理

在测量过程中，如何处理带有未知误差的数据，甄别不同的测量误差，从繁杂的测量数据中筛选出被测变量的真实值，是保证测量质量的关键。分析过程中，一般先分析粗大误差，剔除粗大误差后分析系统误差，对测量结果进行修正，之后对随机误差进行统计分析。

(1) 系统误差的分析与处理 系统误差的特性具有确定性、重现性和修正性。通过实验对比，用高精度的检测仪表校验普通仪表时，可以发现固定不变的系统误差（定值系统误差）。通过对误差大小及符号变化的分析，来判断变化的系统误差（变值系统误差）。但是，通常不容易从测量结果中发现变值系统误差并认识其规律，只能具体问题具体分析，这在很大程度上取决于测量者的知识水平、经验和技巧。

为了减小系统误差的影响，可以从以下几方面入手进行处理。

① 消除系统误差产生的根源 合理选择测量方法，校验检测仪表，保证仪表的测量条件，防止产生系统误差。

② 在实际测量中，采用一些有效的测量方法，来消除或减小系统误差 可以采用的测量方法有交换法、代替法、补偿法、对称测量法等。

交换法是将引起系统误差的某些条件相互交换，使产生系统误差的因素对测量结果起相反的作用，从而在求两次测量结果的平均值时抵消系统误差。如用天平称量时，交换左右秤盘，可以消除天平臂长不同带来的系统误差。

代替法是在测量条件不变的情况下，用已知标准量替代被测量，得到修正值，达到消除系统误差的目的。

补偿法是在测量过程中，根据测量条件的变化、仪表某环节的非线性特性带来的系统误差，有针对性地采取补偿措施，自动消除系统误差。

③ 对测量数据引入修正值以消除系统误差 通过机械调零、应用修正公式、增加自动补偿环节等措施消除系统误差，修正测量结果。

(2) 随机误差的分析与处理 随机误差在测量次数足够多时，一般呈正态分布，具有对称性、有界性和抵偿性，如图 1-1 所示。

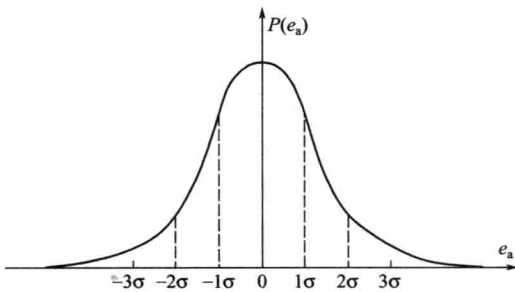


图 1-1 随机误差的正态分布图

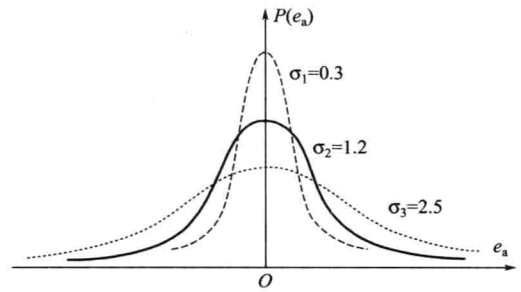


图 1-2 σ 值对随机误差分布的影响

图 1-1 中，横坐标为随机误差（绝对误差） $e_a = x - x_t$ ，纵坐标为随机误差出现的概率 $P(e_a)$ 。对于随机误差来说，它对测量结果的影响可用标准误差（又称均方根误差） σ 表示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{ai}^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_t)^2}{n}} \tag{1-6}$$

- 式中 n ——测量次数（趋于无限）；
- e_{ai} ——第 i 次测量产生的误差， $e_{ai} = x_i - x_t$ ；
- x_i ——第 i 次测量值；
- x_t ——真实值。

实际情况下，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时，标准误差一般表示为：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{1-7}$$

- 式中 $x_i - \bar{x}$ ——剩余误差；
- \bar{x} ——测量结果的算术平均值。

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \tag{1-8}$$

标准误差反映测量结果的分散程度，如图 1-2 所示。 σ 越小，分布曲线越尖锐，小误差

出现的概率大,大误差出现的概率小。而 σ 越大,分布曲线越平坦,大误差和小误差出现的概率相差不大。

理论计算表明,介于 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 之间的随机误差出现的概率为0.9973,随机误差出现在此区间之外的概率仅为 $1-0.9973=0.27\%$ 。因此在1000次等精度测量中,只有可能3次随机误差超过 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间,实际上可以认为这种情况很难发生。

也就是说,当随机误差在某一区间内[如 $(-K\sigma, +K\sigma)$]的概率足够大时,测量结果落在该区间的概率大,测量结果的可信程度也大。一般把随机误差出现的区间称做置信区间,把置信区间相应的概率称做置信概率。

一般情况下,取置信区间为 $\pm 2\sigma$ 、置信概率为95.45%,说明测量结果为 $x=\bar{x}\pm 2\sigma$ 的可能性为95.45%,即对某一被测量进行100次等精度测量中,可信的真实结果不少于95次,不可信的大误差仅出现不超过5次。在工业测量条件下,这足以满足测量的要求。

所以,为消除随机误差,需要在消除了系统误差和粗大误差的影响之后,对同一被测量进行多次测量(一般为5~10次即可),计算多次测量结果的算术平均值 \bar{x} 。任意一次测量结果位于式(1-9)的范围内,其可信度由 K 确定。

$$x = \bar{x} \pm K\sigma \quad (1-9)$$

(3) 粗大误差分析与处理 粗大误差会显著歪曲测量结果,所以必须在剔除含有粗大误差的测量值后,再进行数据的统计分析,从而得到符合客观实际的测量结果。但是,也应当防止无根据地丢掉一些误差大的测量值。目前判定粗大误差的常用方法是“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,予以剔除,即满足

$$|x_i - \bar{x}| > 3\sigma \quad (1-10)$$

的误差为粗大误差,必须剔除。相应的测量值 x_i 就是坏值,必须剔除,不能作为有效的测量结果。

应用莱伊特准则时,计算 \bar{x} 、 σ 应当使用包含坏值在内的所有测量值。按式(1-10)剔除坏值后,应重新计算 \bar{x} 、 σ ,再用莱伊特准则检验,看有无坏值出现。如此反复进行,直到检查不出坏值。

4. 检测系统的误差确定

在由多个环节或仪表组成的检测系统中,整个系统的测量误差,不是系统中各个环节误差的简单叠加。因为各环节的误差不可能同时按相同的符号出现最大值,有时会相互抵消。因此必须按照概率统计的方法,用各环节误差的标准误差来估计系统的总误差,即

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (1-11)$$

【例 1-1】 有一测温点,采用 WZP-350 型铂电阻和 XMZ-610 数字温度显示仪表组成测温系统。热电阻、显示仪表的基本误差分别为 $\sigma_1 = \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_2 = \pm 1^\circ\text{C}$,连接热电阻和显示仪表的导线电阻变化所引起的基本误差为 $\sigma_3 = \pm 2^\circ\text{C}$,由于线路老化、接触电阻和环境电磁干扰带来的基本误差为 $\sigma_4 = \pm 4^\circ\text{C}$ 。试计算这一测温系统的误差为多少。

解: 根据检测系统误差综合原则,测温系统标准误差为

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum \sigma_i^2} = \pm \sqrt{3^2 + 1^2 + 2^2 + 4^2} = \pm 5.477 (^\circ\text{C})$$

答: 此温度检测系统的标准误差为 5.477°C 。

(三) 检测仪表的品质指标

一台仪表的优劣,可用它的品质指标来衡量。常用的指标如下。

1. 精确度

精确度（简称精度）是反映仪表在规定的使用条件下，测量结果的准确程度的一项综合指标。其形式用最大引用误差去掉“±”号及“%”号来表示，可用下式描述：

$$A_c = \frac{e_{\max}}{S_p} \times 100 \quad (1-12)$$

仪表的精确度是用基本误差来表示的。在规定的工作条件下，仪表基本误差的允许最大误差就叫允许误差，一般用最大引用误差来表示。在测量过程中，仪表的基本误差不超过该仪表规定的允许误差时，仪表合格；否则，仪表不合格。

仪表的允许误差越大，表示仪表的准确度越低；反之，仪表的允许误差越小，表示仪表的准确度越高。

事实上，国家就是利用这一办法来统一规定仪表的精度（准确度）等级的。将仪表的允许误差去掉“±”和“%”号，便可以用来确定仪表的精度等级。

根据标准 GB/T 13283—2008，精度等级有：

0.01, 0.02, (0.03), 0.05, 0.1, 0.2, (0.25), (0.3), (0.4), 0.5, 1.0, 1.5, (2.0), 2.5, 4.0, 5.0

注：① 必要时，可采用括号内的精度等级。其中 0.4 级只适用于压力表。

② 低于 5.0 级的仪表，其精度等级可由各类仪表的标准予以规定。

不宜用引用误差或相对误差来表示精度的仪表（如热电偶、热电阻等），可用拉丁字母或阿拉伯数字表示精度等级，如 A、B、C 或 1、2、3，按拉丁字母或阿拉伯数字的先后顺序表示精度等级的高低。

一般精度等级数值越小，就表征该仪表的精度等级越高，也说明该仪表的精度越高。0.05 级以上的仪表，常用来作为标准表；工业现场用的测量仪表，其精度大多在 0.5 以下。

仪表的精度等级以一定的符号形式表示在仪表面板上，如 1.0 外加一个圆圈或三角形。精度等级 1.0，说明该仪表允许误差为 ±1.0%。

【例 1-2】 某台测温仪表的量程是 600~1100℃，其最大绝对误差为 ±4℃，试确定该仪表的精度等级。

解：仪表的最大引用误差为

$$E_{q\max} = \frac{e_{\max}}{S_p} \times 100\% = \frac{\pm 4}{1100 - 600} \times 100\% = \pm 0.8\%$$

将仪表的最大引用误差去掉“±”号和“%”号，其数值是 0.8。由于国家规定的精度等级中没有 0.8 级仪表，而该仪表的最大引用误差超过了 0.5 级仪表的允许误差，所以这台仪表的精度等级应定为 1.0 级。

【例 1-3】 某台测温仪表的量程是 600~1100℃，工艺要求该仪表指示值的误差不得超过 ±4℃，应选精度等级为多少的仪表才能满足工艺要求？

解：根据工艺要求，仪表的最大引用误差为

$$E_{q\max} = \frac{e_{\max}}{S_p} \times 100\% = \frac{\pm 4}{1100 - 600} \times 100\% = \pm 0.8\%$$

±0.8% 介于允许误差 ±0.5% 与 ±1.0% 之间，如果选择精度等级 1.0 级的仪表，则其允许误差为 ±1.0%，超过了工艺上允许的数值。所以只能选择一台允许误差为 ±0.5%，即精确度等级为 0.5 级的仪表，才能满足工艺要求。

根据以上两个例子可以看出，根据仪表校验数据来确定仪表精度等级和根据工艺要求来选择仪表精度等级，情况是不一样的。根据仪表校验数据来确定仪表精度等级时，仪表的允

许误差应该大于（至少等于）仪表校验所得的最大引用误差；根据工艺要求来选择仪表精度等级时，仪表的允许误差应该小于（至多等于）工艺上所允许的最大引用误差。

仪表精度的高低不仅与仪表在测量范围内产生的最大绝对误差值有关，还与仪表的量程有关，量程是根据所要测量的工艺变量来确定的。在仪表精度等级一定的前提下适当缩小量程，可以减小测量误差，提高测量准确性。

2. 变差

在外界条件不变的情况下，使用同一仪表对同一变量进行正、反行程（被测参数由小到大和由大到小）测量时，仪表正、反行程指示值之间的差值，称为变差（又称回差），如图 1-3 所示。

不同的测量点，变差的大小也会不同。为便于与仪表的精度比较，变差的大小，一般用采用仪表测量同一参数值，正、反行程指示值间的最大绝对差值与仪表量程之比的百分数表示，即

$$E_{h\max} = \frac{e_{h\max}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100\% = \frac{e_{h\max}}{S_p} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 $E_{h\max}$ ——仪表的变差百分数；

$e_{h\max}$ ——仪表正、反行程示值之差的最大值。

造成变差的原因很多，如传动机构的间隙，运动部件的摩擦，弹性元件的弹性滞后的影响等。变差的大小反映了仪表的稳定性，要求仪表的变差不能超过精度等级所限定的允许误差，否则应及时检修。

【例 1-4】 某测温仪表的测量范围为 $0 \sim 600^\circ\text{C}$ ，精度等级为 0.5 级。进行定期校验时，检验数据如表 1-1 所示。试确定该仪表的变差和精度等级。如果仪表不合格，应将该仪表定为几级精度使用？

表 1-1 温度仪表校验单

被校表读数/ $^\circ\text{C}$		0	100	200	300	400	500	600
标准表读数/ $^\circ\text{C}$	正行程	0	99	198	298	405	499	600
	反行程	0	101	201	301	404	502	600

解：分析校验数据表可知，变差的最大值发生在 200°C 处，可求出

$$e_{h\max} = 201 - 198 = 3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$E_{h\max} = \frac{e_{h\max}}{S_p} \times 100\% = \frac{3}{600 - 0} \times 100\% = 0.5\%$$

最大绝对误差发生在 400°C 处，由最大绝对误差

$$e_{\max} = 400 - 405 = -5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

可求出仪表的基本误差为

$$E_{q\max} = \frac{e_{\max}}{S_p} \times 100\% = \frac{-5}{600 - 0} \times 100\% = -0.83\%$$

确定精度等级时，仪表的基本误差应小于或等于国家规定的允许误差（精度等级值加上

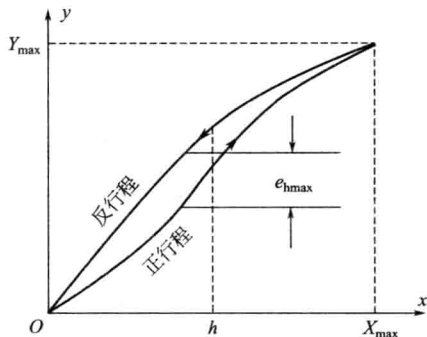


图 1-3 检测仪表的变差