

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热工自动检测技术

刘正华 赵津津 佟莹欣 编

REGONG ZIDONG JIANCE JISHU



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热工自动检测技术

刘正华 赵津津 佟莹欣 编
苏 杰 主审



机械工业出版社

本书为高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材。本书首先介绍了热工检测技术的基本知识,然后分别介绍了温度、压力、流量、液位、成分、机械量等各种热工参数的检测方法及相关仪表。

本书内容紧密结合目前我国火力发电机组热工检测的实际,体现热工检测的新技术,具有很强的实用性。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业及相关专业的教材,也可以作为电力企业的培训教材,还可以供工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件、模拟试卷及解答等,凡选用本书作为授课用书的学校,均可来电索取。咨询电话:010-88379375; E-mail: wangzongf@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

热工自动检测技术/刘正华,赵津津,佟莹欣编. —北京:机械工业出版社,2011.8

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

ISBN 978-7-111-34428-5

I. ①热… II. ①刘…②赵…③佟… III. ①热工测量—高等职业教育—教材 IV. ①TK31

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第137633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 王宗锋 责任编辑:王宗锋 曲世海

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14印张·343千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-34428-5

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

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

根据教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》的精神,本书的编写突出高职教育的实践性,体现了高等职业教育的“职业性”和“高等性”的统一。

本书从应用的角度介绍基本理论,在基本理论阐述清楚的前提下,增加了仪表的校验、安装、测量系统的故障分析等实践性的内容,并且与电力生产实践紧密结合,体现了高等职业教育的性质、任务和培养目标,符合高等职业教育的课程教学基本要求、有关岗位职业能力要求。在取材上尽量反映目前我国火力发电机组热工检测的实际,体现热工检测的新技术。

本书由山东电力高等专科学校的刘正华、郑州电力高等专科学校的赵津津、辽宁科技学院的佟莹欣编写。其中,刘正华编写第1章、第4章、第8章、第9章和第6章的6.1~6.3节,赵津津编写第2章、第3章、第7章,佟莹欣编写第5章和第6章的6.4~6.10节,刘正华对全书进行统稿。

本书由华北电力大学的苏杰副教授担任主审,苏老师对书稿进行了认真仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 热工检测的基础知识	1
1.1 热工检测的基本概念	1
1.1.1 热工检测的意义	1
1.1.2 测量的定义	1
1.1.3 测量方法	2
1.1.4 热工测量仪表的组成	3
1.2 测量误差	4
1.2.1 测量误差及其表示方法	4
1.2.2 测量误差的分类及处理方法	5
1.2.3 测量不确定度	12
1.3 仪表的质量指标及仪表的校验	12
1.3.1 仪表的质量指标	12
1.3.2 仪表的校验	14
本章小结	15
思考题与习题	16
第 2 章 温度测量	17
2.1 温度测量概述	17
2.1.1 温度测量的基本概念	17
2.1.2 温度测量方法概述	21
2.2 热电偶温度计	25
2.2.1 热电偶测温原理	26
2.2.2 热电偶的基本定律	28
2.2.3 热电偶的种类及结构形式	31
2.2.4 热电偶冷端温度补偿	38
2.2.5 热电偶测温系统的组成	43
2.3 热电阻温度计	44
2.3.1 热电阻的测温原理及分类	44
2.3.2 常用热电阻温度计	47
2.4 温度感受件的校验及常见故障分析	49
2.4.1 热电偶校验	49
2.4.2 热电阻校验	52
2.4.3 温度测量系统常见故障分析	52
本章小结	54
思考题与习题	55

第 3 章 显示仪表	57
3.1 模拟式显示仪表	58
3.1.1 动圈式显示仪表	58
3.1.2 平衡式显示仪表	65
3.2 数字式显示仪表	73
3.3 计算机数据采集系统	88
3.3.1 计算机数据采集系统的组成和结构	88
3.3.2 计算机数据采集系统的功能	89
3.4 显示仪表的发展趋势	91
本章小结	92
思考题与习题	93
第 4 章 接触测温误差分析及测温元件的安装	94
4.1 接触测温误差概述	94
4.2 导热误差的分析及减小误差的措施	94
4.2.1 管内流体温度测量	94
4.2.2 壁面温度测量	95
4.3 辐射散热误差的分析及减小误差的措施	97
4.4 接触测温的动态误差	99
4.5 测温元件的安装	100
4.5.1 测量流动介质温度的测温元件的安装	100
4.5.2 测量金属壁温度的测温元件的安装	102
本章小结	103
思考题与习题	104
第 5 章 压力测量	105
5.1 压力测量概述	105
5.1.1 压力的概念和单位	105
5.1.2 压力测量方法	106
5.2 液柱式压力计	106
5.2.1 U 形管压力计	106

5.2.2 单管压力计	107	6.5.2 浮子流量计流量公式	144
5.2.3 斜管微压计	107	6.5.3 浮子流量计刻度换算	145
5.3 弹性压力计	108	6.5.4 金属管浮子流量计	145
5.3.1 弹性压力计的工作原理	108	6.5.5 浮子流量计的使用	146
5.3.2 弹性元件的形式及特性	108	6.6 电磁流量计	147
5.3.3 弹簧管压力计	109	6.6.1 概述	147
5.4 压力(差压)变送器	111	6.6.2 电磁流量计的测量原理	148
5.4.1 电容式压力变送器	111	6.6.3 电磁流量变送器	148
5.4.2 扩散硅式压力变送器	113	6.6.4 电磁流量计的干扰	150
5.4.3 智能压力变送器	115	6.6.5 电磁流量转换器	152
5.5 压力仪表的选择与安装	117	6.6.6 电磁流量计的安装和使用	152
5.5.1 压力仪表的选择	117	6.7 靶式流量计	153
5.5.2 压力仪表的安装与管路敷设	118	6.7.1 靶式流量计的工作原理	153
5.6 压力仪表的校验	119	6.7.2 靶式流量计的安装	154
5.6.1 活塞式压力计的使用	119	6.8 超声波流量计	154
5.6.2 压力仪表的检定	120	6.8.1 时差法	155
本章小结	121	6.8.2 频差法	155
思考题与习题	121	6.9 容积式流量计	156
第6章 流量测量	122	6.9.1 椭圆齿轮流量计	156
6.1 流量测量概述	122	6.9.2 腰轮流量计	157
6.1.1 流量的概念	122	6.9.3 刮板式流量计	157
6.1.2 流量测量方法	122	6.10 质量流量计	158
6.2 节流变压降流量计	123	6.10.1 质量流量计的分类	158
6.2.1 概述	123	6.10.2 直接式质量流量计	159
6.2.2 标准节流装置	123	6.10.3 间接式质量流量计	159
6.2.3 流量公式	129	本章小结	161
6.2.4 标准节流装置的相关系数	130	思考题与习题	163
6.2.5 流量测量的温度、压力补偿	133	第7章 液位测量	164
6.2.6 测量管路的安装	136	7.1 就地式水位计	165
6.3 无节流元件的主蒸汽流量测 量	138	7.1.1 云母水位计	166
6.3.1 根据汽轮机第一压力级组前后压 力测量主蒸汽流量	138	7.1.2 双色水位计	167
6.3.2 根据汽轮机调节级级后压力测量 主蒸汽流量	139	7.2 电接点水位计	169
6.4 均速管流量计	140	7.2.1 电接点水位计的工作原理	170
6.4.1 阿牛巴流量计	141	7.2.2 水位发送器结构	171
6.4.2 热线均速管流量计	142	7.2.3 电接点水位计显示电路	172
6.4.3 威尔巴流量计	142	7.2.4 电接点水位计测量的误差分析	175
6.5 浮子流量计	143	7.2.5 电接点水位计测量筒的安装	176
6.5.1 浮子流量计的工作原理	143	7.3 差压式水位计	177
		7.3.1 单室平衡容器	177
		7.3.2 双室平衡容器	178
		7.3.3 补偿型平衡容器	178
		7.3.4 差压式水位计锅筒压力的自动	

校正	180	9.1.3 电感式位移测量	194
7.3.5 平衡容器的安装	181	9.1.4 电涡流式位移传感器	196
7.4 水位计的安装	183	9.2 振动测量	199
本章小结	183	9.2.1 磁电式传感器	199
思考题与习题	184	9.2.2 磁电式传感器的信号转换电路	200
第8章 烟气含氧量测量	186	9.2.3 电涡流振动测量装置	200
8.1 烟气测量概述	186	9.2.4 振动传感器在电厂中的应用	201
8.2 氧化锆氧量计	186	9.3 转速测量	201
8.2.1 氧化锆管的结构	186	9.3.1 转速传感器	201
8.2.2 工作原理	187	9.3.2 转速信号的转换与显示	203
8.2.3 使用氧化锆氧量计应注意的问 题	188	9.4 汽轮机监测仪表	204
8.3 氧化锆氧量计测量系统	188	9.4.1 TSI的监测参数及传感器	204
8.4 氧化锆氧量计的检定	191	9.4.2 TSI的基本组成和工作原理	206
本章小结	191	9.5 煤量测量	206
思考题与习题	192	9.5.1 电子皮带秤	207
第9章 机械量测量	193	9.5.2 核子皮带秤	209
9.1 位移测量	193	本章小结	210
9.1.1 机械式位移测量	193	思考题与习题	210
9.1.2 液压式位移测量	194	附录	212
		参考文献	216

第 1 章 热工检测的基础知识

1.1 热工检测的基本概念

1.1.1 热工检测的意义

热工检测技术是指用于获取热工参数的测量技术，是研究测量原理、测量方法和测量工具的一门科学。随着科学技术的不断发展，热工过程参数的测量越来越广泛地使用了自动检测技术。热工参数的自动检测，不仅可以方便及时地反映热工系统及其设备的运行工况，同时也为热工系统过程的自动控制提供了所需的信号，是实现热工系统安全可靠、高效经济运行的必要手段。

随着电力工业逐渐向大电网、大机组、高参数、高度自动化发展，对热工检测的准确性、可靠性和机组自动化水平的要求也日益提高。以“4C（计算机、控制、通信、CRT）技术”为基础的现代火电机组热工自动化技术也得到了迅速发展。大容量的机组监视点多达几千个，例如：300MW 燃煤机组 I/O 点数约 5000 个；600MW 燃煤机组 I/O 点数约 6000 ~ 7000 个；1000MW 燃煤机组 I/O 点数达 10000 多个。另外，大容量机组参数变化速度快、控制对象数量大，而各控制对象间又相互关联，所以，操作稍有失误，就可能引起十分严重的后果。如果将大机组的监视与控制操作任务仅交给运行人员去完成，不仅体力和脑力劳动强度大，而且很难做到及时调整和避免人为的操作失误，因此，必须由高度计算机化的机组集中控制来取代人工检测与控制，也就是说，大型火电机组必须采用热工自动化系统。

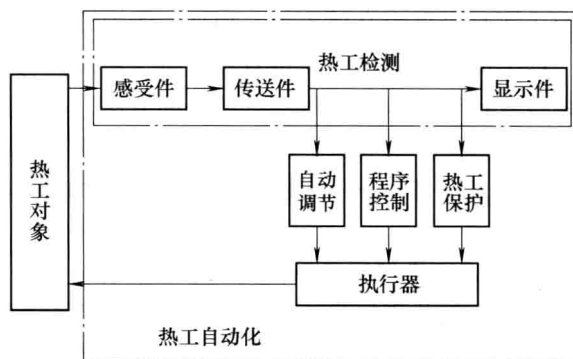


图 1-1 热工检测和热工自动化的关系

热工自动检测是实现热工自动化的基础。电厂的热工自动化主要包括：自动调节、热工保护及程序控制等，这些都必须通过热工检测获得准确的参数，图 1-1 反映了热工检测和热工自动化的关系。现代化的工业离开了自动检测，就无法安全经济地进行生产。

1.1.2 测量的定义

测量是以确定量值为目的的一组操作。测量过程中，人们借助专门工具，通过实验和对实验数据的分析计算，将被测量 X_0 以测量单位 U 的倍数 μ 显示出来，即

$$X_0 = \mu U \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 μ 称为被测量的真实数值，

简称为真值。实际测量中，由于测量方法不够完善、测量工具不够精确、观测者的主观性、周围环境的影响以及所取数值化后的位数有限等，都会引起测量误差，所以通过测量所得到的测量结果 x 只能近似地等于真值 μ ，所以式 (1-1) 变为

$$X_0 \approx xU \quad (1-2)$$

测量过程中不可避免地存在着测量误差，测量工作者的任务之一就是尽量使之减小。因此，测量时应选择合理的测量方法；所用的测量单位必须是稳定的，并且是国家法定或国际公认的；所用的测量工具必须足够准确，并事先经过检定等。通常将测量方法、测量单位及测量工具称为测量过程的三要素。

热工测量是指对压力、温度及流量等热力状态参数的测量，通常还包括对一些与热力生产过程密切相关的参数的测量，如液位、振动、位移、转速和烟气成分等。

1.1.3 测量方法

测量方法就是获得测量结果的方法。测量方法有很多种，从不同的角度可进行不同的分类。

1. 按测量结果的获取方式分

可分为直接测量法和间接测量法，这种分类方法对测量误差的分析很有意义。

(1) 直接测量法 使被测量直接与测量单位进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而得到测量结果的测量方法，称直接测量法。例如，用直尺测量长度，用弹簧管压力表测量容器内介质压力，用玻璃管温度计测量介质温度等。

(2) 间接测量法 通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各变量，再按函数关系进行计算，从而求得测量结果的方法，称为间接测量法。例如：用直尺测量长方形的面积，是通过测量长和宽，然后通过面积公式得到的；电厂中主蒸汽流量的测量，是先测量主蒸汽的温度、压力和标准节流装置输出的差压信号，然后通过计算得到主蒸汽的质量流量。

2. 按被测量与测量单位的比较方式分

可分为偏差测量法、微差测量法和零差测量法。

(1) 偏差测量法 测量器具受被测量的作用，其工作参数产生相对于初始状态的偏离，由偏离量得到测量结果，称为偏差测量法。例如：用玻璃管温度计测量温度，在测量过程中水银柱偏离初始零刻度点，偏离量就显示了被测温度值；用弹簧秤测量质量；热电偶测量温度；热电阻测量温度；弹簧管压力表测量压力等，都是采用了偏差测量法。

(2) 微差测量法 用准确已知的、与被测量同类的恒定量去平衡掉被测量的大部分，然后用偏差测量法测量余下的差值，测量结果是已知量值和偏差测量法测得值的代数和。例如：用微差测量法检定热电偶时，将同类型的标准热电偶与被校热电偶反向串接，两者的热端同置于检定炉中，冷端置于冰点槽中，用电位差计测量标准热电偶与被校热电偶热电动势的差值。由于标准热电偶热电动势的准确度很高，被校热电偶的热电动势大部分被其所平衡，两者差值很小，再通过电位差计测量此差值，就可得到较高的测量准确度。

(3) 零差测量法 测量过程中通过调整已知的连续可变的标准量，使它与被测量相等，也就是说，使已知的标准量和被测量的差值为零，这时偏差测量仅起检零作用，因此，被测量就是已知的标准量。例如：用电位差计测量热电偶产生的热电动势；用天平测量质量等。

零差测量法比微差测量法具有更高的测量准确度，但操作时间较长，更适用于稳定参数的测量。

3. 按测量仪表是否与被测对象是否接触分

可分为接触测量法和非接触测量法。

(1) 接触测量法 在测量中，仪表的全部或一部分与被测对象相接触，受到被测对象的直接作用才能得出测量结果的测量方法。

(2) 非接触测量法 在测量中，仪表的任何部分都不必与被测对象直接接触就能得到测量结果的测量方法。

1.1.4 热工测量仪表的组成

热工参数的测量过程也就是信号的转换与传递过程，热工仪表种类繁多，结构、原理以及外形千差万别，但根据各部分的功能不同，可分为感受件、传送件和显示件三部分，各部分之间的联系如图 1-2 所示。

1. 感受件

感受件也称为传感器、一次元件、发送器等。感受件直接与被测对象相联系，其作用是感受被测量，并把它转变成相应的信号输出。例如热电偶温度计中的热电偶，弹性压力计中的弹性元件等。

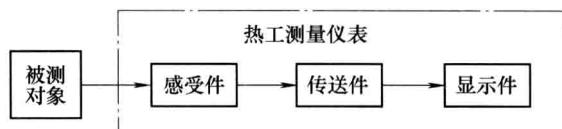


图 1-2 热工测量仪表的组成

仪表是否能够快速准确地反映被测量，很大程度上取决于感受件。作为感受件，必须满足下列要求：

1) 输出信号必须随被测量的变化而变化，它们的关系是稳定的，可复现的。

2) 输出信号只能随被测量的变化而变化，也就是说，非被测量对输出信号的影响应小到可以忽略的程度，否则要采取补偿措施。

3) 输出信号与被测信号之间是单值关系，最好是线性关系。只有单值关系输出信号才能反映被测量的大小，线性关系可以使仪表读数或信号处理简化，如果不是线性关系必要时可以进行线性化处理。

4) 感受件应尽量少地消耗被测对象的能量，并且不干扰被测对象的状态或干扰很少。

2. 显示件

显示件也叫二次仪表，其作用是向观测者显示被测参数的量值。

显示件的显示方式有模拟式、数字式和屏幕式三种。模拟式显示仪表是通过指针、光点或液面相对于标尺标记的位置，反映被测量的连续变化。模拟式显示有时伴有记录，即以曲线形式给出测量数据。数字式显示仪表用数字量显示出测量结果。屏幕式显示是通过 CRT 显示屏或液晶显示屏以图形、数字等多种形式显示被测量的大小，是目前电厂比较常见的显示方式。

显示件具有不同显示功能，分别是：

1) 显示被测参数的瞬时值（指示仪表）；

2) 记录被测参数随时间的变化规律（记录仪表）；

3) 显示被测参数对时间的积分结果（积算式仪表）；

4) 反映被测参数是否超过规定的限值(信号式仪表)。

有的显示件只有其中一项功能,也有的可以兼有几项功能。

3. 传送件

传送件也叫传送变换元件或中间件,其作用是将感受件输出的信号,根据显示件的要求,传输给显示件。根据不同情况,传送件有下列功能:

(1) 单纯起传输作用 当感受件输出的信号能够直接被显示件接收时,传送件只起传输作用。如电缆、光导纤维等,都只起传送信息的作用。

(2) 起放大作用 当感受件输出的信号比较微弱时,它需要对信号进行放大,以满足远距离传输以及驱动显示、记录装置的需要。

(3) 起转换作用 为了使各种感受件的输出信号便于与显示仪表和调节装置配套,常常把信号转换成标准化的统一信号,即各种感受件的输出信号都被转换成统一数值范围的气、电信号,这时的传送件常称为变送器。例如压力变送器、流量变送器等。通过变送器把不同类型的被测参数转变成统一的标准信号后,可以使用同一种类型的显示仪表显示不同类型的被测量。

1.2 测量误差

1.2.1 测量误差及其表示方法

任何一个被测量,在任一时刻它都具有一个客观存在的量值,这一量值称为真值,用 μ 表示。测量的目的就是获得被测量的真值,但是,由于测量仪表、测量方法、人的观察能力等各方面的限制,通过测量仪表测量得到的结果往往和真值存在一定的差值,我们把通过测量得到的值称为测量结果,用 x 表示。测量误差就是表征被测量参数的测量结果与其真值的接近程度的指标。

测量误差通常有下面几种表示方法。

1. 绝对误差

仪表测量结果与被测量的真值之间的差值,称为绝对误差,绝对误差用 δ 表示,即

$$\delta = x - \mu \quad (1-3)$$

式中, δ 为绝对误差; x 为测量结果; μ 为真值。

但由于被测参数的真值是不可知的,在实际测量中我们通常用下面几种方法来获得真值:

1) 用标准物质(标准器)所提供的标准值,例如水的三相点。此方法获得的真值准确,但应用受限制。

2) 用标准仪表测量得到的值近似作为真值。此方法是在仪表校验时经常采用的方法,用此方法获得的值与真值之间仍存在误差,其误差的大小决定于标准仪表的准确度,一般规定标准仪表应具备有效的计量合格检定证明。

3) 对被测量进行多次等准确度测量,各次测量得到的显示值的算术平均值近似为真值。从理论上讲,当测量次数无穷多时,平均值就等于真值,测量次数越多,平均值越接近真值。

2. 相对误差

相对误差为绝对误差与真值之比，常用百分数的形式表示。相对误差常用 γ 表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\%$$

上述两种误差的表示方法，通常用来表示测量结果的准确度。绝对误差与被测量具有相同的量纲，其值可正可负，是表示误差的基本形式，但相对误差更能体现测量结果的准确程度。例如：用温度计测量体温，假设体温的真值是 36.5°C ，如果读数是 37.5°C ，那么其绝对误差为 $+1^{\circ}\text{C}$ ，相对误差为 $+2.74\%$ ；用温度计测量主蒸汽温度，假设主蒸汽温度的真值为 540°C ，温度计的指示值为 541°C ，其绝对误差为 $+1^{\circ}\text{C}$ ，相对误差约为 $+0.19\%$ 。这两次测量绝对误差相同，但两个指示值的准确性是不同的，显然用相对误差表示测量结果的准确度更合适。

3. 引用误差

引用误差又叫诱导相对误差，是用测量仪表的量程代替真值所得到的相对误差。引用误差为绝对误差与仪表量程之比，也常用百分数的形式表示。引用误差也叫折合误差。

$$\gamma_y = \frac{\delta}{A} \times 100\% = \frac{x - \mu}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\%$$

式中， A 为仪表的量程； A_{\max} 、 A_{\min} 分别代表仪表的测量上限和测量下限。

引用误差通常用于表示仪表的质量指标。例如仪表的基本误差、允许误差一般都用引用误差的形式来表示。

1.2.2 测量误差的分类及处理方法

在测量过程中，测量误差是不可避免的，因此，只有在得到测量结果的同时，给出测量误差的范围，所得的测量结果才是有意义的。为了得到准确的测量结果，需要对测量误差进行分析与处理，并根据误差的规律性，找出消除或减少误差的方法，科学地表达测量结果，合理地设计测量系统。

根据测量误差性质不同，可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类，以便对测量误差采取不同的误差处理方法。

1. 随机误差

随机误差的定义是：测量结果与在重复性条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。在实际测量中，由于我们只能进行有限次测量，所以往往只能确定随机误差的估计值。随机误差的特征是：在相同条件下多次测量同一被测量时，误差的绝对值和符号毫无规律地变化。这类误差对于单个测量结果来说，误差的大小和正负都是不确定的，但对于一系列重复测量结果来说，误差的分布服从统计规律。

随机误差大多是由测量过程中大量彼此独立的微小因素对测量影响的综合结果造成的。这些因素通常是测量者所不知道的，或者因其变化过分微小而无法加以严格控制，因此，随机误差是无法消除的，只能通过分析找出误差的界限及误差出现的概率。

(1) 随机误差的正态分布性质 随机误差对于单个直接示值来说，它的大小和符号是不可预知的，但在同样条件下，对同一被测量进行反复测量，它的分布则服从统计规律。在测量次数足够多的前提下，随机误差概率密度分布服从正态分布规律，随机误差的正态分

布曲线如图 1-3 所示。图中, $f(\delta)$ 为概率密度函数, 其大小反映误差出现的概率。从大量测量结果观察统计, 可得到随机误差的分布性质。

1) 单峰性。绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差出现的概率大, 绝对值为零的误差出现的概率最大。正态分布曲线在误差为零处最高, 好像一座小山峰。

2) 对称性。绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相同。正态分布曲线以零误差为中心呈对称分布。

3) 有界性。绝对值很大的随机误差出现的概率接近零。正态分布曲线沿横轴向两边延伸时, 逐渐接近横轴。

4) 抵偿性。当测量次数趋近无穷多时, 所有误差的平均值趋近于零。由此可得出一个结论: 当测量次数趋近无穷多时, 平均值 \bar{x} 就等于真值 μ , 所以在实际测量中, 常用有限次测量的平均值来代替真值 μ 。

(2) 随机误差的正态分布概率 假设在同一条件下, 重复测量同一被测量, 测量次数用 n 表示, 直接示值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ 。

概率密度函数可用下式表示:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-4)$$

式中, δ 为绝对误差, $\delta = x - \mu$; σ 为测量列的标准 (偏) 差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

标准 (偏) 差是由测量条件决定的, 其数值大小说明在一定条件下进行测量时随机误差出现的概率密度分布情况。在一定的测量条件下, 随机误差的分布是确定的, 标准 (偏) 差的值也是确定的。

同一条件下的一系列直接示值, 具有相同的标准 (偏) 差, 不同条件下的两组测量量一般具有不同的标准 (偏) 差。标准 (偏) 差越小, 直接示值的准确度越高, 正态分布曲线越尖锐; 标准 (偏) 差越大, 正态分布曲线越平缓。图 1-4 给出了三组具有不同标准 (偏) 差的直接示值的随机误差正态分布曲线。

对概率密度函数求定积分就可以求出误差出现在某个区间 $[a, b]$ 内的概率。

$$P\{a \leq \delta \leq b\} = \int_a^b f(\delta) d\delta = \int_a^b \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) d\delta$$

如果把区间改成标准 (偏) 差的倍数, 即可求出误差出现在区间 $[-z\sigma, +z\sigma]$ 内的

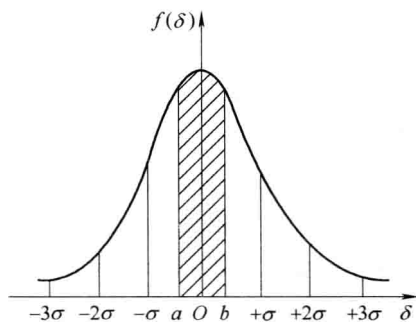


图 1-3 概率密度函数曲线

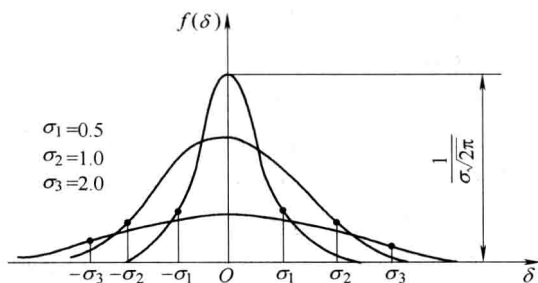


图 1-4 标准 (偏) 差对随机误差概率密度曲线的影响

概率为

$$\Phi(z) = P\{-z\sigma \leq \delta \leq +z\sigma\} = \int_{-z\sigma}^{+z\sigma} f(\delta) d\delta = \int_{-z\sigma}^{+z\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) d\delta$$

对于任意一组直接示值，只要 z 的值确定了，误差出现在这个区间的概率 $\Phi(z)$ 就确定了，其对应关系见表 1-1。

表 1-1 随机误差函数表

z	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.00000	0.07966	0.15852	0.23582	0.31084	0.38293	0.45149	0.51607	0.57629	0.63188
1	0.68269	0.72867	0.76986	0.80640	0.83849	0.86639	0.89040	0.91087	0.92814	0.94257
2	0.95450	0.96427	0.97219	0.97855	0.98360	0.98758	0.99068	0.99307	0.99489	0.99627
3	0.99730	0.99806	0.99863	0.99903	0.99933	0.99954	0.99968	0.99978	0.99986	0.99990

$[a, b]$ 或 $[-z\sigma, +z\sigma]$ 称为置信区间，置信区间所对应的概率 $P\{a \leq \delta \leq b\}$ 或 $P\{-z\sigma \leq \delta \leq +z\sigma\}$ 叫置信概率，也可叫置信水平。置信区间和置信概率共同表示测量结果的可靠性。 z 称为置信因数。置信区间 $[-\infty, +\infty]$ 内的置信概率为 1， $\alpha = 1 - \Phi(z)$ 叫显著性水平，代表误差落在置信区间以外的概率。从表 1-1 中可以看出，置信区间为 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 的置信概率为 0.9973，也就是说 99.73% 的随机误差的绝对值都小于 3σ ，所以，通常把 3σ 看作随机误差的限。

(3) 测量结果的分析与表示方法 随机误差在测量过程中是无法消除的，但我们可以根据随机误差规律，科学地表达测量结果。经过对随机误差的分析，可以得出下面的结论：当测量次数趋近无穷多时，平均值 \bar{x} 就等于真值 μ ，但这只是理论值，实际上我们是无法进行无数次测量的，也就是我们只是测量“母体”中的一部分，这部分称为子样，我们也只能从子样中求取母体的真值和实验标准（偏）差。假设在同一条件下对同一量进行 n 次测量，直接示值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ，下面介绍如何表示测量结果。

1) 真值的估算。

真值的估算值为

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2) 实验标准（偏）差。

在真值不知道的前提下，绝对误差和标准（偏）差是无法求出的。用真值的估算值代替真值，就得到残差（剩余偏差）和实验标准（偏）差。

残差为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

实验标准（偏）差为

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

式中， $n-1$ 为自由度。在标准差的计算中，和的项数减去对和的限制条件的个数就是自由度。由于残差有 $\sum_{i=1}^n v_i = 0$ 的性质，也就是只有这一个限制条件，所以，这时的自由度为 $n-1$ 。

3) 算术平均值的标准（偏）差。

测量子样的平均值是一个服从正态分布的随机变量,可以得到,算术平均值的标准(偏)差为

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

从上式看出算术平均值的标准(偏)差 $s_{\bar{x}}$ 是标准(偏)差值 s 的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍,也就是说,用有限次测量的平均值作为测量结果比单次测量结果具有更高的准确度,增加测量次数能提高平均值的准确度。但由于是二次方根的关系,在测量次数超过 30 次时,若再增加测量次数,效果就不明显了。此外,也很难做到长时间的重复测量而保持测量对象和测量条件的稳定。

4) 测量结果的表示。

对于进行有限次重复测量,测量结果一般可以表示为:以子样的平均值为中心,另外附加一个误差限,即 $x = \bar{x} \pm z s_{\bar{x}}$, 其中 z 是置信因数,其值由置信概率确定,因此表示测量结果时,也要把置信概率标出来,例如 $x = \bar{x} \pm 3 s_{\bar{x}}$ ($P = 99.73\%$)。

【例题 1-1】 用温度计测量一个恒定的温度,得到下列值(单位为 $^{\circ}\text{C}$): 98.61, 97.80, 98.13, 97.90, 98.47, 98.35, 98.10, 97.96, 98.27, 98.36, 98.32, 98.53, 98.20, 求被测温度(要求测量结果的置信概率为 95%)。

【解】 1) 求平均值: $\bar{x} = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} x_i \approx 98.23^{\circ}\text{C}$

2) 求实验标准(偏)差: $s = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{13} (x_i - \bar{x})^2} \approx 0.246^{\circ}\text{C}$

3) 求算术平均值的标准(偏)差: $s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.246}{\sqrt{13}}^{\circ}\text{C} \approx 0.068^{\circ}\text{C}$

4) 根据置信概率求置信区间: 根据置信概率为 95%, 查表 1-1, 用内插法得到: $z = 1.96$ 。则

$$z s_{\bar{x}} = 0.068 \times 1.96^{\circ}\text{C} \approx 0.13^{\circ}\text{C}$$

5) 测量结果表示为 $x = (98.23 \pm 0.13)^{\circ}\text{C}$ ($P = 95\%$)。

实际工作中,如果已经得到同样条件下的标准(偏)差估算值时,为简化起见,可以只进行一次测量,用单次测量的值与得到的标准(偏)差表示测量结果。如 $x = x_d \pm z s$ (标出置信概率), 其中 x_d 为单次测量的值, z 是由置信概率决定的置信因数。但用此方法表示时,在同样的置信概率下,置信区间增加了。

2. 系统误差

系统误差的定义是:在重复性条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量真值之差。由于只能进行有限次测量,真值是无法得到的,所以我们往往用适当次数重复测量的平均值代替真值,因此只能确定系统误差的估计值。系统误差的特征是:绝对值和符号保持不变或按某种确定规律变化,前者称为定值系统误差,后者称为变值系统误差。系统误差通常是由测量仪表本身的原因、仪表使用不当以及环境条件发生较大改变等原因引起的。例如:仪表零位未调整好,会引起恒值系统误差;环境条件发生较大变化往往引起变值系统误差。

测量系统和测量条件不变时,增加重复测量次数并不能减少系统误差。定值系统误差可

通过对测量仪表进行校验确定系统误差的值,求得与该误差数值相等符号相反的校正值,加到测量结果上来消除。对于变值系统误差,因为容易与随机误差混淆,所以首先要判断出是否属于系统误差。变值系统误差可以通过实验方法找出产生误差的原因及变化规律,改善测量条件来加以消除,也可以通过计算或在仪表上附加补偿装置加以校正。变值系统误差可通过下面几种方法判断。

(1) 根据测定值残差的变化规律判断 直接示值的误差需要在真值已知的前提下才能得到,在有限次测量的情况下,用平均值代替真值得到的绝对误差称为残差,通常用 v_i 表示。

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

将直接示值按测量的先后顺序排列,如果残差的代数值逐渐向正的或负的方向变化,则可能含有累积系统误差;如果残差的符号有规律地交替变化,则可能含有周期性系统误差。

(2) 马尔科夫准则 将直接示值按测量的先后顺序排列,用前一半直接示值残差之和减去后一半直接示值残差之和,当测量次数很多时,只要差值不等于零,就认为含有累积系统误差;当测量次数不很多时,只有差值大于测量列中的最大残差,才认为含有累积系统误差。

(3) 阿贝准则 将直接示值按测量的先后顺序排列,求出测量列标准(偏)差的估计值 s , 计算统计量 $c = \sum_{i=1}^{n-1} v_i v_{i+1}$ 。若 $|c| > \sqrt{n-1} s^2$, 则认为该组直接示值中含有周期性系统误差。

注意: 随机误差与变值系统误差之间既有区别又有联系,二者并无绝对的界限,在一定条件下它们可以相互转化。随着测量条件的改善和认识水平的提高,一些过去被视为随机误差的测量误差可能分离出来作为系统误差处理。

3. 粗大误差

测量结果明显地歪曲了真值的误差叫粗大误差,也叫疏失误差。粗大误差一般数值较大,严重影响测量结果的真实性,所以含有粗大误差的值叫坏值,也叫异常值。异常值应该剔除掉。粗大误差产生的原因往往是由于测量者的主观过失,如观测者过于疲劳,缺乏经验,操作不当或责任心不强等造成;也可能是测量系统突发故障。

需要说明的是,对粗大误差的处理不同于随机误差和系统误差,测量结果中的测量误差往往是系统误差和随机误差的综合,但不允许出现粗大误差。对粗大误差的处理方法是通过检验发现粗大误差,以便剔除。在我国的国家计量技术规范 JJF 1001—1998《通用计量术语及定义》和 JJF 1059—1999《测量不确定度评定与表示》中均取消了“粗大误差”这一术语,但保留了术语“异常值”的使用。JJF1059—1999 中明确指出:异常值的剔除应通过对数据的适当检验进行。目前在最新国家标准 GB/T 4883—2008《数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理》中,又把“异常值”改为“离群值”。

下面介绍对粗大误差的检验及处理办法。对于同一条件下,多次测量同一被测量所得的一组直接示值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, 判断粗大误差的方法通常有下面两种。

(1) 拉依达准则 对于一组直接示值,如果其中某一直接示值的残差 v_i 的绝对值大于该测量列的标准(偏)差的三倍,那么可认为该直接示值含有粗大误差,即

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma$$

实际使用中,如果标准(偏)差 σ 没法得到,可以用标准(偏)差的估计值 s 代替。

按上述方法剔除异常值后，应重新计算剔除异常值后测量列的算术平均值和实验标准（偏差） s ，再判断，直至余下直接示值中无异常值存在。用此准则判断粗大误差的存在，依据是随机误差的正态分布规律，所以测量次数越多越准确，如果测量次数不够多时，由于所取界限太宽，粗大误差漏判的可能性较大，当测量次数少于 10 次时，不建议使用此方法。

(2) 格拉布斯准则 把格拉布斯准则数 T_i 与格拉布斯准则的临界值 $T(n, \alpha)$ 相比较。

$$\text{格拉布斯准则数为} \quad T_i = \frac{|v_i|}{s} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

然后根据直接示值的个数 n 和所选取的判断显著性水平 α ，从表 1-2 中查出相应的格拉布斯准则临界值 $T(n, \alpha)$ ，当 $T_i \geq T(n, \alpha)$ 时，则认为 x_i 含有粗大误差，应剔除，然后重新计算格拉布斯准则数，重新判断，一次只能剔除一个异常值。

表 1-2 格拉布斯准则临界值 $T(n, \alpha)$

α		0.05		0.01		α		0.05		0.01	
		n		n				n		n	
3		1.153		1.155		17		2.475		2.785	
4		1.463		1.492		18		2.504		2.821	
5		1.672		1.749		19		2.532		2.854	
6		1.822		1.944		20		2.557		2.884	
7		1.938		2.097		21		2.580		2.912	
8		2.032		2.221		22		2.603		2.939	
9		2.110		2.323		23		2.624		2.963	
10		2.176		2.410		24		2.644		2.987	
11		2.234		2.485		25		2.663		3.009	
12		2.285		2.550		30		2.745		3.103	
13		2.331		2.607		35		2.811		3.178	
14		2.371		2.659		40		2.866		3.240	
15		2.409		2.705		45		2.914		3.292	
16		2.443		2.747		50		2.956		3.336	

在用格拉布斯准则判断粗大误差时，实际上给粗大误差定了一个界限值，当误差大于等于界限值时，就认为是粗大误差，否则，就不是粗大误差。界限值的大小是由显著性水平决定的，显著性水平在表 1-2 中可以取 0.05 和 0.01。通过对随机误差的学习我们知道，对于同一组测量数值，显著性水平取的越大，置信区间就小，也就是把粗大误差的界限值的绝对值得取得小。在标准 GB/T 4883—2008 中，把离群值分为检出水平下岐离值和剔除水平下的统计离群值，如无特殊约定一般岐离值的 α 取 0.05，统计离群值的 α 取 0.01，但在任何情况下，剔除水平的 α 的取值都不应该超过检出水平的 α 。

在用上述两种方法判断粗大误差时，为了简便起见，应先从误差绝对值最大的开始判断，然后按误差绝对值逐渐减小的顺序逐渐判断。下面通过例题说明粗大误差的判断方法。

【例题 1-2】 对某喷嘴开孔直径进行 15 次测量，直接示值如下（单位为 mm）：120.42，120.43，120.40，120.43，120.42，120.30，120.39，120.43，120.40，120.43，120.42，120.41，120.39，120.39，120.40。试分别用拉依达准则和格拉布斯准则判断该批数据是否含有粗大误差（取显著性水平 $\alpha=0.05$ ）。