



教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
职业教育电力技术类专业教学用书

# 热工测量及仪表

潘汪杰 主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
职业教育电力技术类专业教学用书

# 热工测量及仪表

主编 潘汪杰  
编写 黄桂梅 史金铎  
主审 李国光 李学明



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书重点介绍了一些发展成熟的仪表及传感器的基本原理、基本结构、使用方法、校验方法及安装方法等知识, 主要内容包括: 热工测量的基本知识, 温度测量及仪表, 压力测量及仪表, 流量测量及仪表, 水位测量及仪表, 其他参数测量仪表等。

本书可作为高职高专类电厂集控运行、检测技术及自动化等专业“热工测量技术”、“热工测量及仪表”、“传感器及检测技术”课程的教材, 也可供其他专业及广大工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

热工测量及仪表/潘汪杰主编. —北京: 中国电力出版社, 2005  
教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
ISBN 7-5083-3026-9

I. 热... II. 潘... III. ①热工测量—成人教育: 高等教育—教材②热工仪表—成人教育: 高等教育—教材 IV. ①TK3②TH81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 013438 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

三河市德利印刷有限公司

各地新华书店经售

\*

2005 年 5 月第一版 2006 年 8 月北京第四次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 12 印张 253 千字

印数 9001~12000 册 定价 15.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 前言

---

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，同意列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书在重点介绍了一些发展成熟的仪表及传感器的基本原理和基本结构、使用方法、校验方法及安装方法等知识的基础上，内容上也力求反映近年来检测领域中的新技术、新方法和新发展，并注重实用性和先进性，力求做到理论与实践相结合。

本书由武汉电力职业技术学院潘汪杰主编，并编写了第二章、第五章；保定电力职业技术学院黄桂梅编写了第三章、第四章；保定电力职业技术学院史金铎编写了第一章、第六章。潘汪杰负责全书的统稿工作。

全书由襄樊电厂高级工程师李学明博士和华北电力大学李国光教授主审。编者对主审老师对本书付出的心血表示深深的谢意。同时，本书在编写过程中，得到了湖北电力公司、河北电力公司等单位的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，恳请广大读者不吝赐教。

编者

2004.12

# 目 录

## 前言

<b>第一章 热工测量的基本知识</b> .....	1
第一节 测量的概念和测量方法 .....	1
第二节 热工测量仪表的组成与分类 .....	3
第三节 测量误差及其种类 .....	4
第四节 测量误差的处理 .....	6
第五节 仪表的质量指标及仪表的校验 .....	11
本章小节 .....	14
复习思考题与习题 .....	14
<b>第二章 温度测量及仪表</b> .....	15
第一节 温度测量的基本知识 .....	15
第二节 热电偶 .....	18
第三节 热电阻 .....	33
第四节 模拟显示仪表 .....	38
第五节 数字显示技术 .....	44
第六节 温度变送器 .....	46
第七节 非接触式测温仪表 .....	48
第八节 光纤传感器 .....	55
本章小节 .....	60
复习思考题与习题 .....	62
<b>第三章 压力测量及仪表</b> .....	64
第一节 压力的概念及压力测量仪表的分类 .....	64
第二节 液柱式压力计 .....	65
第三节 弹性式压力计 .....	67
第四节 压力(差压)变送器 .....	71
第五节 压力取样及管路敷设 .....	85
第六节 压力测量系统故障分析 .....	86
本章小节 .....	88
复习思考题与习题 .....	89
<b>第四章 流量测量及仪表</b> .....	90
第一节 流量测量概述 .....	90
第二节 差压式流量计 .....	92
第三节 超声波流量计 .....	100
第四节 智能流量计 .....	104
第五节 其他流量计 .....	106

第六节 流量计的检定 .....	109
本章小节 .....	112
复习思考题与习题 .....	113
<b>第五章 水位测量及仪表 .....</b>	<b>115</b>
第一节 就地水位计 .....	115
第二节 差压式水位计 .....	118
第三节 电接点水位计 .....	129
本章小节 .....	134
复习思考题与习题 .....	135
<b>第六章 其他参数测量及仪表 .....</b>	<b>137</b>
第一节 氧化锆氧量计 .....	137
第二节 电子皮带秤 .....	144
第三节 机械位移量测量仪表 .....	146
第四节 转速测量仪表 .....	150
第五节 振动测量仪表 .....	153
本章小节 .....	155
复习思考题与习题 .....	156
附表 1 铂铑 10 - 铂热电偶分度表 .....	157
附表 2 铂铑 13 - 铂热电偶分度表 .....	157
附表 3 铂铑 30 - 铂铑 6 热电偶分度表 .....	158
附表 4 镍铬 - 镍硅 (镍铝) 热电偶分度表 .....	158
附表 5 镍铬 - 康铜热电偶分度表 .....	159
附表 6 铂热电阻分度表 .....	159
附表 7 铂热电阻分度表 .....	159
附表 8 铜热电阻分度表 .....	160
附表 9 铜热电阻分度表 .....	160
参考文献 .....	161

## 热工测量的基本知识

**【教学提示】** 本章讲述了测量及测量误差的基本概念，测量的一般方法，测量仪表的组成及种类，测量误差的种类、表示方法和误差的处理方法，以及评估测量仪表质量优劣的技术指标等内容。本章重点是测量误差的种类及表示方法，测量误差的处理方法及仪表的质量指标。

“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。人类在从事科学研究、工程技术以及其他一切生产活动时，为了取得各种事物之间的定量关系，就必须进行测量。测量是人们认识事物本质所不可缺少的手段。

不同的科技和生产领域，有不同的测量项目和测量特点。热工测量是指在热工过程中对各种热工参数，如温度、压力、流量、物位等的测量（热力发电厂中，有时也把成分分析、转速、振动等列入其中）。

在热力发电厂中，通过热工测量可以及时地反映热力设备以及热力系统的运行工况，为运行人员提供操作的依据，并且为热工自动控制准确、及时地提供所需的信号。因此，热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动控制的必要手段。

### 第一节 测量的概念和测量方法

#### 一、测量的定义

所谓测量，就是利用测量工具，通过实验的方法将被测量与同性质的标准量（即测量单位）进行比较，以确定出被测量是标准量多少倍数的过程。所得到的倍数就是被测量的值，即

$$L = \frac{x}{b} \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——被测量；

$b$ ——标准量（测量单位）；

$L$ ——所得到的被测量的值，即得到的测量结果。

从式中可知，被测量的值与所选用的测量单位有关。测量单位人为规定，并得到国家或国际公认。在“国际单位制”诞生前，各国、各地区的测量单位各不相同，同类被测量比较时，必须进行单位换算，很不方便，且有些测量单位制订的科学性和严密性较差。随着科学技术的发展和国际科技、经济交往的加强，人们迫切要求制订统一的测量单位。1960年，第十一届国际计量大会通过了“国际单位制”，代号为SI，它对长度、质量、时间、电流和热力学温度等七种基本单位作了统一规定。其他的物理量单位，可以由这七种基本单位一一导出。实践证明，国际单位制具有科学、合理、精确、实用等优点，给生产建设和科技发展带来了很大方便。我国于1984年2月27日由国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。法定计量单位是以国际单位制为基础，结合我国实际情况增加了一些非国际

单位制单位构成的。在热工测量中，应积极推广使用。

## 二、测量方法

测量是一种实验工作，为了及时获得准确可靠的数据，必须根据行业的要求及被测对象的特点，选择合理的测量方法。

根据获得测量结果的程序不同，测量可分为：

(1) 直接测量。就是将被测量直接与所选用的标准量进行比较，或者用预先标定好的测量仪表进行测量，从而直接得出测量值的方法。如用尺测长度，用玻璃管水位计测水位等。

(2) 间接测量。通过直接测量与被测量有确定函数关系的其他各个变量，然后将所得的数值代入函数式进行计算，从而求得被测量值的方法称为间接测量。例如，用平衡容器测量汽包水位；通过测量导线电阻、长度及直径求电阻率等。

(3) 组合测量。组合测量是在测量出几组具有一定函数关系的量值的基础上，通过解联立方程来求取被测量的方法。例如，在一定温度范围内铂电阻与温度的关系为

$$R_t = R_{t_0} (1 + At + Bt^2)$$

式中  $R_{t_0}$ ——铂电阻在  $0^\circ\text{C}$  时的电阻值；

$R_t$ ——铂电阻在  $t^\circ\text{C}$  时的电阻值；

$A, B$ ——温度系数（常数）。为了求出温度系数  $A, B$ ，可以分别直接测出  $0^\circ\text{C}$ 、 $t_1^\circ\text{C}$ 、 $t_2^\circ\text{C}$  三个不同温度值及相应温度下的电阻值  $R_{t_0}$ 、 $R_{t_1}$ 、 $R_{t_2}$ ，然后通过解联立方程来求得  $A, B$  的数值。

根据检测装置动作原理不同，测量可分为：

(1) 直读法。被测量作用于仪表比较装置，使比较装置的某种参数按已知关系随被测量发生变化，由于这种变化关系已在仪表上直接刻度，故直接可由仪表刻度尺读出测量结果。例如，用玻璃管水银温度计测量温度时，可直接由水银柱高度读出温度值。

(2) 零值法（平衡法）。将被测量与一个已知量进行比较，当二者达到平衡时，仪表平衡指示器指零，这时已知量就是被测量值。例如，用天平测量物体的质量，用电位差计测量电势都是采用了零值法。

(3) 微差法。当被测量尚未完全与已知量相平衡时，读取它们之间的差值，由已知量和差值可求出被测量值。用不平衡电桥测量电阻就是用微差法测量的例子。零值法和微差法测量对减小测量系统的误差很有利，因此测量准确度高，应用较为广泛。

根据仪表是否与被测对象接触，测量可分为：

(1) 接触测量法。仪表的一部分与被测对象相接触，受到被测对象的作用才能得出测量结果的测量方法。例如用玻璃管水银温度计测温度时，温度计的温包应该置于被测介质之中，以感受温度的高低。

(2) 非接触测量法。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。例如用光学高温计测温，是通过被测对象所产生的热辐射对仪表的作用而实现测温的，因此仪表不必与对象直接接触。



## 第二节 热工测量仪表的组成与分类

### 一、组成

热力发电厂中的热工参数，多数不能直接测量，一般总是借助于一些物质的物理、化学性质的关联性把测量参数转变为其他便于测量的相关量，以间接得出被测参数的数值。因此，各种测量仪表尽管工作原理、结构外形等有所不同，但从其各部分结构的功能和作用上看，总不外乎由三部分组成，即感受部件、传输变换部件及显示部件，如图 1-1 所示。

#### 1. 感受部件

感受部件也称一次仪表，它是测量仪表的感受部分直接与被测对象相联系（但不一定直接接触）。它的作用是感受被测参数的大小和变化，并且必须随着被测参数变化产生一个相应的信号输出到传输变换部件。

仪表能否快速、准确地反映被测参数的大小，很大程度上取决于感受部件。对感受部件的具体要求是：

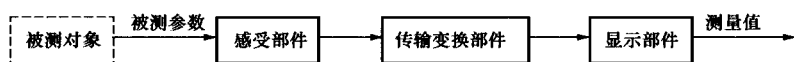


图 1-1 测量仪表组成方框图

(1) 输出信号与被测参数的变化之间呈单值函数关系，最好呈线性关系，并有较高的灵敏度，即有较小的被测量变化时，输出信号就有较显著的变化。

(2) 对非被测量的变化，感受部件应不受影响或受影响极小。

(3) 反应快、迟延小。

感受部件要完全满足上述条件一般比较困难，因而通常在仪表内部采取一些措施加以弥补。例如设置中间放大环节以弥补感受件灵敏度的不足，设置补偿环节以克服非被测量的影响以及采用线性化环节克服非线性等。

#### 2. 传输变换部件

传输变换部件也称中间件，它的作用是，将感受件输出的信号，根据显示件的要求传送给显示件。因此有的中间件只是单纯起传递作用；有的则可放大感受件发出的信号；还有的在感受件输出信号不便于远距离传送，或者因某些特定要求需要变为某种统一的信号时，中间件可以根据要求将感受件的输出信号变换为相应的其他输出量，如电流、电压等，再送到显示部件。这种传输变换部件往往构成独立完整的器件，通称为变送器。

#### 3. 显示部件

显示部件也称二次仪表，其作用是接受传输变换部件送来的信号并将其转换为测量人员可以辨识的信号。

根据显示方式不同，仪表一般可分为模拟显示仪表、数字显示仪表和屏幕显示仪表。模拟显示仪表通过指针、液面、光标或图形图像等形式，反映被测量的连续变化；数字显示仪表则用数字量显示出被测量值的大小；屏幕显示仪表通过液晶屏或 CRT 显示屏以图形、数字等多种形式显示被测量的大小。

有些测量仪表根据不同的需要，还具有记录、累计、报警及调节等功能，有些还可以巡回检测多个不同的参数。

## 二、仪表的分类

根据仪表的用途、原理及结构等不同，热工仪表可分为多种类型。

(1) 按被测参数不同，可分为温度、压力、流量、物位、成分分析及机械量（位移、转速、振动等）测量仪表。

(2) 按仪表的用途不同，可分为标准用、实验室用及工程用仪表。

(3) 按显示特点和功能不同，可分为指示式、记录式、积算式、数字式及屏幕式仪表。

(4) 按工作原理不同，可分为机械式、电气式、电子式、化学式、气动式和液动式仪表。

(5) 按安装地点不同，可分为就地安装式及盘用仪表。

(6) 按使用方式不同，可分为固定式和便携式仪表。

在热工生产现场，大多采用结构牢固，能适应较为恶劣环境的工程用仪表，标准仪表则常作为实验室校验工程用仪表以及作为标准传递之用。

## 第三节 测量误差及其种类

### 一、测量误差及其表示方法

测量工作是一种实验工作，所以在进行测量工作时，由于仪表本身不完善，测量人员操作不当，测量时客观条件的变化以及受人类自身认识水平的局限等原因，都会使得测量结果与被测量的真实值之间出现不符的现象，即存在测量误差。

测量误差一般有以下三种表示方法。

#### 1. 绝对误差

绝对误差是指仪表的测量值与被测量的真实值之间的差值，即

$$\delta = x - x_0 \quad (1-2)$$

式中  $\delta$ ——绝对误差；

$x$ ——测量值；

$x_0$ ——被测量的真实值（真值）。

应该指出，在测量过程中测量误差的存在是不可避免的，任何测量值都只能近似反映被测量的真实值。也就是说， $x_0$ 也只能是理论上的真实值。在实际的热工测量中，绝对准确的真实值是得不到的。因此，在常规的测量中，我们一般把比所用的测量仪表更准确的标准表的测量结果作为被测量的真实值。

#### 2. 相对误差

相对误差是仪表的绝对误差与被测量的真实值之比，用百分数表示，即

$$\text{相对误差} = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

对于大小不同的测量值，相对误差比绝对误差更能反映测量的准确程度，相对误差越小，测量的准确性越高。

#### 3. 折合误差

绝对误差和相对误差的表示形式都不能用于判断测量仪表的质量，因为，两只仪表如果绝对误差相同，但仪表的量程不同，显然量程范围大的那只仪表准确度更高些。所以，判断

仪表的质量时一般不采用绝对误差和相对误差的表示形式，而采用折合误差。折合误差也称为引用误差，是指仪表的绝对误差与该仪表的量程范围之间的百分比，即

$$\gamma = \frac{x - x_0}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中  $A_{\max} - A_{\min}$ ——仪表的量程。

无论如何，误差的存在对于测量工作来说都是不利的。为了减小测量误差，得到更接近于真实值的测量结果，有必要对测量误差产生的原因及变化规律进行分析。

## 二、测量误差的分类

根据误差的性质不同，可分为以下三个大类。

### 1. 系统误差

在相同条件下多次重复测量同一被测量时，如果每次的测量值误差基本保持不变或者按一定规律变化，则这种误差被称为系统误差。

系统误差通常是由于仪表的测量方法或测量系统本身不够完善，或者仪表使用不得当，以及测量时外界条件变化等原因造成的。例如，仪表的零位变化或者量程未调整好，仪表未在规定的温度下使用，仪表的安装不符合要求等等。

在掌握了系统误差产生的原因后，可以对仪表加以校对。可以通过采用正确的使用方法，在仪表规定的条件下使用仪表，对测量仪表或测量系统进行完善，或对测量结果加修正等措施，来设法消除系统误差，以提高测量的准确程度。

系统误差的大小表明了测量结果偏离真实值的程度，即“正确度”的大小。系统误差越小，测量的正确度越高。

### 2. 随机误差

在设法消除了系统误差之后，在相同条件下，对同一量值进行多次反复测量（亦称等精度测量）时，也会出现绝对值和符号不确定的微小误差，这种误差称为随机误差，也称为偶然误差。

随机误差大多数是由于测量过程中大量彼此独立的微小因素对测量的影响造成的，这些因素往往是尚未知道和难以控制的。随机误差表面看好象无任何规律，但仔细研究却可以发现，随着重复测量的次数增加，随机误差的出现还是有规律可循的，即绝对值越小的误差出现的机会越多，正负误差出现的机会基本相同。

随机误差的大小表明了一个测量系统的测量“精密度”。如果在一组等精度测量中，绝对值小的随机误差出现率越高，也就是说随机误差越小，则表明该测量系统的测量“精密度”越高，即多次测量值的一致性越好。

关于随机误差的处理我们在下一节中将详细讨论。

### 3. 疏忽误差

疏忽误差是由于测量人员在测量过程中疏忽大意、仪表的误动作等原因造成的测量误差，也称为粗大误差。

疏忽误差一般数值较大，严重影响测量结果的真实性和准确性，所以含有疏忽误差的测量值也被称为坏值。因此，测量人员在测量过程中应有高度的责任感和熟练的操作技术，尽量避免坏值的出现。

坏值对测量是没有意义的，应该从测量结果中剔除。鉴别和剔除坏值也要遵循一定的准

则。

很显然，一个好的测量系统，应该尽量减小测量的系统误差和随机误差，并避免疏忽误差的出现。这就要求不断完善测量仪表的工作原理，不断提高测量工作人员的技术素质。

## 第四节 测量误差的处理

### 一、随机误差的处理

#### 1. 当重复测量的次数足够多时

通过对大量的等精度测量的结果进行观察和分析后可知，随机误差具有如下性质：大小相同、符号相反的误差出现的概率相同；当测量次数足够大时，全体误差的代数和为零；绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的概率大；绝对值非常大的误差基本不出现。因此，当重复测量的次数足够多时，随机误差的分布规律服从于数学的概率统计理论中的正态分布规律。所以，我们可以根据这种分布规律，从一系列重复测量值中求出被测量值的最可信值作为测量的最终结果，并给出该结果以一定概率存在的范围，此范围称作置信区间，被测量的随机误差出现在该置信区间的概率称为置信概率。严格地说，一个测量结果，必须同时附有相应的置信区间和置信概率的说明，否则该测量结果就是无意义的。

随机误差概率密度的正态分布曲线如图 1-2 所示，曲线的横坐标为误差  $\delta = x - x_0$ ，纵坐标为随机误差的概率密度  $f(\delta)$ ，概率密度  $f(\delta)$  与误差  $\delta$  之间的关系为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}} \quad (1-6)$$

式中  $\delta$ ——测量值的误差， $\delta = x - x_0$ ；  
 $x$ ——测量值；  
 $x_0$ ——被测量的真实值；  
 $\sigma$ ——标准误差（均方根误差）；  
 $n$ ——重复测量的次数。

由图可见， $f(\delta) d\delta$  即为测量误差落在  $\delta_i$  与  $\delta_i + \Delta\delta$  之间的概率。如  $\delta = x - x_0$ ，并给出误差区间  $[a, b]$ ，则随机误差  $\delta$  出现在区间  $[a, b]$  上的概率为

$$P\{a \leq \delta \leq b\} = \int_a^b f(\delta) d\delta \quad (1-7)$$

其数值等于图 1-2 中阴影部分的面积。由于  $-\infty < \delta < +\infty$ ，

为必然事件，所以  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(\delta) d\delta = 1$ 。

为了方便地表示随机误差的大小，随机误差发生的范围即置信区间，常用标准偏差  $\sigma$  的倍数表示，即  $\pm z\sigma$ ，其中  $z$  为置信系数。把概率  $P\{-a \leq \delta \leq a\}$  称为在  $\pm a$  置

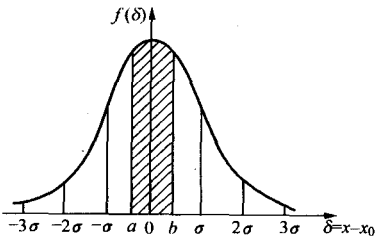


图 1-2 正态分布曲线

信区间上的置信概率或置信水平；把  $1 - P = \alpha$  称为显著性水平。置信区间和置信概率合起来称为置信度，即可信赖的程度。

显然，置信区间愈宽，置信概率愈大；置信区间愈窄，置信概率也愈小。

由计算可以得出，当置信区间分别为  $\pm \sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$  时，相应的置信概率分别为 0.6827、0.9545 和 0.9973。由此可见，对于一组重复测量值中的任意一个测量值来说，随机误差超出  $\pm 3\sigma$  的概率仅有千分之三。对于概率如此小的事件，实际上可近似认为是不可能发生的事件，即在进行测量时，其随机误差的最大值不会超过  $\pm 3\sigma$ 。因此，通常把  $\pm 3\sigma$  称为最大误差或极限误差，把  $3\sigma$  称为随机不确定度，简称不确定度。

应当指出，在实际测量工作中，被测量的真实值  $x_0$  通常是不知道的，只能对其作出最佳估计，即求出其最优概值。通常，在直接测量中，如果重复测量的次数足够多（一般在 60 次以上）时，其最优概值就是全部测量值的算术平均值  $\bar{x}$ 。

此时，标准误差的估计值可由贝塞耳公式求出，即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1-8)$$

也就是说，测量结果应表示成

$$\bar{x} \pm zS \quad (\text{置信概率})$$

其中  $z$  为置信系数。

而在对测量仪表进行校验时，被测量的真值则可用标准表的测量值来代替。

## 2. 当重复测量的次数较少时

正态分布是大量随机事件的分布规律，也就是说，只有当重复测量的次数足够多时，测量结果才服从正态分布。而在实际测量中，测量次数越多，越难保证测量条件的恒定，所以重复的次数不可能太多，一般在 20 ~ 30 次以下。测量次数少，造成数据离散度大，此时实验数据将不服从正态分布而是服从  $t$  分布（又称 Student 分布），这时测量值的置信区间和置信概率可由  $t$  分布求得。

对于有限次的重复测量，其测量结果为

$$\bar{x} \pm t \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{置信概率}) \quad (1-9)$$

式中  $\bar{x}$ ——全部测量值的算术平均值；

$S$ ——标准偏差的估计值；

$n$ ——重复测量的次数；

$t$ —— $t$  分布系数。

系数  $t$  取决于置信概率  $P$  和均方根误差估计值  $S$  的自由度  $\nu$ ， $\nu = n - 1$ （这是由于计算平均值时已失去一个自由度）。系数  $t$ 、置信概率  $P$  及自由度之间的关系见表 1-1。

**【例 1-1】** 对某已知电阻进行了 8 次测量，得到的测量结果分别为 15.30, 14.94, 15.19, 14.86, 15.11, 15.15, 14.97, 15.35，要求测量结果的置信概率为 99%，求该电阻的真实阻值及不确定度。

解  $n = 8$

表 1-1

t 分 布

置信概率 P		t 分 布			置信概率 P			
t 值	90%	95%	99%	t 值	90%	95%	99%	
自由度 v				自由度 v				
1	6.314	12.706	63.657	18	1.734	2.101	2.878	
2	2.920	4.303	9.925	19	1.729	2.093	2.868	
3	2.353	3.182	5.841	20	1.725	2.086	2.845	
4	2.132	2.770	4.604	21	1.721	2.080	2.831	
5	2.015	2.571	4.032	22	1.717	2.074	2.819	
6	1.943	2.447	3.707	23	1.714	2.069	2.807	
7	1.895	2.365	3.499	24	1.711	2.064	2.797	
8	1.860	2.306	3.355	25	1.708	2.060	2.787	
9	1.833	2.262	3.250	26	1.706	2.056	2.779	
10	1.812	2.228	3.169	27	1.703	2.052	2.771	
11	1.796	2.201	3.106	28	1.701	2.048	2.763	
12	1.782	2.179	3.055	29	1.699	2.045	2.756	
13	1.771	2.160	3.012	30	1.697	2.042	2.750	
14	1.761	2.145	2.977	40	1.684	2.021	2.704	
15	1.753	2.131	2.947	60	1.671	2.000	2.660	
16	1.746	2.120	2.921	120	1.658	1.980	2.617	
17	1.740	2.110	2.898	∞	1.645	1.960	2.576	

测量结果的最优概值为  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 15.11(\Omega)$

标准偏差的估计值为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (x_i - 15.11)^2}{8-1}} = \sqrt{\frac{0.2127}{8-1}} = 0.17(\Omega)$$

自由度  $v = 8 - 1 = 7$ , 置信概率为  $P = 99\%$ , 从表 1-1 中可以查出  $t = 3.499$ , 故最优概值的不确定度为

$$\pm t \frac{S}{\sqrt{n}} = \pm 0.21 (\Omega) \quad (99\%)$$

所以该电阻的真实阻值应取  $R = \bar{x} \pm t \frac{S}{\sqrt{n}} = 15.11 \pm 0.21 (\Omega) (99\%)$

### 3. 间接测量随机误差的处理

当间接被测量  $y$  与多个互相独立的直接被测量  $x_1, x_2, \dots$  之间有如下函数关系

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

并且  $x_1, x_2, \dots$  的标准误差分别为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots$  时,  $y$  的标准误差可由下式求得:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2 \quad (1-10)$$

上式称为随机误差传递公式,  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  称为误差传递系数。

## 二、疏忽误差的剔除

在一系列测量数据中，可能会包含个别的坏值，这些坏值会严重影响测量结果的可靠性和真实性，所以应当加以剔除，但在剔除之前应鉴别其是不是坏值。鉴别的原则，就是设置一定的置信概率，看这个可疑值的误差是否在相应的置信区间内，如果不在，则判其为坏值，并加以剔除。

鉴别坏值的标准很多，下面介绍几种工业测量中常用的鉴别标准。

### 1. 拉依达检验准则

也称  $3\sigma$  判据。由前面的分析可知，在多次重复测量中，误差的绝对值大于  $3\sigma$  的测量值出现的概率只有 0.3%，因此，就把  $3\sigma$  作为检验的临界值。当某次测量值  $x_i$  的残差  $|x_i - \bar{x}| > 3\sigma$  时，即认为  $x_i$  为坏值，将其剔除后再重新计算剩余测量值的算术平均值  $\bar{x}$  和标准误差  $\sigma$ ，然后再用上述表达式对剩余的测量值进行检验，直到没有坏值为止（实际测量中，可用标准误差的估计值  $S$  来代替标准误差  $\sigma$  进行判别）。

此判据简单方便，所以常被测量工作者使用。但应注意的是，此判据是建立在重复测量次数为无穷多次的基础上的，当测量次数较少时，此判据并不十分可靠，即有些被判为坏值的测量值其实并非坏值，使得剔除后的测量结果有虚假的较高准确度。

### 2. 格拉布斯检验准则

对某个量进行  $n$  次重复测量，得到一组为  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的测量值，且服从正态分布。设其中  $x_i$  为可疑数据，可用下式计算  $T$ ：

$$T = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S} \quad (1-11)$$

其中  $\bar{x}$ ——算术平均值；

$S$ ——均方根误差估计值。

然后根据重复测量次数  $n$  和所选的置信概率  $P$ ，从表 1-2 中查得格拉布斯准则的临界值  $T_g$ ，如果  $T > T_g$ ，则认为此可疑数据为坏值，应予剔除。剔除后用剩余的  $n-1$  个测量数据重新计算  $\bar{x}$  和  $S$ ，再用上述公式检查其他可疑数据，直至没有坏值为止。

使用该准则时，置信概率不宜选得过低，如选得过低，则可能把不是坏值的数据当作坏值剔除。

表 1-2 格拉布斯检验准则的临界值  $T_g$

$n$	$T_g$		$n$	$T_g$		$n$	$T_g$	
	$P=0.95$	$P=0.99$		$P=0.95$	$P=0.99$		$P=0.95$	$P=0.99$
3	1.15	1.16	11	2.23	2.48	23	2.62	2.96
4	1.46	1.49	13	2.33	2.61	24	2.64	2.99
5	1.67	1.75	15	2.41	2.71	25	2.66	3.01
6	1.82	1.94	17	2.48	2.78	30	2.74	3.10
7	1.94	2.10	19	2.53	2.85	35	2.81	3.18
8	2.03	2.22	20	2.56	2.88	40	2.87	3.24
9	2.11	2.32	21	2.58	2.91	50	2.96	3.34
10	2.18	2.41	22	2.60	2.94	100	3.17	3.59

3.  $t$  分布检验准则

当重复测量的次数较少时 ( $n < 20$ ), 用  $t$  分布检验准则较为合适。得到一组  $n$  个数据, 将被怀疑的数据先剔除, 而后按余下的  $(n-1)$  个测量值来计算算术平均值和均方根误差的估计值:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1} \quad (1-12)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2}{n-2}} \quad (1-13)$$

按要求的置信概率  $P$  和剩余测量数据的自由度  $v = n-2$  查表 1-3, 确定  $t$  分布的临界值  $T_t$ , 若被剔除的读数确实含有疏忽误差, 它的统计量  $T$  就满足下式关系:

$$T = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S} \geq T_t \quad (1-14)$$

式中  $x_i$ ——被剔除的读数;

$\bar{x}$ ——按余下的  $(n-1)$  个读数计算的算术平均值;

$S$ ——按余下的  $(n-1)$  个读数计算的均方根误差的估计值。

也就是说将该读数剔除是正确的; 反之, 若不满足式 (1-14), 则表明该测量值不含疏忽误差, 应该重新将它收入到数据列, 并重新计算误差。

表 1-3

 $t$  分布检验准则的临界值  $T_t$ 

$v \backslash P$	0.999	0.99	0.95	$v \backslash P$	0.999	0.99	0.95
2	77.696	77.964	15.561	17	4.131	3.006	2.181
3	36.486	11.460	4.969	18	4.074	2.997	2.168
4	14.468	6.530	3.558	19	4.024	2.953	2.156
5	9.432	5.043	3.041	20	3.979	2.932	2.145
6	7.409	4.355	2.777	21	3.941	2.912	2.135
7	6.370	3.963	2.616	22	3.905	2.895	2.127
8	5.733	3.711	2.508	23	3.874	2.880	2.119
9	5.314	3.536	2.431	24	3.845	2.865	2.112
10	5.014	3.409	2.372	25	3.819	2.852	2.105
11	4.791	3.310	2.327	26	3.796	2.840	2.099
12	4.618	3.233	2.291	27	3.775	2.830	2.094
13	4.481	3.170	2.261	28	3.755	2.820	2.088
14	4.369	3.118	2.236	29	3.737	2.810	2.083
15	4.276	3.075	2.215	30	3.719	2.802	2.079
16	4.198	3.038	2.197	40	3.602	2.742	2.048



**【例 1-2】** 试按  $t$  分布检验准则判别一组测量数据: 5.29, 5.30, 5.31, 5.30, 5.32, 5.29, 5.28, 5.27, 5.31, 5.28 中是否有疏忽误差。

**解** 以上 10 个测量数据中, 5.32 数值最大, 我们先假定它是坏值, 将它剔除后计算剩余数据的算术平均值和标准误差的估计值得:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{10-1} x_i}{10-1} = 5.292$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10-1} (x_i - 5.292)^2}{10-2}} = 1.39 \times 10^{-2}$$

若要求置信概率  $P=0.95$ , 且剩余数据的自由度  $\nu=10-2=8$ , 查表 1-3 得  $T_i=2.508$ 。而

$$T = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S} = \frac{|5.32 - 5.292|}{1.39 \times 10^{-2}} = 2.014$$

显然  $T < T_i$ , 所以 5.32 这个测量值为正常测量值, 不应该剔除。

由此方法, 可以得出 5.27 也不是坏值, 所以上述 10 个测量数据中不含疏忽误差。

## 第五节 仪表的质量指标及仪表的校验

### 一、仪表的质量指标

仪表的质量指标是评估仪表质量优劣的标准, 它与仪表的设计和制造质量有关, 是正确选择和使用仪表的重要依据, 也是仪表工校验仪表、判断仪表是否合格的重要依据。

#### 1. 仪表的准确度(精确度)等级及允许误差

准确度是正确度和精密度的总称。正确度表征系统误差的大小; 精密度表征随机误差的大小。因此, 仪表的准确度是表示测量结果与被测真值之间综合的接近程度。

国家根据各类仪表的设计制造质量不同, 对每种仪表都规定了正常使用时允许其具有的最大误差, 即允许误差。允许误差是一种极限误差, 在仪表的整个量程范围内, 各示值点的误差都不能超过允许误差, 否则该仪表为不合格仪表。

允许误差去掉百分号后取绝对值, 就是该仪表的准确度等级, 又称精确度等级。我国目前规定的准确度等级有 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 5.0 等级别。仪表准确度等级一般都标志在仪表标尺或标牌上, 如  $\diamond 0.5$  或  $\odot 0.5$  就表示该仪表的准确度等级为 0.5 级。数字越小, 准确度越高。

由此可见: 仪表的允许误差 =  $\pm$  准确度等级%

**【例 1-3】** 对某机组进行热效率试验, 需用 0~16MPa 压力表来测量 10MPa 左右的主蒸汽压力, 要求相对测量误差不超过  $\pm 0.5\%$ , 试选择仪表的准确度等级。

**解** 仪表的允许绝对误差 =  $10 \times \pm 0.5\% = \pm 0.05\text{MPa}$

仪表的允许折合误差 =  $\frac{\pm 0.05}{16-0} \times 100\% = \pm 0.313\%$

所以该仪表的准确度等级应选为 0.2 级。