

# 热工测量及仪表

南京工学院 吴永生 方可人编

电力工业出版社

# 热工测量及仪表

南京工学院 吴永生 方可人编

电力工业出版社

## 内 容 提 要

本书讲述热工测量及仪表的基本知识；热力发电厂热工过程的各种参数，如温度、压力、流量、水位及炉烟成分的测量方法及测量仪表，其中包括新的测量方法和传感器，按流量测量节流装置的新规范进行节流装置的设计等。最后简要介绍巡回检测装置的工作原理。

本书可作为高等学校热工类“热工测量及仪表”课程的教材，亦可供有关工程技术人员参考。

## 热工测量及仪表

南京工学院 吴永生 方可人 编

\*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 18印张 406千字 1插页

1981年3月第一版 1981年3月北京第一次印刷

印数 00001—15120册 定价 2.00元

书号 15036·4177

# 前 言

本书是按照1978年4月原水利电力部专业教材会议审订的《热工测量及仪表》教材大纲编写的，可以作为高等学校热工类专业的“热工测量及仪表”课程的教学用书。

近十多年来，我国热力发电厂的热力设备日益向大容量、高参数的方向发展，热工测量的要求和热力系统自动控制的水平愈来愈高。随着电子技术的广泛应用，新的测量方法和新的仪表结构不断出现，热工测量领域的新技术有了很大的进展。本书内容除阐述热工测量及仪表的基本理论外，对热工测量的新技术也作了一定的介绍。

本书由南京工学院吴永生、方可人编写，并由浙江大学许冀森、王志勤等审阅。在编写过程中得到许多兄弟院校和有关单位的热情支持，在此表示深切的谢意。

编者水平有限，缺乏实践经验，书中不足或错误之处，希望读者指正。

编 者

1980年7月

# 目 录

## 前 言

概 论 .....	1
一、热工测量仪表及其组成；    二、仪表的质量指标；    三、测量误差的分类及其性质；四、 误差合成定律	
第一章 温度测量概述 .....	13
§ 1-1 国际实用温标 .....	13
一、度及其表示方法；    二、“1968年国际实用温标”建立的原则	
§ 1-2 各种测温方法简介 .....	15
一、膨胀式温度计；    二、压力表式温度计	
第二章 热电偶温度计 .....	22
§ 2-1 热电现象和热电偶的基本定律 .....	22
一、热电现象和热电偶温度计；    二、热电偶的基本定律	
§ 2-2 标准化与非标准化热电偶 .....	25
一、选择热电偶材料的一般要求和各种材料的热电性质；    二、标准化热电偶；    三、非标准 化热电偶；    四、热电偶的构造	
§ 2-3 热电偶自由端（冷端）温度补偿问题 .....	31
一、算法；    二、冰点槽法；    三、仪表机械零点调整法；    四、补偿电桥法（冷端补偿器）； 五、多点冷端温度补偿	
§ 2-4 热电偶的校验 .....	34
§ 2-5 测量热电势的毫伏计方法 .....	36
一、毫伏计的工作原理；    二、动圈测量机构中电阻的温度补偿；    三、毫伏计的改刻度	
§ 2-6 测量热电势的电位差计方法 .....	40
一、手动电位差计；    二、电子电位差计	
第三章 电阻温度计 .....	60
§ 3-1 金属（导体）测温电阻和半导体热敏电阻 .....	60
一、金属（导体）测温电阻；    二、半导体热敏电阻	
§ 3-2 电阻的测量方法 .....	66
一、用电位差计测量电阻；    二、用不平衡电桥测量电阻；    三、用手动平衡电桥测量电阻； 四、用电子平衡电桥测量电阻	
§ 3-3 热电阻的校验 .....	70
第四章 接触测温方法的讨论 .....	72
§ 4-1 管内流体温度测量 .....	72
§ 4-2 壁面温度测量 .....	74
一、热电偶导热误差；    二、热电偶的接点导热误差	
§ 4-3 高温气体温度测量 .....	76
第五章 非接触测温方法和仪表 .....	81

§ 5-1 热辐射测温基本原理	81
§ 5-2 单色辐射高温计	83
一、光学高温计；    二、光电高温计	
§ 5-3 全辐射高温计	87
§ 5-4 比色高温计	88
§ 5-5 红外线温度传感器	91
一、热敏探测器；    二、光电探测器	
<b>第六章 压力及差压的测量</b>	<b>95</b>
§ 6-1 常用压力及差压测量仪表	96
一、液柱式压力计；    二、弹性式压力计；    三、其它形式的测压仪表	
§ 6-2 压力信号的电变送方法	106
一、电位器式压力变送器；    二、电容式压力变送器；    三、电感式压力变送器；    四、霍尔压力变送器；    五、力平衡式压力变送器；    六、应变式压力变送器	
§ 6-3 压力和差压测量仪表的使用和校验	123
一、校验测压仪表用标准器；    二、测压仪表的使用	
<b>第七章 流体流量的测量方法</b>	<b>130</b>
§ 7-1 容积式流量测量方法	130
§ 7-2 速度式流量测量方法	133
一、涡轮流量计；    二、漩涡流量计；    三、电磁流量计；    四、超声波流量计；    五、热式流量计	
§ 7-3 差压式测量方法	147
一、毕托管与均速管；    二、节流变压降流量计；    三、恒压降变截面流量计	
§ 7-4 质量流量计	154
一、直接式质量流量计；    二、推导式质量流量计；    三、温度、压力补偿式质量流量计	
§ 7-5 流量测量仪表的校验与分度	159
<b>第八章 节流变压降流量计</b>	<b>162</b>
§ 8-1 标准节流装置	162
一、标准节流件及其取压装置；    二、标准节流装置的管道条件	
§ 8-2 标准节流装置的流量公式	167
一、流动情况和流量公式；    二、标准节流装置的 $\alpha$ 值及其标准误差；    三、标准节流装置的 $\epsilon$ 值及其标准误差；    四、标准节流装置的压力损失	
§ 8-3 标准节流装置的计算	171
一、计算命题；    二、实用计算公式；    三、计算举例；    四、使用标准节流装置测量流量时的误差	
§ 8-4 非标准节流件及其应用	180
一、1/4圆弧孔板；    二、锥形入口孔板	
§ 8-5 节流变压降流量计的显示件——差压计	182
一、差压计的开方装置与开方器；    二、流量积算装置和积算器；    三、差压计信号管路的安装	
<b>第九章 汽鼓水位测量</b>	<b>199</b>
§ 9-1 云母水位计	199
§ 9-2 差压式水位计	200

一、平衡容器的改进；    二、汽鼓水位信号的压力校正	
§ 9-3 电接点水位计	203
§ 9-4 水位测量的其它方法	205
一、浮力法；    二、静压法；    三、电容法；    四、超声波法；    五、同位素法	
<b>第十章 炉烟分析</b>	209
§ 10-1 氧量计	209
一、热磁式氧量计；    二、氧化锆氧量计	
§ 10-2 热导式二氧化碳分析仪	217
§ 10-3 气相色谱分析仪	220
一、工作原理；    二、分析流程	
<b>第十一章 巡回检测装置</b>	225
§ 11-1 JXC系列装置基本原理和技术性能	225
§ 11-2 采样器	228
一、采样；    二、采样控制器	
§ 11-3 数据放大器	234
§ 11-4 模数转换器	235
一、模数转换器的模拟部分；    二、模数转换器的数字部分	
§ 11-5 报警控制器	242
一、上、下限越限判别器；    二、报警灯光、音响控制器	
§ 11-6 译码显示	245
§ 11-7 打印控制器	245
§ 11-8 数字钟	245
§ 11-9 整定盘与分组盘	246
一、整定盘；    二、分组盘	
§ 11-10 JXC装置总逻辑图分析	247
<b>附录 I</b>	250
I-1 各种测温材料的物理性质	250
I-2 铂铑 <sub>10</sub> -铂热电偶分度表	252
I-3 铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub> 热电偶分度表	253
I-4 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	254
I-5 镍铬-考铜热电偶分度表	255
I-6 铜-康铜热电偶分度表	255
I-7 铂热电阻分度表( $R_0 = 46.00$ 欧姆)	256
I-8 铂热电阻分度表( $R_0 = 100.00$ 欧姆)	257
I-9 铜热电阻分度表( $R_0 = 53.00$ 欧姆)	257
I-10 铜热电阻分度表( $R_0 = 50.00$ 欧姆)	258
I-11 某些材料在 $\lambda = 0.65$ 微米时的单色辐射黑度 $\epsilon_\lambda$	258
I-12 某些材料在不同温度下的全辐射黑度 $\epsilon$	258
<b>附录 II</b>	259
II-1 水和水蒸汽的动力粘度 $\eta \times 10^6$ (公斤力·秒/米 <sup>2</sup> )	259

II-2	水的重度 $\gamma$ (公斤力/米 <sup>3</sup> ) 与压力和温度的关系	260
II-3	节流件和管道材料的线膨胀系数 $\lambda$	261
II-4	标准孔板开孔直径 $d$ 的加工公差	262
II-5	各种管道绝对粗糙度 $K_s$ 值	262
II-6	角接取压标准孔板的光管流量系数 $\alpha_0$ 值	263
II-7	角接取压标准孔板的 $r_0$ 值	264
II-8	角接取压标准孔板的 $\beta^2\alpha_0$ 值	264
II-9	角接取压标准孔板的流束膨胀系数 $\epsilon$ 值	265
II-10	法兰取压标准孔板 $Re_D$ 限值	266
II-11	法兰取压标准孔板的 $\alpha_0$ 值	267
II-12	法兰取压标准孔板的 $F_D$ 值	268
II-13	法兰取压标准孔板的 $F_R$ 值	269
II-14	法兰取压标准孔板的流束膨胀系数 $\epsilon$ 值	269
II-15	标准喷嘴的光管流量系数 $\alpha_0$	270
II-16	标准喷嘴的 $r_0$ 值	271
II-17	标准喷嘴的 $\beta^2\alpha_0$ 值	272
II-18	标准喷嘴的流束膨胀系数 $\epsilon$ 值	273
II-19	标准节流装置流量系数计算公式	273
II-20	节流装置不符合标准要求对流量系数的影响	274
II-21	节流装置不符合标准要求所产生流量读数误差的若干试验结果	275
II-22	1/4圆弧孔板所用的 $r/D$ 值	276
II-23	几种差压计的基本特性表	277
附录 III		279
III-1	集成电路5G623 逻辑图	279
III-2	集成电路5G671 逻辑图	280



# 概 论

## 一、热工测量仪表及其组成

热工测量是指对热工过程中热工参数（如温度、压力、流量等）的测量，用来测量热工参数的仪表称为热工测量仪表。

在火力发电厂中，通过热工参数的准确测量，可及时地反映热力设备的运行工况；为运行人员提供操作依据；为热工自动化装置准确及时地提供信号，因此，热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动化的必要条件。

随着电厂热力设备日益向大容量、高参数发展，以及自动化水平的不断提高，对热工测量的要求也愈来愈高，并促使采用新原理、新材料和新结构的热工测量仪表不断涌现。目前一套大型发电机组所要求的检测项目有上百个，测点多达千余个，已不得不考虑使用巡回检测装置，甚至使用专用计算机来处理大量测量数据。

热工仪表的种类繁多，尽管各种表的原理、结构不同，但就其组成部分的作用来看，一般可以把一块表剖析为下列三个基本部分：

### 1. 感受件

感受件直接与被测对象相联系，感受被测参数的变化，并将感受到的被测参数的变化转换成一相应的信号输出。例如：热电偶温度计中的热电偶，它把对象的温度变化转换为热电势变化输出。感受件有时也称敏感元件、一次元件或传感器。对感受件的要求是：

（1）输出信号必须随被测参数变化而变化。

（2）输出信号只能随被测参数变化而变化。如果其它参数变化会影响感受件的输出，那么，测量过程中这些参数的变化就是测量误差的来源。在这种情况下，一般要附加补偿装置或创造条件使这些参数的变化不影响（或很少影响）测量结果。

（3）输出信号与被测参数之间必须是单值关系，最好是线性关系。

### 2. 显示件

仪表最终是通过它的显示件向观察者反映被测参数的变化的。按显示件的功能不同，仪表有以下几种：

（1）指示被测参数瞬时值的，称为指示仪表。

（2）记录被测参数随时间变化的，称为记录仪表。在记录仪表中，除了以记录笔的运动来反映被测参数变化外，还需要有一个等速运动的部件（一般为同步电机）来带动记录纸。记录纸的形式有长方形的，也有圆形的。

（3）显示被测参数对时间的积分结果的，称为积算式仪表或积算器。例如：在测量流量时，如果要测出某个时间间隔内流过的总量，就要采用流量积算器。

（4）反映被测参数是否超过允许限值的，称为信号式仪表。当被测参数达到或超过所规定的限值时，仪表自动发出声、光信号，引起操作人员注意。

(5) 有些显示件可以根据被测参数与规定值的偏差情况, 发出对被测对象进行调节的信号, 经过调节作用, 使被测参数保持在预定的数值, 也就是说显示件附加有自动调节的功能, 具有这种显示件的仪表称为调节仪表。

同一台仪表可能有多种显示功能, 例如有些仪表既有指示, 又带记录, 又能发信号等; 甚至有的仪表能接受多种感受件的信号, 并具有轮流显示、记录、报警等功能, 例如巡回检测仪。

### 3. 中间件

中间件的作用是, 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, 中间件有下列功能:

(1) 单纯起传输作用。当感受件输出的信号直接可以送显示件显示时, 中间件只起传输作用, 如信号管道与电缆。

(2) 放大感受件发出的信号, 以满足远距离传输以及驱动指示、记录装置的需要。

(3) 在感受件输出信号的形式不适合于显示时, 要通过中间件把信号转换成适合于显示的形式。例如在单元组合仪表中, 将各种感受件的输出信号转换成具有统一数值范围的气、电信号, 这时的中间件常称为变送器。这样, 一种型式的二次仪表常可用来显示不同的被测参数。

仪表测量过程的实质是信号的转换与传递过程, 这个过程中有时也包含着能量的转换与放大。通常用方框图来表示仪表的组成部分及各部分间的信号传递过程, 现以毫伏计为例加以说明。毫伏计实际上是一只磁电式电流表, 其信号转换按以下三步进行(参看图0-1):

(1) 将输入电流  $I$  转换为处于磁场中的可动线圈所受的力矩  $T$ ;

(2) 将力矩  $T$  转换为线圈的转角  $\theta$ ;

(3) 将转角  $\theta$  转换为指针在标尺上指针的位移  $X$ 。

图中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  是各组成部分的输入与输出信号之比, 称为仪表各组成部分的传递系数, 也就是仪表各组成部分的灵敏度。仪表在稳定工况下的输入信号  $I$  和输出信号  $X$  之间的关系(即仪表的静态特性)可由下式表示:

$$X = K_1 K_2 K_3 I = KI$$

式中  $K = K_1 K_2 K_3$  —— 仪表的传递系数, 即仪表的灵敏度。

由此可见, 要保证仪表指示正确, 必须保持  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  不变, 而  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  或多或少总是有变化的, 其变化将引起仪表产生测量误差。

图0-1所表示的仪表信号传递系统为开环系统, 如果加入反馈部分, 则构成闭环系统。电子电位差计的测量系统属于闭环系统, 其方框图如图0-2所示。图中  $K_1$  是正向的放大器等部分的传递系数,  $K_f$  为反向的反馈部分的传递系数, 被测电压  $V$  与反馈电压  $V_f$  相减后

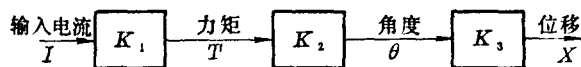


图 0-1 毫伏计方框图

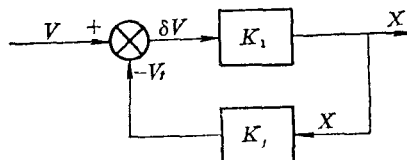


图 0-2 电子电位差计方框图

得到差值信号 $\delta V$ ， $\delta V$ 经放大部分放大，推动可逆电机带动仪表指针偏移 $X$ ， $X$ 通过反馈部分使反馈电压改变，直至 $V$ 与 $V_f$ 接近相等时， $\delta V \approx 0$ ，系统处于平衡状态，这时指针的指示表示被测电压值，由于

$$X = K_1 \delta V = K_1 (V - V_f)$$

其中

$$V_f = K_f X$$

代入上式经整理后，得到闭环系统的输出信号和输入信号之间的静态关系为

$$X = \frac{K_1 V}{1 + K_1 K_f} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + K_f} V$$

如果使 $K_1 \gg 1$ 时，上式可近似地写成

$$X = \frac{1}{K_f} V$$

可见，此时仪表的传递系数 $K = \frac{1}{K_f}$ ，只与反馈部分的传递系数 $K_f$ 有关，而与正向的放大器等部分的传递系数 $K_1$ 无关。因此，仪表对正向的放大器等部分的性能要求可降低。而 $K_f$ 通常可以做得比较精确与稳定，这也就是采用闭环系统的仪表常比采用开环系统的仪表有较高准确度的原因。

## 二、仪表的质量指标

### 1. 准确度

这是表征仪表指示值接近被测真值程度的质量指标。

由于种种原因，仪表指示值与被测真值之间总不免存在误差，如仪表指示值为 $M$ ，被测真值为 $\mu$ ，则指示值的误差表示为

$$\text{绝对误差} = M - \mu$$

$$\text{相对误差} = \frac{M - \mu}{\mu} \times 100\%$$

上述两种表示方法中，相对误差更能说明指示值的准确程度。例如用高温计测量一炉子温度，高温计指示值为 $1645^\circ\text{C}$ ，炉子的真实温度为 $1650^\circ\text{C}$ ，则绝对误差为 $-5^\circ\text{C}$ ，相对误差为 $-\frac{5}{1650} \times 100\% = -0.3\%$ 。如果在测量 $100^\circ\text{C}$ 的水时，虽然也有 $-5^\circ\text{C}$ 的绝对误差，但其相对误差则为 $-5\%$ ，显然后者相对误差大得多，则说明后者的测量的准确度要低得多。

被测参数的真值通常是不知道的，在仪表校验中，常用标准仪表指示的标准值来代替真值。

一个测量元件或一台仪表，在其测量范围内，各处指示值的误差是不相同的，对于实验室用仪表常给出仪表的校验曲线或表格，表示其测量范围内各校验点处的指示值误差；对于工业仪表经常是给出一个最大的误差限值，说明在正常使用条件下，测量范围内各处指示值的误差不会超过此限值，此限值可以用绝对值、相对值或折合值给出，作为仪表误差。例如对于EA型热电偶，在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内其误差用绝对值给出为 $\pm 0.04$ 毫伏；在 $100^\circ\text{C}$ 以上以相对值给出为 $\pm 1\%$ ，即在 $100^\circ\text{C}$ 以上的测量范围内任一点指示值的相对误差不超过该点温度的 $\pm 1\%$ 。

以仪表量程范围的百分值表示的仪表误差称为仪表误差的折合值。

$$\text{仪表误差的折合值} = \pm \frac{\text{仪表量程范围内指示值的最大绝对误差}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

例如一量程范围为  $0 \sim 50$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 的压力表, 在其标尺各点处指示值的最大绝对误差为 1 公斤力/厘米<sup>2</sup>, 则仪表误差的折合值为  $\pm \frac{1}{50} \times 100\% = \pm 2\%$ 。

仪表的准确度等级是按国家统一规定的允许误差大小而划分的。某一级仪表的允许误差是指在规定的正常情况下, 国家规定这类仪表所允许具有的最大仪表误差(以折合值表示), 例如: 准确度等级为 1 级的仪表, 其允许误差不超过  $\pm 1\%$ , 也就是说该仪表各点处指示值的误差均不允许超过量程范围的  $\pm 1\%$ 。

在规定的正常工作条件下, 仪表具有的最大误差, 称为基本误差, 一块合格的表, 其基本误差应小于允许误差。实际使用中, 还可能由于环境温度的变化、电源电压波动、外部干扰等超过规定的正常工作条件而造成附加误差。因此要准确测量还应注意测点的合理选择, 仪表的正确安装和使用。另外, 仪表只有不断地定期校验和调整, 才能长期保持其准确度。

仪表的误差是由很多因素组成的, 如线性度、滞后误差、重复性、不灵敏区和漂移等。

#### 2. 线性度(或非线性误差)

对于理论上具有线性“输入-输出”特性曲线的仪表, 由于各种因素的影响, 实际特性曲线往往偏离线性关系, 它们之间的最大偏差与量程范围之比的百分数称之为线性度。

#### 3. 滞后误差(变差)

仪表上、下行程的“输入-输出”特性曲线之间的最大偏差与量程范围之比的百分数称为仪表的滞后误差, 它通常是由于仪表运动系统的摩擦、间隙、弹性元件的弹性滞后等原因造成的。

#### 4. 重复性

同一工作条件下, 多次按同一方向输入信号作全量程范围的变化时, 对应于同一输入值, 仪表输出值的一致性称为重复性。重复性大小是以全量程上, 对应于同一输入值输出的最大值和最小值的差与量程范围之比的百分数表示。

#### 5. 不灵敏区

不能引起输出变化的输入信号范围, 即缓慢地向增大或减小方向改变输入信号时, 输出不发生变化的最大输入变化幅度与量程范围之比的百分数称为不灵敏区。有时也把仪表能响应的输入信号的最小变化称为仪表的灵敏度限。应将灵敏度限与仪表的灵敏度相区别, 灵敏度是指输出与输入之间的比值, 对于指示仪表就是指单位输入信号所引起指针的偏转角度或位移量。

#### 6. 漂移

在保持一定的输入信号和工作条件下, 经过一段时间后输出的变化称为漂移, 它是整个仪表量程上输出的最大变化量与量程之比的百分数表示。漂移通常是由于电子元件的老化、弹性元件的时效、节流元件的磨损、热电偶和热电阻元件的污染变质等原因引起。

此外，在被测参数快速变化时，常常会由于感受件输出信号来不及跟上被测参数的变化而产生动态误差，动态误差的大小与感受件的动态特性有关，将在调节原理课程中叙述。

### 三、测量误差的分类及其性质

如前所述，由于在测量过程中所用仪表准确度的限制、环境条件的变化、仪表使用方法不够完善等原因，在测量结果上不可避免地存在着误差，研究误差的目的就是为尽可能地减小误差，正确地处理误差，以提高测量结果的准确性。按照误差性质的不同可将误差分为疏失误差、系统误差和随机误差三种，测量结果中所存在的误差性质不同，则采用的误差处理方法也不同。

#### 1. 疏失误差

由于观察者的主观过失、仪表的误动作等原因以致使该次测量失效的误差称作疏失误差，含有疏失误差的测定值称为坏值。例如：读错数据、充水的差压信号管路中偶然存在气泡等等。这类误差应尽量避免，存在这类误差的测定值应当舍弃，但应注意，不应当轻率地舍弃被怀疑的实验数据。对于在同一条件下，多次测量同一被测量时所得的一组测定值，可用统计检验方法来判断是否存在疏失误差。有多种检验误差的准则，例如莱伊特准则就是判断疏失误差的准则之一。它指出在一组测定值中，若某一数据 $M_i$ 与该组数据的算术平均值 $\bar{X}$ 之差 $v_i$ 大于三倍该组数据的均方根误差 $\sigma$ 时， $v_i$ 为疏失误差， $M_i$ 为坏值应舍弃。莱伊特准则的表达式如下：

$$|v_i| = |M_i - \bar{X}| > 3\sigma$$

其中

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N}$$

$$\sigma \approx s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{X})^2}$$

在舍去坏值后再重新计算平均值 $\bar{X}$ 和均方根误差 $\sigma$ 值，并再次检验有无坏值。

莱伊特准则是在重复测量次数 $N$ 趋于无穷大的前提下建立的，当 $N$ 有限时，特别是当 $N$ 值很小时，此准则不可靠，此时数据的舍弃用格拉布斯方法较为合适。格拉布斯方法是：若 $M_i$ 为一组测定值中的一个可疑数据，则用下式计算格拉布斯准则数 $T$ 值：

$$T = \frac{|v_i|}{s} = \frac{|M_i - \bar{X}|}{s}$$

其中

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{X})^2}$$

然后根据重复测量次数 $N$ 和所选的显著性水平 $\alpha$ ，从表0-1中查得相应的 $T_{(N,\alpha)}$ 值，如 $T \geq T_{(N,\alpha)}$ ，则认为此可疑数据含有疏失误差，应于舍弃。舍弃后重新计算 $s$ 和 $\bar{X}$ ，再检查有无可疑数据。

所选的显著性水平 $\alpha$ （5.0%、2.5%或1.0%）代表了这种判断是错误的概率， $\alpha$ 不宜选得过小，因为 $\alpha$ 过小，把不是含疏失误差的数据当作含疏失误差的数据舍弃的错判概率固然小了，但相反把确实是含疏失误差的数据错判为不含疏失误差的数据而没有舍弃的概率却增大了。

表 0-1

格拉布斯准则数 (T)

显著性 水平 $\alpha$	5.0%			2.5%			1.0%			
	$T(N, \alpha)$	测量次数 $N$		$T(N, \alpha)$	测量次数 $N$		$T(N, \alpha)$	测量次数 $N$		
5.0%	1.15	3	1.15	1.15	3	1.15	20	2.56	2.71	2.88
	1.46	4	1.48	1.49	4	1.49	21	2.58	2.73	2.91
	1.67	5	1.71	1.75	5	1.75	22	2.60	2.76	2.94
	1.82	6	1.89	1.94	6	1.94	23	2.62	2.78	2.96
	1.94	7	2.02	2.10	7	2.10	24	2.64	2.80	2.99
	2.03	8	2.13	2.22	8	2.22	25	2.66	2.82	3.01
	2.11	9	2.21	2.32	9	2.32	30	2.75	2.91	
	2.18	10	2.29	2.41	10	2.41	35	2.82	2.98	
	2.23	11	2.36	2.48	11	2.48	40	2.87	3.04	
	2.29	12	0.41	2.55	12	2.55	45	2.92	3.09	
	2.33	13	2.46	2.61	13	2.61	50	2.96	3.13	
	2.37	14	2.51	2.66	14	2.66	60	3.03	3.20	
	2.41	15	2.55	2.71	15	2.71	70	3.09	3.14	
	2.44	16	2.59	2.75	16	2.75	80	3.14	3.31	
	2.47	17	2.62	2.79	17	2.79	90	3.18	3.35	
	2.50	18	2.65	2.82	18	2.82	100	3.21	3.38	
	2.53	19	2.68	2.85	19	2.85				

## 2. 系统误差

在同一条件下, 多次测量同一被测量时, 绝对值和符号保持不变或按某种确定规律变化的误差称作系统误差。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。

系统误差通常是由于仪表使用不当, 以及测量时外界条件变化等原因引起的。例如: 仪表的零位或者量程未调整好就会引起一个固定的系统误差, 其大小和方向都是不变的。这种系统误差可通过校验仪表求得与该误差数值相等、符号相反的校正值, 加到测量结果上来加以消除, 经过这样校正以后, 测量结果就不再含有系统误差。

另一类是变动的系统误差, 例如: 仪表实际使用时的环境温度与校验时不同, 并且在变化, 就会在测定值上带来一变动的系统误差。这类误差可通过实验或理论计算, 找出误差与造成误差的原因之间的确定关系式, 并通过计算或在仪表上附加补偿线路加以校正。

还有一些系统误差, 由于尚未被充分认识, 因此只能估计它的一个误差范围和方向 (即正、负号), 然后在测量结果上代数相加平均估计误差值来对测量结果进行校正。上述平均估计误差在数值上等于误差范围上、下限的代数平均值。可以认为校正后的测量结果的系统误差 (或称系统不确定度) 为误差范围的一半, 即测量结果为

$$R = M + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$$

系统误差为

$$\Delta R = \pm \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2}$$

其中  $M$ ——测定值；

$\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ ——估计的系统误差范围的上、下限。

如果某些系统误差的符号未知，而误差范围的大小可以估计时，则平均估计误差可取为零，系统误差应取为误差范围的一半。

系统误差只能在改变测量条件和装置的情况下由实验估计出来。在测量中应尽可能估计到一切可能产生系统误差的来源，并创造条件避免或减小系统误差的发生。

### 3. 随机误差

是指在相同条件下（同一个观测者、同一台测量器具、相同的环境条件等），多次测量同一量值时，绝对值和符号不可预知地变化着的误差。这种误差对于单个测定值来说，它的大小和方向都是不确定的，但对于一系列重复测定值来说，它的分布服从统计规律。因此随机误差只有在不改变测量条件和装置的情况下，对同一量值进行多次测量才能估计出来。

随机误差大多是由于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的。根据中心极限定理可知，在这种情况下，只要重复测量次数足够多，测定值的随机误差的概率密度分布服从于正态分布，并可根椐这种分布规律从一系列重复测定值中求出被测量值的最可信值作为测量结果，并给出该结果以很高概率存在的范围，此范围称作测定值的随机不确定度。表示被测量的真值落在这个不确定度范围内的概率称为该不确定度的置信概率。严格地说，一个测量结果必须同时附有不确定度和相应的置信概率的说明，否则测量结果是无意义的。

随机误差概率密度的正态分布曲线如图0-3所示，曲线的横坐标为误差  $x$ ，也就是测定值与真值之差。纵坐标为随机误差的概率密度  $y$ ，其定义为

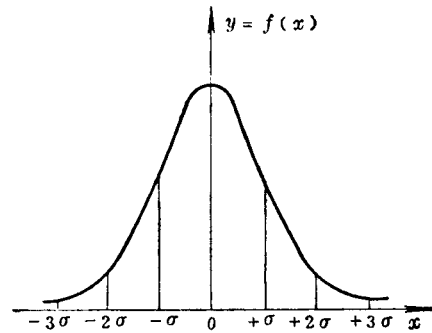


图 0-3 概率密度分布曲线

$$y = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{n_i}{N} \times \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{N} \frac{dn_i}{dx}$$

式中  $N$ ——总的测量次数；

$n_i$ ——误差在  $x_i$  到  $x_i + \Delta x$  之间所出现的次数。

$y dx$  表示测定值的误差落在  $x_i$  与  $x_i + dx$  之间的概率。随机误差概率密度的正态分布规律，即误差的概率密度  $y$  与误差  $x$  之间的关系为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

式中  $x$ ——测定值的误差， $x = M - \mu$ ；

$M$ ——测定值;  
 $\mu$ ——真值;

$\sigma$ ——称为均方根误差或标准误差,  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \mu)^2}{N}}$ ;

$M_i$ ——第  $i$  次的测定值 ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )。

由图0-3可知, 绝对值相等的正误差和负误差出现的概率相等, 因此随机误差具有相互抵偿的统计规律, 可以通过多次重复测量, 求取算术平均值的方法来抵消, 即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \mu)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N} - \mu = 0$$

所以

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N} = \mu$$

也就是说, 当重复测量次数足够多时, 测定值的算术平均值为被测量的最可信值, 即最接近真值的值。

同时还可看出, 绝对值小的误差出现的概率较大, 绝对值大的误差出现的概率较小, 无穷大的正、负误差出现的概率为零。实际上, 在一定的测量条件下随机误差的绝对值是不超过一定限值的。并且误差在  $-\infty$  到  $+\infty$  之间出现的概率 (即概率密度曲线下的总面积) 为 1, 即

$$P\{-\infty \leq x < \infty\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1$$

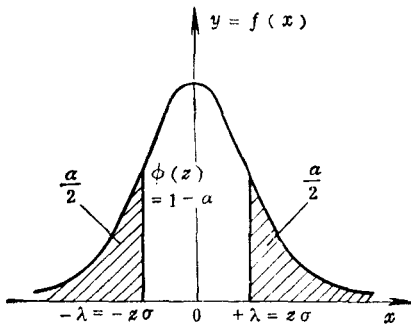


图 0-4 置信概率等在图形上的表示

通常是由下述方法来表示随机误差的大小的, 就是给定随机误差的一个界限, 称为置信限  $\lambda$ ,  $-\lambda \sim +\lambda$  所形成的区间称为置信区间, 如图 0-4 所示, 随机误差落在置信区间之外的概率称为显著性水平  $\alpha$ , 随机误差落在置信区间中的概率称为置信概率。置信概率  $\phi(z) = 1 - \alpha$ ,  $z$  为置信系数, 它等于置信限与均方根误差之比。若给出了随机误差的置信区间和置信概率, 就表示了随机误差的大小。例如当

取置信限  $\lambda = \sigma, 2\sigma, 3\sigma$  (即置信系数  $z = 1, 2, 3$ ) 时, 随机误差落在该置信区间的概率即置信概率为

$$\phi(1) = P\{-\sigma \leq x < +\sigma\} = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 0.6827$$

显著性水平  $\alpha = 1 - \phi(1) = 0.3173$



$$\phi(2) = P\{-2\sigma \leq x < +2\sigma\} = \int_{-2\sigma}^{2\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 0.9545$$

显著性水平  $\alpha = 0.0455$

$$\phi(3) = P\{-3\sigma \leq x < +3\sigma\} = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 0.9973$$

显著性水平  $\alpha = 0.0027$

因此，对于一组重复测定值中的任一个测定值来说，随机误差超出  $\pm 3\sigma$  的概率（即显著性水平  $\alpha$ ）仅在千分之三以下。对于概率为如此小的事件，实际上可近似认为是不可能事件，所以通常以  $\pm 3\sigma$  作为最大误差或极限误差，并把它称作该组测定值的随机不确定度，与它相应的置信概率为 0.997。也有以  $\pm 2\sigma$  为极限误差而作为测量值的随机不确定度的，这时相应的置信概率为 0.954。

由此可知，均方根误差  $\sigma$  实际上反映了一组测定值的随机误差的大小。关于这一点，我们还可从图 0-5 中看出。当  $x = 0$ ，即测定值等于真值处，概率密度达到极大值，为  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ ，说明一组测定值的均方根误差  $\sigma$  愈小，测定值接近于真值的概率愈大。如图 0-5 所示。概率密度分布曲线愈陡，测定值的集中程度愈好，则测定值的精密度愈高。通常以  $h$  来作精密度指数：

$$h = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma}$$

因此正态分布的概率密度函数通常也可写成

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2}$$

困难在于除了仪表校验情况（此时把标准仪表指示值作为真值）外，在实际测量工作中被测量的真值通常是不知道的，但是当重复测量次数  $N$  足够多时（一般要 60 次以上），可以证明，此时均方根误差  $\sigma$  值可用该组测定值的算术平均值  $\bar{X}$  代替真值来进行估计，所得均方根误差的估计值  $s$  为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

如上所述，在认为不存在系统误差的情况下，对于一测量系统，可以通过多次重复测量来求出它的均方根误差的估计值  $s$ ，从而估计出这一测量系统的精密度。以后用这个测量系统作等精度测量时，如仅作一次测量，就可估计这一次测定值（ $M$ ）的极限误差为  $\pm 3s$ ，也就是说该测定值与真值之间不超过  $\pm 3s$  的偏差的概率为 99.7%，即该值为  $M \pm 3s$ （99.7%）。

对于多次重复测量，是取测定值的算术平均值（ $\bar{X}$ ）作为测量结果的。根据随机误差

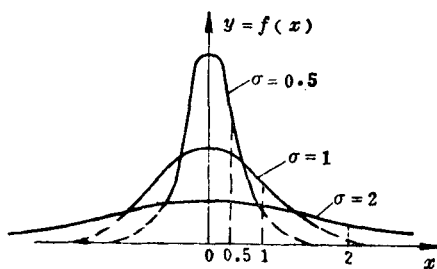


图 0-5 不同  $\sigma$  的概率密度分布曲线