

林宗虎 编著

工程测量技术手册

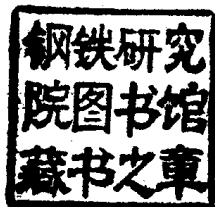
化学工业出版社



工程测量技术手册

林宗虎 编著

G711/12



化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

224649

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

工程测量技术手册/林宗虎编著. —北京:化学工业出版社, 1997. 12

ISBN 7-5025-1979-3

I. 工… II. 林… III. 工程测量-手册 IV. TB22-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 14224 号

工程测量技术手册

林宗虎 编著

责任编辑:陈丽 刘哲

责任校对:马燕珠

封面设计:于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 120 字数 499 千字

1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月北京第 1 次印刷

印 数:1—5000

ISBN 7-5025-1979-3/TQ · 989

定 价:32.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

测量技术是发展科学和工程技术的一种必不可少的手段,对于保证工程设备的安全经济运行和发展国民经济具有重要意义。

随着科技和生产的进展,测量技术也得到了飞速发展。至今,各种测量技术种类繁多,原理各异,为各种工程提供了宽广的选用领域。

现有的测量技术书籍主要有两类。一类只对某种参数的测量技术进行全面论述,其优点为专而全,但不足之处为内容繁杂,读者面小。另一类为大型计量测试手册,一般有一系列分册,对各种行业的测量技术或对各种参数的测量技术进行分册论述。这类手册的优点是全面深入,但对从事某一专业或某些参数测量的工程技术人员而言,往往存在内容过多,价格昂贵的缺点,较适宜于单位购买。本书对化工、石油、动力、冶金、核能等多种工程具有共性的主要参数的现代测量技术进行了较全面的论述,具有适用范围广而篇幅适当的特点。

本书是一本手册,重点论述了上述多种工程领域的主要测量技术。全书分八章,分别论述了工程测量基本概念,压力和压差测量技术,温度测量技术,流量和流速测量技术,特种工况测量技术,物质物性和传递特性测量技术,流体成分测量技术和物位测量技术。本书取材力求反映国内外测量领域的新技术和新成就,诸如各种先进仪表,多相流测量技术和特种工况测量技术等均有专门章节进行论述。本书计算式及图表齐全,采用法定计量单位。在编排上力求便于读者查阅。可供从事化工、石油、动力、冶金、核能等专业的师生和从事这些专业的运行、监察、科研和测量工作的工程技术人员阅读参考。

由于编者水平有限,书中欠妥之处在所难免,尚请读者批评指正。

西安交通大学能源系教授

林宗虎

1997 年 1 月

目 录

前言

第一章 工程测量基本概念..... 1

第一节 测量及其分类..... 1

第二节 测量单位..... 1

第三节 测量误差..... 6

第四节 测量仪表技术性能指标 14

第二章 压力和压差测量技术 16

第一节 压力、真空和压差..... 16

第二节 压力计和压差计的分类 16

第三节 液体式压力计和压差计 18

第四节 弹性式压力计和压差计 25

第五节 活塞式压力计 36

第六节 电动式压力或压差传感器 ... 38

第七节 气动式压力或压差传感器 ... 46

第八节 光学式压力或压差传感器 ... 47

第九节 压力计和压差计的选用 48

第十节 特种工况下的压力和压差 测量 49

第三章 温度测量技术 52

第一节 温度和温标 52

第二节 温度计分类 53

第三节 玻璃液体膨胀式温度计 55

第四节 固体膨胀式温度计 58

第五节 压力式温度计 60

第六节 热电阻温度计 61

第七节 热电偶温度计 70

第八节 光学温度计..... 119

第九节 光电温度计..... 121

第十节 红外温度计..... 122

第十一节 比色温度计..... 123

第十二节 全辐射温度计..... 124

第十三节 温度计的选用..... 126

第十四节 特种工况温度测量..... 127

第四章 流量和流速测量技术..... 133

第一节 流量和流速..... 133

第二节 流量计和流速计分类..... 137

第三节 孔板..... 139

第四节 文丘利管和喷嘴..... 163

第五节 容积式流量计..... 175

第六节 转子流量计..... 179

第七节 叶轮式流量计..... 182

第八节 电磁流量计..... 186

第九节 超声波流量计..... 189

第十节 量热式流量计..... 191

第十一节 靶式流量计..... 192

第十二节 旋涡式流量计..... 193

第十三节 质量流量计..... 196

第十四节 堰式和槽式流量计..... 198

第十五节 流速计..... 200

第十六节 流量计和流速计选用..... 210

第五章 特种工况流量测量技术..... 213

第一节 大流量测量技术..... 213

第二节 高温流体流量测量技术..... 217

第三节 脉动流体流量测量技术..... 218

第四节 气液两相流的流量测量 技术..... 219

第五节 气固两相流的流量测量 技术..... 230

第六节 液固两相流的流量测量 技术..... 236

第七节 多相流的流量测量技术..... 241

第八节 颗粒物料的流量测量 技术..... 245

第六章 物位测量技术..... 250

第一节 物位及其测量仪表分类..... 250

第二节 直读式液位计..... 250

第三节 浮力式液位计..... 252

第四节 静压式物位计..... 255

第五节 电极式物位计..... 259

第六节 电容式液位计..... 260

第七节	核辐射式物位计·····	261	第九节	热流密度测量·····	285
第八节	热敏式物位计·····	262	第八章	流体成分测量技术 ·····	289
第九节	其他形式的物位计·····	263	第一节	奥氏烟气分析器·····	289
第七章	物质物性和传递特性测量		第二节	烟气全分析器·····	291
	技术 ·····	267	第三节	热导式气体成分分析器·····	292
第一节	密度计·····	267	第四节	色谱分析器·····	294
第二节	粘度计·····	271	第五节	红外线气体成分分析器·····	298
第三节	酸度计·····	275	第六节	磁性氧气分析器·····	300
第四节	湿度计和露点计·····	277	第七节	电导式成分分析器·····	303
第五节	燃料发热量测量·····	279	第八节	光电比色计·····	307
第六节	导热系数测量·····	280	第九节	其他成分分析方法·····	309
第七节	对流换热系数测量·····	282	参考文献 ·····		311
第八节	热辐射性质测量·····	283			

第一章 工程测量基本概念

第一节 测量及其分类

在工程实践中常需测定一系列参数的量值,如压力、温度、流量、流速、物位等。应用专用设备或实验方法测定某一被测参数的过程称为测量过程或简称测量。

绝对准确地测得的被测参数的量值称为真值。在实际测量过程中,由于测量方法、测量设备、操作过程和环境条件等的不完善性,是不可能测得真值的。实际测得的量值总具有一定的误差。

测量方法的分类见表 1-1。

表 1-1 测量方法分类

分类方法	名 称	简 要 说 明
按取得测量结果的方法分类	直接测量法	用基准量值定度好的测量仪表直接测得被测量的数值
	间接测量法	用直接测量法测得与被测量有已知函数关系的各个量,再按函数关系求得被测量的数值
	组合测量法	被测量与直接测量得到的量不是一个函数关系,需求解一个方程组才可得出被测量的数值
按测量方式分类	偏位测量法	用测量仪表指针位移值来表示被测量的数值。此法简单迅速,但准确度较差
	零位测量法	用已知数值的标准量具与被测量直接比较,调整标准量具的量值使之与被测量值相同,此时标准量具的数值即为被测量值。此法准确度高,但操作麻烦,费时较多
	差值测量法	用量值接近被测量的标准量具与被测量进行比较,再用偏位式测量仪表指示两者的差值。标准量具值与上述差值之和即为被测量的数值。此法较简单、迅速,且准确度较高

第二节 测量单位

测量单位是约定选取的一个参数的固定同类量,具有明确的定义和名称。不同国家和地区采用不同的测量单位。由国际计量委员会规定的单位称为国际单位制(SI)。我国统一实行中华人民共和国法定计量单位,其内容以国际单位制为基础,包括:

- (1)国际单位制的基本单位(见表 1-2);
- (2)国际单位制的辅助单位(见表 1-3);
- (3)国际单位制中具有专门名称的导出单位(见表 1-4);
- (4)国家选定的非国际单位制单位(见表 1-5);

表 1-2 国际单位制的基本单位

量 的 名 称	单 位 名 称	单 位 符 号
长 度	米	m
质 量	千克(公斤)	kg
时 间	秒	s
电 流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

(5)由以上单位构成的组合形式的单位；

(6)由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表 1-6)。

表 1-3 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad	立体角	球面度	sr

表 1-4 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示例	量的名称	单位名称	单位符号	其他表示例
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}	磁通量	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
力,重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$	磁通量密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	电 感	享[利]	H	Wb/A
能量,功,热	焦[耳]	J	$N \cdot m$	摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	
功率,辐射,通量	瓦[特]	W	J/s	光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
电 荷 量	库[仑]	C	$A \cdot s$	光 照 度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
电位,电压,电动势	伏[特]	V	W/A	放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
电 容	法[拉]	F	C/V	吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
电 阻	欧[姆]	Ω	V/A	剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg
电 导	西[门子]	S	A/V				

表 1-5 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	$1\text{min}=60\text{s}$
	[小]时	h	$1\text{h}=60\text{min}=3600\text{s}$
	天[日]	d	$1\text{d}=24\text{h}=86400\text{s}$
平 面 角	[角]秒	($''$)	$1''=(\pi/648000)\text{rad}$
	[角]分	($'$)	$1'=60''=(\pi/10800)\text{rad}$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ}=60'= (\pi/180)\text{rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{r/min}=(1/60)\text{s}^{-1}$
长 度	海里	n mile	$1\text{ n mile}=1852\text{m}$ (只用于航程)
速 度	节	kn	$1\text{kn}=1\text{ n mile/h}=(1852/3600)\text{m/s}$ (只用于航行)
体积,容积	升	L, (l)	$1\text{L}=1\text{dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
质 量	吨	t	$1\text{t}=10^3\text{kg}$
	原子质量单位	u	$1\text{u}\approx 1.6605655\times 10^{-27}\text{kg}$
能	电子伏	eV	$1\text{eV}\approx 1.6021892\times 10^{-19}\text{J}$
级 差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	$1\text{tex}=1\text{g/km}$

表 1-6 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10^{18}	艾[可萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉[咖]	G	10^{-4}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

对表 1-2~表 1-6 中的符号说明如下:

- ①周、月、年(年的符号为 a)为一般常用时间单位。
- ②[]内的字,是在不致混淆的情况下,可以省略的字。
- ③()内的字为前者的同义词。
- ④角度单位度、分、秒的符号不处于数字后时,要用括弧。
- ⑤升的符号中,小写字母 l 为备用符号。
- ⑥r 为“转”的符号。
- ⑦人民生活和贸易中,质量习惯称为重量。
- ⑧公里为千米的俗称,符号为 km。
- ⑨ 10^4 称为万, 10^8 称为亿, 10^{12} 称为万亿,这类数词的使用不受词头名称的影响,但不应与词头混淆。

常用法定计量单位与非法定计量单位之间的换算关系列于表 1-7。

表 1-7 常用法定计量单位与非法定计量单位间的换算关系

量的名称	法定单位名称	法定单位符号	换算关系
热力学温度	开[尔文]	K	
摄氏温度	摄氏度	℃	$\text{华氏温度} = \frac{9}{5} \text{热力学温度}$ $-459.67 = \frac{9}{5} \text{摄氏温度} + 32$
热,热量,功	焦[耳]	J	1 国际蒸汽表卡(cal _{IT})=4.1868J 1 热化学卡(cal _{th})=4.1840J 1 20℃卡(cal ₂₀)=4.1816J 1 15℃卡(cal ₁₅)=4.1855J 1 千克力米(kgf·m)=9.80665J 1 国际蒸汽英热单位(Btu _{IT})=1055.056J 1 热化学英热单位(Btu _{th})=1054.350J 1 英尺磅力(ft·lbf)=1.355818J
热流量	瓦[特]	W	1 卡每秒(cal _{IT} /s)=4.1868W 1 千卡每小时(kcal _{IT} /h)=1.163W 1 热化学卡每秒(cal _{th} /s)=4.184W 1 热化学英热单位每小时 (Btu _{th} /h)=0.292875W

续表

量的名称	法定单位名称	法定单位符号	换算关系
热导率, 导热系数	瓦[特]每米开[尔文]	$W/(m \cdot K)$	可用 $^{\circ}C$ 代替 K 1 卡每厘米秒开[尔文] $[cal_{IT}/(cm \cdot s \cdot K)] = 418.68 W/(m \cdot K)$ 1 千卡每米小时开[尔文] $[kcal_{IT}/(m \cdot h \cdot K)] = 1.163 W/(m \cdot K)$ 1 英热单位每英尺小时华氏度 $[Btu/(ft \cdot h \cdot ^{\circ}F)] = 1.73073 W/(m \cdot K)$
传热系数	瓦[特]每平方米开[尔文]	$W/(m^2 \cdot K)$	可用 $^{\circ}C$ 代替 K 1 千卡每平方米小时开[尔文] $[kcal_{IT}/(m^2 \cdot h \cdot K)] = 1.163 W/(m^2 \cdot K)$ 1 卡平方厘米秒开[尔文] $[cal_{IT}/(cm^2 \cdot s \cdot K)] = 41868 W/(m^2 \cdot K)$ 1 英热单位每平方英尺小时华氏度 $[Btu/(ft^2 \cdot h \cdot ^{\circ}F)] = 5.67826 W/(m^2 \cdot K)$
比热容, 比嫡	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$	对比热容可用 $^{\circ}C$ 代替 K, 对比嫡不可用 $^{\circ}C$ 代替 K 1 千卡每千克开[尔文] $[kcal_{IT}/(kg \cdot K)] = 4186.8 J/(kg \cdot K)$ 1 千克力米每千克开[尔文] $[kgf \cdot m/(kg \cdot K)] = 9.80665 J/(kg \cdot K)$ 1 英热单位每磅华氏度 $[Btu/(lb \cdot ^{\circ}F)] = 4186.8 J/(kg \cdot K)$
比内能, 比焓	焦[耳]每千克	J/kg	1 千卡每千克 $[kcal_{IT}/kg] = 4186.8 J/kg$ 1 千克力米每千克 $[kgf \cdot m/kg] = 9.80665 J/kg$ 1 英热单位每磅 $[Btu/lb] = 2326 J/kg$ 1 英尺磅力每磅 $[ft \cdot lbf/lb] = 2.98907 J/kg$
热阻率	开[尔文]米每瓦[特]	$K \cdot m/W$	1 厘米秒开[尔文]每卡 $[cm \cdot sK/cal]$ $= 0.238846 \times 10^{-2} K \cdot m/W$ 1 开[尔文]小时米每千卡 $[K \cdot h \cdot m/kcal]$ $= 0.859845 K \cdot m/W$ 1 英尺小时华氏度每英热 单位 $[ft \cdot h \cdot ^{\circ}F/Btu] = 0.577789 K \cdot m/W$
散热率	瓦[特]每立方米	W/m^3	1 卡每立方厘米秒 $[cal_{IT}/(cm^3 \cdot s)] = 4.1868 \times 10^6 W/m^3$ 1 千卡每立方米小时 $[kcal_{IT}/(m^3 \cdot h)] = 1.163 W/m^3$ 1 英热单位每立方英尺小时 $[Btu/(ft^3 \cdot h)] = 10.3497 W/m^3$
体积热容	焦[耳]每立方米开[尔文]	$J/(m^3 \cdot K)$	1 千卡每立方米开[尔文] $[kcal_{IT}/(m^3 \cdot K)] = 4186.8 J/(m^3 \cdot K)$ 1 英热单位每立方英尺华氏度 $[Btu/(ft^3 \cdot ^{\circ}F)] = 67066.1 J/(m^3 \cdot K)$
力矩, 转矩, 力偶矩	牛[顿]米	$N \cdot m$	1 达因厘米 $(dyn \cdot cm) = 10^{-7} N \cdot m$ 1 千克力米 $(kgf \cdot m) = 9.80665 N \cdot m$ 1 磅力英尺 $(lbf \cdot ft) = 1.35582 N \cdot m$

续表

量的名称	法定单位名称	法定单位符号	换算关系
力,重力	牛[顿]	N	1 达因(dyn)= 10^{-5} N 1 千克力(kgf)=9.80665N 1 磅力(lbf)=4.4482N
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	1 达因每平方厘米(dyn/cm ²)=0.1Pa 1 巴(bar)= 10^5 Pa 1 千克力每平方米(kgf/m ²)=9.80665Pa 1 千克力每平方厘米(kgf/cm ²)=98.0665kPa 1 磅力每平方英尺(lbf/ft ²)=47.8803Pa 1 磅力每平方英寸(lbf/in ²)=6894.76Pa 1 毫米汞柱(mmHg)=133.322Pa 1 毫米水柱(mmH ₂ O)=9.80665Pa 1 托(Torr)=133.322Pa 1 工程大气压(at)=98066.5Pa 1 标准大气压(atm)=101325Pa
动力粘度	帕[斯卡]秒	Pa·s	1 泊(P)=0.1Pa·s 1 厘泊(cP)= 10^{-3} Pa·s 1 千克力秒每平方米(kgf·s/m ²)=9.80665Pa·s 1 磅力秒每平方英尺(lbf·s/ft ²)=47.8803Pa·s
运动粘度	平方米每秒	m ² /s	1 斯托克斯(St)= 10^{-4} m ² /s 1 平方英尺每秒(ft ² /s)= 9.29030×10^{-2} m ² /s
表面张力	牛[顿]每米	N/m	1 达因每厘米(dyn/cm)= 10^{-3} N/m
动量	千克米每秒	kg·m/s	1 达因秒(dyn·s)= 10^{-5} kg·m/s 1 磅英尺每秒(lb·ft/s)=0.138255kg·m/s
转动惯量	千克平方米	kg·m ²	1 磅平方英尺(lb·ft ²)=0.0421401kg·m ²
质量	千克	kg	1 磅(lb)=0.453592kg 1 盎司(oz)=28.3495g
密度	千克每立方米	kg/m ³	1 磅每立方英尺(lb/ft ³)=16.0185kg/m ³
质量流量	千克每秒	kg/s	1 磅每秒(lb/s)=0.453592kg/s
体积流量	立方米每秒	m ³ /s	1 立方英尺每秒(ft ³ /s)=0.0283168m ³ /s
功率	瓦[特]	W	1 千克力米每秒(kgf·m/s)=9.80665W 1 马力=735.499W
长度	米	m	1 英寸(in)=0.0254m 1 英尺(ft)=0.3048m 1 英里(mile)=1.609344×10 ³ m
面积	平方米	m ²	1 平方英寸(in ²)= 6.4516×10^{-4} m ² 1 平方英尺(ft ²)=0.09290304m ²
体积	立方米	m ³	1 立方英尺(ft ³)=0.0283168m ³
磁场强度	安[培]每米	A/m	1 奥斯特(Oe)=79.578A/m
磁通量密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	1 高斯(Gs,G)= 10^{-4} T

第三节 测量误差

一、测量误差及其分类

测量误差是测量结果与被测量的真值之间的差值。由于真值是一个理想概念,在实际测量过程中无法测得,因此在实际测量中常用测得数据的平均值来代替真值。测量误差可分类如下。

(一)根据误差成因和特性分类

按误差成因和特性可将误差分为三类,即随机误差、系统误差和粗大误差。

1. 随机误差

其特点为在相同条件下,少量重复测量同一参数时,误差时大时小,时正时负,无一定规律性,且不可能预先测定。但在测量次数增多时,可以发现误差的变化是符合一定统计规律的,即正向与负向误差数值基本相同,数值分布基本对称,其分布一般符合正态分布规律。这种误差的成因主要是一些非主要的、尚未发现或无法控制的随机因素所致。随机误差的具体成因虽不清楚,但由于其分布符合正态分布规律,因此理论上可算出随机误差对测量结果的影响。

2. 系统误差

其特点是误差数值及正负号都固定不变或数值及正负号均按一定规律发生变化。产生系统误差的原因有测量仪表自身的误差,周围环境变化的影响(如外界压力,温度、湿度等的变化),以及测量人员的习惯和读数偏向等。符号或绝对值已经确定的系统误差称为已定系统误差;符号或绝对值未能确定的称为未定系统误差。已定系统误差可根据产生的原因采用修正值或其他方法加以消除。未定系统误差只好作为随机误差计算。

3. 粗大误差

简称粗差,又称疏失误差或过失误差。其特点是在数值上具有明显的偏差。读数误差、记录误差、计算误差、未达到测量条件就开始测量等因粗心、疲劳或操作不当等原因都会直接造成粗大误差。正确的测量是不允许存在粗大误差的,因此必须设法从试验数据中剔除含有粗大误差的测量值(称为坏值或异常值)后,才能得出正确的试验结果。

(二)根据误差表示方法分类

按误差表示方法的不同,可将误差分为算术平均误差、标准误差、极限误差、绝对误差和相对误差。

1. 算术平均误差

在一组测量数据中,如果用全部测得值的随机误差绝对值的算术平均值来表示这一组测量数据的误差,则得出的误差称为算术平均误差。算术平均误差可按下式计算:

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

式中 δ ——一组测量数据的算术平均误差;

x_i ——一组测量数据中的各个测量值, $i=1, 2, \dots, n$ (测量次数);

$\bar{x}$ ——一组测量数据的算术平均值,等于 $\sum_{i=1}^n x_i / n$;

$|x_i - \bar{x}|$ ——第 i 个测量 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 的误差绝对值;

n ——测量次数。

应用算术平均误差方法计算误差虽已考虑到测量次数 n 对误差的影响,但并不能反映各

测量值之间相互符合的程度。因为一组各测量值相互接近的数据,其算术平均误差有可能与另一组各测量值并不相互接近的数据的算术平均误差是相同的。

2. 标准误差

也称均方根误差。用测量值与全部测量值的算术平均值的差的平方和与测量次数 n 比值的平方根来表示误差。按定义,标准误差可用下式表示:

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

式中 δ ——一组测量数据的标准误差;

n ——测量次数。

式(1-2)适用于计算进行无限次测量时的标准误差。当测量次数 n 为有限次时,可用式(1-3)进行标准误差计算:

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-3)$$

标准误差不仅考虑了测量次数的影响,而且对数据组中的特大或特小误差十分敏感,因此应用标准误差方法计算误差能同时较好地反映各测量值之间的相互符合程度。

一组测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 的标准误差计算式如下:

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\delta}{\sqrt{n}} \quad (1-4)$$

3. 极限误差

极限误差等于标准误差与置信系数的乘积。单项测量值的极限误差可按下式计算:

$$R = t\delta \quad (1-5)$$

式中 R ——测量值的极限误差;

t ——置信系数;

δ ——标准误差。

当置信系数取 3 时,按统计学计算,所测量值的真值落在 $\pm 3\delta$ 范围内的置信概率为 99.73%,而超出此范围的可能性已极小,所以一般将 3δ 定义为极限误差。

当置信系数小于 3 时,置信概率随之下降。单项测量值的置信系数与置信概率的相互关系见表 1-8。

一组测量值的算术平均值的极限误差可按下式计算: **表 1-8 单项测量值的置信系数 t 与置信概率 $(1-\alpha)$ 的对应关系**

$$R_{\bar{x}} = t\delta_{\bar{x}} = \frac{t\delta}{\sqrt{n}} \quad (1-6)$$

对于测量次数为 n 的一组测量值,置信系数 t 与置信概率 $(1-\alpha)$ 及测量次数 n 之间的对应关系见表 1-9。

t	$1-\alpha$
1	0.6826
2	0.9544
3	0.9973

在计算极限误差时,可先算出标准误差值,再根据选定的置信概率值 $(1-\alpha)$ 和测量次数 n 在表 1-8 或表 1-9 中查出对应的置信系数 t 。最后按具体情况用式(1-5)或式(1-6)算出相应的极限误差值。

表 1-9 $t, (1-\alpha)$ 与 n 之间的对应关系[适用于式(1-6)]

$t \backslash \begin{matrix} 1-\alpha \\ n \end{matrix}$	0.9977	0.99	0.95	$t \backslash \begin{matrix} 1-\alpha \\ n \end{matrix}$	0.9977	0.99	0.95
2	3.0	3.0	3.0	16	3.0	2.95	2.13
3	3.0	3.0	3.0	17	3.0	2.92	2.12
4	3.0	3.0	3.0	18	3.0	2.90	2.11
5	3.0	3.0	2.78	19	3.0	2.88	2.10
6	3.0	3.0	2.57	20	3.0	2.86	2.09
7	3.0	3.0	2.45	30	3.0	2.76	2.05
8	3.0	3.0	2.36	40	3.0	2.70	2.02
9	3.0	3.0	2.31	50	3.0	2.68	2.01
10	3.0	3.0	2.26	60	3.0	2.66	2.00
11	3.0	3.0	2.23	70	3.0	2.65	1.99
12	3.0	3.0	2.20	80	3.0	2.64	1.99
13	3.0	3.0	2.18	90	3.0	2.63	1.99
14	3.0	3.0	2.16	100	3.0	2.63	1.98
15	3.0	2.98	2.14	∞	3.0	2.58	1.96

4. 绝对误差

等于测量结果与被测量真值之间的差值。

5. 相对误差

等于被测量值的绝对误差与被测量真值之比。

二、直接测量、间接测量与组合测量的误差

测量误差大多是在各参数的直接测量过程中产生的。直接测量过程中产生的粗大误差应加以剔除,系统误差中的已定系统误差应采用修正等方法加以消除,其未定系统误差可作随机误差计算。因此在直接测量中需要计算的误差主要是随机误差及当作随机误差计算的未定系统误差。这两部分随机误差的合成计算方法参见本节有关随机误差的论述。

各个直接测量值所具有的随机误差、系统误差和粗大误差都会按一定规律传递给间接测量值和组合测量值。其误差传递计算方法参见本节有关间接测量中的误差传递计算的论述。

三、粗大误差及坏值的剔除

在测量过程中,由于粗大误差的存在,会在测量数据中出现偏差特大的坏值。不剔除坏值必然影响测量结果的精确性。判别坏值的方法主要有以下几种。

(一)拉伊达(Райта)法

此法以极限误差 3δ 为依据进行坏值判别。如果一组数据中某测量值 x_i 与这组数据的算术平均值 $\bar{x}$ 的差值绝对值大于 3δ ,则认为此 x_i 值是坏值,应加以剔除。

此法优点是简便,不需查表,但要求测量次数至少大于 10 次,否则将无法发现坏值。

(二)肖维勒(Chauvenet)法

应用此法时先根据测量次数 n 由表 1-10 中查出 Z 值。如一组数据中某测量值 x_i 与这组数据的算术平均值 $\bar{x}$ 的差值绝对值大于 Z 值和标准误差 δ 的乘积 $Z\delta$,则此 x_i 值为坏值,应以剔除。

此法考虑了测量次数的影响,但未考虑置信概率。

表 1-10 测量次数 n 与 Z 值的相互关系

n	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Z	1.65	1.73	1.79	1.86	1.92	1.96	2.00	2.04	2.07	2.10
n	15	20	25	30	35	40	50	60	80	100
Z	2.13	2.24	2.33	2.39	2.45	2.50	2.58	2.64	2.74	2.81

(三)格拉布斯(Grubbs)法

应用格拉布斯法判别坏值并加以剔除的具体步骤如下:

- ①将一组测试数据按其大小进行排列,算出其算术平均值 $\bar{x}$,并按式(1-3)算得其标准误差 δ 值;
- ②选定一个检出水平 α 值,一般选为 0.05 或 0.01
- ③将该组测量数据的各测量值分别算出其 $(x_i - \bar{x})/\delta$ 的值;
- ④根据该组数据的测量次数 n 和选定的检出水平 α 值,由表 1-11 中查得差别值 k ;
- ⑤将其 $|x_i - \bar{x}|/\delta$ 值大于 k 值的测量值定为坏值,并将其剔除;
- ⑥将应剔除的测量值去掉后,再对该组数据的剩余测量值按步骤①重新计算,直到不再出现应该剔除的坏值为止。

格拉布斯法被实践证明是效果最好的方法,是目前得到广泛应用的一种判别和剔除坏值的方法。

表 1-11 格拉布斯表(差别值 k 与 α 和 n 的对应关系)

$k \backslash \alpha$ n	α		$k \backslash \alpha$ n	α	
	0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.15	1.15	16	2.44	2.75
4	1.46	1.49	17	2.47	2.79
5	1.67	1.75	18	2.50	2.82
6	1.82	1.94	19	2.53	2.85
7	1.94	2.10	20	2.56	2.88
8	2.03	2.22	21	2.58	2.91
9	2.11	2.32	22	2.60	2.94
10	2.18	2.41	23	2.62	2.96
11	2.23	2.48	24	2.64	2.99
12	2.29	2.55	25	2.66	3.01
13	2.33	2.61	30	2.75	3.10
14	2.37	2.66	40	2.87	3.24
15	2.41	2.71	50	2.96	3.34

四、系统误差及其消除方法

对于未定系统误差,可将其并入随机误差一起计算。

对于已定系统误差可以采用下列一些方法加以减轻或消除。

(一)应用修正值消除已定系统误差

如在测量过程中一时不宜改用适宜的测量方法来消除已定系统误差,则可应用修正值来实现较为准确的测量。例如,对于由于仪表及其附属设备的基本误差引起的已定系统误差,可应用精度高的标准仪表对所用仪表及附属设备进行校验,以取得相应的修正值或修正曲线,以

便对测量值进行更正。对于环境影响偏离正常值而引起的已定系统误差,也可根据校验及理论分析取得的修正曲线或修正计算式对测量值进行更正。

(二)消除产生系统误差的因素或根源

在测量过程中应随时消除产生系统误差的各种因素或根源。例如,由于安装错误引起的系统误差,因测量人员习惯引起的系统误差等,都只有采用从根源上改正或消除的措施才能得到解决。

(三)选用适宜的测量方法消除已定系统误差

1. 替代消去法

该法利用等量代换原理来消除系统误差。以天平测重为例。设天平两臂实际上有误差,一臂长度为 l_1 ,另一臂长度为 l_2 ,因此尽管砝码标准也不能得到准确结果,称重时将产生已定系统误差。应用替代消去法时,可选用一中间量 T 与被测量 G 在天平上平衡,可得 G 的计算式为 $G=l_2T/l_1$ 。然后,用砝码替代 G 再称一次,可得砝码 P 的计算式为 $P=l_2T/l_1$ 。对比两式,可得 $G=P$ 。因而应用此法即消除了天平不等臂长引起的已定系统误差。

2. 换位法

此法采用通过安排测量方法,使引起系统误差的因素以相反的效果影响测量结果,从而抵消系统误差。例如,以天平称重量,第一次将被测物置于天平右侧,第二次将被测物置于天平左侧,取两次测量结果的平均值作为被测物的重量,即可消除天平的系统误差。

3. 对称观测法

对于具有线性变化的系统误差,可用等时距对称观测法消除。由于线性变化,只要时间间距相等,其变化量也相等,利用这一关系,适当安排实验手段,可消除线性变化的系统误差。例如,用补偿法测电阻时,利用等时距对称观测法可消除工作电流随时间变化所引入的误差。

五、随机误差及误差合成

在直接测量中,当剔除具有粗大误差的坏值和消除系统误差中的已定误差后,余下的误差尚有随机误差和系统误差中的未定系统误差,后者通常与随机误差一起计算。

直接测量中的随机误差可按前述方法,根据误差表示方式的不同,用算术平均误差算法、标准误差算法或极限误差算法算得。

当随机误差与未定系统误差合成计算时可按下列方法计算。当测量某一参数时,如存在 n 个随机误差和 m 个未定系统误差,则该参数的综合随机误差(标准误差)可按下式计算:

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^n \delta_i^2 + \sum_{i=1}^m \Delta_i^2 \right)^{1/2} \quad (1-7)$$

式中 δ ——总标准误差;

δ_i ——各个用标准误差表示的随机误差;

Δ_i ——各个未定系统误差。

该参数用极限误差表示的综合随机误差按下式计算:

$$R = \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 + \sum_{i=1}^m \Delta_i^2 \right)^{1/2} \quad (1-8)$$

式中 R ——总极限误差;

R_i ——各个用极限误差表示的随机误差。

如果测量参数的总误差中除测量误差外还包括取样误差,则该测量参数的总标准误差应为:

$$\delta_{\Sigma} = (\delta^2 + \delta_c^2)^{1/2} \quad (1-9)$$

式中 δ_{Σ} ——考虑取样误差后的总标准误差；
 δ ——未考虑取样误差的总标准误差；
 δ_c ——取样误差。

该测量参数考虑取样后的总极限误差应为：

$$R_{\Sigma} = (R^2 + \delta_c^2)^{1/2} \quad (1-10)$$

式中 R_{Σ} ——考虑取样误差后的总极限误差；
 R ——未考虑取样误差的总极限误差。

六、间接测量中的误差传递和计算

直接测量值带来的误差将在间接测量中传递。间接测量中误差传递计算式及其运算方式如下。

(一) 间接测量误差传递计算式

设间接测量值 y 与直接测量值 u, v, w 存在下列函数关系：

$$y = f(u, v, w) \quad (1-11)$$

令 Δy 表示间接测量值 y 的绝对误差， $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 分别表示直接测量值 u, v, w 的绝对误差，则可列出下列误差传递关系式：

$$y + \Delta y = f(u + \Delta u, v + \Delta v, w + \Delta w) \quad (1-12)$$

如误差 $\Delta u, \Delta v$ 和 Δw 较小，式(1-12)按泰勒级数展开并略去高阶无穷小量后可得：

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial f}{\partial w} \Delta w \quad (1-13)$$

上式为间接测量值的绝对误差传递表达式。如用相对误差表达，则可采用下式：

$$\frac{\Delta y}{\bar{y}} = \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\Delta u}{\bar{y}} + \frac{\partial f}{\partial v} \frac{\Delta v}{\bar{y}} + \frac{\partial f}{\partial w} \frac{\Delta w}{\bar{y}} \quad (1-14)$$

式中 $\bar{y}$ ——间接测量值的算术平均值。

(二) 误差传递计算式的运算

1. 对加法函数的运算

设 $y = u + v + w$ ，则由式(1-13)可得：

$$\Delta y = \Delta u + \Delta v + \Delta w$$

由于 $\Delta u, \Delta v$ 及 Δw 可正可负，当求最大误差时可取各误差的绝对值，即：

$$\Delta y = |\Delta u| + |\Delta v| + |\Delta w| \quad (1-15)$$

2. 对减法函数的运算

设 $y = u - v - w$ ，则由式(1-13)可得：

$$\Delta y = \Delta u - \Delta v - \Delta w$$

其最大误差为：

$$\Delta y = |\Delta u| + |\Delta v| + |\Delta w| \quad (1-16)$$

3. 对乘法函数的运算

设 $y = uvw$ ，则由式(1-14)可得最大相对误差为：

$$\frac{\Delta y}{\bar{y}} = \left| \frac{\Delta u}{u} \right| + \left| \frac{\Delta v}{v} \right| + \left| \frac{\Delta w}{w} \right| \quad (1-17)$$

4. 对除法函数的运算

设 $y = \frac{u}{v}$ ，根据式(1-14)可得最大相对误差为：