



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温测试技术

ZHILENG YU DIWEN CESHI JISHU

甘智华 张小斌 王 博 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与低温测试技术

甘智华 张小斌 王 博 编著

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

制冷与低温测试技术 / 甘智华等编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2011. 6

ISBN 978-7-308-08713-1

I. ①制… II. ①甘… III. ①制冷技术—低温测量方法
IV. ①TB663

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 092216 号

制冷与低温测试技术

甘智华 张小斌 王 博 编著

责任编辑 杜希武
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 德清县第二印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 11.25
字 数 273 千
版 次 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-08713-1
定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换
浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

在制冷技术、低温工程、低温物理、超导研究、气体液化和分离技术中,都有许多装置和设备组成一个完整的系统,各个系统都要及时地提供装置(或设备)在运行中有关的各种参数信息,以反映装置或实验的运行情况,并为装置运行的自动化和计算机控制提供确切依据。因此,测量是保证实验正确与否、装置正常运行、安全运行、经济运行和实现测量自动化的必要条件,每个从事制冷与低温工程设计、研究及教育的人员必须熟悉和掌握有关制冷与低温测量的原理和基本技能,为今后的科研、教育、设计和生产奠定基础。

制冷和低温需要测量制冷和低温流体(气体和液体)的各种物性数据,它是热力学理论、科学实验和工业生产的依据。在流体物性数据测量中,有些测量可以直接得到,如温度 T 、压力 P 、液体深度(液位)、流量等等,大部分流体性质要通过测量基本参量再进行函数关联后才能得到,而且这种参数很多。制冷和低温测量的基本参数大致与热工测量参数一样,但在热工测量中均以室温以上的测量原理、方法、以及配套的检测仪表为主;而室温以下的测量,特别是低温测量介绍不多,由于在摄氏零度以下的制冷和低温测量中,最普通的流体——水要结冰,空气要结霜,检测仪表的环境变坏,一般热工测量已不适应。

根据本专业特点,本书较详细地介绍制冷和低温流体有关参量的测量原理、方法和相对应的仪表,并尽可能把特殊的制冷和低温测量转化为一般的热工测量,此外,本书也介绍了一般流体的热工测量方法。

低温流体的一般特性如表 0-1 所示,表中示出了低温流体的摩尔质量、三相点、正常沸点、临界点的温度和压力、密度、气化潜热等重要特性参数。

除低沸点明显特征外,还有:

蒸发潜热小:低温流体特征之一是具有低的蒸发潜热。由于所有流体正常蒸发焓不变,预示蒸发潜热随着正常沸点的降低成正比地减小。对于氧、氟、氮的情况确实是如此,而氢的蒸发潜热要比预测值小得多,氢只有预测蒸发潜热的一半,氦的蒸发潜热更小。

二相流体:由于低沸点,再加上低的蒸发潜热,使得低温液体极易沸腾成二相流体,这样必定影响液体的输送,给密度和液面测量增加了难度。因此任何测量敏感元件引入的很小一点漏热、元件本身产生的自热以及流体流动产生的摩擦力等都能使低温液体蒸发气化形成二相流体。

热膨胀性大:液氢和正常流体相比具有较大的热膨胀系数,氢的蒸气压曲线也较陡峭,对液氢贮槽从一个大气压加压到二个大气压时,则液氢的温度上升到 23K 以上(正常沸点,一个大气压下为 20.39K),液面升高约 5%,也即,一个封闭的质量不变的液氢贮槽,当加压时液面反而会上升。

相对密度小:低温蒸气的密度与常规气体相比是较大的,另一方面低温液体与相同常规气体的液体相比是较轻的,因此低温流体的液体/蒸气密度比非常的小,对于某些流体在正常

表 0-1 常用低温流体性质

kg/kmol	单位	甲烷 CH ₄	氧 O ₂	氩 Ar	空气 Air	氮 N ₂	氖 Ne	氢 H ₂	氦-4 ⁴ He	氦-3 ³ He	氪 Kr	Xe	水 H ₂ O
摩尔质量 M	Kmol	16.04	32.00	39.944	28.968	28.016	20.283	2.016	4.003	3.016	83.80	131.30	18.0
正常沸点 T _b	K	111.7	90.188	87.29	78.9/81.7	77.36	27.108	20.28(e)	4.224	3.191	119.8	165.05	378.15
临界温度 T _c	K	191.06	154.78	150.72	132.22	126.28	44.45	32.9(e)	5.204	3.324	209.4	289.75	647.3
临界压力 P _c	10 ³ kPa	4.64	5.107	4.864	3.769	3.398	2.721	1.287	0.2275	0.1165	5.51	5.88	22.12
三相点温度 T _s	K	90.66	54.107	83.81	—	63.15	24.56	13.81	—	—	115.76	161.37	273.15
三相点压力 P _s	kPa	11.6676	0.152	68.92	—	12.5257	43.3075	7.0406	—	-73.6	81.6	0.61	—
饱和蒸气密度 ρ _v	kg/m ³	424.5	1142	1400	-879	808	1204	-70.8	125	143	2900	3540	958
饱和液体密度 ρ _L	kg/m ³	01.8	4.8	5.7	4.48	4.61	4.8	1.34	15.5	22	8.95	—	0.5976
在 0°C, 1 大气压下 密度 ρ ₀	kg/m ³	0.7167	1.4289	1.758	1.2928	1.2506	0.9004	0.0899	0.1785	0.1345	3.745	5.85	0.00485 (V)998(L)
气化 LV	kJ/kg	509.54	212.76	163.02	205.5	199	85.7	447.	20.8	8.5	107.5	96.2	2257
0°C, 1 大气压气体 等质量液体的体积 比相对密度 (ρ _L /ρ _v)	m ³ /m ³	592.30	799.2	796.4	675.3	646.1	1337.2	787.5	1063.2	774.4	605.1	—	—
		235.7	225	241	194.8	175	126	52.8	7.4	6.5	270	297	1603

沸点时液/气密度比, $\text{H}_2\text{O} : 1603/1$; $\text{O}_2 : 250/1$; $\text{H}_2 : 50/1$; $\text{He} : 8/1$ 。因此同个“放空”的液氢火箭燃料贮箱依旧有可观的氢质量(约为原来质量的 20%)。一个如电容型的总质量敏感元件,当储箱放空时仪表的指示值趋向 0%,此时会产生较大的误差,这个误差可达指示值的百分之几。

易热分层:由于低温流体导热性能差,在静止情况下,贮槽顶部的液体温度较高,密度较小,浮在较冷液体的上部产生热分层。要避免它就得减压或增加贮槽的壁厚,同时,这个系统也会产生各向异性或多相性。它必定影响均相测量仪表的精确度。

在种类繁多的低温流体中,有些易燃易爆,有些有毒,有些气体贵重需要回收,故一般都不能直接暴露在空气之中,更有些低温流体在低温下,其性质与一般正常流体有较大差异,甚至会产生超流、超导、无粘度等现象,使低温测量具有特殊的要求和检测方法,所采用的敏感元件本身要有小的热容量,小的工作电流和低的漏热量,还应考虑各种元件及材料在低温下的性能,有些材料在低温下发脆,产生应变和应力,有些材料则根本不能在低温下使用。

为此,我们根据专业的需要,结合“十一五”教材规划的契机,在原有讲义(历经郑建耀副教授、冯仰浦教授、刘楚芸教授等)试行二十多年的基础上,编写了这一适用于制冷与低温专业方向的测试技术教材,就在本书即将付梓之际,作为后学之辈的我们,深切地感受到前辈们为此付出的辛劳,我们唯有不断前行,以更踏实的工作作风来迎接更大的挑战。

科学技术在进步,新技术、新成果不断涌现,而我们的水平有限,因此,在内容选择和安排上,会有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2011年3月

目 录

第一章 测量误差分析	1
第一节 测量基本概念	1
一、测量仪表的组成	1
二、仪表的质量指标	2
第二节 测量误差及其表示方法	4
一、测量误差的基本概念	4
二、测量误差的分类	6
三、误差的表示方法	8
第三节 随机误差及其计算	9
一、随机误差的特性	9
二、测量次数对标准误差的影响	9
三、标准误差的计算.....	10
第四节 误差的传递	12
一、和差关系的误差传递.....	12
二、乘积函数的误差传递.....	13
三、一般函数的误差传递.....	13
第五节 误差的综合	15
第二章 温度的测量	17
第一节 温度与温标	17
一、热力学温标.....	18
二、国际温标.....	19
三、温度计.....	24
第二节 膨胀式温度计	26
一、液体膨胀式温度计.....	26
二、固体膨胀式温度计.....	28
第三节 气体温度计	28
一、简易气体温度计.....	29

二、实验室用比较精确的气体温度计·····	30
第四节 蒸汽压温度计·····	34
一、饱和蒸气压和温度的关系·····	35
二、蒸汽压温度计的结构·····	38
三、简易蒸气压温度计和复合温度计·····	39
四、使用蒸气压温度计应注意的问题·····	40
第五节 电阻温度计·····	40
一、金属电阻温度计·····	41
二、合金电阻温度计·····	47
三、半导体电阻、碳电阻和热敏电阻温度计·····	51
第六节 热电偶温度计·····	54
一、热电偶测温原理·····	54
二、热电偶回路基本性质·····	56
三、低温热电偶·····	59
四、热电偶的分度和校验·····	64
五、热电偶的制作和使用·····	65
第七节 热电势和电阻的测量·····	68
一、热电势毫伏计测量法·····	68
二、热电势电位差计测量法·····	68
三、电阻的测量方法·····	71
四、乱真电动势的消除·····	72
五、数字式温度计·····	73
第八节 半导体二极管温度计和电容温度计·····	77
一、半导体二极管温度计·····	77
二、电容温度计·····	78
第九节 磁温度计·····	80
一、磁温度计的结构·····	80
二、磁温度计测量温度的方法·····	81
第三章 压力和真空的测量·····	83
第一节 概述·····	83
一、压力的概念·····	83
二、压力的分类·····	84
第二节 液柱式压力计·····	84
第三节 弹性式压力计·····	85



一、弹性元件的测压原理·····	85
二、弹性感压元件的特性·····	86
三、弹簧管压力计·····	88
四、膜片式压力计·····	90
五、膜盒压力计·····	91
六、波纹管压力计·····	91
第四节 压力变换器 ·····	92
一、电感式压力变换器·····	93
二、电容式压力变换器·····	96
三、霍尔片弹簧式压力变换器·····	97
四、应变式压力变换器·····	100
第五节 真空的测量 ·····	102
一、压缩式真空计·····	103
二、热电耦式真空计·····	104
三、电离式真空计·····	104
四、复合式真空计·····	106
第四章 流体流量的测量 ·····	110
第一节 容积式流量计 ·····	111
第二节 涡轮流量计 ·····	113
一、涡轮流量计的测量原理·····	113
二、涡轮流量计的特性及压力损失·····	114
三、涡轮流量计使用中应注意的问题·····	114
第三节 电磁流量计 ·····	118
一、电磁流量计的工作原理·····	118
二、电磁流量计的结构·····	119
第四节 超声波流量计 ·····	121
第五节 速度头流量计 ·····	123
一、速度头流量计测量原理·····	123
二、皮托管·····	123
三、测量方法·····	123
第六节 靶式流量计 ·····	125
一、靶式流量计的工作原理·····	125
二、电动靶式流量计·····	126
三、气动靶式流量计·····	126

第七节 转子流量计	128
第八节 节流式流量计	132
一、节流装置原理及流量方程	132
二、节流装置的种类和取压方式	134
三、标准孔板	135
四、标准喷嘴	138
五、标准节流装置的安装	139
第九节 低温流体质量流量的测量	140
第十节 流量仪表的标定装置	143
一、标定中的一般注意事项	143
二、标定方法及其装置	144
第五章 低温流体液面的测量	147
第一节 差压式液面计	147
第二节 电阻式液面计	148
第三节 超导式液面计	150
第四节 电容式液面计	151
一、检测原理	151
二、检测电容量的方法	152
第五节 热力学液面计	154
第六节 其他低温流体液面测量方法	157
附录 A1 预冷型液氦温区高频脉管制冷机冷端制冷温度和制冷量的误差分析	158
附录 A2 铝(合金)RRR 值测量随机误差分析	162
参考文献	166



第一章 测量误差分析

第一节 测量基本概念

用来测量各种热工参数(如温度、压力、流量、液位等)的各种仪表统称为热工测量仪表,制冷与低温测量实质是热工测量的一部分。它的种类繁多,其原理和结构虽然各不相同,但一般来说测量仪表均包含传感器、传输器和显示器三个基本部分。

一、测量仪表的组成

1. 传感器

传感器又称感受件,是仪表与被测对象直接发生联系的部分,因此也常称敏感元件或一次元件,例如热电偶和热电阻就是测温传感器。传感器能感受被测参量的大小,并输出一个相应的信号,对传感器的要求是:

- (1) 输出的信号必须迅速地随被测量参量的变化而变化;
- (2) 输出的信号只受被测参量的影响,如果其他参量变化会影响传感器的输出,那么,测量过程中,这些参量变化就是测量误差的来源,应对这些参量采取补偿或修正等措施;
- (3) 输出信号与被测参量之间必须是单值关系,最好是线性关系;
- (4) 在测量中,敏感元件应不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

2. 传输器

传输器的作用是将传感器的输出信号传输给显示器,又称中间件。信号在传输过程中有时还要进行如下的加工处理:

- (1) 为了满足远距离输送以驱动显示器的需要,将信号加以放大;
- (2) 若输出信号与被测参量之间不是线性关系,最好进行线性化处理;
- (3) 传感器的输出信号形式不适合于显示时,通过传输器转变成适合显示的形式。

例如,弹簧管压力计中压力对弹簧管(传感器)输出的是位移信号,通过由拉杆、扇形齿轮、中心齿轮等组成的传输器传输并转换为显示器一指针的转角信号时,就经历了信号放大、转换等过程。

此外,信号在传输中传递,应使信号损失最小,从而减小误差。

3. 显示器

所有测量的最终结果是通过显示器向使用者反映被测参量的数值和变化,根据测量要求和目的不同,显示可以是瞬时量、累计量、超限(上、下限)或极限指示(报警)、还可以记录相应的量,有时还有调节功能去控制热工过程。显示器常称二次仪表。

显示方式有模拟式、数字式和屏幕式三种：

(1) 模拟式显示 通常是以指示器在仪表刻度尺上移动的方式来连续指示被测参量之值。读数的最后一位数字总是由读者估计，因此加入了主观因素，会产生误差。这类仪表只能指示被测参量的瞬时值。当需要知道被测参量随时间而变化的情况时，可用曲线形式记录测量结果，比较直观。

(2) 数字式显示 数字显示式仪表是将模拟量通过模数编码器转换成二进码的数字量，然后借助于译码器将二进制数字量翻译成人们所熟悉的十进制数字量，并用数码管直接向测量人员显示被测参量的大小和单位。这种显示克服了模拟显示仪表的读数慢和视差的缺点，它既可显示瞬时量又可显示累计量，并可打印出有关数据。目前这类仪表(如数字电压表、数字温度计、数字频率计)已广泛应用于我国的科学研究和工业生产中。

(3) 屏幕式显示 这是电视技术在测量显示上的应用，是目前最先进的显示方式，它既能按模拟量给出曲线，也能显示出数字。或两者同时显示，屏幕显示富于形象又易读数，并在屏幕上显示多种参量，便于参量之间的分析与比较。

在现代化测量技术中，常设立中心控制室，把各种被测参数显示器集中地一起，便于整体调节和控制，有些配有微处理器(即专用微型计算机)的数据采集系统，它能通过各种传感器自动检测试验(生产)系统中各种参量的信号，并将所测量结果汇总输入到微处理器中，然后按一定的数学模型(编成程序)进行数据综合计算处理，从而可立即得出试验结果(数据或曲线)。它具有快速与准确的优点，大大提高实验工作的效率和降低测试人员的劳动强度。

二、仪表的质量指标

当要进行某种实验时，首先应根据实验中被测参量和种类(何种热工基本量)、性质(瞬时量或累计量)和要求(被测量的范围、精度等)，选用合适的测量仪器。

仪表的质量指标一般有：

1. 仪表的误差

在介绍仪表性能指标时，常会涉及仪表的各种误差，现对仪表误差作一简单说明：

(1) 绝对误差

当使用某一测量仪表对某一参量进行测量时，由于种种原因(如仪表零件的加工质量、组装好坏以及工作环境的变化等)，仪表的指示值 M 和被测量参量真值 μ 存在的差值称为绝对误差 δ ，即

$$\delta = M - \mu \quad (1-1)$$

(2) 相对误差

绝对误差 δ 与被测参量的真值 μ 之比称为相对误差，通常以百分为数表示，即

$$\epsilon = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% = \frac{M - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (1-2)$$

相对误差比绝对误差更能确切地反映测量的精确程度。

(3) 基本误差

在规定正常工作条件(如环境温度、湿度、电源电压、频率等)下，仪表具有的最大误差 δ_{\max} 与仪表量程范围 L_m 之比，称为基本误差 ϵ_b ，即

$$\epsilon_b = \frac{\delta_{\max}}{L_m} \times 100\% = \frac{M - \mu}{L_m} \times 100\% \quad (1-3)$$

仪表的基本误差是仪表质量的主要指标之一。

2. 仪表的量程

仪表能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围称为仪表的量程或称测量范围,许多仪表测量范围分为若干档,使用时应选择合适的档次,务必注意。

在选用仪表时,首先要大致估计一下被测参量的大小,由大至小的对仪表的量程进行选择,必须使被测参量处在仪表量程之内,最好是使测量值落在仪表量程的三分之二左右。在测量过程中,决不允许测量值超过仪表的量程,否则,将导致仪表损坏或精度降低。反之,若选用量程大的仪表,则会使测量结果达不到所需的精度。

3. 仪表的精确度

仪表的精确度简称仪表的精度,它是表征指示值与被测真值接近程度的质量指标。通常,仪表出厂时保证其基本误差不超过某一规定值,此规定值称为允许误差。仪表的精度等级以其允许误差去掉百分号后的数值表示,并将其注明在表盘上。一般工业仪表的精度等级应符合国家系列:0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0和5.0。

仪表的等级是衡量仪表测量示值正确度的重要指标。科学研究用的仪表其精度等级约为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$,有时甚至更高;工业检测用的仪表其精度等级值为 $10^{-1} \sim 5.0$,应根据测量要求合理地选用不同精度等级的测量仪表,如0.5级仪表表示允许误差 $\leq 0.5\%$ 。一个量程为 100°C 的0.5级测温仪表,其基本误差应 $\leq 0.5\%$,即最大误差应 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

在实际使用中,还可能由于环境温度变化,电源电压波动,外部干扰等与规定的正常工作条件不符而引起附加误差,因此,要做到准确测量,除注意上述各点外,还应注意测量点的合理选择及仪表的正确安装和使用。另外,还必须定期的对仪表进行检测和调整,才能保持仪表的精确度。

4. 仪表的灵敏度

灵敏度是衡量仪器仪表质量的另一重要指标,它表示被测参量变化时测量仪表反应的灵敏程度。其定义为被测参量(输入量)变化 ΔN 与其引起的仪表输出量变化 ΔL 之比,即

$$\text{灵敏度 } S = \frac{\Delta L}{\Delta N}$$

换言之,仪表灵敏度就是单位输入信号所引起指针偏转角或位移量(或者是数码显示器中数字量)的变化。

不同类型仪表的灵敏度表示方法是各不相同的。例如,对于压力传感器,输入量压力的单位是Pa,输出量为mV,则这种传感器的灵敏度单位为mV/Pa;对于液柱式压力表,灵敏度为mm/Pa;对弹簧管式压力表灵敏度,则为 $\Delta r/\text{Pa}$ 。

测量仪表的灵敏度可以用增大放大系统(机械或电子的)的放大倍数的办法来提高。但是必须指出,仪表的性能主要决定于仪表基本误差,如果单纯地加大仪表灵敏度企图达到更准确的读数是不合理的,反而会造成灵敏度高而精度下降,为此规定仪表标尺上的分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

5. 仪表的分辨率

仪表分辨率也是仪器仪表的重要指标之一,它表示仪表对信号输入量微小变化分辨能力。在精度较高的指示型仪表中,刻度标尺的刻度总是又密又细。一般来说,仪表分辨率不大于仪表测量值中基本误差的一半,分辨误差为

$$\epsilon_L = \frac{1}{2} \epsilon_s$$

这个误差也称不灵敏区(或死区),被测参量变化某一定值时,输出指示仍然不变。

6. 仪表的线性度

理论上具有线性刻度特性的测量仪表,往往会由各种因素的影响使仪表的实际特性偏离其理论线性特性,这种偏离线性关系的现象如图 1-1 所示。

线性度的好坏以非线性误差来表示,即实际值与理论值之间绝对误差最大值 δ'_{\max} 和仪表量程范围 L_m 之比百分数。

$$\text{非线性误差} \quad \epsilon_l = \frac{\delta'_{\max}}{L_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

7. 仪表的重复性

在同一条件下,多次按某一方向(通常指正行程或逆行程)使输入信号作全量程范围的变化时,对应于同一输入值,仪表输出值的一致程度称为重复性。

重复性的好坏以重复性误差 ϵ_r 表示,它指在全量程范围内对应于同一输入值,输出的最大值和最小值之差 ΔR 与量程范围 L_m 之比的百分数,即

$$\epsilon_r = \frac{\Delta R}{L_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

重复性还可以用来表示仪表在一个相当长的时间内,维持其输出特性恒定不变的性能,有时称漂移,因此,从这个意义上讲,仪表的重复性和稳定性意义是相同的。

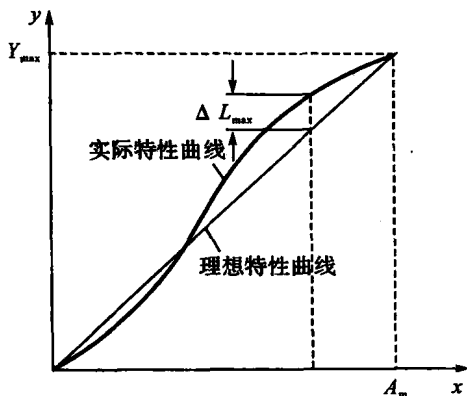


图 1-1 偏离线性现象

第二节 测量误差及其表示方法

在生产和科学研究中都要对某些参数进行定量的测定,由于测量方法、测量仪器、测量环境,观察者的习惯与熟练程度等因素的影响,测得的结果总不能与该参数实际存在的真值完全一致,测量值在一定程度上偏离实际真值,即存在误差。研究误差的目的就是尽可能地减少误差,正确地处理误差,以提高测量结果的准确性。

一、测量误差的基本概念

若用最小刻度为 1°C 的温度计测量液体的温度,温度计的指示在 14°C 和 15°C 之间,而且指示值离 14°C 和 15°C 距离大致相等,无法确定它是 14.4°C 还是 14.5°C 。但是,无论是 14.4°C 还是 14.5°C 都较 14°C 或 15°C 更接近实际。为表示这一测量的准确程度可把测定值与真值加以比较,设测定值为 X ,真值为 μ ,二者之差称为该测定值误差,即

$$X - \mu = \pm \delta \quad (1-6)$$

式中, δ 为绝对误差,其大小与测定值的大小有关,绝对误差相同的测量,其准确性不一定相

同,因而要引进相对误差以表示测定值的准确程度,相对误差 ϵ 用绝对误差与被测量的真值 μ 之比表示:

$$\epsilon = \frac{\delta}{\mu} = \frac{X - \mu}{\mu} \quad (1-7)$$

相对误差的值在 $0 \sim 1$ 之间,其值越靠近 1,测量值与真值相差越远。相同准确性的测定值,其相对误差相等。

相对误差与绝对误差的关系可通过下式近似表示:

$$\mu = X \pm \delta = X(1 \pm \frac{\delta}{X}) \approx X(1 \pm \frac{\delta}{\mu}) = X(1 \pm \epsilon) \quad (1-8)$$

真值是某物理最客观真实值,在测量中,由于主、客观的因素,这个真值不可能真正测量到,因此,用式(1-6)和式(1-7)来计算误差就发生困难,根据误差理论,在一定条件下,如果进行无限次的测量,则可以找到一个无限逼近真值的最优近似值,该值就是多次测量所得到测定值的平均值 M 。

根据平均方法的不同,常用的平均值求法可分为下列几种:

(1) 算术平均值

设 $X_1, X_2 \dots X_n$ 为某物理量的 n 次测量值, μ 代表真值, M 为算术平均值,则

$$M = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1-9)$$

此外,由于每次测量的偏差为

$$\left. \begin{aligned} X_1 - \mu &= \delta_1 \\ X_2 - \mu &= \delta_2 \\ \vdots \\ X_n - \mu &= \delta_n \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

则

$$M - \mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} - \mu = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$$

所以

$$\mu = M - \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \quad (1-11)$$

当测量次数 n 增多时,各次测量的平均偏差 $\sum_{i=1}^n \delta_i / n$ 趋近于零,因而可用算术平均值 M 近似代替真值 μ 。

(2) 加权平均值

如在测量中采用了不同的测量方法,或熟练程度不同的人进行测量时,必须对所有数据进行平均处理,要区别不同测量的质量,对可靠性较好的测定值优先考虑,加重其在平均值中的分量,这种平均方法称为加权平均。

设 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 表示各测量值的权数(权数量份数的意思是一个无量纲数),则加权平均值为

$$M_w = \frac{\omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \dots + \omega_n X_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i X_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (1-12)$$

(3) 均方根平均值

按其定义

$$M_2 = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}} \quad (1-13)$$

在通常的热工测量中,一般采用算术平均值,对于同一准确程度正态分布的误差,当测量次数增多时,测量的真值最接近算术平均值。

二、测量误差的分类

由于产生误差的原因不同,误差可按其性质分成三类。

(1) 系统误差

由某些固定的因素造成的测量值的误差称系统误差。这种误差的大小和方向是恒定的,或按一定规律变化,造成系统误差的原因有:

(a) 仪器误差:是由仪器不完善因素引起的误差。如仪器零点不准或刻度不均匀,零件加工不准等因素所造成的读数有固定的偏向,或偏大或偏小等。

(b) 测量方法不完善造成的误差:如热电偶温度计直接测量固体表面温度时,由于导热损失将造成所测温度偏低或偏高。

(c) 环境条件影响造成的误差:如强电磁场的存在将对数字显示仪表产生影响,磁场对电阻温度计测温的影响,大气温度、压力、湿度的变化对实验数据产生的影响等。

(d) 测试者个人主观因素造成的误差:如因视觉缺陷或测读习惯不同,有人读数偏高,有人读数偏低等。

(e) 实验装置造成的误差:如低温恒温器绝热不好而加大了漏热损失,材料表面氧化、结垢而形成附加热阻等,均可造成误差。

(f) 实验原理和方法的近似性引起的误差:非稳态导热中,电热源热容被忽略而产生的误差等。

系统误差在测量中应尽量避免,一旦存在,则不能用增加测量次数消除,而要分析、查明其产生的原因,根据其变化规律对测量结果进行修正。

(2) 过失误差

过失误差又称错差。这完全是由于测量者的过失或操作错误,仪器故障等所造成的巨大差错,错差应尽量避免,一旦出现应从测定数据中剔除,可用莱伊特准则来判断误差。在一组测量值中,若某一测量值 X_i 与该组测量值的算术平均值 M 之差 V_i 大于三倍该组测量值的均方根误差 σ 时, V_i 为过失误差。 X_i 为错差(坏值)就予舍弃,莱伊特准则表示式如下:

$$|V_i| = |X_i - M| > 3\sigma \quad (1-14)$$

其中

$$M = \sum_{i=1}^n X_i / n$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - M)^2}$$

舍去坏值后重新计算平均值 M , 和均方根误差 σ , 并再次检验有无坏值。

(3) 随机误差

随机误差指当测试条件保持不变(同一个测量者、同一台测量仪器、相同的环境条件), 对同一物理量进行重复测量时, 测量结果时正、时负、时大、时小的误差。这种误差特点是: 误差的大小和正负具有随机性, 并服从一定的统计规律。

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不知道的。或者因其变化过于微小而无法加以严格控制。根据中心极限定理可知, 对于这种情况, 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正态分布, 正误差和负误差出现的概率相等。因此, 随机误差的算术平均值逐渐接近于零。测量值的算术平均值逼近真值。

测量误差分析主要对系统误差和随机误差进行分析。这两种误差性质不同, 处理方法也不同。

上述各种误差可通过精度反映出来。误差分析的主要目的之一就是确定测试的精度。所谓精度是指测量结果与真值接近程度的量度, 精度越高, 测量结果愈逼近真值, 精度在数量上等于相对误差的倒数, 如相对误差为 0.1%, 则精度为 10^3 。实质上, 精度表示了测量误差的大小, 所以精度又可细分为下列三种:

准确度: 表示系统误差的大小, 它说明测量值的平均值与真值的偏离程度。

精密度: 表示随机误差的大小及重复性的好坏, 说明随机误差的弥散程度。

精确度: 表示综合误差(即系统误差与随机误差的合成)的大小, 精确度是测量的评价, 它既反映了系统误差的大小, 又反映了随机误差的大小。准确度高的测量, 精密度不一定高。反之, 精密度高度的测量, 准确度不一定高。但精确度高时, 准确度, 精密度都高。如图 1-2 为着点分布图。可以说明上述三种情况。图 1-2(a) 表示系统误差大而随机误差小, 即弥散程度小, 准确度低而精密度高; (b) 表示系统误差小而随机误差大, 即弥散程度大, 准确度高而精密度低; (c) 表示系统误差和随机误差都很小, 即精确度高, 在测量中都希望得到精确度高的结果。

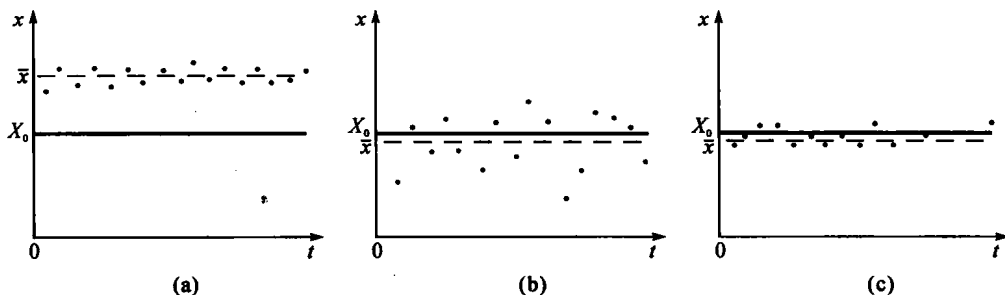


图 1-2 着点分布