

制冷与空调实验教程

——专业基础部分

主 编 陈瑞球 陆佩强
副主编 刘圣春 解海卫 诸 凯



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

制冷与空调实验教程

——专业基础部分

主 编 陈瑞球 陆佩强
副主编 刘圣春 解海卫 诸 凯

内容提要

本实验教材在总结多年实验教学经验的基础上,基于天津商业大学制冷与空调实验教学中心的实验教学体系构架编写而成,系该中心教材建设中的系列教材之一。

本教材中的内容以热工实验为主,共分9章。第1章为测量的基本知识,介绍测量的基本概念及误差分析与数据处理方面的理论和方法。第2章简单介绍了实验中热工基本参数的测量方法及所使用的仪器仪表。第3~9章具体介绍工程热力学、传热学、流体力学、热工测量及仪表、泵与风机、流体输配管网以及建筑自动化等课程的实验内容。每一个实验都着重于阐明其实验原理、实验装置结构、基本测试方法和数据处理等内容。大多数实验附有思考题,以加强学生对实验内容的理解。本教材的架构既便于实验教学与课程理论教学的同步进行,也便于实验课程单独设置的教学模式。

本教材可作为热能动力类专业及相近专业大学生的实验教材,也可作为有关教师、实验技术人员编写实验的指导书、安排实验的参考书,亦可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷与空调实验教程. 专业基础部分/陈瑞球,陆佩强主编. —天津:天津大学出版社,2010. 2

ISBN 978-7-5618-3381-0

I. ①制… II. ①陈… ②陆… III. ①制冷技术—实验—教材 ②空气调节设备—实验—教材 IV. ①TB657—33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 031527 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www. tjup. com
印 刷 天津市泰宇印务有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 9
字 数 230 千
版 次 2010 年 3 月第 1 版
印 次 2010 年 3 月第 1 次
定 价 50.00 元(共三册)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

序

2001年8月教育部下发的《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》一文明确指出,要进一步加强实践教学,注重学生创新精神和实践能力的培养。众所周知,大学作为高素质创新人才的培养基地,更应特别重视本科实践教学,重视知识、能力和素质的综合训练,为国家培养大批创新人才。因此,国家级实验教学示范中心建设的目的在于发挥其辐射作用,促进本科教学质量的提高。目前,实验教学的最大弊病就是开设了大量仅为理论教学服务的验证性实验,而缺乏培养工程应用能力的实验。国外大学的人才培养模式并非完美无缺,但其重视能力培养的模式的确是我们所应借鉴的。审视我们人才培养体系所塑造、培养的毕业生,虽然有着基础知识扎实等优点,但在创新意识和能力的培养等方面却存在着明显的不足。实验教学要向实践教学的方向迈进,实践教学环节是一个将知识转化成能力的"酿造过程"。作为素质教育的重要内容,实验教学不仅是理论教学的补充、解释、验证和延伸,更应当作为一个与理论教学同等重要的环节来设计,实验教学与理论教学应该相互促进、相辅相成。所以,构建一批适应于教学改革为目的,更具专业性、设计性和创造性的实验教材非常之必需,以便使学生在4年学习中能接受多个带有实践环节的培养。实践创新教育是重视学生对所学知识的应用空间,是重视学生的思维意识,是重视创新精神和实践能力的培养。

近年来,各高校教学环境及硬件设备都有很大的提高,但是相对于实验教学软件方面的重视尚有待加强,如改进实验教学体系,开发设计性、创新性和综合性实验教学项目,重视实验教材的建设等方面。基于目前情况,天津商业大学热能与动力工程实验教学中心依据自身的实验教学体系,编写了这套《制冷与空调实验教程》的实验教材,教材包括了专业基础、制冷和供热空调三大部分。将实践性较强、与制冷及暖通专业联系密切、注重培养专业技能的一些实验编进本套教材,是一件非常有意义的工作,适应于热能与动力工程及相关专业实验教学发展的需要。所以,该实验教材的编写出版在满足本校实验教学需要的同时,更因为其中

许多内容体现了天津商业大学制冷学科多年的实践积累,可以为国内其他高校相关专业所参考和借鉴,更好地发挥其国家级实验教学示范中心的辐射作用。

天津商业大学制冷学科与社会的接触较为密切,多个科研和生产单位已作为学生的实习基地,这对于实践教育改革的实施也是非常有利的条件,同时毕业生也容易被社会所接纳。该教材的出版也体现了他们的工作成效,在此感谢参与这套实验教材建设的教师们,也感谢天津大学出版社。这套实验教材将在我国能源动力类实验教学发展中发挥巨大作用。

热能与动力工程教学指导委员会副主任

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the Vice Chairman of the Thermal and Power Engineering Teaching Guidance Committee.

2009 年 6 月

前 言

全国设置热能与动力工程或建筑环境与设备工程专业的学校有 100 多所,由于这两个专业在一定程度上是相通的,服务的行业也有一定的相似性,因此这 100 多所学校中大部分学校这两个专业都有,有的是先有热能与动力工程专业(原名制冷设备专业或制冷工艺专业,习惯称制冷专业),后有建筑环境与设备专业(原名为供热、供燃气、通风与空气调节专业,习惯称空调专业);也有的是先有建筑环境与设备工程专业,后有热能与动力工程专业。在国家相关专业教学指导委员会制定的教学大纲的指导下,各学校根据自身的办学特色,在理论课教学过程中除了选择一些国家级“十五”或“十一五”规划教材外,还选择一些自编的特色教材,而在实验教学方面则是根据各学校实验设备条件来设置一定的实验课。各学校并无统一的实验教学大纲和教学方案,更无统一的实验教材。为此,我们在“高等学校本科教学质量与教学改革工程”建设思想指导下,组织编写了这套《制冷与空调实验教程》,全套书分三部分:专业基础部分、制冷部分和供热空调部分,这套实验教程的出版,一方面总结了我校多年来在制冷与空调实验教学方面的经验,使实验教学内容和体系更加完善;另一方面也对有相关专业的学校起一个辐射和示范作用。

实验教学是实践教学的重要内容之一,是专业人才培养过程中的重要教学环节。制冷与空调相关基础课程在热能与动力工程、建筑环境与设备工程等相关专业人才培养的课程体系中占有重要的地位,这类课程的实验教学在理论知识与方法的传授、工程应用与创新能力的培养过程中起着承上启下的关键作用。

《制冷与空调实验教程——专业基础部分》主要对应与专业基础密切相关的课程(工程热力学、传热学、流体力学、热工测量及仪表、泵与风机以及流体输配管网等),对其各层次实验项目进行了阐述,既包括各课程的一些传统必做实验项目,也包括一些综合和设计型实验项目。此外,还介绍了一些与实验测试相关的基础知识。

为便于学生实验前预习,使每个实验过程的系统性,各实验项目的阐述采用了统一的内容构架,即实验目的,实验内容,实验要求,实验准备,实验原理、方法

和手段,实验条件,实验步骤,思考题,实验报告,注意事项及其他说明等十部分;为了强化实验教学和 Related 理论知识的联系,提高实验教学的效率和效果,对每个实验项目都设置了与实验内容和方法相关的思考题,学生在完成实验后,应对实验内容和方法进行认真思考,以巩固实验成果。

本教程由陆佩强担任主编,第1章由陈瑞球编写,第2章由陈瑞球编写,第3章由刘万福、刘圣春、解海卫、杜雅萍编写,第4章由陈瑞球、邱倩倩、诸凯、陆佩强编写,第5章由陆蓓蕾、苏新军、张东明、吕冰编写,第6章由邱倩倩、陆佩强、杜雅萍编写,第7章由陆蓓蕾编写,第8章由刘剑编写。第9章由金梧凤编写,全书由陈瑞球统稿。

在本书的编写过程中,参阅了其他兄弟院校的同类教材、资料及文献,并得到许多同行专家、教授的支持和帮助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请广大师生、读者提出宝贵意见,以求进一步改进。

编者

2009年6月

目 录

第一章 测量的基本知识	(1)
第一节 测量的基本概念	(1)
第二节 测量仪表的组成、分类和质量指标	(1)
第三节 测量的误差分析及实验数据的处理	(3)
第二章 常用测量仪表简介	(8)
第一节 温度的测量	(8)
第二节 压力的测量	(15)
第三节 流量的测量	(17)
第四节 热量(或热流量)的测量	(22)
第三章 工程热力学实验	(25)
第一节 前言	(25)
第二节 二氧化碳状态变化规律实验	(25)
第三节 湿空气的参数测定	(28)
第四节 低沸点流体临界状态及 $p-V-T$ 关系的观测	(31)
第五节 气体定压比热的测定	(34)
第六节 综合实验	(37)
第四章 传热学实验	(39)
第一节 前言	(39)
第二节 常功率平面热源法测定材料的导温系数及导热系数	(39)
第三节 导电纸热电模拟实验	(42)
第四节 空气沿横管表面自由运动放热实验	(45)
第五节 空气横掠单管时平均对流换热系数的测定	(47)
第六节 高热流密度器件冷却散热性能实验	(51)
第五章 流体力学实验	(55)
第一节 前言	(55)
第二节 静水力学实验	(55)
第三节 能量方程实验	(58)
第四节 文丘里流量计	(61)
第五节 雷诺实验	(64)
第六节 沿程水头损失实验	(67)
第六章 热工测量及仪表实验	(71)
第一节 前言	(71)
第二节 热电偶制作及测温性能实验	(71)
第三节 铜电阻测温性能实验	(74)

第四节	电容式传感器的位移实验	(76)
第五节	压力表的校验实验	(78)
第七章	泵与风机实验	(81)
第一节	前言	(81)
第二节	离心泵性能实验	(81)
第三节	风机性能曲线实验	(85)
第八章	流体输配管网实验	(89)
第一节	前言	(89)
第二节	风系统性能参数综合测定	(89)
第三节	风系统管网性能曲线的测定	(99)
第四节	离心式水泵的性能曲线测定	(105)
第五节	水泵并联运行性能测试	(110)
第九章	建筑自动化实验	(117)
第一节	前言	(117)
第二节	多支热电偶的温度校验	(117)
第三节	涡轮流量变送器系数的测定	(120)
第四节	离心泵恒流量控制实验	(124)
第五节	离心泵恒压力控制实验	(127)
第六节	单容水箱液位定值控制实验	(130)
参考文献		(135)

第一章 测量的基本知识

第一节 测量的基本概念

测量就是用实验的方法,把被测量与选定的测量单位进行比较,求取两者比值,从而得出被测量的数值(比值乘以单位)。测量方法就是实现被测量与测量单位的比较,并给出比值的方法。按照获得测量参数结果的方法不同,测量方法可以分为两大类。

1. 直接测量法

从实测数据(仪表读数)中直接得到被测量值,不需要进行函数关系的再运算的测量方法称为直接测量法。例如,用直尺测量长度,用压力表测量容器内介质压力,用玻璃温度计测量介质温度等。直接测量法根据直接获取数据(测量值)的方法不同,又可分为如下几种。

1) 直读法 用度量标准直接比较或由仪表直接读出。

2) 差值法 用仪表测出两量之差即为所要求之量,如用热电偶测温差、差压计测压差等。

3) 代替法 用已知量代替被测量,当两者对仪表的影响相同时,则被测量等于已知量,如用光学高温计测温度。

4) 零值法 被测量的作用完全被一个已知标准量的作用所抵消,以致于净结果为零,这样被测量就等于已知标准量,如用电位差计测量热电势等。

2. 间接测量法

利用被测量与直接可测量之间存在的函数关系式,通过直接测量值计算出被测量,这种方法称为间接测量法,如从力矩与转速的直接测量结果来求功率等。

第二节 测量仪表的组成、分类和质量指标

一、仪表的组成和分类

仪表的种类繁多,其原理和结构各异,但就其基本功能来看,一般可以剖析为三个基本部分。

1) 感受件 它直接与被测对象相联系,感受被测量的变化,并将感受到的被测量的变化转换成相应的信号输出。例如热电偶,它把对象的被测温度转换成热电势信号输出。

2) 显示件 仪表通过它向观察者反映被测量的变化。根据显示件的显示方式,显示件可分为模拟式显示、数字式显示和屏幕式显示三种。

3) 传送件 连接感受件与显示件之间的环节称为传送件。在测量中其作用是将感受件输出的信号,根据显示件的要求(放大、转换等)传输给显示件。

根据仪表的不同功用,仪表的分类有多种形式:若按热工过程的被测参数分类有压力仪表、流量仪表、温度仪表、湿度仪表等;若按仪表的显示功能分类有指示仪表、记录仪、积算仪、调节仪表等;若按仪表的精度等级分类有标准表、一级范型表、二级范型表、实验室用表、工程用表等。

二、仪表的质量指标

仪表的质量指标指仪表的固有品质,它主要包括评价仪表计量性能、操作性能、可靠性和经济性等方面的指标。从使用角度看,要了解仪表计量性能方面的指标,主要包括以下几个方面。

1. 准确度

仪表的准确度是指仪表指示值接近于被测量真实值的程度,它通常用误差的大小来表示。若仪表的指示值为 x ,被测参数的真实值为 μ ,则

$$\text{绝对误差 } \delta = x - \mu \quad (1-1)$$

$$\text{相对误差 } \gamma = \frac{x - \mu}{|\mu|} \times 100\% = \frac{\delta}{|\mu|} \times 100\% \approx \frac{\delta}{|x|} \times 100\% \quad (1-2)$$

上述两种表示方法中,相对误差更能说明仪表指示值的准确程度。例如,在温度测量中得到两组测量结果 $(1650 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、 $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$,虽然它们的绝对误差均为 $\pm 5^\circ\text{C}$,但相对误差却分别为 $\pm 0.3\%$ 和 $\pm 5\%$,说明后者的准确度比前者低得多。

但在实际中,仪表基本误差的大小一般用最大的引用误差来表示,即在仪表量程范围内,各示值中最大绝对误差 $\delta_{\max}$ 的绝对值与量程 A 之比(以百分数表示),即

$$\text{最大引用误差 } \gamma_{\max} = \pm \frac{|\delta_{\max}|}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中:仪表量程 A 为仪表测量上限与测量下限之差。

仪表最大引用误差去掉百分号后余下的数字称为仪表的准确度等级。工业仪表准确度等级的国家标准系列有0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4等七个等级。仪表刻度盘上应标明该仪表的准确度等级。关于仪表准确度等级的概念,在实际应用中应注意两点。

①仪表绝对误差与被测参数的大小无关,仅取决于其准确度等级和量程大小。这说明,准确度等级相同的仪表,量程越大,其绝对误差也越大。所以,在选择仪表时,在满足被测量数值范围的条件下,应选用量程小的仪表,并使测量值在满刻度的三分之二处。例如,有两个准确度等级为1.0级的温度表,一个量程为 $0 \sim 50^\circ\text{C}$,另一个为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$,用这两个温度表进行测量时,如读数都是 40°C ,则仪表的测量误差分别为

$$\Delta t_1 = \pm (50 - 0) \times 1\% = \pm 0.5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \pm (100 - 0) \times 1\% = \pm 1^\circ\text{C}$$

②仪表的准确度等级仅指仪表本身的误差大小,而并非其测量精度。测量精度除了取决于仪表的准确度外,还受到所使用的测量方法和测试条件偏离正常工作条件时所造成误差等的影响。

2. 灵敏度

灵敏度是表征仪表对被测参数变化的敏感程度。其值等于在仪表到达稳态后,输出增量与输入增量之比,也即为仪表“输入—输出”特性的斜率。若仪表具有线性特性,则量程各处的灵敏度为常数。

3. 分辨率

引起仪表示值可察觉的最小变动所需的输入信号的变化,称为仪表的分辨率,也称灵敏限或鉴别阈。输入信号变化不致引起示值可察觉的最小变动的有限区间与量程之比的百分数,称为仪表的不灵敏区或死区。

4. 重复性

同一工作条件下,多次按同一方向输入信号做全量程变化时,对应于同一输入信号值,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来表示,它是在全量程范围内对应于同一输入值时,输出的最大值和最小值之差与量程范围之比的百分数。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。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。

5. 线性度

对于理论上具有线性“输入—输出”特性曲线的仪表,由于各种原因,实际特性曲线往往偏离线性关系,它们之间最大偏差的绝对值与量程之比的百分数,称为线性度。

6. 动态特性

它为仪表对随时间变化的被测量的响应特性。动态特性好的仪表,其输出量随时间变化的曲线与被测量随同一时间变化的曲线一致或比较接近。一般仪表的固有频率越高,时间常数越小,其动态特性越好。

第三节 测量的误差分析及实验数据的处理

测量的目的是求出被测量的真实值 μ 。然而,在测量中由于各种因素的影响,无论我们怎样小心,使用测量仪表有多么精确,测量方法有多么完善,最后得到的测量结果总是与被测量的真实值 μ 不同。换言之就是测量结果不可避免地存在误差,这个误差可用绝对误差 δ 或相对误差 γ 来表示。那么造成测量误差的主要原因,概括起来有以下四方面。

1) 测量装置误差 它包括标准器、仪表、附件等本身在测量中所造成的误差。误差大小取决于测量装置的制造工艺、结构完善程度、安装是否符合要求等因素。

2) 环境误差 测量装置的实际工作条件偏离其规定的工作条件而产生的误差。如测试环境下的温度、压力、湿度等与仪表规定的不一致而引起的附加误差。

3) 方法误差 采用不完善的测量方法而造成的误差。如测量中使用新的不成熟的测量方法或采用近似的测量方程等会引起方法误差。

4) 人员误差 它是由测量者主观因素所引起的误差。如测量人员操作不当、读数错误等引起的误差。

一、直接测量的误差分析与处理

从测量误差的来源可以看出,有些误差(环境误差)在测量中是客观存在的,单次测量没有规律性,因而不能消除;而有些误差(方法误差、仪表调整误差等)是固定不变或有规律的,是可以消除的。因此误差按其性质及特点,可以分为三类。

1. 随机误差(也称偶然误差)

在相同条件下(同一观测者、同一台测量器具、相同的环境条件等)多次测量同一被测量时,绝对值和符号不可预知地变化着的误差称为随机误差。它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效果造成的,在测量中是始终存在的,难以消除;对于单个测量值来说,误差的大小和正负都是不确定的,但对于一系列重复测量值来说,误差的分布服从统计规律。假设在一定的条件下,对某个恒定的被测量 μ 进行 n 次等精度的重复测量,在消除系统误差和粗大误差的影响之后,得到一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$,可以证明,此时其被测量真值的最佳估计值 $\hat{\mu}$ 就是各测量值的算术平均值 $\bar{x}$,即

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \cdots + x_i + \cdots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-4)$$

如果 $n \rightarrow \infty$, 即测量值的随机误差服从正态分布, 此时其测量值的标准误差 σ 可由下式确定

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-5)$$

但是, 在实际中测量次数 n 总是有限的, 同时因不知道被测量真实值 μ 而常用 $\bar{x}$ 值来代替, 故测量值的标准误差 σ 的估计值 S

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (n \text{ 足够大}) \quad (1-6)$$

式中: $v_i = x_i - \bar{x}$, 称为残差或剩余误差, $(n-1)$ 称为自由度, 式(1-6)称为贝赛尔公式。

由于测量中最后的结果是以算术平均值 $\bar{x}$ 来表示的, 可以证明, 平均值 $\bar{x}$ 的标准误差的估计值

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-7)$$

最后的测量结果可以表示为

$$X = \bar{x} \pm 3S_{\bar{x}} = \bar{x} \pm 3 \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1-8)$$

如果测量次数非常小 ($n < 10$), 此时的测量结果可由下式表示

$$X = \bar{x} \pm t(\alpha, v) S_{\bar{x}} = \bar{x} \pm t(\alpha, v) \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1-9)$$

式中: $t(\alpha, v)$ 为 t 分布的置信系数, 其显著性水平 α 和自由度 v 如表 1-1 所示。

表 1-1 t 分布的置信系数 $t(\alpha, v)$ 数值

$\alpha = 1 - p$			$\alpha = 1 - p$		
$v = n - 1$	0.05	0.01	$v = n - 1$	0.05	0.01
1	12.71	63.7	14	2.14	2.98
2	4.3	9.92	15	2.13	2.95
3	3.18	5.84	16	2.12	2.92
4	2.77	4.60	17	2.11	2.90
5	2.57	4.03	18	2.10	2.88
6	2.45	3.71	19	2.09	2.86
7	2.36	3.50	20	2.09	2.84
8	2.31	3.36	25	2.06	2.79
9	2.26	3.25	30	2.04	2.75
10	2.23	3.17	40	2.02	2.70
11	2.20	3.11	60	2.00	2.66
12	2.18	3.06	120	1.98	2.62
13	2.16	3.01	∞	1.96	2.58

2. 粗大误差 (也称疏失误差)

在测量中, 由于测量人员的粗心大意, 读数错误, 记录或运算错误以及在测量中操作不小

心而使该次测量失效的误差称为粗大误差。或者说,明显歪曲测量结果的误差称为粗大误差。含有粗大误差的测定值称为坏值。当多次重复测量中含有坏值时,舍弃坏值后测量值才符合实际情况,但应注意不要轻易地舍弃被怀疑的实验数据。坏值的舍弃原则可简单地按下列方法确定。

1) 拉依达准则 对于大量的重复测量值,如果其中某一测量值残差 $v_i = x_i - \bar{x}$ 的绝对值大于该测量列的标准偏差 σ 的 3 倍,那么可以认为该测量值存在粗大误差,即

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\sigma \approx 3S \quad (n \rightarrow \infty) \quad (1-10)$$

按上述准则剔除坏值后,应重新计算剔除坏值后测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准误差估计值 S ,再行判断,直至余下测量值中无坏值存在。

2) 格拉布斯准则 将重复测量值按大小顺序重新排列, $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, 用下式计算首尾测量值的格拉布斯准则数

$$T_i = \frac{|v_i|}{S} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S} \quad (i \text{ 为 } 1 \text{ 或 } n, n \text{ 有限}) \quad (1-11)$$

然后根据子样容量 n 和所选取的判断显著性水平 α (α 一般可取 0.05 或 0.01), 相应的格拉布斯准则临界值 $T(n, \alpha)$ 如表 1-2 所示。若 $T_i \geq T(n, \alpha)$, 则可认为 x_i 为坏值, 应剔除, 每次只能剔除一个测量值。若 T_1 和 T_n 都大于或等于 $T(n, \alpha)$, 则应先剔除 T_i 大者, 再重新计算 $\bar{x}$ 和 S , 这时子样容量只有 $(n-1)$, 再行判断, 直至余下的测量值中再未发现坏值。

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			
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

3. 系统误差

系统误差是指在同一条件下,多次重复测量同一量值时,误差的大小和符号保持不变(称为恒值系统误差)或按预定方式变化(称为变值系统误差)。例如,仪表机构设计原理上的缺点、仪表的不正确安装和调整、采用近似的测量方法、测量人员习惯上的读数偏高或偏低、测量条件偏离仪表规定工作条件等都会造成系统误差。

对于恒值系统误差,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,加到测量值上来消除。对于变值系统误差,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,也可通过理论计算或在仪表上附加补偿装置加以校正。对于一些尚未被充分认识的未定系统误差,只能估计它的一个误差范围和方向(正、负号),然后将测量结果与平均估计误差值(这个值在数值上等于误差范围上、下限的代数平均值)相加来对测量结果进行校正。

4. 测量结果的一般处理步骤

对于一系列 n 次的等精度直接测量,其数据处理过程如下。

(1) 使用系统误差的处理方法,设法消除或减小系统误差对测量结果的影响。

(2) 在消除系统误差后,求 n 次测量的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

(3) 求出对应的每一测量值的剩余误差 $v_i = x_i - \bar{x}$,并用式 $\sum_{i=1}^n v_i = 0$ 校核 v_i 计算结果的正确性。

(4) 求测量值标准误差估计值 S 。

(5) 用粗大误差判别准则判断测量值中的坏值并剔除它。

(6) 重复过程(2)~(5),直至测量值中没有坏值时为止,然后算出 $\bar{x}$ 和 S_x 。

(7) 测量结果可表示为

$$X = \bar{x} \pm 3S_x \quad (n \text{ 足够大}) \quad (1-8)$$

$$X = \bar{x} \pm t(\alpha, v) S_x \quad (n \text{ 较小}) \quad (1-9)$$

5. 直接测量中的误差综合

在测量中,当只存在系统误差或只有随机误差时,可以使用上述方法对测量结果进行处理,判断出测量结果的可靠程度。但是,当测量中这两种误差同时存在(实际情况也往往如此)时,要想准确地合成它们是不容易的。一般可采用如下方法进行估计。

在求得系统误差 ε 和标准误差估计值 S, S_x 后,从保守观点出发,其总误差对单次测量可表示为 $\pm(\varepsilon + 3S)$;对平均值可表示为 $\pm(\varepsilon + 3S_x)$ 。

但是,系统误差和随机误差的最大值并不一定同时出现,显然上述总误差的估计是偏大了,故有时也可用几何合成方法,对单次测量可表示为 $\pm \sqrt{\varepsilon^2 + (3S)^2}$;对平均值可表示为 $\pm \sqrt{\varepsilon^2 + (3S_x)^2}$ 。

二、间接测量误差的处理

前面简要地介绍了直接测量的误差分析及处理方法。但是,在很多情况下,由于被测对象的特点,对被测量的直接测量可能有困难或者根本不能进行,或者直接测量精度太低而满足不了工程要求,此时就必须采用间接测量法。间接测量的函数关系一般可表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1-12)$$

式中: y 为被测量值; $x_1, x_2, \dots, x_m$ 分别为直接可测的独立量(相互独立)。

假设各直接可测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的测量次数均为 m , 相应的算术平均值为 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$; 可以证明,间接测量结果的最佳估计值为

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m) \quad (1-13)$$

间接测量的误差,不仅与直接测量中造成的误差有关,而且还和函数关系的形式有关。对于间接测量中的常值系统误差,若各直接测量值(设测量次数均为 m) 的系统误差的均值分别为 $\bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2, \dots, \bar{\varepsilon}_m$, 则被测量 y 的系统误差 $\Delta \bar{y}$ 可由下式计算

$$\Delta \bar{y} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_j} \varepsilon_j \quad \text{或} \quad \frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial \ln f}{\partial x_j} \varepsilon_j \quad (1-14)$$

式中: $\frac{\partial f}{\partial x_j}$ 是函数 $f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)$ 关于第 j 个自变量 $\bar{x}_j$ 的偏导数, 称为误差的传递系数。式 (1-14) 称为间接测量系统误差的传递公式。

对于间接测量中的随机误差, 若各直接测量值的标准误差为 σ_{x_j} , 则间接测量的标准误差 σ_y 可由下式表示

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 \sigma_{x_j}^2} \quad \text{或} \quad \frac{\sigma_y}{\bar{y}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{x_j}}{\bar{y}} \right)^2} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 称为随机误差传递公式, 其中 $\frac{\partial f}{\partial x_j}$ 称为第 j 个直接测量值的误差传递系数, 表示该测量误差对间接测量误差影响的大小。

第二章 常用测量仪表简介

在各种实验中,经常要对设备中工质的状态、过程和循环等进行测量。例如,要想知道气体的状态,就必须测量它的基本状态参数——温度、压力和比容(或密度),对于水蒸气,有时还需要测定其干度;要了解热工过程的换热强弱或传热量的大小,总免不了要测定传热介质的流速和流量。此外,各种热机的工作情况以功率和效率来表示。因此,基本热工量有温度、压力、流速、流量、湿度、干度、热量与功率等。本章将扼要介绍实验中的一些基本量的测量原理和方法以及有关常用仪器仪表的工作原理、选择与使用要点,以便在本书后面的各种实验中使用。

第一节 温度的测量

温度是表征物体冷热程度的物理量,是工业生产过程中的重要参数之一。在实际中,温度的各种测量方法大都是利用物体的某些物理化学性质(如物体的膨胀率、电阻率、热电势、辐射强度和颜色等)与温度具有一定关系的原理。当温度不同时,上述各参量中的一个或几个随之发生变化,测出这些参量的变化,就可间接地知道被测物体的温度,测量温度的仪表称为温度计。根据所选的测温物质和作用原理的不同,温度计的分类如表 2-1 所示,本节仅简单介绍在实验中常用的几种测温仪表。

表 2-1 温度计的分类

温度计类型		测温范围/℃	作用原理	使用场合
接触式	膨胀式温度计 1. 玻璃温度计 2. 双金属温度计	-200 ~ +600 -185 ~ +620	液体或固体受热膨胀	生产过程和实验室各种介质温度的就地测量
	压力式温度计 1. 液体式 2. 气体式 3. 蒸气式	-80 ~ +400	封闭在固定容积中的液体、气体或某种液体的饱和蒸气受热体积膨胀或压力变化	生产过程中较远距离的非腐蚀性液体或气体的温度测量
	电阻温度计 1. 铂电阻 2. 铜电阻 3. 热敏电阻	-258 ~ +900 -200 ~ +150 -50 ~ +300	导体或半导体受热电阻变化	用于测量液体、气体、蒸气的中、低温度,能远距离传送
	热电偶温度计 1. 铂铑 30 - 铂铑 6 2. 铂铑 10 - 铂 3. 镍铬 - 镍硅 4. 镍铬 - 考铜 5. 铜 - 康铜	0 ~ +1 800 0 ~ +1 600 -50 ~ +1 200 -50 ~ +800 -200 ~ +400	热电偶的热电势与温度有关	用于测量液体、气体、蒸气的中、高温度,能远距离传送