



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热工理论基础实验

姜昌伟 主 编
傅俊萍 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热工理论基础实验

主 编 姜昌伟
副主编 傅俊萍
编 写 邹新元 宁佐阳 夏侯国伟
张云峰 石 尔 朱先锋
主 审 李贺松



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合当前热工基础实验教学改革的实际和最新要求编写而成。全书系统地介绍了热工实验过程中温度、压力、流量、流速等基本热工参数的测试方法、测量原理、测量设备、实验数据处理与误差分析的基础知识,此外还介绍了热工测量新技术、新设备及相关的热工基础实验。

本书可作为能源与动力工程类相关专业本科生的实验教材,也可供研究生、科研人员及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工理论基础实验/姜昌伟主编. —北京:中国电力出版社, 2016.1

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-6728-9

I. ①热… II. ①姜… III. ①热工学-实验-高等学校-教材
IV. ①TK122-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 250676 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 201 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

热工理论基础系列课程（包括热工理论基础、工程热力学、传热学、工程流体力学）是高等院校中能源与动力工程、建筑环境与能源应用工程、热工过程自动化、内燃机工程、交通运输工程、食品工程等专业十分重要的专业基础课，既具有较强的理论性，又具有广阔的工程应用背景。为了加深对理论知识的理解，进一步提高学生的动手能力，培养面向 21 世纪的创新型人才，作者结合热工理论基础系列课程编写了《“十三五”普通高等教育本科规划教材 热工理论基础实验》，并与热工理论基础系列课程配套使用。

本书注重对学生基本实验技能的训练，通过实验学会使用各种测量仪器，掌握数据采集、观察、处理和分析的基本方法，培养学生运用基本理论分析解决问题的能力及学生的创新思维和创造能力。

全书共 6 章，第 1 章由姜昌伟编写，第 2 章由宁佐阳、朱先锋编写，第 3 章由宁佐阳、石尔编写，第 4 章由姜昌伟编写，第 5 章由邹新元、宁佐阳、夏侯国伟编写，第 6 章由傅俊萍、张云峰编写。姜昌伟教授与傅俊萍教授分别担任本书的主编和副主编。全书由中南大学能源科学与工程学院李贺松教授主审。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 8 月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 热工理论基础研究对象	1
1.2 热工理论基础的研究内容和方法	2
第2章 实验数据处理及误差分析	3
2.1 实验数据的测量误差与测量精度	3
2.2 实验数据测量误差分析	5
2.3 实验数据处理与整理	8
2.4 热工数据处理及误差分析常用软件	16
第3章 常用热工测量基本知识	32
3.1 温度测量	32
3.2 湿度测量	38
3.3 热量测量	40
3.4 压力与压差测量	42
3.5 流速和流量的测量	49
第4章 热工测量新技术与新设备	57
4.1 红外热像仪	57
4.2 温度场的激光全息干涉测量	59
4.3 激光多普勒测速仪测速技术	61
4.4 粒子图像速度场仪(PIV)测试技术	65
第5章 热工实验	67
5.1 物体热物性测定	67
5.2 工质饱和温度与饱和压力关系的测定	79
5.3 CO_2 临界状态的观测及 $p-v-t$ 关系的测定	80
5.4 喷管性能测定	82
5.5 液体饱和蒸气压测定	86
5.6 流体流动现象演示实验	87
5.7 流体沿程阻力和局部阻力实验	92
5.8 流量计流量系数的测定	95
5.9 管路流动规律研究试验	97

5.10	空气纵掠平板时局部换热系数的测定·····	100
5.11	空气横掠圆柱体时局部表面传热系数的测定·····	102
5.12	热边界层演示实验·····	105
5.13	大容器内水沸腾换热实验·····	106
5.14	真空法测量固体表面黑度·····	108
5.15	中温辐射时物体黑度的测定·····	109
5.16	角系数的测定·····	111
第 6 章	热工理论基础创新性实验·····	113
6.1	复合建筑材料制备及其导热性能测试实验·····	113
6.2	磁场作用下 CO ₂ 跨临界特性试验·····	115
6.3	超声波强化传热实验·····	117
6.4	换热器换热性能的测试实验·····	119
附表 A	常用热电偶简要技术数据·····	124
附表 B	铜-康铜热电偶分度表·····	125
附表 C	镍铬-银硅（镍铅）热电偶分度表·····	126
参考文献	·····	128

第1章 概 述

1.1 热工理论基础研究对象

能源是国民经济发展的基础，人类社会的发展离不开能源的开发和对先进能源技术的使用。在当今世界，能源和环境是全世界、全人类共同关心的问题，也是我国社会经济发展的重要问题。自然界中蕴藏着各种不同形式的能源，人类迄今已不同程度地开发利用了自然界中化石燃料的化学能、原子能、太阳能、风能、水能、潮汐能等。其中风能和水能以机械能的形式提供能量，而其他能源主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。人类在开发、利用能源，特别是在把化学能等转换成热能的同时，却污染了我们赖以生存的环境，例如，矿石燃料的燃烧、原子废物的核辐射等。因此，热能的利用和研究对人类的文明发展和环境保护有着重要的意义。

热能的利用主要有两种方式：一种是直接利用，即利用热能直接加热物体，如烘干、采暖、冶炼等；另一种是动力利用，即把热能转换成机械能或电能，为生产及生活提供动力。这两种利用方式，均需通过一定热工设备和过程才能实现。

把热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置。至今，热力工程利用的热能主要来自矿物燃料所蕴藏的化学能。燃料在适当的燃烧设备中进行燃烧，产生热能，在热机中再将热能转变为机械能。热能动力装置可分为两大类：蒸汽动力装置和燃气动力装置。前者如火电发电厂的蒸汽动力装置及原子能动力装置等；后者如内燃机、燃气轮机装置等。制冷、热泵装置原则上属于把机械能转换为热能的设备，在热力学分析上与热能动力装置有很多相似之处。

蒸汽动力装置是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵等组成的热力装置。燃料在锅炉中燃烧，把物质的化学能转变为热能，锅炉沸水管内的水吸热后变为蒸汽，并在过热器中过热，成为过热蒸汽。此时蒸汽的温度及压力比外界介质（空气）的温度及压力高，蒸汽具有做功的能力。蒸汽被导入汽轮机后，通过喷管时，由于膨胀，压力降低，速度增大，具有一定动力的蒸汽推动叶片，使轴转动做功。做功后的排汽（称为乏汽）从汽轮机进入冷凝器，被冷却水冷却，凝结成水，又由泵打入锅炉内加热。如此不断循环，不断产生蒸汽，汽轮机不断对外做功。

制冷装置的目的在于把低温物体的热量向高温物体转移，为此，需外界输入功。热泵是实施从低温物体吸热，向高温物体输送热量的装置，其原理与制冷装置相同。以制冷装置工作过程为例，工质在压缩机中被压缩，其压力、温度升高，接着工质在冷凝器中冷凝；然后，通过节流阀，其温度降低到冷藏室温度以下；最后在冷藏室中吸热汽化，返回压缩机完成循环。如同热能动力装置一样，工质周而复始地吸热、压缩、放热，将热能从低温物体传向高温物体。

1.2 热工理论基础的研究内容和方法

热工理论基础涵盖了工程热力学、流体力学和传热学三部分。工程热力学主要是研究热能与机械能相互转换的规律及其在热动力工程中的应用；流体力学主要研究流体本身的静止状态和运动状态，以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律；传热学主要研究热量传递的规律及其工程应用。热工理论为研究热力设备的工作情况及提高转换效率提供必需的理论基础。

热工理论的理论教学和实验教学是教学中既紧密相连又相对独立的两个方面，与理论教学不同的是，实验教学更强调动手能力和知识的综合运用能力的培养。因此，实验教学与理论教学在教学中具有同等重要的地位。

实验教材作为热工理论基础教材的配套教材，主要侧重学生实际操作技能的培养，本书系统地介绍了热工实验过程中温度、压力、流量、流速等基本热工参数的力学、电学和光学测试方法、测量原理、测量传感器及测量系统、实验数据处理与误差分析的基础知识，此外还介绍了热工测量新技术、新设备及相关的热工基础实验。全书分为6章，第1章为概述；第2章主要介绍热工实验数据的处理方法及常用热工实验数据处理软件使用方法；第3章主要介绍各种热工测量仪器，包括温湿度测量仪器、热量测量仪器、压力和压差测量仪器、流速和流量测量仪器；第4章主要介绍红外热像仪、激光多普勒测速仪、粒子图像速度场仪、全息干涉技术等比较先进的仪器与设备测量温度场和速度场的原理与方法；第5章主要介绍热工理论基础系列课程的实验项目，其中每一个实验都介绍了实验目的、实验方法、实验内容、实验装置等；第6章介绍了热工理论基础创新性实验。

本教材注重对学生基本实验技能的训练，通过实验学会各种测量仪器的使用方法，掌握数据采集、观察、处理和分析的基本方法，培养学生运用基本理论分析解决问题的能力及学生的创新思维和创造能力。

第2章 实验数据处理及误差分析

2.1 实验数据的测量误差与测量精度

热工实验不仅要定性的观察现象,更重要的是找出有关热工物理量之间的定量关系。因此就需要进行定量的测量,以取得物理量数据的表征。对热工物理量进行测量,是热工实验中极其重要的一个组成部分。对某些物理量的大小进行测定,实验上就是将此物理量与规定的作为标准单位的同类量或可借以导出的异类物理量进行比较,得出结果,这个比较的过程就叫做测量,比较的结果记录下来就叫做实验数据。测量得到的实验数据应包含测量值的大小和单位,二者缺一不可。

2.1.1 真值和测量值

一个特定的物理量在一定条件下所具有的客观量值叫真值,用 x_0 表示。通过测量得到的结果叫测量值,用 x 表示。

测量的目的是求出被测量的真实值,然而在任何一次试验中,不管使用多么精密的仪器、测量方法多么完善,操作多么细心,由于受到计量器具本身误差和测量条件等因素的影响,都不可避免地会产生误差,使得测量结果并非真值而是测量值。因此,对于每次测量,需知道测量误差是否在允许范围内。分析研究测量误差的目的在于:找出测量误差产生的原因,并设法避免或减少产生误差的因素,提高测量的精度;其次是通过测量误差的分析和研究,求出测量误差的大小或其变化规律,修正测量结果并判断测量的可靠性。

2.1.2 测量误差

由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的影响,只能获得该物理量的近似值,也就是说,一个被测量值 x 与真值 x_0 之间总是存在着这种差值,这种差值称为测量误差,即

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

显然误差 Δx 有正负之分,因为它是指与真值的差值,常称为绝对误差。注意,绝对误差不是误差的绝对值!

绝对误差与真值之比的百分数称为相对误差 δ , 即

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

相对误差是无量纲量,当被测量值不同且相差较大时,用它更能清楚地比较或反映两测量值的准确性。

以上计算式要有真值才能求出结果,而真值具有不能确定的本性,故实际中常用对被测量多次重复测量所得的平均值作为约定真值。

2.1.3 测量误差分类

按误差的性质,测量误差分为随机误差、系统误差和过失误差三类。

1. 随机误差

在相同条件下对同一量的多次重复测量过程中,各测量数据的误差值或大或小,或正或

负，其取值的大小没有确定的规律性，以不可预知方式变化的一种误差叫做随机误差，它是整个测量误差中的一个分量。这一分量的大小和符号不可预定，它的分散程度，称为精密度。

随机误差即为随机变量，具有随机变量的一切特征。它虽不具有确定的规律性，但却服从统计规律，其取值具有一定的分布特征，因而可利用概率论提供的理论和方法来研究。理论和实践表明，大量的随机误差服从正态分布。

例如，在测量过程中测量仪的不稳定造成的误差；环境条件中温度的微小变动和地基振动等所造成的误差，均属于随机误差。

2. 系统误差

在相同条件下对同一被测量的多次测量过程中，保持恒定或以可预知方式变化的测量误差叫做系统误差，即误差的绝对值和符号固定不变。按其本质被定义为：对同一被测量进行大量重复测量所得的结果的平均值，与被测量真值之差。它的大小表示测量结果对真值的偏离程度，反映测量的正确度，对测量仪器而言，可称为偏移误差。

例如，由于仪器本身存在固有缺陷（刻度不准，零点没调准等），由于环境（温度、湿度等）偏离了预计的情况等所造成的误差，均属于系统误差。

3. 过失误差

由于实验人员粗心大意造成与事实不符的误差。产生过失误差的原因包括错误读取示值；使用有缺陷的测量器具；量仪受外界振动、电磁等干扰而发生的指示突跳等都属于过失误差。

2.1.4 测量的精密度、准确度和精确度

测量的精密度、准确度和精确度都是用来评价测量结果的术语。

1. 精密度

测量精密度表示在同样测量条件下，对同一物理量进行多次测量，所得结果彼此间相互接近的程度，即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度，因而测量精密度是测量随机误差的反映。测量精密度可用仪器的最小分度来表示，仪器最小的分度越小，所测量物理量的位数就越多，仪器精密度就越高。

2. 准确度

测量准确度表示测量结果与真值接近的程度，因而它是系统误差的反映。测量准确度高，则测量数据的算术平均值偏离真值较小，测量的系统误差小，但数据较分散，随机误差的大小不确定。它一般标在仪器上或写在仪器说明书上，如电学仪表所标示的级别就是该仪器的准确度。

3. 精确度

测量精确度则是对测量的随机误差及系统误差的综合评定。精确度高，测量数据较集中在真值附近，测量的随机误差及系统误差都比较小。

如图 2-1 所示，可用射击打靶的例子来描述三者之间的关系。

图 2-1 (a) 中，弹着点集中靶心。相当于系统误差和随机误差均小，即精密度和正确度都高，从而准确度亦高。

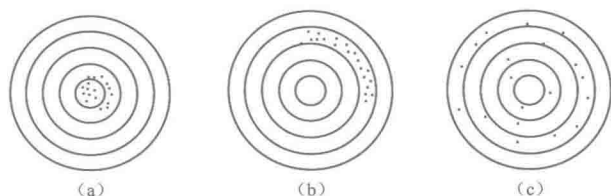


图 2-1 测量的精密度、准确度和精确度示意图

图 2-1 (b) 中, 弹着点集中, 但偏向一方, 命中率不高。相当于系统误差大而随机误差小, 即精密度高, 正确度低。

图 2-1 (c) 中, 弹着点全部在靶上, 但分散。相当于系统误差小而随机误差大, 即精密度低, 正确度高。

2.2 实验数据测量误差分析

根据测量方法可分为直接测量和间接测量。直接测量就是把待测量与标准量直接比较得出结果。例如, 用米尺测量物体的长度, 用天平称量物体的质量, 用电流表测量电流等, 都是直接测量。

间接测量借助函数关系由直接测量的结果计算出所谓的物理量。例如, 已知路程和时间, 根据速度、时间和路程之间的关系求出的速度就是间接测量。

2.2.1 实验数据直接测量误差分析

实验数据直接测量误差分析主要包括随机误差分析和系统误差分析。

1. 随机误差分析

在实验时, 测量结果因受被测对象、所用仪器、周围环境以及实验者本人情况的影响, 会偏离真值而产生误差。由于影响测量结果的因素很多, 它们又各自以不同的方式变动, 所以对某一次具体的测量来讲, 很难确定测得值与真值偏离的程度, 这就使得每一个测量值的误差大小和正负具有随机性, 但是在大量的重复测量时, 这些误差又遵守一定的统计规律。在误差理论中常将那种测量误差的大小与正负都不确定, 但在大量重复测量中它们又遵守一定统计规律的误差叫随机误差。分析随机误差问题主要是对测量数据的离散性或重复性作出定量的描述。

(1) 正态分布规律。一般实验测量结果的随机误差的出现服从正态分布规律, 正态分布曲线呈对称钟形, 两头小, 中间大, 分布曲线有最高点, 即实验测量数据结果落在中间位置的概率大, 落在两头的概率小。标准化的正态分布曲线如图 2-2 所示。图中横坐标 x 表示某一物理量的测量值, 纵坐标表示测量值的概率密度 $f(x)$;

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right]$$

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

式中 σ ——正态分布的标准偏差;

x_0 ——真值;

x ——测量值。

从图可得出下面的结论:

随机误差绝对值相等的正负误差出现的概率相等。

绝对值大的误差出现的概率小, 绝对值小的误差出现的概率大。

绝对值的有限性, 绝对值大的误差出现的概率趋

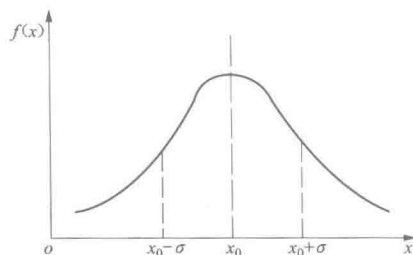


图 2-2 正态分布曲线图

近于零。因而测量中误差特大的测量值可以舍去。

由曲线的对称性可知, 随机误差的总和有一定的补偿性。用公式表示为

$$\frac{1}{n} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n x_i = 0 \quad (2-3)$$

(2) 用算术平均值表示真值。在相同条件下对某物理量进行 n 次等精度重复测量, 每次的测量值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 根据最小二乘法原理可知被测量的最佳估计量 $\bar{x}$ 应为全部测量数据的算术平均值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-4)$$

当系统误差为零时, 随测量次数 n 的增加, 算术平均值和真值接近, 当测量次数 n 增加到无穷大时, 算术平均值 $\bar{x}$ 会依概率收敛于真值 x_0 。

(3) 残差、误差。残差: 单次测量值 x_i 与测量平均值 $\bar{x}$ 之差。即

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (2-5)$$

误差: 单次测量值 x_i 与测量真值 x_0 之差。

(4) 标准偏差和算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差。

1) 标准偏差。标准偏差的定义:

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

式 (2-6) 要求 $n \rightarrow \infty$, 而实际中 n 总是有限的, 而 x_0 无法求得, 因此只能用 $\bar{x}$ 来估计, 故由上式无法求出 σ , 实际中只能用有限的测量次数的算术平均值来估算 σ 值。

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

σ 表征对同一被测量做 n 次有限测量时, 其结果的分散程度。其相应的置信概率接近于 68.3%, 但不等于 68.3%。

2) 算术平均值 $\bar{x}$ 的标准偏差 $\hat{S}$ 。如果在相同条件下, 对同一量做多组重复的系列测量, 则每一系列测量都有一个算术平均值。由于随机误差的存在, 两个测量列的算术平均值也不相同。它们围绕着被测量的真值 (设系统误差分量为零) 有一定的分散。此分散说明了算术平均值的不可靠性, 而算术平均值的标准偏差 $\hat{S}$ 则是表征同一被测量的各个测量列算术平均值分散性的参数, 可作为算术平均值不可靠性的评价标准。可以证明:

$$\hat{S} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

(5) 置信概率。对于正态分布的随机误差, 根据概率论可计算出测量值落在 $[-\sigma, +\sigma]$ 区间的概率为

$$p\{|x_i| \leq \sigma\} = \int_{-\sigma}^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right) d(\Delta x) = 0.683 \quad (2-8)$$

该结果的含义: 在进行大量等精度测量时, 测量值落在区间 $[x_0 - \sigma, x_0 + \sigma]$ (该区间在概率论中称为置信区间) 内的概率 (在概率论中称为置信概率) 为 0.683。

同样可以求出随机误差落在 $[-2\sigma, +2\sigma]$, $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为 0.995、0.997。 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间内的概率为 99.7%, 而落在外面的只有 0.3%, 即每测 1000 次

其误差绝对值大于 3σ 的次数仅有 3 次。因此,在有限次的测量中,就认为不会出现大于 3σ 的误差,故把 3σ 定义为极限误差,或称最大误差。

2. 系统误差分析

通常,测量结果中除随机误差外,还包含一定的系统误差,有时甚至系统误差占据主要地位,因此应对系统误差给以足够的重视。

(1) 系统误差产生的原因。在测量过程中,影响测量偏离真值的所有误差因素中,只要是由确定性变化规律的因素造成的,都可以归结为系统误差,而且这些误差因素是可以设法预测的。以下介绍几种常见的系统误差来源。

1) 仪器误差。由于仪器或测量工具的不完善或缺陷所造成的,例如,仪器设计原理的缺陷、电子仪器的某些器件性能达不到设计要求等。

2) 调整误差。某些仪器在使用前,必须事先调整到正确的使用状态,例如,天平使用时要求调整水平状态,仪表指针初始调零,气压计要求铅直等。如果操作者没有按要求调整就进行测量,自然会使测量结果产生系统误差。

3) 环境误差。由于测量时所处的周围环境,例如,温度、湿度、气压、震动、电磁场等,与使用说明书所要求的条件不一致而引起的误差。

4) 理论误差。它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性或者对测量方法不完善造成的误差。

5) 人为误差。由于测量人员操作水平、技术水平不高或有视力等其他原因而造成的误差。

(2) 消除系统误差的方法。

1) 消除误差源法。从产生误差源上消除误差是最根本的方法,它要求测量人员对测量过程中可能产生的系统误差的各个环节进行细致分析,并在正式测量前就将误差从产生根源上加以消除。

2) 加修正值法。这种方法是预先将测量器具的系统误差检定出来或计算出来,作出误差表或误差曲线,然后取与误差数值大小相同而符号相反的值作为修正值,将实际测得值加上相应的修正值,即可得到不包含该系统误差的测量结果。

3) 改进测量方法。在测量过程中,根据具体的测量条件和系统误差的性质,采取一定的技术措施,选择适当的测量方法,使测得值中的系统误差在测量过程中相互抵消或补偿而不带入选测量结果之中,从而实现减弱或消除系统误差的目的。

2.2.2 实验数据间接测量误差分析

对于间接测量问题,往往是通过直接测得的量与被测量之间的函数关系计算出被测量。同样,间接测得的被测量也应是直接测得量及其误差的函数。通常把通过用直接测量误差来计算间接测量误差的方法叫误差的传递。

1. 间接测量系统误差传递

设 y 为间接测得量,直接测量的物理量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 它们之间的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-9)$$

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的系统误差分别为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$, 并令 Δy 为间接测得量 y 的系统误差,根据多元函数微分学,当这些误差值皆小,则函数系统误差可线性近似为

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \quad (2-10)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i} (i=1, 2, \cdots, n)$ 为各个直接测得量在该测量点 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 处的误差传递系数。通过上式可以由直接测量的系统误差来计算间接测量的系统误差。

2. 间接测量的随机误差传递

随机误差常用表征其取值分散程度的标准偏差来评定, 对于函数的随机误差, 也可用函数的标准偏差来评定。因此, 函数随机误差计算的一个基本问题就是研究函数的标准偏差与各测得量值 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的标准偏差之间的关系。

设函数的一般形式为

$$y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) \quad (2-11)$$

各个测得量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的随机误差分别为 $\delta x_1, \delta x_2, \cdots, \delta x_n$, 则上式变成

$$y + \delta y = f(x_1 + \delta x_1, x_2 + \delta x_2, \cdots, x_n + \delta x_n) \quad (2-12)$$

假设 y 随 $x_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 连续变化, 且各个误差 δx_i 都很小, 因此可以将函数展开成泰勒级数, 并取其一项作为近似值, 可得

$$y + \delta y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \delta x_n \quad (2-13)$$

这样就得到

$$\delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \delta x_n \quad (2-14)$$

若已知 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的标准偏差分别为 $\sigma_{x1}, \sigma_{x2}, \cdots, \sigma_{xn}$, 它们之间的协方差为 $D_{ij} = \rho_{ij} \sigma_{xi} \sigma_{xj} (i, j=1, 2, \cdots, n)$ 。根据随机变量函数的方差计算公式, 可得 y 的标准偏差 σ_y 为

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{xn}^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} D_{ij} \right) \quad (2-15)$$

根据上式, 可由各个测得量的标准偏差计算出函数的标准偏差, 故称该式为函数随机误差的传递公式。

若各测量值的随机误差是相互独立的, 相关项 $D_{ij} = \rho_{ij} = 0$, 则上式可简化为

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \sigma_{xn}^2 \quad (2-16)$$

2.3 实验数据处理与整理

2.3.1 实验异常数据的剔除

在一组测定值中, 常发现其中某个测定值明显比其余的测定值大得多或小得多。对于这个测定值首先必须设法探寻其出现的原因。在判明其是否合理之前, 既不能轻易保留, 亦不能随意舍弃。由于各种原因 (如粗心大意等), 若不能找出这个测定值的确切来源, 可借助统计检验的方法来决定取舍。其基本方法是作出相应于某一数据的统计量, 当该统计量超出一定范围, 则认为相应的测量数据不服从正常分布而属异常数据, 剔除测量值中异常数据的标准有几种, 有 $3\sigma_x$ 准则、肖维准则、格拉布斯准则等。

1. $3\sigma_x$ 准则

对某量进行 n 次等精度的重复测量, 得 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 则任一数据 x_i 相应的残差

Δx_i 为

$$\Delta x_i = |x_i - \bar{x}| \quad (2-17)$$

其标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-18)$$

统计理论表明, 测量值的残差超过 3σ 的概率已小于 1% 。因此, 可以认为残差超过 3σ 的测量值是由其他因素或过失造成的, 为异常数据, 应当剔除。剔除的方法是将多次测量所得的一系列数据, 算出各测量值的残差 Δx_i 和标准偏差 σ , 把其中最大的 Δx_i 与 3σ 比较, 若 $\Delta x_i > 3\sigma$, 则认为第 i 个测量值是异常数据, 舍去不计。剔除 x_i 后, 对余下的各测量值重新计算残差和标准偏差, 并继续审查, 直到各个残差均小于 3σ 为止。

2. 肖维准则

假定对一物理量重复测量了 n 次, 其中某一数据在这 n 次测量中出现的几率不到半次, 即小于 $\frac{1}{2n}$, 则可以肯定这个数据的出现是不合理的, 应当予以剔除。

根据肖维准则, 采用随机误差的统计理论可以证明, 在标准误差为 σ 的测量值中, 若某一个测量值的残差等于或大于误差的极限值 K_σ , 则此值应当剔除。不同测量次数的误差极限值 K , 见表 2-1。

表 2-1

肖维系数表

n	K_σ	n	K_σ	n	K_σ
4	1.53σ	10	1.96σ	16	2.16σ
5	1.65σ	11	2.00σ	17	2.18σ
6	1.73σ	12	2.04σ	18	2.20σ
7	1.79σ	13	2.07σ	19	2.22σ
8	1.86σ	14	2.10σ	20	2.24σ
9	1.92σ	15	2.13σ	30	2.39σ

3. 格拉布斯准则

假定对一物理量重复测量了 n 次, 得 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 设测量误差服从正常分布, 若某数据 x_i 满足下式, 则认为 x_i 含有过失误差, 应剔除。

$$g_{(i)} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \geq g_{0(n,a)} \quad (2-19)$$

式中 $g_{(i)}$ ——数据 x_i 的统计量;

$g_{0(n,a)}$ ——统计量 $g_{(i)}$ 的临界值, 它依测量次数 n 及显著度 a 而定, 其值见表 2-2;

a ——显著度, 为判断出现的概率, a 值根据具体问题选择。即当 x_i 满足式 (2-19), 但不含过失误差的概率为

$$a = p \left[\frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \geq g_{0(n,a)} \right] \quad (2-20)$$

这就是格拉布斯准则。

2.3.2 实验测量结果的处理

热工实验中测量得到的许多数据需要处理后才能表示测量的最终结果。用简明而严格的

方法把实验数据所代表的事物内在规律性提炼出来就是数据处理。数据处理的目的是要恰当地处理测量所得的数据,最大限度地减少测量误差的影响,以便给出一个尽可能精确的结果,并对这一结果的精确度作出评价。

通过对同一量进行多次等精度的测量,得到一组数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 按算术平均原理处理, 所得结果比较精确, 即测量的随机误差的影响最小。其处理的一般过程:

(1) 将测量得到的数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 排列成表。

(2) 求出测量数据的算术平均值 $\bar{x}$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-21)$$

(3) 求出对应的残差 Δx_i

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (2-22)$$

(4) 求出其标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-23)$$

表 2-2

格拉布斯准则表

$\begin{matrix} \alpha \\ g_0(n,\alpha) \\ n \end{matrix}$			$\begin{matrix} \alpha \\ g_0(n,\alpha) \\ n \end{matrix}$		
0.01			0.01		
0.05			0.05		
3	1.16	1.15	17	2.78	2.48
4	1.49	1.46	18	2.82	2.50
5	1.75	1.67	19	2.85	2.53
6	1.94	1.82	20	2.88	2.56
7	2.10	1.94	21	2.91	2.58
8	2.22	2.03	22	2.94	2.60
9	2.32	2.11	23	2.96	2.62
10	2.41	2.18	24	2.99	2.64
11	2.48	2.23	25	3.01	2.66
12	2.55	2.28	30	3.10	2.74
13	2.61	2.33	35	3.18	2.81
14	2.66	2.37	40	3.24	2.87
15	2.70	2.41	50	3.34	2.96
16	2.75	2.44	100	3.59	3.17

(5) 判断有无异常数据。如发现有异常数据,则剔除这一数据,然后重复(1)~(4)步骤再判断有无异常数据,一直到无异常数据为止。

(6) 剔除异常数据后,计算出算术平均值的标准偏差 $\hat{S}$

$$\hat{S} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-24)$$

式中 n ——不包括异常数据的测量次数。

(7) 确定平均值的有效数位。

(8) 写出测量结果的表达式, 即 $x = \bar{x} \pm \hat{S}$ (置信度 68.3%) 或 $x = \bar{x} \pm 3\hat{S}$ (置信度

99.7%)。

2.3.3 实验数据整理方法概述

实验数据整理的一般方法有列表法、图解法、公式法。

1. 列表法

列表法是将实验数据制成表格，它显示了各变量间的对应关系，反映出变量之间的变化规律，它是绘制曲线的基础。对一个物理量进行多次测量或研究几个量之间的关系时，往往借助于列表法把实验数据列成表格。其优点是，使大量数据表达清晰醒目，条理化，易于检查数据和发现问题，避免差错，同时有助于反映出物理量之间的对应关系。

2. 图解法

图解法是将实验数据绘制成曲线，它直观地反映出变量之间的关系。在报告与论文中几乎都能看到，而且为整理成数学模型（方程式）提供了必要的函数形式。图线能够直观地表示实验数据间的关系，找出物理规律，因此图解法是数据处理的重要方法之一。

3. 公式法

公式法是借助于数学方法将实验数据按一定函数形式整理成方程即数学模型。

2.3.4 实验数据整理的列表法

列表没有统一的格式，但所设计的表格要能充分反映上述优点，并应注意以下几点：

- (1) 各栏目均应注明所记录的物理量的名称（符号）和单位。
- (2) 栏目的顺序应充分注意数据间的联系和计算顺序，力求简明、齐全、有条理。
- (3) 表中的原始测量数据应正确反映有效数字，数据不能随便涂改，确实要修改数据时，应将原来数据画条杠以备随时查验。
- (4) 对于函数关系的数据表格，应按自变量由小到大或由大到小的顺序排列，以便于判断和处理。

实验记录表（流体力学）见表 2-3，计算结果表见表 2-4。

表 2-3 实验记录表（流体力学）

设备编号	管径	管长	管件	水温度	仪表常数
序号	数字电表读数 (N/S)	直管阻力压差计读数		局部阻力差计读数	
		左 (mm)	右 (mm)	左 (mm)	右 (mm)
0					
1					

表 2-4 计算结果表

序号	流量(m ³ /s)	u(m/s)	Re×10 ⁴	H _f (mmH ₂ O)	λ	H _j (mmH ₂ O)	ξ
1							
2							
3							

2.3.5 实验数据整理的图解法

图解法处理数据，首先要画出合乎规范的图线，其要点如下。

1. 选择图纸

图纸有直角坐标纸（即毫米方格纸）、对数坐标纸和极坐标纸等，根据作图需要选择。