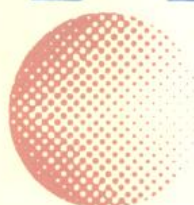


高等学校教材

热工与气动参数测量

林其勋 主编



西北工业大学出版社

(陕)新登字 009号

【内容简介】《热工与气动参数测量》全书共十章。内容主要包括：误差分析与实验数据处理；压力、温度、速度、流量和液位测量；烟气分析；动态测量基础和计算机自动测量系统简介。本书是根据航空高等院校八五统编教材《热工与气动参数测量》大纲编写的。对象为航空发动机专业和热能工程专业的大学本科生，可供研究生和相应专业的工程技术人员参考。

229/35

高等学校教材
热工与气动参数测量

林其勋 主编
责任编辑 蒋相宗
责任校对 钱伟峰

*

© 1995 西北工业大学出版社出版
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 4253407)

陕西省新华书店发行
陕西西安丰华印刷厂印装

ISBN 7-5612-0756-5/V·18 (课)

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：11 字数 257 千字
1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月第 1 次印刷
印数：1—1 500 册 定价：8.70 元

购买本社出版的图书，如有缺页、错页的，本社发行部负责调换。

前 言

本书是根据航空高等院校八五统编教材《热工与气动参数测量》大纲编写的。总学时为60学时。供航空发动机专业及热能工程专业使用,也可供相应专业的工程技术人员参考。

参加本书的编写人员有西北工业大学林其勋、王宗源、游绍堃、乔渭阳和北京航空航天大学魏福清。编写的分工如下:

- 第一、二章 林其勋
- 第三章 林其勋、游绍堃 (第一节)
- 第四章 魏福清
- 第五章 林其勋
- 第六章 魏福清
- 第七、八章 游绍堃
- 第九章 乔渭阳
- 第十章 王宗源
- 主编 林其勋

本书由西安交通大学喻真烷同志主审。

由于测量技术发展速度很快,涉及的知识面极广,而我们的水平有限,因此缺点错误在所难免,热情欢迎读者批评指正。

编 者

1994年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 测量系统的组成和要求	1
第二节 测量系统的基本特性	2
2.1 静态特性	2
2.2 动态特性	3
习题一	3
第二章 误差分析与实验数据处理	4
第一节 测量误差与误差传递	4
1.1 真值与误差	4
1.2 算术平均值与偏差	4
1.3 误差的分类	4
1.4 误差的合成与仪器的精度等级	6
1.5 误差传递	6
第二节 实验数据处理	7
2.1 数据位数的确定	7
2.2 实验数据的加权平均	7
2.3 实验数据的图形表示	7
2.4 实验曲线的拟合	7
习题二	8
第三章 压力测量	9
第一节 压力显示仪表	9
1.1 液柱式压力计	9
1.2 弹性式压力计	11
1.3 压力和差压测量仪表的校验	14
1.4 测压仪表的使用	17
第二节 压力传感器	17
2.1 压阻式压力传感器	17
2.2 压电式压力传感器	18
2.3 力平衡式压力传感器	19
2.4 频率式压力传感器	19
2.5 压力扫描系统	20

第三节 压力探针	21
3.1 总压针	21
3.2 静压测量	22
3.3 总静压针	23
3.4 三孔针	23
3.5 五孔针	25
3.6 校准风洞	28
3.7 设计与使用压力探针时应注意的几个问题	29
习题三	30
第四章 温度测量	31
第一节 热电偶温度计	31
1.1 热电偶测温原理	31
1.2 热电偶回路的性质	33
1.3 热电偶的材料	34
1.4 热电偶的参考端温度处理	36
1.5 测量热电势的显示仪表	38
第二节 热电阻温度计	40
2.1 工业用铂电阻	40
2.2 工业用铜电阻	40
2.3 热电阻的国际标准化问题	41
2.4 热电阻的结构	41
2.5 热敏电阻	41
2.6 测量热电阻的显示仪表及线路	42
第三节 温度探针	44
3.1 高速气流的温度测量	44
3.2 高温气流的温度测量	45
3.3 动态气流温度的测量	46
3.4 总温热电偶	47
第四节 其他测温方法	47
4.1 玻璃管液体温度计	47
4.2 双金属温度计	48
4.3 压力计式温度计	49
4.4 热辐射温度计	49
习题四	50
第五章 速度测量	52
第一节 热线测速	52
1.1 探针简介	52

1.2	恒温(恒电阻)热线风速仪	53
1.3	使用热线测速要考虑的一些影响因素	55
第二节	激光多普勒测速	55
2.1	差动多普勒效应	55
2.2	差动多普勒的干涉图案解释	57
2.3	散射粒子的特性	58
2.4	激光束的频移与分色	59
2.5	信号处理方法	60
第三节	其他测速方法	61
3.1	激光双焦点测速法	61
3.2	粒子图像测速法	62
习题五		63
第六章	流量测量	64
第一节	速度式流量计	64
1.1	流速法测流量	64
1.2	进口流量管	66
1.3	速度式涡轮流量计	66
1.4	涡街流量计	68
第二节	容积式流量测量	69
2.1	椭圆齿轮流量计	69
2.2	腰轮流量计	69
2.3	湿式流量计	70
2.4	伺服式容积流量计	70
第三节	节流式流量计	70
3.1	概述	70
3.2	测量原理及流量公式	71
3.3	标准节流件及其取压位置	72
3.4	流量系数 α 和流束膨胀系数 ϵ	73
3.5	标准节流装置的压力损失	73
3.6	标准节流件的应用条件	73
第四节	其他流量计	74
4.1	电磁流量计	74
4.2	超声波流量计	75
4.3	玻璃管转子流量计	76
习题六		77
第七章	液位测量	78
第一节	云母水位计	78

第二节 双色水位计	78
第三节 电接点水位计	79
第四节 压差式水位计	80
4.1 工作原理	80
4.2 平衡容器的改进	81
4.3 汽包水位信号的的压力校正	82
习题七	82
第八章 烟气分析	83
第一节 氧量计	83
1.1 热磁式氧量计	83
1.2 氧化锆氧量计	87
第二节 气相色谱分析仪	89
2.1 工作原理	89
2.2 气相色谱仪的分离系统——色谱柱	89
2.3 成分检测器	89
2.4 分析流程	90
2.5 色谱仪的定性和定量分析方法	91
习题八	92
第九章 动态测量基础	93
第一节 动态测试的基本知识	93
1.1 稳态量和动态量	93
1.2 测试系统的组成	93
第二节 动态信号的分类与描述	94
2.1 确定性信号的描述	95
2.2 非确定性信号的描述	97
第三节 测量系统的动态特性	100
3.1 测量系统的数学模型	101
3.2 传递函数与动态响应特性描述	102
3.3 一阶测量仪器的阶跃响应特性	104
3.4 二阶测量仪器的阶跃响应特性	105
3.5 测量仪器的频率响应特性	107
第四节 实现不失真测量的条件	110
4.1 实现不失真测量的条件分析	110
4.2 管腔效应及测量系统频率响应特性的改善	111
第五节 测量系统动态特性的校准	113
5.1 正弦信号响应法	113
5.2 阶跃信号响应法	114

5.3 随机信号校准法	116
5.4 动态特性校准装置	117
第六节 动态信号记录仪器	118
6.1 记录仪器的作用、分类和基本组成	118
6.2 显式记录仪器	118
6.3 磁带记录仪	122
习题九	124
第十章 计算机自动测量系统简介	125
第一节 系统的基本组成	125
1.1 概述	125
1.2 模拟输入通道的组成与结构	126
1.3 系统的类型及其与计算机的连接方式	127
第二节 信号调理	127
2.1 电桥连接与激励	127
2.2 热电偶冷端补偿	128
2.3 信号的放大	128
2.4 信号的衰减	132
2.5 低通滤波	132
第三节 多路转换开关及采样保持器	133
3.1 多路转换开关的类型与特点	133
3.2 多路开关的结构形式	133
3.3 采样保持器	134
第四节 数模转换与模数转换	135
4.1 数模转换器 (D/A)	135
4.2 模数转换器 (A/D)	135
第五节 系统干扰的抑制	137
5.1 电磁耦合干扰	138
5.2 静电耦合干扰	138
5.3 地电位差干扰	139
习题十	143
附录	145
附录 I 90 国际温标通用热电偶分度表	145
表 1 铂铑 10-铂热电偶 (S 型) $E(t)$ 分度表	145
表 2 镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝) 热电偶 (K 型) $E(t)$ 分度表	151
表 3 铜-铜镍合金 (康铜) 热电偶 (T 型) $E(t)$ 分度表	157
附录 II 热电阻分度表	160
表 1 工业用铂热电阻分度表	160

表 2	工业用铜热电阻分度表 (分度号 Cu50)		164
表 3	工业用铜热电阻分度表 (分度号 Cu100)		165

第一章 绪 论

第一节 测量系统的组成和要求

在航空发动机的部件试验和全台试验中,需要测量大量的热工和气动参数,如总压、静压、气流方向、速度、总温、流量等等。不仅要测量稳态量(指随时间缓慢变化的量),而且要测量动态量(指随时间很快变化的量)。

图 1-1 例示压气机试验中使用的出口截面稳态压力测量系统简图。以此为例说明测量系统的基本组成。

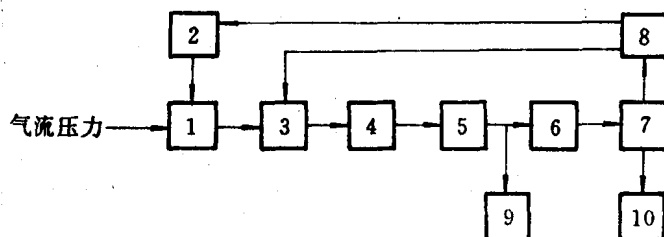


图 1-1 稳态压力测量系统

1—微型五孔压力探针;2—位移机构;3—压力扫描阀;4—压力传感器;5—信号调理电路;
6—微机接口电路;7—微机;8—控制电路;9—指示仪表;10—显示打印

微型五孔压力探针 1 安装在位移机构 2 上。微机 7 通过控制电路 8 控制位移机构带动探针,使其依次停留在指定的径向位置上。

探针的五个孔感受的五个压力通过各自的管路分别接到五个压力传感器 4 上。通过传感器进行物理量的变化(例如把压力的变化转变为电阻的变化)。然后经信号调理电路 5 变成电压信号,再经接口电路 6 输入微机 7。

微机根据系统的特性(包括探针的特性、传感器的特性、电路的放大倍数等等)算出相应位置的总压、静压及气流方向角,并进行实时显示和打印。

指示仪表 9 供人工监控用。

由于一般压力传感器的精度不够高,存在时漂、温漂等问题,因此上述系统在传感器之前使用一个压力扫描阀 3。每次测量前,在微机控制下,扫描阀先把三个标准压力通到所有传感器上,进行实时校准。用多项式(例如二次多项式)拟合出压力传感器的实时特性曲线。然后,扫描阀再将被测压力接往传感器进行测量。这就基本上克服了上述缺点。实际上,这种实时校准也克服了一些电路上的问题。

当然,实际的压气机试验台的测量系统要复杂得多,要测量大量的稳态和动态参数。但大体上都要包括:探针、传感器、调理电路、接口电路、控制电路、微机、显示仪表、输出设备、校准设备等这几部分。当然对有些参数的测量,某些部分可能合而为一(例如,热线测速的探针与传

传感器就是一体的),某些部分则可能可以省去。

应该强调指出,测量系统是作为一个整体进行工作的。各部分应该协调一致。对系统的要求是以最低廉的价格、最合适的总精度来可靠地满足试验要求。

盲目提高个别部分的精度要求,对总精度往往无益,但却造成经济上的浪费,因此必须避免。反之,个别部分的低精度则可能使整个测量失去意义,因此必须克服。例如在测量几十路压力的情况下,如果每路都用高精度压力传感器,将是沉重的经济负担,而且无此必要,因为它与压力探针的精度不匹配。而使用一般的压阻式压力传感器,虽然价格低廉但精度不足,因此近代发展出快速的压力扫描阀以解决这个矛盾。

测量技术是一门综合性课程,涉及多方面的知识,需要有良好的基础。它发展迅速,可以说几年就更新一代。

第二节 测量系统的基本特性

测量系统的基本特性包括静态特性和动态特性。

2.1 静态特性

静态特性指被测量为稳态量(随时间缓慢变化)时的输出输入关系。

一般的说,测量系统的静态特性可以用多项式来表示(当然,也可以有其他的形式)。通常三阶多项式已足够,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1-1)$$

式中 x —— 输入量;

y —— 输出量;

a_0 —— 零输入时的输出,亦称零偏。

当 $y = a_0 + a_1x$ 时,称为线性系统。当 $y = a_1x$ 时,则为理想的线性系统。

静态特性指标包括:线性度、灵敏度、分辨力、分辨率及迟滞等。

2.1.1 线性度与灵敏度

线性度指特性曲线与直线 $y = a_1x$ 之间的最大偏差与满量程输出之比的百分数,即

$$\delta_f = \pm (\Delta_m / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 δ_f —— 线性度;

Δ_m —— 最大偏差;

y_{FS} —— 满量程输出。

式中各符号的意义,参看图 1-2。

灵敏度 K 指测量系统的输出量的变化量与输入量的变化量之比,即 $K = dy/dx$ 。

线性系统当然便于应用。输出与输入成正比, K 为常数。

非线性系统则关系复杂,从系统的输出倒推被测的输入量要困难一些。但今天微机已普遍引入测量系统,只要事先用实验校准的办法(包括实时校准的办法)求得非线性系统的实际特性,由微机做这些计算是比较容易的。

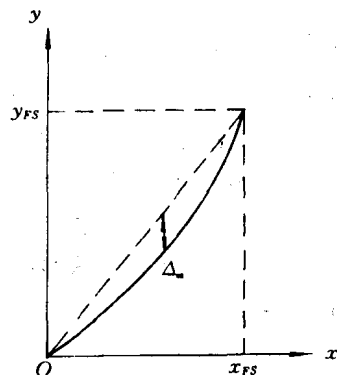


图 1-2 线性度

2.1.2 分辨力、分辨率与迟滞

分辨力:指造成一个可检测的输出所需的最小输入变化。

分辨率:指上述最小输入变化与最大量程输入之比的百分数。

迟滞 δ_i :指外界条件不变的情况下,对应于同一大小的输入信号,测量系统在正、反行程时的输出数值会不相等(见图 1-3)。用 δ_i 表示这种正向特性和反向特性的不一致程度。

$$\delta_i = (\Delta_m / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 Δ_m ——正向和反向输出量的最大偏差;

y_{FS} ——满量程输出。

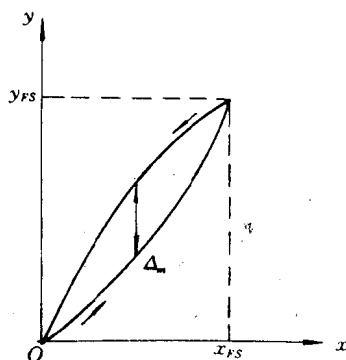


图 1-3 迟滞特性

2.2 动态特性

动态特性指测量系统对于随时间变化的输入量(动态量)的响应特性。

动态量一般分三类:正弦信号、脉冲信号和随机(噪声)信号。实际的被测量往往兼而有之。

例如用测压气机叶片尾迹变化的办法监视失速,尾迹波形就是含有多种频率成分的正弦信号。

又如用激光风速仪测量附面层速度分布,本来速度信号是脉冲信号,但因存在壁面反射光,它造成很大的噪声信号,有用的脉冲信号与无用的噪声信号就一起被检测。

随机信号在发动机试验中也是一种检测对象,例如在做动态畸变试验时。

动态参数测量在发动机试验中的地位十分重要。本书将在第九章专门论述。

习 题

1. 什么是动态量?什么是稳态量?
2. 什么是系统的静态特性?什么是理想的线性系统?
3. 设系统静态特性方程为 $y = x^2$, 理想特性方程为 $y = x$, $x_{FS} = 1$, $y_{FS} = 1$, 试求线性度 δ_f 。
4. 设系统的正向特性方程为 $y = x^2$, 反向特性方程为 $y = \sqrt{x}$, $x_{FS} = 1$, $y_{FS} = 1$, 试求迟滞 δ_i 。

第二章 误差分析与实验数据处理

第一节 测量误差与误差传递

1.1 真值与误差

真值指被测量的真实值。因为从测量方法、测量系统直到测量条件都不可能完美无缺,所以真值无法确知。测得值只能以一定的误差接近真值。

以 A 代表真值, l 代表测得值, 则绝对误差 Δ 和相对误差 γ 分别定义为

$$\Delta = l - A \quad (2-1)$$

$$\gamma = (\Delta/A) \times 100\% \quad (2-2)$$

由于真值无法确知, 故误差计算实质上只是一种估计。任何测量若不能估计出它的误差, 其价值就很有限。

与工程测量不同, 在科研试验中目前对有些量的测量, 要估计出其误差还是相当困难的, 例如一些湍流参数的测量。当然随着科学技术的发展, 会逐步得到改进。

1.2 算术平均值与偏差

对某量进行 n 次测量, 得到 n 个测得值: $l_1, l_2, \dots, l_n$, 其算术平均值 $\bar{L}$ 为

$$\bar{L} = (l_1 + l_2 + \dots + l_n)/n \quad (2-3)$$

定义偏差 v_i 为某测得值 l_i 与算术平均值之差, 即

$$v_i = l_i - \bar{L} \quad (2-4)$$

一般情况下, $\bar{L}$ 并非真值 A , 故 v_i 亦非误差 Δ 。

1.3 误差的分类

误差按其性质分为三类: 系统误差、随机误差和粗大误差。

1.3.1 系统误差及其消除

系统误差指数值一定或按一定规律变化的误差。主要由测量方法、测量系统及环境条件所引起。

如制造工艺给压力探针特性带来的误差, 就是数值一定的。而环境温度变化引起的传感器零点漂移和灵敏度漂移则是按一定规律变化的。

消除系统误差的办法有两种: 一是引入修正值(例如对压力探针进行风洞吹风, 求其校准特性); 二是消除产生系统误差的根源(例如对仪器的工作环境进行恒温控制)。

实际工作中系统误差的危险性远大于随机误差。往往在自认为没有问题的情况下, 实际上却存在相当的系统误差。发现并消除系统误差是测量工作的主要任务之一。

系统误差决定测量结果的准确度。

1.3.2 随机误差及其数值估计

随机误差(亦称偶然误差)指用同一仪器,在认为相同的条件下,对同一不变的量重复多次测量,测得值都不完全一致,都有或正或负或大或小的误差。这种误差称为随机误差。它服从高斯正态分布规律。高斯曲线如图2-1所示。其方程为

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2-5)$$

式中 σ ——标准误差。

高斯曲线从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的积分等于1。从 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 的积分等于0.68。曲线底下所围面积 ydx 代表测得值落在 x 到 $x+dx$ 这个间距内的机会,即概率。在不存在系统误差和粗大误差的前提下,当测量总次数接近 ∞ 时,所有测得值的算术平均值就等于真值。

σ 决定高斯曲线的形状。 σ 小,曲线陡峭,说明测得值分布密集,测量系统的精密度高。因此常用 σ 表征随机误差的大小,其计算公式如下:

$$\sigma = K \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n v_i^2 \right) / (n-1)} \quad (2-6)$$

式中 K ——由测量次数 n 决定的系数(见表1-1)。

表1-1 K 与 n 的关系表

n	2	3	4	5	6	7	9	20	∞
K	1.25	1.13	1.09	1.06	1.05	1.04	1.03	1.01	1.00

从表1-1可见, n 愈少, K 愈大。这是因为用偏差 v_i 来计算误差,本质上只是一种估计。测量次数 n 愈少,估计本身的误差也当然愈大,因此误差就应估计得越大些。

工程上习惯用极限误差 δ 来表示偶然误差

$$\delta = 3\sigma \quad (2-7)$$

高斯曲线从 -3σ 到 $+3\sigma$ 的积分等于99.7%,这意味着在333次测量中才有一次其误差可能超过 $\pm 3\sigma$ 。因此可以认为所有可能发生的随机误差,其绝对值都不会超过 3σ 。即任何一个个别测得值一定处于(真值 $\pm \delta$) 的范围内。反过来说,真值一定在(任一个别测得值 $\pm \delta$) 的范围内。

应当指出,实际上测量次数不可能很多,所以算术平均值虽然优于个别测得值,但仍非真值,还有误差。算术平均值的标准误差 S 为

$$S = \sigma / \sqrt{n} \quad (2-8)$$

S 随 n 的增加而减小。但当 $n > 10$ 时,效果已不明显,因此取 $n = 10 \sim 12$ 次,一般已足够。

随机误差决定测量结果的精密性。

1.3.3 粗大误差及其剔除

粗大误差指个别数值特大的误差。一般是由于工作疏忽或外界的突发干扰造成。有粗大误差的测得值应予剔除。最基本的办法就是根据专业知识进行判断。

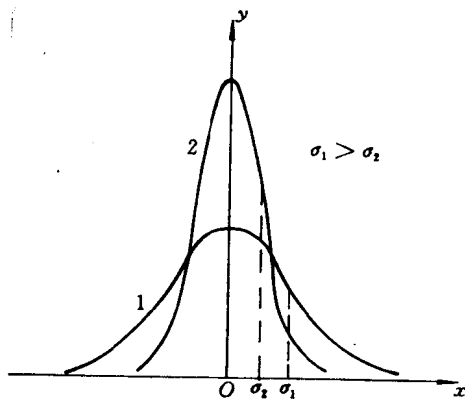


图2-1 高斯曲线

误差理论也提供了一些判别粗大误差的准则,如肖维勒准则。其具体步骤如下:

- (1) 求出这一组测得值的算术平均值及标准误差 σ , 计算时可疑的测得值应包括在内;
- (2) 算出可疑测得值的偏差 v_i 与 σ 之比, 即 v_i/σ ;
- (3) 按表 1-2 查出与测量次数 n 相对应的 v/σ ;
- (4) 若 $v_i/\sigma > v/\sigma$ 则剔除此可疑测得值;
- (5) 弃去可疑值后, 重新求平均值及 σ 。

表 1-2 粗大误差判别表

n	5	6	7	8	9	10	12	14
v/σ	1.65	1.73	1.80	1.86	1.92	1.96	2.03	2.10

1.4 误差的合成与仪器的精度等级

理论上讲, 系统误差一经发现就应消除。因此测量的结果只剩下随机误差。但限于实际条件, 系统误差往往虽经发现却消除不掉。

一般, 系统误差中有两种情况。一是知道其极限值, 并知其符号, 称为常差 E 。另一是只知其极限值而不知其符号, 称为不定常差 δ_1 。这样, 再加上随机误差(用 δ_1 表示), 则测量的总误差 U 估计为

$$U = E \pm (\delta_1 + \delta_1) \quad (2-9)$$

这种合成算法, 把系统误差中的不定常差合并到随机误差中去, 是偏于保守的。但注意到整个误差计算只是一种估计, 因此还是保守一点稳妥。

仪器的精度等级, 如 0.5 级、1 级、1.5 级、2.5 级等等, 是其所有误差源(随机误差和系统误差)所造成的总结果。精度等级的数字表示允许仪器的极限误差为仪器满量程的正负百分之几。

同一仪器在不同情况下使用, 其可达的精度可能相差很大。所以应具体地深入分析其使用条件。

1.5 误差传递

许多参数本身不能用仪器直接测得, 而是直接测量另外一些有关参数, 然后通过公式算出它。如空气流量, 就是通过测压力与温度求得的。这样, 结果参数的误差就由直接测量参数的误差通过误差传递公式来决定。

若结果参数 y 与直接测量的独立参数 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 之间有如下函数关系

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2-10)$$

全微分之, 得

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_m} dx_m \quad (2-11)$$

用 y 通除之, 则

$$\frac{dy}{y} = \frac{x_1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{dx_1}{x_1} + \frac{x_2}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{dx_2}{x_2} + \dots + \frac{x_m}{y} \frac{\partial y}{\partial x_m} \frac{dx_m}{x_m} \quad (2-12)$$

常差的传递就可使用式(2-11)和式(2-12)计算。

但不定常差和随机误差,应该为平方和的开方关系,即

$$dy = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} dx_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_m} dx_m\right)^2} \quad (2-13)$$

$$\frac{dy}{y} = \sqrt{\left(\frac{x_1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{dx_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{y} \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{dx_2}{x_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{x_m}{y} \frac{\partial y}{\partial x_m} \frac{dx_m}{x_m}\right)^2} \quad (2-14)$$

第二节 实验数据处理

2.1 数据位数的确定

一般,误差只保留一个数字。测得值的最后一位就应取至与该误差数字同一数量级。例如已知测量空气流量的极限误差 $\delta = \pm 0.4 \text{ kg/s}$,则测得的流量数字就只须保留到小数一位,如 43.6 kg/s 。于是测量结果写成 $43.6 \pm 0.4 \text{ kg/s}$ 。

2.2 实验数据的加权平均

在求测得参数的平均值时,经常遇到加权平均问题,即

$$\bar{L} = \left(\sum_{i=1}^n W_i L_i \right) / \sum_{i=1}^n W_i \quad (2-15)$$

式中 W_i ——权数。

权数可以是面积、质量、测量次数或误差。

2.3 实验数据的图形表示

根据解析几何的原理,用曲线将实验数据表示出来,可以直观地看出它的规律性。对于进一步获得经验公式很有帮助。

图形表示的具体步骤如下:

- (1) 选择坐标。如直角坐标、对数坐标等等。
- (2) 决定坐标分度。坐标的最小分格应与误差相对应。分度过细会造成曲线的人为弯曲。
- (3) 根据数据描点。点的大小应与测量误差相对应。
- (4) 作曲线。曲线应光滑匀整,尽量接近所有的点,但不必通过所有的点。只要位于曲线一侧的点数大约等于位于另一侧的点数就可以。

2.4 实验曲线的拟合

一般可以采用多项式来拟合实验曲线,以获得经验公式。如果有 n 个测值点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$, 根据曲线的图形表示,可以决定应该采用几次多项式来拟合。

以二次多项式拟合为例

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (2-16)$$

按照最小二乘法,其对应的正规方程组是

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \end{cases} \quad (2-17)$$

解此线性方程组,就可确定系数 a_0, a_1, a_2 。

方程(2-16)对实验点的拟合程度,用标准偏差 S 来估计

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)]^2} \quad (2-18)$$

有些实验曲线,在直角坐标上并非直线或二次曲线,但经适当的变换在对数坐标或半对数坐标上可以化为直线或二次曲线。

有的可以进行分段拟合,在每一段中用二次多项式来拟合。

习 题 二

1. 已知压气机效率 η_k^* 与进口总温 T_1^* 、进口总压 p_1^* 、出口总压 p_2^* 及压气机温升 ΔT_i^* 之间有如下关系

$$\eta_k^* = T_1^* \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{0.286} - 1 \right] / \Delta T_i^*$$

若 $p_2^*/p_1^* = 7.14$, 各参数的相对测量误差分别为 $(dp_1^*/p_1^*) = (dp_2^*/p_2^*) = (dT_1^*/T_1^*) = \pm 1\%$, $(d\Delta T_i^*/\Delta T_i^*) = \pm 1.5\%$, 试求效率 η_k^* 的相对误差。

2. 将某压力传感器与压力表作对比测量。记下传感器电阻与压力值的关系,如下表。

压力($\times 10^5 \text{Pa}$)	电阻 (Ω)
0.00 ± 0.05	44 ± 1
1.00 ± 0.05	63 ± 1
2.00 ± 0.05	79 ± 1
3.00 ± 0.05	94 ± 1
4.00 ± 0.05	110 ± 1
5.00 ± 0.05	130 ± 1
6.00 ± 0.05	146 ± 1
7.00 ± 0.05	160 ± 1

试画出此实验曲线,并拟合出经验公式。