

航空发动机气动参数测量

西北工业大学 编

国防工业出版社

航空发动机气动参数测量

西北工业大学 编



30271798

国防工业出版社

401119

内 容 简 介

本书是航空高等院校发动机专业的统编教材。全书分五篇，共十四章。

第一篇共二章，介绍了测量误差的基本理论和实验数据处理的基本方法；第二篇共三章，分别介绍了压力、速度和流量测量的基本原理及方法；第三篇共六章，较详细地叙述了温度测量的基本原理及方法；第四篇共二章，介绍了动态测量基础；第五篇共一章，对数字数据采集系统作了简要的介绍。书后并附有各种测温材料的物理性质表、常用热电偶的分度表以及热电阻的分度表。

本书系作为航空高等院校发动机专业的教学用书，也可供从事热工测量和热机试验工作的工程技术人员参考。

航空发动机气动参数测量

西北工业大学 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张13¹/₈ 333千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷 印数：0,001—1,700册

统一书号：15034·2118 定价：1.35元

编写说明

本书是根据航空高等院校专业教育计划的规定和教材会议草拟的“航空发动机气动参数测量”教材编写大纲编写的。供航空高等院校发动机专业作为教学用书，也可供从事热工测量和热机试验工作的工程技术人员参考。

本书共分五篇，介绍了测量误差的基本理论和实验数据处理的基本方法；压力、速度、流量和温度测量的基本原理及方法；动态测量基础；以及提高测量精确度的基本技能。对显示和记录仪表及数字数据采集系统也作了简要介绍。

本课程是一门实践性较强的课程。因此，在内容安排上，既注意加强基本概念和基本理论的阐述，又力求结合航空发动机试验中气动参数测量工作的特点和实际需要，介绍必要的基本技能，并努力反映国内外先进的测量技术。

为了使读者对气动参数测量有一个较全面的知识，并具有一定的分析问题和解决问题的能力，故本书的编写内容略多于教学要求。因此，作为教学用书时，可按实际情况，对内容酌情取舍。第五篇可以不作为教学的必要内容。

本书第一、二、五章由林其勋编写；三、四章由游绍堃编写；六、八、十、十一章由刘嗣镒编写；七、九章由赵觉良编写；十二、十三、十四章由王宗源编写。全书由赵觉良统编。

本书由王维贵主审。参加审稿的有南京航空学院、北京航空学院、浙江大学、三〇四所、六〇六所、六二四所等单位的代表。在此表示衷心感谢。

由于水平有限，本书疏漏谬误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

目 录

第一篇 误差分析与实验数据处理

第一章 误差及其传递	1
第一节 误差的基本概念	1
1.1 真值与误差	1
1.2 算术平均值与偏差	1
1.3 误差的分类	2
1.4 偶然误差的性质及其数值估计	3
1.5 系统误差及其消除	7
第二节 仪表、传感器的静态精度指标	8
第三节 误差的传递	9
3.1 误差传递的一般公式	9
3.2 传递公式的应用	10
第二章 实验数据处理	14
第一节 数据位数的确定	14
第二节 粗大误差数据的剔除	14
第三节 实验数据的图形表示法	15
第四节 实验数据的方程表示法——一元线性回归和多项式回归	17
4.1 一元线性回归	17
4.2 多项式回归	19
4.3 化曲线为直线或抛物线的回归	21
第五节 实验数据的加权处理	22
5.1 按面积加权	22
5.2 按质量加权	22
5.3 按测量次数加权	23
5.4 按误差加权	23
第六节 误差的合成	24

第二篇 压力、速度和流量测量

第三章 压力测量	25
----------------	----

第一节 一般知识	25
第二节 总压测量	27
2.1 L型总压管	30
2.2 带套型总压管	31
2.3 球窝型总压管	31
2.4 多点总压管	31
2.5 附面层总压管	34
2.6 超音速气流中总压的测量	34
第三节 静压测量	35
3.1 壁面静压孔	35
3.2 静压管	38
第四节 气流速度与方向的测量	42
4.1 气流速度的测量	42
4.2 气流速度与方向的测量	44
第五节 校准风洞	59
第六节 设计压力感受器应注意的几个问题	60
6.1 强度问题	60
6.2 感受器的自振频率	61
6.3 堵塞影响	62
6.4 感受器的定位	62
第七节 压力显示仪表	62
7.1 液柱式压力计	63
7.2 弹簧机械式压力表	68
第八节 压力传感器	69
8.1 力平衡式压力传感器	70
8.2 电感式压力传感器	71
8.3 电容式压力传感器	72
8.4 压电式压力传感器	74
8.5 电阻应变式压力传感器	75
8.6 压阻式压力传感器	78
第九节 压力显示仪表和传感器的静态校验设备	81
9.1 活塞式压力计	82
9.2 双活塞真空压力计	83
9.3 浮球式标准压力发生器	84
第四章 流量测量	85
第一节 用测风速法测流量	85
1.1 等环面法	86
1.2 进口流量管	90
第二节 节流流量计	91

2.1 概述	91
2.2 流量公式	91
2.3 流量系数 α	94
2.4 流束膨胀修正系数 ε	95
2.5 标准节流装置的压损 Δp	96
2.6 标准节流件的应用条件	96
第三节 卡门旋涡流量计	97
3.1 卡门旋涡流量计的原理	97
3.2 卡门旋涡流量计的结构和工作情况	99
3.3 卡门旋涡流量计的特点和存在的问题	100
第四节 涡轮流量计	100
第五节 浮子流量计	102
第五章 热线风速仪和激光风速仪	104
第一节 热线风速仪	104
1.1 探头构造简介	104
1.2 基本工作方程	104
1.3 恒电阻工作方式	106
1.4 恒电流工作方式	112
1.5 热线风速仪的应用	112
第二节 激光风速仪	114
2.1 差动多普勒效应	114
2.2 光混频	117
2.3 流向判别	118
2.4 差动多普勒的干涉图案解析	119
2.5 二元双色差动多普勒风速仪	121

第三篇 温度测量

第六章 温度测量概述	123
第一节 温度及温度测量	123
第二节 温标	124
第七章 热电偶温度计	128
第一节 热电偶测温原理	128
第二节 基本定律及其应用	131
2.1 均质导体定律	131
2.2 中间导体定律	132
2.3 连接导线定律和中间温度定律	133
2.4 参考热电极定律	135
第三节 热电偶的结构及材料	137

3.1 热电偶的基本结构	137
3.2 常用的热电偶材料	138
3.3 绝缘材料和保护管材料	144
第四节 热电偶参考端温度	146
4.1 用保温瓶保持参考端为 0°C	146
4.2 参考端温度 t_n 不等于 0°C , 但为定值时的补正方法	147
4.3 参考端温度 t_n 在波动时的补正方法	148
4.4 参考端温度不需要补正的热电偶	150
第五节 常用的热电偶测温线路	151
5.1 测量气流平均温度的线路	151
5.2 测量温差的线路	154
5.3 多支热电偶共用一台显示仪表的测量线路	156
第六节 热电偶的检定	158
第七节 测量热电势的显示仪表	161
7.1 动圈式仪表	161
7.2 直流电位差计	163
7.3 电子电位差计	167
第八章 电阻温度计	170
第一节 热电阻及热敏电阻	170
1.1 铂热电阻	171
1.2 铜热电阻	172
1.3 镍热电阻	172
1.4 热敏电阻	173
1.5 热电阻的结构型式	174
第二节 测量热电阻的仪表及线路	176
2.1 平衡电桥	176
2.2 动圈式仪表	178
2.3 电位差计	179
第三节 电阻温度计的应用	180
3.1 不应有附加电阻	181
3.2 用电阻温度计本身的电阻-温度关系推算温度	181
第九章 气流温度测量	182
第一节 高速气流的温度测量	183
1.1 速度误差及复温系数	183
1.2 减小速度误差的方法	188
1.3 复温系数的测定	191
第二节 高温气流的温度测量	193
2.1 热电偶测量端的热交换关系	194
2.2 热电偶的对流换热系数	195

2.3 辐射误差及其减小的方法	199
2.4 导热误差及其减小的方法	202
2.5 催化效应及火焰稳定效应	206
第三节 动态气流温度测量	209
3.1 时间常数及动态响应误差	210
3.2 减小动态响应误差的方法	212
第四节 叶栅后的气流温度测量	216
4.1 流场不均匀的影响	216
4.2 堵塞的影响	217
4.3 转子尾迹的影响	218
第五节 总温热电偶及其设计	219
5.1 几种总温热电偶及其性能	219
5.2 测量气流温度的热电偶类型	222
5.3 总温热电偶的设计	230
第十章 壁面温度测量	234
第一节 表面热电偶	234
1.1 表面热电偶	236
1.2 旋转物体的壁面温度测量	239
第二节 示温涂料	240
2.1 示温涂料及其种类	240
2.2 示温涂料的变色原理及影响因素	242
第十一章 其它测温方法	246
第一节 流量法测温	246
第二节 红外测温	247
2.1 红外测温原理	248
2.2 红外测温系统及其应用	250
第三节 射流测温	254
第四节 激光全息测温	257

第四篇 动态测量基础

第十二章 测量系统的动态特性	260
第一节 基本概念	260
1.1 稳态量和动态量	260
1.2 测量系统	261
第二节 一般信号的形式及其频域表示法	262
2.1 一般信号的形式	262
2.2 周期性信号	263
2.3 过渡态信号	266

2.4 随机信号	269
第三节 测量系统的数学模型	274
3.1 概述	274
3.2 零阶仪器	274
3.3 一阶仪器	275
3.4 二阶仪器	276
3.5 线性系统	280
第四节 简单仪器的动态特性	281
4.1 一阶仪器的动态特性	281
4.2 二阶仪器的动态特性	283
4.3 频率特性	287
4.4 动态特性参数	291
第五节 测量系统或复杂仪器的频率特性和它对一般信号的响应	293
5.1 测量系统和复杂仪器	293
5.2 测量系统的频率特性	294
5.3 测量系统频率特性的改善	297
5.4 测量系统对一般信号的响应	303
第六节 测量系统动态特性的校验	308
6.1 正弦信号校验法	308
6.2 脉冲信号校验法	311
6.3 随机信号校验法	314
第十三章 动态信号的显示和记录仪器	316
第一节 光线示波器	317
1.1 工作原理	317
1.2 动态特性	319
第二节 磁带记录器	323
2.1 引言	323
2.2 工作原理	324
2.3 记录方式	326
第三节 电子示波器	330
3.1 引言	330
3.2 基本原理和构造	331
3.3 技术特性	332
3.4 示波图形的照像	333
3.5 记忆示波器	334
3.6 数字示波器	335

第五篇 数字数据采集系统

第十四章 数字数据采集系统	338
---------------------	-----

第一节	概述	338
第二节	数据采集系统的干扰误差	344
2.1	常模干扰误差	344
2.2	共模干扰误差	347
第三节	数据采集系统的主要设备	352
3.1	多路开关	352
3.2	低电平直流放大器	357
3.3	模-数转换器	362
3.4	数字记录装置	368

附 录

附表一	各种测温材料的物理性质	372
附表二	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	374
附表三	铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶分度表	380
附表四	镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	387
附表五	镍铬-考铜热电偶分度表	393
附表六	铜-康铜热电偶分度表	397
附表七	铂热电阻 (Pt 100) 分度表	399
附表八	铂热电阻 (Pt 50) 分度表	403
附表九	铜热电阻 (Cu 100) 分度表	407
附表十	铜热电阻 (Cu 50) 分度表	408
	参考资料	409

第一篇 误差分析与实验数据处理

第一章 误差及其传递

第一节 误差的基本概念

1.1 真值与误差

真值指被测量的真实值。严格说, 真值无法确知。因为从测量仪器、测量方法、测量条件到人的观察力都不可能完美无缺, 所以测得的值只能以一定的误差接近真值。

若以 A 代表真值, l 代表测得值, Δ 代表误差, 则

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

若测得值大于真值, 误差为正, 反之为负。此误差亦称绝对误差。

用相对误差来说明测量结果的优劣, 往往更确切。若以 γ 代表相对误差, 则

$$\gamma = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

问题是真值无法确知, 因此, 误差计算说到底只是对误差大小的一种估计。就是在真值不知的情况下如何合理地估计出误差的范围来。

任何测量若不能估计出它的误差, 则它的价值就很有有限了。

1.2 算术平均值与偏差

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

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (1-3)$$

称每一个别测得值与算术平均值之差为偏差 v , 即

$$v_i = l_i - \bar{L} \quad (1-4)$$

一般情况下, 由于算术平均值 $\bar{L}$ 并非真值 A , 所以偏差 v 亦非误差 Δ 。

1.3 误差的分类

误差按其性质分为系统误差、偶然误差、粗大误差三类。

系统误差: 指数值一定或按一定规律变化的误差。主要由测量仪器、试验装置、测试方法和观测者本身, 以及测量时的外界环境 (如温度、湿度等) 影响所引起。

偶然误差: 指用同一仪器, 当以同样仔细程度, 在认为相同的条件下, 对同一个不变的量重复地进行多次测量时, 每次测得的值都不完全一致, 都有或大、或小、或正、或负的误差, 这种误差称为偶然误差。偶然误差只服从统计规律, 随着测量次数的增加, 偶然误差的平均值趋于零。

粗大误差: 指个别数值特别大的误差。一般是工作疏忽所造成, 所以亦称疏失误差。有粗大误差的数据应予剔除。

图 1-1 用打靶作一形象譬喻, 说明这三种误差。图 1-1(a)、(b)、(c) 为三个射手的成绩。中间画断面线处为靶心。图 1-1(a) 表示系统误差很小, 但有一定的偶然误差。图 1-1(b) 表示偶然误差很小, 但有一定的系统误差 (原因可能是准心与枪筒不平行等)。图 1-1(c) 表示系统误差和偶然误差都很小, 而个别远离的点则是粗大误差 (可能是射手一时疏失所致)。



图1-1 误差譬喻图

偶然误差决定了测量结果的精密度，偶然误差小说明精密度高。

系统误差决定了测量结果的准确度（或准确性），系统误差小说则准确度高。

一个既准确（系统误差小）又精密（偶然误差小）的测量称为精确测量，即精确度高。

由此可见误差与精确度实为同一事物的两个方面。

1.4 偶然误差的性质及其数值估计

讨论偶然误差时，为了便于分析，假定不存在系统误差和粗大误差。

例如，测定某型涡轮喷气发动机进气道在某状态下的总压恢复系数 σ_a^* ，共测 27 次 ($N=27$)。发现结果总不完全一样，有的大，有的小。这 27 次的平均值为 0.9952。现以间距 $\Delta s=0.0001$ 为一档，对所测数据分组，分成九组。表 1-1 列出了各组的出现次数 n_i 及相对出现次数 n_i/N 。把这些数值画成直方图，如图 1-2 所示。把相对出现次数 n_i/N 再除以间距 Δs ，即得到单位间距上的相对出现次数，称为概率密度，其值亦列于表 1-1。在图 1-2 上，对于 n_i 、 n_i/N 及 $n_i/(N\Delta s)$ 分别采用适当比例尺，实际就都

表1-1 进气道总压恢复系数测得值统计

测 得 值 区 间	出现次数 n_i	相对出现次数	概率密度
		$\frac{n_i}{N} \%$	$\frac{n_i}{N\Delta s}$
0.9947~0.9948	1	3.7	370
>0.9948~0.9949	2	7.4	740
>0.9949~0.9950	2	7.4	740
>0.9950~0.9951	5	18.5	1850
>0.9951~0.9952	7	26.0	2600
>0.9952~0.9953	5	18.5	1850
>0.9953~0.9954	3	11.1	1110
>0.9954~0.9955	1	3.7	370
>0.9955~0.9956	1	3.7	370

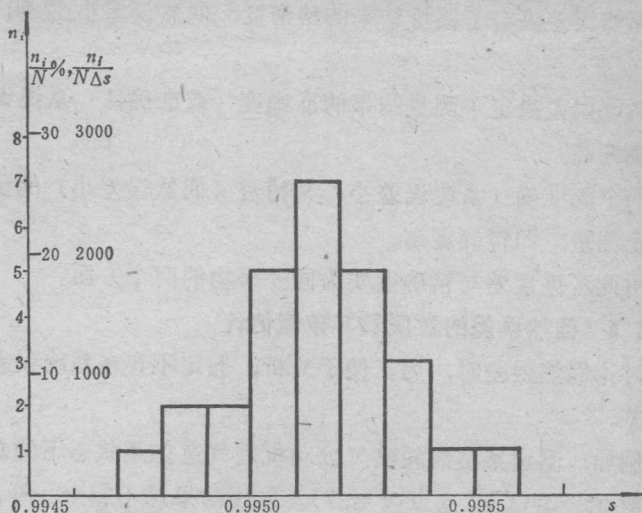


图1-2 进气道总压恢复系数测得值的直方图

可用同一直方图表示。

若测量总次数 N 再大大增加, $N \rightarrow \infty$; 分组间距再大大缩小, $\Delta s \rightarrow ds$, 则 $n_i \rightarrow dn$, $n_i/(N\Delta s) \rightarrow (1/N)(dn/ds)$ 。这样, 基本对称的台阶形直方图就趋于完全对称的连续曲线, 称为高斯正态分布曲线, 或高斯曲线。若把坐标变换一下, 令 $y = (1/N)(dn/ds)$, $x = s$, 并从曲线正中作为原点, 则高斯正态分布曲线可用如下方程表示:

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

式中 σ —— 标准偏差。

图 1-3 示出了此高斯曲线的形状。高斯曲线底下所围的面积 $ydx = (1/N)(dn/dx)dx = dn/N$, 就是测得值落在 x 到 $(x+dx)$ 这个间距内的出现机会, 即出现概率。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。

偶然误差的出现服从高斯正态分布规律。它具有下列特性: 当

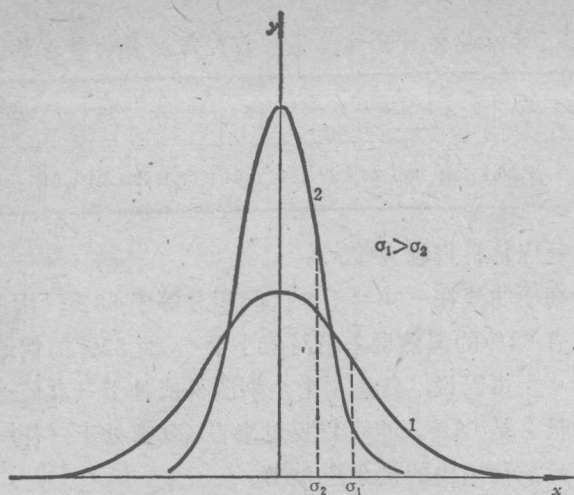


图1-3 高斯曲线

测量总次数 N 很大，接近 ∞ 时，所有测得值的算术平均值就等于真值；绝对值相等、符号相反的偶然误差出现的机会相等，正号的偶然误差的出现次数等于负号偶然误差的出现次数；数值小的偶然误差出现的机会多于数值大的。

因此，采用算术平均值作为测量结果就消除了偶然误差的影响。当然这一系列的 N 次测量中的每个个别测得值则仍是有误差的。

σ 决定高斯曲线的形状（见图 1-3）。 σ 小，曲线陡峭，误差分布密集，说明测量系统质量好，精密度高。而 σ 大，曲线平缓，误差分布离散，说明测量系统质量差，精密度低。因此，常用标准偏差 σ 来表征偶然误差的大小，其计算公式如下：

$$\sigma = K \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N-1}} \quad (1-6)$$

式中 K 为由测量次数 N 所决定的系数，列于表 1-2； v_i 为偏差。从表 1-2 可见， N 愈少， K 愈大。这是因为用偏差来计算误差，本质上只是一种估计。测量次数愈少，这种估计本身的误差就愈大，

表1-2 标准偏差计算的修正系数 K 与测量次数 N 的关系

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	∞
K	1.25	1.13	1.09	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1

因此误差就应估计得越大些。

由于高斯曲线在 $-\sigma$ 到 $+\sigma$ 区间积分等于68%，因此，在一组测量中有68%的偶然误差绝对值小于 σ ，而32%的偶然误差绝对值大于 σ 。可以说，任意一个个别测得值处于（真值 $\pm\sigma$ ）的范围内的机会是68%。也可以反过来说，真值处于（任一个别测得值 $\pm\sigma$ ）的范围内的机会是68%。

工程上更习惯于用极限误差 δ 来表示偶然误差

$$\delta = 3\sigma \quad (1-7)$$

由于高斯曲线在 $\pm 3\sigma$ 范围内的积分等于99.7%，因此，只有0.3%的机会可能超过它，这意味着在测量333次中才有一次误差可能超过 $\pm\delta$ 。实际上可以认为，所有可能发生的偶然误差，其绝对值都不超过 $\pm 3\sigma$ ，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。

除了用 σ 和 δ 之外，还有别的一些表示偶然误差的办法。例如，节流流量计中用 2σ 表示偶然误差的大小。这没有什么本质区别，只要说明白，用那个都行，因为它们之间在数量上有严格的关系。

同时应该指出，实际进行的测量次数是不可能很多的。因此，绝对值相等的正负误差出现的次数不一定正好相等，从而不一定正好互相抵消完。所以算术平均值虽然比每个个别测得值好，但仍有偶然误差残留，而非真值。算术平均值的标准误差 S 为

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1-8)$$