



“十三五”普通高等教育本科规划教材

锅炉实验与测试技术

鄢晓忠 主 编
周 臻 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通

教材

锅炉实验与测试技术

主 编 鄢晓忠
副主编 周 臻
编 写 徐慧芳 汪淑奇 冯磊华
刘 亮 何金桥
主 审 刘志强 陈冬林



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材，主要包括：概述、实验数据的处理方法、煤的物理特性分析、煤的成分及发热量分析、热分析实验、煤灰特性测试分析、燃烧产物测试分析、锅炉热平衡试验测试、炉膛空气动力场测试、锅内流动特性实验等，对各实验测量分析的原理、方法及仪器设备也做了重点介绍。

本书可作为高等学校能源与动力工程及相关专业锅炉实验教材，也可供从事锅炉运行、燃烧调试及煤燃料测试的技术及研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉实验与测试技术/鄢晓忠主编. —北京：中国电力出版社，2016.5

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-7075-3

I. ①锅… II. ①鄢… III. ①锅炉—高等学校—教材
IV. ①TK22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 045321 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 322 千字

定价 28.00 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

实验教学是高等教学工作的重要组成部分,是深化课堂理论教学的重要环节,是学生获取、掌握知识及增强实践动手能力的重要途径。同时,随着科学技术的迅速发展,新仪器、新的测试方法不断出现,使测试技术的水平日新月异。因此,编者结合锅炉工业的发展、锅炉原理系列课程的特点编写了本教材,对于学生掌握锅炉测试技术的基本原理,熟悉现代锅炉测试技术手段,了解测试技术最新的发展趋势具有重要作用及意义。

本书是为能源与动力工程专业的专业技术课锅炉原理系列课程(含单独实验课)的教学而编写的。编写过程中,在总结了编者多年来从事锅炉原理系列课程的理论和实验教学经验的基础上,尽量体现理论与实践相结合的特点,详细地介绍了各测试项目的基本测试原理、测试方法与手段,对该领域内最新测量仪器及方法也做了介绍。

全书共分十章,第一章、第五章第五~七节,第九章、第十章由鄢晓忠编写,第二章由冯磊华编写,第三章由汪淑奇编写,第四章由周臻编写,第五章第一~四节由刘亮编写,第六章由何金桥编写,第七章、第八章由徐慧芳编写,全书由鄢晓忠统稿。

本书由中南大学能源科学与工程学院刘志强教授和长沙理工大学能源与动力工程学院陈冬林教授担任审稿人,两位教授在百忙中详细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的修改意见和建议,使编者受益匪浅,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,得到了长沙理工大学李录平教授的热心指导与帮助,在此表示深深的谢意。同时本书参考了相关标准与资料、产品样本和说明书,在资料整理过程中得到尹艳山、聂明、张博、李帆等的热心帮助,在此表示真诚的感谢。

本书涉及的知识面较广,限于编者水平,疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2016年2月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 锅炉实验的目的与分类	1
第二节 锅炉实验大纲的拟定	2
第三节 实验报告编写	2
第二章 实验数据的处理方法	4
第一节 误差的基础理论	4
第二节 实验数据的记录及整理	7
第三节 实验数据的分析处理	11
第四节 实验要求及注意事项	18
第三章 煤的物理特性分析	19
第一节 煤的可磨性测定	19
第二节 煤粉细度与均匀度的测定	21
第三节 煤粒的颗粒特性及粒度分布测定	23
第四节 煤粉浓度测定	28
第四章 煤的成分及发热量分析	31
第一节 煤的采样及制样	31
第二节 煤的工业分析	38
第三节 煤的元素分析	51
第四节 煤的发热量测定	66
第五节 煤的各种基准换算	78
第五章 热分析实验	80
第一节 热分析技术概述	80
第二节 热分析的概念	81
第三节 热分析的基本特征及热分析仪器	82
第四节 影响热重分析测量实验的因素	86
第五节 煤的热解及燃烧特性热重分析	90
第六节 煤反应动力学参数的测定	94
第七节 热重分析在煤的工业分析中的应用	96
第六章 煤灰特性测试分析	99
第一节 灰熔融特性分析	99
第二节 煤灰熔融性测定	102
第三节 煤灰成分分析	106

第四节 煤灰结渣性分析.....	109
第七章 燃烧产物测试分析.....	119
第一节 燃烧产物的取样.....	119
第二节 烟气成分的色谱分析法.....	122
第三节 氧化锆氧气分析仪.....	127
第四节 奥氏烟气分析.....	130
第八章 锅炉热平衡试验测试.....	135
第一节 锅炉热平衡试验的目的、任务及方法.....	135
第二节 热量输入及有效利用热.....	137
第三节 锅炉的各项热损失.....	139
第四节 热效率的计算.....	144
第五节 锅炉热效率的测定.....	144
第九章 炉膛空气动力场测试.....	157
第一节 速度的测量.....	157
第二节 速度法测量管内流量.....	173
第三节 气流压力的测量.....	175
第四节 炉膛冷态模化实验.....	179
第五节 旋流燃烧器阻力系数的测试.....	186
第六节 旋流燃烧器空气动力场测试.....	190
第十章 锅内流动特性实验.....	193
第一节 自然水循环实验.....	193
第二节 直流锅炉工作原理实验.....	195
第三节 并联平行管冷态流量偏差实验.....	200
参考文献.....	206

第一章 概 述

第一节 锅炉实验的目的与分类

一、锅炉实验的目的

锅炉实验是锅炉系列课程教学中的重要环节。锅炉实验的目的是：使学生通过锅炉实验测试技能的基本训练，掌握锅炉实验与测试的基本方法，学会常规测量仪器的使用方法，同时借助实验中的物理化学现象和数据，进一步深化对“锅炉原理”系列课程中有关概念和理论的理解。

二、锅炉实验分类

1. 根据教学要求，实验设备和现场条件分类

(1) 演示（示范性）实验。教师进行实验表演，学生在明确实验目的和实验原理的基础上，观察实验过程及在实验过程中所显示的具体化学、物理现象。

(2) 模仿性实验。学生在已组合好的试验台上，根据实验指导书规定的实验目的、实验原理、实验内容和实验方法，在教师的指导下动手做实验。模仿性实验的主要内容包括：①在学习指导书的基础上掌握实验原理、熟悉实验台及实验系统；②调整实验工况、建立实验条件；③记录实验过程、实验工况及测试数据等；④整理实验数据并进行必要的计算，绘制实验曲线，分析实验结果，编写实验报告。

(3) 综合性实验。综合性实验是指实验内容涉及本课程的综合知识或与本课程相关课程知识的实验。主要内容包括：学习与掌握实验目的、内容及实验原理，熟悉相应理论及相关实验设备、测试条件、现场条件等；建立试验条件；记录实验过程、试验工况及测试数据等；整理实验数据并进行必要的计算，绘制特征曲线，分析实验结果，编写实验报告。

(4) 设计性实验。设计性实验是指给定实验目的、要求和提供实验条件，由学生自行设计实验方案并加以实现的实验。学生根据实验任务书中的目的和要求，在教师指导下独立完成实验全过程。设计性实验主要内容包括：研究与掌握实验任务书中的目的、要求和实验原理，调查研究实验设备、测试条件、现场条件及有关技术资料和文献；设计实验方案、编写实验大纲；建立试验台，校验或标定测试表计和仪器；调整试验工况，建立试验工况，建立试验条件；记录实验过程、试验工况及测试数据等，整理实验数据并进行必要的计算，绘制实验特征曲线，实验结果分析，编写实验报告。

2. 按实验内容分类

按实验内容又可分为单项性实验和综合性实验。例如：煤的挥发分测定属于单项性实验；锅炉热平衡试验的目的是测定锅炉的热效率，而热效率是各项热损失指标的综合，故属于综合性实验。

3. 按影响实验的因素及水平分类

影响实验测定指标的各种物理、化学条件称为因素（或称因子）。一个因素的量级数称为水平数。某实验的因素可以是单因素的，也可以是多因素的。因素的水平可以是单水平的，也可以是多水平的。因此，按影响实验的因素及水平分类可分为单因素水平实验、单因

素多水平实验、多因素单水平实验和多因素多水平实验等。例如：锅炉热效率试验中，过量空气系数、煤粉细度、配风方式，以及一、二次风的风速和风温等都对热效率指标有影响，故称为多因素实验 $\eta_{gl} = [f(\alpha, R_{90}, v_{1(2)}, t_{1(2)}, \dots)]$ 。假如实验中规定在设计工况下测定锅炉的热效率，本实验就是多因素单水平实验；在燃烧调整试验中，如将过量空气系数、煤粉细度、一次风速等各因素取 2~3 个水平（如炉膛出口过量空气系数 α'' 取 1.1、1.2、1.3 三个水平，煤粉细度取 $R_{90} = 9\%$ 、 12% 、 15% 三个水平等）来进行组合实验，由此以求锅炉最佳热效率的燃烧调整试验，即是多因素多水平实验。

第二节 锅炉实验大纲的拟定

实验开始前，应先确定实验方案，编写实验大纲。实验大纲是实施实验的纲领性文件。实验结束，要整理实验数据，写出实验报告。实验报告是表明实验成果的文件。

一、确定实验方案

实验方案是实验的总体设想。拟定实验方案时，要根据现场的实际条件，确定实验所需设备和试验台、实验仪器和仪表、测试方法和技术要求、测试人员的组织（包括人员的素质和数量）、实验材料，提出实验所需经费预算等。制订的实验方案应满足安全、经济和测量精度的要求。

二、编写实验大纲

实验大纲是在完成实验方案设计后编制的，用于指导实验的全过程，故称为实验的纲领性文件。实验大纲一般包括以下基本内容。

- (1) 实验任务。明确实验对象、实验技术条件和技术目的。
- (2) 实验原理。说明实验理论根据和计算根据。
- (3) 实验装置。说明实验设备，仪器仪表，测量系统等。
- (4) 实验方法与要求。说明实验工况，实验技术条件和技术要求，实验的安全措施，实验的阶段和程序，测量项目与记录时间间隔，测量技术要求等。
- (5) 实验人员组成与分工。应根据实验操作、测量记录等工作组织实验人员并进行分工（包括：数量、技术素质要求），制订对实验人员的培训计划。
- (6) 实验进度计划。实验进度计划包括实验准备、实验日期、实验次数（包括预备性实验）、每次实验延续的时间、实验数据整理和计算完成日期、实验报告完成日期。

第三节 实验报告编写

实验报告是在分析实验过程中观察到的物理、化学现象，并对测定的数据进行整理、分析和综合的基础上，论述实验目的、实验条件和实验原理，以分析实验结果为重点内容的技术文件。实验报告要力求简单明了，说明问题。实验报告的格式可参照下列的格式。

（一）实验目的

指出实验所要达到的目的。

（二）实验原理

简述实验所依据的测定原理和所涉及的理论基础。

（三）实验装置

出实际的实验装置流程（测试系统）图，标出主要设备和监测仪表或设备的类型及规格。

（四）实验步骤

结合实验操作过程，简述测试方法、操作方法、操作步骤及过程等。

（五）实验数据及数据处理

采用表格的形式整理实测数据，依据实验原理完成数据的计算处理；计算步骤要全面清晰，类型相同的多组数据的处理，可以用一组数据处理的全过程为列进行整理，其他数据的处理、计算过程类同，予以省略，对整理后的实验数据与计算结果编制成汇总表，必要时还应绘制实验特征曲线。

（六）实验结果及讨论、分析

对实验工况、实验过程和实验结果进行分析、评价并提出建议。

- （1）给出实验结果。
- （2）讨论实验结果与理论值的一致性，分析误差原因。
- （3）回答实验有关的问题。
- （4）针对产生误差的原因，提出合理化建议。

实验报告的重点应放在实验数据的处理和实验结果的讨论、分析上。

第二章 实验数据的处理方法

第一节 误差的基础理论

一、误差概述

实验中, 由于实验方法和实验设备的不完善, 周围环境的影响, 以及人对实验现象的判断、测量仪器、测量方法等原因, 使实验测量值与真值之间总是存在一定的差异, 而测量本身多次测取数据也可能不完全一致, 在数值上的这种差异即为误差。

1. 精密度和准确度

测量中所测得的数值重现性的程度称为精密度, 也称为精确度。测量值与真值之间的符合程度称为准确度。图 2-1 (a) 所示为精密度和准确度很高; 图 2-1 (b) 所示为精密度很高, 但准确度不高; 图 2-1 (c) 所示为精密度和准确度都不高。可见精密度高, 其准确度不一定高, 但准确度高, 其精确度一定高。当然, 在实验测量中没有像靶心那样明确的真值, 而是要设法去测量未知的真值。

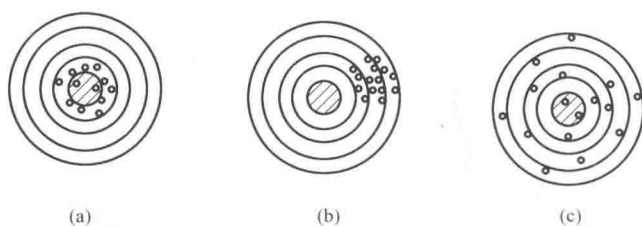


图 2-1 精密度及准确度示意图

(a) 精密度和准确度很高; (b) 精密度高, 准确度不高; (c) 精密度和准确度都不高

2. 真值与平均值

真值是一个理想的概念, 在实验中, 一个待测物理量的真值通常是客观存在但无法知道的, 由于实验误差难以避免, 故真值一般不能直接观测。但对某一物理量经过无限多次的测量, 出现的误差有正也有负, 而正、负误差出现的概率是不相同的, 因此, 倘若在无系统误差的情况下, 测量值的平均值相当接近于该物理量的真值。因此在实验科学中定义: 无限多次的观测值的平均值为真值。由于实验工作中观测的次数总是有限的, 由此得出的平均值只能近似于真值, 故这个平均值有时也称为最佳值。处理实验数据常用的平均值有下列几种。

(1) 算术平均值。设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各次的测量值, n 代表测定次数, 则算术平均值为

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n \quad (2-1)$$

(2) 几何平均值。将一组 n 个测量值相乘开 n 次方求得, 即

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \quad (2-2)$$

(3) 对数平均值。设两个量为 x_1, x_2 , 则其对数平均值为

$$\bar{x} = (x_1 - x_2) / \ln(x_1 / x_2) \quad (2-3)$$

(4) 均方根平均值。均方根平均值可按下式计算, 即

$$\bar{x} = \sqrt{\sum x_i^2 / n} \quad i = 1, \dots, n \quad (2-4)$$

使用不同的方法求得的平均值, 并不都是最佳值, 平均值计算方法的选择, 取决于一组观测值的分布类型。一般情况下, 观测值的分布属于正态分布, 该种类型的最佳值是算术平均值。因此, 选用算术平均值作为最佳值的场合是最为广泛的。

二、误差的分类

根据误差的描述方法、误差来源和表现形式不同, 误差有多种分类方法, 常用的有下列几种。

1. 按性质和产生的原因分类

在定量分析中, 根据误差性质及产生的原因不同, 可以分为系统误差和随机误差。

(1) 系统误差。系统误差是在分析过程中由于某些固定的、经常性的因素所引起的, 因此对测定结果的影响比较恒定。系统误差具有单向性 (即测定结果系统偏高或偏低, 误差的符号和大小恒定或按一定的规律变化)、重现性 (即在相同条件下进行同样的测定时会重复出现) 和可测性 (即在一定条件下, 因其大小、正负可用适当方法测量出来, 找到产生的原因, 可设法进行校正或加以消除)。系统误差是定量分析误差的主要来源, 对测定结果的准确度有较大影响。系统误差具有一定的规律和重复性, 经过校正可以消除。

(2) 随机误差。随机误差是由于测量过程中许多偶然性的因素, 以及某些随机因素造成的误差, 又称为偶然误差, 或不可测误差。由于大量偶然因素造成的每次测量结果之间的误差, 误差难以估计, 但其服从统计规律。在平行测量过程中, 即使消除了系统误差的影响, 所得数据仍然参差不齐, 这就是随机误差的影响结果。例如, 测定时周围环境温度、湿度、气压等外界条件的突然变化, 仪器性能的微小变化等不确定因素都会引起随机误差。随机误差是不可避免的, 即使是一个优秀的分析人员, 很仔细地对同一试样进行多次测定, 也不可能得到完全一致的分析结果。随机误差时大时小, 时正时负, 表面上看, 随机误差的产生似乎没有规律, 但是通过对多次平行测量的随机误差进行统计学分析发现, 随机误差的分布遵循一般的统计规律, 即绝对值大小相等的正、负误差出现的概率相等; 小误差出现的概率大, 大误差出现的概率小; 特别大的误差出现的机会非常小。消除系统误差后, 多次测定结果的算术平均值接近于真实值。因此, 分析测定时有必要进行平行实验。

随机误差的大小决定分析结果的精密度。在消除了系统误差的前提下, 如果严格操作, 增加测定次数, 分析结果的算术平均值就越趋近于真实值, 即采用“多次测定, 取平均值”的方法可以减小随机误差。

2. 按误差的描述方法分类

按误差的描述方法可分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差。测量值与真值之差的绝对值称为绝对误差。其计算公式为

$$\Delta = |x_x - x_r| \quad (2-5)$$

式中 x_x ——测量值, 是检测仪表的指示值;

x_r ——真值, 被测量应有的数值, 通常用更精确仪表的指示值近似实际值;

Δ ——绝对误差。

(2) 相对误差。绝对误差与真值之比称为相对误差, 通常用百分数表示, 即

$$\varepsilon = \Delta / x_r \times 100\% \quad (2-6)$$

实际中有时还使用引用误差（即引用相对误差） ϵ_r 和最大引用误差 $\epsilon_{r\max}$ ，即

$$\epsilon_r = \Delta / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100\% \quad (2-7)$$

$$\epsilon_{r\max} = |\Delta_{\max}| / (x_{\max} - x_{\min}) \times 100\% \quad (2-8)$$

式中 $x_{\max}$ ——仪表量程的上限值；

$x_{\min}$ ——仪表量程的下限值；

$|\Delta_{\max}|$ ——最大绝对误差的绝对值。

也就是说，引用误差是绝对误差与仪表量程的百分比，而最大引用误差是量程范围内各点中最大绝对误差的值与仪表量程的百分比。

3. 按误差来源分类

按误差来源来分，测量结果的误差可分为装置误差与方法误差。

(1) 装置误差。由于仪表元件质量和装配工艺不可能绝对符合要求，因而仪表本身不可避免地存在着误差，该误差称为装置误差，其大小取决于制造工艺。

(2) 方法误差。由于仪表设计时的测量原理不十分完善或使用仪表方法不恰当而导致的误差称为方法误差。对检测仪表使用方法不当有可能产生很大的误差。

4. 按误差出现的时间分类

按误差出现的时间，测量误差又可分为稳态误差与动态误差。

(1) 稳态误差。又称为静差，即当系统从一个稳态过渡到新的稳态，或系统受扰动作用又重新平衡后，系统可能会出现偏差，这种偏差称为稳定误差。

(2) 动态误差。动态误差是指被测信号变化时由于仪表惯性而不能准确跟踪信号变化，使示值产生所谓的滞后误差。一般情况下，信号稳定后，动态误差最终会消失。但是在动态测试或者变换链比较长，仪表各个环节的惯性时间比较大时，必须充分考虑动态误差的影响。

除此之外，还有由于测试操作人员不慎造成的粗大误差，又称疏忽误差。其大小远远超过系统误差和随机误差范围，严重歪曲测量结果，在实验数据处理时应该舍去。造成粗大误差的原因往往是操作人员对仪器不熟悉，因而使用不当。工作条件突然变化也可能导致粗大误差。

三、误差分析和处理

实验过程中的误差存在是不可避免的，但要使测量结果正确，应尽量减少误差的影响。首先要分析出现误差的原因，然后逐一克服，就能在一定程度上减少误差。一般有如下处理方法。

1. 从引起误差的根源入手进行分析和处理

该方法是从根本上消除误差的方法。测量人员应熟悉测量设备，尽量选用仪表元件的质量和装配工艺符合要求的仪表；尽量使测量的环境条件充分满足仪表的使用条件，认真操作，严格调试，采用合理的测试方法等。

2. 在测量结果中加入修正值进行处理

由于仪器、仪表结构本身固有的缺陷，会造成一定的误差。因此，需预先用标准仪器来确定测量仪表的修正值（修正值等于修正的测量结果的绝对误差，但正、负号相反），将实际测量得值加上相应的修正值，即可得到正确的测量结果。对各种外界影响因素（温度、湿度、频率、电磁场、重力加速度及其他因素）力求确定其修正公式、修正曲线和修正表格，

以便修正测量结果。

3. 测量过程中选择适当的测量方法

测量过程中选择适当的测量方法,可使误差抵消而不至于带入测量结果中。如测取数值时,要在仪表显示数值相对稳定后,读取结果。

4. 剔除严重不合理和明显误差的结果

认真分析测取的实验结果,对严重不合理和明显误差的结果,应舍去。

第二节 实验数据的记录及整理

一、数据整理的目的

实验过程中记录的测量数据是实现实验目的的基础。一般情况下,应当对实验直接测量的数据进行整理,即进行编序、筛选、修正和平均后,才能用于计算实验和绘制特征曲线。

实验数据的正式整理是在测试结束之后进行的。可是,在实验测试过程中或测试刚结束时应进行数据的预整理,以便及时评定实验的正确性和可靠性,一旦发现问题可及时纠正或补做。预整理是局部的、粗略的、简明的初步整理。

二、数据的正确记录

(1) 实事求是地记录实际测量的每一个实验数据。

(2) 记录数据尽量用表格,记录的数据应整齐准确,小数点位对齐。

(3) 位数多的数值用科学记数法记录。

三、数据整理的一般程序

实验记录数据的整理,一般按以下程序进行:①初筛实验记录数据;②将数据编号并进行必要的换算和修正;③删去疏忽误差和偶然误差偏大的数据;④计算实验指标和编制汇总表;⑤绘制特征曲线。

1. 初筛测试记录数据

(1) 删去偏离工况的数据。测试期间,由于各种原因,实验工况会发生波动。在允许波动范围内的工况是有效的,超过允许波动范围的工况则无效。无效数据应删去。

假设表征实验工况的参数为 x ,其允许波动范围为

$$\Delta x_1 = \frac{x_{\max} - x}{x} \times 100\% \quad (2-9)$$

$$\Delta x_2 = \frac{x_{\min} - x}{x} \times 100\% \quad (2-10)$$

由式(2-9)和式(2-10)可算出允许的最大参数 $x_{\max}$ 和最小参数 $x_{\min}$,即

$$x_{\max} = \left(1 + \frac{\Delta x_1}{100}\right)x \quad (2-11)$$

$$x_{\min} = \left(1 + \frac{\Delta x_2}{100}\right)x \quad (2-12)$$

所有 $x > x_{\max}$ 和 $x < x_{\min}$ 的工况都应删去,当然,对应的测试记录数据也应删去。这样,可能使有效实验工况段中的个别点也被删去,如果删去的点数超过有效工况段全部实验点的20%,则该段工况无效。

(2) 删去偏离一致性时间的数据。所有有效记录数据和工况观察记录的时间必须协调一致, 偏离一致性时间的数据应删去。

通过初筛后的数据应重新排列序号和制成表格。

2. 数据的换算和修正

(1) 数据的换算。对物理状态或单位不一致的各物理量要进行换算, 如: 非标准状态换算成标准状态, 压力单位换算, 温度单位换算, 时间单位换算等; 各记录表计的记录曲线坐标单位要换算成统一的单位, 时间按测量的数据要算出其目标量 (如由测量的动压值计算出流量)。

(2) 数据的修正。在测量系统中, 测量仪器不完善、仪表装置位置等影响会引起测量误差, 如玻璃温度计刻度标尺和中心毛细管不均匀造成的测量误差, 压力表与测点间位置高度差造成的测量误差。该误差具有恒定值 (正或负), 可用定值常数对其修正, 将误差消除。

3. 删去疏忽误差或偶然误差偏大的数据

测量记录数据时, 由于测试人员疏忽读错或测量方法不正确等造成的测量数据误差称疏忽误差, 其值常大于允许误差, 应删去。偶然误差是由于仪器的内摩擦、零位位移或工况波动等引起的。偶然误差大于允许值的数据也应删去。

删去疏忽误差或偶然误差偏大的数据, 可按下述方法进行 (假设检查数据为 x)。

第一步, 在一个工况阶段内对重复测量的数据取其算术平均值, 即

$$x_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-13)$$

式中 n ——重复测量次数;

x_i ——第 i 次测定值。

第二步, 计算偏差平方和, 即

$$\sum_{i=1}^n (x_{pj} - x_i)^2 \quad (2-14)$$

第三步, 计算均方根误差, 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{pj} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2-15)$$

最后根据下式判别式判别:

(1) $(x_{pj} - x_i) \leq \sigma$ 时, x_i 留用;

(2) $(x_{pj} - x_i) > \sigma$ 时, x_i 删去。

4. 数据计算和编制汇总表

测试记录数据通过以上要求整理后留下的数据称为有效数据。逐个计算一个实验工况的有效数据的算术平均值, 即

$$a_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (2-16)$$

式中 a_i ——一个工况下第 i 个有效数据;

n ——一个工况下的有效数据个数。

一个工况下如有多个类别的测试数据,则应分别计算其平均值。最后,利用整理后的数据,计算实验指标值。

5. 绘制特征曲线

多工况实验的重要因素与指标之间的函数关系,或时间、距离等参数与重要因素或指标之间的函数关系可绘制成曲线图,也称特征曲线,如图 2-2 所示。特征曲线可直观地示出有关参数的变化趋势和特性,如工质温度与时间的函数关系、过量空气系数与锅炉热效率的函数关系等,都可用特征曲线表示。

绘制特征曲线要注意以下几点:

(1) 绘制特征曲线要求仅有一个独立变量,其余的系数都保持不变。例如绘制锅炉效率特性曲线 $\eta_{gl} = f(\alpha_1'')$ 特征曲线时,炉膛出口过量空气系数 α_1'' 为独立变量(因素),影响 η_{gl} 的其余参数(如锅炉蒸发量 D 、煤粉细度 R_{90} 、一次风率 r_1 等)都保持不变。

(2) 由于测量误差、读数误差和工况的波动,不可能使所有试验点都落在特征曲线上,但应有 75% 以上的试验点落在曲线上才是正确的(如图 2-3 所示)。

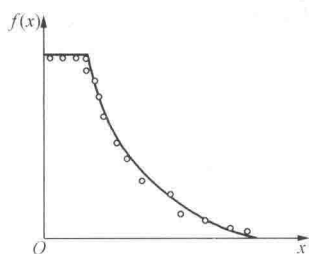


图 2-3 应有 75% 以上试验点落在特征曲线上

(3) 绘制特征曲线时,要求绘制者不仅对所表示的物理过程有正确、明晰的概念,也要熟悉某一种条件对测量产生的影响,使曲线有正确的规律。

(4) 绘制特征曲线时,坐标的比例尺选择要适当。比例过小,绘出的曲线将过于平坦,比例过大,又会导致图上的点过于分散,以致难以确定试验点分布的规律。

四、实验数据的记数法与有效数字

实验测量结果通常用数字表示,而这些数字代表了拟测量值的近似值。在整理实验数据时,有人认为一个数值中小数点后面的位数越多越准确,或者计算结果保留的位数越多越精确。实际上,这两种想法都是错误的。前者错在没有弄清小数点的位置仅与所用测量单位的大小有关,而与测量的准确度无关。例如:某一长度的数据为 21.9cm 和 0.219cm,其准确度是完全相同的。后者认识的错误,是不了解在一定的实验条件下,所测得的数据只能具有一定的精确度,该精确度与所用测量仪表等因素有关。为了掌握位数的正确取法,做到测量结果的正确记录和数据的正确处理,就要应先弄清有效数字的概念及有效数字的计算法则。

有效数字是指用来反映一个数大小的任意数,但它应该是准确无误的数字(末位数除外)。

1. 有效数字的表示法

(1) 一个近似值,四舍五入到哪一位,就说该近似值精确到哪一位,此时,从左边第一个非零的数字起,至末尾一位数字为止的所有数字,都称为这个数的有效数字。

(2) 用仪表测得且具有某种计量单位的读数,连同末尾估计的一位数字在内,均为有效数字。如 0.187、0.0187,近似值左边为零,不是有效数字,故有效数字为三位;又如 187000、1870,后面的零是作为定位用的,故有效数字也为三位。

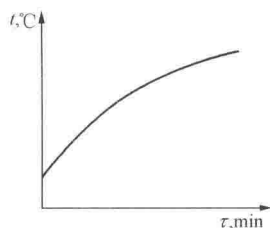


图 2-2 特征曲线示例

$t = f(\tau)$ 特征曲线

t —工质温度; τ —时间

(3) 小数点右边末尾的零为有效数字。如 1.60、3.00，表示近似值准确到 0.001 位，故有效数字为三位。

必须特别注意：1.60 与 1.6 是不等的值。1.60 表示大于或等于 1.595 而小于 1.605；1.6 表示大于或等于 1.55 而小于 1.65。由此可以看出，1.60 比 1.6 的准确度高，故 1.60 后面的“0”不能随意舍掉。

(4) 科学记数法。把一个绝对值小于（或者大于等于 10）的实数记为 $A \times 10^n$ 或 $A \times 10^{-n}$ 的形式（其中 $1 \leq |A| < 10$ ），这种记数法称为科学记数法。 A 表示有效数字， n 代表次方。如 187000 可写成 1.87×10^5 ；0.0000187 可以写成 1.87×10^{-5} 。

2. 有效数字的计算法则

(1) 当有效数字确定后，其余数字一律舍去。舍弃的办法可按四舍五入或偶舍奇入的原理。一般采用偶舍奇入的原则。

例：0.235、1.34、1.459、1.368、1.247 的和为：

$$0.235 + 1.34 + 1.459 + 1.368 + 1.247 = 5.649$$

若以有效数字最小的 1.34 为准，按四舍五入的原则，上组数值为 0.24、1.34、1.46、1.37、1.25，则 $0.24 + 1.34 + 1.46 + 1.36 + 1.25 = 5.66$ ，使误差增大。

按偶舍奇入的原则，上组数值为 0.24、1.34、1.46、1.36、1.25，则 $0.24 + 1.34 + 1.46 + 1.36 + 1.25 = 5.65$ 。由于有舍有入，基本均匀，使误差不增大。

(2) 加减计算中，各数值所保留的小数点的位数，应与其中各数小数点后位数最少的相同。

如：13.65 + 0.0082 + 1.632，应改为 $13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$ 。

(3) 在乘除计算中，各数值保留的位数，以有效数字最少为标准，所得积或商的准确度，不大于精度最小者。

如：0.0125 × 20.04 × 1.0579 中最少有效数字为三位，故应改为 $0.0125 \times 20.0 \times 1.06 = 0.265$ 。

(4) 取对数时，对数的定值部分与原数值有相同的有效数字，定位部分不计入内。

如：lg15.35 = 1.1861

$\downarrow$ 定值部分
 $\downarrow$ 定位部分

原数值的有效数字为四位，故定值的有效数字也应该是四位。

(5) 在四个数以上的平均值计算中，平均值的有效数字可增加一位。

(6) 不含误差的数值（如倍数）可假定其有效数字为无穷位，计算时不受上述法则的限制。

如：125 × 3.3 = 412.5，若 125 为无误差的数值，不要限定其有效数值的位数，计算结果应以准确度最差为准定位。

五、数据记录的内容与测试记录表

根据实验目的和任务、测量原理等要求，实验数据记录通常包括：实验环境的有关数据、实验设备的有关数据和操作的有关数据三个方面的内容。如离心泵特征曲线的测定，实验数据记录的内容为：①与环境有关的数据，如水温等；②与设备有关的数据，如离心泵型号，进、出口管的直径，两压力测点截面间垂直距离，流量计的种类和型号，涡轮流量计系

数 ξ , 压力表的形式, 真空表的形式, 功率表的规格等; ③与实验操作有关的数据, 如离心泵泵轴的转速, 涡轮流量计的频率或孔板流量计、U形管压力计指示液液面高度的差值等, 泵进口真空表压力, 泵出口表压力, 功率 P (或 P_e) 的读数等。

为了获得完整可靠的数据, 应事先制订测试数据记录表。测试数据记录表是在实验过程中记录数据的一种表格形式, 其完整性和合理性是做好数据整理工作的必要条件。记录表格可由实验者根据实验内容、实验目的和测试项目等制订。测试数据记录表应包括各测量的记录时间、数据及单位, 测点位置, 测试工况等内容。

第三节 实验数据的分析处理

一、实验数据整理方法

实验数据整理的一般方法有列表法、绘图法和回归分析法。

1. 列表法

将函数值随自变量变化测得的数据列在表格中。此方法的优点是简明实用。

(1) 列表法的要点。

1) 表格名称要简明、完备, 各项的名称、单位要清晰。主项一般是实验中可直接测量的物理量, 如压力、温度等; 副项表示因变量, 如热容量、导热系数等。

2) 主项中的自变量应按递增或递减的规律排列, 同一项目有效数字的位数应一致, 且应用科学计数法表示数据。

3) 自变量的间距应选适当, 即两相邻数值之差不可过大或过小。

4) 关于有效位数, 一般均假定自变量无误差。函数的有效位数则取决于实验的精确度。

5) 原始数据最好与处理结果并列在一张表上以做参考, 并在表下注明处理方法。

(2) 列表的插值法。

在实际测量中, 测量的次数往往是有限的, 也就是说测量的结果不可能是连续的, 而在实际使用中出现的变量往往是随机的, 其值在表中可能找不到, 因此需要用内插法获取。常用方法有比例法、多项式差分法。

1) 比例法。当内插间距较小时, 可把对应的函数值变化视为线性, 如图 2-4 所示, 当 $x_1 - x_2 = \Delta x$ 相对较小时, 与 x_1, x_2 相应的 a, b 之间的函数曲线可视为直线, 因而 x_{1-2} 的对应函数值 y_{1-2} 为

$$y_{1-2} = y_1 + \frac{x_{1-2} - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) \quad (2-17)$$

当 $y = f(x)$ 为非线性函数时这种方法是近似的, 其误差随插值间距及函数形式而变。当欲得较准确的值时应采用多项式差分法。

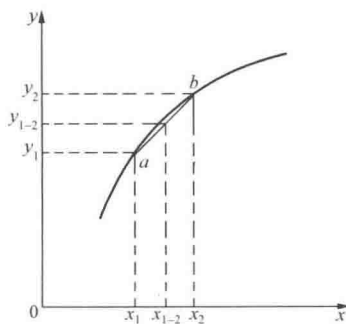


图 2-4 比例法示意图

2) 多项式差分法。当实验数据 x, y 之间的关系可用多项式表示时, 可求出多项式的各阶差分。表 2-1 所示为函数关系为 $y = x^2$ 的实验数据 x, y 。

分别求出函数的一阶差分 Δy 、二阶差分 $\Delta^2 y$ 和三阶差分 $\Delta^3 y$, 从表中可以看出其二阶