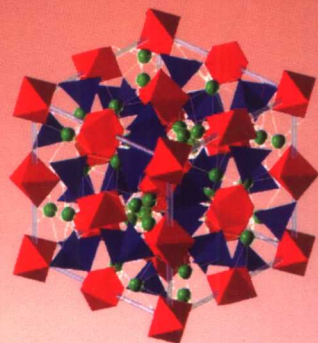


WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

材料工程研究 与测试方法

曲祖源 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

材料工程研究与测试方法

主 编 曲祖源

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

【内容简介】

全书共分10章。第1章至第5章,介绍工程研究方法。主要包括:工程实验数据处理方法,模型研究理论基础,硅酸盐热平衡分析方法,工程焓分析方法及反求工程研究方法。

第6章至第10章,主要介绍工程测试技术。主要包括:粉体测试技术及仪器,温度测量,压力及流动测试技术,流量的测量,测试技术新技术、新方法。

为便于学生及读者更好地领会、掌握工程研究的基本方法和工程测试的基本技术。便于理论联系实际,增强解决工程实际问题的能力书中附有例题和习题。

本书可作为高等院校材料工程专业本科生及相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料工程研究与测试方法/曲祖源主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2005.10

ISBN 7-5629-2332-9

I. 材…

II. 曲…

III. ①材料科学-研究方法-高等学校-教材 ②工程材料-试验-方法-高等学校-教材

IV. TB30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 005300 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路 122 号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:20.625

字 数:512 千字

版 次:2005 年 10 月第 1 版

印 次:2005 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:30.00 元

普通高等学校材料科学与工程类专业 新编系列教材编审委员会

顾 问：郭景坤 袁润章 范令惠 杨南如
胡道和 王民权 岳文海 曹文聪

主任委员：张联盟

副主任委员：徐德龙 郑治祥 雷绍锋

委 员：(以姓氏笔画为序)

万发荣	马保国	王国梅	王培铭	文梓芸
叶卫平	叶枝荣	叶 菁	田道全	曲祖元
刘亚云	刘 军	孙成林	吴建青	陈 文
杨长辉	钱觉时	钱春香	高建明	徐秋林
黄佳木	黄学辉	程晓敏	程 新	谢峻林
曾令可	葛 勇	潘 伟	薛理辉	

秘 书 长：田道全

总责任编辑：徐秋林

出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和帮助下,经过大量的调研,组织国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

教材体系体现人才培养目标——本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业的课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整合后合,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章内容提要、本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学需要,又便于学生自学。

教材内容反映教改成果——本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

教材出版实现立体化——本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业的教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为一套开创性的系列教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

武汉理工大学出版社

前 言

材料学通常涉及材料科学和材料工程两个领域。这两个领域相互关联、相互渗透而研究的目的、方法和涉及的测试技术又有所区别。

材料科学研究材料的微观与宏观性能。研究材料的性能与材料结构之间的关系。研究材料本质的发现、探索、分析等。通过研究提供材料结构的客观描绘或模型,对材料结构与性能之间的关系提供合理、客观的解释。它涉及的测试技术主要是借助近代测试技术、测试仪器如电子探针、扫描电镜、能谱等近代测试仪器来实现,它的制造设备主要是各种工业电炉等。

材料工程一方面要解决从实验室里研究的样品变成现代工业生产线上的合格产品所要面临的各种技术问题。另一方面要解决企业生产过程所出现的各种技术问题。以确保生产过程的连续、稳定和正常。同时要解决企业生产的优质高产、节能降耗及客观评价企业的生产能力、生产水平等问题。

材料工程研究对象主要是企业的实际生产线及各类工业窑炉。硅酸盐工厂高温、粉尘、噪音大,其测试技术主要属于工程测试。利用各种工程测试仪表测试工业设备的粉尘、流量、压力、温度等技术参数。

本教材主要为从事工程专业的本科生解决工程问题而编写,介绍基本的工程研究方法及工程测试技术。

本教材也是为适应 21 世纪材料工程技术的发展和人才培养的需要而编写,它可作为材料工程专业本科生及相关专业的教材。适用教学时数为 40~60 学时。

本教材分为两部分:工程研究方法和材料工程测试技术。

工程研究方法包括:工程实验数据处理方法,模型研究理论基础,硅酸盐热平衡分析方法,工程焓分析方法,反求工程研究方法。

工程测试技术包括:粉体测试技术及仪器,温度测量,压力及流动测试技术,流量测量技术,测试技术新方法。

本教材的主要特色是,在加强基础理论、基本概念阐述的基础上,加强应用,注意理论联系实际,并通过大量应用实例的分析达到学以致用、举一反三的目的。通过本教材的学习,可以提高学生在工程领域研究分析和解决实际问题的能力。

工程研究方法部分是曲祖源教授长期从事本科生、研究生教学和科研实践的总结和经验积累的结果。

工程测试技术部分是简森夫副教授在南京工业大学《工程测试技术》教材的基础上,按照材料工程专业本世纪发展需要和要求,结合自己的工程测试实践而增加的新的内容。其中许多材料来自新的科研报道资料。

本书主编为武汉理工大学曲祖源教授。编写的具体分工是:1、2、3、4、5 章为曲祖源教授撰写;6、7、8、9、10 章为南京化工大学简森夫副教授撰写。

在编写过程中得到武汉理工大学出版社徐秋林、王忠林的支持,在此表示感谢。

编 者

2004 年 4 月

目 录

1 工程实验数据处理方法	(1)
1.1 实验数据的误差及表示方法	(1)
1.1.1 实验数据的真值和平均值	(1)
1.1.2 误差的定义及分类	(2)
1.1.3 实验数据的有效数字及其表示方法	(2)
1.1.4 系统误差的简易判定准则	(3)
1.1.5 消除或减少系统误差的方法	(3)
1.2 工程实验数据的整理方法	(4)
1.2.1 列表法	(4)
1.2.2 图示法	(4)
1.3 实验数据的回归分析方法	(5)
1.3.1 一元线性回归	(6)
1.3.2 二元线性回归	(23)
习题	(26)
2 模型研究理论基础	(28)
2.1 国际单位制及法定计量单位	(28)
2.1.1 国际单位制	(28)
2.1.2 法定计量单位	(32)
2.2 量纲分析理论	(33)
2.2.1 量纲和无量纲量	(34)
2.2.2 物理量的量纲表达式	(35)
2.2.3 参量量纲的无量纲乘积数目	(36)
2.2.4 量纲分析方法	(38)
2.3 相似理论	(41)
2.3.1 相似的概念及相似准数	(42)
2.3.2 相似三定理	(47)
2.3.3 相似准数的导出方法	(51)
2.3.4 相似准数的转换原则	(53)
2.4 物理模型研究方法	(54)
2.4.1 物理模型的分类方法	(54)
2.4.2 物理模型的设计	(55)
2.4.3 相似模型研究的应用范围及可靠性	(59)
2.4.4 实体模型与近似模化研究方法	(60)
习题	(63)

3 硅酸盐热平衡分析方法	(65)
3.1 概论	(65)
3.2 水泥工业热平衡测试系统的确定原则	(65)
3.3 热平衡测试前的准备工作	(66)
3.4 热平衡计算书的编写要求	(66)
3.5 两大平衡计算	(67)
3.5.1 物料平衡计算	(67)
3.5.2 热量平衡计算	(71)
3.6 旋风预热器热平衡计算	(76)
3.6.1 收入热量项目	(77)
3.6.2 支出热量项目	(77)
3.7 增湿塔两大平衡计算	(79)
3.7.1 增湿塔物料平衡计算	(79)
3.7.2 增湿塔热平衡计算	(79)
3.8 回转烘干机两大平衡计算	(81)
3.8.1 回转烘干机物料平衡计算	(81)
3.8.2 烘干机热平衡计算	(82)
3.9 回转窑热平衡计算中单项参数的测定及计算	(84)
3.9.1 熟料产量、温度、成分的测定及计算	(84)
3.9.2 生料消耗量、温度、成分的测定	(84)
3.9.3 燃料消耗量、温度、成分及发热量的测定及计算	(84)
3.9.4 进入窑系统空气的体积、温度、静压的测定与计算	(86)
3.9.5 废气的体积、温度、压力及成分	(88)
3.9.6 气体湿含量的测定方法	(88)
3.9.7 含尘浓度、飞灰量和窑回灰量的测定与计算方法	(88)
3.9.8 冷却机烟囱排风量及排尘量的计算及测定	(88)
3.9.9 冷却水量的测定	(89)
3.9.10 表面散热损失的测定及计算	(89)
3.10 熟料烧成的综合能耗计算	(90)
3.10.1 熟料烧成的综合能耗	(90)
3.10.2 各种能源消耗量	(91)
3.10.3 各种能源综合计算原则	(91)
3.10.4 熟料烧成的综合能耗分类与计算	(91)
3.11 热平衡分析的几项指标	(91)
3.11.1 单位能耗	(91)
3.11.2 综合能耗	(92)
3.11.3 产品单位电耗	(92)
附件 3-1 熟料形成热的理论计算方法(GB 4179—84)	(93)
附件 3-2 中华人民共和国国家标准	(95)

附件 3-3 中华人民共和国国家标准	(102)
附件 3-4 中华人民共和国国家标准	(113)
习题	(128)
4 工程熵分析方法	(129)
4.1 能量分析方法简介	(129)
4.1.1 焓分析法——热平衡分析法	(129)
4.1.2 熵分析法	(130)
4.1.3 熵分析法	(130)
4.2 熵分析的基本概念	(130)
4.3 熵值的基本计算方法	(131)
4.3.1 热量熵和冷量熵的计算方法	(132)
4.3.2 物流熵和物理熵的计算	(134)
4.3.3 化学熵的计算方法	(136)
4.3.4 混合物熵的计算	(150)
4.4 熵平衡与熵损失	(153)
4.4.1 熵损失的概念	(153)
4.4.2 各类熵损失的计算方法	(154)
4.5 熵分析的评价指标	(157)
4.5.1 用能过程的评价指标	(158)
4.5.2 单元过程设备的评价指标	(159)
4.5.3 生产系统的评价指标	(161)
习题	(186)
5 反求工程研究方法	(187)
5.1 反求工程研究方法概论	(187)
5.2 反求设计方法	(188)
5.3 功能的分析	(189)
5.4 功能元	(191)
5.4.1 功能元的分类	(191)
5.4.2 功能元的求解	(192)
5.5 功能的评价方法	(193)
5.5.1 01 评分法	(194)
5.5.2 04 评分法	(195)
5.5.3 定量评分法	(196)
5.6 求系统的原理解	(198)
5.7 系统最佳原理方案解的选择方法	(199)
5.7.1 矩阵评分法	(199)
5.7.2 给分评价法	(200)
5.7.3 加权评分法(有效值法)	(202)
5.8 功能的设计方法	(203)

5.9 软件反求设计方法	(203)
5.9.1 软件反求设计程序	(204)
5.9.2 产品规划反求	(204)
5.9.3 原理方案的反求	(207)
5.9.4 结构方案的反求	(209)
5.10 实物反求设计方法	(211)
5.10.1 实物反求设计的过程	(211)
5.10.2 实物的功能分析及测试	(212)
5.10.3 实物的分解与测绘	(212)
5.10.4 零件技术条件的反求	(213)
习题	(214)
6 粉体测试技术及仪器	(215)
6.1 粉体浓度测试方法	(215)
6.1.1 等速取样	(217)
6.1.2 滤纸光散射法	(218)
6.1.3 粉体浓度测量的其他方法	(220)
6.2 粉体粒度测试技术及其应用	(221)
6.2.1 筛分粒度测试	(222)
6.2.2 沉降粒度测试	(224)
6.3 比表面积测量	(229)
6.3.1 比表面积	(229)
6.3.2 气体透过法测量比表面积	(229)
6.3.3 氮吸附法测量比表面积	(233)
习题	(239)
7 温度测量	(240)
7.1 温度测量的基本方法	(240)
7.1.1 常用测温方法	(240)
7.1.2 测温传感器	(241)
7.2 接触式测温	(243)
7.2.1 固体内部温度测量	(243)
7.2.2 固体表面温度测量	(244)
7.2.3 流动介质温度测量	(245)
7.3 辐射式测温	(253)
7.3.1 辐射测温的基本原理	(253)
7.3.2 光学高温计	(254)
7.3.3 全辐射高温计	(256)
7.3.4 比色高温计	(257)
7.4 其他测温方法	(258)
7.4.1 用物质的熔融点来测量温度	(258)

7.4.2 根据物质的颜色来测量温度	(258)
习题	(260)
8 压力及流动测试技术	(262)
8.1 压力	(262)
8.2 压力测量方法分类	(263)
8.3 压力测量装置	(264)
8.3.1 机械式测压	(266)
8.3.2 应变式及压阻式压力传感器	(266)
8.3.3 振弦式差压变送器	(268)
8.4 静压的测量与静压管	(269)
8.4.1 壁面静压孔	(269)
8.4.2 静压管	(270)
8.5 工程压力测量	(272)
8.5.1 压力测点位置的选择	(272)
8.5.2 取压装置的形式和安装	(273)
8.6 总压管与总压的测量	(275)
8.7 动压管与气流速度的测量	(275)
8.7.1 动压管	(275)
8.7.2 气流速度的测量	(277)
8.7.3 毕托管的标定系数	(277)
8.8 三元测压管与流场的测量	(278)
8.8.1 三元测压管	(279)
8.8.2 球形五孔三元测压管的测量方法及校准曲线	(280)
8.8.3 空间气流速度矢量的测定	(282)
8.8.4 不转向测量法	(283)
习题	(285)
9 流量的测量	(287)
9.1 流量测量的基本概念	(287)
9.1.1 流量	(287)
9.1.2 流量测量方法分类	(288)
9.1.3 流量计的特性	(289)
9.2 测速法流量测量	(291)
9.2.1 毕托管测速法	(291)
9.2.2 均速管	(293)
9.3 粉体流量测量	(294)
9.3.1 粉粒体冲量式流量测量	(294)
9.3.2 压差法流量测量	(296)
9.3.3 用科里奥利力粉体流量计测量粉体流量	(297)
9.3.4 环状天平计重法流量测量	(298)

9.3.5 其他粉体流量测量方式	(298)
习题	(300)
10 测试技术新技术新方法	(302)
10.1 粒子图像测速法	(302)
10.2 过程层析成像技术	(304)
10.2.1 测量原理	(305)
10.2.2 电容层析成像技术	(306)
10.2.3 火焰温度层析成像技术	(309)
10.3 粉料停留时间测量	(309)
10.3.1 基本测试原理	(309)
10.3.2 测量系统的构成	(310)
10.3.3 应用实例	(313)
习题	(315)
参考文献	(316)

1 工程实验数据处理方法

本章提要

本章主要介绍工程实验数据误差估算及分析的有关基本概念,如误差的表示方法,系统误差的简易判定准则等。重点介绍回归分析方法,侧重介绍一元线性回归,一元非线性回归及二元线性回归方法。通过本章的学习,掌握一般工程实验数据的处理方法。

1.1 实验数据的误差及表示方法

实验研究过程,由于所选用的测试仪器及人的实验水平等各方面的因素,获得的实验数据不可避免地存在一些误差。如何减少实验误差,如何处理实验数据以提高实验数据的准确性,以及提高实验研究的质量,是大家非常关心的问题。下面就有关的基本概念,扼要地加以介绍。

1.1.1 实验数据的真值和平均值

一般定义实验数据的真值为:它是指某物理量客观存在的确定值。真值是无法直接测出的一个理想值。我们获得的实验数据只是接近于真值。为使获得的实验数据更接近于真值,通常用算术平均值、均方根平均值、几何平均值、对数平均值对实验数据进行处理,使实验数据与真值之间的误差更小,更接近。

1.1.1.1 算术平均值

假设各次测量的实验数据为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 则其算术平均值的计算公式为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

当所测出的实验数据呈正态分布时,用算术平均值来表示较为方便。

1.1.1.2 均方根平均值

计算式为

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (1.1)$$

1.1.1.3 几何平均值

计算式为

$$\bar{x}_n = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \dots x_n} \quad (1.2)$$

可以用对数表示为

$$\lg \bar{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n} \quad (1.3)$$

当实验数据给出的曲线呈对称形式,并选用对数坐标时,用几何平均值来表示。

1.1.1.4 对数平均值

若测出的实验数据为 x_1, x_2 时,对数平均值的计算公式表示为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1.4)$$

1.1.2 误差的定义及分类

误差定义为实验测量值与真值之差。误差的大小,表示每一次测量值相对于真值不符合程度的大小。按误差产生的原因及性质,分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

1.1.2.1 系统误差

由某些固定不变的因素所引起的误差称为系统误差。该误差的特点是在相同条件下进行多次测量,误差数的大小保持恒定;当条件改变后误差呈一定规律变化。

产生系统误差的原因有:测量仪器的因素、环境因素、测量方法的因素和测量人员的水平与测量习惯等因素。

1.1.2.2 随机误差

由某些不易控制的因素引起。特点是相同条件作多次测量,但误差值时大时小,无规律性。

1.1.2.3 粗大误差

由于测量人员的粗心大意,仪器不正常等原因引起。这类误差与真值相差很大,应当在整理数据时加以剔除。

误差的表示方法,有绝对误差和相对误差。也可以用精密度、正确度、准确度等概念来加以表示,本节不作介绍,有兴趣的读者可参阅书后所附的参考文献。

1.1.3 实验数据的有效数字及其表示方法

实验数据的有效数字,通常与所选用的测量单位有关,也与测量仪器的准确度有关。

有效数字用科学记数法来表示。通常把有效数字写成一个小数与相应的 10 的幂的乘积,则此时乘号前面的数字都为有效数字。

例如: 6.400×10^5 表示 4 位有效数字

7.80×10^6 表示 3 位有效数字

0.001×10^3 表示 3 位有效数字

数字舍入规则:

当有效位数确定后,如何将多余的数字舍去,下面介绍新的舍入规则。

传统的 4 舍 5 入法,舍或入只取决于舍去部分的第一位数字,是大于 5 还是小于 5。新的舍入法,是舍是入应看整个舍去部分数值的大小。它的规则为:

- ① 若舍去部分的数值,大于保留部分末位的半个单位,则末位加 1。
- ② 若舍去部分的数值,小于保留部分的末位的半个单位,则末位不变。
- ③ 若舍去部分的数值,等于保留部分的末位的半个单位,则末位凑成偶数;若末位为偶数时,则末位不变;当末位为奇数时,则末位加 1。

在大量运算时,新的舍入法引起的计算结果对真值的偏差趋近于零。

例如,将下面的数据保留 4 位有效数字。

$$4.15159 \rightarrow 4.152 \quad 6.51050 \rightarrow 6.510 \quad 7.24567 \rightarrow 7.246$$

1.1.4 系统误差的简易判定准则

系统误差通常定义为按一定规律(如线性、周期性等)或恒定不变的变化的误差。它通常隐性地出现在测量数据中,虽经多次反复测量,也难以消除它对测量准确度的影响。

为消除系统误差对测量精度的影响,实验研究人员通常用下列方法如观察法、比较法来确定它的存在。下面扼要加以介绍。

(1) 观察法

对某研究测出的物理量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 求出算术平均值 $\bar{x}$ 及偏差 d_i

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad d_i = x_i - \bar{x}$$

然后用下列法则发现,并确定系统误差是否确实存在。

准则 1 将测得数据按 x_i 递增的顺序排列,若偏差 d_i 连续出现负值而在另几个连续测量中皆为正值,则测量中存在线性误差。若中间发生波动,则测量中有随机误差存在。

准则 2 将测得数据按 x_i 递增的顺序排列,若偏差值的符号发生有规律地交替变化,则存在周期系统误差;若中间存在微小波动,则测量中有随机误差的存在。

准则 3 在某种条件下测量数据偏差基本上保持相同符号,而当测量条件改变或不存在时偏差均改变符号,则说明存在有随测量条件改变而变化的固定误差。

(2) 比较法

比较法包括实验对比法和数据比较法。

通过改变实验条件来发现系统误差的方法称为实验对比法。

数据比较法,对某一物理量进行多组测量,计算出各组的算术平均值 $\bar{x}$ 和标准误差 σ_i ,若任两组间满足不等式

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| < 3\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$$

则认为该测量不存在系统误差。不满足上述不等式,则认为存在系统误差。

也可以用各类分布检验以便使系统误差的确定更加准确和科学。

1.1.5 消除或减少系统误差的方法

消除或减少系统误差的方法,有根除消除法、修正消除法、代替消除法、异号消除法、交换消除法、对称消除法、回归消除法等。有兴趣的读者可参阅书后有关参考文献。

1.2 工程实验数据的整理方法

工程实验数据的整理方法,一般有三种途径,即列表法、图示法和公式表示法。

列表法,就是将实验结果进行归纳、分析,最后以表格的形式表示出来。

图示法,将经过分析整理的实验结果以图形的方式绘制在坐标纸上,供研究与分析用。

公式表示法,也称作分析表示法。它是将实验结果,借助数学计算,用一个恰当的函数关系式(或称经验公式)表示出来。

对于工程研究,人们最感兴趣的就是公式表示方法。它应用起来方便、准确,变量之间的关系明确。整理出来的经验表达式便于推广应用。

1.2.1 列表法

实验数据的列表法有两类,原始记录数据表和实验结果数据表。原始数据记录表在开始实验或测试前就应当设计好。数据表设计要求简洁、清楚、方便,便于计算使用。

实验结果数据表除上述要求外,应列出实验计算的有关公式,使用的测试仪器。

表格设计的注意事项:

(1) 表头列出物理量的名称,符号和计量单位之间用斜线“/”隔开。斜线不能重复使用。例如温度 $t/^{\circ}\text{C}$; 压力 p/Pa 。计量单位不能混在数字之中。

(2) 有效数字位数的确定,应当与测量仪表的准确度相匹配。

(3) 物理量的数值应当用科学记数法来表示。即“物理量的符号 $\times 10^{\pm n}$ /计量单位”的形式。将 $10^{\pm n}$ 记入表头。用公式表示为

$$\text{物理量的实际值} \times 10^{\pm n} = \text{表中数据}$$

(4) 为便于引用,每个数据表都应在表的上方按出现的顺序准确编号。同一个表尽量不跨页,必须跨页时,在此表上应注明“续表 $\times\times\times$ ”。

(5) 数据书写清楚整齐,修改时可用单线将错误的画掉。各种实验条件及记录者的姓名可作为表注,写在表的下方。

1.2.2 图示法

图示法的优点是直观清晰,便于比较。容易看出数据中的极值点、转折点、周期性、变化率及其他相关特征。

1.2.2.1 坐标系的选择原则

工程上常选用的坐标系有直角坐标系(包括笛卡儿坐标系)、半对数坐标系和对数坐标系,可购买相关坐标纸或手工绘制。

(1) 半对数坐标系

两个坐标轴,一个坐标轴是分度均匀的普通坐标轴,另一个坐标轴为分度不均匀的对数坐标轴。一般 x 轴(横坐标轴)为对数坐标轴, y 轴(纵坐标轴)为普通坐标轴。为清楚起见,可作一条平行于横坐标轴的对数数值线。通常在下列情况下采用半对数坐标:

① 变量之一在所研究的范围内发生几个数量级的变化。

② 需要将某种函数变换为直线函数关系,例如指数函数 $y = ae^{kx}$ 等。

(2) 对数坐标系

两个坐标轴 x 和 y 都为对数坐标轴的坐标系称为对数坐标系。

通常在下列情况下采用对数坐标系：

- ① 所研究的函数 y 和自变量 x 在数值上均发生几个数量级的变化。
- ② 当需要变换某种非线性关系为线性关系时。例如，幂函数 $y=ax^b$ 。
- ③ 曲线开始部分需要划分成展开的形式。

1.2.2.2 坐标分度的确定步骤

- ① 首先确定 x 和 y 的测量误差 $D(x), D(y)$ 值。
- ② 计算 x 轴和 y 轴的比例常数 M_x 和 M_y 。

$$M_x = \frac{1}{D(x)} \quad (1.5)$$

$$M_y = \frac{1}{D(y)} \quad (1.6)$$

则 x 轴物理量的 1 个单位取 $M_x = \frac{1}{D(x)}$ ； y 轴物理量的 1 个单位取 $M_y = \frac{1}{D(y)}$ 。

③ 确定实验点的几何尺寸

实验点的底边长度为 $2D(x)$ ；实验点的高度为 $2D(y)$ 。

1.2.2.3 坐标分度确定的注意事项

- ① 当测量数据的误差不知道时，则坐标轴的分度要与实验数据的有效数字位数相匹配。
- ② 坐标轴的比例常数 M ，一般选取 $M=(1,2,5) \times 10^{\pm n}$ 。不宜选取 $M=(3,6,7,8,9) \times 10^{\pm n}$ 值。选取后者既给绘图带来困难，又易于产生错误。这是从绘图实践中得出的经验。
- ③ 当按绝对误差 $D(x), D(y)$ 确定的比例常数 M_x 与 M_y 的推荐值不相等时，为使图形适当放大，使绘出的图形更清楚、更准确，通常应选择小的推荐值。

1.2.2.4 对坐标图的要求

- ① 定量绘制的坐标图，描述的曲线要光滑规范。
- ② 坐标图必须清楚注明图号和图名，便于引用。坐标图各坐标轴必须注明该坐标代表的物理量名称、符号及选择的计量单位。
- ③ 不同线上的数据点必须选择不同的符号表示，而且在图上清楚地标出，避免混淆。

1.3 实验数据的回归分析方法

一个函数所涉及的变量之间的关系大致可分为两类：一类是确定性关系，即变量之间的函数关系可以用一个较精确的函数关系式来表达，例如，求圆的面积公式 $S=\pi r^2$ ；另一类为非确定关系，称为相关关系。

对于具有相关关系的问题，通常可以借助于回归分析方法来确定它们的经验表达式。

回归分析方法是处理已有的实验数据的一种数理统计方法。例如，我们运用作图法来描绘实验结果时，由于各种原因，有时所描绘出来的点很分散，可以连成几条曲线。那么哪一条曲线与实际最符合呢？这时可以用回归分析方法来确定它的最佳曲线，并确定它的误差及精度如何。

回归分析方法除解决上述问题，还可以帮助我们解决下列问题：