

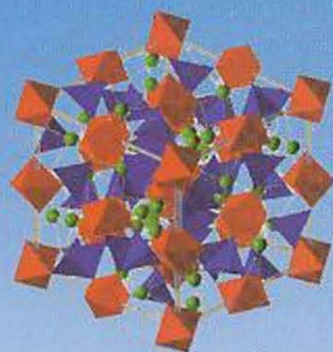
WUTP

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

本书荣获中南地区大学出版社协会优秀教材一等奖

# 计算机在材料科学与工程中的应用

曾令可 叶卫平 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

# 计算机在材料科学与工程中的应用

主编 曾令可 叶卫平

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

## 【内容简介】

为适应材料科学与工程专业的教学需要,本书有针对性地选择材料科学与工程中计算机应用的共性,兼顾材料科学与工程研究领域的广泛性、前瞻性和多学科渗透的特殊性,选择有代表性的应用领域进行介绍。主要包括:数值模拟中应用基础有限差分法和有限元法,物理场分析中的温度场及浓度扩散场分析,计算机在材料科学与工程控制中以及在企业管理中的应用,计算机辅助设计、人工神经网络及专家系统等。

本书可作为高等学校材料科学与工程专业,包括有机材料、无机非金属材料、金属材料类以及相关专业的本科生、低年级硕士研究生的教材或教学参考书,也可供广大科技人员或工程管理人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机在材料科学与工程中的应用/曾令可,叶卫平主编. —武汉:武汉理工大学出版社, 2008. 12(重印)

ISBN 978-7-5629-2051-9

I. 计… II. ①曾… ②叶… III. 计算机应用-材料科学-高等学校-教材 IV. TB3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 014251 号

## 【主编简介】

**曾令可** 华南理工大学教授,博士生导师,享受国务院特殊津贴专家。长期从事无机非金属材料领域的教学及科研工作。曾参加国家“七五”攻关项目 1 项,主持国家“九五”攻关项目 1 项,主持国家自然科学基金项目 2 项,参加国家自然科学基金项目 3 项、国家教委博士点专项基金项目 2 项。曾荣获教育部科技进步三等奖 1 项,广东省科技进步三等奖 1 项。申请专利 5 项,公开发表学术论文 180 多篇,有多篇论文被美国工程索引(ED)等收录。中国硅酸盐学会自动化委员会、陶瓷专业委员会理事。

E-mail:imjqlab@letterbox.scut.cn

**叶卫平** 武汉理工大学副教授。上海交通大学金属材料与工程专业毕业。曾两次赴法国南特大学材料热能研究所从事高新金属材料方面的研究。长期从事金属材料的教学和科研工作。曾主讲《金属材料学》、《计算机在材料科学与工程中的应用》等本科生及研究生课程。曾主持国际科技合作项目 1 项、湖北省基金项目 2 项、武汉市科委攻关项目 1 项。出版教材 1 部,公开发表学术论文 30 余篇。曾荣获湖北省科技成果三等奖、湖北省教学成果三等奖。

E-mail:ywping618@21cn.com

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:安陆市鼎鑫印务有限责任公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:18

字 数:460 千字

版 次:2004 年 3 月第 1 版

印 次:2008 年 12 月第 3 次印刷

印 数:6001~8000 册

定 价:25.00 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

宋晓岚 林宗寿 杨长辉 姜洪舟 钱觉时

钱春香 高建明 徐秋林 黄佳木 黄学辉

蒋 阳 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人才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  
2004 年 3 月

# 前 言

随着科学技术的发展,人们对三大材料(金属材料、无机非金属材料 and 有机高分子材料)的认识不再是独立的,它们之间相互渗透,其联系更密切、更透明,有些甚至无法分开。材料科学与工程一级学科专业的宽口径概念愈来愈适应形势发展的需要。为此,2002年5月在武汉理工大学出版社召开了普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材建设规划与出版工作会议,为了使材料科学与工程大专业以及相关材料专业学生对计算机在材料科学与工程中的应用有比较全面的了解,决定编辑出版这本教材。

计算机技术的发展已改变着世界,对整个人类文明和社会进步产生着极其深刻的影响。材料科学技术的发展也与计算机的发展应用分不开。利用计算机技术和网络技术 etc 对材料科学与工程中的传统产业的改造,已给材料产业带来了革命性的变化。而且,随着应用范围的扩大,所带来的经济效益和社会效益也日臻显著。为了进一步推动和促进计算机技术在材料科学领域中的应用和实践,为了使材料类学生对计算机的应用有更多的了解,本书作者结合多年来的教学和科研实践经验,编写了《计算机在材料科学与工程中的应用》这一教材。该书从一级学科出发,比较全面而系统地介绍了计算机在材料科学与工程中应用的现状和发展前景,本书编写的原则是:

(1) 结合材料科学领域中计算机应用的特点,做到专业与计算机应用之间的沟通,重在应用;既要考虑材料专业各个研究方向的共性,又要兼顾材料科学研究领域的广泛性和各学科的相互渗透给计算机在材料科学与工程中应用所带来的复杂性和特殊性。

(2) 以三大材料应用中的例子进行介绍,既适应三大专业学生的需求,又可适应其他相关材料专业学生的使用。

(3) 书中内容较广泛,既要保证本书的完整性和系统性,又要避免与有关课程内容的重复。

(4) 本书为计算机应用的入门教材,主要目的是启迪学生的应用思维,故应用中所涉及到的计算机应用方面的理论知识或相关专业的专业理论,尽量避免过多、过深。

(5) 本教材主要是针对材料类专业本科生,为了达到推广计算机应用的目的,本书内容也可作为材料类硕士研究生或相关专业大专生使用。

本书由华南理工大学曾令可主编,全书共分六章,具体编写分工:武汉理工大学韩建军编写第1章;武汉理工大学叶卫平编写第2章;华南理工大学曾令可、尹



海翔编写第3章;西安建筑科技大学李辉编写第4章;景德镇陶瓷学院章义来编写第5章;华南理工大学曾令可、罗民华编写第6章。全书由华南理工大学曾令可、王慧统稿。

由于计算机技术的发展日新月异,材料科学的应用范围很广泛,新的应用不断出现,这给我们编写本书带来了一定的困难,虽然我们力求把最新的应用知识和信息奉献给读者,但本书所介绍的内容和信息还不能涵盖计算机在材料科学中所有方面的应用领域,加上参编者自身的教学实践和工作实践有限,本书难免存在许多不足之处,尚祈广大同行读者不吝指正。

曾令可

2003年7月

# 目 录

<b>1 常用计算方法和数值模拟基础</b> .....	(1)
1.1 正交试验设计 .....	(1)
1.1.1 正交试验设计的基本原理 .....	(2)
1.1.2 正交试验设计的基本方法 .....	(4)
1.1.3 多指标试验设计的分析方法 .....	(10)
1.1.4 水平不同的正交试验设计 .....	(14)
1.1.5 有交互作用的正交试验设计 .....	(15)
1.1.6 正交试验设计的方差分析方法 .....	(18)
1.2 数据处理技术 .....	(22)
1.2.1 正交试验设计插值方法 .....	(22)
1.2.2 曲线拟合与最小二乘法 .....	(24)
1.3 高斯消去法求解线性代数方程组的解法 .....	(30)
本章小结 .....	(34)
思考题与习题 .....	(35)
<b>2 材料科学与工程中的物理场计算机分析</b> .....	(37)
2.1 温度场计算机分析 .....	(37)
2.1.1 传热学及温度场基本概念 .....	(37)
2.1.2 导热微分方程 .....	(38)
2.1.3 导热微分方程初始条件与边界条件 .....	(40)
2.1.4 平面稳态温度场的有限差分求解 .....	(41)
2.1.5 非稳态导热问题的有限差分求解 .....	(44)
2.2 浓度场计算 .....	(48)
2.2.1 扩散方程 .....	(48)
2.2.2 扩散方程的数值解 .....	(49)
本章小结 .....	(53)
思考题与习题 .....	(53)
<b>3 计算机在材料科学与工程控制中的应用</b> .....	(54)
3.1 计算机控制系统的一般概念 .....	(54)
3.1.1 在线控制系统和离线控制系统 .....	(54)
3.1.2 实时控制系统 .....	(54)
3.1.3 闭环控制系统和开环控制系统 .....	(55)
3.1.4 直接数字控制系统 .....	(55)
3.1.5 监督控制系统 .....	(56)
3.2 以微机为核心的工业控制系统的组成原理及功能特点 .....	(57)



3.2.1	以微机为核心的工业控制系统组成	(57)
3.2.2	硬件部分	(57)
3.2.3	软件部分	(58)
3.2.4	控制系统的基本功能和主要特点	(58)
3.3	过程通道和数据采集	(59)
3.3.1	输入和输出过程通道	(59)
3.3.2	模拟量输入、输出通道信号的处理	(63)
3.3.3	过程通道的干扰及其抑制	(65)
3.4	直接数字控制	(68)
3.4.1	直接数字控制系统的组成和特点	(68)
3.4.2	直接数字控制系统的控制规律	(69)
3.5	模糊控制系统特点及建立过程	(75)
3.5.1	模糊控制的特点	(75)
3.5.2	模糊控制系统的建立	(76)
3.6	多变量复杂控制系统	(80)
3.7	集散控制系统及应用	(82)
3.7.1	集散控制系统的组成框图	(83)
3.7.2	集散控制系统的特点	(83)
3.7.3	集散控制系统的结构形式	(85)
3.7.4	集散控制系统应用	(85)
3.8	控制管理一体化	(90)
3.8.1	管理与控制分层结构	(90)
3.8.2	一体化结构体系及特点	(91)
3.8.3	应用前景	(92)
3.9	虚拟仪器	(93)
3.9.1	虚拟仪器的结构、组成及特点	(93)
3.9.2	虚拟仪器的应用	(98)
	本章小结	(99)
	思考题与习题	(99)
<b>4</b>	<b>计算机在企业管理中的应用</b>	<b>(101)</b>
4.1	管理信息系统概念	(101)
4.1.1	管理信息的定义	(102)
4.1.2	管理信息系统的结构	(103)
4.1.3	管理信息系统在企业管理中的应用	(105)
4.2	信息系统技术	(108)
4.2.1	数据库系统	(108)
4.2.2	数据库设计	(111)
4.2.3	材料数据库及其应用	(112)
4.2.4	生产、技术管理数据库及其应用	(114)

4.2.5	决策支持系统 .....	(116)
4.3	企业管理信息系统的开发 .....	(118)
4.3.1	系统分析 .....	(118)
4.3.2	系统设计 .....	(126)
4.3.3	系统的实施、运行与评价 .....	(132)
4.3.4	企业管理信息系统开发实例——铸造企业市场营销管理信息系统的 开发 .....	(136)
	本章小结 .....	(137)
	思考题与习题 .....	(138)
<b>5</b>	<b>计算机辅助设计 .....</b>	<b>(139)</b>
5.1	CAD 技术 .....	(139)
5.1.1	CAD 技术简介 .....	(139)
5.1.2	计算机辅助设计中的新技术 .....	(143)
5.1.3	计算机辅助造型设计 .....	(146)
5.1.4	计算机辅助模具设计 .....	(148)
5.1.5	计算机辅助工艺过程设计 .....	(154)
5.1.6	计算机在设备设计中的应用 .....	(159)
5.2	计算机在材料设计和相图设计中的应用 .....	(163)
5.2.1	材料设计的发展 .....	(163)
5.2.2	相图设计原理 .....	(168)
5.2.3	相图计算及合成 .....	(170)
5.3	材料的微观结构设计及模拟 .....	(178)
5.3.1	原子/分子层次的计算机模拟 .....	(178)
5.3.2	断裂与晶粒长大的模拟 .....	(186)
5.3.3	材料模拟软件及其在材料科学中的应用 .....	(187)
	本章小结 .....	(195)
	思考题与习题 .....	(196)
<b>6</b>	<b>神经网络在材料科学与工程中的应用 .....</b>	<b>(197)</b>
6.1	ANN 概述 .....	(197)
6.1.1	生物神经网络 .....	(197)
6.1.2	人工神经网络(ANN) .....	(200)
6.1.3	ANN 发展史 .....	(206)
6.1.4	人工神经网络的学习 .....	(208)
6.1.5	学习算法的种类 .....	(209)
6.2	BP 神经网络结构、学习算法及其设计 .....	(210)
6.2.1	BP 网络模型与结构 .....	(211)
6.2.2	BP 学习规则 .....	(211)
6.2.3	BP 网络的设计 .....	(219)
6.2.4	BP 网络的限制与不足 .....	(222)

6.2.5 反向传播法的改进方法 .....	(223)
6.3 神经网络在材料科学中的应用 .....	(227)
6.3.1 材料的设计与性能预测 .....	(227)
6.3.2 在无机非金属材料工业中的应用 .....	(232)
6.3.3 在有机材料工业中的应用 .....	(234)
6.3.4 在金属材料工业中的应用 .....	(239)
6.4 专家系统及其在材料科学与工程中的应用 .....	(242)
6.4.1 专家系统及其特点 .....	(242)
6.4.2 专家系统的类型 .....	(243)
6.4.3 专家系统的构成 .....	(244)
6.4.4 专家系统的开发 .....	(245)
6.4.5 材料科学与工程的一些专家系统 .....	(248)
6.4.6 专家系统的发展展望 .....	(260)
本章小结 .....	(260)
思考题与习题 .....	(260)
<b>附录</b> .....	(262)
附录 A .....	(262)
附录 B .....	(264)
附录 C 计算程序 .....	(266)
<b>参考文献</b> .....	(273)

# 1 常用计算方法和数值模拟基础

## 本章提要

在研制新材料时,当选定某系统后,都要进行大量的实验,不断调整配方,才能最后选定一种或几种符合要求的材料成分。这种研制方法既费时,又浪费大量人力、物力。随着科学技术的发展,人们希望能有一种方法,只需要有限次的实验,就得到满意的结果,这就是实验设计问题。实验设计方法有多种,国内普遍采用的有优选法、正交设计法,优选法主要用于只有一个因素影响(决定)某一事物的特性或性能的情况。而一般材料组成中的每一组分的变化,都可能影响其性能,即影响材料性能的因素有多个,解决这类多因素问题的最好方法是正交设计法。

本章结合材料设计、研究以及生产控制的需要,介绍了正交试验设计、高斯消去法求解线性方程组的方法和几种常用的数据处理技术,并提供了简单的计算程序。

## 1.1 正交试验设计

在科学研究、产品设计与开发和工艺条件的优选过程中,为了揭示多种因素对试验或计算结果的影响,一般都需要进行大量的多因素组合条件的试验。

如果对这些因素的每种水平(指每一因素拟比较的具体状况)可能构成的一切组合条件,均逐一进行试验——全面试验,则因其试验次数繁多而需付出相当的试验代价,有时甚至使试验无法完成。

假如影响某项试验结果的因素有7项,而每个因素又有两种,则需做 $2^7=128$ 次试验。但限于客观条件,只能做少数次试验,为此,如何安排多因素试验方案和怎样分析试验结果,就是一个值得探索的课题。

应用数理统计概念和正交原理所编制的正交表,是解决该问题的有效工具。利用规格化的正交表来进行试验方案设计,便于人们从次数众多的全面试验中,挑选出次数较少而又具有代表性的组合条件,再经过简单计算就能找出较好的工艺条件或最优配方。进一步分析试验结果又能探寻出可能最优的试验方案。

目前,许多国家都非常重视正交法试验的研究和推广。正交试验法的应用在日本已达到“家喻户晓”的程度,它已成为促进日本生产率增长的“诀窍”。

我国在正交试验设计的理论研究方面,一直处于领先地位,设计出了许多有实用价值和简便易行的正交表。

### 1.1.1 正交试验设计的基本原理

正交试验设计是利用规格化的正交表,恰当地设计出试验方案和有效地分析试验结果,提出最优配方和工艺条件,并进而设计出可能更优秀的试验方案的一种科学方法。

#### 1.1.1.1 正交表介绍

正交表是利用“均衡搭配”与“整齐可比”这两条基本原理,从大量的全面试验方案(点)中,为挑选出少量具有代表性的试验点,所制成的排列整齐的规格化表格。

国际上通用的田口型正交表和我国自行设计的正交表,目前在国内都广泛流行和使用。两者的区别在于对因素交互作用的安排及处理。所谓交互作用,是指诸因素各水平的搭配之间,不同的联合作用对试验结果的影响。

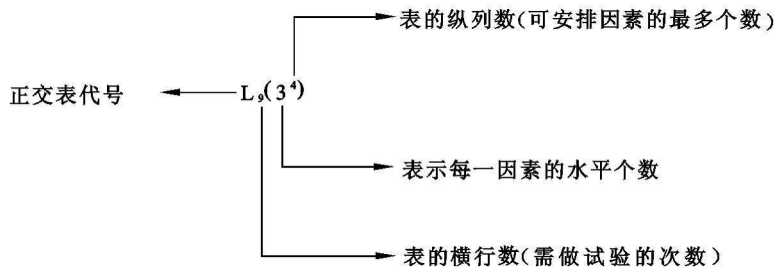
田口型正交表的特点是强调因素间的交互作用,在试验设计时,需按各因素的交互作用情况进行表头设计,以便确定各因素在正交表中的位置。

我国自行设计的正交表,则对田口型表作了简化和改进,认为在试验结果中,实际上已包含了交互作用的影响。因此,在试验设计时,不搞表头设计,采用“因素顺次上列,水平对号入座”的办法,在结果分析时,不需繁琐的数学运算。

本节将从实际应用出发,对上述正交表进行综合介绍。

#### (1) 正交表的形式及代号

正交表代号及含意如下所示:



正交表基本上可以分为两种形式:同水平正交表和混合水平正交表。

同水平正交表是各因素水平数相等的表格。在试验设计时,当人们认为各因素对结果的影响程度大致相同时,往往选用同水平正交表(参见表 1.1)。

表 1.1  $L_9(3^4)$  正交表

列号 试验号	1	2	3	4
1	1	1	3	2
2	2	1	1	1
3	3	1	2	3
4	1	2	2	1
5	2	2	3	3
6	3	2	1	2
7	1	3	1	3
8	2	3	2	2
9	3	3	3	1

表 1.2  $L_8(4^1 \times 2^4)$

列号 试验号	1	2	3	4	5
1	1	1	2	2	1
2	3	2	2	1	1
3	2	2	2	2	2
4	4	1	2	1	2
5	1	2	1	1	2
6	3	1	1	2	2
7	2	1	1	1	1
8	4	2	1	2	1

混合水平正交表是指诸因素的水平数不全相等的正交表。当试验设计时,如感到某些因素更重要而希望对其仔细考察时,就可将其多取一些水平,这样既突出了重点,又照顾到了一般,故而产生了混合水平正交表(参见表 1.2)。

表 1.1 是  $L_9(3^4)$  正交表。该表有 4 个纵列,9 个横行,表示此表最多可安排 4 个因素,每个因素可取 3 个水平,共需做 9 次试验。

表 1.2 是  $L_8(4^1 \times 2^4)$  混合水平正交表。该表共有 5 个纵列,8 个横行,表示最多可安排 5 个因素,其中有一个因素可取 4 个水平,其余 4 个因素均取两个水平,共需做 8 次试验。

常用正交表可查阅相关试验设计和数据处理书籍。

## (2) 正交表的特点

仔细观察正交表中的字码“1”、“2”、“3”、…,会发现它们有如下两个特点:

① 每个纵列中“1”、“2”、“3”、…字码出现的次数相同。如  $L_9(3^4)$  中,各列均出现 3 次;  $L_8(4^1 \times 2^4)$  中,第一列各出现 2 次,其余各列出现 4 次。

② 任意两纵列的横行所构成的有序数字对中,每种数字对出现的次数是相同的,即任意两纵列的字码“1”、“2”、“3”、…的搭配是均衡的。如  $L_9(3^4)$  表中,1,2 纵列,其横向可形成 9 种不同的有序数字对:(1,1)、(2,1)、(3,1)、(1,2)、(2,2)、(3,2)、(1,3)、(2,3)、(3,3),且均各出现一次。

### 1.1.1.2 正交性原理

正交性原理是设计正交表的科学依据,它主要表现在“均衡搭配”和“整齐可比”两个方面。

均衡搭配是指用正交表所安排的试验方案,能均衡地分散在水平搭配的各种组合方案之中,因而其试验组合条件具有代表性,容易选出最优方案。

现要安排 3 个因素(A、B、C),每个因素取 3 个水平的试验。如果要通过全面试验来选择优秀方案,则共需做  $3^3 = 27$  次试验,其全部水平搭配的组合方案可用正方形形象地说明(见图 1.1)。

以 A、B、C 为互相垂直的三个坐标轴,对应于 A 因素的 3 个水平  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  是左、中、右三个竖平面,对应于  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  的是下、中、上三个平面,对应于  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  的是前、中、后三个竖面,共有 9 个平面。整个立方体内共有 27 个交点,正好是全面试验的 27 个组合试验条件。

如条件所限只允许做 9 次试验,就需从这 27 个完全组合条件中,选出 9 个有代表的试验条件。显然,9 个黑点就不太合适,因其各因素的每个水平分散不均匀,对因素 C 而言, $C_1$  出现了 3 次, $C_2$  出现 4 次, $C_3$  才出现 2 次。同样,对因素 A, $A_1$  出现 2 次, $A_2$  出现 5 次, $A_3$  出现 2 次。

如果按正交表  $L_9(3^4)$  来选择 9 次试验,则其试验条件就是 9 个黑点,此时所设计出的 9 个

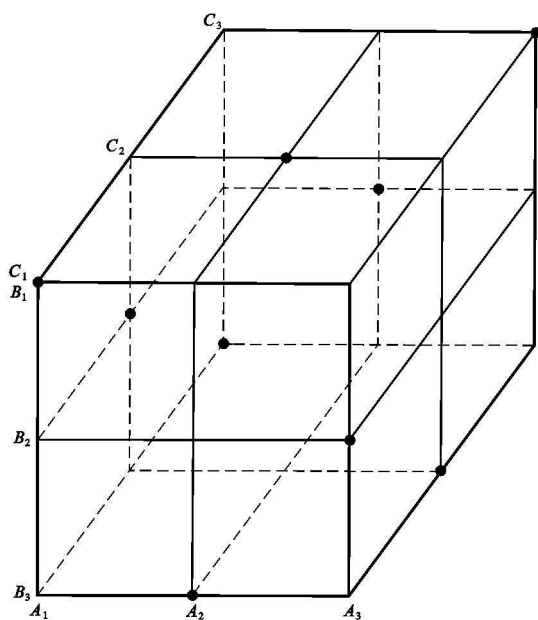


图 1.1 正交试验设计方案

点在每个平面上正好有三个,在每条线上都有一个,就是说,每一因素的每个水平都有3次试验,水平的搭配是均匀的。也就是说,用正交表所安排的试验方案,其各因素水平的搭配是“均衡的”,或者说方案是均衡地分散在一切水平搭配的组合之中。

正是由于正交表的均衡搭配性,从9个试验条件中所得出的优秀结果,其代表性是很充分的。人们再通过对试验结果的分析,就能选出可能更优的水平组合方案。

为了对某一因素(如A)比较其各水平( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ )的作用,从中找出优秀水平时,其余因素各水平( $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ ;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ; ...)出现的次数应该相同,以便最大限度地排除其他因素的干扰,使这一因素的9个水平之间具有可比性。

如将 $L_9(3^4)$ 正交表中列号1、2、3代入相应的因素A、B、C,则A列下面的1、2、3就代表相应的水平 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 。从表1.1中看出,包含水平 $A_1$ 者有3个试验;包含 $A_2$ 与 $A_3$ 者也各有3个试验,它们的试验组合方案为:

$$A_1 \begin{cases} B_1, C_3 \\ B_2, C_2 \\ B_3, C_1 \end{cases} \quad A_2 \begin{cases} B_1, C_1 \\ B_2, C_3 \\ B_3, C_2 \end{cases} \quad A_3 \begin{cases} B_1, C_2 \\ B_2, C_1 \\ B_3, C_3 \end{cases}$$

在这三组试验里,对因素A的各水平 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 来说,其因素B和C的三个水平都各出现了一次。相对来说,当对表内同一水平( $A_1$ 或 $A_2$ 或 $A_3$ )所导致的试验结果之和进行比较时,其他条件是固定的。这就使水平 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 具有了可比性,它是选取各因素优秀水平的依据。

正是因为正交表具有“均衡搭配”和“整齐可比”性,才使正交试验法获得了广泛的应用并收到了“事半功倍”和“多、快、好、省”的效果。

### 1.1.2 正交试验设计的基本方法

本节将结合实例,讨论用正交设计安排试验方案及分析试验结果的基本步骤和方法。

在研究“水电站高窗厂房热压自然通风”时,提出了自然通风时计算车间温度 $T_n$ 的公式为:

$$\frac{T_n - T_w}{T_w} = \frac{1}{\eta} \left( \frac{NQ^2}{M} \right)^{1/3} \quad (1.1)$$

式中  $T_w$ ——室外空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$Q$ ——车间余热;

$M$ ——室外空气特性参数,  $M = 2g\rho_w^2 c_p T_w^2$ ;

$N$ ——建筑门窗的特性参数;

$\eta$ ——热压通风系数。

作为例题,下面用正交模型试验法来确定其热压通风系数 $\eta$ 。

#### 1.1.2.1 明确试验目的,确定考核指标

任何一项试验都有其自身的目的,据此才能提出用哪些量来衡量达到目的的程度,这就是确定考核指标。指标可以是单项也可以是多项,后者在综合选优时,应将其综合为单一指标(详见后述);至于产品的外观、造型、色泽等凭耳、鼻、眼等感觉器官来评价优劣的定性指标,应通过评分法将其转化为定量指标来处理。

本例题中,试验的目的是通过自然通风模型试验,寻找自然通风的计算方法,也就是探索



使热压通风系数  $\eta$  最大时,车间几何尺寸的最优化方案,并进一步求出计算  $\eta$  的“最优”回归方程。考核指标为  $\eta$  值, $\eta$  值愈大,车间自然通风效果愈佳。

### 1.1.2.2 挑因素,选水平

所谓因素,是指直接影响试验结果而需要进行考察的不同原因。在试验中影响结果的原因是很多的,一般情况下,把直接和必然的原因称为正交试验设计中的因素。至于人们的操作技巧、检测仪表的精度等,并不直接影响试验结果,而是产生误差的原因。除特殊情况外,一般不把它列为因素。

由于正交试验法是专为多因素选优而创立的,所以增加一两个因素不一定会增加试验次数,但若漏掉重要因素,就可能降低试验质量。因此,除了那些对试验结果的影响程度已经清楚或影响不大的因素可不加考虑外,其余因素应尽可能排到正交表中去进行考察。

“水平”是指各因素在试验中要比较的具体状况和取值。合理地确定“水平量”(水平数及水平值),可以减少试验工作量。如果已经掌握了部分情报和资料,就可以在较小的范围内选取和确定水平量;当缺乏经验时,水平取量的范围应宽一些,以免遗漏试验中的好条件,但所取的水平个数不必太多。考虑到试验的代价,对于适合分批试验的项目,应本着“分批走着瞧”的原则,一般是少分水平、选用小表来安排试验;对于无需进行试验的可计算性项目,由于电子计算机擅长于循环计算,所以应多取水平数,适当增加正交表的行数。

对某个因素,若需作仔细考察时,就应多分几个水平;若勿需详察时,就少分几个水平。

对连续变化型因素,如若在范围  $[m, M]$  内等分成 5 段,这里  $m, M$  分别是该因素可以取用的最小值与最大值,于是,其中的 4 个分点  $x_1, x_2, x_3, x_4$  值,即为 4 个水平的取值(这时  $m, x_1, x_2, x_3, x_4, M$  为等差数列)。在研究电气元件(电阻、电容等)时,也可用等比的办法将  $[m, M]$  分为 5 段(这时  $m, x_1, x_2, x_3, x_4, M$  为等比数列)。

对于离散型因素,如四种玻璃、几个朝向、几种墙体构造等,其水平是自然形成的,不便随意改变,只能对照现有的正交表格来确定水平数目。

当第一轮正交表选优完毕后,如其结果尚未达到解决问题的目的,这时应根据本轮的结果,来决定下一轮试验还要考察哪些因素,这些因素分多少个水平,以及水平量该如何选取。

本例中,根据初步分析,认为热压通风系数  $\eta$  主要受高窗厂房的建筑特征影响,它们是:门面积  $F_1$ 、每台机开窗面积  $F_2$ 、上升气流高度  $H_2$ 、发电机间长度  $L$ 、窗口阻力系数  $K_2$  和大门位置系数  $\alpha$ (当大门在安装间侧面时为 1,在端墙时取 2)。即:

$$\eta = f(F_1, F_2, H_2, L, K_2, \alpha) \quad (1.2)$$

每个因素取两个水平,具体数值取决于模型尺寸,详见“因素水平表”(表 1.3)。

表 1.3 正交试验因素水平

因素 列代号	$L(m)$	$F_2(m^2)$	$\alpha$	$F_1(m^2)$	$H_2(m)$	$K_2$	
试验号	A	B	C	D	E	F	G
1	4.69	0.6	1	0.452	0.545	6.55	
2	2.49	0.2	2	0.179	0.57	2.68	

### 1.1.2.3 选择合适的正交表

选择正交表时首先要求表中水平个数与被考察的水平个数完全一致;其次,要求正交表的

纵列数等于或大于被考察因素的个数。这里分两种情况：

(1) 必需做试验的研究项目

在正交试验中,考虑到试验的代价,为节省人力、物力和时间,对于能分批进行的项目,一般是少分水平数、选用小表来安排试验,本着“分批走着瞧”的原则。当因素的个数确定后,水平数不宜取得过多。本书附录中已备有常用的正交表,如附表表格不够,可查阅有关资料,当正数  $m$  不大时,一般都存在有  $L_{4m}(2^{4m-1})$  的正交表。

(2) 计算性的研究项目

由于计算机擅长于循环计算,所以当因素不很多时,应多分水平数,适当增加行数。当因素增多到 14 个以上时,不能无休止地增加水平数目,因为这样会增加计算工作量。压缩水平个数的办法是:当不超过 8 个因素时,可改用  $L_{18}$  表;7 到 13 个因素,可改用  $L_{27}(3^{13})$  表;14 到 31 个因素,可改用  $L_{16}(2^{15})$ ,  $L_{24}(2^{23})$  或  $L_{32}(2^{31})$  表以代替  $L_{125}(5^{31})$  表。

另一种减少工作量的办法是将几张三水平的正交表联合使用。例如,对于 13 个因素,可联合使用两张  $L_{27}(3^{13})$ ,共分 5 个水平来考察 54 个设计(计算或试验)条件。第一张  $L_{27}$  表的三个水平“1”、“2”、“3”字码对应考察水平 1、3、5;第二张  $L_{27}$  表的三个水平“1”、“2”、“3”字码对应水平 2、3、4。

本例中,所有 6 个因素均取两个水平,故应选用同水平正交表中的二水平正交表,从附录中可找到: $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_{12}(2^{11})$ 、 $L_{16}(2^{15})$  表,由于考察因素仅有 6 个,故最后选用  $L_8(2^7)$  正交表。

1.1.2.4 用正交表安排试验

按因素水平表中的代号,采用对号入座的办法,将数据填入所选出的正交表中,可得到试验计划表(见表 1.4)。

表 1.4  $L_8(2^7)$  试验计划及结果分析表

因素 列代号 试验号	L(m)		$F_2(m^2)$		$\alpha$		$F_1(m^2)$		$H_2(m)$		$K_2$		G	$\eta$
	A	B	C	D	E	F	G							
1	1	4.690	1	0.6	1	1	1	0.454	1	0.545	1	6.55	1	1.57
2	1	4.690	1	0.6	1	1	2	0.179	2	0.570	2	2.68	2	1.94
3	1	4.690	2	0.2	2	2	1	0.454	1	0.545	2	2.68	2	0.92
4	1	4.690	2	0.2	2	2	2	0.179	2	0.570	1	6.55	1	1.54
5	2	2.490	1	0.6	2	2	1	0.454	2	0.570	2	2.68	1	0.86
6	2	2.490	1	0.6	2	2	2	0.179	1	0.545	1	6.55	2	1.37
7	2	2.490	2	0.2	1	1	1	0.454	2	0.570	1	6.55	2	1.33
8	2	2.490	2	0.2	1	1	2	0.179	1	0.545	2	2.68	1	1.37
$K_1$	5.97		5.74		6.21		4.68		5.23		5.81		5.34	
$K_2$	4.93		5.16		4.69		6.22		5.67		5.09		5.53	
极差 $\Delta R$	1.04		0.58		1.52		1.54		0.44		0.72		0.19	

填好正交试验计划表后,此表的每一横行即代表要试验的一组条件。 $L_8(2^7)$  表有 8 行,因此要做 8 个不同的试验。

第 1 号试验条件: $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$ 、 $F_1$ 。具体内容是:横型的发电机间长度 4.690m,每