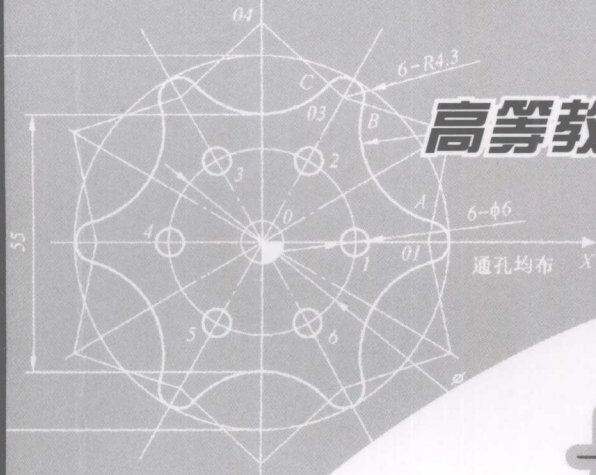
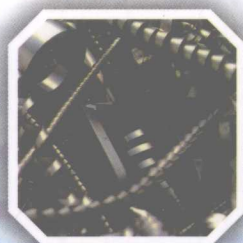


高等教育机电类专业规划教材



机械工程 实验

■ 陈磊 主编 付廷龙 吴曙 于建 副主编 陈凌 主审



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等教育机电类专业规划教材

机械工程实验

陈 磊 主编

付廷龙 吴 晔 于 建 副主编

陈 凌 主审



人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

机械工程实验 / 陈磊主编. —北京: 人民邮电出版社,
2009.9
高等教育机电类专业规划教材
ISBN 978-7-115-20080-8

I. 机… II. 陈… III. 机械工程—实验—高等学校—教材 IV. TH-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第130556号

内 容 提 要

本书在新的机械工程实验课程体系下,系统地介绍了机械类课程中的基本实验方法、内容、原理、目的、过程、操作与分析等,主要内容包括正交试验与数据处理、公差与测量实验、液压与气动实验、机械设计实验、机械制造实验、工程材料实验、测试技术实验和实验报告撰写等。

本书可作为高等院校机械类及非机械类的机械工程实验专用教材,也可作为高职高专机械和近机械类专业教材,或者作为工程技术人员的参考书。

高等教育机电类专业规划教材

机械工程实验

-
- ◆ 主 编 陈 磊
 - 副 主 编 付廷龙 吴 暉 于 建
 - 主 审 陈 凌
 - 责任编辑 潘新文
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13.5
字数: 329千字
印数: 1—3 000册
 - 2009年9月第1版
2009年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-20080-8

定价: 27.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

科学实验是理论的源泉、科学的基础。科技发展的历史表明,许多伟大的发现、发明都来源于科学实验。从人类使用的原始工具,到今天的载人宇宙飞船等,都是在经过无数次实验探索和验证的基础上得到的结果。通过实验,人类能够认识和掌握自然界各种事物的本质和规律。随着科学技术的不断发展,科学实验的范围和深度得到不断拓展和深入,具有越来越重要的作用。

实验教学是高等学校理工科教育教学中的重要组成部分,它不仅是学生获取知识和技能的重要途径,而且对培养学生严谨的科学态度、扎实的研究和动手能力以及深入的创新思维起着相当重要的作用。机械工程类基础系列课程是机械类专业重要的技术基础课,含有大量的实验教学内容,但目前这些实验大都是附属于相关的课程,实验缺乏系统性,而且在实际教学操作过程中也容易出现重理论学习、轻实验操作的问题,这与新世纪高素质应用型人才和创新型人才的培养要求差距很大。为了配合机械基础系列课程的改革,本书编者通过对各个实验系统的优化整合,并按学科体系安排实验教学,设置机械工程实验课程。

本书在新的机械实验课程体系下安排实验内容,由不同层次模块构成,内容包括机械原理、机械设计、工程材料、互换性与技术测量技术、传感器与测试技术等课程中的基本实验方法、内容、原理、目的、过程、操作与分析等。全书在传统测量与现代测量相结合,机电测试相结合等方面进行了一些探索,力求在加强学生动手能力、创新能力方面有所突破。各个院校在实际教学过程中,可以根据自己学校具体教学实际情况,对实验内容进行取舍。

本书可作为高等院校机械类及非机械类的机械工程实验专用教材,也可作为高职高专机械和近机械类专业教材,或者作为工程技术人员的参考书。

本书由江西蓝天学院陈磊主编,江西蓝天学院付廷龙、吴暉、山西大学光电研究所于建任副主编。其中第1章、第2章由陈磊编写,第3章由付廷龙编写,第4章由吴暉编写,第5章由缪燕平编写,第6章由罗春华编写,第7章由张美芸编写,第8章由杨家兴编写,第9章和附录由于建编写。全书由陈磊统稿,陈凌主审。

由于本书作者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免存在疏漏和不当之处,恳请广大师生批评指正。

编 者
2009年6月

目 录

第1章 绪论1

- 1.1 机械工程实验课程的重要性1
- 1.2 机械工程实验教学的目的是任务1
- 1.3 机械工程实验课程的主要内容2
- 1.4 机械工程实验课程的要求3

第2章 试验设计与数据处理6

- 2.1 正交试验设计6
- 2.2 正交表的使用和极差分析9
- 2.3 正交试验的方差分析15
- 2.4 试验误差分析与数据处理20
- 2.5 回归分析33
- 2.6 试验数据的表图表示法39

第3章 公差与测量试验45

- 3.1 基本尺寸的测量与检验45
- 3.2 配合尺寸的测量与检验50
- 3.3 零件形状误差的测量与检验52
- 3.4 零件位置误差的测量与检验58
- 3.5 表面粗糙度测量64
- 3.6 普通螺纹尺寸的测量与检验68
- 3.7 键与花键尺寸的测量与检验72
- 3.8 齿轮尺寸的测量与检验75
- 3.9 齿轮形位误差的测量与检验78
- 3.10 用三坐标机测量轮廓度误差81

第4章 液压与气压传动实验83

- 4.1 液压传动实验83
- 4.2 气压传动实验101

第5章 机械设计实验106

- 5.1 概述106
- 5.2 机构运动简图的测绘108

5.3 渐开线齿轮范成实验109

- 5.4 齿轮几何参数测定的实验111
- 5.5 轴系结构测绘实验114
- 5.6 机械创新设计陈列柜演示实验115
- 5.7 减速器结构分析及拆装实验122
- 5.8 结构创新设计试验125
- 5.9 模具拆装实验127

第6章 机械制造实验130

- 6.1 机械原理控制陈列柜介绍130
- 6.2 机械设计陈列柜介绍132
- 6.3 材料成形与切削加工陈列柜介绍132
- 6.4 金属切削机床车床 CA6140133
- 6.5 Y38 型滚齿机142
- 6.6 J—36 冲床145
- 6.7 HY—350 注塑机151

第7章 工程材料实验155

- 7.1 硬度实验155
- 7.2 金相试样的制作和显微镜的使用158
- 7.3 铁碳合金的平衡组织观察162
- 7.4 碳钢非平衡显微组织观察165
- 7.5 碳钢的热处理170
- 7.6 工业用钢、铸铁、有色合金、粉末冶金的金相组织观察175
- 7.7 钢的中频感应加热表面淬火实验180

第8章 测试技术试验182

- 8.1 概述182
- 8.2 应变片与直流电桥（单臂、半桥、全桥比较）184
- 8.3 应变片温度效应及补偿实验188

8.4	热敏电阻测温实验	189
8.5	气敏传感器实验	191
8.6	差动变压器的性能实验	192
8.7	电涡流式传感器的静态标定	194
8.8	半导体霍尔式传感器	196
8.9	热电式传感器——热电偶	197
8.10	光纤位移传感器实验	199
8.11	光电传感器的应用—— 光电转速测试	200

第 9 章	实验报告撰写	202
9.1	概述	202
9.2	学生实验报告的编写	202
9.3	技术报告的编写	204
附 录		208

第1章 绪 论

1.1 机械工程实验课程的重要性

实验一般多指科学实验,是按照一定的目的,运用相关的仪器设备,在人为控制条件下,模拟自然现象进行研究,从而认识自然界事物的本质和规律。实验是纯化、简化或强化和再现科学研究对象,延缓或加速自然过程,为理论概括准备充分可靠的客观依据。实验可以超越现实生产所及的范围,缩短认识周期。科学发展的历史表明,许多伟大的发现、发明和重大的研究成果都产生于科学实验。例如,居里夫人就是在实验室里夜以继日工作了10多年才发现和提炼了铀。回顾机械的发展历史,人类从使用原始工具到创造发明原始机械、古代机械、近代机械乃至今天的汽车、数控机床、智能机器人、载人宇宙飞船、航天飞机等现代机械,都是经过艰辛的科学实验的结果。由于科学的迅速发展,高新技术产品不断问世,高等学校绝大多数的科研成果和高新技术产品都是在实验室里通过实验研究而成功的。据资料表明,诺贝尔物理奖自1900年以来的100多个奖项中,可以认为70%以上是授予实验项目的。由此可见实验对理论和科学研究的重要性。随着科学技术的发展,科学实验的范围和深度不断拓展和深入,科学实验具有越来越重要的作用,成为自然科学理论和工程技术的直接基础。

机械工业与机械工程历来是国家经济建设的支柱产业和支柱学科之一,而且是基础产业与基础学科之一。随着科学技术的不断发展,社会对机械学科和机械类专业人才也提出了更高的要求。高等学校工科学生,尤其是机械类专业的学生,必须具有良好的实践能力、创新能力和综合设计能力。实验正是培养学生具有这些能力的极好的教学环节。实验教学是理工科专业教学中重要的组成部分,它不仅是学生获得知识和经验的重要途径,而且对培养学生的自学能力、工作态度、实际工作能力、科学研究能力和创新思维具有十分重要的作用,也对实现培养学生成为适合国家和社会需要的高素质人才起着关键的作用。

1.2 机械工程实验教学的目的是任务

实验教学就是在教师的指导下,学生通过实验的方法,进行学习的一种教学形式。这里所说的实验方法,是人们根据研究课题规定的任务,利用专门的仪器和设备对研究对象进行积极的干预,人为地变革、控制和模拟研究对象,以便在最有利的条件下对其进行观察,从而获得经验事实的一种方法。

从实验教学和实验方法的概念就可以看出,实验教学是非常有利于促进学生学习及培养

创造力的教学形式。实验教学中需要学生自己主动去探索、去发现,自己去建构知识的意义;实验教学中学生要主动搜集并分析有关的信息及资料,对所学的问题提出条件假设并努力加以验证;实验教学中学生要把当前学习内容与已有的知识相联系,并对这种联系加以认真的思考;实验教学中学生需要充分地与教师和学习伙伴进行交流、讨论,主动接受教师的指导及伙伴的协作。由于实验教学天然具备促进学生学习及培养学生创造力的教学因素,这决定了它在高等院校实施创新教育中的重要地位。因此,在教学实践中应明确地提出“通过实验教学进行创新学习”。所有的实验教学活动都应当围绕着提高学生创新能力培养展开,而不是围绕教师的教学展开。

机械工程专业课程包括机械制造基础、公差与技术测量、机械原理、机械设计、测试技术、液压与气动、工程材料等课程。这些课程是重要的技术基础课,是连接基础课与专业课的重要环节,都有一系列的实验来支撑。为了适应知识经济和技术创新的时代要求,使实验教学的内容和水平符合培养高素质技术人才的要求,我们尝试对机械工程系课程的实验进行整合、优化,形成系列课程互相衔接、互相配合、互相支撑的实验教学体系。注意反映当代机械工程实验技术,并引入相关学科如激光测量、图像处理、智能控制、虚拟实验等新技术、新成果,丰富实验教学内容,提高实验的质量和水平,开出独立的机械工程综合实验课程。

本实验课程的任务是培养学生以下方面技能与素质。

- (1) 了解机械工程领域基础实验的常用工具、仪器、设备系统和实验方法,具有熟练使用相关工具,操作实验仪器、设备系统的基本技能。
- (2) 具有利用测试设备、仪器进行采集、分析和处理实验数据和实验误差的综合分析能力。
- (3) 具有理解、构思、改进机械工程实验方案的基本能力。
- (4) 培养严格按科学规律从事实验工作,遵守实验操作规程的基本素质和不怕困难、勇于探索创新和实事求是的科学态度。
- (5) 养成良好学风,养成观察、分析事物和现象的习惯,训练善于综合思考的创新思维,提高科学实验能力。
- (6) 培养和提高自学能力、科学研究能力、分析思维能力、实际动手能力、撰写实验报告的表达能力、独立工作能力和团队合作精神。

1.3 机械工程实验课程的主要内容

机械工程实验课程以机械工程实验方法自身的系统为主线设置实验课,成绩单独考核和计分。实验课程的教学内容注意培养学生的创新能力和综合设计能力。重视实验内容由“验证性”转为“开发性”,“单一性”转为“综合性”,注意实验内容的创新性,增加实验内容和选题的自主性,改进实验指导方法,尽量发挥教师指导、学生自主的作用。

机械工程实验课程分为基本实验和实验设计研究两个层次。机械工程基本实验包括必修和选修两个部分。选修实验含有一定的实验设计和研究实践,供学有余力的学生使用。本实验教程增加实验内容和选题的柔性及开放性,以发挥学生的个性和创造能力,鼓励学生充分

自主,发挥想象力,敢于打破“思维定势”的约束,提出新方案、新方法、应用新技术。实验设计属研究型综合实验,要求学生根据实验题目或专题(如机械加工工艺设计实验、机器人性设计实验等)进行实验设计。在老师指导下,学生根据任务自主查阅资料、确定实验方案、选用实验设备和测试仪器完成实验设计,进行实验获取和处理实验数据,并撰写相关分析的实验设计研究报告。

机械工程实验课程的实验内容应反映机械学科的发展方向,改革陈旧的实验内容和实验装置是必须的。因此,我们要充分考虑现有的工作条件,处理好传统实验与综合性实验、创新性实验之间的关系,在发挥传统实验作用的基础上,应该采取开发更新实验装置,增加实验设计,引进先进的数据采集和数据处理手段,实现计算机技术在机械工程实验中的应用,引入控制技术和机电一体化技术等先进的实验设备、实验内容、实验手段,达到培养学生的创新能力、综合设计能力和掌握新的科学技术的目的。

机械工程实验课程应有较多的创新设计实验内容,允许学生实现自己构思的原理方案,为了节省经费又不约束学生的新构思,实验装置可采用在一定条件下的组装式实验模块。此外,在机械工程部分实验中采用计算机仿真技术和虚拟实验,以增加实验的柔性,让学生在实验中能充分体现自主性。

机械工程实验课程的主要内容有三部分:

(1) 实验的基本知识。包括概论、机械工程实验常用仪器设备、实验数据采集和误差分析及处理。

(2) 基本实验。包括机械组成的认识实验、机械零件几何精度的测量、机械设计实验、液压与气动实验、工程材料实验、测试技术实验等。

(3) 拓展实验。包括机械创新设计实验、综合设计实验,在每门课程中均可开设。

本实验课程的各个实验之间有相对独立性,便于不同系、不同层次的师生根据学校的实际情况选择使用。

1.4 机械工程实验课程的要求

机械工程实验课程是机械工程实验教学的重要组成部分,是机械工程系列课程的重要教学内容和课程体系改革的主要内容之一。学生通过本课程的学习和实验实践,要求掌握以下基本内容:

(1) 充分认识科学实验的内涵和重要意义。

(2) 了解和熟识机械工程实验常用的实验装置和仪器,掌握实验原理、实验方法、测试技术、数据采集、误差分析及处理方法。

(3) 严格按科学规律从事实验工作,遵守实验操作规程,求实求是,不粗心大意、主观臆断,更不允许弄虚作假。

(4) 实验过程中认真观察实验现象,不忽视、不放过“异常”现象,敢于“存疑、探求、创新”,对实验结果和实验中观察到的一些现象作出自己的解释和分析。树立实验能验证理论,也能发展和创造理论的观点。

(5) 实验报告是展示和保存实验成果的依据,同时也是实验教学中对学生分析综合、抽

象概括、判断推理能力及语言文字、曲线图表、数理计算等表达能力的综合实践训练，要重视实验报告的撰写。

实验完成后，必须严谨规范地撰写实验报告。实验报告是显示并保存实验数据和成果的载体，是分析、解决问题的依据。实验报告包括实验名称、实验目的、实验原理、实验装置、实验步骤、数据处理、实验结果、分析与结论、附录等内容。通过撰写实验报告可培养学生分析综合、抽象概括、判断推理等思维能力，也可训练学生对语言、文字、曲线、图表、数理计算等方面的表达能力，因此实验报告是实验教学的重要组成部分。

1.4.1 实验室管理规则

(1) 学生应按时参加实验课，进入实验室应佩戴身份卡并及时签名，未经指导教师同意不得动用任何仪器设备，不得随意进出实验室。

(2) 学生应在实验课前认真预习实验内容，写好预习报告，无预习报告者不得参与实验课程。

(3) 学生在实验操作前要认真听取指导教师讲解，明确实验目的、原理、方法和步骤，以小组为单位由小组长签名领取相关的工具和零配件，如有问题应及时向指导教师提出。

(4) 实验室以小组为单位进行实验，分工负责、有序进行，严禁任意调换座位，更不得影响他人实验，不准动用教师控制台的各种设备。

(5) 实验室应保持整洁、安静，不得在桌面、仪器设备上随意涂写，不得将与实验无关的物品带入实验室，不乱扔纸屑、杂物，严禁高声喧哗、吸烟、随地吐痰，不准在实验室吃东西。

(6) 实验准备工作就绪后，要经过认真自查、互查，须经指导教师检查同意后，方可进行实验。操作设备的旋钮开关时不要用力过猛或超位。实验中应严格遵守设备操作规程，实验中严禁用手触摸线路中带电的裸露导体，一旦有人触电，应立即切断电源，并采取必要的救护措施并报告老师。实验中认真观察和分析实验现象，及时记录实验数据，不准抄袭他人实验结果，不做与规定实验无关的事。

(7) 实验中要爱护实验仪器设备，爱护各种零配件和工具，注意安全，节约用电、节约消耗材料。凡违反操作规程或不听指导而造成事故、损坏公物者，必须写出书面检查，并按有关规定赔偿损失。

(8) 实验中若发现仪器设备故障或其他事故，应立即停止使用并切断电源、油源、气源，停止操作，保持现场并报告指导教师，等查明原因并排除故障后，方可继续进行实验。未经指导教师允许，不得改动实验室的配电板和更换保险丝，不得擅自拆卸仪表及实训设备。

(9) 实验完成后，应及时关掉电源、油源、气源，并将所用桌椅、仪器设备、工具、各种零配件等按摆放顺序整理好交回原处并签名，做好清洁工作，将所做的实验报告交给指导教师批阅同意后，方可离开实验室。

(10) 学生实验时必须严格遵守《学生实验守则》、《学生实验安全操作规程》，如有违反，按规定处理，并通报有关部门。

1.4.2 学生实验守则

(1) 学生必须按规定的时间参加实验课，不得迟到早退，迟到 15 分钟以上者，不得参

加本次实验。

(2) 学生进入实验室必须衣着整洁, 室内必须保持安静、整洁和良好的工作环境, 严禁高声喧哗、吸烟、随地吐痰、吃零食和乱扔纸屑杂物。

(3) 服从实验指导教师的指导, 严格遵守《实验室规则》等各项制度以及实验室操作规程。

(4) 实验前应认真预习实验讲义, 写好实验预习报告, 仔细听取指导教师讲解, 明确实验的目的、要求、方法和步骤, 做好各项准备, 经指导教师检查认可后方可开始实验。

(5) 实验时应仔细观察现象, 详细记录实验数据和结果, 认真分析思考, 得出结论。不得弄虚作假, 马虎从事。

(6) 实验后应按时做好实验报告, 交指导教师批阅。不得无故不写或不交实验报告。

(7) 实验中不准动用与实验无关的仪器和设备, 不得动用他组的仪器、工具、文件和材料, 不得随意做规定以外的其他实验。

(8) 自觉爱护室内一切仪器、药品和其他设备, 不准乱拿乱用、乱拆乱装, 或私自借用, 拿出室外。

(9) 注意节约用电、用水、用气和药品材料, 实验完毕后, 及时断电、关水、停气, 按规定处理实验废品, 将仪器设备等物品清洗整理复原, 经指导教师检查后方能离开。

(10) 切实注意实验操作程序, 严防在使用仪器、设备及试剂、原料时发生着火、爆炸、中毒、放射性污染、损坏仪器设备等事故。如违章操作又不听教师指导而造成事故者, 要追究责任。

(11) 凡属责任事故给实验室及其他仪器、设备造成损失者, 均按学校制定的有关规定处理。

(12) 以上各条必须严格遵守, 违反者视情节轻重予以批评教育、经济赔偿直至追究法律责任。

1.4.3 实验室卫生管理规定

实验室是学校教学和科研工作的重要基地, 创建文明、卫生、安全的实验环境, 是教学及科研实验正常进行的重要保证。

(1) 实验仪器设备的布局要尽量和实验工艺一致, 科学布置, 摆放合理。实验结束后, 各种仪器设备要及时清理, 分类摆放。

(2) 实验室各房间应设置专门的卫生负责人, 要认真负责各房间的卫生工作, 垃圾日产日清。

(3) 实验室严禁随地吐痰, 严禁乱扔瓜果皮核、纸屑等杂物; 严禁吸烟、就餐、聚会; 严禁存放私人物品。

(4) 实验桌(台)、仪器柜、文件柜、抽屉等应保持整洁无尘, 对各种仪器设备、文件资料要定期清扫或整理, 保持干净、无灰尘。

(5) 保持实验室内无蚊蝇, 墙面、地面无污迹, 墙角无蜘蛛网, 做到窗明几净。

(6) 保持各种灯具无灰尘, 安装整齐划一。

第2章 试验设计与数据处理

2.1 正交试验设计

为了达到一定的目标,需要通过试验寻求该目标的一些因素的最优值。实验设计的目的就是尽可能少的试验次数,尽快找到这些因素的最优值。如果影响目标的因素只有一个,则称为单因素问题,否则称为多因素问题。实际问题要复杂的多,不仅影响目标的因素会有很多,而且有时需同时考察几项目标值。“正交试验设计”是处理这类问题的一种科学方法,它可以应用一种规格化的表——正交表,合理安排试验。用这种方法,可以进行最少的试验而判断出较优的条件,若再对试验结果进行简单的统计分析,还可以更全面、更系统地掌握试验结果,指导后续的试验和生产。

2.1.1 基本概念

正交试验设计(orthogonal design)简称正交设计,它是利用正交表(orthogonal table)科学的安排与分析多因素试验的方法。

【例 2-1】 45 钢热处理,考察不同工艺规范对热处理后钢性能的影响。

1. 试验指标

在一项试验中,用来衡量试验效果的指标称为试验指标,简称指标或试验结果,通常用 y 表示。本例中衡量钢调质后性能的指标为强度和塑性,而且越高越好,这就是试验指标。类似可以用数量表示的指标,称为定量指标;不能用数量直接表示的指标,称为定性指标,如产品外观质量、色泽等。在试验分析中,定性指标一般可以转化为定量指标。

2. 试验因素

试验中,凡对试验指标可能产生影响的原因,都称为因素,也称因子或元。需要在试验中考察的因素称为试验因素,通常用大写字母 A 、 B 、 C 等表示。在一般的试验研究中,并非要考察所有的因素,这需由技术人员的理论知识和实际经验确定。本例中,考察影响性能的因素主要有淬火加热温度(A)、回火加热温度(B)、回火冷却方式(C),这就是试验中的 3 个因素。在试验中,有些因素能严格控制,是可控因素,本例中的 A 、 B 、 C 3 个因素都是可控因素。有些因素难以控制,称为不可控因素,如本例中材料本身的微观偏差,试验中可能出现的随机误差。试验中可能出现的随机误差,对试验结果会产生影响,有时也列为因素处理。

3. 因素水平

因素在试验中所处的状态,或能取的不同值,称为该因素的水平,也简称水平或位级,

通常用下标 1、2、3、……表示。如果试验中一个因素的 K 个值，则称为 K 水平因素。本例中的加热温度取为 860°C 和 840°C 两个状态，则该因素有两个水平，称为二水平因素，用 $A_1=860$ 、 $A_2=840$ 分别表示 1 水平和 2 水平。因素的水平可以取为具体值，如本例中的温度；有的不能取为具体值，如冷却方式用空冷、水冷和油冷等。

明确指标，选好因素，恰当地定出各因素的水平变化范围是正交设计的重要环节，对得出正确结论有重要意义，需要慎重考虑。

4. 正交设计解决的问题

通过正交设计进行试验和分析，可以回答下面 4 个问题。

- (1) 试验中相应因素对指标影响的作用大小，作用大的因素，应是重点研究的因素。
- (2) 每个因素的水平对指标的影响，找出每个因素的最好水平。
- (3) 能够得到较好指标的最佳因素的水平组合，得出最佳的工艺和方案。
- (4) 通过方差分析，判断误差的作用。

2.1.2 安排试验的原则

现以三个因素，每个因素取三个水平为例说明安排试验的原则。

如果对每个因素中的三个水平分别选取一个水平组成可能的试验方案，共有 3^3 个试验。显然，做完这 27 种可能的搭配的试验，就能得到满意的结果，然而能否减少试验量，只在 27 种搭配中抽出一小部分搭配进行试验，就可以解决问题呢？如果可能，对于更多因素，更多水平的试验，其意义就更大。

正交试验设计的“均衡搭配”原则和在此基础上的“综合可比性”原则，就为解决这一问题提供了便利的条件。

如图 2-1 所示，每个“●”代表一个试验。在 27 个试验中只挑 9 个点进行试验，按照正交试验的原则，在这 9 个试验中，每一个因素的每一个水平都有 3 个试验，而且任一因素的任一水平与其他因素的每一个水平相遇一次，且仅相遇一次。选用其他点进行试验，则满足不了这一要求。

正交设计所用的“正交表”正是按照上述原则建立的规范表格，只要根据选定的因素和水平数，选用相应的已经编排好的“正交表”安排试验并进行分析，就能达到上述目标。

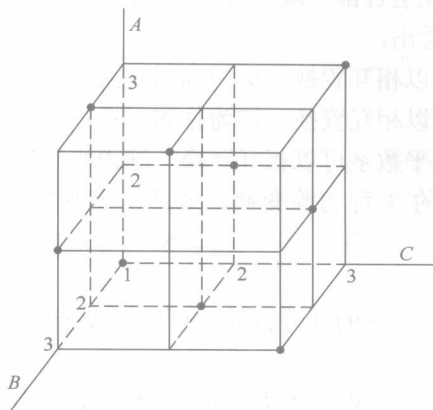


图 2-1 正交试验点分布

2.1.3 正交表

1. 正交表

正交表是正交试验设计的基本工具，它是根据均衡搭配的原则，运用组合数学理论构造的一种数字表格。

$L_4(2^3)$ 是一张最简单的正交表，它表示一个具体的数字表格，见表 2-1。表中各个数字的含义说明如下：

表 2-1

$L_4(2^3)$ 正交表

列 号 试 验 号	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

通常等水平正交表写成 $L_a(b^c)$ ，其中 L 是 Latin 的第一个字母，表示正交表； a 是正交表的行数，即应安排的次数； b 表示正交表同一列中出现的不同数字的个数或因素的水平数，因素有 b 个水平或在正交表中出现 b 个数字，就称为 b 水平正交表； c 表示正交表的列数，或正交表最多能安排的因素数，每列安排一个因素，因素数可以小于列数，把多余的列空缺或抹去，但不能多于列数。

显然， $L_4(2^3)$ 是一个二水平正交表。有四行三列，最多能安排三个因素，每个因素有二水平。所安排的试验数是 4 个，而全面试验数是 8 个，就是说，用 $L_4(2^3)$ 安排三个二水平因素试验时，可以比全面试验少做一半。

除等水平正交表外，还有非等水平正交表，一般表示为 $L_a(b_1^{c_1} \times b_2^{c_2})$ ， $L_a(b_1^{c_1} \times b_2^{c_2} \times b_3^{c_3})$ ($b_1 \neq b_2 \neq b_3$)，各字母表示意义与 $L_a(b^c)$ 相同。实际上这是一种不等水平的混合正交表。

常用正交表可分为：标准表、非标准表和混合型正交表。常用的正交表表格见附录。

2. 正交表的基本性质

(1) 正交性 具体表现在：在任何一列中各水平都出现，且出现的次数相同；任意两列之间各种不同水平的所有可能组合都出现，且出现的次数相同。

由正交表的正交性可以看出：

- ① 正交表的各列之间可以相互置换，称为列间置换。
- ② 正交表的各行之间可以相互置换，称为行间置换。
- ③ 正交表中同一列的水平数字可以相互置换，称为水平置换。

上述三种置换为正交表的 3 种初等变换。经过初等变换得到的一切正交表，称为原正交表的同构表或等价表。实际应用时，可根据试验要求，把一个表变成与之等价的其他形式的表。

(2) 代表性 按照正交表安排的部分试验，可以代表全面试验，这是由正交表的均衡搭配原则得到的。

(3) 综合可比性 经过简单的数字处理，可以单独比较一个因素对试验指标的影响大小，这种综合可比性是正交试验设计进行结果分析的理论基础。

2.2 正交表的使用和极差分析

正交试验设计的基本程序分设计试验方案和处理试验结果两大步。设计试验方案时，主要步骤可归纳如下：

- (1) 明确试验目的，确定试验指标。
- (2) 确定需要考察的因素，选取适当水平。
- (3) 选用合适的正交表。
- (4) 进行表头设计。
- (5) 编制试验方案，组织实施。

处理试验结果的方法有多种，这里先介绍极差分析法即直观分析法。

下面用实例介绍正交表的使用和极差分析法。

【例 2-2】 轴承圈退火试验，试验目的为消除工件内应力，降低硬度，增加韧性。

2.2.1 试验方案设计

1. 确定指标

试验指标由试验目的确定。本例的指标是退火后的硬度合格率，是一个定量指标，且越大越好。

2. 确定因素并选出水平

根据理论分析和经验确定考查指标的因素及每一因素的变化水平。这是合理设计试验的重要环节，应慎重考虑。当因素较多时，选取因素不宜过多，以 2~4 为宜，经过试验，分析出主要的影响因素后，可再考查这些因素，水平可适当多一些。

本例中的因素选择加热温度、保温时间和出炉温度 3 个因素，每个因素考查两个水平。因素和水平变化情况列于表 2-2。

表 2-2

因素水平表

水 平 \ 因 素	(A)	(B)	(C)
	加热温度	保温时间	出炉温度
1	800℃	6h	400℃
2	820℃	8h	500℃

3. 选用正交表、排表头、编制试验方案

根据选取的因素和水平，选择一个合适的正交表，该表能容纳下所有的因素和水平。排表头就是确定哪个因素放在哪一列上，在简单的情况下表头很容易安排，问题复杂时，就比较麻烦。

本例选用 $L_4(2^3)$ 表，可安排三个因素，每一个因素有两个水平，见表 2-2。

具体做法：在 $L_4(2^3)$ 表头的第 1、2、3 列上分别写上加热温度、保温时间和出炉温度。表中各因素列中，分别在数字 1 和 2 的位置填上各因素的 1 水平、2 水平，得到一张试验计划表，见表 2-3。

表 2-3 正交试验结果

列 号 试 验 号	1 (A) 加热温度 (°C)	2 (B) 保温时间 (h)	3 (C) 出炉温度 (°C)	结果 (y _a)
1	1 (800)	1 (6)	1 (400)	90
2	1 (800)	2 (8)	2 (500)	85
3	2 (820)	1 (6)	2 (500)	45
4	2 (820)	2 (8)	1 (400)	70
K _j	175.0	135.0	160.0	a=1, 2, 3, 4 j=1, 2, 3
k _j	115.0	155.0	130.0	
$\bar{K}_j$	87.5	67.5	80.0	
$\bar{k}_j$	57.5	77.5	65.5	
极差 R _j	30.0	10	15	

4. 试验

按照正交表中的四个试验方案进行试验，将试验结果填入表格的右端，每一结果与每一试验方案对应，本例中有 4 个试验，得到 4 个试验结果 $y_1 \sim y_4$ 。

2.2.2 试验结果处理——极差分析法

试验结果处理的目的在于确定试验因素的主次，各因素的最优水平及试验范围内的最优组合。

1. 直接比较

直接分析、对比部分试验的结果，求得较优组合。从表 2-3 可以看出，1 号试验的结果最好，其次是 2 号、4 号，3 号最差。这样比较的结果，虽然能求得较优组合，但却不能完全地达到试验结果处理的目的，因为能做的部分试验不能完全保证最优组合就在其中。

2. 综合比较（极差分析）

依据正交表的综合可比性，利用极差分析法（也简称 R 法），可以非常直观简便地分析试验结果，确定因素的主次和最优组合。

首先，比较每个因素的不同水平对试验结果的影响大小。计算每列中相同水平，对应两试验的指标及其平均值。本例中，第一列（因素 A）的 1 水平 A_1 出现在表 2-3 的第 1、2 号试验，这两个试验结果的和及平均值是：

$$K_1 = y_1 + y_2 = 90 + 85 = 175$$
$$\bar{K}_1 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = \frac{1}{2}(90 + 85) = 87.5$$

(A) 的二水平 A_2 出现在第 3、第 4 号试验中，这两个试验的平均结果是：

$$k_1 = y_3 + y_4 = 45 + 70 = 115$$
$$\bar{k}_1 = \frac{1}{2}(y_3 + y_4) = \frac{1}{2}(45 + 70) = 57.5$$

现在在 A_1 和 A_2 条件下的两次试验中，B 和 C 的变化是“平等”的，所以， $\bar{K}_1$ 和 $\bar{K}_2$ 的差异反映了 A 的两个水平间的差异，这就是正交设计中的综合可比性。

比较可以看出， $\bar{K}_1(\bar{A}_1) > \bar{K}_2(\bar{A}_2)$ ，因此因素 A 的 A_1 水平对结果有利。

同理可以比较其他两个因素 B、C，以每一因素的同一水平为一组，取平均值，有：

$$K_2 = y_1 + y_3 = 90 + 45 = 135$$

$$\bar{K}_2 = \frac{1}{2}(y_1 + y_3) = \frac{1}{2}(90 + 45) = 67.5$$

$$k_2 = y_2 + y_4 = 85 + 70 = 155$$

$$\bar{k}_2 = \frac{1}{2}(y_2 + y_4) = \frac{1}{2}(85 + 70) = 77.5$$

$$K_3 = y_1 + y_4 = 90 + 70 = 160$$

$$\bar{K}_3 = \frac{1}{2}(y_1 + y_4) = \frac{1}{2}(90 + 70) = 80$$

$$k_3 = y_2 + y_3 = 85 + 45 = 130$$

$$\bar{k}_3 = \frac{1}{2}(y_2 + y_3) = \frac{1}{2}(85 + 45) = 65$$

为了便于比较, 上述计算结果均列入表 2-3 中, 其 K_j 是正交表中第 j 列的一水平对应的指标和, $\bar{K}_j$ 是其平均值; k_j 为第 j 列的二水平对应的指标值之和, $\bar{k}_j$ 为其平均值。

按每一列中获得最大值的水平, 选择 A_1 、 B_2 、 C_1 为最优水平组合, 即最优工艺条件为 $A_1B_2C_1$ 。该条件在 4 次试验中没有做过, 通过综合比较, 得出的该条件获得的指标应比直接比较的指标要高, 这可以通过补充该条件试验加以验证。如果经试验表明仍不及已做过的 4 次试验的指标, 而且差别很大, 说明该试验问题复杂, 有未列入的因素影响, 需进一步研究。

现在, 分析 A 、 B 、 C 3 个因素对指标的影响次序。直观上, 一个因素的变化对试验结果的影响大, 就是主要的, 即这个因素的不同水平对应的指标之间的差异越大, 说明这个因素对指标的影响越大。反之, 一个因素的不同水平对应的指标的差异很小, 就说明这个因素的影响小, 可以用极差值的大小来判断影响因素的主次。极差值 R_j 就是第 j 列的因素水平变动时试验指标的变动幅度, 具体计算是用该因素的水平对应的指标的平均值中最大值减去最小值, 计算式为

$$R_j = \max[\bar{K}_j, \bar{k}_j, \dots] - \min[\bar{K}_j, \bar{k}_j, \dots] \quad (2-1)$$

本例中, R_j 计算比较简单, 结果列入表 2-3, $R_1 > R_2 > R_3$, 因此影响因素中, 加热温度 (A) 最大, 出炉温度 (C) 次之, 保温时间 (B) 最小。

这样的分析结果可以帮助我们正确地确定工艺参数和控制影响因素。如本例中, 在生产中, 正严格控制主要因素 A , 而对于保温时间, 对指标影响是最小的, 从节能和高效的原则出发, 可以选择 B_1 而不选 B_2 。但这样的分析结果并不是固定的, 当试验条件变化时, 它们也要变化。如从理论上我们知道, 如果保温时间水平选择不当, 不能充分均热, 这就有可能成为主要因素, 因此, 水平的选择在正交试验中是非常重要的。

【例 2-3】 40Cr 热处理试验。40Cr 是广泛采用的合金钢, 其使用寿命在一定程度上决定着设备的工作效率和生产量。

1. 制定试验计划

(1) 试验目的 提高 40Cr 的使用寿命, 指标是热处理后硬度和冲击韧性。

(2) 确定因素和水平 确定试验因素有四个: 冷却方式、加热温度、回火温度和回火后的冷却方式, 每个因素选取 3 个水平。因素、水平表见表 2-4。