

921623

高等学校教材

工业开发技 术分析原理

侯克复 编著

兵器工业出版社

工业开发技术分析原理

侯克复 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书共八章，两大部分。第一部分为开发工业项目可行性研究，内容包括试验设计方法，经济评价、展望和预测以及多目标决策；第二部分为开发工业项目系统整体最优，包括系统综合分析、系统优化、系统可靠性、安全性及环境影响评价。两部分内容相互渗透、补充、配合，从而使工程技术科学和软科学有机地结合起来，比较系统、全面地从技术上和经济上阐述了开发新产品、新技术，从实验室研究到大工业生产全过程的基本理论和研究方法。

本书内容新颖，概念清晰，说理透彻，深入浅出，适用面广。数学理论部分推导简洁，理论联系实际，书中配有大量的实例，对解决实际问题有参考价值。

本书可作为工科院校各专业高年级的教材和参考书，亦可供工程技术人员参考。

工业开发技术分析原理

侯克复 编著

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京沙河建华印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：17.75 字数：435.24千字

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

印数：1~1400 定价：3.55元

ISBN 7-80038-229-X/TB·11(课)

前 言

当前,我国正处在改革、开放、创新的时期,新产品、新技术开发与日俱增。产品和技术开发要以“面向现代化,面向世界,面向未来”为指针。一个成功的开发项目不仅是出产品,更重要的是要求开发项目在经济上合理,技术上先进,时间短、花费小,还要从资源、资金、能源、工艺现状、安全性、可靠性、环境保护、市场需求以及人材培养等方面综合考虑。它包括了工程技术系统问题和事理系统问题,需要综合运用工程科学、社会科学、经济科学、环境科学以及管理科学等方面的知识,来解决‘开发’问题。广大工科院校的学生面临着一个学习和掌握‘开发’必备的基础理论知识和研究方法的紧迫任务。使工科院校毕业生不仅是具有工程技术知识的‘专材’,而且是具有经营管理能力的‘通才’,培养出集理论知识与管理能力于一身的人材。为了适应这一需要,编写了本教材,欲起到抛砖引玉的作用。

本教材力图将工程技术科学和软科学有机地结合起来,从技术上和经济上论述新产品、新技术,是从实验室研究过渡到大工业生产工程技术的人员应该掌握的理论和研究方法。特别注意解决实际问题的技能,突出‘开发’过程的经济效益和从‘开发’系统整体上研究问题。为此,以两个主题为重点:

第一,以数学模型来描述开发项目性能、特点和发展趋势,籍此确定项目开发的价值。

第二,应用系统工程的理论和方法建造开发项目系统和评价各种系统方案的优劣。为此,本书共分八章,第一章简述‘开发’研究对象、内容及任务。第二章在必须考虑经济效益的现代化科研和生产中,应该怎样进行试验设计和分析的原理和方法,对此作了深入浅出的详细讨论。第三、四章研究开发项目的经济评价、展望和预测,以及决策原理和方法。第五~八章讨论了“开发”系统,综合了几种比较有效的方法。介绍了运筹学、大系统理论在“开发”系统整体最优设计、最优控制和最优管理中的应用。同时以现代数学为工具对开发系统的可靠性、安全性、经济性和环境影响的评价原理和方法进行了讨论。

本教材内容比较充实、新颖,材料较为丰富。全书涉及的学科较多,但在内容安排上,避免全面系统地介绍它们的广泛内容,而着重论述一些适合工程上应用的概念、原理和方法。力图做到近代数学理论与工程实际相结合,使抽象问题具体化,数学问题工程化,有助于建立起直观,正确的概念。在内容选取上,贯彻了加强基础和少而精的原则。全书给出了许多实例,以此将各学科的原理与工程实际有机地联系起来,有利于对原理的理解与深化。

本教材可作为工科院校高年级学生一学期的教程也可供大学毕业的工程技术人员学习用。全书共分八章,总参考学时数为90,其中第一章为2学时,第二章为10学时,第三章为12学时,第四章为14学时,第五章为10学时,第六章为18学时,第七章为8学时,第八章为10学时,机动6学时。由于本教材涉及学科多,各章节内容介绍繁简不一,使用时对各章节内容的删补,可按实际情况确定。建议安排1~2个综合性作业,以便深入掌握全书内容。在编写本教材过程中引用了有关书刊、教材和资料,特向作者表示感谢。

本教材是根据近年来讲授该课程的讲稿、讲义编写成的。参加编写的有郭质良和侯克忠两位同志,侯筠同志承担了全书的插图绘制、文字整理等工作。

本教材由北京理工大学洪宝华教授主审,机电工业部兵工教编室孙业斌副教授对本教材

EAC29/06

结构及格式提出了宝贵意见。在此，一并表示感谢!

由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1989.8

出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中精选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由洪宝华主审，经机械电子工业部兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年8月

目 录

第一章 概述	(1)
§1-1 工业开发技术分析原理的研究对象和任务.....	(1)
§1-2 工业开发技术分析原理的内容.....	(2)
§1-3 工程项目开发的步骤.....	(4)
第二章 工业试验设计方法	(5)
§2-1 概述.....	(5)
§2-2 析因试验设计.....	(8)
一、概述.....	(8)
二、完全析因(全面)试验设计.....	(9)
三、随机化区组试验设计.....	(13)
四、拉丁方区试验设计.....	(14)
五、因子套试验设计.....	(16)
§2-3 分析因(正交)试验设计.....	(18)
一、试验方案设计.....	(18)
二、试验结果的计算和分析.....	(20)
三、正交表的灵活运用.....	(27)
§2-4 <i>SN</i> 比试验设计.....	(39)
一、概述.....	(39)
二、 <i>SN</i> 比试验设计.....	(40)
§2-5 调优试验设计.....	(42)
一、概述.....	(42)
二、调优试验设计.....	(43)
第三章 工程项目经济分析与评价	(47)
§3-1 预测技术与应用.....	(47)
一、概述.....	(47)
二、调查研究预测法.....	(49)
三、时间序列预测法.....	(51)
四、概率预测法.....	(57)
五、回归正交设计预测法.....	(70)
六、灰色系统预测模型.....	(80)
§3-2 项目的经济评价.....	(93)
一、现金流通.....	(93)
二、工程项目建设总投资估算.....	(94)
三、总生产成本和生产规模的估算.....	(95)
四、工程项目经济评价方法.....	(97)

第四章 决策分析	(102)
§4-1 随机性决策分析	(102)
一、随机性决策问题的基本概念	(102)
二、风险型决策分析	(103)
三、非确定型决策分析	(108)
四、效用理论	(110)
§4-2 多目标决策分析	(115)
一、基本概念	(115)
二、决策方法	(116)
§4-3 层次分析法	(117)
一、概述	(117)
二、层次分析法的基本原理	(118)
三、应用举例	(121)
§4-4 线性多目标决策分析	(122)
一、线性规划	(122)
二、多目标线性规划	(124)
§4-5 序贯决策问题分析	(134)
一、动态规划	(134)
二、单目标序贯决策问题	(137)
三、多目标序贯决策问题	(145)
§4-6 模糊决策	(146)
一、模糊决策的数学基础	(146)
二、单目标模糊决策	(149)
三、多目标模糊决策	(150)
四、多级模糊决策	(150)
第五章 开发过程系统分析与综合	(156)
§5-1 概述	(156)
§5-2 系统分析	(158)
一、系统分析的基本概念	(158)
二、系统的数学模拟	(158)
§5-3 系统综合	(169)
一、直接最优化法	(169)
二、探试法	(170)
第六章 系统最优化	(172)
§6-1 几何规划及其应用	(172)
一、几何规划的基本思想	(172)
二、正定几何规划	(173)
三、广义几何规划	(176)
四、应用举例	(178)

§6-2	连续系统最优化	(183)
一、	连续型最大值原理简述	(183)
二、	应用举例	(188)
§6-3	离散系统最优化	(193)
一、	概述	(193)
二、	应用举例	(195)
§6-4	大系统的最优化	(208)
一、	概述	(208)
二、	大系统的分解协调法	(211)
三、	应用举例	(214)
第七章	系统的评价	(221)
§7-1	热力学评价法	(221)
§7-2	模糊评价法	(222)
一、	概述	(222)
二、	模糊综合评价	(224)
§7-3	系统可靠性	(227)
一、	概述	(227)
二、	不可维修系统的可靠性	(228)
三、	系统可靠性的预测和分配	(230)
第八章	工业开发项目环境影响评价	(238)
§8-1	污染源调查与评价	(238)
一、	污染源调查	(238)
二、	污染源的评价	(239)
§8-2	建设工程项目环境影响预测	(240)
一、	大气污染预测	(240)
二、	地面水污染预测	(241)
§8-3	环境影响评价方法	(247)
一、	环境质量综合指数法	(247)
二、	环境质量模糊评价法	(249)
三、	双层模糊综合评价法	(254)
§8-4	环境质量的分级	(258)
一、	模糊聚类分析	(258)
二、	模糊识别	(264)
	主要参考文献	(267)
	附录一 常用正交表	(269)
	附录二 正交拉丁方表	(273)
	附录三 随机数字表(部分)	(276)

第一章 概 述^{[1][8][9][10]}

随着我国社会主义“四化”建设事业的发展，需要开发的新产品、新技术越来越多，作为探索事物的系统性和共性的综合性学科，也越来越引起人们的瞩目。新产品、新技术的开发是一件复杂而又困难的工作，既要解决工程技术系统问题，又要处理管理系统问题。这就不仅需要工程科学知识，还需要经济学、环境科学、系统科学、试验设计技术、近代数学以及社会学等方面的知识。应用这些学科知识从各自的角度研究开发工程项目问题，使得所开发的项目技术上最先进，经济上最合理。这是一个崭新的而且有实际意义的课题。本课程即是围绕这一课题，将工程技术科学和管理科学有机地结合起来，从技术上和经济上论述开发新产品、新技术，从实验室研究过渡到大工业生产所必须遵循的原理和研究方法。特别重视实用性和开发过程的经济效益。通过本课程的学习能够有效地解决各种错综复杂的问题，使开发项目实现整体最优。

§ 1-1 工业开发技术分析原理的研究对象和任务

工业开发技术分析原理的研究对象是开发新产品、新技术的基本原理和研究方法。虽然开发工程项目种类繁多，制备方法、机器设备及结构型式等各有不同，但若对开发过程加以分析，则发现它们有其共同的基本原理和相似的研究方法。例如，无论开发任何工程项目都必须预先进行可行性研究。所谓可行性研究就是运用多种科学知识，对开发项目进行调查研究和综合论证，为拟建项目提供科学依据，从而保证工程项目获得最佳经济效果。例如，开发化工新产品需要进行市场预测，掌握该产品投产后市场需求情况及发展趋势，而开发机械工业产品以及其它门类工业产品也需要进行市场预测。再如，开发任何工业产品都必须进行研究，将原料、能量和专门技能转化成为产品的系统进行综合。所谓综合是将各个生产单元或各个部分综合为一个最优的整体。为此，从“工业开发技术”的角度出发，可以认为任何开发项目的开发程序，不论简繁，均系由若干个基本过程，共同原理和类似的方法综合而成。这正是形成本门课程的客观条件。

“工业开发技术”的任务是开发国民经济各个部门所需要的新产品和新技术，满足日益发展的社会主义建设的需要。这种开发过程可以分为两个阶段：第一阶段是实验室研究，主要解决新产品或新技术开发的可能性；第二阶段是从实验室过渡到第一套工业装置建成试产。这两个阶段构成了一个工程项目从设想到建成投产的全过程。在这过程中需要解决下列几个问题：确定工程项目是否要开发，有无经济价值和技术意义，获得足够的信息、数据供工厂规模放大设计使用；工程项目整体最优化，即最优设计、最优控制和最优管理；解决废

物处理和环境污染问题。

§ 1-2 工业开发技术分析原理的内容

上已述及开发工程项目需要解决的主要问题。为了解决这些问题，本教材的内容为：

1. 试验设计方法 工程项目的开发是把新产品或新技术的生产或应用“设想”变为生产或应用“现实”。这种“现实”必须首先在实验室实现，所以任何开发项目都必须经过实验室研究。确定采用什么原料、设备和机器；研究开发项目采用什么工艺路线和技术路线；选择最佳的工艺参数和设计参数；寻找预选开发方案，从中筛选出满意方案。这些工作的基础是获得大量的、有效的信息数据，而收集数据、情报资料最有效的手段是试验设计方法。所谓试验设计方法是指在花费一定的人力、物力和时间的条件下，能够取得的信息资料或数据的试验方法。试验设计方法广泛应用于科学研究，生产实践上，也开始应用市场调查，民意测验等领域。应用对象如此变化，各自所采用的试验设计也就有所不同。然而，试验设计的基本思想、方法和步骤、作为共性的东西（如处理的选择、误差的控制等），还是可以探讨的，找出其共同的规律性。

试验设计方法有两个重要方面：处理的选择，即因素和水平的选取方法；误差的控制，即试验配置方法。任何实验，其成功与否基本上取决于所选取的因素和水平是否恰当。无论实验做得如何精密，在相同的条件下得到的数据，也还是存在一些波动的，这种波动是无法控制的“误差”，“误差”要与“差错”和失败区分开。因此，在进行实验时必须作到重复，它可以控制实验误差；随机化，可以把系统误差转化为偶然误差；采用局部管理来消除系统误差。显然，重复、随机化和局部管理是实验配置必须遵守的原则。

2. 可行性研究 开发工程项目可行性研究，就是对工程项目从技术、经济方面进行综合论证。如开发这个项目的理由，资源、市场情况如何，项目规模、工艺技术路线，预计投资效果和成功的可能性等，必须作出明确的结论，作为项目开发的依据，从而保证开发项目有最佳的经济效果。

可行性研究的主要内容：

(1) 市场销售情况与项目规模的确定。研究开发项目的产品（或技术）市场销售情况，是可行性研究的一个重要环节。一个工程项目的设想，有时来自市场的需要，有时起源于自然资源的发现与开发。无论哪种情况，都必须对产品的需求进行研究。分析市场当前销售量，是否有利可图，并预测未来可能的销售量，从而确定开发项目发展方向及规模。因此，开发工程项目过程中，对产品的需要和市场分析是十分重要的，对项目的可行与否起决定性作用。

(2) 原料和技术路线的选择。研究开发项目采用什么原料、机器设备和技术路线，才能保证项目成功后技术上先进和经济上合理有利。原料路线的选择必须满足可靠性，经济性和合理性的三项原则。所谓合理性就是将资源能够综合利用。

技术路线就是把原料加工出产品所采用的工艺操作方法和技能。由一种原材料加工成某种产品，可以采用各种不同的技术路线，从这些技术路线中，选择最好的加以采用称为技术路线的选择。选择的原理是“技术上先进，经济上合理”。必须指出，不能片面强调技术上先

进，而不注意经济效果。新技术能否广泛应用，主要取决于它的经济效果是否优于已有的工艺技术。

(3) 资金与成本的研究。它包括建设投资与生产成本的估算，资金规划及经济评价等方面，它们之间有着密切的关系。建设投资和成本估算是工程项目经济评价的基础。所谓经济评价就是预先估算开发工程项目的经济利益。经济效果好坏是工程项目和方案取舍的决定因素。资金规划是指资金的运筹，即如何计划和使用资金才能得到最大的经济利益。同一项目，同样的投资方案和投资额，由于资金运用计划不同，经济效果的差异可能很大。因此，必须掌握资金规划方法。

上述几点，是开发项目可行性研究的主要内容。在建设工程项目可行性研究时，对上述几个方面尽量作出比较准确的评价，使决策者据此做出开发或不开发的决策。

3. 预测技术分析 预测是对尚未发生的或目前还不明确的事物进行预先的推测或估计。比如，预测产品需求、原料与人工费用、投资估算以及对影响收益、成本和利润的各种因素作出预测，然后将这些预测值综合到评价中去。因此，预测是开发项目的评价与分析的基础。预测的对象虽然是错综复杂的，受着各种因素的影响，但是，事物之间都存在着必然联系，而这种联系又不断地重复出现，并且决定着事物必然向着某种趋向发展。因此，认识事物的发展变化规律，并且利用规律的必然性，然后进行科学的预测，可以取得良好的效果。

4. 决策分析 决策是指欲达到一个目的，从多个候选的可行方案中，选定一个理想的或满意的方案。简单地说，决策就是决策者经过周密考虑和比较之后，对于应当做什么和怎样做来做出结论。在开发工程项目过程中各个阶段，都要作出决策。例如，对资金分配、生产规划、投标选择以及设备机器使用等作出决策。这类事情举不胜举。决策是一个过程，这个过程可以分为若干步骤，其中主要步骤是确定目标、价值准则和方案优选等环节，决策者必须亲自研究和处理。

5. 系统分析与综合 分析与综合都是应用系统工程方法分析和解决开发项目问题。分析是将一个整体分离或分解为若干个基本要素或组成部分，分析研究各个组成部分的功能和相互关系，以及它们与环境的相互影响，使系统最优地达到预定的目标。综合是将各个要素或各个部分合成为一个整体，且整体最优。显然，无论是系统分析还是系统综合，最终目标都是建立最优的系统，因此其核心问题是系统数学模型的建立及其模拟。

6. 系统最优化 所谓系统最优化就是寻求目标函数在给定约束条件下的最优值。也可以说，通过对数学模型的求解，来达到系统最优化的目的。由于描述系统的目标函数及约束条件不同，而采用的最优方法也不同。一般来说，目标函数和约束条件可以分为：线性形式、多项式形式、微分形式及差分形式。这四种形式可以分别用线性规划、几何规划、最大值原理及动态规划求解。

7. 环境影响评价 环境影响评价是指工程项目建成后，预测其对自然环境和社会环境的影响。环境影响评价是近十年来发展起来的。由于这项工作的开展，使我国环境保护工作，从消极的治理走向防患于未然的阶段，由被动转向主动。环境影响评价的主要内容：开发项目的地理位置、建设规模，自然环境与社会环境以及“三废”排放数量等，并作出经济损益分析；采取一定的评价模型，对未来环境影响进行定性或定量的评价；提出补救办法或采取代替方案。

§ 1-3 工程项目开发的步骤

工程项目开发的步骤如图1-1所示。这图所表示的仅仅是个典型的过程步骤，并非每个项目开发均是如此。通过实验室的研究后，取得了一些数据资料，据此提出项目的设想系统。经过第一次评价后，进入预设计阶段，并进行第二次评价。模型实验或中试是获得所必须的工程参数，并按工程设计观点加以整理，作为基础设计的依据。经过基础设计后，建造了工程项目系统，并进行试产。反复修改最后得到满意的结果。

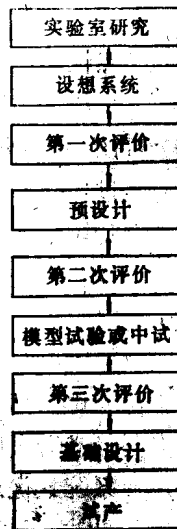


图 1-1

第二章 工业试验设计方法^{[1~2][3][7]}

§ 2-1 概 述

试验设计方法是20世纪初产生的,最先应用于农业、生物学等方面。到了40年代将试验设计方法逐步推广到工业生产、科学研究和经济管理领域。

试验设计的内容丰富、发展迅速,大致经历了三个阶段:单因素和多因素方差分析法;传统的正交试验设计法;信噪比试验设计法(SN)与产品的三次设计法。信噪比试验设计法是试验设计方法中最为重要的,是对传统试验方法的发展和完善。它与方差分析法和正交试验设计法相结合,开辟了更为重要,更为广泛的应用领域。近年来又创造出调优运算方法(EVOP),并将其表格化和程序化。

国内外经验表明,在工业试验中应用试验设计法取得了显著的经济效益。二次大战后,日本工业生产飞跃地发展的原因之一,就是在工业领域里普遍推广、应用试验设计法。近几年来,我国许多工厂企业应用试验设计法也取得了十分显著的效果。试验设计法不仅能用于技术性领域,即实物性试验,也能用于非技术性领域,即非实物性试验。如生产计划、产品销售、事物管理等多方面。

开发新产品、新工艺或改造旧工艺,都必须进行各种试验。通常,试验分析分为三个阶段:试验设计、试验实施、试验结果分析。其中,以试验设计和结果分析最为重要。通过试验得到各类不同的试验数据,从这些数据中找出影响产品质量的重要因素,找出最优的工艺参数,以使产品达到优质、高产、低消耗的目的,从而使产品在竞争中具有强大的生命力,获得巨大的经济效益。但是,预想达到这个目标必须有良好的试验设计方法和科学的处理试验结果的方法。所谓试验设计方法,顾名思义是有关试验的设计方法。一般说来,在一定的试验费用条件下,凡是有条件取得的情报量都能得到的方法,都可以称为试验设计方法。或者说,为获得一定的情报量,用最低的试验费用进行试验的方法,也是获得试验数据的一个有效手段,而试验数据的处理是对所需解决的问题给出明确的答案。由于试验数据都包含有相当的试验误差(随机误差、系统误差和过失误差),所以对试验数据进行整理和分析,从中获得可靠结论的唯一稳妥的处理办法便是数理统计法。试验设计方法是以概率论与数理统计学为理论基础,结合专业知识,应用有关的近代数学方法合理安排试验,以最少的费用和最小的试验工作量,取得所需要的一切资料,并且准确可靠,分析方便。但是,试验结果的分析 and 试验的设计密切关联、相辅相成。任何好的分析都无法补救拙劣的设计。试验的设计必须保证该试验完成后,对所需解决的问题给出明确的答案,而分析方法必须能从试验数据中提取出全部有用的资料。因此,在进行一项开发研究工作时,必须兼顾到试验的设计和试验结果的分析。

工业中的试验工作五花八门,种类繁多,但其中大部分可归纳为几种类型的研究工作:物理或物理化学研究,原料、中间产品和产品的分析;材料试验;工艺过程的试验室研究;

工厂操作和生产过程的研究。在这些试验研究中，应用试验设计方法可以解决如下问题：（1）科学地、合理地确定试验方案，以期能最大限度地降低试验误差和试验工作量；（2）从众多的影响产品性能指标值的因素中，找出主要的影响因素以及各因素之间的相互作用；（3）可以分析出试验误差的大小和确定目标值的期望值及其置信区间；（4）能够确定最优的设计参数和工艺条件。在试验过程中产生试验误差是不可避免的，其原因来自两方面：一是试验对象；二是观测仪器。来自试验对象的误差，也称为条件误差。它可分为内部条件误差和外部条件误差。前者是由于试验对象本身内部原因的差异产生的误差，而后者是因试验对象受外界条件影响而产生的误差。它们都反映在空间和时间上的不均匀，不一致。例如，对一根试验材料的质量进行研究，由于材料的各部分性质不一致，就会因取样位置的不同造成误差，这就是空间上的不均匀性造成的内部条件误差。又如，电烘箱内各个部位的温度有差异，就会因试样放置位置的不同而性能不一样。这是由于空间的不一致性出现外部条件误差。来自观测仪器的误差也称为估计误差或观测误差。主要是由于观测仪器条件限制产生的误差，表现在时间与空间的不一致性。其次，观测者判断时的主观偏见也带来了误差。

显然，根据误差的来源和表现形式，可以将实验误差大致分为三类：

1. 随机误差 它是由一系列偶然因素引起的一类不易控制的测量误差。例如，任何试验都只能从试验材料总体中抽取一定数量的试样来进行，使试验有很大的局限性，这时内部或外部的条件误差表现出随机性，即产生了随机性误差。又如，测量仪器精度不高，其测量结果时高时低，也会产生随机性误差。在多次重复试验过程中，随机误差具有统计规律性，其算术平均值随着重复观测次数的增加愈来愈小，逐渐接近于零。

2. 系统误差 它是服从确定性规律的误差，也是一个常量。例如，如果从试验对象总体中，抽取的个体有一定的偏向性，则试验对象的内部或外部条件误差就表现有系统性，即产生了系统性误差。又如，仪器本身测量结果，总偏高或偏低，就会造成系统误差。观测者的主观偏见也会造成系统误差。在处理试验数据过程中，可以采用适当的方法将这类误差识别、分离和消除，但不可能用增加试验次数的方法来消除这种误差。

3. 过失误差 由于试验观测系统测错、传错或记错等不正常的原因造成的误差称为过失误差。这时的试验数据称为异常点。在整理试验数据时必须消除这种异常点，否则得不到正确的结论。

通常，在试验过程中试验误差是综合性的，即随机误差、系统误差及过失误差，同时存在于一组试验数据里。

上已述及，虽然试验误差的产生是不可避免的，但是通过管理试验现场，可以使误差减少。管理试验现场必须遵守三个原则：重复原则、随机化原则、局部管理原则。

重复原则是减少随机误差的基本手段。每种试验条件只进行一次试验称为一次重复试验；若进行多次的试验，则称为多次重复试验。只有多次重复试验才能缩小误差。这是因为试验条件不可能完全一致，那么，在多次重复试验过程中，这几次重复里条件可能不利，而另几次重复里条件却有利，故对其条件的平均值而言，就差别甚小了。

如果在相同的条件下重复2次以上，就能了解试验数据波动的大小，从而利用其数据的差异正确地估计出试验误差。虽然产生随机误差的原因是多种多样的，但只要采用重复手段使样本的容量增大，试验结果对整体的代表性就越接近真实。多次重复试验也就提高了试验的精确性和可靠性。当然，重复试验必须在正确试验设计方案指导下进行，否则，只是消耗

大量人力、物力并无助于减少试验误差。根据经验重复次数以6~20次为适宜，且每次试验的样本大小必须相等。随机化原则就是在试验中对试验的顺序、步骤按照机遇的次序来安排。而机遇次序可以采用抽签、查随机数表等方法决定。这样一来，可以把人为的有次序安排试验而引起的系统误差转化为偶然误差。在试验中一旦有系统误差的混入，不仅无法判断效应作用的有无，而且不能用数学处理的方法来消除，使试验做不出正确的判断而失败。局部管理原则是把一个大的试验对象按照某种标准分为若干个组（区组），来减少系统误差。组内的试验尽可能做到均匀，保持受同样的影响，以期减少组内的变化，而使组与组之间的变化大些。这样一来，组内试验条件差别较小，误差也必然较小，提高了试验的精度。显然，局部管理原则是将比较的水平设置在差异较小的区组内，从而减少了试验误差。

现在，介绍一些试验设计中常用的基本概念和术语。

1. 试验指标 在试验设计中，根据试验目的而选定的用来衡量试验效果好坏所采用的标准称为试验指标。简称为指标。例如，在火炸药产品研制中常常把火药力、燃烧速度、爆炸速度以及猛度等作为产品的爆炸性能指标。试验指标可分为两大类：数量（定量）指标，如温度、压力、重量等；非数量（定性）指标，如产品的颜色、味道、光泽等。定性指标可以转化为定量指标。试验指标为一个的试验设计称为单指标试验设计，而同时为几个试验指标的称为多指标试验设计。试验指标必须根据专业知识和用户的要求来决定，并且应从本质上表示出某项性能。

2. 试验因素（因子） 凡对试验指标可能有影响的原因或要素称为因素（因子），而在试验中需要进行考察的因素称为试验因素。通常以大写字母A、B、C…等表示。在试验中，人们可以控制和调节的因素，如温度、压力等称为可控因素；人们不能控制和调节的因素，如机械的轻微振动、机械磨损等称为不可控因素。可控因素是试验研究的主要对象，必须根据专业知识和实践经验来确定。一般地说，为了确保试验再现性，应尽可能多决定些可控因素。对于一些不能轻易改变或选择的因素，如原材料种类，设备使用条件等称为条件因素，或统称为试验条件。在试验过程中，因素的变化会影响试验指标特性值，它们之间的关系类似于数学中自变量与因变量之间的关系，但并非是确定的函数关系，而呈相关关系。因此，必须应用数理统计理论来研究它们之间的关系。

3. 因素的水平 因素在试验中变化的各种状态和条件或所取的不同值称为该因素的水平或位级，通常用下标1、2、3、…表示。水平与因素一样应根据专业知识决定。通常取2或3水平，只是在特殊要求的场合，才取4以上水平。由于3水平的因素试验结果分析的效应图分布呈二次函数，二次曲线有利于呈现试验趋势的结果，故取3水平为宜。水平幅度不能过狭，也不能过宽。若过狭可能得不到任何有用的信息；而过宽时，会出现不良结果。一般地，开始水平的幅度可取得宽些，而后随着试验进行可以把水平幅度逐渐缩小。水平应取等间隔，其间隔值可以取算术等间隔值，也可以取对数等间隔值。

4. 处理组合 在试验中可以控制并能主动变更的那些因素有关水平所组成的一种安排称为处理组合。例如，两个二水平因素的试验，可组合 A_1B_1 、 A_1B_2 、 A_2B_1 和 A_2B_2 四种处理组合，即四个试验点。

5. 全面试验 对全部处理组合都进行试验，即将全部因子和所有水平都一一搭配起来，进行试验称为全面试验。全面试验的处理组合数等于各因素水平的乘积。例如，一个4因素3水平进行全面试验，需要做 $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ 次试验。显然，试验次数随因素及其水平数的

增加, 迅速增加。因此, 这种全面试验, 虽然能找出最好的试验方案, 但费时费工, 有时甚至不可能实现。除了一些特殊情况外, 一般不进行全面试验。

6. 部分试验 从全部处理组合中, 选择一部分处理组合进行试验称为部分试验。那么, 如何从全部处理组合中选择一部分处理组合进行试验呢? 这个问题利用正交试验设计就可以得到妥善地解决。它是运用排好了的正交表来安排试验, 分析试验结果的一种方法, 能以很少的试验次数找到最佳条件, 达到预期的目的。

7. 和与平均值 和是指数据组的总和, 以 T 表示。例如, n 个观测值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 其和为 $T = \sum_{i=1}^n x_i$ 。和除以数据个数之商为算术平均值, 以 \bar{x} 表示。即 $\bar{x} = \frac{T}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

8. 偏差 偏差或离差有两种表示法: 观测值与目标值 x_0 的偏差; 观测值与平均值 \bar{x} 的偏差。例如, 设有 n 个观测值 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 若这 n 个数据均有目标值, 那末, 把 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 与目标值 x_0 之间的差值叫做与目标值 x_0 之间的偏差; 若这 n 个数据没有目标值, 那末, 可计算与平均值 \bar{x} 之间的差值。这叫做与平均值之间的偏差; 这种偏差的总和为零。

9. 偏差平方和与自由度 由偏差的定义可知, 其数值有正、负和零。为了消除正、负的影响, 表征数据的分散程度而采用偏差平方和(或平方和), 以 S 表示。偏差平方和有两种情况: 若存在目标 x_0 时, 则 $S_T = \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$; 若无目标值可用平均值 \bar{x} 代替, 则 $S_T = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 。前者, 独立的平方个数为 n , 称为自由度, 以 f 表示, 即 $f = n$ 。而后者其自由度 $f = n - 1$ 。这是因为 $(x_1 - \bar{x}) + (x_2 - \bar{x}) + \dots + (x_n - \bar{x}) = 0$ 的关系式存在, 所以只能有 $n - 1$ 个独立的平方个数。

10. 平均偏差平方和与标准偏差 平均偏差平方和又称方差、均方和或均方, 以 v 表示。它表示单位自由度的偏差大小, 或者说它是表示误差、差值或波动等单位变化的大小, 其值等于自由度除偏差平方和, 即 $v = S_T / f$ 。标准偏差又称均方差或根方差, 以 $v \sqrt{v}$ 表示。

11. 极差 它是一组数据中最大值与最小值之差, 即 $R = x_{\max} - x_{\min}$ 。

12. 变异系数 它表示产品质量特性不稳定程度, 即相对波动大小, 以 cv 表示。其值越大, 说明产品质量波动越大。变异系数 cv 的倒数, 即 $1/cv$ 则表示产品质量特性的稳定程度, 其值越大, 说明产品质量波动越小。

本章主要讨论试验设计的基本知识、正交试验设计、序贯搜索设计、SN比试验设计以及调优运算试验设计等设计方法。对于列举的方法, 不作过多的理论上和数学上的证明和推导, 仅结合实例阐述方法本身。特别注重理论联系实际, 列举一些近年来国内外的研究成果。

§ 2-2 析因试验设计

一、概述

在科研生产实践中, 许多试验要求考察两个或更多的因素变化对试验结果的影响。这