



GAODENG XUEXIAO ZHUANYE JIAOCAI

• 高等学校专业教材 •

[高校教材]

食品与生物试验 设计与数据分析

章银良 编著

FOOD AND BIOLOGICAL EXPERIMENT
DESIGN & DATA PROCESSING




中国轻工业出版社

高等学校专业教材

食品与生物试验 设计与数据分析

章银良 编著

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

食品与生物试验设计与数据分析 / 章银良编著. —北京:
中国轻工业出版社, 2010. 4
高等学校专业教材
ISBN 978-7-5019-7501-3

I. ①食… II. ①章… III. ①食品工业 - 科学实验 -
统计分析 - 高等学校 - 教材②生物统计 - 试验设计
(数学) - 高等学校 - 教材 IV. ①TS2 - 33②Q - 332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 017578 号

责任编辑: 白 洁

策划编辑: 白 洁 责任终审: 简延荣 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 王培燕 责任校对: 李 靖 责任监印: 马金路

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 16.5

字 数: 381 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-7501-3 定价: 28.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

80877J1X101ZBW

前 言

《食品与生物试验设计与数据分析》教材是根据作者多年的“实验方法学”和“试验设计与数据处理”课程教学实践以及研究生在实际使用过程中出现的问题和新的需求情况而进行编写的。本教材包括绪论，试验设计基础，方差分析，协方差分析，回归分析，正交试验设计，均匀试验设计，回归正交设计，回归旋转设计，拉丁方设计和希腊拉丁方设计，抽样调查与数据处理——软件应用实例共 12 章及附录（常用统计数学用表和试验设计用表）。全书由郑州轻工业学院章银良教授编著。

本教材的编写，力求做到科学性与实用性、先进性与针对性相统一；做到循序渐进，由浅入深，深入浅出，简明易懂；着重于基本概念、基本方法的介绍，特别注意学生处理数据能力的培养；每一种设计或分析方法都安排有步骤完整、过程详细的实例予以说明；各章都有明确的教学目标且配备有习题供读者练习。

本教材在保持学科系统性和科学性的前提下，紧密联系食品科学生产与生物技术应用的科研实际，结合统计分析与计算机科学，采用软件分析手段提高数据处理能力，深入揭示内在规律，解决研究中出现的困难与问题。本教材除可作为轻工、商学、水产、粮食、农业、师范等院校的食品科学与工程、食品质量与安全、发酵（生物）工程、生物技术等专业开设《试验方法学》课程的教学用书，更可作为研究生的示范教材。此外，对食品科技工作者亦有重要参考价值。

限于编者水平，书中错误、缺点在所难免，敬请专家和广大读者批评指正，以便修订时改正。

章银良 于郑州

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 科学研究的基本过程和方法	(1)
一、科学研究的基本过程	(1)
二、科学研究的基本方法	(1)
第二节 试验设计概述	(2)
一、试验设计的性质	(2)
二、食品科学试验的特点与要求	(3)
三、试验设计的类型	(3)
四、试验设计的发展历史	(5)
五、我国试验设计的技术研究与应用现状	(7)
六、试验设计在科学研究中的地位与意义	(7)
思考与习题	(7)
第二章 试验设计基础	(8)
第一节 试验设计的基本术语	(8)
一、试验因子 (试验因素)	(8)
二、试验水平	(8)
三、试验指标	(8)
四、试验处理	(9)
五、重复	(9)
六、全面试验	(9)
七、部分实施	(9)
第二节 试验设计的基本原则	(10)
一、重复原则	(10)
二、随机化原则	(10)
三、局部控制原则	(10)
第三节 试验的误差及来源	(12)
一、误差的来源	(12)
二、误差的分类	(13)
第四节 试验数据的特征数	(13)
一、总体与样本	(13)
二、统计量	(14)
三、表征数据资料集中趋势的统计特征数——平均数	(14)
四、表征数据资料变异程度的统计特征变异数	(14)
第五节 统计假设检验	(15)

一、预备知识	(15)
二、统计检验的原理和基本思想	(18)
第六节 试验设计的基本程序	(24)
一、实验目的	(24)
二、因素和水平的确定	(24)
三、指标的确定	(24)
四、实验计划的确定	(24)
五、试验设计的实施	(25)
六、数据分析	(25)
七、结论与应用	(25)
思考与习题	(25)
第三章 方差分析	(26)
第一节 方差分析基本原理	(27)
一、自由度与平方和分解	(27)
二、 F 分布与 F 测验	(30)
三、多重比较	(31)
第二节 单向分组资料方差分析	(35)
一、组内观察值数目相等的单向分组资料方差分析	(35)
二、组内观察值数目不等的单向分组资料方差分析	(35)
三、系统分组资料方差分析	(37)
第三节 两向分组资料方差分析	(41)
一、组合内无重复观测值的两向分组资料方差分析	(41)
二、组合内有重复观测值的两向分组资料方差分析	(44)
思考与习题	(48)
第四章 协方差分析	(50)
第一节 协方差分析的意义	(50)
一、对试验进行统计控制	(50)
二、估计协方差组分	(50)
第二节 单因素试验资料的协方差分析	(51)
思考与习题	(59)
第五章 回归分析	(61)
第一节 相关分析	(61)
一、函数关系与相关关系	(61)
二、相关关系的种类	(62)
三、相关分析	(62)
第二节 一元线性回归分析	(65)
一、回归分析的概念与种类	(65)
二、一元线性回归	(65)
第三节 多元回归	(67)

思考与习题	(73)
第六章 正交试验设计	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 正交试验设计的概念及原理	(77)
一、正交试验设计的基本概念	(77)
二、正交试验设计的基本原理	(77)
三、正交表及其基本性质	(78)
第三节 正交试验设计的基本程序	(80)
一、试验方案设计	(80)
二、试验结果分析	(83)
第四节 正交试验设计的直观分析	(84)
一、无交互作用的正交试验的直观分析	(84)
二、有交互作用的正交试验的直观分析	(86)
第五节 正交试验设计的方差分析	(89)
一、不考虑交互作用的正交试验的方差分析	(89)
二、考虑交互作用的正交试验的方差分析	(94)
三、正交试验方差分析的注意问题	(100)
第六节 多指标问题及正交表在试验设计中的灵活运用	(100)
一、多指标问题的处理	(100)
二、水平数不同的正交表的使用	(100)
三、活动水平与组合因素法	(103)
四、分割试验法	(104)
思考与习题	(107)
第七章 均匀试验设计	(109)
第一节 均匀试验设计的概念与特点	(109)
第二节 均匀设计的思想	(110)
第三节 均匀设计表	(111)
一、等水平均匀设计表	(111)
二、混合水平的均匀设计表	(113)
第四节 均匀性准则	(115)
第五节 均匀试验设计的基本方法	(120)
一、试验方案设计	(120)
二、试验结果分析	(121)
第六节 均匀试验设计的应用	(122)
一、DPS 软件处理的应用	(122)
二、SAS 软件处理的应用	(123)
三、Mathematics 软件处理的应用	(125)
四、MATLAB 软件处理的应用	(125)
五、偏最小二乘回归分析技术的应用	(127)

第七节 含有定性因素的均匀设计	(129)
一、定性因素与定量因素之区别	(129)
二、混合因素均匀设计	(130)
三、全是定性因素的均匀设计	(132)
四、混合型因素混合型水平的均匀设计	(133)
第八节 均匀试验设计特别注意的几个问题	(134)
第九节 配方均匀设计	(135)
思考与习题	(138)
第八章 回归正交设计	(139)
第一节 一次回归正交设计	(139)
第二节 最速上升法	(147)
第三节 二次回归正交设计	(152)
一、数学模型	(153)
二、二次回归正交组合设计	(153)
思考与习题	(160)
第九章 回归旋转设计	(161)
第一节 旋转设计的基本原理	(161)
一、回归设计的旋转性和正交性条件	(161)
二、二次旋转组合设计的通用性	(165)
第二节 二次正交旋转组合设计的统计方法	(167)
一、原理	(167)
二、实例	(169)
第三节 通用旋转组合设计及统计方法	(171)
一、原理	(171)
二、通用旋转组合设计试验结果的统计分析	(172)
三、四元二次通用旋转组合示例	(174)
思考与习题	(176)
第十章 拉丁方设计和希腊拉丁方设计	(177)
第一节 拉丁方设计	(177)
一、原理	(177)
二、拉丁方试验结果的分析示例	(178)
第二节 希腊拉丁方设计	(181)
一、原理	(181)
二、希腊拉丁方试验结果的分析示例	(181)
思考与习题	(183)
第十一章 抽样调查	(184)
第一节 抽样调查概述	(184)
一、全面调查与抽样调查	(184)
二、抽样调查的实施	(184)

三、调查表的设计及注意事项	(185)
第二节 抽样调查方法	(186)
一、简单随机抽样	(187)
二、分层抽样	(187)
三、整群抽样法	(187)
四、等距抽样法	(187)
思考与习题	(188)
第十二章 数据处理——软件应用实例	(189)
第一节 主成分分析	(189)
一、主成分分析原理和模型	(189)
二、实例操作	(190)
第二节 数据(曲线)拟合方法	(199)
一、最小二乘法原理	(199)
二、实例	(200)
第三节 多重比较	(203)
第四节 响应面分析	(207)
第五节 SPSS 软件进行均值检验和方差分析	(212)
一、均值检验	(212)
二、方差分析	(212)
思考与习题	(215)
附录	(219)
附录 1 t 值表	(219)
附录 2 F 表	(221)
附录 3 Duncan's 新复极差测验 5% 和 1% SSR 值表	(227)
附录 4 常用正交表	(229)
附录 5 均匀试验设计表	(236)
附录 6 二次回归正交设计表 ($m_0 = 3$)	(244)
附录 7 二次回归正交旋转组合设计表	(247)
附录 8 二次回归通用旋转组合设计表	(250)
参考文献	(253)

第一章 绪 论

教学目的与要求

1. 了解科学研究的基本过程和方法；
2. 了解试验设计的性质与类型；
3. 了解试验设计的发展历史；
4. 熟悉试验设计的意义和应用。

第一节 科学研究的基本过程和方法

一、科学研究的基本过程

科学研究的目的在于探求新的知识、理论、方法、技术和产品。基础性或应用基础性研究在于揭示新的知识、理论和方法；应用性研究则在于获得某种新的技术或产品。在食品工业生产和科学研究中，通常的研究目的是为了改革生产工艺、开发新产品，寻求优质、高产、低消耗的方法等，因此属于应用基础性的研究，是以探索食品科学规律，解决理论与实践问题为目的，运用一定的科学方法，遵循一定的科学研究程序，有目的有计划的认识活动。无论是以发现或发展一定的原理、原则、方法或理论为目的的探索性研究，还是以寻求解决现实问题答案为目的的对策性研究，都需要做出理论说明和逻辑论证，而不是简单的资料收集或观点的罗列。

二、科学研究的基本方法

(1) 选题 科学研究的基本要求是探新、创新。研究课题的选择决定了该项研究创新的潜在可能性。优秀的科学研究人员主要在于选题时的明智，而不仅仅在于解决问题的能力。最有效的研究是去开拓前人还未涉及过的领域。不论理论性研究还是应用性研究，选题时必须明确其意义或重要性，理论性研究着重看所选课题在未来学科发展上的重要性，而应用性研究则着重看其未来生产发展的作用和潜力。

科学研究不同于平常一般的工作，它需要进行独创性的思维。因此要求所选的课题使研究者具有强烈的兴趣，促进研究者心理状态保持十分敏感。反之，若所选的课题并不激发研究者的兴趣，那么这项研究是难以获得新颖的见解和成果的。有些课题是资助者设定的，这时研究者必须认真体会它的确实意义并激发出对该项研究的热情和信心。

(2) 文献 科学的发展是累积性的，每一项研究都是在前人建筑的大厦顶层上添砖加瓦，这就首先要登上顶层，然后才能增建新的层次，文献便是把研究工作者推到顶层，掌握大厦总体结构的通道。选题要有文献的依据，设计研究内容和方法更需文献的启示。查阅文献可以少走弯路，所花费的时间将远远能为因避免重复、避免弯路所节省的时间所补偿，绝对不要吝啬查阅文献的时间和功夫。

科学文献随着时代的发展越来越丰富。百科全书是最普通的资料来源，它对于进入一

一个新领域的最初了解是极为有用的。文献索引是帮助科学研究人员进入某一特定领域作广泛了解的重要工具。专业书籍可为所进入的领域提供一个基础性的了解。评论性杂志可使科学研究人员了解有关领域里已取得的主要成绩。文摘可帮助研究人员查找特定领域研究的结论性内容，使之跟上现代科学前进的步伐。科学期刊和杂志登载最新研究的论文，它介绍一项研究的目的、材料、方法以及由试验资料推论到结果的全过程，优秀的科学论文，可给人们以研究思路和方法上的启迪。

(3) 假说 在提出一项课题时，对所研究的对象总有一些初步的了解，有些来自以往观察的累积，有些来自文献的分析。因而围绕研究对象和预期结果之间的关系，研究者常已有某种见解或想法，即已构成了某种假说，而须通过进一步的研究来证实或修改已有的假说。一项研究的目的和预期结果总是和假说相关联的，没有形成假说的研究，常常是含糊的、目的性不甚明确的。简单的假说只是某些现象的概括；复杂的假说则要进一步假定各现象之间的联系，这种联系可能是平行的，也可能是因果的，复杂的假说中甚至还可能包含类推关系。假说只是一种尝试性的设想，即对于所研究对象的试探性概括，在它没有被证实之前，绝不能与真理、定律混为一谈。

科学的基本方法之一是归纳，从大量现象中归纳出真谛；演绎是科学的另一基本方法，当构思出一个符合客观事实的假说时，可据此推演出更广泛的结论。这中间形式逻辑是必要的演绎工具。自然科学研究人员应自觉地训练并用好归纳、演绎以及形式逻辑的方法。

(4) 假说的检验 假说有时也表示为假设。在许多研究中假设是简单的，它们的推论也很明确。对假说进行检验，可以重新对研究对象进行观察，更多的情况是进行实验或试验，这是直接的检验。有时也可对假说的推理安排试验进行验证，这是一种间接的检验，验证了所有可能的推理的正确性，也就验证了所做的假说本身，当然这种间接的检验要十分小心，防止漏洞。

(5) 试验的规划与设计 围绕检验假说而开展的试验，需要全面、仔细的规划与设计。试验所涉及的范围要覆盖假说涉及的各个方面，以便对待检验的假说可以作出无遗漏的判断。

第二节 试验设计概述

一、试验设计的性质

为了推动食品科学（包括其他学科）的发展，常常要进行科学研究。进行科学研究离不开调查或试验，进行调查或试验必须解决两个问题：

- (1) 如何合理地进行调查或试验设计；
- (2) 如何科学地整理、分析所收集的具有变异性的数据资料，揭示出隐藏在其内部的规律性。

通过科学地安排试验，可以较少的试验次数和较短的试验周期以及较低的成本而获得正确的试验结果和可靠的结论，反之则增加试验次数，延长试验周期，浪费大量人力、物力、财力和时间，也难以达到预期的目的，甚至导致试验的失败，因此试验设计显得相当重要。

试验设计与数据处理就是专门研究合理地制定试验方案和科学地分析试验结果的方法的一门应用技术学科。是以概率论和数理统计为理论基础，结合专业知识和实践经验，经济、科学、合理地安排试验，有效地控制试验干扰，充分地利用和科学地分析所获得的试验信息，从而达到尽快获得最优方案的目的。

试验设计解决的问题：

- ① 通过试验设计可以分清试验因素对指标影响的大小顺序，找出主要因素。
- ② 通过试验设计可以了解试验因素与指标之间的规律性，即每个因素改变时的指标变化。
- ③ 通过试验设计可以了解试验因素之间的相互影响情况，即因素之间的交互作用情况。
- ④ 通过试验设计可迅速地找出最优生产工艺条件，确定最佳方案，并且能够预估最优条件下的试验指标值及波动范围。
- ⑤ 通过试验设计的方差分析、回归分析，可以了解试验误差大小，从而提高试验的精度。

二、食品科学试验的特点与要求

(1) 原料广泛性 可以作为食品加工的原料来源广泛，可以分为植物性原料、动物性原料和微生物性原料等。而植物性原料又可分为粮食、果品、蔬菜、野生植物；动物性原料又可以分为畜禽、水产、野生动物、特种水产养殖等。不同的原料对食品加工提出了不同的要求，因而给不同产品的加工和保鲜带来困难。

(2) 加工工艺的多样性 由于作为食品加工的原料可以分为几十类、上千个品种，因而体现了食品加工工艺的多样性。比如有的产品加工要求保持原料原有的色泽和风味，而有的产品又要求掩盖原来的色泽和风味；有些初级产品加工只需要简单的烘干或晒干，而有的产品加工则需要均质、发酵、超滤乃至纳米技术、转基因等。充分体现了食品加工工艺的多样性。

(3) 加工质量控制的重要性 食品加工的质量控制体现在以下几个方面：① 对加工过程中各个工序的控制，以保证加工过程的安全和产品加工质量的稳定。② 对各种在市场流通的产品的质量监督和检验，以保证各种产品的质量稳定和防止假冒伪劣产品，维护消费者的合法权益。③ 对食品的安全进行监督保证，以防止食品在加工过程中化学物质超标或不合理使用，或者某些对人体健康有害的物质超过规定的标准。

鉴于以上食品加工中的特点，我们在进行食品科学试验和生产实践中，就应该特别注重对试验的合理设计和科学安排，注意试验过程的正确运转，保证试验结果的可靠性和准确性，并进行科学正确的统计分析，以便于正确揭示事物的本质，得出科学的结论。

三、试验设计的类型

(一) 分类 I

实验的目的和方式千差万别，根据不同的实验目的，试验设计可以划分为以下五种类型。

1. 演示实验

实验目的是演示一种科学现象，只要按照正确的实验条件和实验程序操作，实验的结果就必然是事先预定的结果。对演示实验的设计主要是专业设计，其目的是为了更简便易行，实验的结果更直观清晰。

2. 验证实验

实验目的是验证一种科学推断的正确性，可以作为其他实验方法的补充实验。本书中讲述的很多实验设计方法都是对实验数据作统计分析，通过统计方法推断出最优实验条件，然后对这些推断出来的最优实验条件作补充的验证实验给予验证。

验证实验也可以是对已提出的科学现象的重复验证，检验已有实验结果的正确性。例如1996年7月5日，由英国罗斯林研究所的伊恩·威尔穆特教授等人通过体细胞克隆法培育的第一只克隆羊“多利”问世之后，世界各地的生物学家纷纷做验证实验。最初有许多验证实验是失败的，不少人对其正确性产生怀疑，但是随着时间的推移，越来越多的验证实验宣告成功，并且实验出克隆牛、克隆猪等一系列克隆产品。这种验证实验着重于实验条件，而不是统计技术。

3. 比较实验

比较实验（comparative experiments）的实验目的是检验一种或几种处理的效果，例如对生产工艺改进效果的检验，对一种新药物疗效的检验，其实验的设计需要结合专业设计和统计设计两方面的知识，对实验结果的数据分析用于统计学中的假设检验问题。

4. 优化实验

优化实验（optimization experiments）的实验目的是高效率地找出实验问题的最优实验条件，这种优化实验是一项尝试性的工作，有可能获得成功，也有可能不成功，所以常把优化实验称为试验（test），以优化为目的的实验设计则称为试验设计。例如目前流行的正交设计和均匀设计的全称分别是正交试验设计和均匀试验设计。不过在英文中实验设计和试验设计是同一个名称“design of experiments”，都简称为DOE。

优化实验是一个十分广阔的领域，几乎无所不在。在科研、开发和生产中，可以达到提高质量、增加产量、降低成本以及保护环境的目的。随着科学技术的迅猛发展，市场竞争的日益激烈，优化实验将会越发显示出其巨大的威力。

5. 探索实验

对未知事物的探索性科学研究实验称为探索实验，具体来说包括探索研究对象的未知性质，了解它具有怎样的组成，有哪些属性和特征以及与其他对象或现象的联系等的实验。

（二）分类 II

试验设计有广义与狭义之分。

广义的试验设计是指试验研究的课题设计，也就是指整个试验计划的拟定，主要包含课题名称、试验目的、研究依据、内容以及预期达到的效果，试验方案，经济效益或社会效益的估计，已具备的研究条件，参加研究人员的分工，试验时间、地点、进度安排和经费预算，成果鉴定，学术论文撰写等内容。

狭义的试验设计主要是指试验单位（试验单元）的选取、重复数目的确定、试验单位的分组和试验处理的安排。通常讲的试验设计主要指狭义的试验设计。合理的试验设计

能控制和降低试验误差，提高试验的精确性，为统计分析获得试验处理效应和试验误差的无偏估计提供必要的参数。食品试验研究中常用的试验设计方法有完全随机设计、随机区组设计、正交设计、均匀设计、回归正交设计和回归旋转设计等。

调查设计也有广义与狭义之分。

广义的调查设计是指整个调查计划的制定，包括调查研究的目的、对象与范围，调查项目及调查表，抽样方法的选取，抽样单位、抽样数量的确定，数据处理方法，调查组织工作，调查报告撰写与要求，经费预算等内容。

狭义的调查设计主要包含抽样方法的选取，抽样单位、抽样数目的确定等。通常讲的调查设计主要是指狭义的调查设计。合理的调查设计能控制与降低抽样误差，提高调查的精确性，为获得总体参数的可靠估计提供必要的参数。

试验或调查设计主要解决合理地收集必要而有代表性资料的问题。

四、试验设计的发展历史

近代试验设计可以追溯到伟大的统计学家 R. A. Fisher 20 世纪 30 年代在英国 Rothamsted 农业试验站的开创性的工作。R. A. Fisher 的杰出工作以及 F. Yates 和 D. J. Finney 的卓越贡献都是受到农业和生物中的问题的激励。由于农业试验规模较大、花费时间长，而且必须妥善处理田间的差异，这些考虑便导致了分区组、随机化、重复试验、正交性以及方差分析和部分因析设计等技术的发展，这时组合设计理论（R. C. Bose 为此做了基础性的工作）也随着处理区组设计和部分因析设计中问题的刺激而发展起来。这个时期的工作在社会科学研究以及在纺织和羊毛等工业中得到了应用。

第二次世界大战后，试验设计得到了迅速的发展。尝试用以前的技术解决化学工业中的问题时，G. E. P. Box 和他在皇家化学工业的合作者发现原来的分析技术已经不能满足新的形势要求，必须发展新的技术和方法来处理流程工业中的特殊问题。新的技术着重于流程的建模和优化，而不是限于处理比较，处理比较曾是农业试验中最初等的目的。出于试验的费用问题，流程工业的试验趋于考虑更省时间和更经济地设计试验次数。这种对时间和费用因素的考虑使得序贯试验成为自然而然的选项，同样这些考虑导致了试验设计的一些新技术的发展，如著名的中心复合设计和最优设计等，它们的分析更多地依赖回归建模和图表分析。基于拟合模型的过程优化也受到重视，因为设计的选项常常与特殊的模型相联系（如二阶中心复合设计对应一个二阶回归模型），且试验的区域可能是不规则的，故在寻找与一个特殊模型和（或者）试验区域相适应的设计时需要有灵活的策略。随着快速计算方法的发展，最优设计（J. Kiefer 为此做了开拓性的工作）已经成为这种策略的一个重要组成部分。

20 世纪 40 年代，在二次世界大战期间，美国军方大量应用试验设计方法。

20 世纪 50 年代，日本统计学家田口玄一将试验设计中应用最广的正交设计表格化，在方法解说方面深入浅出，为试验设计的更广泛使用作出了众所周知的贡献。

日本田口玄一博士继 1957 年提出了信噪比（Signal to Noise Ratio, SNR）设计法后，70 年代又提出了设计技术的三次设计法（又称为田口稳健设计），为产品开发设计、研究中的技术与经济的结合、质量与成本的协调提供新的应用方法。这种方法的基本点是，对影响特性值即考核指标的各种参数之间的搭配，根据专业技术与实践经验，在合适的正交表上进行

方案设计，对各参数水平组合即条件，主要不是去做试验测定数据，而是通过与该产品有关的一组数学公式来计算，用计算结果来代替试验数据，并通过编制程序，运用计算机反复迭代运算，计算出产品的性能指标，从而确定最佳的生产条件或参数水平组合。

田口设计将工程技术与统计原理相结合，形成了独具特色的实验设计与数据分析方法，主要有以下六个特点：

(1) 将设计过程分为以下系统设计、参数设计以及容差设计三个阶段：

① 系统设计——以专业技术为中心的系统结构与功能设计，其任务是把产品规划所确定的目标具体化，设计出满足用户需求的产品。

② 参数设计——以聚焦顾客关注的质量特性稳定性为目标，同时兼顾考虑质量成本，确定实现质量特性要求的最佳参数组合。

③ 容差设计——确定对质量特性值影响大的因素，是否需用质量波动小的零部件来代替质量波动大的零部件，从而使系统的质量特性波动引起的社会总损失最小，从而达到产品全寿命周期成本最优。

(2) 在进行参数设计以及容差设计时，采用了内外表法，充分考虑了可控因素与不可控噪声因素的共同影响，在内表中安排可控因素，而将噪声因素安排在外表中。田口博士认为在输出质量特性与参数因子水平特性之间是非线性关系，综合考虑噪声因素的影响可以考虑用质量波动大的零部件参与实验，用调整参数不同水平值间的最佳组合达到相对最优输出特性，然后用容差设计细调参数因子精度，从而得到相对稳定的输出特性。

(3) 在实验选点上采用了正交设计表，使实验设计更加易用，实验选点也更加规范，同时使较高因素与水平值的实验次数大幅度降低。

(4) 采用了切比雪夫 (P. L. Chebyshev) 正交多项式回归，用以建立参数因子与输出质量特性之间的回归方程，并对综合考虑误差因素后是否存在曲率做出判定，综合考虑参数因子 1 次项与 2 次项的作用，便于精确地计算质量损失，对参数因子精度进行容差调整。对于输出质量特性 y 的影响可以分段用多项式逼近，其求解复杂，且因为回归系数之间具有相关性，不能直接用回归系数比较各参数因子对质量特性的影响。在参数设计阶段完全可以将各参数因子等水平取值，这样可使正规方程组的系数除对角线以外全部变成了零，也就是使系数矩阵变为对角矩阵，从而简化了计算及消去回归系数间的相关性，此时 y 可以用切比雪夫正交函数的正交多项式表示。

(5) 引入质量损失的概念，提出质量损失函数，为详细设计中综合考虑质量与成本的均衡进行参数选择提供了很好的数学评价方法。产品质量特性的波动是客观存在的，有波动就会造成损失，称为质量波动损失，它不仅包括异常波动损失，而且还包括正常波动损失。

(6) 提出用信噪比 (SNR) 作为衡量参数因子重要性的标准。SNR 的评价原理来自数理统计中的变异系数 C_v ， C_v 的大小由标准差与均值的比值决定。产品特性值越分散，则 C_v 值也越大，说明产品质量较差；反之， C_v 值越小，说明产品质量越好。因此，变异系数 C_v 是衡量产品质量优劣程度的一个重要指标。

田口博士提出的 SNR 分析方法构思非常独特，但其从统计意义上是有局限性的，对于望小问题，如果把 SNR 作为响应变量来用就会将位置效应和分散效应相混淆。Schmidt 和 Boudot 进行过相关模拟实验，表明对于望大特性和望小特性分析时，尽管 SNR 可以用来识别位置效应，但在识别分散效应方面是无效的。

五、我国试验设计的技术研究与应用现状

我国对试验设计技术的研究与推广应用起步较晚，新中国成立后才逐步开展这方面的工作。

20 世纪 60 年代末期，华罗庚教授在我国倡导与普及“优选法”，如黄金分割法、分数法和斐波那契数列法等。数理统计学者在工业部门中普及“正交设计”法。70 年代中期，优选法在全国各行各业取得明显成效。

1978 年，七机部由于导弹设计的要求，提出了一个五因素的试验，希望每个因素的水平数要多于 10，而试验总数又不超过 50，显然优选法和正交设计法都不能用，随后，方开泰教授（中国科学院应用数学研究所）和王元院士提出“均匀设计”法，这一方法在导弹设计中取得了成效。至于对 SNR 设计、产品的三次设计和调优运算试验设计的研究和推广应用，在我国直到 20 世纪 80 年代初才开始起步，目前应用还不广泛。

总之，在试验设计的研究与应用上，我国与发达国家还有一定的差距。

六、试验设计在科学研究中的地位与意义

试验设计方法是一项通用技术，是当代科技和工程技术人员必须掌握的技术方法。运用这种方法，可以科学地安排实验，以最少的人力和物力消费，在最短的时间内取得更多、更好的生产和科研成果，简称为：多、快、好、省。

试验设计在工业生产和工程设计中能发挥重要的作用，主要有：

- (1) 提高产量；
- (2) 减少质量的波动，提高产品质量水准；
- (3) 大大缩短新产品试验周期；
- (4) 降低成本；
- (5) 试验设计延长产品寿命。

其应用领域包括食品、生物技术、化工、医药、电子、材料、建工、建材、石油、冶金、机械、交通、电力等。其作用是提高试验效率、优化产品设计、改进工艺技术、强化质量管理。

食品科学是涵盖了农副产品贮藏加工、生物科学、农业工程和轻工业等学科的综合性和交叉型学科。随着 20 世纪 80 年代以来世界食品工业的飞速发展，食品科学研究朝着自动化生产、计算机应用、系统工程、生物酶技术、基因工程等高新技术方面发展，逐步脱离了传统的加工方法，体现了科学化、集约化生产的特色，也对食品科学研究的试验设计和统计方法提出了更高的要求。食品的试验研究已经由简单的假设测验、方差分析发展到多元分析、优化设计等高级试验设计分析方法，越加显出了试验设计和统计分析在食品科学研究中的重要性。可以预言，随着生物科学、计算机和高级试验统计在食品工业中的广泛而深入的应用，食品科学将进入一个更快更新的发展阶段。

思考与习题

1. 什么是试验设计？试验设计解决哪些问题？
2. 食品试验设计的特点是什么？
3. 食品试验研究中常用的试验设计方法有哪些？

第二章 试验设计基础

教学目的与要求

1. 了解试验设计的基本术语；
2. 掌握试验设计的基本原则；
3. 熟悉试验的误差及来源；
4. 了解试验数据的特征数；
5. 熟悉统计假设检验；
6. 掌握试验设计的基本程序。

第一节 试验设计的基本术语

一、试验因子（试验因素）

影响科学试验结果的因子往往很多，但进行试验时，仅能挑选少数几个因子进行试验，因此试验中安排的因子称为试验因子（experimental factor）或试验因素，而未在此次试验中安排的因子则统称为非试验因子。在安排试验中，每个因子的某种具体措施则称为该因子的某种水平（Level）。例如酱油的质量受原料、曲种、发酵温度、发酵时间、制曲方式、发酵工艺等多方面的影响，这些就是影响酱油质量的因素；又如生产某种功能性饮料，其影响因子有原料质量、萃取工艺、辅助添加剂等。它们有的是连续变化的定量因子，有的是离散状态的定性因子。

二、试验水平

试验中试验因素所处的各种状态或取值称为因素水平，简称为水平。若一个因素取 m 个水平，则该因素为 m 水平的因素。如某试验中，温度 A 选定了 50, 60, 70 三种状态，就称 A 因素为 3 水平因素；B 因素选定了 20%, 30%, 40%, 50% 四种浓度，就称 B 因素为 4 水平因素。因素水平可以是定量的，也可以是定性的。如原料品种、食品添加剂、色谱柱不同类别等。

三、试验指标

在试验设计中把判断试验结果好坏所采用的标准称为试验指标，简称为指标。它类似于数学中的因变量或目标函数。例如在考察加热时间和加热温度对果胶酶活性的影响时，果胶酶活性就是试验指标；在考察微生物发酵过程中碳源、氮源等对海藻糖产量的影响时，其海藻糖含量就是考察的试验指标。

试验指标可以分为定性指标和定量指标两类，能够用数量表示的指标是定量指标，如食品的酸度、蛋白质、脂肪、碳水化合物、水分含量等；不能用数量表示的指标为定性指标，如色泽、风味和质地等。在试验设计中，为了便于分析试验结果，常把定性指标进行