

普通高等教育轻工与食品专业实验类系列规划教材

食品加工与贮藏实验

王双飞 / 主编

刘小玲 丘 华 林 莹 王勤志 尹秀华

李全阳 余 炼 李秋庭 陈德慰 / 编著

FOOD PROCESSING AND STORAGE EXPERIMENT



中国轻工业出版社

普通高等教育轻工与食品专业实验类系列规划教材

食品加工与贮藏实验

Food Processing and Storage Experiment

王双飞 主编

刘小玲 丘华 林莹 王勤志 尹秀华 李全阳 余炼 李秋庭 陈德慰 编著

图书在版编目 (CIP) 数据

食品加工与贮藏实验/王双飞主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2009. 7

普通高等教育轻工与食品专业实验类系列规划教材
ISBN 978-7-5019-6964-7

I. 食… II. 王… III. ①食品加工-实验-高等学校-教材②食品贮藏-实验-高等学校-教材 IV. TS205-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 071405 号

责任编辑: 李建华

策划编辑: 林 媛

责任终审: 张乃柬

封面设计: 灵思舞意·刘微

版式设计: 王超男

责任校对: 吴大鹏

责任监印: 张 可

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: 2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 7.5

字 数: 192 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-6964-7

定价: 18.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119845 65128898 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读者服务部联系调换

90294J1X101ZBW

前 言

食品科学与工程是一门交叉的综合性应用学科。食品工业是在食品资源利用和保藏的要求下发展起来的，因此最初的食品加工技术可以认为主要是原料处理和保藏技术。随着农业的发展，食品原料日趋丰富，所有的农副产品都涉及采后的贮藏和加工问题，因此食品加工与贮藏技术涉及的面非常广泛。伴随着人们生活水平的提高和新的需求，食品加工保藏技术不断有新的内涵，并随着生物技术、微生物、机械、化工等多学科发展而快速发展。

就食品加工业的现状而言，食品加工技术可以说是传统与现代并存，手工与机械相辅，食品的种类也纷繁复杂。食品加工技术的分类方法很多，从原料特性出发，食品加工技术可以分为粮食加工技术、乳品加工技术、油脂加工技术、发酵技术、软饮料加工技术等。这种分类方法更适合于了解原料的加工特性，每一类都有各自的系统加工技术，是针对原料的特点而设定的。本书按照原料的不同分类，介绍了食品研究开发的方法，以及各类食品的加工保藏技术。本教材是为接受过食品化学、食品加工原理、食品工艺学等食品科学与工程专业基础知识训练的学生独立开设综合实验课程而编写的，旨在使学生了解和掌握几大类食品的加工原理和工艺技术，以及生产这些食品所需要的机械设备及原辅料条件，产品应满足的质量要求和基本检验要求等，从而提高学生的实际操作技能和综合运用相关知识的能力，提高食品科学与工程专业学生的研究开发技术水平。

本书由广西大学轻工与食品工程学院长期从事食品科学与工程专业教学的教授、博士教师共同编写。本书可作为高等院校、职业技术学校食品科学与工程专业、食品质量与安全专业学生的实验参考用书，也可作为食品加工技能培训教材使用。书中有不当之处，请批评指正。

编者

2009.3

目 录

第一章 食品新产品研制开发	1
第一节 新产品开发的基础	1
第二节 食品新产品的开发研究	4
第二章 罐头食品	15
第一节 糖水菠萝罐头的加工	15
第二节 蘑菇罐头的加工	19
第三节 茄汁罗非鱼罐头的加工	23
第三章 果蔬加工制品	26
第一节 圣女果蜜饯的加工	26
第二节 脱水蔬菜的加工	29
第四章 软饮料	33
第一节 植物蛋白饮料的加工	33
第二节 果汁和蔬菜汁类饮料的加工	36
第五章 烘焙食品	40
第一节 广式月饼制作	40
第二节 面包的制作	44
第六章 肉蛋制品	47
第一节 腌腊肉制品的加工	47
第二节 干肉制品加工	50
第三节 再制蛋制品加工	52
第七章 乳制品	57
第一节 酸乳的制作	57
第二节 冰淇淋的制作	61
第三节 水牛乳干酪的制作	65
第八章 其他粮食加工制成品	69
第一节 鲜湿米粉的加工	69
第二节 干式发芽糙米的加工	72
第三节 方便面的加工	74
第九章 发酵食品——酱油的加工	78
第十章 植物油脂——茶籽油的精制	81
第十一章 果蔬原料贮藏保鲜	84
第一节 果蔬原料贮藏保鲜的检测	84
第二节 果蔬的采后商品化处理	108
第三节 芒果的贮藏保鲜	109
参考文献	113

第一章 食品新产品研制开发

第一节 新产品开发的基础

一、新产品开发的必要性

每种产品都有一个生命周期，并可划分为五个阶段：

(1) 产品开发期：在这个阶段，企业找到并开发出一种新产品。

(2) 产品稳步递增期：这一阶段，产品逐步进入市场，利润缓慢增长。

(3) 产品调整期：在这个阶段，企业努力改进产品，进入新的细分市场和销售渠道，并适当减价。

(4) 成熟期：在该时期，销售增长减慢，利润保持稳定。企业寻找各种战略以便使销售重新增长。

(5) 产品进入销售和利润都缩减的衰退期：企业在这个阶段的任务是找到衰退产品并决定是维持收获还是放弃该产品。

因此，当企业产品进入衰退期时，企业必须酝酿和开发新产品以替换原有产品，寻找企业收益的新增长点。但是新产品也有失败的可能。因此，新产品的开发成功与否关系到企业的生死存亡。

二、新产品的概念

新产品是指企业为了降低成本或适应市场需求，在原有产品的技术、配方、包装、概念方面进行突破，开发与原有产品在上述一个方面或多方面不同的产品。新产品蕴涵了几层含义：

1. 对现有产品重新包装并给予新名称和新外涵

以乳制品为例，某乳品厂一种液态奶原产品以复合塑料膜包装，根据市场定位的不同，在不改变生产技术、配方的基础上，新产品采用了新型爱壳包装，新颖的包装形式获得新的消费人群。如可口可乐公司，为了降低成本，扩大消费市场占有率，推出了零售机，在包装形式和销售形式上做了大幅度变动，从而奠定了可口可乐作为碳酸饮料王者的地位。

2. 对旧产品技术配方的更新

以月饼为例，近年流行健康概念，很多月饼生产厂家为了适应市场的需求，对其旧产品进行更新，改变口感，如推出低糖配方、低脂配方，这些产品一般都是在原有配方的基础上，分析了市场需求，并对本公司产品进行判断，改进或者更新现有产品，从而推出的新产品。

3. 全新意义的产品，它能满足消费者未曾满足的需要

以王老吉凉茶饮料为例，两广岭南地区夏季由于酷暑，人们喜欢喝凉茶。凉茶是广东、广西地区的一种由中草药熬制的、具有清热去湿等功效的“药茶”。在众多老字号凉

茶中，又以王老吉最为著名。广东的王老吉药业股份有限公司借助中国几千年的中医“清热祛火”概念对其产品进行市场定位，在国内开创了凉茶类饮料的先驱，并创下了120亿元的年销售收入。“预防上火”成了消费者的购买动机，而王老吉也满足了中国人预防“上火”的需求。

事实上，目前我们能看到的很多新产品或多或少都带有上述三层意思或三个功能。这三个功能也不能截然分开。开发一个新产品并不容易，一个口味合适的产品还必须考虑它的货架寿命和成本。质量必须要与利润平衡，同时还要考虑市场的需求。

三、新产品的基本要求

一般的新产品都要求具有5个特点：①先进性；②效益性；③实用性；④适应性；⑤创造性。如果新产品总的设计和技术水平等方面落后于原有产品，无论如何优惠，价格如何的便宜，都无法被市场接受，最终可能会失败。但食品不同，食品实际上是同文化、习惯紧密结合的。首先，食品很难讲是否先进，技术有先进、落后，加工手段、包装等都有先进、落后，但食品产品本身没有先进还是落后。比如窝窝头食用了几千年，现在依然在大规模食用，但加工方法不断在改进，产品配方从保藏性、营养性、口感等方面也逐步改善。

其次，一般的工业产品适应性好，其消费人群广，往往会带来良好的效益；但食品不然，食品往往是需要有针对性，适应性太好，可能会适得其反。目前的开发趋势是细分市场，比如方便面，国内市场康师傅、统一占据中高档面市场主要份额，而农村市场为以华龙、白象等为代表的内地或区域性产品所占领。白酒市场也类似，国内白酒市场高档品牌由茅台、五粮液长期占领，而红星二锅头等品牌只走低端大众化路线，也获得良好的效益，因此，适应性应该一分为二地看待。

再者，与工业产品相似，实用性、便捷性是新产品的一大特点。随着人们生活节奏的加快，满足人们对产品食用的便捷以及携带的方便性需求，都是新产品研发的出发点。实用性与便捷性往往体现在产品的形式和包装上。典型的例子如罐头易拉罐的开发使用，方便面替代挂面，桶装方便面替代袋装方便面等就是新产品便捷性与实用性的体现。

任何一种站在原有产品基础上的革新都具有一定的创新性，创新性的高低体现在他人跟随或模仿的难易程度。创新性越高，产品保持独特性的时间越长。

一般来讲，食品新产品开发要成功的话，需要做到以下几点：

(1) 预期利益回报。在新产品开发之前，对产品的市场容量、产品本身的研究开发程度、市场测试、生产成本、广告费用等进行预测统计，从而预测利益回报，这个数据虽然不一定完全正确，但可以有效地控制风险。

(2) 满足消费者的兴趣。消费者兴趣只能猜测，但这种猜测可以通过科学的市场调查来证实，比如：大规模的消费者兴趣调查、问卷、面谈等；从零售商、零售额也可分析出人们在买什么，在寻求什么。

(3) 产品在某种程度上必须独一无二。往往有人认为品质卓越的产品无人模仿，其实那只是一种幻想。重要的是产品必须拥有一些新技术，这些技术使竞争者不能马上就能模仿，这样就会产生时间效应。

具有可预测的利益回报率，产品可被消费者接受，产品技术在一定时限里具有创新性或独特性，是新产品获得成功的基础。

四、新产品开发的内容

企业开发新产品的内容是非常广泛的，它既涉及新产品的结构，又涉及与新产品有关的科学研究、工艺设备、原材料及零部件的开发，还涉及新产品销售中的商标、广告、销售渠道和技术服务等方面。

1. 产品技术条件的开发

产品技术条件的开发包括产品技术原理、工艺设备、原材料、零部件等的开发。产品技术条件的开发往往是食品科学与工程专业者所关注和开展的工作。在大量试验研究的基础上，形成新的技术。

2. 产品整体性能的开发

产品整体性能的开发包括产品质量、品种、功能、结构、使用方式等的开发。其中质量开发包括质量标准的改进；测试手段和保证体系完善；存在问题的产品的原因分析以及性能的开拓等。功能开发包括改进结构、增加新的功能、降低成本等。结构开发包括改进结构、改变包装、赋予新造型等。使用方式开发包括增加产品方便性，增加新的使用方式等。产品整体性能开发需借助多部门、多学科人才的通力合作，集合各部门的研究成果，实现统一目标。

3. 产品市场条件的开发

产品市场条件的开发包括商标、广告、销售渠道、销售服务等。

五、新产品开发程序

新产品一般按以下程序进行开发：新产品的消费人群和市场定位调研；产品构思；开发阶段；产品评价；货架寿命；包装；产品生产；市场测试；商业化。

（一）新产品的消费人群和市场定位调研

由于个人性格、文化背景、受教育程度和社会地位等因素的影响，不同的消费者对新产品的接受程度不同。影响消费者购买的因素：①饮食习惯；②购买心理；③方便、质量、价格之间的比较（兴趣）。

（二）产品构思

产品构思不是凭空瞎想，而是有创造性的思维活动。新产品构思包括两方面的活动：①根据得到的各种信息，发挥人的想象力，提出初步设想的线索；②考虑到市场需要什么样的产品及其发展趋势，提出具体的产品设想方案。

这个阶段要涉及研究开发人员、公司高层领导以及市场部门人员。一般情况下，这个阶段可能要消耗数月到一年的时间甚至更长。以下一些问题可能有助于思考：

- （1）产品能否获利？
- （2）能否满足消费者需求？
- （3）能否为消费者、批发商和零售商所接受？
- （4）产品是否为独一无二，能否提供消费者新的特点或新的服务？
- （5）产品是否适合于公司现有的生产水平或销售能力？
- （6）新产品是否是全新的（人无我有），还是模仿的（人有我优）？
- （7）公司开发产品时是否存在技术问题？
- （8）开发费用多少？公司是否有足够的资金？

（三）开发阶段

技术原型完成后进行开发阶段，产品开发时涉及的一些具体的食品加工原理在以后的章节中详细介绍，这里介绍一些基本的概念。

1. 对新产品进行设计

在已经选定的设想和技术原型基础上，具体确定产品开发的经济指标、功能以及一些参数，包括：①产品开发的投资规模，利益分析及市场目标；②产品的各项技术与原则要求；③产品开发的方式。

2. 试验

试验是与感官评定结合在一起的，根据预期目标来评价所有实验因素水平，最终获得预期效果：①感官微生物指标；②其他质量指标。

（四）产品评价与货架寿命

经过初步试验，按试验所确定的技术参数进行产品的试制，并对产品的性状及货架寿命进行测试和评估。此时产品的评价体系包括了产品质量性状以外的其他指标，如经济性指标、包装效果等。

第二节 食品新产品的开发研究

一、新产品开发试验研究

在进行产品开发时，食品专业技术人员需要开展一系列的试验研究以确定新产品的技术方案，此时，需要根据实验目标进行试验设计。试验设计是一个试验或一系列试验，它对一个过程或系统的输出变量做一些有目的的改变，以便能够观察到和识别出引起输出响应变化的缘故。试验的优化是指提高产品的可靠性，降低产品成本，找出最优组合条件的试验。我们首先要了解试验的研究对象及试验设计的两个重要手段、试验设计的基本方法。

（一）研究对象

试验的目的可能是要比较某个现象中各个因素的重要性以及它们不同状态的效果；也可能是要寻找某个特定过程中各个变量之间的数量规律。

例 1. 某食品研究所希望对两种保鲜剂（ A_1 、 A_2 ）进行苹果保鲜效果比较。试验目的是要确定哪种保鲜效果好。试验可按如下方法进行，选取一批同品种苹果若干个，分别用两种保鲜剂，并记录果肉硬度变化的时间。然后比较两种保鲜剂的效果。

例 2. 某食品研究所希望研究胡萝卜出汁率与果胶酶的酶解温度、时间、用量之间的关系，试验的目的是要寻找最佳酶解条件。试验可按如下方法进行，选用三种反应温度，例如 30、35、40℃；选用三种酶解时间，例如 1、1.5、2h；选用三种酶用量，例如 0.2%、0.3%、0.4%，对温度、时间、用量的 27 种组合的每一种做一次试验，记录胡萝卜的出汁率，根据试验结果找出出汁率与温度、时间、用量之间的规律，然后根据所找到的规律确定最佳生产条件。

将衡量试验结果好坏的指标称为响应变量，例 1 中的果肉硬度与例 2 中的出汁率就分别是这两个试验问题的响应变量，很多情况下的响应变量可用数值表示，称其为定量的响应变量，例 2 中的出汁率就是一个定量的响应变量，有时响应变量不是用数值表示的，称其为定性的响应变量，例 1 中的保鲜效果可用显效、有效、无效表示，它是一个定性的响应

变量。

将影响响应变量的因素称为试验问题中的因数，例 1 试验问题中有一个因数，即保鲜剂的品种；例 2 试验问题中有三个因数，即温度、时间和酶用量，在试验中因数所处的各个状态称为因数的水平，例 1 中的保鲜剂 A_1 与保鲜剂 A_2 就是保鲜剂品种这个因数的两个水平；例 2 中 30、35、40℃ 就是反应温度这个因数的三个水平，因数也有定量因数与定性因数之分，例 1 中的那个因数是定性因数，例 2 中的三个因数都是定量因数。

解决任何一个试验问题都有三个阶段：制订试验计划；实施试验计划，记录试验结果；分析试验数据。试验的设计与分析这门学科的研究对象就是第一、三两个阶段中的数学和统计问题。具体地说，就是研究如何合理地制订试验计划（设计问题）和如何科学地分析试验结果（分析问题）。

设计问题与分析问题之间是有制约关系的。对设计的要求是省（人力、财物、时间……），即试验次数要尽量少；而所包含的有用信息要尽量多，并且能有方便地分析试验结果的方法。分析方法又是依赖于设计方法的，不同的设计方法的试验结果需要采用不同的分析方法。

（二）试验设计中的两个基本手段

为了保证试验结果中包含尽量多的有用信息，并且能够方便地将它们分析提取出来，一般采用如下两种基本手段：

1. 重复

重复是指一个基本试验（或试验条件）重复进行若干次，即对应着某因数的诸水平或者某些因数的诸水平组合重复进行若干次试验。由于使用了重复这一手段，在分析试验结果时，就可以对误差做出估计，当因数诸水平或若干因数的诸水平组合的效应之间的差异超过误差时，我们才能对因数的诸水平或若干因数的诸水平组合的优劣做出比较和选择。而且，在用样本均值去估计效应时，由于使用了重复这一手段，可使估计更加准确，重复次数越多，估计量的方差越小。当然在做试验设计时，不能只追求分析试验结果中估计量的精度，还要考虑到重复试验带来的试验时间延长、试验经费提高等问题。因此，试验设计应该使两者取得平衡。

2. 随机化

随机化是指试验仪器、材料、人员……的布置要随机地确定，各试验单元的执行顺序要随机地确定。由于使用了随机化这一手段，给分析试验结果提供了使用统计方法的基础。试验结果是一个个随机变量，随机化保证了它们的独立性，在对效应做检验或估计时，就可以应用数理统计学中有关独立样本的基本理论。另一方面，在分析试验结果时，随机化还可以有效地消除“外来因数”对数据的干扰。

（三）解决试验问题的主要步骤

概括地说，完整地解决一个试验问题的主要步骤如下：

1. 问题的叙述

粗看起来，将问题叙述清楚并不困难，实际上往往很不简单，只有对所研究的现象有相当的了解，才能把试验目的、所要解决的具体问题叙述清楚。主要包括：

（1）响应变量的选取：选定的响应变量不仅要与试验目的相一致，而且其分布还应该与试验统计模型的假定相一致或非常近似。因此，确定响应变量是一件需要仔细推敲的工作。我们需要区分响应变量是定性的还是定量的，更要决定测量响应变量的方法，要了解测量的精度。

（2）因数的选取：首先要将对响应变量有影响的因素尽量罗列出来。然后根据试验目的将那些对响应变量影响很小的因素作为误差因数，在试验中不必控制而任其随机变化；将那

些对响应变量影响较大而又不准备考察其影响的因素，在试验中或对它加以控制，或制订一种试验计划使其能保证在分析试验结果时可以消除它们的影响，试验中也不对它们加以控制，即不把它们作为试验问题中的因数。只有那些对响应变量影响大，又希望通过试验对它们的影响加以研究、比较的因素才当做试验问题中的因数。一个试验问题中因数的个数对试验次数是有影响的，选取因数时，也要顾及试验次数能否承受得了。

(3) 各因数诸水平的选取：像选定因数一样，确定各因数的诸水平对解决试验问题同样重要，既要根据试验目的和实践经验，又要注意因数水平的多少对总试验次数的影响更大。因此，要根据试验问题的需要和经费、人力、时间的许可来确定各因数的诸水平，这里还要注意两点：

① 因数是定性的还是定量的。如果是定量的，还要考虑在试验中如何控制它们的水平，控制的精度如何。

② 因数是固定的还是随机的。如果试验中某因数的诸水平是按试验人的主观意图选定的，则称该因数是固定的；如果试验中某因数的诸水平是随机确定的，则称该因数是随机的。一个因数是随机的还是固定的，要由试验目的来确定。

一般都各因数的诸水平列成一张因数水平表，使人一目了然。

2. 试验计划的设计与实施

(1) 确定总试验次数：在能包含试验目的所需要的尽可能多的信息并保证分析试验结果统计精度的前提下使试验次数尽量少。

(2) 各因数诸水平怎样组合：要明确试验计划中必须包含哪些水平组合，有时还要注意避免哪些试验中不能实施的水平组合。

(3) 试验按怎样的顺序进行，采用什么样的随机化的方法。

(4) 采用什么样的统计模型描述试验。

进行试验时，要严格保证试验计划的要求得到实现，并准确记录试验结果。

3. 试验结果的统计分析

(1) 搜集试验数据，并做适当整理。

(2) 计算统计假设检验中的统计量和模型中诸参数的估计量。

(3) 对统计分析的结果做出科学而符合实际的解释，并提出建议。

二、食品试验设计与优化的基本方法

(一) 对比试验设计

对比试验是食品研究中最简单的试验方法，它以差异对比的原则，设置简单的处理和对照试验，通过多次重复估计误差的方法比较和分析影响产品质量的因素，常常应用于新工艺、新技术的引进、工艺诊断等。按照传统的设计观念，对比试验设计属于顺序排列的一种，容易产生系统误差，特别是间比法和互比法排列，没有正确的误差估计，往往通过增加重复次数来提高试验的精确性。

对比试验包括共轭对比和交叉对比两种，共轭对比的特点是有一共轭轴，处理和对照可以横向比较也可以纵向比较，而交叉对比是在共轭对比试验的基础上，待数据调查完毕并试验效应失效以后，将处理与对照交叉对换进行第二次处理，处理安排对照，对照安排处理，分析是讲两次资料合并分析，以消除试验材料本身的差异。

描述这种试验数据的统计模型为：

$$Y_{ij} = \mu_i + \beta_j + \epsilon_{ij} \begin{cases} i=1, 2, \dots, a \\ j=1, 2, \dots, n \end{cases}$$

其中 Y_{ij} 是 i 在样品 j 上的观察值, μ_i 是 i 的平均真值, β_j 是第 j 块样品的效应值, ϵ_{ij} 是随机误差。第 j 个配对差为 $d_j = y_{1j} - y_{2j} = \mu_1 - \mu_2$, 当观察值用这种方式配对时, 样品的附加效应 β_j 会消失。

检验 $H_0: \mu_1 = \mu_2$

等价检验 $H_0: \mu_d = 0 \quad H_1: \mu_d \neq 0$

这一假设的检验统计量是:

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}}$$

其中配对差的样品均值 $\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j$

$$\text{配对差的样本标准差 } s_d = \left[\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n-1} \right]^{1/2} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n d_j^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n d_j \right)^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

(二) 单因数试验设计

单因数试验在食品试验中经常遇到, 设想要比较单因素的不同水平或处理。

例 3. 在无酒精啤酒的研究中, 为了了解麦芽汁的浓度对发酵中双乙酸生成量的影响, 在发酵温度 7°C , 非糖比 0.3, CO_2 压力 $5.88 \times 10^4 \text{ Pa}$, 发酵时间 6d 的试验条件下, 选定麦芽汁浓度为 6% (A_1), 10% (A_2), 12% (A_3) 3 个水平, 每个水平重复 5 次, 进行完全化试验, 寻找适宜的麦芽汁浓度。

本试验中, 水平数为 3, 重复 5 次, 共进行 $3 \times 5 = 15$ 次试验。这 15 次试验完全按随机顺序进行, 随机化方法可采用抽签的方法, 即准备 15 张纸签, A_1, A_2, A_3 各写 5 个, 充分混合后, 抽签决定顺序。也可用随机数据表确定试验顺序, 方法是: 从随机数据表上随机地抽取一个数字, 从此开始依次往下 (也可往上、往左、往右, 方向是随机的) 读 15 个 2 位数 (如出现相同的 2 位数, 就把它跳过去, 往后多读一个 2 位数), 再按从小到大的顺序把 15 个两位数依次编号, 这个编号即为试验顺序号。本例编号结果见表 1-1 (括号数字为试验顺序编号)。

表 1-1

完全随机化单因素试验顺序

水 平	试 验 顺 序				
A_1	86(14)	76(12)	25(2)	37(6)	69(11)
A_2	46(8)	07(1)	36(5)	78(13)	57(10)
A_3	32(3)	51(9)	34(4)	38(7)	91(15)

从表 1-1 可见, 本例的试验顺序为 $A_2 A_1 A_3 A_3 A_2 A_1 \cdots A_2 A_1 A_3$ 。

每一处理的观察响应是一随机变量。用线性统计模型 (1-1) 来描述这些观察值是有用的, 其中 y_{ij} 是第 (ij) 个观察值, μ 是所有处理的共同参数, 叫做总均值, τ_i 是第 i 个处理的唯一的一个参数, 叫做第 i 个处理效应, ϵ_{ij} 是随机误差分量。我们的目标是要去检验关于处理效应的合适的假设并去估计它们。在假设检验中, 假定模型误差是独立的正态分布的随机变量, 其均值为零, 方差为 σ^2 。并假定对某一因素的各个水平来说方差 σ^2 是常数。

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i=1,2,\dots,a \\ j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (1-1)$$

这一模型叫做单向方差分析或单因素方差分析，因为只研究一个因素。还有，我们要求实验是以随机顺序的方式进行的，所以，用于处理的环境（通常叫做试验单元）尽可能均匀。于是，这一实验的设计是一完全随机化设计。

实际上，统计模型式（1-1）描述了关于处理效应的两种不同情况。如果因素的 a 个水平是根据试验的具体情况，在试验前由试验人按主观意图指定好的，并在试验中得到很好的控制。这种情况下的统计模型称为固定效应模型。我们希望估计 μ 、 τ_i 和 σ^2 并检验有关 τ_i 的各种假设，结论只适用于试验所使用过的因素的各个水平，而不能推广至试验中未使用过的水平。如果因素的 a 个水平是从因素的全部可能的水平这一总体中选取的一个随机样本，这种情况下的统计模型称为随机效应模型。

（三）随机完全化区组设计

在很多试验问题中，我们希望能系统控制由已知的干扰源引起的变异性。随机区组试验设计是一种随机排列的区组试验设计。其方法是：根据局部控制的原理，将试验的所有供试单元先按重复划分成非处理条件相对一致的若干单元组，每一组的供试单元数与试验处理数相等，这样的单元组叫做区组（block）。然后分别在各个区组内，用随机的方法将各个处理逐个安排于各供试单元中，由于同一区组内的各处理单元的排列顺序是随机而定的，故这样的区组叫做随机区组（randomized block），是一种适用性较广泛的设计方法。既可以应用于单因数试验，也适用于多因数试验。

例 4. 红碎茶加工中的通气发酵试验，因素为发酵时间 A ，有 5 个水平： A_1 30min， A_2 50min， A_3 70min， A_4 90min， A_5 120min，试验目的是从各处理中找出最适发酵时间。试验设 4 次重复。本试验中多数非处理条件都能被控制为相对一致，只是用来揉切茶叶的 4 台转子机是不同型号的。为了使试验误差尽可能地小，试验中的 5 个水平最好能使用同一转子机，试验者在每个转子机都检测 5 个水平的发酵时间试验，这种设计叫做随机化完全区组化设计。

本试验设计中，分别以各台转子机安排 1 个区组（重复）。先给各台转子机编号为区组 I、II、III、IV。试验的每个供试单元以从转子机出来的每 25kg 揉碎叶为准。各台转子机先后出来的 5 个 25kg 揉碎叶即为该区组的 5 个供试单元，分别编号为①、②、③、④、⑤。至于各处理安排在哪个供试单元，则由随机方法（如抽签法）确定。表 1-2 即为本试验的设计方案。

表 1-2

随机化完全区组试验设计方案

区组(揉切机)	试验单元序号(揉碎叶出机先后序号)				
	①	②	③	④	⑤
I	A_2	A_5	A_1	A_4	A_3
II	A_1	A_3	A_5	A_2	A_4
III	A_5	A_4	A_3	A_1	A_2
IV	A_3	A_2	A_4	A_5	A_1

按表 1-2 设计方案实施本试验，即为在 I 机上的最先出来的 1 个 25kg 揉碎叶安排第二水平 A_2 ，即发酵时间为 50min；接着出来的第二个 25kg 揉碎叶安排第 5 个水平 A_5 ，即发酵时间 120min；余类推。照此方案操作就可以完成本试验的全部实施工作。随机化完全区组试

验设计是最广为应用的试验设计之一。适用随机化完全区组试验设计的情况很多，而且从实际情况中察觉，试验仪器或机器的单元间在其运行特性上常常有所不同，这是一类典型的区组化因素。各批原材料、人以及时间，也都是试验变异性的普通干扰源，它们也是可以通过区组化而被系统控制的。

这一设计的统计模型是：

$$y_{ij}=\mu+\tau_i+\beta_j+\epsilon_{ij}\begin{cases} i=1,2,\cdots,a \\ j=1,2,\cdots,b \end{cases}$$

其中 μ 是总均值， τ_i 是第 i 种处理的效应， β_j 是第 j 个区组的效应， ϵ_{ij} 是通常的 NID $(0, \sigma^2)$ 随机误差项。

其数据统计分析见表 1-3。

表 1-3 随机化完全区组设计的方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方	F_0
处理	$\sum \frac{y_{i.}^2}{b} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$a-1$	$\frac{SS_{处理}}{a-1}$	$\frac{MS_{处理}}{MS_E}$
区组	$\sum \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$b-1$	$\frac{SS_{区组}}{b-1}$	
误差	SS_E (用减法)	$(a-1)(b-1)$	$\frac{SS_E}{(a-1)(b-1)}$	
总和	$\sum \sum y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$N-1$		

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{处理} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{b} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_{区组} = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j}^2}{a} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

而误差平方和由减法得出为：

$$SS_E = SS_T - SS_{处理} - SS_{区组}$$

（四）拉丁方试验设计

随机化完全区组设计可以减少由一个已知的可控的多余变量的变异性所引起的在实验中的剩余误差。有很多其他类型的利用区组化原理的设计。例如，食品厂中确定蛋糕工艺流程，实验者研究五种不同的工艺的配方。每批原材料仅仅够混合配成五份供试验的配方。而且，这些配方是为几个操作人员准备的，设计是按正方形排列的，五种配方（或处理）用拉丁字母 A、B、C、D、E 表示，因而叫做拉丁方见表 1-4。原材料的批（行）与操作人员（列）对处理是正交的。

表 1-4 蛋糕配方问题的拉丁方设计

原材料的批	操作人员				
	1	2	3	4	5
I	A	B	C	D	E
II	B	C	D	E	A
III	C	D	E	A	B
IV	D	E	A	B	C
V	E	A	B	C	D

拉丁方设计用来消除两个多余的变异性来源；也就是说，允许从两个方向系统地随机化。这样一来，行和列，实际上就是表示了两种随机约束。一般说来，一个 p 因素的拉丁方或 $p \times p$ 拉丁方，是一个含有 p 行和 p 列的方形。 p^2 个单元中含有与处理对应的 p 个字母之一，每一字母在每行每列中恰好出现一次。一些拉丁方的例子如：

2×2 拉丁方：其标准方 1 个，共 2 种排列方式。

A	B	B	A
B	A	A	B

3×3 拉丁方：其标准方 1 个，共 12 种排列方式。

A	B	C
B	C	A
C	A	B

4×4 拉丁方：其标准方 4 个，共 576 种排列方式。

(一)	(二)	(三)	(四)
A B C D	A B C D	A B C D	A B C D
B A D C	B C D A	B D A C	B A D C
C D B A	C D A B	C A D B	C D A B
D C A B	D A B C	D C B A	D C B A

拉丁方的统计模型是：

$$y_{ijk} = \mu + a_i + \tau_j + \beta_k + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i=1,2,\dots,p \\ j=1,2,\dots,p \\ k=1,2,\dots,p \end{cases}$$

其中 y_{ijk} 是第 j 种处理的第 i 行第 k 列的观察值， μ 是总均值， a_i 是第 i 个行效应， τ_j 是第 j 种处理效应， β_k 是第 k 个列效应， ε_{ijk} 是随机误差。这一模型是完全可加的；也就是说，行、列与处理之间都没有交互作用。因为每一单元只有一个观察值，对每个指定的值，在 i 、 j 与 k 这三个右下标中只需表示两个就可以了。例如，表 1-4 中的蛋糕的工艺配方问题，当 $i=2$ 与 $k=3$ 时，自动得出 $j=4$ （配方 D），当 $i=1$ 与 $j=3$ （配方 C）时得 $k=3$ 。这是因为每种处理在每行每列中恰好出现一次。

方差分析的计算方法如表 1-5 所示，从平方和的计算公式看出，这一分析只是随机化区组设计的简单延伸，所多的行的平方和可由行的总数得出。

表 1-5 拉丁方设计的方差分析

变差来源	平方和	自由度	均方	F_0
处理	$SS_{\text{处理}} = \sum_{j=1}^p \frac{y_{.j}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_{\text{处理}}}{p-1}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{处理}}}{MS_E}$
行	$SS_{\text{行}} = \sum_{i=1}^p \frac{y_{i.}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_{\text{行}}}{p-1}$	
列	$SS_{\text{列}} = \sum_{k=1}^p \frac{y_{.k}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_{\text{列}}}{p-1}$	
误差	$SS_E (\text{相减})$	$(p-2)(p-1)$	$\frac{SS_E}{(p-2)(p-1)}$	
总和	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	p^2-1		

(五) 正交试验设计

正交试验设计是在复因数试验设计中有规律地选取具有代表性的部分水平组合进行试验, 这样既考虑了多因数多水平, 又不扩大试验规模, 它的实施依据是根据选定的因数和水平数, 合理选择正交表, 按表安排试验。由于多因数的交互作用随着因素的增加而逐渐变小, 所以 3 因素以上的正交试验一般不考虑交互作用。正交设计适用于多因素、多指标、试验周期较长、试验误差较大的试验, 尤其适用于研究营养物质间的合理配比。

1. 正交表

正交试验, 是借助于正交表来布置试验的。因此, 首先得搞清楚正交表的含义。比如, 需做 A、B、C 三因数试验, A 分为 A_1 、 A_2 两个水平; B 分为 B_1 、 B_2 两个水平; C 分为 C_1 、 C_2 两个水平。显然, 该试验共有 8 个处理组合, 详列如下:

这 8 个处理组合, 可用数字来简单表示, 如 $A_1B_1C_1$ 可简记为“111”, $A_1B_1C_2$ 可简记为“112”等。这样, 如若写出“221”, 则表示这是处理组合 $A_2B_2C_1$ 。即因数 A 取 A_2 , 因数 B 取 B_2 , 因数 C 取 C_1 所组成的组合。

如在前面的析因试验分析中, 试验包括因数的全部水平组合, 如果仅有部分实施则为正交试验。即从 8 个处理组合中采用正交表挑选一部分处理组合。二水平的最简单一张正交表是 $L_4(2^3)$, 见表 1-6, 此外二水平的正交表还有 $L_8(2^7)$, $L_{12}(2^{11})$, $L_{16}(2^{15})$ 等; 三水平的正交表有 $L_9(3^4)$, $L_{27}(3^{13})$ 等。此外还有一种混合型的正交表, 如 $L_8(4 \times 24)$, 它表示第 1 列应安排四水平的因数, 另 4 列只能安排二水平的因数, 共做 8 个处理组合的试验。

表 1-6 $L_4(2^3)$ 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

2. 正交试验的安排

安排正交试验, 可分为以下两个步骤:

第一步, 挑因数、选水平: 参试因数的确定, 主要依据试验工作者的生产实践经验和试验所具备的条件。要注意的是既不能把所有影响生产的因数都安排在试验中, 也不能把重要的因数漏掉。一般以不超过四个因数为好。各因数取几个水平, 也要按实际情况来确定。水平取得太少可能考察不周, 取得太多又增加试验工作量, 一般选 24 个水平为宜。

例 5. 在桑葚果汁饮料最佳配方确定中, 为了使桑葚饮料具有最佳的口感和色泽, 以桑葚原汁含量、糖酸比、白砂糖用量为 3 因数, 做因数、水平表时, 各因数的水平可按大小顺序排列, 也可以不按大小顺序排列 (见表 1-7)。

表 1-7 桑葚果汁饮料配方的因数水平

水 平	因 数		
	1 原汁含量/%	2 糖酸比	3 白砂糖用量/%
1	15	21 : 1	7
2	30	25 : 1	8
3	60	30 : 1	9

第二步，做表头设计：

(1) 不考察交互作用的表头设计：不考察交互作用的试验，一般采用未带交互作用列表的正交表进行设计。如例 5，如若不考察交互作用，则可采用 $L_9(3^4)$ 进行设计。将因数 A、B、C 分别确定在 $L_9(3^4)$ 的列上，叫做表头设计。若将 A、B、C 分别确定在 $L_9(3^4)$ 的第 1、2、3 列上，则得表头设计见表 1-8。

表 1-8 桑葚果汁饮料配方正交试验表 $L_9(3^4)$

列号 因子	1	2	3
处理号	1	2	3
1	原汁含量(1)	糖酸比(1)	白砂糖(1)
2	原汁含量(1)	糖酸比(2)	白砂糖(2)
3	原汁含量(1)	糖酸比(3)	白砂糖(3)
4	原汁含量(2)	糖酸比(1)	白砂糖(2)
5	原汁含量(2)	糖酸比(2)	白砂糖(3)
6	原汁含量(2)	糖酸比(3)	白砂糖(1)
7	原汁含量(3)	糖酸比(1)	白砂糖(3)
8	原汁含量(3)	糖酸比(2)	白砂糖(1)
9	原汁含量(3)	糖酸比(3)	白砂糖(2)

上面的正交表是由下面的设计图产生的。三个因数各有三个水平的试验，共有 27 个处理组合，见图 1-1 的 27 个交点，但如果每个平面取三个点，每条线段取一个点，一次可得 9 个点，这正是图 1-1 中 A_1 、 B_1 、 C_1 ， A_1 、 B_2 、 C_2 ， A_1 、 B_3 、 C_3 等 9 个试验点，这就是表 1-8 正交表的来历。

表 1-8 每一横行都是一个处理组合，如第 5 号处理 ABC 表示采用原汁含量 30，糖酸比 25 : 1，白砂糖 9%。每区组设 9 个小区，随机安排以上 9 个处理。

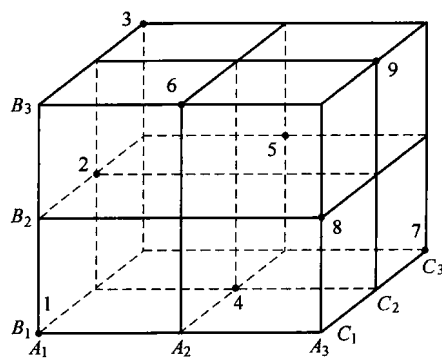


图 1-1 正方体的 27 个交点

其统计模型及数据的方差分析参照析因试验设计的分析处理。

(2) 考察交互作用的表头设计：实际中很多情况下各因素不是孤立的，而是彼此存在交互作用，这种交互作用影响了它们的作用效果。在这种情况下应用前面介绍的普通正交试验方法就难以得到正确的结果。下面介绍在正交试验中如何考虑因素之间的交互作用。

如果因素 A 和 B 存在交互作用，可以把它们之间的交互作用看作一个新的因素，记为 $A \times B$ 。同理，如果 A、B、C 三个因素之间存在交互作用，则新的因素记为 $A \times B \times C$ 。在正交表中，专门有考虑了交互作用的正交表，读者可以根据需要选用。

在例 5 中，如果原汁含量与糖酸比之间有交互作用，则可用有交互作用正交试验表 $L_8(2^7)$ 安排试验，见表 1-9 所示，表中第三列是 A 和 B 的交互作用列，第五列是 A 和 C 的交互作用列，第六列是 B 和 C 的交互作用列，第七列是 A、B、C 的交互作用列。

有交互作用的正交试验表的分析方法与前面介绍的不考虑交互作用的正交试验表相同，只是将交互作用列作为一个因素来处理。