



四川农业大学食品学院  
College of Food Science, Sichuan Agricultural University

# 实验设计与统计分析

李美良 博士/副教授/系主任

[2045581917@qq.com](mailto:2045581917@qq.com)    13350567991 (微信同号)



## □教育经历

- 2004.09-2008.06 四川农业大学 食品科学与工程 学士
- 2008.09-2010.06 中国农业大学 食品科学 硕士
- 2010.09-2013.06 中国农业大学 食品科学 博士

## □工作经历

- 2013.07-2016.01 四川农业大学 讲师
- 2016.02-至今 四川农业大学 副教授
- 2016.07-2017.06 四川农业大学 副系主任
- 2017.07-至今 四川农业大学 系主任/专业负责人
- 2018.09-至今 四川农业大学 支部书记

姓 名：李美良

出生年月：1984.08

籍 贯：四川巴中

政治面貌：中共党员



# 第10章 试验设计基础

---

& 10.1 试验设计常用术语

& 10.2 试验设计的基本原则

& 10.3 试验设计的概述

& 10.4 食品研究常用试验设计





## & 10.1 试验设计常用术语

---

### 1. 试验指标

在试验设计中，据试验的目的而选定的用来  
**衡量或考核试验效果的量**称为试验指标。

例如：考察加热时间和加热温度对果胶酶活性影响时，**?**是试验指标；

例如：在考察贮存方式对红星苹果果肉硬度的影响时，**?**是试验指标。

试验指标可分为**定量指标**和**定性指标**两类。

**定量指标：**能用数量表示的指标，或称数量指标。

如食品的糖度、酸度、**pH**值、吸光度、合格率等指标。

**定性指标：**不能用数量表示的指标称为定性指标。

如色泽、风味、口感、手感等食品的感官指标多为定性指标。

**定性指标定量化：**定性指标不能用数值直接表示，通过评分、分级等办法进行量化的过程。使其转化为定量指标。

例1：在研究增稠剂种类、pH值和杀菌条件对豆奶稳定性的影响时，可只选用豆奶的稳定性作为试验指标。

例2：在研究不同吸附剂去除甜橙汁中苦味物质的效果时，可同时选用苦味物质的去除率、维生素C的损失率、可溶性固性物质损失率作为试验指标，综合考虑确定哪种吸附剂合适。

## 2. 试验因素

试验中，凡对试验指标可能产生影响的原因或要素，都称为因素，也称因子。

如酱油质量受原料、曲种、发酵时间、发酵温度、制曲方式、发酵工艺等诸方面的影响，这些都是影响酱油质量的因素。它们有的是连续变化的定量因素，有的是离散状态的定性因素。

### 3. 因素水平

试验因素所处的各种状态（质量或数量上不同）称为因素水平，简称水平。

如某试验中温度**A**选了**30°C**，**50°C** 2个水平，因素**B**选了**80min**，**40min**，**60min** 3个水平，就称**A**因素为**2**水平因素，**B**因素为**3**水平因素。

如食品添加剂的不同种类、设备的不同型号、原料的不同品种、工艺的不同操作方法等质量上的不同。



#### 4. 单、复因子试验作用区别：

考察1个试验因素的试验叫单因素试验

考察2个或2个以上试验因素的试验叫多因素试验

单因子试验，解决该因子水平间的比较问题。

复因子试验不仅要了解各个因子自身水平间的比较问题，还要了解因子之间的相互作用问题，从而找出最有效的措施，精度较高的优点。

## 5. 试验处理

试验处理：指事先设计好的实施在试验单位上的一种具体措施，简称处理。

在单因素试验中，试验的1个水平就是1个处理。在多因素试验中，每个处理组合即处理。

例如，研究**3**种不同温度（**A**）和**2**种不同制曲（**B**）方式，对酱油质量的影响。处理数？

**$A_1B_1$ ,  $A_1B_2$ ,  $A_2B_1$ ,  $A_2B_2$ ,  $A_3B_1$ ,  $A_3B_2$**  6个水平组合。

处理数=参试各因素水平的乘积。

## 6. 试验单位

试验单元（小区）：接受某种处理的最小的试验材料的一个独立单位。

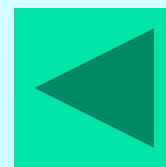
或试验中用以观察、记录的最小的独立范围。

一个试验单元，只能接受一个处理，也只能有一个输出结果。

## 7. 重复

在1个试验中，将1个处理实施在2个或2个以上的试验单位上称为重复。

1个处理实施的试验单位数称为处理的重复数（ $n$ ）。





## & 10.2 试验设计的基本原则

---

试验设计的目的是避免系统误差，缩小随机误差，以保证试验的准确度和精确度，试验设计必须贯彻三原则——**重复、随机化、局部控制**。是试验设计创始人**R.A.Fisher**提出来的。



# 一. 重复原则

---

**重复**：是指在试验中每种处理至少进行2次以上。

例如：▶

重复作用：估计和减小随机误差。

重复次数过多效果并不好。

## 二、 随机化原则

随机化原则，就是在试验中，每一个处理、重复随机地安排在某一特定的空间和时间环境中，保证试验条件在空间和时间上的均匀性。

采用方法：抽签、摸牌、查随机数表等方法来实现。

作用：正确、无偏估计试验误差。

### 三、局部控制（区组化）：

局部控制：将整个试验空间分成若干个各自相对均匀的局部，每一个局部叫做一个区组，所有局部构成区组因素。

**局部控制原则：**重复区内具有同质性，重复区间允许有最大异质性。

**局部控制实质：**消除试验单元间的系统误差。



实施局部控制时，区组如何划分，应根据具体情况确定。

区组可以是培养箱中的一层、试验地的某一段。

如果日期(时间)变动会影响试验结果，就可以把试验日期(时间)划分为区组；

如果试验空间会影响试验结果，可把空间划为区组；

如果全部试验用几台同型号的仪器或设备，考虑仪器或设备间差异的影响，可把仪器或设备划为区组；可把操作人员划分为区组。

**局部控制作用：**进一步减少试验误差。

这样做有两个好处：

一是增加了一个区组因素，可把区组间的差异（系统误差）从观察值的误差中分离出来，增加试验的准确度；

二是各区组内可保证试验单元的一致，增加试验的精确度。

**\*\*三者关系：重复是基本、随机排列最重要，要做好田间试验必须贯彻三原则。**

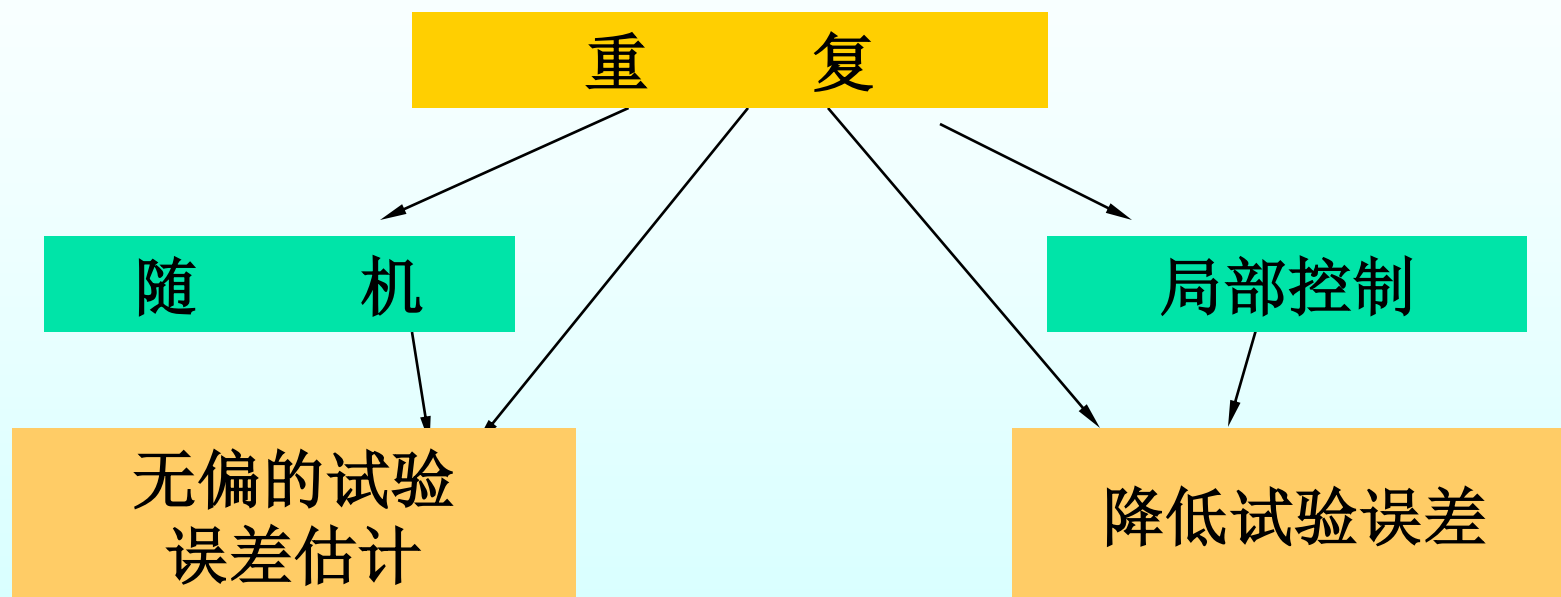


图8.2 田间试验设计三个基本原则的关系和作用





## & 10.3 试验设计的概述

---

### 一、试验设计的意义及作用

在食品生产和科学研究中，为了革新生产工艺，开发新产品，寻求优质、高产、低消耗的方法等，经常要进行各种试验研究。

试验研究可分为试验设计、试验的实施、收集资料、整理资料和分析资料等步骤。

## 1. 试验设计:

广义是指整个研究课题的设计，主要包括课题的确定、试验方案的拟定、试验材料的选择和分组、资料收集和统计分析方法等。

狭义的理解是指重复数的确定、对试验材料的选择与分组。

## 2. 试验设计的任务：

据研究项目的需要，数理统计原理为理论基础，结合专业知识和实践经验，经济、科学、合理地安排试验；有效地控制试验误差干扰；力求用较少的人力、物力、财力和时间，最大限度地获得丰富而可靠的资料；充分地利用和科学地分析所获取的试验信息；从而达到能明确回答研究项目所提出的问题和尽快获得最优方案的目的。

### 3. 试验设计的作用

主要体现在以下几方面：

- ①分清试验因素对试验指标影响的大小顺序，找出主要因素，抓住主要矛盾。
- ②可以了解试验因素对试验指标影响的规律性，即每个因素的水平改变时，指标是怎样变化的。
- ③可以了解试验因素之间相互影响的情况，即因素间的交互作用情况。

④可较快地找出**最优生产条件和工艺条件**，确定最优方案并能预估或控制一定条件下的试验指标值及其波动范围。

⑤可以正确估计和有效控制、降低试验误差，从而提高试验的精度。

⑥通过对试验结果的分析，可以明确为寻找最优生产或工艺条件、深入揭示事物内在规律而进一步研究的方向。



## 二、试验设计方法的主要内容

完全随机设计，随机区组设计、正交试验设计；

介绍均匀设计、回归正交设计、回归正交旋转设计、回归通用设计、混料设计等方法。

### 三、全面试验与部分试验

#### 1. 全面试验

指试验因素的所有水平组合全部实施1次以上的试验称全面试验。

全面试验是有局限性的，它只适用于因素和水平数目均不太多的试验。

## 全面试验的优缺点：

**优点：**能够获得全面的试验信息，无一遗漏，各因素及各级交互作用对试验指标的影响剖析的比较清楚，因此又称为**全面析因试验** (factorial experiments)。

**缺点：**当试验因素和水平较多时，处理数↑，试验次数↑。当试验还要设置重复时，试验规模就非常庞大，以至在实际中难以实施。

## 2. 部分试验

部分试验：从全部试验处理中选取部分有代表性的处理进行试验。如正交试验设计和均匀设计。

部分实施可使试验规模大为缩小。

如4因素3水平共有81个处理，全面试验需进行81次，而用 $L_9(3^4)$ 正交表安排正交试验只需9次，仅为全面试验的 $1/3$ 。

如一个4因素5水平试验，全面试验至少需进行 $5^4=625$ 次试验，而用 $L_5(5^4)$ 均匀设计表安排试验，仅需5次试验。

## 四、 食品的线性、非线性质量研究（了解）

**线性质量研究**是指食品制造过程中的质量研究方法，是通过对生产工序的合理诊断、调节、改善与检查，使生产工序的质量达到效果好、费用低的目的。

**非线性质量研究法：**重点在保证达到食品质量特性的前提下，充分利用各种设计参数与食品特性的非线性关系，通过系统设计、参数设计和允许误差设计的三段优化设计方法，从设计上控制食品的输出特性和质量波动或出于经济考虑，在不压缩原材料质量波动的情况下，仍然保证食品特性的一种稳定性优化设计方法。

## 五、食品质量研究的几个阶段（自学）

根据食品形成的全过程，食品质量研究大体可分为以下几个阶段：

**1、食品规划阶段：** 根据市场的需要决定食品的功能和价格。

**2、食品设计阶段：** 一般可分为系统设计、参数设计和允许误差设计3个步骤。

**系统设计**是由专业设计人员根据市场所需的性能、质量、价格情况进行功能设计，即决定食品结构和材料。

**参数设计：**是运用参数组合与食品特性的非线性关系通过设计适当的试验以及与其相配套统计分析方法，找出食品最佳性状的工艺条件和参数组合，即决定最佳参数组调中心值。

**允许误差设计：**是在参数设计完成后，通过计算质量的管理费用，把质量与成本加以综合平衡的一种公差设计方法，即决定食品质量的适当的公差范围内。

### 3、工艺设计阶段

一般也可以分成系统设计、参数设计和允许误差设计3个步骤。此阶段的系统设计主要是由工艺人员决定采用何种原料、何种加工设备、怎样的加工工序等；参数设计主要是在生产工序、生产设备已决定的情况下进一步选择合理的加工机器的工作状态和工业标准；允许误差设计则主要是决定整个工艺各个阶段的可调公差范围。



## 4、生产制造阶段

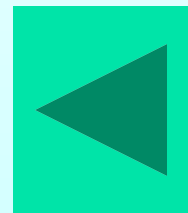
## 5、食品的销售阶段

主要是搞好市场销售服务及市场信息的收集、调查和分析。此外，在食品产后销售前这个阶段同样存在食品质量研究的问题，主要是食品质量保持途径的研究。

产品设计、工艺设计阶段(统称为设计阶段)是整个质量研究的关键，是食品科学试验研究的重点。

质量研究的目的：从设计上控制食品质量特性和质量波动以取得好的技术经济综合效果。

## 六、试验计划与方案（略）



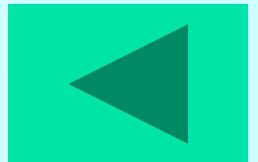


## &10.4 食品研究常用试验设计

---

试验设计包括处理、供试体和指标设计三部分。

- 一、完全随机设计
- 二、随机区组试验设计
- 三、拉丁方设计
- 四、正交设计
- 五、其他





## 四 正交设计

---

- 1、正交试验
- 2、正交表
- 3、正交试验设计的基本步骤
- 4、正交试验实例





# 1、正交试验

---

正交试验是用正交表（确定试验点）来安排的试验，是复因子试验的一种不完全区组设计方法，具简单易行，均衡分散、整齐可比的特点。

用较少的处理数获得较好的结果。解决生产中多因子、多指标、周期长的试验问题。



## 2、正交表

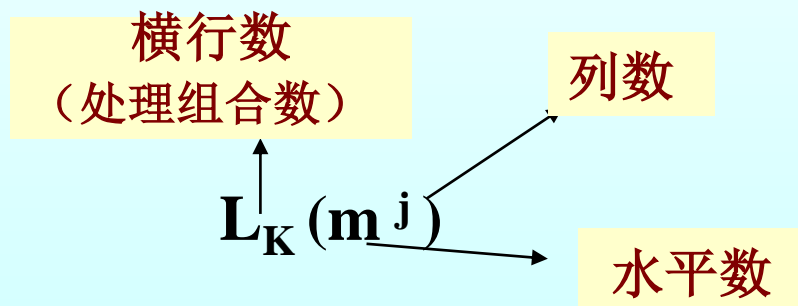
### (1) . 正交表的类型

普通型——水平数相等

混合型——水平数不全等

水平数：各列的数字数即因子的水平数

$L$ =(Lattice Design=格子设计) 表示一张正交表



例：  $L_9(3^4)$

$L_8(4 \times 8^4)$

正交表决定从全部处理组合中选哪几个处理组合参加试验。

## (2)、正交表的性质

正交表中：

1. 每一列中，不同数字出现的次数相等
2. 任意两列中，每种有序数对出现的次数相等

这种性质即正交性，它决定了每个因子各水平的重复次数相等,并且各个处理组合出现的次数也相等。因而使得正交设计具有**均衡分散、整齐可比**的特性。

综合可比性→保证在每列因素各个水平的效果中，最大限度地排除其他因素的干扰。

代表性：在部分试验中，所有因素的所有水平信息及两两因素间的所有组合信息都无遗漏→虽是部分试验，但且能了解到全面试验的情况，部分试验的优化结果有与全部试验一致的趋势。

(8)可伸可缩，效应明确

例： $L_9(3^4)$



### 3、正交表设计的步骤

第一步 明确试验目的，确定考核指标

挑因子、选水平（专业知识）

第二步 选一张适合的正交表

所选正交必须符合两个条件：

1. 正交表各列的**水平数**必须等于和研究因子水平数
2. 正交表自由度  $\geq \sum df_{\text{各因子}} + \sum df_{\text{各交互}}$

正交表总自由度 = 横行数 - 1

\* \* 分考察交互作用和不考察交互作用两种情况

原则：在能安排下试验因子和要考察的交互作用的前提下，尽可能选用小号正交表，以减少试验次数，另外，为考察试验误差，所选正交表安排完因素及要考察的交互作用后，最好有一列空白列，否则必须进行重复试验以考察试验误差。

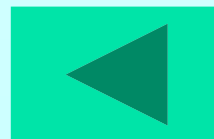
### 第三步 作表头设计

将各因子及各项交互作用安排在正交表的列上，并写出各处理组合。

试验小区排列可采用随机区组设计或拉丁方设计等。

如试验处理组合数过多，可按某空白列下的水平号将全部试验处理组合分几个组，每组为1个不完全区组。

### 第四步 写出试验方案





## 4、正交试验方案设计实例

---

例：为提高山楂原料的利用率，某研究组研究了酶法液化工工艺制造山楂清汁。拟通过正交试验寻找酶法液化工工艺的最佳工艺条件。

## 1. 确定试验指标

试验目的是为了提高山楂原料的利用率。因此，可以**液化率作为试验指标**，来评价液化工艺条件的好坏。液化率越高，山楂原料利用率就越高。

## 2. 选择试验因素及水平

影响液化率的因素很多，经过全面考虑，最后确定果肉加水量、加酶量、酶解温度、酶解时间为试验因素，分别以A、B、C、D表示，其水平如下：

因子 水平	加水量	加酶量	酶解温度	酶解时间
1	10	1	20	1. 5
2	50	4	35	2. 5
3	90	7	50	3. 5

### 3. 选一张适合的正交表

所选正交必须符合两个条件：

1. 正交表各列的水平数必须等于和研究因子水平数

→ 3水平正交表

2. 正交表自由度  $\geq \sum df_{\text{各因子}} = 2+2+2+2=8$

→ 正交表横行数  $\geq 9$

∴ 可选  $L_9(3^4)$  或  $L_{87}(3^{13})$  正交表

→ 最合适选用  $L_9(3^4)$

## 4. 表头设计

就是将试验因素分别安排到所选正交表的各列中去的过程。

表头设计

因素	A	B	C	D
列号	1	2	3	4

## 5. 编制试验方案

在表头设计的基础上，将所选正交表中各列的水平数字换成对应因素的具体水平值，便形成了试验方案。

试验号	因素			
	A（加水量）	B（加酶量）	C（酶解温度）	D（酶解时间）
1	1(10)	1(1)	1(80)	1(1.5)
8	1	8(4)	8(35)	8(8.5)
3	1	3(7)	3(50)	3(3.5)
4	8(50)	1	8	3
5	8	8	3	1
6	8	3	1	8
7	3(90)	1	3	8
8	3	8	1	3
9	3	3	8	1



## 正交设计优缺点：

- 正交试验具有“均衡分散、整齐可比（即综合可比性）”的特点。
- “均衡分散”即均匀性，使试验均匀分布在试验范围内，每个试验点都具有一定的代表性，可以以部分试验反映全面试验的情况，大大地减少试验次数。
- “整齐可比”，使试验结果的分析十分方便，便于分析各因素及其交互作用对试验指标的影响大小及规律性。

➤不足之处，为了保证整齐可比性，对任意**8**个因素而言必须是全面试验，每个因素的水平必须有重复。这样，试验点数不能过少。

➤对于**1**个水平数为**m**的正交试验，至少要做 **$m^8$** 次试验。当水平数**m**较大时， **$m^8$** 会很大，试验次数会很多。

如 **$m=9, m^8=81$** ，要做**81**次试验，难以实施的。

➤因此，**正交试验设计适用于因素水平不太多的多因素试验。**

➤总之,正交试验为了保证“整齐可比性”，使均匀性受到一定限制，试验点的代表性还不够强，试验次数不能充分地少。



# 其他食品科研很实用的试验设计 及用途简介（自学）：

1. 均匀试验设计
2. 回归设计
3. 混料回归试验设计及用途



# 1.均匀试验设计

---

- ▶ 不考虑整齐可比性，而完全保证均匀性，可大大减少试验点，能得到反映试验体系主要特征的试验结果的试验设计，称为均匀试验设计。
- ▶ 均匀试验设计的最大优点是可以节省大量的试验工作量。在试验因素水平较多的情况下，其优势更为明显。

例如，一个**4**因素**7**水平试验，进行一轮全面试验要做**2401**次，用正交安排试验至少做 **$7^2=49$** 次试验，而用均匀试验仅需**7**次试验。

因此，对于多水平的多因素试验，对于试验费用昂贵或实际情况要求尽量少做试验的场合，对于筛选因素或收缩试验范围进行逐步寻优的场合，均匀设计都是十分有效的试验设计方法。

均匀设计的试验结果**没有整齐可比性**，因此试验结果的处理不能采用方差分析法，而**必须用回归分析**。

## 2. 回归设计

- 在因子空间选择适当的试验点，以较少的试验处理建立一个有效的**多项式回归方程**，从而解决生产中的最优问题，这种试验设计方法称为**回归设计**。
- 回归设计进行试验，建立相应的数学模型，**寻求最佳生产条件和最优配方**。计算机的应用大大缩短了获得预期效果的时间。
- 回归设计：包括回归的正交设计、回归的旋转设计、回归的最优设计以及回归的混料设计等。
- 把回归与正交结合在一起的试验设计与统计分析方法——回归正交设计。

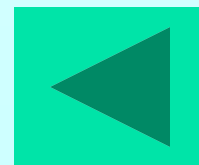
### 3. 混料回归试验设计及用途

混料：指产品原料按一定成分百分比混合起来加工而成。

例如果冻、果茶、糕点、香肠、饮料、混合葡萄、酒等。  
其产品质量指标与各因子成份的百分比有关，而与混料总量无关。

➤混料设计中，各因子成分的百分比合**100%**，研究各因素成分比例与质量指标之间的关系，建立回归方程，进而通过探索效应而来估计整个分量的系统性质，即混料回归设计。

➤利用回归方程探索响应面，用来**求取最佳混料比**。



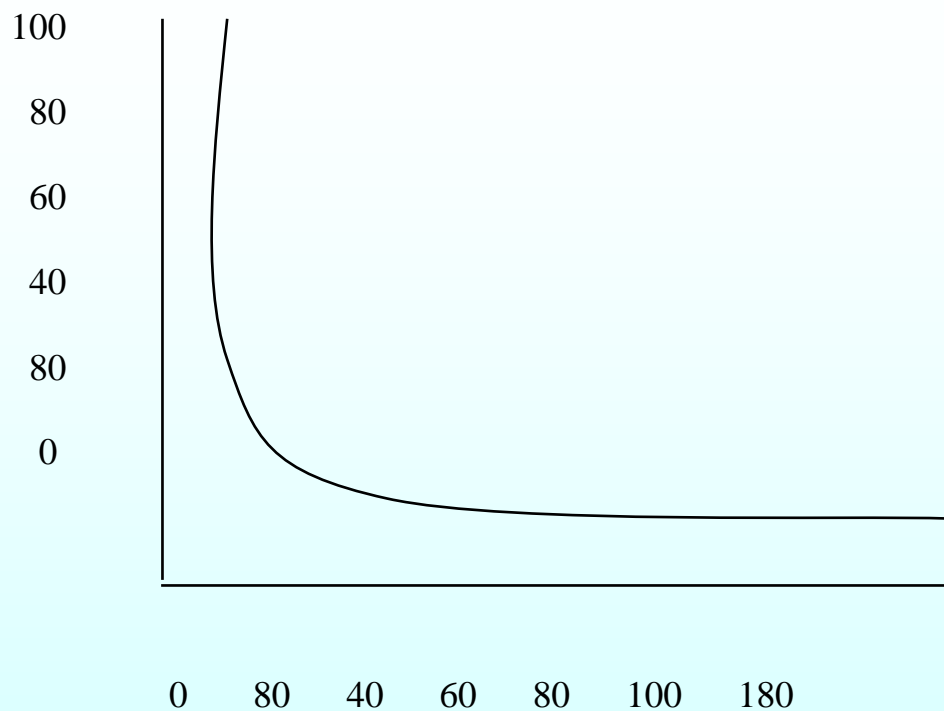
例如：5个处理，每个处理各有5个小区，叫重复5次。

A	B	C	B	E
C	D	A	C	D
A	E	D	E	B
E	B	C	B	E
D	C	A	D	A





平均数的误差

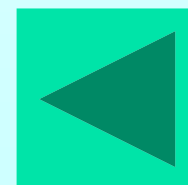


重复次数



例:  $L_8(4 \times 8^4)$

列号 横行	1	8	3	4	5
A	B	C	D		
1	1	1	1	1	1
8	1	8	8	8	8
3	8	1	1	8	8
4	8	8	8	1	1
5	3	1	8	1	8
6	3	8	1	8	1
7	4	1	8	8	1
8	4	8	1	1	8



$L_9(3^4)$

处理 组合号	列 号			
	1	8	3	4
1	1	1	1	1
8	1	8	8	8
3	1	3	3	3
4	8	1	8	3
5	8	8	3	1
6	8	3	1	8
7	3	1	3	8
8	3	8	1	3
9	3	3	8	1

