

科学实验设计一百例评注

(上册)

中国科学院生物物理研究所 楊紀珂 讲

北京市科学技术协会 印

1964年5月

6D
Y193a

30677

西 江 月

事物皆含规律，
奈他变易重重。
恰如云障护苍龙，
只见一鳞半迹。

拾得端香一百，
收存花粉千钟。
春采大地漫东风，
繁使蜂蝶相送。

下-58



目 录

~~~~~

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. 科学实验中的比较.....                   | 9  |
| 例 1.1 农业中的比较实验.....                | 9  |
| 例 1.2 工业中的比较实验.....                | 10 |
| 例 1.3 有对照的比较实验.....                | 11 |
| 例 1.4 药物的生物测定法中的比较实验.....          | 11 |
| 例 1.5 临床比较实验.....                  | 12 |
| 例 1.6 作物实验中的系统误差.....              | 13 |
| 例 1.7 高炉实验中的系统误差.....              | 14 |
| 例 1.8 家畜饲养实验中的系统误差.....            | 15 |
| 例 1.9 大鼠实验中的系统误差.....              | 15 |
| 例 1.10 在比较实验中的精度的度量.....           | 16 |
| 例 1.11 大麦实验的推广问题.....              | 17 |
| 总 结 .....                          | 18 |
| 2. 基本的假定.....                      | 18 |
| 例 1.1 适合可加性假定的例子——<br>施肥实验的比较..... | 18 |
| 例 2.2 药物的生物测定实验中的药力问题.....         | 20 |
| 例 2.3 除莠剂实验中的除莠率问题.....            | 23 |
| 例 2.4 在猪的育种实验中的评分问题.....           | 24 |
| 例 2.5 在工业实验中的原料问题.....             | 24 |

|                 |                        |    |
|-----------------|------------------------|----|
| 例2.6            | 在一項頭痛藥實驗中的清型問題.....    | 26 |
| 例2.7            | 在工業實驗中的前後準速問題.....     | 26 |
| 例2.8            | 在乳牛飼料實驗中的前後影響的問題.....  | 27 |
| 總 結             | .....                  | 28 |
| 3. 為減低誤差而作的實驗設計 | .....                  | 28 |
| 例3.1            | 污水處理的成對比較實驗.....       | 28 |
| 例3.2            | 棉花施肥的隨機化區組實驗.....      | 30 |
| 例3.3            | 雞窩至小雞的隨機化區組實驗.....     | 34 |
| 例3.4            | 改進工業過程的隨機化區組實驗.....    | 35 |
| 例3.5            | 工業過程的拉丁方實驗.....        | 37 |
| 例3.6            | 田間作物的拉丁方實驗.....        | 40 |
| 例3.7            | 乳牛飼料的拉丁方實驗.....        | 41 |
| 例3.8            | 公共汽車燃料消耗的拉丁方實驗.....    | 42 |
| 例3.9            | 乳牛飼料的混合拉丁方實驗.....      | 43 |
| 例3.10           | 改進工業過程的希臘拉丁方實驗.....    | 45 |
| 總 結             | .....                  | 47 |
| 4. 依靠協變量縮小誤差    | .....                  | 47 |
| 例4.1            | 在系索實驗中加協變量.....        | 47 |
| 例4.2            | 在紡織實驗中加協變量.....        | 50 |
| 例4.3            | 蘋果產量的隨機化區組實驗中加協變量..... | 51 |
| 例4.4            | 多年生作物實驗中的協變量.....      | 54 |

|         |                             |     |
|---------|-----------------------------|-----|
| 例4.5    | 藥物鑑定拉丁方實驗中的協變量.....         | 5 5 |
| 例4.6    | 動物實驗中的屬性協變量.....            | 5 7 |
| 總 結     | .....                       | 5 8 |
| 5. 隨機化  | .....                       | 5 8 |
| 例5.1    | 在隨機化區組中小區間的隨機化配置法.....      | 5 8 |
| 例5.2    | 完全隨機實驗設計的隨機配置法.....         | 6 0 |
| 例5.3    | 在作物實驗中用系統化配置法的缺點.....       | 6 1 |
| 例5.4    | 一種化學分析實驗的系統化配置.....         | 6 3 |
| 例5.5    | 在小學生營養試驗中的主觀配置問題.....       | 6 3 |
| 例5.6    | 在臨床實驗中的隨機化.....             | 6 4 |
| 例5.7    | 在含氟牙膏實驗中的隨機化.....           | 6 5 |
| 例5.8    | 耐磨合金鋼熱處理實驗的設計問題.....        | 6 6 |
| 例5.9    | 在隨機化配置中遇到系統化的問題.....        | 6 7 |
| 總 結     | .....                       | 6 8 |
| 6. 析因實驗 | .....                       | 7 2 |
| 例6.1    | 在肥料析因實驗中的不同處理.....          | 7 2 |
| 例6.2    | 在牛精稀釋劑實驗中的因素.....           | 7 3 |
| 例6.3    | 煉鐵實驗過程中的因素.....             | 7 3 |
| 例6.4    | 肥料析因實驗的重复與隨機配置.....         | 7 4 |
| 例6.5    | 在汽油合成催化過程中催化劑濃度實驗里的響應面..... | 7 6 |
| 例6.6    | 在球磨機磨碎實驗中的響應面.....          | 7 7 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 例 6 . 7 化学分析的新因实验 ..... | 79 |
|-------------------------|----|

|           |    |
|-----------|----|
| 总 結 ..... | 80 |
|-----------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 7 . 简单的析因实验設計 ..... | 81 |
|---------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 例 7 . 1 在小家鼠寄生虫实验中的因素 ..... | 81 |
|-----------------------------|----|

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 例 7 . 2 在青霉素生产实验中的因素 ..... | 82 |
|----------------------------|----|

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 例 7 . 3 在小麦抗锈病品种比較实验中的因素 ..... | 83 |
|--------------------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 例 7 . 4 在学外文记忆力实验中的因素 ..... | 84 |
|-----------------------------|----|

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 例 7 . 5 在防治桃蛀螟的实验中含因素的水准 ..... | 84 |
|--------------------------------|----|

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 例 7 . 6 在度量因素中选定极端水准的例子 ..... | 85 |
|-------------------------------|----|

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 例 7 . 7 度量水准的区间間距 ..... | 86 |
|-------------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 例 7 . 8 在度量因素中水准的数目 ..... | 87 |
|---------------------------|----|

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 例 7 . 9 高炉炼铁实验的五点設計与九点設計 ..... | 89 |
|--------------------------------|----|

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 例 7 . 10 在小家鼠寄生虫初因实验中的随机化区組配置 ..... | 90 |
|-------------------------------------|----|

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 例 7 . 11 續例 6 . 4 的田間实验設計 ..... | 91 |
|---------------------------------|----|

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 例 7 . 12 小家鼠的生化实验 ..... | 91 |
|-------------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 例 7 . 13 牧坊实验中的裂区实验設計 ..... | 94 |
|-----------------------------|----|

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 例 7 . 14 氧气炼鋼鋼錠质量的实验 ..... | 96 |
|----------------------------|----|

|           |    |
|-----------|----|
| 总 結 ..... | 97 |
|-----------|----|

|                     |    |
|---------------------|----|
| 8 . 該取多少观测数据? ..... | 98 |
|---------------------|----|

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 例 8 . 1 两个家畜飼料比較的实验 ..... | 98 |
|---------------------------|----|

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 例 8 . 2 为探索誤差項均方作的两阶段实验法 ..... | 100 |
|--------------------------------|-----|

例 8.3 两种計数数据均方的估計.....103

例 8.4 两种鋼筋混凝土预制构件的应力实  
驗的单元数.....103

例 8.5 在沉降式粒度測定仪的比較实驗中所需数据数  
目.....105

例 8.6 在两种紅血球檢驗法的比較实驗中的单元数.....106

例 8.7 在大豆品种的随机化区組田間实驗中  
的区組数.....107

例 8.8 完全随机实驗与随机化区組实驗設計的比較.....108

例 8.9 拉丁方田間实驗的处理数.....109

例 8.10 在牧草行間距实驗中各水准的实驗单元数目.....110

例 8.11 土壤分析实驗的設計.....111

例 8.12 支气管哮喘症疗法的序貫实驗法.....114

9. 拉丁方的安排法.....117

例 9.1 拉丁方的随机化方法.....117

例 9.2 希腊拉丁方的随机化.....119

例 9.3 拉丁方的正交划分.....121

例 9.4 檢查紡錠缺陷的多因素拉丁方实驗設計.....122

例 9.5 銷售避孕药的拉丁方实驗.....123

例 9.6 为选择均匀的实驗单元用的拉丁方.....124

例 9.7 鍍义齿的拉丁方比較实驗.....125

10. 不完全設計.....126

例 10.1 比較核桃树品种的平衡不完全区組实驗  
的設計.....126

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 例10.2 | 比较几种去污粉的B I B 实验設計.....        | 128 |
| 例10.3 | 比较检查牛结核病用的試剂的B I B 实验設計.....   | 130 |
| 例10.4 | 例10.1的結果数据分析.....              | 131 |
| 例10.5 | 研究山羊鏈球菌病用的尤登方实验設計.....         | 133 |
| 例10.6 | 研究不同世系紅首猪的抗銹病性能的平衡格子方实验設計..... | 134 |
| 例10.7 | 成对实验的不完全区組設計.....              | 137 |
| 总 結   | .....                          | 139 |

## 11. 其他实验設計..... 140

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 例11.1 | 在豌豆肥料实验中把高次交互影响混杂的析因实验設計..... | 140 |
| 例11.2 | 在一項气体合成实验中使用混杂設計.....         | 141 |
| 例11.3 | 土壤对豆箕效应的部分混杂实验設計.....         | 142 |
| 例11.4 | 在乳牛飼养法研究中的时序实验設計.....         | 146 |
| 例11.5 | 打紙漿过程的时序拉丁方实验設計.....          | 147 |
| 例11.6 | 在六个不同地区作的土豆施肥实验.....          | 149 |
| 例11.7 | 計数微粒的最优单元体积.....              | 150 |
| 例11.8 | 小鼠鼠对某种細菌起反应的概率.....           | 151 |
| 例11.9 | 在过程工程 探索最优条件的实验設計.....        | 153 |
| 总 結   | .....                         | 155 |

|      |                  |    |
|------|------------------|----|
| 附表 I | 数字1到9的随机排列表..... | 68 |
|------|------------------|----|

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 附表 II | 2000个随机数字表..... | 70 |
|-------|-----------------|----|

附表II 几种常用的平衡不完全区组实验 (BIB) 设计..... 156

附表IV 处理数 ( $t$ ) 在 10 以内的可能的 BIB 设计..... 159

附表V 一些尤登方实验设计..... 160

## 一、科学实验中的比较

### 例 1. 1    农业中的比较实验

大多数农业上的田间试验是比较。比较几个品种的优劣，比较几种施肥法的优劣，比较几种田间管理的优劣等。实验方法是把试验田划分为若干小区田，如要比较几种施肥法的优劣，就把各种施肥法配置在各小区田上种植，到收获期量它们的产量。我们把小区田款作为实验单元，把不同的施肥法款作为不同的处理。从过去大量的试验结果告诉我们：

1. 如只用一种施肥法，在产量上，相邻小区田的要比距离远的小区田的较近似。

2. 用同一施肥法，不同地区或不同年分做相同的实验，在产量上的变异可能很大。

3. 试验田的肥沃度往往或者会有系统的从一头较肥沃到另一头较贫瘠，或者会局部一块较肥沃周围较瘠。

4. 各施肥法在同一年分、地区、与环境下的差异，比起各法本身在不同年分、地区、与环境下的差异来，还是有一定程度的稳定性。

评註 实验的目的如是为了决定采用哪一种施肥法最好。我们就不要去估计各种施肥法的作物产量，这不容易估得很准，只需对各种

施肥法作相对的比較。这样可以使实验設計簡單得多。

此外，由于偶然性變差不可避免地存在，它混淆了由于施肥法的不同而引起的差異，因此实验数据必需使用数理統計方法加以分析，同时还要安排好实验，以便从偶然性變差的复盖下找出因处理的不同所导致的差異来。

### 例1.2 工业中的比較实验

在工业过程中的大多数实验也具有与上例同样的性質。或者是比較几种过程（新过程与原过程，新过程与新过程）間的优劣，或者是，在过程中某一設備或条件或操作方法上作了改革，要比較改革前后的优劣，或者是比較几种不同設備在性能与效率上的优劣。如以比較几种不同的过程为例，譬如說对从一种含铜的鉄矿中提铜研究出了两种不同的提铜过程。現在为了比較这两种过程的优劣，要进行一个比較实验。我們把矿石分成若干批，每批矿石用一种过程方法提取其中所含的铜，提出了铜，求出有关铜的回收率、铜的質量、以及处理一吨矿石所費的成本等方面的数据用数理統計方法加以分析比較，以决定这两种过程孰优孰劣。这里把每批矿石认作为实验单元，把不同的过程认作为处理。与上例一样，也是在各实验单元上施以不同处理来进行实验。这里所谓处理是广义的，如比較的是不同型的設備，則設備就是处理；如比較的是不同来源的矿石，則矿石就是处理。“处理”这个名詞已成为实验設計和数理統計中的通用名詞了。

如果处理间的差异并不存在，或者用同一种处理，实验结果还是有差异的，非但如此，随着设备的逐渐变旧，矿石成分的逐渐变化，即使用同一种处理过程，也会使结果有在长期中发生变化的倾向。

評註 同上例一样，我們当然不能把过程内部偶然性的变异以及长期趋势的倾向误认为是不同过程间的差异。在进行比较实验时，除出了过程上的不同外，其它条件如矿石原料的成分、操作技术的水平、草間管理的措施等应尽可能地保持一致。得出的数据当然須用数理統計方法处理。

### 例 1. 3 氮肥实验中的对照组

某公社土地很是肥沃，怀疑再施氮肥也許不起什么作用。因此，以小区田为实验单元，以施氮肥和不施氮肥为两种处理，来进行实验。这种不施氮肥的“处理”是个空白的处理，称为对照。

假如已知施加氮肥是有效的，实验的目的仅在于比较两种或几种含氮量相同的氮肥的功效，则对照就不一定需要。但如果有效与否不能十分肯定，最好有个对照。

評註 如同我們在数理統計方法中学过的，在对照组内重复实验的数目最好与其它处理组内的重复实验数目相等或大致相等。如果对照组只有一个或少几个实验单元，在处理组内即使有较多的实验单元也不一定能够增加实验的辨别能力。

### 例 1. 4 药物的生物测定法中的比较实验

有一种在动物身上做比較实验来鑑定藥物的藥力的方法，那就是藥物的生物鑑定法。方法是把在遺傳上和環境上差別都很小的同胎同性體重差不多的小家鼠作為實驗單元，把要鑑定的藥物和一個藥力屬已知的標準藥物作為處理，對許多單元進行實驗，度量出在某種症狀出現時的劑量（閾劑量），或者有半數小家鼠死亡的劑量（半致死劑量），或者任何其它可度量的現象達於一定程度時的藥物劑量，然後對實驗數據的對數的平均數用發理統計方法加以比較，來判斷該藥物的藥力超過標準還是不達標準。

評註 有人想省去標準藥物，只用受試藥物作實驗，得出的閾劑量或半致死劑量會因不同的動物或者不同的時間或者不同的其他環境條件而大有變遷。因此不用標準藥物作成對的對照比較，藥物的鑑定就不可能是正確的；不僅如此，只用一對小家鼠作比較實驗也不可靠，究竟應該用多少對實驗單元？可以按第八章中舉例的辦法。至於數據在平均之前為什麼要取對數？留在第二章中例2.1中去講。

### 例1.5      臨床比較實驗

在臨床實驗中，最常見的比較是：比較一種新藥的成效。這跟上面例1.3相象，如果已知治療某病的新藥舊藥都有效，只比較兩者之間的差異——例如療效程度上的和速度上的差異，副作用上的差異，成本上的差異等——則沒有必要使用對照組；但如該藥的療效尚屬未知，則必須同時使用對照組。由仍舊是因為在不同環境條件下偶然性

的變差足以使藥物的療效受到混淆之故。在臨床實驗中的實驗單元就是病人，處理就是不同的療法或者對照。

評註 有兩點值得在此提一下。首先是不能為了實驗，把肯定是有益於嚴重病人的藥物或療法保留起來不用，因此有許多藥物和療法須先在動物身上作實驗。其次，在對病人肯定無害的條件下進行有對照的實驗時，須注意到心理的影響。有時病人如知道是在做實驗，他的心理反應可能影響到生理上去，從而使診斷起來發生偏差，尤其是那些由問答得出的診斷。為避免這項偏倚，需把對照組藥物調成與處理組的外表完全相同，只有成分上的不同——對照組缺那種問題中的藥物。不令病人知道服的是真是假，不但如此診病的醫師最好也不許他知道誰是對照誰是處理，免得受先入為主的思想的支配。掌握分配工作的最好是一位能嚴格保密的護士。

從以上五例看來，實驗的設計包括兩部分。第一部分是選定實驗單元，選定處理的種類，規定要度量的判斷是什麼。第二部分是把各種處理配置於各實驗單元的方法以及應該使用多少個實驗單元才能多快好省地完成實驗並作出所期望的科學推斷。以後所要舉例討論的只是第二部分。

### 例 1.6      作物實驗中的系統誤差

如果有一塊試驗田，劃分為 12 塊小区田作為實驗單元。所要比較的是三個不同品種的作物，作為處理。記為 A, B, C。現在如

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |     |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| 肥 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | → 薄 |
|   | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C   |

这三个品种依次配置在12块小区上如图所示。如果这块试验田的肥沃度从一头到另一头逐渐减低（例如试验田一头靠河，一头不靠河；或者在山坡上的试验田，一头低，一头高；这种情况就更为显著）那末，即使这三个品种的作物在产量上不相上下，经这个试验后会得出A最优，B次之，C最次的结果。换言之，即使只种一个品种，也会出现A小区田上产量的平均数大于B的，B的大于C的，象这样的误差称为系统误差，它混淆了各处理间真正的差异的有无，是要设法避免的。

### 例1.7 高炉实验中的系统误差

有人在一座高炉上进行两种不同风温的比较实验，风温A为700℃，风温B为900℃。如果在一年的时期中每月按次序换用一种风温A B A B A B.....进行实验。实验结果经统计分析得B的平均产量显著地大于A的平均产量，但是同时在这一年中，由于侵蚀之故，炉腹部分逐渐扩大。虽然可以推断风温的提高有助于产量的提高，但由于系统误差之故，炉腹的扩大未始不对产量不产生影响，从而使上述的推断大为逊色。类此的系统误差也是要设法避免的。

评注 避免发生系统误差的方法是采用随机化的方法把各处理配

置在各个实验单元上。至于怎样随机化，請看第五章里的例子。

### 例 1.8     家畜飼养实验中的系統誤差

在家畜飼育实验中，如把許多头家畜譬如猪放在一个猪栏里飼以一種飼料，把另外許多头猪放在另一个猪栏里飼以另一种飼料，如把各栏中每头畜成为一个实验单元，經一定时期后將其育重进行比较，以定那一种飼料在育肥效应上較优。这种实验有一个明显的缺点是一栏的环境跟另一栏的可能很不相同。使得环境所致的差異与处理所致的差異混染起来无法分辨。类似发生的誤差也被称为系統誤差。不仅如此，譬如在飼鸡实验中，一个鸡群的飼料如不足，强的鸡不許弱的鸡啄食，結果强的鸡因吃得多增的体重不能抵消弱的鸡因吃食不足而减少的体重。这样，一群常爭吵的鸡群要比一群相处得很好的鸡群不但在个体間的變差方面要大得多而且在平均增重量上也会产生系統性的誤差。

評註 这个例子中的問題在于我們誤把每只猪当作一个实验单元。实际上它不成为实验单元。一栏猪才是个实验单元。显然，以两个实验单元各配置一种处理所得出的实验結果是无法从而作出教理統計推断的。因此，实验单元的定义應該是：在实验中能施以不同的处理的最小的材料单元称为实验单元。在飼养一栏猪时，各头猪共食一槽，不能給以不同的飼料（即不能施以不同的处理），因此各头猪不能分別作为实验单元看待。

### 例 1.9     大家鼠实验中的系統誤差

1927年 McDougall 用大家鼠为材料作了个实验。

他把一代代的家鼠加以训练，使之追光，并对每代的鼠测量其追光的速度。在没有选择的情况下，他发现这速度随世代而增，于是认为这是个获得性遗传效应的例证。可是他并没有采用对照组，后来到了1936年 Creel 采用了对照组（不予训练）与处理组（予训练）作平行实验，发现这种遗传效应是存在的。后来 Agar 等人又做了将近20年的实验，发现训练的大家鼠确实有家 McDougall 所描述的追光速度随代加快的现象，可是不予训练的对照组里的大家鼠也同样加快。于是得出结论，认为这个现象并不是由于训练所致的获得性遗传效应，而是归因于鼠群在多年中健康情况的变化所致。

評註 从以上四个实验我们得出一条经验教训：系统误差会导致错误的结论，即把系统误差误认为是处理的效应。因此我们在实验的进行中必须确认系统误差是不存在的，如对此有所怀疑的话，则需设法借附加的实验来予以验证。

#### 例 1.10 在比较实验中的精确定度的度量

我们在数理统计方法中已学过标准离差和标准误差的计算。标准离差度量各组实验单元间的内在的偶然性变异，标准误差则度量各平均数间的偶然性的误差。但当有两组数据进行比较时，对两组平均数的差数而说，也由于随机抽样之故，存在着一个标准误差，