



# 试验设计 与 数据处理

张铁茂 丁建国 编著

SHIYAN SHEJI  
YU  
SHUJU CHULI

兵器工业出版社

## 内容简介

本书介绍试验设计与数据处理的基本原理和常用方法，包括数理统计中有关的基本概念。回归分析方法，正交试验设计，回归正交设计，数据结构，新型试验技术以及试验技术在各个领域中的发展与应用，全书共十章。

本书从应用观点出发，简要地介绍数据处理的基本原理，并通过实例阐明常用方法的具体应用。

本书可以作为工科高等院校的试用教材或教学参考书。对于工程技术人员、管理人员和企业决策人员都有参考价值。

本书由邓子琼主审，经机械电子工业部兵工教材编审室审定，同意作为部级教材出版。

## 序

随着科学技术的不断发展，应用研究的日益广泛与深入，试验设计与数据处理已经成为科技人员的必备技术。

当前，尽管有不少关于数据处理理论的书籍，但是都有它们各自的系统，并偏重于复杂定理的证明和公式的推导。工程技术人员阅读起来，具有一定的难度。

该书从应用观点出发，扼要系统地介绍了数据处理的基本原理和常用方法，并通过作者的科研成果与所发表的论文把数据处理与试验设计、测试资料有机地结合起来，使工程上经常遇到的多因子试验的复杂问题得到迅速有效的解决；在介绍数据处理原理及应用实例时，重点强调分析问题、解决问题的思路和方法，从而把理论与实际、教学与科研结合起来。

几年来的教学实践表明，利用本书进行教学，对大学本科生及研究生都取得了较好效果。本书可以作为工科高等院校的试用教材或教学参考书，并可供有关工程技术人员参考。

沈正功

1989年1月

## 前 言

试验设计与数据处理统称为试验技术。它是对实物试验与非实物试验进行试验设计与分析的一种通用的现代技术，是一门关于试验研究的软科学，是优化理论的一个重要方面。本书主要介绍试验设计与数据处理的基本原理、常用方法及其在科学研究、生产实践、产品设计、计划决策和质量管理等方面的实际应用。同时叙述作者对试验技术某些方法的完善与发展。

随着科学技术的不断发展，试验技术的应用愈益广泛，并被人们认为是科技人员、管理人员和企业决策人员的必备技术。国外不少单位已从行政上规定，所有的工程技术人员、销售人员和生产管理人员，都必须学习试验技术。国内许多高等院校也先后为本科生、研究生开设了试验技术课程，有的学校，已将试验设计列为本科生的必修课，将回归分析列为研究生的学位考试课。为了满足各方面读者的实际需要，本书从技术观点、应用观点，力求对每种方法的原理给予通俗的说明，并通过简单实例阐述各种方法的应用技术，略去繁冗公式的推导和复杂定理的证明。读者只要理解公式的意义，便能顺利阅读本书，并应用于实践。希望进一步了解数学原理的读者，可以阅读本书所附的参考文献。

全书共十章。前五章是有关回归分析方面的内容，它们是试验设计与数据处理的基础，是初学者应该首先掌握的；六至八章是正交试验设计技术及其拓广与应用，其中回归正交设计把回归分析与正交试验两者的优点结合起来，使得试

验技术进一步完善与发展；九、十两章属于新型试验技术，是正交试验技术在不同学科的发展与应用。读者可在掌握上述试验设计与数据处理所必须的基础知识的条件下，根据实际需要阅读有关章节。

本书由张铁茂、丁建国编著。各章的执笔人是：张铁茂第一、二、六、七、八、九、十章，丁建国第三、四、五章。最后由张铁茂统一定稿。

本书由邓子琼教授主审。

本书可以作为工科各专业本科生、研究生的试用教材或教学参考书。对于科学工作者、工程师和管理人员，寻求产品最优设计与最佳生产条件，制定工厂的生产计划以及建立各种线性与非线性数学模型，本书都有参考价值。

在编写本书的过程中，得到了沈正功教授、潘承洋教授、章渭基教授、杨惠民教授等人的热情指导，机械制造试验室协助做了大量试验，在此一并表示感谢！

由于我们的理论水平和实际经验所限，书中缺点错误在所难免，诚望读者批评指正。

编著者

一九八八年八月

# 目 录

结论	( 1 )
第一章 基本概念	( 4 )
第一节 误差及其分类	( 4 )
第二节 误差的正态分布	( 6 )
第二章 回归分析与一元线性回归	( 18 )
第一节 回归分析	( 18 )
第二节 一元线性回归	( 22 )
第三节 回归方程的应用——预报和控制	( 51 )
第四节 可化为线性回归的曲线回归	( 61 )
第五节 回归直线的简便求法	( 62 )
第六节 两条回归直线的比较	( 64 )
第三章 多元线性回归	( 68 )
第一节 多元线性回归的数学模型	( 68 )
第二节 多元线性回归系数的求解	( 71 )
第三节 多元线性回归方程的显著性检验	( 80 )
第四节 多元线性回归系数的显著性检验	( 85 )
第五节 利用回归方程进行预报和控制	( 88 )
第六节 多元线性回归分析步骤总结及举例	( 90 )
第四章 多元非线性回归与多项式回归	( 97 )
第一节 多元非线性回归	( 97 )
第二节 多项式回归	( 98 )
第三节 正交多项式的应用	( 100 )
第四节 正交多项式回归步骤总结及举例	( 113 )

<b>第五章 最优回归方程和逐步回归分析</b> .....	( 123 )
<b>第一节 最优回归方程的选择</b> .....	( 123 )
<b>第二节 逐步回归分析的数学模型</b> .....	( 125 )
<b>第三节 求解求逆紧凑变换</b> .....	( 131 )
<b>第四节 逐步回归分析的具体方法</b> .....	( 138 )
<b>第六章 正交试验设计</b> .....	( 157 )
<b>第一节 基本概念和方法</b> .....	( 157 )
<b>第二节 具有交互效应的试验设计</b> .....	( 168 )
<b>第三节 正交试验的方差分析</b> .....	( 173 )
<b>第四节 混合水平的正交试验设计</b> .....	( 190 )
<b>第七章 回归正交设计</b> .....	( 196 )
<b>第一节 一次回归的正交设计</b> .....	( 197 )
<b>第二节 多水平因素的“编码”与应用</b> .....	( 213 )
<b>第三节 二次回归的正交设计</b> .....	( 240 )
<b>第八章 数据结构</b> .....	( 264 )
<b>第一节 试验数据的结构式</b> .....	( 264 )
<b>第二节 正交试验设计中效应的估计</b> .....	( 273 )
<b>第三节 缺失数据的补偿</b> .....	( 282 )
<b>第四节 异常数据的判定与剔除</b> .....	( 288 )
<b>第九章 若干新型试验设计技术</b> .....	( 311 )
<b>第一节 均匀试验设计</b> .....	( 311 )
<b>第二节 信噪比试验设计</b> .....	( 326 )
<b>第三节 物理试验设计</b> .....	( 344 )
<b>第四节 数学试验设计</b> .....	( 357 )
<b>第十章 广义试验设计技术</b> .....	( 365 )
<b>第一节 广义试验</b> .....	( 365 )

第二节	故障判析法	( 368 )
第三节	寿命试验	( 369 )
第四节	生产计划试验设计	( 371 )
第五节	产品销售试验技术	( 374 )
<b>附表</b>		( 378 )
附表一	$F(f_1, f_2)$ 表	( 378 )
附表二	$t$ 分布的双侧分位数 ( $t_\alpha$ ) 表	( 381 )
附表三	正交多项式表( $n=2\sim30$ )	( 383 )
附表四	常用正交表	( 396 )
附表五	均匀设计表	( 411 )



## 绪 论

人们在生产实践和科学实验中，不断地探索和揭示客观事物的内在联系以及它们发展变化的规律。其方法有两种：一是理论分析的方法；二是实验研究的方法。

实验研究的方法是极为重要的，它不仅能定性地验证理论分析的正确性，而且还能够定量地验证理论结果的正确程度，进而找出诸多变量之间的数量关系，建立它们之间的关系式。所以，著名的科学家门捷列夫说“科学始于试验”。

早在 1906 年泰勒 (Taylor) 发表了迄今仍享有盛誉的论文<sup>[1]</sup>，它报导了 26 年来实验研究的结果。泰勒实验了粗加工中刀具材料和切削条件对刀具耐用度的影响，其主要目的是寻找实验规律，以便确定最佳切削条件。泰勒建立的著名公式为：

$$v t^m = A$$

式中  $m$ 、 $A$  分别为泰勒指数和泰勒常数。泰勒用实验研究的成果指导生产和改革。于是，使贝斯莱赫 (Bethlehem) 钢铁公司机械车间的生产增加了 5 倍<sup>[2]</sup>。自从泰勒的论文发表之后，有关金属切削方面的实验研究成果和理论著作如雨后春笋般地增加起来。在社会实践中，借助于实验研究的成果推动和促进生产发展与理论提高的例子是很多的。

为什么要花费多年的时间进行辛劳的实验呢？因为试验数据具有两种性质：

### 第一 波动性

在任何一种试验中，即使是在同一试验条件下，对同一

参数进行重复试验时，无论所用仪器多么精密，方法多么完善，对试验条件控制得多么严格，试验者多么细心，最后得到的各次试验结果总不会完全一致，而是忽高忽低，表现出一种波动性。因为许多因素在影响实验过程，而且各种影响因素还在经常不断地变化着，所以，试验结果并不完全准确地反映试验对象的本来面貌。波动性是科学试验的必然现象和普遍规律。

## 第二 规律性

试验数据虽有波动，但并不是杂乱无章的，而总是呈现出一定的规律性。这表现在：同一试验条件下，用同一测量方法，同一测量仪器，同一观测者，在很短的时间间隔内对同一参数连续试验时，大多数实验结果都落在某个范围之内，而且数据落到一定范围内的次数与总实验次数之比是比较稳定的，也就是说：试验数据的分布是有规律的。

在科学试验中得到的这些试验数据，为人们认识事物的本质、研究事物之间的关系、预测事物今后可能的发展变化，提供了丰富的材料和科学的依据。但是，要想从这样一些庞大的数据堆中找到有用的东西，得到可靠的结论，却不是一件容易的事情，必须很好地下一翻工夫，对试验数据进行认真的整理和必要的检验。概率和数理统计中的一些计算方法和处理技巧，可以帮助我们对试验数据进行去粗取精、去伪存真的分析整理和统计检验，从而便于揭示事物的本质，找到解决问题的线索或可能途径。所以，概率和数理统计是一种行之有效的数据处理方法。

随着近代科学技术的发展，概率和数理统计也日益发展，其应用范围也愈来愈广泛。本书仅就应用性的试验研究

方面所用到的概率和数理统计的基本概念、回归分析方法、试验设计等内容作了比较简明的介绍，重点是它们在试验研究方面的应用。

试验技术的推广与应用，对提高经济效益是十分有利的。据报道，日本推广应用试验设计的头十年，即整个 60 年代，应用正交表已超过 100 万次，对于创造利润和提高生产率起了巨大的作用。今天，试验设计技术已成为日本企业界人士、工程技术人员、研究人员和管理人员的必备技术，已被认为是工程师共同语言的一部分。在日本，一个工程师如果没有试验设计方面的知识，就只能算半个工程师。我国一些学者自 50 年代就开始研究试验技术，在理论研究、设计方法与应用技巧方面，都有新的创见，对这一技术的发展与推广作出了一定的贡献。尤其自 70 年代以来，试验技术的应用越来越广，取得了可喜的成果。据粗略估计，仅正交试验设计的应用成果目前已超过万项，经济效益在若干亿元以上。但与开展这项工作最发达的国家相比，与我国应该达到的应用规模相比，还有相当大的差距。因此，大力推广与应用试验设计技术，确实具有相当的迫切性。

# 第一章 基本概念

## 第一节 误差及其分类

### 一、误差

在科学试验中，任何一个被测参数，如切削力、切削温度、刀具磨损量等，都不可避免地总有误差。

**误差**——某被测量的观测值（给出值或实验值）与真值之差。

**真值**——被测量客观存在的值。它是在没有系统误差的情况下，试验无限多次，观测结果的平均值。

**偏差**——某观测值（实测值）与有限次观测结果的算术平均值之差。

因为科学试验不可能做无限多次，所以真值是测不到的。但是，如果试验采用标准设备和标准仪器，而且它们的精度比一般设备和一般仪器的精度高一个数量级，则该系统多次试验观测结果的算术平均值可视为真值。

### 二、误差的分类

从不同角度出發，误差有不同的分类方法。在这里仅按误差的性质和产生的原因分为系统误差、随机误差（又叫偶然误差）、过失误差。

## 1. 系统误差

在试验过程中，误差的大小和符号始终不变化，或按一定的规律变化，叫做系统误差。例如切削力偏大或偏小，切削温度偏高或偏低等。

系统误差产生的原因有：

(1) 装置误差 这是由于试验设备和仪器的安装、调试不当而产生的误差。例如仪器调零不准，标定有误差等。

(2) 环境误差 这是受外界环境的影响而产生的误差。例如温度、湿度、电磁场等。

(3) 方法误差 方法误差也叫理论误差。它是由试验方法本身所造成的误差，或者是由于试验所依据的理论不完善等原因而形成的误差。

(4) 人身误差 这是由于测试人员的感觉器官或运动器官问题而产生的误差。这类误差往往因人而异，并与个人当时的心理状态密切相关。

一般情况下系统误差具有规律性，其产生的原因往往可知或能掌握。试验时，首先要预见到各种系统误差的具体来源，并且要设法消除其影响；其次，是设法确定或估计出系统误差的数值。

## 2. 随机误差

当在同一条件下对同一参数反复进行试验时，在尽力消除或改正一切明显的系统误差之后，每次试验结果仍会出现一些无规律的随机性变化，这些变化是由随机误差造成的。随机误差的出现，从表面上看有大有小、有正有负，毫无规律，似乎纯属偶然。所以，随机误差又叫偶然误差。

产生随机误差的因素很多，有些因素虽然知道，但无法

准确控制。例如工件的材质、组织结构、机械性能，刀具的性能、晶粒度、微裂纹等对试验都有影响。试验时虽然力求将它们控制在某一定值或某种程度，然而在每一次试验时，它们都存在微小的变化。另外，还有一些产生随机误差的因素尚未发现。所以，随机误差是产生试验数据波动性的原因。就其个体而言，随机误差没有规律，不可预料，也不可控制。但就随机误差的总体而言，当试验次数足够多时，它服从统计规律，其算术平均值将逐渐接近于零。因此，多次试验结果的算术平均值将更接近真值（如果不存在系统误差）。

### 3. 过失误差

它是一种与事实不符的误差，主要是由于试验人员粗枝大叶、过度疲劳或操作不正确而引起的。例如，试验中读错、记错、算错、操作失误，仪器突然跳动、突然振动、外界干扰等。此类误差只要多方警惕、细心操作，一般都可避免。所以，进行科学试验，必须有严肃的态度、严密的组织、严格的要求。试验中要一丝不苟，步步把关，一旦发现过失，就要立即纠正。

## 第二节 误差的正态分布

### 一、数理统计中的某些名词

在本书中，经常遇到数理统计中常用的下列名词：

#### 1. 随机变量

对某一对象进行试验研究时，每次试验都对应一个试验

结果，而且每个试验结果都带有偶然性质。那么，这个研究对象就叫随机变量。换言之，随机变量是一个变量，它取得的数值是变化的，而且它的数值在试验之前不能确定，只能在试验之后才能确定。其特点是，在大量重复试验下，它的数值反映一定的统计规律。随机变量常用大写字母表示，如  $X, Y, Z, W$  等等；其可能取得的数值用小写字母表示，如  $x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n$  等。

## 2. 总体与个体

研究对象一切可能值的全体称为总体又叫母体；研究对象的每一个可能值称为个体。

## 3. 样本与样本容量

包含着若干个个体的全体称为样本，又称子样；样本所容纳的个体的数目称为样本容量又称样本大小。

由此可见，样本是总体的一部分。一般来讲，只能用样本来了解总体。所以，样本越大越能反映总体的本质。

## 4. 样本均值与数学期望

样本的算术平均值称为样本均值  $\bar{y}$ 。

设样本容量为  $n$ ，各个个体为： $y_1, y_2, \dots, y_n$ ，则有样本均值  $\bar{y}$

$$\bar{y} = 1/n \sum_{i=1}^n y_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1-1)$$

当样本容量趋近于无限大时，样本就变为总体。这时的样本均值  $\bar{y}$  便趋于总体的数学期望  $\mu$ 。一般称  $\mu$  是  $\bar{y}$  的数

学期望。

### 5. 方差与标准差

当样本的容量有限时，即所作的试验次数有限时，常以

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  表示试验值的散布程度，用  $S^2$  表示

样本方差，用  $S$  表示标准离差或均方根偏差。其表达式分别为

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (1-2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1-3)$$

其中  $i=1, 2, \dots, n$ 。

当样本容量趋近于无限大时，即试验次数无限增大时，有限次试验的样本方差  $S^2$  向总体方差  $\sigma^2$  逼近。在数理统计中，称  $\sigma^2$  是  $S^2$  的数学期望。在习惯上，统称  $\sigma^2$  为方差， $\sigma$  为均方差； $S^2$  称为样本方差， $S$  称为标准差或标准离差。 $S, \bar{y}$  的单位均与  $y_i$  的单位相同。

### 6. 自由度

自由度是计算方差时独立随机变量的个数。例如，式 (1-2) 中的分母  $(n-1)$  就是样本方差  $S^2$  的自由度。由于计算方差  $S^2$  时要用到  $\bar{y}$ ，在  $n$  个偏差  $(y_i - \bar{y})$  中 ( $i=1, 2, \dots, n$ )，若  $(n-1)$  个偏差已经确定，则第  $n$  个偏差必须满足  $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) = 0$  的约束条件，即第  $n$  个偏差不允许任



意变化。所以计算方差时的自由度是  $n-1$ 。

## 二、频率分布直方图

刀具耐用度是金属切削加工中的一个重要参数，为了求得在一定条件下刀具耐用度的数据，需要进行大量的重复试验。这里用耐用度试验的实例来说明频率分布直方图。

工件材料 SAE1010 低碳钢管；

工件尺寸  $\phi 57 \times 152$  ( $\phi 2 \frac{1}{2}$  英寸  $\times$  6 英寸)；

刀具材料 高速钢  $W_{18}Cr_4V$  (即 T1)；

加工方法 车端面 (加速试验)；

切削速度  $91 \text{ m/min}$  (300 英尺/分)  $\pm 1\%$ ；

切削深度  $3.2 \text{ mm}$  (0.125 英寸)  $\pm 1\%$ ；

进给量  $0.06 \text{ mm/r}$  (0.0023 英寸/转)；

车刀角度  $\gamma_0 = 5^\circ$ ,  $\alpha_0 = 5^\circ$ ；

切削条件 干切削；

耐用度准则 刀刃完全损坏。

在上述条件下重复试验了 298 次，车刀耐用度的测试结果见表 1-1。

表中，刀具耐用度按  $0.02 \text{ min}$  的区间来划分。试验值落在某一区间内的次数叫做频数  $n_i$  ( $i$  为区间序号)；频数除以总试验次数  $N$  叫做相对频数或频率  $n_i/N$ ；该区间的频率与各个小于该区间频率之总和叫做累计频率，或者说，到该区间为止的各个区间的频率之总和叫做累计频率。

根据频数表中的数据，按以下步骤可以作出频数分布直方图：

(1) 以横坐标记数据值，以纵坐标记频数  $n_i$  (或频率)；