

试验设计 与数据处理

牛长山 徐通模 编

西安交通大学出版社



shiyansheji
yushujuchuli

试验设计与数据处理

牛长山 徐通模 编

西安交通大学出版社

内 容 提 要

全书从理论和实践两个方面系统地介绍了数据处理、试验设计和回归分析等数理统计的基本原理和应用方法，对正确掌握和应用这一方法具有指导作用。本书重点介绍了要因正交试验设计方法及误差处理，并对表头设计、点线图、混杂等作了详细的论述。

深入浅出，物理概念明确、应用性强是本书的突出特点，为便于理解，各章均配有例题。

本书可作高等工科院校各有关专业高年级学生的教材，也可供有关的工程技术人员参考。

开本787×1092 1/32 印张12.25 字数，258千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数：1——3000册

ISBN 7-5605-0019-6/TB·7 定价：2.00元

前 言

试验方法设计及数据处理, 误差估计对科技工作者来说是非常重要的知识。它对于培养大学生和科技人员的思维能力、责任感和科学态度无疑是必不可少的。作者多年来一直致力于把这门综合知识引入工科大学生的教学内容之中, 并力求把数学基本知识如概率论、数理统计及工程应用数学等与科学工程试验研究的实际结合起来。从1980年开始, 作者多次为西安交通大学热能工程等专业的本科大学生开设了这门课程, 作为必修课或选修课进行教学实践。与此同时又为华北地区六个电力试验研究所的科技人员及中南、西南、西北地区有关锅炉制造厂、研究所的科技人员进行了这门课程的专题讲座, 取得了较好的效果。

七年来, 该课程曾油印讲义三版。根据教学计划的要求, 作者对教学内容不断地进行了充实、精选和删节。现经过加工整理, 铅印出版。

本书内容主要包括试验设计及数据处理两大部分, 共十章, 对正交试验设计、方差分析、回归分析以及直接测量间接测量和组合测量数据的数学处理方法、误差、置信度等都进行了比较详细的介绍, 并通过比较丰富的实例, 引导读者学会和掌握具体的应用。此外书末还附有常用的数理统计表, 可供读者在实际工作中使用。

学习本课程读者应具备线性代数、概率论、数理统计、以及有关工程专业的基本知识。

本教材第一章至第四章由徐通模编写, 第五章至第十章

由牛长山编写。由于作者水平有限,编写中的错误在所难免,恳请读者提出批评意见。

本书的顺利编写出版得到了热能工程专业师生的协助,并得到西安交通大学出版社及本书责任编辑的大力支持,此外本书主审西安交大机械工程系微型技术教研室赵卓贤教授对全书的内容、结构提出了许多非常宝贵的建设性意见,作者在此一并表示最诚挚的感谢。

作 者

1987.7于西安

目 录

第一章 概论

第一节	数据测量及法定计量单位制	(1)
第二节	误差的分类及其表示方法	(9)
第三节	有效数字及其计算	(21)

第二章 误差理论

第一节	随机误差的正态分布定律 ——高斯 (Gauss) 误差定律	(26)
第二节	等精度测量中的最可信赖值	(36)
第三节	不等精度测量中的最可信赖值	(41)
第四节	误差的统计意义	(46)
第五节	小子样误差的 t 分布	(51)
第六节	测量中的坏值及剔除	(53)
第七节	系统误差的分类和消除	(59)
第八节	试验误差的合成方法	(64)

第三章 间接测量中误差的数学处理

第一节	间接测量量最可信赖值 (即算术平均值)的求法	(67)
第二节	间接测量中误差传递的普遍公式	(70)
第三节	间接测量中误差传递普遍公式 在基本运算中的使用	(74)

第四节	间接测量误差传递公式的应用	(79)
第五节	测量误差分析及处理原则	(87)

第四章 统计假设检验

第一节	统计检验的原理和基本思想	(90)
第二节	正态性检验	(93)
第三节	u 检验法	(99)
第四节	t 检验法	(102)
第五节	F 检验法	(108)
第六节	两条回归线间的显著性检验	(111)
第七节	总体均值的其他检验方法	(113)

第五章 试验设计

第一节	概述	(119)
第二节	统计判断的思想方法	(126)
第三节	平均值分离	(129)
第四节	误差控制	(134)

第六章 方差分析法

第一节	数据的数学模型	(140)
第二节	两个加法定理	(144)
第三节	显著性检验	(147)
第四节	方差分析表	(151)
第五节	要因效应估计	(153)
第六节	方差分析的基本假设	(156)
第七节	方差分析法的应用	(160)

第七章 正交试验设计

- 第一节 数据结构模型.....(170)
- 第二节 正交表的方差分析计算方法.....(184)
- 第三节 3^m 型正交测验设计.....(191)

第八章 要因正交试验设计

- 第一节 何谓要因正交试验设计.....(197)
- 第二节 表头设计.....(199)
- 第三节 点线图.....(208)
- 第四节 要因正交试验设计和数据处理方法.....(214)

第九章 要因正交试验设计的应用

- 第一节 拟水平试验设计.....(234)
- 第二节 区组因素的试验设计.....(236)
- 第三节 裂区试验设计.....(240)
- 第四节 赋闲法试验设计.....(253)
- 第五节 部分追加法试验设计.....(265)

第十章 回归分析

- 第一节 概述.....(270)
- 第二节 最小二乘法原理.....(272)
- 第三节 直线的回归.....(275)
- 第四节 曲线回归.....(289)
- 第五节 线性回归矩阵算法.....(299)
- 第六节 多元回归.....(303)
- 第七节 逐步回归法.....(318)

附表

附表 1	符号检验表.....	(343)
附表 2	秩和检验表.....	(344)
附表 3	夏皮罗—威尔克的 a_i 系数表.....	(345)
附表 4	$W(n, \alpha)$ 表.....	(350)
附表 5	正态分布表.....	(351)
附表 6	$t(f, p)$ 表	(353)
附表 7	F 检验的临界值 (F_α) 表... ..	(355)
附表 8	Ω 变换表.....	(365)
附表 9	正交表和点线图.....	(372)

第一章 概 论

第一节 数据测量及法定计量单位制

一、数据测量的方法

数据测量就是用单位物理量去描述或表示某一未知的同类物理量的大小。

物理量是反映任何物理现象的状态及其过程特征的数值量。任何物理量一般都有如下三个特点：物理量都是有因次的量，即它们都有相应的单位；数值为1的物理量称为单位物理量，或称为单位；同一物理量可以用不同的物理单位来描述，如能量可以用焦耳、千瓦小时等不同单位来表述。

人们根据自然界中各种物理量测量的不同难易程度和实现测量的不同可能性，将常用的测量方法分为以下三种。

1. 直接测量法

用一个标准的单位物理量或经过预先标定好的测量仪器去直接度量未知物理量的大小，这种方法就是直接测量法。其测量结果称为直接测量量，直接测量是实现物理量测量的基础，自然界可以直接测量的物理量很多，例如在工程技术领域中，用米尺或卡尺测量长度，用温度计测量温度，用表计计量时间等。

直接测量可表示为

$$y = x \quad (1-1)$$

式中 y 为被测量的未知量, x 为直接测得的量。

在由若干基本物理单位导出的物理量中,有相当多的量是无法用仪表直接测出的,如机组的效率、物质的含热量等。此时,只能用间接测量法进行测量。

2. 间接测量法

把直接测量量代入某一特定的函数关系式中,通过计算求出未知物理量的大小,这种方法就是间接测量法。计算出的结果称间接测量量。

例如,用毕托管 (pitot tube) 测量气流的速度 w ,直接测量量不是流速,而是压差值 Δh 。而 w 是根据伯努利方程 (Bernoullis, equation) 计算出来的。计算 w 的特定函数关系式为

$$w = \varphi \sqrt{2g \frac{\Delta h}{1000} \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right)} \quad (1-2)$$

式中: Δh ——U型差压计的读数

g ——重力加速度

ρ_1, ρ_2 ——分别为被测流体和差压计中液体的密度

φ ——毕托管的速度系数(通过标定求得)

间接测量可用如下通用的函数关系式表示:

$$y = f(x_1, x_2, \dots) \quad (1-3)$$

式中 y 为被间接测量的量, $x_1, x_2, \dots$ 为直接测量的量。

3. 组合测量法

将直接测量或间接测量的数值,代入确定的联立方程组或通过重复测量计算的方法求得未知量,这种方法称为组合测量法。例如图 1-1 所示的通过试验研究两股平行空气射流之间的湍流混合情况。

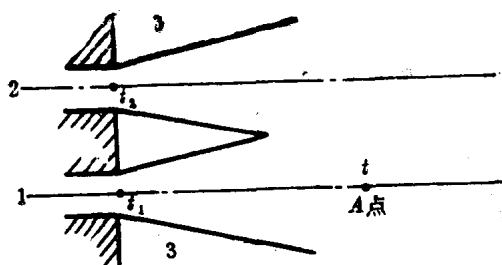


图1-1 两股平行射流之间混合特性试验的数据测量图

1、2—射流；3—环境

根据质量守恒和能量守恒定律分别列出如下关系式：

$$\sum_{i=1}^3 G_i = 100\% \quad (1-4)$$

$$\sum_{i=1}^3 G_i c_i \Delta t_i = 100c \Delta t \quad (1-5)$$

式中： G_i ——分别代表在混合点A处，各射流及环境气体的质量百分浓度(用百分数表示)，这是要求的未知量

c_i ——分别代表三种气体的定压质量比热

Δt_i ——以环境温度 t_3 为基准的剩余温度，即

$$\Delta t_1 = t_1 - t_3, \Delta t_2 = t_2 - t_3, \Delta t_3 = t_3 - t_3 = 0$$

$c, \Delta t$ ——在混合点A处，混合气体的定压比热和剩余温度， $\Delta t = t - t_3$

由于未知量有三个，即 G_1 、 G_2 和 G_3 ，而方程只有两个，因此可以改 t_1 (或 t_2) 为 t_1' (或 t_2')，重复测量各个温度值，这样便可得另一个热量守恒方程：

$$\sum_{i=1}^2 G_i c_i \Delta t_i' = 100c\Delta t' \quad (1-6)$$

在重复测量中,一般温度 t_1 (或 t_2)改变的数值仅几十度,此时由于空气的比热 c 和温度场的分布规律基本不变,于是可以把式(1-6)与式(1-4)、(1-5)联立,求解出 G_1 、 G_2 和 G_3 来。

组合测量可以用如下的通用联立方程组表示:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots, y_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots, y_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, y_1, y_2, \dots, y_n) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中: $f_1, f_2, \dots, f_n$ ——表示组合测量中的函数关系

 $x_1, x_2, \dots$ —— 直接测量的物理量 $y_1, y_2, \dots, y_n$ ——未知的物理量

上述三种方法在工程技术和科学实验中大量应用。不同的测量方法, 所得数据的处理方法也不一样。一般说来, 直接测量数据的处理是在正态分布规律的基础上, 求出被测量的最可信赖值 (或最或然值) 及其标准误差; 间接测量数据的处理依据误差传递的基本原理; 组合测量则普遍采用回归分析及统计检验的方法, 求出未知量及其误差。这方面的详细内容将在以后各章介绍。

在数据测量中，通常还有等精度测量和不等精度测量的概念。前者是指在多次、重复测量中，每一次测量都是在同样的环境和条件下，采用了相同的方法、相同的仪表，并且测量人员也以同样认真、负责、仔细的态度来进行数据的观测；否则，就算为不等精度测量。这两种测量数据的最可信赖值及其误差计算方法也是不同的。前者的最可信赖值是算术

平均值。后者为加权平均值。这些将在第二章中详细说明。

二、单位制 (unit system)

测量是把被测的物理量与标准的单位物理量进行比较的一门实验科学。下面对单位制度作一简单介绍。

1. 国际单位制

1960 年第 11 届国际计量大会决定以米、千克、秒、安培、开尔文和坎德拉六个单位作为国际间实用计量单位的基础。1971 年又增加了“摩尔”单位。以这七个基本单位及两个辅助单位 (见表 1-1) 为基础的单位制被命名为国际单位制 (Le Systeme International d'unites), 缩写为 SI。

国际单位制的优越性在于它科学的构成原则和定义方法:

(1) 在国际单位制中, 定义了七个代表各个学科的、彼此相互独立的物理量作为基本量, 而同时另加了两个辅助单位。其他的物理量都是通过选择与基本量相联系的方程式来表示的。由几个基本单位就可以构成某一个学科范围的单位制。例如, 可以用米、千克、秒和两个辅助单位定义出全部的力学及声学单位; 由米、千克、秒、安培可定义出全部电学及磁学单位; 由米、千克、秒、开尔文、摩尔可定义出全部热力学单位。

(2) 在国际单位制中, 按物理量之间的关系, 由基本单位以相乘、相除的形式构成的单位称为导出单位。各个导出单位定义方程式中的数字系数一律取为 1。这种单位制称为一贯单位制。只有采用了一贯单位制才能使反映基本规律的各定义方程式具有最简单的形式。

(3) 在国际单位制中, 继承了十进制及使用词头构成

表 1-1 SI 基本单位和辅助单位

量	单位名称	单位符号	定 义
长度 length	米 metre	m	光在真空中于 $(1/299\ 792\ 458)s$ 时间间隔内所经路径的长度
质量 mass	千克(公斤) kilogram	kg	千克是质量单位, 等于国际千克原器的质量
时间 time	秒 second	s	秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\ 192\ 631\ 770$ 个周期的持续时间
电流 electric current	安培 ampere	A	安培是一恒定电流值, 若保持在处于真空中相距 $1m$ 的两无限长而圆截面可忽略的平行直导线内, 则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 $2 \times 10^{-7}N$
热力学温度 thermodynamic temperature	开尔文 kelvin	K	热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$
物质的量 amount of substance	摩尔 mole	mol	(1) 摩尔是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 $0.012\ kg$ 碳-12 的原子数目相等 (2) 在使用摩尔时, 基本单元应予指明, 可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或是这些粒子的特定组合
发光强度 luminous intensity	坎德拉 candela	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度, 该发光源发出频率为 $540 \times 10^{12} Hz$ 的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $(1/683) W/sr$
平面角 plane angle	弧度 radian	rad	弧度是一圆内两条半径之间的平面角, 这两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等
立体角 solid angle	球面度 steradian	sr	球面度是一立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积

表 1-2 SI 词 头

因 数	词 头		
	名	称	符 号
10^{18}	艾可萨	exa	E
10^{15}	拍它	peta	P
10^{12}	太拉	tera	T
10^9	吉咖	giga	G
10^6	兆	mega	M
10^3	千	kilo	k
10^2	百	hecto	h
10	十	deca	da
10^{-1}	分	deci	d
10^{-2}	厘	centi	c
10^{-3}	毫	milli	m
10^{-6}	微	micro	μ
10^{-9}	纳诺	nano	n
10^{-12}	皮可	pico	p
10^{-15}	飞姆托	femto	f
10^{-18}	阿托	atto	a

倍数单位和分数单位的原则。词头扩大到 10^{-18} 至 10^{18} 的范围（见表1-2）。

（4） 国际单位制科学地把力学、热学、电学、光学及化学等各个学科领域的单位都统一在一个单位制中，达到了计量制度在全世界范围内的统一。

2. 法定计量单位

1984年2月27日中华人民共和国国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，我国的法定计量单位包括如下内容；

- （1） 国际单位制的基本单位（表1-1）；
- （2） 国际单位制的辅助单位（表1-1）；
- （3） 国际单位中具有专门名称的导出单位；
- （4） 国家选定的非国际单位制单位（表1-3）；

表 1-3 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	1 min = 60 s
	[小]时	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	天(日)	d	1 d = 24 h = 86 400 s
平面角	[角]秒	($''$)	1 $''$ = ($\pi/648\,000$) rad (π 为圆周率)
	[角]分	($'$)	1 $'$ = 60 $''$ = ($\pi/10\,800$) rad
	度	($^{\circ}$)	1 $^{\circ}$ = 60 $'$ = ($\pi/180$) rad
旋转速度	转 每 分	r/min	1 r/min = (1/60) S $^{-1}$
长 度	海 里	n mile	1 n mile = 1 852 m (只用于航程)
速 度	节	kn	1 kn = 1 n mile/h = (1 852/3 600) m/s (只用于航行)
质 量	吨	t	1 t = 10 3 kg
	原子质量单位	u	1 u $\approx$ 1.6 605 655 $\times 10^{-27}$ kg
体 积	升	L, (l)	1 L = 1 dm 3 = 10 $^{-3}$ m 3
能	电子伏	eV	1 eV $\approx$ 1.6 021 892 $\times 10^{-19}$ J
级 差	分 贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1 tex = 1 g/km