

53

概率论与数理统计

曹振华
赵 平 编
胡跃清

东南大学出版社
·南京·

内 容 提 要

本书介绍随机数学的一些基本知识,总共 12 章,内容包括概率论、数理统计、随机过程三部分。每章附有习题,书末附有习题答案,可作为高等学校工学类、经管类本科专业的教材,也可供教师及工程技术人员、管理决策者参考。

图书在版编目(CIP)数据

概率论与数理统计/曹振华,赵平,胡跃清编. —南京:东南大学出版社,2001.10

ISBN 7-81050-820-2

I. 概... II. ①曹...②赵...③胡... III. ①概率论②数理统计 IV. 021

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 050459 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人 宋增民

江苏省新华书店经销 华东有色地研所印刷厂印刷

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:13.75 字数:345 千字

2001 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定价:20.00 元

(凡有印装质量问题,可直接向发行科调换,电话:025-3792327)

前 言

概率论与数理统计是研究随机现象规律性的数学学科。随着现代科学技术的迅猛发展,概率统计的理论和方法得到了日益广泛的应用,可以毫不夸张地讲,几乎所有的科学技术领域,工农业生产和国民经济的各个部门都离不开概率统计的方法。例如,使用概率统计的方法可以进行气象预报、水文预报;现代工业生产中,产品质量抽样验收方案的制定,大型设备的可靠性分析,研制新产品时最佳生产方案的寻求等都要用到概率统计的原理;在医疗卫生中,治疗一种疾病时种种药物的疗效以及治疗方法的效果也要用统计资料来评定。另外,随机数学的理论和方法向工程学科的渗透已成为近代科学技术发展的特征之一,随机数学已成为许多重要学科的基础,如信息论、控制论、人工智能、通讯科学等。

这本概率论与数理统计教材就是为高等学校的工学类、经济类、管理类各专业编写的。目的是使学生通过本教材内容的学习,初步掌握处理随机现象的基本理论和方法,培养他们解决实际问题的能力。

本书实质上由三部分组成,虽然在正文中并没有给出这种形式的划分。第一部分包括第1至第5章,它们构成了本书的概率论部分;第二部分包括第6至第9章,为本书的数理统计部分;第三部分包括第10至第12章,构成了随机过程的基础。书中带*号的章节各专业可根据学时以及专业的需要适当选取;带*号的习题,初学者可以略去。

本书由长期从事概率统计课程教学的老师编写,书中融入了作者在长期教学实践中的一些经验体会。文字的叙述尽量以讲课的形式展开;概念的阐述十分注意它的统计背景;内容的安排注意抓住重

点,保持前后呼应。为了巩固读者所学的知识,书中举有较多的典型例题。每章附有习题和答案。由于作者水平有限,书中也会有许多不妥和错误,恳请读者提出批评和意见

本书在编写过程中得到东南大学应用数学系领导的热情关心和支持,韦博成教授详细阅读了书稿并提出了许多宝贵意见,谨此一并表示衷心的感谢!

本书概率论部分由曹振华同志编写,数理统计部分由赵平同志编写,随机过程部分由胡跃清同志编写

编 者

2001年4月于东南大学应用数学系

目 录

1 随机事件与概率	(1)
1.1 随机事件	(1)
1.1.1 随机试验	(1)
1.1.2 随机事件与样本空间	(2)
1.1.3 事件之间的关系及其运算	(4)
1.2 随机事件的概率	(7)
1.2.1 事件的频率	(8)
1.2.2 概率的公理化定义	(9)
1.3 等可能概型	(13)
1.4 条件概率	(22)
1.4.1 条件概率的定义	(22)
1.4.2 概率的乘法定理	(24)
1.4.3 全概率公式和贝叶斯公式	(25)
1.5 事件的独立性	(30)
1.5.1 2个事件的独立性	(30)
1.5.2 多个事件的独立性	(32)
习题 1	(36)
2 随机变量及其分布	(42)
2.1 随机变量	(42)
2.2 随机变量的分布函数	(44)
2.3 离散型随机变量	(47)
2.3.1 离散型随机变量的分布律	(47)
2.3.2 常见的离散型随机变量	(50)
2.4 连续型随机变量	(58)

2.4.1	连续型随机变量的概念	(58)
2.4.2	几个重要的连续型随机变量	(63)
2.5	随机变量函数的分布	(75)
	习题 2	(83)
3	多维随机变量及其分布	(89)
3.1	二维随机变量的联合分布	(89)
3.1.1	二维随机向量的联合分布函数	(89)
3.1.2	二维离散型随机向量	(92)
3.1.3	二维连续型随机向量	(95)
3.2	边缘分布	(99)
3.2.1	边缘分布函数	(99)
3.2.2	边缘分布律	(100)
3.2.3	连续型随机向量的边缘概率密度	(103)
3.3	条件分布	(106)
3.3.1	条件分布函数	(106)
3.3.2	离散型随机变量的条件分布律	(107)
3.3.3	连续型随机变量的条件分布密度	(110)
3.4	随机变量的独立性	(113)
3.5	n 维随机向量简介	(117)
3.5.1	n 随机向量的联合分布	(117)
3.5.2	k 维边缘分布及条件分布	(118)
3.5.3	n 个随机变量的独立性	(120)
3.6	随机向量函数的分布	(121)
	习题 3	(142)
4	随机变量的数字特征	(147)
4.1	数学期望	(147)
4.1.1	数学期望的定义	(147)
4.1.2	几种常见的随机变量的数学期望	(152)

4.1.3	随机变量函数的数学期望	(155)
4.1.4	数学期望的性质	(158)
4.2	随机变量的方差	(161)
4.2.1	方差的定义	(161)
4.2.2	几种常见随机变量的方差	(162)
4.2.3	方差的性质	(164)
4.3	协方差与相关系数	(168)
4.3.1	协方差与相关系数的概念	(168)
4.3.2	协方差与相关系数的性质	(170)
4.4	矩、协方差矩阵	(173)
4.4.1	矩	(173)
4.4.2	协方差矩阵	(173)
4.4.3	n 维正态分布	(175)
	习题 4	(176)
5	极限定理	(183)
5.1	大数定律	(183)
5.2	中心极限定理	(186)
	习题 5	(193)
6	数理统计的基本概念及样本分布	(196)
6.1	引言	(196)
6.1.1	什么是数理统计学	(196)
6.1.2	数理统计学的应用	(199)
6.2	数理统计的基本概念	(201)
6.2.1	母体	(201)
6.2.2	样本	(202)
6.2.3	统计量和样本矩	(205)
6.3	抽样分布	(207)
6.3.1	正态母体样本均值的分布	(207)

6.3.2	χ^2 - 分布	(208)
6.3.3	t - 分布	(211)
6.3.4	F - 分布	(216)
习题 6		(219)
7	参数估计	(221)
7.1	点估计	(221)
7.1.1	问题的提出	(221)
7.1.2	矩估计法	(222)
7.1.3	极大似然估计	(224)
7.2	估计量的评选标准	(228)
7.2.1	无偏估计	(228)
7.2.2	最小方差无偏估计	(231)
7.2.3	相合估计(一致估计)	(232)
7.3	区间估计	(235)
7.4	正态母体参数的置信区间	(238)
7.5	非正态母体参数的置信区间	(241)
习题 7		(242)
8	假设检验	(246)
8.1	假设检验的基本概念	(246)
8.1.1	问题的提出	(246)
8.1.2	拒绝域显著水平	(247)
8.1.3	两类错误	(249)
8.2	正态母体参数的检验	(249)
8.2.1	均值 μ 的检验	(249)
8.3	χ^2 - 拟合优度检验	(256)
8.3.1	理论分布完全已知的情况	(257)
习题 8		(262)
9	方差分析及回归分析	(265)

9.1	单因素试验的方差分析	(265)
9.1.1	单因素试验	(265)
9.1.2	平方和分解	(268)
9.1.3	假设检验问题的拒绝域	(270)
9.1.4	未知参数的估计	(271)
9.2	一元线性回归	(272)
9.2.1	模型的描述	(272)
9.2.2	参数 β_0, β_1 的估计	(273)
9.2.3	$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ 的性质	(275)
9.2.4	回归方程的显著性检验	(276)
9.2.5	利用回归方程进行预报和控制	(279)
9.3	多元线性回归	(283)
9.3.1	多元线性回归模型	(283)
9.3.2	参数 β 的极大似然估计	(284)
9.3.3	$\hat{\beta}$ 的性质	(284)
9.3.4	回归方程的显著性检验	(285)
9.3.5	回归系数的显著性检验	(286)
9.3.6	利用回归方程进行预报	(288)
9.4	若干可化为线性回归标准形式的函数类型	(289)
	习题 9	(290)
10	随机过程的基本概念	(292)
10.1	随机过程的基本概念	(292)
10.2	随机过程的统计描述	(296)
10.2.1	随机过程的分布函数族	(297)
10.2.2	随机过程的数字特征	(297)
10.2.3	二维随机过程的分布函数和数字特征	(301)
10.3	泊松过程及维纳过程	(304)
10.3.1	泊松过程	(305)

10.3.2 维纳过程·····	(312)
习题 10 ·····	(315)
11 马尔可夫链·····	(318)
11.1 马尔可夫过程及其概率分布·····	(318)
11.2 多步转移概率的确定·····	(327)
11.3 遍历性·····	(332)
习题 11 ·····	(338)
12 平稳随机过程·····	(341)
12.1 平稳随机过程的定义·····	(341)
12.2 各态历经性·····	(346)
12.3 相关函数的性质·····	(357)
12.4 平稳随机过程的功率谱密度 ·····	(363)
12.4.1 平稳过程的功率谱密度·····	(363)
12.4.2 谱密度的性质·····	(367)
12.4.3 功率谱密度函数与相关函数之间的关系·····	(370)
12.4.4 白噪声过程·····	(378)
习题 12 ·····	(381)
习题答案	
习题 1 ·····	(384)
习题 2 ·····	(386)
习题 3 ·····	(391)
习题 4 ·····	(396)
习题 5 ·····	(398)
习题 6 ·····	(398)
习题 7 ·····	(399)
习题 8 ·····	(400)
习题 9 ·····	(401)
习题 10 ·····	(401)

习题 11	(403)
习题 12	(405)
附表 A	(406)
附表 B	(408)
附表 C	(409)
附表 D	(411)
附表 E	(412)
参考文献	(421)

1 随机事件与概率

1.1 随机事件

1.1.1 随机试验

概率论是研究随机现象规律性的数学分支。也就是说,其研究对象是随机现象;对非随机现象,概率论没有用武之地。那么,什么是随机现象呢?这要从自然界存在的现象来分辨。

自然界和人类社会中有一类现象,我们可以预言它在一定条件下是否会出现。例如,重物让它自由地下落必然是垂直下落。纯水在一个标准大气压下加热到 100°C 必然会沸腾。这种在一定条件下必然会发生的称为必然事件。反之,在一定条件下必然不会发生的事件称为不可能事件。例如,“同性的电荷互相吸引”这种现象是不可能发生的。必然事件和不可能事件虽然形式相反,但两者的实质是相同的,即在一定条件下可以预言是否会发生。所有这类现象称为决定性现象。

但是,自然界中还存在着与决定性现象有着本质区别的现象。例如,抛一枚硬币,假定其不能直立,则可能正面朝上,也可能反面朝上;某地区在将来某一时刻可能下雨,也可能不下雨;向一目标进行射击可能击中目标,也可能击不中目标等等。这些在一定条件下可能发生也可能不发生的现象称为随机现象。

从上面的叙述中我们可以看到,随机现象是一定综合条件下的表现,研究它就要对其进行观察。在概率论中,通常称“观察一定条件下发生的现象”为试验。条件实现一次就完成一次试验。若试验

满足下述 3 个条件,则称该试验为随机试验:

(1) 它可以在相同条件下重复进行;

(2) 每次试验中可以出现不同的结果,而究竟会出现哪一个结果试验前不能预先断言;

(3) 试验中一切可能出现的结果可以预先知道。随机试验通常用字母 E 表示,本书中以后提到的试验都是指随机试验。下面举一些试验的例子:

例 1 E_1 : 掷一枚硬币,观察其正面(H)和反面(T)出现的情况。试验的条件就是掷一枚硬币,条件实现(一枚硬币掷出)就完成一次试验。

例 2 E_2 : 将一枚硬币掷 2 次,观察正、反面出现的情况。试验的条件就是把硬币掷 2 次,条件实现(硬币掷了 2 次)就完成了一次试验。

例 3 E_3 : 从含有 2 个黑球 a_1, a_2 和 3 个白球 b_1, b_2, b_3 的盒子中任意地取出 3 个球,观察取出的球。条件实现(从含有 5 个球的盒中取出 3 个球)就完成一次试验。

下面几个试验中的试验条件请读者自己分析。

例 4 E_4 : 把 2 个球 a 和 b 任意地放入 3 个盒中(每个盒中可以容纳任意多个球),观察球在盒中的放法。

例 5 E_5 : 记录某电话交换台在 1 min 所来的电话呼叫次数。

例 6 E_6 : 观察某厂生产的灯泡的使用寿命 t 。

1.1.2 随机事件与样本空间

从前面试验的例子中可以看到,随机现象是通过随机试验表现出来的。我们称一个试验 E 中可能发生也可能不发生的事件为该试验 E 的随机事件,以后简称为事件。通常用字母 A, B, C, \dots 来表示。称试验 E 可能出现的每一个结果 ω 为 E 的基本事件。基本事件的全体组成的集合称为该试验 E 的样本空间。所以,基本事件也称为样

本点。在具体问题中,十分重要的是要认清样本空间是由什么构成的。下面就来看一看 1.1.1 中 6 个试验的样本空间:

$$\Omega_1 = \{H, T\}$$

$$\Omega_2 = \{(H, H), (H, T), (T, H), (T, T)\}$$

$$\Omega_3 = \{(a_1, a_2, b_1), (a_1, a_2, b_2), (a_1, a_2, b_3), (a_1, b_1, b_2), (a_1, b_1, b_3), (a_1, b_2, b_3), (a_2, b_1, b_2), (a_2, b_1, b_3), (a_2, b_2, b_3), (b_1, b_2, b_3)\}$$

$$\Omega_4 = \left\{ \begin{array}{|c|c|c|} \hline ab & & \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline & ab & \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & ab \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline a & b & \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline b & a & \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline a & & b \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline b & & a \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline & a & b \\ \hline \end{array} , \begin{array}{|c|c|c|} \hline & b & a \\ \hline \end{array} \right\}$$

$$\Omega_5 = \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$\Omega_6 = \{t \mid t \geq 0\}$$

要注意的是:样本空间的构成是由试验的条件和观察目的所决定的。例如试验 E_1 和 E_2 都是掷硬币,由于掷的次数(试验的条件)不一样,其样本空间 Ω_1 和 Ω_2 也不一样。又如在试验 E_3 中,若不是观察取出的 3 个球的情况,而是观察取出的 3 个球中白球的个数,则其样本空间应为 $\Omega_3' = \{1, 2, 3\}$ 。

基本事件是事件的一种,一般的事件总是由若干个基本事件共同组成的,因而是样本空间的一个子集。如在例 3 中,事件 A :“取出的 3 个球中有 1 个白球”。事件 A 发生当且仅当基本事件 $(a_1, a_2, b_1), (a_1, a_2, b_2), (a_1, a_2, b_3)$ 中的一个出现。这样,我们可以认为 A 是由这 3 个基本事件组成的,即

$$A = \{(a_1, a_2, b_1), (a_1, a_2, b_2), (a_1, a_2, b_3)\}$$

这是 Ω_3 的一个子集。

以后,我们就将事件定义为样本空间 Ω 的某个子集。事件 A 发生当且仅当试验中出现 A 中某个基本事件。

样本空间 Ω 作为一个事件,因为在每次试验中至少要出现一个

基本事件。所以 Ω 在一次试验中必然会发生,即 Ω 是必然事件

空集 \emptyset 作为一个事件,它在每次试验中都不会发生,所以空集 \emptyset 是不可能事件。

必然事件和不可能事件是可以预言在一定条件下是否会发生的
事件,是决定性事件,不属于随机事件的范畴,但为了研究问题方便
起见,仍将它们作为特殊的随机事件

1.1.3 事件之间的关系及其运算

现在,对应着集合之间的关系及运算,定义事件之间的关系及运
算。在以下的叙述中,设 Ω 是给定的样本空间,所出现的 Ω 的子集都
是事件,并用字母 A, B, A_i, B_i, \dots 表示。

1) 如果 A 发生必然导致 B 发生,则称 B 包含 A ,记作 $A \subset B$ 。如
果 $A \subset B$ 且 $B \subset A$,就说 A 与 B 相等,记作 $A = B$ 。

例如,在例 3 中, A :“取出的 3 个球中有一个白球”, B :“取出的 3
个球中有 2 个黑球”。因为一共只取 3 个球,有 1 个白球必然有 2 个黑
球,故 $A \subset B$ 。反之,取出的 3 个球中有 2 个黑球必然有 1 个白球,故
亦有 $B \subset A$,因此 $A = B$ 。

2) “2 个事件 A, B 中至少有一个发生”也是一个事件,称此事件
为 A 与 B 的和(或称 A 与 B 的并)。记作 $A \cup B$ 。

例如,在例 3 中, A :“取出的 3 个球中有 1 个白球”, B :“取出的 3
个球中有一个黑球”,则 $A \cup B$ 表示“取出的 3 个球中至少有 1 个黑
球”。即

$$A = \{(a_1, a_2, b_1), (a_1, a_2, b_2), (a_1, a_2, b_3), (a_1, b_1, b_2), \\ (a_1, b_1, b_3), (a_1, b_2, b_3), (a_2, b_1, b_2), (a_2, b_1, b_3), (a_2, b_2, b_3)\}$$

2 个事件的和可以推广到多个事件的和,“事件 A_1, A_2, \dots, A_n
中至少有一个发生”称为 A_1, A_2, \dots, A_n 的和,记为 $A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup$
 A_n 或 $\bigcup_{i=1}^n A_i$ 。“事件 $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ 中至少有一个发生”称为可列

多个事件的和,记作 $A_1 \cup A_2 \cup \dots$ 或 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ 。

例如,在例5中, A_i :“在1 min内来 i 次呼叫($i = 0, 1, 2, \dots$)”,则 $\bigcup_{i=0}^{\infty} A_{2i}$ 表示“在1 min内来偶数次呼叫”。

3) “2个事件 A, B 都发生”也是一个事件,称此事件为 A 与 B 的交,记作 $A \cap B$ (或 AB)。类似地“ n 个事件 A_1, A_2, \dots, A_n 同时发生”也是一个事件,称为 A_1, A_2, \dots, A_n 的交,记作 $A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n$ (或 $\bigcap_{i=1}^n A_i$)。“事件 $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ 都发生”称为可列多个事件的交,记作 $A_1 \cap A_2 \cap \dots$ (或 $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n$)。

例如,在例6中, $A_n = \left\{ t \mid t < 1000 + \frac{1}{n} \right\}$ 表示“灯泡的使用寿命小于 $\left(1000 + \frac{1}{n}\right)$ h” ($n = 1, 2, \dots$), 则 $\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n$ 表示“灯泡的使用寿命不超过1000 h”。

4) “事件 A 发生而 B 不发生”也是一个事件,称为 A 与 B 的差,记作 $A - B$ 。

例如,考虑随机试验 E :“从含有分别标有号码 $1, 2, \dots, N$ 的 N 个球的盒子中有放回地抽取 n 个球”。记 A_k 为事件“取出的 n 个球中最大号码不超过 k ” ($k = 1, 2, \dots$), 则 $A_k - A_{k-1}$ 表示“取出的 n 个球中最大号码刚好等于 k ”这一事件。

5) 如果2个事件 A, B 满足关系式

$$AB = \emptyset \quad (1.1)$$

也就是说,事件 A, B 不能同时发生,则称 A 与 B 是互不相容的事件。

6) 2个事件 A, B 如果满足关系式

$$A \cup B = \Omega, \quad AB = \emptyset \quad (1.2)$$

也就是说, A, B 中至少有一个发生,但也最多只有一个发生,则称 A 与 B 是相互对立的事件,或者说 A 是 B (或 B 是 A) 的对立事件。 A 的对立事件记作 \bar{A} 。

相互对立的事件一定是互不相容的事件,反之,不一定成立.如在例6中若令 $A = \{t \mid t > 1000\}$ 即“灯泡的使用寿命超过1000 h”, $B = \{t \mid t \leq 500\}$ 即“灯泡的使用寿命不超过500 h”显然 $AB = \emptyset$, 但 $A \cup B = \{t \mid t \leq 500 \text{ 或 } t > 1000\} \neq \Omega$

事件之间的关系及运算也常用图形来直观地示意(如图 1.1 所示):

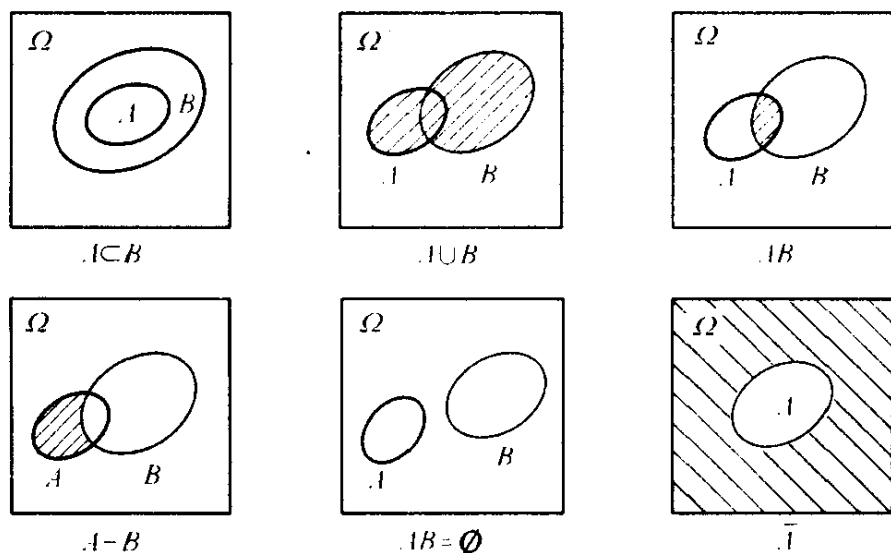


图 1.1

因为事件之间的关系及运算完全对应着集合之间的关系与运算,从而事件的运算也有如下的运算规律:

交换律 $A \cup B = B \cup A, AB = BA$

结合律 $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C), (AB)C = A(BC)$

分配律 $(A \cup B)C = AC \cup BC, AB \cup C = (A \cup C)(B \cup C)$

德摩根(De Morgan)公式 $\overline{A \cup B} = \overline{A} \overline{B}, \overline{AB} = \overline{A} \cup \overline{B}$

分配律和德摩根公式可以推广到任意有限或无限多个事件:

$$\overline{\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \right) C} = \bigcap_{n=1}^{\infty} \overline{A_n C} = \bigcap_{n=1}^{\infty} (\overline{A_n} \cup \overline{C})$$

$$\overline{\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n \right) \cup C} = \bigcup_{n=1}^{\infty} \overline{A_n \cup C} = \bigcup_{n=1}^{\infty} \overline{A_n} \overline{C}$$