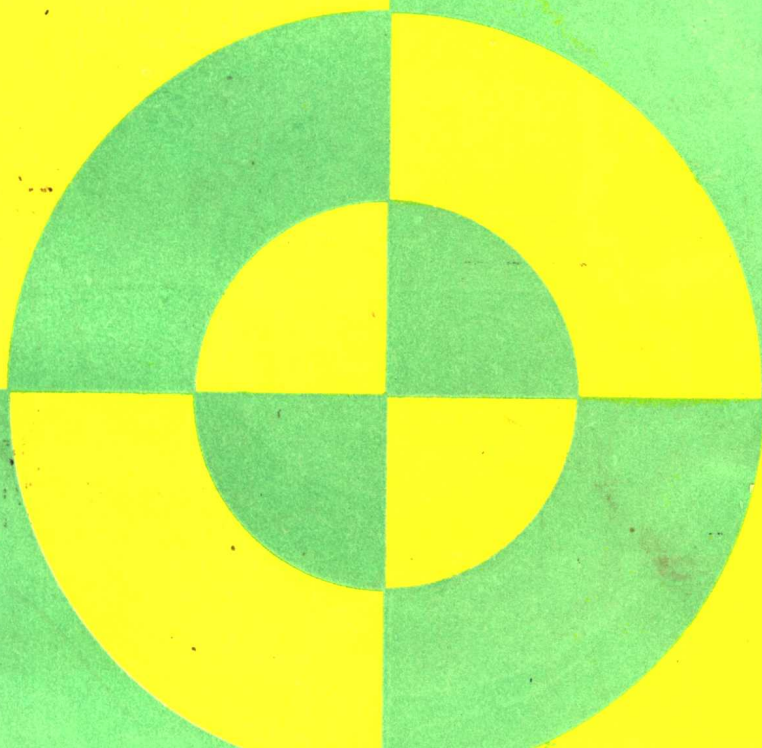


概率论与数理统计

陈希孺 编著



中国科学技术大学出版社

概率论与数理统计

陈希孺 编著

中国科学技术大学出版社

1992·合肥

(皖)新登字 08 号

概率论与数理统计

陈希孺 编著

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮政编码: 230026)

安徽省肥东县印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 850×1168/32 印张: 13.375 字数: 346 千

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—4000 册

ISBN7-312-00349-4/O·112 定价: 4.35 元

序

本书的目的，是作为高等学校理工科非数学系概率统计课程的教材。具有相当数学准备（初等微积分与少量矩阵知识）的读者，也可以作为自修本课程的读物。

书中部分材料，一般认为可能超出本课程的范围，如最小方差无偏估计、克拉美-劳不等式、一致最优检验、非中心 t 分布、截尾寿命检验、多元线性回归、偏复相关、随机区组与正交表设计、贝叶斯方法等。作者认为，这些内容有的在应用上很重要，其所以未在课堂讲授，多是由于时间限制，有的虽偏于理论，但性质很基本，有助于学生对统计方法及其局限性的理解。这些内容并不一定要用高深数学，写入教材，给学生一个提高和加深对本学科理解的机会，也给教师一种根据需要对讲授内容进行选择的余地，是有益的。

虽然学习这门课程的读者主要是着眼于其应用，但作者认为，把教材写成方法手册式的东西不一定可取，要用好统计方法，除了与问题有关的专业知识外，对统计概念的直观理解，以及对方法的理论根据的认识（它关系到方法的应用条件及局限性），也很重要，基于这个考虑，本书花了较多的篇幅于统计概念的阐释，并在设定的数学程度上，坚持叙述的严谨，能证明的，尽量给以证明，有的则放到附录或习题之中，当然，任课教师可根据需要作适当的选择。

本书在各章后都附有习题，它们大致可分为三类：一类对正文内容有所补充，例如证明正文中未予证明的某些结论，一类是纯练习性的较易的题，这两类所占比例较少，更多的一类是作者称之为“中等难度”的题，解这些题不需特殊技巧，但也不是直套

公式即得出，而要求读者对所学内容有切实的掌握，并在一定程度上能灵活运用。希望学习这门课程的学生能尽可能多地独立作出一些习题，这对切实掌握一门数学课程至关重要。为了方便教和学，编写了“习题提示与解答”，附于书的末尾，但作者希望，学生们在未经深入的独立思考之前，不要轻易去翻看它。

本书分章、节、段，例如，“2.3(4)”表示第二章第三节第四段。本书中的公式每一节从头编号，例如，1.3节，2.3节……的公式，都从(3.1)，排起，接着是(3.2)，(3.3)，……当提到本章内某公式时(包括在本章习题及其提示解答中)，则只提该公式的编号，否则另加章号。

方兆本和缪柏其同志对本书的编写给了不少协助，朱荣同志代为绘制了插图。作者谨此向他们表示衷心的感谢。书中不当以至谬误之处，恐在所难免，请同行专家及读者不吝指教。

陈希孺

1991年6月23日于合肥

内 容 简 介

本书内容包括初等概率计算、随机变量及其分布、数字特征、多维随机向量、极限定理、统计学基本概念、点估计与区间估计、假设检验、回归相关分析、方差分析等。书中选入了部分在理论和应用上重要,但一般认为超出本课程范围的材料,以备教者和学者选择。

本书着重基本概念的阐释,同时,在设定的数学程度内,力求做到论述严谨。

书中精选了百余道习题,并在书末附有提示与解答。

本书是作为高等学校理工科非数学系的概率统计课程教材,也可以作为具有相当数学准备(初等微积分及少量矩阵知识)的读者自修之用。

目 次

序	(i)
第一章 事件的概率	(1)
1.1 概率是什么	(1)
1.2 古典概率计算	(11)
1.3 事件的运算、条件概率与独立性	(19)
习题	(40)
第二章 随机变量及概率分布	(44)
2.1 一维随机变量	(44)
2.2 多维随机变量(随机向量)	(61)
2.3 条件概率分布与随机变量的独立性	(73)
2.4 随机变量的函数的概率分布	(85)
附录	(104)
习题	(107)
第三章 随机变量的数字特征	(113)
3.1 数学期望(均值)与中位数	(114)
3.2 方差与矩	(130)
3.3 协方差与相关系数	(138)
3.4 大数定理和中心极限定理	(145)
习题	(152)
第四章 参数估计	(155)
4.1 数理统计学的基本概念	(155)
4.2 矩估计、极大似然估计和贝叶斯估计	(164)
4.3 点估计的优良性准则	(180)
4.4 区间估计	(195)

习题	(210)
第五章 假设检验	(214)
5.1 问题提法和基本概念	(214)
5.2 重要参数检验	(224)
5.3 拟合优度检验	(261)
附录	(277)
习题	(283)
第六章 回归、相关与方差分析	(288)
6.1 回归分析基本概念	(288)
6.2 一元线性回归	(295)
6.3 多元线性回归	(314)
6.4 相关分析	(331)
6.5 方差分析	(340)
附录	(363)
习题	(365)
习题提示与解答	(369)
附表	(414)

第一章 事件的概率

1.1 概率是什么

概率, 又称或然率, 几率, 是表示某种情况(事件)出现的可能性大小的一种数量指标, 它介于零 0 与 1 之间。

这个概念笼统地说起来很容易理解。但若从理论或者说从哲学的高度去分析, 就可以提出一大堆的问题。虽然在本课程范围内我们不必去深入讨论这些问题的各个方面, 但仍希望, 通过下文的叙述, 使读者对“什么是概率”这个问题, 有一个较为全面的理解。

1.1.1 主观概率

甲、乙、丙、丁四人一早进城去办事, 要傍晚才能回来。为了决定是否带伞, 各自在出发前, 对

$$A = \{ \text{今天下午 6 时前不会下雨} \}$$

这个情况或事件发生的可能性大小作个估计。设根据个人的经验和自信, 甲、乙、丙、丁分别把这一可能性估计为 0, 0.2, 0.7 和 1。这意味着甲认为事件 A 不可能出现, 丁认为必然出现, 乙认为 A 出现的可能性是有的, 但很小, 而丙认为 A 有相当大的可能性出现, 但并非必然。这些数字反映了他们四个人对一种情况的主观估计, 故称为主观概率。其实际后果是, 例如, 甲、乙决定带伞而丙、丁则否。

主观概率可以理解为一种心态或倾向性。究其根由大抵有二: 一是根据其经验和知识。拿上例来说, 若某人在该城市住了

30年，又是一个有些气象知识的人，他在作出可能性大小的估计时，多半会使用这些经验和知识，这将会使他的估计较易为人所相信。从这一点说，所谓主观概率也可有其客观背景，终究不同于信口雌黄。二是根据其利害关系，拿上例来说，若对某人而言下雨并不会造成多大问题而带伞又增加不少麻烦，则其心态将倾向于去把 A 的可能性高估一些。

主观概率的特点是：它不是在坚实的客观理由基础上为人们所公认的。因而看来应被科学所否定（科学是以探讨客观真理为任务的）。本书作者说不清楚这问题该如何全面地去理解，但不同意简单的全盘否定的态度。理由有三：1. 这个概念有广泛的生活基础，我们几乎无时不在估计种种情况出现的可能性如何，而不同的人很少能在“客观”的基础上达成一致。2. 这可能反映认识主体的一种倾向性，而有其社会意义。例如，“若问三年后经济形势会得到根本改善”的可能性大小怎样，则不同经济状况，社会地位以至政治倾向的人，会作出有差异的估计。就个别估计而言可能谈不上多大道理，但从总体而言，则反映了社会上广大群众对长远发展的信心如何。对社会学家乃至决策者来说，这是很有用的资料。3. 在涉及利益（经济或其他的）得失的决策问题中，处于不同地位和掌握情报多少不同的人，对某事件可能性大小要参照这些情况及可能的后果去作衡量，适合于某人的决策，例如风险较小的决策，不必适合于另一个人，因对他而言，这一决策可能风险太大。因此，主观概率这个概念也有其实用基础。事实上，许多决策都难免要包含个人判断的成分，而这就是主观概率。

1.1.2 试验与事件

前面我们已经提到了“事件”这个名词。事件是什么？在通常的意义下，它往往是指一种已发生的情况，例如某某空难事件，1941年日本偷袭珍珠港的事件之类。在概率论中则不然，事件不

是指已发生了的情况,而是指某种(或某些)情况的“陈述”,它可能发生,也可能不发生,发生与否,要到有关的“试验”有了结果以后,才能知晓。

拿前例而言,事件 A “陈述”了这样一种情况:下午 6 时前不会下雨。我们当然并未说这已发生了。它是否发生,要等试验结果。这个试验,就是对到下午 6 时前的天气情况进行观察。

推而广之,我们就不难明白:在概率论中,“事件”一词的一般含义是这样的:

1. 有一个明确界定的试验。试验一词,有人为主动的意思,而像上例那样,人只处在被动地位,只是记录而并不干预气象过程。这类情况一般称为“观察”。在统计学中,这一分别有时有实际含义。但对目前的讨论不重要,可以把试验一词理解为包含了观察。

2. 这个试验的全部可能结果,是在试验前就明确的。拿上例来说,试验的全部可能结果只有两个:其一是 A ,另一是 $\bar{A} = \{\text{今天下午 6 时前会下雨}\}$ 。为此,可把这试验写为 (A, \bar{A}) 。不必等到试验完成(不必到下午 6 时),我就知道:非 A 即 \bar{A} ,必居其一。又如,投掷一个赌博用的骰子这个试验,虽无法预卜其结果如何,但总不外乎是“出现 1 点”,……,“出现 6 点”这 6 个可能结果之一,因而不妨把这试验简记为 $(1, 2, \dots, 6)$ 。

在不少情况下,我们不能确切知道一试验的全部可能结果,但可以知道它不超出某个范围。这时,也可以用这个范围来作为该试验的全部可能结果。如在前例中,若我们感兴趣的不仅在于下午 6 时前是否下雨,而需要记录下午 6 时前的降雨量(如以毫米为单位)。则试验结果将是非负实数 x 。我们无法确定 x 的可能取值的确定范围,但可以把这范围取为 $[0, \infty)$ 。它总能包含一切可能的试验结果。尽管我们明知,某些结果,如 $x > 10000$,是不会出现的。我们甚至可以把这范围取为 $(-\infty, \infty)$ 也无妨。这里就有了一定的数学抽象。它可以带来很大的方便,这一点在以后会更

清楚。

3. 我们有一个明确的陈述,这个陈述界定了试验的全部可能结果中一确定的部分。这个陈述,或者说这一确定的部分,就叫做一个事件。如在下雨的例中, A 是全部可能结果(A, \bar{A})中确定的一部分。在掷骰子的例中,我们可以定义许多事件。例如

$$E_1 = \{\text{掷出偶数点}\} = (2, 4, 6)$$

$$E_2 = \{\text{掷出素数点}\} = (2, 3, 5)$$

$$E_3 = \{\text{掷出3的倍数点}\} = (3, 6)$$

等等,它们分别明确地界定了全部试验结果的集合 $(1, 2, \dots, 6)$ 中的一个相应的部分。

如果我们现在把试验做一次,即把这骰子投掷一次,则当投掷结果为2,或为4,或为6时,我们说事件 E_1 “发生了”,不然就说事件 E_1 “不发生”。因此,我们也可以说:事件是与试验结果有关的一个命题,其正确与否取决于试验结果如何。

在概率论上,有时把单一的试验结果称为一个“基本事件”。这样,一个或一些基本事件并在一起,就构成一个事件,而基本事件本身也是事件。在掷骰子的例中,有1, 2, \dots , 6等6个基本事件。事件 E_2 则由2, 3, 5这三个基本事件并成。

设想你处在这样一种情况:投掷一个骰子,若出现素数点,则你将中奖,则在骰子投掷之前你会这样想:我能否中奖,取决于机遇。因此,在概率论中,常称事件为“随机事件”或“偶然事件”。“随机”的意思无非是说,事件是否在某次试验中发生,取决于机遇。其极端情况,是“必然事件”(在试验中必然发生的事件,例如,{掷一个骰子,其出现点数不超过6})和“不可能事件”(在试验中不可能发生的事件)。这两种情况已无机遇可言,但为方便计,不妨把它们视为随机事件的特例。正如在微积分中,常数可视为变量的特例。

可以把必然事件和不可能事件分别等同于概率为1和概率为0的事件。从严格的理论角度而言这二者有所区别,但这种区别

并无实际的重要性。

本段讲的概念虽很浅显,但是很重要。特别提醒读者区别“事件”一词在日常及在概率论中的不同含义。

1.1.3 古典概率

承接上一段。假定某个试验有有限个可能的结果 e_1, e_2, \dots, e_N 。假定从该试验的条件及实施方法上去分析,我们找不到任何理由认为其中某一结果,例如 e_i ,比任一其他结果,例如 e_j ,更具有优势(即更倾向于易发生),则我们只好认为,所有结果 e_1, \dots, e_N 在试验中有同等可能的出现机会,即 $1/N$ 的出现机会。常常把这样的试验结果称为“等可能的”。

拿掷骰子的例子而言,如果1. 骰子质料绝对均匀。2. 骰子是绝对的正六面体。3. 掷骰子时离地面有充分的高度,则一般人都会同意,其各面出现的机会应为等可能。当然,在现实生活中这只能是一种近似,何况,在骰子上刻上点数也会影响其对称性。

在“等可能性”概念的基础上,很自然地引进古典概率的定义。

定义 1.1 设一试验有 N 个等可能的结果,而事件 E 恰包含其中的 M 个结果。则事件 E 的概率,记为 $P(E)$,定义为

$$P(E) = M/N \quad (1.1)$$

本定义所根据的理由很显然。按前面的分析,由等可能性的含义,每个结果的概率同为 $1/N$ 。今事件 E 包含 M 个结果,其概率理应为 $1/N$ 的 M 倍,即 M/N 。古典概率是“客观”的。因为,如果等可能性是基于客观事实(例如在骰子绝对均匀且为严格正六面体时)而非出于主观设想,则看来除按(1.1)式外,别无其他的合理定义法。因此在等可能性的前提下,(1.1)式应为大家所公认。这样,关键就在于保证这等可能性成立无误。在开奖时要设计适当的方法并设置公证人,这些措施都是为了保证所用方法导

致等可能的结果。

设有一个坛子,其中包含 N 个大小和质地完全一样的球, M 个为白球, $N-M$ 个为黑球。将这 N 个球彻底扰乱,蒙上眼睛,从中抽出一个。人们都能接受:“抽到白球”这个事件的概率,应取为 M/N 。这个“坛子模型”看起来简单却很有用;它是在一切概率的讨论中,唯一的一个易于用形象的方法加以体现的情况。日常习用的按“抽签”来保证机会均等的做法,就是基于这一模型。有了这一模型,我们可以把一些难于理解的概率形象化起来而获得感性。如在“下雨”那个例中,说乙估计事件 A 的概率为 0.20。这听起来不甚了然和不好理解。但如乙说“我认为 A 发生的机会,正如在 4 黑球 1 白球中,抽出白球的机会”,则人们就感到顿时领悟了他的意思。

古典概率的计算主要基于排列组合。将在下一节举一些例子来说明。这个名称的来由,是远自 16 世纪以来,就有一些学者研究了使用骰子等赌具进行赌博所引起的“机会大小”的问题,由此结晶出概率论的一些最基本的概念,如用(1.1)式定义的概率(赌博中各种结果自应公认为等可能的)及数学期望(见下章)等。其中一个著名的问题是“分赌本问题”。在下面已简化了的例中,我们来看看,使用古典概率的概念,如何使这个问题达到一个公正的解决。

例 1.1 甲、乙二人赌技相同。各出赌注 500 元。约定:谁先胜三局,则谁拿走全部 1000 元。现已赌了三局,甲二胜一负而因故要中止赌博,问这 1000 元要如何分,才算公平?

平均分对甲欠公平,全归甲则对乙欠公平。合理的分法是按一定比例而甲拿大头。一种看来可以接受的方法是按已胜局数分,即甲拿 $2/3$, 乙拿 $1/3$ 。仔细分析,发现这不合理,道理如下:设想继续赌两局。则结果无非以下四种情况之一:

甲甲, 甲乙, 乙甲, 乙乙, (1.2)

其中“甲乙”表示第一局甲胜第二局乙胜,余类推。把已赌过的三

局与(1.2)中这四个结果结合(即甲、乙赌完五局),我们看出,对前三个结果都是甲先胜三局,因而得仟元,只在最后一个结果才由乙得仟元。在赌技相同的条件下,(1.2)中的四个结果应有等可能性。因此,甲、乙最终获胜可能性大小之比为3:1。全部赌本应按这比例分,即甲分750元,乙分250元,才算公正合理。

这个例子颇给人以启发,即表面上看来简单自然的东西,经过深入一层的分析而揭示了其不合理之处。这个例子还和重要的“数学期望”的概念有关,见第二章。

古典概率的局限性很显然:它只能用于全部试验结果为有限个,且等可能性成立的情况。但在某些情况下,这概念可稍稍引申到试验结果有无限多的情形,这就是所谓“几何概率”。举一个例子。

例 1.2 甲、乙二人约定1点到2点之间在某处碰头。约定先到者等候10分钟即离去。设想甲、乙二人各自随意地在1—2点之间选一个时刻到达该处,问“甲乙二人能碰上”这事件 E 的概率是多少?

以1点钟作原点,分钟为单位,把甲、乙到达时间 x, y 构成的点 (x, y) 标在直角坐标系上,则图1.1中的正方形 $OABC$ 内每个点都是一个可能的试验结果,而这个正方形就是全部可能的结果之集。“甲、乙二人各自随意地在1—2点之间选一个时刻到达该处”一语,可以理

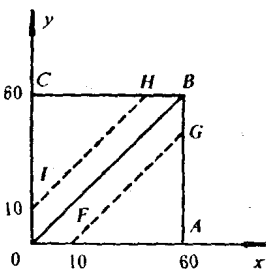


图 1.1

解为这正方形内任一点都是等可能。按约定,只有在点 (x, y) 落在图中的多边形 $OFGBHI$ 内时,事件 E 才发生。因正方形内包含无限个点,古典概率定义(1.1)无法使用。于是,我们把“等可能性”这概念按本问题特点引申一下:正方形内同样的面积有同样的概率。全正方形的面积为 $60^2 = 3600$,而易算出上述多边形有面积为1100。按上述引申了的原则,算出事件 E 的概率为 $P(E) =$

$$1100/3600 \approx 11/36.$$

这样算出的概率称为“几何概率”，因它是基于几何图形的面积、体积、长度等而算出的。就本例而言，重要之点在于把等可能性解释或引申为“等面积，等概率”。其他一些可用几何概率处理的问题，都需要作类似的引申。在某些较复杂的问题中，几种引申看来都可接受，由此可算出不同的结果。这并无矛盾可言，因为每一种不同的引申，意味着对“等可能性”的含义作不同的解释。问题在于哪一种解释最符合你的问题的实际含义。

1.1.4 概率的统计定义

从实用的角度看，概率的统计定义无非是一种通过实验去估计事件概率的方法。拿“掷骰子”这个例子来说，若骰子并非质地均匀的正立方体，则投掷时各面出现的概率不必相同。这时，“出现么点”这个事件 E_1 的概率有多大，已无法仅通过一种理论的考虑来确定，但我们可以做实验：反复地将这骰子投掷大量的次数，例如 n 次。若在这 n 次投掷中么点共出现 m_1 次，则称 m_1/n 是 E_1 这个事件在这 n 次试验（每次投掷算作一次试验）中的“频率”。概率的统计定义的要旨是说，就拿这个频率 m_1/n 作为事件 E_1 的概率 $P(E_1)$ 的估计。这个概念的直观背景很简单：一事件出现的可能性大小，应由在多次重复试验中其出现的频繁程度去刻划。

一般的情况与此毫无区别，只须在上文的叙述中，把“掷骰子”改换成某个一般的试验，而把“出现么点”这事件 E_1 改换成某个指定的事件即可。要点在于：该试验必须能在同样条件下大量次数重复施行，以便我们有可能观察该事件的频率。

读者恐怕已注意到上述定义中的不足之处，即频率只是概率的估计而非概率本身。形式上可以用下面的说法来解脱这个困难：把事件 E 的概率定义为具有如下性质的一个数 p ：当把试验重复时， E 的频率在 p 的附近摆动，且当重复次数增大时，这摆动愈来愈小。或者干脆说：概率就是当试验次数无限增大时频率的

极限。要这样做，就必须回答下述问题：你怎样去证明具有上述性质的数 p 存在，抑或 p 的存在只是一个假定？

依本书作者的观点，“概率的统计定义”的重要性，不在于它提供了一种定义概率的方法——它实际上没有提供这种方法，因为你永远不可能依据这个定义确切地定出任何一个事件的概率。其重要性在于两点：一是提供了一种估计概率的方法，这在上文已谈到了，这种应用很多。例如在人口的抽样调查中，根据抽样的一小部分人去估计全部人口的文盲比例，在工业生产中，依据抽取的一些产品的检验去估计产品的废品率，在医学上依据积累的资料去估计某种疾病的死亡率等。二是它提供了一种检验理论正确与否的准则。设想根据一定的理论、假定等等算出了某事件 A 的概率为 p 。这理论或假定是否与实际相符？我们并无把握。于是我们可诉诸实验，即进行大量重复的试验以观察事件 A 的频率 m/n 。若 m/n 与 p 接近，则认为实验结果支持了有关理论，若相去较远，则认为理论可能有误。这类问题属于数理统计学的一个重要分支——假设检验，将在本书第五章中讨论。

1.1.5 概率的公理化定义

数学上所说的“公理”，就是一些不加证明而承认的前提。这些前提规定了所讨论的对象的一些基本关系和所满足的条件。然后以之为基础，推演出所讨论的对象的进一步的内容。几何学就是一个典型的例子。

成功地将概率论实现公理化的是现代的苏联大数学家柯尔莫哥洛夫，时间在1933年。值得赞赏的不止在于他实现了概率论的公理化，还在于他提出的公理为数很少且极为简单，而在这么一个基础上建立起了概率论的宏伟的大厦。

在第1.1.2段中我们曾指出：事件是与试验相连，试验有许多可能的结果，每个结果叫做一个基本事件。与此相应，在柯氏的公理体系中引进一个抽象的集合 Ω ，其元素 ω 称为基本事件。