



普通高等教育
“十一五”
国家级规划教材

大学数学

——随机数学

吉林大学数学学院 主编
孙毅 高彦伟 张静

第
3
版

高等教育出版社



普通高等教育
“十一五”
国家级规划教材

Daxue Shuxue Suiji Shuxue

大学数学

——随机数学

吉林大学数学学院 主编
孙毅 高彦伟 张静

第
3
版

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,主要介绍了概率论与数理统计两部分内容。概率论部分主要包括随机事件及其概率、随机变量及其分布、二维随机变量及其分布、随机变量的数字特征、大数定律与中心极限定理等;数理统计部分主要介绍了数理统计的基本概念、参数估计和假设检验,并介绍了回归分析和方差分析等内容。各章后都配备了精选的习题,书后附有部分习题参考答案,便于读者学习。

本书可供高等学校非数学类理工科各专业的学生选用,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学数学. 随机数学 / 孙毅, 高彦伟, 张静主编. --
3 版. -- 北京: 高等教育出版社, 2014. 12
ISBN 978 - 7 - 04 - 040740 - 2

I. ①大… II. ①孙… ②高… ③张… III. ①高等数学 - 高等学校 - 教材②随机过程 - 高等学校 - 教材 IV.
①O13②O211.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 158286 号

策划编辑	兰莹莹	责任编辑	兰莹莹	封面设计	张申申	版式设计	童 丹
插图绘制	郝 林	责任校对	刘春萍	责任印制	尤 静		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京宏信印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 21.75
字 数 390 千字
购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2004 年 7 月第 1 版
2014 年 12 月第 3 版
印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷
定 价 31.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 40740 - 00

《大学数学》教材编委会

主 任 李辉来

副主任 孙 毅 张 然

编 委 (以姓氏笔画为序)

马瑞杰 王国铭 王 颖 术洪亮 白 岩

刘 静 孙 毅 李 宾 李辉来 张朝凤

陈殿友 赵玉娟 高彦伟 郭 华 黄万风

第三版前言

《大学数学》教材第二版面世已经 5 年多了,在此期间,许多高校同行和读者给我们提出了宝贵的意见,也给予本套教材充分的肯定。结合过去 5 年读者反馈的意见、我们使用本套教材的体会和近几年大学数学课程改革的最新成果,编委会决定对本套教材进行再次修订、完善,以更好地适应当前的教学需求。

本次修订的指导思想是:1. 保持原书的风格与特色,力求叙述严谨准确,简洁明了,基础知识交代清楚透彻。2. 在保持理论知识系统性的同时,突出数学思想方法的运用,贯彻理论联系实际的原则,注重实际问题的解决。3. 加强数学应用的广泛性,提高数学技术应用的深度和技巧,使数学理论、思想、方法更好地满足其他学科的需要。4. 重点修订大学数学课程实验教材,补充 MATLAB 软件解决数学应用问题等。

根据读者的意见和我们的教学实践,本次修订改正了第二版中存在的不足之处,更换了部分例题和习题,以更好地适应理工科各专业的教学实际;在文字叙述上也做了一定的调整,使概念叙述和理论推导更加清晰易懂、严谨准确。

参加本书第三版修订的有孙毅(第一、三、九、十章)、高彦伟(第六、七、八章)、张静(第二、四、五章)。

在本书的修订过程中,得到了吉林大学数学学院和高等教育出版社理工出版事业部数学分社的大力支持和帮助,吴晓俐女士承担本套教材修订的编务工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的错误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

《大学数学》教材编委会

2014 年 4 月

第二版前言

《大学数学》系列教材面世已经 5 年了,在此期间,有不少高校同行在使用本系列教材的过程中提出了许多宝贵意见,结合过去 5 年我们使用本系列教材的教学实践经验和近几年大学数学课程改革的一些新动态,编委会决定对本系列教材进行修订、完善。新版列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本次修订的指导思想是:1. 保持原书风格与特色,力求叙述简洁明了,把基础知识尽可能交代得透彻些;2. 在加强理论知识系统性的同时,尽可能突出数学思想方法的讲授,删繁就简;3. 突出数学应用的广泛性,提高数学技术应用的深度和技巧。

本书第二版突出了以随机变量的分布为核心的编写思路,删去了第一版教材中随机过程部分(第十一章至十三章),重新编写了随机变量的分布及数字特征部分(第二章至第五章),其余部分做了较大幅度的修改和完善,使得内容安排和例题搭配更加合理,文字叙述及理论推导更为准确。

参加本书第二版编写的有李忠范(第二、五、七、八章)、孙毅(第四、六章)、高文森(第一、三、九、十章),由李忠范统稿并最后定稿。

在本书的修订过程中,得到了吉林大学数学学院和高等教育出版社数学分社的大力支持和帮助,吴晓俐女士承担了本系列教材修订的编务工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的错误和不当之处,敬请读者批评指正。

《大学数学》系列教材编委会

2009 年 1 月

第一版前言

《大学数学》系列教材是普通高等教育“十五”国家级规划教材。本系列教材共四册:《微积分》(上、下)、《线性代数》和《随机数学》。

本系列教材的编写体现了时代的特点。本着加强基础、强化应用、整体优化、注重后效的原则,力争做到科学性、系统性和可行性的统一,使传授数学知识和培养数学素养得到了较好的结合。

本系列教材是在吸取国内外同类教材的精华,借鉴近几年我国出版的一批“面向 21 世纪课程教材”的成功经验,结合在吉林大学公共数学教学、教研的具体实践,针对非数学类理工科大学学生的特点编写的。

本系列教材内容充实,可作为高等学校非数学类理工科各专业的教材或教学参考书。在教材体系与内容的编排上,认真考虑了不同专业、不同学时的授课对象的需求。对数学要求较高的物理、计算机、电子等专业,原则上可讲授本教材的全部内容;其他专业可以在不带“*”号的内容中,根据实际需要选择适当的章节讲授。每章后面所配备的习题分成两类,其中(A)是体现教学基本要求的习题;(B)是对基本内容提升、扩展以及综合运用有关知识的习题。与教材中“*”号内容相应的习题用“*”号做了标注。书后给出了习题参考答案或提示,供读者参考。

本册《随机数学》的一、六至十三章由高文森编写,二至五章由潘伟编写。

在《大学数学》系列教材的编写过程中,得到了吉林大学教务处的大力支持,数学学院尹景学教授为本套教材初稿的版面设计、软件培训提供了悉心的技术指导;公共数学教学与研究中心副主任吴晓俐女士承担了本系列教材初稿的编务工作,研究生王军林、孙鹏、任长宇、李明、柯长海、吴刚、姜政毅及湖北大学郑巧仙老师完成了本系列教材初稿的排版制图工作,在此一并致谢。作者要特别感谢高等教育出版社高等理工分社的领导和编辑们,他们对本系列教材的编辑出版工作给予了精心指导和大力支持。

由于我们水平所限,书中的错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正,以期不断完善。

《大学数学》系列教材编委会

2004 年 7 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一章 随机事件及其概率	1
§ 1 随机试验与随机事件	1
1.1 随机试验	1
1.2 随机事件及其运算	3
§ 2 随机事件的概率	8
2.1 频率	9
2.2 概率	10
2.3 古典概型	13
2.4 几何概型	17
§ 3 条件概率	18
3.1 条件概率与乘法公式	18
3.2 全概率公式	23
3.3 贝叶斯(Bayes)公式	26
§ 4 事件的独立性	28
§ 5 伯努利(Bernoulli)概型	32
习题一	34
第二章 随机变量及其分布	38
§ 1 随机变量的分布函数	38
1.1 随机变量	38
1.2 分布函数及其性质	39
§ 2 离散型随机变量及其概率分布	42
§ 3 连续型随机变量及其概率密度	43
§ 4 几种常用的分布	46
4.1 几种常用的离散型随机变量	46
4.2 均匀分布和指数分布	50
4.3 正态分布	52

§ 5 随机变量的函数的分布	57
5.1 离散型随机变量的函数的分布	57
5.2 连续型随机变量的函数的分布	58
习题二	63
第三章 二维随机变量及其分布	66
§ 1 二维随机变量	66
1.1 二维随机变量及其分布函数	66
1.2 边缘分布	67
1.3 随机变量的独立性	68
§ 2 二维离散型随机变量及其概率分布	69
2.1 二维离散型随机变量及其概率分布	69
2.2 边缘概率分布	70
2.3 随机变量的独立性	72
§ 3 二维连续型随机变量及其概率密度	75
3.1 二维连续型随机变量及其概率密度	75
3.2 边缘概率密度	77
3.3 随机变量的独立性	77
3.4 二维均匀分布和正态分布	79
§ 4 条件分布	83
4.1 离散型随机变量的条件分布	83
4.2 连续型随机变量的条件分布	85
§ 5 二维随机变量的函数的分布	88
5.1 二维离散型随机变量的函数的分布	88
5.2 二维连续型随机变量的函数的分布	90
§ 6 n 维随机变量	99
习题三	102
第四章 随机变量的数字特征	106
§ 1 数学期望	106
1.1 数学期望的概念	106
1.2 随机变量函数的数学期望	109
1.3 数学期望的性质	111
§ 2 方差	114

2.1 方差的概念	114
2.2 方差的性质	116
2.3 随机变量的标准化	118
§ 3 协方差与相关系数	118
3.1 协方差	118
3.2 相关系数	119
§ 4 矩	124
4.1 矩的概念	124
4.2 协方差矩阵	124
4.3 n 维正态分布	125
习题四	127
第五章 大数定律与中心极限定理	131
§ 1 切比雪夫(Chebyshev)不等式	131
§ 2 大数定律	133
2.1 依概率收敛	133
2.2 大数定律	134
§ 3 中心极限定理	136
3.1 依分布收敛	136
3.2 中心极限定理	137
习题五	141
第六章 样本及样本函数的分布	143
§ 1 总体与样本	143
1.1 总体	143
1.2 简单随机样本	144
§ 2 直方图与样本分布函数	146
2.1 直方图	146
2.2 样本分布函数	149
§ 3 样本函数及其概率分布	151
§ 4 χ^2 分布	157
§ 5 t 分布	161
§ 6 F 分布	164
习题六	167

第七章 参数估计	170
§ 1 参数的点估计	170
1.1 矩估计法	170
1.2 最大似然估计法	173
§ 2 估计量的评选标准	181
2.1 无偏性	181
2.2 有效性	184
2.3 一致性	185
§ 3 参数的区间估计	186
§ 4 正态总体参数的区间估计	187
4.1 单个正态总体均值与方差的区间估计	187
4.2 两个正态总体均值差与方差比的区间估计	192
§ 5 单侧置信区间	197
习题七	199
第八章 假设检验	202
§ 1 假设检验的基本概念	202
§ 2 正态总体参数的假设检验	205
2.1 单个正态总体均值与方差的假设检验	205
2.2 两个正态总体均值差与方差比的假设检验	210
§ 3 总体分布的假设检验——分布拟合检验*	216
习题八	222
第九章 回归分析	225
§ 1 一元线性回归分析	225
1.1 回归分析的基本概念	225
1.2 常数 a, b 的最小二乘估计	226
1.3 估计量 $\hat{a}, \hat{b}$ 的分布	230
1.4 回归效果的显著性检验	232
1.5 回归系数的区间估计	236
1.6 利用回归直线方程进行预测与控制	237
§ 2 可线性化的回归方程*	241

§ 3 多元线性回归分析*	246
3.1 多元线性回归模型与系数的最小二乘估计	246
3.2 线性假设的显著性检验	248
习题九	252
第十章 方差分析与正交试验设计*	254
§ 1 单因素试验的方差分析	254
§ 2 无交互作用的双因素试验的方差分析	260
§ 3 有交互作用的双因素试验的方差分析	266
§ 4 正交试验设计及其结果分析	273
4.1 正交试验设计的设计与试验阶段	273
4.2 正交试验设计的结果分析	278
习题十*	286
部分习题参考答案	288
附表	303
附表 1 标准正态分布表	303
附表 2 泊松分布表	306
附表 3 t 分布表	309
附表 4 χ^2 分布表	311
附表 5 F 分布表	314
附表 6 正交表	324
附表 7 相关系数检验表 $r_{\alpha}(n-2)$	326
附表 8 几种常用的概率分布	327
参考文献	329

第一章 随机事件及其概率

随机数学是研究随机现象统计规律性的数学学科,它的理论和方法在自然科学、社会科学、工程技术、经济、管理等诸多领域中得到了广泛的应用.

概率论是随机数学的理论基础,它给出描述随机现象规律性的数学模型.随机事件及随机事件的概率是概率论中最基本的概念.早在 17 世纪,人们就开始用古典概型来研究人口统计、天文、产品检查等各个方面的问题,促进了概率论的发展.但直到 20 世纪 30 年代,概率论才有了建立在公理化体系上的严密的理论基础.

本章介绍随机试验、样本空间、随机事件、随机事件的频率和概率、条件概率以及随机事件的独立性等基本概念,介绍古典概型和几何概型,介绍加法公式、乘法公式、全概率公式、贝叶斯(Bayes)公式以及二项概率公式等计算概率的基本公式.

§1 随机试验与随机事件

1.1 随机试验

在自然界和人类社会中出现的各种现象大致可以分为两类:必然现象和随机现象.

在一定条件下必然出现的现象叫做**必然现象**.例如,每天早晨太阳从东方升起,人从地面向上抛起的石块经过一段时间后落到地面,同性电荷互相排斥等,都是必然现象.

在相同的条件下,可能出现不同的结果,而在试验或观测之前不能预知确切的结果的现象叫做**随机现象**.例如,抛掷一枚骰子出现的点数,抽样检查某产品的检验结果,某城市某日的交通事故发生的次数等,都是随机现象.许多随机现象在相同的条件下可以重复出现.如果我们对这种随机现象进行大量重复地观测,则在每次观测之前不能预先确定其结果,这就是这种现象的随机性;但在进行了大量重复地观测之后,其结果往往会表现出某种规律性,这就是随机现象的统计规律性.例如,抽样检查一大批电子元件,每次抽查的一件可能是合格品,也

可能是次品,检验之前无法预先确定是哪一个结果,这就是随机性;但在多次抽查之后,次品出现的比率(即在抽查中出现的次品件数与抽查总件数的比值)将在整批电子元件的次品率附近摆动,随机现象的统计规律性便体现出来了.

为了研究和揭示随机现象的统计规律性,我们需要对随机现象进行大量重复地观察、测量或试验.为了方便,将它们统称为试验.如果试验具有以下特点:

(1) 可重复性 试验可以在相同条件下重复进行多次,甚至进行无限次;

(2) 可观测性 每次试验的所有可能结果都是明确的、可以观测的,并且试验的可能结果有两个或两个以上;

(3) 随机性 每次试验出现的结果是不确定的,在试验之前无法预先确定究竟会出现哪一个结果,则称之为**随机试验**,简称为**试验**.

我们通常用字母 E 表示一个随机试验.随机试验 E 的基本结果称为**样本点**,用 ω 表示.称随机试验 E 的所有基本结果的集合为**样本空间**,用 $\Omega = \{\omega\}$ 表示.

例 1.1 抛掷一枚硬币,观察正面和反面出现的情况(将这两个基本结果分别记为 ω_1 和 ω_2),则该试验的样本空间为

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}.$$

例 1.2 抛掷一枚骰子,观察出现的点数,将基本结果“出现 i 点”记为 ω_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$),则该试验的样本空间为

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6\}.$$

例 1.3 在一只罐子中装有大小和形状完全一样的 2 个白球和 3 个黑球,依次在 2 个白球上标以数字 1 和 2,在 3 个黑球上标以数字 3, 4 和 5,从罐子中任取一个球,观察球上的数字,用 ω_i 表示“取出的是标有数字 i 的球”($i = 1, 2, 3, 4, 5$),则试验的样本空间为

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5\}.$$

例 1.4 在一个箱子中装有 10 个同型号的某种零件,其中有 3 个次品和 7 个合格品,从该箱子中任取 3 个零件,观察其中次品的个数.由于次品个数可能是 0, 1, 2, 3, 因此试验的样本空间为

$$\Omega = \{0, 1, 2, 3\}.$$

例 1.5 记录某机场在一天内收到咨询电话的次数,则试验的样本空间为

$$\Omega = \{0, 1, 2, \dots\}.$$

例 1.6 从某一大批同型号电子元件中任取一个测试其使用寿命(单位: h),则试验的样本空间为

$$\Omega = [0, +\infty).$$

为了研究随机现象的统计规律性,需要合理地安排随机试验,分析试验的样

本空间. 在许多实际问题中, 人们不仅关心试验的基本结果, 还关心某些特定的结果在重复试验中是否会出现, 出现的比率(即该结果出现的次数与试验总次数的比值)有多大. 例如, 在例 1.6 中, 如果规定该型号电子元件优质品的标准是使用寿命超过 1 000 h, 则“任取 1 个元件是优质品”这一结果可以用样本空间 $\Omega = [0, +\infty)$ 的一个子集 $A = (1\,000, +\infty)$ 来表示. 这一结果在重复试验中有时出现, 有时不出现. 如果这一结果在重复试验中出现的比率高, 则表明这批元件的优质品率较高.

1.2 随机事件及其运算

1. 随机事件的概念

我们把随机试验 E 的样本空间 $\Omega = \{\omega\}$ 的子集(进一步还要要求这些子集满足一些特定的性质, 在此不做讨论)称为随机试验 E 的**随机事件**, 简称为**事件**, 用大写字母 A, B, C 等表示. 设 $A \subseteq \Omega$, 如果试验结果 $\omega \in A$, 则称在这次试验中事件 A 发生; 如果 $\omega \notin A$, 则称事件 A 不发生.

在上面的例子中, $A = (1\,000, +\infty) \subseteq \Omega = [0, +\infty)$, A 是一个随机事件. 如果取出一个元件的使用寿命 $\omega = 1\,500$ h, 则 $\omega \in A$, 表明事件 A 发生; 如果取出另一个元件的使用寿命 $\omega = 920$ h, 则 $\omega \notin A$, 表明事件 A 没有发生.

由一个样本点 ω 组成的事件, 称为**基本事件**. 样本空间 Ω 本身也是 Ω 的子集, 它包含 Ω 的所有样本点, 在每次试验中 Ω 必然发生, 称为**必然事件**. 空集 $\emptyset$ 也是 Ω 的子集, 它不包含任何样本点, 在每次试验中都不可能发生, 称为**不可能事件**.

例 1.7 在例 1.3 中, 子集 $A = \{\omega_1, \omega_2\}$ 表示事件“从罐子中任取一球是白球”, 子集 $B = \{\omega_3, \omega_4, \omega_5\}$ 表示事件“从罐子中任取一球是黑球”. 事件“取出 2 号球”可表示为 $C = \{\omega_2\}$, 事件“取出的是白球或黑球”为必然事件, 事件“取出的是黄球”为不可能事件.

在一个样本空间中, 如果只有有限个样本点, 则称它为**有限样本空间**; 如果有无限个样本点, 则称它为**无限样本空间**. 在例 1.1 ~ 例 1.4 中的样本空间都是有限样本空间, 在例 1.5 和例 1.6 中的样本空间都是无限样本空间.

2. 随机事件的关系

在一个试验 E 的样本空间 Ω 中可能有很多随机事件, 每一事件具有各自的特性, 在一些事件之间可能存在着某种联系. 为了考察一个比较复杂的事件, 往往是把它与一些较为简单的事件联系起来, 通过对这些简单事件的研究去掌握复杂事件的特性, 因此我们需要研究事件的关系及事件的运算. 由于事件是样本空间的子集, 因此事件的关系及运算与集合的关系及运算是互相对应的. 这里要

注意的是理解事件的关系及运算在概率论中的含义.

在以下的讨论中,假定 Ω 是试验 E 的样本空间,所论及的事件都是同一试验 E 的事件.

(1) 事件的包含 如果当事件 A 发生时事件 B 一定发生,则称事件 B 包含事件 A , 记作 $A \subseteq B$.

在例 1.7 中,有 $C \subseteq A$.

设试验 E 是将一个点随机地投入矩形区域 Ω 内, A, B 为 Ω 内的两个圆形子区域, 事件 A 表示该点(称为随机点)落在圆形区域 A 内, 事件 B 表示该点落在区域 B 内, 用 Ω 表示试验 E 的样本空间, 用 Ω 的子集 A 和 B 分别表示事件 A 和事件 B , 如图 1.1 ~ 图 1.6. 在图 1.1 中, 有 $A \subseteq B$.

对于任意事件 A , 有 $\emptyset \subseteq A \subseteq \Omega$.

如果 $A \subseteq B, B \subseteq C$, 则 $A \subseteq C$.

(2) 事件的相等 如果事件 A 和事件 B 相互包含, 即 $A \subseteq B$ 且 $B \subseteq A$, 则称事件 A 与事件 B 相等, 记作 $A = B$.

事件 A 与事件 B 相等, 表明 A 和 B 是样本空间 Ω 的同一子集, 实际上是同一事件.

(3) 事件的互不相容 如果事件 A 和事件 B 在同一次试验中不能同时发生, 则称事件 A 与事件 B 是互不相容的, 或称事件 A 与事件 B 是互斥的.

在例 1.7 中, 事件 A 与事件 B 是互不相容的, 事件 C 与事件 B 也是互不相容的. 这表明, 事件 B 和事件 C 在同一次试验中是不能同时发生的, 但也可能同时都不发生.

在图 1.2 中, 随机点不能同时落在圆形区域 A 和 B 内, 因此事件 A 与事件 B 是互不相容的. A 和 B 作为样本空间 Ω 的子集, 它们的交集是空集 $\emptyset$.

(4) 事件的互逆 如果在每一次试验中事件 A 和事件 B 必有一个且仅有一个发生, 则称事件 A 与事件 B 是互逆的或对立的, 称其中的一个事件是另一个事件的逆事件, 记作 $\bar{A} = B$, 或 $\bar{B} = A$. 显然 $\bar{\bar{A}} = A$.

在例 1.7 中, 事件 A 与事件 B 是互逆的.

在图 1.3 中, 事件 A 与事件 B (阴影区域) 是互逆的. 作为样本空间 Ω 的子集, $\bar{A} = B$ 是 A 在全集 Ω 中的补集(或称余集).

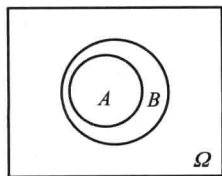


图 1.1

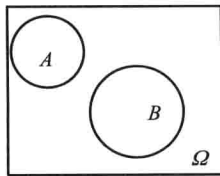


图 1.2

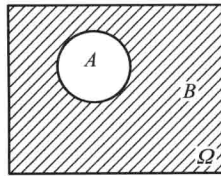


图 1.3