

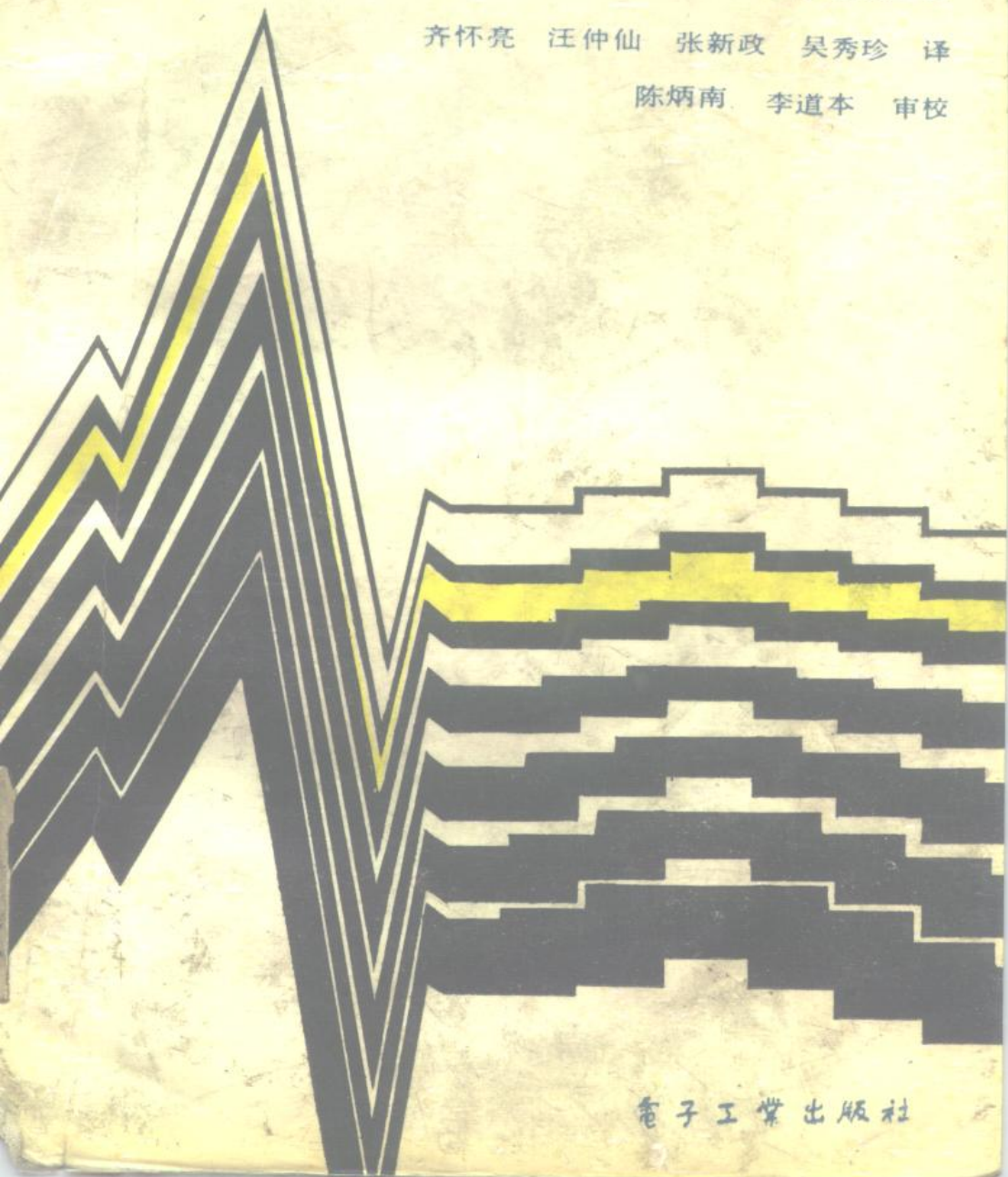
# 数字通信

DIGITAL COMMUNICATIONS

[美] 约翰 G·普罗基斯 著

齐怀亮 汪仲仙 张新政 吴秀珍 译

陈炳南 李道本 审校



电子工业出版社

72-4616  
42

# 数 字 通 信

〔美〕约翰G·普罗基斯 著

齐怀亮 汪仲仙 张新政 吴秀珍 译  
陈炳南 李道本 审校

电子工业出版社

8910017

2032/15  
内 容 简 介

这是一本比较深入、全面阐述数字通信的理论著作。内容有信源编码、数字调制和解调技术，编码和解码技术等数字通信的基本原理。在后几章中还以较大的篇幅介绍自适应均衡技术、多径衰落信道的数字信号传输以及扩谱信号等方面的研究新成果。这些成果反映了近年来数字通信技术的发展趋势。本书的特点是取材新颖、内容丰富。在叙述上从基本原理出发，逐步深入，分析严谨，条理清晰。为加深读者对正文的理解，文中列举了许多例题。每章后附有大量习题，除帮助理解正文外，还可对数字通信的内容进一步加深和扩展。

本书可作为相关专业大学高年级学生和研究生的教材，亦可供从事通信技术的工程技术人员参考。

DIGITAL COMMUNICATIONS

John G. Proakis New York 1983

数 字 通 信

(美) 约翰·G·普罗基斯 著

齐怀亮 汪仲仙 张新政 吴秀珍 译

陈炳南 李道本 审校

责任编辑 王昌喜

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

通县宏飞印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 印张: 24 字数: 600千字

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数: 2500 册 定价: 9.90元

ISBN7-5053-0192-6/TN133

## 中译本前言

无论哪位作者都乐意看到自己的著作翻译成其他文字，这不仅意味着赢得了更多的读者，还表明其著作受到其他国家同行的重视。基于这种心情，欢迎把我的著作译成中文。

在此书英文版完成的最后阶段，我高兴地和上海科技大学来的两位访问学者林如俭先生、周志畅先生一道工作。他们复阅了原稿，并提出了若干重要建议，致使样书得到了改进。我还高兴地感谢在东北大学攻读博士学位的凌复云和我的合作，这个合作的突出成就是弄清楚了数字通信中采用最小二乘方法，这一点涉及到第六章论述这个问题的表达式。

*John S. Proakis*  
*December 5, 1984*

## 译 者 前 言

近年来,由于通信容量需要的增加,通信质量要求的提高,通信范围和内容的扩大,数字通信技术在理论上和实际上都有了很大的发展。数字通信具有通信容量大、传输效率高、抗干扰能力强、便于加密,特别是便于利用计算技术,组成容纳各种业务的数据通信网,对信息的传输、存贮、处理、转换等极为有利。总之,数字通信是一种通用性强、灵活性大、可靠性高的通信方式。计算技术的发展和大规模集成技术的日臻完善推动了数字通信技术的进展,而网络数字化程度的提高,也加强了信息传输和处理的能力,进而扩大了计算技术的应用范围。所以数字通信技术是现代科学技术发展的一个重要方面。

我们翻译的约翰·G·普罗基斯的“数字通信”一书是作者多年来教学和科研成果的总结,它系统地阐述了数字通信的基本理论问题,涉及信源编码、数字调制与解调、编码与译码等基本理论和数字处理方法。还以较大篇幅阐述了近年来数字通信技术发展的新成果,特别在均衡技术和多径衰落信道传输方面进行了深入的分析。本书的特点是取材较新且全面、分析严谨、条理清晰。是一本比较深入、系统、全面的数字通信的理论著作。宜于作为研究生的教材。对高等院校相关专业的教师及学生以及科技工作者也是一本很好的参考书。

本书的翻译分工如下:一、四章由汪仲仙同志翻译,二、七章及序言由张新政同志翻译、三、六章由齐怀亮同志翻译,五、八章由吴秀珍同志翻译。由齐怀亮同志负责统一全书工作。全书除序言、六、七章由李道本同志审校外,其余皆由陈炳南同志审校。

在本书的翻译工作中，魏津同志自始至终地参与了讨论和定稿工作，提出了宝贵意见。姚彦同志对本书的全部译稿，进行了仔细的阅读，提出了很好的建议。对于他们的帮助，在此我们表示衷心的感谢。

限于译者水平，如有不妥或谬误之处，欢迎读者指正。

1984·10

# 序 言

本书是作者十五年以来从事教学、科研及数字通信咨询业务方面的总结。它是专为电机工程系一年级研究生编写的教科书，当然也可以作为自修课本和从事数字通信系统设计工程师们的参考书。在阅读本书之前，读者应该透彻了解基本计算方法、基本线性系统理论和一些初步的概率及随机过程方面的知识。

自从三十五年前 C. E. 仙农 (C. E. Shannon) 的著作发表以来，数字通信领域有了惊人的发展。它包含有非常广泛的课题，概括起来就是信息论。其中包括信源编码理论、信道编码和解码理论。深入理解和掌握这些课题需要坚实的数学基础，已有一些优秀的著作深入地论述了这些课题。如 R. G. 加拉赫 (R. G. Gallager) 的“信息论和可靠通信”、E. R. 伯利凯普 (E. R. Berlekamp) 的“代数编码理论”、W. W. 彼得森 (W. W. Peterson) 和 E. J. 韦尔登 (E. J. Weldon) 的“纠错编码”以及 A. J. 维特比 (A. J. Viterbi) 与 J. K. 奥穆拉 (J. K. Omura) 的“数字通信和编码原理”。

与这些较深的书籍相比较，本书对数字通信的论述可认为是本课题的导论。我们着重强调的是：(1) 数字信号的数学表示式；(2) 为了在通信信道中传输信息，如何选择或设计数字信号；(3) 实际信道的数学模型及其特性；(4) 为了从受信道畸变的接收信号中解调和解码，对最佳和准最佳接收设备的系统设计。对这些课题的选择和强调反映了我的观点，即上述内容应包括在这一领域的入门课中。我力求使本书能对该领域有兴趣的大多数研究生易于领会。

本书第一章扼要介绍概率和随机过程的基础知识，其中包括

本书所用的一些概率分布函数与矩。另外关于契尔诺夫边界的推导，这对寻求某些数字通信系统性能边界是很有用的。

第二章介绍数字通信系统的基本原理和信息论中一些有关信道容量的基本结论。简要介绍信源编码问题，着重于介绍一些较成熟的语音数字化技术，如脉冲编码调制 (PCM)、差分脉冲编码调制 (DPCM)、增量调制 (DM) 以及基于线性预测的信源模型。

第三章为读者介绍数字信号的表示法以及对窄带信号与系统的表示法，还介绍了数字调制信号的频谱特性。

第四章叙述在加性白高斯噪声信道中数字通信的调制和解调的设计方法。重点放在对各种数字信号传输技术的差错概率性能计算及其相应信号所要求的信号带宽。对所涉及到的相干解调中的相位捕获以及定时同步等重要实际问题只简单介绍。

第五章介绍信道编码和解码问题，描述这个非常广泛又丰富的课题必然要限制在一定范围之内。编码可以看成为扩充信号符号表容量以换取性能改善的一种有效方法，这也是以适当增加信号带宽和解调复杂性为代价的。我们只讨论线性分组码和卷积码，也介绍了软判决和硬判决解码及其在加性白高斯噪声 (AWGN) 信道中的性能。虽然其中已涉及了有关分组码的软判决和硬判决解码的若干实际算法，但为简明起见，我们不打算介绍其算法，只对卷积码的维特比解码算法作详细介绍，而对序列解码、反馈解码、堆栈算法只作简要叙述。我曾打算介绍随机编码方法以及分组码和卷积码的上边界问题，但我决定不这样做。如果这样做，本书就会太长了。

第六章介绍限带信道的数字通信问题，其中电话信道最有代表性。本章包括限带信道的信号设计、表征方法以及信道失真（它引起符号干扰）的影响。还详细讨论了为减少符号干扰的自适应均衡算法。另外也介绍了基于递归最小二乘方法的快速收敛



算法。因为目前这种方法实现起来价格便宜和设备合理。本章比较长，因为我们对其内容特别有兴趣，并且在限带信道中进行高速数据传输时必然涉及到符号干扰问题。

许多信道，尤其是无线信道对于所传输的信号呈现出时变的传输特性，对这种信道的表征以及对信号和接收机的设计问题是第七章研究的课题。重点研究存在衰落时对实现可靠传输来说，分集的重要性。最后，我们介绍并估计编码的增益。这里编码可看作是为获得分集效果的一种有效利用带宽的技术。

在本书最后一章（第八章），我们介绍了伪噪声（PN）和频率跳变（FH）扩谱信号。直到几年前，它们才被工程师们在设计军用通信系统时所注意。但是目前扩谱信号已被商用数字通信系统，特别是多用户多址传输系统所注意。

第二章至第五章的内容是基本的，无疑一学期研究生课程可以讲完它们，稍加快一些速度，教师将有足够时间把其余三章中的某一章也讲完。每章末尾的家庭作业是学习正文必不可少的部分，其中大多数习题是用来作为正文中所得结论的补充和扩展，供教师所用的题解手册可通过出版社索取。

在我的整个事业发展的过程中，有机会同许多知名学者一块工作并向他们学习。这里我要向R. 普赖斯（R. Price）博士、P. R. 德罗依尔汉（P. R. Drauilhet）先生和 P. E. 格林（P. E. Green）博士表示我感激之情。在我于麻省理工学院林肯实验室工作期间，他们在数字信号通过多径衰落信道和多路信号传输等方面给了我许多指导。我也感谢 D. W. 塔夫兹（D. W. Tufts）教授审查我的哈佛大学博士学术论文并指导我对限带信道的信号设计和均衡问题的研究。

在过去的十五年中，我也从在通用电话和电子公司（GTE）的谢瓦尼亚（Sylvania）与斯坦因（Stein）协作组工作的许多同事和朋友的密切合作中得益非浅，我与这两个工业部门的联系

对本书的选题及其描述方法是很有帮助的。我特别感谢 S. 斯坦因 (S. Stein) 博士、B. 巴罗 (B. Barrow) 博士、A. A. 吉奥达诺 (A. A. Giordano) 博士、A. H. 利弗斯奎 (A. H. Levesque) 博士、R. 格林斯潘 (R. Greenspan) 博士、D. 弗里曼 (D. Freeman) 博士和 P. H. 安德森 (P. H. Anderson)、D. 古德因 (D. Gooding) 及 J. 林德霍姆 (J. Lindholm) 等先生。还要特别感谢 D. 弗里曼博士对原稿的仔细审阅与有益的建议，这使得本书形式得以改进。原稿的各部分还由林如俭 (R. Lin)、周志畅 (T. Chou) 和 H. P. 戴尔嘎道 (H. P. Delgado) 审阅，他们提出了若干很有用的建议。T. 斯科霍夫 (T. Schonhoff) 博士提供了 CPFSK 的频谱特性曲线图，H. 吉本斯 (H. Gibbons) 提供了第七章曲线图中的数据，这些数据表示出了在分集情况下 PSK 和 DPSK 的性能。凌复云 (F. Ling) 提出了逆矩阵恒等式，可以简化第六章中最小二乘方点阵均衡器的推导。对这些同事的帮助我表示衷心的感谢。

最后，感谢我的妻子菲利娅 (Felia) 打印了全部 1000 页手稿并作了订正。她在完成这项工作的同时，还继续担任教学任务，并履行了作为家庭主妇和两个孩子母亲的责任。

约翰 G·普罗基斯

# 目 录

第一章 概率和随机过程 .....	1
1.1 概率 .....	1
1.1.1 随机变量、概率分布和概率密度 .....	7
1.1.2 随机变量的函数 .....	14
1.1.3 随机变量的统计平均 .....	20
1.1.4 某些有用的概率分布 .....	26
1.1.5 尾部概率的上边界 .....	44
1.1.6 随机变量之和与中心极限定理 .....	51
1.2 随机过程 .....	57
1.2.1 统计平均 .....	59
1.2.2 功率密度谱 .....	64
1.2.3 线性非时变系统对随机输入信号的响应 .....	66
参考文献 .....	70
习题 .....	71
第二章 数字通信系统和信息论基础 .....	75
2.1 数字通信系统模型 .....	76
2.2 信息的对数量度 .....	80
2.3 信源、信源模型和信源编码 .....	85
2.3.1 离散无记忆信源的编码 .....	86
2.3.2 模拟信源的编码 .....	90
2.4 信道模型和信道容量 .....	113
附录2A 列文森-杜宾算法 .....	124
参考文献 .....	127
习题 .....	129
第三章 带通信号和系统的表示法 .....	133
3.1 带通信号的表示法 .....	133

3.2	线性带通系统的表示法	136
3.3	带通系统对带通信号的响应	137
3.4	带通平稳随机过程的表示法	138
3.4.1	正交分量的性质	141
3.4.2	白噪声的表示法	142
3.5	数字调制信号的表示法	140
3.6	数字调制信号的频谱特性	148
附录3A	连续相位移频键控的功率密度谱	162
	参考文献	169
	习题	170
第四章	加性高斯噪声信道中的调制和解调	174
4.1	信号波形和信道特性的表示	175
4.2	加性高斯噪声中确知信号的最佳解调	177
4.2.1	加性白高斯噪声信道中二进制信号的传输	180
4.2.2	加性白高斯噪声信道中 $M$ 进制正交信号的传输	187
4.2.3	等相关波形 $M$ 进制的信号传输	195
4.2.4	$M$ 进制双正交信号传输波形	200
4.2.5	多相信号传输波形	201
4.2.6	$M$ 进制PAM信号传输波形	220
4.2.7	联合的多相多幅波形	215
4.2.8	数字信号传输方法的比较	233
4.2.9	相干解调的载波恢复	235
4.2.10	符号同步	243
4.3	在加性高斯噪声中对随机相位信号的最佳解调	248
4.3.1	加性白高斯噪声信道中二进制信号的非相干检测	250
4.3.2	加性白高斯噪声信道中 $M$ 进制正交信号的非相干检测	255
4.4	在加性白高斯噪声信道中多信道数字信号传输	258
附录4A	加性高斯噪声中对确知信号的最佳解调器	266
附录4B	二进制信号多信道接收的差错概率	273
附录4C	加性高斯噪声中对随机相位信号的最佳解调器	280

参考文献 .....	284
习题 .....	286
第五章 有效传输中的编码 .....	298
5.1 使用编码的数字通信系统模型 .....	298
5.2 线性分组码 .....	301
5.2.1 生成矩阵和一致监督矩阵 .....	303
5.2.2 某些专用的线性分组码 .....	308
5.2.3 循环码 .....	310
5.2.4 线性分组码的最佳软判决解码 .....	320
5.2.5 硬判决解码 .....	329
5.2.6 硬判决解码和软判决解码性能的比较 .....	336
5.2.7 线性分组码的最小距离边界 .....	342
5.2.8 非二进制分组码和级联分组码 .....	345
5.3 卷积码 .....	348
5.3.1 卷积码的传递函数 .....	357
5.3.2 卷积码的最佳解码—维特比算法 .....	364
5.3.3 软判决解码的差错概率 .....	368
5.3.4 硬判决解码的差错概率 .....	373
5.3.5 二进制卷积码的距离特性 .....	376
5.3.6 非二进制双 $k$ 码和级联码 .....	381
5.3.7 卷积码的其它解码算法 .....	386
参考文献 .....	391
习题 .....	395
第六章 存在符号间干扰和加性高斯噪声信道中的数字 信号传输 .....	401
6.1 限带信道的特性 .....	402
6.2 限带信道的信号设计 .....	412
6.2.1 无符号间干扰的限带信号设计—奈奎斯特准则 .....	413
6.2.2 具有可控符号间干扰（部分响应信号） 的限带信号设计 .....	418
6.3 存在符号间干扰和加性高斯噪声时的最佳解调器 .....	434

6.4	线性均衡	442
6.4.1	峰值失真准则和迫零算法	443
6.4.2	均方误差准则和均方误差算法	451
6.5	判决反馈均衡器	474
6.6	逐个符号概率均衡算法	480
6.7	最大似然序列估计与维特比算法	490
6.7.1	最大似然序列估计的性能	497
6.7.2	自适应信道估计器	511
6.8	自适应均衡的递归最小二乘方算法	514
6.8.1	递归最小二乘方(卡尔曼)算法	516
6.8.2	线性预测与点阵滤波器	521
6.8.3	递归最小二乘方点阵算法	525
6.8.4	梯度点阵均衡器	542
6.8.5	快速卡尔曼算法	549
附录 6A	乔雷斯基因式分解	554
	参考文献	556
	习题	562
<b>第七章</b>	<b>多径衰落信道中数字信号传输</b>	<b>569</b>
7.1	多径衰落信道的特性	570
7.2	信号特性对信道模型选择的影响	579
7.3	频率非选择性、慢衰落信道中二进制信号	583
7.4	多径衰落信道的分集技术	587
7.5	在频率选择性、慢衰落信道中数字信号传输	591
7.6	在频率非选择性、慢衰落信道中多相信号传输	611
7.7	通过频率非选择性、慢衰落信道 $M$ 进制正交信号传输	614
7.8	衰落信道中波形编码	625
7.8.1	线性二进制分组码软判决解码时差错概率	627
7.8.2	线性二进制分组码硬判决解码时差错概率	632
7.8.3	瑞利衰落信道卷积码的性能上边界	633
7.8.4	衰落信道中固定重量码和级联码	638
附录 7A	$M$ 相信号自适应接收差错概率	653

7A.1	$M$ 相信号通信系统数学模型	654
7A.2	相位 $\theta$ 的特征函数与概率密度函数	657
7A.3	慢瑞利衰落信道的差错概率	659
7A.4	非时变和莱斯衰落信道差错概率	663
	参考文献	668
	习题	671
<b>第八章</b>	<b>数字通信中的扩展频谱信号</b>	677
8.1	扩展频谱数字通信系统模型	679
8.2	伪噪声扩展频谱信号	680
8.2.1	解码器的差错率性能	684
8.2.2	伪噪声扩展频谱信号的某些应用	697
8.2.3	伪噪声序列的产生	704
8.2.4	伪噪声扩展频谱系统中窄带干扰的消除	709
8.2.5	脉冲干扰对伪噪声扩展频谱系统的影响	719
8.3	跳频扩展频谱信号	721
8.3.1	加性白高斯噪声的跳频扩展频谱信号的性能	724
8.3.2	跳频扩展频谱信号在局部通带干扰下的性能	727
8.3.3	以跳频扩散频谱信号为基础的码分多址系统	737
8.4	其他形式的扩展频谱信号	739
	参考文献	741
	习题	743
<b>附录一</b>	<b>本书英文缩写名词对照表</b>	747
<b>附录二</b>	<b>本书人名中译文对照表</b>	750

# 第一章 概率和随机过程

概率论和随机过程是设计数字通信系统的基本数学工具。本章内容对于表示信息源的统计模型、信息源输出数字化及表示数字信息传输信道的特性、设计用以处理信道中荷载信息信号的接收机以及评价通信系统性能等方面都是很重要的。对于这些丰富而有趣的内容，我们只选了主要和有限的部分。我们只介绍概率论和随机过程中的一些定义及基本概念，并且导出对于设计高效率的数字通信系统及评价其性能都很重要的一些结论。

我们考虑到大多数读者已具有概率和随机过程的初步知识，因此，对本章的论述仅作为复习。如果有一些读者没有初步知识，也可以在这一章中得到非常简要的介绍。这些读者还可再阅读一些与本章内容有关的著作，如参考文献〔1〕〔2〕〔3〕，这些著作是从工程角度论述的。

## 1.1 概 率

我们来研究一个实验，例如一个滚动的骰子，它有几种可能的结果。实验的样本空间  $S$  由所有可能结果的集组成。就骰子来说，

$$S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \quad (1.1.1)$$

式中整数 1 到 6 表示骰子六个面上圆点的数目。这六个可能的结果是实验的样点。一个事件是  $S$  的一个子集，它可以由任意数目的样点组成。例如事件  $A$  定义为

$$A = \{2, 4\} \quad (1.1.2)$$

事件  $A$  由结果 2 和 4 组成。事件  $A$  的补对立事件表示为  $\bar{A}$ ， $\bar{A}$  由



不包含在  $A$  内的所有  $S$  中的其他样点组成, 因此,

$$\bar{A} = \{1, 3, 5, 6\} \quad (1.1.3)$$

如果两个事件没有公共样点, 我们就认为这两事件是互不相容的, 也就是说如果一个事件的出现就会排除另一事件的出现。

例如, 如果规定  $A$  为式 (1.1.2), 而事件  $B$  规定为

$$B = \{1, 3, 6\} \quad (1.1.4)$$

那么  $A$  和  $B$  是互不相容事件。同样,  $A$  和  $\bar{A}$  是互不相容事件。

两个事件的和是另一个事件, 这个事件由这两个事件中的所有样点组成。例如规定事件  $B$  为式 (1.1.4), 规定事件  $C$  为

$$C = \{1, 2, 3\} \quad (1.1.5)$$

那么,  $B$  和  $C$  的和表示为  $B \cup C$ , 它是这样一个事件

$$\begin{aligned} D &= B \cup C \\ &= \{1, 2, 3, 6\} \end{aligned} \quad (1.1.6)$$

同样,  $A \cup \bar{A} = S$ , 其中  $S$  是整个样本空间或是必然事件。另一方面, 两个事件之交是由该两事件的公共点所构成。如  $E = B \cap C$  表示事件  $B$  和事件  $C$  之交, 事件  $B$  和  $C$  又分别由式 (1.1.4) 和 (1.1.5) 确定, 那么

$$E = \{1, 3\}$$

当两个事件是互不相容时, 则它们之交是零事件, 并用  $\phi$  表示。例如  $A \cap B = \phi$ , 以及  $A \cap \bar{A} = \phi$ 。我们可以将和与交的定义直接推广到两个以上的事件。

将  $A$  与包含在  $S$  内的每个事件联系在一起的是它的概率  $P(A)$ 。在说明事件的概率时, 我们采用一种公理化的观点, 即我们假定事件  $A$  的概率满足条件  $P(A) \geq 0$ 。我们还假定样本空间 (必然事件) 的概率是  $P(S) = 1$ 。而第三个假定涉及互不相容事件的概率, 假设  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 是样本空间  $S$  内一定数量 (也可能是无穷的) 的事件, 且有

$$A_i \cap A_j = \phi, \quad i \neq j = 1, 2, \dots$$