

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代声学科学与技术丛书

声呐信号处理引论

李启虎 著



内 容 简 介

声呐是目前用来进行水下观测、定位、识别和通信的主要设备,它在海洋开发中日益得到广泛的应用;而声呐工作状态的优劣,很大程度上取决于海洋水声环境和声呐信号处理技术。本书以简明扼要的方式,向读者介绍声呐信号处理的基本原理及一些具有实用价值的热点课题。

本书内容分为三篇:第一篇预备知识,介绍了声呐信号处理中常用的基本知识,从信号与系统理论入手,进一步介绍最佳估计与检测理论;第二篇声呐系统与波束成形理论,介绍了声呐系统设计的一般概念,对波束成形和数字式声呐的信号处理技术作了详细的描述;第三篇,用专题选讲的方式,针对水声工程技术的特点,就人们感兴趣的新技术和新概念作了简单介绍。

本书内容广泛、语言简练、层次分明,适合从事声呐系统研究的设计师、工程技术人员,以及有关专业的技术人员参阅,也可作为水声专业高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

声呐信号处理引论/李启虎著. —北京:科学出版社,2012

(现代声学科学与技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-034833-3

I. ①声… II. ①李… III. ①声呐通信—信号处理 IV. ①TN929.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 128007 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:朱光兰

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:21

字数:407 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

《声呐信号处理引论》初稿完成于 1983 年，本书第一次出版的时间是 1985 年，当时我正在美国普林斯顿大学作访问学者，到次年回国时才看到这本书。回想起当时利用业余时间，在斗室中挥汗写作的艰辛，颇为感慨。当时没有电脑，也没有先进的计算机软件支持专著的写作，与现在相比真是不可同日而语。

近 30 年来，声呐信号处理的理论与应用发展十分迅速，尤其是进入 21 世纪以后，海洋高科技已普遍成为大国优先发展、重点投资的领域。声呐技术的面貌已发生了很大变化。但是作为声呐设计和信号处理的基础性专著，本书仍有一定参考价值。

科学出版社的领导决定再次出版本书，我感到非常荣幸并表示感谢。在再版过程中我改正了已发现的若干错误，并修改了个别图，在内容上未作改动。

希望本书的再版仍能为从事声呐设计和信号处理的工程技术人员和管理专家提供帮助。

科学出版社的刘凤娟同志在本书再次出版的过程中做了大量的工作，我在此表示由衷的感谢。

欢迎读者对本书提出批评指正。

李启虎

2012 年 5 月

序

声呐信号处理是信号处理理论在水声领域中的应用，是一门对国防和国民经济的发展都有重要作用的边缘学科。对于从事声呐系统研制的设计师、工程技术人员来说，声呐信号处理理论乃是一门必修课；对于使用声呐的技术人员和海军指战员来说，大致了解声呐信号处理的基本概念及结果也是十分必要的。

由于声呐信号处理理论内容很多，尤其是数字信号处理技术迅速发展，不少新技术、新概念仍处于萌芽状态，从事实际工作的工程技术人员难以在短时期内了解这一理论的各个方面。

本书试图以比较简明的方式，向读者介绍声呐信号处理的基本理论及一些具有实际应用价值的正在研究中的课题。希望对于从事声呐研制和应用的科学工作者、工程技术人员以及海军指战员有所帮助。

中国科学院声学研究所所长汪德昭同志曾对本书的写作给予很大的支持，提出过宝贵的意见。本书的部分初稿曾由黄曾暘同志审阅，他的一些建议使本书无论在内容上还是在形式上均有所改进。对于这些支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于本人学识和实际经验的局限，本书一定有许多不妥之处，我期待着读者的批评与指正。

作 者

1983年2月

目 录

第一篇 预 备 知 识

第一章 概率论	3
一、样本空间与概率	3
二、随机变量与分布函数	11
三、随机变量的数字特征	16
四、大数定理和中心极限定理	24
五、随机过程简介	28
参考文献	33
第二章 信号与系统理论	34
一、信号与频谱	34
二、线性系统	47
三、信号的非线性运算	55
四、最佳估计理论与检测理论介绍	60
参考文献	66

第二篇 声呐系统与波束成形理论

第三章 声呐系统设计的一般概念	69
一、声呐系统的构成及特点	69
二、声呐方程	72
三、水声信道	78
四、海洋噪声	87
五、海洋中的混响	92
六、舰艇辐射噪声	97
七、声呐信号的最佳检测问题	102

八、主动声呐信号分析·····	111
参考文献·····	121
第四章 波束成形理论 ·····	123
一、波束成形的一般概念·····	123
二、线阵·····	129
三、圆阵与圆弧阵·····	136
四、加权与加档·····	142
五、基元离散分布的空间基阵·····	153
六、连续分布的基阵·····	160
七、普通波束成形的实现·····	166
参考文献·····	172
第五章 数字式声呐的信号处理 ·····	174
一、引言·····	174
二、采样与分层·····	177
三、数字滤波·····	187
四、快速傅里叶变换(FFT)·····	196
五、数字多波束系统·····	203
六、时域上波束成形的新方法·····	208
七、频域上的波束成形·····	214
八、自适应波束成形·····	218
参考文献·····	230

第三篇 专题选讲

第六章 目标方位角、距离和速度的估计 ·····	235
一、声呐系统中的参数估计问题·····	235
二、线阵与圆弧阵的分裂波束定向·····	243
三、互谱法精确定向系统·····	252
四、目标测距与测速的实现·····	258
五、被动测距声呐原理·····	262

六、对目标参数的自动判决	266
七、水声信道的起伏对主动声呐检测的影响	273
参考文献	280
第七章 声呐设计中的计算机模拟	282
一、系统的计算机模拟的必要性	282
二、随机信号的模拟	285
三、声呐环境场的模拟	293
四、波束成形的计算机模拟	296
五、后置积累的计算机模拟	302
六、其他常用算法	304
参考文献	312
附录	314
1. 常用数据	314
2. $1/K$ 倍频程	314
3. 速度换算	315
4. 长度换算	315
5. 常用分贝换算	315
6. 正态分布	316
7. $\text{sinc}(x)$ 函数表	317
8. 贝塞尔函数 $J_0(x)$ 和 $J_1(x)$	320
《现代声学科学与技术丛书》已出版书目	323

第一篇 预备知识

第一章 概 率 论

概率论是声呐信号处理理论中所用到的最基本的数学工具。因为声呐信号通常可以被看作是随机信号，所以对声呐信号的各种处理，从数学角度来看就是对随机信号进行运算及变换。这正是概率论所研究的对象。

声呐信号处理理论的迅速发展是把概率论、信息论、水声物理学等基本理论用于声呐系统统计的结果；反过来，声呐技术的发展又不断地提出新的课题，从而推动这些学科的研究工作。

本章我们将介绍声呐信号处理中所用到的概率论、数理统计和随机过程的基本概念^[1-5]。我们的重点是从实用的角度去解释那些主要的定理和结论，而不是这些定理本身的数学推导。

一、样本空间与概率

概率论是数学的一个分支，它研究的对象是随机事件的数量规律性。

自然界中有许多事件，在一定条件下可能出现也可能不出现，这种现象称为随机事件。例如，一个硬币有两面，一面是面值(数字)，另一面是图案(国徽)。我们随便掷出一个硬币，到底是数字朝上，还是图案朝上，事先并不知道。所以“掷出一个硬币图案朝上”就是一个随机事件。在声呐信号的检测中，也有大量的随机事件，如某一时刻有没有目标出现以及出现在哪一个方向等就是随机事件。

随机事件在一次观测中是否发生，我们事先并不知道。但这并不是说它是一种没有规律的现象。当观测次数很多时，随机事件的出现往往有一定的规律性。概率论就是研究这种规律性的数学分支。

为了用数学的语言来描述随机事件，我们先引进集合的概念。集合的概念在数学的各个分支中是常见的。例如在平面几何学中，“与一个已知点等距离的点的集合”是一个圆；在微积分学中，一个函数的定义域是一个数的集合。

在概率论中，集合的概念起着更基本的作用。我们对很一般的抽象集合和具体的特殊集合同样感兴趣。考虑以下的例子：

(a) 一个学院中的全体学生；

(b) 一个靶标上的全体弹着点；

(c) 一个声呐基阵上的所有换能器。

给上面这些例子建立一个数学模型，即对“一组事物”这个直观概念抽象化和一般化，就得到集合的概念。把构成集合的那些具体或抽象的事物称为样本点，而把样本点的全体称为样本空间。因此，样本点可以是一个学生、一个几何点的抽象。

今后，我们用大写英文字母 X 表示一个样本空间，它可能包含任意多个点，甚至无穷多个点。样本空间中的任意一个点用小写希腊字母 ω 来表示。全部样本点的任何一部分所构成的集合，都称作是 X 的一个子集合。由于已经规定了 X ，所以我们干脆称它为一个集合。一个集合的极端情况可以是 X 本身，或者是一个点子也没有的空集，我们以后用 A 来表示空集。

如果对任何给定的点能够讲出它是属于还是不属于一个特殊的集合 A ，那么集合 A 就完全确定了。属于或不属于 A 分别记为

$$\omega \in A, \quad \omega \notin A \quad (1.1)$$

如果 A 的每一点都属于 B ，那么 A 被包含在 B 中，是 B 的一个子集，我们用 $A \subset B$ 或 $B \supset A$ 来表示；如果两个集合 A 、 B 恰好有同样的点子，则它们是相同的，记作 $A=B$ 。

对集合进行运算可以产生另外一些集合，它们满足一些有关的法则。这些法则的证明是很容易的，所以下面我们只是把这些运算与有关法则罗列出来。

余集 集合 A 的余集是由不属于 A 的那些点所构成的集合，记作

$$A^c = \{\omega : \omega \notin A\} \quad (1.2)$$

和集 两个集合 A 和 B 的和集记作 $A \cup B$ ，它是至少属于 A 和 B 之一的点的集合，即

$$A \cup B = \{\omega : \omega \in A \text{ 或 } \omega \in B\} \quad (1.3)$$

交集 两个集合 A 和 B 的交集记作 $A \cap B$ ，它是同时属于两个集合的点所构成的集合，即

$$A \cap B = \{\omega : \omega \in A \text{ 同时 } \omega \in B\} \quad (1.4)$$

差集 集合 A 和集合 B 的差集记作 $A-B$ ，它是由属于 A 而不属于 B 的点所构成的集合，即

$$A-B = A \cap B^c = \{\omega : \omega \in A \text{ 同时 } \omega \notin B\} \quad (1.5)$$

图 1.1 给出了集合之间的相互关系的几个例子。

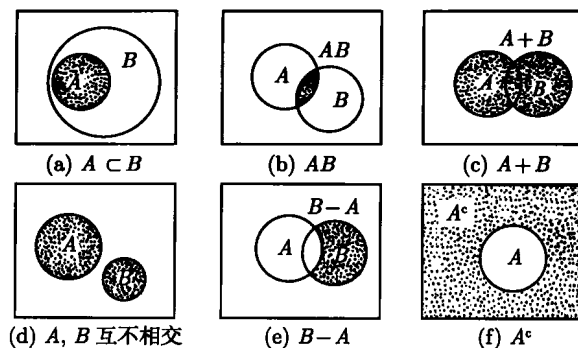


图 1.1 集合的相互关系及运算

为书写简单起见, 用 $A+B$ 来代替 $A \cup B$, 用 AB 代替 $A \cap B$ 。

集合的运算满足下列简单的规律:

交换律 加法和乘法都是可以交换的, 即

$$A+B=B+A, \quad AB=BA$$

结合律 加法和乘法都是可以结合的。即

$$A+B+C=(A+B)+C=A+(B+C)$$

$$ABC=(AB)C=A(BC)$$

分配律 加法对乘法的分配律是 $(A+B)C=AC+BC$; 乘法对加法的分配律是 $AB+C=(A+C)(B+C)$ 。

德摩根(De Morgan)律

$$(A+B)^c = A^c B^c, \quad (AB)^c = A^c + B^c$$

这些运算规则的证明可以通过和集、交集、差集和余集的定义去验证。

现在我们可以把随机事件的概念与集合的概念联系起来了。

我们用 X 表示某一试验的全体可能结果, 它就是样本空间; X 中的某一样本点 ω 就是试验的某一可能结果, 也称作基本事件。一个随机事件就是 X 中的某一集合 A 。

由于随机事件和集合之间建立的这种对应关系, 我们上面谈到的关于集合之间的运算及其有关法则都可以转换到随机事件上来。例如, $A+B$ 表示事件 A 和事件 B 中至少有一个发生; AB 表示事件 A 和事件 B 同时发生。

例 1 设一部声呐由甲、乙两个声呐员同时值班。令事件 $A_1 = \{\text{甲声呐员报警}\}$, $A_2 = \{\text{乙声呐员报警}\}$, 那么 $A_1 + A_2$ 表示“甲、乙两个声呐员中至少有一个报警”; $A_1 A_2$

表示“甲、乙两个声呐员同时报警”； $(A_1 A_2)^c$ 表示“甲、乙两个声呐员至少有一个不报警”。

读者还可以说出 A_1^c , A_2^c 以及 $A_1^c A_2^c$ 等的意义。

事件的概率

既然各事件出现的可能性有大有小,自然使我们想到该用一个数字来刻画事件 A 出现的可能性的。它就称为事件 A 的概率,记作 $P(A)$ 。

下面几种有关概率的定义是分别由它们所处理的问题中推导出来的,实际上也非常容易接受。

i) 概率的古典定义: 设某工厂生产的一批水听器共 550 个, 其中不合格的有 28 个。我们任取一个水听器其不合格的概率为 $28/550=0.0509$ 。换句话说, 如果样本空间 X 由 n 个样本点构成, 事件 A 由 m 个样本点构成, 并且每一基本事件的出现都是等可能性的, 那么事件 A 的概率为

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (1.6)$$

ii) 概率的几何定义: 假如我们随便地往一个长 3 米宽 3 米的正方形内扔石子, 在正方形内有一个半径为 1 米的圆(图 1.2 中的阴影部分), 问石子落入该圆的概率是多少?

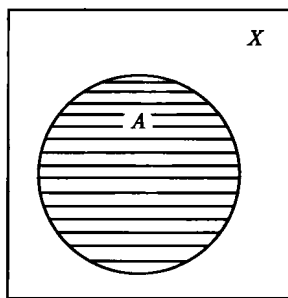


图 1.2 概率的几何定义的例子

在这个例子中, 样本空间 X 是正方形, 它的面积是 $3 \times 3 = 9(\text{米}^2)$ 。正方形内的圆是 X 内的一个集合 A , 它的面积近似等于 3.14米^2 。于是所求的概率 $P = 3.14/9 \approx 0.35$ 。

在这个例子中, 样本空间 X 包含了无穷多个样本点, 我们有

$$P(A) = \frac{A \text{ 的面积}}{X \text{ 的面积}} \quad (1.7)$$

例 2 设一个单频信号具有随机相位 φ ，那么样本空间就是 $[0, 2\pi]$ 。 φ 落在区间 $\left[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}\right]$ 内的概率是

$$P = \frac{\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6}}{2\pi} = \frac{1}{12}$$

iii) 概率的统计定义: 设一个射手在同一条件下重复射击了 n 次, 其中射中靶子 m 次, $m \leq n$ 。当次数 n 很大时, 我们可以说这个射手的命中率是 m/n 。这里的“命中率”实际上指的是他一次射中的概率。一般来说, 如果 $N_n(A)$ 是在 n 次重复试验中事件 A 出现的次数, 那么我们就定义一次试验中事件 A 出现的概率为

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_n(A)}{n} \quad (1.8)$$

前面提到的有关概率的三种定义来自三种不同的模型。下面我们把概率的概念建⽴在一个严格的数学基础上, 把三种定义统一起来。由于我们已经讨论过随机事件与集合的概念, 所以已具备给出概率的公理化定义的条件。

首先, 概率是结合或指定于一个集合的一个数, 使在某种意义上可以度量这个集合。因此可以说, 概率是集合的函数, 它的定义域就是样本空间中的随机事件所构成的那些集合族。

定义 在样本空间 X 上的概率测度 $P(\cdot)$ 是 X 上的子集的实值函数, 它满足下面三条公理:

i) 对每一集合 $A \subset X$, 函数值 $P(A)$ 非负, 即

$$P(A) \geq 0 \quad (1.9)$$

ii) 如果 A 和 B 是两个不相交的集合, 即 $AB = \emptyset$, 那么

$$P(A + B) = P(A) + P(B) \quad (1.10)$$

iii) 样本空间 X 本身的概率测度为 1, 即

$$P(X) = 1 \quad (1.11)$$

我们这里采用了一个记号 $P(\cdot)$, 它表示一个概率测度, 用它去度量集合 A , 得到它的概率 $P(A)$, 后者是一个具体的数。就好像我们拿尺子去量布, 尺子是一种具体的测度。

很容易验证我们前面提出的三种概率的定义都符合上面提到的三条公理。

从这三条公理出发, 我们可以推导出一些概率的运算规则。这些规则在今后计算概率时是很有用的。

i) 概率测度永远小于等于 1, 即对任何集合 A 有

$$P(A) \leq 1 \quad (1.12)$$

这个事实的证明是很简单的, 但是在证明的过程中却要用到全部公理。因为 $A + A^c = X$, 所以根据(1.10)式、(1.11)式有 $P(A) + P(A^c) = 1$, 于是 $P(A) = 1 - P(A^c)$, 再用一下(1.9)式便得到(1.12)式。

ii) 对满足 $A \subset B$ 的任何两个集合, 有

$$\begin{aligned} P(A) &\leq P(B) \\ P(B - A) &= P(B) - P(A) \end{aligned} \quad (1.13)$$

这个式子的证明是(1.12)式证明的翻版, 只不过这一次用 B 来担当 X 的角色。事实上, $B = A + (B - A)$, 再注意 A 与 $(B - A)$ 是两个不相交的集合, 就得到 $P(B) = P(A) + P(B - A)$, 移项得到(1.13)式。

iii) 对任意有限个互不相交的集合 $A_1, \dots, A_n$ 有

$$P(A_1 + \dots + A_n) = P(A_1) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (1.14)$$

只要多次使用(1.10)式, 便可得到(1.14)式。

iv) 对任意两个集合 A 与 B , 我们有

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB) \quad (1.15)$$

证明 利用等式 $A + B = A + (B - AB)$, 应用(1.10)式及(1.13)式, 便可得到(1.15)式。

例 3 设 X 表示一个换能器基阵的使用寿命所构成的样本空间。用 A 表示“使用寿命 ≥ 10 年”; 用 B 表示“使用寿命 < 5 年”。假定 $P(A) = 0.9$, $P(B) = 0.03$ 。问使用寿命大于或等于 5 年但小于 10 年的概率?

令 $C = \{5 \text{ 年} \leq \text{使用寿命} < 10 \text{ 年}\}$ 。根据德摩根律 $C = B^c A^c = (A + B)^c$ 。利用(1.13)式及(1.14)式, 我们有

$$\begin{aligned} P(C) &= P(B^c A^c) = P[(A + B)^c] = P[X - (A + B)] \\ &= P(X) - P(A + B) = 1 - [P(A) + P(B)] \\ &= 0.07 \end{aligned}$$

条件概率

在实际问题中, 除了要知道事件 A 的概率 $P(A)$ 之外, 有时还需要知道“在事件 B 已出现”的条件下, 事件 A 出现的概率。这个概率记作 $P(A|B)$ 。由于增加了新的

条件, 所以 $P(A)$ 一般来说与 $P(A|B)$ 不一样。例如, 从标号 1、2、3、4 的四个球中, 等可能地任取一球, 令 $A = \{\text{得标号为2的球}\}$, 那么 $P(A) = 1/4$; 如果已知事件 $B = \{\text{得标号为偶数的球}\}$ 已出现, 那么这时事件 A 出现就只有两种可能, 或得 2 号, 或得 4 号。所以 $P(A|B) = 1/2$ 。

应当如何定义 $P(A|B)$ 呢? 我们从古典概率的模型来看一下。设 X 由 n 个样本点构成, B 包含 m 个样本点, AB 包含 k 个样本点。那么 $P(A|B) = \frac{k}{m} = \frac{k/n}{m/n} = \frac{P(AB)}{P(B)}$ 。这就启发我们对条件概率测度 $P(\cdot|B)$ 下这样的定义:

定义 设 B 是样本空间 X 中的一个集合, $P(B) > 0$, 在事件 B 已出现的条件下, 事件 A 出现的条件概率 $P(A|B)$ 定义作

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} \quad (1.16)$$

容易证明, $P(\cdot|B)$ 满足概率测度的三条公理。因此凡是对概率所证明的结果也都适用于条件概率。

下面三条定理在计算条件概率时是常用的。

定理 1(乘法定理) 设 $P(B) > 0$, 那么

$$P(AB) = P(B)P(A|B) \quad (1.17)$$

这个定理是不证自明的, 因为它就是(1.16)式的另一种写法。

定理 2(全概率公式) 如果 $B_1, \dots, B_n$ 是 n 个互不相交的集合, $\sum_{i=1}^n B_i = X$, 那么对任何集合 A 有

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i)P(A|B_i) \quad (1.18)$$

证明 因为 $A = AX = AB_1 + \dots + AB_n$, 利用(1.10)式便得到(1.18)式。

定理 3(贝叶斯公式) 设 $B_1, \dots, B_n$ 是 n 个不相交的集合, $\sum_{i=1}^n B_i = X$, 那么对任一事件 A , 只要 $P(A) > 0$, 就有

$$P(B_i|A) = \frac{P(A|B_i)P(B_i)}{\sum_{k=1}^n P(A|B_k)P(B_k)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.19)$$

证明 由条件概率的定义及全概率公式得到

$$P(B_i | A) = \frac{P(AB_i)}{P(A)} = \frac{P(A | B_i)P(B_i)}{\sum_{k=1}^n P(A | B_k)P(B_k)}$$

贝叶斯公式说明了如何由条件概率 $P(A | B_k)$ 去计算另一种条件概率 $P(B_i | A)$ 。

例 4 设甲、乙两人轮流使用一台仪器，甲用时损坏的概率为 0.1，乙用时损坏的概率为 0.2。若现在发现仪器已损坏，问是甲损坏的概率是多少？

令 $B_1 = \{\text{甲使用仪器}\}$, $B_2 = \{\text{乙使用仪器}\}$, $A = \{\text{仪器损坏}\}$ 。

按上面的条件 $P(B_1) = P(B_2) = 1/2$; $P(A | B_1) = 0.1$, $P(A | B_2) = 0.2$ 。所求的概率是

$$P(B_1 | A) = \frac{P(B_1)P(A | B_1)}{P(A)} = \frac{0.5 \times 0.1}{0.5 \times 0.1 + 0.5 \times 0.2} = 1/3$$

条件概率的计算在日常生活中也是有用的。例如，一个单位有 30 个人，分到两张有奖储蓄的彩票，由 30 个人抽签。第一个去抽的人，抽中的概率为 $2/30=1/15$ ，第二个人去抽就不一样了。如果第一个人已抽中，那么第二个人抽中的概率为 $1/29$ ；如果第一个人还没有抽中，那么第二个人抽中的概率为 $2/29$ 。读者可用全概率公式去计算一下，到底是先抽好还是后抽好。

在声呐信号处理理论中，条件概率的概念也是经常用到的。例如，声呐在检测目标时，我们所关心的虚警概率与检测概率就是一种条件概率。事实上

虚警概率 = $P(\text{判断有目标} | \text{实际上无目标})$

检测概率 = $P(\text{判断有目标} | \text{实际上有目标})$

我们将在以后的有关章节中讨论如何计算这两个重要的概率。

事件独立性的概念

我们再来介绍概率论中最重要的概念之一——事件独立性的概念。如果事件 B 的出现不影响事件 A 出现的概率，我们就说事件 A 与 B 是独立的。用数学式子来表示就是 $P(A) = P(A | B)$ ，或者按(1.17)式，写成 $P(AB) = P(A)P(B)$ 。也就是说，两个事件同时发生的概率等于它们各自概率的乘积。

要注意，这里所给出的事件独立性的概念与我们平常所理解的“没关系”、“不相关”是有区别的。我们将在叙述随机变量时更详细地阐明独立性的概念。在后面几节再解释声呐信号处理中用到的“不相关”概念与独立性概念之间的内在联系。

例 5 设一部声呐的输出端由 30 个通道构成，只要某一个通道的输出超过事先确定的电平 Z_0 就报警，如果每一通道的虚警概率是 0.01，并且假定各通道的报警是相互