



全国水文勘测技能培训系列教材

实用水文统计

水利部水文局 组织编写
周建康 主 编
王晓平 李 帆 副主编
陈松生 主 审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国水文勘测技能培训系列教材

实用水文统计

水利部水文局	组织编写
周建康	主 编
王晓平 李 帆	副主编
陈松生	主 审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是“全国水文勘测技能培训系列教材”的分册之一，系统介绍概率统计方面的基本知识和水文应用。全书共分9章，内容包括绪论、事件与概率、随机变量及其分布、随机变量的数字特征、极限定理和抽样分布、水文频率计算、统计推断、回归分析和误差理论基础及应用。每章均有小结、思考与练习。

本书力求体现职业培训特点，原理简明，深入浅出，示例丰富，宜教宜学。本书可作为水文职工技术技能培训用教材，也可供从事水利工作的技术人员及大中专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用水文统计 / 周建康主编；水利部水文局组织编写. — 北京：中国水利水电出版社，2017.6
全国水文勘测技能培训系列教材
ISBN 978-7-5170-5580-8

I. ①实… II. ①周… ②水… III. ①水文统计—教材 IV. ①P333.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第160747号

书 名	全国水文勘测技能培训系列教材 实用水文统计 SHIYONG SHUIWEN TONGJI
作 者	水利部水文局 组织编写 周建康 主编 王晓平 李帆 副主编 陈松生 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16印张 379千字
版 次	2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编 委 会

主 任	林祚顶	杨诚芳				
副 主 任	张建新	周济人				
委 员	周国树	熊亚南	罗国平	黄红虎	朱春龙	
	周建康	王晓平	李 里	陈松生	宋政峰	
	马 倩	李正最	阴法章			
办 公 室	张海翎	李 帆	董秀颖	李 静	李 薇	

主 编 单 位

水利部水文局
扬州大学

致 谢 单 位

长江水利委员会水文局
黄河水利委员会水文局
淮河水利委员会水文局
珠江水利委员会水文局
太湖流域管理局水文局
天津市水文水资源勘测管理中心
辽宁省水文局
黑龙江省水文局
吉林省水文水资源局
上海市水文总站
江苏省水文水资源勘测局
浙江省水文局
安徽省水文局
河南省水文水资源局
湖北省水文水资源局
湖南省水文水资源勘测局
广西壮族自治区水文水资源局
贵州省水文局
陕西省水文局
甘肃省水文局
青海省水文局
水利部南京水利水文自动化研究所

序

为满足我国经济社会发展对水文的新要求，近年来水文服务范围不断扩大，水文现代化建设突飞猛进，水文监测能力不断提升，水文的基础作用和支撑能力明显增强，我国的水文事业取得了跨越式的发展。

水利部一直以来高度重视水文人才队伍建设，持续不断地开展人才培养和培训工作，不断提升水文队伍素质。近年来，随着水文事业不断发展，水文先进技术和仪器设备不断得以应用，在新形势、新需求下，水文人才培养尤为重要。为适应新时期水文事业的发展需求，2014年伊始，在水利部人事司的指导下，水利部水文局主持并启动了水文勘测技能培训系列教材的编撰工作。

为使该系列教材更有针对性，更具实用性，水利部水文局联合扬州大学在全国水文系统进行了广泛调研，又邀请了数十位专家、教授和技术能手，对水文勘测工作和任务进行了深入的分析研究，参考借鉴了国际上流行的能力本位教育模式（Competency Based Education，简称CBE），按照我国人力资源和社会保障部组织制订的国家职业技能标准《水文勘测工》的有关要求，结合近年来水利部人事司、水利部水文局在扬州大学联合主办的水文职业技能培训情况和我国水文职工队伍现状，特别是根据新时期水文勘测工作所承担的职责和具体任务，编写了水文勘测技能培训教学的课程体系框架，以及各门课程教材的编写大纲。在此基础上，按计划编撰出版各门课程的教材。

这套培训教材体系完整，在阐述应知的理论知识基础上，突出实践与应用，突出新技术、新方法、新设备、新仪器的应用，针对性强，并具有一定的前瞻性，宜教宜学，紧密贴合水文勘测岗位情况，能满足新技术发展的要求，适用于水文行业职业教育和在职职工培训，也适用于大专院校相关专业师生学习参考，并可作为全国水文勘测技能竞赛培训教材。

希望这套培训教材的面世，能为全国水文职工培训和自学创造更好的条件，促进我国水文行业优秀人才不断涌现，推动我国水文事业不断发展。

编委会

2016年3月

前 言

《实用水文统计》是“全国水文勘测技能培训系列教材”的分册之一。本系列教材的编撰，以提高技术、技能为主旨，力图反映最新科技的发展，贯彻执行新的技术标准，突出新技术、新方法、新设备、新仪器的应用；理论以必需、够用为度，突出实践与应用，适当拓展，具有一定的前瞻性；循序渐进，图文并茂，示例丰富，宜教宜学。

本教材与以往相关的水文统计教材相比，在内容上有很大调整。考虑到培训教材特点，将一般教材单独成章的多元随机变量及其分布并入第3章随机变量及其分布，作为其中一节；水文频率计算单独成章，强化具体的水文应用；参数估计的数理统计方法和假设检验合为统计推断；增加了误差理论基础及应用的内容和应用实例。教材内容充分考虑当前水文职工的学历和专业结构，淡化数学理论和公式推导，突出水文统计方法在水文工作中的实际应用。教材增加了Excel软件的水文应用，利用其统计函数和数据分析的功能，解决水文统计中样本统计参数计算和回归分析计算等，计算简便实用。

本分册共分为9章。第1章绪论，第2章事件与概率，第3章随机变量及其分布，第4章随机变量的数字特征，第5章极限定理和抽样分布，第6章水文频率计算，第7章统计推断，第8章回归分析，第9章误差理论基础及应用。每章均有小结、思考与习题。

本分册由扬州大学周建康主编，水利部水文局王晓平、扬州大学李帆任副主编，水利部水文局魏延玲、李静参加编写。扬州大学研究生郭佳香、赵诣、薛辰影参与了部分资料收集整理工作。本分册由水利部长江水利委员会水文局陈松生担任主审。

本分册的编写得到多方指导、支持与帮助。水利部水文局和扬州大学水利与能源动力工程学院予以精心组织；水利部水文局张建新处长、上海市水文总站宋政峰总工、江苏省水文水资源勘测局马倩、辽宁省水文局李里对本书的编写给予了详细指导和建议；江苏、上海、辽宁、陕西、贵州、甘肃、青海等省（直辖市）水文局（水文总站）提出了许多宝贵建议；扬州水文局王永东局长、长江水利委员会水文局中游局局长助理罗兴提供了计算实例资料；扬州大学杨诚芳教授在教材编写的各个环节均给予了具体指导；中国水

利水电出版社李亮分社长、刘佳宜编辑对分册的编辑和出版给予了大力支持。在此，一并表示诚挚感谢。

在编写中，本分册的编撰参考和引用了一些专著、教材和技术文献，在书中参考文献中都尽量注明出处，但难免有遗漏，在此谨向所有原作者表示谢意。

由于编者水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请专家和广大读者批评指正。

编 者

2017年6月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水文现象与统计规律	1
1.2 水文统计学的产生与发展	1
1.3 水文统计在水文工作中的地位	2
本章小结	2
思考与练习	3
第 2 章 事件与概率	4
2.1 随机试验与事件	4
2.2 概率的定义与性质	8
2.3 条件概率和事件的独立性	11
本章小结	15
思考与练习	15
第 3 章 随机变量及其分布	17
3.1 随机变量与分布函数	17
3.2 离散型随机变量	18
3.3 连续型随机变量	23
3.4 多元随机变量及其分布	32
3.5 随机变量函数的分布	39
本章小结	45
思考与练习	46
第 4 章 随机变量的数字特征	48
4.1 数学期望	48
4.2 方差与变差系数	51
4.3 偏态系数与峰度系数	54
4.4 矩	55
本章小结	56
思考与练习	57

第 5 章 极限定理和抽样分布	59
5.1 极限定理	59
5.2 抽样分布	63
5.3 几种重要统计量的抽样分布	75
5.4 顺序统计量及分布	77
本章小结	78
思考与练习	79
第 6 章 水文频率计算	81
6.1 概述	81
6.2 频率曲线	83
6.3 总体参数估计的适线法	90
6.4 有特异值时的频率计算	93
本章小结	98
思考与练习	98
第 7 章 统计推断	100
7.1 概述	100
7.2 参数的点估计	100
7.3 参数的区间估计	105
7.4 假设检验	107
7.5 非参数的假设检验	117
7.6 抽样误差	124
本章小结	126
思考与练习	127
第 8 章 回归分析	129
8.1 基本概念	129
8.2 线性回归数学模型	130
8.3 经验线性回归方程	131
8.4 回归分析的统计检验	136
8.5 非线性回归	144
8.6 回归分析应用中的常见问题	147
本章小结	148
思考与练习	149
第 9 章 误差理论基础及应用	152
9.1 误差的基本概念	152
9.2 随机误差	154
9.3 系统误差	159
9.4 粗大误差	165

9.5 误差的传播与综合	167
9.6 测量的不确定度	171
9.7 流量测验不确定度计算实例	179
本章小结.....	201
思考与练习.....	202
附录 A 常见分布函数表	204
附录 B 排列和组合	233
附录 C Γ 函数	236
附录 D Excel 中常用的统计函数	238
参考文献	242

第 1 章 绪 论

1.1 水文现象与统计规律

水文现象是指地球上的水受外部作用而产生的永无休止的运动形式，即降雨、入渗、径流、蒸发等现象的统称。水文现象受到复杂因素的影响，各因素不断变化和相互作用，因此表现出随机性的特征。俗话说“天有不测风云”，说明很久以前，人们就发现天气与气候现象变化万千，影响因素复杂多样，难以准确推断。与天气现象类似，水文现象也具有这样的特点。例如，某河流断面下一个年份的最大流量、最高水位及最小流量、最低水位等数值及其发生时刻不能够准确预测。换句话说，目前还无法找到一个准确预报未来河流水文特征值的确定性方法。水文现象的发生发展过程都存在着一定的偶然性，水文现象的随机性，无疑增大了水资源保护的难度和复杂性。

概率和统计作为数学领域的一个重要分支，专门研究随机的现象，与现实世界有着密切的联系。随机现象的个别观察或试验结果虽然是毫无规律，但通过大量观察，对资料的收集、整理和分析，人们渐渐发现，随机现象也遵循着某一种规律，随机现象所遵循的规律称为统计规律。概率论和数理统计就是研究随机现象统计规划的数字分支。概率统计方法以大量的观察试验为基础，虽然不能准确预测随机现象的个别结果，但能估计随机现象的总体特征。采用概率统计方法，可以避免由于过多因素的制约而使个别现象的处理过于复杂，转而直接研究大量观察的统计结果。这种方法不仅能对随机现象的特性作出科学的预测，还有助于揭示各种现象间的因果关系。

水科学技术中应用概率统计方法的一个重要实例是通过洪水（暴雨）的频率分析，来研究具有一定超过频率的洪水（暴雨）值，以此为水利工程规模的设计提供依据。随着科学技术的发展，水科学技术中应用概率统计方法的重点将转移到对水资源及水资源工程、措施的管理运用方面，即通过水文预报、预测来获取最大的运行效益或最大限度地减少灾害损失。

1.2 水文统计学的产生与发展

由于水文现象的随机性，概率统计方法在水文学的各个方面都有广泛的应用。比如水文测验中的站网规划和测验误差的分析等，水文水资源分析计算中的水量平衡计算、水利工程的设计标准以及水文预报中的预报方案制定等。通常，把水文学中的概率统计方法称为水文统计法，通过应用水文统计法来解决水文问题就逐渐形成了水文统计学科。

水文统计法的使用开始于 1880—1890 年，最初大都应用纯经验的历时曲线，即经验频率曲线。后来霍顿（Horton）在 1896 年的径流研究中首先使用了正态分布，海

森 (Haizen) 注意到了资料的不对称性, 而选用了非对称的对数正态分布。随着水文统计学的发展, 越来越多的概率统计方法被应用到水文现象的研究中, 比如我国常用的 $P-III$ 型分布, 研究极值的耿贝尔分布等, 特别是在分布参数的估计方面提出了许多方法, 大大推动了水文统计学的发展。

我国水文统计方法大约始于 20 世纪 30 年代, 但由于历史原因以及水文资料的匮乏, 几乎没有什么发展。新中国成立以后, 我国水文工作者广泛学习应用水文统计学的理论和方法, 有效地解决了许多水文分析计算问题。1955 年 3 月, 北京水利科学研究院水文研究所组成洪水频率研究组, 对频率方面的理论和方法进行了研究, 并搜集了全国各地的水文资料进行分析论证, 于 1956 年提出了初步总结报告, 并于 1957 年修订成为《暴雨及洪水频率计算方法的研究 (初稿)》, 这是我国第一篇比较全面叙述频率问题的报告。1959 年 5 月出版的金光炎的专著《水文统计原理和方法》系统地阐述了水文分析中常用的概率论与数理统计基本概念和理论, 对我国水文科技人员普及和提高水文统计知识曾起过积极作用。1981 年 6 月丛树铮主编的《水文学的概率统计基础》详细介绍了随机模拟技术及其在水文学中的应用。王俊德、黄振平和陈元芳分别于 1992 年和 2011 年编写出版了《水文统计》《水文统计学》教材, 对我国水文统计学科的发展和教学起到了积极的推动作用。

应当指出的是, 在水文现象中, 起主导作用的依然是物理规律, 而不是统计规律。概率统计方法是一种数据的描述方法, 而不是一种确定因果关系的方法。因此在研究水文现象时, 必须把概率统计法和物理成因分析方法密切结合起来, 只有这样才能更深入地研究水文现象的客观规律和正确运用水文统计的分析结果。

可以展望, 随着水利事业的快速发展, 水文统计将会有新的发展。

1.3 水文统计在水文工作中的地位

水文统计是一门专业基础课程, 其理论性较强, 它主要为水文测验、水文预报、水文水资源分析计算等工作提供必要的概率统计基础知识。水文统计的理论和方法同时也是水文研究和实践的有力工具。

本教材主要针对一线水文勘测工作中经常遇到的实际问题, 介绍概率论、数理统计和误差分析的基本内容。本教材不同于一般的概率论和数理统计教材, 不强调数学推导和证明, 重点是概率统计方法在水文工作中的实际应用, 在统计推断和误差分析中增加了水文流量测验应用实例, 并介绍了 Excel 的统计函数在水文统计中的应用。

本 章 小 结

本章主要介绍了水文现象和水文现象的随机性, 简单介绍了水文统计学的发展过程和水文统计在水文工作中的地位。通过本章的介绍, 读者可以对水文统计学有一个初步的认识, 为后续的课程学习明确方向。

思考与练习

- 1.1 水文现象具有什么特性？
- 1.2 概率论与数理统计研究的对象是什么？
- 1.3 什么是随机现象的统计规律？
- 1.4 结合自身实际，列举工作中与水文统计有关的内容。

第2章 事件与概率

概率论是研究和揭示随机现象统计规律的一门学科。本章主要介绍随机现象、随机事件、概率的基本概念，着重介绍事件的关系和运算，以及随机事件的概率计算公式，为概率统计方法在水文中的应用提供理论基础。

2.1 随机试验与事件

2.1.1 随机现象

从观测到的某一个现象是否能够准确进行预测的角度，将自然现象和社会现象归纳为两种类型：一类现象是在某种条件下，其结果是可以预测的，我们称之为必然现象。比如，在标准大气压下，将水加热到 100°C ，则水必然会沸腾，向上抛一块石头，石头必然会落下。这些现象都可以根据自然规律，准确地预测到下一秒将会发生什么样的结果。另外一类现象，称为随机现象或偶然现象。这类现象会出现多个结果，但具体出现哪一个结果是无法准确预测的。比如，某条河流下一个年度的最大流量的大小，某地区 8 月的降水总量等。之所以会有随机现象的存在，是因为这些现象往往受到很多偶然因素的影响，从而使得准确地预测其结果变得不可能。水文现象如水位、流量、降水等，因其影响因素众多，而且它们都具有偶然性，均无法准确预测。水文现象具有随机性，可以使用概率统计方法来分析其统计规律。

2.1.2 随机试验

在一定条件下，对自然现象和社会现象进行的观测、调查和试验，以了解其特性和变化规律的活动都称为试验。

如果一个试验的结果仅由试验条件决定，则把这类试验称之为确定性试验。另有一类试验，在相同的条件下，其试验结果是不确定的，即试验结果具有随机性。若一种试验满足下列 3 个条件：①试验可以在相同条件下重复进行；②试验的结果不止一个，并且所有结果都是预先知道的；③试验前并不知道哪一种结果会发生。则称之为随机试验，简称试验，用符号 E 表示。

【例 2.1】 掷一枚色子并观察其点数。这是一个随机试验。因为掷色子可以重复进行；所有可能结果是已知的，只可能出现 1 点、2 点、……、6 点这 6 种情况；每次掷色子之前不能确定将会出现哪一种点数。

【例 2.2】 观测某地汛期（5—9 月）降雨量，这也是一个随机试验。因为每年汛

期(5—9月)的降雨量都可以观测;设该地汛期的降雨量不会低于 P_{\min} ,也不会高于 P_{\max} ,则降雨量 P 的所有可能取值为 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 区间;而在每年观测之前却不能确定该年的 P 是多少。

在水文工作中,对某河流断面的年最大洪峰流量、年最高水位或对某地区一定时段内的降雨量、蒸发量等水文要素的观测,都可以看成是随机试验。

2.1.3 随机事件

随机试验中,可能发生也可能不发生的事情称为该随机试验的随机事件,简称事件,通常用大写字母 A, B, C, \dots 表示。而在随机试验中,每一个可能的结果(又称为样本点,记作 ω)称为基本事件。基本事件可以看做是试验中不能再分解的事件,而由若干个基本事件组成的事件称为复合事件。

每次试验,有且仅有一个基本事件发生,基本事件的全体则构成基本空间(又称为样本空间),记作 Ω 。

在[例2.1]中,共有6个基本事件:“出现1点”“出现2点”……“出现6点”,它们都是不可再分的事件。而“出现奇数点”“出现的点数大于4点”等都是复合事件。

设 $\omega_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 表示事件“出现 i 点”, A 表示“出现奇数点”, B 表示“出现的点数大于4点”,则

$$A = \{\omega_1, \omega_3, \omega_5\}$$

$$B = \{\omega_5, \omega_6\}$$

事件 A 由3个基本事件组成,当且仅当 $\omega_1, \omega_3, \omega_5$ 中的一个出现时,事件 A 才发生;反之,若 A 发生了,则表明它所包含的基本事件 $\omega_1, \omega_3, \omega_5$ 中有一个发生了。

在[例2.1]中,基本空间

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

在[例2.2]中,以 C 表示“汛期雨量大于300mm”, D 表示“汛期雨量在300~500mm之间”等都是随机事件。若用 P 表示该地汛期(5—9)月的降雨量,则基本事件有无限多个,它可以取值为 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 中任何一个数值,所以其基本空间为

$$\Omega = \{P | P_{\min} \leq P \leq P_{\max}\}$$

特别地,在每次试验中一定发生的事件称作必然事件,仍记为 Ω , [例1.2]中“汛期雨量在 $(0, \infty)$ 范围内”是必然事件;每次试验中一定不发生的事件称为不可能事件,记为 \emptyset , [例2.1]中“色子的点数小于0”是不可能事件。显然,必然事件和不可能事件都是对确定性现象试验的结果,为了研究和讨论问题方便,我们通常把必然事件和不可能事件也看做随机事件,即把他们当做随机事件的两个极端情况。

从上面的例子中,基本空间中的基本事件可以是有限多个,也可以是无限多个。以集合论的观点,对于某一随机试验 E ,基本空间 Ω 是基本事件全体的集合。随机事件是集合的一个子集,必然事件就是基本空间,不可能事件就是空集 \emptyset 。

2.1.4 事件的关系及运算

在水文工作中,很多时候需要研究相同条件下的多个事件,以及事件之间的关系。比

如一场洪水，它其实包含了洪峰流量、洪水总量和洪水历时 3 个事件；一个流域的洪水包括了各个支流的洪水以及上下游的洪水。因此，详细分析事件之间的关系是有必要的，不但可以更好地理解事件的本质，简化问题，还可以进行复杂事件的概率计算。

1. 包含关系

若事件 B 发生，必然导致事件 A 发生，则称事件 A 包含事件 B，记为 $A \supset B$ 或 $B \subset A$ 。如图 2.1 (a) 所示，其中矩形 Ω 表示基本空间。如果 $A \supset B$ 且 $A \subset B$ ，则 A 与 B 等价，此时图 2.1 (a) 中 A 与 B 重合，记为 $A=B$ 。

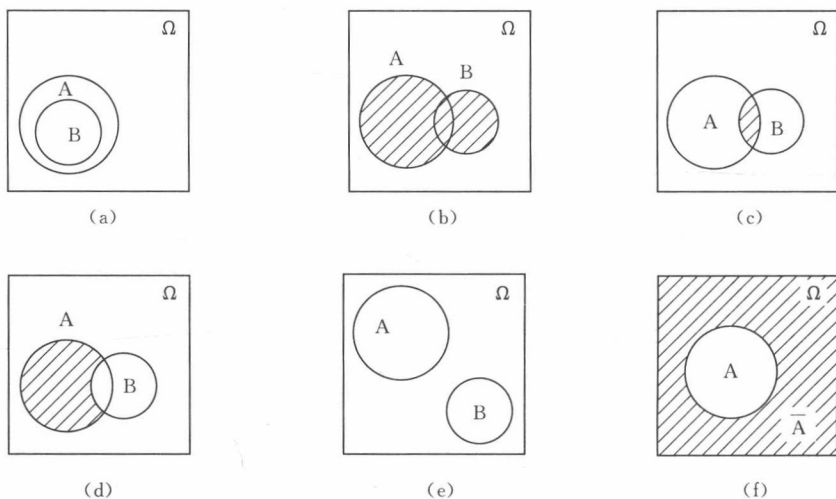


图 2.1 事件之间的关系

【例 2.3】 设随机试验 E 为某雨量站观测雨量，则该随机试验的基本空间 $\Omega = \{\text{雨量大于等于 } 0\}$ ，若事件 $A = \{\text{雨量小于 } 50\text{mm}\}$ ，事件 $B = \{\text{雨量小于 } 20\text{mm}\}$ ，则 $A \supset B$ 。

【例 2.4】 设随机试验 E 为掷一枚色子并观察其点数，则该随机试验的基本空间 $\Omega = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，若事件 $A = \{2, 4, 6\}$ ，事件 $B = \{2, 4\}$ ，则 $A \supset B$ 。

2. 事件的和

若事件 C 表示事件 A 与事件 B 至少有一个发生，则称事件 C 为事件 A 与事件 B 的和，记为 $C = A + B$ 或 $C = A \cup B$ 。如图 2.1 (b) 所示，图中阴影部分为事件 A 与事件 B 的和事件 C。特别地， $A + \Omega = \Omega$ ， $A + \emptyset = A$ ， $A + A = A$ ，若有 $A \supset B$ ，则 $A + B = A$ 。

【例 2.5】 在 [例 2.3] 中，事件 $A = \{\text{雨量小于 } 50\text{mm}\}$ ，事件 $B = \{\text{雨量大于 } 20\text{mm 且小于 } 70\text{mm}\}$ ，则 $A + B$ 表示事件 $\{\text{雨量小于 } 70\text{mm}\}$ 。

【例 2.6】 在 [例 2.4] 中，若事件 $A = \{2, 4, 6\}$ ， $B = \{2, 4, 5\}$ ，则 $A + B$ 表示事件 $\{2, 4, 5, 6\}$ 。

事件和的概念可以从两个事件推广到有限多个事件的和。若事件 B 表示事件 A_1, A_2, \dots, A_n 中至少有一个事件发生，则 $B = A_1 + A_2 + \dots + A_n$ ，或记为 $B = \sum_{i=1}^n A_i$ ，也可记为 $\bigcup_{i=1}^n A_i$ 。