

工程中的概率概念

——在土木与环境工程中的应用

(原著第二版)

[美] 洪华生 邓汉忠 著
陈建兵 彭勇波 刘 威 艾晓秋 译
李 杰 校



中国建筑工业出版社

工程中的概率概念

——在土木与环境工程中的应用

(原著第二版)

[美] 洪华生 邓汉忠 著
陈建兵 彭勇波 刘 威 艾晓秋 译
李 杰 校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2016-8963 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程中的概率概念——在土木与环境工程中的应用
(原著第二版)/(美) 洪华生, (美) 邓汉忠著; 陈建兵等
译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-112-20049-8

I. ①工… II. ①洪… ②邓… ③陈… III. ①概
率统计-应用-土木工程-研究 ②概率统计-应用-环境工
程-研究 IV. ①O211 ②TU ③X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 260657 号

Probability Concepts in Engineering; Emphasis on Applications to Civil and Envi-
ronmental Engineering, Second Edition/Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang,
ISBN 978-0-471-72064-5

Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc.

Chinese Translation Copyright ©2017 China Architecture & Building Press

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition Published by John Wiley & Sons, New
York, Chichester, Brisbane, Singapore and Toronto. No part of this book
may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley &
Sons Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and
illegal.

没有 John Wiley & Sons, Inc. 的授权, 本书的销售是非法的

本书经新加坡 John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd 出版公司正式授权翻译、出版

责任编辑: 赵梦梅 董苏华

责任校对: 王宇枢 李美娜

工程中的概率概念——在土木与环境工程中的应用 (原著第二版)

[美] 洪华生 邓汉忠 著

陈建兵 彭勇波 刘威 艾晓秋 译
李杰 校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 27 字数: 669 千字

2017 年 8 月第一版 2017 年 8 月第一次印刷

定价: 99.00 元

ISBN 978-7-112-20049-8

(29523)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

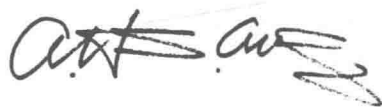
中译本前言

由中国同济大学的李杰教授和陈建兵教授两位结构可靠度与风险管理领域的国际著名学者领衔、已将我们的著作《工程中的概率概念——在土木与环境工程中的应用》第 I 卷第 2 版翻译为中文，我和合著者对此深感荣幸。我们衷心感谢他们在翻译和校对过程中付出的辛勤努力。

很早以来，我和合著者邓汉忠 (Wilson Tang) 教授就相信，在具有不确定性的情况下，概率统计的基础知识在工程中的应用是重要且必不可少的。因此，本书将概率基本概念（不需要概率论的预备知识）与具有实际意义的工程应用结合起来，致力于工科学生教育并为执业工程师提供自学材料。事实上，工科学生理解和掌握概率概念的最好方式是通过首先向他们介绍有工程意义的应用示例。

随着该书中译本的出版，更多的未来工程师（和现在的执业工程师）可以学习和充分领悟概率概念与方法及其对具有不确定性的工程问题进行合理建模与分析的实际价值，这也是我们的夙愿。

最后，衷心感谢李教授和陈教授团队的努力，使得本书能够以中文呈现在读者面前。



A. H-S. Ang
洪华生

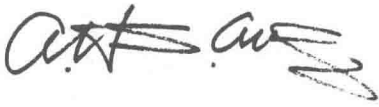
On behalf of my co-author and myself, we are honored that the 2nd edition of Volume I of our book, *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering* has been translated into the Chinese language by Prof. Li Jie and Prof. Chen Jianbing, two world-renowned professors in reliability engineering and risk management at the Tongji University, Shanghai, China. It is with great pleasure to acknowledge their painstaking efforts in providing and checking the translation of the original English version of the book into the Chinese language.

Early on, my co-author Wilson Tang and I believed that the fundamentals of probability and statistics are important and essential for applications in engineering under conditions of uncertainty. For this reason, the book was intended to educate engineering students, and for self-study by practicing engineers, with the fundamentals of probability (without prior knowledge of probability theory) coupled with relevant and meaningful engineering applications. That is, the understanding and appreciation of the concepts of probability can best

be introduced first to engineering students through illustrations of meaningful engineering applications.

It is, therefore, our continuing hope that with the translation of our book into the Chinese language, many more future engineers (and currently practicing engineers) can learn to comprehend the real value of probability concepts and methods for properly modeling and analysis of engineering problems under conditions of uncertainty.

Finally, it is with sincere thanks to Prof. Li and Prof. Chen for making our book available in the Chinese language.



A. H-S. Ang



前言

目标与途径

本书第一版（原书名“工程规划与设计中的概率概念，第1卷：基本原理”，1975年出版）以工程师与工科专业学生易于理解的方式阐述了概率与统计概念的基本知识。书中通过工程和物理科学，特别是土木与环境工程中的相关问题对基本原理进行阐述与示例，每章设计的习题则用以进一步加强对基本概念的理解、强化对概念和方法的应用能力。我们坚信，工程师学习一门像概率与统计这样的抽象理论、并掌握到能够在工程问题的建模与分析中加以应用的程度，最容易和最有效的方式是通过对这些原理的应用进行多方示例。此外，当工程师最初开始接触概率概念与方法时，应该采用物理意义明确的方式，这对合适地强调并促使人们认识到相关数学概念在工程中的重要意义与作用是十分必要的。

第二版的新内容

本书第二版继承了第一版的基本风格，但所有章节中的内容都进行了完善和大幅度修改、更新，有些甚至完全重写。特别是，对第一版中的几乎所有例题与习题都进行了更新。对来自实际数据的例题则更新了相应的数据，采用或添加了更近的数据或新数据。同时，增加或扩充了几个新的论题和章节，包括：

- 两类不确定性。在新版中，我们在第1章强调了区分两类不确定性，即固有不确定性与认知不确定性的重要性，以及在工程应用中对其影响进行分离处理的必要性。工程师与工科专业学生应该对此有所认识，在实际工程决策中这一点尤为重要。虽然如此，进行此类分析所需要的仍然是本书阐述的概率与统计学基本原理。
- 极值问题。第4章现在包括了极值分布，这对工程师分析处理自然灾害与极端事件是非常重要的。
- 假设检验。新增加了假设检验的内容作为第6章的一部分。
- Anderson-Darling方法。第7章现在包括了拟合优度检验的Anderson-Darling方法（适用于概率分布的尾部信息很重要的情形）。
- 回归分析的置信区间。第8章中线性回归的内容进行了扩充，以包括如何确定置信区间。
- 回归与相关分析。关于贝叶斯概率的第9章现在包括了贝叶斯回归与相关分析。
- 计算机数值与模拟方法。新的一章（第5章）“概率中的计算机数值与模拟方法”将使得本书第二版更适应当今时代的工程教育。该章中阐述的数值与模拟方法、特别是Monte Carlo方法，将概率概念与方法进一步拓展到传

统的纯粹解析工具难以分析和解决的实际工程问题中去。由于现在计算机与商业软件随处可得，作为解析方法的扩展，这些数值方法功能尤其强大，进一步拓宽了概率与统计学在工程中的广泛适用性和有效性。

- 质量保障。关于“质量保障与验收抽样基础”的一章（第一版第9章）现在是第10章，但仅放在网上。本章内容超出了本书范围，本书仅阐述概率与统计学的基本概念。但本章对质量保障这一专业领域是有用的。该章内容可以在 Wiley 网上下载，网址是：www.wiley.com/college/ang。

读者范围

本书强调了概率建模与统计推断的基础知识，适合修习应用概率与统计学初等课程的工科专业二年级或三年级大学生，也适合自学。主要目的是促进对基本理论的深入理解，从而为在工程中进行正确应用奠定基础。仅需要微积分的基础知识，因此可对任意水平的本科生讲授。可用于工学系科开设的课程，也可用于数学系和统计系为工科学生开设的课程。

建议教学安排

一学期课程。对一学期(或半学期)课程，建议内容包括：第1章(作为教师指导下的阅读材料)到第5章，以强调概率问题的建模，加上第6章到第8章，以强调统计推断的基础知识。

半学期课程。对半学期课程，建议主要内容与前面相同，但对某些专门章节可以不必着重(例如，仅讨论较少类型的常用概率密度函数)并在每章中减少例题。

高级课程。高级课程可在一学期内讲授所有章节，包括第9章的第一部分。

各章后面的大量习题可以布置作业，读者也可以用来检验自己掌握的程度。

教师参考资料

教师参考资料可在网址 www.wiley.com/college/ang 下载。下述资料仅提供给以本书作为教材的教师：

- 习题答案：书中所有习题的答案。
- 图表：书中所有图和表的图片文件，可用于准备 Power Point 课件。

上述资源需要密码。请参见上述网页上的说明进行注册。

数学严密性

在本书中，我们不强调数学上的严密性。这方面可参考概率论与统计学的数学理论方面的论著。我们主要关心概率概念在工程中的实际应用及其合理性。必要的数学概念是通过在工程问题或物理状态与现象的概率建模过程中引入或建立起来的。因此，本书中仅讨论了必不可少的数学理论基础，为了强调其在工程中的意义，这些原理是通过非抽象性的术语加以解释的。这对强化人们对概率概念的

实际重要性的认识与认可也是必要的,也是极为重要的。

动机

不确定性在工程系统的规划与设计中是不可避免的。因此,合适的工程分析工具应包含分析和评价不确定性对系统性能与设计重要性的方法和概念。就此而言,概率论(及其与统计和决策理论相关的领域)提供了进行不确定性建模并分析其对工程设计影响的数学基础。

概率与统计决策理论在工程规划与设计的各个方面都有特殊的重要性,包括:(1)在具有不确定性的条件下进行工程问题的建模与系统性态的分析;(2)系统地发展明确考虑不确定性的设计准则;(3)为与决策相关的定量风险评估和风险-效益权衡分析提供逻辑框架。我们的主要目的是强调概率与统计决策理论在工程中的更广泛的作用,特别关注在建设和工业管理、岩土、结构和机械设计、水利与水资源规划、能源与环境问题、海洋工程、交通运输工程和航空摄影测量与大地测量工程等方面的相关问题。

出版本书修订版的主要动力是我们的坚定信念:尽管本书中的例子主要来自土木工程与环境工程,但概率与统计原理对所有工程分支领域都具有基础性的重要地位。这些原理对风险评估中不确定性的定量分析与建模是必须的,而风险评估在考虑不确定性条件下的现代决策方法中具有中心地位。

本书阐述的概念与方法仅构成合理处理不确定性的必要基础。在具体应用中,这些基本原理可能需要与更高级的工具相结合。相关的高等论题请参见 Ang 和 Tang (1984) 第 2 卷。

多年来,我们收到了来自从前的学生和同事们的很多赞誉,推许我们在第一版中阐明概念和方法的方式,特别是对希望学习与应用概率与统计原理的人来说尤为如此。在这一意义上,本书第一版为几代工科专业的学生和通过自学的专业工作者的教育作出了贡献,我们为此深受鼓舞。今天,由于更容易得到计算机和相关商业软件,概率和统计学在工程中的实际作用和重要意义更进一步加强了。我们希望本书能够继续为将来几代工科专业学生在此方面的教育做出贡献。这是激励我们修订并出版该书新版的动力。

第 2 卷

本教材的第一版包括两卷。本书第二版仅修订出版了第 1 卷。若读者想要第 2 卷,可通过 ahang2@aol.com, 直接与洪华生教授联系。

致谢

最后,我们要感谢对本书原稿出版提出建设性意见与建议的评审人,包括:

C. H. Aikens, 田纳西大学

B. Bhattacharya, 特拉华大学

C. Cariapa, Marquette 大学

A. Der Kiureghian, 加州大学伯克利分校
S. Ekwaro-Osire, 得克萨斯工业大学
B. Ellingwood, 佐治亚理工学院¹
T. S. Hale, 俄亥俄大学
P. A. Johnson, 宾夕法尼亚州立大学
J. Lee, 路易斯安那大学
M. Maes, Calgary 大学
S. Mattingly, 得克萨斯大学阿灵顿分校
P. O'Shaughnessy, 艾奥瓦大学
C. Polito, Valparaiso 大学
J. R. Rowland, 堪萨斯大学
Y. K. Wen, 伊利诺伊大学香槟分校

以及多位其他匿名评审人。他们的许多建议有助于提高文稿的质量。我们也非常感谢几位评阅人的好评, 包括认为“作者似乎理解了苏格拉底很久以前就知道的事情……‘彻底理解了的工具得到应用的可能性更大’”, 将本书与苏格拉底相联系当然是高度的赞誉。最后, 当然也是很重要的, 感谢 T. Hu, H. Lam, J. Zhang 和 L. Zhang 在部分例题的求解及准备本书的习题答案手册时提供的帮助。

洪华生 邓汉忠

1 Ellingwood 教授现已转任科罗拉多州立大学教授。——译者注

目录

中译本前言	
前言	
第 1 章 概率与统计在工程中的作用	1
1.1 引言	1
1.2 工程中的不确定性	1
1.2.1 与随机性相关的不确定性 ——固有不确定性	2
1.2.2 与知识不完备相关的不确定性 ——认知不确定性	12
1.3 不确定性条件下的设计与决策	14
1.3.1 交通基础设施系统的规划与设计	15
1.3.2 结构与机械设计	16
1.3.3 水利系统的规划与设计	16
1.3.4 岩土工程系统的设计	17
1.3.5 施工规划与管理	17
1.3.6 航空摄影测量、大地测量与 勘测工程	18
1.3.7 在质量控制与保障中的 应用	18
1.4 本章小结	19
参考文献	19
第 2 章 概率模型的基本概念	21
2.1 事件和概率	21
2.1.1 概率问题的特点	21
2.1.2 概率的估计	24
2.2 集合论基础——定义事件的 工具	24
2.2.1 重要基本概念	24
2.2.2 集合的数学运算	33
2.3 概率的数学计算	37
2.3.1 加法规则	38
2.3.2 条件概率	42
2.3.3 乘法规则	45
2.3.4 全概率定理	50
2.3.5 贝叶斯定理	55
2.4 本章小结	57
习题	58
参考文献	79
第 3 章 随机现象的分析模型	80
3.1 随机变量与概率分布	80
3.1.1 随机事件与随机变量	80
3.1.2 随机变量的概率分布	81
3.1.3 随机变量的数值特征	86
3.2 常用概率分布	93
3.2.1 高斯(或正态)分布	94
3.2.2 对数正态分布	98
3.2.3 伯努利序列和二项分布	102
3.2.4 几何分布	106
3.2.5 负二项分布	108
3.2.6 泊松过程与泊松分布	110
3.2.7 指数分布	115
3.2.8 Gamma 分布	119
3.2.9 超几何分布	122
3.2.10 Beta 分布	124
3.2.11 其他常用分布	128
3.3 多个随机变量	128
3.3.1 联合概率分布和条件概率 分布	129
3.3.2 协方差和相关性	134
3.4 本章小结	137
习题	137
参考文献	151
第 4 章 随机变量的函数	152

4.1 引言	152	习题	277
4.2 随机变量函数的概率分布	152	参考文献	282
4.2.1 单个随机变量的函数	152	第7章 概率分布模型的确定	283
4.2.2 多个随机变量的函数	157	7.1 引言	283
4.2.3 极值分布	172	7.2 概率纸	283
4.3 随机变量函数的矩	179	7.2.1 使用方法和坐标绘制	284
4.3.1 函数的数学期望	179	7.2.2 正态概率纸	284
4.3.2 一般函数的均值与方差	182	7.2.3 对数正态概率纸	286
4.4 本章小结	189	7.2.4 一般概率纸的制作	289
习题	189	7.3 分布模型的拟合优度检验	293
参考文献	201	7.3.1 拟合优度的 χ^2 检验	293
第5章 概率中的计算机数值与模拟		7.3.2 拟合优度的 Kolmogorov-Smirnov 检验	297
方法	202	7.3.3 拟合优度的 Anderson-Darling (A-D) 检验	300
5.1 引言	202	7.4 极值分布渐近形式的不变性	304
5.2 数值与模拟方法	202	7.5 本章小结	305
5.2.1 Monte Carlo 模拟的实质	203	习题	305
5.2.2 数值算例	204	参考文献	310
5.2.3 固有不确定性和认知不确定性的处理	228	第8章 回归分析与相关分析	311
5.2.4 具有相关随机变量问题的 Monte Carlo 模拟	236	8.1 前言	311
5.3 本章小结	246	8.2 线性回归分析基础	311
习题	246	8.2.1 常方差时的回归分析	311
参考文献	250	8.2.2 回归分析的方差	313
第6章 统计推断	251	8.2.3 回归分析的置信区间	313
6.1 统计推断在工程中的作用	251	8.3 相关分析	316
6.2 参数的统计估计	252	8.3.1 相关系数的估计	316
6.2.1 随机抽样和点估计	252	8.3.2 正态变量的回归分析	317
6.2.2 抽样分布	259	8.4 非常数方差情况下的线性回归	323
6.3 假设检验	262	8.5 多元线性回归	326
6.3.1 引言	262	8.6 非线性回归分析	330
6.3.2 假设检验流程	263	8.7 回归分析在工程中的应用	337
6.4 置信区间 (区间估计)	265	8.8 本章小结	343
6.4.1 均值的置信区间	266	习题	343
6.4.2 比例的置信区间	272	参考文献	350
6.4.3 方差的置信区间	273	第9章 贝叶斯方法	351
6.5 计量理论	273	9.1 前言	351
6.6 本章小结	277		

9.1.1 参数估计	351
9.2 基本概念-离散分布情况	352
9.3 连续分布情况	357
9.3.1 通用公式	357
9.3.2 贝叶斯更新过程的特殊 应用	361
9.4 抽样理论中的贝叶斯概念	363
9.4.1 一般公式	363
9.4.2 正态分布抽样	364
9.4.3 估计的误差	366
9.4.4 共轭分布	368
9.5 两个参数的估计	372
9.6 贝叶斯回归和相关分析	375
9.6.1 线性回归	375
9.6.2 回归参数的更新	378
9.6.3 相关分析	378
9.7 本章小结	380
习题	380
参考文献	386
附录 A 概率表	387

表 A.1 标准正态概率表	387
表 A.2 二项分布的概率分布函数 ...	391
表 A.3 置信水平为 $(1-\alpha) = p$ 时 t 分布的临界值	396
表 A.4 概率水平为 α 时 χ^2 分布的 临界值	397
表 A.5 K-S 检验中显著性水平为 α 时 D_n^* 的临界值	399
表 A.6 Anderson-Darling 拟合优度检 验的临界值	399
附录 B 组合公式	401
B.1 基本关系	401
B.2 有序序列	401
B.3 二项式系数	402
B.4 多项式系数	403
B.5 Stirling 公式	403
附录 C 泊松分布的推导	405
索引	407
校译者后记	417

第1章

概率与统计在工程中的作用

► 1.1 引言

在客观实际问题中，不确定性是不可避免的。作为工程师，洞察工程中不确定性的所有主要来源是至关重要的。工程中的不确定性来源可以分为两大类：一类与天然的随机性有关，另一类与对客观世界的预测与估计不精确性有关。前者可称为固有型不确定性，而后者则可称为认知型不确定性。无论对哪一种不确定性，概率与统计理论都提供了建模与分析的合理工具。在本书接下来各章中，我们将论述概率与统计理论的基本原理，并通过工程实例说明它们在工程问题中的应用。与一般着重统计数据分析的书不同，虽然本书中也包含统计学基础内容，但本书的主要目的是阐述在具有不确定性的工程问题建模与分析中概率统计的概念与方法。

毫无疑问，不确定性对工程系统规划与设计的影响是十分重要的。然而，量化地把握不确定性及其对系统性态与设计的影响，则需要合理地引入概率统计的概念与方法。而且，在具有不确定性的情况下，工程系统的设计与规划中必须考虑风险、即概率及其相应后果，而相关决策则可能需要基于量化的风险-效益分析，这当然也属于应用概率统计的范畴。因此，关于具有随机性与不确定性的问题，概率与统计概念和物理、化学及力学原理在工程问题的分析中具有同样的重要性。

从上述分析可见，从基本信息的描述到设计与决策的基本工具，概率与统计的作用在工程中是相当普遍的。在接下来的章节中，将考虑一些具有这样不完备信息的情形及概率统计在工程设计与决策问题中应用的例子。

► 1.2 工程中的不确定性

工程中的不确定性显然是不可避免的。可获取的数据通常不完备或不够，而且总是具有变异性。此外，工程规划与设计必须依赖于基于理想化模型的预测或估计，而这些理想化模型对客观实际反映的不完备性程度是未知的，因而带来额外的不确定性。在实际中，我们可以区分两大类不同性质的不确定性，即：(i) 与内在现象随机性有关的不确定性，表现为观测信息的变异性；(ii) 与模型不完备性有关的不确定性，是由于客观实际知识不完备或不足导致的。如前所述，这

两类不确定性可以分别称为固有不确定性和认知不确定性。有关定义和处理这两类不确定性的基本理论框架详见 Ang (1970, 2004)。这两类不确定性可以综合作为总的确定性加以处理,也可以分别处理。无论何种情况,都要采用概率与统计的基本原理。

区分两类不确定性及其对工程的不同影响具有重要意义。首先,固有(基于数据的)不确定性与基本信息内在的变异性有关,这是客观世界的属性(在我们观察与描述的能力范围内)。土木工程中必须面对的许多固有不确定性是由内在属性决定的,因此,这些不确定性无法进一步减小或修正。而认知(或基于知识的)不确定性与对客观世界所具有的知识不完备性有关。通过采用更好的预测模型或提高实验手段,这些不确定性是可以降低的。其次,这两类不确定性造成的影响也可能不同:固有随机性导致分析结果是一个计算出来的概率或风险,而认知不确定性的影响则是刻画这一概率或风险本身的不确定性。在诸多工程应用领域与物理科学中,风险或概率分析结果的不确定性(或误差界)与风险分析结果本身具有同等重要性。例如,美国国家研究理事会(National Research Council)(1994)强调了风险分析本身不确定性量化的重要性。这一风险分析的定量化方法不仅在英国(2000)、也在美国诸多政府机构获得了应用,如美国能源部(1996)、美国环境保护总署(1997)、美国航空航天局(2002)、美国国家卫生研究院(1994)。然而,在一些实际应用中,这两类不确定性是耦合的,因而分析结果是其综合效应。无论上述两种不确定性是综合考虑还是单独考虑,本书后续章节的概念和方法都是同样适用的。

最后强调,上述两类不确定性的区分应该是明确的——固有不确定性本质上是基于数据本身的,而认知不确定性则来自知识不完备性。当然,虽然认知不确定性在原则上包括了对概率分布形式及其所有参数的不精确性,但在实际中往往限于对均值或中值的估计。

1.2.1 与随机性相关的不确定性——固有不确定性

工程师关心或必须面对的诸多现象或过程都具有随机性,即预期结果是不可预测的(在一定程度上)。这些现象的现场或试验数据含有显著的变异性,表征了该现象的天然随机性,也就是说,即使在表面上相同的试验或观测条件下,每次不同试验(或不同观测)的结果也不同。换言之,观测或试验结果具有一个分布范围,而且在该范围内,某些值较之其他值出现的频度要高些。这些数据或信息内蕴的变异性本质上具有统计规律性,一个特定值(或分布范围)的实现具有一定的概率。观测数据中的内蕴变异性可通过直方图或频数图表示,如图 1.1~图 1.23 所示,其中演示了来自土木与环境工程中相关物理现象的数据信息。此外,如果需要考虑两个变量,其联合变异性可以类似地通过散点图表示。

直方图仅仅显示了单个变量的多次观测值的相对频度。例如,对于给定的实验数据集,可采用下述方式画出其直方图:

根据观测数据集的范围,可在横轴上(对于一个二维直方图)定出一个足够覆盖最大值与最小值的范围,并将该范围划分为若干合适的区间。纵轴可表示观

测值在每一个区间内出现的次数，或该次数与总次数之比。例如，考察表 1.1 中所示的某流域内 29 年的年累计降雨量。可见，观测降雨量的范围在 39.91~67.72in 之间。因此，可在 38~70in 之间采用 4in 的均匀区间划分，各区间出现的观测值次数及其与总次数之比见表 1.2。

29 年的降雨量观测数据

表 1.1

年份	降雨量 (英寸)	年份	降雨量 (英寸)	年份	降雨量 (英寸)
1918	43.30	1928	54.49	1938	58.71
1919	53.02	1929	47.38	1939	42.96
1920	63.52	1930	40.78	1940	55.77
1921	45.93	1931	45.05	1941	41.31
1922	48.26	1932	50.37	1942	58.83
1923	50.51	1933	54.91	1943	48.21
1924	49.57	1934	51.28	1944	44.67
1925	43.93	1935	39.91	1945	67.72
1926	46.77	1936	53.29	1946	43.11
1927	59.12	1937	67.59		

各区间出现的观测值次数及其与总数目之比

表 1.2

区间	观测值次数	观测值次数与总次数之比
38~42	3	0.1034
42~46	7	0.2415
46~50	5	0.1724
50~54	5	0.1724
54~58	3	0.1034
58~62	3	0.1034
62~66	1	0.0345
66~70	2	0.0690

表 1.2 中的均匀划分区间可表示在横轴上，相应的观测值次数（表 1.2 第 2 列）可沿纵轴画成直方条，如图 1.1a 所示。直方条也可以直接采用各区间内观测值次数与总数目之比（表 1.2 第 3 列），如图 1.1b 所示。人们有时会将经验频度图（如直方图）与理论频度图（如概率密度函数，将在第 3 章中讨论）进行对比。

经验频度图下的面积应为 1。为此，可将直方图的纵坐标除以其总面积。例如，经验频度函数可通过将图 1.1a 中各纵坐标值除以 $29 \times 4 = 116$ 获得，亦可通过将图 1.1b 中的纵坐标除以 $4 \times 1 = 4$ 获得。无论何种情况，得到的都是图 1.1c 中该流域年降雨量的经验频度函数。显然，经验频度函数的总面积为 1。因此，在给定范围内的面积可用来估计降雨量在该区间内的概率。

4 ▶ 第1章 概率与统计在工程中的作用

图 1.1~图 1.23 是大量物理现象的示例。这些专门收集的例子表明大多数工程信息中包含显著的变异性。例如,大多数建筑材料特性的变异范围很大。图 1.2 和图 1.3 分别是残积土的容重和混凝土试件的水灰比,而图 1.4 和图 1.5 则分别是钢筋屈服强度和钢材角焊缝抗剪极限强度的直方图。

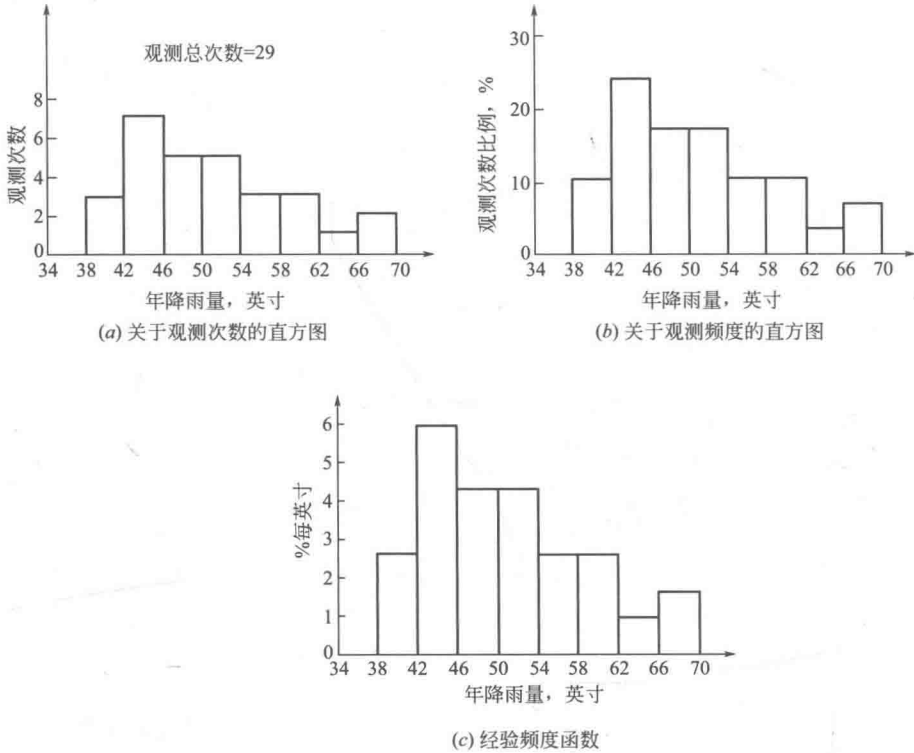


图 1.1 年降雨量直方图

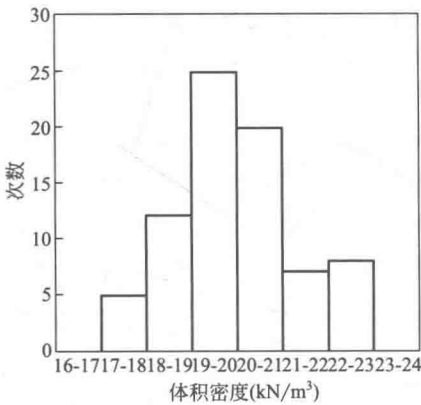


图 1.2 残积土的容重
(Winn 等, 2001)

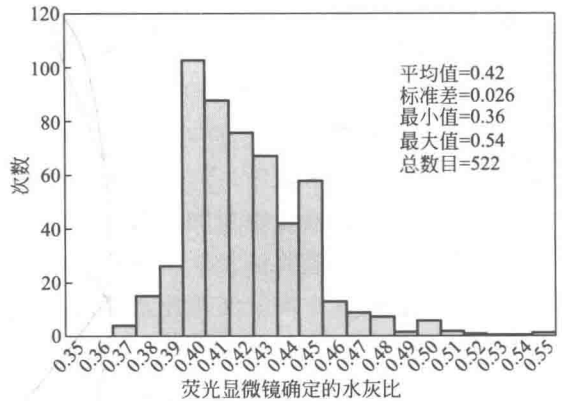


图 1.3 混凝土的水灰比 (w/c)
(Thoft-Christensen, 2003)

类似地,对于木材,从图 1.6 可见南方松和花旗松的弹性模量直方图,而图

1.7 则是由砂浆砌筑的砌体弹性模量直方图。木材是天然有机材料，而砌体是水泥和自然砂组成的高度不均匀杂合体。不出所料，这两种材料的弹性模量变异性都很大。

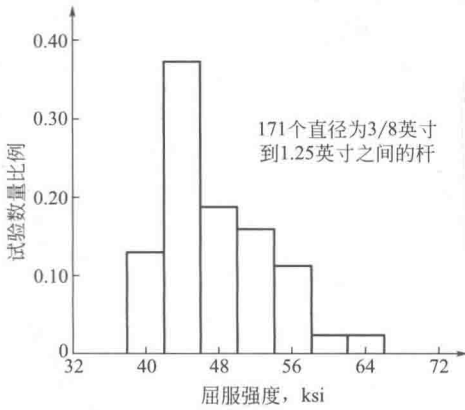


图 1.4 钢筋屈服强度
(Julian, 1957)

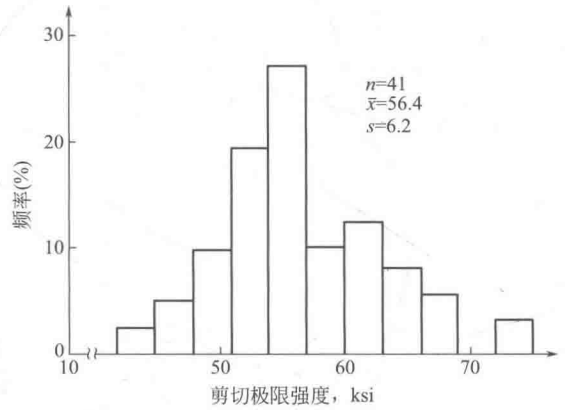


图 1.5 钢角焊缝的抗剪极限强度
(Kulak, 1972)

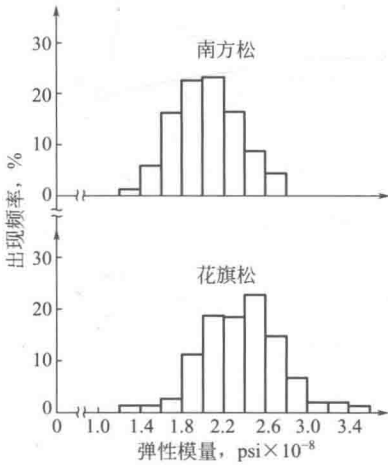


图 1.6 建筑木材的弹性模量
(Galligan & Snodgrass, 1970)

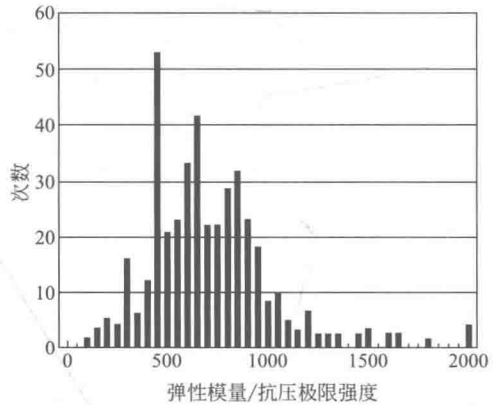


图 1.7 砌体的弹性模量
(Brandow 等, 1997)

钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀是值得高度关注的。图 1.8 是混凝土结构中钢筋锈蚀活性的直方图（通过电流密度测量）。在岩石力学中，各向同性岩石块体中含有裂隙。从图 1.9 可见，岩石块体中不连续面迹长具有很大的离散性。

在岩土工程中，可以预期与土特性有关的信息将有很大的变异性。例如，图 1.10 是软泥岩残余摩擦角的直方图，而图 1.11 则显示了加拿大 Confederation 大桥基础下卧砂岩抗压强度的变异性。

此外，如图 1.12a 和 1.12b 所示，黏土和沙土中的群桩效应也具有高度的变异性。