

# 工程规划与 设计中的 概率概念

第 II 卷

冶金工业出版社

# 工程规划与设计中的 概 率 概 念 (第Ⅱ卷)

[美] A.H-S.ANG (洪华生) 著  
[美] W.H.TANG (邓汉忠)

孙芳垂 陈星焘 顾子聪 译

冶金工业出版社

## 内 容 提 要

本书为Alfredo H-S Ang和Wilson H. Tang所著《Probability Concepts in Engineering Planning and Design》的第Ⅱ卷（1984年出版）的中译本。

本书共分七章。第一章阐述全书的范围与目标；第二章为决策分析论；第三章为马尔可夫链，排队论及可用性模型；第四章为极值统计；第五章蒙特卡罗模拟；第六章为可靠度及以可靠度为依据的设计；最后一章为系统可靠度。

本书各章均附有大量联系实际的工程问题及大量的习题。书后还附有常用于概率计算及极值参数的计算表格及索引。

本书可作为高等院校工程系学生的教材，也可供各类工程技术人员和专业设计人员自学使用。

ERS3/25 12

## 工程规划与设计中的概率概念

（第 I 卷）

〔美〕A. H-S. ANG（洪华生） 著  
〔美〕W. H. TANG（邓汉忠） 著

孙芳垂 陈星焘 顾子聪 译

\*

冶金工业出版社出版发行

（北京北河沿大街嵩祝院北巷30号）

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 印张 22 5/8 字数 598 千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷

印数00,001~1,240册

ISBN 7-5024-0793-6

TU·39 定价16.20元

## 译 者 的 话

自1985年本书第Ⅰ卷出版以来 由于内容适合广大工程技术工作者及教学工作者的需要,颇受欢迎,纷纷致函译者询问Ⅰ卷何时译出。自该书第Ⅱ卷于1984年在美正式发行后,即着手第Ⅱ卷的翻译工作,使其尽快与读者见面。

正如作者在第Ⅰ卷序言中所述,第Ⅱ卷全面地介绍概率论与统计学中较高深的概念及其应用,着重论述在现代工程规划与设计中的决策分析与风险分析和以概率论为基础的设计方法。在写作技巧上,两卷有共同的特点;而在应用上,则广泛联系工程中各类实际问题,提供大量的实例与习题,以加深理解。

译者认为,该书内容前后贯通,连接紧密,形成整体,通读全书,可使读者对概率论有较全面系统的认识,提高读者的实际运用能力。

本书翻译的过程中,得到许多同志的关注和支持,徐正坤建筑师,陈丹娜工程师和李兴源同志在制图、编写索引、校核清样等方面做了大量工作,谨向她们表示感谢。

由于译者水平有限,错误之处,在所难免,希望读者批评指正。

## 序 言

如同卷I, 本卷仍着重于概率与统计在工程中之应用。它立足于卷I中的一些基本原则, 但提供了更多先进的手段, 其中包括统计决策分析, 马尔可夫模型及排队模型, 极值统计, 蒙特卡罗模拟以及系统可靠度等。此外, 在一些工程问题的内容中, 对必要的概念还作了介绍与说明。诚然, 在工程应用上, 逻辑概念的推论以及阐明所建立的原理是本卷的主要目的。所提供的手段为风险估计, 控制, 管理以及在不确定性条件下作出明智的决策等建立定量的基础。

在某些情况下, 利用多类领域的问题来说明相同的或相类似的基本原理。目的在于说明如何广泛地应用有关的概念, 也为读者在各种实例应用中提供更多的选择。

当然, 在文献中采用了不少有关数学的资料, 其中一些是引自原文的。例如耿贝尔 (Gumbel)<sup>[68]</sup>的极值统计; 鲁宾斯坦 (Rubinstein)<sup>[121]</sup>的蒙特卡罗模拟; 雷依发 (Raiffa)<sup>[116]</sup>及施莱费尔 (Schlaifer)<sup>[124]</sup>的统计决策分析; 佩曾 (Parzen)<sup>[106]</sup>与萨特 (Saaty)<sup>[123]</sup>等关于马尔可夫过程及排队过程的著述等。但是, 对于工程规划与设计特别有用的那些概念, 则着重予以强调, 而且, 在工程重要性范畴内, 有针对性地介绍这些概念并以工程师易于理解的词句表达 (附以大量的说明例题)。在第六、七章中有基本的和系统的可靠度的文献资料, 其中大部分目前通常仅能在一些科技期刊中得到, 为此, 作者不拟详尽提供, 仅引用了一些通用的有代表性的参考资料。

本卷内容适用于大学生或研究生的两门高等课程。其一可采用本卷中第二、三、五章为基础并辅以卷I中的第八章, 内容包含工程决策和风险分析; 另外则着重探讨系统可靠度及其设计并将本卷中第四、六、七章的内容加以引伸推论。这两门课程都必

须事先具备应用概率及统计方面的基本知识，如卷 I 中的有关章节。

在为本卷内容作准备和编写的过程中，作者要对我的同事们和学生，也对前期学生，他们当时读到的仅是不完全和不完善的版本，表示深切谢意。我们的同事 Y.K. 温 (Wen) 教授多年来作过多次讨论与建议；A. 克尤雷海安 (kinreggian)、M. 施罗佐卡 (Shinozuka)、E. 沃马尔克 (Vanmarcke) 及 J.T.P 姚 (Yao) 等教授均曾提出过一些建设性的建议并对手稿给予中肯的评论，在此深表谢意。前期研究生也对本书的编制包括实例计算等作出贡献；特别是对 R.M. 贝耐特 (Bennett)、C.T. 朱 (Chu)、H. 佩尔斯 (Pearce)、J. 皮雷斯 (Pires)、I. 西迪 (Sidi)、M. 雅马莫托 (Yamamoto)，及 A. 泽尔沃 (Zerva) 等的贡献与帮助应给予赞赏。最后，对克劳迪尔库克 (Claudia Cook) 女士为手稿许多文本所作的耐心而熟练的打字工作以及 R. 温布尔恩 (Winburn) 先生的专业制图工作表示感谢。

洪华生 邓汉忠

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 概论 .....                | 1  |
| 一、卷Ⅰ的宗旨及范围 .....            | 1  |
| 二、要素与重点 .....               | 1  |
| 1. 决策分析 .....               | 1  |
| 2. 马尔可夫模型, 排队模型及可用性模型 ..... | 2  |
| 3. 极值的统计理论 .....            | 3  |
| 4. 蒙特卡罗模型 .....             | 3  |
| 5. 可靠度及基于可靠度的设计 .....       | 4  |
| 6. 系统可靠度 .....              | 4  |
| 第二章 决策分析 .....              | 6  |
| 一、引言 .....                  | 6  |
| 1. 简单风险决策问题 .....           | 6  |
| 2. 一般决策问题的特征 .....          | 11 |
| 二、决策模型 .....                | 12 |
| 1. 决策树 .....                | 12 |
| 2. 决策准则 .....               | 18 |
| 3. 以现有信息为依据的决策——先验分析 .....  | 20 |
| 4. 带有补充信息的决策——终端分析 .....    | 31 |
| 5. 预后验分析 .....              | 36 |
| 6. 信息的价值 .....              | 38 |
| 7. 概率估计中的误差对决策的敏感度 .....    | 40 |
| 8. 例题 .....                 | 42 |
| 三、抽样与估计的应用 .....            | 60 |
| 1. 贝叶斯点估计值 .....            | 60 |
| 2. 最优样本量 .....              | 64 |
| 四、功利理论的基本概念 .....           | 72 |
| 1. 功利理论的原理 .....            | 72 |
| 2. 功利函数 .....               | 74 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3. 确定功利值 .....               | 77  |
| 4. 经济价值的功利函数 .....           | 81  |
| 5. 其它变量的功利函数 .....           | 84  |
| 6. 最大期望功利 .....              | 86  |
| 7. 功利函数的常用型式 .....           | 89  |
| 8. 期望功利对功利函数型式的敏感性 .....     | 92  |
| 五、概率值的评价 .....               | 94  |
| 1. 概率估计的依据 .....             | 94  |
| 2. 主观概率 .....                | 95  |
| 3. 一个随机变量的主观分布 .....         | 96  |
| 六、具有多项目标的决策 .....            | 98  |
| 1. 加权的目标决策分析 .....           | 99  |
| 2. 多属性的功利方法 .....            | 107 |
| 习题 .....                     | 122 |
| 第三章 马尔可夫模型, 排队模型及可用性模型 ..... | 146 |
| 一、马尔可夫链 .....                | 146 |
| 1. 引言 .....                  | 146 |
| 2. 基本模型 .....                | 146 |
| 3. 状态概率 .....                | 147 |
| 4. 定态概率 .....                | 154 |
| 5. 首次通过概率 .....              | 159 |
| 6. 循环状态、瞬时状态和吸收状态 .....      | 162 |
| 7. 阶段间的随机时间 .....            | 176 |
| 8. 具有连续参量的齐次马尔可夫链 .....      | 179 |
| 二、排队模型 .....                 | 182 |
| 1. 引言 .....                  | 182 |
| 2. 泊松过程的到达与离开 .....          | 183 |
| 3. 泊松到达与任意分布的服务时间 .....      | 193 |
| 4. 等候时间的分布 .....             | 200 |
| 三、可用性问题 .....                | 203 |
| 1. 引言 .....                  | 203 |
| 2. 连续不断的检验-修复过程 .....        | 203 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 3. 定期检验与维修 .....    | 216 |
| 4. 退化系统 .....       | 220 |
| 习题 .....            | 232 |
| 第四章 极值统计 .....      | 244 |
| 一、引言 .....          | 244 |
| 1. 极值在工程上的重要性 ..... | 244 |
| 2. 目标与范围 .....      | 245 |
| 二、极值的概率分布 .....     | 245 |
| 1. 精确分布 .....       | 245 |
| 2. 渐近分布 .....       | 254 |
| 3. 对称原则 .....       | 265 |
| 三、三种渐近型式 .....      | 268 |
| 1. 耿贝尔的分类 .....     | 268 |
| 2. I 型渐近型式 .....    | 269 |
| 3. II 型渐近型式 .....   | 279 |
| 4. III 型渐近型式 .....  | 286 |
| 5. 收敛准则 .....       | 294 |
| 四、极值概率纸 .....       | 301 |
| 1. 耿贝尔极值概率纸 .....   | 301 |
| 2. 对数极值概率纸 .....    | 307 |
| 五、超越概率 .....        | 314 |
| 1. 与分布无关的概率 .....   | 314 |
| 2. 概率分布的重要性 .....   | 318 |
| 六、极值参数的估计 .....     | 325 |
| 1. 极值估计的要点 .....    | 325 |
| 2. 矩法 .....         | 326 |
| 3. 有序统计法 .....      | 327 |
| 4. 其它渐近分布的参数 .....  | 332 |
| 5. 图解法 .....        | 338 |
| 习题 .....            | 341 |
| 第五章 蒙特卡罗模拟 .....    | 350 |
| 一、引言 .....          | 350 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 1. 蒙特卡罗模拟之一例 .....     | 351 |
| 二、随机数的生成 .....         | 355 |
| 1. 具有标准均匀分布的随机数 .....  | 356 |
| 2. 连续随机变量 .....        | 359 |
| 3. 离散随机变量 .....        | 367 |
| 4. 联合分布随机变量的生成 .....   | 370 |
| 5. 与样本量有关的误差 .....     | 372 |
| 三、方差缩减技术 .....         | 372 |
| 1. 对偶变数 .....          | 372 |
| 2. 相关抽样 .....          | 378 |
| 3. 控制变量 .....          | 380 |
| 四、应用例题 .....           | 384 |
| 习题 .....               | 416 |
| 第六章 可靠性和基于可靠性的设计 ..... | 426 |
| 一、工程系统的可靠性 .....       | 426 |
| 二、可靠性的分析与评价 .....      | 427 |
| 1. 基本问题 .....          | 427 |
| 2. 二阶矩的表达式 .....       | 434 |
| 3. 线性性能函数 .....        | 442 |
| 4. 非线性性能函数 .....       | 457 |
| 三、不确定性的模拟与分析 .....     | 489 |
| 1. 不确定性的种类及其根源 .....   | 489 |
| 2. 不确定性的量度的定量 .....    | 493 |
| 3. 不确定性的分析 .....       | 497 |
| 4. 不确定性的另一种表现形式 .....  | 516 |
| 四、根据概率设计的准则 .....      | 525 |
| 1. 关于设计与设计准则 .....     | 525 |
| 2. 二次矩准则 .....         | 527 |
| 习题 .....               | 554 |
| 第七章 系统可靠度 .....        | 573 |
| 一、引言 .....             | 573 |
| 二、多种失效模态 .....         | 573 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 1. 概率界限 .....             | 574 |
| 三、赘余和非赘余系统 .....          | 602 |
| 1. 串联系统 .....             | 605 |
| 2. 并联系统 .....             | 607 |
| 3. 串联-并联组合系统 .....        | 612 |
| 四、错误树, 事件树分析 .....        | 623 |
| 1. 错误树图形 .....            | 623 |
| 2. 概率估计 .....             | 634 |
| 3. 事件树分析 .....            | 633 |
| 五、近似方法 .....              | 646 |
| 1. PNET法 .....            | 647 |
| 习题 .....                  | 662 |
| 附录 A 概率表 .....            | 680 |
| 附录 B 非正态变量转换为独立正态变量 ..... | 690 |
| 参考文献 .....                | 700 |
| 本书涉及的计量单位换算系数 .....       | 709 |

# 第一章 概 论

## 一、卷Ⅱ的宗旨与范围

本卷的主要目标与卷Ⅰ一样，即模拟那些包含不定性的工程问题，以分析它们对系统性能的影响，并在不定性条件下制定设计和决策的依据。

在卷Ⅰ中介绍了一些基本原则及手段，在本卷中又补充了更多的高级手段与概念，包括统计决策理论，马尔可夫过程及排队过程和极值统计理论。若不提及蒙特卡罗模拟方法，则有关概率计算的数值方法的讨论就不能认为完善。卷中有一章对这种计算方法的要旨作了综合的叙述。在工程中，概率概念最为重要的应用是，在工程体系的可靠度与安全度的评价以及在与之有关的设计准则的制订，有关这些要求的当前发展情况是本书最后两章的论题，最后一章还特别着重于工艺系统可靠度的分析。

在讨论实际问题时强调判断的作用，而工程上的判断又常常必须在不能顾及理论的严密性下作出。但是，在全面分析不定性以及它对决策，风险与可靠度的影响中，必将显示判断的重要性及其作用。再者，判断还必须与所用的概率方法协调一致，并用概率或统计的语言表达；凡是用传统的或确定的语言（经常如此）所表达的专家的判断，都必须改变为合适的概率术语。为此，在卷Ⅱ中提供了一些方法。

## 二、要素与重点

在以后诸章中，其主要论点与重点可归纳如下：

### 1. 决策分析

大多数工程分析的目的是为制订决策提供信息或依据。制订工程决策，其范围从简单地选择一项结构中一根柱子的尺寸，到选定一座主要水坝的坝址，到决定核动力是否是一种适用的能

源。不幸的是，在工程决策中的各个方面，实际上不可避免地存在着各种各样的不定性。就此而言，在工程系统的规划与设计作出任何决策，都不可避免地要衡量某些风险。一种在不确定性条件下作出决策分析的系统框图可能非常有用，在其中列出各种可行的方案并对其后果作出估计。这类决策分析的手段是本卷第二章的主题。

在这里，介绍了决策树模型，用于鉴别决策问题中的各种必要的因素，包括各种可行的方案，与每一方案有关的可能后果及其各自的概率以及每一方案的潜在影响。简言之，对于有关一项系统决策分析的所有信息，决策树提供了一个有组织的纲要。

在正式决策分析中，运用各种工程实例说明一些概念。在制订最后决策之前，就是否需要收集补充信息而讨论了信息价值这一概念。与抽样有关的问题，即确定设计中的参数估计值和制订最优抽样方案等，也可以构成一项决策问题。

作为一种广义的价值量度，介绍了功利理论的基本概念，据此，可以估计出某项决策的各种可能后果的相对重要性。还探讨了一些复杂工程决策问题的特例，包括那些有多重目标的问题。

## 2. 马尔可夫模型，排队模型及可用性模型

工程系统的性能特征，经常以各种不同的离散状态来分类。例如，一次地震对结构的可能影响可以按几种不同的损坏程度划分为若干种不同的状态；工程承包商的财务状况（即就现金流通而言）也有几种状态，包括破产在内；在收费站前车辆等候的数量（排队长度）也代表收费系统的一种状态。根据某种概率法则，这类系统的条件可以从这一种状态转变到另一种状态。在经过一定量次变动之后，系统成为某一特定状态的概率也将是人们所关注的。

马尔可夫链是为分析具有多重状态系统而特别设计的一种模型。首先介绍了具有离散参数的均匀马尔可夫链的基本概念。然后再说明以排队模型作为具有连续参数的马尔可夫链的实例。并

用具有泊松到达次数的特殊排队系统来推导定态排队长度的概率。

一项工程系统的性能常常被划分为两种状态：安全状态与不安全状态，或运行状态与非运行状态。这两种状态系统转移性能的研究称之为可用性问题。系统的可用性（在安全状态下的系统）问题可能包括一项维护计划，即，定期的检查与维修，在此情况下，更新理论是一个有用的模型，在工程中所关注的可用性问题包括系统在给定时间内维修或不维修的可用性。

在第三章中阐述了马尔可夫过程，包括排队模型及可用性模型等在工程中的应用。

### **3. 极值的统计理论**

在许多工程问题中，物理现象的极值或极端状况都有其特殊的意义，特别是对于那些涉及到工程系统的安全性和可靠性问题和涉及到那些与自然灾害有关的工程问题。因此，在考虑风险及可靠性的工程问题中，极值统计理论具有特别的重要性。

很多统计极值理论可从文献中获得，但是，得到的资料主要是数学性质的，许多工程师难以运用。第四章的目的之一就是综合并突出统计极值的主要概念，并着重说明这些概念在工程问题中的实际意义。特别是，极值统计的渐近性质增加了极值理论的重要性；在多种应用中了解这个概念是十分关键的。因此，渐近理论和与之有关的一些概念，通章均予以强调，并用工程问题中的多项实例加以说明。

### **4. 蒙特卡罗模型**

随着工程系统复杂性的增长，采用数学手段构成所需的分析模型将非常困难，除非采用笼统的理想化和简化的方法；此外，在某些情况下显然有可能构成模型，但难以采用分析的方法求解。此时，应用蒙特卡罗模拟法可能得到一个概率解。蒙特卡罗模拟也就是对某一命题生成确定解的重复过程；每个解都是所含随机变量的一组确定值。蒙特卡罗模拟过程的要点就是从一项特定的分布中生成随机数。本章汇总和说明了从几种常用的概率分

布中生成随机数的系统而又有效的方法。

由于蒙特卡罗模拟通常需要大量的重复性工作，特别是用于那些涉及非常罕见事件的问题，因而它对那些很复杂的问题可能耗费甚大。因此，有理由使我们对采用蒙特卡罗模拟采取慎重态度。一般地说，仅仅作作为最后的一种手段来利用，也就是说，只有在分析法和近似法都不能用或都不适用时才用它。通常，蒙特卡罗模拟可能是用于校核或检验概率计算的近似方法有效性的唯一手段。

通过解释一系列探讨的问题来说明模拟过程以及由蒙特卡罗计算得出的信息类型。

### **5. 可靠度及基于可靠度的设计**

工程系统的安全度及其性能永远是工程设计的主要目标。为了达到某种期望的可靠性程度，当然就需要有对其评价的正确方法。由于工作中总是存在着不定性，因此，可靠度或安全度的合适量度也只能在概率范围内给予规定。事实上，只有当设计准则建立在可靠性的概率量度上时，才有可能获得恰当的安全度和可靠度。

工程设计中的工程可靠度及其重要性是一个快速发展的领域；本章将介绍其最新和最实用的进展情况。用多种工程范围内的实际应用来说明，并特别着重于土木工程方面的应用。不用说，正是由于设计中存在着不定性而引起安全度和可靠度的问题，因此，不定性的定量与分析则是如何估计可靠度以及发展有关的基于可靠设计中的关键问题。本章对这类目标的统计依据和统计方法均给予广泛的说明。

### **6. 系统可靠度**

尽管整个系统的可靠度是讨论的重点，系统可靠度是它的各个组成部件的可靠度的函数（均见第六章）。也就是说，确定系统可靠度必然要以各部件的可靠度信息为根据。更为重要的是，工程设计总是在部件这一级实现的，并按此通过分析对系统可靠度作出评价。第七章介绍了为此目的而运用的技巧。

按可靠度的观点，一个系统是用多重失效形式来表现其特征的，其中每一种潜在的失效形式均由其各部件的失效事件并联或串联组成，或者是它们的组合体（尤其对于冗余体系）。对于一般的冗余体系，冗余性质既可以是备用形式，也可以是现役形式。根据其冗余性是备用还是现役，系统可靠度及其分析将有所不同。

对于复杂体系，必将涉及到如何鉴定潜在的失效形式，这就需要有一个系统的鉴定程序，如故障树型。此外，系统的失效（或正开始失效的事件）的潜在后果也可能随着特定的起始事件所带来的后续事件情况不同而有所变化。运用事件树模型就更有利于对所有潜在后果作出系统的鉴别。在最后一章中用多种工程实例说明故障树模型和事件树模型的应用。

## 第二章 决策分析

### 一、引言

作出技术决策是工程规划与设计项目中一项必要的组成部分。事实上工程师的主要责任就是作出决策。这类决策常常是以预计和信息为依据的，而它们总含有不定性。在这种条件下，实际上风险是不可避免的。通过概率模拟与分析，就可以正确地模拟和评价不定性，还可以系统地说明它们对所作决策的影响。这样，与每一种决策方案有关的风险也可以表达出来，同时，如果需要或者必要的话，采取一些措施控制或缩小其相应可能发生的后果。

在工程规划与设计中，决策问题也常常需要考虑一些非技术因素，例如社会要求或承受条件，环境影响，有时甚至政治干预。对于后者这些情况，“最好”决策方案的选择不能够仅使用技术上的考虑来左右。考虑到决策问题所有各个方面的系统的框图称之为决策模型。

决策模型的各种因素和对决策问题的各种分析方法都将在本章中讨论。单一和多重目标的工程决策问题也都将进行讨论和说明。

#### 1. 简单风险决策问题

在任何决策分析中，决策（或设计）的变量集首先应予以鉴别与确定。例如，设计暴雨排水系统，工程师需要选择一个管子直径，以满足预期的流量。由于未来暴雨径流的变异，这里就会有所选管径不能满足流量的概率。因为这个概率与管径有关，那么概率水平也可代替管径作为决策变量。

为了使各种设计分类，通常用决策变量来确定一个目标函数。而这个函数又常常以货币量来表示总受益或总费用。显然，最优设计就将用决策变量的值来确定，该值应使受益最大，或使损失最小。在某种情况下，目标函数是决策变量的连续函数，求