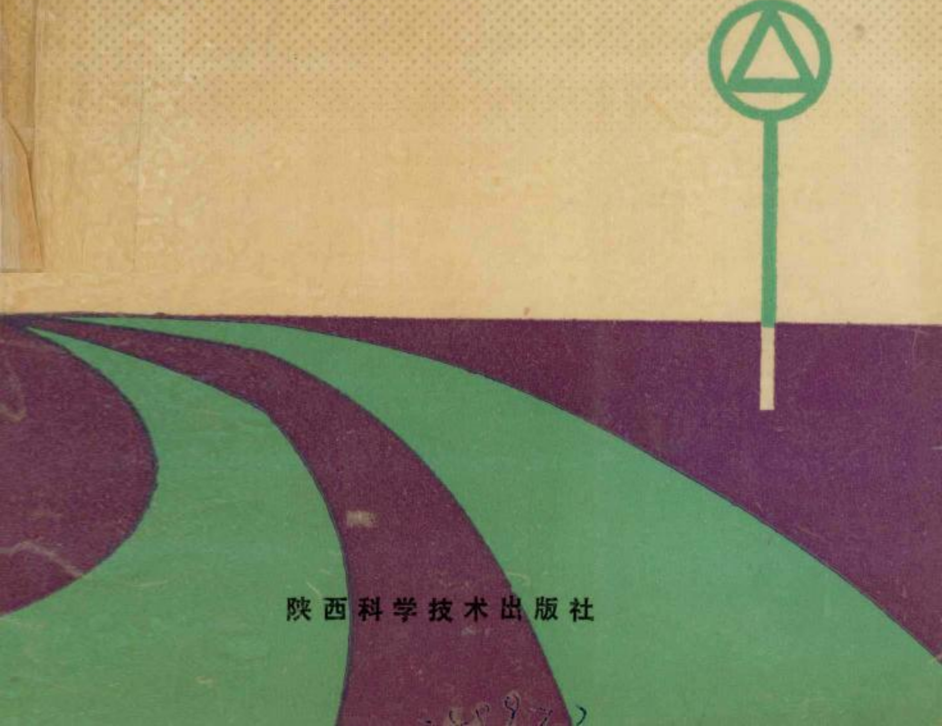
可靠性理论和方法在道路工程中的应用

李硕 编著



陕西科学技术出版社

可靠性理论和方法在道路工程中的应用

李 硕 编著

陕西科学技术出版社

可靠性理论和方法在道路工程中的应用

李硕　编著

陕西科学技术出版社出版发行

（西安北大街131号）

西安政治学院印刷厂印刷

787×1092毫米32开本　6.25印张　125千字

1990年11月第1版　1990年11月第1次印刷

ISBN 7-5369-0917-9/T·10

定价：2.90元

前　　言

70年代以来，可靠性理论及方法在道路工程中的应用发展较快，尤其是路面结构可靠性设计方法日趋完善，有些国家已进入实用阶段。我国在这方面的研究起步晚，但起点高。1985年以来，上海同济大学和西安公路学院等单位展开了有关的研究，所取得的成果为今后的进一步研究和把可靠性理论引入我国的有关道路工程结构设计规范，打下了一定的基础。

当前，可靠性理论和方法越来越受到我国道路界科研、设计、施工和管理人员的重视。遗憾的是缺少一本系统阐述可靠性理论和方法在道路工程中应用及可靠度分析计算基本方法的书，无法满足道路工程界有关人员的工作需要，也无法满足公路与城市道路专业学生学习要求。为此，我们编写了本书。

在编写此书时，从概念着手，力求讲清解决问题的理论方法。并着重于基本问题及其基本方法在工程中的实际应用，书中有些公式的结果是根据以往的计算机程序计算得到的，现对原单位注明了换算关系。全书内容精练，由浅入深，便于阅读。

全书由西安公路学院李硕编写，西安公路学院刘端参加了第二章和第五章的编写工作。研究生导师王秉纲教授和戴经梁副教授仔细阅读了全稿，并提出了宝贵的意见，在此一

并致谢。

鉴于可靠性理论及其方法在道路工程中应用的研究历史较短，而内容多、涉及面广，同时限于我们的水平，书中错误之处请广大读者批评指正。

编著者

1990年6月于西安公路学院

目　录

第一章　绪论…………………………………………（1）
　第一节　结构可靠性设计的发展…………………（1）
　第二节　道路工程结构的不定性…………………（2）
第二章　可靠性数学基础…………………………（6）
　第一节　普通集合…………………………………（8）
　第二节　随机事件及其概率………………………（14）
　第三节　随机变量及几种常用的分布函数………（24）
　第四节　随机变量分布函数的参数估计…………（38）
第三章　道路工程结构可靠性分析方法…………（38）
　第一节　基本方法…………………………………（44）
　第二节　近似方法…………………………………（65）
　第三节　多失效模式的结构可靠性分析…………（78）
第四章　蒙特卡罗模拟方法………………………（78）
　第一节　随机数的生成……………………………（78）
　第二节　给定概率分布的随机数的生成…………（80）
　第三节　蒙特卡罗模拟法在可靠度计算中的
　　　　　应用………………………………………（83）
第五章　系统可靠性最优化方法…………………（86）
　第一节　线性规划…………………………………（86）
　第二节　非线性规划………………………………（97）
　第三节　动态规划…………………………………（106）

第六章　结构系统可靠性…………………………（110）
第一节　串联系统的可靠性…………………………（110）
第二节　并联系统的可靠性…………………………（114）
第三节　复合系统的可靠性…………………………（115）
第四节　结构系统可靠度分配………………………（117）
第七章　道路工程结构的可靠性分析……………（123）
第一节　路面结构的可靠性分析……………………（123）
第二节　路基边坡稳定的可靠性分析………………（141）
第三节　挡土墙的可靠性分析………………………（147）
第四节　结构系统的目标可靠度……………………（151）
第八章　道路工程结构参数的统计分析及质量控制……………………………………（154）
第一节　数据的获取…………………………………（154）
第二节　荷载的统计分析……………………………（156）
第三节　材料参数的统计分析………………………（159）
第四节　结构几何尺寸的统计分析…………………（165）
第五节　质量控制……………………………………（166）
参考文献……………………………………………（178）
附　录………………………………………………（180）
Ⅰ．标准正态分布函数表
$$F(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}e^{-\frac{t^2}{2}}dt$$ ……………………（180）
Ⅱ．夏皮罗-威尔克检验a_{in}系数表………………（182）
Ⅲ．夏皮罗-威尔克检验临界值W（n，α）……（186）
Ⅳ．标准正态分布函数分位数表……………………（188）

Ⅴ. χ^2检验临界值$\chi_\alpha^2(m)$……………………(188)
Ⅵ. 均匀随机数列……………………………… (189)
Ⅶ. 控制图控制界线系数………………………… (192)

第一章 绪 论

第一节 结构可靠性设计的发展

科学的发展，是实践—认识—再实践—再认识的循环向前的过程。现代结构设计理论，不但要求结构的安全性满足使用者的心理上的愿望，而且要求结构满足经济及社会发展的需要，也就是说，应该可靠。

任何一个系统，小到电子元件和结构构件，大到航天飞机和摩天大楼，首先必须可靠。系统的可靠性，一般定义为系统在规定的条件下，在规定的时间内，完成其预定功能的能力。这里，预定的功能就是对系统提出的安全、使用性能和经济要求。对于不同的系统，把规定的条件、时间和预定的功能具体化，就可进行可靠性分析。

可靠性理论最早于30年代初出现在电子工业中。40年代初Pugsley把可靠性理论引入航空工业；同年，Freudenthal应用概率理论研究结构安全问题。此后，结构的可靠性问题引起了广泛的注意。1951年Pugsley论述了结构安全度的基本概念，1955年苏联建筑法规采用抗力及荷载的标准值表示结构安全度；1956年Freudenthal研究了结构安全度和失效概率。60年代Cornell的研究取得突破性进展，他提出了和失效概率有关的“Cornell系数β”（即可靠指标），

使得结构安全度有了统一的数量指标。70年代可靠性设计的实用研究取得了可喜的成果，Lind提出了分项系数方法，Rosenbluth提出了概率矩的点估计方法，Paloheimo和Hannus提出了设计验算点的概念，Fiessler和Rüger Rackwitz提出了在设计验算点当量正态化方法，Alfred H-S Ang和James T.P.Yao分别研究了主观不定性及动力可靠性，使得结构可靠性理论更加完善。我国大连工学院的赵国藩教授也研究提出了一种实用方法。

同建筑结构相比，可靠性概念在路面或其它道路结构设计中的应用起步较迟，其原因是路面等结构不象建筑结构一样直接影响人们的安全，一旦失效所造成的社会影响不象建筑结构那样大。汽车诞生以前的路面，没有现在的“设计”的概念。只是有了汽车，才促使人们研究路面设计理论和方法。随着近年来理论研究的不断深入，计算理论日趋完善，但同时对材料性能、施工质量和交通荷载的随机性表现出妥协的姿态，在设计时采用安全系数之类的修正值以抵消不利因素的作用。道路工作者试图摆脱这种被动的局面，随着工程经验的积累，开始采用设计变量的均值设计，后来有些参数采用标准值，如路面回弹弯沉计算值为

$$l_0 = \bar{l}_0 + \lambda\sigma$$

式中σ为弯沉测定值的标准差，λ为同路面等级有关的保证率。事实上这已引入可靠性设计的初始概念。但是，多数参数仍是假定为定值。

直到70年代初，道路工作者才意识到路面分析理论的精确性同设计参数的不定性格格不入，参数取值的误差可能使理论分析所做的努力成为徒劳。1971年，A.C.Lemer和F.-

Moavenzadeh研究了路面设计的可靠性；1972年，M.I.Darter、B.F.McCllough和J.L.Brown把可靠性概念应用于美国得克萨斯州柔性路面系统；1973年，R.K.Kher和M.I.Darter把可靠性概念引入AASHO路面设计方法。1981年，You T.Chou分析了美国机场道面CBR设计方法的可靠性；同年，Paul Irick较为系统的研究了路面可靠性设计的有关概念、概率处理方法、设计变量的方差估计以及确定设计可靠度水平的一般原则。

我国从1985年以来着手道路结构可靠性设计的研究，上海同济大学和西安公路学院都先后做了大量的工作，取得了一些成果。可以预言，可靠性设计方法，将被我国道路工作者所接受。

第二节　道路工程结构的不定性

道路工程结构的可靠性分析，是在力学分析的基础上应用概率理论研究结构的安全问题，可靠性设计是由此得到的一种崭新的设计方法。图1.1表示的是一重力式挡土墙，其基底应力验算的传统公式为

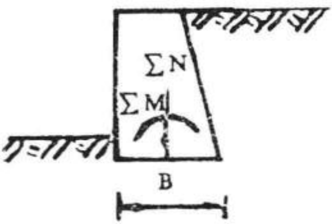


图1.1　重力式挡土墙

$$\begin{matrix}\sigma_1\\ \sigma_2\end{matrix} = \frac{\Sigma N}{B} \pm \frac{\Sigma M}{W} \leqslant [\sigma_0]$$

式中ΣN为作用于基底合力的垂直分力，ΣM为对中性轴的力矩之和，B为底宽，W为基底截面模量，$[\sigma_0]$为容许应力。

公式中把土压力视为定值，

并忽略施工造成的误差及填土性能、圬工材料性能的误差，和结构实际状态不符。另外，容许应力的取值也带有一定的主观性。

现代结构工程力学，应用经典数学、计算数学和计算机科学的成就，把实际结构抽象成一理想的数学模型，用确切的函数或方程表征变量之间的关系，求出精确解或数值解。但是，无论是自然界还是人类自身，都存在许多错综复杂的现象，无法确切地用经典数学、力学描述。

随机性　自然界中某些现象在一组条件下可能出现，也可能不出现。例如，汽车在道路上行驶时，轮迹的横向分布、水泥混凝土路面各点抗折强度和土的容重的变化都是随机的，这类现象称为随机现象。为了寻求随机现象的规律性，需要对随机现象进行大量的观察，如钻孔取样测定路面的强度及厚度，观察结果表现出随机规律。研究随机规律的数学有概率论、数理统计以及随机过程。

道路工程结构的随机性，来源于结构材料性能的变异性、路基土的变异性、施工质量的变异性和车辆荷载的变异性。我们所感兴趣的不是具体的个体，而是总体所呈现的状态。例如水泥混凝土的抗折强度，可用一定的概率分布模型及统计特征值进行描述。把路面力学、土力学和概率论结合起来，预测道路工程结构的可靠度，籍以确定各结构的几何尺寸，如路面厚度、挡土墙尺寸和边坡坡角大小，就是道路工程结构可靠性设计。

模糊性　模糊性是道路工程结构不定性的另一重要内容，在路面结构设计方法中，经验方法一直居于重要的地位，但“经验”常常给人模糊的感觉。另外，有些概念也是不明确

的，如“路面使用性能尚好”，谁也无法说出达到什么程度为“尚好”；路基土干湿类型的划分也产生了模糊信息。设计人员的主观信息也呈现模糊性，如设计参数的取值，尤其是安全系数的取值。这些是另一门数学分支——模糊数学研究的问题。

第二章　可靠性数学基础

概率论是可靠性理论的基础，它在可靠性理论中得到最广泛的应用。因此，本章内容是全书的预备知识，只有掌握了有关概率论的知识，才能应用可靠性理论去解决实际工程结构的有关问题。

第一节　普通集合

集合论是康托在19世纪末创立的。自然界中经常会遇到由某些特定的事物组成的集体，我们称其为集合，简称集。例如“公路学院的学生”、“公路系的教师”等等都是集合。集合常用大写英文字母表示，如U。集合里的各个事物为这集合的元素，用小写字母表示，如u。若集合U是由元素u_1，u_2，…等组成，则记为

$$U=\{u_1, u_2, \cdots\}$$

数学上常用符号“∈”表示属于，“∉”表示不属于.例如ξ属于U，u不属于U，分别记作

$$\xi\in U \text{和} u\notin U$$

如果U中的元素为有限多个，则称U为有限集，否则称为无限集。如果集合A是由U中的一部分元素组成，则称集合A为U的子集，记作

$$A\subset U$$

例如“公路学院公路系的学生”是“公路学院的学生”的子集。由集合U的全体元素组成的集合称为全集，它是最大的子集。不含U中任何元素的子集为空集，它是U的最小子集，记为ϕ。任一集合，重复的元素只计一次，如{a，a，b，c}和{a，b，c}为同一集合。集合U若含n个元素，则它的子集必有也只有2^n个，例如U={a，b}的子集有

{a}，{b}，{a，b}，ϕ共4个。

集合的运算有三种：交、并和余，分别对应于“与”、“或”和“非”三种逻辑运算。若A、B、C为集合U的子集，由同时属于A与B的元素组成的集合，称为A、B的交集，记作

$$A \cap B = \{x \mid x \in A \text{且} x \in B\}$$

由至少属于A或B的每个元素组成的集合称为A、B的并，记作

$$A \cup B = \{x \mid x \in A \text{或} \in xB\}$$

由不属于A的元素组成的集合，称为集合A的余集，记作

$$\overline{A} = \{x \mid x \notin A,\ x \in U\}$$

集合图见图2.1。

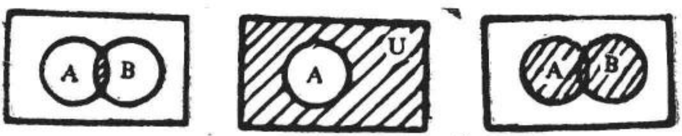


图2.1　集合运算图

集合运算常用的性质有

1．交换律

$$A \cup B = B \cup A \quad A \cap B = B \cap A$$

2．幂等律

$$A \cup A = A \quad A \cap A = A$$

3. 分配律

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$
$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cap C)$$

4. 相补律

$$\overline{\overline{A}} = A \qquad A \cup \overline{A} = A$$
$$A \cap \overline{A} = \phi \qquad \overline{\phi} = U$$

5. 对偶律

$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \qquad \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

6. 同一律

$$A \cup \phi = A \quad A \cap \phi = \phi$$
$$A \cup U = U \quad A \cap U = A$$

7. 结合律

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$
$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$$

8. 传递律

如果$A \subset B$，$B \subset C$，则$A \subset C$。

第二节 随机事件及其概率

一、随机事件

在生产和实验中，存在种种不同的现象。在一定条件下必然发生的事件，称为必然事件；反之，必然不发生的事件称为不可能事件；可能发生也可能不发生的事件称为随机事件。例如扔骰子，“点数不超过6”就是必然事件；“点数

超过6”就是不可能事件；“点数不超过4”就是随机事件。为了探索随机事件的规律性，常常需要对随机事件进行观察，每一次观察看作是一个试验。有些试验在规定的条件下，在完成试验前，不能肯定试验结果是什么，只能知道试验结果在某个范围之内，并且每个可能的结果都有一定的出现机会，称这种试验为随机试验。

二、概率

设有一试验，基本空间$U=\{u_1, u_2, \cdots u_n\}$，而事件A是由U中的r个不同的基本事件组成，那么规定事件A的概率为

$$P(A)=\frac{r}{n} \qquad (2.1)$$

这种定义称为概率的古典定义。必然事件的概率为1，不可能事件的概率为0。

由概率的定义，可得到以下概率的性质：

1. 对任意事件A，有$0\leqslant P(A)\leqslant 1$。

2. 设$A_1, A_2, \cdots A_r$为互不相容事件，则

$$P\left(\sum_{i=1}^{r}A_i\right)=\sum_{i=1}^{r}P(A_i)$$

这一性质称为概率的可加性。

古典的概率以“等可能性”为条件，这个条件是难以确定的，并且有些实际问题其结果可能为无限，这时就不能由古典定义计算事件的概率，为此给出概率公理化的定义。

设A为基本空间U的子事件，P(A)为一实函数，且有

1. $0\leqslant P(A)\leqslant 1$；