

◎李其军 陈肇和 著

TUSHIBA MANBA FENGXIAN
LILUN YU YINGYONG

土石坝漫坝风险 理论与应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝 漫坝风险理论与应用

TUSHIBA MANBA FENGXIAN
LILUN YU YINGYONG

◎李其军 陈肇和 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了风险分析的基础理论和计算方法,并详细阐述了作者对土石坝漫坝风险分析的理论、模型和估算方法进行的创新性研究成果,提出了土石坝漫坝风险标准,列举了分别代表并联水库、串联水库、大型和中型水库等四种类型的工程应用实例。

本书可供水利工程研究与技术人员、工程管理人员使用和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土石坝漫坝风险理论与应用/李其军,陈肇和著. —北京:中国水利水电出版社,2008
ISBN 978-7-5084-5907-3

I. 土… II. ①李…②陈… III. 土石坝—溃坝—风险分析 IV. TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 145413 号

书 名	土石坝漫坝风险理论与应用
作 者	李其军 陈肇和 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 8.5 印张 157 千字
版 次	2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	36.00 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

Contents

目 录

第一章 引言	1
第二章 文献述评	3
第三章 风险分析的基础理论	7
第一节 随机数学的一些概念	7
第二节 风险分析的一些基本概念	10
第三节 风险辨识	13
第四节 不确定性分析	16
第五节 敏感性分析	18
第六节 风险的计算方法	21
第四章 土石坝漫坝风险理论、模型与估算方法	34
第一节 土石坝水利枢纽工程的风险辨识与事故分析	34
第二节 漫坝风险模型理论基础	36
第三节 洪水作用下的漫坝风险模型	38
第四节 年最大洪水系列与风浪联合作用下的漫坝风险模型	46
第五节 串联双库漫坝风险理论与模型	50
第六节 漫坝风险中的洪水荷载	53
第五章 土石坝漫坝风险标准	58
第六章 工程应用实例	61
实例一 通过漫坝风险分析,提高清河水库兴利效益的研究	64
实例二 小南海—彰武水库漫坝风险分析研究	75
实例三 桃曲坡水库漫坝风险分析与安全评价	93
实例四 紫坪铺水库漫坝风险分析	108
第七章 结论	126
参考文献	127
后记	131

第一章 引言

水，是人类社会生存与发展最重要的不可替代的自然资源，也是生态系统须臾不可或缺的环境要素。水在人类社会系统中，对于支持人类生命、提供人类食物的光合作用、经济社会的生产及现代人的生活具有基本的保障功能和支撑作用。在地球生态系统中，水又是生物生命的载体，是物质循环和能量流动的介质，是地球上所有生物物种的生命之源。现代的经济与社会、生态与环境须臾离不开水，可见水是保障人民健康、粮食安全、能源安全、生态安全的重要战略资源，是人类社会和地球生态环境的血液和动脉。

我国是一个缺水的国家，人均水资源占有量仅 2200m^3 ，不足世界人均占有量的 $1/4$ ，只有美国的 $1/5$ 、俄罗斯的 $1/7$ 、加拿大的 $1/50$ 。目前我国有 18 个省（自治区、直辖市）人均水资源量低于联合国可持续发展委员会审议的人均占有水资源量 2000m^3 的标准，其中有 10 个省（自治区、直辖市）人均水资源量低于 1000m^3 的最低限，尤其海河、淮河和黄河流域，人均水资源量仅 $350\sim 750\text{m}^3$ ，属严重缺水地区。水资源的短缺已成为经济社会发展和生态环境改善最主要的制约因素和瓶颈。

新中国成立以来，水利事业进入了新的发展时期。大江大河综合治理、农田水利全面建设、水力发电和水资源综合利用、调水供水工程建设等都得到了飞速发展。截至 2004 年，全国已建成大中小型水库 8.52 万座，总库容 5542 亿 m^3 。在大中型水库中，土坝占 91%，砌石坝占 5.4%，混凝土坝占 3.1%。水库的建设对防洪减灾具有控制性的作用，但也存在着因事故而危害下游人民生命财产的潜在威胁，尤其是漫坝、垮坝事故威胁更甚。据统计，我国水库失事率约为 3.8%，漫坝失事占失事总数的 51.5%，可见漫坝失事是水库失事的主要形式^[1]。

在兴利方面，水库对充分利用水资源起着重要的作用。2005 年，全国实际供水量为 5633 亿 m^3 ，其中通过水库供水占 26.7%，很大程度上保障了工农业生产及城镇居民的用水需求。但由于我国水资源为量不丰、分布不均，水的供需矛盾十分突出，尤其是北方缺水地区，已达到严重影响区域社会、经济发展的地步。鉴于我国当前社会发展水平和财力所限，加之这些地区水资源总量及时空分布特点，不可能大规模地对水库库容进行扩大或广泛地实施跨流域



长距离引水，因此，如何充分利用当地的宝贵水资源，妥善处理防洪与兴利的矛盾，便成为解决问题的重要方法之一。

对于具有防洪任务的水库，在汛期其水位不得超过汛限水位，而北方地区水资源又主要集中在汛期，故而，为确保汛期防洪安全，不得不将超汛限水位的水量白白弃掉，汛后，限于水资源不足，及汛尾降雨的不确定性，又往往蓄不到正常高水位，严重影响水库的兴利效益。传统上，在进行防汛调度和调洪演算时将入库洪水、库容、泄流能力、风浪都视为确定量，而实际上它们都是随机量。另一方面，随机理论在水利水电工程技术中的应用已成为发展趋势。在水利行业，《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》已颁布实施，对于水力设计及防洪工程的可靠度分析与计算，由于其情况比较复杂，涉及的因素较多，故仍处于科学研究和积累资料阶段。本着科研先行、积极探索、逐渐积累的方针，在作者完成课题“土坝及河道堤防风险和设防标准的研究（土坝部分）”以后，又相继完成了数十座水库的漫坝风险分析研究，取得了极为显著的社会经济效益。

漫坝风险分析从概率论的角度出发，综合应用可靠性数学、随机水文学、随机水力学等学科知识，全面考虑洪水、风浪、库容和泄流能力的不确定性，建立土坝对抗洪水与风浪共同作用下的漫坝风险分析的基础理论和计算方法，并结合具体工程实际，以期妥善处理防洪与兴利的矛盾，并在确保大坝防洪安全的前提下，充分利用宝贵的雨洪资源，提高水库的兴利效益。

漫坝风险分析应用于实际工程，对于土坝坝体坚强、防洪标准较高的水库，可以通过漫坝风险分析，对其防洪调度方案进行比选，从而提出切实可行的建议，譬如抬高（或分时段抬高）设计规定的汛限水位，以资在确保大坝安全的前提下，使水库既充分发挥防洪功能，又尽可能多地蓄水，恰当地处理防洪与兴利问题，来提高其兴利效益，使宝贵的水资源得到充分的利用。对于防洪标准较低水库的改扩建工程以及新建水库，可以利用漫坝风险分析理论，恰当地选定最经济合理的改扩建规模和优化枢纽布置，使工程的综合效益最大。

本书即是对“土坝及河道堤防风险和设防标准的研究（土坝部分）”和陡河等 10 余座水库的漫坝风险分析研究的归纳和总结。

第二章 文 献 述 评

国外对大坝风险的研究始于 20 世纪 60 年代末 70 年代初。由于几起严重的大坝失事，促使许多国家如美国、前苏联等开展大坝防洪风险研究。但对可靠性的零星研究早在第一次世界大战后就已经开始，当时主要应用统计手段研究飞机性能的可靠性和必要的安全规范。而早期的可靠性数学模型的发展却是第二次世界大战期间在德国开始的，主要应用于 V—1 导弹发射成功率的研究。50 年代，美国成立了专门研究机构，开展对宇航、核领域、电子系统的可靠度研究。60 年代出现了新的可靠性技术，更广泛地用于各种专门用途；之后，可靠性研究方兴未艾，应用日趋广泛，可靠性分析已成为人类生产实践的一个重要组成部分。土木结构方面的可靠性研究，始于 50 年代初。在初创时期，美国的 A. M. Freudenthal 和前苏联学者斯特列律茨基、尔然尼采等做出了较大的贡献；并在 A. M. Freudenthal 的倡议下于 1969 年在华盛顿召开了第一届国际结构安全性和可靠性会议（ICOSSAR），随后又连续召开了几次会议。需要指出的是，关于一阶二次矩（包括可靠性指标的概念）一整套分析理论和方法的主要成就是 C. A. Cornell, A. H. S. Ang, N. C. Lind, R. Rackwitz 和 A. M. Shinozuka 等人所做的贡献。开展水利工程防洪系统的风险研究晚于结构可靠性研究，主要是由于水利工程防洪系统涉及的自然因素较多，无法通过人工试验检验其随机性，受历史资料限制，不易获得其随机性规律；而且变量之间多为非线性、非解析函数关系，系统内部关系复杂，难以用数学模型精确描述。但在借鉴结构可靠性研究成果的基础上，经过许多研究人员的努力，水利工程防洪风险研究取得了明显的进展，在此领域中作出重要贡献的主要有：A. H. S. Ang, Wood, E. F., Yen Ben Chie, Mays, L. W., C. A. Cornell, R. Rackwitz, W. H. Tang 等。在 1989 年国际水利协会（IAHR）大会和讨论会上，这个问题已成为与会者颇为关注的一个热点，在 1991 年举行的国际水利协会大会上专门召开了关于可靠性和风险分析讨论会，且在 1996 年 7 月专门召开了 IAHR 第七届国际随机水力学学术讨论会，以促进这一领域向更完善的方向发展，此后，每届国际水利协会（IAHR）大会均将风险分析与洪水管理作为固定的主题或专题加以研讨。

国内开展水利工程防洪可靠度的研究起步较晚，是从 20 世纪 80 年代开始

的, 尽管如此也取得了一批成果。

水利工程风险分析研究包括: 抗力和荷载的随机性研究, 风险模型与估算方法的研究, 灵敏度分析, 风险标准的研究, 系统分析和事故树分析研究。抗力和荷载的随机性研究包括: 洪水、风浪的随机分布规律和分布参数的确定, PMF 值的估算及其对应的重现期研究, 泄流能力及影响因素的随机性研究, 库面积和库容不确定性研究。风险模型与估算方法研究包括: 风险模型的建立, 风险的计算方法和数值计算手段。灵敏度分析是分析各种因素对风险影响的程度。风险标准的研究是指确定适当的风险标准, 使其既能被社会公众所接受又具有较好的经济社会效益, 包括投资—效益—风险分析、社会公众心理调查、政策研究等。系统分析和事故树分析研究主要是将系统分析理论、事故树分析手段应用于水利工程风险分析系统之中, 分析其结构、组织, 使总风险分解成单项风险时, 不重叠、不遗漏。

在水利工程防洪风险研究发展史上, 多数文献只考虑了单项或两项因素来估算风险, 如在 1970 年 B. C. Yen 教授所提出的对设计标准为 T_r 年一遇的洪水, 建筑物使用年限为 N 年时, 失事风险为

$$\bar{R}_N = P\{X > Q\} = 1 - (1 - 1/T_r)^N \quad (2-1)$$

就只考虑了水文的年际间的随机性。而早在 1967 年 Otto Pfastette 在论述溢洪道设计的经济问题时, 就提出大坝失事风险应由大坝失事概率和失事后果来确定。

在文献 [17] 中 B. C. Yen 和 A. H. S. Ang 对风险分类方法进行了论述, 把不确定性划分为主观不确定性和客观不确定性, 提出了在缺乏资料时处理不确定性的方法。

援引文献 [19], Wood, E. F. 在 1971 年首次提出了综合风险的概念, 即同时考虑洪水与泄流能力的不确定性, 计算排水涵洞的风险, 虽然在计算过程中采用了简化手段, 但在方法论上却向前迈出了重要的一步。

1973 年, 美国土木工程师学会组织工作委员会重估了已建大坝的泄流能力, 并提出了风险费用的概念, 在委员会提交的报告中认为, 确定泄流能力应取风险费用与年费用之和为最小时的泄流能力。该报告只考虑了经济因素与水文因素的不确定性来确定泄流能力; 实际上, 泄流能力的确定应综合考虑政治、经济、社会、技术等方面的因素。

1976 年, Rackwitz 首次把一阶二次矩方法应用于防洪风险的计算, 1977 年 CIRIA 报告对该方法作了详细的介绍。

1977 年, Wood, E. F. 计算了由洪水引起的堤防漫坝风险, 在计算中作者只考虑水文随机性, 而没有考虑水力因素的不确定性。

1979年, F. E. Fahlbusch 对大坝的失事风险标准进行了研究, 认为大坝所承担的风险依赖于下游居民的稠密程度与失事后的财产损失。

1980年及1983年, Yeon Koung Tung, Larry W. Mays^[5] 和 Han Lin Lee^[21] 先后提出了考虑洪水重复发生情况的“动态”风险模型, 首次把洪水看成是时间序列的“动态”分布过程。

1982年, S. T. Cheng, B. C. Yen 和 W. H. Tang^[2] 在考虑了水文、水力两方面的不确定性情况下, 估算了漫坝风险, 并对风险标准作了进一步的研究, 该研究中所用的洪水过程线过于简化, 以致偏离实际。

1984年, Y. Y. Haimes 等运用多目标风险分割方法对水资源规划进行了研究, 把政治、法律、社会因素看作约束条件考虑在内, 对工程进行风险一效益一损失的综合研究, 以确定工程的规模和泄流能力。这是首次把风险分析理论应用于水资源系统规划中去, 但在确定泄流能力及估算风险时, 没有考虑水力不确定性。

1987年, Leach, M. R.^[46] 等研究了各单目标风险的灵敏性, 提出了处理各单目标风险方法, 即分割风险方法与界限。

1988年, Y. Y. Haimes, R. Petrakian, P. O. Karlsson, J. Mitsiopoulos^[15] 运用风险分割的方法, 研究了有关大坝失事的小概率/后果严重事件的概率, 并提出对这类事件的处理方法; 此外还对洪水频率的外推进行了细致的分析, 提出超过100年一遇的洪水并不都满足P-III的分布。

1990年, A. Afshar, M. A. Marino 在总结前人研究成果的基础上, 阐述了利用风险分析设计溢洪道最优泄洪能力的方法。

1992年5月, 在中国台北召开的第六届国际随机水力学学术研讨会上, E. J. Plate 作了题为“水力学中的随机设计: 更为广泛应用的概念”的主旨报告; B. C. Yen 作了题为“水力学中的随机考虑”的邀请报告; G. Meon 发表了题为“大坝洪水漫顶的概率”的论文等。

在国内, 1988年, 郭子中、徐祖信研究了泄洪及消能风险^[6]。

1989年, 王木兰等利用 Monte Carlo 方法研究了挑流冲刷的风险^[72]。

1991年3月, 作者在全面考虑水文、水力、库容、风浪等随机因素的情况下, 研究了针对水文系列的土坝漫坝风险^[8-9]; 其后, 于1991年10月, 姜树海在考虑了水文、水力、库容等随机因素的情况下, 研究了针对单场设计洪水的泄洪风险^[10]。两者研究的特点均是从求解随机微分方程出发, 且考虑的随机因素较全面, 成果比较切合实际。

1994年, 作者和姜树海分别承担了水利部重点科研项目“土坝漫坝风险分析与设防标准的研究”土坝和堤防部分, 土坝漫坝风险理论、模型和计算方



法更趋完善。

2001 年，莫崇勋、吴彰敦等采用同样的技术路线，进行了土坝漫坝风险分析研究。

自 1991 年以后，作者与合作者相继开展了数十座水库的漫坝风险分析研究^[9,35,38-39]，土坝漫坝风险分析逐步走向实际应用阶段。

第三章 风险分析的基础理论

在建立漫坝风险分析理论之前，先提纲挈领地介绍一些漫坝风险分析要用到的可靠性数学理论，以便于方便理解漫坝风险分析理论的建立过程，至于更系统的知识，请参考文献 [24 - 29]。

第一节 随机数学的一些概念

一、随机现象与随机数学

在一定条件下必然发生某种结果的现象，称之为必然现象。描述这类现象的数学工具主要是确定性函数理论，这类数学为确定性数学。而在一定条件下，其结果具有不确定性，可能出现这种结果也可能出现那种结果的现象，称之为随机现象。随机现象的大量试验又具有统计的规律性，描述这种现象的数学为随机数学，是风险分析的理论基础。

二、概率空间

随机现象的每一可能结果称之为样本点，由该随机现象的所有样本点组成的集合为样本空间 (Ω)。由样本空间 Ω 的一些子集所组成的 δ -代数称之为事件域 F ，其中的元素为事件。用通俗的语言讲，即由样本点所组成的集合，但满足 δ -代数条件，这些集合称之为事件，所有的这些集合组成的整体为事件域 F 。在事件域上定义非负集合函数，即每一集合对应一个非负实数，用来表征该事件发生可能性的大小，并且满足公理化条件（非负性、规范性、完全可知性），这样的实数就称之为事件的概率 (P)。样本空间 Ω 、事件域 F 、概率 P 组成的三元总体 (Ω 、 F 、 P) 为概率空间。

三、随机变量与分布函数

对于样本空间 Ω 中每一样本点 ω ，可用一个实数与之对应，不同样本点对应不同实数，这样，在样本空间上就定义了一个实数单值函数，这个函数同样具有随机性。事实上，上述函数是用实数来表示随机现象的结果，该实数变量定义为随机变量。因此概率就成为实数或实数集与非负实数集之间的对应关系。

设 X 是一个随机变量； x 是任意实数，用函数

$$F(x) = P\{X \leq x\} \quad (3-1)$$

来表示随机变量 X 取值小于等于 x 时的概率，则 $F(x)$ 定义为 X 的分布函数。式 (3-1) 中 P 表示概率， $\{ \}$ 号内表示随机变量的取值范围。

如果对于任意实数 x ，存在有

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (3-2)$$

式中 $f(x) \geq 0$ ，则称 X 为连续型随机变量， $f(x)$ 称为 X 的概率密度函数。此外还存在另一类随机变量，它的全部可能取值是有限的或可排列成有序一系列的无限多个，这种随机变量称作离散型随机变量。描述离散型随机变量一般用下式：

$$P\{X = x_k\} = p_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3-3)$$

p_k 称为 X 的分布律。依照分布函数的概念，离散型随机变量的分布函数为

$$F(x) = \sum_{x \leq x_k} p_k \quad (3-4)$$

工程中常用的概率分布为正态分布、对数正态分布、P-Ⅲ型分布、极值分布，其特性和参数请参阅有关文献。

如果每个样本点 ω ，都必须用一个向量 $\{\xi_1(\omega), \xi_2(\omega), \dots, \xi_n(\omega)\}$ 来描述，则称 $\xi(\omega) = \{\xi_1(\omega), \xi_2(\omega), \dots, \xi_n(\omega)\}$ 为 n 维随机变量。在实际工程中常用到二维随机变量，二维随机变量的分布为

$$F(x_1, x_2) = P\{\xi_1(X) < x_1, \xi_2(X) < x_2\} \quad (3-5)$$

同样可定义连续型随机变量，它满足

$$F(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} f(y_1, y_2) dy_1 dy_2 \quad (3-6)$$

式中 $f(y_1, y_2) \geq 0$ 。更高维的随机变量，与二维随机变量相仿，这里不再赘述。

四、条件概率与统计独立性

设 A 、 B 是事件域中两个事件， $P(B) > 0$ ， AB 表示 A 、 B 两事件中相同的样本点所组成的交集，定义

$$P(A/B) = P(AB)/P(B) \quad (3-7)$$

为在事件 B 发生的条件下，事件 A 发生的概率。

对条件概率，如果满足 $P(A/B) = P(A)$ ，也即 $P(AB) = P(A)P(B)$ ，称 A 、 B 两事件相互独立。如果两个随机变量相互独立，即两者的发生彼此互不影响，则满足。

$$F(x_1, x_2) = F_{x_1}(x_1)F_{x_2}(x_2) \quad (3-8)$$

称两个随机变量具有统计的独立性。

五、随机变量的数字特征

除了用概率分布来描述随机变量外，数字特征也可用来描述随机变量。工程中常用的数字特征为：均值、方差、均方差、变异系数。

1. 均值 $M(X)$

对离散型随机变量，定义 $M(X)$ 为

$$M(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3-9)$$

对连续型随机变量， $M(X)$ 为

$$M(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (3-10)$$

2. 方差 $D(X)$ 与均方差

对离散型随机变量， $D(X)$ 为

$$D(X) = M\{[X - M(X)]^2\} = \sum_{k=1}^{\infty} [x_k - M(X)]^2 p_k \quad (3-11)$$

对连续性随机变量， $D(X)$ 为

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(X)]^2 f(x) dx \quad (3-12)$$

标准差（均方差）定义为方差的平方根，即

$$\sigma = \sqrt{D(X)} \quad (3-13)$$

3. 变异系数 δ

变异系数 δ 表示随机变量 X 的离散程度，定义为

$$\delta = \sigma / M(X) \quad (3-14)$$

4. 数字特征的估计值

在实际工程中，往往事先并不知道随机变量的分布规律，只知道随机变量的一组统计资料，这时，可利用统计资料进行参数估计。均值和方差的估计值为

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3-15)$$

$$\bar{D}(X) = S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{X})^2 \quad (3-16)$$

n 为统计资料的个数。相仿地， $\bar{\sigma}$ 可表示为

$$\bar{\sigma} = S = \sqrt{\bar{D}(X)} \quad (3-17)$$



变异系数可表示为

$$\delta = \bar{\sigma} / \bar{X} = S / \bar{X} \quad (3-18)$$

第二节 风险分析的一些基本概念

一、抗力与荷载

抗力是指研究对象抵抗破坏或失事的能力；荷载是指作用于研究对象之上的“失事动力”。抗力与荷载是两个抽象化的概念，对不同的研究对象、不同的失事形式，抗力与荷载所代表的物理含义是不同的。

二、系统与失事

风险分析研究对象，既可以是元件，也可以是一个系统，系统是指由若干个既相互区别又相互联系和相互作用的部分所组成，并处于同一的外部环境之中，又为实现同一个或若干个目标而存在的有机体。元件和系统的概念是相对的，一个系统可以是一个更大系统的组成“元件”，称之为子系统；系统的元件在较小的范围内又可以看成是一个系统，因此元件可以作为一个简单的系统来处理。

系统可以是单目标的，也可以是多目标的；可以具有单一用途，也可以是具有多种用途的复杂系统。

失事是正常系统在设计基准期内丧失其设计功能的事件。复杂系统的失事可呈多种形式，每一形式的失事又有程度上的不同。系统的失事域就是由各种形式、不同程度失事事件所组成的整体。

三、风险与可靠性

可靠性是指系统在规定的工作条件下，在规定的时间内，完成预定功能的能力。可靠度是可靠性的概率度量，是指系统在规定的工作条件下、规定的时间内，完成其预定功能的概率。

风险是指系统在规定的工作条件下，在规定的时间内，发生失事的概率及由此产生的后果。风险可表示成如下函数式：

$$\bar{R} = f(P, C) \quad (3-19)$$

式中： $\bar{R}$ 为风险； P 为失事概率； C 为对应的失事后果。

因此，风险概念由两个规定的条件（工作条件、时间）及组成风险的两个要素 P 、 C 构成。

(1) 工作条件。是指系统所处的外部环境及作用因子的状态和系统内部特征，也即抗力、荷载及外部环境的状态和特性。

(2) 规定的时间。是指进行风险估算时的基准期, 也即考虑各项基本变量与时间关系所选用的分析基准期。

(3) 概率 P 。代表失事后果为 C 的失事概率。

(4) 失事后果 C 。是指对系统失事进行划分后, 相互独立、某种形式和特定程度失事的影响后果。

在社会主义国家, 失事后果 C 可分为三个方面: 经济损失 M 、人身健康损失 L 和环境恶化 E 。

经济损失 M 是指失事后造成系统本身损失以及由于系统失事而引起系统外的其他直接经济损失。系统本身的损失对于不可修型的失事, 就是其本身的造价; 对于可修型的失事, 为修复失效系统所花费用。

人身健康损失 L 是指失事后所造成的人员伤亡。对伤的情况, 又有损伤程度的区别, 分因伤致残和伤后治愈, 对后者, 其医疗费、生活补助费和误工费可划到经济损失之中。因此, 人身健康损失 L 包括生命的死亡和伤残两项。

环境恶化 E 是指因失事而造成某地区的生活环境和生产环境的恶化以及自然生态条件的恶化甚至破坏。环境恶化是由一系列指标来衡量和表示的, 对轻微的环境恶化, 可通过治理加以修复, 这种环境恶化可用其相应的治理费来表示, 从而可以划归到经济损失一类中; 而对较严重的生态环境破坏就不能单纯从经济角度考虑, 需要从社会、政治、经济等方面加以综合考虑。

(5) 函数 $f(\cdot)$ 。由以上分析可见, 失事需要用三个量来衡量和描述, 这三个量是经济损失、人身健康损失和环境恶化。因此, 风险也必须用三个指标来衡量。

由于系统的失事有其形式和危害程度的区别, 故而对于各种形式和特定程度的失事, 其失事概率也不同, 这就需要用 $f(\cdot)$ 把各种形式和不同程度的失事统一到同一指标上来, 以便获得系统的整体特性。

对于某种形式、特定程度的失事 F_{ij} , 其风险 $\bar{R}_{ij}$ 可分别表示为

$$\bar{R}_{ij1}[\text{经济损失} / \text{时间}] = P_{ij} \cdot M_{ij} \quad (3-20)$$

$$\bar{R}_{ij2}[\text{伤或亡} / \text{时间}] = P_{ij} \cdot L_{ij} \quad (3-21)$$

$$\bar{R}_{ij3}[\text{环境恶化指标} / \text{时间}] = P_{ij} \cdot E_{ij} \quad (3-22)$$

以上式中, 下标 i 表示失事的形式, 下标 j 表示对应 i 失事形式下特定程度的失事, 时间是指风险估算的分析期。

因此, 函数 $f(\cdot)$ 可概括地表示为

$$f(P, C) = P \cdot C \quad (3-23)$$

四、系统的总风险

系统的总风险是由各种形式、每一危害程度失事风险综合而成的系统整体

风险。由以上讨论可知,总风险为

$$\bar{R}_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{R}_{ij1} \quad (3-24)$$

$$\bar{R}_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{R}_{ij2} \quad (3-25)$$

$$\bar{R}_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \bar{R}_{ij3} \quad (3-26)$$

以上式中, n 为失事形式种类; m 为对应某种失事形式所划分的危害等级数。

五、单项风险

单项风险是指对应某种形式、特定程度的失事风险,即式(3-23)中失事后果 C 已知时的风险。因此,单项风险的研究重点在于估算 P 值。

单项风险也就是对应于确定的 C , 该系统的荷载超过系统抗力的概率,在失事后果 C 已知情况下,系统的风险及可靠特性仅依赖于失事概率 P 。用数学形式表示,即

$$\bar{R} = P(L > R) = \int_{L>R} P_f dX \quad (3-27)$$

式中, L 为荷载; R 为抗力; P_f 为 (L, R) 联合概率密度函数; X 为向量 (L, R) 。

由于 L 和 R 均为随机变量,代表系统的荷载和抗力的综合特征,则 L 可表示为荷载因素 X_i 的函数, R 可表示为抗力因素 X_j 的函数,即

$$L = g_l(X_i) = g_l(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) \quad (3-28)$$

$$R = g_r(X_j) = g_r(X_{m+1}, X_{m+2}, X_{m+3}, \dots, X_n) \quad (3-29)$$

其中,荷载、抗力因素 X_i 、 X_j 是指决定系统荷载和抗力的系统构成因子, X_i 、 X_j 一般也为不确定的随机变量。

假设 $f_r(r)$ 表示荷载 R 的概率密度函数, $f_l(l)$ 表示抗力 L 的概率密度函数, $f_{r,l}(r, l)$ 表示 R, L 的联合概率密度函数,如图 3-1 所示。则 $f_r(r)$ 与 $f_l(l)$ 相交的区域为影响区,风险在影响区内产生。用数学公式表示,即

$$\bar{R} = \int_0^\infty \int_0^l f_{r,l}(r, l) dr dl \quad (3-30)$$

如果 R 和 L 具有统计独立性,则 $f_{r,l}(r, l)$ 可表示为

$$f_{r,l}(r, l) = f_l(l) f_r(r) \quad (3-31)$$

式(3-30)可简化为

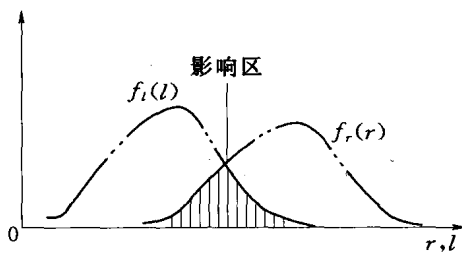


图 3-1 荷载-抗力影响区

$$\bar{R} = \int_0^{\infty} f_l(l) \left[\int_0^l f_r(r) dr \right] dl = \int_0^{\infty} f_l(l) F_r(l) dl \quad (3-32)$$

式中, $F_r(l)$ 是 R 在 l 点的概率分布, 即

$$F_r(l) = \int_0^l f_r(r) dr \quad (3-33)$$

式中, l 为荷载的某一量值。

对于单项风险, 由于 C 已知, 因此风险 $\bar{R}$ 可用失事概率 P 表示, 在此情况下可靠度 R 和 $\bar{R}$ 有互补关系, 即

$$R + \bar{R} = 1 \quad (3-34)$$

今后的讨论将基于此前提。对风险的划分、分类及 C 的确定将在下节介绍。

除了用 $R < L$ 表示失事外, 失事还可以表示成如下形式: $R - L < 0, R/L - 1 < 0, \ln(R/L) < 0$, 因此风险又可表示成

$$\bar{R} = P\{R - L < 0\} = P\{R/L - 1 < 0\} = P\{\ln(R/L) < 0\} \quad (3-35)$$

综合式 (3-35) 的各种表达形式, 风险可以表示成统一的形式, 即

$$\bar{R} = P(Z < 0) \quad (3-36)$$

Z 为系统的特征变量, 可用 $R - L$ 、 $R/L - 1$ 、 $\ln(R/L)$ 表示。 $Z > 0$ 表示系统处于可靠状态, $Z = 0$ 表示系统处于失事临界状态, $Z < 0$ 表示系统处于失事状态, 风险的评估就是对 $Z < 0$ 的概率进行计算和评价。

由于 Z 是 R 和 L 的函数, 而 R 和 L 又是 X_i , X_j 的函数, 因此 Z 也是 X_i , X_j 的函数, 即

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_m; X_{m+1}, \dots, X_n) \quad (3-37)$$

函数 $g(\cdot)$ 称为系统的特征函数, 当 $Z = 0$ 时, 函数 $g(\cdot)$ 代表 n 维空间的失事状态。

第三节 风 险 辨 识

风险辨识是指识别系统失事, 分析系统运行时可能发生的失事, 并对失事的主要影响因素加以分析, 指出失事后果的轻重程度。风险辨识包括三个方面的内容:

- (1) 系统可能存在哪几种失事, 亦即确定其失事域。
- (2) 分析失事的影响因素与原因。
- (3) 分析计算失事后果, 也即确定 C 。

一、风险辨识阶段

在风险辨识过程中, 必须先分析、研究系统组织、结构, 以便对系统的组