

南水北调东中线运行 工程风险管理研究

耿雷华 姜蓓蕾 刘 恒 徐澎波 胡亚林 编著

NANSHUI BEIDIAO
DONGZHONGXIAN YUNXING
GONGCHENG FENGXIAN GUANLI YANJIU

中国环境科学出版社

本书由“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调运行风险管理关键技术研究”
和南京水利科学研究院出版基金联合资助

南水北调东中线运行 工程风险管理研究

耿雷华 姜蓓蕾 刘 恒 徐澎波 胡亚林 编著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

南水北调东中线运行工程风险管理研究/耿雷华等编著. —北京: 中国环境科学出版社, 2010.10

ISBN 978-7-5111-0339-0

I. ①南… II. ①耿… III. ①南水北调—水利工程—风险管理—研究—中国 IV. ①TV68

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 151891 号

责任编辑 周 煜

封面设计 玄石至上

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 8 月第 1 版
印 次 2010 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 16
字 数 355 千字
定 价 48.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

南水北调是一项水资源配置工程，其基本目标是从根本上缓解我国华北和西北水资源短缺、实现工程涉及范围内水资源最佳时空配置。无论从调水线路的长度，还是调水的规模，南水北调工程超过目前世界上已建的最大调水工程。南水北调工程是一个复杂的巨系统，沿途距离长、投资大、范围广、地质情况复杂，无论是对调水工程沿线的城市城镇，还是对国家的水资源战略安全而言，如此巨大的调水工程，保障其工程的安全运行，显得十分重要。任何不确定因素引发的工程失效都会造成不可想象的后果。预计东线、中线一期将分别于 2013 年、2014 年建成通水。随着这些长距离跨流域水利工程的建成运行，工程运行中各种不确定性因素引起的风险问题正成为人们关注的焦点，南水北调运行的风险分析和风险管理也摆在管理者面前，研究如何降低、减小和控制风险已经成为目前亟待研究的重要课题。

风险分析技术于 20 世纪 50~60 年代开始用于工程项目管理，伴随着西方国家战后重建，特别是西欧经济的复苏，在欧洲兴建了一大批宇航、水电、能源、交通项目，巨大的投资使项目管理者越来越重视成本管理。而复杂的工程项目环境又使项目本身面临诸多的不确定因素。如何定量地事先预计不确定性对工程项目成本的影响成为管理者的一大难题。为此，学者们先后开发、研究了各种项目风险评估技术。随着新的评价方法的不断产生，对工程风险分析也向综合、全面、多维方向发展。经过几十年的理论研究和探讨以及在实践中的初步应用，国际学术界已对风险管理的理论达成较一致的看法，认为风险管理是一个系统工程，它涉及管理的各个方面，包括风险的辨识、评价、控制和管理，其目的在于通过对项目环境不确定性的研究与控制，达到降低损失、控制成本的目的。

本书以在建的南水北调东中线为研究对象，根据南水北调东中线工程建筑物与功能的不同，考虑东中线工程建筑物复杂，类型众多，将东线工程划分成提水、输水和蓄水 3 大系统，中线工程分解成交叉建筑物、输水干渠工程、穿黄穿漳工程、控制物 4 大系统。通过对 7 大工程系统工程内在质量或运行过程中其他外在因子的变化影响，研究工程稳定和安全运行所带来的风险，即风险识别；从系统工程出发，分析各类工程风险因子组合的可能性，评价和预测工程风险，提出南水北调中线工程重点监测和保护的工程

建筑物对象；根据不同类型风险因子的分析结果、不同类型建筑物运行的可靠度，提出包括回避、转移、控制等风险控制措施。

本书结合我国南水北调未来运行工程风险管理的实践，参照国际惯例，对工程运行风险管理的基本概念、风险类别、风险管理的程序与方法进行了详细的阐述。“南水北调运行工程风险管理研究”是“十一五”国家科技支撑计划重大项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”下“南水北调运行风险管理关键技术问题研究”课题的一个专题。本书以该专题研究成果为主，吸纳了本专题培养的两名硕士研究生李爱花、宋轩撰写的硕士论文的部分内容。参加本专题研究人员还有：黄昌硕、陈炼钢、王淑云、卞锦宇、王立群、李伟、陈晓燕、吴福生等同志；在研究过程中得到了朱尔明、翁文斌、任光照、裴源生、王慧敏、康玲、王建生、李砚阁、秦福兴等专家的指导和帮助；同时借鉴了一些国内外风险管理中有益的内容。在此，一并表示谢意。

本书由于编写时间仓促，对风险管理的认知水平有限，如有不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2010年5月于南京

目 录

第一章 绪 论.....	1
第一节 研究背景及意义.....	1
第二节 国内外研究进展.....	2
一、工程风险研究技术方法.....	2
二、国外水利工程风险研究进展.....	11
三、国内水利工程风险研究进展.....	14
四、存在的问题.....	16
第三节 研究技术路线.....	17
第二章 风险管理理论基础.....	18
第一节 风险管理基础.....	18
一、风险管理的概念.....	18
二、风险度的确定.....	18
三、风险管理与安全管理.....	19
四、风险分析内容及目的.....	20
第二节 风险管理的理论基础.....	21
一、风险管理的基本过程.....	21
二、风险管理的理论体系.....	22
三、风险管理的范畴.....	23
四、风险管理的程序.....	25
第三节 风险管理技术.....	25
一、风险管理的技术步骤.....	25
二、风险管理规划.....	26
三、风险识别与评估模式.....	26
四、风险控制技术.....	27
第四节 水利工程风险分析.....	28
一、风险率、不确定性与安全系数.....	29
二、失事后果分析.....	40

第一部分 南水北调东线工程运行工程风险管理研究

第三章 东线工程风险因子识别及机理分析	45
第一节 东线工程简介	45
第二节 提水系统风险因子识别	47
一、泵站系统提水效率	47
二、泵站系统工程安全	48
第三节 输水系统风险因子识别	49
一、输水系统工程失事模式	49
二、工程风险因子识别及机理分析	50
第四节 蓄水系统风险因子识别	53
第四章 东线工程运行风险分析与评价	54
第一节 提水系统运行风险分析与评价	54
一、东线提水系统概况	54
二、风险率等级评估指标体系	63
三、风险率评估结果分析	78
四、失效风险评价	78
第二节 输水系统运行风险分析与评价	81
一、输水系统概况	81
二、输水河道失事风险评价准则	85
三、输水河道失事风险评价	89
四、穿黄工程失事风险评价	92
第三节 蓄水系统运行风险分析与评价	93
一、东线蓄水系统概况	93
二、蓄水系统失事风险评价准则	101
三、蓄水系统失事风险评价	102
四、典型湖堤断面失事风险率评价	106
第五章 东线工程运行风险控制与预案研究	113
第一节 东线工程运行风险控制技术及对策	113
一、提水系统	113
二、输水蓄水系统	115
第二节 东线工程运行风险调度预案	117
一、风险调度预案原则及分级	117
二、工程风险应急响应机制	118

第六章 东线工程风险分析管理研究结论	120
一、南水北调东线工程风险因子识别	120
二、南水北调东线工程风险分析与评价	121
三、南水北调东线工程风险管理与风险预案	121

第二部分 南水北调中线工程运行工程风险管理研究

第七章 中线工程风险因子识别	125
第一节 中线工程简介	125
第二节 交叉建筑物系统风险因子识别	127
一、交叉建筑物概况及分类	127
二、渡槽破坏风险识别及机理研究	129
三、倒虹吸破坏风险识别及机理研究	130
四、涵洞破坏风险识别及机理研究	131
五、交叉建筑物失效原因分析	132
第三节 输水干渠与穿黄、穿漳工程系统风险因子识别	134
一、输水干渠系统风险因子识别	134
二、穿黄、穿漳工程系统风险因子识别	135
第四节 控制建筑物风险因子识别	135
第八章 中线河渠交叉建筑物运行工程风险评估标准及模型	137
第一节 风险评估标准	137
一、评估标准建立依据	137
二、初始风险因子风险率评估标准	138
三、风险率综合评估标准	141
四、风险综合评估标准	141
第二节 风险率层次分析评价模型	143
一、系统功能	143
二、层次分析结构的建立	144
第三节 变权层次分析评估模型	146
一、变权层次分析评估原理	146
二、权函数构造原则	147
三、权函数的特征	147
第四节 贝叶斯网络分析评估模型	148
一、建立交叉建筑物失效网络模型结构	148
二、确定节点参数	149
第五节 失效后果分析评价	150
一、失效后果分析	150

二、失效后果评价	151
第九章 中线河渠交叉建筑物失效风险评估	153
第一节 沿线风险因子状况调查	153
一、暴雨洪水特性	153
二、工程地质特性	155
三、低温冻融特性	158
四、工程质量管理	159
第二节 初始风险因子风险率评估	161
一、陶岔—沙河南工程段	161
二、沙河—黄河南工程段	162
三、黄河北—漳河南工程段	163
四、漳河北—古运河工程段	163
五、古运河—北拒马河工程段	164
六、北京工程段	165
七、天津工程段	165
第三节 常权层次分析模型失效风险率评估	166
一、系统功能权重	166
二、风险因子作用权重	167
三、综合风险率评估	170
第四节 变权层次分析模型失效风险率评估	171
一、构造权函数	171
二、综合风险率评估	171
第五节 贝叶斯网络失效风险率评估	172
一、贝叶斯网络的计算机输入	172
二、节点参数选取	173
三、综合风险率评估	173
第六节 风险率评估对比分析	174
第七节 河渠交叉建筑物综合风险评价	176
一、失效后果评估	176
二、风险综合	176
第十章 中线输水干渠、穿黄穿漳工程、控制建筑物运行风险分析与评价	178
第一节 输水干渠风险机理与分析模型	178
一、渠道沿线工程地质问题	178
二、渠道冰情分析	180
三、渠道工程风险分析模型	180
第二节 输水干渠系统工程失效风险分析	189
一、陶岔—沙河南	190

二、沙河南—黄河南.....	196
三、黄河北—漳河南.....	201
四、漳河北—古运河.....	207
五、古运河—北拒马河段.....	213
六、北京段暗渠.....	219
七、天津段暗渠.....	223
第三节 渠道工程失效风险评价.....	228
一、输水干渠风险评价标准.....	228
二、输水干渠风险评价.....	228
第四节 穿黄、穿漳工程系统运行风险分析与评价.....	231
第五节 控制建筑物风险分析与评价.....	231
 第十一章 中线工程运行风险控制措施研究.....	 233
一、非工程措施.....	233
二、工程措施.....	234
 第十二章 中线工程风险分析管理研究结论.....	 236
一、中线工程风险因子识别.....	236
二、中线工程风险分析与评价.....	237
三、中线工程风险管理措施.....	238
 第十三章 结语.....	 239
 参考文献.....	 241

第一章 绪 论

第一节 研究背景及意义

随着人类科学技术的进步,工程的规模越来越大。工程项目的建设和运行往往不可避免地面临着自然灾害风险和社会风险,如台风、洪水、地震、海潮、地质灾害、战争、原材料、技术失误、判断错误等。为保证工程的正常运行,必须认识和避免工程在它的生命周期中潜在的风险。从全国工程实践来看,由于事先没有充分进行风险评估和风险分析,工程灾害时有发生,使国民经济蒙受巨大损失。对于规模大、周期长、复杂性高的工程来说,在实施和运行过程中存在着更多的不确定因素,比一般的工程项目具有更大的风险。因而,对巨大工程,引入风险管理,对确保工程健康、有序地运行尤为重要。

风险分析是利用已有信息和合适的方法、措施、手段推测未知信息,确认风险主体和风险客体及其状况、辨识与评估风险因素、明晰风险的状况、寻找消除风险对风险主体威胁方法的行为。通过研究处理复杂工程系统,辨识其中存在的各种风险,分析这些风险出现的可能性和造成损失的严重程度,提出控制风险的相关措施,达到尽可能地防止和降低可能风险的目的。

风险管理是管理人员通过风险识别、风险评价、风险对策等多种管理方法、技术、手段对工程项目所涉及的风险实行有效的控制,采取主动,创造条件,尽量把风险减小到最低水平。

南水北调工程是我国继长江三峡工程之后的超大型水利工程,是解决我国北方水资源短缺、优化水资源配置、改善生态环境的战略举措,是一项超大型的调水工程,对保障和促进我国北方地区经济发展、环境改善和社会稳定具有十分重要的战略意义。南水北调东线和中线的输水线路长度均在 1 000 km 以上,每条线的输水流量为 500~800 m³/s,年调水量为 100 亿~150 亿 m³。

南水北调东线工程基本任务是从长江下游调水,向黄淮海平原东部和山东半岛补充水源,解决我国北方地区水资源紧缺问题。南水北调东线工程从江苏省扬州附近的长江干流引水,利用京杭大运河及与其平行的河道向北输水,连通洪泽湖、骆马湖、南四湖、东平湖作为调蓄水库。从长江至东平湖共设有 13 个低扬程大流量大型梯级泵站,总扬程 65 m。从长江到天津北大港水库输水主干线长约 1 156 km,其中黄河以南 646 km,穿黄段 17 km,黄河以北 493 km。供水目标主要是解决调水线路沿线与山东半岛的城市和工

业用水,改善淮北部分地区的农业供水条件,一期工程抽江规模 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

南水北调中线工程从丹江口水库引水,经过长江流域与淮河流域,沿唐白河流域和黄淮海平原西部边缘开挖渠道,在郑州以西采用隧洞穿过黄河,沿京广铁路西侧北上,自流到北京、天津。输水总干渠全长 $1\,246 \text{ km}$,其中黄河以南 462 km ,穿黄隧道 10 km ,黄河以北 774 km 。中线工程主要向唐白河平原和黄淮海平原中西部供水,主要供京、津、冀、豫、鄂五省市城市生活和工业用水为主,并兼顾沿线生态环境和农业用水,渠首引水规模为 $350\sim 420 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

无论从调水线路的长度,还是调水的规模,南水北调东线和中线工程都超过目前世界上已建的最大调水工程。南水北调工程是一个复杂的巨系统,沿途距离长、投资大、范围广、地质情况复杂。无论是对调水工程沿线的城市城镇,还是对国家的水资源战略安全而言,如此巨大的调水工程,保障其工程的安全运行,实现风险管理至关重要。任何不确定因素引发的工程失稳都会造成不可想象的后果。因此,对该巨系统运行期间可能出现的风险因子进行风险分析,提出风险控制对策措施,实现风险管理是十分重要的。

第二节 国内外研究进展

一、工程风险研究技术方法

(一) 工程风险的基本概念

风险(Risk),自19世纪末被提出以来,已经在经济学、社会学、自然科学以及工程学等领域得到了广泛的应用。由于其含义极其广泛、深刻,不同专业、不同角度,风险的定义各不相同,风险分析在决策过程中所起的作用也因学科而异。总体来说,目前风险概念可划分为广义和狭义两种。广义的风险强调风险的不确定性,主要特点是伴随风险可能是机会也可能是威胁,其结果具有双重性,可能带来意外收益也可能带来意外损失。而狭义的风险则强调损失发生的不确定性,把风险看做是不利事件发生的概率及其后果的函数,主要从不利方面考察风险,侧重于减少损失。

加拿大标准协会1997年给出“风险”的直接定义,即以概率为衡量标准进行的,对由于工程失效造成的人员伤亡、财产损失、环境影响、健康损失及其他损害等后果的评价。美国Wisconsin大学James C. Hickman教授认为风险的定义方式及其在决策过程中所起的作用因学科的不同而异。风险是由不确定性因素产生某种程度损失的机会;或为“失事”的概率,即系统在规定的时间和条件下,不能完成规定功能的概率;或在客观条件下、特定时间内,实际结果与预期结果之变动程度,变动程度越大,风险就越大。

不确定性是风险存在的主要原因,包括客观存在的不确定性和人们认识水平的局限所引起的不确定性。风险可以是多种致险因素造成的总风险,也可以是某个特定因素造成的特定风险,如洪水、地震、管涌、滑坡、溢洪道损毁等。

因此,风险是指特定危害事件发生的概率和后果严重程度的总和,是描述工程系统危险程度的度量,风险Risk一般地可以通过损失量loss和发生概率 p_j 的函数来表示:

$$\text{Risk} = f(p_f, \text{loss}) \quad (1-1)$$

在工程风险中，常常将系统失效概念和动力学意义上的荷载和承载能力联系起来，则风险发生的概率可定义为：系统外来荷载（作用） L 大于本身承载能力（抗力） R 的概率，即：

$$p_f = P(L > R) \quad (1-2)$$

对于不同的研究问题，广义荷载和广义承载能力具有不同的物理含义。在防洪系统中，广义荷载可表示为洪量、洪水位或洪峰，广义承载能力可表示为防洪系统防洪容量、防洪高度或泄流能力。

风险的后果，即损失量，可以表达为人身生命安全、社会经济损失、社会环境损失等。

（二）工程风险识别

风险因子识别的方法很多，大致可以分为：专家调查法、核查表法、幕景分析法、图解法、故障树分析法等。

1. 专家调查法

有些风险及其损失情况在短期内采用数理统计方法加以验证是困难的，况且实践中有时在风险识别阶段并不要进行过多的定量分析，主要是进行定性估计。因此，专家调查法在风险识别过程中具有特殊的意义。专家调查法主要有座谈会法和德尔菲法。

（1）座谈会法。专家小组通常由风险分析专家、风险管理专家、相关专业领域的专家以及具有较强逻辑思维能力和综合分析能力的专家组成。座谈会主要讨论的问题有：项目进展中会遇到哪些风险；这些风险的风险程度如何；有什么防范措施；提出有益的建议供参考。

（2）德尔菲法。德尔菲法是由美国著名的咨询机构兰德公司于 20 世纪 50 年代初发明的，它要求各位参加者匿名发表意见，互相不得讨论，不发生横向联系，只能与调查人员发生关系，调查人员对各种反应进行统计处理并反复征询、归纳、修改，最终汇总成基本一致的看法，作为预测的结果。

2. 核查表法

核查表法是把以前经历过的风险事件及来源一一罗列出来，成为一张核查表，再结合特定工程所面临的环境、条件等特点，识别本项目的潜在风险因子。核查表包括多种内容，例如：以前项目成果或失败的原因，项目所处环境、成员技能，项目可用资源等。

3. 幕景分析法

幕景分析法是一种能识别关键因素及其影响的方法。一个幕景就是对工程未来某种状态的描述。它研究：当某种因素变化时，整体情况如何？有什么危险发生？像一幕幕场景一样，供人们比较研究。幕景分析的结果大致分两类：一类是对未来某种状态的描述；另一类是描述一个发展过程，及未来若干年某种情况一系列的变化。它可以向决策者提供未来某种机会带来最好的、最可能发生和最坏的前景，还可能详细给出三种不同情况下可能发生的事件和风险。

幕景分析法适用于：提醒决策者注意某种措施可能引起的风险；需要进行监视的风险范围；关键因素对未来的影响；新技术对未来的影响，等等。在应用幕景分析法时具有一定的局限性。由于所有幕景分析都是围绕目前的状况和信息水平，可能与实际产生一定的偏差，为避免此现象带来的弊端，幕景分析法最好能与其他分析方法一同使用。

4. 图解法

运用图解法识别风险，包括两种分析图：因果分析图和流程图。因果分析图是根据核查表等分析风险的存在，或根据假设风险存在的基础上，使用确定风险起因的方法；流程图是根据工程项目实施过程，或者根据工程项目某一部分管理过程，或某一部分结构的实际施工过程，进行罗列，再结合工程具体情况，识别本工程存在风险的方法。风险识别流程图方法可以识别非技术风险，也可应用于识别技术风险。

5. 故障树分析法

故障树法是利用图解的方法将大故障分解成小故障，或对各种引起故障的原因进行分解。在故障树中，顶端是故障（对工程而言，即为破坏模式），下面为原因分解，每个原因还可以分解为对应的若干层原因，从各个支点的故障原因中便能得到主要故障所在。

（三）工程风险分析

风险分析是研究系统在一定条件下完成其预定功能所承担的风险，包括确定系统的失事概率和失事后果。

1. 系统失事概率分析方法

目前，大部分的工程风险分析方法适用于系统失事概率的分析，失事后果分析方法并不多。确定工程系统失事概率的方法很多，例如：Monte Carlo 模拟法、数据统计分析（Statistical Data Analysis）、故障树分析法 FTA（Fault Tree Analysis）、灰色系统理论（Grey System Theory）、失效模式和后果分析（Failure Modes and Effects Analysis, FMEA）、事件树分析法（Event Tree Analysis, ETA）、外推法（Extrapolation）、模糊分析方法（Fuzzy Analysis）、概率计算方法等。

（1）Monte Carlo 模拟法（MC 法）

MC 模拟法是一种随机模拟方法。这种方法的基本思想是人为地造出一种概率模型，使它的某些参数恰好重合于所需计算的量；又可以通过实验，用统计方法求出这些参数的估值，把这些估值作为要求的量的近似值。计算机技术的发展，借助计算机的高速运转能力，使得原本费时费力的实验过程，变成了快速和轻而易举的事情。MC 法关键在于将生成的伪均匀分布随机数转换为符合风险指标随机变量的概率分布的随机数。方法原理简单，精度高。但进行模拟的前提是各个风险变量相互独立，难以解决各个风险变量之间的相互影响。且计算结果依赖于样本容量和抽样次数，计算量大。对变量的概率分布假设很敏感，要求给出各个风险变量的概率分布曲线，在统计数据不足时是难以实现的。

（2）数据统计分析（Statistical Data Analysis）

该方法是风险分析以及不确定性分析中非常有用的工具，同时，数据统计也是可靠度和风险分析中信息很重要的来源。对工程领域的定量风险分析，精确的和相关的数据参数是保证风险分析结果可靠的前提条件。假设检验、置信区间分析、变异性分析、曲

线拟合、抽样方法、相关性分析、回归分析等均是常用的统计方法。由于岩土工程及水利工程领域的可靠度和风险分析中荷载及抗力因素可以通过统计分布函数来描述,因而数据统计分析方法在单个小型工程的风险分析中运用较多。

(3) 故障树分析法 (FTA)

故障树分析法是美国贝尔电话实验室的维森于 1962 年首先提出的,我国于 1976 年开始进行介绍和研究这种方法,并随之应用于许多项目中,取得了不少成果。FTA 是一种具有广阔应用范围和发展前途的分析方法。故障树是由一些节点及它们间的连线所组成的,每个节点表示某一具体事件,而连线则表示事件之间的关系。FTA 是一种演绎的逻辑分析方法,遵循从结果找原因的原则,分析项目风险及其产生原因之间的因果关系,即在前期预测和识别各种潜在风险因素的基础上,运用逻辑推理的方法,沿着风险产生的路径,求出风险发生的概率,并能提供各种控制风险因素的方案。FTA 具有应用广泛、逻辑性强、形象化等特点,其分析结果具有系统性、准确性和预测性。

(4) 失效模式和后果分析 (FMEA)

失效模式与后果分析方法是一种归纳法,是在系统设计过程中通过对系统各组成部件所有可能的各种失效模式都进行详细分析,并确定其对整个系统的影响的一种设计方法,是一种系统化的工作技术和模式化的思考形式。失效模式和后果分析 FMEA 在风险评价中占重要地位,是一种非常有用的方法,主要用于预防失效,但在试验、测试和使用中又是一种有效的诊断工具。FMEA 实质是进行概念分析,或者说是从可靠性角度对其完成的设计进行详细分析。对潜在的故障按其影响程度确定等级,并根据需要指出改进设计的意见,完善设计工作。其特征为:用表格形式表示,从低依次开始,逐步向高层次分析,原则上是进行全面的分析。

(5) 事件树分析 (ETA)

事件树分析方法是一种按事件顺序进行分析的方法,即应用逻辑演绎法和图表法,对给定的初因事件,分析可能导致的各种时间序列的发生概率,从而评价事件的风险。在事件树分析方法中,事件树可表示为二元树,每个节点代表事件成功或失败的可能性。随着事件数目的增加,这个图形表示法就像一棵树的枝叶一样展开,这就是“事件树”名称的由来。

事件树分析 ETA 的理论基础是系统工程的决策论。与故障树分析 FTA 恰好相反,该方法是从原因到结果的归纳分析法。其分析方法是:从一个起因事件开始,按照事故发生过程中事件出现与不出现,交替考虑成功与失败两种可能性,然后再把这两种可能性又分别作为新的起因事件,坚持分析下去,直到分析最后结果为止。其特点是能够看到事故发生的动态发展过程。在进行定量分析时,各事件都要按条件概率来考虑,即后一事件是在前一事件出现的情况下出现的,后一种事件选择某一种可能发展途径的概率是在前一事件做出某种选择的情况下的条件概率。事件树分析方法最早是为识别核电站的重要事故而开发的,后来逐渐应用于其他的各行各业概率风险问题的分析研究,目前事件树已作为一种标准工具广泛应用于系统概率风险分析以及安全分析中。

(6) 外推法 (Extrapolation)

外推法是一种十分有效的项目风险评估和分析方法,它可分为前推、后推和旁推三种类型。前推就是根据历史的经验和数据推断出未来事件发生的概率及其后果。如果历

史数据具有明显的周期性,就可据此直接对风险作出周期性的评估和分析,如果从历史记录中看不出明显的周期性,就可用一曲线或分布函数来拟合这些数据再进行外推,此外还得注意历史数据的不完整性和主观性。后推是在手头没有历史数据可供使用时所采用的一种方法。由于工程项目的一次性和不可重复性,所以在项目风险评估和分析时常用后推法。后推是把未知的想象事件及后果与一已知的事件与后果联系起来,把未来风险事件归结到有数据可查的造成这一风险事件的初始事件上,从而对风险作出评估和分析。外推法就是利用类似项目的数据进行外推,用某一项目的历史记录对新的类似项目可能遇到的风险进行评估和分析,当然这还得充分考虑新环境的各种变化。这三种外推法在项目风险评估和分析中都得到了广泛的采用。

(7) 模糊分析法 (Fuzzy Analysis)

除随机不确定性外,水利工程风险还存在大量的模糊因素,许多风险因子难以用确定性的数值进行描述,只能给出发生概率大或小之类的评语。在应用时,若不考虑这种模糊不确定性,风险分析的可行性和可靠性可能会存在问题。模糊评价法将风险因子视为模糊变量,应用模糊集理论建立风险因子的隶属函数,将文字性描述转化为数学描述,按照模糊关系运算规则计算系统的不确定性,弥补了其他方法的不足。模糊综合分析法实现了定性指标定量化,且考虑了参数等的不确定性,对一些问题不是绝对的肯定或否定,涉及模糊因素,模糊分析法能很好地解决。

(8) 概率计算方法

在风险分析的风险估计这一环节中,需要对可能失效模式发生概率进行估计,由于一般失效模式发生概率都不大,要进行定量化分析需要一些有效的工具,其中常用的概率计算方法有:重现期法、直接积分法、随机抽样方法、一次二阶矩及其扩展方法、点估计法、响应面法、优化方法、随机有限元方法等。

2. 系统失事后果分析方法

目前,对工程系统失事概率分析方法较多,对系统失事后果的分析,从目前掌握的资料来看,研究相对较为成熟是溃坝失事后果计算。国际上对溃坝的生命风险和经济风险已有较多深入的研究,但对社会与环境类别的风险后果研究相对较少。无论是哪一方面的损失分析计算,都面临着资料不足、调查工作量大、难以定量化等多方面的困难。

(1) 生命损失计算

普遍认为溃坝的生命损失计算主要是计算生命损失人数,它是洪水特性参数的函数:如水深、流速、温度、洪水含沙量、洪水持续时间,以及发生时间、预警时间、撤退路线等。一般计算时主要考虑三个方面因素:风险人口(PAR, population at risk)、警报时间和暴露因素(如白天或晚上、冬季或夏季等)。生命损失的主要计算方法有:

a) Brown & Graham 方法,采用如下经验公式:

$$L_0 = \begin{cases} 0.5 \times (\text{PAR}) & W_T < 15 \\ (\text{PAR})^{0.6} & 15 \leq W_T \leq 90 \\ 0.0002 \times (\text{PAR}) & W_T > 90 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中: L_0 ——潜在生命损失;

PAR——风险人口,指那些处于溃坝影响区范围内的直接暴露于洪水之下而没有撤

退的人口；

W_T ——警报时间 (min)，指启动溃坝警报至溃坝洪水到达 PAR 的时间。

b) DeKay & McClelland 方法，经过理论分析，结合大量的国外溃坝和洪水泛滥造成灾害的历史统计资料，推导的生命损失数的经验计算简化式为：

$$L_0 \approx 0.075 N^{0.56} \exp[-0.759 W_T + (3.790 - 2.223 W_T) F_c] \quad (1-4)$$

即生命损失数 L_0 是预警时间 W_T 、淹没区人口 N 和洪水强度 F_c 的函数。高水力风险 HF 的峡谷泛区，水深流急，取 $F_c=1$ ；低水力风险 LF 的平原泛区，水浅流缓，取 $F_c=0$ 。

有比较意义的是生命损失率 L_0/N 。制定生命风险标准时可以参考部分国家的生命风险标准。或者对生命损失人数进行失事后果严重度赋值。

(2) 经济损失计算

经济损失的计算：分为直接经济损失和间接经济损失。

直接经济损失主要包括：大坝的全部或部分破坏；下游淹没区内城市、乡村、工矿企业、主要公路、铁路等的损害，以及河流下游水工建筑物（水电站）的破坏；工程收益的损失等。间接经济损失主要是指由于电力中断引起的工业损失、灌溉中断引起的农业损失、税收损失等。

直接经济损失可根据损失特征采用不同的方法进行计算：

a) 按损失率计算，适用于各类社会固定资产、流动资产，计算公式如下：

$$S_1 = \sum_{i=1}^n S_{1i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \beta_{ijk} W_{ijk} \quad (1-5)$$

式中： S_1 ——按损失率计算的直接经济损失；

S_{1i} ——按损失率计算的第 i 类财产损失；

β_{ijk} 、 W_{ijk} ——第 i 类第 j 种财产在第 k 类风险区的损失率和价值；

n ——财产类别数；

m ——第 i 类财产类别数；

l ——风险区类别数。

b) 按经济活动中断的时间计算，适用于工业、商业、交通、邮电等部门的经济活动中断所造成的损失，计算公式如下：

$$S_2 = \sum_{i=1}^n S_{2i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l t_{ijk} S_{ijk} \quad (1-6)$$

式中： S_2 ——按经济活动中断时间计算的直接经济损失；

S_{2i} ——第 i 类部门损失；

t_{ijk} 、 S_{ijk} ——第 i 类部门第 j 行业第 k 类经济活动中断时间（以小时或天为单位）和单位时间损失值；

n ——部门类别数；

m ——第 i 类部门行业类别数；

l ——第 i 类部门第 j 行业经济活动类别数。

c) 按毁坏长度、面积等指标计算，适用于交通、邮电通讯线路、水利工程（堤防、渠道）等设施的修复费用，计算公式如下：