



DABA FENGXIANPINGJIA YU FENGXIANGUANLI

大坝风险评价与风险管理

李 雷 王仁钟 盛金保 王昭升 彭雪辉 张士辰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



**DABA FENGXIANPINGJIA YU
FENGXIANGUANLI**

大坝风险评价与风险管理

李 雷 王仁钟 盛金保 王昭升 彭雪辉 张士辰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

大坝风险评价和风险管理技术是20世纪80年代发展起来的大坝安全管理技术,在生产水平较高的国家已经得到了较为规范的应用。本书系统地介绍了大坝风险评价和风险管理方面的研究成果和应用现状;根据我国大坝安全现状和存在的关键问题,分析了我国在大坝安全管理方面引入风险理念的必然性及进行风险评价、风险管理的必要性;重点介绍了水库大坝的破坏概率和溃决模式的确定方法、大坝溃决对下游的影响和评价方法、水库大坝风险标准的确定,以及大坝风险管理及其模式等4个方面的基本概念、研究现状和笔者的最新研究成果;针对我国在溃坝生命损失评价方法方面的薄弱现状,特别介绍了国外生命损失的评价方法。本书还详尽地给出了笔者在沙河集水库所做的风险分析实例。

本书可作为水利工程学科,岩土、水工、安全管理等专业的本科生、研究生的教材或参考书,也可供从事风险分析和安全管理的研究、技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大坝风险评价与风险管理/李雷等著. —北京:中国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-3681-4

I. 大... II. 李... III. ①大坝—风险分析②大坝—风险管理 IV. TV698

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第025954号

书 名	大坝风险评价与风险管理
作 者	李雷 王仁钟 盛金保 王昭升 彭雪辉 张士辰 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)、68331835(营销中心)
经 售	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	787mm×1092mm 16开本 12印张 285千字
版 次	2006年5月第1版 2006年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	30.00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

序

我国现有大坝总数超过 8.5 万座，居世界第一位。这些水库大坝在防洪、灌溉、发电、供水、改善生态环境等方面发挥着巨大作用，是我国防洪保安工程体系的重要组成部分，也是保障国民经济可持续发展的重要基础设施。我国的大坝大都修建于 20 世纪 50~70 年代，建设标准偏低，工程质量较差，其中存在不同程度病险的大坝总数超过 3 万座。这些带病运行的大坝，不仅难以发挥应有的工程效益，而且容易酿成溃坝灾难，严重威胁下游人民生命财产、基础设施及生态安全。1975 年 8 月河南板桥、石漫滩两座大坝溃决，1993 年 8 月青海沟后坝溃决，均造成人民生命财产的巨大损失。

我国政府历来十分重视大坝安全，20 世纪 80 年代以来，我国大坝安全状况有了显著改善。随着经济社会的迅速发展，我国及公共安全的大坝安全提出了更高的要求。正是在这样的背景下，近 10 年来在国外发展起来的一种大坝安全管理新理念——风险评价与风险管理技术被引进到我国大坝安全管理领域中，并得到了应用和发展。

本书的作者长期从事大坝安全管理领域的基础性科学研究工作。近年来，他们通过水利部 948 项目“水库风险评估和智能化大坝安全技术”，引进了大坝风险分析和风险管理技术，并得到了“病险水库风险判别标准体系研究”、“小型水库除险决策系统研究”、“已建堤坝工程风险分析和应急对策的研究”、“小型水库除险成套实用技术研究”等科技部与水利部基金项目的资助，在消化吸收的基础上，结合我国国情，全面系统地开展了大坝破坏概率和溃决模式、大坝溃决对下游影响及其评价、大坝风险标准、大坝风险管理模式、溃坝下游生命损失及其评价方法、除险排序技术等专题的研究工作，并通过对安徽沙河集水库大坝除险加固前后风险的评估和比较，证明了大坝风险评价和风险管理技术的先进性及其在我国的广阔应用前景，取得了丰硕的成果，本书正是这些研究成果的总结。我相信，本书的出版将对我国大坝风险评价和风险管

理技术的应用与发展起到积极的推动作用，促进我国大坝安全由工程安全管理向风险管理模式的转变，提高我国大坝安全管理水平。

大坝风险评价与风险管理技术是一门新兴的学科，在很多问题上大家尚有不同的见解，还面临很多挑战，研究与实践的任务仍然艰巨。例如，如何研究提出适合中国国情的溃坝生命损失与社会环境评估方法、风险管理模式、风险标准；如何考虑小型水库安全状况差、管理水平低、基础资料少的特点，研究小型水库风险评价技术；尽快研究制订中国大坝风险评价指南等。这些问题都不是一个基金项目或短期内可以彻底解决的，期待着本书的作者们及其他水利科技研究人员继续研究和实践，取得更多的突破，使我国大坝风险评价与风险管理技术后来居上，跃居国际领先水平。谨以此致意于本书的编者和读者。

水利部副部长 胡一

2005 年 12 月于南京

前言

大坝风险是近 10 来国外发展起来的一种安全管理新理念。其最大的特点就是不仅关心大坝安全，而且关心大坝溃决对下游的影响。换言之，大坝风险就是大坝溃决概率和溃决影响的综合。大坝风险这个理念对我国大坝安全与管理的影响十分巨大，实际上是将我国工程界历来重视的“工程安全”转换到“工程风险”的思路上来。事实上，工程安全和工程风险两种理念代表了两种不同的生产力发展水平的要求。生产力水平较低时，人们满足于工程的安全。随着生产力发展到某一高度，人们已经不仅仅关注工程是否安全，而是更加关注与自己切身利益和生存有关的社会、环境等各种威胁。这就是为什么先进国家率先提出风险的理念，这也是为什么我国政府在 21 世纪提出了“以人为本”和全面、协调、可持续发展的战略决策，我国水利部提出了治水新思路。

2000 年在我国召开的第 20 届国际大坝会议对我国坝工界具有十分重要的意义，这次会议的 76 专题就是大坝风险分析。会议期间，美国专家 D. Bowles 到水利部举办了群坝风险分析讲座，给我国坝工界带来了新的理念。2002 年，水利部组织了“群坝风险分析培训代表团”赴澳大利亚进行风险和风险评价技术考察。考察报告认为，引入风险评价技术对提高我国大坝安全管理水平将是非常及时的、必要的，具有十分明显的现实意义。风险、风险准则、风险管理等概念的引入，将会大大推动我国大坝安全的法规建设和管理水平。

2003 年，笔者在水利部 948 项目“水库风险评估和智能化大坝安全技术”的支持下，在澳大利亚接受了为期一个月的大坝风险理论与技术培训，和澳大利亚 GHD 公司专家一起，对安徽沙河集水库加固前后的大坝风险进行了评价。2002 年，在水利部综合事业局基本项目“病险水库风险判别标准体系研究”的资助下，笔者结合我国的实际情况，对我国水库大坝溃坝情况作了深入分析，提出了大坝溃决概率的估算办法，特别结合水库大坝除险加固，提出了除险排序技术等，同时对下游

损失估算办法和风险标准进行了初步的研究与探索。在国家科技部专项基金“小型水库除险成套实用技术研究”项目的支持下，笔者在大坝风险评价和管理技术上继续进行了探索和研究。

本书是笔者近几年来研究成果的综合。由于大坝风险评价与管理技术是水利工程安全管理的发展趋势，近期必将得到迅速发展，所以笔者希望抛砖引玉，把近年来的研究结果，和大家一起交流，通过讨论，使大坝风险评价与管理技术得到更快更好的发展。

本书共分七章，第一章由李雷撰写，第二章由李雷、张士辰撰写，第三章由王仁钟、王昭升、盛金保撰写，第四章由盛金保撰写，第五章由王昭升撰写，第六章由李雷撰写，第七章由彭雪辉撰写，沈登乐参与了部分编写工作。吴素华、周克发参加了资料收集和整理工作。

本书得到了水利部“948”办公室、水利部规划计划司、水利部综合事业局以及国家科技部基金项目的支持，得到了富曾慈、李君纯等专家的指导，得到了南京水利科学研究院出版基金的资助，在此一并表示衷心感谢。还要特别感谢澳大利亚 GHD 公司的风险评估专家 Melcome Barker 和 Yu Sheng，以及安徽滁州水利勘测设计院沈登乐，他们提供了大量的资料，并合作完成了沙河集水库的风险评估。

本书编写时间仓促，不当之处，请读者批评指正。

作 者

2006 年 1 月于南京

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 我国大坝安全与管理的现状和面临的挑战	1
1.2 世界先进国家在大坝安全与管理方面的风险评价模式	1
1.3 中国大坝风险分析发展及现状	7
1.4 风险评价和管理发展的必然性和重要性	12
参考文献	16
2 水库大坝的破坏概率和溃决模式	17
2.1 大坝的破坏及其概率	17
2.2 大坝溃决的主要原因分析	22
2.3 溃坝模式和溃坝路径	28
2.4 确定溃坝概率的事件树方法	30
2.5 溃坝概率估计	31
2.6 计算大坝破坏概率的可靠度方法	34
2.7 风险排序时的溃坝概率估算和专家经验综合分析	44
2.8 沙河集水库可能溃坝模式和溃坝概率	45
参考文献	58
3 大坝溃决对下游的影响及其评价	59
3.1 溃坝模型及溃坝洪水研究	59
3.2 溃坝后果的确定	70
3.3 溃坝后果综合评价方法	88
参考文献	95
4 水库大坝风险标准	97
4.1 水库大坝风险分类	97
4.2 生命风险标准	98
4.3 经济风险标准	101
4.4 环境风险标准	102
4.5 社会风险标准	102
4.6 实例	103

参考文献	104
5 水库大坝的风险管理	105
5.1 风险管理的含义及重要性	105
5.2 降低风险的对策研究	112
5.3 应急预案的内容及其在风险管理中的重要位置	115
5.4 水库大坝除险加固排序（群坝风险分析）	116
参考文献	129
6 溃坝对下游生命损失的影响及其评价方法	130
6.1 国内外大坝溃决导致的生命损失	130
6.2 生命损失估算的几个关键参数	132
6.3 生命损失估算的几种方法	133
6.4 我国生命损失估算方法研究展望	139
6.5 结论与建议	140
参考文献	141
7 安徽省滁州沙河集水库大坝风险分析	142
7.1 工程介绍	142
7.2 破坏模式分析	148
7.3 溃坝概率分析	154
7.4 溃坝影响分析	168
7.5 风险分析	174
7.6 结论与建议	181



1 绪 论

1.1 我国大坝安全与管理的现状和面临的挑战

截至 2004 年,我国已建成水库 85200 多座^[1],其中大型水库 487 座,中型水库 2955 座,小型水库 81700 多座。343 座大型水库、2683 座中型水库和所有的小型水库由水利部门管理。这些水库大坝在我国国民经济建设和发展中、在减灾防灾中发挥了极其重要的作用。

20 世纪 80 年代以来,我国在水库大坝安全与管理方面取得了突破性的进展。通过法规的建设和实施,不但初步形成了安全管理体系,而且年平均溃坝率大大下降,达到了先进国家的水平。

我国经济的快速增长,给 21 世纪水库大坝安全与管理工作提出了更高的要求。各地经济的发展,使得水库大坝防灾减灾的责任更加重大。我国水资源在时间和空间分布上不均匀,北方干旱、南方洪水的局面反复出现,北方城市供水的压力越来越大。目前,我国有 100 多座大、中城市严重缺水^[2],包括北京、天津、大连、西安、长春等都是以远距离从水库调水的方式来保证城市供水。全国水库在防洪减灾中承担了极大的责任,水库防洪保护范围内有 3.1 亿人口、数百座大中城市、4.8 亿亩农田。1998 年,长江、松花江特大洪水,全国共有 1335 座大中型水库参与拦洪削峰,拦蓄洪量 532 亿 m^3 ,不论哪座水库溃决,后果都不堪设想。经济的发展和繁荣,下游密集的人口,使得水库大坝的安全与公共安全更加息息相关。经济越发展,社会越繁荣,水库溃决的后果越严重,也就是风险越大。即使是小型水库的溃决,也将影响到成百上千人的生命安全。因此,21 世纪我国水库大坝的安全管理面临着新的严峻挑战,不但要保证工程的安全运用,发挥最大的社会和经济效益,而且要使水库导致的下游风险能够被社会和公众所接受。这个挑战是社会发展的需要,我们必须面对。

1.2 世界先进国家在大坝安全与管理方面的风险评价模式

风险分析技术的发展,最早起源于美国,使用在军事工业方面。1974 年,美国原子能委员会发表了商用核电站风险评价报告^[3],引起了世界各国的普遍重视,推动了风险分析技术在各个领域的研究与应用。自从 20 世纪 80 年代初美国发表了不少关于水库大坝风险分析的原理、方法和实例的文章以来,大坝风险分析技术发展很快,特别是在美国、加拿大、澳大利亚和西欧发展迅速。下面主要介绍这些国家大坝风险分析的发展现状。

1.2.1 美国陆军工程师团 (USACE)

美国各部门用于水库大坝风险评判的标准各异,风险分析方法也各异。美国陆军工程



师团 (USACE) 的 Hagen (1982) 最早提出了风险的概念^[4,5], 用相对风险指数来判别大坝风险。相对风险指数用下式计算:

$$Rr = \prod_{i=1}^3 O_i + \prod_{j=1}^3 S_j \quad (1.1)$$

式中: O_i 为洪水漫顶的第 i 项风险因素值; O_1 为溃坝危及的家庭数; O_2 为按现行洪水设计标准达到的防洪库容; O_3 为大坝抗御漫顶破坏的能力; S_j 为建筑结构的第 j 项险情值 (含地震及洪水); S_1 为溃坝危害的家庭数; S_2 为建筑物明显的损坏数; S_3 为潜在的地震活动性。

式 (1.1) 中有两大类风险因素, 按项分别打分, 共 250 分。即漫顶因素 (占 125 分) 和结构险情因素 (占 125 分)。 O_i 、 S_j 值随风险的高低而相应增减。这种方法中的各类风险值靠专家判断, 若 Rr 值高, 则表明该工程危险。

2005 年 4 月, USACE 的大坝安全特别顾问刘桢业先生在南京讲学时, 介绍了他们近年来在风险评价方面所做的工作。陆军工程师团将风险评价的方法作为大坝安全评价的一种工具, 对所属的 609 座大坝进行了群坝风险分析, 用于指导降低大坝风险的决策过程。特别是在风险排序方面进行了深入的研究。

1.2.2 美国垦务局 (USBR)

美国垦务局 (USBR) 是美国大坝管理机构之一, 负责管理 350 多座大坝。USBR 推荐使用现场评分 (site rating) 法来衡量水库大坝的风险^[4,5]。现场评分法是在美陆军工程师团 Hagen (1982) 的启发下形成的, 按下式计算:

$$SR = \sum_{i=1}^g (SR)_i \quad (1.2)$$

式中: $(SR)_i$ 为第 i 因素的评分值, 所考虑的各风险因素如表 1.1 所示。将各因素构成的险情分成低、中、高、极高 4 级, 各级从低至高相应赋予风险值。若某工程的 SR 值高, 则表明该工程危险。

表 1.1 现场检查时考虑的风险因素

风险类别	大 坝 工 程				潜 在 险 情				
因素	工程龄期	建筑质量	渗流态势	结构	库容	水头	隐患	洪水	地震

USBR 把风险分析和评价视为改进安全管理的一种手段, 是大坝管理的一部分。他们把大坝风险评价作为一种决策工具, 指导往风险最大的工程上投入。为了保证大坝不出现威胁公共安全、财产和社会安全的不可接受的风险, USBR 建立了大坝安全管理程序, 通过比较不同荷载作用所导致的风险和不同大坝间的风险, 对产生不可接受风险的大坝进行确认, 并采取有效的、费用合理的适当措施降低或消除这些风险。USBR 认为, 安全的大坝首先是它的风险可以被公众接受, 其次才是完成预定的功能。

1.2.3 美国国家气象局 (NWS)

由于大坝风险分析的一个重要组成部分是大坝溃决的下游影响分析, 因此必须研究溃坝洪水及其演进, 为此美国国家气象局 (NWS) 开发了一系列溃坝模型, 从 DAMBRK



模型到 BREACH 模型^[6]，再到 FLDWAV 模型^[7]，为溃坝洪水计算提供了强大的软件支持，大坝风险分析可以直接应用这些计算成果进行溃坝后果评价。

DAMBRK 模型是 Fread (1984) 研究开发的溃坝洪水预报模型。模型由 3 个主要部分组成：①描述溃口随时间和空间变化的破坏模型；②溃口泄量；③下游河谷的洪水演进。

BREACH 模型是基于 Fread (1984) 预报土坝溃坝洪水过程线而开发的一个数学模型。模型建立在水力学、泥沙输移、土力学、大坝几何尺寸与数学特征、水库库容特性、溢洪道特性以及入库流量随时间变化的基础上。模型包括 7 个主要部分：①溃口形成；②溃口宽度；③库水位；④溃口泄槽水力学；⑤泥沙输移；⑥突然坍塌引起溃口的扩大；⑦计算方法。模型可以模拟因漫顶或管涌引起的溃坝。大坝可以是均质的，也可以是由两种不同特性的材料组成的坝壳和心墙。

FLDWAV 模型是 Fread (1998) 在 DAMBRK 模型和 BREACH 模型基础上开发出来的功能更强大的模型，本文溃坝后果分析用的就是 FLDWAV 模型。

1.2.4 加拿大 BC Hydro^[8]

加拿大 BC Hydro (不列颠哥伦比亚省水电公司) 是加拿大 BC 省的水电公司，负责管理 BC 省内 43 座水库大坝的安全。BC Hydro 于 1991 年把风险分析方法引入大坝安全评估中。BC Hydro 风险分析有 3 个主要目标：①确定水库大坝的安全程度；②确定水库大坝是否安全的判别标准；③用最经济的方法加固不安全大坝达到安全的标准。因为传统的工程分析难以实现这些目标，所以 BC Hydro 引入了风险分析和管理技术，其风险管理框图如图 1.1 所示。由图可见，大坝风险分析从大坝安全审查工作开始，包括设计计算、

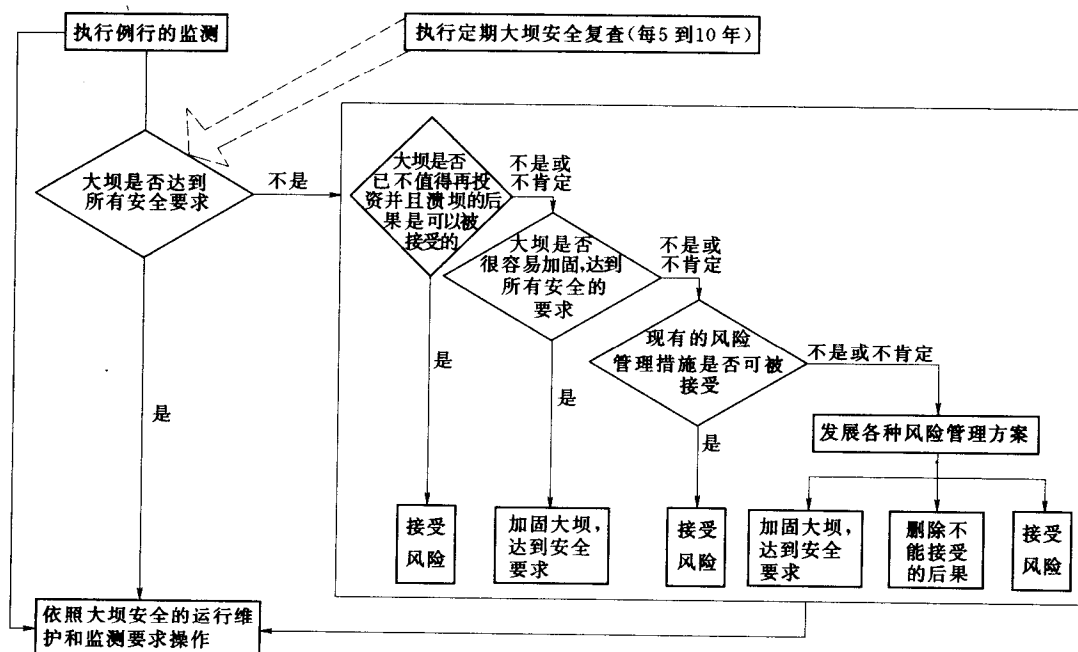


图 1.1 加拿大 BC Hydro 大坝风险管理框图



设计标准、施工记录、大坝工况及大坝运行和维护方式。如果每个方面都令人满意，则可认为大坝是“安全”的，没必要进行风险评价。反之，如果不满足标准的要求，或者标准已更新，且查明大坝存在潜在的隐患，则应进行风险评价。由参加大坝安全审查和现场检查的工程师组成专家组，负责判断失事模式和事故，画出初步事件树，并估算失事的概率和后果。初步风险评价之后，专家组可以对风险较大的失事模式进行进一步的风险评价，直至找到最好的解决办法。

大坝风险评估的主要任务是根据风险标准来评价风险分析的结果。BC Hydro 的风险标准是根据业主大坝安全管理条例、下游居民的生命财产价值、国家法律和业主的赔偿能力来制定的。任何一个风险标准的制定首先要了解系统中的所有风险，这个系统可能仅限于大坝本身，也可能包括下游地区、整个省、全国，甚至可能包括邻近国家。BC Hydro 曾制定了一个临时性的风险标准，不过目前 BC Hydro 对大坝进行风险分析时执行的是 ALARP (as low as reasonably practicable) 原则（使风险在合理可行的情况下尽可能地低的原则）。

BC Hydro 认为，以风险为主的大坝安全管理有如下主要优点：①可增强对大坝薄弱部位的了解；②在情况了解不够或资料不足的情况下鉴定大坝的工况；③鉴定可能被忽略的潜在的问题；④可充分了解大坝的安全程度；⑤为比较不同大坝的安全性提供了一种方法。

1.2.5 澳大利亚^[9]

在澳大利亚，风险分析已经在相当数量的水库大坝上应用。在昆士兰州，已在 2/3 的水库大坝上应用。群坝风险评价也已经在澳大利亚的几个大坝群中应用，并取得了一系列成果。澳大利亚有关大坝法规建设和风险管理也走在世界的前列。1994 年，澳大利亚大坝委员会 (ANCOLD) 颁布了《ANCOLD 风险评估指南》，为大坝安全评估的应用提供了概念性基础，但没有提供进行风险评价的细节指南。1995 年以来不断对指南进行修订，2003 年完成了新指南的草稿，该草稿提供了澳大利亚大坝风险管理的一般性框架，确定了风险分类、风险分析、风险评估和风险处理过程中的主要步骤，其对单个大坝风险评价过程和群坝风险评价过程分别如图 1.2 和图 1.3 所示。

澳大利亚还制定了许多风险评估工作中的其他指南，例如，1994 年 ANCOLD《大坝安全管理指南》，1998 年 ANCOLD《大坝地震设计指南》和《大坝环境管理指南》，1999 年 ANCOLD《大坝可接受防洪能力选择指南》，2000 年 5 月 ANCOLD《大坝溃决后果评估指南》，2002 年 2 月昆士兰州政府自然资源和矿产部《大坝溃决影响评价指南》和《昆士兰州大坝安全管理指南》等。

1.2.6 英国^[10]

目前，英国大坝业主的定量风险分析并未得到官方的支持和应用，也未进行可接受风险标准的应用。不愿应用定量风险评估 (QRA) 主要是由于在确定大坝溃决的可靠性概率方面的困难而导致的，英国大坝做定量风险评估 (QRA) 的费用和正常维护所需费用差别很大，而且 1975 年实施《水库法》以来安全事故发生得非常少。

但苏格兰和南方能源公司认为，风险评估是大坝安全和资产管理极其重要的一部分，

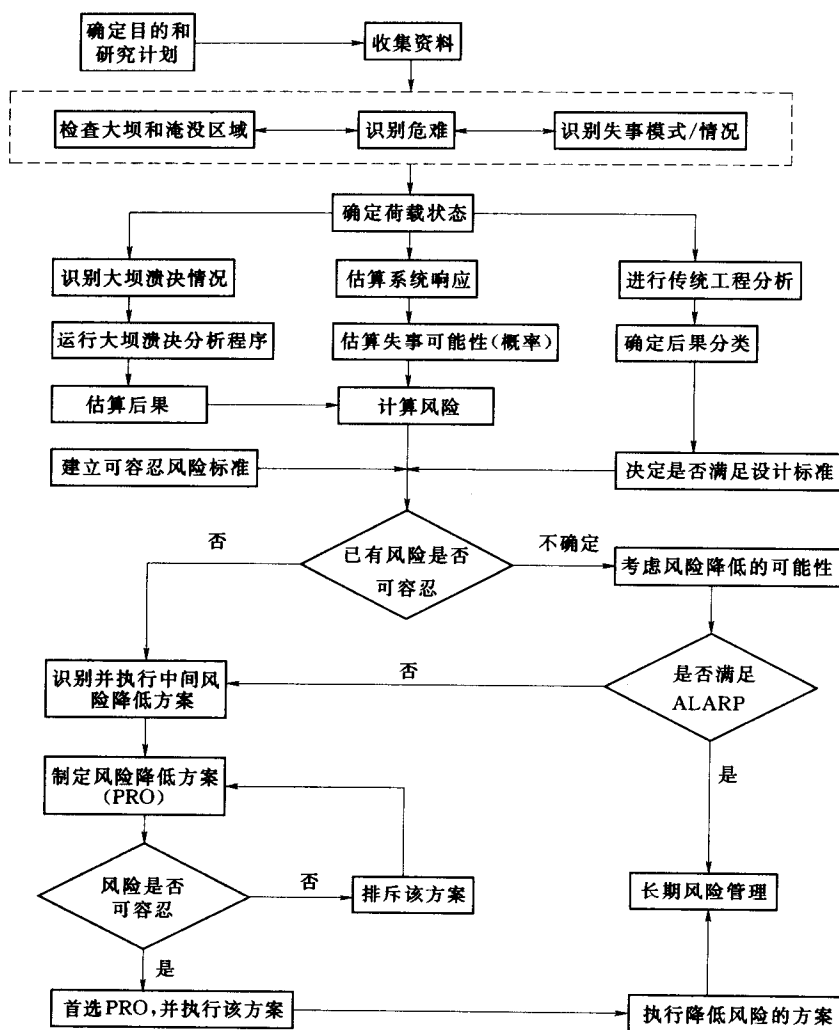


图 1.2 ANCOLD 典型大坝风险评价过程

是英国已建坝安全办法的补充，而且是经济有效的。苏格兰和南方能源公司是英国主要的大坝业主，拥有 84 座大坝，其中 56 座大坝是在 ICOLD（国际大坝委员会）注册的。1996 年以来，在 Babbie 咨询顾问支持下，公司开展了大坝失事模式、影响及严重程度分析（FMECA）过程研究。

英国健康和安委员会（HSE）针对有危险的工业部门研究了一种相当好的风险框架，非常有用。1988 年，HSE 发布了《核电站可容忍风险指南》（以下简称《指南》），建立了一套公共安全框架，即“风险的可容忍性框架”。《指南》说明了 HSE 的核电站风险控制理论，有关风险的法规编制人员和核能源以外的工业部门都很大程度上接受了这个思想。关于人员死亡风险，《指南》要求“几乎不发生”，因为这类小概率事件会引起很严重的社会后果。这种要求反映出了国际社会的一致性，也适用于大坝风险评价。

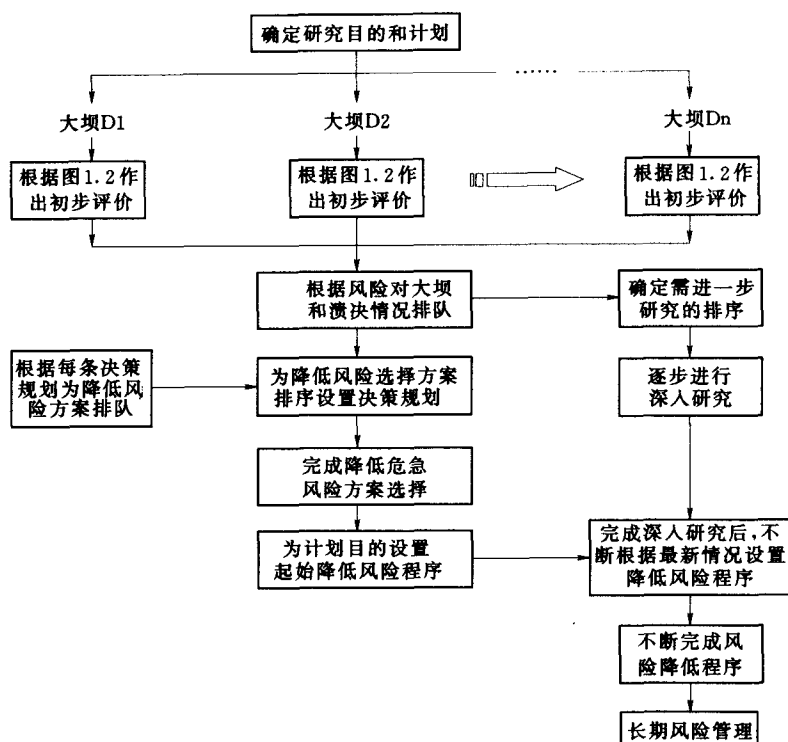


图 1.3 ANCOLD 群坝风险评价典型过程

1.2.7 芬兰^[11]

1999 年 6 月 1 日~2001 年 3 月 31 日, 芬兰环境研究院和芬兰农林部、芬兰内务部、芬兰西部地区环境中心联合开发了 RESCDAM 计划, 并提交了《根据溃坝洪水分析开发营救行动计划 RESCDAM》总报告。该计划分为 3 部分: ①风险评价 (分析); ②溃坝危险分析; ③应急/营救行动计划。RESCDAM 计划提出了一套风险分析方法, 应用数字地形模型对溃坝洪水进行一维和二维模拟。另外, 还研究了人在流水中的稳定性和机动性、流水中房屋的性能等。

1.2.8 瑞典^[10]

瑞典政府已经考虑建立大坝安全法规, 大坝业主在 1997 年建立了 RIDAS 指南。政府明确表示大坝业主应全部负责大坝安全和大坝溃决后果, 这要求业主必须非常了解群坝的全部风险。风险分析在瑞典正在被作为一种大坝安全隐患加固的排序方法。为此, 瑞典能源公司 Vattenfall 和主要的大坝业主, 在瑞典能源咨询公司的支持下, 用定量分析和失事模式、影响及危急程度进行分析, 以估计哪一种方法更合适。

1.2.9 葡萄牙^[4,5]

葡萄牙工程师考虑了多达 11 个风险因素, 提出了综合风险指数法, 即

$$\alpha = \frac{1}{n_e(n_f - n_e - 1)(n_r - n_f - 1)} \sum_{i=1}^{n_e} \alpha_i \sum_{j=n_e+1}^{n_f} \alpha_j \sum_{k=n_f+1}^{n_r} \alpha_k \quad (1.3)$$



式中： α 为综合风险指数； α_i 为环境因素，分为地震、库岸塌滑、洪水、水库调节能力、环境侵害等 5 项； α_j 为工程结构因素，分为结构可靠性、坝基优劣、防洪设施安全性、工程管理维修好坏等 4 项； α_k 为溃坝损失因素，分为水库库容、洪泛区可能损失情况等。

以上各种风险，均按低、中、高三级风险划分，每一级又细分为两级，也就是将风险共细分为 6 级，每级 1 分，每一因素最低风险值为 1，最高风险值为 6。 α 值愈高，水库大坝愈危险。这种风险指数法计算简单，可操作性强，可用于定性风险分析。

1.3 中国大坝风险分析发展及现状

1.3.1 水库大坝总体安全度评价方法

中国对水库大坝的安全评价，过去一般按照设计规范分别对防洪、抗滑、抗震、抗渗、抗裂等功能分项进行安全计算，按规范要求用大于 1 的安全系数 $[K_0]$ 作为安全与否的衡量标准。然而上述方法没有考虑各种不确定性和计算参数的变异性，也没有考虑对下游的影响，需要进一步完善。1990 年，李君纯、李雷^[12~14]提出了水库大坝总体安全度法，总体安全度的定义为：

$$SD = P_s / \eta \quad (1.4)$$

式中： SD 为总体安全度； P_s 为某一水库大坝的工程安全度； η 为水库的社会经济影响因子。

大坝工程安全度 P_s 按坝的防洪、抗滑、抗裂、抗渗、抗震及抗生物破坏 6 个方面进行计算，认为其中任何一项功能失效，都将造成坝工结构的整体破坏。

$$P_s = \prod_{i=1}^6 (1 - P_{fi}) = \prod_{i=1}^6 P_{si} \quad (1.5)$$

式中： P_{fi} 为第 i 项功能的失效概率； P_{si} 为第 i 项功能的可靠度。

水库大坝对社会经济的影响因子 η 用简单的经济尺度和工程重要性来衡量。按水库工程除险加固的总投入 I 与产出效益 E 之比，以及工程等级 C ，可表述如下：

$$\eta = \left(\frac{E}{I} \right)^{\frac{1}{10C^{1/3}}} e \quad (1.6)$$

根据水库大坝总体安全度 SD ，参考水库大坝安全度评判标准，得出水库大坝的风险程度。这种方法理论上可将水库大坝的安全度予以量化界定，既以结构安全的可靠度为基础，又计及工程的社会及经济等影响，代表了中国坝工界从工程安全管理向风险管理的转化和探索。但是由于大坝溃决概率可靠性分析的复杂性、所需计算参数获得的困难性，这种方法并没有得到实际应用。

1.3.2 大坝安全可靠度分析

导致大坝溃决的主要起始事件包括漫顶、裂缝、渗流破坏和大坝滑坡等，20 世纪 80 年代，中国开始研究这些事件的可靠度分析方法。

吴世伟在 1984 年^[15]提出了重力坝结构稳定和强度的可靠度计算方法，利用一次二阶矩法对 5 座砌石重力坝进行了稳定和强度的可靠度校核，较为详细地讨论了各随机变量对计算可靠度的影响。吴世伟和李同春^[16]于 1990 年提出了重力坝最大可能破坏模式的



探讨。

陈肇和等^[17]提出了考虑洪水、风浪和调度三因素作用下洪水漫坝概率 P_f 的可靠度分析方法, 即

$$P_f = P(Z(t) \geq Z_c) = P(Z_0 + H_{\max} + e + R_p \geq Z_c) \quad (1.7)$$

式中: Z_0 为汛限库水位; $H_{\max}$ 为由于洪水产生的库水位增加值; e 为水面壅高, 为极值 I 型分布; R_p 为沿坝坡的波浪爬高, 为瑞利 (Rayleigh) 分布; Z_c 为漫坝临界高程, 如坝顶高程或防浪墙顶高程。

李雷、盛金保^[18]提出了计算碾压式土石坝坝顶裂缝概率的可靠度分析方法, 并提出了判断裂缝的功能函数为:

$$Z = \epsilon_{lf} - \epsilon_x \quad (1.8)$$

式中: ϵ_{lf} 为填土的极限拉应变; ϵ_x 为填土所承受的水平拉应变。同时, 李雷、盛金保^[18]应用一次二阶矩法分析了坝体发生裂缝的概率。为了探讨填土裂缝极限拉应变的概率分布模型, 李雷和荣卫东^[19]对典型填土做了 200 多组土梁挠曲试验, 确定了极限拉应变的模型, 认为不同土体满足不同的分布, 正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布都有可能。

盛金保、李雷^[20]提出了计算大坝抗滑稳定概率的可靠度分析方法, 探讨了筑坝土料土性指标的统计特性以及随机变量之间相关性对可靠度指标的影响。

2004 年, 张士辰^[21]对无粘性土渗流系数和抗渗强度进行了试验研究, 提出了两种基于原型观测资料和基于计算公式的渗流破坏的可靠度分析方法。

由于可靠度分析方法需要较多资料, 对各种随机变量的概率分布的研究难度较大, 特别是有些随机变量的概率分布只能通过试验研究来确定。目前, 可靠度分析方法未能成为确定破坏概率的重要方法。但是, 从理论上说, 可靠度分析方法考虑了变量的随机性、不确定性、变异性, 据此得到的破坏概率应该更为可信。因此, 土石坝可靠度分析方法将会在风险分析进入“详细分析”水平后, 成为确定破坏概率的一种重要方法。

1.3.3 大坝病险程度排序

1999 年, 李雷等^[22]对江西省 29 座大中型水库按照 USBR 现场评分法和葡萄牙综合风险指数法进行了风险排序。排序的目的是评价水库大坝的安全现状, 以便在对各工程进行除险加固规划时权衡其轻重缓急, 因此排序的原则主要考虑各坝的相对安全程度, 作出定量判断, 水库效益则置于从属位置, 仅作适当考虑。评分工作由四五位高级专业技术人员操作, 通过现场访问、检查、踏勘、记录并摄像或 (及) 录音, 当即共同评议打分, 作出相应的现场评价意见。

(1) 现场评分 (site rating) 法。该法是美国垦务局 SEED 法中推荐使用的, 在美陆军工程师团 Hagen (1982) 的启发下形成, 按下式计算:

$$SR = \sum_{i=1}^K (SR)_i \quad (1.9)$$

式中: $(SR)_i$ 为第 i 因素的评分值。

所考虑的各风险因素包括大坝工程和潜在险情两大部分, 大坝工程中包含工程龄期、建筑质量、渗流势态和结构状况 4 个因素, 潜在险情包括库容、水头、隐患、洪水、地震