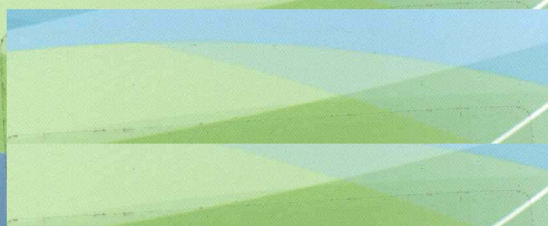


病险水库 除险加固风险决策

严祖文 彭雪辉 张延亿 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

● “十一五”国家科技支撑计划项目（2006BAC14B04）资助

病险水库 除险加固风险决策

严祖文 彭雪辉 张延亿 编著

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共8章,较系统地讲述了病险水库除险加固风险决策技术的基本理论、分析方法以及在工程上的应用,内容包括:大坝风险要素及风险分析方法,除险加固排序的群决策技术,除险加固措施与大坝风险的关联决策分析,方案优选的基本理论,基于风险的除险加固方案优化技术,除险加固方案优选的风险决策方法。

本书可供水利工程学科和岩土、水工、安全管理等领域的科研、技术人员和管理工作者使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

病险水库除险加固风险决策 / 严祖文, 彭雪辉, 张延亿编著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2011.4
ISBN 978-7-5084-3981-5

I. ①病… II. ①严… ②彭… ③张… III. ①水库—加固—水库管理: 风险管理—研究 IV. ①TV697

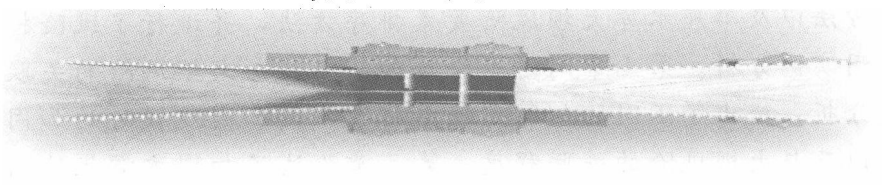
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第047329号

书 名	病险水库除险加固风险决策
作 者	严祖文 彭雪辉 张延亿 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 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	175mm×245mm 16开本 11.5印张 213千字
版 次	2011年4月第1版 2011年4月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	38.00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

前言



目前水库的除险加固由于技术方面的原因以及评价标准的限制,存在着诸多不尽合理和完善的地方,表现为正在进行的除险加固的水库并不是最危险的水库,除险加固的方案并非最优设计方案,以及除险加固的效果没有达到最佳效果等。从风险分析角度出发的病险水库除险加固风险决策,实质上是要回答关于病险水库除险加固 2 个方面的问题:①哪些病险水库需要优先进行除险加固;②病险水库采取何种除险加固方案最优。第一个方面的问题是病险水库除险加固的顺序问题,即对需要进行除险加固的病险水库进行全面的综合分析,根据病险水库风险大小实行科学的排序,重险优先,将有限的资金优先用于最迫切需要进行除险加固的病险水库;第二个方面的问题是病险水库除险加固方案的优选问题,即对已确定需要进行除险加固的病险水库,按照风险决策准则,从众多的能使病险大坝达到社会可接受的大坝安全风险标准的除险加固方案中,优选出最满意的方案,从而使改善大坝安全的投资及效益与除险加固后的大坝安全风险水平达到一种最佳的协调关系。

本书针对目前病险水库除险加固存在的问题,为满足病险水库重险优先加固的需求,充分利用有限的除险加固资金,并对风险处理方案进行优化,最大可能地降低病险水库带来的风险,进行病险水库除险加固风险决策的研究,提高除险加固决策的科学性,促进我国大坝安全由工程安全管理向风险管理模式转变。

本书共分 8 章。第 1 章绪论,阐述了选题背景及意义,简介

了本书的主要内容。第2章叙述了大坝风险要素、风险分析方法及基于风险的大坝安全决策,为后续章节提供基本理论依据。第3章重点讲述了基于溃坝概率分析和基于大坝缺陷两种群坝风险排序方法以及单座水库大坝风险要素排序方法,并进行了风险排序应用实例分析。第4章阐述了除险加固措施与大坝风险的关联决策分析,提出了不同的加固处理措施在不同加固规模时的加固效果以及与大坝风险的关联程度。第5章论述了加固方案优选的基本理论。第6章重点叙述了基于事件树法和基于层次分析法的除险加固方案优化技术,提出了一种新的病险水库除险加固设计理念,即基于风险的病险水库除险加固方案设计。第7章概述了优选病险水库除险加固方案的风险决策模型和求解方法。第8章结语。

本书的出版得到了“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC14B04)的资助,特表示感谢。在本书编写过程中,温彦锋、魏迎奇、盛金保、李雷、张国栋、马福恒等专家提供了大量相关资料并进行了悉心指导,在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促以及水平所限,书中不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2011年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 大坝风险要素及风险分析方法	4
2.1 概述	4
2.1.1 传统的大坝安全管理模式	4
2.1.2 大坝风险管理模式	5
2.2 大坝风险分析方法	6
2.2.1 大坝风险要素	6
2.2.2 破坏模式分析	7
2.2.3 溃坝模式识别	10
2.2.4 溃坝概率分析	12
2.2.5 溃坝后果分析	15
2.2.6 风险计算	19
2.3 基于风险的大坝安全决策	19
第 3 章 除险加固排序的群决策技术	21
3.1 概述	21
3.2 基于概率分析群坝风险排序	22
3.2.1 溃坝后果综合评价方法	22
3.2.2 病险水库风险指数	23
3.2.3 应用实例	24
3.3 基于大坝缺陷群坝风险排序	39
3.3.1 大坝安全缺陷特征	39
3.3.2 风险指数方法	42
3.3.3 应用实例	50
3.4 单座水库大坝风险要素排序	58

3.4.1	FMECA 方法	58
3.4.2	FMECA 方法的应用	62
3.4.3	FMECA 方法应用的总结	68
3.5	小结	68
第 4 章	除险加固措施与大坝风险的关联决策分析	69
4.1	概述	69
4.2	病险水库除险加固措施	69
4.2.1	坝体加高培厚技术	69
4.2.2	坝体与坝基防渗加固技术	71
4.2.3	坝体稳定加固技术	75
4.2.4	坝体结构加固技术	79
4.2.5	坝体灌浆加固技术	80
4.2.6	混凝土老化及病害处理技术	80
4.2.7	新老混凝土界面处理技术	84
4.2.8	混凝土植筋加固技术	84
4.3	灰色关联分析决策模型	85
4.3.1	概述	85
4.3.2	灰色关联分析法及其模型建立	85
4.4	除险加固措施与大坝风险的灰色关联决策分析	87
4.4.1	概述	87
4.4.2	基于破坏形式的除险加固措施分类	88
4.4.3	大坝风险综合评价标准的划分	88
4.4.4	除险加固规模的划分	90
4.4.5	除险加固效果评价等级的划分	90
4.4.6	大坝安全程度等级的划分	92
4.4.7	除险加固措施与大坝风险的关联分析与决策	93
4.4.8	实例分析	97
4.5	小结	100
第 5 章	方案优选的基本理论	102
5.1	方案评价与优选决策	102
5.1.1	方案评价	102
5.1.2	方案决策	103
5.2	与方案设计阶段相适应的评价策略	104
5.2.1	方案构思阶段的评价策略	105

5.2.2	方案初步设计阶段的评价策略	105
5.2.3	方案详细设计阶段的评价策略	105
5.3	优选方法概述	106
5.4	优选方法的确定	107
第6章	基于风险的除险加固方案优化技术	109
6.1	概述	109
6.2	基于事件树法的除险加固方案优化	109
6.2.1	事件树法的基本原理	109
6.2.2	事件树法确定溃坝概率的分析步骤	111
6.2.3	溃坝概率分析方法	114
6.2.4	事件树法初筛加固方案的基本思路	117
6.2.5	实例分析	118
6.3	基于层次分析法的除险加固方案优选	148
6.3.1	概述	148
6.3.2	评价指标体系建立的步骤和原则	149
6.3.3	除险加固方案优选评价指标体系的确立	152
6.3.4	综合评价指标评价集的处理	154
6.3.5	评价指标权重的确定	157
6.3.6	除险加固方案的优选决策模型	161
6.3.7	基于风险的除险加固方案优选概念设计	165
6.4	小结	167
第7章	除险加固方案优选的风险决策方法	168
7.1	除险加固方案优选的决策分析方法	168
7.1.1	病险水库除险加固方案的分类	168
7.1.2	优选除险加固方案的风险决策方法	168
7.1.3	多目标决策模型	169
7.1.4	风险期望损失的确定方法	169
7.2	实例分析	171
7.3	小结	172
第8章	结语	173
	参考文献	175

第 1 章 绪 论

水库是调控水资源时空分布、优化水资源配置和防洪减灾的重要工程措施。水库已成为我国水利工程体系和防洪工程体系的重要组成部分,是国民经济的重要基础设施,水库在防洪、灌溉、发电、供水、航运、水产养殖、改善生态环境等方面发挥了巨大综合效益,在保障经济社会可持续发展、构建社会主义和谐社会与建设小康社会的伟大战略中发挥着重要的、不可替代的作用。截至 2006 年底,我国已建成各类水库 87085 座(不含港、澳、台地区),其中,大型水库 510 座[大(1)型 81 座、大(2)型 429 座],中型水库 3260 座,小型水库 83315 座[小(1)型 16672 座、小(2)型 66643 座]^[1]。

我国水库大都建于 20 世纪 50~70 年代,绝大多数属“三边”工程,普遍存在防洪标准低、工程质量差等安全隐患,加上管理维护不善、工程老化严重等影响,造成病险水库的大量存在。根据 2006 年普查材料统计,全国仍有病险水库约 3.7 万座,约占全国水库总数的 43%。这些病险水库大坝不仅不能正常发挥工程效益,工程本身已成为安全度汛的薄弱环节和心腹之患,严重影响下游人民生命财产、基础设施和生态环境的安全,制约当地社会经济的可持续发展。据 1954~2008 年资料统计,全国各类水库溃坝失事 3504 座,约占水库总数的 4%,其中小型水库 3376 座,占垮坝失事总数的 96.3%以上,平均年溃坝率为 64.9 座/年,其中 1980 年以前平均为 112.4 座/年。溃坝高峰期发生在 1959~1961 年和 1972~1973 年,年溃坝概率高达 51.79×10^{-4} ,给下游人民的生命、经济、社会和生态环境造成了重大损失。例如,1963 年海河大水,5 座中型水库垮坝,死亡达 1000 多人;1975 年河南板桥、石漫滩 2 座大型水库、2 座中型水库和 58 座小型水库垮坝,致使 29 个县市 1100 万亩农田遭受毁灭性灾害,冲毁铁路 102km,直接经济损失 100 亿元,死亡人数达 9 万人,这次垮坝堪称是世界最大垮坝惨剧。20 世纪 90 年代后,由于《水库大坝安全管理条例》(1991)的颁布实施,水库大坝安全管理工作得到加强,特别是大中型水库的溃坝事故大量减少,溃坝概率显著下降。1990~1997 年为 27.3 座/年,而 1998~2006 年大幅度降低至 7.2 座/年,但在此期间仍有造成全国影响的小型水库溃坝事件发生。1993 年 8 月,青海省沟后小(1)型水库垮坝,死亡 320 余人;2001 年 10



月，四川省大路沟小（1）型水库垮坝，伤亡近 40 人；2005 年 7 月 21 日，云南省昭通市彝良县七仙湖小（2）型水库垮坝，16 人死亡。显然，进入到 21 世纪，随着我国社会、经济的迅速发展，以及“以人为本”、“构建和谐”等执政理念的贯彻落实，病险水库安全问题越发显得突出，不再仅仅是各级水行政主管部门和水库管理单位关心的工程安全问题，而已经成为公众关注的公共安全问题。如何治理面广量大的高风险病险水库成为迫切需要解决的重大问题，受到党和政府的高度重视。

为此，自 1999 年以来，国家加大了对病险水库除险加固的投资力度，全国进入病险水库除险加固高潮。“十五”期间，各级财政投入数百亿元（其中中央财政 200 多亿元）对第一批专项规划中的约 1500 座病险水库进行了除险加固，取得了显著成效；第二批专项规划中的约 2000 座病险水库正在加固处理过程中；第三批专项增补规划中的 6240 座病险水库（含第一、第二批专项规划中未加固的病险水库 1759 座）则需要在 2008~2010 年 3 年内完成除险加固，任务十分艰巨，水利部将其列为当前水利工作的重中之重和当务之急。

即便如此，考虑全国病险水库数量巨大，加固经费和加固设计施工等条件，水库除险加固仍是一个长期和艰巨的系统工程。中央和各地财政很难能在短期内拿出巨资一次解决问题，因此，根据病险水库风险大小排序，重险优先，用有限的经费发挥最大的效益，不但是工程技术问题，更是政府决策的关键问题。因此，根据病险水库的风险等级，按轻重缓急，渐次进行病险水库的除险加固，既是政府决策层面的优先认定需求，也是工程技术层面的最优选择需要。

水库除险加固后，虽然提高了坝体的安全程度，但抬高的蓄水位将会增加对下游影响程度，同时也加大了水库大坝的风险度，水库一旦失事，对下游居民安全、社会经济和重要设施等造成的灾难也将加大。因此，基于风险分析的除险加固优化技术对于今后病险水库的除险加固设计方案是有效和必要的，也是今后发展的主要方向。基于风险分析的除险加固优化技术是以最大程度降低大坝风险为目标，既考虑有针对性的工程加固措施，也考虑下游实际情况以减少溃坝后可能造成的严重后果的工程治理措施。

从风险分析角度出发的病险水库除险加固风险决策，实质上是要回答关于病险水库除险加固的 2 个方面的问题：①哪些病险水库需要优先进行除险加固；②病险水库采取何种除险加固方案最优。第一个方面的问题是病险水库除险加固的顺序问题，即对需要进行除险加固的病险水库进行全面的综合分析，根据病险水库风险大小实行科学的排序，重险优先，将有限的资金优先用于最迫切需要进行除险加固的病险水库；第二个方面的问题是病险水库

除险加固方案的优选问题，即对已确定需要进行除险加固的病险水库，按照风险决策准则，从众多的能使病险大坝达到社会可接受的大坝安全风险标准的除险加固方案中，优选出最满意的方案，从而使改善大坝安全的投资及效益与除险加固后的大坝安全风险水平达到一种最佳的协调关系。

本书针对目前病险水库除险加固存在的问题，为满足病险水库重险优先加固的需求，充分利用有限的除险加固资金，并对风险处理方案进行优化，最大可能地降低病险水库带来的风险，进行病险水库除险加固风险决策的研究，提高除险加固决策的科学性，主要包括：①大坝风险要素及风险分析方法；②除险加固排序的群决策技术及单座水库大坝风险要素排序；③除险加固措施与大坝风险的关联决策分析；④基于风险的除险加固方案优化技术；⑤除险加固方案优选的风险决策方法。

第2章 大坝风险要素及风险分析方法

2.1 概 述

2.1.1 传统的大坝安全管理模式

从安全管理模式看,我国目前采用的是一种传统的大坝安全管理模式。绝大多数水库大坝的业主是政府,政府委托水行政主管部门来管理大坝的安全。水行政主管部门委派水库管理部门进行大坝安全管理。每年汛前,水行政主管部门派出检查组进行水库大坝的安全检查,防汛办公室负责汛期的安全度汛和洪水调度,水库管理部门负责日常安全检查,发现事故或隐患立即向主管部门报告,并逐级上报。接到事故报告后,上级主管部门将派出检查组或工作组,领导或监督事故处理,严重时组织抢险,避免事故发展。政府部门根据资金情况,组织对大坝事故进行鉴定、加固,最终验收。

传统的大坝安全理念是一种关于工程自身安全的理念,围绕着工程自身的安全问题,在设计、施工和运行不同阶段中考虑采用何种措施、技术,保证工程具有良好的性态。几十年来在这样传统大坝安全理念的指导下,我国已经建立起一套完整的大坝安全管理体系和法规,大坝安全管理水平不断提高,取得了明显的成效。但是,传统的大坝安全模式也存在以下不足。

1. 大坝安全的相对性

所谓的大坝安全是设计标准下的安全,超过设计标准的荷载,大坝安全就可能得不到保障,大坝可能不安全。事实上,安全是相对的,没有一座大坝是绝对安全的。对于大坝不安全的状况,传统的大坝安全没有给予足够的重视。

2. 大坝安全的不确定性

大坝安全取决于外部荷载因素以及大坝自身质量因素,设计荷载、施工质量、运行管理均存在不确定性,因此,大坝安全存在某种不确定性。事实上我国自1954年开始的溃坝记录表明,迄今为止我国已经发生过3500余起

溃坝事件，充分说明了这种不确定性。

3. 下游公共安全风险

所谓下游公共安全风险是指由于大坝溃决所造成的下游生命损失、经济损失和社会环境影响的总和。随着“以人为本”、“构建和谐社会”等执政理念的贯彻落实、经济社会的迅速发展和环保意识的不断增长，下游公共安全风险越来越大。和过去的几十年相比，这种风险不但不能忽略，而且显得越来越重大，以至于需要把它和大坝安全相提并论。而这恰恰是传统大坝安全理念所没有足够重视的一个领域。

因此，必须建立一种全新的大坝安全管理模式来适应这一变化。

2.1.2 大坝风险管理模式

现代大坝风险理念是在传统大坝安全理念基础上发展而来。传统的大坝安全理念本质是“工程安全”。现代大坝安全理念本质是“工程风险”，大坝安全不仅要保证工程安全，同时需要保障下游的公共安全，使之处于可接受风险以内。

现代大坝安全管理模式是指围绕着现代大坝安全理念，即以事故和风险为核心，以预防和控制为主导的政府、业主职责明确的大坝安全管理模式，目前国外基本上已经从传统的安全管理模式过渡到了现代大坝安全管理模式。

这种模式有以下一些特征。

(1) 不但关心大坝的各别事故，而且关注大坝所有可能出现的事故和隐患，包括管理过程的不足，因为它也可能导致事故。不但关心事故后的处理，更关心这些可能出现的事故的可能性和严重性，更关心如何预防和控制所有可能出现的事故。

(2) 下游区域的公共安全是大坝安全管理的另一个核心，如何预防和控制水库下游风险，将风险控制在下游社会和公众能够接受的范围内，是大坝风险管理的重点。

(3) 政府与业主职责分明，政府负责安全立法和监督检查，业主负责大坝安全，有一个能够良性循环的大坝安全管理体系。

(4) 采用制度化、法规化、专业化和社会化的动态安全管理。

传统的大坝安全管理模式所面临的困难和挑战已为我国政府所重视，现代大坝安全管理模式已被水利部高层所接受，目前正在逐步推广。

本书对现代大坝安全管理模式在我国的实际应用——大坝风险排序群决策技术和基于风险的除险加固方案优化技术进行了研究。

2.2 大坝风险分析方法

大坝风险分析过程如图 2.1 所示。

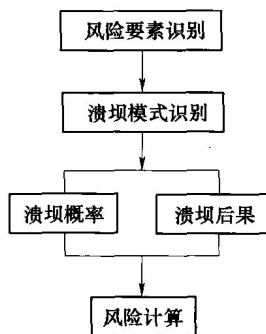


图 2.1 大坝风险分析过程图

2.2.1 大坝风险要素

水库大坝风险要素是指可能引起水库大坝破坏的内因与外因，可分为人为风险要素、工程风险要素与环境风险要素 3 类。

1. 人为风险要素

据不完全统计，我国水库溃坝事件中，有超过 5% 为人为因素造成（表 2.1），主要体现在管理人员专业素质低以及管理机制与非工程措施不完善。如管理制度不健全，管理粗放，技术含量低；日常运行维修养护不善，泄洪设施紧急情况下无法投入运用；操作失误；部分管理者有法不依，盲目超蓄；防汛交通、通信及大坝安全监测等管理设施和手段落后；应急预案及应急措施不能满足需要；水库下游盲目开发等。

2. 工程风险要素

根据对我国已溃坝资料统计，洪水漫坝是造成小型水库溃坝的最主要原因，约占 50%；工程质量 [包括渗漏、裂缝、滑坡、坝内埋涵（管）等] 问题导致的溃坝约占 35%；管理和其他形式引起的溃坝占 11.4%，具体见表 2.1。另据对 1991 年以来总计 235 座水库垮坝事件的统计分析（小型水库 233 座，中型水库 2 座），漫坝失事占 63%；因工程质量差、抢险不力失事 30%；其他 7%。可见，水库主要工程风险要素依次为：洪水、渗漏、坝内埋涵（管）、裂缝与滑坡、地震、生物破坏等。

表 2.1 主要溃坝原因及其比例和平均年溃坝率

溃坝原因		数量 (座)	比例 (%)	平均溃坝率 ($\times 10^{-4}$)	备 注
漫坝	超标准洪水	435	12.6	1.0996	漫坝 1737 座, 比例为 50.2%, 年平均溃坝概率为 4.391×10^{-4}
	泄洪能力不足	1302	37.6	3.2912	
工程质量	坝体坝基渗流	701	20.2	1.7720	由质量问题引起的溃坝事件为 1205 座, 占 34.8%, 年平均溃坝概率为 3.016×10^{-4}
	坝体滑坡	110	3.2	0.2781	
	溢洪道	208	6.0	0.5258	
	泄洪洞	5	0.1	0.0126	
	涵洞	168	4.9	0.4247	
	坝体塌陷	13	0.4	0.0329	
管理不当		185	5.3	0.4676	包括无人管理、超蓄、维护运行不当、溢洪道筑堰等
其他		212	6.1	0.5359	人工扒口、近坝库岸滑坡、溢洪道堵塞、工程布置不当等
总计		3339		8.45	

注 表中总计溃坝数较总溃坝数少 123 座, 系溃坝原因不详, 无法检索所致。

3. 环境风险要素

环境要素包括自然环境要素与社会环境要素。由于全球气候变化影响、水资源匮乏及政治等影响, 大坝的运行环境可能发生变化。如超标准洪水、水库功能转变、战争、恐怖活动等, 都可能成为影响水库安全的风险要素。

2.2.2 破坏模式分析

破坏模式 (failure mode) 是指在某种危险作用下, 导致水库大坝最终破坏的路径。如洪水→溢洪道堵塞→库水位上升→漫顶→大坝溃决便是一种破坏模式。

破坏模式分析 (failure modes analysis) 是指应用系统综合筛选过程确定水库大坝所有可能的破坏模式, 如破坏模式和影响分析 (failure modes and effects analysis, 简称 FMEA), 破坏模式、影响和危急程度分析 (failure modes, effects and criticality analysis, 简称 FMECA)。这里“影响”是指某种破坏模式对水库大坝造成的后果, 这种后果仅仅是对水库大坝本身而言, 并不包括溃坝洪水对大坝下游的生命损失和财产损失。在定性风险评价中一般使用 FMECA, 在定量风险评价中一般使用 FMEA, 因为在随后的风险评价中会对每种破坏模式的危急程度进行分析。当然, 这种区分并不十分严格, 在定量风险评价中也可应用 FMECA 来确定那些需要进行详细分析

的破坏模式。

进行破坏模式分析时,把水库大坝看作一个总体,按照功能把水库大坝分成挡水建筑物、泄水建筑物和输水建筑物等子系统,再把子系统细分成一个个要素。所谓要素,是指构成水库大坝的有一定功能的最小单元。把水库大坝的所有要素都罗列出来,然后分析在每一种危险情况下各要素的反应,考虑各种要素的危险组合,找出水库大坝所有可能的破坏模式。只要某种破坏模式有可能发生,则需进一步分析其风险。只有当某种破坏模式明显可以忽略时,才可以不作进一步风险分析。不过也有人认为,不管风险大小如何,所有破坏模式都应进行风险分析。

确定破坏模式以后,应根据不同危险对破坏模式进行分类,以便和相应的荷载状态连接起来。一般根据危险把破坏模式分为与洪水有关、与地震有关、正常运用条件下和与其他危险有关的4大类。

不同的破坏模式其严重性是不同的,应根据水库大坝要素和及其破坏后果的严重性对破坏进行分类,以便划定风险评价的范围。如可以把水库大坝破坏分为灾难性洪水溃决、较大洪水溃决、中等洪水溃决、较小洪水溃决和没有溃决5类。

FMECA方法最早应用于电子、机械、航空、石化和核工业,到20世纪80年代开始应用于大坝工程。它可以为事件树和事故树分析提供依据,对那些确认的重要的破坏模式,应用事件树或事故树方法可以进行更加详细的分析。通过FMECA分析可以找出水库大坝的各种安全隐患,这对那些至今还没有安全监测的大坝进行险情分析特别有用。在大坝设计阶段也可以应用FMECA方法,根据设计方法和指南,把潜在大坝破坏模式消灭在萌芽状态中。

FMECA的基本步骤如下。

(1) 把水库大坝看作一个总体,按照功能把水库大坝分成挡水建筑物、泄水建筑物和输水建筑物等子系统,再把子系统细分成一个个要素。有些要素由不同的材料构成,因此,还可以进一步划分为不同的子要素。把水库大坝划分完毕,用表格形式记录下来,并把要素或子要素的主要功能和辅助功能列于表里。表格形式如表2.2所示。

表 2.2 水库大坝要素划分表格形式

1	子 系 统					
要素	要素编号	子要素	子要素编号	总体编号	主要功能	辅助功能

(2) 根据上述划分原则,确定每种要素或子要素的破坏模式。有的要素

或子要素不止一种破坏模式，应把所有可能的破坏模式都找出来，把每种破坏模式的主要影响和次要影响以及破坏原因列出来，计算每种破坏模式的危急程度 C_r ，采用式 (2.1) 计算破坏模式危急程度，即

$$C_r = P_1 P_2 P_3 \quad (2.1)$$

式中 P_1 ——某种危险发生概率，分为 5 级；

P_2 ——该种危险作用下某一破坏模式发生概率，分为 5 级；

P_3 ——该种破坏模式发生下破坏后果，分为 5 级。

P_1 、 P_2 、 P_3 的划分见表 2.3。

表 2.3 P_1 、 P_2 、 P_3 划分标准

危急程度	P_1	P_2	P_3
1	极少几率发生	失事不会继续发展下去	破坏影响非常小
2	根据经验小于 10% 的概率发生	根据经验失事很少继续发展下去	破坏影响较小
3	根据经验有 50% 的概率发生	通过人为干预可以阻止失事继续发展下去	破坏影响中等
4	在外部条件（如风、暴雨等）作用下大于 50% 的概率发生	人为干预困难，但溃决有可能避免	破坏影响较大
5	在外部条件作用下肯定发生	人为干预困难，溃决不可避免	出现灾难性后果

C_r 越大，则该破坏模式发生的风险越大。把上述结果用表格形式记录下来，可以对每种破坏模式提出一些初步建议，采取什么措施可以降低溃决发生，表格形式如表 2.4 所示。

表 2.4 破坏模式、影响和危急程度分析表格形式

子系统	要素	编号	子要素	编号	总体编号	破坏模式	编号	模式编号	主要影响	次要影响	破坏原因	P_1	P_2	P_3	C_r	措施
-----	----	----	-----	----	------	------	----	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	----

(3) 计算出每种破坏模式危急程度后，统计每种要素的危急程度、在子系统所占比重和在总体中所占比重，统计各个子系统的危急程度及其在总体中所占比重。每种要素的危急程度为该要素的各种破坏模式危急程度的简单相加，子系统的危急程度为该子系统的各个要素的危急程度的简单相加。最后把表 2.2 和表 2.4 综合起来，做成最终成果报表，报表格式如表 2.5 所示。