

高等水工建筑物

程心恕 刘国明 苏燕 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等水工建筑物

程心恕 刘国明 苏燕 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是作者在多年来的水工结构工程专业硕士研究生的“高等水工建筑物”自编讲义的基础上编写的。全书分十章，主要包括：建设与生态环境和社会和谐绿色大坝应关注的一些问题；我国坝工技术的新动向；坝工（特别是碾压混凝土坝和混凝土面板堆石坝等）关键技术以及分析大坝的稳定和应力方法，特别是有限元法的应用以及存在问题和解决方法途径的研讨；对不同学术见解观点也做了分析和讨论。书中关于拱坝设计准则的研讨是作者科研成果和心得。

本书可供高校有关专业师生使用，也可供水利水电工程有关人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

高等水工建筑物 / 程心恕, 刘国明, 苏燕编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2011.9
ISBN 978-7-5084-9035-9

I. ①高… II. ①程… ②刘… ③苏… III. ①水工建筑物 IV. ①TV6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第198612号

书 名	高等水工建筑物
作 者	程心恕 刘国明 苏燕 编
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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话 (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	汇鑫腾达商贸公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 344千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	40.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在今后 20~30 年的一段时间，我国水电发展将迎来高峰，特别是还要修建许多 200~300m 级的高坝，水利学科将随之进一步发展和提高。因此，大学水利专业培养研究生的重要性不容忽视，而目前水工结构工程专业研究生的高等水工建筑物教材几乎是空白。作者从 20 世纪 90 年代就用自编的高等水工建筑物教材为硕士生上课，并逐年有增换内容。此次编写本书除满足本校的需要外，更希望起到抛砖引玉的作用。

本书与其他水工结构专业方面书的不同在于，阐述了一些较新的工程理念，如：人和大自然和谐共处的水利水电工程理念，关于建坝的争论，以及应重视的环保问题和风险管理概念等。另外本书将有限元技术融到几种大坝的分析方法中，对坝工建筑的关键技术和存在问题及其解决途径进行了研讨，特别是对一些不同学术观点也进行了讨论分析。

本书材料来源包括：一是国内外已建大坝的有关研究资料；二是我国国家科技攻关的课题成果，主要是各种会议上印发交流的书刊和资料等；三是作者长期从事教学科研和咨询的实践经验和成果等；四是近年来《中国水利报》关于大坝与生态、生态补偿、河流、环境影响评价、健康水库生态理念，以及国内坝工技术最新动态等有关文章和报道。

编著者

2010 年 3 月

目 录

前言

第一章 绿色大坝建设与生态环境和社会和谐	1
第一节 人与自然和谐共处的水电工程理念	1
第二节 建坝已成国际主流认识	4
第三节 大坝安全和风险管理	8
第四节 河流生命伦理的哲学概念	16
第五节 河流的生态补偿和生态调度	22
第六节 水利工程的环境影响及后评价	24
第七节 健康水库开发建设的概念	24
参考文献	28
第二章 中国坝工技术新进展	29
第一节 高混凝土拱坝	29
第二节 高碾压混凝土坝	31
第三节 混凝土面板堆石坝	32
第四节 沥青混凝土防渗技术	34
第五节 “十一五”我国坝工和水电机组技术发展展望	34
参考文献	36
第三章 岩基上混凝土重力坝稳定分析	37
第一节 概述	37
第二节 重力坝稳定分析中的若干问题	40
第三节 重力坝稳定分析的非线性有限元法	56
参考文献	59
第四章 重力坝应力分析有限元法若干问题	60
第一节 有限单元法中应力成果整理(计算方法)综述	60
第二节 非均质材料有限元法	65
第三节 关于若干问题的处理	72
参考文献	74

第五章 混凝土重力坝施工温控及防裂	75
第一节 概述	75
第二节 体积变形和温度应力	75
第三节 结构措施及温控	76
第四节 裂缝与修补	77
第五节 重力坝变温应力有限元计算原理	79
第六节 温度场的确定	83
参考文献	85
第六章 碾压混凝土坝	86
第一节 概论	86
第二节 碾压混凝土的优点	91
第三节 碾压混凝土坝的特点	92
第四节 碾压混凝土的性能	94
第五节 碾压混凝土施工的温控及防裂	98
第六节 碾压混凝土重力坝的设计	102
第七节 碾压混凝土筑坝的若干问题	113
第八节 碾压混凝土拱坝	117
参考文献	124
第七章 拱坝稳定分析	125
第一节 拱坝失稳机理及影响因素	125
第二节 拱坝稳定分析方法	127
第三节 提高拱坝稳定性的工程措施	135
参考文献	138
第八章 拱坝若干问题讨论	139
第一节 拱坝横缝不抗拉对坝体应力的影响	139
第二节 拱坝的事故及开裂问题	143
第三节 拱坝与地震	148
参考文献	155
第九章 拱坝设计准则研讨	156
第一节 拱坝设计现状及存在的问题	156
第二节 拱坝应力分析方法的讨论提纲	160
第三节 拱坝应力分布的特点和规律	164
第四节 拱坝混凝土强度与标号的合理选择	169
第五节 拱坝设计准则	173
参考文献	183

第十章 高土石坝若干问题讨论	184
第一节 土石坝的建设与安全	184
第二节 混凝土面板堆石坝的设计与施工若干问题	192
第三节 混凝土面板堆石坝接缝止水的新进展	197
第四节 面板坝混凝土面板的裂缝及其防治	199
第五节 恶劣自然条件下的混凝土面板堆石坝	203
第六节 关于面板坝边坡稳定、应力及变形分析方法的讨论	205
参考文献	223

第一章 绿色大坝建设与生态环境和社会和谐

第一节 人与自然和谐共处的水电工程理念

一、兴水利除水害是人类社会发展和进步永恒的课题

生命离不开水，人类的生存和发展也离不开水，21世纪人类面临三大课题——人口、资源和环境。水资源是一种很普遍但又很特殊的资源，它可再生但不可替代。世界年人均水资源占有量 11800m^3 ，我国人均不到 2500m^3 ，福建省人均 3367m^3 ，2003年3月6日《参考消息》报道了联合国报告认为世界面临水资源危机。为了解决缺水地区、工业、农业用水及生活用水的需要，调水工程应运而生了，如我国正在实施的南水北调工程。世界上还有：苏联建设了15项调水工程（土库曼运河、伏尔加—莫斯科调水工程、库班河—卡劳斯河调水工程、瓦赫什河—喷赤河调水工程等）；埃及东水西调工程；美国科罗拉多河东水西调等。

此外，水资源在时间上分布不均匀，又产生了江河洪水和洪灾问题。前者是不可避免的，后者可以采用修建水工建筑物，如大坝、水闸、防洪堤等治理洪水的工程措施，但这只是控制一定标准的洪水，而更重要的是要给洪水以出路，应对洪水施以科学有效的防控，如2003年淮河流域的大洪水，就充分发挥了水利工程的作用，及时运用了蓄洪区和分洪河道，做到“拦、分、蓄、滞、排”合理安排，尽管洪水量级大于1991年、汛情重于1991年，但灾情、抗灾投入的灾害损失均小于1991年。

随着经济的发展，人类对电力的需求越来越多，而水电则是最清洁又可重复使用的资源。当前，大多数发达的国家水电开发率极高，水电资源开发已近饱和，而我国水电资源开发才达到百分之十几，以水库拦蓄水资源来看，以美国为例已达到河川年均总径流量34%以上，远远高于我国。我国的水电建设从解放初期装机容量16.3万kW发展到2005年底装机1.16亿kW，解决了当前五分之一以上的能源需求。据测算到2020年国家电力装机为9.3亿kW，其中水电装机需在当前的基础上再增加1.7亿kW，达到3.28亿kW。也就是说今后平均每年要新增水电装机1000万kW。

二、水资源危机——人类发展的进步的反思

“日出江花红似火，春来江水绿如蓝”（白居易——忆江南），这就是大自然的写照，具有生命的江河湖泊的美丽描述。

但随着全球经济的发展，江河湖库水体状态不佳，具有明显恶化的趋势。工业废水、农田径流、养殖业废物、废水对生态与人类健康造成危害。2003年3月6日的“参考消息”报道了联合国一份报告中说“目前世界上没有哪个地区可以说没有水资源危机”，每

天有 200 万 t 的垃圾被倒入河流、湖泊、小溪中，每一升废水正在污染 8L 淡水。在美国 1998 年评估有水资源的地方已有 40% 被污染，欧洲 55 条大河流只剩下 5 条目前没有被污染。

在我国同样存在许多地方缺水严重，另一方面我国环境状态令人担忧，我国的水资源正面临着整体恶化的危机，特别是在人口稠密的“三河三湖”即淮河、辽河、海河和巢湖、滇池、太湖流域，其水质状态令人不安。《2003 年中国环境质量状态》显示 2003 年我国七大水系中 I ~ III 水质的断面比例为 37.7%，IV、V 为 32.0%，劣 V 类为 30.3%。我国还是水产品的第一养殖大国，由于过量使用抗生素和过量投放化学物质，而造成水质恶化，使养殖业受到严重损失，例如洪湖，一曲“洪湖水浪打浪”唱遍全国，然而泛舟洪湖，昔日碧波万顷红莲映日，草长莺飞的胜景已不存在，那“四处野鸭和莲藕，晚上回来鱼满舱”歌谣再也无法传唱了。中国科学院测量与地球物理研究所洪湖湿地自然保护区管局进行的综合科学考察表明，由于多年的非法围垦、乱捕滥捞和过度围湖围养等原因，洪湖生态凸显重重危机，湖底沉淀、湖面萎缩、水质恶化，防洪蓄水的功能大大减弱。20 世纪 50 年代洪湖还是一个同江敞水湖，湖泊面积 114 万亩，因江湖隔断，围湖造田，目前洪湖实有水面不足 40 万亩。目前洪湖湿地已被列入《中国重要湿地保护名录》和《中国湿地保护计划》的优先保护项目。

2006 年 7 月下旬，由于淮河上游突降暴雨，一片长达 133km 的污水团形成并“扫荡”淮河干流，7 月 22 日污染水体前锋进入洪泽湖。

总之，从我国生态环境总体来看，生态环境恶化的趋势一直未得到遏制，森林覆盖率低，林区增长速度缓慢，部分地区森林面积减少，草地破坏加重，水土流失仍然严重，荒漠化面积扩大。为遏制恶化趋势，国家一方面采取封育保护植树种草的植被建设措施，另一方面采取生态环境综合治理，包括水土保持和荒漠化防治。在国家重视生态建设的大环境下，为了兴水利、除水害，在江河中修建大量的水工建筑物，这是我国国情的需要，也是发展和进步的必须。那么，这些水工建筑物为改善江河湖泊的水质状态能发挥什么作用，新建的水工建筑物如何实现人类与大自然和谐相处，是值得深入研究的课题。

三、生态方法修复水体技术的启迪

生态方法修复水体技术是利用培育的植物、动物或微生物的生命活动，对水中污染物起转移、转化及降解作用，从而使水得到净化。其包括：人工湿地、生物膜法、土壤处理及生物操纵等，位于南京乌龙潭公园内有 4 万 m³ 水，多年来污染严重，不久前环保科研工作者在乌龙潭截出 2000m³ 水体，投放“利蒙”微生物制剂，不到几天，潭水开始变清澈，能见度从 42cm 提高到 100cm，水也不臭了，作为富氧化标志的藻类也减少了。深圳一家高尔夫球场的生活污水处理厂是一块 1200m² 的人工湿地，种植再力花、纸莎花、美人蕉和富贵竹等使发臭的污水变清水。韩国的汉江支流良才川，利用河卵石表面形成的生物膜的地下生物廊道对河流污染处理效果显著。其实自然界对于江河湖海就具备一种很强的净化能力，河流湖泊本身就具有不可替代的生态功能，生态方法修复水体技术只不过是大自然自净能力的一种强化，是人类遵循和利用自然界生态系统自身规律而已。

在以往的兴水利除水害而修建水工建筑物时，工程师对大自然生物圈中水在气候系统中的循环运行以及水文循环中的水变换规律有较多研究，但对河流的生态功能，对于河流

中水是生物群体的载体，又是能量流动和物质循环的介质，研究重视不够。水是生态系统中重要组成部分，水与动物、植物、微生物共生存，在生态系统中水与生物群体之间进行能量交接、物质循环，水是生物群体的生命之源，同时生物群体又净化了水，形成了水体自然净化机制，这就是大自然的特殊功能。生态系统是一个整体，任何一环的或缺，都会引起生态系统的失衡，因此兴水利除水害的同时，要防止破坏这种平衡和努力恢复这种平衡。

四、水工建筑学与生态学结合——生态水工建筑学的探讨

现在的水工学是以水流为控制对象，因此从工程项目可行性研究到设计和施工及管理，主要是针对满足人们兴水利除水害的各种需求（如供水、发电、航运、防洪、排涝等），而忽视了水流自身需求及水流生态功能。在高等院校中，学生所学的水工建筑学，更集中在如何计算保证水工建筑物规模达标、安全承载等，而工程与生态平衡的关系的影响涉及甚少。例如：水工建筑物课程教科书中一般是仅在某一章节中以一节的篇幅提及“水利工程对环境的影响”。

人与自然和谐共处是生态水工建筑学的指导思想，因此水利专业教科书和教学过程应让学生掌握兴水利除水害与生态环境的相关知识，懂得水利工程是不但能够实现开发利用水的功能价值，还能兼顾建设一个健全的流域生态系统，有利于环境保护的可持续发展工程。为了更好地扩展更新水电工程概念，必须在原有的水工建筑学的基础上，吸收融合生态环保理论，建立和发展新的生态水工建筑学，在此前提下提出以下一些设想，以期抛砖引玉。

首先在大学教育培养计划中，水利专业培养目标必须做相应的修改，将人与大自然和谐共处的工程理念作为基本要求写进培养目标中。

其次，在理论教学课程设置中，应对原有的有些课程加以充实，吸收有关生态环境的内容，并增设一些相关课程，如地质课中增加库岸崩塌滑坡、水库诱发地震等与地质灾害有关的内容；水利工程概论中应增加已建工程对一些地区恢复生态环境的作用的影响等；建筑材料课程应增加建材生产所引起的环保问题与对策的概要；工程水文学中应将河流泥沙分析的内容中增加大坝对泥沙与河道的影响，将三门峡水利水电工程等典型事例引入教材；在水工钢筋混凝土结构学中，应增加一些生态混凝土、绿色混凝土、生态型建筑砌块等新材料、新构件的介绍；水能规划课程中可增加流域规划与流域生态影响和对策等有关方面的内容；水利工程施工课程中增加一章有关施工与环保的内容；水工建筑物中应将原来的水利工程对环境的影响的一节内容扩展为一章。此外建议增设生态平衡学理论、河流生态学、水库淹没与对策、水库对航运、水质及大气影响与对策等课程，可以是必修课程，也可以是选修课程。

实践环节方面：在认识实习内容中应增加已建水库对环境的影响、改进等；生产实习中可增加有关分洪泄洪区的有关内容；毕业设计中应根据不同的专业增加环境评估等有关内容等。

教书必须育人，也必然育人，因此，大学水利教育必须使老师和学生都能站在水的立场上、河流的立场上、大自然的立场上，做水的代言人、河流的代言人、大自然的代言人，着眼于人类社会未来发展和进步，呵护生态平衡、呵护河流的生命、水的生命，这样

才能培养出具有人与自然和谐共处工程理念的新一代人才，才能更好地挑起历史赋予的水利水电建设与生态保护两副重担，才能以水资源的可持续利用支持推动社会经济可持续发展。

第二节 建坝已成国际主流认识

一、关于大坝建设的争论

(一) 水库大坝在兴水利除水害中具有不可替代的地位

过去两千多年中洪灾、旱灾频繁发生，黄河平均两年改道一次，现在没有这么突出了，很重要的原因是水库、大坝发生了宏观调控作用。

黄海 60 年“波涛不惊”，大坝功不可没。前几年由于开发用水过渡，造成黄河断流，通过水库调控和供水调控，黄河连续从 1999 年到 2009 年 10 年不断流，现在黄河调水调沙亦是大坝的功劳。长江三峡大坝可使江汉平原防洪标准从 10 年提高到百年。即使千年洪水也可保证长江中下游免遭毁灭性灾害。

国际上一直致力的目标——每个人拥有安全饮用水，我国在河流上建坝解决水资源时空分布不均，增加河流供水能力，在提供饮用水、保证粮仓安全中发挥着重要的作用，如密云水库向北京供水，否则北京用水图景会如何是可想而知的。在提供清洁可再生能源中，大坝也发挥重要作用。大坝建设不仅满足许多人的能源要求（水电占 20% 左右），还减少了矿燃料的消耗，减少环境的污染，对保护地球环境是一个很大的贡献。三峡工程年发电量 847 亿 kW·h，相当于 10 座大亚湾核电站。

(二) 大坝建设与生态环境

在人类历史进程的长河中，人与自然关系经历了四个时期——依存、开发、掠夺、和谐。从原始社会的“天人合一”，即靠天吃饭，人类被动地适应自然；随后人类开始开发利用自然：人类在不断进步的同时，毫无节制向大自然索取、掠夺，招致大自然报复与惩罚；到近代人类开始寻求“人天和谐”，即人与大自然和谐共处的新境界。对此有充分的新认识，就能更好地自觉地树立科学发展观，才能正确对待大坝建设与生态环境的关系，处理好人与大自然和谐的关系。

树立和落实科学发展观。按照人与自然和谐相处的理念，认识和处理大坝建设生态影响问题，要求水利工作者更加重视生态与环境问题。我国是发展中国家，水电资源开发与大多数发达国家相比，开发率低很多，发达国家人均能源消耗远远高于发展中国家，如美国人均用电量是我国的十几倍，水库拦蓄水资源量的比例远远高于我国。最新的我国水能资源普查，我国河流经济装机容量达 6.94 亿 kW，技术可开发装机达 5.42 亿 kW，2005 年底，水电装机 1.16 亿 kW，根据测算我国到 2020 年国家需电力装机 9.3 亿 kW，其中水电装机要达到 3.28 亿 kW，按照世界上发达国家情况看，水电开发最终可能达到 60%~70% 的水平。因此在今后的 20~25 年的一段时间内，我国水电开发将迎来高峰，我们应充分重视每一座大坝的生态问题，要注意到在不同的河流、不同的河段、不同的坝址上建设带来的生态问题是不同的，要有认真的生态环境评估报告，不能一概否定建坝。同时我们应当充分注意到修大坝要慎重，拆大坝也要慎重。因为拆掉大坝也有可能破坏即成

的、现实的生态系统，带来新的生态失衡问题。

要正确处理大坝与生态的环境关系，必须科学地、实事求是地分析大坝可能导致那些生态环境问题，现在归纳为以下几点。

1. 对河流原生态条件的影响

要综合考虑大坝的规划与设计，河流的有形功能（发电、灌溉、防洪、供水等）和无形功能（生态功能、环境功能、人文功能等），要按生态经济的理念研究工程效益，不但要计算有形功能的效益，也要计算无形功能的效益，用收益回报的原则，通盘考虑流域的生态修复、环境质量、人文影响，用以平衡工程建设产生的生态影响。同时要研究设计与工程管理，使工程范围内的河流尽量接近自然流态，或者尽快在较短距离内达到这一目标。要认真研究大坝建设后所形成的新的生态系统与原河流的差别，尽量使其产生或恢复原河流的多样物种群落。

2. 移民问题

水库移民涉及众多领域，是一项庞大的、复杂的系统工程，关系到人的生存权和居住权的调整。全世界移民人数达 8000 余万人。1949 年新中国成立以来我国修建了 8 万多座水库，移民达 1500 多万人，三峡水库工程移民 110 万人，为此中央制定了开发性移民方案设立专门机构，成立重庆直辖市，采取了一系列措施，移民工作初见成效。我国国情使我国能够妥善解决移民问题，我国水库移民有其特殊性，我国相当一部分水库是山区水库，库区群众原本生活十分贫困，移民带来了脱贫的机会，因此移民工作得到了库区百姓的支持。世界银行、亚洲银行的官员到我国一些库区考察，了解到库区群众都愿意移民。这一点与外国不同，是中国水库移民的一大特点，因此只要扎实地做好工作，我国水库移民问题是能够妥善解决的。

3. 对泥沙和河道的影响

泥沙对于河势、河床、河口和整个河道的影响，从生态角度来讲，是建大坝产生的最根本的影响。大坝阻断了天然河流，导致河流流态发生了变化，从而引发了河流上下游和江河的水沙发生变化，如三门峡水利枢纽就是因为建坝时对泥沙问题估计不足，导致水库几乎被淤满，以及上游河床抬高影响库区上游的区域洪涝问题严重。三峡工程已开始运用，其对下游河道、江湖关系及入海口的影响，仍需高度重视。

4. 对气象变化的影响

水库形成一定水域会改变附近地区的小气候，并使附近地区的生态发生变化，必需引起重视。

国际上把大坝的修建对大气的影响看作生态影响的首要问题，其原因是由于南美洲的阿根廷、巴西、委内瑞拉等国、北美洲以及俄罗斯的西伯利亚的大坝水库淹没了大片森林，水库蓄水没有很好地砍伐清库，林木长期浸没在水中腐烂后便产生有害的气体，对大气造成污染，从世界范围来看这个问题十分突出。

这个问题在中国并不严重，因为中国大电站多属于高山峡谷型水库，相对国外库容并不大，同时库区内没有大面积的森林。如三峡水电站是世界上最大的水电站，但三峡水库库容并不是很大（总库容 393 亿 m^3 ），林木淹没很少，因此反坝人士的攻击，说明对中国大坝建设缺乏了解。

5. 水体变化带来的影响

修建大坝河流的流态改变，水在水库中停滞产生库水温变化的幅度随着水深而减少，水温 10m 左右变幅较气温低 2~5℃，水深 50~60m 处，变幅只有 4~5℃，再深变化很小，几乎处于常温状态。水库水质可能由于库区内生物机体分解，流入水库的磷氮等盐类造成水体“富营养化”使水质变坏，因此，在蓄水前清库和运行中都必须充分重视。还有对航运的影响，如过船闸的影响以及下游河道冲刷的影响，也会对航运造成问题。水库的沟汊中易产生蚊虫和其他有害的微生物滋生，卫生条件变化应给予重视。

6. 对生物物种的鱼类的影响

这里的生物物种是泛指动植物和微生物，特别指出鱼类是人们都直接感受到的。在不同的地区、不同的河流上建坝对鱼类和生物物种的影响不同，需要对具体问题作具体分析，采取不同的措施。有的河流有洄游鱼类，有的没有，乌苏里江、黑龙江、松花江就有鲟鱼又叫大马哈鱼。我国长江葛洲坝工程建设中，用人工繁殖的办法很好地解决了中华鲟洄游的问题。其他 20 世纪五六十年代的工程中也有采用鱼道、鱼闸等过鱼建筑物，但效果并不理想。

7. 对文物古迹的影响

水库库区淹没对文物古迹有影响，在三峡水电工程中做了大量的迁移保护，使很多的文物、古迹得以保护，这一问题必须引起高度重视。

8. 地质灾害

岸坡浸水后，岩体抗剪强度降低，水库水位降落时，可能发生滑坡、崩岸。意大利的瓦依昂拱坝（高 265m）因库区大滑坡，岩体将库水挤溢坝顶，超出坝顶 150m，造成下游巨大灾害，水库被淤满不能再使用。有些工程在施工中由于坝址附近滑坡，造成改变设计，甚至中途停工。

修建水库后可能诱发地震，特别对于高坝和大坝（坝高 100m 以上和库容 10 亿 m^3 以上），诱发地震的几率较高，但一般震级不会超过构造地震。此外，有地震多发地带建坝以后，地震减少，震级变小，如苏联阿拉木图是地震频发区，修建了卡普盖水库后，20 年来未发生过有感地震。国立哈萨克教授 B. 伊纽申认为：卡普盖水库减缓着该地区全部地震的活动性，阿拉木图科研小组发现了水的共振波谱存储现象。埃及地球物理学者得出了类似的结论：阿斯旺水库能淹没“地震波”。科学家对乌兹别克的努列克水库也发表了类似的意见。中国尚无此类的报道，而新丰江水库（坝高 105m，库容 117 亿 m^3 ），1962 年 3 月发生 6.1 级地震。坝址地震烈度Ⅷ度，丹江口（坝高 97m，库容 209 亿 m^3 ），1973 年 11 月发生 4.7 级地震，坝址地震烈度Ⅷ度，对大坝造成一定的损坏，需要高度重视，三峡工程作了相关的大量研究，结论是不会产生诱发地震。

9. 大坝失事和溃坝

可能造成大坝失事和溃坝有多方面原因，如设计和施工不当，或运行中管理失误，或洪水超标以及战争破坏等。

不同的坝型失事和溃坝率根据统计，重力坝鲜有溃坝报道，而拱坝则到现在为止全世界只有 2 座真正溃坝失事（失事率小于 0.125%），全世界大坝失事和溃坝绝大多数为土石坝，我国也是土石坝为主，按统计到 1980 年底全国大中小水库溃坝（包括溢洪道及输

水洞的冲毁)共 2976 起,平均溃坝率为 3.4%,其中土石坝 2925 起,堆石坝 1 起,混凝土坝只有 1 起,小型水库占 96.21%。由此可能反映出中国大坝安全重点在于小型水库的大坝建设与管理。

以上对生态 9 个方面的影响是从广义上来讨论的。我们应当注意到在不同河流、不同河段、不同坝址上建坝,可能带来的生态并不相同,应当具体问题具体分析,不能一概而论。

(三) 正确对待社会舆论对生态与大坝问题的评论

生态与环境是当前全人类共同关注的问题作为水利水电工作者,保护生态是我们重要的任务,这样才能促进人与自然和谐相处。对社会上关于建坝不同看法,我们应持欢迎的态度,但同时,对全盘否定大坝的过激的错误观点,也决不能苟同。

我们在建坝时应当考虑到前面所谈到的大坝对社会生态环境的负面影响,研究和提出减少或消除这些负面影响的措施。但有些反坝人士愈来愈走极端,不仅片面夸大大坝的负面影响,而且对大坝的综合效益也全面否定;不仅反对建大坝,而且要拆除已建的大坝,让每条河流都“自由地流淌”。中国国内也有人提出美国停止建坝并已开始拆坝,中国也应停止建坝,并拆除一些不好的坝等。其实反坝人士的论述中也承认,在美国已经退役的几百座“高龄”水坝中,绝大多数都是 10m 以下的小坝(到 2003 年底拆除的坝最高也只 25~30m),其实中国在已往的年代中也拆了不少的小坝,只不过鲜于报道而已。

世界反坝潮流中的代表人物是美国的 Patrick Macully,他在 1996 年写了一本《Silenced River》,书中不仅详细讨论了大坝的种种弊端,而且对大坝的防洪、发电、灌溉、供水等效益也作了全面否定性的分析和评价,甚至否定水电站作为清洁能源的地位。这本书现已译成中文,中文版书名改成《大坝经济学》,该书呼吁“让江河畅通无阻地流淌”、“希望世界上的河流都能恢复其原来的状态”。麦卡利先生还宣布“大坝时代终结”和“为大坝写墓志铭”。对于我们水利水电工作者来说,对于此类“毒草”不应采取完全排斥的做法,而可以在大坝的规划建设和运行管理中作为一种警示的镜子,使我们不断增强以人为本、人与自然和谐相处的水利水电工程理念。

二、大坝可以与环境和社会和谐——建大坝已成国际主流认识

2006 年 6 月 19~23 日,国际大坝会议第 22 届大会和第 74 届年会在西班牙城市巴塞罗那召开。对大坝在 21 世纪中的作用、环境保护和大坝安全等方面共识增加,认识逐步深化,大会体现了经过国际社会一系列多边和双边会议,分歧减少,在保护中开发,在开发中保护的理念深入人心,并在各国大坝建设中得到了不同程度的落实。在这样的国际背景下,现在反对建坝的相对减少,支持建坝的舆论增强,主张建坝而非拆坝是当前主流的观点。

1973 年,在西班牙首都马德里召开的第 11 届国际大坝会议上中国申请加入国际大坝委员会,1974 年正式加入。国际大坝委员会是一个非官方组织,成立于 1928 年,到 2005 年底,已有 83 个国家成立了大坝委员会。委员会对全世界会员国的 15m 以上大坝或低于 15m 库容大于 300 万 m^3 的大坝登记造册(我国大坝占 50%左右)。在本届大会上,水利部副部长矫勇率领中国代表团参加了会议,并在开幕式上作了题为《中国大坝建设与可持续发展》的主旨发言。大会在可持续发展的召唤下,在世界舆论普遍支持建坝的大背景

下，以建设性的态度、科学的精神，探讨了大坝与社会、环境和谐的相关问题。在 21 世纪大坝在可持续发展中，仍然具有极其重要的战略地位。

中国乃至世界大坝的建设不再仅仅考虑经济可行、技术合理和安全可靠，还追求环境的可持续和社会的认可。大坝的管理更加关注对环境的影响，力争把负面影响减少到最低程度，这种大坝建设和管理上的自律行为，以及科技的发展，使大坝更加安全，为大坝的发展消除了障碍，正因为如此，联合国、世界银行等国际组织，明确表示支持大坝建设。世界银行不仅希望参与中国大坝投资，还期望和中国专家及有关政府部门组成团队帮助非洲建设大坝。2003 年 3 月在日本京都举行的第三届世界水论坛部长级会议，170 个部长或代表团参加了会议，并发表了“部长宣言”，在宣言中明确指出：“我们意识到水电作为一种清洁的、可再生的能源的作用。”

对中国的三峡工程，瑞士联邦水务地质署副署长安德鲁亚斯·高兹来三峡调研考察，撰写了题为《减少长江洪灾风险》的报告。该文较全面地分析了包括泥沙问题、环境方面的问题等，对三峡工程的功绩是肯定的。

第三节 大坝安全和风险管理

一、大坝的可靠度和失效概率的概念

任何结构都不可能是绝对安全的，都有可能失效，大坝亦是如此。可靠度设计是以承认结构（大坝）有失效（或破坏）的可能为前提的。结构（大坝）的可靠度是指在给定的条件下，在基准期内完成预定功能的概率。其基本测度为 P_r ，即可靠性概率，有时也用相反的测度 P_f ，即结构失效（或破坏）概率，很显然 $P_r + P_f = 1$ 。结构可靠度分析方法，在于正确地定量评价结构或大坝的可靠程度和风险，例如坐飞机或乘汽车有每小时百万分之一失事的可能性（大体上与常见病死亡率相当）时，这种风险人们是可以接受的。大坝也相应制定了可靠度设计的统一标准，当然不同级别的大坝可靠度指标不同，但也都与失事可能性挂勾，而且这些失事的概率也是为社会所能接受的。

二、大坝风险与风险管理

1. 风险及风险管理的概念

风险是指大坝对作用于生命、健康、财产和环境负面影响的可能性和严重性度量，是破坏概率与危害后果的乘积。风险来自大坝溃决的可能性和溃决后对下游所造成的危害影响两方面，前者与大坝工程安全有关，后者与下游社会经济发展程度有关。

风险管理则是指通过用于管理、控制风险的一整套政策和程序，对风险进行分析、评估、处理和监控的系统管理过程，据此来评价和监控可能的损失后果。这种基于风险度量理念的事前管理机制，通过全过程性的管理接受、拒绝、减少和转移风险。

2. 大坝风险管理产生的国际背景

风险分析技术最早源于美国，由 20 世纪 40 年代的环境辐射标准制定方法引伸出来。70 年代率先由美国土木工程师协会的一个工作委员会应用于水库溢洪道规模分析，同期美国一系列大坝失事后，联邦政府对“概率论或风险分析在坝址选择、设计、施工和运行的过程中的应用”展开了调查，促进了大坝风险技术的发展。大坝风险管理应运而生，最

早由加拿大的 Bc Hydro 公司于 1991 年应用于水坝安全管理。

近 20 年来风险评价技术得到很大发展。2003 年 10 月 ANCOLD《风险评价指南》正式发布，同年大坝委员会发布了《大坝安全管理中的风险评价》通告。这些文件标志着风险概念已经被世界接受。

我们注意到在“十一五”规划建议中对水电开发的表述由上一个五年计划的“积极发展水电”变为“在保护生态基础上有序开发水电”。“十一五”规划建议的这个变化表达了水资源的开发利用应该从现在的无序到有序，从过渡到适度，从一时到持久。

因此，在开发水电的过程中要尽量减少大坝可能对生命、健康、财产和环境产生的负面影响。在风险管理中，一个基本的认识是：一个“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。风险管理是大坝管理的有效工具，可以有效地降低大坝风险，有助于病险水库除险决策的科学化，有助于完善水库大坝安全管理体系。在大坝风险突出的现状下，建立与下游公共安全相协调的大坝风险管理战略，具有现实意义。

三、我国大坝的安全与管理现状

截至 2004 年，我国已建成水库 85200 多座，其中大型水库 487 座，中型水库 2955 座，小型水库 81700 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的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，我国在大坝安全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体系，而且年平均溃坝率大大下降，达到了先进国家的水平。

目前我国的大坝安全管理仍主要着眼于工程本身的安全管理，主要是定期的安全检查与运行维护，而对可能溃坝等不利事件对下游公共安全造成的影响程度缺乏足够的认识或关注较少。当前管理中，面临国家资金投入有限与病险水库数量巨大的矛盾，除险加固将是一个长期的工作。

现有管理模式很难回答以下问题：怎样的大坝才是安全的？大坝是如何失事的？如何有效避免大坝失事的发生？哪座大坝需要优先加固？如何有效使用有限的资金？下游足够安全吗？如何提高大坝安全水平、平衡大坝安全、公共安全与水资源利用之间的关系？

目前，正在各领域逐渐推广使有的风险管理技术可以较好地解决这些问题，风险管理已成为管理的趋势及管理决策的有效手段。

四、国际上大坝安全与管理的风险评价模式

1. 美国陆军工程师团 (USACE)

美国各部门用于大坝风险评判标准各异，风险分析方法也各异。美国陆军工程师团的 Hagen (1982) 最早对大坝使用了风险概念，用相对风险指数来判别大坝风险。相对风险指数：

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

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定, 若 R_r 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楨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。

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。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:

$$SR = \sum_{i=1}^R (SR)_i \quad (1-2)$$

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方法, 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。

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, 再到 FLDWAV 模型, 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 基于 Fread (1984) 预报土坝溃坝洪水过程线而开发的五个数学模型。模