



大坝服役状态的综合评判方法

吴中如^{①②③}, 徐波^{②③}, 顾冲时^{②③}, 李占超^{②③*}

① 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

② 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098;

③ 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098

* E-mail: lizhanchao@gmail.com

收稿日期: 2011-12-26; 接受日期: 2012-03-20

国家自然科学基金重点项目(批准号: 51139001)、国家自然科学基金项目(批准号: 51179066, 51079046, 50909041)、世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-10-0359)、江苏省“333 高层次人才培养工程”(批准号: 2017-B08037)和水利部公益性行业科研专项经费项目(批准号: 201201038)资助

摘要 针对我国已建 8.7 万多座大坝中约 1/3 大坝为病险工程以及在西部建设一批高坝、特高坝的现状, 结合大坝建设往往注重社会经济效益而忽视环境、生态以及我国大规定检偏重大坝安全等问题, 提出了大坝服役状态评估应遵循社会经济效益最大, 对环境与生态的负面影响最小或互为和谐共处的总原则, 并应具体考虑社会经济效益、大坝安全、环境与生态四个方面. 在分析社会经济效益、大坝安全、环境与生态评估的基础上, 评述了大坝服役状态的分析方法, 进而建立了基于证据理论的层间评估的融合算法和基于模糊数学的模糊综合分析法, 并构建了大坝服役状态综合评判模型. 实例分析表明, 上述方法可以对大坝的服役状态作出科学评估.

关键词大坝
服役状态
评估原则
评估方法
综合评判模型

1 前言

我国人均水资源贫乏而又时空分布严重不均, 旱涝灾害频繁, 水能资源丰富而主要分布在西南地区. 为了充分利用水资源和水能资源, 我国已建大坝 8.7 万余座, 产生了巨大的社会经济效益, 然而由于多种原因, 已有超过三分之一的大坝为病险工程^[1], 严重影响了工程安全和效益的发挥, 其中存在严重安全隐患病害又能发挥重大社会经济效益以及与环境、生态和谐共处的大坝, 如丰满大坝在原址附近拆除重建, 佛子岭连拱坝与古田溪三级大坝进行重大改建补强加固, 已垮坝多年的板桥与石漫滩大坝在原址附近重建水利大坝. 此外为了改善能源结构, 充

分利用水能等绿色能源, 我国在西部地区已建、在建和待建一批特大型水库大坝, 包括已建成的二滩拱坝、三峡重力坝、小湾拱坝、龙滩碾压混凝土坝, 在建的拉西瓦、溪洛渡、锦屏一级和拟建的锦屏二级等大坝, 这些工程的技术指标突破了现行的技术规范, 对安全也提出了更高的要求.

与此同时, 随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 大坝安全已引起各国政府和人们的高度关注, 水工程安全被列为《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006–2020)》中“重大自然灾害监测与防御”的重要内容^[2], 需要重点研究灾变形成机理及其预测调控, 健康服役评估理论与方法, 保障水工程的长效服役. 而大坝是最重要的水工程. 保障大坝健康

长效服役关系到整个工程的安危, 不仅直接影响到工程效益的发挥, 而且涉及人民的生命和财产安全, 在经济建设和社会安定中起着举足轻重的作用. 因此, 大坝安全的分析评价, 大坝服役状态的诊断评估, 将成为水利学科的重点研究课题.

针对上述关键科学技术问题, 本文提出了大坝服役状态评估的原则, 评述了大坝服役状态评估的分析方法, 并对大坝服役状态的综合评判模型进行研究, 以期为大坝的运行管理工作提供科学依据, 并为大坝健康服役诊断评估提供技术支持.

2 大坝服役状态评估原则

从 1978 年开始, 我国开始对大坝进行定检工作, 到 2005 年先后完成了第一轮和第二轮大坝的定检工作, 2005 年底启动了第三轮定检工作. 根据我国 96 座水电站大坝第一轮定期检查^[3]可以发现, 定检的重点主要偏重于大坝的安全状况, 而未提及工程效益和生态、环境的状况.

以往建造大坝时, 往往注重防洪、灌溉、养殖、供水、发电、通航等工程效益, 而忽视对生态、环境的影响^[4, 5]. 例如, 某水利大坝忽视了泥沙问题, 导致上游平原次生盐渍化^[1]; 胡佛大坝及其下游的米德湖水库、印度的弋伊纳等修建后经历了频繁的地震^[6]; Edwards 坝, 服役 162 年后因该坝破坏了大西洋某些物种的生存环境而被拆除^[7]. 同时, 世界自然基金会与世界资源研究所共同完成的《险境中的河流——大坝与淡水生态系统的未来》报告中指出^[8]: 截止 2003 年, 世界上 60% 的大江大河已被大坝、运河和引水工程所阻断; 由于大坝及其附属水利设施的建设, 导致了众多淡水栖息地和物种的丧失. 因此, 建议大坝建设频繁的国家, 应有计划、系统地在全流域范围内进行科学决策.

针对上述关键科学技术问题, 结合我国国情, 笔者提出大坝服役状态评估应该遵循社会经济效益最大, 对环境、生态的负面影响最小或互为和谐共处的总原则. 若大坝能发挥巨大的社会经济效益, 对国民经济贡献有无法替代的作用, 而又适应流域当地的环境, 以及与生态和谐共存, 这是大坝存在的必要充分条件. 在考虑总原则的前提下, 大坝服役状态评估应具体考虑社会经济效益、大坝安全、环境、生态等 4 个方面.

1) 社会经济效益: 要考虑大坝的防洪、供水、灌溉、发电、通航、养殖、旅游等效益, 还要考虑大坝补强加固费用, 溃坝引起的经济损失以及生命损失等.

2) 大坝安全: 除防洪安全满足要求外, 在各种荷载组合作用下, 大坝应该满足强度、稳定性以及耐久性等安全要求.

3) 环境: 应考虑大坝对自然环境(次生地质灾害、泥沙问题、水文条件、气候等)和社会环境(移民问题、人文景观、污染工业等)的影响.

4) 生态: 应该考虑大坝对库区、河道生物与生物栖息地的影响等.

3 大坝服役状态评估方法

根据大坝服役状态评估的总原则, 若大坝不能发挥应有的社会经济效益或者其工程效益小于运行费用, 而又对环境、生态有严重的负面影响, 则大坝服役状态不满足评估的总原则, 此时, 该坝已经没有存在的必要, 进而也不需要在大坝的服役状态进行具体的分析评估. 若大坝满足服役状态评估的总原则, 笔者建议从社会经济效益、大坝安全、环境、生态等四个方面对大坝服役的状态进行评估.

3.1 社会经济效益评估

修建大坝的目的是要发挥防洪、供水、灌溉、通航、发电、养殖等工程效益, 因此评估大坝的社会经济效益, 要考虑如下 4 个方面: 大坝效益发挥的程度, 大坝效益与运行费用的技术经济比较, 大坝失事引起的社会经济损失与社会公众的接受水平, 大坝失事引起的生命损失与社会的接受水平等.

针对上述 4 个方面, 社会经济效益可以采用以下标准进行评估.

若工程效益实际的发挥程度小于某一限定值, 则认为大坝社会经济效益不满足要求, 即

$$\eta < \eta_0, \quad (1)$$

其中 η 为大坝实际的社会经济效益发挥程度; η_0 为社会经济效益发挥程度限定值.

若工程效益小于运行费用(如补强加固费用), 则认为大坝的社会经济效益不满足要求, 即

$$I < P, \quad (2)$$

其中 I 为社会经济效益; P 为运行费用.

若大坝失事(考虑大坝失事概率)引起的社会经济损失高于社会允许的风险值, 则认为大坝社会经济效益不满足要求, 即

$$J < S_z + S_j, \quad (3)$$

其中 J 为社会允许的经济效益风险值; S_z 为大坝失事引起的直接社会经济损失; S_j 为大坝失事引起的间接社会经济损失.

公式(1)和(2)中的各项物理意义较明确, 计算也比较直接. 而公式(3)中的社会经济损失需要计算直接社会经济损失和间接社会经济损失.

直接社会经济损失包括大坝失事引起的大坝本身的经济损失和溃坝引起的下游区域的直接社会经济损失. 溃坝引起的本身的直接经济损失, 可以根据破坏程度以及工程造价计算, 该部分损失可直接记为 Q . 而大坝失事造成下游的直接社会经济损失, 需要根据财产损失特征按照 3 种方法计算: 按照损失率计算, 按照毁坏长度、面积等计算, 按照经济活动中断时间计算^[9]. 假定按照损失率、毁坏长度和面积、经济活动中断时间等计算得到直接社会经济损失分别为 S_1, S_2, S_3 , 则大坝失事造成的直接经济损失可以通过下式得到

$$S_z = \beta(Q + S_1 + S_2 + S_3), \quad (4)$$

其中 β 为大坝失事概率.

间接社会经济损失的计算, 目前有直接估算法和折算系数法两种计算方式^[9~11]. 由于直接估算法需要详细的基础资料, 而且工作量较大, 所以在此推荐折算系数法:

$$S_j = \sum_{i=1}^q S_{ji} = \sum_{i=1}^q \gamma_i S_{zi}, \quad (5)$$

其中 S_j 为大坝失事造成的间接社会经济损失; S_{ji} 为大坝失事给第 i 部门造成的间接社会经济损失; q 为间接社会经济损失部门数; γ_i 为第 i 部门的间接社会经济损失折算系数; S_{zi} 为大坝失事给第 i 部门造成的直接社会经济损失.

大坝对生命损失影响的评估, 主要考虑在一定的溃坝概率下, 溃坝造成的生命损失能否为社会公众所接受. 溃坝对生命损失的影响, 国内外许多学者做了大量的研究工作, 并取得了较多研究成果^[9, 12~15].

溃坝后, 下游区域可以分为溃决区、洪水快速上升区、剩余区 3 部分, 3 部分对应的死亡率各不相同. 在各区域的死亡率确定后, 确定各区域的暴露人口数量即可计算溃坝的生命损失:

$$F = \beta \sum_{i=1}^3 f_i N_i, \quad (6)$$

其中 F 为生命损失; f_i 为各区域的死亡率; N_i 为各区域的暴露人口数量; β 为溃坝风险率.

假定社会公众所能接受的生命损失的界限值为 F' , 若 $F \leq F'$, 则生命损失评估满足要求, 否则生命损失评估不满足要求.

3.2 大坝安全评估

不同类型的大坝包括混凝土坝、土石坝、面板堆石坝等, 其安全评估的内容有一定差异. 在此主要分析混凝土坝安全评估的内容和方法. 混凝土坝安全评估应该包括防洪安全、强度条件、抗滑稳定安全、耐久性、大坝辅助设施等 5 个方面的评估.

3.2.1 防洪安全评估

目前, 防洪安全设计标准的选择大体经过了三个阶段^[16, 17]: 不区分大坝的类型、规模、下游损害程度, 采用通用设计标准的第一阶段; 将设计洪水标准与溃坝危害联系起来的第二阶段; 基于风险评价确定防洪设计标准的第三阶段. 第一代防洪标准的不合理性是显而易见的. 第二代防洪标准的缺点主要表现在: 漫顶溃坝对下游的危害程度本身是很难界定的, 依据规范确定的界限进行分级并不合理, 只能是定性的分级且带有一定的随意性; 规范中规定可根据危害程度提升标准, 但是并没有给出相应的提升标准的明确依据; 规范中的标准没有考虑经济效益、工程安全等与防洪标准的关系. 第三代防洪标准考虑了社会对风险的接受、允许水平, 对漫顶溃坝造成的损失尤其是生命损失和经济损失与防洪标准之间的联系进行了分析研究, 并增强了人们的风险意识, 促使大坝业主尽量采取措施避免风险. 因此, 大坝的防洪安全应该采用基于风险的防洪标准进行评估.

基于风险的防洪标准对大坝的防洪安全进行评估主要包括如下四个方面.

1) 综合考虑水库内泥沙淤积、坝顶沉降、泄洪建筑物破损、闸门启闭设备故障等因素的影响^[18]可以确定大坝实际发生洪水漫顶的概率 P_{fr} :

$$P_{fr} = P(H_n > D_n), \quad (7)$$

其中 H_n 为考虑泥沙淤积、闸门启闭设备故障等随机不确定性因素的库水位; D_n 为考虑坝顶沉降等随机

不确定性因素的坝顶高程。

2) 大坝漫顶失事概率应该隶属于洪水漫顶概率^[19], 因此根据大坝洪水漫顶概率和大坝漫顶失事概率之间的关系, 由大坝洪水漫顶概率 P_{fr} 可以推求大坝洪水漫顶失事概率 P_f :

$$P_f = P_{fr} \cdot \mu_f, \quad (8)$$

其中 μ_f 为大坝漫顶失事概率和洪水漫顶概率之间的隶属关系。

3) 根据大坝所处的地理环境、下游社会经济的发展水平等确定社会所能接受的风险水平 L^* , 社会所能接受的风险水平应该包括洪水漫顶失事造成的生命、经济、环境以及生态等各方面的损失。

4) 根据社会所能接受的风险水平 L^* , 确定允许的大坝洪水漫顶失事概率 P'_f 。若 $P_f \leq P'_f$, 则大坝实际的防洪标准满足要求, 否则大坝的防洪标准不满足要求。

3.2.2 强度条件评估

混凝土坝强度分析主要以控制部位的拉、压应力是否满足允许应力作为判断标准。目前混凝土大坝应力的分析主要有规范法和有限单元法。规范法概念明确, 应用方便, 并且有相应的判断标准, 但是计算结果误差较大, 而且难以解释局部应力集中现象。有限单元法可以计算结构在不同荷载组合下的静力、动力情况的应力问题, 而且有限单元法有考虑一维、二维以及三维结构线弹性和非线性的分析计算方法^[20]。

由于有限单元法的计算精度与模型网格的划分有较大关系, 同时有限单元法没有与之相对应的安全标准。笔者建议采用规范法和有限单元法相互验证的方法评估大坝的强度条件, 即将有限单元法应力计算结果与规范规定进行对比, 其差别应在一定的范围内。同时有条件的情况下, 对安全状况要求较高的大坝, 应该采取模型试验对数值计算结果进行验证分析。

3.2.3 抗滑稳定安全评估

规范中比较常用的混凝土坝抗滑稳定安全度计算方法有刚体极限平衡法和分项系数法^[21]。分项系数法的各个分项系数可以根据可靠度理论经过优选确定, 该方法的计算结果能够反映规定的可靠度水平。但是不确定性因素对该方法的计算结果影响较大。此外, 规范中的刚体极限平衡法在滑动面比较复杂

杂, 或者其参数不确定时, 计算结果与实际情况相差较大。基于概率统计理论的可靠度分析法, 也是确定混凝土坝抗滑稳定安全度的一种计算方法。该方法中的极限状态方程难以用显函数表示, 计算时较困难; 此外, 该方法涉及的不确定因素和随机变量往往使计算精度较低。

有限单元法已成为解决工程问题的主要数值分析方法, 其在混凝土大坝抗滑稳定安全度计算分析中也得到了较好的应用。基于有限单元法的混凝土坝抗滑稳定安全度分析方法主要包括直接法和间接法^[22]。

直接法, 首先通过有限元分析计算大坝在正常荷载、正常参数下的位移场和应力场, 然后通过极限平衡公式计算整体抗滑安全度。间接法又包括超载法、强度折减法和综合法。超载法和强度折减法通过超载或者降低材料抗剪强度使大坝一坝基系统达到极限平衡状态, 根据系统达到极限平衡状态时荷载增加的倍数或者抗剪强度降低的倍数来确定稳定安全度。而综合法是指在增加水荷载的同时, 降低材料抗剪强度使大坝一坝基系统达到极限平衡状态, 超载倍数与材料强度降低倍数的乘积即为整体安全度。间接法分析安全度时, 可根据收敛性判据和突变性判据两类判据来确定系统的整体抗滑安全度。

有限元法中的直接法滑动面需要事先假定且仅适用于滑动面为平面或圆弧面的情况; 间接法不必事先给出破坏面, 而是在分析的过程中通过自动搜索来确定, 且能够解决复杂的工程问题。因此, 在确定抗滑稳定安全度时, 笔者推荐有限元法中的间接法。同时, 有些学者提出的块体单元法^[23]和不连续变形法(DDA)^[24]在大坝抗滑稳定安全度分析时, 也值得推广和应用。

3.2.4 耐久性评估

水工混凝土结构耐久性影响因素可主要归纳为物理作用和化学作用。物理作用包括水的渗透、荷载、冻融循环、干缩、徐变、磨损等, 化学作用包括酸碱盐侵蚀、水的溶蚀、碱骨料反应、碳化及电化学作用引起的钢筋腐蚀、有害气体的侵蚀等。对水工混凝土结构而言, 耐久性破坏主要表现在裂缝、溶蚀、冻融、碳化等^[25]。

裂缝是水工混凝土结构老化和病变的主要反映, 对安全的危害很大, 一般大坝的裂缝为张开型裂缝,

对裂缝稳定性分析除采用断裂力学的方法外, 吴中如等提出裂缝的失稳机理也可用裂缝尖端不可逆变形 $\delta_{r\theta}$ 随时间的变化规律进行分析:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_{r\theta}}{dt} = 0, & \text{稳定状态,} \\ \frac{d\delta_{r\theta}}{dt} > 0, & \frac{d^2\delta_{r\theta}}{dt^2} \leq 0, & \text{亚临界扩展,} \\ \frac{d\delta_{r\theta}}{dt} > 0, & \frac{d^2\delta_{r\theta}}{dt^2} > 0, & \text{失稳扩展,} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\frac{d\delta_{r\theta}}{dt}$ 表示 $\delta_{r\theta}$ 随时间的变化率.

混凝土的冻融破坏是一个由表向内逐渐发展的过程, 冻融以后水泥石和砂浆的孔隙率增大较多, 这可归因于反复冻融过程的静水压力和渗透压力的作用. 孔隙率的增加导致水泥水化物由密实体向松散体发展, 且伴随着微裂缝的出现, 最后导致粗骨料和砂浆分离. 关宇刚, 孙伟等基于可靠度与损伤理论建立了混凝土的寿命预测模型, 并具体研究了冻融条件下的损伤演变方程^[26, 27]. 但实验表明混凝土的快速冻融破坏机理与自然条件下缓慢冻融的破坏机理有一定差别^[25].

溶蚀是渗流水溶解并带走水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 降低了水泥石中的 Ca^{2+} 离子浓度, 并导致水泥水化产物中 Ca^{2+} 离子和其他离子的溶出. 这种水泥石的溶蚀现象, 使混凝土强度和抗渗性降低. 混凝土其他的一些耐久性问题, 如碱集料反应、碳化和钢筋锈蚀、冻融循环破坏等都与渗透性密切相关, 可以说抗渗性是保证混凝土大坝结构安全、耐久性的重要条件. 对于混凝土坝溶蚀的破坏程度, 目前比较成熟的方式为现场调查^[28].

碳化对混凝土坝的影响主要表现在两方面: 混凝土中水泥石碳化后, 由于碳酸钙在孔隙中的沉积起到堵塞和分割毛细孔的作用, 使水泥石中大孔体积减小, 总孔隙率降低, 孔径细化, 从而降低水泥砂浆或混凝土的渗透性. 同时碳化过程又在一定程度上类似于干燥过程, 即伴随着水泥石的体积收缩, 这种收缩受到限制时就可能引发裂纹产生, 导致砂浆或混凝土渗透性增大. 金祖权、孙伟等对荷载作用下混凝土的碳化深度进行了研究^[29]:

$$D_{\sigma} = D_0(1 + k(S_{\sigma})^m), \quad S_{\sigma} \in (0, 1), \quad (10)$$

其中 D_{σ} 和 D_0 分别为在施加荷载和未施加荷载情况下

混凝土的碳化深度; S_{σ} 为荷载率(%); k, m 为实验常数.

由上述混凝土结构耐久性的分析方法可以发现, 现有的水工混凝土结构耐久性研究涉及的影响因素和指标较少, 且研究成果主要根据室内试验. 结合混凝土坝工作环境的复杂性, 应该在大坝环境调查、混凝土外观检查及现场试验、混凝土劣化机理研究及耐久性试验、流场数值模拟、多个大坝的混凝土耐久性调查与比较的基础上, 研究混凝土大坝耐久性评估的各项指标和多个大坝耐久性影响因素之间的关系及其随时间的变化, 从而对大坝的耐久性做出综合评估:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(z_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n; t), \quad (11)$$

其中 y 为大坝的整体耐久性状况; x_i 为大坝的耐久性指标; z_0 为坝体混凝土质量; θ_i 为大坝耐久性影响因素; t 为时间; f 表示耐久性影响因素与耐久性指标之间的关联函数.

(11)式对应的耐久性影响因素和耐久性指标之间的关联函数, 比较精确的确定方法是考虑大坝具体的工作环境(即考虑大坝耐久性具体的影响因素)进行室内试验和现场试验确定.

3.2.5 大坝辅助设施评估

大坝辅助设施评估主要评估大坝附属结构的安全和耐久性, 以及大坝安全监测设施的布置运行状况.

大坝附属结构包括溢洪道、启闭机房、排架及其他轻型结构、导墙、挑流鼻坎、闸门及启闭设备等. 对这些附属结构进行评估时, 主要评估其安全性和耐久性, 例如闸门及启闭设备在承受荷载下的安全情况, 及是否能正常挡水和启闭. 安全性的评估各种结构都有相应的评估方式, 而耐久性的评估可以参考大坝耐久性的评估方法, 考虑耐久性影响因素和耐久性指标之间的关系及其随时间的变化, 对附属结构的耐久性进行评估.

大坝安全监测已成为分析评价大坝安全的重要手段. 大坝安全监测设施是否齐全, 以及监测设施的新旧程度、测值精度、可靠性、先进性等是大坝辅助设施评估的另一方面. 笔者认为在保证大坝安全监测设施齐全, 且监测成果可靠的同时, 将一些先进的监测技术和监测设施引入到大坝的安全监控中也是必要的, 例如纳米监测技术和 4S 监测技术^[1], 以及 GPS 监测技术^[30]等.

3.3 环境评估

3.3.1 环境评估的重要因素

大坝的环境评估主要包括其对自然环境和社会环境等的影响。对自然环境的影响主要包括次生地质灾害、泥沙问题、河道形态、水文条件、气候影响等, 而社会环境的影响主要包括移民问题、重要设施、污染工业以及人文景观等。

3.3.2 环境评估方法

由于大坝对环境(自然环境和社会环境)的影响考虑的因素较多, 而且目前的评估方法涉及的评估因素与本文考虑的因素并不完全一致^[31, 32]。此外, 由于环境因素评估没有确定的计算分析公式, 也较难具体量化其评估结果, 故笔者提出采用一定的方法量化大坝对环境的危害程度作为评估的依据。在此, 采用灰色理论^[33]的相关知识对这种危害程度进行量化。

对于一确定的环境因素, 大坝非正常运行、溃坝等对其造成的影响可借助专家区间评分法和灰色理论等对其进行量化。参照文献[34]的思路, 对于一确定的环境因素, 将大坝对其影响的程度分为非常严重、严重、中等、一般、轻微等五个等级, 每个等级对应的评分区间为 H_5, H_4, H_3, H_2, H_1 , 且 $H_i > H_{i-1}$ (例如: $[10, 8], [8, 6], [6, 4], [4, 2], [2, 0]$)。请 n 位专家根据调查资料对影响程度进行打分, n 位专家的评分结果为 $[a_1, b_1], \dots, [a_n, b_n]$ 。利用一定的数学方法, 如集值理论^[35]等可以将 n 位专家的评分值融合为一个确定值 d :

$$d = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (b_i^2 - a_i^2)}{\sum_{i=1}^n (b_i - a_i)}. \quad (12)$$

在上述分析的基础上, 借助灰色理论中的白化权函数可以确定大坝对该环境因素的影响程度。大坝对环境影响程度的 5 个等级对应 5 个等级编号分别为 e_i , e_i 为各评分区间上限值的二分之一 (例如: $e_i = i (i = 5, 4, \dots, 1)$)。每个等级对应的白化权函数为

$$f_i(d) = \begin{cases} 0, & d \notin [0, 2e_i], \\ d/e_i, & d \in [0, e_i], \\ (2e_i - d)/e_i, & d \in [e_i, 2e_i]. \end{cases} \quad (13)$$

对 5 个等级对应的白化权函数的计算结果进行归一化处理即得到各等级对应的概率值, 进而确定

了大坝对某一环境因素的影响程度:

$$p_i = \frac{f_i(d)}{\sum_{i=1}^5 f_i(d)}, \quad (14)$$

其中 $f_i(d)$ 为第 i 等级的白化权函数计算值; p_i 为大坝对环境影响程度的概率值。

3.4 生态评估

生态评估主要考虑大坝对生物和生物栖息地的影响^[36], 同时要考虑大坝失事对生物和生物栖息地的影响。生物评估, 主要评估大坝对生物物种成分变化、优势种群变化、种群缺失率、生物行为变化、生物代谢变化、组织变化和形态畸变等的影响。除上述评估外, 还要评估对生物的生长、发育、生殖、行为和分布等有直接或者间接影响的生态因子, 包括光照、温度、水分、食物和与其相关的其它生物。生物栖息地评估, 主要评估物理化学条件, 水文条件, 河流地貌形态, 大坝的淹没区、浸没区, 库区周围的农田、森林、草原, 以及下游的泛洪区等对生物种群生存的适宜程度。

大坝对生态系统的影响虽然已有一些定量的评估方法^[37], 但是对生物和生物栖息地的评估适用性较差。对于生物和生物栖息地的评估, 可以参考现有的分析方法和体系^[38, 39]进行定性评估, 而大坝失事对其影响和危害程度的量化可以仿照大坝对环境的影响, 借助集值理论、灰色理论等进行计算评估, 即按照公式(12)~(14)的分析思路进行评估。

4 大坝服役状态的综合评判模型与方法

4.1 总体结构

在大坝满足健康服役总原则的前提下, 根据上述评估方法, 可以将大坝服役状态的评估分为三层分别进行评估, 第一层为大坝服役状态; 第二层为社会经济效益评估、大坝安全评估(以混凝土坝为例)、环境评估、生态评估; 第三层为社会经济效益、大坝安全评估、环境评估、生态评估中各单项的评估。评估过程为由底层向顶层逐层定量和综合分析, 即由第三层向第一层逐层评估, 从而构建如图 1 所示的大坝综合评判模型总体结构。

4.2 评判方法

1) 基于证据理论的层间评估融合算法。

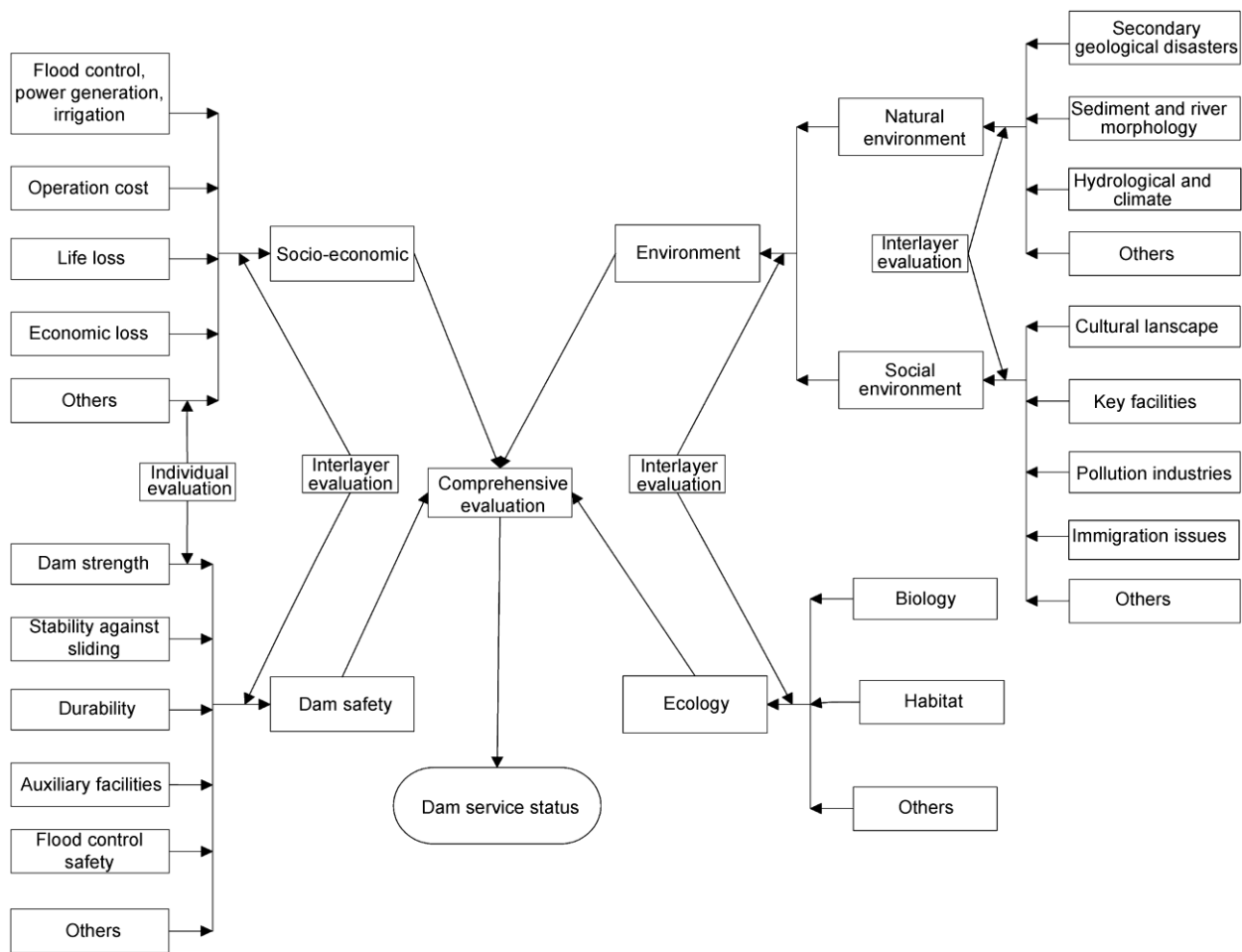


图 1 大坝服役状态综合评判模型总体结构图

社会经济效益评估、大坝安全评估、环境评估和生态评估的各单项评估相似,可以先根据各单项对应的评估方法进行单项评估;在此基础上,可以利用一定的评估方法,例如 BP 神经网络^[40],得到单项评估的评价向量;然后根据一定的融合方法进行层间评估,进而得到社会经济效益评估、大坝安全评估、环境评估和生态评估对应的评价向量 m_j , m_a , m_h , m_s . 评价向量 m_j , m_a , m_h , m_s 应包括社会经济效益、大坝安全、环境和生态对大坝服役状态的反映程度和不确定性。

对于社会经济效益评估、大坝安全评估、环境评估和生态评估的层间评估有较多的融合算法,在此基于证据理论^[41]构建层间评估的融合算法。

假定社会经济效益、大坝安全、环境、生态中任意一项对应的评价向量为 m , 其各单项对应的评价

向量为 $m_i(i=1, 2, \dots, n)$, 则根据证据理论, 评价向量 m 可由下式确定:

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n, \quad (15)$$

其具体的结果可根据以下两个公式得到

$$m = m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i)}{1 - C}, & A \neq \Phi, \\ 0, & A = \Phi, \end{cases} \quad (16)$$

$$C = \sum_{\cap A_i = \Phi} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i), \quad (17)$$

其中 A_i 为 m_i 的焦点; Φ 代表空集。

2) 模糊综合分析法。

在得到社会经济效益、大坝安全、环境和生态对应的评价向量 m_j , m_a , m_h , m_s 后,可以根据融合算法对其进行综合评估,从而得到大坝实际的服役状态。综合评估的融合算法可以和层间评估的融合算法相

同,也可以采用其他融合算法,在此基于模糊数学的知识^[42]构建模糊综合分析法。

大坝服役状态由 m_j, m_a, m_h, m_s 四个评价向量直接影响和确定。假定上述四个向量对应的权重值分别为 w_j, w_a, w_h, w_s , 根据模糊综合分析法, 大坝服役的状态向量 z 可由下式确定:

$$z = [w_j, w_a, w_h, w_s] \cdot [m_j, m_a, m_h, m_s]^T. \quad (18)$$

(18)式中, 权重值 w_j, w_a, w_h, w_s 为研究的重点, 而权重值可根据加权统计法、经验分析法、层次分析法及熵值法等方法确定。

3) 大坝服役状态及处理方案的确定。

由(18)式确定的大坝服役状态 z 为一个向量值, 该向量值包括社会经济效益、大坝安全、环境和生态综合反映的大坝服役状况, 也包括一个代表大坝服役状态不确定性的概率值。利用向量 z 和专家评分的标准, 可以最终分析确定大坝的服役状态。假定专家的评分标准为 $\Omega = [H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_i] (i=1, \dots, 5)$ 代表大坝不同服役状态的评分值, 该值既可以是一个区间值也可以是一个定值。若大坝服役状态向量 $z = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z]$ 则与评分标准对应的大坝服役状态值 WK 为:

$$WK = [H_1, H_2, H_3, H_4, H_5] \cdot [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5]^T. \quad (19)$$

利用(18)式中的大坝服役状态向量 z 和(19)式中的大坝服役状态值 WK 均可对大坝服役的状态作出评判。同时, 根据大坝服役状态评估的总原则和评估过程可以确定影响大坝服役状态最主要的因素; 在此基础上, 可以确定大坝合理的处理方案, 包括维持现状、补强加固、拆除或者拆除重建等。

4.3 评判步骤

根据评估原则和服役状态的综合评判模型与方法, 大坝服役状态的评判步骤归纳如下。

1) 按照总原则对大坝的服役状态进行分析评估, 若大坝服役状态符合总原则, 则按照下面的步骤评估, 否则直接确定大坝的处理方案; 2) 根据社会经济效益、大坝安全、环境、生态单项内容的评估方法对各个单项进行评估; 3) 利用基于证据理论的融合算法对单项评估的结果进行层间评估得到社会经济效益、大坝安全、环境、生态对应的评价向量; 4) 采用模糊综合分析法对层间评估的结果进行综合分析确定大坝的服役状态; 5) 根据评估结果和评估过程

确定大坝的处理方案。

5 实例分析

5.1 工程实例

某水电站拦河坝为混凝土重力坝, 最大坝高 91.7 m, 坝顶长度 1080 m, 坝顶高程 267.70 m。大坝正常运用洪水重现期为 500 年, 非常运用洪水重现期为 10000 年。水库正常蓄水位 263.50 m, 汛限水位 260.50 m, 死水位 242.00 m, 校核洪水位 267.70 m, 总库容 $109.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为多年调节水库。电站以发电为主, 兼有防洪、灌溉、工农业及城市供水、航运、养殖及旅游等综合利用。在所属电网系统担负着供电、调峰、调频、事故备用等任务。大坝建成运行 60 多年来, 已进行了多次补强加固处理。现采用本文的大坝服役状态综合评判理论和方法对该坝的服役状态进行评估, 并提出对该坝处理措施的建议。

5.2 基于总原则的评估

1) 防洪、供水效益。

该坝坝址控制流域面积 $4.25 \times 10^4 \text{ km}^2$, 下游保护面积 269 km^2 、人口约 230 万人; 沿江两岸保护面积约 1185 km^2 、人口约 138.5 万人、农田约 106.5 万亩; 该坝对下游大城市的大部分年型的洪水洪峰均有较明显的削峰作用。春灌季节若是没有该坝水库的调节, 供水保证率仅能达到 60%, 通过水库调节后保证率达到 90% 以上。城市供水, 通过该水库的调节, 保证率 97% 的流量由 $178 \text{ m}^3/\text{s}$ 调高到 $183 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

该坝在一次全面补强加固处理时, 其投资总额为 1.2 亿元, 而这次补强加固减免洪灾损失达 176.8 亿元, 仅防洪效益就远高于全面补强加固费用。

2) 发电效益。

目前, 电站总装机容量为 1002.5 MW, 多年平均发电量 $19.68 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。电站调节性能好, 距负荷中心近, 是所属电网的骨干调峰电源, 可以快速跟踪负荷的变化。特别是当系统发生事故时, 曾多次在 3 min 内快速开启机组, 对及时消除电网事故, 尽快恢复电网的正常运行起到了至关重要的作用。其调峰、调频、事故备用的地位与作用都是不可替代的。

3) 环境与生态状况。

该坝在 60 多年的运行中, 已经适应了当地流域环境, 对流域生态基本无负面影响, 且已与环境、生

态和谐共存.

4) 其他.

随着地区国民经济发展、城镇化发展战略实施, 水资源短缺已成为经济发展的瓶颈, 迫切要求水资源支撑和保障, 该坝可以较大程度的缓解经济发展面临的水资源短缺问题.

综上分析, 该坝在防洪、灌溉、发电、供水等社会经济效益方面发挥了巨大的作用, 同时其运行费用(补强加固费用)远低于其社会经济效益, 且该坝与流域环境和生态和谐共存, 所以该坝符合大坝服役评估的总原则.

5.3 具体评估

5.3.1 单项评估

该混凝土重力坝能发挥巨大的社会经济效益, 且对环境、生态基本无负面影响. 社会经济效益、环境、生态的其它评估因素, 包括大坝失事引起的社会经济损失、生命损失、对环境、生态的危害等均与大坝安全有关. 因此, 在对该坝各单项进行评估时, 主要以大坝安全评估的 5 个单项为例进行评估. 该坝安全评估的 5 个单项的具体评估如下.

1) 防洪安全评估.

选取 1991 年的洪水过程线进行防洪标准校核时, 该大坝在遭遇万年一遇洪水时坝前水位为 270.70 m, 超过现在的坝顶高程 3.0 m, 即 P_f 为 0.0001 时该坝肯定发生洪水漫顶. 由于该坝已运行多年, 且大坝的其它各项安全指标均较差(见其余各单项评估), 所以可以认为该坝发生超过坝顶高程 3.0 m 的洪水时, 其溃坝概率为 1.0. 从而, 该坝漫顶失事概率 P_f 近似等于 0.0001. 该坝百年一遇洪水时, 下游需要防护的人口已达 230 万左右, 根据我国人口稠密的特点和我国的国情, 在此保守的假定大坝万年一遇洪水失事时, 人口损失为 100 人. 社会所能接受的人口损失, 参考国外标准选为 0.001 人/(年坝), 则社会所能接受的洪水漫顶失事概率 P_f 为 0.00001. 所以在上述假定条件下, 大坝洪水漫顶失事概率为社会所能接受的漫顶失事概率的 10 倍, 仅从生命损失一项来考虑, 大坝的防洪标准就不满足要求.

2) 强度条件评估.

根据有限元计算成果, 扣除局部应力较高的区域后, 在校核洪水位高温工况下, 坝基面有些部位存

在 0.3–0.7 MPa 的拉应力; 坝体表面上游侧有些坝段存在 0.1–0.2 MPa 的拉应力; 坝体内部存在 0.2–0.6 MPa 的拉应力; 这些拉应力均不符合规范的规定. 参考坝体混凝土浇筑资料, 坝体内部存在 32.3 万立方米的混凝土抗压强度在 6.23 MPa 左右, 此外还有 18.2 万立方米的混凝土抗压强度在 5.02 MPa 左右, 这些混凝土的强度均低于现行规范要求的坝体混凝土强度不低于 C7.5 混凝土强度的要求, 且这两部分混凝土占坝体混凝土体积的 30.62% 左右. 从上述有限元计算成果和坝体混凝土浇筑资料可以发现, 该坝的强度条件不足.

3) 整体抗滑稳定要求.

通过有限元计算发现 4 个坝段的超载安全度较低, 分别为 1.13, 1.16, 1.06, 1.11, 这四个坝段的超载安全度接近或者低于重力坝设计的建议值 1.15. 此外, 采用规范中的方法对 4 个坝段的抗滑稳定性进行校核时, 正常工况下抗滑稳定系数为 2.75~2.89, 低于 3.0; 地震工况下为 2.27~2.29, 低于 2.5. 所以该坝整体抗滑稳定安全度不满足安全要求.

4) 耐久性评估.

该混凝土重力坝耐久性破坏主要表现在裂缝、渗漏、溶蚀、冻胀等方面. 裂缝状况: 坝体存在浇筑层面缝和施工冷缝等水平缝, 如图 2 所示; 坝顶和上下检查廊道均存在裂缝, 且上检查廊道内有些部位裂缝宽度达到 5 cm 以上; 挡水坝段补强加固新浇混凝土存在裂缝; 个别坝段存在贯穿性裂缝. 渗漏、溶蚀与冻胀状况: 坝体内部混凝土渗漏和溶蚀破坏以及水平施工缝风化疏松和溶蚀破坏严重, 导致该坝渗漏通道多, 坝体漏水严重, 如图 3 所示. 此外, 根据调查资料, 坝体年溶蚀量达到 10.64 吨/年, 其中钙离子溶蚀量约占 31.4%~34.1%. 冬季在一定深度内裂缝结冰使混凝土结冰膨胀, 使部分混凝土破碎. 同时坝体混凝土中存在蜂窝、空洞、砂浆骨料胶结不良、无砂浆胶结、卵石脱落或者混凝土芯柱表面粗糙等缺陷, 图 4 给出了钻孔取样发现的坝体内部混凝土存在骨料分离和蜂窝现象.

由于该坝经过多次补强加固, 其混凝土种类相当复杂, 尚缺少其耐久性各项指标的分析模型和耐久性试验数据, 所以对该坝的耐久性只能进行定性分析. 但从所得到的资料看, 该混凝土重力坝的耐久性存在严重隐患病害.

5) 大坝辅助设施评估.

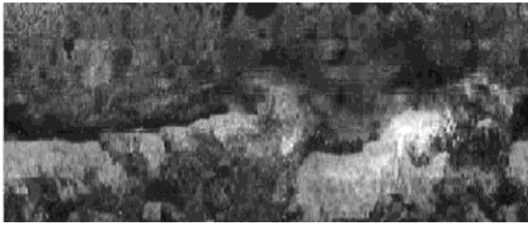


图2 该重力坝某坝段存在的水平缝

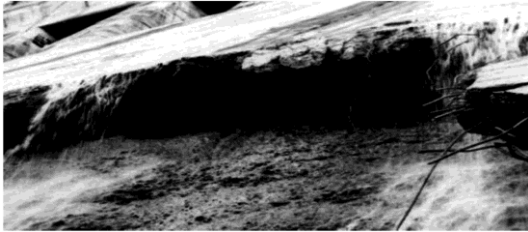


图3 坝体渗漏和溶蚀

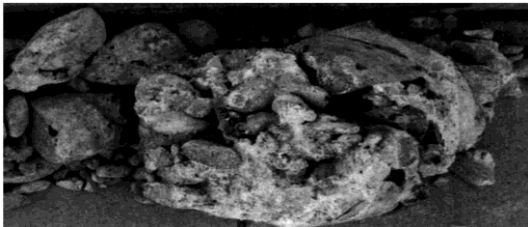


图4 坝体内部存在的骨料分离和蜂窝现象

溢流孔闸墩垂直裂缝与闸墩的闸门槽平行,从底部(堰顶)一直裂到坝顶,11个溢流孔两侧闸墩均有.裂缝呈楔形状,上部宽下部窄,裂缝上部宽度达到2.5 cm.且闸门时常出现不能正常开启的状况.1986年泄洪时溢流面冲走混凝土 1917 m^3 ,冲坑深度2~3 m,虽对冲毁坝面进行全面补强加固,但补强加固后的溢流面已布满网状裂缝.

变形监测设施:坝顶真空激光系统误差较大、可靠性较低;坝顶精密水准垂直位移观测,工作基点有损坏的情况;4条倒垂线不能正常工作;无坝顶倾斜观测.渗流监测设施:部分坝段的坝基纵向扬压力的自动化观测不能正常工作;坝基横向扬压力观测的部分测点传感器损坏;溢流坝段部分坝体渗压计测值不准确;绕坝渗流的2个孔口装置损坏.内部监测设施:应力应变计数量较少,且大部分测值精度较低.此外,坝体无微震监测设施;大坝仅有数据库管理系统,缺少大坝安全评价分析系统,因此大坝安全状况快速评价分析存在严重不足.

从上述分析评估看出,大坝安全存在险情.

5.3.2 层间评估

该坝主要存在安全问题,所以对大坝安全评估的层间评估进行具体的分析,其余各层间评估只给出结果,不再列出具体分析计算过程.

根据单项评估的结果,利用专家评分法和BP神经网络可以得到安全评估各单项对应的评价向量.构建一个输入是专家评分,输出是评价等级对应概率值的BP神经网络,同时将网络误差作为不确定性.将BP网络计算的概率值和误差做归一化处理,即可得到表1所示的安全评估各单项对应的最终评价向量.表1中专家的评分标准为[10,8], [8,6], [6,4], [4,2], [2,0],评分越高表明大坝的安全状况越差,反之亦然.

利用表1中的数据,借助本文构建的基于证据理论的层间融合算法,可以得到安全评估的评价向量 $m_a=[0.15\ 0.82\ 0.02\ 0.01\ 0\ 0]$.由安全状况的评价向量可知,该坝的危险程度较高,服役状况较差.

按照上述分析思路,根据单项评估的结果,利用专家评分法和BP神经网络确定单项评估的评价向量,并借助层间融合算法对各单项对应的评价向量进行融合,可以得到社会效益、环境、生态对应的评价向量 $m_j=[0.01\ 0.11\ 0.84\ 0.03\ 0.01\ 0]$, $m_h=[0.01\ 0.02\ 0.80\ 0.14\ 0.02\ 0.01]$, $m_s=[0.01\ 0.16\ 0.79\ 0.02\ 0.02\ 0]$.在社会经济效益、环境、生态评估中可以发现,大坝社会效益的发挥程度较高,在长期的运行过程中已经与周围环境和生态有了良好的协调性;而由于大坝的安全状况较差,大坝失事对下游的经济损失、生态损失和环境损失等具有较大的影响,所以三者的评价向量反映出的大坝服役状态为中等,这与实际情况相符.

5.3.3 综合评估

利用层次分析法确定社会效益、大坝安全、环境、生态对该坝健康服役状态影响的权重值为 $[w_j\ w_a\ w_h\ w_s]=[0.15\ 0.57\ 0.13\ 0.15]$.从而基于模糊综合评价法可以确定大坝服役状态向量 $z=[0.09\ 0.51\ 0.36\ 0.03\ 0.01\ 0]$.向量 z 前5项与评分标准[10,8], [8,6], [6,4], [4,2], [2,0]对应,最后一项与不确定性对应,根据上述分析评估,该混凝土重力坝健康服役状态的不确定性为0,该结果有一定的误差,但这对评价的最终结论影响较小,是可以接受的.利

表 1 安全评估各单项对应的评价向量

Evaluation grades	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	Uncertainty
Grading standards	10-8	8-6	6-4	4-2	2-0	
Flood control m_1	0.07	0.65	0.07	0.07	0.06	0.08
Dam strength m_2	0.52	0.24	0.05	0.06	0.06	0.07
Stability against sliding m_3	0.07	0.24	0.49	0.09	0.04	0.07
Durability m_4	0.67	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08
Ancillary facilities m_5	0.07	0.66	0.08	0.06	0.05	0.08

用向量 z 和评分标准, 可以求得该坝的服役状态值 $WK=[7.28 \quad 5.28]$.

根据向量 z 可以确定大坝的服役状态为危险状况严重, 根据服役状态值 WK 可以确定大坝的服役状态的危险状况介于中等和严重危险之间, 所以可以最终确定大坝健康服役的状态为介于中等危险和严重危险之间, 且偏于严重危险.

5.4 评估结果分析

根据上述分析评估, 可以得到如下结论.

1) 该坝能发挥防洪、发电、供水、灌溉等多种社会效益, 而且该坝在长期的运行过程中已经与生态和环境条件实现了协调共存, 满足大坝存在的必要充分条件.

2) 大坝安全评估结果是影响综合评估结果最主要的因素, 即安全条件不满足要求使得该坝的服役状态较差. 而从安全条件的单向评估来看, 坝体强度和耐久性的评估结果是最差的两个方面. 因此要改善大坝的服役状态必须改善大坝的安全条件.

3) 该坝已运行了 60 多年, 在运行期间虽经多次补强加固处理, 其安全条件仍不能满足要求, 即补强加固处理无法根本解决该坝严重的病害与险情, 因此需要考虑拆除该坝, 或者对该坝拆除重建. 而直接拆除报废该坝对社会经济效益、该坝所处流域的环境以及生态将会产生较大的影响.

4) 笔者建议在原坝址下游选择地形、地质条件较好且便于枢纽布置的区域重建该坝; 在新坝建设期间, 老坝可以作为上游围堰使用, 并对老坝进行适当加固和加强监测; 新坝建成后, 老坝可以拆除或者淹没在水库中.

6 结论

本文提出了大坝服役状态评估的原则, 在对前人研究成果分析总结的基础上评述了大坝服役状态评估的分析方法, 并提出了大坝服役状态的综合评判模型与方法, 据此对某大坝的服役状态进行了评估, 得到如下结论.

1) 大坝健康服役状态评估应该遵循社会效益最大, 对环境、生态的负面影响最小或互为和谐共存的总原则; 在总原则前提下, 应具体考虑社会效益、大坝安全、环境和生态等 4 个方面.

2) 综合评判模型是一个由底层向顶层逐层评估的体系, 包括单项评估、层间评估和综合评估等. 该模型综合运用了社会效益、大坝安全、环境和生态的评估方法, 并运用了基于证据理论的融合算法和模糊综合分析法对大坝的服役状态进行综合评估.

3) 利用综合评判模型及方法对某大坝的服役状态进行了评估, 得到该坝满足存在的总原则, 但是该坝存在严重的病害险情的结论; 同时, 多次补强加固处理并未也不能彻底解决大坝安全条件不满足要求的问题; 为此建议在原坝址下游选择合适区域重建新坝, 新坝建设期间, 老坝可作为上游围堰使用, 在新坝建成后, 老坝退役. 该坝的处理措施提示我们在高坝、特高坝等重大水利工程选址建设时, 应在其下游预留利于重建的坝址.

4) 本文构建的大坝服役状态综合评判模型, 为大坝服役状态的安全评判提供了更全面的评估内容和思路. 该模型也适用于其它水工程, 只需评估内容和各单项评估的方法做相应的调整即可.

参考文献

- 1 吴中如, 顾冲时, 郑东键, 等. 探讨重大水利水电工程寿命诊断的理论和方法. 岩石力学与工程学报, 2005, 24: 3017-3022
- 2 Wu Z R, Peng Y, Li Z C, et al. Commentary of research situation and innovation frontier in hydro-structure engineering science. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 767-780
- 3 邢林生, 谭秀娟. 我国水电站大坝安全状况及修补处理综述. 大坝与安全, 2001, 5: 4-8
- 4 王正旭. 美国水电站退役与大坝拆除. 水利水电科技进展, 2002, 22: 61-63

- 5 Doyle M W, Stanley E H. Dam removal in the United States: Emerging needs for science and policy. EOS, Trans, Am Geoph Union, 2003, 84: 29–36
- 6 McCully P. 大坝经济学. 北京: 中国发展出版社, 2001
- 7 Charlwood R G. 美国大坝管理中的焦点问题. 中国水利, 2004, 13: 21–24, 45
- 8 Schelle P, Collier U, Pittcock J. Rivers at Risk: Dams and the future of freshwater ecosystems. WWF and the World Resources Institute, 2003
- 9 王志军. 溃坝后果评估方法研究. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2009
- 10 Hill P I, Cook D, Nathan R J, et al. Development of a comprehensive approach to consequence assessment. ANCOLD Bull, 2001, 117: 33–46
- 11 Kelman I. Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England. Dissertation of Doctoral Degree. UK: University of Cambridge, 2002
- 12 Aboelata M A. Conceptualization and development of a dam break life-loss estimation model. Dissertation of Doctoral Degree. Utah State: Utah State University, 2005
- 13 Jonkman S N, Gelder P H A J M, Vrijling J K. An overview of quantitative risk measure for loss of life and economic damage. J Hazard Mater, 2003, A99: 1–30
- 14 李雷, 周克发. 大坝溃决导致的生命损失估算方法研究现状. 水利水电科技进展, 2006, 26: 76–80
- 15 姜树海, 范子武. 大坝的允许风险及其运用研究. 水利水运工程学报, 2003, 3: 7–11
- 16 周祥林, 杨百银, 王正发, 等. 国内外水库工程防洪标准分析. 水力发电, 2011, 37: 72–74, 82
- 17 肖义, 郭生练, 周芬, 等. 基于风险分析的大坝设计洪水标准研究. 水力发电, 2003, 11: 6–9
- 18 范子武, 姜树海. 大坝防洪时变风险率研究. 水利学报, 2007(增刊): 168–173
- 19 姜树海. 防洪设计标准和大坝的防洪安全. 水利学报, 1999, 5: 19–25
- 20 朱伯芳. 有限单元法原理及应用. 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- 21 王世夏. 水工设计的理论和方法. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- 22 任青文, 钱向东, 赵引, 等. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究. 水利学报, 2002, 2: 1–7
- 23 Shi G H, Goodman R E. Block theory and its application to rock engineering. Englewood Cliffs. N.J. Prentice-Hall, 1985
- 24 Shi G H. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of block system. Dissertation of Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 1988
- 25 吴中如, 顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断. 北京: 高等教育出版社, 2005
- 26 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I: 模型阐述与建立. 硅酸盐学报, 2001, 29: 530–534
- 27 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 II: 模型验证与应用. 硅酸盐学报, 2001, 29: 535–540
- 28 刘远, 余学芳, 韦未. 水工混凝土耐久性评价体系研究. 人民黄河, 2009, 31: 94–96
- 29 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 荷载作用下混凝土的碳化深度. 建筑材料学报, 2005, 8: 179–183
- 30 杜瑞林, 乔学军. 长江三峡水库蓄水荷载地壳形变—GPS 观测研究. 自然科学进展, 2004, 14: 1006–1011
- 31 钟姗姗. 水利工程社会评价模型研究. 硕士学位论文. 长沙: 长沙理工大学, 2006
- 32 何鲜峰. 大坝运行风险及辅助分析系统研究. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2008
- 33 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 34 Wu Z R, Li J, Gu C S, Su H Z. Review on hidden trouble detection and health diagnosis of hydraulic concrete structures. Sci China Ser E-Tech Sci, 2007, 50(Suppl. I): 34–50
- 35 陈坤成. 混凝土坝健康综合诊断分析方法研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2010
- 36 向衍, 盛金保, 杨孟, 等. 水库大坝退役拆除及对生态环境影响研究. 岩土工程学报, 2008, 30: 1758–1764
- 37 曾容, 赵彦伟, 杨志峰, 等. 基于能值分析的大坝生态效应评价. 环境科学学报, 2010, 30: 890–896
- 38 包广静. 大坝建设生态环境影响国外研究进展. 生态环境, 2008, 3: 145–148
- 39 董哲仁. 国外河流健康评估技术. 水利水电技术, 2005, 36: 15–19
- 40 何金灿. 信息融合技术在矿井通风系统安全评价中的应用研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2006
- 41 杨露菁, 余华. 多源信息融合理论与应用. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005
- 42 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2003