

# 小型水库除险加固工程安全评价方法研究

辛红超

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

**摘要:** 小型水库在我国水利基础建设中占据重要地位,承担着防洪、灌溉、供水及生态调节等多重功能。然而,由于历史原因、建设标准偏低、运行管理不善等因素,大量小型水库存在不同程度的安全隐患,亟需进行除险加固。科学、系统、高效的安全评价是除险加固工程顺利实施的前提和保障。本文在分析小型水库安全现状及除险加固特点的基础上,深入探讨了现有安全评价的局限性,并提出了一套融合多源信息、兼顾定性与定量、突出风险导向的综合安全评价方法体系。该体系以“风险识别—指标构建—权重确定—状态评估—加固决策”为主线,引入层次分析法(AHP)与熵权法组合赋权,并结合模糊综合评价模型,可以有效提升评价结果的客观性与实用性。最后,对未来小型水库安全评价的发展方向进行了展望。

**关键词:** 小型水库; 除险加固; 安全评价; 风险评估; 模糊综合评价

## 引言

我国拥有大量的小型水库,据水利部统计,截至2023年底,全国已注册的小型水库超过9万座,占全国水库总数的95%以上。这些水库大多建于20世纪50至70年代,受当时技术、经济条件限制,普遍存在设计标准低、质量要求低、配套不完善等问题。加之长期超期服役、维护经费不足、管理粗放,导致病险问题日益突出,如大坝渗漏、结构失稳、泄洪能力不足、金属结构老化等,严重威胁下游人民生命财产安全和区域经济社会稳定发展。为消除安全隐患,国家自2000年起陆续启动了大规模的病险水库除险加固工程,并将其纳入国家重大民生工程。然而,在除险加固实践中,如何科学、准确地对水库的安全状况进行评价,从而为加固方案的制定提供可靠依据,成为一项关键且具有挑战性的课题。传统的安全鉴定方法往往侧重于单一工程结构或静态指标,难以全面反映水库系统的整体安全状态和动态风险演化过程。因此,开展针对小型水库除险加固工程的安全评价方法研究,不仅具有重要的理论价值,更具有迫切的现实需求。

## 1 小型水库安全现状与除险加固特点

### 1.1 主要安全问题类型

小型水库主要安全问题可归纳为以下几类:(1)防洪能力不足:原设计洪水标准偏低,或因河道变迁、淤积等原因导致实际泄洪能力下降,无法满足现行规范要求。(2)

大坝结构安全问题:包括坝体、坝基存在裂缝、塌陷、滑坡等失稳迹象;混凝土老化、剥蚀;砌石结构松动等。(3)渗流安全问题:坝体或坝基渗透破坏,表现为渗流量过大、渗透坡降超标、出逸点过高、浑水渗漏等,是诱发管涌、流土等险情的主要原因<sup>[1]</sup>。(4)金属结构与机电设备老化:启闭机锈蚀失灵、闸门变形漏水、电气控制系统落后,严重影响应急调度能力。(5)管理设施缺失:缺乏必要的安全监测、预警预报和通信系统,运行管理水平低下。

### 1.2 除险加固工程的特点

小型水库除险加固工程具有鲜明的特点:

(1)项目分散、单体投资小:点多面广,单个项目投资额有限,要求评价方法必须经济、高效。(2)基础资料普遍缺失:原始设计、施工、历次维修及监测资料不全,给精确评价带来困难。(3)技术力量薄弱:基层水管单位专业人才匮乏,需要评价方法具备较强的可操作性与指导性。(4)目标导向明确:评价的核心目的是服务于加固方案的比选与决策,而非单纯的学术研究。这些特点决定了安全评价方法必须在保证科学性的前提下,尽可能简化流程、降低对数据完整性的依赖,并能直接为工程决策提供清晰的输入。

## 2 综合安全评价方法体系构建

针对上述问题与特点,本文提出一个五阶段的综合安全评价方法体系。其流程如图1所示。



图1: 小型水库除险加固安全综合评价流程图

## 2.1 阶段一：风险识别与初步筛查

此阶段是整个评价体系的“过滤器”，旨在以最低的成本快速排除大量低风险水库，将有限的人才和检测资源集中干大事。具体操作可分为两步：（1）宏观风险普查：利用低成本、高效率的技术手段进行大范围筛查。例如，通过分析历史气象水文数据，识别位于暴雨中心区或上游汇流面积突增区域的水库；利用高分辨率卫星遥感影像或无人机航拍，自动识别坝体是否存在明显的变形、塌陷、植被异常（如沼泽化）等宏观险情特征<sup>[2]</sup>。（2）专家清单初评：编制一份简明扼要的《小型水库安全风险初筛清单》，包含

5-8个关键问题，如“近五年是否发生过险情？”、“下游是否有村庄或重要设施？”、“是否有明显渗漏或管涌迹象？”。由熟悉当地情况的水管员或乡镇水利员进行勾选。若清单中超过半数问题的答案为“是”，则判定为中高风险，进入下一阶段。该阶段的核心价值在于实现了从“普查式”到“靶向式”评价的转变，极大地提升了工作效率。

## 2.2 阶段二：安全评价指标体系构建

指标体系是评价的“骨架”。如表1所示，本体系采用目标层（A）—准则层（B）—指标层（C）的三层结构。这种结构具有良好的层次性和可解释性。

表1：小型水库除险加固安全评价指标体系

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)
小型水库安全状态(A)	防洪能力(B1)	设计洪水复核成果(C11) 泄洪建筑物安全状况(C12) 调洪演算结果(C13)
	结构安全(B2)	坝体稳定性(C21) 坝基处理情况(C22) 建筑材料老化程度(C23)
	渗流安全(B3)	渗流量及水质(C31) 浸润线/测压管水位(C32) 反滤排水设施有效性(C33)
	金属结构与设备(B4)	闸门及启闭机状况(C41) 电气及控制系统可靠性(C42)
	运行管理(B5)	日常巡查与维护记录(C51) 应急预案完备性(C52) 监测设施完备性(C53)

该指标体系经过多轮专家论证和试点应用，证明其既能覆盖所有关键风险点，又避免了过于繁杂，非常适合小型水库的应用场景。

## 2.3 阶段三：评价指标量化与权重确定

### 2.3.1 指标量化方法

量化过程需区分硬指标与软指标。（1）硬指标：指可以直接通过仪器测量或数值模拟得到的物理量。例如，渗流量（C31）可用量水堰实测；坝坡稳定安全系数（C21）可通过极限平衡法（如Bishop法）计算得出。这类指标应尽可能采用实测值，以保证客观性。（2）软指标：指难以直接量化的管理或状态描述类指标<sup>[3]</sup>。对此，采用五级李克特量表（LikertScale）进行转化。邀请专家根据现场调查、资料查阅和经验判断，将定性描述（如“反滤排水设施有效性”）映射到“很好(90-100)”、“好(75-89)”、“一般(60-74)”、“差(40-59)”、“很差(0-39)”五个等级，并取中值作为最终得分（如“一般”对应67分）。为减少个体偏差，通常取多位专家打分的平均值。

### 2.3.2 组合赋权模型

权重反映了各指标在整体评价中的相对重要性。单一

赋权法存在固有缺陷，故采用AHP-熵权法组合模型。（1）AHP法（主观赋权）：首先，专家针对同一准则层下的各指标进行两两重要性比较，构造判断矩阵。然后，通过计算矩阵的最大特征根及其对应的特征向量，得到主观权重向量 $W_s$ 。最后，进行一致性比率（CR）检验，确保专家判断的逻辑一致性（ $CR < 0.1$ ）。（2）熵权法（客观赋权）：假设我们有 $n$ 座待评价的小型水库， $m$ 个评价指标，构成一个 $n \times m$ 的决策矩阵 $X$ 。首先对 $X$ 进行标准化处理，消除量纲影响。然后计算第 $j$ 项指标的熵值 $e_j$ 和差异系数 $g_j = 1 - e_j$ 。差异系数越大，说明该指标在不同水库间的信息量越大，其客观权重 $w_{oj}$ 也应越高。最终得到客观权重向量 $w_o$ 。（3）组合权重合成：引入协调系数 $\alpha$ （建议取值0.6），综合主客观权重：

$$w_j = \alpha w_{sj} + (1 - \alpha) w_{oj}, j = 1, 2, \dots, m$$

这种方法既尊重了水利工程领域专家的集体智慧，又利用了数据本身蕴含的客观规律，有效克服了单一赋权法的片面性。

## 2.4 阶段四：安全状态模糊综合评价

在获得各指标的量化得分和权重后，即可进行综合

评价。鉴于安全状态的边界具有模糊性（例如，“基本安全”与“病险”之间并无绝对界限），采用模糊综合评价法（FCE）是最为恰当的选择。具体步骤如下：（1）确定因素集与评语集：因素集 $U$ 即为所有指标层元素 $\{C_{11}, C_{12}, \dots, C_{53}\}$ 。评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{安全, 基本安全, 病险, 严重病险}\}$ 。（2）单因素模糊评价：对每个指标 $C_i$ ，根据其量化得分，确定其对 $V$ 中各等级的隶属度。例如，若某水库“渗流量”得分为55分，则其对“病险”的隶属度可能为0.8，对“严重病险”的隶属度为0.2，对其余等级为0。所有指标的隶属度构成单因素评价矩阵 $R$ 。（3）模糊合成运算：采用加权平均算子 $M(\cdot, \oplus)$ ，将权重向量 $W$ 与评价矩阵 $R$ 进行合成，得到综合评价结果向量 $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ 。其中， $b_i$ 表示该水库整体安全状态隶属于第 $i$ 个等级的程度。（4）去模糊化与等级判定：为便于决策，需将模糊向量 $B$ 转化为一个清晰的数值。为此，给评语集 $V$ 赋予分值 $S = (95, 80, 60, 30)$ ，计算综合得分 $F = \sum(b_i \cdot s_i)$ 。最终，根据预设的阈值区间（如 $F \geq 85$ 为安全）确定其安全等级。该方法的优势在于，它不仅给出了一个最终等级，还保留了评价过程中的全部模糊信息，使得结果更具说服力和稳健性。

#### 2.5 阶段五：加固方案决策支持

评价的终点是决策。本体系特别强调评价结果与工程实践的无缝衔接。在得出综合得分的同时，系统会自动生成一份详细的《安全评价诊断报告》，其中包含：各准则层（ $B_1$ – $B_5$ ）的得分雷达图，直观展示水库安全的“短板”所在<sup>[4]</sup>。得分最低的3–5个具体指标（ $C$ 层）及其详细状况描述。基于短板分析，提出1–2条最优先的除险加固建议。例如，若报告显示“渗流安全( $B_3$ )”得分仅为45分，且其下“渗流量及水质( $C_{31}$ )”和“反滤排水设施有效性( $C_{33}$ )”均低于50分，则报告会明确建议：“优先考虑对坝体及坝基进行防渗处理，并修复或重建失效的反滤排水体。”这种精准的“诊断–处方”模式，彻底改变了以往加固方案“大而全”、“一刀切”的弊端，显著提升了财政资金的使用效益。

#### 3 方法体系的适用性与实施要点

本方法体系专为我国小型水库“数量多、单体小、资料少、人才缺”的现实国情量身定制，具有极强的适用性。在具体实施中，需注意以下几点：（1）专家团队的组建：AHP打分和软指标量化高度依赖专家水平。建议组建由设计、施工、管理等多领域专家构成的评审小组，以保证评价的全面性。（2）数据采集的标准化：应制定统一的现场调查和检测规程，确保不同评价人员获取的数据具有可比性。（3）信息化工具的开发：可开发配套的移动APP或Web平台，将评价流程、指标释义、打分界面、计算模型等固化其中，降低人为操作错误，提高效率。通过以上系统化的构建与精细化的实施，安全评价方法体系能够为小型水库除险加固工程提供坚实、可靠、高效的技术支撑。

#### 4 结语

本文聚焦小型水库除险加固工程安全评价，构建“风险识别—指标构建—权重确定—状态评估—加固决策”五阶段综合评价方法体系。其创新点突出：风险导向优化资源配置，提升评价效率；主客观融合的AHP–熵权法组合赋权，让权重分配更合理；模糊综合评价模型解决信息不完全与不确定性问题；决策闭环使评价结果直接对应加固措施，增强工程科学性与经济性。展望未来，随着智慧水利和数字孪生技术发展，小型水库安全评价将迎来新机遇。可深度融合物联网技术实现实时在线评价与动态预警；深度学习等智能算法实现险情早期智能识别；将安全评价模块嵌入水库群管理平台，形成“一张图”管理与风险协同防控。

#### 参考文献

- [1]陈韶强.小型水库安全评价与除险加固技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(17):214–216.
- [2]邓剑峰.小型水库安全评价及其除险加固设计研究[J].水利技术监督,2023,(04):221–224.
- [3]邓凌云,王欢.新山水库土坝安全评价及除险加固方案分析[J].云南水力发电,2024,40(10):220–223.
- [4]张愿,陈新民.南郊水库砌石拱坝安全评价及除险加固方案分析[J].小水电,2023,(02):70–73.