

水库大坝的监测与结构安全评估

顾娴

北京金河水务建设集团有限公司, 北京 102206

摘要： 在全球范围内，水库大坝作为重要的水利工程设施，承担着水资源调配、防洪减灾以及发电等多重功能。然而，随着环境变化和技术发展，这些大坝面临着诸多挑战，如气候变化引发的极端天气、材料老化、地质稳定性问题以及运营管理的复杂性。为了确保大坝的安全运行和有效管理，开展监测与结构安全评估显得尤为重要。本文首先讨论了水库大坝监测和安全评估的重要性，包括维护水资源安全、防范环境灾害和保障公共安全。随后，文章深入分析了影响大坝安全的关键因素，如环境与气候变化、设计与材料老化、地质与地震活动以及运营与维护管理。最后，探讨了监测与安全评估技术的未来发展趋势，为大坝安全管理提供了新的视角和方法。

关键词： 水库大坝；监测；结构安全评估

Monitoring and Structural Safety Assessment of Reservoir Dams

Gu Xian

Beijing Jinhe Water Construction Group Co., Ltd, Beijing 102206

Abstract： Globally, reservoir dams, as important water conservancy engineering facilities, undertake multiple functions such as water resource allocation, flood control and disaster mitigation as well as power generation. However, with environmental changes and technological development, these dams face many challenges, such as extreme weather triggered by climate change, material aging, geologic stability issues, and complexity of operation and management. In order to ensure the safe operation and effective management of dams, it is particularly important to conduct monitoring and structural safety assessment. This paper first discusses the importance of monitoring and safety assessment of reservoir dams, including maintaining water resource security, preventing environmental disasters, and ensuring public safety. Subsequently, the article provides an in-depth analysis of the key factors affecting dam safety, such as environmental and climate change, design and material aging, geological and seismic activities, and operation and maintenance management. Finally, the future development trend of monitoring and safety assessment technology is discussed, which provides new perspectives and methods for dam safety management.

Key words： reservoir dams; monitoring; structural safety assessment

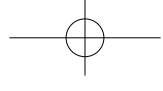
一、引言

水库大坝的安全与稳定对于保护人类生活和生态环境具有至关重要的意义。随着全球气候的剧烈变化和人类活动的影响，大坝安全受到了前所未有的挑战。从维护水资源安全、防范环境灾害到保障公共安全，大坝的稳定性直接关系到广泛的社会经济问题。因此，对水库大坝进行有效的监测和结构安全评估，不仅是技术问题，更是一个社会责任。本文将从多个维度探讨影响大坝安全的关键因素。同时，文章还将关注监测与安全评估技术的最新发展，特别是在高精度传感技术、人工智能与数据分析、遥感与卫星监测等方面的进步，这些技术的发展为大坝安全评估提供了新的工具和方法。通过对这些关键问题的深入分析和讨论，本文旨在为大坝的安全监测与评估提供一种全面而深入的视角。

二、水库大坝监测与安全评估的重要性

(一) 维护水资源安全

水库大坝在维护水资源安全方面扮演着关键角色。根据国际水利与环境工程协会的数据，全球约有58%的饮用水来源于水库。大坝通过调节河流流量，为农业灌溉、工业用水以及居民生活供水提供了稳定的水源^[1]。例如，中国三峡大坝的蓄水量高达393亿立方米，直接支撑着下游地区的水资源需求。此外，大坝在干旱期通过释放蓄水，缓解了水资源短缺的问题。美国加州历经严重干旱时，其大型水库发挥了至关重要的作用，有效保障了居民的日常用水和农业生产。然而，大坝结构的稳定性直接影响到其蓄水能力。一旦大坝发生损坏或功能失效，不仅会造成水资源的急剧减少，还会导致严重的供水危机^[2]。因此，对水库大坝进行严格的监测与安全评估，是确保水资源安全的必要条件。



（二）防范环境灾害

大坝在防范环境灾害方面同样发挥着重要作用。据世界水利组织统计，全球超过30%的洪水控制工程依赖于大坝。它们通过调节水库蓄水量，减少河流洪峰流量，从而有效预防和减轻洪水灾害^[8]。例如，2010年中国南方洪水期间，三峡大坝成功拦截了约40%的洪水，极大减轻了下游地区的洪灾损失。此外，大坝还能够防止河流倒灌，保护低洼地区不受水患威胁。然而，大坝的监测与评估不到位，其在防洪中的功能就会受到限制，甚至引发灾难性的后果。2005年卡特里娜飓风期间，美国新奥尔良的堤坝系统失效，导致大面积洪水灾害和重大生命财产损失。因此，加强大坝的监测与评估，是有效预防和减轻环境灾害的关键。

（三）保障公共安全

水库大坝的稳固与安全直接影响着下游地区的公共安全。根据国际水电与水坝委员会（ICOLD）的数据，20世纪发生的大坝事故中，超过90%是由于设计、监测和运营不当造成的。例如，1975年中国河南省班公湖大坝的崩溃，造成约171,000人死亡和数百万人无家可归。

大坝的监测与结构安全评估对于防范这类灾害至关重要。通过实时监测大坝的结构健康状况，可以及时发现潜在的风险，如裂缝、渗漏或位移等问题，并采取相应的维护措施^[14]。此外，除了防范自然灾害，大坝安全监测还涉及保护重要基础设施和防止经济损失。大坝破坏容易导致交通中断、农业损失、工业停产和生态破坏，这些后果不仅影响当地社区，还会对国家经济产生长远影响^[5]。因此，加强水库大坝的监测和安全评估，不仅是保护人民生命财产安全的必要措施，也是维护国家经济和社会稳定的重要环节。

三、对影响水库大坝安全的因素分析

（一）环境与气候变化

端天气事件如洪水和干旱的频率和强度都在增加。根据联合国环境规划署的报告，全球气温自19世纪以来已上升约1.1摄氏度，导致极端天气事件增加了近50%。这些极端气候事件对大坝结构提出了更高的要求，因为它们必须能够抵御更强的洪水和更长时间的干旱。

此外，气候变化还影响了水文周期，改变了降雨模式和河流流量^[6]。这种变化对大坝的设计、运营和安全评估提出了新的挑战。这就要求大坝管理者必须重新评估现有大坝的设计标准和运营策略，以应对这些变化。同时，气候变化还加剧了水库淤积的问题。随着更强降雨和地表径流，河流中的泥沙量增加，导致水库淤积加速，这不仅影响水库的储水能力，还会影响大坝的稳定性。

（二）设计与材料老化

设计缺陷和材料老化是影响水库大坝安全的关键因素。许多现有的大坝是在几十年前设计和建造的，那时的设计标准和材料科技与今天相比有限^[7]。由于这些大坝未能适应当前的技术和安全标准，它们在结构上容易存在缺陷。例如，一些老旧大坝的设

计未能充分考虑极端天气事件的影响，使它们在面对如今频繁的极端气候时存在安全隐患。其次，材料老化也是一个重要问题。随着时间的推移，大坝使用的混凝土、钢筋和其他建筑材料会逐渐退化。这种退化容易导致裂缝、渗漏或其他结构问题，从而降低大坝的安全性能。为了应对这些问题，需要对老旧大坝进行定期的检查和维修。此外，对于新建大坝，采用先进的设计方法和更耐用的材料是必要的。这包括使用更高标准的混凝土和钢筋，以及引入新技术，如智能传感器，以实时监测大坝的健康状况。

（三）地质与地震活动

地质条件和地震活动对水库大坝的安全至关重要。大坝的位置通常选在地质复杂的区域，这些区域容易存在不稳定的岩层、活跃的断层或易滑动的土层。这些地质因素还会导致地基不稳定，增加大坝发生滑动或倒塌的风险^[9]。此外，地震也是对大坝安全构成威胁的主要自然因素之一。在地震多发地区，即使是小规模的地震也容易导致大坝结构受损，尤其是对于那些设计时未充分考虑抗震性能的老旧大坝。根据美国地质调查局的数据，每年全球约发生50,000次感觉到的地震，其中不乏能对大坝安全构成威胁的强震。为了应对地质和地震带来的挑战，大坝的设计和建造必须考虑当地的地质条件和历史地震记录。同时，对现有的大坝进行定期的地质和结构评估，以及加强对地震活动的监测，对于及时发现并修复潜在的结构问题至关重要。

（四）运营与维护管理

水库大坝的运营与维护管理是保障其结构安全的关键因素。有效的运营管理包括定期的检查、维修和升级，以确保大坝结构符合安全标准。缺乏或不恰当的维护管理会增加大坝发生故障的风险，容易导致灾难性的后果^[9]。此外，运营管理还包括对大坝的水位控制和泄洪能力的有效管理，特别是在极端天气事件下，这对于防止大坝溢流和保护下游地区安全至关重要。另一方面，随着大坝老化，对老旧大坝的运营和维护管理提出了更高的要求。这要求管理者不仅需要具备专业知识，还需要有足够的资源和资金进行必要的维护工作^[10]。因此，建立和维护一个全面的大坝安全管理体系是至关重要的。这包括定期的结构检查，使用先进的监测技术，如传感器和遥感设备，以及制定应急预案以应对潜在的大坝事故。有效的运营与维护管理确保了大坝能够在其预期的寿命内安全稳定地运行，同时也保护了下游地区的安全。

四、监测与安全评估技术的未来发展趋势

（一）高精度传感技术

在监测和安全评估技术的未来发展趋势中，高精度传感技术是关键。这种技术使得大坝的实时监控成为常态，提供了对大坝健康状况更精确的理解^[11]。具体来说，高精度传感器能够监测大坝的位移、裂缝、渗漏以及温度变化等关键参数。例如，光纤传感技术可以沿大坝全长部署，实时监测大坝结构的微小变化。根据国际大坝协会的数据，通过这些技术实施的监测项目已经显著提高了大坝安全评估的准确性和效率。高精度传感器不仅能够提供实时数据，还能够通过长期数据积累，帮助理解大坝在长期运



营过程中的行为模式。这种长期监测有助于预测大坝容易面临的风险，从而使维护和修复工作更加及时和针对性。进一步地，将这些传感器与无线通信技术结合，可以实现远程监测，使得大坝的状态评估更加灵活和高效。此外，随着技术的进步，新型传感器如基于纳米技术的传感器正在开发中，它们预计将提供更高的灵敏度和更低的成本。这将使得在更多大坝上部署这些先进技术成为常态，从而更全面地提升全球水库大坝安全监控的水平。

（二）人工智能与数据分析

人工智能（AI）和数据分析在水库大坝监测与安全评估的未来发展中扮演着重要角色。通过利用大数据和机器学习算法，可以从大量的监测数据中提取有用的信息，对大坝的健康状态进行更准确的评估。例如，利用AI分析过去的监测数据可以帮助预测未来大坝容易遇到的问题，为维修和加固提供指导。具体做法包括将从传感器收集的大量数据输入到机器学习模型中，这些模型能够识别数据中的模式和异常^[12]。通过这种方式，可以及时发现大坝结构中的潜在问题，甚至在它们造成实际损害之前进行干预。例如，通过分析裂缝的发展趋势，可以预测何时需要进行加固或修复。此外，AI技术也能够在灾害响应中发挥作用。通过模拟不同的灾害情景，AI可以帮助制定应急预案，优化泄洪策略，从而在灾害发生时最大限度地减少损害。综合来看，AI和数据分析的应用提高了大坝安全管理的智能化水平，使得预防和应对措施更加精确和有效。

（三）遥感与卫星监测

遥感与卫星监测的发展趋势着重于提升监测范围、精度和数据分析能力，以优化水库大坝的安全评估和管理。具体策略包括利用高分辨率和多光谱卫星图像，以监测大坝及其周围地区的环境变化^[13]。例如，使用合成孔径雷达（SAR）技术能够精确监测地表移动，该技术可捕捉到几毫米至厘米级的地面变化。根据欧洲航天局（ESA）的数据，Sentinel系列卫星提供的SAR图像已被用于全球多个大坝的监测。此外，结合地理信息系统（GIS）和遥感数据，可以全面分析大坝周围的地质、水文和生态条件^[14]。

例如，通过分析雨量、水库水位和地质稳定性等数据，可以预测洪水和滑坡等自然灾害的风险。未来的发展将着重于提高数据处理的自动化程度和实时性，以及增强对遥感数据的解读能力，如通过机器学习算法自动识别潜在的风险因素。

（四）综合风险评估模型

在综合风险评估模型的发展趋势中，重点是建立更全面和多维度的风险评估体系。这一策略涉及整合工程、地质、气象和环境科学的数据，构建一个跨学科的风险评估模型。例如，结合工程结构分析、地质稳定性评估和气候变化模型，可以更全面地评估大坝面临的风险和潜在影响。具体做法包括使用计算机模拟和数值分析技术，分析不同环境条件和应力情况下大坝的响应^[15]。例如，通过模拟极端降雨或地震事件对大坝的影响，可以评估其结构的稳定性和安全性。根据国际水电协会的数据，这种模型已被应用于全球范围内的大坝安全评估。

未来的发展将着重于提高模型的预测准确性和实时性。通过实时数据的集成，如从高精度传感器和遥感监测中获取的数据，可以实现对大坝状态的动态评估。此外，数字孪生技术的应用，即创建大坝的虚拟副本进行模拟分析，将成为风险评估的重要工具。这种方法不仅提高了预测的准确性，还能够为大坝的运维和应急响应提供支持。

结束语

在本文的探讨中，深入了解了水库大坝监测与结构安全评估的重要性和复杂性。通过分析各种影响因素和探索未来发展趋势，得出结论，大坝安全是一个多维度、跨学科的问题，需要综合考虑技术创新、环境因素和社会影响。面对不断变化的自然环境和科技发展，持续的监测、科学的评估以及创新的管理策略是确保大坝安全的关键。最终，这些努力将有助于保障人类社会和自然环境的和谐共存，为未来的可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 朱位隆. 大坝安全监测自动化技术应用现状及发展思考 [J]. 水利技术监督, 2023, (11): 124-127.
- [2] 张泽天. 关于水库大坝安全监测的吸引子分析法应用研究 [J]. 水利科技与经济, 2023, 29 (11): 135-140.
- [3] 勾建朋, 尚昊博, 任莉萍. 金盆水库大坝安全监测资料分析及存在的问题 [J]. 陕西水利, 2023, (11): 183-184+189.
- [4] 高雅彬, 杨赞, 王春霞, 焦林可, 李生彬. 槐树关水库大坝稳定性评价 [J]. 农业与技术, 2023, 43 (20): 66-71.
- [5] 郝晓辉, 李鹏明, 高原. 济宁市尹城水库大坝安全自动监测系统设计 [J]. 山东水利, 2023, (10): 32-33.
- [6] 吕亚楠. 水库大坝安全管理关键点及运维 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52 (10): 97-98.
- [7] 白凤玲, 陈城, 吴建森. 无线自组网在大坝安全监测系统中的应用 [J]. 四川水利, 2023, 44 (05): 53-55.
- [8] 杨源行. 河口村水库大坝两岸山体渗流安全监测分析 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52 (09): 56-57.
- [9] 周凤杰, 徐正飞, 张旭漫. 超长服役期混凝土坝安全性评估——以凤凰水库大坝为例 [J]. 江苏水利, 2023, (09): 50-54+65.
- [10] 郎颖. 基于风险优先数的范家屯水库大坝安全评估 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51 (04): 159-163.
- [11] 郭继勇. 基于层次分析法的某大坝安全综合评价 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51 (02): 58-61.
- [12] 易会明. 基于云模型的水库大坝安全评价方法研究与应用 [J]. 红水河, 2022, 41 (06): 1-6.
- [13] 陈泳江, 张慧颖, 王新华, 武文浩, 尹琴, 吕松峰. 基于FMECA-模糊层次分析法的水库大坝安全性分析 [J]. 水电能源科学, 2022, 40 (05): 101-104.
- [14] 周荣. 丹江口大坝加高工程混凝土坝安全评价研究 [D]. 华中科技大学, 2022.
- [15] 周秋景, 刘毅, 周钟, 杨宁, 万连宾, 雷峥琦, 程恒. 基于结构仿真的混凝土坝在线监控预警系统研发 [A] 中国水利学会2020学术年会论文集第四分册 [C]. 中国水利学会、黄河水利委员会, 中国水利学会, 2020: 5.