极端天气事件下水利工程应急运行管理策略研究

张 岩 曹 恒 封 锐
连云港市通榆河北延送水工程管理处 江苏 连云港 222000

摘 要：随着全球气候变化加剧，极端天气事件（如特大暴雨、持续干旱、超强台风等）频发且强度增大，对水利工程的安全运行与调度管理构成严峻挑战。传统水利工程运行管理模式在应对突发性、高强度、复合型极端天气事件时显现出响应滞后、协同不足、预案僵化等问题。本文系统分析了极端天气事件对水库、堤防、水闸、泵站等典型水利工程设施带来的风险特征，梳理了当前应急运行管理中存在的主要短板，包括监测预警能力不足、应急预案适应性差、多部门协同机制不畅、智慧化支撑薄弱等。在此基础上，从“预防—响应—恢复”全周期视角出发，提出了构建“韧性水利”导向下的应急运行管理策略体系：强化风险识别与动态评估机制，优化多目标协同调度模型，完善分级分类应急预案体系，健全跨部门联动响应机制，并推动数字孪生与人工智能技术在应急决策中的深度应用。研究成果可为提升水利工程在极端气候条件下的安全韧性与应急保障能力提供理论支撑与实践路径。

关键词：极端天气；水利工程；应急运行管理；韧性水利；数字孪生；多目标调度

引言

近年来，全球气候变化导致极端天气事件呈现频率增加、强度增强、持续时间延长、影响范围扩大的趋势。据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，未来几十年内，全球所有地区都将面临更频繁和更强烈的极端高温、强降水、干旱和复合型灾害事件。我国作为季风气候显著的国家，洪涝与干旱交替发生，台风、暴雨、山洪等灾害频发，对国家水安全构成严重威胁。水利工程作为国家基础设施的重要组成部分，在防洪减灾、供水保障、生态调节等方面发挥着不可替代的作用。然而，现有水利工程多基于历史水文资料设计，其设防标准难以应对日益加剧的极端气候情景。2020年长江流域特大洪水、2021年河南“7·20”特大暴雨、2022年长江流域历史性夏秋连旱等事件表明，传统“以常应变”的运行管理模式已难以满足极端条件下的应急管理需求。如何在极端天气事件冲击下，科学、高效、协同地开展水利工程应急运行管理，成为保障人民生命财产安全和经济社会稳定运行的关键课题。本文聚焦于极端天气背景下水利工程应急运行管理的核心问题，旨在系统剖析风险成因与管理短板，构建面向韧性的应急运行策略体系，为提升水利系统抗灾能力与恢复能力提供理论依据与实践指导。

1 极端天气事件对水利工程的影响特征

1.1 对水库工程的影响

极端强降雨可导致入库流量远超设计标准，引发水库超汛限水位运行，甚至面临漫坝、溃坝风险。例如，2021年河南郑州“7·20”暴雨期间，郭家嘴水库出现管涌险情，被迫紧急泄洪。另一方面，持续干旱则导致水库蓄水量锐减，供水功能受限，如2022年长江流域60年一遇干旱致使三峡水库水位降至145米死水位附近，严重影响发电、航运与生态流量保障。这种双向极端压力使得水库在防洪与兴利之间的调度矛盾日益突出，传统静态调度规则难以兼顾多重目标，亟需引入动态、灵活的应急调度机制。

1.2 对堤防与河道工程的影响

极端洪水易造成堤防漫顶、渗漏、管涌、滑坡等险情。高流速水流冲刷河岸，破坏护岸结构，加剧河道淤积或冲刷，改变河势。此外，冰凌洪水、风暴潮叠加天文大潮等复合型灾害亦可对沿海及北方河流堤防构成多重威胁。尤其在城市化快速推进的背景下，河道被侵占、行洪断面缩窄等问题进一步放大了极端洪水对堤防系统的冲击效应[1]。一旦堤防失事，不仅直接威胁沿岸居民生命财产安全，还可能引发连锁反应，影响交通、能源、通信等关键基础设施的正常运行。

1.3 对水闸与泵站的影响

强降雨期间，排涝泵站需超负荷运行，易因电力中断、设备故障或排水能力不足导致城市内涝。水闸在紧急调度中若操作不当，可能引发上下游水位剧烈波动，影响行洪安全或造成次生灾害。极端低温还可能导致闸门启闭机构冻结，影响应急响应效率。值得注意的是，许多中小型泵站和水闸建设年代较早，自动化水平低，缺乏远程监控与智能诊断能力，在极端天气下高度依赖人工值守，应急响应存在明显滞后性。这种技术与管理上的双重短板，使得局部工程失效可能迅速演变为区域性

内涝或供水危机。

1.4 系统性风险特征

极端天气事件往往具有突发性、连锁性与复合性。单一工程失效可能引发“多米诺骨牌”效应，如水库泄洪不当加剧下游堤防压力，泵站瘫痪导致城区积水倒灌入河，进而影响整个流域水系的调度平衡。因此，应急运行管理必须从系统整体出发，统筹考虑工程群的协同响应。现代流域水系统已高度耦合，水利工程不再是孤立节点，而是嵌入于复杂社会-自然系统中的关键枢纽。在极端扰动下，其功能稳定性直接关系到区域水安全、粮食安全乃至生态安全，必须以系统思维重构应急管理体系。

2 当前水利工程应急运行管理存在的主要问题

2.1 监测预警能力不足

尽管我国已建成较为完善的水文监测网络，但在中小河流、山洪沟、小型水库等区域仍存在监测盲区。部分老旧工程缺乏实时感知设备，数据采集频率低、精度差。气象水文耦合预报模型在极端情景下的准确率有限，预警提前量不足，难以支撑精准调度决策。

2.2 应急预案适应性差

多数水利工程应急预案基于历史典型情景制定，缺乏对“黑天鹅”“灰犀牛”类极端事件的覆盖。预案内容偏重程序性描述，缺乏量化阈值与动态调整机制，难以适应复杂多变的灾情发展。此外，预案演练流于形式，实战化水平不高。

2.3 多部门协同机制不畅

水利工程应急涉及水利、气象、应急管理、交通、电力、通信等多个部门，但信息共享不充分、指挥体系不统一、职责边界模糊等问题突出[2]。在紧急状态下，易出现“各自为战”或“多头指挥”，降低整体响应效率。

2.4 智慧化支撑薄弱

尽管“智慧水利”建设持续推进，但多数系统仍停留在数据展示层面，缺乏基于人工智能的智能研判、仿真推演与辅助决策功能。数字孪生流域尚未实现全域覆盖，难以支撑“预报—预警—预演—预案”四预体系的闭环运行。

3 面向韧性的水利工程应急运行管理策略体系构建

“韧性”指系统在遭受扰动后吸收、适应并恢复原有功能的能力。构建韧性水利应急管理体系，需贯穿“事前预防、事中响应、事后恢复”全周期，形成“风险识别—智能预警—科学调度—协同处置—评估优化”的闭环机制。

3.1 强化风险识别与动态评估机制

面对日益不确定的气候环境，水利工程的风险管理必须从静态评估转向动态感知。应积极开展极端情景压力测试，基于气候模式与水文模型，模拟不同重现期（如100年、200年一遇）极端降雨、干旱情景，系统评估水利工程在超标准工况下的承载能力与失效阈值。在此基础上，整合工程结构安全监测、水文气象实时数据、社会经济脆弱性指标等多源信息，构建水利工程风险动态画像，实现风险等级的滚动更新与空间可视化。尤其要推行“隐患即事故”的管理理念，对病险水库、老化堤防、关键闸泵等重点部位实施清单化、台账式管理，建立从排查、整改到验收的闭环机制，将风险化解于萌芽状态。

3.2 优化多目标协同调度模型

在极端天气条件下，水利工程调度面临防洪、供水、生态、发电等多重目标的激烈冲突，传统的单目标或经验调度模式已难以为继。亟需构建融合不确定性分析的多目标优化调度模型，引入鲁棒优化或随机规划方法，充分考虑水文预报误差与气候变异因素，生成既安全又高效的稳健调度方案。在暴雨预警阶段，应坚持防洪优先原则，通过提前预泄腾库，为后续拦洪削峰预留充足空间；在流域尺度上，强化梯级水库群的联合调度，通过错峰、补偿等策略，最大限度减轻下游防洪压力；而在干旱应急调度中，则需设定最小生态下泄流量阈值，防止河流断流引发生态灾难，同时统筹城乡供水与农业灌溉需求，实现水资源的公平与高效配置。

3.3 完善分级分类应急预案体系

应急预案的生命力在于其现实适应性与操作便捷性。应构建“情景—任务—能力”匹配的预案框架，根据极端事件类型（如暴雨型、干旱型、台风型）及其强度等级（对应黄、橙、红预警），科学划分应急响应级别，并明确各阶段的核心任务、责任主体与资源需求。为提升一线人员执行效率，可推行“一页纸”应急卡，将关键操作流程、风险点位、联络方式、处置要点浓缩为简明卡片，便于快速查阅与执行[3]。更重要的是，建立预案动态修订机制，每次应急响应结束后及时开展复盘评估，总结经验教训，将实战反馈转化为预案优化输入，形成“演练—实战—改进”的良性循环，确保预案始终与风险环境同步演进。

3.4 健全跨部门联动响应机制

高效的应急响应离不开强有力的协同治理。应依托各级防汛抗旱指挥部，建立统一、权威的应急指挥平台，整合水利、气象、应急管理、交通、电力等部门力量，实行“平战结合、一键启动”的指挥模式。在平时加强联合演练与信息互通，在战时实现指令统一、行动协同。同时，大

力推动跨部门数据共享与业务协同，打通气象短临预报、水文实时监测、城市内涝点位、电力保障状态等关键数据壁垒，构建“一张图”作战视图，支撑多部门在同一时空基准下协同决策。此外，需通过制度设计明确各部门在应急响应中的权责边界与协作接口，制定标准化的协作规程，规范信息报送、资源调配、现场处置等关键流程，从根本上解决“多头指挥”或“无人负责”的体制性障碍。

3.5 推进数字孪生与智能决策技术应用

数字技术是提升应急运行管理智能化水平的核心引擎。应加快数字孪生流域建设，集成BIM、GIS与物联网技术，构建水利工程高保真三维实景模型，实现物理实体与数字模型的实时映射与双向交互。在此基础上，开发基于水动力模型与人工智能算法的智能预演系统，能够对不同调度方案下的洪水演进路径、溃坝影响范围、城市内涝扩散过程等进行高精度仿真，为决策者提供直观、可信的方案比选依据[4]。同时，在关键泵站、水闸等节点部署边缘计算智能终端，赋予其本地感知、自主判断与快速响应能力，如在检测到强降雨时自动启动排涝泵组，减少对中心控制系统的依赖，提升系统整体鲁棒性。通过“云—边—端”协同架构，构建覆盖全域、响应敏捷、智能高效的应急决策支持体系。

4 典型案例分析：2022年长江流域抗旱应急调度实践

2022年夏季，长江流域遭遇1961年以来最严重气象干旱，鄱阳湖、洞庭湖水位创历史新低，多地出现供水紧张。面对这一罕见旱情，水利部长江水利委员会迅速启动应急调度机制，展现出较强的系统韧性。首先，通过联合气象部门滚动发布干旱预警，提前30天预判枯水趋势，为应急准备赢得宝贵时间。其次，统筹调度三峡、丹江口等骨干水库加大下泄流量，累计向中下游补水超60亿立方米，有效缓解了沿江城市取水困难和农业灌溉用水缺口。在调度过程中，特别注重生态流量保障，设定了长江干流主要控制断面的最小下泄流量阈值，成功防止了河口咸潮上溯对饮用水源的威胁。此外，还建立了赣鄂湘皖四省用水协商机制，通过跨省协调，统筹农业灌溉与城乡供水需求，避免了区域用水冲突。这一系列举措充分体现了多目标协同调度、跨区域协调、生态优先等韧性管理理念，成功避免了大规模断水事件，验证了本文所提策略在实际应用中的有效性与可行性。

5 结语

极端天气事件已成为新常态，对水利工程应急运行管理提出更高要求。本文研究表明，传统被动响应模式亟需向主动韧性治理转型。未来应着力构建以风险动态评估为基础、以智能调度为核心、以协同联动为保障、以数字技术为支撑的现代化应急运行管理体系。展望未来，水利工程应急运行管理将呈现三大趋势：一是标准化与个性化结合，在统一框架下针对不同工程类型定制应急策略；二是自动化与人性化融合，在提升智能决策水平的同时保留人工干预弹性；三是工程措施与非工程措施并重，通过制度创新、公众参与、保险机制等多元手段提升整体韧性。建议国家层面加快修订《水库大坝安全管理条例》《防洪法》等法规，将极端气候适应性纳入工程设计与运行规范；同时加大智慧水利基础设施投入，推动数字孪生流域全覆盖，为构建安全、绿色、智慧、韧性的国家水网奠定坚实基础。

参考文献

[1]周彬.水利工程中应对极端天气的现场管控方法研究——以某工程项目为例[J].水上安全,2024,(21):145-147.

[2]张峰,张伟.水利工程运行管理现状分析及对策研究[J].水上安全,2025,(18):142-144.

[3]唐庆杰.小型水利工程建设与运行管理问题及对策研究[J].水上安全,2025,(13):46-48.

[4]刘启俊,侯军,肖文忠.智能化技术在水利工程运行管理中的应用研究[J].水上安全,2025,(14):73-75.