

# 大型水利工程输水隧洞安全管理分析

普 恒

云南省滇中引水二期工程有限公司 云南 昆明 650000

**摘要：**本文以大型水利工程输水隧洞为研究对象，深入剖析其安全风险因素，涵盖工程结构风险、运行环境风险及外部干扰风险，并构建涵盖安全管理体系、组织与职责划分、技术保障体系的安全管理框架。通过探讨监测与预警技术、风险评估与决策支持、智能运维与信息化管理等安全管理技术与方法，提出应对技术与管理双重挑战的对策建议，为输水隧洞的安全管理提供理论支持与实践指导。

**关键词：**大型水利工程；输水隧洞；安全管理；风险评估；智能运维

引言：输水隧洞作为水利工程的关键设施，其安全性直接影响工程效益与社会稳定。随着隧洞规模扩大与地质条件复杂化，传统管理模式难以应对结构老化、运行环境恶化及外部干扰等风险。本文将从风险识别、管理框架与技术方法三方面展开研究，提出系统性解决方案。

## 1 输水隧洞安全风险因素分析

### 1.1 工程结构风险

地质条件复杂性是输水隧洞工程结构安全的首要威胁。断层、岩溶、软弱夹层等不良地质体广泛分布于隧洞沿线，其空间分布的不确定性增加了施工与运维难度。断层活动可能引发隧洞衬砌开裂甚至坍塌，岩溶发育区域则易形成溶洞或突水通道，软弱夹层在长期水流冲刷下易发生变形失稳。衬砌结构的老化与裂缝问题亦不容忽视。混凝土衬砌在长期水压力、温度应力及化学侵蚀作用下，易出现碳化、开裂、剥落等病害，导致结构承载力下降。应力变形与渗流耦合作用进一步加剧了结构损伤<sup>[1]</sup>。隧洞周围岩体的应力释放与调整可能引发衬砌开裂，而裂缝的存在又为地下水渗透提供了通道，形成渗流场与应力场的相互作用，加速结构劣化进程。

### 1.2 运行环境风险

水流冲刷与空蚀效应是输水隧洞运行期间的主要风险之一。高速水流在隧洞转弯段、分岔口等部位易产生空化现象，形成空蚀破坏。空蚀作用导致衬砌表面材料剥落，形成蜂窝状孔洞，严重时可穿透衬砌结构，威胁隧洞安全。温度应力与冻融循环影响则主要体现在寒冷地区。昼夜温差及季节性温度变化导致隧洞结构产生温度应力，而冻融循环作用使衬砌材料反复经历冻胀与融缩，加速材料劣化。化学侵蚀风险则与水质条件密切相关。含硫酸盐、氯离子等腐蚀性物质的水体可能引发混凝土衬砌的化学侵蚀，导致强度降低、体积膨胀等病害。例如，硫酸盐侵蚀可能生成膨胀性产物，引发衬砌开裂；氯离子渗透则可能

加速钢筋锈蚀，削弱结构耐久性。

### 1.3 外部干扰风险

自然灾害是输水隧洞面临的重大外部威胁。地震活动可能引发隧洞周围岩体破裂、滑坡等次生灾害，直接破坏隧洞结构。强震作用下，隧洞衬砌可能产生裂缝甚至整体坍塌，导致输水中断。泥石流等灾害则可能堵塞隧洞进口或出口，造成水流淤积与压力骤增，诱发结构破坏。周边人类活动亦对隧洞安全构成潜在威胁。爆破作业产生的冲击波可能传播至隧洞结构，引发振动损伤；采矿活动引发的地面沉降则可能改变隧洞周围应力状态，导致衬砌开裂。地下工程开挖、交通荷载等人类活动产生的附加应力亦可能对隧洞结构造成长期影响。输水隧洞安全风险因素具有复杂性、隐蔽性与动态性特征。地质条件、运行环境及外部干扰等多重因素相互作用，共同威胁隧洞结构安全。需从全生命周期视角出发，建立系统性的风险评估与防控体系，强化监测预警与应急响应能力，确保输水隧洞长期安全稳定运行。

## 2 输水隧洞安全管理框架构建

### 2.1 安全管理体系设计

全生命周期管理理念是输水隧洞安全管理的核心原则。这一理念贯穿于工程规划、设计、施工及运维各阶段，强调风险防控的前置性与动态性。在规划阶段，需通过详细地质勘察与风险预评估，识别潜在风险源，为后续设计提供依据。设计阶段需针对地质条件与运行需求，优化衬砌结构与防灾减灾措施，确保结构安全冗余度。施工阶段应严格遵循设计要求，强化施工工艺控制与质量检测，避免施工缺陷引发安全隐患。运维阶段则需建立常态化巡检与监测机制，通过数据分析与结构健康诊断，实现风险早期预警与精准处置。风险分级管控与隐患排查治理机制是安全管理体系的重要抓手。需依据风险发生的可能性与后果严重程度，对输水隧洞各风

险源进行分级分类,制定差异化管控策略<sup>[2]</sup>。高风险区域应加强监测频次与应急资源储备,中低风险区域则需定期巡检与隐患排查。隐患排查需覆盖结构缺陷、设备故障、环境异常等多维度内容,通过专项检查与日常巡查相结合,确保隐患及时发现与闭环整改。

## 2.2 组织与职责划分

管理机构设置是输水隧洞安全管理的组织保障。需建立业主、设计、施工、运维单位协同参与的联动机制,明确各方职责边界与协作流程。业主单位作为项目统筹方,需牵头制定安全管理制度与应急预案,监督各方履职情况。设计单位应提供技术支撑,参与风险评估与加固方案设计。施工单位需落实施工安全措施,确保工程质量达标。运维单位则需承担日常巡检与应急处置责任,保障隧洞安全运行。岗位安全责任制与应急响应流程是组织协同的具体体现。需将安全管理责任分解至各岗位,明确岗位安全职责与考核标准。例如,巡检人员需定期记录隧洞结构状态,监测人员需实时分析数据异常,维修人员需及时响应设备故障。应急响应流程需涵盖预警发布、资源调配、现场处置与事后恢复等环节,确保突发事件快速响应与高效处置。应急预案应定期演练与更新,提升各方协同作战能力。

## 2.3 技术保障体系

监测技术是输水隧洞安全管理的核心支撑,需搭建多参数、高精度监测网络,涵盖变形、渗流、应力等关键指标。变形监测借助全站仪、光纤传感技术实时获取隧洞结构位移数据;渗流监测利用渗压计、水位计监测地下水渗流变化;应力监测通过应变计、土压力计分析结构受力状态。监测数据需实现自动化采集与智能化分析,为风险评估提供基础。数值模拟与风险评估方法是技术保障体系的重要工具。建立隧洞结构与地质环境的数值模型,通过有限元分析、离散元模拟等技术手段,预测结构变形、应力分布及渗流场演化规律。风险评估结合监测数据与数值模拟结果,采用概率风险评估、模糊综合评价等方法,量化风险发生概率与后果严重程度,为决策提供依据。新型材料与加固技术应用是提升隧洞结构安全性的关键。研发高耐久性混凝土、自修复材料等新型建材,增强衬砌结构抗侵蚀与自修复能力。加固技术包括碳纤维加固、锚杆支护、注浆加固等,针对衬砌裂缝、岩体松动等病害进行专项治理,确保加固效果与经济性。

## 3 输水隧洞安全管理技术与方法

### 3.1 监测与预警技术

输水隧洞的安全管理离不开精准高效的监测与预警

体系。自动化监测系统是技术保障的核心环节,光纤传感技术与无人机巡检技术构成双重监测网络。光纤传感技术通过分布式光纤传感器,实时捕捉隧洞结构中的微小变形、温度变化及应力波动。光纤传感器沿隧洞衬砌及围岩铺设,形成连续的监测链路,将物理信号转化为电信号,实现数据的实时传输与分析。无人机巡检技术则通过搭载高精度相机、红外热成像仪等设备,对隧洞外部结构及周边环境进行全方位扫描。无人机按预设航线飞行,自动拍摄高清影像,识别裂缝、渗水等异常迹象,并生成三维点云模型,为结构健康评估提供直观依据。预警阈值设定与分级响应机制是监测数据转化为安全决策的关键。基于历史数据与工程经验,结合数值模拟结果,设定变形、渗流、应力等指标的预警阈值<sup>[3]</sup>。当监测数据超过阈值时,系统自动触发分级响应程序。一级预警通过短信、邮件等方式通知运维人员,启动日常巡检;二级预警需现场核查,评估风险等级;三级预警则启动应急预案,组织专业团队进行抢险处置。

### 3.2 风险评估与决策支持

定量风险分析为输水隧洞安全管理提供科学依据。概率风险评估通过构建风险模型,分析不同工况下结构失效的概率及后果。模型需考虑地质条件、运行环境、材料性能等多因素耦合作用,采用蒙特卡洛模拟、故障树分析等方法,量化风险发生概率。评估结果以风险矩阵形式呈现,明确高风险区域与关键风险源,为风险管控提供优先级排序。多目标优化决策模型为风险应对提供策略支持。模型需平衡安全、经济、环境等多目标,通过线性规划、遗传算法等技术手段,优化加固方案、应急资源分配等决策变量。例如,在加固方案选择中,需综合考虑加固效果、施工周期、成本投入等因素,寻求最优解。决策模型需结合实时监测数据与风险评估结果,动态调整决策方案,确保安全管理与工程实际相适应。

### 3.3 智能运维与信息化管理

数字孪生技术为输水隧洞运维管理提供虚拟映射。通过构建隧洞结构与运行环境的数字模型,实现物理实体与虚拟模型的实时同步。数字孪生模型可模拟不同工况下的结构响应,预测潜在风险,辅助运维决策。例如,在极端天气条件下,模拟隧洞渗流场变化,评估结构安全性,提前采取防范措施。数字孪生技术还可优化运维流程,通过虚拟巡检、远程诊断等功能,提高运维效率。大数据分析平台为输水隧洞安全管理提供前瞻性支持。通过整合监测数据、运维记录、历史故障案例等多源信息,构建大数据分析平台。平台采用机器学习、深度学习等技术手段,挖掘数据中的潜在规律,预测结构故障趋势。例如,

通过分析变形数据的时间序列特征，识别结构损伤的早期迹象，提前制定维修计划。故障预测模型需持续优化，结合实际故障案例进行反馈修正，提高预测精度。输水隧洞安全管理需构建监测与预警、风险评估与决策支持、智能运维与信息化管理的技术体系。通过自动化监测系统、定量风险分析、数字孪生技术等手段，实现风险的精准识别、科学评估与高效管控，为输水隧洞长期安全稳定运行提供坚实保障。

#### 4 输水隧洞安全管理挑战与对策

##### 4.1 技术与管理双重挑战

输水隧洞安全管理在技术与管理层面均面临显著挑战。技术层面，复杂地质条件对监测与加固提出高要求。隧洞穿越区域常含断层、岩溶、软弱夹层等不良地质体，围岩稳定性差异显著。传统监测手段易受干扰，难以精准捕捉结构变形与应力变化，如岩溶发育区渗压监测数据波动剧烈，影响风险评估准确性。加固技术需因地制宜，软弱夹层导致衬砌结构受力不均，常规加固措施难以形成有效支撑，需研发新型复合加固材料与工艺。长距离隧洞运维效率提升亦成难题。隧洞线路长、环境复杂，传统人工巡检耗时长、效率低，难以覆盖隐蔽部位。无人机巡检虽可提高效率，但续航能力与信号传输稳定性受限。隧洞内设备种类繁多，数据格式不统一，导致信息整合与分析困难，需构建智能化运维体系。管理层面，多主体协同机制不完善是重要障碍<sup>[4]</sup>。隧洞工程涉及设计、施工、运维、监管等多方主体，职责边界模糊、信息沟通不畅，导致风险管控措施难以有效落实。例如，设计单位侧重结构安全性，运维单位关注运行效率，二者在风险评估标准与方法上存在差异，易引发管理矛盾。应急资源分配与调度优化是关键环节。隧洞事故突发性强，需在短时间内调配资源抢险救援，但现有应急资源分布不均、调度机制缺乏灵活性，导致救援效率低下。需建立区域性应急资源库，运用智能调度算法，根据事故类型与严重程度动态分配资源。

##### 4.2 对策建议

强化产学研合作与技术攻关是突破技术瓶颈的有效途径。高校、科研机构与企业需形成紧密合作网络，针

对复杂地质条件下的监测与加固难题，联合开展技术研发。例如，研发基于人工智能的变形预测模型，提升监测数据解析能力；开发新型复合材料，增强围岩加固效果。建立技术示范工程，验证新技术、新工艺的可行性，推动成果转化。推广标准化管理与信息化平台是提升管理效率的重要手段。需制定统一的隧洞运维管理标准，规范设备巡检、维修保养、数据采集等流程，减少人为因素导致的风险。构建信息化管理平台，整合监测数据、运维记录、应急预案等信息，实现风险管控的数字化、智能化。例如，通过物联网技术连接隧洞内各类设备，实时上传运行状态，运用大数据分析挖掘潜在风险，为决策提供支持。完善人才培养与应急演练机制是保障安全管理持续发展的基础。需加强隧洞工程相关专业人才培养，注重理论与实践结合，提升从业人员技能水平。定期组织应急演练，模拟不同类型事故场景，检验应急预案的可行性，提高各方协同响应能力。通过持续培训与演练，形成一支高素质、专业化的安全管理队伍，为输水隧洞长期安全稳定运行提供坚实保障。

##### 结束语

输水隧洞安全管理是保障水资源调配工程顺利运行的关键。通过全面分析安全风险因素，构建系统的安全管理框架与技术方法，虽面临技术与管理双重挑战，但通过强化产学研合作、推广标准化管理与信息化平台、完善人才培养与应急演练机制等对策，有望提升输水隧洞安全管理水平。未来，需持续创新技术与优化管理，为输水隧洞长期安全稳定运行提供更坚实保障。

##### 参考文献

- [1]谢玉轩.水利工程输水隧洞施工安全管理分析[J].建材发展导向,2022,20(16):102-104.
- [2]杨鹏,蔡本林.水工隧洞施工质量隐患及保证施工质量的建议[J].珠江水运,2022,(09):92-94.
- [3]郝玉鹏.水利工程隧洞施工管理分析[J].建筑技术开发,2021,48(24):75-76.
- [4]张妙妙.输水隧洞施工安全技术研究[J].水利水电科技进展, 2022, 39(1): 1-5.