

# 水闸老化病害识别与运行可靠性提升对策

王保穆 秦东海

连云港市赣榆区通榆河北延送水工程管理所 江苏 连云港 222100

**摘要:** 水闸作为水利工程体系中的关键控制性建筑物,在防洪排涝、灌溉供水、航运调节及生态保护等方面发挥着不可替代的作用。然而,随着服役年限的增长,大量水闸进入“老龄化”阶段,结构性能退化、设备老化、材料劣化等问题日益突出,严重威胁其安全运行与功能发挥。本文系统梳理了水闸老化过程中常见的病害类型及其成因,构建了基于多源信息融合的老化病害识别技术体系,并在此基础上提出了涵盖结构加固、设备更新、智能监测、运维优化等维度的运行可靠性提升综合对策。研究表明,通过科学识别病害、精准评估风险、实施全生命周期管理,可显著延长水闸使用寿命,保障其在复杂工况下的安全高效运行,为新时期水利基础设施高质量发展提供技术支撑。

**关键词:** 水闸; 老化病害; 结构劣化; 运行可靠性; 智能监测; 全生命周期管理

## 引言

我国是世界上水闸数量最多的国家之一,截至2023年底,全国已建成各类水闸逾7万座,其中多数建于20世纪50—80年代。这些水闸在长期服役过程中,受自然环境侵蚀、荷载反复作用、材料性能退化及维护管理不足等多重因素影响,普遍存在不同程度的老化现象。水闸老化不仅导致其启闭功能下降、渗漏加剧、结构承载力减弱,还可能在极端水文事件中诱发溃闸风险,造成重大经济损失和人员伤亡。因此,如何科学识别水闸老化病害、准确评估其运行状态、并采取有效措施提升其可靠性,已成为当前水利工程安全管理领域的核心课题。近年来,随着无损检测、物联网、大数据与人工智能等技术的发展,水闸健康诊断与智能运维水平显著提升。然而,现有研究多聚焦于单一病害或局部构件,缺乏对水闸整体老化机理的系统性认知与集成化对策。

## 1 水闸老化病害类型与成因分析

### 1.1 混凝土结构劣化

混凝土是水闸主体结构的主要材料,其性能退化最为普遍。长期服役中,受环境与力学因素共同作用,易发生多种劣化:大气中CO<sub>2</sub>渗透引发碳化,降低孔隙液pH值,破坏钢筋钝化膜,导致锈蚀;锈胀应力使保护层开裂剥落,削弱承载力。在寒冷地区,冻融循环造成孔隙水反复胀缩,形成微裂缝,引发表层剥蚀、骨料外露<sup>[1]</sup>。部分早期工程使用含活性二氧化硅骨料,在碱性环境下发生碱-骨料反应,生成吸水肿胀凝胶,导致不均匀膨胀开裂。沿海或曾用除冰盐区域,氯离子侵入加速钢筋锈蚀,尤其在水位变动频繁的闸墩与底板部位更为严重。

### 1.2 基础与地基问题

老旧水闸常因地勘精度不足或地基处理技术落后,

未充分考虑软弱土层长期沉降特性,运行多年后出现不均匀沉降,引发闸室倾斜、止水错位及附加应力裂缝。若防渗体系老化或施工缺陷,高水头差下渗流力增大,可能诱发管涌或流土,细颗粒被带走形成渗漏通道,掏空基础,危及整体稳定。地震区饱和砂土在震动下易液化,瞬间丧失承载力,导致水闸失稳甚至倾覆,虽属低频但后果严重。

### 1.3 金属结构腐蚀与疲劳

水闸的闸门、支臂、吊耳及启闭机架等金属构件长期处于潮湿、含氧甚至含盐的环境中,极易发生电化学腐蚀。腐蚀往往首先出现在焊缝、螺栓连接处或涂层破损区域,这些部位既是应力集中点,又是防护薄弱环节。随着时间推移,截面损失不断累积,构件刚度与强度显著下降。与此同时,水闸在调度运行中需频繁启闭,金属构件承受周期性交变荷载,容易产生疲劳损伤。微裂纹在应力集中处萌生并逐步扩展,若未及时发现,可能在无明显征兆的情况下突然断裂,造成闸门失控等严重事故。此外,早期涂装的防腐涂层因紫外线照射、温湿度变化及机械磨损而老化剥落,失去对基材的保护作用,进一步加速了腐蚀进程,形成恶性循环。

### 1.4 止水系统失效

止水系统是确保水闸关闭严密、防止渗漏的关键部件。常见的橡胶止水带在长期紫外线照射、臭氧侵蚀及温度变化作用下,会发生老化、龟裂甚至硬化脆断,失去弹性密封功能。金属止水片则可能因基础不均匀沉降而发生变形,或因焊接质量不佳而产生微小缝隙<sup>[2]</sup>。一旦止水失效,即使闸门完全关闭,仍会有大量水流渗漏。这不仅降低水资源利用效率,渗漏水还可能携带泥沙冲刷下游护坦、消力池等结构,引发局部冲刷破坏,进而

威胁整个水闸的稳定。在某些情况下,持续渗漏还会改变闸基渗流场,增加管涌风险,形成连锁反应。

### 1.5 机电设备老化

启闭机、电气控制系统、传感器及配电装置等机电设备是水闸实现自动化调度的核心。然而,这些设备中的电子元器件、绝缘材料及机械传动部件同样存在寿命限制。长期运行后,继电器触点氧化、电容老化、电机

绕组绝缘性能下降等问题频发,导致设备响应迟滞、动作失灵甚至误操作。部分早期建设的水闸仍采用手动或半自动控制系统,缺乏故障自诊断与远程监控能力,在突发情况下难以及时应对。此外,软件系统版本陈旧、兼容性差,也限制了与现代智慧水利平台的对接,影响整体调度效率与安全性。

表1:典型水闸老化病害特征统计

病害类别	主要表现形式	平均严重程度*	高发区域/构件
混凝土碳化与钢筋锈蚀	保护层开裂、剥落,钢筋外露锈胀	中-高	闸墩、胸墙、工作桥
止水系统失效	橡胶止水带龟裂、金属止水变形,闭门渗漏	中	闸门侧墙、底板接缝处
金属结构腐蚀	钢闸门、支臂锈蚀减薄,焊缝开裂	中-高	水位变动区、浪溅区
基础渗漏与管涌隐患	下游冒水、反滤层失效,渗流量超标	高	闸基、翼墙后填土区
启闭设备老化	启闭卡涩、电机过热、控制系统失灵	中	启闭机房、电气控制柜
混凝土冻融剥蚀	表面疏松、骨料脱落,强度下降	中	北方地区闸墩迎水面、护坦
不均匀沉降	闸室倾斜、止水错位、结构裂缝	高	软土地基、分期施工接缝处
碱-骨料反应	网状膨胀裂缝,混凝土鼓胀	高	使用活性骨料的早期工程

\*严重程度分级:低(不影响功能)、中(需维修)、高(危及结构安全)

## 2 老化病害识别技术体系

### 2.1 外观检查与人工巡检

尽管现代检测技术日新月异,人工巡检仍是水闸病害识别不可或缺的基础手段。经验丰富的技术人员通过目视观察,能够快速发现裂缝、渗水痕迹、混凝土剥落、金属锈迹等直观异常,并结合锤击听音、塞尺测量等简易方法初步判断损伤程度。该方法成本低廉、操作灵活,适用于大范围初步筛查和日常例行检查。虽然其主观性强、量化精度有限,但在缺乏先进设备的基层单位仍具有重要实用价值,且可为后续精细化检测提供目标导向。

### 2.2 无损检测技术

为克服人工巡检的局限性,无损检测技术被广泛应用于水闸内部缺陷的精准识别。超声波检测利用声波在介质中的传播特性,可有效探测混凝土内部的空洞、分层及裂缝深度;地质雷达则通过高频电磁波反射信号,构建混凝土内部结构图像,识别钢筋分布异常或隐蔽空腔。红外热成像技术基于物体表面温度场的差异,能够非接触式地定位渗漏点或保温层失效区域。对于混凝土强度评估,回弹法与超声回弹综合法因其操作简便、结果可靠而被普遍采用。而在钢筋锈蚀诊断方面,电化学测试方法如半电池电位法和线性极化电阻法,能够定量反映锈蚀活性与速率,为耐久性评估提供关键参数。

### 2.3 结构健康监测

对于重要或高风险水闸,建立长期结构健康监测系

统是实现动态风险管控的有效途径。通过在关键部位布设应变计、位移计、加速度计、渗压计及腐蚀传感器等,可实时获取结构在各种工况下的响应数据。这些数据不仅能反映当前状态,还可通过时序分析识别性能退化趋势。例如,某测点应变持续增大可能预示局部开裂;渗流量异常升高则提示防渗体系可能受损。将监测数据与设计阈值或历史基准值对比,可实现早期预警,为运维决策提供科学依据。

### 2.4 无人机与遥感技术

随着低空遥感技术的发展,无人机已成为水闸外部病害识别的高效工具。搭载高清光学相机的无人机可快速获取闸体全景影像,生成高精度三维模型,便于裂缝分布测绘与变形分析;配备激光雷达(LiDAR)的机型则能穿透植被,精确测量结构几何尺寸变化;多光谱或热红外载荷还可辅助识别因渗漏导致的局部温湿异常<sup>[3]</sup>。该技术特别适用于大型水闸、地形复杂区域或汛期无法接近的工况,显著提升了巡检效率与覆盖范围。

### 2.5 数字孪生与智能诊断

面向智慧水利的发展方向,构建水闸数字孪生模型成为病害智能诊断的新范式。该模型以BIM技术为基础,集成GIS空间信息、设计图纸、施工记录、历次检测报告及实时监测数据,形成虚实映射的动态数字体。在此基础上,引入机器学习算法对海量异构数据进行融合分析。例如,利用卷积神经网络(CNN)自动识别巡检图像中的裂缝特征,结合时间序列预测模型评估其发展趋势;或通过图神经网络分析结构各部件间的关联性,实现系统级风

险评估。这种智能化诊断方式不仅提高了识别精度，还支持“预测性维护”，推动水闸管理由被动响应向主动预防转变。

### 3 运行可靠性提升对策

#### 3.1 结构加固与修复技术

针对已识别的结构病害，应根据损伤程度与功能需求选择适宜的加固修复方案。对于混凝土裂缝，可采用低压注浆工艺注入环氧树脂或聚氨酯材料，实现裂缝封闭与粘结恢复；对保护层剥落区域，则使用聚合物改性水泥砂浆进行修补，并辅以阻锈剂喷涂延缓钢筋进一步锈蚀。在承载力不足的梁板构件上，粘贴碳纤维布（CFRP）是一种高效轻质的加固手段，既能显著提升抗弯抗剪能力，又不增加结构自重。对于基础渗漏问题，可通过高压旋喷桩或垂直防渗墙切断渗流路径；若已形成管涌通道，则需结合反滤压重与化学注浆进行综合治理。金属结构方面，应彻底清除锈蚀产物后，重新涂装高性能复合防腐涂层体系，必要时辅以阴极保护技术，实现长效防护。

#### 3.2 机电设备现代化改造

提升水闸运行可靠性的关键环节之一是机电系统的更新换代。传统螺杆式或卷扬式启闭机应逐步替换为液压或伺服电机驱动系统，后者具有启闭平稳、定位精准、过载保护完善等优势。配套的电气控制系统需升级为基于PLC和SCADA架构的智能平台，支持远程监控、自动调度、故障自诊断及数据记录功能。同时，应配置柴油发电机或UPS不间断电源，确保在电网中断等极端情况下仍具备应急启闭能力，保障防洪安全底线。

#### 3.3 构建智能监测预警平台

运行可靠性的持续保障依赖于高效的监测预警机制。应构建集“感知—传输—分析—决策”于一体的智能平台：前端部署多样化传感器网络，实现关键参数全覆盖；中间层利用5G或LoRa等低功耗广域网技术，确保数据低延时、高可靠回传；后台依托云计算与大数据分析引擎，对海量数据进行实时处理与模式识别<sup>[4]</sup>。平台应设定多级预警阈值，当监测指标超过黄色预警线时触发巡检复核，达到红色预警则自动停用并通知应急处置。管理人员可通过移动端APP随时掌握水闸状态，实现闭环管理。

#### 3.4 全生命周期风险管理

从根本上提升水闸可靠性，必须推行全生命周期管理理念。在设计阶段，应强化耐久性设计，优选高抗渗、抗

冻、抗碳化混凝土，合理设置检修通道与排水系统；施工阶段需严格质量控制，确保防渗、防腐措施落实到位；运行阶段则建立“一闸一档”电子台账，制定差异化巡检与维护计划；临近设计使用年限时，应开展系统性安全鉴定，科学评估剩余寿命，合理决策是加固延寿还是功能置换。这种贯穿始终的管理思维，有助于从源头减少老化病害的发生。

#### 3.5 制度与能力建设

技术措施的有效落地离不开制度保障与人才支撑。应加快修订《水闸安全鉴定办法》等法规标准，明确老化水闸的评估周期、技术要求与处置流程。各级财政应设立专项维修改造资金，确保“有钱办事”。同时，加强基层水管单位技术人员培训，提升其病害识别、监测数据分析与应急处置能力。鼓励引入专业化运维公司，推行“物业化”管理模式，通过市场化机制提高管理效能。唯有技术、制度、人才协同发力，方能构建水闸长效安全运行的坚实屏障。

### 4 结语

本文研究表明：水闸老化病害具有多源性与耦合性，需从材料劣化、结构损伤、设备失效及管理缺失等多维度综合分析；构建“人工巡检+无损检测+智能监测+数字孪生”的多层级识别体系，可实现病害的早发现、早预警；运行可靠性提升应坚持“结构加固为基础、设备更新为支撑、智能监测为手段、制度建设为保障”的综合策略；全生命周期管理理念的贯彻实施，是实现水闸长效安全运行的根本路径。未来，随着数字孪生、人工智能大模型、新型智能材料（如自修复混凝土、形状记忆合金）的发展，水闸将向“自感知、自诊断、自修复、自适应”的智能基础设施演进。建议进一步加强老化机理基础研究，推动标准体系更新，探索基于风险的差异化管理策略，为国家水网建设与水安全保障提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1]边司.浅析小型水闸的病害成因及对策[J].河北水利,2023,(02):31.
- [2]赵允林.小型水闸常见病害问题及管理维护措施研究[J].水上安全,2025,(14):127-129.
- [3]王昌才,秦辉,秦殿国.水闸老化病害的成因及修补[J].河南水利与南水北调,2018,47(08):79+88.
- [4]宋辉.材料老化对水闸抗震性能的影响分析[J].陕西水利,2023,(12):175-178.