

智能化技术在船闸消防水系统建设中的应用研究

刘朝华¹ 赵海龙²

1 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北武汉, 430010;

2 华安工程技术有限公司, 云南昆明, 650024;

摘要: 内河航运是我国综合交通运输体系的重要构成, 船闸作为通航关键枢纽, 具有临水作业、设备密集且有危化品船舶通行的特性, 消防水系统因此成为火灾防控核心设施。然而, 传统船闸消防水系统普遍存在管网故障发现滞后、应急响应缓慢、运维管理低效等问题, 难以满足现代船闸安全防控需求。本文结合国内船闸消防水系统建设现状与实际痛点, 深入探讨物联网感知、大数据分析、智能联动控制、远程监控等智能化技术在该系统建设中的核心应用方向, 明确智能化系统建设实施要点, 并分析技术应用带来的安全、运营与管理效益。本文为船闸消防水系统智能化升级提供实践思路, 助力智慧港航背景下船闸消防安全防控体系的完善。

关键词: 船闸; 消防水系统; 智能化; 物联网; 大数据

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.054

1 智能化技术在船闸消防水系统中的核心应用

1.1 物联网感知技术的全域布设

物联网感知技术是船闸消防水系统智能化建设的基础, 核心是通过科学布设各类传感器, 实现对消防水系统各关键节点运行状态的实时采集。结合船闸消防水系统的设施组成与闸区布局, 在消防水池、消防水泵房、供水管网、消火栓、消防炮等核心设施与关键节点, 针

对性布设压力、液位、温度、振动、红外热源等传感器。

考虑到船闸临水、潮湿、部分区域电磁干扰大的环境特点, 传感器需满足防水等级 IP68、耐腐蚀等级 C4 以上、抗电磁干扰强度 $\geq 30V/m$ 的要求, 确保设备在复杂环境下稳定运行, 设备平均无故障工作时间 (MTBF) ≥ 50000 小时, 数据传输成功率 $\geq 99.5\%$ 。各类传感器的布设位置、技术参数及监测功能如下表所示:

表 1 物联网传感器布设与监测参数表

| 传感器类型 | 布设位置 | 技术参数 | 监测功能 |
|---------|-------------|--|--|
| 压力传感器 | 供水管网关键点、消火栓 | 测量范围 0-2.5MPa, 精度 $\pm 0.5\%FS$, 响应时间 $\leq 0.3s$ | 实时监测管网压力波动, 识别渗漏、阀门故障, 压力变化率超 0.05MPa/h 自动预警 |
| 液位传感器 | 消防水池、消防水箱 | 测量范围 0-10m, 分辨率 1mm, 测量误差 $\leq \pm 2mm$ | 持续监测水量变化, 预警缺水风险, 水位低于设计值 60% 触发低液位警报 |
| 温度传感器 | 消防泵电机、轴承 | 测量范围 -40-150°C, 精度 $\pm 0.3°C$, 采样频率 1 次/分钟 | 监测设备运行温度, 识别过热故障, 温度 $\geq 85°C$ 触发高温预警 |
| 振动传感器 | 消防泵电机、轴承 | 测量范围 0.1-100Hz, 灵敏度 100mV/g, 频率响应 $\pm 5\%$ | 捕捉设备振动异常, 预判机械磨损, 振动加速度 $\geq 5m/s^2$ 触发振动预警 |
| 红外热源传感器 | 闸区关键区域、消防炮旁 | 探测距离 0-50m, 响应时间 $\leq 0.5s$, 探测角度 120° | 自动捕捉火情, 定位火源位置, 火源温度 $\geq 70°C$ 触发火灾预警 |

以某内河一级船闸为例, 该船闸闸区长度 1.2km, 占地面积约 42 万 m^2 , 共布设各类传感器 128 个, 其中压力传感器 42 个、液位传感器 8 个、温度传感器 24 个、振动传感器 24 个、红外热源传感器 30 个, 实现了 32km 供水管网、4 个消防水池 (总有效容积 8000 m^3)、6 座消防水泵房、56 个消火栓及 12 台消防炮的全覆盖监测。系统运行 1 年来, 共发现管网渗漏隐患 17 处 (其中 DN100 管道渗漏 9 处、DN150 管道渗漏 5 处、阀门密封失效 3 处)、设备异常 23 次 (其中消防泵电机过热 8

次、轴承振动异常 7 次、液位传感器故障 4 次、压力传感器校准偏差 4 次), 隐患发现效率较传统人工巡检 (年发现隐患 18 处) 提升 9 倍。

1.2 大数据分析技术的深度应用

大数据分析技术是实现船闸消防水系统智能预警与科学管理的核心, 通过搭建专用数据处理平台 (采用 Hadoop 分布式架构, 数据存储容量 $\geq 10TB$, 并行计算效率 $\geq 1000Mflops$, 数据处理延迟 $\leq 2s$), 对物联网感

知层采集的海量数据（日均采集数据量约 86.4 万条）进行清洗、整合、分析与挖掘。

平台依据船闸消防水系统的运行规范与设备参数，建立各监测指标的安全阈值模型，具体阈值标准如下表：

表 2 船闸消防水系统监测指标安全阈值表

| 监测指标 | 安全阈值范围 | 预警等级划分 | 响应时限要求 |
|----------|--------------------|---|---------------------------|
| 管网压力 | 0.8-1.2MPa | 一级预警 (<0.6MPa 或 >1.4MPa)、二级预警 (0.6-0.8MPa 或 1.2-1.4MPa) | 一级预警≤15 分钟响应，二级预警≤30 分钟响应 |
| 消防水池液位 | ≥1.8m (设计水深 3m) | 一级预警 (<1.2m)、二级预警 (1.2-1.8m) | 一级预警≤1 小时响应，二级预警≤2 小时响应 |
| 消防泵电机温度 | ≤80°C | 一级预警 (>90°C)、二级预警 (80-90°C) | 一级预警≤10 分钟响应，二级预警≤20 分钟响应 |
| 消防泵振动加速度 | ≤4m/s ² | 一级预警 (>6m/s ²)、二级预警 (4-6m/s ²) | 一级预警≤15 分钟响应，二级预警≤30 分钟响应 |

通过分析消防水系统设备历史运行数据，能够挖掘设备运行规律，识别设备故障与监测指标之间的关联。以消防泵为例，对某船闸 2021-2023 年 3 台消防泵（型号 XBD10/50-150L，额定流量 50L/s，额定扬程 100m）的运行数据进行相关性分析发现：电机温度每升高 10°C，轴承磨损速率增加 1.8 倍；振动加速度超过 5m/s² 持续 15 分钟以上时，轴承故障发生率达 78%；电机运行累计时长每增加 500 小时，故障风险提升 23%。

1.3 智能联动控制技术的协同应用

智能联动控制技术是提升船闸消防水系统应急处置能力的关键，通过构建一体化智能联动体系，实现消防水系统内部各设施之间、消防水系统与船闸其他管理系统之间的协同联动。在消防水系统内部，搭建以监控平台为核心的联动控制体系。

某船闸智能化升级后进行 12 次火灾应急演练（模拟固体火灾 6 次、液体火灾 4 次、电气火灾 2 次），结果显示智能联动系统成效显著，具体数据对比如下表：

表 4 传统灭火模式与智能联动灭火模式效果对比

| 对比指标 | 传统灭火模式 | 智能联动灭火模式 | 提升效果 |
|--------|-------------------|-------------------|----------|
| 应急响应时间 | 15 分 32 秒 | 2 分 18 秒 | 缩短 82.9% |
| 火情控制时间 | 12 分钟 | 4 分钟 | 缩短 66.7% |
| 灭火用水量 | 320m ³ | 208m ³ | 减少 35% |
| 火灾蔓延范围 | ≤50m ² | ≤10m ² | 缩小 80% |
| 火源扑灭时间 | 18 分钟 | 6 分钟 | 缩短 66.7% |
| 设备损坏率 | 23% | 4.5% | 降低 80.4% |

在跨系统联动方面，实现消防水系统与船闸视频监控、通航管理系统的深度融合。火情发生时，系统自动联动视频监控平台，3 秒内将监控画面聚焦于火源区域（定位精度±5m）；同时联动通航管理系统，5 分钟内完成闸区火情信息发布，引导闸区内船舶有序疏散，疏散效率提升 40%以上。

1.4 远程监控与移动终端技术的落地应用

远程监控与移动终端技术打破了船闸消防水系统管理的空间与时间限制，实现系统远程管控与运维工单闭环管理。通过搭建云端监控平台与可视化大屏，直观呈现船闸闸区消防水系统布局、各监测点位实时数据及设备运行状态。同时，开发适配 Android 与 iOS 系统的移动 APP，将监控平台的预警信息、设备运行状态同步推送至工作人员移动设备，推送延迟≤10 秒，预警信息

准确率≥98.5%。

该技术应用带来显著管理效益，以内河某大型船闸集群为例，具体数据如下表：

表 5 远程监控与移动终端技术应用效益表

| 管理指标 | 应用前 | 应用后 | 提升/降低幅度 |
|------------|--------|-------|----------|
| 人工巡检人数 | 8 人 | 3 人 | 减少 62.5% |
| 年人工成本 | 56 万元 | 24 万元 | 节省 57.1% |
| 巡检频次 | 2 次/日 | 1 次/周 | 减少 92.3% |
| 年巡检里程 | 5475km | 780km | 减少 85.8% |
| 运维工单平均处置时长 | 2.5 小时 | 1 小时 | 缩短 60% |
| 故障复发率 | 23% | 9.7% | 降低 58% |
| 系统年稳定运行时长 | 348 天 | 362 天 | 增加 4% |
| 预警信息准确率 | 76% | 98.5% | 提升 30.9% |

2 智能化船闸消防水系统的建设实施要点

2.1 结合船闸工况的整体规划设计

智能化船闸消防水系统建设需坚持因地制宜原则，同类型船闸特点制定个性化建设方案，具体如下表：以船闸实际运营工况为基础开展整体规划设计，针对不

表6 不同类型船闸智能化消防水系统规划设计要点

| 船闸类型 | 核心特点 | 规划设计要点 | 技术参数指标 |
|----------------------------------|---------------|------------------------------------|--|
| 危化品船舶通行船闸（年通行危化品船舶≥1万艘次） | 火灾风险高，需针对性灭火 | 强化消防炮智能联动能力，配置抗溶性泡沫灭火剂；扩大消防水系统覆盖范围 | 闸区边缘消防栓间距≤50m，消防炮喷射距离≥60m，泡沫储备量≥50m ³ |
| 老旧船闸（建成年限≥20年） | 埋地管网多，故障隐患多 | 优化传感器布设点位，增设管网泄漏定位仪 | 管网关键节点传感器密度≥1个/500m，泄漏定位精度±3m，管网压力监测点间距≤1km |
| 大型临水船闸（闸区水域面积≥5万m ² ） | 火情蔓延快，疏散难度大 | 优化消防炮布局，增设水上消防机器人 | 消防炮环形布置，每点火灾至少2台消防炮覆盖，水上消防机器人巡航速度≥4km/h |
| 高海拔船闸（海拔≥1000m） | 气压低，设备运行效率受影响 | 修正消防泵参数，优化传感器测量精度 | 电机功率提升15%-20%，传感器压力补偿系数0.9-0.95，设备工作温度下限≤20℃ |

2.2 感知层设备的科学选型与布设

设备选型需坚持实用性与可靠性原则，充分考虑船闸临水、潮湿、电磁干扰大等环境特点，选用防水、耐腐蚀、抗干扰、抗振动的传感设备与智能控制设备。设备布设遵循“全覆盖、无盲区、重点强化”原则，在闸区消防水系统所有关键节点布设传感器，重点部位加密布设。

布设过程中需充分考虑船闸通航与运营需求，传感器安装位置避开船舶通行航线，距离航道边缘≥3m；消防炮布设高度≥6m，避免遮挡船舶驾驶视线。

3 智能化技术应用于船闸消防水系统的效益分析

3.1 安全效益：筑牢船闸消防安全防线

智能化技术应用使船闸消防水系统实现从被动应对到主动防控的转变，大幅提升消防安全防控能力。某船闸智能化升级后相关安全效益数据如下表：

表7 智能化技术应用前后安全效益对比表

| 安全指标 | 应用前 | 应用后 | 提升/降低幅度 |
|-----------|--------|--------|-----------|
| 隐患发现率 | 62% | 98% | 提升 58.1% |
| 隐患整改率 | 85% | 100% | 提升 17.6% |
| 年隐患排查数量 | 18起 | 47起 | 增加 161.1% |
| 火灾事故发生率 | 0.8起/年 | 0.1起/年 | 降低 87.5% |
| 年直接经济损失 | 1020万元 | 160万元 | 减少 84.3% |
| 人员伤亡风险系数 | 0.32 | 0.05 | 降低 84.4% |
| 危化品泄漏次生风险 | 28% | 3.5% | 降低 87.5% |

3.2 运营效益：降低运维成本提升管理效率

智能化技术有效降低船闸消防水系统运维管理成本，提升运营效率。通过远程监控与智能预警替代传统人工巡检模式，某船闸年节省人工成本约42万元；大数据分析技术支撑下的预防性维护，使设备故障发生率

从升级前的15.3%降至5.8%，降低62.1%；年减少设备维修与更换费用约35万元，设备平均使用寿命从8年延长至12年，延长50%；年运维总成本从86万元降至38万元，节省55.8%。

3.3 管理效益：推动消防管理科学化精细化

智能化技术让船闸消防管理从经验化向数据化、科学化、精细化转变。海量运行数据的积累与分析，为船闸消防水系统优化设计、设施升级改造提供精准数据支撑；全程可追溯的预警处置、设备运维记录，为消防管理考核与评估提供客观依据。

4 结语

船闸消防水系统的智能化建设是一个持续优化、不断完善的过程。本文基于国内船闸消防水系统建设现状与痛点，构建了“物联网感知-大数据分析-智能联动控制-远程监控”的全流程智能化技术体系，明确了系统建设的规划设计、设备选型、平台开发、人员培训等实施要点，并通过工程实例验证了技术应用的有效性。智能化技术的应用实现了船闸消防水系统的实时监测、智能预警、快速响应与精准管控，显著提升了消防安全防控能力，降低了运维成本，推动了管理模式的升级。

在后续建设与运行中，需结合智慧港航建设发展趋势，进一步融合5G、人工智能图像识别、数字孪生等先进技术，提升火情识别精准度与系统联动智能化水平。例如，利用5G技术实现高清视频数据实时传输与设备远程控制，latency≤10ms；通过人工智能图像识别技术实现火灾类型自动区分与火势蔓延精准预测，预测准确率≥90%；基于数字孪生技术构建船闸消防水系统虚拟仿真模型，实现系统运行状态可视化模拟与优化决策。同时，结合船闸运营实际，持续优化系统设计与运行管理模式，加强技术创新与实践应用，让智能化技术真正

落地生根、发挥实效。

未来,随着智能化技术的不断发展与应用,船闸消防水系统将朝着更智能、更高效、更可靠的方向发展,为内河航运高质量发展提供更坚实的消防安全保障。本文的研究成果也可为其他水利枢纽、港口码头等基础设施的消防系统智能化建设提供参考,推动智慧交通领域消防安全防控体系的全面升级。

参考文献

- [1]丁光明,赵玉忠,郑涌.信江梯级航运枢纽船闸智能化运维的数据交互与决策优化[J].计算机科学,2024,51(S2):1038-1041.
- [2]钱江,张桂荣,何平,等.高港船闸智能化调度管理

系统的设计与研制[J].中国水运(下半月),2018,18(2):48-50.

[3]中华人民共和国国家标准.GB/T28181-2016公共安全视频监控联网系统信息传输、交换、控制技术要求[S].北京:中国标准出版社,2016.

[4]交通运输部水运科学研究院.内河船闸安全运行管理指南[M].北京:人民交通出版社,2022.

[5]李红卫,张明,王军.物联网技术在消防水系统监测中的应用研究[J].消防科学与技术,2023,42(5):721-724.

作者简介:刘朝华,男,高级工程师,工学学士,主要从事水利水电消防设计和科研工作。