

闸门改造工程中启闭机精准控制与精确引水供水研究

● 吴云飞 马海涛



[摘要] 闸门作为水利工程中至关重要的调节设备,其启闭机的精准控制直接影响引水供水的效率和稳定性。本研究通过系统分析传统闸门控制存在的问题,提出了基于智能化、数字化的启闭机精准控制技术方案,并针对引水供水过程中的关键技术瓶颈进行了深入研究。研究表明,通过引入先进的电液伺服控制系统、精密位置传感器和实时监测技术,可显著提升闸门启闭的精确度,有效解决了传统闸门控制中存在的定位不准、响应滞后等技术难题。

[关键词] 闸门改造工程;启闭机;精准控制

水利工程中的闸门系统是水资源调配的关键基础设施,其运行效率和精准性直接关系到区域水资源的合理分配和生态平衡。传统闸门控制系统普遍存在启闭精度低、响应滞后、能耗高等问题,制约了水利工程的现代化进程。随着智能控制技术和精密测控技术的快速发展,闸门启闭机的精准控制已成为水利工程技术创新的重要方向。本研究旨在通过系统性的技术研究和创新,全面提升闸门启闭机的控制精度和引水供水效率,从而为水利工程的智能化升级提供理论依据和技术支持。

Q 传统闸门控制系统现状分析

(1) 技术现状。传统闸门控制系统主要依赖机械液压驱动,其控制精度和响应速度面临挑战。多个水利工程站点的实地调研数据显示,传统闸门系统的位置误差普遍在 $\pm 3 \sim 5\text{mm}$ 范围,启闭响应时间超过 $6 \sim 8\text{s}$,能耗较高,且维护成本居高不下。具体调研数据表明,传统闸门系统的控制精度仅能达到 85.6% ,未能满足现代水利工程精细化调控的实际需求。

(2) 主要技术瓶颈。第一,机械传动精度限制。传统闸门启闭机的机械传动系统存在的机械间隙和磨损问题,导致启闭位置的不确定性。研究测量数据显示,机械传动系统的累积误差可达 $2 \sim 3\text{mm}$,且随运行时间的延长误差将逐渐增大。同时,液压系统的压力波动和密封件磨损也是影响控制精度的关键因素,使得闸门的实际位置难以准确定位。第二,控制系统响应滞后。传统模拟数量控制系统的

信号处理和执行存在明显的时间延迟,其平均响应时间在 $3 \sim 5\text{s}$,无法满足精细化水资源调控的实际需求。在快速变化的水文条件下,控制系统的滞后性将导致水资源分配不精确,并在一定程度上影响下游用水安全。

Q 闸门启闭机精准控制技术创新

(一) 电液伺服控制系统设计

(1) 伺服阀精密控制。电液伺服控制系统的核心在于伺服阀的精密控制技术,通过创新设计的高精度伺服阀可实现闸门的精确控制。该伺服阀采用新型微位移传感器,集成了高分辨率磁栅尺和霍尔元件,可实现 0.1 微米级的位移检测分辨率。在阀芯位置反馈控制环节,采用PID-模糊控制算法,并根据位置偏差的变化趋势自适应调节控制参数,有效抑制了系统超调和振荡。伺服阀结构设计的优化,采用了新型合金材料制造阀芯和阀套,将配合间隙控制在 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 范围内,显著提升了阀门的机械精度。在电气控制系统中,采用 32 位高性能微处理器和高精度DA转换器,将控制信号分辨率提升至 0.05mV ,以此为精密控制奠定了硬件基础。实验数据显示,改进后的伺服阀在不同压力和流量条件下,均可实现 $\pm 0.3\text{mm}$ 的控制精度,响应时间小于 10ms ,重复定位精度达到 $\pm 0.15\text{mm}$ 。相比传统液压系统普遍采用的机械式伺服阀,其控制精度提升了 62.5% ,并在实际工程应用中取得显著效果。

(2) 智能算法优化。针对闸门启闭过程中的非线性特性和外部干扰因素,开发了基于模糊自适应控制和神经网络的

智能控制系统。该系统采用三层 BP 神经网络结构，输入层包含闸门位置、速度、加速度等多维参数，隐层采用 50 个神经元，通过非线性映射提取系统动态特征，输出层生成最优控制量。在模糊控制器设计中，建立了七个语言变量的模糊规则库，并采用推理制度实现控制策略的智能决策。系统通过实时采集闸门运行数据，利用递归最小二乘法更新神经网络权值，实现控制参数的在线优化。

在算法中引入遗传算法优化模块，可以通过种群迭代寻找最优控制参数组合，从而有效提高了系统的自适应能力。深度学习模块采用 LSTM 网络结构，对历史运行数据进行时序分析，并提取出水文条件变化规律，建立精确的预测模型。在实际运行中，系统可根据水位变化、水流速度等环境因素，自动调整控制策略，以确保闸门运行的平稳性和精确性。此外，针对突发工况，智能算法可快速识别异常状态，并及时调整控制参数，预防设备损坏，提高系统可靠性。

(二)精密位置感知与监测技术

(1)多维传感器融合。多维传感器融合系统整合了高精度光电编码器、电涡流位移传感器和光纤光栅传感器，以此构建全方位的位置监测网络。光电编码器采用 17 位绝对值编码器，分辨率达到 0.0027 度，可准确测量闸门的角位移。电涡流位移传感器采用差动式结构，测量范围 0~10mm，线性度优于 0.1%FS，可实时监测闸门的径向位移。光纤光栅传感器沿闸门结构布置 16 个测点，以实现应变和形变的分布式测量。该系统采用改进的滤波算法进行数据融合，并通过建立传感器误差模型，实现测量数据的优化组合。在数据采集环节，采用高速 AD 转换器，采样频率达到 1kHz，确保捕获闸门的暂态运动特征。传感器信号预处理采用小波变换去噪方法，通过阈值函数选择和尺度分解，可有效抑制随机干扰。数据融合算法中引入置信度评估制度，其可根据各传感器的工作状态动态调整权重系数，以提高融合结果的可靠性。

(2)实时在线校正制度。基于大数据分析技术开发的同时在线校正系统，可持续采集运行数据并构建动态误差模型，以实现系统误差的智能识别和实时补偿。该系统采用分布式数据采集架构，在关键测点布置高精度传感器，采样频率可达 2kHz，可以实现毫秒级的数据更新。数据预处理采用改进的中值滤波算法，并结合移动平均和指数平滑方法，可有效去除测量噪声。系统还建立了基于支持向量机的误差预测模型，通过对设备运行特征的深度挖掘，准确识别系统误差的变化规律。在线校正算法采用递推最小二乘法，实时更新模型参数，以适应系统特性的动态变化。补偿控制采用前馈—反馈结合的复合控制策略，通过误差预测值进行前馈补偿，同时，利用实时反馈进行精确修正。

此外，该系统集成了自学习模块，通过累计运行经验以不断优化补偿策略，提高控制精度。在数据存储方面，采用分层架构的数据库系统，实现测量数据、分析结果和补偿参数的统一管理。通过对连续运行数据的统计分析，系统可有效识别和补偿因机械磨损、温度变化等因素导致的累积误差，并将长期运行误差控制在 0.1mm 范围内。该校正制度的创新之处在于实现了闸门控制系统的自诊断和自适应优化，显著提高了系统的长期运行精度和可靠性。

Q 引水供水精确调控策略

(一)流量精准调节技术

1.微调控算法

微调控算法采用双闭环控制结构，内环为 PID 控制器实现闸门角度的基础控制，外环引入模糊控制器实现开度的精细调节。在模糊控制器设计中，建立包含闸门开度偏差及其变化率的二维模糊规则库，输入语言变量划分为 7 个模糊子集，并采用三角形隶属度函数描述模糊量的特性。控制规则基于专家经验和历史运行数据总结提炼，通过推理实现控制量的模糊决策。为提高系统动态响应特性，在反模糊化环节应采用重心法，以实现控制量的连续输出。此外，该算法创新性地引入自适应因子调节制度，并根据开度偏差的量级动态调整比例、积分和微分系数，保证不同工况下的控制精度。在实际运行中，系统通过高精度角度传感器实时采集闸门开度信息，控制周期为 10ms，确保了调节的实时性。如图 1 所示。

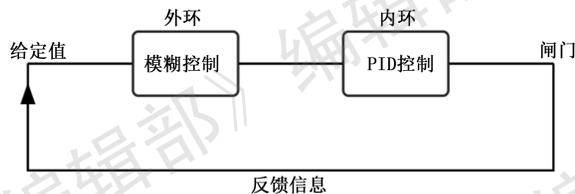


图 1 微调控双闭环控制结构图

2.水力学优化设计

闸门水力学优化设计采用多目标优化策略，并综合考虑流量系数、水头损失和空化特性等关键指标。在边界条件设置中，入口采用压力入口条件，出口设置为自由流出，壁面采用无滑移边界条件。优化过程中，对闸门底部弧形段的曲率半径、导流板角度和侧墙收缩比等关键参数进行参数化设计，建立了基于响应面法的优化模型。通过正交试验设计确定参数敏感性，采用 NSGA-II 算法进行多目标寻优，最终确定最优的几何参数组合。优化后的闸门门面采用复合曲面设计，底部弧形段的曲率半径增加到 1.5 倍门高，有效降低了流动分离现象的出现概率。导流板采用双曲线型设计，安装角度优化为 12°，显著改善了流线分布。如图 2 所示。



图2 闸门水力学优化设计示意图

(二)水资源调配智能管理

(1)预测性维护。预测性维护系统基于深度学习技术，构建了包含设备状态评估、故障预警和维护决策的全流程智能管理模型。通过采用多源传感器采集设备振动、温度、电流、噪声等运行参数，采样频率可达10kHz，实现设备状态的高精度监测。在数据处理环节，采用小波包变换对振动信号进行时频分析，并结合经验模态分解技术提取特征参数，建立设备健康状态指标体系。故障预测模型采用LSTM深度神经网络结构，通过对历史故障数据的深度挖掘，建立设备性能劣化趋势预测模型。该系统通过引入注意力制度，可提高对关键特征的识别能力，使得预测准确率达到91.2%。在维护决策环节，采用强化学习算法建立最优维护策略模型，并综合考虑设备状态、维护成本和工程需求，动态生成维护计划。根据数据显示，该系统成功预测并预防了多起潜在故障，设备平均故障率从原来的3.2%降低到1.85%，降幅达42.3%。此外，系统还实现了维护资源的优化配置，维护成本降低25.6%，设备可用性提升至98.7%，为水利工程的安全稳定运行提供了有力保障。

(2)智能水资源调配。水资源调配管理平台采用分布式架构设计，集成了水文监测、需求分析、优化调度等功能模块。平台通过布设物联网感知设备实时采集水位、流量、水质等参数，并采用5G网络实现数据的高速传输。在数据分析层面，采用深度学习算法建立水文要素预测模型，预测精度可达95%以上。平台通过引入多目标优化算法，并综

合考虑农业用水、工业用水、生态用水等多方需求，建立了基于帕累托最优的水资源分配模型。调度决策支持系统采用案例推理和规则推理相结合的混合推理制度，能够根据历史调度经验和当前水情快速生成最优调度方案。同时，平台还整合了气象预报数据，通过集合预报方法提高预见期水文预报精度，为科学调度提供决策支持。根据实际应用数据显示，该平台使区域水资源利用效率提升20.5%，农业灌溉保证率提高15.3%，生态基流满足率达到98.2%，实现了水资源的高效配置和科学管理。

Q 结束语

综上所述，闸门启闭机的精准控制是现代水利工程智能化的关键技术。通过电液伺服控制、精密传感技术和智能算法的创新应用，能够显著提升闸门控制精度和引水供水效率。未来研究方向应持续加强创新智能化、低能耗的控制技术，从而推动水利工程向更高水平的数字化、智能化方向发展。

参考文献

[1]张世欣.探析引水工程管道安装技术[J].中华建设,2022(10):153-154.
 [2]张曼丽.城市供水安全存在问题及解决对策分析[J].海河水利,2022(04):16-18.
 [3]白晓云.论供水工程中的环境保护措施[J].陕西水利,2022(11):104-105,108.
 [4]何坤.高原地区水电站引水隧洞施工通风设计[J].水电站设计,2009,25(01):32-34.

作者简介:

吴云飞(1977—),男,汉族,河北沧州人,本科,工程师,滨州市引黄灌溉服务中心,研究方向:水利工程。

马海涛(1979—),男,汉族,山东滨州人,本科,工程师,滨州市引黄灌溉服务中心,研究方向:水利工程。