

数字孪生智能泵站智能模型使用方法及构建方法

夏世飞¹ 乔强² 缪宏伟³

1. 南京市高淳区水务局砖墙水务站, 中国·江苏 南京 211305

2. 睢宁县节约用水办公室, 中国·江苏 徐州 221200

3. 徐州市水利工程建设有限公司, 中国·江苏 徐州 221142

摘要: 一种数字孪生智能泵站智能模型使用方法及构建方法, 涉及泵站管理领域, 解决了泵站运行消耗的能源中存在无端浪费, 造成巨额的能源损失的技术问题。该方法包括: 根据遗传算法和动态规划法在约束条件下对预先构建的多目标优化函数进行求解, 得到最优解; 将最优解输入至数字孪生模型进行仿真计算, 得到预期数据。本方法依托智能算法对耗电、效率、流量、费用多目标进行量化优化, 确保运行参数与目标需求、实时工况精准匹配, 避免参数适配不当导致的能耗浪费或流量不足。

关键词: 数字孪生; 智能泵站; 智能模型; 使用方法; 构建方法

Usage and Construction Methods of Digital Twin Intelligent Pump Station Smart Models

Xia Shifei¹, Qiao Qiang², Miao Hongwei³

1. Zhuanqiang Water Affairs Station, Gaochun District Water Affairs Bureau, Nanjing, China Jiangsu Nanjing 211305

2. Water Conservation Office of Suining County, China Jiangsu Xuzhou 221200

3. Xuzhou Water Conservancy Engineering Co., Ltd., China Jiangsu Xuzhou 221142

Abstract: A method for using and constructing an intelligent model of a digital twin smart pumping station, involving the field of pumping station management, addresses the technical issue of excessive energy waste in pumping station operations, leading to significant energy losses. The method includes: solving a pre-established multi-objective optimization function under constraints using genetic algorithms and dynamic programming to obtain an optimal solution; inputting the optimal solution into the digital twin model for simulation calculations to obtain expected data. This method relies on intelligent algorithms to quantitatively optimize multiple objectives such as power consumption, efficiency, flow rate, and cost, ensuring precise matching of operational parameters with target requirements and real-time working conditions, thereby avoiding energy waste or insufficient flow due to parameter misalignment.

Keywords: Digital twin; Smart pumping station; Intelligent model; Usage method; Construction method

1 背景技术

目前的泵站由于水泵与管路不匹配、水源需求波动大、进水条件不良及电力供应不稳定等难以完全控制的外部或技术限制, 以及运行调度不合理、控制系统落后等因素, 大多数泵站都是低效运行的, 其中一半以上的泵站的装置效率还不到一半, 不少泵站的装置效率只有三分之一。目前缺乏对多目标、多约束、混合变量优化问题的针对性求解设计, 难以平衡全局寻优与局部精准优化的需求。导致目前为止泵站所消耗的能源有一半以上是被浪费的, 泵站的运行付出了高额的成本。

2 技术方案

第一方面, 提供一种数字孪生智能泵站智能模型的构建方法, 包括:

S1: 分别采集蓄水区的三维点云数据以及泵站机组的

静态数据和动态监测数据, 对数据进行清洗、去重、标准化处理后得到建模数据; 其中, 静态数据按设备铭牌参数固化存储, 动态监测数据按预设采集频率(1~5s/次)实时更新;

S2: 基于物理仿真引擎和流体力学模型将泵站机组实体运行的建模数据与数字模型进行虚实映射, 构建可动态仿真泵站运行状态的数字孪生模型;

S3: 获取各区域的目标流量, 并根据目标流量和实时外部水文数据设置调度场景, 为每个调度场景配置对应的多目标优化权重系数; 其中, 所述调度场景包括生活供水场景和应急排涝场景; 所述外部流量包括降雨量、水位、上游来水量;

S4: 构建多目标优化函数和约束条件; 其中, 所述多目标优化函数包括耗电目标函数、效率目标函数、流量目

标函数和费用目标函数；所述约束条件包括：流量约束、功率约束、扬程约束、叶片角度约束、开机台数约束；

需要说明的是，静态数据包括：泵站装机台数 n 、水泵 / 电动机的额定功率 W_m/N_e 、额定流量 Q_{imax} 、叶轮直径、叶轮角度调节范围 $[\theta_{imin}, \theta_{imax}]$ 、电费单价 f 、单泵运维基础费用 R_i 等数据；动态监测数据包括：泵站净扬程 H_j 、单泵实时流量 Q_i 、水泵 / 电动机实时功率 W/N_i 、进出水池水位、水泵运行温度与振动值等；而对于动态监测数据需要根据预设的采集频率进行更新，确保数据的实时性。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述耗电目标函数为：

$$\min N = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho g Q_i H_j}{1000 \eta_i} \right)$$

式中， N 为泵站的总耗能， Q_i 为泵站中第 i 台水泵运行工况点的流量； H_j 为泵站净扬程， η_i 为第 i 台水泵的效率； ρ 为水的密度， n 为泵站总装机台数； g 为重力加速度。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述效率目标函数为：

$$\max \eta_{st} = \frac{\gamma Q H_{st}}{W_m} \times (3.12 W^2 - 6.278 W W_m + 3.994 W_m^2)$$

其中， η_{st} 为泵站装置总效率， γ 为水的容重； H_{st} 为泵站扬程； W 为电动机在当前工况的有效功率； W_m 为电动机额定功率。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述流量目标函数为：

$$\max Q = \sum_{i=1}^m Q_i$$

式中， m 为实际开机台数，且 $m \leq n$ ， Q_i 为第 i 台水泵运行工况的流量。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述费用目标函数为：

$$\min F = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{3600} \left(\frac{\rho g Q_i H_j}{1000 \eta_i} + \frac{R_i}{Q_i} \right) \right]$$

式中， F 为泵站正常运行的总费用； f 为电费单价； η_i 为第 i 台水泵的效率； R_i 为第 i 台水泵单位时间运维费用。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述约束条件包括：流量约束、功率约束、扬程约束、叶片角度约束、开机台数约束；

所述流量约束：

$$Q_z = \sum_{i=1}^n Q_i, \text{ 且 } Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax}$$

其中， Q_z 为泵站总目标流量； Q_i 为泵站中第 i 台水泵的抽水量， Q_{imin} 为第 i 台水泵的最小流量，为第 i 台水

泵的最大流量；

所述功率约束： $N_i \leq N_e$ ；其中， N_i 为第 i 台电动机的功率； N_e 为第 i 台电动机的配套功率；

所述扬程约束： $H_j = H_i + (S_i Q_i)^2$ ；其中， H_j 为第 i 个水泵运行工况点的扬程， H_i 为第 i 台水泵总的水头损失系数；

所述叶片角度约束： $\theta_{imin} \leq \theta_i \leq \theta_{imax}$ ； θ_{imin} 为第 i 个水泵运行工况点的叶片安放角度；第 i 台水泵的最小叶片安装角度；第 i 台水泵的最大叶片安装角度；

所述开机台数约束： $0 \leq Z \leq n$ ； Z 为泵站中水泵的开机总量。

第二方面，提供一种数字孪生智能泵站智能模型的使用方法，包括：

S5：根据遗传算法和动态规划法在约束条件下对多目标优化函数进行求解，得到最优解；其中，所述最优解包括：泵站开机台数、单泵运行时长、叶片角度；

S6：将最优解输入至数字孪生模型进行仿真计算，得到预期数据，若预期数据与调度场景优化目标偏差 $\geq 5\%$ ，则返回 S5 重新求解；其中，预期数据包括总能耗、总效率、总费用和总流量。

结合上述第一方面，在一种可能的实现方式中，所述根据遗传算法和动态规划法对多目标优化函数进行求解，包括：

S51：将泵站开机台数 Z 、单泵运行时长 t_i 和叶片角度 θ_i 进行二进制编码，生成满足约束条件的初始种群；

S52：对多目标优化函数进行归一化处理，并根据调度场景设置的权重系数进行加权求和，以构建适应度函数；

S53：通过自适应交叉概率和变异概率对初始种群中的若干染色体进行选择、交叉、变异操作，直至达到迭代条件后终止，得到初始泵站开机台数、初始叶片角度；

S54：基于初始泵站开机台数和初始叶片角度，将总调度周期 T 划分 k 个阶段，并求解初始运行时长；

S55：重复 S53 和 S54 直至满足收敛条件，输出初始解集合，并从初始解中筛选出满足约束条件解，得到最优解。

3 附图说明

根据遗传算法和动态规划法在约束条件下对预先构建的多目标优化函数进行求解，得到最优解

将最优解输入至数字孪生模型进行仿真计算，得到预期数据；

图1 数字孪生智能泵站智能模型使用方法的流程示意图

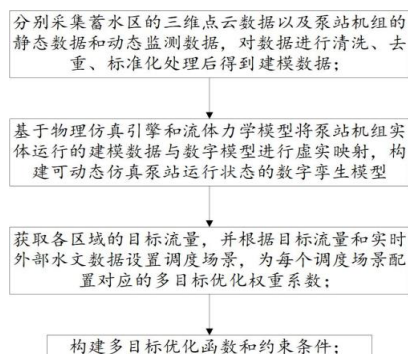


图2 数字孪生智能泵站智能模型构建方法的流程示意图

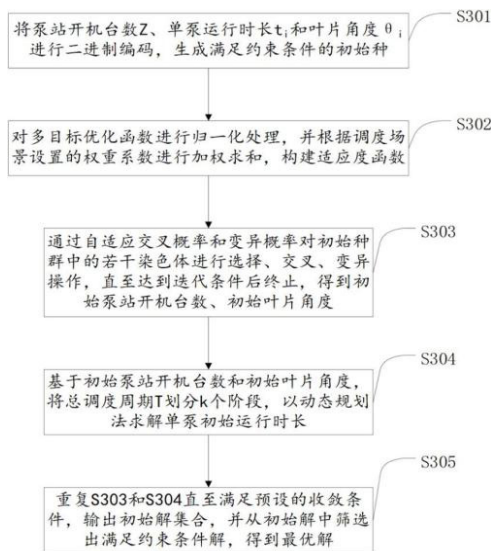


图3 实施例提供的最优解的求解方法示意图

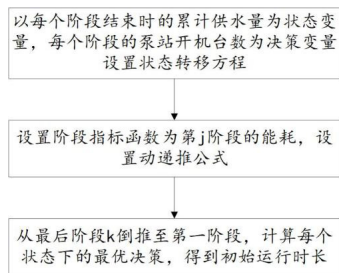


图4 实施例提供的初始运行时长的求解方法示意图

4 有益效果

一种数字孪生智能泵站智能模型使用方法及构建方法,依托智能算法对耗电、效率、流量、费用多目标进行量化优化,确保运行参数与目标需求、实时工况精准匹配,避免参数适配不当导致的能耗浪费或流量不足,并且通过数字孪生模型对最优解进行仿真计算,提前获取总能耗、总效率、总费用、总流量等预期数据,可预判调度方案的可行性与优化效果,避免盲目执行调度导致的设备过载、运行不稳定等问题,并且适配生活供水、应急排涝等多类调度场景,在常规工况下实现能耗与费用最优,在应急工况下保障流量最大化,兼顾泵站运行的经济效益与社会效益。

参考文献:

- [1] 张社荣,张耀飞,王超等.引调水工程泵站群运行管控数字孪生引擎构建方法[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(11):1807-1818.
- [2] 何彬浩,傅志敏,吴巍等.基于改进遗传算法与动态规划的输水泵站日优化调度[J].水电能源科学,2023,41(2):128-132.
- [3] 方国华,曹蓉,刘芹等.改进遗传算法及其在泵站优化运行中的应用[J].南水北调与水利科技,2016,14(2):142-147.
- [4] 郭永灵,张海晨,朱兴林.基于动态规划法的单级泵站日经济运行优化模型[J].中国农村水利水电,2020(1):192-196.
- [5] 谈震.BIM与CFD技术在大型泵站运行管理中联合应用的研究[J].中国农村水利水电,2024(12):137-141.
- [6] 王文杰,彭文杰,裴吉等.基于LabVIEW和Python的水泵数字孪生平台设计[J].灌溉排水学报,2026,45(5):34-41.