

杜梦盈, 王小林, 张召, 等. 基于抽水装置特性曲线校正的泵站优化模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1159-1164.
DU M Y, WANG X L, ZHANG Z, et al. Optimization model of pumping station based on correction of characteristic curve of pumping set[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1159-1164. (in Chinese)

基于抽水装置特性曲线校正的泵站优化模型

杜梦盈^{1,3}, 王小林^{2,3}, 张召³, 廖卫红³, 闫静¹

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要:受运行时长、安装位置等多种因素影响, 水泵装置理论特性曲线难以准确描述实际抽水装置的运行特性, 导致通过以其为基础所构建的泵站优化模型计算得到的运行方案偏离实际。基于水泵理论曲线提出数据和机理双重驱动的参数辨识方法校正水泵装置特性曲线, 通过对实测数据进行多项式拟合校正装置效率曲线, 以实测数据诱导转速理论曲线整体平移可实现装置转速曲线的校正。以南水北调东线工程的泗洪泵站为例, 构建考虑机组差异特性的泵站优化模型。结果表明: 经过校正, 效率曲线与实测数据的符合程度从校正前的 0.60 提升至 0.99, 转速曲线与实际的平均绝对误差比较正前降低了 0.23 r/min; 基于装置特性曲线校正的差异特性站内优化分配方案更加贴近实际运行情况, 相比历史运行方案平均降低 10.1% 的能耗, 可实现泵站高效运行与调度目标的精细控制。利用实际运行数据对泵组装置特性曲线进行校正可有效加强泵站优化分配方案对实际调度的指导作用。

关键词:抽水装置; 曲线校正; 泵站优化; 节能运行; 差异特性

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0114

泵站系统在运行过程中消耗大量电能^[1-3], 因此如何通过优化调度实现泵站的节能运行是当下研究热点之一。众多学者针对泵站优化问题进行了探索和研究, 经常以最小能耗^[4-6]、效率最高^[7-8]、运行费用最低^[9]作为优化模型的目标函数。李智等^[10]针对西台上泵站建立了流量优化分配模型并采用动态规划法进行求解; 郭昕等^[11]针对定速泵和调速泵的联合运行问题, 以总功率最小为目标函数, 改善了原泵站由于机组组合不合理导致效率低下的问题; Feng 等^[12]针对明渠系统中的并联泵站的优化分配问题展开了研究, 并分析了水源水位对流量分配效果的影响。算法求解方面, 数学规划类的动态规划^[13]、整数规划算法^[14]、通用性较强的遗传算法^[15]、粒子群算法^[16]被广泛应用于泵站优化问题的求解。此外还有部分学者为提高模型的收敛速度, 以及避免求解复杂问题时出现维数灾问题, 提出了很多混合优化算法, 例如, 扩展动态规划算法 (extended dynamic programming algorithm)^[17]、蚁群优化算法

(ant colony optimization algorithm) 和单纯形法 (simplex method) 的混合计算方法^[18]等。

上述针对泵站节能优化的研究大多通过计算水泵装置的运行效率和功率等参数进一步评估泵站的运行能耗, 通常以水泵原始曲线为基础, 综合考虑电机效率、传动损耗等影响因素, 确定不同扬程、流量组合下的装置效率。设备本身会随着运行时间的增加逐渐老化, 以及受到运行过程中发生的气蚀磨损等因素的影响, 抽水装置的实际特性曲线也会因为使用周期与运行状况等原因与理论特性曲线产生不同程度的偏移^[19], 导致通过优化模型计算得到的方案对实际调度的指导作用大打折扣。针对上述问题, 吴昊等^[20]根据实测效能数据, 基于最小二乘法原理, 拟合泵站在不同叶片角度下流量-扬程和效率-扬程的三次关系式, 并调用泵站效能曲线的数学表达式进行离散工况点的插值计算; 朱驾宇^[21]采取实数编码的自适应遗传算法以及人工神经网络对水泵运行实际工况数据进行泛化, 实现水泵特

收稿日期: 2023-09-15 修回日期: 2023-10-26 网络出版时间: 2023-11-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231127.1741.016>

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52209046)

作者简介: 杜梦盈(1999—), 女, 河南开封人, 主要从事泵站运行调度研究。E-mail: 3468147371@qq.com

通信作者: 张召(1992—), 男, 河北辛集人, 高级工程师, 博士, 主要从事计算水力学与数值模拟研究。E-mail: zhangzhao@iwhr.com

性曲线的校验及更新。但截至目前,国内外对于泵站曲线的校正大多集中在水泵装置^[22-27],很少有针对泵站抽水装置特性曲线校正的系统研究。

因此,本文在现有研究的基础上,根据泵站实际运行数据,结合水泵装置到抽水装置的转化过程,对抽水装置效能曲线进行更新校正,并以此为基础通过优化算法进行站内流量优化分配方案的求取。

1 基于抽水装置特性曲线校正的泵站优化模型

1.1 抽水装置特性曲线校正

1.1.1 抽水装置流量-扬程-效率曲线校正

通常抽水装置效率需在水泵装置效率基础上,考虑电机效率、传动效率及变频效率,表达式为

$$\eta_{\text{set}} = \eta_{\text{pump}} \eta_{\text{trans}} \eta_{\text{motor}} \eta_{\text{f}} \quad (1)$$

式中: η_{set} 为抽水装置效率; η_{pump} 为水泵装置效率; η_{trans} 为传动装置效率(电机和水泵齿轮减速箱传动的情况下取“0.98”); η_{motor} 为电机效率; η_{f} 为变频效率(叶片安放角调节取“1”变速调节取“0.96”)。

基于长序列历史监测水情、工情监测数据,对“流量、扬程、抽水装置效率”等数据直接拟合,得到新的“流量-扬程-抽水装置效率”的关系表达式。多项式拟合是用一个多项式函数去近似表示输入和输出关系的一种线性模型。其目标是找到多项式的系数,使得多项式的损失函数(用平方误差和作为损失函数)最小,其数学表达式为

$$y(x, w) = \sum_{j=0}^M w_j x^j \quad (2)$$

式中: M 为多项式的阶数; x^j 为 x 的 j 次幂; w_j 为多项式系数。

受工程实际影响,抽水装置常在设计工况附近运行,参与校正的监测工况点较为集中。因此,本文基于历史数据进行抽水装置效率的拟合,对历史运行区域内的工况点具有较强指导意义,但不影响历史未运行区域内的工况点的效率值。

1.1.2 抽水装置流量-扬程-转速曲线校正

对于抽水装置转速曲线的校正,国内外相关研究较少。对比水泵装置特性曲线,抽水装置特性曲线中转速特性并未发生改变,因而一般常采用水泵装置特性曲线中的流量-扬程-转速相关关系作为抽水装置特性曲线中的流量-扬程-转速关系。

本文提出数据与机理双重驱动的参数辨识方法,考虑到运行工况点的转速变化不大,数据点相对集

中,可利用水泵的相似转换原理将流量、扬程、转速转化为特定转速下的相似点,为后续校正提供充分的数据基础。

水泵装置在 n 和 n_1 转速下的相似点 $A(Q, H, \eta, n)$ 和 $A_1(Q_1, H_1, \eta_1, n_1)$ 的流量、扬程和效率关系如式(3)所示。按相似转化原理可将工况上的监测样本 $A(Q, H, \eta, n)$ 转化为规定转速下的有效样本 $A_1(Q_1, H_1, \eta_1, n_1)$,以转换后的实测数据诱导水泵装置转速特性曲线整体调整,在精度满足要求的同时,规避了小样本存在的过拟合问题。

$$\begin{cases} \frac{\eta}{\eta_1} = 1 \\ \frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1} \\ \frac{H}{H_1} = \frac{n^2}{n_1^2} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 考虑机组差异特性的泵站优化模型

由于各机组安装位置和运行时长的不同,校正后的各机组特性之间往往存在着一定差异,为进一步增强模型通用性,在构建泵站流量优化分配模型时考虑机组间的差异特性。

1.2.1 目标函数

泵站装置效率为抽水装置输出功率与输入功率的比值,是反映泵站运行的技术经济性指标。由于明渠工程水泵装置的进出水流道产生的水力损失较小,为简化模型将其忽略不计,因此泵装置工作扬程为进水池出水池水位差。目标函数为

$$\max \eta_{\text{st}} = \frac{\rho g Q H_{\text{sy}}}{\sum_{i=1}^n \rho g Q_i H_r} \quad (4)$$

式中: H_{sy} 为平均装置扬程, m; H_r 为单台机组的需要扬程,在本文中均认为是装置的静扬程, m; Q_i 为单台机组的分配流量, m^3/s ; η_i 为其对应的装置效率。

1.2.2 决策变量

由于校正后的水泵装置特性曲线之间存在差异,故以站内各水泵机组的运行流量 Q_i 和开关机状态 S_i ,共同作为决策变量。

1.2.3 约束条件

流量约束分为单机流量约束和总流量约束,表达式为

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i S_i = Q \quad (6)$$

转速约束,表达式为

$$N_{\min} \leq N_i \leq N_{\max} \quad (7)$$

1.2.4 模型求解

采用通用性较强的粒子群优化算法进行问题求解,随机生成满足问题决策变量边界的种群粒子的初始值和初始化粒子群速度,再根据适应度函数计算适应度的值,记录历史最优和全局最优,并更新粒子的速度和位置重新计算下一代的适应度函数值,引导下一代粒子沿着更优的方向进行搜寻,直至找寻到最优解。

2 实例分析

2.1 研究区域概况

泗洪泵站是南水北调东线一期工程的第4级抽水泵站,主要任务是抽调洪泽湖水入徐洪河,与睢宁泵站和邳州泵站共同通过徐洪河向骆马湖输水,输水流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泗洪泵站设计流量为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$,单机流量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,通过调节转速控制水泵的输水流量;设计扬程 3.73 m ,但常低于设计扬程(2.5 m 以下)运行;年运行时长可达 5000 h ,每年有 210 d 运行抽水。长时间低扬程运行易导致水泵产生汽蚀,泗洪泵站水泵机组运行特性曲线发生偏移,以理论曲线为基础的运行方案往往不能有效指导实际调度。泗洪泵站机组原型特性曲线见图1,图1中的 N 代表额定转速,本研究区中,泗洪泵站的额定转速为 107.1 r/min 。

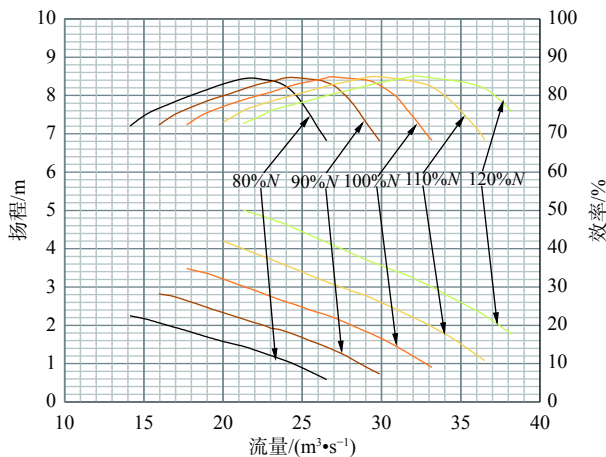


图1 泗洪泵站机组原型特性曲线

Fig. 1 Prototype characteristic curve of pumping station unit

2.2 曲线校正效果

基于泗洪泵站相关基础资料以及2022年的运行数据,提取筛选可用工况点信息,将其随机打乱并按照80%和20%的比例划分率定集和验证集,分别对流量-扬程-效率和流量-扬程-转速曲线进行

校正。

经过水泵装置特性曲线提取得到的水泵装置流量-扬程-效率关系为

$$\eta_{\text{pump}}(Q, H) = 38.89 + 4.49Q - 2.542H - 0.1849Q^2 + 1.135QH - 5.781H^2 + 0.001587Q^3 + 0.001928Q^2H - 0.1418QH^2 + 0.9292H^3 \quad (8)$$

校正前由水泵装置转换得到的泵站抽水装置流量-扬程-效率关系为

$$\eta_{\text{set}}(Q, H) = 30.17 + 3.412Q - 2.534H - 0.1407Q^2 + 1.078QH - 4.246H^2 + 0.001205Q^3 - 0.00006803Q^2H - 0.1255QH^2 + 0.6972H^3 \quad (9)$$

校正后由历史数据直接拟合得到的泵站抽水装置流量-扬程-效率关系为

$$\eta_{\text{set}}(Q, H) = -11.48 + 0.5535Q + 113.2H + 0.009746Q^2 - 1.101QH - 42.87H^2 - 0.0003957Q^3 + 0.01522Q^2H + 0.08016QH^2 + 5.57H^3 \quad (10)$$

由表1可知,校正前的流量-扬程-效率曲线决定系数 R^2 仅为0.60,已不能满足计算精度要求。对实际运行数据进行多项式拟合校正后的效率曲线决定系数 R^2 约为0.99,验证集均方根误差(RMSE)由0.44%下降至0.10%,平均绝对误差(MAE)从4.64%下降至0.30%。

表1 泗洪站流量-扬程-效率关系拟合结果

Tab. 1 Fitting results of flow-head-efficiency relationship of Sihong station

评价指标	校正前		校正后	
	训练集	验证集	训练集	验证集
R^2	0.60	0.60	1.00	1.00
RMSE/%	0.32	0.19	0.10	0.10
MAE/%	4.70	4.64	0.30	0.30

校正前由水泵装置特性曲线提取得到的水泵装置流量-扬程-转速关系为

$$n(Q, H) = 23.53 + 1.498Q + 21.02H + 0.0194Q^2 - 0.2343QH - 0.6133H^2 \quad (11)$$

校正后由水泵装置特性曲线整体调整得到的水泵装置流量-扬程-转速关系如下:

$$n(Q, H) = 24.24 + 1.498Q + 21.02H + 0.0194Q^2 - 0.2343QH - 0.6133H^2 \quad (12)$$

经过实测数据诱导理论曲线进行调整,在保留原始曲线特性的同时提升拟合精度,结果见表2。校正前后抽水装置流量-扬程-转速曲线的决定系数

R^2 均达到 0.99, 说明校正前转速曲线的误差不大, 与实测数据的符合程度较好。通过实测数据诱导理论曲线进行整体调整, 校正后, 验证集的 RMSE 基本不变, MAE 相比校正前降低了 0.23 r/min。

表 2 泗洪站流量-扬程-转速关系拟合结果

Tab. 2 Fitting results of flow-head-speed relationship of Sihong station

评价指标	校正前		校正后	
	训练集	验证集	训练集	验证集
R^2	0.99	0.99	0.99	0.99
RMSE/(r·min ⁻¹)	0.10	0.17	0.10	0.17
MAE/(r·min ⁻¹)	0.89	0.91	0.67	0.68

2.3 泵站优化分配方案分析

选取 2022 年的部分历史运行工况进行泵站优化分配方案的求取, 并将特性曲线校正前后的流量优化分配方案进行对比, 见表 3。由于泗洪站各机组之间差异特性并不明显, 故最优分配结果仍为等流量分配。在某些实际可运行的工况, 由于实际运行特性的偏移, 通过理论曲线无法求取可运行方案, 通过曲线校正可有效避免上述问题的发生。由于实际的装置特性曲线向下偏移, 通过原始曲线计算得到的方案装置效率普遍偏高, 通过校正后曲线再进行泵站优化分配方案的求取可使得方案更加贴合实际的运行效果。相比于历史运行方案, 基于抽水装置特性曲线校正的泵站优化方案更加节能, 平均减少了 10.1% 的能耗。

表 3 曲线校正前后优化运行方案对比

Tab. 3 Comparison of optimized operation schemes before and after curve correction

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	扬程/m	实际装置运行效率/%	理论曲线方案运行效率/%	校正曲线方案运行效率/%
45.9	0.90	53.15	无	58.75
57.3	1.28	65.24	69.91	68.93
91.5	1.25	61.73	71.14	68.18
72.7	1.16	64.02	70.28	66.45
62.3	2.16	71.74	77.09	75.40
106.1	0.60	44.11	49.58	46.08
104.3	0.95	58.24	66.97	60.63
119.0	1.03	59.27	65.56	63.06

3 结论

考虑实际运行中泵站抽水装置特性曲线发生偏

移现象, 基于实际运行数据进行装置效率和转速曲线的校正, 并根据校正结果构建考虑机组间差异的泵站优化模型。以南水北调东线泗洪站为例, 结果表明:

在效率曲线校正方面, 随着时间推移, 泗洪泵站抽水装置流量-扬程-效率较出厂特性曲线发生明显偏移, 决定系数 R^2 约为 0.60, 使用校正前的特性曲线已不能很好地满足计算精度要求; 多项式拟合校正后的效率曲线能够更好地计算效率值, 决定系数 R^2 达到 0.99, 校正后平均绝对误差为 0.30%, 较校正前下降 4.34%;

在转速曲线校正方面, 随着时间推移, 转速曲线因不考虑电机、传动损失影响仍能较好地满足计算精度要求, 校正前后转速曲线变化不大, 仅在垂直方向上向上平移 0.71 r/min, 说明满足同等流量、扬程提水要求需要的转速较出厂设置的略微大一些。

基于装置特性曲线校正下的差异特性站内优化分配方案更加贴近实际运行情况, 相比于历史运行方案平均降低 10.1% 的能耗。利用实际运行数据对泵组装置特性曲线进行校正可有效加强泵站优化分配方案对实际调度的指导作用。

参考文献:

- [1] ARUN SHANKAR V K, UMASHANKAR S, PARAMASIVAM S, et al. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system[J]. *Applied Energy*, 2016, 181: 495-513. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.070.
- [2] SAIDUR R. A review on electrical motors energy use and energy savings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 877-898. DOI: 10.1016/j.rser.2009.10.018.
- [3] ZHANG L, ZHUAN X T. Optimization on the VFDs' operation for pump units[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(1): 355-368. DOI: 10.1007/s11269-018-2106-2.
- [4] CÓRCOLES J I, TARJUELO J M, MORENO M A. Methodology to improve pumping station management of on-demand irrigation networks[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 144: 94-104. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.02.002.
- [5] OLSZEWSKI P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 527-539. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.084.
- [6] SORIN P, LIVIU VALER H. Reducing energy consumption by upgrading pumping stations in water distribution systems[J]. *Environmental Engineering and*

- Management Journal, 2013, 12(4): 735-740. DOI: 10.30638/eemj.2013.090.
- [7] SANG G Q, CAO S L, GUO R, et al. Optimization of cost per day of cascade pumping station water-delivery system[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(8): 688-695. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.2013.08.008.
- [8] LÓPEZ-IBÁÑEZ M, PRASAD T D, et al. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2008, 134(4): 337-346. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(337).
- [9] CHENG X, LI G Y, CHENG C T, et al. Modeling method of operation rules on cascade hydroelectric plants with hybrid pumped storage power station[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44: 388-397.
- [10] 李智, 刘波波, 王新民, 等. 单级泵站不同机组流量分配的优化研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 691-694, 707.
- [11] 郭昕, 贾敏智, 徐晨晨. 泵站群控系统的节能优化调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 160-164.
- [12] FENG X L, QIU B Y, WANG Y X. Optimizing parallel pumping station operations in an open-channel water transfer system using an efficient hybrid algorithm[J]. *Energies*, 2020, 13(18): 4626. DOI: 10.3390/en13184626.
- [13] ZHENG H, ZHANG Z, WU H, et al. Study on the daily optimized dispatching and economic operation of cascade pumping stations in water conveyance system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47: 1558-1565. DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20151350.
- [14] NAOUM-SAWAYA J, GHADDAR B, ARANDIA E, et al. Simulation-optimization approaches for water pump scheduling and pipe replacement problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(1): 293-306. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.028.
- [15] SADATIYAN ABKENAR S M, STANLEY S D, MILLER C J, et al. Evaluation of genetic algorithms using discrete and continuous methods for pump optimization of water distribution systems[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2015, 8: 18-23. DOI: 10.1016/j.suscom.2014.09.003.
- [16] TANG Y L, ZHENG G L, ZHANG S R. Optimal control approaches of pumping stations to achieve energy efficiency and load shifting[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 55: 572-580. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.10.023.
- [17] ZHUAN X T, XIA X H. Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps[J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 250-257. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.028.
- [18] ZHANG H R, LIANG Y T, LIAO Q, et al. A hybrid computational approach for detailed scheduling of products in a pipeline with multiple pump stations[J]. *Energy*, 2017, 119: 612-628. DOI: 10.1016/j.energy.2016.11.027.
- [19] 桑国庆, 张林, 董庆杰, 等. 叶片全调节泵站抽水装置性能计算[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 14-17, 65.
- [20] 吴昊, 周志华, 高英, 等. 基于水动力模型和遗传算法的梯级泵站优化调度研究[J]. *海河水利*, 2014(4): 46-49. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2014.04.017.
- [21] 朱驾宇. 基于水泵特性曲线校验的供水泵站优化调度研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [22] ZHANG B W, CHENG L, XU C L, et al. The influence of geometric parameters of pump installation on the hydraulic performance of a prefabricated pumping station[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1039. DOI: 10.3390/en14041039.
- [23] 龙新平, 朱劲木, 刘梅清, 等. 基于性能曲面拟合的泵站优化调度分析[J]. *水利学报*, 2004(11): 27-32.
- [24] 李琳. 基于遗传算法的泵站系统优化调度研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [25] 张林, 徐辉, 于永海. 基于最优节点样条逼近的水泵特性曲线拟合方法[J]. *水力发电学报*, 2008(2): 141-144. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2008.02.027.
- [26] 汤跃, 肖妹, 汤玲迪. 泵性能测试曲线分段最小二乘多项式拟合算法[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(9): 744-748.
- [27] 杜卓, 吴建华, 张少华, 等. 非线性最小二乘法在离心泵特性曲线拟合的应用[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(3): 152-154.

Optimization model of pumping station based on correction of characteristic curve of pumping set

DU Mengying^{1,3}, WANG Xiaolin^{2,3}, ZHANG Zhao³, LIAO Weihong³, YAN Jing¹

(1. Fluid Machinery Engineering Technology Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Pumping station equipment will gradually age with the increase of operating time, and the different

operating time and installation position of each unit in a pumping station will lead to the difference in the degree of wear of each unit. Therefore, the operating characteristics of different pumping station units may have different degrees of deviation compared with the theoretical curve, which leads to the deviation of the operation scheme calculated by the optimization model of pumping station based on the theoretical curve.

Based on the theoretical curve of the pump, the data and mechanism driven parameter identification methods were used to correct the characteristic curve of pumping station unit. The wear of the unit directly affects the operation efficiency of the pump. The efficiency curve of the unit is corrected by polynomial fitting of the measured data. For the correction of the theoretical curve of speed, because the speed of the operating condition points does not change much and the data points are relatively concentrated, the actual working condition can be converted into the operating parameters under different speeds in proportion, and the overall translation of the theoretical curve of speed can be further induced to achieve the correction of the speed curve. On the basis of the corrected results, considering the possible differences between the characteristic curves of each unit, the optimization model of the pumping station considering the difference characteristics of the unit is established. The maximum total operating efficiency of the pumping station is taken as the objective function to satisfy the flow constraint of a single unit, the total flow constraint and the rotation speed factor. The general particle swarm optimization algorithm is used to solve the model. The flow distribution results of each unit are more suitable for the actual output, so as to realize the fine control of the efficient operation and scheduling objectives of the pumping station.

Taking Sihong Pumping Station of the East Route of South-to-North Water Transfer Project as an example, after sifting and sorting out the historical operation data, the curve correction and the comparison between the historical scheme and the optimized scheme are carried out. The results show that, compared with the theoretical curve, the deviation of the actual efficiency curve of the pumping device is large, and the characteristic curve before using the correction can not meet the requirement of calculation accuracy. Since the operation time of each unit in Sihong Pumping Station is more balanced, the difference between each unit is not obvious, and the coincidence degree between the modified efficiency curve and the measured data is increased from 0.6 before the correction to 0.99. However, because the cavitation generated by the pump itself will not affect the functional relationship between the unit speed and flow head, the deviation of the actual pumping device speed curve is very small, the consistency between the theoretical speed curve and the measured data reaches 0.99, the average absolute error of the corrected speed curve is 0.23 r/min less than the actual error before the correction. By comparing the historical operation scheme and the optimization scheme without curve correction, it can be found that the optimal distribution scheme based on the equipment characteristic curve correction is closer to the actual operating condition, avoids the flow distribution error compared with the actual operating condition, and effectively improves the problem of high efficiency of the optimized operation scheme based on the theoretical curve calculation. Compared with the historical operation scheme, the average energy consumption of the operation scheme calculated by the optimization model constructed is reduced by 10.1%.

To sum up, using the actual operation data to correct the characteristic curve of the pump unit regularly can effectively strengthen the guiding role of the optimal distribution scheme of the pumping station to the actual dispatching.

Key words: pumping set; curve correction; pumping station optimization; energy-saving operation; unit differential characteristic