

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221667

基于 IWOA 算法求解含调压井水轮机调速系统控制参数的优化分析

杨金东¹, 李 洋², 邹屹东³

(1. 南方电网云南电力科学研究院, 云南 昆明 650000; 2. 云南电力技术公司, 云南 昆明 650000;
3. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为了提高含调压井水轮机调速系统的控制性能, 提出一种基于改进鲸鱼优化算法(IWOA)的控制参数优化方法。首先建立含调压井水轮机调速系统的数学模型, 即利用连续性方程和管道传递函数建立包含调压井动态的水轮机进口水头—流量传递函数, 然后与水轮机调速模型一起构成含调压井的水轮机调速系统模型。以该系统中水轮机的转速偏差时间积分值作为优化过程的适应度值, 并以该适应度最小化为目标, 采用 IWOA 对研究对象的 PID 控制器参数进行优化。在 Matlab 平台对研究对象常见运行工况进行仿真, 结果表明 IWOA 算法具有收敛速度快、精度高等优点, 寻优操作后的 PID 控制器使研究对象面对各类型扰动具有更好的调节及鲁棒性能。

关键词: IWOA 算法; 调压井; 水轮机调速系统; 控制参数; 优化

中图分类号: TV734.4; TM622

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0188-04

1 引言

水电能源是可再生能源中最主要的组成部分, 随着水电事业的发展, 水电能源生产过程中的主要设备水轮机调节系统, 其安全性和稳定性面临着诸多挑战^[1]。针对调速器控制优化, 大致分为两类, 一类是对 PID 参数进行优化^[2-4]; 另一类则是对 PID 控制器结构进行设计优化, 如吴道平等^[5]在调节系统的 PID 控制的基础上提出了改进滑模控制策略, 并证明了其有效性和先进性。但已有研究的控制策略大多停留在控制理论研究的层面, 与工程实践应用尚存在较大距离。所以在常规水轮机调节系统 PID 控制基础上对其参数进行优化具有更大的工程应用价值。此外, 在某类型水电站中通常设立调压井来确保暂态过程中管道压力变化在设计范围内, 并确保电站的安全稳定运行。因此, 进行含调压井水轮机调节系统控制优化对水电站安全稳定运行具有积极意义^[6,7]。本文以含调压井的水轮机调速系统为研究对象, 采用改进 WOA 算法进行含调压井动态特性的水轮机调速系统的 PID 控制器的参数优

选, 确定出最优的 PID 控制器参数, 再通过仿真试验验证了所提方法的先进性。

2 含调压井的水轮机调速系统建模

图 1 为含调压井水轮机调节系统示意图。对

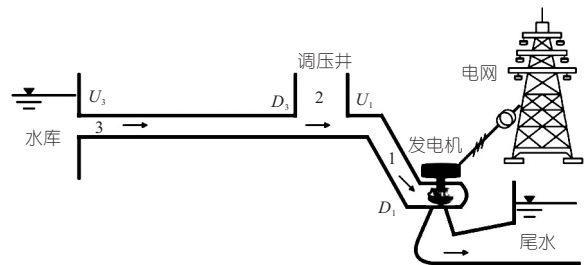


图 1 含调压井水轮机调节系统示意图

Fig. 1 Diagram of turbine regulation system with surge tank

图 1 带有调压井的水力系统, 在建模过程中略去调压井入口处的摩擦阻尼, 则筒式调压井动态特性可描述为:

$$\Delta H = \frac{1}{A_j} \int \Delta Q dt \quad (1)$$

式中, ΔH 为调压井内水位的变化; ΔQ 为进出调压井的流量; A_j 为调压井的截面面积。

以额定水头 H_r 与额定流量 Q_r 为基准值, 对

收稿日期: 2022-08-12, 修回日期: 2022-10-14

基金项目: 南方电网科技项目(YNKJXM20191234)

作者简介: 杨金东(1984-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为智能配电网运行与控制, E-mail: 1440771598@qq.com

通讯作者: 李洋(1987-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水电站智能优化与控制, E-mail: 339256858@qq.com

式(1)取相对值后有:

$$q = T_j dh/dt \tag{2}$$

其中 $T_j = Q_r/(H_r A_j)$
式中, T_j 为时间常数。

图 1 中 2 处调压井的水头 H 变化与流量 Q 变化之间的传递函数可描述为:

$$G(s) = H_2(s)/Q_2(s) = 1/(T_j s) \tag{3}$$

式中, s 为拉普拉斯算子。

根据文献[7],从调压井到水轮机蜗壳进口处管道的水力联系为:

$$\begin{bmatrix} H_{D1} \\ Q_{D1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(0.5T_{r1}s) & -2h_{w1}\text{sh}(0.5T_{r1}s) \\ \frac{-\text{sh}(0.5T_{r1}s)}{2h_{w1}} & \text{ch}(0.5T_{r1}s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{U1} \\ Q_{U1} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, $\text{ch}(\cdot)$ 、 $\text{sh}(\cdot)$ 分别为双曲余弦、正弦; h_{w1} 为 #1 管道特征系数; T_{r1} 为 #1 水击波传播时间。

调压井管道中 U_3 处接上游水库,则:

$$H_{D3} = -Q_{U3} z_{c3} \text{sh}(r_3 l_3) \tag{5}$$

$$Q_{D3} = Q_{U3} \text{ch}(r_3 l_3) \tag{6}$$

其中 $z_{c3} = 2h_{w3} + \frac{h'_{f3} a}{s}$; $r_3 = \frac{1}{a} s + \frac{h'_{f3}}{2h_{w3}}$

式中, a 为水击波速; h_{w3} 为 #3 管道特征系数; h'_{f3} 为 #3 管道沿程损失系数; l_3 为 #3 管道长度。

在调压井处流量与水头动态关系可描述为:

$$Q_{D3} = Q_2 + Q_{U1} \tag{7}$$

$$H_{D3} = H_2 = H_{U1} \tag{8}$$

由此可得 U_1 处的流量动态关系为:

$$Q_{U1} = Q_{D3} - Q_2 = Q_{D3} - T_j s H_{D3} \tag{9}$$

由式(4)、(5)、(9)可求出水轮机蜗壳进口处的水力动态关系传递函数,在 $0.5T_{r1}s$ 、 $r_3 l_3$ 均远小于 1, T_j 比引水管道 1 处的 T_{w1} 大得多的情况下该传递函数可化简为:

$$G_{D1} = \frac{-(T_{w3}s + h_{f3})}{1 + T_j s (T_{w3}s + h_{f3})} - T_{w1}s \tag{10}$$

式中, T_{w1} 为水库到调压井段引水管道的的水流惯性时间常数; T_{w3} 为从调压井到水轮机进口段管道的时间常数。

式(10)为计及调压井的水轮机进口断面流量与压力传递函数。考虑水力系统水轮机刚性水击作用,其传递函数可描述为:

$$G_t(s) = \frac{e_y - (e_{qy}e_h - e_{qh}e_y)G_{D1}(s)}{1 + e_{qh}G_{D1}(s)} \tag{11}$$

式中, e_y 、 e_h 分别为水轮机主动力矩与其导叶开度之间、水轮机力矩之间的传递系数; e_{qy} 、 e_{qh} 分

别为水轮机流量与其导叶开度之间、水头之间的传递系数。

研究对象中的接力器模型用一阶惯性的传递函数数学模型表示:

$$G_g(s) = 1/(T_y s + 1) \tag{12}$$

式中, T_y 为水轮发电机接力器时间常数。

研究对象中的发电机模型采用发电机负荷动态方程的传递函数形式,其表达式为:

$$G_a(s) = 1/(T_a s + e_n) \tag{13}$$

综合以上水力系统、接力器及发电机数学模型,可得出研究对象含调压井水轮机调速系统的被控系统框图(图 2)。其中 m_g 为介入系统中的负荷扰动, u 为 PID 控制器输出的控制信号, y 为接力器位移; T_a 为发电机时间常数, e_g 为负荷自调节系数。

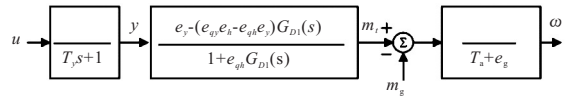


图 2 水轮机调节系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram for turbine regulation system

3 基于 IWOA 的调速系统 PID 参数优化

根据文献[8],研究对象中的 PID 控制器形式为:

$$G_c(s) = K_P + K_I/s + K_D s/(T_n s + 1) \tag{14}$$

由式(14)可知, PID 控制器的性能取决于 K_P 、 K_I 、 K_D 、 T_n 这四个参数是否合理,因此对 PID 控制器的参数进行优化具有重要意义。采用改进鲸鱼优化算法(IWOA)来改进 PID 控制器参数的优化选取设计。在选择 K_P 、 K_I 、 K_D 、 T_n 过程中,需要在时域中适当调整控制器并评估其性能,从而找到一组合适的 PID 参数,对 PID 参数优化过的适应度值的求取采用 ITAE 指标,即积分绝对误差 IAE 定义为误差绝对值的积分,其数学表达式为:

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \tag{15}$$

式中, $e(t)$ 为控制误差。

优化过程为鲸群位置的值依次赋给 PID 控制器的参数 K_P 、 K_I 、 K_D 、 T_n ,然后运行相应水轮机调节系统的 Simulink 模型并输出 ITAE 指标,以 ITAE 指标作为该组鲸鱼位置参数对应的性能指标。该性能指标传递到 WOA 中并作为算法执行相关 bubble-net 的捕食策略,最后判断是否满足迭代次数来退出算法优化。该 WOA 算法中,每只鲸鱼的位置表示一个可行解。同时,每只鲸鱼都有 bubble-net 捕食策略,通过该捕食策略来

完成最优位置也就是最优解的搜索。

WOA 的基本方法具有较高的搜索随机依赖性、收敛精度低和收敛时间过长等缺点。为此,本文对基本 WOA 算法进行改进,主要的改进如下。

(1)改进 1。采用反向学习算法对鲸鱼的种群初始位置进行设定,这能够提高初始种群位置的质量,从而提高算法在迭代前期的效率和精度。在此基础上,给出了一个基于逆向学习的群体定位初始化的程序,该过程表述见图 3。图 3 中的 S_N 表示鲸鱼种群数量, D 表示可解的维度数, $x_{\max,j}$ 、 $x_{\min,j}$ 分别为鲸鱼种群 x_i 第 j 维元素的最大、最小值。

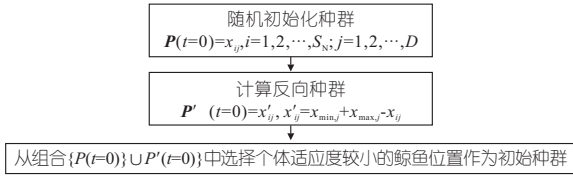


图 3 基于反向学习算法的种群初始化过程

Fig. 3 Population initialisation process based on a backward learning algorithm

(2)优化 2。对惯性权重表达式进行优化,使其能够快速收敛到全局最优解。增强的权重表达式为:

$$\omega = \omega' - (\omega' - \omega'') (t/T_{\max})^{1/t} \quad (16)$$

式中, ω' 为最大惯性权重; ω'' 为最小惯性权重。

改进后的鲸鱼位置矢量公式为:

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \omega \mathbf{X}^*(t) - A\mathbf{D} & p < P_i \\ \omega \mathbf{X}^*(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l) & p \geq P_i \end{cases} \quad (17)$$

其中 $\mathbf{D} = |\mathbf{CX}^*(t) - \mathbf{X}(t)|$; $l = \text{rand}(-1, 1)$

式中, $\mathbf{X}^*(t)$ 为最优的鲸鱼的定位矢量; A 、 C 均为系数; D_p 为鲸到捕食者的间距; b 为恒量,限定了螺旋线的外形; P_i 为一个选择了收缩的环绕机理。

由式(17)可看出,当迭代数增大, ω 值降低时,该方法的早期迭代更有利于整体的查找。较小的 ω 值则使迭代后期在算法局部寻优具有较大优势。引入的 ω 下降幅度很大,也使算法的收敛精度及收敛速度得到提高。图 4 为使用改进的鲸鱼算法(IWOA)优化研究对象的 PID 控制参数的流程图。

4 仿真验证

4.1 参数优化结果

基于 Matlab/Simulink 仿真环境,搭建含调

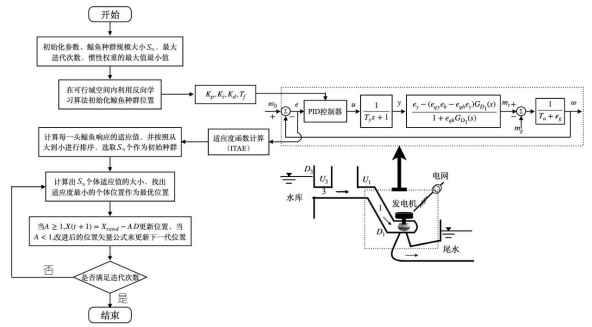


图 4 IWOA 算法优化流程图

Fig. 4 IWOA algorithm optimisation flow chart

压井的刚性水击混流式调节系统模型,在此基础上进行 IWOA 算法的寻优操作及仿真对比试验。相关的仿真参数为 $T_{w1} = 0.3s$ 、 $T_{w3} = 1s$ 、 $e = 1$ 、 $e_y = 1$ 、 $e_{qh} = 0.5$ 、 $T_j = 101s$ 、 $T_y = 0.1$ 、 $T_a = 5$ 。

IWOA 算法参数中取 S_N 为 40,迭代次数 G 为 50, P_i 为 0.5, ω' 、 ω'' 分别为 0.9、0.4。在开机工况下,设置调节系统的目标转速为 1 p.u,以水轮机转速偏差的 IAE 值最小化作为算法的优化目标。设置迭代次数 G 为 50 次。图 5 为鲸鱼优化算法在改进前后迭代过程的对比。由图 5 可知,经过 50 次迭代计算,IWOA 算法约在第 10 次接近收敛,未改进的 WOA 算法陷入了局部最优。这说明 IWOA 算法具有较高的工作效率及较精确的计算结果。

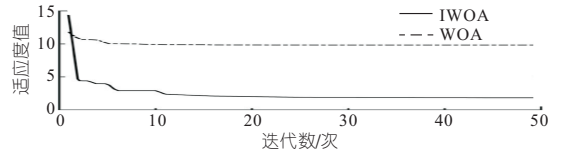


图 5 开机工况优化下的不同算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves for different algorithms under start-up optimization

经过 IWOA 算法优化计算后得到的研究对象的最优 PID 控制参数为 $K_p = 2.95$ 、 $K_i = 0.819$ 、 $K_D = 2.616$ 、 $T_n = 0.015$ 。

4.2 仿真验证

图 6 为开机工况下 PID 控制器对调节系统在开机工况中的响应过程。设置调节器的目标跟踪转速为 1 p.u。由图 6 可知,未经过优化选择的 PID 控制器对额定转速的追踪有较大的超调量,且调节时间超过近 10 s。而经过 IWOA 算法优

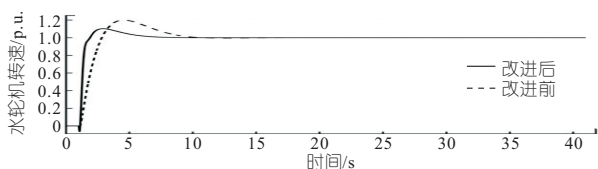


图 6 开机工况转速动态曲线图

Fig. 6 Dynamic graph of speed at start-up

化后的 PID 控制器作用下的调节系统在此工况下具有良好的动态特性,超调量减小,同时调节时间也下降。

图 7 为甩 100% 负荷扰动转速响应曲线。由图 7 可看出,在甩 100% 负荷时,未改进 PID 控制的机组经过 30 s 作用方能达到稳定状态,调节过程需要较长时间。而经过 WOA 算法优化后的 PID 控制器,机组在甩负荷过程中转速下降相对迅速、动态响应时间较短,在 20 s 时机组转速已达到额定值 1 p. u.,即转速的偏差量为 0 p. u。这说明经过 IWOA 算法优化后的 PID 控制器对这一工况具有较好的适应性。

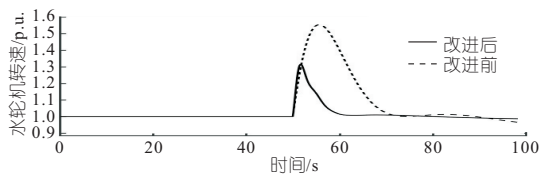


图 7 甩 100% 负荷扰动转速响应曲线

Fig. 7 Speed response curve under loss of 100% load perturbation

为提高新能源的消纳能力及电网运行的稳定性,对水机组的鲁棒性能提出了更高的要求。对外界负荷功率、风电功率及光伏功率联合作用下的功率波动,系统在 PID 控制及 IWOA 优化后的 PID 控制的频率响应见图 8。由图 8 可看出,尽管负荷扰动的变化幅度前后较大,但机组转速动态在改进后的控制器作用下其调节有明显减少。研究对象经过 IWOA 优化后系统转速波动范围变小,说明 IWOA 的优化能够明显改善系统的动态性能并提高了系统的鲁棒性。

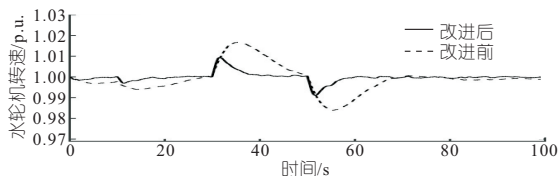


图 8 随机负荷扰动下的转速响应曲线

Fig. 8 Speed response curve under random load perturbation

研究对象数学模型的建立忽略了从调压井到蜗壳入口处的摩擦阻尼。因此,需要对优化的 PID 控制器存在摩擦阻尼的情况进行仿真,以验证其合理性。假设这段的摩擦阻尼系数为 0.000 16。图 9 为相同控制器作用下,系统引入 0.1 p. u. 负荷扰动时,研究对象是否含有调压井到蜗壳入口处的摩擦阻尼时系统的响应情况。由图 9 可知,相比于未引入摩擦阻尼的数学模型,引入摩擦阻尼的系统表现出更大的超调量及震荡。这表明由于引入摩擦阻尼后系统变为非线性系统,线性控制器 PID 在此控制处理上存在不足。

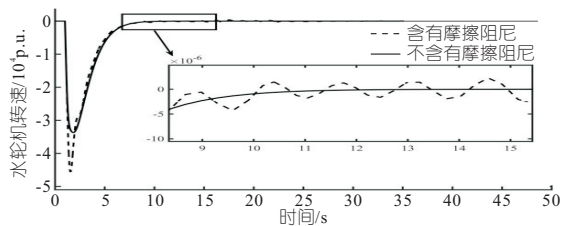


图 9 引入摩擦阻尼前后对控制的影响

Fig. 9 Effect on control before and after the introduction of friction damping

5 结论

a. 以含调压井水轮机调速系统控制优化作为研究对象,采用 IWOA 算法对调速系统中的 PID 控制器参数进行寻优,目标是使调速系统在不同的工况下水轮机转速偏差量的 ITAE 性能指标最小。同时,与改进前的 PID 控制器的控制效果进行对比,结果表明改进 WOA 算法能够使含调压井动态的调节系统在不同工况下具有更好的动态特性及鲁棒性。

b. 未来应考虑调压井到蜗壳入口处摩擦阻尼下的含调压井动态特性的非线性水轮机调速系统控制设计与优化。

参考文献:

- [1] XU B, ZHANG J, EGUSQUIZA M, et al. A review of dynamic models and stability analysis for a hydro-turbine governing system[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2021, 144(1): 1108801-11088022.
- [2] FANG H, CHEN L, SHEN Z. Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor[J]. Energy conversion and management, 2011, 52(4): 1763-1770.
- [3] JIANG C, MA Y, WANG C. PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing systems using deterministic-chaotic-mutation evolutionary programming (DCMEP)[J]. Energy conversion and management, 2006, 47(9-10): 1222-1230.
- [4] CHENG Y C, YE L Q, CHUANG F, et al. Anthropomorphic intelligent PID control and its application in the hydro turbine governor[C]//Proceedings. international conference on machine learning and cybernetics. IEEE, 2002, 1: 391-395.
- [5] 吴道平, 鄢波, 刘冬, 等. 适用于水电机组的改进滑模控制策略研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(10): 82-91.
- [6] 蔡龙, 刘昌玉. 机组调速系统引入调压井涌浪反馈对减负荷过程的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(7): 175-177, 149.
- [7] 何建宇, 钱晶, 曾云, 等. 计及调压井动态的水轮机微分代数模型[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(4): 319-324, 356.
- [8] 高亢, 唐兆祥, 李科, 等. 带引水调压室水轮机调节系统稳定性及动态品质研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 160-162.

3.3.4 推荐方案

综上所述,洪家渡电站平均综合出力系数为 8.68,推荐采用综合考虑水头和流量的分段拟合方法,结果见式(11)。

4 结论

通过平均综合出力系数法和分段拟合法分别对综合出力系数进行率定,并进一步分析水头分段拟合法及综合考虑水头和发电流量拟合法计算结果,以确定电站合适的综合出力系数。对洪家渡水电站计算表明,综合考虑水头和发电流量分段拟合方法率定得到的出力系数更符合生产实际。

参考文献:

[1] 苟露,陈森林,胡志鹏. 水电站综合出力系数变化规律及应用研究[J]. 中国农村水利水电,2017(6): 181-183.

[2] 薛金淮. 关于水能计算中 K 值的探讨[J]. 电网与水力发电进展,2008,24(3):27-29.

[3] 王雨雨,王磊之. 基于历史用水效率的龙江水电站优化调度研究[J]. 小水电,2014(5):1-5.

[4] 罗鑫燃,刘攀,温岩,等. 水电站综合出力系数的出力加权聚合法[J]. 水电能源科学,2022,40(1):168-171,162.

[5] 刘荣华,魏加华,李想. 电站枢纽综合出力系数计算及对调度过程模拟的影响[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(1):14-17.

Study on Rate Determination of Comprehensive Output Coefficient of Hongjiadu Hydropower Station

XU Wei¹, GE Yong¹, ZHONG Wei², WEN Xin²

(1. Hydropower Station Remote Centralized Control Center of Guizhou Wujiang Hydropower Development, Guiyang 550002, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the problem that the comprehensive output coefficient of power station deviates from the actual situation in varying degrees with the accumulation of operation time, the change of operating conditions, unit wear, the comprehensive output coefficient was calibrated according to the average comprehensive output coefficient and the piecewise fitting coefficient. The piecewise fitting method was further divided into piecewise fitting according to the water head and piecewise fitting considering the water head and power generation flow in terms of the dispatching characteristics. The results were verified by precision evaluation. Combined with the historical operation process of Hongjiadu Hydropower Station, a case study was carried out. The results show that compared with the actual results, the relative error of the average coefficient method is 2.64%, that of the piecewise fitting method according to the head is 2.52%, and that of the piecewise fitting method considering the head and flow is 0.59%. The piecewise fitting method is closer to the actual production process than the average comprehensive output coefficient method, and the piecewise fitting method considering the head and power flow is the most accurate.

Key words: comprehensive output coefficient; average comprehensive output coefficient method; piecewise fitting method; head; flow

(上接第 191 页)

IWOA Based Algorithm for Solving Optimization Problem of Control Parameters of Hydro-Turbine Speed Control System with Surge Tanks

YANG Jin-dong¹, LI Yang², ZOU Yi-dong³

(1. Yunnan Electric Power Technology Company, Kunming 650000, China;
2. School of Power and Mechanics, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to improve the control performance of hydro-turbine speed control system containing surge tanks, this paper proposes a control parameter optimization method based on the improved whale optimization algorithm (IWOA). Firstly, the mathematical model of the turbine speed control system with surge tanks was established. The turbine inlet head-flow transfer function containing the dynamics of surge tanks was established by using the continuity equation and pipe transfer function. And then the turbine speed control system model with surge tanks was formed together with the turbine speed control model. The time integral value of the speed deviation of the turbine in this system was used as the fitness value in the optimization process, and IWOA was used to perform optimization of the PID controller parameters of the study object with the objective of minimizing this fitness. The results show that the IWOA algorithm has the advantages of fast convergence speed and high accuracy, and the optimized PID controller provides better regulation and robustness to various types of disturbances.

Key words: IOWA algorithm; surge tank; hydro-turbine speed control system; control parameters; optimization