

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-791-09

基于改进 AOA 与 PID 的高效机房冷却水系统 能耗优化与控制研究

李守杰¹ 莫修栋¹ 余志锋² 浦诗悦² 杨爱明³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司 宁波 315100;

2. 浙江华展研究设计院股份有限公司 宁波 315100;

3. 宁波东源节能科技有限公司 宁波 315100)

【摘要】 为降低高效机房冷却水系统能耗, 提高高效机房冷却水系统控制效果, 提出一种基于改进阿基米德算法 (Artificially Intelligent Optimization Algorithm, AOA) 与 PID 的能耗优化与控制方法。方法首先构建高效机房冷却水系统能耗优化模型, 并以系统能耗最低目标函数, 采用引入 Circle 映射和莱维旋转变换策略的改进 AOA 算法进行目标函数求解, 实现了高效机房冷却水系统能耗优化。然后构建高效机房冷却水系统被控对象模型, 利用改进 AOA 算法优化的 PID 控制算法对被控对象进行控制, 实现了高效机房冷却水系统控制。仿真结果表明, 该方法可降低高效机房冷却水系统能耗, 达到节能效果, 相较于能耗优化前, 优化后的系统平均能耗降低了 9.88%, 且改善了冷却水系统控制效果, 使冷却水系统中的冷却水泵流量和冷却塔出水温度能更快达到期望流量和温度, 且响应时间较快, 为 235s, 表现出良好的控制性能。

【关键词】 AOA 算法; PID 控制; 能耗优化; 系统控制; 冷却水系统; 高效机房
中图分类号 TP391 文献标志码 A

Research on Energy Consumption Optimization and Control of Efficient Computer Room Cooling Water System Based on Improved AOA and PID Control

Li Shoujie¹ Mo Xiudong¹ Yu Zhifeng² Pu Shiyue² Yang Aiming³

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd, Ningbo, 315100;

2. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd, Ningbo, 315100;

3. Ningbo Dongyuan Energy Saving Technology Co., Ltd, Ningbo, 315100)

【Abstract】 In order to reduce the energy consumption of the high-efficiency cooling water system in the computer room and improve the control effect of the high-efficiency cooling water system, a method for energy consumption optimization and control based on the Improved Archimedes Algorithm (AOA) and PID is proposed. The method first constructs an efficient energy consumption optimization model for the cooling water system in the computer room, and uses an improved AOA algorithm with the introduction of Circle mapping and Levy rotation transformation strategy to solve the objective function of minimizing system energy consumption, achieving the optimization of energy consumption for the efficient cooling water system in the computer room. Then, an efficient machine room cooling water system controlled object model was constructed, and the PID control algorithm optimized by the improved AOA algorithm was used to control the controlled object, achieving efficient machine room cooling

作者简介: 李守杰 (1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为轨道交通机电及弱电工程, E-mail: 401788733@qq.com
通讯作者: 余志锋 (1979-), 男, 本科, 正高级工程师, 研究方向为通风空调、绿色建筑, E-mail: 13777140095@qq.com
收稿日期: 2024-04-24

water system control. The simulation results show that this method can reduce the energy consumption of the high-efficiency computer room cooling water system and achieve energy-saving effects. Compared with before energy optimization, the average energy consumption of the optimized system has been reduced by 9.88%, and the control effect of the cooling water system has been improved. The flow rate of the cooling water pump and the outlet temperature of the cooling tower in the cooling water system can reach the expected flow rate and temperature faster, and the response time is fast, which is 235 seconds, showing good control performance.

【Keywords】 AOA algorithm; PID control; Energy consumption optimization; System control; Cooling water system; Efficient computer room

0 引言

随着大型公共建筑的投入使用, 高效机房冷却水系统的能耗优化备受关注。但就目前而言, 国内高效机房冷却水系统遍存在能耗高和运行效率低的问题, 仍具有较大的优化空间。因此, 降低高效机房冷却水系统能耗, 提高系统控制效果迫在眉睫。周志豪为优化高效机房中央空调冷源系统能耗, 通过结合 BP 神经网络与灰箱模型, 提出一种混合模型的能耗优化方法, 降低了高效机房中央空调冷源系统 8.2% 的能耗^[1]。闫军威等提出一种非支配排序遗传算法 II 的高效冷源机房多目标参数优化方法, 提高了系统能效 14.35%, 使高效冷源机房的能耗降低了 12.52%^[2]。杨秀等根据高效机房中央空调工作原理, 以中央空调系统总能耗最小为目标, 提出一种动态权重与加速因子改进的粒子群算法对高效机房中央空调系统能耗进行优化, 降低了高效机房整体能耗^[3]。研究表明, 虽然目前对高效机房能耗优化的方法众多, 但综合能效很难超过额定工况综合能效, 也就是说, 现有方法离高效机房能耗的要求还有比较大的差距, 且控制效果难以满足要求。因此, 为解决该问题, 本文利用阿基米德优化算法强大的寻优能力, 通过引入 Circle 映射和莱维旋转变化策略, 提出一种改进 AOA 算法的能耗优化方法。同时, 为提高控制效果, 结合改进 AOA 算法和 PID 控制算法, 对高效机房冷水系统进行控制。

1 基本算法

1.1 AOA 算法原理

AOA 算法是根据阿基米德定律提出的一种算术优化算法, 具有可移植性强和收敛速度快的特点, 广泛应用于优化问题求解^[4,5]。

AOA 算法原理包括初始化、勘探、开发 3 个

部分。初始化包括对算法种群的位置、密度、加速度等参数进行初始化。然后设定一个随机数 R1, 并根据数学优化器加速函数 (MOA) 确定勘探阶段^[6,7]。当 R1 小于 MOA 时, 进入勘探阶段; 当 R1 大于 MOA 时, 进入开发阶段。其中, 勘探阶段是利用乘除运算符进行全局寻优; 开发阶段则是利用加减运算符对局部进行开发。

图 1 为 AOA 算法流程示意图。通过勘探或开发, 控制了算法的寻优精度, 使算法能在全局范围内进行寻优, 且具有良好的寻优效果。

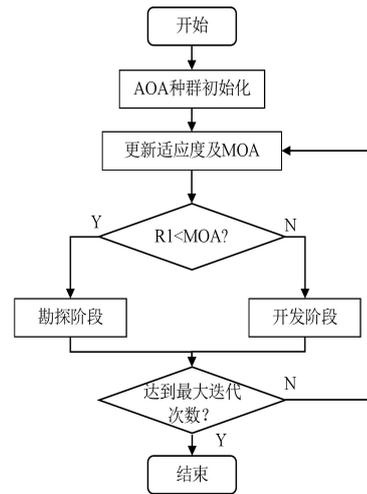


图 1 AOA 算法流程示意图

Fig.1 Flowchart of AOA algorithm

1.2 PID 控制算法

PID 控制是一种闭环控制方法, 基本原理如图 2 所示。图中, $r(t)$ 、 $e(t)$ 分别表示给定值和偏差值, $u(t)$ 、 $y(t)$ 分别为 PID 输出和实际输出值^[8]。

通过输入 $e(t)$, 进行比例、积分和微分运算, 可得到:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}] + u_0 \quad (1)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 为比例、积分、微分系数; u_0 为控制常量。

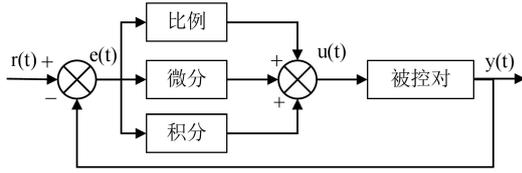


图2 PID控制原理

Fig.2 PID control principle

2 高效机房冷却水系统能耗优化

2.1 能耗优化模型构建

高效机房冷却水系统由冷水机组、冷却水泵、冷却塔3个部分组成,如图3所示^[9,10]。考虑到三部分能耗不同,为实现准确的能耗优化,分别构建了不同能耗优化模型。

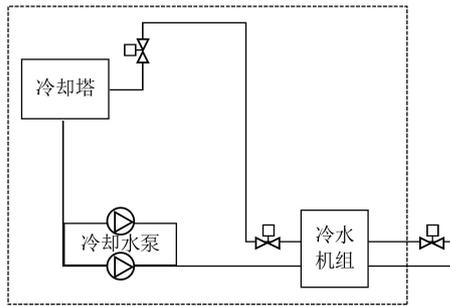


图3 高效机房冷却水系统组成

Fig.3 Composition of efficient computer room cooling water system

(1) 冷水机组能耗模型

冷水机组能耗于冷却水供水和进水温度,以及制冷量,本文构建其能耗优化模型为:

$$P_c = a_0 + a_1 Q_e + a_2 Q_e^2 + a_3 (T_{cw} - T_{chw}) + a_4 (T_{cw} - T_{chw})^2 + a_5 Q_e (T_{cw} - T_{chw}) \quad (2)$$

式中: P_c 为冷水机组功率; Q_e 为冷水机组制冷量; $a_0 \sim a_5$ 为拟合参数; T_{chw} 为进水温度; T_{cw} 为供水温度。

(2) 冷却水泵能耗模型

冷却水泵能耗与水泵频率相关,故构建其能耗优化模型如式(3)所示:

$$P_p = a_0 + a_1 f_e + a_2 f_e^2 + a_3 f_e^3 \quad (3)$$

式中: P_p 为冷却水泵功率; f_e 为冷却水泵频率。

(3) 冷却塔能耗模型

结合冷却塔的整体能效,将冷却塔的能耗优化模型构建为:

$$P_t = a_0 + a_1 f_t + a_2 f_t^2 + a_3 f_t^3 \quad (4)$$

式中: P_t 为冷却塔风机功率; f_t 为冷却塔风机频率。

综合上述三个优化模型,可得到高效机房冷却水系统的整体能耗优化模型 P_z 为:

$$P_z = \sum (P_c + P_p + P_t) \quad (5)$$

2.2 目标函数与约束条件

高效机房冷却水系统能耗优化的目的是降低高效机房设备能耗,因此本文以 P_z 最低为目标,构建目标函数。

结合式(5)和MATLAB软件,对 $a_0 \sim a_5$ 拟合参数进行拟合,得到目标函数如式(6)所示^[11]:

$$P_z = -0.70 + 0.24Q_e - 0.01Q_e^2 + 0.01(T_{cw} - T_{chw}) - 0.01(T_{cw} - T_{chw})^2 + 0.02Q_e(T_{cw} - T_{chw}) - 0.05 + 0.01f_t - (1.33e-4)f_t^2 + (6.88e-6)f_t^3 - 0.15 + 0.01f_e - (4.56e-4)f_e^2 + (2.84e-4)f_e^3 \quad (6)$$

考虑到实际应用中,目标函数变量会受到应用环境约束,因此对目标函数变量进行如下约束^[12]:

$$\begin{cases} 20\text{Hz} \leq X_1 \leq 50\text{Hz} \\ 20\text{Hz} \leq X_2 \leq 50\text{Hz} \\ 28^\circ\text{C} \leq X_3 \leq 32^\circ\text{C} \\ 6\text{m}^3/\text{h} \leq X_4 \leq 15\text{m}^3/\text{h} \end{cases} \quad (7)$$

式中: X_1 为冷却塔风机频率; X_2 为冷却水泵频率; X_3 为冷却塔水温范围; X_4 为冷却水泵流量范围。

结合目标函数以及约束条件,可得到目标函数最终数学描述为:

$$\begin{cases} \min P_z = -0.70 + 0.24Q_e - 0.01Q_e^2 + 0.01(T_{cw} - T_{chw}) - 0.01(T_{cw} - T_{chw})^2 + 0.02Q_e(T_{cw} - T_{chw}) - 0.05 + 0.01f_t - (1.33e-4)f_t^2 + (6.88e-6)f_t^3 - 0.15 + 0.01f_e - (4.56e-4)f_e^2 + (2.84e-4)f_e^3 \\ \text{st.} \begin{cases} 20\text{Hz} \leq X_1 \leq 50\text{Hz} \\ 20\text{Hz} \leq X_2 \leq 50\text{Hz} \\ 28^\circ\text{C} \leq X_3 \leq 32^\circ\text{C} \\ 6\text{m}^3/\text{h} \leq X_4 \leq 15\text{m}^3/\text{h} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

2.3 目标函数求解

2.3.1 AOA 算法改进

AOA 具有良好的寻优精度，因此选用该算法对式 (8) 目标函数进行求解。但由于其初始化种群为随机设置，可能影响寻优结果。为解决该问题，采用 Circle 映射，如式 (9)，对算法进行改进^[13]：

$$x_{i+1} = \text{mod}(x_i + 0.2 - (\frac{0.5}{2\pi})\sin(2\pi \times x_i), 1) \quad (9)$$

式中： x_{i+1} 、 x_i 分别表示引入 Circle 映射的混沌策略后的物体位置和物体原始位置。

此外，由于 AOA 算法后期同样存在优化算法面临的容易陷入局部最优问题，降低算法寻优精度。因此，为解决该问题，本文通过引入莱维旋转变换策略对该算法进行改进，以提高算法种群多样性和收敛速度，避免算法陷入局部最优。

莱维旋转变换策略的变换策略如式 (10) 所示^[14]：

$$x'_i = x_{best} + s \times \frac{1}{n \|x'_i\|_2} R_r x'_i \quad (10)$$

式中： R_r 为均匀分布的随机矩阵； $\|\cdot\|$ 为向量 2-范数； s 为莱维旋转因子。

改进 AOA 算法流程如图 4 所示。

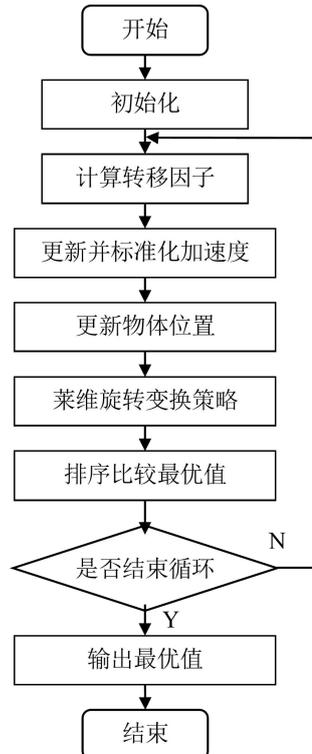


图 4 改进 AOA 算法流程

Fig.4 Process of improved AOA algorithm

2.3.2 改进 AOA 算法目标函数求解流程

基于构建的高效机房冷却水系统能耗模型和目标函数，并结合实际约束条件，采用改进 AOA 算法求解能耗优化最佳工况，具体步骤如下：

- (1) 初始化改进 AOA 算法的最大迭代次数等参数，并利用 Circle 映射生成初始化种群；
- (2) 将改进 AOA 算法的适应度函数设置为高效机房冷却水系统能耗模型，并将待优化的冷却水系统变量代入算法；
- (3) 迭代循环并更新种群位置；
- (4) 当达到算法终止条件，则结束算法输出最优变量和适应度。

上述流程可概括为图 5。

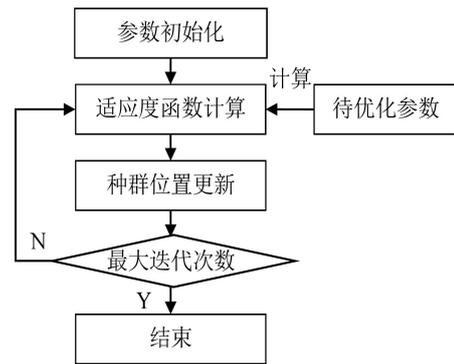


图 5 高效机房冷却水系统能耗优化流程

Fig.5 Energy consumption optimization process of efficient computer room cooling water system

3 高效机房冷却水系统控制

基于改进 AOA 算法求解的高效机房冷却水系统最低能耗，并以其为目标，利用 PID 控制算法控制冷却水泵流量和冷却水出水温度进行控制，即可实现高效机房冷却水系统能耗最优控制，提高系统运行效率。

3.1 被控对象模型构建

高效机房冷却水系统控制分为冷却水泵流量和冷却塔出水温度控制两部分，为实现其精确控制，分别构建了控制模型。

(1) 冷却水泵流量控制模型

冷却水泵流量与冷却泵频率相关，调整冷却泵频率可控制冷却水泵流量。因此，冷却水泵流量控制可转化为冷却泵频率。利用 MATLAB 软件，可得到冷却水泵流量控制模型如式 (11) 所示。

$$G(x) = \frac{0.13}{1.03s + 1} e^{-2s} \quad (11)$$

(2) 冷却塔出水温度控制模型

冷却塔出水温度与冷却塔风机频率相关, 因此可将其出水温度控制可转化为风机频率控制。利用 MATLAB 软件, 可得到其控制模型如式 (12) 所示:

$$G(x) = \frac{0.07}{2.52s + 1} e^{-3s} \quad (12)$$

3.2 系统控制

(1) PID 控制算法改进

根据式 (11) 可知, PID 控制算法的控制效果与参数与 K_p 、 K_i 、 K_d 相关, 而这些参数通常由经验设定, 导致其控制效果有待提高。为此, 本文结合改进 AOA 算法在寻优问题上的强大性能, 采用改进 AOA 算法优化 PID 控制参数。

采用改进 AOA 算法优化 PID 控制参数, 具体的流程可用图 6 表示。首先初始化改进 AOA 算法参数, 并将 PID 控制算法的 K_p 、 K_i 、 K_d 设置为改进 AOA 算法的寻优变量, 然后利用改进 AOA 算法进行迭代寻优, 当达到寻优重置条件时, 输出结果即为 PID 控制算法的 K_p 、 K_i 、 K_d 。

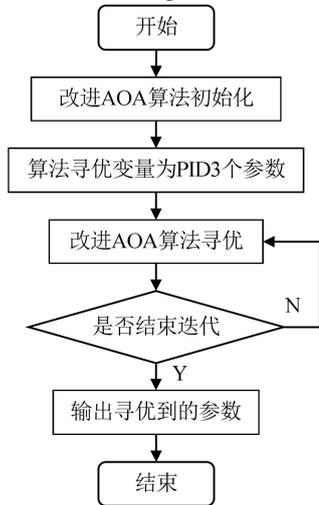


图 6 改进 AOA 算法优化 PID 控制算法参数流程
Fig.6 Process of optimizing PID control algorithm parameters by improved AOA algorithm

(2) 控制流程

根据构建的冷却水泵流量控制模型和冷却塔出水温度控制模型, 采用改进 AOA 算法优化的 PID 控制算法进行控制, 详细流程如下:

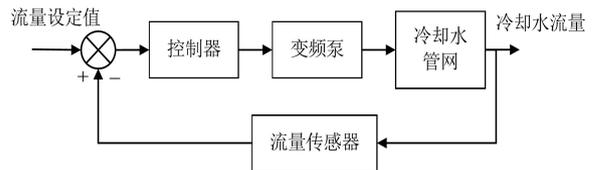
①被控对象建模。根据式 (9) 和式 (10) 构

建冷却水泵流量控制模型和冷却塔出水温度控制模型。

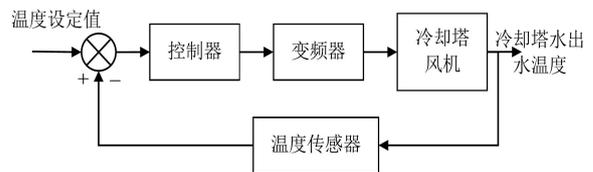
②高效机房空调负荷预测。根据被控对象建模分析可知, 高效机房冷水系统控制是根据下一时刻空调负荷, 对冷却泵频率和冷却塔风机频率进行控制, 进而实现冷却水泵流量控制和冷却塔出水温度控制。因此, 需对高效机房空调负荷进行预测。由于神经网络具有良好的预测性能, 本文利用神经网络对空调负荷进行预测。

③冷却水系统控制。基于神经网络预测的空调负荷, 利用改进 AOA 算法求解空调冷却水系统能耗最低目标下的系统设定值, 最后利用 PID 控制器进行控制。

具体控制框图如图 7 所示。



(a) 冷却水泵流量控制



(b) 冷却塔出水温度控制

图 7 冷却水系统控制框图

Fig.7 Cooling water system control block diagram

4 仿真实验

4.1 实验环境搭建

本次实验基于 MATLAB 软件和 TRNSYS 软件搭建高效机房冷却水系统能耗优化及控制仿真模型, 并在 Windows10 操作系统上运行。系统配置 Intel 酷睿 i7-8700K CPU, AORUS GTX 1080Ti Gaming oc 11G 显卡。

仿真模型具体搭建如下: 首先, 采用 TRNSYS 软件的 Type666 模块搭建高效机房冷却水系统冷水机组模块, 并设定器制冷量、COP 值、冷却水温度等参数。采用 TRNSYS 软件的 Type114 模块搭建高效机房冷却水系统水泵模块, 并设定其入口流体温度、流速和出口流体温度、流速、额定功率、

额定流量等参数。同时设定水泵工作、停止的控制信号，当控制信号小于 0.5，则水泵停止运行，反之，则水泵开启运行。采用 TRNSYS 软件的 Type162 模块搭建高效机房冷却水系统冷却塔模块，并设定其冷却塔模式、单元数、单元最大流速等参数。

然后利用 Type15 模块进行数据读取，利用 Type65 模块进行数据输出，利用 Type682 模块进行流量计算，利用 Type31、Type647、Type649 模块进行数据传输，通过 Type24 模块进行能耗计算。

4.2 数据来源及预处理

本次仿真数据来自 TRNSYS 软件模拟的高效机房冷却水系统相关数据，包括冷却水泵流量和冷却塔出水温度等。模拟时间为 5 月 1 日至 9 月 30 日，共 5000 条数据。

考虑到模拟数据中存在数据缺失的问题，实验前删除了缺失数据。同时，采用最大-最小标准化统一了所有数据量纲，如式 (13) 所示。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

式中： x 、 x' 分别表示数据原始值和归一值； x_{\max} 、 x_{\min} 分别表示数据最大值和最小值。

通过上述处理，最终得到用于高效机房冷却水系统能耗优化和控制的数据共 4367 条。

4.3 参数设置

本次仿真设置改进 AOA 算法的 c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 分别为 2、6、2、0.5， u 为 0.9， l 为 1；设置改进 AOA 算法优化后的 PID 控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 0.18、0.2、0.16^[15]。

4.4 结果与分析

4.4.1 仿真模型验证

为验证本文搭建的仿真模型正确性，分析了仿真模型模拟结果与实测结果，如图 8 所示。由图可知，仿真模型的模拟结果与实测结果变化趋势一致，且数值较为接近，表明本文仿真模型具有一定的正确性，可用于后续能耗优化和控制仿真。

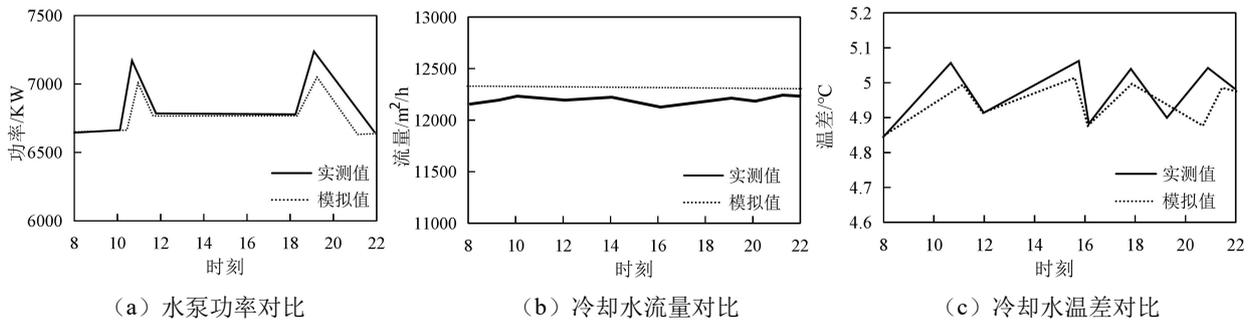


图 8 模拟结果与实测结果对比

Fig.8 Comparison between simulation results and actual measurement results

4.4.2 能耗优化验证

(1) 改进 AOA 算法验证

为验证采用 Circle 映射和莱维旋转变换策略对 AOA 算法的改进效果，利用基准测试函数 Sphere 单峰函数和 Generalized Griewank's Function 多峰函数对改进前后 AOA 算法性能进行测试。其中，Sphere 单峰函数的定义域为[-100,100]，最优值为 0，维度为 30；Generalized Griewank's Function 多峰函数定义域为[-600,600]，最优值为 0，维度为 30。测试结果如表 1 所示。根据表 1 测试结果可知，AOA 算法在 Sphere 单峰函数上的寻优精度明显低于改进 AOA 算法，而在 Generalized Griewank's Function 多峰函数上，改进前后 AOA 算法具有相同的搜索性能。综合来看，改进 AOA 算法搜索性

能更优异，表明改进有效。

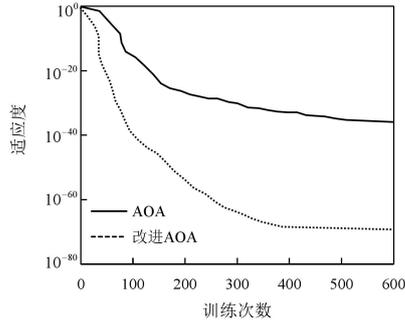
表 1 改进前后 AOA 算法在基准测试函数上测试结果

Table 1 Test results of AOA algorithm before and after improvement on benchmark function

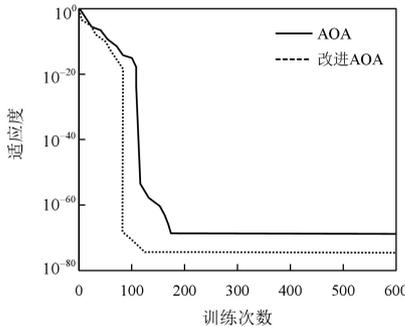
测试函数	算法	最优值	标准差	平均值
Sphere	AOA	2.36e-146	9.04e-102	1.25e-110
	改进 AOA	3.47e-129	5.22e-140	9.56e-124
Generalized Griewank's Function	AOA	0	0	0
	改进 AOA	0	0	0

为直观地反映改进前后 AOA 算法的搜索性能，将算法改进前后在 Sphere 单峰函数和 Generalized Griewank's Function 多峰函数上的收敛

曲线进行了比较, 得到图 9。根据收敛曲线对比可知, 改进后的 AOA 算法在基准测试函数 Sphere 和 Generalized Griewank's Function 函数上均表现出更快的收敛速度和更高的寻优精度。由此说明, 本文采用 Circle 映射和时变高斯变异的位置扰动策略对 AOA 算法的改进有效。



(a) Sphere 单峰函数上的收敛曲线



(b) Generalized Griewank's Function 多峰函数上的收敛曲线

图 9 改进前后 AOA 算法在基准函数上的收敛曲线对比

Fig.9 Comparison of convergence curves of AOA algorithm before and after improvement on benchmark function

(2) 改进 AOA 算法对比

为验证改进 AOA 算法的优越性, 在 Sphere 单峰函数和 Generalized Griewank's Function 多峰函数上测试了该算法与粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)、灰狼优化算法 (Grey Wolf Optimizer, GWO) 的性能。为确保所有算法是在相同条件下进行, 设置 PSO 算法的参数为: 种群数目 30, 最大迭代次数为 50, 惯性系数 0.9, 学习因子 2, 最大位置 3, 最大速度 3; 灰狼优化算法的参数为: 种群规模为 30, 最大迭代次数为 50^[6]。

表 2 为不同优化算法的测试结果。根据表 2 可知, 改进 AOA 算法寻优精度明显高于对比算法,

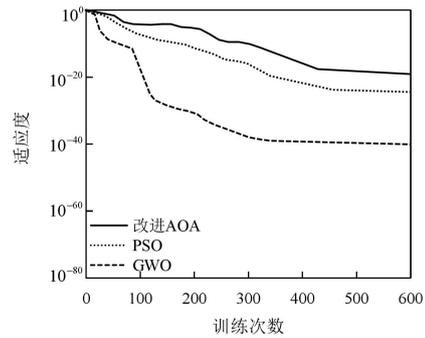
具有一定优越性。

表 2 改进前后 AOA 算法在基准测试函数上测试结果

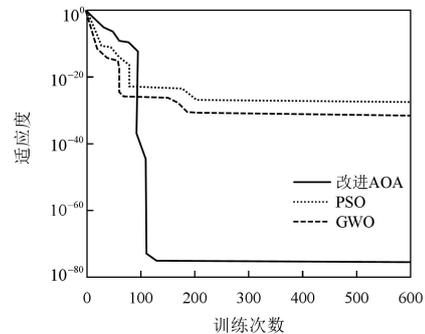
Table 2 Test results of AOA algorithm before and after improvement on benchmark function

测试函数	算法	最优值	标准差	平均值
Sphere	PSO	3.01e-15	4.55e-2	9.32e-10
	GWO	3.44e-30	1.58e-36	1.30e-33
	改进 AOA	3.47e-129	5.22e-140	9.56e-124
Generalized Griewank's Function	PSO	2.98e-20	0.07	0.04
	GWO	0	0.01	0.01
	改进 AOA	0	0	0

图 10 为不同算法在基准测试函数 Sphere 单峰函数和 Generalized Griewank's Function 多峰函数上的收敛曲线。对比三种算法的收敛曲线可知, 改进 AOA 算法具有更快的收敛速度和更高的收敛精度, 具有明显的优越性。



(a) Sphere 单峰函数上的收敛曲线



(b) Generalized Griewank's Function 多峰函数上的收敛曲线

图 10 不同算法在基准函数上的收敛曲线对比

Fig.10 Comparison of convergence curves of different algorithms on benchmark function

(3) 能耗优化结果

为检验改进 AOA 算法对高效机房冷却水系统能耗的优化效果,对实验数据中 8 月 1 日的能耗进行优化。表 3 为改进 AOA 算法优化前后冷却水泵流量和冷却塔出水温度对比结果示例。根据对比结果可知,改进 AOA 算法优化后的冷却水泵流量和冷却塔出水温度均低于优化前,表明改进 AOA 算法降低了高效机房冷却水系统能耗,达到了节能效果,满足高效机房冷却水系统能耗需求。

表 3 改进 AOA 算法优化前后能耗对比结果示例

Table 3 Example of energy consumption comparison results of improved AOA algorithm before and after optimization

时间	冷却水泵流量		冷却塔出水温度	
	优化前	优化后	优化前	优化后
06:00:00	8.22m ³ /h	8.18m ³ /h	28.30℃	27.11℃
07:00:00	10.39m ³ /h	10.02m ³ /h	30.09℃	29.44℃
08:00:00	11.88m ³ /h	11.34m ³ /h	30.60℃	29.64℃
09:00:00	12.36m ³ /h	12.09m ³ /h	27.20℃	25.41℃
10:00:00	12.54m ³ /h	12.30m ³ /h	28.94℃	27.01℃
11:00:00	12.76m ³ /h	12.51m ³ /h	31.22℃	29.05℃
12:00:00	12.66m ³ /h	12.14m ³ /h	31.39℃	30.10℃
13:00:00	10.87m ³ /h	10.12m ³ /h	31.65℃	30.21℃
14:00:00	10.53m ³ /h	10.32m ³ /h	32.68℃	29.09℃
15:00:00	13.98m ³ /h	12.41m ³ /h	30.55℃	29.04℃
16:00:00	13.55m ³ /h	13.20m ³ /h	29.44℃	27.30℃
17:00:00	11.08m ³ /h	10.32m ³ /h	31.25℃	29.05℃
18:00:00	11.99m ³ /h	11.04m ³ /h	32.54℃	30.14℃
19:00:00	10.36m ³ /h	9.52m ³ /h	30.26℃	28.41℃
20:00:00	10.14m ³ /h	9.33m ³ /h	32.33℃	28.43℃
21:00:00	12.36m ³ /h	11.55m ³ /h	32.65℃	28.76℃
22:00:00	8.03m ³ /h	7.58m ³ /h	29.56℃	27.32℃
23:00:00	10.03m ³ /h	9.55m ³ /h	35.41℃	29.07℃
24:00:00	11.97m ³ /h	11.00m ³ /h	32.69℃	28.47℃
01:00:00	10.36m ³ /h	9.42m ³ /h	29.22℃	27.03℃
02:00:00	10.23m ³ /h	9.17m ³ /h	30.88℃	29.32℃
03:00:00	10.39m ³ /h	9.12m ³ /h	30.97℃	29.29℃
04:00:00	12.33m ³ /h	10.14m ³ /h	30.86℃	29.03℃
05:00:00	11.78m ³ /h	11.01m ³ /h	30.76℃	29.14℃

4.4.3 系统控制验证

(1) 冷却水泵流量控制

图 11 为 PID 控制和改进 AOA 算法优化 PID

控制下,高效机房冷却水系统能耗冷却水泵流量的输出与期望输出对比。根据图 11 可知,改进 AOA 算法优化 PID 控制下的冷却水泵流量能更快达到期望输出冷却水泵流量,调节时间更短,降低了 14s,为 16s,且达到稳定状态后未出现超调,表明改进 AOA 算法优化 PID 控制可提高冷却水系统对冷却水泵流量的控制效果,具有良好的控制性能。

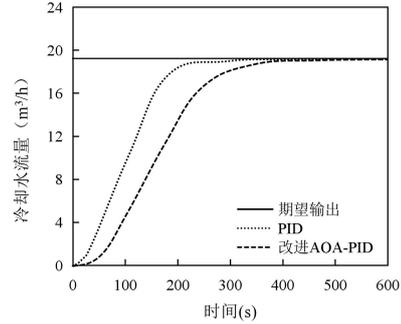


图 11 冷却水泵流量控制结果对比

Fig.11 Comparison of flow control results of cooling water pump

(2) 冷却塔出水温度控制

图 12 为 PID 控制和改进 AOA 算法优化 PID 控制下,高效机房冷却水系统能耗冷却塔出水温度的输出与期望输出对比。对比结果表明,改进 AOA 算法优化 PID 控制下的冷却塔出水温度可更快达到期望出水温度,且调节时间更短,为 235s,减少了 88s,且在达到稳定状态后未出现超调现象,表明改进 AOA 算法优化 PID 控制可提高冷却水系统对冷却塔出水温度的控制效果,具有良好的控制性能。

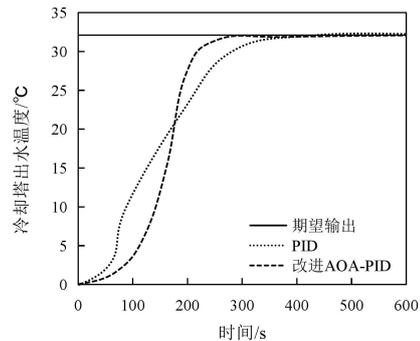


图 12 冷却塔出水温度控制结果对比

Fig.12 Comparison of outlet temperature control results of cooling tower

5 结论

综上所述,基于改进 AOA 算法与 PID 控制的高效机房冷却水系统能耗优化及控制方法,在冷却

水系统内能耗普遍较高的背景下,通过减少冷却水泵流量,降低了冷却塔出水温度,促使高效机房冷却水系统整体能耗下降,达到了节能效果,满足高效机房冷却水系统能耗要求;通过改善了冷却水系统控制效果,使冷却水系统中的冷却水泵流量和冷却塔出水温度能更快达到期望流量和温度,实现了更好高效机房冷却水系统控制,且具有较快的响应速度,响应时间为235s,表现出良好的控制性能,明显提升了高效机房冷却水系统的控制效果。本文虽取得一定研究成果,但由于条件限制,仍存在一些不足有待改进,主要表现在实验数据方面,仅选取5月1日至9月30日5000条数据对方法进行验证,存在一定的局限性。未来将尝试采用更多实验数据对方法进行验证,以说明方法的有效性。

参考文献:

- [1] 周志豪.基于混合模型的中央空调冷源系统运行能耗优化[J].建筑热能通风空调,2020,39(3):1-7.
- [2] 闫军威,卢泽东,周璇.基于NSGA-II的冷源机房设备运行参数多目标优化[J].科学技术与工程,2021,21(7):2896-2903.
- [3] 杨秀,刘欣雨,孙改平,等.基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化控制[J].电力科学与技术学报,2023,(3):65-75.
- [4] 李春生,卢羿州.二进制阿基米德优化算法及其应用[J].计算机技术与发展,2023,33(5):180-186,207.
- [5] 陈俊,何庆,李守玉.基于自适应反馈调节因子的阿基米德优化算法[J].计算机科学,2022,49(8):237-246.
- [6] 张树义,张芯语.概率度量空间中调和映象对的公共不动点定理[J].西华大学学报(自然科学版),2021,40(2):103-109.
- [7] 聂辉,张树义.一类积分Altman型映象不动点定理及应用[J].广西师范大学学报(自然科学版),2020,38(1):60-69.
- [8] 赵宇冰,刘育平,卜小伟,等.基于决策树算法的园区照明系统能耗优化控制方法[J].计算技术与自动化,2023,42(1):72-77.
- [9] 陈俊,何庆,李守玉.基于黄金莱维引导机制的阿基米德优化算法[J].计算机应用,2022,42(9):2807-2815.
- [10] 罗仕杭,何庆.融合Sin混沌和分段权值的阿基米德优化算法[J].计算机工程与应用,2022,58(14):63-72.
- [11] 周瑶佳.基于深度学习的中央空调负荷预测与优化控制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2023.
- [12] 熊乔枫,李铮伟,赵铭炎.基于深度Q神经网络(DQN)的空调冷却水系统无模型优化[J].暖通空调,2023,53(7):88-93.
- [13] 吴锋艳,韩凌,张世强,等.基于改进AOA的联合采购与配送问题研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(3):467-473.
- [14] 陈俊,何庆,李守玉.基于自适应反馈调节因子的阿基米德优化算法[J].计算机科学,2022,49(8):237-246.
- [15] 罗仕杭,何庆.多策略协同改进的阿基米德优化算法及其应用[J].计算机应用研究,2022,39(5):1386-1394.
- [16] 万文欣,陈柏寒,杨威,等.基于IGWO-KELM的复合电能质量扰动识别[J].山东电力高等专科学校学报,2024,27(3):5-9.