

多蒸发器空调系统的室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ –送风温度 PD^{μ} 串级调节

魏明松¹, 李绍勇^{1†}, 周 姣², 王成闵¹, 杨 睿¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 天水师范学院 土木工程学院, 甘肃 天水 741000)

摘要: 对于多蒸发器空调系统(MEACS)的性能参数调节, 本文提出了室内温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ –送风温度 PD^{μ} 串级控制的思路, 并设计了改进多目标人工鱼群算法(IMOAFSA), 应用于室内温度分数阶PID控制器(IT-FOPIDC)和送风温度分数阶PD控制器(SAT-FOPDC)参数的整定, 进而稳定MEACS的送风状态点, 提升室温调节品质. 首先, 依据基本型单目标人工鱼群算法, 构建自适应因子对鱼群中的视野和步长进行非线性递减的演变, 重建改进单目标人工鱼群算法(ISOAFSA). 其次, 基于该ISOAFSA, 将高斯变异引入外部档案集(EF), 从而设计了IMOAFSA, 对IT-FOPIDC和SAT-FOPDC的8个参数进行连续整定. 最后, 数值模拟该串级调节系统作用下的室内温度和送风温度控制效果. 结果表明: 该IMOAFSA可获取这两个控制器的8个参数Pareto最优解(POS)并连续更新它们, 能够明显地减小送风温度的波动, 进一步提升了室温调节品质, 如室温稳态误差较小、超调量较小、衰减比不合适、调节时间较短等.

关键词: 多蒸发器空调系统; 串级控制; 分数阶PID控制; 改进多目标人工鱼群算法; 控制器参数整定

引用格式: 魏明松, 李绍勇, 周姣, 等. 多蒸发器空调系统的室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ –送风温度 PD^{μ} 串级调节. 控制理论与应用, 2024, 41(10): 1842 – 1852

DOI: 10.7641/CTA.2023.20686

Cascade control mode of indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and supply air temperature PD^{μ} for multi-evaporator air-conditioning system

WEI Ming-song¹, LI Shao-yong^{1†}, ZHOU Jiao², WANG Cheng-min¹, YANG Rui¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui Gansu 741000, China)

Abstract: Aiming at regulating performance parameters of the multi evaporator air-conditioning system (MEACS), this project proposes a cascade control mode of indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and supply air temperature PD^{μ} and an improved multi-objective artificial fish swarm algorithm (IMOAFSA) is designed to tune parameters of fractional order PID controller for indoor temperature (IT-FOPIDC) and fractional order PD controller for supply air temperature (SAT-FOPDC), so as to stabilize the state point of supply air of MEACS and improve the regulation quality of indoor temperature. Firstly, according to the basic single objective artificial fish swarm algorithm (BSOAFSA), an adaptive factor is constructed to execute the nonlinear decreasing evolution to the visual field and step size in the fish swarm, so an improved single objective artificial fish swarm algorithm (ISOAFSA) is rebuilt. Secondly, on the basis of this ISOAFSA, Gaussian variation is introduced into external files (EF) to design an improved multi-objective artificial fish swarm algorithm (IMOAFSA) in order to continuously tune eight parameters of IT-FOPIDC and SAT-FOPDC. Finally, the control effects hosted by this cascade control system for indoor temperature and supply air temperature are numerically simulated. The results show that the designed IMOAFSA finds out Pareto optimal solutions (POS) of eight parameters of these two controllers and continuously updates them, which can obviously reduce fluctuation of supply air temperature and further improve the control quality of indoor temperature such as minor steady-state error, the smaller overshoot, the appropriate damping ratio and the shorter adjustment time, etc.

Key words: multi evaporator air conditioning system (MEACS); cascade control; fractional order PID control (FOPID-C); improved multi-objective artificial fish swarm algorithm (IMOAFSA); tuning parameters of controller

Citation: WEI Mingsong, LI Shaoyong, ZHOU Jiao, et al. Cascade control mode of indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and supply air temperature PD^{μ} for multi-evaporator air-conditioning system. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(10): 1842 – 1852

收稿日期: 2022–08–02; 录用日期: 2023–09–11.

†通信作者. E-mail: lishaoyong99@163.com; Tel.: +86 18993047739.

本文责任编辑: 邹云.

国家自然科学基金项目(61364004, 41967043, 52160003), 国家出国访学人员基金项目([2014]5049, 201408625045), 甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2020C-40), 兰州理工大学博士研究基金项目(B04-237).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61364004, 41967043, 52160003), the China Scholarship Council Foundation for Chinese Scholars to Study Overseas ([2014]5049, 201408625045), the Project of Industrial Support and Guidance for Colleges and Universities in Gansu Province(2020C-40) and the Doctoral Research Funds of Lanzhou University of Technology (B04-237).

1 引言

随着现代科技的不断发展、生活质量的不断提高,人们对生活空间的安全性、便捷性、舒适性也提出了更高的要求^[1]. 多蒸发器空调系统 (multi evaporator air conditioning system, MEACS), 本质为变制冷剂流量系统, 具有安装灵活、节省空间、节能潜力大和满足多种需求等特点, 在大空间家居、办公楼和公寓等中小型建筑中得到了广泛的关注与应用^[2].

随着MEACS应用的日益广泛, 对其运行阶段的调节、管理与维护等工作也提出了更高的要求. 尤其是关键性能参数的测量、控制策略确定及其实施等内容, 对于MEACS能否安全、经济地运行起着决定性作用^[3]. 所以, 相关研究成为建筑设备自动化领域有价值的课题.

由于MEACS作用下的多个空调房间室温被控对象具有非线性、多干扰等特性, Zhang^[4]等提出了一种通过调节蒸发器出口的气态制冷剂过热度 (degree of superheating, DS) 来控制室温 T_n 的策略, 包括自优化控制方法和基于有效开环传递函数的PI控制系统. 测试结果表明: 该控制策略显著地提升了 T_n 的控制指标, 制冷机组的能效比 (coefficient of performance, COP)也可提高约8.6%. 针对MEACS运行下的室温被控对象存在较大时滞问题, 文献[5]采用串级控制策略去控制 T_n . 其中副环设置PI控制器: 通过改变 O_{EEV} 和 q_r , 来调节DS; 主环采用比例微分 (proportional derivative, PD) 控制器, 输出控制指令 p 作为PI控制器的设定值, 来进一步调节 T_n . 仿真结果表明: 该串级控制方式使得 T_n 的控制指标, 如响应速度、超调量、调节时间和稳定性等得到了很大提升, 且DS稳定. 尽管传统的整数阶PID (integer order proportional integral derivative, IOPID) 控制方式以数学表达简单、易理解与实现和鲁棒性强而被广泛使用, 但对于非线性强、时滞大的被控对象, 往往控制效果不理想.

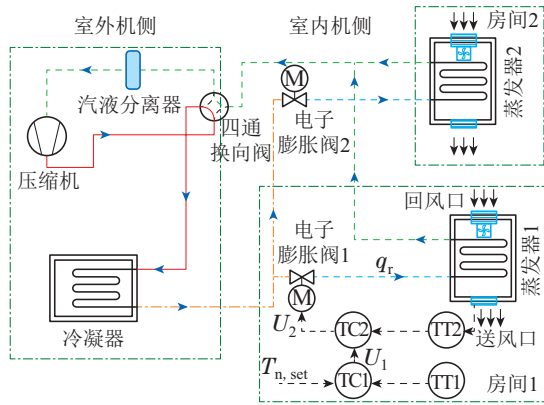
Podlubny^[6]首先提出了分数阶PID控制器 (fractional order PID controller, FOPIDC), 也称为 $PI^\lambda D^\mu$ 控制方式, 具有IOPID调节方式不可比拟的优点, 如广泛的适应性与灵活性、更强鲁棒性以及更优的控制精度等^[7]. 而对于IOPID控制器与FOPIDC而言, 其参数整定结果对于相应的控制系统调节质量起着重要作用^[8]. 尤其是后者, 由于整定内容包括比例、积分和微分系数、积分和微分算子阶次5个参数, 即 $[K_P, K_I, K_D, \lambda, \mu]$, 这直接增加了 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器参数整定的难度与计算负荷. 所以, 近年来的智能优化算法兴起并被广泛应用, 如人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABCA)^[9]、粒子群算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO)^[8]和人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[10]等, 不但被应

用于各类系统或工程问题的优化设计与解决, 而且设计了许多不同类型控制器的参数整定算法, 能够获取相应的参数最优值以提升相应控制系统的调节质量. Jiang和Zhu^[11]提出了一种利用改进的AFSA来求解多目标最优问题的方法. 该算法动态调整AFSA中的视野Visual及步长Step, 并行搜索解空间和利用外部档案集 (external file, EF) 保存所找到的Pareto最优解. 基于测试函数的仿真结果表明: 与非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II) 相比, 该算法所需种群规模更小, 运行时间更短. 对于自动稳压器系统, 文献[12]提出了一种基于改进的多目标极值优化算法 (improved multi-objective extremal optimization algorithm, IMOEOA) 的FOPIDC设计方案. 它将FOPIDC设计问题表述为一个包括三目标函数: 积分绝对误差 (integral absolute error, IAE)、绝对稳态误差 E_{ss} 和调节时间 t_c 的多目标优化问题, 且运用IMOEOA对该FOPIDC的参数实施整定. 结果表明: 该IMOEOA-FOPID控制器在精度和鲁棒性方面明显优于基于多目标极值优化算法 (MOEOA) 的IOPID控制器 (MOEOA-IOPID 控制器) 和基于单目标进化算法的FOPID控制器.

分析MEACS夏季制冷循环工艺, 可知蒸发器送风口处的送风温度 T_{sa} 和空调房间室温 T_n 是表征MEACS运行性能和空调效果如何的关键参数, 其中流经蒸发器的液态制冷剂流量 q_r 直接影响着 T_{sa} , 而 T_n 则受 T_{sa} 的影响^[13]. 同时, 空调房间室温和送风温度被控对象呈现非线性、大惯性与时滞等特性, 当传统的单回路室温PID控制系统作用时, 未考虑 T_{sa} 影响, 直接改变 q_r 来调节 T_n , 会导致 T_n 波动, 调节效果往往不理想. 所以本文提出一种室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 串级调节系统, 既发挥分数阶PID调节的适应性广、抗干扰性强与控制精度高的优势, 又使得送风温度分数阶PD控制器 (fractional order PD controller for supply air temperature, SAT-FOPDC) 和室内温度分数阶PID控制器 (fractional order PID controller for indoor temperature, IT-FOPIDC) 串级调节 T_{sa} 和 T_n . 并设计改进多目标人工鱼群算法 (improved multi-objective AFSA, IMOAFSA) 来整定这两个控制器的8个参数: $[K_{P,1}, K_I, K_{D,1}, \lambda, \mu_1, K_{P,2}, K_{D,2}, \mu_2]$, 获取相应的Pareto最优解, 进一步, “软提升”室温调节品质, 如满足 $T_n \approx T_{n,set}$, 较小的超调量和较短的调节时间的性能指标, 且明显减小 T_{sa} 的波动.

2 MEACS关键参数的分数阶PID-PD调节

基于MEACS空调工艺和FOPID控制技术, 分析其送风温度和室温被控对象特性^[5,13], 本文将室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 串级调节方式施加于它, 相应的空调工艺流程与测控原理如图1所示.



$T_{n, set}$:室内温度设定值
 TC1:室内温度PI^λD^μ控制器
 TT1:室内温度测量变送器
 TT2:送风温度测量变送器
 TC2:送风温度PD^μ控制器
 U_1 :主回路控制指令
 U_2 :副回路控制指令
 ---:低低压制冷剂液体
 ---:过热低压制冷剂蒸汽
 ---:高温高压制冷剂蒸汽
 ---:高温高压制冷剂液体
 ---:测控信号线
 q_r :制冷剂流量

图1 MEACS室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制的流程图
 Fig. 1 Flow chart of cascade control of indoor temperature PI^λD^μ and supply air temperature PD^μ for MEACS

T_{sa} 作为MEACS的重要性能参数之一,对 T_n 的影响显著。TT1\TC1作用于主回路(main loop, ML),定值调节 T_n ;TT2\TC2作用于副回路(auxiliary loop, AL),接受TC1的输出信号作为TC2设定值,随动调控 T_{sa} 。当干扰 F 的作用,使得 T_n 偏离 $T_{n, set}$ 时,TT1传送 T_n 的测量信号给TC1,计算误差 $e_1 = T_{n, set} - T_n$,对 e_1 进行PI^λD^μ运算后,输出控制指令 U_1 给TC2,作为其设定值,即 $U_1 = T_{sa, set}$ 。同时,TT2将 T_{sa} 的测量信号传递给TC2,求误差 $e_2 = T_{sa, set} - T_{sa}$,对 e_2 进行PD^μ运算后,输出控制指令 U_2 给电子膨胀阀(electronic expansion valve, EEV),从而改变其开度 O_{EEV} ,使得流经室内蒸发器的液态制冷剂流量 q_r 发生变化。因此,副回路AL“粗调、快调” T_{sa} ,主回路ML进一步“细调、慢调” T_n 。这样SAT-FOPDC和IT-FOPIDC串级调节,既满足 $T_n \approx T_{n, set}$ 和减小 T_{sa} 的波动,又发挥了PI^λD^μ调节的适应性广和抗干扰性强的优势。

3 室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统组成环节特性的描述

3.1 室内温度被控对象的输入/输出特性

由于空调房间室温调节过程中存在时滞,相应的室温被控对象的数学模型可简化为一阶惯性加时间滞后环节^[5],其传递函数如下:

$$G_{plant,1}(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau_1 s} = \frac{0.371}{360s + 1} e^{-36s}, \quad (1)$$

式中 K_1 , T_1 和 τ_1 分别为室温被控对象的放大系数、时间常数(单位:秒)、时间滞后或时滞(单位:秒)。

3.2 送风温度被控对象的输入/输出特性

流经室内蒸发器中的液态制冷剂与输送空气之间

的热传递主要形式是对流换热和导热。经过热交换, T_{sa} 随着 q_r 的增加(减少)而下降(上升),即二者为负相关^[2]。且送风温度调节过程中也存在时滞。基于文献[5],可获取 q_r 与 T_{sa} 的数学关系,并对其进行拉普拉斯变换,传递函数如下:

$$G_{plant,2}(s) = \frac{K_2}{s} e^{-\tau_2 s} = \frac{-144.73}{s} e^{-10s}, \quad (2)$$

式中 K_2 和 τ_2 分别为送风温度被控对象的放大系数和时间滞后或时滞(单位:秒)。

3.3 电子膨胀阀的输入/输出特性

基于文献[5, 14],可知EEV开度 O_{EEV} 与流经室内蒸发器的液态制冷剂流量 q_r 成线性变化,所以EEV的数学模型是一个比例增益环节或比例环节,即

$$G_{EEV}(s) = K_V, \quad (3)$$

式中 K_V 为EEV的比例系数^[5],取值为 1.86×10^{-4} 。

3.4 IT-FOPIDC的输入/输出特性

室温PI^λD^μ控制器在ML中起到定值调节的作用,参考文献[7],其传递函数如下:

$$G_{IT-FOPIDC}(s) = K_{P,1} + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_{D,1} s^{\mu_1}, \quad (4)$$

式中 $K_{P,1}$, K_I , $K_{D,1}$, λ 和 μ_1 分别为室温PI^λD^μ控制器的比例、积分和微分系数、积分和微分算子阶次,是需要整定的。

3.5 SAT-FOPDC的输入/输出特性

送风温度PD^μ控制器作用于AL中,以室温PI^λD^μ控制器的输出值作为其设定值,发挥随动调节的作用^[7]。其传递函数如下:

$$G_{SAT-FOPDC}(s) = K_{P,2} + K_{D,2} s^{\mu_2}, \quad (5)$$

式中 $K_{P,2}$, $K_{D,2}$ 和 μ_2 分别为送风温度PD^μ控制器的比例、微分系数和微分算子阶次,也是需要整定的。

此外,参考文献[3, 13],可得 T_n 和 T_{sa} 相应的测量变送器的传递函数均为比例环节,且取值均为1。

综上,本文提出的室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统,如图2所示。

该串级调节系统中的SAT-FOPDC“粗调、快调” T_{sa} ,快速克服AL中的副干扰 F_2 对 T_{sa} 的影响,使得 T_{sa} 迅速稳定在送风状态。而IT-FOPIDC“细调、慢调” T_n ,则进一步克服ML中的主干扰 F_1 对 T_n 的影响,满足 $T_n = T_{n, set}$ 。同时以 $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ 为多目标函数的IMOAFSA连续对SAT-FOPDC和IT-FOPIDC的8个参数进行整定,获取相应的Pareto最优解 $[K_{P,1}^*, K_I^*, K_{D,1}^*, \lambda^*, \mu_1^*, K_{P,2}^*, K_{D,2}^*, \mu_2^*]$,满足对 T_{sa} 和 T_n 调节的多目标优化。明显地提升室温调节品质和减小 T_{sa} 的波动。这里,ITAE, t_c , E_{ss} 分别表示室温的时间乘以误差绝对值积分(integral time absolute error)、室温的调节时间、室温的稳态误差。对于IMOAFSA的相关内容将在第4节中介绍。

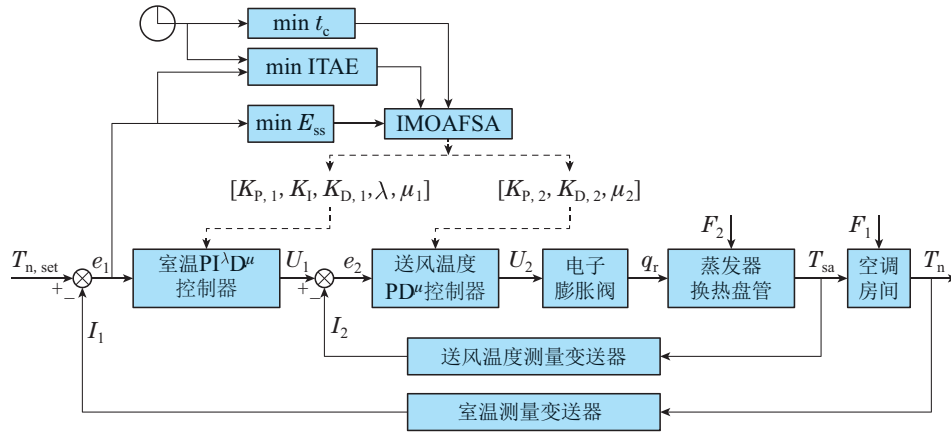


图2 室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统方框图

Fig. 2 Block diagram of the cascade control system of indoor temperature PI^λD^μ and supply air temperature PD^μ

4 改进人工鱼群算法

4.1 基本人工鱼群算法

结合鱼群生物及人工智能, 人工鱼群算法(AFSA)于2002年被首次提出. AFSA具有克服局部极值、鲁棒性强、易实现、收敛速度快及使用灵活等优点, 广泛应用于多个领域^[10]. AFSA变量部分包括: AF个体当前状态 $X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_j, \dots, X_n)$ 、种群规模 N 、AF视野Visual、移动的步长Step、最大重复尝试次数Try_n、拥挤度因子 δ 和个体 X_i 与 X_j 之间的距离 $d_{ij} = |X_i - X_j|$. 其行为函数包括聚群行为Swarm, 追尾行为Follow, 觅食行为Prey和随机行为Move. 算法运行过程中, 根据拥挤度排序和个体目标函数值 Y 的优劣比较, 对4种行为函数进行选择, 相应基本公式如下^[10-11]:

$$X_{i+1} = X_i + \text{rand}() \text{ Visual}, \quad (6)$$

$$X_{i+1,S} = X_i + \text{rand}() \text{ Step} \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|}, \quad (7)$$

$$X_{i+1,F} = X_i + \text{rand}() \text{ Step} \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|}, \quad (8)$$

$$X_{i+1,P} = X_i + \text{rand}() \text{ Step} \frac{X_P - X_i}{\|X_P - X_i\|}, \quad (9)$$

式中: X_{i+1} 是执行某个行为后的AF新状态; X_i 是AF当前状态; X_c 是执行聚群行为时, 领域中的AF中心位置状态; X_j 是执行追尾行为时, 领域中的AF最优状态; X_P 是执行觅食行为时, 在视野范围内随机感知到的AF的一个状态; rand()是介于0和1之间的随机数.

由于基本型人工鱼群算法(basic swarm optimization algorithm for fish school algorithm, BSOAFSA)明显存在运行后期的搜索盲目性较大、寻优速度慢及结果精度不高等缺点, 导致BSOAFSA寻优性能受到限制^[11]. 因此, 需要加以改进.

4.2 改进单目标人工鱼群算法

分析BSOAFSA, 发现Visual和Step两个参数对

于AF在目标区域内的搜索能力有着决定性作用. 因此本文构建一个自适应因子 a , 对Visual和Step进行非线性递减变化, 使得初始值Visual₀和Step₀较大, 终止值Visual_{min}和Step_{min}较小. 即满足算法在初期具有较强的全局搜索能力, 避免陷入局部最优; 在后期具有强的局部搜索能力和快速收敛. 其改进公式为

$$\begin{cases} a = 0.5 \cot\left(\left(\frac{i}{i_{\max}} + 1\right) \frac{\pi}{4}\right), \\ \text{Visual} = a \text{ Visual}_0 + \text{Visual}_{\min}, \\ \text{Step} = a \text{ Step}_0 + \text{Step}_{\min}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: i 为当前迭代次数; i_{\max} 为最大迭代次数; a 为自适应因子, $a \in [0, 0.5]$. 这里, a 随 i 增大的递减变化曲线如图3所示.

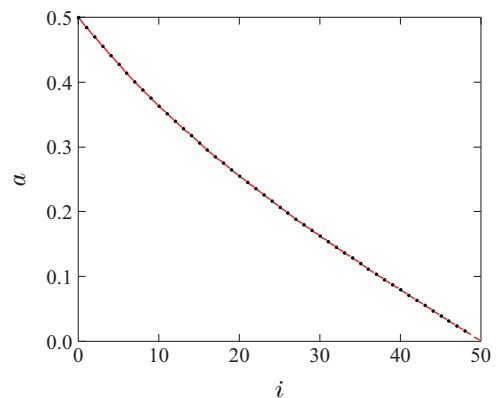


图3 自适应因子 a 随迭代次数 i 的变化曲线

Fig. 3 Curve of adaptive factor varying with the iteration step

由此, 保持BSOAFSA结构和其他参数不变^[10], 基于式(10)对Visual和Step进行非线性递减的改变, 本文重构的改进单目标人工鱼群算法(improved single objective AFSA, ISOAFSA), 相应的执行流程如下:

步骤 1 参数初始化: 对 $N, i_{\max}, \delta, \text{Try}_n, a, \text{Step}_0, \text{Step}_{\min}, \text{Visual}_0, \text{Visual}_{\min}$, 解空间的维度dim赋值. 同时, 将 $\min f(X)$ 设为ISOAFSA的适应度函数fitness;

步骤2 人工鱼状态初始化: 随机生成 N 条人工鱼个体, 作为初始鱼群, 并计算初始鱼群中个体的适应度值 $fitness[i], i = 1, 2, \dots, n$, 找出初生代中的最优人工鱼 X_o 记录;

步骤3 基于式(10), 自适应更新Step和Visual. 对每条人工鱼 X_i 执行以下行为;

步骤4 人工鱼 X_i 进行Swarm, 找出视野范围内的人工鱼数量 n_s 和中心位置 X_c . 若拥挤度 $D[X_c] < D[X_i]$, 且 $fitness[X_c] < fitness[X_i]$, 则输出聚群行为后的人工鱼 X_s . 按照式(7)向 X_c 移动. 反之, 则以随机视野找到新的状态 X_p , 并按式(9)进行Prey;

步骤5 人工鱼 X_i 进行Follow, 找出视野范围内的人工鱼数量 n_f 中的最小适应度个体 X_j . 若拥挤度 $D[X_j] < D[X_i]$, 且 $fitness[X_j] < fitness[X_i]$, 则输出追尾行为后的人工鱼 X_f , 按照式(8)向 X_j 移动. 反之, 则以随机视野找到新的状态 X_p , 按式(9)进行Prey, 更新状态;

步骤6 若达到 Try_n 后, 仍无法满足移动条件, 则在感知范围内的随机步长, 执行Move. 使得 X_i 达到一个新的状态并重新寻优, 跳出局部最优解;

步骤7 更新当前人工鱼状态, 对比状态 X_s 与 X_f . 若 $fitness[X_f] < fitness[X_s]$, 则记录 X_f 和 $fitness[X_f]$. 反之, 则记录 X_s 和 $fitness[X_s]$;

步骤8 更新信息. 对比 $fitness[X_o]$ 和步骤7中记录的适应值, 选取最优值, 记录执行以上所有行为对比后得到的人工鱼个体及最优适应度值;

步骤9 若满足 $i > i_{max}$, 则算法停止, 输出最优人工鱼个体和全局最优适应度值. 否则, 返回步骤3, 继续迭代运算.

借助MATLAB软件, 对该ISOAFSA进行编程, 命名为ISOAFSA.m文件. 这里, 相关参数的初始化设置为: $N = 30, \delta = 27, Try_n = 100, i_{max} = 500, Step \in [2.00E-04, 3], Visual \in [1.00E-03, 25], dim = 10$ 和 $a \in [0, 0.5]$.

选取文献[5]中的经典测试函数—Rastrigin函数, 其函数式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^D \{x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10\}, \quad (11)$$

式中 $x_i \in [-5.12, 5.12]$, 当 $x_i = 0 (i = 1, 2, \dots, D)$ 时, $f(x)$ 达到全局最小, 即 $\min f(x) = 0$.

分别将PSOA^[8], ABCA^[9], BSOAFSA^[10]和该ISOAFSA作用于Rastrigin函数, 运行30次, 结果统计见表1.

此外, 相应的 $\min f(x)$ 演变过程, 如图4所示.

分析表1, 该ISOAFSA所获取的各项数据均好于其他3种算法, 表明其收敛性占优. 分析图4, 该ISO-

FSA作用下的 $\min f(x)$ 变化曲线最平滑, 说明其全局搜索寻优和避免局部最优的能力最强, 且收敛速度也最快. 而其他3种算法作用下的 $\min f(x)$ 变化曲线, 不同程度地出现多处曲折, 这表明它们在寻优过程中易陷入局部最优. 因此, 该ISOAFSA是可行的, 收敛性和稳定性得到了明显提高.

表1 4种算法的优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results obtained by four algorithms

算法	ISOAFSA	BSOAFSA	PSOA	ABCA
理论值			0	
最小值	1.3E-4	4.2	5.0	8.5
最大值	2.9	15.7	26.9	23.5
平均值	2.1	8.1	14.5	9.1
方差	0.7	8.1	21.8	10.7
计算结果(置信度99.7%)	2.1±0.4	2.8±0.4	4.7±0.3	3.3±0.2

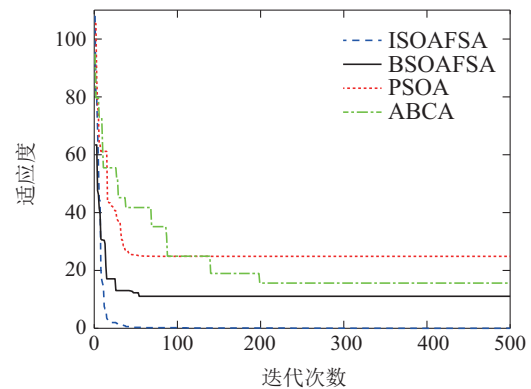


图4 4种算法作用下的 $\min f(x)$ 演变过程

Fig. 4 Evolution processes under four algorithms for $\min f(x)$

4.3 改进多目标人工鱼群算法

4.3.1 多目标优化问题简述

对于实际工程中的优化问题, 往往需要求解多个目标的最大或最小值, 且这多个目标是相互冲突、相互矛盾的. 因此, 求解需在多目标之间寻求一种平衡, 使得个目标相对最优, 从而得出这些目标函数的Pareto解集, 即多目标问题优化^[12].

4.3.2 改进多目标人工鱼群算法

高斯变异是由高斯分布衍生而来. 由于高斯变异能够在上一代个体的附近区域进行随机搜索, 可增强算法的局部搜索能力. 所以, 引入高斯变异^[15], 对存放在EF中的多目标优化问题Pareto最优解进行再次寻优, 相应的高斯变异公式如下:

$$rep_i^* = rep_i + k N(0, 1), \quad (12)$$

式中: i 为当前迭代次数; rep_i^* 和 rep_i 分别为存放在EF中的高斯变异后的AF解和AF原始的Pareto最优解;

k 为用户设定值; $N(0, 1)$ 是一个标准的高斯分布(也称正态分布).

基于第4.2节中的ISOAFSA和式(12)对多目标优化问题的Pareto最优解进行更新, 本文所设计的改进多目标人工鱼群算法(IMOAFSA), 相应运算流程如下:

步骤 1 参数初始化: 对 $N, i_{\max}, \delta, Try_n, a, Step_0, Step_{\min}, Visual_0, Visual_{\min}, dim$ 和 k 赋值;

步骤 2 计算每条人工鱼个体的 $\min F(X)$, 并进行快速非支配排序(fast non-dominated sorting, FNDS), 获取初生代中的非支配解(non-dominated solutions, NDS), 存放在EF中;

步骤 3 执行ISOAFSA中的步骤2-9, 对每条人工鱼进行自适应更新. 基于 $\min F(X)$ 对比, 得到相应的Pareto解集(Pareto set, PS). 并对其进行支配关系判断, 生成新的外部档案集EF(New). EF(New)中的个体数目记为 L ;

步骤 4 对EF(New)中的PS再次进行FNDS, 并对其外部档案维护. 若 $L > N$, 则进行拥挤度降序排序计算, 按照降序排列选取前 N 个体, 完成EF(New)的更新;

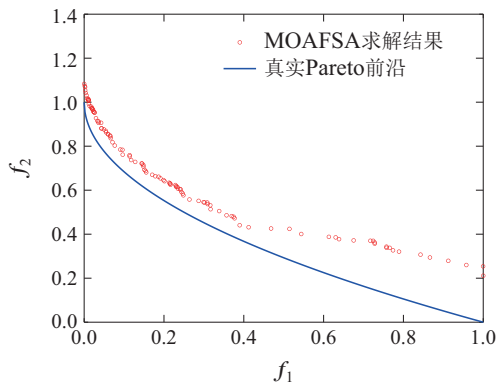
步骤 5 对更新后的EF(New)应用式(14), 并进行支配关系判断. 若新个体支配原个体, 则用新个体替换原个体, 再次对存放EF(New)中的Pareto最优解(Pareto optimum solution, POS)进行寻优与更新;

步骤 6 若满足 $i > i_{\max}$, 则停止算法, 输出最终EF(New)中存放的最优解 x^* 和POS*. 否则, 返回步骤3, 继续迭代执行.

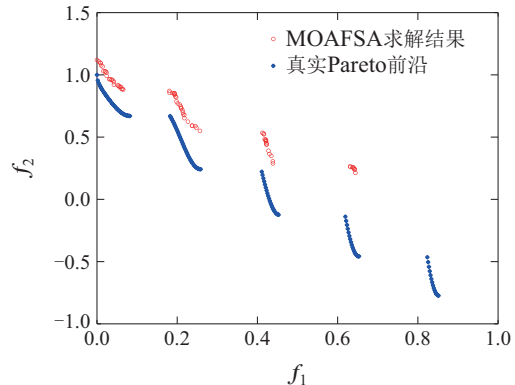
类似地, 该IMOAFSA可使用MATLAB软件进行编程, 命名为IMOAFSA.m文件. 这里, 相关参数的初始化设置为: $N = 300, \delta = 27, Try_n = 100, i_{\max} = 200, Step \in [2.00E-06, 0.15], dim = 10, Visual \in [1.00E-05, 1], k = 1$ 和 $a \in [0, 0.5]$.

下面选取ZDT1, ZDT3和DTLZ2测试函数, 其中ZDT1和ZDT3的目标个数为2, 而DTLZ2的目标个数为3. 分别将该IMOAFSA和基本型多目标人工鱼群算法(MOAFSA)^[11]作用于它们, 且运行30次, 以验证IMOAFSA的可行性. 图5所示为3种测试函数的多目标优化求解过程.

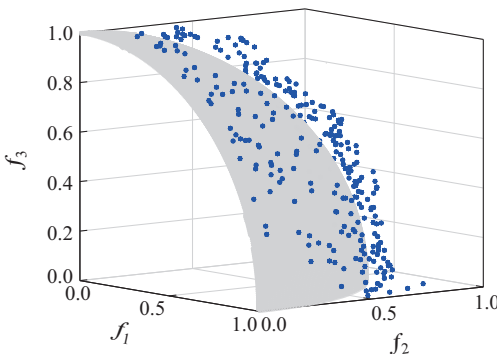
分析图5, 应用IMOAFSA对3个测试函数问题进行多目标优化求解时, 最后得到的相应非支配解均更好地收敛到相应的真实Pareto前沿; 而MOAFSA所得到的多目标优化求解结果与真实Pareto前沿之间的偏离度则明显偏大, 这说明IMOAFSA收敛性更好. 同时, 选取5个性能指标^[10]: 世代距离(generational distance, GD)、收敛性(convergence performance, CP)、反世代距离(inverted GD, IGD)、超体积(hyper volume, HV)和广泛性(spacing, SP), 对IMOAFSA和MOAFSA所得到的多目标优化求解结果进行定量对比, 如表2所示.



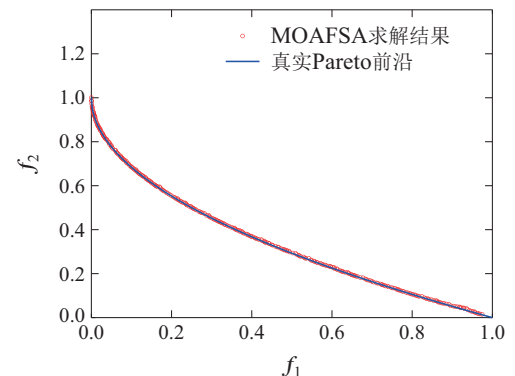
(a) MOAFSA对ZDT1的多目标优化



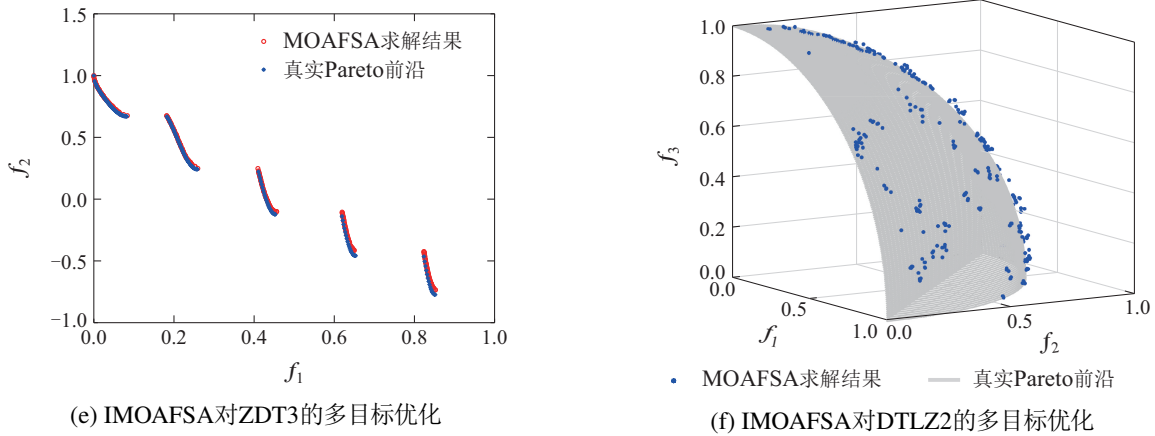
(b) MOAFSA对ZDT3的多目标优化



• MOAFSA求解结果 — 真实Pareto前沿
(c) MOAFSA对DTLZ2的多目标优化



(d) IMOAFSA对ZDT1的多目标优化



(e) IMOAFSA对ZDT3的多目标优化

(f) IMOAFSA对DTLZ2的多目标优化

图5 基于MOAFSA和IMOAFSA的3种测试函数多目标优化过程

Fig. 5 Multi-objective optimizing processes solved by MOAFSA and IMOAFSA for three test functions

表2 基于MOAFSA和IMOAFSA的3种测试函数多目标优化结果的性能评价

Table 2 Performance evaluation on multi-objective optimizing results solved by IMOAFSA and MOAFSA for three test functions

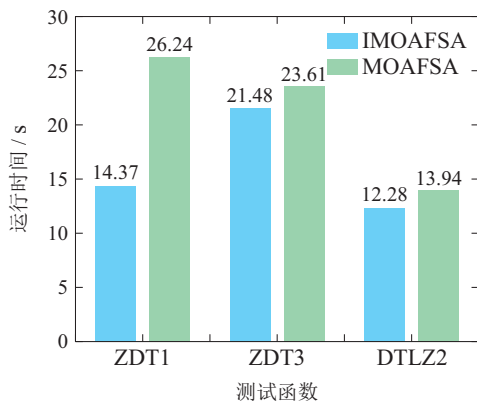
测试函数	统计指标	IMOAFSA / MOAFSA				
		GD	CP	SP	IGD	HV
DTLZ2	平均值	0.001(0.007)	0.019(0.050)	0.021(0.026)	0.019(0.050)	85.592 (63.691)
	最大值	0.002(0.008)	0.022(0.059)	0.025(0.037)	0.022(0.055)	86.345(70.548)
	最小值	0.001(0.006)	0.015(0.038)	0.015(0.021)	0.015(0.038)	84.577(53.647)
ZDT1	平均值	0.002(0.007)	0.026(0.087)	0.002(0.009)	0.026(0.087)	38.174(9.846)
	最大值	0.002(0.008)	0.029(0.105)	0.002(0.011)	0.029(0.105)	40.974(11.875)
	最小值	0.001(0.007)	0.024(0.071)	0.002(0.008)	0.024(0.071)	36.185(8.397)
ZDT3	平均值	0.001(0.019)	0.007(0.152)	0.005(0.010)	0.005(0.125)	35.239(7.038)
	最大值	0.001(0.028)	0.009(0.211)	0.010(0.030)	0.007(0.180)	44.329(11.658)
	最小值	0.001(0.012)	0.005(0.095)	0.002(0.006)	0.003(0.078)	30.616(3.261)

注: 基于MOAFSA的多目标优化求解结果, 相应的5个性能指标统计值列写在表中括号内。

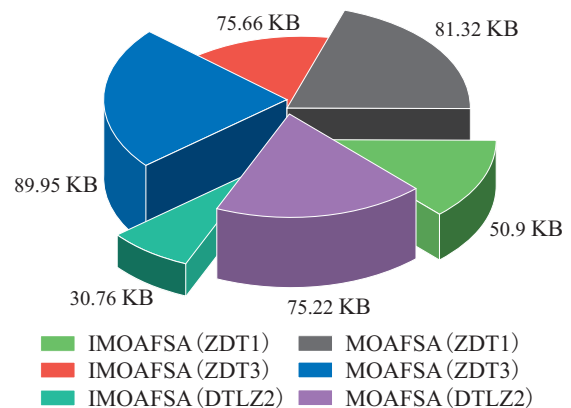
分析表2, 对于3种测试函数的多目标优化求解结果, IMOAFSA求解的性能指标GD, IGD, SP和CP的数值均小于MOAFSA. 这表明IMOAFSA所得到的非支配解更贴近Pareto前沿面, 算法收敛性与寻优更好, 解集更均匀. 而HV的数值则均大于MOAFSA, 这说明IMOAFSA的综合性能优于MOAFSA. 所以该IMO-

AFSA是可行、有效的。

此外, 以算法的运行时间和占用内存这两项作为算法计算复杂度的评价指标. 在 Windows 11 操作系统、Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU@1.60 GHz、1.80 GHz和8.00 GB 内存的条件下, 相应的测试结果如图6所示。



(a) 运行时间对比



(b) 占用内存对比

图6 MOAFSA和IMOAFSA的计算复杂度测试结果

Fig. 6 Computational complexity testing results for MOAFSA and IMOAFSA

分析图 6, 可见 IMOAFSA 执行 3 种测试函数所消耗的运行时间和占用内存均小于 MOAFSA, 这说明 IMOAFSA 比 MOAFSA 在计算复杂度方面有所改进. 因此, 综合图 5-6 及表 2 结果, 可知 IMOAFSA 性能相对于 MOAFSA 有明显的提高.

4.3.3 基于 IMOAFSA 的控制器参数整定算法

考虑 ITAE, t_c 和 E_{ss} [12], 以 $\min (ITAE, t_c, E_{ss})$ 作为 IMOAFSA 三目标函数, 设计 IT-FOPIDC 和 SATFOP-DC 参数整定算法, 获取 8 个控制器参数 $[K_{P,1}, K_I,$

$K_{D,1}, \lambda, \mu_1, K_{P,2}, K_{D,2}, \mu_2]$ 以及 ITAE, t_c 和 E_{ss} 的 PO-S, 从而提升室温控制品质和减小送风温度的波动. 由此, 基于 IMOAFSA 的室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 控制器参数整定算法执行, 如图 7 所示.

应用 MATLAB 对上述的执行流程进行编程, 保存为一个独立运行程序, 命名为 IMOAFSA·Parm.m. 需要说明的是: 该 IMOAFSA·Parm.m 是与下节中的闭环负反馈室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 串级控制 Simulink 模型同步运行的.

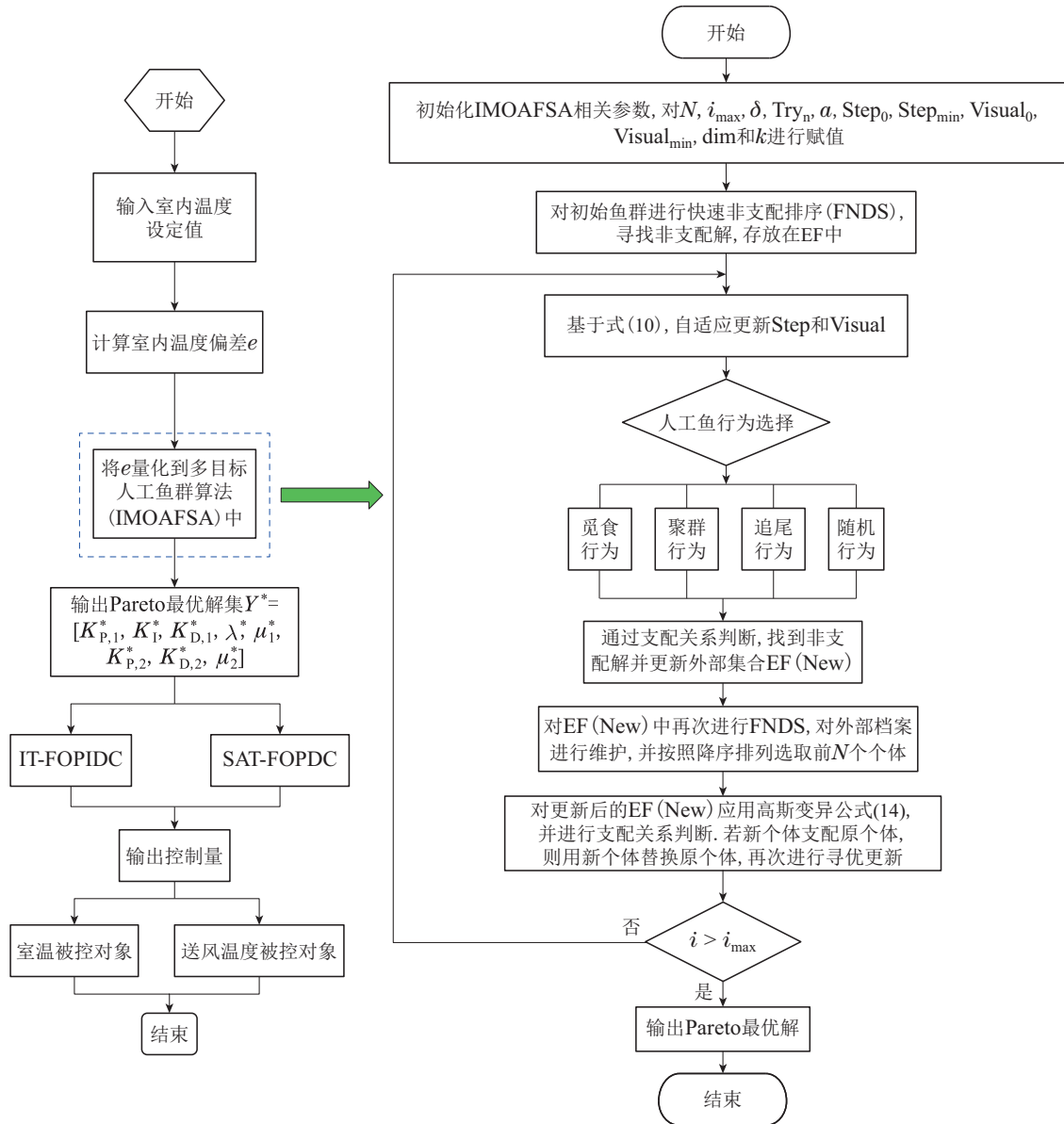


图 7 基于 IMOAFSA 的室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 控制器参数整定算法流程图

Fig. 7 The flowchart of the IMOAFSA-based algorithm to tune parameters of IT-FOPIDC and SAT-FOPDC

5 系统的仿真与分析

5.1 室温 $PI^\lambda D^\mu$ -送风温度 PD^μ 串级控制系统的组态与数值模拟

考虑到室温被控对象和送风温度被控对象均存在时滞环节, 需引入 Smith 预估器 [16] 来消除时滞对室温

与送风温度调节的不利影响. 即将室温、送风温度被控对象中的时滞环节 $e^{-\tau_1 s}$ 和 $e^{-\tau_2 s}$, 分别并联相应的时间滞后的补偿环节, 转化为带 Smith 预估器的室温被控对象和带 Smith 预估器的送风温度被控对象及其控制系统, 如图 8 所示.

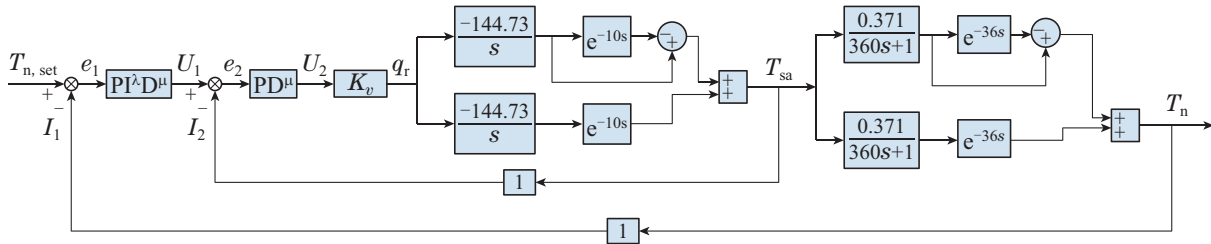


图8 带Smith预估器的室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统方框图

Fig. 8 Block diagram of the cascade control system containing the Smith predictors for indoor temperature PI^λD^μ and supply air temperature PD^μ

这样,既消除了原来闭环控制系统特征方程中的 $e^{-\tau_1 s}$ 和 $e^{-\tau_2 s}$ 不利影响^[16],又使得原来被延迟 τ_1 和 τ_2 的 T_n 和 T_{sa} 测量信号,可提前反馈到IT-FOPIDC和SAT-FOPIDC,经过求偏差 e_1 和 e_2 ,相应的PI^λD^μ和PD^μ运算后,及时发出调节指令 U_1 和 U_2 。所以基于图1所示室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统,运用M-

ATLAB/Simulink进行组态,如图9所示。这里,夏季室内初始温度 $T_{n,0} = 30^\circ\text{C}$, $T_{n, set} = 26^\circ\text{C}$ ^[14]。IMOAFSA参数设置同上;非支配解的数目 $m = 3$; $K_{P,1} \in [29, 35]$, $K_I \in [6, 9]$, $K_{D,1} \in [45, 50]$, $\lambda \in [0.7, 0.9]$, $\mu_1 \in [0.6, 0.8]$, $K_{P,2} \in [-2, -1]$, $K_{D,2} \in [-65, -60]$, $\mu_2 \in [0.6, 0.8]$ 。

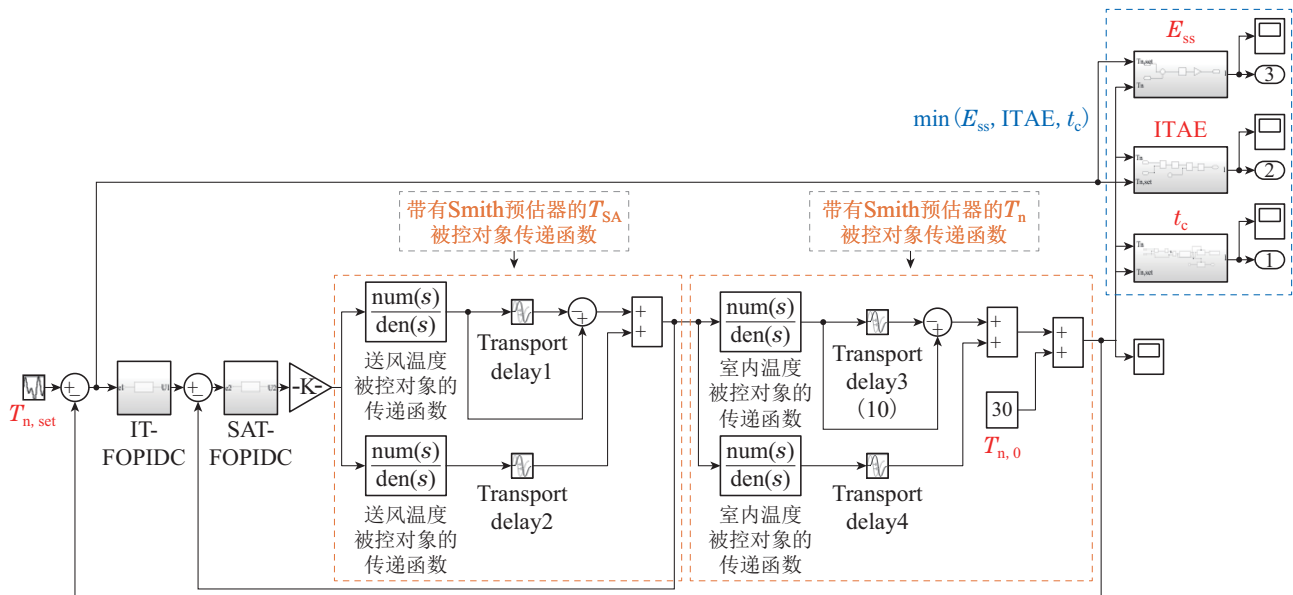
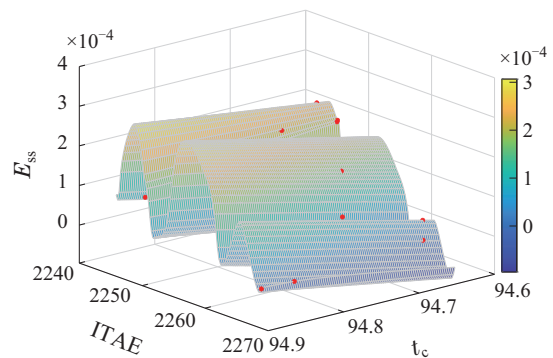


图9 基于IMOAFSA的室温PI^λD^μ-送风温度PD^μ串级控制系统Simulink模型

Fig. 9 Simulink model of the cascade control system of indoor temperature PI^λD^μ and supply air temperature PD^μ based on IMOAFSA

在MATLAB中的Command Window界面和Simulink环境,同步运行IMOAFSA.Parm.m和图9所示的Simulink组态模型,可得到IMOAFSA获取的IT-OFPIDC和SAT-FOPIDC参数Pareto最优解集 $Y^* = [K_{P,1}^*, K_I^*, K_{D,1}^*, \lambda^*, \mu_1^*, K_{P,2}^*, K_{D,2}^*, \mu_2^*]$ 和对应的 $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$ Pareto最优解集 $[\text{ITAE}^*, t_c^*, E_{ss}^*]$,列于下表。此外, $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$ 的多目标优化过程,如图10所示。

分析表3,可知3组 $[\text{ITAE}^*, t_c^*, E_{ss}^*]$ 数值之间是相互矛盾的。例如,相较于其他两组,第1组ITAE值最大,但 E_{ss} 值最小;第2组ITAE值虽小, t_c 值却大;而第3组尽管 t_c 值最小,但 E_{ss} 值最大,且ITAE值要大于第2组。



通过内插法得到的Pareto前沿面 · FOPIDC的Pareto最优解集

图10 $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$ 的多目标优化过程

Fig. 10 Multi-objective optimization process for $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$

表 3 IT-FOPIDC和SAT-FOPDC参数及其三目标函数的Pareto最优解

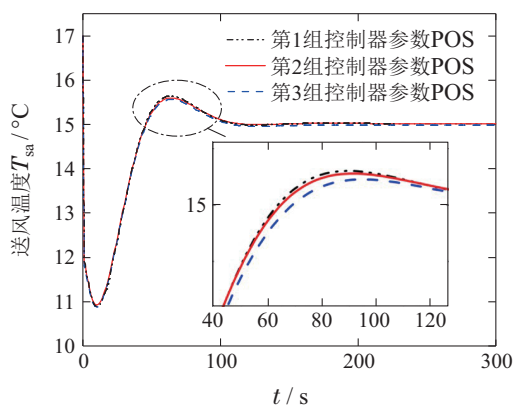
Table 3 Pareto optimal solutions of eight parameters of IT-FOPIDC and SAT-FOPDC and three objective functions

m	IT-FOPIDC参数	SAT-FOPDC参数	ITAE*/(°C·s)	t_c^*/s	$E_{ss}^*/°C$
1	[35.79, 9.47, 50.10, 0.79, 0.83]	[-1.49, -60.20, 0.72]	2268.76	94.85	6.38E-08
2	[35.94, 9.50, 50.48, 0.78, 0.82]	[-1.41, -60.09, 0.71]	2245.67	94.86	9.04E-05
3	[35.93, 9.50, 50.47, 0.78, 0.82]	[-1.40, -60.17, 0.71]	2250.13	94.64	2.00E-04

由图10可见不同的[ITAE*, t_c^* , E_{ss}^*]数值所对应的IT-FOPIDC和SAT-FOPDC参数的POS, 也对应了不同的控制特征. 因此, 当采用多目标优化算法整定控制器参数时, 可根据被控参数的性能指标需求, 如 E_{ss} 或 t_c 最小, 来选择相应控制器参数的POS. 这样既求得相对最优解, 使得相互矛盾的指标之间达到相对平衡, 又可满足不同的控制需求.

同时, 基于3组 IT-FOPIDC 和 SAT-FOPDC 参数的POS, 可得到 T_n , EEV开度 O_{EEV} 和 T_{sa} 的动态响应曲线, 分别如图11(a)–(c)所示.

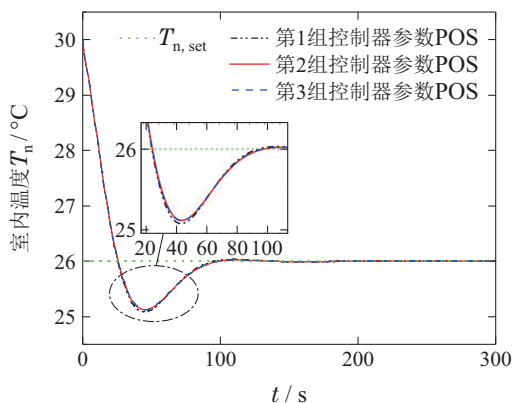
分析图11, 由于多目标优化问题的矛盾性, 每一组IT-FOPIDC和SAT-FOPDC参数的POS各自表现出了 T_n 和 T_{sa} 不同的控制效果. 通过快速调节EEV控参数 T_n 迅速变化, 直至 $T_n \approx T_{n,set}$, 串级调节过程才停止.



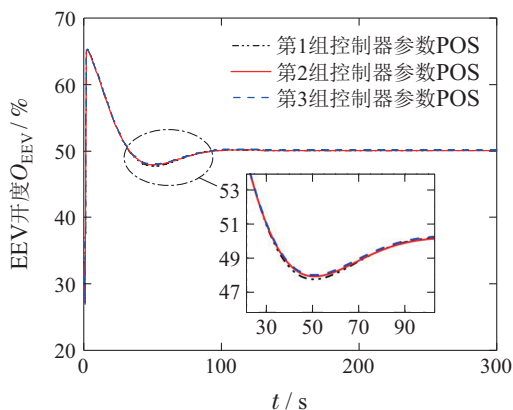
(c) T_{sa} 动态响应

图 11 3组控制器参数POS作用下的 T_n , O_{EEV} 和 T_{sa} 的动态响应

Fig. 11 Dynamic responses of T_n , O_{EEV} and T_{sa} under three sets of POS of controller parameters



(a) T_n 动态响应



(b) O_{EEV} 动态响应

5.2 室温控制效果的对比

对于相同的 IT-FOPIDC 和 SAT-FOPDC, 以 $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$ 作为多目标函数, 分别应用改进 Z-N 公式^[17]、MOAFSA^[10]和 IMOAFSA 对这两种控制器的 8 个参数进行整定. 不同算法解出的相应 Pareto 最优解 $[K_{P,1}^*, K_I^*, K_{D,1}^*, \lambda^*, \mu_1^*, K_{P,2}^*, K_{D,2}^*, \mu_2^*]$ 和 $[\text{ITAE}^*, t_c^*, E_{ss}^*]$ 见表 4. 输出的 T_n 动态响应如图 12 所示. 需要说明的是, 对于相同的分数阶串级调节系统中的室温被控对象参数、送风温度被控对象参数和电子膨胀阀参数的设置, 见第 3.1–3.3 节.

分析表 4 和图 12, 可知 IMOAFSA 作用下的各项指标, 如调节时间最短, E_{ss}^* 和超调量最小和衰减比在合理范围; 同时, 在调节作用下的室温变化趋势正确, T_n 迅速趋近 $T_{n,set}$. 对于相同的 IT-FOPIDC 和 SAT-FOPDC 而言, 这表明这两个串级控制器发挥出了良好的动态与静态调节性能.

6 结论

综合考量空凋制冷循环工艺和分数阶 PID 控制技术, 本文提出了室温 $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$ -送风温度 PD^μ 串级控制系统和设计了 IMOAFSA, 从而解决 MEACS 作用下的空调房间室温控制问题和提升室温调节品质. 通过经典测试函数的数值验算和该串级调节系统的仿真运行, 结果表明: 1) 该 IMOAFSA 是可行的, 其

搜索精度和收敛速度都得到了明显的提升; 2) 该串级调节系统能够“粗调、快调” T_{sa} 和“细调、慢调” T_n , 获取良好的室温调节品质和减小送风温度的波动. 相比其他控制系统, 调节质量占优; 3) 基于该IMO-AFSA和 $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ 的串级控制器参数整定算法, 可获取IT-FOPIDC和SAT-FOPD的8个参数和

三目标函数的Pareto最优解 $[K_{P,1}^*, K_I^*, K_{D,1}^*, \lambda^*, \mu_1^*, K_{P,2}^*, K_{D,2}^*, \mu_2^*]$ 和 $[ITAE^*, t_c^*, E_{ss}^*]$, 从而明显地提升 T_{sa} 和 T_n 的调节作用. 相比其他算法, 参数整定效果占优. 这些结论也可为空调与制冷系统的其它性能参数, 如压力、压差、湿度和流量等的控制问题, 提供相应的解决思路与参考.

表4 3种算法作用下的控制器参数、多目标函数Pareto最优解及对应的控制指标

Table 4 Pareto optimal solutions of eight parameters of two controllers and three objective functions and the corresponding control indexes under three algorithms

算法	IT-FOPIDC参数	SAT-FOPD参数	ITAE*/(°C·s)	t_c^*/s	$E_{ss}^*/°C$	超调量/%	衰减比/n : 1
改进Z-N公式	[30.0, 7.0, 45.0, 0.90, 0.7]	[-1.0, -62.0, 0.60]	4549	17.6	2.14E-04	-5	13:1
MOAFSA	[29.0, 6.0, 50.0, 0.88, 0.6]	[-1.5, -60.0, 0.75]	4403	196.5	1.32E-03	-4	9:1
IMOAFSA	[35.6, 9.0, 50.5, 0.78, 0.8]	[-1.6, -60.5, 0.71]	2367	97.01	1.19E-04	-3	8:1

注: 基于 E_{ss}^* 最小, 选取上述控制器参数整定的最优值.

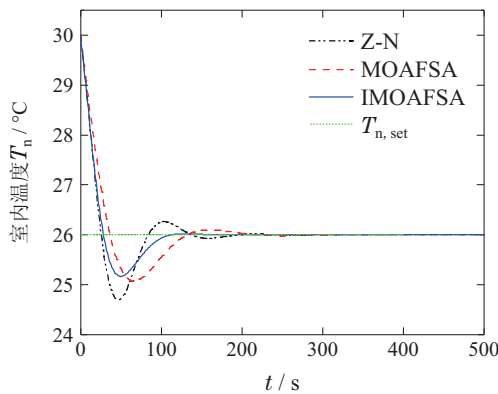


图12 3组控制器参数作用下的 T_n 动态响应

Fig. 12 Dynamic responses of T_n under three sets of the controllers' parameters

参考文献:

- [1] WAN H, CAO T, HWANG Y, et al. A review of recent advancements of variable refrigerant flow air-conditioning systems. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 169: 114893.
- [2] ATAŞŞ, AKTAŞ M, CEYLAN I, et al. Development and analysis of a multi-evaporator cooling system with electronic expansion valves. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42(11): 4513 - 4521.
- [3] LI S Y, WEI M S, WEI Y R, et al. A fractional order PID controller using MACOA for indoor temperature in air-conditioning room. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103295.
- [4] ZHANG Z Y, ZHANG C L, XIAO F. Energy-efficient decentralized control method with enhanced robustness for multi-evaporator air conditioning systems. *Applied Energy*, 2020, 279: 115732.
- [5] WANG Lin. *The control study of compressor and electronic expansion valve in ground-source water-cooled VRV system*. Jinan: Shandong Jianzhu University of China, 2018. (王琳. 地源水冷VRV系统中压缩机与电子膨胀阀的控制研究. 济南: 山东建筑大学, 2018.)
- [6] PODLUBNY I. Fractional-order systems and $PI^\lambda D^\mu$ -controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(1): 208 - 214.
- [7] LIU L, XUE D, ZHANG S. Closed-loop time response analysis of irrational fractional-order systems with numerical Laplace transform technique. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 350: 133 - 152.
- [8] KOMMULA B N, KOTA V R. Design of MFA-PSO based fractional order PID controller for effective torque controlled BLDC motor. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 49: 101644.
- [9] ZHOU X Y, LU J X, HUANG J H, et al. Enhancing artificial bee colony algorithm with multi-elite guidance. *Information Sciences*, 2021, 543(8): 242 - 258.
- [10] POURPANAH F, WANG R, LIM C P, et al. A review of artificial fish swarm algorithms: Recent advances and applications. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(3): 1867 - 1903.
- [11] JIANG M, ZHU K. Multi-objective optimization by artificial fish swarm algorithm. *International Conference on Computer Science and Automation Engineering*. Shanghai, China: IEEE, 2011: 506 - 511.
- [12] ZENG G Q, CHEN J, DAI Y X, et al. Design of fractional order PID controller for automatic regulator voltage system based on multi-objective extremal optimization. *Neurocomputing*, 2015, 160(21): 173 - 184.
- [13] LI S Y, WANG D, HAN X L, et al. Auto-tuning parameters of fractional PID controller design for air-conditioning fan coil unit. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2021, 26(2): 186 - 192.
- [14] GAO J J, XU X H, LI X M, et al. Model-based space temperature cascade control for constant air volume air-conditioning system. *Building and Environment*, 2018, 145: 308 - 318.
- [15] LI C, LIU Q, SONG S, et al. Path planning for mobile robots based on an improved ant colony algorithm with Gaussian distribution. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2188(1): 012005.
- [16] BETTAYEB M, MANSOURI R, AL-SAGGAF U, et al. Smith predictor based fractional-order-filter PID controllers design for long time delay systems. *Asian Journal of Control*, 2017, 19(2): 1 - 12.
- [17] MURESAN C I, KEYSER D R. Revisiting Ziegler-Nichols. A fractional order approach. *ISA Transactions*, 2022, 129: 287 - 296.

作者简介:

魏明松 硕士研究生, 目前研究方向为建筑环境参数的测控与优化, E-mail: wmssong@163.com;

李绍勇 博士, 教授, 目前研究方向为建筑设备自动化及其应用、基于Petri网的死锁控制策略, E-mail: lishao Yong99@163.com;

周姣 硕士, 讲师, 目前研究方向为建筑设备自动化及其应用, E-mail: 840362476@qq.com;

王成闵 硕士研究生, 目前研究方向为建筑环境参数的测控与优化, E-mail: 984826594@qq.com;

杨睿 硕士研究生, 目前研究方向为建筑环境参数的测控与优化, E-mail: 941276730@qq.com.