

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-476-12

基于 MMOAFSA 蒸汽压缩式 制冷机组的双参数前馈解耦 PID 控制策略研究

阴志杰 李绍勇 李东升 杨睿

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050)

【摘要】 鉴于蒸汽压缩式制冷机组蒸发温度 T_e 与过热度 D_{sh} 的控制回路之间存在强耦合及大惯性、非线性和时延等特性。提出了一种蒸发温度与过热度的前馈解耦 PID 控制策略, 且设计出改进多目标人工鱼群算法 (Modified Multi-objective Artificial Fish Swarm Algorithm, MMOAFSA) 对相应的 PID 控制器参数进行整定, 以提升 T_e 与 D_{sh} 的调节质量。首先, 对两个控制环路: 电子膨胀阀开度 O_{EEV} —蒸发温度 T_e 和压缩机驱动电机的供电频率 f —过热度 D_{sh} , 通过前馈补偿解耦方式来消除这两个控制回路之间的耦合效应。其次, 对基本型单目标人工鱼群算法的视野 V 和步长 S 进行指数递减变化, 构建改进单目标人工鱼群算法 (Modified Single Objective Artificial Fish Swarm Algorithm, MSOAFSA)。再将多目标优化的混沌局部搜索策略引入 MSOAFSA, 设计了 MMOAFSA。考虑绝对积分时间误差 (Integrated Time Absolute Error, ITAE)、调节时间 t_c 和稳态误差绝对值 E_{ss} , 将 $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ 作为 MMOAFSA 的多目标适应度函数, 并应用该 MMOAFSA 对两个控制器的 6 个参数 ($K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}$) 进行多目标寻优, 获取了相应的 Pareto 最优解。最后, 借助 MATLAB 工具, 对 VCRU 双参数前馈解耦 PID 控制系统 (Two-Parameter Feedforward Decoupling PID Control System for VCRU, VCRU-TPFDPIDCS) 组态与数值模拟。结果表明: 该控制策略能够消除控制回路之间的耦合效应, 同时 MMOAFSA 对两个控制器 6 个参数的自适应整定是可行的, 且对 T_e 与 D_{sh} 的调节质量也明显优于传统的 PID 调节方式。

【关键词】 蒸发温度与过热度; 前馈解耦 PID 控制; 改进的多目标人工鱼群算法多目标优化; 控制器参数整定

中图分类号 TP273+1 文献标识码 A

Study on Two-Parameter Feedforward Decoupling PID Control Strategy for Vapor Compressor Refrigerating Unit Using Modified Multi-Objective Artificial Fish Swarm Algorithm

Yin Zhijie Li Shaoyong Li Dongsheng Yang Rui

(School of engineering, Lanzhou university of technology, Lanzhou, 730050)

【Abstract】 In view of vapor compression refrigerating unit (VCRU) with strong coupling effects on the control loops between evaporation temperature (denoted as T_e) and degree of superheating (denoted as D_{sh}) and its characteristics of large inertia, non-linearity and time-delay. Consequently, this paper presents a feedforward compensation decoupling control PID mode for T_e and D_{sh} and designs a modified multi-objective artificial fish swarm algorithm (MMOAFSA) to tune parameters of the

基金项目: 兰州理工大学博士研究基金项目 (编号: BS04-237); 国家自然科学基金项目 (61364004, 51808275)

作者简介: 阴志杰 (1993-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 2215421217@qq.com

通讯作者: 李绍勇 (1966-), 男, 博士, 教授, E-mail: lishaoyong99@163.com

收稿日期: 2021-10-11

corresponding PID controllers in order to improve the control quality of T_e and D_{sh} . First of all, for two control loops in VCRU: the electronic expansion valve opening (denoted as O_{EEV}) and T_e and the power supply frequency of the motor driving compressor (denoted as f) and D_{sh} , by the feedforward compensation method, the coupling effect among these two loops is eliminated. Secondly, on the basis of basic single objective artificial fish swarm algorithm, a modified single objective artificial fish swarm algorithm (MSOAFSA) is reconstructed by decreasing the visual and step exponentially, and then a chaotic local search strategy with multi-objective optimization is added to this MSOAFSA so that an MMOAFSA is redesigned. Considering integrated time absolute error (ITAE), the regulating time (denoted as t_c) and the absolute value of steady state error (denoted as E_{ss}), $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ is selected as the multi-objective fitness function for MMOAFSA. So an algorithm of tuning parameters of PID controller for T_e and D_{sh} , is designed to solve the optimal values of six parameters (denoted as $K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}$) of the PID controllers for T_e and D_{sh} and the corresponding Pareto optimal solutions of ITAE, t_c and E_{ss} are obtained by means of multi-objective optimization. Finally, this two-parameter feedforward decoupled PID control system for VCRU (VCRU-TPFDPIDCS) is configured and simulated by means of MATLAB tools. The corresponding results the control strategy can eliminate the coupling effect between the control loops, and the adaptive setting of six parameters of two controllers by MMOAFSA is feasible, and the quality of T_e and D_{sh} regulation is obviously better than the traditional PID regulation method.

【 Keywords 】 Evaporation temperature and degree of superheating; feedforward decoupling PID control; modified multi-objective artificial fish swarm algorithm (MMOAFSA); multi-objective optimization; tuning parameters of controller

0 引言

蒸汽压缩式制冷机组 (Vapor Compression Refrigerating Unit, VCRU) 一般由压缩机、冷凝器、热力或电子膨胀阀和蒸发器构成, 其中蒸发器在制冷循环中发挥着关键作用, 即将低温低压的液态制冷剂进行气化, 释放制冷量给空调冷冻水, 从而对夏季的空调房间进行降温^[1], 满足室温 T_n 等于其设定值 $T_{n,set}$ 的空调设计需求。蒸发器的热工性能可通过两个重要参数—蒸发温度 T_e 和过热度 D_{sh} 来表征, 而 T_e 和 D_{sh} 测量值是否满足制冷工艺所要求的相应设定值 $T_{e,set}$ 和 $D_{sh,set}$, 对于实际运行中的蒸发器和 VCRU 具有重要意义^[2]。因此, 对 T_e 和 D_{sh} 施加恰当的控制方式, 确保 $T_e \approx T_{e,set}$ 和 $D_{sh} \approx D_{sh,set}$, 可满足蒸发器及其 VCRU 的安全、稳定与节能运行需求。

从控制角度来看, 关联 T_e 和 D_{sh} 的蒸发器这个被控对象具有结构参数时变、惯性大和时延等特性, 采用传统 PID 控制策略, 往往导致 T_e 和 D_{sh} 的稳态误差和超调量较大、调节时间较长等问题^[3], 会影响蒸发器运行的稳定性。同时, T_e 和 D_{sh} 的控制回路之间还存在耦合效应, 该耦合效应会使得 $T_e = T_{e,set}$ 和 $D_{sh} = D_{sh,set}$ 的预期控制效果下降。此外, 蒸发器这个被控对象还存在较大的时滞 τ , 该时滞会使得 T_e 和 D_{sh} 的控制系统稳定性下降。这些均导致蒸发器及其 VCRU 运行性能降低和 T_e 和 D_{sh} 动

态响应变差^[4]。因此, T_e 和 D_{sh} 控制问题及其 VCRU 运行模式的研究, 成为当前空调与制冷装置自动化领域的一个研究热点。

针对复杂非线性的双输入双输出的 VCRU, 尚羽佳等^[5]将无模型控制方法应用其节能控制方案中。仿真结果表明, 过热度与蒸发温度的控制效果稳定, 且动态响应得到了改善。张腾飞等^[6]将 PID 控制器与改进型 Smith 预估器相结合, 实现了制冷系统中过热度与蒸发温度的双回路 Smith 预估解耦 PID 控制。设计扰动观测器对系统的集中扰动进行估计并进行前馈补偿。结果表明, 该系统的抗干扰能力和跟踪性能均得到了提升。文献^[7]采用自适应 PID 控制器来控制冷凝器与蒸发器之间的电子膨胀阀开度 O_{EEV} 。这样 PID 控制器的 3 个参数 (K_P, K_I, K_D) 是连续整定的, 可适应室温被控对象的结构参数变化。既动态改变 O_{EEV} 和调控进入蒸发器的液态制冷剂流量 q_r , 又满足快速调节室温 T_n 需求。

PID 控制方式由于其结构简单、鲁棒性强和可靠性高等特点因而在工业过程参数的控制中得到了广泛的应用。其控制效果主要取决于相应 PID 控制器参数的整定^[8], 所以不少学者关注 PID 控制器参数的整定算法研究。为了对光电伺服系统中的光束进行高精度, 稳定的跟踪, 肖冰冰等^[9]引入一种改进的萤火虫算法 (Improved Firefly Algorithm,

IFA) 对 PID 控制器的参数进行优化整定。结果表明: 对于该光电伺服系统 (Photoelectric Servo System, PSS) 相比 Z-N 法, 改进的萤火虫算法对 PID 控制器参数进行优化整定后, 光束控制系统的响应速度、带宽和跟踪精度分别提高了 40%, 33.3% 和 25%。Chen 等^[10]采用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO) 对电机伺服驱动系统 (Motor Servo System, MSS) 的 PID 控制器参数进行整定, 结果表明该控制方法使得系统的动态性能和稳态性能得到了显著的提高, 其超调量、响应速度和 ITAE 都有着显著改善。

然而, 衡量 PID 控制系统质量的指标, 如稳定性、快速性以及准确性等是一个相互制约的关系, 同时满足这些指标很困难^[11]。Gilberto 等^[12]将多目标优化方法应用于制冷压缩过程中的 T_e 与 D_{sh} 控制问题。将评价指标: 积分绝对误差 (Integral Absolute Error, IAE)、控制量的总变化量 (Total Variation, TV) 和闭环对数模量 (Closed loop Log Modulus, LCM) 作为 T_e 和 D_{sh} 的 PID 控制器参数整定算法的目标函数, 实现了对 6 个控制器参数连续、多目标优化的整定, 并取得了预期的 T_e 和 D_{sh} 控制效果。文献^[13]采用改进多目标粒子群算法, 以轨迹跟踪偏差 (Trajectory Tracking Error, TTE) 和控制器输出力矩 (Controller Output Torque, COT) 作为目标函数, 对机器人轨迹跟踪模糊 PID 控制器中的 162 个参数进行优化整定。仿真结果表明了该方法对机器人轨迹跟踪控制的有效性和优越性。

综上, 考虑密切 T_e 和 D_{sh} 的蒸发器这个被控对象具有结构参数时变、惯性大和时延等特性及其 T_e 和 D_{sh} 的控制回路之间存在耦合效应, 为进一步提高 T_e 和 D_{sh} 控制质量, 本文提出蒸发温度与过热度前馈解耦 PID 控制策略的设计理念, 即 VCRU 双参数前馈解耦 PID 控制系统 (Two-Parameter Feed-forward Decoupled PID Control System for VCRU-TPFDPIDCS), 构建前馈解耦补偿器的传递函数矩阵, 消除这两个控制回路之间的耦合效应。同时, 对于 T_e 和 D_{sh} 的 PID 控制器参数整定问题, 依据基本型单目标人工鱼群算法, 对人工鱼的视野 V 和步长 S 进行指数递减变化, 构建 MSOAFSA。再将多目标优化的混沌局部搜索策略引入 MSOAFSA, 得到 MMOAFSA。以 $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ 作为它的 3 个目标适应度函数, 设计出 T_e 和 D_{sh}

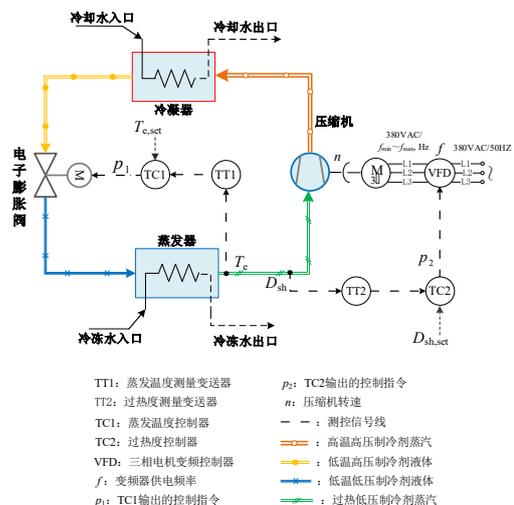
的 PID 控制器参数整定算法 MMOAFSA, 来获取相应的参数最佳值和 3 个目标函数的 Pareto 最优解。仿真结果表明, 该 MMOAFSA 是可行的, 能求解出两个 PID 控制器参数的最佳值和 ITAE、 t_c 和 E_{ss} 的 Pareto 最优解。同时本文提出的 VCRU-TPFDPIDCS 可消除两个控制回路之间耦合效应, T_e 和 D_{sh} 的调节品质得到明显提升。

1 VCRU 的蒸发温度与过热度控制

1.1 单级制冷循环工艺

如上所述, VCRU 包括压缩机、冷凝器、热力或电子膨胀阀和蒸发器。蒸发器发挥着将低温低压的液态制冷剂进行气化, 释放制冷量给空调冷冻水的作用, 实现对夏季的空调房间进行降温, 满足室温 $T_n \approx T_{n, set}$ 的空调设计需求。采用电子膨胀阀的 VCRU 单级制冷循环工艺^[2], 相应的测控流程图如图 1 所示。

分析图 1: 由蒸发器排出的低温低压制冷剂蒸汽被压缩机吸入, 再经过压缩机的做功, 使其变成高温高压的制冷剂蒸汽后排入冷凝器。在冷凝器中与空调冷却循环水进行热量交换, 而被冷凝为高压高温的液态制冷剂。该高压高温的液体制冷剂再经电子膨胀阀节流降压后, 变成低压低温的液态制冷剂进入蒸发器。低压低温的液态制冷剂在此吸收空调循环冷冻水的热量, 使得空调循环冷冻水的温度由 12°C 降低为 7°C; 同时变成低压低温的制冷剂蒸汽, 被压缩机吸入。这样, 经过压缩、冷凝、节流和蒸发四个热力过程的循环, 制冷剂将从低温物体吸收的热量不断地传递到高温热源中去, 从而达到制冷与降温的目的^[1]。



TT1: 蒸发温度测量变送器
 TT2: 过热度测量变送器
 TC1: 蒸发温度控制器
 TC2: 过热度控制器
 VFD: 三相电机变频控制器
 f: 变频器供电频率
 p1: TC1 输出的控制指令
 p2: TC2 输出的控制指令
 n: 压缩机转速
 - - -: 测控信号线
 - - -: 高温高压制冷剂蒸汽
 - - -: 低温高压制冷剂液体
 - - -: 低温低压制冷剂液体
 - - -: 过热度低压制冷剂蒸汽

图 1 VCRU 单级制冷循环工艺的测控流程图

Fig.1 Flowchart of measurement and control for VCRU with one stage refrigeration circulating process

这里, 存在关联 T_e 和 D_{sh} 的两个测量、控制环路 1 和 2。测量、控制环路 1: TT1 将反映蒸发温度大小的标准电流信号 T_e 传递给 TC1, 进行求偏差 $\Delta T_e = T_{e,set} - T_e$, 对 ΔT_e 进行 PID 运算后, 输出控制指令 p_1 给电子膨胀阀 EEV。改变其开度 O_{EEV} , 动态调节流入蒸发器的液态制冷剂流量 q_r , 使得 $T_e \approx T_{e,set}$ 。测量、控制环路 2: TT2 将反映过热度大小的标准电流信号 D_{sh} 传送给 TC2, 先进行 $\Delta D_{sh} = D_{sh,set} - D_{sh}$ 运算, 然后将 ΔD_{sh} 也进行 PID 运算后, 输出控制指令 p_2 给变频器 VFD。VFD 则输出变化的供电频率信号 f , 使得压缩机的转速 n 动态改变, 确保 $D_{sh} \approx D_{sh,set}$ 。

1.2 蒸发器中的两个控制回路的耦合作用

如上所述, 表征蒸发器性能的 2 个参数 T_e 和 D_{sh} , 对应两个控制环路: 电子膨胀阀开度 O_{EEV} —蒸发温度 T_e 和压缩机驱动电机的供电频率 f —过热度 D_{sh} 。相应的被控参数 T_e 和 D_{sh} , 记为 y_1 和 y_2 ; 相应的调节参数 O_{EEV} 和 f , 记为 u_1 和 u_2 。用矩阵表示, 即调节参数 $U = [u_1 \ u_2]^T$, 被控参数 $Y = [y_1 \ y_2]^T$

由于存在耦合效应。可借助矩阵分析法, 建立这两个控制回路的耦合传递函数矩阵。故两个控制回路的耦合传递函数关系可表示为 $Y = G_{ij}(s)U$ 。这里, $G_{ij}(s) (i=1,2; j=1,2)$ 表示第 j 个调节参数 u_j 与第 i 个被控参数 y_i 之间的传递函数, 如 $G_{i1}(s) (i=1,2)$ 表示第 1 个控制回路中的调节参数 $u_1 (O_{EEV})$ 分别对两个控制回路中的被控参数 $y_1 (T_e)$ 与 $y_2 (D_{sh})$ 造成的影响。故, 蒸发器中的 T_e 和 D_{sh} 控制回路之间的耦合传递函数矩阵, 如下式所示:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由文献[3]中的相关数据, 式 (1) 可改写为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.775}{37s+1} e^{-21s} & \frac{-1.206}{41s+1} e^{-4s} \\ \frac{-7.695}{37s+1} e^{-22s} & \frac{1.043}{29s+1} e^{-7s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

分析上式, 可知第 1 个控制回路中的调节参数 V_{EEV} 变化除了对该回路的被控参数 T_e 产生作用外, 还会影响到第 2 个控制回路中的被控参数 D_{sh} 。同时,

第 2 个控制回路中的调节参数 f 变化除了对该回路的 D_{sh} 产生作用外, 也会对第 1 个控制回路中的 T_e 存在着影响。因此该耦合效应会使得 $T_e = T_{e,set}$ 和 $D_{sh} = D_{sh,set}$ 的预期控制效果下降。

1.3 双参数前馈解耦 PID 控制系统

针对上述 2 个控制回路之间出现的相互影响, 本研究采用前馈补偿控制的方式对该 2 个控制回路进行解耦, 使之成为两个独立的无相互影响的参数 PID 控制系统。基于不变性原理^[4], 考虑 T_e 和 D_{sh} 控制回路之间控制量 U 与被控量 Y 的相互作用, 相应的蒸发器双参数前馈解耦补偿器的传递函数 $F_{ij}(s) (i=1,2; j=2,1)$, 如式 (3) 所示。

$$F_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)}; \quad F_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (3)$$

将式 (3) 所示的前馈解耦补偿器 $F_{ij}(s)$ 与蒸发温度和过热度的 PID 控制回路相综合, 本文提出的双参数前馈解耦 PID 控制系统, 如图 2 所示。

这样, 通过解耦补偿器 F_{12} 与 F_{21} 的添加, 可消除一个控制回路中的控制量 $u_j (j=1,2)$ 对另一个控制回路中的被控量 $y_i (i,j=1,2)$ 的耦合影响, 使之成为两个独立的控制回路。即, 蒸发温度 PID 控制系统通过操纵电子膨胀阀开度 O_{EEV} , 改变进入蒸发器的液态制冷剂流量 q_r , 实现 $T_e = T_{e,set}$ 的制冷工艺目的; 而不会对 D_{sh} 产生影响。过热度 PID 控制系统通过操纵压缩机驱动电机的供电频率 f , 改变压缩机转速 n , 满足 $D_{sh} = D_{sh,set}$ 的制冷工艺需要; 同样不会对 T_e 产生影响。

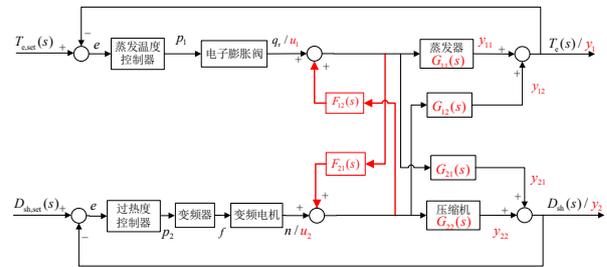


图 2 双参数前馈解耦 PID 控制系统方框图

Fig.2 Block diagram of two-parameter feedforward decoupling PID control system

2 改进的多目标人工鱼群算法及其 PID 控制器参数的整定

2.1 多目标优化原理

多目标优化是对多个所设计的目标函数同时进

行优化, 获取这些目标函数的最佳值。然而, 这些被同时优化的目标函数之间往往是相互冲突的, 不能同时达到最优, 因此在多目标优化过程中会在多个目标问题之间寻求一个平衡值, 从而得出这些目标函数的Pareto最优解^[15]。

一般而言, 具有 r 个目标的多目标问题优化, 相应的最小化求解, 如式(4)所示^[12]:

$$\begin{aligned} \min J(X) &= [J_1(X), J_2(X), \dots, J_r(X)] \\ g_i(X) &\leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, k) \\ h_i(X) &= 0 \quad (i=1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为决策向量, 其中 n 为决策变量数; $g_i(X) \leq 0$ 为不等式约束; $h_i(X)=0$ 为等式约束; r 为目标数量; i 为约束个数; J 为目标函数。

2.2 改进多目标人工鱼群算法

(1) 改进单目标人工鱼群算法

人工鱼群算法是一种基于模拟鱼群行为的优化算法, 基本型单目标人工鱼群算法 BSO AFSA 随机、觅食、聚群、追尾行为如式(5a) — (5d) 所示^[16]:

$$X_n^{i+1} = X_n^i + \text{Random}(V) \quad (5a)$$

$$X_n^{i+1} = X_n^i + (X_j - X_n^i) / \|X_j - X_n^i\| \cdot \text{Random}(S) \quad (5b)$$

$$X_n^{i+1} = X_n^i + (X_c - X_n^i) / \|X_c - X_n^i\| \cdot \text{Random}(S) \quad (5c)$$

$$X_n^{i+1} = X_n^i + (X_m - X_n^i) / \|X_m - X_n^i\| \cdot \text{Random}(S) \quad (5d)$$

式中: i 为迭代次数; n 为人工鱼; X_n^i 为人工鱼的当前状态; X_n^{i+1} 为执行行为后状态; $\text{Random}(V)$ 为随机视野; $\text{Random}(S)$ 为随机步长; X_j 为执行觅食行为: 随机视野范围内搜索的任意状态; X_c 为聚群行为: 领域中人工鱼的中心位置状态; X_m 为追尾行为: 领域中人工鱼的最优状态。

由于视野 V 和步长 S 是人工鱼群算法中是两个重要参数, 直接影响着鱼群的活动行为选择。然而, 固定的 V 和 S 会导致 BSOAFSA 的求解易陷入局部最优, 且收敛速度和寻优精度降低^[16]。故本文对 BSOAFSA 中的 V 和 S 进行适当改变, 即 V 和 S 随着 i 的增加, 而指数递减; 其他参数不变, 构建改进单目标人工鱼群算法 (Modified Single Objective Artificial Fish Swarm Algorithm, MSOAFSA)。修正的 V 和 S 表达式如下:

$$\begin{cases} V = V_{\min} + V_0 \exp(-i / i_{\max}) \\ S = S_{\min} + S_0 \exp(-i / i_{\max}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_0 、 V_{\min} 为视野的初始值与最小值, $V \in$

$[0.01, 10]$ ^[17]; S_0 、 S_{\min} 为步长的初始值与最小值, $S \in [0.002, 2]$ ^[17]; i 为当前迭代次数; i_{\max} 为最大迭代次数, 一般 $i_{\max} \geq 100$ ^[17]。

所以, 基于 BSOAFSA 和式(6), 本文重构的 MSOAFSA 流程如下:

Step 1: MSOAFSA 的适应度函数 $f(X)$ 设为 $\min f(X)$, 相关参数初始化设置, 包括人工鱼规模 N 、人工鱼维度 D 、 V_0 与 V_{\min} 、 S_0 与 S_{\min} 、当前迭代次数 i 、最大迭代次数 i_{\max} 、拥挤度因子 δ 、尝试次数 T 、变量 Variable;

Step 2: 初始化人工鱼群的状态 X_n ;

Step 3: 对每个人工鱼进行适应度函数值 $\text{fitness}[n](n=1, 2, \dots, N)$ 的计算, 并找出最优人工鱼 X_b ;

Step 4: 基于式(6), 进行 V 与 S 自适应更新;

Step 5: 将人工鱼 X_n 进行聚群行为, 找出视野范围内的中心位置。若拥挤度 $D[X_c] < D[X_n]$, 且 $\text{fitness}[X_c] < \text{fitness}[X_n]$, 则输出聚群行为后的人工鱼 X_s , 并向前移动一个步长。反之, 则进行觅食与随机行为, 继续搜索聚群行为下的最优状态 X_s ;

Step 6: 将人工鱼 X_n 进行追尾行为, 找出在视野范围内最小适应度个体 X_m 。若拥挤度 $D[X_m] < D[X_n]$, 且 $\text{fitness}[X_m] < \text{fitness}[X_n]$, 则输出追尾行为后的人工鱼 X_f , 并向前移动一个步长。反之, 则进行觅食与随机行为, 继续搜索追尾行为下的最优状态 X_f ;

Step 7: 对比聚群与追尾行为中的最优状态 X_s 与 X_f , 若 $\text{fitness}[X_f] < \text{fitness}[X_s]$, 则输出 X_f 替换 X_b 。反之, 则输出 X_s 替换 X_b ;

Step 8: 若 $i < i_{\max}$, 则返回 Step 3, 继续迭代运算。否则运算结束, 输出最优适应度值 fitness^* 。

该 MSOAFSA 可用 MATLAB 软件进行编程, 命名与保存为一个 MSOAFSA.m 文件。选取文献 [18] 中的 Rastrigin 函数, 数学式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad (7)$$

式中, $x_i \in [-5.12, 5.12]$, $f(x)$ 是多峰函数, 理论极小值点在 $(x_1, x_2, \dots, x_D) = (0, 0, \dots, 0)$ 处取 0。

将该 MSOAFSA 和 BSOAFSA^[17] 分别作用于 Rastrigin 函数, 进行 $\min f(x)$ 优化结果对比。这里, MSOAFSA 与 BSOAFSA 相关参数设置为: $V \in [0.01, 10]$ 、 $S \in [0.002, 2]$ 、 $i_{\max}=100$ 、 $N=200$ 、 $\delta=15$ 、

$T=100$ 、 $D=10$ 、 $\text{Variable} \in [-10, 10]$ 。BSOAFSA 中的 $V=5$ 、 $S=2$ 。两种算法分别运行 10 次, 相应的统计结果和 $\min f(x)$ 在 MSOAFSA 和 BSOAFSA 作用下的变化进程, 分别如表 1 和图 3 所示。

表 1 MSOAFSA 和 BSOAFSA 对 Rastrigin 函数优化结果
Table 1 Optimization results of Rastrigin function by MSOAFSA and BSOAFSA

统计指标 \ 算法	MSOAFSA	BSOAFSA
理论极值	0	0
平均值	6.02	8.82
中间值	6.95	8.87
最优值	3.43	6.96
标准差	1.79	1.18
测试结果 (置信度 99.7%)	6.02±0.29	8.82±0.13

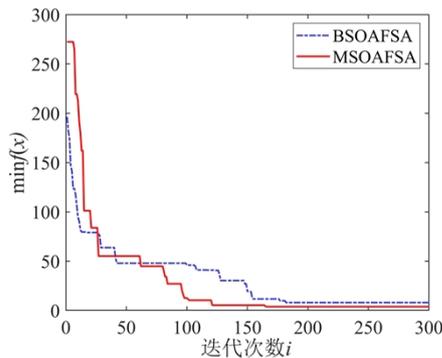


图 3 基于 MSOAFSA 和 BSOAFSA 的 Rastrigin 函数适应度值进化过程

Fig.3 Evolution process of Rastrigin function fitness value based on MSOAFSA and BSOAFSA

分析表 1 和图 3, 相比 BSOAFSA, 本文重构的 MSOAFSA 可以使 Rastrigin 函数适应度值更接近理论值。BSOAFSA 虽在早期收敛速度较快, 但在后期明显差于 MSOAFSA, 这也说明了对人工鱼视野和步长进行动态调整的必要性, 也表明了 MSOAFSA 是可行的。

(2) 改进多目标人工鱼群算法

为了使用人工鱼群算法求解多个目标问题的 Pareto 最优解, 本节将基于多目标的混沌局部搜索策略^[19] (Multi-objective Chaotic Local Search Strategy, MOCLSS) 引入 MSOAFSA, 形成改进多目标人工鱼群算法 (Modified Multi-objective

Artificial Fish Swarm Algorithm, MMOAFSA), 相应的运算流程如下:

Step 1: 初始化设置: 对 V_0 、 S_0 、 V_{\min} 、 S_{\min} 、 i_{\max} 、 N 、 δ 、 T 和混沌搜索最大迭代次数 G_{\max} 、映射参数 r 、变量 Variable 进行赋值;

Step 2: 计算每个人工鱼个体的目标函数 $J(X)$, 并进行快速非支配排序 (FNDS), 找出非支配解 (NDS), 存放在外部档案集 (Rep) 中;

Step 3: 开始优化, 由式 (6) 自适应更新 V 、 S , 对其执行的行为进行选择, 包括: 觅食 Pray、聚群 Swarm、追尾 Follow 和随机行为 Move, 并将其通过 FNDS, 找出 NDS, 与上次生成的 Rep 进行合并, 生成 $(\text{Rep})_{\text{New}}$;

Step 4: 对合并后的 $(\text{Rep})_{\text{New}}$, 再次进行 FNDS, 并对其维护: 若 $\text{Rep} > N$, 则进行 Dis 计算, 并按照降序排列选取前 100 个个体, 完成 Rep 的更新;

Step 5: 通过基于多目标的混沌局部搜索策略, 再次更新 Rep;

Step 6: 若 $i \geq i_{\max}$, 则停止算法, 输出最终 Rep 作为 Pareto 最优解 x^* 。否则, 返回 Step 3 迭代继续。

同样的, 上述 MMOAFSA 也可用 MATLAB 软件进行编程, 命名与保存为一个 MMOAFSA.m 文件。选取文献[20]中的 ZDT1、ZDT3 和 DTLZ2 测试函数, 分别将该 MMOAFSA 和文献[15]中的 MOAFSA (也编程、命名与保存为一个 MOAFSA.m 文件) 作用于它们。这里, MMOAFSA 和 MOAFSA 相关参数设置为: $V \in [0.01, 5]$ 、 $S \in [0.002, 1.2]$ 、 $i_{\max}=200$ 、 $N=200$ 、 $\delta=15$ 、 $T=100$ 、 $G_{\max}=10$ 、 $r=4$ 、 $\text{Variable} \in [0, 1]$, MOAFSA 中的 $V=2$ 、 $S=0.5$ 。

此外, 选择 5 个性能指标^[20]: 世代距离 (Generational Distance, GD)、反世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD)、超体积 (Hypervolume, HV)、均匀性 (Spacing, SP) 和多样性 (Diversity, DIV) 来定量分析两种算法的优化性能。其中, GD 表示非支配解到 Pareto 最优解的平均距离, 而 IGD 为 GD 的逆向映射, 其值越小, 表明优化解越接近于参考解且算法收敛性越好; HV 值表示非支配解集与参照点围成的目标空间中区域体积, 其值越大说明算法的综合性能更强; SP 为每个解到其他解的最小距离标准差, 其值越小, 说明解集越均匀; DIV 值反应解的多样性, 值越小,

解的多样性越高。

MOAFSA与MMOAFSA分别运行10次，图4和表2 分别为这两种算法对上述3 个测试函数的优化

过程和基于5 个性能评价指标的结果统计，括号内代表MOAFSA^[15]的优化结果。

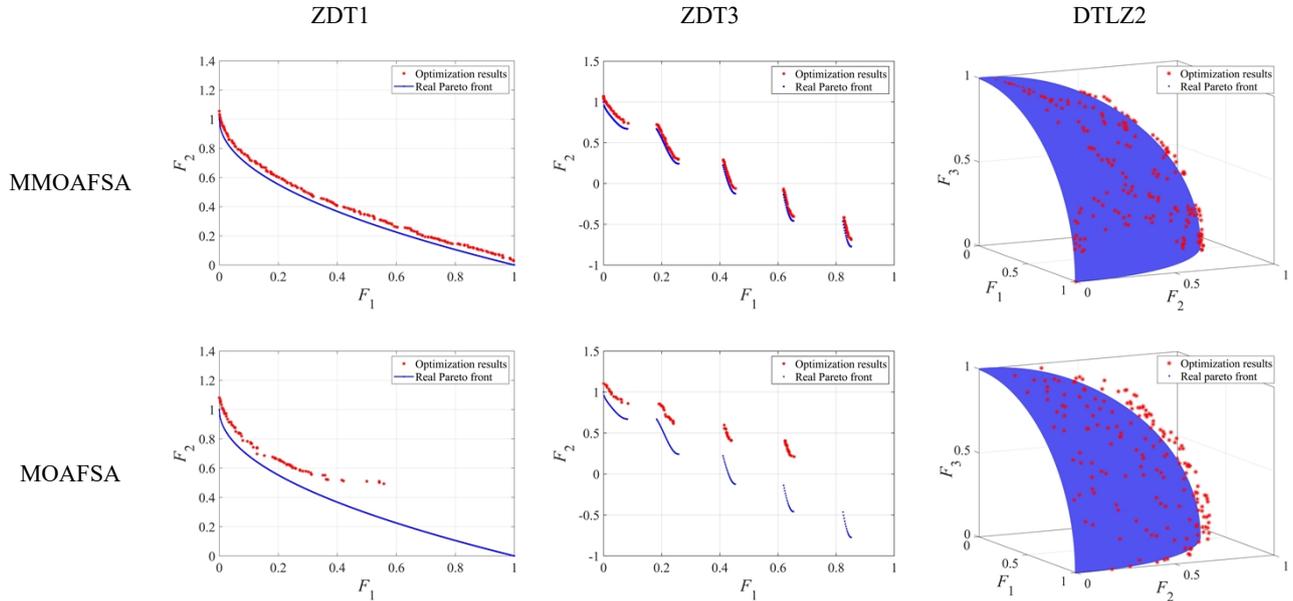


图4 MOAFSA^[15]和MMOAFSA对ZDT1、ZDT3、DTLZ2 测试函数的优化过程

Fig.4 Optimizing processes solved by MOAFSA and MMOAFSA for the test functions of ZDT1, ZDT3 and DTLZ2

由图4可知，当MOAFSA与MMOAFSA对两目标和三目标函数的问题进行优化时，最后均可收敛到相应的真实Pareto前沿区域。但后者求解变化与

真实Pareto前沿变化之间的偏离度更小，且所求解的非支配解更贴近Pareto前沿，收敛性更好。

表2 MMOAFSA 与 MOAFSA^[15]性能指标结果

Table 2 Performance index results solved by MMOAFSA and MOAFSA

	GD	HV	DIV	IGD	SP
ZDT1	0.0022 (0.0083)	25.5042 (4.6667)	0.5976 (0.8176)	0.0302 (0.0642)	0.0031 (0.0072)
ZDT3	0.0029 (0.0198)	25.9552 (7.3422)	0.6466 (0.8429)	0.0241 (0.1285)	0.0037 (0.0067)
DTLZ2	0.0015 (0.0101)	56.9353 (53.3448)	0.5285 (0.5183)	0.0182 (0.0730)	0.0236 (0.0323)

分析表2，可知MMOAFSA求解的HV平均值大于MOAFSA，表明其综合性能优于MOAFSA。对于其他4项指标平均值，MMOAFSA的解均小于MOAFSA，表明MMOAFSA得到的非劣解相比MOAFSA更接近Pareto前沿面，算法的收敛性及解的多样性均优于MOAFSA。所以，该MMOAFSA的改进思路是可行、有效的，为后面PID控制器参数整定算法的设计，奠定了坚实的基础。

2.3 基于MMOAFSA的PID控制器参数整定算法

本节选择ITAE、 t_c 和 E_{ss} ^[8]作为MMOAFSA的三个目标函数：

$$\min J(X)=[J_1(X), J_2(X), J_3(X)] \quad (8)$$

式中， $J_1(X)=ITAE$ ； $J_2(X)=t_c$ ； $J_3(X)=E_{ss}$ 。min $J(X)$ 作为PID控制器参数整定算法的目标函数，相应的运算流程表述如下：

Step 1: 根据Z-N整定法的PID控制器参数整定公式，计算出PID控制器参数的初始值 $J_0=[K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}]$ ，置入基于MALAB/Simlink工具

组态中的 PID 控制器, 且设定变量 K_P 、 K_I 和 K_D 的上、下限;

Step 2: MMOAFSA 参数设置的初始化;

Step 3: 输入单位闭环负反馈 PID 控制系统的反馈信号 $e(t)$, 基于 $\min J(X)$, 计算每个鱼群个体的适应度值 $[J_1, J_2, J_3]$;

Step 4: 增大 i , 由式 (6) 自适应更新人工鱼的 V 和 S , 并对其进行行为选择。同时通过 FNDS, 不断输出每一组 NDS, 即 y_i ;

Step 5: 对 NDS, 进行 MOCLSS, 并更新输出搜索结果 NDS。同时输出对应的闭环负反馈 PID 控制系统动态响应;

Step 7: 当 $i \geq i_{\max}$, 停止运算。输出 PID 控制器参数最优值 $y^*=[K_P^*, K_I^*, K_D^*]$, ITAE、 t_c 和 E_{ss} 的 Pareto 最优解以及相应的闭环负反馈 PID 控制系统动态响应。否则, 返回 Step 3。

需要说明的是, 可用 MATLAB 软件, 将上述的 PID 控制器参数整定流程进行编程, 保存为一个独立程序, 命名为 MMOAFSA.m。该 MMOAFSA.m 是与组态的闭环 PID 负反馈控制系统同步运行的。

选用文献[11]中的二阶传递函数, 如式 (9) 所示, 作为被控对象设计一个单位闭环 PID 负反馈控制系统作用于它。

$$G_{\text{plant}}(s) = \frac{1}{4.32s^2 + 19.1801s + 1} \quad (9)$$

首先借助 MATLAB/Simlink 工具, 进行上述的单位闭环 PID 负反馈控制系统的组态。其次, 分别用 MOAFSA^[15]、MMOAFSA 和 Z-N 法来整定该 PID 控制器的 3 个参数。其中 MOAFSA^[15] 也将 $\min J(X)$ 作为其目标函数, 它与 MMOAFSA 相关的参数设置为: $N=30$ 、 $i_{\max}=30$ 、 $V \in [0.01, 2]$, $S \in [0.002, 1]$ 、 $\delta=15$ 、 $T=100$ 、 $G_{\max}=10$ 、 $r=4$ 、 $K_P \in [2, 5]$ 、 $K_I \in [0.1, 0.5]$ 、 $K_D \in [0.2, 0.5]$ 。最后, Z-N 法离线计算出 PID 控制器参数值。再依次同步运行 MOAFSA.m 和单位闭环 PID 负反馈控制系统组态模型, MMOAFSA.m 和单位闭环 PID 负反馈控制系统组态模型。可获取该 PID 控制器的 3 个参数整定结果, 如表 3 所示。

表 3 PID 控制器参数整定的结果

Table 3 Results of tuning three parameters for PID controller

参数整定值	K_P^*	K_I^*	K_D^*
Z-N	15.3	9.6	6.12
MOAFSA	3.414	0.628	0.067
MMOAFSA	4.496	0.238	0.492

相应的闭环负反馈 PID 控制系统动态响应曲线, 如图 5 所示。

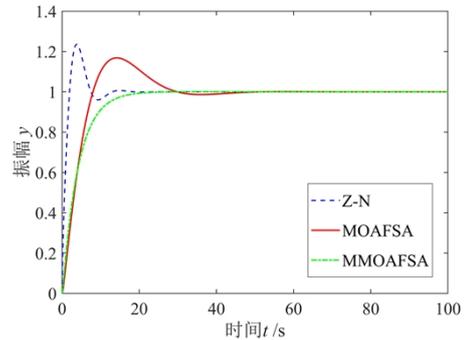


图 5 不同 PID 控制器参数值的单位闭环负反馈控制系统动态响应

Fig.5 Dynamic responses of a unit closed-loop negative feedback PID control system with different values of controller's parameters

分析图 5 可知, 基于 MMOAFSA 整定的 K_P^* 、 K_I^* 、 K_D^* , 其闭环 PID 控制系统的性能指标, 如最大偏差、超调量和误差等, 均好于由 Z-N 法和 MOAFSA 参数整定作用下的闭环 PID 控制系统的性能指标, 表明 MMOAFSA 对 PID 控制器的参数整定是可行的。

3 数值仿真

3.1 双参数前馈解耦 PID 控制系统中的组成环节的输入/输出特性

(1) 蒸发器的输入/输出特性

蒸发器这一被控对象为一阶惯性、时滞的环节, 其输入/输出特性为: 通过电子膨胀阀后的制冷剂流量 q_r /蒸发温度 T_e , 传递函数如下^[3]。

$$G_{11}(s) = \frac{0.775}{37s+1} e^{-21s} \quad (10)$$

(2) 压缩机的输入/输出特性

压缩机同样为一个一阶惯性、时滞的环节, 其输入/输出特性为: 变频电机输出的电机转速 n /过热度 D_{sh} , 传递函数如式 (11) 所示^[3]。

$$G_{22}(s) = \frac{1.043}{29s+1} e^{-7s} \quad (11)$$

(3) 电子膨胀阀的输入/输出特性

具有线性流量特性的电子膨胀阀,可连续改变其开度 O_{EEV} 来调节制冷剂流量 q_r 。因此它的传递函数如下^[21]:

$$G_{EEV}(s) = \frac{0.82}{s} \quad (12)$$

(4) 变频器的输入/输出特性

在工程实践中,变频器传递函数可简化以设定为一个比例环节^[22]。

$$K = f/U \quad (13)$$

式中, f 为变频器输出的供电频率, Hz; U 为输入的电压控制信号, V。

(5) 变频电机的输入/输出特性

通过文献^[22],可知变频电动机为一个一阶惯性环节,其输入/输出特性为:变频器输出频率 f /转速 n ,传递函数如下所示:

$$G_M(s) = \frac{K_M}{T_M s + 1} \quad (14)$$

式中, K_M 为稳态转速与供电频率的比值; T_M 为电机拖动系统的时间常数,取值为电机启动时间的四分之一。

(6) 蒸发温度、过热度 PID 控制器的输入/输出特性

在蒸发温度与过热度两个控制回路中均选择简单、形式固定、操作便捷的 PID 控制器。相应的传递函数表示如下^[10]:

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (15)$$

式中, K_P 、 K_I 、 K_D 为控制器的比例增益、积分增益、微分增益。

(7) 蒸发温度、过热度测量变送器的输入/输出特性

测量变送器在过程控制中是必不可少的组成部分,蒸发温度和过热度测量变送器分别作用于这两个控制回路中的反馈通道上。蒸发温度和过热度测量测量变送器均视为比例环节^[5],对应的传递函数分别为 $H_1(s)=1$, $H_2(s)=1$ 。

3.2 双参数前馈解耦 PID 控制系统的组态与仿真
考虑到蒸发器与压缩机的被控对象具有时滞

特性,引入 Smith 预估器^[6],来消除时延带来的影响,提升系统的控制品质,同时,设置前馈补偿解耦器 $F_{12}(s)$ 和 $F_{21}(s)$,实现对 VCRU 双参数的解耦控制。所以,基于 MMOAFSA 的蒸发温度与过热度前馈补偿解耦 PID 控制系统,如图 6 所示。

基于 $\min(\text{ITAE}, t_c, E_{ss})$,通过 MMOAFSA 对两个控制回路中的 PID 控制器 6 个参数 ($K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}$) 进行寻优整定,获取 PID 控制器参数最优解及三目标函数值,使得 $T_{e,\text{set}} \approx T_e$, $D_{sh,\text{set}} \approx D_{sh}$,满足制冷工艺的要求。

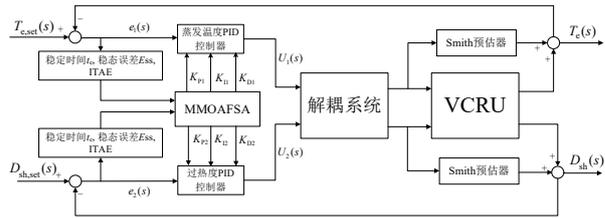


图 6 基于 MMOAFSA 的蒸发温度与过热度前馈解耦 PID 控制系统方框图

Fig.6 Block diagram of two-parameter feedforward decoupling PID control system based on MMOAFSA

基于图 6 和 Simulink 工具,构建出该双参数前馈解耦 PID 控制系统的 Simulink 模型,如图 7 所示。夏季制冷工况下的空调冷冻水进/出口温度为 $12^\circ\text{C} / 7^\circ\text{C}$,而蒸发温度一般较冷冻水出口温度低 $2^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$,且过热度范围为 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ ^[1]。因此,设置蒸发温度初始、终止值分别为 3°C 、 5°C ,即 $T_{e,0}=3^\circ\text{C}$ 、 $T_{e,\text{set}}=5^\circ\text{C}$;过热度初始、终止值分别为 8°C 、 6°C ,即 $D_{sh,0}=8^\circ\text{C}$ 、 $D_{sh,\text{set}}=6^\circ\text{C}$ 。

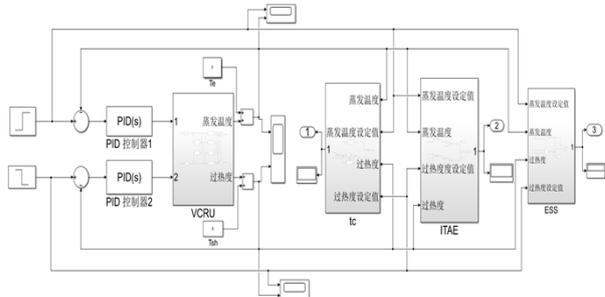


图 7 基于 MMOAFSA 的双参数前馈补偿解耦 PID 控制系统 Simulink 模型

Fig.7 Simulink model of two-parameter feedforward decoupling PID control system based on MMOAFSA

因此,在 MATLAB 中的 Command Window 界

面和 Simulink 环境, MMOAFSA.m 参数设置同上述 2.3 中一样, 非支配解的规模设定为 3, 变量范围调整为: $K_{P1}, K_{P2} \in [0.7, 1]$ 、 $K_{I1}, K_{I2} \in [0.05, 0.08]$ 、 $K_{D1}, K_{D2} \in [0.02, 0.06]$ 。同步运行 MMOAFSA.m 和图 7 所示的 Simulink 模型, 该 MMOAFSA 得到的蒸发温度、过热度 PID 控制器参数及其对应的 ITAE、 t_c 和 E_{ss} 的 3 组 Pareto 最优解, 列于表 4。

表 4 蒸发温度、过热度 PID 控制器参数及其三目标函数的 Pareto 解

Table 4 Pareto solutions of parameters of PID controllers for evaporation temperature and degree of superheating and three objective functions

	1	2	3
蒸发温度PID 控制器参数	[0.8998, 0.0718, 0.0513]	[0.9000, 0.0682, 0.0519]	[0.8967, 0.0740, 0.0523]
过热度PID控 制器参数	[0.8962, 0.0602, 0.0439]	[0.8999, 0.0577, 0.0481]	[0.9000, 0.0590, 0.0435]
t_c/s	212.93	179.52	174.67
ITAE($^{\circ}C \cdot s$)	3855.18	3838.81	3865.51
$E_{ss}/^{\circ}C$	2.40E-13	0.021E-13	6.76E-13

从表4可看出三组Pareto解及其对应的三个目标函数值存在互相冲突的地方, 每组解都表现出不同的特征, 例如, 第3组的 t_c 最小, 但ITAE与 E_{ss} 却大于另外两组解。由此看出, 在多目标优化整定控制器参数过程中可以获得侧重点不同的控制效果, 以供不同的控制需求使用。

相应的ITAE、 t_c 和 E_{ss} 的优化过程, 如图8所示。

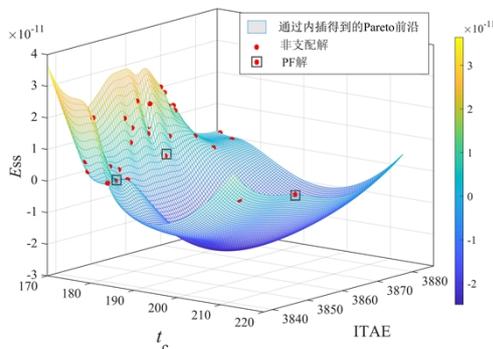


图8 ITAE, t_c , E_{ss} 的寻优过程

Fig.8 Optimization process for ITAE, t_c and E_{ss}

由图8可清楚地看出不同Pareto解所对应的三个目标函数值之间的关系, 在曲面上不同的位置都反应出不同的控制特征。

同时, 空调夏季工况下, 基于蒸发温度、过热度PID控制器参数的3组Pareto最优解, 可得到蒸发温度、过热度的动态响应过程, 分别如图9和10所示。

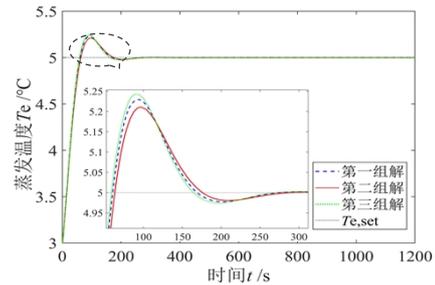


图 9 三组 Pareto 最优解下的蒸发温度动态响应

Fig.9 Dynamic responses of evaporation temperature under three Pareto optimal solutions

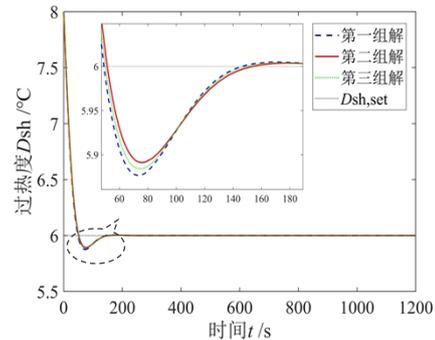


图 10 三组 Pareto 最优解下的过热度动态响应

Fig.10 Dynamic responses of degree of superheating under three Pareto optimal solutions

分析图9和10可知, 基于MMOAFSA得到的两个PID控制器的三组解均可使蒸发温度与过热度达到较好的控制效果。但从局部分大部分可看出, 每组解在其调节时间、超调量都表现出不同的差异, 且与表4中三目标函数值所反应出的特征相对应。

3.3 与其他控制方式的对比

此外, 选择 Z-N 整定法和 MOAFSA, 也对相同的蒸发温度与过热度 PID 控制系统中的两个控制器参数进行整定和输出 T_c 和 D_{sh} 的动态响应, 且与 MOAFSA 进行对比分析, 如图 11 和 12 所示。

分析图 10 和图 11, 可知采用 MMOAFSA 的 PID 控制器参数整定方式, 蒸发温度与过热度响应

曲线的性能均优于其他两种方式。Z-N 整定法, 虽然调节时间缩短, 但表现出了较大的超调量和震荡频率。相比 MOAFSA, MMOAFSA 使得 T_e 和 D_{sh} 的调节时间和超调量均有一定的减小, 提升了控制品质。

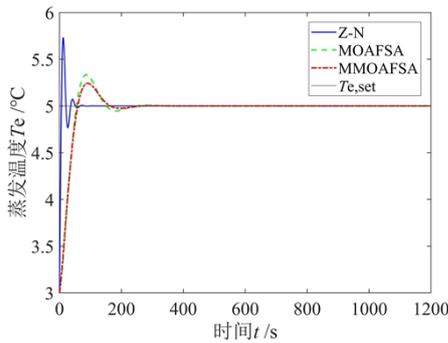


图 11 三种 PID 控制器参数整定方式下蒸发温度响应曲线

Fig.11 Dynamic responses of evaporation temperature under three modes of tuning parameters of PID controller

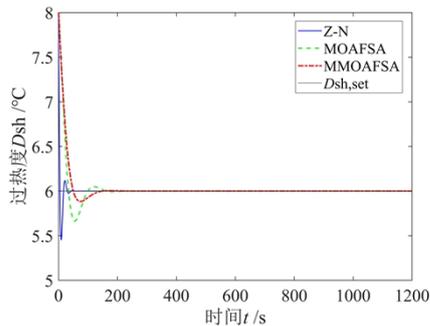


图 12 三种 PID 控制器参数整定方式下过热度响应曲线

Fig.12 Dynamic responses of degree of superheating under three modes of tuning parameters of PID controller

4 结论

针对VCRU中的蒸发温度与过热度被控对象, 本文提出了一种基于MMOAFSA的双参数前馈补偿解耦PID控制策略。首先, 通过对人工鱼的视野和步长同时进行非线性改变, 重构了MSOAFSA, 且基于Rastrigin函数测试, 验证了该算法改进的可行性。其次, 将基于多目标优化的混沌局部搜索策略引入MSOAFSA, 形成MMOAFSA。通过ZDT1、ZDT3和DTLZ2三个测试函数和GD、IGD、DIV、SP、HV五个评价指标, 可看出MMOAFSA在收敛性、分布性、多样性等均优于MOAFSA。进而将 $\min(ITAE, t_c, E_{ss})$ 作为MMOAFSA的目标函数, 形成PID控制器参数的整定算法。同时, 构建前馈解

耦补偿器的传递函数矩阵, 来消除蒸发温度 T_e 和过热度 D_{sh} 这两个控制回路之间的耦合效应。最后, 构建 T_e 和 D_{sh} 前馈解耦PID控制系统, 对于 T_e 和 D_{sh} 回路中两个PID控制器中的6个参数, 应用MMOAFSA进行寻优整定, 获取了其最佳值及ITAE, t_c , E_{ss} 的PF解。满足 $T_e=T_{e,set}$ 和 $D_{sh}=D_{sh,set}$ 的制冷工艺目的, 且调节时间、超调量和震荡频率都有着明显的改善, 控制质量显著提升。

参考文献:

- [1] 石文星,田长青,王宝龙.空气调节用制冷技术(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2016,3-28.
- [2] Muresan C I, Robin D K, Isabela B, et al. Benchmark challenge: a robust fractional order control auto-tuner for the refrigeration systems based on vapor compression[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018,51(4):31-36.
- [3] 李冬辉,高亚男.压缩式制冷系统预测自抗扰控制[J].西安交通大学学报,2020,54(11):98-105,120.
- [4] Dola G P, Somanath M. Modified Smith predictor based cascade control of unstable time delay processes[J]. ISA Transactions, 2012,51(1):95-104.
- [5] 尚羽佳,王卫军,刘克冲.压缩式制冷系统双回路无模型控制方法[J].仪器仪表标准化与计量,2018,(6):25-29.
- [6] 张腾飞,方星,刘飞,等.基于改进 Smith 预估补偿的制冷系统抗干扰控制[J].控制工程,2020,27(7):1204-1209.
- [7] Ding X D, Wang J, Duan P Y, et al. A novel on-line auto-tuning PI controller for the superheat of evaporator with electronic expansion valve[C]. In: 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Ji Nan, China, 2017:7513-7517.
- [8] 刘金琨.先进 PID 控制. MATLAB 仿真(第四版)[M].北京:电子工业出版社,2016:336-337.
- [9] 肖冰冰,张燕革,陈晶,等.改进萤火虫算法的 PID 控制器在光电伺服系统中的应用[J].光通信技术,2021,45(6): 58-62.
- [10] Chen L B, Xiong X H, Zheng Y S, et al. Parameter tuning of PID controller of servo system based on particle swarm optimization algorithm[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019,533(1):171-177.
- [11] Gaidhane P J, Nigam M J. Preference oriented multi-objective optimization for tuning of controllers: a

- reference point-based approach[C]. In: 5th IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, Solan, India, 2019:342-347.
- [12] Gilberto R M, Helem S S, Victor H A R. Control of refrigeration systems based on vapor compression using multi-objective optimization techniques [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018,51(4):722-727.
- [13] 蒋清泽,王宏涛.改进多目标 PSO 算法优化机器人轨迹跟踪模糊 PID 控制器[J].应用科技,2021,48(3):97-103.
- [14] Wang P F, Wan J S, Wei X Y, et al. A decoupled mechanical shim core control strategy for a pressurized water reactor using feedforward compensation and a multimodel approach[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019,126:194-210.
- [15] Jia S Y, Zhou K, Zhou S S, et al. An artificial fish swarm algorithm for a multi-objective grain transportation problem[J]. Evolutionary Intelligence, 2020,13(1):9-19.
- [16] Neshat M, Adeli A, Sepidnam G, et al. A review of artificial fish swarm optimization methods and applications[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2017,5(1):108-148.
- [17] 余胜威.MATLAB 优化算法案例分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2015:526-533.
- [18] Dhawan D, Singh R. Performance evaluation of nature inspired meta-heuristic algorithms using Rosenbrock, Rastrigin and Sphere test function for Optimization[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 2019,8(1):1157-1163.
- [19] Tavazoeia M, Haeri M. Comparison of different one-dimensional maps as chaotic search pattern in chaos optimization algorithms[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007,187(2):1076-1085.
- [20] 郑金华. 多目标进化优化(第一版)[M].北京:科学出版社,2017:17-97.
- [21] 朱建秋,温阳东,林勇.基于自适应 DE 算法的电子膨胀阀 PID 控制器参数整定[J]. 化工自动化及仪表,2016,43(1):16-19.
- [22] 侯秀杰. 局部通风机智能控制系统研究[D].北京:中国矿业大学,2016:14-16.

(上接第 439 页)

- [15] Pottker G, Hrnjak P. Experimental investigation of the effect of condenser subcooling in R134a and R1234yf air-conditioning systems with and without internal heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2015,50:104-113.
- [16] ANSI/ASHRAE 34-2007, Designation and safety classification of refrigerants[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [17] Park K J, Kang D G, Jung D. Condensation heat transfer coefficients of R1234yf on plain, low fin, and Turbo-C tubes[J]. International journal of refrigeration, 2011, 34(1):317-321.
- [18] Saitoh S, Dang C, Nakamura Y, et al. Boiling heat transfer of HFO-1234yf flowing in a smooth small-diameter horizontal tube[J]. International journal of refrigeration, 2011,34(8):1846-1853.
- [19] 刘雨声,李万勇,施骏业,等.R1234yf 热泵技术综述与潜力分析[J].制冷学报,2020,41(1):10-19.
- [20] 郑贤德. 制冷原理与装置[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [21] 吴业正,李红旗,张华.制冷压缩机[M].北京:机械工业出版社,2010.