

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-523-09

应用改进人工蜂群算法的 VCRU 冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制的数值研究

李东升 李绍勇 阴志杰

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050)

【摘要】 充分考虑蒸汽压缩式制冷机组 (Vapor Compression Refrigerating Unit, VCRU) 中的冷凝器被控对象具有结构参数时变、惯性大和时滞等特点, 传统 PID 调节方式会导致其关键性能参数—冷凝温度 T_c 的调节时间长、稳态误差和超调量均较大的问题。对此提出冷凝温度分数阶 PID ($PI^{\lambda}D^{\mu}$) 控制策略, 且设计改进人工蜂群算法 (Improved Artificial Bee Colony Algorithm, IABCA) 对该冷凝温度分数阶 PID 控制器 (Fractional Order PID Controller for Condensation Temperature, CT-FOPIDC) 参数进行优化整定, 提升 T_c 的调节质量。首先, 根据空调制冷工艺的要求和相关自动控制理论, 对该冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统中的各个组成环节进行建模。其次, 基于基本人工蜂群算法 (Basic Artificial Bee Colony Algorithm, BABCA), 对学习因子 c_1 和 c_2 进行线性变化, 保持其他参数不变, 重构 IABCA, 且将 $\min ITAE$ (Integrated Time Absolute Error, 绝对积分时间误差) 作为其目标函数, 进而对 CT-FOPIDC 的 5 个参数进行整定, 得到相应的最佳参数值。最后, 使用 MATLAB 软件, 分别对 IABCA 和该冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统进行编程和组态。仿真结果表明该 IABCA 对 CT-FOPIDC 参数的优化整定是可行的, 同时该冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统的调节品质明显优于传统 PID 控制系统。

【关键词】 冷凝温度; 分数阶 PID ($PI^{\lambda}D^{\mu}$) 控制; 改进人工蜂群算法; 控制器参数整定; 数值模拟 (仿真)
中图分类号 TP273+.1 文献标识码 A

Numerical Study on $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Control Using Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Condensation Temperature in Vapor Compression Refrigeration Unit

Li Dongsheng Li Shaoyong Yin Zhijie

(School of Civil Engineering Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050)

【Abstract】 Considering the controlled plant of condenser in vapor compression refrigerating unit (VCRU) with characteristics of time-varying structure parameters, large inertia, and time-delay, etc, the conventional PID control mode can lead to the problems of the long regulating time, larger steady state error and overshoot for condensation temperature, one of the key performance parameters associated with condenser. So this paper proposes a fractional order PID control mode for condensation temperature and designs an improved artificial bee colony algorithm (IABCA) to optimally tune the parameters of this fractional order PID controller for condensation temperature (CT-FOPIDC) in order to upgrade the control quality of CT. Firstly, according to the requirements of air conditioning and refrigerating process and related automatic control theory, each component of this fractional

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61364004)

作者简介: 李东升 (1994-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1061669208@qq.com

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

收稿日期: 2021-12-13

order PID control system for CT is modeled, respectively. Secondly, on the basis of basic artificial bee colony algorithm (BABCA), by varying the learning factors c_1 and c_2 linearly and keeping the other parameters constant, an IABCA is redesigned and min ITAE (integrated time absolute error) is selected as its objective function. Thus, this IABCA can tune five parameters of CT-FOPIDC and obtain the optimal values of the corresponding parameters. Finally, IABCA and this fractional order PID control system for CT are programmed and configured by MATLAB software, respectively. Numerical simulation results show that the proposed IABCA to optimize the parameters of CT-FOPIDC is feasible and meanwhile the control quality of this fractional order PID control system for CT is obviously better than that of the conventional PID control one for CT.

【Keywords】 Condensation temperature; Fractional order PID control; Improved artificial bee colony algorithm (IABCA); Tuning parameters of controller; Numerical simulation

0 引言

如今中央空调系统 (Central Air Conditioning System, CACS) 在建筑领域中的应用越加广泛^[1], 而作为 CACS 冷、热源子系统中的重要设备—蒸汽压缩式制冷机组 (Vapor Compression Refrigerating Unit, VCRU), 具有结构简单, 便于操作, 输出冷、热负荷大和能效比 (Coefficient of Performance, COP) 高等特点^[2], CACS 功能的发挥与其运行工况密切相关。其中作为 VCRU 关键部件之一的冷凝器, 担负着将在空调房间室内吸收到的热量通过它释放到室外环境的重要作用^[3], 其冷凝效果可通过重要参数—冷凝温度 T_c 来表征。而 T_c 测量值是否满足制冷循环工艺所要求的设定值 $T_{c,set}$, 对于实际运行的冷凝器及其 VCRU 至关重要。文献[4]研究了 $T_{c,set}$ 变化对于 VCRU 运行能耗的影响, 结果表明: 当 $T_{c,set}=40^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ 和 $45^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 时, 压缩机运行能耗可分别提高 13% 和 8%。文献[5]指出在蒸发温度不变的情况下, T_c 平均值每下降 1°C , VCRU 的 COP 值可相应地提高 3.76%。由此可见, 设计适当的冷凝温度控制系统, 确保 $T_c=T_{c,set}$, 使得冷凝器及其 VCRU 安全、经济运行, 已成为国内外空调制冷技术领域的研究热点之一^[6]。

针对冷凝温度控制这一问题, Lee 等^[7]提出了一种冷却水回水温度设定值固定的方法, 该方法能够实现 $T_c=T_{c,set}$ 效果, 同时可消除由于室外湿球温度变化, 使得冷却水供水温度也发生变化, 对 T_c 的影响。Li 等^[8]提出了一种在 CO_2 跨临界制冷系统中增加经济器的方法, 该方法可以有效降低冷凝器出口的冷凝温度 T_c , 且 COP 值也得到一定提升。Al-Bassam 等^[9]提出了一种根据冷凝温度变化, 变速调节冷却塔风机转速的方法, 结果表明: 在不同冷负荷需求和不同环境湿球温度下, 该方法可保持

稳定的冷却塔出水温度并可以有效调节 T_c 。吴斌^[10]提出了一种流经冷凝器的冷却水供、回水温差的控制方法, 该方法可快速反映冷凝温度的变化, 同时确保 $T_c=T_{c,set}$ 。张瑞等^[11]提到了一种流经冷凝器的冷却水供、回水压差 ΔP 的控制方法, 该方法可有效地避免 T_c 波动过大对 VCRU 稳定运行产生的影响。王磊等^[12]提出了一种利用回热器增加回热循环的方法, 结果表明: 该方法可以通过改变冷凝器出口的过冷度, 达到控制 T_c 的效果。

PID 控制方式以其结构简单、鲁棒性强、可靠性高和便于理解与操作, 在暖通空调、制冷等实际系统或工程中得到普遍应用^[13]。对于 PID 控制的核心问题—控制器参数整定, 文献[14]提出一种基于遗传算法优化神经网络连接权值和阈值的方法, 来整定 PID 控制器参数。结果表明: 该算法可为神经网络提供最优连接权值和阈值, 进一步缩短 PID 控制器参数的整定时间, 同时 PID 控制系统在瞬态、稳态和鲁棒性能方面都得到很大提升。基于人工蜂群算法, 文献[15]设计了一种精英学习策略, 从而求解 PID 控制器参数的优化问题。采用环形拓扑结构和遗传算法的交叉、变异、选择操作, 产生精英个体, 再优化 PID 控制器参数。结果表明: 采用该策略可以有效提高算法的搜索能力和开发能力, 整定出 PID 控制器参数的最优值, 系统的控制品质也得到进一步的提高。

相比 PID 控制器, 由于 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制器中加入了积分算子阶次 λ 和微分算子阶次 μ , 扩大了控制区间并提升了控制效果^[16], 但增加了 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制器参数整定的难度与计算负荷。文献[17]提出一种采用改进粒子群算法整定 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制器参数的方法。先根据多因素、多水平试验, 得到粒子群算法的最优基本参数, 再对 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制器参数进行离线优化。

对比参数整定的仿真结果, 表明该方法收敛速度更快, 且 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 闭环控制系统的阶跃响应在超调量、上升速度和调节时间, 均比普通 PID 控制方式更好。文献[18]提出一种基于随机进化灰狼算法的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定方法。对种群的更新过程采用可变的进化速率来描述, 从而增强更新过程的随机性和收敛速度, 再对 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数进行在线自整定。结果表明: 算法精度和收敛速度有效提升, 且设计的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器能明显改善系统的抗干扰能力, 系统的鲁棒性相比普通 PID 控制系统也得到增强。

综上和考虑密切 T_c 的冷凝器被控对象存在结构参数时变、大惯性和时滞等特点, 本文提出 VCRU 冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统 (Fractional Order PID Control System, FOPIDCS) 的设计方案, 即在冷凝器低温高压液态制冷剂的出口端设置冷凝温度测量变送器, 实时测量冷凝温度 T_c 并上传给冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器, 求偏差 $\Delta T_c = T_{c,set} - T_c$ 和对 ΔT_c 进行 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 运算后, 输出控制指令 p 给冷却水流量电动调节阀。改变其开度, 使得流经冷凝器的冷却水流量 q_{cw} 发生变化, 从而保证 $T_{c,set} = T_c$, 实现冷凝器的安全、经济运行。此外, 依据基本人工蜂群算法 (Basic Artificial Bee Colony Algorithm, BABCA), 对学习因子 c_1 和 c_2 进行线性变化, 同时保持其他参数不变, 重构改进人工蜂群算法 (Improved Artificial Bee Colony Algorithm, IABCA) 和选择 $\min ITAE$ (Integrated Time Absolute Error, 绝对积分时间误差) 作为其目标函数。运用该 IABCA 对冷凝温度分数阶 PID 控制器 (Fractional Order PID Controller for Condensation Temperature, CT-FOPIDC) 参数进行优化整定, 获取对应的最佳值。仿真结果表明, 该冷凝温度 FOPIDCS 和 IABCA 是可行的, 能求解出 CT-FOPIDC 的 5 个参数最佳值, 且 T_c 的调节品质得到明显提升。

1 VCRU 中的冷凝温度控制

1.1 单级制冷循环工艺中的冷凝温度测控

对于 VCRU 单级制冷循环工艺而言, 一般是通过调节冷却水流量 q_{cw} 来控制冷凝温度 T_c [7], 冷却水的进/出口温度为 $32^{\circ}C/37^{\circ}C$, 相应的测控流程图如图 1 所示。

图 1 所示是一个 VCRU 单级制冷循环工艺: 在

蒸发器中吸收空调冷冻循环水的热量后, 低温低压液态制冷剂由蒸发器排出, 而被压缩机吸入。再经过压缩机的做功, 使其变成高温高压的制冷剂蒸汽后, 进入冷凝器。在此与来自冷却塔的冷却水进行热量交换, 而被冷凝为低温高压的液态制冷剂。通过热力膨胀阀节流与降压后, 变成低温低压的液态制冷剂进入蒸发器。再次吸收空调循环冷冻水的热量, 又成为低温低压的制冷剂蒸汽。这样完成压缩、冷凝、节流和蒸发四个热力过程的循环, 实现 VCRU 的制冷目的[19]。

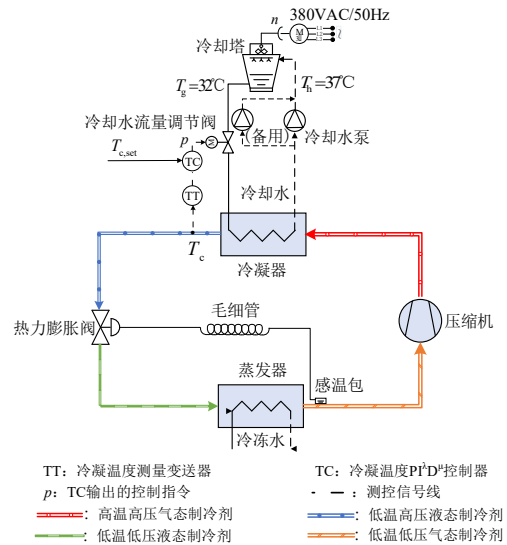


图 1 VCRU 单级制冷循环工艺测控流程图

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

当 VCRU 中蒸发器侧的冷负荷需求发生变化时, 相应进入冷凝器的高温高压的制冷剂蒸汽流量也会发生变化, 则 T_c 也随之变化, 导致 T_c 偏离 $T_{c,set}$, 即 $\Delta T_c = T_{c,set} - T_c \neq 0$ 。此时 TT 将测得的冷凝器出口端低温高压制冷剂温度, 近似反映 T_c 大小的标准电流信号传递给 TC, 进行求偏差 ΔT_c 。再对 ΔT_c 进行相应的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 运算后, 输出控制指令 p 给冷却水流量电动调节阀 (安装在冷凝器的冷却水入口端, 水温 $32^{\circ}C$), 改变其开度, 导致进入冷凝器的冷却水流量 q_{cw} 发生相应的改变, 从而保证 $T_c = T_{c,set}$, 达到控制冷凝温度的效果。而且, 当蒸发器侧的冷负荷发生扰动, 流经冷凝器的冷却水流量 q_{cw} 可快速响应, 避免 T_c 产生较大波动, 使得冷凝器安全、经济运行。

1.2 冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统

(1) 冷凝器温度被控对象的输入/输出特性

在 VCRU 制冷系统中, 冷凝器是一种常见的换热器形式, 可视为一阶惯性加时滞环节, 输入信号为冷却水流量 q_{cw} , 输出信号为冷凝器出口端的冷凝温度 T_c , 传递函数如式 (1) [20]。

$$G_C = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} = \frac{-0.95}{25s+1} e^{-15s} \quad (1)$$

式中, K 为冷凝温度调节通道的放大系数, %; τ 为冷凝温度调节通道的滞后时间, s; T 为冷凝温度调节通道的时间常数, s。

(2) 冷却水流量电动调节阀的输入/输出特性 它接受冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器输出的控制指令 p ($0 \sim 10\text{mA} \cdot \text{DC}$ 或 $4 \sim 20\text{mA} \cdot \text{DC}$), 通过改变阀门开度来控制 q_{cw} 大小。本文选择对数流量特性的调节阀[21], 传递函数如式 (2)。

$$G(s) = \frac{1}{s+1} \quad (2)$$

(3) 冷凝温度测量变送器的输入/输出特性 它是将 T_c 转换为标准电流信号 $0 \sim 10\text{mA} \cdot \text{DC}$ 或 $4 \sim 20\text{mA} \cdot \text{DC}$ 的设备, 作用在冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制系统的反馈通道上, 实时测量 T_c 的大小, 可视为比例环节[22], 传递函数如式 (3)。

$$H(s) = 1 \quad (3)$$

(4) 冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器的输入/输出特性 本文中的冷凝温度 FOPIDCS 采用的是分数阶 PID 控制器, 其保留了整数阶 PID 控制器结构简单、适应性好、鲁棒性强的特点, 并且控制区间更广, 控制效果更好, 传递函数如式 (4) [17]。

$$G_{\text{FOPID}}(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (4)$$

式中, K_p 、 K_I 、 K_D 、 λ 、 μ 为冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器的比例系数、积分系数、微分系数、积分阶次和微分阶次。

1.3 冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制系统的构建

至此, 本文拟研究的基于 IABCA 冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制系统, 如图 2 所示。

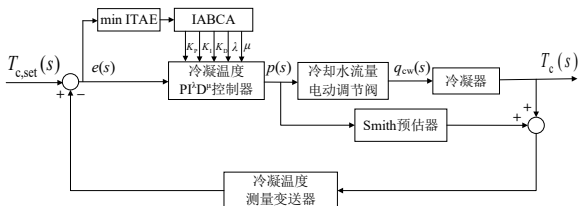


图 2 基于 IABCA 的冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制系统方框图

Fig.2 Block diagram of condensation temperature PI ^{λ} D ^{μ} control system based on IABCA

分析图 2, 冷凝温度测量变送器实时测量冷凝温度 T_c , 并将其与 $T_{c,set}$ 比较, 求出 $e=T_{c,set}-T_c$, 继而通过 IABCA 整定出冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器的 5 个参数 [$K_p, K_I, K_D, \lambda, \mu$]. 同时冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器输出控制信号 p , 控制冷却水流量电动调节阀开度, 进而控制 q_{cw} 的大小, 确保 $T_c=T_{c,set}$ 和冷凝器的安全、经济运行。此外, 考虑到冷凝器温度的被控对象具有时延特性, 在本文的冷凝温度 PI ^{λ} D ^{μ} 控制系统中引入 Smith 预估器[23], 将滞后环节转移到闭环控制回路之外, 消除对系统的不利影响, 从而进一步提升系统的控制品质。

2 改进人工蜂群算法及其 PI ^{λ} D ^{μ} 控制器参数的整定

2.1 改进人工蜂群算法

人工蜂群算法是一种受蜂群觅食行为启发而提出的算法, 具有良好的全局搜索能力, 受初始种群规模的影响较小[15]。在基本人工蜂群算法 BABCA 中, 包括引领蜂、跟随蜂、侦查蜂, 在搜寻过程中, 若一个解经过 L 次循环都未得到更新, 则认为该解陷入局部最优并被舍弃, 该解对应的引领蜂转化为侦查蜂。每个蜜源代表搜索空间中的一个可行解。在蜂群搜索过程中, 每个引领蜂会发现一个新蜜源, 即对应一个新的可行解, 搜索公式如式 (5) 所示[24]。

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + \phi(x_{ij}^k - x_{hj}^k) \quad (5)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N, h=1, 2, \dots, N, N$ 为蜜源数量, h 不等于 $i; j=1, 2, \dots, D, D$ 为求解问题的维度; ϕ 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数; x_{ij}^k 为当前蜜源位置; x_{ij}^{k+1} 为迭代后蜜源位置; k 为当前迭代次数。

为了提高 BABCA 的全局搜索能力和局部搜索能力, 同时期望引领蜂搜寻到的新蜜源都是好蜜源。鉴于此, 本节引入文献[25]中的代表当前搜寻到的最佳位置 bp_{ij} , 此位置称为个体极值点 p_{best} , 以及搜寻到的全局最佳位置 bg_{ij} , 此位置称为全局极值点 g_{best} , 并提出线性变化的学习因子 c_1 和 c_2 , 对式 (5) 进行修改, 如式 (6) 所示。

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + c_1 \phi_a (bp_{ij} - x_{ij}^k) + c_2 \phi_b (bg_{ij} - x_{ij}^k) \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} c_1 = c_{\max} - \frac{c_{\max} - c_{\min}}{G_{\max}} * k \\ c_2 = 1 - c_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, c_{\max} 、 c_{\min} 为学习因子的上、下限, c_{\max} 、 $c_{\min} \in [0, 1]$; G_{\max} 为最大迭代次数; ϕ_a 、 ϕ_b 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数; bp_{ij} 为当前最佳位置, $bp_{ij} = (bp_{i1}, bp_{i2}, \dots, bp_{iD})$; bg_{ij} 为全局最佳位置, $bg_{ij} = (bg_{i1}, bg_{i2}, \dots, bg_{iD})$ 。

所以, 保持 BABCA 的基本结构和参数不变^[24], 用式 (6) 代替式 (5), 构建改进人工蜂群算法 IABCA, 运算流程如下:

Step1: 初始化 IABCA 基本参数: 对 N 、 G_{\max} 、 c_{\max} 、 c_{\min} 、 ϕ 、 D 、 L 、 bp_{ij} 和 bg_{ij} 赋值, 产生初始解集 x_{ij}^k ;

Step2: 计算每个蜜源的适应度值 fit , 其中适应度好的选为跟随蜂, 剩下的为引领蜂, 并记录最优值;

Step3: 引领蜂搜索新蜜源, 根据式 (6), 产生新的可行解 x_{ij}^{k+1} ;

Step4: 跟随蜂计算该可行解的选择概率, 并在 $[0, 1]$ 内随机产生一个数。若该可行解的概率值大于该随机数, 则跟随蜂由式 (6) 产生一个新解, 反之, 保存该可行解。并检验其适应度值 fit ;

Step5: 若 $fit < fit[p_{best}]$, 则用 fit 替换 $fit[p_{best}]$; 反之, 则保留 $fit[p_{best}]$ 。若 $fit < fit[g_{best}]$, 则用 fit 替换 $fit[g_{best}]$; 反之, 则保留 $fit[g_{best}]$;

Step6: 若一个解经过 L 次循环都未更新, 则该解被舍弃, 该解对应的引领蜂转化为侦查蜂, 侦查蜂根据式 (6) 产生新解, 取代旧解;

Step7: 对算法终止条件进行判断: 若 $k < G_{\max}$, 则返回 Step3, 继续迭代运算。否则算法结束, 输出全局极值坐标 $(bg_{i1}^*, bg_{i2}^*, \dots, bg_{iD}^*)$ 和最优适应度值 fit^* 。

这样, 在 IABCA 执行的前期, c_1 较大 (c_2 较小), 能增加引领蜂的全局搜索范围和种群多样性。随着迭代次数 k 的增加, 在算法执行的后期, c_2 渐增 (c_1 渐减), 有利于在算法执行的后期, 收敛到全局最优解 g_{best} 。该 IABCA 可用 MATLAB 软件进行编程, 命名与保存为一个文件 IABCA.m。

2.2 基于经典测试函数对 IABCA 的验证

为了验证 IABCA 的有效性, 选取典型测试函

数 Rastrigin^[25], 如式 (8) 所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad (8)$$

式中, $f(x)$ 为多峰函数, $x_i \in [-5.12, 5.12]$ 。理论全局最小值点, 仅在 $(x_1, x_2, \dots, x_D) = (0, 0, \dots, 0)$ 处取 0。

所以将 $\min f(x)$ 作为适应度函数 J , 对 BABCA 和 IABCA 进行验证。其中 BABCA 和 IABCA 相关参数设置如表 1 所示。

表 1 BABCA 和 IABCA 的参数设置

Table 1 The values of parameter for BABCA and IABCA

算法	BABCA	IABCA
解空间维度 D	10	10
蜂群规模 N	200	200
最大迭代次数	100	100
G_{\max}		
循环限制次数 L	10	10
学习因子 $[c_1, c_2]$		$[0, 1]$
随机数 $[\phi_a, \phi_b]$		$[-1, 1]$
搜索公式	式 (5)	式 (6)
解的取值范围	$[-5.12, 5.12]$	$[-5.12, 5.12]$

另外为了增强对比, 再引入文献^[25]中的粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO) 和布谷鸟搜索算法 (Cuckoo Search Algorithm, CSA), 保持其基本结构和参数不变, 分别将 PSO、CSA、BABCA 和 IABCA 作用于该 Rastrigin 函数。4 种算法分别运行 30 次, 相应的统计结果和 $\min f(x)$ 迭代过程如表 2 和图 3 所示。

表 2 BABCA 和 IABCA 对 Rastrigin 函数优化结果

Table 2 Optimization results of Rastrigin function solved by BABCA and IABCA

算法	PSOA	CSA	BABCA	IABCA
理论极值	0	0	0	0
最优值	29.601	10.676	18.452	2.7027
最差值	35.038	13.683	24.135	4.2200
中间值	31.872	12.167	20.695	3.2229
平均值	32.436	11.481	21.537	3.4323
标准误差	3.3146	1.5287	1.7961	0.1499

结果区间	[29.291, [10.032, [19.833, [2.9826,
(置信度 99.7%)	35.581] 12.933] 23.241] 4.0319]

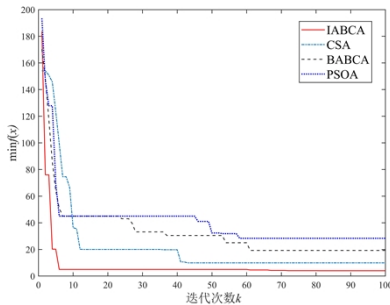


图 3 基于四种算法的 J 进化过程

Fig.3 Evolution process of J based on four algorithms

分析表 2 可知, IABCA 求解的 $\min f(x)$ 的最优值、最差值、中间值、平均值和标准误差的结果, 均好于 PSOA、CSA、BABCA, 另外基于建筑环境与能源测试技术的误差分析方法^[26], 在置信度 99.7% 情况下, IABCA 求解的 $\min f(x)$ 结果区间, 也优于其他三种算法。另外分析图 3, 可见四种算法作用下的 Rastrigin 函数适应度值 J 变化趋势整体上是一致的, 但是 IABCA 作用下的 J 变化更贴近理论极值点 0, 搜索速度更快, 说明 IBACA 的收敛性要优于 PSOA、CSA、BABCA, 因此也验证出本文构建的 IBACA 性能是优于一般算法的。

2.3 基于 IABCA 的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定

如上所述, CT-FOPIDC 的参数整定密切冷凝温度的调节品质。本节选择 $\min ITAE$ 作为 IABCA 目标函数:

$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (9)$$

来设计 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定的算法, 相应的算法执行流程如下:

Step1: 初始化 IABCA 相关参数: 对 N 、 G_{\max} 、 c_{\max} 、 c_{\min} 、 φ 、 D 、 L 、 bp_{ij} 和 bg_{ij} 赋值;

Step2: 根据 Z-N 整定法计算出 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数的初始值 $[K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}]$ 和 $\lambda_0 = \mu_0 = 1$, 即 $y_0 = [K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}, 1, 1]$ 置入 MALAB/Simlink 工具组态中的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器, 且设定 K_P 、 K_I 、 K_D 、 λ 和 μ 的上下限;

Step3: 输入闭环负反馈 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统的反馈信号 $e(t)$, 产生初始解集 X_{ij}^k , 基于 $\min ITAE$ 计算每个可行解 $y = [K_P, K_I, K_D, \lambda, \mu]$ 的适应度值 fit ;

Step4: 引领蜂根据式 (6) 进行搜索, 产生新

解 X_{ij}^{k+1} 和新解的适应度值 fit ; 跟随蜂计算每个新解的选择概率, 并与 $[0, 1]$ 内的随机数比较, 若解的概率值大于该随机数, 则跟随蜂由式 (6) 产生一个新解, 反之, 保存该解。并检验解的适应度值 fit ;

Step5: 若 $fit < fit[p_{best}]$, 则用 fit 替换 $fit[p_{best}]$ 。反之, 则保留 $fit[p_{best}]$; 若 $fit < fit[g_{best}]$, 则用 fit 替换 $fit[g_{best}]$ 。反之, 则保留 $fit[g_{best}]$;

Step6: 舍弃经过 L 次循环都未更新的解, 该解对应的引领蜂转化为侦查蜂, 侦查蜂根据式 (6) 产生新解取代旧解;

Step7: 若 $k < G_{\max}$, 则返回 Step3 继续迭代运算, 否则, 输出 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数最优值, 即 $y^* = [K_P^*, K_I^*, K_D^*, \lambda^*, \mu^*]$, $\min ITAE$ 最优解以及相应的闭环负反馈 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统动态响应曲线。

使用 MATLAB 软件, 对上述基于 IABCA 的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定算法进行编程, 保存并命名为 IABCA.m 文件, 同时借助 MATLAB/Simlink 工具进行闭环负反馈 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统进行组态, 并与 IABCA.m 同步运行。

为了验证本节所设计的 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数整定算法-IABCA.m, 选用文献[14]中的二阶传递函数, 如式 (10) 所示。

$$G_{\text{plant}}(s) = \frac{1.6}{s^2 + 2.584s + 1.6} \quad (10)$$

作为被控对象, 并设计一个单位闭环负反馈 PID 控制系统作用于它。分别运用 IABCA、BABCA 和 Z-N 整定法对该控制系统中的 PID 控制器参数进行整定, 相应的结果如表 3 所示, 并输出其动态响应曲线, 如图 4 所示。

表 3 PID 控制器 3 个参数整定结果

Table 3 Results of tuning three parameters for PID controller

参数整定值 整定方法	controller				
	K_P^*	K_I^*	K_D^*	λ^*	μ^*
Z-N	12.45	10.96	1.231		
BABCA	0.686	0.879	0.113	1	1
IABCA	1.236	0.925	0.122	1	1

分析表 3 和图 4 可知, 基于 IABCA 整定的 PID 控制器参数 $[K_P^*, K_I^*, K_D^*, \lambda^*, \mu^*]$, 其控制效果要明显优于 BABCA 和 Z-N 整定法。而基于 BABCA 和 Z-N 整定法作用下的单位闭环负反馈

PID 控制系统, 对应的动态响应均存在较大的超调量且调节时间较长。这表明本节设计的基于 IABCA 的 PI^λD^μ 控制器参数整定算法是可行的, 也为下节冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统及其参数整定的数值模拟, 奠定了基础。

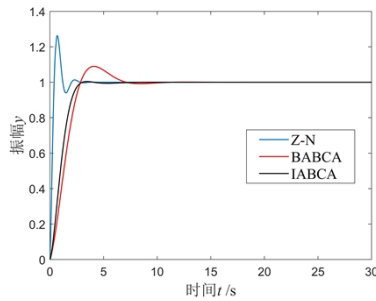


图 4 不同 PID 控制器参数值的单位闭环负反馈控制系统动态响应

Fig.4 Dynamic responses of a unit closed-loop negative feedback PID control system with different values of controller's parameters

3 数值模拟

3.1 冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统仿真

根据空调工艺的相关要求, 夏季制冷工况下的流经冷凝器的冷却水供、回水温度为 32℃/37℃, 冷凝温度设定值 $T_{c,set}=36℃$, 初始冷凝温度 $T_{c,0}=50℃$ [27]。借助 MATLAB/Simulink 工具, 根据图 2 的基于 IABCA 的冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统方框图, 对本文基于 IABCA 的冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统进行组态, 如图 5 所示。

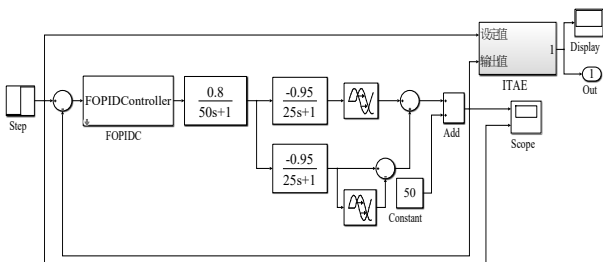


图 5 基于 IABCA 的冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统 Simulink 模型

Fig.5 Simulink model of condensation temperature PI^λD^μ control system based on IABCA

首先, IABCA.m 参数设置与 2.2 中的相关部分相同。设定 CT-FOPIDC 的 5 个参数范围: $K_p \in [100, 300]$, $K_i \in [5, 35]$, $K_d \in [160, 220]$, $\lambda \in [0.5, 1.8]$, μ

$\in [0, 1]$ 。然后同步运行图 5 所示冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统 Simulink 模型和 IABCA.m, 可得冷凝温度 T_c 过渡过程, 如图 6 中黑色实线所示。相应的 $[K_p^*, K_i^*, K_d^*, \lambda^*, \mu^*]=[163.2569, 9.7856, 195.8580, 0.8828, 0.7997]$ 和最佳 $\min ITAE=1085$ 。

其次, BABCA.m 参数设置与 2.2 中的相关部分相同, CT-FOPIDC 的 5 个参数范围同上。然后同步运行图 5 所示冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统 Simulink 模型和 BABCA.m, 也得到 T_c 过渡过程, 如图 6 中所示。相应的 $[K_p^*, K_i^*, K_d^*, \lambda^*, \mu^*]=[278.5965, 32.7512, 198.5630, 1.5123, 0.8900]$ 和最佳 $\min ITAE=1383$ 。

最后, 应用 Z-N 整定法, 离线计算出冷凝温度 PID 控制器参数 $[K_p, K_i, K_d]=[145.7635, 9.8175, 202.2150]$, 将 $[145.7635, 9.8175, 202.2150, 1, 1]$ 设置到图 5 所示冷凝温度 PI^λD^μ 控制器。然后运行图 5 所示冷凝温度 PI^λD^μ 控制系统 Simulink 模型, 同样可得到 T_c 过渡过程, 如图 6 中所示。

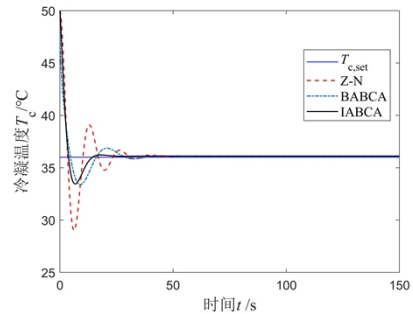


图 6 三种 PI^λD^μ 控制器参数整定方式作用下的冷凝温度响应曲线

Fig.6 Response curves of condensation temperature under three types of tuning parameters of PI^λD^μ controller

分析图 6 可知, 相比基于 Z-N 整定法 ($\lambda=\mu=1$) 和 BABCA 这两种 PI^λD^μ 控制器参数整定方式, 采用 IABCA 方式所得到的冷凝温度 T_c 响应曲线, 无论是在最大偏差、调节时间以及超调量, 表现的都比其他方式要更好, 且稳态误差 ΔT_c 为 0℃, 说明采用 IABCA 的控制效果优于一般控制方法。

3.2 三种控制器参数整定的控制效果比较

采用 Z-N 整定法 ($\lambda=\mu=1$)、BABCA 和 IABCA 对本文冷凝温度 PI^λD^μ 控制器进行参数整定, 得到 T_c 相应的控制指标如表 4 所示。

分析表 4 可知, 采用 IABCA 对 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器参数进行整定, 得到的冷凝温度相应的各项控制指标都要优于 Z-N 整定法和 BABCA, 冷凝温度达到设定值的过程中所需的时间更短、波动更小, 说明基于 IABCA 对本文的冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器进行参数整定, 有效提升了系统的控制质量。

表 4 冷凝温度控制性能指标比较

Table 4 Comparison of control performance indexes for condensation temperature

控制指标	整定方法 Z-N 整定法	BABCA	IABCA
稳态误差/℃	0.1108	0.0657	0
最大偏差/℃	6.9655	2.6645	2.5524
超调量/%	19.444	7.4013	7.0901
调节时间/s	36.781	30.255	25.923
衰减比	5.6115	2.2973	7.3072
上升时间/s	4.2215	5.7043	4.5335
峰值时间/s	19.688	9.2307	6.7558
ITAE/(℃·s)		1383	1085

4 结论

针对 VCRU 中冷凝温度被控对象, 为了达到有效控制冷凝温度的目的, 本文提出了一种基于 IABCA 的冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制策略。引入基本人工蜂群算法 BABCA, 对算法更新公式进行改进, 同时在此基础上提出线性变化的学习因子 c_1 和 c_2 改善算法搜索性能, 构建出改进人工蜂群算法 IABCA。一方面通过多峰测试函数 Rastrigin 验证其性能, 统计结果表明 IABCA 求解的 $\min f(x)$ 的最优值和平均值都更接近理论值, 且标准误差更小, 说明 IABCA 在寻优性能方面优于 BABCA。另一方面通过对 PID 控制器参数进行整定, 通过单位闭环负反馈控制系统动态响应结果对比, 表明 IABCA 在控制器参数整定效果方面优于 BABCA 和 Z-N 整定法。最后采用 IABCA 对本文的冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制系统进行参数整定, 获取 $[K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu]$ 五个参数的最优值以及目标函数 ITAE 的最优解, 并借助 MATLAB/Simulink 进行模拟。结果表明: 采用 IABCA 得到的各项控制指标都优于 BABCA 和 Z-N 整定法, 冷凝温度响应曲线的最大偏差、调节时间以及超调量也比其他两种方式表现更好, 并且达到 $T_c = T_{c, set}$ 的控制要求。说明本文基于 IABCA 的冷凝温度 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控

制策略在理论上是可行的, 且相应的冷凝温度也能满足空调工艺的相关要求。

参考文献:

- [1] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J]. 暖通空调, 2021, 51(10): 1-12.
- [2] Cong T V, Christopher R L. Approximation of refrigerant properties for dynamic vapor compression cycle models[J]. IFAC PapersOnLine, 2018, 51(2): 625-630.
- [3] 鱼晟睿, 李安桂, 高然, 等. 区域供冷系统冷水机组的最佳运行工况区间和性能研究[J]. 暖通空调, 2015, 45(8): 84-88, 52.
- [4] Heidinger G G, Nascimento S M, Gaspar P D, et al. Experimental evaluation of the thermal performance at different environmental conditions of a low temperature display case with built-in compressor and water-cooled condenser[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 825-835.
- [5] 郑慧明, 邹磊, 徐祯祥, 等. 论蒸发温度和冷凝温度对制冷效率的影响[J]. 发电与空调, 2013, 34(2): 32-35.
- [6] Wang Z G, Hou J, Sun Y X. Comparative efficiency assessment of a novel low-temperature solar-powered ORC based cogeneration system[J]. Applied Solar Energy, 2015, 51(2): 88-93.
- [7] Lee C M, Jeon T Y, Jung B G, et al. Design of energy saving controllers for central cooling water systems[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(5): 513.
- [8] Li M X, Zhan H M, Wang P, et al. A CO₂ transcritical refrigeration system with ejector and economizer[J]. CIESC Journal, 2021, 72(S1): 146-152.
- [9] Al-Bassam E, Alasserri R. Measurable energy savings of installing variable frequency drives for cooling towers' fans, compared to dual speed motors[J]. Energy and Buildings, 2013, 67: 261-266.
- [10] 吴斌. 基于模糊神经网络算法的冷却水优化控制技术[J]. 智能建筑电气技术, 2016, 10(3): 46-49.
- [11] 张瑞, 罗定鑫, 李元阳, 等. 集中式空调系统冷却水变流量特性研究[J]. 制冷与空调, 2021, 21(4): 65-71, 81.
- [12] 王磊, 张信荣, 杭晨哲. 内部循环过冷对制冷空调系统性能的影响[J]. 低温与超导, 2021, 49(6): 1-8, 24.

- [13] 王维洲, 吴志伟, 柴天佑. 电熔镁砂熔炼过程带输出补偿的 PID 控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(7): 1282-1292.
- [14] Zeng G Q, Xie X Q, Chen M R, et al. Adaptive population extremal optimization-based PID neural network for multivariable nonlinear control systems[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 44: 320-334.
- [15] 王贞, 李旭飞. 精英学习人工蜂群算法的 PID 控制器参数优化[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(16): 177-186.
- [16] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 771-776.
- [17] 郑恩让, 姜苏英. 基于改进粒子群优化算法的分数阶 PID 控制[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2082-2087.
- [18] 阮祝鑫, 肖玲斐, 林聪. 基于随机进化灰狼优化算法的分数阶自抗扰起动控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 10-16.
- [19] 张春路. 制冷空调系统仿真原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 2-72.
- [20] 常然然. 非补燃式压缩空气储能系统换热器的建模仿真与控制策略研究[D]. 保定: 河北大学, 2017: 7-28.
- [21] 李鹏波, 李绍勇, 吴宗礼, 等. 变风量末端装置的基于 IPSA-DE 算法室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -送风量 PI 串级控制器的数值仿真[J]. 制冷与空调, 2018, 32(4): 428-434, 450.
- [22] 郭金钱. 变风量空调系统的建模与控制仿真[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014: 54-60.
- [23] Gu Q, Zheng F L, Liu B B, et al. Application of a new smith fuzzy PID in electric boiler temperature control system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3759: 633-636.
- [24] 毕晓君, 王艳娇. 加速收敛的人工蜂群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2755-2761.
- [25] 高叶军, 李国明, 陈阳泉, 等. 一种协同进化布谷鸟搜索算法[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 260-264.
- [26] 陈刚. 建筑环境与能源测试技术(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 28-30.
- [27] 曹玉鹏, 雷波. 利用冷凝水喷雾冷却冷凝器的实验研究[J]. 制冷与空调, 2019, 33(4): 355-359.