

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-010-09

应用 IMOABC 空调房间 CO₂ 浓度 二自由度内模分数阶 PI 控制性能的研究

杨 睿¹ 李绍勇¹ 魏明松¹ 王少波²

(1. 兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050;

2. 广州市恒盛建设工程有限公司 广州 510080)

【摘 要】 由于定风量空调机组 (Constant Air Volume Air Handling Unit, CAVAHU) 输出的新风量往往是固定的, 当空调房间内的额定人员数量超员或不足时, 会导致空调房间 CO₂ 浓度测量值 C_n 高于室内 CO₂ 浓度设定值 $C_{n,set}$ 或新风负荷增大的状况。对此提出了一种空调房间 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制策略和设计改进多目标人工蜂群算法 (Improved Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm, IMOABCA) 对控制器参数实施整定的思路。首先, 基于人工蜂群算法, 分别对雇佣蜂和观察蜂引入自适应惯性权重和精英组策略, 进行非线性递减和柯西变异的演变, 并结合观察蜂搜索特性, 将最小粒子角度引入外部档案集, 获取相应的 Pareto 解集, 设计 IMOABCA, 进而对控制器的 3 个参数进行整定, 获得相应的最优值。最后, 借助 MATLAB 工具, 对该室内 CO₂ 浓度的二自由度内模分数阶 PI 控制系统进行组态和仿真。结果表明: 该室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统和 IMOABCA 是可行的, 能够实现 $C_n=C_{n,set}$ 的调节目的和获取控制器的 3 个参数最优值, 提升室内 CO₂ 浓度的调节品质。

【关键词】 定风量空调机组; 空调房间 CO₂ 浓度; 二自由度内模分数阶 PI 控制; 改进多目标人工蜂群算法; 控制器参数整定

中图分类号 TP273+.1 文献标识码 A

Study on Performance of Two-Degree of Freedom Internal Model Fractional Order PI Control Using Improved Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm for the Concentration of Carbon Dioxide in Air-conditioning Room

Yang Rui¹ Li Shaoyong¹ Wei Mingsong¹ Wang Shaobo²

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

2. Guangzhou Hengsheng Construction Engineering Co., Guangzhou, 510080)

【Abstract】 Since fresh air volume outputted from constant air volume air handling unit (CAVAHU) is generally constant, the state that the measured value of the concentration of carbon dioxide (denoted as CO₂) in air-conditioning room (denoted as C_n) is greater than the setting value of indoor CO₂ concentration (denoted as $C_{n,set}$) or increasing the load of fresh air occurs when the nominal number of persons in air-conditioning room is excessive or insufficient. So a two-degree of freedom internal model fractional order PI control policy for the concentration of CO₂ in air-conditioning room is proposed and an improved

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61364004, 51808275)

作者简介: 杨 睿 (1997-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: xiaofyang58@163.com

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

收稿日期: 2022-09-22

multi-objective artificial bee colony algorithm (IMOABCA) is designed to tune the controller parameters. Firstly, based on the artificial bee colony algorithm, an adaptive inertia weight and an elite group strategy are introduced to the employment bees and the observation bees, respectively, in order to carry out the evolution of nonlinear decrease and Cauchy variation. On the basis of combining with the search characteristics of observation bees, an IMOABCA is designed to tune three parameters of the controller by means of introducing the minimum particle angle into external files to obtain the corresponding Pareto set, so the optimal values of three parameters of the controller are found. Finally, by MATLAB tool, this two-degree of freedom internal model fractional order PI control system for the indoor CO₂ concentration is configured and simulated. The results show that the proposed the system for the indoor CO₂ concentration and IMOABCA are feasible in theory, the regulation purpose of $C_n = C_{n,set}$ and the optimal values of three parameters of the controller can be achieved, respectively, and the regulation quality of indoor CO₂ concentration is improved.

【Keywords】 Constant air volume air handling unit; carbon dioxide concentration in air-conditioning room; two-degree of freedom internal model fractional order PI control; improved multi-objective artificial bee colony algorithm; tuning parameters of controllers

0 引言

伴随世界经济快速增长,人们的生活质量得到了明显改善。同时,对建筑环境的舒适度、空气品质的关注度也与日俱增,使得中央空调系统在各类建筑环境中得到了广泛应用。由于定风量空调系统(Constant Air Volume, CAV)具备结构简单、初始投资低、易操作和送风量稳定等特点,在高大空间和室内人员密度大的建筑场所,例如大型会议室、商场和办公大厅等,广泛应用^[1]。对于CAV系统中的关键设备CAVAHU而言,新风量 q_{oa} 、回风量 q_{ra} 以及排风量 q_{ea} 经空调工艺设计后,往往保持不变^[2]。当CAVAHU实际运行,常出现空调房间内的额定人员超员或不足的状况,导致 q_{oa} 不够或过量,产生室内CO₂浓度超标($C_n > C_{n,set}$)或处理新风所消耗的冷、热负荷增加的问题,使得室内空气质量下降或增大CAVAHU运行能耗。

室内CO₂浓度变化呈现非线性、多干扰等特性,采用传统控制方式很难得到一个满意的控制效果。因此,室内CO₂浓度的控制问题,是当前暖通空调自动化领域的一个有研究价值的课题。Kusuda^[3]针对传统的机械通风系统,首次提出基于室内CO₂平均浓度的需求控制通风策略,将房间CO₂平均浓度作为调节新风量大小的控制指标。Igor等^[4]在通风系统上设计了室内CO₂浓度内模控制系统,对输送到室内的新风量 q_{oa} 进行调节。结果显示, q_{oa} 能够根据室内CO₂浓度的变化快速做出响应。文献[5]利用直接反馈线性化设计了基于室内CO₂浓度变化的机械通风控制系统。结果表明,

该控制系统对于室内CO₂浓度控制的速度和稳定性等方面都优于传统PID控制系统。

分数阶PID(Fractional Order PID Controller, FOPID)控制器比整数阶PID控制器^[6]更具有设计自由度广、自适应好和强鲁棒性等特性^[7],在许多工业领域得到了应用,呈现出了更好的控制性能^[8-10]。将内模控制与FOPID控制相结合能使得控制系统获得更好的设定值跟踪和抗干扰等性能^[11,12]。此外,控制器的参数整定对于控制系统的稳定性和快速性具有显著意义。目前,许多研究工作都集中在控制器参数整定的单目标优化问题^[9-13,14]。但在实际应用中,控制系统所输出的被控参数的多个性能指标之间往往是相互制约的^[15]。因此,解决控制器参数整定的多目标优化问题,显得十分迫切。文献[15]提出了一种基于改进多目标极值优化算法的自动稳压器系统FOPID控制器设计方法。通过积分绝对误差,绝对稳态误差和调节时间三个性能指标,建立多目标优化函数来整定FOPID控制器参数的最优值。结果表明,该方法使自动稳压器系统的控制精度和鲁棒性方面有明显提升。针对旋转式倒立摆系统在稳定阶段的控制问题,文献[16]选择摆角绝对积分时间误差和转角绝对积分时间误差两个目标函数,建立多目标优化问题,并设计了一种基于改进多目标粒子群算法来实施FOPID控制器参数的整定。通过试验验证了该算法的有效性,使得倒立摆系统具有良好的稳定性和动态品质。

综上所述,空调房间CO₂浓度与输配到每个空

调房间的新风量密切相关。基于保持 CAVAHU 输出的总送风量 q_{sa} 恒定, 同时动态调节新风量 q_{oa} 和新风比 m , 确保 $C_n=C_{n,set}$ 的目标, 本文提出一种室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制策略, 发挥控制器参数少, 系统调节灵活, 快速跟踪和鲁棒性强等优势。此外, 对于室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器参数的整定问题, 依据人工蜂群算法, 对雇佣蜂阶段引入自适应惯性权重, 同时对观察蜂阶段施加精英组策略, 分别进行非线性递减和柯西变异的演变, 并结合观察蜂搜索特性, 将最小粒子角度^[17]引入外部档案集, 获取相应的 Pareto 解集, 设计得到 IMOABCA。考虑调节时间 t_c 、稳态误差绝对值 E_{SS} 和绝对积分时间误差 (Integrated Time Absolute Error, ITAE), 选择 $\min (ITAE, E_{SS}, t_c)$ 作为 IMOABCA 目标函数, 设计室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器参数整定算法。仿真结果表明: 该参数整定算法可获取 3 个控制器参数和 3 个目标函数的 Pareto 最优解。从而提升室内 CO_2 浓度调节品质, 确保 $C_n=C_{n,set}$ 和满足室内空气品质需求。同时, 二自由度内模分数阶 PI 控制器作用下的 CAVAHU, 其输出的新风量 q_{oa} 是动态变化的, 可适应空调房间内的额定人员超员或不足的实际情况。

1 CAVAHU 作用下的空调房间 CO_2 浓度控制

对于新风+一次回风的空调方式, CAVAHU 输出的总送风量 q_{sa} 包括新风量 q_{oa} 和一次回风量 q_{ra} , 即 $q_{sa}=q_{oa}+q_{ra}$, 新风比 $m=q_{oa}/q_{sa}$ 。同时为了维持室内的微正压, 空调工艺的设计使得新风量等于排风量 q_{ea} , 即 $q_{oa}=q_{ea}$, 且 $q_{sa}>q_{ra}$ 。由上述可知, CAVAHU 输配的 q_{oa} 对空调区域的 CO_2 浓度 C_n 影响显著。所以综合考虑 CAVAHU 输出的 q_{sa} 恒定和空调房间内的额定人员超员或不足的实际状况, 本文提出一种室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制策略, 能够动态调节新风量 q_{oa} , 实现 $C_n=C_{n,set}$ 的目的。相应的空调工艺测控流程图, 如图 1 所示。

当 CAVAHU 运行空调冬/夏季工况时, 设置在一次回风管道上 CT 将反映 n 个空调房间平均 CO_2 浓度测量值信号 C_n 上传到 CC, 与经过 CF 的室内 CO_2 浓度设定值 $C_{n,set}$ 进行比较, 求偏差 $e=C_{n,set}-C_n$, 对其进行内模分数阶 PI 运算后, 输出 3 路控制信号 p_1 、 p_2 和 p_3 , 分别到新风电动调节阀、一次回风

电动调节阀和排风电动调节阀。这里, $p_1=p_3$, $p_2=p_{max}+p_{min}-p_1$ 。 p_1 、 p_2 、 $p_3 \in [p_{min}, p_{max}]$, p_{min} , $p_{max}-CC$ 输出的控制信号的下限、上限。动态改变输送到空调房间的新风量 q_{oa} , 经过通风置换, 实现 $C_n=C_{n,set}$ 的目的, 适应空调房间内的额定人员超员或不足的实际情况。同时 CAVAHU 以变新风比 ($m<100\%$) 运行, 输出的总送风量 q_{sa} 是恒定的; 且维持室内的微正压。这是由于当 $e<0$ (>0) 时, 接受控制指令 p_1 和 p_3 , 新风阀开度 v_1 和排风阀开度 v_3 是同向增大 (减小), 即 $v_1=v_3=a\%$ (某个开度值), $q_{oa}=q_{ea}$; 而接受控制指令 p_2 , 回风阀开度 v_2 ($100\%-a\%$) 是反向减小 (增大), 即 $v_1+v_2=100\%$, $q_{oa}+q_{ra}=q_{sa}$ 。

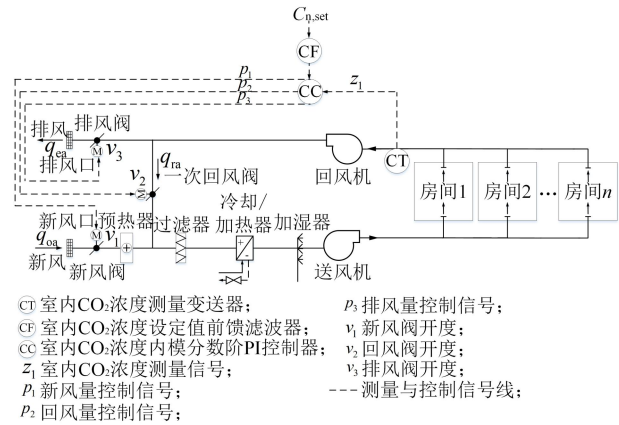


图 1 CAVAHU 运行工艺测控流程图

Fig.1 Flowchart of measurement and control for CAVAHU operation process

这样, 该室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制策略, 可以实现 CAVAHU 对室内 CO_2 浓度的实时调整, 既动态调节新风量 q_{oa} , 实现 $C_n=C_{n,set}$ 的目的; 又使得 CAVAHU 以输出的 q_{sa} 是恒定的和变新风比 ($m<100\%$) 运行。

2 室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统

2.1 空调房间 CO_2 浓度的数学模型

分析文献[5], 可得空调房间 CO_2 浓度质量平衡方程如下:

$$V \frac{dC_n}{dt} = q_{oa} C_w + m_n - q_{oa} C_n \quad (1)$$

式中, q_{oa} 为新风量, m^3/s ; C_w 和 C_n 为室外和室内 CO_2 浓度, %; m_n 为室内 CO_2 发生量, m^3/s ; V 为房间体积, m^3 。

由于空调 CO₂ 浓度变化是非线性的, 利用式 (1) 对空调房间 CO₂ 浓度模型在平衡点 (稳定点) 建立线性过程, 得到相应的传递函数为^[4]:

$$G(s) = \frac{b}{s-a} \quad (2)$$

式中, $a=-(q_{oa}^*/V)$, $b=(C_w-C_n^*)/V$ 。

这里, q_{oa}^* 、 $C_n^*-q_{oa}$ 、 C_n 的平衡点。两者的关系如下:

$$C_n^* = \frac{m_n(1-m^*)}{q_{oa}^*} + C_w \quad (3)$$

式中, $m^*-q_{oa}^*$ 对应的新风量。

2.2 空调房间 CO₂ 浓度测量变送器传递函数

室内 CO₂ 浓度测量变送器的作用是实时测量空调房间内的 CO₂ 浓度 C_n 大小, 输送标准信号到 CC 控制器与 $C_{n,set}$ 进行比较, 其传递函数如下式^[18]:

$$G_1(s) = 1 \quad (4)$$

2.3 新风量、排风量与一次回风量电动调节阀传递函数

由于新风量 q_{oa} 可直接影响房间 CO₂ 浓度 C_n , 所以设置新风量电动调节阀, 接受输出的控制指令 p_1 (0~10mA·DC 或 4~20mA·DC), 通过改变其开度 v_1 来控制 q_{oa} 大小。对于排风量 q_{ea} 和一次回风量 q_{ra} , 由第 1 节可知 $q_{ea}=q_{oa}$, $q_{oa}+q_{ra}=q_{sa}$, 且 $p_1=p_3$, $p_2=p_{max}+p_{min}-p_1$ 。所以, 三个风阀本文均选择直线流量特性的电动调节阀, 其可看作放大环节处理^[19]:

$$G_2(s) = 10 \quad (5)$$

2.4 室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器传递函数

从上文可知, 新风量电动调节阀与空调房间所构成的广义被控对象为一阶惯性数学模型:

$$G_p(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (6)$$

式中, $K=10b/-a$; $T=b/-a$ 。

分析文献[11]可以得出, 内模分数阶 PI 控制器的分数特性是通过施加的分数阶滤波器体现的, 其传递函数如下:

$$C_1(s) = \frac{1}{s^\alpha} \frac{T}{KT_1} \left(1 + \frac{1}{Ts}\right) \quad (7)$$

式中, T_1 、 α 为分数阶滤波器的时间常数和阶次的非整数项 ($0<\alpha<1$)。

从上式可以看出, 内模分数阶 PI 控制器是由一个整数阶 PI 控制器与一个分数阶积分器串联而成, 其中 $K_p=T/KT_1$, $K_i=1/KT_1$ 。

此外, 为了提升参数控制系统对设定值的跟踪特性, 加快响应速度和降低超调量, 引入二自由度内模控制理论^[20], 构建设定值前馈滤波器, 其传递函数如下:

$$C_2(s) = \frac{1+T_1s^{\alpha+1}}{1+T_2s} \quad (8)$$

式中, T_2 为一阶低通滤波器的时间常数; T_1 、 α 同上。

所以, 考虑内模分数阶 PI 控制器和设定值前馈滤波器的优势, 本文提出的室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器, 其结构如图 2 所示。

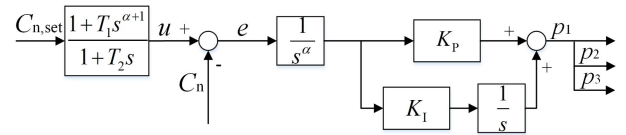


图2 室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器结构

Fig.2 Block diagram of structure for two-degree of freedom internal model fractional order PI controller for the indoor CO₂ concentration

如上所述, 该控制器可输出 3 路控制信号 p_1 、 p_2 和 p_3 , 分别作用于新风量、一次回风量和排风量电动调节阀, 在保证送风量 q_{sa} 不变的情况下, 动态调节新风量 q_{oa} , 实现 $C_n=C_{n,set}$ 的目的。

因此, 本文提出的基于 IMOABCA 空调房间 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统, 如图 3 所示。

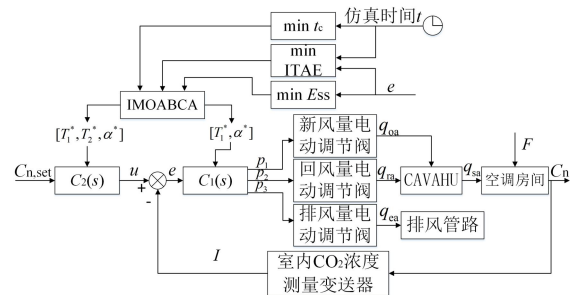


图3 基于 IMOABCA 空调房间 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统方框图

Fig.3 Block diagram of two degree of freedom internal model fractional order PI control system based on IMOABCA for the concentration of CO₂ in air-conditioning room

图 3 为二自由度内模分数阶 PI 控制器作用下的空调房间 CO₂ 浓度控制系统方框图, 并采用 IMOABCA 对控制器参数进行整定。考量 ITAE, E_{ss} 和 t_c , 确定 $\min(ITAE, E_{ss}, t_c)$ 作为 IMOABCA 的目标函数, 进而对控制器的三个参数 $[T_1, T_2, \alpha]$ 进行整定, 获取相应的 Pareto 最优解: $[T_1^*, T_2^*, \alpha^*]$ 和 $[ITAE^*, E_{ss}^*, t_c^*]$, 提升调节质量, 使得 $C_n = C_{n, set}$, 满足室内空气品质要求; 且动态调节新风量 q_{oa} , 减少 CAVAHU 处理新风所消耗的冷、热负荷。

3 控制器参数整定

3.1 多目标人工蜂群算法改进方法

多目标优化问题是指当在解决一个问题时, 需要对多个目标进行最大或最小优化, 但这几个目标都是相互制约, 相互矛盾的。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 解集^[17]。

人工蜂群算法是一种简单、高效的群体仿生优化算法, 具有收敛快、鲁棒性强等特点^[21]。但由于采用随机选择邻居的策略, 导致 Akbari 等^[23]所设计的 MOABCA 在雇佣蜂阶段的前期全局搜索能力弱, 后期局部探索能力不足。因此, 加入余弦自适应权重因子 w , 利用余弦函数在 $[\pi/2, \pi]$ 呈现单调递减变化, 使得雇佣蜂: (1) 前期具有较强的全局搜索能力。(2) 随着算法迭代次数的增加, 后期也具有充足的局部探索能力。这样, 雇佣蜂在全局搜索任务中的能力得以提升。相应的 w 及改进后的雇佣蜂搜索公式如下:

$$w = \cos\left(\frac{\pi \cdot it}{2 \cdot it_{\max}} + \frac{\pi}{2}\right) + 1 \quad (9)$$

$$v_{i,j} = x_{i,j} + w \cdot \phi_{i,j} \cdot (x_{i,j} - x_{k,j}) \quad (10)$$

式中, it 、 $it_{\max}$ 为算法的当前迭代次数和最大迭代次数; $\phi_{i,j}$ 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数; $x_{i,j}$ 为当前蜜源位置; $x_{k,j}$ 为随机蜜源位置; $v_{i,j}$ 为新蜜源位置。

当观察蜂对较好蜜源进行挖掘时, MOABCA 往往存在陷入局部最优或早熟的问题。因此, 引入柯西算子 *Cauchy* 对其步长进行变异, 使得观察蜂:

(1) 当出现陷入局部最优的趋向时, 利用较长的步长跳出局部极值。(2) 当在最优解附近挖掘时, 利用较小的步长加速收敛。标准的柯西分布的概率密度表达式如下:

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{x^2 + 1} \right), \quad -\infty < x < +\infty \quad (11)$$

与此同时, 本文对 MOABCA 的外部档案 (External Files, EF) 的网格方法应用最小粒子角度^[17], 并基于精英组策略, 利用观察蜂“优中寻优”的特点对网格中的 Pareto 解集进行优化, 进而提升 Pareto 解的质量。为了保证算法在搜索过程中的多样性, 加入控制参数 MR ^[22] 进行修正。改进后的网格结构 (基于两目标函数优化) 和观察蜂搜索公式分别如图 4 和公式 (12) 所示:

$$v_{i,j} = \begin{cases} leader + Cauchy \cdot \phi_{i,j} \cdot (leader - rep_{k,j}) & rand() < MR \\ x_{i,j} + \phi_{i,j} \cdot (x_{i,j} - x_{k,j}) & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_{i,j}$ 为雇佣蜂发送的优质蜜源; *leader* 为 $x_{i,j}$ 对应 EF 中的最优蜜源; $rep_{k,j}$ 为 EF 中随机生成的蜜源; *Cauchy* 为柯西算子; MR 为控制参数, 一般取 0.5^[22]。

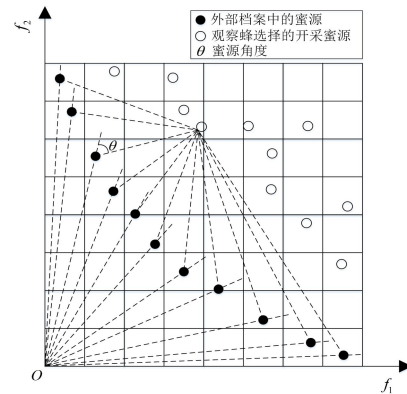


图 4 基于最小粒子角度的网格结构图

Fig. 4 Grid structure based on minimal particle angles

分析图 4, 可知观察蜂从雇佣蜂搜索的蜜源中选择较优的蜜源, 进行了开采。与此同时, 通过计算所选的开采蜜源与网格中的蜜源角度, 选取 EF 中与其蜜源角度最小的蜜源, 作为最优蜜源进行柯西变异, 达到优化 EF 中的 Pareto 解集目的。

因此, 基于改进的网格结构以及搜索公式, 本文在 MOABCA 的基础上构建出了 IMOABCA。

3.2 室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器参数整定算法

本节选择调节时间 t_c 、稳态误差绝对值 E_{ss} 和绝对积分时间误差 ITAE^[9] 作为 IMOABCA 的三目标函数, 即 $F(x) = \min J = \min (ITAE, E_{ss}, t_c)$, 来设计室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器参数

整定算法。基于 IMOABCA 改进内容, 相应运算流程如图 5 所示。

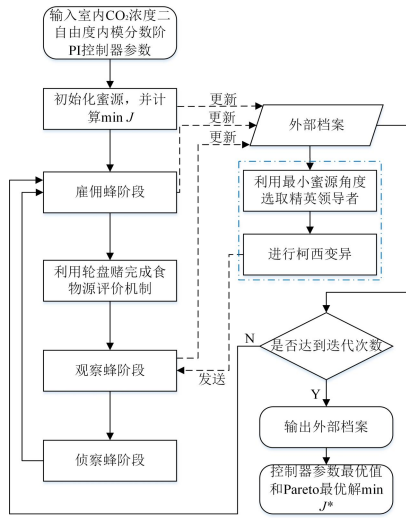


图 5 控制器参数整定算法流程

Fig.5 Parameter tuning algorithm flow of the controller

Step1: 设置 MATLAB/Simlink 工具组态中的室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器参数变量 $[T_1, T_2, \alpha]$, 并设定 T_1 、 T_2 和 α 的上限、下限。

Step2: 初始化: 设置决策空间维数 D , 种群规模 N , 雇佣蜂数目 N_e =观察蜂数目 $N_s=N$, 阈值 limit , 外部档案规模 n_{EF} , 最大迭代次数 $it_{\max}$ 以及多目标函数 $F(x)=\min J$ 。

Step3: 输入单位闭环负反馈室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统的反馈信号 $e(t)$, 基于 $\min(\text{ITAE}, E_{ss}, t_c)$, 计算每个初始蜜源的适应度值 F , 完成网格非支配排序。

Step4: 进入雇佣蜂阶段, 根据公式 (10) 生成新蜜源 v_{ij} , 计算目标函数值 F , 并与旧蜜源进行支配关系判断: 若新蜜源支配旧蜜源, 则替代旧蜜源, 成为非劣解, 雇佣蜂阶段结束。非劣解被加入 EF 中进行网格非支配排列, 并删除网格中被支配蜜源。

Step5: 利用轮盘赌方式, 在雇佣蜂阶段获取的蜜源 F 中, 为观察蜂选择开采对象。通过计算开采对象与 EF 中的蜜源之间的角度, 选取角度最小的蜜源作为最优蜜源。将开采对象和最优蜜源同时发送给观察蜂。

Step6: 进入观察蜂阶段, 根据公式 (12) 生成新蜜源 v_{ij} , 计算目标函数值 F , 并与收到的开采对象、最优蜜源进行支配关系判断: 若新蜜源支配开采对象或最优蜜源, 则替代它, 成为非劣解, 观

察蜂阶段结束。非劣解被加入 EF 中进行网格非支配排列, 并删除被支配蜜源。

Step7: 进入侦察蜂阶段, 若某蜜源的开采次数超过了阈值 limit , 则随机生成新蜜源替代旧蜜源, 并计算目标函数值 F 。反之, 则继续保留旧蜜源。

Step8: 若满足 $it=it_{\max}$, 输出控制器参数最优值 $[T_1^*, T_2^*, \alpha^*]$, ITAE、 t_c 和 E_{ss} 的 Pareto 最优解 $\min J^*$ 以及相应的闭环负反馈控制系统动态响应曲线。否则, 返回 Step4。

需要说明的是, 借助 MATLAB 软件, 将上述的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 IMOABCA.m。该 IMOABCA 是与后面章节中的控制系统组态 Simulink 模型同步运行的。

4 数值模拟

4.1 室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统的组态与仿真

对于兰州市一个大型办公区域, 其容积 $V=1200\text{m}^3$, 额定人员 90 人, 人员的活动强度为轻度, 人均 CO₂ 发生率为 $0.0173\text{m}^3/\text{h}$ 。根据 GB/T 18883-2022 标准, 室内 CO₂ 浓度不应超过 0.1% ^[25], 故本文选择室内 CO₂ 浓度设定值 $C_{n,\text{set}}=0.1\%$, 相应的 CAVAHU 总送风量 $q_{sa}=4.1\text{m}^3/\text{s}$ 。对该 CAVAHU 配置本文设计的室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统。基于图 3 和 MATLAB 中的 Simulink 工具, 对该控制系统进行组态, 相应的 Simulink 模型如图 6 所示。

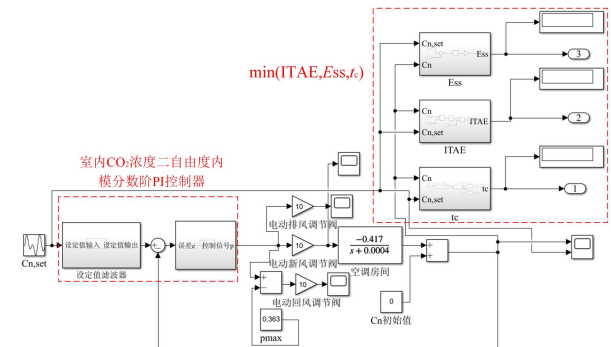


图 6 基于 IMOABCA 的室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统组态图

Fig.6 Configuration diagram of two-degree of freedom internal model fractional order PI control system for the indoor CO₂ concentration based on IMOABCA

根据空调工艺要求^[25], $C_{n,\text{set}}=0.1\%$, 假定室内 CO_2 浓度初始值 $C_{n,0}=0.11\%$, IMOABCA.m 中的相关参数设置如下: $N=100$, $n_{\text{EF}}=3$, 控制器参数整定的数目 $D=3$, $it_{\text{max}}=200$, $\text{limit}=300$, $w \in [0,1]$, $T_1 \in [90,110]$, $T_2 \in [10,12]$, $\alpha \in [0.4,0.6]$, 仿真时间设为 500s。

在 MATLAB 中的 Command Window 界面和 Simulink 环境, 同步运行 IMOABCA.m 和图 6 中的 Simulink 模型, 可获得室内 CO_2 浓度的动态响应 $C_n(t)$, $\min(\text{ITAE}, E_{\text{SS}}, t_c)$ Pareto 前沿变化和 3 组控制器参数 Pareto 最优值 $[T_1^*, T_2^*, \alpha^*]$, 分别如图 7, 图 8 和表 1 所示。

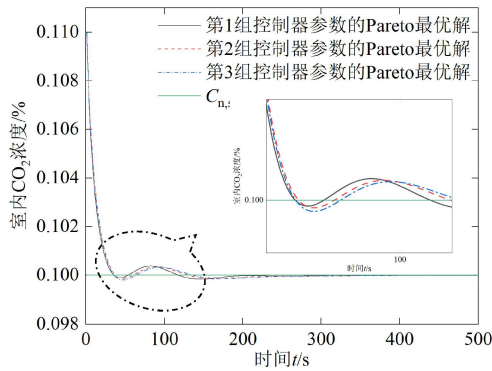


图 7 三组控制器参数 Pareto 最优解下的室内 CO_2 浓度动态响应

Fig.7 Dynamic responses of indoor CO_2 concentration under three Pareto optimal solutions of parameters of the controller

分析图 7 可知, 基于 IMOABCA 得到的控制器三组最优参数均能使得 $C_n=C_{n,\text{set}}$, 说明 IMOABCA 对控制器的参数整定是可行的。从局部放大图可见, 输出三组 $C_n(t)$ 在超调量, 调节时间表现出了不同的差异, 也与表 1 中的三个目标函数值所表征的相呼应。

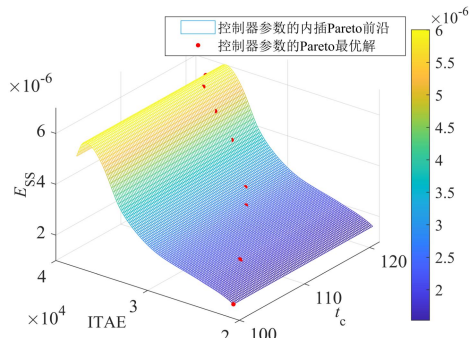


图 8 $\min(\text{ITAE}, E_{\text{SS}}, t_c)$ Pareto 前沿变化

Fig.8 Pareto front variation for $\min(\text{ITAE}, E_{\text{SS}}, t_c)$

分析图 8, 容易观察到 3 个目标函数值所对应的不同控制器参数的 Pareto 解之间的联系, 曲面上的控制器参数 Pareto 解的分布位置对应了不同的 $C_n(t)$ 控制特征。

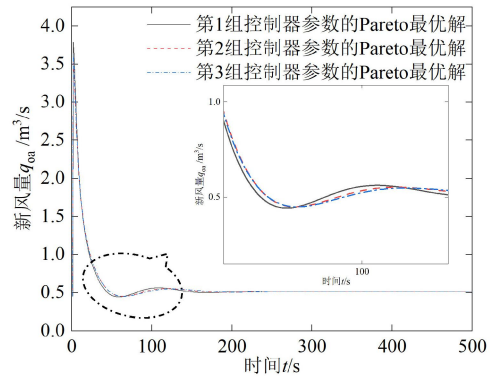
表 1 控制器参数及其三目标函数的 Pareto 解

Table 1 Pareto solution of parameters of the controller and three objective functions

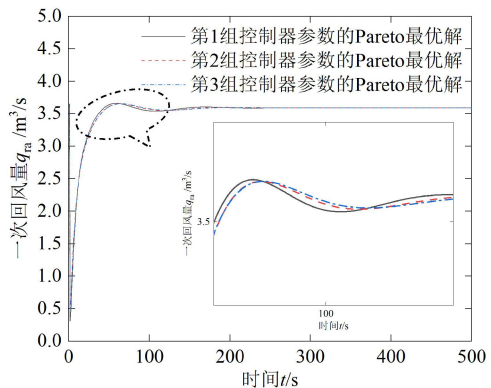
序号	控制器参数	ITAE/(%·s)	$E_{\text{SS}}/\%$	t_c/s
1	[92.05,10.43,0.56]	64025	3.63×10^{-6}	178.9
2	[92.2,11.36,0.49]	56918	5.98×10^{-6}	186.06
3	[92.16,10.92,0.45]	44057	8.96×10^{-6}	192.05

分析表 1, 可知控制器参数的三组 Pareto 最优解所对应的三个目标函数值之间是相互制约或矛盾的。例如, 第 1 组中的 ITAE 最大, 但 t_c 和 E_{SS} 最小; 第 3 组中的 ITAE 最小, 但 E_{SS} 和 t_c 最大。由此说明 IMOABCA 可以使得室内 CO_2 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器获得侧重点不同的 $C_n(t)$ 控制效果, 以满足不同控制需求。

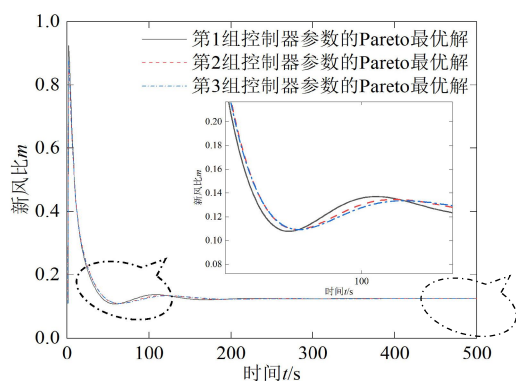
相应的新风量 q_{oa} 、一次回风量 q_{ra} 变化和新风比 m 变化, 如图 9 所示。



(a) 新风量变化



(b) 一次回风量变化



(c) 新风比变化

图 9 三组 Pareto 控制器参数最优解下的响应变化

Fig.9 Response changes under three Pareto optimal solutions of the controller

分析图 9 的 (a) 和 (b), 控制器的 3 组 Pareto 参数最优解均能够使控制器根据室内 CO₂ 浓度的变化快速做出反应, 发送控制信号作用到新风量、一次回风量和排风量电动调节阀完成新风量的调节, 达到 $C_n=C_{n,set}$ 的目的。图 (c) 反映了控制器的 3 组 Pareto 参数最优解的新风比 m 变化过程, 计算得到 3 组平均新风比均约为 14%, 满足 $m \geq 10\%$ ^[25]空调工艺要求。

4.2 与现有算法的对比

此外, 为了说明本文 IMOABCA 的优越性, 分别将 IMOABCA 和 MOABCA 作用于室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制系统对控制器参数进行整定。可获得其控制器参数 Pareto 最优解 $[T_1^*, T_2^*, \alpha^*]$ 及其三个目标函数值如表 2 所示。

表 2 控制器参数及其相应的三目标函数的 Pareto 解

Table 2 Pareto solutions of parameters of controllers and the corresponding three objective functions

算法	IMOABCA	MOABCA
控制器参数	[90.12,10.96,0.58]	[98.32,11.17,0.43]
ITAE/(%·s)	41395	59752
$E_{ss}/\%$	3.2×10^{-6}	6.32×10^{-6}
t_c/s	179.23	228.45

相应的室内 CO₂ 浓度的动态响应 $C_n(t)$, 如图 10 所示。

分析表 2, 从 $\min (ITAE, E_{ss}, t_c)$ Pareto 最优值不难看出, 相比 MOABCA, IMOABCA 对本文所设计的控制系统表现出了更好的收敛性和控制精度。同时, 从图 10 可以看出, IMOABCA 作用下的控制系统具有更快的响应速度和更小的超调量,

且能够很快的达到稳定状态, 说明 IMOABCA 在解决多目标优化问题上更具有优越性, 可以使系统呈现较强的控制性能, 也表明 IMOABCA 的设计是可行、有效的。

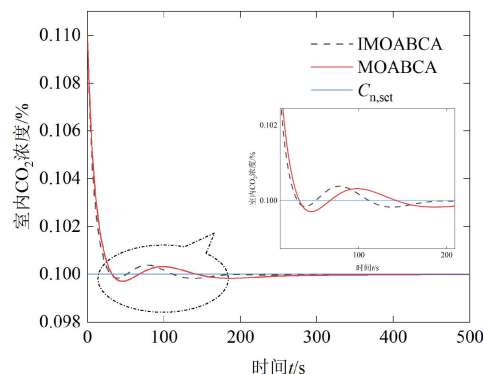


图 10 两算法下的室内 CO₂ 浓度动态响应

Fig.10 Dynamic responses of indoor CO₂ concentration under two algorithms

5 结论

针对 CAVAHU 作用下的空调房间 CO₂ 浓度的控制问题, 本文提出了一种基于 IMOABCA 的二自由度内模分数阶 PI 控制策略。依据人工蜂群算法, 对雇佣蜂阶段引入自适应惯性权重, 同时对观察蜂阶段施加精英组策略, 分别进行非线性递减和柯西变异的演变, 并结合观察蜂搜索特性, 将最小粒子角度引入外部档案集, 获取相应的 Pareto 解集, 设计了 IMOABCA, 进而对室内 CO₂ 浓度二自由度内模分数阶 PI 控制器的 3 个参数 $[T_1, T_2, \alpha]$ 进行整定。结果表明: (1) 该 IMOABCA 是可行的, 可获取控制器的 3 个参数相应的最优解 $[T_1^*, T_2^*, \alpha^*]$, 从而提升室内 CO₂ 浓度的调节品质, 实现 $C_n=C_{n,set}$ 的目的。(2) 该 IMOABCA 可以使得控制器获得侧重点不同的室内 CO₂ 浓度控制效果, 以满足不同控制需求。(3) 与现有算法相比, IMOABCA 对本文所设计的系统呈现出了明显的优越性, 表明了 IMOABCA 的设计是可行、有效的。此外, CAVAHU 是以变新风比 m 、保持总送风量 q_{sa} 恒定的方式运行的, 为 CAVAHU 运行、管理提供了新方式。

参考文献:

- [1] Xu X, Wang S, Huang G. Robust MPC for temperature control of air-conditioning systems concerning on

- constraints and multi-type uncertainties[J]. Building Service Engineering, 2010,31(1):39-55.
- [2] 战乃岩,王建辉.空调工程[M]北京:北京大学出版社, 2014:112-113.
- [3] Kusuda T. Control of ventilation to conserve energy while maintaining acceptable indoor air quality[J]. ASHRAE Transactions, 1976,82(1):89-93.
- [4] Igor S, Barbara S. Control of indoor CO₂ concentration based on a process model[J]. Automation in Construction, 2014,42:122-126.
- [5] Shi Z, Li X, Hu S. Direct feedback linearization based control of CO₂ demand controlled ventilation[C]. In: The 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, Cheng Du, China, 2010:571-574.
- [6] 刘凯,陈伊宁,吴阳,等.基于RBF神经网络的气动人工肌肉PID位置控制[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,40(5):142-148.
- [7] Podlubny I. Fractional-order systems and PI ^{λ} D ^{μ} controllers[J]. IEEE Transactions on automatic control, 1999,44(1):208-214.
- [8] 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.
- [9] 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[J]. Journal of Building Engineering, 2021,44(1):103295.
- [10] Oshnoei S, Oshnoei A, Mosallanejad A, et al. Contribution of GCSC to regulate the frequency in multi-area power systems considering time delays: A new control outline based on fractional order controllers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020,123:106197.
- [11] Maamar B, Rachid M. IMC-PID-fractional-order-filter controllers design for integer order systems[J]. Isa Transactions, 2014,53(5):1620-1628.
- [12] Ranganayakulu R, Babu G U B, Rao A S. Analytical design of enhanced fractional filter PID controller for improved disturbance rejection of second order plus time delay processes[J]. Chemical Product and Process Modeling, 2019,14(1):2018012.
- [13] Pratap C P, Rabindra K S, Sidhartha P. Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016,19(1):338-354.
- [14] Cao J Y, Liang J, Cao B G. Optimization of fractional order PID controllers based on genetic algorithms[C]. In: Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 2005:5686-5689.
- [15] 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 [J]. Neurocomputing, 2015,160(21):173-184.
- [16] 魏立新,王浩,穆晓伟.基于粒子群算法倒立摆分数阶PID参数优化[J].控制工程,2019,26(2):196-201.
- [17] 张勇,巩敦卫.先进多目标粒子群优化理论及其应用[M].北京:科学出版社,2016:25-36.
- [18] 王铎,李绍勇.定风量空调送风温度的二自由度内模控制[J].控制工程,2022,https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200743.
- [19] (美) Dale E S, Thomas F E, Duncan A M.过程的动态特性与控制(第二版)[M].王京春,王凌,金以慧,等译.北京:电子工业出版社,2006:279-280.
- [20] 张井岗.二自由度控制[M].北京:电子工业出版社, 2012:26-28.
- [21] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. J Global Optim, 2007,39(3):459-471.
- [22] Zhou X Y, Lu J X, Huang J H, et al. Enhancing artificial bee colony algorithm with multi-elite guidance[J]. Information Sciences, 2021,543(8):242-258.
- [23] Akbari R, Hedayatzadeh R, Ziarati K, et al. A multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2012,2:39-52.
- [24] Xiang Y, Zhou Y R, Liu H L. An elitism based multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 2015,245(1):168-193.
- [25] GB/T 18883-2022,室内空气质量标准[S].北京:中国标准出版社,2022.