文章编号：1671-6612（2019）05-570-07

风机盘管室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器基于 IACOA 的参数整定及其控制性能分析

魏先宏　李绍勇　吴宗礼　李海林

（兰州理工大学土木工程学院　兰州　730050）

【摘　要】　由于机型体积小，安装、操作方便和分散控制等特点，风机盘管（Fan Coil Unit, FCU）空调系统在办公楼、宾馆和公寓等建筑场所得到了广泛应用。然而，其主要设备−FCU 具有惯性和较大时间滞后等动态特性，传统控制方式，如整数阶 PID 方式会导致室温稳态误差和超调量较大，调节时间长等问题。鉴于此，提出 FCU 的室温分数阶 PID（$PI^{\lambda}D^{\mu}$）控制器参数整定新算法及其控制系统构建的设计思路。首先，结合空调工艺的相关要求和分数阶控制技术，分别对 FCU 作用下的室内温度对象、室温测量变送器、FCU 的送风单元、冷却/加热单元和室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器（Indoor Temperature Fractional Order Proportional Integral Derivative Controller, IT-FOPIDC）进行建模。其次，基于改进的蚁群优化算法（Improved Ant Colony Optimization Algorithm, IACOA）对该 IT-FOPIDC 的 5 个控制参数进行整定，获取其最佳值。最后，借助 Matlab 工具，对 FCU 作用下的空调房间室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$调节系统进行组态和数值模拟其控制效果。结果表明，该室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$调节系统在理论上是可行的，且室温控制效果明显优于 Ziegler-Nichols（Z-N）整定法和 ACOA 算法的室温整数阶 PID 控制系统。

【关键词】　空调风机盘管；室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器；改进蚁群优化算法；控制器参数整定；数值仿真

中图分类号　TP273+.1　　文献标识码　A

Numerical Study on Tuning the Parameters of an Indoor Temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller for FCU Based on IACOA and its Performance Analysis

Wei Xianhong　Li Shaoyong　Wu Zongli　Li Hailin

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

【**Abstract**】　The air conditioning system adopting fan coil units (FCUs) has been widely used in the buildings including offices, hotels and apartments because of the characteristics of its compact size, easy installation, convenient operation and decentralized control, etc. However, the main equipment- FCU has the dynamic characteristics of inertia and large time delay. So the traditional control methods, such as the integer order PID manner can lead to the problems of larger steady state error and overshoot of indoor temperature and the longer adjustment time, etc. In view of this, this paper puts forward the design ideas of a new algorithm for tuning parameters of an indoor temperature fractional order proportional integral derivative controller (IT-FOPIDC) and the corresponding control system construction for FCU in an air-conditioning room. First, combining the relevant requirements of air-conditioning process and fractional order control technology, the indoor temperature plant, indoor temperature measuring

项目基金：甘肃省自然科学基金（编号：1508RJZA109）
兰州理工大学博士研究基金项目（编号：B04-237）
兰州理工大学建工七七基金项目（编号：TM-QK-1301）
作者（通讯作者）简介：魏先宏（1991-），女，硕士研究生，E-mail：1396755462@qq.com
收稿日期：2018-10-18

transmitter, IT-FOPIDC, air supply unit, cooling and heating unit of FCU are modeled, respectively. Secondly, the parameters of this IT-FOPIDC are tuned by a new algorithm, called IACOA, and five optimal values are obtained. Finally, this indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control system is configured and the related control effects are numerically simulated by mans of MATLAB tool. The results show that this indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control system is feasible in theory, and the indoor temperature control effect is more superior to that of the ziegler-nichols (Z-N) tuning method and the ACOA algorithm for the integer order PID control system for the same FCU in an air-conditioning room.

【Keywords】 Air-conditioning fan coil unit (FCU); indoor temperature $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller (IT-FOPIDC); improved ant colony optimization algorithm (IACOA); tuning parameters of controller; numerical simulation

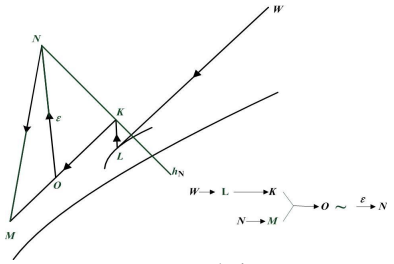
0　引言

由于空调风机盘管（Fan Coil Unit, FCU）具有布置灵活，占用建筑空间小，运行噪音低，操作方便和分散控制等特点，目前办公楼、宾馆、医院、商用住宅以及休闲娱乐等公共场所都采用风机盘管空调系统[1]。在该系统当中，为了获得均衡的送、回风气流组织，FCU 的布置数量较多，故其电力消耗占据了暖通空调系统（Heating Ventilation and Air Conditioning System, HVACS）运行能耗的很大一部分。因此，改进 FCU 的控制方式不仅可以提高热舒适水平，而且有助于节约能源和降低运行成本[2]。目前，风机盘管系统的控制主要有两种手段，即风量调节和水量调节，风量调节一般采用单相三档变速电机，按照高、中、低三档控制风机的风量；水量调节主要是利用室内温度传感器和控制器，控制电动两通阀门的开度，调节流经盘管的冷/热水流量来达到控制温度的目的[3]。由于空调房间温度对象具有非线性、时变性和时滞的特点，传统的风机盘管控制方式不可避免地导致室温控制误差大、调节时间长和降低房间的热舒适性等问题。很多学者对此进行了相关的研究，如：广东技术师范大学柳秀山[4]采用模糊控制的风机盘管温控系统自动根据室内的热环境因素调节室内温度，为空调区人员创造了一个舒适的工作环境，同时又达到了良好的节能效果；华中科技大学学者舒刚等[5]设计了一种模糊自整定 Fuzzy-PID 控制器利用模糊控制规则，在线调整 PID 控制器的参数来调节 FCU 空调房间的温度，能够较好地满足室内外条件变化时房间舒适度的要求。但是这些整数阶 PID 控制器或系统存在超调量大和调节时间长等不足。

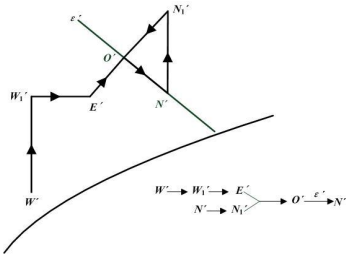
根据以上研究存在的问题，本文提出了风机盘管室温分数阶 PID 控制系统的设计思路。其中，通过对基本蚁群算法中的蒸发系数ρ进行动态调整，设计出改进的蚁群优化算法（IACOA），对核心环节—室温分数阶 PID 控制器（IT-FOPIDC）的 5 个参数进行整定，获取其最佳值。借助 MATLAB 工具，对 FCU 空调房间的室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$调节系统进行组态和数值模拟。仿真结果表明该室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$调节系统能较好地适应空调房间对象所具备的非线性和大时滞等特性以及克服室温整数阶 PID 控制所存在的超调量大和调节时间长等问题。此外，填补了 Z-N 整定法无法整定 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器参数的不足。

1　独立新风加风机盘管的空调处理工艺

由于室内 CO_2 浓度高的问题无法解决，不设新风的风机盘管空调系统很少应用[6]，因此风机盘管空调系统，多指室内风机盘管机组加独立新风系统。目前主要采用室外新风经过冷却、加热与加湿的处理后，单独送入室内；而 FCU 则承担处理室内冷/热负荷的方式，其空调工艺处理过程（夏季、冬季）如图 1 所示[7]。



（a）夏季



（b）冬季

图 1　新风单独处理、风机盘管承担室内冷/热负荷

Fig.1　The fresh air is treated alone, the fan coil unit bears the indoor cooling/heat load

空调夏季工况时，新风机组内的表冷器将新风冷却、减湿处理到状态点 L，然后经新风管道送入小型空调房间，对应状态点 K。同时，FCU 将室内空气从状态点 N 处理到状态点 M，即承担室内冷负荷。然后，与状态点 K 的新风混合达到送风状态点 O，送入室内。

空调冬季工况时，新风由新风机组内的加热器首先加热到状态点 W_1'点，然后经蒸汽加湿器等温加湿到状态点 E'，然后经新风管道送入小型空调房间。同时 FCU 将室内空气从状态点 N'处理到状态点 N_1'，即承担室内热负荷。然后，与状态点 E' 的新风混合达到送风状态点 O'，送入室内。由于 FCU 出风口和新风口各自是独立出风的，且 FCU 出风与新风混合这一过程是在新风送入室内后完成的，所以在空调设计时，应使新风口紧靠 FCU 的出风口。

2　空调风机盘管的室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制系统的构建

图 2 所示为二管制 FCU 作用下的空调房间室温测量、控制工艺流程图。其中，室温控制系统由室温变送器 TT、室温控制器 TC、电动冷/热水调节阀、冷/热盘管与风机和空调房间组成。

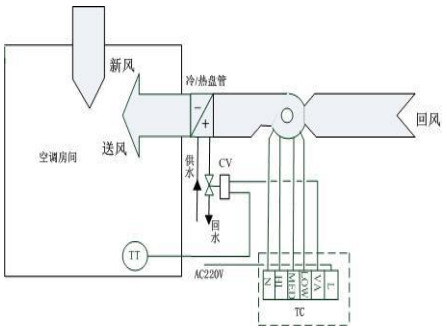


图 2　空调 FCU 室温测量、控制工艺流程图

Fig.2　Temperature measurement and control process flow chart of air-conditioning FCU

TT—室温变送器；CV—电动冷/热水节阀；

TC—室温控器带风机三速开关

TC 接受 TT 传送的室温信号 T_n，进行 $\Delta T=T_{n,set}-T_n$。且对ΔT 进行相应的控制算法，如 PID 运算后，输出控制指令 p 自动调节冷、热盘管回水管上的 CV 开度，对 FCU 的回风进行冷却或加热，改变 FCU 的送风温度 T_{SA}。同时 TC 可根据ΔT 大小，自动切换 FCU 风机三档的高（HI）、中（MED）、低（LOW）送风量 q_{SA}。这样，FCU 的送风与室内空气进行热交换，循环往复，从而使得 $T_n\approx T_{n,set}$。此外，TC 还具有制冷/热模式的自动转换功能，以适应空调夏季与冬季的运行工况。

2.1　空调房间室温对象的传递函数

空调房间温度对象属于具有较大时滞、大惯性等特性的热工过程对象，其输入/输出特性可用一阶惯性环节加纯滞后的传递函数来表述[8,9]，即

$$G_1(s)=\frac{K_1}{T_1s+1}e^{-\tau_1 s} \tag{1}$$

式中，K_1 为空调房间的放大系数；T_1 为空调房间的惯性时间常数，s；τ_1 为空调房间的纯滞后时间，s。

2.2　风机盘管的传递函数

由于 FCU 的表面式冷却/加热盘管的传热有一定的惯性，其传递函数可用一阶惯性环节的特性来描述[8]：

$$G_2(s)=\frac{\theta'(s)}{Q_{FC}(s)}=\frac{K_2}{T_2s+1}e^{-\tau_2 s} \tag{2}$$

式中，$\theta'(s)$为表面式冷却/加热盘管供、回水的平均温度，℃；$Q_{FC}(s)$为通过冷却/加热盘管的水量，kg/s；K_2 为表面式冷却/加热盘管的静态放大系数；T_2 为表面式冷却/加热盘管的时间常数，s。

由于 FCU 安装在空调房间内，FCU 和空调房间这两个环节属于串联，因此整个 FCU 空调房间室温对象传递函数 $G(s)$，如下式所示：

$$G(s)=G_1(s)\cdot G_2(s)=\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}e^{-\tau s} \tag{3}$$

式中，$K=K_1*K_2$；$\tau=\tau_1+\tau_2$。

根据文献[5,9]，可知 K_1=8，K_2=1，T_1=180，T_2=2.5，τ_1=21，τ_2=9，所以 $G(s)$为：

$$G(s)=\frac{8}{450s^2+182.5s+1}e^{-30s} \tag{4}$$

2.3　室温测量变送器的传递函数

由文献[6]可知，室温测量变送器的传递函数可以视为比例环节：

$$G_3(s)=K_3 \tag{5}$$

式中，K_3 为室温测量变送器的比例系数。本文取 K_3=1，即 $G_3(s)=1$。

2.4　FCU 冷/热水流量调节阀的传递函数

目前常用的调节阀流量特性包括直线、等百分

比、抛物线和快开性四种。本研究选择等百分比流量特性的电动调节阀。基于文献[10]，该 FCU 冷、热水流量电动调节阀的传递函数，如下式所示：

$$G_4(s)=\frac{1}{s+1} \tag{6}$$

2.5　室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制器的传递函数

室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制器的输入信号为室温设定值与室内温度的差值 e，即 e=ΔT=$T_{\mathrm{s,set}}$-T_{n}；输出信号为经过 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制运算的输出指令 p_1。基于文献[11]，可得对应的传递函数如下：

$$G_{\text{IT-FOPIDC}}=K_{\mathrm{P}}+\frac{K_{\mathrm{I}}}{s^{\lambda}}+K_{\mathrm{D}}\cdot s^{\mu}\qquad \lambda,\mu>0 \tag{7}$$

式中，K_{P}为比例增益；K_{I}为积分常数；K_{D}为微分常数；λ为积分阶次；μ为微分阶次。

从上式可知 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$是传统 PID 广义化形式，它包含了积分阶次λ和微分阶次μ，当λ=μ=1 时，PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$就转化为传统的整数阶 PID。

2.6　送风量三位控制器的输入/输出函数

根据ΔT 大小，该送风量三位控制器可发出相应的三位控制指令 p_2，自动切换 FCU 送风机的高（HI）、中（MED）、低（LOW）三档送风量 q_{SA}。其输入/输出关系式如下：

$$p_2\begin{cases}1,\mathrm{HI}, & \Delta T>5℃\\ 0,\mathrm{MED}, & 2℃<\Delta T<5℃\\ -1,\mathrm{LOW}, & \Delta T<2℃\end{cases} \tag{8}$$

送风机环节可视为比例环节[6]，对应着 HI、MED 和 LOW 三段式送风量，其传递函数如下：

$$G_5(s)=\begin{cases}q_H, & 1760\,\mathrm{m^3/h}\\ q_M, & 1250\,\mathrm{m^3/h}\\ q_L, & 850\,\mathrm{m^3/h}\end{cases} \tag{9}$$

因此，本文构建的 FCU 作用下的空调房间室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$调节系统方框图，如图 3 所示。

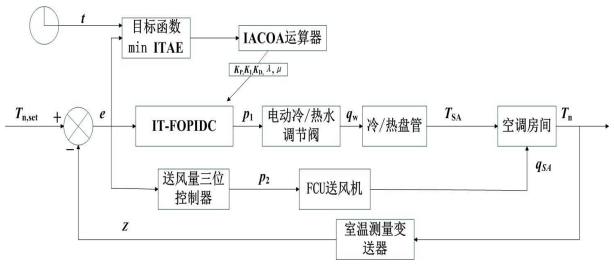


图 3　基于 IACOA 的风机盘管室温分数阶 PID 控制系统原理图

Fig.3　Principle diagram of fan-coil unit fractional order PID control system based on IACOA

该室温分数阶 PID 控制系统的调节过程简述如下：室温测量变送器 TT 将反映室温 T_{n} 大小的标准信号 z 与室温设定值 $T_{\mathrm{n,set}}$ 相比较，产生 e=ΔT=$T_{\mathrm{n,set}}$−T_{n}。e 被输送到 IACOA 运算器，实时整定出 IT-FOPIDC 所需的 5 个控制参数值。这样，基于不断更新的 K_{P}、K_{I}、K_{D}、λ、μ，IT-FOPIDC 连续输出适应室内空调负荷变化的控制指令 p_1 给 FCU 的冷、热水流量调节阀，调节流经冷\热盘管的冷、热水量，从而改变 FCU 的送风温度 T_{SA}；同时，送风量三位控制器根据ΔT 大小，发出相应的三位控制指令 p_2，自动切换 FCU 的 HI、MED 和 LOW 送风量 q_{SA}。这样，给空调房间送入了 T_{SA} 和 q_{SA} 相应变化的冷、热负荷 Q_s，经过热交换，满足 T_{n}≈$T_{\mathrm{n,set}}$ 空调工艺要求及其它控制指标，如室内温度 T_{n} 合理的衰减比、较小的超调量和较短的调节时间等。

3　基于 IACOA 的室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制器参数整定

3.1　基本蚁群算法

蚁群算法是一种源于大自然生物界新的仿生进化算法，由意大利学者 M Dorigo，V Maniezzo 和 A Colorni 等于 20 世纪 90 年代初期通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径行为而提出的一种基于种群的启发式随机搜索算法[12]，每只蚂蚁开始搜索时是从任意一个节点出发，在 t 时刻以概率 P 选择下一个节点，此概率计算公式如（10）式所示。

$$p_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}\cdot[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{s\in J_k(i)}[\tau_{is}(t)]^{\alpha}\cdot[\eta_{is}]^{\beta}}, & \text{当 } j\in J_k(i)\text{时}\\ 0, & \text{其 他}\end{cases} \tag{10}$$

式中，α为信息素的重要程度；β为期望启发式因子；$J_{\mathrm{k}}(i)$为第 k 只蚂蚁下一步可能访问的节点；$p_{ij}^{k}(t)$为在 t 时刻第 k 只蚂蚁在节点 i 选择节点 j 的概率；η_{ij}为节点 i 与节点 j 距离的倒数；$\tau_{ij}(t)$为在 t 时刻路径 ij 上留下的信息素大小。

当所有蚂蚁完成一次周游后，各路径上的信息素根据式（11）～（13）进行更新。

$$\tau_{ij}(t+n)=(1-\rho)\cdot\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij}\qquad 0<\rho<1 \tag{11}$$

$$\Delta\tau_{ij}=\sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^{k} \tag{12}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{Q}{L_K}, & \text{当蚂蚁}k\text{在本次周游经过边}ij\text{时}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{13}$$

式中，ρ为路径上信息素的蒸发系数；$\Delta\tau_{ij}$为本次迭代中边 ij 上信息素的增量；τ_{ij}^{k}为第 k 只蚂蚁在本次迭代中留在边 ij 上的信息素量；Q 为正常数。

3.2 改进的蚁群算法 IACOA

基本蚁群算法中的信息素蒸发系数ρ是(0，1)区间的某个固定值，其大小直接关系到算法的全局搜索能力和收敛速度，当ρ过小时，已经被搜索过的路径被再次选择的可能性过大，容易出现局部收敛；反之，当ρ过大时，虽然可以提高算法的随机性能和全局搜索能力，但又会使算法的收敛速度降低[13]。

为了使算法的全局搜索能力和收敛速度均得到提高，使算法的全局搜索能力和收敛速度在动态平衡中得到最大程度上的优化效果。基于文献[14]，本文提出阈值函数$\rho(k)$的概念，即ρ随着迭代次数 k 的改变而适当地变化，对$\rho\in[0.1,0.9]$进行动态调整，$\rho(k)$表达式如下：

$$\rho(k)=\frac{\varphi}{1+\gamma e^{\frac{K}{G}}} \tag{14}$$

式中，φ为常数项，本文取 1.32；k 为当前迭代次数；G 为总的迭代次数；γ 为改变因子，本文取为 1。

将基本蚁群算法中的ρ用$\rho(k)$予以替代，就构成了改进的蚁群算法 IACOA。在整个迭代过程中，开始时ρ取值为 0.9，可以在初始阶段提高算法的全局搜索能力；随着迭代次数 k 的增大，ρ逐渐减小，使得 IACOA 算法既加快收敛速度，又不会陷入局部收敛。当迭代次数 k 足够大，即迭代搜索过程的末期，ρ值就接近 0.1，此时的搜索结果和过程已经基本确定和结束。

3.3 基于 IACOA 的室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制器参数的整定

控制器参数整定的目标是在期望的目标函数 J 达到最优时，获取对应的控制器的相关参数值，进而输出控制指令到执行单元，产生调节作用，克服干扰，使被控参数尽可能接近设定值。为避免室温超调量过大，本文选取时间乘室温误差绝对值的积分性能指标 ITAE[10]，即 $\mathrm{ITAE}=\int_0^{\infty}t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t$ 作为目标函数 J，以 min J 进行寻优，获取相应的 IT-FOPIDC 5 个参数的最佳值 K_P^*、K_I^*、K_D^*、λ^*、μ^*。基于 IACOA 的 ITFOPIDC 参数整定算法流程图，如图 4 所示。

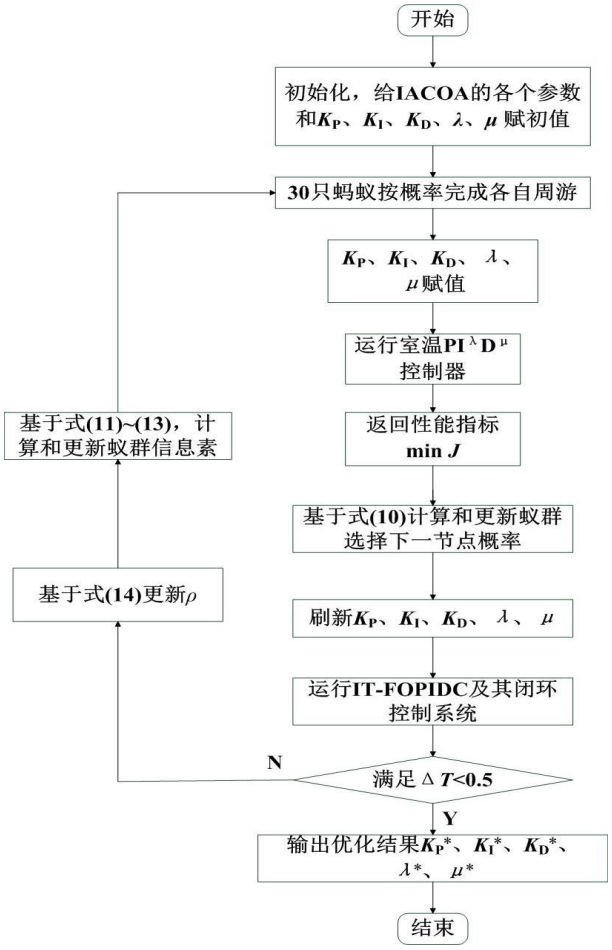


图 4 基于 IACOA 的 IT-FOPIDC 控制器 5 个参数整定流程图

Fig.4 Five parameters tuning flow chart of IT-FOPIDC controller based on IACOA

4 数值模拟

基于图 3 所述的在 FCU 作用下的室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制系统方框图，通过 MATLAB 中 Simulink 工具进行该室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制系统的组态，如图 5 所示。

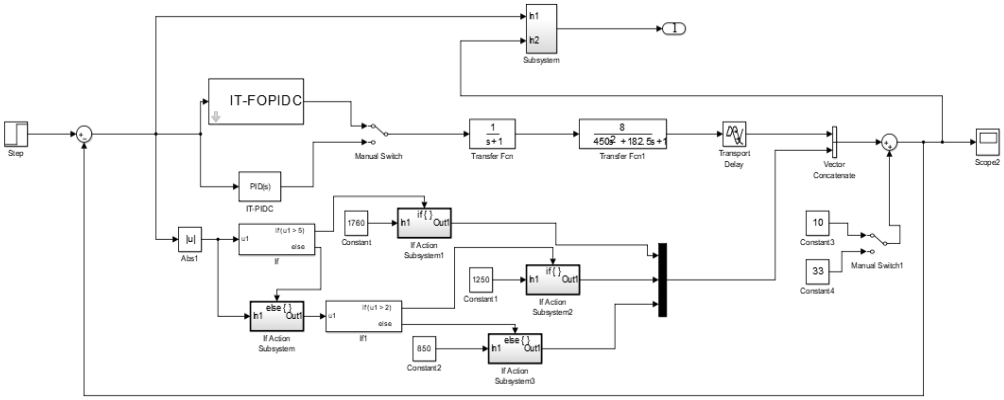


图 5　FCU 作用下的室温 PIλDμ控制系统 Simulink 模型组态图

Fig.5　Configuration diagram of Simulink model of room temperature PIλDμ control system under the action of FCU

基于文献[15]，通过控制单一变量的变化，来整定相应参数 K_P、K_I、K_D、λ、μ的取值范围。其中 K_P 的取值范围为[0,20]，K_I 的取值范围为[0,5]，K_D 的取值范围为[0,30]，λ的取值范围为[0,1.6]，μ 的取值范围为[0,2]，同时，根据图 1 所示舒适性空调工艺过程和室温要求，夏季和冬季的室内初始温度分别为 $T_{n,0}$=33℃ 和 $T_{n,0}$=10℃，相应的 $T_{n,set}$=25±1℃和 $T_{n,set}$=22±1℃。将该 IACOA 算法的相关参数值设定为：m=30；G=200；P_0=0.2；ρ_{min}=0.1；ρ_{max}=0.9，以 min J 进行寻优。Switch 置于位置 1，运行该室 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制系统 Simulink 模型，可得到的空调夏季、冬季的室温变化过程，如图 6 所示。同时整定出满足 min J 的 IT-FOPIDC 参数最佳值，即 [K_P*，K_I*，K_D*，λ*，μ*]=[9.516，0.384，12.239，0.752，1.210]。

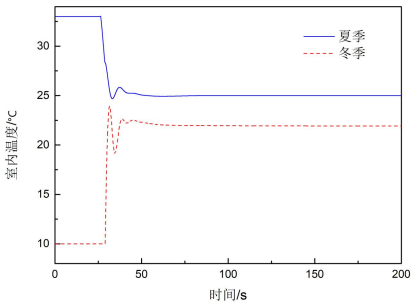
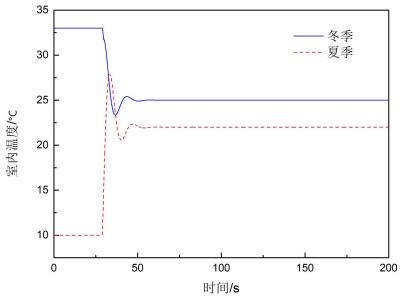


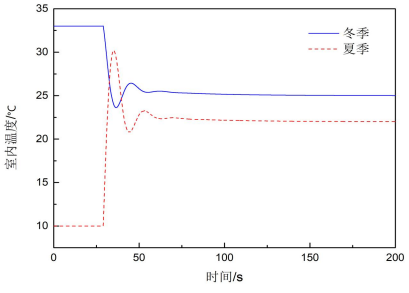
图 6　基于 IACOA 整定的 FCU 室温 PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$控制系统的夏季、冬季工况下室温变化曲线图

Fig.6　Temperature Change Curve in Summer and Winter Conditions of FCU Room Temperature PI$^{\lambda}$D$^{\mu}$ Control System Based on IACOA

Switch 置于位置 2，以 min J 进行寻优，分别应用 AOCA 算法和 Z-N 算法运行该室温 PID 控制系统 Simulink 模型，同样可得到空调夏季、冬季的室温变化过程，如图 7 所示。同时整定出满足 min J 的 IT-PIDC 参数最佳值分别为[$K_{P,1}$*，$K_{I,1}$*，$K_{D,1}$*]=[9.120，0.050，15.958]和[$K_{P,2}$*，$K_{I,2}$*，$K_{D,2}$*]=[8.433，0.218，10.931]。



（a）基于 AOCA 的 IT-PIDC 参数整定



（b）基于 Z-N 算法的 IT-PIDC 参数整定

图 7　空调夏季、冬季工况下，FCU 室温 PID 控制系统的室温变化曲线图

Fig.7　Temperature change curve of FCU room temperature PID control system in summer and winter conditions

基于图 6 和 7，可比对出室温分数阶与整数阶 PID 控制系统的性能指标，如表 1 所示。

表 1　风机盘管末端房间温度在三种控制策略下的控制指标

Table 1　Control index of room temperature at the end of fan coil unit under three control strategies

控制指标 系统形式	IACOA-ITFOPIDC	ACOA-ITPIDC	Z-N-ITPIDC
夏季室内最低温度/℃	24.8	23.2	23.62
冬季室内最高温度/℃	23.9	28.0	30.18
超调量σ/%	8.6	27.3	36.4
上升时间 t_r/s	30.7	31.2	32.3
峰值时间 t_p/s	32.6	34.1	38.2
调节时间 t_s/s	37.1	44.2	53.1
室温稳态误差/℃	0.0	0.0	0.0

基于图 6、7 和表 1 分析，可知本文提出的基于 IACOA 参数整定法的室温分数阶 PID 控制系统的控制效果明显优于 Z-N 整定法和 ACOA 算法的室温整数阶 PID 控制系统。

5　结论

综上所述，在冬、夏两季，基于 FCU 对空调房间室内温度的调节作用和自动控制技术，本文提出了 IACOA-ITFOPID 室内温度自动控制系统，在该系统当中，主要应用室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器来实现室内温度在冬、夏两季的室外温度变化过程当中，使得室内温度基本保持在满足室内人体舒适度的要求。根据设计思路，本文借助 MATLAB/Simulink 软件，对所设计的系统进行组态和数值模拟。仿真结果表明：在该系统当中，本文通过设计的 IACOA 算法整定 FCU 室温 IT-FOPIDC 控制器参数，从而确定该系统的控制器；从仿真数据结果的分析可以得出，本文把 $PI^{\lambda}D^{\mu}$控制器应用到 FCU 对室内温度的自动控制系统中可以获得更快的调节速度，使得系统在较短时间内达到稳态值；系统超调量及稳态误差得到了很好的控制；并且基于 IACOA 算法整定相关控制器参数具有更高的整定效率。从而证明了本文所提算法的可靠性以及仿真的适用性。

参考文献：

[1] 韩璐.干盘管加独立新风空调系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:4-15.

[2] Chen Z, Xue F, Wang F. A novel control logic for fan coil unit considering both room temperature and humidity control[J]. Building Simulation, 2015,8(1):27-37.

[3] 李玉云.建筑设备自动化(第 2 版)[M].北京:机械工业出版社,2016:106-108.

[4] 柳秀山.基于网络与模糊控制的风机盘管节能控制器的设计[J].低压电器,2009,2(12):7-10.

[5] 舒刚,沈国民.模糊自整定 PID 控制器在风机盘管系统中的仿真研究[C].2007 年湖北省暖通空调制冷及热能动力学术年会论文集,2008,43-46.

[6] 张卫政.基于模糊控制的风机盘管空调系统应用研究[D].广州:广东工业大学,2005:1-22.

[7] 安大伟.暖通空调系统自动化[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:244-246.

[8] 萧震宇.空调风机盘管加新风系统调节特性研究[J].流体机械,2005,33(2):24-27.

[9] 王亚峰,李绍勇.空调房间温度模糊分数阶 PID 控制器的设计[J].制冷与空调,2014,28(4):451-456.

[10] 李玉云,李绍勇,王秋庭.自动控制原理与 CAI 教程[M].北京:机械工业出版社,2010,77-80:255-263.

[11] Podlubny I, Dorcak L, Kostial I. On fractional derivatives, fractional-order dynamic systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$-controllers[C]. In: Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, American, 1997:4985-4990.

[12] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, Part B, 1995,26(1):29-41.

[13] 赵伟,蔡兴盛,曲慧雁.一种基于惩罚函数和新信息素更新方式的蚁群算法[J].计算机工程与科学,2013,35(3):103-107.

[14] 张金榜,孙艺笑,王润典,等.改进的阈值函数去噪算法[J].电子科技,2014,27(2):17-20.

[15] 李鹏波.变风量末端装置的基于 IPSA-DE 算法 $PI^{\lambda}D^{\mu}$-PI 串级控制器的数值研究[D].兰州:兰州理工大学,2018:41-46.