

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-538-07

# VAV-Box 室温分数阶串级控制系统的数值研究

孙智冬 李绍勇 陈宗帅 贺冬辰

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050)

**【摘要】** 目前, 空调房间所配置的风机型变风量末端装置 (Variable Air Volume Box, VAV-Box) 往往采用整数阶 PID 或 PID-PI 串级的调节方式, 会导致室温控制的稳态误差和超调量均较大以及室内静压波动的问题。鉴于此, 本文提出了风机型 VAV-Box 室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -室内送风量  $PI^{\lambda}$  串级控制策略和修正的人群搜索算法实施控制器参数整定的设计理念。首先, 结合空调工艺要求和自动控制技术, 对风机型 VAV-Box 作用下的室温被控对象、室内温度和室内送风量测量变送器、室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器、室内送风量  $PI^{\lambda}$  控制器、变频器和送风机分别进行建模。其次, 构建修正的人群搜索算法对  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  和  $PI^{\lambda}$  两个控制器的 8 个参数进行整定, 获取最佳值; 最后, 借助 MATLAB 工具, 对该串级调节系统进行组态和数值模拟其控制效果。结果表明: 基于修正的人群搜索算法的  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  和  $PI^{\lambda}$  控制器参数整定和该串级调节系统在理论上是可行的, 且相应的室温控制性能指标满足空调工艺的相关要求。

**【关键词】** 变风量空调系统; 风机型 VAV-Box; 分数阶 PID 控制; 修正的人群搜索算法; 控制器的参数整定; 数值仿真

中图分类号 TU831 文献标识码 A

## MSOA-based Indoor Temperature Fractional Cascade Controller Parameter Setting Strategy

Sun Zhidong Li Shaoyong Chen Zongshuai He Dongchen

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

**【Abstract】** At present, a VAV-Box with fan installed in each air-conditioning room is usually controlled by the modes of integer order PID or PID-PI cascade, which results in the problems of indoor temperature control with larger steady state error and overshoot and indoor static pressure fluctuations. In view of these problems, this paper presents the ideas of designing the cascade control policy of fractional order PID primary controller for indoor temperature and fractional order PI secondary controller for indoor supply air volume and modified seeker optimization algorithm for tuning parameters of tuning parameters of these two controller. Firstly, on the basis of the requirements of air-conditioning process and automatic control technology, the controlled plant of indoor temperature, measuring transmitters of indoor temperature and indoor supply air volume, fractional order PID primary controller for indoor temperature, fractional order PI secondary controller for indoor supply air volume, variable frequency controller and supply fan are modeled, respectively. Secondly, a modified seeker optimization algorithm is reconstructed to continuously tune eight parameters of these two controllers until the corresponding optimal values are obtained. Finally, the configuration of this fractional order PID cascade control system and the numerical simulation of its control effect are carried out by means of MATLAB tool. The results indicate that tuning parameters of  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  and  $PI^{\lambda}$  controller based on the modified seeker

基金项目: 兰州理工大学博士研究基金项目 (B04-237); 兰州理工大学建工七七基金项目 (TM-QK-1301)

作者简介: 孙智冬 (1993-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1149304718@qq.com

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

收稿日期: 2019-11-26

optimization algorithm and the proposed fractional order PID cascade control system are feasible in theory, and the related control indexes of indoor temperature can meet the relevant requirements of air-conditioning technology.

**【Keywords】** Variable air volume air-conditioning system; VAV-Box with fan; fractional order PID control; modified seeker optimization algorithm; tuning parameters of controller; numerical simulation

## 0 引言

随着人们生活水平的显著提高和健康理念的强化深入, 室内环境的舒适性已被广泛专注。变风量空调系统 (Variable Air Volume Air Conditioning System, VAVACS) 作为一种舒适、安全、节能的新型空调系统代表, 已成为国内外空调工程应用的主流, 而安装在空调房间内的 VAV-Box 运行工况如何, 则对表征室内舒适性的关键参数—室内温度存在着显著的影响<sup>[1]</sup>。空调房间室温对象具有非线性、时滞和结构参数变化等特性, 使得目前常用控制方式, 如 VAV-Box 室温 PID 单回路<sup>[2]</sup>往往出现室温稳态误差和超调量均过大、调节时间长和室内压力波动的问题; 而室温 PID—室内送风量 PI<sup>[3]</sup>或室温 PI<sup>λD<sup>μ</sup></sup>—室内送风量 PI 串级控制系统<sup>[1]</sup>尽管能消除室内压力波动, 但会出现室温稳态误差和超调量较大、调节时间较长等问题。此外, 不同的控制算法<sup>[4]</sup>和不同类型的 VAV-Box<sup>[5]</sup>也会对室温的控制及室内舒适度有着很大的影响。为此, 研究人员始终在寻求性能优良, 易于实现的控制方法及其控制器。

对于风机型 VAV-Box 作用下的空调房间, 为进一步提高室温控制性能和消除室内压力波动的影响, 本文提出室温 PI<sup>λD<sup>μ</sup></sup>—室内送风量 PI<sup>λ</sup>串级控制策略。同时, 受启于模糊数学中的 S 型隶属度函数<sup>[6]</sup>, 构建非线性变化的新变量  $v$ , 将标准人群搜索算法 (Standard Seeker Optimization Algorithm, SSOA) 中的线性变化惯性权值  $\omega$  进行替换, 构建出修正的人群搜索算法 (Modified Seeker Optimization Algorithm, MSOA), 对 PI<sup>λD<sup>μ</sup></sup>—PI<sup>λ</sup>两控制器的 8 个参数进行整定, 获取其最佳值。这样, 分别作用在该串级调节系统的主回路 (Main Loop, ML) 中的室温 PI<sup>λD<sup>μ</sup></sup> 控制器 (Indoor Temperature Fractional Order PID Controller, IT-FOPIDC) 和副回路 (Auxiliary Loop, AL) 中的室内送风量 PI<sup>λ</sup> 控制器 (Indoor Supply Air Volume Fractional Order PI Controller, ISAV-FOPIC) 串级联动, 输出更为精准的控制指令给每个空调房间的风机型

VAV-Box, 动态地送入随室内空调负荷变化的冷、热风量, 满足  $T_n = T_{n,set} \pm \Delta T$  的空调工艺要求, 且有效地克服冷、热风量变化所导致的室内压力  $P_n$  波动的影响。同时, IT-FOPIDC 和 ISAV-FOPIC 充分发挥其整定参数多, 可调范围广的优势, 可进一步降低室温稳态误差和超调量和减少调节时间。

## 1 VAV-Box 的室温控制

VAV-Box 是 VAVACS 中的重要末端装置, 承担着处理空调房间冷、热负荷变化, 保证室温达标的任务。类似于压力无关型基本型 VAV-Box 的控制方式, 对于风机型 VAV-Box, 本文将分数阶串级调节方式施控于它, 相应的空调工艺控制原理如图 1 所示。

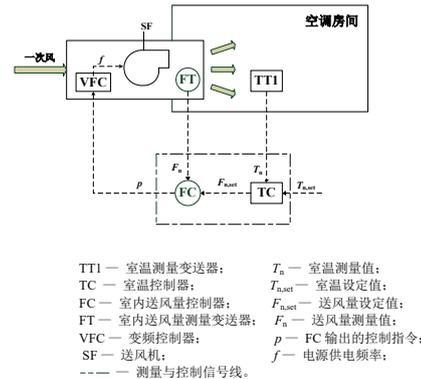


图 1 风机型 VAV-Box 空调工艺控制原理图

Fig.1 Principle diagram of air-conditioning process control for VAV-Box equipped with fan

TT1 将室温信号  $T_n$  传给 TC, TC 根据 TT1 传送的反映室温  $T_n$  信号, 进行求偏差  $\Delta T = T_{n,set} - T_n$ 。且对  $\Delta T$  进行相应的 PI<sup>λD<sup>μ</sup></sup> 运算后, 输出控制指令, 即空调房间所需送风量的设定值  $F_{n,set}$  给 FC。同时, FC 根据 FT 传送的反映室内送风量  $F_n$  信号, 也进行  $\Delta F = F_{n,set} - F_n$  和对  $\Delta F$  进行相应的 PI<sup>λ</sup> 运算后, 输出控制指令  $p$  给 VFC。VFC 则输出变化的供电频率信号  $f$ , 使得 SF 转速  $n$  发生变化。这样, 送入空调房间的冷、热风量  $q_v$  也发生相应的变化, 与室内空气进行热交换, 循环往复, 从而使得  $T_n \approx T_{n,set}$ ,

这种串级调节方式在改变  $q_v$  的同时, 对室内压力  $P_n$  不会造成波动。

## 2 室温 $PI^\lambda D^\mu$ - 送风量 $PI^\lambda$ 串级控制系统组成环节的建模

### 2.1 室温模型构建

空调房间室温对象属于大惯性、时滞等特性的热工过程对象, 其模型可用二阶惯性环节加纯滞后的传递函数来表示<sup>[7, 8]</sup>。

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s} = \frac{3.06}{(300+1)(10+1)} e^{-30s} \quad (1)$$

式中,  $K$  为室温调节通道的放大系数;  $T_1$ 、 $T_2$  为室温调节通道的第一、第二时间常数,  $s$ ;  $\tau$  为室温调节通道的滞后时间,  $s$ 。

### 2.2 室温和室内送风量测量变送器的 I/O 特性

室温和室内送风量测量变送器分别作用在串级调节系统的主、副回路的反馈通道上, 发挥实时测量  $T_n$  和  $F_n$  的大小, 并反馈到系统的主、副回路的输入端的作用。室温和室内送风量测量变送器均视为比例环节<sup>[9]</sup>, 对应的数学模型分别为  $H_1=1$  和  $H_2=1$ 。

### 2.3 送风机的 I/O 特性

送风机属于复杂的动态控制系统。为使问题简单化, 可将其近似成一个输入信号为转速  $n$ , 输出信号为送风量的一阶惯性环节<sup>[5]</sup>来描述。

$$G_{SF} = \frac{K_{SF}}{T_{SF}s+1} = \frac{5.2}{2s+1} \quad (2)$$

式中,  $K_{SF}$  为输入频率  $f$  与输出转速  $n$  的比值;  $T_{SF}$  为转速  $n$  由零到稳态值的启动时间除以 4。

### 2.4 变频控制器的 I/O 特性

变频器大多采用压频比( $U/f$ =常数)的控制方式, 即改变其供电电源的输出频率  $f$ , 且保持输出电压  $U$  和相应频率  $f$  之比为恒定值<sup>[5]</sup>。忽略时间滞后, 可用一个一阶惯性环节来描述。

$$G_{VFC} = \frac{K_{VFC}}{T_{VFC}s+1} = \frac{0.2}{2s+1} \quad (3)$$

式中,  $K_{VFC}$  为 VFC 的压频比, %;  $T_{VFC}$  为 VFC 的时间常数,  $s$ 。

### 2.5 室温 $PI^\lambda D^\mu$ 和室内送风量 $PI^\lambda$ 控制器的 I/O 特性

FOPID 控制器比常规 PID 控制器多了积分阶

次  $\lambda$  和微分阶次  $\mu$ , 其不但保留了 PID 的所有优点, 而且调节能力与范围更加精准和更广<sup>[10]</sup>。室温  $PI^\lambda D^\mu$  和室内送风量  $PI^\lambda$  控制器的传递函数如下所示。

$$G_{IT-FOPIDC} = K_{P,M} + \frac{K_{I,M}}{s^{\lambda_M}} + K_{D,M}s^{\mu_M} \quad (4)$$

$$G_{ISAV-FOPIC} = K_{P,A} + \frac{K_{I,A}}{s^{\lambda_A}} \quad (5)$$

式中,  $K_{P,M}$ 、 $K_{I,M}$ 、 $K_{D,M}$ 、 $\lambda_M$  和  $\mu_M$  为室温  $PI^\lambda D^\mu$  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;  $K_{P,A}$ 、 $K_{I,A}$  和  $\lambda_A$  为室内送风量  $PI^\lambda$  控制器的比例系数、积分系数和积分阶次。

需要说明的是, 以上控制器的各参数大小均通过下节中的 MSOA 整定而得到。

## 3 修正的人群搜索算法

SSOA 是通过模拟人类搜索的“经验梯度”和不确定推理, 分别确定搜索步长和方向, 完成位置更新, 实现对所求问题解的优化。但是, SSOA 中影响其搜索步长和方向的重要参数  $\omega$  的线性递减会导致搜索结果次优或早熟和多样性变差<sup>[11]</sup>。

基于非线性递减 S 型隶属度函数<sup>[6]</sup>, 本文构建新变量  $v$ , 使得  $v$  随迭代次数  $t$  增加而非线性递减, 新变量  $v$  如式(6)所示。

$$v = \frac{\lambda}{1 + e^{-\alpha(\frac{Kt}{T_{max}} - \beta)}} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  为常数项, 一般,  $\lambda=1.72$ ,  $\alpha=-2.6$ ,  $\beta=0$ ;  $t$ 、 $T_{max}$  为当前迭代次数、最大迭代次数;  $v \in [0.24, 0.82]$ 。

将 SSOA 中的  $\omega$  用式 (6) 替换, 其余算式和参数均保持不变, 构建了 MSOA 如下:

Step1: 初始设定MSOA基本参数, 确定搜寻者个体位置  $p_i$ ;

Step2: 计算搜寻者个体的适应度值  $J$ ;

Step3: 若  $J < g_{i,best}$  (第  $i$  个搜寻个体所在邻域的集体历史最佳位置), 则  $J$  替换  $g_{i,best}$ ; 反之, 则保留  $g_{i,best}$ ;

若  $J < p_{i,best}$  (第  $i$  个体目前为止所经历的最佳位置), 则  $J$  替换  $p_{i,best}$ ; 反之, 则保留  $p_{i,best}$ ;

Step4: 基于式 (6) 计算出的  $v$  替代 SSOA 中

的  $\omega$ , 以确定搜索步长  $\alpha_{ij}$  和方向  $d_{ij}$ ;

Step5: 进行搜寻者个体位置更新;

Step6: 若满足  $t=T_{\max}$ , 输出结果, 算法结束; 否则转至 Step2。

### 3.1 基于经典测试函数的 MSOA 验证

为验证 MSOA 的有效性, 选取函数 Rastrigin 作为测试算例, 其表达式如下[7]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10), |x_i| \leq 5.12 \quad (7)$$

将 MSOA 和 SSOA 分别作用于它, 进行算法性能的测试与对比。这里,  $\min f(x)$  作为适应度函数  $J$ , MSOA 与 SSOA 相关参数设置为: 种群规模  $\text{Size}=30$ ; 搜索空间维数  $D=30$ ;  $T_{\max}=500$ ;  $\omega \in [0.1, 0.9]$ ,  $v \in [0.24, 0.82]$ 。两种算法分别运行 10 次, 运算结果见表 1, 相应的适应度函数  $J$  进化过程如图 2 所示。

表 1 两种算法的性能对比

Table 1 Performance comparison for SSOA and MSOA

算法 \ J	理论极值	平均值	最优值	最差值
SSOA	0	14.722	6.325	22.944
MSOA	0	4.712	1.038	7.066

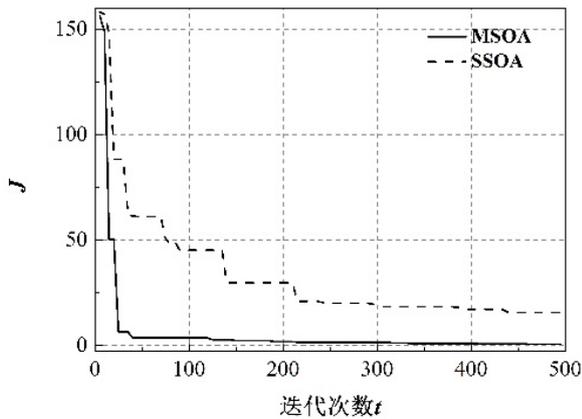


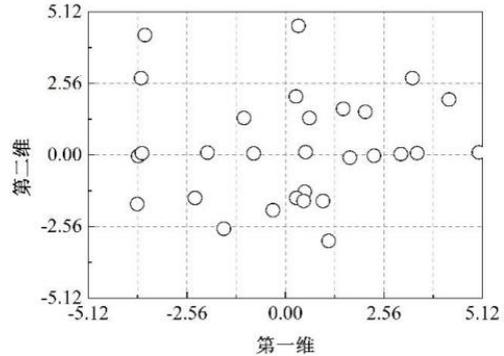
图 2 基于 Rastrigin 函数测试的 MSOA 和 SSOA 适应度函数  $J$  进化过程

Fig.2 Evolutionary processes of fitness function  $J$  for Rastrigin function obtained by MSOA and SSOA

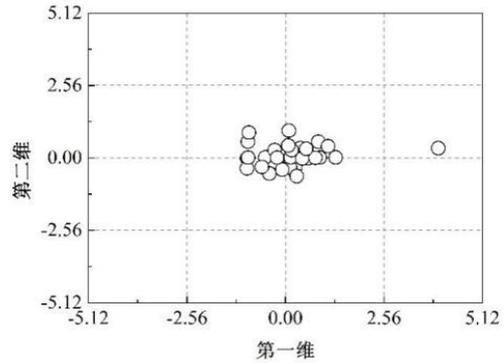
分析表 1 和图 2, 在整个迭代过程中, MSOA 收敛性较 SSOA 好。

图 3 和图 4 分别给出了 MSOA 和 SSOA 在迭代次数  $t=10, 100, 300$  和  $500$  次时, 相应的迭代

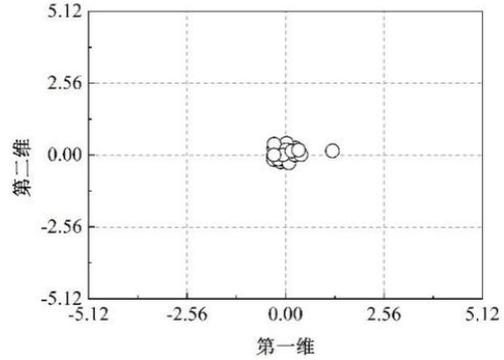
种群个体分布图。



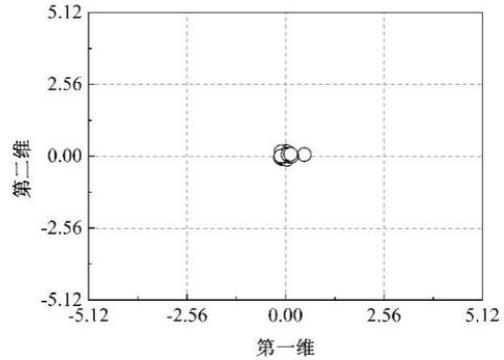
(a)  $t=10$



(b)  $t=100$



(c)  $t=300$



(d)  $t=500$

图 3 MSOA 迭代过程中种群个体分布图

Fig.3 Diagrams of individual population distribution during the iterations for MSOA

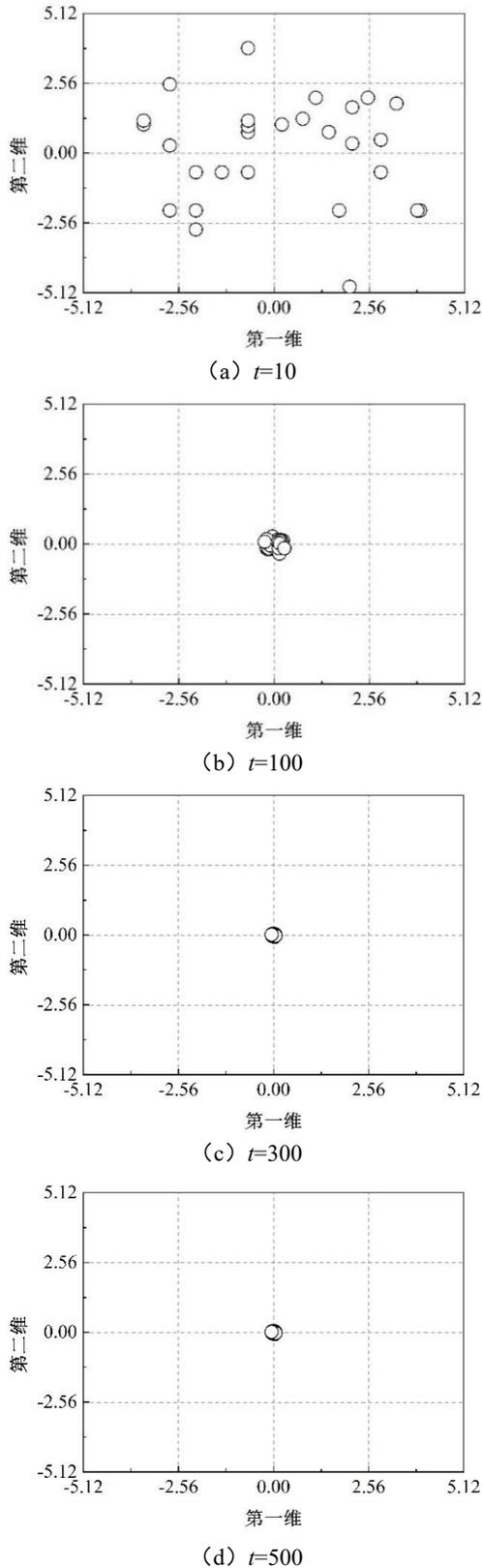


图4 SSOA 迭代过程中种群个体分布图

Fig.4 Diagrams of individual population distribution during the iterations SSOA

分析图 3 和图 4，在算法的整个迭代执行过程中，基于 SSOA 搜索的种群很快进入早熟状态，且多样性表现为在早期较好，后期不好；而基于 MSOA 搜索的种群则未出现早熟问题，且收敛性与多样性的表现均一直较好。所以，从算法执行的收敛性和多样性而言，MSOA 的综合寻优能力比 SSOA 得到了较大的提升。

3.2 基于 MSOA 的 PID 控制器参数整定的验证

进一步，选取  $G_p = \frac{1.6}{s^2 + 2.584s + 1.6}$  作为单位闭

环 PID 负反馈控制系统中的被控对象传递函数<sup>[12]</sup>，从而验证 MSOA 应用于 PID 控制器参数整定的可行性。

基于单回路 PID 控制系统性能指标，选取时间乘误差绝对值的 ITAE 作为适应度函数，分别应用 MSOA、SSOA 和 Z-N 法来整定该 PID 控制器的 3 个参数，获取的结果如表 2 所示。这里，SSOA 与 MSOA 相关参数设置：

$D=3$  ;  $Size=30$  ;  $T_{max}=100$  ;  $\omega \in [0.1, 0.9]$  ;  $v \in [0.24, 0.82]$ 。

表 2 PID 控制器参数的整定值

Table 2 Tuning values of three parameters for PID controller

参数 整定法	controller		
	$K_P^*$	$K_I^*$	$K_D^*$
Z-N 法	12.453	2.281	0.109
SSOA	0.715	0.806	0.091
MSOA	1.372	0.961	0.120

相应的该单位闭环 PID 负反馈控制系统动态响应曲线，如图 5 所示。

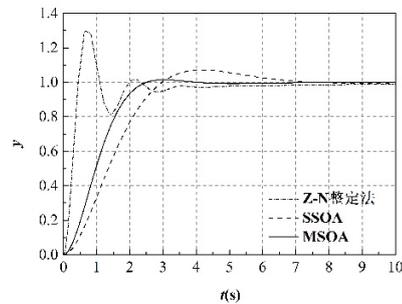


图 5 不同 PID 控制器参数值的单位闭环负反馈控制系统的动态响应曲线

Fig.5 The dynamic response processes of a unit closed-loop negative feedback PID control system with different controller's values

分析图 5 可知, 对于相同的被控对象, 基于 MSOA 整定的 PID 控制器参数值, 其闭环控制系统的性能指标, 如最大偏差、超调量和调节时间等, 均好于 Z-N 法和 SSOA 整定的 PID 控制器参数值的相应闭环控制系统。这表明 MSOA 应用在 PID 控制器参数的整定是可行的。

### 4 数值仿真

#### 4.1 VAV-Box 室温控制系统运行模式

如上所述, 本研究拟进行风机型 VAV-Box 作用下的空调室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  一室内送风量  $PI^{\lambda}$  串级控制策略和基于 MSOA 的控制器参数整定的研究, 相应的调节系统方框图如图 6 所示。

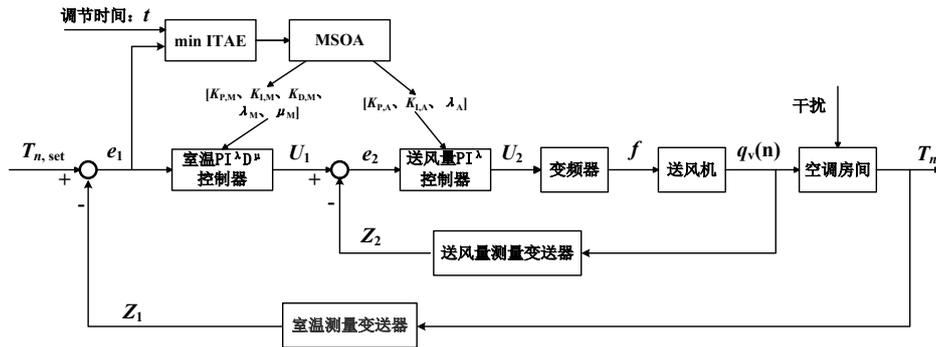


图 6 室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ —室内送风量  $PI^{\lambda}$  串级调节系统方框图

Fig.6 Block diagram of the cascade control system of indoor temperature  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  and indoor supply air volume  $PI^{\lambda}$

室温测量变送器将反映室温  $T_n$  的测量值  $z_2$  传送给室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器, 与  $T_{n,set}$  相比较, 求取  $e_1 = T_{n,set} - T_n$ 。  $e_1$  被分为 2 路输送: 1 路输送到 min ITAE, 基于 MSOA 的运行, 连续整定出  $[K_{P,M}, K_{I,M}, K_{D,M}, \lambda_M, \mu_M, K_{P,A}, K_{I,A}, \lambda_A]$  数值和刷新主、副控制器的 8 个参数设置; 另 1 路进行相应的  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  运算和输出控制指令  $U_1$  作为室内送风量  $PI^{\lambda}$  控制器的设定值。同样通过室内送风量  $q_v$  的测量值  $z_2$  与  $U_1$  相比较, 求取  $e_2 = U_1 - z_2$ , 进行相应的  $PI^{\lambda}$  运算后, 输出控制指令  $U_2$  给 VFC。VFC 则输出连续变化的供电频率  $f$ , 使得 SF 转速  $n$  和冷、热送风量  $q_v$  都发生变化, 以克服室内外的热干扰和室内风压  $P_n$  波动的影响, 使得  $T_n = T_{n,set} \pm \Delta T_{n,set}$ , 满足空调工艺要求。

#### 4.2 室温 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ —室内送风量 $PI^{\lambda}$ 串级控制系统的数值模拟

首先, 根据 FOPID 控制器的参数区间<sup>[1]</sup>, 相应地增大 15%, 可计算出该室温  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ —室内送风量

$PI^{\lambda}$  串级控制器的 8 个参数上、下限区间:  $K_{P,M} \in [0, 22]$ ,  $K_{I,M} \in [0, 0.5]$ ,  $K_{D,M} \in [0, 80]$ ,  $\lambda_M \in [0, 1.15]$ ,  $\mu_M \in [0, 2]$ ,  $K_{P,A} \in [0, 35]$ ,  $K_{I,A} \in [0, 1.2]$  和  $\lambda_A \in [0, 1.1]$ 。

其次, 根据舒适性空调工艺过程和室温要求, 空调夏、冬季的室内初始温度  $T_{n,0}$  和  $T_{n,set} \pm \Delta T_{n,set}$  见表 3 所示。

此外, 考虑到空调房间室温被控对象具有时滞特性, 引入 Smith 预估补偿器<sup>[2]</sup>来改善该室温控制系统的稳定性。

下一步, 将 MSOA.m 中的  $D=3$  改为  $D=8$ , 其余参数值保持不变, 保存和命名为新程序 MSOA\_FOPID-Parameters.m。基于 MALAB/Simlink 工具, 整定的控制器的 8 个参数最佳值及其相应的室温过渡过程  $T_n(t)$ , 分别如表 3 和图 7 所示。

表 3 IT-FOPIDC 和 ISAV-FOPIC 的 8 个参数最佳值

Table 3 The optimal values of eight parameters for IT-FOPIDC and ISAV-FOPIC

参数	$T_{n,0}$	$T_{n,set} \pm \Delta T$	$K_{P,M}^*$	$K_{I,M}^*$	$K_{D,M}^*$	$\lambda_M^*$	$\mu_M^*$	$K_{P,A}^*$	$K_{I,A}^*$	$\lambda_A^*$
运行工况	/ °C	/ °C								
冬季	10	22 ± 1	2.76	0.01	22.37	0.51	0.05	1.05	0.58	0.55
夏季	35	25 ± 1	3.52	0.01	12.25	1.05	0.11	0.95	0.01	0.52

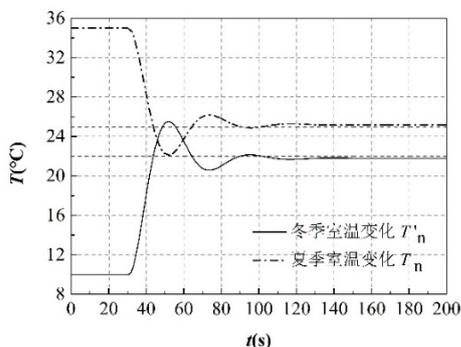


图7 冬、夏季空调工况下的室温变化曲线图

Fig.7 Diagram of indoor temperature variations under air-conditioning operating conditions in winter and summer

基于图7，计算出的室温过渡过程指标如表4所示。

表4 冬、夏季空调工况下的室温控制指标

Table 4 Control indicators for indoor temperature under air-conditioning operating conditions in winter and summer

性能指标	工况	
	冬季	夏季
最大偏差/°C	3.83	3.24
最大超调量/%	17.41	12.96
峰值时间 $t_p/s$	52	48
调节时间 $t_s/s$	78	75
上升时间 $t_r/s$	45	42
稳态误差/°C	0.22	0.19
衰减比 ( $n:1$ )	4.71:1	3.42:1

分析表4可知，该VAV-Box室温PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>一室内送风量PI<sup>λ</sup>串级控制系统具有较短的调节时间、很小的稳态误差、较小的超调量和合理的衰减比等，是可以满足空调工艺对室温品质的相关要求的。

## 5 结论

针对风机型VAV-Box作用下的室温被控对象，本文提出了室温PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>一室内送风量PI<sup>λ</sup>串级控制策略，串级调节送入室内的冷、热风流量。同时充分发挥分数阶PID控制器整定参数多，可调范围广泛的优势，既满足 $T_n = T_{n,set} \pm \Delta T$ 的空调工艺要求，又有效地克服冷、热风流量变化所导致的室内压力 $P_n$ 波动的影响。对于主、副调节器参数整定的关键问题，受启于模糊数学中的S型隶属度函数，构建非线性变化新变量 $v$ ，替换SSOA中的惯性权值 $\omega$ ，设计出MSOA，可对两个控制器的8个参数进行连续整

定，获取对应的最佳值。基于MALAB工具，分别对该室温PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>一室内送风量PI<sup>λ</sup>串级调节系统进行组态和MSOA编程，且同步运行数值模拟。结果表明：基于MSOA的控制器参数整定和该分数阶PID串级调节系统在理论上是可行的，且进一步提升了室温控制性能指标，如很小的稳态误差、较小的超调量和较短的调节时间等。这些对于风机型VAV-Box的实际控制应用，具有一定的参考作用。

## 参考文献:

- [1] 李鹏波, 李绍勇, 吴宗礼, 等. 变风量末端装置的基于IPSA-DE算法PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>-送风量PI串级控制器的数值研究[J]. 制冷与空调, 2018, 32(4): 428-434.
- [2] 高磊. 室温PID控制实验系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 1-60.
- [3] 吴正松. VAV BOX控制算法与仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 21-31.
- [4] Shui Y, Ronald P. Multiple zone ventilation and temperature control of a single-duct VAV system using model predictive strategy[J]. Energy and Building, 2006, 38(10): 1248-1261.
- [5] 魏先宏, 李绍勇, 吴宗礼, 等. 风机盘管室温PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器基于IACO的整定及其控制性能分析[J]. 制冷与空调, 2019, (5): 570-576.
- [6] 李献, 骆志伟. 精通MATLAB/Simulink系统仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 417-418.
- [7] 邓勇. 中央空调系统的模糊神经网络PID控制器研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2012: 8-11, 32-34.
- [8] 曹建秋, 徐凯. 模糊PID控制在变风量空调系统中的应用[J]. 计算机仿真, 2011, 28(5): 197-200.
- [9] 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.
- [10] Yogendar A. AGC of restructured multi-area multi-source hydrothermal power systems incorporating energy storage units via optimal fractional-order fuzzy PID controller[J]. Neural Computer & Applications, 2019, 31(3): 851-872.
- [11] Shafik M, Chen B, Hongkun R, et al. Adaptive multi objective parallel seeker optimization algorithm for incorporating TCSC devices into optimal power flow framework[J]. IEEE Access, 2019, 10(7): 36934-36947.
- [12] 郭大庆, 李晓, 赵永进. 基于改进PSO算法的PID参数自整定[J]. 计算机工程, 2007, 33(18): 202-204.