

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-451-05

# 基于模型预测的定风量系统串级控制研究

梁进学<sup>1</sup> 车轮飞<sup>2</sup> 陈玲帆<sup>1</sup> 刘俊<sup>2</sup> 徐新华<sup>3</sup> 高佳佳<sup>3</sup>

(1. 武汉地铁集团有限公司 武汉 430030;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430064;

3. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074)

**【摘要】** 针对定风量系统室内温度的控制,提出了一种基于模型预测的串级控制方法,用以提高室内温度控制的鲁棒性和精确度。该方法根据实时的负荷情况,利用送风温度预测模型预测系统需要的送风温度,并以此作为设定值,通过冷水阀门开度调节进行控制,使得送入空调区域的冷量始终满足负荷需求,进而实现室内温度的鲁棒控制。采用 TRNSYS 软件建立定风量空调系统模拟平台,对该控制方法的控制特性进行测试。测试结果表明,相比传统的比例积分 (PI) 算法直接追踪室内温度的方法,提出的串级控制方法能够明显的提高室内温度控制的鲁棒性和精确度。

**【关键词】** 定风量系统; 模型预测; 串级控制; 室内温度控制; 鲁棒控制

中图分类号 TU831.3 文献标识码 A

## Model Predictive-Based Cascade Control of Constant Air Volume Air-conditioning System

Liang Jinxue<sup>1</sup> Che Lunfei<sup>2</sup> Chen Lingfan<sup>1</sup> Liu Jun<sup>2</sup> Xu Xinhua<sup>3</sup> Gao Jijia<sup>3</sup>

(1. Wuhan Metro Group Operation Co., Ltd, Wuhan, 430030;

2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430063;

3. Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

**【Abstract】** This paper proposes a model predictive-based cascade control method for the space air temperature control of constant air volume (CAV) system aiming at improving the robustness and accuracy of the space air temperature control. This method uses the supply air temperature prediction model to predict the system demand supply air temperature based on the real-time load condition. The predictive value is used as the set-point and controlled by adjusting the cold water valve opening. It can guarantee the cooling capacity supplied to the air-conditioning area always to satisfy the load demand for realizing the robust control of the space air temperature. TRNSYS software was used to build a simulation platform of the CAV air-conditioning system to test the control performance of the control method. The results show that the cascade control method proposed in this paper can improve the robustness and accuracy of the space air temperature control significantly when compared with the method using conventional PI algorithm to track the space air temperature directly.

**【Keywords】** CAV system; Model predictive; Cascade control; Space temperature control; Robust control

作者简介: 梁进学 (1970.10-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: liangjx@wuhanrt.com

通讯作者: 徐新华 (1972.01-), 男, 博士, 教授, E-mail: bexhuxu@hust.edu.cn

收稿日期: 2020-12-26

## 0 引言

在现代商业建筑中,中央空调系统是用于营造

舒适室内环境的主要手段。当前,变风量系统和定风量系统是中央空调系统中广泛应用的形式<sup>[1]</sup>。不

论是变风量系统还是定风量系统，均是通过空气处理机中的冷/热盘管将新风和回风的混合空气冷却或加热，然后经风机将处理后的混合空气送入空调区域，实现空调区域的热环境调节。近些年，虽然变风量系统因其节能效果和调控性能更好而受到更多研究者的青睐<sup>[2-5]</sup>，但定风量系统因系统设计、施工、调试简单，且成本较低，在实际工程当中依然被广泛采用<sup>[6]</sup>，尤其是一些恒温恒湿的洁净室，对送风量有特殊要求，通常采用定风量系统<sup>[7]</sup>。

针对变风量系统室内温度的控制研究者们提出了许多先进算法<sup>[8]</sup>，但对于定风量系统室内温度控制的研究相对较少。定风量系统室内温度控制通常是直接采用比例积分（PI）控制算法根据室内温度对冷水阀开度进行调节，即通过冷冻水量的调节制冷量，进而实现室内温度的控制<sup>[9]</sup>。采用该控制方法时，PI 控制参数整定较困难，且因室内空气的热惰性大，整个控制过程存在很大的滞后性，室内温度实际控制效果不佳。张雪萍等<sup>[5]</sup>从预测的角度出发，采用神经网络、建模分析等方法，对定风量空调系统进行最优开机和停机控制，并对其间歇启停控制进一步优化，以达到最佳的运行效果和节能效果。该方法虽然能一定程度提高室内温度控制效果，但采用启停控制时，室内温度在设置的上下限值之间波动，且限值设置不佳时会增加风机启停频率，影响其使用寿命。

针对定风量系统室内温度的常规控制的滞后性及控制效果不佳问题，本文提出了一种基于模型预测的串级控制方法。该控制方法根据实时的负荷情况，利用送风温度预测模型预测系统需要的送风温度，并以此作为设定值，通过冷水阀门开度调节进行追踪，使得送入空调区域的冷量始终满足负荷需求，进而实现室内温度的鲁棒控制。

### 1 系统描述及控制方法

图 1 为定风量空调系统室内温度控制原理图。送风机为工频风机，新风阀和回风阀的开启状态在系统运行过程中始终维持不变。新风和回风混合后经冷/热盘管冷却/加热后送入空调区域，用以调节室内热湿环境。该系统在实际工程中通常采用 PI 控制算法通过对冷水阀开度的调节直接控制室内温度。但由于室内空气的热惰性大，通过冷冻水量的调节直接控制室内温度是一种大滞后的过程，这

使得室内温度的实际控制效果很差。而在定风量系统运行过程中，送风温度随冷冻水量的变化响应较快，即可以通过调节冷冻水量很快的追踪送风温度设定值。

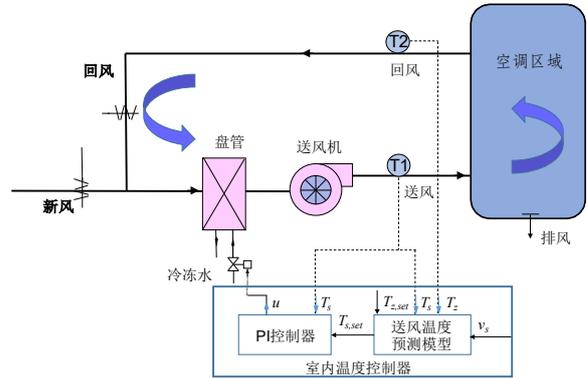


图 1 定风量空调系统室内温度控制原理图

Fig.1 Schematic diagram of the space temperature control for the typical CAV system

针对上述控制问题，并结合室内温度变化的动态特性，可对定风量系统室内温度进行串级控制，如图 1 所示，即根据测量的室内温度、送风量和室内温度设定值等，通过送风温度预测模型预测需要的送风温度，并将该送风温度作为设定值输入 PI 控制器，PI 控制器则根据测量的实时送风温度调节水阀开度以追踪送风温度设定值，最终实现室内温度的控制。该串级控制的原理如图 2 所示。

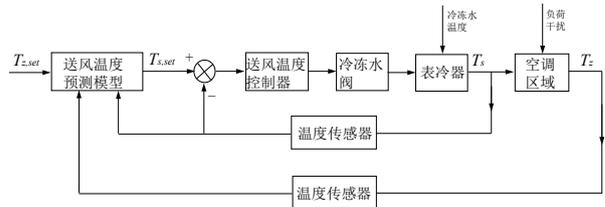


图 2 室内温度串级控制回路

Fig.2 Cascade control loop of the space temperature

### 2 控制算法模型

空调区域室内温度变化的动态模型如式（1）：

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = c_a \rho_a v_s (T_s - T_z) + q_z, C_z = c_a \rho_a V_z \quad (1)$$

式中， $T_z$  表示室内温度（通常以回风温度作为室内温度）， $T_s$  表示送风温度， $v_s$  表示送风量。 $C_z$  为空调区域空气的热容， $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ ； $c_a$  为空气的比热容， $\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ； $\rho_a$  为空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $V_z$  为空调区域体

积,  $\text{m}^3$ ;  $q_z$  为空调区域的显热负荷,  $\text{kW}$ 。

利用采样周期  $h$  将式 (1) 离散成式 (2):

$$T_{z,k+1} = T_{z,k} + \alpha_1 v_{s,k} (T_{s,k} - T_{z,k}) + \alpha_2 q_{z,k} \quad (2)$$

式中,  $k$  表示当前时刻,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为模型参数, 可由式 (3) 计算获得。

$$\alpha_1 = c_a \rho_a h / C_z, \quad \alpha_2 = h / C_z \quad (3)$$

假设  $k$  时刻的室内温度误差为  $e_{z,k}$ , 则  $e_{z,k} = T_{z,k} - T_{z,set}$ ,  $T_{z,set}$  表示室内温度设定值。参考变风量系统的送风风量双线性预测模型<sup>[8,10]</sup>, 如式 (4), 可以获取定风量系统送风温度预测模型, 如式 (5), 其中  $\zeta_{z,k}$  是与冷负荷相关的参数,  $\gamma$  为自定义参数, 满足式 (6)。

$$v_{s,k} = \frac{(1 - \gamma)e_{z,k} + \alpha_2 \zeta_{z,k}}{\alpha_1 (e_{z,k} + T_{z,set} - T_{s,k})} \quad (4)$$

$$T_{r,k} = e_{z,k} + T_{z,set} - \frac{(1 - \gamma)e_{z,k} + \alpha_2 \zeta_{z,k}}{v_{s,k} \alpha_1} \quad (5)$$

$$0 < \gamma < 1 \quad (6)$$

将  $T_{r,k}$  作为送风温度设定值输入到 PI 控制器, PI 控制器则根据反馈的实时送风温度  $T_{s,k}$  对水阀开度进行调节, 将送风温度维持在设定值  $T_{r,k}$ 。根据式 (5) 的预测模型, 当 PI 控制器能很好地追踪送风温度  $T_{r,k}$  时, 即  $T_{s,k} \approx T_{r,k}$ , 则室内温度控制的闭环路的动态过程可以写成式 (7) 的形式。可以看出, 如果  $\gamma$  的选择满足式 (6), 且  $\zeta_{z,k}$  足够靠近  $q_{z,k}$ , 室内温度达到稳态时追踪误差  $e_{z,k}$  将趋近于零, 即实现室内温度的最终控制。

$$e_{z,k+1} = \gamma e_{z,k} + \alpha_2 (q_{z,k} - \zeta_{z,k}) \quad (7)$$

式 (5) 的预测模型中, 计算冷负荷参数  $\zeta_{z,k}$  是一个主要的问题。由于冷负荷是一个时变变量, 准确预测其大小非常困难, 本文则采用一种简单的冷负荷估算方法估算实时负荷大小, 如式 (8), 即根据循环空气的能量平衡进行粗略的估算 (仅考虑显热负荷)<sup>[7]</sup>。考虑到测量工具的动态过程, 可采用遗忘因子  $\lambda$  对式 (8) 估算的冷负荷值进行处理, 使估算的冷负荷更加平滑, 如式 (9) 所示。 $\lambda$  的取值范围如式 (10)。根据计算的实时负荷大小即可对参数  $\zeta_{z,k}$  进行在线更新, 如式 (11)。

$$q_{z,k} = c_a \rho_a v_{s,k} (T_{z,k} - T_{s,k}) \quad (8)$$

$$\hat{q}_{z,k} = \lambda \hat{q}_{z,k-1} + (1 - \lambda) q_{z,k} \quad (9)$$

$$0 < \lambda < 1 \quad (10)$$

$$\zeta_{z,k} = \hat{q}_{z,k} \quad (11)$$

PI 控制器可采用增量式 PI 算法。控制律如式 (12) 和式 (13):

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1) + \frac{t_s}{T_i} e(k)) \quad (12)$$

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (13)$$

式中,  $k$  为当前时刻,  $u$  为 PI 控制器的输出变量,  $\Delta u$  为输出变量的增量,  $e$  为输入变量与设定值的偏差值,  $K_p$  和  $T_i$  为 PI 控制器的比例控制参数和积分控制参数,  $t_s$  为 PI 控制的采样周期。

该控制算法中有两个采样周期需要确定, 一个是主控制器送风温度设定值预测的采样周期  $h$ , 一个是副控制器 PI 控制的采样周期  $t_s$ 。在实际应用中, 需要满足  $h \geq t_s$ 。 $h/t_s$  的值越大, 系统控制过程越稳定, 但追踪送风温度的实时性就越差, 室内温度的控制精度也越低。在本文的研究中取  $h/t_s=1$ , 即送风温度设定值预测与 PI 控制采用相同的采样周期。具体实施流程如下:

(1) 首先, 确定室内温度设定值  $T_{z,set}$  和送风量  $v_s$ , 设置自定义参数  $\gamma$  (范围见不等式 (6)) 以及遗忘因子  $\lambda$  (范围见不等式 (10)) 的大小;

(2) 其次, 每一个采样周期, 执行: (a) 利用式 (8) 估算实时冷负荷 (仅考虑显热负荷) 大小, 并利用遗忘因子  $\lambda$  对估算的负荷进行处理, 如式 (9), 然后由式 (11) 计算冷负荷参数  $\zeta_{z,k}$ ;

(b) 由式  $e_{z,k} = T_{z,k} - T_{z,set}$ , 计算追踪误差  $e_{z,k}$ , 进而由式 (5) 计算所需的送风温度  $T_{r,k}$ ; (c) 将  $T_{r,k}$  作为送风温度设定值输入到 PI 控制器, PI 控制器则根据测量的实时送风温度  $T_{s,k}$  计算水阀开度大小  $u(k)$ ; (d) 通过控制系统将水阀开度  $u(k)$  应用到电动水阀, 实现送风温度的控制, 并最终实现室内温度的控制。

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 边界条件

利用 TRNSYS 软件建立图 1 所示的定风量空调系统模拟仿真平台, 对提出的串级控制方法的控制特性进行测试。仿真平台包括建筑房间模型, 盘管模型, 风机模型, 水阀模型, 温度传感器模型以及阀门执行器模型。其中建筑房间以普通大空间办公室为例, 房间面积  $196\text{m}^2$ , 层高  $3\text{m}$ , 房间人员  $30$

人, 房间设备和照明负荷 8.3kW。空调机组配置的风机为工频风机, 输入功率为 1.5kW, 送风量为 7000m<sup>3</sup>/h; 盘管的冷冻水供水温度为 7℃, 最大水量为 2.03kg/s。空调系统设计新风量为每人 30m<sup>3</sup>/h。以夏季典型日为例对系统控制效果进行评估, 典型日的室外气象参数如图 3 所示。室内温度的设定值为 25℃, 典型日房间的负荷情况如图 4 所示。空调系统运行时间为 8:00am 到 18:00pm, 控制系统的采样周期取 15s。

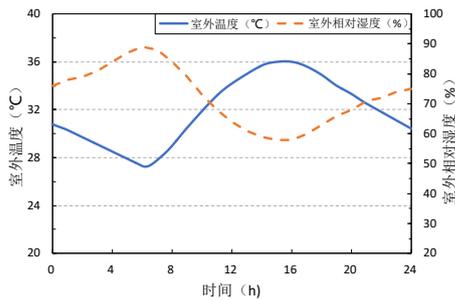


图 3 夏季典型日室外气象参数

Fig.3 Outdoor air temperature and relative humidity in a typical day of Summer

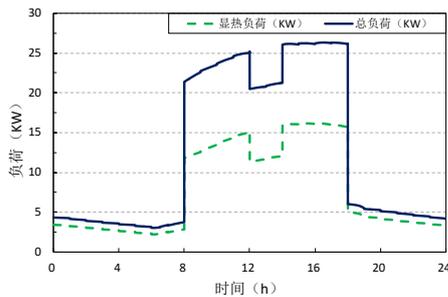


图 4 夏季典型日室内负荷情况

Fig.4 Indoor heat gains in a typical day of Summer

串级控制算法的送风温度预测模型中有两个控制参数需要设置, 即自定义参数  $\gamma$  和遗忘因子  $\lambda$ , 两个参数取值范围均为(0,1)。文献[10]研究了参数  $\gamma$  大小对系统控制信号响应的快慢, 较大的  $\gamma$  使得控制器的响应较慢, 控制信号更加平稳; 较小的  $\gamma$  虽然可以使控制器响应更快, 温度更快趋于平稳, 但会导致控制信号的震荡, 造成室内温度的波动。文献[11]也实验研究了参数  $\gamma$  对控制的影响, 当不考虑瞬态变化过程时, 建议选取稍微大一点的  $\gamma$ 。 $\lambda$  为过滤遗忘因子, 其大小对控制效果的影响较小, 主要是影响负荷的估算。 $\lambda$  越大, 估算的负荷参数越平滑, 但负荷变化的响应越慢。需要对负荷的估

算进行测算以确定  $\lambda$  的取值大小。本测试中, 取  $\gamma=0.6$ ,  $\lambda=0.8$ 。PI 控制器的比例常数及积分常数根据系统的阶跃响应实验获得过程的稳态增益、时间常数、以及纯滞后因子, 再采用 Ziegler 与 Nichols 参数设定法计算。本测试中, 送风温度 PI 控制器的控制参数  $K_p$  和  $T_i$  根据系统的阶跃响应实验确定, 即  $K_p=5$ ,  $T_i=120s$ 。

### 3.2 控制效果评价

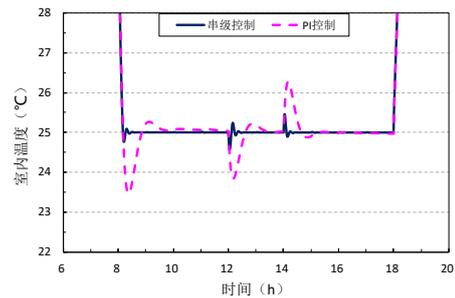


图 5 夏季典型日不同控制方法室内温度的控制效果

Fig.5 Control performance of the space temperature in a typical day of summer by using different methods

图 5 给出了夏季典型日分别采用串级控制和传统 PI 控制时室内温度的控制效果。可以看出, 串级控制可以很好的将室内温度维持在设定值, 当负荷发生剧烈变化时, 依然能很好地抵抗干扰, 快速地达到室内温度的稳定控制。典型日空调系统运行阶段, 室内温度平均绝对控制误差为 0.06℃。采用 PI 直接控制室内温度 (控制参数  $K_p=1.5$  和  $T_i=150s$ , 采样周期同样为 15s) 时, 室内温度控制效果较差。如图, 当负荷发生剧烈变化时, PI 控制器无法及时响应, 使得室内温度发生波动, 而且波动很大 23.5~26.2℃, 空调系统运行阶段, 室内温度平均绝对控制误差为 0.24℃。

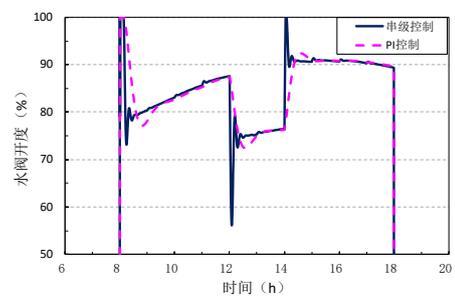


图 6 夏季典型日不同控制方法冷水阀门开度调节过程

Fig.6 Water valve control signals in a typical day of summer by using different methods

图 6 给出了夏季典型日分别采用串级控制和传统 PI 控制时冷水阀门开度的调节过程。可以看出, 采用串级控制时, 冷水阀门能够对负荷的剧烈变化做出快速响应, 以维持室内温度的稳定。这主要是因为串级控制方法将室内温度和负荷的变化直接传递到送风温度的变化, 而冷水阀门对送风温度变化的响应较快。采用传统 PI 直接控制室内温度时, 冷水阀门对负荷的剧烈变化响应较为缓慢, 这主要是因为负荷的变化首先引起室内温度的变化, 然后 PI 控制器才能做出响应。

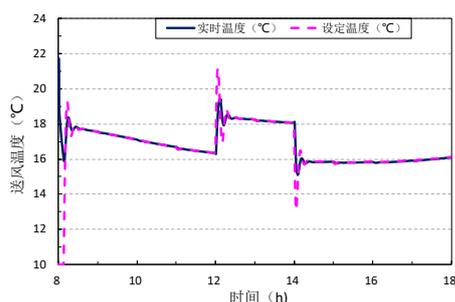


图 7 夏季典型日串级控制时送风温度变化过程

Fig.7 The supply air temperature profile by using the cascade control method

图 7 给出了夏季典型日采用串级控制时送风温度的变化过程。可以看出, 当负荷发生剧烈变化时, 送风温度预测模型能够快速作出响应并获取相应的送风温度设定值, 而送风温度 PI 控制器也能够很好地进行追踪。

#### 4 结论

本文针对定风量系统室内温度控制, 提出了一种基于模型预测的串级控制方法, 用以提高室内温度控制的鲁棒性和精确度。采用 TRNSYS 软件建立定风量空调系统仿真平台, 对串级控制方法的控制效果进行测试。结果表明, 串级控制方法能够对负荷变化作出快速响应, 相比传统 PI 控制器直接追踪室内温度的方法, 串级控制能够显著地提高室内温度控制的鲁棒性和精确度。串级控制时, 室内温度的平均绝对偏差为  $0.06^{\circ}\text{C}$ , 而 PI 控制器直接

追踪室内温度时的平均绝对偏差为  $0.24^{\circ}\text{C}$ , 而且波动很大  $23.5\sim 26.2^{\circ}\text{C}$ 。本文提出的串级控制方法的控制参数较少且容易设置, 在实际定风量空调系统的控制中具有很大的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] Xu X, Wang S, Huang G. Robust MPC for temperature control of air-conditioning systems concerning on constraints and multitype uncertainties[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2010, 31(1):39-55.
- [2] 邓小飞, 黄光亚, 宋志国, 等. 变风量空调系统的优化控制算法[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2013, (2):61-63.
- [3] Aktacir M A, Büyükalaca O, Yılmaz T. A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions[J]. Applied Energy, 2010, 87(2):599-607.
- [4] Gao J, Huang G, Xu X. Experimental study of a bilinear control for a GSHP integrated air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2016, 133:104-110.
- [5] 闫秀联, 颜菲菲, 闫秀英. 变风量空调系统温湿度解耦控制[J]. 制冷与空调, 2019, 33(3):298-3021.
- [6] 张雪萍, 刘作军, 李练兵. 智能楼宇定风量空调系统的启停控制[J]. 河北工业大学学报, 2001, (6):98-101.
- [7] 马长捷, 朱凤. 恒温恒湿实验室空调系统的节能优化设计[J]. 节能, 2009, (5):16-18.
- [8] Gao J, Huang G, Xu X. Space temperature control of a GSHP-integrated air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2015, 108:127-136.
- [9] 郭向阳. 定风量空调系统的监测与自动控制[J]. 制冷, 2001, 20(3):80-81.
- [10] Huang G. Model predictive control of VAV zone thermal systems concerning bi-linearity and gain nonlinearity[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(7):700-710.
- [11] 高佳佳. 启停式小型热泵中央空调系统的优化控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.