

MFAC 和前馈补偿组合的 VAV 系统解耦控制仿真

冯增喜, 任庆昌

(西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 在空调机风量优化控制的研究中, 变风量(Variable Air Volume, VAV) 系统存在多变量、耦合强烈、非线性及带有时延等特点。针对子系统耦合严重的现象, 提出了无模型自适应控制(Model Free Adaptive Control, MFAC) 和前馈补偿相结合方法, 建立了两个空气处理机组组成的耦合系统的数学模型, 设计了 MFAC 控制器和前馈补偿解耦网络, 对所建立的耦合系统进行了解耦控制。仿真结果表明: 相对 PID 与前馈补偿组合解耦而言, 无模型自适应控制配合前馈补偿的方法可以大幅减少调节时间, 且超调量为 0, 具有很好的解耦效果, 可以解决变风量系统的耦合问题。

关键词: 变风量; 无模型; 自适应; 解耦

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

The Decoupling of VAV Based on the Combination of MFAC and Feedforward Compensation

FENG Zeng-xi, REN Qing-chang

(School of Information & Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an Shanxi 710055, China)

ABSTRACT: Variable Air Volume system (VAV) is character of multivariable, serious coupling, nonlinear and time delay. In order to decoupling the variable air volume system, the combination method of Model Free Adaptive Control (MFAC) and feedforward compensation control is designed in this paper. The math model of two coupling air handle units is built, and the decoupling net based on the control is realized. The decoupling net is used to decouple two air handle units, and the simulation results show that the proposed combination method has good decoupling performance with 0 overshoot and little settling time, which is better than the combination method of traditional PID and feedforward compensation control. It can solve the coupling problem of Variable Air Volume system.

KEYWORDS: Variable air volume (VAV); Model free; Adaptive; Decoupling

1 引言

变风量(Variable Air Volume, VAV) 系统通过变风量箱调节送入房间的风量或新回风混合比, 并相应调节空调机的风量或新回风混合比来控制某一空调区域温度的一种空调系统^[1]。VAV 系统的节能效果很好, 但是由于其具有多变量、耦合强烈、非线性及带有时延等特点, 且其各子系统之间存在着强烈的耦合作用, 相互干扰影响, 导致系统不能很好地稳定运行^[2-3]。因此, 消除各子系统之间的耦合作用, 实现变风量空调系统的稳定运行, 变风量空调系统控制的关键问题之一。

VAV 系统的解耦控制多采用常规 PID 控制, 但 PID 的参数调节困难, 超调量较大, 振荡时间长, 容易产生积分饱和,

对干扰较敏感。普通的 PID 控制参数调节困难, 控制效果不甚理想^[4-6]。韩志刚教授在文献^[7]中提到“无模型控制方法无需解耦就能实现对多变量耦合系统的闭环稳定控制, 即无模型控制方法自身具有解耦能力, 这种能力来源于无模型控制方法的一系列优越的性能, 特别是它的快速收敛性能。应用这种方法, 可以实现非解耦控制。在无模型控制算法中加入适当的前馈, 可使控制效果变得更好”^[8]。基于此, 本文提出了无模型自适应控制(Model Free Adaptive Control, MFAC) 和前馈补偿组合的方法, 对 VAV 系统进行解耦。该方法具有自适应能力强、收敛快、控制精度高等优点, 能够很好地解决 VAV 系统的耦合问题。

2 VAV 系统组成

本文所研究的 VAV 系统主要由冷冻水系统、冷却水系统、2 台空调机组、加热系统组成。冷水系统由两台冷水机组、3 台 1 次泵、1 台二次变频泵、1 个膨胀水箱组成。冷却水

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K1-35); 陕西省教育厅自然科学专项基金项目(11JK0914)

收稿日期: 2014-04-21

系统由1个带变频风机冷却塔、3台冷却泵构成。加热器主要包括一个二级加热器。在每个房间送风管道装有末端控

制器 VAVBOX。整个系统的结构如图1所示。

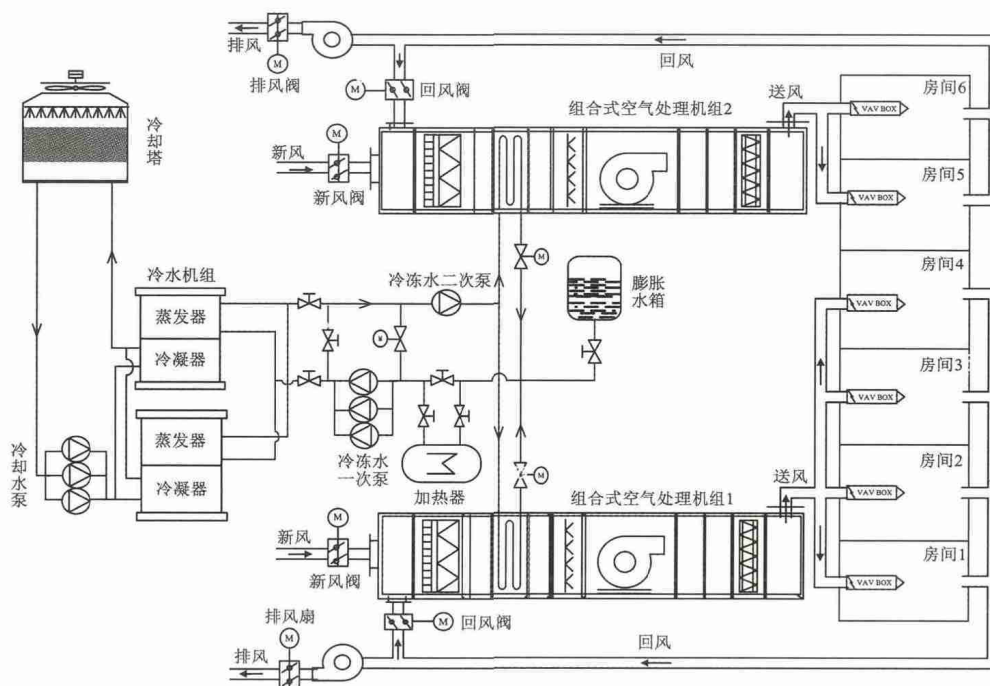


图1 变风量空调系统结构图

VAV 系统存在多处耦合,如“两个空气处理机组组成的耦合系统”、“风系统和水系统组成的耦合系统”、“送风系统的温湿度耦合”等等。由于多个耦合回路的存在,当多个变量同时作用系统时,不同回路之间将产生强耦合、强干扰性的作用,对 VAV 系统的性能指标影响较大。因此,减少或消除回路之间的耦合效应,将提高变风量空调系统的控制精度及性能指标。“空气处理机组组成的耦合系统”是 VAV 空调系统典型的耦合代表,故本文在该 VAV 系统上针对“两个空气处理机组组成的耦合系统”进行了建模,并利用无模型自适应控制和前馈补偿设计了组合的解耦网络,进行了解耦控制仿真。

3 MFAC 和前馈补偿组合的解耦网络设计

3.1 无模型自适应控制方法

无模型自适应控制是一种采用不依赖被控对象的具体数学模型的“泛模型”和一些“控制功能”的某种组合相结合的方法^[8-10],该控制方法采用边建模边控制的方式,得到新的观测数据后,再建模再控制,使每次得到的“泛模型”逐渐精确,从而控制律的性能也随之得到改善。

无模型自适应控制的“泛模型”如式(1)所示。

$$y(k) - y(k-1) = \varphi(k-1)^T [u(k-1) - u(k-2)] \quad (1)$$

式中 $y(k)$ 是系统的一维输出, $u(k-1)$ 是 $k-1$ 时刻的输入, $\varphi(k)$ 是特征参量,它是利用某种辨识算法在线估计

的, k 是离散时间。

无模型自适应控制方法的控制律基本形式如式(2)所示^[11]:

$$u(k-1) = u(k-2) + \frac{\lambda_k}{\sigma + \|\varphi(k)\|^2} \varphi(k)^T [y_0 - y(k-1)] \quad (2)$$

式中 σ 为适当的正常数, λ_k 是控制参数, y_0 是系统的输出希望值。

在无模型自适应控制方法应用时,要用 $\varphi(k)$ 的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 来代替 $\varphi(k)$ 进行计算,因此要求 $\varphi(k)$ 的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 能够被实时得到,且有足够的准确性。关于 $\varphi(k)$ 的估值有一系列方法。本文采用递推梯度算法来计算 $\varphi(k)$ 的估值 $\hat{\varphi}(k)$ 。 $\hat{\varphi}(k)$ 的计算如式(3)^[11]:

$$\hat{\varphi}(k-1) = \hat{\varphi}(k-2) + \frac{\delta}{\eta_k + \|\varphi(k)\|^2} \varphi(k)^T [z(k) - \varphi(k)^T \hat{\varphi}(k-2)] \quad (3)$$

式中 η_k 是适当小的正数, δ 为适当的常数, $z(k) = y(k) - y(k-1)$, $\varphi(k) = u(k-1) - u(k-2)$ 。

等式(2)和(3)构成了无模型自适应控制器的基本形式。

为了扩大无模型自适应控制器的应用范围,并加强其抗干扰和解耦等性能,在基本无模型自适应控制器中引入了功能组合模块。可将等式(2)做以下改进:

$$u(k-1) = u(k-2) + \frac{\lambda_k}{\sigma + \|\varphi(k)\|^2} \quad (4)$$

$$\varphi(k) = [y_0 - y(k-1) + G(Y_{k-1}^{k-n} - U_{k-2}^{k-m})]$$

等式(3)和(4)构成了无模型自适应控制器的一般形式。

在无模型自适应控制器的一般形式中,无模型自适应控制的“控制功能”的组合途径是由一系列单元控制方法用线性和非线性方式组合成控制律的途径。其单元控制方法包括静差克服控制方法、反向预调控制方法、控制作用转向加速控制方法、强制稳定控制方法、前馈控制方法、时滞控制方法、串级调节控制方法及正反作用控制方法等^[11-13]。

要实现良好解耦,控制控制算法需要快速的收敛性。无模型自适应控制方法的一个显著优点就是收敛非常迅速,故其自身具有一定的解耦能力。本文在无模型自适应控制算法中加入前馈,以取得更好的解耦性能。

由于本系统中,延迟时间较长,由后面所建的机组的数学模型可知其延时时间约在 35-39 秒之间,故控制时所使用的一个主要的单元控制方法是时滞控制方法。带时滞控制的无模型自适应控制原理如图 2 所示。图中 $G_p(s)e^{-\tau s}$ 是非线性大滞后对象的传递函数,其中 τ 为滞后对象的滞后时间,一般过程的滞后时间可以用相关的辨识方法测得。MFAC 是无模型自适应控制器。 y^* 是系统给定值, y 是系统实际输出。

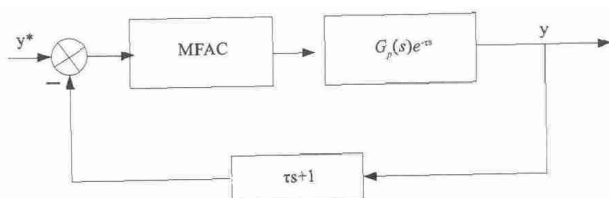


图2 带时滞调节的MFAC原理图

由图-2可知,在带时滞控制的无模型自适应控制方法中,反馈部分加入了一个超前环节来预测未来时刻的输出。由于系统参数和结构慢时变的情况下,系统参数和结构参数慢时变的情况下, $\tau s + 1$ 可以近似代替 $e^{\tau s}$,则加入的超前环节可以近似为一个Smith预估器;而无模型自适应控制器对系统参数的变化和外界干扰有较强的抑制作用;因此这种结构的自适应控制系统结合了Smith预估控制和无模型自适应控制两种控制方法的优点,效果更好^[13-14]。

3.2 前馈补偿设计

前馈补偿是自动控制中最早出现的一种克服干扰的方法,该方法对应的前馈解耦补偿法是目前多变量耦合系统解耦常用的三种方法(前馈补偿法、对角矩阵法和单位矩阵法)之一^[15-16]。前馈解耦补偿法是用不变性原理设计解耦网络,从而解除系统的耦合关联^[16-17]。下面以两个空气处理机组构成的耦合系统为例,说明“2输入-2输出”系统的前馈网络设计。两个空气处理机组构成的耦合系统包括机组A“水流量A-送风温度A”和机组B“水流量B-送风温度

B”两个回路,其耦合关系如图3所示。

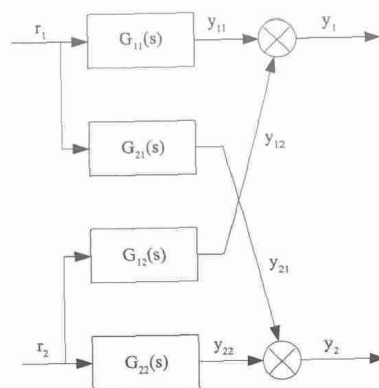


图3 两个空气处理机组耦合关系

图中, $G_{11}(s)$ 为“水流量A-送风温度A”控制回路模型, y_1 为机组A的送风温度。 $G_{21}(s)$ 为“水流量A-送风温度B”控制回路模型, $G_{12}(s)$ 为“水流量B-送风温度A”控制回路模型, $G_{22}(s)$ 为“水流量B-送风温度B”控制回路模型, y_1 为机组A的送风温度, y_2 为机组B的送风温度, r_1 为机组A的送风温度设定值, r_2 为机组B的送风温度设定值。

本文将具有接近白噪声性质的线性移位寄存器序列(M序列)作为VAV系统输入,并采集系统输出数据:机组A的送风温度和机组B的送风温度。利用Matlab系统辨识工具箱建模,得到各回路模型,如下式所示。

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{6.2089}{1+162.55s}e^{-36.216s} & \frac{-3.2392}{1+163.24s}e^{-38.027s} \\ \frac{-3.7429}{1+174.92s}e^{-37.507s} & \frac{7.2764}{1+146.82s}e^{-35.637s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

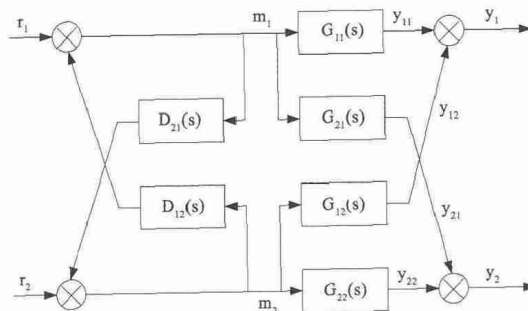


图4 前馈补偿的解耦网络

前馈解耦补偿法是用不变性原理设计解耦网络,图-4为前馈解耦补偿的解耦网络。令

$$y_{11} - y_{12} = 0 \quad (m_2 \neq 0)$$

$$y_{21} - y_{22} = 0 \quad (m_1 \neq 0)$$

$$\text{则有 } G_{12}(s) - D_{12}(s)G_{11}(s) = 0$$

$$G_{21}(s) - D_{21}(s)G_{22}(s) = 0$$

求解可得解耦网络的数学模型为

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (6)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (7)$$

将等式(5)中的相应项代入方程(6)和(7)可得

$$D_{12}(s) = -\frac{0.5217 + 84.78s}{1 + 163.24s} e^{-1.811s}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{0.5144 + 75.52s}{1 + 174.92s} e^{-1.87s}$$

经过前馈补偿解耦后,二维系统变成了两个单回路的控制系统。

3.3 MFAC 控制和前馈补偿组合的解耦网络设计

如果准确知道被控过程扰动通道与控制通道模型,则可实现了完全补偿,达到了被控量不受扰动影响的控制效果。但是实际中,往往由于建模方法和建模对象的复杂性,导致最终建立的模型和被控对象不能完全匹配,从而影响了解耦效果。实际中前馈模型的结构有时比较复杂,甚至难以实现,使得前馈补偿法无能为力。而无模型自适应控制是一种不依赖被控对象的具体数学模型的控制方法,它实现了建模与控制一体化、冲破了PID和线性框架的束缚、打破了参数自适应的限制,实现了结构自适应^[9]。因此,可利用无模型自适应控制规避模型和被控对象不能完全匹配问题,实现良好解耦。

图5为基于无模型自适应控制和前馈补偿解耦的控制系统框图。图4中 $G_{11}(s)$ 、 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 和 $D_{12}(s)$ 、 $D_{21}(s)$ 的传递函数模型分别如等式(5)、(6)、(7)所示。

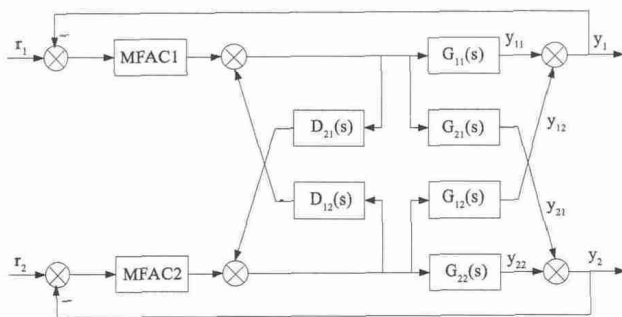


图5 基于MFAC和前馈补偿组合的解耦网络

4 仿真研究

本文的仿真工具采用Matlab软件。对于本文所研究问题的仿真,既可编写Matlab程序来实现,也可由Matlab中的Simulink实现。本文通过Matlab编程来实现。

依据无模型自适应控制算法,设计的无模型自适应控制算法流程如图6所示。针对前面建立的数学模型,利用Matlab分别编写了基于MFAC控制和传统PID控制的程序,并进行了仿真。

无论是基于MFAC和前馈补偿控制组合的解耦控制,还是基于传统PID和前馈补偿控制组合的解耦控制,均需要对

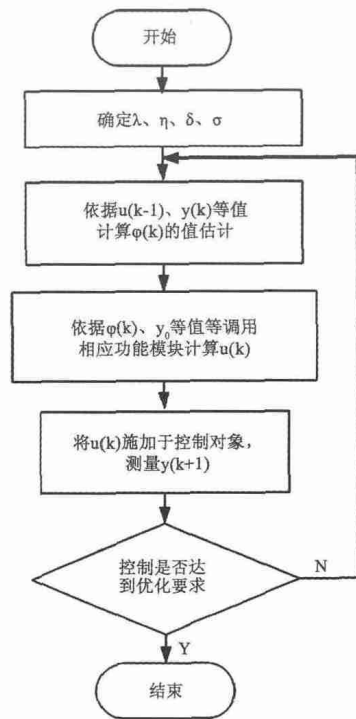


图6 MFAC 算法的流程图

其参数进行设定。对于无模型自适应控制而言,其理论中目前还没有系统的明确的参数整定方法,本文中无模型自适应控制器参数的整定参考了文献[3]和相关无模型自适应控制的报告,并经过多次调试确定。而对传统PID参数的整定,采用了工程整定法。最终确定的无模型自适应解耦控制器和传统PID解耦控制器的参数如下:对于机组A送风温度控制回路的控制器MFAC1,参数 $\delta = 0.95, \eta = 1, \lambda = 0.06, \sigma = 2$;对于机组B送风温度控制回路的控制器MFAC2,参数 $\delta = 1, \eta = 1, \lambda = 0.05, \sigma = 2$ 。对于传统的PID控制,机组A送风温度控制回路的PID控制器参数 K_p, K_i, K_d 分别为0.3055、0.0026、0,机组B送风温度控制回路的PID控制器参数 K_p, K_i, K_d 分别为0.3005、0.0025、0。

仿真中,两台机组送风温度设定值给定是变设定值,在0-600s之间送风温度设定值为30度,在601-1200s之间送风温度设定值为25度,在1201-1800s之间送风温度设定值为28度。送风温度设定值之所以采用变设定值是基于以下两点原因:一是实际中空调机组为达到节能的目的,经常根据实际气象条件改变送风温度值;二是采用变设定值可以反映出控制系统的鲁棒性。

基于MFAC和前馈补偿控制组合解耦、传统PID和前馈补偿控制组合解耦控制的最终仿真结果如图-7、图-8所示。仿真结果表明,对于机组A的送风温度控制,利用MFAC和前馈补偿控制组合解耦时超调量0%,调节时间为208s,而利用传统PID和前馈补偿控制组合解耦时,超调量为9.6%,调节时间为531s。对于机组B的送风温度控制,利用MFAC和前馈补偿控制组合解耦时超调量0,调节时间为191s,而利用传统PID和前馈补偿控制组合解耦时,超调

量为 12.0%, 调节时间为 321s。以上分析表明: 无论是超调量还是调节时间, 利用 MFAC 和前馈补偿组合解耦的效果都要优于利用传统 PID 和前馈补偿控制组合解耦的效果。

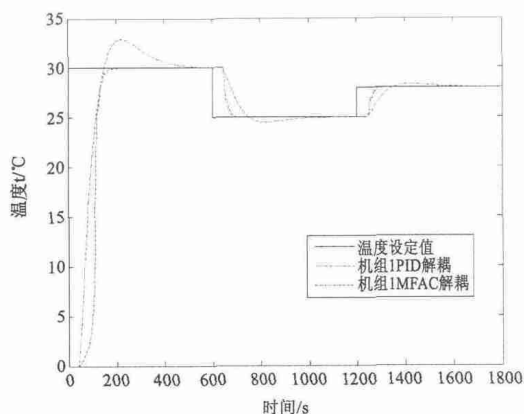


图7 机组 A 解耦控制效果

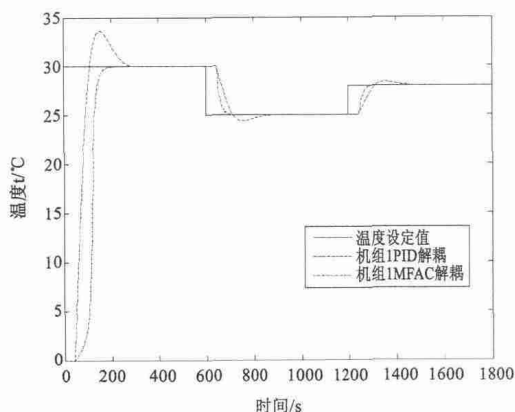


图8 机组 B 解耦仿真控制效果

5 结论

本文建立了变风量空调系统两个空气处理机组组成的耦合系统的数学模型, 设计了无模型自适应控制和前馈补偿组合的解耦网络, 对所建立的耦合系统进行了解耦控制, 并进行了仿真。仿真结果表明: 相对 PID 与前馈补偿组合解耦而言, 无模型自适应控制配合前馈补偿的方法可以大幅减少调节时间, 且超调量为 0, 具有很好的解耦效果。

参考文献:

- [1] 霍小平. 变风量系统的概念分类及应用实例 [J]. 暖通空调, 1997, 27(5): 22-26.
- [2] Avery Gil. The instability of VAV systems [J]. Heating/Piping/Air Conditioning, 1992, 30(2): 280-287.
- [3] 王军, 石磊, 刘咸定. 在变风量空调控制中应用神经元解耦控制技术 [J]. 自动化仪表, 2003, 24(4): 45-48.
- [4] 李界家, 刘岱岩, 祝焯楠. 基于神经网络的变风量空调解耦控制 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 187-192.
- [5] 李超, 张伟平, 马玉玲. 前馈解耦控制器在恒温恒湿空调控制系统中的应用 [J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(6): 54-59.
- [6] 王昕, 李少远. 多模型自适应前馈解耦控制器 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(3): 361-365.
- [7] 韩志刚, 蒋爱平, 汪国强. 无模型控制方法对多变量耦合系统控制的应用研究 [J]. 控制与决策, 2004, 19: 1155-1159.
- [8] 韩志刚. 关于建模与自适应控制的一体化途径 [J]. 自动化学报, 2004, 30(3): 380-389.
- [9] 韩志刚. 大型复杂系统控制器设计的功能组合途径 [J]. 控制工程, 2004, 11(2): 103-107.
- [10] 韩志刚. 一类复杂系统非建模控制方法的研究 [J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 398-402.
- [11] 韩志刚. 无模型控制器的设计问题 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 19-22.
- [12] 江欣欣, 巫红, 曾刚, 韩志刚. 无模型控制方法的应用研究 [J]. 控制工程, 2007, 14(1): 24-26.
- [13] 金尚泰. 无模型学习自适应控制的若干问题研究及其应用 [D]. 北京交通大学博士论文, 2009.
- [14] 王卫红. 无模型自适应控制理论几类问题的研究 [D]. 北京交通大学博士论文, 2009.
- [15] 金以慧. 过程控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] 杨佳丽, 杨俊华, 杨亮. 不平衡工况矩阵变换器前馈补偿闭环控制 [J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 292-296.
- [17] 任庆昌, 徐鹏. PID 自整定调节器在 VAV 空调系统解耦控制中的应用 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(6): 759-764.

作者简介



冯增喜(1979-), 男(汉族), 陕西省韩城市人, 博士研究生, 主要研究领域为智能建筑环境技术、建筑设备自动化;

任庆昌(1945-), 男(汉族), 河南人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为智能建筑。