

PID 自整定调节器在 VAV 空调系统解耦控制中的应用

任庆昌¹, 徐鹏¹, 罗西², 杨怡¹

(1. 西安建筑科技大学信控学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:通过采用 PID 自整定调节器以及前馈补偿解耦网络,对变风量(VAV)空调系统中“两个空气处理机组组成的耦合系统”和“风系统和水系统耦合系统”进行解耦控制.通过 MATLAB 仿真研究和在实际系统中的实验研究验证了调节器和解耦网络的可行性和有效性,仿真结果和实验结果令人满意,为变风量空调系统的解耦控制提供了有效的方法,为变风量空调系统的整体稳定运行奠定了基础.

关键词:变风量空调系统;系统建模;多变量解耦控制;PID 自整定调节器

中图分类号:TP273.2

文献标识码:A

文章编号:1006-7930(2009)06-0759-05

变风量(VAV)空调系统有着广阔的应用前景,但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.解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,是变风量空调系统得到广泛应用的关键问题之一.PID 自整定调节器和前馈解耦网络的配合使用是解决这一问题的一种有效途径.

1 变风量(VAV)空调系统组成

本变风量空调实验系统的组成如图 1 所示.论文涉及两个子系统,一是“两个空气处理机组组成的耦

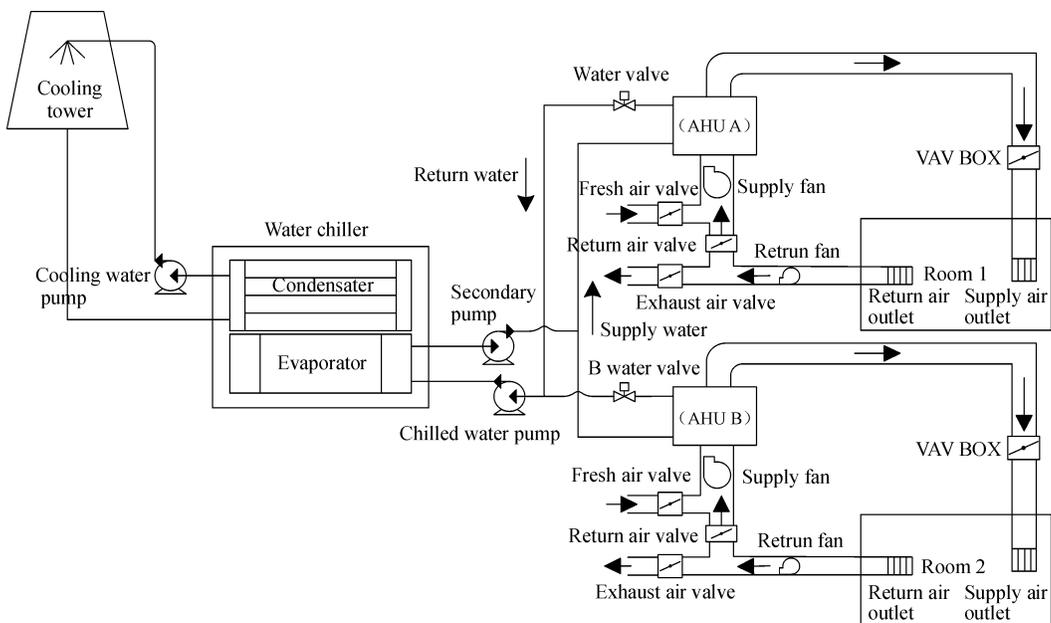


图 1 变风量空调结构图

Fig. 1 Structure diagram of VAV air conditioning system

收稿日期:2009-06-10 修改稿日期:2009-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678145)

作者简介:任庆昌(1945-),男,河南汤阴人,教授,博士生导师,主要研究领域为建筑智能化、智能建筑环境技术.

合系统”,包括“水流量 A(FI_A)-送风温度 A(T_A)”和“水流量 B(FI_B)-送风温度 B(T_B)”两个控制回路;二是“风系统和水系统组成的耦合系统”,包括“二次泵频率(F_P)-供回水压差(DP)”和“水流量 A(FI_A)-送风温度 A(T_A)”两个控制回路.

2 PID 自整定调节器和前馈解耦网络的设计

2.1 系统建模

给耦合控制对象输入端加 M 序列,采集数据^[2],预处理后应用最小二乘法用 MATLAB 系统辨识工具箱(System Identification Toolbox)建模.可得两个耦合控制子系统的传函阵如式(1)和(2)所示.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6.2089}{1+162.5s} e^{-36.216s} & \frac{-3.2392}{1+163.24s} e^{-38.027s} \\ \frac{-3.7429}{1+174.92s} e^{-37.507s} & \frac{7.2764}{1+146.82s} e^{-35.637s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $G_{11}(s)$ 为“水流量 A-送风温度 A”控制回路模型; $G_{21}(s)$ 为水流量 A 对送风温度 B 的影响作用; $G_{12}(s)$ 为水流量 B 对送风温度 A 的影响作用; $G_{22}(s)$ 为“水流量 B-送风温度 B”控制回路模型.

$$G'(s) = \begin{bmatrix} G'_{11}(s) & G'_{12}(s) \\ G'_{21}(s) & G'_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6.2089}{1+162.5s} e^{-36.216s} & 0 \\ \frac{-6.2726}{1+4.9881s} e^{-1.6225s} & \frac{2.1063}{1+1.7068s} e^{-1.4299s} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $G'_{11}(s)$ 为“水流量 A-送风温度 A”控制回路模型; $G'_{21}(s)$ 为水流量 A 对供回水压差的影响作用; $G'_{12}(s)$ 为二次泵频率变化对送风温度 A 的影响作用; $G'_{22}(s)$ 为“二次泵频率-供回水压差”控制回路模型.

2.2 PID 自整定调节器设计

在一阶惯性加延迟系统的 PID 自整定中,设传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_s s + 1} \quad (3)$$

PID 调节器传递函数为:

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (4)$$

在已知了传递函数的情况下,我们可以用误差平方积分准则(ISE)、时间误差平方积分准则(ISTE)、时间平方误差平方积分准则(IST²E)等来评价闭环系统在设定值和负载扰动下的响应波形,在此基础上确定 PID 的三个参数.这些积分准则的定义为^[1]:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (5)$$

$$ISTE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (6)$$

$$IST^2 E = \int_0^{\infty} t^2 e^2(t) dt \quad (7)$$

式中: $e(t) = r(t) - y(t)$, $r(t)$ 表示系统设定输入, $y(t)$ 表示系统输出, $e(t)$ 表示设定输入和系统输出的偏差.文献[1]在“一阶惯性加延迟系统的 PID 自整定”一节中给出了利用最小二乘拟合方法求得的 PID 参数和 τ/T 近似关系式:

$$K_p = \frac{\alpha_1}{K_0} \left(\frac{\tau}{T} \right)^{b_1}, T_i = \frac{T}{\alpha_2 + b_2 \left(\frac{\tau}{T} \right)}, T_d = \alpha_3 T \left(\frac{\tau}{T} \right)^{b_3} \quad (8)$$

式中 $\alpha_1, b_1, \alpha_2, b_2, \alpha_3, b_3$ 的值见表 1.

表 1 对于设定值扰动的 PID 参数自整定公式之有关系数

Tab. 1 The coefficients of PID parameter self-adjusting regulator as to set-point changing

Rules	Range of τ/T					
	0.1~1.0			1.1~2.0		
	ISE	ISTE	IST ² E	ISE	ISTE	IST ² E
a_1	1.048	1.042	0.968	1.154	1.142	1.061
b_1	-0.897	-0.897	-0.904	-0.567	-0.579	-0.583
α	1.195	0.987	0.977	1.047	0.919	0.892
b_2	-0.368	-0.238	-0.253	-0.220	-0.172	-0.165
α_3	0.489	0.385	0.316	0.490	0.384	0.315
b_3	0.888	0.906	0.892	0.708	0.839	0.832

3.3 前馈解耦网络设计

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.二维系统利用前馈补偿解耦法进行解耦的系统框图如图 2 所示.

利用不变性原理来消除这种耦合的影响,令

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

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

则有

$$W_{12}(s) + D_{12}(s)W_{11}(s) = 0$$

$$W_{21}(s) + D_{21}(s)W_{22}(s) = 0$$

由此可以得出解耦网络的数学模型为

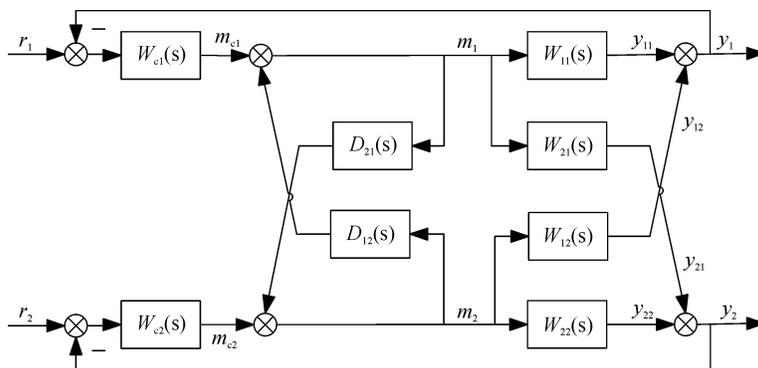


图 2 双输入-双输出前馈补偿法解耦控制系统框图

Fig. 2 Double-input double-output feedforward compensation decoupling control system

$$D_{12}(s) = -\frac{W_{12}(s)}{W_{11}(s)} \tag{9}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{W_{21}(s)}{W_{22}(s)} \tag{10}$$

经过前馈补偿解耦后,图 2 所示的二维系统将变为两个单回路的控制系统^[3].

将式(1)中的相应项带入式(9)和(10)中可得:

$$D_{12}(s) = -\frac{W_{12}(s)}{W_{11}(s)} = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{\frac{-3.2392}{1+163.24s} e^{-38.027s}}{\frac{6.2089}{1+162.5s} e^{-36.216s}} = \frac{0.5217+84.78s}{1+163.24s} e^{-1.811s} \tag{11}$$

$$D_{21}(s) = -\frac{W_{21}(s)}{W_{22}(s)} = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} = -\frac{\frac{-3.7429}{1+174.92s} e^{-37.507s}}{\frac{7.2764}{1+146.82s} e^{-35.637s}} = \frac{0.5144+75.52s}{1+174.92s} e^{-1.87s} \tag{12}$$

显然,式(11)和(12)中的纯滞后时间常数很小,在此忽略这两个纯滞后环节,可得:

$$D_{12}(s) = \frac{0.5217+84.78s}{1+163.24s} \tag{13}$$

$$D_{21}(s) = \frac{0.5144+75.52s}{1+174.92s} \tag{14}$$

同理,将式(2)中的相应项带入式(9)和(10)中可得:

$$D'_{12}(s)=0 \quad (15)$$

$$D'_{21}(s)=\frac{2.9733+5.0748s}{1+4.9981s} \quad (16)$$

3 仿真和实验研究

3.1 仿真研究

通过仿真对三种准则得出的 PID 控制器参数进行比较,综合考虑,论文中用了时间平方误差平方积分准则(IST²E)。系统如式(1)、(2)所示,查表1,将相关参数分别带入式(8)中计算得出三个控制对象 $G_{11}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 、 $G'_{22}(s)$ 的 PID 控制器的三个参数分别为:

$G_{11}(s)$ 的 PID 控制器参数 $K_p=0.6055$, $1/T_i=0.0057$, $T_d=13.46$;

$G_{22}(s)$ 的 PID 控制器参数 $K_{p1}=0.4784$, $1/T_{i1}=0.0062$, $T_{d1}=13.12$;

$G'_{22}(s)$ 的 PID 控制器参数 $K_{p2}=0.5$, $1/T_{i2}=0.4484$, $T_{d2}=0.4601$ 。

对两个耦合系统进行解耦控制的仿真研究, Simulink 仿真结果如图3。

将图3中的图形进一步放大后可以读出,解耦后各个量的峰值,送风温度 A 的峰值为 32.1°C,送风温度 B 的峰值为 31.8°C,供回水压差峰值为 145.76 kPa。可以计算得:

送风温度 A 的超调量: $\delta_A = \frac{32.13-30}{30} \times 100\% = 7.1\%$

送风温度 B 的超调量: $\delta_B = \frac{31.81-30}{30} \times 100\% = 6.03\%$

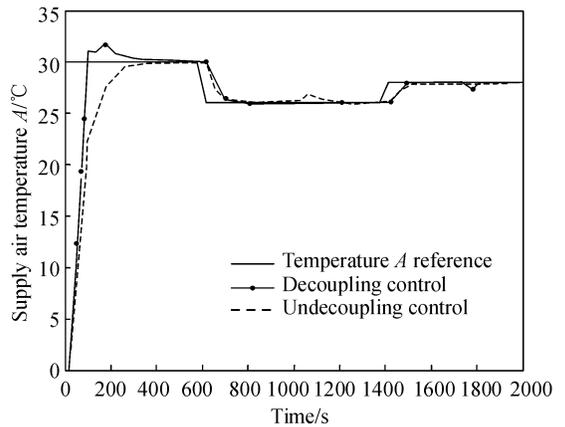
供回水压差的超调量: $\delta_{dp} = \frac{145.76-140}{140} \times 100\% = 4.1\%$

从图3中可以看出,两个送风温度的调节时间大概都在 400 s 以内,这样的超调量和调节过程在实际应用中是可以接受的;供回水压差解耦控制后的超调量和解耦前相比没有明显变化。综上所述,解耦后系统运行效果明显比解耦之前要好,这对整个空调系统的稳定运行是有益的。

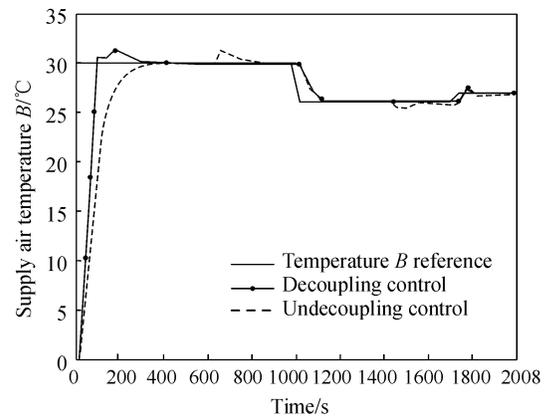
3.2 实验研究

本节中对解耦控制进行实验研究。所有实验都是在西安建筑科技大学变风量(VAV)空调实验系统冬季工况下进行的。实验程序用美国 NI (National Instruments) 公司开发的图形化编程语言 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 开发。

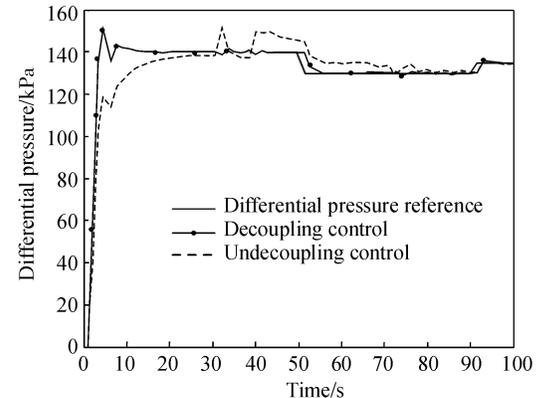
实验时,设定热水温度为 46°C,各个控制回路的给定值和仿真中信号给定一致。对于两个空气处理



(a) Response curves of Supply air temperature A under two cases of control



(b) Response curves of Supply air temperature B under two cases of control



(c) Response curves of differential pressure of supply and return water under two cases of control

图3 解耦控制仿真曲线

Fig.3 Simulation results of decoupling control

机的耦合系统,两个送风温度设定值 30°C ,分别在实验进行到 600 s 时将 A 送风温度的设定值改为 26°C , $1\ 400\text{ s}$ 时改为 28°C ;在 $1\ 000\text{ s}$ 时将 B 送风温度设定值改为 26°C ,在 $1\ 700\text{ s}$ 时改为 27°C 。

风系统和水系统的耦合系统,主要考虑改变水流量控制送风温度时对供回水压差的影响,所以以供回水压差的时间为基准.首先将 A 送风温度设定值设为 30°C ,在实验进行到 30 s 时改设为 28°C ,在 70 s 时改设为 29°C ;供回水压差开始设定为 140 kPa ,实验进行 50 s 时改设为 130 kPa ,在 90 s 时改设为 135 kPa 。

系统实验结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,解耦控制后,虽然超调增大,但是耦合的影响已经很小了,且跟随给定信号的速度也变快了.说明解耦网络的设计是成功的,解耦控制是有效的.但是由于供回水压差控制的响应速度较快,且压力传感器比较敏感,所以实际控制效果没有送风温度控制好,不过依然可以将供回水压差控制在一个合理的范围内。

4 结 论

(1)文中通过采集实验数据,应用最小二乘辨识方法建立了“两个空气处理机组成的耦合系统”和“风系统和水系统组成的耦合系统”的数学模型。

(2)文中设计了 PID 自整定调节器和前馈补偿解耦网络对两个耦合子系统进行了解耦控制,并进行了仿真和实验研究.结果证明,本文给出的方法是有效的。

参考文献 References

[1] 谢新明,丁 峰. 自适应控制系统[M].北京:清华大学出版社,2002.
XIE Xin-ming, DING Feng. Adaptive Control System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

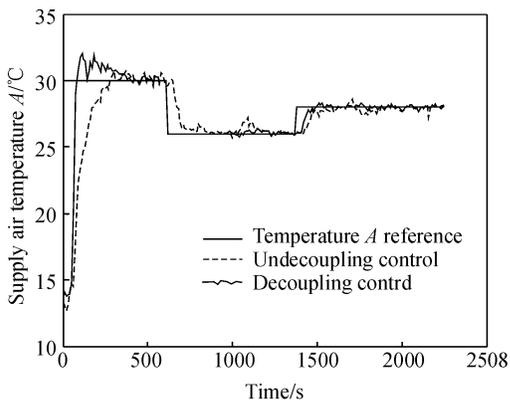
[2] LJUNG Lennart. System Identification—Theory for the User[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press 2002.

[3] 陈夕松,汪木兰. 过程控制系统[M].北京:科学出版社,2005.
CHEN Xi-song, WANG Mu-lan. Process Control System [M]. Beijing: Science Press, 2005.

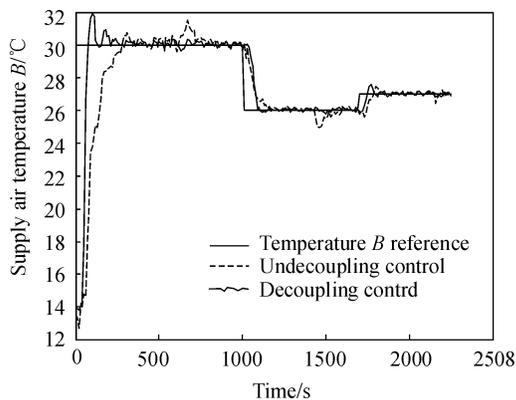
[4] 闫秀英,任庆昌,孟庆龙. 一种自校正 PID 控制器设计与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006(8): 753-756.
YAN Xi-ying, REN Qing-chang, MENG Qing-long. Design and Simulation for Self-tuning PID Controller[J]. Journal of System Simulation, 2006(8): 753-756.

[5] YUN Li, KIAM Heong Ang, CHONG G C Y. PID Control System Analysis and Design [J]. Control System Magazine, IEEE(S0272-1708), 2006, 26, 32-41.

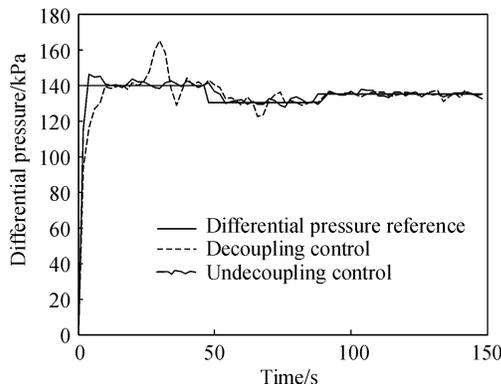
[6] CHAI Tian-You, YUE Heng. Multivariable Intelligent Decoupling Control System and its Application[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 123-131.



(a) Response curves of Supply air temperature A under two cases of control



(b) Response curves of Supply air temperature B under two cases of control



(c) Response curves of differential pressure of supply and return water under two cases of control

图 4 耦合系统实验曲线

Fig. 4 Experiment effect curves of coupling system

Study on the permanent deformation prediction model of clay through tests and simulations

ZHANG Hong-liang^{1,2}, GUO Zhong-yin², LIANG Wei³, GAO Qi-ju², CONG Lin²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Shanghai 200092, China;

3. China Development Bank Qingdao Branch, Qingdao 266071, China)

Abstract: The permanent deformation of subgrade has effects on the rutting of asphalt pavement. The program of permanent deformation tests of subgrade soils was established through analysis in detail. Repeated loads tests were conducted with clay. The basic relationship between the permanent strain and the number of load applications was found, and the regression formula between the coefficients in the models and a moisture content and a resilient modulus were found with the least square method. At last, extended Drucker-Prager model was used to clay and the repeated load triaxial tests were simulated by the finite element method. The square of the correlative coefficient between the calculated curve and measured or numerical simulated one was as great as 0.99. The minimum square of the correlative coefficient of the regression formula of the coefficients in the models was 0.53 which was greater than the critical value of 0.50. Results show that the permanent deformation prediction model for a clay founded have high reliability, and some repeated load triaxial tests can be replaced by finite element simulations.

Key words: *subgrade engineering; clay; permanent deformation; prediction model; repeated loads test; numerical simulation*

Biography: ZHANG Hong-liang, Post Doctor, Associate Professor, Tel: 0086-13572011551, Xi'an 710064, P. R. China, E-mail: L29@gl.chd.edu.cn

(上接第 763 页)

The Application of PID parameter self-adjusting regulator in VAV decoupling control

REN Qing-chang¹, XU Peng¹, LOU Xi², YANG Yi¹

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. and Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the PID parameter self-adjusting regulator and feedforward compensation network, a decoupling control system has been designed for dealing with the coupling between two air-handling units(AHU) and the coupling between water system and air-flow system in variable air volume(VAV) air conditioning system. The feasibility and validity of the regulator and the network is testified by simulation and experiment with satisfying results. The paper offers an efficient method for decoupling control of VAV air conditioning system and paves the way for the stable performance of VAV air conditioning system.

Key words: *VAV air conditioning system; system modeling; multivariable decoupling control; PID parameter self-adjusting regulator*

Biography: REN Qing-chang, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82201334, E-mail: renqch@163.com