

基于模糊预测 PID 算法的地下空间湿度控制*

张晓程 王荣浩[†] 邢建春

(解放军理工大学国防工程学院, 南京 210007)

摘要 根据防护工程地下空间空调系统的时滞以及非线性特性,结合预测控制和模糊控制两种方法,设计了基于模糊预测 PID 算法的控制器.建立了系统的数学模型,并基于所提出的控制方法对其进行仿真研究,结果显示该控制器抗干扰能力较好,相较于传统 PID 控制,该控制器调节时间更快,控制效果更佳.

关键词 地下空间, 预测控制, 模糊控制, 空调系统

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-060

引言

目前已有的控制方法,如经典控制、现代控制等在空调大时滞系统控制方面都已有很多应用^[1].相较于地面空间防护工程,地下空间具有其特殊性:(1)工程内部环境温度受外界气温和太阳照射波动很小,防潮防湿是工程内部热湿环境的主要问题;(2)密闭空间导致的工程自然通风性能差;(3)复杂的用途需求导致对工程内部不同区域的环境质量要求差别较大;(4)地下工程中空调能耗占比大,新风负荷大,换气次数多,湿度影响大;(5)空调系统是一个大时滞非线性系统.基于以上特性,地下空间空调系统的精确控制模型很难得到,单一运用常规的 PID 控制,难以实现高效、节能的运行指标.

本文针对复杂的空调大时滞系统设计了基于模糊预测 PID 算法的控制器.预测控制具有适应复杂过程、滚动优化等优点^[2],PID 作为有效的传统控制算法,已被广泛使用于工程中,结构简单且参数易于调整^[3].而且,由于不能建立被控对象精确的数学模型,选用模糊控制可以减小对模型的依赖程度^[4].基于以上优点,预测控制应用在闭环控制回路,通过提前预测输出值减少时滞,而模糊控制则应用于主回路,用以增加系统的鲁棒性、稳定性.

1 空调系统湿度模型

由于系统控制对象是房间湿度,其动态特性一

般可采用带延迟的一阶模型近似描述,可调节的特性参数有放大系数 K 、传递滞后 τ 与时间常数 T ^[5].由于受控房间的围护结构、湿度要求、送风方式、换气次数和室内设备不同,测得的结果也不相同^[6].这里引用国内常采用的估算公式^[7],如表 1 所示.

表 1 房间湿度模型估算表

Table 1 The estimation of the room humidity model

air supply mode	object properties			characteristics ratio τ/T
	transmission lag τ (s)	time constant T (s)	amplification coefficient K	
sidewall and diffuser air supply	$\frac{9}{N}$	$\frac{90}{N}$	$\frac{1}{1 + \frac{52}{N} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)}$	0.1
orifice plate air supply	$\frac{180}{N}$	$\frac{180}{N}$	$\frac{1}{\left(1 + \frac{52}{Nc} \right) \left[1 + \frac{35}{N} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right) \right]}$	0.1

表 1 中各符号的意义如下:

N :单位时间(小时)房间的换气次数; a, b, c :房间长、宽、高(米).

本文以某防护工程的地下房间为研究对象,长 \times 宽 \times 高为 15 米 \times 14 米 \times 6 米, $N = 15$ 次/小时,采用侧面送风.

按表 1 估算公式计算:

2015-03-17 收到第 1 稿,2015-06-03 收到修改稿.

* 军队 2110 重点学科建设资助项目(20130013)和解放军理工大学预先研究基金资助项目(FYZCJJ201502)

[†] 通讯作者 E-mail: wrh@893.com.cn

$$\tau = \frac{9}{N} = \frac{9}{15} = 0.6(\text{分}) = 36(\text{秒}) \quad (1)$$

$$T = \frac{90}{N} = \frac{90}{15} = 6(\text{分}) = 360(\text{秒}) \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{1 + \frac{52}{N} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{52}{15} \left(\frac{1}{15} + \frac{1}{14} + \frac{1}{6} \right)} = 0.486 \quad (3)$$

所以,房间湿度调节对象的经验数学模型为:

$$\frac{e^{-7s}}{s+1} \cdot \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} = \frac{0.486e^{-43s}}{360s+1} \quad (4)$$

其中 $\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}$ 表示被控对象房间湿度数学模型, $\frac{e^{-7s}}{s+1}$ 表示组合式空调器的数学模型。

2 基于模糊预测PID的控制器设计

基于模糊预测PID控制器的基本思想是将由预测部分得到的最优输入与给定输入的误差变化率和误差作为模糊PID控制器的输入,然后通过模糊化、模糊推理、解模糊等,在线调整PID控制器的参数,再作用到被控对象上,得到预测部分的输入值,进而对系统进行预测控制。控制框图如图1所示。

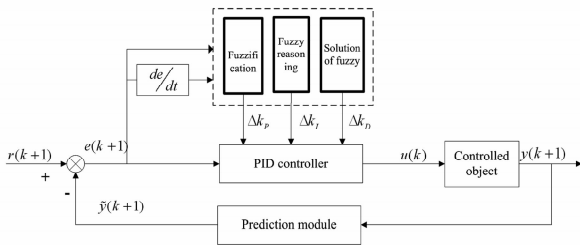


图1 基于模糊预测PID的控制器框图

Fig. 1 Control chart based on fuzzy predictive PID

2.1 输出量预测

2.1.1 预测模型

动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)首先要测定对象单位阶跃响应的采样值:

$$a_i = a(iD), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中 D 为采样周期。对于渐近稳定的对象,其动态信息可近似用模型向量:

$$a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T \quad (6)$$

来描述, n 为建模时域。

因为线性系统具有比例等性质,故利用模型向量 a_i 来预测对象未来时刻的输出值。在 k 时刻初

始预测值为:

$$\tilde{y}_0(k+i|k), i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

从当前时刻起,在 M 个连续的控制增量 $\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+M-1)$ 作用下,未来时刻的输出值为:

$$\tilde{y}_M(k+i|k) = \tilde{y}_0(k+i|k) + \sum_{j=1}^{\min(M,i)} a_{i-j+1} \Delta u(k+j-1), i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

以上输出值可用向量形式表示:

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{P0}(k) + A\Delta u_M(k) \quad (9)$$

其中

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix}, \quad \tilde{y}_{P0}(k) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix}, \quad A = \sum_{j=1}^{\min(M,j)} a_{i-j+1} = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_M & \cdots & a_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_P & \cdots & a_{P-M+1} \end{bmatrix},$$

其中 P 是优化时域长度, M 是控制时域长度。

2.1.2 滚动优化

为了确定从 k 时刻起的 M 个控制增量,使被控对象未来时刻的输出预测值 $\tilde{y}_M(k+i|k)$ 尽可能接近设定值以及确保控制过程中控制增量 $\Delta u(k)$ 不要剧烈变化, k 时刻的优化性能指标可用矩阵表示为:

$$\min J(k) = [Y_\omega(k) - Y_P(k)]^T Q [Y_\omega(k) - Y_P(k)] + \Delta U(k) T R \Delta U(k) \quad (10)$$

其中 $Y_\omega(k)$ 是输出期望值矩阵, $Y_P(k)$ 是输出预测值矩阵, Q 是误差权矩阵, R 是控制权矩阵^[8]。

滚动优化是以参考轨迹作为优化目标,通过最优控制算法使某项性能指标在未来一定时间内最小,利用控制作用序列计算预测偏差,但只执行当前的控制作用并在下一时刻重复执行。

预测控制是通过实施 $\Delta u(k)$,采集 $k+1$ 时刻的输出,完成新的预测→优化→校正过程。优化过程随着时间的推移其优化目标也随着改变,是一个在线反复运行的过程。

2.1.3 反馈校正

当 k 时刻控制量 $u(k)$ 作用于被控对象时,相

当于在其输入端加上了一个幅值为 $\Delta u(k)$ 的阶跃. 由于对象和环境具有不确定性, 所以在 k 时刻进行控制后, $k+1$ 时刻的实际输出 $y(k+1)$ 与其预测输出 $\tilde{y}(k+1)$ 不一定一致, 这就形成预测误差:

$$e(k+1) = y(k+1) - \tilde{y}(k+1) \quad (11)$$

利用这一误差信息用启发式加权方法预测未来的输出误差, 并以此补偿基于模型的预测, 可得到经校正的预测向量, 即:

$$\tilde{y}_{cor}(k+1) = \tilde{y}_M(k+1) + He(k+1) \quad (12)$$

其中 $\tilde{y}_{cor}(k+1)$ 为校正后的预测向量, H 为误差校正矩阵^[9]. 由于引入了这一修正, 使系统变为一个闭环负反馈系统, 有利于系统性能的提高.

2.2 主回路模糊控制

模糊 PID 控制器是以误差变化率 e_c 与误差 e 为输入变量, 并找出 PID 三个控制参数与输入变量的模糊关系, 再经模糊化、模糊推理及解模糊, 输出 PID 参数修正量 Δk_p 、 Δk_I 、 Δk_D 并用其对 PID 参数进行在线实时修正, 以满足在系统输入不同时对控制参数的不同要求, 从而使被控对象具有良好的动、静态性能及较好的稳定性.

2.2.1 模糊化

表 2 模糊化表格

Table 2 The summary of fuzzification variables

variable	e	e_c	Δk_p	Δk_I	Δk_D
language variables	E	E_c	ΔK_p	ΔK_I	ΔK_D
basic domain	$[-15, +15]$	$[-30, +30]$	$[-0.003, +0.003]$	$[-6e^{-7}, +6e^{-7}]$	$[-0.102, +0.102]$
fuzzy subset	NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB				
fuzzy domain	$[-6, +6]$	$[-3, +3]$	$[-6, +6]$	$[-6, +6]$	$[-6, +6]$
quantitative factors	6/15 = 0.4	3/30 = 0.1	0.03/6 = 0.005	6e ⁻⁷ /6 = 1e ⁻⁷	0.102/6 = 0.017

2.2.2 参数整定原则

参数整定原则包括: (1) 当 e_c 和 e 相差不大时, 应取较小的 K_p 以减小系统超调, K_D 应取较小值, 同时 K_I 也应取适当值来保证系统的响应速度; (2) 当 e 较大时, 为了使系统的跟踪性能较好, 应取较大的 K_p 与较小的 K_D , 为避免出现过饱和现象, 同时使 K_I 趋近于 0; (3) 当 e 较小时, 为使系统拥有较好的动、静态性能, 应取较大 K_p 和 K_I .

但其中最关键的原则是满足控制要求, 即最适

合要求的 PID 参数才是最好的. 比如说, 湿控回路是个过程回路, 最大值不能超过允许范围, 那最合适的 PID 参数值的 K_p 作用可能要稍微小点, 尽管响应时间可能比理论的慢了, 衰减比也不是 4:1 或 10:1, 但是不超调, 就是最佳的.

2.2.3 模糊控制规则表建立

根据 PID 各参数对空调性能的影响及参数整定的原则, 可以得出针对 Δk_p 、 Δk_I 、 Δk_D 分别整定的模糊控制规则表, 如表 3、表 4 和表 5 所示.

表 3 Δk_p 的模糊控制规则表

Table 3 Fuzzy control rules of Δk_p

Δk_p	humidity error rate e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
humidity error e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 4 Δk_I 的模糊控制规则表

Table 4 Fuzzy control rules of Δk_I

Δk_I	humidity error rate e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
humidity error e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
	NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
	PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 5 Δk_D 的模糊控制规则表

Table 5 Fuzzy control rules of Δk_D

Δk_D	humidity error rate e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
humidity error e	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZE
	NS	ZE	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	MS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PS

3 仿真实验

按照上述思想, 建立防护工程地下房间的湿度控制系统仿真原理图, 如图 2 ~ 图 5 所示.

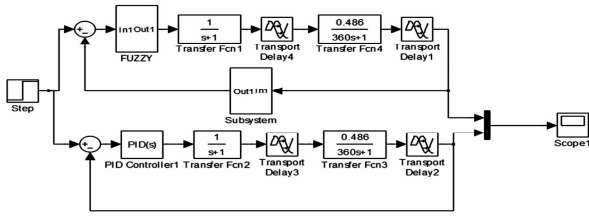


图 2 基于模糊预测 PID 算法的仿真原理图

Fig. 2 The principle diagram based on fuzzy predictive PID algorithm

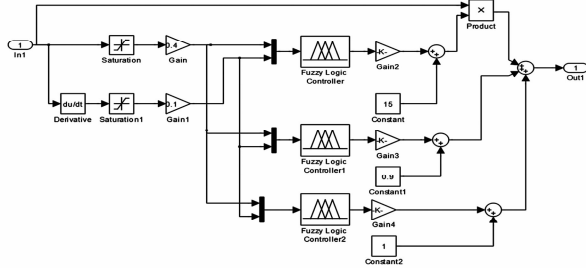


图 3 模糊控制器内部封装原理图

Fig. 3 The principle diagram of fuzzy controller

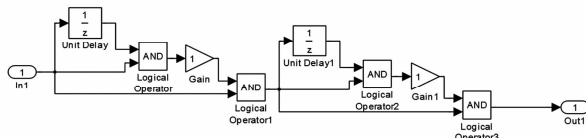


图 4 预测控制器内部封装原理图

Fig. 4 The principle diagram of predictive controller

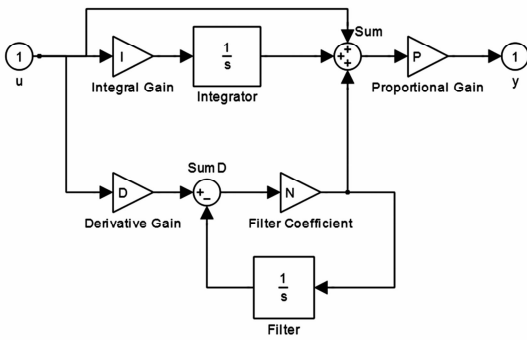


图 5 PID 控制器内部封装原理图

Fig. 5 The principle diagram of PID controller

预测控制模块中,预测优化时域 $P = 1$,控制时域 $M = 1$,采样周期 $D = 5s$ 。模糊 PID 模块中,通过试凑法得到: $K_p = 16.1, K_i = 1.05, K_d = 1.005$, e 和 e_c 分别取值为 $0.1、0.4$,仿真时间设定为 $500s$,系统设定的阶跃输入为 1 (相当于地下空间室内空气质量标准中要求的室内空气湿度标准 $50\% \sim 70\%$ [10]),得到系统输出响应如图 6 所示。将 PID 控制器和基于模糊预测 PID 算法的控制器的控制效果汇总在一个坐标系中,通过观察系统响应,对

控制效果进行比较。

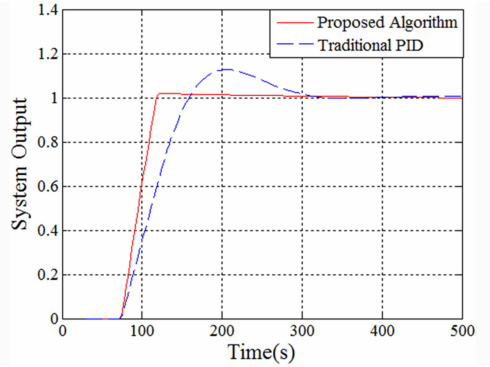


图 6 系统输出响应图($P = 1$)

Fig. 6 Output response of the system($P = 1$)

从图 6 中可以看出,本文算法的峰值为 1.018 ,调节时间为 $379.6s$,超调量为 1.5% ,上升时间为 $121.4s$,稳态值为 1.003 ;而传统 PID 算法的峰值为 1.126 ,调节时间为 $456.6s$,超调量为 11.8% ,上升时间为 $207.6s$,稳态值为 1.007 。仿真结果表明,本文算法的控制器的调节时间更快,与 PID 控制器作比较,震荡更少,超调量更小,稳态误差更小。

预测控制模块中,预测优化时域 $P = 10$,控制时域 $M = 1$,采样周期 $D = 5s$ 。模糊 PID 模块中,通过试凑法得到: $K_p = 14.3, K_i = 0.95, K_d = 1$, e 和 e_c 分别取值为 $0.1、0.4$,仿真时间设定为 $500s$,系统设定的阶跃输入为 1 ,得到系统输出响应如图 7 所示。将 PID 控制器和基于模糊预测 PID 算法的控制器的控制效果汇总在一个坐标系中,通过观察系统响应,对控制效果进行比较。

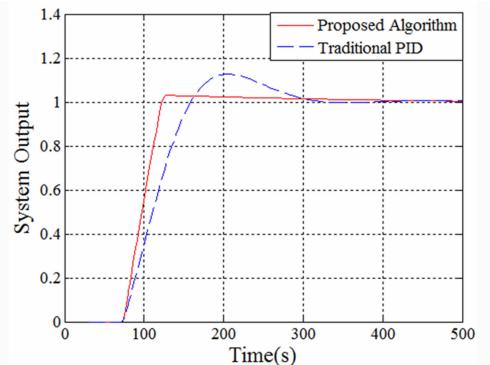


图 7 系统输出响应图($P = 10$)

Fig. 7 Output response of the system($P = 10$)

从图 7 中可以看出,本文算法的峰值为 1.03 ,调节时间为 $415.3s$,超调量为 2.5% ,上升时间为 $128.3s$,稳态值为 1.005 ;而传统 PID 算法的峰值为

1.126, 调节时间为 456.6s, 超调量为 11.8%, 上升时间为 207.6s, 稳态值为 1.007. 仿真结果表明, 本文算法的控制器的调节时间更快, 与 PID 控制器作比较, 震荡、超调量及稳态误差都更小.

下面考虑加入噪声(图8)的影响, 对图9、图10进行分析.

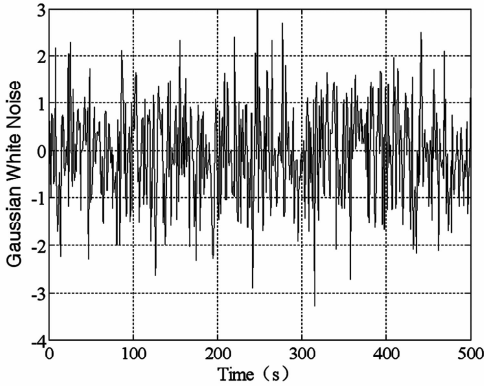


图8 高斯白噪声曲线图

Fig. 8 Gaussian white noise-time curves

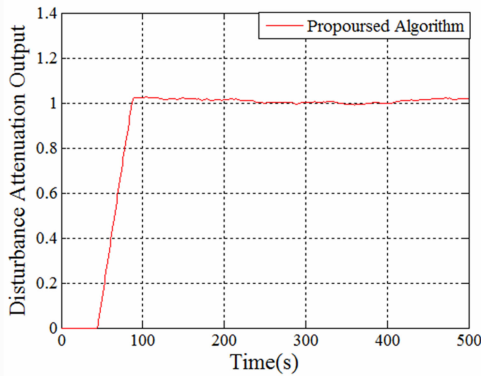


图9 抗扰动输出仿真图($P=1$)

Fig. 9 Disturbance attenuation - time relationship($P=1$)

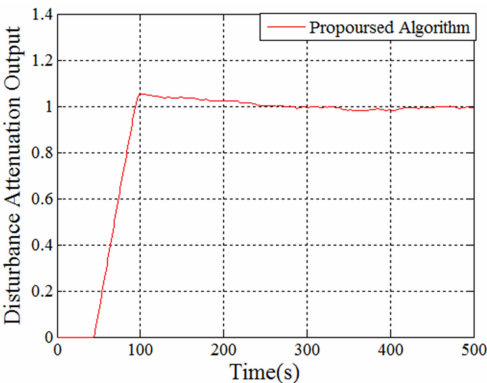


图10 抗扰动输出仿真图($P=10$)

Fig. 10 Disturbance attenuation - time relationship($P=10$)

加入如图8所示的高斯白噪声, 当预测时域 $P=1$ 时, 得到抗扰动输出仿真如图9所示; 当预测

时域 $P=10$ 时, 得到抗扰动输出仿真如图10所示. 从图中可以看出, 过程控制输出对噪声扰动具有一定的抑制作用, 表明本文算法的抗干扰性较好.

参 考 文 献

- 1 方新, 王金娥. 空调温湿度智能控制技术的研究. 机电工程技术, 2014, 43(11): 93 ~ 96 (Fang X, Wang J E. Research on intelligent control technology for air conditioning temperature and humidity. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2014, 43(11): 93 ~ 96 (in Chinese))
- 2 师五喜, 霍伟, 吴宏鑫. 柔性关节微操作机器人自适应模糊预测控制. 动力学与控制学报, 2003, 1(1): 84 ~ 89 (Shi W X, Huo W, Wu H X. Adaptive fuzzy predictive control of a micromanipulator with flexible joints. *Journal of Dynamics and Control*, 2003, 1(1): 84 ~ 89 (in Chinese))
- 3 赵健康, 戴金海. 基于 MATLAB 模糊控制器的预测跟踪控制仿真分析. 计算机仿真, 2004, 21(9): 28 ~ 30 (Zhao J K, Dai J H. Forecast-tracking control for attitude maneuver of spacecraft using MATLAB fuzzy controller. *Computer Simulation*, 2002, 21(9): 28 ~ 30 (in Chinese))
- 4 潘宇晨, 蔡敢为, 吴笃超. 平面三自由度可控挖掘机构动力学建模与控制器设计. 动力学与控制学报, 2014, 12(1): 67 ~ 73 (Zhou H X, Chen Z L, Li J. Dynamic modeling and controller design of a planar 3-D of controllable excavating mechanism. *Journal of Dynamics and Control*, 2014, 12(1): 67 ~ 73 (in Chinese))
- 5 杨成晨, 张九根. 基于灰色预测模糊 PID 算法的空调房间温度控制. 电子技术应用, 2012, 406(4): 56 ~ 59 (Yang C C, Zhang J G. Based on grey prediction fuzzy PID algorithm of air conditioning room temperature control. *Application of Electronic Technique*, 2012, 406(4): 56 ~ 59 (in Chinese))
- 6 殷晔. 基于模糊控制的温湿度试验箱建模及仿真[硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2008 (Yin Y. Based on the fuzzy control of temperature and humidity experiment box modeling and simulation [Master Thesis]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008 (in Chinese))
- 7 施俊良. 室温自动调节原理和应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983 (Shi J L. Room temperature automatic adjustment principle and application. Beijing: China Building Industry Press, 1983 (in Chinese))
- 8 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 2013 (Xi Y G. Predictive control. Beijing: National Defense Industry

- Press, 2013 (in Chinese))
- 9 胡国龙,孔亚广,孙优贤. 基于模糊规则的动力矩阵预测控制及其应用. 中国造纸学报, 2002,17(1):106 ~ 109 (Hu G L, Kong Y G, Sun Y X. Fuzzy rules-based dynamic matrix predictive control and its application. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2002,17(1):106 ~ 109 (in Chinese))
- 10 程绍仁. 地下工程防潮除湿. 北京:国防工业出版社, 1990 (Cheng S R. Moistureproof and dehumidification of underground engineering. Beijing: Nation Defense Industry Press, 1990 (in Chinese))

HUMIDITY CONTROL OF UNDERGROUND SPACE BASED ON FUZZY PREDICTIVE PID ALGORITHM*

Zhang Xiaocheng Wang Ronghao[†] Xing Jianchun

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract According to the time delay and nonlinear characteristics of the air-conditioning system in the underground space of the protection engineering, the controller combining predictive control and fuzzy control is designed based on fuzzy predictive PID algorithm. The mathematical model of the system is developed and investigated through the proposed control method. The results show that the designed controller has good ability to resist disturbance. Compared with the traditional PID control, its accommodation time is shorter, and the control effect is much better.

Key words underground space, predictive control, fuzzy control, air-conditioning system

Received 17 March 2015, revised 03 June 2015.

* The project supported by Military 2110 Leading Academic Discipline Project (20130013) and the Pre - Research Foundation of PLA University of Science and Technology of China (FYZCJJ201502)

[†] Corresponding author E-mail: wrh@893.com.cn