

洁净室温湿度控制算法研究

赵 钢¹, 张盼盼¹

(1. 天津理工大学天津市复杂控制理论与应用重点实验室, 天津 300384)

摘 要:通常洁净室温湿度系统具有大时滞、时变及耦合性,难以建立精确数学模型.本文针对某洁净制药车间的温湿度控制,采用了前馈补偿器,模糊PID控制与改进型Smith预估补偿算法相结合的控制方案,提高温湿度实时控制性能.仿真结果表明,该方案解决了温湿度系统耦合问题,提高了温湿度控制精度,获得较好的控制效果.

关键词:温湿度耦合;解耦;前馈补偿;模糊PID控制;Smith预估补偿

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)03-0435-06

洁净室技术广泛应用于半导体制造、食品生产、生物制药等对生产环境有严格要求的领域.其中洁净室的温湿度是衡量室内环境能否用于正常生产运行的一个重要指标.洁净室温湿度系统是一个大时滞、时变、强耦合系统,且难以建立精确数学模型.现阶段净化空调控制系统大多数仍采用传统的PID控制技术.PID控制稳定性好,但对于工况及环境变化的适应性差,且对大时滞、强耦合控制对象的控制效果不理想^[1].本文对某制药厂净化空调控制系统进行分析,研某制药厂净化空调控制系统进行分析研究.为达到制药车间温湿度精确控制的要求,设计了前馈补偿器解除温湿度之间的耦合,并在此基础上,采用PID控制、模糊控制、改进型Smith预估补偿算法相结合的控制策略,综合三者控制优势,研究温湿度系统的控制性能.

1 净化空调控制系统简介

图1所示为该制药厂净化空调系统,其组成包括初效过滤器、中效过滤器、高效过滤器三级过滤系

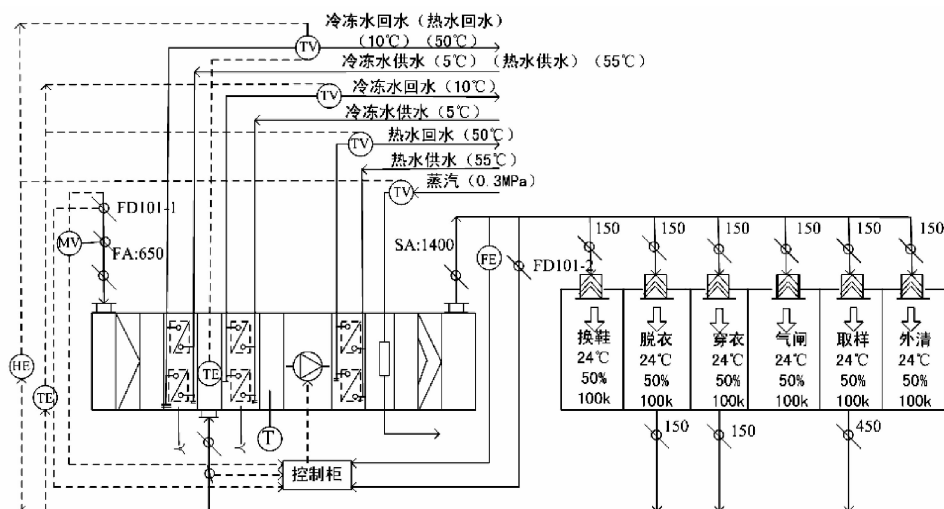


图1 洁净室净化空调系统图

Fig.1 Clean-room air conditioning system

收稿日期:2012-02-22 修改稿日期:2012-05-03

作者简介:赵 钢(1962-),男,天津市人,副教授,硕士生导师,主要从事电力电子,计算机控制等研究.

统,一级表冷器、二级表冷器、加热器、加湿器以及变频风机等环节。图中 TV 为电动调节阀,HE 为相对湿度传感器,TE 为温度传感器。该系统使用一次回风,采用定风量定露点自动控制方式。其特点是送风量不变,通过改变送风温、湿度来满足室内负荷变化的需要。

在图 1 中,控制系统根据温湿度信号,通过调节相应的电动调节阀开度,控制室内温湿度。由于气候及天气变化等因素,净化空调系统运行模式有夏季模式和冬季模式。本文以夏季运行模式为例进行分析研究。夏季相对湿度较高,当回风相对湿度大于 55% 时对新风进行降温除湿。经过降温除湿后,为达到室内温湿度要求,需要进行相应的热湿补偿。但是补偿过程

中温度的升高会引起相对湿度的降低,相对湿度的变化也会引起温度的波动^[2],即存在耦合作用。为达到洁净室气温湿度的精确控制,需对温湿度耦合系统进行分析研究。

2 洁净室温湿度耦合系统研究

夏季运行模式时,定露点净化空调控制系统,通过降温除湿,加热、加湿补偿过程实现洁净室气温湿度的调节。温湿度的调节过程存在耦合作用,相互影响。采用不同的湿度补偿方式,对温度的影响程度不同,有等温加湿,等焓加湿等。用干式蒸汽加湿器或电加湿器等加湿,喷入蒸汽温度为 100℃ 左右,可认为该状态变化为等温过程,忽略加湿过程对温度的影响^[3]。为简化控制,本文采用等温加湿方式。在加热过程中,温度的升高会引起相对湿度的降低,一般温度每上升 1℃,相对湿度下降 2%~3% (Relative humidity, RH)^[4],这种耦合影响不可忽略。综上分析,在洁净室温湿度系统中,耦合通道存在一条,即温度对相对湿度的影响,控制原理示意图如图 2。

由于被控量之间存在耦合,会明显地降低系统的控制精度和可靠性,为了得到满意的控制效果,需要对温湿度系统进行解耦。本文的解耦方案为设计前馈补偿器,前馈补偿解耦是多变量解耦控制的常用方法。该方法原理和结构简单,易于实现,温湿度解耦控制框图如图 3^[5-6]。

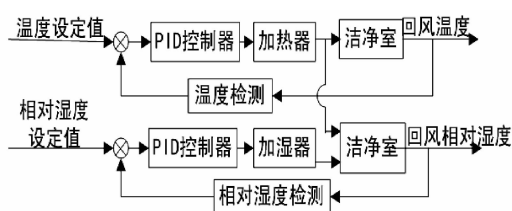


图 2 温湿度耦合示意框图

Fig. 2 Coupling of temperature with humidity

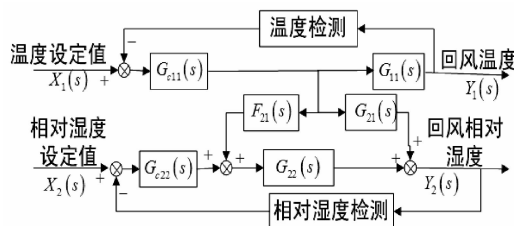


图 3 温湿度前馈解耦控制框图

Fig. 3 Feed-forward decoupling control

由图 3 得到 $Y_2(s)$ 输出如式(1) 所示(耦合通道视为扰动通道):

$$Y_2(s) = X_2(s)G_{c22}(s)G_{22}(s) + X_1(s)G_{c11}(s)[F_{21}(s)G_{22}(s) + G_{21}(s)] \quad (1)$$

要实现系统解耦,即使 $Y_2(s)$ 不受 $X_1(s)$ 作用的影响,从上式得到前馈补偿器如式(2)。利用该式可实现系统完全解耦,解耦后的系统成为独立的单回路控制系统。为达到温湿度精确控制的目的,除对系统进行解耦外,还需对解耦后系统的控制算法进行分析研究。

$$F_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (2)$$

3 温湿度控制策略分析研究

洁净室温湿度系统具有大时滞性、时变性,难以建立精确数学模型,且对温湿度的控制精度要求严格。在中央空调控制系统中,PID 控制器是应用最广泛的一类控制器,稳定性好,工作可靠,其局限性在于要求建立被控对象精确的数学模型,对于大时滞、时变系统,控制效果不能满足要求,且对工况及环境的变化适应性差,一组整定好的 PID 参数不能满足系统要求^[7]。模糊控制,适用于解决非线性、时变性问题,不需要知道被控对象的精确数学模型,由模糊控制规则,能根据变化实时地进行在线自动调整控

制器参数,不足之处是缺乏对具有较大纯滞后时间对象的控制能力^[8]. Smith 预估控制算法是克服大时滞过程的有效控制策略之一^[9],其局限性是太过于依赖精确的数学模型,当估计模型与实际对象匹配较差时,系统的控制品质会变差,而且对外部扰动也非常敏感,鲁棒性较差,针对这个问题,国内外许多学者提出了各种改进方案,C. C. Hang 等人提出了如图4中所示的改进型 Smith 预估器.因此本文将 PID 控制、模糊控制、改进型 Smith 预估补偿算法相结合,如图4所示,使控制系统兼顾三者优点,提高温湿度系统的控制性能.

4 控制策略仿真分析研究

一般而言,建立过程的数学模型有两种基本方法,机理分析建模法和系统辨识法.机理分析建模法适用于较简单的系统,并且对系统的机理要有清楚的了解,对于比较复杂的实际系统,这种建模方法有很大的局限性.系统的输入输出一般总是可以测量的,系统的动态特性必然表现于这些输入输出数据中,系统辨识法可以利用这些输入输出数据提供的信息来建立系统的数学模型.与机理分析建模法相比,系统辨识法的优点是不需要深入了解系统的机理,不足之处是必须设计一个合理的试验以获取所需要的大量信息.

鉴于这两种建模方法的优缺点,文中将这两种建模方法相结合.根据文献[10]中的机理建模法及相关工程运行经验,确定加热器调节阀-洁净室回风温度($G_{11}(s)$)、加湿器调节阀-洁净室回风相对湿度($G_{22}(s)$)、加热器调节阀-洁净室回风相对湿度($G_{21}(s)$)为二阶系统模型.对该洁净室采集记录执行器阀门开度和相应的回风温湿度值,采样周期为10s.辨识温度系统模型参数时,采集记录加热器阀门开度和回风相应的温度值.辨识相对湿度系统模型参数时,在温度不变的条件下,采集记录加湿器阀门开度和回风相应的相对湿度值.辨识温度对相对湿度耦合作用的模型参数时,需要在加湿器阀门开度不变的条件下,采集记录温度变化时,相对湿度的变化值.根据记录的输入输出数据,利用 MATLAB/Simulink 的 System Identification tool,采用最小二乘递推算法,建立 ARX 模型.这三个数学模型参数辨识和模型检验方法类似,如图5(a)、(b)所示的温度系统辨识模型检验情况^[11].检验结果分析表明这三个模型的可靠性都较高,经过 tustin 线性双变换,得到被控对象的传递函数如式(3)、(4)、(5).

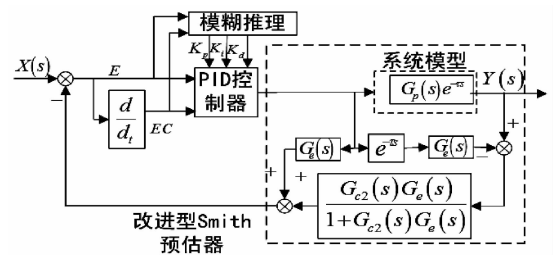
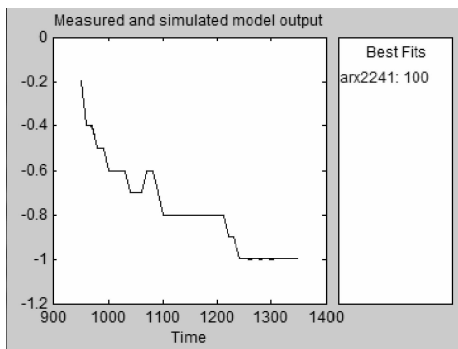


图4 Fuzzy PID-Smith 系统控制框图

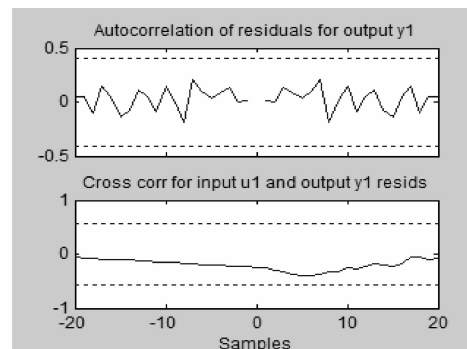
Fig. 4 Fuzzy PID-Smith system control



(a) Model fitting result

图5(a) 模型拟合曲线图

Fig. 5(a) Model fitting result



(b) Model residual test

图5(b) 模型残差检验图

Fig. 5(b) Model residual test

$$G_{11}(s) = \frac{14.7}{2 \ 143.07s^2 + 526.8s + 1} e^{-380s} \quad (3)$$

$$G_{22}(s) = \frac{3.74}{1 \ 345.68s^2 + 135.4s + 1} e^{-360s} \quad (4)$$

$$G_{21}(s) = \frac{-4.38}{1 \ 567.02s^2 + 405.7s + 1} e^{-370s} \quad (5)$$

对该耦合系统进行前馈补偿解耦,在此基础上采用PID-Smith控制策略时,其仿真结果如图6所示.图中1为温度曲线,2为相对湿度曲线.在图6中可以看出,温度、相对湿度的超调量较大,动态调节性能较差,PID-Smith控制不能满足室内温湿度控制的要求.

为了解决常规PID-Smith控制在温湿度系统中的不足,改善系统调节的动态性能,将FuzzyPID-Smith控制策略应用于解耦系统中,系统仿真如图7,其仿真结果如图8.由图8可以看

出,前馈解耦、FuzzyPID-Smith相结合的控制方案,消除了温度对相对湿度的耦合影响,系统调节时间明显减少,超调量也明显减小,优化了系统响应的动、静态性能,达到了比较理想的控制效果^[12].

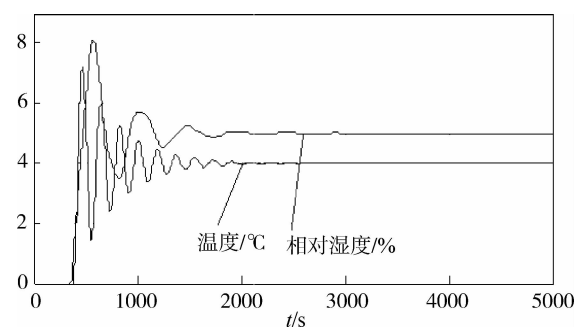


图6 解耦系统PID-Smith仿真结果图

Fig. 6 Simulation result of PID-Smith decoupling system

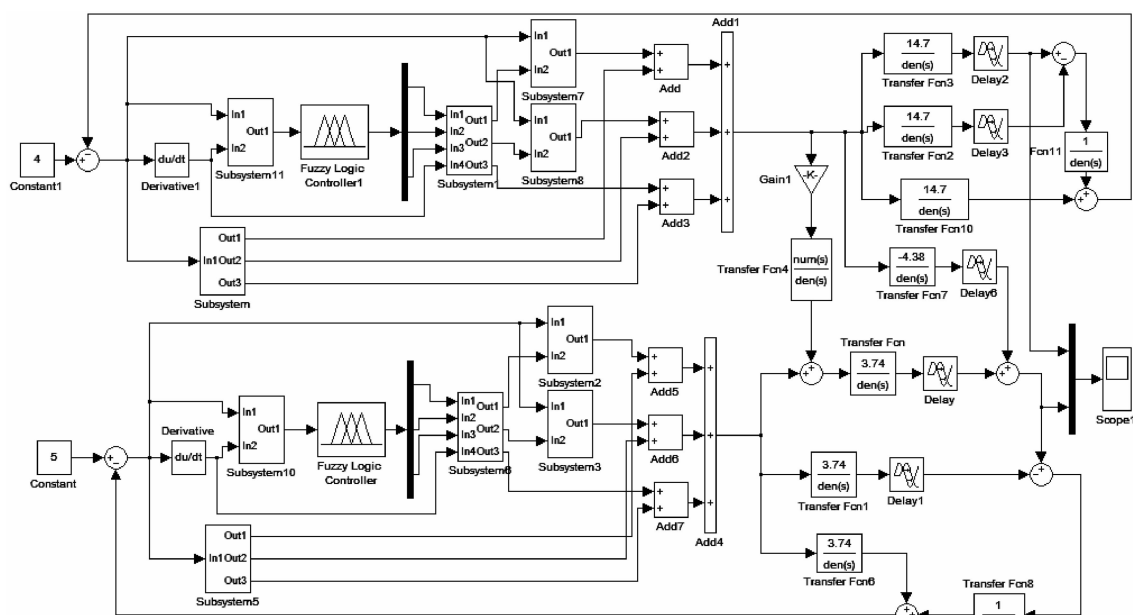


图7 解耦系统FuzzyPID-Smith仿真图

Fig. 7 Simulation of Fuzzy PID-Smith decoupling system

由于洁净室的温湿度系统是个时变控制系统,天气变化、工作人员及洁净室系统等因素对室内空气造成扰动,使被控对象发生变化.温度的变化也会引起相对湿度的变化,因此选取温度对象,对其进行下面的研究,加随机扰动,改变参数,将预估器的 $\tau=360$ 该为 $\tau=330$,二阶系统中的 $2143.07s^2$ 该为 $4143.07s^2$,通过仿真手段,分析研究三种情况FuzzyPID-Smith控制策略是否具有可行性.仿真结果如图9~11,可以看出温湿度曲线(对比图8)几乎没有发生变化,系统抗干扰能力强,鲁棒性好.

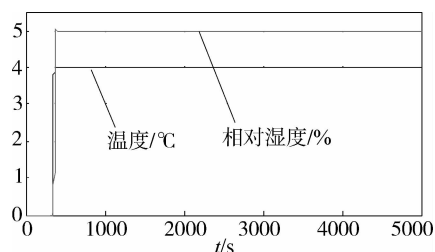


图8 解耦系统FuzzyPID-Smith仿真结果图

Fig. 8 Simulation result of Fuzzy PID-Smith decoupling system

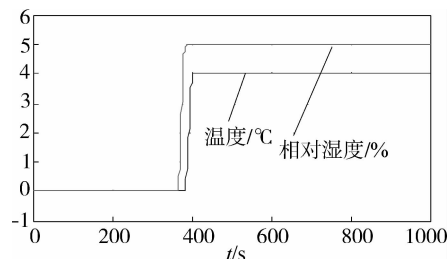


图9 改变参数 τ 仿真结果图

Fig. 9 Simulation result of parameter τ change

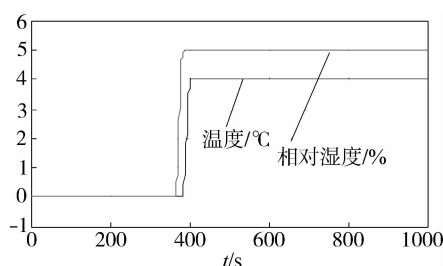


图10 改变二阶系统仿真结果图

Fig. 10 Simulation result of second order system change

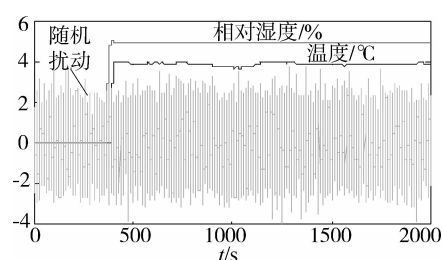


图11 加随机扰动仿真结果图

Fig. 11 Simulation result of random

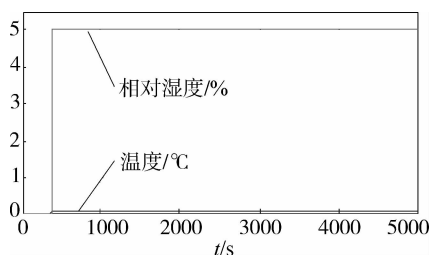
图8所示仿真结果,为回风温度需要增加 4°C ,相对湿度需要增加5个单位(%)时的情况.随着回风温度的升高,当回风温度需要增加 0.1°C ,相对湿度仍然需要增加5%时,采用图5所示控制系统,其仿真结果如图12所示.可以看出温度回路控制系统具有较稳定的、快速的实时调节特性,而且几乎没有对相对湿度造成影响,FuzzyPID-Smith控制的适应能力强,能在较大范围内保证系统的控制精度,同时具有较好的动、静态性能.

5 结 语

前馈解耦补偿器能较好地解决耦合问题,在前馈解耦基础上,将模糊PID控制及Smith预估补偿控制算法相结合,应用于洁净室温湿度控制系统,解决了常规PID控制器用于大时滞、时变性、难以建立精确数学模型系统中的不足.仿真结果表明,Fuzz PID-Smith控制方案使温湿度系统稳定性较好,调节过程的动态性能、鲁棒性、实时控制性能得到改善和提高,提高并保证了洁净室温湿度的控制精度,获得了较好的控制效果.这种控制方案具有可行性.

图12 回风温度变化仿真结果图

Fig. 12 Simulation result of return air temperature and humidity



参考文献 References

- [1] 马 福. 洁净中央空调系统温湿度控制及其节能的研究与实现[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008:21-26.
MA Fu. Temperature and Humidity Control of Clean Central Air-Conditioning System & Energy-saving Research and Implementation[D]. Xi'an: Xi'an University of architecture and technology,2008:21-26.
- [2] 尚 辉. 某检察院中央空调温湿度模糊解耦控制[D]. 西安:西安建筑科技大学,2009:11-12.
SHANG Hui. Study on Fuzzy Decoupling Control of Temperature and Humidity of Air Conditioning System for a Procuracy[D]. Xi'an:Xi'an University of architecture and technology,2009,6:11-12.
- [3] 郭阳宽,王正林. 过程控制工程及仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2009:247-261.
GUO Yang-kuan,WANG Zhen-lin. Process control engineering and simulation[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2009:247-261.
- [4] 陈 炜. 制药车间温湿度智能控制系统的设计及研究[D]. 长沙:中南大学,2008:32.
CHEN Wei. Design and research on temperature and humidity intelligent control system of pharmaceutical plant [D]. Changsha: Central South University:,2009,4:32.
- [5] 马利英. 洁净空调自控系统温湿度解耦控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008:14-19.
MA Li-ying. Study on Temperature and Humidity Decoupling Control for CC&AC Control System[D]. Xi'an: Xi'an University of architecture and technology,2008:14-19.
- [6] 李 超. 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(12):55-58.
LI Chao. Application of feed-forward decoupling controller in the constant temperature and humidity in the air conditioning control system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2006(12):55-58.
- [7] SOYGUDER S, KARAKOSE M, ALLI H. Design and Simulation of Self-turning PID-type Fuzzy Adaptive Control for an Expert HVAC System[J]. Expert Systems with Applications, 2007,10(16):125-129.
- [8] 林 辉,常继彬. 基于PID控制的温度大滞后系统算法研究[J]. 甘肃科学学报,2011(3):118-121.
LIN Hui,CHANG Ji-bin. Study on large time delay temperature system based on PID control Algorithm[J]. Jour-

- nal of Gansu Science, 2011(3):118-121.
- [9] 范传柱, 李振璧. 模糊 Smith 预估控制空调系统温度的研究[J]. 煤矿现代化, 2009(1):61-62.
FAN Chuan-zhu, LI Zhen-bi. Study on Fuzzy Smith predictor control of air-conditioning temperature system[J]. Coal Mine Modernization, 2009(1):61-62.
- [10] 周文杰. 洁净空调温湿度控制系统的机理建模研究[J]. 化学工程与设备, 2012(2):53-58.
ZHOU Wen-jie. Study on mechanism model of the clean air-conditioning control system of temperature and humidity[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2012(2):53-58.
- [11] TASHTOUSH ET AL B. Dynamic model of an HVAV system for control analysis[J]. Energy, 2005, 30: 1729-1745.
- [12] 张晓群. 基于 Fuzzy-PID 智能车舵机控制系统[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011, 43(2):301-304.
ZHANG Xiao-qun. Intelligent car steering gear control system based on Fuzzy-PID[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 43(2):301-304.

Study on clean-room temperature and humidity control algorithm

ZHAO Gang¹, ZHANG Pan-pan¹

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated System,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In normal conditions the temperature and humidity system of clean-room has the characteristics of large time delay, time-varying, making coupling and accurate mathematic model hard to establish. To control the temperature and humidity of clean pharmaceutical workshop, this paper presented a control scheme that combined feed-forward compensation, Fuzzy PID and modified Smith pre-evaluation compensation to improve the system real-time performance of temperature and humidity. Simulation results show the scheme solves the coupling problem of temperature and humidity system, improves the control accuracy, and obtains better control quality.

Key words: temperature and humidity coupling; decoupling; feed-forward compensating; Fuzzy-PID control; Smith pre-evaluation compensation

Biography: ZHAO Gang, Associate Professor, Tianjin 300384, P. R. China, Tel:0086-13821327256, E-mail:zg_tj@yeah.net

(上接第 419 页)

Comparative research on the categories and typical features of Kaiping *diaolou*

ZHANG Wan-sheng¹, ZHOU Hong¹, LIANG Jin-qiao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;
2. Kaiping Administration of Cultural Heritage, Kaiping 529300, China)

Abstract: Research on the categories of Kaiping *diaolou* according to its functions as defense, refugee form floods and residence is focused on the analysis of the elevations, floor plans, size, height and defense works of the *diaolou* structure, as well as the differences and similarities of different types of *diaolou*.

Key words: kaiping *diaolou*; categories; architectural features; functions

Biography: ZHANG Wan-sheng, Lecturer, Master, Jiangmen 529020, P. R. China, Tel:0086-13822416165, E-mail:87535652@qq.com