

WSN 节点温室环境试验系统的预测解耦控制*

张荣标 褚夫环 黄贤林 沈 敏

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 针对无线传感网络(WSN)节点温室环境模拟试验系统中温湿度的强耦合特性,提出了一种基于动态矩阵控制算法的自适应解耦方法。通过前馈补偿措施消除温度和湿度通道间的相互影响,设计一种基于加权方式的自适应解耦算法,实现了不同工况下耦合参数的在线调整,从而有效克服了模型严重失配对控制精度的影响。仿真和试验结果表明,该自适应预测解耦方法与传统PID控制算法相比,大大提高了系统的控制性能。

关键词: 温室 温湿度控制 动态解耦 动态矩阵控制 自适应算法 无线传感网络

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)01-0192-05

Predictive Decoupled Control of WSN Nodes Greenhouse Environment Simulation Experimental System

Zhang Rongbiao Chu Fuhuan Huang Xianlin Shen Min

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In view of the strong coupling between temperature and relative humidity in the greenhouse simulation system, an adaptive decoupling method based on dynamic matrix control was proposed. Taking the measure of feedforward compensation to eliminate interaction between channels of temperature and humidity, an adaptive decoupling algorithm by weighting was designed. The proposed method can adjust the decoupling parameters online under different operating modes, effectively overcome the effect of model severe mismatch to control accuracy. Compared with the traditional PID control, simulation and experimental results both indicated the proposed strategy greatly improved the control performance.

Key words Greenhouse, Temperature and humidity control, Dynamic decoupling, Dynamic matrix control, Adaptive algorithm, Wireless sensor network

引言

WSN 具有部署灵活、成本低廉等优势,在温室中得到了广泛应用^[1~3]。WSN 节点包括汇聚节点和传感器节点,其硬件主要由单片机和传感器等元件构成。温室的高温、高湿环境会破坏元件表面层,使元件产生绝缘击穿和电阻值改变等^[4],尤其是在温度和湿度的某个临界点,节点性能会发生关键性的变化。因此,开发一种具有较高控制精度的温室温湿度环境模拟系统具有重要的现实意义。目前,与温室环境模拟系统类似的产品有人工气候箱等,

这些产品中高精度设备主要依赖进口,价格昂贵。文献[5]和[6]利用模糊控制的方法提高了温湿度控制精度,但参数的确定需要一定的人工经验,只能实现粗略的解耦。文献[7]采用混合智能控制,在稳定性方面使温度和湿度都达到了较高的控制精度。Carlos R G 等^[8]在理论上利用非交互控制的方法实现温湿度的完全动态解耦,但很难在工程上实现。

针对温湿度的大滞后、强耦合和时变等特性,本文在传统动态矩阵控制^[9](dynamic matrix control, 简称 DMC)的基础上自主研发一套具有高控制精度

收稿日期: 2011-02-14 修回日期: 2011-03-27

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z258)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 张荣标,教授,博士生导师,主要从事无线传感网络与智能检测技术研究,E-mail: zrb@ujs.edu.cn

且成本较低的 WSN 节点温室环境试验系统。以不同工况下温湿度的动态解耦^[10]为研究重点,在传统单变量 DMC 的基础上,提出自适应 DMC 解耦控制策略。

1 系统构成与工作原理

试验系统结构图如图 1 所示,该系统主要由控制器、执行机构、模拟试验箱和温湿度测量装置组成。控制器由温度通道的加热 DMC 模块和制冷 DMC 模块,湿度通道的加湿 DMC 模块和除湿 DMC 模块,以及两通道间的自适应解耦模块组成。执行机构包括 4 部分:由 PWM 控制加热功率的加热器、高效自动加湿的超声波加湿器、压缩机制冷器和以半导体制冷片为核心的除湿器。模拟试验箱为密闭保温箱,内部安装了促进箱内温湿度均匀分布的风扇。温度传感器采用具有较宽线性工作范围的 LM35,其工作精度较高;湿度传感器使用 Honeywell 公司的 HIH4010-3,无需二次校准。

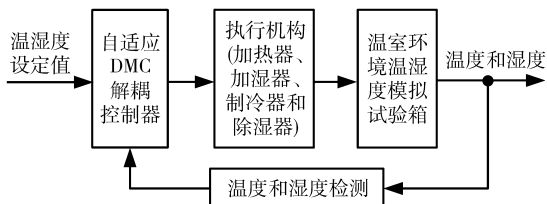


图 1 温室环境试验系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of greenhouse environment experimental system

为了消除温湿度通道间的交互影响,自适应 DMC 解耦控制器根据温湿度的实测值和设定值,利用前馈补偿的思想,将耦合系统分解成 2 个独立的 SISO 系统,从而可以利用单变量 DMC 算法求出相应执行机构的控制量,实现对温湿度的控制。温度和湿度之间的 DMC 解耦算法是建立在单变量 DMC 算法基础上的。4 个 DMC 模块经过解耦后,均可以按照传统单变量 DMC 的方法进行设计。4 个 DMC 模块的设计方法类似,以加热 DMC 模块和加湿 DMC 模块为例。加热器工作原理为:采用 PWM 方式实现对 AC220V 加热器的功率调节。利用加热器控制信号的占空比与加热器功率之间的函数关系,通过调节占空比实现对加热器加热功率的精确控制。传统加湿采用加热使水分蒸发的方式,这种方式加湿强度不易控制且能耗较大。本文采用超声波加湿方式,由超声波驱动换能片将液态水直接转化为细雾,实时性好、控制精度较高且能耗低。控制器通过调节输出电流实现对换能片的控制,达到高效调节加湿强度的目的。

2 自适应 DMC 解耦算法

2.1 DMC 解耦算法

加热 DMC 模块和加湿 DMC 模块的设计步骤如下:

(1) 根据阶跃响应采样数据,计算系统预测模型输出值。

(2) 为降低干扰和模型误差等的影响,将系统的预测输出值用预测模型输出和实际输出的误差进行修正。

(3) 由二次型性能指标确定最优控制律,求出执行机构控制增量,进而求出即时控制量。

本试验系统是一个双输入双输出的温湿度耦合系统,如图 2 所示。 T_{sp} 和 H_{sp} 分别代表温度和相对湿度的设定值; ΔU_1 为通道 1 (温度通道) 的控制增量, ΔU_2 为通道 2 (湿度通道) 的控制增量; A_{ij} ($i, j = 1, 2$) 表示通道 j 对通道 i 的耦合阶跃模型; y_T 和 y_H 表示实际的温湿度值。加热 DMC 算法和加湿 DMC 算法均按照单变量 DMC 的原理进行设计。对于两个通道之间的耦合,采用前馈补偿的方法,耦合关系式^[10]为

$$\begin{cases} \Delta U_1(k) = (A_{11}^T Q_1 A_{11} + \lambda_1)^{-1} A_{11}^T [Y_{1r}(k+1) - A_{11} U_1(k-1) - A_{12} U_2(k-1) - A_{12} \Delta U_2(k) - h_1 e_1(k)] \\ \Delta U_2(k) = (A_{22}^T Q_2 A_{22} + \lambda_2)^{-1} A_{22}^T [Y_{2r}(k+1) - A_{22} U_2(k-1) - A_{21} U_1(k-1) - A_{21} \Delta U_1(k) - h_2 e_2(k)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 Q_1, Q_2 ——误差权矩阵

λ_1, λ_2 ——控制权矩阵

$Y_{1r}(k+1), Y_{2r}(k+1)$ ——输入参考轨迹

h_1, h_2 ——输出反馈误差校正矢量

$e_1(k), e_2(k)$ ——实际输出误差

$$\text{令} \begin{cases} T_1 = (A_{11}^T Q_1 A_{11} + \lambda_1)^{-1} A_{11}^T \\ T_2 = (A_{22}^T Q_2 A_{22} + \lambda_2)^{-1} A_{22}^T \\ H_1 = Y_{1r}(k+1) - A_{11} U_1(k-1) - A_{12} U_2(k-1) - h_1 e_1(k) \\ H_2 = Y_{2r}(k+1) - A_{22} U_2(k-1) - A_{21} U_1(k-1) - h_2 e_2(k) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),并进行求解,可以计算出 ΔU_1 和 ΔU_2

$$\begin{cases} \Delta U_1(k) = [I_1 - T_1 A_{12} T_2 A_{21}]^{-1} [T_1 H_1 - T_1 A_{12} T_2 H_2] \\ \Delta U_2(k) = [I_2 - T_2 A_{21} T_1 A_{12}]^{-1} [T_2 H_2 - T_2 A_{21} T_1 H_1] \end{cases} \quad (3)$$

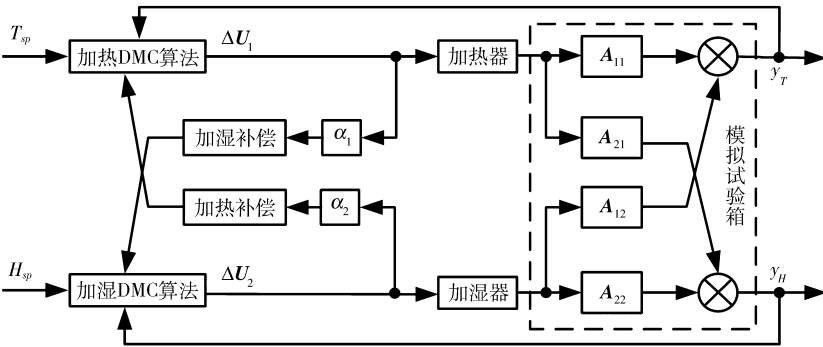


图2 系统自适应 DMC 解耦原理图

Fig.2 Decoupling principle based on adaptive DMC

式中, ΔU_1 和 ΔU_2 不再存在交叉耦合。最终可由

$$U_i(k) = U_i(k-1) + \Delta U_i(k)$$

计算出执行机构控制量 U_1 和 U_2 的值。

2.2 自适应 DMC 算法

在试验中发现,当温湿度工况差异较大时,固定的 DMC 参数会使温湿度的稳定值无法达到设定值。这是因为温湿度的设定值改变后,温湿度模型也发生了改变,从而导致了预测模型和实际模型的模型失配。如果依然使用固定的解耦参数进行控制,当模型失配比较严重时,就会造成控制准确性严重降低。为了防止因工况不同造成这种现象的发生,在传统 DMC 解耦算法的基础上,融入了自适应算法。式(3)通过加权处理可得

$$\begin{cases} \Delta U_1(k) = [I_1 - T_1(\alpha_2 A_{12})T_2 A_{21}]^{-1} \cdot \\ \quad [T_1 H_1 - T_1(\alpha_2 A_{12})T_2 H_2] \\ \Delta U_2(k) = [I_2 - T_2(\alpha_1 A_{21})T_1 A_{12}]^{-1} \cdot \\ \quad [T_2 H_2 - T_2(\alpha_1 A_{21})T_1 H_1] \end{cases} \quad (4)$$

可以通过实时调节解耦因子 α_1 和 α_2 的值,实现不同工况下的解耦。以加热为例,具体调节方法为:如果 $e_T > 0$,并且 $\frac{de_T}{dt} \geq 0$,则 α_2 增;如果 $e_T > 0$,并且 $\frac{de_T}{dt} < 0$,则 α_2 减。其中 $e_T = T_{sp} - y_T$, e_T 为温度误差。

α_2 减表示 α_2 在上次值基础上递减 0.1, α_2 增则表示递增 0.1。 α_2 初值为 1,取值范围为 $0 \leq \alpha_2 \leq 2$,当自增到最大值时,若仍然满足自增条件,则不再自增。同样,当 α_2 自减到最小值时,则不再减小。

对本文提出的自适应 DMC 解耦控制算法的计算流程,描述如下:

- (1) 设定 T_{sp} 和 H_{sp} , α_1 和 α_2 的初值均取 1。
- (2) 周期采样实际输出 y_T 和 y_H ,求出误差和相应的误差变化率。
- (3) 按自适应算法调整 α_1 和 α_2 。
- (4) 按式(4)求出 k 时刻的控制输出增量 $\Delta U_1(k)$ 和 $\Delta U_2(k)$ 。

- (5) 令 $k = k + 1$ 。如果 T_{sp} 和 H_{sp} 均不变,则转到步骤(2),否则转到步骤(1)。

3 温湿度解耦仿真分析

3.1 仿真模型的获取

分别在加热器和加湿器的输入端加阶跃信号,得到相应的阶跃响应曲线。根据阶跃响应辨识系统的传递函数^[11],得到加热和加湿的阶跃模型。

$$\begin{cases} A_{11} = \frac{12.81}{190.3s + 1} \\ A_{21} = \frac{-21.95}{25.14s + 1} \\ A_{12} = \frac{-1.093}{3.918s^2 + 5.31s + 1} \\ A_{22} = \frac{32}{10.32s^2 + 6.214s + 1} \end{cases} \quad (5)$$

3.2 解耦仿真对比

利用式(5)作为仿真模型,在 Matlab 7.0 平台下进行仿真对比试验。利用 Simulink 搭建 PID 控制系统, MPC 工具箱搭建 DMC 仿真系统。得到相同模型下各自的仿真响应曲线,如图 3 和图 4 所示。

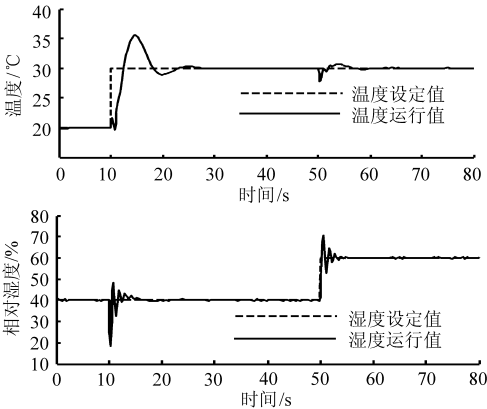


图3 PID 控制仿真曲线

Fig.3 Simulation curves of PID control

由图 3、图 4 和表 1 可知,采用自适应 DMC 解耦算法可以有效地减弱温度和湿度之间的动态耦合,同时消除静态耦合,稳态时温湿度不会产生振荡

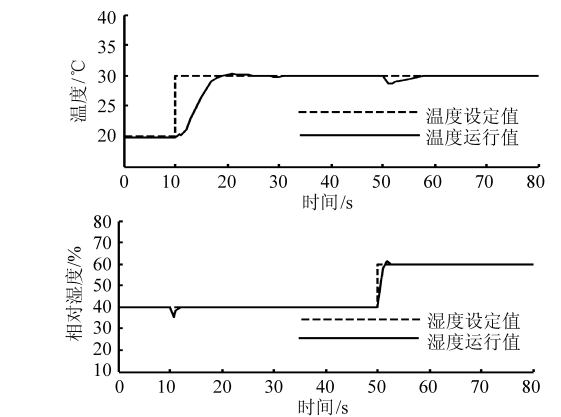


图 4 自适应 DMC 解耦算法仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of the proposed method

表 1 两种控制策略仿真性能对比					
Tab.1 Performance comparison between two control strategies					
设定值	性能指标	温度性能指标对比值		湿度性能指标对比值	
		PID 方法	DMC 方法	PID 方法	DMC 方法
湿度 40% ,温度设定值由 20℃ 变为 30℃	超调量/%	18.5	0.7	− 50	− 5.5
	调节时间/s	7.4	9.8	4.2	1.2
	波动范围	± 0.06℃	0	± 0.7%	0
温度 30℃ ,湿度设定值由 40% 变为 60%	超调量/%	− 7.3	− 3.7	17.5	1.7
	调节时间/s	0.8	1.6	1.8	2.1
	波动范围	± 0.05℃	0	± 0.4%	0

面,当温度和湿度稳定时,PID 控制的温度波动范围约为 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $\pm 4.8\%$ 。而自适应 DMC 算法的温度波动为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,湿度为 $\pm 0.5\%$ 。所以,在静态解耦方面自适应 DMC 解耦算法也存在很大的优势。

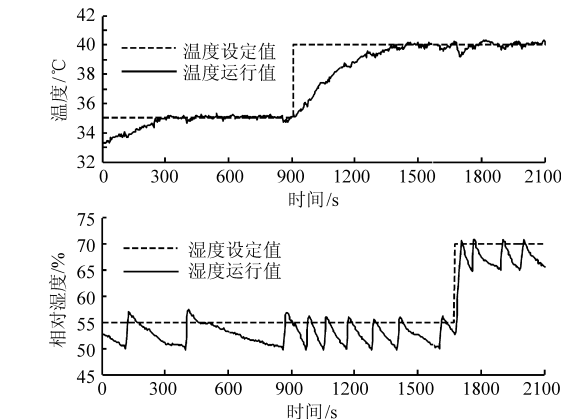


图 5 PID 控制运行曲线

Fig.5 Run curves of PID control

5 结束语

研究了温湿度之间的动态耦合特性,并提出了

现象。虽然自适应 DMC 算法调节时间有所增加,但超调很小,温度和湿度变化都比较平缓。

4 运行试验

在搭建的试验系统上,分别进行了 PID 试验和自适应 DMC 解耦试验。试验运行曲线如图 5、6 所示。从图中可以看出,PID 控制的温度和湿度的波动都较大,并且动态解耦性能较差。而自适应 DMC 方法虽然调节时间较大,但波动范围较小,鲁棒性较强,当温度或湿度其中一个量的设定值发生变化时,能够很好地保证另外一个量不受大的影响,从而有效地实现了两者之间的动态解耦。在静态解耦方

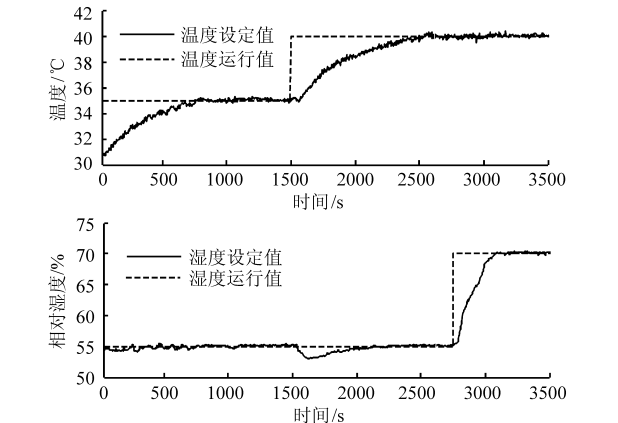


图 6 自适应 DMC 解耦算法运行曲线

Fig.6 Run curves of the proposed algorithms

易于工程实现的自适应 DMC 解耦控制策略。通过采用预测前馈补偿的方法消除两个通道间的交叉影响,实现了温度和湿度之间的动态和静态解耦。并利用自适应算法实现了解耦参数的在线优化,防止在不同工况下由于模型严重失配导致控制精度降低。与传统的 PID 控制方式相比,自适应 DMC 解耦算法拥有良好的动态解耦能力,其系统稳定性较高,鲁棒性较强,具有很好的自适应能力。

参 考 文 献

- 1 张潜,杨祥龙,郭希山,等. 低成本适用型温室环境测控系统[J]. 农业机械学报,2008,39(2):195~197.
- 2 郭文川,程寒杰,李瑞明,等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(7):181~185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):181~185. (in Chinese)
- 3 杨玮,吕科,张栋,等. 基于 ZigBee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. 农业工程学报,2010,26(3):198~202.
Yang Wei, Lü Ke, Zhang Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on ZigBee [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3):198~202. (in Chinese)
- 4 吴志勇. 环境试验箱变温工况的理论与实验研究[D]. 天津:天津商学院,2006.
- 5 庞全,杨翠容. 烟叶烘烤温湿度智能控制仪[J]. 仪器仪表学报,1999,20(3):296~299.
Pang Quan, Yang Cuirong. Research on intelligent temperature humidity controller for tobacco baking [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(3):296~299. (in Chinese)
- 6 彭勇刚,韦巍. 人工气候箱温湿度模糊控制[J]. 农业工程学报,2006,22(8):166~169.
Peng Yonggang, Wei Wei. Fuzzy control over temperature and humidity of artificial climate chest [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8):166~169. (in Chinese)
- 7 周国雄,熊达清,敬文举,等. 禽蛋孵化过程的混合智能控制[J]. 农业机械学报,2008,39(1):118~122.
Zhou Guoxiong, Xiong Daqing, Jing Wenju, et al. Hybrid intelligent control for incubation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):118~122. (in Chinese)
- 8 Carlos R G, Miguel V R. Decoupled control of temperature and relative humidity using a variable-air-volume HVAC system and non-interacting control[C] // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, Mexico City, Mexico, 2001: 1 147~1 151.
- 9 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- 10 牛玉祥,刘宏才. 预测补偿动态矩阵控制在电加热炉中的应用[J]. 北京科技大学学报,1994,16(3):283~288.
Niu Yuxiang, Liu Hongcai. Application of prediction compensation DMC in electrical heating furnace [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1994, 16(3):283~288. (in Chinese)
- 11 张东宝,张庚云. 基于阶跃响应曲线的系统传递函数辨识方法[J]. 中国科技博览,2009(36):207~208.