

龚瑞昆, 王 鹏, 王海平, 等. 基于前馈补偿算法的温室系统解耦控制[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1188-1193.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.05.035

基于前馈补偿算法的温室系统解耦控制

龚瑞昆, 王 鹏, 王海平, 周国庆

(华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 温室系统是一个复杂的系统, 系统中各变量间具有强耦合关系, 影响控制的精度和效率, 也使得对温室系统精确控制的难度增加, 所以在温湿度二维系统的基础上, 增加对 CO_2 浓度的考虑, 建立温室系统的三维数学模型。通过研究前馈补偿算法在三维系统中的应用, 对温室系统中的 3 个主要变量进行解耦, 利用 Matlab 建立温室系统数学模型, 然后进行仿真研究, 通过与仿真结果对比, 证实了前馈补偿算法应用于仿真系统的高效性和稳定性。

关键词: 温室; 前馈补偿; 解耦控制; 三维系统

中图分类号: S625.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)05-1188-06

Decoupling control system of greenhouse based on feedforward compensation algorithm

GONG Rui-kun, WANG Peng, WANG Hai-ping, ZHOU Guo-qing

(North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: The greenhouse system is a complex one in which the variables shows strong coupling relationships affecting the accuracy and efficiency of greenhouse controlling. A three-dimensional mathematical model of greenhouse system taking the concentration of CO_2 into consideration was established based on the two-dimensional system of temperature and humidity by using Matlab. Through applying the feedforward compensation algorithm in the three-dimensional system, the three main variables were decoupled and the simulation study was performed. The simulation results confirmed the high efficiency and stability of the decoupling by application of feedforward compensation algorithm in simulation system.

Key words: greenhouse; feedforward compensation; decoupling control; three-dimensional system

温室系统是一个复杂的大系统, 它具有时延性、非线性和多变量耦合等特点, 这给温室系统的精确控制造成了阻碍。当前关于温室系统控制的研究主要分 2 个方向展开, 分别是控制的深度和广度。

一个研究方向是针对控制的深度, 主要通过更新单变量控制的算法, 获得更精确的控制目标。目前的研究主要针对温度这一变量, 如通过研究模糊比例-积分-微分控制器(PID)来控制温室温度^[1-2], 或通过研究基于径向基函数(RBF)神经网络的 PID 控制, 使温度控制更加精确^[3]。夏爽等^[4]在 RBF 神经网络的基础上对粒子群算法(PSO)进行优化, 使温度的预测更加精准。这一研究主要解决了单一变量的时延性和非线性问题, 使温室系统单变量的控制效果得到很大提高, 但是没有考虑温室系统中的耦合性。

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271402)

作者简介: 龚瑞昆(1962-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 主要从事检测技术及智能装置的研究。(Tel) 13333251918; (E-mail) grk@ncst.edu.cn

通讯作者: 王 鹏, (Tel) 13662112582; (E-mail) 1124017334@qq.com

另一个研究方向是针对控制的广度,就是综合考虑温室中的多重变量,通过多变量解耦算法使相互耦合的变量解耦,从而精确控制系统中各单变量。例如,卢佩^[5]通过模糊控制对温度和湿度进行解耦,秦琳琳等^[6]通过灰色预测模型对温湿度进行仿真和控制。当前的温室系统多变量解耦控制大部分是针对温湿度间的耦合,在这一广度问题上没有进一步扩展,所以针对这一现状,本研究拟考虑温室系统中除温湿度外的其他变量,并在前馈补偿算法的基础上结合 PID 控制,以期对多变量进行解耦控制。

1 前馈补偿算法

温室系统是一个多变量耦合的系统,影响系统状态的变量包括温度、湿度、CO₂浓度、光照度等。综合分析,可将温室系统看作一个多维系统,有的研究者仅考虑温度和湿度这 2 个因素,将其看作一个二维系统进行解耦研究,通过前馈补偿的方式对温湿度二维系统进行解耦,解耦效果令人满意^[7]。但温室系统中 CO₂浓度对植物的生长也起着关键作用,应该对温室系统进行进一步研究,将温室系统看作一个三维耦合系统(图 1),其中 T 、 H 、 C 分别代表温度、湿度和 CO₂浓度的输入变量, Y_T 、 Y_H 、 Y_C 分别代表温度、湿度和 CO₂浓度的输出变量,其中, G_{ij} ($i=1,2,3, j=1,2,3$),代表温室系统三维等价模型的传递函数。

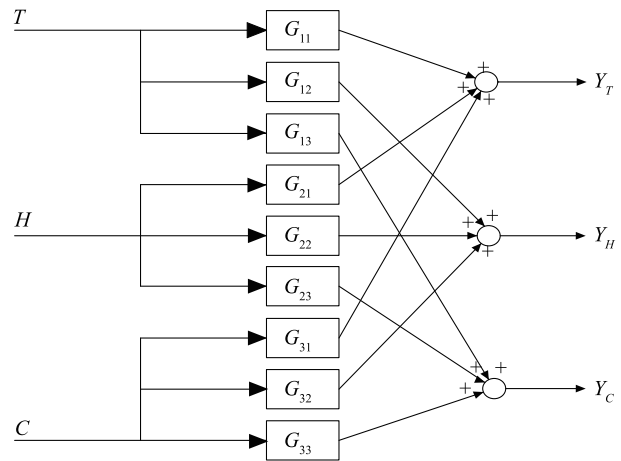


图 1 温室系统三维等效模型

Fig.1 Three dimensional equivalent model of greenhouse system

根据图 1 建立的等效矩阵方程,可以求得三维等效模型传递函数的矩阵,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ H \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_T \\ Y_H \\ Y_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

前馈补偿算法是采用在控制器前加入矫正装置以解除变量间耦合的方式进行解耦,将相互耦合的多个变量解耦成只与单一的输入和输出相关的单一变量,将其他变量的影响归零。根据这一原理,在图 1 的输入变量和传递函数之间加入前馈补偿装置的控制(图 2)。

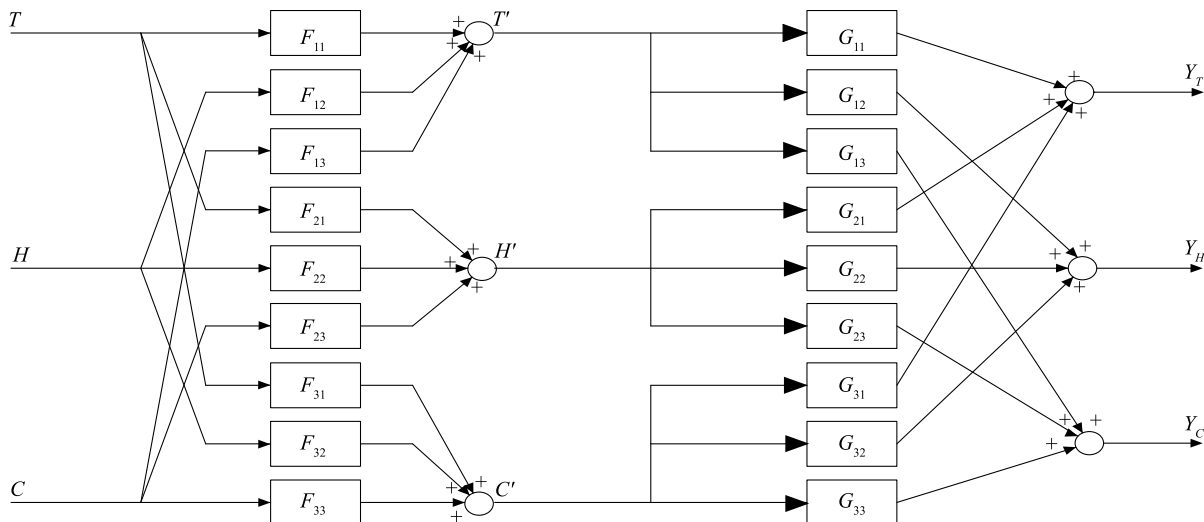


图 2 带前馈补偿的温室系统三维等效模型

Fig.2 Three dimensional equivalent model of greenhouse system with feedforward compensation

通过图 2 中各传递函数之间的逻辑关系,可以求出 T' 、 H' 、 C' (分别代表经过前馈补偿后的温度、湿度和 CO_2 浓度的输入变量修正量) 和 T 、 H 、 C 的关系方程, F_{ij} ($i=1,2,3, j=1,2,3$) 代表前馈补偿器的传递函数。矩阵形式如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ H \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T' \\ H' \\ C' \end{bmatrix} \quad (2)$$

图 2 显示, T' 是 T 经过前馈补偿器补偿后的新输入量, 所以 T 和 T' 之间的系数为 1, T 所产生的影响不变, 所以 $F_{11}=1$, 同理可得 $F_{22}=F_{33}=1$ 。

综合考虑式(1)和式(2)之间的关系, 将式(1)中的 T 、 H 和 C 3 个变量替换为 T' 、 H' 和 C' , 整理后得式(3)。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T' \\ H' \\ C' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_T \\ Y_H \\ Y_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)运算整理可得式(4)。

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T' \\ H' \\ C' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_T \\ Y_H \\ Y_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

P_{ij} ($i=1,2,3, j=1,2,3$), 代表在温室系统传递函数前加入前馈补偿器的新系统传递函数。为了消除变量之间的相互影响, 需要使矩阵非对角线上的数据为零, 于是得到式(5)。

$$\begin{cases} P_{12}=G_{11}F_{12}+G_{12}F_{22}+G_{13}F_{32}=0 \\ P_{13}=G_{11}F_{13}+G_{12}F_{23}+G_{13}F_{33}=0 \\ P_{21}=G_{21}F_{11}+G_{22}F_{21}+G_{23}F_{31}=0 \\ P_{23}=G_{21}F_{13}+G_{22}F_{23}+G_{23}F_{33}=0 \\ P_{31}=G_{31}F_{11}+G_{32}F_{21}+G_{33}F_{31}=0 \\ P_{32}=G_{31}F_{12}+G_{32}F_{22}+G_{33}F_{32}=0 \end{cases} \quad (5)$$

将 $F_{11}=F_{22}=F_{33}=1$ 带入式(5), 通过求解方程组可以得到前馈补偿控制器传递函数矩阵的各项值, 如式(6)所示。

2 温室系统三维等效模型的研究

针对温室系统中温湿度的二维等效模型, 文献[7]中已经提出了近似的模型传递函数矩阵, 其各项传递函数已经给出, $G_2(s)$ 表示二维系统的传递函数, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} F_{12} = \frac{G_{13}G_{32}-G_{12}G_{33}}{G_{11}G_{33}-G_{13}G_{31}} \\ F_{13} = \frac{G_{12}G_{23}-G_{13}G_{22}}{G_{23}G_{32}-G_{22}G_{33}} \\ F_{21} = \frac{G_{23}G_{31}-G_{21}G_{33}}{G_{22}G_{33}-G_{23}G_{32}} \\ F_{23} = \frac{G_{11}G_{23}-G_{13}G_{21}}{G_{12}G_{21}-G_{11}G_{22}} \\ F_{31} = \frac{G_{22}G_{31}-G_{21}G_{32}}{G_{23}G_{32}-G_{22}G_{33}} \\ F_{32} = \frac{G_{11}G_{32}-G_{12}G_{31}}{G_{13}G_{31}-G_{11}G_{33}} \end{cases} \quad (6)$$

$$G_2(s) = \begin{bmatrix} \frac{22.890}{4.572s+1.000}e^{-0.200s} & \frac{-11.640}{1.807s+1.000}e^{-0.400s} \\ \frac{4.870}{2.174s+1.000}e^{-0.200s} & \frac{5.800}{1.801s+1.000}e^{-0.400s} \end{bmatrix} \quad (7)$$

目前, 对考虑 CO_2 浓度的温室系统三维等效模型的研究还比较少, 为了建立三维系统的传递函数矩阵, 需要了解 CO_2 浓度自身的变化规律及其与温湿度的关系。 CO_2 浓度相对于时间的变化率如式(8)所示^[8]。

$$V \frac{dC_{in}(t)}{dt} = Q_{\text{CO}_2}(t-t_d) - [P_n(t) - r_0(t)]A_s - [C_{in}(t) - C_{out}(t)]\varphi \times V \quad (8)$$

其中, A_s 为温室面积 (m^2), V 为空间体积 (m^3), $Q_{\text{CO}_2}(t-t_d)$ 为从 t_d 时刻开始 CO_2 的施用量 (g/h), C_{in} 为室内 CO_2 浓度 (g/m^3), C_{out} 为室外 CO_2 浓度 (g/m^3), φ 为通风率, P_n 为净光合速率, r_0 为净呼吸速率。

对式(8)两边同时进行拉氏变换, 整理后得式(9)。其中, t_d 为 CO_2 开始施用的时间。

$$C_{in}(s) = \frac{\frac{Q_{\text{CO}_2}(s)}{\varphi} e^{-t_d} C_{out}(s) - [P_n(s) - r_0(s)] \frac{A_s}{V \times \varphi}}{\frac{1}{\varphi} s + 1} + \frac{1}{\frac{1}{\varphi} s + 1} \quad (9)$$

通过与一阶惯性环节的标准模型进行对比, 可以看出通过拉氏变换后的方程符合一阶惯性模型的形式, 在一阶惯性时滞系统中, K 、 T 、 τ 分别为控制系统的静态增益、时间常数和纯滞后时间, 将其分析整理后得到式(10)。

$$C_{in}(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_s + 1} + \frac{M(s)}{T_s + 1} \quad (10)$$

$$\text{式中, } K = \frac{Q_{CO_2}(s)}{\varphi}, \tau = t_d, T = \frac{1}{\varphi},$$

$$M(s) = C_{out}(s) - [P_n(s) - r_n(s)] \frac{A_s}{\varphi \times V}$$

考虑到空气中 CO_2 浓度的影响, CO_2 的施用量以 2.4 g/m^3 为佳, 故将 CO_2 施用量设为 $2.4 \text{ g/(m}^3 \cdot \text{h)}$ 。密闭温室不考虑漏气的情况下, 通风率以 $1 \text{ h } 0.5 \sim 1.0$ 次为佳, 取其中间值, 故将通风率设为 $1 \text{ h } 0.7$ 次。 CO_2 以气体的形式释放, 假设 CO_2 释放时没有延迟, 可以设 τ 为零。在理想状态下, 温室系统三维等效模型中 CO_2 浓度变化的近似模型如式(11)所示。

$$C_{in}(s) = \frac{3.4}{1.4s + 1.0} \quad (11)$$

在温室系统中, CO_2 浓度的变化仅对植物的生长有影响, 不会直接影响温湿度。但是温湿度的增加除了影响植物本身外, 还会使土壤中的细菌变得活跃, 从而影响温室内 CO_2 的浓度。温度变化主要受光照度和加热器的影响, 这 2 个因素同时增强, 会增加光合作用的效率, 消耗大量的 CO_2 , 假设温度和 CO_2 浓度成负相关, 即 $E_{CO_2}(T_{in}) = -\alpha T_{in}$ 。湿度增加, 间接导致室温下降, 所以假设湿度和 CO_2 浓度成正相关, 即 $E_{CO_2}(H_{in}) = \beta H_{in}$, 因为温湿度对 CO_2 浓度的影响很小, 取参数 $\alpha = \beta = 0.01$ 。

忽略系统延时环节的影响, 可以得到理想状态下的近似三维等效温室系统模型, 如式(12)所示。

$$G_3(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将原有二维系统模型的值和运算求得的 CO_2 浓度相关的变量值带入三维系统中可得式(13)。

$$G_3(s) = \begin{bmatrix} \frac{22.890}{4.572s+1.000} & \frac{-11.640}{1.807s+1.000} & \frac{-0.229}{4.572s+1.000} \\ \frac{4.869}{2.174s+1.000} & \frac{5.800}{1.801s+1.000} & \frac{0.058}{1.801s+1.000} \\ 0 & 0 & \frac{3.430}{1.430s+1.000} \end{bmatrix} \quad (13)$$

3 仿真与分析

已知温室系统的三维等效模型后, 通过系统的各项传递函数, 经过式(9)的运算, 可以求得前馈补偿装置的各项传递函数值, 如式(14)所示。

通过 Matlab 仿真模块, 建立温室系统的仿真模型, 将温度、湿度和 CO_2 浓度的输入信号设置为不同时间段带有波动的阶跃信号(图 3)。

$$\begin{cases} F_{12} = 11.640 \times \frac{0.200s+0.044}{1.807s+1.000} \\ F_{13} = -0.017 \times \frac{(s-0.808)(s+0.460)}{(s+0.400)(s+0.553)} \\ F_{21} = -4.869 \times \frac{0.311s+0.172}{2.174s+1.000} \\ F_{23} = -0.013 \times \frac{2.008s+1.000}{2.891s+1.000} \\ F_{31} = 0 \\ F_{32} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

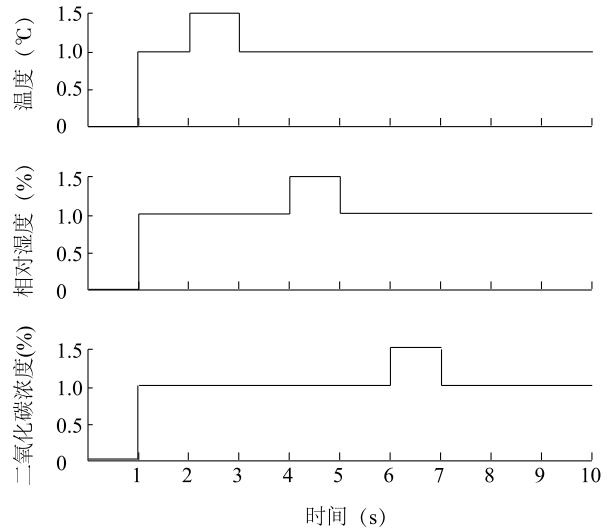


图 3 带有波动的阶跃信号

Fig.3 Step signal with fluctuation

温室系统三维等价模型加入前馈补偿时的温室系统仿真模型如图 4 显示, PID 控制器的参数设定为 $P=30, I=3, D=0$ 。在此设定下, 系统各项参数超调量小, 响应速度快, 能很好地满足系统要求。

以同样的信号分别输入到 2 个系统中, 无前馈补偿系统仿真的波形如图 5 显示, 带前馈补偿系统仿真的波形如图 6 显示。经过比较可以发现, 加入

前馈补偿后,系统仿真波形会更快地进入稳定状态,当系统遇到扰动时,加入前馈补偿系统的仿真波形稳定性更高,波形恢复稳定状态的时间更短。通过对温室系统的仿真,证明了前馈补偿算法不仅可以

解决二维系统的耦合问题,对三维系统也有很好的适用性,简单高效地实现了温室系统所要求的抗干扰性、鲁棒性和自适应性。

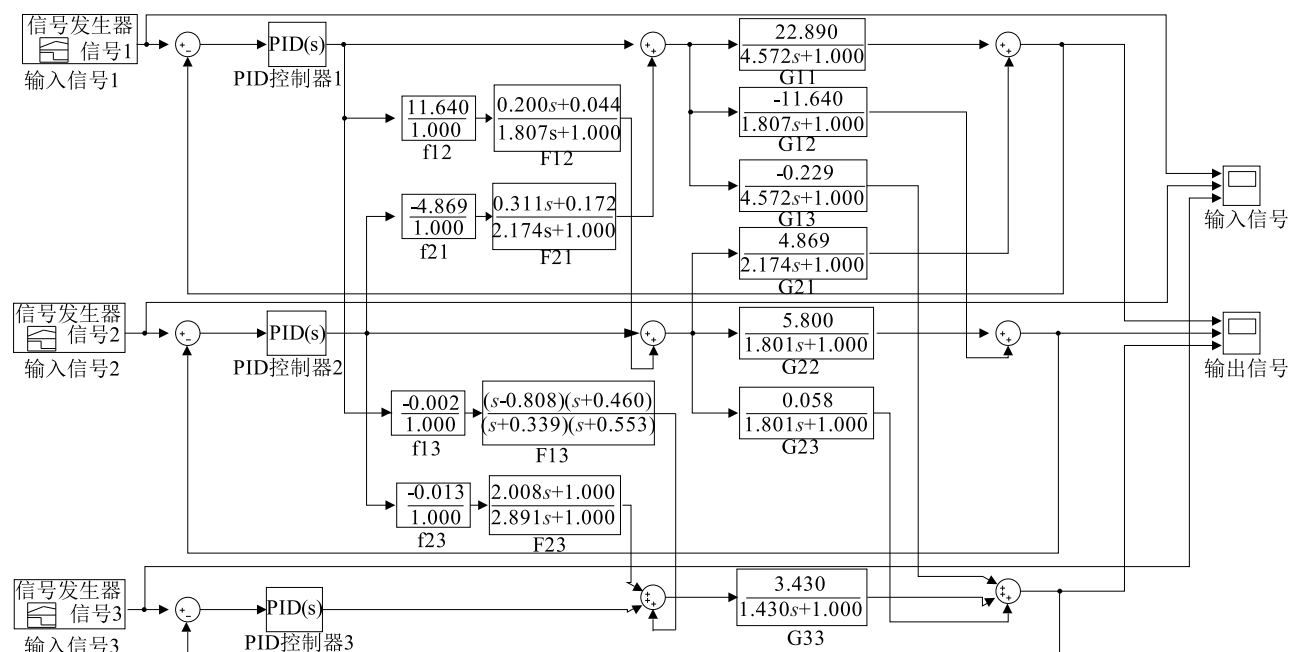


图 4 带前馈补偿的 PID 控制温室系统三维等价模型

Fig.4 Three dimensional equivalent model of PID-controlled greenhouse system with feedforward

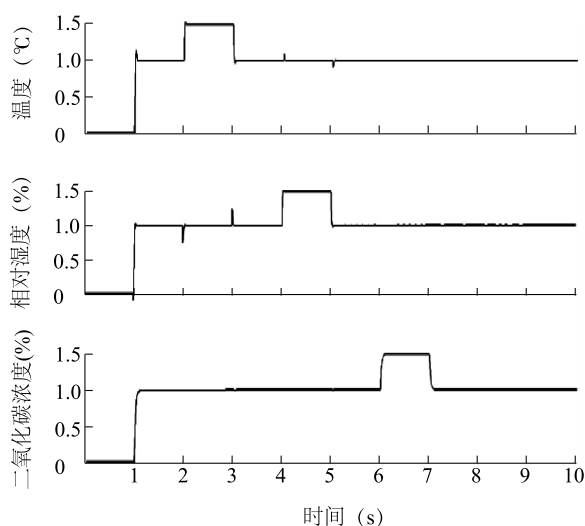


图 5 无前馈补偿系统的 PID 控制器系统仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of PID-controlled system without feedforward compensation

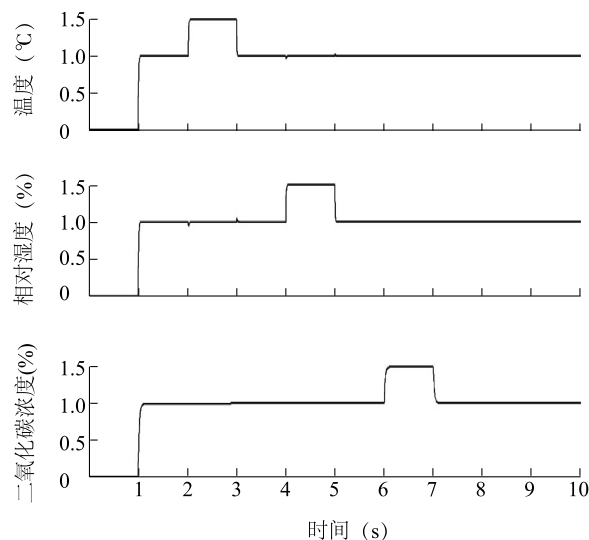


图 6 带前馈补偿系统的 PID 控制器系统仿真波形

Fig.6 Simulation waveform of PID-controlled system with feedforward compensation

4 结 论

根据目前的研究现状,就如何使温室中相互耦合的变量解耦,本研究提出了将前馈补偿算法应用于三维温室系统模型中的解决方法。通过在系统模型前加入前馈补偿系统,使温室系统中相互耦合的变量解耦合。前馈补偿算法的逻辑简单且实现方便,仿真结果表明,对温室系统模型添加前馈补偿器对系统的解耦控制起到了良好的效果。将前馈补偿算法应用于近似温室三维系统中,显著提高了系统的稳定性和响应的快速性。

参考文献:

- [1] 岳文杰,谢守勇,陈 翀,等. 基于模糊 PID 的温室温度控制器设计与仿真[J]. 农机化研究, 2014 (4):194-197.
- [2] 雷 勇,李泽滔. 温室温度系统的自适应模糊 PID 控制[J]. 控制工程, 2014, 21:23-27.
- [3] 申超群,杨 静. 温室温度控制系统的 RBF 神经网络 PID 控制[J]. 控制工程, 2017, 24(2):361-364.
- [4] 夏 爽,李丽宏. 基于 PSO-RBF 神经网络在温室温度预测中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2017,38(3):744-748.
- [5] 卢 佩,刘效勇. 温室大棚温湿度模糊解耦控制系统设计与仿真[J]. 农机化研究, 2010 (1):44-47.
- [6] 秦琳琳,马国旗,储著东,等. 基于灰色预测模型的温室温湿度系统建模与控制[J]. 农业工程学报, 2016,32(1):233-241.
- [7] 付焕森,李元贵. 基于前馈补偿算法温室解耦及 PLC 控制器设计[J]. 农机化研究, 2016(2):205-208.
- [8] 周长吉. 现代温室工程[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[1] 岳文杰,谢守勇,陈 翀,等. 基于模糊 PID 的温室温度控制器

(责任编辑:王 妮)