

温室温湿度耦合控制方法研究

高立婷^{1a}, 戴思慧^{1b}, 徐新明^{1a}, 周娟^{1a}, 李明²

(1. 湖南农业大学 a. 机电工程学院; b. 园艺园林学院, 长沙 410128; 2. 湖南省农业科学院 农业装备研究中心, 长沙 410125)

摘要: 为解决温室温度、湿度环境精准控制问题, 基于 PID 算法并结合温度、湿度热力学分析, 提出了一种温室温湿度耦合控制方法。通过实验结合参数辨识方法建立温室温度、湿度的数学模型; 从热力学角度分析温度与湿度之间存在的耦合关系, 得出温湿度耦合函数; 将耦合函数作为温湿度之间的影响关系添加到基于 PID 算法的控制模型中, 最终建立了基于 PID 算法的温湿度耦合控制模型。实验结果表明: 加入温湿度耦合关系后, 耦合控制相较于无耦合控制方法, 温度控制与湿度控制系统的系统稳态时间分别减少 73.3% 和 50%, 系统稳态误差均为 0, 系统更加稳定准确。温湿度独立控制方法很难实现温室温度与湿度的协调准确控制, 而采用耦合控制方法能够大幅度提高控制系统的稳定性、快速性及准确性, 实现了温室温湿度的精准控制, 从而提高了温室作物的生产品质。

关键词: 温室; 温湿度; PID; 热力学; 耦合控制

中图分类号: S625.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2021)12-0024-07

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.12.004

0 引言

温室作为设施农业的重要组成部分, 在农业现代化过程中占据重要地位。改革开放之后, 我国从日本、荷兰等地区引进了大量现代化温室, 但由于气候、管理技术、信息化技术等原因, 该类温室在我国出现了“水土不服”的现象。目前, 我国温室面积已跃居世界第 1 位, 但温室生产与管理水平仍与发达国家有很大差距^[1-3]。温室通过各类设备对内部环境进行调控, 使作物生长不受自然环境的影响, 从而实现作物的周年供应。温室中影响作物生长的主要环境因子有温度、湿度、二氧化碳浓度及光照度等, 多环境因子之间相互影响、相互制约导致了温室环境是一个存在多变量的大惯性、非线性系统, 且具有耦合、延迟等现象^[4-6]。

温室环境协调控制一直是国内外研究的一个热点和难点, 而温度、湿度作为影响作物生长的最主要的两个因素, 许多学者对它们的协调控制进行了研究。申超群^[7]等人提出了基于 RBF 神经网络 PID 的温室温度控制, 由神经网络 RBF 对 PID 中的 3 个参数

进行在线调整, 提高了温室温度的控制精度。杨旭^[8]设计了基于 PLC 的农业温室模糊控制系统, 基于模糊 PID 对温室温度、湿度进行控制。杨彬^[9]应用模糊控制理论, 主要对温室的温度、湿度环境因子进行自动控制。王健^[10]等人运用变论域模糊控制理论提出了符合北方温室番茄种植的智能温度控制策略。Ito K^[11]设计了一种采用木球加热系统的温室温度控制器, 采用模型预测控制来精确实现温室温度控制。

目前, 针对温室温度、湿度的单因素高精度控制研究已经较为成熟, 但对于温室温度湿度协调高精度控制问题尚有待提高, 这也成为当前我国智能温室发展的一大阻碍。为此, 笔者从热力学的角度出发, 根据干球温度与湿球温度来计算湿空气相对湿度的方法分析温湿度之间的耦合关系^[12]; 通过实验对温室温度、湿度进行建模, 将耦合关系结合 PID 算法建立了温室温湿度耦合控制模型, 最终实现了温室温湿度的高精度协调控制。

1 温室温度、湿度模型建立

1.1 温室环境控制方法

温室内部影响作物生长的主要环境因子有温度、湿度、二氧化碳浓度及光照度等, 这些环境因子不仅受外界气候、作物生长影响, 而且互相影响、互相制约。其中, 二氧化碳浓度和光照度的耦合性不高, 可采用独立的阈值控制方式。温室温湿度变化是一种非线性、大滞后且互相影响的复杂过程, 独立温湿度

收稿日期: 2020-04-10

基金项目: 国家西甜瓜产业技术体系专项 (CARS-25); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200800)

作者简介: 高立婷 (1995-), 女, 湖南汨罗人, 硕士研究生 (E-mail: 625369964@qq.com)。

通讯作者: 戴思慧 (1976-), 女, 长沙人, 副教授, 硕士生导师 (E-mail: daisihui@126.com)。

控制方式准确度较低,需要对耦合关系进行分析。本文对温室温度、湿度分别用 PID 算法进行控制,同时考虑温湿度之间的耦合影响,从而以修正反馈量的方式进行综合控制。温室环境控制方式如图 1 所示。

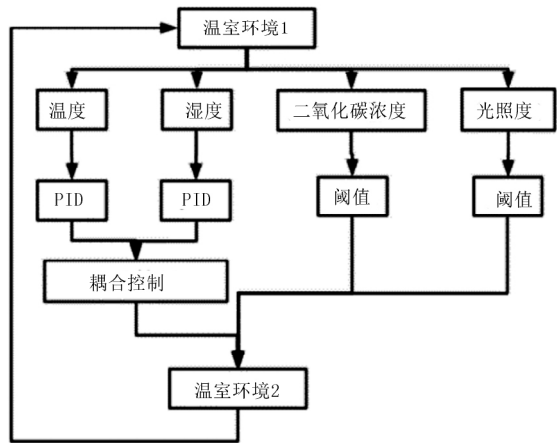


图 1 温室环境控制方式
Fig.1 Control mode of greenhouse environment

1.2 实验设施

实验在湖南农业大学自主研发的 2MH-655B 型循环运动式温室大棚(长×宽×高=12m×5.5m×3.6m)进行,占地面积 66m²,温度控制设备为温室专用空调,湿度控制设备为雾化喷淋系统与除湿设备。

1.3 基于实验法的温室温度模型建立

1.3.1 温度模型

被控对象受内部和外界影响较大,其数学模型是随时间变化的,难以建立精准的数学模型。查阅相关文献,近似认为温度模型是一个非线性一阶带延时的惯性环节模型^[13-14]。其传递函数表达式为

$$G(s)_1 = \frac{K_1 e^{-\tau_1 s}}{1 + T_1 \times s} \tag{1}$$

其中 K_1 为系统增益; T_1 为时间常数; τ_1 为延时时间(s)。对于上式 K_1 、 T_1 、 τ_1 ,采用实验法进行参数辨识后,建立温室的温度模型。

1.3.2 温度实验

在温室系统稳定条件下,假设系统的输入和输出基准线均为零,突然改变系统的输入量 $u(t)$,即开启加温设备,给温室系统输入一个幅值为 U (为加温设备的输出温度)的阶跃信号,用数据采集系统记录温室内的温度变化。假设参数辨识实验中数据采集时刻为 t_i ,记录各个采集时刻的输出响应(温度)的数据为 $y(t_i)$ ($i=1,2,3\cdots$),实验温室温度初始值为 12.8℃,加温设备的输出温度为 60℃,持续加温 3h,采样频率为 150s/次,记录数据如表 1 所示。

表 1 温度变化过程数据采集表					
Table 1 Temperature change process data					
采样点	温度	采样点	温度	采样点	温度
t_i	$y(t_i)$	t_i	$y(t_i)$	t_i	$y(t_i)$
1	12.8	13	20.9	25	32.2
2	13.0	14	22	26	32.8
3	13.1	15	23.8	27	33.4
4	13.4	16	24.5	28	33.8
5	13.7	17	25.9	29	34.2
6	14.1	18	27.2	30	34.5
7	14.5	19	28.2	31	34.6
8	14.8	20	28.9	32	34.7
9	15.7	21	29.7	33	34.8
10	16.1	22	30.5	34	34.9
11	17.9	23	31.2	35	35.0
12	19.2	24	31.7	36	35.0

根据表 1 数据 $y(t_i)$ 绘制温度阶跃响应曲线,如图 2 所示。

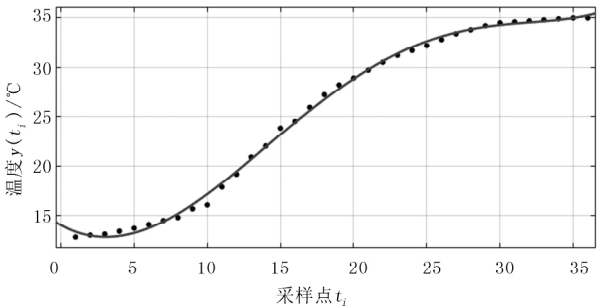


图 2 温度采样数据阶跃响应曲线
Fig.2 Step response curve of temperature sampled data

1.3.3 温度模型建立

温度模型建立重点在于对温度传递函数进行参数辨识,参数辨识方法主要有图解法、一点法及两点法^[15]等。本文采用两点法进行参数辨识,采用阶跃响应曲线上的两个采样点数据($t_1, y(t_1)$),($t_2, y(t_2)$)来确定传递函数的参数。

温室以阶跃信号输入进行实验,传递函数为

$$U(s) = \frac{60}{s} \tag{2}$$

一阶惯性延时环节的阶跃响应为

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{60K_1 \times e^{-\tau_1 s}}{s(1 + T_1 \times s)} \tag{3}$$

对式(3)进行拉氏逆变换得到输出关于时间 t 的原函数为

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = 60K(1 - e^{-\frac{t-\tau_1}{T_1}}) \tag{4}$$

利用响应稳态值求系统增益,即

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 60K_1; K_1 = 0.5833 \tag{5}$$

取响应曲线上过渡阶段的两个观测数据点 $y(t_1) = 0.4y(\infty)$ 、 $t_1 = 900s$ 、 $y(t_2) = 0.9y(\infty)$ 、 $t_2 = 3600s$ 根据式(4)有

$$y(t_1) = 60K_1(1 - e^{-\frac{t_1-\tau_1}{T_1}})$$
$$y(t_2) = 60K_1(1 - e^{-\frac{t_2-\tau_1}{T_1}}) \tag{6}$$

$$\frac{t_1 - \tau_1}{T_1} = -\ln\left(1 - \frac{y(t_1)}{60K_1}\right)$$
$$\frac{t_2 - \tau_1}{T_1} = -\ln\left(1 - \frac{y(t_2)}{60K_1}\right) \tag{7}$$

对式(7)整理可得

$$T_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left[1 - \frac{y(t_1)}{60K_1}\right] - \ln\left[1 - \frac{y(t_2)}{60K_1}\right]}$$
$$= \frac{t_2 - t_1}{\ln\left[\frac{60K_1 - y(t_1)}{60K_1 - y(t_2)}\right]} = 1507 \tag{8}$$

$$\tau_1 = \frac{1}{2}$$
$$\left\{t_1 + t_2 + T_1\left[\ln\left(1 - \frac{y(t_1)}{60K_1}\right) + \ln\left(1 - \frac{y(t_2)}{60K_1}\right)\right]\right\}$$
$$= 130 \tag{9}$$

温度传递函数表达式为

$$G(s)_1 = \frac{0.5833 \times e^{-130s}}{1 + 1507s} \tag{10}$$

1.4 基于实验法的温室湿度模型建立

1.4.1 湿度模型

同理,近似认为湿度模型是一个非线性一阶带延时的惯性环节模型,其传递函数表达式为

$$G(s)_2 = \frac{K_2 e^{-\tau_2 s}}{1 + T_2 \times s} \tag{11}$$

1.4.2 湿度实验

在温室系统稳定条件下,通过增湿实验对传递函数中 K_2 、 T_2 、 τ_2 进行参数辨识。假设实验中数据采集时刻为 t_i ,记录各个采集时刻的输出响应(温室)的数据为 $Z(t_i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots$),实验温室湿度初始值为 35.6% RH(实验中的湿度均采用相对湿度),增湿设备的输出湿度为 90%,持续增湿 18min,采样频率为 30s/次,记录数据如表 2 所示。根据表 2 数据 $Z(t_i)$ 绘制湿度阶跃响应曲线如图 3 所示。

表 2 湿度变化过程数据采集表
Table 2 Humidity change process data % RH

采样点 t_i	湿度 $Z(t_i)$	采样点 t_i	湿度 $Z(t_i)$	采样点 t_i	湿度 $Z(t_i)$
1	35.6	13	57.2	25	76.7
2	35.9	14	59.3	26	77.5
3	36.3	15	61.5	27	78.4
4	36.9	16	63.4	28	79.2
5	38.5	17	64.8	29	79.6
6	40.2	18	66.3	30	79.9
7	42.6	19	68.1	31	80.2
8	43.9	20	70.2	32	80.5
9	46.4	21	71.5	33	80.8
10	48.1	22	73.2	34	80.9
11	51.6	23	74.8	35	81.1
12	54.1	24	75.5	36	81.2

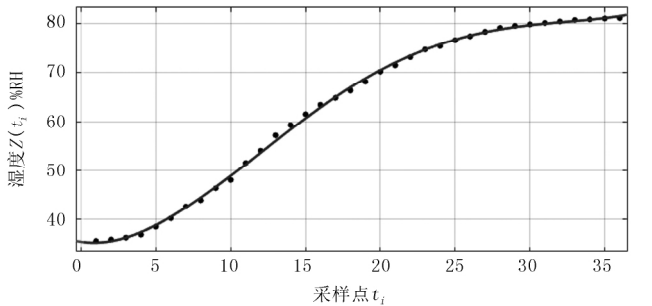


图 3 湿度采样数据阶跃响应曲线
Fig. 3 Step response curve of humidity sampling data

1.4.3 湿度模型建立

采用两点法对湿度传递函数进行参数辨识,采用阶跃响应曲线上的两个采样点数据($t_1, Z(t_1)$)、($t_2, Z(t_2)$)来确定传递函数的参数。

温室以阶跃信号输入进行实验,其传递函数为

$$U(s) = 90/s \tag{12}$$

根据式(4)、式(5)可得

$$K_2 = \frac{z(\infty)}{U} = 0.9022 \tag{13}$$

取响应曲线上过渡阶段的两个观测数据点 $Z(t_1) = 0.5Z(\infty)$ 、 $t_1 = 180y(s)$ 、 $Z(t_2) = 0.95Z(\infty)$ 、 $t_2 = 780(s)$,将相关参数代入式(7),计算时间常数 T_2 、延时时间 τ_2 ,整理得

$$T_2 = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left[1 - \frac{Z(t_1)}{90K_2}\right] - \ln\left[1 - \frac{Z(t_2)}{90K_2}\right]} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left[\frac{90K_2 - Z(t_1)}{90K_2 - Z(t_2)}\right]}$$

$$= 249 \quad (14)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \left\{ t_1 + t_2 + T_2 \left[\ln \left(1 - \frac{Z(t_1)}{90K_2} \right) + \ln \left(1 - \frac{Z(t_2)}{90K_2} \right) \right] \right\} = 95 \quad (15)$$

湿度传递函数表达式为

$$G(s)_2 = \frac{0.9022 \times e^{-95s}}{1 + 249s} \quad (16)$$

2 温湿度关系的热力学分析

要建立温湿度耦合模型,首先要确立温湿度之间存在的关系,对于密闭环境的温室来说,温度的升高必然会导致湿度的下降,湿度的升高同样会造成温度的下降,因此建立温湿度之间的耦合关系是建立温湿度耦合模型的关键。为此,通过热力学公式分析温湿度之间存在的关系,拟合温室的温湿度耦合关系。

2.1 温湿度的热力学关系

含有水蒸气的空气称为湿空气,将湿空气看作混合物,以干空气为溶剂,水蒸气为溶质,温湿度之间相互影响主要由湿空气中水蒸气的含量决定。湿空气的湿度通常用绝对湿度、相对湿度和比湿度来表示,由于绝对湿度并不能判断空气是否还能继续吸湿,通常采用相对湿度或比湿度来衡量。一般生活中、天气预报中,大多使用相对湿度^[16](该小节温度单位未注释,默认为 K)。

湿空气中水蒸气的密度与饱和湿空气中水蒸气的密度之比称为相对湿度,由定义可知

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{v \max}} = \frac{p_v}{p_s} \quad (17)$$

式中 φ —相对湿度(%);

ρ_v —湿空气中水蒸气的密度(g/cm³);

$\rho_{v \max}$ —饱和湿空气中水蒸气的密度(g/cm³);

p_v —湿空气中水蒸气分压力(Pa);

p_s —饱和湿空气中水蒸气分压力(Pa);

湿空气中水蒸气分压力可由下式计算,即

$$p_v = \frac{p \times d}{0.622 + d} \quad (18)$$

1kg 干空气所含水蒸气的质量称为含湿量,由定义可知

$$d = \frac{m_v}{m_a} \quad (19)$$

由理想气体的状态方程 $P_a V = m_a R_a T$ 、 $p_v V = m_v R_v T$ 可得

$$d = \frac{R_a}{R_v} \times \frac{p_v}{p_a} = \frac{287}{461} \times \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (20)$$

湿空气的饱和含湿量为

$$d_b = 0.622 \frac{p_v(T_g)}{p - p_v(T_g)} \quad (21)$$

式中 d —含湿量(g/kg);

P_a —干空气的压强(Pa);

P_v —水蒸气的压强(Pa);

V —理想气体的体积(m³);

m_v —干水蒸气的质量(kg);

m_a —干空气的质量(kg);

T —理想气体的热力学温度(K);

R_a —干空气的理想气体常数(J/mol·K);

R_v —水蒸气的理想气体常数(J/mol·K);

P —湿空气总压力(Pa) $p = p_v + p_a$;

p_v —干空气分压力(Pa);

$p_v(T_g)$ —对应干球温度 T_g 的饱和湿空气中水蒸气分压力(Pa)。

参考姚畔等人的研究认为用 Antoine 方程,计算饱和湿空气水蒸气分压力^[12-17],即

$$\ln p_v(T_g) = m_1 - \frac{m_2}{m_3 + T_g} \quad (22)$$

Antoine 方程中 $m_1 = 23.1964$ $m_2 = 3816.44$ $m_3 = -46.13$ T_g 为干球温度(K)。

将式(22)代入式(21)可得对应干球温度 T_g 的饱和含湿量为

$$d^{(1)} = 0.622 \frac{e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_g - 46.13}}}{p - e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_g - 46.13}}} \quad (23)$$

同理,对应湿球温度 T_s 的饱和含湿量为

$$d^{(2)} = 0.622 \frac{e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_s - 46.13}}}{p - e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_s - 46.13}}} \quad (24)$$

对于 1kg 干空气,由其能量方程式得

$$r_s(d^{(2)} - d) = c_p(T_g - T_s) \quad (25)$$

根据 Watson 公式^[18]计算得

$$r_s = r_b \left(\frac{T_c - T_s}{T_c - T_b} \right)^k \quad (26)$$

式中 r_s —湿球温度下水的汽化潜热(kJ/kg);

c_p —湿空气的定压比热容(kJ/kg·K) $c_p = 1.01 + 1.88d$;

r_b —水在标准沸点下的汽化潜热, $r_b = 2257.3$ (kJ/kg);

T_c —水的临界温度, $T_c = 647.3$ K;

T_b —水在标准状态下的沸点温度, $T_b = 373.15$ K;

K —指数,取 $k=0.38$ 。

代入式(26),可得

$$r_s = 267.38 \times (647.3 - T_s)^{0.38} \tag{27}$$

$$d = \frac{166.31 \times (647.3 - T_s)^{0.38} \times e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_s - 46.13}} + 1.01 \times (T_s - T_g) \times (p - e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_s - 46.13}})}{[1.88(T_g - T_s) + 267.38(647.3 - T_s)^{0.38}](p - e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_s - 46.13}})} \tag{28}$$

将式(18)、式(22)代入式(17)式 φ 整理可得

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} = \frac{\frac{p \times d}{0.622 + d}}{e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_g - 46.13}}} = \frac{\frac{101325d}{0.622 + d}}{e^{23.1964 - \frac{3816.44}{T_g - 46.13}}} \tag{29}$$

为了验证公式(29),取8组干湿球温度计算相对湿度并与查表数值进行对比,结果如表3所示。

表3 不同干球温度、湿球温度对应的相对湿度表

Table 3 Relative hygrometer with different dry bulb temperature and wet bulb temperature

干球温度 /℃	湿球温度 /℃	查表的相对 湿度/% RH	公式计算的相对 湿度% RH
16	7.32	25	24.61
18	9.43	30	29.66
20	11.63	35	34.73
22	13.92	40	39.82
24	16.28	45	44.81
26	18.73	50	49.88
28	21.24	55	54.86
30	23.82	60	59.87
32	26.47	65	64.95
34	29.15	70	69.9

2.2 温湿度补偿关系

查阅相关气象信息^[19]得到:长沙地区的夏季(5-10月)干湿球温度差约为2.6℃,冬季(11-4月)干湿球温度差约为2.9℃。设定20℃(干球温度)以下为冬季气温,20℃以上为夏季气温,求出相应的湿球温度代入式(29)计算相对湿度。计算结果如表4所示。

表4 长沙地区不同干球温度对应的相对湿度表

Tale 4 Relative humidity table for different dry bulb temperatures in Changsha

干球温度 /℃	相对湿度 /% RH	干球温度 /℃	相对湿度 /% RH
6	60.88	26	80.44

将式(24)、式(27)代入式(25),计算湿空气含湿量 d ,整理可得

续表4

干球温度 /℃	相对湿度 /% RH	干球温度 /℃	相对湿度 /% RH
8	63.80	28	81.22
10	66.35	30	81.93
12	68.57	32	82.57
14	70.52	34	83.15
16	72.23	36	83.68
18	73.75	38	84.17
20	75.09	40	84.62
22	78.62	42	85.04
24	79.58	44	85.43

采用MatLab对表4的数据进行双向高斯拟合,得到温度与湿度的双向拟合函数。

温度对湿度的拟合函数为

$$\varphi = 4.336e^{-\left(\frac{t-47.08}{7.187}\right)^2} + 83.26e^{-\left(\frac{t-36.63}{55.22}\right)^2} \tag{30}$$

湿度对温度的拟合函数为

$$t = -6.409e^{-\left(\frac{\varphi-80.91}{4.877}\right)^2} + 683.6e^{-\left(\frac{\varphi-160.6}{45.8}\right)^2} \tag{31}$$

3 结果与分析

3.1 温度 Simulink 模型的建立

采用 Simulink 对温度 PID 控制模型进行建模,模型如图4所示。

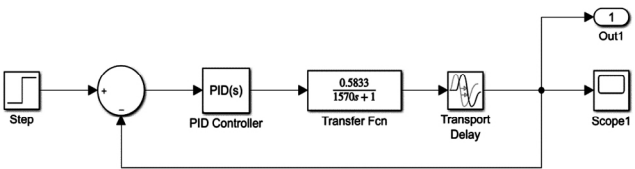


图4 温度PID控制Simulink模型

Fig. 4 Simulink model of temperature PID control

由于温室环境恶劣且多变,仿真中设定输入为工作条件严峻的阶跃信号,初始值为13℃,稳定值为25℃,仿真时间为10 000s。

3.2 湿度 Simulink 模型的建立

采用 Simulink 对湿度 PID 控制模型进行建模,模

型如图 5 所示。

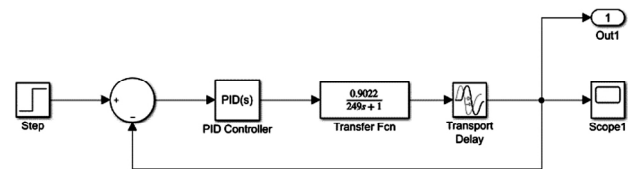


图 5 湿度 PID 控制 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of humidity PID control

湿度仿真中初始值为 35% , 稳定值为 75% , 仿真时间为 10 000s。

3.3 温湿度 Simulink 模型的建立与仿真

在温度、湿度单因素 PID 控制的基础上加入耦合函数 , 利用 Simulink 建立模型如图 6 所示。

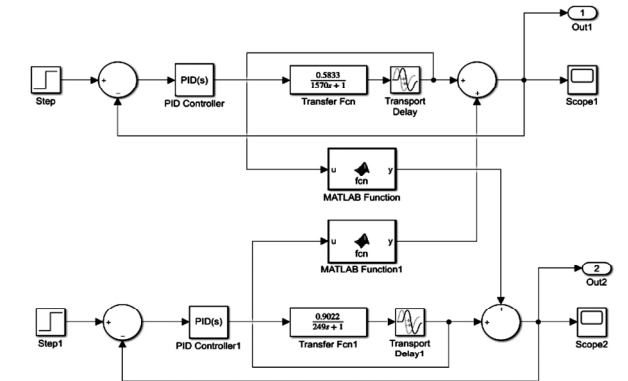


图 6 温湿度耦合 PID 控制 Simulink 模型

Fig. 6 Simulink model of temperature and humidity coupled PID control

3.4 结果分析

设定初始温度为 13℃、湿度为 35% , 目标稳定温度为 25℃、湿度为 75% , 将式 (30)、式 (31) 作为耦合函数分别写入 Function、Function1 中 , 经参数整定 , 各模型最佳参数如下:

单独 PID 温度控制时 $K_{p1} = 6.5$ $K_{i1} = 0.0045$ $K_{d1} = 0$; 单独 PID 湿度控制时 $K_{p2} = 0.4$ $K_{i2} = 0.0025$ $K_{d2} = 0$; 耦合温湿度控制时 $K_{p1} = 7.8$ $K_{i1} = 0.0048$ $K_{d1} = 0$ $K_{p2} = 0.5$ $K_{i2} = 0.0026$ $K_{d2} = 0$ 。

实验结果如图 7、图 8 所示。

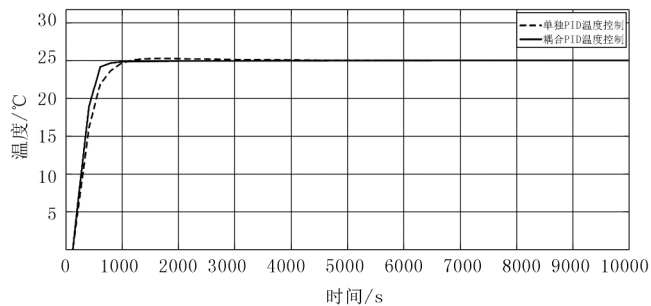


图 7 温度响应曲线

Fig. 7 Temperature response curve

由图 7 可知: 单独 PID 温度控制上升时间约 1300s , 超调量为 2% , 系统的稳态时间为 3000s , 用时

长且存在稳态误差; 加入湿度耦合控制关系后 , 系统上升时间约 800s , 超调量为 0 , 系统稳态误差为 0。综合对比可知: 对于温度控制 , 温湿度耦合控制方式系统更加稳定 , 响应更快速 , 达到稳态时间减少 73.3% , 控制精度更高。

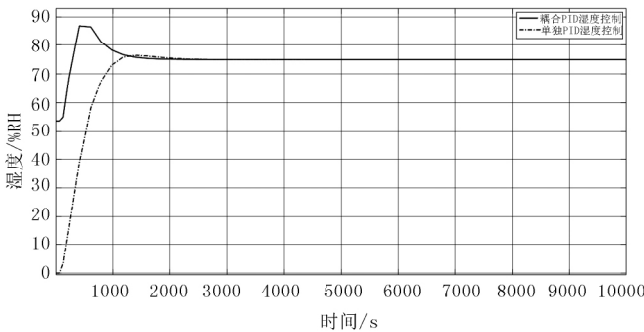


图 8 湿度响应曲线

Fig. 8 Humidity response curve

由图 8 可知: 单独 PID 湿度控制超调量为 1.3% , 上升时间约 1300s , 系统稳态误差为 0 , 系统达到稳态时间约 2400s; 加入温度耦合控制关系后 , 设定初始值 35% RH , 由于温度影响 , 湿度的初始值达到 55% RH , 系统超调量为 14.67% , 上升时间约 300s , 峰值时间 200s , 系统达到稳态时间为 1200s。综合对比可知: 温湿度耦合控制方式系统响应速度更快 , 达到稳态时间减少 50% , 且系统无稳态误差 , 控制精度高。

4 结论

从热力学角度分析了温室小环境中温度与湿度的耦合关系 , 并结合长沙地区的气候实际特点得出了温湿度耦合函数。以阶跃信号为输入进行温室温度、湿度实验 , 得到阶跃响应曲线 , 对曲线进行参数辨识建立温室温度、湿度的数学模型。在 PID 温度、湿度控制方法的基础上加入温室温湿度耦合关系后 , 建立了温室温湿度耦合控制模型 , 经 Simulink 建模仿真可知 , 该方法具有良好的控制效果。相较于温室温度、湿度单因素控制 , 耦合 PID 控制方式在加入干扰后能始终处于稳定状态; 在快速性方面 , 耦合 PID 控制方式达到系统稳态的时间更短 , 系统遇到干扰的响应也更加快速; 在准确性方面 , 耦合 PID 控制方式的控制精度更高。

由于存在测量误差以及耦合函数阶数选取等因素 , 实验仅得出实际温室系统的近似模型 , 在一定程度上影响了控制系统的控制精度 , 后续将在缩小误差及加入熵值方面对温湿度耦合关系的影响进行研究 , 以提高系统控制效果 , 同时将控制方法用于芫荽的温室种植中 , 以实际应用优化本研究。

参考文献:

- [1] 毛罕平,晋春,陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报 2018 49(2):1-13.
- [2] L MC CARTNEY, M G LEFSRUD. Protected agriculture in extreme environments: a review of controlled environment agriculture in tropical arid, polar and urban locations [J]. Applied engineering in agriculture 2018 34(2):455-473.
- [3] TANGARIFE H I, Díaz A E. Robotic applications in the automation of agricultural production under greenhouse: a review [C]//In: Proc. of IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control, 2017: 1-6.
- [4] 辛萍萍. 效益优先的温室环境多因子协同调控模型与方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学 2019.
- [5] 张宁, 谭亲跃, 张戈风. 温室地上环境因子模型研究综述[J]. 中国农学通报 2019 35(2):93-99.
- [6] 倪文彬, 王荣林. 基于 AT89S52 的温度控制系统设计[J]. 通信电源技术 2012 29(6):50-51, 54.
- [7] 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.
- [8] 杨旭. 基于 PLC 的农业温室模糊控制系统仿真设计与应用[D]. 合肥: 安徽农业大学 2018.
- [9] 杨彬. 温室温、湿度智能控制系统的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学 2006.
- [10] 王健, 谢南. 基于变论域模糊理论的温室番茄智能控温策略[J]. 中国农业科技导报 2018 20(03):71-79.
- [11] Ito K. Greenhouse temperature control with wooden pellet heater via model predictive control approach [C]// Control & Automation. IEEE, 2015.
- [12] 姚晔, 连之伟, 侯志坚. 湿空气相对湿度的一种计算方法[J]. 暖通空调 2004(10):53-54.
- [13] 王辰. 基于模型的温室大棚环境参数控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学 2014.
- [14] 高保泰. 基于 ARM 的温室温湿度智能控制系统设计[D]. 银川: 宁夏大学 2011.
- [15] 丁锋, 徐玲, 刘喜梅. 传递函数辨识(1): 阶跃响应两点法和三点法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版) 2018, 39(1):1-14.
- [16] 冯青, 李世武, 张丽. 工程热力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [17] 刘晖, 张洪涛, 肖红. 水饱和蒸汽压的 Antoine 方程常数的比较[J]. 内蒙古石油化工 2009 35(13):32-34.
- [18] 杨思文, 金六一. 高等工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2018 [R]. 北京: 中国统计出版社 2018.

Research on Temperature and Humidity Coupling Control Method of Greenhouse

Gao Liting^{1a}, Dai Sihui^{1b}, Xu Xinming^{1a}, Zhou Juan^{1a}, Li Ming²

(1. Hunan Agricultural University, a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. College of Horticulture and Garden, Changsha 410128, China; 2. Agricultural Equipment Research Center, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: In order to solve the problem of precise control of the temperature and humidity in greenhouse, based on the PID algorithm and the thermodynamic analysis of temperature and humidity, a coupling control method of temperature and humidity in greenhouse was proposed. The mathematical model of greenhouse temperature and humidity was established through experiments and parameter identification methods; the temperature-humidity coupling function was obtained by analyzing the coupling relationship between temperature and humidity from the perspective of thermodynamics. Finally, the coupling function, as the influence between temperature and humidity each other, was added to the control model based on PID algorithm and temperature-humidity coupling control model was established. After temperature and humidity coupling was added, compared with the uncoupled control method, the steady state time of temperature and humidity control systems were reduced by 73.3% and 50% respectively, system steady-state error is 0 and stability of system was better. The verification results showed that the independent temperature and humidity control method was difficult to achieve the coordinated control of the temperature and humidity in the greenhouse, and the coupling control method could improve the stability, speed and accuracy of the control system to a certain extent, more accurate control of temperature and humidity in the greenhouse could improve the quality of greenhouse crops.

Key words: greenhouse; temperature and humidity; PID; thermodynamics; coupling control