

玻璃温室地热加热系统模型与控制^{*}

林东亮¹ 沈恩德² 张侃谕¹ 余玲文¹

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海都市绿色公司, 上海 200040)

【摘要】 运用传热学理论和控制理论,对玻璃温室使用地热水加热系统进行建模和分析,并通过现场试验测试法获得温室加热系统模型参数。利用内模控制器设计方法,基于控制对象模型,将 Smith 预估器和 PI 控制器应用于加热系统控制器设计,根据温室加热系统模型参数调整加热控制器参数,并开发应用程序加以实现。试验结果表明,相对低温的地热水可以满足现代农业冬天加热要求,加热控制系统控制精度达到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,响应时间小于 10 ms。

关键词: 玻璃温室 地热水 内模控制 Smith 预估器 加热控制

中图分类号: S625.4 **文献标识码:** A

Greenhouse Control Using Geothermal Water Heating System

Lin Dongliang¹ Shen Ende² Zhang Kanyu¹ Yu Lingwen¹

(1. College of Mechanical & Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. Shanghai Dushi Green Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract

Mathematical model of greenhouses heating system by using geothermal water resources was developed and numerical analysis was determined based on the theory of heat transfer and control. The experimental method to determine the parameters of the greenhouses heating system mathematical model was introduced. In the greenhouses heating controller, which was designed and implemented with internal model control technology, the Smith predictor configuration was represented and combined with a PI controller. The approach to tune the parameters of the heating controller was defined. Results showed that the geothermal water resources is suitable for greenhouses heating and the heating controller performances, such as control accuracy and response time, matched current heating need of the greenhouses.

Key words Greenhouses, Geothermal water resources, Internal model control, Smith predictor, Heating control

引言

由于温室加热系统具有大时滞、强干扰的特点,不同温室建筑结构及加热系统设备就会有不同加热过程特性。目前农业温室主要以中小型燃煤锅炉作为冬天加热设备,燃料成本成为温室运营的主要成本,同时,加热过程中二氧化碳、烟尘和灰渣的排放,

也带来了环境问题。选择环保且价格低廉的温室加热能源成为必要。地热能与石油、煤等相比是比较清洁的能源^[1],地热能可以作为温室农业生产环保而有效的加热能源。与应用锅炉热水的温室加热控制系统不同,锅炉的热水温度可以达到 70°C 以上甚至更高,并且调节容易,地热水温度相对较低,通常在 50°C 左右,对控制响应时间和精度等都具有不利

收稿日期: 2008-03-18 修回日期: 2008-05-22

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A311)

作者简介: 林东亮, 博士生, 主要从事工业过程自动化研究, E-mail: lindl@shu.edu.cn

通讯作者: 张侃谕, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂工业对象计算机控制研究, E-mail: kanyu_zhang@sina.com

的影响。本文针对温室地热水加热系统特点,在我国西部重庆市某温室中,对温室地热水加热系统进行建模,应用内模控制器设计方法^[2-3],开发具有PI调节器和Smith预估器功能的温室加热控制器,通过试验验证加热效果。

1 试验温室及其加热系统结构

试验温室地处重庆市,是Venlo型标准玻璃温室。温室有4个结构单元跨,每个结构单元跨度为8 m,温室宽32 m,高4 m,安装保温帘,使用地热水作为加热水源。温室加热控制系统结构如图1所示。

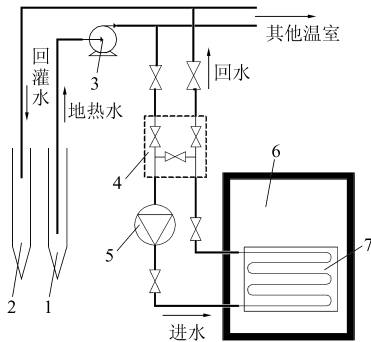


图1 温室地热水加热系统结构图

Fig. 1 Greenhouse geothermal water heating system

1. 地热开采井 2. 回灌井 3. 抽水泵 4. 四通阀 5. 热水泵
6. 温室 7. U型加热管道阵列

图1中地热开采井深达1 000 m,距温室4 km,通过管道输送,到达温室的热水温度为50℃,目前除给4个相同大小温室(包括试验温室)冬天供热外,同时还供给温室旁边一个宾馆使用。

图1中U型加热管道阵列按照一定规则分布在温室底部和周边,加热管道内热水流速由热水泵控制,运行状态下流速近似为恒定。计算机控制系统可以控制四通阀的开度以控制热水和回水进入加热管道中的比例,从而控制加热管道水温,进而控制温室温度。

计算机控制系统通过传感器采集U型加热管道热水温度和温室温度,通过室外气象站采集室外温度、风速、风向、辐照度等气象数据。

2 地热加热系统模型与控制模型

2.1 数学模型

温室地热加热系统输入输出关系如图2所示,其中加热管道温度为输入变量,温室温度为输出量,外气候等其他因素影响作为系统干扰变量。

基于温室能量平衡关系,可以建立温室加热系统模型^[4-6]。在单位时间内温室得到热量与温室散失的热量之差应等于温室储存热量的变化率,即

$$Q_p + Q_r + Q_l + Q_s - Q_v - Q_g - Q_t = C \frac{dT_i}{dt} \quad (1)$$

式中 Q_p ——加热管道供热流量,W
 Q_r ——太阳辐射热流量,W
 Q_l ——补光灯辐射热流量,W
 Q_s ——植物呼吸热流量,W
 Q_v ——天窗通风损失热流量,W
 Q_g ——玻璃向外界散热流量,W
 Q_t ——光合作用热流量,W
 C ——温室空气热容,J/K
 T_i ——温室室内温度,K

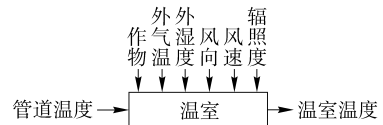


Fig. 2 Greenhouse heating system inputs and outputs

在温室中由于补光灯辐射热流量 Q_l 、植物呼吸热流量 Q_s 和光合作用热流量 Q_t 对温室热量影响很小,与其他相比一般可忽略不计,这样式(1)可简化为

$$Q_p + Q_r - Q_v - Q_g = C \frac{dT_i}{dt} \quad (2)$$

加热管道热水作为温室的可控热源,其对温室温度的加热作用是通过加热管道外表面对流和热辐射的形式进行的。加热水提供的热流量可表示为

$$Q_p = k_p A_p (T_p - T_i) \quad (3)$$

式中 k_p ——管道散热系数, $W/(m^2 \cdot K)$
 A_p ——整个管道表面积, m^2
 T_p ——管道内水温, K

太阳辐射通过玻璃进入温室,同时具有光效应与热效应作用。其中热效应直接影响温室气温。温室太阳辐射热流量为

$$Q_r = \sigma A_g K_\tau T^4 \quad (4)$$

式中 σ ——Stefan-Boltzman 常量, $W/(m^2 \cdot K^4)$
 A_g ——温室地表面积, m^2
 K_τ ——温室玻璃透光率
 T ——太阳表面绝对温度, K

在实际中太阳辐照度可通过室外气象站直接测量得到,太阳辐射热流量可简化表示为

$$Q_r = k_r A_g R \quad (5)$$

式中 k_r ——辐照转换系数
 R ——太阳辐照度, W/m^2

由于内外温度差的存在,通过温室建筑缝隙和天窗的空气交换会损失热量,其大小受通风效率的

影响。通风损失热流量为

$$Q_v = C \frac{A_v k_v v_o (T_i - T_o)}{V} \quad (6)$$

式中 A_v ——通风口面积, m^2

k_v ——风向系数 v_o ——风速, m/s

T_o ——室外温度, $^{\circ}C$ V ——温室体积, m^3

温室通过覆盖面玻璃传热向外面散失热流量为

$$Q_g = k_g A_t (T_i - T_o) \quad (7)$$

式中 k_g ——玻璃传热系数, $J/(m^2 \cdot K)$

A_t ——温室外围表面积, m^2

将式(3)、(5)、(6)、(7)代入式(2),利用增量表示,整理得到微分方程式为

$$K_1(\Delta T_p - \Delta T_i) + K_2 \Delta R - K_3(\Delta T_i - \Delta T_o) - K_4(\Delta T_i - \Delta T_o) = C \frac{d\Delta T_i}{dt} \quad (8)$$

其中 $K_1 = k_p A_p$ $K_2 = k_r A_g$

$K_3 = C \frac{A_v k_v v_o}{V}$ $K_4 = k_g A_t$

相对于温室温度而言,室外温度变化缓慢,可令 $\Delta T_o = 0$;温室加热一般在阴天或夜间,因此辐照度也基本保持不变,可令 $\Delta R = 0$,于是可得

$$K_1(\Delta T_p - \Delta T_i) - K_3 \Delta T_i - K_4 \Delta T_i = C \frac{d\Delta T_i}{dt} \quad (9)$$

式(9)可写成一般形式

$$C \frac{d\Delta T_i}{dt} + (K_1 + K_3 + K_4) \Delta T_i = K_1 \Delta T_p \quad (10)$$

通过拉氏变换可得

$$G(s) = \frac{T_i(s)}{T_p(s)} = \frac{K_1}{C s + K_1 + K_3 + K_4} = \frac{K}{T s + 1} \quad (11)$$

其中 $K = \frac{K_1}{K_1 + K_3 + K_4}$ $T = \frac{C}{K_1 + K_3 + K_4}$

式中 K ——对象静态增益

T ——对象时间常数

由于加热管道水流迟滞、控制阀门动作延迟、加热系统热量传输过程迟滞和温室热惯性,温室加热系统是个大时滞系统,温度加热系统惯性延迟为 $e^{-\tau s}$,则可以得出温室加热系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{T s + 1} \quad (12)$$

式中 τ ——纯延迟时间

温室加热过程是一个一阶惯性纯滞后过程。

2.2 基于内模控制的加热系统控制器

针对温室加热系大延迟的特点,基于温室加热系统模型,应用内模控制器设计方法^[2-3],通过对控制器的结构和参数选择,使其具有 Smith 预估器

补偿系统长延迟的功能。温室加热控制系统控制框图如图3所示。

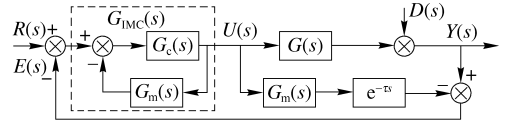


图3 温室加热控制系统控制框图

Fig. 3 Block diagram for greenhouse heating control system

图中 $R(s)$ ——温室温度设定值
 $U(s)$ ——温室加热系统加热系统输入,即温室加热管道热水温度
 $D(s)$ ——温室干扰输入
 $G(s)$ ——被控对象,即温室加热系统
 $G_m(s)$ ——温室加热系统中无延迟部分
 $G_c(s)$ ——PI 控制器

$$G_m(s) = \frac{K}{T s + 1} \quad (13)$$

假设温室加热系统模型 $G_m(s) e^{-\tau s}$ 和实际加热温室加热系统吻合及没有干扰输入,即 $G_m(s) e^{-\tau s} = G(s)$ 及 $D(s) = 0$ 时,上述控制系统的传输函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G_{IMC}(s) G_m(s) e^{-\tau s} = \frac{G_c(s) G_m(s) e^{-\tau s}}{1 + G_c(s) G_m(s)} \quad (14)$$

由式(14)可见,控制系统传输函数和经典 Smith 预估器控制器^[7]的传输函数相同。

利用内模控制器的设计方法^[2],可变为

$$G_c(s) = \frac{T s + 1}{K \tau s} = \frac{T}{K \tau} + \frac{1}{K \tau s} \quad (15)$$

PI 控制器的参数为

$$K_p = \frac{T}{K \tau} \quad (16)$$

$$T_i = T \quad (17)$$

3 试验与结果分析

3.1 试验测定温室加热系统模型参数

温室加热系统的模型是控制器实现的基础。要通过直接计算获得模型参数较为复杂,在实际应用中用温室现场试验测定法^[8]获得模型参数。

试验测定法过程:选择重庆市冬天典型的一段时间,先完全关闭加热系统,让试验温室加热管道温度和温室温度处在初始状态:加热管道热水温度 $26.4^{\circ}C$,室内温度 $16.9^{\circ}C$,室外温度 $9^{\circ}C$,风速 $1 m/s$,然后手工将试验温室加热系统开启,加热泵进入运行状态,调节阀阀门开到最大,同时开始运用控制系统数据采集模块自动记录试验温室环境因子数据,直到室内温度进入饱和状态,测得饱和状态管道热水温度为 $50^{\circ}C$,室内温度为 $27^{\circ}C$,得到温室温度开

环阶跃响应曲线如图4所示。

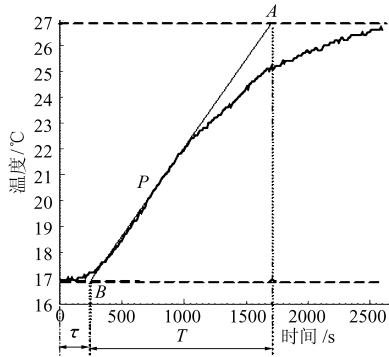


图4 温室加热系统阶跃响应曲线

Fig. 4 Response of greenhouse heating system step input

由前面推导可知,温室加热系统模型是有延迟的一阶惯性过程,温室加热系统温度阶跃响应是一条近似S形的曲线。基于测得温室开环加热阶跃响应曲线和数据,通过与机理模型式(12)拟合,近似可获得加热系统模型的传递函数参数。通过测定法得到加热系统模型参数为: $K=0.43$, $T=1500\text{ s}$, $\tau=250\text{ s}$ 。

从而计算获得该试验温室加热系统传递函数为

$$G(s) = \frac{0.43e^{-250s}}{1500s + 1} \quad (18)$$

3.2 温室加热控制系统运行效果

根据实际模型参数,试验调整控制算法中PI控制器参数 K_p 和 T_i 以及 $G_m(s)$ 和 $e^{-\tau s}$ 环节实现计算过程,系统成功投入运行。温室地热水加热系统控制效果曲线为温室加热系统在控制器控制下的运行效果(图5)。

图5中横坐标对应系统运行时刻,纵坐标轴对应温室温度、温室温度设定值、室外温度和加热管道热水温度。加热系统在冬天夜晚19:00开启运行,第二天早上9:00结束试验记录,温室在与设定温度相差4°C左右,常温16.2°C下开始被加热,管道热水温度迅速达到最大,在1h左右温室温度被加热达到设定值。然后,温室温度在控制系统控制下跟随温室温度设定值。忽略系统跟随设定温度过程,系

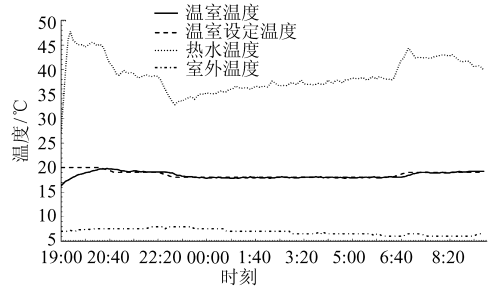


图5 温室地热水加热系统控制效果曲线

Fig. 5 Control result for greenhouse geothermal heating control system

统在外气候变化强干扰下,系统控制精度达到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,完全满足温室温度控制的要求。由于Smith预估器的补偿时滞作用,加热系统的超调和振荡现象基本消除。温室加热控制系统在温度设定值变化时,温室温度存在一定跟随滞后,测量得到加热系统响应时间小于10ms。试验结果表明使用地热水的温室加热控制系统基本达到现代农业温室精准控制的要求。

4 结论

(1) 通过实际应用证明地热水可以用于温室加热,在一定流量保证下,地热水可以满足温室冬天的温室加热要求以及精准温度控制,取得理想的控制效果。

(2) 同无滞后的过程相比,存在滞后使得系统响应性能变差,控制难度大大增加。温室加热系统是个有大滞后、强干扰的复杂系统。基于内模控制的控制器结构和Smith预估器的应用使得温室加热系统的稳定性和鲁棒性等性能得到提高,系统控制精度达到 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,响应时间小于10ms,有效解决了温室加热精准控制问题。

(3) 采用现场试验测试获得加热系统模型参数和手工调整加热控制器的参数还有待于改进。通过现场采集数据,自动进行系统模型辨识和控制器参数调整等还有待作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 陈兴华,叶学锋,高宁. 使用热泵的地热水供热系统[J]. 能源研究与利用, 2003(3):25~27.
Chen Xinghua, Ye Xuefeng, Gao Ning. Using heat pump geothermal water heating system[J]. Energy Research and Utilization, 2003(3): 25~27. (in Chinese)
- 2 Ibrahim Kaya. IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration[J]. Computer and Chemical Engineering, 2004,28(3):281~290.
- 3 Ibrahim Kaya. Auto-tuning of a new PI-PD Smith predictor based on time domain specifications[J]. ISA Transactions, 2003,42(4): 559~575.
- 4 Gurpreet Singha, Parm Pal Singh, Prit Pal Singh Lubana, et al. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse[J]. Renewable Energy, 2006, 31(10):1541~1560.

7 结论

本文建立了真实载荷条件下修形斜齿轮的三维整体有限元分析模型,应用有限元非线性接触分析技术模拟修形斜齿轮的接触状况,定量地考察了修形参数对轮齿上载荷分布和接触应力的影响,可以得出以下结论:

(1) 螺旋角修形可以纠正因支撑轴的弯曲和扭转造成的偏载现象,改善轴向载荷分布。

(2) 齿向修鼓可以降低轮齿两端承受的载荷,消除边缘接触,改善应力集中现象。

(3) 齿廓修形可以降低齿顶承受的载荷,消除齿顶应力集中,使载荷集中于齿的中间区域,改善啮合状况。

参 考 文 献

- 霍肇波,徐振忠,常山. 降低斜齿轮噪声的齿轮修形优化设计[J]. 热能动力工程,1995,10(9):334~337.
Huo Zhaobo, Xu Zhenzhong, Chang Shan. Optimized design of tooth profile correction to reduce helical gear noise[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power,1995,10(9):334~337. (in Chinese)
- 常山,徐振忠. 船用传动齿轮齿面接触应力分布及修形研究[J]. 舰船科学技术,1995(5):31~34.
Chang Shan, Xu Zhenzhong. A study on the tooth surface contact stress distribution and profile modification of marine gear [J]. Ship Science and Technology,1995(5):31~34. (in Chinese)
- Shuting L I. Gear contact model and loaded tooth contact analysis of a three-dimensional, thin-rimmed gear[J]. Journal of Mechanical Design,2002, 124(9):511~517.
- 方宗德. 斜齿轮齿面柔度矩阵与修形的有限元计算[J]. 航空动力学报,1994,9(7):242~244.
Fang Zongde. Calculation on flexibility matrix and modification of helical gears by FEM[J]. Journal of Aerospace Power, 1994,9(7):242~244. (in Chinese)
- 方宗德,张永才. 斜齿轮的齿廓修形[J]. 汽车工程,1993,15(1):59~64.
Fang Zongde, Zhang Yongcai. Optimal tooth profile modification of helical gears[J]. Automotive Engineering, 1993, 15(1):59~64. (in Chinese)
- 常山,徐振忠,霍肇波,等. 斜齿圆柱齿轮瞬时啮合刚度及齿廓修形的研究[J]. 热能动力工程,1997,12(7):270~274.
Chang Shan, Xu Zhenzhong, Huo Zhaobo, et al. A study on themomentary meshing rigidity and tooth profile modification of helical cylindrical gears[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power,1997,12(7):270~274. (in Chinese)
- Faydor L Litvin, Alfonso Fuentes, Ignacio Gonzalez-Perez, et al. Modified involute helical gears: computerized design, simulation of meshing and stress analysis[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2003,192(33~34): 3 619~3 655.
- 赵海峰,蒋迪. ANSYS8.0 工程结构实例分析[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- Chen Yicheng, Chung-Biau Tsay. Stress analysis of a helical gear set with localized bearing contact[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2002,38(8):707~723.

(上接第 154 页)

- Bartzanas T, Tchamitchian M, Kittas C. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(4):487~499.
- 唐储文. 基于 PC/104 嵌入式系统大型温室多模态专家控制系统的开发与应用[D]. 上海:上海大学,2003.
Tang Chuwen. Development of greenhouse multi-mode expert control system based on PC/104 [D]. Shanghai: University of Shanghai, 2003. (in Chinese)
- Bequette B W. Process control modeling, design, and simulation[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2003.
- Seborg D E, Edgar T F, Mellichamp D A. Process dynamics and control, second edition[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004.