

温室测控系统开关设备优化组合预测控制方法*

沈敏 张荣标 盛碧琦 宋永献

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 考虑开关设备组合作用下温室测控系统的非线性动态特性,提出了结构简单、不需复杂数值计算的离散预测模型,在不小于最大时滞时域内设备组合不变情况下,对设备组合进行滚动优化预测控制,从而大大简化了温室测控系统预测控制算法的复杂性,缓解了测控系统分布大时滞问题。仿真分析和温度的均方差表明,对分布式、大时延温室测控系统的优化组合预测控制方法是有效的。

关键词: 温室 预测控制 开关设备 优化组合 时延补偿

中图分类号: S625.5⁺1; TP273⁺.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0186-04

Predictive Control Method for Greenhouse Measurement and Control System Based on Switch Devices Optimization Combination

Shen Min Zhang Rongbiao Sheng Biqi Song Yongxian

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

Abstract

Considering the nonlinear dynamic response of the greenhouse measurement and control system based on switch devices combination control, a discrete predictive model was proposed. The model had simple structure and uncomplex computation. Within the time domain not less than the maximum distribution delay of the system, the devices combination was kepted invariably and optimized rollingly to carry out predictive control, so the predictive control complexity of the system was greatly simplified, the problem of long distribution delays of the system was relieved. The simulation analysis and root mean square of the temperature showed that the optimization combination predictive control method was effective for the greenhouse measurement and control system with long distribution delays.

Key words Greenhouse, Predictive control, Switch device, Optimization combination, Delay compensation

引言

与输入量连续的系统相比,温室输入量具有开关特性,并且往往以设备组合的方式进行控制,如有时候温室降温需要同时升南卷帘、北卷帘和开天窗等;此外,具有分布大时滞特性的温室开关设备组合控制,会降低系统控制性能,甚至引起控制系统不稳定。因此,很有必要研究适合开关设备组合控制的分布式、大时延温室测控系统预测控制方法。

GPC、DMC、Smith 预估控制^[1-4]等常规预测控

制方法一般用于 SISO 时滞系统。在智能控制方法中,模糊控制^[5]、神经网络^[4,6-7]以及二者的结合在输入量连续的时滞系统预测控制中应用最为广泛,但它们的结构、数值计算复杂,不适合对开关设备组合控制的系统进行预测控制。

文献[8~9]中以连续指数和离散辨识模型方法建立了温、湿度在开关设备组合作用下的非线性动态特性,但模型数值计算复杂,也没有考虑系统的大时滞。因此,对具有开关设备组合控制的分布式、大时滞温室测控系统的预测控制,现有研究不够简

便、深入。

本文针对开关设备组合控制系统单因子情况,提出一种结构简单、不需复杂数值计算的离散预测模型;为简化对分布大时滞温室进行预测控制的复杂性,在不小于最大时滞的时域内保持设备组合不变,并对设备组合进行滚动优化的预测控制。

1 基于开关设备组合控制的离散预测模型

m 个开关控制设备最多有 2^m 种开关组合控制方式,即有 2^m 种动态特性^[9]。

将控制设备按 $1 \sim m$ 编号,同时建立一个 m 位二进制数,每一个二进制位代表一个设备,启动为 1,关闭为 0。比如:1101 表示第 1、3、4 号设备启动,2 号设备关闭,设开关设备组合 U_{i-1} 代表由 $i-1$ 表示的二进制数中各设备的启动与关闭情况。

设系统状态变量为 x ,其初始值为 $x[0]$,设定值为 x_{set} ,第 k 周期采样值、预测值分别为 $x[k]$ 和 $\hat{x}[k]$, $k \geq 1$ 。

假设设备组合在其线性作用范围内引起环境因子增量的变化具有时不变特性,则一定的开关设备组合作用于一定的系统环境时,无论控制有无时滞、时滞多大、时滞分布如何、控制作用如何,系统的非线性动态特性是一定的,引起的状态增量也是一定的。据此,提出如下结构简单、不需复杂数值计算的离散预测模型。

1.1 离散增量模型

以二维矩阵 A 表示离散增量模型,其元素 $A(i, k)$ 表示设备组合 U_{i-1} 在同一个周期被启动后连续工作 k 周期与连续工作 $k-1$ 周期的状态值之差,即

$$A(i, k) = x[k] - x[k-1] | U_{i-1} \quad (i=1 \sim 2^m, k=1 \sim l) \quad (1)$$

由离散增量模型的定义式(1)可知,对于任何复杂开关设备组合情况的控制,只是该模型矩阵元素值的大小、变化不同,模型的结构形式依然一致,式(1)以简单的结构形式得到了离散增量模型。

由于开关控制设备总数为 m ,则建立离散增量模型要进行 2^m 次基本操作,计算的复杂度随着开关控制设备总数的增长呈指数增长。所以,一方面 m 不宜过大,另一方面只取 2^m 种开关组合中有效的控制方式。

1.2 离散预测模型

由于设备组合 U_{i-1} 中被启动的设备可能不是在同一周期内被启动的,比如 2 号设备在上一个周期已被启动,但在这个周期仍需启动,所以这个周

期就不需再启动 2 号设备。分别用变量 $l_1 \sim l_m$ 计数设备组合 U_{i-1} 中 $1 \sim m$ 号设备到第 $k-1$ 周期时已连续启动的周期数,初值为 0,控制设备被关闭时清零。

$l_1 \sim l_m$ 中,计数相同的设备分为一组,设共有 k' 个分组,各分组计数值分别为 $f_{i'}$, $i' = 1 \sim k'$ 。各分组控制设备的 m 位二进制数,其对应位与设备组合 U_{i-1} 的相同,非分组中设备的对应位为 0,则共有 k' 个 m 位二进制数,设为 $g_{i'} - 1$,则可以认为设备组合 U_{i-1} 由其各分组作用叠加而成,即 $U_{i-1} = \bigcup_{i'} U_{g_{i'} - 1}$ 。

在第 k 周期施加设备组合 U_{i-1} ,预测值为

$$\hat{x}[k] = x[k-1] + a \sum_{i'=1}^{k'} A(g_{i'}, f_{i'} + 1) | U_{i-1} \quad (2)$$

调节系数 a 用来弥补由于非线性、时变、模型失配、干扰等引起的模型匹配的不足, a 初值为 1。

由离散预测模型的定义式(2)可知,无论分组设备在当前周期 k 之前连续运行的周期数是否已大于其相对阶,控制是否起了作用,该模型都能以统一、简便的算法和结构形式得到分组作用引起的状态增量,然后基于分组作用之和得到总增量,从而得到 $\hat{x}[k]$ 。

2 温室测控系统的分布大时滞

设温室测控系统以 m 个设备的某种组合方式对某状态进行控制。被控过程普遍存在时滞,温室测控系统的第 i ($i=1 \sim m$) 个设备控制的时滞如图 1 所示。时滞

$$\tau_i = \tau_{sc}(i) + \tau_c(i) + \tau_{ca}(i) + \tau_d(i) \quad (i=1 \sim m)$$

式中 $\tau_{sc}(i)$ —— 传感器-控制器时滞

$\tau_c(i)$ —— 控制器时滞

$\tau_{ca}(i)$ —— 控制器-控制设备时滞

$\tau_d(i)$ —— 控制设备启动后物料和能量的传输时滞

从时滞性质来说,控制系统的时滞包括控制时滞和状态时滞,其中 $\tau_{sc}(i) + \tau_c(i) + \tau_{ca}(i)$ 为控制时滞, $\tau_d(i)$ 为状态时滞。

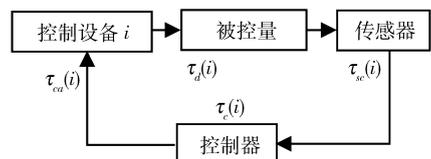


图 1 温室测控系统第 i 个设备控制的时滞

Fig. 1 Time delay of the i th device control for greenhouse measurement and control system

令 $\tau_i = (d_i - 1)T + \tau'_i$, $i = 1 \sim m$, 其中相对阶 $d_i \geq 1$, $0 \leq \tau'_i < T$, T 为周期。设 $d_{\max} = \max(d_i)$, 则

d_{\max} 为最大相对阶。取 $N_p \geq d_{\max}$ 。

如果 m 个设备同时控制,则 $N_p T$ 不小于最大时滞,那么温室测控系统每一个控制设备在启动 $N_p T$ 时间后,控制都起了作用。

3 开关设备优化组合预测控制方法

预测控制不仅可以进行优化控制,更可以补偿系统的时滞。预测控制^[10]除了需要预测模型,还包含滚动优化和反馈校正 2 个主要部分,滚动优化通过在每个滚动时域根据预测模型、系统状态反复在线优化目标函数来得到预测的优化输入,反馈校正对基础预测模型进行补偿。

3.1 滚动优化

不同于常规预测控制方法以 T 为滚动时域,为了简化分布时滞带来的预测控制的复杂性,考虑温室所有开关控制设备最大的相对阶,以 $N_p T$ 为滚动时域和控制时域,即滚动时域和控制时域相等;在控制时域 $N_p T$ 内设备组合保持不变,基于目标函数优化设备组合,这样不仅可以补偿最大时滞的影响,而且可以避免过分频繁的控制切换,在下一个 $N_p T$ 滚动时域再重复这个过程。

预测时域设为 $k''N_p T$ ($k'' \geq 1$),这里取 $k'' = 1$,则目标函数为

$$J = \sum_{j=1}^{N_p} \{ \|\hat{x}[k-1+j|k-1] - x_{\text{set}}\|^2 \} \quad (3)$$

基于采样值 $x[k-1]$ 及式(2)的离散预测模型,使 J 最小的设备组合 U_{i-1} 为在第 $k \sim k-1+N_p$ 周期施加的优化控制。

由于温室的复杂性,实际控制很难正好在设定值并维持很长时间,但植物生长对环境的要求只是一个范围,对设备组合进行优化,使目标函数 J 最小对温室进行预测控制,可以满足植物生长要求。

3.2 反馈校正

反馈校正对式(2)的基础预测模型在线修正,滚动优化只有建立在反馈校正的基础上,才能体现出其优越性^[10]。

设当前为第 k 周期,上一个滚动时域的预测值与采样值误差平方和最小

$$\min \sum_{j=1}^{N_p} (x[k-N_p-1+j] - \hat{x}[k-N_p-1+j])^2 \quad (4)$$

设上一个控制时域设备组合为 $U_{i-1} = \bigcup_{i'} U_{\#i'-1}$,在当前第 k 周期调节 a 为 a' 使式(4)满足, a 的调节过程为:令 $\sum_{i'=1}^{k'} A(g_{i'}, f_{i'} - N_p + j) = q(j)$, $j = 1 \sim N_p$,则调节后预测值为

$$\begin{aligned} \hat{x}[k-N_p] &= \hat{x}[k-N_p-1] + a'q(1) = \\ &= x[k-N_p-1] + a'q(1) \\ \hat{x}[k-N_p+1] &= \hat{x}[k-N_p] + a'q(2) = \\ &= x[k-N_p-1] + a'(q(1) + q(2)) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{x}[k-1] &= \hat{x}[k-N_p-1+N_p] + a'q(N_p) = \\ &= x[k-N_p-1] + a'(q(1) + \dots + q(N_p)) \end{aligned}$$

将以上各式及采样值代入式(4),对 a' 求导后设为 0,可求得

$$a' = \frac{\sum_{j=1}^{N_p} (x[k-N_p-1+j] - x[k-N_p-1])}{\sum_{j=1}^{N_p} (N_p+1-j)q(j)} \quad (5)$$

由式(5)可知, a' 的调节基于上个滚动时域的采样值进行,用于弥补模型匹配的不足,而调节后的 a' 用于当前滚动时域的预测,预测当前控制时域应施加的控制设备组合,从而实现了反馈校正和在线预测控制。

此外,当温室中采集单环境因子的传感器数量增多,对多传感器采集的数据进行数据融合后确定合理的采样值,则算法的效果是一样的。

4 温室降温预测控制仿真与分析

设温度初始值 $x[0] = 38^\circ\text{C}$,设定值 $x_{\text{set}} = 32^\circ\text{C}$,用预测控制方法仿真夏季温室降温。设在降温设备工作时,对理想模型的输出加上 $-0.05 \sim 0.05^\circ\text{C}$ 的随机干扰作为实际输出;在降温设备不工作时,由于温度耗散,温度渐渐上升折合的控制增量 $du_0 = 0.8743$ 。

仿真与分析基于以下几点假设进行:

(1) 温度模型为 $T_m \dot{x} + x = Ku$,其中时间常数 $T_m = 371.7472\text{ s}$,温室放大系数 $K = 0.7435$,采样周期 T 为 30 s , u 为综合作用折合的总的送风温度变化量 ($^\circ\text{C}$)。

(2) 有两种降温设备,设备 1 的阶跃控制量为 $du_1 = -4.842$,时滞相对阶 $d_1 = 6$;设备 2 的 $du_2 = -6.725$, $d_2 = 4$;设备 1 和设备 2 联合作用的 $du_3 = -10.0633$, $d_3 = 4$ 。

(3) 各设备的有效线性控制范围为 $25 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

取 $N_p = d_{\max}$,即 $N_p = 6$,则以 $6T$ 为滚动时域,若当前周期为 k ,基于 $x[k-1]$ 、式(2)的离散预测模型和 J 最小得到下一个 $6T$ 滚动时域的开关设备组合,开关设备组合优化切换情况如图 2 所示。

预测控制效果如图 3 所示,控制历时 10 min 左右,温度缓慢下降到设定值后基本保持了平稳,图 3

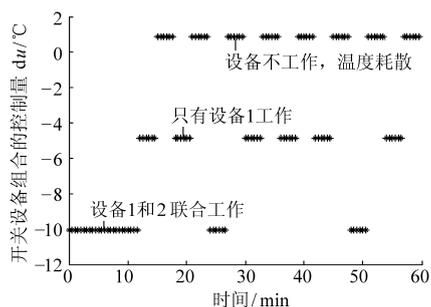


图2 开关设备组合优化切换情况

Fig. 2 Optimization switch of devices combination

中总控制量 u 不仅包括开关设备组合的控制量,还包括由初值、随机干扰、温度耗散上升等折合的综合作用。结合图2、图3可知,当控制开始时,由于初始温度比设定值高出不少,则经过开关设备优化组合,选择了降温作用最强的设备1和2联合工作组合,在10 min以后温度基本达到设定值后,设备2关闭,设备1断续工作,维持温度在设定值附近。图3中,温度在总时长内与设定值的均方差为1.704 0,10 min以后的均方差为0.235 3,取得了较好的控制效果。因此,由仿真结果可知,本文的预测控制方法能够简便、有效地在线对具有大分布时滞的温室测控系统实现开关设备组合优化预测控制和时延补偿。

5 结论

(1)分析了控制系统时滞 τ 与采样周期 T 和相对阶 d 的关系,并且以大于开关设备组合最大相对阶的时间 $N_p T (N_p \geq d_{\max})$ 作为滚动时域和控制时域,简化了分布时滞造成的系统预测控制的复杂性,

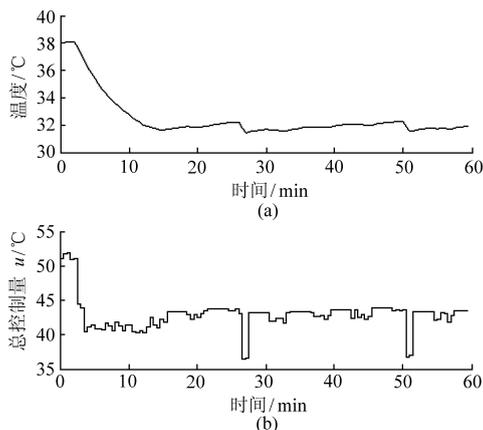


图3 预测控制及温度趋势

Fig. 3 Predictive control and temperature trend

(a) 温度 (b) 总控制量

避免了频繁的控制切换。

(2)基于开关设备组合作用于一定环境时非线性动态特性一定,以二维矩阵 A 作为开关设备组合控制的增量模型,并在此基础上考虑开关设备连续运行状况,提出了一种结构简单、不需复杂数值计算的离散预测模型。

(3)以上一个滚动时域内预测值与实际值误差平方和最小来调节离散预测模型的系数,并基于目标函数最小,优化选择当前控制时域开关设备组合,实现了优化组合预测控制。

(4)对温室降温预测控制的仿真,表明该预测控制方法能够通过开关设备组合优化的切换,对具有分布大时滞的系统实现简便、有效的预测控制。

(5)当采样周期 T 、环境等变化时,该预测控制方法可以方便地在线或离线得到增量模型而不需重新计算复杂的模型参数。

参 考 文 献

- Cao Rongmin, Zhou Huixing, Hou Zhongsheng. The model-free direct adaptive generalized predictive control approach of permanent magnet linear motor[C]//12th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009, 2009.
- 黄智明,张建武,鲁统利,等. 基于 DMC-PID 串级算法的起步离合器 MAP 图控制[J]. 中国机械工程,2010,21(9): 1 123 ~ 1 127.
Huang Zhiming, Zhang Jianwu, Lu Tongli, et al. MAP control of starting clutch based on DMC-PID cascade algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2010,21(9):1 123 ~ 1 127. (in Chinese)
- Du Feng, Qian Qingquan. Networked control systems based on generalized predictive control and modified smith predictor [C]//Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2008:7 853 ~ 7 858.
- Du Feng, Du Wencai. Networked control systems with RBF neural network control and new smith predictor [C]//2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009, 2009:2 744 ~ 2 748.
- Mazinan A H, Sadati N. Multiple modeling and fuzzy predictive control of a tubular heat exchanger system[J]. WSEAS Transactions on Systems and Control,2008,3(4):249 ~ 258.
- 夏长亮,修杰. 基于 RBF 神经网络非线性预测模型的开关磁阻电机自适应 PID 控制[J]. 中国电机工程学报,2007, 27(3):57 ~ 61.
Xia Changliang, Xiu Jie. RBF ANN nonlinear prediction model based adaptive PID control of switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(3):57 ~ 61. (in Chinese)

(下转第 161 页)

从图7可以看出,显示屏能够正确显示作业机具所在不同网格位置,说明该网格识别算法可行。

4 结束语

实现了施肥机在不规则田块的实时定位,使该

定位方法更具有现实意义。田间试验结果表明,自动网格识别算法是可行的,而且定位系统工作稳定,可应用在其他精确农业变量作业机具的定位中,具有一定的通用性。

参 考 文 献

- 1 吴才聪,张书慧,马成林,等.利用 MapBasic 划分精确农业田块网格方法的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):156~159.
Wu Caicong, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Method of making field grids by MapBasic in precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 156~159. (in Chinese)
- 2 于英杰,张书慧,齐江涛,等.基于传感器的变量施肥机定位方法[J].农业机械学报,2009,40(10):173~176.
Yu Yingjie, Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, et al. Positioning method of variable rate fertilizer applicator based on sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 173~176. (in Chinese)
- 3 陈曠. ARM 嵌入式技术实践教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:9~13.
- 4 胥静.嵌入式系统设计与开发实例详解——基于 ARM 的应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:142~154.
- 5 吴才聪,马成林,张书慧,等.精确农业倾斜网格划分及其应用[J].农业工程学报,2003,19(1):137~141.
Wu Caicong, Ma Chenglin, Zhang Shuhui, et al. Method and application of making leaning field grid cell in precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 137~141. (in Chinese)

(上接第189页)

- 7 Ferreira P M, Ruano A E. Application of computational intelligence methods to greenhouse environmental modelling[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2008;3 582~3 589.
- 8 顾寄南,毛罕平.温室环境智能化控制数学模型的研究[J].农业机械学报,2001,32(6):63~66.
Gu Ji'nan, Mao Hanping. A mathematical model on intelligent control of greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 63~66. (in Chinese)
- 9 王子洋,秦琳琳,吴刚,等.基于切换控制的温室温湿度控制系统建模与预测控制[J].农业工程学报,2008,24(7):188~192.
Wang Ziyang, Qin Linlin, Wu Gang, et al. Modeling of greenhouse temperature-humid system and model predictive control based on switching system control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 188~192. (in Chinese)
- 10 魏东.非线性系统神经网络参数预测及控制[M].北京:机械工业出版社,2008.