

实验温室温度系统混杂控制器设计与分析

储著东, 秦琳琳, 陆林箭, 马国旗, 吴刚

(中国科学技术大学自动化系, 安徽合肥 230027)

摘要: 温室环境调控系统是一类具有离散设备控制和连续环境因子输入输出的混杂系统. 传统温室控制算法大都没有考虑温室的混杂特性, 采用系统建模与古典或现代控制算法控制温室环境系统, 缺乏对中国温室实际情况设计控制器和分析系统的混杂特性. 为此基于混杂自动机理论, 结合实验温室的降温设备, 设计了夏季温度混杂控制器, 并分析其执行的非阻塞性和确定性. 春季和夏季实验表明, 该控制器能根据设定值合理及时地切换控制设备状态. 此外, 建立了夏季和冬季两种典型模式的控制器框架, 通过分析2013年夏季至2014年夏季温室内日最低温度, 得到切换两种模式的参考时间设定值, 为实现温室周年连续控制提供设定参数, 对实际生产控制具有指导意义.

关键词: 温室温度; 混杂自动机; 混杂控制器; 时间设定值

中图分类号: S625.5+1; TP301.1 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.04.002

引用格式: CHU Zhudong, QIN Linlin, LU Linjian, et al. Hybrid controller design and analysis for experimental greenhouse temperature system[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(4):268-274.

储著东, 秦琳琳, 陆林箭, 等. 实验温室温度系统混杂控制器设计与分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(4):268-274.

Hybrid controller design and analysis for experimental greenhouse temperature system

CHU Zhudong, QIN Linlin, LU Linjian, MA Guoqi, WU Gang

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Due to the interaction between discrete on-off controls and continuous environmental factors, greenhouse temperature control systems can be regarded as a class of hybrid system. Most previous greenhouse control algorithms rely on an exquisite system model and classical or modern control theories, and fail to consider the actual conditions of greenhouses in China in their design of a controller and their system analysis does not include the hybrid properties of the greenhouse. Based directly on the hybrid automata theory, a hybrid controller was designed for controlling the temperatures of experimental greenhouse in summer. The controller was shown to be non-blocking and deterministic in hybrid automata theory framework. Experiments were performed in the spring and summer of 2014, and the controller behaved reasonably and timely when events triggered state transitions. Further more, a controller framework containing two typical hybrid controller modes was established for winter and summer to meet the needs of continuous control all year round. And the referential time points for mode transitions were obtained by analyzing daily lowest temperatures from 2013 to 2014.

Key words: greenhouse temperature, hybrid automata, hybrid controller, time set point value

收稿日期:2014-07-23;修回日期:2014-12-03

基金项目:国家自然科学基金(31000672),中央高校基本科研业务费专项资金(WK2100100024)资助.

作者简介:储著东,男,1989年生,硕士生.研究方向:现代温室建模与控制. E-mail: chu123@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:秦琳琳,博士/高级工程师. E-mail: qinll@ustc.edu.cn

0 引言

现代温室栽培,是通过温室内各种自动控制设备对温室环境的调控,营造适宜作物生长的环境,从而实现可控、高效和优质的农业生产。

为达到更好的控制效果,现代温室已大量使用智能控制算法^[1-4],这些算法将温室作为连续的动态系统,建立基于能量与物质平衡的物理模型,在此基础上设计控制算法,控制精度依赖于物理模型的准确性.我国温室环境控制设备大多数为开关设备,输入变量只有开启或关闭两种状态,是一类由离散事件驱动的动态系统,因此基于连续输入信号的建模方法难以适用于温室系统^[5].如果忽略这一特性,实际控制中会导致控制精度降低或设备切换频繁,使得设备能耗增加。

国内外学者将这类同时包含离散变量和连续变量的系统抽象为混杂系统^[6-7].该模型用一个离散变量集表示控制状态,当系统处于不同的控制状态时,连续变量遵循特定的规则演化^[8].其优点在于,利用这种模型可以直接研究系统的状态切换。

目前,直接利用混杂系统理论对温室建模与控制的文献并不多见. Rajaoarisoa 等^[9]结合温室小气候模型和混杂系统理论设计了最优控制器,但该方法对温室的控制依赖于各子状态机理模型的准确性.王子洋等^[5]对温室环境建立了切换系统模型,该方法仅考虑温室设备的不同组合,并没有将设备的当前状态作为切换条件进行考虑.阳斌等^[10]利用混杂自动机理论,结合渐消记忆增广最小二乘(RELS)法,分别表示温室天窗温度控制系统的离散和连续部分,在仿真实验取得良好控制效果的同时,缺少对模型的合理性进行分析,且控制设备仅限于天窗.由于温室控制设备多种多样,有必要设计调控多种设备状态的混杂系统控制器,以使控制手段多样化、合理化,达到更有力的控制效果;且对于该混杂控制器,需从混杂系统的状态切换角度分析其特性。

1 温室夏季典型温度混杂控制器的设计

1.1 混杂自动机

本文的分析是基于 Lygeros 提出的简化的混杂系统的定义^[11].

定义 1.1 混杂自动机(hybrid automata):混

杂自动机 $H = (Q, X, f, \text{Init}, \text{Dom}, E, G, R)$, 其中:

$Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ 是离散状态集(discrete states);

$X = \mathbb{R}^n$ 是连续状态集(continuous states);

$f(\cdot, \cdot): Q \times X \rightarrow \mathbb{R}^n$ 为向量场(vector field);

$\text{Init} \subseteq Q \times X$ 为初始状态集(initial states);

$\text{Dom}(\cdot): Q \rightarrow 2^X$ 为区域(domain);

$E \subseteq Q \times Q$ 表示离散转移(discrete transitions);

$G(\cdot): E \rightarrow 2^X$ 为保护条件(guard conditions);

$R(\cdot, \cdot): E \times X \rightarrow 2^X$ 表示重置映射(reset map).

对于 H 离散状态的切换时刻 $\tau_i, i = 1, 2, \dots$, 有:

定义 1.2 混杂时间序列(hybrid time set): 混杂时间序列 $\tau = \{I_0, I_1, \dots, I_N\} = \{I_i\}_{i=0}^N$, 其中,

对于 $i < N$, 有 $I_i = [\tau_i, \tau_i']$;

如果 $N < \infty$, 则 $I_N = [\tau_N, \tau_N']$ 或者 $I_N = [\tau_N, \tau_N')$, 并且可能有 $\tau_N' = \infty$;

对于所有 i , 有 $\tau_i \leq \tau_i' = \tau_{i+1}$.

在此基础之上,可以给出混杂自动机执行的定义:

定义 1.3 执行(Execution): 混杂自动机 H 的执行可表示为三元组 (τ, q, x) , 且 (τ, q, x) 满足:

初始状态: $(q_0(\tau_0), x_0(\tau_0)) \in \text{Init}$;

离散演化: 对于所有 i , 有: $(q_i(\tau_i'), q_{i+1}(\tau_{i+1})) \in E$, $x_i(\tau_i') \in G(q_i(\tau_i'), q_{i+1}(\tau_{i+1}))$, $x_{i+1}(\tau_{i+1}) \in R(q_i(\tau_i'), q_{i+1}(\tau_{i+1}), x_i(\tau_i'))$;

连续演化: 对于所有的 i , 有:

(I) $q_i(t) = q_i(\tau_i), t \in I_i$;

(II) $x_i(\cdot): I_i \rightarrow X$ 是微分方程 $dx_i(t)/dt = f(q_i(t), x_i(t))$;

以 $x_i(\tau_i)$ 为初值的解, 其中, $t \in I_i$;

(III) $t \in [\tau_i, \tau_i'), x_i(t) \in \text{Dom}(q_i(t))$.

定义 1.4 Reach: 如果对于混杂自动机 H , 存在有限执行 (τ, q, x) 以状态 (\hat{q}, \hat{x}) 结尾, 则称 (\hat{q}, \hat{x}) 为可达状态. 所有可达状态的集合称之为 Reach.

与之相对应, Trans 为连续状态无法继续演化的状态集合, 即: $\text{Trans} = \{(q, x) \in Q \times X \mid \forall \epsilon > 0, \exists t \in [0, \epsilon) \text{ 使得 } x(t) \notin \text{Dom}(q)\}$.

对于两个时间序列 $\tau = \{I_i\}_0^N$ 和 $\hat{\tau} = \{\hat{I}_i\}_0^M$, 如果它们完全相同, 或者 τ 是有限序列, $N \leq M$, $I_i = \hat{I}_i$ ($i = 0, 1, \dots, N-1$) 且 $I_N \subseteq \hat{I}_N$, 称 τ 是 $\hat{\tau}$ 的前缀, 记作 $\tau \subseteq \hat{\tau}$; 如果 $\tau \subseteq \hat{\tau}$ 且 $\tau \neq \hat{\tau}$, 则称 τ 是 $\hat{\tau}$ 的严格前缀, 记作 $\tau \subset \hat{\tau}$. 同理可定义执行的前缀与严格前缀的概念. 对于 H 的执行 (τ, q, x) , 如果 τ 是一个无限序列或 $\sum_{i=0}^N (\tau_i' - \tau_i) = \infty$, 则称该执行为无限执行; 如果 (τ, q, x) 不是任何其他执行的严格前缀, 则称其为 H 的最大执行.

混杂自动机模型具有自身的性能特性, 这些性能主要针对状态切换, 如模型的确定性、非阻塞性、可达性等. 对于温室温度控制, 还应包括对事件响应的时延、状态切换次数等.

1.2 温室夏季混杂自动机控制器框架

针对夏季高温高光辐射的天气, 设计温室混杂自动机控制器, 利用天窗、风机和湿帘三种设备的开关组合, 将室内温度控制在 (T_l, T_u) 区间内. 在春季和秋季, 由于本实验温室所在地区气候温和, 该控制器可以正常调控温室温度. $Q_0 \sim q_4$ 各离散状态所代表的控制情景的意义如表 1 所示.

图 1 为温室混杂自动机控制器的转移图. 各个离散状态的切换由室内、外实时温度以及它们和设定值的关系确定; 同时考虑到不同离散状态的工作能耗和可靠性, 在满足温度设定值的条件下, 选用离散状态的优先顺序为 $q_1 - q_2 - q_3 - q_4$.

表 1 离散状态含义表

Tab. 1 Connotations of discrete states

离散状态	含义	设备状态
Q_0	保护状态	极端天气, 或夜间模式
q_1	保温	风机关、湿帘关、天窗关
q_2	自然通风	风机关、湿帘关、天窗开
q_3	强制通风	风机开、湿帘关、天窗关
q_4	湿帘-风机降温	风机开、湿帘开、天窗关

图 1 中, u 为温室系统的输入变量集; x 为混杂自动机的连续状态向量, 这里表示室内温度; $t_{out} \in u$ 表示室外温度; T_u 和 T_l 分别为设定的温度上下限; T_b 为期望温度值, 可取为 $(T_u + T_l)/2$; ΔT 为设置的防抖动阈值, 是为了避免在某些离散转移后, 又立即跳变到另一个离散状态; Q_1 代表夏季降温典型控

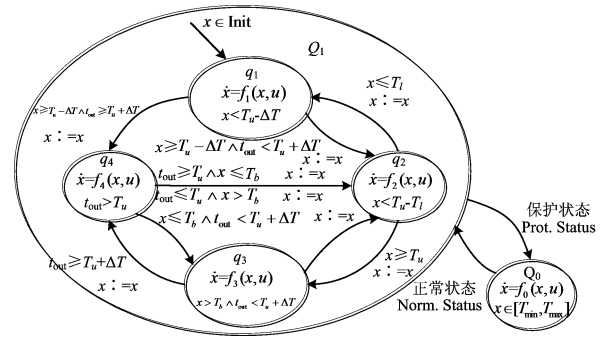


图 1 夏季温室混杂控制器转移图

Fig. 1 Transition graph of hybrid controller in summer 制模式. 在不考虑保护状态 Q_0 的情况下, H 可描述为:

$$Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\};$$

$$X = \{x\}.$$

其中, $x \in (a, b)$ 表示 H 只有一个连续状态, 且 x 的取值范围根据实际气候, 取为 (a, b) .

$\dot{x}(t) = f_i(q_i, x(t))$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 表示在每一个控制状态下, 连续变量的演化方程. 该方程一般为基于机理模型的微分方程, 或者基于输入输出模型的差分方程, 或者是一个形式未知的方程. 此时 $x(t)$ 代表室内的实时温度, 为一个连续量.

Init = $q_0 \times (a, T_u - \Delta T)$ 为初始状态集;

Dom(q_i), $i = 1, 2, 3, 4$ 为状态顶点中的不等式, 表示当 $x(t) \in \text{Dom}(q_i)$ 时, 系统可保持 q_i 状态不变;

E 表示离散转移, 为图 1 中的起、止点都为状态的箭头, 图中共有 8 中转移可能;

$G(\cdot)$ 为保护条件, 为离散转移上的不等式, 表示该转移发生的条件或事件;

$R(\cdot, \cdot)$ 为重置映射, 为离散转移上 $x := x$, 表示转移前后 x 不变.

图 1 中, Q_0 为保护状态. 设定 Q_0 的开启条件为雨雪、大风等恶劣天气, 或者温室维护和夜间模式.

对上面的 Dom(q_i) ($i = 1, 2, 3, 4$) 进行分析可得图 2. 图 2 中, 横坐标表示室内温度 x , 纵坐标表示室外温度 t_{out} , 图中不同的网状区域代表各个离散状态覆盖的温度空间. 可以看出, 该控制器能够处理由于气候和控制设备导致的室内温度和室外温度的各种组合. 该图还有一定的冗余性, 即包含实际系统不会出现的情形. 例如, 在夏季状态下的 q_1 和 q_2 , 室内温度 x 不会小于室外温度 t_{out} ; 对于本地气候条件, 夏季温度 t_{out} 和 x 不会出现负值.

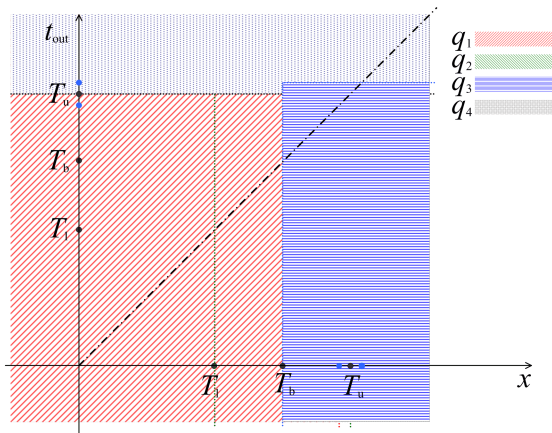


图 2 控制器各离散状态的覆盖范围

Fig. 2 The coverage of each discrete state of controller

1.3 控制器执行的非阻塞性和确定性分析

对于混杂自动机控制器而言,其执行具有非阻塞性的意义在于可以从理论上确保控制器可以一直运行下去;而确定性可以使其有一个确定的轨迹,消除了轨迹的多歧性.同时满足以上两个性质的混杂系统被成为适定的(well-posed)混杂系统.文献[12]中给出了非阻塞性和确定性的定义和判定方法.

定义 1.5 非阻塞性和确定性:如果对于 H 所有的初始状态 $(\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Init}$,都存在一个从 (\hat{q}, \hat{x}) 开始的无限执行,则称 H 为非阻塞的(Non-blocking);如果对于所有的初始状态 $(\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Init}$,只存在一个最大执行,则称 H 为确定的(deterministic).

定理 1.1 如果对于所有 $(\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Reach} \cap \text{Trans}$,都存在 $\hat{q}' \in Q$,使得 $(\hat{q}, \hat{q}') \in E$ 且 $\hat{x} \in G(\hat{q}, \hat{q}')$,则称该混杂自动机为非阻塞的.

对于图 1 所示的混杂自动机控制器:

首先计算 Reach ,易得 $\text{Reach} = \bigcup_{i=1}^4 (q_i \times \text{Dom}(q_i))$.

对于 $\text{Trans}(q_i)$,显然有 $\text{Dom}(q_i)$ 的外部(记作 $\text{Dom}(q_i)^c$)连续状态都不能继续演化,即 $\text{Dom}(q_i)^c \subseteq \text{Trans}(q_i)$;而对于 $\text{Dom}(q_i)$ 的内部(记作 $\text{Dom}(q_i)^o$),都存在一个 $t \in [0, \epsilon)$,连续状态可以继续演化,即 $\text{Trans}(q_i) \subseteq (\text{Dom}(q_i)^o)^c$.因此 $\text{Dom}(q_i)^c \subseteq \text{Trans}(q_i) \subseteq (\text{Dom}(q_i)^o)^c$.从 1.2 节中看出, $\text{Dom}(q_i)$ 为开集,有 $\text{Dom}(q_i)^c = (\text{Dom}(q_i)^o)^c$,所以 $\text{Trans}(q_i) = \text{Dom}(q_i)^c$.

综上, $\{(\hat{q}, \hat{x}) \mid (\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Reach} \cap \text{Trans}\} = \emptyset$.

根据定理 1,图 1 所示混杂自动机为非阻塞的.

定理 1.2 对于所有的 $(\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Reach}$,如果满足:

- ① 对于边缘 $(\hat{q}, \hat{q}') \in E$,如果有 $\hat{x} \in G(\hat{q}, \hat{q}')$,则 $(\hat{q}, \hat{x}) \in \text{Trans}(\hat{q})$;
- ② 如果 $(\hat{q}, \hat{q}') \in E$ 和 $(\hat{q}, \hat{q}'') \in E, \hat{q}' \neq \hat{q}''$,则 $\hat{x} \notin G(\hat{q}, \hat{q}') \cap G(\hat{q}, \hat{q}'')$;
- ③ 如果对于 $(\hat{q}, \hat{q}') \in E$ 和 $\hat{x} \in G(\hat{q}, \hat{q}')$,有 $R(\hat{q}, \hat{q}', \hat{x}) = \{\hat{x}'\}$,即集合只有一个元素.则称该混杂自动机为确定的.

对于图 1 所示的混杂自动机控制器,有:

(I) 从图 1 及非阻塞性证明中可以看出, $G(\hat{q}, \hat{q}') \subseteq \text{Dom}(\hat{q})^c = \text{Trans}(\hat{q})$,因此条件 ① 满足;

(II) 从图 1 可看出,从同一状态顶点出发的转移路径上的保护条件之间,交集都为 \emptyset ,因此条件 ② 满足;

(III) 图 1 中,转移路径上的重置映射都为 $x: = x$,显然满足 $R(\hat{q}, \hat{q}', \hat{x}) = \{\hat{x}'\}$.因此图 1 所示的混杂自动机为确定的.

1.4 实际控制器的验证与结果分析

在中国科学技术大学自动化系实验温室硬件基础之上,利用 VB 语言和 SQL 工具,依据图 1 所示的混杂自动机控制器转移图编写了现代温室智能监控软件.实验温室内外温度传感器采用 WS301A0T 型温湿度传感器,精度 $\leq \pm 0.3^\circ\text{C}$.另外,本实验温室室内遮阳单独控制,其开度仅由光辐射强度驱动.

验证实验于 2014 年春季和夏季进行,实验结果分别如图 3(a)和(b)所示.图中,22:00~07:00 时段为保护状态 Q_0 ,驱动状态切换的事件包括时间定时和温度区间的设定.图 3(b)中保护状态结束后,由于全天温度很高,所以一直保持在 q_4 状态.由于传感器精度误差不超过 $\pm 0.3^\circ\text{C}$,状态切换后时滞产生的温度变化误差不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,因此 ΔT 可取为 1°C .通过对状态切换的分析,该混杂自动机控制器能够根据离散转移的条件,做出合理的切换决策,响应速度快($< 5\text{s}$),且状态切换没有冗余.

表 2 给出了两次实验数据的对比与分析.由此可以看出,该控制器能正确地切换离散状态,但是由于设备调温能力有限,室内温度有时会跳出目标区间,

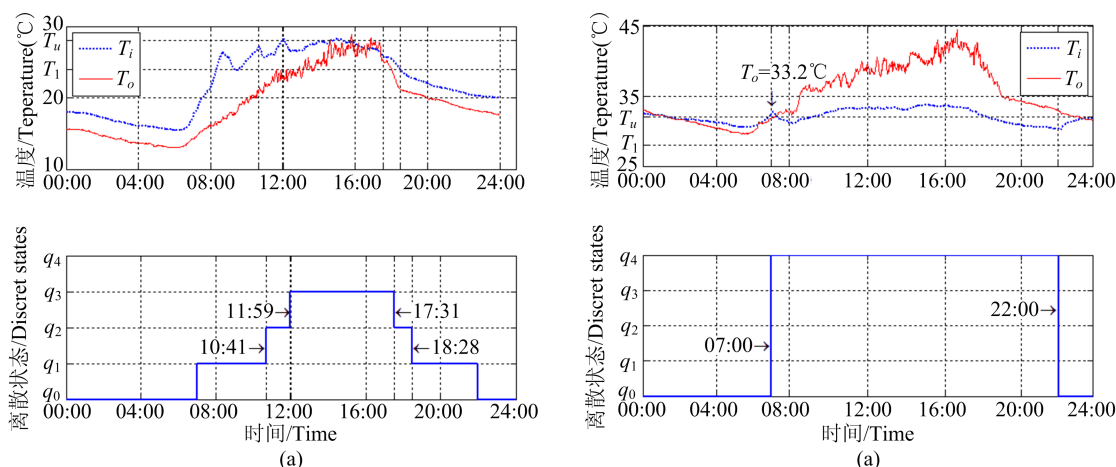


图 3 温室温度曲线和离散状态转移曲线

Fig. 3 Temperature curve and discrete states curve of greenhouse

表 2 实验数据比较与分析

Tab. 2 Comparison and analysis of experimental data

Date	T_u	T_l	T_b	T_o		T_i		$r(\%)$	
				$T_{o\max}$	$T_{o\min}$	$T_{i\max}$	$T_{i\min}$		
Fig. 3(a)	2014/4/2	28.0	24.0	26.0	28.8	17.3	28.3	17.3	61.6
Fig. 3(b)	2014/7/23	32.0	28.0	30.0	44.4	31.8	33.8	30.3	37.2

注:上表中单位为 $^{\circ}\text{C}$, 时间段为 7:00~22:00. T_o 表示室外温度, T_i 表示室内温度; $T_{o\max}$ 表示室外最高温度, $T_{o\min}$ 为室外最低温度; $T_{i\max}$ 表示室内最高温度, $T_{i\min}$ 表示室内最低温度; r 表示室内温度在目标区间的数据占总数据的百分比.

即 r 参数无法达到 100%. 例如图 3(b) 中, $T_{o\max} = 44.4^{\circ}\text{C}$, 现有实验温室的设备无法将温度控制在 (T_l, T_u) 范围内, 以致 $T_{i\max} = 33.8^{\circ}\text{C}$. 在实际生产中, 如果温度不超过种植作物的最高温度, 可以不采取其他降温措施.

温室系统是一类时变的复杂对象, 其系统模型难以描述成 LTI 方程或方程的建立难度非常大, 导致很多算法无法在温室中实际连续运行. 混杂自动机理论从状态切换出发, 以外部事件驱动切换, 这保证了该控制器可以非常方便地投入到实际应用中.

2 温室混杂控制器设计问题

2.1 温室混杂系统控制器设计

对于不同的生长季节, 植物对环境有不同的要求, 相应的需要不同的环境目标值. 除了上文中所述的夏季降温, 冬季温室的主要作用在于增温, 使室内温度保持在 (T_l, T_u) 之间. 冬季温室除利用室外光照自然积温外, 还可以利用加热装置增温. 图 4 中 Q_2 代表冬季增温典型控制模式, 状态 q_5 代表加热器增温状态.

对图 4 所示的控制器, 同样可利用 1.3 节中介

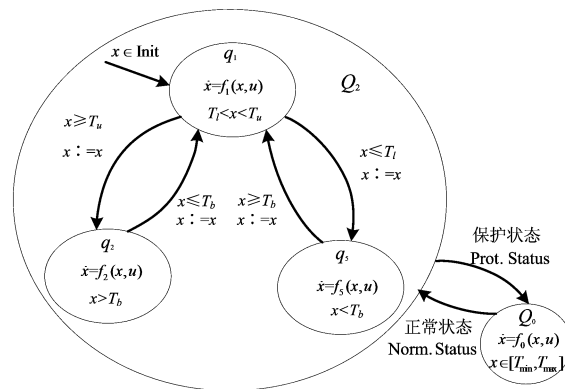


图 4 冬季温室混杂控制器转移图

Fig. 4 Transition graph of hybrid controller in winter

绍的方法, 分析其合理性. 本实验温室处于亚热带季风气候, 春季和秋季的室外温度适中, 因而可采用夏季温室控制器的控制策略对温度进行调控. 这样对于温室温度就建立了如图 5 所示的层次化的混杂控制器.

2.2 温室温度混杂控制器的设定

以上温室温度混杂控制器的设计, 关键在于对特定的栽培作物, 设置合理的 T_u 、 T_l 以及冬季模式和夏季模式的开始时间. 例如, 文献[13]表明, 蝴蝶

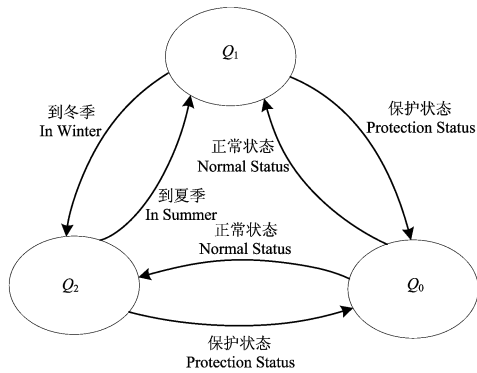


图 5 温室温度混杂控制器

Fig. 5 Hybrid controller for greenhouse temperature

兰最适生长温度为 24~27℃, 11 月中旬至 3 月中旬需进行人工增温, 此期间温度控制在 15~18℃. 蝴蝶兰冷害的临界温度在 10~12℃.

对于商业温室, 控制决策往往依据历史经验和数据, 因此对历史数据的分析尤为重要. 图 6 为实验温室 2013/6/15~2014/6/15 期间, 温室内日最低温度曲线. 根据文献[13], 如果在设定冬季温室内最低温度临界点为 15℃, 从图中得到冬季模式可以从 10 月中旬开始, 夏季模式从 2014 年 4 月初开始. 夏季温室混杂控制器中 $T_u = 27℃$, $T_l = 24℃$; 冬季温室混杂控制器中 $T_u = 18℃$, $T_l = 15℃$.

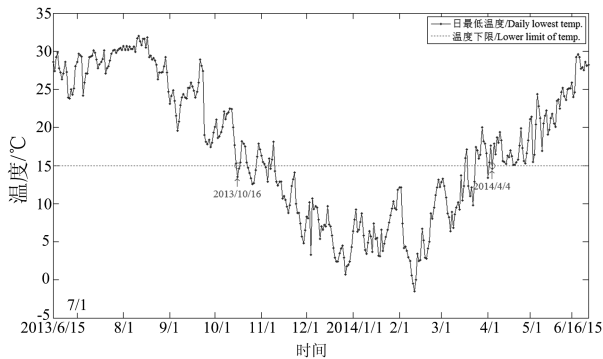


图 6 2013—2014 年温室内日最低温度

Fig. 6 Daily lowest temperatures in greenhouse from 2013 to 2014

2.3 混杂自动机研究中的一些问题

由于混杂动态系统本身的混杂特性, 在设计混杂控制器时会遇到一些不同于连续系统和离散系统的特性与要求. 一些混杂系统要求具有多目标的控制要求, 如在保证系统安全性 (safety) 情况下尽量使系统高效 (efficiency). 在混杂系统控制器综合问题中, 系统可达性 (reachability) 非常重要. 大体上说, 系统可达性是判断系统从某个初始状态集出发, 能否达到某个特定集合的问题[14]. 可达性分析可以

判定控制器能否通过控制作用, 使系统状态始终处于安全集合内, 这对温室内温度控制具有重要意义.

温室小气候具有大时滞、强耦合、强扰动、非线性等特点, 是一个复杂的控制对象[15]. 建立混杂自动机模型的目的之一就是将控制设备的离散输入转化为混杂自动机模型的离散状态的切换, 从而在建立连续变量演化方程时不考虑设备的控制输入. 此时系统的输入为室外的气象条件, 如室外温度、光照、风速、湿度等, 具有不确定性和不可预知性. 在建立连续变量的演化方程时, 无论以式(1)所示的输入输出模型表示[16], 还是以式(2)所示的机理模型表示[17], 其输出温度值都是由室外环境因子决定. 这给这类混杂系统可达性理论分析带来了困难.

$$A(q^{-1})y(k) = \sum_{i=1}^n B_i(q^{-1})u_i(k - n_{di}) + \xi(k) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V\rho c_p \frac{dT_{in}}{dt} = & h_c A_c (T_{out}(t) - T_{in}(t)) + \\ & \rho c_p V_{in}(t) (T_{out}(t) - T_{in}(t)) + kQ_{rad}(t) - \\ & \lambda E(t) A_c + Q_{heat}(t - t_d) \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)中, $y(k)$ 为室内温度, u_i 为室外温度、室外湿度、太阳辐射等因子, $\xi(k)$ 为随机项. 式(2)中, T_{in} 表示室内温度, T_{out} 为室外温度, Q_{rad} 为温室吸收的太阳能, E 为作物蒸腾作用吸收的热量, Q_{heat} 为温度调控设施提供的热量, V 为温室体积, V_{in} 为通风率, ρ 为空气密度, c_p 为空气比热容, 其他为系数.

3 结论

混杂自动机理论作为一种新兴的控制理论, 为温室的温度控制指出了一个新的方向. 利用该理论, 本文主要成果为:

(I) 建立实验温室夏季温度混杂控制器, 并分析了该控制器的确定性和非阻塞性. 春季和夏季实验表明, 该控制器状态切换合理, 对温度设定和时间设定响应及时; 且不依赖于温度模型, 实用性强.

(II) 分析实验温室内 2013~2014 年日最低温度, 得到实验温室冬季模式和夏季模式的切换时间, 为实现混杂控制器的周年连续控制提供时间设定依据.

如何利用试验温室内外多种气象因子设计多目标控制器, 是未来工作重要内容. 此外, 温度控制器在周年控制中的合理性与可靠性需要进一步验证分析.

参考文献(References)

- [1] Chen L J, Zhang H R, Du S F. Greenhouse temperature control system based on fuzzy theory[C]// Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Shenyang, China: IEEE Press, 2013:1673-1677.
- [2] Durão B, Joyce A, Mendes J F. Optimization of a seasonal storage solar system using genetic algorithms [J]. Solar Energy, 2014, 101: 160-166.
- [3] Xu Z T, Yao Z Y, Chen L J, et al. Greenhouse air temperature predictive control using the dynamic matrix control [C]// 2013 4th International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Beijing, China: IEEE Press, 2013: 349-353.
- [4] Fathi Fourati. Multiple neural control of a greenhouse [J]. Neurocomputing, 2014, 139:138-144.
- [5] 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 CSAE, 2008, 24 (7): 188-192.
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.
- [6] Alur R, Courcoubetis C, Halbwachs N, et al. The algorithmic analysis of hybrid systems[J]. Theoretical Computer Science, 1995, 138(1): 3-34.
- [7] Antsaklis P J. Special issue on hybrid control systems: Theory and applications a brief introduction to the theory and applications of hybrid systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(7):879-887.
- [8] Campagna D, Piazza C. Hybrid automata in Systems biology: How far can we go? [J]. Theoretical Computer Science, 2008, 229(1):93-108
- [9] Rajaoarisoa L H, M' Sirdi N K, Balmat J. Microclimate optimal control for an experimental greenhouse automation[C]// 2012 2nd International Conference on Communications, Computing and Control Applications. Marseilles, France: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [10] Yang B, Qin L L, Wu G. Modeling and control for greenhouse temperature system based on hybrid automata [C]// 30th Chinese Control Conference, Yanta, China: IEEE Press, 2011: 1627-1631.
阳斌,秦琳琳,吴刚.基于混杂自动机的温室温度系统建模与控制[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会 D 卷.烟台,2011:1627-1631.
- [11] Lygeros J. Hierarchical hybrid control of large scale systems [D]. Department of Electrical Engineering, University of California, Berkeley, 1996.
- [12] Lygeros J, Johansson K H, Simic' S N, et al. Dynamical properties of hybrid automata [J]. IEEE Transactions on automatic control, 2003, 48(1): 2-17.
- [13] Lou J H. Effect of temperature, light and media on growth of phalaenopsis [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1995, 7 (6): 464-467.
楼建华. 温度、光照及栽培基质对蝴蝶兰生长发育的影响[J].浙江农业学报,1995,7(6):464-467.
- [14] Abate A, Prandini M, Lygeros L, et al. Probabilistic reachability and safety for controlled discrete time stochastic hybrid systems[J]. Automatica, 2008, 44 (11): 2724-2734.
- [15] Ma L L, Ji J W, He C X. The study of greenhouse temperature modeling based on fuzzyneural network [C]// 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment. Henan, China: IEEE Press, 2010: 1- 4.
- [16] Li J, Qin L L, Yue D Z, et al. Experiment greenhouse temperature system modeling and simulation [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20 (7): 1869-1875.
李晋,秦琳琳,岳大志,等.试验温室温度系统建模与仿真[J].系统仿真学报,2008,20(7):1869-1875.
- [17] Qu Y, Ning D, Lai Z C, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2), 307-311.
屈毅,宁铎,赖展翅,等.温室温度控制系统的神经网络PID控制[J].农业工程学报,2011,27(2):307-311.