

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.039

基于积温理论的温室温度混杂系统预测控制

秦琳琳 马 娇 黄云梦 吴 刚
(中国科学技术大学信息科学技术学院, 合肥 230027)

摘要: 温室温度系统作为典型的混杂系统,其输入包括离散的设备控制量以及可测不可控的多个室外环境扰动量。本文针对温室温度混杂系统,建立切换系统模型,基于此模型设计多输入预测控制。首先分别在4种离散状态(保温模式、自然通风模式、强制通风模式、湿帘-风机模式)下确定模型的主相关输入,采用带遗忘因子的递推最小二乘法建立子模型。然后设计预测控制器,利用双周期积温法规划预测控制设定值。求解多输入预测控制量问题为NP-hard问题,采用最优修剪法优化搜索。最后在实验温室应用控制算法进行实验,实验结果表明,多输入预测控制算法可以有效调控温室内温度,并且由于积温理论动态规划预测控制设定值,可减少设备的切换次数,降低能耗。

关键词: 温室; 温度; 积温; 切换系统; NP-hard问题; 最优修剪法
中图分类号: S625 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0347-09

Predictive Control of Greenhouse Temperature Hybrid System Based on Crop Temperature Integration Theory

QIN Linlin MA Jiao HUANG Yunmeng WU Gang
(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Greenhouse temperature system is a typical hybrid system, and its inputs include discrete equipment control quantities and a number of outdoor environmental disturbances that can be measured and not controlled. A hybrid system was proposed for greenhouse temperature, a switching system model was established, and a multi-input predictive control was designed based on this model. A determined device state can be considered as a subsystem, and the modeling of the greenhouse system can also be transformed into the modeling of all subsystems. There were numerous greenhouse environments, so it was needed to simplify the input variables. By correlation analysis, outside temperature, outside humidity and solar radiation had obviously strong correlation with inside temperature. The ARMAX model was used to describe the model, and the augmented recursive least square method with forgetting factor was used to identify the model parameters, and the model accuracy was verified. The ARMAX model was used to design a predictive control controller to solve each device's action sequence, which was an NP-hard problem, and it was solved by optimized pruning simplifies the calculation process. At each sampling time, the set value predictive control was determined, however, under uncontrollable external environmental factors, the output fluctuations were large. If a fixed set-point was used, the system would be switched frequently, and thus increasing equipment loss. In order to solve this problem, the dual-period accumulative temperature method was utilized to dynamically adjust the set-point of predictive control according to the long-period average value of the indoor temperature and the current value, so as to reduce the unnecessary switching of the equipment and reduce the loss.

Key words: greenhouse; temperature; temperature integration; switched systems; NP-hard problem; optimized pruning

0 引言

现代温室是设施农业的典型代表,温室技术是现代农业技术的重要组成部分,温室环境系统建模与控制是温室技术的核心^[1]。为实现温室环境调控,现代温室安装有各类传感器和环境调控设备。根据温室环境调控需要,传感器一般包括温度传感器、湿度传感器、二氧化碳浓度传感器、太阳辐射强度传感器、风速传感器等,分别用来测量室内外温度、室内外湿度、室内二氧化碳浓度、太阳辐射强度以及室外风速。控制装置主要包括天窗、湿帘、风机、遮阳网等^[2]。在中国,温室环境调控设备主要由开关设备和能连续控制但无位置反馈的设备构成。

温室小环境控制经过多年积累,已经取得很多重要成果,目前研究重点主要集中在3个方面:①建立温室温度和湿度模型,包括根据能量平衡和物质平衡建立的机理模型^[3-5],以及根据输入输出数据,采用系统辨识方法建立的辨识模型^[6-8],由于机理模型未知参数较多,而且多数参数难以确定,部分参数测量需要特殊仪器,甚至部分参数还可能随着温室长期运行发生改变,建模较多采用基于输入输出数据的参数模型^[9]。②利用各种先进的智能控制算法进行环境控制,如 MIRZAEI-GHALEH 等^[10]采用模糊控制、FOURATI^[11]采用人工神经网络、MARTINOVIĆ 等^[12]采用专家系统,都是试图避免建模过程,直接设计控制系统。③国内温室混杂系统的研究,通过引用混杂自动机^[13]、切换系统^[14-15]来解决温室温度建模与控制的问题。混杂自动机控制可以有效解决设备频繁切换的问题,但控制精度有限,切换系统可以与智能控制算法结合^[16],提高控制质量。

目前温室调控策略多是着眼于“最优”的气候环境控制^[17],但温室温度系统的输入量包括环境调控设备的开关状态以及外界可测不可控的扰动输入,只能通过控制调控设备开关对温室温度进行调控,但扰动输入会使温度控制无法始终满足设定值。如果只考虑控制精度会大大增加调控成本,为减少调节温室温度带来的能源浪费,需要优化温度调控设定值^[18]。

本文利用切换系统的思想来解决温室温度系统的建模和多输入预测控制问题,在每个控制时刻获得温室多个设备的控制序列,因此优化性能指标的求解是一个 NP-hard 问题^[19]。引入积温控制思想^[20-21]对预测控制设定值进行优化,采用双周期规划积温目标,根据积温和当前温度动态调整预测控

制设定值,以减少能耗,避免设备频繁切换。

1 温室温度系统建模

由于温室温度调控设备主要是由开关设备以及能连续调节但无位置反馈设备构成,设备(如天窗、湿帘、风机、遮阳网等)状态一般是离散变量,而室外环境变量(如太阳辐射、室外温度、室外湿度、风速等)与室内环境变量(室内温度、室内湿度等)是连续变量,因此温室温度系统是一个典型的混杂系统。温室温度系统中的室外环境变量是可测不可控的扰动输入变量,与环境调控设备共同影响温度系统的动态特性。设备状态不同逻辑组合会使系统产生不同的动态特性,一种确定的设备状态即可视为一个子系统,温室系统的建模也可转换为对所有子系统的建模。

1.1 模型选取

模型选择采用线性自回归滑动平均(Auto-regressive moving average with exogenous variable, ARMAX)模型

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

(1)

其中

$$\begin{cases} A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \cdots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B_i(q^{-1}) = b_{i1}q^{-1} + \cdots + b_{in_{bi}}q^{-n_{bi}} \\ C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \cdots + c_{n_c}q^{-n_c} \end{cases}$$

(2)

$$q^{-1}y(k) = y(k-1)$$

式中 k ——采样时刻序号
 q^{-1} ——移位算子
 $y(k)$ ——第 k 个采样时刻室内温度
 $u_i(k)$ ——第 k 个采样时刻室外环境因子
 n_{bi} ——各室外环境因子量阶次
 n_{di} ——噪声阶次
 $e(k)$ ——均值为零、有界、不相关的平稳随机序列

温室环境变量众多,冗余的信息条件会降低模型精度,减慢收敛速度,故需要分析输入变量以简化模型。采用相关分析技术选取与温度系统最相关的输入变量。皮尔逊相关性系数 $\rho_{x,y}$ 计算公式^[22]为

$$\rho_{x,y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)} \sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}}$$

(3)

式中 E ——数学期望

1.2 模型结构确定

模型阶次 n 是模型残差平方和 $\gamma(n)$ 的函数,模型阶次递增 $\gamma(n)$ 下降,且在 $n = n^*$ 处有拐点, n^* 为实际阶次,根据拐点实现模型定阶^[23]。

$$\gamma(n) = (y - X\hat{\theta})^T (y - X\hat{\theta}) \tag{4}$$

式中 $\hat{\theta}$ ——参数估计向量

为了更直观判断,利用统计假设检验判断拐点,引入统计量

$$f = \frac{\frac{\gamma(n_1) - \gamma(n_2)}{3(n_2 - n_1)}}{\frac{\gamma(n_2)}{N - 3n_2}} \tag{5}$$

式中 N ——数据长度

f 服从 $F(f_1, f_2)$ 分布,2 个自由度分别是: $f_1 = 3(n_2 - n_1)$, $f_2 = N - 3n_2$,当阶次是逐阶递增,则 $f_1 = 3$,当数据长度足够长, $f_2 \approx N$ 。

根据 F 检验,判断当阶次从 n_1 增加至 n_2 时, $\gamma(n)$ 的减小是否显著。引入统计量 α, f^* 为 f_1, f_2 确定时的 F 分布临界值,若 $f > f^*$,则认为在 α 风险水平下 $\gamma(n)$ 的变化是显著的,反之亦然。按照上述分析,可知第一次出现 $f < f^*$ 时,模型阶次即为当前阶次,即 $n = n^*$ 。取 $\alpha = 0.05$,查表可知,对应 $f_1 = 3$, $f_2 = \infty$,临界值 $f^* = 2.60$ 。

1.3 辨识方法与模型检验

为防止因辨识数据过多导致饱和,优先考虑新数据对模型的影响,采用带遗忘因子 λ 的最小二乘增广递推算法^[24]

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + L(k)(Y(k) - \Psi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \\ L(k) = P(k-1)\Psi(k)(\Psi^T(k)P(k-1)\Psi(k) + \lambda)^{-1} \\ P(k) = (I - L(k)\Psi^T(k))P(k-1)/\lambda \end{cases} \tag{6}$$

式中 $L(k)$ —— k 步估计观测向量

$Y(k)$ —— k 步模型输出

λ ——遗忘因子, $\lambda \in (0, 1]$

为检验模型精度,验证模型输出与实际输出的拟合效果,采用均方根误差(Root mean square error, RMSE)作为指标^[25]

$$e_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2}{N}} \tag{7}$$

式中 y_k —— k 采样时刻的实际输出

$\hat{y}_k$ —— k 采样时刻的模型输出

e_{RMSE} ——均方根误差

2 温室温度系统的预测控制

预测控制基本思想是在每一个采样时刻,使用当前时刻的实测输出和模型的多步预测输出,通过极小化有约束的目标函数,获到当前和未来有限时段的控制量序列,仅使用控制量序列第一个值作为当前控制量。在下一采样时刻检验实际输出值,重

新计算预测输出,计算控制量,形成了闭环反馈控制。

预测控制引入到温室温度控制中,每个采样周期优化的应是预测域中的状态切换序列。预测控制算法性能指标函数为

$$J = \min \sum_{k=0}^{P-1} (J_a + J_b) \tag{8}$$

其中 $J_a = \|y(t+k|t) - S_{pt}\|_{Q_1}^2$ (9)

$$J_b = \sum_{i=1}^R (\|\sigma_i(k) - \sigma_i(k-1)\|_{Q_2}^2 + \|\sigma_i(k)\|_{Q_3}^2) \tag{10}$$

$$y(t+k|t) = \sum_{j=1}^R \sigma_{jk}(A'_j(q^{-1})y(t+k-1|t) + B_j(q^{-1})U(t+k-n_{dj})) \tag{11}$$

$$A'_j(q^{-1}) = -a_{1j} - a_{2j}q^{-1} - \dots - a_{n_{aj}}q^{-n_{aj}+1} \tag{12}$$

$$y(t|t) = y(t) \tag{13}$$

式中 S_{pt} ——预测控制设定值
 P ——预测步长
 R ——子模型个数
 σ_{jk} ——第 j 个子模型状态,0 表示关闭,1 表示开启, $\sigma_{jk} = \{0, 1\}$

$y(t)$ ——当前 t 时刻输出

$y(t+k|t)$ —— t 时刻对 $t+k$ 时刻的预测输出

$\|y(t+k|t) - S_{pt}\|_{Q_1}^2$ 保证了状态达到平衡状态,输出跟随设定值; $\|\sigma_i(k) - \sigma_i(k-1)\|_{Q_2}^2$ 包含采样时间点之间设备切换变化信息,此信息加入性能指标中; $\|\sigma_i(k)\|_{Q_3}^2$ 可以保证设备运行时间最小化,减少设备运行能耗。故控制量优化的目标是对包括跟随设定值、设备状态切换次数最小化、设备使用时间最少化 3 个目标的折中考虑,系数 Q_1, Q_2, Q_3 是不同指标的权重因子。

在预测控制序列求解过程中,由于系统输入包括可测不可控的室外环境因子扰动,而扰动序列中 $[u_{t+1}, u_{t+2}, \dots, u_{t-d+k}]$ 是未来时刻室外环境因子,需要对其进行预测。采用滑动灰色预测算法^[15] 预测未来短时间室外环境因子。

每个设备的动作序列为待求解的控制量,每一步预测输出中,不同时刻不同设备控制序列是乘积关系,性能指标函数阶次为 R^P 。这个高阶多项式还是一个非确定性多项式(Non-deterministic polynomial, NP),所求问题是 NP-hard 问题^[19],且待优化问题中,未来的决策受之前状态的直接影响,即不满足动态规划算法的无后效性原理,无法使用动态规划解决。采用最优化剪枝穷举法来求解待优化问题。最优化剪枝算法实施步骤如下:

(1) 按预测步数将问题分解成 P 个子问题: $J =$

$J_1 + J_2 + \cdots + J_P。$

(2) 计算切换序列的损失函数 $J(i), i = 1$, 令最小损失函数 $\min J = J(i), i = i + 1。$

(3) 逐步计算切换序列的损失函数 $J(i)$, 若第 k 步时累积损失函数 $\sum_{n=1}^k J_n(i) > \min J$, 实施剪枝, 不再计算 k 步以后的值; 若计算完全部 P 步 $J(i) = \sum_{n=1}^P J_n(i) < \min J$, 令 $\min J = J(i), i = i + 1。$

(4) 重复步骤(3), 直到遍历所有切换序列。

3 积温理论优化温度设定值

在切换系统中运用预测控制, 在每一采样时刻, 设定值是确定的, 得到的控制量是切换序列, 而系统在不可控的室外环境因子强力扰动下, 输出波动较大, 若采用固定设定值, 则系统会频繁切换, 增加设备损耗。一般温室温度控制是将室内温度控制在一个区间内, 且目标区间的取值也不是固定的。

作物在极端温度下生理结构、光合作用会受到损害, 积温控制理论认为, 在极限温度之内, 作物的生长发育与一段时间内其所处环境温度的积累有关。作物光合反应是瞬间过程, 而光合同化物向干物质转换是动态过程, 有缓冲能力。不同作物的缓冲能力有差异, 为防止积温对作物生长发育造成影响, 需要规划积温控制的积温周期与积温设定值。

本文采用双周期积温控制方法, 长周期设为 6 d, 短周期设为 1 d^[20]。作物在长周期期间积温总量期望为 $T_{set,LT}$, 长周期积温有效区间为 $[T_{min,LT}, T_{max,LT}]$, 作物可承受极限温度区间(即短周期积温区间)为 $[T_{min,ST}, T_{max,ST}]$, 短周期积温期望是非固定的, 温度在允许范围内波动的同时, 其平均温度需要满足长周期规划。

双周期积温规划图如图 1 所示, 图中实线表示长周期规划曲线, 虚线表示短周期规划曲线。图中曲线 a 是常见的短周期温度曲线, 所有温度都在长周期有效积温区间内, 平均温度为 $T_{set,LT}$; 曲线 b 则是以极限温度作为界限, 平均温度为 $T_{set,LT}$, 温度波动范围很宽; 曲线 c 平均温度为 $T_{max,LT}$, 曲线 d 平均温度为 $T_{min,LT}$, 都满足短周期规划, 也都可作为长周期规划的其中 1 d。 $T_{targ,ST}$ 表示短周期规划日平均温度目标区间。

作物生长发育除了与积温关系密切, 其形态学特征是受昼夜温差 (Difference between day temperature and night temperature, DIF) 的影响, 温差为正要促进植株长高, 反之会抑制植株株高, 根据作

物生长需求调节 DIF 值。

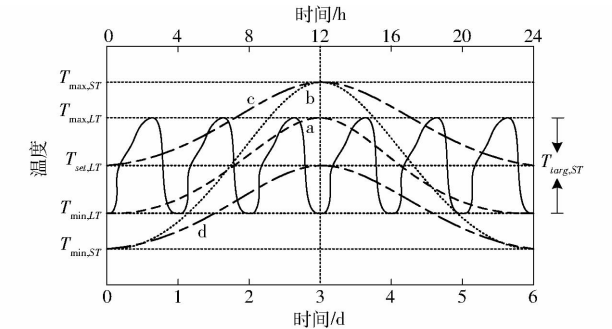


图 1 双周期积温规划

Fig. 1 Dual-cycle temperature integration planning

长周期积温控制策略是一种事后补偿过程, 并非在控制过程前确定整个周期内最佳的温度设定值, 而是在长周期最后 1 d 补偿周期前 5 d 的平均温度偏差。故未来 24 h 积温目标可表示为

$$\bar{T}_{set,24} = \sum_1^P T_{set,LT} - \sum_1^{P-1} \bar{T}_{real} \tag{14}$$

$T_{min,ST} \leq \bar{T}_{set,24} \leq T_{max,ST}, T_{min,ST} \leq T_{set,LT} \leq T_{max,ST}$ 代入式(14)有

$$\begin{cases} \bar{T}_{set,24} \geq \sum_1^P T_{min,LT} - \sum_1^{P-1} \bar{T}_{real} \\ \bar{T}_{set,24} \leq \sum_1^P T_{max,LT} - \sum_1^{P-1} \bar{T}_{real} \end{cases} \tag{15}$$

令
$$\begin{cases} T_{set,L} = \sum_1^P T_{min,LT} - \sum_1^{P-1} \bar{T}_{real} \\ T_{set,H} = \sum_1^P T_{max,LT} - \sum_1^{P-1} \bar{T}_{real} \end{cases} \tag{16}$$

$[T_{set,L}, T_{set,H}]$ 即为未来 24 h 温度控制目标, 前 $(P - 1)$ 日平均温度和直接决定未来 24 h 的温度控制设定值。若前 $(P - 1)$ 日平均温度已满足长周期积温规划, 则未来 24 h 设定值区间会放宽, 如图 1 曲线 b; 若前 $(P - 1)$ 日平均温度低于长周期积温规划设定值, 则未来 24 h 设定值会升高, 如图 1 曲线 c; 若前 $(P - 1)$ 日平均温度高于长周期积温规划设定值, 则未来 24 h 设定值会降低, 如图 1 曲线 d。积温在长周期积温要求的同时, 短时温度也不能超过作物可承受极限温度范围。此外, 设定值范围应合理, 不应集中在过高或者过低区域, 以长周期积温上下限中点 $T_{mid,LT} = (T_{max,LT} + T_{min,LT})/2$ 作为积温目标 $T_{set,L}$ 的上限, 作为积温目标 $T_{set,H}$ 的下限, $T_{min,ST} \leq T_{set,L} \leq T_{mid,LT}, T_{mid,LT} \leq T_{set,H} \leq T_{max,ST} \circ$

所以有

$$T_{set,L} = \begin{cases} T_{mid,LT} & (T_{set,L} \geq T_{mid,LT}) \\ T_{set,L} & (T_{min,ST} \leq T_{set,L} < T_{mid,LT}) \\ T_{min,ST} & (T_{set,L} < T_{min,ST}) \end{cases} \tag{17}$$

$$T_{set,H} = \begin{cases} T_{\max,ST} & (T_{set,H} \geq T_{\max,ST}) \\ T_{set,L} & (T_{\text{mid},LT} \leq T_{set,H} < T_{\max,ST}) \\ T_{\text{mid},LT} & (T_{set,H} < T_{\text{mid},LT}) \end{cases} \quad (18)$$

预测控制积温设定值规划为

$$S'_{pt} = \begin{cases} T_{set,L} & (T_{real} < T_{set,L}) \\ T_{real} & (T_{set,L} \leq T_{real} < T_{set,H}) \\ T_{set,H} & (T_{real} \geq T_{set,H}) \end{cases} \quad (19)$$

式中 T_{real} ——当前室内温度
 S'_{pt} ——积温规划设定值

设定值的确定还应考虑 DIF 值,研究表明试验温室种植的番茄作物在开花前保证 6.0 ~ 8.0℃ 的 DIF 可以促进生长^[26]。

由于试验温室缺少加温设备,对于夜间温度控制能力有限,故使用前 1 d 夜间平均温度来指导第 2 天白天温度设定值。计算前 1 d 18:00 至当天 08:00 这 14 h 平均温度作为夜间平均温度 $\bar{T}_N$,白天平均温度定义为 $\bar{T}_D = (T_{set,L} + T_{set,H})/2$,则 $T_{DIF} = \bar{T}_D - \bar{T}_N$ 。若利用积温计算的设定值满足 DIF 要求则设定值不变,若积温设定值不满足 DIF 要求则需要调整设定值以满足 DIF 指标。综合积温与 DIF 最终确定预测控制设定值 S_{pt} 。

4 实验分析

4.1 实验材料与方法

实验温室位于安徽合肥中国科学技术大学西区信息科学技术学院,面积 82 m²,东西走向,东西长 12.2 m,南北跨度 8.2 m。温室内安装有温湿度传感器、太阳辐射仪器、CO₂ 浓度传感器,室外设有小型气象站,包括温湿度传感器、太阳辐射仪器、风速风向传感器用于测量环境参数。

实验温室中温度调控的设备包括天窗、风机和湿帘,结合温室控制经验,这 3 种设备可将系统分为保温、自然通风、强制通风与湿帘-风机 4 种状态,状态如表 1 所示。

表 1 设备状态

Tab.1 Meaning of discrete states

离散状态	状态名称	设备状态($\delta_1\delta_2\delta_3$)	辅助变量 Δ
q_1	保温	000	0
q_2	自然通风	001	1
q_3	强制通风	100	4
q_4	湿帘-风机	110	6

表 1 中设备状态表示风机、湿帘和天窗 3 个设备的开关状态,0 表示设备关闭,1 表示设备打开,如自然通风模式下设备状态为“001”表示 $\delta_1 = 0, \delta_2 = 0, \delta_3 = 1$,即风机关闭、湿帘关闭、天窗打开。辅助变

量的值是计算设备状态的二进制值,即 $\Delta = 4\delta_1 + 2\delta_2 + \delta_3$,利用辅助变量可实现状态的编码。

4.2 建模结果与分析

4.2.1 相关性分析

不同离散状态下输入变量与输出相关性分析结果如表 2 所示。

表 2 室外环境因子与室内温度相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between outside environmental factors and inside temperature

环境因子	q_1	q_2	q_3	q_4
x_1	0.931 5	0.948 0	0.949 2	0.706 5
x_2	-0.914 9	-0.935 6	-0.938 3	-0.521 9
x_3	-0.056 6	0.121 2	-0.096 6	0.123 8
x_4	-0.101 2	-0.345 7	-0.301 2	-0.272 1
x_5	0.716 6	0.440 4	0.580 5	0.862 5

注: x_1 为室外温度, x_2 为室外湿度, x_3 为风向, x_4 为风速, x_5 为太阳辐射强度。

表 2 中相关系数绝对值越大说明相关性越强,正值表示两个变量正相关,负值表示两个变量负相关。由表 2 数据可知,在保温模式下,室外温度、室外湿度、太阳辐射强度与室内温度相关性较强,因此选取室外温度、室外湿度、太阳辐射强度作为主要输入变量。在自然通风、强制通风和湿帘-风机模式下,室外温度、室外湿度、太阳辐射强度以及风速与室内温度相关性较强,因此选取室外温度、室外湿度、太阳辐射强度与风速作为主要输入变量。

4.2.2 模型阶次确定

从阶次 $n = 1$ 依次计算 $\gamma(n), \gamma(1) = 0.041\ 4, \gamma(2) = 0.018\ 9, \gamma(3) = 0.018\ 6$ 。

当 $n_1 = 1, n_2 = 2, N = 136$ 时,有

$$f = \frac{0.041\ 4 - 0.018\ 9}{\frac{3(2-1)}{0.018\ 9}} = 51.59 > f^*$$

当 $n_1 = 2, n_2 = 3, N = 136$ 时,有

$$f = \frac{0.018\ 9 - 0.018\ 6}{\frac{3(3-2)}{0.018\ 6}} = 0.68 < f^*$$

所以模型阶次为二阶,为进一步确定子阶,假设 $n_a = n_{b1} = n_{b2} = n_{b3} = n_{b4} = n_c = 15, n_{d1} = n_{d2} = n_{d3} = n_{d4} = 1$,根据假设检验确定子阶与时延结果为: $n_a = 2, n_{b1} = 1, n_{b2} = 1, n_{b3} = 2, n_{b4} = 1, n_c = 0, n_{d1} = 1, n_{d2} = 2, n_{d3} = 2, n_{d4} = 10$ 。

4.2.3 辨识结果

保温模式下辨识结果为: $a_{11} = -1.367\ 3, a_{12} = 0.562\ 2, b_{11} = 0.005\ 6, b_{12} = 0.055\ 6, b_{131} = -0.055\ 3, b_{132} = -0.164\ 9$ 。

自然通风模式下辨识结果为: $a_{21} = -1.195\ 8$,
 $a_{22} = 0.427\ 6$, $b_{21} = 0.189\ 6$, $b_{22} = 0.001\ 3$, $b_{231} =$
 $0.086\ 6$, $b_{232} = 0.064\ 8$, $b_{24} = -0.064\ 4$ 。

强制通风模式下辨识结果为: $a_{31} = -0.682\ 5$,
 $a_{32} = 0.282\ 6$, $b_{31} = 0.684\ 6$, $b_{32} = 0.017\ 3$, $b_{331} =$
 $-0.180\ 0$, $b_{332} = 0.073\ 5$, $b_{34} = -0.057\ 3$ 。

湿帘-风机模式下辨识结果为: $a_{41} = -1.033\ 6$,
 $a_{42} = 0.457\ 7$, $b_{41} = 0.277\ 5$, $b_{42} = -0.059\ 7$, $b_{431} =$
 $0.268\ 7$, $b_{432} = -0.155\ 8$, $b_{44} = -0.178\ 8$ 。

4.2.4 模型预测结果

分别在2017年3月9日(保温)、2017年3月22日(自然通风)、2017年8月10日(强制通风)、2017年8月4日(湿帘-风机)的08:00—18:00对温室温度系统4种子模型建模,效果如图2~5所示。

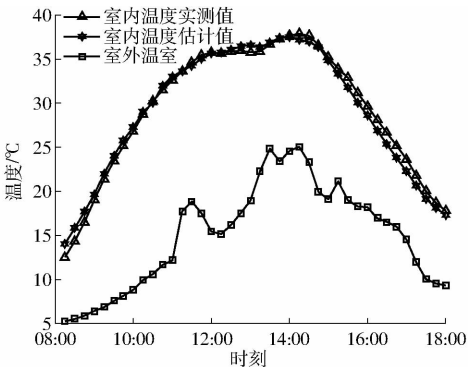


图2 保温模式模型拟合效果(RMSE为0.706 4℃)
Fig.2 Fitting result of temperature under preservation mode(RMSE was 0.706 4℃)

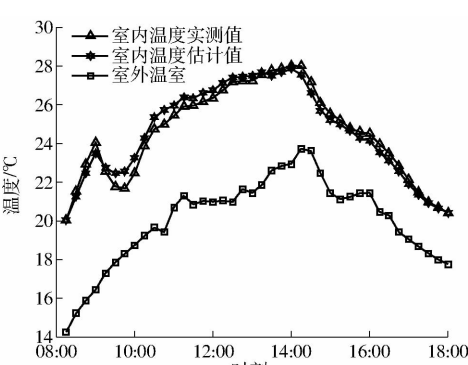


图3 自然通风模式模型拟合效果(RMSE为0.305 5℃)
Fig.3 Fitting result of temperature under nature ventilation mode(RMSE was 0.305 5℃)

4.2.5 预测控制结果

若未引入积温,设定值为固定值。实验时间为2018年3月27日,取设定值为

$$S_{pt} = \begin{cases} 29.0 & (T_{real} \geq 29.0^{\circ}\text{C}) \\ T_{real} & (24.0^{\circ}\text{C} \leq T_{real} < 29.0^{\circ}\text{C}) \\ 24.0 & (T_{real} < 24.0^{\circ}\text{C}) \end{cases}$$

预测控制效果如图6所示,图中系统给出1 d

室内外温度以及离散状态切换过程。

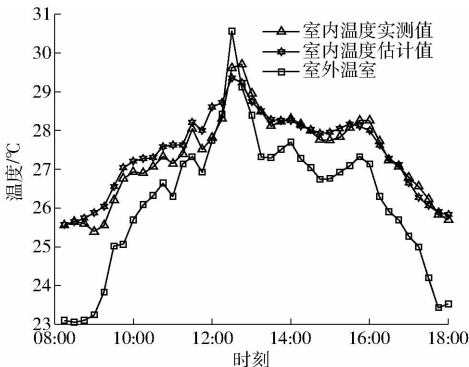


图4 强制通风模式模型拟合效果(RMSE为0.335 8℃)
Fig.4 Fitting result of temperature under forced ventilation mode(RMSE was 0.335 8℃)

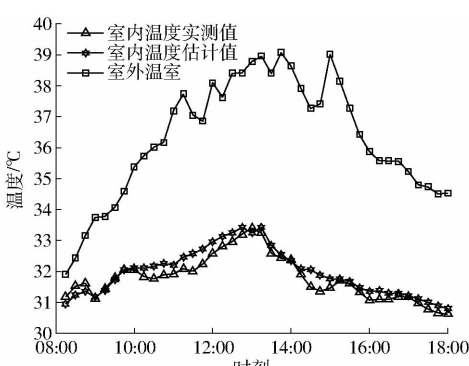


图5 湿帘-风机模式模型拟合效果(RMSE为0.277 8℃)
Fig.5 Fitting result of temperature under curtain-fans mode(RMSE was 0.277 8℃)

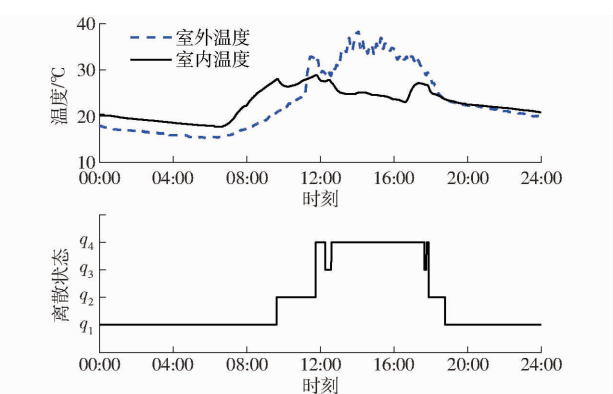


图6 预测控制效果
Fig.6 Predictive control results

室内最低温度为17.7℃,比设定值下限24.0℃低26.3%,这是由于实验温室设备控温能力有限,没有主动加温装置,故不能保证室内温度始终在设定范围内;最高温度28.9℃,低于设定值上限29.0℃。在设备能控范围内(08:00—18:00时间段),有76.6%的时间室内温度控制在设定范围内,可看出预测控制能有效控制室内温度。

使用双周期积温规划预测控制设定值,取 $T_{DIF} = 6^{\circ}\text{C}$, $T_{\min,LT} = 22.0^{\circ}\text{C}$, $T_{\max,LT} = 26.0^{\circ}\text{C}$, $T_{\min,ST} = 10.0^{\circ}\text{C}$, $T_{\max,ST} = 30.0^{\circ}\text{C}$ 。实验时间2018年3月31

日,前 5 d 日平均气温如图 7 所示。

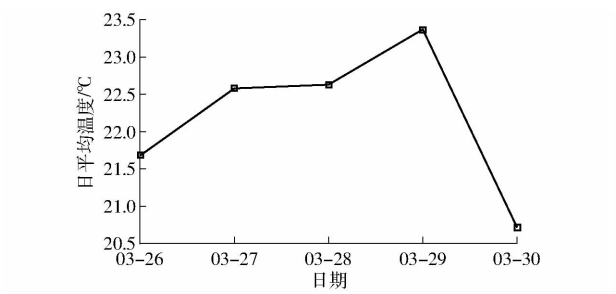


图 7 2018 年 3 月 26—30 日 5 d 平均温度曲线

Fig. 7 Average daily temperature curve of five days from March 26 to March 30 of 2018

前 5 d 日平均温度和为 111.0℃。计算可知, $T_{set,L} = 22.6^{\circ}\text{C}$, $T_{set,H} = 30.0^{\circ}\text{C}$ 。测量的夜间平均温度 $T_N = 19.1^{\circ}\text{C}$, 计算得白天平均温度 $\bar{T}_D = 25.6^{\circ}\text{C}$, 满足 DIF 要求。

设定值规划为

$$S'_{pt} = \begin{cases} 30.0 & (T_{real} \geq 30.0^{\circ}\text{C}) \\ T_{real} & (21.0^{\circ}\text{C} \leq T_{real} < 30.0^{\circ}\text{C}) \\ 21.0 & (T_{real} < 21.0^{\circ}\text{C}) \end{cases}$$

加入积温优化设定值后,控制效果如图 8 所示。室内最低温度为 16.3℃,比设定值下限 $T_{set,L}$ 低 22.5%;室内温度最高为 $T_{set,H} = 30.0^{\circ}\text{C}$ 。在设备能控范围内,室内温度全部被控制在设定值范围内。

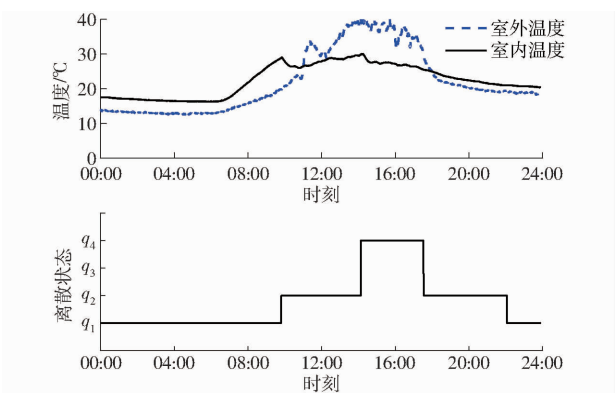


图 8 积温优化设定值预测控制效果(2018 年 3 月 31 日)

Fig. 8 Predictive control results optimized by accumulative temperature method

积温第 2 个实验时间为 2018 年 4 月 10 日,前 5 d 日平均气温如图 9 所示。

前 5 d 日平均温度和为 88.5℃。计算可知, $T_{set,L} = 24.0^{\circ}\text{C}$, $T_{set,H} = 30.0^{\circ}\text{C}$ 。测量的夜间平均温度为 $\bar{T}_N = 21.3^{\circ}\text{C}$, 计算的白天平均温度为 $\bar{T}_D = 27.0^{\circ}\text{C}$, 由于 $T_{DIF} = 5.7^{\circ}\text{C} < 6.0^{\circ}\text{C}$, 不满足要求,需要上升设定值。调整后设定值上限为 $T_{set,L} = 24.0 + (6.0 - 5.7) \times 2 = 24.6^{\circ}\text{C}$, 设定值下限为 $T_{set,H} = 30.0^{\circ}\text{C}$ 。

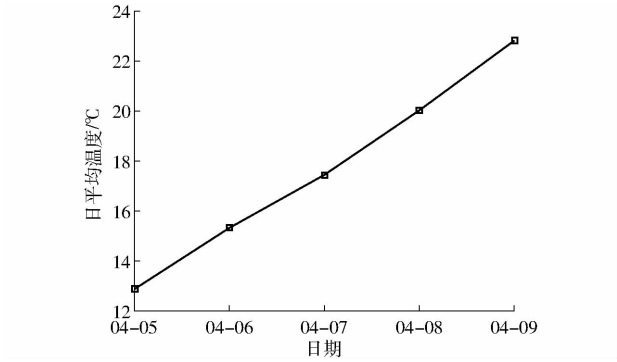


图 9 2018 年 4 月 5—9 日 5 d 平均温度曲线

Fig. 9 Average daily temperature curve of five days from April 5 to April 9 of 2018

设定值规划为

$$S_{pt} = \begin{cases} 30.0 & (T_{real} \geq 30.0^{\circ}\text{C}) \\ T_{real} & (24.6^{\circ}\text{C} \leq T_{real} < 30.0^{\circ}\text{C}) \\ 24.6 & (T_{real} < 24.6^{\circ}\text{C}) \end{cases}$$

加入积温优化设定值后,控制效果图如图 10 所示。室内最低温度为 18.1℃,比设定值下限 $T_{set,L}$ 低 26.2%;室内温度最高 30.4℃比设定值上限 $T_{set,H}$ 高 1.3%。在设备能控范围内,有 95.6% 的时间室内温度控制在设定值范围内。

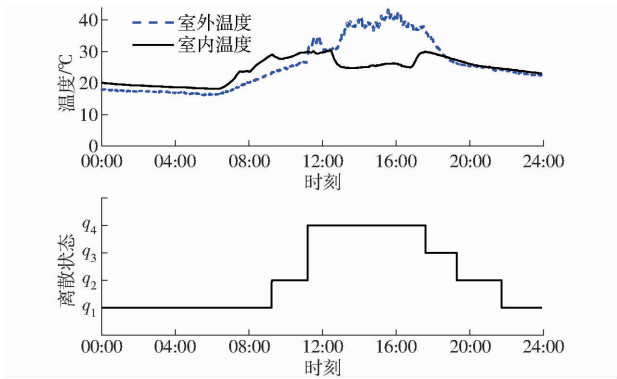


图 10 积温优化设定值预测控制效果(2018 年 4 月 10 日)

Fig. 10 Predictive control results optimized by accumulative temperature method

对比图 6 与图 8、图 10,可见引入积温理论动态调整设定值,将设定值范围放宽可以有效减少设备切换次数。

5 结论

(1) 基于温室温度系统同时包含离散状态(设备开关)与连续状态(各环境因子)的混杂特性,利用切换系统建模方法,根据设备状态将温室温度混杂系统分为 4 个子系统,分别对 4 个子系统建模。首先选取室外环境因子中与温室温度相关性最高的室外温度、室外湿度、太阳辐射强度和风速作为输入变量,使用 ARMAX 模型描述系统,利用统计假设检验方法确定模型阶次为二阶。分别在 4 个子系统

下,采用带遗忘因子的增广递推最小二乘法辨识模型参数,并检验模型精度。

(2)使用建立的切换系统模型设计预测控制器,引入双周期积温法调整预测控制设定值,避免设备频繁切换。待求解问题为高阶 NP-hard 问题,采

用最优化剪枝法优化求解过程。最后在实际系统验证预测控制算法,实验证明温室内温度在设备调控范围内可以有效控制在设定值范围内,并且引入积温理论规划预测控制设定值可以减少设备切换次数。

参 考 文 献

- 1 戴剑锋,罗卫红,乔晓军,等. 基于模型的温室加温控制目标优化系统研究[J]. 农业工程学报,2006,22(11):187-191.
DAI Jianfeng, LUO Weihong, QIAN Xiaojun, et al. Model-based decision support system for greenhouse heating temperature set point optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 187-191. (in Chinese)
- 2 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报,2009,40(5):162-168.
DING Weiming, WANG Xiaochan, LI Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 162-168. (in Chinese)
- 3 BOT G P A. A validated physical model of greenhouse climate[J]. Engineering and Economic Aspects of Energy Saving in Protected Cultivation, 1988, 245: 389-396.
- 4 PAPADAKIS G, MANOLAKOS D, KYRITSIS S. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale models[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(4): 331-338.
- 5 YILDIZ I, STOMBAUGH D P. Dynamic modeling of microclimate and environmental control strategies in a greenhouse coupled with a heat pump system [C] // III International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation, 2006, 718: 331-340.
- 6 CUNHA J B, COUTO C, RUANO A E B. Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(10): 1473-1481.
- 7 SUYANTOHADI A, HARIADI M, PURNOMO M H, et al. Dynamic neural network model for identifying cumulative responses of soybean plant growth based on nitrogen fertilizer compositions[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2010, 1(5): 188.
- 8 刘淑梅,薛庆禹,黎贞发,等. 基于 BP 神经网络的日光温室气温预报模型[J]. 中国农业大学学报,2015,20(1):176-184.
LIU Shumei, XUE Qingyu, LI Zhenfa, et al. An air temperature predict model based on BP neural networks for solar greenhouse in North China[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(1): 176-184. (in Chinese)
- 9 秦琳琳,吴刚. 温室小气候环境建模与控制的现状及展望[J]. 自动化博览,2010(2):58-60.
QIN Linlin, WU Gang. The present situation and prospect of modeling and control of the greenhouse microclimate[J]. Automation Panorama, 2010(2): 58-60. (in Chinese)
- 10 MIRZAEI-GHALEH E, OMID M, KEYHANI A, et al. Comparison of fuzzy and on/off controllers for winter season indoor climate management in a model poultry house[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 110: 187-195.
- 11 FOURATI F. Multiple neural control of a greenhouse[J]. Neurocomputing, 2014, 139: 138-144.
- 12 MARTINOVIĆ G, SIMON J. Greenhouse microclimatic environment controlled by a mobile measuring station [J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2014, 70: 61-70.
- 13 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.
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. (in Chinese)
- 14 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 CSAE, 2008, 24(7): 188-192. (in Chinese)
- 15 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(增刊1):233-241.
QIN Linlin, MA Guoqi, CHU Zhudong, et al. Modeling and control of greenhouse temperature-humidity system based on grey prediction model[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.1):233-241. (in Chinese)
- 16 RIVOTTI P, PISTIKOPOULOU E N. A dynamic programming based approach for explicit model predictive control of hybrid systems [J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 72: 126-144.
- 17 徐立鸿,苏远平,梁毓明. 面向控制的温室系统小气候环境模型要求与现状[J]. 农业工程学报,2013,29(19):1-15.
XU Lihong, SU Yuanping, LIANG Yuming. Requirement and current situation of control-oriented microclimate environmental model in greenhouse system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 1-15. (in Chinese)
- 18 王定成,乔晓军,汪春秀,等. 基于作物响应的温室环境 SVMR 控制仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(1):290-293.
WANG Dingcheng, QIAO Xiaojun, WANG Chunxiu, et al. Simulation of greenhouse environment SVMR control based on plant response[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 290-293. (in Chinese)
- 19 PARDALOS P M, VAVASIS S A. Quadratic programming with one negative eigenvalue is NP-hard [J]. Journal of Global Optimization, 1991, 1(1): 15-22.
- 20 KÖRNER O, CHALLA H. Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation[J]. Computers and

- Electronics in Agriculture, 2003, 39(1): 39 – 59.
- 21 KÖRNER O, VAN STRATEN G. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 18 – 30.
- 22 MA Guoqi, QIN Linlin, LIU Xinghua, et al. Modeling and predictive control of greenhouse temperature-humidity system based on MLD and time-series [C] // Control Conference (CCC), 2015 34th Chinese. IEEE, 2015: 2234 – 2239.
- 23 冯培梯. 系统辨识 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.
- 24 张溥明, 王忠志. 系统模型与辨识 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
- 25 WILLMOTT C J, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [J]. Climate Research, 2005, 30(1): 79 – 82.
- 26 李莉, 李佳, 高青, 等. 昼夜温差对番茄生长发育、产量及果实品质的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2700 – 2706.
- LI Li, LI Jia, GAO Qing, et al. Effects of day and night temperature difference on growth, development, yield, and fruit quality of tomatoes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2700 – 2706. (in Chinese)
- 27 张国祥, 刘星星, 张领先, 等. 基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 279 – 286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170935&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.035.
- ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, ZHANG Lingxian, et al. Relationship between indoor temperature and rolling shutter opening of solar greenhouse based on CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 279 – 286. (in Chinese)
- 28 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 1 – 13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180201&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.001.
- MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Analysis and prospect of research progress on greenhouse environmental control methods [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 1 – 13. (in Chinese)
-
- (上接第 144 页)
- 19 李沐桐, 温翔宇, 周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37 – 43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160906&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006.
- LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37 – 43. (in Chinese)
- 20 李沐桐. 玉米苗期精准穴施肥机构设计及试验 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- LI Mutong. Design and test analysis of maize precision fertilization mechanism of acupoint [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 21 张勋. 玉米穴播穴施肥装置的设计研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- ZHANG Xun. Research on the equipment of hill-drop drill and fertilization [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 22 吴然然, 张刘扬, 钱梵梵, 等. 玉米穴施肥装置的设计与仿真 [J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 941 – 946.
- WU Ranran, ZHANG Liuyang, QIAN Fanfan, et al. Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 941 – 946. (in Chinese)
- 23 钱梵梵. 玉米穴施肥机的设计与试验 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- QIAN Fanfan. The design and test of corn hole fertilizing machine [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 24 陈艳萍, 肖尧, 孔令杰, 等. 缓释肥施用量对超高产夏玉米氮素积累分配的影响 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(27): 34 – 40.
- CHEN Yanping, XIAO Yao, KONG Lingjie, et al. Effects of slow-release fertilizer treatments on nitrogen accumulation and distribution of super-high yield summer maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(27): 34 – 40. (in Chinese)
- 25 陈国清, 肖尧, 景立权, 等. 不同缓释肥水平对超高产夏玉米产量及群体质量的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 182 – 187.
- CHEN Guoqing, XIAO Yao, JING Liqun, et al. Effects of slow-release fertilizer treatments on yield and population quality of super-high yield summer maize [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(30): 182 – 187. (in Chinese)
- 26 LANDRY H, THIRION F, LAGUË C, et al. Numerical modeling of the flow of organic fertilizers in land application equipment [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 51(1–2): 35 – 53.
- 27 刘彩玲, 黎艳妮, 宋建农, 等. 基于 EDEM 的离心圆盘撒肥器性能分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 32 – 39.
- LIU Cailing, LI Yanni, SONG Jiannong, et al. Performance analysis and experiment on fertilizer spreader with centrifugal swing disk based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 32 – 39. (in Chinese)