

# Environment Optimal Control in Intelligent Greenhouse

Lujuan Deng<sup>1,2</sup>, Kanyu Zhang<sup>2</sup>, Youmin Gong<sup>2</sup>, Songhe Xie<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Information and Control Engineering, Zhengzhou Institute of light Industry, Zhengzhou 450002, China  
(E-mail: denglujuan@zzuli.edu.cn)

<sup>2)</sup> School of Mechanical Electronic Engineering and Automation, Shanghai Univ., Shanghai 200072, China  
(E-mail: jacktwo123@yahoo.com.cn)

**Abstract**—As many variables were unobservable, especially for crop growth status, so when solving optimal control problem of intelligent greenhouse several difficulties appeared concerning the greenhouse and crop model, the criterion and the computation of the optimal controls. In order to evade modeling difficulty, one method was utilizing fuzzy logic and neural network technology that realize the models by the black box and gray box theory. In receding horizon optimal control, a finite horizon open-loop optimal control problem, with initial values based on actual measurements, was solved at each time step. The computation was repeated at the next time step, moving the horizon one step up. The simulation results are accord with the rule of plants growth. Studies on optimal control method of plant environment in greenhouse by means of soft compute technology have been developed. Nowadays, the greenhouse environment optimal control focus on energy saving, economic profit, environment protection and continually develop.

**Keywords**—intelligent greenhouse; environment control; intelligent control; optimal control; soft compute; continually develop; energy saving

## 智能温室环境的优化控制

邓璐娟<sup>1,2</sup> 张侃谕<sup>2</sup> 龚幼民<sup>2</sup> 谢宋和<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> 郑州轻工业学院信息与控制工程系, 郑州 450002

<sup>2)</sup> 上海大学机电工程与自动化学院自动化系, 上海 200072

**摘要** 温室环境控制的目标是增加种植者的收益和可持续发展。探索把优化控制和智能控制思想用于复杂的温室控制系统, 所监测的变量在原来基础上进一步包括叶温、植株形态和重量、茎流等多种植物生理状态变量, 所追求的性能是给出作物最佳生长环境、节能和降低成本并根据市场需求调节生产。模仿种植专家行为的优化控制是比较传统的一种方法, 它采用专家系统、神经网络等技术, 比较安全但不易调整; 基于模型的优化控制依赖静态的优化理论、Pontryagin 的最大值理论、贝尔曼优化原理等技术, 但由于准确的数学模型不容易得到, 在实践中采用这种方法还有一定难度。采用 RHOC 方法把温室环境的优化控制转变成一个有限范围的开环控制问题, 仿真结果说明了方法的可行性。温室环境控制的进一步发展依赖于多学科、多技术的融合。而软计算技术由于融合了多种智能控制思想和技术, 在解决复杂温室系统的非线性性和不确定性等方面具有潜力。

**关键词** 智能温室, 环境控制, 智能控制, 优化控制, 节能, 软计算, 可持续性发展

### 1. 引言

智能温室工程及温室环境控制技术可以使农业生产摆脱自然环境的束缚, 如高温、暴雨、低温、霜冻等, 实现周期性、全天候、反季节的企业化规模生产, 以期获得速生、高产、优质高效农产品。它具有高投入、高产出、高效益、无污染等可持续性农业特征。

温室生产目标之一是增加种植者的可持续性收入。温室的投入成本、工作成本和能量消耗远远高于常规作物的生产系统, 只有取得较高的作物产量和质量、较高的劳动生产率和较高的能量效率才能平衡, 因此, 需要对环境采取优化控制来达到高产量、高质量、低能源消耗和最大经济效益。

## 2. 概述

温室环境系统主要包含两大部分，作物和温室。温室为作物提供生长环境，但作物生长的生理过程（如：蒸腾作用、呼吸作用和光合作用等）又影响温室的环境。因此，控制决策（如：加热启动、通风调节、帘幕展收、循环风扇动作等）直接影响温室环境，而植物生理过程间接影响温室环境，环境系统和生态系统交叉影响，许多因素互相关联和耦合，构成了一个复杂系统。而且这个复杂系统还具有多个不同数量级的时间常数（如：太阳从云层后出现可以在秒级内检测到，而加温系统开启后，温度的上升需要在几十分钟才能检测到，而当环境因子变化后，植物的响应（如：干物质、叶面积、果实的数量和质量）则需要几周时间甚至一个生长周期才能检测出）。因此温室生产系统具有不确定性、不精确性、部分事实、非线性性、强耦合性、大惯性等问题，对温室植物环境的控制是一个难点。为了实现优化控制，必须考虑系统内不同的时间尺度，如表1所示。一般，温室作物环境控制过程中，物理系统响应快，生态系统响应慢。第3层的控制主要应该考虑市场的因素，其控制模型肯定是市场价格的函数，一般把处理和控制权交给温室的管理者；第2层控制需考虑作物的生态响应，而且应该是最根本要考虑的，第2层的实现依赖第一层对它的驱动。第1层和第2层是相互影响和关联的，设定控制目标和设计控制策略时既要考虑作物实时的生长响应状况，使植物处于最佳生长环境，又要考虑生产成本和能量消耗最少，即达到温室系统的最优控制。而第1层控制的效率又很大地依赖第0层，特别商业生产（非实验）的温室，都具有比较大的面积和空间，当第0层动作以后，会有一个比较大的滞后时间才能影响到温室内部环境。影响系统的扰动频率也有较宽的范围，例如：影响太阳辐射的散云、白天黑夜的循环、价格变化等。

在温室生产过程中，优化控制是一种新的方法，也是园艺和控制工程师所追求的目标。它主要有两种方法：1) 模仿种植专家的行为，它是比较传统的一种方法，比较安全，但当外部条件偏离标准设定时（例如：市场价格波动过大、反常的气候等），不容易调整。需要较长的时间才能调整到适应一个新的生产工艺。2) 基于模型的优化方法。具体地说，就是利用系统（作物+温室+经济学）数学模型、判别（纯量）函数和时间间距来设计作物生长计划、设定环境变量目标点的一种方法，基于模型的优化控制需要生产利润率数学模型，利润率是作物对环境调节响应的经济

河南省自然科学基金（资助号：0311032200）和河南省教育厅自然科学基金（资助号：2003210074）和郑州轻工业学院科技发展基金资助

表1 温室生产系统的时间尺度

层	0	1	2	3
控制参数	执行机构（阀门、风扇等）	温室环境	植物生长状态	成熟时间
时间尺度	秒	分钟	小时/天 /周	生长 周期

度量，还需要包括作物状态行为和温室环境的精确复合模型，从决定渴望的作物状态到决定最佳的环境变量目标值。它一般可依据以下三种理论：(1)为静态的优化理论；(2)为Pontryagin的最大值理论；(3)为贝尔曼优化原理。基于模型的优化方法要求模型的准确，当在一些特别的条件下时，如：异常的温度，由于数据的缺乏可能导致重大的控制错误。从发展的观点看，也可以考虑两者的结合。

## 3. 模仿专家的方法

### 3.1 专家系统

这个方法建立在认为温室环境控制是一门艺术的思想基础上，因此只有种植专家能够使得温室环境控制效果得到圆满。控制和园艺工程师一直很努力探索采用专家系统的方法来达到温室环境的最优控制<sup>[1][2]</sup>。专家系统用于温室环境控制的瓶颈在于专家知识的获取，而且专家的知识也是有限的。

### 3.2 神经网络

神经网络通过自动地、客观的学习种植专家的行为而模仿专家对温室进行优化管理和控制，也可以达到比较好的效果<sup>[2]</sup>。神经网络的输入端是一些能通过客观观察得到的变量，如：气象、作物状态、市场价格等，而在它的输出端可以得到一些控制决策，如：温室环境变量的设定点、调节器动作终止位置或状态等，而种植人员则不要求对其决策作出任何指导和解释。但是基于神经网络的优化控制的难点在神经网络建模（或训练）时，需要大量的可信赖的数据。而且，神经网络的输出也会偶然出现不可信赖的推断结果。

## 4. 基于模型的方法

基于模型的优化方法也可以称为数学的方法。由于温室环境控制系统存在许多不确定性和非线性性，再加上既具有响应慢而长（作物干物质的积累）的子系统又具有响应快而短（光合作用、蒸腾作用和呼吸作用）的子系统，使得用数学方法解决温室环境的优化控制需解决以下四个难点：1) 温室和作物模型的建立；2) 判别函数的选择；3) 优化控制的计算；4) 未来市场价格和气象的预测。以温室

黄瓜种植为例，我们进行了一些仿真研究。

#### 4.1 温室环境模型

温室环境的物理模型可以用一组耦合的一阶微分方程式 (1) (2) (3) (4) 表示。由于温室是水泥地再覆盖塑料薄膜，因此土壤温度近似为常数，忽略温室中土壤与空气的热量交换。

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_a} ((k_v + k_r)(T_o - T_i) + k_p(T_p - T_i) + \eta G) \quad (1)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{C_p} (k_p(T_i - T_p) + k_h(T_h - T_p)) \quad (2)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{A_g}{V_g} (\phi_v(C_o - C_i) + \phi_i + k_c(R - P)) \quad (3)$$

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{A_g}{V_g} (\phi_v(H_o - H_i) + E - M_c) \quad (4)$$

$$\lambda E = k_q \Delta e \quad (5)$$

这里， $T_i, T_o, T_p, T_h$  分别代表温室内部空气温度，温室外部空气温度，温室内部加热管道温度，锅炉出口预混组入口热水温度； $k_v, k_r, k_p, k_h, k_c$  分别代表通风热传递系数，温室覆盖物热传递系数，从热水管道到空气的热传递系数，热水阀门打开后有效的（从预混组入口到热水管道）热传递系数， $CO_2/CH_2O$  的变换因子（分子量比值）； $C_a, C_p, C_o, C_i$  分别代表温室空气热容，热水管道热容，室外  $CO_2$  浓度，室内  $CO_2$  浓度； $\eta, G, A_g, V_g, \phi_v, \phi_i, R, P, H_o, H_i, E, M_c$  分别代表太阳辐射传热系数，太阳辐照度，温室面积，温室体积，通风量， $CO_2$  施肥量，呼吸作用量，光合作用量，室外绝对湿度，室内绝对湿度，蒸腾带走的热量，在温室天花板上凝结带走的热量； $\lambda$  为水蒸汽的潜热， $k_q$  为潜热交换系数， $\Delta e$  为植物冠层表面内外水汽压差。

#### 4.2 作物生长模型

一般来讲，主要是环境变量  $T_i, C_i$  影响作物的叶温  $T_l$  和叶肉细胞间隙  $CO_2$  浓度  $C_c$ ，而光合作用模型是将光合作用速率表达为叶肉细胞间隙  $CO_2$  浓度 ( $C_c$ )、光量子通量密度 ( $P_{fd}$ ) 和叶温 ( $T_l$ ) 的函数。作物生长的净光合速率可以按照公式 (6) - (16) 计算<sup>[4][5]</sup>。

$$A_n = \min\{J_e, J_c, J_s\} - R_d \quad (6)$$

其中  $J_c$  是受 Rubisco 活性限制的光合作用速率；

$$J_c = V_{max} (p_i - \Gamma) / [p_i + k_c(1 + [O_2]/k_o)] \quad (7)$$

$$V_{max} = V_{m0} \{1 + \exp[(-a + bT_l)/(RT_l)]\}^{-1} \quad (8)$$

$$\Gamma = O_a / 2\tau \quad (9)$$

$$p_i = p \times c_c \quad (10)$$

$J_c$  是由 RuBP 再生速率限制的光合作用速率，它依赖于电子传递速率，主要由光通量密度 ( $P_{fd}$ ) 和叶肉细胞间隙  $CO_2$  浓度 ( $C_c$ ) 决定；

$$J_e = \varepsilon \times \alpha \times P_{fd} (p_i - \Gamma) / (p_i + 2\Gamma) \quad (11)$$

$J_s$  是光合产物运输或利用的能力，它表示光强和  $CO_2$  浓度达到饱和时的最大光合速率。

$$J_s = V_{max} / 2 \quad (12)$$

为了使光合作用随不同限制因子发生光滑的变化，允许  $J_s, J_e$  和  $J_c$  共同作用，因此通过解下列方程并取较小的根。

$$\theta J_p^2 - J_p(J_e + J_c) + J_e J_c = 0 \quad (13)$$

$$\beta A_n^2 - A_n(J_p + J_s) + J_p J_s = 0 \quad (14)$$

$$R_d = 0.0015 V_{max} \quad (15)$$

其中， $A_n$  是净光合速率； $R_d$  是暗呼吸量； $J_p$  是中间变量； $\varepsilon = 0.66$ ，是叶子对光合有效辐射的吸收率； $\alpha = 0.06$ ，是  $CO_2$  同化的量子效率； $\tau = 2600$ ，是动力学参数，随温度变化(用  $Q_{10}$  函数表示)，描述 RuBP 分配于 Rubisco 羧化和氧化的比率； $O_a = 209 \text{ hPa}$ ，是一个常数； $P = 1000 \text{ hPa}$ ，为大气压； $a = 220 \text{ K J mol}^{-1}$ ， $b = 703 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ； $V_{m0} = 100 \mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； $R = 8.31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，为理想气体常数； $\theta = 0.95$ ，为经验常数； $\beta = 0.98$ ，为经验常数。

动力学参数  $K_c, K_o, \tau$  随温度变化，可以用  $Q_{10}$  函数来表达，即

$$K = K_{25} Q_{10}^{(T_i - 25)/10} \quad (16)$$

$K_{25}$  是  $K$  在参考温度 ( $25^\circ\text{C}$ ) 时的值，这里  $K_c = 2.1$ ； $K_o = 1.2$ ； $\tau = 0.57$ 。

#### 4.3 优化的问题

优化控制的数学模型一般如 (17) 式：

$$dX/dt = f\{X\{t\}, e\{t\}, u\{t\}\} \quad (17)$$

(17) 式中， $t$  是时间，一般起点在植物成功移植的第一天； $X$  是状态变量矢量（如：光合作用速率、干物质等）； $e$  是外因（扰动）矢量（如：室外温度、市场价格等）； $u$  是控制矢量（如：热量的流动）； $f$  是矢量函数，常常是非线性

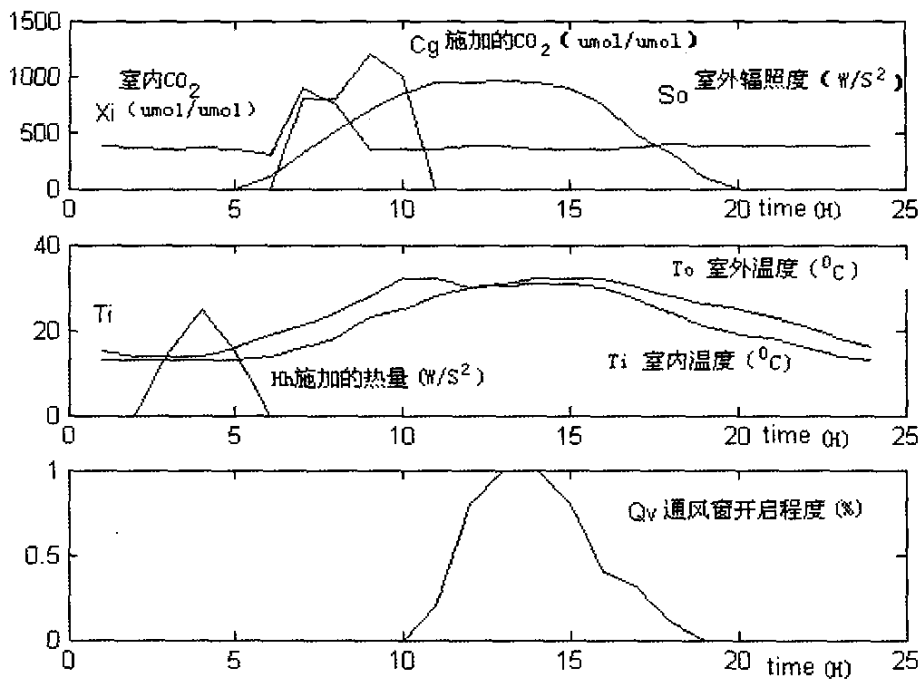


图1 24小时仿真曲线图

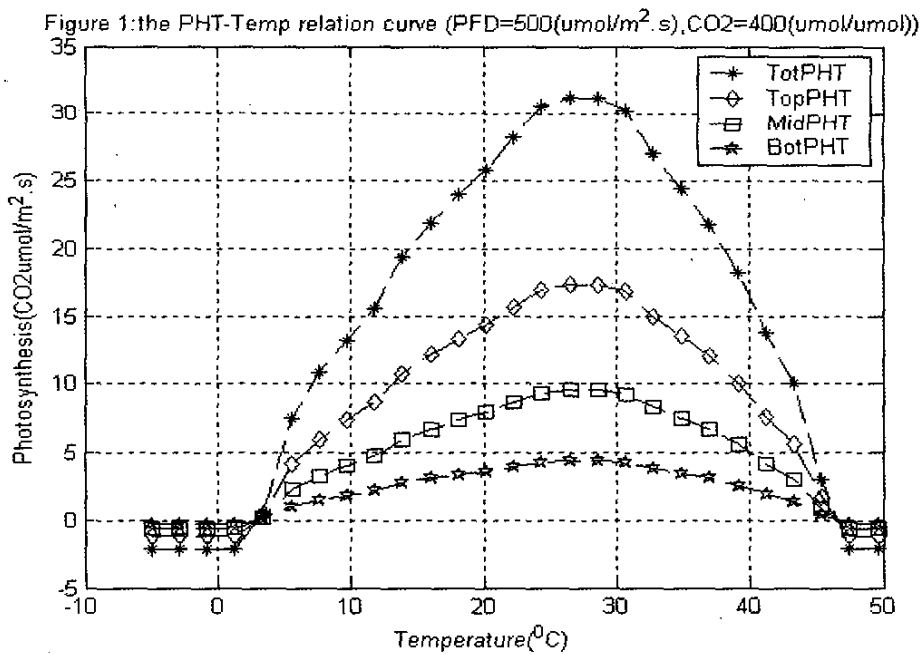


图2 光合作用随温度和辐照度变化图

的。不同的控制序列会产生不同的输出，因此，选择目标函数是重要的。温室生产的最终目标是最大净利润，其目

标函数的一般式如(18)式所示。

$$J = h\{X\{t_f\}, e\{t_f\}\} + \int_0^f g\{X\{t\}, e\{t\}, u\{t\}\} dt \quad (18)$$

(18) 式中, 右边第一项是系统终止值, 例如, 作物采摘时的价值, 它依靠作物产量  $X\{t_f\}$  和市场价格  $e\{t_f\}$ ,  $t_f$  是终止时间。第二项  $g$  包括农作物收益与成本消耗的差值和惩罚函数  $p(X, t)$ , 如 (19) 式示。

$$p(X, t) = \begin{cases} \alpha^T (X - b_l(t)) & X \leq b_l(t) \\ 0 & b_l(t) < X \leq b_u(t) \\ -\alpha^T (X - b_u(t)) & b_u(t) < X \end{cases} \quad (19)$$

$b_l(t), b_u(t)$  分别是状态变量  $X$  的下边界和上边界条件。优化问题就是对于一个给定的外因变量 (扰动)  $e\{t\}$ , 在一个控制约束 (如: 加热器容量、温室空气温度上下限、羧化作用) 条件下, 决定控制序列  $u\{t\}$ , 从而能最大化目标函数  $J$ 。由于一些约束是非常难处理的, 如: 羧化作用约束 (碳水化合物缓冲器), 使得动态优化分析解决方法难于实现, 当系统模型含有较多的状态变量时, 简单的数字解决方法也有很大困难。理论上, 基于模型的优化可以把问题转化为非线性的  $NLP$  问题; 或者利用 Pontryagin 的最大值原理; 或者采用 Hamilton-Jacobi-Bellman 偏微分方程式来实现, 但以上三种办法都有很大的难度。

#### 4.4 RHOC 方法

由于只做仿真研究, 因此忽略温室环境模型和作物模型的不精确性, 可以把温室环境的优化控制转变成为一个有限范围的开环控制问题<sup>[6]</sup>, 即采用 Receding horizon optimal control 方法进行仿真, 得到次优化结果。把整个全局的优化范围分解成一个个小的时间步长的迭加, 在每一个小区间范围内进行局部优化, 时间步长为 1 个小时。首先给定一个基于实际条件和种植专家知识的初始值, 在第一个时间步计算下一步的优化控制策略, 这种计算在下一个时间步重复, 逐步接近终值。这样全部的问题被分成慢而长的子问题和快而短的子问题两部分。

#### 4.5 仿真结果

图 1 是取上海六月上旬中某一天气候的仿真结果, 此时, 按常规情况, 温室黄瓜正在盛果采摘期。从结果看, 基本与专家种植规则一致, 略有差别, 考虑了节能和满足作物生长要求。温室模型参数取自上海市农科院 800(m<sup>2</sup>) 的试验温室, 黄瓜冠层光合作用计算如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

### 5、结论

温室生产中采用优化控制具有以下特点: 理论上的最优可以用选择判别函数保证; 温室作物生产过程的规划管

理在实质上被提出; 有能力挖掘生物过程的先进知识; 本质上有能力处理冲突的目标。但是, 模型和目标函数都不可能是完美的, 因此问题的解决方法有可能不是最优的; 解决问题的方法非常敏感模型的不精确; 计算的困难; 状态变量的数目、决策的数目和不确定性不容易处理; 有困难找到合适的目标函数和集成不能比较的数量。再加上价格和气候预测的困难, 因此从传统的知识方法转到更多的目标和更精确的控制是不容易的。

目前, 最好的方法是按照历史情况使用离线的方法为将来形成一个季节性的控制政策, 用一个限制数目的时变的共模变量 (共模规划) 表达, 从而指导局部的优化, 而且允许种植者通过改变一些共模设置修改控制政策, 来取得有意义的主题, 如: 同化率、适时、风险等。

今后的发展可以考虑采用 Wolfe's 的收敛理论来开发新的算法, 处理无约束的动态优化问题; 采用随机优化控制解决答案的多极值不确定性问题。优化成本可以使用有限差分逼近 Hamilton-Jacobi-Bellman 偏微分方程式, 有限差分逼近同样也满足一些 Markov chains 函数, 马尔科夫的过渡函数由有限差分方程式的系数给定。如果温室过程是采用随机差分方程式建模, 这种方法就比较灵活。

#### 参考文献

- [1] Kano A. and Shimaji H., "Greenhouse environmental control system with a crop model and an expert system," *Acta Hort.*, Vol.230, pp.229-236, 1988.
- [2] Cross M.-J. and Martin Clouaire R., "Determination of climatic setpoints by constraint satisfaction," in *Proc IFAC Workshop Series*, Vol.1, pp.271-276, 1991.
- [3] I.Seginer, "Optimal control of the greenhouse environment: an overview," *Acta Hort*, Vol.406, pp.191-201, 1996.
- [4] Farquhar, G.D., von Caemmerer S. and Berry J. A., "A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species", *Planta*, Vol.149, pp.78-90, 1980.
- [5] Collatz, G. J., Ball J. T., Grivet C. and Berry J. A., "Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, Photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer", *Agr. For, Meteorol.*, Vol.54, pp.107-136, 1991.
- [6] R.F. Tap, L.G van Willigenburg and G van Straten, "Experimental results of receding horizon optimal control", *Acta Hort.*, Vol.406, pp.229-238, 1996.
- [7] 邓瑞娟, 张佩瑜, 龚幼民, 谢宋和. 黄瓜冠层光合作用模型研究. 农业工程学报 (在印刷中)。