

# 温室系统夏季温度动态模型的建模与仿真

张胜波, 戴青玲, 于殿龙 (九江学院机械与材料学院, 江西九江 332005)

**摘要** 运用一种基于能量和物质守恒的温室环境智能化控制的建模思路和方法, 分析了温室小气候中辐射、通风、对流和作物蒸腾作用引起的热质交换物理过程, 研究和建立了夏季温室温度的动态模型。用 Matlab/Simulink 软件仿真, 验证了动态模型能可靠地估计温室内空气的温度值, 为合理调控温室内空气环境因子提供了借鉴和依据。

**关键词** 温室; 动态模型; 仿真

**中图分类号** S625 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)30-14889-03

## Modeling and Simulation on Temperature Dynamic Model in Greenhouse during Summer

ZHANG Sheng-bo et al (School of Machinery and Material, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005)

**Abstract** Modeling approaches and methods of greenhouse environmental intellectualized control were used on the basis of the balance of energy and substance, the energy and mass exchange physical processes resulted from radiation, ventilation, convection and crop transpiration in the greenhouse were discussed. The dynamic model of the summer greenhouse temperature was studied and built. Matlab/Simulink software simulation was used which proved the dynamic model can evaluate the temperature value of air in the greenhouse reliably, which provided reference for regulating greenhouse environment factors reasonably.

**Key words** Greenhouse; Dynamic model; Simulation

温室系统是一个非常复杂的生产系统, 它作为一个三维的作物生长结构系统, 目的在于改善作物生长的直接环境, 从而控制作物的生长状况。其生产的目标是最大程度地获得作物的经济产出。因而对温室环境的控制, 要综合考虑各个方面的因素, 动态模型是进行环境模拟研究和最优控制不可缺少的部分。

动态模型的基本方法是在确定太阳辐射、长波辐射、对流换热、通风换气等物理过程的数学表达的基础上, 采用集总参数法(lump parameter method), 即认为室内空气、覆盖材料、植物冠层等温室各组成部分的温度、湿度均匀一致(除土壤被划分成若干单元外), 对各组成部分列出质能平衡式, 得到一组代数方程(时间常数小的部分)和微分方程(时间常数大的部分), 以及室外气象条件、温室各部分的物性参数、设备状态和初值条件, 即可求得室内环境条件的变化过程。相对于静态模型, 动态模型能更精确地反映温室的真实情况。

### 1 温室内空气温度动态模型的构建

温室热环境一般分为 5 个组成部分: 土壤层、加管道、作物、室内空气和温室覆盖层, 它们之间及其与外界的物质和能量交换主要有太阳热辐射、长波热辐射、通风热交换、与覆盖材料的热交换、人工加热系统、与土壤热交换以及作物蒸腾作用。温室内空气的交换过程见图 1。

温室内的能量平衡可以用来解释温度的动态变化率。在建立数学方程前, 为了突出研究对象的本质, 先对研究对象温室的一些条件进行必要的简化: ①温室内种植的作物冠层温度分布均匀; ②根据传热学可知, 如果平面板壁的高(长)度和宽度是厚度的 8~10 倍, 按一维导热处理, 其计算误差不大于 1%<sup>[1]</sup>。因此, 在该研究中计算土壤传热时, 只考虑深度方向上的一维传热。

温室的热量来源主要有 2 种途径: 一是太阳辐射, 这是温室热量的主要来源; 二是温室配备的各种加热设备, 如热

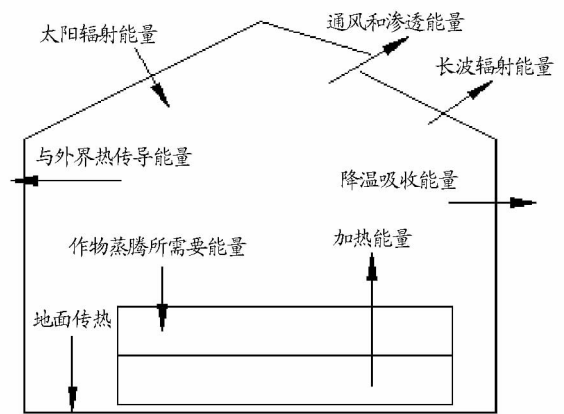


图 1 温室能量平衡

Fig. 1 Energy balanced graphs in greenhouse

风机、热水锅炉加热器等。

温室内的能量平衡解释温度的变化率  $\frac{\partial T_g}{\partial t}$ , 用来计算温室的热需求, 根据温室内空气平衡来建立如下的室内温度动态平衡方程<sup>[2]</sup>:

$$\rho_g v_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Q_r + Q_h - Q_v - Q_w - Q_l - Q_{gl} - Q_{gc} - Q_{tr} \quad (1)$$

式中,  $v_g$  为试验温室的体积 ( $m^3$ );  $\rho_g$  为试验温室内空气密度 ( $kg/m^3$ ), 取  $\rho_g = 1.2 kg/m^3$ ;  $C_g$  为试验温室内空气定压比热 [ $J/(kg \cdot K)$ ], 取  $C_g = 1.01 J/(kg \cdot K)$ ;  $T_g$  为试验温室内空气的温度 ( $^{\circ}C$ );  $t$  为时间 ( $s$ );  $Q_r$  为室外太阳光照辐射能量 ( $kJ$ );  $Q_h$  为维持设计温度加热设备提供的能量 ( $kJ$ );  $Q_v$  为通风和渗透散失的能量 ( $kJ$ );  $Q_w$  为覆盖材料的热传导能量 ( $kJ$ );  $Q_l$  为长波辐射散失的能量 ( $kJ$ );  $Q_{gl}$  为室内空气与作物叶面的热传导散失能量 ( $kJ$ );  $Q_{gc}$  为降温吸收的能量 ( $kJ$ );  $Q_{tr}$  为作物蒸腾所需要的能量 ( $kJ$ )。

夏季降温是温室运行费用的重要部分, 也是保证温室高效高质运行的首要条件。为降低运行成本, 夏季温室采用湿帘-风机降温时, 天窗和侧窗基本处于关闭状态, 因而不考虑通风热交换, 同时忽略叶面热传导、光合作用等对温度的微小影响。对(1)式模型作进一步简化可得:

$$\rho_g v_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Q_r - Q_v - Q_w - Q_l - Q_{gc} \quad (2)$$

(1) 太阳辐射能量  $Q_r$  表达式如下:

$$Q_r = A_g I_D \tau_D + A_g I_d \tau_d \quad (3)$$

式中,  $A_g$  为温室覆盖材料的表面积( $m^2$ );  $I_D$  为室外直接辐射光照强度( $W/m^2$ );  $I_d$  为室外直接散射辐射光照强度( $W/m^2$ );  $\tau_D$  为直射光的透光率(%);  $\tau_d$  为散射光的透光率(%)。

由于室外直接辐射和散射辐射大小与大气的条件(如云层、悬浮颗粒和污染程度)有关,测量不是很方便,因此辐射能量可以采用室外总辐射  $I_t$  和覆盖材料总的透光率  $\tau_t$  来计算。

$$Q_r = A_g I_t \tau_t \quad (4)$$

(2) 通风和渗透散失的能量  $Q_v$  表达式如下<sup>[3]</sup>:

$$Q_v = \rho_g C_g \phi_v v_g (T_g - T_0) \quad (5)$$

式中,  $T_0$  为室外温度( $^{\circ}C$ )。

通风量  $\phi_v$ , 以开天窗通风为例, 则可有下式:

$$\phi_v = (\phi_b^2 + \phi_w^2)^{1/2} \quad (6)$$

式中,  $\phi_b$  为热压通风;  $\phi_w$  为风压通风。

这里对自然通风进行分析, 自然通风的驱动力是“热压”和“风压”。“热压”是指温室外面风速低于  $2 m/s$  情况下, 温室内外温度差引起的空气流动。“风压”是指当风速高于  $2 m/s$  的情况下, 由于室外自然风的影响而产生的空气流动。许多文献对通风进行了分析, 如 Brown 和 Solvason (1962) 对自然通风进行原理分析研究, 对天窗“热压”引起的自然通风建立模型。这里  $\phi_b$  和  $\phi_w$  可以通过下面的公式确定。

$$\phi_b (m^3/s) = C_f \beta^{1/2} \frac{L_0}{3} H^{3/2} (T_g - T_0)^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $C_f$  为流动系数, 取值为  $0.6$ ;  $\beta$  为空气的热膨胀系数( $^{\circ}C^{-1}$ );  $L_0$  为窗户的长度( $m$ );  $H$  为窗户的开启高度( $m$ )。

$$\phi_w (m^3/s) = V_w G(\alpha) L_0 H_0 \quad (8)$$

式中,  $H_0$  表示窗户的宽度;  $V_w$  表示外界的平均风速;  $G(\alpha)$  是用窗户打开角度  $\alpha$  表示的通风函数。这里笔者根据 Wang 和 Deltour (1999) 在大型连栋温室中采用的 CFD 方法, 得到开窗函数:  $G(\alpha) = 1.20 \times 10^{-3} + 1.82 \times 10^{-3} \alpha$ 。

(3) 覆盖材料的热传导能量  $Q_w$ 。温室内的空气与覆盖材料内表面进行能量交换, 同时覆盖材料还与外界空气进行能量交换。这些交换主要通过空气对流形成的, 当然也有热传导和水蒸汽流动的作用。在温室内部, 空气流速较低, 局部空气的温度形成了自然对流; 在温室外部由于空气流速(风速)形成了强迫对流。

$$Q_w = A_g K_w (T_{wg} - T_{w0}) \quad (9)$$

式中,  $K_w$  为温室覆盖材料的传热系数 [ $W/(m^2 \cdot k)$ ];  $T_{wg}$ ,  $T_{w0}$  为温室覆盖材料内外的温度。

(4) 长波热辐射。温室内存在许多长波热辐射, 如加热管道与室内空气, 作物冠层与加热管道, 加热管道与覆盖材料的内表面, 等等; 但由于相对其他能量交换, 这些长波热辐射的能量较小, 这里只考虑温室覆盖材料与天空的长波热辐射。

$$Q_l = \varepsilon_{12} A_g \sigma (T_g^4 - T_0^4) \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon_{12}$  为表面之间的联合发射率;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数 [ $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$ ]。

其中, 联合发射率  $\varepsilon_{12}$  由覆盖材料表面的发射系数  $\varepsilon_1$  和

天空的辐射系数  $\varepsilon_2$  表示:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (11)$$

(5) 湿帘 - 风机降温。夏季高温情况下, 通常采用湿帘 - 风机降温<sup>[4]</sup>。

$$Q_{gc} = \chi \varphi_v \rho_g (x_{cg} - x_0) \quad (12)$$

式中,  $\chi$  为湿帘的通风量系数;  $\varphi_v$  为风机的通风量;  $x_{cg} - x_0$  为经过湿帘后绝对湿度的变化量。

在进行湿帘 - 风机降温时, 分别将方程(4)、(5)、(9)、(10)和(12)带入方程(2)可得:

$$\rho_g v_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = A_g I_t \tau_t - \rho_g C_g \phi_v v_g (T_g - T_0) - A_g K_w (T_{wg} - T_{w0}) - \varepsilon_{12} A_g \sigma (T_g^4 - T_0^4) + \chi \varphi_v \rho_g (x_{cg} - x_0) \quad (13)$$

其中,  $\partial T_g / \partial t$  反映了温室内温度的变化率。这是一个随时间变化的动态方程, 在实际的环境控制中需要对时间进行积分。由于室外环境是一个缓变过程, 根据文献资料<sup>[5]</sup>, 一般情况下在  $20 min$  内变化极小, 可看成无变化。由此, 对(13)式两边积分, 可以建立  $20 min$  内温室内温度的预测模型:

$$\rho_g v_g C_g T_g = [A_g I_t \tau_t - \rho_g C_g \phi_v v_g (T_g - T_0) - A_g K_w (T_{wg} - T_{w0}) - \varepsilon_{12} A_g \sigma (T_g^4 - T_0^4) + \chi \varphi_v \rho_g (x_{cg} - x_0)] \Delta t \quad (14)$$

这是一个非线性对象, 室内温度  $T_g$  同时还受室外太阳辐射  $I_t$  与室外温度  $T_0$  的影响。由于各变量之间的复杂关系, 直接建模比较困难, 这里借助模块化设计的思想, 从能量的角度, 将系统划分成问题简单的子系统; 再依照各子系统间变量的控制关系, 建立被控对象温室内环境温度的 MATLAB 仿真系统框图 2。

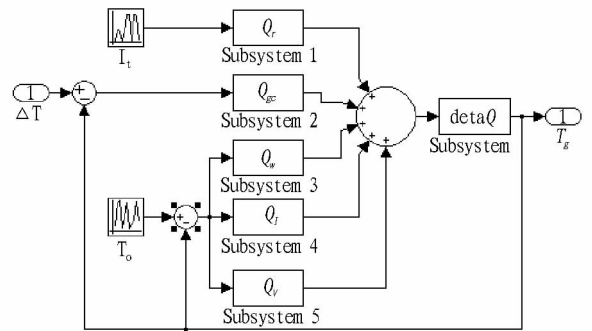


图 2 温室环境温度的仿真框图

Fig. 2 Simulation block diagram of greenhouse environment temperature

图中  $I_t$  为室外的太阳辐射,  $T_0$  为室外气温, 两者都是自然因素。温室温度控制系统就是通过控制天成侧窗的开启来实现温室内温度  $T_g$  的控制。框图内各子系统(Subsystem)依照各自的数学模型进行功能运算函数的编制, 完成整个温室内气体温度数学模型的 MATLAB 建模。模型中涉及到的相关参数见表 1。

### 2 动态模型的仿真与验证

对 2008 年 8 月 23 ~ 24 日温室采集的数据进行仿真, 温室内温度仿真的结果见图 3。从图 3 可看出, 温室内的仿真温度与实测温度曲线吻合较好, 趋势一致。用均方根误差 (RMSE) 标准来分析模拟值与测量值的误差为 2.284 0。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数 Parameters	符号 Symbol	数值 Value	来源 Source
温室容量 Greenhouse capacity	$v_g$	1 036.8 m <sup>3</sup>	计算
浮法玻璃的厚度 Thickness of floating glass	$d$	4 mm	-
玻璃的透光率 Transparency of glass	$\tau_i$	0.93	-
空气的发射率 Air emittance	$\varepsilon_1$	0.90	Oke(1987), Monteith(1990)
玻璃的发射率 Glass emittance	$\varepsilon_2$	0.90	Oke(1987), Monteith(1990)
玻璃的传热系数 Heat transfer coefficient of glass	$K_w$	1.86 $\Delta T^{0.33}$ W/(m <sup>2</sup> ·K)	Bailey(1990)
空气密度 Air density	$\rho_g$	1.2 kg/m <sup>3</sup>	-
空气中的热含量 Heat content in the air	$C_g$	1.006 J/(kg·K)	-
覆盖材料表面积 Surface area of covering material	$A_g$	443.4 m <sup>2</sup>	计算
Stefan-Boltzman 常数 Stefan-Boltzman constant	$\sigma$	5.67 × 10 <sup>-8</sup> W/(m <sup>2</sup> ·K)	-
湿帘面积 Wet - curtain area		54 m <sup>2</sup>	计算

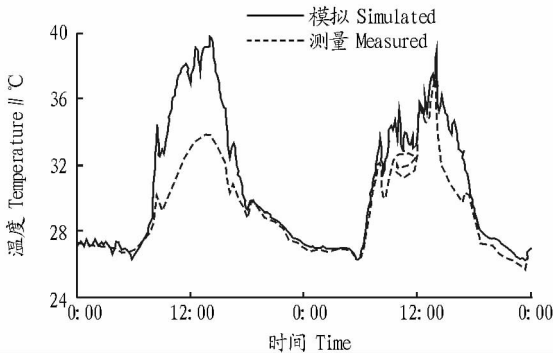


图 3 温室内的模拟温度和测量温度

Fig. 3 The simulated and measured temperature graph in greenhouse

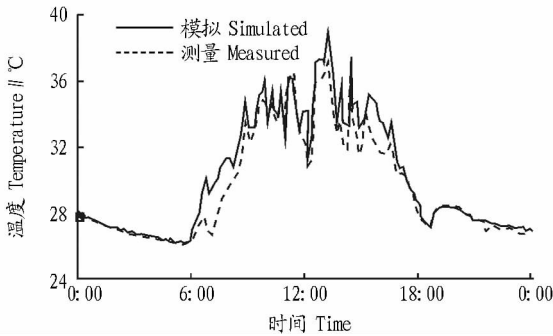


图 4 湿帘 - 风机作用下温室内的模拟温度和测量温度

Fig. 4 Simulated and measured temperature graph under action of wet curtain and fan

为了验证模型在夏季高温时的适用性,对湿帘 - 风机降温系统启用时,温室内模拟温度的变化情况与真实测量数据进行了比较。对 8 月 26 日数据进行模拟仿真,结果显示(图 4),温室内的模拟温度与实测温度曲线基本一致,计算得到 RMSE 为 0.623 4。

3 结论

温室是一个复杂的热交换系统,室内的温湿度变化与室外的环境变化有很大的相关性,把传热学理论应用到温室环境的建模中来,通过对温室的能量平衡和物质平衡的分析,建立了温室内温度的动态模型,采集了模型需要的相关数据。运用 MATLAB/SIMULINK 软件仿真,得到夏季温室内温度动态模型输出的温度与实测值平方均方根误差为 2.284 0,夏季湿帘 - 风机降温条件下,模型模拟仿真的温度与实测值平方均方根误差为 0.623 4。结果验证了建立的温室小气候动态模型能可靠地估计温室内空气的温度值。

参考文献

- [1] YANG X. Greenhouse micrometeorology and estimation of heat and water vapour fluxes[J]. J Agric Engng Res, 1995, 61: 227 - 238.
- [2] BOT G P A. Physical modelling of greenhouse climate[J]. Proceedings of the IFAC/ISHS Workshop, 1991, 12(3): 7 - 12.
- [3] JOSEF T, SHABTAI C, MEIR T. Screenhouse microclimate and ventilation: an experimental study[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(3): 331 - 341.
- [4] 陈教科. 温室小气候建模及其智能控制研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [5] 李永欣, 李保明, 王朝元, 等. Venlo 型温室外遮阳和屋顶喷淋系统夏季降温效果[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 127 - 130.

(上接第 14826 页)

- [14] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J]. 浙江统计, 2003(4): 24 - 25.
- [15] 欧雄, 冯长春, 沈青云. 协调度模型在城市土地利用潜力评价中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2007(1): 42 - 45.
- [16] 袁丽丽. 城市土地可持续利用评价研究[J]. 安徽农业科学, 2006(16):

4069 - 4071, 4083.

- [17] 王家耀, 周海燕, 成毅. 关于地理信息系统与决策支持系统的探讨[J]. 测绘科学, 2003(1): 1 - 4.
- [18] 雷兵, 刘纪平, 谭海, 等. 空间辅助决策支持系统的应用模型及管理研究[J]. 测绘科学, 2005(1): 55 - 56, 75.