

长江中下游地区温室内温湿度预测模型的研究

邓玲黎, 李百军, 毛罕平

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 该文利用传热学理论, 以温室热平衡模型为基础, 分析了温室内温度和湿度的动态模型, 并以此建立了室内温湿度预测模型。最后, 作者通过 SR5 2 型连栋塑料温室的实验研究, 求出该模型参数, 为实现智能温室前馈控制奠定基础。

关键字: 温室; 热平衡; 温湿度; 预测模型

中图分类号: 625.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0263-04

0 引言

长江中下游地区夏季气候炎热, 温度高, 湿度低, 光照强; 冬季低温、高湿, 对大多数蔬菜花卉的生长极为不利, 温室气候环境的调控尤其必要。目前国内大多应用反馈控制的方法进行温室环境的控制, 控制的效率低而且稳定性差, 如把温室看成一个热平衡系统, 建立温室内温湿度的预测模型, 实现温室“前馈+反馈”控制, 将会提高温室控制的效率和平稳性。

国内对连栋塑料温室环境模型的研究刚刚起步, 但对日光温室环境模型已有较多的研究。如陈端生、杨晓光等人对日光温室气象环境进行了较为深入的研究^[17-19]; 李元哲等人对日光温室的微气候进行了理论和实验研究^[20]; 陈青云等建立了日光温室光温环境的动态数学模型, 并对单屋面温室光照环境进行了实验分析^[21, 22]等。

国外已有许多学者研究过温室环境(气候)模型问题。如 M. Kindelan (1980) 探讨了温室环境的动态模型, 建立了基于能量和质量平衡的方程^[23]; G. A. Duncan (1981) 等人研究了温室能量流动的模拟问题, 得出了温室能量分析的结果^[24]; Pitam Chandra 等 (1981) 利用温室内热量平衡和湿度平衡推算了温室内随时间而变化的加温和降温要求。P. I. Cooper 等 (1983) 建立了温室的稳态模型等。Seginer I G (1993) 等研究了温室多状态可变的最优温度轨迹。Jolliet O (1994) 建立了预测和优化温室内湿度与蒸发模型等。总之, 以模型为基础的综合控制方法代表着未来研究发展的方向。

温度和湿度是影响温室控制效果最主要的因子。本文作者通过在 SR5 2 型连栋塑料温室内进行的实验, 建立室内温湿度预测模型。室内温湿度预测模型主要是指一定时间内, 室内外环境对室内温度和相对湿度的影响模型, 该模型是实现前馈控制的基础。

1 室内温度的动态模型

为了方便计算和突出研究对象的本质, 在建立数学

模型时, 需要对研究对象作一些必要的简化:

- 1) 温室内种植的作物(如生菜)冠层温度分布均匀;
- 2) 在本研究中计算土壤传热时, 忽略温室内土壤的横向传热, 只考虑深度方向的一维传热。

温室热量的来源主要有两种途径: 第一是太阳辐射, 这是温室热量的主要来源; 第二是温室内各种加热设施的加热。温室的传热主要有四种途径: 第一是通过温室的围护层(对于连栋塑料温室是指温室四周的塑料薄膜及门等)传输的热量; 第二是通过温室的覆盖层(对于连栋塑料温室是指温室顶部的塑料薄膜等)传输的热量; 第三是通过温室内的土壤层传输的热量; 第四是通过温室通风和缝隙漏气而进行通风换热。如图 1 所示。

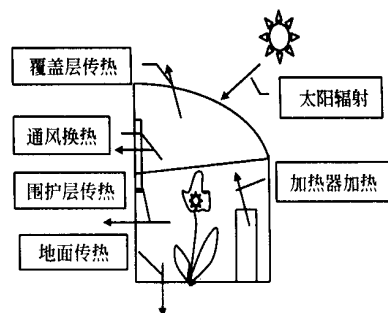


图 1 温室内的热收支(取一跨为例)

Fig 1 Thermal balance in greenhouse

据文献^[2], 室外气候对温室内气候的影响程度按下面的递减次序排列: 1. 室外气温; 2. 土壤深层温度; 3. 天空辐射温度; 4. 太阳总辐射; 5. 风速; 6. 散射辐射; 7. 相对湿度。因散射辐射和相对湿度对室内温度的影响很小, 用前面的五个因素构建的动态平衡关系式^[3]便可较精确地表述温室内的温度特征:

$$\rho C_p V \frac{\partial T_i}{\partial t} = b A_s S_i - h A_c (T_i - T_o) - h_w A_w (T_i - T_o) - h A_s (T_i - T_s) - \rho C_p V_R (T_i - T_o) + H \quad (1)$$

式中 ρ ——温室内空气密度, kg/m^3 ; C_p ——空气热容, $1.005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; V ——温室的体积, m^3 ; T_i ——温室内空气温度, $^\circ\text{C}$; T_o ——温室外空气温度, $^\circ\text{C}$; t ——时间, s ; b ——太阳热效率, $b = 0.28$; A_s ——地面面积, m^2 ; T_s ——土壤表面温度, $^\circ\text{C}$; S_i ——温室内

收稿日期: 2003-05-14 修订日期: 2003-11-24

基金项目: 江苏省“九五”重大攻关项目(BG985021)资助

作者简介: 邓玲黎, 硕士, 助教, 江苏镇江 江苏大学机械工程学院, 212013

的太阳总辐射, W/m^2 ; H —— 加热器的加热功率, W ; h_c —— 覆盖层的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_c —— 覆盖层的面积, m^2 ; h_w —— 围护层的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A_w —— 围护层的面积, m^2 ; h_s —— 土壤与空气间的湍流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; V_R —— 温室内换气率, m^3/s

2 室内湿度的动态模型

温室内湿度的变化, 由室内的水分平衡决定。温室内水分变化与室内作物栽培床的蒸散率、土壤蒸发率、喷淋系统的蒸发速率、水蒸汽的凝结率、水蒸汽的渗漏率和通风换气影响水蒸汽的变化率有关。为突出研究的主要对象, 这里假设温室内湿度分布均匀; 由于温室采用滴灌技术, 地面蒸发很少, 忽略考虑。由文献^[5], 温室内绝对湿度的变化可以下述方程表示

$$\frac{dk_i}{dt} = \frac{1}{\rho V} [(M_{etp} + M_{vp}) - (M_{cd} + M_i + M_v)] \quad (2)$$

式中 M_{etp} —— 温室内作物栽培床的蒸散率, kg/s ; M_{vp} —— 喷淋系统的蒸发速率, kg/s ; M_{cd} —— 室内水蒸汽在覆盖物内侧的凝结率, kg/s ; M_i —— 由于温室渗漏而影响室内水蒸汽变化率, kg/s ; M_v —— 通风换气影响室内水蒸汽的变化率, kg/s ; k_i —— 室内实际含湿量, kg/kg

温室作物栽培床的蒸散率国外已有许多研究^[6-11], 根据 Jolliet 和 Bailey 的研究^[12], 蒸散率 M_{etp} 与太阳总辐射 (S_i) 和温室内饱和水蒸汽与实际水蒸汽的压力之差 ($e_{sa} - e_a$), 气象学中称为饱和差有关。如 ($e_{sa} - e_a$) 用室内饱和水蒸汽含湿量与实际含湿量之差 ($k_{sa} - k_i$) 来表示, 则式 (2) 由如下方程式表示

$$M_{etp} = A_s [\omega S_i + \xi \Psi (k_{sa} - k_i)] \quad (3)$$

式中 ω —— 太阳辐射影响蒸散的特征系数, kg/J ; ξ —— 室内饱和差影响蒸散的特征系数, $kg/(m^2 \cdot kPa \cdot s)$; Ψ —— 水汽压与含湿量之间的转换系数, $(kPa \cdot kg)/kg$; k_{sa} —— 室内饱和水蒸汽含湿量, 在标准大气压下与室内温度有关, 可查表得到, kg/kg

喷淋系统的蒸发速率 M_{vp} 在不考虑风速影响的情况下, 与室内饱和水蒸汽含湿量与实际含湿量之差 ($k_{sa} - k_i$) 有关, 其表达式如下

$$M_{vp} = A_s \cdot m_{vp} \cdot \sigma \cdot \Psi (k_{sa} - k_i) \quad (4)$$

式中 m_{vp} —— 喷淋系统单位面积和单位时间的喷水量, $kg/(m^2 \cdot s)$; σ —— 室内饱和差影响蒸发的特征系数, $1/kPa$

室内水蒸汽在覆盖物内侧凝结的水蒸汽变化率 M_{cd} 国外也有较多的研究^[6, 10, 13-15], 它与温室内的 ($e_a - e_{sc}$) 成比例关系。覆盖层温度可简化看成是室外温度, 同样用室内实际含湿量与室外饱和水蒸汽含湿量之差 ($k_a - k_{so}$) 来表示的方程式如下

$$M_{cd} = A_s \frac{h_{cv} \Psi}{\lambda \gamma} (k_i - k_{so}) \quad (5)$$

式中 h_{cv} —— 温室内的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ —— 水分的蒸发潜热, 在 20 为 2450 kJ/kg ; γ ——

干湿表常数, $66 \times 10^{-3} kPa/^\circ C$; k_{so} —— 室外饱和水蒸汽含湿量, 在标准大气压下与室外温度有关, 可查表得到, kg/kg

水蒸汽的渗漏率 M_i 与通风换气影响室内水蒸汽的变化率 M_v 类似, 与室内外湿度差、通风率和温室体积有关, 其表达式为^[4]

$$M_i = \rho (k_i - k_o) V_i \quad (6)$$

$$M_v = \rho (k_i - k_o) V_R \quad (7)$$

式中 k_o —— 室外空气含湿量, kg/kg ; V_i —— 温室漏气率, m^3/s ; V_R —— 温室换气率, m^3/s

3 室内温湿度预测模型

根据温室管理实践, 温室的配套设施, 如内外遮阳、内外喷淋、风机和热风机加热器等, 都是在温室中卷帘和天窗的动作不能达到预期效果时才采用的。因此, 为了方便实现前馈控制, 室内温湿度的预测模型, 夏季是在自然通风状态下建立的 (温室的天窗和卷帘全部打开, 其他调控设施关闭或收起的状态), 冬季是在封闭状态下建立的 (温室的天窗和卷帘全关闭, 其他调控设施关闭或收起的状态)。

3.1 室内温度预测模型

式 (1) 指出室内温度变化与室内外温差、光照度和温室换气率的关系。这是一个瞬时的动态方程, 在实际的温室环境控制中需要对时间进行积分, 否则不能发挥前馈控制的作用。由于室外光照度和温度是一个缓变过程, 除突然有云遮住外, 正常情况在 20 min 内变化很小, 可以看成不变。由此, 对 (1) 式两边积分, 在不加热、不考虑水分相变热交换、作物生理过程热效应等情况下, 可建立 20 min 内室外气候环境对室内温度影响的理论预测模型为

$$\Delta T_{t+\Delta t} = \left[\frac{h_a S_i}{\rho C_p V} - (T_i - T_o) c - (T_i - T_o) \frac{v \cdot B}{V} \right] \Delta t$$
$$c = \frac{1}{\rho C_p V} (h_a A_c + h_w A_w + h_a A_s) \quad (8)$$

式中 $\Delta T_{t+\Delta t}$ —— ΔT 后室内的温度变化值; t_0 —— 当前室外温度; T_i —— 当前室内温度; S_i —— 温室内的太阳净辐射, W/m^2 ; c —— 室内温度变化系数, 与温室的覆盖材料特性和覆盖的表面积有关, $1/s$; Δt —— 时间, s ; v —— 温室的通风风速, m/s ; B —— 温室通风截面积, m^2 ((8) 式中假设 $T_s \doteq T_o$)。

3.2 室内湿度预测模型

根据公式 (2~7) 可以看出湿度模型相当复杂, 然而, 作物生长对湿度的敏感性不是很强, 为研究方便, 对其作必要的简化。在本文中, 喷淋系统是温室的配套设施, 温室自然通风和封闭状态下不使用, 在预测模型中不作考虑; 夏季正常天气下, 温室天窗和四周卷帘是打开的, 室内水蒸汽在覆盖物内侧的凝结率 M_{cd} 很小, 可以看成是零; 在自然通风的情况下, 只考虑自然通风的换气率。因此, 可用相对湿度来表示的夏季室内湿度的预测模型, 由公式 (2~7) 可简化推导出如下方程

$$\frac{dH}{dt} = \frac{A_s}{\rho V} \left[\frac{\omega S_i}{k_{sa}} + \xi \Psi (1 - H_i) \right] + \frac{(H_o - H_i) V_R}{V}$$

同温度模型类似, 20 m in 内, 方程两边对时间积分, 得出 20 m in 内室内相对湿度的理论预测模型为

$$\Delta H_{i+\Delta t} = \left[a \frac{S_i}{k_{sa}} + b(1 - H_i) + \frac{(H_o - H_i) v \cdot B}{V} \right] \Delta t \tag{9}$$

式中 $\Delta H_{i+\Delta t}$ —— Δt 后室内的相对湿度, %;
 H_i ——室内相对湿度, %; H_o ——室外相对湿度, %。

$a = \frac{A_s \omega}{\rho V}, b = \frac{A_s \xi \Psi}{\rho V}$

对于冬季, 除了必要的通风换气外, 温室的卷帘和天窗在通常情况下是关闭的。作物的蒸散率、室内水蒸汽在薄膜内侧的凝结率和换气影响水蒸汽的变化率是影响室内湿度的主要因素, 得出 20 m in 内室内相对湿度的理论预测模型可用以下方程表示

$$\Delta H_{i+\Delta t} = \left[a \frac{S_i}{k_{sa}} + b(1 - H_i) - c(H_i \frac{k_{sa}}{k_{sa}}) - (H_i - H_o) \cdot n \right] \Delta t \tag{10}$$

式中 $c = \frac{A_s h_{ev} \Psi}{\rho V \lambda Y}; n$ ——温室的换气率, 1/s。

4 实验研究

4.1 实验条件

实验温室为 SR5.2 型连栋塑料温室, 跨度 6.5 m, 开间 4 m, 覆盖材料为进口薄膜。所用传感器有: VA ISALA 数字手提式温湿度计、干湿球温度表、6Z-5 型照度计和 EYIA 型电传风向风速仪等。实验时, 每个温室内各装有 5 个温湿度计, 东西两间的测点布置完全相同, 温湿度计的排列分布如图 2, 温室室外空旷区设置温湿度计和 EYIA 型电传风向风速仪和雨量器。

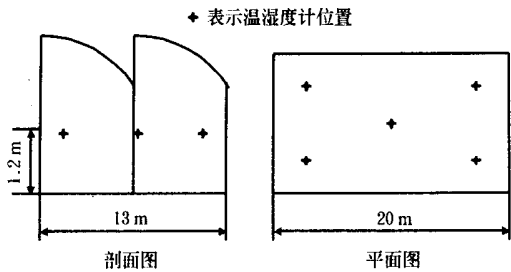


图 2 东间温室测点温湿度计的分布图
Fig.2 Distributing of the thermometer and hygrometer in the greenhouse

4.2 实验方法

室内温湿度预测模型的实验是在东间温室中进行的, 夏季自然通风, 冬季封闭。夏冬季都选择晴天、多云、阴天的三种天气各做 3 d。实验时间是从上午 8:00 开始, 到下午 4:00 结束, 每天做 8 组数据。实验时, 每整点时刻测一次, 过 20 m in 后再测一次。测定的环境因子是室内的 5 个点的干湿球温度、光照度和室外的干湿球温度、光照度和风速(风速是在温室通风面测得的)。

4.3 实验结果

室内温湿度均是 5 点的平均值。将测得的室内光照度、5 个干湿球温度和室外的干湿球温度、光照度和风

速值, 通过计算得出室内温度、相对湿度和光照度和室外的温度、相对湿度、光照度和风速值, 代入方程(8)、(9), 通过自编的回归软件进行回归计算后, 得出夏季室内温度(20 m in 内)的预测模型^[16], 如 Δt 取 20 m in 即可计算 20 m in 后室内温度的预测值, 其方程如下

$$\Delta T_{i+\Delta t} = [1.374 \times 10^{-2} \times L_i - 7.02 \times 10^{-2} \times (T_i - T_o) - 3.82 \times 10^{-2} \times (T_i - T_o) \times v] \times \Delta t \tag{11}$$

式中 L_i ——温室内光照度, klx。
夏季室内湿度的预测模型为

$$\Delta H_{i+\Delta t} = \left[\frac{6.724 \times 10^{-5}}{k_{sa}} \times L_i - 2.6 \times 10^{-3} \times (100 - H_i) - 0.1191(H_i - H_o) \times v \right] \times \Delta t \tag{12}$$

冬季室内温度预测模型为

$$\Delta T_{i+\Delta t} = [2.763 \times 10^{-2} \times L_i - 4.836 \times 10^{-2} \times (T_i - T_o)] \times \Delta t \tag{13}$$

冬季室内湿度的预测模型为

$$\Delta H_{i+\Delta t} = \left[\frac{1.586 \times 10^{-3}}{k_{sa}} \times L_i - 9.38 \times 10^{-2} \times (100 - H_i) - 0.135(H_i - \frac{k_{sa}}{k_{sa}}) - 0.1178(H_i - H_o) \right] \times \Delta t \tag{14}$$

5 结 语

本文作者利用传热学理论, 分析了温室的热平衡, 建立温室内的温湿度预测模型, 并在 SR5.2 型连栋塑料温室内进行实验, 得出该温室内温湿度的预测的数学模型, 为实现智能温室前馈控制奠定基础, 同时也为这一领域的进一步研究提供参考。

该模型已在作者的硕士学位论文^[16]——智能化温室综合环境控制技术的研究中得到应用和试验。试验表明, 该模型能较好地实现该温室的预测和前馈控制。温度的最大绝对误差在 ± 0.25 内, 相对湿度的最大绝对误差 $\pm 0.8\%$ 内。温度最大误差出现在 20 m in 内有云变化时, 计算值小于实测值, 主要是由于模型假设光照度不变, 而实际光照度增加。冬季湿度计算值小于实测值, 这与冬季实际换气率小于计算换气率有关。同时将该模型结合温室环境调控设施的调控效果模型, 植物生长模型和成本模型及综合环境控制模型研制了智能化温室综合环境控制系统, 经试验控制效率高且稳定。

[参 考 文 献]

[1] 彦启森, 赵庆珠 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 187.
[2] 温室动态模型的灵敏度研究[Z]. 王绍金译 译自(比利时) J. Nijsskens et al. Rapport d'activites de centre d'etude de la regulation climatique des serres[R]. 1990.
[3] Chao K. Design of switch control systems for ventilated greenhouse[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(4): 1513- 1523.
[4] Cooper K, Parsons D J, Demmers T. A thermal balance model for livestock buildings for use in climate change studies[J]. J agric Engng Res, 1998, 69: 43- 52.

- [5] D. de Halleux, Gauthier L. Energy consumption due dehumidification of greenhouse under northern latitudes[J]. J agric Engng Res, 1998, 69: 35- 42
- [6] Joliet O Hortitrans A Model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouse[J]. J agric Engng Res, 1994, 57: 23- 37.
- [7] Stanghellini C. Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management[D]. Ph. D. dissertation, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 1987.
- [8] Yang S, Short T H, Bauerle W L. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1990, 51: 197- 209.
- [9] Yang X. Greenhouse micrometeorology and estimation of heat and water vapour fluxes[J]. J agric Engng Res, 1995, 61: 227- 238
- [10] Okuya A, Okuya T. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors[J]. Acta Horticulturae, 1988, 230: 307- 311.
- [11] de Graaf R, van den Ende J. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crop [J]. Acta Horticulturae, 1981, 119: 147- 158
- [12] Joliet O, Bailey B J. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 58: 43- 62
- [13] Wilhelm L R. Numerical calculation of psychrometric properties[J]. Transactions of A S A E, 1976, 19(2): 318 - 325
- [14] Pieters J G, Deltour J, Debruyckere M J. Condensation and static heat transfer through greenhouse covers during night[J]. Transactions of the A S A E, 1994, 37(6): 1965 - 1972
- [15] Pieters J G, Deltour J, Debruyckere M J. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night[J]. J agric Engng Res, 1995, 61: 165 - 171.
- [16] 李百军 智能化温室综合环境控制技术研究[D]. 江苏大学硕士论文, 2002 3
- [17] 陈端生, 郑海山, 刘步洲 日光温室气象环境综合研究(一)[J]. 农业工程学报, 1990, 6(2).
- [18] 陈端生 日光温室气象环境综合研究(三)[J]. 农业工程学报, 1992, 8(4).
- [19] 杨晓光, 陈端生, 郑海山 日光温室气象环境综合研究(四)[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1).
- [20] 李元哲, 吴德让, 于 竹 日光温室微气候的模拟与实验研究[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 130- 131.
- [21] 陈青云, 汪政富 节能型日光温室光温环境的动态模拟及其应用[J]. 农业工程学报, 1995, 11(增刊): 126- 131.
- [22] 陈青云 单屋面温室光照环境的数值实验[J]. 农业工程学报, 1993, 9(3): 96- 101.
- [23] Kindelan M. Dynamic modeling of greenhouse environment[J]. Transactions of the A S A E, 1980, 23(6).
- [24] Duncan G A, et al Simulation of energy flows in a greenhouse: magnitudes and conservation potential[J]. Transactions of the A S A E, 1981.

Forecasting model of inter temperature and humidity for intelligent greenhouses in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

Deng Lingli, Li Baijun, Mao Hanping

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on the model of the thermal balance, the paper applies the diathermanous theory, analyzes the thermal model of greenhouse, and builds the forecasting model of the temperature inside greenhouse and humidity for the intelligent greenhouse by theoretical deduction. Finally, the parameters of this model were obtained by a lot of experiments on the SR5.2 continuous plastic intelligent greenhouse. This research will be the function of realizing the control in advance.

Key words: greenhouse; the thermal balance; temperature and humidity; the forecasting model