

基于灰色粒子群算法的温室环境多目标优化控制

张雪花^{1,2}, 张武^{1,2*}, 李叶云³, 蔡芮莹², 朱小倩²

(1.农业部农业物联网技术集成与应用重点实验室,安徽 合肥 230036 2.安徽农业大学信息与计算机学院,安徽 合肥 230036; 3.茶树生物学与资源利用国家重点实验室,安徽 合肥 230036)

摘要:引入人工控制因素,以扩展的自回归模型(ARX)为基础,构建茶树育苗的温度、相对湿度及耗电量多目标模型函数,采用灰色关联理论和粒子群优化算法(PSO),面向茶树育苗温室环境模型进行多目标优化控制。仿真结果表明,运用多目标灰色 PSO 算法将育苗温室内温度值从 31.5 °C 降为 24.51 °C,相对湿度从 47.2%提升为 59.35%,耗电量降低 17.6%。与线性加权和法、单目标 PSO 算法相比,选取多目标灰色 PSO 算法对温室进行优化,得到在开启遮阳与喷淋组合调控的情况下,经过 20 min 温室内温度和相对湿度调控,即可达到茶苗生长的要求。

关键词:温室;模型;灰色粒子群算法;多目标优化

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2017)02-0217-05

Multi-objective function optimization for environmental control in greenhouse based on grey particle swarm algorithm

ZHANG Xuehua^{1,2}, ZHANG Wu^{1,2*}, LI Yeyun³, CAI Ruiying², ZHU Xiaoqian²

(1.Key Laboratory of Technology Integration and Application in Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Hefei 230036, China;2.College of Information and Computer Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3.Key Laboratory of Tea Plant Biology and Resource Utilization, Hefei 230036,China)

Abstract: On the basis of the extended autoregressive model (ARX), a multi-objective function of the temperature, the humidity and the economic cost was established by introducing the artificial control factors. Multi-objective function optimization for environmental control was carried out in the tea-growing seedling greenhouse by using the grey correlation theory and the particle swarm optimization algorithm (PSO). The simulation results showed that the energy consumption could reduced by 17.6% under the control of the multi-objective PSO as the temperature dropped from 31.5 °C to 24.51 °C and the humidity increased from 47.2% to 59.35%. Comparison with the linear weighted sum method and the single objective PSO, it could regulate the temperature and the humidity to meet the requirements for the growth of tea seedlings in greenhouse within 20 minutes under the condition of opening sun shading and spraying conditions.

Keywords: greenhouse; model; grey particle swarm algorithm; multi-objective optimization

温室的温度和相对湿度直接影响作物的长势。传统的温湿度控制依赖于生产者的先验知识,主观性强,误判率高。目前温室环境控制的研究主要集中在构建实用的温湿度模型和选取有效的优化控制方法两个方面。

Albright^[1]提出了经典温湿度模型,模型中虽然

考虑到作物的生理过程,如蒸发、蒸腾速率、室内空气参数等,但忽略了光照度和二氧化碳浓度对作物生长的影响。DSSAT 模型和 TOMGRO 作物生长模型,模型结构过于复杂,需要以大量的数据为基础,给实际温室建模带来了困难^[2]。何芬等^[3]、杨昆等^[4]建立冬季日光温室空气湿度的神经网络模

收稿日期: 2016-09-06

修回日期: 2017-01-25

基金项目: 农业部引进国际先进科学技术“948”项目(2015-Z44); 农业部农业物联网技术集成与应用重点实验室开放基金(2016KL05); 安徽农业大学引进与稳定人才科研项目(wd2015-05)

作者简介: 张雪花(1991—),女,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事计算机应用技术研究,18255104312@163.com; *通信作者,张武,博士研究生,副教授,主要从事计算机控制研究, zhangwu@ahau.edu.cn

型,并运用遗传算法优化 BP 神经网络模型,结果显示,神经网络预测模型具有收敛速度快、预测精度高等特点。

在温室环境控制方法研究中,主要采用各种智能控制方法对温室环境进行控制。Albert Setiawan 等^[5]在 PI 控制算法的基础上,提出使用拟微分反馈控制的方法,相对于 PI 控制器可以改善静态误差和最大超调量等性能,但此方法对模型结构有较强的依赖性。雷勇等^[6]针对 PID 自适应能力差、控制精度不佳问题,提出基于自适应模糊 PID 控制温室温度的方法,该方法能够对温室内作物生长环境要求实现自适应性控制策略,提高作物产量的同时还能增加经济效益,但是该方法仅仅用温度这一指标作为参数整定的评估准则,存在局限性。朱丙坤等^[6]以控制精度和能耗作为控制目标,提出多目标相容控制算法,并将改进后的遗传算法引入到优化过程,使控制精度和能耗达到平衡,仿真结果表明,新算法在节能降耗方面有着一定的优势。

温室系统具有非线性、大时滞的特点,温室内各控制设备之间存在耦合关系。笔者在前期研究^[8-9]基础上,从满足茶树育苗温室环境的控制需求角度出发,以温室调控设备为研究对象,综合考虑温度、相对湿度及耗电量 3 个目标,以扩展的自回归模型 (ARX)^[9]为基础,采用多目标灰色粒子群算法^[10-11],对育苗温室环境调控设备进行组合控制,以期在满足温室茶苗适宜的生长环境情况下,节约用电成本。

1 温室环境建模

1.1 温室温湿度模型

引入人工控制因素,运用扩展的自回归模型 (ARX)建立温室的温度和相对湿度模型,在模型基础上进行温室环境的多目标优化控制。

温度、相对湿度、风速和光照度对温室环境的影响较大^[12]。在建模时视室外气象信息为扰动输入量,将温室调控设备(如风机、湿帘、遮阳、喷淋、顶窗等)视为决策输入量,输出变量为温室内的温度和相对湿度,建立温湿度模型。

$$A(z^{-1})y(k) = \sum_{i=1}^n B(z^{-1})x_i(k) + v(k) \quad (1)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \quad (2)$$

$$B_i(z^{-1}) = b_{i1} + b_{i2} z^{-1} + b_{i3} z^{-2} + \dots + b_{in} z^{-ni}$$

式中: $y=[y_1 \ y_2]^T$ 为温室内的温度和相对湿度; $x=[x_1 \ x_2 \dots x_9]^T$ 为模型输入量; x_1 为室外温度($^{\circ}\text{C}$); x_2 为室外相对湿度(%); x_3 为室外风速(m/s); x_4 为光照度(lx); x_5 至 x_9 分别为风机、湿帘、遮阳、喷淋、顶窗等控制设备; $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 为 ARX 模型系数多项式,其中 $A(z^{-1})$ 是输出变量对应的参数多项式, $B(z^{-1})$ 分别为 9 个输入变量对应的参数多项式; z^{-1} 为后移算子; k 为时间变量(min), $v(k)$ 为随机噪声; n 为 $A(z^{-1})$ 的阶, $n_1, n_2 \dots n_9$ 为 $B_1(z^{-1}), B_2(z^{-1}), \dots, B_9(z^{-1})$ 的阶。因温室规模小, $v(k)$ “不显著”或“难以猜测”^[14], 其模型为:

$$A(z^{-1}) \times y_i(t) = B(z^{-1}) \times x_j(t) (i=1,2; j=1,2,3 \dots 9) \quad (3)$$

根据温室实际情况,将模型的最高阶次设置成二阶^[9]。将(2)式代入(3)式,即可推出温度、相对湿度的具体表达式。

$$(1+a_1 z^{-1}+a_2 z^{-2}) \times y_1(t) = (b_{11}+b_{12} z^{-1}+b_{13} z^{-2}) \times x_1(t) + \quad (4)$$

$$(b_{21}+b_{22} z^{-1}+b_{23} z^{-2}) \times x_2(t) + \dots + (b_{91}+b_{92} z^{-1}+b_{93} z^{-2}) \times x_9(t)$$

$$(1+c_1 z^{-1}+c_2 z^{-2}) \times y_2(t) = (d_{11}+d_{12} z^{-1}+d_{13} z^{-2}) \times x_1(t) + \quad (5)$$

$$(d_{21}+d_{22} z^{-1}+d_{23} z^{-2}) \times x_2(t) + \dots + (d_{91}+d_{92} z^{-1}+d_{93} z^{-2}) \times x_9(t)$$

已知 $z^{-1} \times u(t) = u(t-1)$, $z^{-2} \times u(t) = u(t-2)$, 将其代入(4)和(5)式,即可求得温度和相对湿度的模型函数表达式。

1.2 能耗模型

将调控设备运行消耗的电量作为能耗成本进行参考。温室控制设备运行过程中,调控设备消耗的电量包括连续可控设备运行一段时间消耗的电量(如风机、喷淋及湿帘等)和非连续可控设备完全开启消耗的电量(如遮阳网和顶窗等^[13])。耗电量模型 J 可表述为:

$$J = \sum_{i=1}^n p_i t_i x_i + \sum_{j=1}^m q_j t_j x_j \quad (6)$$

根据温室实际情况,耗电量模型为:

$$J = p_{15} \times x_5 + p_{26} \times x_6 + q_{17} \times x_7 + p_{38} \times x_8 + q_{29} \times x_9 \quad (7)$$

式中: $\sum_{i=1}^n p_i t_i x_i$ 为 n 个连续调控机构开启消耗的电量, $\sum_{j=1}^m q_j t_j x_j$ 为 m 个非连续调控机构消耗的

电量; p_i 为单个连续调控机构的额定功率; q_i 为单个非连续调控机构的额定功率; x_i 为调控机构的开关状态,“0”表示设备处于关闭状态,“1”表示设备

处于开启状态； t_i 为非连续性调控机构完全打开的运行时间； t_j 为连续性调控机构运行时间。

2 灰色粒子群优化算法

在标准 PSO 算法的基础上，将控制设备组合种类视为粒子的解，分别以温度模型函数、相对湿度模型函数及能耗成本函数为适应度函数，粒子解空间的限制和速度范围限制由控制设备组合种类的具体值确定。每个粒子在若干次更新迭代后，寻找到最优的组合，此组合即为满足该目标环境下最优的控制决策。

由于温室的温度、相对湿度及能耗成本之间存在耦合关系，当温湿度达到作物的最佳值时，能耗成本会显著增加，因此引入灰色关联度，用于评价 3 个目标与最优解之间的相似程度，关联度越大，它们之间的相似程度则越大，反之就越小^[14]。

1) 运用标准 PSO 算法分别求出温度、相对湿度及能耗成本目标函数在控制设备组合种类约束下的最优适应值，由各目标函数的最优值组成的序列作为基准矢量序列。

2) 根据温室实际情况，以 5 种调控设备排列组合种类作为粒子的解，在组合种类的约束条件下，初始化各粒子规模、迭代次数、位置及速度等，将每个粒子解的初始值转化成二进制矩阵形式代入各目标函数，得到初始目标值，将此目标值作为目标矢量序列。

3) 评价每个粒子的基准矢量序列与目标矢量序列之间的关联度，将当前目标矢量序列和其对应的关联度设置为粒子的个体极值存储为 p_b ，将关联度最大粒子的位置和其关联度作为整个种群的全局极值存储为 g_b 。

4) 更新粒子位置、速度、学习因子及权值。在更新粒子位置时，对粒子位置进行取整操作。

5) 计算每个粒子的关联度，将其关联度与历来的最好位置所对应的关联度作比较，如果较优，把当前关联度和其对应的粒子位置存储为 p_b 。比较所有粒子的个体极值和全局极值，如果较优，将该个体极值更新为全局极值，并存储其对应的粒子位置。

6) 判断当前迭代次数是否满足停止条件，若不满足返回步骤(4)继续迭代；否则，停止搜索，输出全局极值对应的开关设备组合与温度、相对湿度及

耗电成本值。

3 结果与分析

3.1 数据采集

试验于 2016 年 3 月 14 日至 4 月 21 日在安徽农业大学农萃园茶树育苗温室进行。温室面积约 80 m²，顶部有天窗、遮阳可控设备，温室北部有 2 台风机，与温室南部的湿帘形成风向对流，便于降温，喷淋管位于茶苗上方 0.5 m。茶苗高度约为 15 cm。以往仅根据经验对茶苗进行管理。根据茶树育苗适宜温度为 22~28 ℃，相对湿度为 50%~70%，设定温度值 25 ℃和相对湿度为 60%。距茶苗高 1 m 的水平区域，按南北方向等间隔布置 3 处温度、相对湿度传感器，运用自适应加权数据融合估计算法，将温度和相对湿度在数据层进行融合，用于温室建模和优化控制。利用 NI Compact RIO 与 WSN3202 短距离无线通信模块采集室内温度、相对湿度、二氧化碳浓度及光照度；用 PH 自动气象站采集室外温度、相对湿度、风速及光照度。

3.2 建模结果与验证

选取 3 月 14 日至 4 月 18 日的数据，建立温室环境模型，运用交叉验证的方式检验模型的准确性。将 4 月 19 日 11:00—11:30 和 12:00—12:30 的数据分别用于温湿度建模试验，以 4 月 19 日 11:30—12:00 和 12:30—13:00 期间的数据为验证数据，记为 D_1 和 D_2 。将 D_1 和 D_2 中数据的输入量分别代入上述模型计算出温度和相对湿度的预测值，其结果如图 1 至图 4 所示。

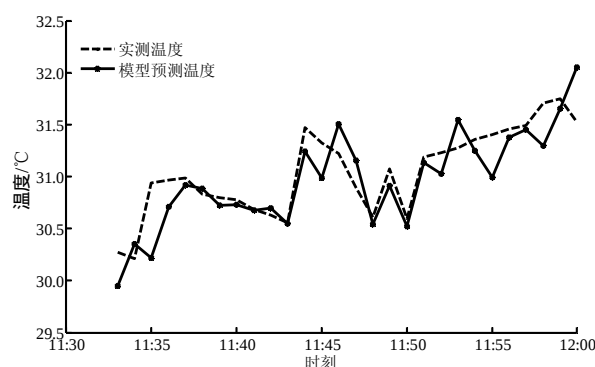


图 1 用 D_1 验证模型温度的输出曲线

Fig.1 The output curve of temperature model is verified by the data from 11:30 to 12:00

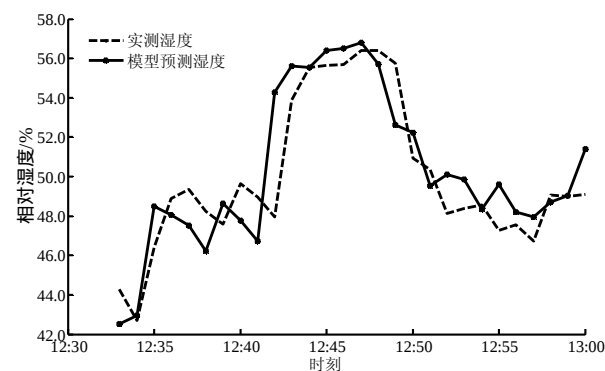


图 2 用 D_1 验证模型相对湿度的输出曲线

Fig.2 The output curve of the humidity model is verified by the data from 11:30 to 12:00

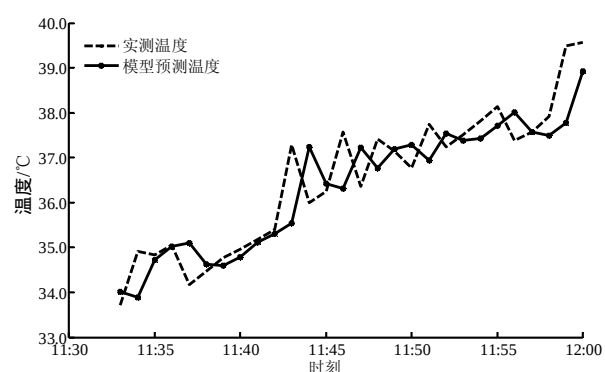


图 3 用 D_2 验证模型温度的输出曲线

Fig.3 The output curve of the temperature model is verified by the data from 12:30 to 13:00

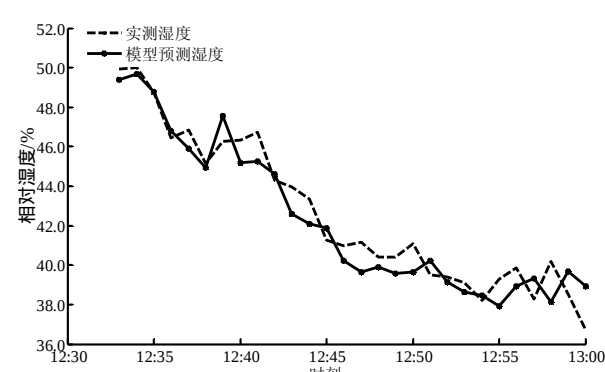


图 4 用 D_2 验证模型相对湿度的输出曲线

Fig.4 The output curve of the humidity model is verified by the data from 12:30 to 13:00

从图中可以看出,仿真计算得到的温度和相对湿度曲线与实际测量的温湿度曲线变化趋势一致。

温度均方根误差为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对误差为 1.59% ; 相对湿度均方根误差为 1.1% , 相对误差为 2.14% 。说明 ARX 模型能有效模拟温室环境内的温度和相对湿度, 同时在一定程度上避免了系统带来的滞后性, 可满足温室环境调控设备对模型结构的需求。

3.3 算法结果分析

选取 4 月 19 日 11:35 监测的数据实施多目标优化控制。该时刻温度 $31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 47.2% , 开启的调控设备是遮阳、湿帘和顶窗, 此时温室需要降温操作。将已建立的温度、相对湿度、耗电量模型作为优化目标函数, 以风机、湿帘、遮阳、喷淋及顶窗为决策变量, 运用多目标灰色 PSO 算法对决策变量和温度、相对湿度及耗电量进行模拟仿真。优化后的设备组合是遮阳与喷淋, 选取 11:35 时刻对温室环境进行模拟仿真: 根据优化后的调控设备组合可知, 该时刻需关闭湿帘、顶窗, 开启喷淋调控设备。开启遮阳与喷淋组合 20 min 后, 观察室内 3 组传感器监测的温湿度值, 经过融合得到的温度为 $24.51\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 59.35% , 经计算, 得到该时间段内耗电量为 0.14 J , 此时温室内的温度、相对湿度均达到茶苗生长适宜的范围, 对比 11:35 之前开启的遮阳、湿帘和顶窗消耗的电量下降。

将多目标灰色 PSO 算法与标准 PSO 算法、线性加权和法作比较, 分别对温度、相对湿度、耗电量进行优化仿真, 结果列于表 1。

由表 1 可知, 运用标准 PSO 和多目标灰色 PSO 算法优化方法得到的温度和相对湿度值均在适宜的温湿度范围内, 线性加权和法优化方法得到的温度和湿度值在适宜温湿度范围之外。对比消耗电量可知, 运用多目标灰色 PSO 算法优化后消耗的电量介于标准 PSO 与线性加权和法之间。按照多目标同时达到较优的策略, 选用多目标灰色 PSO 算法对温室进行优化, 在开启遮阳与喷淋的组合情况下, 得到使温室内温度和湿度满足茶苗适宜生长条件且耗电量较少的调控设备组合种类。

表 1 不同算法优化的温湿度和耗电量

Table 1 Temperature, humidity and power consumption of different algorithms									
阶段	温度/ $^{\circ}\text{C}$			相对湿度/%			耗电量/J		
	线性加权和法	标准 PSO	多目标灰色 PSO	线性加权和法	标准 PSO	多目标灰色 PSO	线性加权和法	标准 PSO	多目标灰色 PSO
优化前	31.50			47.20			0.17		
优化后	31.19	26.29	24.51	38.67	54.69	59.35	0.04	0.52	0.14

4 结论与讨论

引入人工控制因素,以 ARX 模型为基础,构建温度、相对湿度及能耗成本的多目标模型函数,运用改进的多目标灰色 PSO 进行温室环境的优化控制。结果表明,与线性加权和法、单目标 PSO 算法相比,运用多目标灰色 PSO 算法得到的温度、相对湿度及能耗均达到较优值。

在温室调控设备优化的过程中,仍存在一些亟待解决的问题:

一是提升温室调控执行机构。目前多数温室环境调控设备较为简陋,在模型基础上运用调控策略得到合理的调控执行机构组合时,需要人员进入温室进行手动调控,中间存在一段时间差问题,若建立一个较为完善的远程调控自动化水平较高的温室可避免此问题。考虑温室环境最优控制的情况下,建立精准和多源信息采集机构、有效的模型结构及完善的自动化控制执行过程,能够提升温室环境的控制效果。

二是完善作物模型结构。温室环境控制系统大多是基于温室作物生长和小气候环境模型,所使用的模型易忽略作物在各个生长发育阶段所具有的参数特性,且模型缺乏通用性。基于此,温室控制算法在其基础上,虽然取得了很多成果,但能有效应用于实际温室控制的成果却不多。若要使温室环境得到良好的控制效果,可靠的模型是温室环境最优控制的前提条件,因此,构建面向实际生产的模型结构仍是温室环境控制研究领域不可忽视的问题。

参考文献:

[1] ALBRIGHT L D ,GATES R S ,ARVANITIES K G ,et al. Environmental control for plants on earth and in space[J]. IEEE Control System Magazine ,2001 ,21(5):

28-47 .

- [2] 姚宁,周元刚,宋利兵,等.不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J].农业工程学报,2015,31(12):138-150.
- [3] 何芬,马承伟.遗传算法优化人工神经网络模型在日光温室湿度预报中的应用[J].中国农学通报,2008,24(1):492-495.
- [4] 杨昆,蔡青,刘家勇,等.甘蔗生长模型研究进展[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(1):29-34.
- [5] ALBERT Setiawan, LOUIS D A, RICHARD M P. Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(3): 283-302.
- [6] 雷勇,李泽滔.温室温度系统的自适应模糊 PID 控制[J].控制工程,2014,21(增刊 1):23-27.
- [7] 朱丙坤,徐立鸿,胡海根,等.基于节能偏好的冲突多目标相容温室环境控制[J].系统仿真学报,2011,23(1):95-99.
- [8] 张雪花,张武,杨旭,等.农业温室环境控制方法研究综述[J].控制工程,2017,24(1):8-15.
- [9] 闫宇,潘炜,江朝晖,等.蜂巢温度全覆盖采集系统的设计与实现[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(4):460-464.
- [10] 张武,周荣双,朱诚.基于 ARX 模型的温室温度模拟[J].江苏农业学报,2013,29(1):46-50.
- [11] SIVAKUMAR K ,BALAMURUGAN C ,RAMABALAN S. Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with alternative manufacturing selection[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(2): 207-218.
- [12] 杨卫中,王一鸣,董乔雪,等.大型连栋温室环境参数的线性时不变系统建模[J].农业工程学报,2010,26(14):285-289.
- [13] 伍德林,毛罕平,李萍萍.基于经济最优目标的温室环境控制策略[J].农业机械学报,2007,38(2):115-119.
- [14] 张武,陈剑.基于灰色粒子群算法的发动机悬置系统多目标优化设计[J].机械设计,2011,28(8):57-62.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立