

面向控制的温室系统小气候环境模型要求与现状

徐立鸿¹, 苏远平¹, 梁毓明^{1,2}

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 江西理工大学电气学院, 赣州 341000)

摘 要: 以往的温室作物生长和小气候环境模型, 主要是从面向研究而不是面向实际生产的温室获得的, 这二者的最大不同是: 面向研究的模型主要考虑的是得到作物生长高产所需的“最优”的温室内部气候环境参数设定值, 而较少考虑温室内控制设备的能力(控制动态过程)、生产过程中温室外气候变化情况和达到“最优”所需付出的能量等代价; 而后者在面向实际生产的自动化控制的温室系统模型中是必不可少的。当前温室系统自动化控制面临的一个最大困难, 就是缺乏一个这样的可靠的温室系统模型, 而只能采用面向研究的温室系统模型去进行实际生产的温室系统控制, 这种忽视实际生产条件下的温室系统模型与理想条件下的模型之间差异的“纸上谈兵”的做法, 必然导致温室控制技术水平低、达不到预期效果。该文介绍了温室系统的整个控制过程, 对一个实际生产的温室系统中各种变量和参数作了简要描述, 并概括了面向实际的温室生产控制要求的温室系统模型的基本结构, 对温室环境模型、作物生长模型和能耗及 CO₂ 消耗模型的研究现状作了详细的回顾。从满足控制需求出发对现有的温室系统模型所存在的问题进行了分析, 并指出了其中的不足和局限性。探讨了未来温室系统的建模方法和需要解决的关键问题, 提出了面向控制需求的温室系统建模要满足的要求, 为温室系统的建模研究提供了一种新的思路 and 方向。

关键词: 温室, 系统, 控制, 作物, 环境模型, 生长模型, 能耗模型, CO₂ 消耗模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.001

中图分类号: S625.5⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0001-15

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 1-15. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

温室作物生产是农业生产发展的一个新阶段。相对于大田作物生产, 其生产过程受外界气候变化的影响较小, 能够满足人们在不同季节对各种农产品的需求。温室作物生产以其突出的优越性正受到各国政府的重视和大力支持, 栽培面积逐年上升, 已成为现代农业生产的重要组成部分。目前中国已是温室作物栽培面积最大的国家之一, 其面积已超过了 200 万 hm²[1]。

温室作物生产与大田作物生产的最大区别是温室中的小气候环境可以根据作物生长的需要进行实时控制。通过加热、通风、二氧化碳注入、喷雾和补光等控制手段把温室环境调节到适宜作物生长的状态, 从而提高作物的品质和产量。然而,

目前大多数的温室生产主要还是以人工经验管理为主, 对经验的依赖使得温室生产的作物产量和经济效益偏低。解决这一问题的关键技术之一是高效的温室环境控制。

温室环境控制虽然已经研究多年, 在控制算法等方面也取得了不少成果, 但能有效应用于实际温室控制的成果却不多。究其原因, 最主要的是, 当前温室环境控制都面临一个最基本的问题, 即缺乏温室环境控制所需要的温室系统精确模型。因此, 建立面向控制需求的温室系统精确模型, 是实现温室生产过程最优控制的前提和基础。

一般来说, 温室系统小气候最优控制(注: 这里“最优”的意义是指作物产量高、同时能量和 CO₂ 消耗低)设计需要建立 4 类模型, 分别是温室环境模型(本文中出现的“温室环境模型”均指温室小气候模型)、作物生长与产量模型、能量消耗预测模型和 CO₂ 消耗预测模型。在基于模型的控制系统设计, 温室环境模型被看作是实际被控对象的一种数学抽象描述, 而作物产量模型、能量消耗预测模型和 CO₂ 消耗预测模型是构成性能函数的主要组

收稿日期: 2013-05-01 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 国家 863 计划重大项目(2012AA10A507); 国家自然科学基金项目(61174090)

作者简介: 徐立鸿(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事温室环境建模与控制、预测控制和智能控制。上海 同济大学电子与信息工程学院, 201804。Email: xulhk@163.com

成部分。这 4 类模型与控制器和优化器一起构成了整个温室经济效益最优控制系统。为突出关键问题和针对性,本文重点讨论与生产过程控制层相关的模型,优化层的模型和性能函数综述将在另一综述论文中详述。

在已经取得的众多建模研究成果中,大多数温室系统相关模型(例如作物生长和小气候模型)都是面向研究的,它们的研究对象大多是试验温室而非实际生产温室,侧重于某些子过程的模拟,试验数据在时空上存在不完整性,不能覆盖整个温室系统和作物生长周期。这类面向研究的模型主要考虑的是得到作物生长高产所需的“最优”的温室内部气候环境参数设定值,而较少考虑生产过程中的温室外气候变化情况、温室内控制设备的能力和达到“最优”所需付出的能量等代价,也就是说,利用面向研究的模型而获得的参数设定值在实际生产温室中未必能达到,以室内温度为例,受制于加热设备的功率以及散热能力,并同时考虑室外低温的影响,某种所谓的最优温度在某些情况下可能根本不能达到,即便能达到也可能会消耗大量的能量等代价,从而导致低经济效益。可见,这样的“最优”在实际温室生产中是没有意义的。所以,与面向研究的模型不同,面向实际生产自动化控制过程的模型必须要考虑各种控制设备的实际调控能力和调控过程中付出的能量等代价。

从实际温室生产过程最优控制要求考虑,控制系统设计需要的温室系统模型与面向研究和管理等需求的模型并不完全相同。因此需要立足现有研究成果,并根据温室生产过程最优控制系统的整体结构及所需模型的具体要求,通过研究现有模型现状和存在的问题,并对其进行完善或重构,从而建立一种面向控制的温室系统模型。

1 温室系统模型研究现状

1.1 温室环境模型研究现状

设施农业已经发展了上百年的时间^[2],为了提高经济效益,温室生产越来越注重自动化生产与管理。温室环境模型和作物生长模型是实现温室自动化生产与管理的重要基础。而温室小气候环境是影响作物生长和产量的主要条件之一,是温室系统的直接控制对象。建立一个具有较高模拟精度的温室环境模型对实现温室系统的优化与控制具有重要意义。经过几十年的发展,国内外先后建立了多种温室环境模型,其形式主要有静态模型和动态模型,机理模型和辨识模型等,以适应不同的应用需求。

1.1.1 国外温室环境机理建模研究发展

自 20 世纪 60 年代开始^[3],人们就对温室环境

变化展开了深入的研究,试图建立起相应的环境模型用于温室的管理和结构设计。由于在早期建设的农业温室中生产所需的能量基本上来自太阳辐射,而不同地区气候差异较大,温室的结构设计和材料对室内环境影响很大。温室环境模型主要用于研究不同结构和材料对温室环境的影响以便指导温室的结构设计和材料选择,而对温室整体环境的模拟精度要求不高,而且大多数是针对某一环境因子(例如温度)进行的,因此模型主要以静态模型为主。随着材料科学的发展和结构设计新理念提出,用静态模型来研究材料和结构对温室保温性能的影响一直在进行^[4]。出于对作物产量精确模拟的需要,作物生长与产量模型对温室气候预测的要求越来越高,简单的静态模型已不能满足产量模拟的要求。此时,人们开始了温室环境动态建模的探索。Bot^[5]从温室的结构、朝向以及太阳高度等方面深入研究了太阳辐射在温室中的分布和吸收,并详细研究了温室通风口的开窗位置、形状和大小对温室通风的影响,建立了一个机理比较充分的温室环境动态模型。这些研究成果对后来的温室环境模型研究起到了非常重要的作用,很多模型都在这些研究的基础上建立起来的。

受资金和技术条件的限制,早期温室大多没有配备气候调节设备的日光温室,温室小气候的变化主要受室外天气变化的影响,在建模过程中不需要考虑气候调节设备动作的问题。然而,温室环境的主动调节是改善作物生长所需气候条件、提高作物产量的重要手段,在温室生产中越来越受到人们的重视。随着技术的进步和投资条件的改善,加热、通风和喷雾等各种气候调节设备也开始成为温室建设中必不可少的配置。这些气候调节设备的配备使得温室系统的环境变化更加复杂而多样。整个温室系统不仅包括室内外环境状态,同时也包含了气候调节设备。与此相对的是包含气候调节设备在内的温室环境模型研究却相对落后。在众多的温室环境模型中,大多只考虑了通风这一控制操作,而具有加热和喷雾等操作的温室环境模型相对较少。针对温室小气候控制的需求,1984 年 Arinze^[6]提出了一种包括加热和通风操作的温室环境动态模型,建立了室内温度、湿度、冠层温度、覆盖层温度等环境状态的动态微分方程。为提高模拟精度,土壤被划分为多个层次,并建立了每一层土壤的温度动态变化方程。尽管模拟精度比较高,由于土壤和覆盖层被划分为多个层次,模型的阶数(即模型包含的状态微分方程个数)比较高,给环境控制器的设计带来了很大的困难。这类模型一般更注重对温室热效应的模拟,至今还在研究以适应不同地区和结构

的温室^[7-10]。考虑到控制过程中的实际困难, Albright^[11]等在现有模型的基础上综合作物的蒸腾作用, 对模型进行了简化和合并, 获得了一个包含温度和湿度的二阶环境动态模型。由于模型结构简单, 控制器的设计相对容易, 这个模型已经被广泛用于各种温室环境控制中。类似的模型还有 Bennis^[12]模型和 Ferriara^[13]模型等。这类模型在温室环境控制中应用方便, 计算简单, 但缺点是模拟精度较差, 没有充分考虑作物生长对环境的重大影响。

尽管室内温度和湿度是影响作物生长的两个重要环境因子, 而且早期的温室环境控制也主要针对这两个环境因子进行调节的。然而, 室内的 CO₂ 浓度也是影响作物产量的关键因素, 它直接影响了作物光合作用以及碳水化合物的转化。不同 CO₂ 浓度下, 作物的光合作用对室内的温度和湿度的要求也不一样, 此时, 温湿度不一定需要调节在经验值上, 在某种意义上可以降低能量的消耗(如为达到一定的光合速率, 既可以调节温度也可以调节 CO₂ 浓度, 或者两者同时进行调节, 其控制决策的采用原则是使总成本最小)。对室内 CO₂ 浓度的调节既是促进作物生长, 提高作物产量的需要, 同时也是降低能耗成本, 改善经济效益的需要。CO₂ 浓度动态模型的建立是保证室内 CO₂ 浓度得到精确控制的前提。Van Henten^[14]是较早研究温室系统最优控制的学者。为研究以经济效益为控制目标的温室系统, 他建立了一个包含室内温度、湿度和 CO₂ 浓度为状态的温室环境动态模型以及一个生菜干物质产量模型。温室环境模型中反映了光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等作物对环境变化的反馈, 同时描述了作物生长所以依赖的 3 个主要环境状态, 同时含有通风、加热和 CO₂ 注入等控制量。相对来说, 这个模型比较简单, 模型没有包含执行机构的动态性能, 以加热控制为例, 模型中的加热控制量是输入到温室系统中的热量, 然而, 实际上这些热量的输入并不能立刻使得空气温度发生变化, 这是因为热量有一个扩散和交换的过程, 温度的变化总是要滞后于控制量的变化, 而这就是执行机构动作引起的环境变化动态。要真实反映控制执行机构动作与系统状态变化之间的动态关系, 模型中必须要包含执行机构的这种动态性能, 例如不同的控制执行机构(例如管道热水式加热或热风机式空气加热)会导致温室系统升温速度的不同, 亦即其动态模型有所不同——这也是面向控制的温室系统模型与单纯的作物生长模型或小气候环境模型的根本不同之处。

随着温室结构设计的不断完善, 装配在温室中的各种气候调控设备也逐渐增多, 温室气候变化的机理过程也更为复杂, 为此, De Zwart^[15]提出了面

向通用 Venlo 型商业温室的更为完善的温室环境模型以研究和分析温室生产过程中的节能策略。在这个模型中充分反映了温室内的各种热质交换, 同时建立了加热系统动态模型。在这种温室中加热系统由锅炉和加热管构成, 具有天窗和侧窗通风系统、喷雾降温系统和遮阳保温层控制系统。温室各种功能得到了进一步的完善, 相对于早期的温室, 其结构和热质交换过程也更为复杂。后来很多温室环境模型如 Vanthoor 模型^[16]和 van Ooteghem 模型^[17]都是在这个模型基础上改进和完善的。这类模型能够在很大程度上反映温室内各种因子的相互作用机理过程, 相比早期的温室环境模型是一个巨大的飞跃。但其缺点是状态变量多、结构复杂, 计算量大, 控制器设计困难(如在文献[16]中只能采用基于经验且较为简单的协调控制策略), 控制实时性的要求难以满足。针对这个问题, Tap^[18]提出了一个包含锅炉加热系统、地面温度、室内空气温度、湿度和 CO₂ 浓度的五阶非线性温室环境模型, 并配合一个简化的作物生长与产量模型用于温室生产的优化与控制, 取得了一定的效果, 但模拟精度还是不够理想。

1.1.2 国内温室环境模型研究概况

相对于欧美国家, 中国对农业温室的研究起步较晚, 温室环境模型的研究基本上开始于 20 世纪 90 年代初。由于早期的温室环境模型大多数受到地理条件和温室结构的影响, 不具有普遍通用性, 不能适用于中国建设的农业温室。由于受制于资金和技术等原因, 中国对温室环境的研究更侧重于温室结构的优化以改善温室的性能。大多数对温室环境模型的研究都是基于这个目的展开的。如佟国红等^[19]分别对温室内的太阳辐射分布和吸收进行了深入的研究, 建立了温室内光环境的数学模型。张勇等^[20]对温室建筑材料和结构对温室储热性能进行了深入的研究。日光温室是中国广泛推广的农业温室。目前对这类温度的研究比较透彻, 取得的研究成果也较多, 建立了模拟精度较高的温室环境模型, 如李元哲^[21]和陈青云^[22]运用热力学、传热学和建筑采光理论建立了适用于中国北方温室的温室环境模型。李海树等^[23]建立了日光温室环境的动态机理性模型, 适用于温室结构设计, 并能够在给定的室外温度、湿度、太阳辐射、风速和设备(加热器、湿垫、通风系统等)的不同工作状态下, 预测室内温度、湿度、能流密度等的状况和变化趋势。这方面的研究工作一直在继续^[24-27]。相对于日光温室, 对玻璃温室的研究相对不足, 主要原因是这类温室在中国的建设较少, 且大多是从国外引进的, 主要集中在南方温暖地区。经过很多学者的

多年研究,也取得了一定的成果。如胥芳^[28]建立了一个玻璃温室小气候温湿度模型,罗卫红等^[29-30]对中国亚热带气候不同季节条件下的温室管理和 KASPRO 气候模型进行较为详细的分析和验证,以探索适合中国气候条件的 Venlo 型温室气候调控策略,汪小岳^[31]对长江中下游地区的 Venlo 型温室室内温湿度进行模拟。这些模型为中国温室环境模型的研究奠定了基础。温室环境模型的用途也从最初的指导温室结构设计和材料选择扩展到了温室环境预测与控制^[32]以方便温室生产的管理。

1.1.3 温室环境辨识模型的研究

机理模型的优点是模型能够真实再现温室中各种环境变化的机理过程,模型中每个参量都有具体的物理意义,有助于人们对动态过程的理解,且模拟过程较稳定,适应性较好,是系统建模的主要方法。然而其缺点是模型结构复杂,参变量较多,而且很多参数一般难以确定,同时在长期的运行中,构成温室的各种材料由于各种原因造成的腐蚀和老化也会改变其原有的参数,从而导致了建模的困难,或后期模拟精度的下降。为此,一些学者开始探讨根据温室系统输入输出数据,用系统辨识的方法来建立温室环境的输入输出模型。常见的辨识模型主要有 ARX 模型^[33]、神经网络模型^[34-35]、模糊模型^[36]以及通过进化算法进行寻优而获得的模型^[37-38]等。这类辨识模型通常结构简单,分析方便,比较适合于温室环境的控制(如在线辨识在线控制),但其缺点是模型受特定的温室结构、地理位置和气候条件的影响很大,普适性较差。

1.2 作物生长模型研究现状

温室作物生长模型的研究要晚于大田作物,在发展过程中参考和借鉴了大田作物生长模型的相关成果,先后建立了多种作物生长与产量模型。这些模型大多建立在有效积温理论^[39-40]基础上,用生长过程中温度的累积来描述作物的叶面积扩展、干物质分配以及产量。在模型中反映作物生长变化的只有温度这一环境因子,而光照等其他环境因子的影响也主要体现在温度的变化上,它们与作物生长是一种间接的关系。在某种特定条件下,这种方法较简单实用,能够满足产量预测的要求。由于有效积温法没有考虑辐射这个重要的环境因子,倪纪恒等^[41-42]采用辐热积的方法实现了番茄叶面积和干物质生产与分配。相对于有效积温法,这种方法模拟效果较好,预测精度较高。但从本质上说,辐热积方法还是一种统计回归模型,它不能解释作物生长真实的机理过程,不能有效反映环境变化对作物生长的巨大影响。

要准确描述作物生长与环境变化之间的定量

关系,就必须要建立基于作物生长真实机理过程的完全模型。欧美国家先后建立多种能够在一定程度上描述作物生长机理过程的温室作物模型,其中具有代表性的模型有 TOMGRO^[43]、HORTISIM^[44]和 TOMSIM^[45]模型。TOMGRO 和 TOMSIM 模型以番茄为模拟对象,但这两种模型也可以应用于以番茄为代表的其他果菜类作物,而 HORTISIM 是一个园艺作物通用模型,能够实现番茄、黄瓜和甜椒等作物的生长模拟。这类模型能够模拟作物在生长中各个阶段器官的发育状态、果实数量、叶面积以及干物质在不同器官中的分配。同时模型能够反映室内温度、CO₂ 浓度和光照等环境变量对作物产量和器官发育的影响,具有较强的机理性。它们都是建立在作物的光合作用和呼吸作用 2 个基本生理过程和“源-库”理论基础之上。TOMGRO 1.0 模型于 1991 年由 Jones 提出,它能够动态模拟番茄在温室环境的生长过程,含有 69 个作物生长状态。之后,De Koning 和 Jones 共同对 TOMAGRO 模型进行了改进,使之发展为 TOMGRO3.0。改进后的模型含有 574 个作物生长状态,能够精确模拟番茄生长过程中的由光合作用转化的同化物在作物不同器官中的分配、叶面积、作物的茎节数量、干物质产量、不同阶段的果实数量和产量以及成熟果实数量和产量。经过验证,这个模型具有较高的精确性和普适性,能够在不同地理区域的温室生长中对作物生长进行模拟。TOMSIM 模型由 Heuvelink 于 1996 年提出。它含有 34 个作物生长状态,能够精确模拟作物干物质的累积和在不同器官中的分配以及器官的发育。

与面向温室生产管理与决策的作物生长模型要求不同,温室生产优化与控制所需的作物生长模型更需要反映包括室内温度、湿度、CO₂ 浓度和光照等在内的主要环境变量对作物产量的影响,而对作物生长不同阶段的状态模拟精度要求并不很高,对果实数量的模拟也不作要求,但对作物产量变化的模拟要求较高。TOMGRO 模型虽然能够精确模型作物的生长过程,但由于含有大量的作物生长状态,很多参数难以确定,模型计算非常困难,计算时间相对较长,在温室系统的优化与控制中很难应用,以至于这些模型通常只用来对温室作物产量的预测和温室管理。为满足温室生产的优化与控制需要,模型研究者先后对各自建立的模型进行了简化,使之既能够保证较为理想的作物生长模拟性能,同时也能够达到优化与控制的要求。TOMGRO 模型的作物生长状态由原来的 574 个降低到 5 个^[46],简化后的模型计算量大大减低而不失精确性,但离温室生产的优化

与控制要求还有一定的距离。

1.3 能耗和 CO₂ 消耗模型研究现状

能耗预估模型和 CO₂ 消耗预估模型是经济效益目标函数的重要组成部分，反映了温室生产的成本投入。所谓预估模型指的是在一定的期望生产期内预测温室生产的成本投入量并用于计算可能的经济效益，方便人们改善温室生产的管理以提高生产率。温室系统的优化是一种滚动优化，其目的是在一定的作物生长期寻找能够达到高产出、低投入的一种控制策略。因此在优化经济效益函数时，作为计算温室生产成本的能耗预估模型和 CO₂ 消耗预估模型的准确性就显得非常重要。相对于温室环境模型和作物生长模型的研究，能耗预估模型和 CO₂ 消耗预估模型的研究还很不足，而且很多研究集中在如何提高温室生产的效率层面上^[47-48]，能量消耗模型没有包含环境和作物的状态，只是一种能量成本计算模式。这种能量消耗模型只能适合温室生产的经济性能分析而不能用于优化与控制。实际上，温室环境控制的研究者很早就注意到了温室生产的节能优化控制，如 Marsh^[49]为实现温室生菜生产获得最大经济效益，在作物产值和加热成本之间取得一个最佳的温室环境温度控制轨迹，建立了一个基于温室内外能量平衡的加热量估计模型。同样，Seginer^[50]应用庞德里亚金最大化原则对温室栽培的生菜产值和能量投入成本进行优化以获得一个最优温室环境温度设置点而建立了一个与 Marsh 模型相似的能量消耗估计模型，可以用下式表示

$$\frac{dQ}{dt} = K_e(T_{in} - T_{out}) - b \cdot \tau \cdot I_{glob} - \lambda E \quad (1)$$

式中， Q 为加热系统的能量供应速率，W/m²； K_e 为温室与外界环境的总传热系数， T_{in} 为室内气温，℃； T_{out} 为室外气温，℃； I_{glob} 为到达温室上方的太阳辐射量，W/m²； λ 为水的蒸发潜热系数，J/kg； E 为蒸发蒸腾速率，kg/m²·s； τ 为覆盖层的透光系数； b 为温室对太阳辐射的吸收率。这个能耗估计模型的基本原理是任时刻输入温室的能量等于温室向外界散发的能量，也就是说温室能量的吸收率等于散发率，是一种静态模型。实际上在大多数情况下，温室的输入能量不会等于输出能量，因为室内的空气、冠层和地面都具有一定蓄热能力，随着温度的提升，温室中的各种结构和物质所吸收的能量也要增加。也就是说输入到温室中的能量一部分要被温室自身所吸收以提升温度，另一部分要通过覆盖层和通风等形式向室外散发，所以输入能量应该是温室吸收能量和散发能量的总和，需要建立一个动态模型才能准确预测温室生产的能耗。

López^[51]在室内温度控制设置点已知的情況

下，根据白天和夜晚不同的温度设置点以及一天内室外最低温度模拟了一天时间内温室加热能量的消耗量，并根据实验测定的数据按照 2 阶多项式回归拟合的方法获得了一个某一作物生长期内的温室的能量消耗量，其一天能量消耗预测的拟合相关系数为 0.89，100 d 的拟合相关系数为 0.95，而一年的拟合相关系数为 0.99。这个预测模型可以表示为如下

$$\frac{dQ}{dt} = 0.049\Delta T_{min}^2 - 0.001\Delta T_{min} + 1.17 \quad (2)$$

$$\Delta T_{min} = T_{set} - T_{out,min}$$

式中， T_{set} 为室内空气温度设置点，℃； $T_{out,min}$ 为一天内室外最低温度，℃； ΔT_{min} 为设定温度与室外最低气温的温差，℃。尽管这个模型能够获得如此高的拟合精度，但却不能被温室系统优化性能函数所用，因为得到这个拟合模型的前提条件是假定温度设置点 T_{set} 已知，如果 T_{set} 未知，以上拟合模型是无法得到的，而我们的经济效益优化问题中，正是要通过优化得到这个 T_{set} ，因此，这类拟合模型在我们的优化问题中无法被采用。对于一些基于非机理过程建立的能耗预测模型，如 Mario^[52]用多层神经网络构建的能耗预测模型，虽然模拟精度较高，但这种非结构的预测模型很难用于温室生产的优化，原因是这类模型中不含有优化所需的环境状态变量。对于 CO₂ 消耗预测模型的研究报道，基本上还很少见到。

2 现有温室系统模型所存在的主要问题

总的来说，目前温室环境模型和作物生长模型可以归结为静态模型和动态模型，机理模型和辨识模型形式，从简单到复杂，模型的性能差异较大，适用的场合也不尽相同。至今为止，在众多的模型中能够满足温室环境控制要求的模型却非常少。现有模型中，有些要么过于庞大复杂（如 Vanthoor 温室环境模型和 TOMGRO 作物生长模型），从而导致了系统分析和计算的困难，有些要么过于简单，某些甚至不能真实反映温室小气候环境的变化和作物的生长以及作物与环境之间的相互影响关系（如 Albright 温室环境模型中甚至没有包含叶面积指数等重要的作物生长变量）。

现有温室系统模型存在的主要问题集中在以下 3 个方面：

1) 温室系统模型结构过于庞大复杂，计算量大、控制器设计困难。

这类模型以 Vanthoor 提出的一个连栋温室模型为代表，它包含环境子模型和作物生长子模型两部分。环境模型把整个温室气候环境（从土壤地面

到屋顶覆盖物)分成了5个结构层次,共有8个控制输入变量,2个作物生长状态(叶面积指数、干物质)和多个作物生理参数(如作物光合、蒸腾、呼吸作用率、叶片气孔开度等等)、17个环境状态变量(包括5层不同土壤深度的温度状态,地面温度状态,加热管温度状态,冠层温度状态,内保温层下方空气的温度状态、湿度状态和CO₂浓度状态,内保温层温度状态,内保温层上方空气的温度状态、湿度状态和CO₂浓度状态,覆盖层内侧温度状态、覆盖层外侧温度状态)。其中的CO₂浓度模型、湿度模型等都包含了作物光合、呼吸及蒸腾作用对环境的影响。有些单项式本身具有非常复杂的函数结构,如作物蒸腾速率 E 和光合速率(P_g , mg/m²·s)。

这类模型对温室系统的各种机理描述得较为详细,能够比较充分地刻画真实的温室环境变化和作物生长,但其缺点是温室小气候环境分层过细,导致各层温度模型结构过于庞大而复杂,分析较为困难,这是温室建模走向的一个极端。实际上,作物冠层和保温层下方空气是作物接受能量和物质的主要媒介,它们的环境状态变化极大地影响了整个温室系统的小气候变化,而冠层温度、保温层下方空气温度、湿度及CO₂浓度这四个“主”状态变量直接受控制输入量的影响,并且是影响作物生长的主要环境因子。而保温层上方空气、覆盖层、地表层和土壤五层则是室内空气与外界进行能量与物质交换的中间媒介,从输入输出角度来说可以把它们看作是温室环境系统的中间变量。这些中间变量有些完全可以合并简化。在系统建模过程中一般无须对它们建立相关的动态模型,而由系统的主状态变量及外界输入的函数来简单表示。这类复杂模型之所以复杂,很大的原因就是原本系统中可以看作是中间变量的环境状态确定为系统状态变量,建立了其动态模型(这对温室作物栽培是必要的--如土壤温度),从而导致了模型结构复杂。

另外,模型中CO₂浓度与温度等环境因子的相互作用(即温室效应)、以及CO₂浓度与作物生长的相互作用(即光合、呼吸和蒸腾作用等)子模型相对粗糙,不能充分刻画它们之间的定量关系,这是该模型的另一个缺陷。

因此,尽管这类模型显含控制变量并且充分考虑了温室生产过程中可能实施的控制操作,但由于其庞大而复杂的结构,给控制器的设计造成了很大的困难,同时大大增加了计算机的负担,控制过程的实时性已不大可能。完全可以将其中的某些中间变量子过程合并,得到一个相对简单、而又不牺牲准确性的系统模型。

2) 温室系统模型过于简单,某些重要环境因

子(如CO₂浓度)对其它环境因子和作物生长的重大影响在模型中没有得到充分体现,因而不能真实反映“整体”温室环境的动态变化。

自从自动控制技术引入到温室环境中后,模型问题一直是制约温室环境控制发展的一个瓶颈。为了勉强能用,目前控制采用的温室系统模型大都过于简单。应用较广的状态空间模型主要有 Albright 等提出的一个温室系统温湿度动态模型^[8]

$$\begin{aligned} \frac{dT_{in}}{dt} &= \frac{1}{\rho C_p V} [q_{heater} + I_{in} - \lambda q_{fog}] - \\ &\frac{\phi_{vent}}{V} [T_{in} - T_{out}] - \frac{K_e}{\rho C_p V} [T_{in} - T_{out}] \\ \frac{dH_{in}}{dt} &= \frac{1}{V} q_{fog} + \frac{1}{V} E(I_{in}, H_{in}) - \\ &\frac{\phi_{vent}}{V} [H_{in} - H_{out}] \\ E(I_{in}, H_{in}) &= \alpha \frac{I_{in}}{\lambda} - \beta_T H_{in} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, H_{in} 为室内湿度, kg/m³; H_{out} 为室外湿度, kg/m³; q_{heater} 为加热速率, J/m²·s; q_{fog} 为喷雾速率, kg/m²·s; ϕ_{vent} 为通风率, m³/m²·s; V 为温室单位面积上的等效体积, m³/m², K_e 为室内外空气传递系数, W/m²·K; E 为蒸发蒸腾速率, kg/m²·s; I_{in} 为温室内吸收的太阳辐射, W/m²; ρ 为室内空气密度, kg/m³; C_p 为室内空气比热容, J/K·kg。

这个模型包含喷雾、加热和通风3种主动控制输入量,同时考虑了作物蒸腾作用对温湿度变化的影响。但这是远远不够的。

首先,温室环境模型并不等同于一个简单的温湿度动态模型,温室环境控制也不等同于一个简单的温湿度控制。光合作用是作物生长的主要动因,因此,CO₂浓度和光强(即光照度)的控制模型中是非常重要的,甚至是必不可少的。而且它们对温室环境变化(例如对温度的变化影响很大)以及与作物生长之间的耦合作用在模型中也描述不足。

受认知水平的制约,长期以来室内温度和湿度被认为是影响作物产量和品质的主要因素,因而过去对面向控制的温室环境建模研究都是围绕着室内温度和湿度展开的,所建立的环境模型实际上是室内温、湿度模型,而温室环境控制实际上也是对室内温湿度进行调节。这类模型占目前温室模型的大多数。

近20年来随着作物生长机理研究的深入,人们逐渐认识到光强和室内CO₂浓度变化对作物产量和品质产生的巨大作用,同时作物光合作用和呼吸作用也极大地影响着室内CO₂浓度的变化。温室生

产管理越来越注重对室内 CO_2 浓度的调节。室内 CO_2 浓度成为温室环境建模必须要考虑的一个重要环境状态变量。

3) 许多温室系统模型由于没有充分考虑作物生长对温室内环境变化的影响 (即不含作物生长模型)、没有充分反映多个环境因子间的相互影响 (即模型不含 CO_2 浓度等)、没有充分考虑控制输入设备动作对温室内环境改变的动态作用 (即不显含控制输入量) 等原因, 无法有效应用于温室控制。

这类模型有的是建立在温室裸地 (没有作物) 基础上, 应用热力学、传热学和建筑采光理论分析室内外的热平衡, 建立各种传热过程的数学描述, 模型中没有包含作物生长的各种状态, 没有反应作物生长对温室环境变化的反馈作用, 其主要用于指导温室的结构设计和材料选择。如中国 20 世纪 80 年代研究的温室环境模型大多属于这一类, 以适应中国北方日光温室发展的需要。通常可以归结为如下结构

$$\begin{aligned} \text{Cap}_a \frac{dT_{in}}{dt} &= \sum_{i=1}^n k_i A_i (T_i - T_{in}) - \rho C_p \varphi_{vent} (T_{in} - T_{out}) \\ \frac{V_g}{A_g} \frac{dH_{in}}{dt} &= E_{soil} + E - \varphi_{vnet} (H_{in} - H_{out}) - \\ &\sum_{i=1}^n 6.4 \times 10^{-9} k_i A_i (VP_i^* - VP_a) \\ \text{Cap}_i \frac{dT_i}{dt} &= k_i A_i (T_{in} - T_i) + \\ &\sum_{j=1}^{n-1} A_i \varepsilon_{ij} F_{ij} (T_j^4 - T_i^4) + \eta_i I_{glob} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, T_i 为温室内第 i 个表面温度, $^\circ\text{C}$; T_j 为温室内第 j 个表面的温度, $^\circ\text{C}$; Cap_a 为室内空气热容, $\text{J/K} \cdot \text{m}^3$; Cap_i 为各表面热容, $\text{J/K} \cdot \text{m}^2$; V_g 为温室有效总体积, m^3 ; A_g 为温室有效总面积, m^2 ; E_{soil} 为土壤蒸发率, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; A_i 为各表面单位等效面积, m^2/m^2 ; k_i 为第 i 表面与室内空气传热系数, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$; F_{ij} 为辐射角系数, VP_i^* 为各表面得饱和水汽压, Pa ; VP_a 为空气实际水汽压, Pa ; ε_{ij} 为 2 表面之间的长波辐射系统发射率; η_i 为表面的太阳辐射吸收系数。

有的模型没有刻画出多个环境因子间的相互作用关系, 如辐热积模型^[39], 作物生长的状态主要用温度和光照来表示, 如下式所示

$$\begin{aligned} Y_d(l) &= W_f(l) \times HI \\ HI &= 0.74 \times \\ &(1 - \exp(-(TEP - 155.0562) \times 0.0056 / 0.74)) \\ W_f(l) &= B(l) \times PIS(l) \times PIF(l) \\ PIS(l) &= f_1(TEP) \\ PIF(l) &= f_2(TEP) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} TEP(l) &= TEP(l-1) + RTEP(l) \\ RTEP &= \sum RTE \times PAR \times 3600 / 1000000 \end{aligned} \quad (5)$$

$$RTE = \begin{cases} 0 & (T \leq T_b) \\ (T - T_b) / (T_o - T_b) & (T_b < T < T_o) \\ 1 & (T = T_o) \\ (T_m - T) / (T_m - T_o) & (T_o < T < T_m) \\ 0 & (T \geq T_m) \end{cases}$$

式中, T_o 为生长最适温度, $^\circ\text{C}$; T_b 为生长下限温度, $^\circ\text{C}$; T_m 为生长上限温度, $^\circ\text{C}$; T 为每小时平均温度, $^\circ\text{C}$; PAR 为光合有效辐射, W/hm^2 ; RTE 为每小时相对热效应; $RTEP$ 为每日相对辐热积, $\text{MJ/hm}^2 \cdot \text{d}$; TEP 为整个生长期的辐热积, MJ/hm^2 ; HI 为采收指数; Y_d 为作物产量干质量, kg/hm^2 ; B 为作物总干质量, kg/hm^2 ; W_f 为果干质量, kg/hm^2 ; PIS 为地上部分干物质分配指数; PIF 为果实干物质分配指数; f_1 为 PIS 的计算函数; f_2 为 PIF 的计算函数; l 为定植后的天数。

这类模型本质上是回归模型, 结构简单, 适应于满足一定室内 CO_2 浓度水平的条件下指导温室生产管理中某几个特定环境变量的调控、预估作物产量等, 有较好的效果。但是这种由少数环境因子描述的作物生长模型不能适应于现代温室生产环境最优控制的需要。

基于神经网络和模糊理论等输入输出辨识模型, 由于其辨识时所采用的数据不完全, 且作物生长和外界气候是动态变化的, 单次测量的数据难以真实描述整个生长期的环境变化, 所辨识的模型具有较大的局限性, 这类模型应用于整个温室生产周期的环境控制其可靠性不能得到很好的保证。另外, 有不少模型并不是严格意义上的显含控制输入量的模型, 没有反映真实的控制信号与环境状态改变之间的动态关系, 其后果是实际控制效果与理论分析有很大差距, 如忽视了执行机构可能存在的非线性时滞等造成系统不稳定的因素, 而且模型不具有显式结构, 给控制器的设计带来了非常大的困难。

从当前的研究现状和存在的主要问题可以看出, 大多数现有的温室系统模型不完全适合温室生产过程的最优控制设计。这些模型与面向控制的温室系统模型要求还有一定的距离。要建立一个适用于温室生产过程控制的温室系统模型, 首先需要分析整个温室控制系统的工作机制和结构, 并根据这种工作机制分析系统模型应具备的特点, 然后依据这些特点确定系统建模需要达到的要求。

3 温室控制系统结构

3.1 温室系统控制过程结构

有很多种控制策略可以把温室环境调节到作物生长所需的最适宜范围,而面向经济效益最优的环境控制策略既能够保证作物生长所需的最佳环境,从而达到作物产量高的目的,又能够有效降低温室生产的能耗和生产成本,从而获得最大经济效益。这种控制策略以其突出的优越性正受到温室控制研究领域的广泛关注,其控制过程如图 1 所示。

整个温室系统的控制分为 2 层。上层是环境控制目标优化层,其作用是根据经济效益目标函数和状态约束条件,运用相应的优化方法为温室生产过程控制层的环境控制器寻找一个满足经济效益最优的环境状态参考输入 $x^*(t)$ 。下层是生产过程控制层,其作用是环境控制器按照一定的控制策略把室内环境状态调节到由优化层获得的最优环境状态参考轨迹上。而环境控制器的设计和性能直接取决于温室环境模型的结构和模拟精度。

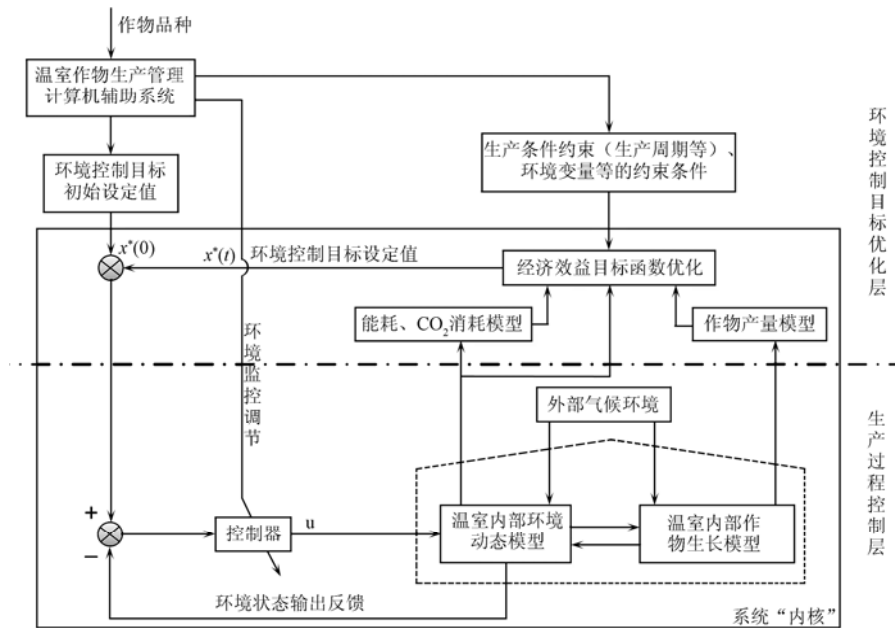


图 1 温室系统最优控制基本结构

Fig.1 Basic framework of greenhouse system optimal control

以上这种 2 层结构的优化控制策略对温室环境控制是非常重要的,甚至是必不可少的。举例来说,在温室环境调节过程中当室内 CO_2 浓度较低时需要增加温室内 CO_2 的浓度,从降低 CO_2 消耗和节约成本考虑应该优先利用通风操作由外界空气中的 CO_2 来补充,但在寒冷的天气条件下,温室内的温度通常要比室外温度高,在通过通风操作来增加 CO_2 浓度的同时温室内的能量也要随通风过程散发到室外,这样就导致了室内能量的损失,而损失的这部分能量就要通过加热来补充。也就是说虽然通风操作可以补充 CO_2 的消耗量,但却要以增加能量消耗为代价。而最优化经济效益目标函数的目的就是要寻找能量消耗和 CO_2 消耗总成本最低而经济效益最高的最佳设置参考点来驱动加热和通风设备。

经济效益目标函数由作物产值和能耗成本及 CO_2 消耗成本构成,一般表示为

$$J = p_c \int_{t_0}^{t_f} Y(x_c, x_a, u, w, t) dt - p_e \int_{t_0}^{t_f} Q(x_c, x_a, u, w, t) dt - p_{\text{CO}_2} \int_{t_0}^{t_f} C(x_c, x_a, u, w, t) dt \quad (6)$$

式中, Y 为作物产量累积速率, $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; C 为 CO_2 施肥系统的供应速率, $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$; t_0 为作物定植时间, t_f 为作物收获时间, x_c 为作物生长状态; x_a 为室内气候状态; u 为控制输入变量; w 为室外气候状态; t 为时间变量, s ; p_c 为作物销售价格; p_e 为燃料价格; p_{CO_2} 为 CO_2 价格。

由图 1 可以看出,温室系统最优控制首先要解决系统的建模问题。整个最优控制过程需要建立温室环境、作物生长、能耗和 CO_2 消耗速率 4 种模型。温室环境控制的本质是通过温室执行机构(如加

热、通风、增施 CO_2 、喷雾（湿帘风机）等）的动作营造作物生长的室内“整体”气候环境、提高温室（生产）系统的作物生产产量和效益。作物生长发育主要是由作物的光合作用驱动的，它与温室内部小气候环境状态直接相关，而与外部气候变化的关系是间接的。作物生长发育目标可以通过对温室环境状态的调控而达到。所以，温室环境是整个控制过程的直接控制对象。从结构上来说，温室系统可以分成环境子系统、作物生长子系统和肥水灌溉子系统（由于这个子系统与其他两个子系统之间相对独立，在温室小气候环境控制中一般不考虑其影响）。环境子系统的输入是执行机构的控制信号和外界气候状态，而输出是直接影响作物生长的各种环境状态，它们同时也是作物生长子系统的输入；作物产量既是作物生长子系统的输出也是整个温

室系统的输出。温室系统模型需要充分反映系统中各种变量之间的输入输出关系，如图 2 所示。

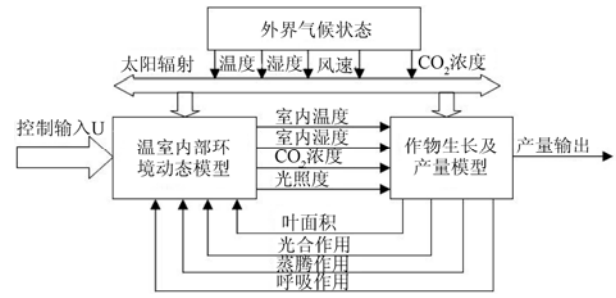


图 2 温室系统输入输出关系

Fig.2 Input-output relationship of greenhouse system

3.2 温室系统模型结构

温室系统是一个非线性时变多输入多输出时延系统，并且具有参数多、强耦合等特点。一个实际温室系统可以用图 3 来描述。

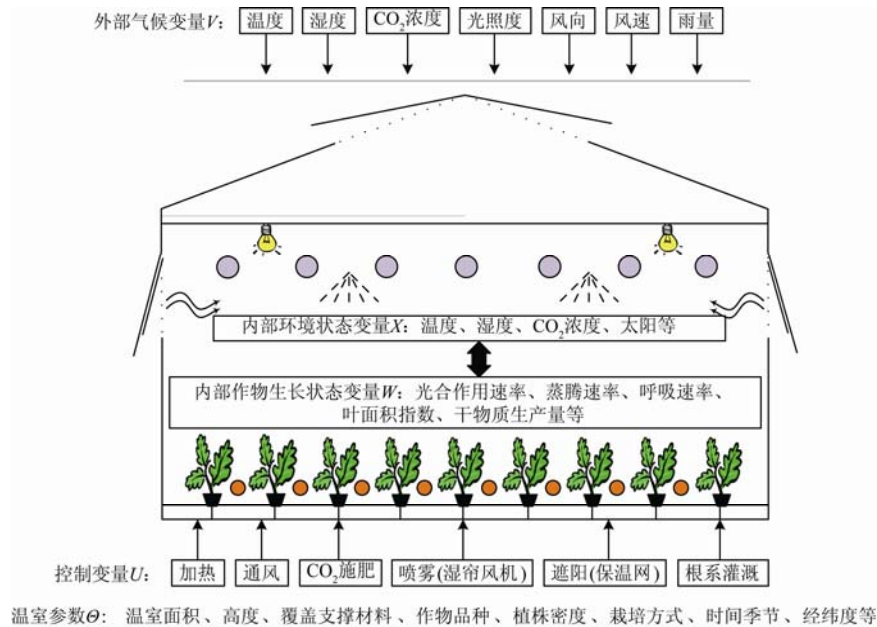


图 3 温室系统结构及各变量的相互关系

Fig.3 Structure of greenhouse system and relationships between variables

从图 3 中可以看出一个面向优化与控制的温室系统模型主要包括 5 类变量：

1) 温室内部小气候环境状态变量 $x_a=(T_{in}, H_{in}, CO_{2in}, I_r)$ ：温室内温度 T_{in} 、湿度 H_{in} 、 CO_2 浓度 CO_{2in} 、太阳辐射 I_r 等；

2) 温室作物生长状态变量 $x_c=(P_g, E, R_g, LAI, DW)$ ：光合速率 P_g 、蒸腾速率 E 、呼吸速率 R_g 、作物叶面积指数 LAI 、干物质质量 DW 等

3) 温室外部气候变量 $w=(T_{out}, H_{out}, CO_{2out}, I_r, v_w, v_{wd}, v_R)$ ：温室外大气的温度 T_{out} 、湿度 H_{out} 、 CO_2 浓度 CO_{2out} 、太阳辐射 I_r 、风速 v_w 、风向 v_{wd} 、雨量 v_R 等；

4) 温室环境控制输入变量 $u=(U_{heat}, U_{vent}, U_{CO_2}, U_{fog}, U_{scr}, U_{ir})$ ：加热 U_{heat} 、通风 U_{vent} 、 CO_2 施肥 U_{CO_2} 、喷雾（湿帘风机） U_{fog} 、外遮阳（或内保温网） U_{scr} 、根系肥水灌溉 U_{ir} 等（国内温室一般没有补光控制，而是通过启闭温室外遮阳网的开度调控温室内的光照度）；

5) 温室结构相关物理参数与作物信息 $\Theta=(\theta_a, \theta_h, \theta_{cm}, \theta_{sm}, \theta_p, \theta_{pd}, \theta_{pm}, \theta_s, \theta_l)$ ：温室面积 θ_a 、高度 θ_h 、覆盖材料 θ_{cm} 、骨架材料 θ_{sm} 、作物品种 θ_p 、植株密度 θ_{pd} 、栽培方式 θ_{pm} 、时间季节参数 θ_s 、温室地点经纬度 θ_l 等。

在温室作物生产过程中，温室环境状态的改变

是在受外部气候变量 w (它不可调控) 和内部作物生长发育生理过程 (如光合作用速率、蒸腾速率、呼吸作用) 对温室环境的反馈作用客观影响的同时, 主要通过对温室环境调控设备 u (加热、通风、 CO_2 注入、喷雾 (湿帘风机)、遮阳 (保温) 网等) 的主动控制达到。因此, 温室环境控制所需要的温室系统输入输出动态模型可以归结为

$$\begin{aligned}\frac{dx_a}{dt} &= f(x_a, x_c, U, w, \Theta) \\ \frac{dx_c}{dt} &= g(x_a, x_c, w, \Theta)\end{aligned}\quad (7)$$

作物生长对环境有其自身的要求, 温室环境中的各种状态也不能够任意变化。为满足作物生长的需求, 环境状态应该控制在一定的范围之内。另外, 环境控制器的输出量受控制器硬件结构和执行机构的限制也不能作无限变化, 实际的物理量总是受到一定条件的约束。基于这些实际条件的限制, 环境变量和控制输入变量都要约束在一定范围内。

需要指出的是, 在温室系统的优化与控制中, 为了提高产量和节约能源, 在作物生长的不同阶段, 可能面临环境状态的约束条件也不尽相同。所以温室系统建模除了要建立能够准确反映温室内部多因子互作关系的模型之外, 也需要确定这些环境变量和控制输入变量的约束条件。不同的约束条件下, 优化和控制的效果可能会相差很大, 因此约束条件的确立是温室系统建模的重要组成部分。

从温室生产过程的工作机制和结构可以看出, 对于一个包含控制设备、环境和作物的温室系统来说, 一个控制所需要的温室系统模型可以归结为如下几个基本要求:

1) 模型应当充分描述温室多环境因子之间、环境与作物生长之间强大的相互作用。同时, 能够准确表达温室系统控制 (设备) 输入变量 u 与小气候状态 X 的动态变化关系、以及室外大气候变化对小气候变化的影响关系。

2) 温室系统模型应当包括控制过程中的能量消耗和 CO_2 消耗预测模型。

3) 在满足动态模拟精度的前提下, 模型应当尽可能是低阶的, 且具有较为简单的描述形式。

4) 模型应当显含控制输入变量 u , 而这种控制输入变量必须是控制执行机构能够达到的输出量, 即控制输入变量 u 满足控制执行机构的输出约束, 也即

$$u_{i,\min} \leq u_i \leq u_{i,\max}$$

5) 确定系统中相关状态变量 $X=(x_a, x_c)$ 在作物生长过程全周期的边界条件和其他约束条件, 即

$$X_{i,\min} \leq X_i \leq X_{i,\max}, \quad g(X_i) \leq 0$$

应该说, 现有模型能够精确模拟温室系统中的大部分子过程, 这为建立一个面向控制的温室系统模型奠定了坚实的理论基础。根据控制所需的温室系统建模要求, 立足于现有研究成果, 还需要对现有模型作进一步的完善。

4 温室系统建模需要进一步解决的问题

多年来, 很多学者和机构投入了大量的人力和物力对温室环境和作物生长进行了深入的研究, 先后建立了很多温室环境模型和作物生长模型。温室系统中大部分动态过程的机理已基本探明, 累积了大量的数据和资料。这为温室系统模型的进一步完善奠定了坚实的基础。由于目前温室系统模型在温室生产控制中还存在诸多不足, 未来要建立一个满足控制要求的温室系统模型还需解决以下几个关键问题:

4.1 进一步研究机理未知的温室子系统、控制动态过程、以及能量与 CO_2 消耗模型

由于温室系统本身的复杂性, 其精确模型的建立必然要经历一个从简单到复杂的过程。尽管系统中大多数机理过程以被人们所掌握, 但仍然还有不少动态过程的机理不能用准确的数学形式描述。在模型中, 即使用数学方式描述了这些过程, 其输入输出关系往往也是在某种特定场合下获得的拟合公式。例如 Roy^[53]对各种文献中提出的覆盖层外表面与外界空气的对流传热系数和覆盖层内表面与室内空气的对流传热系数进行的总结发现, 不同的研究者由于所处的试验条件不同, 所获得的结果也存在较大的差异, 对于相同的动态过程, 并没有形成一种普遍适用的数学描述。这给温室环境模型的使用者造成了选择性的困难。其本质是人们对这些过程的真实机理并没有完全认知。在模拟过程中只能用一种较为简单的拟合关系来取代真实的输入输出关系。这也意味着需要进一步研究这些动态过程的机理。

为方便使用, 尽管温室系统通常用一个集中参数系统模型来表示, 但其本质是时空上的一个分布参数系统。系统中的能量和物质的扩散都是动态演变的过程, 特别是考虑加热、喷雾和 CO_2 施肥等主动操作时更需要考虑扩散过程对室内气候的影响。由于这种扩散动态过程的存在, 导致了室内气候的变化要滞后于主动操作过程。一般来说, 可以把这种滞后看作是执行机构的一种动态响应。温室空间越大, 其滞后响应也越大。对于温室环境控制来说, 这种滞后响应无论是对模拟精度还是对控制器的设计都会产生较大的影响, 因此模型中需要反映这

种执行机构的动态, 尽可能地用一个集中参数模型来逼近这个分布参数系统。

针对温室系统的优化与控制要求, 在作物生长模型研究方面应该进一步研究在环境变化对干物质累积以及其在作物不同器官上的实时分配的影响, 研究温度、湿度等环境因子对果实成熟速率和果实品质的影响, 并建立其确切的输入输出关系。

进一步对其他机理尚未探明的动态过程(如 CO_2 和水蒸汽因辐射吸热对室内温度变化的影响等)进行研究, 并根据研究结果, 完善模拟性能相对较高的现有复杂模型。

4.2 按照面向控制的模型需求, 对机理比较完善的复杂模型进行简化和重构

从系统控制考虑, 温室系统模型不能太过复杂, 这主要是因为复杂非线性系统的控制器设计非常困难, 计算量大, 控制的实时性得不到保证。一个相对简单、低阶的温室系统模型无论在理论分析还是工程应用中都具有突出的优势。

一个有效的温室系统模型应该具备模拟精度高而结构简洁。获得一个相对简单而不失精度且面向控制的温室系统模型, 一种有效的途径就是首先选择一个机理完善的复杂模型进行简化和重构。这是一个从复杂到简单的过程。以 Vanthoor 模型为例, 从控制角度来说, 没有必要建立 5 层土壤温度的动态, 实际上这些温度动态可以看作是地面与恒温层土壤热交换的中间变量, 在保证模拟精度的前提下, 完全可以把总共 1.26 m 厚的 5 层土壤和一层地面的温度动态进行合并, 用一个等效地面温度动态来取代, 这样可以大大降低模型的阶数(即状态微分方程的个数)。另外, 由于保温网的作用, 室内空间被分成了上下 2 层, 在 Vanthoor 模型中分别建立了上下 2 层的温湿度以及 CO_2 浓度动态, 从而使得模型结构庞大。实际上, 内保温网的作用相当于降低室内外之间的热交换和物质交换强度, 若把内保温网对室内气候变化的影响折算到覆盖层上, 等效于减小覆盖层的传热系数, 而上层空间的温湿度以及 CO_2 浓度可以看作是其他室内外变量的静态函数。这样, 对于 Vanthoor 模型, 系统的状态变量可由原来的 17 个减少到 6 个, 即室内空气温度、湿度、 CO_2 浓度、冠层温度、覆盖层温度和等效地面温度动态。根据以上这个研究思路, 我们研究得到了只有 6 个系统状态方程的温室系统简化模型, 这个简化模型与 Vanthoor 模型的拟合程度是比较理想的, 拟合结果如图 4 所示, 这一成果已投稿至国际期刊上待发表。以上研究结果表明, 这种对复杂模型进行简化的方法是可行且有效的, 进一步,

从系统状态的可测量性考虑, 希望能够把系统简化到只含有室内空气温度、湿度及 CO_2 浓度 3 个系统状态变量的温室环境模型。

此外, 对于某些函数关系比较复杂的子过程模型(如光合速率模型、蒸腾速率模型等)可以用一种结构比较简洁的函数来逼近。这种处理方法对于温室系统控制来说是十分有意义的。

作物的产量模型是构成决策优化性能函数的重要组成部分, 它必须反映环境各因子的变化对作物产量的影响。考虑到决策优化过程的实际困难, 希望作物的产量模型不能太过复杂。产量模型可以对一个性能较好的作物生长模型(如 TOMGRO 模型)进行简化而获得, 产量的累积速率最好能够表达为作物干物质累积速率和环境因子的函数, 而叶面积指数可以表达为干物质总量的一个静态函数。若这种简化能够实现将大大减轻决策优化过程的压力, 有助于获得一个较理想的环境状态参考轨迹。

4.3 建模新方法以及模型可靠性检验方法研究

对复杂温室系统模型进行状态合并和过程简化后, 整个过程的输入输出变量关系发生了较大的改变, 函数结构也变得更为复杂, 而且有时从机理建模上很难确定这种输入输出定量关系, 需要引入新的系统建模方法来确定这种关系。系统辨识理论是解决结构和机理未知系统建模的重要工具。对于复杂温室系统, 状态合并后可以采用系统辨识的方法来确定合并状态的输入输出关系, 如可以采用多项式方法来表示这些未知输入输出关系的结构, 利用各种参数辨识的方法来确定多项式的系数, 从而达到辨识整个模型的目的。另一方面, 所建立的模型是否可靠, 也需要通过相应的检验方法来验证。检验的方法有 2 种, 一种是试验检验法, 就是用系统的实际输入输出数据来检验模型在相同输入条件下对输出的逼近程度。这种方法简单直观, 但不能确保模型在各种条件的可靠性。这是因为用于检验的实际数据往往是在某种条件下获得的, 没有覆盖系统所有可能的运行情况, 有可能导致在某些条件下模型的误差较大甚至不稳定。解决这一问题的有效方法是用模型可靠性理论来论证所获得模型的可靠性。用这种方法验证的模型可靠性比较高, 但验证难度大。通常采用的方法大多基于概率统计理论, 如 t 检验方法和 F 检验方法等。对于复杂系统, 可能还需要研究更加有效的检验方法。模型可靠性检验是系统建模的一项重要工作, 直接关系到系统能否安全可靠运行。

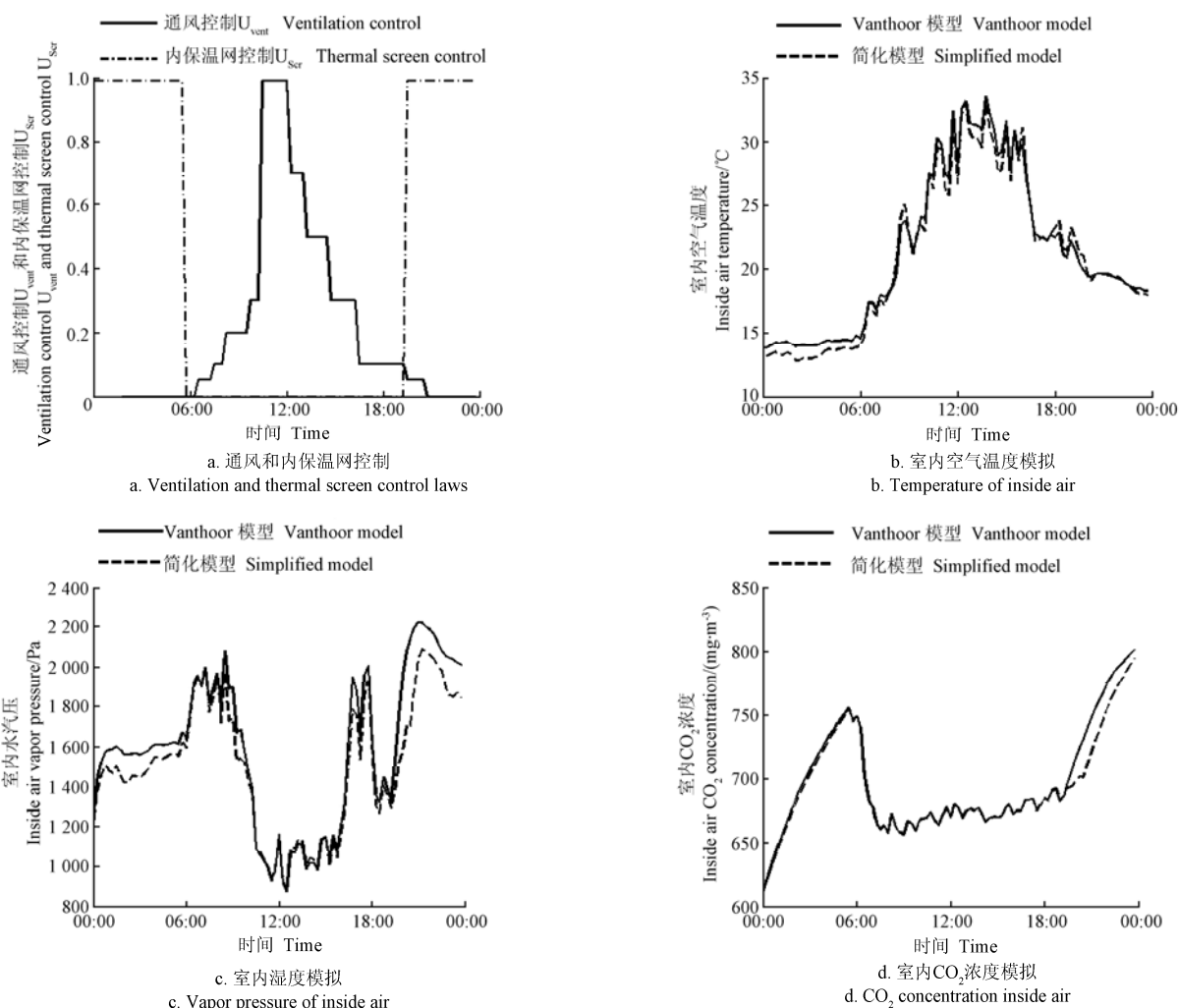


图4 Vanthoor模型与简化模型的模拟比较

Fig.4 Greenhouse climate simulation compare between Vanthoor's model and simplified model

5 结论

本文从温室生产过程最优控制角度考虑,对当前温室系统模型的研究现状作了回顾与分析。现阶段缺乏一种适合温室系统最优控制的高性能温室系统模型,而现有模型存在的问题主要表现在模型对真实系统的模拟精度、模型结构复杂度、缺乏对控制执行机构动态的描述和能耗与CO₂消耗有效预估模型,从而使得模型很难用于实际生产温室系统的控制。在现有研究成果的基础上,解决这些问题的方法可以从三个方面考虑,一是进一步完善现有模型,获得一个包含执行机构动态等机理完善、模拟精度高的复杂模型;二是根据控制所需的温室系统建模要求,对复杂模型作必要的简化或重构,从而便于系统分析和控制器的设计,保证控制过程具有实时性;三是需要对模型进行可靠性验证,以保障整个温室最优控制系统的安全可靠运行。

本文的现实意义在于明确了面向控制的温室

系统建模的基本要求,在现有模型的基础上为建立一种适用于温室系统控制的温室系统模型,指明了后续的研究方向。

[参考文献]

- [1] 钟晓红, 张秋明, 黄远飞. 我国温室园艺生产现状及发展对策[J]. 北方园艺, 2003(1): 4—7.
- [2] 胡建. 现代设施农业现状与发展趋势分析[J]. 农机化研究, 2012(7): 245—248.
Hu Jian. Analysis on the current situation and development of modern facilities agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(7): 245—248. (in Chinese with English abstract)
- [3] Businger J A. The Glasshouse Climate Physics of Plant Environment[M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963: 277—318.
- [4] Impron I, Hemming S, Bot G P A. Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 79—89.

- [5] Bot G P A. Greenhouse Climate: From Physical Processes to A Dynamic Model[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1983.
- [6] Arinze E A, Schoenau G J, Besant RW. A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(2): 508—519.
- [7] Ahmed M, Abdel-Ghany, Toyoki Kozai. Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse[J]. Renewable Energy, 2006, 31(10): 1521—1539.
- [8] Oliver Körner, Jesper Mazanti Aaslyng, Andrea Utoft Andreassen. Microclimate prediction for dynamic greenhouse climate control[J]. Hortscience, 2007, 42(2): 272—279.
- [9] Sengar S H, Kothari S. Thermal modeling and performance evaluation of arch shape greenhouse for nursery raising[J]. African Journal of Mathematics and Computer Science Research, 2008, 1(1): 1—9.
- [10] Fitz-Rodriguez, Kubota E, Giacomelli C, et al. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 105—116.
- [11] 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.
- [12] Bennis N, Duplaix J, Eneab G, et al. Greenhouse climate modelling and robust control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 96—107.
- [13] Ferreira P M, Ruano A E. Discrete model-based greenhouse environmental control using the Branch and Bound Algorithm[C]// The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, 2008.
- [14] Van Henten E J. Greenhouse Climate Management: An Optimal Control Approach[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1994.
- [15] De Zwart H F. Analyzing Energy-saving Options in Greenhouse Cultivation Using a Simulation Model[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1996.
- [16] Vanthoor B H E. A Model-based Greenhouse Design Method[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2011.
- [17] van Ooteghem. Optimal Control Design for a Solar Greenhouse[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2007.
- [18] Tap F. Economics-based Optimal Control of Greenhouse Tomato Crop Production[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2000.
- [19] 佟国红, 李保明. 日光温室内外各表面太阳辐射照度的模拟计算[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(1): 61—65.
Tong Guohong, Li Baoming. Simulation of solar radiation on surfaces of a solar greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(1): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张勇, 邹志荣, 李建明, 等. 日光温室相变空心砌块的制备及功效[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 263—267.
Zhang Yong, Zou Zhirong, Li Jianming, et al. Preparation of the small concrete hollow block with PCM and its efficacy in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 263—267. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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—136.
Li Yuanzhe, Wu Derang, Yu Zhu. Simulation and test research of micrometeorology environment in a sun-light Greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1994, 10(1): 130—136. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈青云, 汪政富. 节能型日光温室热环境的动态模拟[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 67—72.
Chen Qingyun Wang Zhengfu. Dynamic simulation of sun-light greenhouse thermal environment[J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(1): 67—72. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李树海, 马承伟, 张俊芳, 等. 多层覆盖连栋温室热环境模型构建[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 217—221.
Li Shuhai, Ma Chengwei, Zhang Junfang, et al. Thermal model of multi-span greenhouses with multi-layer covers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 217—221. (in Chinese with English abstract)
- [24] 孟力力, 杨其长, Bot G P A, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 164—170.
Meng Lili, Yang Qichang, Bot G P A, et al. Visual simulation model for thermal environment in Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 164—170. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李小芳. 日光温室的热环境数学模拟及其结构优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Li Xiaofang. Simulation of Thermal Environment and Structural Optimizaiton for Sunlight Greenhouse[D]. Beijing: Agricultural University of China, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴春艳, 赵新平, 郭文利. 日光温室作物热环境模拟及分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 190—195.
Wu Chunyan, Zhao Xinping, Guo Wenli. Simulation and analysis of the temperature inside the sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(4): 190—195. (in Chinese with English abstract)

- [27] 马丽丽. 番茄生长模型及日光温室小气候建模的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
- Ma Lili. The Research of Tomato Growth Model and Greenhouse Microclimate Modeling[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [28] 胥芳, 张立彬, 陈教料, 等. 玻璃温室小气候温湿度动态模型的建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 102, 105.
- Xu Fang, Zhang Libin, Chen Jiaoliao, et al. Modeling and simulation of subtropical greenhouse microclimate in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):102:105. (in Chinese with English abstract)
- [29] Luo Weihong, Hendrik Feije, de Zwart, et al. Simulation of greenhouse management under subtropical climate conditions, part I: Model validation and scenario study for the winter season[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(3): 307—318.
- [30] Luo Weihong, Cecilia Stanghellini, Dai Jianfeng, et al. Simulation of greenhouse management in the subtropics, part II: Scenario study for the summer season[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 433—441.
- [31] 汪小昆. 南方现代化温室小气候模拟及其能耗预测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- Wang Xiaochan. Research on Microclimate Simulation and Energy Consumption Prediction of Modern Greenhouse in Subtropical Area[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [32] 邹秋滢. 温室小气候模型的建立及其控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010.
- Zou Qiuying. Study on Dynamic Modeling and Control Strategy in Greenhouse Climate System[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [33] Boaventura J, Cunha 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.
- [34] Ferreira P M, Faria E A, Ruano A E. Neural network models in greenhouse air temperature prediction[J]. Neuro- computing, 2002, 43(1/2/3/4): 51—75.
- [35] 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—193.
- [36] Paulo Salgado, Boaventura Cunha J. Greenhouse climate hierarchical fuzzy modeling[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(5): 613—628.
- [37] Herrero J M, Blasco X, Martínez M, et al. Non-linear robust identification of a greenhouse model using multi-objective evolutionary algorithms[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(3): 335—346.
- [38] Guzmán-Cruz R, Castañeda-Miranda R, García-Escalante J J, et al. Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 135—142.
- [39] 齐维强, 张志斌, 邹志荣, 等. 基于积温的日光温室番茄生长发育规律研究[J]. 华中农业大学学报, 2004, (增刊 2): 53—57.
- Qi Weiqiang, Zhang Zhibin, Zou Zhirong, et al. Research of tomato's growth rule based on accumulation temperature in greenhouse[J]. Journal of Hua zhong Agricultural University, 2004(Supp.2): 53 — 57. (in Chinese with English abstract)
- [40] Dieleman, Meinen J A E. Interacting effects of temperature integration and light intensity on growth and development of single-stemmed cut rose plants[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 113(2): 182—187.
- [41] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 811—816.
- Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of greenhouse tomato dry matter partitioning and yield prediction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 811—816. (in Chinese with English abstract)
- [42] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 811—816.
- Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of greenhouse tomato dry matter part itioning and yield prediction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 811—816. (in Chinese with English abstract)
- [43] Jones J W, Dayan E, Allen L H, et al. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO)[J]. Transactions of ASAE, 1991, 34(2): 663—672.
- [44] Gijzen H, Heuvelink E, Challa H, et al. HORITISIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate[J]. Acta Horticulturae, 1998, 456: 441—450.
- [45] Heuvelink E. Tomato Growth and Yield Quantitative Analysis and Synthesis[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1996.
- [46] Jones J, Kenig A, allejos C E. Reduced state-variable tomato growth model[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(1): 255—265.
- [47] Zeinab Shabani, Shahin Rafiee, Hossein Mobli. Econometric model on energy input and yield in carnation flower[J]. Journal of Agricultural Science and Applications, 2012, 1(1): 8—12.
- [48] Mihov M, Tringovska I. Energy efficiency improvement of greenhouse tomato production by applying new biofertilizers[J]. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2010, 16(4): 454—458.
- [49] Marsh L S, Albright L D. Economically optimum day temperatures for greenhouse hydroponic lettuce production part I: A computer model[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2): 550—556.
- [50] Seginer I, McClendon W R. Methods for optimal control of the greenhouse environment[J]. Transactions of The ASAE, 1992, 35(4): 1299—1307.

- [51] López J C, Baille A. Predicting the energy consumption of heated plastic greenhouses in south-eastern Spain[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2006, 4(4): 289–296.
- [52] Mario Trejo-Perea, Gilberto Herrera-Ruiz, Jose Rios-Moreno, et al. Greenhouse energy consumption prediction using neural networks models[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2009, 11(1): 1–6.
- [53] Roy J C, Boulard T, Kittas C, et al. Convective and ventilation transfers in greenhouses, part 1: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 83(1): 1–20.

Requirement and current situation of control-oriented microclimate environmental model in greenhouse system

Xu Lihong¹, Su Yuanping¹, Liang Yuming^{1,2}

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Economy-based optimal control of greenhouses is an important technique to reduce the operating cost and increase the crop yield. In General, the structure of a typical greenhouse control system consists of two layers: the objective optimization layer and the process control layer. The aim of the former is to obtain the target trajectories of environmental states; while in the latter, environmental states are tuned to track those obtained trajectories. Based on this framework, some relevant models to the greenhouse system, such as greenhouse microclimate model, crop growth and yield model, energy consumption predicting model and CO₂ consumption predicting model, need to be built, and some constraints over environmental states and control inputs must be determined. However, most greenhouse climate models and crop growth models proposed in literature are research-oriented rather than based on practical cultivation. The biggest difference between the two is that research-oriented models solely focus on the optimal set-points of internal climatic parameters for maximum crop yield, ignoring the abilities of control actuators, the ambient climate change, and the overall energy consumption. From a practical point of view, the latter are certainly necessary in greenhouse models. It would be difficult to achieve realistic results if the models are incomplete. The lack of reliable greenhouse models has become the greatest difficulty for greenhouse optimization and control. In this paper, the latest trends in greenhouse climate models, crops growth models, energy consumption models, and CO₂ consumption models are reviewed in details. The main shortcomings of current models can be summarized as follows: (1) although some models obtained by ample mechanisms, their structures are excessively complicated, such that the corresponding computations are very expensive, which makes it difficult to design an efficient controller based on them. This class of models interprets the real physical laws with large number of parameters and complex structures, and Vanthoor's model and TOMGRO are examples; (2) some models are too simple to accurately reflect the relationships between greenhouse environment and crop growth. Generally, only the dynamics of air temperature and humidity in greenhouses are described in this class of greenhouse climate model, such as Albright's model, while the dynamic of CO₂ concentration, which is an important environmental factor to affect photosynthesis, is not included. Furthermore, the influence to crop growth of environmental factors is always partially reflected in simplified crop growth models, e.g. in radiation and thermal effectiveness model, only air temperature and radiation is used to describe the accumulation and allocation of dry matter; (3) only single control input variable is included in many greenhouse climate models, such as the thermal environmental model of solar greenhouse, this is because most greenhouses are not equipped with relevant control actuators. Generally, these greenhouse climate models are used to guide the structure design, material selection, or management of greenhouse production. Additionally, although some greenhouse climate models include various control inputs, including heating, fogging, ventilation and CO₂ injection, the dynamic response of control actuators are still not described adequately, and so, they can't be used for greenhouse climate control. In order to obtain a suite of efficient greenhouse models, great efforts need to be made to solve the following key problems: (1) the unknown mechanisms of some processes need to be explored further for a mathematical expression of their input-output relationship. Provided with these results, some complex models can be improved; (2) based on a complex model with detailed mechanistic expressions, some dynamic sub-processes can be reconstructed or simplified to reduce the model complexity; (3) new approaches and theories about system modeling and model validation can be developed.

Key words: greenhouses, systems, control, crops, climate model, growth model, energy consumption model, CO₂ consumption model

(责任编辑: 张俊芳)