

基于奇异摄动理论的综合温室控制系统设计*

李永博^{1,2} 周伟¹ 汪小昆^{1,2} 丁为民^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

【摘要】 为了建立集环境因子、作物生长过程和上层指标的综合温室控制系统,分析了现有温室控制研究成果,基于控制周期原则将温室控制系统分为分钟级温室环境因子控制系统(快速时变系统)、天或旬级的作物生长周期控制系统(中速时变系统)、年級的温室上层指标控制系统(慢速时变系统)。通过多时间尺度分析发现3类控制系统具有多时标特性,借助奇异摄动理论,对温室控制系统进行了分层递阶设计,进而得出该理论下的总体温室控制系统模型与控制器求解过程。通过算例演绎该设计方法的步骤,进行了仿真研究,结果表明,基于奇异摄动理论的温室控制系统设计思路清晰、计算量小、易于工程实现。

关键词: 温室 控制系统 多时标 奇异摄动理论

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0184-06

Greenhouse Control System Design Based on Singular Perturbation Theory

Li Yongbo^{1,2} Zhou Wei¹ Wang Xiaochan^{1,2} Ding Weimin^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province,

Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

In order to set up an integrated greenhouse control system including environmental factors, plant growth period and upper index, relevant literatures of greenhouse control system were analyzed and based on control period principle, the literature was divided into three types of control systems: greenhouse environmental factors control system (fast speed time-varying systems), crop growing period control system (middle speed time-varying systems) and upper index control system in year (slow speed time-varying systems). By the multi-time-scale analysis, three types of control systems were found out to have multi-time-scale property. By means of singular perturbation theory, the greenhouse control system was designed hierarchically at first, and then the overall model of control system of greenhouse and the solution of the controller were obtained within such theoretical framework. Finally, the example and simulation results show that the proposed method is simple, effective and convenient for the application.

Key words Greenhouse, Control system, Multi-time-scale, Singular perturbation theory

引言

温室能否发挥其最大生产潜能,取决于控制系统设计。过去几十年,温室控制研究成果大量涌现,各种控制策略和控制技术被应用,如 PID

(proportional integral derivative controller)控制^[1]、模糊控制^[2~4]、神经网络控制^[5~6]、遗传算法控制^[7]、最优控制^[8~10]、预测控制^[11~12]、多级决策控制^[13]和鲁棒控制^[14]等。但是温室控制系统不同于一般的工业控制(设定值恒定),有其特殊性。从微观角度

收稿日期: 2011-12-26 修回日期: 2012-02-08

* 国家自然科学基金资助项目(60971106)、南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ2011024)和江苏省农机局、南京农业大学工学院科研启动基金资助项目(rcqd10-01)

作者简介: 李永博, 博士后, 主要从事农业生物环境控制研究, E-mail: bewit@njau.edu.cn

看,它注重对各种环境因子的控制,且在一定生物或季节周期中控制目标是不同的;从宏观角度看,它涉及到温室产业上层诸如经济效益、市场需求、人力成本等指标要求,是一个完整温室产业链的控制与优化。因此温室控制系统的复杂性与特殊性,使得研究者只能从温室控制的某一方面去探讨,无法从整体上去把握温室控制系统的设计、分析与优化。

本文在研究现有温室控制系统成果基础上,将现有研究成果分为基于温室环境因子的实时控制、基于作物不同生长周期的温室控制、基于上层产业链的温室控制 3 个时间尺度层次,借助奇异摄动理论中的时标分离原理,将这 3 种温室控制系统集成,构成一个统一的控制系统,这样不仅便于对温室控制系统的全面分析,而且有利于系统的综合。

1 温室控制的文献分析

温室作为一种人工小气候环境,随着所处地理位置的不同,其控制要求和控制方法也不尽相同;同时由于研究者出发点的不同,提出的控制策略也多种多样,但是从不同系统的控制周期上看则可将其分为 3 类:

(1) 基于各种温室环境因子的控制系统设计,也就是一般意义上的温室控制。在这类控制系统中主要包括表征环境因子的状态,如温度、湿度、光照、CO₂ 浓度、空气流速等,这些状态除了与温室作物有关外,同时还受到温室外气象条件、温室结构及材料特性、温室环境调控设备以及人为干扰等因素的影响,是一个复杂的动力学系统,特点为多变量耦合、非线性、时变和滞后。

(2) 基于温室内作物生长所处阶段或外界环境周期的各种控制策略^[11~13,15~17]。如文献[15]提出在每天控制中要满足植物生长所要求的昼夜温差,即采取变温管理,白天增进光合作用时段,傍晚至前半夜促进光合产物运转时段和后半夜抑制呼吸消耗时段;文献[10]将作物整个生长周期分为营养生长阶段和生殖生长阶段,分别制定控制策略;以季为周期的研究见文献[16~17],前文以作物干物质的积累为控制目标,后文则是通过施肥量的控制实现作物的高产。

(3) 基于人力成本、市场需求、经济效益等上层指标的温室控制系统^[18~24]。这类温室控制由于要参考过去年份的统计数据,因此其控制周期以年计,这样才有比较意义,结论或是进行温室投资风险评^[18]估、或以大系统理论为依据进行以产出投入比为指标的最优控制^[19~22],文献[23]更是以 5 年的数据来分析研究外界气候对温室生产的影响。这类文

献除了实验研究外,还有理论研究,其中多以变分法为工具推导大周期下温室在不同指标下的最优控制问题^[24]。

综上所述,温室控制的成果繁多,但是若从时间域角度去考虑,以上 3 类控制系统则可在此基础上统一,其区别仅在于研究者着眼的时间尺度不同,第一类时间尺度为分钟级,第二类时间尺度为日或旬级,第三类时间尺度为年级,因此可借助奇异摄动理论中的多时间尺度理论来对温室控制系统加以分析和综合,将不同时间尺度的研究统一在此理论框架下,既可分析温室环境因子控制的细节问题,又可对温室产业的整体进行把握。

2 奇异摄动理论在温室控制中的应用

2.1 奇异摄动理论

在系统理论与控制工程中,对于表现为高阶微分方程的实际物理系统,若直接分析或进行控制器设计则计算复杂度较高,早期对这类系统的处理方法是简单忽略快变模态从而降低系统的阶数,然而大量事实证明,基于这样简化模型设计的控制效果往往与设计要求相距甚远^[25]。为了解决上述问题,奇异摄动理论自 20 世纪 60 年代开始应用于控制系统设计,在实际应用中采用多时间尺度法,在温室控制中如文献[22,24]就是基于此方法设计了针对单指标的最优控制系统,但并未涉及到温室总体控制系统设计。

多时间尺度一般指 2 个或者更多时间(空间)尺度的系统,它的作用在于:若一个系统存在不同的时间尺度,那么就可以采用奇异摄动原理来进行控制器设计。根据系统状态变量频率特性的不同,将不同频率范围的状态分别设计控制器,这实际上相当于在多个时间尺度范围内独立完成设计任务。对于一个动态系统,上述的分解实际上就是一种时标的分解^[25]。

因此在温室控制系统设计时,如果温室控制系统的状态变量存在多时标特性,则可基于奇异摄动系统理论来进行控制器设计。实施时将系统状态变量进行多时标化,在不同频域抓住主要状态分别进行控制器设计。高频段对应快状态变量,低频段对应慢状态变量;设计快时变控制器时,可认为慢时变系统不变,设计慢时变控制器时,则认为快时变系统已达稳态。

2.2 3 类温室控制系统的频率特性

2.2.1 第一类系统频率特性

温室环境因子的实时控制是整个温室控制系统的基础,这其中涉及到的状态变量可表示为

$$\mathbf{x}^b = (\mathbf{x}_1^b, \mathbf{x}_2^b, \mathbf{x}_3^b, \mathbf{x}_4^b, \cdots) \tag{1}$$

式中 $\mathbf{x}_i^b (i = 1, 2, \cdots, n_1)$ 分别表示温度、湿度、光照、CO₂ 浓度等表征环境因子的状态, 这些状态的控制周期在设定值不变时一般可取 10 ~ 15 min, 与一般工业控制相似, 因此其状态频率 f^b 为 $1.11 \times 10^{-3} \sim 1.67 \times 10^{-3}$ Hz。

2.2.2 第二类系统频率特性

温室小气候环境由于地理、季节、调控等手段的不同, 其控制思路不同于一般工业过程的恒值控制。随着日起日落、季节变化、植物生长等因素影响, 其设定值必须是变化的, 这样才能满足植物生长的需要, 因此在此类温室控制中的状态变量可表示为

$$\mathbf{x}^m = (\mathbf{x}_1^m, \mathbf{x}_2^m, \mathbf{x}_3^m, \cdots) \tag{2}$$

式中 $\mathbf{x}_j^m (j = 1, 2, \cdots, n_2)$ 分别表示室外气象、室内作物、季节等状态, 因此在第二类温室控制系统中, 其控制周期可以是天或旬, 相应的状态频率 f^m 为 $1.16 \times 10^{-5} \sim 1.16 \times 10^{-6}$ Hz。

2.2.3 第三类系统频率特性

温室生产的最终目标是获得最大收益, 因此在第三类温室控制中, 需引入上层经济指标作为状态, 如能耗、经济收入、人力花费等状态变量, 可表示为

$$\mathbf{x}^u = (\mathbf{x}_1^u, \mathbf{x}_2^u, \mathbf{x}_3^u, \cdots) \tag{3}$$

式中 $\mathbf{x}_k^u (k = 1, 2, \cdots, n_3)$ 分别表示耗能、经济收益、人力成本等状态, 这些变量为大时间尺度特性, 单独一年的数据没有参考意义, 因此这一类系统的控制周期应该为 3 ~ 5 年或更长, 相应的状态频率 f^u 为 $1.04 \times 10^{-8} \sim 6.22 \times 10^{-9}$ Hz。

从频域角度分析以上 3 类温室控制系统特性, 可以得到其频带比 $n_m^b (f^b/f^m)$ 为 $1.44 \times 10^2 \sim 9.57 \times 10^2$; $n_u^m (f^m/f^u)$ 为 $1.87 \times 10^2 \sim 1.12 \times 10^3$ 。

可见 n_m^b 和 n_u^m 均在 10² 以上, 因此 3 类控制系统状态 $\mathbf{x}_i^b$ 、 $\mathbf{x}_j^m$ 和 $\mathbf{x}_k^u$ 具有明显的多时标特性, 在温室控制系统设计中, 可以根据奇异摄动理论中的时标分离原则, 基于这种理论来设计温室控制系统, 将系统

分为慢时变系统(第三类系统)、中时变系统(第二类系统)和快时变系统(第一类系统), 分别独立设计控制器, 这样可降低系统阶次从而简化设计, 将 1 个三阶系统简化为 2 个二阶系统, 减小控制器设计的复杂度和计算量, 以适应实际工程需要。

3 温室控制系统的综合

3.1 温室控制系统的分层递阶结构

从频域角度分析, 3 类温室控制系统状态有明显的多时标特性。在利用奇异摄动理论进行控制器设计时, 中、慢速时变系统状态可认为是不变的, 即经济指标、环境因子设定值是确定的, 快速时变系统的设定值则从中速时变系统的输出获得; 在设计中速时变系统时(日或旬为时间尺度), 则认为快速时变系统已经达到稳态, 即温室环境因子的控制已经达到设定值, 慢速时变系统变量是不变的, 中速时变系统的设定输入来自慢速时变系统的输出; 同理在设计慢速时变系统时, 认为快、中速时变系统均已达到稳态, 其设定输入则来自外界的人工, 因此整个温室 3 类时标的时变控制系统呈现出分层递阶结构, 如图 1 所示。

图 1 中 $\mathbf{x}_{Des}^u$ 、 $\mathbf{x}_{Des}^m$ 、 $\mathbf{x}_{Des}^b$ 表示慢、中、快速时变系统的设定值, $\bar{\mathbf{u}}^u$ 、 $\bar{\mathbf{u}}^m$ 、 $\mathbf{u}^b$ 为对应 3 类系统控制输出, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^u, \mathbf{x}^m, \mathbf{x}^b)$ 为整个系统状态。整个系统的输入值为慢速时变系统的人为设定, 中、快速时变系统的设定值均来自上层系统的输出。整个闭环系统实现的过程是: 通过状态反馈慢速时变系统获得人为设定 $\mathbf{x}_{Des}^u$ (上层指标) 与慢速状态的偏差, 计算输出给中速时变系统设定值, 获得一段时间内(日或旬)温室状态的设定值, 而中速时变系统则充当快、慢系统之间的桥梁, 其输入、输出均在温室控制系统内部完成, 它的任务是给快速时变系统提供实时(分钟级)的设定值, 最后通过快速时变系统完成各个温室环境因子的控制, 满足植物生长需要, 完成整个系统的

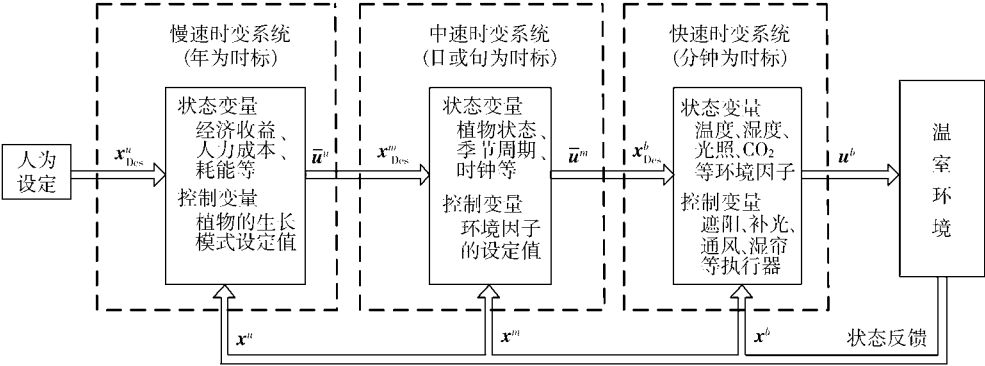


图 1 温室控制系统的分层递阶结构图

Fig. 1 Structure block diagram of greenhouse control system

大闭环运行。

通过对温室控制系统的分层递阶分析可以看出,温室控制最终依靠的是快速时变系统,也就是 u^b 的作用方式,因此如何合理有效设计 u^b 的动作模式至关重要,目前温室控制的文献也多是这一时标下控制系统的研究成果。

3.2 温室控制系统设计

由以上分析知温室 3 类状态变量具有明显的多时标特性,可以采用奇异摄动理论来进行控制器设计,为表述清晰起见进一步分解为 2 级,包含 2 个奇异摄动子系统,分别为:慢、中速子系统设计和中、快速子系统设计,这样降阶之后可直接利用现有奇异摄动的理论成果,并简化计算量。

3.2.1 慢、中速时变系统设计

系统描述为

$$\begin{cases} \dot{x}^u = h_1(x^u, x^m, u^u, u^m; \varepsilon_1) \\ \varepsilon_1 \dot{x}^m = g_1(x^u, x^m, u^u, u^m; \varepsilon_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中慢控制量为 $u^u = \bar{u}^u$, 控制量为 $u^m = \bar{u}^m$, $\varepsilon_1 \in (0, 1]$ 为摄动参数,由图 1 可以看出 $\bar{u}^u$ 和 $\bar{u}^m$ 均在系统内部完成,可认为是伪控制量。

由奇异摄动原理知^[26],设计慢速时变系统时,中速时变系统已进入稳态,因此令式(4)中 $\varepsilon_1 = 0$,即

$$g_1(x^u, \bar{x}^m, u^u, \bar{u}^m; 0) = 0 \quad (5)$$

式中 $\bar{x}^m$ 、 $\bar{u}^m$ 表示已达到稳态的中速系统状态变量和输出变量,假设上述方程可逆,解之可得

$$\bar{u}^m = G_1(\bar{x}^m, x^u, u^u) \quad (6)$$

即为中速时变系统控制律,其中 G_1 为 g_1 的逆。设计中速时变系统时,认为慢速时变系统保持不变,即

$$h_1(\bar{x}^u, x^m, \bar{u}^u, u^m; \varepsilon_1) = 0 \quad (7)$$

式中 $\bar{x}^u$ 、 $\bar{u}^u$ 表示慢速时变系统状态和输出变量,假设上述方程可逆,解之可得

$$\bar{u}^u = H_1(\bar{x}^u, x^m, u^m; \varepsilon_1) \quad (8)$$

即为快速时变系统控制律,其中 H_1 为 h_1 的逆, ε_1 为已知量。

3.2.2 中、快速时变系统设计

系统描述为

$$\begin{cases} \dot{x}^m = h_2(x^m, x^b, u^m, u^b; \varepsilon_2) \\ \varepsilon_2 \dot{x}^b = g_2(x^m, x^b, u^m, u^b; \varepsilon_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中的符号与 3.2.1 节中类同,区别在于 u^b 不再是伪控制量,而是温室环境因子控制的具体手段,见 3.1 节中的描述,同理可以得到降阶后的中速时变系统和快速时变系统的控制律

$$u^b = G_2(\bar{x}^b, x^m, u^m) \quad (10)$$

$$\bar{u}^m = H_2(\bar{x}^m, x^b, u^b; \varepsilon_2) \quad (11)$$

其中的符号与 3.2.1 节中类同。

3.3 算例分析

为说明奇异摄动理论在温室控制系统中的应用,本文以快速和中速时变系统中的“温度”和“作物生长”为状态,构建一个两级的综合时变奇异摄动温室控制系统,各自模型分别参考文献[27~28],其中文献[27]以陕西关中地区温室的物理过程进行分析,温室结构是热水管道加热、单层透明覆盖物(薄膜或玻璃)、天窗通风以及农作物生长环境的自动控制;文献[28]以温室黄瓜为生长作物,采用天窗、卷帘、遮阳网、保温幕、风机、喷淋、燃油加热系统等为具体调控手段设计控制系统。

借鉴文献[29]中关于奇异摄动系统控制器设计方法,综合温室控制系统可描述为

$$G(s, \varepsilon) = \frac{s + 2}{(s + 1)(\varepsilon s + 1)} \quad (12)$$

式中 ε 为摄动因子参数,其取值可表征出快、中速时变系统工作频率的差异,传递函数 $G(s, \varepsilon)$ 为二阶系统代表综合温室系统的 2 个状态:温度和作物生长。

由文献[29]结论可知,式(12)在低频可近似为

$$G_s(s) = \frac{s + 2}{s + 1} \quad (13)$$

高频处可近似为

$$G_f(s) = \frac{1}{s + 1} \quad (14)$$

为了说明式(13)、(14)对于式(12)在不同频率等价的合理性,采用 Bode 图分析法给出式(12)~(14)的频域特性,如图 2 所示。

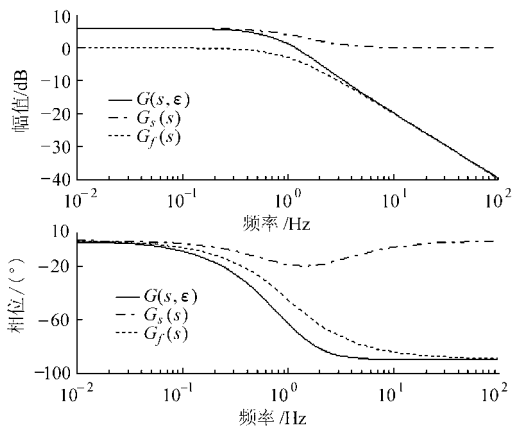


图 2 式(12)~(14) Bode 图

Fig. 2 Bode diagram of formula (12) ~ (14)

通过 Bode 图可以看出在不同频率下,系统增益的大小及相位,也可以看出幅值大小及相位随频率变化的趋势。图 2 中原系统 $G(s, \varepsilon)$ 频率在左边的低频时,幅相特性几乎与 $G_s(s)$ 重合,这表明在此频域时可以采用 $G_s(s)$ 来表征“作物生长”的状态模型

$G(s, \varepsilon)$, 即式(13)为中速时变系统; 图2中原系统 $G(s, \varepsilon)$ 频率在右边的高频时, 幅相特性几乎与 $G_f(s)$ 重合, 这表明在此频域时可以采用 $G_f(s)$ 来表征“温度”的状态模型 $G(s, \varepsilon)$, 即式(14)为快速时变系统。经过上面分析, 对于式(12)可在低频和高频段分别用式(13)、(14)来等价, 从而从整体上简化控制系统设计, 并提高系统响应速度。

对已经递阶的2类不同时间尺度控制系统进行控制器设计, 采用极点配置原理, 取低频和高频段状态指标为

$$D_\alpha = \{s \in \mathbb{C}; \operatorname{Re} s(s) \leq -\alpha\} \quad (\alpha > 0) \quad (15)$$

式中 α 为极点在左半平面的位置, 表征控制系统设计所要求的动态调节时间和超调量, 此处要求控制系统的所有极点的实部均位于复平面 $-\alpha$ 的左侧, 控制器取状态反馈形式

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{w} \quad (16)$$

式中 $\mathbf{F}$ ——所求控制量

$\mathbf{K}$ ——所求的状态反馈矩阵

$\mathbf{w}$ ——不同时间尺度下所选取的状态变量

阶跃函数响应是控制系统设计中的常用典型输入, 如系统启停、设定值变化等都可归为此类响应。本文研究阶跃响应的误差特性, 中速时变系统 $\alpha = 1.0$, 快速时变系统 $\alpha = 3.0$, 可得到系统在2个时标下的跟踪误差曲线, 如图3所示。

图3a以温室环境因子为时间尺度, 时间轴为分钟, 这就要求此类控制系统对设定值的跟踪必须在分钟级完成, 文中采用极点配置的方法在3 min就能达到这种要求, 所以控制器是有效的; 在图3b中以作物生长阶段为时间尺度, 时间轴为天, 这就表示对于一季作物而言, 由于短期天气的相似性, 其设定值可以是不变的, 也就是根据作物生长阶段改变设定值, 同样利用极点配置可以达到快速跟踪的目的, 表明控制器的设计方法是有效的。

通过上述算例可以看出, 将奇异摄动理论应用于温室控制系统是合理的, 不仅可将一个复杂的三阶系统(式(12))降阶简化为2个一阶系统(式(13)和式(14)), 而且从温室总体控制系统设计上思路更加简单, 加之三阶系统在计算上只能有数值解, 计算量和复杂度远远高于有解析解的一阶系统, 因此若将奇异摄动理论用于实际设计将简化控制系统的设计过程, 计算量大为减小, 易于工程实现。

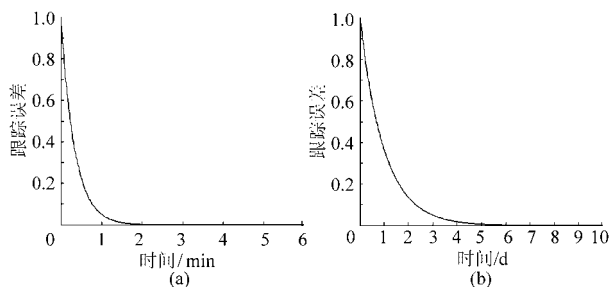


图3 中速和快速时变系统状态跟踪误差曲线

Fig. 3 Tracking error of middle-speed system and fast-speed system

(a) 快速系统 (b) 中速系统

4 结论

(1) 温室控制系统的状态具有多时标特性, 具体可划分为慢、中、快3种频率的时变系统。

(2) 对温室控制系统的分层递阶分析可以看出, 不同时标的控制系统呈现独立形式, 整个系统的输入为人工设定, 即输出结果, 其余状态均为内部变量。

(3) 时标分离后的状态可利用奇异摄动理论设计控制器, 在简化系统设计基础上减小计算量和复杂度, 对于工程实现更加有利。

(4) 在温室控制系统设计中, 研究者首先应确定研究对象处于哪一时标尺度, 只有这样才能明确系统状态以及输入输出关系, 结果也会更有针对性。

参 考 文 献

- Boaventura Cunha J, Couto C, Ruano A E. Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(10): 1473 ~ 1481.
- Goggos V, King R E. Qualitative-evolutionary design of greenhouse environment control agents [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(3): 271 ~ 282.
- Lafont F, Balmat J F. Optimized fuzzy control of a greenhouse [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 128(1): 47 ~ 59.
- Rodrigo Castañeda-Miranda, Eusebio Ventura-Ramos Jr, Rebeca del Rocio Peniche-Vera, et al. Fuzzy greenhouse climate control system based on a field programmable gate array [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(2): 165 ~ 177.
- Fathi Fourati, Mohamed Chtourou. A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(8): 1016 ~ 1028.
- Ferreira P M, Faria E A, Ruano A E. Neural network models in greenhouse air temperature prediction [J]. Neuro Computing, 2002, 43(1 ~ 4): 51 ~ 75.
- Blasco X, Martínez M, Herrero J M, et al. Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1): 49 ~ 70.

- 8 Gerrit van Straten. Acceptance of optimal operation and control methods for greenhouse cultivation [J]. *Annual Reviews in Control*, 1999, 23(1): 83 ~ 90.
- 9 Christelle Lopes, Thierry Spataro, Laurent Lapchin, et al. Optimal release strategies for the biological control of aphids in melon greenhouses [J]. *Biological Control*, 2009, 48(1): 12 ~ 21.
- 10 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.
Wu Delin, Mao Hanping, Li Pingping. Environmental regulation techniques based on economic optimization in greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(2): 115 ~ 119. (in Chinese)
- 11 Coelho J P, De Moura Oliveira P B, Boaventura Cunha J. Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimization algorithm [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 49(3): 330 ~ 344.
- 12 Gruber J K, Guzman N L, Rodriguez F, et al. Nonlinear MPC based on a Volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(1): 354 ~ 366.
- 13 Korner O, Van Straten G. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 60(1): 18 ~ 30.
- 14 Bennis N, Duplaix J, G Enea, et al. Greenhouse climate modeling and robust control [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 61(2): 96 ~ 107.
- 15 邓璐娟, 张侃谕, 龚幼民, 等. 温室环境多级控制系统及优化目标值设定的初步研究[J]. *农业机械学报*, 2005, 21(5): 119 ~ 122.
Deng Lujuan, Zhang Kanyu, Gong Youmin, et al. Preliminary study on hierarchical greenhouse environment control system and setting of the optimized target values [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 21(5): 119 ~ 122. (in Chinese)
- 16 Pucheta J A, Schugurensky C, Fullana R, et al. Optimal greenhouse control of tomato-seedling crops[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2006, 50(1): 70 ~ 82.
- 17 Ilya Ioslovich. Optimal control strategy for greenhouse lettuce: incorporating supplemental lighting [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 57 ~ 67.
- 18 姚益平, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 中国连栋温室黄瓜周年生产能耗分布模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 273 ~ 279.
Yao Yiping, Dai Jianfeng, Luo Weihong, et al. Simulation analysis of distribution of energy consumption for year round cucumber production in multi-span greenhouse in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 273 ~ 279. (in Chinese)
- 19 王纪章, 李萍萍, 毛罕平. 基于数据库的温室环境调控效果模型[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(11): 84 ~ 87.
Wang Jizhang, Li Pingping, Mao Hanping. Model of greenhouse environment control based on database [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(11): 84 ~ 87. (in Chinese)
- 20 顾寄南, 毛罕平. 温室环境智能化控制数学模型的研究[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(6): 63 ~ 66.
Gu Ji'nan, Mao Hanping. A mathematical model on intelligent control of greenhouse environment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, 32(6): 63 ~ 66. (in Chinese)
- 21 van Straten G, Challa H, Buwalda F. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(3): 221 ~ 238.
- 22 van Straten G, Willigenburg L G, Tap R F. The significance of crop co-states for receding horizon optimal control of greenhouse climate [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(3): 625 ~ 632.
- 23 Bamsey M, Berinstain A, Graham T, et al. Developing strategies for automated remote plant production systems: environmental control and monitoring of the Arthur Clarke Mars Greenhouse in the Canadian High Arctic [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(12): 1367 ~ 1381.
- 24 van Henten E J, Bontsema J. Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(1): 88 ~ 96.
- 25 刘华平, 孙富春, 何克忠, 等. 奇异摄动控制系统: 理论与应用[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(1): 1 ~ 7.
Liu Huaping, Sun Fuchun, He Kezhong, et al. Survey of singularly perturbed control systems: theory and applications [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(1): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 26 许可康. 控制系统中的奇异摄动[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- 27 屈毅, 宁铎, 赖展翅, 等. 温室温度控制系统的神经网络 PID 控制[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 307 ~ 311.
Qu Yi, Ning Duo, Lai Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 307 ~ 311. (in Chinese)
- 28 王纪章, 李萍萍, 毛罕平. 基于作物生长和控制成本的温室气候控制决策支持系统[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(9): 168 ~ 171.
- 29 梅平. 奇异摄动系统的鲁棒控制-分频组合方法与统一时域设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.