

水培阳台蔬菜机营养液电导率自适应控制

李 颀,高一星,王 俊,杨 柳,赵 洁

(陕西科技大学 电气与信息工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:针对当前水培阳台蔬菜机营养液电导率(Electrical conductivity,EC)控制系统易受外界温度、湿度、光照强度和混合营养液中pH等因素干扰的问题,设计了营养液EC的模型参考自适应控制系统。基于物料守恒关系建立营养液EC控制系统数学模型,同时依据被控对象模型、响应时间和控制性能等指标选取参考模型,并采用李雅普诺夫稳定性原理设计系统的自适应律和控制律。仿真试验表明,系统可在40 s左右进入稳定状态,同时在外界温度、湿度、光照强度、混合营养液pH等的扰动下,依旧具有较好的鲁棒性(控制绝对误差<0.1 mS/cm)。

关键词:水培阳台蔬菜机;营养液;电导率;模型参考自适应

中图分类号:S24;S63 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2019)01-0153-07

Electrical Conductivity Adaptive Control of Nutrient Solution of Hydroponic Veranda Vegetable Machine

LI Qi, GAO Yixing, WANG Jun, YANG Liu, ZHAO Jie

(School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract:The electrical conductivity (EC) control system of the hydroponic veranda vegetable machine nutrient solution is easily interfered by external temperature, humidity, light intensity and the pH of mixed solution, so the model reference adaptive control system of nutrient solution EC was designed. The mathematical model of EC regulation system of nutrient solution was established by the relationship of conservation of materials. Meanwhile, the reference model was selected by these indicators of the controlled object model, response time and control performance etc, and the adaptive law and control law of the system were designed by Lyapunov stability principle. The system simulation test showed that the system can enter the stable state of EC about 40 seconds under the disturbance of external temperature, humidity, light intensity and pH of the mixed solution. The system had a good robustness(absolute error was less than 0.1 mS/cm).

Key words:Veranda vegetable machine; Nutrient solution; EC; Model reference adaptive control system

由于我国城市化进程加快,城市耕地减少,阳台农业及其培植设备逐渐走进城市人的生活。同时,随着无土栽培农业技术的快速发展,适用于家庭的小型智能蔬菜种植机,开始进入城镇家庭。其中,水培阳台蔬菜机由于其清洁、无公害和营养液易于控制等特点,普遍受到人们喜爱^[1-2]。

水培阳台蔬菜机营养液电导率(Electrical con-

ductivity,EC)控制是水培阳台蔬菜机整体设计的重要环节,其控制性能直接影响蔬菜的生长状况和产量^[3]。

当前常见的水培阳台蔬菜机营养液控制系统,一般通过将蔬菜置于封闭小环境中,采用人工手动混合、多次循环和定时添加进行控制,控制过程简单实用。其中,基于增量式PID(Proportion integration

收稿日期:2018-07-17

基金项目:陕西省农业科技创新工程项目(201806117YF05NC13(1));陕西省科技厅农业科技攻关项目(2015NY028)

作者简介:李 颢(1973-),女,陕西西安人,教授,博士,主要从事农业智能化信息化研究。E-mail:liqidq@sust.edu.cn

通信作者:高一星(1991-),男,山西吕梁人,在读硕士研究生,研究方向:智能农业设施研究。

E-mail:1454779654@qq.com

differentiation, 比例 - 积分 - 微分) 技术的营养液 EC 控制系统通过增加改进 Smith 预估器的方法, 能够将营养液 EC 控制精度和系统响应速度提高到较满意的指标^[4]。同时, 由于营养液中的 EC 与 pH 存在一定的耦合关系, 采用基于云模型推理的 pH 与 EC 的解耦控制, 实现了对营养液 EC 的精准调节^[5-6]。上述控制系统在营养液 EC 控制过程中, 对于外界环境和营养液 pH 的扰动缺乏综合考虑与分析。鉴于此, 根据水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统在不同环境下系统特性易受干扰的特点, 通过试验测试和理论推导建立系统数学模型, 并运用模型参考自适应控制理论, 设计控制系统的理想参考模型和自适应律, 增强营养液 EC 控制系统对外界环境等变化的适应能力, 以保证其在控制精度等方面拥有较高的性能指标。

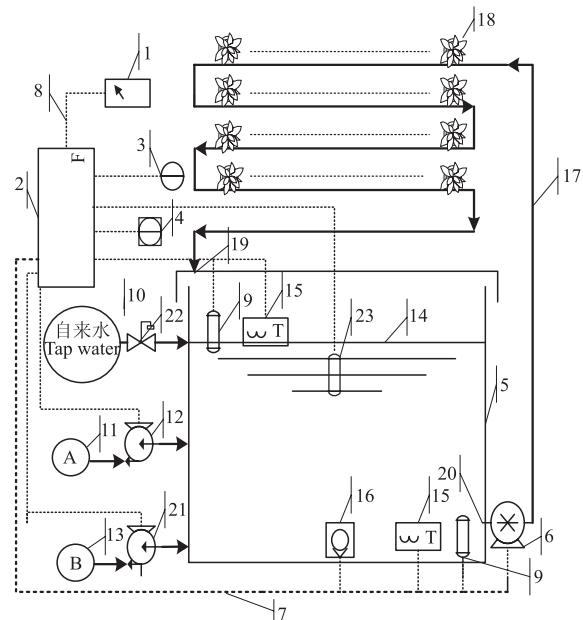
1 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统设计

本研究以梯架式水培阳台蔬菜机为研究对象, 以微控器为整个营养液 EC 自适应控制系统的主控器, 以 EC 传感器实时采集蔬菜机营养液混合罐内的 EC 值作为系统反馈并传入微控器, 以温湿度、光照强度、pH 等传感器采集蔬菜机外界环境参数、营养液混合罐内混合营养液 pH 等参数送入微控器并实时显示到液晶屏上。微控器根据系统自适应律和控制律实时调节蔬菜机蠕动泵、循环泵、搅拌泵的开闭和工作时间, 间接调节营养液混合罐中的营养液和自来水的添加量, 实现对整体蔬菜机营养液 EC 的自适应控制。

1.1 水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统组成

水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统示意图见图 1。微控器作为整个营养液 EC 控制系统的主控器; 温湿度传感器、光照强度传感器采集水培阳台蔬菜机外部小环境参数; 液位开关控制营养液混合罐中混合营养液体积, 使其保持恒定; 蠕动泵 A、蠕动泵 B 可分别将营养液 A、B 泵入营养液混合罐中, 搅拌泵将营养液和自来水搅拌后, 通过循环泵不断将营养液混合罐内搅拌好的混合营养液抽送至蔬菜机最高层; 最高层营养液通过重力作用蛇形流至下面几层 PVC 给水管中。至此, 完成一次水培阳台蔬菜机的混合营养液供应。同时在营养液混合罐的混合营养液出口和营养液入口附近各放置 1 个 EC 传感器和防水型温度传感器, 温度传感器对营养液混合罐内 2 个位置的 EC 传感器进行温度补偿, 可准确获取混合营养液出口、入口处 2 个位置不同温度下

的 EC 值, 将其平均值作为控制系统该时刻的 EC 值; 同时, 将 pH 传感器置于营养液混合罐的中间位置, 实时采集混合营养液的 pH 值, 为控制系统扰动分析提供系统依据。



1: 显示屏; 2: 微控器; 3: 光照强度传感器; 4: 温湿度传感器;
5: 营养液混合罐; 6: 循环泵; 7: 信号线束; 8: 信号线;
9: EC 传感器; 10: 自来水; 11: 营养液 A; 12: 蠕动泵 A;
13: 营养液 B; 14: 混合营养液; 15: 温度传感器; 16: 搅拌泵;
17: PVC 给水管; 18: 水培蔬菜; 19: 营养液入口; 20: 混合营养液出口;
21: 蠕动泵 B; 22: 液位开关; 23: pH 传感器
1: Display screen; 2: Control box; 3: Illuminance sensor;
4: Temperature and humidity sensor; 5: Mixing tank of nutrition liquid and water; 6: Circulating pump; 7: Signal harness;
8: Signal line; 9: EC sensor; 10: Tap water; 11: Nutrition fluid A;
12: Peristaltic pump A; 13: Nutrition fluid B; 14: Mixed liquid;
15: Temperature sensor; 16: Mixing pump; 17: PVC pipe;
18: Hydroponic vegetables; 19: Circulating fertilizer liquid inlet;
20: Mixed fertilizer outlet; 21: Peristaltic pump B;
22: Liquid level switch; 23: pH sensor

图 1 水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统

Fig. 1 Diagram of EC control system for nutrient solution of veranda vegetable machine

1.2 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统硬件组成及主要硬件选型

1.2.1 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统硬件组成 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统通过显示屏实现人机界面交互, 其硬件结构见图 2。电源模块为微控器及外围电路供电; EC 传感器经过放大电路将采集到的实时 EC 值传入微控器, 混合营养液中的温度传感器将采集到的温度作为 EC 传感器的温度补偿。蔬菜机外部的温湿度、光照强度以及营养液混合罐中的 pH 传感器实时采

集外界参数并传入微控器,为整个系统的外部扰动分析提供系统参数。微控器根据系统自适应控制方法,驱动蠕动泵 A 和蠕动泵 B,分别滴加营养液 A、B,同时搅拌泵自动开启对混合营养液的搅拌。搅拌完成后,循环泵每隔一段时间打开一次,将营养液混合罐中的混合营养液泵入 PVC 给水管,为蔬菜提供养分。显示屏可实时显示当前蔬菜机的温度、光照强度、EC 值、pH 值以及种植天数等信息,供用户查看。同时,语音播报模块可实现人对显示屏操作时的即时语音播报。

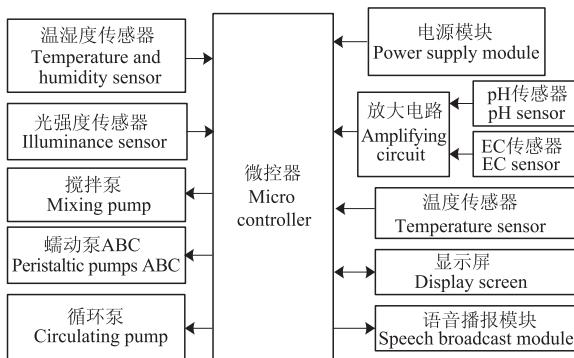


图 2 水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统硬件结构

Fig.2 Hardware structure diagram of EC control system for nutrient solution of veranda vegetable machine

1.2.2 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统主要硬件选型

1.2.2.1 微控器 选用 STM32F103RCT6 芯片,主频为 72 MHz,32 位。外围设备有电机控制 PWM 接口,程序容量为 256 K。

1.2.2.2 温湿度传感器 选用 DHT11,温度的测量精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,温度量程为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$,温度分辨率为 1°C ,供电电压为 $3.3\sim 5.5\text{ V}$ 。

1.2.2.3 蠕动泵 选用 KPP-S04DHL,其额定电压为 3 V、功率为 5 W,其硅胶管直径为 1 mm(可更换),主要用于精确吸取营养液 A、B 和自来水,并将其添加到营养液混合罐中。

1.2.2.4 循环泵 选用 Zp1-600,工作电压为直流 12 V、最大扬程为 2.5 m、额定功率为 12 W 的微型潜水泵。

1.2.2.5 光照强度传感器 选用 ZD-6 照度传感器,测量范围为 $0\sim 2\,000\text{ lx}$,分辨率为 1 lx ,使用环境温度范围为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2.6 EC 传感器 选用 SC210G 传感器,工作范围为 $0\sim 5\text{ dS/m}$,工作电压为 $0\sim 5\text{ V}$,测量精度为 0.1 dS/m ,用于测量营养液混合罐中混合营养液出口、入口处的 EC 值。

1.2.2.7 搅拌泵 选用直流 12 V 供电、 0.5 m 扬程、 2 W 功率的小型水泵,主要用来搅拌营养液与自来水,缩短其混合时间,增加营养液混合的均匀度。

1.2.2.8 温度传感器 选用高温型 DS18B20 防水型数字温度传感器,具有耐高温并可长期使用的水温探头, $3\sim 5\text{ V}$ 供电,用来测量营养液混合罐出口、入口处混合营养液的温度,并作为上述两处 EC 传感器的温度补偿。

1.2.2.9 pH 传感器 选用 pH 复合电极,测量范围为 $0\sim 14$,测量温度为 $0\sim 80^{\circ}\text{C}$,碱误差 $< 15\text{ mV}$,响应时间 $< 2\text{ min}$,可为系统的扰动分析提供依据。

1.2.2.10 显示屏 选用 DMTFT-28TFT 屏,驱动芯片为 ILI9320,接口类型为并口 8 位,兼容 12864 接口,提供友好的人机交互接口。

1.2.2.11 语音播报模块 选用 WT588M01 语音模块,支持 DCA/PWM 串口控制模式,通过串口控制模式实现对显示屏人机操作的语音播报。

1.3 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统控制器设计

1.3.1 水培阳台蔬菜机营养液 EC 模型参考自适应控制器设计 模型参考自适应系统一般由参考模型、对象模型、自适应律和控制律组成,当对象模型发生变化时,其通过自适应律校正控制律参数,使对象模型输出跟随参考模型输出^[7]。

在实际生产中,水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统对象模型易在外界环境参数发生较大变化时发生改变,这将使其 EC 控制系统的响应时间难以预测,同时系统稳定性变差,无法实现对水培阳台蔬菜机营养液 EC 的准确、快速、稳定的控制。基于此,采用基于模型参考自适应控制理论设计水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统的控制器,控制器结构框图见图 3。首先根据营养液 EC 系统的实际模型,建立与被控对象相同阶次、响应输出理想的营养

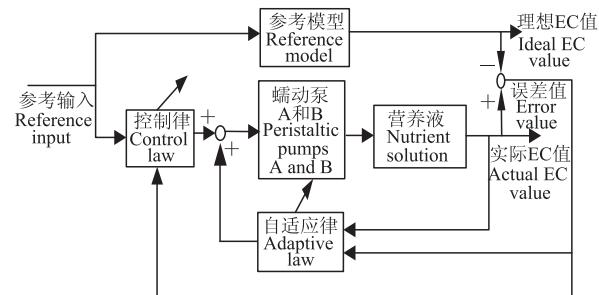


图 3 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统控制器结构框图

Fig.3 Controller block diagram of EC adaptive control system for nutrient solution of veranda vegetable machine

液 EC 参考模型。再根据李雅普诺夫稳定性原理设计系统的控制律和自适应律。最后,判断理想 EC 值与实际 EC 值之间的误差,如果该误差的绝对值 $< 0.1 \text{ mS/cm}$,则系统调节完成。否则,系统将通过控制律和自适应律调节蠕动泵 A 和蠕动泵 B 的开断时间等,使理想 EC 值与实际 EC 值之间误差的绝对值 $< 0.1 \text{ mS/cm}$,保证系统实际输出对理想输出具有很好的跟随特性,从而实现对水培阳台蔬菜机营养液 EC 系统的模型参考自适应控制。

1.3.2 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统数学模型试验分析 进行被控对象数学模型推导前,首先进行营养液与自来水的混合试验。以某公司生产的浓缩植物生长营养液(营养液 A、B)作为试验用营养液,用于调节无土栽培混合营养液的 EC 值。以本地自来水作为试验用水。通过控制营养液(营养液 A、B 等体积混合)及自来水的加入量实现对营养液 EC 值的调节。因此,营养液 EC 值调节的关键点是营养液与自来水的添加比例、将其混合后混合营养液的 EC 值及其内在数学关系。

配制营养液和自来水的混合营养液,记录混合营养液中自来水体积($V_{\text{水}}$)、营养液体积(V_{AB})及其比值($V_{\text{AB}}/V_{\text{水}}$);将 EC 传感器和相对应的温度传感器置于混合营养液中部,待营养液与自来水混合均匀且传感器读数稳定时,读取 EC 值和温度值;将读取的 EC 值进行温度补偿计算,记录补偿后的 EC 值,设置营养液 A、B 和自来水体积,按上述方法进行营养液混合试验,结果见表 1。将数据代入 MATLAB 软件进行拟合,拟合曲线见图 4。其关系式为:

$$EC = 26.18 V_{\text{AB}}/V_{\text{水}} + 0.4586 \quad (1)$$

表 1 水培阳台蔬菜机营养液混合试验结果

Tab. 1 Test results of mixed fertilizer solution of nutrient solution and tap water of veranda vegetable machine

$V_{\text{水}}/\text{mL}$ V_{Water}	V_{AB}/mL	$V_{\text{AB}}/V_{\text{水}}$ $V_{\text{AB}}/V_{\text{Water}}$	EC/ (mS/cm)
100	4	0.040	1.52
100	6	0.060	2.07
100	8	0.080	2.56
100	10	0.100	3.05
120	10	0.083	2.62
140	10	0.071	2.33
200	10	0.050	1.79
250	10	0.040	1.53
300	10	0.033	1.33
350	10	0.029	1.21
400	10	0.025	1.08
100	2	0.020	0.95

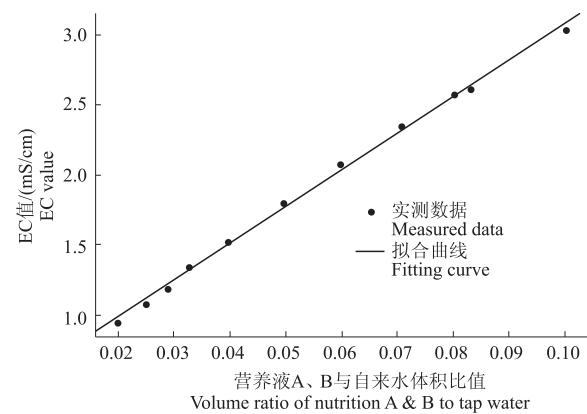
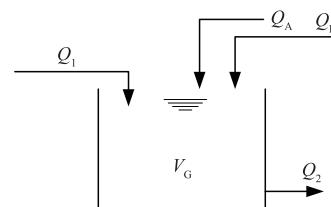


图 4 水培阳台蔬菜机营养液 A、B 与自来水体积比值与 EC 值的关系曲线

Fig. 4 Curve diagram of the relation between volume ratio of nutrient solution A, B to tap water and EC value of veranda vegetable machine

1.3.3 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统建模 混合营养液的制备,是先将自来水和营养液加入营养液混合罐,以搅拌泵搅拌混合,再由循环泵抽取混合营养液至水培阳台蔬菜机的 PVC 给水管中,从而实现对蔬菜营养液的供应。其中,自来水和营养液不断注入营养液混合罐,循环泵不断抽取混合营养液至水培阳台蔬菜机的 PVC 给水管中。系统总体处于动态平衡,液体的有效混合体积保持不变。因此,对营养液实际混合过程进行分析时,可将被控对象进行模型简化。简化模型见图 5。其中,自来水注入营养液混合罐的流量为 $Q_1 = 200 \text{ mL/s}$ 。注入的营养液 A、B 的总体积一般不超过 8 mL,远远 $< 10 \text{ L}$ (营养液混合罐的容积)。因此,将注入营养液 A、B 的总体积忽略,设定营养液混合罐中的营养液有效混合体积为 $V_G = 10 \text{ L}$ 。基于此,可得营养液有效混合时间为 $T_r = T_G/Q_1 = 50 \text{ s}$ 。



Q_1 :自来水进水流量; Q_2 :混合营养液输出的流量; Q_A :营养液 A 加液流量; Q_B :营养液 B 加液流量; V_G :营养液混合罐的总体积

Q_1 :Nttering flow of tap water; Q_2 :Flowing out flow of mixed fertilizer solution; Q_A :Adding flow of nutrient solution A; Q_B :Adding flow of nutrient solution B;

V_G :The total volume of mixed tank of nutrient solution

图 5 水培阳台蔬菜机营养液与自来水混合简化模型

Fig. 5 Simplified mixed model diagram of nutrient solution and tap water of veranda vegetable machine

实际混合过程中,营养液调节是将营养液A、B同时以1:1(体积比)加至自来水中完成的,每次动作蠕动泵A、B会同时吸取营养液A、B到营养液混合罐内。供电电压为5V时,营养液A、B的注入流量分别为 Q_A 、 Q_B 。本研究用 Q_{AB} 代表营养液A、B的总流量,即 $Q_{AB} = Q_A + Q_B = 2 \text{ mL/s}$ 。

根据物料守恒定律与公式(1),得出系统的营养液混合过程动态描述方程:

$$T_p \frac{dEC(t)}{dt} = \frac{26.18Q_{AB}(t)}{Q_1(t)} + 0.4586 - EC(t) \quad (2)$$

上式中, $Q_1(t)$ 为不同时刻的进水流量,其中 $K = 16.18/Q_1 = 26.18/200$,为常数。当系统处于动态平衡时,即加入营养液混合罐的自来水和营养液的流量与混合营养液输出的流量相等时,可将实际进水流量作为常数^[6]。而营养液在混合过程中,营养液A、B是由蠕动泵抽到营养液混合罐中,蠕动泵从收到微控器的动作信号,再到营养液输送至营养液混合罐需要一定的动作时间。其中,吸管长为10cm,营养液流速为5cm/s,则可得到该动作时间(τ_1)为2s。营养液输送至营养液混合罐后,靠搅拌泵加快液体的混合。从营养液输送至营养液混合罐,再到基本混合均匀,也需要一定的时间。反复试验,得出该混合时间(τ_2)为8s。由此可知,该系统具有纯滞后特性,滞后时间(τ)为10s。同时由 $\tau = (1 - \lambda) T_r$ 和 $T_p = \lambda T_r$ ^[8],可推导出 $T_p = 0.8 T_r = 40 \text{ s}$ 。其中, T_p 为制备过程时间常数, λ 为溶液的混合系数, $\lambda \in [0, 1]$ 。

又从图4可知,当只添加自来水时,混合营养液的EC值不为0,这是由于自来水自身带有一定浓度的离子,具有较小的EC值。此时,将只添加自来水的混合营养液EC值近似作为自来水的EC值,即为0.4586 mS/cm。至此,本研究设置新的系统输出量 $EC'(t)$,令 $EC'(t) + 0.4586 = EC(t)$,进一步简化本系统动态描述方程,等价动态方程为:

$$T_p \frac{dEC'(t)}{dt} = Q_{AB}(t)K - EC'(t) \quad (3)$$

根据上述系统动态方程,可得系统的输入量为 Q_{AB} ,输出量为 EC' 。通过拉普拉斯变换,将系统动态描述方程转换到频域,则传递函数为:

$$\frac{EC'(s)}{Q_{AB}(s)} = G_p(s) e^{-\tau s} = \frac{26.18}{8000s + 200} e^{-10s} \quad (4)$$

1.3.4 水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统参考模型选择 参考模型选择是自适应控制系统的最重要组成部分,需要根据控制对象特性慎重选择。参考模型性能过高,自适应控制难以达到,性能过

低,则难以体现其优越性^[9-10]。本研究水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统的参考模型选择应遵循以下原则。

(1)水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统的参考模型与实际被控模型阶数相同,保证实际被控模型对于理想模型的跟踪特性。根据1.3.3可知,水培阳台蔬菜机营养液EC控制系统的参考模型为一阶纯滞后系统,则营养液EC自适应控制系统参考模型也为一阶纯滞后系统,滞后时间相等,均为 $\tau = 10 \text{ s}$ 。

(2)消除控制过程的系统超调,保证水培阳台蔬菜机营养液EC调节过程的稳定性。

(3)系统响应时间控制在40s左右。当设置响应时间<40s时,水培阳台蔬菜机营养液EC控制系统较难实现,且其在不确定扰动下的鲁棒性变差;当响应时间>40s后,系统进入稳定状态时间延长,实时性变差。

因此,在满足上述设计原则的基础上,反复进行仿真试验,得出水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统理想参考模型的传递函数为:

$$\frac{EC_m(s)}{Q_m(s)} = \frac{K_m}{s + a_m} e^{-\tau s} = \frac{0.2}{s + 0.2} e^{-10s} \quad a_m > 0, K_m > 0 \quad (5)$$

1.3.5 水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统控制律与自适应律设计 水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系统为一阶线性定常系统,同时,由于被控对象模型与参考模型的滞后时间相同,可先不考虑滞后环节,待设计完成后再将其统一加入到控制系统中。由此,设计出系统整体结构框图,如图6所示,控制律设为 $c_0(t)$,自适应律设为 $d_0(t)$ 。

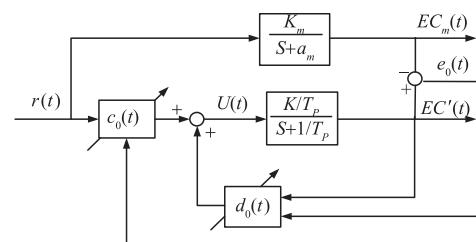


图6 水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制器设计框图

Fig. 6 Design block diagram of EC adaptive controller for nutrient solution of veranda vegetable machine

根据系统输入输出特性,分别写出被控对象与参考模型的时域描述方程如下:

$$\dot{EC}'(t) = -(1/T_p)EC'(t) + (K/T_p)U(t) \quad (6)$$

$$\dot{EC}_m(t) = -a_m EC_m(t) + K_m r(t) \quad (7)$$

根据水培阳台蔬菜机营养液EC自适应控制系

统设计框图,可得:

$$U(t) = c_0(t)r(t) + d_0(t)EC'(t) \quad (8)$$

公式(8)代入公式(6),可得:

$$\begin{aligned} \dot{EC}'(t) &= [Kd_0(t)/T_p - 1/T_p]EC'(t) + \\ &(K/T_p)c_0(t)r(t) \end{aligned} \quad (9)$$

再将参考模型输出 EC_m 与实际输出 EC' 的差值设定为 e_0 ,其满足如下公式:

$$e_0(t) = EC'(t) - EC_m(t) \quad (10)$$

$$\dot{e}_0(t) = \dot{EC}'(t) - \dot{EC}(t) \quad (11)$$

将公式(7)、(9)、(10)代入(11),可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_0(t) &= -a_m e_0(t) + (K/T_p)\{[c_0(t) - K_m T_p/K] \\ &r(t) + [d_0(t) - (1 - a_m T_p)/K]EC'(t)\} \end{aligned} \quad (12)$$

则理想状态下,若令:

$$c_0(t) = c_0 = \frac{K_m T_p}{K} = 61.12 \quad (13)$$

$$d_0(t) = d_0 = \frac{1 - a_m T_p}{K} = -53.48 \quad (14)$$

即可令实际模型与参考模型完全匹配。

但系统遭受外界扰动时,系统则会通过调节 $c_0(t)$ 和 $d_0(t)$ 来克服外界扰动,此时设参数误差为:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_r(t) \\ \phi_{EC'}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0(t) - c_0 \\ d_0(t) - d_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

则公式(11)可变换为:

$$\dot{e}_0(t) = -a_m e_0(t) + K/T_p[\phi_{EC'}(t)EC'(t) + \phi_r(t)r(t)] \quad (16)$$

为验证系统稳定性,选取李氏函数如下:

$$V(e_0, \phi_r, \phi_{EC'}) = e_0^2/2 + K/(2gT_p)(\phi_r^2 + \phi_{EC'}^2) \quad (\text{正定}), \text{其中 } g > 0 \quad (17)$$

对公式(17)进行求导变换,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_0, \phi_r, \phi_{EC'}) &= -a_m e_0^2 + (K/T_p)\phi_{EC'}[e_0 EC' + \\ &\dot{d}_0(t)/g] + (K/T_p)\phi_r[e_0 r + \dot{c}_0(t)/g] \end{aligned} \quad (18)$$

当令 $e_0 EC' + \dot{d}_0(t)/g = 0$ 和 $e_0 r + \dot{c}_0(t)/g = 0$ 时,则可化简公式(18)为:

$$-\dot{V}(e_0, \phi_r, \phi_{EC'}) = a_m e_0^2 \geq 0 \quad (19)$$

此时,通过公式(19)可知系统半正定,即系统稳定。因此,可得出自适应律和控制律如下:

$$\dot{c}_0(t) = -ge_0(t)r(t) \quad (20)$$

$$\dot{d}_0(t) = -ge_0(t)EC'(t) \quad (21)$$

根据以上数学推导,即可设计出完整的水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统控制器实际框图,见图 7。

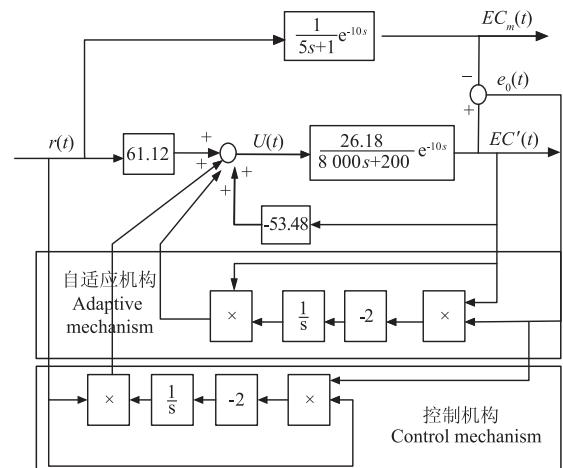


图 7 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制器实际框图

Fig. 7 Actual block diagram of EC adaptive controller for nutrient solution of veranda vegetable machine

2 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统仿真验证

根据设计出的水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应系统,使用 MATLAB 中的 Simulink 仿真模块对水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统进行系统仿真验证。水培阳台蔬菜机营养液 EC 值调节过程中,其 EC 值设置一般为 1.6~2.5 mS/cm。因此,本研究选取系统的期望输出 $EC = 2.0$ mS/cm 进行系统仿真验证。

当水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统参考模型和实际系统模型输入终值为 2.0 的阶跃信号时,仿真结果如图 8 所示。可以看出,参考模型在 40 s 时基本达到系统期望值,而实际模型在 90 s 时趋于 0.25 mS/cm,无法达到系统的期望输出。

根据设计出的自适应控制律和控制律,对实际

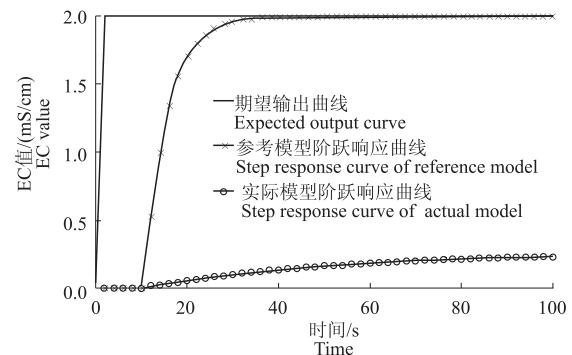


图 8 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统参考模型和实际模型的阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response diagram of reference model and actual model of EC adaptive control system for nutrient solution of veranda vegetable machine

水培阳台蔬菜机营养液 EC 系统进行自适应控制,其仿真结果见图 9。可以看出,实际系统从 10 s 后开始跟随参考模型的输出特性,40 s 左右达到系统期望值,保持与参考模型相同的输出特性。

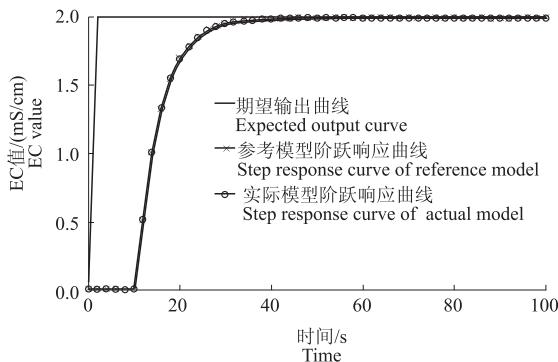


图 9 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统实际模型跟随曲线

Fig. 9 Following curve diagram of actual model of EC adaptive control system for nutrient solution of veranda vegetable machine

水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统在实际生产中,温度、湿度和光照强度等的突然增大或者减小,新加入营养液后由于其 pH 值与混合营养液的 EC 值耦合作用,会使系统的特性发生改变^[4,11]。这是因为系统外部扰动会使系统的负反馈值突然增大或者减小,对应于实际系统时,等同于在系统输入端加入 1 个阶跃信号,故可依据该思路对系统进行鲁棒性验证。

根据上述分析,在 50 s 时给系统加入阶跃值为 1.0 的系统扰动,系统仿真结果如图 10 所示。仿真结果显示,系统在加入扰动后,经历 10 s 的系统滞后,在 60 s 时开始出现微小波动,但其误差绝对值 < 0.1 mS/cm,证明水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统具有较好的鲁棒性和输出特性。

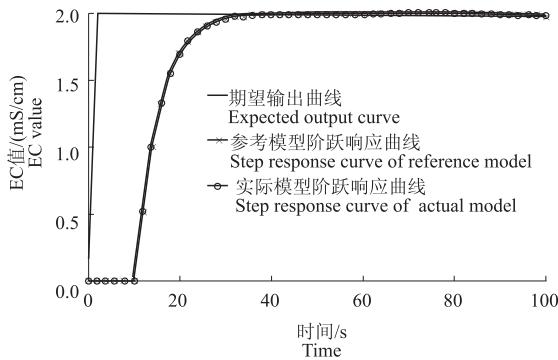


图 10 水培阳台蔬菜机营养液 EC 自适应控制系统添加阶跃扰动的输出曲线

Fig. 10 Output curve of control system of EC adaptive control system for nutrient solution of veranda vegetable machine after adding step disturbance

3 结论与讨论

当前水培阳台蔬菜机营养液 EC 控制系统多数建立在系统模型已知和控制过程参数相对固定的基础上,对于外界环境的多变和不确定性等因素缺乏必要的研究,尤其当系统受到较大的、不确定的外界因素扰动的情况下,更不容易保证较快的收敛速度和理想的输出特性。

本研究基于物料守恒关系对水培阳台蔬菜机营养液 EC 调节过程进行分析建模,依据被控对象模型、响应时间、控制性能等指标选取了系统参考模型,采用李雅普诺夫稳定性原理设计出自适应律和控制律,同时证明了该系统的稳定性。仿真实验得出,系统在 40 s 左右可进入稳定状态,同时在外界温度、湿度等突然增大或者减小,以及混合营养液 pH 值等变化时,系统控制绝对误差 < 0.1 mS/cm,具有较好的输出特性、鲁棒性和控制精度,在小型阳台施肥机的营养液控制方面具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 刘婧. 无土栽培技术的应用与发展 [J]. 北方园艺, 2012(16):204-206.
- [2] 高锐涛, 杨洲, 曹玉华, 等. 阳台蔬菜种植设备的优化设计 [J]. 机械设计, 2013(5):116-118.
- [3] 李莉, 王俊衡, 孟繁佳, 等. 基于二次混合机构的营养液调控模型与 PID 算法实现 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(22):100-106.
- [4] 李顾, 武付闯. 基于云模型推理的施肥机 pH 值和电导率解耦控制 [J]. 浙江农业学报, 2017, 27(9):1172-1178.
- [5] 袁巧霞, 朱端卫, 武雅娟. 温度、水分和施氮量对温室土壤 pH 及电导率的耦合作用 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(5):1112-1117.
- [6] 牛寅, 张侃渝. 轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程变论域模糊控制 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(3):45-52.
- [7] LEKSONO E, PRATIKTO. Adaptive speed control of induction motor with DSP implementation [C]//Industrial electronics conference. Piscataway: IEEE, 2004:1423-1428.
- [8] 袁洪波, 李莉, 王俊衡, 等. 温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):27-32.
- [9] 方强, 陈立鹏, 费少华, 等. 定位器模型参考自适应控制系统设计 [J]. 浙江大学学报, 2013, 47(12):2234-2242.
- [10] MONHA KRISHNA S, FEBIN DAYA J L. MRAS speed estimator with fuzzy and PI stator resistance adaptation for sensorless induction motor drives using RT-lab [J]. Perspectives in Science, 2016, 8(4):121-126.
- [11] 毛罕平, 胡云辉, 左志宇, 等. 设施栽培中母液加入量与营养液 EC/pH 值的回归模型 [J]. 农机化研究, 2012, 34(2):149-152.