

大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机设计与试验

刘林^{1,2} 李扬^{1,2} 杨坤¹ 苑进^{1,2} 郝明¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 为提高大田施肥精度和水肥利用效率,进一步促进灌溉施肥技术在大田中的应用,设计了大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机并进行样机试验。首先,对一体机的移动式行走架、精量配肥装置和首部枢纽装置进行机械设计。其次,基于作物不同生长期所需水肥量,结合实时测定土壤墒情信息,设计3段式全自动灌溉施肥时间分配模型和母液浓度动态计算方法;建立母液浓度动态调控数学模型,针对不同类型颗粒肥溶解时间差异问题,设计一种含 Smith 预估器的 PID 切换控制方法快速稳定母液浓度,并通过 Simulink 对控制方法进行仿真验证;在此基础上,设计并实现一体机的中央控制系统,集成灌溉施肥时间分配模型和母液浓度动态调控方法,实现全自动灌溉施肥功能和母液浓度精准调控;最后,在大田环境中对试制样机开展灌溉施肥试验,测定注肥口电导率(EC)响应曲线并进行分析,结果表明:EC 响应曲线呈3段式变化,表明一体机能够按设计的时间分配模型对大田作物进行全自动作业;施肥阶段 EC 值平稳,误差波动幅度小,过渡时间短、坡度陡、超调量小,表明针对不同类型的颗粒肥,提出的切换控制方法可以快速稳定母液浓度。

关键词: 大田; 灌溉施肥; 移动式一体机; 时间分配模型; 切换控制

中图分类号: S274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0124-10

Design and Experiment of Mobile Irrigation and Fertilization Integrated Machine of Precision Fertilizer in Field

LIU Lin^{1,2} LI Yang^{1,2} YANG Kun¹ YUAN Jin^{1,2} HAO Ming¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: In order to improve precision of fertilization and efficiency of water and fertilizer utilization in the field, which can further promote flexible application of irrigation and fertilization technology in the field, the mobile irrigation and fertilization machine of precision fertilizer in the field was designed. Firstly, the mechanical design of mobile walking frame, precision fertilizer dispensing device and the first pivot device of integrated machine was carried out. Secondly, taking wheat as an example, based on the amount of water and fertilizer needed by crops in different growing periods, combined with the real-time measurement of soil moisture information, a three-stage automatic fertilization time distribution model and a dynamic calculation method of mother liquor concentration were designed. A mathematical model for dynamic control of mother liquor concentration was established. A PID switching control method with Smith predictor was designed to rapidly stabilize the concentration of mother liquor, and the control method was simulated by Simulink to verify the difference of dissolution time of different types of granular fertilizer. On this basis, the central control system of integrated machine was designed, which integrated the time distribution model of irrigation fertilization and the dynamic control method of mother liquor concentration to realize automatic irrigation fertilization function and accurate control of mother liquor concentration. Finally, the experiment of irrigation and fertilization was carried out in the field environment. The response curve of EC of the injector was measured and analyzed. The results showed

收稿日期: 2019-03-21 修回日期: 2019-05-31

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目、山东省重点研发计划项目(2017CXGC0206)、国家自然科学基金项目(51675317)和山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTD14)

作者简介: 刘林(1987—),男,实验师,博士生,主要从事精确农业与智能装备研究,E-mail: swzcr@163.com

通信作者: 苑进(1972—),男,教授,博士,主要从事智能机电控制技术研究,E-mail: juyan@sdau.edu.cn

that the response curve of EC was changed in three segments, which indicated that integrated machine can carry out automatic operation of field crops according to the designed time distribution model. Because of small error fluctuation, short transition time, steep slope and small overshoot, the EC value of fertilization stage was stable, which indicated that the proposed switching control method can quickly stabilize the concentration of mother liquor for different types of granular fertilizer. The research of this machine was of great significance to the field integration and automatic precision irrigation and fertilization.

Key words: field; irrigation and fertilization; mobile integrated machine; time allocation model; switching control

0 引言

我国大力发展现代化集约型农业,通过水肥一体化技术,将水肥溶液按比例由管路定时、定量、同步供给作物,实现节水节肥、高产增收的效果,已广泛应用于农业各领域的经济作物栽培^[1]。但在大田粮食作物生产中,受到工况、成本、动力等方面制约,水肥一体化技术难以开展推广应用,水肥供应不同步现象严重。通过设计大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机,将大田广泛使用的颗粒水溶肥料按比例掺混,在控制灌溉量和施肥精度基础上,提高系统的易用性、移动性、复用性,方便设备接入田间灌溉网,实现设备即插即用功能,有利于降低系统投入成本,提高农田投入产出比,对促进水肥一体化技术在大田中的应用有重要意义。

在国外已有的水肥一体化系统研究成果中,较有代表性的是以色列 Eldarshany 公司提供的系列化自动灌溉施肥产品^[2],其使用先进的 Galileo/Elgal 系列计算机控制系统,结合灵活多变的组态化操作界面能够为用户提供专家级灌溉施肥服务;加拿大 CCS 公司研发了主动精确注肥水肥一体机(PDI 技术)管理系统^[3],应用于温室气候管理及灌溉系统;以色列 Netafim 公司则作为滴灌技术的发明者,将灌溉施肥产品进行了标准化、规格化^[4]。在国内,李加念等^[5]设计了文丘里变量灌溉施肥装置,采用 PWM 技术控制电磁阀改变文丘里进出口压力差,准确调节吸肥量;阮俊瑾等^[6]设计了一种能实现自动灌溉、施肥、配方、混肥为一体的球混式水肥灌溉系统,但该系统主要解决面向温室大棚领域的液态肥料混合问题;周亮亮^[7]研制了温室灌溉施肥控制系统,采用基于 PLC 模糊系统控制,可依据作物需求供给水和养分。

已有相关研究多针对设施农业开展,直接抽取液体肥料进行混合灌溉,缺少大田环境下采用颗粒水溶肥料实时配比掺混、溶解灌溉的相关研究成果。本文研究大田水肥一体化技术,针对大田环境动力受限、系统投入成本高、颗粒肥实时比例掺混溶解等

问题,设计大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机;研究全自动灌溉施肥时间分配模型和母液浓度动态计算方法;设计实现一体机中央控制系统,研究并集成快速稳定母液浓度的控制算法;最后通过在大田环境中对试制样机开展自动化灌溉施肥试验,验证一体机系统的可行性和实用性。

1 工作原理与机械结构设计

1.1 工作原理

大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机(图 1)的机械部分包括移动行走架、精量配肥装置和首部枢纽装置。其中,移动行走架便于一体机在田间移动,精量配肥装置用于肥料比例掺混溶解和母液浓度动态调控,首部枢纽装置用于输送灌溉水和肥料母液,并为微喷带提供灌溉压力。

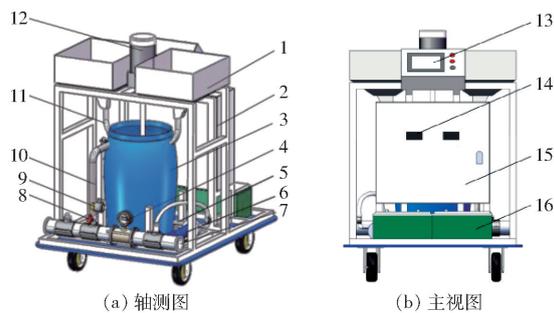


图 1 一体机结构示意图

Fig. 1 Schematics of integrated machine structure

1. 肥料漏斗 2. 移动行走架 3. 母液罐 4. 主管道流量传感器
5. 母液罐出水管 6. 注肥泵 7. 主管道 8. 电磁阀 9. 支管道流量传感器 10. 母液罐进水管 11. 排肥口 12. 搅拌电机
13. 工控触摸屏 14. EC 值显示器 15. 蓄电池 16. 控制箱

农户通过手持式测墒仪测量即时墒情,并在一体机上输入测墒信息、补灌面积和作物类型,一体机针对不同作物的灌溉施肥农艺要求计算施肥量和灌溉量,由中央控制单元实现全自动变比配肥、母液浓度动态计算调控和灌溉施肥控制。

一体机整体结构原理如图 2 所示。中央控制单元由工控触摸屏和下位机 PLC 控制板组成,其中工控触摸屏提供交互式良好的人机界面,PLC 控制板提供对注肥泵、排肥电机、搅拌电机和电磁阀的驱动

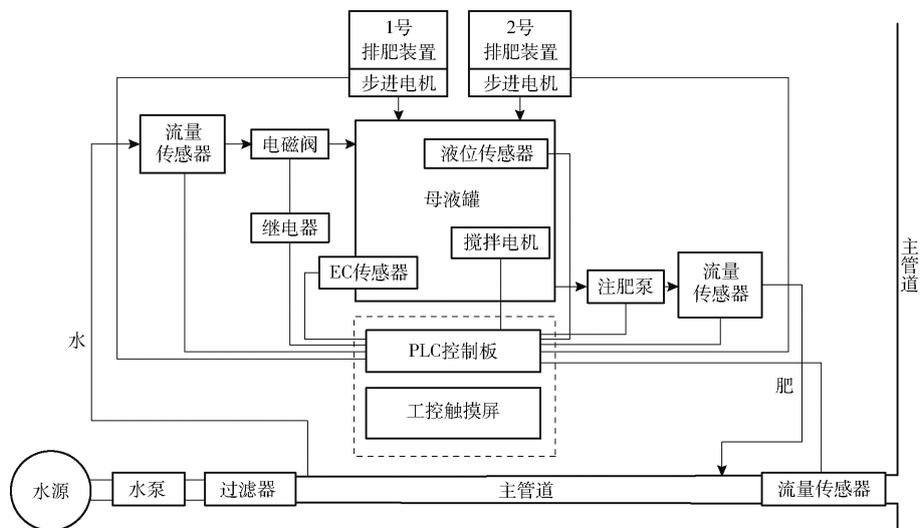


图2 移动式大田精量配肥灌溉施肥一体机原理图

Fig.2 Schematic of mobile precision fertilizer farmland irrigation and fertilization machine

支持,并负责实时采集进出口流量、EC值(电导率)等信息。注肥时,通过在母液罐安装的EC传感器,实时监测母液浓度,控制排肥电机的转速调节肥料配比和排肥量,经溶解、搅拌作用后使母液浓度稳定在设定值,再由注肥泵将母液泵入主管道,实现肥料“随排、随配、随注”。母液罐进出口管道上分别装有流量传感器,母液配制过程中,可通过液位传感器检测母液罐中的液位,再通过控制电磁阀和注肥泵使母液罐内水的体积保持稳定。

1.2 移动行走架

移动行走架由不锈钢焊接而成,底部四角装有2个万向轮和2个定向轮,采用手推式结构,便于移动和转向。架上固定有精量配肥装置、首部枢纽装置和中央控制系统等部件,整机采用蓄电池供电,解决了田间动力供应问题。

1.3 精量配肥装置

精量配肥装置由肥料漏斗、排肥电机、螺旋输送机以及搅拌过滤器组成,如图3所示。

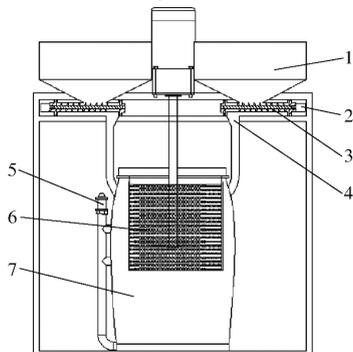


图3 精量配肥装置结构示意图

Fig.3 Structure diagram of precision fertilizer dispensing device

1. 肥料漏斗 2. 步进电机 3. 螺旋输送机 4. 排肥口 5. 液位传感器 6. 搅拌过滤器 7. 母液罐

工作时,精量配肥装置由步进电机通过减速器、联轴器驱动螺旋输送机,推进肥料在排肥口落入母液罐的过滤网桶中,经搅拌过滤器溶解。螺旋输送器的型号可根据施肥量计算得到,选用螺旋叶片直径为^[8]

$$D \geq K \sqrt[2.5]{\frac{Q_f}{\varphi \rho c}} \quad (1)$$

式中 D ——螺旋叶片直径,m

Q_f ——肥料输送量,t/h

ρ ——物料松散密度,t/m³

φ ——填充系数

K ——物料特性系数

c ——倾角系数

本文中选取肥料输送量 $Q_f = 0.07$ t/h,以尿素为准,物料松散密度 $\rho = 1.335$ t/m³,查DT II《固定式带式输送机设计选用手册》填充系数 $\varphi = 0.3$,查手册取物料特性系数 $K = 0.0632$,倾角系数 $c = 0.46$ 。将上述参数代入式(1)中,可得螺旋叶片直径 $D = 0.04$ m。水平布置时,螺距和螺旋轴直径为

$$S = K_1 D \quad (2)$$

$$d = K_2 D \quad (3)$$

式中 S ——螺距,mm

d ——螺旋轴直径,mm

K_1 ——螺距系数,一般为0.8~1.0

K_2 ——螺旋轴直径系数,一般为0.2~0.35

选取螺距系数 $K_1 = 1.0$,螺旋轴直径系数 $K_2 = 0.25$,将上述参数代入式(2)和式(3),计算得螺距 $S = 40$ mm,螺旋轴直径 $d = 10$ mm。

最终选择螺旋叶片直径为40 mm,螺旋轴直径为10 mm,螺距为40 mm的螺旋输送机。

搅拌过滤器主要对过滤网桶、搅拌电机和搅拌

叶片进行选型。一般地,选择 100 目以上的过滤网就能满足水肥一体化的技术要求。搅拌叶片类型通过查询《搅拌与混合设备选用手册》,可知肥料溶解宜选用涡轮式搅拌叶片。此外,样机中选用直流搅拌电机,由蓄电池供电,其额定功率 P_M 计算式^[9]为

$$P_M = \frac{K_q P_s + P_m}{\eta} \quad (4)$$

其中 $P_s = K_3 P_v V$ (5)

式中 P_s ——搅拌轴功率, kW
 K_q ——启动时的额定功率系数,一般为 1
 P_m ——轴密封处摩擦损失功率, kW
 η ——传动系统机械效率,一般为 0.8~0.9
 K_3 ——功率倍数,一般为 1.2~1.8
 P_v ——平均搅拌功率,一般为 0.3~0.4 kW/m³
 V ——母液罐溶液体积, m³

因样机的搅拌轴内嵌入母液罐中,认为轴密封处摩擦损失功率 $P_m = 0$,传动系统的机械效率 $\eta = 0.8$,取功率倍数 $K_3 = 1.2$,平均搅拌功率 $P_v = 0.4$ kW/m³,母液罐容量 $V = 0.06$ m³,经计算最终选用搅拌电机额定功率为 36 W。

1.4 首部枢纽装置

首部枢纽是集中安装于系统进口部位的加压、调节、控制、净化、施肥、保护和测量等设备的集成,是为了正确选择和合理配置有关设备和设施,以保证微灌系统实现设计目标^[10]。

首部枢纽装置主要包括过滤器、电磁阀、母液罐、注肥泵、液位传感器、母液罐进水管和母液罐出液管。首先,灌溉水经管道引入首部枢纽装置,在首部的管道分为两路:一路水肥溶液经主管道输送至田间管网;另一路通过母液罐进水管将水输送进母液罐进行母液配置,母液再经注肥泵注入到主管道中。母液注入主管道之前,需经过搅拌过滤器和安装在母液罐出水管 120 目的过滤器的两级过滤,防止母液杂质注入灌溉管网中。

在配置母液时,为确保母液罐内液体的体积保持稳定,安装液位传感器,来实时测量母液罐中液体的液位,并通过电磁阀的通断控制母液罐中溶液的体积。此外,汽油机水泵作为整个管道系统的总动力,根据实际情况也可以选用潜水泵,考虑到水泵体积重量以及工作环境,不把水泵放在一体机内部,在灌溉施肥时需将一体机与水泵现接现用。

根据农艺要求^[11],小麦灌水定额为每 667 m² 的地块灌水 40~80 m³,考虑到移动性和时间效率问题,可选择水泵流量为 60 m³/h。

注肥泵流量需满足

$$Q_1 \geq Q_0 / K_4 \quad (6)$$

式中 Q_1 ——注肥泵流量, m³/h

K_4 ——母液稀释倍数

Q_0 ——水泵流量, m³/h

根据农艺要求和生产经验,母液稀释倍数 $K_4 \geq 100$,可满足灌溉施肥要求,求得注肥泵流量 $Q_1 \geq 0.6$ m³/h。

注肥泵出口压力

$$p_1 > p_0 \quad (7)$$

式中 p_1 ——注肥泵出口压力, MPa

p_0 ——主管道压力, MPa

在低压管道输水灌溉中,其管道压力一般不超过 0.4 MPa^[11],可求得注肥泵出口压力 $p_1 > 0.4$ MPa。

综上所述,注肥泵流量取 10 L/min,压力取 0.6 MPa。

2 全自动灌溉施肥时间分配模型

工作时,一体机通过设定的流程进行全自动灌溉施肥,按照大田灌溉农艺对灌溉施肥时间分配模型进行设计。通过在山东省多地市开展生产调研,以大田微喷灌水肥一体化技术为例,设计 3 阶段灌溉施肥时间分配模型:第 1 阶段为灌溉阶段,通过喷洒一定灌溉水增加土壤湿度,软化土壤,减缓肥液在根的周围下渗速度,利于肥料吸收;第 2 阶段为灌溉施肥阶段,一体机将比例掺混好母液泵入主灌溉管道,实现大田同步灌溉施肥的目的;第 3 阶段为灌溉阶段,一体机停止泵入母液,主管道内继续灌溉一定水量,利用灌溉水冲刷主管道和支管道,清除管道内肥液残留,避免微生物在管道内滋生。

2.1 灌溉水量计算

单次灌溉水量计算与作物类型、生长期、土壤含水率有关。参照桑晓光等^[12]的方法,通过仪器法实测数据计算单次灌溉水量,灌水定额公式为

$$M = 100H(W_{cut} - W_{cva}) \quad (8)$$

式中 M ——灌水总量, m³/hm²

H ——测墒土层深度, cm

W_{cut} ——目标土壤体积含水率, %

W_{cva} ——补灌前用仪器法测得的土壤体积含水率, %

以小麦为例,田间持水率取 19.7%,土壤容重取 1.37 g/cm³,不同生长期目标土壤含水率如表 1 所示^[13]。

2.2 灌溉时间模型设计

考虑到一体机在第 2 阶段泵入的水肥量远小于主管道流量,可计算出总灌溉时间 t_z 为

$$t_z \approx \frac{M}{Q} = t_{g1} + t_s + t_{g2} \quad (9)$$

表1 小麦不同生长期目标土壤含水率

Tab.1 Water content of target soil in different growing periods of wheat

	%		
生长期	相对含水率	质量含水率	体积含水率
出苗—越冬	62.5~67.6	12.3~13.3	16.9~18.2
越冬期	63.4~70.9	12.5~14.0	17.1~19.1
返青—拔节	64.5~72.2	12.7~14.2	17.4~19.5
拔节—抽穗	62.4~69.1	12.3~13.6	16.8~18.6
抽穗—成熟	64.2~72.7	12.6~14.3	17.3~19.6

式中 Q ——主管道流量, m^3/h

t_{g1} ——第1阶段灌溉时间, h

t_s ——第2阶段灌溉施肥时间, h

t_{g2} ——第3阶段灌溉时间, h

第1阶段灌溉时间取决于灌溉水在地层中的渗透速度和深度。为保证营养水分的充分吸收,作物在不同生长期对土层灌溉深度都有不同需求,以小麦不同生长期为例,其计划湿润层深度范围如表2^[11]。

表2 小麦不同生长期计划湿润层深度

Tab.2 Depth of planned wetting layer in different periods of wheat

生长期	计划湿润层深度 h_s	cm
出苗	30~40	
三叶	30~40	
分蘖	40~50	
拔节	50~60	
抽穗	50~80	
开花	60~100	
成熟	60~100	

第1阶段灌溉时间 t_{g1} 为

$$t_{g1} \approx \frac{h_s}{v_s} \quad (10)$$

式中 h_s ——初始灌溉水渗透深度, cm

v_s ——灌溉水渗透速度, cm/s

灌溉水渗透速度与土壤入渗速率、土壤初始含水率、土壤容重、孔隙度等物理性质有关,不同区域存在很大差异。灌溉时可以通过土壤湿度传感器,实时监测计划土层湿度,动态调控灌溉时间 t_{g1} 。此外,结合山东省多地市调查数据,实际灌溉时 t_{g1} 可采用经验值代替,在粗略计算时取 $t_{g1} \geq 10 \text{ min}$,可以满足大多数土壤类型的灌溉需求。

第2阶段时间分配决定了灌溉施肥浓度的大小。灌溉施肥浓度过大作物吸收后会引引起细胞质壁分离,严重时会造成细胞缺水而死亡,灌溉施肥浓度过小则对肥料吸收和作物生长不利。在测量方法中,施肥浓度通常以肥液中电导率(EC)的形式反映,肥液浓度与EC呈线性关系。根据李加念等^[14]

提出的肥液浓度与其电导率线性关系函数可以计算出相对应的浓度。具体函数关系式为

$$\rho_z = 0.209x - 0.026 \quad (11)$$

式中 ρ_z ——肥液浓度, %

x ——肥液电导率, mS/cm

以小麦为例,施肥时EC一般在1~3 mS/cm 范围内,根据式(11)计算浓度范围是0.18%~0.6%。考虑到相对于整个灌溉施肥过程,肥料溶解时间可忽略不计,计算 t_s 为

$$\frac{C_s}{Q\rho_{z_{\max}}} \leq t_s \leq \frac{C_s}{Q\rho_{z_{\min}}} \quad (12)$$

式中 $\rho_{z_{\min}}$ ——作物施肥浓度的下限

$\rho_{z_{\max}}$ ——作物施肥浓度的上限

C_s ——单次追肥量

一般来说,第3阶段时间 t_{g2} 可以通过总灌溉时间 t_z 分别减去第1、2阶段的时间得到,即

$$t_{g2} = t_z - (t_{g1} + t_s) \quad (13)$$

另一方面,管道冲刷时间与干管路、支管路、微喷带的长短及肥料在所有管道内总残留量有关。假设第2阶段结束后,有

$$t_{g2} \geq \frac{V_c}{Q} \quad (14)$$

式中 V_c ——管路内肥料残留体积

因此,为保证管路冲刷效果,实际中 t_{g2} 应取

$$t_{g2} \geq \max \left(t_z - (t_{g1} + t_s), \frac{V_c}{Q} \right) \quad (15)$$

需要说明的是, t_s 与 t_{g2} 存在关联性, t_{g2} 的选择必然造成 t_s 的浮动, t_{g2} 越大 t_s 越小,在施肥量一定情况下, t_s 应在计算范围式(13)内调整,在满足 t_{g2} 时间设定条件基础上最终确定时间 t_s 和浓度 ρ_z 。

3 母液动态调控方法实现

3.1 母液浓度计算

根据上述分析,母液浓度 ρ_m 应该动态维持在一定数值上,该值计算与时间分配模型及施肥浓度 ρ_z 有关。根据质量守恒原理,可知

$$\rho_m Q_m = \rho_z Q \quad (16)$$

式中 Q_m ——注肥管道流量

主管道流量和注肥管道流量均由流量传感器测量得到,因此母液浓度动态设定值为

$$\rho_m = \rho_z \frac{Q}{Q_m} \quad (17)$$

通过设计母液动态调控方法,使母液浓度稳定于 ρ_m 。

3.2 动态调控模型

目前营养液调控方式大致分为3类:基于EC

值的营养液调控、基于养分利用的营养液调控和基于作物模型的营养液调控^[15-18]。其中,基于 EC 值的营养液调控方式操作简单,实时性强,易于推广,当前大多数基于液态肥水肥一体化装备都是采用这种调控方式。本文针对颗粒肥水溶解,研究采用基于 EC 值的营养液调控方式进行母液浓度调控的模式。

在一体机母液罐的 2 个进出水口安装流量传感器,考虑到颗粒肥溶解对肥液总体积的变化可忽略不计,故假设母液罐中溶液体积不变,同时假设罐中母液浓度与出水口浓度相同,根据质量守恒可得达到动态平衡时的方程为

$$\frac{d(V\rho_m(t))}{dt} = P_1(t) + P_2(t) + Q_0(t)\rho_0(t) - Q_1(t)\rho_c(t) \quad (18)$$

式中 $\rho_m(t)$ ——母液罐中母液浓度
 $\rho_c(t)$ ——母液罐中出水口浓度
 $\rho_0(t)$ ——母液罐中进水口浓度
 $P_1(t)$ ——排肥机构 1 颗粒肥排肥量
 $P_2(t)$ ——排肥机构 2 颗粒肥排肥量
 $Q_0(t)$ ——母液罐进水口流量
 $Q_1(t)$ ——母液罐出水口流量

当系统达到稳态时,有 $Q_0(t) = Q_1(t)$, $\rho_m(t) = \rho_c(t)$, 且进水管取自大田井水,浓度相对于母液罐溶液浓度可忽略不计,即 $\rho_0(t) \approx 0$, 则式(18)可简化为

$$\frac{d(V\rho_m(t))}{dt} = P_1(t) + P_2(t) - \rho_m(t)Q_1(t) \quad (19)$$

单次灌溉时, $Q_1(t)$ 可看作定值,令 $Q_1(t) = Q_d$ 。而排肥量取决于排肥步进电机的转速,即正比于步进电机的控制脉冲

$$P_i(t) = K_a S_i(t) \quad (i=1,2) \quad (20)$$

式中 $S_i(t)$ ——第 i 个排肥电机的控制脉冲
 K_a ——比例系数

当进行肥料比例混溶时有

$$S_2(t) = K_b S_1(t) = K_b S(t) \quad (21)$$

式中 K_b ——肥料混溶比

因此 $\frac{d(V\rho_m(t))}{dt} = K_a K_b S(t) - \rho_m(t)Q_d$ (22)

再将其进行拉普拉斯变换可得

$$Vs\rho_m(s) = K_a K_b S(s) - \rho_m(s)Q_d \quad (23)$$

得到系统传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{\rho_m(s)}{S(s)} = \frac{K_a K_b}{Vs + Q_d} \quad (24)$$

可以看到,肥料母液动态调控模型是 1 个一阶

线性系统。由于肥料溶解需要一定延时,得到系统传递函数模型为

$$G(s) = \frac{\rho_m(s)}{S(s)} = \frac{K_a K_b}{Vs + Q_d} e^{-\tau s} \quad (25)$$

式中 τ ——时滞系数, s

3.3 肥料溶解时间分析

颗粒肥溶解过程是引起系统时滞的主要因素,通过搅拌可以加速肥料溶解,降低系统时滞。由于搅拌速度不同,不同肥料溶解时间也不同,有必要针对不同肥料研究最佳搅拌速度下的系统最小时滞问题。

针对常用追肥类型开展试验,选取水溶肥、小颗粒尿素(直径为 0.85 ~ 2.8 mm)、大颗粒尿素(直径为 2.8 ~ 4.0 mm)和氯化钾颗粒 4 种肥料,研究不同搅拌速度与溶解时间的关系。试验方法为:选取排肥机构中 1 个螺距所容纳的肥料为 1 个单位,设定搅拌电机在 150 ~ 850 r/min 转速范围内,以 50 r/min 的间隔调整转速,分别记录单位质量肥料在不同搅拌速度下的溶解时间,测得试验结果如表 3 所示。可以看到,随着搅拌速度增加,溶解速度逐渐变快,当搅拌速度达到一定值后,肥料溶解时间基本稳定。为简化系统设计,选取搅拌速度为 650 r/min,此时试验所用水溶肥、小颗粒尿素、大颗粒尿素和氯化钾的溶解时间分别是 8.8、11.5、52.2、53.0 s。

表 3 不同搅拌速度下 4 种肥料的溶解时间

Tab.3 Mixing time of four kinds of fertilizers at different stirring speeds

搅拌速度/ (r·min ⁻¹)	溶解时间			
	水溶肥	小颗粒尿素	大颗粒尿素	氯化钾
150	18.5	23.1	77.2	113.2
200	16.3	20.9	76.1	110.0
250	15.5	19.9	72.3	95.5
300	14.7	18.1	68.8	90.7
350	13.9	16.9	66.1	82.4
400	12.8	16.1	63.0	80.1
450	12.0	15.2	60.6	76.2
500	11.2	14.6	58.4	69.8
550	10.3	13.8	56.8	62.4
600	9.0	12.3	54.6	56.3
650	8.8	11.5	52.2	53.0
700	9.0	10.9	51.9	52.7
750	8.4	10.7	52.0	51.8
800	8.3	11.0	51.1	52.9
850	8.7	10.5	52.3	53.4

3.4 调控方法设计

基于以上分析,可知在设定搅拌速度下,不同肥料的溶解时间(即系统时滞)不同。通常,PID 控制方法被广泛应用于肥液浓度调控^[19],且对于时滞较小的系统能够达到较好的控制效果,但对于时滞较

大的系统,普通PID控制方法的效果很差,甚至很难保证系统的基本稳定^[20]。

Smith 预估器是克服系统大延迟环节的一种有效方法,通过预估对象的动态特性,用一个预估模型来进行时间延迟补偿,补偿器与被控对象共同构成一个不含时滞的广义被控对象^[21-23],从而有效削弱由系统时滞带来的影响。

因此,针对肥液在母液罐中的不同溶解时滞问题,本文设计了一种切换控制器,集成增量式PID控制方法和含Smith预估器的PID控制方法,设计合理的切换策略,根据肥料类型在控制方法之间自动切换选择,以消除系统不同时滞现象,设计的切换控制器结构如图4a所示,含Smith预估器的控制器结构如图4b所示, $G_c(s)$ 为增量式PID控制器, $2K_aK_b/(Vs+Q_d)e^{-\tau_s}$ 为被控对象, $2K_aK_b/(Vs+Q_d)$ 为被控对象模型, $e^{-\tau_s}$ 是纯滞后环节, r 是系统的输入, e 是系统输入与输出偏差, u 是控制器的输出, p 是系统实际输出, d 是外部干扰。

3.5 仿真

为了验证切换控制对母液浓度调控的有效性,在Matlab软件Simulink环境中建立母液动态调控模型,进行切换控制算法仿真。

对表3中选用的肥料和溶解参数进行仿真,针对水溶肥、小颗粒尿素、大颗粒尿素和氯化钾分别设定系统仿真时滞为8.8、11.5、52.2、53.0s。并针对以上系统时滞,设定PID参数^[24-25],绘制切换控制策略下的浓度变化曲线,及单独采用PID或含Smith

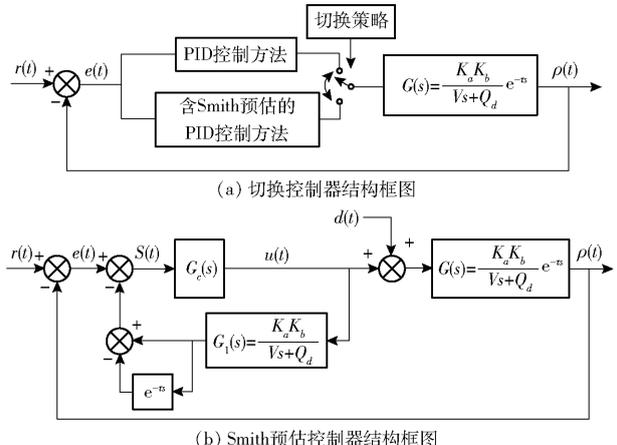


图4 母液浓度切换控制器

Fig. 4 Mother liquor concentration switch controller

预估器PID的响应曲线,如图5所示。

从图5中可看出,试验用水溶肥和小颗粒尿素时,简单PID控制系统要比Smith预估控制的响应曲线效果明显,从100s就开始接近稳定;试验用大颗粒尿素和氯化钾时,简单PID控制系统虽然出现超调量,但达到稳定时间仍快于Smith预估控制。而再随着延迟时间的增大可以看出简单PID控制系统超调量变大而且不稳定,Smith预估控制效果明显优于简单的PID控制,Smith预估控制的响应曲线从大约120s就已经处于稳定状态。从而说明在母液动态调控过程,自适应切换控制会根据不同延迟的时间选用不同的控制方法,在小的时滞时可选用简单PID控制系统,在大的时滞时Smith预估控制系统对参数变化适应能力强。

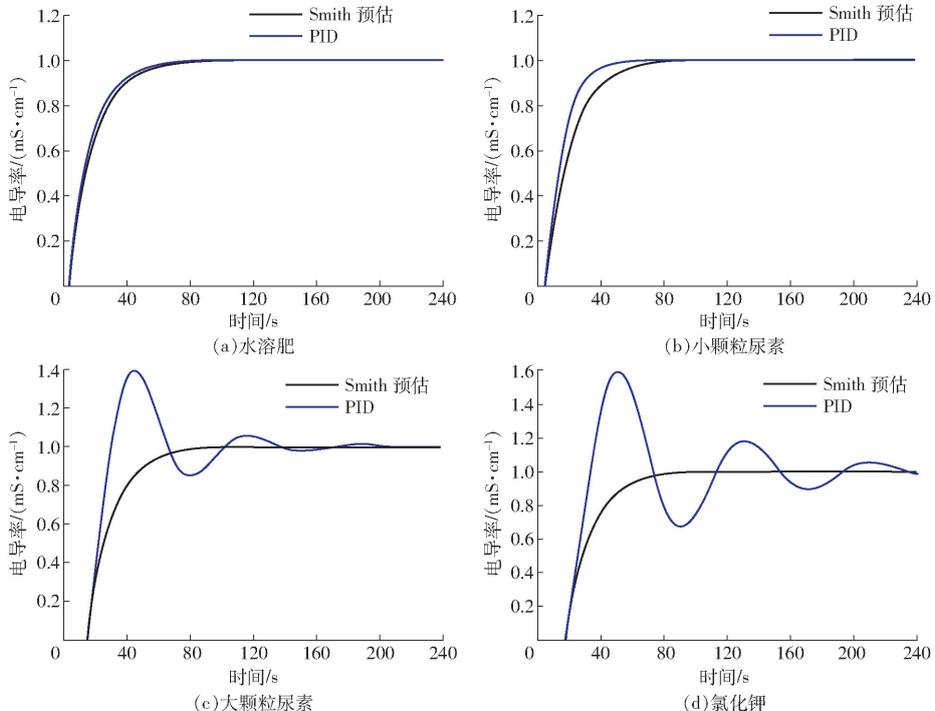


图5 切换控制策略仿真曲线

Fig. 5 Smith predictor and PID control strategy simulation curves

4 控制系统设计与控制方法实现

一体机控制系统由以 PLC 为核心的下位机和友好人机界面的工控触摸屏组成,其中工控触摸屏

与下位机之间通过 485 接口进行通信,用于执行数据采集处理、灌溉施肥量决策及灌溉施肥实时操作,包括数据实时采集模块、数据通讯模块、灌溉施肥量决策模块、灌溉施肥执行模块和工控触摸屏,如图 6 所示。

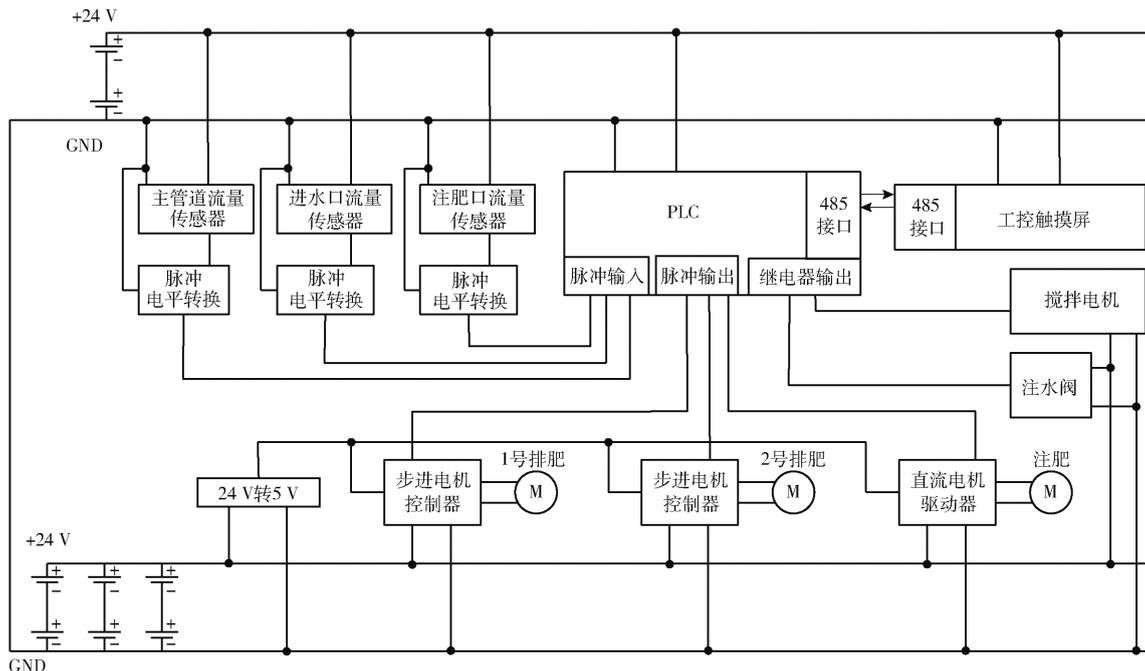


图 6 一体机控制系统原理图

Fig. 6 Schematic of control system

数据实时采集模块采集流量传感器和 EC 传感器的数据并通过数据通讯模块传输到 PLC,通过安装在工控触摸屏的应用软件及时显示采集的数据,为母液的配置提供数据支持。灌溉施肥量决策模块主要作出灌水量和施肥量的决策,通过测墒仪测得墒情进行测墒补灌,结合农艺补灌策略确定施肥类型以及施肥量。灌溉施肥执行模块进行母液配制和灌溉施肥阶段分配。母液配制过程中根据计算母液浓度设置 EC 参考值,并设置合理的排肥速度和搅拌速度,母液配制完成后分配灌溉施肥阶段进行 3 段灌溉施肥。工控触摸屏具有良好的人机交互功能,可以显示灌溉施肥过程中各个模块的工作状态,以及以触摸操作的方式设置 EC 值、排肥速度、注肥量等参数。一体机的工作流程图如图 7 所示,根据输入的灌溉施肥信息,计算出灌溉量和施肥量,并由中央控制单元实现全自动化灌溉施肥时间分配、母液浓度动态调控和灌溉施肥作业。

5 试验

5.1 试验方法

针对建立的灌溉施肥时间分配模型和肥料母液动态调控数学模型,对大田移动式精量配肥灌溉施肥一体机分别进行灌溉施肥过程中注肥时间试验和母液配制试验(图 8)。

一体机的整个系统是由基于 PLC 的嵌入式控制器控制母液浓度动态调控过程。母液罐的进出管均安装 LWGY 液体涡轮流量传感器,确保进出管中液体的流量相同,传感器量程为 $0.6 \sim 6 \text{ m}^3/\text{h}$,精度为 0.5% ,母液罐进水管安装 24 V 电磁阀,出水管安装额定流量为 $10 \text{ L}/\text{min}$ 的注肥泵。排肥机构由 57BYG250C 步进电机驱动,扭矩为 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。母液浓度由 EC 传感器实时监测,EC 传感器的量程为 $0 \sim 10 \text{ mS}/\text{cm}$,精度为 $0.01 \text{ mS}/\text{cm}$ 。水肥一体化整个系统的操作可在工控触摸屏上进行,可实现混肥配方、实时检测、精量注肥等操作,整个过程实时采集的流量、EC、pH 值数据通过 RS485 总线上传到工控触摸屏进行记录。整个系统由 2 块 12 V 、 20 A 的直流蓄电池供电,可持续工作。

一般农作物灌溉施肥时肥液 EC 小于 $3 \text{ mS}/\text{cm}$,试验设定 EC 为 $1 \text{ mS}/\text{cm}$ 。母液罐中装有 50 L 的清水,经测清水的 EC 值为 $0.277 \text{ mS}/\text{cm}$,母液罐的进水管和出液管通过控制电磁阀通断和调节注肥泵的流量确保进出的流量相等,以使母液罐中保持 50 L 水不变。以山东地区小麦为例,根据农艺要求,一般在拔节期追肥 $189 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

5.2 动态性能验证

设计了给定灌水量和施肥量情况下不同肥料的灌溉施肥试验,来验证灌溉施肥时间分配模型的准

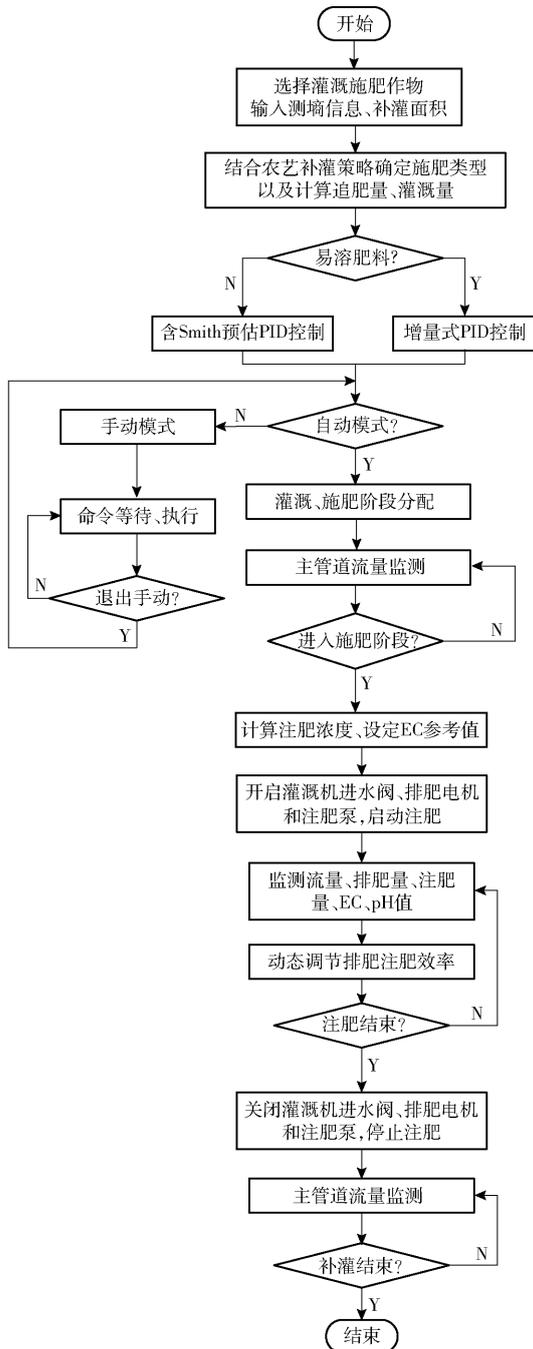


图7 一体机工作流程图

Fig. 7 Integrated machine work flow chart



图8 试验现场

Fig. 8 Test scenario

确性和母液浓度动态性能调控。根据对灌溉施肥时间分析可知,灌溉施肥分3阶段进行作业,分别是:先灌溉,再灌溉注肥,再灌溉。试验使用当地井灌区潜水泵作为水压源,潜水泵的流量是 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 。根据农艺以及作物长势确定追肥量为每 667 m^2 地块 13 kg ,

经计算灌水量是 50 m^3 ,总共需要灌溉 50 min 。第1阶段灌溉时间是 10 min ,可根据实际情况进行调整。根据第2阶段灌溉施肥时间计算公式可以计算出第2阶段的时间为 $21 \sim 72 \text{ min}$,结合整个灌溉时间,取 30 min 。剩余为第3阶段的灌溉时间。灌溉作业时用秒表开始计时直到灌溉结束,同时 EC 传感器对母液进行电导率测量并记录数据,用电导率变化显示灌溉施肥3个时间阶段的变化。试验结果如图9所示。

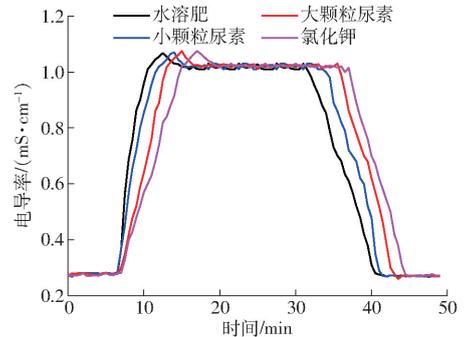


图9 4种肥料的电导率试验结果曲线

Fig. 9 EC value test result curves of four kinds of fertilizer

从图中电导率变化曲线可以看出灌溉施肥过程分为灌溉、灌溉施肥和灌溉3个阶段。以水溶肥为例,8 min时排肥机构开始排肥,接近10 min时母液罐中肥液的电导率达到设定值 $1 \text{ mS}/\text{cm}$,这是第1阶段灌溉时间。母液罐中肥液的电导率达到设定值时开启注肥泵开始注肥,同时进水管电磁阀开启,实现边进水、边排肥混肥、边注肥,这是第2阶段灌溉施肥时间,本阶段持续时间较长,约为 30 min 。剩余则是第3阶段灌溉时间,约为 10 min 。经对比,试验数据与理论计算值基本吻合。同时,可以看出4种肥料基于自适应切换控制母液浓度达到稳态的时间分别约为2、3、4、5 min,这说明基于自适应切换控制的方法能够根据不同肥料快速实现母液的动态调控,可有效地减小延迟时间。

6 结论

(1) 针对颗粒肥在大田水肥一体化过程中母液动态调控时滞问题以及灌溉施肥时间分配问题,设计了移动式大田精量灌溉施肥一体机。根据一体机工作原理,建立灌溉施肥时间分配模型,简化颗粒肥母液动态调控的数学模型,并提出灌溉施肥自适应切换控制算法。

(2) 使用 Matlab 软件的 Simulink 进行自适应切换控制算法的仿真并经过现场试验,结果表明:一体机可根据3阶段的灌溉施肥制度完全实现全自动化灌溉施肥作业,且自适应切换控制会根据不同延迟的时间选用不同的控制方法,快速实现母液的动态调控,有效减小延迟时间。

参 考 文 献

- [1] 奚玉银,任全军,付永斌.水肥一体化、艺机一体化技术在冀西北的应用[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1363.
- [2] 张承林.以色列的现代灌溉农业[J].中国农资,2011(9):53.
- [3] CHANDRA A, MADRAMOOTOO, JANE M. Advances and challenges with micro-irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62(3):255-261.
- [4] 吴江.“耐特菲姆”的中国之旅——访以色列耐特菲姆现代灌溉和农业系统公司中国总经理李勇[J].中国农资,2010(9):66-68.
- [5] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等.基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(8):105-110.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. Design and experiment of Venturi variable fertilizer apparatus based on pulse width modulation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8):105-110. (in Chinese)
- [6] 阮俊瑾,赵伟时,董晨,等.球混式精准灌溉施肥系统的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):131-136.
RUAN Junjin, ZHAO Weishi, DONG Chen, et al. Design and performance experiment of spherical mixing precision fertigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2):131-136. (in Chinese)
- [7] 周亮亮.温室PLC模糊灌溉施肥控制系统研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
ZHOU Liangliang. Greenhouse PLC fuzzy control system research for fertigation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 机械工程师编委会.机械工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 刘欣.关于搅拌设备设计中的几个问题[J].精细化工中间体,2002,32(6):48-50.
LIU Xin. Several problems in the design of stirring apparatus[J]. Fine Chemical Intermediates, 2002, 32(6):48-50. (in Chinese)
- [10] 徐卫红.水肥一体化实用新技术[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [11] 王春堂.农田水利学[M].北京:中国水利水电出版社,2014:59-240.
- [12] 桑晓光,王东,于振文.测墒补灌条件下深松和耙压对冬小麦耗水特性和产量的影响[J].麦类作物学报,2014,34(9):1239-1244.
SANG Xiaoguang, WANG Dong, YU Zhenwen. Effects of subsoiling and harrowing on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under condition of supplemental irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(9):1239-1244. (in Chinese)
- [13] 方文松,刘荣花,邓天宏.冬小麦生长发育的适宜土壤含水量[J].中国农业气象,2010,31(增刊1):73-76.
FANG Wensong, LIU Ronghua, DENG Tianhong. Study on reasonable soil moisture indexes of growth and development for winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(Supp. 1):73-76. (in Chinese)
- [14] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等.基于模糊控制的肥液自动混合装置设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(16):22-30.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. Design and experiment of automatic mixing apparatus for liquid fertilizer based on fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):22-30. (in Chinese)
- [15] WANG Z Q, GAN D X, LONG Y L. Advances in soilless culture research[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(2):269-278, 323.
- [16] 倪纪恒,毛罕平,马万征.温室营养液管理策略的研究进展[J].蔬菜,2011(6):45-47.
- [17] MAGAN J J, GALLARDO M, THOMPSON R B. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9):1041-1055.
- [18] FRANCESCO M, ANGELO P, PIETRO S. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(3):338-344.
- [19] 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.
YUAN Hongbo, LI Li, WANG Junheng, et al. Design and test of regulation and control equipment for nutrient solution of water and fertilizer integration in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8):27-32. (in Chinese)
- [20] 牛寅,张侃瑜.轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程的变论域模糊控制[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):45-52.
NIU Yin, ZHANG Kanyu. Variable universe fuzzy control of water-fertilizer mixing process in fertigation system under the rotational irrigation situation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):45-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.007. (in Chinese)
- [21] 王海华,付强,孟繁佳,等.模糊与PI分段调控肥液EC的优化设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(15):110-116.
WANG Haihua, FU Qiang, MENG Fanjia, et al. Optimal design and experiment of fertilizer EC regulation based on subsection control algorithm of fuzzy and PI[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15):110-116. (in Chinese)
- [22] 杜辉.模糊自适应Smith预估器在温室控制中的应用研究[J].计算机仿真,2006,23(6):150-154.
DU Hui. Application of fuzzy adaptive Smith predictor in greenhouse control[J]. Computer Simulation, 2006, 23(6):150-154. (in Chinese)
- [23] VANDEURSEN J M, PEPPERSTRAETE J A. Internal model control with improved disturbance rejection[J]. International Journal of Control, 1995, 62(4):983-999.
- [24] 刘玲玲.PID参数整定技术的研究及应用[D].郑州:郑州大学,2010.
LIU Lingling. Research and application on the PID parameters tuning technology[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese)
- [25] 李国林.PID控制器参数整定技术与优化设计[D].大连:大连理工大学,2010.
LI Guolin. PID controller parameter tuning and optimization technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)