

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.006

基于 Cortex - M3 的免耕播种机监控系统设计与试验

孙永佳 沈景新 窦青青 李青龙 陈刚 孙宜田

(山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 针对目前国内免耕播种机的监测传感器抗尘效果差、监测精度低,且施口肥量不能变量调节,施用不当易引起烧种、烂种的问题,设计了一种基于 Cortex - M3 处理器的免耕播种机监控系统。该系统采用面源无盲区抗尘监测技术设计种子传感器,消除了监测盲区,提高了系统对多尘环境的适应性和监测准确性;采用离散增量式 PID 控制算法,根据预施肥量和采集作业速度,实时调节口肥量与作业速度相匹配,实现了播种、施肥状况的监测和作业面积的统计,进一步实现了作业过程中缺种、堵种、缺肥、堵肥等故障报警,并可显示故障类型和故障行号。室内和田间试验验证结果表明:该监控系统工作稳定可靠,播种量计数和施肥量变量调节准确率较高,播种量计数偏差在 4% 以内,当施口肥量设定为 75 kg/hm² 时,不同作业速度下,实际施肥量与理论施肥量的偏差在 5% 以内,满足了实际生产需求,提高了播种机的工作效率和施肥精度。

关键词: 免耕播种机; 监控系统; 控制算法; 变量施肥

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0050-09

Design and Test of Monitoring System of No-tillage Planter Based on Cortex - M3 Processor

SUN Yongjia SHEN Jingxin DOU Qingqing LI Qinglong CHEN Gang SUN Yitian

(Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: At present, the anti-dust effect is poor and the monitoring precision is low for the monitoring sensor of domestic fertilization planter. Besides it can not adjust the amount of fertilizer. A monitoring system of fertilization seeder based on Cortex - M3 processor was designed in order to settle these problems. The system could adjust the amount of fertilizer according to the working speed. It also could monitor conditions of seeding and fertilizing in time, count quantity of seeding and area statistic. When the fault occurred, it would send out alarm by buzzer and show fault type. The system adopted one piece of silicon photoelectric diode which had a large photosensitive area as receiving component and three infrared light emitting diode (LEDs) to design the seed sensor, which contained a vitreous dust cover. The structural and installation parameters of sensor were optimized to eliminate monitoring blind area. All the above helped to improve the dust-laden environmental adaptability and accuracy of monitoring system. The system adopted outer groove-wheel to design fertilizer apparatus which was driven by a worm-gear direct current (DC) motor with the rated voltage of 12 V and power of 50 W. Besides one end of worm shaft was connected to outer groove-wheel and the other connected to an incremental encoder for motor speed measurement. The encoder's accuracy was 100 P/R (pulses/revolution). The main hardware circuits such as sensor signal acquisition circuit, motor drive circuit and controller area network (CAN) bus interface circuit were designed by Altium Designer software. The display interface contained three parts: main interface, setting interface and query interface. They were designed based on four rows corn planter. The seeding performance of each row was displayed in the form of a number and ring icon. The numbers showed specific seeding values. When the performance became poor, the ring icon was turned from green to red. The software development environment was Keil uVision5, and the program was written in C language. The system adopted incremental proportion integration differentiation (PID) control

收稿日期: 2018-02-09 修回日期: 2018-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)和山东省重点研发计划项目(2016CYJS03A01)

作者简介: 孙永佳(1985—),男,工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: max212@163.com

通信作者: 孙宜田(1980—),男,高级工程师,主要从事农业信息化和精准农业技术研究,E-mail: sytde@163.com

algorithm for the speed adjustment of fertilization motor. Lab test showed that when presetting fertilization amount was 75 kg/hm^2 , the work breadth was 2.6 m , speed was 3 km/h , 4 km/h , 5 km/h , 6 km/h and 7 km/h , respectively, fertilization was varied with the speed. Fertilization deviations were 2.88% , 4.63% , 0.74% , 2.47% and 3.17% , respectively. When presetting motor rotation speed was 150 r/min , seeding quantity counting deviation of the system were within 4% . The monitoring system was installed on no-tillage corn precision planter of Debon company to conduct a field trial. When presetting fertilization amount was 75 kg/hm^2 , vehicle run $1\,000\text{ m}$ with a stable speed of 3 km/h , 4 km/h , 5 km/h , 6 km/h and 7 km/h , respectively, the coefficient of variation of fertilization were 1.70% , 1.98% , 1.92% , 1.76% and 2.63% , respectively. Meanwhile, fertilization deviation was less than 5% . Therefore, consistency and accuracy of the system were good, which could meet the requirement of actual production. The study provided reference for the research of variable rate fertilization control technology and development of intelligent monitoring system.

Key words: no-tillage planter; monitoring system; control algorithm; variable rate fertilization

0 引言

东北地区玉米播种面积大,农民习惯将基肥和口肥随播种一同施入。口肥可以提供玉米苗期营养,满足种子发芽及生长发育初期的营养需求,为后期生长打下基础,并能改善种床的理化性状和提高微生物活性。由于口肥与种子直接接触或距离较近,对肥料用量的要求较严,施用不当易引起烧种、烂种,造成缺苗断垄现象^[1-2]。由于机具播种作业过程具有全封闭特点,机手无法直接监测播种施肥作业状况,对作业过程中出现的排种、排肥故障无法进行预判,影响了播种施肥质量。

针对精准农业中播种机智能化监控和变量施肥问题,国内外学者进行了大量研究^[3-13]。国外的高端播种机安装智能监控系统,不仅能实现播种施肥状况的监控,而且具有变量施肥的功能,通过电磁比例阀控制液压马达带动施肥机构实现变量施肥,如 John Deere 公司的 JD - 1820 型变量施肥播种机、CASE 公司的 Flexi Coil 施肥播种机等,但是,这种控制方案成本太高,无法应用于国内玉米播种机。国内研究的各种播种机监控系统实现了排种质量的监测,但缺少口肥的变量施放装置,研究的变量施肥装置又多在稻麦播种机上应用。针对东北地区玉米种植模式,国内一些企业已经开发出对应的具备施口肥功能的免耕播种机,如北京德邦大为科技股份有限公司的 2BMG - 4 型高性能免耕精量播种机,吉林省康达农业机械有限公司的 2BMZF - 4 型免耕指夹式精量施肥播种机,在原有精量播种机的基础上增设了施口肥装置,实现了基肥、口肥一次施入,简化了生产环节。但这两种机型施口肥装置的施肥量无法进行设定和变量调节,容易造成施用不当的情况,整机缺少一体化的监控系统。

针对上述问题,本文以基于 Cortex - M3 内核的 STM32F103 芯片为核心芯片,采用面源无盲区抗尘

监测技术和增量式 PID 控制技术,设计一种可以监测播种质量、设定和变量调节口肥施用量的播种机监控系统,并进行室内试验和田间试验验证,以期改善玉米免耕播种机的工作性能。

1 系统总体方案与关键部件设计

监控系统组成及结构如图 1 所示,监控系统包括多功能控制终端、采集驱动模块、种子传感器、速度传感器、料箱传感器、施口肥装置。多功能控制终端位于驾驶室内,内部集成了显示器和薄膜面板,用于显示作业信息、报警信息以及作业参数的录入和查询,并处理采集驱动模块发送过来的信号计算生成作业信息,发送至显示器显示,判断出故障时进行报警提示。采集驱动模块安装在机具上,用于采集、处理各个传感器的脉冲信号和驱动口肥电动机,并将计算处理后的信号通过 CAN 总线发送给控制终端。种子传感器安装在播种单体下方的导种管处,种子经过时传感器产生一定时间宽度的脉冲信号,根据此信号来统计播种数并判断缺种、堵种故障。速度传感器安装在地轮转动轴处,采用增量式编码器测速,分辨率为 100 P/R ,地轮转动一圈编码器输出 100 个速度脉冲信号,根据此信号进行作业速度换算和作业面积统计。料箱传感器用于检测基肥肥箱是否缺肥。施口肥装置用于口肥的精准变量施放,并装有口肥电动机转速测量装置,为口肥电动机

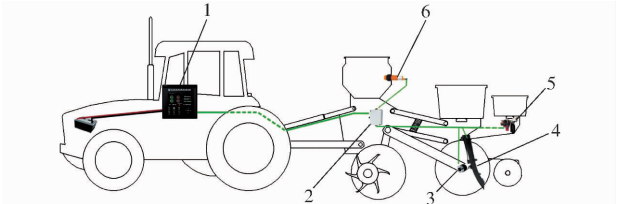


图 1 监控系统整体结构图

Fig. 1 Structure diagram of monitoring system

1. 多功能控制终端 2. 采集驱动模块 3. 速度传感器 4. 种子传感器 5. 料箱传感器 6. 施口肥装置

的闭环控制提供反馈。

1.1 种子传感器设计

针对目前的光电传感器存在灰尘堆积导致感应信号衰弱的问题^[14-17],本文采用光电式面源无盲区抗尘监测技术设计种子传感器,其发射端包含3个串联连接的红外发射管,接收端为1片面源式硅光电二极管,用于把照射到表面的光能转化为电能,与传统的光电二极管相比,其感光面积更大,当导种管中灰尘增多导致照射到硅光电二极管接收面上的光能减弱时,其转化的电能仍可以满足系统后续电路的触发要求,而传统光电二极管由于感光面积不够大,此时的感应电能衰弱很明显,无法导通后续电路,因此存在传感器灵敏度在多尘环境下降低的问题。硅光电二极管外罩有透明玻璃外壳,感光区域与种子不直接接触,避免了种子下落时对感光器件的划损,且不易附着、堆积灰尘,种子下落时与感光器件的接触可以对灰尘起到一定的清除作用。种子传感器结构图如图2所示。

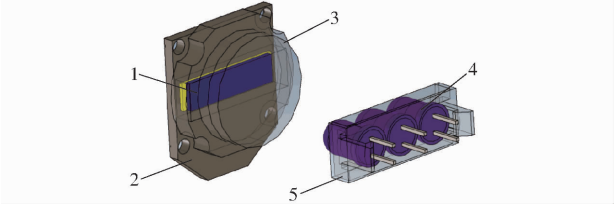


图2 种子传感器结构图
Fig.2 Structure diagram of seed sensor

1. 硅光电二极管 2. 电路板 3. 防尘玻璃罩 4. 红外发射管
5. 发射管固定支架

传感器器件布局和选型时还要考虑监测盲区的问题,本文设计的种子传感器接收部分的硅光电二极管感光区域尺寸为4 mm×19 mm,可覆盖整个导种管内截面,因此盲区不会在接收端部分产生。红外发射管选用SHARP公司的GL537,发光角度 $\theta=25^\circ$,直径 $D=5\text{ mm}$,3个发射管中心间距 $d_1=6\text{ mm}$,左右两侧的发射管壁与导种管内壁的间距 $d_3=1\text{ mm}$ 。为保证发射的红外光强度,发射管应尽可能靠近导种管内壁^[18],所以发射管安装时顶端紧贴导种管内壁,发射管顶端到发光处的距离 $d_2=10\text{ mm}$,种子传感器监测区域示意图如图3所示,形成的监测盲区位于两个相邻发射管处和两侧发射管与导种管内壁处,4个三角形区域两两对应,根据几何关系可知监测盲区的宽度 b_1 、 b_2 ,以及长度 L_1 、 L_2 的计算公式为

$$\begin{cases} L_1 = (d_1/2) \cot(\theta/2) - d_2 \\ b_1 = 2L_1 \tan(\theta/2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_2 = (d_3 + D/2) \cot(\theta/2) - d_2 \\ b_2 = L_2 \tan(\theta/2) \end{cases} \quad (2)$$

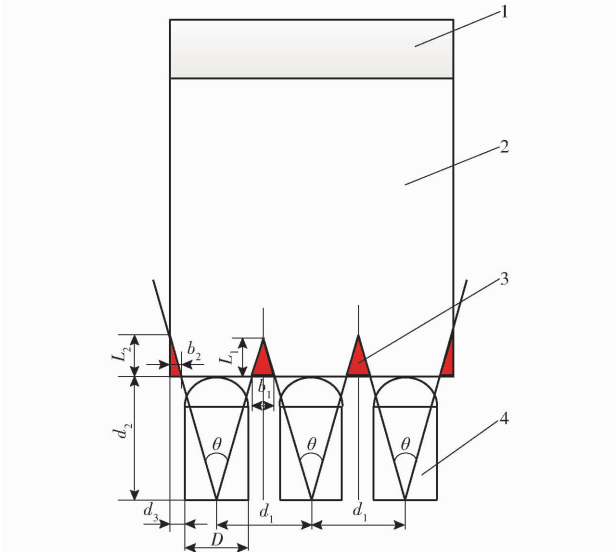


图3 种子传感器监测区域示意图
Fig.3 Sketch of monitoring area of seed sensor

1. 硅光电二极管 2. 导种管横截面 3. 监测盲区 4. 红外发射管

根据本文设计的布局尺寸,代入式(1)、(2)中计算得出 $L_1=3.5\text{ mm}$, $b_1=1.6\text{ mm}$, $L_2=5.9\text{ mm}$, $b_2=1.3\text{ mm}$,而玉米种子三轴基本尺寸大约为:长度11.9 mm、宽度8.0 mm、厚度4.1 mm^[19],无论玉米种子以哪种形态下落,其横截面积都远大于4个监测盲区的面积,都可以遮挡住红外光信号,因此,本文设计的种子传感器不存在监测盲区。

1.2 施口肥装置设计

排肥盒选用外槽轮式排肥器,可通过调节旋钮调节槽轮的工作长度,从而实现口肥量的标定,驱动电动机选用12 V/50 W蜗轮蜗杆式直流电动机,涡轮连接轴一端与编码器连接,一端与槽轮连接,编码器选用欧姆龙公司的E6B2-CWZ1X增量型编码器,分辨率为100 P/R,当蜗杆带动涡轮转动时,编码器随之转动,一圈输出100个脉冲信号,通过该脉冲信号可进行施肥量标定和计算,施口肥装置结构图如图4所示。

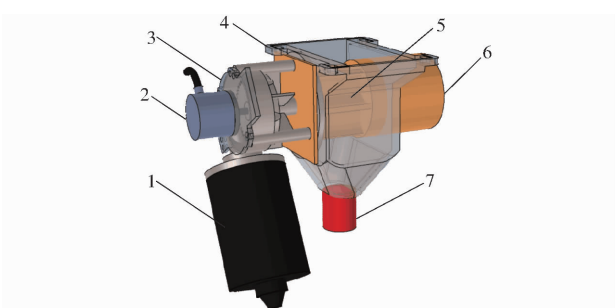


图4 施口肥装置结构图
Fig.4 Structure diagram of fertilizing device

1. 直流电动机 2. 增量型编码器 3. 编码器固定支架 4. 肥盒
5. 槽轮 6. 槽轮旋钮 7. 施肥口

2 硬件电路设计

2.1 主芯片

选用 STM32F103 作为控制芯片,该芯片采用 Cortex - M3 内核,是专门针对低功耗、低成本、高性能嵌入式应用所设计的^[20]。STM32F103 内置了 512 KB 的 FLASH 和 64 KB 的 SRAM,可直接运行内部代码,无需外部扩展;内部定时器具有输入捕获和 PWM 输出功能,满足系统脉冲采样和电动机驱动的需求;自带的基本扩展 CAN 控制器支持 CAN 协议 2.0A 和 2.0B,波特率最高达 1 Mb/s,可实现高速率、高可靠的 CAN 总线通信。

2.2 传感器信号采集电路

监控系统包括 4 种传感器,分别为:种子传感器、速度传感器、口肥电动机转速测量传感器和料箱传感器,前 3 种传感器输出脉冲信号,料箱传感器输出高低电平,传感器信号采集电路如图 5 所示,采用 Altium Designer 软件绘制。信号经光电耦合器 TLP281 和反相器 74HC14 两级反相后,分别输入到 STM32F103 的输入捕获定时器 TIM2 的通道 1 ~ 3 和普通 I/O PA4,捕获定时器设计为 1 μ s 计数 1 次,上升沿计数,并设置重装载值最大,通过输入捕获功能实现脉冲宽度和频率的测量。光电耦合器 TLP281 同时还具有电平转换功能,把 12 V 的传感器信号转换为 3.3 V,满足 STM32F103 单片机 I/O 口的电平限制要求。

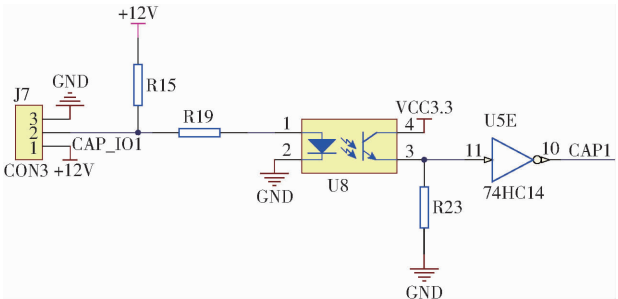


图 5 传感器信号采集电路

Fig. 5 Sensor signal sampling circuit

2.3 电动机驱动电路

施口肥装置采用外槽轮式排肥器,内部装有刷肥毛刷,口肥电动机只能沿逆时针方向转动,因此采用半桥电路驱动口肥电动机,MOSFET 功率器件选用 N 沟道的 IRF3205,其工作噪声较低、工作频率高、抗干扰能力强,MOSFET 驱动芯片选用 L6384,该芯片是 ST 公司生产的不对称半桥驱动芯片,采用 BCD 离线工艺制造,具备施密特触发器输入和死区时间设置,驱动能力强,频率特性好,电动机驱动电路如图 6 所示。L6384 的 1 号引脚连接在单片机定

时器 TIM4 的通道上,6 号引脚和 GND 接口肥电动机,TIM4 定时器配置为 PWM 输出,频率为 1 kHz,占空比 0 ~ 99% 可调,通过调节 PWM 输出占空比实现口肥电动机的转速调节。

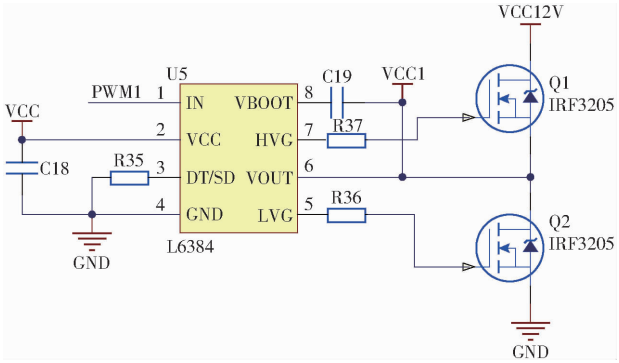


图 6 电动机驱动电路

Fig. 6 Motor driving circuit

2.4 CAN 总线接口电路

为了保证监控系统各模块之间数据传输的准确性和可靠性,以及系统的可扩展性和移植性,适应农田高噪声、高振动的复杂恶劣环境,各个模块采用 CAN 总线进行数据通信。STM32F103 单片机自带一路 CAN 控制器,但是由于 CAN 总线电平不能直接连接到单片机,所以外部需增设 CAN 总线驱动器实现电平转换,本文选用 PHILIPS 公司的高速 CAN 总线驱动器芯片 TJA1050。TJA1050 是 CAN 控制器和物理总线之间的接口,硬件内部集成了 CAN 底层协议,且包含电流限制电路和温度保护电路,使用方便、安全性高,总线接口电路如图 7 所示,R53 为终端匹配电阻。

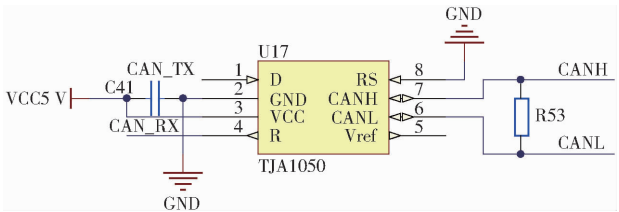


图 7 总线接口电路

Fig. 7 Bus interface circuit

3 机载显示器设计

机载显示器选用北京迪文科技有限公司的 5.0 英寸 65 K 色的 DGUS 屏,分辨率为 800 像素 $\times$ 480 像素,亮度为 900 nit,阳光直射下界面内容也清晰可见^[21]。本文设计的显示器主界面和薄膜面板界面如图 8 所示,适用于 2 行和 4 行玉米播种机,主界面显示机具的作业幅宽、作业面积、作业速度、作业时间、行播种量、亩播种量等参数,每行的播种性能通过数字加圆环图标的形式展示,数字表示具体的播种数值,圆环表示每行亩播种量与理论亩播种

量的比值,比值大于 90% 时,圆环显示绿色,小于 90% 时圆环变红。主界面除了显示各行的播种性能外还显示整机的播种性能,以百分比加条形框的形式展示。当出现缺种、堵种、缺肥、堵肥、模块异常故障时,显示器弹出红色闪烁叹号图标,并在图标上方显示具体的故障类型。



图 8 显示器主界面和薄膜面板界面

Fig. 8 Interface of screen and membrane panel

对显示器的操作通过薄膜面板按键来实现,需要进行作业参数设置时,点击设置按键,主控模块给显示器发送页面切换指令:5A A5 04 80 03 00 0B,界面切换到参数设置页面,如图 9 所示,在该界面完成参数基本设置和口肥电动机标定,通过左右按键实现设置参数的切换,用灰色图标指示选中,上下按键实现设置参数的增减。圆圈中的数字表示转动圈数,口肥电动机标定时,数字从 20 开始递减至 0,表示电动机转动 20 圈,将每行计量的肥料质量除以 20 即可得到每行口肥电动机转动一圈的排肥量。



图 9 参数设置界面

Fig. 9 Parameter setting interface

单次作业完毕后,可以点击薄膜面板上的保存按键,把作业时间、作业面积、机器性能和平均亩播种量保存下来,点击查询按键界面切换到参数查询界面,如图 10 所示,单界面显示 4 次作业记录,通过



图 10 参数查询界面

Fig. 10 Parameter inquiring interface

上下按键可进行作业记录翻页查询,查询完毕后点击返回按键,界面切换回主显示界面。

4 监控系统软件设计

根据系统方案布局方式,监控系统的软件设计包括:多功能控制终端软件设计和采集驱动模块软件设计,软件开发环境为 Keil uVision5,多功能控制终端软件用于完成作业参数设置、保存和查询、采集驱动模块信息接收和处理、CAN 总线通讯、故障报警等,其程序流程图如图 11 所示。

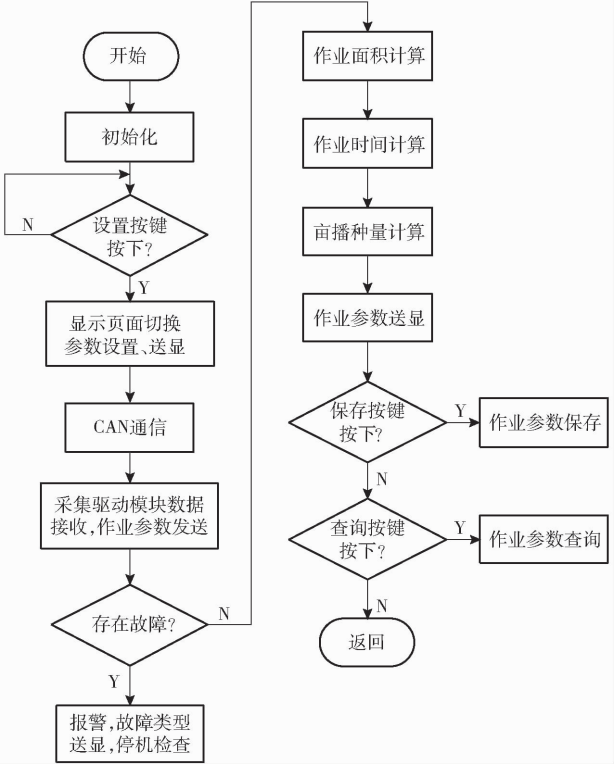


图 11 控制终端软件流程图

Fig. 11 Flow chart of control terminal software

采集驱动模块软件用于完成口肥电动机的调速、传感器信号采集和处理、增量式 PID 算法实现、CAN 通讯等功能,口肥电动机的调速采用离散的增量式 PID 算法实现。增量式 PID 是一种在过程控制中使用范围很广的控制算法,具有鲁棒性好、可靠性高并且参数易整定等优点^[22-25]。离散的增量式 PID 算法方程为

$$\Delta u_k = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (3)$$

式中 Δu_k ——PID 控制器输出值

$e(k)$ ——第 k 次采样的偏差值

K_p ——比例系数 K_i ——积分系数

K_d ——微分系数

本文设计的监控系统通过增大或减小定时器的 PWM 输出占空比来实现电动机的加速或减速控制,

程序设计时通过调节 $TIMx \rightarrow CCRx$ 寄存器的值来实现 PWM 输出占空比的变化,因此, Δu_k 对应 $TIMx \rightarrow CCRx$ 寄存器值的增量,而 $e(k)$ 在软件中表示口肥电动机的理论转速与实际采样转速的偏差。假设在 Δt 时间段内机具以速度 v 作业,设置的机具幅宽为 w , A 为机具这段时间内的作业面积,则

$$A = \frac{v}{3.6} \frac{\Delta t w}{10\,000} \tag{4}$$

又有设置的机具施口肥量为 m_0 ,作业行数为 4 行,则该时间段每行需要的施肥量为

$$m = \frac{m_0 A}{4} \tag{5}$$

假设标定完的某行电动机每圈的排肥量为 m_1 ,该行电动机的理论转速为 n ,则有

$$m = \frac{m_1 n \Delta t}{60} \tag{6}$$

由式(4)~(6)即可计算出电动机的理论转速

$$n = \frac{15 m_0}{10\,000 m_1} \frac{v}{3.6} w \tag{7}$$

增量式 PID 算法的实现还需要整定 K_p 、 K_i 、 K_d 3 个控制参数,通过综合响应速度、稳定性、超调量和稳态精度对系统的影响来进行 PID 控制参数整定。实际整定时,先将 K_i 、 K_d 的值置为零,控制算法为纯比例控制, K_p 初始值根据经验数据进行设定,从小往大调,增大 K_p 可以提高口肥电动机的响应速度,但同时也会增大系统的超调量,此时可以通过加入 K_d 系数来减小超调量, K_d 系数也是从小往大调,过大会导致系统产生稳态误差。当系统出现稳态误差时,通过调节 K_i 系数来消除系统的稳态误差,但是增大 K_i 会降低口肥电动机的响应速度。由于超调量对本系统影响较小,参数整定时选取使系统响应速度快的方案,通过不断试验整定,在 $K_p = 6$, $K_i = 0.012$, $K_d = 0.1$ 时得到比较理想的特性曲线,仿真结果如图 12 所示,此时口肥电动机的转速控制比较理想,达到要求。

5 试验

5.1 室内试验

为了验证本文设计的播种机监控系统的技术指标及可靠性,在田间试验前先搭建试验台进行室内试验,试验台如图 13 所示,口肥电动机通过 4 个定位孔安装在肥箱下方,与肥箱底部严密接触,不存在漏肥现象,导肥管下方安放收集肥料的盒子;种子传感器通过导种管安装在排种器下方,位置与下种口相适合,不存在漏籽、挡籽的问题,导种管下方安放

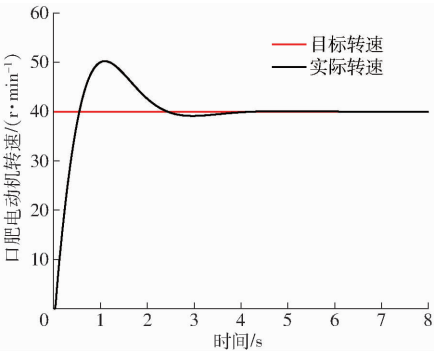


图 12 转速控制特性曲线

Fig. 12 Characteristic curves of speed control



图 13 试验台

Fig. 13 Test bed

收集种子的盒子。通过试验台进行口肥量变量控制试验和播种量计数试验,口肥选用吉林省扶化化工有限责任公司的扶化牌复合肥料,氮、磷、钾肥质量比为 8:23:5,总养分大于等于 36%,是玉米专用口肥。种子选用山东登海种业股份有限公司的登海牌京科 968,籽粒黄色、半马齿型,百粒质量 39.5 g。

5.1.1 口肥量变量控制试验

试验开始前,先进行口肥电动机标定,肥箱装满口肥,清空口肥盒,电动机转 20 圈,将盒子中收集的口肥用精度为 0.01 kg 的天平称量,得到的质量除以 20 后通过薄膜面板输入到显示器中。试验中,作业幅宽按四行机计算,设置为 2.6 m,口肥量设置为 75 kg/hm²,作业速度依次设定为 3、4、5、6、7 km/h,每个作业速度下试验 5 次,每次试验时间 10 min,记录不同作业速度下收集的口肥量,计算平均值,与该速度下的理论排肥量进行比较,并计算偏差,试验结果如表 1 所示。其中,理论排肥量 m_2 与作业速度 v 关系为

$$m_2 = \frac{v \times (1/6) \times 1\,000 \times 2.6}{10\,000} \frac{5}{4} = 0.054 v \tag{8}$$

从表 1 可以看出,施口肥装置的排肥量随作业速度不同而变化,实现了变量控制的目标,与理论值的偏差控制在 5% 以内,控制精度较高。

表 1 排肥量试验结果

Tab.1 Fertilization experiment result

项目	速度/(km·h ⁻¹)				
	3	4	5	6	7
理论排肥量/kg	2.43	3.24	4.05	4.86	5.67
实际平均排肥量/kg	2.50	3.39	4.02	4.98	5.85
排肥量偏差/%	2.88	4.63	0.74	2.47	3.17

5.1.2 播种量计数试验

试验台排种器采用可调速直流电动机驱动,转一圈排 18 粒种,排种株距按照 20 cm 计算,试验中设置电动机转速为 150 r/min,重复试验 5 次,每次试验时间 2 min,记录盒子中的实际种子数和显示器显示的种子数,各次试验数据如表 2 所示。从试验数据可以看出,监控系统播种数计数偏差在 4% 以内,计数准确率较高。

表 2 播种量计数试验结果

Tab.2 Seeding quantity counting experiment result

项目	编号				
	1	2	3	4	5
显示播种量/粒	5 122	5 238	4 963	5 015	4 862
实际播种量/粒	5 018	5 103	4 885	4 924	4 711
计数偏差/%	2.03	2.58	1.57	1.81	3.11

5.2 田间试验

为检验监控系统的实际性能,系统安装在佳木斯沃迪农机制造有限公司的德邦大为 2BMG-4 型免耕精量播种机上,并在其试验田进行了田间试验,田间试验如图 14 所示,口肥选用与室内试验相同。



图 14 田间试验

Fig.14 Field experiment

试验开始前,按照室内试验方案进行 4 行口肥电动机的标定,并把标定结果输入到显示器中。试验时,在 4 个口肥导肥管下方安装接肥袋,试验地块量取 1 000 m 试验距离,口肥量设置为 75 kg/hm²,作业幅宽为 2.6 m,代入式(8)可得每行的理论施口肥量为 4.87 kg,机具按照 3、4、5、6、7 km/h 的速度稳定行驶,每个作业速度重复试验 5 次,试验完成后将接肥袋中的肥料分别收集编号,用精度 0.01 kg 的天平称量并记录。试验统计结果如表 3 所示,分别计算各行施口肥量的平均值以及一致性的标准差和

变异系数

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n_0} \\ \gamma_s &= \frac{|\bar{x} - x_0|}{x_0} \times 100\% \\ S^* &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n_0 - 1}} \\ V &= \frac{S^*}{\bar{x}} \times 100\% \end{aligned} \right. \quad (9)$$

式中 n_0 ——机具的作业行数 n ——试验次数
 x_i ——每行同一作业速度下各次施口肥量的平均值,kg
 $\bar{x}$ ——4 行平均施口肥量的平均值,kg
 γ_s ——各行口肥量平均值与理论值偏差,%
 x_0 ——每行的理论施口肥量,kg
 S^* ——各行施口肥量一致性的标准差,kg
 V ——各行施口肥量一致性的变异系数,%

从表 3 可以看出,相同作业速度下,各行施口肥量的变异系数小,偏差在 5% 以内,一致性和准确性较好,不同作业速度下,各行排肥量基本恒定,实现了随作业速度变量施肥的功能。

表 3 各行口肥量一致性试验结果

Tab.3 Experiment result of each row fertilizer quantity consistency

项目	速度/(km·h ⁻¹)				
	3	4	5	6	7
第 1 行平均口肥量/kg	4.75	4.99	4.73	5.17	5.08
第 2 行平均口肥量/kg	4.63	5.11	4.66	5.11	4.86
第 3 行平均口肥量/kg	4.79	5.17	4.58	5.15	4.79
第 4 行平均口肥量/kg	4.65	4.97	4.80	4.98	5.01
行平均口肥量/kg	4.71	5.06	4.69	5.10	4.94
偏差/%	3.29	3.90	3.70	4.72	1.44
标准差/kg	0.08	0.10	0.09	0.09	0.13
变异系数/%	1.70	1.98	1.92	1.76	2.63

6 结论

(1)针对目前玉米精量播种机对作业状况智能化监控和口肥量变量调节的需要,设计了面源无盲区监测种子传感器和变量施口肥装置,并集成开发了一套基于 Cortex-M3 处理器的监控系统,通过薄膜面板设置施口肥量,作业过程中能根据机具实际作业速度实时调节各行口肥量,并实时监测播种、施肥状况,提高了口肥利用率和精准率,提升了机具性能。
(2)室内试验和田间试验结果表明,监控系统

能实现播种量精准计数和口肥精准变量调节,播种数计数偏差在 4% 以内,当施口肥量设定为 75 kg/hm² 时,不同作业速度下,实际施肥量与理论施肥量的偏差在 5% 以内,同一作业速度下,各行施口肥量的变异系数在 3% 以内,播种计数和施肥作业精度达到了设计目标。

参 考 文 献

1 袁文胜,金梅,吴崇友,等. 国内种肥施肥机械化发展现状及思考[J]. 农机化研究, 2011,33(12):1-5.
YUAN Wensheng, JIN Mei, WU Chongyou, et al. Development status and prospect of seed manure fertilizing mechanization in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(12):1-5. (in Chinese)

2 李前,陈延玲,陈晓超,等. 基肥、种肥施用技术对东北春玉米苗期生长及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017,25(1):147-152.
LI Qian, CHEN Yanling, CHEN Xiaochao, et al. Effect of basal and seed fertilizers on seedling growth and grain yield in spring maize in Northeast China [J]. Journal of Maize Sciences, 2017,25(1):147-152. (in Chinese)

3 YUAN J, LIU C L, LI Y M, et al. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,70(1):33-41.

4 VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, RAMON H. Discrete element simulations of the influence of fertilizer physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders[J]. Biosystems Engineering, 2009,102(4):392-405.

5 QI G T, JIA H L, LI Y, et al. Design and test of fault monitoring system for corn precision planter [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015,8(6):13-19.

6 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(8):1-6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160801&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.001.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(8):1-6. (in Chinese)

7 彭丽芳,杨自栋. 基于 PLC 的玉米播种机监测系统设计[J]. 农机化研究, 2013,35(6):170-173.
PENG Lifang, YANG Zidong. The work state monitoring system of corn seeder based on PLC [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(6):170-173. (in Chinese)

8 王振华,李文广,翟改霞,等. 基于单片机控制的气力式免耕播种机监测系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊1):56-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.011.
WANG Zhenhua, LI Wenguang, ZHAI Gaixia, et al. Monitoring system of pneumatic no-tillage sower based on PIC single-chip microcomputer control [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):56-60. (in Chinese)

9 史智兴,高焕文. 排种监测传感器的试验研究[J]. 农业机械学报, 2002,33(2):41-43.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. RLD optoelectronic sensor for seeding monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(2):41-43. (in Chinese)

10 姚宗路,高焕文,王晓燕,等. 2BMX-5 型小麦-玉米免耕播种机设计[J]. 农业机械学报, 2008,39(12):64-68.
YAO Zonglu, GAO Huanwen, WANG Xiaoyan, et al. Design and experiment on 2BMX-5 no-till wheat-maize seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(12):64-68. (in Chinese)

11 陈立平,黄文倩,孟志军,等. 基于 CAN 总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008,39(8):101-104.
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):101-104. (in Chinese)

12 梁春英,衣淑娟,王熙,等. 变量施肥控制系统 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2010,41(7):157-162.
LIANG Chunying, YI Shujuan, WANG Xi, et al. Strategy of the variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):157-162. (in Chinese)

13 宿宁. 精准农业变量施肥控制技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
SU Ning. Research on variable rate fertilization control technology in precision agriculture [D]. Hefei:University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

14 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012,28(13):16-21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(13):16-21. (in Chinese)

15 车宇,伟利国,刘婵韬,等. 免耕播种机播种质量红外监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(增刊):11-16.
CHE Yu, WEI Liguó, LIU Xingtao, et al. Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(Supp.):11-16. (in Chinese)

16 胡建平,陆黎. 磁吸式穴盘播种器图像监控系统设计[J]. 农业机械学报, 2006,37(11):88-91.
HU Jianping, LU Li. Design of the image monitored control system for the magnetic type precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(11):88-91. (in Chinese)

17 黄东岩,贾洪雷,祁悦,等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23):15-22.

- HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidene fluoride piezoelectric film [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(23):15–22. (in Chinese)
- 18 STEFFEN R W, QI D H, MILLER G C. Seed sensor with lightpipe photodetect assembly; US, 2014/035949 A1[P]. 2014–06–03.
- 19 李心平, 马义东, 金鑫, 等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(7):97–101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015.
- LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):97–101. (in Chinese)
- 20 黄伟力, 边燕, 冯青春, 等. 基于 Cortex-M3 的农作物生长参数监测系统设计[J]. 农机化研究, 2015,37(2):203–205.
- HUANG Weili, BIAN Yan, FENG Qingchun, et al. Crop growth parameters monitoring system based on Cortex-M3 [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(2):203–205. (in Chinese)
- 21 孟鹏祥, 耿端阳, 李玉环, 等. 基于单片机与 DGUS 显示的精密播种机监测系统研究[J]. 农机化研究, 2017,39(2):171–175.
- MENG Pengxiang, GENG Duanyang, LI Yuhuan, et al. Research on the monitoring system of the precision seeder based on single chip microcomputer and display DGUS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(2):171–175. (in Chinese)
- 22 朱嵘涛, 武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(7):121–126.
- ZHU Rongtao, WU Hongtao. Design of DC motor speed regulation system based on incremental PID algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(7):121–126. (in Chinese)
- 23 李明生, 赵建军, 朱忠祥, 等. 拖拉机电液悬挂系统模糊 PID 自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊2):295–300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s255&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.055.
- LI Mingsheng, ZHAO Jianjun, ZHU Zhongxiang, et al. Fuzzy-PID self-adaptive control method in electro-hydraulic hitch system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.2):295–300. (in Chinese)
- 24 梁春英, 吕鹏, 纪建伟, 等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统 PID 参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊1):89–93,88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s117&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.017.
- LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):89–93,88. (in Chinese)
- 25 郭娜, 胡静涛. 基于 Smith-模糊 PID 控制的变量喷药系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2014,30(8):56–64.
- GUO Na, HU Jingtao. Design and experiment of variable rate spaying system on Smith-Fuzzy PID control [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(8):56–64. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- 20 刘朝英, 宋哲英, 宋雪玲. MATLAB 在模糊控制系统仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2001, 18(5):10–13.
- LIU Zhaoying, SONG Zheyang, SONG Xueling. Application of MATLAB in the simulation of fuzzy control system [J]. Computerized Simulation, 2001, 18(5):10–13. (in Chinese)
- 21 邹战强, 蓝莎. 荔枝需水量和灌溉制度试验研究[J]. 节水灌溉, 1999(3):8–9.
- ZOU Zhanqiang, LAN Sha. Experimental study on water requirement and irrigation system of litchi [J]. Agricultural Water Management, 1999(3):8–9. (in Chinese)
- 22 陈汇林, 吴翠玲. 利用费歇尔准则判别荔枝花芽分化期[J]. 中国农业气象, 2007,28(4):417–419.
- CHEN Huilin, WU Cuiling. Judgment of period of flower bud differentiation of litchi by Fisher discriminant analysis [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(4):417–419. (in Chinese)
- 23 全杰, 秦世引, 段建民. 基于 MATLAB 命令方式的模糊控制系统仿真及可视化实现[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5):113–116.
- QUAN Jie, QIN Shiyin, DUAN Jianmin. Simulation and visual realization of fuzzy control system based on MATLAB [J]. Computerized Simulation, 2002, 19(5):113–116. (in Chinese)
- 24 牛寅, 张侃谕. 轮灌条件下灌溉施肥系统混肥过程变论域模糊控制[J/OL]. 农业机械学报, 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.
- NIU Yin, ZHANG Kanyu. Variable universe fuzzy control of water-fertilizer mixing process in fertigation system under rotational irrigation situation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):45–52. (in Chinese)
- 25 李晓静, 黄红飞. S 函数建模和仿真过程研究[J]. 电子设计工程, 2011,19(18):27–32.
- LI Xiaojing, HUANG Hongfei. S-function of modeling and simulation process [J]. Electronic Design Engineering, 2011,19(18):27–32. (in Chinese)