

基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究

杨 洋^{1,2} 张 刚¹ 查家翼¹ 李延凯¹ 张 铁³ 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对农机装备电控液压自动转向系统生产成本低及电动方向盘自动转向系统中控制力矩小、存在自由行程的问题, 设计了基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向机构及其电控系统, 该系统主要包括自动转向执行机构、自动转向控制器和液压转向机构等。自动转向执行机构与原车液压转向机构连接实现自动转向功能, 考虑了底盘阿克曼角的自动转向控制器实现车轮转向的精确控制, 通过在转向驱动电机输出轴安装电磁离合器和转向柱扭矩传感器实现人工驾驶模式和自动驾驶模式的自动切换。试验结果表明, 车轮转角响应平均稳态误差小于 0.1° , 最大稳态误差为 0.158° , $\pm 20^{\circ}$ 阶跃信号最快响应时间达 1.2 s , 超调量小于 1% , 可以满足对各种轮式农机的自动导航辅助驾驶转向系统性能的要求。

关键词: 自动转向; 转向控制器; 转向执行机构; 直流电机; 全液压转向器

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)08-0044-11 OSID: 

Design of Automatic Steering System Based on Direct Connection
of DC Motor and Full Hydraulic Steering Gear

YANG Yang^{1,2} ZHANG Gang¹ ZHA Jiayi¹ LI Yankai¹ ZHANG Tie³ CHEN Liqing^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 230036, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The automatic steering system of agricultural machinery equipment includes electric hydraulic automatic steering system and electric steering wheel automatic steering system. However, the electric hydraulic steering system has the disadvantages of high production cost and complex structure, and the electric steering wheel steering system has the problem of small control moment and free travel. In order to solve those problems, an automatic steering mechanism and its electronic control system were designed based on the direct connection between DC motor and full hydraulic steering gear. The automatic steering system mainly consisted of automatic steering actuator, automatic steering controller, hydraulic steering mechanism and wheel angle sensor. Automatic steering actuator and the original car hydraulic steering mechanism was coupled to achieve automatic steering function. In order to improve the accuracy of steering control of the wheels, an automatic steering controller was designed which considered Ackerman angle. An electromagnetic clutch and a steering column torque sensor were installed on the output shaft of the steering drive motor to realize automatic switching between manual driving and automatic driving. The automatic steering system designed was processed and applied to tractor, harvester and plant protection machine, which can meet the needs of use. The test results showed that the average deviation value of wheel response angle was less than 0.1° , the maximum deviation value was 0.158° , the response time of $\pm 20^{\circ}$ step signal can reach 1.2 s and the overshoot was less than 1% . Moreover, the step response was non-oscillatory, which was faster, accurate and stable than the traditional steering control system. The

收稿日期: 2019-12-24 修回日期: 2020-02-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700902)、国家自然科学基金项目(51905004)、安徽省自然科学基金项目(1808085QE168)和安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-036)

作者简介: 杨洋(1988—),男,副教授,博士,主要从事智能农业机械装备研究, E-mail: yangyang82512@163.com

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业机械装备研究, E-mail: 13838470472@163.com

automatic steering system designed not only met the performance index of automatic steering control, but also reduced the production cost, which provided support for the development of agricultural navigation technology.

Key words: automatic steering; steering controller; steering actuator; DC motor; full hydraulic steering gear

0 引言

农业机械导航技术在农业智能化发展中占有重要地位^[1],自主转向是自动导航系统的关键环节,研究转向控制精度高、适用性广和价格低廉的自动转向系统是农机导航装备推广应用的关键^[2]。

常见自动转向驱动系统主要有电控电磁比例液压阀、电控全液压阀和电控方向盘^[3]。文献[4-6]通过电控电磁比例阀控制车轮转向,该系统响应速度快、执行精度较高,但是成本较高。文献[7-11]设计了电控全液压阀自动转向系统,在不改变原有液压系统工作性能的基础上,并联了一个由电机控制的全液压转向器,该系统控制便捷,但缺少自动驾驶与人工驾驶的自动切换功能。随着对控制精度及控制便捷程度的提高,自动转向系统逐渐从加装比例阀或全液压阀控制的方式向电控方向盘方式转变。文献[12-13]在方向盘上加装步进电机,基于摩擦轮驱动方向盘转向,该方式安装方便,但存在摩擦滑移现象,角度偏差较大。张漫等^[14]设计了玉米中耕除草复合导航系统,通过在方向盘下方的转向柱上加装伺服电机驱动方向盘,进而控制车轮转向。魏爽等^[15]以 John Deere 拖拉机为试验平台,在方向盘上加装了步进电机,通过步进电机控制方向盘转向。何杰等^[16]以井关 PZ-60 型水稻插秧机为平台,通过加装电动方向盘来控制车轮转向,该方式控制精度较高、响应迅速,但是电控方向盘仅提供 3 N·m 的驱动力矩,在极端情况下提供转向力矩不足,影响控制精度。

综上,亟需设计一款适用性强、控制精度高、集成度高,且安装简便、具有驾驶模式自动切换功能的自动转向系统。为了便于农机自动驾驶的使用推广,自动转向系统除了满足性能指标外,还应成本低廉。本文研究基于直流有刷电机与全液压转向器直联的电-液混合自动转向系统,通过直流有刷电机控制全液压转向器工作,以期满足自动转向控制性能指标,并降低生产制造成本。

1 自动转向系统总体设计

基于直流有刷电机与全液压转向器直联的电-液混合自动转向系统总体设计如图 1 所示,系统主

要包括自动转向驱动装置、电磁离合器、自动转向控制器和原有底盘转向液压系统。

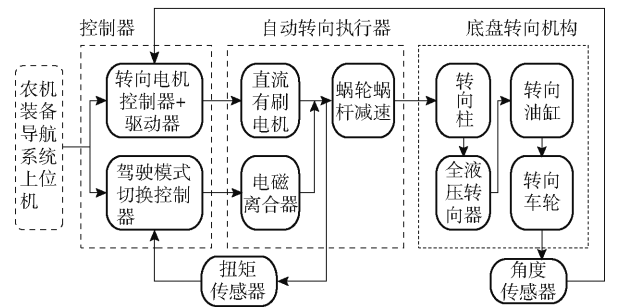


图 1 自动转向系统结构框图

电机通过电磁离合器和蜗轮蜗杆减速器驱动转向柱,转向柱与全液压转向器通过联轴器连接,实现车轮自动转向。自动转向驱动装置由控制器控制,控制器输入信号为前轮期望转角和车轮角度传感器获取的车轮实时转角,输出量为控制直流有刷电机的 PWM(脉冲宽度调制)方波信号。此外,控制器还控制电磁离合器通断,实现人工驾驶/自动转向的自动切换。

2 自动转向装置结构设计

2.1 并联双驱动转向装置

人工转向控制和自动转向控制组成并联双驱动转向装置系统,如图 2 所示,主要由方向盘、转向柱、转向电机、电磁离合器、蜗轮蜗杆减速器、扭矩传感器和全液压转向器组成。转向柱上端与方向盘通过

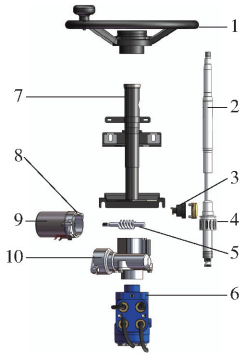


图 2 转向驱动装置原理图

Fig. 2 Steering drive schematic

1. 方向盘 2. 转向柱 3. 扭矩传感器 4. 蜗轮 5. 蜗杆 6. 全液压转向器 7. 转向柱外壳 8. 电磁离合器 9. 转向电机 10. 传动齿轮外壳

花键连接,下端和全液压转向器通过联轴器连接,实现驾驶员控制方向盘驱动全液压转向器。方向盘、转向柱和全液压转向器机械连接,能够确保人工转向控制的优先权和可靠性。在转向柱中间安装蜗轮齿轮,转向电机经过电磁离合器与蜗杆连接,最终转向电机通过蜗轮蜗杆减速后驱动转向柱,实现车轮自动转向功能。

电磁离合器安装在转向电机输出轴和蜗杆之间,用于通断转向电机与蜗杆连接,电磁离合器吸合状态转向电机经过蜗轮蜗杆减速驱动转向柱,电磁离合器断开状态转向电机与蜗杆断开,此时驾驶员控制方向盘驱动转向。通过安装在转向柱上的扭矩传感器判断驾驶员操纵状态,设计逻辑控制算法实现电磁离合器通断控制。

2.2 车轮转角测量装置

车轮转角测量是自动转向系统的重要组成部分,直接影响转向性能的重要环节^[17-19]。车轮转角测量装置如图 3 所示,采用非接触式霍尔角度传感器测量车轮转向角。



图 3 车轮转角测量装置

Fig. 3 Wheel angle measuring device

1. 角度传感器 2. 柔性联轴器 3. 车轮转向轴 4. 定位支架
5. 传感器信号线 6. 车桥机体

传感器通过定位支架安装在农业机械装备车桥机体上,传感器定位孔与支架通过螺栓固结,相对于车桥机体静止,传感器 D 型输出轴通过柔性联轴器与车轮转轴固结。柔性联轴器静态扭转刚度为 $20\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$,额定扭矩 $1.0\text{ N}\cdot\text{m}$,而传感器启动扭矩小于 $0.001\text{ N}\cdot\text{m}$,因此选用的柔性传感器能够满足车轮转角信号的准确测量,不会产生转角误差。此外,柔性联轴器在铅垂方向弹性较小,可有效避免工作环境和机械振动等对传感器的影响,有效保护传感器和避免测量振动噪声干扰。

3 控制器硬件设计

3.1 硬件系统总体设计

自动转向控制系统框架示意图如图 4 所示,主要由 STM32F103 处理器、核心电路、电源电路、转向电机驱动电路、CAN 通信电路、车轮角度传感器采

集电路、方向柱扭矩传感器采集电路、电磁离合器控制电路以及其他附属电路组成^[20-23]。

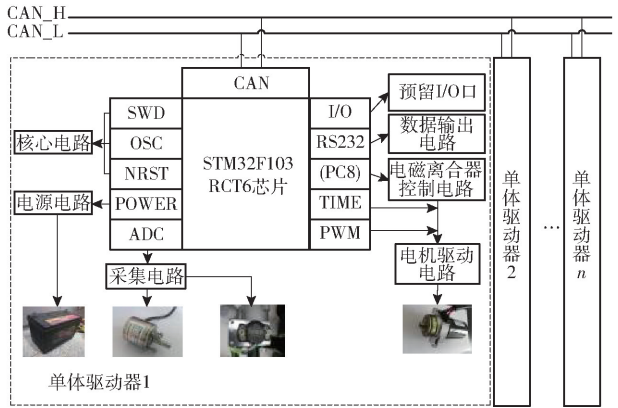


图 4 自动转向控制系统结构框图

Fig. 4 Structure diagram of automatic steering system control system

STM32F103 处理器负责控制器信息处理和数据运算,核心电路是 STM32F103 处理器正常工作所需的基本电路;电源电路为电磁离合器控制电路、电机驱动电路、CAN 通信电路以及为车轮角度传感器、扭矩传感器和 STM32F103 处理器供电电路;电磁离合器控制电路控制电磁离合器的开合,实现人工驾驶模式和自动驾驶模式的自动切换;电机驱动电路用于驱动直流有刷电机转动;CAN 通信电路用于上位机与下位机信息的交互、传感器信号的传输;传感器电路实时采集车轮转向角与方向盘扭矩。

3.2 处理器 I/O 分配

图 5 为自动转向控制器单片机所用的 I/O 分配图,使用了 ADC(模拟数字转换器)电压采集模块、定时器脉冲采集模块、PWM 波输出模块、CAN 通信模块、RS232 通信模块、高低电平输出等单片机资源。

3.3 电源电路设计

转向控制系统由车载 12 V 蓄电池供电,根据各个模块电路对电压的需求设计控制器电源电路。如图 6 所示,将 12 V 电压转换为 5、3.3 V 电压输出,并加入保护及滤波电路。

3.4 传感器选型及其信号采集电路设计

车轮转角传感器如图 7 所示,选用 LA-3006-5VV05 型非接触式霍尔角度传感器,输入电压 5 V,输出电压 $0\sim5\text{ V}$, $0^\circ\sim360^\circ$ 无死角检测,线性精度 0.3%。壳体采用 304 不锈钢加工制作,防护等级 IP67,适用于农业作业环境。

图 8 为实时监测驾驶员操纵方向盘状态的 QCG-N11L-100 型扭矩传感器,输入电压 5 V,通过检测扭转杆的扭转变形对外输出 $0\sim5\text{ V}$ 的电压

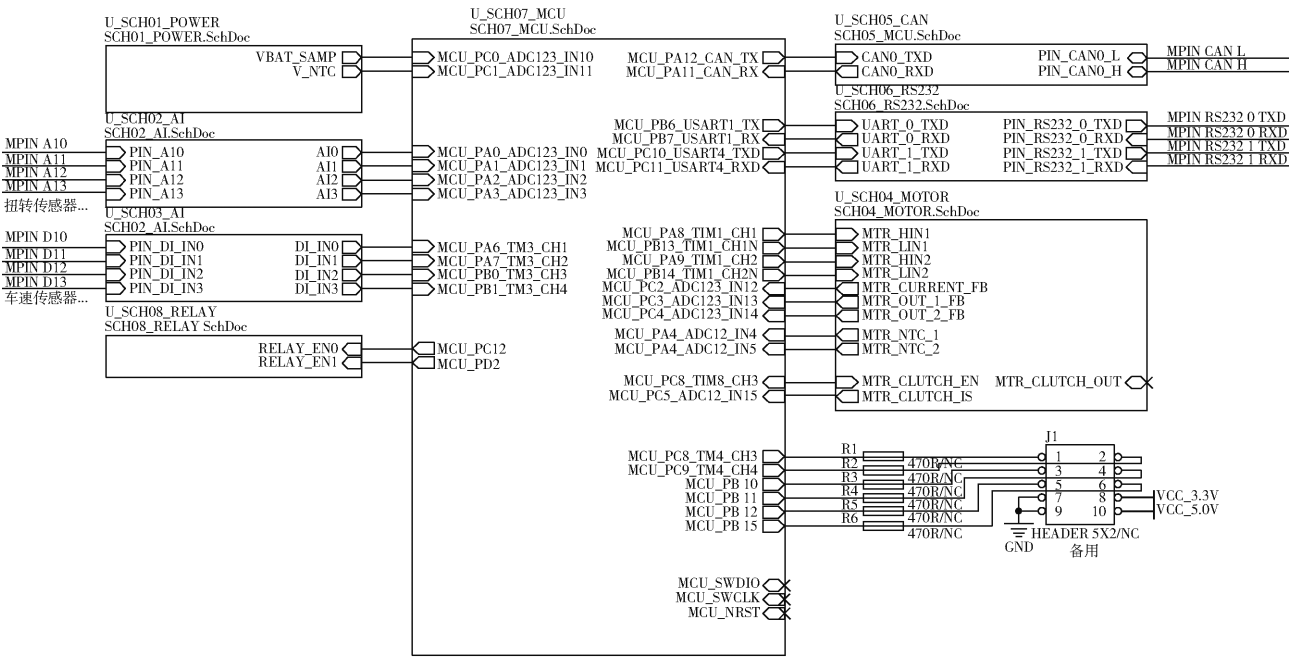


图 5 处理器 I/O 分配图

Fig. 5 Processor I/O allocation diagram

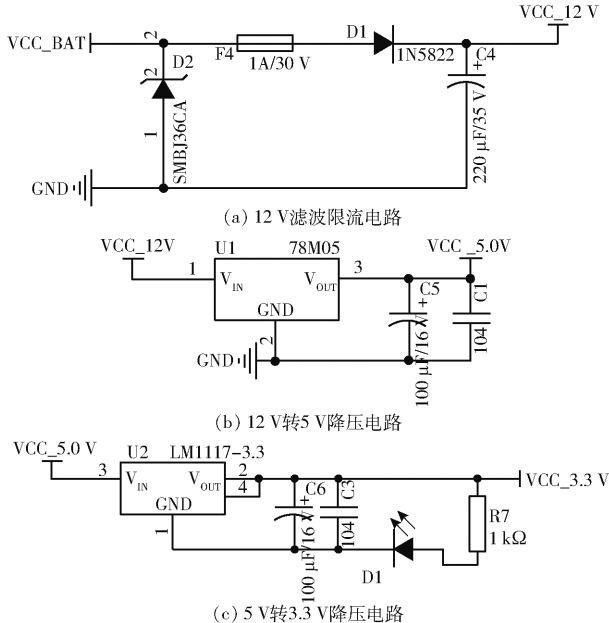


图 6 电源电路原理图

Fig. 6 Power circuit schematic

信号。
角度传感器及方向盘扭矩传感器电压采集电路

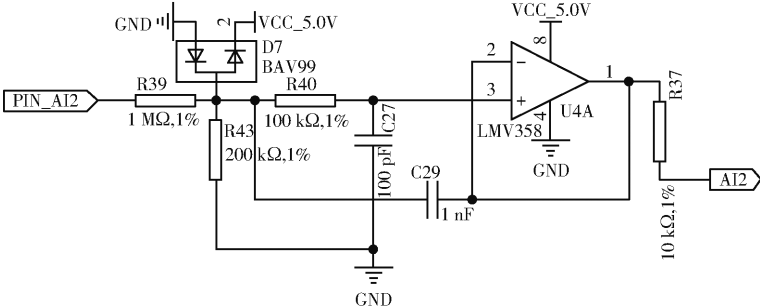


图 9 电压采集电路

Fig. 9 Voltage acquisition circuit



图 7 车轮角度传感器

Fig. 7 Wheel angle sensor

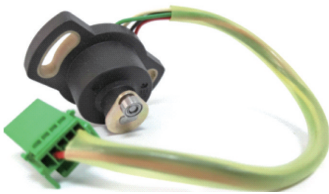


图 8 方向盘扭矩传感器

Fig. 8 Steering column torque sensor

如图 9 所示,电压由 PIN_AI2 端口接入,输出端接单片机的 PA2 角进行 ADC 采集电压。

3.5 电机驱动系统设计

电机驱动系统主要由电机驱动电路、离合驱动电路以及电机电流采样电路组成。

3.5.1 驱动电机选型

自动转向驱动电机采用 12 V 直流有刷电机,直流有刷电机具有价格低廉、易于控制、响应迅速且具有高启动转矩等优点,确保电机在低速时也能输出高扭矩,电机参数如表 1 所示。

表 1 直流有刷电机主要参数

参数	数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 050
最大转矩/(N·m)	1.6
额定功率/W	130
额定电流/A	25
额定电压/V	12
蜗轮蜗杆减速比	20.5
转向柱最大扭矩/(N·m)	30

3.5.2 电机驱动电路

如图 10a 所示,电机驱动电路采用 2 个 IR2104 芯片构成的电机全桥驱动电路。IR2104 自带死区保护,MTR_HIN1 和 MTR_LIN1 接入 STM32 高级定时器 TIM1 通道 1 引脚上。功率器件选用 AP9990GH 型的 N 沟道场效应管,耐压 60 V,可过电流 100 A。

3.5.3 电机电流检测电路

由于电机在带载低速工作和堵转时,电机电流比额定电流高 2 倍以上,因此需要加入检测电路实时检测电机电流。电机电流检测电路如图 10b 所示,在全桥电路的 MOS 管(MOSFET,金属氧化物半导体型场效应管)源极串联一个 5 mΩ 的采样电阻,将 MOS 管输出的电流信号转换为电压信号,经过运

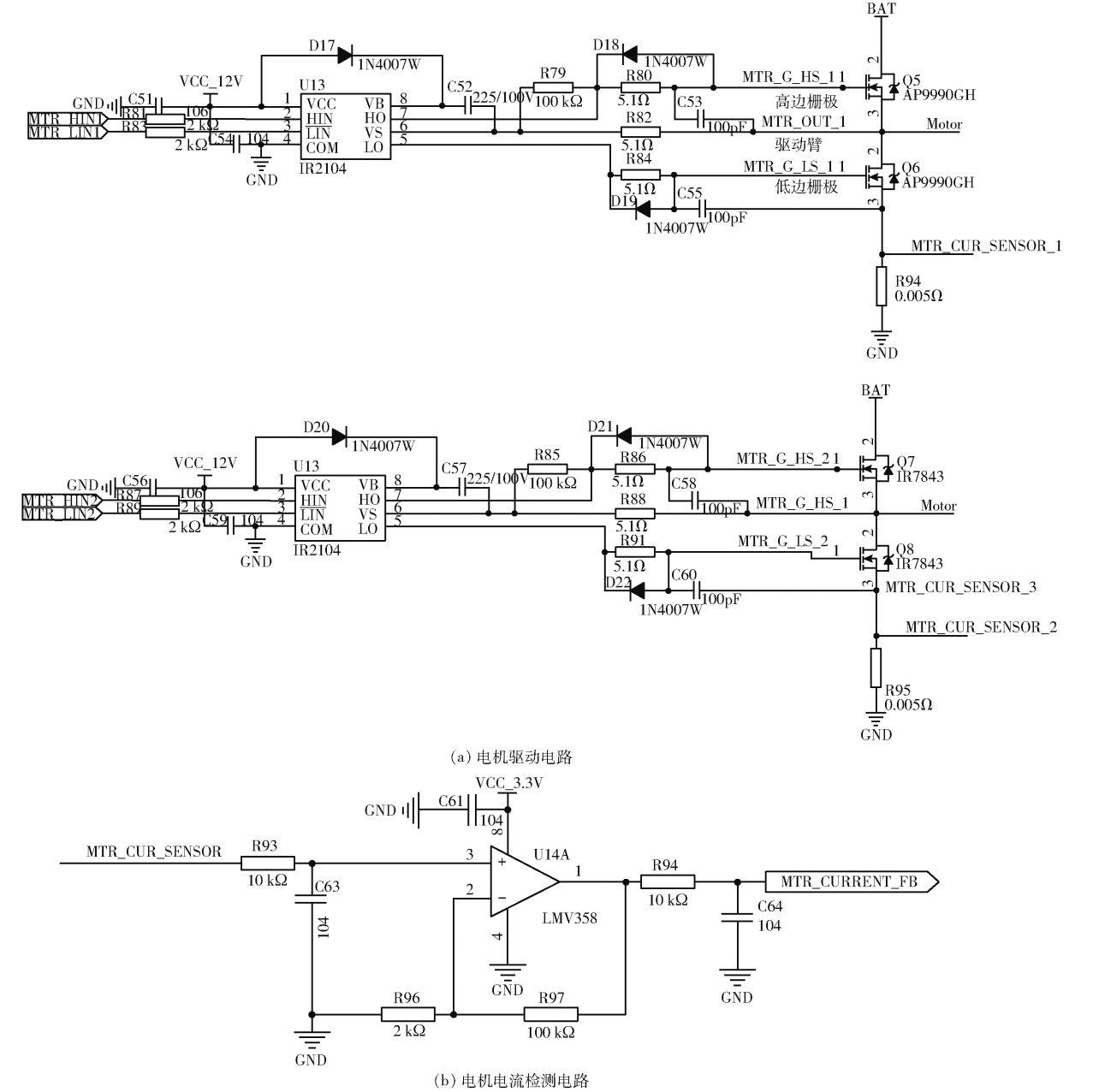


图 10 直流有刷电机驱动电路原理图

Fig. 10 Schematic of DC brush motor drive circuit

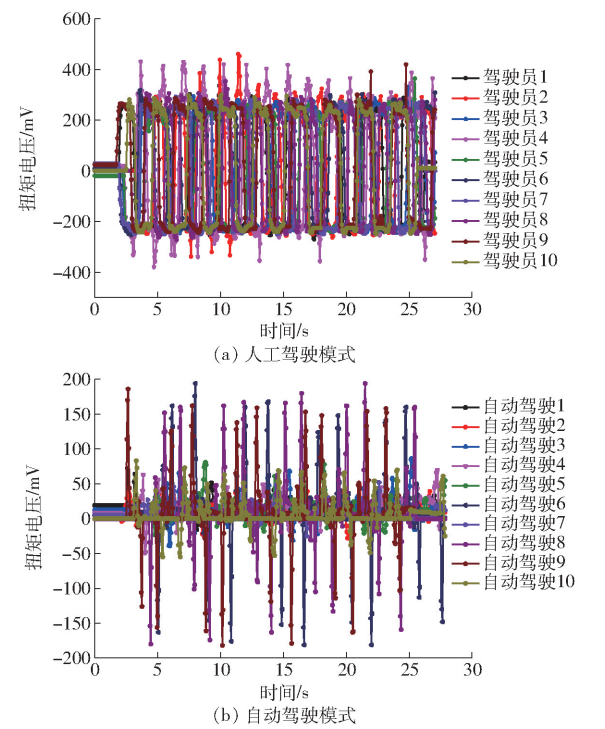


图 14 方向盘在不同情况下扭矩电压信号变化规律
Fig. 14 Torque voltage signal variation law of steering wheel under different conditions

4 控制器软件设计

4.1 CAN 通信协议与报文解析

由于农业机械工作环境复杂多样,各个子系统之间需要相互协调工作,才能满足农业精细化生产的要求。根据转向控制系统多节点的要求以及国际上对农机总线的通用性,选用 CAN 总线通信方式作为自动转向系统的控制网络^[24-26]。数据传输使用 CAN 标准帧,并对其 8 位数据字节进行了重新定义;Data|0|~Data|7|,具体定义如表 2、3 所示。

表 2 物理层通信协议 Tab.2 Physical layer communication protocol			
发送端	接收端	ID	波特率/($\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$)
上位机	转向控制器	0X005	500
转向控制器	上位机	0X006	500

自动转向控制器接收上位机发出的 CAN 信息,并根据表 3 的定义进行解析,如果第 1 位字节不是自动驾驶模式 (Data|0| $\neq$ 0X02),则电磁离合器断开,电机失能,退出自动驾驶模式;如果第 1 位字节是自动驾驶模式 (Data|0|=0X02),则解析第 5 位字节和第 6 位字节的目标角度数据,将目标角度输入,电机使能,电磁离合器吸合。最后解析第 8 位字节目标车轮转向角速度,车轮目标转向角速度的范围为 0.157~0.576 rad/s(对应 Data|7|为 1~255),可以通过控制转向角速度实现车轮转向速度。为了

表 3 应用层通信协议 Tab.3 Application layer communication protocol		
字节序号	内容	数据
Data 0	工作模式	0:手动驾驶模式 2:自动驾驶模式
Data 1		
Data 2	保留	保留
Data 3		
Data 4		
Data 5	目标车轮转角	对应转角范围 -40° (右)~
Data 6		40° (左),精确度 0.1°
Data 7	目标车轮转向角速度	输入范围 1~255,对应角速度 $0.157\sim0.576\text{ rad/s}$

提高自动驾驶的实时性,设定 CAN 报文的收/发速率为 50 Hz/s,为了避免在自动驾驶时与上位机通信出现故障而产生危险,设定了超过 200 ms 没有接收到 CAN 报文,则退出自动驾驶模式,转换为人工驾驶模式,并发出警报。

4.2 电机驱动控制策略

通过控制定时器输出占空比可变的脉冲来控制电机转速,对于电机驱动需要用到的处理器外设模块有高级定时器 TIM1、基本 I/O 口、中断模块等,程序运行时,先对上述模块进行配置。通过配置 TIM1 的 2 通道 PWM 占空比驱动 MOS 管,使电机转动,控制流程如图 15 所示。

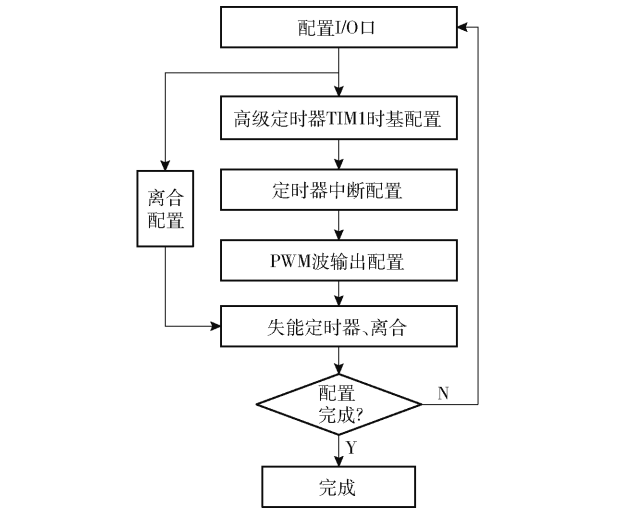


图 15 电机驱动控制流程图
Fig. 15 Motor drive control flow chart

4.3 自动转向精确控制算法

为了精准可靠地控制农机车轮转向,设计了考虑阿克曼角的车轮转角及其转角速度双闭环控制算法。

4.3.1 阿克曼角

图 16 为车前轮转向角度示意图,由于存在阿克曼角,使得挂载在右前轮的角度传感器测得的角度与实际角度存在偏差,因此设计考虑阿克曼角的转

向角控制算法为

$$\theta = \begin{cases} \arctan \left(\frac{L_1}{\frac{L_1}{\tan \frac{\beta \pi}{180}} - \frac{L_2}{2}} \right) \frac{180}{\pi} & (\text{右转}) \\ \arctan \left(\frac{L_1}{\frac{L_1}{\tan \frac{\beta \pi}{180}} + \frac{L_2}{2}} \right) \frac{180}{\pi} & (\text{左转}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ ——实际转向角

β ——右轮转向角

L_1 ——车轴距

L_2 ——车轮距

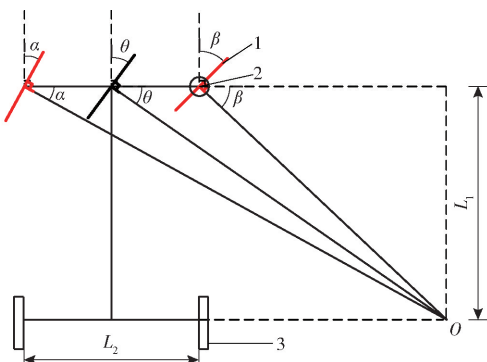


图 16 车轮转向阿克曼角示意图

Fig. 16 Schematic of Ackerman angle for wheel steering

1. 车前轮 2. 角度传感器 3. 车后轮

4.3.2 车轮转角闭环控制算法

为了精确控制车轮转角,本文采用位置式 PID 控制算法,算法为

$$O_{\text{PID}} = K_p e(k) + K_i \sum e(k) + K_d (e(k) - e(k-1)) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中 O_{PID} ——输出值

K_p 、 K_i 、 K_d ——位置控制算法比例、积分和微分系数

$e(k)$ ——第 k 次角度偏差

$e(k-1)$ ——第 $k-1$ 次角度偏差

$\sum e(k)$ —— $e(k)$ 以及之前的偏差累积

以高地隙底盘转向系统作为试验平台,综合考虑转向控制响应速度、控制精度、超调量等,对控制器进行 PID 参数整定,根据先比例后微分最后积分的原则,经过测试及调整,确定位置式 PID 控制算法中参数的最优值分别为 $K_p = 45$ 、 $K_i = 0.015$ 、 $K_d = 0.001$ 。试验结果如图 17 所示,可看出车轮转向响应曲线平滑稳定地逼近目标角度,且超调量小于 1%,由于设定角速度为 0.192 rad/s,对应的转向响

应时间为 3.6 s。

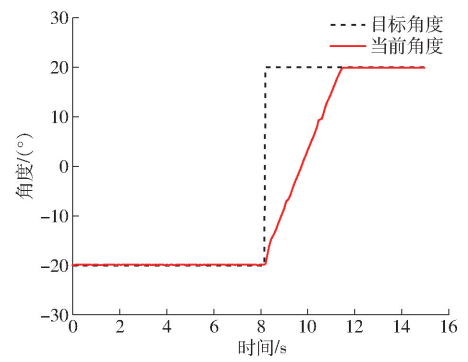


图 17 角度控制算法整定响应图

Fig. 17 Angle control algorithm setting response chart

4.3.3 基于车轮转向角速度的自动转向精确控制

为了增加车轮的可控性,车轮以给定角速度转向,设计了基于车轮转向角速度控制的自动转向精确控制算法,流程如图 18 所示。

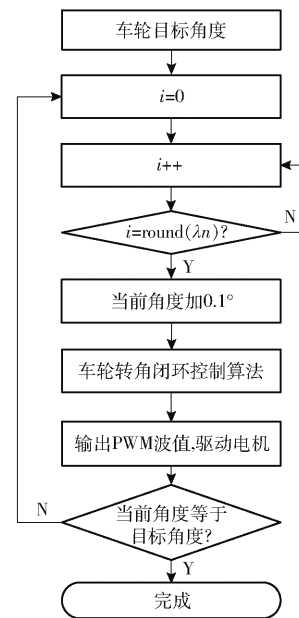


图 18 车轮转向角速度控制算法流程图

Fig. 18 Flow chart of wheel steering angle speed control algorithm

上位机通过 CAN 总线定义车轮转向角速度,数据位定义为 Data[7],由于 Data[7] 为两位 16 进制的整形,十进制取值为 1~255,因此需要构建 Data[7] 取值与车轮转速的映射关系

$$f(n) = \text{round}(\lambda n) \quad (3)$$

式中 $\text{round}()$ ——取整函数

n ——CAN 通信中数据位 Data[7] 取值,在 1~255 范围内取整数

λ ——映射系数

根据人工测试获取转向驱动电机额定最大转速工况下车轮转向角速度为 0.581 rad/s,确定 λ 为 0.13。

5 自动转向系统设计与试验

5.1 系统设计

图 19a 为转向控制器电路板实物图,板卡上模块化集成了各个电路。图 19b 为转向执行器总成实物图,包括转向执行机构与塑料外壳,可以便捷地安装于各种农机。

5.2 车轮转向角信号跟踪试验

以高地隙底盘为试验平台,上位机以 50 Hz 频率发出方波指令控制信号,该信号为在低、中、高 3 种车轮转向角速度情况下的 $\pm 20^\circ$ 阶跃信号,通过 CAN 通信网络发到下位机转向执行机构,下位机采集 CAN 报文同样也是 50 Hz。试验结果如图 20 所示。由图 20 可知,车轮转向角迅速且平滑稳定地转到目标转向角,转向响应时间如表 4 所示,符合车轮转向角速度控制算法设计目标。

车轮转向角实时信号响应差值如图 21 所示。由图 21 可知,在车轮目标转角从 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 变化过程中,最大稳态误差为 0.158° ,超调量全部小于 1%,平均响应稳态误差小于 0.1° 。

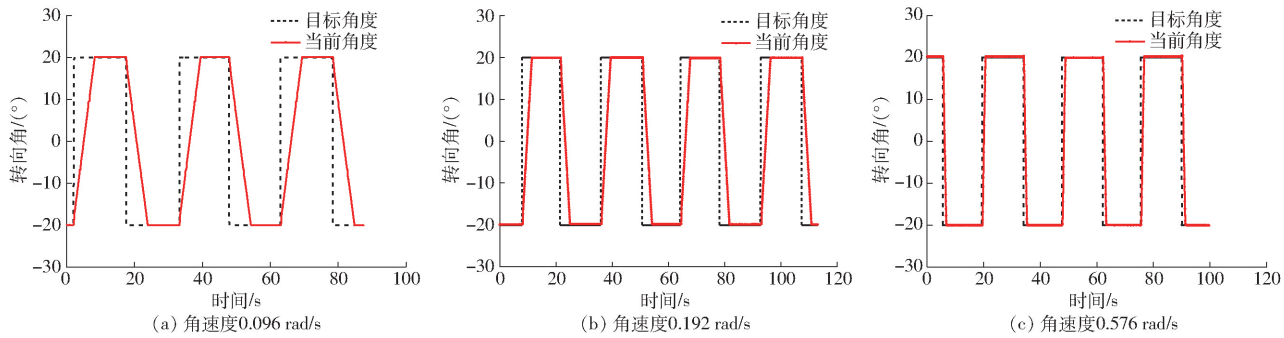


图 20 角速度控制算法测试响应图

Fig. 20 Test response charts of angular velocity control algorithm

表 4 转向响应时间			
Tab. 4 Measurement of steering time			
角度/ $(^\circ)$	角速度/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	响应时间/s	超调量/%
± 20	0.096	7.2	0.39
± 20	0.192	3.6	0.70
± 20	0.576	1.2	0.62

5.3 自动驾驶模式与人工驾驶模式自动切换试验

为了测试在自动驾驶过程中遭遇突发情况需要人工驾驶的性能,在人工干预的情况下进行了自动驾驶模式与人工驾驶模式智能切换试验。图 22 为设定扭矩传感器电压信号阈值 $[-800, 800]\text{ mV}$ 状态开展的自动驾驶模式自动切换到人工驾驶模式的试验测试结果。图 22a 为在自动驾驶模式下车轮当前转角、目标转角及当前扭矩电压信号的变化情况。

由图 22a 可看出,在自动驾驶模式下,方向盘扭矩电压信号在 $[-150, 150]\text{ mV}$ 范围内变化,没有超过程序设定的阈值,此时车轮在自动驾驶模式下平滑稳定的到达目标角度。图 22b 为自动驾驶模式下受到了人工干预的工况。由图 22b 可看出,当人为干预方向盘时,扭矩传感器接收到扭矩电压信号超过设定阈值,此时自动驾驶模式自动快速切换到人工驾驶模式。切换时间小于 20 ms ,可以有效预防农机在田间作业时的紧急情况。

6 结论

(1)提出一种基于直流有刷电机与全液压转向器直联的自动转向执行机构,并设计了电控系统。相对于传统自动转向系统,该系统响应速度快、精度

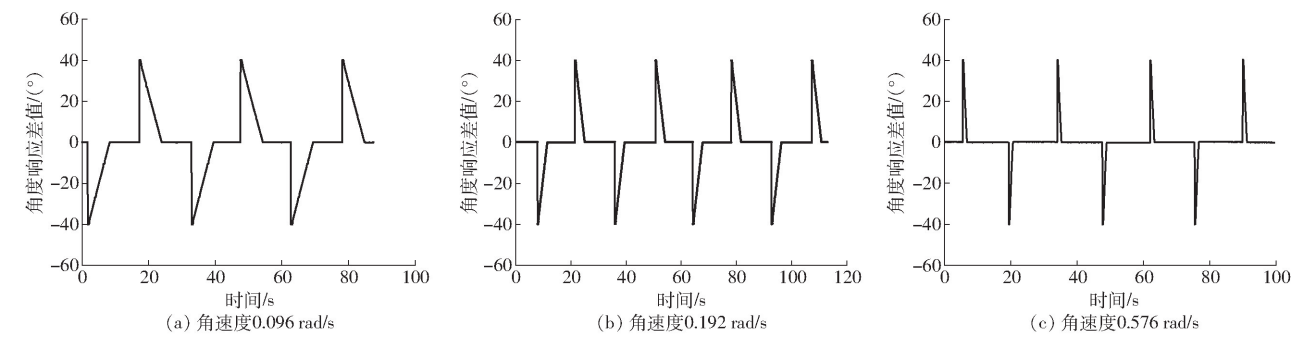


图 21 角度响应跟踪差值

Fig. 21 Angle response tracking error

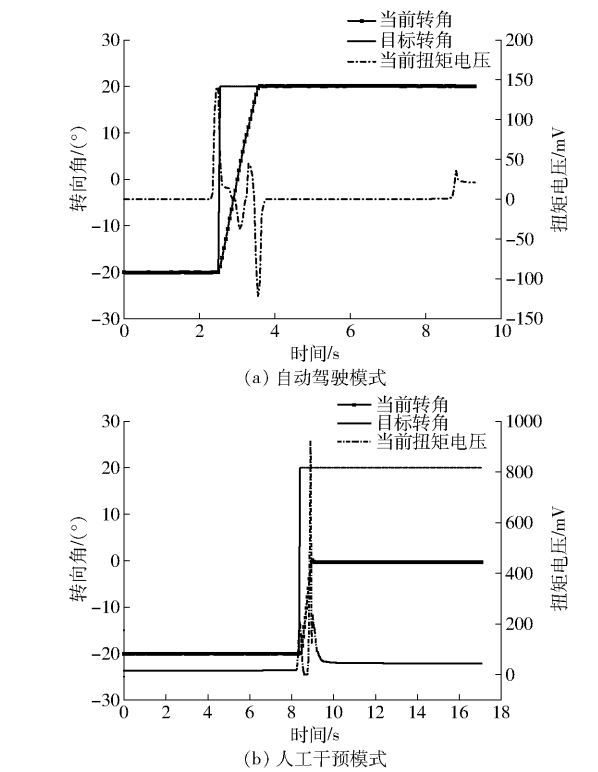


图 22 自动驾驶模式及人工干预模式下的扭矩变化曲线

Fig. 22 Torque value change under automatic driving mode and manual intervention mode

高,控制力矩最大达 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 。自动转向系统集成度高,农机装备加装的精度要求低,成本低廉。

(2)设计的自动转向电机驱动模块采用全桥驱动电路,设计了考虑阿克曼角的转向角度控制算法,并基于 PID 位置式闭环算法控制车轮转角。车轮转角 $\pm 20^\circ$ 试验表明,转向最大稳态误差 0.158° ,平均稳态误差小于 0.1° ,超调量小于 1% ,车轮转角 $\pm 20^\circ$ 最快响应时间为 1.2 s ,且阶跃响应无振荡现象,较传统的转向控制系统更迅速、精准和稳定。

(3)当自动驾驶转换为人工驾驶模式时,提出采用方向盘扭矩传感器检测当前转向模式,并设计了驾驶模式控制逻辑。试验结果表明,系统在 20 ms 内能迅速完成转换,相对于传统的自动驾驶模式更加安全与便捷。

(4)设计的基于 STM32F103 处理器的自动转向驱动器,包含控制器温度监测电路、系统工作电压监测电路、电机驱动电流监测电路及其他各种反馈保护电路,提高了控制系统的稳定性,能够实现电机稳定驱动、角度及扭矩精确采集和 CAN 实时通信等功能。

参 考 文 献

[1] 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9):44–54.
JI Changying,ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):44–54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008. (in Chinese)

[2] 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):1–10.
HU Jingtao,GAO Lei,BAI Xiaoping,et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):1–10. (in Chinese)

[3] 张智刚,罗锡文,李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11):77–80.
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, LI Junling. Automatic steering control system of wheeled model farming machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11):77–80. (in Chinese)

[4] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139–145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):139–145. (in Chinese)

[5] 李逃昌,胡静涛,高雷. 基于级联式控制策略的农业机械鲁棒自适应路径跟踪控制[J]. 机器人, 2014,36(2):241–249.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei. Robust adaptive path tracking control of agricultural machines based on cascaded control strategy [J]. Robot, 2014, 36(2):241–249. (in Chinese)

[6] 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010,41(11):148–152.

- LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):148–152. (in Chinese)
- [7] 丁幼春,王书茂.联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(5):137–142.
- DING Youchun, WANG Shumao. Vision navigation control system for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):137–142. (in Chinese)
- [8] 黎永键,赵祚喜,高俊文,等.东方红拖拉机电控液压转向系统设计及试验研究[J].农机化研究,2016,38(11):252–257.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, GAO Junwen, et al. Steering system design and experiment research for Dongfanghong-X804 tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):252–257. (in Chinese)
- [9] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等.基于DGPS与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL].农业机械学报,2017,48(2):11–19.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):11–19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170202&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002. (in Chinese)
- [10] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等.东方红拖拉机自动转向控制器设计及试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):93–99.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Design and experiment of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(Supp.2):93–99. (in Chinese)
- [11] 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等.基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J/OL].农业机械学报,2013,44(2):165–170.
- HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Joint control method of speed and heading of navigation tractor based on optimal control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):165–170. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130231&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2010.02.031. (in Chinese)
- [12] 张闻宇,丁幼春,王磊,等.拖拉机自动导航摩擦轮式转向驱动系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(6):32–40.
- ZHANG Wengyu, DING Youchun, WANG Lei, et al. Design and experiment on automatic steering control system of friction drive for tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(6):32–40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170604&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.004. (in Chinese)
- [13] 刘阳.拖拉机自动导航系统CAN总线的设计与实现[D].石河子:石河子大学,2012.
- LIU Yang. Design and implement CAN-bus of automatic navigation system on the tractor[D]. Shihezi: Shihezi University, 2012. (in Chinese)
- [14] 张漫,项明,魏爽,等.玉米中耕除草复合导航系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(增刊):8–14.
- ZHANG Man, XIANG Ming, WEI Shuang, et al. Design and implementation of a corn weeding-cultivating integrated navigation system based on GNSS and MV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(Supp.):8–14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.002. (in Chinese)
- [15] 魏爽,李世超,张漫,等.基于GNSS的农机自动导航路径搜索及转向控制[J].农业工程学报,2017,33(增刊):70–77.
- WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(Supp.):70–77. (in Chinese)
- [16] 何杰,朱金光,罗锡文,等.电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J].农业工程学报,2019,35(6):18–25.
- HE Jie, ZHU Jinguang, LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6):18–25. (in Chinese)
- [17] 张智刚,王桂民,罗锡文,等.拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J/OL].农业机械学报,2019,50(3):352–357.
- ZHANG Zhigang, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Detection method of steering wheel angle for tractor automatic driving [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):352–357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190340&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.040. (in Chinese)
- [18] ADAM J, PIOTR M, SEWERYN L, et al. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes [J]. Biosystems Engineering, 2016, 145:22–28.
- [19] THANPATTRANON P, AHAMED T, TAKIGAWA T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: automatic control of trailer position with tractor [J]. Biosystems Engineering, 2016, 147:90–103.
- [20] 陈黎卿,许泽镇,解彬彬,等.无人驾驶喷雾机电控系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):122–128.
- CHEN Liqing, XU Zezhen, XIE Binbin, et al. Design and test of electronic control system for unmanned drive sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):122–128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.013. (in Chinese)

- acoustics and artificial neural networks[J]. Artificial Intelligence Research,2012,1(2):67-74.
- [16] HADI K,HOSSEIN N,ASGHAR M. Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2015,13(1):1-8.
- [17] 何立明,赵昱,程邦勤. 气体动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [18] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):141-148.
- YU Xingrui,GENG Duanyang,DU Ruicheng,et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):141-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s019&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)
- [19] 刘立晶,刘忠军,杨学军,等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):54-57.
- LIU Lijing,LIU Zhongjun,YANG Xuejun,et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):54-57. (in Chinese)
- [20] Kubota. Kubota pneumatic seed drills[EB/OL]. [2018-12-22]. https://www.kubota.com.au/wp-content/uploads/2016/09/KU_SD_Pneu.-Seed-Drills_III_IEN_AUS_LR-1.pdf.
- [21] KVERNLAND. The inventors of pneumatic seeding technology[EB/OL]. [2018-12-23]. https://ien.kverneland.com/content/download/56438/320861/KV_pneumatic_cult_mtd_gb.pdf.
- [22] 梁振伟,李耀明,赵湛,等. 基于模态分析的联合收获机籽粒损失监测传感器结构优化与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(4):22-29.
- LIANG Zhenwei,LI Yaoming,ZHAO Zhan,et al. Structure optimization and performance experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester in using modal analysis[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(4):22-29. (in Chinese)
- [23] 梁振伟,李耀明,赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. 农业工程学报,2014,30(3):18-26.
- LIANG Zhenwei,LI Yaoming,ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(3):18-26. (in Chinese)
- [24] SERGIO Franco. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits[M]. Columbus:The McGraw-Hill Companies,2002.
- [25] 金鑫,李倩文,苑严伟,等. 2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):84-92.
- JIN Xin,LI Qianwen,YUAN Yanwei,et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery,2018,49(5):84-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180510&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)
-
- (上接第54页)
- [21] 李世超,曹如月,季宇寒,等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):40-49.
- LI Shichao,CAO Ruyue,JI Yuhao,et al. Performance analysis and comparison of different types of steering wheel turning control motors in automatic navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):40-49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s007&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)
- [22] HAN X Z,KIM H J,KIM J Y,et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2015,112:161-171.
- [23] HOSSEIN M. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles[J]. Journal of Terramechanics,2013,50(3):211-232.
- [24] 陈黎卿,许鸣,柏仁贵,等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):25-32.
- CHEN Liqing,XU Ming,BAI Rengui,et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):25-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)
- [25] 翟长远,朱瑞祥,黄胜,等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(8):70-74,84.
- ZHAI Changyuan,ZHU Ruixiang,HUANG Sheng,et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):70-74,84. (in Chinese)
- [26] 孟庆华,许进,王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):33-37,20.
- MENG Qinghua,XU Jin,WANG Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8):33-37,20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130806&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.006. (in Chinese)