

基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比

李世超¹ 曹如月¹ 季宇寒¹ 徐弘祯¹ 张漫¹ 李寒²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了提高拖拉机在农田环境中自主导航作业的控制精度,设计开发了3种基于不同类型电机的方向盘转向控制系统,在分析步进电机、伺服电机和步进伺服电机3种电机的参数及其性能差异的基础上,设计了拖拉机自动转向执行机构,并配备了工控机PC、PLC控制器、前轮转角检测机构和GNSS定位系统等设备。设计了工控机车载终端软件,能够实现自动导航的嵌套双闭环控制及相应PID控制算法,设计了控制系统的电气原理图和PLC转向程序,在混凝土路面和田间播种作业两种工况下进行了拖拉机自动导航实验。实验结果表明,当拖拉机作业速度为0.8 m/s时,两种实验条件下,步进电机导航系统的均方根误差分别为8.81 cm和12.09 cm,伺服电机导航系统的均方根误差分别为4.85 cm和10.55 cm,步进伺服电机导航系统的均方根误差分别为4.54 cm和5.53 cm,步进伺服电机在方向盘转向控制系统中自动导航效果较好。

关键词: 自动导航; 转向控制; 电机选型; 嵌套双闭环控制; PID控制算法

中图分类号: S219.032.3; U675.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0040-10

Performance Analysis and Comparison of Different Types of Steering Wheel Turning Control Motors in Automatic Navigation System

LI Shichao¹ CAO Ruyue¹ JI Yuhan¹ XU Hongzhen¹ ZHANG Man¹ LI Han²
(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the control precision of the autonomous navigation operation of agricultural machinery in farmland environment, three steering wheel turning control systems based on different types of motors were designed and developed. Based on the analysis of the parameters of the three kinds of motors, such as stepper motor, servo motor and stepper servo motor, and their performance differences, the tractor automatic steering actuator was designed, and equipped with industrial computer PC, PLC controller, front wheel angle detection mechanism and GNSS positioning system. The design and development of the industrial vehicle terminal software can realize the automatic navigation nested double closed-loop control system and the corresponding PID control algorithm; the electrical schematic of the control system and the PLC steering program were designed. Finally, the tractor automatic navigation concrete pavement and field sowing test were carried out. When the tractor was linearly navigating at a speed of 0.8 m/s, under the two test conditions, the root mean square errors of the stepper motor navigation system were 8.81 cm and 12.09 cm, respectively, the root mean square errors of the servo motor navigation system were 4.85 cm and 10.55 cm, respectively, and the root mean square errors of the stepper servo motor navigation system were 4.54 cm and 5.53 cm, respectively. The test results showed that the stepper servo motor had the best performance for steering wheel turning control in the automatic navigation system.

Key words: automatic navigation; turning control; motor selection; nested double closed loop control; PID control algorithm

收稿日期: 2019-04-20 修回日期: 2019-05-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(31571570)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700400-2017YFD0700403)和中国农业大学研究生实践教学基地建设项目(ZYXW037)
作者简介: 李世超(1992—),男,博士生,主要从事多机协同导航技术研究,E-mail: 18332300241@163.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

0 引言

农业机械自动导航是实施精细农业的关键技术之一^[1-4]。随着 PLC 技术、伺服控制技术的迅速普及和推广,以步进电机和伺服电机为执行元件的定位控制技术在农机自动导航转向系统中得到了越来越广泛的应用。

关于步进电机转向控制的相关研究,文献[5]进行了汽车四轮转向和主动悬架的综合控制研究,采用步进电机作为后轮转向的执行机构,建立了四轮转向系统的硬件开环仿真平台。文献[6]设计了汽车转向传动轴扭转疲劳寿命试验台,利用步进电机驱动传动轴,模拟方向盘正反方向的转动。文献[7]开展智能电动车自动转向控制系统研究,以步进电机转向执行机构取代了方向盘转向控制系统,对电动汽车进行了自主转向的智能化改造。步进电机驱动系统属于开环控制,其位置控制精度不但与控制系统的性能有关,在很大程度上还取决于系统的机械结构,由此产生传动误差、转换误差等许多非线性因素的影响,这些误差系统又无法对其进行有效的校正和补偿,因此很难使系统达到较高的位置控制精度。文献[8]采用西门子 S7-200 PLC 和增量型编码器对步进电机实行了闭环控制回路改造,使其控制性能更为可靠。文献[9]利用光栅尺作为步进电机的位置检测装置及反馈装置,通过 PLC 程序算法实现对步进电机位置的闭环控制。

关于伺服电机转向控制的相关研究,文献[10]采用伺服电机和磁粉制动器开展了电动助力转向控制器基本性能试验台研究。文献[11]通过工控机控制伺服电机对电动助力转向器进行加载,实现了电动助力转向器管柱总成综合性能的测试。文献[12]提出了左、右前轮转向角 PID 同步控制算法,并以松下 PLC 为核心,构建了由左前轮转向交流伺服电机、推杆伺服电机、驱动器和编码器组成的 AGV 转向控制系统。文献[13]选用伺服电机对汽车转向系统进行了模拟实验。以上伺服电机驱动系统相比步进电机而言,属于闭环控制系统,控制精度较高,然而市场报价一般也较高。

大部分自动导航研究中,方向盘控制应用的是步进电机或伺服电机,较少应用步进伺服电机,对不同类型电机在自动导航中方向盘自动转向控制性能的分析比较相对较少。因此,本文通过自主研发的拖拉机电动方向盘转向控制系统,进行 3 种电机性能的对比研究,并设计实验对不同电机导航应用效果进行分析与比较,以选出导航效果更好的方向盘电动控制系统。

1 电动方向盘转向控制系统整体设计

电动方向盘转向控制系统包含控制器与执行器两部分(图 1),控制器部分将工控机 PC 和 PLC 控制器有机结合,前者为导航控制算法提供充足计算能力,后者为保证信号的实时传输提供可靠控制。执行器部分,通过小步距角的高精度电机带动与方向盘稳定紧固的中空轴旋转平台,实现对方向盘的高精度大扭矩控制,进而实现对拖拉机的转向控制。

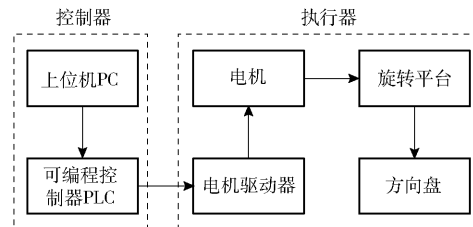


图 1 电动方向盘转向控制系统组成
Fig. 1 Electric steering turning control system

1.1 设备选型

1.1.1 控制器与转台选型

首先是针对控制器部分的选型,包括工控机 PC 和 PLC 控制器选型。

(1) 工控机终端设备

为提高算法处理速度和导航系统的可靠性,选择威达电股份有限公司的 PPC-5152-D525 型工控机作为车载终端,其拥有可靠的 IP65 铝制前面板,适用于恶劣的工业环境,其具体参数如表 1 所示。

(2) PLC 控制器

PLC 控制器采用深圳市宝胜华科技有限公司的三菱 FX3U 系列 PLC,其基本单元的型号为 16MT/DS,采用 24 V 直流电压供电,输入/输出分别为 8/8 点。可输出脉冲信号和方向信号到电机驱动器。通信模块采用 FX3U-232ADP 和 FX3U-CNV-BD,其中 FX3U-232ADP 为 PLC 提供 RS232 串行通信接口;FX3U-CNV-BD 为 PLC 的功能扩展板,用于 PLC 基本单元与 FX3U-232ADP 模块间的转接。A/D 转换模块采用 FX3U-3A-ADP,用于采集角度传感器模拟信号并进行模数转换,包含 2 通道模拟量输入、1 通道模拟量输出,模拟量可以是电压或电流信号,系统采用一路电流输出作为角度传感器信号输入。

(3) 中空轴旋转平台

为增大电机输出扭矩,减小控制中的回空误差,本研究不同类型的电机组合转台统一采用上海市智镛科技有限公司的 ZK130 型中空轴旋转平台,其参数见表 1。

表 1 控制器和中空轴转台参数

Tab. 1 Parameters of controller and hollow shaft rotating platform

名称	参数	数值/型号
PPC-5152-D525 型工控机	CPU 型号	Intel D525 2.8 GHz 双核处理器
	内存容量/GB	2
	触摸屏	1 024 像素×768 像素 LCD 屏带 LED 背光
	RS-232 接口数	2
	USB2.0 接口数	2
	USB3.0 接口数	2
	以太网口	1
	工作温度/℃	-20~50
FX3U-16MT/DS 型 PLC 控制器	通信模块	FX3U-232ADP
		FX3U-CN-V-BD
ZK130 型中空轴旋转平台	转台减速比	0.1
	转台最大容许转矩/(N·m)	20
	转台最大转速/(r·min ⁻¹)	200

1.1.2 电机选型

为满足机械设备对高精度、快速响应的要求,电机作为方向盘转向控制的执行器动力输出部分,按照一定的原则和注意事项^[14],有 3 种不同类型的选择,分别是步进电机、伺服电机和步进伺服电机。

(1) 步进电机

采用上海市智镛科技有限公司的 57 mm 系列两相四线步进电机 57BH2A76-304-Φ8 型。步进电机及其驱动器参数见表 2,电机驱动器采用上海市智镛科技有限公司的 VC-20806A 型细分型两相

表 2 步进电机及其驱动器参数

Tab. 2 Stepper motor and its driver parameters

设备名称	参数	数值
步进电机	电机输出保持转矩/(N·m)	2
	电机输入额定电流/A	3.0
	最小转动分辨率(步距角)/((°)·步 ⁻¹)	1.8
	电机转动惯量/(g·cm ²)	440
	电机最大定位力矩/(N·m)	0.060
步进电机驱动器	工作电压/V	24~80
	输出相电流/A	1.8~6.0(相连续可调)
	步进脉冲频率/Hz	1~200 000
	空载驱动转速/(r·min ⁻¹)	1 000
	逻辑输入电流/mA	6~15
	工作温度/℃	-20~50

步进驱动器,步距角由拨码开关灵活可选。通过输入脉冲和方向信号对步进电机进行控制。

(2) 伺服电机

采用上海市智镛科技有限公司的伺服电机

60BL(2)B40-30L2(ST)型。伺服电机及其驱动器参数见表 3,电机驱动器采用上海市智镛科技有限公司的 PSDP0482A9-N23-M062 型低压四线制驱动器,通过输入脉冲信号和方向信号对电机进行控制。

表 3 伺服电机及其驱动器参数

Tab. 3 Servo motor and its driver parameters

设备名称	参数	数值
伺服电机	电机输出保持转矩/(N·m)	1.27
	电机输入额定电流/A	2.8
	编码器分辨率/(脉冲·r ⁻¹)	10 000
	电机转动惯量/(g·cm ²)	302
	电机最大定位力矩/(N·m)	0.060
伺服电机驱动器	工作电压/V	8~80
	输出电流/A	20
	额定功率/W	30~400
	空载驱动转速/(r·min ⁻¹)	3 000
	逻辑输入电流/mA	8~20
	工作温度/℃	-20~50

(3) 步进伺服电机

步进伺服电机是将伺服控制技术融入步进电机,拥有了高加减速、高转矩、高定位精度、高可靠性和低发热等特性,其本体还是步进电机,但又不同于传统的步进电机,也不同于伺服电机,它集成了前两种电机的优势。采用上海市智镛科技有限公司的SS 系列两相四线步进伺服电机 57MC-HC-II。步进伺服电机及其驱动器参数见表 4,电机驱动器采用上海市智镛科技有限公司的带编码器输入输出端口的 57SDC-H 细分型两相步进伺服驱动器,同时

具备数码显示功能,设置相应参数即可查看温度、转速及转子位置等信息,还可以通过按键调整步进伺服系统的增益、周脉冲细分数、单双脉冲工作方式等功能。通过输入脉冲信号和方向信号对步进伺服电机进行控制。

1.1.3 电机的性能差异分析

由各电机参数信息,从技术指标上对不同类型电机进行对比,如表 5 所示。这 3 种电机的位移均通过脉冲信号的数量控制,转速通过脉冲频率控制。

表 4 步进伺服电机及其驱动器参数
Tab.4 Stepper servo motor and its driver parameters

设备名称	参数	数值
步进伺服电机	电机输出保持转矩/(N·m)	1.27
	电机输入额定电流/A	2.8
	最小转动分辨率(步距角)/(°·步 ⁻¹)	0.036
	编码器分辨率/(脉冲·r ⁻¹)	10 000
	电机转动惯量/(g·cm ²)	302
	电机最大定位力矩/(N·m)	0.060
步进伺服电机驱动器	工作电压/V	8~80
	输出相电流/A	1.8~6.0(相连续可调)
	步进脉冲频率/Hz	1~500 000
	空载驱动转速/(r·min ⁻¹)	3 000
	逻辑输入电流/mA	6~15
	工作温度/℃	-5~50

表 5 不同类型电机技术指标对比
Tab.5 Comparison of different types of motor technical indicators

技术指标	步进电机	伺服电机	步进伺服电机
控制方式	开环	闭环	闭环
速度	不超过 1 000 r/min	额定转速 3 000 r/min	最高 3 000 r/min
精度	由电机步距角决定	由所配编码器精度决定	由所配编码器精度决定
力矩	随速度升高,下降较快	随速度升高,恒定不变	随速度升高,近似恒定不变
低速平稳性	最低 1 r/min,有振动	最低 1 r/min,有蠕动现象	最低 0.2 r/min,无振动蠕动
静止时是否有摆动	否	是	否
是否有运动到停止时的调整时间	否	是	否
静止时受外力位移后可否回到原位	否	是	是

步进电机为开环控制,启动频率过高或负载过大,易出现丢步与堵转的现象,停止时转速过高易出现过冲的现象,所以为保证其控制精度,应处理好升、降速问题。PSDP0482A9-N23-M062 型低压四线制伺服驱动器可直接对电机编码器反馈信号进行采样,内部构成位置闭环和速度闭环,一般不会出现步进电机的丢步或过冲现象,控制性能更可靠^[15-16]。伺服电机一般以 220 V 交流应用为主,田间作业本研究选用的是低压系列,这样低功率的输出扭矩相对较小。

与传统的伺服电机系统相反,SS 步进伺服电机利用步进电机的独特性能使电机停止时没有调整,在达到理想的目标位置后,无位置波动。同时,与传

统步进电机的微步(细分)驱动器完全不同,SS 步进伺服电机系统根据电机的转速,采用了电流控制技术以做到高速范围依旧可以输出大力矩。SS 系列步进伺服电机配备精度 10 000 个脉冲/r 的编码器,采用 32 位高速 DSP+矢量控制和滤波技术,从而达到平滑及高精度。最低平滑无蠕动速度小于 0.2 r/min,角度精度小于 0.036°。SS 系列步进伺服驱动器 57SDC-H 型内置差分输出器,为外部控制设备 PLC 提供了电机编码器的 A、B、Z 相信号。如果 PLC 所发脉冲频率过高,或加速度设置过大,亦或电机所带负载转动惯量较大,则可能导致驱动器最终因电机实际位置无法实时跟上目标位置而失步。由于驱动器提供了电机编码器 A、B、Z 相信号,

所以可以用它作为电机转子位置检测,从而实现闭环控制。此外,市场报价方面步进伺服电机也比伺服电机便宜一半。

关于电机的选型,总体是保证系统加减速快、静态稳定性好、动态响应过程平稳、抗扰性强。因此,单从电机本身性能看步进伺服电机较好一些,具体在自动驾驶中应用的效果需要开展实验进行对比分析。

1.2 转向机构设计与嵌套双闭环改造

车辆自动转向系统主要通过 GNSS 获取定位信息,由工控机作为导航控制器,计算控制量并传输到 PLC 控制器。PLC 向控制方向盘转动的步进电动机输出脉冲和方向信号,并接收前轮转角的检测信息反馈到工控机,形成外部闭环控制^[17]。

对电机的控制,主要是基于脉冲量的位置控制^[18]。由于方向盘转动角度和前轮转动角度不一定是线性关系,所以对电机转动角位移进行内部闭环控制是很有必要的。

嵌套控制回路是一种常见的控制结构^[19]。嵌套控制是指控制回路既有内部闭环反馈控制又有外部闭环反馈控制。内部闭环反馈回路加上外部闭环反馈回路即为嵌套双闭环结构。在步进电机转向机构设计的基础上,对拖拉机转向机构进行嵌套双闭环改造,采用伺服电机或步进伺服电机带动方向盘

转动,一方面,前轮角度传感器检测作为外部闭环转向角度反馈回路;另一方面,通过编码器检测电机转动轴位置作为内部检测反馈环节,并引入内部闭环控制器使方向盘转动的位置精度由编码器检测环节的测量精度决定,并对系统中各种非线性因素的影响通过位置控制器进行有效的动态校正与补偿。嵌套双闭环改造后的自动转向机构控制框图如图 2 所示。

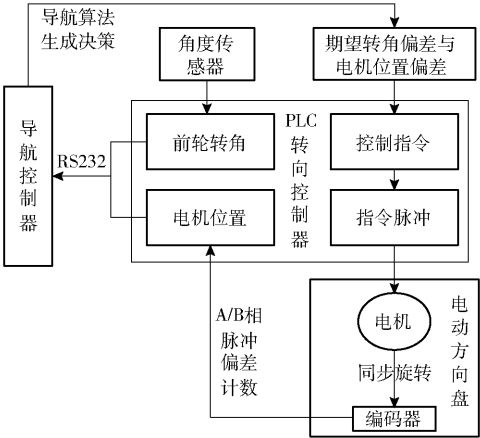


图 2 双闭环转向系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of double closed loop steering system

根据双闭环控制功能需求,系统所需的 I/O 点数为 6 点开关量输入、3 点开关量输出,PLC 的 I/O 分配见表 6。

表 6 PLC 输入/输出信号地址分配
Tab. 6 PLC input/output signal address allocation

PLC 输入地址	功能	PLC 输出地址	功能
X0	与工控机串口通信开关	Y0	输出高速脉冲信号到电机驱动器
X2	与 X3 并联获取 A 相脉冲密度	Y1	输出方向信号到电机驱动器
X3	高速计数编码器 A 相并反馈位置	Y2	使能信号,低电平禁止电机工作
X4	高速计数编码器 B 相并反馈位置		
X6	电机正转开关		
X7	电机反转开关		

从电机编码器反馈给驱动器 A +、A -、B +、B - 相脉冲,由于 PLC 基本单元为 NPN 漏型输入接线,需要通过差分信号转集电极模块输出 A/B 相脉冲信号,再分别并联 1.5 kΩ 的旁路电阻,接线到高速计数输入口 X3 与 X4,并将 X2 与 X3 并联,用 X2 端口获取脉冲密度。通过对 A/B 相位位置脉冲进行计数,将其转换为电机对应的转动位置信息,从而可以更精确地掌握电机端对脉冲指令的完成情况,并对偏差做出补偿。系统硬件接线图如图 3 所示。

2 转向电机控制方法

闭环自动控制技术多基于反馈的概念以减小不确定性。反馈理论的要素包括 3 部分:测量、比较和

执行。被控变量的实际值与期望值相比,得到的偏差用于调节系统响应,执行控制指令。应用最为广泛的调节器控制规律为比例 (Proportion) - 积分 (Integration) - 微分 (Differentiation) 控制,简称 PID 控制。PID 控制器具有结构简单、参数易于调整及可靠性高等特点,广泛应用于农机自动驾驶控制系统^[20]。

PID 控制基本原理就是根据系统误差,利用比例、积分和微分计算出控制量,执行控制指令,本研究嵌套双闭环 PID 原理如图 4 所示。

系统根据前轮转角期望值 $r(t)$ 与前轮转角实际值 $y(t)$ 计算偏差值 $e_1(t)$,根据转角偏差值 $e_1(t)$ 和电机编码器反馈位置脉冲计算偏差值 $y_2(t)$,当

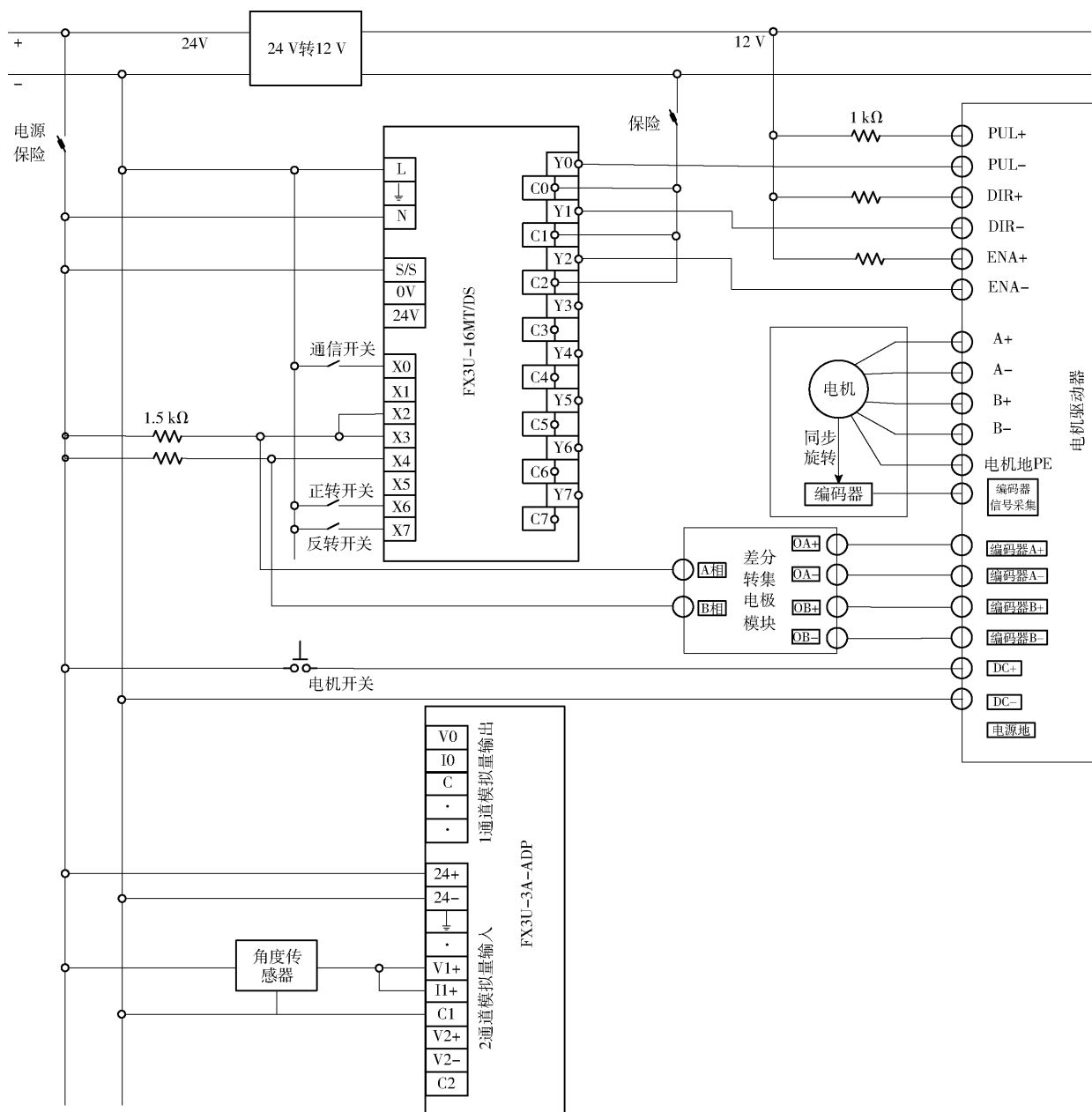


图3 双闭环转向系统电气连接图

Fig. 3 Double closed loop steering system electrical connection diagram

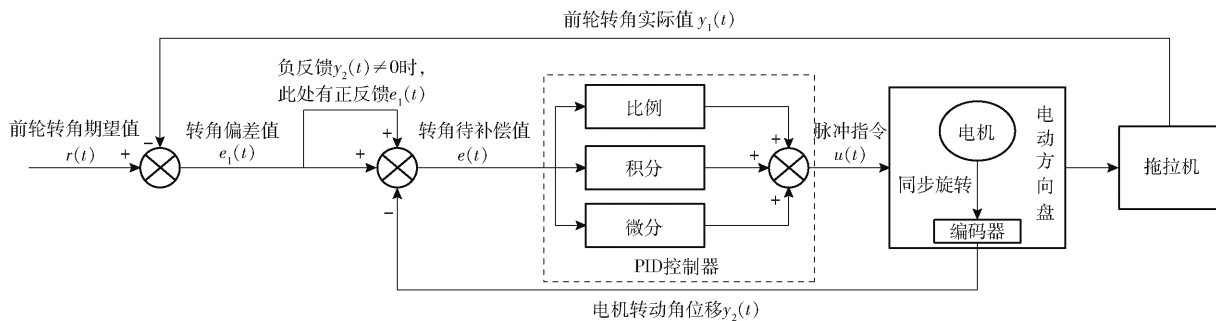


图 4 嵌套双闭环 PID 控制原理图

Fig. 4 Schematic of nested double closed loop PID control

编码器采集的负反馈输入电机转动角位移 $y_2(t) \neq 0$ 时,转角偏差值 $e_1(t)$ 在第2个综合点做2倍的正反馈输入,得出转角待补偿值 $e(t) = 2e_1(t) - y_2(t)$;否则, $e_1(t)$ 只在第2个综合点做一倍的正反馈输

入,得出转角待补偿值 $e(t) = e_1(t)$ 。将 $e(t)$ 作为 PID 控制器的输入,经过比例、积分、微分 3 个单元处理后,得出的电压信号 $u(t)$ 作为输出控制指令传递给 PLC 转向控制器,进而控制电机带动拖拉机方

向盘转动,同时将系统当前的前轮转角实际值 $y_1(t)$ 和电机实际转动角位移 $y_2(t)$ 作为反馈进行下一次计算,算法的表达式为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

式中 $u(t)$ ——电机转动脉冲指令信号
 $e(t)$ ——转角待补偿值对应的脉冲数字量
 K_p ——比例系数
 T_i ——积分系数
 T_d ——微分时间常数

3 转向控制器程序设计

3.1 程序总体设计

(1)需求分析

为了能够自动控制农机转向装置,需要在已有的转向控制器程序上进行 PLC 转向控制器程序设计与改进,使农机自动转向的同时将前轮转角检测装置获取的角度信息和电机编码器获取的电机位置信息反馈到车载终端软件,形成嵌套双闭环控制系统,使控制精度和工作效率得到提高。

(2)功能模块设计

农机自动导航的转向控制器设计主要包含 RS232 通信模块、A/D 转换模块、高速计数模块和转向控制模块 4 部分,分别用于实现数据通讯、模数转换、编码器信号采集和转向控制的程序功能。其中,数据通讯模块包括参数设置、指令读取与数据发送;模数转换模块可以实时获取检测的前轮转角,并将模拟量转换为数字量;高速计数模块可以实时采集编码器反馈的电机位置脉冲串;转向控制模块是程序设计的核心部分,包括面板按钮手动控制和自动控制。PLC 功能模块图如图 5 所示。

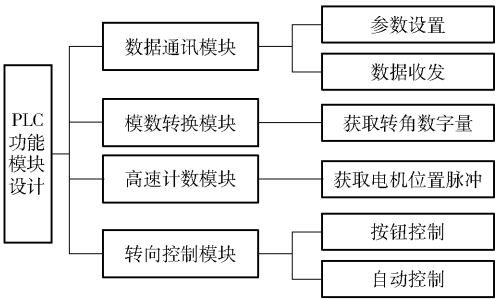


图 5 PLC 功能模块图

Fig. 5 PLC function module diagram

(3)开发环境及语言

转向控制器程序的编程语言采用梯形图 (Ladder diagram),开发环境为 GX Developer V8. 86。PLC 有顺序功能图、梯形图、功能块图、指令表、结构文本 5 种编程语言,其中最直观易懂且容易掌握的是梯形图。梯形图由触点、线圈和应用指令等组成。

触点代表逻辑输入条件,例如外部的开关、按钮和内部条件等。线圈通常代表逻辑输出结果,用来控制外部的指示灯、交流接触器和内部的输出标志位等。由于其特别适用于开关量逻辑控制,所以应用广泛。

3.2 双闭环控制系统开发与实现

对设计的 PLC 功能模块进行程序开发,包括数据通讯模块、模数转换模块、高速计数模块和转向控制模块的开发与实现。

(1)数据通讯模块

转向控制器中 RS232 通信设备作为 PLC 主机和上位工控机之间的通讯模块,通过 RS 通信指令进行串行接口无协议通信方式,这种通信方式使用用户自定义的通信规约,灵活方便。

通信参数可以在程序中用特殊数据寄存器 D8120 设置,用初始化脉冲 M8002 驱动的 MOV 指令将数据的传输格式写入 D8120。具体参数设置为:波特率 19 200 bit/s、无奇偶校验位、1 个停止位,每个字节有 16 位数据,有起始字符和结束字符。

RS 串行通信指令是使用通信功能扩展板和特殊适配器发送和接收串行数据的指令,即通过此指令使 PLC 转向控制器与车载终端进行数据通信。RS 指令如图 6 所示,指令中的 S 和 m 分别存储要发送的数据的起始地址和字节数,即前轮转角信息和电机编码器反馈位置信息;D 和 n 分别保存接收到的数据的起始地址和可以接收的最大数据字节数,即车载终端软件的转角决策控制信息。

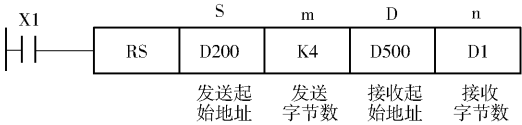


图 6 RS 指令

Fig. 6 RS instruction

(2)模数转换模块

角度传感器的量程范围是 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,对应的电流输出值为 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 。由 RS-232-C 通信标准知,转向控制器中的模数转换模块主要用于获取角度传感器输出的载波信号,并将载波模拟信号解调为数字信号,保存在寄存器 D8261 中,再由 RS232 通信设备通过 RS 无协议通信指令经数据线发送给车载终端软件,完成转角反馈。

(3)高速计数模块

使用 32 位加/减双相双输入高速计数器 C253 分别对连接 PLC 输入端 X3 与 X4 的编码器 A/B 相脉冲信号进行计数。PLC 高速计数与 RS 通信梯形图如图 7 所示,将 C253 累计计数的 32 位数值低 16 位和高 16 位分别存储于 D4 和 D5 数据寄存器,通过 RS232 串口通信最终在工控机终端解析读取为

plc5 的值。

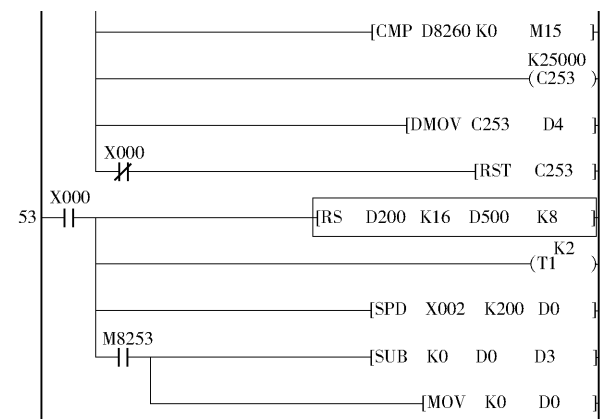


图7 PLC 高速计数与 RS 通信梯形图程序

Fig. 7 Ladder program of PLC high speed counting and RS communication

同时,将 X2 与 X3 并联,使用脉冲密度指令 SPD 检测给定时间内从编码器输入的脉冲个数从而计算出速度值。这里,将 SPD 脉冲密度获取与 RS 通信频率相结合,用于检测在 200 ms 内,每帧指令接收并执行后,电机所转过的脉冲量。

A/B 相输入不仅提供计数信号,根据它们的相对相位关系,还提供了计数的方向。电机正转时可以自动进行加计数,反转时可以自动进行减计数。又因为 M8253 可以监视 C253 的加/减计数状态,加计数时 M8253 为 OFF,电机正转;减计数时,M8253 为 ON,电机反转。通过特殊辅助继电器 M8253 的这个功能可以对正反方向获取的 SPD 脉冲密度赋予不同的符号,以便于在导航控制器 PC 终端做每帧脉冲指令的偏差补偿计算,PLC3 与 PLC4 分别为通信频率 5 Hz 下,电机正反转每帧的数值,PLC5 为电机累计计数的当前位置。另外,每当通信开关断开时(运行时一直为 ON)复位计数器。

(4)转向控制模块

PLC 主机通过 RS232 通信设备,接收车载终端软件的转向决策控制量,实际上是转向自动控制过程中,PLC 主机需要对电机驱动器输出的脉冲数字信号。此自动转向控制量会通过 RS 指令自动存储到数据寄存器 D500 中,等待指令接收完成再通过 BMOV(数据块传送指令)转存至数据寄存器 D300。最终由 PLC 主机采用带加减速的脉冲输出指令 PLSR(S1、S2、S3、D)对电机进行高频脉冲输出,进而控制方向盘自动转向。PLSR 可调速脉冲输出指令如图 8 所示,其中 S1 用于指定最高频率(10 ~ 2 000 Hz),S2 用于指定总的输出脉冲数字量,S3 用于设定加减速时间(0 ~ 5 000 ms),D 用于指定输出口 Y0。

对于转向按钮控制部分的设计,未与车载终端

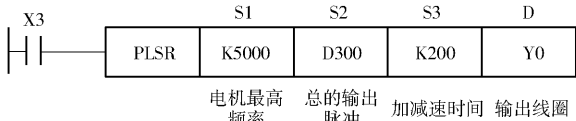


图8 PLSR 可调速脉冲输出指令

Fig. 8 PLSR adjustable speed pulse output command

设备进行通信时,可以通过 PLC 转向控制器面板上的左转、右转按钮进行方向盘的辅助转动控制。基于各输入开关和控制的逻辑组合,对按钮控制转向脉冲输出进行程序设计,如图 9 所示。其中,PLSR 脉冲输出指令与自动控制不同之处在于,总的输出脉冲个数设定为固定值 K1600。PLC 程序中的 Y0 表示对电机的脉冲输出,Y1 代表农机的转动方向,X6 为 ON 时左转。故 X6、X7 分别为 PLC 转向控制器面板上的左转、右转功能选择按钮。

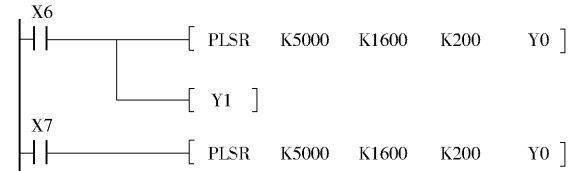


图9 按钮控制转向脉冲输出程序

Fig. 9 Pulse output program of button control steering

4 实验结果与分析

为了验证和对比拖拉机不同电机转向自动控制系统的准确性,分别在混凝土路和田间进行了直线跟踪实验,导航现场实况如图 10 所示。其中,拖拉机作业速度为 0.8 m/s。实验于 2019 年 4 月 19 日在中国农业大学涿州实验站进行。



(a) 混凝土路面自动导航 (b) 田间播种作业自动导航

图10 实验现场

Fig. 10 Field test

4.1 混凝土路面不同电机导航精度

步进电机混凝土路面导航偏差如图 11a 所示,选取步进电机水泥路面自动导航过程中 196.2 s 内的 222 个数据点,分析数据可得其平均偏差为 6.91 cm,均方根误差为 8.81 cm。伺服电机混凝土路面导航偏差如图 11b 所示,选取伺服电机水泥路面自动导航过程中 284.2 s 内的 365 个数据点,分析数据可得其平均偏差为 3.71 cm,均方根误差为 4.85 cm。步进伺服电机混凝土路面导航偏差如图 11c 所示,选取步进伺服电机水泥路面自动导航过程中 236.2 s 内的 270 个数据点,分析数据可得

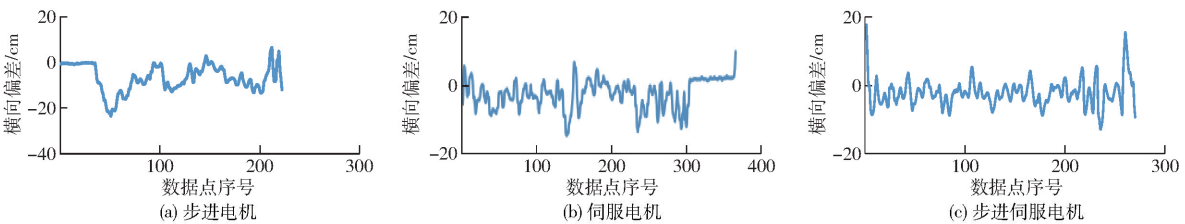


图 11 混凝土路面电机转向系统的导航偏差

Fig. 11 Concrete pavement navigation deviation of motor steering systems

其平均偏差为 3.39 cm,均方根误差为 4.54 cm。

4.2 田间播种作业不同电机导航精度

步进电机田间播种作业导航偏差如图 12a 所示,随机选取步进电机田间播种作业自动导航过程中 166.8 s 内的 140 个数据点,可得其平均偏差为 10.12 cm,均方根误差为 12.09 cm。伺服电机田间播种

作业导航偏差如图 12b 所示,随机选取伺服电机田间播种作业自动导航过程中 198 s 内的 195 个数据点,可得其平均偏差为 6.38 cm,均方根误差为 10.55 cm。如图 12c 所示,随机选取步进伺服电机田间播种作业自动导航过程中 312.6 s 内的 560 个数据点,可得其平均偏差为 4.19 cm,均方根误差为 5.53 cm。

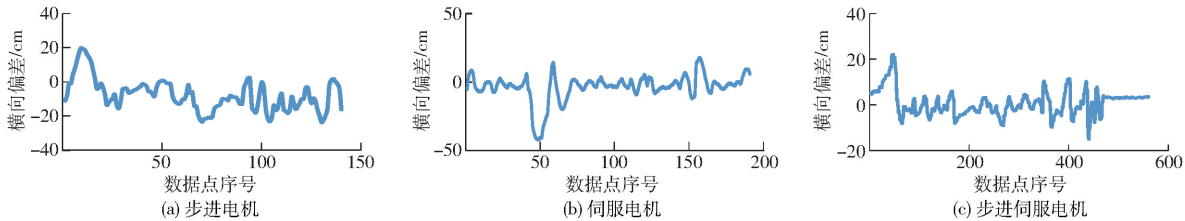


图 12 田间播种作业电机转向系统的导航偏差

Fig. 12 Field sowing operation navigation deviation of motor steering systems

4.3 不同电机导航性能分析比较

3 种不同类型电机转向执行机构在混凝土路面和田间播种作业时的自动导航实验结果如表 7 所示。两种导航工作条件下,步进电机导航系统的均方根误差分别为 8.81 cm 和 12.09 cm,伺服电机导航系统的均方根误差分别为 4.85 cm 和 10.55 cm,步进伺服电机导航系统均方根误差分别为 4.54 cm 和 5.53 cm。可知,总体上每种电机转向控制系统在农田环境下的导航精度相对于混凝土水泥路面的导航精度会有所下降,这是因为水泥路面相对田间

较为平坦,农机行驶过程中对 GNSS 定位数据获取更加准确。其中,步进伺服电机转向控制系统在两种工作条件下,导航偏差都是最小的,说明步进伺服电机的自动导航转向控制性能较步进电机和伺服电机更好一些。此外,可以看到伺服电机在田间播种作业自动导航过程中出现了一个 42.52 cm 的最大偏差,这么大的误差主要来源于田间作业的地块不规则,沟壑田垄较多,单机自动全局导航过程难免产生农机突然倾斜,导致农机自身定位不准和控制超调。

表 7 两种实验条件下不同电机的转向系统导航实验结果

Tab.7 Navigation experiment results of different motor steering systems under two test conditions						
工作条件	电机类型	数据点数	最大偏差/cm	最小偏差/cm	平均偏差/cm	均方根误差/cm
混凝土路面	步进电机	222	23.16	0.01	6.91	8.81
	伺服电机	365	18.73	0.05	3.71	4.85
	步进伺服电机	270	17.70	0.01	3.39	4.54
田间播种作业	步进电机	140	23.83	0.02	10.12	12.09
	伺服电机	195	42.52	0.02	6.38	10.55
	步进伺服电机	560	21.94	0	4.19	5.53

5 结论

- (1)完成了电机及其他设备的选型,并对不同类型电机进行了性能分析对比,表明步进伺服电机自身性能较好。
- (2)设计了 3 种不同类型电机控制方向盘自动

- 转向系统,对转向系统进行了嵌套双闭环改造,并完成了控制程序设计,对伺服电机和步进伺服电机采用位置控制方式,能够保证转向系统平稳、快速的响应。
- (3)系统实验结果表明,步进伺服电机转向系统定位准确,运行稳定,不失步,混凝土路面与田间自动导航精度相对较好。

参 考 文 献

- [1] 赵春江,杨信廷,李斌,等. 中国农业信息技术发展回顾及展望[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 172–178.
ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, LI Bin, et al. The retrospect and prospect of agricultural information technology in China [J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 172–178. (in Chinese)
- [2] 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44–54.
JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44–54. (in Chinese)
- [3] 汪懋华, 李民赞. 现代精细农业理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- [4] SCHIMMELPFENNIG D, EBEL R. On the doorstep of the information age: recent adoption of precision agriculture [J]. Economic Research Service, 2011, 80:EIB–80.
- [5] 董红亮. 汽车四轮转向和主动悬架的综合控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [6] 袁海兵. 汽车转向传动轴扭转疲劳寿命试验台设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(1): 155–157.
YUAN Haibing. Design of test stand for torsional fatigue life test of vehicle steering driveshaft [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(1): 155–157. (in Chinese)
- [7] 徐巧妮. 智能电动车自动转向控制系统研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [8] 王晓瑜. 基于 PLC 及反馈电路的步进电机闭环控制系统改造[J]. 机床与液压, 2014, 42(16): 172–173.
- [9] 董学文, 陈白宁. 基于 PLC 步进电机位置闭环控制研发与应用[J]. 机电信息, 2011(30): 142–143.
- [10] 武志明. 电动助力转向控制器基本性能试验台研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [11] 阳建华, 郑莹娜, 旷雪梅, 等. 基于 PCI-1220U 的电动助力转向器性能测试系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013(2): 22–26.
YANG Jianhua, ZHENG Yingna, KUANG Xuemei, et al. Research on performance test of electric power steering system based on PCI-1220U [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2013(2): 22–26. (in Chinese)
- [12] 谢永良, 尹建军, 贺坤, 等. 轮式 AGV 纯滚动转向系统设计与无侧滑转向控制研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 27–35.
XIE Yongliang, YIN Jianjun, HE Kun, et al. Pure rolling steering system design and research on non-sideslip steering control for wheeled AGV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 27–35. (in Chinese)
- [13] 郑春, 焦金虎, 陈鹏. 伺服电机在汽车转向试验台中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2015(18): 247–248.
- [14] 王军锋, 唐宏. 伺服电机选型的原则和注意事项[J]. 装备制造技术, 2009(11): 129–131, 133.
WANG Junfeng, TANG Hong. Servo motor selection principles and precautions [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(11): 129–131, 133. (in Chinese)
- [15] 王勇. 步进电机和伺服电机的比较[J]. 中小企业管理与科技, 2010(34): 311–312.
- [16] 司鹏辉. 步进电机和交流伺服电机性能综合比较[J]. 电子测试, 2015(13): 85–86, 47.
SI Penghui. The comprehensive comparison of performance of stepping motor and AC servo motor [J]. Electronic Test, 2015(13): 85–86, 47. (in Chinese)
- [17] 李世超, 曹如月, 魏爽, 等. 基于 TD-LTE 的多机协同导航通信系统研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 45–51.
LI Shichao, CAO Ruyue, WEI Shuang, et al. Development of multi-vehicle cooperative navigation communication system based on TD-LTE [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 45–51. (in Chinese)
- [18] 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): 10–17.
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): 10–17. (in Chinese)
- [19] 黄灿灿. 基于 PLC 的脉冲磁体绕线机伺服电机控制系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [20] 连世江, 陈军, 贾海政, 等. 基于 PID 控制的拖拉机自动转向系统[J]. 农机化研究, 2009, 31(6): 211–213.
LIAN Shijiang, CHEN Jun, JIA Haizheng, et al. Automatic turning control system of tractor based on PID control [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(6): 211–213. (in Chinese)