

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.001

基于推杆电动机的拖拉机液压悬挂控制系统*

罗锡文^{1,2} 单鹏辉^{1,2} 张智刚^{1,2} 张继勋³ 刘兆朋^{1,2} 张亚娇^{1,2}

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 3. 山东省收获机械与拖拉机关键技术重点实验室, 潍坊 261000)

摘要: 设计的拖拉机液压悬挂自动控制系统包括推杆电动机、传动机构和控制单元 ECU 等。控制单元 ECU 实时接收上位机决策控制指令, 控制推杆电动机驱动拖拉机液压悬挂的提升器, 调整作业机具至适宜的位置。设计了双阈值斜坡启动和反馈 PI 算法相结合的 PWM 电动机控制方法, 启动阶段以前馈斜坡输入控制为主, 使推杆电动机可以平稳且快速地启动; 主体运行阶段以 PI 反馈控制为主, 以提高控制速度和精度。采用 C 语言实现整个控制系统编程, 包括电动机反馈信号的 AD 转换采集、电动机的 PID 控制、上下位机的 CAN 通讯以及串口通讯等内容。试验测试结果表明, 前馈斜坡启动方式可以较好地避免电动机启动时的瞬间冲击电流; 当死区阈值设置为 10(AD) 时, 最大误差范围为 ± 11 (AD), 体现在推杆电动机上的行程误差为 ± 0.26 mm, 满足拖拉机液压悬挂系统的自动操纵控制要求。

关键词: 拖拉机 液压悬挂系统 自动驾驶 推杆电动机 PWM

中图分类号: S219.032.4; TP271⁺.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0001-06

Electrohydraulic Hitch Control System for Tractor Based on Linear Actuator

Luo Xiwen^{1,2} Shan Penghui^{1,2} Zhang Zhigang^{1,2} Zhang Jixun³ Liu Zhaopeng^{1,2} Zhang Yajiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,

South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Combine Harvester and Tractor Critical Technology, Weifang 261000, China)

Abstract: Electrical control of tractor electro hydraulic hitch system is an important part of the tractor automated driving system. The electrohydraulic hitch control system included the linear actuator, transmission mechanism and single-chip microcomputer control unit. The control unit ECU received decision-making control command from host machine real-time, controlled the rod lifter motor to drive tractor hydraulic lifter and adjust the implements to the suitable position. PWM motor control method with the slope feedforward and PI feedback control algorithm was adopted as the main program. Slope feedforward control algorithm was used at the starting stage to make motor start smoothly. PI control algorithm was used at the steady stage to minimize the movement time of the motor and improve the position control precision of the motor. Control unit was responsible for receiving the linear actuator feedback information to decide and produce appropriate PWM signal, which adjusted the speed and the location of the hitch control system. The ECU hardware system was developed based on Cygnal C8051F040 micro-processor. The whole control software system was realized by using C language programming and its main functions included CAN communication between host computer and slave ECU, AD conversion of the motor feedback signal, the PID control and serial interface communication, etc.

收稿日期: 2015-01-14 修回日期: 2015-04-17

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102307)和广东省高等学校科技创新重点资助项目(cxzd1136)

作者简介: 罗锡文, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械化工程研究, E-mail: xwluo@scau.edu.cn

通讯作者: 张智刚, 副教授, 主要从事农业机械化工程和精细农业研究, E-mail: zzg208@scau.edu.cn

The deadzone threshold was set to 10 (AD), the maximum error range was ± 11 (AD), which indicated that the displacement error of linear actuator was less than 0.26 mm. It conforms to the requirements of the motor control design. This system can be added onto traditional tractor to realize the accurate position control of agricultural implements.

Key words: Tractor Hitch control system Unmanned system Linear actuator PWM

引言

拖拉机电液悬挂控制技术可以减轻驾驶员作业负担,提高拖拉机作业效率与质量,是拖拉机自动驾驶控制系统中的重要支持技术之一。

德国奔驰公司于1978年在拖拉机上率先采用了电液控制的三点悬挂机构^[1]。随后,博世公司生产的电液控制提升器开始广泛应用在奔驰、万国、芬特等大功率拖拉机上。该系统具有位调节、力调节、力位综合调节和深度调节的自动化控制功能。日本芝浦的电液悬挂控制系统,除了力/位调节外,还添加了控制旋耕深度功能,能控制拖拉机作业机具左右倾斜角度,大大提高了耕作质量^[2-3]。目前,机电液一体化控制技术已成为现代拖拉机及其配套机组的主要发展方向,国际大型拖拉机生产商纷纷推出电液悬挂控制产品^[3]。

国内对电液悬挂系统的研究和在拖拉机上的运用较国外有较大的差距。大多数拖拉机机具提升过程的操纵是机械式的,这种机械控制的液压悬挂系统大都采用杆件和弹性元件,结构比较复杂,弹性元件的迟滞、机械摩擦和杆件的胀缩都会影响操纵性能。我国在拖拉机电控液压机具提升系统方面研究还比较少,尚处于试验阶段,且大多集中在高校和科研机构,未得到产业化应用^[3-6]。

由于将传统机械式液压悬挂系统改造成电液控制的工程量较大、成本高且技术复杂,本文以约翰迪尔5-754型拖拉机为原型平台,以直流推杆电动机为驱动动力源,以液压提升器阀门摇臂为控制对象,通过控制算法设计实现拖拉机机械式液压悬挂系统的自动控制调节。

1 系统工作原理

约翰迪尔5-754型拖拉机配备的悬挂系统是半分置式三点悬挂力-位综合调节系统^[7]。使用该系统时,驾驶员对机具位置的调整是通过操作关联提升器摇臂的操纵杆实现的,操纵杆位置与机具位置具有较为线性的对应关系,控制操纵杆位置即可实现机具位置的调整。

综合考虑拖拉机自动驾驶系统在正常作业和地头转弯时对机具位置控制的实际要求^[8-13]以及安

装便利性,本文选择带有位置反馈的直流推杆电动机作为动力源,通过机械传动机构实现对悬挂系统操纵摇臂的驱动和位置控制,进而达到自动调节作业机具高度的目的。由于不同作业机具及作业项目对悬挂系统有着不同的状态位置要求,因此实现悬挂系统的自动调节功能就需满足这些广泛的工作要求。为此,采用点动控制和位置控制相结合的方式实现悬挂系统任意位置的设定和控制。

点动控制方式主要用于适宜耕深和机具提升高度的目标位置设定。进入点动控制工作模式后,推杆电动机的单步运动距离可调,人工控制推杆电动机单步运动,便于寻找并设定目标耕深和提升高度。这种控制方式提高了三点悬挂控制系统的灵活性和可操作性。同时,大大减少了拖拉机自动驾驶系统的初始化设定工作量,提高了自动驾驶系统的性能。

位置控制方式是拖拉机自动驾驶系统正常工作的主要方式,系统依据机具作业状态的切换要求,通过控制单元ECU接收上位机的机具工作状态位置指令,比较推杆电动机反馈的位置信息与作业状态初始设定值,控制推杆电动机调节作业机具到达目标位置。

2 硬件系统设计

2.1 机械传动设计

图1为推杆电动机机械传动装置的实物安装图。推杆电动机的主体固定在固定支架上,通过推杆连接套、刚性推拉杆将推杆电动机推杆与悬挂系统操纵杆相连接,通过推杆电动机往复直线运动实现悬挂操纵杆的前后转动,从而控制悬挂系统的升降。

推杆电动机内部设有电位器,其信号幅值反映推杆电动机的轴端位移,与机具位置呈线性对应关系。因此通过单片机控制电路可控制推杆电动机动作来实现作业机具的精确位置控制。

2.2 硬件电路设计

控制单元ECU选择Cygnal公司的51系列单片机C8051F040作为微处理器,该单片机供电电压2.7~3.6V,处理速度可达25 MIPS,内置8/12 bit A/D转换控制器、CAN总线控制器、片内JTAG调试和边界扫描电路^[14]等,为外围电路简化设计提供了很大

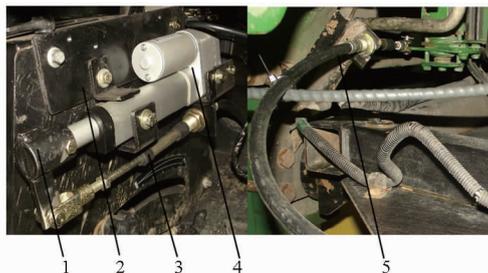


图 1 推杆电动机传动机构实物安装图

Fig. 1 Physical installation of linear actuator solution

- 1. 推杆与软轴连接套头 2. 固定支架 3. 刚性推拉轴 4. 推杆电动机 5. 作业机具提升系统操纵末端

的便利。基于微处理器性能和驱动模块实现要求,设计的硬件外围电路包括: 3. 3/5 V 稳压电源、外部晶振及复位、JTAG 接口、A/D 采样、直流电动机驱动、CAN 接口、USART 接口等。

2.2.1 电源电路

图 2 为 5 V 稳压电源电路, LM2596-5.0 芯片提供稳定的 5 V 电压。芯片外围电路在厂商提供的经典电路基础上改进。增加了 C6 和 C7 值为 0.1 μF 的贴片电容, 来滤除芯片输入输出通道中的高次谐波。1 mH 电感稳定输入电流。同时增大 C8 电解电容, 提高输入电压的稳定度。10 mH 的电感可稳定输出电流。FB 端口为芯片的输出电压反馈端, 将其与输出端相连, 使能芯片内部的转换检测, 提高转换准确度。3 A 的 F2 贴片保险丝防止拖拉机电源不稳定造成其他电路的损坏。D17 反向二极管防止电源正负极接反而损坏电路。该稳压电路经 AS1117 芯片二次稳压为 C8051F040 提供 3.3 V 工作电压。

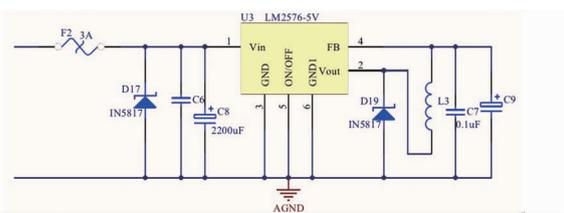


图 2 电源电路

Fig. 2 Power supply circuit

2.2.2 电动机驱动电路

图 3 为推杆电动机的驱动电路, 使用了 L6203 全桥式直流电动机驱动芯片。该芯片内部使用 4 个 DMOS 组成全桥电路, 具有快速的通断控制, 可通过对 IN1、IN2 不同的高低电平控制, 改变芯片输出电流的方向, 即控制推杆电动机的伸缩, 又可对 ENABLE 端口施加 PWM 信号, 实时调节芯片输出电压, 控制推杆电动机的启动、制动、以及运动速度。L6203 芯片耐压 DC 48 V, 且最大工作电流为 5 A, 而本文所使用的力姆泰克(北京)传动设备有限公司的 LAM3-S2 型推杆电动机的额定电流为 3.0 A

(12 V), 额定电压为 12 V 或 24 V^[15], 故该芯片无论从控制要求还是电气特性上都能满足本设计要求。

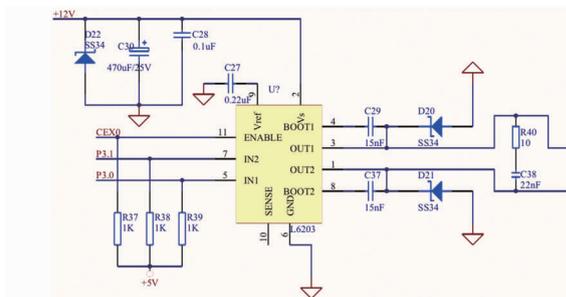


图 3 推杆电动机驱动电路

Fig. 3 Linear actuator driving circuit

3 软件系统设计

3.1 总体流程图

图 4 是软件流程图。控制单元 ECU 上电启动后, 首先对 C8051F040 进行初始化配置, 包括 C8051F040 系统时钟、IO 端口和片上外设功能的配置。之后软件程序进入 While(1) 循环, 通过实时判断中断源选择不同的中断服务函数。主控程序由定时器 2 定时中断来驱动, 包括手动信号检测, 推杆电动机定位 PI 控制, 串口输出等部分, 完成推杆电动机的实际控制。定时器 3 中断服务函数采集推杆电动机反馈位置信息, 以此来判断推杆电动机的实际位置。CAN 中断服务函数的主要作用是实现下位机与上位机的 CAN 通信, 根据设定的 CAN 通信协议读取上位机控制指令, 为 PI 控制算法提供目标位置 AD 值。

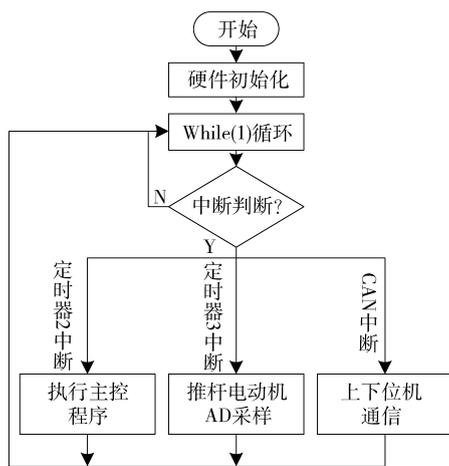


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

3.2 PI 算法设计

实际工作中, 当目标位置和当前位置的差值较大时, 常规 PID 算法^[16-18]产生的控制输出电压瞬间全部施加在推杆电动机上, 导致电路中电流急剧增大, 功率增大, 电动机驱动芯片可能因此而烧毁。为

避免该情况发生,研究开发了分阶段带有双阈值的电动机控制方法。在电动机启动阶段,使用前馈斜坡控制,斜坡系数 K_s 表示斜坡斜率;在主体运行阶段,使用反馈 PI 调节,设斜坡前馈和 PI 调节器的输出量为 $y(t)$,表示 PWM 占空比;输入误差为 $e(t)$,表示目标位置 AD 与当前位置 AD 之间的差值;调节器的比例系数为 K_p ,积分时间常数为 T_i ,启动阶段和主体运行阶段的阈值为 V_{T1} ,死区阈值为 V_{T2} ,可列出电动机控制算法的表达式

$$y(t) =$$

$$\begin{cases} K_s t & (|e(t)| > V_{T2}) \\ K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt \right) & (V_{T1} \leq |e(t)| \leq V_{T2}) \\ 0 & (|e(t)| < V_{T1}) \end{cases} \quad (1)$$

当电动机启动工作时,若目标位置和当前位置的差值大于阈值 V_{T2} ,使用前馈斜坡方式产生控制信号;若差值小于阈值 V_{T2} ,则直接使用 PI 调节器产生控制信号。PI 调节器的比例环节成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$,偏差一旦产生,控制器立即产生控制作用,用来减小偏差。增大 K_p 会加快系统的响应速度但使系统有较大超调并产生振荡,降低系统稳定性;减小 K_p 会降低系统的动态响应速度,导致工作效率下降。积分环节可提高系统的精确度。 T_i 越大,积分作用越小,反之则越大^[17-20]。当目标位置和当前位置的差值落入设置的死区范围 V_{T1} 时,控制输出为 0。

3.3 通信协议设计

3.3.1 点动控制指令

表 1 为上位机发送至下位机的点动控制指令格式,由 8 个字节组成。首位为升降指令标志位 U,用于识别升降指令。A 表示按键增加推杆电动机的 AD 值,S 表示按键减少推杆电动机的 AD 值。增减量位表示控制指令具体需要增减的 AD 值的绝对值。最后是指令类型位,T 表示点动控制指令。

表 1 点动控制指令格式(上位机)

Tab.1 Inching control command packet format (host computer)

升降指令标志位	增减标志位	增减量标志位	保留	保留	保留	保留	指令类型位
U	A/S	增量	0	0	0	0	T

表 2 为下位机反馈的数据包,由 8 个字节组成。首位标志位 F 表示单片机下位机向上位机发送的表示当前 AD 位置的数据。U 表示是电液悬挂控制单元而非其他控制单元向上位机发送的反馈数据

包。AD_H 和 AD_L 分别是推杆电动机当前 AD 值高位和低位,用于传送推杆电动机反馈的 AD 值。

表 2 点动反馈数据格式(下位机)

Tab.2 Inching feedback data packet format (slave computer)

反馈标志位	升降标志位	AD 值高位标志位	AD 值低位标志位	保留	保留	保留	保留
F	U	AD_H	AD_L	0	0	0	0

3.3.2 位置控制指令

表 3 为上位机发送至下位机的位置控制指令,由 8 个字节组成。所用指令与点动控制指令定义相近,此处列出该指令定义,相似定义不再赘述。最后是指令类型位,W 表示位置控制指令。

下位机对位置控制指令的反馈,与点动控制时下位机反馈的数据格式一致(表 2)。

表 3 位置控制指令格式(上位机)

Tab.3 Position control command packet format (host computer)

升降标志位	AD 值高位标志位	AD 值低位标志位	保留	保留	保留	保留	指令类型位
U	AD_H	AD_L	0	0	0	0	W

4 试验与分析

以约翰迪尔 5-754 型拖拉机配旋耕机作业的方式进行了田间试验。所采用的推杆电动机最大行程 100 mm,实际使用距离 40 mm。PWM 基值为 60,为推杆电动机可以推拉传动机构的临界值。 K_s 值取 20, K_p 值取 5, T_i 值取 0.1。推杆电动机两极限位置 AD 差值为 $D = 1998 - 311 = 1687$,阶段阈值设定为 500(AD),死区阈值设定为 10(AD)。

图 5 为系统在田间作业的条件下,推杆电动机的位置数据 AD 值变化曲线。可以看出,目标与实际距离相差较大时,推杆电动机运动的过程中 PWM 比例上升,可维持最大值一段时间,直到在电动机达到目标位置后比例下降。为方便比较数据,故将 PWM 值平移至与目标曲线相同水平。该数据变化曲线显示,推杆电动机控制曲线能较好地跟踪目标曲线,抑制电压瞬间增大,避免瞬间大电流产生烧毁芯片,实现双阈值 PI 算法控制目的。

图 6 为机具自动下降的位置值变化。当目标与实际差值较小时,由于目标与实际距离相差较小,调整时间短,PWM 的变化曲线上升和下降速度快。在调整推杆电动机位置的过程中,PWM 比例上升与下降,控制效果显著。

控制单元 ECU 的数据输出程序是由定时器 T2

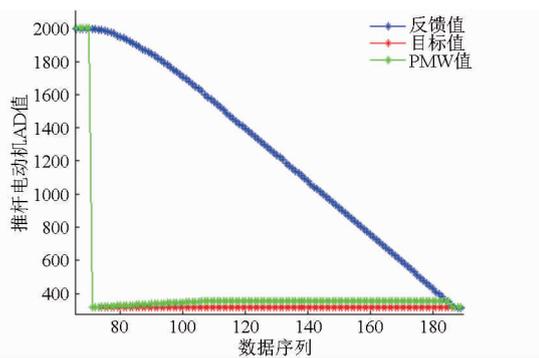


图 5 推杆电动机长距离阶跃响应的试验数据

Fig. 5 Experimental data of linear actuator for large step response

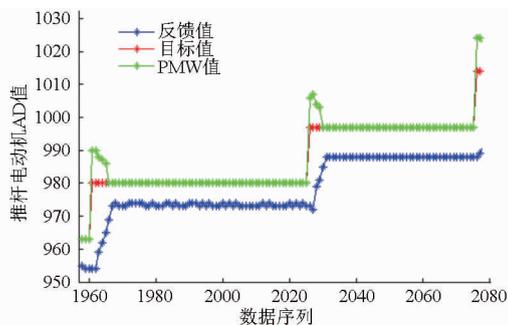


图 6 推杆电动机短距离阶跃响应的试验数据

Fig. 6 Experimental data of linear actuator for short step response

溢出中断驱动的。定时器 T2 为 16 位定时器,由 2 个 8 位 SFR 组成: TMR2L 和 TMR2H。程序通过初始化配置,将定时器 2 设置为自动重装方式,当

TMR2L 和 TMR2H 寄存器中的值与重载寄存器 RCAP2 中的值相等时产生溢出和中断。时钟频率 11.059 2 MHz, 机器周期 $T = 12 \times (1/11\ 059\ 200) = 1.085\ 1\ \mu\text{s}$, $\text{RCAP2} = 0\text{x}4\text{C}00$, 则 $t = T \times \text{RCAP2} = 0.021\ \text{s}$ 。两极限位置之间运动输出得到的数据序列个数为 117, 则推杆电动机运动时间为 2.457 s, 推算出推杆运动速度为 $V = 40/2.457 = 16.28\ \text{mm/s}$, 符合推杆电动机厂商规定的标准速度 12 ~ 17 mm/s。

试验结果表明,在设定死区阈值为 10 (AD) 的情况下,实际误差最大范围是 ± 11 个 AD,符合设计误差范围,体现在推杆电动机上的行程误差为 $\pm 0.26\ \text{mm}$,此精度在手动的情况下是无法感知和精确做到的,这样就避免了人工操作时需来回摇摆操纵杆以确认操作机具是否到位,节省了控制时间,提高了作业效率和质量。

5 结束语

以约翰迪尔 5-754 型拖拉机为原型平台,以直流推杆电动机为驱动动力源和控制对象,通过软轴拉线连接推杆电动机末端和悬挂系统操纵杆摇臂,实现拖拉机机械式液压悬挂系统的自动控制调节,改装简单,成本适宜,适应性广泛。试验结果表明,本研究提出的双阈值斜坡启动和反馈 PI 算法相结合的 PWM 电动机控制方法,控制响应速度快,控制精度高,适用于拖拉机液压悬挂系统的自动驾驶操纵控制。

参 考 文 献

- 王沁敏. 拖拉机电子液压悬挂控制器设计与控制技术[D]. 南京:南京农业大学, 2008.
Wang Qinmin. The research and design of the electrohydraulic control technology of hitch control unit for the tractor [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 李立. 拖拉机后悬挂电液控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
Li Li. Research on the electro-hydraulic system in tractor rear suspension [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- 徐煌. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制技术的研[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
Xu Huang. Research of force-position combined control technology for tractor electrohydraulic hitch system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 王会明, 侯加林, 赵耀华, 等. 拖拉机液压悬挂机构自动化控制系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 42-45.
Wang Huiming, Hou Jialin, Zhao Yaohua, et al. Study on automatic control system for hydraulic hitch equipment of tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 42-45. (in Chinese)
- 谭彧. 拖拉机作业机电液悬挂控制系统的研制[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 64-67.
Tan Yu. Study of hydraulic hitch system controlling technology for tractor working units [J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 64-67. (In Chinese)
- 谭彧. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
Tan Yu. The study of characteristics for hydraulic hitch & loading system in tractor [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 张宗明, 邓中亚. 约翰·迪尔 824、754 型拖拉机主要特点和技术参数[J]. 新疆农机化, 2006(2): 46.
- 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118-122.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 118-122. (in Chinese)

- 9 苗峻齐,罗锡文,张智刚,等.无人驾驶水稻精量穴直播机的自动控制系统设计[C]//中国农业工程学会2011年学术年会,2011.
- 10 胡炼,罗锡文,张智刚,等.基于CAN总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J].农业工程学报,2009,25(12):88-92.
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 88-92. (in Chinese)
- 11 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):139-146.
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): 139-146. (in Chinese)
- 12 吴晓鹏,赵祚喜,张智刚,等.东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J].农业机械学报,2009,40(增刊):1-5.
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1-5. (in Chinese)
- 13 张智刚,罗锡文,赵祚喜,等.基于Kalman滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J].农业机械学报,2009,40(增刊):6-12.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 6-12. (in Chinese)
- 14 新华龙电子有限公司. C8051F04x系列混合信号ISP FLASH微控制器数据手册[M].新华龙电子有限公司,2004.
- 15 力姆泰克(北京)传动设备有限公司.力姆泰克产品目录[M].力姆泰克(北京)传动设备有限公司,2012.
- 16 朱盈,朱俊.多种PID控制及其仿真比较[J].工业控制计算机,2010,23(1):53-54.
Zhu Ying, Zhu Jun. Several kinds of PID control and simulation comparison[J]. Industrial Control Computer, 2010, 23(1): 53-54. (in Chinese)
- 17 孙跃光,林怀蔚,周华茂,等.基于临界比例度法整定PID控制器参数的仿真研究[J].现代电子技术,2012,35(8):192-194.
Sun Yueguang, Lin Huaiwei, Zhou Huamao, et al. Simulation study on setting of PID controller parameters according to critical proportioning method [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(8): 192-194. (in Chinese)
- 18 曾贵娥,邱丽,朱学峰.PID控制器参数整定方法的仿真与试验研究[J].石油化工自动化,2005,20(4):20-23.
Zeng Guie, Qiu Li, Zhu Xuefeng. The simulation and experiment on the parameter-tuning methods of PID controllers [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2005, 20(4): 20-23. (in Chinese)

~~~~~

(上接第30页)

- 17 叶秉良,李丽,俞高红,等.蔬菜钵苗旋转式取苗机构动力学分析与试验[J].农业机械学报,2014,45(6):70-78.  
Ye Bingliang, Li Li, Yu Gaohong, et al. Dynamics analysis and test of rotary pick-up mechanism for vegetable pot-seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 70-78. (in Chinese)
- 18 韩长杰,杨宛章,张学军,等.穴盘苗移栽机自动取喂系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(8):51-61.  
Han Changjie, Yang Wanzhang, Zhang Xuejun, et al. Design and test of automatic feed system for tray seedlings transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 51-61. (in Chinese)
- 19 段运红.基于整瓶移植的马铃薯快繁机器人关键机构研究[D].北京:中国农业大学,2012.
- 20 韩绿化,毛罕平,缪小花,等.基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J].农业机械学报,2013,44(11):260-265.  
Han Lühua, Mao Hanping, Miao Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260-265. (in Chinese)
- 21 韩绿化,毛罕平,胡建平,等.穴盘苗自动移栽钵体力学特性试验[J].农业工程学报,2013,29(2):24-28.  
Han Lühua, Mao Hanping, Hu Jianping, et al. Experiment on mechanical property of seedling pot for automatic transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 24-28. (in Chinese)
- 22 刘伟,刘继展.穴盘苗移栽机器人末端执行器综述[J].农机化研究,2013(7):6-10.  
Liu Wei, Liu Jizhan. Review of end-effectors in tray seedlings transplanting robot[J]. Agricultural Mechanization Research, 2013(7): 6-10. (in Chinese)
- 25 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2008.