

东方红拖拉机自动转向控制系统设计^{*}

吴晓鹏 赵祚喜 张智刚 陈斌 胡炼

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

【摘要】 以东方红-X804型拖拉机为平台,改造原拖拉机的油路,使用电控比例液压阀,并设计电控单元,组成了自动转向控制系统。简述了油路的改造与电控比例液压阀安装,电控单元的设计,包括单片机(C8051F040)、角度传感器(KMA199)以及CAN总线网络,实现了SD卡存储系统,实时存储试验过程中的数据。试验结果表明:信号跟踪的最大误差 1.1° 、平均误差 0.5° 、平均延时为 0.2 s 。自动转向控制系统具有良好的响应特性,满足转向系统的性能要求。

关键词: 自动导航拖拉机 自动转向控制 电控比例液压阀 SD卡存储

中图分类号: TP242.3; TP29 **文献标识码:** A

Development of Automatic Steering Control System Based on Dongfanghong Tractor

Wu Xiaopeng Zhao Zuoxi Zhang Zhigang Chen Bin Hu Lian

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

Automatic steering control plays an important part in an automatic navigation system. A Dongfanghong - X804 tractor is used as a platform and an electro-hydraulic proportional valve is added to the original manually operated steering system. The original circuit of the tractor is improved. An electronic control unit is designed to control the valve, which is composed of a microcomputer (C8051F040), an angle sensor (KMA199), and a CAN bus network. A SD card data storage system is realized for real-time storing experimental data. The experimental results show that the largest and the average signal tracking errors are 1.1° and 0.5° , respectively, and the average delay is 0.2 s . The automatic steering system has good response and can meet the performance requirements.

Key words Automatic navigational tractor, Automatic steering control, Electro-hydraulic proportional valve, SD card data storage system

引言

自动转向控制系统是实现农业机械自动导航的关键技术之一。国内外对自动转向技术进行了大量的研究。目前,常用方法有电动机控制和电液控制两种。国外,自动转向技术研究比较成熟,如 Qiu H 与 Zhang Q 设计了由液压泵、比例换向阀和转向控

制器(ECU)等组成的拖拉机电液操控系统^[1]。在国内,电动机控制方法比较常见,如张智刚等^[2~3]采用张紧带和同步齿形带将电动机转矩传递至方向盘转轴上,实现了插秧机的自动转向控制。胡炼等采用小功率直流电动机驱动摩擦轮,与方向盘产生摩擦,实现插秧机的自动转向控制^[4]。陈文良等通过加装全液压转向器、步进电动机及其驱动器、电磁换

收稿日期: 2009-07-10 修回日期: 2009-08-01

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A304, 2006AA10Z255)

作者简介: 吴晓鹏, 硕士生, 主要从事农业机械自动导航研究, E-mail: wxp633@163.com

通讯作者: 赵祚喜, 教授, 主要从事农业机械与装备自动控制设计研究, E-mail: zhao_zuoxi@yahoo.com.cn

向阀和液压连接部件,实现了拖拉机的自动转向^[5]。

电液控制转向系统具有控制功率大、响应速度快等特点,更适合用于大中型农田作业机械导航中。本文重点阐述自动转向控制系统的结构,包括电控液压比例换向阀的应用和油路的改装、电控单元的实现、无触式磁阻角度传感器 KMA199 的安装与使用、SD 卡存储系统的使用以及 CAN 总线通信网络的搭建。最后,使用 PD 算法,通过实验室和田间试验,获得试验结果。

1 系统结构

拖拉机自动转向控制系统主要由 2 大部分组成:①液压部分,主要是比例电控阀与改装后的油路。②控制单元,包括单片机(MCU)及其外围电路、角度传感器和上位机(ARM9 嵌入式系统)。上位机决策给出输入控制量,角度传感器测量得到车轮当前位置作为反馈量。系统总体结构如图 1 所示。

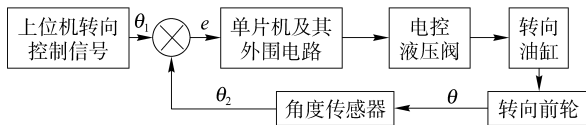


图 1 自动转向控制系统总体结构

Fig. 1 Block diagram of the automatic steering control system

图 1 所示的拖拉机自动转向控制系统是一个闭环系统。其中, θ_1 为上位机的控制信号,也就是目标值, θ 为转向前轮的实际转向角, θ_2 为角度传感器测得的车轮转角, e 为输入控制角度与反馈角度之间的偏差。单片机通过分析上述角度变量,设计控制算法和程序,输出驱动控制电控液压阀,实现电控自动转向。

2 系统硬件部分

2.1 电控液压转向机构

结合东方红-X804 型拖拉机的实际转向系统,建立一种直接电液控制的转向机构,在原转向油路并联安装一转向控制机构,即并联一个用于电路控制的“转向器”。该电控“转向器”是一套电控液压阀,即把原来手动控制转向的方向盘及其连带的液压转向器,改为电控的液压电磁阀机构。如图 2 所示,并联安装了比例阀和 O 型三位四通液压电磁阀。为保证油路油压,还需安装一安全溢流阀。油路上,加装了油管和 3 个油路转换切换阀。由图 2 可知,并联电控液压阀单元后,在需要进行自动控制操作时,换向阀油路由手动(方向盘控制)控制转为自动控制油路。电控液压阀部分(比例阀、换向阀)

经过流量控制,达到控制转向速度的目的,换向电磁阀实现油路方向的切换控制,以控制前轮左、右转向,溢流阀保护整个油路。

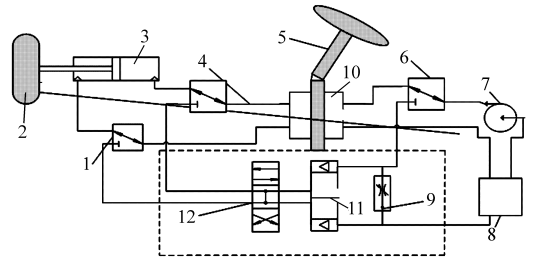


图 2 改装后东方红-X804 转向机构示意图

Fig. 2 Steering structure of Dongfanghong - X804 after modification

1、6. 手动切换阀 2. 转向前轮 3. 转向油缸 4. 油管 5. 方向盘 7. 转向液压泵 8. 油箱 9. 安全阀 10. 转向器 11. 比例阀 12. 三位四通换向电磁阀

2.2 转向控制单元硬件电路

转向控制单元硬件电路主要选用 C8051F040 单片机作为控制器,结合单片机外围电路,实现驱动电控液压阀、测量转向角度和与上位机通信等功能,如图 3 所示。

上位机 ARM9 嵌入式系统通过接收 RTK - DGPS 信号,通过路线规划和算法决策,给出转向控制指令。主控单片机 C8051F040 通过 CAN 总线与上位机通信,得到上位机的转向控制信号。KMA199 角度传感器实测得到当前车轮的转向角,通过 ADC 接口输入给单片机。单片机通过分析、运算和决策,得到控制比例阀开度的 DAC0 控制量和左、右换向阀通断控制量,输出给单片机的外围电路,外围电路连接比例换向阀的线圈,控制前轮动作。前轮动作后,KMA199 又实时检测和反馈给单片机,单片机通过 CAN 总线反馈给上位机。如此循环形成一个闭环控制系统。

C8051F040 单片机是一款功能强大的单片机,包括很多丰富的片内外设^[6],如模数转换器(ADC)、逻辑门阵列(PCA)和 CAN 总线控制器等,方便实现系统的搭建。转向控制单元通过 CAN 控制器接收上位机发送的控制指令,并发送给上位机反馈信息。KMA199 实时测得车轮转向角,利用单片机的片内 ADC 采集得到角度值。C8051F040 单片机还有一个 SPI 总线,用来实现 SD 卡连接。

2.3 磁敏电阻式角度传感器

一般使用连杆装置的传感器测量转向角,如苑志超在轻中型商用车电动助力转向系统的研究中^[7],使用的日本 OMRON 公司的光学编码器是一个连杆机构的传感器。而目前电位器在农机转向角测量中仍有使用,如胡炼在插秧机电控操作机构

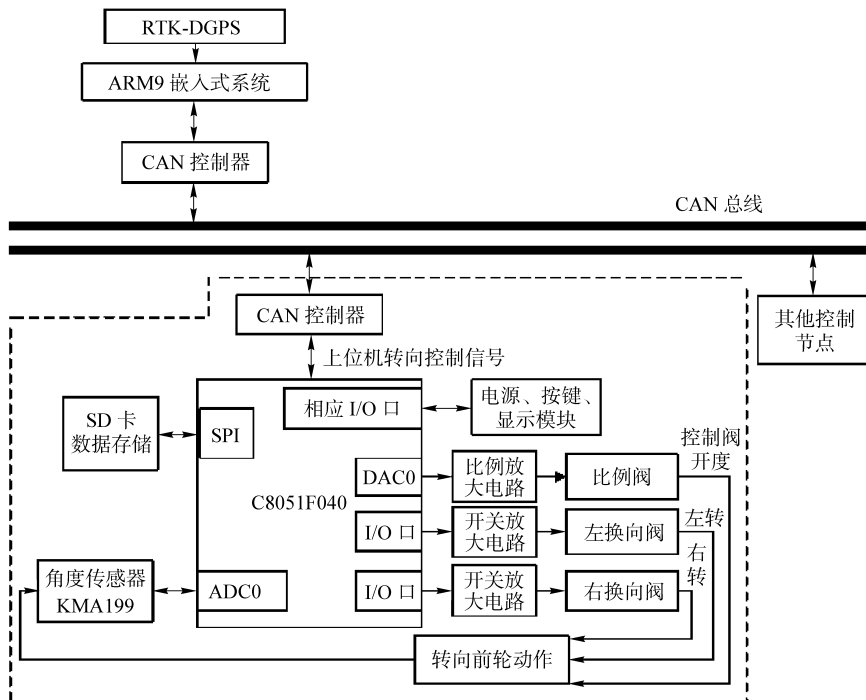


图3 转向控制单元硬件电路框图

Fig. 3 Block diagram of the CAN bus based steering control unit circuit

中,使用的是高精度带连杆机构的电位器^[4]。连杆机构的传感器容易受机械传动和车辆振动影响而导致损坏,且因振动产生测量噪声。KMA199是一种磁敏电阻式角度传感器,采用非接触式测量,受振动影响小,在拖拉机处于污染环境 and 受到机械损伤情况下,仍可以稳定地工作。避免了连杆机构的传感器(如电位器、连杆式角度传感器)由于撞击等原因

造成的角度测量不准确甚至传感器损坏。

图4是角度传感器 KMA199 的安装示意图和实物安装图。KMA199 固定在一个 Z 型座上,Z 型座固定在车轴上。KMA199 相对于车体固定,车轮转动带动固定磁条的底座转动,磁条和 KMA199 之间的相对角度发生了变化,KMA199 就可以测得车轮角度。

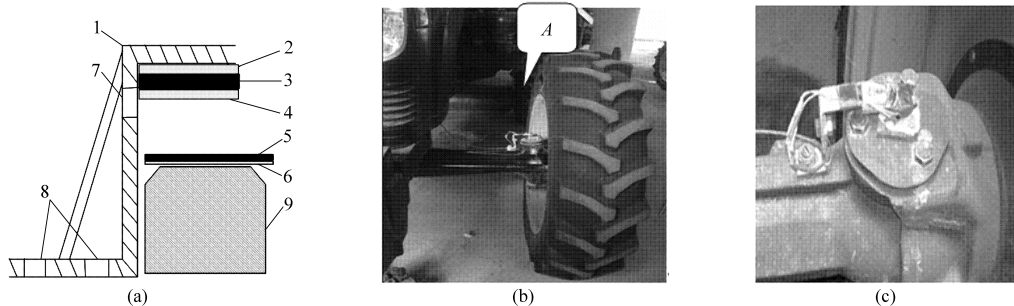


图4 KMA199传感器安装支架及实物安装图

Fig. 4 Installation of KMA199 sensor

(a) 安装示意图 (b) 实物安装图 (c) A处放大图

1. Z型座 2. 橡胶垫片 3. KMA199 4,6. 塑料垫片 5. 磁条 7. 过线孔 8. 定位孔 9. 底座

2.4 SD卡数据存储电路

农业机械智能导航控制技术的试验中,有大量的实时数据需要保存。在室内试验和田间试验过程中,数据的采集存储一般都是通过串口连接计算机采集数据。在长期使用串口线采集数据的试验中,电磁干扰、串口线不慎断开等原因容易造成数据丢失。而且,串口数据采集方式在实时监控方面不方便。本文使用SD卡数据存储系统实现了数据的实

时存储。

SD卡与单片机的SPI总线连接,实现通信。单片机系统时钟设置为11.0592MHz,采用Fat32格式,将系统只设置为存储数据,试验测得系统最快的存储速度为128Kb/s。试验过程中,不同次序试验数据分开文件存储,以便对试验数据进行统计分析,本设计采取两种文件存储方式:①搜索比较当前文件名,然后文件名值累加1的方式区分不同文件名。

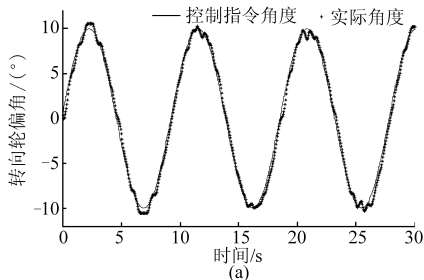
例如原文件名是“wenjian1”,那么下次试验的文件加1就是“wenjian2”。②在电路中增加实时时钟电路,得到创建文件的时间,然后以创建时间作为文件名。这两种方式都为数据区分带来极大的方便。只要设计一个按键或者复位电路就可以重新在一个新的文件中存储数据。在新一组试验开始时,可以避免停止试验、重新建立文件、连接串口接收数据等繁琐操作。试验还证明,即使突然掉电,掉电前存储在SD卡的数据依然保存完好。

2.5 CAN 总线网络结构

CAN (controller area net) 总线具有启动成本低、通信速率较高(最高可达 1 Mb/s)、可靠性高等优点,在农业机械控制中得到了应用^[8]。本设计将 CAN 总线通信网络应用到拖拉机导航系统中。整个导航拖拉机控制系统建立在 CAN 总线网络结构上(图 3)。CAN 总线挂接和卸载其他节点都没有对整个网络造成影响。在实现转向控制节点之后,试验又相继挂接了挡位控制单元、刹车控制单元等其他控制节点。

3 转向控制 PD 算法

为了实现准确、稳定的转向控制,设计了带死区 PD 控制算法。在死区范围内,认为车轮转向已经达到预定目标。增加死区可以增加系统的抗干扰能力。虽然有时不能达到精确地控制目标,但是却增加了系统的稳定性。在车辆转向控制中,可以存在



小角度死区。本文在软件部分加入了死区控制。设置死区相对目标值区间为 $[D_1, D_2]$,则绝对值区间为 $[D_1 - \theta_1, D_2 + \theta_1]$, θ_1 为目标值。如果车轮转向角在区间 $[D_1 - \theta_1, D_2 + \theta_1]$ 内,则认为控制达到目标;如果在区间 $[D_1 - \theta_1, D_2 + \theta_1]$ 外,则根据当前角度值 θ_2 和目标值 θ_1 计算出差值,得到转向控制指令和比例阀开度值。由 PD 算法决定的 DA 输出值 O_{PD} 与差值 e 和 PD 算法各个参数关系如下

$$O_{PD} = K_P e + K_D (e - e_b)$$

式中 O_{PD} ——DA 输出值 K_P ——比例系数

K_D ——微分系数

e, e_b ——当前误差值和前一次误差值

通过试验,得到死区 $D_1 - D_2$ 为 1° , K_P 为 22.1, K_D 为 0.7。

4 试验结果与分析

为了测定转向控制系统的响应特性,将东方红-X804 型拖拉机的前轮支起离地,以方波、正弦波 2 种标准信号作为输入控制信号,信号频率 0.1 Hz,角度幅值为 10° 。

从图 5 可以看出,转向控制系统可以很好地完成信号跟踪任务。正弦信号跟踪有很小的延时,在极限位置 $\pm 10^\circ$ 处有振荡。通过数据统计可以得到,正弦信号跟踪的最大误差为 1.1° ,平均误差为 0.5° ,平均延时为 0.2 s。

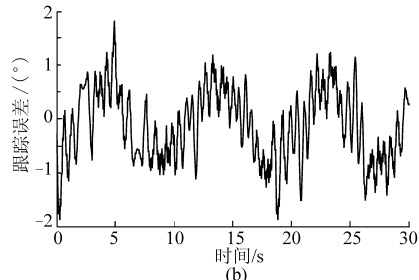


图 5 正弦信号跟踪与对应误差

Fig. 5 Sine signal tracking and error

(a) 正弦信号跟踪的转向轮偏角 (b) 正弦信号跟踪误差

图 6 中类似三角图形的部分是方波信号跟踪过程中没达到稳态时的波形,三角图形后在 0° 附近振荡的波形是达到稳态时的波形。方波信号跟踪时,一个 20° 的阶跃跟踪需要 $1.2 \sim 2$ s,在稳态时也存在振荡。通过数据统计可以得到,方波信号跟踪的最大上升或下降时间为 2 s,最小上升或下降时间为 1.2 s,平均上升或下降时间为 1.3 s,稳态时的最大误差为 0.7° ,平均误差为 0.2° 。

5 结论

(1) 提出的对电控液压转向系统的改造,弥补了使用电动机传动控制对大型机器控制的不足,解决了转向动力的问题。

(2) 信号跟踪的最大误差为 1.1° ,平均误差为 0.5° ,平均延时为 0.2 s,自动转向系统具有良好的响应特性。

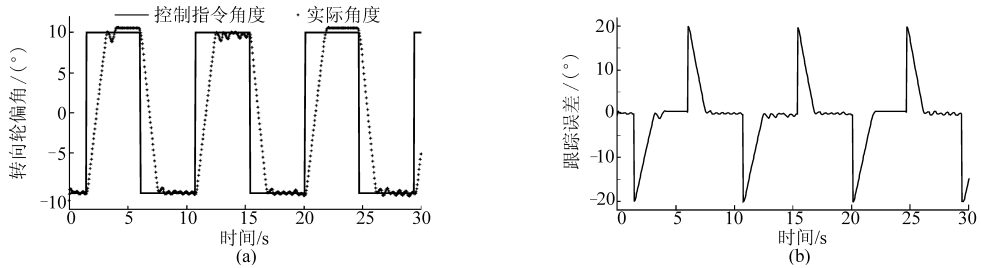


图6 方波信号跟踪与对应误差

Fig.6 Square signal tracking and error

(a) 方波信号跟踪的转向轮偏角 (b) 方波信号跟踪误差

(3) 角度传感器 KMA199 和 CAN 总线在长时间田间等恶劣条件下,工作稳定。SD 卡存储系统的使用,避免了使用传统 PC 机和串口线采集数据操

作繁琐、速度慢等问题,试验数据的采集更加实时、方便,可以存储大容量的数据。

参 考 文 献

- 1 Qiu H, Zhang Q. Feedforward-plus-proportional-integral-derivative controller for an off-road vehicle electrohydraulic steering system[J]. Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(5): 375~382.
- 2 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)
- 3 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
Zhang Zhigang. Automatic guidance system based on DGPS for rice transplanter[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 陈文良, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动驾驶转向控制系统的设计[J]. 华中农业大学学报, 2005(10): 57~62.
Chen Wenliang, Song Zhenghe, Mao Enrong. Design of steering control system for automatic drive of tractor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(10): 57~62. (in Chinese)
- 6 新华龙电子公司. C8051F04x 系列混合信号 ISP FLASH 微控制器数据手册[M]. 新华龙电子公司, 2004.
- 7 苑志超. 轻中型商用车电动助力转向系统的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008.
Yuan Zhichao. Research of the light-medium size commercial vehicles electric power steering system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- 8 安秋, 姬长英, 周俊, 等. 基于 CAN 总线的农业移动机器人分布式控制网络[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 123~126.
An Qiu, Ji Changying, Zhou Jun, et al. Distributed control network for CAN-based autonomous agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 123~126. (in Chinese)
- 9 何卿, 高焕文, 李洪文, 等. 基于 DSP 的拖拉机液压转向控制系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 1~5, 10.
He Qing, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Electrohydraulic steering control system of tractor based on DSP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 1~5, 10. (in Chinese)