

农用车辆自主导航控制系统设计与试验

张美娜¹ 吕晓兰¹ 陶建平¹ 尹文庆² 冯学斌²

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 集成软硬件系统搭建了一套农用车辆自主导航系统并进行了试验研究。硬件系统包括传感器、执行器和 CAN-Bus 通信网络; 软件系统基于 Windows 操作系统、Visual Studio 2005 开发环境, 采用多线程编程技术开发。依据运动学规律建立了车辆运动模型, 依据转向机构闭环响应曲线辨识了转向系统闭环模型, 综合 2 个模型确立了航向与横向控制系统开环传递函数, 基于 PID 理论设计了航向与横向控制器。试验结果表明: 软硬件系统运行稳定; 初始航向偏差在 -86° 与 84° 时, 调节时间均在 2 s 以内, 稳定后航向跟踪的精度均在 1° 以内; 初始横向偏差在 0.7 m 和 1.2 m 时, 横向偏差的最大值分别为 10.4 cm 与 9.2 cm, 横向偏差平均值分别为 6.4 cm 与 3.5 cm, 横向偏差标准差分别为 2.6 cm 与 1.7 cm, 横向控制器能够使系统平滑稳定地跟踪期望路径, 跟踪精度在厘米级。

关键词: 农用车辆; 自主导航; 控制模型; PID 控制

中图分类号: TP274⁺.2; S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0042-06

Design and Experiment of Automatic Guidance Control System in Agricultural Vehicle

Zhang Meina¹ Lü Xiaolan¹ Tao Jianping¹ Yin Wenqing² Feng Xuebin²

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Intelligent agricultural vehicle can significantly improve the production quality and efficiency, reduce environmental pollution, and take advantage of the agricultural resources efficiently. So an automatic guidance control system in agricultural vehicle was implemented by integrating the hardware and software. The hardware included sensors, actuators and CAN-Bus. The software was developed with multithread programming technology in Visual Studio 2005 platform based on Windows operating system. Open-loop transfer function model of the heading control system and the lateral control system were established via the model of the vehicle motion and the steering system. Model of the vehicle motion was established according to the kinematic characteristics, and model of the steering system was identified according to the closed-loop response curve. Then the heading controller and the lateral controller were designed via PID control theory. Tests results showed that the hardware and software system were running stability. With the initial heading deviations of -86° and 84° , the adjusting time were both in 2 s, the turning precisions were both in 1° . With the initial lateral deviations of 0.7 m and 1.2 m, the maximum values of the lateral deviation were 10.4 cm and 9.2 cm respectively, the mean values of the lateral deviation were 6.4 cm and 3.5 cm respectively, and the standard deviations of the lateral deviation were 2.6 cm and 1.7 cm, respectively. So the proposed automatic guidance control system can make the vehicle track the desired path smoothly and steadily with a centimetre-level tracking precision.

Key words: agricultural vehicle; automatic guidance; control model; PID control

收稿日期: 2016-02-01 修回日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31301687)、江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1023)和国家梨产业技术体系机械岗位项目(CARS-29-18)

作者简介: 张美娜(1986—),女,助理研究员,博士,主要从事农用车辆自主导航控制系统研究,E-mail: zmnll22@163.com

通信作者: 吕晓兰(1980—),女,副研究员,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: lxlanny@126.com

引言

农用车辆自主导航是一个高度复杂的系统,除导航传感器、导航路径规划、车辆运动模型和转向控制器 4 个基本要素之外,其硬件结构设计、软件处理算法与数据通信方式同样是影响其导航效果的关键因素^[1-6]。国内外学者采用不同结构研究了农用车辆的自主导航。

国外,NAGASAKA 等^[7]开发了用于插秧的农用车辆自主导航平台,工控机为主控制器,通过 2 个 RS232 串口分别与实时动态差分 GPS(Real time kinematics differential GPS,RTK-DGPS)和光纤陀螺仪 FOG(Fiber optic gyroscope,FOG)进行数据通信,通过逻辑编程控制器(Programmable logic controller,PLC)控制转向、刹车,试验结果表明插秧机速度为 0.7 m/s 时直线跟踪的最大横向偏差小于 12 cm。BAK 等^[8]开发了杂草检测机器人平台,PC 机为主控制器,通过 4 个 RS232 串口分别与 RTK-DGPS、航向陀螺仪、地磁罗盘进行数据通信,通过 CAN-Bus 控制 4 个轮子动作,试验结果表明横向跟踪精度在厘米级。BAKKER 等^[9]开发了自动除草农用机器人平台,基于 CAN-Bus 挂载各模块实现数据通信,每个轮子上嵌有测量轮速和角度的传感器以及相应的控制器,平台装有 2 个 GPS 接收机用于计算位置和航向信息,采用面向仪器系统的 PCI 扩展(PCI extensions for instrumentation,PXI)作为主控制器,采用 PC 机显示人机交互界面,试验表明当机器人以 0.3 m/s 速度行驶时直线跟踪的最大横向偏差为 3.4 cm。

国内,罗锡文等^[10]开发的拖拉机自动导航系统采用 CAN-Bus 结构,由 RTK-DGPS、ARM 嵌入式系统、电控液压转向油路、转向操纵控制器、转向轮偏角检测传感器和拖拉机本体等组成,试验结果表明拖拉机行进速度为 0.8 m/s 时,直线跟踪的最大误差小于 15 cm。张漫等^[11]改装 John Deere 940 型拖拉机实现自主导航,系统由全球定位系统、工控机、PLC、电控转向机构与角度传感器组成,试验结果表明车速为 0.6 m/s 时,最大横向偏差为 10.04 cm。顾宝兴等^[12]研制了一种履带式农用智能移动平台,系统主要包括工控机、运动控制卡、双目摄像机、GPS、姿态方向参考系统、编码器、电动机驱动器以及控制电路,试验结果表明车速在 0.5 m/s 时直线路径最大跟踪误差为 0.05 m,曲线路径最大跟踪误差为 0.11 m。

尽管这些研究在农用车辆平台执行机构的机械结构上存在较大差异,但在系统结构设计上仍存在

共性:①农业车辆自主导航包括多个传感器、控制器与执行器,因此,CAN-Bus 是普遍采用的数据通信方式。②PC 机能够搭载操作系统,便于进行数据处理和人机交互开发,因此,通常选用 PC 机作为主控制器。借鉴国内外研究成果,本文以实现农用车辆自主导航为目标,设计一种软硬件系统结构,通过试验研究验证系统稳定性、航向控制与横向路径跟踪控制系统性能,并总结试验中出现的实际问题,为系统进一步优化改进奠定基础。

1 系统结构

1.1 硬件系统

系统结构示意图如图 1 所示。

图 1 系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of system

农用车辆自主导航系统主要由传感器、执行器和 CAN-Bus 通信网络 3 部分组成。

传感器包括 RTK-DGPS 系统(S86TGPS 型)、惯性传感器(NAV440 型)、绝对式光电编码器(Angtron-RE-38-V-05-Lite 型)和增量式光电编码器(E6B2-CWZ6C 型),依次用于测量车辆的全局定位信息、倾斜姿态信息、转向轮偏角与车辆行驶速度。

执行器包括转向机构、制动机构以及调速机构。转向机构采用齿轮传动方式,由步进电动机(Mdrive34 型)带动齿轮使方向盘动作。制动机构用于紧急情况控制车辆停车,由电动推杆与制动踏板组成,通过遥控器与单片机通信控制推杆电动机的正反转完成推拉动作。调速机构通过单片机控制差速电动机驱动器的输出电压实现电调速。

检测终端计算机(CAN 主节点)通过内部集成 CAN 控制器的 USBCAN-I 模块与扩展了 CAN 控制器(MCP2515)与 CAN 收发器(TJA1050)的各个 CAN 从节点实现 CAN-Bus 网络通信。

试验平台样机如图 2 所示。

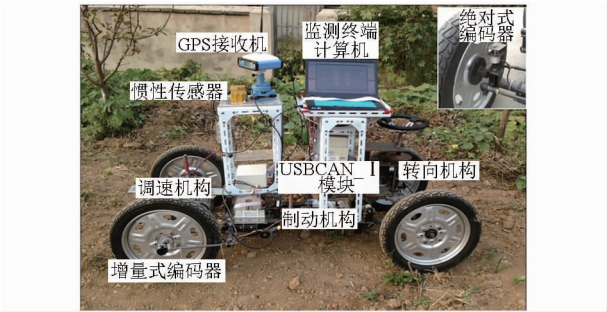


图2 试验平台样机

Fig.2 Test platform

1.2 软件系统

PC 机搭载 Windows 操作系统,软件应用程序选择 Visual Studio 2005 开发环境,基于 MFC 框架,采用多线程编程技术进行开发,系统主要包括 GPS 串口通信线程、惯性传感器串口通信线程、CAN - Bus 通信线程、导航参数计算线程以及导航控制线程。软件界面如图 3 所示。



图3 软件界面

Fig.3 Software interface

2 控制系统数学模型

农用车辆路径跟踪控制是将传感器获得的车辆位姿信息与期望路径相比较,通过控制器做出正确决策,控制执行机构驱使车辆跟踪期望路径的过程,是一个典型的负反馈控制系统。它包括航向控制与横向控制,控制系统结构框图如图 4 所示。

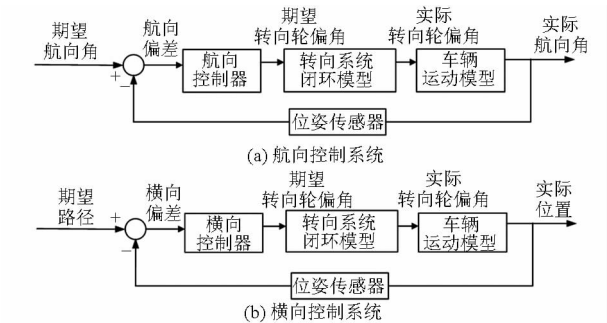


图4 控制系统框图

Fig.4 Diagram of control system

2.1 车辆运动模型

车辆运动模型简化为二轮车模型,见文献[13],车辆运动状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & v_x & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_x}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \Psi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

式中 Ψ ——航向角

v_x ——拖拉机前进方向速度

L ——轴距 δ ——转向轮偏角

x ——沿路径方向的车辆位置

y ——横向偏差

u ——控制输入量,即转向轮偏角变化率 $\dot{\delta}$

则以转向轮偏角 $\delta(s)$ 为系统输入,航向偏差 $\Psi(s)$ 为系统输出的航向控制系统开环传递函数为

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{v_x}{Ls} \quad (2)$$

以转向轮偏角 $\delta(s)$ 为系统输入,横向偏差 $Y(s)$ 为系统输出的横向控制系统开环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{\delta(s)} = \frac{v_x^2}{Ls^2} \quad (3)$$

2.2 转向系统模型

车辆自动转向,是通过绝对式光电编码器实时反馈的实际转向轮偏角 δ ,并与期望转向轮偏角 δ_u 相比较得到误差值,再经控制算法计算出步进电动机的频率 f 与转向,控制步进电动机转动,实现车辆精确转向,自动转向控制系统结构如图 5 所示。

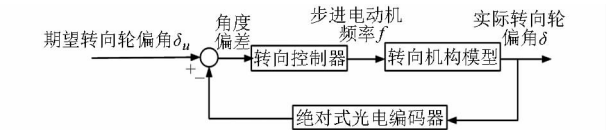


图5 自动转向控制系统原理框图

Fig.5 Automatic steering control system

步进电动机的频率与转向轮角速度为比例关系,频率越大,转向轮角速度越大,反之亦然。设计转向比例控制器,比例系数 k 分别为 7、8、9、10 时,转向闭环系统阶跃响应曲线如图 6 所示。

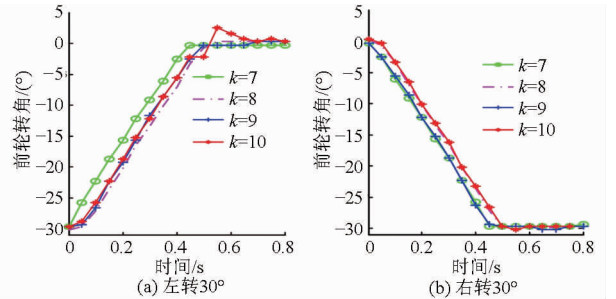


图6 转向闭环系统阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curves of automatic steering control system

由图 6 可知,当比例系数 k 分别为 7、8、9、10 时,自动转向系统均能快速稳定的达到期望值,稳态

误差为 $\pm 0.5^\circ$ 范围内,调节时间在 0.5 s 以内。步进电动机在系统中能够正常运转的最大频率为 25 kHz,当计算的控制量大于 25 kHz 时,均将输出 25 kHz 的脉冲,也就是,当误差角度较大时(大于 4°),尽管比例系数 k 分别为 7、8、9、10,但输出的频率均为 25 kHz,因此,实际的响应曲线基本相同。值得注意的是,当 $k = 10$ 时,由于控制量太大导致系统出现了振荡。因此,转向比例控制器 k 取 7、8、9 均可满足实际控制需求,这里取 $k = 9$ 。

确定转向控制器后,根据系统的实际响应曲线辨识得到能描述转向闭环系统的数学模型。设置期望前轮转角为 -30° (负号代表左转),转向系统的实际响应曲线如图 7 所示。转向系统可用一个过阻尼的二阶惯性环节来近似。

$$\frac{\delta(s)}{\delta_u(s)} = \frac{1}{(\tau_0 s + 1)(\tau_1 s + 1)} \quad (4)$$

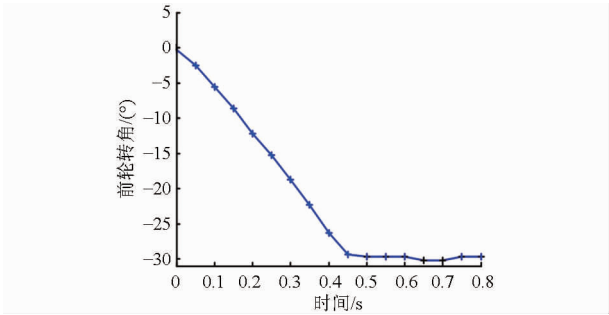


图 7 转向系统实际响应曲线

Fig. 7 Real response curve of automatic steering control system

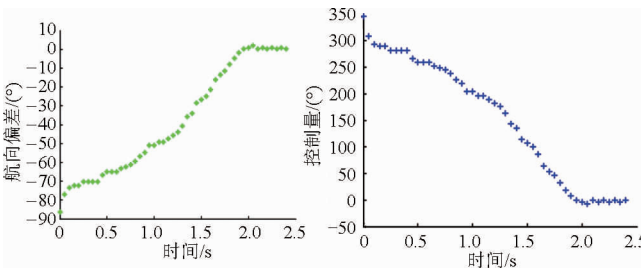
通过参数计算和 Matlab 仿真得 $\tau_0 = 0.04$, $\tau_1 = 0.1$, 则转向系统闭环传递函数为

$$\frac{\delta(s)}{\delta_u(s)} = \frac{1}{(0.04s + 1)(0.1s + 1)} = \frac{250}{s^2 + 35s + 250} \quad (5)$$

由式 (2) 与式 (5) 可得,以期望转向轮偏角 $\delta_u(s)$ 为系统输入,航向偏差 $\Psi(s)$ 为系统输出,航向控制系统开环传递函数为

$$G_{\text{head}}(s) = \frac{\Psi(s)}{\delta_u(s)} = \frac{\Psi(s)}{\delta(s)} \frac{\delta(s)}{\delta_u(s)} = \frac{250v_x}{L(s^3 + 35s^2 + 250s)} \quad (6)$$

由式 (3) 与式 (5) 可知,以期望转向轮偏角



$\delta_u(s)$ 为系统输入,横向偏差 $Y(s)$ 为系统输出,横向控制系统开环传递函数为

$$G_{\text{lateral}}(s) = \frac{Y(s)}{\delta_u(s)} = \frac{Y(s)}{\delta(s)} \frac{\delta(s)}{\delta_u(s)} = \frac{250v_x^2}{L(s^4 + 35s^3 + 250s^2)} \quad (7)$$

2.3 导航控制器

采用简单、实用的经典 PID 控制方法设计航向与横向控制器,基于时间与平方误差乘积的积分(Integral time square error, ITSE)整定 PID 控制器的参数,具体方法参见文献[13],最终获得航向控制器传递函数为 $C_{\text{head}}(s) = 1$,横向控制器传递函数为 $C_{\text{lateral}}(s) = 10s + 0.1$ 。

3 试验

农业车辆自主导航控制试验在南京农业大学工学院校内进行。系统中 CAN 总线通信协议的设定参见文献[14],系统导航参数——航向偏差与横向偏差的计算参见文献[15]。

3.1 航向控制试验

车辆转向时要求车辆速度较慢,设定车辆速度为 0.5 m/s。试验平台轴距 $L = 1.3$ m。

试验 1:车辆初始航向偏差为 -86° 。试验结果如图 8 所示。受车辆转向机构限制,转向轮偏角在 $[-28^\circ, 20^\circ]$ 范围内,因此需对控制量进行限幅处理。

试验 2:以相同的试验条件进行航向控制,车辆初始航向偏差为 84° ,试验结果如图 9 所示。

上述 2 个试验的初始航向偏差设定为 -86° 与 84° ,原因在于,车辆由远距离驶来的状态基本与期望路径垂直,因此选择与期望路径的横向偏差在约 $\pm 90^\circ$ 的状态作为初始状态,主要测试在近距离控制策略中,航向控制系统的性能。试验结果表明,航向控制系统性能良好,初始航向偏差在 -86° 与 84° 时,调节时间均在 2 s 以内,稳定后航向跟踪的精度均在 1° 以内,能够满足航向控制需求。

3.2 横向控制试验

设定车辆速度为 0.5 m/s。

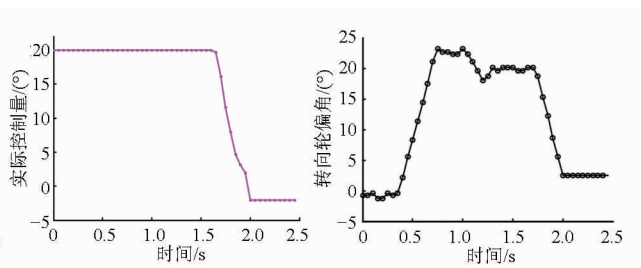


图 8 航向控制试验 1

Fig. 8 Heading control test No. 1

试验 1:初始位置的横向偏差为 0.7 m,航向偏差为 7.9°,试验结果如图 10 所示。

试验 2:初始位置的横向偏差为 1.2 m,航向偏差为 11.7°,试验结果如图 11 所示。

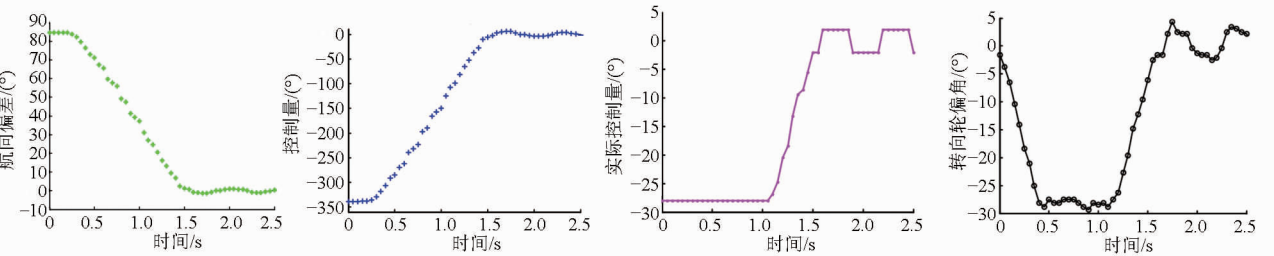


图 9 航向控制试验 2
Fig.9 Heading control test No.2

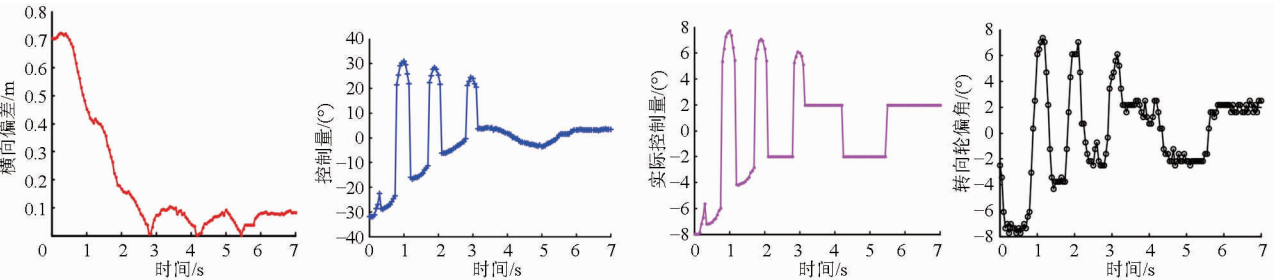


图 10 横向控制试验 1
Fig.10 Lateral control test No.1

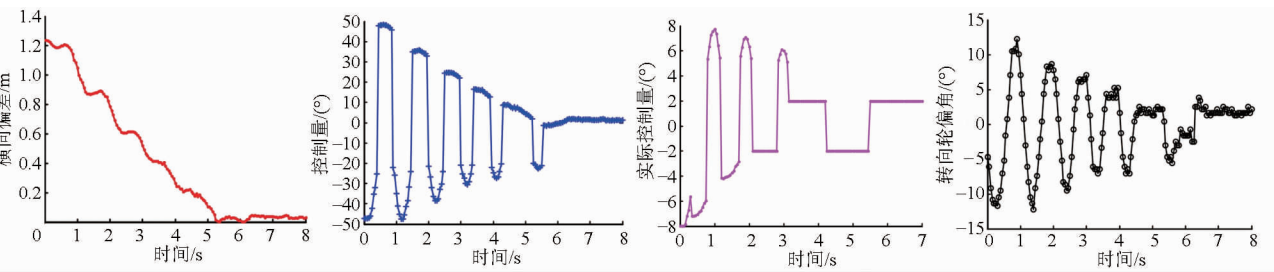


图 11 横向控制试验 2
Fig.11 Lateral control test No.2

2 组试验车辆由初始位置进入稳定区域后,横向偏差的最大值、平均值与标准差如表 1 所示。

表 1 横向跟踪精度			
Tab.1 Accuracy of lateral tracking			
试验序号	横向偏差	横向偏差	横向偏差
	最大值	平均值	标准差
1	10.4	6.4	2.6
2	9.2	3.5	1.7

由图 10、图 11 与表 1 可知,利用横向控制器能够使系统平滑稳定地跟踪期望路径,跟踪精度在厘米级。

3.3 讨论

试验中最突出的问题在于要对控制器计算出的控制量进行限幅处理。

控制器根据导航参数计算出的控制量为期望的转向轮偏角,转向轮偏角的取值范围在 $[-28^{\circ}, 20^{\circ}]$ 内,因此,当控制量大于 20° 时将其限幅为 20° ,

当控制量小于 -28° 时将其限幅为 -28° 。同时,当计算的控制量很小时(接近零)仍需要对控制量进行限幅处理,原因在于,受转向机构和传感器测量精度的限制,转向轮偏角的计算精度为 0.35° ,当控制量接近零时,由于反馈的转向轮偏角精度不够会导致车辆一直以 0.35° (或 -0.35°)的转向轮偏角行驶,最终导致横向偏差越来越大。解决这一问题的方法为,当计算的控制量在 $(-1^{\circ}, 0^{\circ})$ 区间时,将其限幅为 -2° ,当计算的控制量在 $(0^{\circ}, 1^{\circ})$ 区间时,将其限幅为 2° ,这样能使车辆进行及时调整,精确跟踪期望路径。

导航系统控制量用非线性函数式表达为

$$f(u) = \begin{cases} 20^{\circ} & (u \geq 20^{\circ}) \\ 2^{\circ} & (u \in [0^{\circ}, 1^{\circ}]) \\ u & (u \in (1^{\circ}, 20^{\circ}), u \in (-28^{\circ}, -1^{\circ})) \\ -2^{\circ} & (u \in [-1^{\circ}, 0^{\circ}]) \\ -28^{\circ} & (u \leq -28^{\circ}) \end{cases} \tag{8}$$

这凸显了导航系统具有非线性特性的本质。

4 结论

(1)农用车辆自主导航系统采用分布式的硬件系统和多线程的软件系统,实现了多源传感器数据实时、多任务的处理以及多个执行机构独立、有序的控制,

试验结果表明软硬件系统能够稳定工作。

(2)对农用车辆自主导航控制系统进行了剖析,试验结果表明“基于误差来消除误差”的 PID 控制器简单易行,能够满足航向和横向控制需求,路径跟踪精度在厘米级。

参 考 文 献

1 REID J F, ZHANG Q, NOGUCHI N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2):155-167.

2 KEICHER R, SEUFERT H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2):169-194.

3 LI MING, IMOU K, WAKABAYASHI K, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(3):1-16.

4 TORII T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25(1-2):133-153.

5 SCHMOLDT D L. Precision agriculture and information technology [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 30(1-3):5-7.

6 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)

7 NAGASAKA Y, UMEDA N, KANETAI Y, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43(3):223-234.

8 BAK T, JAKOBSEN H. Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2):125-136.

9 BAKKER T, VAN ASSELT K, BONTSEMA J, et al. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field [J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4):357-368.

10 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)

11 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):8-14. (in Chinese)

12 顾宝兴,姬长英,王海青,等.农用开放式智能移动平台研制[J].农业机械学报,2012,43(4):173-178,187.

GU Baoxing, JI Changying, WANG Haiqing, et al. Development of agricultural open intelligent mobile platform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4):173-178,187. (in Chinese)

13 张美娜,林相泽,丁永前,等.基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J].农业工程学报,2012,28(9):40-46.

ZHANG Meina, LIN Xiangze, DING Yongqian, et al. Design of path following controllers based on performance index for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9):40-46. (in Chinese)

14 张美娜,尹文庆,钱燕,等.联合收获机导航数据采集系统设计[J].农业机械学报,2011,42(增刊):117-121.

ZHANG Meina, YIN Wenqing, QIAN Yan, et al. Design of navigation data collecting system for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):117-121. (in Chinese)

15 张美娜,尹文庆,林相泽,等.RTK-DGPS 融合惯性传感器的车辆导航参数计算方法[J].农业机械学报,2015,46(5):7-12.

ZHANG Meina, YIN Wenqing, LIN Xiangze, et al. A method for calculating navigation parameters via RTK-DGPS fusing inertial sensor for agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):7-12. (in Chinese)