

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.043

单HST履带式拖拉机差速转向控制系统研究

秦维贤^{1,2} 张光强^{2,3} 胡书鹏^{2,3} 周豫鸽³ 温昌凯^{3,4} 付卫强^{2,5} 孟志军^{1,2}

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097;

3. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039; 4. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

5. 农机北斗导航与智能测控国家地方联合工程实验室, 北京 100097)

摘要: 针对单路静液压传动 (Hydro static transmission, HST) 履带式拖拉机自动转向控制时存在平稳性差、转向控制分辨率低和单边制动转向对土壤破坏严重的问题, 提出了一种基于状态反馈的差速转向控制系统。首先分析了单HST实现差速转向的机构原理; 其次, 根据履带式拖拉机运动学模型, 设计了基于脉宽调制原理(Pulse width modulation, PWM)的差速转向控制方法, 通过精确调节转向液压缸行程实现更高的转向控制分辨率和稳定性; 接着应用 STM32F4单片机为核心的控制器同时进行直线路径规划和转向控制, 完成车载控制器设计; 最后分别开展在水泥路面和田间3种速度条件下的实车试验。试验结果表明, 在速度2、3、5 km/h条件下, 水泥路面直线跟踪距离绝对偏差平均值分别为1.6、2.2、3.1 cm, 标准差分别为2.7、2.9、3.6 cm; 田间地面直线跟踪距离绝对偏差平均值为1.7、1.9、2.9 cm, 标准差为2.2、2.1、3.4 cm。结果表明, 该系统在不同环境下均表现出优于传统单边制动转向控制效果, 显著提升了转向精度和平稳性。

关键词: 履带式拖拉机; 静液压传动; 差速转向; 控制方法

中图分类号: S219.1; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)S1-0405-07

Differential Steering Control System for Single HST Tracked Tractors

QIN Weixian^{1,2} ZHANG Guangqiang^{2,3} HU Shupeng^{2,3} ZHOU Yuge³ WEN Changkai^{3,4}FU Weiqiang^{2,5} MENG Zhijun^{1,2}

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science, Beijing 100097, China

3. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China

4. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

5. National-Local Engineering Laboratory for Beidou Navigation, Intelligent Control and Telematics of Agricultural Machinery, Beijing 100097, China)

Abstract: To address the issues of poor stability, low steering control resolution, and severe soil damage caused by unilateral braking steering in the automatic steering control of a single hydro static transmission (HST) tracked tractor, a differential steering control system based on state feedback was proposed. Firstly, the mechanism of differential steering using a single HST was analyzed. Then, based on the kinematic model of the tracked tractor, a differential steering control method using pulse width modulation (PWM) was designed. This method improved steering control resolution and stability by precisely adjusting the stroke of the steering hydraulic cylinder. Next, a control system was developed with an STM32F4 microcontroller as the core, which integrated both linear path planning and steering control, completing the design of the onboard controller. Finally, field tests were conducted under three speed conditions on both cement and field surfaces. The test results showed that at speed of 2 km/h, 3 km/h and 5 km/h, the mean absolute errors of straight-line tracking on the cement surface were 1.6 cm, 2.2 cm and 3.1 cm, respectively, with standard deviations of 2.7 cm, 2.9 cm and 3.6 cm. On the field surface, the mean absolute errors were 1.7 cm, 1.9 cm and 2.9 cm, with standard deviations of 2.2 cm, 2.1 cm and 3.4 cm, respectively. These results demonstrated that the system outperformed traditional unilateral braking steering in various environments, significantly improving steering accuracy and stability.

Key words: tracked tractors; hydro static transmission; differential steering; control method

收稿日期: 2024-08-06 修回日期: 2024-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD200150302)、中国烟草总公司重点研发项目(110202301013-3)和智能农业动力装备全国重点实验室建设项目(PT2024-49)

作者简介: 秦维贤(1997—), 男, 硕士生, 主要从事农机装备智能化研究, E-mail: 17315765190@163.com

通信作者: 孟志军(1975—), 男, 研究员, 博士, 主要从事农机智能装备研究, E-mail: mengzj@necita.org.cn

0 引言

履带式底盘具有接地面积大、对土壤压强小和转弯半径小、越野通过性能好、克服障碍能力强等特点,在沙地、黏湿土壤等环境中应用广泛^[1-2]。履带式底盘的行走系统可分为静液压式和液压机械结合式。静液压式行走系统通过轮边马达直接驱动履带主动轮,因其造价高、使用要求高,应用较少^[3]。液压机械结合式行走系统由单HST变速器与机械变速箱配合组成,是目前履带式底盘的主要形式^[4]。单HST履带式底盘行走系统采用齿轮变速箱和单个液压马达驱动的静液压无级变速器,依靠离合器和摩擦片传递力矩和制动,因其结构简单可靠,易于维护和低成本等优势,常用于我国中小型履带式拖拉机、收获机等农业机械之中^[5-6]。

国内外学者对履带式底盘转向和导航控制已经开展了广泛研究。TAKAI等^[7]采用试验标定的方法获得了速度小于3.6 km/h条件下履带式拖拉机转向横摆速率与电磁比例阀输入电压之间的关系,实现单HST履带式拖拉机差速转向控制,转向控制均方根误差小于5 cm,但此方法受限于试验所标定的田间地面类型^[8]。SABIHA等^[9]基于履带车辆的运动学来评估期望的转向线速度和角速度,提出了一种优化的反推控制器作为运动控制器,并利用车辆动力学模型采用积分滑模控制获得所需的扭矩,驱动车辆和收敛到所需的轨迹,但其结构复杂,控制器所需算力高,不可避免地增加应用难度和成本^[10],而基于现代控制理论的状态反馈控制可用于开发高精度和稳定的控制系统,以实现精确的路径跟踪控制,其需要相对较少的计算成本,更适合于车载控制系统^[11]。

贾全等^[12]采用大扭矩舵机对NF-752型履带式拖拉机的液压行星差速转向机构进行电控改装,采用航向预估路径跟踪算法,在拖拉机以速度6 km/h跟踪曲线路径时,跟踪误差优于10 cm。丁幼春等^[13]采用电磁铁和离合器拨叉对小型单HST履带式油菜播种机转向机构进行改装,通过电磁铁带动离合器拨叉实现履带式底盘单边制动转向控制,采用免疫PID的路径跟踪控制方法,在速度2 km/h左右进行路面试验,直线跟踪距离绝对偏差平均值为4.2 cm,田间试验直线跟踪距离绝对偏差平均值为5.8 cm。何杰等^[14]建立脉冲宽度调制运动控制器驱动履带式花生收获机单边制动转向,采用预瞄跟踪双PID路径跟踪控制方法,速度为2 km/h时在沙地直线跟踪距离绝对偏差平均值为2.2 cm。

当前,液压机械结合式行走履带式底盘转向控制多采用单边制动转向,转向控制时存在控制分辨率低、转向时对土壤破坏严重等问题,满足履带式底盘导航精度高、转向控制平稳的低成本控制器研究成果较少。

因此,本研究以单HST履带式拖拉机为平台,分析履带车辆运动特性,采用RTK-GNSS技术,构建单HST履带拖拉机差速转向控制系统,该系统采用STM32F4系

列单片机为核心的嵌入式控制器作为车载控制器,同时完成路径规划与路径跟踪,在路径跟踪过程中可以根据履带车辆所需转角匹配合适的差速转向动作时间和单边制动转向动作时间,以期提高导航精度并减小长时间单边制动转向带来的负面影响^[15]。

1 单HST转向机构原理

单HST履带式拖拉机转向机构由电液阀组、转向液压缸、离合器和制动器等组成^[16]。如图1a所示,发动机动力经由HST传递至变速箱,变速箱动力经离合器传递至半轴,驱动左、右两侧履带行走。液压缸推动转向摇臂可使离合器分离,切断变速箱至半轴的动力,制动器用于动力切断后将半轴刹停,使其不会因车辆运动而被转动,从而实现单边制动转向。而当履带一侧仅有离合器分离但制动器不工作时,这一侧的驱动轮仍会随着车辆的运动而较为缓慢地转动,从而实现差速转向。

履带式拖拉机两侧的离合器和制动器工作状态均由左、右转向液压缸工作行程决定。如图1b所示,电液比例阀和压力比例阀配合工作时,可以分别控制左转向液压缸和右转向液压缸工作行程,切除履带一侧驱动轮动力,实现转向,电磁阀和压力比例阀配合工作时,可以同时控制左转向液压缸和右转向液压缸,切除履带两侧驱动轮动力,实现刹车。

单HST转向动作流程如图2所示,电液阀组控制转向液压缸工作行程,随着转向液压缸工作行程增大,转向液压缸带动转向摇臂使得离合器分离。若转向液压缸工作行程继续增大,制动器制动力矩将由零开始增大直至将半轴刹停使得驱动轮不转动。为了较为简单和显著地实现差速转向,只选取制动器制动力矩为零时的临界状态作为差速转向工作状态。这种简单的转向系统经济可靠,能够实现车辆差速转向和平稳控制^[17]。

将离合器分离,制动器制动力矩为零时转向液压缸行程定义为半行程,将离合器分离,制动器制动力矩使得驱动轮不转动时转向液压缸行程定义为全行程,可以得出转向液压缸与履带式拖拉机转向形式对应关系如表1所示,3种转向形式分别表示为F、 T_H 、 T_F 。

为了使转向液压缸工作在半行程,即转向离合器分离,制动器不工作,对控制压力比例阀控制的占空比信号进行标定:将履带两侧驱动轮悬空,调节占空比使驱动轮恰好由旋转到停止,此时测得控制左、右轮的压力比例阀占空比信号分别为38%、40%。

2 单HST差速转向控制方法

2.1 履带式拖拉机运动学模型

履带车辆运动学模型提供了左、右履带速度与转向角速度的关系,通过调节左、右履带速度,可以实现车辆转向控制,利用运动学模型可以满足履带式拖拉机转向

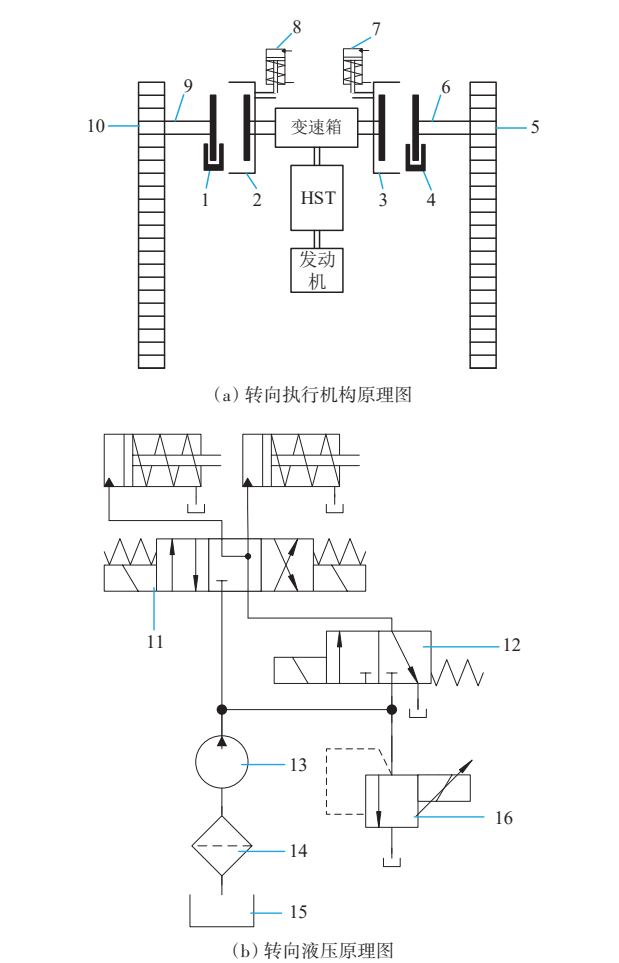


图 1 单 HST 转向原理图

Fig. 1 Single HST steering principle diagram

1. 左制动器 2. 左离合器 3. 右离合器 4. 右制动器 5. 右驱动轮
6. 右半轴 7. 右转向摇臂与液压缸 8. 左转向摇臂与液压缸 9. 左半轴
10. 左驱动轮 11. 电液比例阀 12. 电磁阀 13. 液压泵 14. 油滤
15. 油箱 16. 压力比例阀

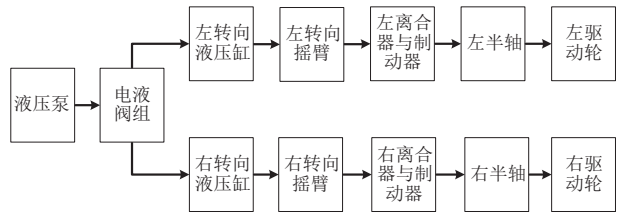


图 2 单 HST 转向动作流程图

Fig. 2 Single HST steering action flowchart

表 1 转向液压缸动作与转向形式			
Tab. 1 Steering cylinder action and steering form			
左转向液压缸工作行程	离合器工况	制动器工况	转向形式
不工作	结合	不工作	不转向(F)
半行程	分离	不工作	差速转向(T _H)
全行程	分离	工作	单边制动转向(T _F)

控制精度要求^[18-19]。为建立履带式拖拉机运动学模型,假设履带式拖拉机质心和几何中心重合且整机关于中心对称;行驶时履带与地面为纯滚动,不产生滑移和滑

转^[20]。在高斯平面坐标系建立如图 3 所示的履带式拖拉机运动学差速转向模型,图中直线 AB 为目标直线,其目标航向角为 θ , ($^{\circ}$); v_1 、 v_2 为左、右侧履带速度, m/s; b 为履带底盘宽度, m; θ 为拖拉机实时航向角, ($^{\circ}$); d 为履带式拖拉机到目标直线的距离偏差, m; R 为拖拉机转向半径, m; ω 为拖拉机转向角速度, rad/s; 点 C 为拖拉机瞬时转向中心; 点 O_c 为拖拉机几何中心。履带式拖拉机理论转向半径 R 、转向角速度 ω 分别为

$$R = \frac{b(v_2 + v_1)}{2(v_2 - v_1)}$$

(1)

$$\omega = \frac{v_2 - v_1}{b}$$

(2)

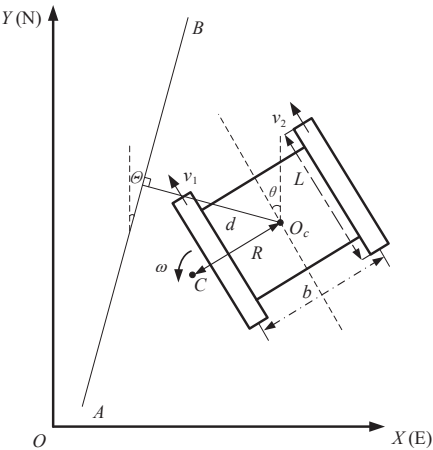


图 3 履带式拖拉机运动学模型示意图

Fig. 3 Schematic of kinematic model of tracked tractor

当速度不变时,履带式拖拉机转向角通过作用时间控制,转向角与作用时间成正比,比例系数为转向角速度。以左转向为例,单边制动转向时 $v_1=0$, 速度固定时,此时转向角速度取得最大值 $\omega_{\max}$, 差速转向时 $v_1 \neq 0$, $\omega < \omega_{\max}$, 因此当作用时间相同时差速转向方式可以控制履带式拖拉机转过更小的角度。通过田间试验测得,速度为 3 km/h 时,单边制动转向平均角速度为 0.21 rad/s, 差速转向角速度平均值为 0.04 rad/s。由于机械结构限制,转向作用时间存在一个最小值,最小转向作用时间下拖拉机采用差速转向方式转过的角度将远小于采用单边制动转向方式转过的角度。因此在转向控制过程中差速转向将具备更灵活的转向控制能力,这将使得在同样的路径跟踪控制方法下,采用差速转向方式的履带式拖拉机路径跟踪效果得到提升^[21]。

2.2 差速转向控制方法

为获得满足要求的跟踪效果,在拖拉机路径跟踪过程中,需通过底盘转向不断调整和改善拖拉机的距离偏差和航向偏差^[22-23]。如图 4 所示,图中 α 为航向修正量, $D_{\min}$ 为设定的最小纠偏距离, δ 为履带式拖拉机所需执行的转角。采用修正设定航向的方式来纠正距离偏差,车载控制器首先根据目标路径计算设定航向,接着实时读取拖拉机的位置信息和航向信息,计算拖拉机所在位置

到设定航线的距离,得到距离偏差,其次判定距离偏差是否在可接受范围内,以此判定是否需要修正设定航向。然后依据设定航向和航向偏差计算拖拉机跟踪直线所需要的转角。最后车载控制器接收到新的转角,依据其大小对应执行相应的转向动作,进入下一个循环。

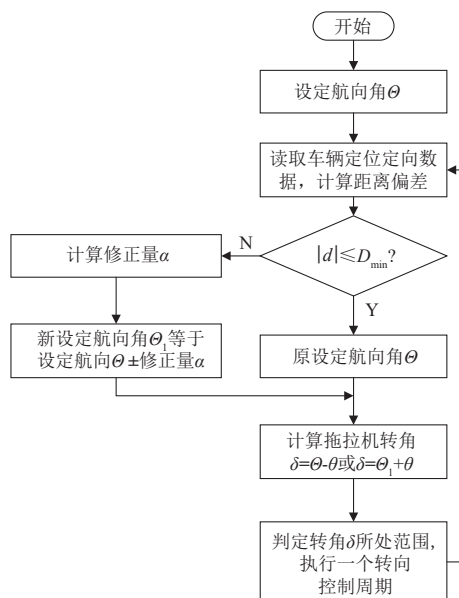


图4 转向控制流程图

Fig. 4 Steering control flowchart

为了迅速缩小距离偏差,修正量与距离偏差呈正相关,修正量计算公式为

$$\begin{cases} |d| \leq D_{\min} & (\alpha = 0^\circ) \\ D_{\min} < |d| \leq D_{\max} & \left(\alpha = \frac{(|d| - D_{\min}) \alpha_{\max}}{D_{\max} - D_{\min}} \right) \\ |d| > D_{\max} & (\alpha = \alpha_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

在动态修正距离偏差和获取拖拉机航向角 θ 的基础上,可以计算出履带式拖拉机底盘所需转角 δ 。为了实现车辆的连续转向控制和防止长时间单边制动转向造成推壅土堆,阻力激增,依据计算所得的履带拖拉机转角 δ ,基于脉宽调制原理思想,建立如表2所示的转向控制方法, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ 表示设置的转角阈值。当转角 $0^\circ < \delta \leq \delta_1$ 时,为减小振荡,转向系统不工作。当转角 $\delta_1 < \delta \leq \delta_2$ 时,转向系统一直处于差速转向 T_H 状态。随着 δ 继续增大,则对应提高 T_F 在一个转向控制周期 T 内所占比例。实现了在偏差较小时履带式拖拉机能够差速平稳转向,偏差较大时履带式拖拉机能够快速纠偏。

以左转为例,车载控制器在接收到转角 δ 时,判定 δ 所处范围,在一个转向控制周期 T 内执行对应的转向动作。每一个转向动作执行时间相同,如表2所示,在一个周期 T 内有5个转向动作,则每一个转向动作执行时间为 $T/5$ 。在转向执行过程中,距离偏差和航向偏差以车载控制器接收导航信息的频率为依据实时更新,即拖拉机所需转角 δ 在动态变化。在一个转向控制周期 T 内所

有转向动作执行完毕时,转向控制器将读取最新的转角 δ 并执行对应的转向动作。如此周而复始,可以实现履带式拖拉机的直线跟踪控制。以直线跟踪精度来对比评价差速转向和仅采用单边制动转向的控制效果。

表2 差速转向控制输出

Tab. 2 Differential steering control output

转角 δ	转向动作				
$(0^\circ, \delta_1]$	F	F	F	F	F
$(\delta_1, \delta_2]$	T_H	T_H	T_H	T_H	T_H
$(\delta_2, \delta_3]$	T_F	F	T_H	T_H	T_H
$(\delta_3, \delta_4]$	T_F	T_F	F	T_H	T_H
$(\delta_4, 180^\circ)$	T_F	T_F	T_F	T_F	T_F

3 差速转向控制系统设计

3.1 控制系统组成

差速转向控制系统组成如图5所示,主要包括履带式拖拉机(东方红 CR502 型)、凸轮轴转速传感器(驭芯科技 H138 型)、电液阀组(HydraForce)、转向液压缸(SL-ZXG 型)、变速箱(浙江云洲 YZ-60 型),及在此基础上对其进行低成本差速转向控制改造,包括车载控制器(农芯科技 AMC-C0808 型,嵌入式控制器)、RTK-GNSS 导航数据接收机(农芯科技 AMG-PFZ202 型)。



图5 差速转向控制系统组成

Fig. 5 Composition of differential steering control system

1. GNSS 天线
2. 电液阀组
3. 转向液压缸
4. RTK-GNSS 接收机
5. 车载控制器
6. 转速传感器

RTK-GNSS 接收机用于接收 GNSS 天线信息并输出履带式拖拉机位置坐标、航向角等导航信息,电液阀组和转向液压缸用于执行转向动作,车载控制器用于分析传感器信号、实时读取处理导航信息、存储路径点、生成路径、执行路径跟踪控制算法并输出控制信号,转速传感器用于检测履带式拖拉机行进速度。

3.2 车载控制器设计

车载控制器兼具转向控制和路径跟踪功能,按其软件功能可划分为转向控制模块和路径跟踪模块。图6为履带式拖拉机车载控制器的整体设计流程,图中S为转向控制器的输出,此时为控制压力比例阀的PWM信号和电液换向阀的开关信号。

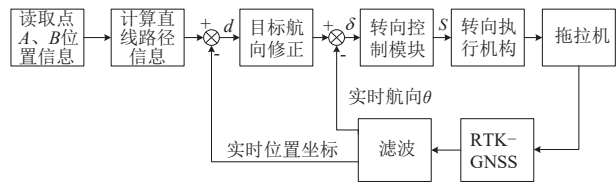


图6 履带式拖拉机车载控制器设计流程图
Fig. 6 Design process of tracked tractor onboard controller

车载控制器读取通过中断程序记录的点 A 、 B 位置信息,随后计算线 AB 及其所对应的航向角,利用RTK-GNSS采集拖拉机的位置信息和航向信息。为了降低动态定位误差,采用加权平均算法对最近4次获取的坐标进行滤波,以获取当前位置^[24-25]。通过点到直线距离公式计算当前位置与设定航线之间的距离偏差 d 。将经过滤波的距离偏差 d 作为输入,利用航向角修正公式计算出目标航向。然后,通过计算拖拉机转角 δ (修正的目标航向角和RTK-GNSS实时采集航向角之差)作为转向控制模块的输入,转向控制模块做出决策并输出控制信号。控制信号经集成于控制器的BTN8962TA驱动芯片作用于电液阀组,从而实现履带式拖拉机转向控制^[26]。控制器程序中设置有转向控制状态标志位,以此来判断每一个转向控制周期是否正确执行完毕,当转向控制周期执行错误或程序出现其它错误时将由看门狗实现软件重启并报警提示,重启时初始化函数会使得拖拉机处于停车状态。

4 实车试验

4.1 试验设计

4.1.1 试验场地与平台

以履带式拖拉机(东方红 CR502 型)为试验平台,在国家精准农业研究示范基地水泥地面和田间开展直线跟踪试验,以直线跟踪精度来对比评价差速转向路径跟踪精度的提升,履带式拖拉机基本参数如表3所示。

表3 履带式拖拉机主要参数

Tab. 3 Main parameters of tracked tractor	
参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 100×1 600×1 485
质量/kg	1 800
底盘宽度/mm	1 000
液压系统压力/MPa	18
速度/(km·h ⁻¹)	0~8.51

4.1.2 试验步骤

设置GNSS卫星接收机输出频率与车载控制器接收频率均为10 Hz。在控制方法和参数设置相同的情况下,进行差速转向和单边制动转向对比试验。试验步骤为:在试验路面两端选取 A 、 B 两点作为转向控制试验的起点和终点。调节初始距离偏差和航向偏差。设置履带式拖拉机的速度为2 km/h。启动履带式拖拉机,开始进行直线跟踪试验。采用车载北斗定位装置实时记录车辆定位数据。重复进行多次试验,并将试验数据进行

滑动均值滤波,消除异常点的干扰,分析直线跟踪效果。将履带式拖拉机速度分别设置为3、5 km/h,重复上述步骤。

4.1.3 评价指标

采用转向控制精度提高百分比 K 作为评价指标^[13],计算公式为

$$K = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%$$
 (4)

式中 M_1 ——单边制动转向控制精度

M_2 ——差速转向控制精度

分别以两者的距离绝对偏差平均值和距离绝对偏差标准差表示控制精度,计算评价指标,用以比较两者直线跟踪精度。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 水泥路面试验结果

根据图7可知,在一开始两种转向方法所对应的距离偏差变化速率几乎相同,这是因为车辆在这一时刻处于上线状态,此时距离偏差较大,基于脉宽调制原理的差速转向控制方法此时在一个转向控制周期内会提高单边制动转向所占时间,以确保车辆能够快速纠正距离偏差。

表4为水泥路面3种速度下不同转向方式距离绝对偏差平均值和标准差,根据式(4)计算可得:水泥路面上速度2 km/h时直线跟踪精度分别提高36.0%、28.9%,速度3 km/h时直线跟踪精度分别提高33.3%、25.6%,速度5 km/h时直线跟踪精度分别提高11.4%、14.3%。

4.2.2 田间地面试验结果分析

图8为履带式拖拉机分别以3个速度在田间地面进行直线跟踪试验时,每一时刻距离偏差的变化情况。根据图7、8可知履带式拖拉机直线跟踪过程中差速转向控制方法较仅采用单边制动转向方法,距离偏差变化幅值和频率都小,这表明采用差速转向控制方法可以更为平稳地控制拖拉机进行路径跟踪。

表5为田间地面3种速度下不同转向方式距离绝对偏差平均值和标准差。数据显示,在相同速度水平下(约2 km/h)差速转向控制履带式拖拉机距离绝对偏差平均值为1.7 cm,最大跟踪偏差小于8.0 cm,二者均明显优于丁幼春等^[13]采用免疫PID方法控制单边制动转向形式的小型履带式油菜播种机所取得的距离绝对偏差平均值5.8 cm、最大跟踪偏差14.9 cm试验结果。在同一速度下(约5 km/h),差速转向控制方法距离绝对偏差平均值为2.9 cm,与张朝宇等^[3]使用昂贵的工控机,采用模糊自适应纯追踪控制器控制履带式油菜播种机取得的试验结果3.2 cm基本一致。由式(4)计算可得:田间地面速度2 km/h时直线跟踪精度分别提高21.7%、18.5%,速度3 km/h时直线跟踪精度分别提高9.5%、12.5%,速度5 km/h时直线跟踪精度分别提高23.7%、22.7%。

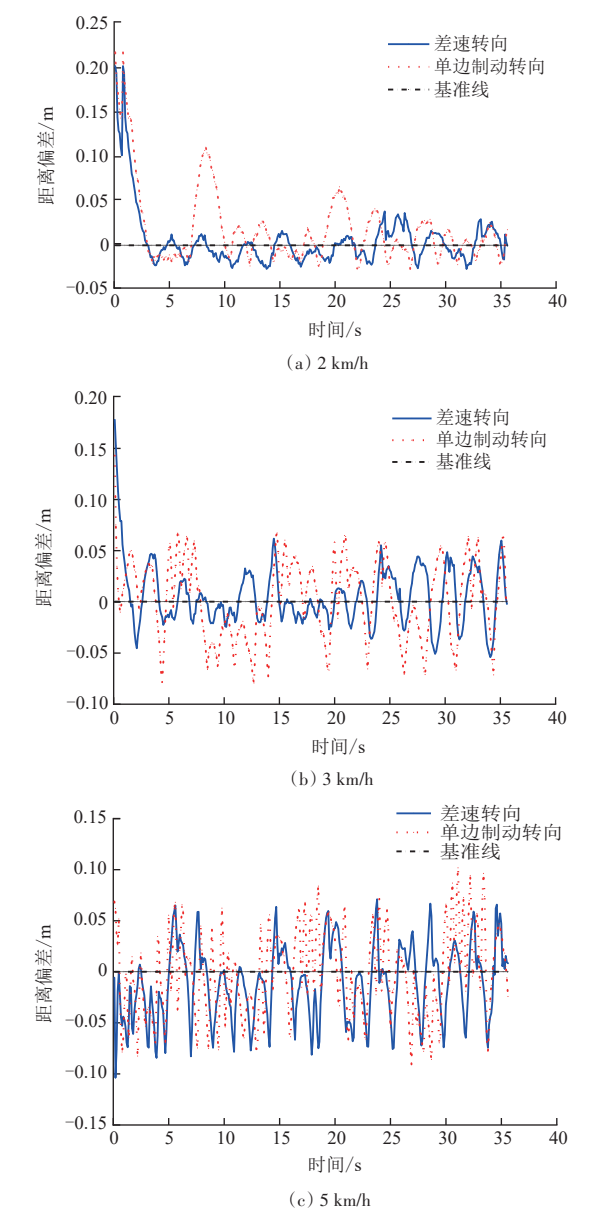


图7 水泥路面直线跟踪距离偏差变化曲线
Fig. 7 Deviation curves of straight-line tracking distance for cement pavement

表4 水泥路面直线跟踪试验结果

Tab. 4 Results of cement pavement linear tracking test

速度/ (km·h ⁻¹)	距离绝对偏差平均值/cm		距离绝对偏差标准差/cm	
	差速转向	单边制动转向	差速转向	单边制动转向
2	1.6	2.5	2.7	3.8
3	2.2	3.3	2.9	3.9
5	3.1	3.5	3.6	4.2

5 结论

(1)通过对单HST履带式拖拉机转向机构原理分析,建立了履带车辆运动学模型,设计了基于脉宽调制原理的差速转向控制方法,提出了一种基于嵌入式控制器的低成本履带式拖拉机直线导航控制方法,并开展3个速度和2种路面状态的直线跟踪试验,验证了方法有效性与准确性。

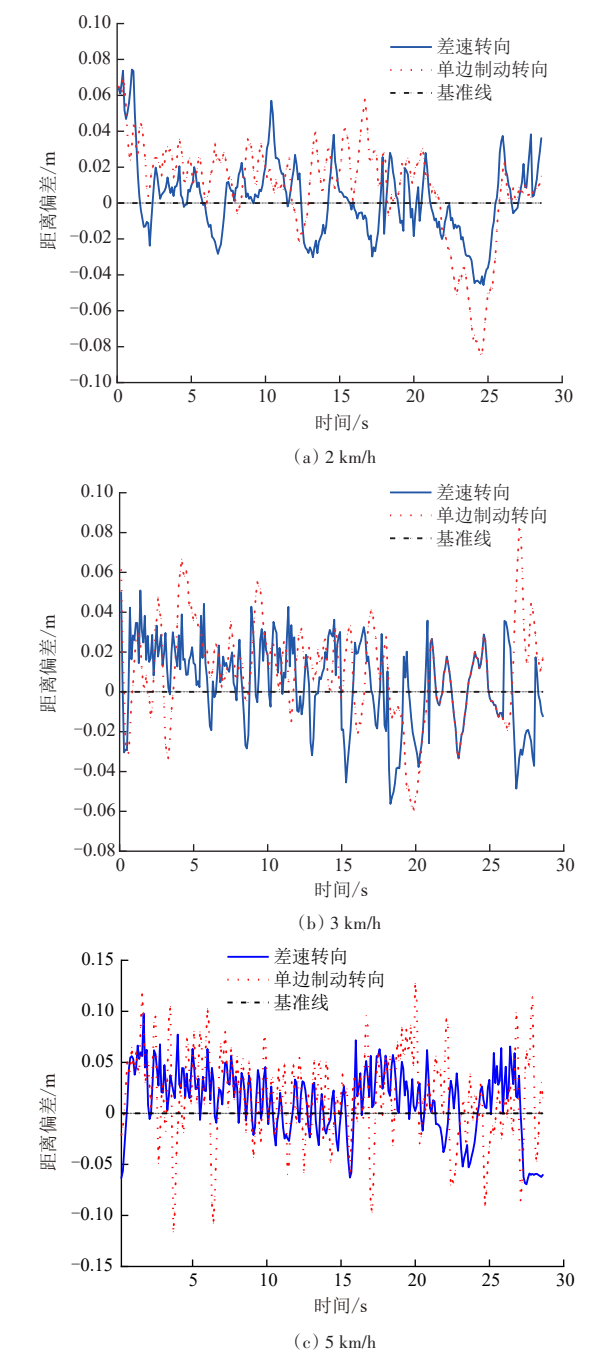


图8 田间地面直线跟踪距离偏差变化曲线
Fig. 8 Deviation curves of straight-line tracking distance on ground in field

表5 田间地面直线跟踪试验结果

Tab. 5 Field ground linear tracking test results

速度/ (km·h ⁻¹)	距离绝对偏差平均值/cm		距离绝对偏差标准差/cm	
	差速转向	单边制动转向	差速转向	单边制动转向
2	1.7	2.3	2.2	2.7
3	1.9	2.1	2.1	2.4
5	2.9	3.8	3.4	4.4

(2)构建了基于状态反馈的单HST履带式拖拉机差速转向控制系统,在水泥路面和田间地面进行直线路径追踪时,差速转向比单边制动转向在路径跟踪精度提升

11.4% ~ 36.0%。

(3)对比仅采用单边制动转向,差速转向控制系统不仅可在偏差较大时迅速纠偏,而且解决了履带式拖拉

机导航过程中控制平稳性差、转向控制分辨率低的问题,同时也避免了单边制动转向方式严重破坏土壤的状况。

参 考 文 献

- [1] 解彬彬,刘继展,蔡连江,等.小地块履带农机 UWB 导航系统设计及其基站布置[J].农业工程学报,2022, 38(7):48 - 58.
XIE Binbin, LIU Jizhan, CAI Lianjiang, et al. Design of the UWB navigation system for tracked agricultural machinery in small land and analysis of base station layout[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(7): 48 - 58. (in Chinese)
- [2] TANG Z, ZHANG H, LI H, et al. Development of crawler steering gearbox for combine harvester straight forward and steering in situ[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 120 - 126.
- [3] 张朝宇,董万静,熊子庆,等.履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J].农业机械学报, 2021, 52(12): 105 - 114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105 - 114. (in Chinese)
- [4] 朱晨辉,李连豪,王万章,等.高地隙液压履带车自动行走控制系统设计与试验[J].农业机械学报, 2018, 49(1): 456 - 462,469.
ZHU Chenhui, LI Lianhao, WANG Wanzhang, et al. Design and test of automatic walking control system for high clearance hydraulic tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 456 - 462,469. (in Chinese)
- [5] ZHAI Z, ZHU Z, DU Y, et al. Multi-crop-row detection algorithm based on binocular vision[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150: 89 - 103.
- [6] 丁肇,李耀明,任利东,等.履带式行走机构压实作用下土壤应力分布均匀性分析[J].农业工程学报, 2020, 36(9): 52 - 58.
DING Zhao, LI Yaoming, REN Lidong, et al. Distribution uniformity of soil stress under compaction of tracked undercarriage [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 52 - 58. (in Chinese)
- [7] TAKAI R, YANG L, NOGUCHI N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(4): 143 - 147.
- [8] RAYMOND J B, JAYAKUMAR P. The shearing edge of tracked vehicle-soil interactions in path clearing applications utilizing multi - body dynamics modeling & simulation[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 58: 39 - 50.
- [9] SABIHA A D, KAMEL M A, SAID E, et al. ROS-based trajectory tracking control for autonomous tracked vehicle using optimized backstepping and sliding mode control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 152: 104058.
- [10] KO M H, RYUH B, KIM K C, et al. Autonomous greenhouse mobile robot driving strategies from system integration perspective: review and application[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(4): 1705 - 1716.
- [11] 白国星,刘丽,孟宇,等.基于非线性模型预测控制的移动机器人实时路径跟踪[J].农业机械学报,2020,51(9):47 - 52,60.
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Real-time path tracking of mobile robot based on nonlinear model predictive control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 47 - 52,60. (in Chinese)
- [12] 贾全,张小超,苑严伟,等. NF - 752 型履带式拖拉机自动驾驶系统[J].农业工程, 2018, 8(4): 24 - 29.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Automatic driving system for NF - 752 tracked tractor[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 24 - 29. (in Chinese)
- [13] 丁幼春,何志博,夏中州,等.小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J].农业工程学报, 2019, 35(7): 12 - 20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12 - 20. (in Chinese)
- [14] 何杰,满忠贤,胡炼,等.履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J].农业工程学报, 2023, 39(1): 9 - 17.
HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 9 - 17. (in Chinese)
- [15] 张万枝,赵威,李玉华,等.基于改进 A - Star 和 LM - BZS 算法的果园履带机器人路径规划[J].农业机械学报,2024,55(8):81 - 92.
ZHANG Wanzhi, ZHAO Wei, LI Yuhua, et al. Path planning of orchard crawler robot based on improved A - Star and LM-BZS algorithms [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 81 - 92. (in Chinese)
- [16] 陈漫,李岩,马彪,等.静液驱动履带车辆模型辨识与运动控制[J/OL].北京理工大学学报: 1 - 9[2024-09-18].https://doi.org/10.15918/j.tbit1001 - 0645.2024.044.
CHEN Man, LI Yan, MA Biao, et al. Model identification and motion control of hydrostatic driven tracked vehicles [J/OL]. Journal of Beijing Institute of Technology: 1 - 9 [2024 - 09 - 18]. https://doi.org/10.15918/j.tbit1001 - 0645.2024.044.(in Chinese)
- [17] ZHANG L, ZHANG R, LI L, et al. Research on virtual Ackerman steering model based navigation system for tracked vehicles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106615.

- HAO Jianjun, MA Yuejin, YANG Xin, et al. Experimental investigation on plowshare coated by flame cladding Ni - base cast WC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 139 - 142. (in Chinese)
- [25] 徐德生, 任露泉, 邱小明, 等. WC/Cu 基仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 148 - 151.
- XU Desheng, REN Luquan, QIU Xiaoming, et al. Study on WC/Cu based bionic, non - smoothed, and composite coating [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 148 - 151. (in Chinese)
- [26] 王文权, 杜明, 张新戈, 等. H13 钢表面电火花沉积 WC - Ni 基金属陶瓷涂层微观组织及摩擦磨损性能[J]. 金属学报, 2021, 57(8): 1048 - 1056.
- WANG Wenquan, DU Ming, ZHANG Xin'ge, et al. Microstructure and tribological properties of WC - Ni matrix cermet coatings prepared by electrospark deposition on H13 steel substrate[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(8): 1048 - 1056. (in Chinese)
- [27] CHAI L, WANG C, XIANG K, et al. Phase constitution, microstructure and properties of pulsed laser - clad ternary CrNiTi medium - entropy alloy coating on pure titanium[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 402: 126503.
- [28] KHRUSCHOV M M. Principles of abrasive wear[J]. Wear, 1974, 28(1): 69 - 88.
- [29] TANG Y, JI P, LI B, et al. Effect of loading on microstructure and friction and wear behavior of an austenite lightweight steel [J]. Tribology International, 2023, 177: 108006.
- [30] STRAFFELINI G, PELLIZZARI M, MOLINARI A. Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al - based metal - matrix - composites against friction material[J]. Wear, 2004, 256(7 - 8): 754 - 763.
- [31] 张云鹏, 孙广标, 张安洲. 超声磨料对 TC4 钛合金电火花加工表面质量的影响[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 204 - 209.
- ZHANG Yunpeng, SUN Guangbiao, ZHANG Anzhou. Effect of abrasive particle ultrasonic vibration on surface quality of titanium alloy TC4 in EDM[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 204 - 209. (in Chinese)

(上接第 411 页)

- [18] 程军伟, 高连华, 王红岩, 等. 履带车辆转向分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(9): 1110 - 1115.
- CHENG Junwei, GAO Lianhua, WANG Hongyan, et al. Analysis on the steering of tracked vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(9): 1110 - 1115. (in Chinese)
- [19] 方志强, 王红岩, 贺小军, 等. 一种测定履带车辆行驶地面性质参数的新方法[J]. 兵工学报, 2007, 28(4): 391 - 395.
- FANG Zhiqiang, WANG Hongyan, HE Xiaojun, et al. A new method to measure the parameters of ground properties for tracked vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(4): 391 - 395. (in Chinese)
- [20] 赵状状, 张国忠, 罗承铭, 等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 46 - 54.
- ZHAO Zhuangzhuang, ZHANG Guozhong, LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 46 - 54. (in Chinese)
- [21] 侯旭朝, 马越, 项昌乐. 电驱动履带车辆转向稳定性控制研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 233 - 244.
- HOU Xuchao, MA Yue, XIANG Changle. Research on steering stability control of electric drive tracked vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 233 - 244. (in Chinese)
- [22] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 - 19.
- WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 - 19. (in Chinese)
- [23] 王法安, 杨全合, 张兆国, 等. 基于 ICR 的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 386 - 395, 425.
- WANG Faan, YANG Quanhe, ZHANG Zhaoguo, et al. Path tracking and turning control algorithm of tracked vehicle based on ICR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 386 - 395, 425. (in Chinese)
- [24] CHEN Y, ZHAO S, FARRELL J A. Computationally efficient carrier integer ambiguity resolution in multiepoch GPS/INS: a common - position - shift approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 24(5): 1541 - 1556.
- [25] ALLOTTA B, CAITI A, CHISCI L, et al. An unscented Kalman filter based navigation algorithm for autonomous underwater vehicles[J]. Mechatronics, 2016, 39: 185 - 195.
- [26] 韩明兴, 徐琨, 廖宜涛, 等. 液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 396 - 408, 418.
- HAN Mingxing, XU Kun, LIAO Yitao, et al. Co-simulation and test of electro-hydraulic system of novel hybrid track[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 396 - 408, 418. (in Chinese)