doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.062

高地隙液压履带车自动行走控制系统设计与试验

朱晨辉[1,2]　李连豪[1]　王万章[1,2]　张红梅[1]　赵　明[1]
(1.河南农业大学机电工程学院,郑州 450002;2.河南粮食作物协同创新中心,郑州 450002)

摘要:针对高秆作物生长中后期无人化田间机械作业需求,在遥控式小型全液压驱动高地隙履带车的基础上,设计了履带车自动行走控制系统。该系统以 STM32 控制器为控制核心,通过搭载测距、触杆、角速度等传感器得到有效信号,精确控制液压电磁阀开闭时间,使履带车旋转对应的角度,进而使履带车在田间可根据作物生长情况对行行走。为得到履带车在不同偏移状态下的转角,建立了该履带车转向运动模型以及标准田间偏移模型,推导出了履带车在不同对应状态下理论转角的表达式。考虑到履带车转向时存在滑移、滑转的现象,对履带车在不同行驶速度下的转向角速度进行了标定,试验得出实际转向角速度在理论转向角速度的 63% ~67% 之间。为验证液压车自动行走系统的行走效果,在硬质水泥路面进行了两种作业模式的履带车通过性试验,使用集思宝 G970 高精度 GNSS 设备精确测定了履带车转向轨迹,数据结果显示,两种行走模式下逆时针行走时,接收机相位中心转向轨迹半径分别为 5.573、5.572 m,顺时针分别为 4.704、4.645 m,两种模式下接收机相位中心偏移量在 0.163 ~0.285 m 之间,车架几何中心转向轨迹半径与实际半径相对误差在 0.92% ~2.14% 之间,履带车对行行走通过效果良好,可为田间自走式履带车辆自动行走控制系统的设计研究提供参考。

关键词:高地隙;履带车;液压;自动行走;控制;差分定位
中图分类号:S224.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)S0-0456-07

Design and Test of Automatic Walking Control System for High Clearance Hydraulic Tracked Vehicle

ZHU Chenhui[1,2]　LI Lianhao[1]　WANG Wanzhang[1,2]　ZHANG Hongmei[1]　ZHAO Ming[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*
2. *Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: In response to the demand of unmanned field machinery in the middle and late stages of high-stalk crop growth, the automatic walking control system was designed based on a remote control type of small high clearance hydraulic tracked vehicle. The STM32 controller was taken as control core, and the effective signal was obtained by using sensors such as ranging, contact rod, angular velocity and so on, the system can precisely control the opening and closing time of the hydraulic solenoid valve, so that the crawler vehicle can rotate the corresponding angle, and it can walk in the field according to the growth of crop. In order to obtain the angle of rotation of the tracked vehicle under different offset transitions, the steering model of the tracked vehicle and the standard field offset model were established, and the expression of theoretical angle of tracked vehicle in different corresponding states was deduced. Considering the phenomenon of slippage and slippage when the tracked vehicle was turning, the steering angular speed of the tracked vehicle at different driving speeds was calibrated. The test results showed that the actual steering angular velocity was between 63% ~67% of the theoretical steering angular velocity. In order to verify the walking effect of the hydraulic vehicle automatic walking system, the track vehicle passing test of two working modes was carried out on the hard cement road surface, and the track trajectory of the tracked vehicle was accurately measured by using Unistrong G970 multi-frequency GNSS

收稿日期:2018-07-03　修回日期:2018-08-10
基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03)、河南省现代农业产业技术体系岗位专项(S2018-02-G07)和河南省烟草公司科技专项(HYKJ1206/2016)
作者简介:朱晨辉(1989—),男,博士生,主要从事农业机械设计与性能试验研究,E-mail:zhuchenui@126.com
通信作者:王万章(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程装备、机电一体化及信息技术应用研究,E-mail:wangwz@126.com

system. The results showed that the two-way mode of the receiver's phase center turning trajectory was 5.573 m and 5.572 m in counterclockwise travel and 4.704 m and 4.645 m in clockwise walking, respectively, receiver phase center offset was between 0.163 m and 0.285 m. The relative error of turning track radius and actual radius of frame geometric center was between 0.92% and 2.14%. The tracked vehicle had good effect on automatic walking, which provided a reference for the design of automatic walking control system of field self-walking tracked vehicle.

Key words: high clearance; caterpillar vehicle; hydraulic pressure; automatic walking; control; differential positioning

0　引言

玉米、烟草等高秆作物是我国重要的粮食作物和经济作物，中耕施肥、除草、喷药等田间管理作业对提高其作物品质和产量具有重要作用。而高秆作物中后期田间管理作业存在劳动强度大、作业环境差等问题，特别是喷雾作业时有毒药物飘散易对驾驶员造成伤害[1]，因此无人作业车辆的研究成为必然趋势。针对不平整的小地块作业条件，要实现无人农业机械自主作业，多传感器融合自动对行控制技术是关键技术之一，也是影响车辆作业质量和作业效果的关键。国内外科研人员在农业机械自动对行控制技术方面已经做了大量研究，如在播种机开沟深度、播种深度和施肥深度自动控制系统、农业机械自动转向控制系统和拖拉机自动转向行走等方面的研究取得了很大进展[2-10]。本文以遥控式小型全液压驱动高地隙履带车为载体[11]，以 STM32 控制器为控制核心，采用液压技术、传感器信号采集技术和微处理器控制技术，设计液压履带车自动行走控制系统，精确控制液压电磁阀开闭时间，使履带车旋转对应的角度，进而使履带车在田间可根据作物生长情况对行行走。

1　结构与工作原理

液压履带车自动行走系统是基于田间液压驱动的小型遥控高地隙履带车而设计的，分别由液压系统、传感系统和单片机控制系统 3 部分组成。液压履带车结构如图 1 所示。液压履带车采用龙门架式结构，发动机通过联轴器带动液压泵提供动力。根据烟草和玉米的农艺要求[12]，同时考虑履带车田间作业的通过性，确定履带中心距为 1.2 m，单侧履带及车架上方各部件的最大宽度均小于 0.45 m。未启动自动行走系统操作时，液压履带车可采用无线遥控器控制其前进、倒退、转向动作。液压履带车自动对行行走时，为避免植株叶片对传感信号的影响以及避免履带车对高秆作物造成碾压，同时根据玉米、烟草植株中后期的生长状况，故将红外测距传感器置于距离履带车前端 0.2 m、高 0.3 m 的履带车车架立柱上；触杆传感器置于高度为 0.55 m 的履带车车架前端。行走系统中速度和压力信号分别由与液压马达串联的编码器和分布在马达两侧油路接口的压力传感器获得。

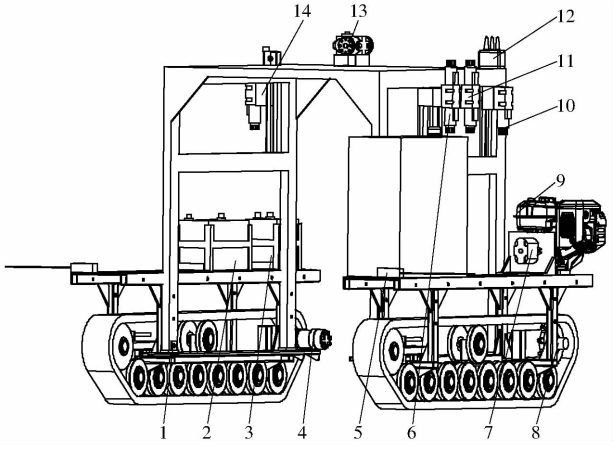


图 1　液压履带车结构示意图

Fig. 1　Sketch of vehicle

1. 测距传感器　2. 电磁阀蓄电池　3. 发动机蓄电池　4. 液压马达　5. 触杆传感器　6. 溢流阀　7. 液压泵　8. 编码器　9. 发动机　10. 左转向阀　11. 三位四通电磁阀　12. 遥控接收单元　13. 分流集流阀　14. 右转向阀

2　自动行走系统液压控制原理

液压系统原理如图 2 所示。履带车液压系统中，由固定式等量分流集流阀控制履带车直线行走，由二位四通换向阀控制履带车的转向，当一侧二位四通电磁阀通电，对应侧的液压马达反转，实现履带车的原地转向。自动行走系统工作时，传感器反馈信号给单片机控制单元，由单片机发出指令控制二位四通电磁阀的开闭。控制单元可通过不同的信号控制电磁阀的开闭时间，进而使履带车实现不同角度的偏转。由于液压系统中分流集流阀的存在，左右行驶马达得到的液压油量基本相同，履带车原则上只能进行原地转向。

3　自动行走系统转向角计算

3.1　履带车转向运动模型

为实现自动行走系统对履带车转向角的精确控

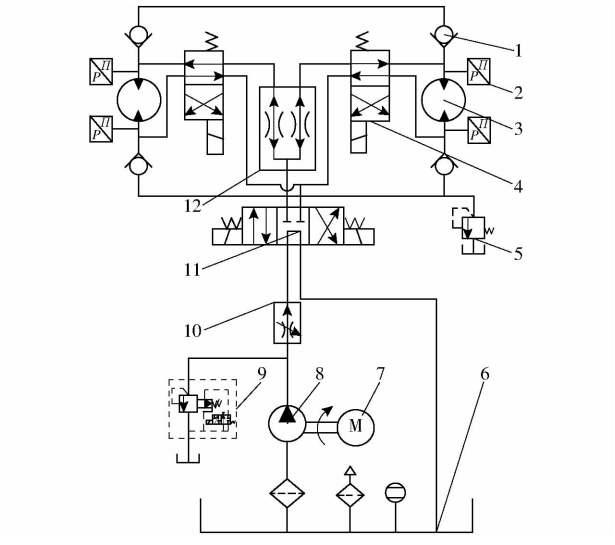


图 2 液压系统原理图

Fig. 2 Schematic of hydraulic system

1. 单向阀 2. 压力传感器 3. 液压马达 4. 二位四通电磁阀 5. 溢流阀 6. 液压油箱阀 7. 发动机 8. 液压泵 9. 电磁溢流阀 10. 调速阀 11. 三位四通电磁阀 12. 分流集流阀

制,建立履带车的转向运动模型。由履带车液压系统设计形式及履带车直线行走试验可知,在分流集流阀的作用下左右马达的进油量始终保持在相差较小的范围内,保证了转向时左右马达的角速度基本相等,转速差在总转速的 3.5% 以内[13],因此履带车转向形式只能为原地转向。由于试验中履带车的最大行驶速度为 1.5 m/s,可忽略离心力对履带车牵引力的影响[14]。

履带车转向受力计算较为复杂[15-18],为便于研究,作如下假设:①履带车质心位置与几何中心在二维平面上重合。②液压履带车稳定行驶时,发动机功率不变,履带接地压力均匀分布。③由于履带车车速较低,忽略空气阻力的影响,不考虑离心力的作用,且在同一路面条件下滚动阻力系数和地面附着系数为定值。④不考虑履带作业车的剪切阻力和推土阻力。转向运动模型如图 3 所示,其中 O_3 为履带车在 XOY 平面上的几何中心,B 为两履带中心线宽度,L 为履带长度,ω 为理论转向角速度,ω_t 为转向角速度,v_1、v_2 为内外履带着地点的卷绕速度,u_1、u_2 为内外履带着地点的牵连运动速度,O_1、O_2 为内外侧履带接地段瞬时转向中心,O' 为履带车转向中心,R 为转向半径,T_d、T_z 分别为履带转向动力矩和阻力矩,A_1、A_2 为履带车转向极横向偏移量。

履带车转向阻力为

$$F_i = (-1)^i \left(F_{Ni}\lambda + \frac{\mu mg}{0.925 \times 4B} \right) \tag{1}$$

式中 F_i——原地转向时内外侧履带所受总阻力,N;i 取 1 和 2 时分别对应左、右侧履带

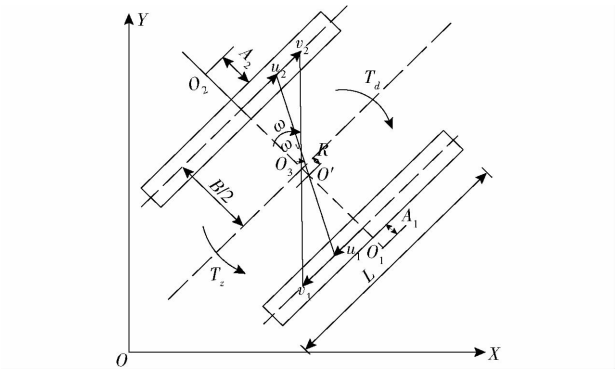


图 3 履带车转向运动模型

Fig. 3 Steering model of tracked vehicle

μ——单边制动时转向阻力系数,水泥路面系数取 0.6

F_{Ni}——单边履带对地支持力,i 取 1 和 2 时分别对应左、右侧履带

g——重力加速度,取 9.8 m/s^2

λ——滚动阻力系数

m——履带车质量,kg

液压马达理论扭矩为

$$M = \frac{F_i r}{\eta_1 \eta_2} \tag{2}$$

式中 M——转向时单侧履带驱动马达理论扭矩,N·m

r——履带驱动轮半径,取 0.095 m

η_1——液压马达机械效率,取 0.9

η_2——履带行走机构效率,取 0.7

履带车转向角速度为

$$\omega_t = \frac{v_2 - v_1}{B + A_1 + A_2} \tag{3}$$

不考虑履带车滑移、滑转时 $A_1 = A_2 = 0$,此时理论转向角速度为

$$\omega = \frac{v_2 - v_1}{B} \tag{4}$$

履带车转向角为

$$\theta = \omega_t t \tag{5}$$

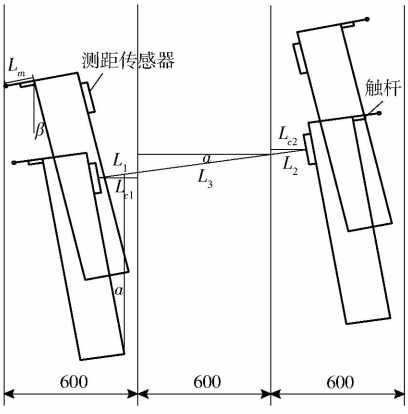
式中 θ——履带车转向角,(°)

t——履带车转向时间,s

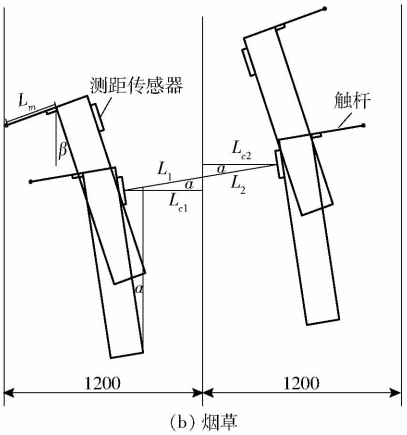
3.2 履带车偏移模型

为确定履带车在一定偏转情况下的回正角度,建立两种模式下的履带车对行作业偏转模型。如图 4 所示,图 4a、4b 分别为履带车在玉米、烟草田间偏转示意图,从图中可以看出偏转角可以通过测距传感器测出的数据求出。由图 4a 可知玉米田间对行行走时履带车偏转角表达式为

$$\begin{cases} L_1 + L_2 + L_3 = B - L_B \\ \cos\alpha = \dfrac{L_{c1}}{L_1} = \dfrac{L_{c2}}{L_2} = \dfrac{600}{L_3} = \dfrac{L_{c1} + L_{c2} + 600}{B - L_B} \end{cases} \tag{6}$$



(a) 玉米



(b) 烟草

图 4　履带车对行作业偏转模型

Fig. 4　Auto-follow deflection model of tracked vehicle

由图 4b 可知烟草田间对行行走时履带车偏转角度表达式为

$$\begin{cases} L_1 + L_2 = B - L_B \\ \cos\alpha = \dfrac{L_{c1}}{L_1} = \dfrac{L_{c2}}{L_2} = \dfrac{L_{c1} + L_{c2}}{B - L_B} \end{cases} \tag{7}$$

式中　L_{c1}——左测距传感器测量距离，m

L_{c2}——右测距传感器测量距离，m

L_B——履带宽度，m

α——履带车偏转角，(°)

由于田间对行行走情况较为复杂，测距传感器可能会出现反馈迟后的现象，当履带车偏转角过大时，需要触杆传感器作用使履带车偏转回正。根据履带车结构尺寸及作物田间种植模式确定触杆传感器长度。玉米田间自动行走时，触杆传感器触杆长度定为 $L_m = 100$ mm，经过测量当触杆传感器触碰到植株时履带车偏转角 β 约等于 13°；烟草田间行驶时，触杆传感器触杆长度定为 $L_m = 325$ mm，经过测量当触杆传感器触碰到植株时履带车偏转角 β 约等于 19°。在对应的速度下，自动行走系统可通过控制二位四通电磁阀的响应时间使履带车偏转相应的角度，进而实现履带车的偏转回正。

4　电子控制系统设计

控制系统通过人机交互界面设定履带车作业模式、初始偏转角。行走时，利用激光测距传感器检测履带车两侧至作物之间的距离，STM32 控制器对传感器信号进行处理，进而得出履带车行驶速度及履带车与固定行道的偏移角度及偏移方向，通过转向角速度与行走速度的对应关系，对相应左、右转向电磁阀进行一定时间的开闭来调整液压履带车的偏移。其中，当安装在履带车两侧的限位触杆传感器被触发时，控制器不再处理激光测距传感器的数据信息，限位触杆子程序直接开启对转向电磁阀的控制，使履带车偏转固定的角度，避免因履带车偏移量过大对植株碾压。控制系统总体设计方案框图如图 5 所示。

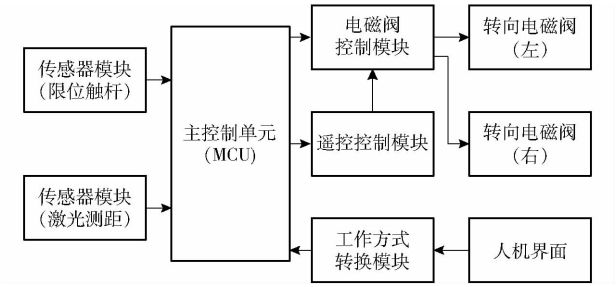


图 5　履带车控制系统框图

Fig. 5　Block diagram of tracked vehicle control system

4.1　硬件设计

作为自动行走系统的核心部件，作业过程中处理器需要实时对传递的各种信号进行处理决策，以此控制电磁阀的状态，所以要求其具有良好的反应速度、抗干扰和稳定性能[19]。本设计最终采用 STM32F103ZETT6 处理器，STM 处理器是基于 ARMCortex－M3 内核，该内核具有高性能、低成本、低功耗的优点[20]。Y－530 VL53L0X 型激光测距传感器具有工作电压范围较大，板子带有的 3.3 V 电源输出接口能够满足其工作需求，所以不需对电压进行转换。TZ－8107 ME 型触杆传感器带有调摆杆式触碰开关，当其触杆接触到作物茎秆时引起触杆触动时触碰开关为断开状态。选用 1000P/R 的 E6B2－CWZ6C 编码器进行角速度信号的采集。为实现微处理器对电磁阀的控制，设计了电磁阀驱动模块，此驱动模块中，+5 V 和 GND 接口与板子的输出电源接口相连，+12 V 接口与供电蓄电池的正极连接，DRIV 与微处理器的电磁阀控制输出信号接口相连，CON2 与转向电磁阀相连。微处理器通过控制板载的 5 V 电源输出接口状态来控制驱动模块的工作时长，从而控制电磁阀电源的导通与断开。人机交互模块选用 2.8 寸 TFT－LCD 显示屏，该显

示屏的色彩深度为 64 K 色,显示区域为57.6 mm × 47.2 mm,驱动 IC 为 ILI9341,供电电压为 3.3 V,人机交互界面可设置大量的参数和显示大量的信息。

4.2 软件设计

控制的核心是系统的软件,软件系统的优劣将直接影响到自动对行系统的工作性能及工作效率。自对对行系统的软件开发环境是 RVMDK 4.12。主程序流程如图 6 所示。

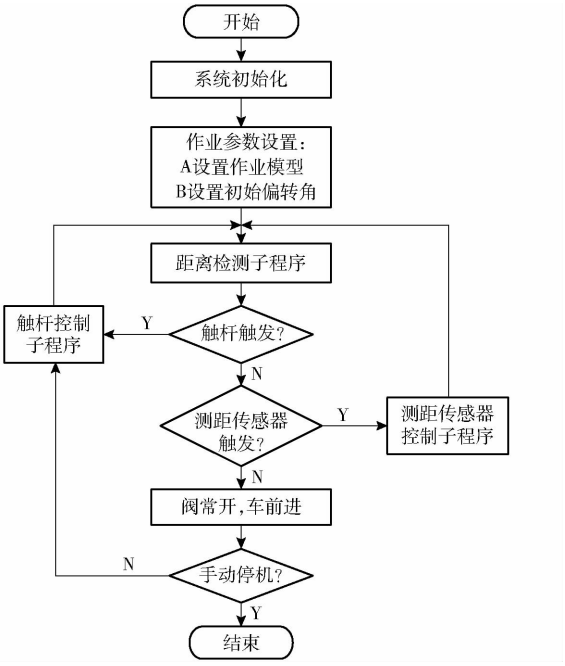


图 6 主程序流程图

Fig. 6 Flow chart of main program

系统上电后完成初始化,读取设置的履带车作业模式、初始偏转角等作业参数,之后开始启动距离检测子程序。通过测距传感器测得的有效测量结果触发测距传感器控制子程序,测距传感器子程序采集距离信号实时计算履带车的偏移角,当计算角小于初始偏转角时,测距传感器控制程序不运行,当计算偏转角大于设置的初始角时,控制器融合编码器信号控制电磁阀的开闭时间使履带车偏转回正。测距传感器控制子程序流程如图 7 所示。当限位触杆开关被触发时,系统开始执行触杆控制子程序,此时控制器不再处理激光测距传感器的数据信息,控制器控制履带车偏转设定的角度使履带车回正,并融合编码器信号计算出电磁阀的开闭时间,若回正量偏大或偏小则再次启动测距控制子程序。

5 试验及分析

为测试履带车自动行走控制系统的可靠性,在水泥硬面路况对履带车自动行走控制系统进行了转向角标定试验和自动行走通过性试验。试验仪器设备:秒表、卷尺、彩色水笔、标记线、立杆、彩带、集思宝 G970 高精度 GNSS 设备、蓝牙模块、便携式计算机等。

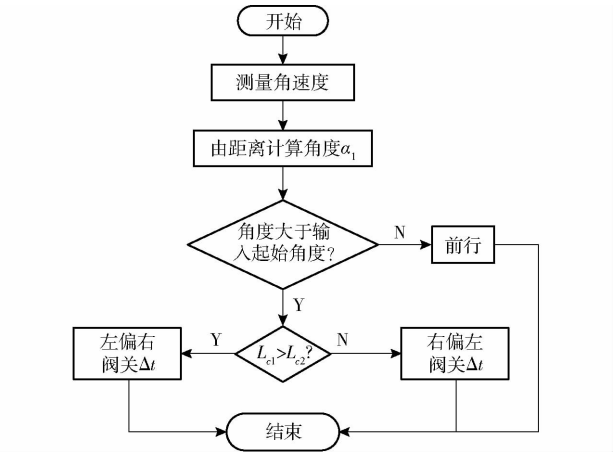


图 7 测距传感器控制子程序流程图

Fig. 7 Flow chart of ranging sensor control subroutine

5.1 履带车转向角速度标定试验

为了测试履带车不同行驶速度与转向角速度的对应关系,进行了履带车转向角速度标定试验。查阅资料可知,烟草起垄、铺膜、耕整地等的作业速度为 0.8 ~ 1 m/s,植保喷药作业速度为 0.8 ~ 1.3 m/s,打顶作业速度约为 1.5 m/s[21],故选取了 0.8、1、1.2、1.5 m/s共 4 个直线行走速度。增加单边配重使履带车质心位置与几何中心在二维平面上重合,待车速稳定后,通过遥控控制使电磁阀一侧处于常闭状态,直到履带车旋转约为 360°为止,记录履带车旋转所用时间。不同行驶速度与转向角速度的对应关系如表 1 所示。由数据可知,在功率不变的情况下履带转向卷绕速度约为直线行驶速度的 33%。由于履带车转向时存在滑移、滑转现象,实际转向角速度在理论转向角速度的 63% ~67% 之间。

5.2 液压履带车自动行走通过性试验

在校实习工厂内水泥地面进行履带车曲线通过性能试验。参照 GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性》试验方法,测试履带车的实际行驶轨迹半径与标准值的相对误差。在试验场地设置半径为 5 m 通过区域约为 270°的圆形转向轨迹,以烟草和玉米两种行距间隔放置立杆,为保证传感器的识别效果,立杆间距定为 0.2 m。履带车以 1 m/s 的速度进入圆形区域,为防止履带车在圆形轨迹中不断调整行进方向,通过设置系统控制参数使履带车在偏移角小于等于 ±7.5°时不进行对行调整。使用集思宝 G970 高精度 GNSS 设备精确测定履带车转向轨迹,为保证采集到足够信息点,将 G970 系统采样频率设置为 5 Hz。采集数据时,蓝牙模块与计算机上的串口调试软件建立通信并记录轨迹信息,后期对轨迹信息中经纬度信息进行提取,经高斯投影正算公

表 1　不同速度下转向角速度的测定

Tab. 1　Determination of steering angular velocity at different speeds

参数	履带车速度/(m·s^{-1})			
	0.8	1.0	1.2	1.5
履带平均转向卷绕速度/(m·s^{-1})	0.28(内侧)/0.30(外侧)	0.32(内侧)/0.35(外侧)	0.40(内侧)/0.44(外侧)	0.50(内侧)/0.55(外侧)
旋转一周时间/s	19.63	16.53	13.65	11.43
平均转向角速度/(rad·s^{-1})	0.32	0.38	0.46	0.55
理论转向角速度/(rad·s^{-1})	0.50	0.56	0.70	0.88
修正系数/%	64	67	66	63

式换算和整理，在 Matlab 软件中用最小二乘法拟合转向圆轨迹，拟合半径为移动站相位中心到转向中心的距离。移动站安装位置、履带车试验过程如图 8、9 所示，图 8 中 O、O_1 分别为作业车接地面几何中心移动站相位中心，移动站相位中心距几何中心距离 a、b 分别为 0.568、0.436 m，相位中心距地高度 1.6 m。履带车接地面几何中心转向轨迹半径与移动站相位中心转向轨迹半径之间关系为

$$\begin{cases} R_s = \sqrt{(R_1 - b)^2 + a^2} \\ R_n = \sqrt{(R_1 + b)^2 + a^2} \end{cases} \tag{8}$$

式中　R_1——履带车几何中心转向半径，m

R_s——顺时针轨迹拟合圆半径，m

R_n——逆时针轨迹拟合圆半径，m

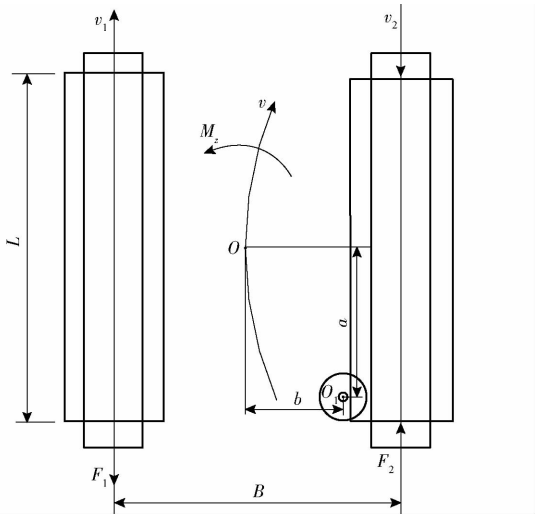


图 8　移动站安装示意图

Fig. 8　Schematic of installation of mobile station

经处理后的烟草模式、玉米模式行走转向轨迹如图 10 所示，由图可知，以 1 m/s 的速度行驶时，两种模式下履带车对行行走通过效果良好。

转向圆轨迹参数如表 2 所示，从表中可知两种模式下接收机相位中心偏移量在 0.163 ~ 0.285 m 之间，履带车几何中心转向轨迹半径相对误差在 0.92% ~ 2.14% 之间，相对误差较小，两种模式下履带车对行行走通过性效果良好；相比与烟草通过模



图 9　履带车转向通过试验

Fig. 9　Pivot steering test of tracked vehicle

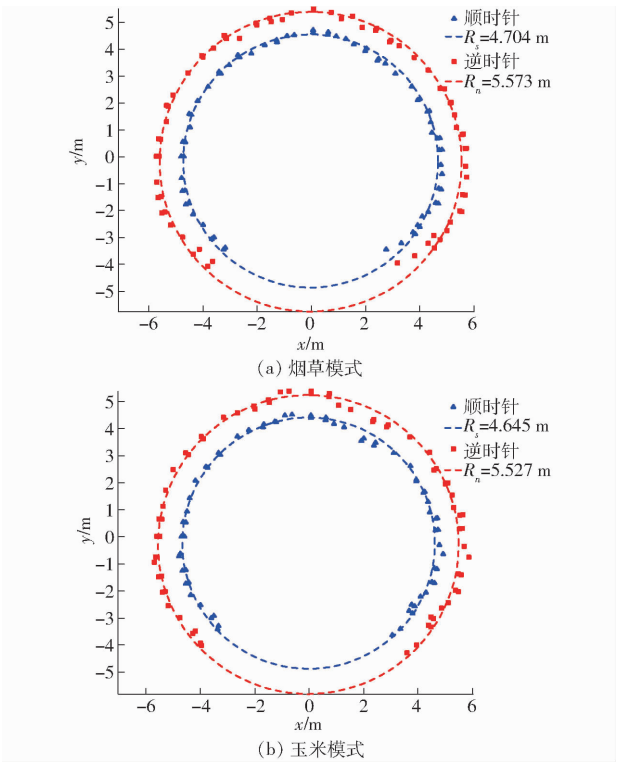


图 10　履带车转向轨迹

Fig. 10　Turning tracks of tracked vehicle

式，玉米模式由于其行间距相对较小，履带车通过时对行动作相对较多，接收机相位中心偏移量较大。

6　结论

(1)针对高秆作物生长中后期无人化田间机械作业需求，设计了履带车的自动行走控制系统，试验

表 2 履带车圆周轨迹参数

Tab. 2 Track trajectory parameters of tracked vehicles

试验类型	转向轨迹类型	接收机相位中心转向轨迹				车架几何中心转向轨迹半径	
		圆心横坐标/m	圆心纵坐标/m	半径/m	偏心距/m	转向半径/m	相对误差/%
烟草模式	顺时针	-0.025	-0.159	5.573	0.163	5.107	2.14
	逆时针	-0.026	-0.183	4.704	0.185	5.105	2.10
玉米模式	顺时针	-0.026	-0.232	5.572	0.233	5.106	2.12
	逆时针	-0.034	-0.283	4.645	0.285	5.046	0.92

表明,自动行走控制系统通过效果良好,两种通过模式下接收机相位中心偏移量在 0.163 ~0.285 m 之间,履带车几何中心转向轨迹半径相对误差在 0.92% ~2.14% 之间,相对误差较小,实现了履带车自动对行行走功能。

(2)履带车转向运动模型和作业模式偏移模型理论建立合理。通过标定试验得到实际转向角速度与理论转向角速度的修正系数在 63% ~67% 之间,代入修正系数后,增加了控制系统对行行走的精准性。

(3)自动行走控制系统中测距传感器、触杆传感器与编码器相结合的方式可行,三者相互作用实现了履带车自动对行行走。使用实时差分的卫星定位信号记录履带车转向轨迹的方案可行。借助 Matlab 数据分析软件进行后处理,可以方便地确定转向轨迹圆心和半径。

参 考 文 献

1 周良富, 沈启杨, 秦维彩, 等. 自走式高地隙喷杆喷雾机防治效果试验分析[J]. 江苏农机化, 2006,21(3): 22 -25.
ZHOU Liangfu, SHEN Qiyang, QIN Weicai, et al. Research on the control efficiency of an autonomous self-propelled high clearance boom sprayer[J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2006, 21(3): 22 -25. (in Chinese)

2 张智刚, 罗锡文, 李俊玲. 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 任文涛,迟德霞,刘金波,等. 遥控插秧机自动转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012, 43(1): 175 -179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120131&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.031.
REN Wentao, CHI Dexia, LIU Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 175 -179. (in Chinese)

4 吴晓鹏, 赵祚喜. 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. Development of auto steering control system on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):1 -5. (in Chinese)

5 陈文良, 谢斌, 宋正河, 等. 拖拉机电控液压动力转向系统的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 122 -125.
CHEN Wenliang, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Electro-hydraulic power steering system for tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):122 -125. (in Chinese)

6 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报,2006, 22(8): 116 -119.
LÜ Antao, SONG Zhenghe, MAO Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8):116 -119. (in Chinese)

7 SAEYS W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, part 1:modelling of the depth control system[J]. Bio-systems Engineering, 2007, 98(10): 146 -154.

8 SAEYS W, WALLAYS C, ENGELEN K, et al. An automatic depth control system for shallow slurry injection, part 2:control design and field validation[J]. Bio-systems Engineering, 2008, 99(2): 161 -170.

9 吴惠昌, 胡志超, 彭宝良, 等.牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J]. 农业工程学报,2013,29(12):17 -24.
WU Huichang, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Development of auto-follow row system employed in pull-type beet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12):17 -24. (in Chinese)

10 蔡国华, 李慧, 李洪文, 等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10):11 -16.
CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(10): 11 -16. (in Chinese)

11 王宝山, 王万章, 王淼森, 等.全液压驱动高地隙履带作业车设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(增刊): 471 -476. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s071&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.071.
WANG Baoshan, WANG Wanzhang, WANG Miaosen, et al. Design and experiment of full hydraulic drive high clearance tracked vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 471 -476. (in Chinese)

(下转第 469 页)

GAO Huichao. Fatigue analysis and optimization of a heavy truck frame[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
12 郑俊，赵红旺，朵兴茂. 应力应变测试方法综述[J]. 汽车科技，2009(1)：5－8.
ZHENG Jun, ZHAO Hongwang, DUO Xingmao. Summarization of stress and strain test method[J]. Auto Su-tech, 2009(1): 5－8. (in Chinese)
13 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京：高等教育出版社，1985.
14 王国军，蒋美华，王俊. 载荷谱信号奇异值剔除与降噪处理[C]//全国信息获取与处理学术会议，2009.
15 SUNG I S, CHOON P, KIN K H, et al. Fatigue strength evaluation of aluminum car body of urban transit unit by large scale dynamic load test[J]. JSME International Journal, 2005, 48(1): 27－34.
16 李成林，宋莎莎，韩振南. 基于 nCode Design－Life 的某车架疲劳可靠性分析[J]. 图学学报，2014，35(1)：42－45.
LI Chenglin, SONG Shasha, HAN Zhennan. Fatigue rellability analysis of frame based on nCode Design－Life[J]. Journal of Graphcs, 2014, 35(1): 42－45. (in Chinese)
17 巢媛. 重型货车车架结构的拓扑优化设计[D]. 重庆：重庆大学，2007.
CHAO Yuan. Study on topology optimization technologies of heavy vehicle frame[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese)
18 刘林华，辛勇，汪伟. 基于折衷规划的车架结构多目标拓扑优化设计[J]. 机械科学与技术，2011，30(3)：382－385.
LIU Linhua, XIN Yong, WANG Wei. Multi-objective topology optimization for an off-road vehicle frame based on compromise programming[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3): 382－385. (in Chinese)
19 洪清泉，赵康，张攀. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
20 董向前，宋建农，李永磊. 基于 ANSYS－Workbench 机架振动的模态分析[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集，2011.

(上接第 462 页)

12 张传斌，张土领. 1YSG－1 型烟田施肥起垄机的改进与试验[J]. 农机化研究，2011，32(6)：119－122.
ZHANG Chuanbin, ZHANG Tuling. Design of granary intelligent measurement and control termina [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 32(6): 119－122. (in Chinese)
13 王宝山，王淼森，王万章，等. 高地隙履带车转向性能试验[J]. 河南农业大学学报，2017，51(3)：335－340.
WANG Baoshan, WANG Miaosen, WANG Wanzhang, et al. Steering performance test of high clearance tracked vehicle[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(3): 335－340. (in Chinese)
14 王红岩，王钦龙，芮强，等. 高速履带车辆转向过程分析与试验验证[J]. 机械工程学报，2014，50(16)：162－172.
WANG Hongyan, WANG Qinlong, RUI Qiang, et al. Analyzing and testing verification the performance about high-speed tracked vehicles in steering process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 162－172. (in Chinese)
15 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)
16 曹付义，周志立，徐立友. 履带车辆液压机械差速转向系统参数优化[J]. 农业工程学报，2013，29(18)：60－66.
CAO Fuyi, ZHOU Zhili, XU Liyou. Parameter optimization of hydro-mechanic differential turning system for tracked vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 60－66. (in Chinese)
17 荆崇波，魏超，李雪原，等. 履带车辆差速转向机构转向过程动态特性的试验方法[J]. 农业工程学报，2009，25(7)：62－66.
JING Chongbo, WEI Chao, LI Xueyuan, et al. Test method of steering dynamic characteristics of differential steering mechanism of tracked vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 62－66. (in Chinese)
18 芮强，王红岩，王钦龙，等. 履带车辆转向性能参数分析与试验研究[J]. 机械工程学报，2015，51(12)：127－136.
RUI Qiang, WANG Hongyan, WANG Qinlong, et al. Research on the acquisition of steering performance parameters of armored vehicle based on experiments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 127－136. (in Chinese)
19 焦瀛. 高性能微处理器基本功能部件的设计与测试[D]. 西安：西安理工大学，2012.
JIAO Ying. Design and testing of basic functional components of high performance microprocessors[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
20 丁力，宋志平，徐萌萌，等. 基于 STM32 的嵌入式测控系统设计[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013，44(增刊 1)：260－265.
DING Li, SONG Zhiping, XU Mengmeng, et al. Design of embedded measurement and control system based on STM32[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(Supp. 1): 260－265. (in Chinese)
21 张传斌，余泳昌，吴亚萍. 高通过性四轮自走式烟草田间作业机的设计[J]. 农业工程学报，2011，27(11)：37－41.
ZHANG Chuanbin, YU Yongchang, WU Yaping, et al. Design of high traffic ability four wheel self-propelled field machine for tobacco[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 37－41. (in Chinese)