doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.006

静液压-机械驱动桥式履带底盘分段跟随转向控制研究

赵建柱[1]　王枫辰[1]　朱永奇[2]　张筱青[1]　王德成[1]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.合肥工业大学机械与汽车工程学院,合肥 230009)

摘要:为提高静液压-机械驱动桥式履带底盘转向的可操作性及安全性,设计了一种分段跟随控制策略及利用转向盘输入的转向电控系统。根据打滑条件下履带底盘转向分析结果,求解出理论转向轨迹,并根据机械驱动桥响应复位时间进行分段处理。实际履带底盘转向轨迹根据控制策略中所划分的行驶方向角度与位置偏离限控制每一分段时间内驱动桥的离合制动器作用状态,实时跟随理论轨迹。建立了控制策略的评价方法,并进行了算法仿真和电控系统设计及实车试验。仿真结果表明控制算法履带底盘转向相对误差为 5.9% ~10%,执行器作用平均频率为 2.5 ~6.6 Hz。实车试验表明,利用转向盘输入的电控转向系统可满足静液压-机械驱动式履带底盘的转向需求,能够实现驾驶人员转向意图,转向过程平稳。同时,电控系统能够有效减少履带底盘转向过程中的原地滑转,从而减小对地面和农作物的损伤。

关键词:履带底盘;静液压-机械式驱动;分段跟随转向控制

中图分类号:U463.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)04-0036-06

Subsection Following Steering Control Strategy and Test of Hydrostatic-mechanical Driving Crawler Chassis

Zhao Jianzhu[1]　Wang Fengchen[1]　Zhu Yongqi[2]　Zhang Xiaoqing[1]　Wang Decheng[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *School of Mechanical and Automotive Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*)

Abstract: A kind of subsection following steering control strategy and steering wheel input-based electronic control system were proposed to improve the steering maneuverability and security of the hydrostatic-mechanical driving crawler chassis. According to the steering analysis results of the crawler chassis under skid condition, the theoretical steering track was obtained, and it was segmented by mechanical drive axle responding time. Actual steering track followed theoretical steering track by controlling barking-clutch performance in every subsection period according to vehicle direction angle and position tolerances defined in control strategy. The evaluation system of the strategy was established, and the steering relative errors, relative steering radius ratio, executing frequency were selected as evaluation indexes. Algorithm stimulation and real vehicle test with steering electronic controller by adopting this strategy were also carried out. The stimulation results obtained by Matlab showed that the relative error of steering radius was between 5.9% and 10%, and the average frequency of actuator working was from 2.5 Hz to 6.6 Hz. The real vehicle test results showed that the electronic steering control system and control strategy had well steering performance, and it could meet various steering needs with stable process, and eliminate the destruction to soil and crops via decreasing the pivot steering slipping.

Key words: crawler chassis; hydrostatic-mechanical driving; subsection following steering control

收稿日期:2015-08-23　修回日期:2015-12-09

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203024)

作者简介:赵建柱(1963—),男,副教授,主要从事车辆动力学研究,E-mail:zhjzh@cau.edu.cn

通信作者:王德成(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事牧草机械研究,E-mail:wdc@cau.edu.cn

引言

履带底盘的转向是通过两侧驱动轮之间的差速来实现[1-2]，控制差速的准确性是整机能否按照驾驶人员的意图进行转向行驶的保证[3-4]。对于履带车辆转向理论，STEEDS 等[5-6]提出考虑履带与地面间滑动因素的履带车辆转向规律，KITANO 等[7-9]随后也做了大量的研究工作。

根据履带底盘不同的驱动形式，如机械驱动、静液压驱动、电驱动，实现两侧驱动轮差速的方式有多种，如机械驱动中的转向离合器、行星齿轮及双差速器式转向机构[10-13]。随着农用作业机械自动化程度的不断提高，此类履带底盘的电控系统设计得到了越来越多的关注，利用电控系统辅助驾驶人员进行转向操作可大大提高该类履带底盘的可操纵性、转向平稳性及行驶安全性。转向控制策略为其电控转向系统实现的重点研究内容[14-16]。针对不同的履带底盘驱动形式，研究人员提出了各种不同的履带底盘转向控制策略[11-15]。

静液压-机械驱动是一种将静液压技术与机械式驱动桥相结合的履带动力底盘驱动方式。由于其结构简单，成本低，性能可靠，在履带式农用动力底盘中得到了广泛应用。发动机动力经静液压驱动器(HST)传递至机械驱动桥后输出至驱动轮。其中，HST 可实现整机在一定范围内无级变速及负载换挡。机械驱动桥直接与驱动轮连接，可通过转动耳轴带动拨叉控制内部两侧离合制动器，为整机提供动力的同时实现两侧驱动轮的独立离合制动。

与一般机械式驱动桥中转向离合器不同，该驱动桥中装有一对牙嵌式离合制动器，而非摩擦离合。它的特点是，在切断一侧的驱动轮动力输入后，立即进行制动。因此，采用此种驱动方式的履带底盘在每次转向操纵时，内侧履带原地滑转，对地面或植物损伤较为严重。为实现非原地转向，将履带原地滑转分散，只能凭借驾驶人员经验采用手动“点刹”的方式实现，可操纵性及安全性较低。

为提高静液压-机械驱动式履带底盘的转向性能及行驶安全性，简化驾驶人员的转向操作，本文提出一种基于静液压-机械驱动桥的履带动力底盘分段跟随转向控制策略，并利用该策略设计一套以转向盘输入转向信息的履带底盘转向电子控制系统，建立算法评价方法，并进行算法仿真和实车试验。

1　履带底盘转向分析

图 1 为静液压-机械驱动桥式履带动力底盘驱动桥的内部结构示意图，其左右各有一拨叉，连接外部耳轴，用以控制移动牙嵌及多片制动器移动片的离合及制动。发动机动力经中央传动主动齿轮、从动齿轮，通过花键传给固定牙嵌，移动牙嵌在弹簧作用下与固定牙嵌啮合，并将动力传递给最终传动主动齿轮，再通过最终传动从动齿轮传递给驱动轮。移动牙嵌上有拨叉槽，当该侧的拨叉拨动拨叉槽克服弹簧力作用时，使该侧的移动牙嵌脱离固定牙嵌而切断动力，同时该侧的多片制动器移动片与制动器固定片接触，并在液压力作用下(图中未表示)实施制动，该侧驱动轮被抱死，即实现一侧离合制动。

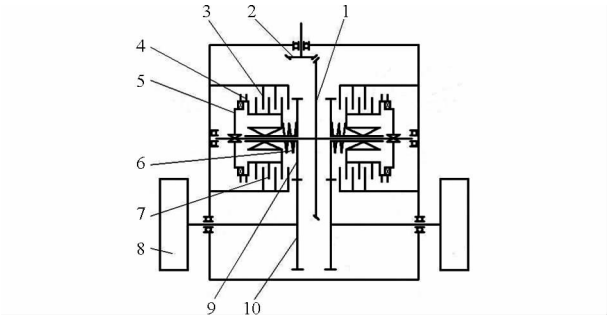


图 1　机械式驱动桥内部结构示意图

Fig. 1　Internal structure scheme of mechanical drive axle

1. 中央传动从动齿轮　2. 中央传动主动齿轮　3. 多片制动器固定片　4. 移动牙嵌　5. 固定牙嵌　6. 弹簧　7. 多片制动器移动片　8. 驱动轮　9. 最终传动主动齿轮　10. 最终传动从动齿轮

在静液压-机械驱动式履带动力底盘行驶过程中，当一侧的拨叉克服弹簧力进行离合制动时，整机立即近似以同侧履带接地段中心为转向中心开始转向，转向半径固定，近似为履带轨距的一半[17-18]。若需可变的转向半径，只能通过拨叉的分段控制作用来实现，其实际转向轨迹即为由固定半径的圆弧线段和直线段间隔组成的近似圆弧曲线。

通常对履带式动力底盘的转向分析中，工程应用往往忽略两侧履带接地段的滑转和滑移，即履带接地段的打滑现象，但其在履带式动力底盘的转向过程中是无法避免的[19-20]。为了在静液压-机械驱动桥式履带动力底盘的转向控制中更为精确地分析其转向过程中的运动学特性，应考虑到履带接地段的打滑条件，即履带式动力底盘在转向分析过程中需考虑外、内侧履带转向极横向偏移量以对分析结果进行修正。由于在计算履带转向极横向偏移量过程中需考虑道路阻力系数，而此系数无法实时采集，因此转向极横向偏移量的修正效果不一，实际道路阻力系数越接近预先设定值，修正效果则越精确。在考虑打滑条件后，需通过求解超越方程组[19]来确定对于给定的转向半径 R 和车速 v，打滑条件下的理论相对转向半径 ρ 和转向角速度 ω，即

$$\begin{cases}\rho = \dfrac{1}{2}\dfrac{1+\lambda a_1 + K_v(1+\lambda a_2)}{1-K_v} \\ \omega = \dfrac{v_2 - v_1}{B + A_1 + A_2}\end{cases} \tag{1}$$

其中 $\rho = R/B \quad \lambda = L/B \quad a_{1,2} = 2A_{1,2}/L$

式中 ρ——相对转向半径

v_1、v_2——外、内侧履带绕卷速度

K_v——外、内侧履带绕卷速度之比

λ——履带底盘结构参数

a_1、a_2——外、内侧履带转向极横向相对偏移量

A_1、A_2——外、内侧履带转向极横向偏移量

2 分段跟随转向控制策略

2.1 分段跟随转向控制原理

在实际转向控制过程中,只需控制转向轨迹内侧的耳轴带动拨叉克服弹簧力移动。根据拨叉响应及复位时间 Δt 把根据车速和转向半径计算出来的理论转向周期 T 分段化,即转向控制问题转换为如何在每个分段的小时间段内确定拨叉的作用,使得整机的整个转向轨迹及转向角速度与理论值尽可能的接近。由于转向过程是以驾驶人员的控制意图为基础的,所以整个转向过程依赖人的参与。为尽可能减小机械驱动桥的磨损和降低执行器的作用频率,本控制策略采用开环控制方式,且仅对转向过程中轨迹内侧耳轴进行控制。

实际底盘行驶轨迹实时跟随理论轨迹,理论轨迹按照转向过程中的车速和方向盘转角输入信号实时变化。根据式(1)计算出的结果作为理论轨迹,理论轨迹同样根据 Δt 进行分段化处理。同时,根据之前控制策略所产生的拨叉控制时序,均需计算并更新当前履带底盘位置及行驶方向信息。在每 Δt 前,根据所计算出的当前底盘实际轨迹相对于当前理论轨迹的位置、行驶方向等判断下一 Δt 内的拨叉的作用状态。控制策略如表 1 所示,其中 R_p 为实际轨迹位置偏离限,R_θ 为实际轨迹方向角度偏离限。R_p、R_θ 如图 2 所示。

表 1 拨叉作用控制策略

Tab.1 Control strategy for shift fork working

底盘位置	行驶方向	判断结果
大于 R_p 上限	小于 R_θ 下限	无拨叉作用
	其他	内侧拨叉作用
位于 R_p 限内	–	无拨叉作用
小于 R_p 下限	大于 R_θ 上限	内侧拨叉作用
	其他	无拨叉作用

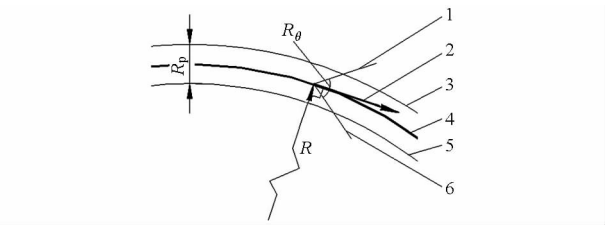


图 2 R_p、R_θ 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of R_p and R_θ

1. 轨迹方向角度偏离上限 2. 理论行驶方向 3. 轨迹位置偏离上限 4. 理论行驶轨迹 5. 轨迹位置偏离下限 6. 轨迹方向角度偏离下限

2.2 分段跟随转向控制流程

分段跟随转向控制流程图如图 3 所示。控制策略中所用参数如表 2 所示。控制策略分 2 个阶段,第 1 阶段为预处理阶段,通过车速与给定的转向半径的输入计算转向过程的各项理论特征参数;第 2 阶段为轨迹跟随阶段,最终生成拨叉控制时序。

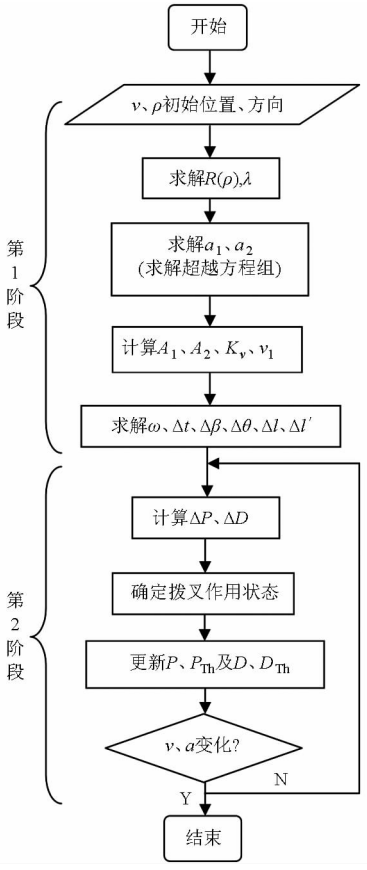


图 3 分段跟随转向控制流程图

Fig. 3 Flow chart of discrete following steering control

2.3 分段跟随转向控制轨迹模型

模型中描述转向过程主要为行驶几何轨迹和行驶速度。由式(1)中计算出的理论行驶几何轨迹为一圆弧度,行驶角速度恒定。

分段跟随转向控制策略控制下的实际轨迹为直线和圆弧段拼接而成的折线段。在此数学模型中,

表 2　控制策略中参数

Tab. 2　Partial parameters explanation of control strategy

参数	含意
N	总分段时间段数
$\Delta\beta$	Δt 内底盘理论行驶方向转角，$\Delta\beta=2\pi/N$
$\Delta\theta$	Δt 内拨叉作用底盘实际行驶方向转角
Δl	Δt 内拨叉作用底盘行驶位移，$\Delta l=\rho\sin\Delta\theta$
$\Delta l'$	Δt 内无拨叉作用底盘行驶位移，$\Delta l'=v\Delta t$
P、P_{Th}	当前实际轨迹点位置与理论轨迹点位置
$P_{x,y}$	当前实际轨迹点位置 x 和 y 坐标
D、D_{Th}	当前实际轨迹点方向与理论轨迹点方向
ΔP	当前轨迹点位置与理论轨迹位置误差
ΔD	当前轨迹点方向与理论方向误差

圆弧段简化为位移直线段。根据控制策略，以理论几何行驶几何轨迹圆弧圆心为坐标原点，履带底盘初始位置坐标为(ρ,0)，初速度为当前履带底盘行驶速度，初始行驶方向为沿坐标系 y 轴正方向。其中 ρ 根据转向盘转角计算得出。建立控制策略下实际转向数学模型

$$\begin{cases} P_x(t+\Delta t)=P_x(t)+p\cos D(t) \\ P_y(t+\Delta t)=P_y(t)+p\sin D(t) \\ D(t+\Delta t)=D(t)+d \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$d=\begin{cases}\omega\Delta t & (\text{拨叉作用}) \\ 0 & (\text{拨叉不作用})\end{cases}$$

$$p=\begin{cases}B\sin\Delta\theta & (\text{拨叉作用}) \\ v\Delta t & (\text{拨叉不作用})\end{cases}$$

式中　p——位置系数　　d——方向系数

v——履带底盘行驶线速度

2.4　分段跟随转向控制策略评价指标

为评价分段跟随转向控制策略下的履带式动力底盘转向性能，参考机械工程精度与测量中对零件圆度误差的评定方法，建立评价指标如下：

(1)转向相对误差为

$$\Delta\rho=\frac{R_{\max}-R_{\min}}{R}\times 100\% \tag{3}$$

式中　$R_{\max}$——实际轨迹最大内切圆半径

$R_{\min}$——实际轨迹最小外切圆半径

$\Delta\rho$ 用以评价实际转向轨迹的圆度。$\Delta\rho$ 越小则越贴近于理论转向轨迹。

(2)拟合相对转向半径比为

$$\Delta\rho_r=\frac{\tilde{\rho}}{\rho}\times 100\% \tag{4}$$

式中　$\tilde{\rho}$——实际轨迹最小二乘拟合相对转向半径

$\Delta\rho_r$用以辅助评价实际转向轨迹的圆度。$\Delta\rho_r$越大，则越贴近于理论转向轨迹。

(3)执行平均频率为

$$f=\frac{n}{T} \tag{5}$$

式中　n——一个转向周期内拨叉作用次数

T——理论转向周期

f用以评价执行器执行平均频率。拨叉若持续作用，则仅计为一次。f 值越小，机械式驱动桥的磨损越小。

(4)转向速度系数为

$$\delta=\frac{\Theta}{2\pi} \tag{6}$$

式中　Θ——一个周期内实际轨迹最小二乘拟合圆弧轨迹转角

δ 用以评价实际转向拟合轨迹的转向速度。由于实际转向轨迹为圆弧线段和直线段拼接而成，且行驶方向转角及实际位置均与理论轨迹存在偏差，则即使是在行驶速度系数为 1 的情况下，实际轨迹与理论轨迹路程相同，但由于偏差存在，在一个周期内，实际轨迹并不能完成整个圆周，即实际转向拟合轨迹的转向速度发生损失。δ 越接近于 1，则转向速度越接近理论值。

3　分段跟随转向电子控制系统设计

转向电子控制系统如图 4 所示。转向盘转角通过霍尔角位移传感器检测，驱动轮转速信号则由霍尔转速传感器检测。在转向过程中，控制算法仅用到转向内侧驱动轮转速，所以根据转向盘信号判断履带底盘转动方向(左转、右转)，并通过控制继电器 1 触发来输入转向内侧驱动轮转速信号。在底盘直行过程中，由于两侧驱动轮转速相同，则输入任意一路转速信号均可。

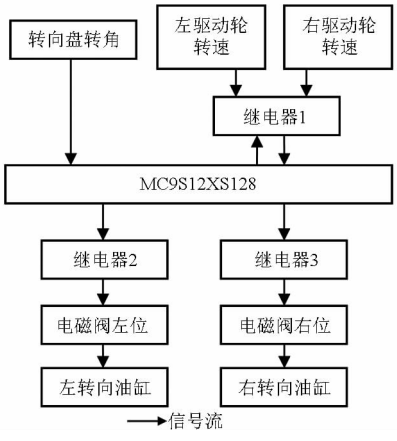


图 4　分段跟随转向电子控制系统

Fig. 4　Discrete following steering electronic control system

由于在转向控制策略中，所使用的履带底盘当前位置及行驶方向信息均根据之前已产生的拨叉控制时序计算得出，所以转向电子控制系统不需通过外界传感器获得履带底盘的当前位置及行驶方向信息。

机械驱动桥上耳轴的转动由一套电控液压系统

来控制。液压系统中包括一个三位四通电磁换向阀和一对液压转向油缸。液压油缸伸出,则耳轴转动,拨叉克服弹簧力切断发动机与相应侧驱动轮动力传递并进行制动;液压缸缩回则撤销作用。液压油缸的伸出、缩回通过电磁换向阀阀芯的位置来确定,阀芯位置通过继电器开闭决定。电子控制芯片选用飞思卡尔公司生产的 MC9S12XS128 微控制器。用于测量车速的转速传感器信号经脉冲信号隔离变送器处理后出入控制器,控制器对输入的转向盘转角及车轮转速信号进行处理后,根据控制策略判断三位四通电磁换向阀应处于的位置并发出控制脉冲,通过触发继电器 2、3 来控制电磁换向阀。

4 分段跟随转向控制仿真、实车试验与分析

4.1 仿真测试与结果分析

利用 Matlab 作为仿真平台,编写控制算法仿真程序。选用静液压-机械驱动式履带底盘各项参数为:L 为 0.948 m,B 为 0.785 m,驱动轮节圆直径为 0.232 m,f 为 0.045,μ_{max} 为 0.68, Δt 设为 0.1 s;R_p、R_θ均以理论值为限中心值确定上下限,取值限长度分别为 0.05 及 $\Delta\beta$ 与 $\Delta\theta$ 之差;模拟试验车速分别为 3.6、7.2、10.8 km/h;相对转向半径输入分别为 3、1.5、1,即转向半径分别为 3、1.5、1 倍轨距。

拨叉作用为开关量,当一侧的拨叉克服弹簧力转动,则履带式动力底盘绕其内侧履带做固定半径的旋转运动,车速一定时,在每个分段的时间段 Δt 内,此过程的转向轨迹不变。由于分段时间段较短,模型中可用一段直线位移来替代这段圆弧,但是经过这个过程后,整机的行驶方向偏转了一个固定的角度。如果无拨叉作用,则整机做直线运动,运动方向不改变,在固定的分段时间段内,行驶距离也为固定值。静液压-机械驱动式履带动力底盘的实际转向轨迹可简化为由若干个 2 种小直线段组成的近似曲线。仿真过程中各评价指标计算即针对此简化曲线。仿真测试结果如表 3 所示。

如表 3 所示,转向相对误差在 4.9% ~10% 范围内,误差符合要求。$\Delta\rho$ 随着相对转向半径 ρ 的减小而减小,随着车速的增大而增大。拟合相对转向半径比 $\Delta\rho_r$基本稳定在 97% 左右,表明实际转向轨迹与理论转向轨迹跟随效果较好,且性能稳定。执行平均频率 f 范围在 2.5 ~6.6 Hz,执行器执行平均频率较低,机械驱动桥磨损不大,且易于实现。转向速度系数 δ 在 79.5% ~96.3% 范围内波动,其随着转向半径的减小而增大,转向速度损失较小。仿真结果表明,该算法可以较好地满足静液压-机械驱动桥式履带动力底盘转向需求。

表 3 分段跟随转向控制策略仿真测试结果

Tab.3 Simulation results of discrete following steering control strategy

v/(km·h^{-1})	ρ	$\Delta\rho$/%	$\Delta\rho_r$/%	f/Hz	δ/%
3.6	3.0	4.9	97.6	2.5	79.5
	1.5	5.3	96.7	4.0	84.6
	1.0	5.6	95.9	4.3	96.3
7.2	3.0	6.8	97.0	3.0	79.9
	1.5	6.5	96.7	4.5	85.1
	1.0	5.4	95.8	6.6	95.8
10.8	3.0	10.0	96.4	3.3	79.6
	1.5	6.3	96.6	5.2	85.5
	1.0	6.5	96.2	6.0	94.9

4.2 实车试验与结果分析

对 9G-1.2 型履带式旋转割草压扁机进行转向系统改造,加装转向盘、霍尔转速传感器、霍尔角位移传感器及控制器。农用履带底盘各项参数与仿真中一致。改装样机如图 5 所示。

实车试验以测试分段跟随转向控制策略在履带底盘实际转向过程中的效果,并对比手控转向行驶效果。



(a) 样机整机



(b) 转向控制器



(c) 转速传感器

图 5 改装样机

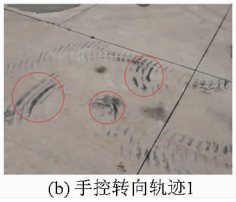
Fig.5 Prototype refitting

样机参数及试验条件与仿真中一致,在不同车速下,驾驶人员按照设定工况进行行驶及转向操作。试验中对履带底盘转向状态及履带底盘在地面留下的痕迹进行评估。

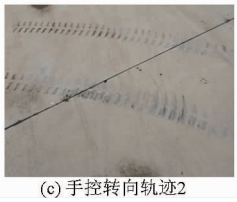
图 6 为履带底盘试验过程中在地面留下的轨迹痕迹。分析试验轨迹可知,在手动控制下,履带底盘转向时原地滑转严重,如图 6b 中红圈所示;而履带底盘在电子转向控制系统作用下,转向过程中原地滑转现象大大减少(图 6a、6c),并且能够反应驾驶员转向意图,满足变半径转向需求。转向过程平稳,整机因转向油缸作用而引起的振动较小。



(a) 电控转向轨迹1



(b) 手控转向轨迹1



(c) 手控转向轨迹2

图 6　实车试验轨迹

Fig. 6　Prototype test trajectory

5　结论

(1)所设计的分段跟随转向控制策略适用于静液压-机械驱动桥式履带底盘转向控制,仿真模拟转向相对误差为 4.9% ~10%,拟合相对转向半径比 $\Delta\rho_r$ 基本稳定在 97% 左右,算法转向误差较小。

(2)执行器作用平均频率为 2.5 ~6.6 Hz,控制策略执行频率较低,对机械式驱动桥磨损较小。

(3)实车试验表明,所设计的利用转向盘控制的电控转向系统可满足静液压-机械驱动桥式履带底盘转向需求。转向过程平稳可靠,有利于提高此类履带底盘转向操纵性及行车安全性,算法性能稳定,转向轨迹效果良好。

(4)能够实现将滑移转向分为多段基于理论转向轨迹的直行和转向的小线段,有利于减少转向过程中的原地滑转现象,减少转向时对地面和农作物的损伤。

参　考　文　献

1　史力晨,王良曦,张兵志. 履带车辆转向动力学仿真[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 289 -293.
SHI Lichen, WANG Liangxi, ZHANG Bingzhi. Dynamic simulation of tracked vehicle steering performance [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 289 -293. (in Chinese)

2　赵建柱,王枫辰,于斌,等. 农用仿形履带式动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 20 -24.
ZHAO Jianzhu, WANG Fengchen, YU Bin, et al. Research on all-terrain profiling crawler power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 20 -24. (in Chinese)

3　曹付义,周志立,贾鸿社. 履带车辆转向性能计算机仿真研究概况[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 184 -188.
CAO Fuyi, ZHOU Zhili, JIA Hongshe. Research summarization on simulation of turning performance of tracked vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 184 -188. (in Chinese)

4　马星国,陈媛媛,刘兴婷,等. 基于多体动力学仿真的履带车辆转向性能分析[J]. 机械设计, 2012, 29(6): 52 -57.
MA Xingguo, CHEN Yuanyuan, LIU Xingting, et al. Steering performance analysis of tracked vehicles based on multi-body dynamics simulation [J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(6): 52 -57. (in Chinese)

5　MERRITT H. Some considerations influencing the design of high-speed track-vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Automobile Engineers, 1939: 398 -429.

6　STEEDS W. Tracked vehicles—an analysis of the factors involved in steering[J]. Automobile Engineer, 1950: 143 -148.

7　KITANO M, JYORZAKI H. A theoretical analysis of steerability of tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1976,13(4): 241 -258.

8　KITANO M,KUMA M. An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1977,14(4): 221 -225.

9　WONG J Y. Theory of ground vehicles[M]. 3rd ed. New York:John Wiley & Sons Inc., 2001.

10　陈泽宇,赵广耀,翟丽,等. 基于模糊 PID 算法的双侧电传动履带车辆转向控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 410 -415.
CHEN Zeyu, ZHAO Guangyao, QU Li, et al. Research on turning control strategy based in fuzzy-PID algorithm for dual electric tracked vehicle [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 410 -415. (in Chinese)

11　翟丽,孙逢春,谷中丽. 电子差速履带车辆转向转矩神经网络 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 1 -5.
ZHAI Li, SUN Fengchun, GU Zhongli. Neural networks PID control of steering torque for electronic differential tracked vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 1 -5. (in Chinese)

12　伍迪,姚进,李华,等. 履带车辆液压机械差速转向系统控制策略[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 78 -83.
WU Di, YAO Jin, LI Hua, et al. Control strategy for hydro-mechanical differential turning system of tracked vehicles [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 78 -83. (in Chinese)

13　杨磊,马彪,李和言. 高速履带车辆静液驱动转向控制策略[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 14 -19.
YANG Lei, MA Biao, LI Heyan. Steering control strategy of high-speed hydrostatic drive tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 14 -19. (in Chinese)

(下转第 35 页)

pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):86 – 90. (in Chinese)

16 董玮, 楚武利. 平衡孔直径对离心泵性能及平衡腔压力的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6):73 – 77.
DONG Wei, CHU Wuli. Influence of balance hole diameter on performance and balance chamber pressure of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):73 – 77. (in Chinese)

17 赵斌娟,王瑜,陈汇龙,等. 偏工况下壁面粗糙度对泵腔内流动规律的影响[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9):1927 – 1932.
ZHAO Binjuan, WANG Yu, CHEN Huilong, et al. Impact of wall roughness on the flow law in chamber of a centrifugal pump at off-design operating condition[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(9):1927 – 1932. (in Chinese)

18 ITOH M, YAMADA Y, IMAO S, et al. Experiments on turbulent flow due to an enclosed rotating disk[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1992, 5(3):359 – 368.

19 潘冬远,王彤,张斌,等. 封闭缸体内旋转圆盘流动的 PIV 测试研究[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(2):200 – 206.
PAN Dongyuan, WANG Tong, ZHANG Bin, et al. PIV measurement on rotating disks flow in cylinder[J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(2):200 – 206. (in Chinese)

20 SANG Hyun Park, GERALD L Morrison. Analysis of the flow between the impeller and pump casing back face for a centrifugal pump[C] //Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2009), 2009, 1:221 – 235.

21 张元勋,唐倩,李忠华,等. 基于流体力学泄漏模型的螺杆泵泄漏机理分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10):326 – 332.
ZHANG Yuanxun, TANG Qian, LI Zhonghua, et al. Leakage mechanism of screw pump based on leakage model in fluid mechanics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):326 – 332. (in Chinese)

22 刘在伦,许立中,贾晓,等. 离心泵浮动叶轮轴向间隙的液体流动分析及轴向力计算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12):79 – 85.
LIU Zailun, XU Lizhong, JIA Xiao, et al. Analysis of liquid flow and axial force calculation in axial clearance for floating impeller of centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12):79 – 85. (in Chinese)

23 黄思,宿向辉,杨文娟. 节段式多级离心泵的能耗分析[J]. 武汉大学学报:工学版, 2014, 47(4):557 – 560.
HUANG Si, SU Xianghui, YANG Wenjuan. Energy consumption analysis of multistage centrifugal pumps[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(4):557 – 560. (in Chinese)

24 李巍,徐忠,陆逢升. 泵内圆盘摩擦损失实验研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2):58 – 61.
LI Wei, XU Zhong, LU Fengsheng. Experimental study of the disk friction losses in the pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(2):58 – 61. (in Chinese)

25 陈强, 李国玉, 吴生盼,等. 离心泵圆盘摩擦损失浅析[J]. 水泵技术, 2009(1):13 – 15.

(上接第 41 页)

14 吴绍斌,陈慧岩,郑慕侨. 遥控履带车辆的转向控制方法[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(8): 680 – 683.
WU Shaobin, CHEN Huiyan, ZHENG Muqiao. Steering control methods of remote operated tracked vehicle[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(8): 680 – 683. (in Chinese)

15 张海岭,李和言,马彪,等. 静液传动履带车辆转向神经元自适应 PID 控制[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(1): 52 – 56.
ZHANG Hailing, LI Heyan, MA Biao, et al. Steering control of tracked vehicle with hydrostatic transmission based on neural PID [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(1): 52 – 56. (in Chinese)

16 杨磊,马彪,李和言. 静液驱动履带车辆转向神经网络 PID 控制仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 15 – 20.
YANG Lei, MA Biao, LI Heyan. Steering neural network PID control for tracked vehicle with hydrostatic drive[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 15 – 20. (in Chinese)

17 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)

18 汤久望,刘维平,刘德刚,等. 非精确转向情况下履带车辆转向轨迹分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 779 – 783.
TANG Jiuwang, LIU Weiping, LIU Degang, et al. An analysis of steering track for tracked vehicle at inaccurate steering [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(5): 779 – 783. (in Chinese)

19 程伟军,高连华,王红岩. 基于打滑条件下的履带车辆转向分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(增刊): 192 – 195.
CHENG Junwei, GAO Lianhua, WANG Hongyan. Steering analysis of tracked vehicle based on skid condition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(Supp.): 192 – 195. (in Chinese)

20 毕小平,王普凯,李海军,等. 履带车辆动态转向过程的仿真模型[J]. 兵工学报, 2003, 24(4): 551 – 554.
BI Xiaoping, WANG Pukai, LI Haijun, et al. A simulation model for dynamic steering processes of tracked vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(4): 551 – 554. (in Chinese)