

双转向系统多轴车辆非线性建模及转向性能分析

郑添义, 张海涛, 王云超, 邹 蕾, 吴则旺, 胡志超, 叶雨婕

(集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 采用双转向系统的多轴车辆存在转向耦合干涉问题, 且该问题与后轴主动转向控制策略密切相关。为了探索后轴主动转向控制对多轴车辆轮胎侧偏角及分布和车辆稳定性的影响, 基于 Dugoff 轮胎模型, 构建了以滑移率、质心侧偏角和转弯半径等为变量的双转向系统多轴车辆 3 自由度非线性模型。以 5 轴转向车辆为研究对象, 仿真探讨了双转向系统多轴车辆的转向耦合干涉、驱动模式、车轮转角和后轴转向控制策略对轮胎滑移率、侧偏角及分布的影响。仿真结果表明: 轮胎侧偏角从前轴到后轴逐渐减小, 相对于全主动转向车辆, 双转向系统车辆的轮胎侧偏角更大; 车轮转角对轮胎侧偏角和滑移率具有明显影响; 随着车速增加, 后轴主动转向中心后移动速度越快, 轮胎侧偏角越小, 但轮胎磨损增大; 全轮驱动比部分驱动的滑移率明显小, 而侧偏角偏大, 车辆安全稳定裕度更大。

[关键词] 汽车工程; 多轴转向; 非线性模型; 转向性能

[中图分类号] U 461.99

Modeling and Research on Turning Characteristic of Multi-Axle Steering Vehicle with Dual-Steering Systems

ZHENG Tianyi, ZHANG Haitao, WANG Yunchao, ZOU Lei, WU Zewang, HU Zhichao, YE Yujie

(College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A multi-axle vehicle with dual-steering systems(DSS) has steering coupling interference problem, which is closely related to the active steering control strategy of the rear axle. In order to explore the influence of active steering control strategy of the rear axle on tire side slip angle and its distribution and vehicle stability of a multi-axle vehicle, based on the Dugoff tire model, a 3-DOF nonlinear model of a multi-axle vehicle with DSS is established, which takes slip ratio, side slip angle and turning radius of mass center as variables. Taking a 5-axle steering vehicle as an example, the effects of steering coupling interference, driving mode, wheel steering angle and the rear axle steering control strategy on tire slip rate, side slip angle and its distribution of a multi-axle vehicle with DSS were simulated. The simulation results show that the tire side slip angle gradually decreases from the front axle to the rear; compared with the vehicle with full active steering, the tire side slip angle of the vehicle with DSS is larger; the wheel steering angle has a significant effect on the tire side slip angle and slip ratio; with the increase of the vehicle speed, the rear axle active steering center moves faster, the tire side slip angle become smaller but the tire wear increases; the slip ratio of the all-wheel driven ve-

[收稿日期] 2024-03-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目“新泵控主驱/横拉杆辅控式多轴电液转向的精准轨迹跟踪机理与分层控制”(52375046)

[作者简介] 第一作者: 郑添义(1973—), 讲师, 从事机械系统动力学和嵌入式控制系统开发研究。通信作者: 王云超(1976—), 教授, 从事多轴车辆的转向系统和悬架系统研究。E-mail:ychaowang@jmu.edu.cn

hicle is obviously smaller than that of a partial driven vehicle, while the side slip angle is larger and the vehicle safety and stability margin is greater.

Keywords: automobile engineering; nonlinear model; multi-axle steering system; steering performance

0 引言

多轴转向技术作为多轴全地形车辆底盘关键技术之一，越来越受到国内外学者的关注。在多轴转向车辆动力学建模研究方面，Chen 等^[1]在多轴转向车辆操纵性能研究中综合分析了车身侧倾、非簧载质量、转向中心距等因素；Du 等^[2]构建了一个包含转向机构、阀控双回路液压驱动器和车轮轮胎模型的精确电液动力转向系统模型；Wang 等^[3]推导了双转向系统多轴车辆的轮胎稳态变形规律。多轴转向系统匹配设计研究聚焦转向杆系与轮胎转向阻力之间的匹配设计^[4-5]，Zhang 等^[6]针对轮胎磨损问题，提出了一种采用变长拉杆的新型二自由度电液伺服转向系统；田林雳等^[7]提出基于“当量理论转角”的转向系统优化设计方法，通过降低转角误差减少轮胎磨损。在车辆稳定性控制研究方面，Oh 等^[8]基于模型预测，提出了一种后轴主动转向控制方法，并对双转向系统多轴车辆的动力学稳定性、转向效率等进行了探讨；Ali 等^[9]提出了一种侧向加速度裕度函数，在不侧翻条件下，保证多轴车辆高速道路跟踪特性；为提高操纵稳定性与行驶安全性，贾冠永^[10]基于质心侧偏角和横摆角速度，设计了转向系统的滑模控制器以及多轴转向与主动悬挂耦合的上层模糊协调控制器。多轴转向车辆无人驾驶研究主要聚焦路径跟踪控制与鲁棒性优化^[11-12]，张昊等^[13]根据横向位移和横摆角变化差异，提出 BP 神经网络的转向模式切换策略，有效提高了跟踪精度。

综合分析发现，以上研究主要针对多轴单转向系统车辆的研究。由于双转向系统车辆转弯时存在两个转向中心，与阿克曼定律相冲突。因此，为揭示多轴车辆双转向系统中的干涉转向、驱动模式、不同车轮转角、主动转向系统控制算法等因素对轮胎侧偏角、纵向滑移率和车辆质心的动态转弯半径等的综合作用机制，本文开展系统性建模与仿真研究。

1 双转向系统多轴车辆模型

1.1 车辆的动力学模型

考虑系统的安全性，实际多轴车辆普遍采用双转向系统，即前部各轴采用转向杆系控制，后部各轴采用电液主动转向控制，如图 1 所示。

双转向系统多轴转向车辆的前 k 轴采用转向杆系控制的方式转向，后 $n-k$ 轴采用电液主动转向控制方式转向，如图 2 所示，转向杆系控制的各轴绕着转动中心 O_r 转动，电液主动控制的各轴绕着转动中心 O_l 转动，原地静止转向时， O_r 和 O_l 重合，绕着 O_l 转动。但是随着车速增加，后轴主动转向的车轮转动中心 O_r 会向后移动，即两个转动中心发生分离，从而导致车轮产生转向干涉，增加一个附加变形，影响车辆的稳定性和轮胎磨损。因此，后轴电液主动转向的控制策略将影响轮胎的变形和车辆的稳定性。

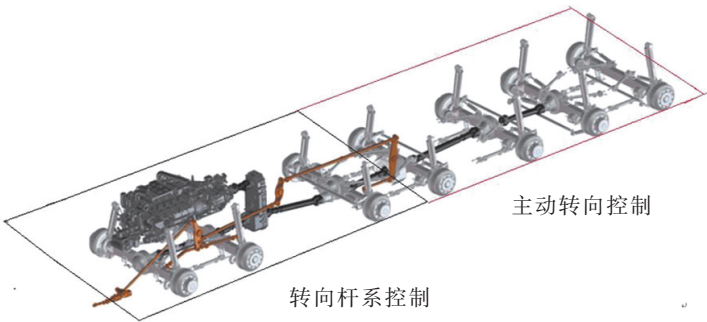


图 1 全地面起重机 LTM 1400.7.1 的双转向系统
Fig.1 The dual steering system of the all-terrain crane LTM 1400.7.1.

纵向力为 0。因此，以 Dugoff 轮胎模型为基础建立的车辆动力学模型就忽略了车辆的滚动阻力的影响。

轮胎侧向力为

$$F_{li} = C_c \tan \alpha_i f(\lambda_i)/(1 + s_i)。$$

(4)

其中： C_c 为轮胎纵向侧偏刚度；且有

$$\begin{cases} f(\lambda_i) = (2 - \lambda_i)\lambda_i, \lambda_i < 1; \\ f(\lambda_i) = 1, \lambda_i > 1。 \end{cases}$$

(5)

其中：

$$\lambda_i = \mu F_z(1 + s_i)/2 \sqrt{C_z^2 s_i^2 + C_c^2 \tan^2 \alpha}。$$

(6)

式 (6) 中： μ 为路面附着系数； F_z 为垂向载荷。

驱动时，轮胎滑移率为

$$s_i = (r_e \omega_w - v_x)/r_e \omega_w。$$

(7)

其中： r_e 为车轮滚动半径； ω_w 为车轮转动角速度； v_x 为纵向速度。

制动时，轮胎滑移率为

$$s_i = (r_e \omega_w - v_x)/v_x。$$

(8)

将纵向滑移率式 (7) ~ (8) 和轮胎侧偏角式 (2) 代入式 (6)，再将式 (6) 代入式 (5)，式 (5) 再代入式 (4)，并将计算结果代入多轴转向车辆的动力学平衡方程式 (1)。

1.3 滚动阻力模型

车辆转弯过程是一种转向/驱动耦合工况，试验证明车辆的滚动阻力与轮胎的侧偏角呈非线性关系^[3]。目前的研究普遍将轮胎的滚动阻力认为是常数，或不考虑轮胎侧偏的车速的函数。针对该问题，引入文献 [4] 中滚动阻力系数的定义，即 $f_{ri} = \mu(s_i^2 + \alpha_i^2)^{0.5}(\psi_x^2 + \psi_y^2)^{0.5}$ 。其中： ψ_x 、 ψ_y 为轮胎的 x 、 y 方向的附着利用率。车轮 i 的滚动阻力则为 $F_{ri} = F_{zi} f_{ri}$ 。其中： F_{zi} 为轮胎的垂直载荷。

2 仿真模型建立

为了分析双转向系统多轴车辆的转向稳定性，本文以某五轴转向车辆为例，以转向杆系控制 ($\Delta = \Delta_0$) 和主动转向控制 ($\Delta = -v^{2.5}/1200$) 的五轴车辆为对比对象，分析双转向系统多轴车辆的轮胎侧偏角变化、分布和车辆的稳定性。五轴转向车辆参数配置如表 1 所示。

表 1 五轴车辆结构参数

Tab. 1 Structural parameters of a five-axle vehicle

参数	l_1/m	l_2/m	l_3/m	l_4/m	l_5/m	C_c/m	Δ_0/m	C_z/m	m/kg
数值	4.07	1.32	-0.30	-1.90	-3.54	6.12×10^5	0	9.27×10^5	5.80×10^4

该五轴转向车辆的整车长 15 m，宽 3 m，高 3.95 m，转弯半径为 12 m，各轴轴荷均匀分配，为 1.16×10^4 kg。双转向系统车辆的前 3 轴采用转向杆系控制转向，后 2 轴采用电液主动转向控制，后轴主动转向控制的转向中心按照纯主动转向控制的变化规律向后移动。

3 双转向系统多轴车辆仿真分析

3.1 转向模式的影响分析

为了保证对比分析的效果，双转向系统多轴车辆和全主动转向车辆的 1 轴车轮转角均为 0.1 rad，路

面摩擦系数为 0.8。两种转向模式的主动转向轴的控制策略一致, 即 $\Delta = -v^{2.5}/1200$ 。仿真分析了匀加速转弯过程中两种转向模式的转向性能。

图 3 中虚线所示为双转向系统多轴车辆的轮胎侧偏角, 实线为全主动转向多轴车辆的轮胎侧偏角。从图 3 中可以看出, 两种转向模式的各轴轮胎侧偏角的分布规律完全一致, 即从 1 轴到 5 轴, 各轴轮胎侧偏角依次减小。进一步观察发现, 双转向系统车辆的轮胎侧偏角明显大于全主动转向车辆, 随着车速增加, 双转向系统车辆中主动转向的 4、5 轴轮胎侧偏角与全主动转向的侧偏角逐渐减小。此外, 从轮胎侧偏角的分布密度看, 双转向系统车辆的轮胎侧偏角偏差明显大于全主动转向车辆, 说明该控制策略下, 双转向系统的轮胎侧偏磨损较大。轮胎侧偏角变化也会引起车辆转弯半径的变化。

从图 4 两种转向模式的车辆质心转弯半径对比可以看出, 双转向系统多轴车辆的转弯半径明显大于全主动转向的转弯半径。轮胎的滑移率对比结果如图 5 所示。从图 5 中可看出, 两种转向系统的轮胎滑移率差别不大, 低速时, 双转向系统车辆的轮胎滑移率略大于全主动转向车辆, 高速时反之。

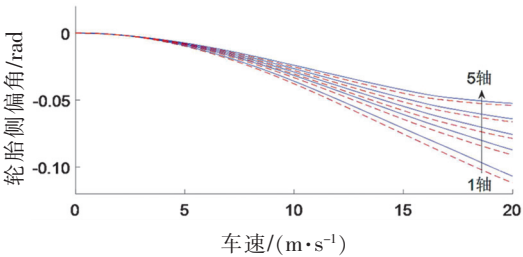


图 3 不同转向模式的轮胎侧偏角
Fig.3 Tire side slip angle under different steering modes

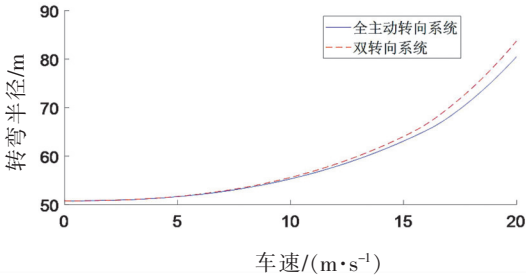


图 4 不同转向模式的转弯半径对比
Fig.4 Comparison of turning radii across different steering modes

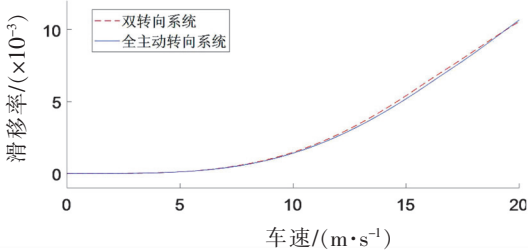


图 5 不同转向模式的滑移率对比
Fig.5 Comparison of slip ratios across different steering modes

3.2 驱动方式的影响

为了分析驱动方式对双转向系统多轴车辆的轮胎侧偏角和滑移率的影响, 在其他条件完全相同的情况下, 只改变车辆的驱动轴数量, 从而分析驱动轴数量对转向特性的影响, 即对比分析了 3 轴驱动和 5 轴驱动车辆特性。为了便于分析, 假设各驱动轴轮胎的滑移率一样。

图 6 所示为双转向系统车辆的驱动方式对轮胎侧偏角的影响。图 6 中实线为 5 轴驱动方式的结果, 虚线为 2、3、4 轴驱动方式的结果。从图 6 中可明显看出, 相较于 5 轴驱动, 3 轮驱动的轮胎侧偏角偏小。造成 5 轴驱动车辆轮胎侧偏角增大的原因主要是其转弯半径小于 3 轴驱动车辆的转弯半径, 如图 7 所示。

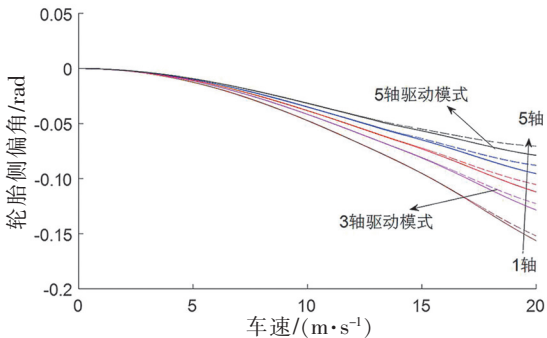


图 6 不同驱动方式对轮胎侧偏角的影响
Fig.6 The impact of different driving modes on tire side slip angle

图 8 反映了两种驱动方式的轮胎滑移率的对比结果, 可明显看出, 5 轴驱动方式的轮胎滑移率明显降低。其原因是相同速度, 驱动轴越多, 驱动力越小, 滑移率越小。

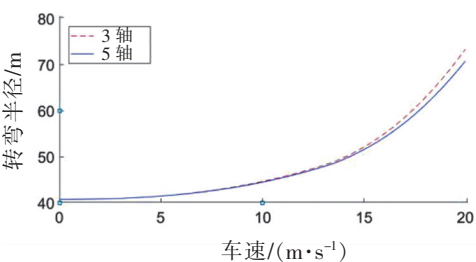


图 7 不同驱动方式的转弯半径对比

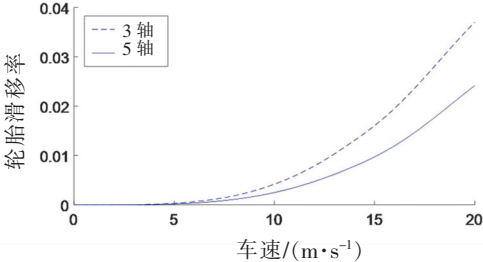


图 8 不同驱动方式的滑移率对比

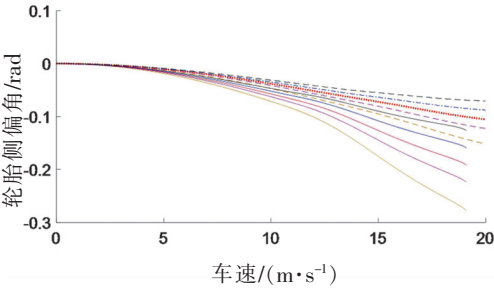
Fig.7 Comparison of turning radii across different drive systems

Fig.8 Comparison of slip ratios across different drive systems

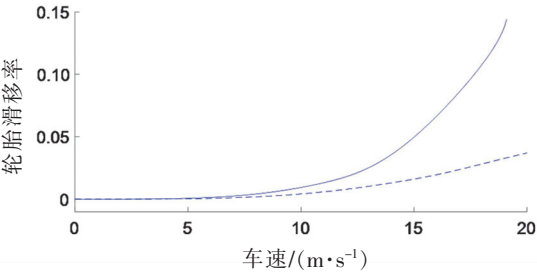
综合对比两种驱动方式的轮胎侧偏角和轮胎纵向滑移率可知，5 轴驱动方式的车辆安全稳定裕度更大，转向更灵活。

3.3 车轮转角的影响分析

图 9 中，虚线表示车轮转角位为 0.1 rad 的仿真结果，实线表示车轮转角位为 0.15 rad 的仿真结果。图 9a 所示为一轴转角分别在 0.1 rad 和 0.15 rad 时轮胎侧偏角的变化规律。从图 9 中可明显看出，当车轮转角增大到 0.15 rad 时，车辆在车速为 19 m/s 处发生失稳。从图 9a 中还可以看出，随着车轮转角增大，车速越高，车轮侧偏角的增大趋势越明显。从图 9b 可以看出，车轮转角增大后，滑移率急剧增大。



a) 轮胎侧偏角对比



b) 轮胎滑移率对比

图 9 车轮转角的影响分析

Fig.9 Analysis of the impact of a wheel steering angle

3.4 主动转向控制策略的影响

双转向系统车辆的主动转向控制策略影响两个转向系统的转向中心之间的距离变化规律，从而影响轮胎的侧偏角大小和分布规律。仿真对比分析了 $\Delta = -v^{2.5}/1200$ 和 $\Delta = -v^{2.8}/1200$ 两种控制策略的仿真结果。

图 10 中实线对应控制策略 $\Delta = -v^{2.5}/1200$ 的仿真结果，虚线对应控制策略 $\Delta = -v^{2.8}/1200$ 的仿真结果。从图 10 中可以看出，相同车速时，主动转向中心向后移动的速度越快，各轴轮胎侧偏角越小。这将导致轮胎磨损增大，也不利于车辆的稳定。因此，控制主动转向中心的变化规律，可对各轴轮胎侧偏角的分布密度和大小进行控制，从而提高车辆的稳定性。

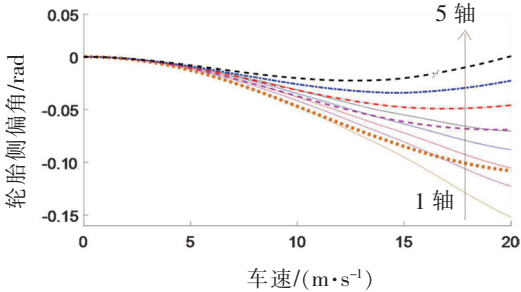


图 10 主动转向中心对轮胎侧偏角的影响

Fig.10 The impact of the active steering center on the tire side slip angle

4 总结

本文通过对比分析，探讨了双转向系统多轴车辆的轮胎侧偏角大小及其分布和车辆的稳定性。主要获得以下结论：

- 1) 相同控制策略下,采用双转向系统的多轴车辆轮胎侧偏角明显大于全主动转向多轴车辆的轮胎侧偏角,从轮胎侧偏角的分布规律可知,从第一轴到最后一轴,轮胎侧偏角逐渐减小。
- 2) 随着车速增加,双转向系统车辆与全主动转向车辆的轮胎侧偏角偏差逐渐减小,双转向系统车辆的轮胎侧偏角偏差明显大于全主动转向车辆,因此,双转向系统的轮胎侧偏磨损更大。
- 3) 对于双转向系统多轴车辆,全轮驱动比部分驱动的滑移率低,侧偏角偏大,但车辆安全稳定裕度更大,转向更灵活。
- 4) 随着车速增加,主动转向中心后移动速度越快,各轴轮胎侧偏角越小,各轴轮胎侧偏角的分布密度明显减小,从而导致轮胎磨损增大,不利于车辆的稳定。

[参 考 文 献]

- [1] CHEN X, GUO K H. Development for generalised multi-axle steering vehicle handling[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2020, 27(6): 777-799.
- [2] DU H, ZHANG Q M, CHEN S M, et al. Modeling, simulation, and experimental validation of electro-hydraulic power steering system in multi-axle vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(2): 317-332.
- [3] WANG Y C, HU Z C, LI B, et al. Tyre side-slip deformation of dual-steering multi-axle vehicles based on steady-state cornering [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Chengdu: IOP, 2020, 761: 012011.
- [4] WANG Y C, WANG C Z. Matching and optimising analysis of multi-axle steering vehicle steering system[J]. International Journal of Vehicle Design, 2018, 76: 82-109.
- [5] 李西德, 胡文才, 彭建军, 等. 一种多轴电液转向系统的优化设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(12): 99-103.
- [6] ZHANG Z Z, DU H, CHEN S M, et al. A novel electro-hydraulic servo steering system for Ackermann steering of heavy multi-axle vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2022, 236(12): 2610-2624.
- [7] 田林雳, 陈尧, 马力, 等. 多轴线矿用转向系统协同优化设计[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 282-289, 298.
- [8] OH K, SEO J. Model predictive control-based approach for assist wheel control of a multi-axle crane to improve steering efficiency and dynamic stability[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(4): 948-960.
- [9] ALI M A, KIM C, KIM S, et al. Lateral acceleration potential field function control for rollover safety of multi-wheel military vehicle with in-wheel-motors[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(2): 837-847. DOI: 10.1007/s12555-014-0573-7.
- [10] 贾冠永. 具有主动悬挂的重型车辆多轴转向操纵稳定性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [11] 王玮琛, 李军求, 孙逢春, 等. 基于 Tube MPC 的多轴重型车辆全轮转向路径跟踪策略[J]. 汽车工程, 2022, 44(11): 1665-1715.
- [12] 江深, 张海兰. 基于非线性模型的无人驾驶车辆路线修正算法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(2): 88-92.
- [13] 张昊, 魏超, 胡纪滨, 等. 基于转向模式切换的三轴独立转向车辆路径跟踪控制研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(2): 243-251.

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)