

基于主动转矩分配的电动车车道保持辅助控制方法

吴乙万¹, 朱越¹, 李凡²

1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350116

2. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082

摘要 针对高速工况下四轮独立驱/制动电动车的车道偏离问题, 提出一种基于主动转矩分配的车道保持辅助控制方法。该方法的辅助控制系统分为3层, 顶层控制器根据人-车-路信息实时进行辅助控制决策, 并计算车道保持所需的横摆响应; 中层控制器基于滑模控制算法, 计算横摆响应跟踪所需的附加横摆力矩; 底层控制器通过主动转矩分配产生附加横摆力矩, 干预车辆行驶轨迹, 以达到车道保持的目的。采用 CarSim/Simulink 联合仿真进行高速单移线实验验证, 结果表明, 提出的基于主动转矩分配的四轮独立驱/制动电动车车道保持辅助控制方法, 具有良好的车辆动力学稳定性, 在高附路面和低附路面上均能够有效地干预车辆行驶轨迹, 防止车辆偏离车道。

关键词 电动车; 独立驱/制动; 主动转矩分配; 车道保持辅助控制

近十几年的统计数据表明, 在高速公路上发生的交通事故主要是由驾驶员注意力不集中和疲劳驾驶导致的^[1], 而无意识的车道偏离则是造成单车交通事故的第二大原因^[2]。车道保持辅助控制(LKAS)是一种先进辅助驾驶技术(ADAS), 能根据人-车-路信息主动干预车辆行驶轨迹, 确保车辆行驶在车道内, 已引起国内外学者的广泛关注。

实现主动干预车辆行驶状态可采用的技术手段主要有主动/线控转向、差动制动和主动转矩分配^[3]。已有的研究主要以转向控制^[2,4-6]为手段, 通过施加额外的转向力矩或角位移, 防止车辆偏离车道。Kim等^[4]提出了用于车道保持的基于转矩叠加的转向盘闭环控制方

法, Switkes等^[5]将线控转向系统应用于车道保持, 均取得较好的控制效果。张海林等^[6]提出了基于电动助力转向(EPS), 并集成EPS-LKAS综合考虑车辆横越车道线时间(TLC)与驾驶员操作行为判断的车道保持协调控制方法。驾驶员的转向操作对于LKAS是一种干扰, 而LKAS的转向输出则可能导致驾驶员感到不适甚至恐慌, 因此二者如何协调是此类技术应用的关键。为解决转向输入可能导致的人机冲突, LeBlanc等^[7]、吴乙万等^[8-10]提出了通过差动制动产生附加横摆力矩纠正车辆行驶轨迹以避免发生车道偏离。基于常规ABS/ESP液压制动系统的差动制动控制技术, 仍存在响应滞后的不足之处。四轮轮毂电机独立驱/制动电动车可独立

收稿日期: 2017-08-24; 修回日期: 2017-12-28

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01196); 福州大学科研启动项目(XRC-1430, 2014-XQ-17)

作者简介: 吴乙万, 博士, 研究方向为车辆动力学及汽车安全技术, 电子信箱: wuyiwan@fzu.edu.cn

引用格式: 吴乙万, 朱越, 李凡. 基于主动转矩分配的电动车车道保持辅助控制方法[J]. 科技导报, 2018, 36(5): 98-104; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.05.012

控制各轮驱/制动转矩,为主动干预车辆运动状态提供了新的技术途径。本文针对四轮轮毂电机独立驱/制动电动车,研究一种通过主动分配四轮转矩干预车辆行驶状态,以实现车道保持的辅助控制方法。

1 控制方法

基于主动转矩分配的车道保持辅助控制方法如图1所示。上层控制器根据人-车-路状态信息实时进行车道保持辅助控制决策,并计算车道保持所需的期望横摆角速度。中层控制器依据滑模控制算法计算产生跟踪横摆响应所需的附加横摆力矩。下层控制器根据载荷转移情况控制四轮驱/制动转矩来提供期望附加横摆力矩。

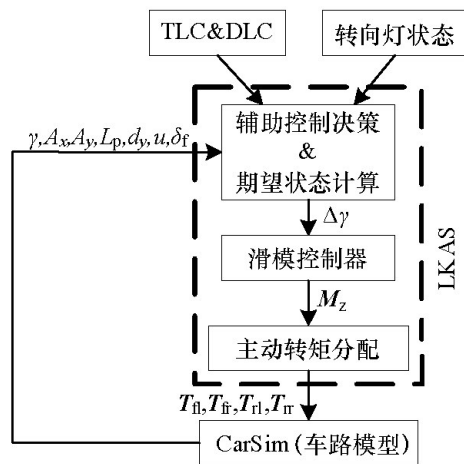


图1 车道保持辅助控制方法
Fig. 1 Lane keeping assistance system block diagram

1.1 上层控制器

1.1.1 控制决策

采用基于车辆横越车道线时间^[11](t_{TLC})和车辆至车道中心线距离(D_{DLC})混合决策方法。 t_{TLC} 越小表示发生车道偏离的可能性越大, $|D_{DLC}|$ (绝对值)越大表示车辆偏离车道中心越远。以转向灯的开启/关闭状态,判断驾驶员是否有明显的换道操纵意图。当驾驶员有明显的换道意图时,停止辅助控制。车道保持辅助控制决策阈值如表1所示。

1.1.2 期望横摆角速度

车道保持辅助控制的目的是在驾驶员没有换道操纵意图的前提下,若车辆有偏离车道行驶的危险时,主动跟踪车道中心线并干预车辆行驶轨迹以确保车辆行

表1 控制决策阈值

Table 1 Decision Making Parameters

决策变量	启动阈值	停止阈值
t_{TLC}/s	≤ 0.75	≥ 2
$ D_{DLC} /m$	≥ 0.5	≤ 0.3

驶在车道内。为模拟驾驶员在车道保持过程中的转向操作,根据单点预瞄理论^[12]可推导出消除预瞄点处横向偏差所需的理想前轮转角 δ_d ,即

$$\delta_d = \arctan \left[\frac{2L}{L_p^2} (\Delta y_p - L_p \beta) \right] \quad (1)$$

$$L_p = ut_p \quad (2)$$

式中, L 为轴距, m ; β 为质心侧偏角, rad ; u 为车辆行驶速度, m/s ; L_p 为预瞄距离, m ; t_p 为预瞄时间, s ; Δy_p 为预瞄点处横向偏差, m 。

由参考车辆模型,可确定预瞄点处路径跟踪所期望的车辆运动状态。采用线性二自由度单轨车辆模型作为车道保持辅助控制的参考车辆模型,其运动微分方程可表达为

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{C_f + C_r}{mu} \beta + \left(\frac{aC_f - bC_r}{mu^2} - 1 \right) \gamma - \frac{C_f}{mu} \delta_f \quad (3)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{aC_f - bC_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{I_z u} \gamma - \frac{aC_f}{I_z} \delta_f + \frac{M_z}{I_z} \quad (4)$$

式中, a 、 b 分别为车辆质心至前轴和后轴的距离, m ; C_f 、 C_r 分别为前、后轴的等效侧偏刚度, N/m ; m 为整车质量, kg ; I_z 为车辆横摆转动惯量, $kg \cdot m^2$; γ 为车辆横摆角速度, rad/s ; δ_f 为前轮转角, rad ; M_z 为附加横摆力矩, $N \cdot m$ 。

对于线性二自由度单轨车辆模型,由理想前轮转角、车辆行驶速度和部分车辆结构参数可计算出理想横摆角速度 γ_i ,即

$$\gamma_i = \frac{u}{L \left[1 + \frac{m(aC_f + bC_r)}{L^2 C_f C_r} u^2 \right]} \delta_d \quad (5)$$

考虑路面附着状况的约束,车辆侧向加速度 A_y 应满足

$$A_y \leq \mu g \quad (6)$$

式中, μ 为路面附着系数; g 为重力加速度。

设定侧向加速度极限 $A_{y,lim}$ 和横摆角速度极限 γ_{lim} 分别为

$$A_{y,lim} = 0.85 \mu g \quad (7)$$

$$\gamma_{lim} = 0.85 \frac{\mu g}{u} \quad (8)$$

则期望横摆角速度为

$$\gamma_d = \min(|\gamma_i|, |r_{lim}|) \text{sgn}(\gamma_i) \quad (9)$$

1.2 中层控制器

采用滑模控制算法进行期望横摆响应跟踪。设滑模面为

$$\lambda = \gamma - \gamma_d \quad (10)$$

对式(10)微分,即

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\gamma_d}{dt} \quad (11)$$

由式(4)和式(11)可得

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{I_z} \left[(aC_f - bC_r)\beta + \frac{a^2C_f + b^2C_r}{u} \gamma - aC_f\delta_f + M_z \right] - \frac{d\gamma_d}{dt} \quad (12)$$

设 $d\lambda/dt = -\xi \cdot \lambda$ ^[3,13], 可得控制律, 即

$$M_z = I_z \left(\frac{d\gamma_d}{dt} - \xi(\gamma - \gamma_d) \right) - (aC_f - bC_r)\beta - \frac{a^2C_f + b^2C_r}{u} \gamma + aC_f\delta_f \quad (13)$$

1.3 下层控制器

根据载荷转移状况, 采用主动转矩分配方式确定各车轮的驱/制动转矩, 得到所需的附加横摆力矩, 即

$$M_z = \frac{(\Delta T_{fl} + \Delta T_{fr} + \Delta T_{rl} + \Delta T_{rr})l_w}{2r} \quad (14)$$

式中, ΔT_{fl} 、 ΔT_{fr} 、 ΔT_{rl} 、 ΔT_{rr} 分别为前左轮、前右轮、后左轮、后右轮产生的附加驱/制动转矩, $N \cdot m$; l_w 为轴距, m ; r 为车轮半径, m 。

设定附加横摆力矩控制阈值为 $M_{z_{th}}$, 且 $M_{z_{th}} > 0$ 。当 M_z 为正且 $|M_z| > M_{z_{th}}$ 时, 左侧车轮制动/减小驱动, 右侧车轮增加驱动/减小制动。当 $|M_z| \leq M_{z_{th}}$ 时, 左右侧车轮均不产生附加转矩。当 M_z 为负且 $|M_z| > M_{z_{th}}$ 时, 左侧车轮增加驱动, 右侧车轮制动/减小驱动。

主动转矩分配控制导致车辆纵向速度变化率 $< 1\%$, 可忽略纵向加速度引起的载荷转移对轴荷分配的影响。

由轴荷分配情况可确定前后轮附加转矩的关系, 即

$$\Delta T_{rl} = \Delta T_{fl} \frac{a}{b} \quad (15)$$

$$\Delta T_{rr} = \Delta T_{fr} \frac{a}{b} \quad (16)$$

由横向载荷转移可确定左右侧车轮附加转矩的关系, 即

$$\Delta T_{rl} = \Delta T_{fr} \left(\frac{l_w g - 2h_g a_y}{l_w g + 2h_g a_y} \right) \quad (17)$$

$$\Delta T_{rl} = \Delta T_{fr} \left(\frac{l_w g - 2h_g a_y}{l_w g + 2h_g a_y} \right) \quad (18)$$

分配过程中应考虑电机转矩的约束和电驱子系统响应时间的约束。轮毂电机的峰值扭矩特性如图2所示^[14]。

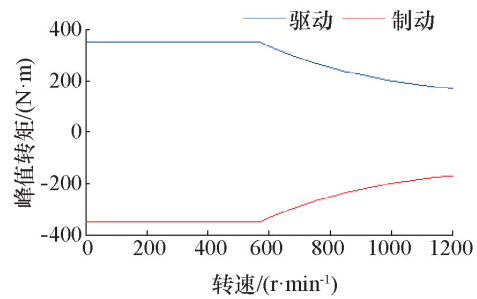


图2 轮毂电机峰值扭矩特性
Fig. 2 Specification of in-wheel motor

电驱子系统输出转矩的响应延迟可由实验测得, 用一阶环节来表征轮毂电机的峰值扭矩特性, 即

$$G(S) = \frac{1}{\tau S + 1} \quad (19)$$

式中, τ 为实验测得的时间常数; S 为复参数。

2 仿真结果与分析

为验证本文的车道保持辅助控制方法, 采用 Carsim/Simulink 联合仿真, 进行高速单移线实验。Carsim 是成熟的商业软件, 经过大量的实验验证, 其仿真结果准确可靠^[15]。但 Carsim 中没有分布式驱动电动车的整车模型, 因此将 Carsim 中的车辆传动系修改为外部差速器, 利用 Matlab/Simulink 搭建轮毂电机模型, 再将电机转矩直接加载至车轮建立 Carsim/Simulink 联合仿真模型。车道保持辅助控制仿真模型如图3所示, 车辆参数如表2所示。

参照《ISO 3888-2: 2002 标准双移线实验规范》设计目标道路, 如图4所示。

高附路面工况: 车速为 80 km/h, 路面附着系数为 0.8, 在 2~5 s 内不进行转向操作以模拟驾驶员因注意力不集中而未调整方向盘跟踪道路。

在高附路面工况下, 车道保持辅助控制决策过程如图5所示。在 2.21 s 时, $t_{n,c}$ 小于启动阈值, LKAS 开始进行辅助控制。在 2.84 s 时, $t_{n,c}$ 大于停止阈值, 但 $|D_{blc}|$ 仍大于停止阈值, 即车辆仍未回到车道中心区域, LKAS 保持辅助控制。在 4.56 s 时, $t_{n,c}$ 大于停止阈值且 $|D_{blc}|$

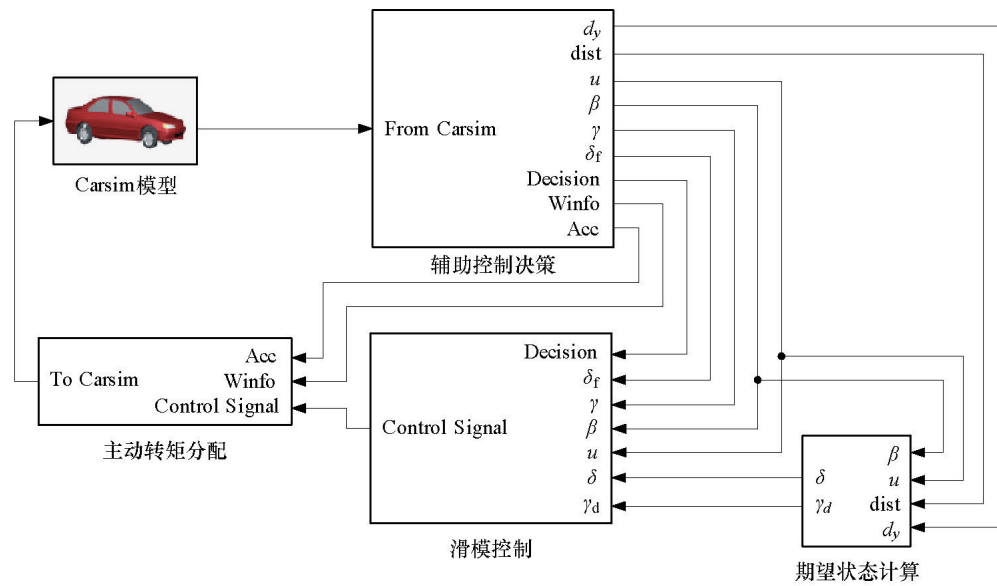


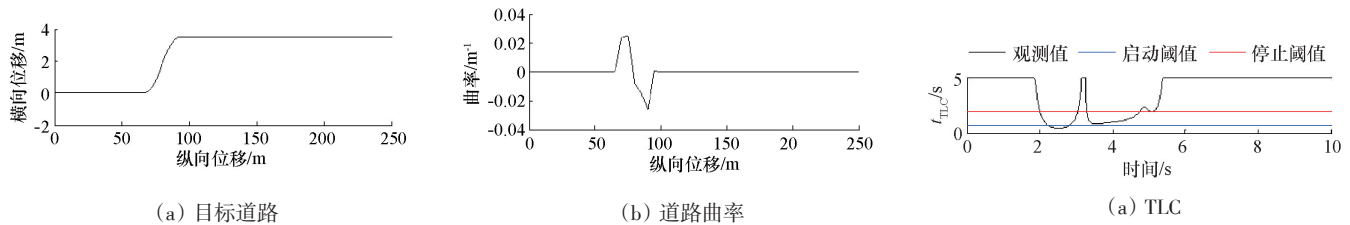
图3 车道保持辅助控制仿真模型

Fig. 3 Simulation model for lane keeping assistance control

表2 车辆参数

Table 2 Vehicle Parameters

参数	整车质量/kg	轮距/m	质心距前轴距离/m	前轮等效侧偏刚度/(N·m ⁻¹)	车轮半径/m
数值	1231	1.481	1.56	-62577	0.304
参数	轴距/m	质心距前轴距离/m	车辆横摆转动惯量/(kg·m ²)	后轮等效侧偏刚度/(N·m ⁻¹)	质心高度/m
数值	2.6	1.04	2031.4	-44714	0.34



(a) 目标道路

(b) 道路曲率

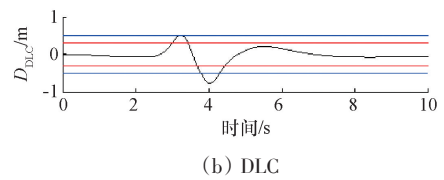
(a) TLC

图4 目标道路及对应曲率

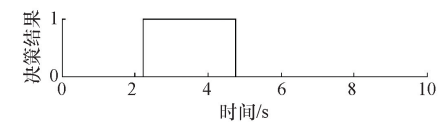
Fig. 4 Target road and curvature

小于停止阈值, LKAS 停止辅助控制输出。LKAS 的决策逻辑如图 5(c)所示,“1”表示开启辅助控制,“0”表示停止辅助控制。

在车辆行驶过程中, LKAS 根据人-车-路信息实时进行辅助控制决策,并在必要时进行辅助控制:当车辆偏离车道的危险程度达到预定阈值时,启动车道保持辅助控制,由下层控制器实时调整四轮驱/制动转矩,产生附加横摆力矩,实现对期望横摆角速度的跟踪。在启动辅助控制的时段内, LKAS 分配至四轮的驱/制动转矩响应曲线如图 6 所示, T_n 、 T_r 、 T_d 、 T_n 均未超出垂向载



(b) DLC



(c) 控制决策

图5 车道保持辅助控制决策

Fig. 5 Control decision for lane keeping assistance control

荷、路面附着状态的约束极限,而 T_{fr} 受电机峰值扭矩特性约束响应曲线出现一小段平台,但不影响横摆角速度的跟随效果。横摆角速度响应曲线如图 7 所示,通过调整四轮转矩,实际横摆角速度有效地跟随期望值。侧向加速度响应曲线如图 8 所示,其峰值为 $0.34g$,满足式(6)、式(7)的约束(即处于路面附着状态的约束范围内),通过调整四轮转矩,车辆有足够的侧向稳定裕度。质心侧偏角响应曲线如图 9 所示,其峰值为 0.025 rad ,通过调整四轮转矩,车辆有效地跟踪目标轨迹。

由图 5 可知,辅助控制介入后, $|D_{DLC}|$ 的最大幅值为 0.768 m (车道宽度为 3.75 m),表明在高附路面及时启动车道保持辅助控制能确保车辆行驶在车道内。

低附路面工况:车速为 80 km/h ,路面附着系数为 0.4 ,在 $2\sim 5 \text{ s}$ 内进行转向操作以模拟驾驶员因注意力不集中而未调整方向盘跟踪道路。

在低附路面工况下,车道保持辅助控制决策的具体过程如图 10 所示,决策过程与高附路面相同。

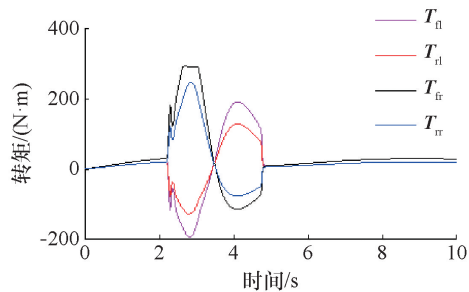


图 6 驱/制动转矩响应
Fig. 6 Driving/braking torque

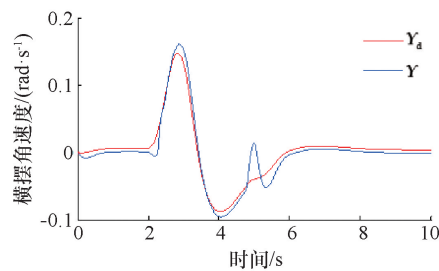


图 7 横摆角速度响应
Fig. 7 Yaw rate tracking

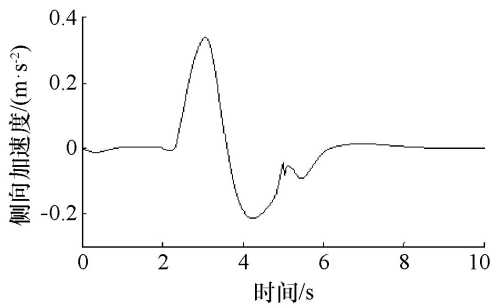


图 8 侧向加速度响应
Fig. 8 Lateral acceleration

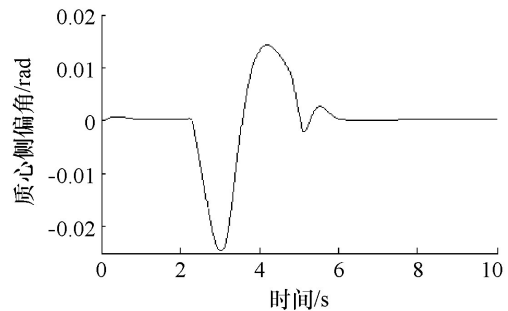


图 9 质心侧偏角响应
Fig. 9 Sideslip angle

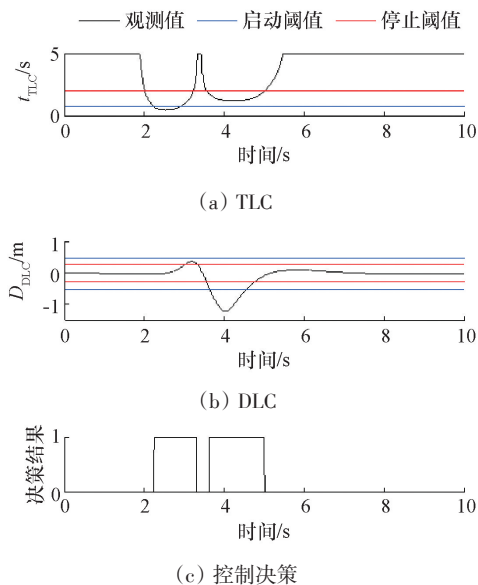


图 10 车道保持辅助控制决策

Fig. 10 Control decision for lane keeping assistance control

在启动辅助控制时段内, LKAS 分配至四轮的驱/制动转矩响应曲线如图 11 所示,受路面附着状态约束四轮输出转矩受限出现小段平台,但不影响横摆角速度的跟随效果。横摆角速度响应曲线如图 12 所示,受路面附着状况约束出现部分小平台,通过调整四轮转矩,实际横摆角速度有效地跟随期望值。侧向加速度响应曲线如图 13 所示,其峰值为 $0.22g$,满足式(6)和式(7)的约束,通过调整四轮转矩,车辆有足够的侧向稳定裕度。车辆质心侧偏角响应曲线如图 14 所示,其峰值为 0.0164 rad ,通过调整四轮转矩,车辆有效地跟踪目标轨迹。由图 10 可知,辅助控制介入后,车辆偏离车道中心线的最大距离为 1.21 m ,表明在低附路面及时启动车道保持辅助控制能确保车辆行驶在车道内。

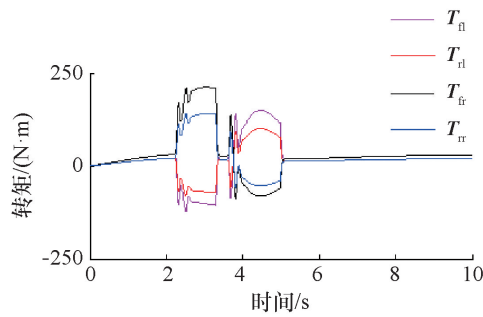


图 11 驱/制动转矩响应

Fig. 11 Driving/braking torque

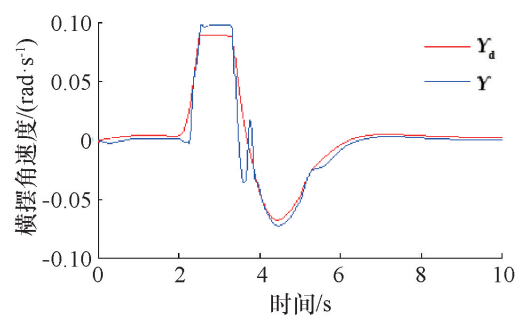


图 12 横摆角速度响应

Fig. 12 Yaw rate tracking

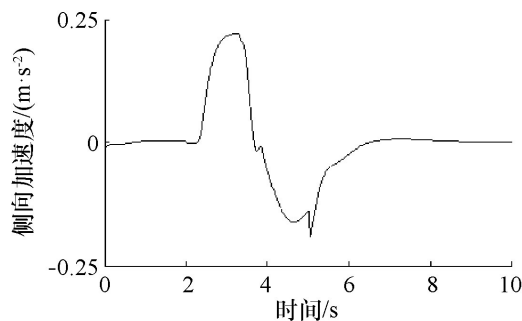


图 13 侧向加速度响应

Fig. 13 Lateral acceleration

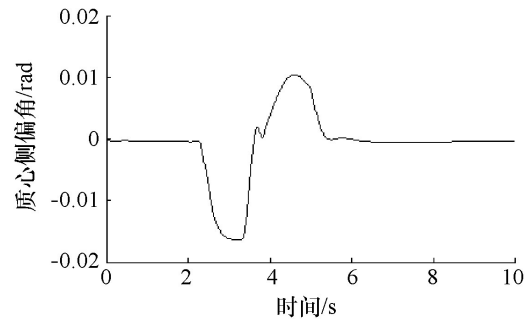


图 14 质心侧偏角响应

Fig. 14 Sideslip angle

3 结论

针对四轮轮毂电机独立驱/制动电动车,提出一种主动分配四轮转矩干预车辆行驶状态以实现车道保持的辅助控制方法。采用 Carsim/Simulink 联合仿真进行高速单移线实验,证明本文的车道保持辅助控制方法在高附路面和低附路面上均能有效地干预车辆行驶状态,确保车辆行驶在车道内。该方法具有良好的车辆动力学稳定性,是车道保持辅助控制的有效技术途径。

参考文献 (References)

- [1] Lee J Y, Choi J W, Yi K S, et al. Lane-keeping assistance control algorithm using differential braking to prevent unintended lane departures[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 23(1): 1-13.
- [2] Merah A, Hartani K, Draou A. A new shared control for lane keeping and road departure prevention[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(1): 86-101.
- [3] Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*[M]. New York: Springer, 2011.
- [4] Kim W, Son Y S, Chung C C. Torque-overlay-based robust steering wheel angle control of electrical power steering for a lane-keeping system of automated vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 65(6): 4379-4392.
- [5] Switkes J P, Rossetter E J, Coe I A, et al. Hand wheel force feedback for lane keeping assistance: combined dynamics and stability[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2006, 128(3): 532-542.
- [6] 张海林, 罗禹贡, 江青云, 等. 基于电动助力转向的车道保持系统[J]. *汽车工程*, 2013, 35(6): 526-531.
Zhang Hailin, Luo Yugong, Jiang Qingyun, et al. Lane keeping system based on electric power steering system[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(6): 526-531.
- [7] LeBlanc D J, Venhovens P J T, Lin C F, et al. A warning and intervention system to prevent road-departure accidents[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1996, 25(Suppl): 383-396.
- [8] 吴乙万, 黄智, 刘李盼. 基于差动制动的车道偏离辅助控制[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(21): 2977-2981.
Wu Yiwan, Huang Zhi, Liu Lipan. Differential braking control for lane departure avoidance[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(21): 2977-2981.
- [9] 黄智, 吴乙万, 刘剑, 等. 高速车辆车道偏离辅助控制研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 157-163.
Huang Zhi, Wu Yiwan, Liu Jian, et al. Research on lane departure avoidance system of high-speed vehicle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 157-163.
- [10] Huang Z, Wu Y W. Lane departure assistance based on bal-

- anced longitudinal slip ratio differential braking control[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2015, 8(3): 205-217.
- [11] Mammari S, Glaser S, Netto M. Time to line crossing for lane departure avoidance: A theoretical study and an experimental setting[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 226-241.
- [12] Macadam C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1981, 11(6): 393-399.
- [13] Yim S, Park Y, Yi K. Design of active suspension and electronic stability program for rollover prevention[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2): 147-153.
- [14] Xiong L, Yu Z P, Yang W, et al. Vehicle Dynamics control of four in-wheel motor drive electric vehicle using gain scheduling based on tyre cornering stiffness estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(6): 831-846.
- [15] 郭孔辉, 付皓, 胡进, 等. 车辆电子稳定性控制试验与评价方法的仿真应用[J]. 汽车技术, 2008(10): 1-3.
Guo Konghui, Fu Hao, Hu Jin, et al. Simulation application of test and evaluation methods on electronic stability control [J]. Automobile Technology, 2008(10): 1-3.

Electric vehicle lane keeping assistance system based on active torque distribution

WU Yiwan¹, ZHU Yue¹, LI Fan²

1. School of Machine Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract This paper focuses on the lane keeping assistance system (LKAS) for a four in-wheel motor drive electric vehicle. A new method for lane keeping assistance is presented, which applies additional yaw moment to the electric vehicle to achieve lane maintenance with active distribution of four wheels driving/braking torque. The lane keeping assistance system is divided into three layers. In the upper layer, assistance control decision is made, and the desired yaw rate is calculated by considering vehicle-lane deviation, vehicle dynamic and limitation of road adhesion. In the middle layer, a sliding mode controller (SMC) is designed to control the additional yaw moment. In the lower layer, yaw moment is produced by distributing of drive/brake torques between the four wheels. Lane keeping assistance is carried out by tracking desired yaw response. The LKAS is evaluated via Carsim/Simulink. The simulation result for a single lane change test shows that the proposed method can make the vehicle have good dynamic stability, and can restrict the vehicle within the lane and avoid lane departure accidents.

Keywords electric vehicle; independent drive/brake; lane active torque; distribution keeping assistance control ●



(责任编辑 韩星明)