

基于主从策略的双轮直驱电动汽车转向差速控制

孙宜标, 王 哲, 丁惜瀛

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 双轮直驱式电动汽车采用感应轮毂电机驱动, 通过对轮毂电机进行精确的同速和差速控制, 取代传统汽车的机械差速器和传动装置。采用基于Ackerman转向模型的虚拟主从控制策略, 轮毂电机均采用直接转矩控制(DTC), 实现高动态牵引。基于系统的稳定性分析, 用Matlab/Simulink软件对系统进行了仿真, 结果表明, 该方法在两轮毂电机存在负载转矩差异的情况下, 可获得良好的稳态跟踪精度和较小的动态积分误差。

关键词: 电动汽车; 轮毂电机; 电子差速; 直接转矩控制

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)05-0045-04

Steering Differential Control of Two-wheeled Direct-drive Electric Vehicle Based on Master-slave Strategy

SUN Yi-biao, WANG Zhe, DING Xi-ying

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract: Two-wheeled direct-drive electric vehicle is driven by induction in-wheel motor, which can precisely control the in-wheel motor with the same and differential speed and take place of the mechanical differential and transmission device of traditional vehicles. High dynamic traction is realized, which is based on virtual master-slave control strategy of Ackerman steering model and direct torque control of in-wheel motor. The system has been simulated in the Matlab/Simulink via its stability analysis. The result shows that when the load torque is different between two in-wheel motors, the steady tracking accuracy is good, and its dynamic integral error is small.

Key words: electric vehicle; in-wheel motor; electronic differential; direct torque control

0 引言

随着电力电子技术、轮毂电机技术的不断发展, 直驱式电动汽车已经成为了研究热点。与传统汽车相比, 首先, 直驱电动汽车无需传统汽车变速器、传动轴等机械部件, 直接将电机安装在车轮中, 节省了大量的空间, 减轻了车重并提高了能量的利用效率; 其次, 电机动态响应快且精确^[1-3]。采用轮毂电机单独驱动, 设计

结构更加灵活, 成为电动汽车发展的新方向。

轮毂电机驱动的电动汽车是一种由电机直接驱动的汽车, 每个电机单独提供驱动力矩, 电机之间没有机械联系。如何有效地控制两个电机, 完成驾驶员期望的转向, 是轮毂电机直驱式电动汽车研究的重点之一。目前研究较多的方案有两种: (1) 线控转向技术^[4], 此方法需要多个转向传感器参与工作, 实时检测转向盘与转向电机的转矩或转角的大小和方向^[5], 并将此信息转换为电信号由电子控制器处理, 但是传感器的精度和稳定性是其最主要的瓶颈; (2) 电子差速(Electronic Differential ED)控制, 此方法的实质是根据汽车在不同的操纵方式和外部环境下为驱动轮提供转速给定, 进而控制驱动轮输出不同的转矩, 实现机械差速器的功

收稿日期: 2010-08-02

作者简介: 孙宜标(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为伺服控制、直接驱动技术;

王 哲(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车直接驱动技术。

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20092052)

能^[6]。

本文以多电机协同控制为切入点,探讨电子差速控制的新方法。多电机协同控制的方法首先是在轨迹控制机器人和模式控制同步中提出来的^[7-8]。此方法能够抑制直驱式电动汽车在行驶过程中两驱动轮速度不等的情况,提高车辆运行稳定性。重点是研究各个驱动轮的不可预测的扰动现象,利用虚拟主从式的同步控制策略,来增强方向控制和减小转向误差。

1 Ackerman 转向模型

基于三角函数得到的简化Ackerman转向模型如图1所示。简化模型做了3点假设:(1)认为前轮是主动轮,后轮的行驶轨迹能够完全跟随前轮;(2)后轮不出现滑移现象,这样车轮的速度能够被表述成半径的函数^[9-10];(3)车辆速度是两个驱动轮速度和的一半。

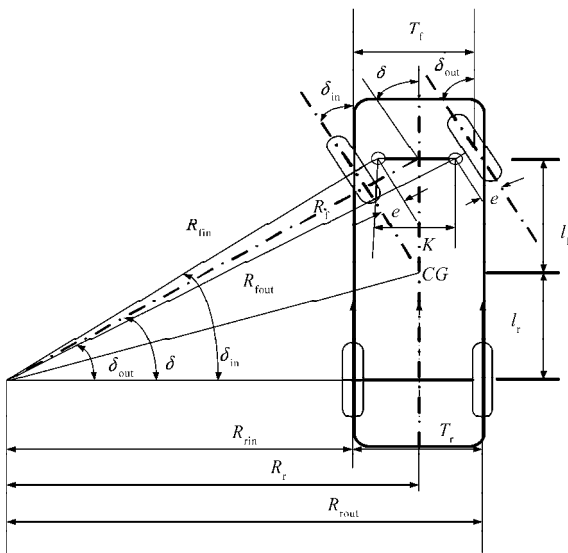


图1 Ackerman 转向模型原理图

Fig. 1 The theory diagram of Ackerman steering model

注: R_{fin} 、 R_{fout} 分别为内外前轮转向半径; R_{rin} 、 R_{rout} 分别为内外后轮转向半径; l_f 为质心至前轴的距离; l_r 为质心至后轴的距离; T_f 为前轮轮距; δ_{in} 为内轮转角; δ_{out} 为外轮转角; e 为主销到车轮中心的距离

前轴内外车轮转向角可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{fin} &= \arctan \left[\frac{(l_f + l_r) \tan \delta_f}{l_f + l_r - \frac{K}{2} \tan \delta_f} \right] \\ \delta_{fout} &= \arctan \left[\frac{(l_f + l_r) \tan \delta_f}{l_f + l_r + \frac{K}{2} \tan \delta_f} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: δ_f ——方向盘转角; K ——两主销中心延长线到地面交点之间的距离。

根据参考文献[6],内外车轮的速度 v_{in} 、 v_{out} 可分别用式(2)、式(3)表示。

$$v_{in} = v \left(1 - \tan \left(\delta_{fin} \frac{T_f}{2l} \right) \right) \quad (2)$$

$$v_{out} = v \left(1 + \tan \left(\delta_{fout} \frac{T_f}{2l} \right) \right) \quad (3)$$

式中: v ——实际车速; $l = l_f + l_r$ 。

因此,汽车转向时,以整车质心速度为参考,计算每个车轮绕转向中心的线速度,进而得出每个车轮需要的电机转速。通过向电机控制器发出电压指令,调节电机转速,即调整车轮转速,合理地分配每个电机的输出转矩,以实现车轮按指定转向行驶。根据Ackerman转向模型得到双驱动轮设定转速,并将车辆的速度转化成电机的角速度,从而可以由两个轮毂电机控制器提供的转速信号控制车辆的速度。

2 电子差速控制策略

2.1 轮毂电机控制策略

电动汽车对电机驱动系统的要求主要集中在快速性、调速范围和带载能力上,以满足汽车在不同的路面上行驶时启停、加速、减速和制动的操纵要求,而对电机驱动系统控制精度的要求并不苛刻。目前电动汽车大多沿用传统汽车的配件系统,按转矩指令控制电机的运转。直接转矩控制(DTC)技术的响应速度比脉宽调制技术的快10倍,系统可直接依照驾驶指令控制转矩,而且磁链闭环能够优化电机磁通,提高电机和驱动器的总能量利用率。因此,本文采用直接转矩控制作为电机驱动系统的控制方案。

直接转矩控制定子磁链 ψ_s 和电磁转矩 T_e 可以通过式(4)和式(5)得到:

$$\psi_s = \int (U_s - R_s i_s) dt \quad (4)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_s' L_r} \psi_s \psi_r \sin \theta_{sr} \quad (5)$$

式中: θ_{sr} ——定子磁链 ψ_s 和转子磁链 ψ_r 之间的夹角; n_p ——极对数; U_s ——定子电压; R_s ——定子电阻; i_s ——定子电流; L_m ——互感; L_s' ——折算到定子侧的电感; L_r ——转子电感。

直接转矩控制结构框图如图2所示^[1]。

2.2 双电机同步控制策略

同步控制策略是基于一个虚拟的通用主控制器实现的,它将Ackerman算式计算得来的转速作为两个驱动电机的转速给定(图3)。现将异步电机简化为一阶惯

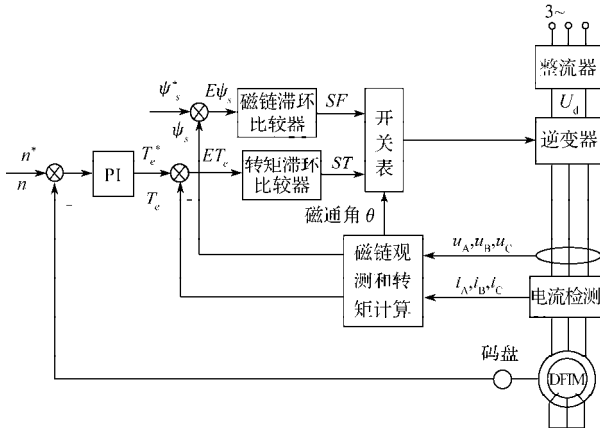


图2 直接转矩控制框图

Fig. 2 The schematic of Direct Torque Control (DTC)

性环节,这里只考虑控制量和电机转速之间的关系:

$$\frac{\omega_i(s)}{u_i(s)} \approx \frac{1}{J_i s + b_i} \quad (6)$$

式中: \$\omega_i\$——电机的转速,其中 \$i=1,2\$, 分别代表两个轮毂电机; \$u_i\$——转矩控制量,即电磁转矩; \$J_i\$——等效的转动惯量; \$b_i\$——摩擦因数。

将两个电机的控制量经过加权作为虚拟主控制器的负载,从而得到电机转速的设定值 \$\omega_f\$。

如图3所示,整个同步控制策略包括3个部分:(1)虚拟主控制器;(2)两个电机的速度控制器(从控制器),每个从控制器都是直接转矩控制;(3)通过平均增益 \$K_2\$ 将从控制过程中的控制量送回主控制器,经过差速算法再分别作为从控制过程的转速给定。其中电机控制系统1和电机控制系统2由图2所示的结构框图建立的异步电机直接转矩控制系统代替。

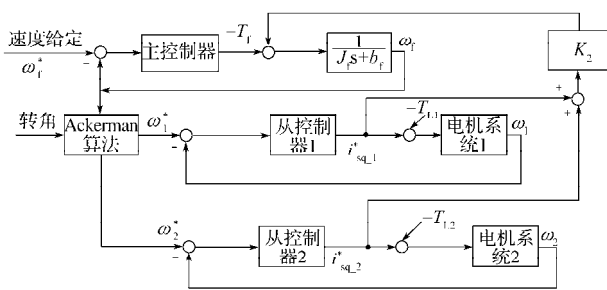


图3 主从结构框图

Fig. 3 The structure figure of master-slave control

在汽车定速巡航的时候,路面状态一致,两个轮毂电机的结构相同,即电机处于相同的状态,此时两个电机不存在转矩变化 \$\omega_f\$ 不会发生变化。

在左右轮路面条件不一致且其中某轮毂电机上负载转矩变化时,电机自身的直接转矩控制器将首先克服转矩的脉动,并且转矩波动还将经过 \$K_2\$ 的加权回馈到虚拟主控制器中。虚拟的主控制器中的PI调节器可抑制转矩扰动给整车运行造成的影响,得到新的 \$\omega_f\$,并

通过Ackerman算法,由式(2)式(3)得到两个电机新的速度给定。这样能够使车辆在给定转向的条件下,合理地分配给两个电机不同的转矩,使驱动电机在不同条件下满足车辆行驶要求。

2.3 主控制器参数的选择

主控制器的结构框图如图4所示。当扰动开始出现时,电机驱动控制器开始自身调节,之后主控制器再根据控制量的变化更新 \$\omega_f\$。这样可以避免出现尖峰电流,保证逆变器在安全区域内工作。因此,主控制等效的转动惯量 \$J_f\$ 和摩擦因数 \$b_f\$ 为:

$$J_f \geq J_1 + J_2 \quad (7)$$

$$b_f \geq b_1 + b_2 \quad (8)$$

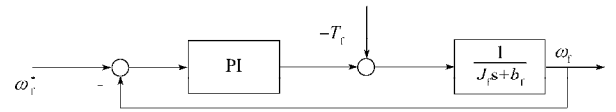


图4 主控制器框图

Fig. 4 The structure figure of master controller

3 系统稳定性分析

对系统稳定性的分析,主要是分析系统抵抗突发扰动的情况。通过对系统稳定性的分析可以确定 \$K_2\$ 的取值范围、主控制器比例系数 \$K_p\$ 和积分系数 \$K_i\$ 的取值范围。

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ \varepsilon I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} e + \phi(\omega_f^*, T_L, e) \quad (9)$$

式中: \$e = [e_1, e_2, e_3, \int e_1 d\sigma, \int e_2 d\sigma, \int e_3 d\sigma]^T \in \chi^6\$, 其中 \$e_1 = \omega_1 - \omega_1^*\$; \$e_2 = \omega_2 - \omega_2^*\$; \$e_3 = \omega_f - \omega_f^*\$。

状态变量不仅包括设定转速和反馈转速的偏差,还包括偏差的积分。这样寻求的稳定性条件,不仅能够满足系统稳定,还能够在动态过程中使设定值与反馈值尽快相等,没有偏差。外部扰动函数 \$\phi(\omega_f^*, T_L, e) = [\phi(\omega_f^*, T_L, e), 0_3]^T \in \chi^6\$ 的变化都反映在负载转矩 \$T_{L1}\$ 和 \$T_{L2}\$ 上,如式(10)。

$$\phi(\omega_f^*, T_L, e) = \begin{bmatrix} -(\frac{K_2}{J_1} + \frac{b_f}{J_f})\omega_f^* f_1 - \frac{T_{L1} + \gamma_1 + \gamma_2}{J_1} \\ -(\frac{K_2}{J_2} + \frac{b_f}{J_f})\omega_f^* f_2 - \frac{T_{L2} + \gamma_1 + \gamma_3}{J_2} \\ \frac{b_f \omega_f^*}{J_f} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\gamma_1 = -d_f r M g (f_f \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (11)$$

$$\gamma_2 = -(1/2) d_f r \rho A C_b ((e_1 + f_1(e_3 + \omega_f^*))^2 / J_1 f_1^2) \quad (12)$$

$$\gamma_3 = -(1/2) d_f r \rho A C_b ((e_2 + f_2(e_3 + \omega_f^*))^2 / J_2 f_2^2) \quad (13)$$

式中: \$M\$——汽车质量; \$r\$——车轮半径; \$\alpha\$——坡度;

d_f ——质量的分布系数； ρ ——迎风空气密度； A ——汽车迎风面积； C_D ——空气阻力系数。

$A_1 \in \chi^{3 \times 3}$ 是 f_1 、 f_2 和比例增益 $K_p = \text{diag}[K_{p,1}, K_{p,2}, K_{p,f}]$ 的连续函数,如式(14),其中 $a_{31} = (K_2 K_{p,1} / J_f)$; $a_{32} = (K_2 K_{p,2} / J_f)$; $a_{33} = -1 - J_f (b_f + K_{p,3})$ 。 $A_2 \in \chi^{3 \times 3}$ 是 f_1 、 f_2 和 $K_i = \text{diag}[K_{i,1}, K_{i,2}, K_{i,f}]$ 的连续函数,如式(15),整体的矩阵增益 $K_1 = \varepsilon K_i$, $\varepsilon > 0$, $a_{34} = (K_2 K_{i,1} / J_f)$, $a_{35} = (K_2 K_{i,2} / J_f)$, $a_{36} = -(K_{i,3} / J_f)$ 。

$$A_1 = \begin{bmatrix} \Delta_1 & -f_1 a_{32} & -(a_{33} + \frac{b_1}{J_1}) f_1 \\ -f_2 a_{31} & \Delta_2 & -(a_{33} + \frac{b_2}{J_2}) f_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -a_{34}(f_1 + \frac{J_f}{J_1 K_2}) & -f_1 a_{35} & -f_1 a_{36} \\ -f_2 a_{34} & -a_{35}(f_2 + \frac{J_f}{J_2 K_2}) & -f_2 a_{36} \\ a_{34} & a_{35} & a_{36} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\Delta_1 = -(b_1 / J_1) - a_{31} (f_1 + (J_f / J_1 K_2))$; $\Delta_2 = -(b_2 / J_2) - a_{32} (f_2 + (J_f / J_2 K_2))$ 。

正的比例积分增益 $K_{p,j}$ 、 $K_{i,j}$ ($j=1, \dots, 3$) 满足 $a_{31} > 0$, $a_{32} > 0$, $a_{34} > 0$, $a_{35} > 0$, $a_{33} < 0$, $a_{36} < 0$ 时,下面的两个定理才能成立:(1) $0 < K_2 < 1$, $K_{p,j} > 0$ ($j=1, \dots, 3$) 矩阵 A_1 是赫尔维兹稳定的;(2) 当 $K_{i,j} > 0$ ($j=1, \dots, 3$), $-A_1^{-1} A_2$ 是赫尔维兹稳定的。满足上述条件的 ε 能够快速的收敛到零,即转速偏差的动态和静态性能达到最优。具体证明过程见参考文献[11]。

已证实,当 $0 < K_2 < 1$ 的时候能够保证系统稳定,不仅稳态精度高,而且动态精度也得到提高。文中采用 $K_2 = 1/n$, n 为从控制器数目。

4 仿真验证

通过Matlab/Simulink仿真来验证和分析直驱电动汽车使用驱动电机同步控制方法的有效性。仿真中建立了异步轮毂电机、逆变器模型和差速控制模型。电机参数为:额定功率7.5 kW;额定频率50 Hz;电机转动惯量0.0343; $J_f = 2$; $b_f = 3$; $K_2 = 1/2$ 。

图5和图6示出了在仿真过程0.4 s时突加100 N·m的负载扰动得到的转速和转矩图像。从转速图像可以看出,从启动直到稳态时,转速保持严格一致,其中任意一个驱动电机出现负载扰动时,在直接转矩控制和同步控制策略的共同作用下,两车轮的转速保持一致,

并且以较快的时间回到同步稳定状态。图7和图8分别是模拟车辆转向运行,转向角为3°时的转速曲线和转矩曲线。在车辆稳定运行的基础上0.2 s时刻施加3°的转向指令,并在0.4 s的时候将一个车轮的负载加大。从仿真曲线看出,在转向的时候出现了转速差,同时转矩也在瞬间有了尖峰,和速度的变化效果一致,并且在有负载扰动的情况下,系统能很快地恢复到稳定状态,说明了主从控制的有效性。

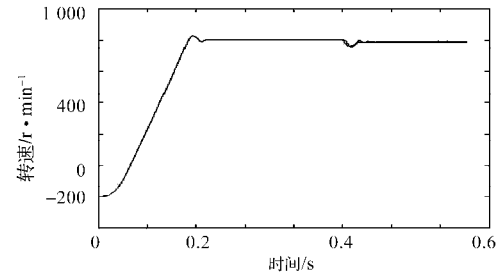


图5 任意驱动轮0.4 s突加负载转速曲线
Fig. 5 Speed curve of increasing load of any drive motor at 0.4s

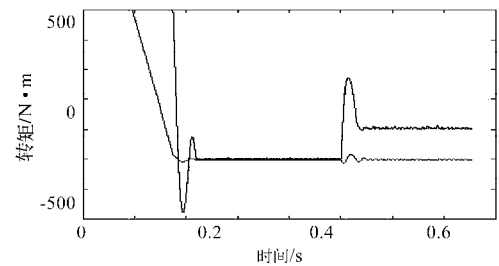


图6 任意驱动轮0.4 s突加负载转矩曲线
Fig. 6 Torque curve of increasing load of any drive motor at 0.4s

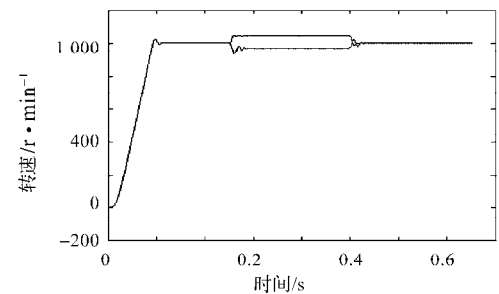


图7 转向角为3°时转速曲线
Fig. 7 Speed curve when the steering angle is 3 degree

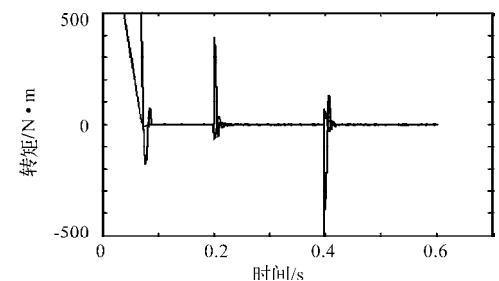


图8 转向角为3°时转矩曲线
Fig. 8 Torque curve when the steering angle is 3 degree

- [6] Ledwich G, George T A. Negative-phase-sequence reduction with adjacent static reactive-power compensators[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1994, 4(5): 259-263.
- [7] 電気学会, 静止形無効電力補償装置の省エネルギー - 技術調査専門委員会. 静止形無効電力補償装置の省エネルギー - 技術[G]//日本東京: 電気学会技術報告 第973号. 2006.
- [8] 電気学会, 鉄道におけるパワ - エレクトロニクス技術調査専門委員会. 鉄道におけるパワ - エレクトロニクス技術[G]//日本東京: 電気学会技術報告 第979号. 2006.
- [9] 麻建宗. 牵引变电所电能质量治理测试与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [10] 持永芳文. 静止反相电流补偿装置[J]. 电学论B, 1992(7).
- [11] ABB Power Transmission. Multiple SVC installations for traction load balancing in central Queensland[R]. Sweden: ABB Power Systems AB.
- [12] Zhu Yongqiang, Liu Wenhua. Balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[C]//The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2004), 2004: 425-429.
- [13] 黄足平, 姜齐荣. 京沪线南翔牵引变电所有源无源混合补偿方案[J]. 电气化铁道, 2009, (5): 1-5.
- [14] 文 珺, 陈建业. SVC和STATCOM在电气化铁道中的应用[J]. 机车电传动, 2003(3): 7-11.
- [15] 罗承廉, 纪 勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [16] Celli G, Pilo F, Tennakoon S B. Voltage regulation on 25kV AC railway systems by using thyristor switched capacitor[C]//Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings 2000(2): 633-638.
- [17] Tetsuo UZUKA, Shouji JKEDO, Keiji UEDA. A Static Voltage Fluctuation Compensator for AC electric railway[C]//2004 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen Germany, 2004: 1869-1873.
- [18] Gruenbaum R. FACTS for power quality improvement in grids feeding high speed rail traction[C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2007) Antalya, TURKEY, 2007: 618-623.

.....

(上接第48页)

5 结语

双轮直驱电动汽车相对于传统电动汽车有着质量轻、节能、响应速度快等优点,但是由于减去了机械差速器,需要对驱动轮同步控制。本文提出的一种新型的电机同步控制策略,转速能够反映驱动轮上的负载扰动;直线行驶时,要求驱动轮速度完全一致;转向运行时,要求驱动轮存在速度差,实现对电动汽车操纵性的控制。通过仿真进一步验证同步策略的可行性,转速能够跟随设定值,实现了在直线和转向过程中的稳定运行,能够保证恒速续航,并且能够克服环境的干扰,实现汽车的稳定运行。

参考文献:

- [1] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] Massimo C, Lorenzo F, Antonella F, et al. Vehicle Yaw Control via Second-Order Sliding-Mode Technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3908-3916.
- [3] 余卓平, 姜 炜, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. 同济大学学报, 2008, 36(8): 1115-1119.
- [4] Cong Geng, Toshiyuki U, Yoichi H. Body slip angle estimation and control for electric vehicle with in-wheel motors[C]//The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, 2007: 351-355.
- [5] Yang Yee-Pien, Lo Chun-Pin. Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2008(16): 1285-1292.
- [6] Zhao Y E, Zhang J W, Guan X Q. Modeling and Simulation of Electronic Differential System for an Electric Vehicle with Two-Motor-Wheel Drive[J]. IEEE International Conference, 2009 (10): 1209-1214.
- [7] Toshiyuki Uchida, Shin-ichiro Sakai, Yoichi Hori. Vehicle Stability Improvement Based on MFC Independently Installed on 4 Wheels-Basic Experiments using "UOT Electric March 1"[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Osaka, Japan: 2002: 582-587.
- [8] Nobuyoshi Mutoh, Yuki Nakano. Dynamic Characteristic Analyses of the Front-and Rear-Wheel Independent Drive Type Electric Vehicle (FRID EV) When the Drive System Failed during Running under Various Road Conditions[C]//Vehicle power and Propulsion conference. 2009: 1162-1169.
- [9] 宋明国. 轻型汽车线控转向技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] Mutoh N, Takahashi Y, Tomita Y. Failsafe Drive Performance of FRID Electric Vehicles With the Structure Driven by the Front and Rear Wheels Independently[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2306-2315.
- [11] Francisco J, Perez-Pinal, Ilse Cervantes. Stability of Electric Differential for Traction Applications[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007, VPPC 2007, IEEE, Arlington, TX, 2007: 771-776.