

基于转矩分配的电动汽车横摆稳定性控制

丁惜瀛, 张钦爽, 覃艳丽, 苑克臣

(沈阳工业大学 特种电机与高压电器实验室, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 四轮驱动电动汽车在行驶过程中, 行驶姿态与轨迹仅靠差速控制难以准确跟踪司机指令, 路面变化及轮胎非线性会使汽车出现过大幅摆、侧滑、过度或不足转向等不稳定问题。针对可能出现的问题, 分析了横摆角速度与车辆稳定性的表征关系, 提出了基于转矩分配的直接横摆控制策略, 轮毂电机均采用直接转矩控制(DTC), 实现高动态牵引, 并在稳定性分析的基础上对系统进行Matlab/Simulink环境下仿真。仿真结果表明, 车辆在行驶过程中, 各车轮转矩的动态优化分配可将车辆姿态参数控制在最佳范围内, 保证车辆能够按照预定方向稳定行驶。

关键词: 电动汽车; 横摆角速度; 直接转矩控制; 四轮驱动; 转矩分配

中图分类号: U461.6

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)05-0041-04

Yaw Stability Control of EV based on Torque Distribution

DING Xi-ying, ZHANG Qin-shuang, QIN Yan-li, YUAN Ke-chen

(Motor and High-voltage Electrical Laboratory of Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China)

Abstract: The driving posture and trajectory of four-wheel-drive EV in the process of turning can not track orders of drivers just based on differential control, because the variable factors like road and tyre will cause some instability problems such as overswing, sideslip, oversteering and understeer. In order to solve these instability problems, after analyzing the relations between yaw rate and stability, it proposes direct yaw control strategy based on torque distribution, in-wheel motor is controlled with direct torque control(DTC) to high dynamic traction and conducted the simulation under Matlab/Simulink environment. The simulation result shows that the dynamic optimization of the tire torque distribution can control the vehicle attitude in the best range to ensure stability of the vehicle in the predetermined direction.

Key words: EV; yaw rate; direct torque control; 4-wheel drive; torque distribution

0 引言

快速准确的转矩控制使电动汽车的性能在与其他新能源汽车竞争中获得绝对优势^[1], 尤其是装备多个轮毂电机的电动汽车, 通过电机驱动系统的智能化控制可达到并超越传统内燃机汽车的性能。多电机独立驱动在提高电动汽车稳定性方面具有令人瞩目的潜力^[2-3]。

近些年来, 通过对汽车稳定性的理论分析, 出现了

直接横摆力矩控制(Direct Yaw Control, DYC)的概念^[4-6], 即通过采集方向盘转角的信息判断驾驶员的转向意图, 改变车辆内外侧驱动力或制动力的分配, 调节汽车的横摆运动, 直接保障汽车的稳定性。围绕DYC, 文献[7]运用横摆角速度的反馈, 纠正驾驶员的道路感官偏差, 提高了车辆的转弯和加速能力。文献[8]着重分析了如何确定车轮纵向力和侧向力分配的权重系数, 以提高车辆的操纵性和安全性, 并指出不同的权重分配系数对车辆快速性和稳定性的影响。

本文在七自由度汽车动力学模型的基础上, 采用直接转矩控制策略控制的永磁同步电机作为轮毂电机来驱动电动汽车, 并分析了姿态参数对汽车稳定性的

收稿日期: 2011-06-26

作者简介: 丁惜瀛(1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事电动汽车驱动系统控制等方面的研究。

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20092052)

影响,提出一种基于转矩分配的DYC策略,使车辆姿态参数跟随理想值,改善车辆的操纵性和稳定性。

1 整车动力学模型

1.1 车辆动力学模型

为进行车辆稳定性分析,本文忽略汽车悬架特性,建立了以车辆纵向、侧向、绕z轴的横摆运动以及4个车轮转动的七自由度车辆模型^[9](图1),其方程如下:

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{v}_x - rv_y) &= \sum F_x = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} \\ m(\dot{v}_y + rv_x) &= \sum F_y = F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} \\ J_z \dot{r} &= \sum M = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) + \\ &\quad \frac{T_f}{2}(F_{xfr} - F_{xfl}) + \frac{T_r}{2}(F_{xrr} - F_{xrl}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m ——整车质量; v_x 、 v_y ——分别为整车纵向速度和侧向速度; r ——车辆横摆角速度; F_x 、 F_y ——分别为车轮所受的纵向力和侧向力(下标fl、fr、rl、rr分别表示左前、右前、左后、右后车轮); J_z ——车辆绕z轴的转动惯量; M ——作用于车辆的力矩, l_f 、 l_r ——分别为质心到前轴和后轴的距离; T_f 、 T_r ——分别为前后轮的轮距。

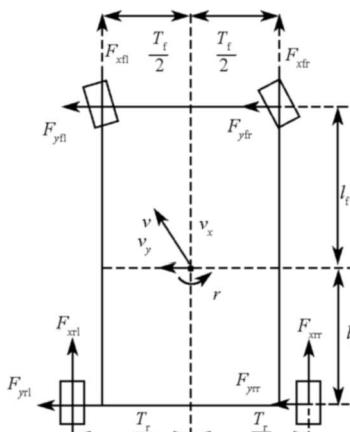


图1 整车模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of vehicle model

1.2 电机及其控制策略

永磁同步电机驱动系统控制具有较高的鲁棒性,电机气隙较小使其具有较强的电枢反应,可以控制电机在恒转矩及弱磁恒功率区高速运行,其控制特性非常适合电动汽车的运行特点。与相同功率的其他类型电机相比,永磁电机体积小、质量轻,可以实现低速大转矩,尤其适合直接轮毂式驱动。

电动汽车对于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,以满足汽车在不同路况下的操纵要求,而对电机驱动系统控制精度的要求并

不苛刻,所以响应速度较快的直接转矩控制(DTC)技术可以作为其电机驱动系统的控制方案。直接转矩控制结构图如图2所示。

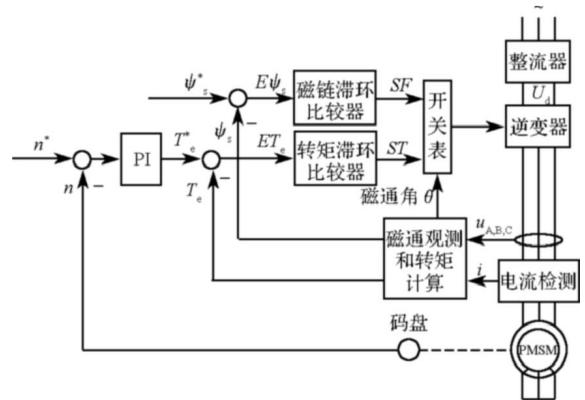


图2 直接转矩控制框图
Fig.2 Schematic of direct torque control

直接转矩控制的定子磁链 ψ_s 和电磁转矩 T_e 可以通过式(2)得到:

$$\left. \begin{aligned} \psi_s &= \int (U_s - R_s i_s) dt \\ T_e &= n_p \frac{L_m}{L_s L_r} \psi_s \psi_r \sin \theta_{sr} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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。

2 稳定性分析

汽车行驶状态主要由纵向速度、侧向速度和横摆角速度确定。纵向速度与侧向速度确定汽车质心侧偏角,汽车的横摆角则是由横摆角速度的积分得到,而质心侧偏角与横摆角之和为汽车行驶的航向角。假设汽车的质心侧偏角较小忽略不计,则汽车的航向角主要由横摆角决定,在质心侧偏角比较小的情况下,横摆角速度决定了汽车的稳定状态。若横摆角速度过大,车辆会出现失控、侧翻等危险情况。

车辆运行的转向特性可分为3种:不足转向、中性转向和过度转向。中性转向时,车辆的实际转向角与驾驶员的方向盘转角一致,但当车辆各轮间的转矩分配不合理时,车辆的实际转向与驾驶员的转向就会有偏差,车辆会出现不足转向或过度转向,严重时会出现翻车危险。车辆的这些转向特性可以由汽车前后轴侧偏角(α_f , α_r)的差来确定:

$$\alpha_f - \alpha_r \begin{cases} < 0 & \text{不足转向} \\ = 0 & \text{中性转向} \\ > 0 & \text{过度转向} \end{cases} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_f &= \beta + \frac{r \times l_f}{v} - \delta_f \\ \alpha_r &= \beta - \frac{r \times l_r}{v} \\ \alpha_f - \alpha_r &= \frac{l \times r - \delta_f \times v}{v} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： l ——前后轴距； β ——整车侧偏角； v ——整车速度； δ_f ——方向盘转角。

由式(3)和式(4)可得：

$$r = \begin{cases} < \frac{\delta_f \times v}{l} & \text{过度转向} \\ = \frac{\delta_f \times v}{l} & \text{中性转向} \\ > \frac{\delta_f \times v}{l} & \text{不足转向} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可见,当质心侧偏角较小时,可以通过横摆角速度来判断车辆的转向特性,进而分析车辆是否失稳。当车辆趋于失稳时,合理分配转矩可使车辆保持接近中性转向状态。

3 转矩分配控制

3.1 整车控制结构

整车控制结构如图3所示。理想模型根据驾驶员输入(即方向盘转角、加速和制动动作)计算车辆的期望状态。

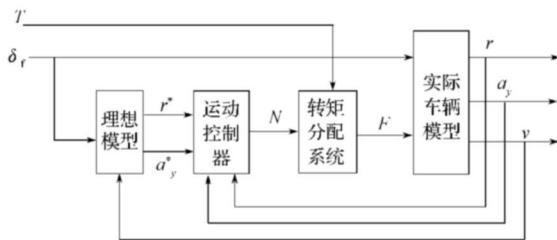


图3 整车控制结构
Fig.3 Vehicle control structure

运动控制器根据实际车辆响应的姿态参数和期望姿态参数之间的偏差调整作用在车辆上的横摆力矩；转矩分配系统将运动控制模块计算出的横摆力矩合理地分配给4个车轮。

3.2 理想模型

产生期望车辆姿态参数(横摆角速度、侧偏角以及侧向加速度)的线性理想模型表达式如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta_f \quad (6)$$

其中，

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\left(\frac{C_1 + C_2}{mv_x} \right), & a_{12} &= -\left(1 + \frac{1}{mv_x^2} \times (C_1 l_f - C_2 l_r) \right), \\ a_{21} &= -\left(\frac{l_f C_1 - l_r C_2}{J_z} \right), & a_{22} &= -\left(\frac{C_1 l_f^2 + C_2 l_r^2}{J_z v_x} \right), \\ b_1 &= \frac{C_1}{mv_x}, & b_2 &= \frac{C_1 l_f^2}{J_z} \end{aligned}$$

式中： C_1 、 C_2 ——分别为前、后轮的侧偏刚度。

3.3 转矩分配控制模块

转矩分配控制模块的框图如图4所示。



图4 转矩分配模块
Fig.4 Torque distribution module

上层控制器的作用是保证整车横摆的稳定性,给出理想的横摆转矩。控制过程充分利用由汽车模型输出的横摆角速度、轮速、侧向加速度以及相应控制算法计算出的理想横摆角速度。下层控制器通过独立控制4个车轮的转速提供车辆校正横摆转矩,减少紧急情况下车辆稳定性对驾驶员操作的依赖程度。

3.3.1 上层控制器设计

如上所述,上层控制器用于确定整车校正横摆转矩,从而使车辆达到期望横摆角速度、期望侧偏角以及期望侧向加速度。上层控制器采用PID控制。

假设车辆左转向,横摆角速度偏差 e_r 和侧向加速度偏差 e_{ay} 分别为：

$$\left. \begin{aligned} e_r &= r - r_d \\ e_{ay} &= a_y - a_{yd} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： a_y 、 r ——通过车辆模型得到的实际车辆状态,分别为侧向加速度和横摆角速度； a_{yd} 、 r_d ——理想模型的输出值。

上述两个参量偏差经过PID得到的校正转矩分别为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_r &= K_{p1} e_r + K_{i1} \int e_r dt + K_{d1} \frac{de_r}{dt} \\ \Delta T_{ay} &= K_{p2} e_{ay} + K_{i2} \int e_{ay} dt + K_{d2} \frac{de_{ay}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3.3.2 下层控制器设计

下层控制器的任务是根据上层控制器产生的校正横摆力矩计算出各车轮的驱动转矩给定值,进而通过转矩控制器和执行装置完成转矩分配,实现横摆力矩校正,完成加速、制动或转向等车辆动作。

基于横摆角速度校正转矩的转矩分配方案如下：

$$\left. \begin{aligned} T_{L_new} &= T_L + \frac{\Delta T_r}{2} \\ T_{R_new} &= T_R - \frac{\Delta T_r}{2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： T_{L_new} 、 T_{R_new} ——分别为新的左右轮转矩。

基于侧向加速度校正转矩的转矩分配方案如下：

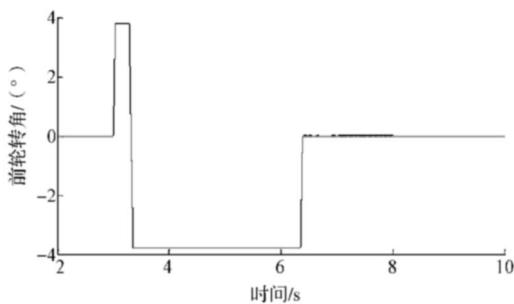
$$\left. \begin{aligned} T_{L_new} &= T_L + \frac{\Delta T_{ay}}{2} \\ T_{R_new} &= T_R - \frac{\Delta T_{ay}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

4 系统仿真分析

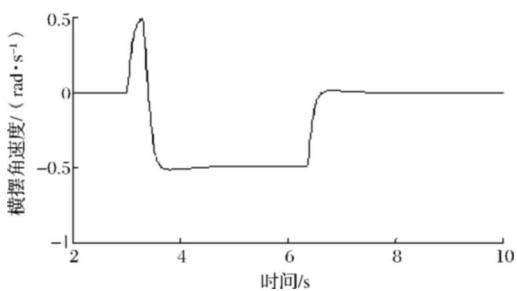
为了验证上述控制方法的有效性，在 Matlab/Simulink 环境下运用整车动力学模型对其进行了鱼钩测试的仿真研究。车辆参数为： $m=1862 \text{ kg}$ ， $J_z=2488 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $l_f=1.18 \text{ m}$ ， $l_r=1.77 \text{ m}$ ， $C_f=99700 \text{ N/rad}$ ， $C_r=66300 \text{ N/rad}$ ， $T_f=1.57 \text{ m}$ ， $T_r=1.57 \text{ m}$ ，车轮半径 $R=0.38 \text{ m}$ 。

鱼钩测试是在车辆急速转向时测试动态稳定性，具体仿真工况（图5(a)）为：车辆以80 km/h的速度行驶3 s后，前轮转角按图5(a)发生变化，图中转角变化时的斜率 K 分别为 $\pm(720/6.5) (\text{ }^\circ/\text{s})$ ，正反向最大转角为 3.8° ，持续时间分别为0.25 s和3 s。

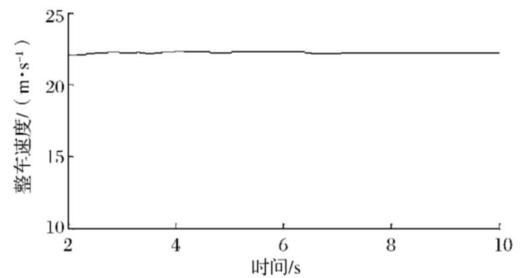
由图5可知，车辆稳定运行时，前轮转角发生变化后，横摆角速度响应较慢，严重滞后于转角变化，车辆状态响应无法跟随驾驶员的输入变化，车辆的实际路径会严重偏离驾驶员期望行驶路径。



(a) 前轮转角
(a) Steer angle



(b) 横摆角速度
(b) Yaw rate

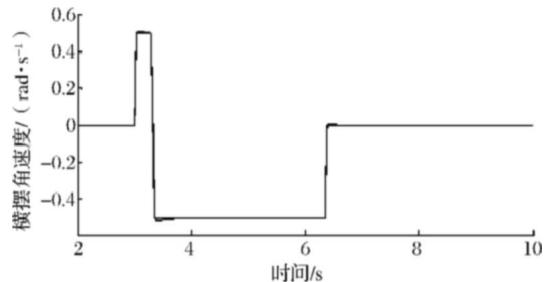


(c) 整车速度
(c) Vehicle speed

图5 不加控制时的仿真结果

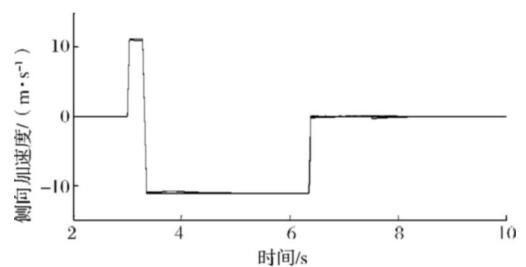
Fig.5 Simulation result without control

对于同样的工况，施加DYC控制后的仿真结果如图6所示。可以看出，在车辆转角发生变化时，DYC控制可使车辆实际横摆角速度及侧向加速度都能准确跟随其理想值。由于各车轮转矩重新分配，内侧车轮和外侧车轮的驱动力和制动力发生改变，车辆的内侧车轮施加了较大的制动力，同时外侧车轮施加了适当的驱动力，从而使车辆更准确地跟随驾驶员的意图行驶。车辆的如此响应说明，本文采用的DYC策略提高了车辆的稳定性。



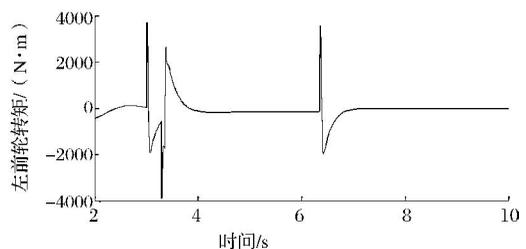
(a) 横摆角速度跟随给定值

(a) yaw rate following the given value



(b) 侧向加速度跟随给定值

(b) lateral acceleration following the given value



(c) 左前轮转矩

(c) Torque of left front wheel

4 结语

级联H桥型多电平变流器具有结构简单、输出谐波含量少等优点,对此拓扑应用载波移相调制策略,可提高等效开关频率,有效地减小输出谐波,很好地解决大功率变流过程中存在的问题,在大功率应用场合前景良好。

参考文献:

[1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:

机械工业出版社,1998.

[2] Lee C K ,Leung J S K ,Hui S Y R ,et al. Circuit-level Comparison of STATCOM Technologies [J]. IEEE Trans. on Power Electronics , 2003, 18(4):1084-1092.

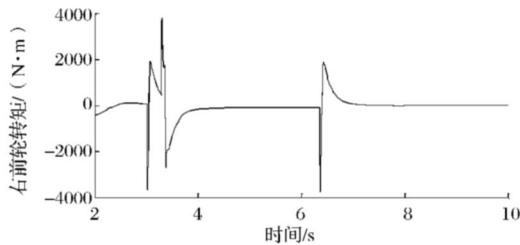
[3] Kim I D , Nho E C ,Kim H G ,et al. A Generalized Undeland Snubber for Flying Capacitor Multilevel Inverter and Converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1290-1296.

[4] 李永东,肖曦,高跃. 大容量多电平变换器[M]. 北京: 科学出版社,2005.

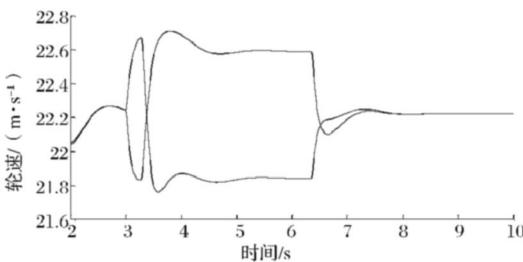
[5] 赵勇,何宝福,余威. 基于增量式PID控制实现高精度跟踪机构设计研究[J]. 战术导弹技术,2009(1): 66-69.



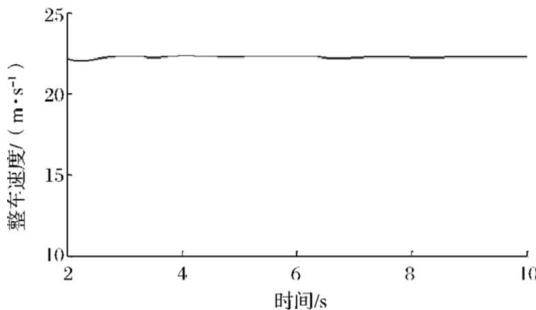
(上接第44页)



(d) 右前轮转矩
(d) Torque of right front wheel



(e) 两前轮差速结果
(e) The differential result of two front wheels



(f) 整车速度
(f) Vehicle speed

图6 施加DYC后的仿真结果
Fig.6 Simulation results with DYC

的特点,以电动汽车整车动力学模型为基础,分析了横摆角速度对于车辆稳定性的影响。针对 r 对车辆稳定性的表征关系研究了基于转矩分配的直接横摆控制策略,采用直接转矩控制实现永磁同步电机的转矩分配,控制过程由上层控制器和下层控制器协调实现。对比仿真结果表明:通过两层控制器动态调整横摆力矩,可有效控制车辆内外轮的转矩分配,使车辆运动跟随驾驶员的期望。

但研究中发现, r 和 β 之间存在耦合,使两个姿态参数控制不能兼顾,这是今后一个亟待研究解决的问题,以便进一步提高车辆的稳定性。

参考文献:

[1] 丁惜瀛,郭庆鼎.基于二阶滑膜的电动汽车感应电动机速度辨识[J]. 沈阳工业大学学报,2011,33(1):20-24.

[2] 孙宜标,王哲,丁惜瀛.基于主从策略的双轮直驱电动汽车转向差速控制[J].大功率变流技术,2010(5):45-48,58.

[3] Massimo C, Lorenzo F, Antonella F. Vehicle Yaw Control via Second-Order Sliding-Mode Technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(11):3908-3916.

[4] 于卓平,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.

[5] 陈士安,邱峰,何仁.2种制造/安装偏差对高速车辆方向稳定性的影响[J].江苏大学学报,2011,32(1):32-37.

[6] Peters S C ,Iagnemma K. Stability measurement of high-speed vehicles [J]. Vehicle System Dynamics ,2009,47(6):701-720.

[7] Farzad Tahami ,Shahrokh Farhanghi. A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles[J]. IEEE Transactions on vehicular technology,2003,52(3):683-687.

[8] Shino Motoki,Miyamoto Naoya,Wang YuQing, et al. Traction control of electric vehicles considering vehicle stability[C]//The 6th International Workshop on Advanced Motion Control. Nagoya. 2000:311-316.

[9] 丁惜瀛.无刷双馈电机牵引双轮驱动电动汽车差速与操纵稳定性控制策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2010:44-46.

5 结语

本文利用四轮驱动电动汽车各车轮转矩分别控制