

独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究

续丹, 王国栋, 曹秉刚, 冯晓辉

(西安交通大学电动汽车与系统控制研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了充分发挥四轮驱动电动汽车转矩独立可控的优势, 提出了一种以提高驱动系统能效为目标的转矩分配策略. 系统能效目标函数中包含了稳定性和经济性 2 个指标, 旨在满足稳定行驶的同时尽量降低车辆的能量消耗. 在横摆力矩、最大附着力和最大驱动力的约束条件下, 对目标函数进行了求解, 并利用 MATLAB 软件进行了仿真分析. 结果表明, 优化分配策略在保证车体稳定行驶的前提下, 能够明显减少驱动系统的能量消耗, 提高车体的系统能效.

关键词: 独立驱动; 转矩分配; 系统能效; 仿真分析

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0042-05

Study on Optimizing Torque Distribution Strategy for Independent 4WD Electric Vehicle

XU Dan, WANG Guodong, CAO Binggang, FENG Xiaohui

(Institute for Electric Vehicle and System Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An optimization method of torque distribution for four wheels controlled independently was proposed to improve the drive system efficiency under the stable conditions. Both electric vehicle (EV) stability and EV fuel economy were considered in the efficiency target index. The solution of the target index was derived under the constraint conditions of sway torque requirement, maximum adhesion, and maximum driving force. The simulation analysis was performed with MATLAB. The simulation results show that the optimized distribution can reduce the energy consumption obviously and increase the system efficiency under the stable conditions.

Keywords: independent drive; torque distribution; system efficiency; simulation analysis

电动汽车由于节能环保而成为新能源汽车研究的热点^[1]. 多轮独立驱动的电动汽车, 其驱动/制动力矩具有独立可控的特点, 在满足整车控制要求下, 通过转矩优化分配策略可进一步改善直接横摆力矩控制(DYC)车体的稳定性和系统效率.

Ono 等^[2-3]以最小化轮胎路面附着利用率来分配各车轮的地面切向力, 为汽车的稳定行驶保留了更多的附着余量, 但此方法在一定程度上削弱了车体的其他动力学性能. 文献[4]分别建立了侧重于稳定性和机动性的 2 种目标函数, 并利用模糊权重函数优化了纵向力分配, 但未考虑优化分配对系统的

影响. 针对以上问题, 本文在综合能耗经济性和行驶稳定性的基础上, 提出了一种最优车体系统能效的转矩分配策略, 并采用 MATLAB 软件进行了仿真.

1 独立驱动电动汽车的驱动系统

汽车整车的驱动系统如图 1 所示. 系统中, 参考模型通过期望转矩 T 和方向盘转角 δ_r 可以计算出汽车的参考状态, 运动控制器根据参考状态中车体的质心侧偏角 β 、横摆角速度 γ 和观测器反馈的 β^* 、 γ^* 可以计算出所需的驱动力矩 T_{rep} 和横摆力矩 T_{yaw} , 转矩分配器利用优化分配方法可将转矩合理

地分配给4个驱动电机控制器,观测器可对汽车的重要参数和路面状态进行实时估计,滑转率控制器根据路面情况可将各车轮的滑转率控制在合理的范围内,以保证汽车的稳定性。

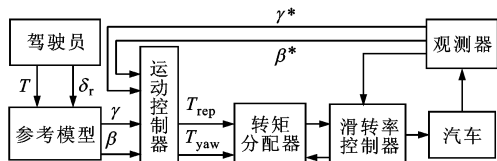


图1 汽车整车的驱动系统

2 系统能效目标函数

2.1 系统能效函数

在保证稳定行驶的基础上,电动汽车仍然存在着节能和提高系统效率的问题。通过转矩分配能够提高驱动电机的运行效率和汽车整车的动力性及经济性,使得轮毂或轮边电机的发热减少,电机寿命延长。

分别利用车体稳定性和经济性^[5]的目标函数,可得到对应的2种转矩分配结果。由于分配策略是非线性的,所以不能简单地将2种分配结果进行权重加和。综合考虑2种分配结果的、能够表征车体在稳定系数 κ 影响下的系统能效为

$$J = \kappa \left[\frac{J_s}{\min J_s} \right]^{-1} + (1 - \kappa) \frac{J_e}{\max J_e} \quad (1)$$

式中: J_s 为稳定性目标函数; $\min J_s$ 为当前车体状态下 J_s 的最优、最小值; J_e 为经济性目标函数; $\max J_e$ 为 J_e 的最优、最大值。

2.2 侧重于稳定性的目标函数

由车轮路面附着载荷来描述车体稳定性的函数为

$$\min J_s = \sum_{i=1}^4 \eta_i^2 = \sum_{i=1}^4 \frac{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}{\mu_i^2 F_{zi}^2} \quad (2)$$

式中: η_i 为车轮的路面附着^[6]利用率; F_{xi} 、 F_{yi} 和 F_{zi} 分别为车轮的纵向力、侧偏力和垂直载荷; μ_i 为车轮的路面峰值附着系数。 F_{zi} ^[7]的计算式为

$$F_{zi} = \frac{M(g l_j - a_x h_g)}{2(l_r + l_f)} + \frac{(-1)^i M h_g l_j a_y}{d_f(l_r + l_f)} \quad (3)$$

式中: M 为整车质量; l_j 为质心到前轴(求前轮载荷时)或后轴(求后轮载荷时)的距离; h_g 为车体质心高度; d_f 为轮距; a_x 、 a_y 分别为车体横、纵向加速度; i 的取值与车轮位置有关,左侧车轮的 $i=1$,右侧车轮的 $i=2$ 。根据HSRI轮胎模型^[8]知,车胎的侧向力

$$F_{yi} \approx \frac{C_i \alpha_i}{C_{r,s}} F_{xi} \quad (4)$$

式中: C_f 、 C_r 、 α_i 和 s 分别为车胎的侧偏刚度、纵向刚度、侧偏角和滑转率。

将式(4)代入 J_s ,并假设 p_i 为常数,可得

$$\min J_s = \sum_{i=1}^4 \frac{p_i F_{xi}^2}{F_{zi}^2} \quad (5)$$

汽车在行驶过程中, J_s 越小,表明相同工况下地面附着利用率越低,即车胎的利用率较低。这样,汽车具有更多的附着余量来应对车体可能出现的稳定性问题,也相当于提高了车胎和汽车的稳定性极限。当纵向力和侧偏力之和使得车胎达到最大附着能力时,车胎的利用率为1,此时车体处于临界失稳状态。

2.3 侧重于经济性的目标函数

图2为轮边电机的效率等效曲线。从图2可以看出:在不同的工作区间,电机的效率差别很大;在低转速和低转矩区,电机效率较低;在1500~2500 r/min的转速区,不同转矩下的电机效率相差较大,处于低效率和高效率间的过渡区。如果车体的总需求转矩较小,则平均分配到每个车轮上的转矩就越小,此时驱动系统的总体效率较低;如果仅由2个车轮来承担需求转矩,则分配到每个车轮的转矩是平均分配时的2倍,此时驱动系统的总体效率提高。所以,汽车在行驶过程中,实时地根据需求转矩对4个轮毂或轮边电机的转矩进行合理的分配,可以提高驱动系统的总体效率^[5],降低整车的能耗。

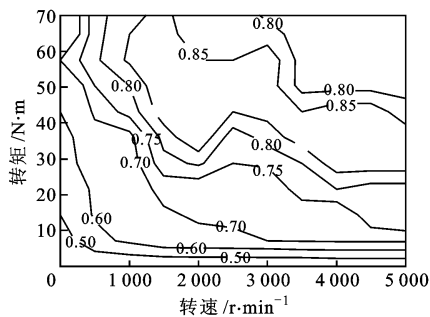


图2 轮边电机的效率等效曲线

汽车燃料的经济性函数 J_e (系统的能源利用率 η_d)为

$$J_e = \eta_d = \frac{T_{rep} n}{\left[\frac{T_{fl}}{\eta(T_{fl}, n)} + \frac{T_{fr}}{\eta(T_{fr}, n)} + \frac{T_{rl}}{\eta(T_{rl}, n)} + \frac{T_{rr}}{\eta(T_{rr}, n)} \right] n} = \left[\frac{k_{fl}}{\eta(\kappa_{fl} T_{rep}, n)} + \frac{k_{fr}}{\eta(\kappa_{fr} T_{rep}, n)} + \frac{k_{rl}}{\eta(\kappa_{rl} T_{rep}, n)} + \frac{k_{rr}}{\eta(\kappa_{rr} T_{rep}, n)} \right]^{-1} \quad (6)$$

式中: T_{rep} 为需求转矩; n 为电机实时转速; T_{fl} 、 T_{fr} 、 T_{rl} 、 T_{rr} 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮的电机驱动转矩; k 为车轮实际转矩与期望转矩的比值; $\eta(\cdot)$ 为电机效率. 因此, 根据汽车行驶的实际速度和转矩需求, 按照 J_e 的最高目标, 可以确定转矩分配系数, 使得驱动系统的经济性最大.

2.4 系统能效的目标函数

系统能效函数将稳定性和经济性有机地相结合, 并考虑了分配结果对驱动系统的影响, 其在保证汽车稳定行驶的同时, 力求能耗最小. 实验证明, 当汽车的质心侧偏角很大时, 方向盘输入的转向角对汽车的横摆力矩和侧向力的影响很有限, 也就是说, 汽车会出现失控^[9], 因此本文将质心侧偏角作为影响汽车稳定性的重要参数. 车体的纵向速度 v_x 与其运动稳定后的质心侧偏角上限 β_0 ^[8] 的关系为

$$\beta_0 = 10^\circ - 7^\circ \left| \frac{v_x}{40} \right|^2 \tag{7}$$

本文中, $|\beta/\beta_0|$ 将作为模糊权重函数的输入, 车体稳定系数 $\kappa(\beta)$ 将作为函数的输出. 当 β 较小时, 车体稳定性较好, 相应的 $\kappa(\beta)$ 较小, 此时增加经济性分配的权重可以提高车体的运行效率; 当 β 较大时, 车体稳定性较差, 增大 $\kappa(\beta)$ 的权重可以提高车体的稳定裕度. 相应的推理规则为: 如果 $|\beta/\beta_0|$ 为 f_ξ^m , 则 $\kappa(\beta)$ 为 f_ξ^n , $\xi=1, 2, 3, 4, 5$. $|\beta/\beta_0|$ 和 $\kappa(\beta)$ 的隶属度函数如图 3 和图 4 所示.

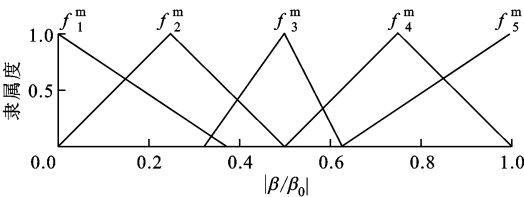


图 3 $|\beta/\beta_0|$ 的隶属度函数

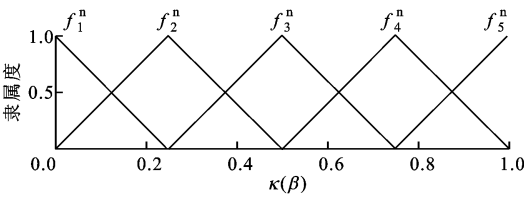


图 4 $\kappa(\beta)$ 的隶属度函数

由于独立驱动电动汽车的转矩分配必须满足期望的纵向力需求、直接横摆力矩需求、车胎地面最大附着力和电机的最大驱动能力的要求, 所以以提高系统能效为目标转矩分配策略可抽象为以下的优化问题.

目标函数: $\max J$

设计变量: $T_{\text{fl}}, T_{\text{fr}}, T_{\text{rl}}, T_{\text{rr}}$

约束条件:

$$T_{\text{fl}} + T_{\text{fr}} + T_{\text{rl}} + T_{\text{rr}} = T_{\text{rep}} \tag{8}$$

$$(F_{\text{fl}} - F_{\text{fr}})d_f + (F_{\text{rl}} - F_{\text{rr}})d_r = T_{\text{yaw}} \tag{9}$$

$$|F_i| \leq \min\left(\mu_i F_{z_i}, \left| \frac{2T_{\text{max}}\epsilon}{b} \right| \right) \tag{10}$$

$$\left(\frac{F_{x\text{fl}}^2 + F_{y\text{fl}}^2}{(\mu_{\text{fl}} F_{z\text{fl}})^2} \right)^2 + \left(\frac{F_{x\text{fr}}^2 + F_{y\text{fr}}^2}{(\mu_{\text{fr}} F_{z\text{fr}})^2} \right)^2 \geq \left(\frac{F_{x\text{rl}}^2 + F_{y\text{rl}}^2}{(\mu_{\text{rl}} F_{z\text{rl}})^2} \right)^2 + \left(\frac{F_{x\text{rr}}^2 + F_{y\text{rr}}^2}{(\mu_{\text{rr}} F_{z\text{rr}})^2} \right)^2 \tag{11}$$

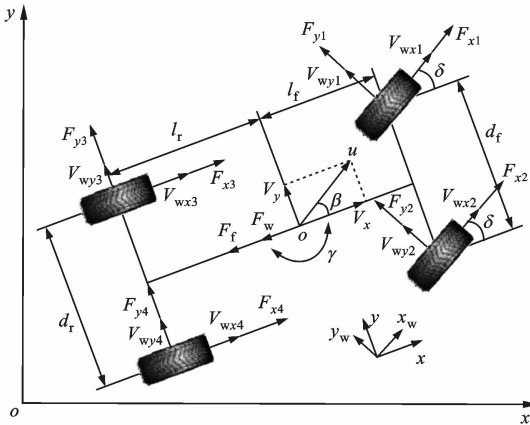
式中: $F_i = 2T_i \epsilon / b$ 为单个车轮转矩对地面的作用力; T_{yaw} 为车体需求横摆力矩; ϵ 为车体的主减速比; b 为轮胎直径.

式(8)、式(9)表示汽车行驶时需要满足的驱动力矩和横摆力矩; 式(10)表示电动轮提供的驱动力在路面极限附着力和电机最大驱动力的范围内; 式(11)表示分配给前轮的转矩大于或等于分配给后轮的转矩.

3 仿真分析

3.1 汽车动力学模型

车体 7 自由度模型如图 5 所示. 汽车坐标系的原点 o 与汽车质心重合. 根据达朗伯原理得到的车体动力学方程如下.



δ : 前轮转角; I_z : 车体绕 z 轴的转动惯量;

F_f : 车体滚动阻力; F_w : 风阻

图 5 车体 7 自由度模型

车体纵向运动时

$$Ma_x = \sum_{i=1,2} (F_{x_i} \cos\delta - F_{y_i} \sin\delta) + \sum_{i=3,4} F_{x_i} - F_f - F_w \tag{12}$$

车体横向运动时

$$Ma_y = \sum_{i=1,2} (F_{xi} \sin\delta + F_{yi} \cos\delta) + \sum_{i=3,4} F_{yi} \quad (13)$$

车体绕 z 轴旋转时

$$I_z \dot{\gamma} = l_f \sum_{i=1,2} (F_{xi} \sin\delta + F_{yi} \cos\delta) -$$
$$l_r \sum_{i=3,4} F_{yi} - \frac{d_f}{2} (F_{x1} - F_{x2}) \cos\delta +$$
$$\frac{d_f}{2} (F_{y1} - F_{y2}) \sin\delta - \frac{d_r}{2} (F_{x3} - F_{x4}) \quad (14)$$

利用 MATLAB 软件对优化分配策略进行了仿真验证. 仿真所用汽车的原型为三门峡速达电动汽车 SDEV,其基本参数如表 1 所示.

表 1 速达电动汽车的基本参数

M/kg	ϵ	轴距 /m	前轮距 /m	后轮距 /m	迎风面 积/ m^2	车轮直 径/m	质心高 度/m
1 310	4	2.5	1.5	1.495	2.68	0.634	0.6

3.2 仿真实验

仿真 1 J1015 循环工况如图 6 所示. 本文按图 6 进行仿真分析,同时考察了优化分配策略在循环工况下的经济性. 图 7 为 2 种分配策略下驱动系统的效率对比. 在整个循环工况中,采用平均分配策略时驱动系统的平均效率为 77.53%,采用优化分配策略时驱动系统的平均效率为 81.45%,可见优化分配的平均效率提高了 3.9%. 将循环划分为低速、中速、高速 3 个阶段,相应的经济性分析数据如表 2 所示. 从表 2 可以看出,随着电机转速和转矩的提高,电机的工作效率不断提高,单位能耗(即行驶 1 m 的能耗)不断降低,该结果与前述的电机效率分析结果相符. 在中速阶段,采用优化分配策略,驱动系统的单位能耗减小了 5.6%;在低速和高速阶段,能耗分别减小了 2.9%和 4.6%. 这是因为:在中速阶段(电机转速在1 500 r/min左右),电机工作点处于低效率和高效率间的过渡区,此时采用优化分配策略,驱动系统效率将有一个较大跨度的提高,节能效果较为明显;在低速阶段,电机效率普遍较低,采用优化分配后的节能效果不太明显;在高速阶段,由于电机工作点处于高效率区,此时采用优化分配策略的节能效果较之中速阶段略低. 图 8 为 2 种分配策略下整车的功率消耗对比. 从图 8 可以看出:相同工况下,利用优化分配策略可以降低汽车的能耗功率;平均分配策略下汽车的一次 J1015 工况循环的能耗为 2 826 kJ,优化分配策略下能耗为 2 690 kJ,采用优化分配策略后能耗降低了 4.8%.

仿真 2 考察汽车的稳态响应和基本操纵性能,同

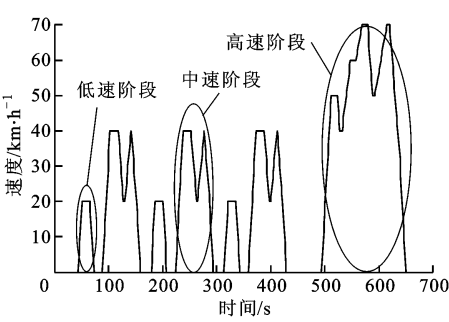


图 6 J1015 循环工况

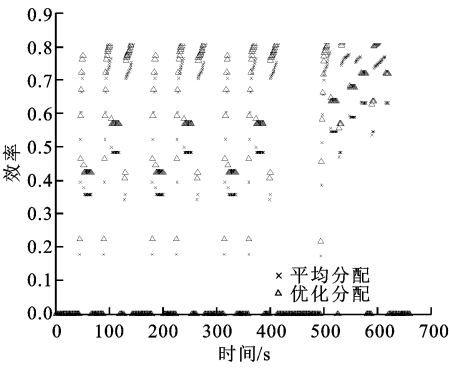


图 7 2 种分配策略下驱动系统的效率对比

表 2 3 种循环阶段分配策略的经济性比较

循环阶段	分配策略	里程 /m	能耗 /kJ	单位能耗 /kJ·m ⁻¹
低速	平均分配	122	89.8	0.736
	优化分配	122	87.2	0.715
中速	平均分配	541	379.1	0.701
	优化分配	541	357.6	0.662
高速	平均分配	2 173	1 419.3	0.653
	优化分配	2 173	1 353.4	0.623

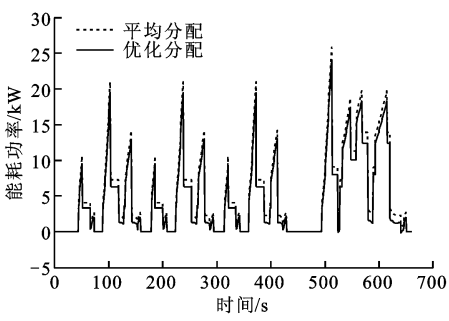


图 8 2 种分配策略下整车的能耗功率对比

时假设道路为干燥的水泥路面,4 个车轮的路面附着系数 $\mu=0.8$,汽车速度为 40 km/h,前轮转向角为 9°. 图 9 为采用优化分配策略时车轮的转矩分配

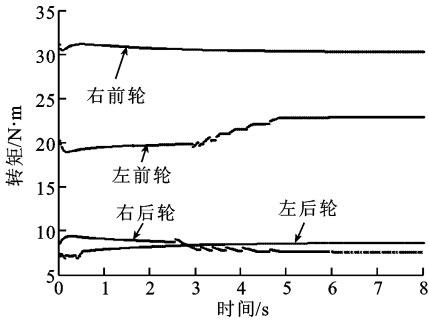


图 9 优化分配策略下车轮的转矩分配结果

结果. 从图 9 可以看出, 转矩不大时, 前轮承担的转矩占总转矩的 80% 左右, 符合前述经济性分配的分析结果; 从图 9 还可以看出, 车体的右侧车轮分配到的力矩比左侧车轮的大, 这是因为在左转向时, 采用优化分配策略可以对车体附加一定的横摆力矩, 从而减小了转向时的阻力, 减少了转向过程中的能耗.

图 10 为采用优化分配、稳定性分配(以侧重稳定性为目标)、平均分配等策略时汽车的行驶轨迹. 从图 10 可以看出: 采用优化分配策略和直接横摆力矩控制可以使得转向半径最小, 相同时间内行驶里程增加, 即等效于增加了系统的经济性; 采用稳定性分配策略的转向半径比平均分配策略的略小, 表明采用该策略加大了车胎的利用率, 使得汽车路径接近于理想路径^[10]. 图 11 为 3 种策略下整车的能耗功率对比. 从图 11 可以看出, 在转向前期(转向前 2 s), 实际车体状态与稳定的理想状态差别较大, 采用稳定性分配策略的分配结果波动性较大. 前期中稳定系数较小, 为了保证车体稳定行驶, 能效函数中稳定性分配的权重较大, 此时采用优化分配策略, 驱动系统的能耗大于平均分配策略, 因为平均分配策略未考虑车体的稳定性. 2 s 后, 车体进入基本稳定状态, 其稳定性增强, 能效函数中经济性分配的权重增大, 能耗降低. 3 种策略在 8 s 后的能耗分别为 66.8 kJ、69.4 kJ 和 71.8 kJ. 可见: 采用稳定性分配策略虽然增加了汽车行驶的稳定裕度, 但能耗比较大, 也就是说, 汽车稳定行驶时采用稳定性分配策略会浪费能源; 采用优化分配策略时系统能耗总体上较低, 较之平均分配策略降低了 3.7%, 较之稳定性分配策略降低 6.9%. 当稳定系数较小时, 优化分配策略侧重于提高车体的稳定性, 而在稳定性较好时会加大经济性分配的权重, 以使驱动系统的能耗、经济性达到最优. 在整个转向过程中, 采用优化分配策略, 不仅保证了车体的稳定性, 而且使得燃料的经济性得到了进一步的提高.

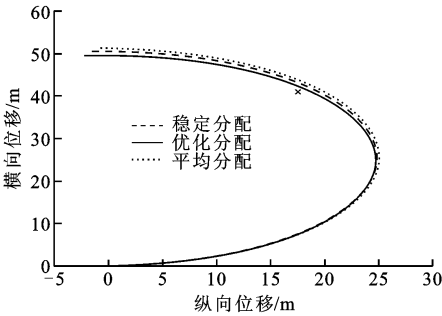


图 10 3 种策略下汽车的行驶轨迹

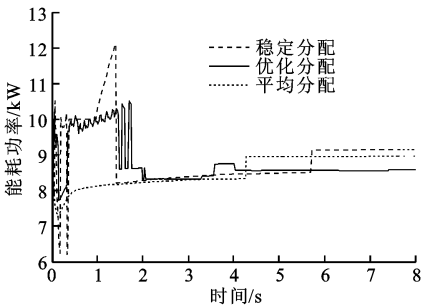


图 11 3 种策略下整车的能耗功率对比

4 结 论

- (1) 本文在综合考虑稳定性和经济性的基础上, 提出了利用系统能效函数来优化分配独立驱动电动汽车转矩的方法, 其可在保证汽车稳定行驶的同时, 最大程度地提高驱动系统的能源效率.
- (2) 在横摆力矩需求、最大附着力和最大驱动力的约束条件下, 对优化目标函数进行了求解和仿真. 结果表明, 采用优化分配策略可使车体的稳定性和燃料的经济性均有所提高, 车体的综合能效达到最佳.

参考文献:

[1] 曹秉刚, 张传伟, 白志峰, 等. 电动汽车技术进展和发展趋势 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(1): 1-5.
CAO Binggang, ZHANG Chuanwei, BAI Zhifeng, et al. Technology progress and trends of electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(1): 1-5.

[2] ONO E, HATTORI Y. Vehicle dynamics integrated control for four-wheel-distributed steering and four-wheel-distributed traction/braking system [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2): 139-151.

[3] MOKHIAMAR O, ABE M. How the four wheels should share forces in an optimum cooperative chassis control [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(3): 295-304.

[4] 邹广才, 罗禹贡, 李国强. 四轮独立电驱动车辆全轮纵

向力优化分配方法 [J]. 清华大学学报, 2009, 49(5): 111-115.

ZOU Guangcai, LUO Yugong, LI Keqiang. Tire longitudinal forces optimization distribution for independent 4WD EV [J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(5): 111-115.

[5] 余卓平, 张立军, 熊璐. 四驱电动车经济性改善的最优转矩分配控制 [J]. 同济大学学报, 2005, 33(10): 1354-1357.

YU Zhuoping, ZHANG Lijun, XIONG Lu. Optimized torque distribution control to achieve higher fuel economy of 4WD electric vehicle with four in-wheel motors [J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(10): 1354-1357.

[6] HATTORI Y, KOIBUCHI K, YOKOYAMA T. Force and moment control with nonlinear optimum distribution for vehicle dynamics [C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Hiroshima, Japan: Japan Society of Mechanical Engineers, 2002: 595-600.

[7] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 99-101.

[8] KIECKKE U, NIELSEN L. Automotive control systems [M]. Washington DC, USA: SAE, 2000: 322.

[9] 张缓缓. 采用电动轮驱动的电动汽车转矩协调控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.

[10] 余卓平, 姜炜, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车转矩分配控制 [J]. 同济大学学报, 2008, 36(8): 1115-1119.

YU Zhuoping, JIANG Wei, ZHANG Lijun. Torque distribution control for four wheel in-wheel-motor electric vehicle [J]. Journal of Tongji University, 2008, 36(8): 1115-1119.

(编辑 苗凌)