

DOI: 10.7652/xjtuxb201505007

考虑侧向稳定性的分布式电驱动车 制动滑移率控制

袁希文, 文桂林, 周兵

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 410082, 长沙)

摘要: 针对分布式电驱动车在复杂路面紧急制动时引起车轮突然滑转或抱死而导致的车辆失去转向能力甚至甩尾的问题,提出了一种考虑车辆侧向稳定性的电液复合制动滑移率控制策略。滑移率控制采用了滑模极值搜索算法,基于分层结构,即上层为期望制动力矩计算模块,中层为考虑执行器带宽的动态控制分配模块,下层为电液复合执行器,同时还考虑了位置和速率约束且应用主动前轮转向(AFS)系统补偿侧向稳定性。基于 MATLAB/Simulink 建立了 7 自由度整车模型,在分离路面典型制动工况下对控制算法进行了验证。结果表明:所提控制策略可以有效减小制动距离,保证车辆侧向稳定性;滑移率控制器可以自适应于路面附着系数的变化。

关键词: 电动汽车;电液复合制动;极值搜索算法;侧向稳定性;滑移率控制

中图分类号: U463.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)05-0043-06

Wheel Slip Control in Distributed Electric Drive Vehicles with Lateral Stability Improvement

YUAN Xiwen, WEN Guilin, ZHOU Bing

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

Abstract: As imminent braking, distributed electric drive vehicles on complex roads often encounter slipping or locking leading to the loss of steering ability or rear sway. A new wheel slip control strategy with lateral stability improvement for electro-hydraulic hybrid braking system was proposed. The wheel slip controller was designed by sliding mode extremum-seeking algorithm with a hierarchical control structure. In the upper layer, the desired braking torque was carried out, and a dynamic control allocator considering different actuators dynamics was employed to determine the optimal split between electric and friction brake torque in the middle layer. In the lower layer, a hybrid actuator system consisting hydraulic brake and the electrical brake was designed based on actuator position and rate constraints. The active front steering (AFS) system was set up to compensate the vehicle lateral stability. The simulation in MATLAB/Simulink environment for split- μ straight-line braking of a 7-DoFs vehicle model shows that the proposed strategy enables to significantly reduce braking distance with vehicle lateral stability, and the wheel slip controller adapts to variable road adhesion coefficient.

收稿日期: 2014-09-21。 作者简介: 袁希文(1985—),男,博士生;文桂林(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(11225212);国家自然科学基金资助项目(51275162);吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金资助项目(20121109)。

网络出版时间: 2015-02-27 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150227.0845.004.html>

Keywords: electric vehicle; electro-hydraulic hybrid braking; extremum-seeking algorithm; lateral stability; wheel slip control

新能源汽车的发展对汽车制动系统提出了新的要求。传统产品化的电子稳定程序(ESP)控制利用防抱死制动系统(ABS)和驱动防滑控制系统(ASR)作为下层来控制车轮的滑移率。现有的分布式电驱动汽车制动力矩分配控制未能结合 ABS 和 ASR^[1],而制动过程中制动力矩分配直接影响着汽车侧向稳定性,车轮突然滑转或抱死会引起轮胎与路面间的侧向附着降低,严重时可导致车辆失去转向能力甚至甩尾。目前,针对制动安全性研究多通过对制动动力学和 ECE R13-H 制动法规的分析,从理论上确定电液复合再生制动的安全运行范围,这在一定程度上限制了制动能量回收^[2]。此外,国内外针对均一附着路面的滑移率控制进行了较多的研究,但对复杂路面的研究较少^[3]。

对分布式电动驱动汽车而言,受限电机本身特性和电池荷电状态(SoC),纯电机制动无法满足一些强制制动工况的需求,一般需要采用电液复合制动的方式^[4]。如何对电机与液压扭矩进行协调,实现电动车的 ABS 功能是目前电动车 ABS 系统研究的核心,现有的研究主要集中于电液力矩的开环规划,采用的是静态分配方法,然而由于二者执行器动力学特性存在差异,致使实际响应力矩的复合效果与期望值之间有偏差^[5]。因此,如何在考虑执行器带宽条件下进行电液扭矩动态控制分配是需要关注的。

鉴于此,本文提出了一种考虑侧向稳定性的电液复合制动滑移率控制策略,其通过主动前轮转向(AFS)系统来补偿制动过程中车辆的侧向稳定性,再利用滑模极值搜算法设计滑移率控制器。电液扭矩协调控制采用动态控制分配法^[6],通过增加执行机构速率的惩罚来扩展一般的二次规划控制分配算法,这样算法具有频率依赖性特性,同时考虑了执行机构带宽的问题。最后,在分离路面复杂制动工况下对控制策略进行了仿真验证。

1 车辆动力学模型

1.1 整车模型

图1为面向控制器验证用的7自由度车辆模型。

7自由度包含整车纵向、侧向、横摆3个自由度和车轮旋转4个自由度。整车纵向、横摆、侧向动力学方程表达式如下

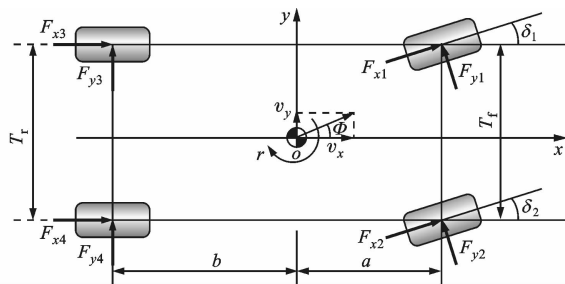


图1 7自由度车辆模型

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{v}_y - rv_x) &= -F_{y1} \sin \delta_1 - F_{y2} \sin \delta_2 + F_{x1} \cos \delta_1 + \\ &\quad F_{x2} \cos \delta_2 + F_{x3} + F_{x4} \\ m(\dot{v}_x + rv_y) &= F_{y1} \cos \delta_1 + F_{y2} \cos \delta_2 + F_{x1} \sin \delta_1 + \\ &\quad F_{x2} \sin \delta_2 + F_{y3} + F_{y4} \\ I_{zz} \dot{r} &= a(F_{x1} \sin \delta_1 + F_{x2} \sin \delta_2 + F_{y1} \cos \delta_1 + \\ &\quad F_{y2} \cos \delta_2) - b(F_{y3} + F_{y4}) + T_f(F_{y1} \sin \delta_1 - \\ &\quad F_{y2} \sin \delta_2 - F_{x1} \cos \delta_1 + F_{x2} \cos \delta_2) / 2 - \\ &\quad T_r(F_{x3} - F_{x4}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m 为整车质量; v_x 为纵向速度; v_y 为侧向速度; r 为横摆角速度; I_{zz} 为整车绕 z 轴的转动惯量; F_{xi} 、 F_{yi} 分别为轮胎纵向力和侧向力, $i=1,2,3,4$ 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮; a 、 b 分别为前轴、后轴至质心的距离; T_f 、 T_r 分别为前轮、后轮轮距; δ_1 、 δ_2 分别为左、右前轮转角。

1.2 模型验证

车轮模型采用魔术公式轮胎模型,同时利用ADAMS/Car和Carsim软件对本文车辆模型进行了验证,设初始车速为75 km/h,方向盘1 s内转到75°,图2为模型验证结果。由此可见,所建模型与商业软件计算结果误差在10%以内,证明了该模型是有效的。

2 控制策略

控制策略采用内、外环结构。外环采用鲁棒性较好的滑模控制来设计AFS控制器,内环滑移率控制器采用滑模极值搜索算法,控制结构为分层结构,如图3所示。

2.1 AFS控制器

滑模控制器基于以下线性2自由度模型设计

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{E}\delta_{st} \quad (2)$$

式中

$$\mathbf{x} = [v_y \quad r]^T$$

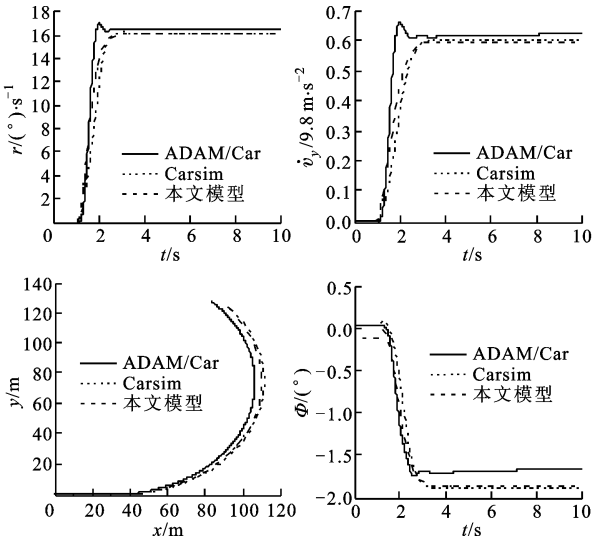


图 2 本文车辆模型验证结果

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-(C_{f0} + C_{r0})}{mv_x} & \frac{bC_{r0} - aC_{f0} - v_x}{mv_x} \\ \frac{bC_{r0} - aC_{f0}}{v_x I_{zz}} & \frac{-(a^2 C_{f0} + b^2 C_{r0})}{v_x I_{zz}} \end{bmatrix}$$
$$E = \begin{bmatrix} \frac{C_{f0}}{m} \\ \frac{aC_{f0}}{I_{zz}} \end{bmatrix}$$

其中 C_{f0} 、 C_{r0} 为前、后轴轮胎等效侧偏刚度； δ_{st} 为驾驶员输入的前轮转角。

令 $\dot{x} = [\dot{v}_y \quad \dot{r}]^T = 0$ ，可以求得稳态横摆角速度，取考虑路面附着极限约束的稳态横摆角速度为理想横摆角速度

$$r_d = \max \left\{ \frac{1}{1 - [m(aC_{f0} - bC_{r0})v_x^2 / (C_{f0}C_{r0}L^2)]} \cdot \frac{v_x}{L} \delta_{st}, \mu(g/v_x) \right\} \tag{3}$$

式中： $L=a+b$ ； μ 为路面摩擦系数。

选择切换函数

$$S = r - r_d + \lambda \int_0^t (r - r_d) d\tau \tag{4}$$

式中： λ 为正加权系数。

令 $\dot{S}=0$ ，得到等效控制律

$$u_{eq} = (1/e_2)[-a_{21}v_y - a_{22}r + \dot{r}_d - \lambda(r - r_d)] \tag{5}$$

式中： a_{21} 、 a_{22} 和 e_2 分别为矩阵 A 、 E 的元素。

为了使系统存在扰动和参数不确定性时仍能保证滑模条件，修改控制律后得

$$u_{law} = u_{eq} - K_r \text{sgn}(S) \tag{6}$$

式中： sgn 为符号函数； K_r 为增益，是控制器的设计参数。

为了进一步消除控制输入的高频抖振，可用饱和函数替代符号函数 $\text{sgn}(S)$ ，即

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| > 1 \\ x, & |x| \leq 1 \end{cases} \tag{7}$$

因此，最终滑模控制律为

$$\delta_i = u_{eq} - K_r \text{sat}(S/\psi) \tag{8}$$

式中： ψ 为边界层厚度参数，本文取 0.05。

上述控制律得到的是前轮总输入转角，因此前轮附加转角为

$$\delta_c = \delta_i - \delta_{st} \tag{9}$$

2.2 滑移率控制器(WSC)

2.2.1 滑模极值搜索算法 该算法通过不断搜寻轮胎纵向力-滑移率曲线的极值点，自适应于路面附着系数变化，且不依赖于参考滑移率，结构原理如图 4 所示。其中，切换变量 $\xi(t) = y(t) - \rho t$ ，它迫使 $y(t)$ 随着 ρt 不断增大或者减小， $y(t)$ 最终追踪到极值。滑模极值搜索算法拥有一系列的滑模面，采用

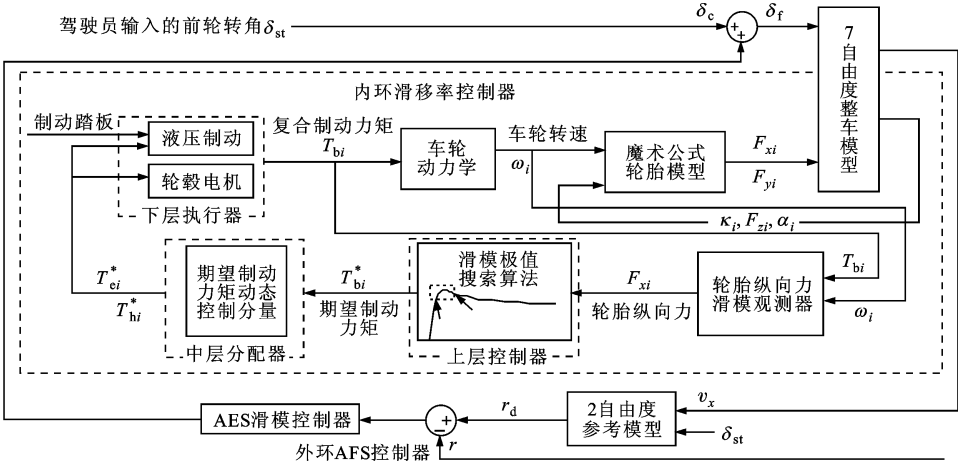


图 3 控制策略框图

为了比较动态控制分配效果,采用链式递増法实现静态控制分配^[9],即

$$T_{ei}^* = \text{sat}_{[\underline{T}_{ei}, \overline{T}_{ei}]}(T_{bi}^*)$$
$$T_{hi}^* = \text{sat}_{[\underline{T}_{hi}, \overline{T}_{hi}]}(T_{bi}^* - T_{ei}^*)$$

(23)

图 5 为静态与动态制动力矩分配频域响应。可以看出,在高频阶段,执行带宽电机制动权重更大。

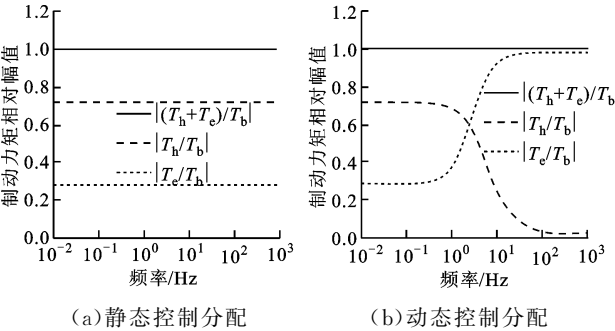


图 5 制动力矩分配频域响应

3 数值仿真与验证

参考 GB/T 13954—2003^[10]和文献[4],在分离路面的紧急制动(此时滑移率控制器处于激活状态)工况下验证了所提控制策略。工况:初始车速 25 m/s;路面摩擦系数左侧 0.8、右侧 0.4。

作为比较,进行了其他 3 种未考虑 AFS 补偿的控制策略计算,其中:后轮低选控制表示后轮高附着—侧制动力与低附着—侧相同;滑模极值搜索与门限值控制均为四通道独立控制,逻辑门限控制时参考滑移率为 0.2。表 1 为车辆与执行器参数。

图 6 为横摆角速度比较。可以看出:考虑 AFS 的 WSC 使横摆角速度接近理想值 0,较好地补偿了由于左、右制动力不均产生的干扰力矩;未考虑 AFS 补偿的 WSC 控制策略均无法跟踪理想值,后轮低选控制由于两后轮制动力相同,产生的干扰横摆力矩减小,因此横摆角速度相对较小。图 7 为车辆行驶轨迹变化曲线。可以看出:考虑 AFS 补偿的 WSC 最大侧向偏移为 0.8 m,纵向位移为 58.6 m;未考虑 AFS 补偿的 WSC 控制均出现了较大制动跑偏,其中逻辑门限值控制跑偏的侧向距离最大,为 5.2 m;滑模极值搜索算法跑偏的侧向距离为 5.1 m,纵向距离为 62.5 m,小于逻辑门限值控制的 69.6 m;后轮低选控制最大侧向距离为 4.08 m 且小于滑模极值搜索的 5.1 m,而纵向制动距离为 67.6 m 且大于滑模极值搜索的 62.5 m。此外,由于 AFS 的调节作用,所以考虑 AFS 补偿的 WSC 控制与未考虑 AFS 补偿的 WSC 控制所产生的侧向距

离方向相反。

表 1 车辆与执行器参数

m/kg	2 002
$I_{\omega}, I_{zz}/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	2.5, 5 525
a/m	1.1
b/m	1.8
R/m	0.313
$\omega_n/r\cdot\text{min}^{-1}$	750
$C_{f0}, C_{r0}/\text{kN}\cdot\text{rad}^{-1}$	108, 118
$T_{ei,n}, T_{hi,max}/\text{N}\cdot\text{m}$	385, 3 000
$\tau_e, \tau_h/\text{ms}$	1.5, 16
$\dot{T}_{e,max}, \dot{T}_{h,max}/\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	35, 18
k_v	1
$v_0/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	5

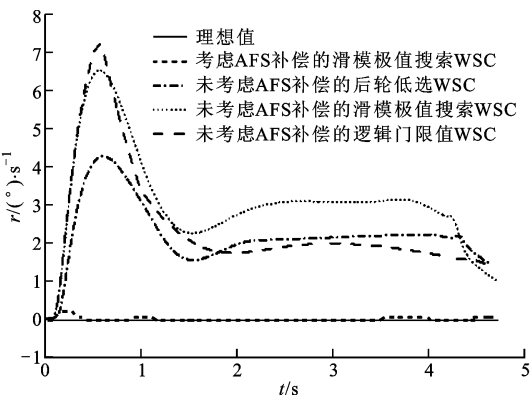


图 6 横摆角速度比较

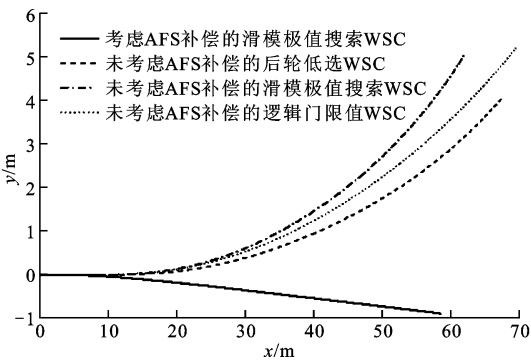


图 7 车辆行驶轨迹变化曲线

图 8 为考虑 AFS 补偿的 WSC 产生的归一化轮胎纵向力。可以看出,左侧轮胎纵向力在 0.8 s 左右稳定,右侧在 0.4 s 左右稳定,说明基于滑模极值搜索算法的 WSC 可以自适应于路面附着系数的变化,快速搜索到轮胎最大制动力。前轴左、右轮归一化轮胎纵向力在 0.2~0.3 s 时有所减小,这是由于 AFS 控制产生了一定的附加转角,由此造成轮胎纵向力减小。

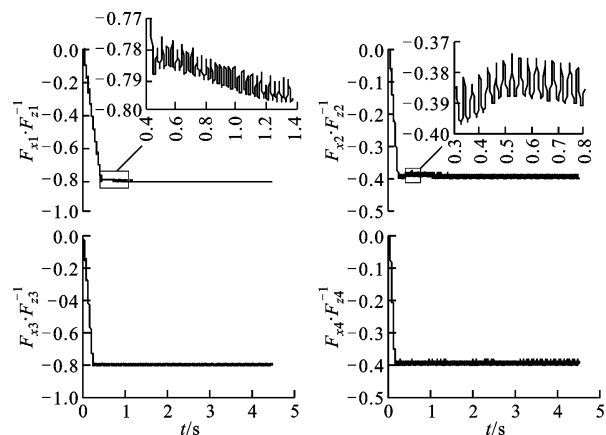


图8 归一化轮胎纵向力

图9为考虑AFS补偿的WSC产生的轮胎滑移率变化。可以看出,0.25 s左右控制器搜索到了最优滑移率并保持稳定,说明滑模极值搜索算法可以自动搜索到最优滑移率,且右侧低附路面最优滑移率偏小,符合路面附着系数越小最优滑移率也就越小的趋势。

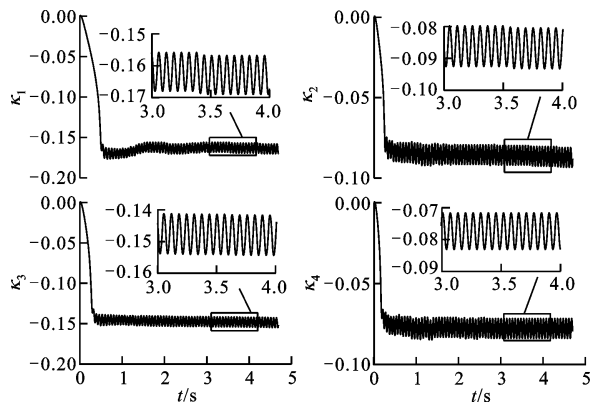
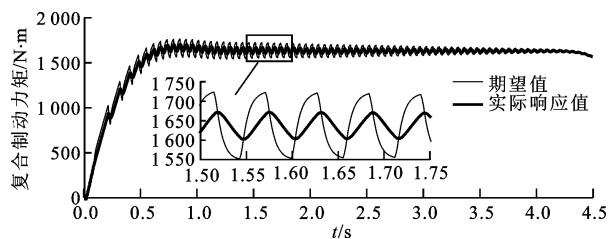


图9 轮胎滑移率变化

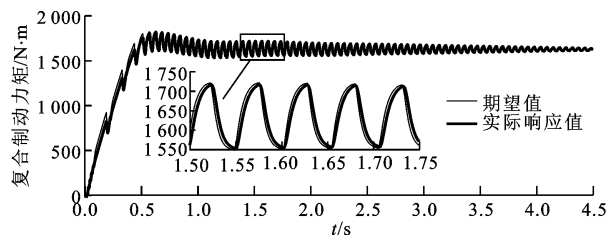
图10为左前轮电液复合制动实际响应力矩跟踪期望值的效果。可以看出,动态控制分配能较好地跟踪期望值,而静态控制分配则无法跟踪期望值。

图11为电机与液压制动力矩变化曲线。可以看出,0.06 s内仅有电机制动,当制动力矩达到饱和后,液压制动开始工作。随着车速的降低,当电机转速低于电机基速时,电机制动力矩开始减小,直至为0,而液压制动力矩逐渐增大,其中电机系统的响应时间常数远小于液压系统,使得电机制动波动较大。右后轮的制动波动更明显,这是由于制动时后轴载荷前移和右侧附着系数低,右后轮期望的总制动力矩较小,最终由电机制动提供的力矩比较小,不再受约束条件限制所致。此外,制动力矩出现波动也是由于控制律中sign函数高频切换的缘故,通过减小参数 M 可以减小波动幅值,但是 M 过小会导致制动力矩

达到极值点的响应时间延长,因此 M 应合理选择。



(a) 动态控制分配



(b) 静态控制分配

图10 制动力矩控制分配跟踪效果

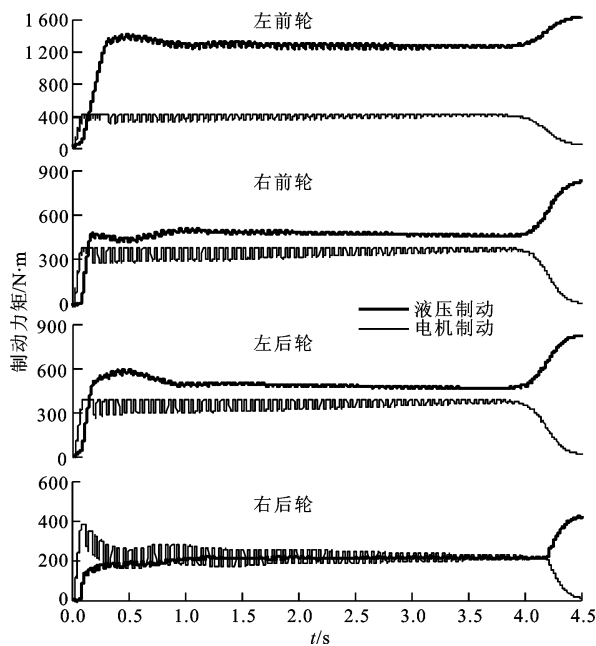


图11 电机与液压制动力矩变化曲线

4 结论

针对分布式电驱动汽车在分离路面紧急制动时可能引起的车轮抱死而导致车辆失去转向能力甚至甩尾的问题,提出了一种考虑侧向稳定性的电液复合制动滑移率控制策略。通过仿真验证得出了以下结论。

(1)分离路面直线制动时,所提控制策略产生的横摆角速度接近0,侧向偏移仅为0.8 m,纵向位移为58.6 m,可保证制动效能和制动方向稳定性,使

(下转第121页)