

电动汽车再生摩擦集成制动系统 ABS 控制性能研究*

张 露^{1,2} 王国业¹ 张延立³ 张忠富¹ 赵建柱¹ 刘晓秋³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070;
3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 提出电动汽车再生摩擦集成制动系统,建立了集成制动系统动力学模型和仿真系统;针对小型电动乘用车,分别在高附着路面直行、低附着路面直行、高附着弯道行驶3种典型工况下,对集成制动系统进行ABS性能仿真试验研究。研究中,以各轮制动转矩、滑移率和质心纵向加速度表征ABS控制性能参数,以纵向位移和质心侧偏角表征车辆行驶稳定性参数,以制动能回收率表征车辆能量回馈性能参数。研究结果表明,电动汽车再生摩擦集成制动系统具有较高制动性能、良好的ABS控制性能及较好的前后轮制动力分配性能,同时显著提高了制动能回收率。

关键词: 电动汽车 再生制动 ABS性能

中图分类号: U469.72; U463.52⁺⁶ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0350-07

ABS Control Performance of Integrated Brake System with Regenerative Friction Brake in Electric Vehicle

Zhang Lu^{1,2} Wang Guoye¹ Zhang Yanli³ Zhang Zhongfu¹ Zhao Jianzhu¹ Liu Xiaoqiu³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Huhhot 010070, China
3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: An integrated brake system was put forward, and the dynamic model of the integrated brake system was found to set up its simulation model in computer. Based on the simulation model of the integrated brake system, simulation tests were made under three conditions of high and low adhesions with straight movement and curve movement for the ABS control performances of the integrated brake system in the small electric passenger car. The ABS control performance was described by longitudinal slip of each wheel, the brake torque of each wheel and the longitudinal acceleration of mass center. The driving stability of vehicle was described by longitudinal displacement and slip angle of mass center. The brake energy recovery performance was described by electric power consumption per kilometer. By analyzing the variables characterizing the performances of ABS control, driving stability and brake energy recovery, the research results showed that the integrated brake system with regenerative friction brake in electric vehicle was provided with good braking efficiency, favorable ABS control performance and preferable braking force distribution from front to rear wheels, as well as remarkably improved brake energy recovery rate. Depending on the above results, the suitable advices will be put forward and adopted, which would be helpful for the rapid development of the electric vehicle technology.

Key words: Electric vehicle Regenerative braking ABS performance

引言

汽车保有量的增长使其能源消耗不断增加,发

展汽车节能技术显得越来越重要和迫切,在各种汽车节能技术中,再生制动技术一直以来受到高度关注,应用前景广阔,已有丰富的研究成果和应

收稿日期: 2014-11-21 修回日期: 2014-12-29

* 国家自然科学基金资助项目(51175498)

作者简介: 张露,博士生,内蒙古大学讲师,主要从事车辆系统动力学、汽车电子控制及智能化技术研究, E-mail: happyzhanglu@126.com

用^[1-10]。张俊智等^[7]提出的制动能量回馈技术是在气动制动系统中串联回馈制动控制阀实现能量回馈,同时在需要 ABS 时启用原气动摩擦制动系统。Peng 等^[9]将复合控制策略应用于电动汽车,从而协调传统液压制动系统和再生制动系统。综上,汽车制动能量回馈普遍采用再生制动和摩擦制动两套独立的并联系统来实现,不仅结构复杂,而且存在能量回收率不高,制动性能难以保证,实现 ABS 控制技术尚不成熟等问题^[6-10]。

本文提出在电动汽车轮毂电动机再生制动的同时通过反馈部件促动摩擦制动的集成制动系统,建立集成系统动力学模型和仿真系统;针对小型乘用车,将动力系统改为四轮轮毂电动机的纯电动系统,分别通过仿真对高附着路面直行、低附着路面直行、弯道行驶 3 种典型工况下集成制动系统进行 ABS 性能仿真试验分析,验证所建集成制动系统的可行性和合理性。

1 再生摩擦制动集成制动系统

构建的电动汽车再生摩擦集成制动系统如图 1 所示,由制动能量回馈机构和促动摩擦制动机构组成,实现再生制动促动摩擦制动的系统集成。通过制动能量回馈机构实现再生制动,通过促动摩擦制动机构实现摩擦制动。

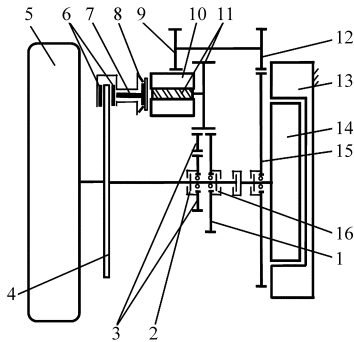


图 1 再生摩擦制动集成制动系统的结构图
Fig. 1 Schematic drawing of integrated brake system with regenerative friction brake

1. 一级反馈主动齿轮 2. 倒车反馈齿轮电磁离合器 3. 倒车制动反馈齿轮组 4. 制动盘 5. 车轮 6. 制动块 7. 制动推进柱 8. 膜片弹簧 9. 二级反馈从动齿轮 10. 二级反馈主动齿轮和促动推进螺母 11. 一级反馈从动齿轮和促动推进螺杆 12. 三级反馈主动齿轮 13. 电动机定子 14. 电动机转子 15. 三级反馈从动齿轮 16. 一级反馈主动齿轮电磁离合器

制动能量回馈机构将车轮动能回馈至轮毂电动机,轮毂电动机作为发电机产生再生制动,传递路线为:车轮、车轴、一级反馈主动齿轮,一级反馈主动齿轮电磁离合器(前行制动时结合,倒车制动时分离),倒车制动反馈齿轮组和倒车反馈齿轮电磁离合器(前行制动时分离,倒车制动时结合),一级反

馈从动齿轮和促动推进螺杆(同时为促动摩擦制动机构组成部件),二级反馈主动齿轮和促动推进螺母(同时为促动摩擦制动机构组成部件),三级反馈主动齿轮,三级反馈从动齿轮,电动机转子,电动机定子。

促动摩擦制动机构在再生制动的同时一级反馈从动齿轮和促动推进螺杆由车轮转动驱动其转动,其转动一方面经二级反馈从动齿轮反馈至电动机产生再生制动,另一方面推动二级反馈主动齿轮和促动推进螺母轴向移动,并依次推动膜片弹簧、制动推进柱、制动块,压紧制动盘进行摩擦制动,实现通过再生制动促动摩擦制动。

推进螺母的轴向推进力由作用在推进螺母圆周上的电动机再生制动转矩决定;推进力依次推动推进柱、制动块产生制动盘压紧力;因此,制动器摩擦制动力由轮毂电动机再生制动力决定,电动机再生制动力由 ABS 控制器通过电动机控制器控制,因此,摩擦制动力和再生制动力的合力构成的整个车轮制动力由 ABS 控制器根据踏板位置和车辆运动参数控制。

2 车辆制动动力学模型

2.1 车身制动动力学模型

为反映车辆 ABS 控制性能,建立 3 自由度平面运动车身制动动力学模型和仿真模型^[11]。

车身动力学模型为

$$\begin{cases} F_x = m(\dot{u} - v\omega_z) \\ F_y = m(\dot{v} + u\omega_z) \\ M_z = I_z\dot{\omega}_z \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_x 、 F_y ——车辆质心所受纵向和侧向合力, N
 M_z ——车辆横摆合力矩, N·m
 u 、 v ——车辆质心纵向和侧向速度, m/s
 ω_z ——车辆横摆角速度, rad/s
 m ——整车质量, kg
 I_z ——整车转动惯量, kg·m²

2.2 车轮动力学模型

车轮轮胎动力学分析如图 2 所示。

车轮力矩平衡式为

$$I_{\omega i}\dot{\omega}_i = -F_{xi}R - T_{\mu i} - T_{bi} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

式中 $I_{\omega i}$ ——车轮转动惯量, kg·m²
 ω_i ——车轮转动角速度, rad/s
 F_{xi} ——地面对各轮胎纵向作用力, N
 R ——车轮滚动半径, m
 T_{bi} ——各车轮制动器制动力矩, N·m
 $T_{\mu i}$ ——各车轮再生制动力矩, N·m

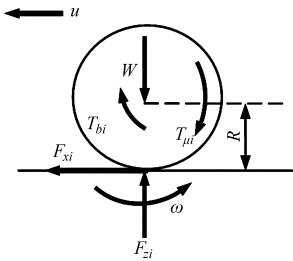


图 2 车轮受力分析

Fig. 2 Force analysis of wheel

轮胎模型采用郭孔辉院士提出的统一轮胎模型(UniTire)。极限工况下的纵滑与侧滑联合统一轮胎模型为

$$\left\{\begin{aligned} S_{xi} &= \frac{s_i}{1-s_i} & S_{yi} &= \frac{\tan\alpha_i}{1-s_i} \\ \varphi_{xi} &= \frac{K_x S_{xi}}{\mu_i F_{zi}} & \varphi_{yi} &= \frac{K_y S_{yi}}{\mu_i F_{zi}} \\ \varphi_i &= \sqrt{\varphi_{xi}^2 + \varphi_{yi}^2} \quad (i=1,2,3,4) \\ \bar{F}_i &= 1 - \exp\left(-\varphi_i - E\varphi_i^2 - \left(E + \frac{1}{12}\right)\varphi_i^3\right) \\ \bar{F}_{xi} &= \frac{\varphi_{xi}}{\varphi_i} \bar{F}_i & \bar{F}_{yi} &= \frac{\varphi_{yi}}{\varphi_i} \bar{F}_i \\ F_{xi} &= \bar{F}_{xi} \mu_i F_{zi} & F_{yi} &= \bar{F}_{yi} \mu_i F_{zi} \end{aligned}\right. \quad (3)$$

式中 S_{xi} ——车轮纵向滑移率
 S_{yi} ——车轮侧向滑移率
 φ_{xi} ——相对纵滑率 φ_{yi} ——相对侧滑率
 φ_i ——相对总滑移率
 $\bar{F}_i$ ——无量纲总切力
 $\bar{F}_{xi}$ ——无量纲纵向力
 $\bar{F}_{yi}$ ——无量纲侧向力
 s_i ——车轮滑移率 E ——曲率系数
 μ_i ——轮胎与地面的摩擦因数(认为纵向和侧向摩擦因数相同,且忽略滑移速度对摩擦因数的影响)
 K_x ——轮胎纵向刚度, N/m
 K_y ——轮胎侧向刚度, N/m
 F_{zi} ——车轮垂向载荷, N
 F_{xi} ——轮胎纵向力, N
 F_{yi} ——轮胎侧向力, N

2.3 制动系统动力学模型

2.3.1 制动能反馈机构传动模型

从电动机输出的扭矩经三级、二级和一级主从动反馈齿轮,传递到制动轮,其运动方程为

$$T_{bi} = i_{e-w} \eta_{e-w} T_{ei} \quad (4)$$

式中 i_{e-w} ——电动机到车轮的传动比
 η_{e-w} ——电动机到车轮的传动效率
 T_{ei} ——电动机力矩

2.3.2 促动摩擦制动机构的力学分析

在集成制动系统中,通过采用非自锁螺旋传动机构在再生制动的同时实现反馈促动摩擦制动,动力学模型如图 3 所示,螺母为二级反馈主动齿轮和促动推进螺母,螺杆为一级反馈从动齿轮和促动推进螺杆,非自锁螺旋传动保证解除制动时促动摩擦制动机构及时回位,有利于提高制动系统的实时性和实现 ABS 控制。

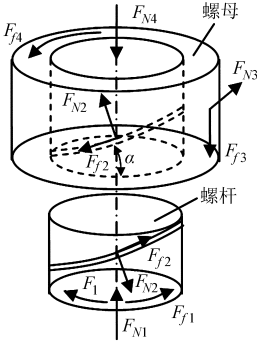


图 3 反馈能分流非自锁螺旋传动机构

Fig. 3 Screw driving mechanism without self-lock for feedback energy bypassing

反馈能分流非自锁螺旋传动机构如图 3 所示,非锁止螺旋传动机构动力学方程式为

$$\left\{\begin{aligned} F_{fi} &= f_i F_{Ni} \quad (i=1,2,3,4) \\ F_1 R_1 &= F_{f1} R_1 + F_{f2} R_2 \cos\alpha + F_{N2} R_2 \sin\alpha \\ F_{N1} + F_{f2} \sin\alpha &= F_{N2} \cos\alpha \\ F_{N4} + F_{f3} + F_{f2} \sin\alpha &= F_{N2} \cos\alpha \\ F_{f2} R_2 \cos\alpha + F_{N2} R_2 \sin\alpha &= F_{f4} R_4 + F_{N3} R_3 \end{aligned}\right. \quad (5)$$

式中 F_{N1} 、 F_{N2} 、 F_{N3} ——推进螺杆端面、螺纹接触面、推进螺母与二级反馈从动齿轮啮合的法向力, N
 f_1 f_2 f_3 ——对应上述 3 个摩擦副的摩擦因数
 F_{N4} ——推进螺母作用在制动块上的压紧力, N
 f_4 ——推进螺母端面摩擦因数
 α ——螺纹导程角
 F_1 ——一级反馈从动齿轮圆周切向力, N
 F_{f1} 、 F_{f2} 、 F_{f3} 、 F_{f4} ——螺杆端面摩擦力、螺纹面摩擦力、推进螺母轴向齿面摩擦力和推进螺母端面摩擦力, N
 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ——推进螺杆端面轴承摩擦半径、螺纹啮合作用半径、反馈从动齿轮啮合半径、反馈从动齿轮端面轴承摩擦半径, m

由于机构相对车轮转动惯量很小,可以忽略,将动力方程简化为静力方程。

制动盘上摩擦制动力矩为

$$T_{\mu i}=\mu F_{N4i}R_C \tag{6}$$

式中 μ ——制动盘摩擦因数
 R_C ——制动盘制动半径

3 ABS 控制策略

ABS 控制策略采用模糊控制^[12]。其中,模糊逻辑系统输入是滑移率跟踪误差 Δs 和等效滑移率变化率 $\dot{s}_{eq}$ 为

$$\dot{s}_{eq}=\frac{d(s-s_0)}{dt} \tag{7}$$
$$\Delta s=s-s_0 \tag{8}$$

式中 s ——车轮实际滑移率
 s_0 ——车轮目标滑移率
模糊论域的划分和隶属函数的设计如图 4 所示。

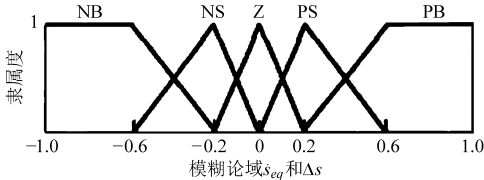


图 4 $\dot{s}_{eq}$ 和 Δs 隶属函数

Fig. 4 Membership function of $\dot{s}_{eq}$ and Δs

模糊语言值“负大”表示为 NB,“负小”表示为 NS,“适中”表示为 Z,“正小”表示为 PS,“正大”表示为 PB。经研究,根据 ABS 系统的特点、控制规律和系统输入量建立了 25 条模糊控制规则,如表 1 所示。

表 1 控制规则
Tab.1 Control rule

等效滑移率 变化率 $\dot{s}_{eq}$	滑移率跟踪误差 Δs				
	PB	PS	Z	NS	NB
PB	NB	NB	NB	NS	Z
PS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
NS	NB	Z	PS	PB	PB
NB	Z	PS	PB	PB	PB

4 制动能回收率

GB/T 18386—2005《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法》,以每公里耗电量来计算能量消耗率。本文旨在研究 ABS 发挥能效的工况下,电动汽车再生摩擦集成制动系统在一次制动过程中的制动能回收率,计算公式为

$$N_r=\frac{\int_0^t(T_e\omega_e-P_{Cu}-P_{Fe}-P_{inv}-P_{bat})d_t}{E_v+E_j} \tag{9}$$

式中 N_r ——制动能回收率
 T_e ——电动机转矩 ω_e ——电动机转速
 P_{Cu} ——电动机铜耗 P_{Fe} ——铁耗
 P_{inv} ——逆变器损耗
 P_{bat} ——电池充电损耗
 $E_v、E_j$ ——整车平动动能和转动动能

5 集成制动系统 ABS 控制性能分析

根据车辆及集成制动系统动力学模型和 ABS 控制策略对 ABS 控制性能进行仿真分析,以小型电动乘用车(奇瑞 A3)参数作为车辆系统参数,将动力系统改为纯电动系统,两前轮分别采用 30 kW 轮毂电动机,两后轮分别采用 13.6 kW 轮毂电动机,额定功率与原车相同。

分别对高附着路面直行、低附着路面直行、弯道行驶 3 种工况下集成制动系统 ABS 性能进行仿真分析。

图 5a、6a、7a 为车辆在 3 种工况下的各轮 ABS 控制性能曲线,图 5b、6b、7b 为整车制动性能曲线。

仿真分析中,以各轮制动转矩 $T_{ff}、T_{fr}、T_{rf}、T_{rr}$ 和滑移率 $s_{ff}、s_{fr}、s_{rf}、s_{rr}$ 以及质心纵向加速度 a_x 表征 ABS 控制性能;以纵向位移 Y 和质心侧偏角 B_i 表征车辆稳定性;以制动能回收率 N_r 表征本系统的能量回馈性能。

5.1 车辆在高附着路面直行 ABS 性能

车辆在高附着路面直行时的车轮制动性能和 ABS 控制性能如图 5a 所示,设置车辆制动初速度 $v_0=120\text{ km/h}$,轮胎地面附着系数为 0.8。图中可见,在 ABS 起作用时,左、右前轮电动机制动转矩在 $90\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动,左、右后轮电动机制动转矩在 $18\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动,整车制动力矩大约为 $200\text{ N}\cdot\text{m}$,对应整车最大制动力约为 657.89 N ,其制动时间约为 5 s ;四轮滑移率均在 0.2 附近较小范围内波动,控制效果良好;前、后车轮 ABS 起作用时间基本一致,具有较好的前、后轮制动力分配性能。

车辆在高附着路面直行时整车制动性能如图 5b 所示,质心侧向位移和侧偏角接近于零,整车具有较好的制动稳定性;制动减速度小于 1.5 m/s^2 时,制动能回收率平均为 97.8%;制动减速度在 $1.5\sim3.1\text{ m/s}^2$ 时,制动能回收率在 40%~97.8%;ABS 起作用时,平均制动减速度约为 7.88 m/s^2 ,制动能回收率约为 21%;由于车辆一般制动减速度小

于 $3\text{ m/s}^{2[10]}$, 可见, 电动汽车再生摩擦集成制动系统, 不仅具有较高的制动能回收率, 同时具有较高制动效能, 保证了制动安全性。制动时车辆质心在地面坐标系中的 Y 向位移为零, 且质心侧偏角为零。

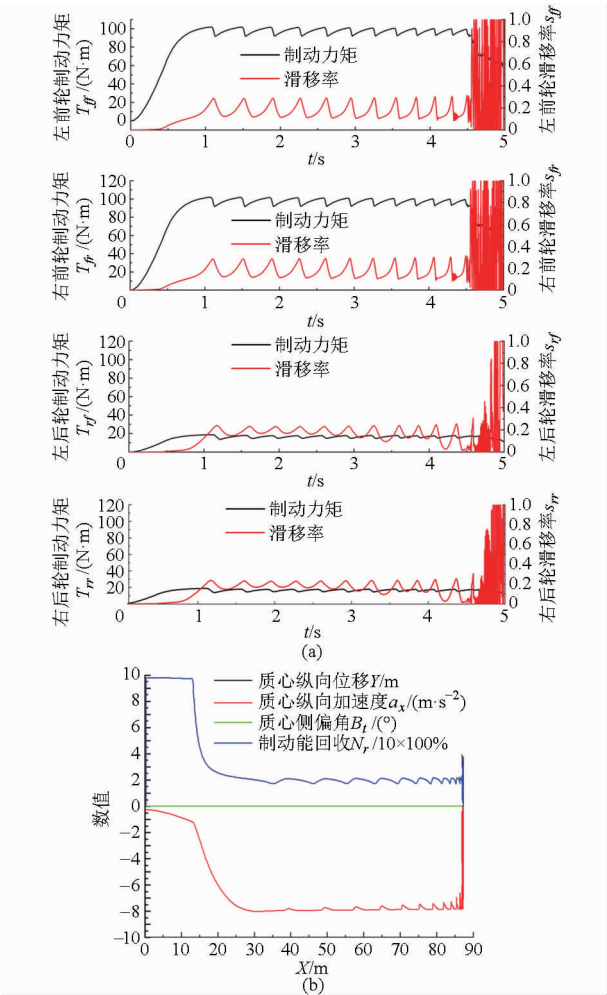


图5 车辆在高附着路面直行时的制动性能
Fig.5 Brake performance of vehicle driving straightly on high adhesion road surface
(a) 各轮 ABS 控制性能 (b) 整车制动性能

5.2 车辆在低附着路面直行 ABS 性能

车辆在低附着路面直行时制动性能如图 6a 所示。设置车辆制动初速度 $v_0 = 40\text{ km/h}$, 轮胎地面附着系数为 0.2。图中可见, 在 ABS 起作用时, 左、右前轮电动机制动转矩在 $43\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动, 左、右后轮电动机制动转矩在 $11\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动, 整车制动力矩大约为 $108\text{ N}\cdot\text{m}$, 对应整车最大制动力约为 355 N , 其制动时间约为 6 s ; 四轮滑移率均在 0.2 范围内波动, 控制效果良好。

车辆在低附着路面直行时整车制动性能如图 6b 所示。质心侧向位移和侧偏角接近于零, 整车具有较好的制动稳定性; 制动减速度小于 0.3 m/s^2 时, 制动能回收率平均为 97%; 制动减速度在 $0.3 \sim 1.6\text{ m/s}^2$ 时, 制动能回收率在 50% ~ 97%; ABS 起作用时, 平

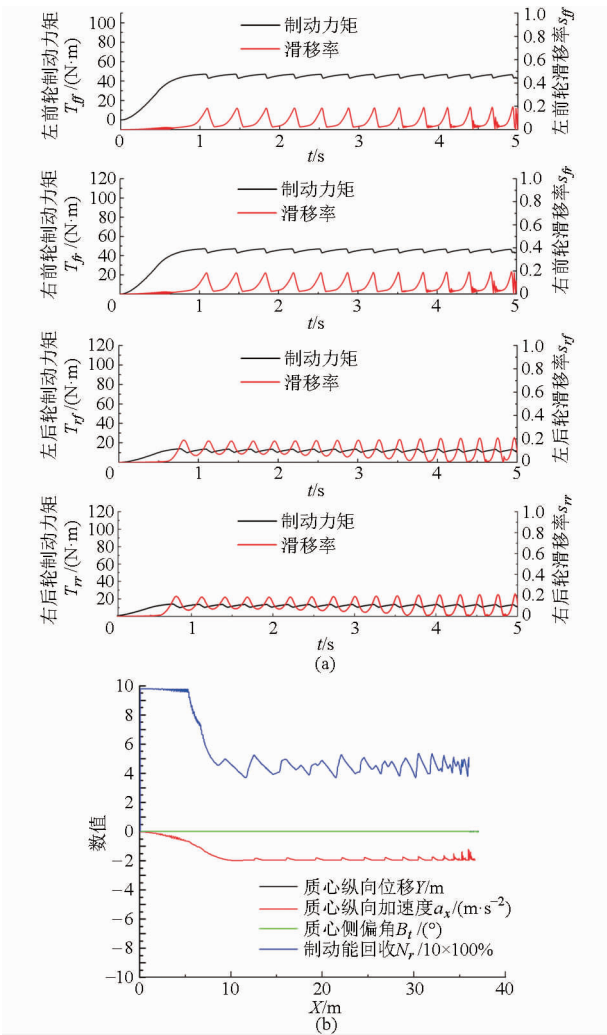


图6 车辆在低附着路面直行时的制动性能
Fig.6 Brake performance of vehicle driving straightly on low adhesion road surface
(a) 各轮 ABS 控制性能 (b) 整车制动性能

均制动减速度约为 1.93 m/s^2 , 制动能回收率约为 44%。因此, 车辆在低附着路面直行时, ABS 起作用时的制动强度较小, 制动能回收率较高附着路面直行时高, 同时到达对应附着条件的最高制动效能。

5.3 车辆弯道行驶 ABS 性能

车辆弯道行驶车轮制动性能如图 7a 所示。设置车辆制动初速度 $v_0 = 120\text{ km/h}$, 轮胎地面附着系数为 0.8, 前轮转向角为 2° 。图中可见, 在 ABS 起作用时, 左、右前轮电动机制动转矩分别在 97 、 $99\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动, 左、右后轮电动机制动转矩分别在 13.8 、 $16.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 附近较小范围内波动, 外侧车轮较内侧车轮制动转矩大, 整车制动力矩大约为 $226.4\text{ N}\cdot\text{m}$, 对应整车最大制动力约为 744.74 N , 其制动时间约为 4.5 s ; 四轮滑移率均在 0.2 附近范围内波动, 车轮滑移率内侧车轮较外侧、前轮较后轮控制效果好, 与常规制动系统性能一致。

车辆弯道行驶整车制动性能如图 7b 所示, 质心

轨迹接近中性转向时的轨迹,侧偏角在 $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 范围内,整车具有较好的弯道制动稳定性;制动减速度小于 1.27 m/s^2 时,制动能回收率平均为 97.6% ;制动减速度在 $1.27 \sim 3.1 \text{ m/s}^2$ 时,制动能回收率在 $40\% \sim 97.6\%$;ABS 起作用时,平均制动减速度约为 7.8 m/s^2 ,制动能回收率约为 19.8% 。

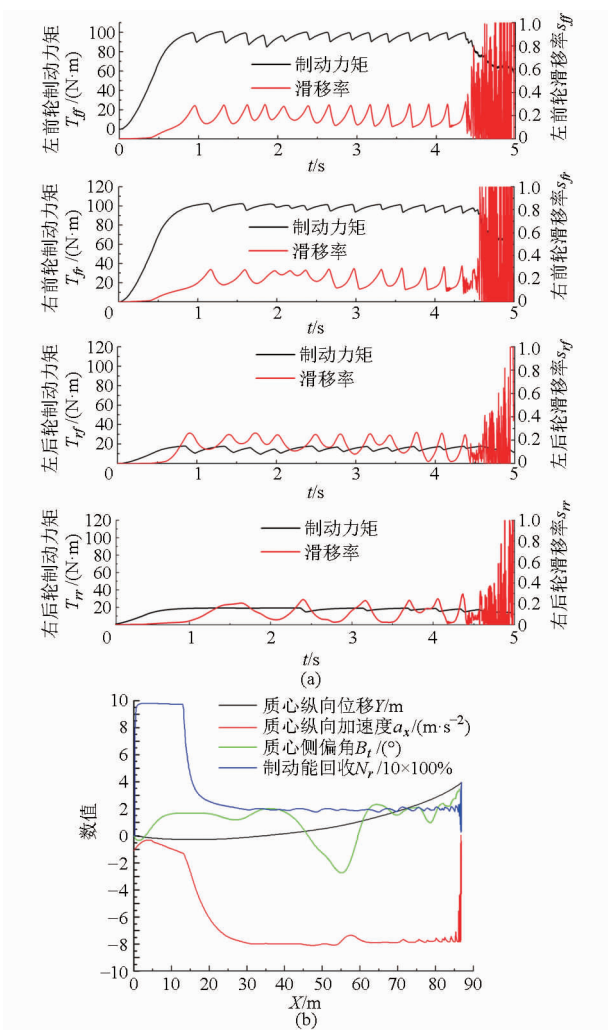


图 7 车辆在高附着路面弯道行驶时的制动性能

Fig. 7 Brake performance of vehicle driving on high adhesion road surface

(a) 各轮 ABS 控制性能 (b) 整车制动性能

上述分析可知,在高附着路面直行制动时,四轮滑移率控制效果良好,具有较好的前、后轮制动力分配性能,质心侧向位移和侧偏角接近于零,整车具有较好的制动稳定性和较高的制动能回收率;在低附着路面直行制动时,四轮滑移率控制效果良好,质心侧向位移和侧偏角接近于零,整车具有较好的制动稳定性,制动能回收率较高附着路面直行时高,同时到达对应附着条件的最高制动效能;在弯道行驶制动时,外侧车轮较内侧车轮制动转矩大,车轮滑移率内侧车轮较外侧、前轮较后轮控制效果好,与常规制动系统性能一致,质心轨迹接近中性转向轨迹,侧偏角在 $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 范围内,整车具有较好的弯道制动稳定性。

在 3 种典型制动工况下,电动汽车再生摩擦集成制动系统,由于轮毂电动机再生制动力可连续控制的特性和集成制动系统特性,均具有良好的 ABS 控制性能,同时具有较高的制动能量回收率和良好的制动稳定性。

6 结论

(1) 在高附着路面直行制动时,滑移率控制效果良好,具有较好的前、后轮制动力分配性能,整车具有较好的制动稳定性和较高的制动能回收率。

(2) 在低附着路面直行制动时,滑移率控制效果良好,整车具有较好的制动稳定性,制动能回收率较高附着路面直行时高,同时到达对应附着条件的最高制动效能。

(3) 在弯道行驶制动时,外侧车轮较内侧车轮制动转矩大,车轮滑移率内侧车轮较外侧、前轮较后轮控制效果好,与常规制动系统性能一致,整车具有较好的弯道制动稳定性。

(4) 电动汽车再生摩擦集成制动系统 ABS 控制性能良好,并具有较高的制动能回收率、制动效能和良好的制动稳定性。

参 考 文 献

1 Gao Yimin, Chen Liping, Mehrdad Ehsani. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[C]. SAE Paper 1999-01-2901,1999.

2 Gao Yimin, Mehrdad Ehsani. Electronic braking system of EV and HEV—integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS[C]. SAE Paper 2001-01-2478,2001.

3 Michael Panagiotidis, George Delagrammatikas. Development and use of a regenerative braking model for a parallel hybrid electric vehicle[C]. SAE Paper 2000-01-0995,2000.

4 赵峰,罗禹贡,李克强,等. 基于动态协调控制的 ISG 型混合动力电动汽车牵引力控制方法[J]. 汽车工程, 2011, 33(6):463-468.

Zhao Feng, Luo Yugong, Li Keqiang, et al. Traction control scheme for ISG hybrid electric vehicle based on dynamic coordinated control[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(6):463-468. (in Chinese)

5 李舒欣,曹秉刚,白志峰,等. 电动汽车再生制动的模糊 PI 控制实验研究[J]. 电子技术,2006,27(1):52-54.

Li Shuxin, Cao Binggang, Bai Zhifeng, et al. The experiment research on fuzzy-PI control for regenerative braking of an electric

- vehicle[J]. Electrical Engineering, 2006, 27(1):52-54. (in Chinese)
- 6 秦大同, 谭强俊, 杨阳, 等. 混合动力汽车再生制动控制策略与仿真分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(3):220-225.
Qin Datong, Tan Qiangjun, Yang Yang, et al. Simulation on regenerative braking control strategy for hybrid electric vehicle with CVT[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(3):220-225. (in Chinese)
- 7 张俊智, 薛俊亮, 陆欣, 等. 混合动力城市客车串联式制动能量回馈技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6):102-106.
Zhang Junzhi, Xue Junliang, Lu Xin, et al. Series regenerative braking technique for hybrid electric buses[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6):102-106. (in Chinese)
- 8 陈庆樟, 何仁, 商高高. 基于 ABS 的汽车能量再生制动集成控制研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(4):301-304.
Chen Qingzhang, He Ren, Shang Gaogao. A research on integrated control of vehicle regenerative braking based on ABS[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(4):301-304. (in Chinese)
- 9 Peng D, Zhang Y, Yin C L, et al. Combined control of a regenerative braking and anti-lock braking system for hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(6):749-757.
- 10 Zhang J L, Yin C L, Zhang J W. Improvement of drivability and fuel economy with a hybrid antiskid braking system in hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2):205-213.
- 11 王国业, 张彦如, 章娟丽, 等. 基于非平稳约束试验系统的汽车附着极限稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8):1-6.
Wang Guoye, Zhang Yanru, Zhang Juanli, et al. Research for vehicle ESP control performances beyond the extreme adhesion conditions on the unsteady constraint dynamics test system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):1-6. (in Chinese)
- 12 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车 ABS 模糊自适应控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11):242-247.
Wang Guoye, Liu Zhaodu, Hu Renxi, et al. Fuzzy logic direct adaptive control of ABS-equipped vehicles based on equivalent slip differential of tire[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11):242-247. (in Chinese)
- 13 王国业, 刘昭度, 王仁广, 等. 汽车 ABS 在对开路面上的弯道制动性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(4):318-321.
Wang Guoye, Liu Zhaodu, Wang Renguang, et al. Performances of ABS-equipped vehicle during cornering braking on bisectonal roads[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(4):318-321. (in Chinese)
- 14 Wang Guoye, Liu Zhaodu, Ma Yuefeng, et al. EBD control methods of ABS-equipped vehicles during cornering braking[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Natural Sciences, 2007(1):34-37.
- 15 仇斌, 陈全世, 张开斌. 北京市区电动轻型客车制动能量回收潜力[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):88-91.
Qiu Bin, Chen Quanshi, Zhang Kaibin. Effectiveness of regenerative braking for electric car in Beijing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12):88-91. (in Chinese)
- 16 尹安东, 赵韩, 张炳力. 微型电动乘用车制动能量回收及控制策略的研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2008, 31(11):1760-1766.
Yin Andong, Zhao Han, Zhang Bingli. Study on regenerative braking and control strategy for electric vehicles [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(11):1760-1766. (in Chinese)

(上接第 342 页)

- 17 熊蕊, 刘向东. 含 PID 控制器的迟滞非线性控制系统的主共振及奇异性[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8):72-77.
Xiong Rui, Liu Xiangdong. Principal resonance and singularity of a hysteretic nonlinear control system with a PID controller [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(8):72-77. (in Chinese)
- 18 汪少华. 半主动空气悬架混杂系统的多模式切换控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
Wang Shaohua. Research on multi-mode switching control of semi-active air suspension hybrid system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 19 张明君, 张化光. 基于遗传算法优化的神经网络 PID 控制器[J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35(1):91-96.
Zhang Mingjun, Zhang Huaguang. Neural network PID controller optimized by GA [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(1):91-96. (in Chinese)
- 20 吴志成, 陈思忠, 杨林, 等. 基于有理函数的路面不平度时域模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(9):795-798.
Wu Zhicheng, Chen Sizhong, Yang Lin, et al. Model of road roughness in time domain based on rational function [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(9):795-798. (in Chinese)