

基于轮毂电机的电动汽车再生制动研究

徐进^{1,2}, 顾苏菁², 郑竹安², 熊新², 石小龙², 翟豪瑞²

(1. 无锡职业技术学院 汽车工程学院, 江苏 无锡 214000;

2. 盐城工学院 汽车工程学院, 江苏 盐城 240051)

摘要: 基于轮毂电机驱动的电动汽车的结构特点以及轮毂电机低转速、高转矩的特点, 提出了轮毂电机再生制动方法。为了恢复最大制动能量, 在中等强度制动条件下通过轮内电机输出车辆减速的所有制动转矩。由 AMESim 软件建立液压制动系统和轮毂电机驱动系统的车辆动力学模型。通过 NEDC 循环和 FTP75 循环对车辆驾驶条件进行了仿真。仿真结果表明: 采用轮内电机制动方式, 制动能量回收率显著提高, 电动车的能源效率提高 30% 以上。

关键词: 电动汽车; 轮毂电机; 再生制动

中图分类号: U 461.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0103-05

Research on Regenerative Braking Based on Electric Vehicle with In-Wheel Motor

XU Jin^{1,2}, GU Sujing², ZHENG Zhu'an², XIONG Xin², SHI Xiaolong², ZHAI Haorui²

(1. College of Automotive Engineering, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214000, China;

2. College of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 240051, China)

Abstract: Based on the structural features of electric vehicle driven by in-wheel motor and the characteristics of low speed as well as high torque of in-wheel motor, regenerative braking method for in-wheel motors was presented. All braking torque for vehicle deceleration was output by in-wheel motor under moderate intensity braking condition for the sake of recovering the maximum braking energy. The vehicle dynamics model that included the hydraulic braking system and the in-wheel motor driving system was built by AMESim software. Simulation was carried out for vehicle driving conditions by NEDC cycle and FTP75 cycle. The results showed that the recovery rate of braking energy was increased dramatically by in-wheel motor braking method. The energy efficiency of electric vehicle was improved by more than 30%.

Key words: electric vehicle; in-wheel motor; regenerative braking

0 引言

随着人们对能源效率、能源多样化和环境保护的关注, 电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 的发展步伐不断加快^[1]。但 EV 的续驶里程难以达到成本效益。再生制动是扩大电动车行驶里程的有效方法, 无需任何额外成本, 在节能中起着重要的作用^[2-5]。因此, EV 的再生制动在过去 20~25 年引起了人们相当大的兴趣。

近年来, 人们致力于开发再生制动系统的模

型以及提高制动效能, 给出了再生制动算法的详细方法以及并联混合动力汽车 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) 动态模型的仿真结果^[6], 用车辆模型、滑移率模型和车辆速度观测器来控制制动期间 HEV 的防抱死过程。通过迭代学习过程, 对电机转矩进行优化, 以保持制动过程中与轮胎峰值牵引系数相对应的轮胎滑移率, 并对小型车辆进行仿真^[7]。设计了模糊控制器算法, 准确地关闭再生制动, 同时开启物理制动^[8]。文献[9]将再生制动力最大化, 并给出了仿真结果。文献[10]

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51875494); 江苏省产学研合作项目(BY2018290)

作者简介: 徐进(1963—), 男, 教授, 研究方向为汽车先进底盘技术及新能源汽车技术。

计算了一个理想再生制动系统的节油效率。上述文献提出了再生制动的模型,并分析了制动性能。文献[11]则通过试验验证了提高能量回收效率的方法。人们通过采用 DSP 和 EXB841 分析无刷直流电机的能量再生制动方法并实现了驱动和控制电路。文献[11-12]重点介绍了控制方法的数字化实现,并应用了经典的 PID 控制方法。文献[13]介绍了在车辆再生制动期间,转动惯量对每个部件的功率和能量的影响。结果表明:通过良好的控制方法可以提高能量回收效率。本文针对由轮毂电机驱动的电动汽车进行再生制动研究。用 AMESim 软件建立车辆动力学模型。仿真结果表明:采用轮内电机制动方式,可显著提高制动能量回收率。

1 轮毂电机制动系统的可行性分析与设计

再生制动系统与传统的摩擦制动器一起工作,理由如下:(1) 再生制动系统不足以产生所需的制动转矩;(2) 再生制动受很多情况限制,例如为延长电池寿命而必须让电池处于高充电状态(State of Charge, SOC)或高温状态下,依靠传统的摩擦制动系统来提供所需的制动力。因此,为了能采用再生制动,对于电池 SOC、电动机速度等,需要设计一个如何将制动力分配到再生制动力和机械摩擦力的控制算法。另外,再生制动控制算法应充分利用再生制动能源,进一步减排并改善燃油经济性。

1.1 可行性分析

大多数车辆在行驶中,使用轻微减速。汽车制动强度概率分布如图 1 所示。在所有制动情况中,99% 的减速度小于 $0.23g^{[7]}$,这一减速度值远远小于防抱死制动系统工作的逻辑门。如表 1,对于 1 500 kg 的汽车,表 1 列出了在不同减速度下前后

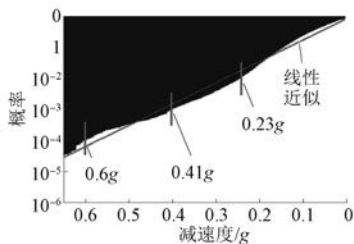


图 1 汽车制动强度概率分布

轴制动力矩的要求。表 1 中 a 表示减速度, T_F 和 T_R 分别表示前、后轮转矩。可以得出,当总制动转矩小于 $600\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,汽车以 $0.23g$ 的减速度制动,每个车轮的转矩小于 $200\text{ N}\cdot\text{m}$ 。轮毂电机的峰值转矩足以获得这个减速率,即轮毂电机的再生制动系统能满足车辆 99% 减速条件下制动力矩的要求。在紧急制动情况下,最大制动减速度可达 $0.8g$ 。考虑到制动力分配,前后车轮的制动扭矩要求达到 $2\ 300\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $700\text{ N}\cdot\text{m}$ 。轮毂电机的峰值扭矩不能满足这一要求,特别是在高速下。

液压制动系统对于紧急制动条件必不可少。但是对于车轮电机再生制动转矩,液压制动系统的制动能力可以降低。本文提出一种新型复合再生制动系统。可以看出,车辆只能在相对低速情况下通过车轮电机进行制动,在紧急制动的情况下必须通过液压制动器和车轮电机进行复合制动。

表 1 制动减速度所需的不同转矩

$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$T_F/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_R/(\text{N}\cdot\text{m})$
0	0	0
0.98	109	175
1.96	228	339
2.94	357	492
3.92	496	635
4.90	645	767
5.88	804	889
6.86	973	1 000
7.84	1 152	1 100
8.82	1 341	1 190
9.80	1 540	1 269

1.2 再生制动程序的设计

设计思路是在制动踏板和主缸之间的压力传递路径中设置压力缓冲装置。轮毂电机制动力矩取代小踏板行程时,轮缸内不产生制动压力。随着踏板行程的增加,轮缸压力迅速增加,以满足紧急制动的要求。同时,压力缓冲装置产生弹簧力来模拟驾驶员踩踏踏板时的感觉。通过反馈将车辆制动压力传递给驾驶员。

传统的制动系统控制机构原理如图 2 所示。新型制动主缸控制机构如图 3 所示。

在制动踏板和推杆之间设置一个预推杆。预推杆一端通过连杆与制动踏板连接,另一端通过滑动铰链与推杆连接。预推杆与推杆之间的距离

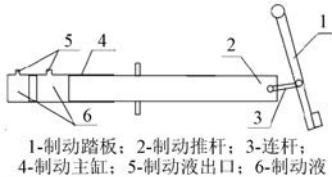


图2 传统的液压主缸控制结构

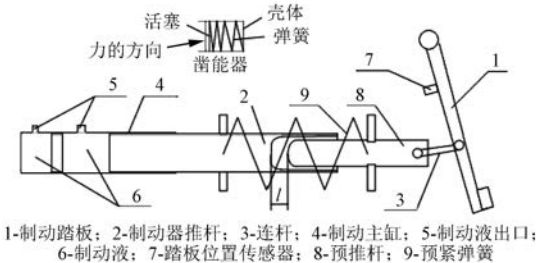


图3 EV 液压主缸控制结构

沿轴向滑动方向设定。预推杆和制动推杆之间设有预压弹簧。踏板行程传感器用于测量踏板行程。制动蓄能器与制动管连接,缓冲制动压力。

1.3 机电复合制动系统的控制方法

车辆的总制动力矩要求由预推杆与推杆接触前集成在轮辋内的轮毂电机产生,可通过踏板行程传感器进行测量。由复合再生制动控制器控制的轮毂电机输出与踏板行程成比例的再生制动转矩。如果踏板行程传感器检测到预推杆和推杆开始接触,则由复合再生制动控制器控制的轮毂电机通过增大液压制动转矩来减小再生制动转矩,直到轮毂电机的再生制动转矩为零。在大踏板行程的紧急制动条件下,液压制动系统输出主要的制动力矩,以保证制动安全,此时轮毂电机的再生制动力矩起辅助作用。

2 轮毂电机 EV 动力学仿真模型

由 AMESim 构建 EV 动力学仿真模型。整车动力学模型有 15 个自由度,包括悬架、转向系统模型、制动系统模型和轮毂电机驱动系统模型。制动系统模型和轮毂电机系统模型被整合到车辆模型中。防抱死制动系统内置于制动系统模型中,防止车轮滑动。

轮毂电机 EV 液压制动模型如图 4 所示,其输入变量和输出变量分别为制动踏板上的主缸压力和轮缸压力。轮毂电机驱动系统模型如图 5 所

示,其输入变量为转矩指令、电池电压和电流,输出变量是实际转矩和轮毂电机的转速。图 5 中数字为连接端口标号。

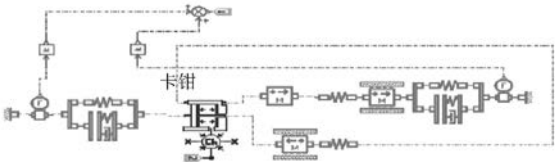


图4 液压制动模型

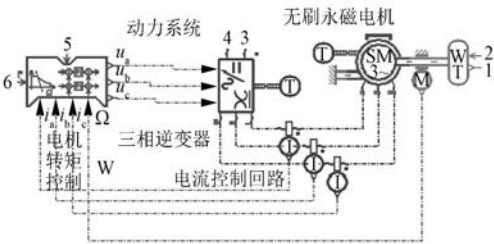


图5 电机模型

3 轮毂电机的节能效果

循环工况是车辆行驶期间的典型操作状况,可用来评估再生制动能量。本文采用 NEDC 和 FTP75 循环工况评估轮毂电机再生制动的节能效果。

3.1 NEDC 工况仿真

NEDC 循环工况下的车辆速率如图 6 所示。模拟两种制动方式:仅有轮毂电机制动和复合制动。对这两种制动方式下的能源经济性加以比较。

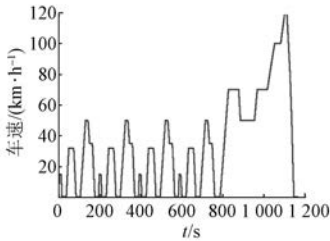


图6 NEDC 循环工况下的车辆速度

在 NEDC 工况下,装有再生制动的轮毂电机 EV 的驱动和制动转矩如图 7 所示。液压制动压力为零,即在模拟状态下没有液压制动。可以得出:在 NEDC 工况下,即使没有液压制动,轮毂再生制动系统的再生制动转矩也足以使车辆减速。

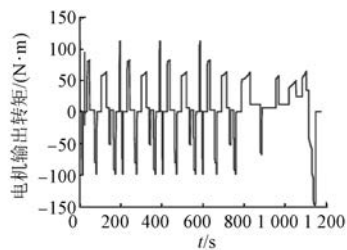


图7 NEDC 循环工况下的电机输出转矩曲线

在采用轮毂电机制动的仿真过程中,电池电压和电流如图8所示。液压制动系统模拟过程中的制动转矩和轮毂电机驱动转矩如图9所示。比较图9与图7,可知两个制动转矩相等。轮毂电机再生制动和液压制动的电池SOC对比如图10所示。在NEDC循环工况中,采用再生制动方式的轮毂电动车辆比采用液压制动方式的EV能量消耗少,因为轮毂电机再生制动系统可以转变制动能量到电池上。在NEDC周期结束时,再生制动系统的电池SOC比液压制动的电SOC高0.8%。与液压制动方式下2.5%SOC的总能耗相比,带有轮毂电机再生制动系统的车辆的节能率可达32%。使用传统的再生制动方法,节能率不超过10%。

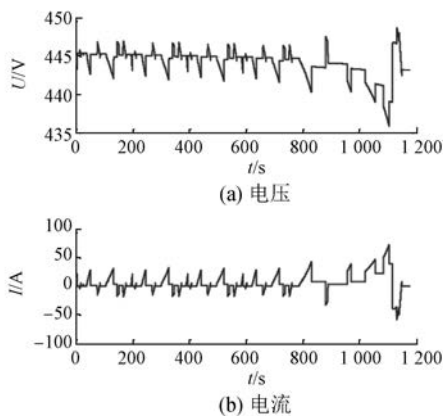


图8 电池电压和电流

3.2 FTP75 工况仿真

在FTP75循环工况下,车辆速度如图11所示。相比于NEDC循环工况,FTP75有更多的制动情况和更大的减速度。

只有轮毂电机制动时转矩输出如图12所示,在较大减速度时,轮毂电机的制动转矩几乎与驱动转矩一样。

车辆减速过程中的最大转矩不超过

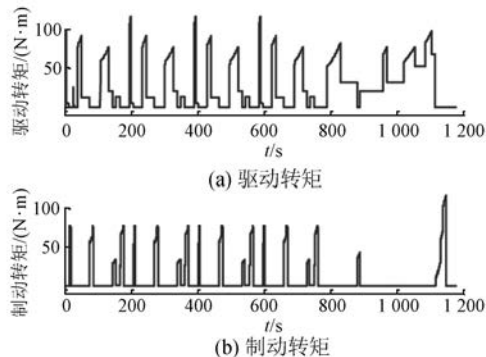


图9 NEDC 循环工况下液压制动时的驱动和制动转矩

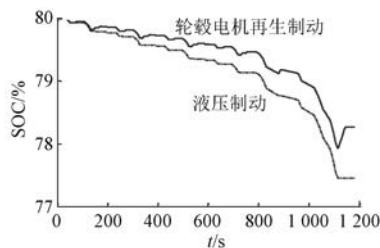


图10 NEDC 循环工况下的SOC变化曲线

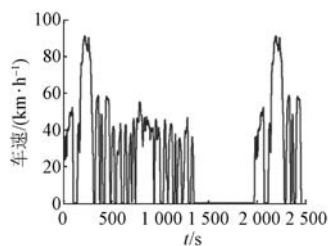


图11 FTP75 循环工况下的车辆速度

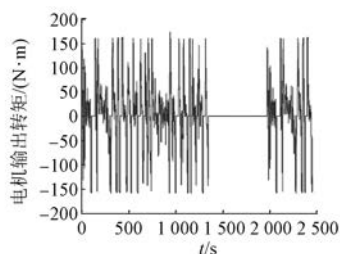


图12 轮毂电机驱动和制动扭矩

150 N·m。轮毂电机可以以额定速率输出该转矩,轮毂电机可以通过其再生制动转矩使车辆持续减速^[11]。复合制动时,轮毂电机前轴由液压制动系统产生的驱动转矩和制动转矩如图13所示。由于前轴的制动转矩比后轴的大,所以图13所示的制动转矩比驱动转矩大。

两种制动方式下电池的SOC变化如图14所示。

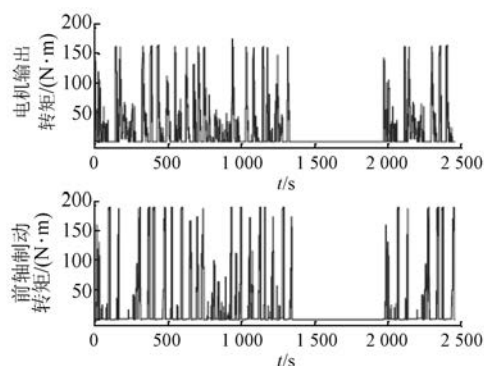


图 13 FTP75 循环工况下液压制动转矩和电机驱动转矩

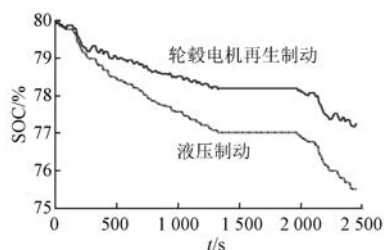


图 14 FTP75 循环工况下的 SOC 变化曲线

与仅使用轮毂电机来使车辆减速所消耗的 2.75% SOC 电能相比,使用液压制动系统来使车辆减速的汽车消耗了 4.5% SOC 电能。因此,使用轮毂电机再生制动的车辆节能率达到 38.9%。在 FTP75 循环中,可以扩大 39% 的驱动范围而无需电池参与。相同行驶里程,与传统液压制动系统的车辆相比,带有轮毂电机再生制动的车辆可以减少 39% 的能耗需求。因此,轮毂电机再生制动是降低成本、增加 EV 行驶里程的理想选择。

4 结 语

针对 EV 轮毂电机低速高转矩特点,提出了轮毂电机 EV 的再生制动方案,通过轮毂电机产生再生制动转矩使车辆减速。建立了液压制动模型和轮毂电机驱动系统的车辆仿真模型,进行了 NEDC 循环工况和 FTP75 循环工况的车辆驾驶模拟。结果表明:轮毂电机的新型再生制动方法在制动状态下可以显著提高再生能量,EV 的能源效率提高 30% 以上。该方法对降低 EV 的成本和延长续航里程具有重要意义。

【参考文献】

[1] CHAN C C. The state of the art of electric and hybrid

vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(2): 247-275.

[2] 曹秉刚, 张传伟, 白志峰. 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.

[3] CHICUREL R. A compromise solution for energy recovery in vehicle braking[J]. Energy, 1999, 24(12): 1029-1034.

[4] YAN X, PATTERSON D. Novel power management for high performance and cost reduction in an electric vehicle[J]. Renewable Energy, 2001, 22(1): 177-183.

[5] SAHA S, DANDEKAR A V, SUNDERSINGH V P. A modified approach of feeding regenerative energy to the main source[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(4): 510-514.

[6] GAO Y, CHEN L, EHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. SAE Transactions, 1999, 108(6): 3184-3190.

[7] GAO Y, EHSANI M. Electronic braking system of EV and HEV-integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS[J]. SAE Transactions, 2001, 110(7): 576-582.

[8] PANAGIOTIDIS M, DELAFRAMMATIKAS G, ASSANIS D. Development and use of a regenerative braking model for a parallel hybrid electric vehicle[J]. SAE Transactions, 2000, 109(3): 1180-1191.

[9] DUOBA M, BOHN T, BUSCH H L. Investigating possible fuel economy bias due to regenerative braking in testing HEVs on 2WD and 4WD chassis dynamometers[J]. SAE Transactions, 2005, 114(4): 324-334.

[10] CIKANEK S R, BAILEY K E. Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle[C] // American Control Conference, IEEE, 2002: 3129-3134.

[11] MI C, LIN H, ZHANG Y. Iterative learning control of antilock braking of electric and hybrid vehicles[J]. Vehicular Technology, 2005, 54(2): 486-494.

[12] PATERSON J, RAMSAY M. Electric vehicle braking by fuzzy logic control[C] // Industry Applications Society Annual Meeting, 1993, Conference Record of the 1993 IEEE, IEEE, 1993: 2200-2204.

[13] GAO H, GAO Y, EHSANI M. A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV[C] // Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001, IEEE, 2001: 571-575.

收稿日期: 2018-07-05