

文章编号:1000-582X(2011)01-001-06

两挡电动汽车动力传动系统的参数设计

秦大同,周保华,胡明辉,胡建军,王 熙

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:在一款采用固定速比减速器的电动汽车的基础上,改用两挡变速传动方案,对驱动电机进行参数匹配设计,并设计了不带离合器的两挡自动变速器。为了提高电机工作效率,对传动系统的速比进行了以整车动力性要求为约束、以 ECE(欧洲城市经济)循环工况下电机能量消耗最小为目标的优化设计,制定了以电机高效运行为原则的换挡控制策略,并与采用固定速比减速器的电动汽车进行了 ECE 运行循环下的能耗和续驶里程的对比。结果表明,整车能耗降低了 6.6%,续驶里程延长了 7.1%。

关键词:电动汽车;驱动电机;变速器;能量消耗;优化

中图分类号:U462.2

文献标志码:A

Parameters design of powertrain system of electric vehicle with two-speed gearbox

QIN Da-tong, ZHOU Bao-hua, HU Ming-hui, HU Jian-jun, WANG Xi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A scheme of two-speed transmission is proposed based on an electric vehicle (EV) with a settled gear ratio. A new traction motor is chosen and a two-speed automatic gearbox without clutch is designed, and matching design between the motor and the two-speed gearbox is carried out. In order to improve operation efficiency of the motor, speed ratios of the two-speed gearbox are optimized aiming at lest energy consumption of the motor over the ECE drive cycle under the condition of ensuring the dynamic performance of the EV. A shifting strategy to guarantee high operation efficiency of the motor is drew up. The simulation results indicate that the energy consumption is decreased by 6.6% and the driving range is extended by 7.1% compared with the EV with a settled gear ratio.

Key words: electric vehicles; traction motors; gearboxes; energy consumption; optimization

目前,小型电动汽车多采用固定速比的一挡减速器,这种传动方式结构简单、制造成本低。但是,采用固定速比的一挡减速器,对牵引电机提出了较高的要求,牵引电机既要在恒转矩区提供较高的瞬时转矩,又要在恒功率区提供较高的运行速度,满足车辆的加速性能要求和最高车速的设计要求。同时,采用固定速比的一挡减速器存在电机利用效率较低的问题,为了保证汽车的最高车速,减速器速比

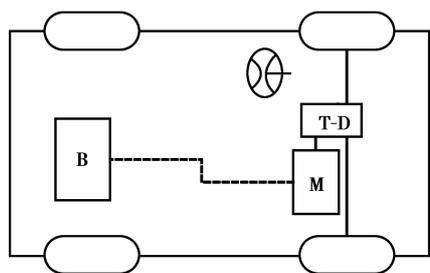
往往选择得比较小,这就使牵引电机长期处于高转矩、大电流的工作状态下,电机效率比较低,从而浪费电池能量而使续驶里程减小。

为了使电动汽车能更好地满足其动力性能,同时降低其对牵引电机和电池的要求,电动汽车传动系统的发展趋于多挡化。国内外在电动汽车多挡化方面都有相关的研究,意大利 Oerlikon Graziano 公司开发出了匹配小型电动汽车的两挡变速器,仿真

表明可以明显降低电池能耗^[1]。在国内,北京理工大学针对北京奥运电动客车开发了3挡机械式自动变速器(无离合器),使整车的经济性提高了9%,0~50 km/h的加速时间减少了18%^[2]。多挡变速器通过对传动系统的控制可使牵引电机工作在理想的区域,从而提高整车的动力性、经济性等指标^[3]。笔者在国内某汽车公司的一款采用固定速比减速器的电动车的基础上,采用两挡变速传动方案,对驱动电机进行了参数匹配设计,设计了不带离合器的两挡自动变速器,制定了以电机高效运行为原则的换挡控制策略,对传动系统的速比进行了以整车动力性要求为约束、以ECE(欧洲城市经济)循环工况下电机能量消耗最小为目标的优化设计,并与采用固定速比减速器的电动汽车进行了ECE运行循环下的能耗和续航里程的对比,结果表明,整车能耗降低了6.6%,续航里程延长了7.1%。

1 车型基本参数

以国内某汽车生产企业设计开发的一款采用固定速比减速器的电动车为基础车型,该电动车牵引电机前置前驱,蓄电池布置在后备箱及后排座位处,其动力传动系统结构如图1所示。



B—动力电池;M—驱动电机;T-D—变速器及差速器

图1 电动汽车动力传动系统布置

该电动汽车的部分参数及设计性能要求如表1所示。

表1 车辆参数及设计要求

参数	车辆特征
牵引电机	永磁电机
动力电池	锂电池
整车质量/kg	1 100
空气阻力系数	0.33
车轮滚动半径/m	0.262
最高车速/(km·h ⁻¹)	≥110
最大爬坡度/%	≥25
0~50 km/h加速时间/s	≤6
50~80 km/h加速时间/s	≤8

2 电机参数匹配

电动汽车的驱动电机通常要求在低速或爬坡时提供大转矩,高速行驶时输出大功率并且变速范围要大,需要确定的电机特性参数主要有额定功率、峰值功率以及最大转矩^[4-5]。

2.1 电机额定功率

电机额定功率的设计方法与传统发动机相似,通常以最高设计车速的90%或中国高速公路最高限速120 km/h匀速巡航行驶的功率作为电机额定功率的下限值^[6],即

$$P_n = \left(mgf + \frac{C_D A u^2}{21.15} \right) \frac{u}{3600 \eta_T}, \quad (1)$$

式中: P_n 为电机额定功率,kW; m 为汽车质量,kg; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数,值为0.015; C_D 为风阻系数; A 为汽车迎风面积,值为2.1 m²; u 为汽车车速,km/h; η_T 为机械传动效率,值为0.9。

根据表1所示整车参数,计算得到电机额定输出功率的下限值为14.75 kW,这里取驱动电机的额定功率为15 kW。

2.2 电机峰值功率

驱动电机具有一定的过载能力,采用峰值功率进行描述,它表征了电动汽车行驶的后备功率,与整车的加速、爬坡性能相关,电机的峰值功率表达式为

$$P_{\text{peak}} = \max(P_{t_a}, P_{t_b}, P_{\alpha_{\text{max}}}), \quad (2)$$

式中: P_{t_a} 为0~50 km/h原地起步加速时间为 t_a 时所需功率,kW; P_{t_b} 为50~80 km/h超车加速时间为 t_b 时所需功率,kW; $P_{\alpha_{\text{max}}}$ 为爬坡度为 α_{max} 所需功率,kW。通过试选法对电机进行峰值功率匹配,固定挡电机峰值功率选择时主要受 P_{t_a} 的约束,而两挡变速器电机主要受 P_{t_b} 的约束。

2.3 电机最大转矩

电动汽车的爬坡性能决定于电机的最大输出转矩,在选择驱动电机时,电机最大转矩必须满足电动汽车爬坡性能的设计要求^[7]。电机的最大转矩为

$$T_{\text{max}} = \frac{r}{\eta_T i} \left(mgf \cos \alpha_{\text{max}} + mg \sin \alpha_{\text{max}} + \frac{C_D A}{21.15} u_{\alpha_{\text{max}}}^2 \right), \quad (3)$$

式中: r 为车轮滚动半径,m; i 为传动系总传动比; α_{max} 为最大爬坡度,(°); $u_{\alpha_{\text{max}}}$ 为最大爬坡度时的车速,km/h。

由于电动汽车的传动系统改用两挡自动变速器,降低了对驱动电机性能的要求。在满足整车动力性设计要求的条件下,匹配两挡自动变速器的驱动电机在峰值功率和最大转矩上会有所减小。经计

算可得采用两挡自动变速器的电动汽车的驱动电机参数如表 2 所示。

表 2 驱动电机参数

电机参数	固定挡	两挡
额定功率/kW	15	15
峰值功率/kW	35	32
电机基速/(r·min ⁻¹)	2 000	2 000
最大转矩/(N·m)	167.0	152.8
最高转速/(r·min ⁻¹)	6 500	6 500
峰值效率/%	92	92

3 两挡自动变速器速比优化设计

3.1 优化问题描述

电动汽车传动系统参数的选择与匹配是否合理直接影响整车性能的发挥,在电机和蓄电池确定之后,选择不同的传动比,整车将具有不同的经济性和动力性,为此,必须对两挡自动变速器的速比进行优化设计。

电动汽车传动系的速比优化是一个多目标、多变量的优化问题^[8],其中优化目标包括动力性和经济性。在这个多目标优化问题中,由于能耗经济性直接影响到电动汽车所需的电池容量和续航里程,是主要目标。因此,笔者将动力性处理为约束条件,在满足动力性要求的前提下,优化电动汽车传动系速比,使整车的能耗经济性达到最优,从而将多目标优化转化为单目标优化。

3.2 优化模型

由于该车型设计最高车速为 110 km/h,根据标准 GB 18386—2001,选用 ECE 循环工况对整车能量消耗进行测试和仿真。在优化过程中,以整车一个 ECE 循环所消耗的能量作为评价指标,通过给定的车速,经车轮、传动系、电机和蓄电池计算出蓄电池输出功率,最终通过积分得到整车消耗的能量,计算流程如图 2 所示。

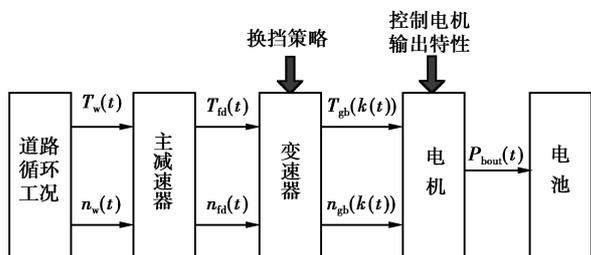


图 2 电动汽车传动系的模拟计算流程图

由图 2 可知,对于预先给定的循环工况,在每个循环工况时刻,根据汽车理论得到:

电机转速

$$n_m(t) = \frac{u(t)i(t)}{0.377r}, \quad (4)$$

电机转矩

$$T_m(t) = \frac{r}{\eta_T i(t)} \left(mgf + mg\lambda + \frac{C_D A}{21.15} u(t)^2 + \delta m \frac{du(t)}{dt} \right). \quad (5)$$

式中: $n_m(t)$ 为循环工况 t 时刻电机转速; $T_m(t)$ 为循环工况 t 时刻电机转矩; $u(t)$ 为循环工况 t 时刻车速,km/h; $i(t)$ 为循环工况 t 时刻传动系总传动比; λ 为道路坡度; $du(t)/dt$ 为汽车行驶加速度,m/s²; δ 为旋转质量换算系数,值为 1.055。

电动汽车的牵引电机在不同转速转矩下具有不同的工作效率,通过变速器速比的优化和挡位的切换,可改变电机的工作转矩和转速,从而使电机更多地工作在高效区。两挡电动汽车的电机效率如图 3 所示。

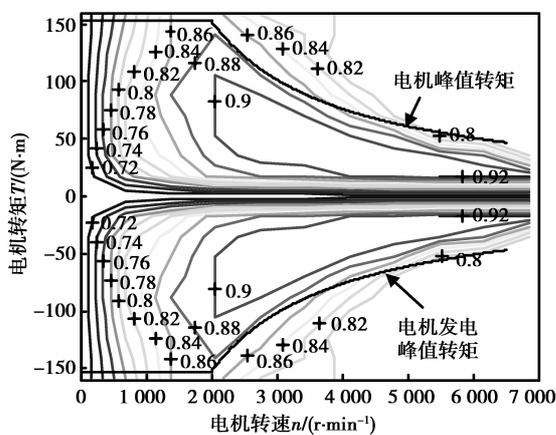


图 3 电机工作效率图

电机的效率特性可以表示为转速和转矩为变量的效率函数

$$\eta_m(t) = F(T_m(t), n_m(t)), \quad (6)$$

式中: $\eta_m(t)$ 为循环工况 t 时刻的电机效率; F 为电机效率转速转矩函数。

蓄电池输出功率

$$P_{bout}(t) = \frac{T_m(t)n_m(t)}{9\,550\eta_m(t)}, \quad (7)$$

蓄电池消耗功率

$$P_b(t) = \frac{P_{in}(t)}{\eta_c \eta_i \eta_{dis}}, \quad (8)$$

式中: η_c 为电机控制器效率; η_i 为逆变器效率; η_{dis} 为

蓄电池放电效率。

3.3 目标函数

为了达到速比优化的目的,在整个 ECE 工况中取 N 个采样时刻点,以整个循环工况所消耗的电池能量为评价指标,建立的目标函数为

$$\min_{\{i(t), t \in \{0, 1, \dots, N\}\}} J = \sum_{t=0}^{N-1} P_b(t) \Delta, \quad (9)$$

式中: J 为 ECE 循环工况所消耗的电池能量, kJ; Δ 为采样时间, s; $P_b(t)$ 为电池功率, W。

目标函数的设计变量为传动系总传动比

$$\mathbf{X} = [i(1) \ i(2)]^T, \quad (10)$$

式中: $i(1)$ 、 $i(2)$ 为变速器分别在 1 挡和 2 挡时传动系的总传动比。

3.4 换挡规律

笔者采用两参数换挡规律,以车速和油门开度为换挡参数。为了减小换挡规律对速比优化的影响,在优化过程中,根据速比的不同,采用相应的换挡规律,这样可以提高优化的准确度。

为了降低整车能耗,采用最优经济性换挡规律,力求有最小的百公里能量消耗率,以电机效率作为换挡依据,保证汽车总是以使电机工作在最高效率的挡位行驶,使蓄电池有更大的续航里程。

通过电机的效率测试,获得了电机效率数据。采用与传统汽车自动变速换挡规律获取相同的方法,如图 4 所示,当汽车挂 1 挡运行在某一油门开度下时,取该油门开度两挡效率曲线的交点对应的车速为升挡车速,如果没有交点则取 1 挡效率曲线的末端车速为升挡车速;当汽车在 2 挡运行时,为了防止循环换挡,降挡车速则是在升挡车速的基础上进行一定的换挡延迟^[9]。两挡自动变速器 $i_1 = 12$, $i_2 = 4$ 时得到的换挡规律如图 5 所示。

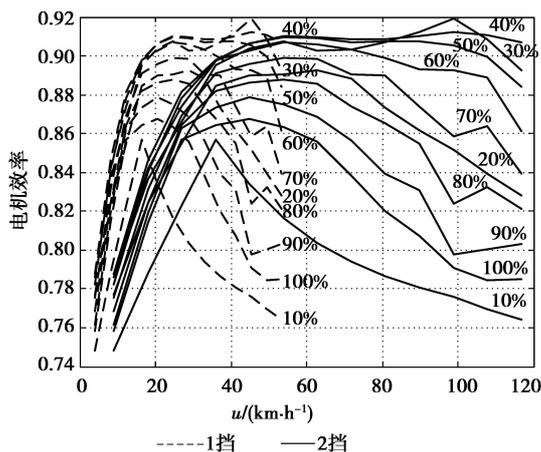


图 4 两挡位各油门开度下电机效率曲线

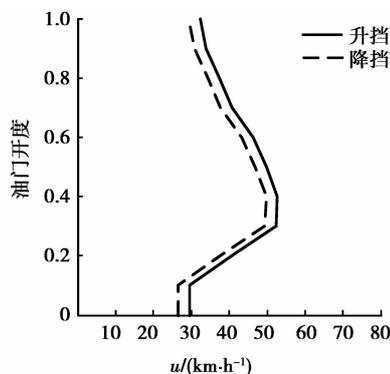


图 5 换挡规律

3.5 约束条件

传动系的传动比的确定必须遵守下述原则:必须保证预期的最高车速;必须保证汽车的最大爬坡度;当汽车以最常用的巡航车速行驶时,尽可能地使电机工作于高效区。

欲满足设计车型的最高行驶车速 u_{\max} 要求,传动系总传动比

$$i \leq 0.377r \cdot n_{\max} / u_{\max} = i_{\max}, \quad (11)$$

式中: i_{\max} 为传动系总传动比最大值; n_{\max} 为电动机最高稳定转速, r/min。

为保证最大爬坡度,根据汽车理论

$$i \geq \frac{mg(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max})r}{T_{\max} \eta_T} = i_{\min}, \quad (12)$$

式中: i_{\min} 为传动系总传动比最小值; α_{\max} 为最大爬坡度, ($^{\circ}$); T_{\max} 为电动机最大扭矩, N · m; η_T 为从电动机到车轮的传动效率, 此处取 0.9。

从以上公式中可以得出,为了保证设计车型的最高设计车速和最大设计爬坡度,如果采用固定速比 1 挡减速器,传动系统总传动比 i 应限制在 $i_{\min} \leq i \leq i_{\max}$ 范围内;而采用两挡自动变速器,则 1 挡传动比决定了汽车的最大爬坡能力,2 挡传动比则决定了汽车的最高车速,因此,传动系在 1 挡时总传动比 $i_1 \geq i_{\min}$, 以保证最大爬坡度;在 2 挡时总传动比 $i_2 \leq i_{\max}$, 以保证最高车速。

在传统汽车上,变速器速比选择时,考虑到相邻两挡传动比比值过大会造成换挡困难,一般认为比值不宜大于 1.7~1.8。由于笔者所采用的两挡自动变速器没有离合器,需控制牵引电机参与换挡,电机的快速响应特性可以克服传动比比值较大造成的换挡困难,通过控制牵引电机的工作状态和转速,能够实现快速平顺换挡^[10]。

3.6 优化方法

根据以上分析,电动汽车两挡自动变速器传动比优化可处理为多不等式约束下的单目标优化问

题。由于目标函数变化趋势比较明显,采用基于 Simulink 模型的复合形法进行优化。

3.7 Simulink 模型

根据本文所述优化数学模型,以整车在 ECE 运行循环下的能量消耗为优化评价指标,建立了基于 Matlab/simulink 的整车仿真模型,模型中考虑了挡位速比对再生制动的影响,采用最优能量回馈方式的再生制动控制策略^[11-12],在满足制动力需求与前后轴都不抱死的条件下,机电制动力分配按保证制动能量回馈最大化来分配。本文模型中再生制动转矩以电机发电最大峰值转矩和前轮抱死时制动转矩的 90% 的最小值为上限值,其表达式为

$$T_{rbmax} = \min(T_{gmax}, 0.9T_b), \quad (13)$$

式中: T_{rbmax} 为再生制动上限值, $N \cdot m$; T_{gmax} 为电机发电最大峰值转矩, $N \cdot m$; T_b 为前轮抱死时的前轮制动转矩, $N \cdot m$ 。

4 仿真分析

4.1 两挡自动变速器整车仿真

采用两挡自动变速器,1 挡传动比较大,受最大爬坡度约束,1 挡时传动系总传动比 $i_1 \geq 5.4513$; 2 挡传动比较小,受最高车速约束,2 挡时传动系总传动比 $i_2 \leq 5.8366$ 。取不同的 1 挡和 2 挡传动比组合,通过仿真得到 ECE 循环下不同的能量消耗。由图 6 可以看出,两挡自动变速器传动比存在最优组合,而通过仿真优化得到传动比在 $i_1 = 13.40, i_2 = 4.22$ 时, ECE 循环消耗的能量最少,为目标函数的最优解。

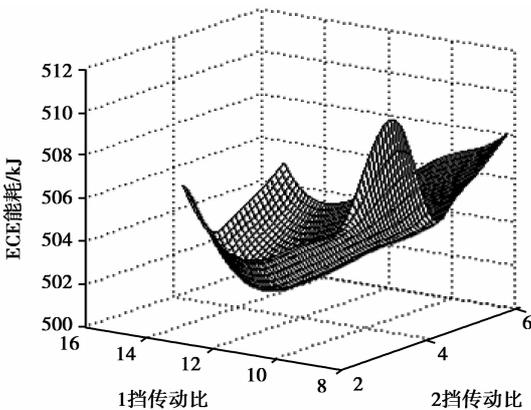


图 6 两挡自动变速器 ECE 能量消耗

4.2 仿真结果分析

采用两挡自动变速器后,新匹配的驱动电机峰值功率降低了 8.57%,最大转矩降低了 8.50%。由表 3 可以看出,新匹配的两挡变速汽车的动力性满足表 1 所示的原车型设计要求,且 0~50 km/h 起步

加速时间减少了 0.26 s,最高车速提高了 22.84 km/h。而在经济性上,采用两挡自动变速器使整车的能耗降低了 6.6%,续驶里程延长了 7.1%。由图 7、8 比较可以看出采用两挡自动变速器,可以使电机更多地工作在高效区,其原因是采用两挡变速器时,电机的工作转矩比采用固定挡减速器小得多,这样就减小了电机的工作电流,降低了电机的绕组损耗,提高了电机的工作效率。

表 3 仿真结果对比

项目	固定挡	两挡
传动系统		$i_1 = 13.40$
总传动比	5.836 6	$i_2 = 4.22$
0~50 km/h 加速时间/s	5.55	5.29
50~80 km/h 加速时间/s	6.85	7.66
最高车速/(km·h ⁻¹)	110	132.84
最大爬坡度/%	≥25	≥25
ECE 耗能/kJ	536.2	500.8
能量消耗率/[kW·h·(100 km) ⁻¹]	14.65	13.68
续驶里程/km	69.41	74.34

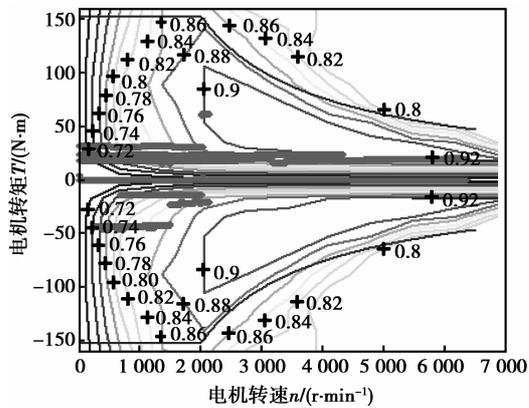


图 7 两挡时电机工作区域

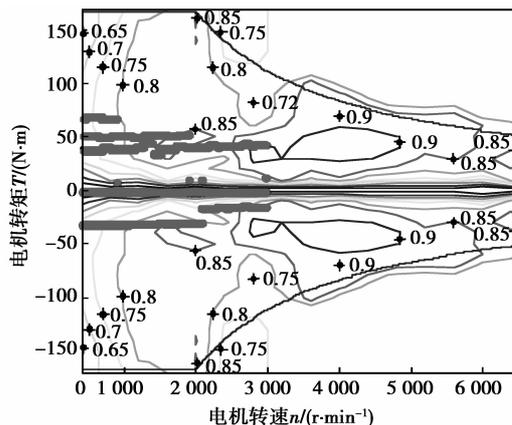


图 8 固定挡电机工作区域

5 结 论

1)采用两挡自动变速器的电动汽车传动系统,降低了对驱动电机的性能要求,使电机的峰值功率降低了8.57%,最大扭矩减小了8.50%。

2)以提高电机工作效率为目的,对两挡自动变速器的速比进行了优化,以整车ECE循环工况所消耗的能量为指标,在满足动力性的前提下得到了可使电动汽车能耗经济性最优的两挡变速器速比。与采用固定挡减速器的电动车相比,能耗经济性提高了6.6%,续航里程延长了7.1%。

参考文献:

- [1] Green Car Congress. New Two-Speed Electric Vehicle Transmission For Improved Performance, Range and Battery Life [EB/OL]. (2009-05-12) [2009-09-21]. <http://www.ecosilly.com/2009/05/12/>.
- [2] XI J Q, XIONG G M, ZHANG Y. Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus [C/OL] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, September 3-5, 2008 [2008-11-18]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4677583&tag=1.
- [3] EBERLEH B, HARTKOPF T H. A high speed induction machine with two speed transmission as drive for electric vehicles [C/OL] // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006, Taormina, May 23-26, 2006 [2006-07-05]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1649779.
- [4] EHSANI M, GAO Y, GAY S. Characterization of electric motor drives for traction applications [C/OL] // The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Roanoke, VA, United States, November 2-6, 2003 [2004-04-05]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1280101.
- [5] OH S C. Evaluation of motor characteristics for hybrid electric vehicles using the hardware-in-the-loop concept [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3):817-824.
- [6] 何洪文,余晓江,孙逢春,等.电动汽车电机驱动系统动力特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 137-140.
- HE HONG-WEN, YU XIAO-JIANG, SUN FENG-CHUN, et al. Study on power performance of traction motor system for electric vehicle [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(6):137-140.
- [7] ZHU Y, HU H, XU G, et al. Hardware-in-the-loop simulation of pure electric vehicle control system [C/OL] // 2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Bangkok, February 1-2, 2009 [2009-02-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4777236.
- [8] 钱立军,吴伟岸,赵韩,等.混合动力汽车传动系优化匹配 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(9):5-8.
- QI LI-JUN, WU WEI-AN, ZHAO HAN, et al. Matching optimization of powertrain for a hybrid electric vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9):5-8.
- [9] 何忠波,白鸿柏,杨建春. AMT 车辆频繁换挡的消除策略 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(7):9-13.
- HE ZHONG-BO, BAI HONG-BAI, YANG JIANG-CHUN. Eliminating strategy of AMT vehicles' shift hunting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7):9-13.
- [10] 廖承林,张俊智,卢青春.混合动力轿车自动变速器换挡过程中的动力系统协调控制方法 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):37-41.
- LIAO CHENG-LIN, ZHANG JUN-ZHI, LU QING-CHUN. Coordinated powertrain control method for shifting process of automated mechanical transmission in the hybrid electric vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12):37-41.
- [11] 陈庆樟,何仁.汽车再生制动系统机电制动力分配 [J]. 江苏大学学报, 2008, 29(5):394-397.
- CHEN QING-ZHANG, HE REN. Motor and hydraulic braking force distribution in car regenerative braking system [J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29(5):394-397.
- [12] ZHANG Y, MAO X J, LI L M, et al. Control of Energy Regeneration for Electric Vehicle [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2008, 13(4): 430-435.

(编辑 张 苹)