

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.005

纯电动汽车液压再生制动能量回收系统的研究*

周翎霄, 宁晓斌*, 谢伟东

(浙江工业大学 车辆工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对纯电动汽车续航里程低、蓄电池使用寿命短等问题,为提高纯电动汽车制动时的再生制动能量回收效率,通过比较多种液压制动能量回收方案与储能方式,提出了定压源飞轮液压再生制动系统。以二次元件的排量为变量对提出系统进行了原理性试验,得出了系统能量回收效率与泵/马达排量的关系;针对所提出的再生制动系统,分别进行了汽车制动工况和ECE-15工况循环仿真,分析了系统的制动能量回收利用率和节能效果;仿真结果表明了整车制动时,能量回收效率与泵/马达排量的关系;通过对比分析试验结果与仿真结果,得到了二次元件的参数和能量回收效率的关系。研究表明,在纯电动汽车上应用定压源飞轮液压再生制动系统,其续航里程能提高25%左右,蓄电池放电深度降低,蓄电池的寿命也得以延长。

关键词: 纯电动汽车; 制动能量回收; 原理性试验; AMESim

中图分类号: U463.6; TH137.9; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)06-0664-05

Hydraulic regenerative braking system in electrical vehicle

ZHOU Ling-xiao, NING Xiao-bin, XIE Wei-dong

(Institute of Vehicle Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of the short drive range and improve efficiency of recovering braking energy in electrical vehicle, a constant pressure hydraulic regenerative braking system with flywheel was established after comparing several hydraulic regenerative braking schemes. An experiment was undertaken by using the displacement of pump/motor as variables. The correlation between displacement of pump/motor and efficiency of energy recovering was explored. After that braking and ECE-15 driving condition simulation based on AMESim was investigated, correlation between displacement of pump/motor and efficiency of energy recovering was evaluated. The results indicate that driving range of electrical has been increased by 25% and the service life of batteries is prolonged because depth of discharge is decreased.

Key words: electrical vehicle; regenerative braking system; experiment; AMESim

0 引言

制动再生系统就是指汽车的制动能量回收再利用,有多种能量回收形式,如电能量回收、液压能量回收等。在纯电动汽车中,使用电机再生制动系统进行能量回收有显著效果,但是还存在一些缺点:①电储能由于能量密度低,回收制动能量的能力有限,影响了电动汽车的续航里程;②电机再生制动属于电子系统,由于制动因素较多,运行可靠性比机械动力系统

低^[1]。在纯电动汽车中采用液压制动能量回收,由于液压能量回收功率密度比电能量回收要高^[2],同等条件下,能在相同时间内回收和释放更多的能量,即能较好地提高电动汽车续航里程。此外,采用液压能量回收对汽车动力传动系统改动较小,相对于电能量回收控制环节相对简单,可靠性更高。

目前,国外研究开发的液压节能汽车有不同的形式,依据其动力传动系统配置及组合方式的不同,主要可分为:①串联结构形式,典型代表是美国EPA的

收稿日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51145015)

作者简介: 周翎霄(1989-),男,浙江衢州人,主要从事液压制动能量回收方面的研究工作. E-mail:282809692@qq.com

通信联系人: 宁晓斌,男,副教授,硕士生导师. E-mail:nxb@zjut.edu.cn

全液压混合动力系统^[3],其结构简单,容易实现对系统不同参数的控制;②并联结构形式,如瑞典 Volvo 公司的 Cumulo 驱动系统^[4],它对汽车改动较小,能量利用率高;③混联结构形式,如日本上世纪 90 年代研发的定压源(constant pressure source, CPS)液压驱动系统,由于其节能效果好,结构简单,已成为目前汽车能量回收系统的主要形式之一^[5]。CPS 系统通过发动机和飞轮的混合驱动为系统提供动力,采用定压源液压系统进行能量传递。

本研究将采用后置式并联结构,提出定压源飞轮液压再生制动系统。该系统能量利用率高,控制环节较为简单,汽车动力系统改动小,成本相对较低。

1 电动汽车液压再生制动系统

根据 CPS 的特点,本研究提出了电动汽车再生制动液压系统方案(简称 ECPS),与动力系统进行并联,确定了传动系统方案为后置型并联式驱动系统。ECPS 系统结构如图 1 所示。

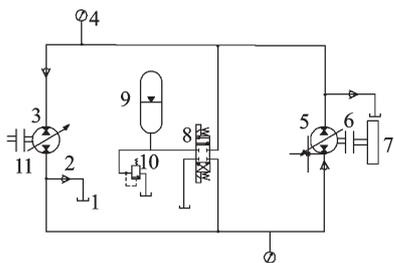


图1 ECPS 液压系统结构图

1—油箱;2—单向阀;3—与驱动桥相连的变量泵/马达;4—压力计;5—与飞轮相连的变量泵/马达;6—离合器;7—飞轮;8—三位四通换向阀;9—蓄能器;10—溢流阀;11—总离合器

图 1 中,汽车在减速制动行驶时,连接驱动轮的泵/马达(3)作为泵工作,产生的阻力通过传动系对车轮进行制动,同时将汽车制动的机械能转化为液压能,回收制动时的能量。制动力的大小通过调节 3 的排量来实现。高压油经过 3 的上方出口到连接飞轮的泵/马达(5)中,离合器(6)连接飞轮(7)与 5,5 此时作为马达带动飞轮转动,将液压能转化为飞轮的动能储存起来。如果汽车回收的能量大于飞轮设定的最大动能时,离合器断开。此时电磁换向阀 8 通电,多余的能量储存在蓄能器中,如果超过系统压力上限值,将通过溢流阀将剩余的能量释放。汽车在加速行驶时,泵/马达(3)作为马达工作,消耗高压油为车轮提供动力,系统压力降低。此时由飞轮和蓄能器提供动力。泵/马达(5)作为泵工作,使系统压力保持到一定程度,高压油经过 5 的下方出口到 3 下方入口。当飞轮的转速到容许的最低转速时,离合器(6)和连接传动系的总离合器(11)断开,ECPS 系统不提供动力。蓄能器(9)防止系统压

力波动太大,保持系统压力的基本恒定。

2 ECPS 再生制动系统原理性试验

该试验验证了 ECPS 再生制动能量回收系统的能量回收效率,试验标准以整车系统所能提供最大制动扭矩的 1/16~1/8 为计算标准。ECPS 等效原理试验的试验装置构成如图 2 所示。

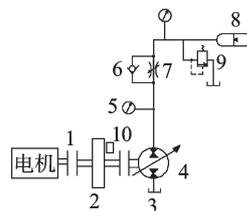


图2 液压再生制动系统试验装置示意图

1—电磁离合器;2—飞轮;3—油箱;4—变量泵/马达;5—压力计;6—单向阀;7—节流阀;8—液压蓄能器;9—溢流阀;10—轮速传感器

其等效原理为:当电机驱动飞轮,飞轮与电机之间的离合器断开后,此时飞轮相当于供能元件,为液压系统提供能量。泵/马达作为泵工作,回收制动能量,将机械能转化为液压能储存在蓄能器中,直至飞轮停转;当蓄能器作压力稳定后开始释放能量,泵/马达作为马达工作,将液压能转化为机械能储存在飞轮中。飞轮作为储能元件,在实际纯电动汽车中,与液压系统一起和电动力系统并联布置于车身底盘。其对应的过程分别为汽车在加速时的行驶工况和汽车在制动时的行驶工况。本研究以泵/马达的排量为实验变量,分别测得蓄能器最终压力与飞轮最终转速,计算得到蓄能器储能效率、飞轮储能效率和液压再生制动系统的能量利用率,试验结果如表 1 所示。

ECPS 试验装置如图 3 所示。

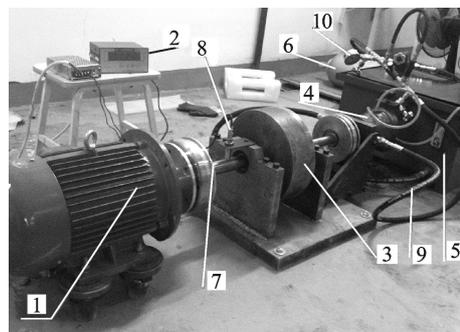


图3 ECPS 试验装置

1—电机;2—转速表;3—飞轮;4—变量泵/马达;5—油箱;6—蓄能器;7—电磁离合器;8—转速传感器;9—管道;10—压力表

2.1 试验研究

当液压泵/马达的排量为 5 L 时,根据图 3,接合飞轮与电机的离合器 1,断开柱塞泵/马达(4)与飞轮的离

表1 制动能量回收试验结果

	液压泵/马达 排量/L	飞轮初始转速 $I/(r \cdot \min^{-1})$	飞轮最终转速 $I/(r \cdot \min^{-1})$	蓄能器最终压力 /MPa	蓄能器储能效率 /(%)	飞轮储能效率 /(%)	ECPS系统的 能量利用率/(%)
1	5	1 500	755	3.61	49.2	51.5	25.3
2	7	1 500	775	3.69	50.2	53.4	26.8
3	9	1 500	781	3.74	51.2	53.0	27.1
4	10	1 500	812	3.80	52.3	56.0	29.3
5	11	1 500	820	3.82	52.7	56.7	29.9
6	12	1 500	809	3.79	52.1	54.7	28.5
7	14	1 500	780	3.75	50.9	51.9	26.4
8	15	1 500	774	3.70	50.7	50.1	25.4

合器,关闭节流阀,电机将飞轮的转速驱动到1 500 r/min后,转速稳定1 min。然后连接柱塞泵/马达与飞轮的离合器,断开1,此时4作为泵工作,将系统高压油储存在蓄能器中。飞轮停转时,蓄能器压力为3.61 MPa。蓄能器储存的能量 $E_1 = 3\ 638\ \text{J}$,系统初始动能 $E_0 = 7\ 395\ \text{J}$,蓄能器的回收效率 $\eta_1 = 49.2\%$ 。

改变泵/马达排量,按照同样试验方法,测得其他7组数据结果如表1所示。

当蓄能器的压力3.61 MPa稳定之后,打开节流阀,将飞轮与柱塞泵/马达4的离合器接合,断开1,利用蓄能器储存的能量驱动飞轮转动,此时4作为马达工作,转速传感器记录飞轮在该过程中达到的最高转速为755 r/min,飞轮的动能 $E_2 = 1\ 784\ \text{J}$,飞轮的能量回收效率为51.5%。

按照同样试验方法,测得的其他7组数据结果如表1所示。

飞轮的最终动能与最初动能的比值,即为液压再生制动系统总的能量利用率^[6],计算公式如下:

$$\eta = \frac{E_2}{E_0} = 25.3\%$$

按照同样试验方法,测得的其他6组数据结果如表1所示。

2.2 试验结果分析

试验结果表明:液压泵/马达的排量不同,蓄能器和飞轮最终回收的能量以及回收效率是不同的,排量越大则回收的能量越多。但当泵/马达排量高于一定值的时候,由于泵/马达上的阻力增加,液压制动能量回收系统能量回收效率会下降;此外,数据表明蓄能器的能量回收效率低于飞轮的回收效率。液压系统各元件之间需要良好的匹配才能获得最优的能量回收效果。

3 系统仿真分析系统仿真分析

基于如图1所示的液压再生制动能量回收系统,本研究在AMESim上建立了仿真所需的整车系统模型^[7]。整车仿真模型如图4所示,其中液压能量回收

系统如图5所示。控制系统的参数分为加速控制参数和制动控制参数,控制类型为PID控制^[8]。

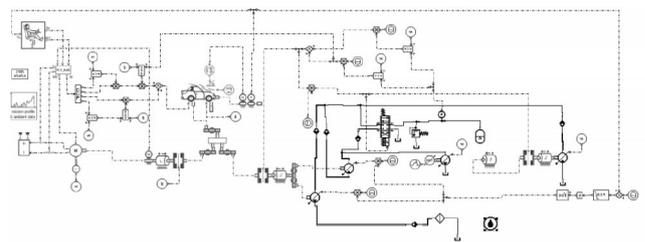


图4 带液压再生制动系统的整车动力传动系统的仿真模型

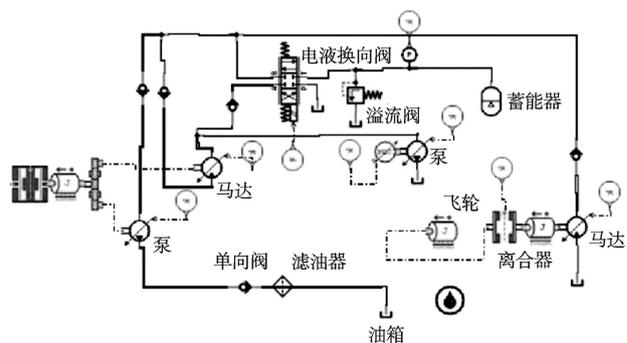


图5 ECPS液压系统模型

本研究以某款电动汽车为研究平台,确定液压再生装置系统参数。①变量泵/马达,假设车辆直线行驶,泵/马达单独驱动,泵/马达排量计算后得出。②确定飞轮尺寸参数为:飞轮半径250 mm,飞轮厚度30 mm,飞轮最高转速2 500 r/min。③液压蓄能器,由于系统压力基本恒定,在20 MPa~25 MPa之间波动。本研究选择蓄能器最小充气压力为18 MPa^[9],计算出蓄能器的总容积为10 L。

3.1 复合再生制动系统的制动工况

根据如图4所示的仿真模型和计算得到的整车仿真参数,本研究对车辆进行制动工况的仿真。满载时汽车的行驶工况:蓄能器初始压力设定18 MPa,混合动力汽车在20 s内加速至50 km/h,30 s时开始制动停车。仿真目的是验证ECPS系统及其控制系统的可行性;改变泵/马达排量,计算不同泵/马达排量下系统的制动能量回收效率,并与相应试验结果作对比。当制动强度为 $0 < z \leq 0.3$ 时,仿真结果如图6所示。

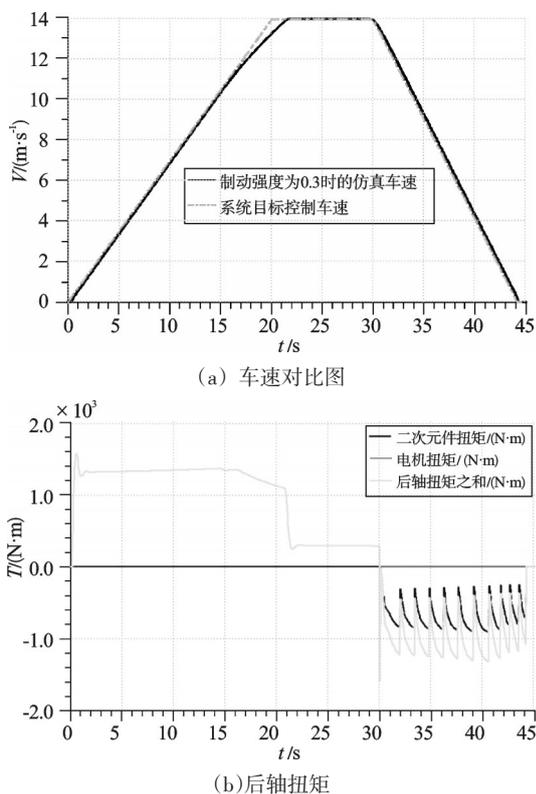


图6 $0 < z \leq 0.3$ 时汽车制动工况

当制动强度 $0 < z \leq 0.3$ 时,从图6(a)中可以看出制动时汽车能够平稳地减速至停车,汽车行驶状态与控制目标较接近,表明控制效果良好。图6(b)中二次元件在0~30 s加速和匀速行驶过程中不作用,加速仅由电机扭矩提供;在30 s~45 s制动时二次元件回收制动能量,后轮无摩擦制动,制动力由ESPS系统提供。后轴扭矩之和在0~30 s时为电机扭矩,在30 s~45 s时为二次元件扭矩乘以传动比之后的扭矩。

泵/马达排量在75 L~145 L之间变化时,飞轮的转速变化情况如图7所示。

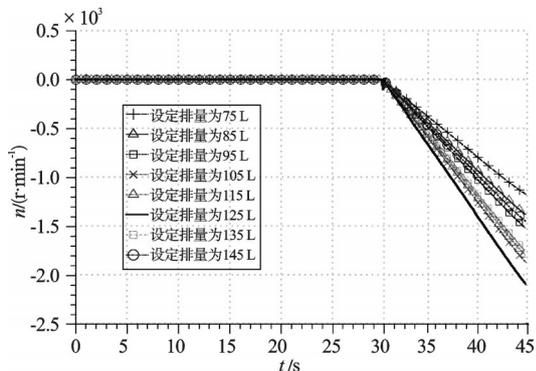


图7 飞轮的转速变化

由图7可知,飞轮的转速受到泵/马达排量大小的影响。当泵/马达排量较小时,飞轮转速随着排量的增大而增加,储存的能量也越多;当泵/马达排量高于一定值的时候,飞轮会随着泵/马达排量的增加而转速降低,回收的能量也在减少。由飞轮的转速变化可以得到飞

轮储存能量的大小,根据汽车的初始动能可以求得液压再生制动系统的能量回收效率,其结果如表2所示。

表2 液压再生制动系统能量回收效率

	液压泵/马达排量/L	汽车初始动能/J	飞轮最终转速/(r·min ⁻¹)	飞轮储能大小/J	ECPS系统的能量利用率/(%)
1	75	167 580	1 200	39 844	23.8
2	85	167 580	1 410	55 134	32.9
3	95	167 580	1 550	66 529	39.7
4	105	167 580	1 795	89 320	53.3
5	115	167 580	1 910	101 050	60.3
6	125	167 580	2 130	125 685	75.0
7	135	167 580	1 790	88 817	53.0
8	145	167 580	1 460	78 763	47.0

如图6(a)所示,仿真工况由加速和制动两个工况组成,分别对应ECPS系统释放能量和回收制动能量的过程。由于试验参数为整车仿真参数按照一定比例缩放所得,本研究在仿真过程中和试验过程中将泵/马达排量作为变量,可分别得到泵/马达排量对再生制动系统能量利用率的影响(分别如表2和表1中的ECPS系统的能量利用率所示),试验结果与仿真结果可以相互验证。在试验中,泵/马达变量变化范围为5 L~15 L;在仿真研究中,泵/马达变量变化范围为75 L~145 L。

通过对比表1和表2可得,当泵/马达排量较小时,飞轮转速随着排量的增大而增加,储存的能量也越多;当泵/马达排量高于一定值的时候(在表1试验中,这个值为11 L左右;在表2仿真时,这个值为125 L左右),飞轮会随着泵/马达排量的增加而转速降低,回收的能量也在减少。主要原因是由于泵/马达上的阻力增加,高于一定值后能量回收效率会下降,说明二次元件的参数需要良好的匹配才能获得最优的能量回收效果。

该试验虽然可以验证系统能回收制动时部分能量(如表1所示,ECPS系统的能量利用率最高为30%左右),但是能量回收效率与仿真结果有一定差距(如表2所示,ECPS系统的能量利用率最高为75%左右),其主要原因为:①飞轮高速转动过程中空气阻力与轴承阻力造成能量损耗,在低速转动时,轴承阻力占能量损耗的比例较大;②高压管路存在泄露,节流阀调节为人工调节,存在一定误差;③各液压元件需要优化匹配。

3.2 复合再生制动系统的循环工况仿真

为了检验ECPS系统的能量回收效果,本研究按照GB/T 18386-2005中的里规定的市区循环工况仿真(ECE-15工况)进行工况仿真^[10],进行800 s的城市工况仿真。系统仿真结果如图8所示。

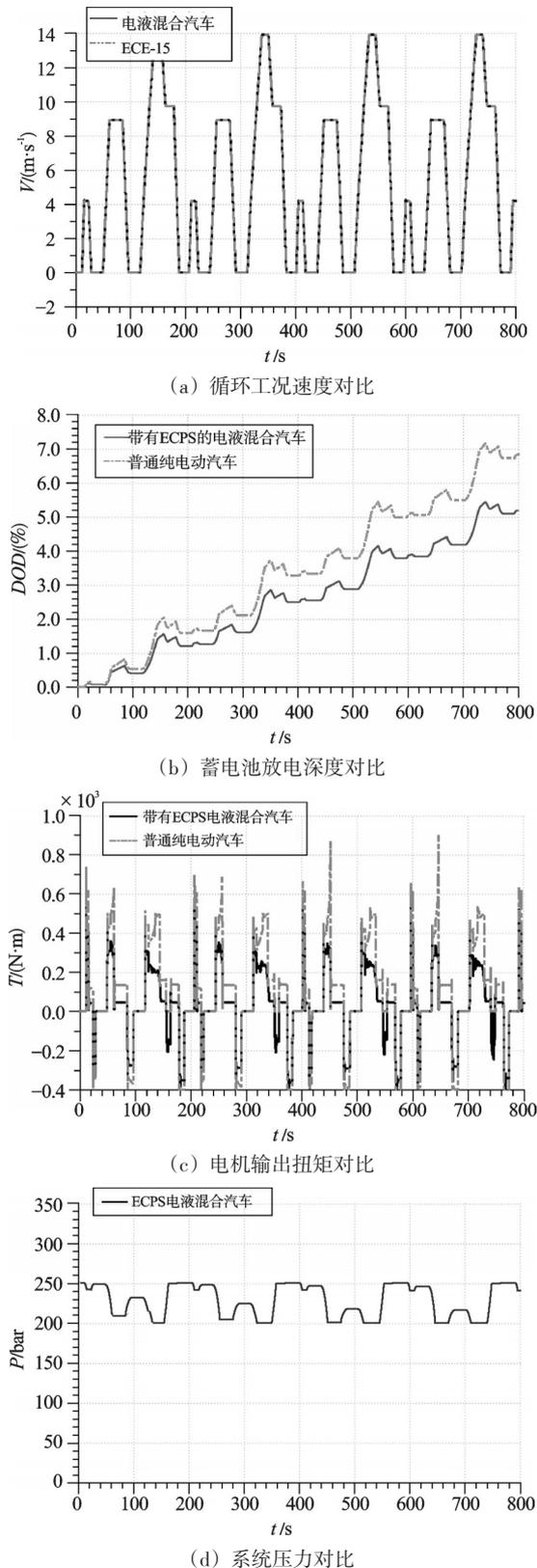


图8 ECE-15循环工况仿真结果

由图8(a)可知,电液混合汽车的速度曲线已基本接近ECE-15工况的速度曲线,表明ECPS系统的制动效能稳定。

由图8(b)可知,ECPS电液混合动力汽车的放电深度比纯电动汽车中要低(ECPS电液混合动力汽车

的放电深度为5.11%,纯电动汽车的放电深度为6.88%),蓄电池的寿命也得到相应提高。如按百分比进行计算,ECPS电液混合动力汽车相比纯电动汽车,续航里程能提高大约25%左右。

由图8(c)可知,ECPS电液混合汽车电机负载与负载变化较小,电机基本工作在额定扭矩左右,很少需要峰值扭矩输出;由图8(d)可知,ECPS系统的系统压力稳定,液压元件避免受到高压的冲击,系统动态性能好。

4 结束语

为了提高纯电动汽车制动时的再生制动能量回收效率,本研究提出了定压源飞轮液压再生制动系统。

研究表明,采用ECPS电液混合动力汽车,相对于不带ECPS的电动汽车,续航里程提高了25%左右;由于电机负载减小,蓄电池放电深度降低,蓄电池的寿命也得以延长;影响ECPS制动能量回收效率的主要因素是泵/马达的排量,针对在各种制动强度下如何控制泵/马达的排量,以实现能量高效回收,该研究结果具有借鉴价值。

参考文献(References):

- [1] ERLSTON L L, MILES M D. Retrofittable regenerative braking in heavy application[N]. SAE Paper, 2008-01-25 (58).
- [2] BULTER K L, KAMATH P. A Matlab-based modeling and simulation package for electrical and hybrid electric vehicle design [J]. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 1999, 48(6): 1770-1778.
- [3] DONG Peng, YONG Zhang, CHENG L Y. Design of hybrid electric vehicle braking control system with target wheel slip raticontrol[N]. SAE Paper, 2007-01-15(15).
- [4] AOKI Y, SHIRASE T, SUZUKI K, et al. Development of hydraulic servo brake system for cooperative control with regenerative brake[N]. SAE Paper, 2007-01-08(68).
- [5] NAKAZAWA N. Development of a braking energy regenerative system for city buses[N]. SAE Paper, 872265.
- [6] 宁涛,姜继海,孙辉. 基于后向建模的并联式液压混合动力车辆再生制动策略研究[J]. **中国机械工程**, 2009, 20(15): 1880-1884.
- [7] 徐耀挺,宁晓斌,王秋成. 基于AMESim的纯电动汽车液压再生制动系统的研究[J]. **机电工程**, 2012, 29(2): 1068-1072.
- [8] 瞿尧杰,舒怀林,熊胜祖. PID神经网络改进研究[J]. **机电工程技术**, 2010, 39(8): 39-41.
- [9] 张中范. 液压传动系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [10] 赵金祥. 液压节能汽车制动能量回收及动态调节控制策略的研究[D]. 长春:吉林大学机械学院, 2009.

[编辑:张翔]