

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.009

液压再生制动系统的能量回收效率研究*

郭杨严¹, 宁晓斌^{1*}, 魏 东²

(1. 浙江工业大学 车辆工程研究所, 浙江 杭州 310014;
2. 吉利汽车研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对纯电动汽车续航里程低、电池充电难等问题,对纯电动汽车的再生制动系统进行了研究,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。为提高所提出的再生制动系统的能量回收效率,以泵/马达和蓄能器工作参数作为变量进行了试验研究和基于 AMESim 软件的仿真研究,通过仿真分析和试验研究对比,找出了最佳的参数匹配。研究表明,该再生制动系统的能量回收效率随着蓄能器容积的大小不同和液压泵/马达的排量不同而改变,泵/马达排量越大回收的能量越多,但是随着排量的增加泵/马达上的阻力也增加了,高于一定值后能量回收效率会下降;蓄能器容积越大,可回收的能量越多。对该系统的研究值得借鉴,可为合理匹配电动汽车液压再生制动系统参数提供依据。

关键词: 制动能量回收; 泵/马达; 蓄能器

中图分类号: TH137; U463; 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0721-04

Analysis on energy recovery efficiency of hydraulic regenerative braking system

GUO Yang-yan¹, NING Xiao-bin¹, WEI Dong²

(1. Institute of Vehicle Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Zhejiang Geely Automobile Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of the short driving range and the difficult of battery charging, the regenerative braking system of pure electric vehicle was studied, a constant pressure hydraulic regenerative braking system with flywheel was established after comparing several hydraulic regenerative braking schemes. In order to improve the energy recovery efficiency of hydraulic regenerative braking system that established for electric vehicles, the experiment and simulation analysis on AMESim was undertaken by using the displacement of pump/motor and volume of the accumulator as variables, through the comparison of simulation analysis and experiment, the best parameters matching was found. The results indicate that the energy recovery efficiency of this system changed while the size of the accumulator volume or the type of hydraulic pump/motor displacement is different, the larger displacement of pump/motor is the more energy recovery, but with increasing the displacement of pump/motor the resistance is also increased, the energy recovery efficiency decreases when displacement of pump/motor larger than a certain value, larger volume of the accumulator, the more energy is recyclable. Study of this system is worth learning, it can provide a reasonable parameter match for the electric vehicle hydraulic regenerative braking system.

Key words: regenerative braking; pump/motor; accumulator

收稿日期: 2013-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375452); 浙江省汽车安全技术实验室开放课题资助项目(LHY1111J0681)

作者简介: 郭杨严(1988-), 男, 浙江温州人, 主要从事汽车动力学及控制方面的研究. E-mail: 379222029@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

0 引 言

电动汽车对能源的高效利用是发挥其节能和环保优势的关键所在。研究表明,在城市行驶工况,大约有50%甚至更多的驱动能量在制动过程中损失掉,郊区工况也有至少20%的驱动能量在制动过程损失掉。因此,制动能量回收是提高汽车能量利用效率的有效措施,对汽车的节能和环保有着不可替代的作用^[1]。制动能量回收技术一直被世界各大知名汽车厂商所重视。丰田公司将该项技术应用在混合动力车型上,有效地提高了其能量利用效率和整车的燃油经济性^[2]。日本本田汽车公司研制的Honda EV Plus 混合动力轿车,它拥有电动制动能量回收系统,有很好的能量回收效果^[3]。福特公司将制动能量回收技术用在其SUV车型Escape上,同样收到了很好的效果^[4]。

相对于电机制动能量回收系统,在同等条件下,液压辅助系统能为车辆提供更大的辅助动力(能够解决纯电动汽车动力不足问题),并且具有更高的能量利用效率,存储和释放能量的速度要比蓄电池快的多,回收的能量也较多,相对地提高汽车的续航里程^[5]。

使用定压源(Constant Pressure Source,简称CPS)的飞轮系统由于具有结构简单、效率高等优点,成为目前汽车能量回收系统的主要形式之一^[6-7]。

基于定压源(CPS)液压制动能量回收系统,本研究提出电动汽车液压再生制动系统(ECPS)^[8]。在ECPS试验台上进行试验研究,通过仿真与实验的结合,找出最佳的参数匹配,从而提高ECPS的能量回收效率。

1 液压再生制动系统

定压源(CPS)系统原理如图1所示。

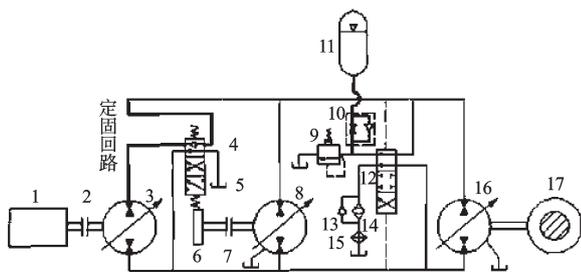


图1 CPS系统原理图

1—发动机;2、7—离合器;3、8、16—变量泵/马达;4、12—三位四通换向阀;5—油箱;6—飞轮;9—溢流阀;10—单向节流阀;11—蓄能器;13—单向阀;14—过滤器;15—冷却器;17—驱动桥

液压再生制动系统ECPS系统结构如图2所示。

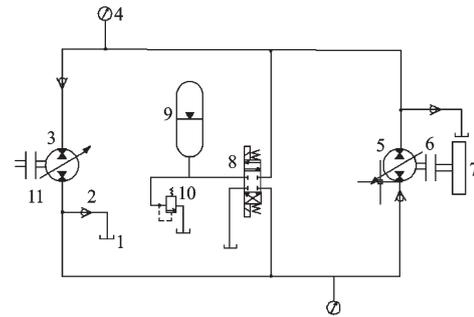


图2 ECPS液压系统结构图

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

车辆需要减速或者制动时,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统对车轮进行制动,同时将车辆制动时的扭矩转化为液压能,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。如果汽车回收能量时飞轮的转速临近临界转速时,离合器断开,以此来保护飞轮。此时电磁换向阀8通电,多余的能量储存到蓄能器中,如果超过系统压力上限值,溢流阀10会将剩余的能量释放。汽车要起动或加速行驶时,3作为马达工作,5作为泵工作,将飞轮和蓄能器中存储的能量释放为车轮提供动力,系统压力降低。当飞轮的转速到容许的最低转速且蓄能器的压力到最低值时,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。

2 液压再生制动系统实验装置

ECPS等效原理实验的实验装置构成如图3所示。

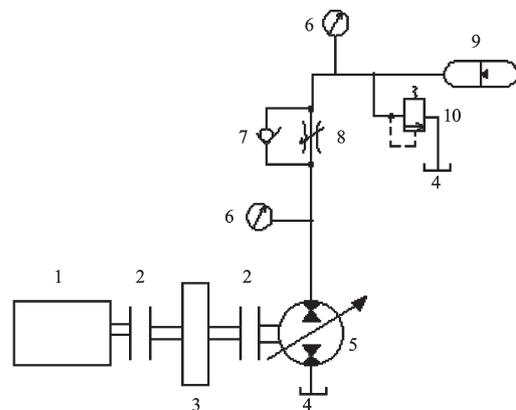


图3 液压再生制动系统实验装置示意图

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

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,飞轮此时相当于供能元件,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到蓄能器中,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到飞轮中。飞轮和蓄能器作为储能元件,在实际纯电动汽车中,与电动车机械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和起动时的行驶工况和汽车在制动时的行驶工况。本研究以泵/马达的排量和蓄能器容积为实验变量,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。

ECPS 试验装置图如图4所示。

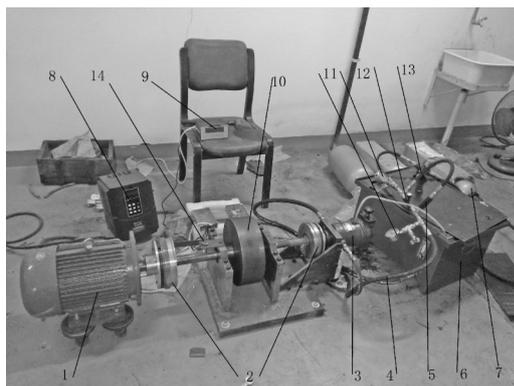


图4 ECPS试验装置

1—电机;2—电磁离合器;3—泵/马达;4—油液管道;5—单向阀;6—油箱;7—蓄能器;8—变频器;9—转速表;10—飞轮;11—压力表;12—节流阀;13—溢流阀;14—转速传感器

3 仿真与试验研究

3.1 能量回收效率仿真研究

本研究在 AMESim 上建立了试验装置仿真模型,用于研究回收能量效率,与蓄能器容积和泵排量关系。其结构如图5所示。

蓄能器的容积和泵排量的大小对蓄能器能回收能量大小的影响如表1所示。

从表1中可以看出,能量回收的效率随着蓄能器容积增加而增加,能量回收的效率与排量呈现非线性关系,而当泵排量为4 ml/r时,系统回收的能量达到最大。

误差分析:因为实验中液压管道会有漏油现象,会使系统的压力下降,蓄能器的最终压力必然会比理想状态下的压力小。由于不同泵排量下做的试验均在同一个试验装置下,误差可忽略,蓄能器的最终压力与泵排量的关系曲线大致是不会变的。

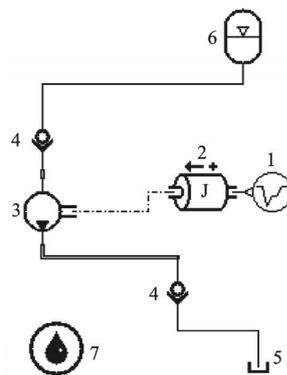


图5 在 AMESim 上建立的飞轮、泵和蓄能器的简易组合模型
1—信号输入;2—飞轮;3—定量泵;4—单向阀;5—油箱;6—蓄能器;7—液压油

表1 蓄能器容积的大小和泵排量的大小对蓄能器能回收能量大小的影响

E/J V/L	$q/\text{ml}\cdot\text{r}^{-1}$				
	2	4	6	8	10
4	15 000	17 000	15 000	13 900	14 000
6	22 000	23 000	22 000	20 900	21 000
8	29 000	30 000	29 000	27 800	27 800
10	36 000	37 000	36 000	34 700	34 700
20	70 000	72 000	71 000	69 300	69 400
80	277 000	27 900	278 000	276 800	277 000

q —泵排量; E —蓄能器回收的能量; V —蓄能器的容积

3.2 试验研究

试验系统的各元件装置参数如下:

电机:5.5 kW,最高转速为1 440 r/min;飞轮尺寸:直径为300 mm,厚度为100 mm;飞轮的转动惯量 $J \approx 0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;变量泵/马达的排量为0~10 ml/r;最大出口压力为31.5 MPa;蓄能器容积分别为4 L、6.3 L和10 L。

本研究分别安装4 L、6.3 L和10 L的蓄能器进行试验:条件是电动机带动飞轮以1 000 r/min转动,持续时间为15 s,在变量泵不同排量的情况下记录蓄能器最终能达到的压力;当然蓄能器最终的压力越大,它所储存的能量就越多。

试验步骤如下:

(1) 首先,分别安装容积为10 L和6.3 L的蓄能器进行试验,试验要研究的是泵排量为2 ml/r~10 ml/r时蓄能器回收能量随泵排量的变化,当泵的排量为8 ml/r以下时,蓄能器均没有压力,因为泵和蓄能器的自身误差,再加上压力表本身的量程问题,在压力很小时无法读数就无从得知能回收多少能量,所要研究的变化曲线因为数据太少显得不严谨,所以不对该项目进行深入研究。

(2) 最后安装容积为4 L的蓄能器进行试验,得

到的数据如表2所示。

表2 蓄能器的最终压力与泵排量大小关系

泵排量/(ml·r ⁻¹)	4	5	6	8	10
蓄能器的最终压力/MPa	4.4	5.0	5.4	5.3	5.3

3.3 分析与结论

仿真模拟中当泵排量为4 ml/r时,蓄能器能回收的能量最大。所以当蓄能器的容积为4 L和泵排量为4 ml/r时蓄能器回收的能量最大,为17 000 J。

试验中,所研究的蓄能器容积为4 L,当泵排量为6 ml/r蓄能器的最终压力最大为5.4 MPa,也就是所回收的能量最大。

根据上述仿真和试验的研究数据,本研究绘制了当蓄能器容积为4 L时,蓄能器能回收的能量随着泵排量变化的曲线,如图6、图7所示。

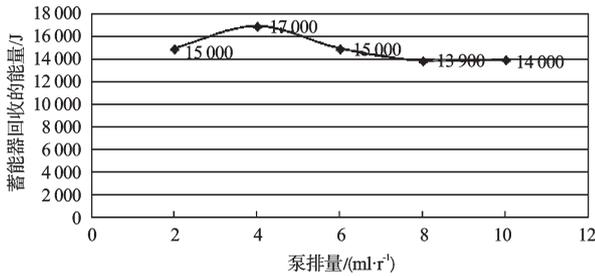


图6 根据仿真数据绘制的曲线

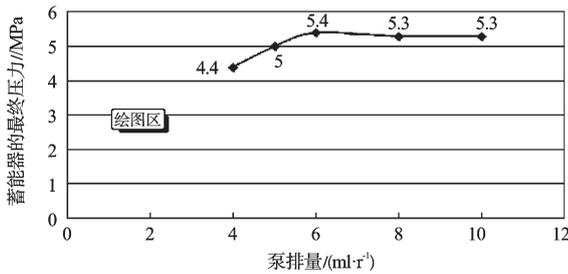


图7 根据试验数据绘制的曲线

根据图6、图7可知,试验与仿真的结果有差别,仿真中当泵排量为4 ml/r时,蓄能器回收的能量最大;而试验结果是当泵排量为6 ml/r时,蓄能器所能回收的能量最大。笔者经过研究总结认为两者存在差别的主要原因在于:

(1) 飞轮在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,轴承阻力损耗了较大一部分能量,而在仿真中是没有这些阻力的;

(2) 一直存在的问题是高压管路存在泄露,尽管已经多次进行补漏措施;

(3) 在实际的试验过程中,当泵的排量过小时,是

无法给蓄能器充油进行能量回收的。

实验与仿真结果表明,液压泵/马达的排量不同,蓄能器最终回收的能量以及回收效率是不同的,排量越大,回收的能量越多,但是随着排量的增加,泵/马达上的阻力也增加,高于一定值后能量回收效率会下降。所以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。

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,本研究提出了飞轮液压复合再生制动系统。笔者对提出的再生制动系统分部进行了仿真分析与原理性试验研究。研究结果表明,影响ECPS制动能量回收效率的主要因素是泵/马达的排量,该研究结果具有借鉴价值。

鉴于实验条件有限,本试验研究不是整车试验,所以研究尚还有不足之处。其结果并不能理想地反映于整车的再生制动系统中泵/马达的排量对能量回收效率的影响。在以后的工作里,如有条件,将会在整车上做再生制动系统的能量回收实验。

参考文献(References):

- [1] 王 猛,孙泽昌,卓桂荣,等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报,2012,43(2):85-88.
- [2] NAKAMURA E, SOGA M. Development of electronically controlled brake system for hybrid vehicle [N]. SAE Paper 2002-01-0300,2002.
- [3] OGURA M, AOKI Y. The HONDA EV PLUS regenerative braking system[C]//The 14th International Electric Vehicle Symposium and Exposition, Orlando, USA, 1997.
- [4] ALBRICHSFELD C, KARNER J. Brake system for hybrid and electric vehicles[N]. SAE Paper,2009-01-1217.
- [5] PENG Dong, ZHANG Yong. Design of Hybrid Electric Vehicle Braking Control System with Target Wheel Slip Ratio Control[N]. SAE Paper,2007-01-15.
- [6] NAKAZAWA H, YOKOTA S. A Hydraulic Constant Pressure Drive System for Engine flywheel Hybris Vehicles. Fluid Power[C]// Third JHPS International Symposium, 1996: 3-5.
- [7] 万里翔. 汽车制动能量回收系统的研究[D]. 成都:西南交通大学载运工具运用工程学院,2008.
- [8] 周翎霄,宁晓斌,谢伟东. 纯电动汽车液压再生制动能量回收系统的研究[J]. 机电工程,2013,30(6):664-668.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

郭杨严,宁晓斌,魏 东. 液压再生制动系统的能量回收效率研究[J]. 机电工程,2014,31(6):721-724.

GUO Yang-yan, NING Xiao-bin, WEI Dong. Analysis on energy recovery efficiency of hydraulic regenerative braking system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6): 721-724.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>