

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.006

# 双蓄能器液压再生制动系统制动特性研究\*

许高伦, 宁晓斌\*, 王宇坤, 陈 鹏  
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**针对传统液压再生制动汽车在高强度制动工况下再生制动特性差的问题,对系统的再生制动过程进行了研究,提出了一种用两个初始压力不同的小容积蓄能器作为液压再生制动系统储能单元的方法。搭建了液压再生制动系统试验台架,通过台架实验分析了蓄能器各主要参数对再生制动过程的影响,在 ADVISOR 平台中搭建了双蓄能器并联式液压再生制动车辆模型,对系统的制动特性进行了仿真研究。研究结果表明:液压再生制动系统提供的制动力矩与蓄能器压力成线性关系,且蓄能器体积越小,压力上升越快;采用双蓄能器进行液压再生制动可有效增大系统再生制动力矩的取值范围,提高系统能量回收效率。

**关键词:**双蓄能器;液压再生制动;ADVISOR

中图分类号:TH137.8<sup>+</sup>1;U462.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1048-05

## Braking characteristics of the hydraulic regenerative braking system with double accumulator

XU Gao-lun<sup>1</sup>, NING Xiao-bin<sup>1</sup>, WANG Yu-kun<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that traditional hydraulic regenerative braking vehicle has poor regenerative braking characteristic on high braking strength, research on regenerative braking process of the system was done, then two small accumulators with different initial pressure were proposed as energy storage units of hydraulic regenerative system. A hydraulic regenerative braking system test bench was built, and the influence of the accumulator main parameters on the hydraulic regenerative braking process was analyzed by bench test. The simulation model of a double accumulator parallel hydraulic regenerative braking vehicle was built in the ADVISOR platform, and the braking characteristics of the system was obtained by simulation. The research results indicate that the regenerative braking torque provided by the system has linear relationship with the pressure of accumulator, and the smaller the accumulator's volume is, the faster its pressure rises. The regenerative braking with double accumulator effectively increase the range of regenerative braking torque and improve the energy recovery efficiency of the system.

**Key words:** double accumulators; hydraulic regenerative braking; ADVISOR

## 0 引 言

在启停频繁的城市工况中,汽车有 30% ~ 50% 的能量损耗在制动过程中,如何有效地回收利用这部分能量成为汽车新能源技术研究的热点<sup>[1]</sup>。纯电动汽

车是新能源汽车的主流,它的再生制动系统通常由蓄电池、电机/发动机组成,该回收系统能量密度较高,但其功率密度低,限制了制动能量的回收。液压再生制动能量回收技术具有功率密度大、结构简单等特点,可以快速实现制动能量回收与释放,降低汽车能耗与排

收稿日期:2018-02-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452)

作者简介:许高伦(1993-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事液压再生制动方面的研究。E-mail:990398391@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

放<sup>[2]</sup>,尤其是对于一些质量较大的客车、货车<sup>[3-4]</sup>。

影响液压再生制动系统制动特性的因素有很多。基于液压理论,国内外学者分析了各影响因素,同时运用一些液压仿真软件对液压再生制动系统进行仿真研究,结果表明蓄能器初始参数对系统制动特性和能量回收效率有着重要影响<sup>[5-8]</sup>。为此,学者们运用一些优化方法对蓄能器初始参数进行选择。陆发龙等人<sup>[9]</sup>通过正交试验优化的方法选择液压系统各主要元件参数,优化后系统制动特性有所改善,能量回收效率提高;杜玖玉等人<sup>[10]</sup>运用动态规划算法对液压系统储能元件参数进行优化,优化后汽车的燃油经济性提高4%。上述这些研究都采用单蓄能器进行液压再生制动,液压再生制动特性受限于单蓄能器的初始参

数<sup>[11]</sup>。张丹丹等人<sup>[12]</sup>提出了用两个初始压力相等的小容积蓄能器代替一个大容积蓄能器,改进后的液压系统制动特性明显改善。

本文将用两个初始压力不同的小容积蓄能器作为系统的储能元件,分析蓄能器参数对液压再生制动系统的影响,在 ADVISOR 中搭建双蓄能器并联式液压再生制动模型,通过循环工况仿真来验证方案的有效性。

## 1 双蓄能器并联式液压再生制动汽车的结构和原理

### 1.1 结构及原理

双蓄能器液压再生制动汽车的结构如图1所示。

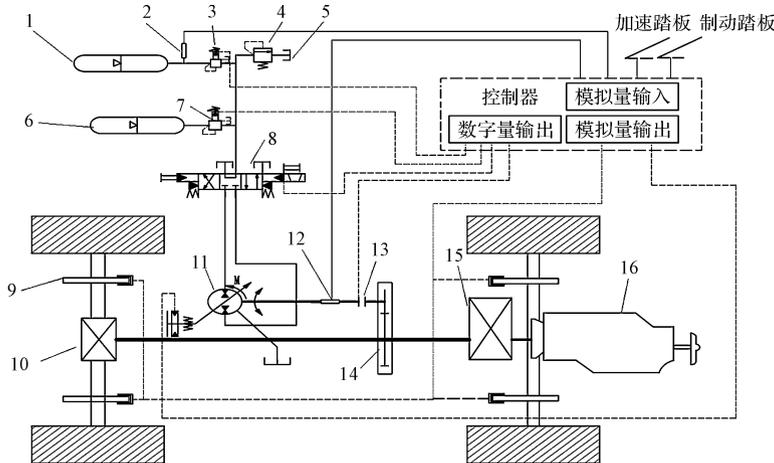


图1 双蓄能器液压再生制动汽车结构图

1—高压蓄能器;2—压力传感器;3—先导压力控制阀(1);4—溢流阀;5—液压力油箱;6—低压蓄能器;7—先导压力控制阀(2);8—三位四通阀;9—摩擦制动器;10—驱动桥;11—二次元件(泵/马达);12—力矩传感器;13—电磁离合器;14—力矩耦合器;15—变速器;16—电机

双蓄能器液压再生制动汽车拥有两个初始压力不同的蓄能器,可以根据所需制动力矩的大小选择合适的蓄能器工作。当汽车启动时,电机16工作带动汽车前行。制动时,驾驶员踩制动踏板,控制器根据踏板力大小判断制动工况。当制动强度较大时,离合器4接合,三位四通阀8左移,先导压力控制阀3打开,传动轴通过力矩耦合带动二次元件工作,此时二次元件以泵的工作状态工作,往高压蓄能器1充液,回收能量。力矩传感器12将再生制动力矩信号反馈到控制器,控制器输出信号控制摩擦制动器9,用以补足制动力矩。随着高压蓄能器1压力的增加,再生制动力矩增加,当再生制动力矩大于汽车所需制动力矩时,先导压力控制阀3闭合,先导压力控制阀7打开,低压蓄能器6开始工作。制动强度小时,二次元件以泵的工作状态工作,往低压蓄能器6充液,回收能量。

加速时,驾驶员踩加速踏板,控制器采集到相应的模拟信号,离合器4接合,三位四通阀8右移,先导压力控制阀3和先导压力控制阀4打开,高压蓄能器1与低压蓄能器6释放油液带动二次元件转动,液混系统为汽车提供驱动力矩,辅助汽车加速。

### 1.2 数学模型

汽车在直线运动时受到的行驶阻力为:

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

式中: $F_f$ —滚动阻力, $F_f = G \cdot f, N$ ;  $G$ —汽车重力, $N$ ;  $f$ —路面滚动阻力系数; $F_w$ —空气阻力, $F_w = C_D A \rho u^2 / 2, N$ ;  $A$ —迎风面积, $m^2$ ;  $F_i$ —坡道阻力, $F_i = G \sin \alpha, N$ ;  $\alpha$ —道路坡度角, $rad$ ;  $F_j$ —加速阻力, $F_j = \delta m du / dt, N$ ;  $u$ —汽车速度, $km/h$ ;  $\delta$ —汽车旋转质量转换系数。

汽车起步时,由蓄能器单独驱动汽车,驱动力大于

汽车起步时受到的行驶阻力,汽车所受到的驱动力  $F_t$  为:

$$F_t = \frac{T_m \cdot i_g \cdot i_0}{r} \quad (2)$$

式中:  $T_m$ — 液压再生制动系统提供的驱动力矩, Nm;  $i_g$ — 主减速器传动比;  $i_0$ — 力矩耦合器传动比。

$$F_t = \frac{1.59 \cdot V_g \cdot p \cdot \eta_{MH} \cdot i_g \cdot i_0}{10 \cdot r} \geq \sum F \quad (3)$$

式中:  $V_g$ — 二次元件的排量, ml/r;  $p$ — 蓄能器压力, MPa;  $\eta_{MH}$ — 马达的机械效率, 取 98%;  $r$ — 汽车轮胎半径, m;

汽车制动时, 液压再生制动系统提供的制动力为:

$$F_{reg} = \frac{1.59 \cdot V_g \cdot p \cdot i_g \cdot i_0}{10 \cdot r \cdot \eta_{MH}} \quad (4)$$

当汽车轻度制动时(制动强度小于 0.2), 制动力全部由液压再生系统提供:

$$F_{reg} = \frac{1.59 \cdot V_g \cdot p \cdot i_g \cdot i_0}{10 \cdot r \cdot \eta_{MH}} \geq 0.2g \cdot m \quad (5)$$

式中:  $g$ — 重力加速度,  $m/s^2$ ;  $m$ — 汽车质量, kg。

汽车在中度制动或重度制动时, 液压再生系统提供部分制动力矩, 剩余所需的制动力矩由摩擦制动器提供。

本文选用气囊式蓄能器作为液压再生制动系统的储能元件, 根据波义耳定律得蓄能器中气体体积与压力的关系为:

$$p_0 V_0^n = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n = \text{const} \quad (6)$$

式中:  $p_0$ — 蓄能器初始充气压力, Pa;  $p_1$ — 系统最低工作压力, Pa;  $p_2$ — 系统最高压力, Pa;  $n$ — 气体多变指数;  $V_0, V_1, V_2$ — 对应压力的蓄能器气体体积,  $m^3$ 。

为了简化模型, 在实验过程中假设油液不可压缩, 蓄能器在工作时处于绝热状态, 气体多变指数  $n$  取 1.4。

蓄能器回收的能量表达式为:

$$E = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ \left( \frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] \quad (7)$$

式中:  $E$ — 蓄能器回收的能量, J。

当蓄能器压力  $p$  达到最高压力  $p_2$  时,  $E$  即为蓄能器最大可以回收的能量。

## 2 蓄能器参数对液压再生系统影响

### 2.1 台架实验

带有液压再生制动系统的车辆在制动时, 汽车的主要作用是为制动系统提供动能, 为此本研究在搭建液压再生制动系统试验台时, 采用飞轮来代替汽车提供动能。所搭建的液压再生制动系统试验台架如图 2 所示。

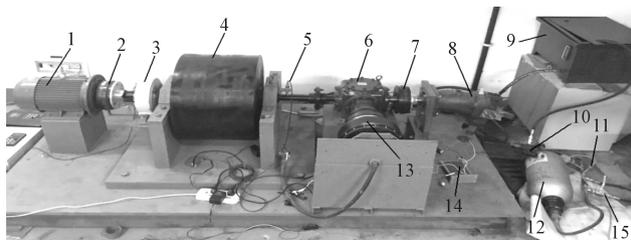


图 2 试验台架

1— 交流电机; 2— 电磁离合器; 3— 磁粉制动器; 4— 飞轮; 5— 转速传感器; 6— 力矩耦合器; 7— 电磁离合器; 8— 二次元件(电控液压泵/马达); 9— 油箱; 10— 溢流阀; 11— 液压压力传感器; 12— 蓄能器; 13— 轮毂电机; 14— 比例放大器; 15— 卸油球阀

图 2 中, 电机带动飞轮转动用于模拟汽车制动前的动能, 液压再生制动时, 离合器 2 断开, 离合器 7 闭合, 飞轮带动液压泵转动给蓄能器充液储能。图中的磁粉制动器用来提供摩擦制动力矩, 轮毂电机用于后续研究, 本文暂不涉及。

该实验台架中的蓄能器压力和飞轮转速信号由北京阿尔泰公司动态信号采集系统采集。采集系统主要元件参数如表 1 所示。

表 1 采集系统主要元件参数

元件	参数
转速传感器	霍尔转速传感器, 量程 0 ~ 1 500 r/min, 灵敏度 750 r/V
压力传感器	量程 0 ~ 35 V, 灵敏度 7 MPa/V
数据采集卡	阿尔泰 USB2812 采集卡, 16 个信号通道, 最高采样频率为 100 000 Hz。

本研究对蓄能器的两个主要参数(蓄能器初始压力和蓄能器体积)设置两组对照试验。

实验一。飞轮转速取 300 r/min, 蓄能器体积为 25 L, 蓄能器初始压力分别取 3.5 MPa、4.5 MPa 和 5 MPa。实验中蓄能器压力与飞轮转速如图 3 所示。

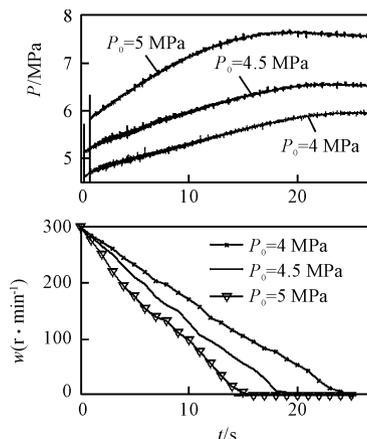


图 3 对照实验一结果

由图 3 可得蓄能器最小工作压力压力略高于初始压力。初始压力越大, 飞轮制动所需要的时间越少, 则

液压再生制动系统所能提供的制动力矩变大,系统的制动特性有所提升。

实验二。飞轮转速取 300 r/min,蓄能器初始压力取 5 MPa,蓄能器体积分别取 10 L、16 L 和 25 L。实验中蓄能器压力与飞轮转速如图 4 所示。

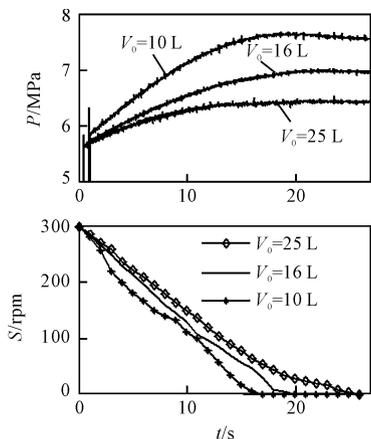


图 4 对照实验二结果

图 4 显示:在充液时,蓄能器气体体积越小,蓄能器压力上升得越快,液压系统所能提供的制动力矩随着蓄能器压力增加而增加,系统的制动特性较优。

### 2.2 结果分析

由上述实验结果可知液压系统提供的再生力矩与蓄能器压力成线性关系。蓄能器初始压力越大,系统所能提供的制动力矩越大;且蓄能器体积越小,其压力上升速度越快,则系统提供的制动力矩也上升得较快。实验中,蓄能器初始压力取 5 MPa,体积取 10 L,飞轮制动时间最短,系统的制动特性最好。

## 3 双蓄能器液压再生制动汽车仿真分析

本研究在 ADVISOR 平台上搭建了双蓄能器液压再生制动车辆模型,该模型是一款质量为 3 600 kg 的前轮驱动车辆。在 ADVISOR 自带的传统电动车模型中加入再生制动系统模块。所建模型的数据传输原理如图 5 所示。

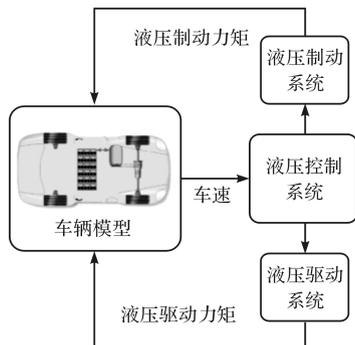


图 5 ADVISOR 模型原理图

车辆模型将车速信号传递到液压控制模型,液压控制模型通过汽车车速的变化判断液压再生制动系统的工作状况,当汽车制动时,液压制动系统作为汽车提供制动力矩;当汽车起步加速时,液压驱动系统作为汽车提供驱动力矩。

相比于传统液压再生制动汽车,双蓄能器液压再生汽车包含两个初始压力不同的小容积蓄能器,根据汽车所需制动力大小选择对应的蓄能器工作。

本文选用日本 1015 城市循环工况进行仿真研究,所选工况的车速和前轴制动力矩如图 6 所示。

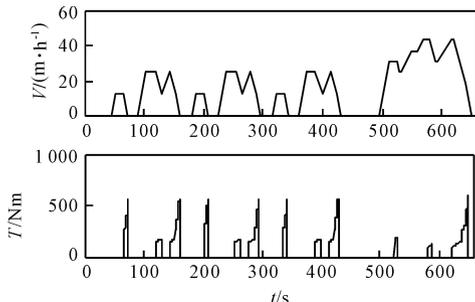


图 6 1015 工况

考虑到蓄能器储能量和汽车制动力矩需求,高压蓄能器的初始压力设为 20 MPa,容积为 16 L,低压蓄能器初始压力为 15 MPa,容积为 10 L。

蓄能器压力的仿真结果如图 7 所示。

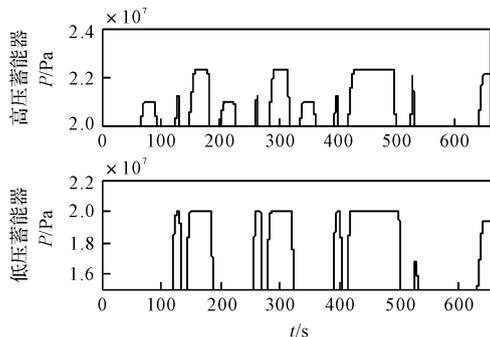


图 7 蓄能器压力仿真结果

对照图(6,7)可得:汽车制动时,蓄能器压力上升,起步加速时蓄能器压力降低;当汽车所需制动力矩较大时,高压蓄能器升压储能;当所需制动力矩较小时,低压蓄能器升压储能。

本研究选用 25 L、15 MPa 的单蓄能器再生制动进行对照仿真。双蓄能器制动与单蓄能器制动液压系统提供的再生制动力矩与回收的总能量如图 8 所示。

由图 8 可得:当所需制动力矩较大时,单蓄能器液压再生制动系统可提供的再生制动力矩有限,液压再生制动特性差。液压再生制动系统采用双蓄能器制动可以提供更大的再生制动力矩,所提供的力矩更加接

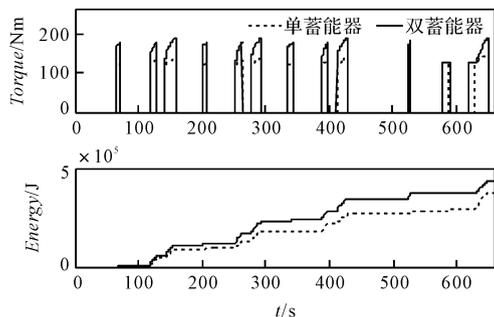


图 8 仿真对比结果

近循环工况所需要的前轴制动力矩,液压再生制动效果好。根据式(7)计算出单蓄能器再生制动时回收了 37 000 J 的能量,双蓄能器再生制动时回收了 43 200 J 的能量,能量回收效率提高了 16.7%。

## 4 结束语

针对传统液压再生制动汽车在高强度制动工况下再生制动特性差的问题,本文提出了用两个压力不同的蓄能器作为液压再生制动系统储能单元的方案,通过实验分析了蓄能器初始压力和体积对液压再生制动过程的影响。实验结果表明:蓄能器初始压力越大,液压系统提供的制动力矩越大,制动特性越好;蓄能器体积越小,其压力上升得越快,制动特性越好。

本文在 ADVISOR 中搭建了双蓄能器液压再生制动车辆模型,并进行了仿真。仿真结果表明:在 1015 循环工况下,相比于单蓄能器再生制动,双蓄能器再生制动可以提供更大范围的再生制动力矩;当汽车制动强度较大时,采用双蓄能器可有效提高再生制动力矩占汽车前轴所需制动力矩的比重,改善系统的再生制动特性,并且液压能量回收效率明显提高。

## 参考文献 (References):

- [1] GAOY, CHEN L, EHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. *SAE Transactions*, 2000, 18(1): 3184-3190.
- [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] 罗念宁,张健,姜继海. 液压混合动力技术[J]. *液压气动与密封*, 2012(2): 81-85.
- [4] ANDREW D. Hydraulic hybrids [J]. *Engineering and Technology*, 2008, 20(3): 40-43.
- [5] 刘涛,刘清河,姜继海. 并联式液压混合动力车辆再生制动的影响因素[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2010, 40(6): 1473-1477.
- [6] 董晗,刘昕晖,王昕,等. 并联式液压混合动力系统中蓄能器各主要参数对系统性能的影响[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2015, 45(3): 420-428.
- [7] 周云霄,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.
- [8] 任国军,朱凤金. 液压混合动力车辆中蓄能器的参数设计研究[J]. *液压与气动*, 2010(8): 12-1.
- [9] 陆发龙,许高伦,胡凯,等. 蓄能器各参数对能量回收效率和制动安全的影响研究[J]. *机电工程*, 2016, 33(6): 656-662.
- [10] 杜玖玉,王贺武,黄海燕. 混联式液压混合动力系统储能元件参数优化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 39-43.
- [11] 黄周轩,史青,刘文广. 基于 AMES 和 ADAMS 联合仿真的盘式刹车液压系统研究[J]. *液压气动与密封*, 2017(11): 45-49.
- [12] 张丹丹,张学炜,张伟. 双蓄能器并联式液压混合动力车制动特性研究[J]. *液压与气动*, 2015(2): 74-78.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

许高伦,宁晓斌,王宇坤,等. 双蓄能器液压再生制动系统制动特性研究[J]. *机电工程*, 2018, 35(10): 1048-1052.

XU Gao-lun, NING Xiao-bin, WANG Yu-kun, et al. Braking characteristics of the hydraulic regenerative braking system with double accumulator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(10): 1048-1052.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>