

# 一种用于液驱混合动力车辆的蓄能器回路

张涛, 王强, 何晓晖, 李思升, 徐磊

(陆军工程大学 野战工程学院机电教研中心, 南京 210007)

**摘要:**设计了一种用于液驱混合动力车辆的蓄能器储能回路,搭建了试验台架,完成了蓄能器充压、保压试验,得到了系统配置参数对蓄能器充能效果的影响规律。试验结果表明:所设计的回路满足设计需求,电机转速1 000 r/min时,回路综合性能较好,变量泵排量范围34~46 cm<sup>3</sup>/rev。

**关键词:**气囊式蓄能器;蓄能器储能回路;台架试验;充压性能

**本文引用格式:**张涛,王强,何晓晖,等.一种用于液驱混合动力车辆的蓄能器回路[J].兵器装备工程学报,2019,40(2):184-188.

**Citation format:**ZHANG Tao, WANG Qiang, HE Xiaohui, et al. Accumulator Circuit Used in Hydraulic Hybrid Vehicle[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(2): 184-188.

中图分类号:TH137.7

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)02-0184-05

## Accumulator Circuit Used in Hydraulic Hybrid Vehicle

ZHANG Tao, WANG Qiang, HE Xiaohui, LI Sisheng, XU Lei

(College of Field Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** An energy storage circuit of accumulator for hydraulic hybrid vehicle was designed. The test bench was built. The pressure-filling and pressure-holding test of accumulator was completed, and the influence of the system configuration parameters on the energy-charging effect of the accumulator was obtained. The test results show that the designed circuit can meet the design demand, the overall performance of the circuit is better when the motor speed is 1 000 r/min, and the range of pump displacement is 34~46 cm<sup>3</sup>/rev.

**Key words:** bladder accumulator; accumulator energy storage circuit; bench test; pressurized performance

随着全球生态环境问题日益严峻,节能环保显得越来越重要,传统车辆已无法满足要求,混合动力车辆应运而生。串联式液驱混合动力车辆由于结构简单、布置灵活、燃油经济性好成为常用的方案之一。该结构是指在传统车辆上,串联一个蓄能器作为辅助动力源,并取消其机械传动机构,采用液压系统进行动力传送<sup>[1-3]</sup>,实现发动机与负载解耦,通过合理的能量管理策略,使得发动机可以工作在燃油经济性较好的点,同时液压蓄能器功率密度高可以提供车辆所需的峰值功率,降低发动机的装机容量,降低燃油消耗,减少排放。蓄能器作为辅助动力元件在混合动力车辆的整个运行阶段都发挥着重要作用,在制动能回收阶段作为系统的唯一

负载存在,在驱动、加速阶段作为系统的主要动力来源<sup>[2,4]</sup>。因此,充压过程伴随车辆行驶的各个阶段,并直接影响到系统的整体性能以及燃油经济性的实现。

本研究对液压蓄能器充能机理进行分析,对蓄能器充能参数的选择进行探讨,并通过液压回路试验研究性能。

### 1 蓄能器储能回路设计与主要元件选型

蓄能器储能回路主要由电动机、变量泵、蓄能器等串联组成。回路以电动机模拟实车的发动机驱动恒压变量泵工作,实现向蓄能器充压,通过调节泵的排量可调节系统的恒

收稿日期:2018-08-25;修回日期:2018-10-08

作者简介:张涛(1995—),男,硕士研究生,主要从事机械装备传动与控制研究。

通讯作者:王强(1964—),男,教授,博士研究生,主要从事机械电子工程研究。

定压力。其中,电动机转速功率连续可调,电动机与液压泵之间连接扭矩传感器,可测量输入机械转矩、转速,回路中装有压力传感器测量回路压力,装有过滤器清洁油路。

蓄能器储能回路的主要元件包括:恒压变量泵、蓄能器、电动机等。下面分别介绍主要元件的选型。

液压泵是回路中的动力元件,液压泵可分为齿轮泵、叶片泵和柱塞泵。由于液驱混合动力车辆液压系统的工作压力较高,因此这里选用轴向柱塞泵。同时变量泵有利于充分发挥车辆的燃油经济性<sup>[5-6]</sup>。变量柱塞泵在蓄能器回路中直接与电机相连,其作用是将电机的机械能转化为回路的液压能,通过准恒压液网络向回路提供所需压力。所选用的恒压变量泵参数如表1所示。

表1 液压泵主要参数

型号	额定压力/ MPa	排量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$ )	最大转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )
PV046L9K1T1NM	35	46	3 000

车用储能元件的基本要求:能量密度和比能量高,功率密度和比功率高,并且在能量储存、传递过程中效率高。蓄能器根据加载方式的不同,可分为重力加载式、弹簧加载式和气体加载式3种<sup>[7]</sup>。其中皮囊式蓄能器具有响应快,无噪声、最高工作压力大的特点,综合比较,采用皮囊式蓄能器作为辅助动力源。皮囊式液压蓄能器是采用钢制外壳和气囊将蓄能器分为两个部分,气囊内充入惰性气体(氮气),另一侧充入液压油,利用气体的可压缩性来实现能量的传递。所选用的蓄能器参数如表2所示。

表2 蓄能器主要参数

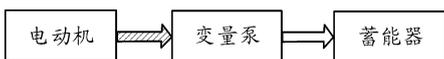
型号	公称压力/ MPa	预充氮气 压力/MPa	最低工作 压力/MPa
NXQ-63-F-A	31.5	16	16.5

由液驱混合动力车辆的工作特点,电动机功率由回路所需的平均供能功率来选择<sup>[7]</sup>,结合厂家提供的电机的万有特性,确定电机功率75 kW。

## 2 蓄能器回路性能分析

### 2.1 工作过程

由混合动力车辆的能量管理策略,当蓄能器压力小于相应工作模式下设定的压力下限值时,系统都需要对蓄能器进行充能<sup>[8]</sup>,回路工作过程的能量流动路线如图1。



压力能  $\rightleftarrows$  机械能  $\rightleftarrows$

图1 能量流动路线

气囊式液压蓄能器工作过程,可把工质(氮气)视为一个独立的热力学系统,蓄能器即通过该热力学过程与外界进行能量传递和转化。蓄能器的工作过程包括充能、持能和放能三个阶段<sup>[5]</sup>。当蓄能器处于充能阶段时,气囊被压缩,压力升高,属于多变过程;持能阶段属于等容过程,由于系统不可避免的泄漏,压力会下降;放能阶段时,气囊膨胀,压力下降。由蓄能器的比能量随多变指数的增大而减小,随最高工作压力的增大而增大,蓄能器的充能效率随多变指数的增加而降低<sup>[5]</sup>。因此理想的充压过程为绝热条件下的等温过程;理想的保压过程是等温过程;理想的放油过程是低热阻条件下的绝热过程。

根据气体定律之多变过程<sup>[8]</sup>有:

$$p_0 V_0^n = p_1 V_1^n = p_2 V_2^n = p V^n = C \quad (1)$$

式中: $p_0, V_0$ 为液压蓄能器充气压力和容积; $p_1, p_2$ 为液压蓄能器初态工作压力和终态工作压力; $V_1, V_2$ 为 $p_1, p_2$ 两种压力下的气体体积; $p, V$ 为任意时刻蓄能器的状态压力和气体体积; $C$ 为常数,由气体的种类、质量和温度决定。

$n$ 为气体多变指数,绝热条件下, $n = 1.4$ ,等温过程则 $n = 1$ 。缓慢充压释放过程 $n$ 取1,快速充压释放过程 $n$ 取1.4<sup>[9]</sup>。本液压回路所用的蓄能器充能过程较慢,取 $n = 1$ 。

考虑研究对象的实际工作状态,将液压蓄能器的工作过程视为等温过程( $n = 1$ ),理论上其可储存和释放的能量为:

$$E = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (2)$$

由 $p = p_0 \left( \frac{V_0}{V} \right)$ ,代入得:

$$E = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} p_0 \frac{V_0}{V} dV = p_0 V_0 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

### 2.2 蓄能器储能回路的性能评价指标

1) 压力损失 $\Delta p$ ,保压过程中系统压力的下降值。

$$\Delta p = p_2 - p_3 \quad (4)$$

2) 压力效率 $\eta_p$ ,系统保压过程终了时压力 $p_3$ 与开始时压力 $p_2$ 之比。

$$\eta_p = \frac{p_3}{p_2} = 1 - \frac{\Delta p}{p_2} \quad (5)$$

3) 蓄能器的充液状态SOC(state of charge 荷能状态):可用蓄能器的气体压力来表达<sup>[9]</sup>。

$$SOC = \frac{P_g - P_1}{P_{\max} - P_1} \quad (6)$$

式中: $P_1$ 为SOC=0时的压力,其值至少为系统最低压力或蓄能器的充气压力; $P_g$ 为某一充液状态对应的压力; $P_{\max}$ 为充液状态最大值对应的压力。

## 3 蓄能器储能回路台架试验

实验的目的是为了研究蓄能器的充压条件、保压能力。蓄能器储能回路试验装置以恒压网络控制技术为基础,采用计算机采集数据与控制的方式,通过电机作为原动机带动变量泵对蓄能器进行充压。

### 3.1 试验平台

试验平台如图2主要由电动机(模拟发动机)、恒压变量泵(排量调节输出压力)、蓄能器、液压阀体、油箱电气控制及信号采集等部分构成。根据试验条件,考察蓄能器充压能力、压力保持情况。忽略试验过程描述,通过对试验数据的统计和整理,得出试验结果。



图2 试验平台

### 3.2 结果及分析

试验中,电机转速信号值分别设为五个值,改变液压变量泵的排量(即恒压系统压力),电机转速、泵排量对应值如表3所示,待蓄能器压力稳定之后,电动机转速置0,蓄能器

进入保压阶段。分析蓄能器充液压力变化和范围以及蓄能器充液速度和时间,试验结果分别如图3~图7所示。

表3 电机转速、泵排量对应表

电机转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	对应值/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	泵排量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$ )	对应值/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{rev}^{-1}$ )
转速1	700	排量1	30
转速2	800	排量2	34
转速3	1 000	排量3	38
转速4	1 300	排量4	42
转速5	1 500	排量5	46

由图3可以看出,蓄能器充压过程中,压力平稳上升,均快速到达同一压力(即充气压力),说明蓄能器的气囊性能较稳定,当蓄能器压力达到设定压力一段时间后,电机转速置0,进入保压阶段。当压力下降至充气压力值时,回路压力便迅速下降。图3为不同泵排量下蓄能器压力变化情况,由图可以看出,同一电机转速下,液压泵的排量越大,蓄能器相对充压越快,同时,电机在主动充压时,其充压时间也就越长,即电机工作的时间长,相应效率下降,反之,效率则好。而在相同泵排量下,电机转速不同时,蓄能器充压时间基本差不多,说明转速对充压速度的影响很小,取电机转速1 000 r/min 充压速度以及回路线性关系都比较好。排量对其的影响比较大。

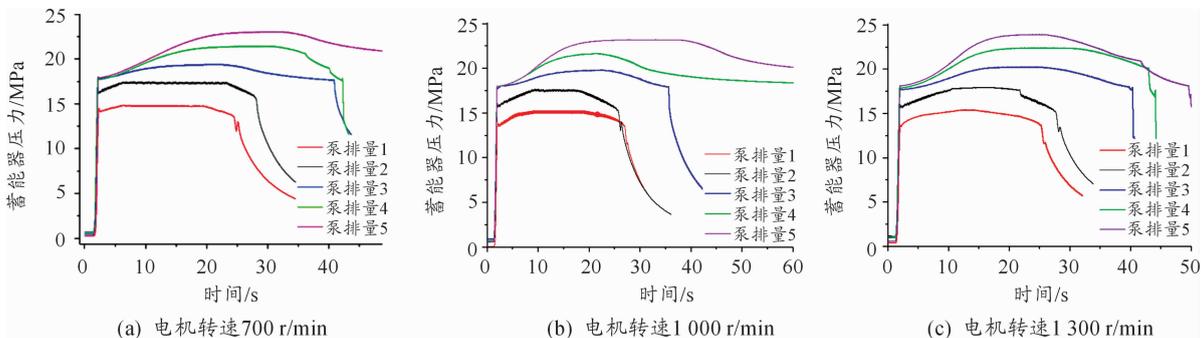


图3 不同泵排量下蓄能器压力

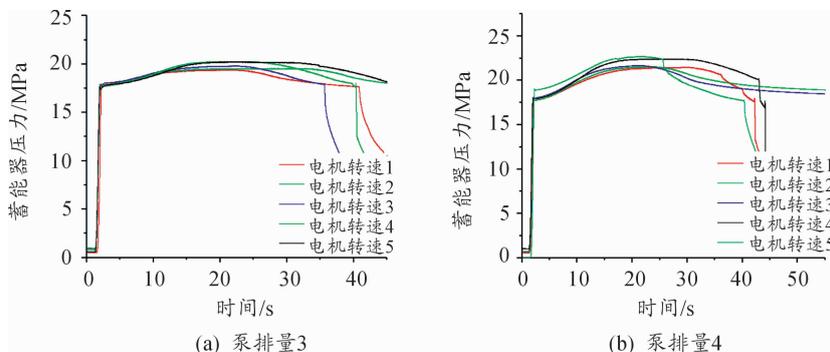


图4 不同电机转速下蓄能器压力

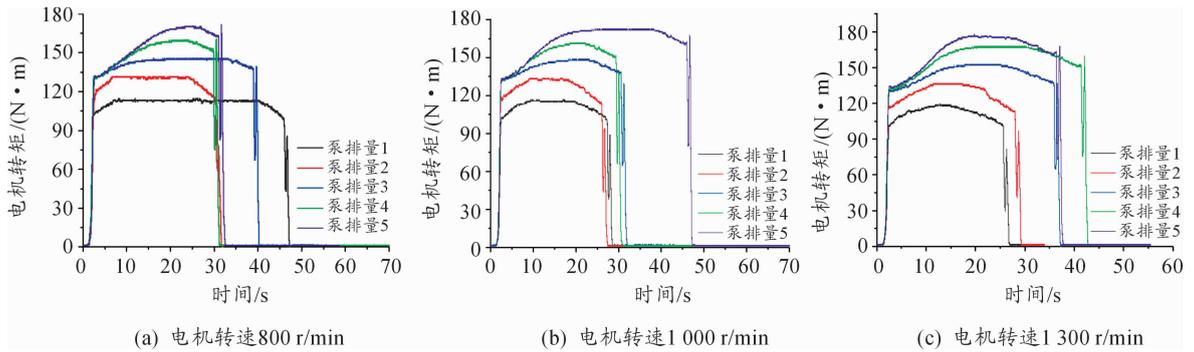


图5 不同泵排量下电机转矩

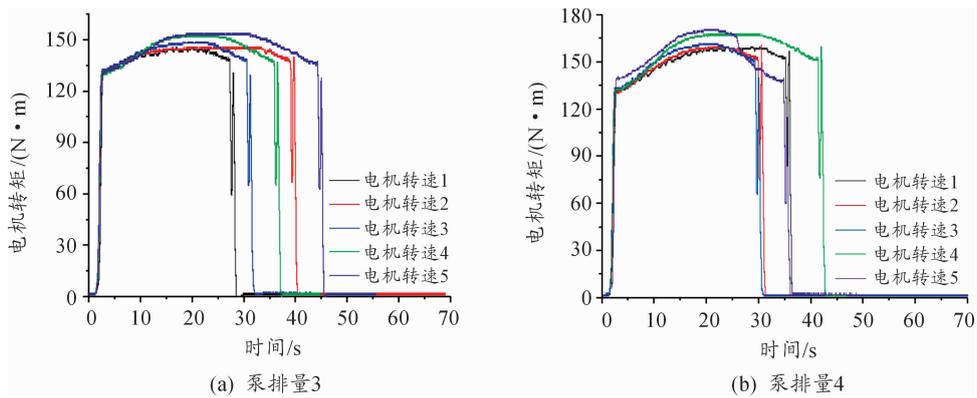


图6 不同电机转速下电机转矩

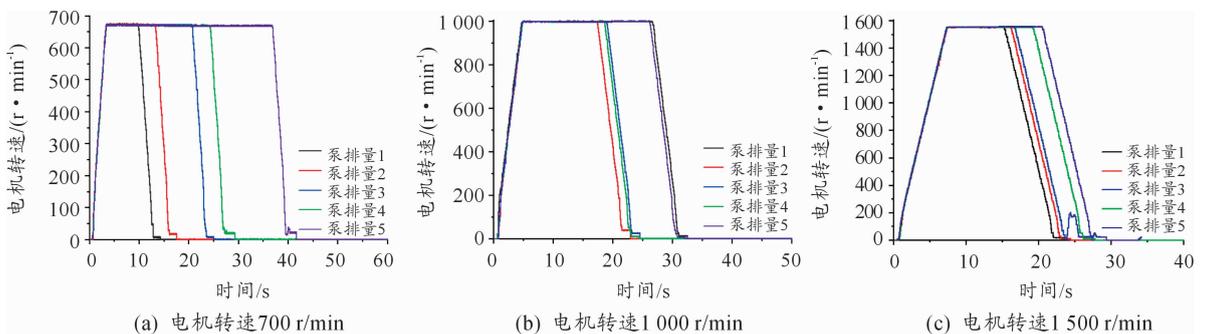


图7 电机转速

从图3、图4中可以看出,蓄能器最高工作压力为23 MPa,最低工作压力为17.5 MPa,整个液压回路在18~20 MPa内保压情况比较好,一定时间内,压力基本无变化,同时蓄能器的压力下限阈值取20 MPa,对应的蓄能器SOC=0.45,可以保证电机高效率<sup>[10]</sup>。由回路稳定后压力大小可确定泵的工作排量范围,当排量为30 cm<sup>3</sup>/rev时,蓄能器并未充上压,因此,取泵排量下限值34 cm<sup>3</sup>/rev,此时回路压力为17.5 MPa,与其他排量下的快速充压值相吻合。

图5为不同转速下电机转矩变化情况。由图可看出,在同一电机转速下,电机转矩随泵排量的增大而平稳地增加,可以满足负载的变化要求,同时转速越低,变化越平稳。由图7可知,在同一泵排量下,电机转速增大时,电机转矩变化

情况基本相同。但是由电机的万有特性曲线可知,这两种情况都会使电机偏离最佳效率点。因此,电机转速不能过高,并且电机的转速和转矩应同步调整来满足负载的变化,以保证电机处于最佳效率点。

从图7可看出,电机转速随时间线性变化,匀速阶段基本保持稳定,转速从700~1 500 r/min,加速所用的时间越来越长,这不利于提高蓄能器的充能效率,因此电机转速1 000 r/min较合理。并且,在电机转速末端均出现台阶,但转速值并没有大幅增大,只是时间相对延长了,由图5在同一时间点,电机转矩末端也出现冲击值,由回路可知,这是由于关闭电机时,液压泵的惯性所引起的冲击。因此,应在电动机与变量泵之间加装离合器,防止电动机受到冲击,影响使用寿命。

## 4 结论

1) 电机转速越大,泵排量越大,则蓄能器充压越快、回路压力越高。但电机转速过高对充能效率作用不明显,并且电机转速过高时,电机所需加速时间较长且回路冲击较大。经分析,电机转速 1 000 r/min 较合理;泵排量对蓄能器充能效率的影响较大,同时电机转速和转矩应该同步调节。

2) 有效泵排量下限值  $34 \text{ cm}^3/\text{rev}$  较合理,对应泵出口压力 17.5 MPa,最大排量  $46 \text{ cm}^3/\text{rev}$ ,所对应的回路实际压力为 23 MPa,因此,确定泵排量为  $34 \sim 46 \text{ cm}^3/\text{rev}$ ,蓄能器储能回路实际工作压力为 17.5 ~ 23 MPa。从蓄能器储能回路的压力保持情况可看出,18 ~ 21 MPa 下回路的压力较稳定,同时,取蓄能器压力下限阈值 20 MPa,有利于电机保持高效率。

3) 电动机停机时电机转矩出现冲击,但对回路整体性能的影响不大。为提高元件的使用寿命,可以在电动机与变量泵之间加装离合器。

## 参考文献:

- [1] 赵博. 串联式液压混合动力车辆参数优化及系统仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [2] 冯代伟. 串联型液压混合动力汽车的能量管理策略研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.

- [3] 朱瑞博,朱毅,雷晶涛. 蓄能器在工程机械中的选择与计算[J]. 工程机械文摘,2015(3):87-88.
- [4] 李翔晟,陈斗,李晓. 液驱混合动力车辆动力源储能元件匹配优化研究[J]. 中国机械工程,2013,24(18):2550-2555.
- [5] 那天明. 基于液压混合动力车辆的蓄能器特性分析[J]. 汽车零部件,2018(4):1-5.
- [6] 路甬祥. 液气气动技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [7] 李翔晟,常思勤. 新型电控液驱车辆储能元件特性分析[J]. 中国机械工程,2007(10):1244-1247.
- [8] MA X, LUO K, ZHANG L, et al. Modeling and Analysis of Torsional Vibration on Engine-Generator System of Hybrid Electric Vehicle[C]//2014 中国汽车工程学会年会论文集. 上海:中国汽车工程学会,2014:59-70.
- [9] Realization and Analysis of Good Fuel Economy and Kinetic Performance of a Low-cost Hybrid Electric Vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(5):774-789.
- [10] JIANG Jihai. Development of Hydraulic Power Unit and Accumulator Charging Circuit for Electricity generation, Storage and Distribution [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008(1):60-64.

(责任编辑 唐定国)