

DOI: 10.3901/JME.2011.14.151

# 并联型三配流窗口轴向柱塞泵特性 理论分析及试验研究\*

张晓刚<sup>1</sup> 权龙<sup>1,2</sup> 杨阳<sup>1</sup> 王成宾<sup>1</sup> 姚李威<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学机械电子工程研究所 太原 030024;

2. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

**摘要:** 采用液压泵按闭式回路方法驱动液压缸, 是电液控制技术领域的研究热点, 这一技术在对称液压缸的控制中已获得很好应用, 但对于广泛采用的差动缸, 效果一直不尽如人意。为此, 依据阀控缸技术中非对称阀控非对称缸的思想, 提出采用三配流窗口轴向柱塞泵直接闭式驱动差动缸运动的原理, 方案是改造现有轴向柱塞泵的吸油窗口为并联布置的两个窗口, 增加一个柱塞, 将普遍采用的 9 柱塞泵改为 10 个柱塞, 并分成两组, 使每一组柱塞的吸排油窗口在半径方向错开位置, 分别对应配流盘上的二个配流窗口。研究工作中, 在 SimulationX 软件环境下, 建立考虑单个柱塞运动特征和配流面积随转角变化的液压泵仿真模型, 通过数字仿真确定了泵的关键参数, 特别是缸体和配流盘卸荷槽的尺寸, 设计并制造了样机, 在试验台上对多种转速下泵的压力、流量和噪声等基本特性进行测试, 验证了原理的正确性。

**关键词:** 轴向柱塞泵 并联 泵控差动缸

**中图分类号:** TH137

## Theoretical Analysis and Experimental Research on Characteristics of Parallel Three Assignment Windows Axial Piston Pump

ZHANG Xiaogang<sup>1</sup> QUAN Long<sup>1,2</sup> YANG Yang<sup>1</sup> WANG Chengbin<sup>1</sup> YAO Liwei<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechatronics Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The adoption of hydraulic pump to drive the hydraulic cylinders in closed circuit is a research hotspot in the field of current electro-hydraulic control technology. This technology is well applied in the control of symmetric cylinders, yet the effect is not that satisfactory for widely used differential cylinders. Therefore, the principle of adopting three assignment windows axial piston pump to directly drive the differential cylinder in closed circuit is proposed according to the concept of asymmetrical cylinder controlled with asymmetrical valve technology. The scheme is to transform the oil suction window of the existing axial piston pump into two parallel windows. When in use, a piston is added to the universally adopted 9-piston pump, then the 10 pistons are separated into two groups, the oil suction and discharge windows of each group are in the staggered position in the radial direction and are respectively corresponding to the two assignment windows in the valve plate. With the software SimulationX, a hydraulic pump simulation model, which takes into consideration the single piston motion characteristics and the change of assignment area with the rotary angle, is established. The pump key parameters, especially the sizes of the cylinder body and the unloading groove of the valve plate, are determined through digital simulation. Then the prototype pump is designed and made. The basic characteristics such as pressure, flow and noise of the pump at different rotation speeds are tested, thus verifying the correctness of the principle.

**Key words:** Axial piston pump Parallel connection Pump controlled differential cylinder

## 0 前言

采用液压泵闭式控制液压缸的运动, 是提高电

液系统能量效率最直接的方法, 是该领域国际上的研究热点<sup>[1-3]</sup>。针对双出杆的对称液压缸, 目前的控制技术已非常成熟, 并已经在航空领域获得了应用<sup>[4-5]</sup>。但是, 对于液压技术中广泛采用的差动液压缸, 虽然已经取得了许多进展, 典型的成果有采用腔压力控制方法解决液压缸两腔预压紧问题<sup>[6]</sup>; 采用两台伺服电动机分别驱动两台定量泵、两台电子

\* 国家自然科学基金(50775156)和浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金(GZKF-2008006)资助项目。20101201 收到初稿, 20110530 收到修改稿

控制的变排量泵, 匹配差动缸的面积差, 闭环控制差动缸的运动<sup>[7-8]</sup>; 采用单台变量泵结合蓄能器和旁通比例阀复合控制差动缸的运动<sup>[9]</sup>; 采用液压泵和马达组成的液压变压器补偿差动缸的不对称流量<sup>[10]</sup>; 采用液控单向阀补油、平衡差动缸流量差的方法<sup>[11-12]</sup>。但是, 由于差动缸的特殊结构, 现有的技术还是不能做到像泵控双出杆缸一样, 无需外部的辅助元件, 只用一台液压泵就能闭环控制差动缸的运动。为了实现这一目标, 课题组依据非对称阀控制非对称缸的思想, 提出在轴向柱塞泵中采用非对称配流方法控制差动缸的原理<sup>[13]</sup>, 目标就是依据这一原理, 研制一种新的液压泵, 可以补偿差动缸的不对称面积, 闭式控制差动缸的运动, 优化回路结构。新型柱塞泵还能够同时输出两路不同压力的流量, 控制两个液压执行器的运动。

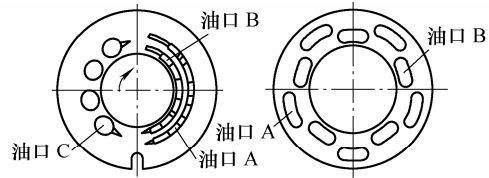
## 1 新型轴向柱塞泵配流原理

通用轴向柱塞泵的配流盘只有两个配流窗口, 吸油窗口和排油窗口腰形槽角度范围相等, 不考虑内泄的条件下, 吸油和排油流量相等, 可闭式控制液压马达和对称液压缸的运动, 但却不能平衡差动缸两腔的不对称流量, 要实现差动缸的控制, 必须采用另外的辅助措施, 图 1a 是新提出具有三个配流窗口的配流盘及对应缸体配流窗口结构原理。

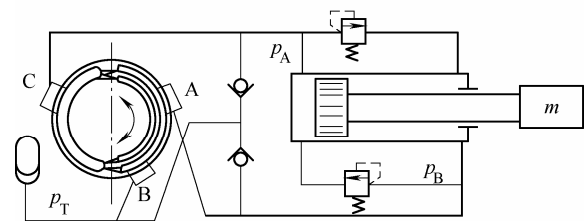
新配流思想是将传统轴向柱塞泵的配流盘及后盖原有的吸油口, 重新设计成两个独立的窗口 A 和 B, 因这两个配流窗口平行布置, 故称为并联方式; 将现有奇数柱塞的泵增加一个柱塞成偶数柱塞, 然后分为两组; 改变缸体底部的进排油窗口为内环油槽和外环油槽, 内环油槽对应窗口 B, 外环油槽对应窗口 A。实际使用中, 参见图 1b, 油口 C 连接差动缸无杆腔, 油口 A、B 分别连接差动缸有杆腔和油箱, 调整柱塞分别与油口 A、B 连通的数量, 或者调整柱塞的直径, 就可以调整从油口 A 和油口 B 排出的流量与差动缸面积匹配, 通过改变泵的排量或转速就可闭式控制差动缸运动。理论上, 油口 C 的流量等于油口 A 与油口 B 的流量之和。泵的另一种用途是同时输出两个流量, 这时, 油口 C 作为吸油口连通油箱, 油口 A 和 B 控制两路不同的负载。

在结构设计中需要考虑的问题有, 改造后的配流盘, 有一侧有二个配流窗口, 对应不同分布直径的柱塞吸油窗口, 在泵旋转过程中, 必须解决好困油产生的压力冲击和噪声; 泵后盖既要结构合理, 又要考虑承压强度以及油道流通的顺畅性, 为了不影响泵的吸油能力, 泵后盖上配流窗口分度圆角度

范围要大于配流盘对应区域。需要重新设计的元件除配流盘、泵后盖和缸体外, 还涉及传动轴、壳体等元件。在设计中还要注意, 设计的泵是作为变转速使用, 还是采用变排量使用, 如果是变转速, 卸荷槽要双向对称布置, 如果是变排量控制, 卸荷槽单向对称布置就可以。



(a) 三窗口配流盘及对应缸体配流窗口原理



(b) 泵控制差动缸回路原理

图 1 并联型配流原理及控制差动缸回路

## 2 新型轴向柱塞泵建模与仿真

### 2.1 仿真模型及计算分析

柱塞泵的流量脉动和压力冲击是产生流体噪声的两个主要因素, 也是关系到设计的泵能否应用的关键。新的柱塞泵由于对原有泵的配流方式做了改变, 特别是与油口 A 和 B 连通的配流窗口, 只有 5 个柱塞吸排油, 使流量的波动加大, 会影响到泵的输出特性。因此, 在制造样机之前, 首先在机电系统仿真软件 SimulationX 环境下, 建立了以单柱塞吸排油过程为单元的新型柱塞泵输出特性仿真计算模型, 对配流盘的结构, 特别是阻尼槽的结构和尺寸进行设计, 对柱塞泵流量脉动、压力冲击进行预测分析, 图 2 所示即为建立的单个柱塞的仿真模型。在此基础上, 对整个柱塞泵用到的 10 个柱塞按相位差进行组合, 并按配流窗口的角度分布对吸排油过程的节流面积进行计算, 就得到整个泵的仿真模型。

柱塞泵工作过程中, 油液经过配流盘上的腰形槽流入或者流出柱塞腔, 过流面积随着柱塞腔和配流盘窗口之间相对位置关系而变化, 呈分段函数的形式, 建立的模型中将其分为柱塞后腰形槽进入配流盘三角槽阶段、二者形成弓形窗口阶段、二者重

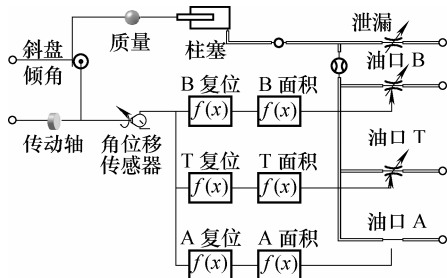


图 2 单个柱塞的仿真模型

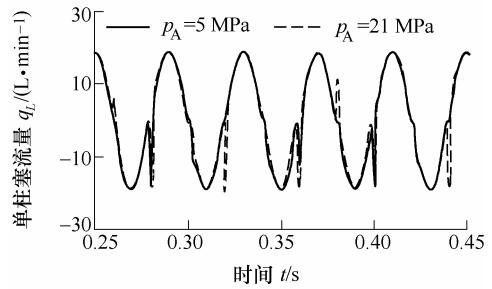
叠面积线性增大阶段、面积恒定最大阶段、面积线性减小阶段和开始转换的弓形减小过程共 6 段，总的过流面积计算公式在仿真软件中采用函数的方法写入。为了能较准确模拟柱塞的吸排油过程，模型中考虑了柱塞与滑靴之间、柱塞与缸体之间以及缸体与配流盘之间的缝隙泄漏。由于油口 C 的特性与现有双配流窗口泵情况一样，因此，仿真主要针对油口 A 特性进行计算，通过仿真计算，确定最终用于样机制造的泵结构参数。

图 3 是按上面建立的仿真模型计算得出泵在转速 1 500 r/min、最大排量 45 mL/r、输出压力分别为 5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 21 MPa 工况下，油口 C 吸油、油口 B 空载，油口 A 输出特性仿真结果。

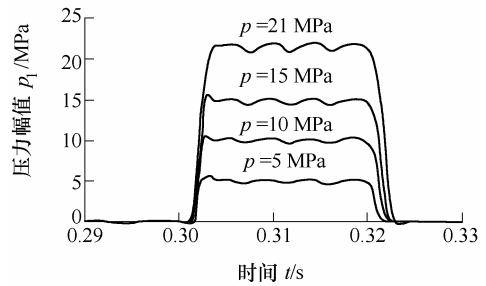
从图 3a 的仿真结果可以看出，对应不同的负载压力，受内泄漏的影响，单腔的输出流量会略有差别，但变化规律相同，只是在从吸油转换为压油的过程中，会产生流量的反向流动，泵出口压力越高，反向流动的流量也越大。由图 3b 单个柱塞腔内的压力变化过程可以看出，经过对卸荷槽的优化，对不同的输出压力，在升压和降压瞬间，腔内压力都不会产生大的压力超调，过度过程比较平稳。油口 A 的输出压力(图 3 c)，随着压力值的增大，压力脉动的幅值会略有增大，原因是流量脉动的幅值也增大，这和现有柱塞泵的变化规律一致。21 MPa 时，压力脉动幅值约为 0.5 MPa，要小于试验结果，原因是试验中泵的进口压力就有压力脉动存在，会产生叠加作用，但变化趋势一致。经过对压力脉动做傅里叶变换，得出泵输出压力的频谱特性如图 3d 所示，可以看出引起最大压力脉动的频率为 25 Hz，这与单个柱塞在泵以 1 500 r/min 转速下的频率一致，其他各次谐波频率都是这一频率值的倍数。

### 2.2 结构设计

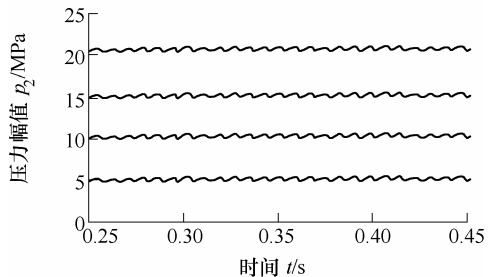
根据第 2.1 节计算确定的泵关键参数，参照现有同等排量泵的结构，采用 Solidworks 设计软件，设计了柱塞泵的三维实体模型及零部件图纸，用于制造并联型三配流窗口轴向柱塞泵样机。图 4 所示为设计的轴向柱塞泵缸体模型及实物照片，通过缸



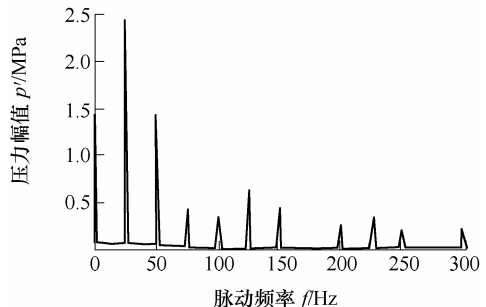
(a) 单个柱塞腔流量特性



(b) 不同压力下单个柱塞腔内压力特性



(c) 不同压力等级下泵出口 A 压力特性



(d) 泵出口 A 压力 21 MPa 的频谱特性

图 3 泵输出特性仿真结果

体底部的配流窗口，实现柱塞与配流盘油口 A、B、C 间的独立连通。

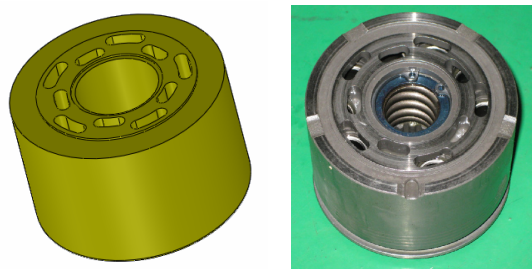


图 4 缸体三维设计模型及实物照片

图 5 所示为设计的配流盘几何模型和制造的实

物照片。图 6a 是根据轴向柱塞泵各元件装配后所得整体装配透视模型,图 6b 为最终制造出的用于测试的并联型非对称配流轴向柱塞泵原理样机。

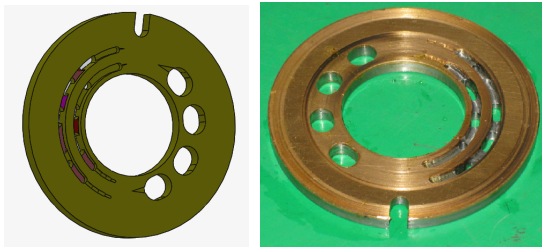
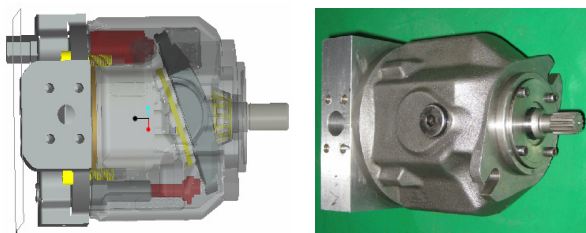


图 5 配流盘几何模型及实物照片



(a) 虚拟样机

(b) 样机照片

图 6 三配流窗口轴向柱塞泵装配透视图及样机照片

### 3 新型柱塞泵试验测试

#### 3.1 测试系统及测试方法

图 7 所示为用于样机泵性能测试的试验系统原理。图 7 中,油口 A、油口 B 分别通过两个先导式溢流阀加载,轴向柱塞泵的三个油口分别连接三个压力传感器,试验中要测试泵三个油口的压力、流量和噪声,测试的压力分别为空载、5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 21 MPa 五个压力等级,通过溢流阀加载至上述压力等级后,进行噪声测量,0~21 MPa 区间的压力脉动状况由压力传感器测试,流量由椭圆齿轮流量计测试,噪声由声强计测试。测试工况分为一进二出,即油口 C 吸油,油口 A 和 B 排油;二进一出,即油口 A 和 B 吸油,油口 C 排油两个阶段,压力回路的变化通过改变电动机的旋转方向实现,电机功率为 55 kW、IV 级,电动机经过变频调速后,设定测试泵转速分别为 1 500 r/min、1 000 r/min 和 500 r/min 三个值。

在图 7 基础上,将泵的油口 A 和 B 连通油箱,油口 C 作为输出口,就构成测试柱塞泵二进一出工况的试验系统,测量过程也是分别测试泵在三种转速下,压力为空载、5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 21 MPa 时,泵出口的压力、流量、噪声等状况。

#### 3.2 容积效率测试

下表为泵流量及容积效率测试数据换算表,

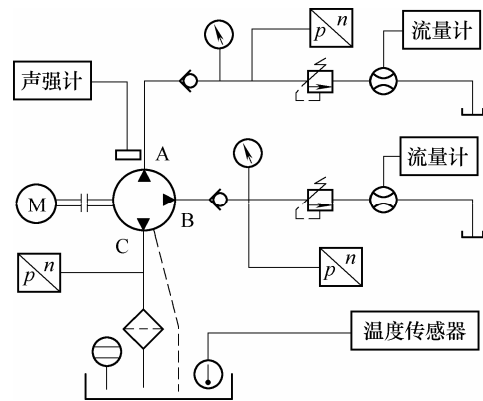


图 7 三配流窗口泵测试系统回路原理

油口 A、油口 B 为一进二出回路测试数据,油口 C 为二进一出回路测试数据。

表 流量测试值与容积效率换算表

参数	压力 $p/\text{MPa}$					
	空载	5	10	15	21	
流量 $q_p/$ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	油口 A	29.1	29.0	28.6	28.2	27.9
	油口 B	30.4	30.3	29.9	29.5	29.2
	油口 C	60.5	60.2	59.5	58.8	58.2
容积效率 $e/\%$	油口 A	—	99.7	98.3	96.9	95.9
	油口 B	—	99.7	98.4	97.0	96.1
	油口 C	—	99.5	98.3	97.2	96.2

油口 A、B 和 C 的流量值均是在不同压力等级下通过流量计测得。在低压时,油口 A 和 B 的流量略有差别,相差 1.3 L/min,随着压力增加,油口 A 和 B 的流量差值逐渐减小,高压时二者逐于一致,符合中高压状态下,泵控差动缸回路使用要求。测试表明,泵 3 个油口的容积效率在 21 MPa 范围内都大于 95%;油口 A、油口 B 的流量之和非常接近油口 C 的流量,3 个油口随压力增加流量变化规律基本一致,试验效果比较理想。

#### 3.3 压力特性测试结果

图 8 是不同转速下出油口 A 的压力特性测试结果。测试时,油口 B 压力保持空载不变,用溢流阀对油口 A 空载,分别加载 5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 21 MPa 的压力,记录油口 A 的压力过程和噪声。由图 8 中曲线可以看出,当油口 B 的压力为空载时,对于不同的压力设定值,A 口压力的脉动幅值随压力设定值的增大也相应增大,但压力脉动幅值都较小,随着泵转速的增加,压力脉动的幅值、特别是高压时明显增大。

图 9 是测试不同转速下,调定油口 A 压力保持 21 MPa 不变,将油口 B 压力分别加载到 5 MPa、10 MPa、15 MPa 和 21 MPa,泵的压力特性曲线。由图 9 中曲线可以看出,低转速工况,油口 B 压力的波动幅值很小,压力值达到 21 MPa 时,叠加了低

频的脉动。高转速工况，B 口的压力脉动幅值增大，当压力达到 21 MPa 时，出现明显的低频脉动，同样，转速低时各压力脉动的幅值都要小于高转速的对应幅值。

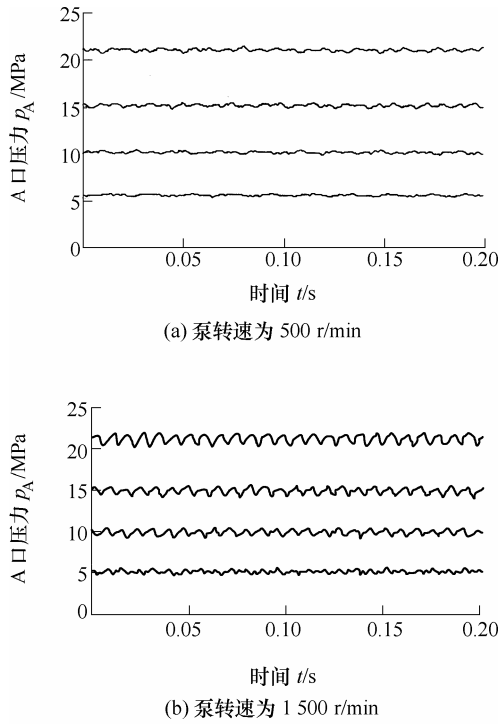


图 8 不同转速下 A 出油口压力特性

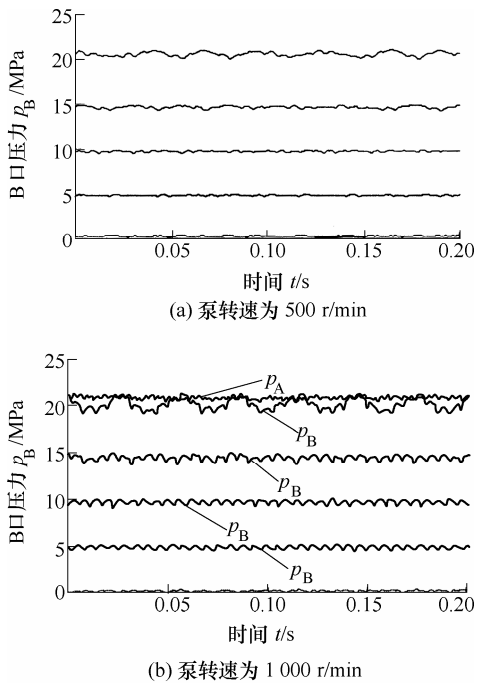


图 9 不同转速下出油口 B 的压力特性

图 10 是不同转速下，A 口和 B 口同时加载的压力特性测试结果。测试时，通过变频器设置液压泵不同的转速，通过溢流阀对油口 A 和 B 加载相同的压力值，同时记录这两个压力值的变化情况和泵

的噪声。由图 10 中曲线可以看出，油口 A 和油口 B 具有几乎相同的压力特性，低速时，压力脉动幅值都很小，高转速工况，随着压力的升高，A 口和 B 口的压力脉动的幅值明显增大，而且二者在相位上要相差 180°。试验结果也表明，这种配流方式，泵可以同时提供两路液压力，控制不同的负载。

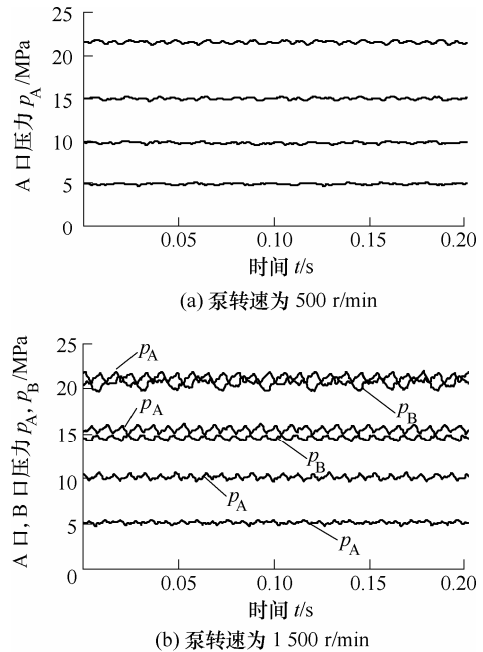


图 10 不同转速下 A 口和 B 口压力特性

图 11 是测试泵二进一出工况的输出压力特性。测试时将油口 A 和 B 与油箱连通，用溢流阀对泵的 C 口施加不同的压力值并记录。由曲线可知，油口 C 的压力脉动幅值要较油口 A 和油口 B 小，但脉动的频率明显增大。

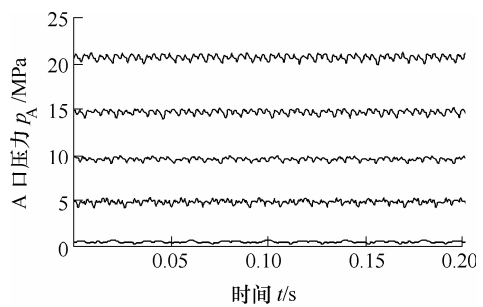


图 11 二进一出工况泵压力特性

### 3.4 噪声特性测试结果

在测量压力的同时记录泵的噪声情况如图 12 和图 13 所示。可以看出，双出油口工作时，如果油口 B 的压力值为空载，则泵的噪声级别随油口 A 压力的升高而增大，当油口 A 设定为最高值 21 MPa 不变，泵的噪声几乎不受 B 口压力的影响，始终处于最大的噪声值。同时改变油口 A 和 B 的压力值，压力低时噪声低，压力高时噪声也增高，变化趋势

与油口 B 空载时一样。试验也表明, 泵的噪声随转速的降低, 明显减小, 当转速从 1 500 r/min 降低到 500 r/min, 噪声值平均降低 10 dB。

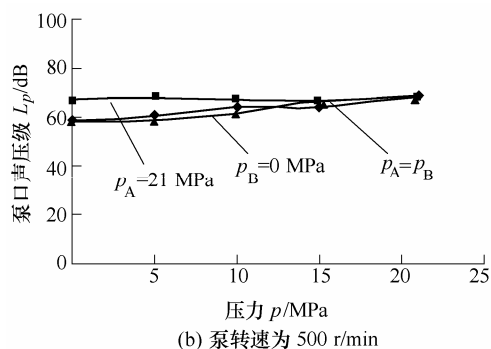
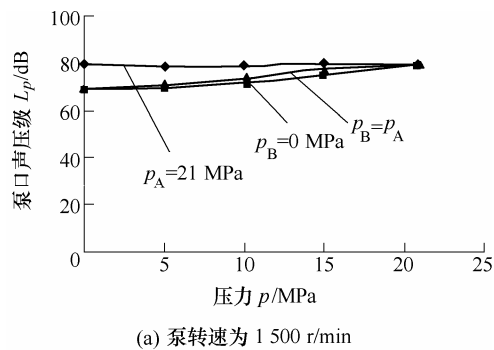


图 12 一进二出工况泵的噪声曲线

由图 13 中的曲线可以看出, 二进一出工况, 随着泵转速的降低, 泵的噪声同样明显减小, 总的趋势是随压力的增大噪声也增大, 与压力脉动的测试结果相吻合, 但总的噪声值要大于一进二出工况的值, 这与泵采用偶数柱塞结构有关。

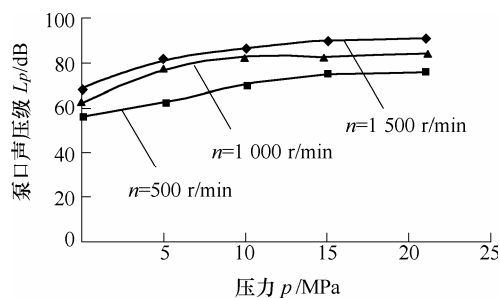


图 13 二进一出工况泵的噪声曲线

## 4 结论

(1) 试验结果验证, 采用并联型三配流窗口, 轴向柱塞泵两个出油口 A、B 可同时提供流量, 驱动不同的负载, 可以用于实际系统。

(2) 在闭式驱动差动缸的运动时, 由于并联型三配流窗口轴向柱塞泵的配流盘卸荷槽为双向三角槽结构, 因而可以由伺服电动机带动, 通过电动机

的正、反转实现泵进、出油口的转化, 方便操作。

(3) 由于采用偶数柱塞, 当采用二进一出方式工作, 泵的噪声要大于一进二出工况。

(4) 从泵的结构上考虑, 适应面积比为 2:1 的液压缸, 最为方便, 当面积比不为 2:1 时, 可以通过改变柱塞的直径, 来适应差动缸的面积比, 也可以通过改变其中一组柱塞的分度圆半径来匹配差动缸的面积差。

## 参 考 文 献

- [1] RAHMFELD R. Development and control of energy saving hydraulic servo driven for mobile machine [D]. Hamburg: Technical University of Hamburg, 2002.
- [2] VICKERS Inc. Electro-hydraulic system and apparatus with bidirectional electric motor hydraulic unit: USA, 98/113581998[P]. 1998-03-19.
- [3] DEMAG Inc. Plastic injection moulding machine controlled with speed variable pump: Germany, 3919823A1[P]. 1990-12-20.
- [4] 付永领. 新型飞机机载作动系统的原理研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1995.  
FU Yongling. Research on principle of new aircraft actuation system [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995.
- [5] 沙南生, 李军. 功率电传机载一体化作动系统的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 909-912.  
SHA Nanshen, LI Jun. Research on airborne power-by-wire integrated electrical actuation and control systems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 909-912.
- [6] FEUSER A, DANTLGRABER J, SPATH D. Servopumpenantriebe fuer differentialzylinder[J]. Oelhydraulik und Pneumatik, 1995, 39(7): 540-544.
- [7] 权龙, NEUBERT T, HELDUSER S. 转速可调泵直接闭环控制差动缸伺服系统的静特性[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 144-148.  
QUAN Long, NEUBERT T, HELDUSER S. Static performance of electro-hydraulic servo system with speed variable pumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 144-148.
- [8] 权龙, NEUBERT T, HELDUSER S. 转速可调泵直接闭环控制差动缸伺服系统的动特性[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 13-17.  
QUAN Long, NEUBERT T, HELDUSER S. Dynamic performance of electro-hydraulic servo system with speed variable Pumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 13-17.

- [9] 权龙, 廉自生. 变量泵、比例阀和蓄能器复合控制差动缸回路原理及应用研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 115-119.  
QUAN Long, LIAN Zisheng. Principle and application of differential cylinder jointly controlled by displacement pump, proportional valve and accumulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 115-119.
- [10] LODEWYKS J. Variable displacement pump closed loop controlled differential cylinder system [D]. Aachen: RWTH Aachen University, 1994.
- [11] RAHMFELD R, IVANTYSYNOVA M. Linear actuator use differential cylinder[C]//The 17th International Fluid Power Conference Ostrava, Czech Republic, 2001: 129-137.
- [12] JORG G, IVANTYSYNOVS M. Model adaptation for robust design of hydraulic joint servo actuators [C]// The 4th International Fluid Power Conference, Wuhan, China, 2003: 16-24.
- [13] 权龙. 泵控缸电液技术的研究现状、存在问题及创新解决方案[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 87-92.  
QUAN Long. Current state, problems and innovative solution of electro-hydraulic technology of pump controlled cylinder [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 87-92.

---

作者简介: 张晓刚, 男, 1964 年出生, 博士研究生。主要研究方向为液压控制系统的节能理论及其应用技术。

E-mail: zyg4458@163.com

权龙(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服及比例控制技术, 获国家科技进步二等奖 1 项, 省级成果奖 4 项, 发表论文 80 余篇。

E-mail: quanlong@tyut.edu.cn

杨阳, 男, 1984 年出生。主要研究方向为电液泵控技术。

E-mail: readyyang\_wonder@163.com

王成宾, 男, 1977 年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为泵控制差动缸技术及其在工程机械中的应用, 发表论文 4 篇。

E-mail: wangchengbin@tyut.edu.cn

姚李威, 男, 1978 年出生, 讲师。主要研究方向为过程控制及测试技术, 发表论文 2 篇。

E-mail: yaoliwei@tyut.edu.cn