

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.048

# 力偶型径向柱塞马达转矩转速特性分析与实验

闻德生 王雷 刘春晓

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

**摘要:**为解决现有液压马达径向力不平衡造成马达易损坏的问题,基于双定子思想,设计了一种力偶型径向柱塞马达,该马达通过力偶输出转矩,输出轴的径向力平衡,不受侧向力的作用。在马达的一个壳体内形成了内、外两个马达,通过不同的配流方式可以输出3种转矩和转速。本文阐述了马达的结构特点和工作原理,分析了导轨曲线与马达转矩转速脉动的关系,通过对马达瞬时转矩的分析,得出了马达转矩转速无脉动的条件,及转矩转速脉动为零时导轨曲线的幅角分配规律。对马达样机进行了加工、实验,测试了马达在3种工作方式下的输出特性。结果表明,转矩转速脉动与进油区段柱塞的速度之和有关,若速度之和为常数,理论上无转矩转速脉动。

**关键词:** 径向柱塞马达; 力偶; 转矩脉动; 特性; 实验

**中图分类号:** TH137.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0402-07

## Analysis and Experiment of Torque Speed Characteristics of Coupled Radial Piston Motor

WEN Desheng WANG Lei LIU Chunxiao

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the existing hydraulic motor is easy to be damaged due to unbalanced radial force, a couple force-type radial piston motor was designed based on the idea of double stators. The radial force balance of motor output shaft was not affected by the lateral force, and the torque was output through the force couple. The inner and outer motors were formed in one shell of the motor, and three kinds of torque and rotational speed can be output through different flow distribution modes. The structural characteristics and working principle of the motor were introduced, and the relationship between curve of guide rail and pulsation of motor torque and rotational speed were analyzed through the analysis of instantaneous torque of motor, the condition that torque and rotational speed of the motor without pulsating was obtained, and the law of angle distribution of guide rail curve when the torque ripple was zero was obtained. A motor test bench was built to test and measure the output characteristics of the motor. When the inner motor worked alone, the output torque was low and the rotation speed was high; when the outer motor worked alone, the torque was high and the rotation speed was low; when the inner and outer motors worked together, the maximum torque and minimum rotation speed were output. The motor prototype was processed and tested, and the output characteristics of the motor under three working modes were tested. The results showed that the torque pulsation was related to the sum of velocities of plungers in the oil inlet section. If the sum of the velocities was constant, there was no torque-speed pulsation in theory.

**Key words:** radial piston motor; force couple; torque ripple; characteristics; experiment

## 0 引言

液压马达是将液压能转换为机械能的液压执行元件,现在广泛应用的液压马达主要包括:齿轮式、

叶片式、轴向柱塞式、螺杆式和径向柱塞式<sup>[1-3]</sup>。大多数液压马达工作时,因受到高压油区的侧向力,加速了马达关键零部件的疲劳损坏,降低了马达的寿命<sup>[4-7]</sup>。而对于径向力平衡的马达,如双作用叶片

收稿日期: 2018-06-04 修回日期: 2018-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975246)

作者简介: 闻德生(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事液压元件与液压传动研究,E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

马达,由于自身结构的限制,无法进行无级变量,导致马达在某些工况下不能满足使用要求<sup>[8-9]</sup>。

为了解决上述问题,基于双定子思想<sup>[10-14]</sup>,提出一种基于力偶原理的马达,该马达工作时马达输出轴的径向力平衡,通过合力偶输出转矩。可以输出 3 种转矩和转速,保证径向力平衡的同时提高马达的调速范围。

### 1 结构特点和工作原理

力偶型径向柱塞马达结构如图 1 所示。

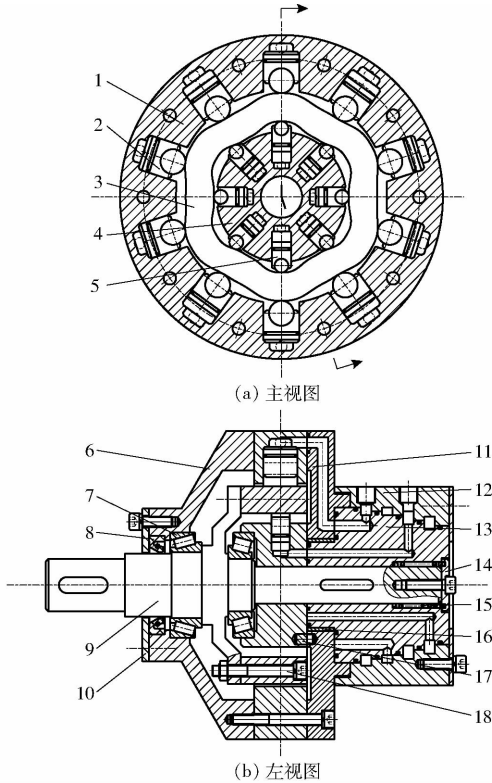


图 1 力偶型径向柱塞马达结构图

Fig.1 Structure diagram of couple type radial piston motor

- 1. 外缸体 2. 外柱塞副 3. 凸轮环 4. 内缸体 5. 内柱塞副
- 6. 左壳体 7. 圆锥滚子轴承 8. 无骨架橡胶油封 9. 输出轴
- 10. 左端盖 11. 右壳体 12. 配流盘壳体 13. 配流盘 14. 轴端挡圈
- 15. 弹簧 16. 滑动轴承 17. 圆柱销 18. 螺栓

由于马达的内、外缸体相互独立且有独立的配流机构,因此该马达可以在一个壳体内形成内、外 2 个马达。内缸体、凸轮环的内导轨、配流盘和输出轴形成内马达;外缸体、凸轮环的外导轨、配流盘和输出轴形成外马达。通过不同的配流方式,使马达有 3 种工作方式,输出 3 种不同的转矩和转速。

凸轮环与马达输出轴相接,内、外缸体与马达的壳体通过螺栓连接,当在马达的内缸体输入高压油时,油液驱动柱塞径向移动并作用到凸轮环,柱塞对凸轮环产生作用力,该力可分解为切向力和径向力,径向力与作用在柱塞上的液压力相平衡,切向力作

用于马达的旋转中心,与关于旋转中心对称的另一个柱塞产生的切向力相等,方向相反且不共线,两个力对凸轮环产生了一个力偶矩,从而驱动马达的输出轴产生转矩。同理,当在马达的外缸体中通入高压油时,外柱塞对凸轮环作用力可以分解为沿缸体半径的径向力和切向力,通过切向力的作用输出转矩。

### 2 马达瞬时转矩分析

马达转矩脉动是评价液压马达性能的重要参数<sup>[15-20]</sup>,故对马达 3 种工作方式下的瞬时转矩进行分析。

#### 2.1 内马达单独工作

##### 2.1.1 瞬时转矩

高压油对柱塞的作用产生转矩,各个柱塞产生的瞬时转矩相互作用,合成了马达的瞬时转矩,因此应先分析单个柱塞产生的瞬时转矩。

如图 2 所示,柱塞与凸轮环的作用力分解为径向力和切向力,切向力对输出轴产生转矩,可得单个柱塞的理论瞬时转矩为

$$T_i = F_{ii}\rho_i = F_{pi}\tan\beta_i\rho_i = A_1\Delta p\tan\beta_i\rho_i \quad (1)$$

- 其中  $F_{ii} = F_{pi}\tan\beta_i$   $F_{pi} = A_1\Delta p$
- 式中  $T_i$ ——单个柱塞产生的理论瞬时转矩, N·m
- $F_{ii}$ ——导轨对单个柱塞的切向分力, N
- $F_{pi}$ ——导轨对单个柱塞的径向分力, N
- $A_1$ ——内柱塞的作用面积, m<sup>2</sup>
- $\beta_i$ ——柱塞与导轨曲线的压力角, rad
- $\Delta p$ ——内马达进出口压差, Pa
- $\rho_i$ ——柱塞对应导轨曲线的矢径, m

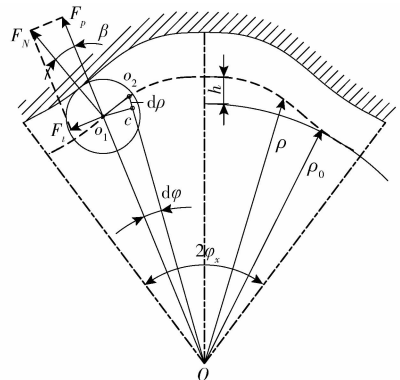


图 2 柱塞在内导轨曲线的受力图

Fig.2 Force diagram of plunger on inner rail curve

设柱塞转过  $d\varphi$  时的径向移动距离为  $d\rho$ ,如图 2 所示,  $\Delta o_1o_2c$  为对应的微元三角形,  $o_1c$  为  $d\varphi$  角度所对应的弧长,可得

$$\tan\beta_i = \frac{\widehat{o_2c}}{\widehat{o_1c}} = \frac{d\rho_i}{\rho_i d\varphi_i} = \frac{v_{ei}}{\rho_i} \quad (2)$$

式中  $v_{\varphi_i}$ ——导轨曲线的速度, m/rad

物理意义为柱塞转过一弧度时径向移动的距离

$$v_{\varphi_i} = d\rho_i/d\varphi_i$$

将式(2)代入式(1)可得

$$T_i = \Delta p A_1 v_{\varphi_i} \quad (3)$$

设内马达的柱塞总数为  $z$ , 位于进油区段的柱塞数为  $z_0$ , 可得内马达的理论瞬时转矩为

$$T_{sh1} = \sum_{i=1}^{z_0} T_i = \Delta p A_1 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i} \quad (4)$$

### 2.1.2 瞬时转速

设单个柱塞在  $dt$  内转过的角度为  $d\varphi$ , 容积变化量为  $dv$ , 由图 2 可得

$$dv_i = A_1 d\rho_i$$

单个柱塞的理论瞬时流量为

$$Q_i = \frac{dv_i}{dt} = \frac{dv_i}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{A_1 d\rho_i}{d\varphi} \omega_1 = A_1 \omega_1 v_{\varphi_i} \quad (5)$$

式中  $\omega_1$ ——内马达的角速度, rad/s

将进油区段内各个柱塞的瞬时流量相加, 得到内马达的理论瞬时流量

$$Q_{sh1} = \sum_{i=1}^{z_0} Q_i = A_1 \omega_1 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i} \quad (6)$$

式中  $Q_{sh1}$ ——内马达的理论瞬时流量,  $m^3/s$

设输入马达的流量为  $q$ , 则内马达的理论瞬时转速为

$$n_{sh1} = \frac{q}{2\pi A_1 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i}} \quad (7)$$

### 2.2 外马达单独工作

如图 3 所示, 外马达输出转矩时, 外柱塞与外导轨曲线相互作用, 形成转矩。设外马达的柱塞在  $dt$  内转过的角度为  $d\varphi$ , 在此过程中柱塞与缸体孔之间容积的变化量为  $dv$ , 得外马达的理论瞬时流量为

$$Q_{sh2} = \frac{dv}{dt} = \frac{A_2 d\rho_i}{d\varphi} \omega_2 = A_2 \omega_2 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i} \quad (8)$$

式中  $Q_{sh2}$ ——外马达的理论瞬时流量,  $m^3/s$

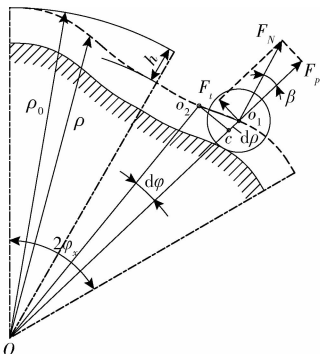


图 3 柱塞在外导轨曲线的受力图

Fig. 3 Force diagram of plunger on outer rail curve

$A_2$ ——外柱塞的作用面积,  $m^2$

$\omega_2$ ——外马达的角速度, rad/s

由式(8)可以得到, 外马达的理论瞬时转矩和理论瞬时转速为

$$T_{sh2} = \frac{\Delta p Q_{sh2}}{\omega_2} = \Delta p A_2 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i} \quad (9)$$

$$n_{sh2} = \frac{q}{2\pi A_2 \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i}} \quad (10)$$

### 2.3 内、外马达共同工作

在内、外马达共同工作时, 两个马达将输出合转矩, 而两个马达的配流机构相互独立, 故两个马达共同工作时的合瞬时转矩为内、外马达瞬时转矩的叠加。

$$T_{sh3} = T_{sh1} + T_{sh2} \quad (11)$$

内、外马达共用一个输出轴, 故共同工作时的角速度相同, 内、外马达共同工作时的理论瞬时排量为

$$V_{sh3} = V_{sh1} + V_{sh2} = 2\pi \left( A_1 \sum_{i=1}^{z_1} v_{1\varphi_i} + A_2 \sum_{i=1}^{z_2} v_{2\varphi_i} \right) \quad (12)$$

式中  $V_{sh3}$ ——内外马达共同工作时理论瞬时排量,  $m^3/r$

$V_{sh2}$ ——外马达的理论瞬时排量,  $m^3/r$

$V_{sh1}$ ——内马达的理论瞬时排量,  $m^3/r$

$z_1$ ——内马达中位于进油区段内的柱塞数

$z_2$ ——外马达中位于进油区段内的柱塞数

$v_{1\varphi_i}$ ——内导轨曲线的速度, m/rad

$v_{2\varphi_i}$ ——外导轨曲线的速度, m/rad

内、外马达共用工作时的理论瞬时转速为

$$n_{sh3} = \frac{q}{V_{sh3}} = \frac{q}{2\pi \left( A_1 \sum_{i=1}^{z_1} v_{1\varphi_i} + A_2 \sum_{i=1}^{z_2} v_{2\varphi_i} \right)} \quad (13)$$

### 3 马达输出转矩转速无脉动的条件

第 2 节推导了马达 3 种工作方式下的瞬时转矩和转速公式。在马达输入油液的压力和流量不变的情况下, 马达的瞬时转矩与马达进油区内柱塞的速度之和有关。若马达进油区内柱塞的速度之和为常数, 则马达的瞬时转矩不变, 理论上马达不会出现转矩的波动; 若马达进油区内柱塞的速度之和不为常数(基于导轨曲线的表达式一般呈周期函数的变化), 则马达的瞬时转矩会出现最大值和最小值, 马达在运行过程中会出现转矩脉动。因此可以得出马达输出转矩无脉动的条件为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{z_0} v_{\varphi_i} = \text{const} \\ \sum_{i=1}^{z_0} a_{\varphi_i} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $a_{\varphi_i}$ ——导轨曲线的加速度,  $\text{m}/\text{rad}^2$

马达进油区内柱塞的速度之和与导轨曲线和马达在进油区段内柱塞的分布位置有关。以 6 作用 8 柱塞的导轨曲线为例,分析柱塞在导轨曲线上的分布情况,如图 4 所示。图 4b 中的阴影部分表示进油区段,无阴影部分表示回油区段,柱塞均匀分布在导轨曲线上,两个柱塞之间的夹角为  $2\pi/z$ ,导轨曲线的一个作用幅角为  $2\varphi_x$ 。由图 4 可得,8 个柱塞被平均分为两组,两组柱塞在导轨曲线上的相位对应相等。由图 4b 可知,柱塞在转过  $\Delta\varphi$  后,柱塞又回到在导轨曲线上的起始分布状态,可知每组柱塞在导轨曲线上的运动周期为  $\Delta\varphi$ ,故马达进油区段柱塞的分布是以  $\Delta\varphi$  为周期变化的,马达的转矩脉动周期为  $\Delta\varphi$ 。

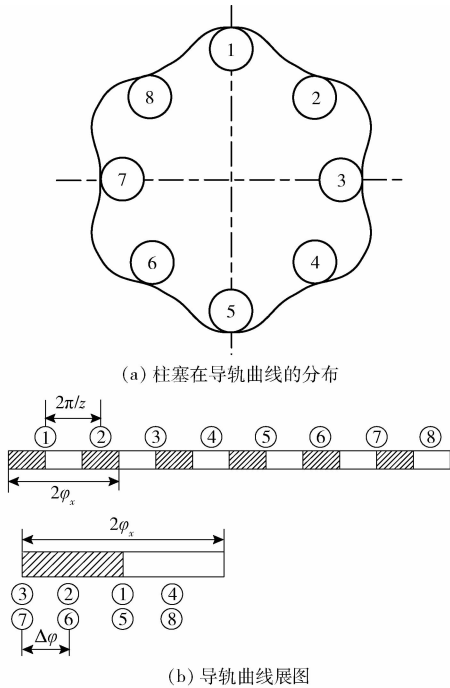


图 4 柱塞在导轨曲线的分布图

Fig. 4 Distribution plot of plunger on guide rail

设马达的作用数为  $x$ , 柱塞数为  $z$ , 作用数和柱

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 & (0 \leq \varphi \leq \varphi_0) \\ \rho_0 + \frac{a_{\varphi_1}(\varphi - \varphi_0)^2}{2} & (\varphi_0 < \varphi \leq \varphi_0 + \varphi_1) \\ \rho_0 + \frac{a_{\varphi_1}\varphi_1^2}{2} + a_{\varphi_1}\varphi_1(\varphi - \varphi_0 - \varphi_1) & (\varphi_0 + \varphi_1 < \varphi \leq \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2) \\ \rho_0 + \frac{a_{\varphi_1}\varphi_1^2}{2} + a_{\varphi_1}\varphi_1\varphi_2 + a_{\varphi_1}\varphi_1(\varphi - \varphi_0 - \varphi_1 - \varphi_2) + \frac{a_{\varphi_3}(\varphi - \varphi_0 - \varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} & (\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 < \varphi \leq \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \\ \rho_0 + \frac{a_{\varphi_1}\varphi_1^2}{2} + a_{\varphi_1}\varphi_1\varphi_2 + a_{\varphi_1}\varphi_1\varphi_3 + \frac{a_{\varphi_3}\varphi_3^2}{2} & (\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 < \varphi \leq \frac{\varphi_x}{2}) \end{cases} \quad (17)$$

塞数的最大公约数为  $m$ , 可以将柱塞分成相位对应相同的  $m$  个柱塞组, 每组柱塞数为  $z' = z/m$ , 得到马达的转矩脉动周期为

$$\Delta\varphi = \frac{2\varphi_x}{z'} = \frac{2\pi m}{xz} \quad (15)$$

其中

$$\varphi_x = \pi/x$$

式中  $\varphi_x$ ——导轨曲线的作用幅角,  $\text{rad}$

由于每个柱塞组在导轨曲线上的分布情况和运动规律相同, 只需研究一个柱塞组在进油区段内的速度和, 而一组柱塞在进油区段内的柱塞数应为  $z'/2$ , 故马达输出转矩无脉动的条件改写为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{z'/2} v_{\varphi_i} = \text{const} \\ \sum_{i=1}^{z'/2} a_{\varphi_i} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

#### 4 导轨曲线的转矩脉动分析

力偶型径向柱塞马达通过柱塞与凸轮环的作用输出转矩, 凸轮环上的导轨曲线与马达的输出转矩有着直接的关系。该力偶型径向柱塞马达采用等加速-阿基米德螺旋线-等减速曲线, 设等加速、等减速曲线的幅角分别为等速区  $\varphi_0$ 、等加速区  $\varphi_1$ 、等速区  $\varphi_2$ 、等减速区  $\varphi_3$ , 在一个作用区段内各个幅角的分配情况如图 5 所示。

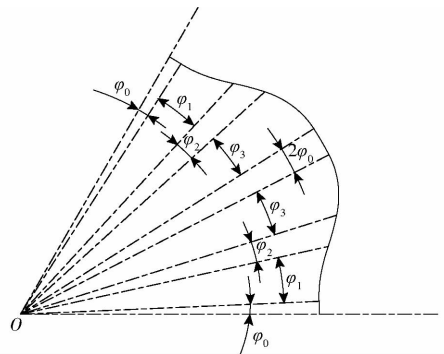


图 5 等加速、等减速曲线在 1 个作用区段内各幅角的分配情况

Fig. 5 Distribution of angles of acceleration and other deceleration curves within one active zone

其方程式为

分析导轨曲线下的转矩脉动情况。曲线在等加速等减速区段内的加速度为常数。在加速区和减速区的加速度应满足

$$a_{\varphi_1}\varphi_1 + a_{\varphi_3}\varphi_3 = 0$$

即

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_3} = -\frac{a_{\varphi_3}}{a_{\varphi_1}} \quad (18)$$

设位于加速区段内的柱塞数为  $z'_1$ , 等速区段内的柱塞数为  $z'_2$ , 减速区段内的柱塞数为  $z'_3$ , 则转矩转速脉动为零应满足

$$\sum_{i=1}^{z'/2} a_{\varphi_i} = z'_1 a_{\varphi_1} + z'_2 a_{\varphi_2} + z'_3 a_{\varphi_3} = 0 \quad (19)$$

其中  $a_{\varphi_2} = 0$

式中  $a_{\varphi_1}$ ——导轨曲线等加速区的加速度,  $\text{m}/\text{rad}^2$

$a_{\varphi_2}$ ——导轨曲线等速区加速度,  $\text{m}/\text{rad}^2$

$a_{\varphi_3}$ ——导轨曲线等减速区的加速度,  $\text{m}/\text{rad}^2$

将式(18)代入式(19), 可得

$$\sum_{i=1}^{z'/2} a_{\varphi_i} = z'_1 a_{\varphi_1} - z'_3 \frac{\varphi_1}{\varphi_3} a_{\varphi_1} = a_{\varphi_1} \left( z'_1 - z'_3 \frac{\varphi_1}{\varphi_3} \right) = 0 \quad (20)$$

因为  $a_{\varphi_1} \neq 0$ , 所以

$$\frac{z'_1}{z'_3} = \frac{\varphi_1}{\varphi_3} \quad (21)$$

$z'_1$  和  $z'_3$  为正整数, 与加速区和减速区的幅角关系为

$$\begin{cases} z'_1 = \frac{\varphi_1}{\Delta\varphi} = k_1 \\ z'_3 = \frac{\varphi_3}{\Delta\varphi} = k_3 \end{cases} \quad (22)$$

导轨曲线的一个作用幅角为

$$\varphi_x = 2\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (23)$$

一个作用幅角内柱塞的分布情况为

$$\frac{\varphi_x}{\Delta\varphi} = z'_1 + \frac{2\varphi_0 + \varphi_2}{\Delta\varphi} + z'_3 \quad (24)$$

令  $k = \varphi_x/\Delta\varphi$ ,  $k_2 = (2\varphi_0 + \varphi_2)/\Delta\varphi$ , 则一组柱塞在进油区段内的分布情况为

$$k = k_1 + k_2 + k_3 \quad (25)$$

式中  $k$ ——导轨曲线的总幅角分配系数

$k_1$ ——导轨曲线等加速区幅角分配系数, 为正整数

$k_2$ ——导轨曲线等速区和零速区的幅角分配系数, 为正整数或含有 0.5 的小数

$k_3$ ——导轨曲线等减速区的幅角分配系数, 为正整数

上述求得的幅角是有一定条件的, 必须满足导轨曲线加速区和减速区的幅角是  $\Delta\varphi$  的整数倍, 当不满足这个条件时, 若使  $z'_1/z'_3 = \varphi_1/\varphi_3$  成立, 则应使

马达在工作过程中位于加速区和减速区内的柱塞数相等, 即一个柱塞在进入加速区段时, 减速区段正好移出一个柱塞, 应满足  $\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_3 + \varphi_2$  且为  $\Delta\varphi$  的整数倍, 于是得出

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = k_1 \Delta\varphi \\ \varphi_3 + \varphi_2 = k_3 \Delta\varphi \\ 2\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = k \Delta\varphi \end{cases} \quad (26)$$

经过上述分析可知, 等加速-阿基米德螺旋线-等减速曲线存在等速区, 可以减少加速度突变时柱塞对导轨产生的冲击, 零速区可以消除柱塞在切换高低压油时的困油现象, 经过合理的角度分配可以实现理论上的无转矩转速脉动。本文采用理论上内、外马达无转矩转速脉动的幅角分配方案, 内、外导轨曲线的幅角分配如表 1 所示。

表 1 内、外导轨曲线的幅角分配情况

Tab. 1 Amplitude distribution condition of inner and outer rail curves ( $^\circ$ )

	零速区	等加速区	等减速区	零速区
内导轨	0 ~ 2.5	2.5 ~ 12.5	17.5 ~ 27.5	27.5 ~ 30
外导轨	0 ~ 2	2 ~ 14	16 ~ 28	28 ~ 30

## 5 马达的原理性实验

力偶型径向柱塞马达采用了新型结构形式, 为了验证结构的合理性, 在燕山大学流体传动与控制实验室搭建了马达实验台, 实验现场见图 6, 测量马达在 3 种工作方式下的转矩转速特性。

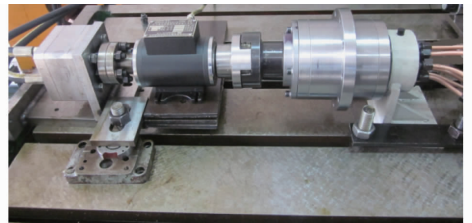


图 6 实验现场

Fig. 6 Test site photo

设计了马达实验的液压系统, 如图 7 所示。该系统可以切换 3 种马达工作方式, 并且可以测量马达工作时的转矩、转速、流量、压力等各项参数。该实验系统通过三位四通换向阀切换马达的 3 种工作方式和正反转, 工作方式的切换如表 2 所示。加载泵作为马达的负载, 通过调节溢流阀的压力来控制负载的大小, 转矩转速测量仪测量马达的输出转矩和转速。流量计 10 和压力表 11 测量液压泵的输出流量和压力, 即为马达进油口的流量和压力, 流量计 13 和压力表 15 测量马达回油口的流量和压力, 流量计 19 和压力表 16 测量加载泵的流量和压力。

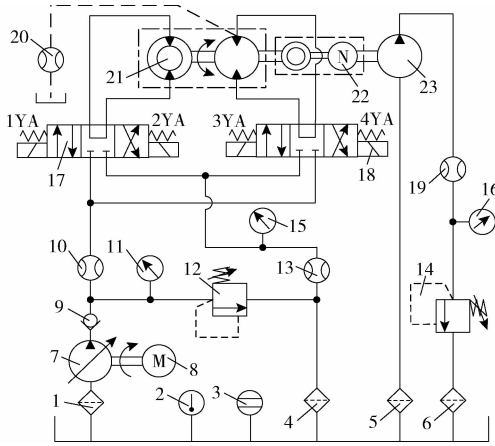


图 7 实验液压系统原理图

Fig. 7 Test system diagram

1, 4, 5, 6. 滤油器 2. 温度计 3. 液位计 7. 变量泵 8. 电机  
9. 单向阀 10, 13, 19, 20. 流量计 11, 15, 16 压力表 12, 14. 溢流阀 17, 18. 三位四通电磁换向阀 21. 力偶型径向柱塞马达 22. 转矩转速测量仪 23. 加载泵

表 2 马达工作方式对应电磁铁的通断电情况

Tab. 2 Working condition of motor corresponded to on-off condition of electromagnet

马达工作方式	1YA	2YA	3YA	4YA
内马达单独工作	+	-	-	-
外马达单独工作	-	-	+	-
内外马达共同工作	+	-	+	-

注：+ 表示通电；- 表示断电。

本次实验对马达进行原理性实验，研究马达 3 种工作方式下的运行情况。考虑实验内容和成本，所加工的实验样机没有进行相关的热处理工序，本次实验中所选用的最高压力为 6 MPa，设计内马达和外马达的理论排量分别为 62、267 mL/r。在不同油液压力下测量马达 3 种工作方式的转矩转速，得到的实验曲线如图 8 所示。

## 6 结论

(1) 在多作用内曲线径向柱塞马达的基础上提

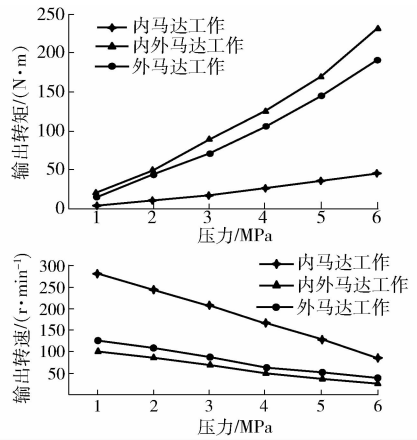


图 8 马达转矩转速实验数据

Fig. 8 Test data of motor torque and speed

出了力偶型径向柱塞马达，该马达在一个壳体中可以形成内、外两个马达，分别有两种排量，内、外马达相互独立，通过配流方式的切换，可以实现内马达单独工作、外马达单独工作和内、外马达共同工作 3 种工作方式。马达的 3 种工作方式可以产生 3 种定排量，在相同的输入压力下可以输出 3 种定转矩和定转速，弥补了定量马达的不足，扩大了马达的应用范围。

(2) 分析了马达导轨曲线与转矩转速脉动的关系，得出了马达 3 种工作方式下的瞬时转矩公式，公式表明，转矩转速脉动与进油区段柱塞的速度之和有关，若速度之和为常数，则无转矩转速脉动。分析了柱塞在导轨曲线的分布情况，得出转矩转速脉动为零时导轨曲线的幅角分配规律。

(3) 搭建了马达实验台，对马达的输出特性进行实验及测量。内马达单独工作时输出转矩较低，转速较高；外马达单独工作时转矩较高，转速较低；内、外马达共同工作时输出最大转矩，最低转速。由数据可得，内、外马达共同工作时的转矩并不是内、外马达转矩的简单相加，而是小于内、外马达转矩之和，这主要是由于这种工作方式的摩擦副较多，机械损失较大。

## 参 考 文 献

- 1 许仰曾. “工业 4.0”下的“液压 4.0”与智能液压元件技术[J]. 流体传动与控制, 2016(1): 1-10.  
XU Yangzeng. “Hydraulic 4.0” and intelligent hydraulic component technology under “industry 4.0” [J]. Fluid Transmission and Control, 2016(1): 1-10. (in Chinese)
- 2 杨尔庄. 中国液压气动工业的现状与展望[J]. 液压气动与密封, 2010, 30(1): 5-9.  
YANG Erzhuang. Current status and prospects of China’s hydraulic pneumatic industry[J]. Hydraulic & Pneumatic & Sealing, 2010, 30(1): 5-9. (in Chinese)
- 3 杨帆. 对称式双外啮合齿轮泵的研究[J]. 制造技术与机床, 2008(9): 145-147.  
YANG Fan. Research on symmetrical double external gear pump[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(9): 145-147. (in Chinese)
- 4 黄方平, 罗从宗, 黄菲, 等. 低速大扭矩多作用内曲线径向柱塞式液压马达的发展与应用[J]. 机床与液压, 2015, 43(4): 181-183.  
HUANG Fangping, LUO Congzong, HUANG Fei, et al. Development and application of low-speed, high-torque multi-acting in-line radial piston hydraulic motors[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(4): 181-183. (in Chinese)

- 5 钟汉田. 内曲线形式对径向柱塞式液压马达输出特性影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.  
ZHONG Hantian. Research on the effect of inner curve form on output characteristics of radial piston hydraulic motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- 6 尹瑞峰, 雷秀, 刘海柱. 单作用叶片泵转子的径向力分析[J]. 流体传动与控制, 2008(1): 26-28.  
YIN Ruifeng, LEI Xiu, LIU Haizhu. Radial force analysis of rotor of single-acting vane pump[J]. Fluid Transmission and Control, 2008(1): 26-28. (in Chinese)
- 7 张立升. 球塞式内曲线液压马达失效分析与径向力不平衡问题[D]. 兰州:兰州理工大学, 2011.  
ZHANG Lisheng. Failure analysis and radial force imbalance problem of ball plunger inner curve hydraulic motor[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 王长江. 中国应该成为液压的大国与强国[J]. 液压气动与密封, 2009, 29(9): 1-3.  
WANG Changjiang. China should become a big power and power in hydraulic states[J]. Hydro-Pneumatic and Sealing, 2009, 29(9): 1-3. (in Chinese)
- 9 赵崇碧. 内曲线液压马达定子曲线设计与寿命验算[J]. 流体传动与控制, 2017(4): 29-32.  
ZHAO Chongbi. Stator curve design and life check of hydraulic motor with inner curve[J]. Fluid Transmission & Control, 2017(4): 29-32. (in Chinese)
- 10 闻德生, 马洪胜, 蔡秋雄, 等. 潜油双定子泵的设计与研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(11): 1110-1113.  
WEN Desheng, MA Hongsheng, CAI Qiuxiong, et al. Design and research of submersible dual stator pump[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(11): 1110-1113. (in Chinese)
- 11 闻德生, 甄新帅, 陈帆, 等. 双定子泵节流调速回路的节能研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(13): 1-4.  
WEN Desheng, ZHEN Xinsuai, CHEN Fan, et al. Research on energy saving of throttle speed regulation circuit of double stator pump[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2017, 45(13): 1-4. (in Chinese)
- 12 闻德生, 刘忠迅, 刘巧燕, 等. 连杆外滚柱型双定子马达及其密封机理研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 57-60.  
WEN Desheng, LIU Zhongxun, LIU Qiaoyan, et al. Research on double-stator motors and their sealing mechanisms of connecting rods[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(5): 57-60. (in Chinese)
- 13 闻德生, 杨杰, 郑珍泉, 等. 双定子对称型多泵多速马达理论特性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 321-324. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140749&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140749&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.049.  
WEN Desheng, YANG Jie, ZHENG Zhenquan, et al. Theoretical analysis of dual stator symmetric multi-pump multi-speed motor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 321-324. (in Chinese)
- 14 闻德生, 常雪, 张少波, 等. 双定子单作用液压马达转矩脉动研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 238-242. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130243&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130243&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.043.  
WEN Desheng, CHANG Xue, ZHANG Shaobo, et al. Research on torque ripple of double-stator single-acting hydraulic motor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 238-242. (in Chinese)
- 15 PENG D, LIU F, XIAO J, et al. Optimal design of five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for low output torque ripple[J]. Large Electric Machine & Hydraulic Turbine, 2016, 10(5): 339-346.
- 16 闻德生, 高俊峰, 周瑞彬, 等. 多作用双定子力偶液压马达转矩脉动分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 319-325. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141050&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141050&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.050.  
WEN Desheng, GAO Junfeng, ZHOU Ruibin, et al. Torque ripple analysis of multi-actuated double-stator coupler hydraulic motor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 319-325. (in Chinese)
- 17 闻德生, 郑珍泉, 杨杰, 等. 力平衡型双定子轴向柱塞马达的转矩脉动分析[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(7): 676-679.  
WEN Desheng, ZHENG Zhenquan, YANG Jie, et al. Torque ripple analysis of force balanced double stator axial piston motor [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(7): 676-679. (in Chinese)
- 18 高殿荣, 王志强, 赵一楠. 径向低速大转矩水液压马达定子曲线特性分析[J]. 机械设计, 2012(9): 33-39, 44.  
GAO Dianrong, WANG Zhiqiang, ZHAO Yi'nan. Analysis of stator curve characteristics of radial low speed and large torque water hydraulic motor[J]. Mechanical Design, 2012(9): 33-39, 44. (in Chinese)
- 19 刘晓滨, 陈新元, 湛从昌, 等. 满配流系数对内曲线径向柱塞马达扭矩的影响[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 290-294.  
LIU Xiaobin, CHEN Xinyuan, ZHAN Congchang, et al. Effect of full flow coefficient on torque of radial piston motor with inner curve[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(4): 290-294. (in Chinese)
- 20 邱冰静, 赵继云. 新型自平衡阀配流式低速大扭矩高水基液压马达的研究[J]. 液压与气动, 2017(9): 71-76.  
QIU Bingjing, ZHAO Jiyun. Research on a new type of self-balanced valve with low speed, high torque and high water-based hydraulic motor[J]. Hydraulic & Pneumatics, 2017(9): 71-76. (in Chinese)