

双定子力偶型液压马达与其转子径向受力特性

刘巧燕 闻德生 吕世君 高俊峰

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 提出了力偶原理液压马达, 分别对不同作用形式下的3种力偶原理进行阐述, 并以转子径向受力为出发点, 分析了马达的叶片数与力偶的关系, 得出叶片数为偶数的偶数作用液压马达以及叶片数能够被作用数整除的奇数作用液压马达才能称为力偶原理液压马达。最后以双定子力偶马达为例对转子的径向受力状况进行分析, 建立双定子液压马达在4种不同工作方式下的转子径向受力数学模型, 分析了马达在4种不同工作方式下的转子径向力特点, 同时搭建实验平台对双定子力偶型液压马达样机进行了测试。结果表明, 在4种不同的工作方式下, 作用在转子上的径向力的大小以及作用位置均呈现周期性变化, 且内、外马达差动工作时转子径向受力最小, 内马达与外马达单独工作时分别次之, 内、外马达联合工作时最大。

关键词: 力偶原理马达; 双定子; 径向受力特性; 差动连接

中图分类号: TH137.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0393-09

Double-stator Couple Hydraulic Motor and Radial Force Characteristics of Rotor

LIU Qiaoyan WEN Desheng LÜ Shijun GAO Junfeng

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

Abstract: Aiming at unbalanced radial force of hydraulic motor, the concept of couple hydraulic motor was proposed, which drove the rotor by a couple acting on the rotor, so that the rotor of the motor was subjected to the balanced radial pressure, the force condition of the rotating parts of the blade motor was improved and the service life of the motor was improved. The principle of three type's couple hydraulic motor under different forms of action was elaborated. Based on the rotor radial force as the starting point, the relationship between number of blades and couple was analyzed in detail. Then it was got that even-acting hydraulic motor with even leaves and odd-acting hydraulic motor with number of blades can be divisible by the motor actions can only be called the couple hydraulic motor. Finally, the radial force of the rotor was analyzed with the double-stator couple motor as an example. The mathematical model of the rotor radial force of the double-stator hydraulic motor in four different working modes was established, and the characteristics of the rotor radial force of the motor under four different working modes were analyzed. And the experimental platform was set up. The results showed that in four different working modes, the radial force acting on the rotor and the position of the action were periodically changed, and the radial force of the rotor was the smallest when the internal and external motor was differentially working. When the inner motor and the outer motor worked separately, the radial force was the second, and the radial force was the largest when the inner and outer motors worked together. Through the experiment of the prototype, the correctness of the principle of double-stator couple hydraulic motor and the rationality of the design of motor structure were verified, which laid a foundation for the future research and development of the double-stator couple hydraulic motor.

Key words: couple hydraulic motor; double-stator; radial force characteristics; differential connection

收稿日期: 2018-09-07 修回日期: 2018-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50975246)

作者简介: 刘巧燕(1989—), 女, 博士生, 主要从事新型液压元件研究, E-mail: liuqiaoyan419729@126.com

通信作者: 闻德生(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型液压元件及液压传动研究, E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

0 引言

现有液压马达,无论是齿轮式、叶片式(双作用叶片马达除外),还是柱塞式,由于受基本工作原理的限制,马达在一侧输入高压油,一侧排出低压油^[1-2]。马达转子在受到高压油驱动力矩的同时,还将受到高压区极大的侧向力,以致马达运动副中存在不平衡力,同时在系统液压脉动的作用下,马达运动副始终处于复杂的交变载荷下,这导致马达零件、标准件(轴承、弹簧)加速疲劳破坏,是马达实际使用寿命短的根本原因^[3-5]。

由于径向不平衡力的存在,这就使得在设计液压马达零件时,为了解决液压马达的不平衡力而增加零件的抗弯强度,致使零件的结构尺寸增大,最终会导致液压马达体积大、质量大、比功率小^[6-8]。

针对上述问题,并结合目前已对双定子系列新型元件进行的一系列分析与研究^[9-21],本文提出力偶原理液压马达,通过原理及结构上的设计,使马达转子、轴、轴承等关键零部件在工作过程中不受不平衡径向力的作用,从本质上改变马达关键零部件的受力状态,以提高其使用寿命。

1 力偶型液压马达定义及分类

力偶原理液压马达在结构上必然为双作用或多作用形式,马达内有多个高压油区及相同数量的低压油区。其中,多作用形式又分为偶数作用与奇数作用的力偶原理液压马达。以偶数作用力偶原理液压马达中的双作用叶片马达为例,如图 1 所示,通过液压油的作用,其依靠作用在转子上的一个力偶来

驱动转子旋转,使得马达的转子受到平衡的径向液压力,从而使叶片马达的旋转部件的受力状况得到改善,进而提高马达的使用寿命。

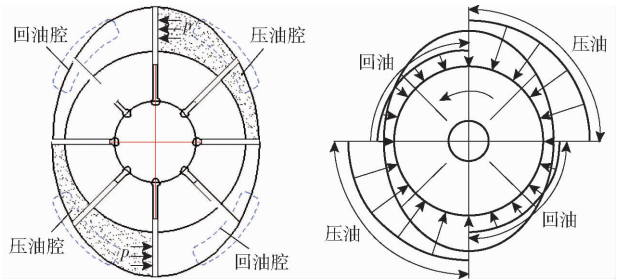


图 1 双作用叶片马达受力示意图
Fig. 1 Force diagram of double acting vane motor

力偶原理液压马达定义为:液压马达工作时,在垂直于转子轴方向的任意平面内,转子受到的合力为零,但合力矩不为零,形成力偶,此力偶使液压马达产生转矩和转速,这种径向力平衡的液压马达称为力偶原理液压马达。根据不同的作用形式,力偶型液压马达可以分为以下 3 种不同的类型。

1.1 力偶原理液压马达

力偶——大小相等、方向相反,但作用线不在同一直线上的一对力。力偶能使物体产生纯转动效应,从而消除液压马达中存在的径向不平衡力,现有的双作用叶片马达是力偶原理液压马达的典型结构。

1.2 力偶系原理液压马达

力偶系——作用在同一平面内的多个力偶组成的力偶集合。力偶系使物体产生的纯转动效应与力偶的作用相似,同样可以消除液压马达中存在的径向不平衡力,现有的多作用内曲线径向柱塞式液压马达与四作用液压马达都是力偶系液压马达的典型结构,四作用液压马达的受力示意图如图 2 所示。

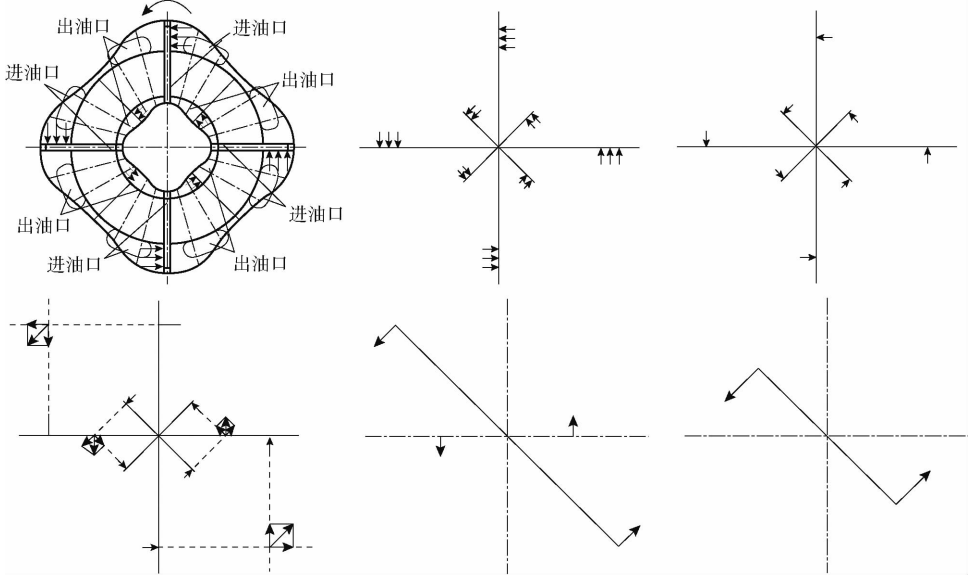


图 2 四作用双定子液压马达受力示意图

Fig. 2 Force diagram of four-acting double-stator motor

1.3 类力偶原理液压马达

类力偶——两个以上奇数个大小相等、沿等径圆周方向均布的一组力的集合。类力偶虽然不属于力偶和力偶系的概念,但是类力偶对刚体产生的综合作

用效果是合力为零、合力矩不为零,与力偶和力偶系的作用效果相同,同样可以消除马达转子中存在的径向不平衡力。双定子三作用叶片马达是类力偶原理液压马达的典型结构,其受力示意图如图 3 所示。

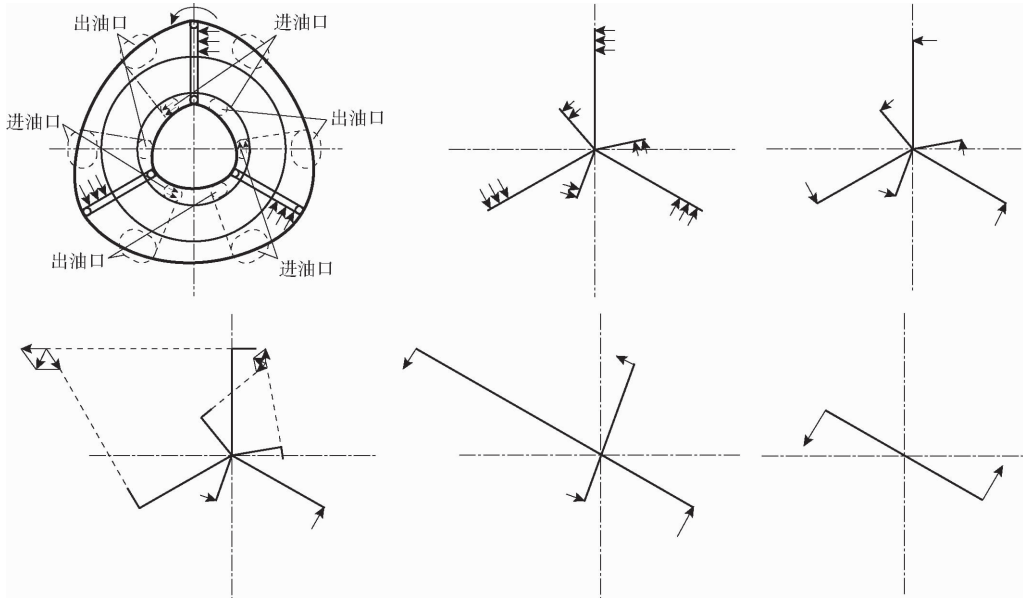


图 3 三作用双定子液压马达受力示意图
Fig. 3 Force diagram of three-acting double-stator motor

2 马达叶片数与力偶的关系

力偶型双定子液压马达中的力偶是由高压区的高压油液作用在多个叶片上产生的,所以探讨力偶与叶片数的关系是提高力偶理论作用效果的关键。

2.1 偶数作用双定子马达的转子径向受力

对于作用数为偶数的双定子液压马达来说,只有当其叶片数为偶数时,由于其高、低压油腔各自成对地对称分布,因此作用于转子圆周上的径向液压力基本平衡,此时转子所受的径向液压力平衡。

双作用双定子偶数叶片在不同工作方式下的高压油液分布示意图如图 4 所示。由图 4 可知,双作用双定子液压马达的各高压油腔均对称分布,所以 4 种不同工作方式下转子所受到的径向液压力基本平衡。

2.2 奇数作用双定子马达的转子径向受力

叶片式马达转子受到的径向力由直接作用在转子圆周上的液压力和作用在封油区叶片上的液压力两部分组成。除了单作用叶片式马达外,处于封油区的叶片均是在大、小圆弧区段的叶片,叶片两侧均受到相同压力油液的作用,而此时叶片所受液压力的方向均沿转子切向方向。因此,对于 $N(N > 1)$ 作用的叶片马达,转子所受径向力只有直接作用在转子圆周上的液压力。

2.2.1 每个作用周期内叶片数相同

如图 5 所示,转子在旋转的过程中,由相邻两个滚柱连杆组与转子、定子、两侧配流装置所组成的密闭容腔的数目也是不断变化的,并且与每个作用周期内的连杆组数也有密切的关系。

(1) 叶片数相同且为奇数

由分析可知每个作用周期内由相邻两滚柱连杆组所围成的高压密闭腔的个数为

$$M_1 = \begin{cases} \frac{z_1 - 1}{2} & (0 \leq \varphi \leq \beta_0 - \beta, \beta_0 - \frac{\beta}{2} < \varphi \leq \beta) \\ \frac{z_1 + 1}{2} & (\beta_0 - \beta < \varphi \leq \beta_0 - \beta/2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 β_0 ——配油窗口的夹角
 β ——两相邻滚柱连杆组夹角
 z_1 ——一个作用周期内的滚柱连杆组数
 φ ——叶片 1 与坐标起始线夹角

在不考虑滚柱连杆组厚度的情况下,单个高压密闭容腔受到高压油作用从而对转子产生的径向液压力分别为:

外马达单独工作

$$F_{r1} = 2p_1BR\sin\frac{\beta}{2} \quad (2)$$

内马达单独工作

$$F_{r2} = 2p_1Br\sin\frac{\beta}{2} \quad (3)$$

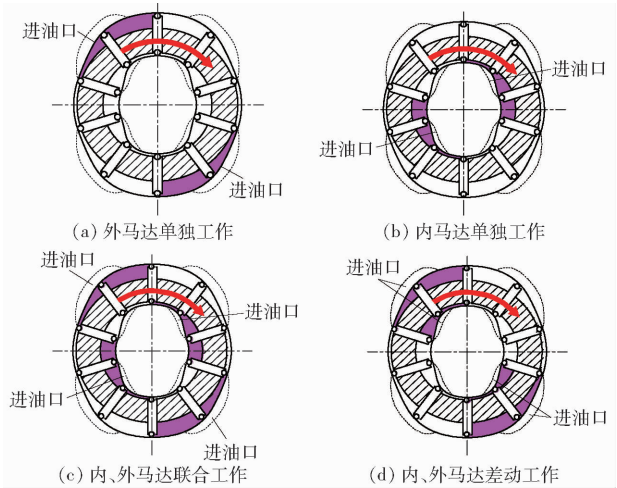


图 4 双作用双定子液压马达高压油液分布示意图

Fig.4 High pressure oil distribution diagrams of double-acting double-stator hydraulic motor

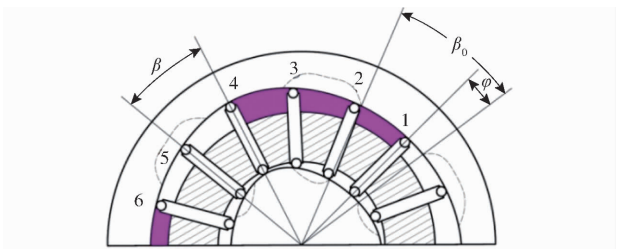


图 5 转子径向受力分析简图

Fig.5 Radial force analysis diagram of rotor

内、外马达联合工作

$$\begin{cases} F_{r1} = 2p_1BR\sin\frac{\beta}{2} \\ F_{r2} = 2p_1Br\sin\frac{\beta}{2} \end{cases} \tag{4}$$

内、外马达差动工作

$$F_r = 2p_1B(R-r)\sin\frac{\beta}{2} \tag{5}$$

式中 R ——转子外圆半径,mm
 r ——转子内圆半径,mm
 p_1 ——高压油腔油液压力,MPa
 B ——转子宽度,mm

因此,在一个作用周期内就有 M_1 个这样的径向液压力指向转子圆心,而这 M_1 个径向液压力又可以合成一个指向转子圆心的合力,且此合力与坐标起始线的夹角为

$$\theta = \frac{M_1}{2}\beta + \varphi \tag{6}$$

(2) 叶片数相同且为偶数

由分析可知,当每个作用周期内的滚柱连杆组数目是偶数时,不管 φ 怎样变化,由相邻两滚柱连杆组所围成的高压密闭腔的个数均为 $M_2 = \frac{z_1}{2}$ 。此时,单个高压密闭容腔受到高压油的作用而对转子产

生的径向液压力与奇数时相同;每个作用周期内的 M_2 个径向液压力也可以合成一个指向转子圆心的径向合力,且与坐标的起始线的夹角为 $\frac{M_2}{2}\beta + \varphi$ 。

结合上述两种情况可知,当每个作用周期内的滚柱连杆组数相同,对于 N (此时 N 为奇数) 作用的双定子液压马达来说, N 个作用周期内就有 N 个大小相等的径向液压合力沿转子外圆周表面或内圆周表面均匀分布且均指向转子圆心或背离转子圆心。在 4 种不同的工作方式下,转子在工作的过程中均受到平衡径向液压力的作用。

2.2.2 每个作用周期内叶片数不同

以三作用双定子液压马达为例进行分析,当 3 个作用周期中的 1 个作用周期内的滚柱连杆组数为 z_1 (令 z_1 为奇数, z_1 为偶数时的情况与奇数时相同) 时,3 个作用周期内的滚柱连杆组数的分布有以下 4 种情况:①2 个作用周期内的滚柱连杆组数为 z_1 , 1 个作用周期内的滚柱连杆组数为 $z_1 - 1$ 。②2 个作用周期内的滚柱连杆组数为 z_1 , 1 个作用周期内的滚柱连杆组数为 $z_1 + 1$ 。③1 个作用周期内的滚柱连杆组数为 z_1 , 2 个作用周期内的滚柱连杆组数为 $z_1 - 1$ 。④1 个作用周期内的滚柱连杆组数为 z_1 , 2 个作用周期内的滚柱连杆组数为 $z_1 + 1$ 。

与上述分析方法类似,分别分析每个作用周期内高压油腔的个数,然后得出双定子液压马达在不同工作方式下的转子径向受力状况,在此仅以第 1 种情况为例进行说明。在此条件下高压油腔的数目情况为:1 个作用周期内的高压油腔的个数为 $\frac{z_1 + 1}{2}$,

2 个作用周期内的高压油腔的个数为 $\frac{z_1 - 1}{2}$ 。此时每个作用周期内的高压密闭容腔受到高压油的作用从而对转子产生的径向液压力为:

外马达单独工作

$$\begin{cases} F_{1out} = F_{2out} = \frac{z_1 - 1}{2}F_{r1} \\ F_{3out} = \frac{z_1 + 1}{2}F_{r1} \end{cases} \tag{7}$$

内马达单独工作

$$\begin{cases} F_{1in} = F_{2in} = \frac{z_1 - 1}{2}F_{r2} \\ F_{3in} = \frac{z_1 + 1}{2}F_{r2} \end{cases} \tag{8}$$

内、外马达联合工作

$$\left\{\begin{aligned} F_{1out} &= F_{2out} = \frac{z_1 - 1}{2} F_{r1} \\ F_{3out} &= \frac{z_1 + 1}{2} F_{r1} \\ F_{1in} &= F_{2in} = \frac{z_1 - 1}{2} F_{r2} \\ F_{3in} &= \frac{z_1 + 1}{2} F_{r2} \end{aligned}\right. \quad (9)$$

$$\left\{\begin{aligned} \theta_1 &= \theta'_1 = z_1 \beta \\ \theta_2 &= \theta'_2 = \frac{3}{4}(z_1 + 1) \beta \end{aligned}\right. \quad (11)$$

内、外马达差动工作

$$\left\{\begin{aligned} F_1 &= F_2 = \frac{z_1 - 1}{2} F_r = \frac{z_1 - 1}{2} 2p_1 B(R - r) \sin \frac{\beta}{2} \\ F_3 &= \frac{z_1 + 1}{2} F_r = \frac{z_1 + 1}{2} 2p_1 B(R - r) \sin \frac{\beta}{2} \end{aligned}\right. \quad (10)$$

以 z_1 取 5 为例, 液压马达在 4 种不同工况下转子所受径向液压力的情况如图 6 所示。

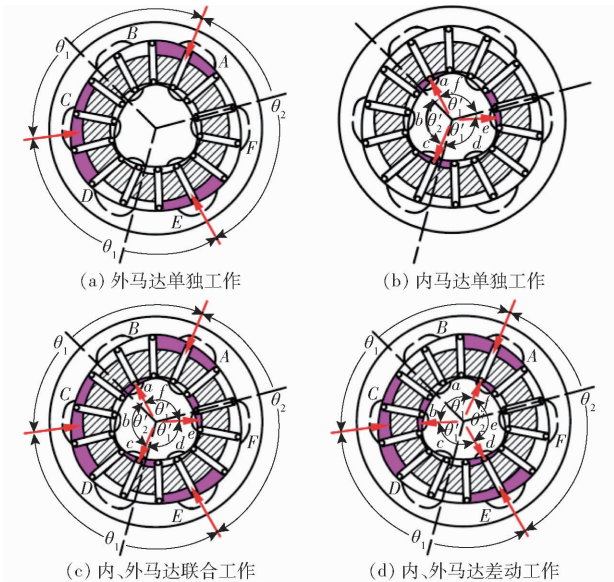


图 6 z_1 取 5 时三作用双定子液压马达受力简图
Fig. 6 Force diagrams of three-acting double-stator hydraulic motor when z_1 was 5

图中各径向力之间的夹角为

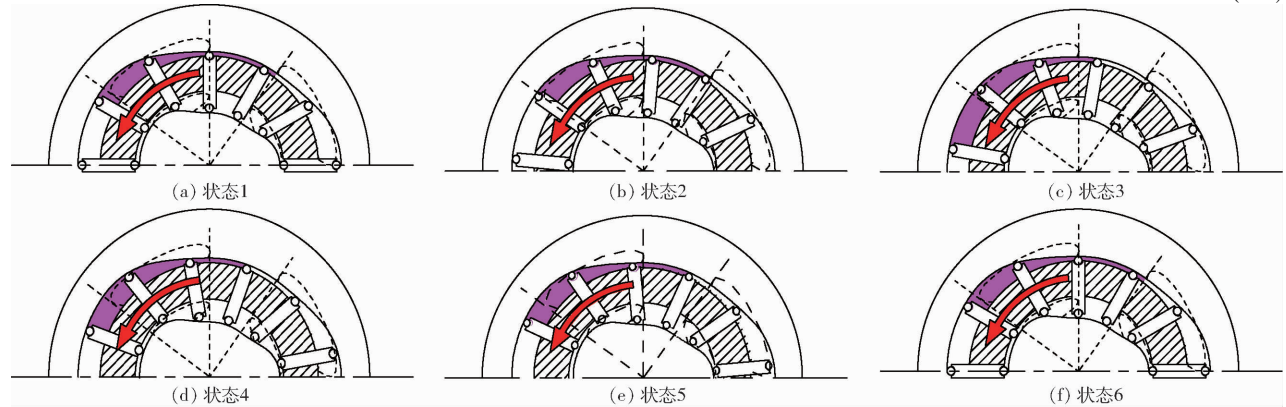


图 7 转子周期性受力示意图
Fig. 7 Periodic force diagrams of rotor

根据各径向力的大小以及作用线的夹角, 由分析可知, 在 4 种不同工作方式下转子所受的径向合力不为零, 即转子径向受力不平衡, 不能称为力偶型液压马达。对另外 3 种情况采用相同的方法进行分析, 也可得相同结论。

3 力偶型双定子马达转子所受径向力

转子是力偶型双定子液压马达中的关键零部件, 作为一个旋转部件, 其在工作的过程中所受到的径向力的作用不仅对其自身的变形程度有影响, 而且还会直接影响轴承寿命, 以致于关系到整个液压马达的使用寿命。

当力偶型双定子液压马达运转稳定时, 转子所受到的径向力是以两相邻叶片间的夹角为周期变化的, 图 7 为外马达单独工作时一个作用周期内转子受到高压油液作用的分布情况。

双作用双定子力偶原理液压马达的原理简图如图 8 所示, 以叶片 1 为起点将转子圆周的一个作用周期等分为 M 个压力分布区, 按顺时针方向依次规定为第 1 压力分布区、第 2 压力分布区、...、第 m 压力分布区 ($1 \leq m \leq M$), 图中 φ_1 、 φ_3 为高压油区的压力分布区间角, φ_2 、 φ_4 为低压油区的压力分布区间角。可以得出双定子液压马达外马达单独工作时转子在 x 、 y 方向上受到的径向液压力为

$$\left\{\begin{aligned} F_{wx} &= \sum_{m=1}^M f_{mx} = \sum_{m=1}^{M/2} -pBR\varphi_0 \cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -p_0BR\varphi_0 \cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \\ F_{wy} &= \sum_{m=1}^M f_{my} = \sum_{m=1}^{M/2} -pBR\varphi_0 \sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -p_0BR\varphi_0 \sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \end{aligned}\right. \quad (12)$$

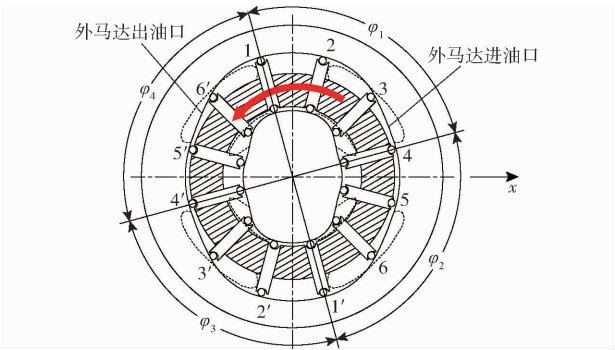


图 8 双作用双定子力偶原理液压马达原理简图

Fig. 8 Schematic of double-acting double-stator couple motor

其中 $\varphi_0 = \frac{2\pi}{N}$

式中 p_0 ——高压油液压力, Pa

p ——低压油液压力, Pa

其与 x 轴正向的夹角为

$$\alpha_w = \arctan \frac{F_{wy}}{F_{wx}} \tag{13}$$

同理可以得出其他工作方式下转子在 x 、 y 方向上受到的径向液压力以及方向:

内马达单独工作时

$$\left\{ \begin{aligned} F_{nx} &= \sum_{m=1}^M f_{mx} = \sum_{m=1}^{M/2} -p_0 B r \varphi_0 \cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -p B r \varphi_0 \cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \\ F_{ny} &= \sum_{m=1}^M f_{my} = \sum_{m=1}^{M/2} -p_0 B r \varphi_0 \sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -p B r \varphi_0 \sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \end{aligned} \right. \tag{14}$$

$$\alpha_n = \arctan \frac{F_{ny}}{F_{nx}} \tag{15}$$

内、外马达联合工作时

$$\left\{ \begin{aligned} F_{ux} &= \sum_{m=1}^{M/2} -B\varphi_0(Rp - rp_0)\cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -B\varphi_0(Rp_0 - rp)\cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \\ F_{uy} &= \sum_{m=1}^{M/2} -B\varphi_0(Rp - rp_0)\sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -B\varphi_0(Rp_0 - rp)\sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \end{aligned} \right. \tag{16}$$

$$\alpha_u = \arctan \frac{F_{uy}}{F_{ux}} \tag{17}$$

内、外马达差动工作时

$$\left\{ \begin{aligned} F_{dx} &= \sum_{m=1}^{M/2} -Bp\varphi_0(R-r)\cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -Bp_0\varphi_0(R-r)\cos(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \\ F_{dy} &= \sum_{m=1}^{M/2} -Bp\varphi_0(R-r)\sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) + \\ &\quad \sum_{m=M/2+1}^M -Bp_0\varphi_0(R-r)\sin(\varphi_1 + (m-1)\varphi_0) \end{aligned} \right. \tag{18}$$

$$\alpha_d = \arctan \frac{F_{dy}}{F_{dx}} \tag{19}$$

4 仿真计算与分析

根据力偶型双定子马达样机(图 9)参数对转子的径向受力及方向在一个作用周期内的状况进行仿真计算。样机参数为:额定压力为 6.3 MPa;外定子大、小圆弧直径分别为 100、91 mm;内定子大、小圆弧直径分别为 65、56 mm;转子内、外直径分别为 65、91 mm;转子宽度为 50 mm。



图 9 力偶型双定子马达样机

Fig. 9 Prototype of double-stator couple motor

由于转子径向受力状况是以两相邻叶片间夹角为周期进行变化的,因此,以图 8 中叶片 2 转到叶片 1 时的过程进行分析,此过程中转子在 4 种不同工作方式下的径向受力以及力的作用点与水平方向的夹角如表 1 所示。

图 10 为力偶型双定子液压马达在单个周期内的转子径向受力变化曲线。对比双定子马达在 4 种不同工作方式下转子的径向受力状况可知:内、外马达联合工作时转子所受径向力最大,外马达单独工作时次之,内、外马达差动连接工作时转子所受径向力最小,且远小于外马达单独工作与内外马达联合工作时转子的径向受力。

图 11 为一个周期内转子所受径向力的变化。从图 11 可以看出,当叶片带动转子进行旋转且叶片 2 运转到叶片 1 的位置时,转子在 4 种不同工作方式下的径向受力均是逐渐增大的,其变化周期均为 $\frac{\pi}{6}$ (当 $z=12$ 时)。

表 1 转子所受径向合力及方向
Tab.1 Rotor's radial force and direction

外马达单独工作		内马达单独工作		内、外马达联合工作		内、外马达差动工作	
F_w/N	$\alpha_w/(^{\circ})$	F_n/N	$\alpha_n/(^{\circ})$	F_u/N	$\alpha_u/(^{\circ})$	F_d/N	$\alpha_d/(^{\circ})$
20 661	29.87	13 121	-57.41	24 001	17.34	4 120.7	59.73
20 800	32.50	13 174	-53.80	24 482	18.71	4 542.0	60.58
20 932	35.14	13 242	-50.23	24 976	20.41	4 959.2	61.50
21 057	37.79	13 325	-46.70	25 478	22.61	5 369.3	62.51
21 174	40.46	13 422	-43.21	25 981	25.55	5 769.7	63.64
21 274	43.14	13 530	-39.79	26 479	28.64	6 158.3	64.89
21 377	45.88	13 650	-36.41	26 969	31.95	6 533.4	66.32
21 461	48.63	13 778	-33.10	27 444	35.46	6 893.6	67.95
21 534	51.41	13 914	-29.85	27 901	39.27	7 237.0	69.85
21 592	54.23	14 055	-26.67	28 336	44.16	7 562.8	72.09
21 637	57.08	14 200	-23.54	28 745	48.08	7 869.7	74.80

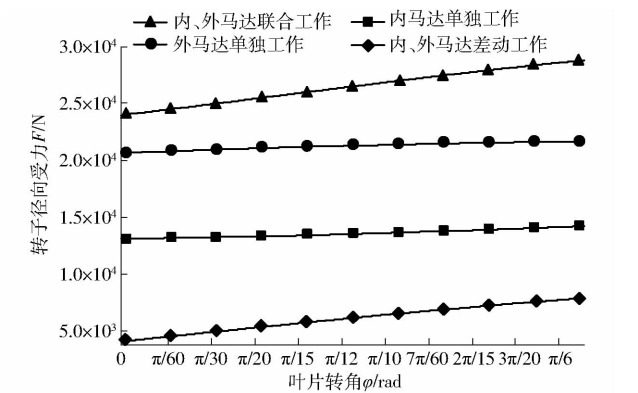


图 10 单个周期内转子所受径向力的变化曲线
Fig. 10 Change of radial force of rotor in a single cycle

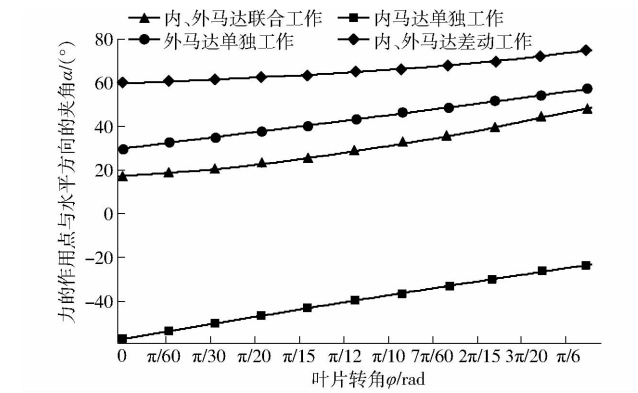


图 12 单个周期内转子所受径向力的方向变化曲线
Fig. 12 Direction of radial force experienced by rotor in a single cycle

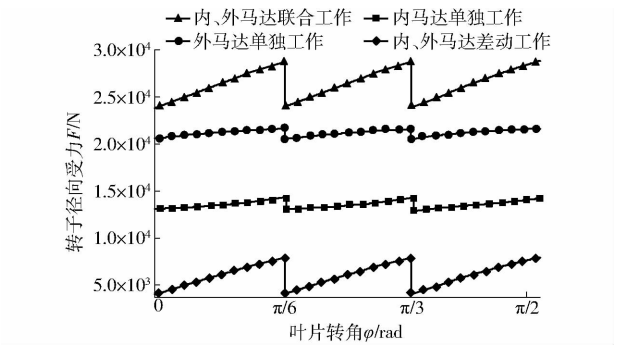


图 11 一个作用周期内转子所受径向力的变化曲线
Fig. 11 Changes of radial force of rotor during one cycle

以此样机为例进行分析,如图 12 所示,外马达单独工作时,转子径向受力的作用点在 $29.87^{\circ} \sim 57.08^{\circ}$ (与 x 轴正向的夹角) 之间进行周期性变化;内马达单独工作时,转子径向受力的作用点在 $-57.41^{\circ} \sim -23.54^{\circ}$ 之间进行周期性变化;内、外马达联合工作时,转子径向受力的作用点在 $17.34^{\circ} \sim 48.08^{\circ}$ 之间进行周期性变化;内、外马达差动连接工作时,转子径向受力的作用点在 $59.73^{\circ} \sim 74.80^{\circ}$ 之间进行周期性变化。

5 样机马达实验

为了验证双定子力偶型液压马达原理和结构设计的正确性与合理性,搭建了实验平台,对样机马达在 4 种不同工作方式下的空载排量及效率进行实验,实验系统原理图及实验测试系统如图 13、14 所示。

根据实验所得数据可得出双定子力偶型液压马达的效率如图 15 ~ 17 所示。

由图 15 ~ 17 可得,当内马达单独工作时马达容积效率最大,外马达单独工作时次之,联合工作时最小。而马达机械效率则是联合工作时最大,内马达单独工作时最小。马达总效率随着工作压力的增大而增加。

6 结论

(1)提出了力偶原理液压马达的概念,根据不同的作用形式对力偶原理液压马达进行分类,并对 3 种不同类型的力偶原理液压马达进行了阐述。

(2)对于偶数作用的液压马达,当叶片数为偶数时,对于奇数作用的液压马达,当叶片数能够被作

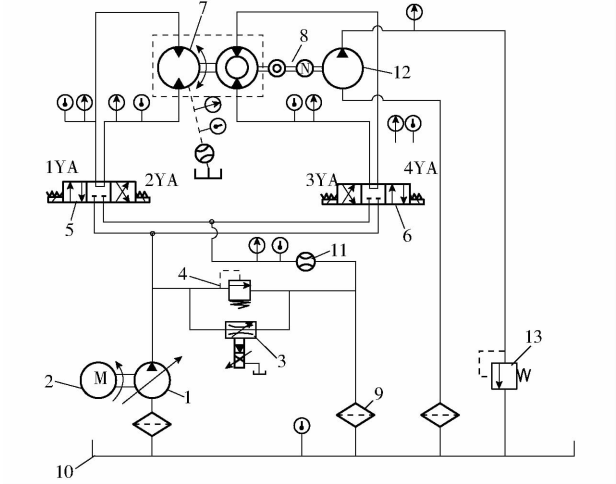


图 13 双定子力偶型马达实验系统图

Fig. 13 Experimental system for double-stator couple motor

1. 变量泵 2. 电动机 3. 比例调速阀 4. 安全阀 5、6. 电磁换向阀 7. 被测马达 8. 转矩、转速测试仪 9. 滤油器 10. 油箱 11. 流量计 12. 负载泵 13. 溢流阀

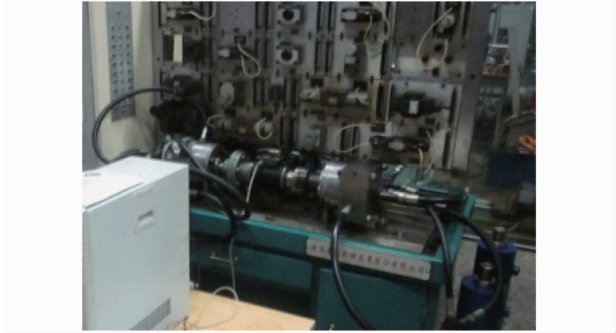


图 14 实验测试系统图

Fig. 14 Picture of experimental test system

用数整除时,转子径向受力状况基本平衡,可称为力偶原理液压马达。

(3) 双定子力偶原理液压马达转子所受径向力

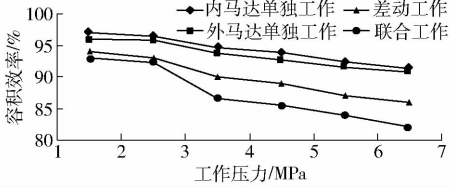


图 15 容积效率曲线

Fig. 15 Volumetric efficiency curves

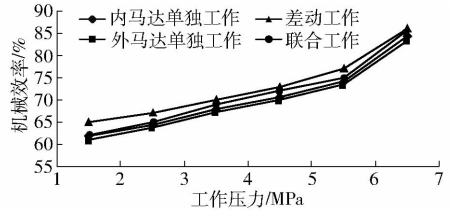


图 16 机械效率曲线

Fig. 16 Mechanical efficiency curves

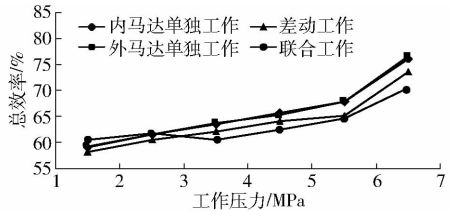


图 17 液压马达总效率曲线

Fig. 17 Total efficiency curves of hydraulic motor

在内、外马达差动工作时最小,内马达与外马达单独工作时分别次之,内、外马达联合工作时最大,且 4 种不同工作方式下的转子径向力在单个作用周期内均是逐渐增大的,径向力以及力的作用点均在一定范围内以周期 $\frac{2\pi}{z}$ 进行变化。

(4) 通过样机实验,验证了双定子力偶型液压马达原理正确性与马达结构设计合理性。

参 考 文 献

[1] 雷天觉. 液压工业手册[M]. 北京:机械工业出版社,1989.

[2] 李壮云. 液压元件与系统[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2011.

[3] FURUSTIG J, ALMQVIST A, BATES C A, et al. A two scale mixed lubrication wearing-in model, applied to hydraulic motors [J]. Tribology International, 2015,90:248 – 256

[4] CHO I S. A study on the optimum design for the valve plate of a swash plate-type oil hydraulic piston pump [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015,29(6):2409 – 2413.

[5] 杨华勇,张斌,徐兵. 轴向柱塞泵/马达技术的发展演变[J]. 机械工程学报, 2008,44(10):1 – 8.

YANG Huayong, ZHANG Bin, XU Bing. Development of axial piston pump/motor technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10):1 – 8. (in Chinese)

[6] 闻德生,刘巧燕,刘忠迅,等. 双定子单作用液压马达转子径向受力特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015,45(6):1825 – 1830.

WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, et al. Rotor radial force of double-stator single-acting motor[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015,45(6):1825 – 1830. (in Chinese)

[7] 尹瑞峰,雷秀,刘海柱. 单作用叶片泵转子的径向力分析[J]. 机械制造与自动化,2008(2):61 – 65.

YIN Ruifeng, LEI Xiu, LIU Haizhu. Analysis and calculation on radial force of the rotor in a single-action vane pump [J]. Fluid Power Transmission and Control, 2008(2):61 – 65. (in Chinese)

[8] 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. Analysis of failure of ball plug type inner curve hydraulic motor and the radial unbalanced force [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 闻德生. 双定子力偶泵:021444072[P]. 2002-09-25.
- [10] WEN D S. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system [J]. SCIENCE CHINA Technoloical Sciences, 2011, 54(4): 992-997.
- [11] WEN D S, WANG Z L, LV S J, et al. Single-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Chongqing University (English Edition), 2010, 9(4): 208-215.
- [12] 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, 247. WEN Desheng, CHANG Xue, ZHANG Shaobo, et al. Analysis of torque pulsation for double-stator single-acting multi-motors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 238-242, 247. http://www.jcsam.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. (in Chinese)
- [13] WEN D S, WANG Z L, GAO J, et al. Output speed and flow of double-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Zhejiang University (Science A), 2011, 12(4): 841-849.
- [14] 闻德生, 张凯明, 张三喜, 等. 双定子异形滑块液压马达角速度不均匀性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 341-346. WEN Desheng, ZHANG Kaiming, ZHANG Sanxi, et al. Uniformity of double stator alien slider hydraulic motor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 341-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140454&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.054. (in Chinese)
- [15] 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. WEN Desheng, GAO Junfeng, ZHOU Ruibin, et al. Analysis of torque pulsation for multi-acting double-stators couple hydraulic motor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 319-325. 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. (in Chinese)
- [16] 闻德生, 刘巧燕, 刘忠迅, 等. 混合型多泵多速马达传动输出特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 15-20. WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, et al. Output characteristics of mix type multi-pump and multi-motor driving system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 15-20. (in Chinese)
- [17] 闻德生, 刘巧燕, 刘忠迅, 等. 滚柱叶片式双定子多速马达的原理与实验验证 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1130-1138. WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, et al. Principle and experiment validation of roller tip-vane type double-stator multi-speed motor [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1130-1138. (in Chinese)
- [18] 闻德生, 胡文龙, 邱华, 等. 多泵单马达传动系统输出转矩特性分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 397-402. WEN Desheng, HU Wenlong, QIU Hua, et al. Output torque characteristics analysis of multi-pump and single-motor transmission system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 397-402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160155&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.055. (in Chinese)
- [19] 闻德生, 商旭东, 潘为圆, 等. 齿轮型多泵多马达传动系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 399-406. WEN Desheng, SHANG Xudong, PAN Weiyuan, et al. Design and experiment of proportional type multi-pump and multi-speed motor driving system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 399-406. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170653&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.053. (in Chinese)
- [20] 闻德生, 商旭东, 吕世君, 等. 双定子液压马达差动连接转矩脉动分析 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 178-184. WEN Desheng, SHANG Xudong, LÜ Shijun, et al. Analysis of torque pulsation for double-stators hydraulic motor in differential connection [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 178-184. (in Chinese)
- [21] 闻德生, 商旭东, 马光磊, 等. 比例型多泵多速马达传动系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 421-428. WEN Desheng, SHANG Xudong, MA Guanglei, et al. Design and experiment on gear multi-pump and multi-motor driving system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 421-428. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170953&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.053. (in Chinese)