

双斜盘多排式轴向柱塞马达转矩特性分析

闻德生¹ 孙立杰¹ 席冰² 杜飞¹ 李德雄¹ 赵国强¹

(1.燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2.燕山大学艺术与设计学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了实现多级转速和转矩的输出, 轴向柱塞马达必须使用节流阀、减压阀等耗能元件来改变输入压力和流量, 但同时降低了效率。新型双斜盘多排式轴向柱塞马达可以利用其结构的特殊性, 实现输出转矩的多样性。本文基于双斜盘多排式轴向柱塞马达的结构特点及工作原理, 推导了该马达在不同工作方式下的理论瞬时转矩和转矩不均匀系数, 并通过 Matlab 分析了内外马达转矩系数比对转矩不均匀系数的影响, 设计了马达的实验液压系统并搭建了实验平台, 对马达进行了原理性实验, 并进行了数据分析。实验结果表明, 在额定压力和额定排量下, 该马达能够实现多种不同的转速与转矩输出, 随着内外马达转矩系数比的增大, 低速大转矩的转矩不均匀系数越小, 高速低转矩不稳定系数越大, 通过合理设计可以实现马达在不同工作状态下的稳定运行, 验证了新型马达在结构原理上的可行性, 为新型轴向柱塞马达的改进设计提供了实验依据。

关键词: 双斜盘; 多排式; 轴向柱塞马达; 转矩脉动; 不均匀系数

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)06-0420-07

OSID:



Output Torque Characteristics Analysis of Double Swash Plate Multi-row Axial Piston Motor

WEN Desheng¹ SUN Lijie¹ XI Bing² DU Fei¹ LI Dexiong¹ ZHAO Guoqiang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. College of Art and Design, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Hydraulic transmission is widely used in aerospace, engineering machinery, agricultural machinery and other industries due to its large power-to-mass ratio, flexible control, and convenient speed control. Hydraulic motors are an important actuator, which determined the working capacity of the entire hydraulic system. In the existing axial piston motor, in order to realize multi-stage speed and torque output, energy-consuming components such as throttle valve and pressure reducing valve must be used to change the input pressure and flow rate, thereby reducing the efficiency. The new double swash plate multi-row axial piston motor can utilize the special characteristics of its structure to achieve a variety of output torque. The structural characteristics and working principle of the motor were introduced. The theoretical instantaneous torque and torque non-uniformity coefficient of the motor under different working modes were derived. The effects of torque coefficient of the internal and external motor on torque non-uniformity coefficient was compared by Matlab. The experimental hydraulic system of the motor was designed and the construction of the experimental platform was completed, the principle experiment on the motor was carried out and the data was analyzed. The results showed that the motor can realize different speed and torque output under the rated pressure and rated displacement of the motor. As the torque coefficient ratio of the inner and outer motors were increased, the torque unevenness coefficient of the low speed and large torque was small, and the speed was high. The higher the low torque instability coefficient was, the better the design of the motor can achieve stable operation under different working conditions, verifying the feasibility of the new structure motor in principle, and providing an experimental basis for the improved design of the new axial piston motor.

Key words: double swash plate; multi-row type; axial piston motor; torque ripple; non-uniformity coefficient

0 引言

液压传动以其功率质量比大、控制灵活、调速方便等优点被广泛应用于航天、工程机械、农业机械等领域,液压传动的应用与发展水平已成为衡量一个国家工业水平的重要标志^[1]。随着工业技术的进步,实际工况变得越来越复杂,对液压元件尤其是液压马达的要求也随之提高^[2-3]。在实际工况中,为了提高执行机构的工作性能、稳定性及其寿命,有时需要液压马达输出稳定的转矩,以减小执行机构的振动,尤其在高速、大转矩情况下,液压马达的稳定性尤为重要。目前,国内外对轴向柱塞马达的研究重点主要集中在传统马达结构的功率质量比、噪声水平、使用寿命和结构设计通用性等方面^[4-7],轴向受力不平衡、输出转矩脉动大、变量控制单一等问题仍未能很好地解决。针对这些问题,文献[8-12]提出新型双斜盘多排式轴向柱塞马达,由于结构的特殊性,该马达具有能够实现低转速大扭矩、缸体的轴向力完全平衡、输出转矩脉动小、输出多种转速和转矩等特点,减少了辅助元件的使用,延长了马达及系统的寿命,降低了传统液压系统的复杂性,减少了液压系统的故障,降低了维修成本,扩大了液压系统的应用范围。但马达本质上还是轴向柱塞马达,不可避免地产生和传统柱塞马达类似的转矩脉动,使系统不稳定,因此本文对这种轴向柱塞马达不同工作方式下瞬时转矩进行分析。

1 结构与工作原理

1.1 结构特点

双斜盘多排式轴向柱塞马达如图1所示。该双斜盘多排式轴向柱塞马达结构特点如下:

在轴向上,马达内部两侧有相互对称的斜盘和柱塞组,这种结构使得马达在工作时受到的轴向力相互平衡,提高了马达强度。

在径向上,在马达转子两个不同半径圆上分布着外径尺寸不相同柱塞缸体,两圈柱塞刚体相互交错均匀分布,充分利用了径向上的结构尺寸,使马达可以输出更大的转矩。

马达采用内侧腰型槽配流,将两圈柱塞分为4个独立工作的马达,使得其能够输出多种转速和转矩^[13-14]。

1.2 工作原理

双斜盘多排式轴向柱塞马达壳体内相同半径的分布圆上有偶数个柱塞,每间隔一个柱塞共用一配流槽形成一个柱塞数为奇数的单独马达,马达共有4个配流盘对应4个独立工作的马达,以单个外马

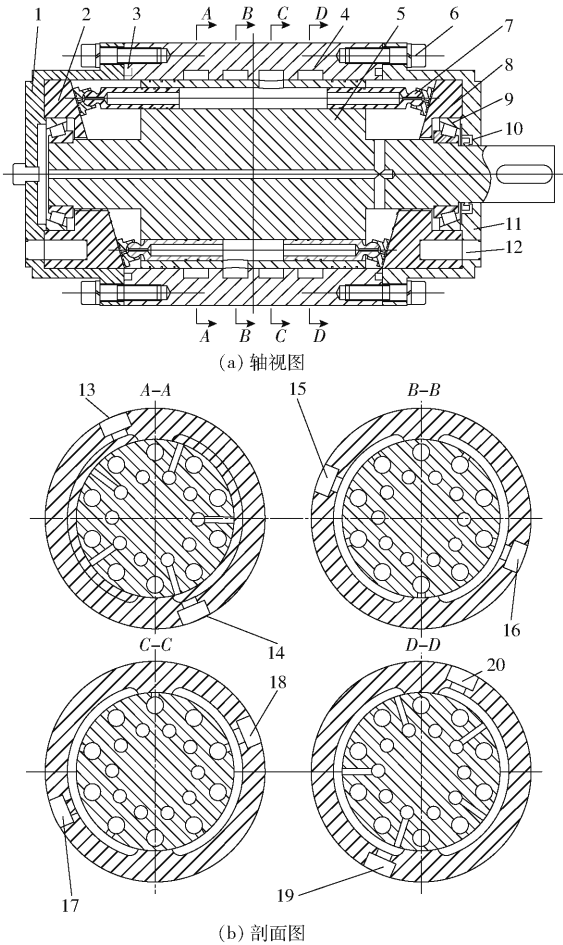


图1 双斜盘多排式轴向柱塞马达原理图

Fig. 1 Schematics of double swash plate multi-row axial piston motor

- 1. 左端盖 2. 左斜盘 3. 密封圈 4. 壳体 5. 缸体 6. 内六角螺栓 7. 柱塞组 8. 右斜盘 9. 圆锥滚子轴承 10. 旋转密封圈 11. 右端盖 12. 销 13、15、17、19. 进油口 14、16、18、20. 出油口

达为例说明双斜盘多排式轴向柱塞马达的工作原理。

如图1所示,高压油通过进油口13进入壳体的腰型配流槽内,形成高压配流槽,然后通过缸体圆周上处于高压配流槽区的外马达流道进入到左右成对柱塞组之间的空腔中并形成压差对柱塞组产生推力,柱塞与滑靴对斜盘表面的推力可以分解出一个方向相同的径向力,作用于缸体并产生力矩驱动缸体转动,当柱塞到达极限位置后,外马达流道进入低压配流区,在斜盘的作用下将柱塞组中的油液排到出油口16。

2 瞬时转矩及转矩不均匀系数的计算

双斜盘多排式轴向柱塞马达在结构上虽有一定特殊性,但工作原理和传统柱塞马达基本一致^[14]。

如图2所示,由每个柱塞组的径向分力可以得到该柱塞组所产生的瞬时转矩,进而对所有柱塞组瞬时转矩相加求和,即可求得马达瞬时转矩。

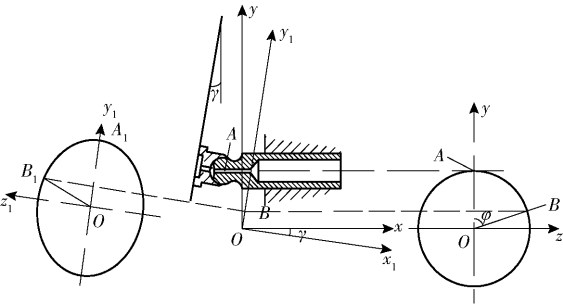


图 2 轴向柱塞马达运动简图
Fig. 2 Motion sketch of motor

设在相同半径的分布圆上共有 Z 个柱塞,令柱塞 1 从低压配油槽转到高压配油槽瞬间转子相位角 φ 为 0。由图 1 可知,柱塞转到低压 ($\varphi + i\beta > \pi$) 时不产生转矩,则每个柱塞组产生的瞬时转矩为

$$T_i = \frac{\pi}{4} d^2 p_e R \tan \gamma f(\varphi + i\beta) \quad (1)$$

式中 γ ——斜盘倾角,rad
 d ——柱塞直径,mm
 p_e ——额定压力,MPa
 R ——柱塞分布半径,mm

令 $f(\varphi + i\beta) = \frac{|\sin(\varphi + i\beta)| + \sin(\varphi + i\beta)}{2} \quad (2)$

式中 β ——每组相邻柱塞相位角差,rad

对所有的外马达 1 柱塞所产生的瞬时转矩进行相加求和,可得外马达 1 瞬时转矩为

$$T_{11} = \frac{\pi}{4} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \sum_{i=1}^Z f(\varphi + (2i - 1)\beta) \quad (3)$$

式中 R_1 ——外柱塞分布圆半径,mm
 d_1 ——外柱塞直径,mm

由于柱塞为中心对称结构,可以认为外马达 2 所有柱塞均和外马达 1 柱塞相位角滞后 β ,所以外马达 2 瞬时转矩为

$$T_{12} = \frac{\pi}{4} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \sum_{i=1}^Z f(\varphi + 2i\beta) \quad (4)$$

同理,内马达所有柱塞对于外马达相位角滞后 $\frac{\beta}{2}$,则内马达瞬时扭矩为

$$\begin{cases} T_{21} = \frac{\pi}{4} d_2^2 p_e R_2 \tan \gamma \sum_{i=1}^Z f(\varphi + (2i - 1)\beta) \\ T_{22} = \frac{\pi}{4} d_2^2 p_e R_2 \tan \gamma \sum_{i=1}^Z f(\varphi + 2i\beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_2 ——内柱塞分布圆半径,mm
 d_2 ——内柱塞直径,mm

此液压马达在额定压力与额定流量下有单个内(外)马达单独工作、所有内外马达单独工作、马达完全工作以及马达差动工作等多种工作模式,需对具有代表性的模式进行分析。通过每种工作方式的

理论瞬时转矩求得马达转矩不均匀系数,进而分析马达输出的转矩品质^[15-17]。

2.1 内(外)马达单独工作

当外马达 1 工作时,利用 Matlab 对式(3)进行仿真,得到输出转矩波动性如图 3 所示。

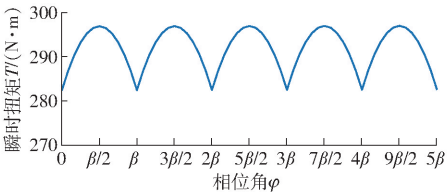


图 3 外马达单独工作时瞬时转矩-相位角图
Fig. 3 Instantaneous torque-phase angle diagram of external motor working individually

由图 3 可知,外马达转矩输出周期为 β ,外马达在第 1 个周期内瞬时转矩计算式为

$$T_{11} = \frac{\pi}{8} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \frac{\cos\left(\varphi + \frac{\beta}{2}\right)}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (6)$$

当缸体相位角 $\varphi = 0$ 时,瞬时转矩取得最小值为

$$T_{11\min} = \frac{\pi}{4} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (7)$$

当缸体相位角 $\varphi = \frac{\beta}{2}$ 时,瞬时转矩取得最大值为

$$T_{11\max} = \frac{1}{4} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \frac{\pi}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (8)$$

根据积分中值定理可得,外马达 1 一个周期内的平均理论转矩为

$$T_{111} = \frac{2}{\beta} \int_0^{\frac{\beta}{2}} T_{11} d\varphi = \frac{\pi}{2\beta} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \quad (9)$$

外马达转矩不均匀系数为

$$\delta_{T11} = \frac{T_{11\max} - T_{11\min}}{T_{111}} = \frac{\beta \left(1 - \cos \frac{\beta}{2}\right)}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \quad (10)$$

根据式(10)可知,在内外马达不同时工作的情况下,转矩不均匀系数只与 β 有关,所以在单个内(外)马达工作和所有单个内(外)马达工作 4 种工作状态下转矩不均匀系数相同。

2.2 马达完全工作

马达完全工作时,输出的转矩最大,对于转矩的品质也具有较高的要求,因此需要对此模式进行分析。该模式下,4 个马达同时输出转矩,因此把 4 个马达输出的瞬时转矩相加可得此工作模式下马达输

出的瞬时转矩,即

$$T_2 = \frac{\pi}{4} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \sum_{i=1}^4 f\left(\varphi + \frac{2\pi i}{Z}\right) + \frac{\pi}{4} d_2^2 p_e R_2 \tan \gamma \sum_{i=1}^4 f\left(\varphi + \frac{2\pi i}{Z}\right) \quad (11)$$

利用 Matlab 对式(11)进行仿真,得到马达完全工作时输出转矩波动性如图 4 所示。

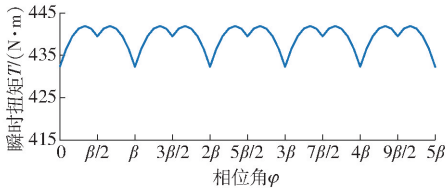


图 4 马达完全工作时瞬时转矩-相位角图

Fig. 4 Instantaneous torque-phase angle diagram of motor in complete independent operation

由图 4 可知,对于完全工作时的马达,它在第 1 个周期内瞬时转矩的计算式为

$$T_2 = \frac{\pi}{2} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1 \cos\left(\varphi - \frac{\beta}{2}\right) + d_2^2 R_2 \cos \varphi}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (12)$$

当缸体相位角 $\varphi = 0$ 时,瞬时转矩取得最小值为

$$T_{2\min} = \frac{\pi}{2} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1 \cos \frac{\beta}{2} + d_2^2 R_2}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (13)$$

通过推导可得,当缸体相位角为

$$\varphi = \arctan \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2} + \frac{d_2^2 R_2}{d_1^2 R_1}}$$

瞬时转矩取得最大值,为

$$T_{2\max} = \frac{\pi}{2} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1}{\sin \frac{\beta}{2}} \sqrt{\left(\cos \frac{\beta}{2} + \frac{d_2^2 R_2}{d_1^2 R_1}\right)^2 + \sin^2 \frac{\beta}{2}} \quad (14)$$

根据积分中值定理可以得到,马达完全工作时一个周期内的平均理论转矩为

$$T_{i2} = \frac{\pi}{\beta} p_e \tan \gamma (d_1^2 R_1 + d_2^2 R_2) \quad (15)$$

则马达转矩不均匀系数为

$$\delta_{T2} = \frac{T_{2\max} - T_{2\min}}{T_{i2}} = \frac{\beta}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \frac{\sqrt{\left(\cos \frac{\beta}{2} + k\right)^2 + \sin^2 \frac{\beta}{2}} - \cos \frac{\beta}{2} - k}{1 + k} \quad (16)$$

其中 $k = \frac{d_2^2 R_2}{d_1^2 R_1}$

式中 k ——内外马达转矩系数比

2.3 马达差动工作

由于液压系统差动工作时工况普遍存在快进或快退状态,此时负载较小,速度要求较高^[18-23],此时内马达的作用类似于泵,动力由外马达提供,由于内马达排量小于外马达,因此外马达在为内马达提供动力的同时还可以向外输出转矩,由图 2 可知,当马达作为泵使用时的输入转矩数值理论上等于作为马达的输出转矩,因此该模式下马达瞬时转矩为外马达瞬时转矩与内马达瞬时转矩之差,即

$$T_3 = \frac{T_1 - T_2}{2} = \frac{\pi}{8} d_1^2 p_e R_1 \tan \gamma \sum_{i=1}^4 f\left(\varphi + \frac{2\pi i}{Z}\right) - \frac{\pi}{8} d_2^2 p_e R_2 \tan \gamma \sum_{i=1}^4 f\left(\varphi + \frac{2\pi i}{Z} + \pi\right) \quad (17)$$

利用 Matlab 对式(17)进行仿真,得到马达差动工作时输出转矩波动性如图 5 所示。

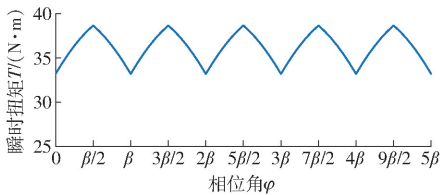


图 5 马达差动工作时瞬时转矩-相位角图

Fig. 5 Instantaneous torque-phase angle diagram of motor in differential operation

由图 5 可知,对于差动工作时的马达,它在第 1 个周期内瞬时转矩计算式为

$$T_3 = \frac{\pi}{4} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1 \cos\left(\varphi - \frac{\beta}{2}\right) - d_2^2 R_2 \cos \varphi}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (18)$$

当缸体相位角 $\varphi = 0$ 时,瞬时转矩取得最小值,为

$$T_{3\min} = \frac{\pi}{4} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1 \cos \frac{\beta}{2} - d_2^2 R_2}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (19)$$

当缸体相位角 $\varphi = \frac{\beta}{2}$ 时,瞬时转矩取得最大值,为

$$T_{3\max} = \frac{\pi}{4} p_e \tan \gamma \frac{d_1^2 R_1 - d_2^2 R_2 \cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \quad (20)$$

根据积分中值定理可以得到,马达差动工作时一个周期内的平均理论转矩为

$$T_{t3} = \frac{\pi}{2\beta} p_e \tan\gamma (d_1^2 R_1 - d_2^2 R_2) \tag{21}$$

则马达转矩不均匀系数为

$$\delta_{T3} = \frac{T_{3\max} - T_{3\min}}{T_{t3}} = \frac{\beta \left(1 - \cos \frac{\beta}{2}\right)}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \frac{1+k}{1-k} \tag{22}$$

2.4 转矩不均匀系数分析

根据文献[5]可知,当每排柱塞数 $Z = 10$ 时,马达各方面性能表现良好,取 $\beta = \frac{\pi}{5}$ 时,转矩不均匀系数如图 6 所示。

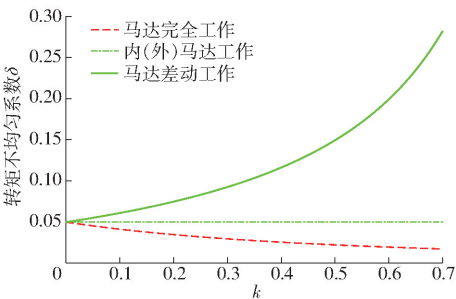


图 6 转矩不均匀系数变化曲线

Fig. 6 Motor torque non-uniformity coefficient

由图 6 可知,外马达单独工作和内马达单独工作时,转矩不均匀系数与 k 无关;随着内外马达转矩系数比 k 增大,马达完全工作时,转矩不均匀系数越小;马达差动工作时,转矩不稳定系数越大。当 k 为 0.4~0.5 时,马达有比较稳定的工作状态。此时完全工作情况下,转矩不均匀系数比同等尺寸单排的轴向柱塞泵(即 $k = 0$ 时)减小大约 50%,在差动工作状态下,转矩不均匀系数也在可接受的范围内。

3 实验

针对双斜盘多排式轴向柱塞马达进行输出转矩实验,在实际中,由于各种参数的影响,与理论计算有所差别,需对马达进行性能实验^[20]。

该样机参数如表 1 所示,图 7 为马达系统原理图,图 8 为马达样机装配体,图 9 为搭建的实验台。

表 1 实验样机设计参数

Tab. 1 Test prototype design parameters

参数	数值
最大输出转矩 $M/(\text{N}\cdot\text{m})$	1001
最大工作压力 p_e/MPa	31.5
最大转速 $n_s/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	500
每排柱塞数 $Z/\text{个}$	10
额定工作压力 p_e/MPa	25
额定转速 $n_e/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	400
斜盘倾角 $\gamma/(\text{°})$	16

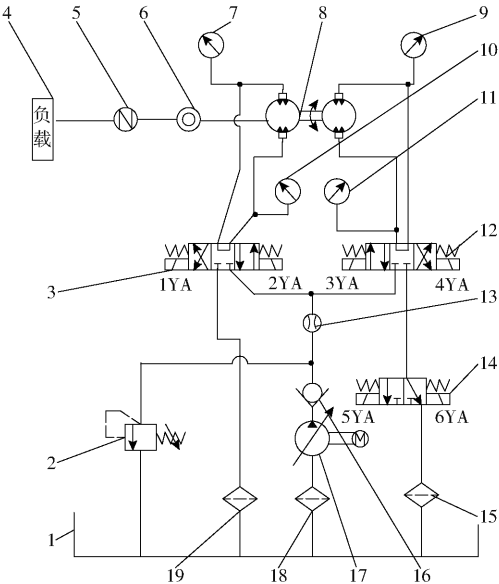


图 7 轴向柱塞马达试验系统原理图

Fig. 7 Experimental system diagram of motor

1. 油箱 2. 溢流阀 3、12、14. 三位四通电磁换向阀 4. 负载
5、6. 转矩测试仪 7、9、10、11. 压力表 8. 马达 13. 流量计
15、18、19. 滤油器 16. 单向阀 17. 供油泵



图 8 轴向柱塞马达样机

Fig. 8 Motor prototype

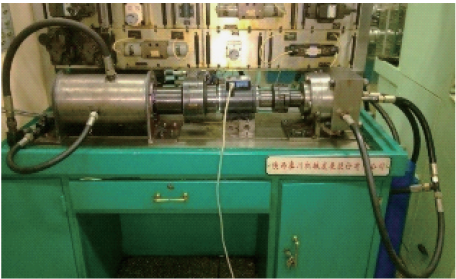


图 9 实验连接图

Fig. 9 Experimental connection diagram

因液压马达输出转矩的波动性曲线很难直接通过实验测得,而本实验通过北京三晶创业科技有限公司生产的 JN338 型转矩测量仪测量,采集多组实验数据,测算出马达输出转矩的不均匀系数。由于加工条件的限制,零部件装配后间隙配合与设计差距较大,因此实验采取较低的压力以减小泄漏,保证实验数据的准确性。在实验开始之前,将系统内的空气排净,检查系统的管路连接是否正确,然后完全打开溢流阀和节流阀并开启电源。泵稳定运行后,

首先将溢流阀压力调至 9 MPa,调节节流阀开度,直到输入流量为 41.8 L/min,然后对马达的实时转矩进行测量,实验数据处理结果如图 10 所示。

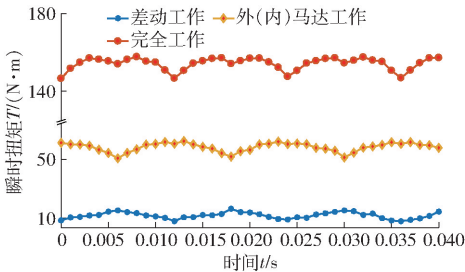


图 10 瞬时转矩曲线

Fig. 10 Instantaneous torque curves

对实验数据整理计算,得出各个工种模式下马达的不均匀系数如表 2 所示。

表 2 液压马达不均匀系数

Tab.2 Non-uniformity coefficient of hydraulic motor

模式	理论转矩	实际转矩
	不均匀系数	不均匀系数
外(内)马达工作	0.049	0.055
马达完全工作	0.021	0.024
马达差动工作	0.151	0.171

在实验过程中,由于油液随着温度的升高导致

粘度降低、读取测试仪器数值有误差、结构的配合精度较低、零件之间的相对运动造成的磨损和其他人为因素等都会造成实验与理论分析存在误差,但误差都在允许范围内^[21]。

从图 10 可看出,在 3 种不同工作方式下的实际转矩与理论转矩的波动相似。由于加工条件等的限制,不能保证零部件之间的间隙和尺寸达到设计要求,从而造成实际转矩不均匀系数比理论值大。然而实验数据的分析验证了该马达原理正确性和结构合理性。

4 结论

(1)相对于传统马达,双斜盘多排式轴向柱塞马达可以利用有限的马达体积,在不安装减压阀、节流阀等耗能元件的情况下输出多种稳定的转矩。减少了传统马达对液压系统的依赖,扩大了回路的应用范围,同时也可以减少能量损失。

(2)对双斜盘多排式轴向柱塞马达输出转矩的不均匀系数进行分析可知,马达完全工作时,输出转矩波动性与内马达柱塞尺寸位置的选取有关,通过选取适当的尺寸,其输出的转矩品质优于传统柱塞马达。

参 考 文 献

[1] 杨华勇,张斌,徐兵,等. 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, et al. Development of axial piston pump/motor technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(10):1-8. (in Chinese)

[2] 杨尔庄. 国际液压气动工业及市场发展动向[J]. 液压气动与密封,2001(1): 66-69.
YANG Erzhuang. Some developing trends of international fluid power industries and market[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2001(1):66-69. (in Chinese)

[3] 许仰曾. 我国液压工业与技术的发展现状与展望的战略思考[J]. 液压气动与密封,2010(8):1-5.
XU Yangzeng. Strategy thinking on development of hydraulic industry and its technology [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2010(8):1-5. (in Chinese)

[4] 赵武,杜长龙. 液压元件的研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2004, 34(14): 71-73.
ZHAO Wu, DU Changlong. Research status and development trend of hydraulic components[J]. Coal Science and Technology, 2004, 34(14): 71-73. (in Chinese)

[5] 闻德生. 液压元件的创新与发展[M]. 北京: 航空工业出版社,2009:375-383.

[6] FURUSTIU J,ALMQVIST A,BATES C A,et al. A two scale mixed lubrication wear in model,applied to hydraulic motors[J]. Tribology International, 2015,90:218-256.

[7] FURUSTIG J,LARSSON R,ALMQVIST A,et al. A wear model for EHT—contacts in gerotor type hydraulic cotors[J]. Proc. Inst. Mech. Part C: J. Mech. Eng. ,2015,229(2):254-264.

[8] 周聪. 双斜盘多排式轴向柱塞马达的设计与研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
ZHOU Cong. The design and research of double inclined plate multi row axial piston motor [D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2017. (in Chinese)

[9] 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)

[10] WEN Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Science China Technology Science: Technological Sciences,2011,54(4):992-997.

[11] 邓海顺,黄然,王传礼,等. 双侧驱动轴向柱塞马达扭矩脉动分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(3):436-441,484.

- DENG Haishun, HUANG Ran, WANG Chuanli, et al. Torque ripple analysis of a double-sided axial piston motor[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2016, 50(3): 436–441, 484. (in Chinese)
- [12] 张军, 许贤良, 章晓飞. 低速大扭矩 I 型复合齿轮转子马达的机理研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 44–47.
ZHANG Jun, XU Xianliang, ZHANG Xiaofei. Study on the mechanism of low speed and high torque I type compound gear rotor motor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 44–47. (in Chinese)
- [13] WEN Desheng, WANG Zhili. Output speed and flow of double-acting double stator multi-pumps and multi-motors[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011, 12(4): 301–309.
- [14] 刘巧燕, 闻德生, 高俊峰. 双定子力平衡轴向柱塞泵及其流量波动性分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(2): 228–232.
LIU Qiaoyan, WEN Desheng, GAO Junfeng. Analysis on balance type double-stator axial piston pump and its flow fluctuation [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(2): 228–232. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 聂松林, 李壮云, 余祖耀, 等. 轴向柱塞式液压马达转矩特性的理论研究[J]. 液压与气动, 2002(7): 7–10.
NIE Songlin, LI Zhuangyun, YU Zuyao, et al. Study on torque characteristic of axial piston hydraulic motor [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2002(7): 7–10. (in Chinese)
- [17] 陈玉华, 卞祖亮, 陆玉春. 背压机组液压调节系统改进与实践[J]. 冶金动力, 2018(5): 37–40, 43.
CHEN Yuhua, BIAN Zuliang, LU Yuchun. Improvement and practice of hydraulic regulating system of back pressure unit[J]. Metallurgical Power, 2018(5): 37–40, 43. (in Chinese)
- [18] 吴肖宇. 双斜盘柱塞式电机泵的动力学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
WU Xiaoyu. Research on dynamics of double swashplate plunger motor pump [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [19] 闻德生, 隋广东, 刘小雪, 等. 多泵多马达调压系统理论分析与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 419–426.
WEN Desheng, SUI Guangdong, LIU Xiaoxue, et al. Theoretical analysis and experiment of multi-pump and multi-motor pressure regulating system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 419–426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181151&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 11. 051. (in Chinese)
- [20] 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. Analysis of output torque characteristics of multi-pump single motor drive 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)
- [21] 刘巧燕, 闻德生, 吕世君. 基于动网格技术的双定子马达配流结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 419–426.
LIU Qiaoyan, WEN Desheng, LÜ Shijun. Optimization of distribution structure of dual stator motor based on moving grid technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 419–426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191049&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 10. 049. (in Chinese)
- [22] 闻德生, 隋广东, 冯佩坤, 等. 多输出径向柱塞泵输出特性分析与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 418–426.
WEN Desheng, SUI Guangdong, FENG Peikun, et al. Analysis and experiment on output characteristics of multi-output radial piston pumps [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 418–426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181049&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 10. 049. (in Chinese)
- [23] 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 on gear multi-pump and multi-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)
- [24] 闻德生, 吕世君, 杜孝杰, 等. 双定子液压马达差动连接理论分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 219–224.
WEN Desheng, LÜ Shijun, DU Xiaojie, et al. Theoretical analysis of differential connection of double-stator hydraulic motor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 219–224. (in Chinese)
- [25] 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.
WEN Desheng, YANG Jie, ZHENG Zhenquan, et al. Theory analyses of double stator symmetrical type multi pump and multi speed motor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 321–324. 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. (in Chinese)