

双定子异形滑块液压马达角速度不均匀性研究*

闻德生 张凯明 张三喜 郑珍泉 杨杰

(燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 基于实际工况需要不同的转速和转矩, 设计了通过改变进出油口可以实现多种转速和转矩的系列双定子马达。阐述了双定子异形滑块液压马达优点。通过数学公式推导和 Matlab 仿真分别探讨了 1 个马达单独工作和 2 个马达同时工作时不同滑块数下角速度的不均匀性。结果表明, 奇数滑块马达输出的瞬时角速度幅值比偶数滑块马达的大, 但是角速度的不均匀性比偶数滑块马达小得多。

关键词: 双定子马达 角速度 不均匀性 滑块

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0341-06

引言

马达作为液压系统的执行元件, 对液压系统工作性能尤为重要。目前在改善马达部件材质、密封、润滑方面已提出很多方案, 但是马达结构的创新却不多。双定子异形滑块马达打破了传统一个马达只能输出一种转矩和角速度的理念, 扩大了马达的使用范围, 同时提高了马达的效率。在分析液压马达性能时, 角速度不均匀性对于马达的输出品质(输出的平稳性、系统的振动)有着直接的影响。本文研究双定子马达在不同工作方式、不同滑块数下角速度的不均匀性, 以期提高双定子马达的平稳性和寿命。

1 双定子异形滑块液压马达工作原理

1.1 工作原理

图 1 为双定子梯形滑块液压马达的结构原理图。其滑块可以是三角形、矩形或半圆形等, 但是马达的原理都是一样的。这里仅以梯形滑块为例进行工作原理的介绍。马达壳体内有一个转子, 2 个定子和 2 个直立配流盘; 前马达由转子、前马达体(可以配流)、前定子、滑块组成; 油液通过压油口进入密闭容腔, 驱动柱塞向容积增大的方向移动, 完成吸油。当滑块移动到终点, 开始回油。后马达由转子、后定子、后马达体(可以配流)、滑块组成, 工作原理同上。与同样规格定子或单缸体柱塞马达相比, 该马达比传统的马达多了一个吸、排油口, 所以在同等

体积下效率会更高。双定子马达的定子曲线在一周内伸长两次, 称之为双作用马达; 如果伸长多次, 则为多作用马达。

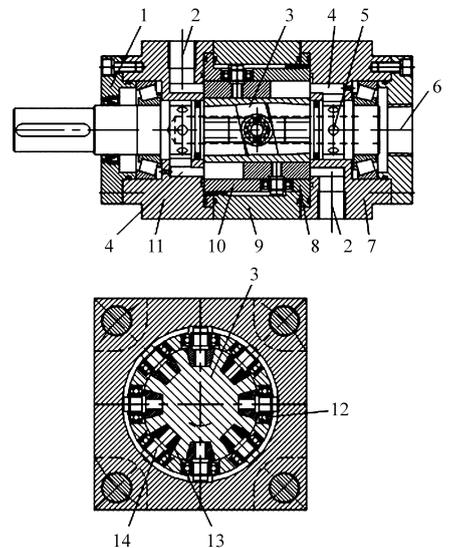


图 1 双定子异形滑块液压马达

Fig. 1 Axial piston motor

1. 端盖 2. 压油口 3. 转子 4. 回油口 5. 通孔 6. 回油腔
7. 后马达体 8. 后定子 9. 马达壳 10. 前定子 11. 前马达体
12. 轴承 13. 滑块 14. 销轴

1.2 结构特点

这种液压马达的结构特点主要有: ①前、后定子与销轴和轴承都是滚动摩擦, 各运动副都工作在润滑状态, 马达寿命与效率得到提高。②前、后定子曲线之间距离为定值即等宽, 而且是相似曲线, 则可以省去回程弹簧等零件, 从而可以以 2 个马达使用, 还

可作为1个多速马达使用。③改变双定子的曲线形状,可研制多种系列的双定子马达。通过控制进出油口,内、外马达可分别单独工作或者内、外马达同时工作,实现多种工作方式。

2 双定子异形滑块液压马达角速度不均匀性分析

液压马达的转速由液压马达的流量与排量决定。马达的每转排量 V 指马达每转一圈吸入液体的体积(无泄漏情况下),马达的每弧度排量 V_d 指马达每转 1 rad 吸入液体的体积,这两个参数都是由马达几何尺寸决定的。马达输出的瞬时角速度与马达瞬时输入流量有关,所以需要推导马达瞬时输入流量的表达式。

因为马达角速度和马达输入流量有关,所以先求出马达的理论输入流量。当滑块形状为三角形时,滑块运动示意图如图2所示。

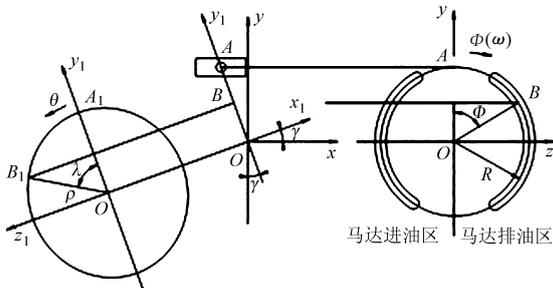


图2 滑块运动示意图

Fig. 2 Slider movement diagram

在坐标系 $Oxyz$ 中,假设滑块伸到最外点 A 为滑块的起点,当缸体转过任一角度 φ 时,某滑块的中心点由 A 点运动到 B 点,此时滑块组中心点的 x 坐标为

$$x = -R \cos \varphi_i \tan \gamma \quad (1)$$

式中 R ——滑块槽在轴上的分布圆半径

φ_i ——缸体转角

γ ——滑槽所在平面倾角

由于轴向运动方向与 x 轴正向一致,所以滑块在滑块槽轴向运动的速度为

$$v_i = \frac{dx}{dt} = \omega R \tan \gamma \sin \varphi_i \quad (2)$$

式中 ω ——缸体转动角速度 t ——时间

由于马达有多个滑块处于高压油区,假设有 m 个滑块在高压油区时,马达瞬时输入的流量为

$$q = \sum_{i=1}^m A v_i = S \omega R \tan \gamma \sum_{i=1}^m \sin \varphi_i \quad (3)$$

式中 A ——滑块面积

当马达的瞬时输入流量为常数时,马达的角速度会发生脉动。通过式(3)反求出角速度为

$$\omega = \frac{Q}{S R \tan \gamma \sum_{i=1}^m \sin \varphi_i} \quad (4)$$

由式(4)可知在缸体转角 φ 、滑槽所在平面倾角 γ 、分布圆半径 R 一定的情况下,角速度只和滑块的面积和有关,而且角速度随滑块面积 S 的增大而减小。

3 不同滑块数角速度不均匀性分析

当一个马达单独工作时,流量表达式见式(3)。

由数学公式得

$$\sum_{i=1}^m \sin \varphi_i = \sum_{i=1}^m \sin(\varphi_1 + 2(i-1)\beta) \quad (5)$$

Z 为偶数时, $m = Z/2$; Z 为奇数时, $m = Z \pm 1/2$, $\beta = \pi/Z$,代入式(4)可以求出不同滑块的角速度,进而求出不同滑块的最大角速度、最小角速度。

在半个工作日内,马达角速度的平均值为

$$\omega_i = \frac{Q \frac{\pi}{Z}}{\int_0^{\frac{\pi}{Z}} S R \tan \alpha \frac{1}{\sin \frac{\pi}{Z}} \cos\left(\frac{\pi}{Z} - \varphi_1\right) d\varphi_1} \quad (6)$$

$$\omega_i = \frac{Q \frac{\pi}{Z}}{S R \tan \alpha} \quad (7)$$

根据定义,不均匀系数为

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_i} \quad (8)$$

代入不同滑块马达的最大角速度、最小角速度、平均角速度可以求出不同滑块数的马达不均匀性。

表1中工况1表示单个马达奇数滑块的情况,工况2表示单个马达偶数滑块的情况。当滑块为奇数时,马达的瞬时角速度为

$$\omega = \frac{2 \sin \frac{\beta}{2} Q}{S R \tan \alpha \cos\left(\varphi_1 - \beta \pm \frac{\beta}{2}\right)} \quad (9)$$

当 $0 \leq \varphi_1 \leq \beta$ 取“+”号,当 $\beta \leq \varphi_1 \leq 2\beta$, 取“-”号。

同理可以得到2个马达同时工作时瞬时角速度、最大角速度、最小角速度、平均角速度最终计算出角速度的不均匀性。

表2中工况1表示2个马达偶数滑块的工况,工况2表示2个马达奇数滑块的工况。

不管是1个马达单独工作还是2个马达同时工作角速度的不均匀性都和滑块的形状无关,只和滑块的个数有关,如表3、4所示。

表 1 单个马达工作不同滑块数的角速度

Tab. 1 Different slider angular velocity on condition of one motor working

工况	最大角速度	最小角速度	角速度平均值	不均匀性
1	$\omega_{\max} = \frac{2Q\sin\frac{\beta}{2}}{SR\tan\alpha\cos\frac{\beta}{2}}$	$\omega_{\min} = \frac{2Q\sin\frac{\beta}{2}}{SR\tan\alpha}$	$\omega_t = \frac{Q}{SR\tan\alpha}$	$\frac{2\pi}{Z} \left(\tan\frac{\beta}{2} - \sin\frac{\beta}{2} \right)$
2	$\omega_{\max} = \frac{Q\tan\beta}{SR\tan\alpha}$	$\omega_{\min} = \frac{Q\sin\beta}{SR\tan\alpha}$	$\omega_t = \frac{Q}{SR\tan\alpha}$	$\frac{\pi}{Z} (\tan\beta - \sin\beta)$

表 2 2 个马达工作不同滑块数的角速度

Tab. 2 Different slider angular velocity on condition of two motor working together

工况	最大角速度	最小角速度	角速度平均值	不均匀性
1	$\omega_{\max} = \frac{Q\tan\beta}{2SR\tan\alpha}$	$\omega_{\min} = \frac{Q\sin\beta}{2SR\tan\alpha}$	$\omega_t = \frac{Q}{SR\tan\alpha}$	$\frac{\pi}{2Z} (\tan\beta - \sin\beta)$
2	$\omega_{\max} = \frac{Q\sin\frac{\beta}{2}}{SR\tan\alpha\cos\frac{\beta}{2}}$	$\omega_{\min} = \frac{Q\sin\frac{\beta}{2}}{SR\tan\alpha}$	$\omega_t = \frac{Q}{SR\tan\alpha}$	$\frac{\pi}{Z} \left(\tan\frac{\beta}{2} - \sin\frac{\beta}{2} \right)$

表 3 不同奇数滑块角速度不均匀性

Tab. 3 Uniformity in velocity of different odd sliders

	滑块数				
	5	7	9	11	13
1 个马达单独工作	0.039 9	0.005 4	0.003 7	0.001 1	0.000 5
2 个马达同时工作	0.019 9	0.002 7	0.001 8	0.000 6	0.000 3

表 4 不同偶数滑块角速度不均匀性

Tab. 4 Uniformity in velocity of different even sliders

	滑块数				
	6	8	10	12	14
1 个马达单独工作	0.153 3	0.115 0	0.092 0	0.076 6	0.065 7
2 个马达同时工作	0.076 7	0.057 5	0.046 0	0.038 3	0.032 8

由此可知:在相同流量下,2 个马达同时工作时角速度不均匀性几乎是 1 个马达工作的一半。随着滑块数的增加角速度的不均匀性在降低,而且奇数滑块下的角速度不均匀性要小于偶数滑块。

4 样机实验

双定子异形滑块液压马达的样机已经被研制,该马达的内部结构如图 4 所示。把马达接入液压回路中,通过不同连接方式就可以输出不同的转矩和转速,起到多功能马达的作用。在该实验中进行跑合实验、启动性实验、效率实验等,以充分验证马达的实用性,为以后马达实际应用提供一个很好的证明。

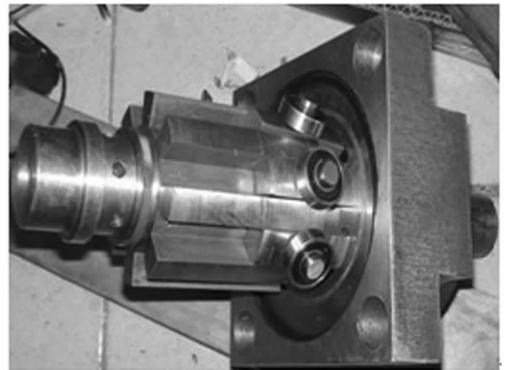


图 4 马达内部结构

Fig. 4 Motor internal structure

通过 Matlab 仿真得到曲线方程就可得到马达在不同工作模式下不同滑块数下的不均匀性如图 3 所示。

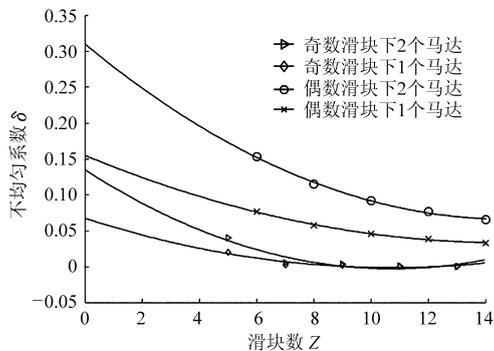


图 3 角速度不均匀性曲线

Fig. 3 Angular velocity uniformity

由图 3 可以看出偶数滑块下的不均匀性要远远大于奇数滑块,在滑块数一样的情况下 2 个马达同时工作的不均匀性是 1 个马达单独工作时的一半,而且随着滑块数的增加不均匀性变小。

设计测试马达角速度实验原理图如图 5 所示。其中被检测液压马达由泵提供压力油。节流阀调节马达的进口流量,马达回油压力由背压阀进行调节。转速通过转速测量仪测得,溢流阀作为安全阀。其中测试角速度的仪器如图 6 所示。

通过实验样机进行角速度不均匀性的实验,在

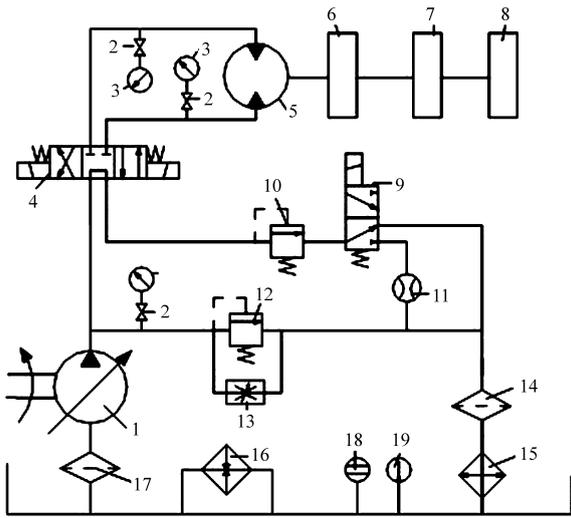


图5 梯形滑块双定子轴向马达实验系统
Fig.5 Trapezoidal slide block double stator axial piston motor experiment system

1. 泵 2. 开关 3. 压力表 4. 换向阀 5. 被测马达 6. 转矩测量仪 7. 转速测量仪 8. 外负载 9. 二位三通换向阀 10. 背压阀 11. 流量计 12. 溢流阀 13. 节流阀 14、17. 滤油器 15. 冷却器 16. 加热器 18. 液位计 19. 温度计



图6 转速转矩测量仪

Fig.6 Rotational speed and torque measuring instrument

工艺结构允许的条件下,滑块数越多,角速度的不均匀性越小,但是考虑到实际的情况,不可能加工出各种滑块数的样机进行实验,通过理论分析也可以知道,奇数滑块为7,偶数滑块为8时,角速度脉动相对较小,对实际工作的影响也很小。所以,验证滑块数为7、8两种马达。通过把两种马达分别接入相应的回路中,实验如图7所示。

由实验可得:当滑块为7时,1个马达单独工作时,最大角速度 $\omega_{\max 1} = 82.6 \text{ rad/s}$,最小角速度 $\omega_{\min 1} = 82.17 \text{ rad/s}$,平均角速度 $\omega_{m1} = 82.35 \text{ rad/s}$,所以通过角速度不均匀性公式可得: $\delta_1 = 0.0052$;当2个马达同时工作时,最大角速度 $\omega_{\max 2} = 41.29 \text{ rad/s}$,最小角速度 $\omega_{\min 2} = 41.18 \text{ rad/s}$,平均角速度 $\omega_{m2} = 41.23 \text{ rad/s}$,角速度不均匀性 $\delta_2 = 0.00266$ 。当滑块

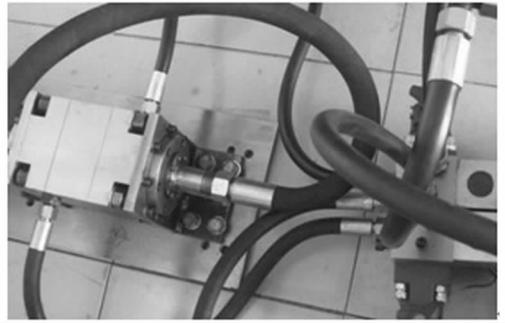


图7 双定子轴向马达实验

Fig.7 Double-stator axial motor experiment

数为8时,1个马达单独工作时,最大角速度 $\omega_{\max 3} = 80.82 \text{ rad/s}$,最小角速度 $\omega_{\min 3} = 72.12 \text{ rad/s}$,平均角速度 $\omega_{m3} = 76.12 \text{ rad/s}$,角速度不均匀性 $\delta_3 = 0.1143$,当2个马达同时工作时,最大角速度 $\omega_{\max 4} = 38.84 \text{ rad/s}$,最小角速度 $\omega_{\min 4} = 36.67 \text{ rad/s}$,平均角速度 $\omega_{m4} = 37.76 \text{ rad/s}$,角速度不均匀性 $\delta_4 = 0.0574$ 。实验测得在不同转角的角速度如图8所示。

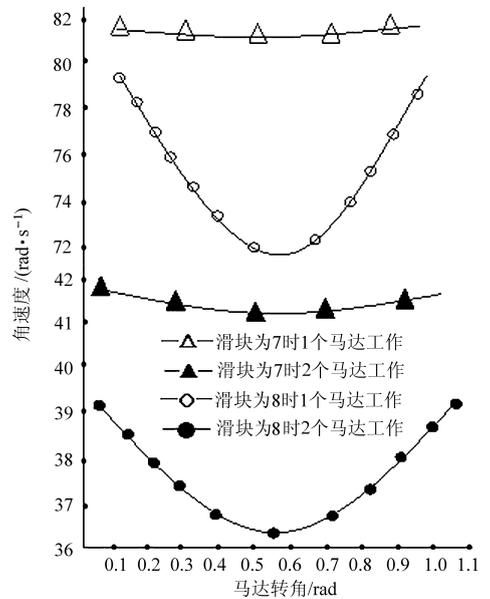


图8 马达转动的角速度曲线

Fig.8 Motor rotation speed chart

从图8可以明显地看出偶数滑块下角速度不均匀性大于奇数滑块。把实验测得的角速度不均匀性和理论的进行比较如表5所示。

表5 实验马达测得角速度不均匀性和理论值对比
Tab.5 Comparison of experimental and theoretical angular velocity uniformity

项目	工况1	工况2	工况3	工况4
实验值	0.0052	0.00266	0.1143	0.0574
理论值	0.0054	0.00270	0.1150	0.0575
差值	0.0002	0.00004	0.0007	0.0001

其中工况1是滑块为7个时1个马达单独工作的角速度不均匀性,工况2是滑块为7个时2个马

达同时工作的角速度不均匀性,工况3是滑块为8个时1个马达单独工作的角速度不均匀性,工况4是滑块为8个时2个马达同时工作的角速度不均匀性。

通过实验测得的数据和计算的数据进行比较,角速度的不均匀性最大差值仅0.0007,这样的差别是因为实验中的误差产生的,属于正常的误差。由此,进一步验证了实验数据的正确性。

5 结论

(1) 双定子异形滑块马达通过控制进出油口可以输出不同转矩和转速,扩大了马达的适用范围。

(2) 双定子异性滑块马达的角速度和滑块的面积呈反比,与滑块的形状无关。角速度不均匀性只与滑块的个数有关,随着滑块数的增加不均匀性减小。

(3) 双定子异性滑块马达奇数滑块的瞬时角速度脉动的幅值比偶数滑块的大,但是脉动的差值比偶数滑块小。2个马达同时工作时比1个马达单独工作时角速度脉动值降低了将近一半,脉动差值大概是1个马达工作时的2倍。

(4) 通过实验测得角速度,进而计算出的角速度不均匀性,充分证明了理论推导是正确的。

参 考 文 献

- 1 闻德生. 多泵多马达传动系统中输出转速的理论分析[J]. 中国科学, 2011, 41(5): 579 - 584.
Wen Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Scientia Sinica, 2011, 41(5): 579 - 584. (in Chinese)
- 2 闻德生. 液压元件的创新与发展[M]. 2版. 北京:北京航空工业出版社, 2009.
- 3 张勇. 梯形滑块双定子轴向马达的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2009.
Zhang Yong. Analysis of trapezoidal slider double stator axial motor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)
- 4 王志力. 矩形滑块双定子轴向液压马达的理论及实验研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2009.
Wang Zhili. Theoretical and experimental analysis of double-stator radial hydraulic motor with rectangle slider[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)
- 5 雷天觉. 液压工程手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.
- 6 闻德生, 吕世军, 刘晓晨, 等. 等宽双定子泵和马达的原理研究[J]. 哈尔滨工业学报, 2008, 40(11): 1840 - 1844.
Wen Desheng, Lü Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal width double-stators pump and motor[J]. 2008, 40(11): 1840 - 1844. (in Chinese)
- 7 闻德生, 高俊, 王志力, 等. 双作用多泵多马达传动中马达输出转矩分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(23): 2836 - 2838.
Wen Desheng, Gao Jun, Wang Zhili, et al. Output torque of double-acting multi-pump and multi-motor[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2836 - 2838. (in Chinese)
- 8 闻德生, 吕世军, 闻佳, 等. 等宽、单滚柱、单作用、双输出、双定子变量泵和马达的原理研究[J]. 现代制造工程, 2005(增刊): 154 - 155.
Wen Desheng, Lü Shijun, Wen Jia, et al. Theoretic research of the variable displacement pump and motor of the same width and with single-roller, single-action, double-output and double-stator[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(Supp.): 154 - 155. (in Chinese)
- 9 闻德生, 吕世军, 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): 220 - 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): 220 - 224. (in Chinese)
- 10 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- 11 Yamaguchi Atsushi. Motion of piston in piston-type hydraulic machine[J]. Bulletin of the JSME, 1976, 19(130): 402 - 419.
- 12 郑阿奇. MATLAB实用教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
- 13 路甬祥. 流体传动与控制技术的历史进展与展望[J]. 机械工程学报, 2001, 37(10): 1 - 9.
Lu Yongxiang. Progress and prospects of the history of fluid power transmission and control technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(10): 1 - 9. (in Chinese)
- 14 王益群, 张伟. 流体传动及控制技术的评述[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 95 - 99.
Wang Yiqun, Zhang Wei. The comments of fluid power transmission and control technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 95 - 99. (in Chinese)
- 15 Wen Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 992 - 997.
- 16 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]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 238 - 242.
Wen Desheng, Chang Xue, Zhang Shaobo, et al. Analysis of the torque pulsation for double-stator single-acting multi-motors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 238 - 242. (in Chinese)
- 17 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. Theoretical study on the first kind of compound gear rotator motor with low speed and

- high torque[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2):44-47. (in Chinese)
- 18 闻德生,张勇,王志力,等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析[J]. 西安交通大学学报,2011,45(3):81-85.
Wen Desheng, Zhang Yong, Wang Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple acting multi pump and multi motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011,45(3):81-85. (in Chinese)
- 19 柯明纯,丁凡,李宾. 背压对液压马达效率影响的探讨[J]. 农业机械学报,2006,37(10):128-131.
Ke Mingchun, Ding Fan, Li Bin. Exploration of the influence of backing pressure on the efficiency of hydraulic motor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):128-131. (in Chinese)
- 20 杨尔庄. 液压技术的发展动向及展望[J]. 液压启气动与密封,2003(4):1-7.

Uniformity of Double Stator Alien Slider Hydraulic Motor

Wen Desheng Zhang Kaiming Zhang Sanxi Zheng Zhenquan Yang Jie
(Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To meet the needs of different working conditions, a double-stator multi-motors was designed. Double-stator single-acting multi-motors was one of double-stator multi-motors. In order to realize the performance of motor, the influence of torque pulsation by different number of slider was studied based on the analysis of the theoretical displacement and theoretical torque of double-stator single-acting multi-motors. Through the analysis, mathematical expressions of the motor torque and the number of sliders were obtained. Meanwhile, the results show that the lag angle can influence torque pulsation when outer motor and inner motor work at the same time and differential connection. It turns out that the uniformity of angular velocity is smaller when the number of alien slider is odd, while the amplitude of angular velocity is a little larger than the motor whose number of sliders is even. This research work lays a theoretical foundation for the design of double-stator single-acting multi-motors.

Key words: Double-stator Angular speed Uniformity Slider

(上接第 340 页)

Motion Error Modeling and Compensating for 6_PUS Parallel Robot of Wind Tunnel Support System

Tan Xingqiang¹ Zhang Jian¹ Xie Zhijiang²
(1. College of Mechanic Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China
2. College of Mechanic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at a kind of new 6-DOF wind tunnel support parallel robot, using the method of D-H single-chain, and together with the method of parameters-perturbation, the motion error model of this support parallel robot used in wind tunnel was established, and simulation program based on this motion error model was made. According to six kinds of typical motion mode of wind tunnel test, six kinds of posture errors of different motion mode of this parallel support system was analyzed and error curves of typical motion mode were also get by simulation. Using the motion error models obtained from the simulation, the corresponding error controlling methods was carried during this parallel support robot components designing and assembling, and ensuring the design and manufacture accuracy of the parallel support robot reached the requirement of wind tunnel tests, and error estimation program which was similar to that of the motion error simulation was embedded in the wind tunnel test to compensate the motion errors of posture and location of tested aircraft model, and it was proved in practice that the precision of wind tunnel test data was improved.

Key words: Robot Parallel mechanism Wind tunnel Support system Error model Error analysis