

双定子对称型多泵多速马达理论特性分析*

闻德生 杨 杰 郑珍泉 张三喜 张凯明

(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: 在现有的对称型定量泵、定量马达原理基础上,设计出了双定子对称型结构的多泵/多速马达,在一个壳体内1个转子对应2个定子,使多速马达可以独立同步工作;以双定子对称型双作用多速马达为例,阐述了结构和工作原理,定义了符号表示方法,分析了多泵的输出流量特性、多速马达的输出转速和转矩特性,对多泵多速马达不同组合方式下的多速马达转速进行了分析,结果表明,双定子对称型多速马达能够输出多种不同的转速和转矩,这为双定子多泵/多速马达系统在机床设备、行走机械等领域的应用奠定了基础。

关键词: 双定子对称型 多泵多速马达 流量特性 差动连接 转速转矩特性

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0321-04

引言

目前,广泛应用在机械行业中的泵和马达都是在一个壳体内一个转子对应一个定子形成的一个泵/马达^[1-3],这种泵和马达组成的系统存在一定的不足,如能量损失较大,传动效率较低,难以实现严格的传动比。随着液压技术的发展,对液压传动中泵和马达的效率、液压系统的节能要求越来越高^[4-7],从而使得液压元件发展的速度越来越快。

双定子多泵和多速马达是从泵和马达的原理出发,在一个壳体内形成多个相互独立的泵和马达^[8-11],这些泵和马达均具有一个转子对应两个定子的特点,根据作用数不同可分为单作用、双作用、三作用和多作用^[12];根据滑块结构的不同可以分为异型滑块型、单滚柱型、双滚柱型、双滚柱连杆型等多种^[13-15];根据结构不同又可分为对称型和非对称型^[16]。本文对双定子对称型多泵的流量输出特性,多速马达的输出转速、转矩特性加以研究,从而为双定子多泵/多速马达系统在机床设备、行走机械等领域的应用奠定基础。

1 双定子对称型多泵/多速马达的工作原理

以对称型双作用多泵/多速马达为例说明其结构和工作原理,其工作原理简图如图1所示,实物图如图2所示。多泵/多速马达的基本结构是一个泵体内设计了1个转子、2个定子(外定子和内定子),由转子与外定子、滚柱连杆组(外滚柱、连杆和内

滚柱)、配流装置、侧板组成2个外泵(马达);由转子与内定子、滚柱连杆组(外滚柱、连杆和内滚柱)、配流装置、侧板组成2个内泵(马达)。当改变内、外定子的曲线形状时,可形成单作用、双作用、三作用、甚至多作用等不同作用数类型的多泵/多速马达。当双作用多泵工作时,在泵体上有4个输出油口,它们可以单独输出,也可以组合输出;当作为多速马达使用时,马达有多种转速和转矩输出,也能实现多马达的差动连接。

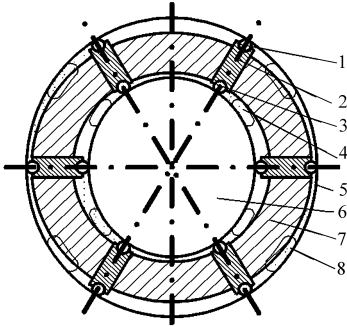


图1 双定子对称型双作用多泵/多速马达原理图
Fig.1 Principle diagram of double stator symmetrical type multi-pump and multi-speed motor

- 1. 外滚柱 2. 连杆 3. 内滚柱 4. 内泵/马达油口 5. 外定子
- 6. 内定子 7. 转子 8. 外泵/马达油口

2 多泵/多速马达的符号设定

根据多泵/多速马达结构的特殊性,对它的符号进行了规定。由于多泵/多速马达中内外泵/马达共用一个壳体,并且只有一个转子,内泵/马达和外泵/

收稿日期: 2013-06-13 修回日期: 2013-07-03

* 国家自然科学基金资助项目(50975246)

作者简介: 闻德生,教授,博士生导师,主要从事新型液压元件的研发与应用研究, E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

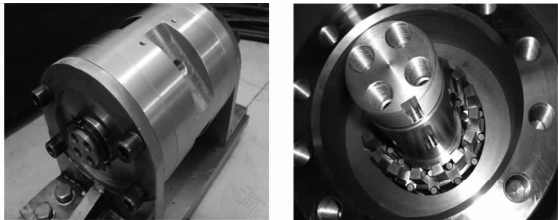


图 2 多泵/多速马达实物照片

Fig. 2 Real photos of multi-pump and multi-speed motor

马达的传动轴相同,所以采用同轴的符号。外泵/马达与传统的定量单泵/马达的圆圈符号相同,内泵/马达用同心的两个圆圈来表示。多泵/多速马达壳体内部的马达数目用黑色三角表示,并且与黑色三角的数量相同,由于多泵是液压动力元件,所以黑色三角箭头朝外,多速马达是液压执行元件,黑色三角箭头朝内。当多泵/多速马达可以双向运动时就用双向的实心黑色三角表示。多泵/多速马达的符号图如图 3 所示。

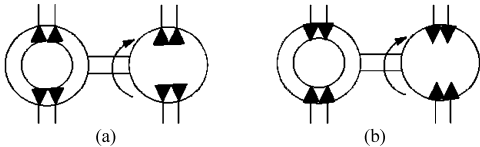


图 3 多泵/多速马达主要符号图

Fig. 3 Main symbol figure of multi-pump and multi-speed motor

(a) 双作用多泵 (b) 双作用多速马达

3 双定子双作用多泵的流量特性分析

在双定子对称型双作用多泵中,由于多泵中内泵和外泵工作相互独立,在作为动力元件输出时可以根据不同的连接方式,形成不同的流量输出特性,可以实现一个泵给一个系统输入不同的定流量,也可以分别给不同的执行机构供油。其中的两种连接方式如图 4 所示(这些组合方式的连接是靠液压阀来实现,为了使系统图简化,这里省略了液压阀)。

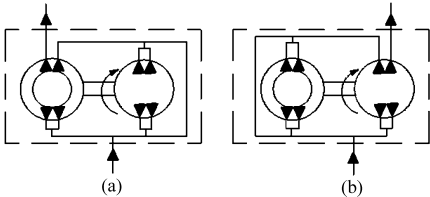


图 4 双作用多泵的连接方法

Fig. 4 Connection method of double-acting multi-pump

(a) 一个内泵单独工作 (b) 一个外泵单独工作

由于双定子双作用多泵的结构是对称的,所以多泵中两个内泵的排量相同,两个外泵的排量也相同,设一个内泵的排量为 V_1 ,一个外泵的排量为 V_2 ,电机转速为 n ,多泵中外泵和内泵的排量比为 a ($a > 1$,与泵的设计结构有关),在不考虑泄漏的情

况下,当只有一个内泵单独工作或只有一个外泵单独工作,多泵的输出流量分别为

$$\begin{cases} q_1 = V_1 n \\ q_2 = V_2 n \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{q_2}{q_1} = \frac{V_2}{V_1} = a \\ q_2 = a q_1 \end{cases} \quad (2)$$

同理可以推导出双作用多泵其他连接方式下输出的流量特性,双定子双作用多泵共有 8 种连接方式,其输出流量如表 1 所示。

表 1 双作用多泵连接方式及流量输出值
Tab. 1 Connection method and flow output values of double-acting multi-pump

内泵工作数	外泵工作数	输出流量
1	0	q_1
2	0	$2q_1$
0	1	aq_1
0	2	$2aq_1$
1	1	$(1+a)q_1$
1	2	$(1+2a)q_1$
2	1	$(2+a)q_1$
2	2	$(2+2a)q_1$

由表 1 可知,多泵不同连接方式下输出的流量成一定的比例,这个比例与 a 有关,从而实现了一个泵的多种定流量输出。

4 双作用多速马达的转速转矩特性分析

双定子对称型双作用多速马达的连接方式和多泵相似,但是多速马达可以实现差动连接,多速马达可以根据不同的连接方式对外输出不同的转速和转矩。为了便于比较,在不考虑泄漏和损失的情况下,设双作用对称型多速马达的内外马达进出口压差均为 Δp ,内、外马达流量输入均为 Q ,一个内马达单独工作时输出的转速和转矩分别为 T_1 和 N_1 ,一个外马达单独工作时输出的转速和转矩分别为 T_2 和 N_2 ,下面对双作用多速马达的不同连接方式下输出的转速和转矩特性进行分析。

4.1 多速马达的一般连接方式

当双定子对称型多速马达采用一般连接方式时,其中的两种连接方式如图 5 所示。

设一个内马达的排量为 V_{1m} ,一个外马达的排量为 V_{2m} ,外马达和内马达排量比例系数为 b ($b > 1$,与马达的设计结构有关)。当多速马达中只有一个内马达单独工作时,马达的输出转速和转矩分别为

$$\begin{cases} N_1 = \frac{Q}{V_{1m}} \\ T_1 = \frac{\Delta p V_{1m}}{2\pi} \end{cases} \quad (3)$$

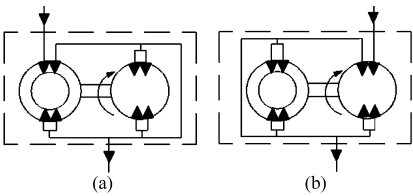


图 5 双作用多速马达的连接方法

Fig.5 Connection method of double-acting multi-speed motor

(a) 一个内马达单独工作 (b) 一个外马达单独工作

当多速马达中只有一个外马达单独工作时, 马达的输出转速和转矩分别为

$$\begin{cases} N_2 = \frac{Q}{V_{2m}} = \frac{Q}{bV_{1m}} = \frac{1}{b}N_1 \\ T_2 = \frac{\Delta p V_{2m}}{2\pi} = \frac{b\Delta p V_{1m}}{2\pi} = bT_1 \end{cases} \quad (4)$$

由于 $b > 1$, 所以 $N_2 < N_1, T_2 > T_1$ 。同理可以推导出双作用多速马达其它不同方式的连接组合, 共有 8 种。针对每一种方式, 多速马达输出的转速和转矩如表 2 所示。

表 2 多速马达一般连接时转速转矩输出值

Tab.2 Speed and torque output values of multi-speed motor in general connection

内马达工作数	外马达工作数	输出转速	输出转矩
1	0	N_1	T_1
2	0	$N_1/2$	$2T_1$
0	1	N_1/b	bT_1
0	2	$N_1/(2b)$	$2bT_1$
1	1	$N_1/(1+b)$	$(1+b)T_1$
1	2	$N_1/(1+2b)$	$(1+2b)T_1$
2	1	$N_1/(2+b)$	$(2+b)T_1$
2	2	$N_1/(2+2b)$	$(2+2b)T_1$

由表可知, 双作用多速马达在一般连接方式下, 通过不同的组合可以对外输出 8 种定转速和定转矩, 多速马达输出的转矩和转速系数都与 b 有关, 并且输出的转矩系数和转速系数互为倒数。

4.2 多速马达的差动连接方式

传统的定量单马达不能实现马达的差动连接, 但是双定子双作用对称型液压马达, 可以向一个液压马达壳体上的内、外两个马达反向同时通入高压油, 由于内、外两个马达的排量(有效工作面积)不同, 故合力矩不为零, 从而可实现双作用对称型液压马达的差动工作。图 6 为双作用多速马达差动连接的两种方式。

当双作用多速马达中的一个内马达和一个外马达差动连接工作时, 马达的输出转速 N_3 和转矩 T_3 分别为

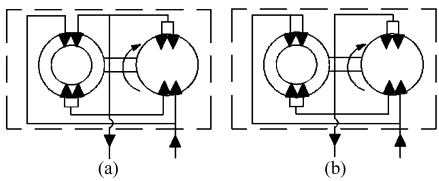


图 6 双作用多速马达的差动连接方式

Fig.6 Differential connection method of double-acting multi-speed motor

(a) 一内一外的差动 (b) 一外两内的差动

$$\begin{cases} N_3 = \frac{Q}{V_{2m} - V_{1m}} = \frac{Q}{(b-1)V_{1m}} = \frac{1}{b-1}N_1 \\ T_3 = \frac{\Delta p (V_{2m} - V_{1m})}{2\pi} = \frac{(b-1)\Delta p V_{1m}}{2\pi} = (b-1)T_1 \end{cases} \quad (5)$$

双作用多速马达的差动连接共有 4 种方式, 同理可以推出马达其他差动连接方式的工作情况, 具体如表 3 所示。

表 3 多速马达差动连接时转速转矩输出值

Tab.3 Speed and torque output values of multi-speed motor in differential connection

内马达工作数	外马达工作数	输出转速	输出转矩
1	1	$N_1/(b-1)$	$(b-1)T_1$
1	2	$N_1/(2b-1)$	$(2b-1)T_1$
2	1	$N_1/(b-2)$	$(b-2)T_1$
2	2	$N_1/(2b-2)$	$(2b-2)T_1$

由表 3 可知, 双作用多速马达可以实现一内一外(一个内马达和一个外马达)、一内两外、两内一外、两内两外 4 种方式的差动连接, 输出 4 种不同的转速和转矩, 这在一定程度上增加了定量马达在液压系统中的转速、转矩调节范围。

5 不同连接方式联合使用的转速分析

由前面对多泵多速马达的理论特性分析可知: 双定子对称型双作用多泵具有 8 种连接方式, 流量输出系数用矩阵 M 表示, 双定子对称型双作用多速马达具有普通连接方式与差动连接方式共 12 种连接方式, 转速输出系数用矩阵 N 表示。将矩阵输入到 Matlab 中求解如下:

```
syms M N;  
M=[1 2 a 2a 1+a 1+2a 2+a 2+2a];  
N=[1 1/2 1/b 1/2b 1/(1+b) 1/(1+2b)  
1/(2+b) 1/(2+2b) 1/(b-1) 1/(2b-1)  
1/(b-2) 1/(2b-2)];  
ans=MN
```

在 Matlab 中计算可以得出 8×12 的矩阵, 所以多泵与多速马达通过不同的连接, 可以使多速马达有 $8 \times 12 = 96$ 种转速输出。多泵与多速马达其中的

4种连接方式如图7所示(为了简化系统图,这里省略了液压阀)。

通过对双作用多泵多马达系统不同连接方式的

转速研究,可实现多速马达从低速大扭矩到高速小扭矩的较宽速度调节范围内转速、扭矩的变化,这在实际生产中有很大的应用价值。

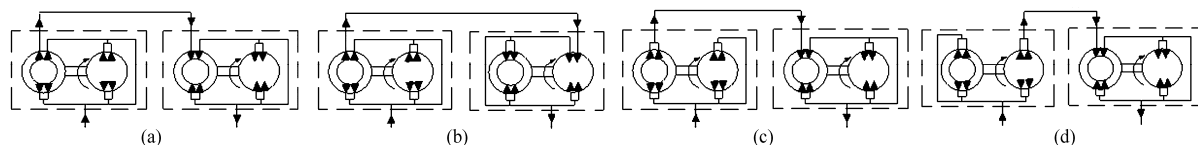


图7 双作用多泵和多速马达的连接方式

Fig.7 Connection method of double-acting multi-pump and multi-speed motor

- (a) 一个内泵和一个内马达的连接 (b) 一个内泵和一个外马达的连接
(c) 两个内泵和一个内马达的连接 (d) 两个外泵和一个内马达的连接

6 结论

(1) 通过对双定子多泵的流量特性分析可知,双定子对称型多泵由于其特殊的结构,实现了一个泵可以输出多种不同的定流量,这种新型的多泵不仅丰富了新型的液压元件,而且为新型的液压传动

奠定了基础。

(2) 双定子对称型双作用液压马达可以实现一个马达的多种转速、扭矩的输出,而且实现了液压马达的差动连接,多泵和多速马达联合使用,增加了马达的转速和扭矩的调节范围,这为多泵多速马达传动系统的研发和应用奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- 王积伟,章宏甲,黄谊. 液压传动[M]. 2版,北京:机械工业出版社,2007.
- 李壮云. 液压元件与系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 雷天觉. 液压工程手册[M]. 北京:机械工业出版社,1990:341-343.
- Kim G W, Wang K W. Enhanced control performance of a piezoelectric-hydraulic pump actuator for automotive transmission shift control[J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(2): 161-174.
- 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 rotorator motor with low speed and high torque[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 44-47. (in Chinese)
- 张利平,周兰午,刘芬,等. 定量泵液压系统节能方法研究[J]. 中国机械工程,2001,12(增刊):36-38.
Zhang Liping, Zhou Wulan, Liu Fen, et al. Analysis of energy-saving ways for fixed delivery pump hydraulic system [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(Supp.): 36-38. (in Chinese)
- Kaya D, Yagmur E A, Yigit K S, et al. Energy efficiency in pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1662-1673.
- 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.
- 闻德生,吕世君,刘晓晨,等. 等宽双定子泵和马达的原理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(11):1840-1844.
Wen Desheng, Lv Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal width double-stators pump and motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 18401-1844. (in Chinese)
- 闻德生. 等宽曲线双定子泵(马达):中国, ZL 02144406.4 [P]. 2002-09-05.
- Wen D, Wang Z, 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): 301-309.
- 闻德生,常雪,张少波,等. 双定子单作用液压马达的转矩脉动研究[J]. 农业机械学报,2013,44(2):238-242.
Wen Desheng, Chang Xue, Zhang Shaobo, et al. Analysis of 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)
- Wen D, Wang Z, Lv S, et al. Single-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Chongqing University (English Edition), 2010, 9(4): 208-214.
- 高俊. 三角形滑块双定子轴向马达的分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2009.
Gao Jun. Analysis of triangle slider double-stator axial piston motor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009. (in Chinese)
- 王志力. 矩形滑块双定子轴向液压马达的理论与实验研究[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)
- 闻德生,王远,张少波,等. 非对称型多泵多速马达特性的理论分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(12):10-13.
Wen Desheng, Wang Yuan, Zhang Shaobo, et al. The theoretical analysis of the characteristics of asymmetric multi-pump and multi-speed motor system[J]. Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(12): 10-13. (in Chinese)

Analysis of Eddy Viscosity Models in Predicting Flow Field of High-speed Water Jet

Yang Minguan¹ Lu Jin'gang¹ Wang Yuli² Gong Chen¹ Yan Longlong¹
(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Department of Mechanics, KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden)

Abstract: Three commonly used two-equation turbulence models were adopted. The computed velocity field was compared with the data from corresponding laser Doppler anemometer measurement to analyze the accuracy of these models. By adjusting the model parameters, the simulation data can fit into the experimental result. The optimal viscosity coefficients C_μ in these used eddy viscosity models were presented. It is shown that the RNG $k-\varepsilon$ model is more sensitive to C_μ , while the results from Standard $k-\varepsilon$ model vary almost linearly with the change of the C_μ value. Study on the simulated flow field gives that if the peak of turbulence kinetic energy appears within the radial span, it will affect the velocity distribution along the jet axis; otherwise, it will modify the velocity magnitude. The proposed numerical scheme reduces the physical complexities involved in ultra-high pressure injection process so that it can be applied to archive fast production from relevant CAE workflow.

Key words: High speed water jet Reynolds-averaged Navier – Stokes equation Turbulent viscosity Laser Doppler anemometer



(上接第 324 页)

Theory Analyses of Double Stator Symmetrical Type Multi-pump and Multi-speed Motor

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

Abstract: A double-stator symmetrical type multi-pump and multi-speed motor is designed based on the principles of existing symmetrical constant pumps and constant motors. In the shell, a rotor is corresponding to two stators, so the multi-speed motor can work independently and synchronously. As an example, we describe the structure and working principle of the double-acting symmetrical-type double-stator multi-speed motor, define its symbolic representation method, and analyze the output flow features of the multi-pump and the output speed and torque features of the multi-speed motor. The speed of the multi-speed motor under different combinations of multi-pump and multi-speed motor is analyzed. The results show symmetric type double-stator multi-speed motor can output many different speeds and torques. The study establishes a basis for applications of double-stator multi-pump and multi-speed motor system on machine tools, mobile machineries and so on.

Key words: Double stator symmetrical Multi-pump and multi-speed motor Flow characteristics Differential connection Speed and torque characteristics