

三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析

闻德生¹, 张勇¹, 王志力¹, 吕世君¹, 筑地徹浩²

(1. 燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛; 2. 上智大学理工学部
机能创造理工学科, 102-8554, 日本东京)

摘要: 为了实现定量泵可输出多种流量、定量马达输出多种转矩和转速的功能, 设计了双定子结构的新泵和马达, 并提出了多泵多马达传动理论. 在一定的马达进出口压差条件下, 通过三作用双定子泵(马达)的不同连接以及泵和马达的多种组合连接, 对泵的不同输出流量、马达输出转矩和转速进行了计算分析. 结果表明, 通过改变泵和马达的连接方式及其组合连接方式, 在一定的范围内可以对马达的转矩和转速、泵的输出流量进行调节和控制, 从而拓宽了元件的适用领域.

关键词: 多泵多马达传动; 转速; 转矩; 差动马达

中图分类号: TH32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0081-04

Rotating Speed and Torque of Triple-Acting Multi-Pump and Multi-Motor

WEN Desheng¹, ZHANG Yong¹, WANG Zhili¹, LÜ Shijun¹, TSUKIJI Tetsuhiro²

(1. Department of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;
2. Department of Engineering and Applied Science, Sophia University, Tokyo 102-8554, Japan)

Abstract: To achieve different value of output flow rate and torque, rotational speed by fixed displacement pump and motor respectively, the theory of multi-pump and multi-motor transmission system is proposed. Under the condition of the same difference in pressure of the motor, with the connection of triple-acting and double-stator pump and motor on themselves and combined connection of pump and motor, the formula derivation and detailed analysis for different output flow, torque and speed are conducted. The results show that the different connection mode enables to acquire many kinds of output speed and torque, and the torque and speed can be adjusted in a wide range.

Keywords: multi-pump and multi-motor drive; rotating speed; torque; differential motor

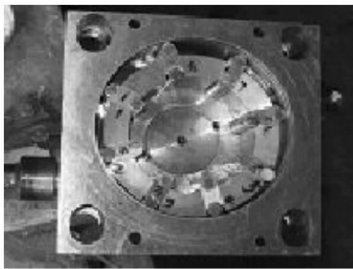
随着液压技术的发展, 对液压元件的效率、比功率、控制方式、节能等各方面的要求越来越高, 元件的种类也需要进一步丰富^[1-3]. 目前, 国内外大多数研究人员都是在已有泵和马达工作原理的基础上从提高性能指标, 改善各部件的材料、密封、润滑条件等方面进行研究, 从而提高元件的实际使用寿命. 还有一部分研究人员通过改变部分摩擦副的材料来提高元件的性能, 并应用于特殊行业^[4-6], 但在泵和马达的工作原理方面进行深入研究则较少.

1 多泵、多马达原理

目前, 广泛应用在液压传动系统的核心元件均

是由单泵和单马达组成的^[7-9], 存在一些不易解决的难题. 因此, 开发新型的液压元件和传动方式是解决实际需求的方法之一. 本文成功试验了等宽曲线双定子泵^[10], 典型结构的(双滚柱连杆型)实物照片如图1所示.

新型结构的元件既可以作泵使用, 又可以作马达使用. 当作为泵使用时, 将几个泵制作在一个壳体内, 形成了多个泵. 多泵是由1个转子(或1个定子)对应2个定子(或2个转子)所形成的一体多泵, 特点是体积小、重量轻、结构简单和比功率大, 并且可以有多个不同流量的输出. 当作为马达使用时, 在一



(a)内部结构



(b)试验现场

图 1 试验泵(马达)的实物照片

个壳体内可实现具有多个马达的功能,可以有多个不同流量的输入,可形成多速马达和差动马达,因此被称为一体多马达.

双滚柱连杆型三作用等宽曲线双定子泵(马达)的原理简图如图 2 所示. 它在一个泵壳内实现了由 3 个输入流量相同的外泵和 3 个输出流量相同的内泵组成的 6 个泵,当作为马达使用时,就是 3 个输入流量相同的外马达、内马达所组成的 6 个马达^[11-12]. 当转子转动时,三作用双定子泵在一个泵体内形成了多个泵(偶数个),3 个外泵是由转子、外定子、滚柱滑块组(滚柱、滑块)、配流装置、侧板形成的,而 3 个内泵是由转子与内定子、滚柱滑块组(滚柱、滑块)、配流装置、侧板形成的. 随着转子的转动,内泵吸油时外泵压油,外泵吸油时内泵压油,所有内泵或外泵的流量相同,且每个内泵和外泵的流量成一定比例,因此三作用双定子泵在一个泵体内形成了同时工作的多个等比例输出的泵. 在一个泵体上可有多多个进油口和出油口,它们可以单独输出,也可以组合输出. 当所有外泵和、内泵和为 1 个输出时,泵的输出流量是成比例的,可作为等比例输出双泵使用.

2 多泵、多马达符号的规定及供油方式

2.1 符号规定

多泵多马达的传动系统是由新型元件多泵、多

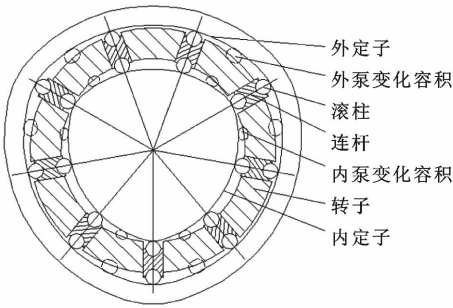
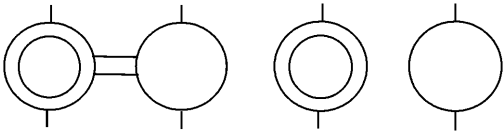


图 2 双滚柱连杆型三作用等宽曲线双定子泵原理简图

马达组成的,因此应对它们的职能符号的表示方法作出规定,才能设计好多泵多马达传动图. 将液压传动中所使用的泵称为单泵,而单泵是指在 1 个壳体内只有 1 个转子对应 1 个定子所形成的泵,当作为马达使用时只有 1 个输入. 以圆圈表示泵(马达),圆内加三角表示液体的流动方向;三角尖向外时为泵,向内时为马达,同时还分为单向、双向和变量的. 为了能表示出多泵、多马达的特性,对多泵、多马达的符号除了参照以上的规定外,还作出了如下的规定: ①由于多泵(马达)中存在多个内泵(马达)和多个外泵(马达),且在一个壳体内实现,共用一个转子和定子,同为一个轴传动,因此采用同轴连接的符号(见图 3);②外泵(马达)采用与单泵(马达)相同的单个圆圈的符号,而内泵采用双圆圈的图形来区分(见图 4);③一个泵体内有几个内、外泵(马达),就在圆圈里加几个三角;④双向的参照现有的规定,在圆圈内加双向三角(见图 5). 按照这些规定就可以画出多泵多马达传动中各种多泵、多马达的符号.



(a)内泵 (b)外泵

图 3 同轴的图形符号 图 4 内、外泵(马达)的图形符号

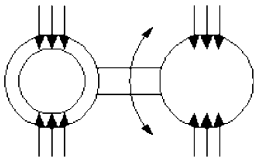


图 5 三作用双向定量马达

2.2 多泵的供油方式

多泵和多马达通过自身不同的连接方式,即可形成多种不同流量的输出和输入,由于连接方式不

同,因此多泵可实现 1 个泵供给 1 个系统不同的定流量.以三作用定量多泵为例,阐述了三单作用双定子泵实现 1 个泵供给 1 个系统不同的定流量,连接方式由控制阀来实现,为简化系统图,将控制阀省略(见图 6).

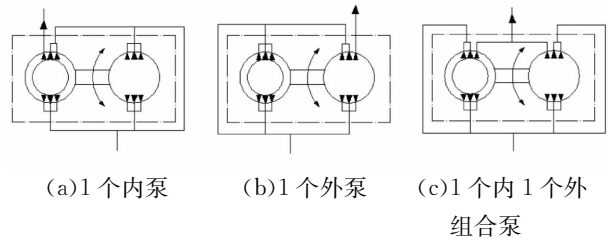


图 6 三单作用定量多泵的连接方法

为便于比较,设 1 个内泵的排量为 q'_1 ,1 个外泵的排量为 q'_2 ,电机转速为 n_d ,泵可以有 3 种流量输出,如图 6 所示.只有 1 个内泵或 1 个外泵工作时的流量分别为

$$Q_1 = q'_1 n_d; \quad Q_2 = q'_2 n_d \tag{1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{q'_2}{q'_1} = c \tag{2}$$

式中: c 为常数.如图 6c 所示,当 1 个内、外泵同时工作时,其输出流量为

$$Q_3 = Q_1 + Q_2; \quad Q_3 = (1 + c)Q_1 \tag{3}$$

图 6 所示泵的连接方式只是最基本的 3 种,同理可以推导出 2 个或 3 个内、外泵,以及它们的组合,共有 15 种.设 $Q_1=1$,则在各种连接方式下所形成的流量系数分别为 1、2、3、 c 、 $2c$ 、 $3c$ 、 $1+c$ 、 $1+2c$ 、 $1+3c$ 、 $2+c$ 、 $2+2c$ 、 $2+3c$ 、 $3+c$ 、 $3+2c$ 和 $3+3c$.

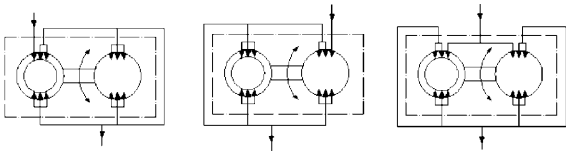
3 多马达的执行方式

在多泵多马达传动系统中,多马达通过不同的连接方式,就可形成不同的转速、转矩输出.以三作用定量多马达为例,有普通和差动两大类连接方式.为便于分析,将马达的进出口压差均设为 ΔP ,马达的输入流量均为 Q .设 1 个内马达的输出转矩为 M_1 ,转速为 n_1 ,1 个外马达的输出转矩为 M_2 ,转速为 n_2 ,并对它们进行具体分析.

3.1 三作用双定子马达的普通连接方式

图 7 是三作用多马达普通连接中 3 种最基本的方式,在其他连接方式下,多马达输出转速、转矩的推导与之相类似.当只有 1 个内马达工作时,马达的转速和转矩为

$$n_1 = \frac{Q}{q_1}; \quad M_1 = \frac{\Delta P q_1}{2\pi} \tag{4}$$



(a)1 个内马达 (b)1 个外马达的 (c)1 个内 1 个外马达的连接方式 连接方式 同向连接方式

图 7 三作用双定子马达的普通连接方式

当只有 1 个外马达工作时

$$n_2 = \frac{Q}{q_2}; \quad M_2 = \frac{\Delta P q_2}{2\pi} \tag{5}$$

因为 $q_2 > q_1$,则 $n_1 > n_2$,即

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_2}{M_1} = d \tag{6}$$

式中: d 为比例常数.当 1 个内马达与 1 个外马达转矩同向、输入总流量仍为 Q 时,则

$$n_3 = \frac{Q}{(q_1 + q_2)}; \quad M_3 = M_1 + M_2 \tag{7}$$

由式(4)~式(7)可得出

$$\left. \begin{aligned} n_3 &= \frac{1}{1+d}n_1; \quad M_3 = (1+d)M_1 \\ n_3 &< n_2 < n_1; \quad M_3 > M_2 > M_1 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

3.2 三作用双定子马达的差动连接方式

图 8 为当 1 个内马达与 1 个外马达转矩反向输入时马达差动的连接图,可类似计算出多马达在其他差动连接方式下的输出转速和转矩为

$$n_4 = \frac{Q}{(q_2 - q_1)}; \quad M_4 = M_2 - M_1 \tag{9}$$

由式(9)、式(10)可得出

$$n_4 = \frac{1}{d-1}n_1; \quad M_3 = (d-1)M_1 \tag{10}$$

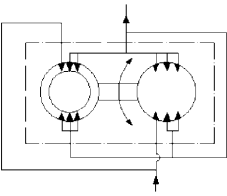


图 8 三作用双定子马达差动连接

3.3 多马达转矩、转速的计算

图 7 中只给出了简单的三作用双定子马达在普通连接方式下的输出转矩、转速,同样方法还可以计算 2 个或 3 个内马达同向输入方式下的马达输出.外马达也类似,而且内、外马达还可以联合同向输入产生不同的转矩和转速.多马达在普通连接方式下的输出转速、转矩的计算如表 1 所示.

表 1 转矩、转速系数表(内、外马达同向输入)

序号	内马达数	外马达数	转矩系数	转速系数
1	1	0	1	1
2	2	0	2	1/2
3	3	0	3	1/3
4	0	1	d	$1/d$
5	0	2	$2d$	$1/2d$
6	0	3	$3d$	$1/3d$
7	1	1	$1+d$	$1/(1+d)$
8	1	2	$1+2d$	$1/(1+2d)$
9	1	3	$1+3d$	$1/(1+3d)$
10	2	1	$2+d$	$1/(2+d)$
11	2	2	$2+2d$	$1/(2+2d)$
12	2	3	$2+3d$	$1/(2+3d)$
13	3	1	$3+d$	$1/(3+d)$
14	3	2	$3+2d$	$1/(3+2d)$
15	3	3	$3+3d$	$1/(3+3d)$

三作用双定子马达有 9 种不同的差动连接方式,即三外三内(指 3 个外马达与 3 个内马达)、三外二内、三外一内、二外三内、二外二内、二外一内、一外三内、一外二内、一外一内,转矩系数分别为 $3d-3$ 、 $3d-2$ 、 $3d-1$ 、 $2d-3$ 、 $2d-2$ 、 $2d-1$ 、 $d-3$ 、 $d-2$ 和 $d-1$,而转速系数则是转矩系数的倒数.由以上分析可看出,此种新型马达在同样的输入流量和压差下,可以实现多个不同转速和转矩的输出.

4 多泵多马达传动的连接方式及计算

由 $M=\frac{\Delta P q}{2\pi}$ 可知,当 ΔP 不变,马达输出转矩只与 q 有关,而多马达的转速不仅与马达排量有关,还与多泵的输入流量有关.因此,多泵和多马达在各种连接方式下,多马达输出转速的计算结果可用矩阵来表示.采用数学软件 Matlab 对矩阵进行求解计算如下

```
>> syms a,b
a=[1,2,3,c,2c,3c,1+c,1+2c,1+3c,2+c,2+2c,2+3c,3+c,3+2c,3+3c];
b=[1,1/2,1/3,1/d,1/(2d),1/(3d),1/(1+d),1/(1+2d),1/(1+3d),1/(2+d),1/(2+2d),1/(2+3d),1/(3+d),1/(3+2d),1/(3+3d)];
```

ans=ba

计算结果是一个 15×15 的矩阵,矩阵中的数据便是多马达各种转速的系数.

差动连接转速系数表的求解法类似,只需改变 b 即可,在 Matlab 软件中输入

```
>> syms a,b,h,l;
a=[1,2,3,c,2c,3c,1+c,1+2c,1+3c,2+c,2+2c,2+3c,3+c,3+2c,3+3c];
b=[1/(3d-3),1/(3d-2),1/(3d-3),1/(2d-3),1/(2d-2),1/(2d-1),1/(d-3),1/(d-2),1/(d-1)];
```

ans=ba

计算得到一个 9×15 的矩阵,矩阵中的数据是多马达差动连接方式下马达输出转速的系数.

5 结 论

(1)由于内马达和外马达在进出油时相互独立并且排量不同,通过不同连接方式不仅可以实现多种不同转速和转矩的输出,而且还可以实现差动马达的功能,因此扩大了双定子马达的适用范围.

(2)双定子结构实现了在一个壳体内 1 个转子对应于 2 个定子,形成 2 个以上马达(泵)的新型元件,其独特的功能在奠定多泵多马达传动的基础上还增加了新的液压元件系列.

参考文献:

[1] 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. Discussing on the efficiency influence of hydraulic motor back-pressure[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2006, 37(10):128-131.

[2] 陈卓如. 低速大扭矩液压马达理论、计算与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1989:151-237.

[3] SADASHIVAPPA K, SINGAPERUMAL M, NARAYANASAMY K. On the efficiency of the axial piston motor considering piston form deviations [J]. Mechatronics,1996,6(3):283-301.

[4] KIM G W, WANG K W. Enhanced control performance of a piezoelectric-hydraulic pump actuator for automotive transmission shift control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(2): 161-174.

[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. The evolution of technology on axial piston pump/motor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(10):1-8.

[6] LIU Y S, WU D F, LONG L, et al. Earch on the port valve of a water hydraulic axial pump [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 223 (3): 155-166.

[7] 雷天觉. 液压工程手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 1990:341-343.

[8] 朱梦周. 机械工程师手册 [M]. 北京:机械工业出版社,2004:1200-1205.

[9] 何存兴. 液压元件 [M]. 北京:机械工业出版社,1982: 14-16.

[10] 闻德生. 等宽曲线双定子滚柱泵: 中国,02144406.4 [P]. 2003-03-19.

[11] 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, LÜ 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):1840-1844.

[12] 闻德生. 液压元件的创新与应用 [M]. 北京:航天工业出版社,2008:375-383.

(编辑 管咏梅)