

齿轮型多泵多马达传动系统设计与试验

闻德生 商旭东 潘为圆 马光磊 顾攀 石滋洲

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了使定量泵输出多级定流量以及定量马达输出多级定转速和定转矩,在比例型和并联型齿轮多泵/多马达的基础上提出了齿轮型多泵多马达传动理论。基于1-1比例型和3并联型齿轮多泵/多马达设计了2种齿轮型多泵多马达传动系统,并阐述了其工作原理和特点,且对2种齿轮型多泵多马达传动系统在不同工作方式下的输出特性进行了理论分析和拓展,并搭建了齿轮型多泵多马达传动系统试验平台。试验结果表明:齿轮型多泵多马达传动系统在不同工作方式下可输出多级定转速和定转矩,且各级转速和转矩存在一定的比例关系。试验结果与理论分析基本一致,验证了理论分析的正确性,为齿轮型多泵多马达传动系统的设计与研究奠定了基础。

关键词: 传动系统; 比例型; 并联型; 齿轮; 多泵多马达; 输出特性

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0399-08

Design and Experiment on Gear Multi-pump and Multi-motor Driving System

WEN Desheng SHANG Xudong PAN Weiyuan MA Guanglei GU Pan SHI Zizhou

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

Abstract: In order to make constant displacement pump output of multi flows, and make constant displacement motor output of multi speeds and multi torques, the proportional type and parallel type of gear multi-pump (multi-motor) consisted of several single pumps and motors were designed, a theory of gear multi-pump and multi-motor driving system was presented based on the proportional type and parallel type of gear multi-pump (multi-motor). The principle of two multi-pump (multi-motor) was introduced, two gear multi-pump and multi-motor driving systems were designed based on 1-1 proportional type and 3 parallel type gear multi-pump (multi-motor), and the principle and characteristics of them were introduced, the output characteristics of the two gear multi-pump and multi-motor driving systems in different working ways were analyzed, and the output characteristics of two gear multi-pump and multi-motor driving systems consisted of X-Y proportional and Z parallel gear multi-pump (multi-motor) were expanded, the experimental platform of gear multi-pump and multi-motor driving system was built. The result showed that the driving system can output multi speeds and multi torques, and there was a certain ratio between the speed and torque levels. The experimental result was consistent with the theoretical analysis, which showed the correctness of theoretical analysis. The research provided a basis for design and research on multi-pump and multi-motor driving system.

Key words: driving system; proportional type; parallel type; gear; multi-pump and multi-motor; output characteristics

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、农业机械等行业中,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]。液压泵和液压马

达作为液压传动系统中的动力元件和执行元件,是其重要组成部分,而齿轮泵和齿轮马达作为液压传动领域应用较为广泛的液压元件,其具有结构简单、加工工艺性好、耐污染等特点^[2-4]。但因齿轮泵和齿轮马达排量不能调节,在很大程度上限制了它的应用范围^[5]。

收稿日期: 2016-09-12 修回日期: 2016-10-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(50975246)
作者简介: 闻德生(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事液压元件和液压传动研究,E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

目前各行业广泛应用的液压传动系统均是由单泵和单马达组成^[6-8],这种传动系统在实际应用中存在着一定的不足:一个系统需要多级定流量时,一个定量泵无法实现;现有定量马达难以实现多级定转速和定转矩的输出等。为解决上述问题,本文在比例型齿轮多泵/多马达和并联型齿轮多泵/多马达的基础上,设计齿轮型多泵多马达传动系统,并对该传动系统的输出特性进行理论分析和试验研究,以期多泵多马达传动系统的设计与应用奠定基础。

1 齿轮型多泵/多马达工作原理

多泵/多马达是指一个转子对应 2 个定子或一个定子对应 2 个转子,在一个壳体内形成多个相互独立的泵(马达)。而齿轮型多泵/多马达根据其壳体内所含子泵、子马达的特点,分为比例型和并联型。

1.1 比例型齿轮多泵/多马达工作原理

比例型齿轮多泵/多马达是指一个壳体内有 2 组相互独立的内泵和外泵(内马达和外马达),其排量不等且成一定比例关系,比例系数取决于齿轮泵(马达)的结构尺寸,实现了一体多泵(马达)^[9-16]。比例型齿轮多泵原理图如图 1 所示,该泵是集内啮合齿轮泵(简称内泵)和外啮合齿轮泵(简称外泵)于一个壳体内,其中内泵由共齿轮的内齿轮、小齿轮、月牙板、内泵进出油口组成;外泵由共齿轮的外齿轮、大齿轮、外泵进出油口组成。内、外泵既可单独工作,又可以同时工作。

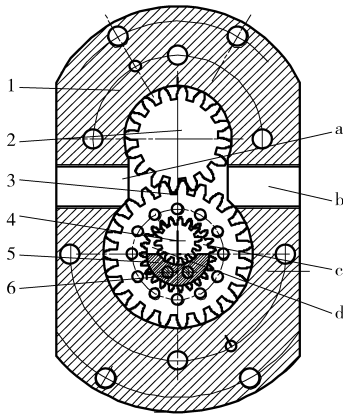


图 1 比例型齿轮多泵原理图

Fig. 1 Principle diagram of proportional gear multi-pump
1.壳体 2.大齿轮 3.共齿轮 4.小齿轮 5.月牙板 6.定位销
a.外泵出油口 b.外泵进油口 c.内泵进油口 d.内泵出油口

比例型齿轮多泵/多马达理论上可实现在一个壳体内形成 X 个内泵(马达)和 Y 个外泵(马达),可以实现齿轮泵的多输出和齿轮马达的多输入。

1.2 并联型齿轮多泵/多马达工作原理

并联型齿轮多泵/多马达是指在一个壳体内有多个排量相等且相互独立的子泵(马达)^[17-18]。并

联型齿轮多马达原理图如图 2 所示,该并联型齿轮多马达主要由中心齿轮、3 个对称布置的空转齿轮、壳体及端盖等组成。中心齿轮和 3 个空转齿轮分别构成 3 个排量相等且相互独立的外啮合齿轮泵。并联型齿轮多泵/多马达理论上可实现在一个壳体内形成 Z 个相同排量的子泵(马达)。可通过控制并联型齿轮多泵/多马达进出油口的连接方式,来改变工作子泵(马达)的数量,扩大了工作方式和应用范围。

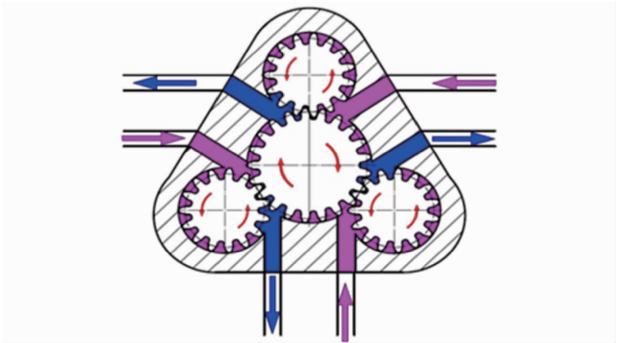


图 2 并联型齿轮多马达原理图
Fig. 2 Principle diagram of parallel gear multi-motor

2 齿轮型多泵多马达传动概述

2.1 齿轮型多泵/多马达的符号规定

对齿轮型多泵/多马达的名称和职能符号作出如下规定:

(1)由 X 个内泵(马达)和 Y 个外泵(马达)组成的比例型齿轮多泵/多马达称为 $X-Y$ 比例型齿轮多泵/多马达(简称 $X-Y$ 型多泵/多马达);由 Z 个子泵(马达)组成的并联型多泵/多马达称为 Z 并联型齿轮多泵/多马达(简称 Z 型多泵/多马达)。

(2)比例型齿轮多泵/多马达的内、外泵(马达)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 2 个圆圈来表示,圆圈内三角个数表示内、外泵(马达)数;并联型齿轮多泵/多马达壳体内有几个子泵(马达),就在圆圈内画几个三角。

1-1 型多泵见图 3a,3 型多马达见图 3b。

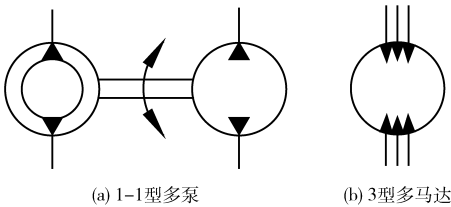


图 3 多泵/多马达的职能符号

Fig. 3 Symbol figures of multi-pump and multi-motor

在齿轮型多泵多马达传动系统中,通过切换该系统不同的连接方式,齿轮型多泵可以实现向

一个系统提供多级定流量,也可以不用减压阀分别给多个不同压力执行机构供油;齿轮型多马达可输出多级定转速和定转矩^[19-20]。且齿轮型多泵/多马达理论容积效率较高,径向受力较小,由其组成的齿轮型多泵多马达传动系统不仅有多种输出特性,且具有低脉动、低噪声等特点,该传动系统具有很强的实用性。齿轮型多泵/多马达部分连接方式如图 4 所示。

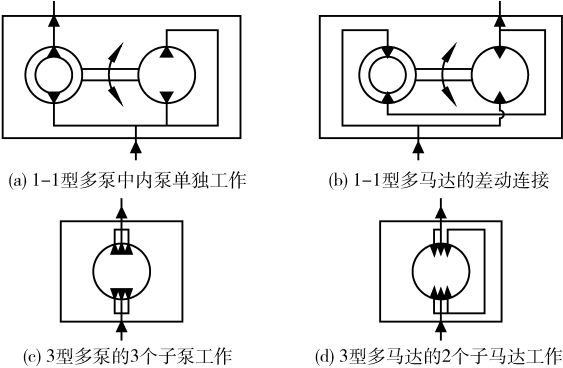


图 4 齿轮型多泵/多马达部分连接方式

Fig. 4 Partial connection methods of gear multi-pump and gear multi-motor

2.2 齿轮型多泵多马达传动系统的分类

齿轮型多泵多马达传动是一种新型传动方式,该传动系统按照齿轮型多泵/多马达的特点可分为:①并联型齿轮多泵-并联型齿轮多马达传动。②比例型齿轮多泵-比例型齿轮多马达传动。③比例型齿轮多泵-并联型齿轮多马达传动。④并联型齿轮多泵-比例型齿轮多马达传动。本文只对后 2 种传动系统进行设计与分析。

3 比例型齿轮多泵-并联型齿轮多马达传动系统设计

以 1-1 型多泵和 3 型多马达所形成的比例型齿轮多泵-并联型齿轮多马达传动系统为例,对该传动系统进行设计与分析,并对其理论拓展得出该类传动的输出规律。

3.1 1-1 型多泵-3 型多马达传动系统设计与分析

3.1.1 多泵多马达传动系统工作原理

图 5 为 1-1 型多泵-3 型多马达传动系统原理图。在该传动系统中,换向阀 6、7 分别控制 1-1 型多泵中内、外泵的工作情况,换向阀 8、9、10 分别控制 3 型多马达中的 3 个子马达的工作情况,1-1 型多泵在内泵单独工作、外泵单独工作、内外泵同时工作 3 种工作方式下的系统压力分别由溢流阀 2、4、1 调定。该多泵多马达传动系统可通过换向阀 5、6、7 实现多种工作方式,具体情况如表 1 所示。

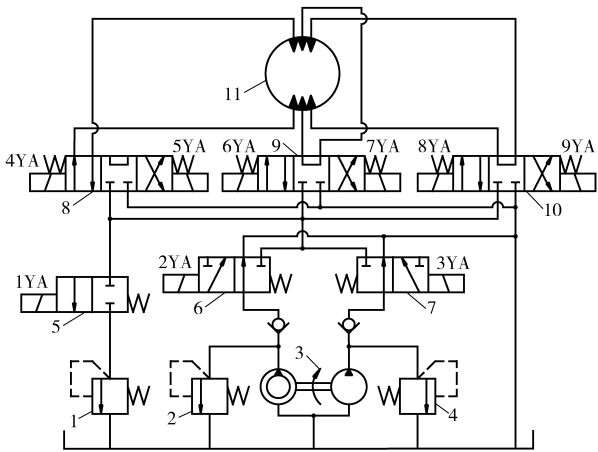


图 5 1-1 型多泵-3 型多马达传动系统原理图

Fig. 5 Principle diagram of 1-1 multi-pump and 3 multi-motor driving system

1、2、4. 溢流阀 3. 1-1 型多泵 5. 二位二通换向阀 6、7. 二位三通换向阀 8、9、10. 三位四通换向阀 11. 3 型多马达

3.1.2 系统输出特性分析

对于 1-1 型多泵,设内泵排量为 V_1 ,外泵排量为 V_2 ,由其结构可知 $V_2 > V_1$,则该泵中外泵与内泵的排量比例系数为 c 为

$$c = \frac{V_2}{V_1} \tag{1}$$

设电动机转速为 n_d ,该泵在 3 种工作方式下输出的流量为

$$\begin{cases} Q_1 = V_1 n_d & \text{(内泵单独工作)} \\ Q_2 = V_2 n_d = c V_1 n_d = c Q_1 & \text{(外泵单独工作)} \\ Q_3 = (V_1 + V_2) n_d = (1 + c) V_1 n_d = (1 + c) Q_1 & \text{(内、外泵联合工作)} \end{cases} \tag{2}$$

若不计流量及压力损失,当内泵和 1 个子马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{11} = \frac{Q_1}{V_3} \\ T_{11} = \frac{V_3 \Delta p_{in}}{2\pi} \end{cases} \tag{3}$$

式中 V_3 ——3 型多马达中 1 个子马达的排量
 Δp_{in} ——内泵单独工作时多马达进出口压差
同理,当外泵和 1 个子马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{21} = \frac{Q_2}{V_{m1}} = c n_{11} \\ T_{21} = \frac{V_3 \Delta p_{out}}{2\pi} \end{cases} \tag{4}$$

式中 Δp_{out} ——外泵单独工作时多马达进出口压差
内、外泵和 1 个子马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{31} = \frac{Q_3}{V_{m1}} = (1+c)n_{11} \\ T_{31} = \frac{V_3 \Delta p_{\text{tog}}}{2\pi} \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δp_{tog} ——内、外泵同时工作时多马达进出口压差

则 1-1 型多泵和 3 型多马达在不同工作方式下,该系统的输出特性如表 1 所示。
由表 1 可知,通过调节 1-1 型多泵和 3 型多马达的工作方式,该传动系统中可输出 9 级定转速和定转矩。

表 1 系统的工作方式和输出特性
Tab.1 Working ways and output characteristics of system

电磁换向阀工况									工作方式	内泵数	外泵数	子马 达数	输出转速	输出 转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA						
-	+	-	+	-	-	-	-	-	内泵对 1 个子马达	1	0	1	n_{11}	T_{11}
-	+	-	+	-	+	-	-	-	内泵对 2 个子马达	1	0	2	$\frac{1}{2}n_{11}$	$2T_{11}$
-	+	-	+	-	+	-	+	-	内泵对 3 个子马达	1	0	3	$\frac{1}{3}n_{11}$	$3T_{11}$
-	-	+	+	-	-	-	-	-	外泵对 1 个子马达	0	1	1	cn_{11}	T_{21}
-	-	+	+	-	+	-	-	-	外泵对 2 个子马达	0	1	2	$\frac{1}{2}cn_{11}$	$2T_{21}$
-	-	+	+	-	+	-	+	-	外泵对 3 个子马达	0	1	3	$\frac{1}{3}cn_{11}$	$3T_{21}$
+	+	+	+	-	-	-	-	-	内外泵对 1 个子马达	1	1	1	$(1+c)n_{11}$	T_{31}
+	+	+	+	-	+	-	-	-	内外泵对 2 个子马达	1	1	2	$\frac{1}{2}(1+c)n_{11}$	$2T_{31}$
+	+	+	+	-	+	-	+	-	内外泵对 3 个子马达	1	1	3	$\frac{1}{3}(1+c)n_{11}$	$3T_{31}$

注:表中只给出了液压马达正转时电磁铁的得电情况。

3.1.3 系统功率特性分析

(1)恒功率工况
由表 1 可知,当多泵的工作方式不变时,在不考虑泄漏损失的情况下,多马达的输出功率为常数。如内泵单独工作时,多马达在 3 种工作方式下的输出功率 P_{in} 为

$$P_{in} = \frac{2\pi n_{11} T}{60} = \frac{2\pi \frac{1}{2} n_{11} 2T_{11}}{60} = \frac{2\pi \frac{1}{3} n_{11} 3T_{11}}{60} \quad (6)$$

同理,当外泵单独工作或内、外泵同时工作时,多马达在 3 种工作方式下的输出功率也分别恒定。且在每种恒功率工况下,可通过改变多马达的工作方式,使多马达输出多级定转速和定转矩,且转速和转矩呈反比例函数关系。因此该系统可以根据工况需求,对外输出高速小转矩、中速中转矩和低速大转矩。

(2)恒转矩工况

在该系统中,通过调节溢流阀来控制系统压力,使系统在不同的工作方式下,多马达进出口压差相同。当系统中多马达的工作子马达数 $z(z$ 可取 1、2、3)恒定时,在不同的供油方式下多马达的输出转矩相同,即

$$T_z = zT_{11} = zT_{21} = zT_{31} = zT_1 \quad (7)$$

则在恒转矩工况下,通过调节多马达中 3 个子马达的工作情况而输出 3 级定转矩,且与系统中多泵的工作方式无关。

3.2 X-Y 型多泵-Z 型多马达传动系统输出特性

在 X-Y 型多泵中,工作的内泵数量 x 可为 0, 1, 2, ..., X;工作的外泵数量 y 可为 0, 1, 2, ..., Y, 则该泵共有 $XY + X + Y$ 种工作方式。当输入轴转速 n_d 一定时,该泵能输出 $XY + X + Y$ 种定流量。则该泵的输出流量 Q 可表示为

$$Q = (x + cy) V_{pn} n_d \quad (8)$$

式中 V_{pn} ——多泵中 1 个内泵的排量

而对于 Z 型多马达,工作的子马达数量 z 可为 1, 2, ..., Z, 则多马达的工作方式有 Z 种。由 X-Y 型多泵与 Z 型多马达所形成的齿轮型多泵多马达传动系统共有 $(XY + X + Y)Z$ 种工作方式,在每种工作方式下系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n = \frac{(x + cy) V_{pn} n_d}{z V_{mz}} \\ T = \frac{\Delta p z V_{mz}}{2\pi} \end{cases} \quad (9)$$

式中 V_{mz} ——Z 型多马达中 1 个子马达的排量
 Δp ——Z 型多马达进出口压差

4 并联型齿轮多泵-比例型齿轮多马达传动系统设计

以 3 型多泵和 1-1 型多马达所形成的并联型齿轮多泵-比例型齿轮多马达传动系统为例,对该传动系统进行设计与分析,并对其进行理论拓展得出该类传动的输出规律。

4.1 3 型多泵-1-1 型多马达传动系统设计

4.1.1 多泵多马达传动系统的工作原理

图6为3型多泵-1-1型多马达传动系统原理图。在该系统中,换向阀5、6、7分别控制3型多泵中3个子泵的工作情况,换向阀8和换向阀9共同控制1-1型多马达中内、外马达的工作情况,使该马达可实现4种工作方式。3型多泵在不同工作方式下的系统压力由溢流阀1、2、4调定。该多泵多马达传动系统可通过换向阀实现多种工作方式,具体情况如表2所示。

4.1.2 系统的输出特性分析

在3型多泵-1-1型多马达传动系统中当电动机转速不变时,3型多泵可通过切换3种工作方式输出3种不同压力、不同流量的压力油,则该泵在不同工作方式下输出的流量关系为

$$Q_3^* = \frac{3}{2} Q_2^* = 3Q_1^* \tag{10}$$

式中 Q_1^* ——1个子泵工作时多泵输出流量
 Q_2^* ——2个子泵工作时多泵输出流量
 Q_3^* ——3个子泵工作时多泵输出流量

若不计流量及压力损失,设1-1型多马达中内马达的排量为 V_{m1} ,外马达与内马达的排量比例系数为 k 。对于该传动系统,当1个子泵和内马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{11}^* = \frac{Q_1^*}{V_{m1}} \\ T_{11}^* = \frac{V_{m1} \Delta p_1}{2\pi} \end{cases} \tag{11}$$

式中 Δp_1 ——1个子泵工作时多马达进出口压差

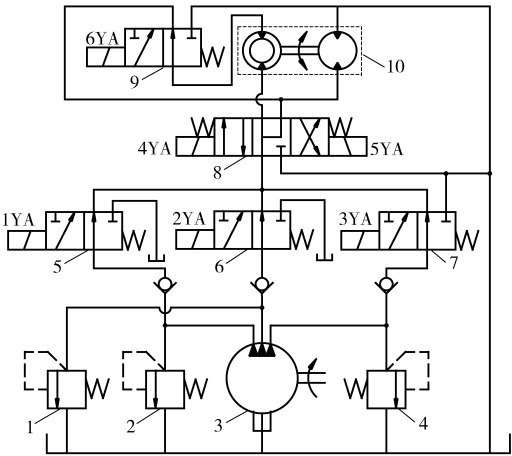


图6 3型多泵-1-1型多马达传动系统原理图

Fig. 6 Principle diagram of 3 multi-pump and 1-1 multi-motor driving system

1、2、4. 溢流阀 3. 3型多泵 5、6、7、9. 二位三通换向阀 8. 三位四通换向阀 10. 1-1型多马达

同理,当2个子泵和内马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{21}^* = \frac{Q_2^*}{V_{m1}} = 2n_{11}^* \\ T_{21}^* = \frac{V_{m1} \Delta p_2}{2\pi} \end{cases} \tag{12}$$

式中 Δp_2 ——2个子泵工作时多马达进出口压差
当3个子泵和内马达工作时,系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n_{31}^* = \frac{Q_3^*}{V_{m1}} = 3n_{11}^* \\ T_{31}^* = \frac{V_{m1} \Delta p_3}{2\pi} \end{cases} \tag{13}$$

表2 系统的工作方式和输出特性

Tab. 2 Working ways and output characteristics of system

电磁换向阀工况						工作方式	子泵数	内马达数	外马达数	马达转速	马达转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA						
+	+	-	-	+	+	1个子泵对内马达	1	1	0	n_{11}^*	T_{11}^*
+	-	+	-	+	+	1个子泵对外马达	1	0	1	$\frac{1}{k} n_{11}^*$	$k T_{11}^*$
+	-	-	-	+	+	1个子泵对内外马达联合作	1	1	1	$\frac{1}{k+1} n_{11}^*$	$(k+1) T_{11}^*$
-	-	+	-	+	+	1个子泵对内外马达差动工作	1	-1	1	$\frac{1}{k-1} n_{11}^*$	$(k-1) T_{11}^*$
+	+	-	-	-	+	2个子泵对内马达	2	1	0	$2n_{11}^*$	T_{21}^*
+	-	+	-	-	+	2个子泵对外马达	2	0	1	$\frac{2}{k} n_{11}^*$	$k T_{21}^*$
+	-	-	-	-	+	2个子泵对内外马达联合作	2	1	1	$\frac{2}{k+1} n_{11}^*$	$(k+1) T_{21}^*$
-	-	+	-	-	+	2个子泵对内外马达差动工作	2	-1	1	$\frac{2}{k-1} n_{11}^*$	$(k-1) T_{21}^*$
+	+	-	-	-	+	3个子泵对内马达	3	1	0	$3n_{11}^*$	T_{31}^*
+	-	+	-	-	-	3个子泵对外马达	3	0	1	$\frac{3}{k} n_{11}^*$	$k T_{31}^*$
+	-	-	-	-	-	3个子泵对内外马达联合作	3	1	1	$\frac{3}{k+1} n_{11}^*$	$(k+1) T_{31}^*$
-	-	+	-	-	-	3个子泵对内外马达差动工作	3	-1	1	$\frac{3}{k-1} n_{11}^*$	$(k-1) T_{31}^*$

注:表中内马达数为-1表示内、外马达差动工作,此时内马达实现了泵的工作原理。

式中 Δp_3 ——3 个子泵工作时多马达进出口压差
该多泵多马达传动系统在不同工作方式下的输出特性如表 2 所示。

由表 2 可以得出,3 型多泵-1-1 型多马达传动系统可输出 12 级定转速和定转矩。

4.1.3 系统的功率特性分析

(1) 恒功率工况

在 3 型多泵-1-1 型多马达传动系统中,若不考虑流量损失,当多泵的工作方式不变时,多马达的输出功率恒定。如当 1 个子泵单独工作时,多马达在 4 种工作方式下输出的功率 P_1 为

$$P_1 = \frac{2\pi n_{11}^* T_{11}^*}{60} = \frac{2\pi \frac{1}{k} n_{11}^* k T_{11}^*}{60} = \frac{2\pi \frac{1}{k+1} n_{11}^* (k+1) T_{11}^*}{60} = \frac{2\pi \frac{1}{k-1} n_{11}^* (k-1) T_{11}^*}{60} \quad (14)$$

则多马达在每种恒功率下工作时,可输出多级转速和转矩,提高了系统的使用性能。

(2) 恒转矩工况

在该传动系统中,当多泵在不同工作方式下,多马达进出口压差相同时,在不同的供油方式下多马达的输出转矩为

$$T_d^* = dT_{11}^* = dT_{21}^* = dT_{31}^* = dT_1^* \quad (15)$$

式中 d ——转矩系数

d 与 1-1 型多马达的工作方式有关,多马达在内马达单独工作、外马达单独工作、内外马达同时工作、内外马达差动工作 4 种工作方式下, d 的取值分别为 1、 k 、 $k+1$ 、 $k-1$ 。

由上述分析可知,当多马达的工作方式不变时,在不同的供油方式下多马达的输出转矩恒定。则该系统在恒转矩工况下,可通过改变多马达的工作方式使其输出 4 级定转矩,且与多泵的工作方式无关。

4.2 Z 型多泵-X-Y 型多马达传动系统的输出特性

在 Z 型多泵中,工作的子泵数量 l 可为 1,2,⋯,Z,则多泵的工作方式有 Z 种,当输入轴转速 n_d 一定时,能输出 Z 种流量。该泵的输出流量可表示为

$$Q^* = lV_{pn} n_d \quad (16)$$

式中 V_{pn} ——Z 型多泵中 1 个子泵的排量

对于 X-Y 型多马达,工作的内马达数量 i 可为 0,1,2,⋯,X;工作的外马达数量 j 可为 0,1,2,⋯,Y,该马达的工作方式有 $2XY+X+Y$ 种。则该传动系统有 $Z(2XY+X+Y)$ 种工作方式。在任意一种工作方式下系统输出的转速和转矩为

$$\begin{cases} n^* = \frac{lV_{pn} n_d}{(i+kj)V_{mn}} \\ T^* = \frac{\Delta p(i+kj)V_{mn}}{2\pi} \end{cases} \quad (17)$$

式中 V_{mn} ——X-Y 型多马达中 1 个内马达排量

5 试验

因 2 种齿轮型多泵多马达传动系统有许多共同点,则本文只对 1-1 型多泵-3 型多马达传动系统进行了原理性试验。为了更好地验证齿轮型多泵多马达传动系统的可行性,用已加工出的 1-1 型多泵和 3 型多马达样机搭建出试验测试平台,如图 7 所示。试验中各主要元件的参数如表 3 所示。

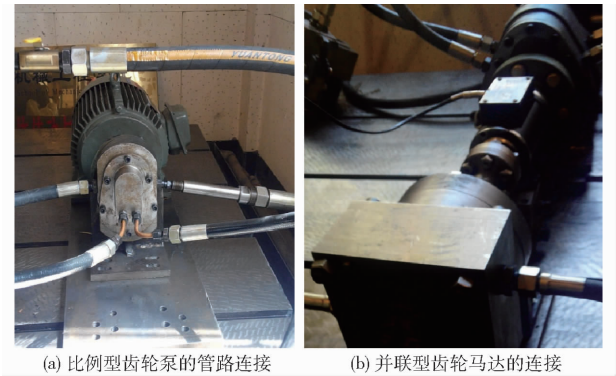


图 7 多泵多马达传动系统试验平台
Fig. 7 Experimental platform of multi-pump and multi-motor driving system

表 3 多泵多马达传动系统的元件参数

Tab.3 Component parameters of multi-pump and multi-motor driving system

元件	参数	数值
比例型齿轮泵	内泵理论排量 $V_1/(\text{mL}\cdot\text{r}^{-1})$	6.81
	外泵理论排量 $V_2/(\text{mL}\cdot\text{r}^{-1})$	27.24
并联型齿轮马达	1 个子马达理论排量 $V_3/(\text{mL}\cdot\text{r}^{-1})$	18.32
电动机	电动机转速 $n_d/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 000

测得该系统在不同工况下输出特性的试验数据如表 4~6 所示。

表 4 内泵单独工作试验数据

Tab.4 Experimental data when inside pump working alone

进油 压力/ MPa	1 个子马达		2 个子马达		3 个子马达	
	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$
1.0	354	1.25	178	2.58	119	4.16
2.1	350	3.13	176	6.43	118	10.25
3.1	345	5.32	173	10.72	118	17.24
4.2	339	8.06	171	16.46	113	25.89
5.1	332	10.59	166	21.59	111	33.85
6.0	322	13.27	162	26.70	108	42.30
6.9	314	15.97	158	32.51	106	50.75
8.0	303	19.06	152	38.77	102	60.46

由表 4~6 可知,该多泵多马达传动系统通过切换不同的工作方式可输出多级转速和转矩。当系统

表 5 外泵单独工作试验数据

Tab.5 Experimental data when outside pump working alone

进油 压力/ MPa	1 个子马达		2 个子马达		3 个子马达	
	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)
1.0	1 426	1.26	716	2.58	478	4.17
2.1	1 412	3.15	709	6.42	474	10.29
3.1	1 391	5.31	699	10.75	467	17.24
4.2	1 365	8.07	685	16.46	458	25.89
5.1	1 337	10.61	671	21.61	448	33.86
6.0	1 301	13.25	653	26.75	437	42.35
6.9	1 267	15.97	636	32.48	425	50.74
8.0	1 225	19.09	616	38.77	411	60.48

表 6 内、外泵同时工作试验数据

Tab.6 Experimental data when inside and outside pumps working simultaneously

进油 压力/ MPa	1 个子马达		2 个子马达		3 个子马达	
	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)
1.0	1 716	1.25	862	2.55	576	4.13
2.1	1 701	3.10	854	6.43	571	10.27
3.1	1 676	5.31	842	10.69	562	17.23
4.2	1 644	8.05	825	14.45	551	25.88
5.1	1 609	10.54	808	21.61	540	33.86
6.0	1 566	13.28	787	26.72	526	42.30
6.9	1 525	15.98	766	32.51	512	50.72
8.0	1 475	19.04	741	38.75	495	60.48

工作压力和多马达工作方式相同时,多马达的输出转矩近似相等,且多马达在内外泵分别单独供油时输出转速的比值与内外泵的排量比例系数近似。因样机加工精度、容积损失和人工操作的影响,试验结果和理论分析略有偏差,但基本一致,从而验证了理论分析的正确性。

6 结论

(1)比例型齿轮多泵/多马达在一个壳体内有多个相互独立的内、外泵(马达),且内、外泵(马达)的排量成一定比例;并联型齿轮多泵/多马达是集多个排量相同且相互独立的子泵(马达)于一体。

(2)因齿轮型多泵/多马达的特殊结构,齿轮型多泵可输出多级定流量;齿轮型多马达可输出多级定转速和定转矩,且比例型齿轮多马达可实现马达的差动连接,齿轮型多泵/多马达不仅丰富了新型液压元件,且为新型液压传动奠定了基础。

(3)基于齿轮型多泵/多马达设计的齿轮型多泵多马达传动系统是一种新的传动方式,可实现多级定转速和定转矩的输出,且各级转速和转矩的大小由多泵和多马达的工作方式及排量比例系数决定。并在此基础上对齿轮型多泵多马达传动系统理论进一步拓展,将其输出特性规律化,为齿轮型多泵多马达传动系统的研究与应用提供了理论依据。

参 考 文 献

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

2 杨帆. 对称式双外啮合齿轮泵的研究[J]. 制造技术与机床,2008(9):145-147.
YANG Fan. Study on symmetric double external meshing gear pump[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2008(9): 145-147. (in Chinese)

3 刘巧燕,李喜田,高俊峰,等. 比例型多泵多马达传动概述[J]. 液压气动与密封,2015,35(5):1-3.
LIU Qiaoyan, LI Xitian, GAO Junfeng, et al. The overview of proportional multi-pump and multi-motor transmission system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2015,35(5): 1-3. (in Chinese)

4 雷天觉. 液压工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社,1990:1978-1981.

5 张利平,周兰午,刘芳,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 Lanwu, LIU Fang, et al. Researching of energy-saving ways and means on hydraulic systems with fixed displacement pump[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(Supp.): 36-38. (in Chinese)

6 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.

7 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)

8 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. 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.
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. (in Chinese)

9 WEN Desheng, WANG Zhili, LÜ Shijun, et al. Single-acting double-stator multi-pumps and multi-motors[J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2010, 9(4): 208-214.

10 WEN Desheng, WANG Zhili, ZHANG Yang, et al. 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.

- 11 闻德生,张凯明,张三喜,等. 内外啮合齿轮马达的理论分析[J]. 北京理工大学学报,2015,35(1):23-26.
WEN Desheng, ZHANG Kaiming, ZHANG Sanxi, et al. Theoretical analysis on the inside and outside gear motor[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(1): 23-26. (in Chinese)
- 12 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. (in Chinese)
- 13 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. http://www.j-csam.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.
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. (in Chinese)
- 14 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. 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.
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. (in Chinese)
- 15 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]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2836-2838. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 侯波,崔瑞,林玉峰,等. 三极并联齿轮马达理论研究[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2008,28(2):47-50.
HOU Bo, CUI Rui, LIN Yufeng, et al. Theoretical study on three-pole parallel-gear motor[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 28(2): 47-50. (in Chinese)
- 18 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 rotor motor with low speed and high torque[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 44-47. (in Chinese)
- 19 刘一山,闻德生,杜孝杰. 多泵多速马达传动系统简介[J]. 液压气动与密封,2012,32(2):73-76.
LIU Yishan, WEN Desheng, DU Xiaojie. Introduction of multi-pumps and multi-motors hydraulic transmission system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(2): 73-76. (in Chinese)
- 20 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. 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.
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. (in Chinese)

(上接第 391 页)

- 15 赵建文,杜志江,孙立宁. 7 自由度冗余手臂自运动流形[J]. 机械工程学报,2007,43(9):132-137.
ZHAO Jianwen, DU Zhijiang, SUN Lining. Self-motion manifolds of a 7-DOF redundant manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 132-137. (in Chinese)
- 16 葛新锋,赵东标. 7 自由度自动铺丝机器人参数化的自运动流形[J]. 机械工程学报,2012,48(13):27-31.
GE Xinfeng, ZHAO Dongbiao. Parameterized self-motion manifold of 7-DOF automatic fiber placement robotic manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 27-31. (in Chinese)
- 17 沈惠平,曾氢菲,李菊,等. 典型并联机构拓扑结构特征分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):388-398. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160851&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.051.
SHEN Huiping, ZENG Qingfei, LI Ju, et al. Topological structure characteristic analysis for typical and practical parallel mechanisms[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 388-398. (in Chinese)
- 18 韩刚. 从欧几里得空间到拓扑空间[J]. 高等数学研究,2015,18(4):8-10.
HAN Gang. From euclidean space to topological space[J]. Studies in College Mathematics, 2015, 18(4): 8-10. (in Chinese)
- 19 吴修云. 诱导的 fuzzy 拓扑生成序空间[J]. 模糊系统与数学,2015,29(3):84-90.
WU Xiuyun. On induced fuzzy topogenous order spaces[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2015, 29(3): 84-90. (in Chinese)
- 20 ZHENG F Y, HUA L, HAN X H. The mathematical model and mechanical properties of variable center distance gears based on screw theory[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 101: 116-139.
- 21 DAI J S. Screw algebra and lie groups and lie algebras [M]. 北京:高等教育出版社,2014:119-149.