

比例型多泵多速马达传动系统设计与试验

闻德生 商旭东 马光磊 石滋洲 潘为圆 顾攀

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了解决目前广泛应用的液压传动输出特性单一等问题, 基于比例型多泵和多速马达提出了比例型多泵多速马达传动理论。在阐述比例型多泵/多速马达结构和工作原理的基础上, 设计了2种比例型多泵多速马达传动系统, 并对其在不同工作方式下的输出特性进行了理论分析, 且进一步探讨了多泵和多速马达排量比例系数对传动系统的影响。通过对比比例型多泵多速马达传动系统的输出特性的理论拓展, 得到该液压传动系统在不同工作方式下输出转速和转矩的一般公式, 并搭建比例型多泵多速马达传动系统试验平台。试验结果表明: 比例型多泵多速马达通过切换多泵和多速马达的工作方式, 可输出多级定转速和定转矩, 且各级转速和转矩与排量比例系数相关。该研究为比例型多泵多速马达传动系统的设计和应用奠定了基础。

关键词: 多泵多速马达; 比例型; 传动系统; 转矩转速特性; 排量比例系数

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0421-08

Design and Experiment of Proportional Type Multi-pump and Multi-speed Motor Driving System

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

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

Abstract: In order to solve the problem that the widely used hydraulic driving system only can output one characteristic, a theory of proportional type multi-pump and multi-speed motor driving system was presented based on proportional type of multi-pump and multi-speed motor. Multi-pump can output multi flows, to work in different pressures without a reducing valve, and multi-speed motor can output multi speeds and torques. Two proportional type multi-pump and multi-speed motor driving systems were designed based on describing the structure and working principle of the multi-pump and multi-speed motor, and the features of the two new driving system were introduced, the output characteristics of the two driving system in different working ways were analyzed theoretically, the effects of the displacement coefficient on the driving system were also discussed. The outputting speeds and torques of the new hydraulic driving system in different working ways were obtained through expanding the output characteristic of this system. The experimental platform of proportional type multi-pump and multi-speed motor driving system was built. The result showed that this driving system can output multi speeds and torques through controlling the working ways of the multi-pump and multi-speed motor, and each level of speeds and torques was related to the displacement coefficient. The research on the proportional type multi-pump and multi-speed motor driving system established a basis for its design and application.

Key words: multi-pump and multi-speed motor; proportional type; driving system; torque and speed characteristics; displacement ratio coefficient

引言

液压传动以其传动平稳、体积小、质量轻、调速方便等优点, 广泛应用于工程机械、压力机械和航空

工业等领域^[1-5]。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, 是其重要的组成部分, 而目前各行业广泛应用的液压传动系统均由单泵和单马达组成^[6-8]。随着社会的发展, 实际工况

日益复杂,这种传动系统在实际应用中存在一定的不足:一个系统需要多级定流量时,一个定量泵无法实现;在不使用减压阀前提下,同一泵无法向多个不同压力系统供油;单泵难以实现多个执行元件在不同压力、流量下同步;一个定量马达难以输出多级定转速和定转矩。

为解决传统液压传动系统在实际应用中存在的不足,本文在比例型多泵和多速马达^[9-13]基础上,设计比例型多泵多速马达传动系统,并对该传动系统的输出特性进行理论分析和试验研究,以期比例为型多泵多速马达传动系统的研究和应用奠定基础。

1 比例型多泵/多速马达工作原理

比例型多泵/多速马达是指一个转子对应多个定子或一个定子对应多个转子,在一个壳体内形成多组不同排量且相互独立的子泵(马达),实现一体多泵和多速马达目的。

比例型多泵如图 1 所示,该液压泵是集内啮合齿轮泵(简称内泵)和外啮合齿轮泵(简称外泵)于一体,其中大齿轮和 3 个共齿轮、壳体、侧板形成 3 个排量相同的外泵;3 个小齿轮与月牙板、共齿轮、侧板形成 3 个排量相同的内泵。因每个子泵有单独的进油口,则每个子泵都是相互独立的。

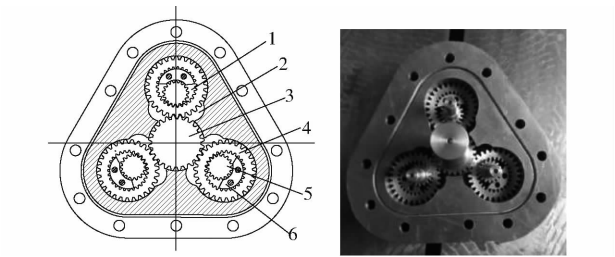


图 1 比例型多泵原理图

Fig. 1 Principle diagram of proportional multi-pump

1. 内泵进油口 2. 外泵进油口 3. 大齿轮 4. 共齿轮 5. 小齿轮 6. 月牙板

比例型多速马达如图 2 所示,该液压马达在一个壳体内设计了 1 个转子、2 个定子(内定子和外定子),由转子、外定子、外滚柱连杆组(外滚柱和连杆)、配流装置等组成一组外马达;由转子与内定子、内滚柱连杆组(内滚柱和连杆)、配流装置等组成一组内马达,且每组马达数量分别与作用数相同。则当改变内、外定子的曲线形状时,可形成不同作用数的比例型多速马达。

2 比例型多泵/多速马达符号规定及连接方式

2.1 比例型多泵/多速马达符号规定

为设计比例型多泵多速马达传统系统图,对比

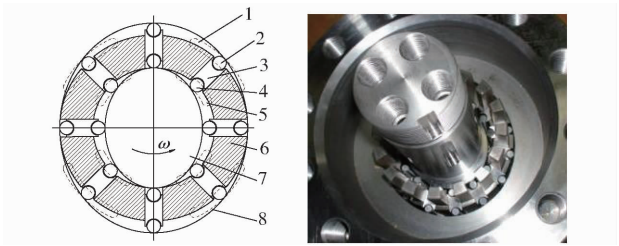


图 2 比例型多速马达原理图

Fig. 2 Principle diagram of proportional multi-speed motor

1. 外马达变化容腔 2. 外滚柱 3. 连杆 4. 内滚柱 5. 内马达变化容腔 6. 转子 7. 内定子 8. 外定子

例型多泵/多速马达的名称和符号做出如下规定^[14-16]:

(1)由 R 种排量子泵(马达)组成的比例型多泵/多速马达,称为 $T_1 - T_2 - \dots - T_R$ 比例型多泵/多速马达(简称 $T_1 - T_2 - \dots - T_R$ 型多泵/多速马达),其中 $T_l (l=1, 2, \dots, R)$ 为第 l 种排量子泵(马达)的数量,且子泵排量随 l 的增大而增大。

(2)比例型多泵/多速马达采用双圆圈区别不同排量的单泵,并用同轴符号将其连接。

则按照上述对比例型多泵/多速马达名称和符号的规定,图 1 中比例型多泵称为 3-3 比例型多泵(简称 3-3 型多泵),其符号如图 3a 所示;而图 2 中比例型多速马达称为 2-2 比例型多速马达(简称 2-2 型多速马达),其符号如图 3b 所示。

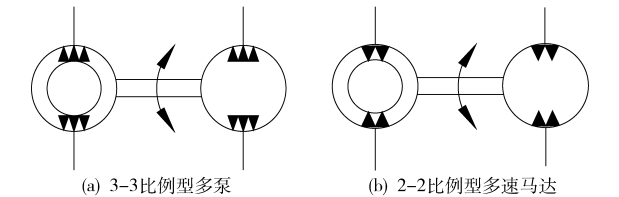


图 3 比例型多泵/多速马达符号

Fig. 3 Symbol diagrams of proportional multi-pump and multi-speed motor

2.2 比例型多泵/多速马达连接方式

由于比例型多泵/多速马达特殊的结构形式,则通过切换不同的连接方式,可以实现液压泵的多输出和液压马达的多输入,适应不同的工况需求。比例型多泵/多速马达的部分连接方式如图 4 所示。

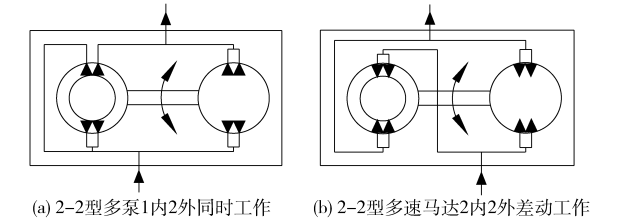


图 4 比例型多泵/多速马达连接方法

Fig. 4 Connections methods of proportional multi-pump and multi-speed motor

3 1-1 型多泵与 1-1 型多速马达传动系统的设计与分析

比例型多泵多速马达传动系统就是将比例型多泵和多速马达组合所形成的传动系统。首先以 1-1 型多泵和 1-1 型多速马达组成的 1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统为例,对该比例型多泵多速马达传动系统进行设计与分析。

3.1 多泵多速马达传动系统工作原理

图 5 为 1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统原理图。在该液压传动系统中,通过切换二位二通换向阀 6、9、10 可使 1-1 型多泵 3 实现内泵单独工作、外泵单独工作、内外泵同时工作 3 种工作方式,而安全阀 2、4、5 分别起到限制 1-1 型多泵在上述 3 种工作方式下系统的最高压力。三位四通换向阀 11 和 12 分别控制 1-1 型多速马达 13 中内、外马达的工作情况,则该系统可通过切换换向阀实现多种工作方式,具体情况如表 1 所示。

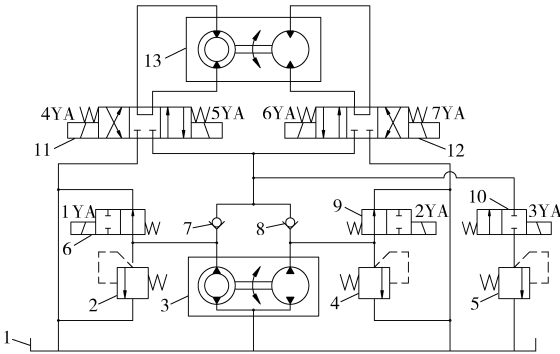


Fig. 5 Principle diagram of 1-1 multi-pump and 1-1 multi-speed motor driving system

1. 油箱 2、4、5. 安全阀 3. 1-1 型多泵 6、9、10. 二位二通换向阀 7、8. 单向阀 11、12. 三位四通换向阀 13. 1-1 型多速马达

3.2 多泵多速马达传动系统输出特性分析

由图 5 可知,在该传动系统中,1-1 型多泵可输出 3 级定流量,设 1-1 型多泵中内泵排量为 V_{pn} ,外泵排量为 V_{pw} ,则多泵中外泵与内泵的排量比例系数为 $k = V_{pw}/V_{pn}$,若内、外泵输出流量分别为 q_{pn} 和 q_{pw} ,则有

$$q_{pw} = kq_{pn} \tag{1}$$

当内、外泵同时工作时多泵输出流量 q_{pt} 为

$$q_{pt} = q_{pw} + q_{pn} = (k + 1)q_{pn} \tag{2}$$

设多速马达中内马达理论排量为 V_{mn} ,外马达理论排量 V_{mw} ,则多速马达外马达与内马达的排量比例系数为 $c = V_{mw}/V_{mn}$ 。当内、外马达同时工作时多速马达的理论排量 V_{mt} 为

$$V_{mt} = V_{mw} + V_{mn} = (c + 1)V_{mn} \tag{3}$$

因比例型多速马达内、外马达排量不同,当内、外马达同时反向通入高压油时,比例型多速马达可实现马达的差动工作^[17-19]。则当内、外马达差动工作时多速马达的理论排量为

$$V_{mc} = V_{mw} - V_{mn} = (c - 1)V_{mn} \tag{4}$$

比例型多泵多速马达传动系统在不同的工作方式下有不同的输出特性。若不计流量及压力损失,令该系统输出转速为 N_{xy} ,输出转矩为 T_{xy} (x 和 y 分别表示比例型多泵和多速马达的工作方式),系统压力为 p_x ,则系统输出转速和转矩为

$$\begin{cases} N_{xy} = \frac{q_x}{V_y} \\ T_{xy} = \frac{p_x V_y}{2\pi} \end{cases} \tag{5}$$

则该系统在不同的工作方式下的输出特性如表 1 所示。

由表 1 可知,1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统输出转速和转矩与比例型多泵和多速马达的排量比例系数 k 和 c 呈一定比例关系。该系统通过切换多泵和多速马达的工作方式,可输出 12 级定转速和定转矩。

3.3 系统功率特性分析

(1) 恒功率工况下系统输出特性分析

在不计流量及压力损失的情况下,1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统在不同工作方式下的输出功率 P_{xy} 为

$$P_{xy} = \frac{2\pi T_{xy} N_{xy}}{60} \tag{6}$$

由表 1 和式(6)可知,当比例型多泵的工作方式不变时,系统输出功率恒定。如当 1-1 型多泵内泵单独工作时,系统输出功率 P_{1y} 为

$$\begin{aligned} P_{1y} &= \frac{2\pi T_{11} N_{11}}{60} = \frac{2\pi c T_{11} (1/c) N_{11}}{60} = \\ &= \frac{2\pi (c + 1) T_{11} [1/(c + 1)] N_{11}}{60} = \\ &= \frac{2\pi (c - 1) T_{11} [1/(c - 1)] N_{11}}{60} \end{aligned} \tag{7}$$

同理,当外泵单独工作时和内外泵同时工作时,系统输出功率 P_{2y} 和 P_{3y} 分别为

$$\begin{cases} P_{2y} = \frac{2\pi T_{21} k N_{11}}{60} \\ P_{3y} = \frac{2\pi T_{21} (k + 1) N_{11}}{60} \end{cases} \tag{8}$$

该液压传动系统通过调节 1-1 型多泵的工作方式,可实现 3 级恒功率输出,且在每种恒功率工况下通过调节 1-1 型多速马达的工作方式可对外输出高速小转矩、中速中转矩和低速大转矩,来满足

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							1-1 型多泵工作方式(x)	1-1 型多速马达	输出转速	输出转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA		工作方式(y)		
+	-	-	-	+	-	-	内泵单独工作(1)	内马达单独工作(1)	N_{11}	T_{11}
+	-	-	-	-	+	-	内泵单独工作(1)	外马达单独工作(2)	$\frac{1}{c}N_{11}$	cT_{11}
+	-	-	-	+	+	-	内泵单独工作(1)	内、外马达同时工作(3)	$\frac{1}{c+1}N_{11}$	$(c+1)T_{11}$
+	-	-	+	-	+	-	内泵单独工作(1)	内、外马达差动工作(4)	$\frac{1}{c-1}N_{11}$	$(c-1)T_{11}$
-	+	-	-	+	-	-	外泵单独工作(2)	内马达单独工作(1)	kN_{11}	T_{21}
-	+	-	-	-	+	-	外泵单独工作(2)	外马达单独工作(2)	$\frac{k}{c}N_{11}$	cT_{21}
-	+	-	-	+	+	-	外泵单独工作(2)	内、外马达同时工作(3)	$\frac{k}{c+1}N_{11}$	$(c+1)T_{21}$
-	+	-	+	-	+	-	外泵单独工作(2)	内、外马达差动工作(4)	$\frac{k}{c-1}N_{11}$	$(c-1)T_{21}$
+	+	+	-	+	-	-	内、外泵同时工作(3)	内马达单独工作(1)	$(k+1)N_{11}$	T_{31}
+	+	+	-	-	+	-	内、外泵同时工作(3)	外马达单独工作(2)	$\frac{k+1}{c}N_{11}$	cT_{31}
+	+	+	-	+	+	-	内、外泵同时工作(3)	内、外马达同时工作(3)	$\frac{k+1}{c+1}N_{11}$	$(c+1)T_{31}$
+	+	+	+	-	+	-	内、外泵同时工作(3)	内、外马达差动工作(4)	$\frac{k+1}{c-1}N_{11}$	$(c-1)T_{31}$

注:表中只给出了比例型多速马达正转时电磁铁的电情况。

实际工况的需求。

(2) 恒转矩工况下系统输出特性分析

当该系统在不同的工作方式下系统压力恒定时,即 p_x 一定时,系统输出转矩和多速马达的工作方式有关。当系统中多速马达的工作方式一定时,在多泵不同的供油方式下,系统输出转矩相同,即

$$T_{xy} = T_{1y} = T_{2y} = T_{3y} = dT_{11} \tag{9}$$

式中 d ——转矩系数

转矩系数与比例型多速马达的工作方式有关,比例型多速马达在内、外马达分别单独工作、内外马达同时工作和内外马达差动工作 4 种工作方式下, d 的取值分别为 $1、c、c+1、c-1$ 。

对上述 2 种工况下系统输出特性的分析可知,系统输出功率和输出转矩分别与多泵和多速马达的工作方式有关。图 6 为系统在不同工作方式下输出转速转矩特性曲线,由图 6 可知,系统输出转速和转矩随多速马达排量比例系数 c 变化而变化,当排量比例系数 c 取某些特殊值时,系统在不同方式下输出转速曲线相交,则转速曲线交点就代表着系统不同工作方式下输出转速相同,即转速的重复输出。

4 2-2 型多泵与 2-2 型多速马达传动系统的设计与分析

4.1 多泵多速马达传动系统工作原理

图 7 为 2-2 型多泵—2-2 型多速马达传动系统原理图,在该系统中,2-2 型多泵可通过切换二位二通换向阀实现多种工作方式,而三位四通换向阀分别控制 2-2 型多速马达中每个子马达的工作

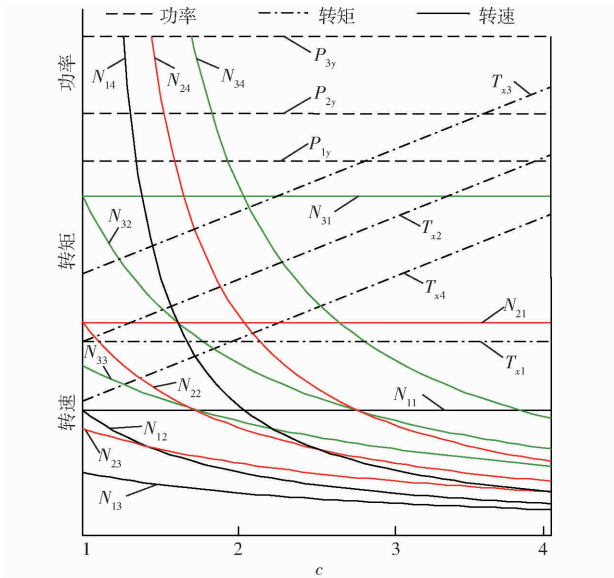


图 6 系统输出转速转矩曲线

Fig. 6 Curves of driving system output speed and torque

情况。则该系统通过换向阀可实现多种工作方式,从而输出多级定转速和定转矩。

4.2 多泵多速马达传动系统输出特性分析

若不计流量及压力损失,当 2-2 型多泵—2-2 型多速马达传动系统中只有 1 个内泵和 1 个外泵工作时,当该系统在不同工作方式下压力恒为 p_0 时,则该系统输出转速和转矩为

$$\begin{cases} N_1 = \frac{q_n}{V_n} \\ T_1 = \frac{p_0 V_n}{2\pi} \end{cases} \tag{10}$$

式中 q_n ——2-2 型多泵中 1 个内泵的理论流量

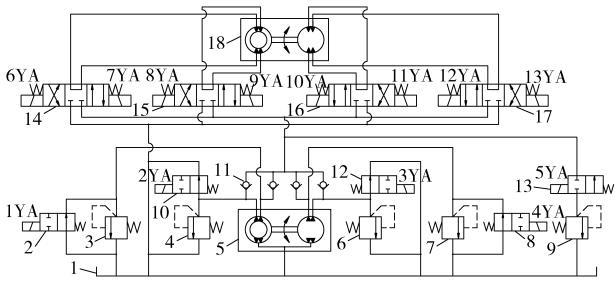


图 7 2-2 型多泵—2-2 型多速马达传统系统原理图

Fig. 7 Principle diagram of 2-2 multi-pump and 2-2 multi-speed motor driving system

- 1. 油箱 2、8、10、12、13. 二位二通换向阀 3、4、6、7、9. 安全阀
- 5. 2-2 型多泵 11. 单向阀 14、15、16、17. 三位四通换向阀
- 18. 2-2 型多速马达

V_n ——2-2 型多速马达中 1 个内马达理论排量

则 2-2 型多泵—2-2 型多速马达传动系统在不同工作模式下输出转速和转矩为

$$\begin{cases} N = \frac{i_1 q_n + i_2 k q_n}{j_1 V_n + j_2 c V_n} = \frac{i_1 + i_2 k}{j_1 + j_2 c} N_1 \\ T = \frac{p_0 (j_1 V_n + j_2 c V_n)}{2\pi} = (j_1 + j_2 c) T_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中 i_1, i_2 ——2-2 型多泵中内、外泵工作数, $i_1, i_2 = 0, 1, 2$
 j_1, j_2 ——2-2 型多速马达中内、外马达工作数, 因内、外马达均可反向连接, 则 $j_1, j_2 = -2, -1, 0, 1, 2$

由式 (11) 可知, 当系统压力恒定时, 系统输出转矩仅与比例型多速马达的工作方式有关, 而与比例型多泵工作方式无关。

4.3 排量比例系数对系统输出特性的影响

比例型多泵多速马达传动系统在某些情况下, 可能会出现重复输出、死点及差动反向现象。

(1) 系统的重复输出

当系统中多泵和多速马达在一定的工作方式下, 系统的输出转速或输出转矩相同, 且与排量比例系数 k 和 c 取值无关, 称之为定重复; 而当排量比例系数 k 和 c 取某些特殊值时, 系统在不同工作模式下输出转速或输出转矩相同, 称为变重复。例如 2-2 型多泵—2-2 型多速马达传动系统有 12 组输出转速定重复, 因 2-2 型多泵有 8 种工作方式, 2-2 型多速马达有 12 种工作方式, 则若不考虑排量比例系数的影响, 该系统可输出 84 种转速。

(2) 系统的死点和差动反向

当系统中比例型多速马达的排量比例系数 c 取某些特殊值时, 系统将会出现死点和差动反向现象。因该传动系统在不同工作模式下系统压力恒定, 则

系统输出转矩仅与比例型多速马达的工作方式有关。

当系统的转矩系数 $j_1 + j_2 c = 0$ 时, 正反两方向输入到多速马达的高压油使其产生的转矩相互抵消, 将出现死点。当系统的转矩系数 $j_1 + j_2 c < 0$ 时, 系统将输出反方向的转速和转矩, 即为差动反向, 其与输入到多速马达中高压油方向有关。则为避免出现死点及差动反向现象, 系统的转矩系数应满足 $j_1 + j_2 c > 0$ 。

4.4 $T_1 - T_2 - \dots - T_R$ 型多泵多速马达传动系统分析

因比例型多泵/多速马达理论上可实现在一个壳体内形成 R 种排量子泵 (马达), 则由 $T_1 - T_2 - \dots - T_R$ 型多泵/多速马达组成的比例型多泵多速马达传动系统可通过切换多泵和多速马达的连接方式输出多级定转速和定转矩。对于 $T_1 - T_2 - \dots - T_R$ 型多泵/多速马达, 令比例型多泵中排量最小的子泵输出流量为 q_1 , 比例型多速马达中子马达的最小排量为 V_1 , 则比例型多泵在不同工作方式下的输出流量为

$$q = (i_1 k_1 + i_2 k_2 + \dots + i_R k_R) q_1 = \left(\sum_{l=1}^R i_l k_l \right) q_1 \quad (12)$$

其中 $k_l = q_l / q_1 \quad k_1 = 1$

式中 i_l ——参与工作的不同排量子泵数量, $i_l = [0, T_l], i_l \in \mathbf{Z}$

k_l ——不同排量子泵的排量比例系数

比例型多速马达不同工作方式下的理论排量为

$$V = (j_1 c_1 + j_2 c_2 + \dots + j_{R'} c_{R'}) V_1 = \left(\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s \right) V_1 \quad (13)$$

其中 $c_s = V_s / V_1 \quad c_1 = 1$

式中 j_s ——参与工作的不同排量子马达数量, $j_s = [-T_s, T_s], j_s \in \mathbf{Z}$

c_s ——不同排量子马达的排量比例系数

当比例型多泵多速马达传动系统在不同工作模式下系统压力 p 恒定时, 该系统输出转速和转矩为

$$\begin{cases} N = \frac{q}{V} = \frac{\left(\sum_{l=1}^R i_l k_l \right) q_1}{\left(\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s \right) V_1} = \frac{\sum_{l=1}^R i_l k_l}{\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s} N_1 \\ T = \frac{pV}{2\pi} = \frac{p \left(\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s \right) V_1}{2\pi} = \left(\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s \right) T_1 \end{cases} \quad (14)$$

为避免系统出现死点或差动反向现象, 系统转矩系数应满足

$$\sum_{s=1}^{R'} j_s c_s > 0$$

(15)

在比例型多泵多速马达传动系统中比例型多泵的工作方式数为

$$X = (T_1 + 1)(T_2 + 1) \cdots (T_R + 1) - 1 = \left[\bigcup_{l=1}^R (T_l + 1) \right] - 1$$

(16)

比例型多速马达的工作方式数为

$$Y = \frac{(2T_1 + 1)(2T_2 + 1) \cdots (2T_{R'} + 1) - 1}{2} = \frac{\left[\bigcup_{s=1}^{R'} (2T_s + 1) \right] - 1}{2}$$

(17)

则该液压传动系统的工作方式数为

$$Z = XY = \left\{ \left[\bigcup_{l=1}^R (T_l + 1) \right] - 1 \right\} \frac{\left[\bigcup_{s=1}^{R'} (2T_s + 1) \right] - 1}{2}$$

(18)

则在不考虑比例型多泵/多速马达排量比例系数的取值等因素可能导致出现死点和重复输出的情况时,比例型多泵多速马达传动系统可输出 Z 种转速和转矩。

5 试验

比例型多泵多速马达传动系统有多种形式,为简化试验,本文选取 1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统进行了原理性试验,试验系统如图 8 所示。本试验用已加工出的 1-1 型多泵和 1-1 型多速马达原理样机搭建了试验测试平台^[20]。该试验系统可分为被测系统(比例型多泵多速马达传动系统)和加载系统,其中加载系统是通过调节加载溢流阀的开启压力来改变加载泵出油口处压力,从而模拟出大小不同的负载。转速转矩测量仪采用的是 JN338 型(准确度等级为 0.5 级),其用来测量被测系统的输出转速和转矩。试验采用的 1-1 型多泵内泵理论排量为 29 mL/r,外泵理论排量为 43 mL/r,则多泵的排量比例系数 k 为 1.48;1-1 型多速马达内马达理论排量为 30 mL/r,外马达理论排量为 65 mL/r,多速马达的排量比例系数 c 为 2.17;电动机转速为 960 r/min,加载泵理论排量为 85 mL/r,加载溢流阀最大开启压力为 13 MPa。

该系统在不同工况下输出特性如表 2 所示,并根据试验数据绘制出当内、外泵同时供油时多速马达不同工作方式下输出转矩曲线,如图 9 所示。

由表 2 可知,该比例型多泵多速马达传动系统通过切换多泵和多速马达的工作方式,可实现多级定转速和定转矩的输出,当电动机转速为 960 r/min

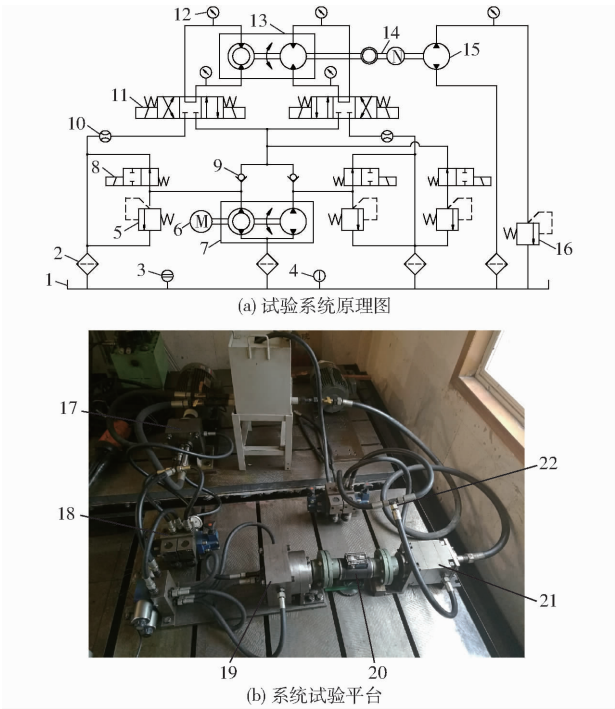


图 8 1-1 型多泵—1-1 型多速马达传动系统试验平台

Fig. 8 Experiment of proportional type multi-pump and multi-speed motor driving

1. 油箱 2. 过滤器 3. 液位计 4. 温度计 5. 溢流阀 6. 电动机 7、17. 1-1 型多泵 8、11. 电磁换向阀 9. 单向阀 10. 流量计 12. 压力表 13、19. 1-1 型多速马达 14、20. 转速转矩测量仪 15、21. 加载泵 16. 加载溢流阀 18. 被测系统 22. 加载系统

时,该系统输出最低转速为 238 r/min,最高转速为 2 246 r/min。当多速马达进出口压差相同时,系统在不同工作方式下输出转速(转矩)的比值与理论转速(转矩)系数的比值接近。当系统中多速马达进出口压差和工作方式一定时,在多泵不同的工作方式下,多速马达输出转矩近似相等。在同一系统工作方式下,多速马达输出转速随其进出口压差的增大而降低,分析主要原因在于系统中多泵和多速马达等液压元件的容积效率随压力的增大而减小,从而导致输出转速的降低。由于样机加工精度、人工操作及容积和摩擦损失等因素,试验结果和理论分析存在一定误差,但基本一致,验证了理论分析的正确性。

6 结论

(1)比例型多泵/多速马达是集多组不同排量且相互独立的子泵(马达)于一个壳体内,实现了一体多泵和多速马达的目的。

(2)比例型多泵可向一个系统输出多级定流量,也可不用减压阀为多个压力系统供油,比例型多

表 2 系统不同工作方式下的试验数据

Tab. 2 Experimental data of driving system under different conditions

系统工作 方式	进出口压 差/MPa	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	
		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)	转速/ (r·min ⁻¹)	转矩/ (N·m)
内泵单独工作	0.9	901	2.6	418	5.7	285	8.3	770	5.0
	2.0	888	6.4	412	14.0	280	20.4	759	11.1
	2.8	882	9.9	407	21.5	281	31.3	747	15.6
	4.1	857	15.4	399	33.6	270	48.9	732	22.8
	5.0	837	19.7	389	43.1	264	62.6	713	27.9
	6.0	816	24.4	380	53.4	257	77.5	693	33.4
	7.1	789	29.7	367	64.8	255	94.2	667	39.6
	8.2	753	35.0	353	76.3	238	111.2	637	45.7
外泵单独工作	0.9	1 340	2.7	621	5.7	424	8.6	1 142	4.9
	2.0	1 319	6.4	613	14.2	418	20.1	1 129	11.4
	2.8	1 299	9.8	603	22.0	412	31.2	1 109	15.5
	4.1	1 274	15.2	592	33.1	404	47.8	1 085	22.3
	5.0	1 245	19.7	579	43.2	394	62.4	1 052	27.5
	6.0	1 212	24.7	564	53.4	384	77.5	1 026	33.6
	7.1	1 172	30.0	548	64.3	371	94.8	992	39.7
	8.2	1 124	34.6	526	76.5	357	110.7	948	45.1
内、外泵同时 工作	0.9	2 246	2.9	1 041	5.5	709	8.4	1 910	5.0
	2.0	2 207	6.8	1 027	14.0	700	20.5	1 888	11.7
	2.8	2 175	9.3	1 012	21.2	689	31.7	1 854	15.6
	4.1	2 131	15.8	993	33.2	674	48.8	1 815	22.3
	5.0	2 083	19.1	969	43.8	658	62.8	1 766	27.7
	6.0	2 027	24.0	944	53.5	642	77.1	1 718	33.2
	7.1	1 960	29.2	917	64.7	621	94.0	1 659	39.8
	8.2	1 878	35.9	879	76.3	597	111.9	1 586	45.6

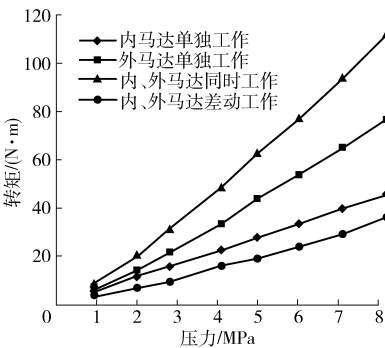


图 9 内、外泵同时工作时多速马达输出转矩曲线

Fig. 9 Output torque curves of multi-speed motor when inner and outer pump working together

速马达可输出多级定转速和定转矩,也可实现马达的差动连接。

(3) 比例型多泵多速马达传动系统是将多泵和多速马达的联合使用,进一步增加了多速马达转速和转矩的调节范围,且多速马达输出转速和转矩的大小取决于多泵和多速马达的工作方式和排量比例系数。

(4) 比例型多泵多速马达传动系统的输出品质很大程度上取决于多泵和多速马达的排量比例系数,若选取不当会使系统出现重复、死点和差动反向现象,因此排量比例系数是比例型多泵多速马达传动系统设计和应用时需要注意的一个重要参数。

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,2011:1-9.

2 王益群,张伟. 流体传动与控制技术的评述[J]. 机械工程学报,2003,39(10):95-99.

WANG Yiqun, ZHANG Wei. Summary of fluid power transmission and control technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 95-99. (in Chinese)

3 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)

4 彭熙伟,陈建萍. 液压技术的发展动向[J]. 液压与气动,2007(3):1-5.

- PENG Xiwei, CHEN Jianping. The future trends of hydraulics[J]. Hydraulics & Pneumatics, 2007(3): 1-5. (in Chinese)
- 5 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)
- 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, 王京, 柴伟超, 等. 单泵多马达传动系统输出转矩特性分析与实验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 88-95.
- WEN Desheng, WANG Jing, CHAI Weichao, et al. Analysis and experiment of output torque characteristics of single-pump multi-motor transmission system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 88-95. (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 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)
- 10 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)
- 11 闻德生. 轴转动等宽曲线双定子多速马达: CN, ZL201010137829.8[P]. 2011-12-21.
- 12 闻德生, 刘巧燕, 刘忠迅, 等. 滚柱叶片式双定子多速马达的原理与实验验证[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(4): 1130-1138.
- WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, et al. Principle and experiment validation of roller tip-vane type double-stator multi-speed motor[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(4): 1130-1138. (in Chinese)
- 13 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.
- 14 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(2): 73-76.
- LIU Yishan, WEN Desheng, DU Xiaojie. Introduction of multi-pumps and multi-motors hydraulic transmission system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012(2): 73-76. (in Chinese)
- 15 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)
- 16 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)
- 17 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, LV 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)
- 18 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)
- 19 WEN Desheng, ZHENG Zhenquan, WANG Yuan, et al. Analysis of rotational speed and torque of differential connection of asymmetric multi-speed hydraulic motor[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2014, 44(5): 1342-1346.
- 20 姜万录, 杨超, 牛慧峰. 液压泵、马达试验台技术概况[J]. 机床与液压, 2005(8): 1-3.
- JIANG Wanlu, YANG Chao, NIU Huifeng. The technique in hydraulic pump and motor test-bed measure system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(8): 1-3. (in Chinese)