doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.051

多泵多马达调压系统理论分析与实验

闻德生　隋广东　刘小雪　田山恒　王少朋　冯佩坤
(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 传统的压力控制回路中,动力元件都采用传统的单作用泵。当回路只用一个泵提供压力时,压力控制回路无法满足系统对多个流量的需求。而多泵和多速马达是基于双定子理论所设计的一种液压元件,可实现一个泵(马达)的多输出。当代替传统单作用泵和单作用马达用于传统液压回路中时,此时的液压回路就是一种新型的液压回路。由于元件的特殊性,使系统可满足多输出、多功率的需求。新型液压回路减少了很多控制元件,所以在实现与传统液压回路相同功能时,新型液压回路可节约很大的能量。多泵多马达调压系统的实验结果表明,由于泄漏原因,导致泵随压力增加,实测流量减少;双定子泵的容积效率随着压力的增大而减小,机械效率和总效率随之增大而增大。尽管由于一些不可控因素导致的误差,但也证明了回路的可行性和元件的原理正确性。

关键词: 多泵多马达; 调压系统; 多输出; 实验
中图分类号: TH137　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0419-08

Theoretical Analysis and Experiment of Multi-pump and Multi-motor Regulating System

WEN Desheng　SUI Guangdong　LIU Xiaoxue　TIAN Shanheng　WANG Shaopeng　FENG Peikun
(*School of Mechanical Engineering*, *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*)

Abstract: In traditional pressure control loops, the power elements use a conventional single-acting pump. When the circuit uses only one pump to provide pressure, the pressure control loop cannot meet the system's need for multiple flows. The new multi-pump and multi-speed motors were based on the double stator theory and a new type of hydraulic components was developed, which can achieve a pump (motor) multi-output. When the conventional single-acting pump and single-acting motor were used in the conventional hydraulic circuit, the hydraulic circuit at this time was a new type of hydraulic circuit. Due to the special nature of the components, the system can meet the needs of multiple outputs and multiple powers. Since the new hydraulic circuit reduced a lot of control elements, the new hydraulic circuit can save a lot of energy when implementing the same functions as the traditional hydraulic circuit. The experimental results of the new multi-pump and multi-speed motor pressure control circuit showed that with the increase of the system pressure, the measured flow of the double stator pump was decreased; the volumetric efficiency of the double stator pump was decreased with the increase of pressure difference, the mechanical efficiency and total efficiency were increased with it. Although the error was caused by some uncontrollable factors, it verified the feasibility of the circuit and the rationality of hydraulic components. The experimental results laid the foundation for the innovation and development of multi-pumps (motors) for other hydraulic circuits.

Key words: multi-pump and multi-motor; pressure regulating system; multiple output; experiment

0　引言

随着液压传动技术的广泛应用,对元件的噪声控制、抗冲击性、比功率等方面的研究越来越深入,而在泵和马达工作原理上的研究有限[1-2]。基于双定子理论,成功研制了双定子泵和双定子马达[3]。对于传统液压系统来说,由于传统泵和马达的局限性,当需要系统多输出时,就需要控制多个定量泵工

收稿日期: 2018-05-23　修回日期: 2018-06-28
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,主要从事液压元件及新型液压传动研究,E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

作。而双定子泵和双定子马达利用其自身结构的特殊性,可以实现一个泵多输出的功能,满足传统液压元件无法实现的需求[4]。当这种液压元件用到传统液压系统中时,构成了一种新的液压系统,即多泵多马达液压传动系统[5],该液压系统可以简化很多不必要的液压控制阀,使得整个系统的功率损失大大降低[6-7]。典型液压回路中的调压回路在液压系统中必不可少,所以多泵多马达调压系统的研究就变得很重要[8]。本文对多泵多马达调压系统进行分析与实验。

1 多泵多马达原理

以单作用双滚柱连杆型等宽曲线双定子泵为例,结构原理如图 1 所示[9]。其工作原理和传统叶片泵工作原理相似,都是容积式泵,其双定子泵由内泵和外泵组成。由外定子内表面、转子外表面、外滚柱和连杆及两侧板形成了双定子泵的外泵;同理,由内定子外表面、转子内表面、内滚柱、连杆及两侧板组成了内泵。这样单作用双滚柱连杆型等宽曲线双定子泵就形成了由一个内泵和一个外泵组成的两个互不相干的比例双泵[10]。

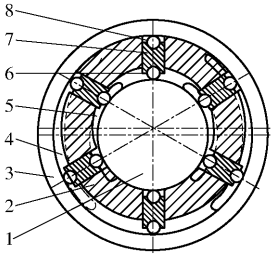


图 1 单作用双滚柱连杆型等宽曲线双定子泵结构原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of single-acting double-roller connecting rod type equal-width curve double stator pump

1. 内定子 2. 转子 3. 外定子 4. 外泵变化容积 5. 内泵变化容积 6. 内滚柱 7. 连杆 8. 外滚柱

同理,双作用可实现 4 个泵,如果是 n 个作用数即可实现 $2n$ 个泵[11]。图 2 所示为双作用双滚柱连杆型等宽曲线双定子泵结构原理简图。

2 双定子双作用泵的调压回路原理分析

调压回路是使系统整体或部分的压力保持恒定或不超过某一数值[12]。传统的多级调压回路为了实现其功能,通常需要多个换向阀和溢流阀作用[13]。然而在使用这些元件的过程中,不但会产生功率损失,还会提高整个系统的故障率。根据传统多级调压回路和双定子双作用泵的特点,设计了双定子双作用泵调压回路,其原理如图 3 所示。

由图 3 可知,只需改变相应支路换向阀不同的

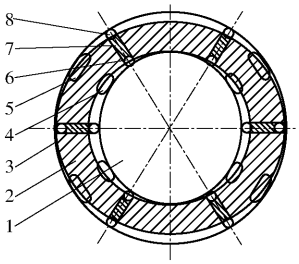


图 2 双作用双滚柱连杆型等宽曲线双定子泵结构原理简图

Fig. 2 Schematic diagram of double-acting double-roller connecting rod type equal-width curve double stator pump

1. 内定子 2. 转子 3. 外定子 4. 外泵变化容积 5. 内泵变化容积 6. 内滚柱 7. 连杆 8. 外滚柱

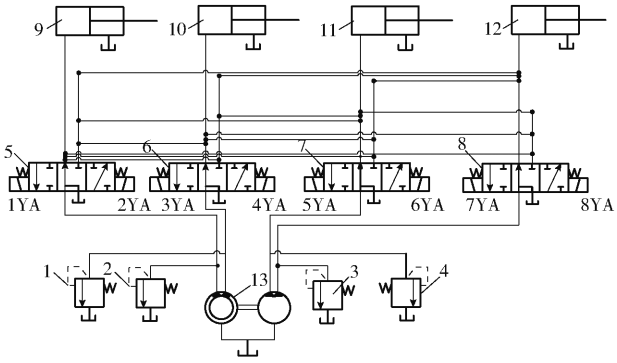


图 3 双定子双作用泵的调压回路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of regulator circuit of double stator double acting pump

1、2、3、4. 溢流阀 5、6、7、8. 换向阀 9、10、11、12. 液压缸 13. 新型双定子泵

工作状态即可实现双定子泵的不同工作形式,而且每个支路只要一个溢流阀就可实现双定子泵的多种压力输出。由于双定子双作用泵的结构原因,使得内泵和外泵的排量不同,设内泵流量为 q,外泵流量为 kq(k 是泵的设计参数),阀 1、2、3、4 分别调定压力 p_1、p_2、p_3、p_4。双定子双作用泵调压回路工作情况如表 1 所示。

表 1 的工作情况是只有单个工作缸工作,但是通过控制换向阀的工况,可以实现多个工作缸同时运动,这就实现了传统的液压泵所不能实现的单个泵同时供应不同负载的要求,结合各个支路的溢流阀,即可实现一个回路实现多功能、多功率的输出。

3 多泵多速马达二级调压回路理论分析

3.1 原理分析

传统二级调压回路原理图如图 4 所示。主溢流阀调定压力为 p_3,远程调压阀调定压力为 p_4,定量泵流量为 kq。由图 4 可知,主溢流阀的控制管路与远程调压阀连接,此时可实现一个系统输出 2 种压力[14-15]。在多泵多速马达二级调压回路中采用

表 1　双定子双作用泵调压回路工作情况

Tab. 1　Double stator double action pump pressure regulation circuit operation

电磁换向阀工况								工作泵	转速	流量	工作缸序号
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA				
+	−	−	−	−	−	−	−	内	n_1	q	9
+	−	−	+	−	−	−	−	2 内	n_2	$2q$	9
+	−	−	−	−	+	−	−	内 + 外	n_3	$(k+1)q$	9
+	−	−	+	−	+	−	−	2 内 + 外	n_4	$(k+2)q$	9
+	−	−	−	−	+	−	+	内 + 2 外	n_5	$(2k+1)q$	9
+	−	−	+	−	+	−	+	2 内 + 2 外	n_6	$(2k+2)q$	9
−	−	−	−	+	−	−	−	外	n_7	kq	11
−	−	−	−	+	−	−	+	2 外	n_8	$2kq$	11

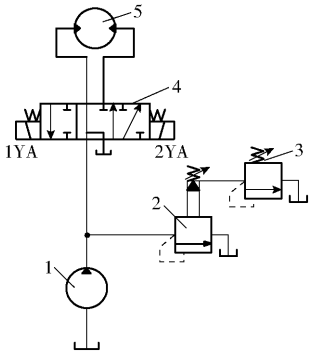


图 4　传统二级调压回路原理图

Fig. 4　Schematic diagram of traditional two-stage regulator circuit

1. 液压泵　2. 主溢流阀　3. 远程调压阀　4. 换向阀　5. 液压马达

的是双定子泵和双定子马达。其中双定子泵(马达)有多种作用数。为了简要说明新型二级调压回路的特点,该液压回路采用单作用泵和单作用马达,多泵多速马达二级调压回路原理图如图 5 所示。

对比传统回路和新型回路可知,该新型回路的调压范围是传统回路的 2 倍。设溢流阀 2、远程调压阀 3、溢流阀 4、远程调压阀 5 调定的压力分别为

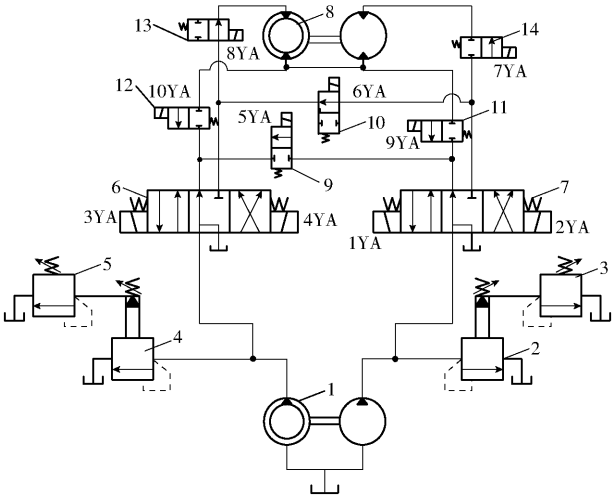


图 5　多泵多速马达二级调压回路原理图

Fig. 5　Multi-pump multi-speed motor secondary regulator circuit schematic

1. 双定子单作用泵　2、4. 先导式溢流阀　3、5. 远程调压阀　6、7. 方向控制阀　8. 双定子单作用马达　9、10、11、12、13、14. 两位换向阀

p_1、p_2、p_3、p_4,且要求 $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$。通过控制换向阀工作,系统可实现多输出。该新型调压回路不同工作方式如表 2 ~ 4 所示。

表 2　内泵单独工作时回路的工作情况

Tab. 2　Working condition of circuit when inner pump worked alone

电磁阀换向工况										工作泵	工作马达	转向	转速	转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA	10YA					
−	−	+	−	−	−	−	+	−	+	内	内	正	n_{11}	T_{11}
−	−	−	+	−	−	−	+	−	+	内	内	反	n_{11}	T_{11}
−	−	+	+	+	−	+	−	+	−	内	外	正	n_{12}	T_{12}
−	+	−	+	−	+	+	−	+	−	内	外	反	n_{12}	T_{12}
+	−	+	−	+	−	+	+	+	+	内	内 + 外	正	$n_{11}+n_{12}$	$T_{11}+T_{12}$
−	+	−	+	−	+	+	+	+	+	内	内 + 外	反	$n_{11}+n_{12}$	$T_{11}+T_{12}$

表 2 ~ 4 中转速、转矩的第 1 位下标的 1、2、3 分别代表内泵、外泵和内、外泵同时工作的情况,第 2 位下标的 1 和 2 分别代表内马达和外马达工作。通过改变双定子泵的 3 种输出方式可调节系统工作不同速度。另外该双定子多速马达有普通工作方式和差动工作方式,共可输出 4 种不同的工作方式。因此,根据工况要求,可通过改变换向阀的工作方式来满足所需转矩。

表 3 外泵单独工作时回路的工作情况

Tab. 3 Working condition of circuit when external pump worked alone

电磁阀换向工况										工作泵	工作马达	转向	转速	转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA	10YA					
+	−	−	−	−	−	+	−	+	−	外	外	正	n_{32}	T_{22}
−	+	−	−	−	−	+	−	+	−	外	外	反	n_{32}	T_{22}
+	−	+	−	+	−	−	+	−	+	外	内	正	n_{21}	T_{21}
−	+	−	+	−	+	−	−	+	+	外	内	反	n_{21}	T_{21}
+	−	+	−	+	−	+	+	+	+	外	内+外	正	$n_{21}+n_{22}$	$T_{21}+T_{22}$
−	+	−	+	−	+	+	+	+	+	外	内+外	反	$n_{21}+n_{22}$	$T_{21}+T_{22}$

表 4 内、外泵联合工作时回路的工作情况

Tab. 4 Working condition of circuit when internal and external pumps worked together

电磁阀换向工况										工作泵	工作马达	转向	转速	转矩
1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA	10YA					
+	−	−	−	−	−	+	−	+	−	内+外	外	正	n_{32}	T_{32}
−	+	−	−	−	−	+	−	+	−	内+外	外	反	n_{32}	T_{32}
+	−	+	−	+	−	−	+	−	+	内+外	内	正	n_{31}	T_{31}
−	+	−	+	−	+	−	−	+	+	内+外	内	反	n_{31}	T_{31}
+	−	+	−	+	−	+	+	+	+	内+外	内+外	正	$n_{31}+n_{32}$	$T_{31}+T_{32}$
−	+	−	+	−	+	+	+	+	+	内+外	内+外	反	$n_{31}+n_{32}$	$T_{31}+T_{32}$

3.2 恒负载工况的静态特性分析

在传统二级调压回路中，当溢流阀有溢流时[16]，液压泵的输出功率 P_p 为

$$P_p = P_0 + \Delta P_i \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} P_0 = Tn = p_1 q_1 \\ \Delta P_i = p_i(q_p - q_1) \end{cases} \tag{2}$$

式中 P_0——液压马达输出功率，W

ΔP_i——溢流阀功率损失，W

q_p——泵输出流量，L/min

q_1——溢流阀溢出流量，L/min

前文假设主溢流阀调定压力为 p_3，远程调压阀调定压力为 p_4。当 $i=1$ 时，此时 $\Delta P_1 = p_3(q_p - q_1)$，其中 ΔP_1 表示溢流阀的功率损失；当 $i=2$ 时，此时 $\Delta P_2 = p_4(q_p - q_1)$，其中 ΔP_2 表示远程调压阀的功率损失。传统调压回路在恒负载工况下的功率特性如图 6 所示。

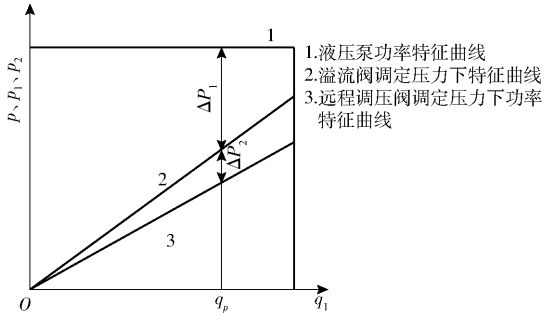


图 6 传统回路恒负载工况下的特征曲线

Fig. 6 Characteristic curve of traditional circuit under constant load conditions

当新型回路的溢流阀有溢流时，新型二级调压回路在恒负载工况下的特征曲线图如 7 所示。

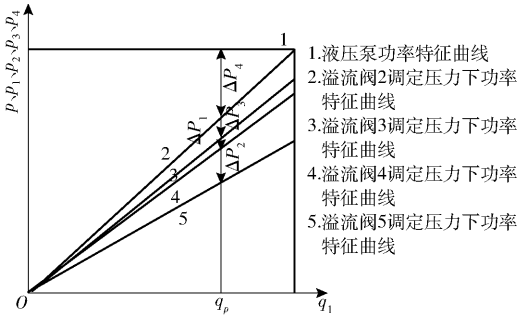


图 7 新型回路恒负载工况下的特征曲线

Fig. 7 Characteristic curve of new circuit under constant load conditions

图中，$\Delta P_1 = p_1(q_p - q_1)$，其中 ΔP_1 表示溢流阀 2 功率损失；$\Delta P_2 = p_2(q_p - q_1)$，其中 ΔP_2 表示溢流阀 3 功率损失；$\Delta P_3 = p_3(q_p - q_1)$，其中 ΔP_3 表示溢流阀 4 功率损失；$\Delta P_4 = p_4(q_p - q_1)$，其中 ΔP_4 表示溢流阀 5 的功率损失。由于传统二级调压回路中溢流阀 2 和 3 的调定压力和新型回路中的溢流阀 4 和 5 的调定压力相同，所以图 6 的 2、3 直线和图 7 的 4、5 直线分别相同，并且溢流阀调定压力越高，系统的功率曲线较高，也就越节能。

恒负载工况下系统效率为

$$\eta = \frac{p_1 q_1}{p_p q_p} \times 100\% \tag{3}$$

式中 p_p、q_p、p_1 是常数，当负载较大，$\Delta P_1 = p_1$，$q_1 = q_p$ 时，回路效率为

$$\eta = \frac{p_1}{p_p} = \frac{p_1}{p_1 + \Delta p} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta p}{p_1}} \approx 1 \tag{4}$$

式中　Δp——液压马达进出口压力，Pa

由此可见，恒负载工况时，所受负载越大，工作效率越高。

3.3　恒功率工况的静态特性分析

在恒功率工况时，设传统回路的液压马达输入功率与输出功率相等，马达输出功率表达式为

$$P_m = q_m \Delta p = T_m n \tag{5}$$

其中

$$T_m = \frac{\Delta p V}{2\pi}$$

式中　q_m——进入马达的流量，L/min

T_m——马达转矩，N·m

n——马达转速，r/min

V——马达排量，L/r

由于传统采用定量马达，所以排量为常数，在驱动一个负载情况下，其液压马达进出口压力也为常数，故液压马达转矩为定值，转速也不能调节[17-18]。但由于新型二级调压回路中采用双定子马达，可调节马达排量，使马达可输出不同转矩。对于该双定子单作用马达来说，可输出 4 种转速和转矩。恒功率下不同工作方式的输出转矩和转速如表 5 所示。

表 5　恒功率工况下不同工作方式的输出转矩和转速

Tab. 5　Output torque and speed for different working modes under constant power conditions

工作方式	转矩	转速
内马达	$T_1 = \frac{\Delta p V_1}{2\pi}$	$\frac{2\pi P_m}{\Delta p V_1}$
外马达	$T_2 = \frac{\Delta p V_2}{2\pi}$	$\frac{2\pi P_m}{\Delta p V_2}$
内马达 + 外马达	$T_3 = \frac{\Delta p (V_1 + V_2)}{2\pi}$	$\frac{2\pi P_m}{\Delta p (V_1 + V_2)}$
内、外马达差动工作	$T_4 = \frac{\Delta p (V_2 - V_1)}{2\pi}$	$\frac{2\pi P_m}{\Delta p (V_2 - V_1)}$

4　实验

为了验证新型多泵多速马达二级调压回路的可行性，建立的实验系统原理图如图 8 所示。

在连接实验设备时，需注意[19]：①检查管路安装是否正确。②严格按照液压元件产品说明书要求进行安装。③工作介质推荐使用 46 号液压油或其他运动粘度(2.5 ~ 3.0) × 10^{-5} m^2/s(50℃)的中性矿物油，连续运转的温度为 15 ~ 60℃。④新机开始运转时，在无负载状态下反复启动原动机，为确保系统内空气排除，连续运转 10 min 左右。图 9 为液压元件连接图，图 10 为新型压力控制回路连接图。

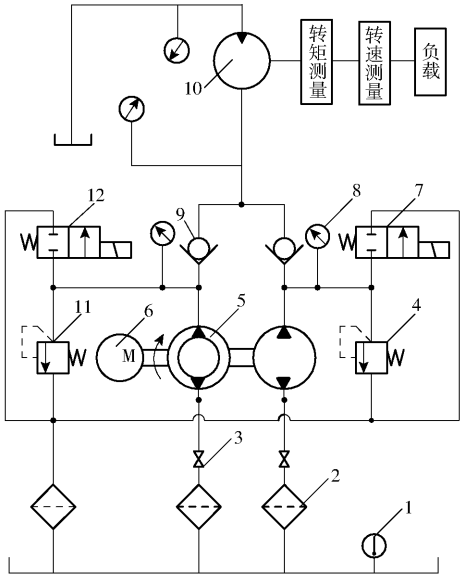
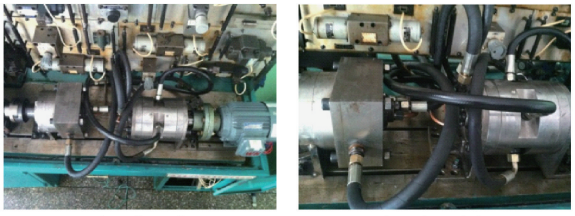


图 8　新型压力控制回路的实验系统原理图

Fig. 8　Schematic diagram of test system for new pressure control circuit

1. 温度计　2. 滤油器　3. 截止阀　4、11. 溢流阀　5. 双定子泵　6. 原动机　7、12. 电磁换向阀　8. 压力表　9. 单向阀　10. 液压马达



(a) 液压泵　　(b) 液压马达

图 9　液压元件连接图

Fig. 9　Diagram of hydraulic components connection

图 10　新型压力控制回路连接图

Fig. 10　Diagram of new pressure control circuit connection

选择的实验样机结构尺寸参数如表 6 所示。

表 6　实验样机结构参数

Tab. 6　Experimental prototype structure parameters

参数	数值
驱动电机功率/kW	5.5
最大理论排量/(L·r^{-1})	60
额定压力/MPa	10

在该压力控制系统实验中，通过转矩测量仪和转速测量仪分别测出马达转矩和系统流量，分析双定子泵的总效率。采集到的数据如表 7 ~ 9，分别表

表 7 不同工作方式的容积效率

Tab. 7 Volumetric efficiency of different working methods

负载压力/MPa	内泵单独工作			外泵单独工作			内、外泵同时工作		
	理论流量/(L·min⁻¹)	实测流量/(L·min⁻¹)	容积效率/%	理论流量/(L·min⁻¹)	实测流量/(L·min⁻¹)	容积效率/%	理论流量/(L·min⁻¹)	实测流量/(L·min⁻¹)	容积效率/%
1	31.23	28.9	92.53	56.42	55.5	98.36	87.65	83.9	95.72
2	31.23	28.8	92.22	56.42	55.3	98.01	87.65	83.7	95.49
3	31.23	28.7	91.89	56.42	55.1	97.66	87.65	83.5	95.26
4	31.23	28.5	91.25	56.42	54.9	97.30	87.65	83.2	94.92
5	31.23	28.3	90.61	56.42	54.4	96.41	87.65	82.5	94.12
6	31.23	27.9	89.33	56.42	53.8	95.35	87.65	81.5	92.98

表 8 不同工作方式的机械效率

Tab. 8 Mechanical efficiency of different working methods

负载压力/MPa	内泵单独工作		外泵单独工作		内、外泵同时工作	
	实际转矩/(N·m)	机械效率/%	实际转矩/(N·m)	机械效率/%	实际转矩/(N·m)	机械效率/%
1	23.2	30.59	41.6	30.82	54.1	36.85
2	20.6	34.38	36.5	35.16	48.3	41.22
3	17.1	41.60	28.9	44.30	41.8	47.64
4	13.3	54.56	22.4	57.16	34.1	58.43
5	11.2	63.93	20.2	63.53	31.1	63.99
6	10.3	70.82	18.0	71.66	28.3	70.25

表 9 不同工作方式的总效率

Tab. 9 Total efficiency of different working methods

负载压力/MPa	内泵单独工作			外泵单独工作			内、外泵同时工作		
	容积效率/%	机械效率/%	总效率/%	容积效率/%	机械效率/%	总效率/%	容积效率/%	机械效率/%	总效率/%
1	92.53	30.59	28.31	98.36	30.82	30.32	95.72	36.85	35.28
2	92.22	34.38	31.71	98.01	35.16	34.47	95.49	41.22	39.37
3	91.89	41.60	38.23	97.66	44.30	43.27	95.26	47.64	45.39
4	91.25	54.56	49.79	97.30	57.16	55.62	94.92	58.43	55.47
5	90.61	63.93	57.93	96.41	63.53	61.25	94.12	63.99	60.23
6	89.33	70.82	63.27	95.35	71.66	68.33	92.98	70.25	70.25

示该回路在不同工作方式下的容积效率、机械效率和总效率。

在不同工作方式下不同压力的双定子泵实际流量、容积效率、机械效率和总效率分别如图 11 ~ 14 所示。

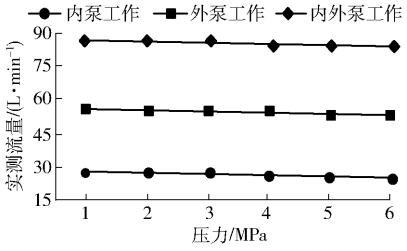


图 11 不同工作方式下双定子压力与泵实际流量关系

Fig. 11 Actual flow of double stator pump under different pressures and working modes

由图 11 ~ 14 可知，双定子泵的容积效率随着压力的增大而减小，其机械效率和总效率随之增大而

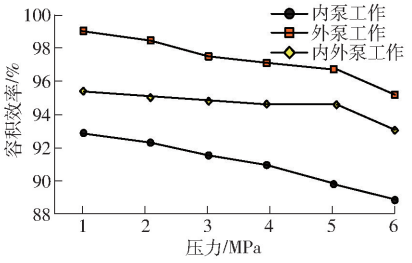


图 12 不同工作方式下双定子压力与泵容积效率关系

Fig. 12 Volumetric efficiency curves of dual stator pump under different pressures and working modes

增大。造成压力、容积效率和总效率较低的主要原因有[20]：①样机加工过程中存在加工误差，影响零部件尺寸精度。②在连接液压系统时，由于管路沿程损失和控制阀等原因会影响实验效率。③在读取实验表结果时，存在人为的读取误差，即人工操作误差。④在元件工作时，内部存在摩擦损失，导致实验结果和理论分析存在一定误差。⑤随着压力的增加

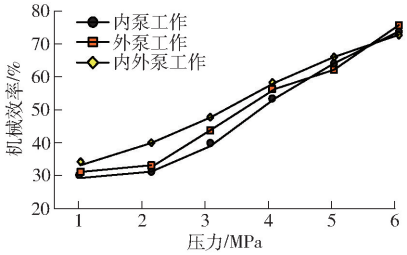


图 13　不同工作方式下双定子泵压力与机械效率关系

Fig. 13　Mechanical efficiency curves of double stator pump under different working modes and pressures

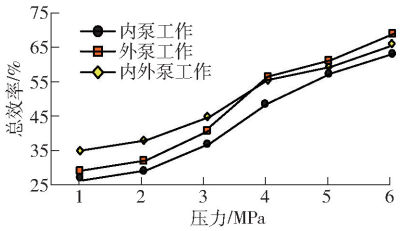


图 14　不同工作方式下双定子泵压力与总效率关系

Fig. 14　Total efficiency curves of double stator pump under different pressures and working modes

使元件工作过程中泄漏量变大，导致双定子泵的实测流量有稍微的下降趋势。但通过以上数据分析，证明了该新型压力控制回路的可行性。但是由于零件的加工存在精度和测得数据的误差等因素，导致该回路效率相对较低，但其结果和理论分析的结果基本一致，这也同时证明了理论分析的正确性。

5　结束语

多泵（马达）可以使一个泵（马达）体起到多个传统的泵（马达）的作用，多泵多速马达调压回路相对于传统的调压回路更节能，且可实现多种输出。通过实验，验证了该回路可行性，故可根据双定子泵双定子马达的理论，可结合传统液压回路创新设计出更多具有多功能的液压系统。

参　考　文　献

1　周广，陈韶华，马元浩，等. 液压传动在机械驱动中的应用[J]. 内燃机与配件，2018(7)：107－108.
ZHOU Guang, CHEN Shaohua, MA Yuanhao, et al. Application of hydraulic transmission in mechanical drive[J]. Internal Combustion Engines & Parts, 2018(7): 107－108. (in Chinese)

2　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)

3　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.

4　闻德生，张凯明，张三喜，等. 双定子异形滑块液压马达角速度不均匀性研究[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(4)：341－346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140454&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.054.
WEN Desheng, ZHANG Kaiming, ZHANG Sanxi, et al. Uniformity of double stator alien slider hydraulic motor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 341－346. (in Chinese)

5　LIU Baojie, YANG Qingwen, WU Xiang, et al. Application of multi-sensor information fusion in the fault diagnosis of hydraulic system[J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2017, 22(1): 12－20.

6　艾超，叶壮壮，孔祥东，等. 液压型风力发电机组主传动系统压力控制特性研究[J]. 中国机械工程，2015，26(6)：729－732.
AI Chao, YE Zhuangzhuang, KONG Xiangdong, et al. Study on pressure control characteristics of main transmission system of hydraulic wind turbine[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(6): 729－732. (in Chinese)

7　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)

8　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)：238－242，247. http://www.jcsam.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, 247. (in Chinese)

9　闻德生，甄新帅，陈帆，等. 液压同步多马达与传统同步马达的对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2017，49(1)：173－177.
WEN Desheng, ZHEN Xinshuai, CHEN Fan, et al. Comparative analysis of hydraulic synchronous multi-motor and traditional synchronous motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(1): 173－177. (in Chinese)

10 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. Analysis of output torque of motor in double-acting multi-pump and multi-motor transmission[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(23): 2836 – 2838. (in Chinese)

11 闻德生,商旭东,马光磊,等. 比例型多泵多速马达传动系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):421 – 428. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170953&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.053.
WEN Desheng, SHANG Xudong, MA Guanglei, et al. Design and experiment of proportional type multi-pump and multi-speed motor driving system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 421 – 428. (in Chinese)

12 张凯明. 新型多泵多速马达压力控制回路的理论研究和实验分析[D]. 秦皇岛:燕山大学,2014.
ZHANG Kaiming. Theoretical research and experimental analysis of pressure control loop for new multi-pump and multi-speed motor[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)

13 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 – 3,71.
LIU Qiaoyan, LI Xitian, GAO Junfeng, et al. Overview of proportional multi-pump multi-motor drive[J]. Hydraulics & Seals Pneumatics, 2015, 35(5): 1 – 3,71. (in Chinese)

14 闻德生,商旭东,潘为圆,等. 齿轮型多泵多马达传动系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):399 – 406. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170653&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.053.
WEN Desheng, SHANG Xudong, PAN Weiyuan, et al. Design and experiment on gear multi-pump and multi-motor driving system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 399 – 406. (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. Study on transmission output characteristics of hybrid multi-pump multi-speed motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 15 – 20. (in Chinese)

16 赵祥栋. 多级调压液压泵站的应用[J]. 冶金设备,2018(3):69 – 71.
ZHAO Xiangdong. Application of multi-stage pressure regulating hydraulic system[J]. Metallurgy Equipment, 2018(3): 69 – 71. (in Chinese)

17 何新桥,王玉庆,石冰岩. 基于调压不正常的压力控制回路故障诊断探究[J]. 科技创新与生产力,2016(9):97 – 99.
HE Xinqiao, WANG Yuqing, SHI Bingyan. Discussion on fault diagnosis of pressure control loop based on abnormal pressure regulation[J]. Science & Technology Innovation and Productivity, 2016(9): 97 – 99. (in Chinese)

18 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)

19 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)

20 陈光强. 浅谈挖掘机液压系统故障诊断与维修[J]. 中国设备工程,2017(10):145 – 146.
CHEN Guangqiang. Discussion on fault diagnosis and maintenance of excavator hydraulic system[J]. China Equipment Engineering, 2017(10): 145 – 146. (in Chinese)