

双定子多输出泵在同步回路的设计

闻德生, 石滋洲, 顾攀, 潘为圆, 商旭东, 马光磊

(燕山大学机械工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要:随着液压技术的普及, 液压同步回路的应用获得了工程行业广泛的认可, 但是当前最为常见的几种同步回路却存在很多弊端。如何更好地实现同步运动效果, 获得更多的同步运动形式、更高的同步精度是液压同步回路设计中的重要任务。双定子多输出泵作为一种新型的液压元件, 由内泵和外泵构成, 既能够实现多输出, 还能根据要求实现比例输出, 并且内外泵之间相互独立, 既能实现单独输出, 也能实现联合输出。将这种新型液压元件进行回路设计, 取代原有的液压同步回路设计, 探究新型液压元件双定子多输出泵(简称双定子泵)在同步回路中应用的性能特点以及其驱动多液压缸同步的规律。借助液压系统的分析, 设计出单作用双定子泵、双作用双定子泵的同步回路, 与传统的同步回路进行比较, 发现新型同步回路具有能驱动不同缸径的液压缸同步, 能实现多种同步速度, 具有回路功率损失少, 泵的使用个数少, 同步精度高等优点; 用已加工出的双定子泵样机组成同步回路进行实验, 结果表明其确实能够达到较高的同步精度, 并且发现影响新型同步回路同步精度的主要因素为双定子泵的内部泄露。因此, 应用双定子多输出泵能消除当前液压回路中的一些问题, 为同步回路提供了一个新的研究方向, 为双定子液压元件的应用奠定了理论研究基础。

关键词: 液压同步回路; 双定子泵; 节能; 同步速度; 同步精度

中图分类号: TH137.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2017)02-0196-06

Design on Synchronous Circuit Driven by Double-stator Multi-output Pump

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

(College of Mechanical Eng., Yanshan Univ., Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: With the popularization of hydraulic technology, the application of synchronous hydraulic circuit for engineering industry has been widely recognized. Now there has appeared several kinds of circuit, but all the circuit performed badly. So how to realize a synchronization effect, to get more moving modes, and to get higher precision has become a very important task for design of synchronous hydraulic circuit. As a new type of hydraulic components, Double stator output pump is composed of inner pump and outer pump, which can realize the function of multi output, and can realize proportional output according to the requirements. It's inner and outer pump are mutually independent, so it can work alone and also can realize the joint output. By using this new type of hydraulic components for circuit design, making the original hydraulic synchronous circuit be replaced, the characteristics of synchronous circuit driven by double-stator multi-output pump (referred to as double-stator pump) was explored, and the laws of multi-cylinder hydraulic synchronous system driven by it was studied. Based on the analysis of the hydraulic system, the synchronous circuit of single double stator pump and double pump stator were designed. The comparison with the traditional synchronous circuit showed that the new synchronous circuits can achieve the hydraulic cylinder synchronization of different sizes, and have multiple synchronous speeds, in addition, it has the advantages of less power loss and using fewer numbers of pumps. The experimental data of a prototype of double-stator pump with the synchronous system showed that the main factor influencing the synchronous precision of the new synchronous circuit is the volumetric efficiency of the double-stator pump. The application of double stator multi output pump can effectively eliminate some of the current problems in the hydraulic circuit, which provides a new research direction for the synchronous circuit and provides the theoretical foundation for the research of application of double stator hydraulic components.

Key words: hydraulic synchronous circuit; double-stator pump; energy saving; synchronous speed; synchronous precision

收稿日期: 2016-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975246)

作者简介: 闻德生(1954—), 男, 教授, 博士。研究方向: 新型液压传动和新型液压元件。E-mail: wendesheng@ysu.edu.cn

在大多数的机械中,常常会遇到2个或多个液压执行元件以相同的位移或相同的速度(或固定的速度比)同步运行的情况,在这种情况下,就要用到同步回路。现有的液压同步回路主要有两种,即为流量控制同步回路、容积控制同步回路。在流量控制同步回路中,会采用控制元件节流阀、调速阀和同步阀等。该类回路的优点是组成结构简单,经济成本低,但也有一个缺点,就是总效率较低。在容积控制同步回路中,采用液压泵、同步马达、同步缸等,该类同步回路同步精度高,效率高,能允许执行器有较大的偏载,但该类回路使用元件多,结构复杂,价格昂贵。因此在一些较为经济的机械中,并不适合采用此种同步回路方式。随着机械朝着节能、低污染、集成化方向的发展,现有的同步回路不能完全适应其发展需求^[1-4]。当今各种新型液压元件和与液压有关的先进技术知识层出不穷。其中,双定子液压泵是一种具有新结构、新功能的新型液压元件,其原理分析和结构设计已经比较成熟。在液压回路的应用方面前人也做了一定的研究,虽然已经提出双定子泵在同步回路中的应用,但具体的研究内容尚未涉及^[5-9]。作者拟通过设计双定子泵驱动多个液压缸的同步回路来说明双定子泵在机械同步回路中应用的可行性,同时与传统的典型同步回路进行比较分析提出的新型同步回路的优点。

1 双定子泵的工作原理与结构特点

图1、2为两种典型的双定子泵,图1所示的液压泵可以依靠改变转子与定子的中心距而实现变量,而图2所示的液压泵由于结构上的制约不能实现变量。其中,由转子、外定子、叶片、两侧端板及配流装置组成的泵称为外泵;由转子、内定子、叶片、两侧端板及配流装置组成的泵称为内泵。

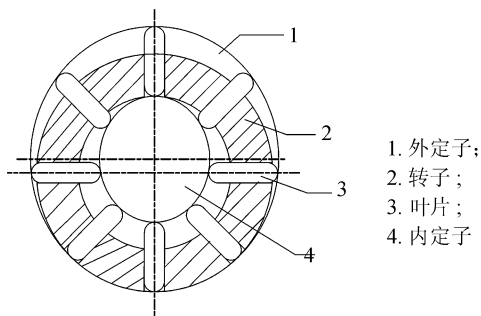


图1 单作用双定子变量泵原理

Fig.1 Principle of single-acting double-stator variable pump

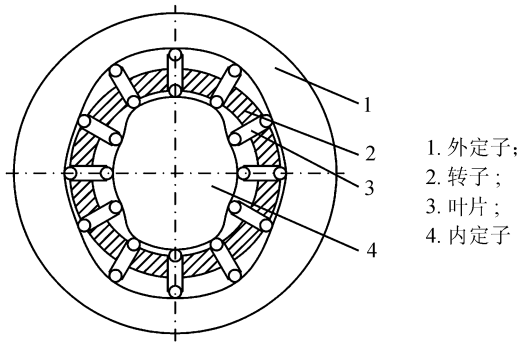


图2 双作用双定子泵原理

Fig.2 Principle of double-acting double-stator pump

以上两种泵在工作时与传统的叶片泵工作原理是相同的,都是依靠定子曲线使叶片相对于转子产生一定的径向运动,从而使叶片、转子、定子之间的容积产生变化,在容积增大时吸油,容积减小时压油。

在结构上,针对传统叶片泵转子进行了改进,使得一个泵体内产生了2个叶片泵的效果,并且内泵与外泵是相对独立的,因此能够实现多样的输出形式。

由于双定子液压泵和马达属于全新的液压元件,所以应有全新的职能符号来定义它们,根据文献[10]所规定的画法规范,画出两种双定子泵的职能符号如图3所示。其中:用双圆圈的画法代表内泵来与外泵进行区分;外泵与传统画法一样,一端的箭头数代表油口输出数^[10]。

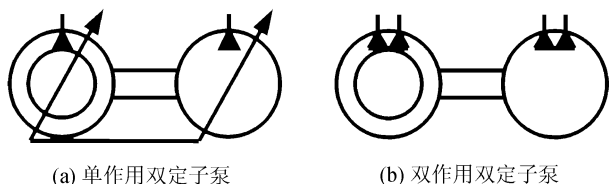


图3 职能符号画法

Fig.3 Drawing of functional symbol

2 传统典型同步回路分析

传统流量控制同步回路有共同的特点:由1个液压泵来实现多个执行元件的同步。这样,要实现同步运动,就要采用节流元件把泵的输出流量平均或按比例分给各个执行元件,这样必然产生能量损失。图4是流量控制同步回路中典型的分流集流阀同步回路,该回路能保证速度同步,同步精度为2%~5%。但该回路有难以消除的缺点:1)只能实现2个同径液压缸的同步;2)由于分流集流阀的内部节流孔是互通的,当活塞在行程中停止时,执行元

件会因负荷不同而蹿油,此时必须在分流集流阀和执行元件间加液控单向阀,这样就增加了元件的使用个数与系统的复杂性;3)分流集流阀压降大,效率低,不适合低压系统^[11-13]。

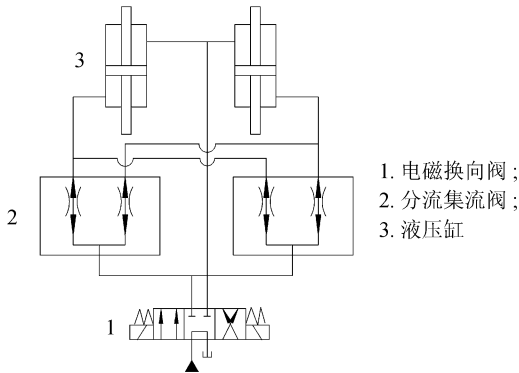


图 4 分流集流阀同步回路

Fig. 4 Synchronous circuit of shunt valve

传统容积控制同步回路中,以泵控同步回路为例,采用多个相同的液压泵来实现多个执行元件的同步运动。这种同步回路的同步精度适用范围广,从 0.5% 至 5%,而且相比于其他同步回路能承受更大的偏载。

图 5 为传统的双泵控制同步回路。但该回路在应用过程中有 2 个问题:1)定量泵控制回路中执行元件的运行速度在整个工作行程中要求一致,即只能实现一种同步速度,否则就会产生节流损失和溢流损失,效率低;2)定量泵控制同步回路中,一旦其中 1 个液压泵有所损坏,那么在容积效率和排量方面很难修复到与另 1 个完全一样状态,这时只能购买 2 个相同的新泵,造成很大的浪费^[14-15]。

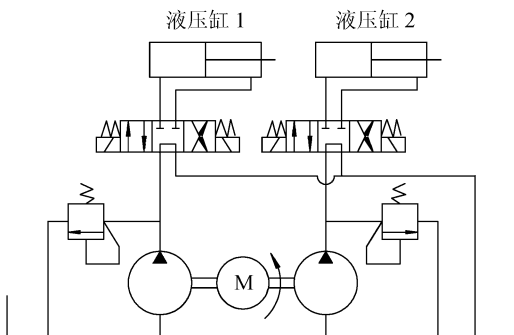


图 5 双泵同步回路

Fig. 5 Synchronous circuit of double pump

3 双定子泵同步回路的设计与分析

3.1 单作用双定子变量泵同步回路的设计与分析

单作用双定子变量泵具有 1 个内泵和 1 个外泵,有 2 个输出油口,输出相互独立,并且能够对应的进行变量调节。图 6 为单作用双定子变量泵的同

步回路系统。称具有较小油液有效作用面积的液压缸为小液压缸,具有较大油液有效作用面积的液压缸为大液压缸。

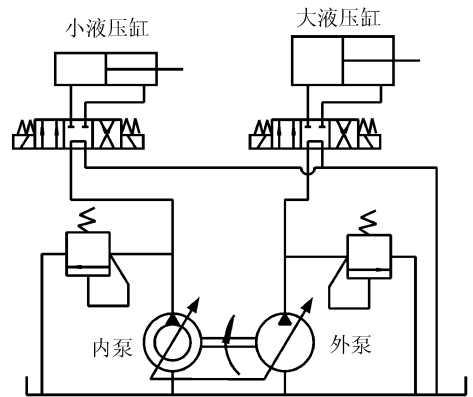


图 6 单作用双定子变量泵同步回路原理

Fig. 6 Synchronous circuit schematic of single-acting double-stator variable pump

设一个内泵单独工作时的输出流量为 q_1 ,一个外泵单独工作时的输出流量为 q_2 ,定义流量比例系数:

$$C = \frac{q_2}{q_1} \quad (1)$$

记小液压缸活塞的有效面积为 s_1 ,大液压缸活塞的有效面积为 s_2 ,定义两液压缸活塞的有效面积比:

$$D = \frac{s_2}{s_1} \quad (2)$$

当内泵给小液压缸单独供油,外泵给大液压缸单独供油,内外泵的流量比例系数等于两液压缸活塞的有效面积比时,即 $C = D$ 时,缸 1 和缸 2 的速度分别是 V_1 和 V_2 有:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{q_1 s_2}{q_2 s_1} = \frac{D}{C} = 1 \quad (3)$$

两液压缸速度相等,实现了不等径液压缸的同步运动。并且由于单作用双定子泵可以实现变量,因此可以有多种同步速度。

由上述分析可知,双定子泵同步回路能实现不等径缸同步,增加了同步回路的形式。并且由于这种泵能够实现变量,因此可以将控制旋钮配置为能够实现远程配置,从而可以实现速度的变化,实现无极调速。

3.2 双作用双定子泵同步回路的设计与分析

3.2.1 双缸同步回路

双作用双定子泵有 2 个内泵和 2 个外泵,有 4 个输出油口,2 个内泵(外泵)输出流量相同。1 个双作用双定子泵驱动 2 个液缸同步,可以通过 4 个输出油口的不同组合向 2 个液缸供给多种不同的流量,实现多种同步速度(驱动 2 个不等径液缸同步时,需要满足条件 $C = D$),如表 1 所示。

表 1 双作用双定子泵双缸同步回路供油情况

Tab.1 Synchronous circuit oil supply situation of double-acting double-stator and double cylinder

液压缸	同步速度 1	同步速度 2	同步速度 3
等径液压缸同步供油方式	液压缸 1 内泵	外泵	内泵 + 外泵
	液压缸 2 内泵	外泵	内泵 + 外泵
不等径液压缸同步供油方式	液压缸 1 内泵	内泵 + 内泵	—
	液压缸 2 外泵	外泵 + 外泵	—

图 7 是双作用双定子泵驱动 2 个液压缸的同步回路原理。该同步回路通过 1 个双作用双定子泵实现了 2 个液压缸的同步运动,而且不采用流量控制元件,只通过 4 个油口组合输出的方式就可以实现多种同步速度。表 2 给出了该回路工作时的电磁铁动作顺序(表 2 中只给出了液压缸前进时的电磁铁得电情况,YA 表示电磁铁)。

表 2 双作用双定子泵双缸同步回路电磁铁动作顺序

Tab.2 Synchronous circuit electromagnet action sequence of double-acting double-stator and double cylinder

缸径大小	工作情况	1YA	2YA	3YA	4YA	5YA	6YA	7YA	8YA	9YA	10YA
等径	同步速度 1	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
	同步速度 2	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
	同步速度 3	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-
不等径	同步速度 1	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-
	同步速度 2	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-

在传统定量单泵同步回路中,电机转速不变时,只能靠节流调速来调节进入液压缸的流量即控制液压缸的运行速度,设定量泵流量为 Q ,双作用双定子泵内泵排量为 Q_1 ,外泵排量为 Q_2 ,由于执行元件最大速度的要求,所以有:

$$Q = 2Q_1 + 2Q_2 \quad (4)$$

在双缸同步回路中,当执行元件以最大速度运行时,进入 2 个液压缸的流量均为 $Q/2$,无能量损失;当要求执行元件以中速运行,即进入每个液压缸的流量均为 Q_2 时,设两液压缸负载压力相同,此时双定子泵输出的功率 N_1 和定量单泵输出的功率 N_2 分别为:

$$N_1 = 2p_p Q_2 \quad (5)$$

$$N_2 = (p_p + \Delta p) Q \quad (6)$$

式中, p_p 为负载压力, Δp 为泵出口压力与负载压力差。则双定子泵同步回路节省的功率 ΔN 为:

$$\Delta N = N_2 - N_1 = 2\Delta p Q_2 + 2Q_1 (p_p + \Delta p) \quad (7)$$

式中,加号前半部分为节流功率损失,加号后半部分为溢流功率损失。同理可得当执行元件以低速运行时,即进入每个液压缸的流量均为 Q_1 时,双定子泵

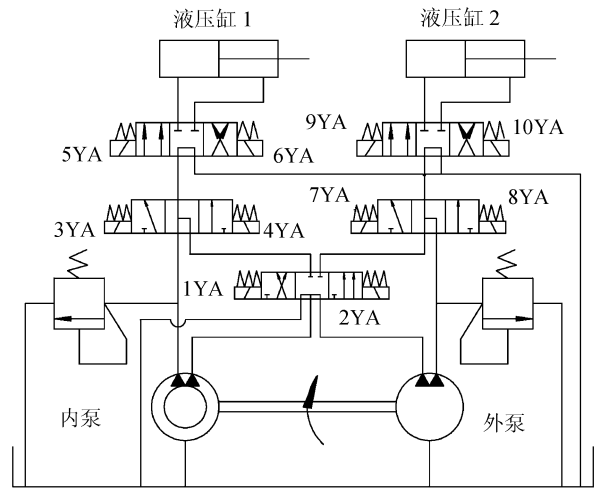


图 7 双作用双定子泵同步回路原理图

Fig.7 Synchronous circuit schematic of double-acting double-stator pump

同步回路减少的功率损失为:

$$\Delta N = 2\Delta p Q_1 + 2Q_2 (p_p + \Delta p) \quad (8)$$

由此可知,当要实现多个同步速度时,双定子泵同步回路相比于传统定量单泵同步回路,减少了功率损失。

3.2.2 三缸、四缸同步回路

图 8 所示是驱动 3 个液压缸同步的液压系统原理图。当双作用双定子泵驱动 3 个液压缸同步时,可以根据流量比例系数 C 的大小分为 3 种情况。当 $C = 2$ 时,2 个内泵的流量等于 1 个外泵的流量,这样 2 个内泵共同驱动 1 个液压缸,就可以驱动 3 个等径液压缸的同步;当 $C > 2$ 或 $C < 2$ 时,2 个内泵的流量小于或大于 1 个外泵的流量,2 个内泵驱动的液压缸缸径小于或大于 1 个外泵驱动的液压缸缸径。这样,就可以根据不同的工况来选择 C 值的大小,以实现 3 个等径缸或不等径缸的同步运动,但由于该回路中泵的输出只有一种组合,所以液压缸也只能实现一种同步速度。

双作用双定子泵有 4 个输出油口,最多驱动 4 个液压缸同步,即 2 个内泵驱动 2 个相同的小径液

压缸,2 个外泵驱动 2 个相同的大径液压缸,实现 4 个液压缸同步运动,同三缸同步一样只有一种同步

速度。四缸同步液压原理在此不再赘述。

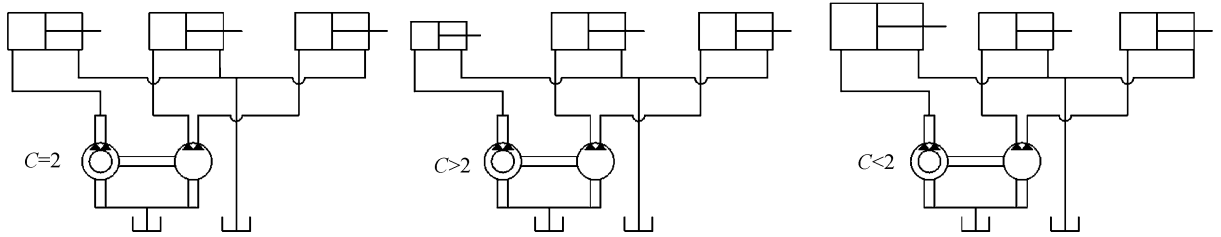


图 8 双作用双定子泵驱动三缸同步回路原理

Fig. 8 Schematic of double-acting double-stator pump driving three cylinder synchronous circuit

综合上述分析可知:双作用双定子泵同步回路既可以实现等径缸同步,又可以实现不等径缸同步;而且与传统的同步回路相比,不采用流量控制元件和变量控制机构,就可以实现多种同步速度的变化,减少了能量损失,提高了回路工作效率,降低了成本。

4 实验

为了更好地研究双定子泵的同步性能,用已加工出的叶片式双作用双定子泵搭建出了图 7 所示的液压同步回路,在两个液压缸的无杆腔设有压力测量点,以检测两个液压缸的负载压力,同时采用准确

度等级为 0.5 的流量计测量进入两个液压缸无杆腔的流量。实验中各主要元件参数如表 3 所示。

当换向阀组如表 2 所示动作时,两液压缸同步动作。表 4 是通过压力表和流量计测量的两液压缸的负载压力差(负载压力差等于液压缸 2 负载压力减液压缸 1 负载压力)和进入两液压缸的流量。负载压力差为零时,两个液压缸的负载压力均为 5 MPa;在同步速度 3 即高速情况下,保持液压缸 1 负载压力 5 MPa 不变,增加液压缸 2 的负载,使负载压力差分别为 2、4、6 MPa。

表 3 双作用双定子泵液压同步系统元件参数

Tab. 3 Parameters of hydraulic synchronous system of double-acting double-stator pump

参数名	液压缸尺寸/mm			双作用双定子泵理论排量/(mL · r ⁻¹)		电机转速/(r · min ⁻¹)
	活塞直径	活塞杆直径	最大行程	内泵	外泵	
参数值	50	28	400	8.0	12.5	1 440

表 4 实验数据

Tab. 4 Experimental datas

负载压力差/MPa	速度情况	液压缸 1 流量/(L · min ⁻¹)	液压缸 2 流量/(L · min ⁻¹)
0	同步速度 1	11.52	11.52
0	同步速度 2	18.00	18.00
0	同步速度 3	29.51	29.50
2	同步速度 4	29.51	29.50
4	同步速度 5	29.50	29.48
6	同步速度 6	29.47	29.45

由实验数据可知:当两液压缸负载压力相同时,进入两液压缸的流量是大致相等。在高速情况下增大液压缸 2 的负载压力时,进入液压缸 2 的流量减少。管道布置对称,初步分析是由于偏载导致内外泵的泄漏不同引起的。在偏载情况下,泄漏量随着负载压力差的增加而增加,所以在同步精度要求高的场合应对泵设计必要的密封结构或采取适当的回

路结构以实现更高的同步精度。

5 结论

通过以上的理论分析和实验介绍,能够得到如下结论:

1) 双定子泵同步回路用 1 个泵能代替原来的多个泵,实现等径缸或者不等径缸的同步运动,并且能够省去某些耗能元件的使用,减少了能量损失。

2) 双定子泵同步回路通过组合输出的方式可以实现多液压缸同步系统中多种同步速度的变化,省去了变量控制机构和速度控制元件,降低了成本,提高了效率。

3) 双定子泵同步回路在负载压力相同时能实现很高的同步精度,在偏载情况下同步精度受泵内部泄漏影响大。

参考文献:

[1] 张绍九. 液压同步系统[M]. 北京: 化学工业出版社,

- 2010:93-95.
- [2]李壮云. 液压系统与元件[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [3]Ning Chenxiao,Zhang Xushe. Study of the hydraulic synchronous circuit and synchronous control of the hydraulic hoist[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275/276/277:2487-2490.
- [4]Chen Chengyi, Liu Liqiang, Cheng Chicheng, et al. Fuzzy controller design for synchronous motion in a dual-cylinder electro-hydraulic system[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(6):658-673.
- [5]闻德生. 液压元件的创新与发展[M]. 北京:航空工业出版社,2009:375-384.
- [6]Wen Desheng, Lv Shijun, Liu Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal-width double-stator pump and motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11):1840-1844. [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.]
- [7]Wen Desheng, Wang Zhili, Lv Shijun, et al. Single-acting double-stator multi-pumps and multi-motors[J]. Journal of Chongqing University, 2010(4):208-215.
- [8]Wen Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system[J]. Science in China, (Series E: Information Science), 2011, 54(4):992-997.
- [9]Zheng Zhenquan. The theory research and analysis of multi-pump multi-speed motor speed control circuit[J]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2014:34-46. [郑珍泉. 多泵-多速马达速度控制回路的理论研究于分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014:34-46.]
- [10]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. [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.]
- [11]邵俊鹏,周德繁,韩桂华,等. 液压系统设计禁忌[M]. 北京:机械工业出版社,2008:158-164.
- [12]Kassema S, El-din T S, Helduser S. Motion synchronization enhancement of hydraulic servo cylinders for mould oscillation[J]. International Journal of Fluid Power, 2012, 13(1):51-60.
- [13]Gao Qinhe, Guan Wenliang. Research on intelligent synchronization control of erecting system driven by two hydraulic cylinders[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012, 422:167-171.
- [14]Yang Wenbin. The design and control strategy research of multi-cylinder synchronous system[D]. Changsha: Central South University, 2014:20-24. [杨文彬. 多液压缸同步系统的设计及其控制策略研究[D]. 长沙:中南大学, 2014:20-24.]
- [15]Tomizuka M, Hu J, Chiu T, et al. Synchronization of two motion control axes under adaptive feed forward control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1992, 114(2):196-203.

(编辑 黄小川)

引用格式:Wen Desheng, Shi Zizhou, Gu Pan, et al. Design on synchronous circuit driven by double-stator multi-output pump [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2):196-201. [闻德生,石滋洲,顾攀,等. 双定子多输出泵在同步回路的设计[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2):196-201.]