

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.026

液压同步多马达与传统同步马达的对比分析

闻德生, 甄新帅, 陈帆, 姜凤, 商旭东

(河北省重型机械流体动力传输与控制实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 为研究新型液压同步多马达(简称液压多马达)的同步特点,并分析其同步性能,把液压多马达用作同步马达应用在同步回路中,设计液压多马达的同步回路;对新型多马达同步回路和传统同步马达同步回路所实现的功能进行对比分析,并通过液压多马达的自身结构来研究影响其容积效率的因素;利用已加工出的液压多马达样机,组成三液压缸同步液压系统并进行实验,验证液压多马达驱动多缸同步回路的同步性能.理论分析和实验结果表明:新型液压多马达同步回路能够完全实现传统同步马达同步回路的功能,并且马达使用数量少,能够实现不同缸径液压缸同步,同步精度高(1.0%~1.7%).

关键词: 流体传动与控制; 液压同步回路; 同步马达; 同步多马达; 容积效率; 同步精度

中图分类号: TH137.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)01-0173-05

A comparison analysis of hydraulic synchronous multi-motor and traditional synchronous motor

WEN Desheng, ZHEN Xinshuai, CHEN Fan, JIANG Feng, SHANG Xudong

(Hebei Province Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control(Yanshan University), Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: To study the characteristics and synchronous performance of new hydraulic synchronous multi-motor (Referred to as hydraulic multi-motor), the hydraulic multi-motor is used as synchronous motor in synchronous circuit. The functions of new synchronous circuit and traditional synchronous circuit are compared and analyzed, and based on the hydraulic multi-motor structure, the factors affecting on its volume efficiency are studied. The three hydraulic cylinder synchronous system constituted by hydraulic multi-motor prototype is composed to carry out the experiments, and the synchronous performance is verified. Theoretical analysis and experimental results show that the new hydraulic multi-motor not only can completely realize the function of traditional synchronous motor with fewer components and higher precision (1.0%–1.7%), but also can achieve different diameter cylinder synchronization.

Keywords: fluid transmission and control; hydraulic synchronous circuit; synchronous motor; synchronous multi-motor; volume efficiency; synchronous precision

液压传动以其单位质量输出功率大、体积小、质量轻等优点,广泛应用于工业、农业、国防、开采、装备制造、水利建筑等领域,已经成为推动我国发展的重要基础技术力量之一. 液压同步系统是液压系统之一,是具有液压同步运动机器设备的核心,同步系统的优劣直接决定着该设备是否具有应有的功能及优良的技术性能. 液压同步系统按液体被控制方式可分为流量控制和容积控制两种. 流量控制同步系统(例如节流阀、调速阀、同步阀系统)具有结构简单、成本低等优点,但由于其存在节流功率损失,易受负载影响,只适合用在功率小且负载较均匀的场合;容积控制同步系统是利用封闭容积变化通过管道等组件向尺寸精度、结构相同的数个执行器(液压缸或液压

马达)输入等体积的液体(若执行器不同就按比例输入液体体积),使其产生同步运动. 相比于流量控制,容积控制具有同步精度高(同步精度可高于1%),效率高(没有节流和溢流损失),允许同步执行器有较大偏载等优点;但该系统存在结构复杂,同步元件加工精度高和价格昂贵等缺点^[1-5]. 在容积控制同步回路中,串联液压缸和同步缸等组成的同步回路只适合中小功率和中小负载系统,在大功率系统中尤其是在多缸同步系统(3缸和3缸以上)中一般选用同步马达控制液压同步回路^[6-10].

新型多马达是燕山大学闻德生教授研究的一种新型液压元件,是在一个马达中具有多个排量成一定比例的内马达和外马达,具有多个输入和输出油口,有关多马达的详细介绍请参考文献[11-15]. 本文在传统同步马达的基础上,结合现有的新型多马达理论,研究了新型多马达用作同步马达组成同步系统来控制多缸同步的理论. 为新型液压元件应用区域的扩

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(50975246)

作者简介: 闻德生(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 闻德生, wendesheng@ysu.edu.cn

展奠定了理论基础.

1 传统同步马达回路的分析

将结构形式、尺寸、精度、尤其是排量相同、容积效率较高且相等的马达两个或两个以上连接,控制液压执行器如液压缸的同步运行,这样的马达为同步马达. 图 1 是典型的采用同步马达的双缸同步系统,本回路用两个同轴驱动的液压马达将两等量的液压油输入有效作用面积相同的缸 1 与缸 2 中,使其实现双向同步. 本回路可用于重负荷,大容量的大功率系统. 其中的单向阀和溢流阀组成的安全补油回路可在行程终点消除位置误差,调速阀可以实现同步回路的无级调速.

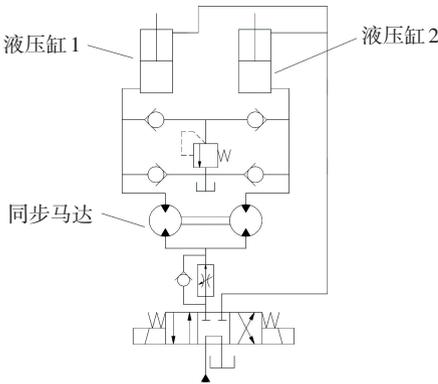


图 1 同步马达双缸同步回路

Fig.1 Synchronous motor double cylinder synchronous circuit

该类型的同步回路精度受多种因素影响,其中最重要的影响因素是同步马达的分流精度. 以双缸同步为例, 设马达入口流量为 Q , 理论上完全等分流量 $Q_1 = Q_2 = Q_3$, 实际上, 各流量之间均有差异, 而最大流量为 Q_{max} , 最小流量为 Q_{min} , 则同步马达的同步精度 δ 为

$$\delta = (Q_{max} - Q_{min}) / Q_{th} \times 100\%, \quad (1)$$

$$Q_{th} = Q_1 = Q_2 = 0.5Q. \quad (2)$$

式中: Q_{max} 为实际上最大流量, Q_{min} 为实际上最小分流, Q_{th} 理论上分流流量.

常见的同步马达有齿轮式同步马达和柱塞式同步马达, 在一般精度情况下, 采用齿轮式同步马达, 其同步精度为 1.5%~2.5%, 优点是体积小, 质量轻, 结构简单, 工艺性好, 对油液污染不敏感, 耐冲击, 惯性小, 成本低; 缺点是运动时有脉动现象, 低速稳定性差, 容积效率不高, 分口流量均匀性差. 当同步精度、压力要求很高时, 则选用柱塞式液压同步马达, 同步精度可达 0.4%~0.9%, 优点是流量脉动小, 速度广, 但加工精度高, 结构复杂, 价格昂贵.

由以上分析可知, 齿轮同步马达虽然成本低, 但容积效率差, 不适合用在高压和高精度同步系统中; 柱塞同步马达虽然精度高, 但价格昂贵, 尤其是在多缸同步时, 需要马达数量多, 成本高.

2 新型同步多马达回路的分析

2.1 单个多马达的同步系统研究

图 2 是新型同步多马达组成的双缸同步系统. 图 2 左是采用单作用的马达实现两个不同径缸的同步 (该系统图中省去了单向阀、溢流阀和调速阀, 下同). 单作用同步马达只有一个内马达和一个外马达, 设一个内马达单独工作时的输出排量为 q_1 , 一个外马达单独工作时的输出排量为 q_2 , 定义排量比例系数为

$$c = q_2 / q_1. \quad (3)$$

当内外马达分别给大小两个不同缸径的液压缸供油时, 大小液压缸活塞的有效面积分别为 S_1 、 S_2 , 且定义面积比 $D = S_2 / S_1$, 此时若 $D = c$ 成立, 则有

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{q_1 S_2}{q_2 S_1} = \frac{D}{c} = 1. \quad (4)$$

两液压缸速度相等, 实现了同步运动^[16]. 该回路利用内外马达的排量不同, 用内马达和外马达分别给两个不同口径的液压缸供油, 使两个不同径液压缸实现了同步运动, 而传统的同步马达大部分只能实现两个同径液压缸的同步, 拓展了同步回路的使用范围. 图 2 右是采用双作用的马达实现两个同径缸的同步. 双作用马达是在一个多马达中有两个内马达和两个外马达, 内马达和外马达的排量分别相同, 当内外马达之间相互组合, 即一个内马达和一个外马达向一个液压缸供油, 则进入两液压缸的流量相等, 两个等径液压缸同步.

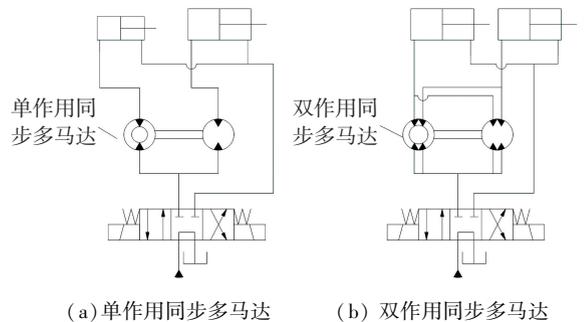


图 2 新型同步多马达双缸同步回路

Fig.2 New synchronous multi-motor double cylinder synchronous circuit

图 3 是新型同步多马达组成的三缸同步系统. 当双作用同步多马达内外马达的排量比例系数 $c = q_2 / q_1 = 2$ 时, 如图 3 左, 此时两个内马达的排量之和等于一个外马达的排量, 两个内马达向一个液压缸供油, 该同步马达就可以同时驱动 3 个同径液压缸的同步. 当某一个液压缸承受的负载较小 (较大) 且为恒负载时, 如图 3 中 (图 3 右), 就可以使 $c > 2$ ($c < 2$), 这样两个内马达的排量就 $<$ ($>$) 一个外

马达的排量,同时选择小径(大径)液压缸,使有效面积减小(增大),就可以实现 3 个不同径液压缸的

同步,并且负载压力也大致相等,减少了偏载对同步精度的影响。

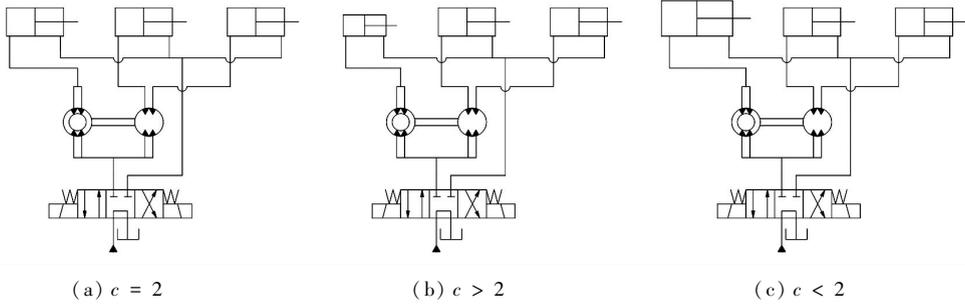


图 3 新型同步多马达三缸同步回路

Fig.3 New synchronous multi-motor three cylinder synchronous circuit

图 4 是新型同步多马达组成的四缸同步系统.当双作用同步马达的 4 个马达分别接液压缸,并且大小液压缸的有效面积比等于内外马达的排量比例系数,就可以实现 4 个不同径液压缸的同步.和三缸同步相同,当大小液压缸负载不同且为恒负载时,就可以调节排量比例系数以达到使负载压力相同的目的.当三作用同步马达的排量比例系数满足 $c = 3$ 时,就可以使 3 个内马达向一个液压缸供油,3 个外马达分别向 3 个液压缸供油,就可以实现 4 个同径液压缸的同步,这里不再多加讨论。

达要比加工两个少作用数的多马达成本还要高,所以有必要对少作用数同步多马达并联的同步系统进行研究,这里以两个单作用和双作用多马达并联的同步系统为例进行研究.图 5 是两个单作用的多马达并联的同步系统,两个完全相同的多马达同轴连接,两个内马达共同驱动一个液压缸,当同步马达的排量比例系数满足 $c = 2$ 时,可以实现 3 个同径缸的同步.当两个内马达出口接油箱时,该系统为两缸同步系统。

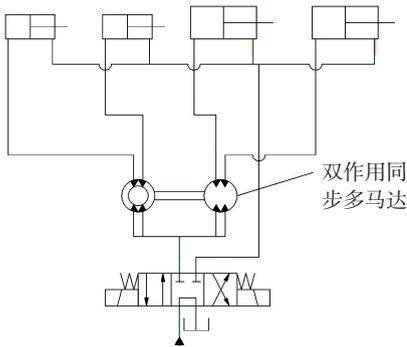


图 4 新型同步多马达四缸同步回路

Fig.4 New synchronous multi-motor four cylinder synchronous circuit

表 1 所示是单个多马达作用数和所能驱动的同径缸与不同径缸最大数之间的对应关系。

表 1 同步多马达驱动液压缸的最大数量

Tab.1 Maximum number of hydraulic cylinders driven by synchronous multi-motor

作用数	同径液压缸同步最大数	不同径液压缸同步最大数
单作用	1	2
双作用	3	4
三作用	4	6
四作用	6	8
n (奇)	$(3n - 1)/2$	$2n$
n (偶)	$3n/2$	$2n$

2.2 两个多马达并联的同步系统研究

随着多马达作用数的增多,加工难度必将越来越大,成本也越来越高,有时加工一个多作用的多马

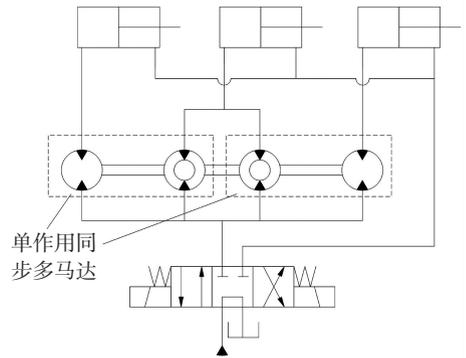


图 5 单作用同步多马达并联同步回路

Fig.5 Single acting synchronous multi-motor parallel synchronous circuit

图 6 是两个双作用的多马达并联的同步系统,当 $c = 2$ 时,该回路最多可以驱动 6 个同径液压缸.表 2 是两个多马达并联能实现的最多的同径缸同步的数目与马达作用数的关系。

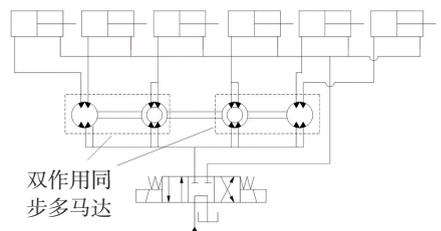


图 6 双作用同步多马达并联同步回路

Fig.6 Double acting synchronous multi-motor parallel synchronous circuit

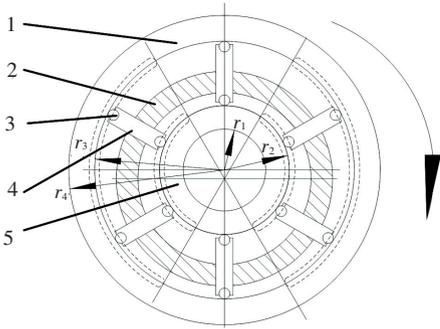
表 2 并联同步多马达能驱动同径液压缸的最大数量

Tab.2 Maximum number of the same diameter hydraulic cylinder driven by parallel synchronous multi-motor

作用数	单作用	双作用	三作用	四作用	n
同径液压缸同步最大数	3	6	9	12	$3n$

3 新型同步多马达的容积效率分析

同步回路的同步精度主要取决于多马达的容积效率,所以有必要对影响多马达容积效率的因素进行分析.下面以单作用双定子多马达为例进行分析,图 7 是单作用双定子多马达的结构原理图,转子和外定子组成外马达,转子和内定子组成内马达,当用作同步马达时,不考虑多马达本身的机械效率,则在负载压力相同的情况下,各密闭容腔的压力相等,内外马达之间没有油液泄漏,影响外马达容积效率的因素只有外马达和外定子之间的端面泄漏,影响内马达容积效率的因素只有内马达和内定子之间的端面泄漏.



1—外定子;2—转子;3—滚柱;4—连杆;5—内定子

图 7 单作用双定子马达原理简图

Fig.7 Schematic diagram of single acting double stator motor

双定子多马达与一个轴带多个同步马达实现同步不同,多个马达为互相独立的个体,每个马达中的零件加工精度、泄漏缝隙大小不会完全相同,因此泄漏量无法保证相同.双定子多马达在结构原理上为

表 3 液压系统主要元件参数

Tab.3 Main component parameters of hydraulic system

双作用多马达理论排量/(mL · r ⁻¹)		液压泵供给流量/(mL · r ⁻¹)	电机转速/(L · min ⁻¹)	液压缸尺寸/mm		
内马达	外马达			活塞直径	活塞杆直径	最大行程
8	16	40	980	50	28	400

当换向阀换向时,3 个液压缸同时动作,调节每个马达出口旁的调速阀,使 3 个液压缸在空载下实现精确同步.然后让其中一个液压缸(液压缸 1)受的负载逐渐增大,用流量计测量进入每个液压缸的流量,得到的实验数据如表 4 所示.

一个马达,所以同一个零部件加工精度相同,同一个运动副间隙相同,同一个摩擦副上密封环的尺寸及精度相同.因为内外马达的泄漏量与内外定子密封环的线性长度相关,而密封环的线性长度又与内外马达的直径有关,内外马达的直径又决定了内外泵的排量大小.设一个内马达单独工作时的排量为 q_1 ,一个外马达单独工作时的输出排量为 q_2 ,定义排量比例系数 $c = q_2 / q_1$.由于 $q_2 = cq_1$,因此系统工作时,可以得出内马达的泄漏量 q_{v1} 和外马达的泄漏量 q_{v2} 之间满足关系

$$q_{v2} = cq_{v1}, \tag{5}$$

则内外马达容积效率相同.

如图,内马达与内定子之间的泄漏量为

$$q_{v1} = \frac{\pi\delta^3}{12\mu c_e} \cdot \frac{p_1}{\ln(r_1/r_2)}, \tag{6}$$

外马达与外定子之间的泄漏量为

$$q_{v2} = \frac{2\pi\delta^3}{12\mu c_e} \frac{p_1}{\ln(r_3/r_4)}. \tag{7}$$

式中: r_1 为内定子泄漏通道半径, r_2 为内定子外表面半径, r_3 为外定子内表面半径, r_4 为外定子泄漏通道半径, δ 为端面间隙, μ 为油液的动力黏性系数, c_e 为修正系数, p_1 为负载工作压力.

所以内外马达泄漏流量比值为

$$\frac{q_{v2}}{q_{v1}} = \frac{\ln(r_1/r_2)}{\ln(r_3/r_4)} = K, \tag{8}$$

即当 $K = c$ 时,有 $q_{v2} = cq_{v1}$ 成立,此时内外马达容积效率相同,理论上实现了在任何负载压力下,都能实现液压缸的绝对同步.

4 实验

为了更好地验证新型多马达驱动多缸同步的同步性能,用已加工出的双作用双定子液压多马达搭建了 3 个等径液压缸同步回路,实验系统图如图 3(a) 左所示.试验中各主要元件的参数如表 3 所示.

表 4 实验数据

Tab.4 Experimental data

缸 1 与其余两缸负载压力差/MPa	流量/(L · min ⁻¹)		
	液压缸 1	液压缸 2	液压缸 3
0	12.88	12.88	12.88
2	12.70	12.85	12.85
4	12.50	12.83	12.82

流量对同步多马达的同步精度有很大的影响, 因此在本实验中采用测量精度为 0.5 级的高精度流量计, 减少测量误差。由实验数据可知, 当液压缸 1 与其余两个液压缸负载压力相同时, 进入 3 个液压缸的流量完全相同; 当液压缸 1 的负载压力逐渐增大时, 进入液压缸的流量有一定的减少, 这是因为马达的泄漏量增多造成的, 但仍在许可的同步精度范围内, 同步精度高(1.0%~1.7%)。由此可知, 新型液压多马达完全可以实现传统同步马达的功能。

5 结 论

1) 新型同步多马达在原理功能上完全可以代替传统的同步马达, 并且用一个或两个多马达就可以实现多个以上液压缸的同步, 节省了马达数量, 节约了成本和装机容量。

2) 新型多马达可以实现不同直径缸的同步, 当液压缸承受的负载不同时, 可以通过改变内外马达的排量比例系数来改变液压缸的有效面积, 从而使每个缸的负载压力相同, 减少了偏载引起的同步误差。

3) 通过合理设计多马达的结构尺寸, 就可以实现在任何负载压力下每个马达的容积效率相同, 从而理论上使同步回路在任何压力下都能有很好的同步精度。

参 考 文 献

- [1] 张绍九. 液压同步回路 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 5-6, 97-121.
ZHANG Shaojiu. Hydraulic synchronous circuit [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 5-6, 97-121.
- [2] 李壮云. 液压系统与元件 [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 299-301.
LI Zhuangyun. Hydraulic systems and components [M]. Third Edition. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011: 299-301.
- [3] 赵月静, 宁辰校. 液压实用回路 360 例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 92-117.
ZHAO Yuejing, NING Chenxiao. 360 cases of hydraulic practical circuit [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 92-117.
- [4] WEN Peng, LU Tawei. Decoupling control of a twin rotor MIMO system using robust deadbeat control technique [J]. IET Control Theory & Applications, 2008, 2(11): 999-1007. DOI: 10.1049/iet-cta: 20070335.
- [5] CHIU G, TOMIZUKA M. Contouring control of machine tool feed drive systems; a task coordinate frame approach [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 130-139. DOI: 10.1109/87.896754.
- [6] 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. DOI: 10.1115/1.2896515.

- [7] 陈德国, 李慧忠, 柏峰, 等. 多流液压同步马达应用研究 [J]. 机床与液压, 2010, 38(8): 55-56. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2010.08.020.
CHEN Deguo, LI Huizhong, BAI Feng, et al. Research on multi flow hydraulic synchronous motor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(8): 55-56.
- [8] NING Chenxiao, ZHANG Xushe. Study of the hydraulic synchronous circuit and synchronous control of the hydraulic hoist [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 2487-2490. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.2487.
- [9] 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. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.422.167.
- [10] CHEN Chengyi, LIU Liquan, 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. DOI: 10.1016/j.conengprac.2007.08.005.
- [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, 刘巧燕, 刘忠讯, 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. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201504016.
WEN Desheng, LIU Shijun, 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. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201504016.
- [13] 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.
- [14] WEN Desheng, WANG Zhili, GAO Jun, 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. DOI: 10.1631/jzus. A1000405.
- [15] WEN Desheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system [J]. Science China, 2011, 54(4): 992-997. DOI: 10.1007/s11431-011-4321-4.
- [16] 杨杰. 多泵多速马达典型方向控制回路的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
YANG Jie. Research on typical directional control circuits in multi-pump and multi-speed motor [D]. Qinhuangdao: Yanshan university, 2014.

(编辑 杨 波)