

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.09.012

液控式泵送系统的运行规律与时序分析^{*}

石 峰¹, 王 琛², 丁海港², 王福鑫¹, 赵延斌²

(1. 徐州徐工施维英机械有限公司, 江苏 徐州 221000; 2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 由于缺乏针对混凝土泵车泵送系统的泵送和摆动环节进行联合分析, 导致泵送系统的泵送单元与摆动单元之间换向逻辑不明确, 为此, 对泵送系统的动态特性与运行规律进行了研究。首先, 阐明了液控式混凝土泵送系统的结构及工作原理, 根据实测数据建立了泵送系统的高精度仿真模型, 并对该仿真模型进行了验证; 然后, 基于仿真模型分别对泵送单元与摆动单元的运行规律开展了研究; 最后, 对泵送系统的换向时序进行了详细分析, 绘制了信号阀-摆阀-摆缸-主阀-主缸的换向时序图。研究结果表明: 混凝土泵车泵送系统的泵送和摆动两动作存在有序性、耦合性和循环性; 该结果揭示了泵送系统的运行规律, 可为混凝土泵送系统的设计和结构优化提供技术参考。

关键词: 液压传动装置; 液控式泵送系统; 换向逻辑; 摆动单元; 换向时序图; 动态特性

中图分类号: TH137.9; TU646

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)09-1262-07

Operation law and time sequence analysis of hydraulic control pumping systems

SHI Feng¹, WANG Chen², DING Hai-gang², WANG Fu-xin¹, ZHAO Yan-bin²

(1. Xuzhou XCMG SCHWING Machinery Co., Ltd., Xuzhou 221000, China;

2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Due to the lack of joint analysis of the pumping and swinging links of the pumping system of the concrete pump truck, the commutation logic between the pumping unit and the swinging unit of the pumping system was still unclear. The dynamic characteristics and operation laws were studied. Firstly, the structure and working principle of the hydraulic control concrete pumping system were expounded. According to the measured data, a high-precision simulation model of the pumping system was established and verified. Then, based on the simulation model, the dynamic characteristics and operation law of pumping unit and swing unit were studied respectively. Finally, the coupling relationship between the pumping unit and the swing unit was analyzed, the commutation sequence of the pumping system was analyzed in detail, and the reversing sequence diagram of signal valve-swing valve-swing cylinder-main valve-master cylinder was drawn. The results show that the high-precision simulation model of the pumping system is established, the interaction mechanism between the pumping link and the swing link is clarified, and the sequential, coupling and cyclic relationship between the pumping and swing actions of the pumping system is revealed. It can provide technical reference for the design and structural optimization of concrete pumping system.

Key words: hydraulic transmission device; hydraulic control pumping system; commutation logic; swinging unit; reversing timesequence diagram; dynamic characteristics

0 引 言

混凝土泵车是实现混凝土快速输送与浇筑的专用

工程机械,在交通、能源、建筑、国防工程等领域得到了广泛应用。

泵送系统是混凝土泵车的核心,采用并列的输送

收稿日期:2022-02-14

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资助项目(2019XKQYMS37);中国矿大-徐工施维英技术研发项目(20210500524)

作者简介:石峰(1983-),男,江苏徐州人,硕士,高级工程师,主要从事泵送机械液压传动与控制方面的研究。E-mail:shicunt123@126.com

缸交替伸缩来输送混凝土,通过分配阀的摆动来实现两输送缸吸料、泵送功能的切换。泵送系统的换向时序是指主油缸换向,以及摆动油缸的换向顺序和换向间隔。

换向时序匹配程度影响泵送效率、系统冲击振动和易损件的寿命。在该领域已有不少学者的研究。陈国安等人^[1]、叶鑫等人^[2]提出了解决混凝土泵送机械换向压力冲击的最有效措施,是对主液压泵和换向阀进行综合控制,完成主液压泵排量调节时机和液压阀换向时机两者的协调。宋春雷^[3]从混凝土泵充盈率的角度出发,对泵送与摆动的不同换向时序进行了计算、分析和比较,并得出了结论,即分配阀与泵送系统同时换向的效果优于摆动系统先换向。李华^[4]、王佳茜^[5]提出了泵送效率、混凝土输送方量、混凝土理论输送方量等相关概念,并依据分配与泵送之间的逻辑关系,分析了影响混凝土泵送机械效率的各个因素。王术东^[6]、谷丰等人^[7]对S阀换向系统进行了建模仿真与动力学分析。FEYS D^[8,9]对混凝土流变特性进行了研究,得到了泵出口压力与混凝土黏度、流动时间、流量的关系曲线。胡任^[10]、安东亮^[11]、靖保平等人^[12]借助 AMESim 软件,对混凝土泵车摆动系统进行了仿真分析,并提出了符合泵送 C25 混凝土工况的系统负载加载方式。WU Wan-rong^[13]对换向过程中液压冲击现象产生的机理进行了理论分析。沈千里等人^[14]分析了液动力对混凝土泵摆动系统的影响。CAZZULANI G^[15]、SECRI-ERU E 等人^[16]搭建了混凝土泵送模拟实验台,并通过实验的方式,对数值模型计算压力的可靠性进行了验证。袁晓亮等人^[17]针对摆动系统,分析了抛物线型缓冲装置的缓冲特性以及减速机理,并提出了缓冲装置的设计方法。

在以上的研究中,虽然研究人员分别对泵送和摆动环节进行了单独研究,但缺乏针对两环节的联合分析,以及其相互作用机理方面的研究,导致目前泵送系统的动态特性与运行规律依然不明。

笔者以全液控开式混凝土泵送系统为研究对象,以仿真软件为工具,根据元件的实际结构参数搭建泵送系统的仿真模型,分析泵送系统的动态特性和运行规律,以期混凝土泵送系统的结构与参数优化提供技术参考。

1 泵送系统液压原理

某型号混凝土泵车^[18]的泵送系统液压原理图,如图1所示。

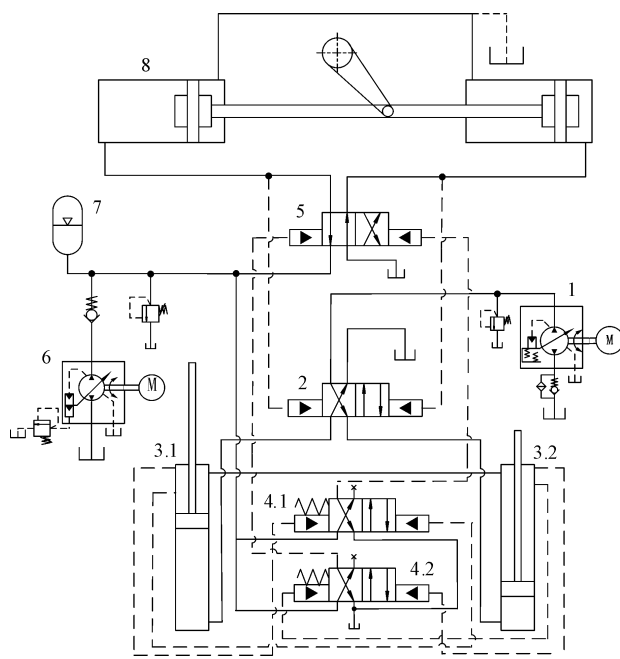


图1 泵送系统液压原理图

1—主泵;2—主阀;3—主油缸;4—信号阀;5—摆阀;
6—摆动泵;7—蓄能器;8—摆缸

该系统采用全液压驱动的换向方式,可实现正反泵、摆缸点动等功能。

图1中,泵送系统包括泵送单元和摆动单元,两个单元协调工作,以实现混凝土的输送。其中,主泵1是恒功率变量泵,摆动泵6是恒压变量泵。

泵送系统的具体工作原理如下:

在泵的工作过程中,来自主泵1的液压油经主阀2,作用于主油缸3.1的无杆腔,主缸3.1伸出泵料,主缸3.2缩回吸料。当主缸3.1活塞经过顶端压力检测点时,在信号阀4.1两腔产生差压信号,使之换向;

摆动泵6的高压油经信号阀4.1,作用于摆阀5左右控制腔,使之换向,进而驱动摆缸8换向;摆缸8两腔的油液作用于主阀5左右控制腔,使之换向,进而使主缸3.1和3.2换向,2个主缸推料、吸料的角色互换,完成一个泵送工作循环。

由此可见,该泵送系统利用液控信号可实现信号阀、摆阀、摆缸、主阀、主缸依次延时换向。

2 泵送系统建模与验证

2.1 泵送系统建模

根据泵送系统的液压原理、各元件实物结构与物理参数,笔者基于 AMESim 软件建立泵送系统仿真模型,如图2所示。

泵送系统仿真模型的主要参数如表1所示。

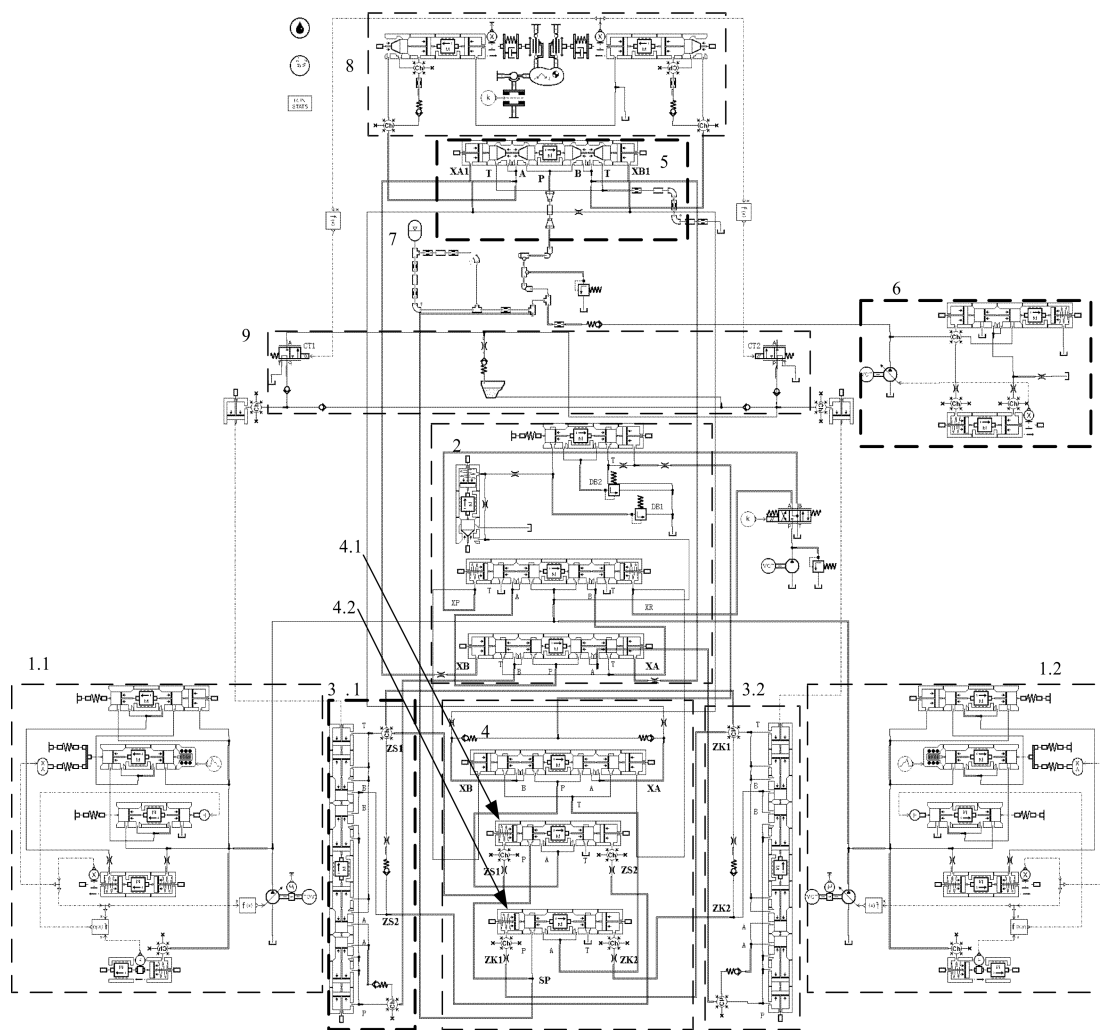


图 2 泵送系统仿真模型

1—主泵;2—主阀;3—主油缸;4—信号阀;5—摆阀;6—摆动泵;7—蓄能器;8—摆缸和摇臂;9—模拟负载

表 1 泵送系统主要元件参数表

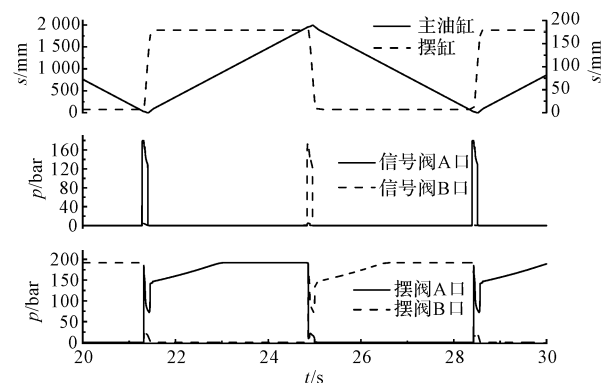
元件参数		数值
主泵	最大排量/($\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$)	190
	切断压力/bar	350
	分动箱输出轴转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 200
	最大排量/($\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$)	28
摆动泵	设定压力/bar	190
	分动箱输出轴转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 200
	行程/mm	2 000
主油缸	活塞直径/mm	120
	活塞杆直径/mm	80
	行程/mm	2 000
	换向检测点位置/mm	1 940
摆动油缸	活塞直径/mm	100
	活塞杆直径/mm	70
	行程/mm	180
蓄能器	容积/L	10
	预充压力/bar	100

2.2 模型验证

泵送系统模型的仿真曲线与实测曲线,如图 3 所示。

由图 3 可知:仿真曲线与实测曲线具有相同的变化规律,且幅值一致性达 90% 以上。两者的偏差主要来源于管路油液温度、液动力、油液弹性模量等因素的影响,这些因素动态时变,且不便检测,造成模型和实际情况有一定的差异,但并不影响该模型的总体精度。

接下来,笔者将基于该仿真模型,研究泵送系统的运行规律,以及泵送与摆动之间的耦合关系。



(a) 仿真曲线

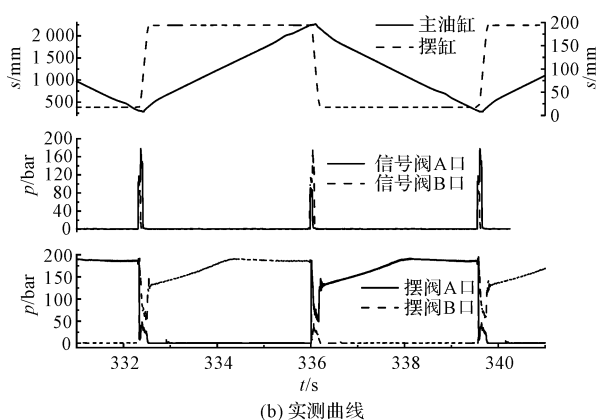


图3 泵送系统运行曲线

3 泵送单元运行规律

基于上述仿真模型,笔者开展泵送单元运行规律的研究。

在泵送循环中,左、右主油缸的运行曲线和各腔的压力曲线,如图4所示。

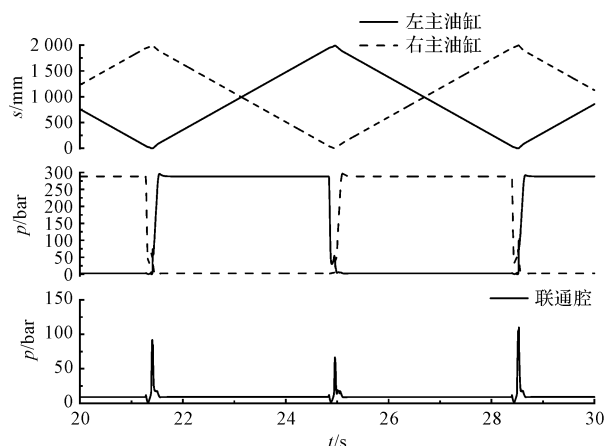


图4 主油缸大腔压力和连通腔压力

由图4可见:

左、右主油缸交替伸出缩回,行程相等;推进油缸的无杆腔压力(约为288 bar)远大于吸料油缸的无杆腔压力(回油背压约为2.5 bar),且连通腔压力也较小(约为9 bar);在主油缸换向时,连通腔出现较大的压力冲击(约为126 bar~142 bar)。

在泵送循环中,主泵出口压力、流量曲线和主溢流阀的流量曲线,如图5所示。

由图5可见:在主油缸推进过程中,主泵处于恒功率状态,其出口压力和流量保持恒定,流量为226 L/min,压力为290 bar;在主油缸换向时,主阀上溢流阀打开,瞬时溢流量达到1 200 L/min,主泵出口压力迅速降低。

泵送循环中信号阀的动态特性,如图6所示。

由图6可见:在主油缸越过检测点后,信号阀一腔

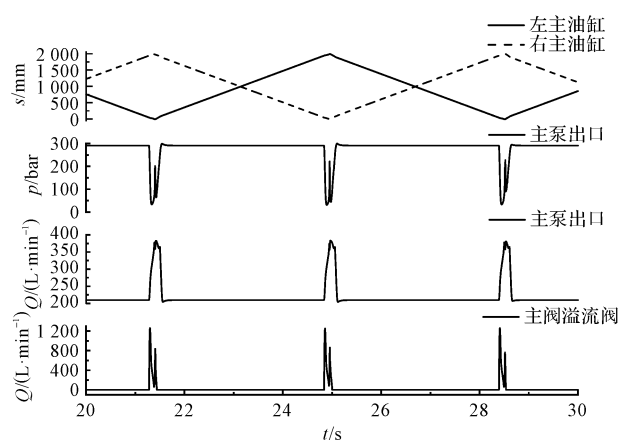


图5 主泵出口压力和流量曲线

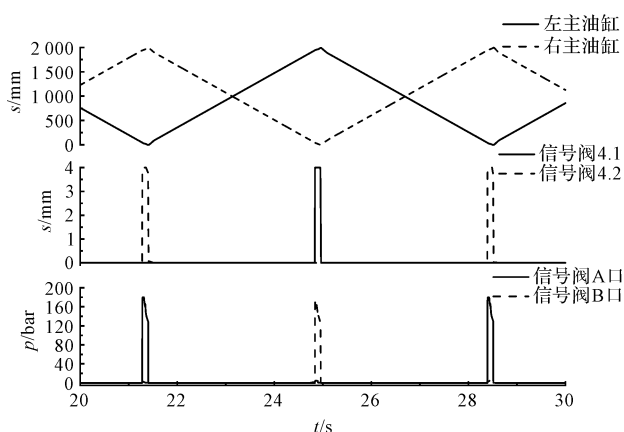


图6 信号阀动态特性曲线

通高压,另一腔通低压,信号阀迅速打开,并维持一段时间,待主缸换向后,信号阀迅速关闭。

泵送循环中,主阀位移和控制腔压力曲线如图7所示。

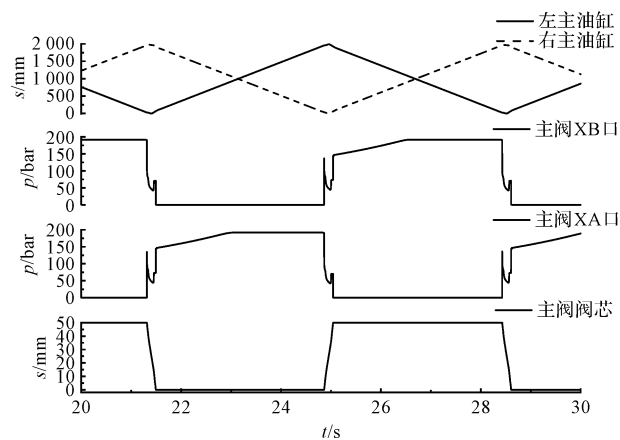


图7 主阀位移和左右控制腔压力曲线

由图7可见:当主油缸活塞越过检测点后,主阀开始换向,直到其阀芯移动一段距离后,主缸开始换向。

主阀的换向时间决定了主缸换向快慢,主阀换向越快,则主缸换向时间越提前。此处,主阀换向时间约为180 ms,主缸换向约120 ms,在主阀换向过程中,主缸已经开始反向移动。

4 摆动单元运行规律

基于上述仿真模型,笔者开展摆动单元运行规律的研究。

泵送循环中,摆阀位移和控制腔压力曲线如图 8 所示。

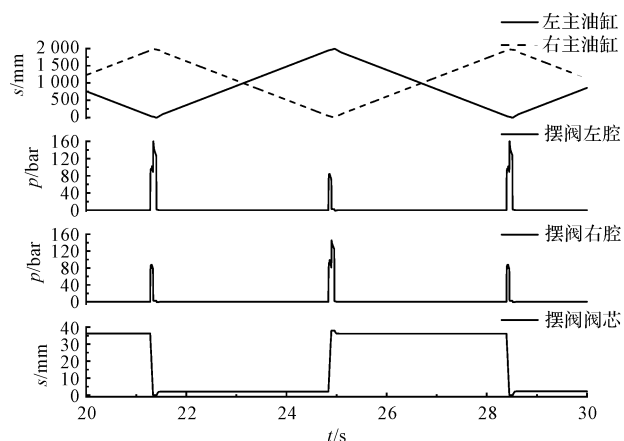


图 8 摆阀位移及其控制腔压力曲线

由图 8 可见:信号阀 4.1 和 4.2 的交替启闭,会控制摆阀两端控制腔压力,推动摆阀换向;

通过摆阀位移曲线可知,这种换向时间较短,以 ms 为单位精确表示,为 63 ms。

泵送循环中,摆缸位移和压力曲线如图 9 所示。

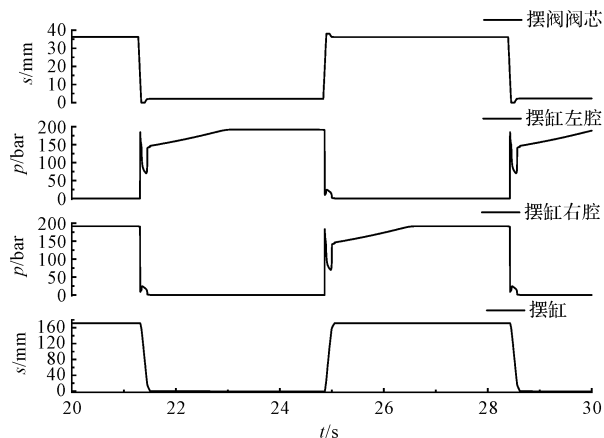


图 9 摆缸位移和压力曲线

图 9 中:在摆阀换向时,摆缸两腔压力交替,且有一定的压力冲击,压力冲击值为 180 bar,待摆缸摆动到位后,摆缸压力上升并升至 190 bar;

摆缸换向时间为 196 ms,其中,缓冲时间占 50 ms,占总时间的 25.5%。

在摆动泵的摆动过程中,摆动泵和蓄能器出口压力和流量曲线,如图 10 所示。

图 10 中:蓄能器的出口压力与摆动泵的出口压力基本一致。

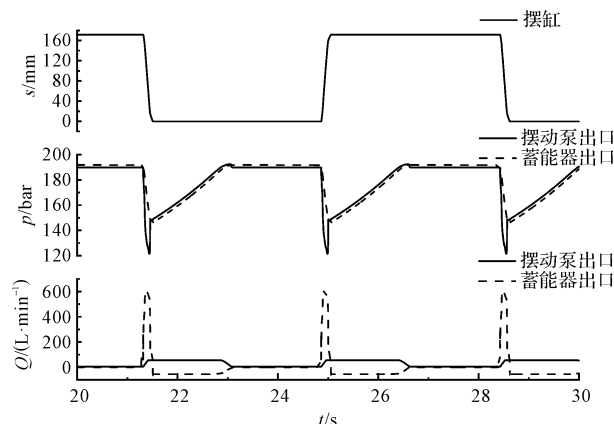
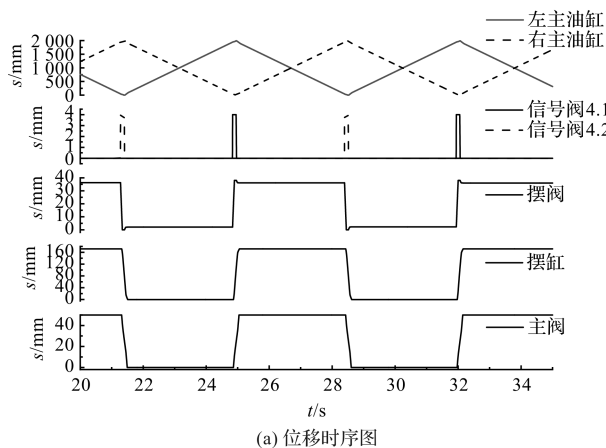


图 10 摆动泵和蓄能器出口压力和流量曲线

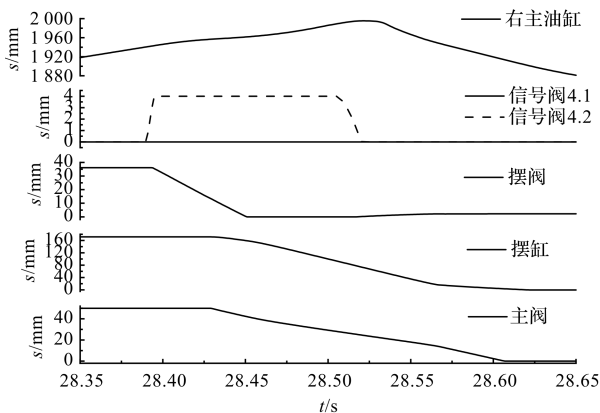
在摆缸快速摆动过程中,蓄能器提供主要能量,蓄能器快速向外放油,流量达到 600 L/min,在蓄能器的高压大流量冲击下摆缸快速换向;待摆缸换向结束后,摆动泵开始向蓄能器中充液,压力达到 190 bar 时停止充液,摆动泵和蓄能器处于待命状态,此时摆动泵的出口流量减小至 4.7 L/min,以满足系统的内泄漏。

5 泵送时序分析

主缸、信号阀、摆阀、摆缸、主阀的换向时序如图 11 所示。



(a) 位移时序图



(b) 局部放大

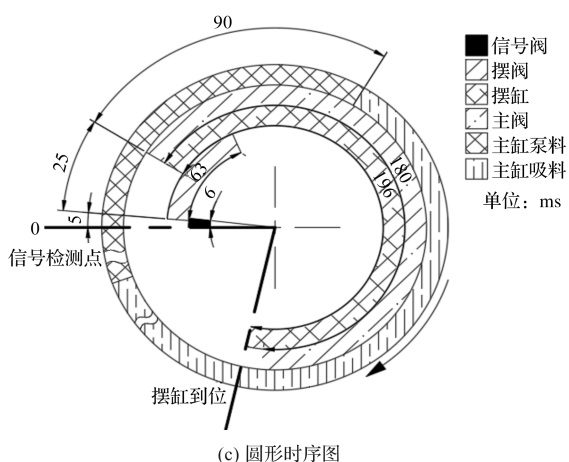


图 11 泵送系统换向时序

泵送系统换向基本规律如下:

(1) 泵送系统具有顺序性。主缸过检测点后,利用液控信号实现了信号阀、摆阀、摆缸、主阀、主缸依次延时换向。当主油缸运动到检测口时,信号阀在检测口两端压差的作用下快速完全打开,信号阀打开时间为 6 ms;信号阀打开后,摆阀开始运动,并保持全开状态,摆阀换向时间为 63 ms;摆阀换向后,摆缸和主阀阀芯同时开始动作,摆缸换向时间约为 196 ms,主阀换向时间约为 180 ms,当主阀换向至另一侧阀口开启时,主油缸开始换向,信号阀迅速关闭,完成一个泵送循环;

(2) 泵送回路和摆动回路具有耦合性。主缸换向和摆缸换向相互影响,换向信号相互调节,从而形成了泵送循环;

(3) 该泵送系统采用液控换向,利用液控信号实现信号阀、摆阀、主阀、摆缸、主缸依次换向,从而构成一个泵送循环。局部放大图显示,摆阀、摆缸、主阀、主缸相对于信号阀换向的延迟时间分别为 5 ms、30 ms、30 ms、120 ms;

(4) 由于主阀相对于信号阀有较大滞后,当推料主缸越过检测点后,主阀并未换向,导致主缸不能及时换向,而当主缸换向时其已向前滑行了一段距离 (44 mm);

(5) 从换向时序来看,在主缸活塞越过检测点向前推进过程中,摆缸已经换向,即分配阀已经开始切换;而当主油缸完成换向并运行一段时间后,摆缸才完全摆到位,分配阀才完全切换到另一腔,这会使得推进缸里的混凝土泄漏到料斗。

6 结束语

由于缺乏针对泵送和摆动环节进行的联合分析,导致泵送系统的动态特性与运行规律目前依然不明,

为此,笔者以全液控开式混凝土泵送系统为研究对象,以仿真软件为工具,根据元件的实际结构参数,基于 AMESim 软件,搭建了全液控开式泵送系统的高精度仿真模型,分析了泵送系统的动态特性和运行规律,以期混凝土泵送系统的结构与参数优化提供技术参考。

研究结果表明:

(1) 测试结果与仿真结果吻合度在 90% 以上,证明泵送系统高精度仿真模型可以较为精确地模拟真实的泵送过程;

(2) 泵送系统具有顺序性。利用液控信号实现各元件依次换向,摆阀、摆缸、主阀、主缸相对于信号阀换向的延迟时间分别为 5 ms、30 ms、30 ms、120 ms;绘制了泵送系统的换向时序图,为优化换向时序提供了依据;

(3) 泵送回路和摆动回路具有耦合性和循环性:主缸换向和摆缸换向相互影响,换向信号相互调节,从而形成了泵送循环。

后续的研究工作中,笔者将基于上述泵送系统高精度仿真模型,对泵送系统的换向时序进行优化匹配,以提高泵送系统的泵送效率。

参考文献 (References):

- [1] 陈国安,范天锦,曹斌祥. 混凝土泵送机械液压冲击行为与控制[J]. 工程机械, 2008, 39(2): 10-15.
- [2] 叶 鑫,胡军科,韩 强. 混凝土泵送系统液压冲击控制方法研究[J]. 合肥工业大学学报, 2014, 37(7): 790-793, 825.
- [3] 宋春雷. 拖式混凝土泵泵送系统性能分析与实验研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2005.
- [4] 李华. 混凝土泵送机械泵送油缸行程优化与研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2014.
- [5] 王佳茜. 混凝土泵送机械泵送效率分析与试验研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2015.
- [6] 王术冬. 混凝土泵 S 管换向系统动力学分析与仿真[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2004.
- [7] 谷 丰,刘会勇,赵 青,等. 混凝土泵 S 管换向系统建模与仿真研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(3): 138-140.
- [8] FEYS D, DE SCHUTTER G, VERHOEVEN R. Parameters influencing pressure during pumping of self-compacting concrete [J]. *Materials and structures*, 2013, 46(4): 533-555.
- [9] FEYS D, KHAYAT K H, KHATIB R. How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 66: 38-46.
- [10] 胡 任,黄 勃,李 硕. 基于 AMESim 的混凝土泵摆动系统的仿真分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(9):

- 169-172.
- [11] 安东亮,沈千里,孙 风,等. 基于 AMESim 的混凝土泵摆动液压系统仿真研究[J]. 建筑机械,2013(15):74-76,81.
- [12] 靖保平. 基于 AMESim 的混凝土泵车摆动系统动态特性研究[D]. 武汉:武汉科技大学机械自动化学院,2015.
- [13] WU Wan-rong, MAO Zhen-wen. Study of control method based on hydromechanics for hydraulic impact of open hydraulic system in concrete pump [J]. **Advanced Materials Research**, 2014, 1(14):908.
- [14] 沈千里,邱艳峰,王普长,等. 液动力对混凝土泵摆动系统影响的分析研究[J]. 设计研究,2016(7):20-23.
- [15] CAZZULANI G, GHIELMETTI C, GIBERTI H, et al. Overview on the truck mounted concrete boom pump: a dynamic numerical model for active control logic definition [J]. **IFAC Proceedings Volumes**, 2011, 44(1):4232-4237.
- [16] SECRIERU E, MOHAMED W, FATAEI S, et al. Assessment and prediction of concrete flow and pumping pressure in pipeline [J]. **Cement and Concrete Composites**, 2019, 12:107-109.
- [17] 袁晓亮,胡军科,周创辉. 混凝土泵 S 管分配阀驱动油缸缓冲特性研究[J]. 河北农业大学学报,2012,35(2):125-129.
- [18] 陈 玲. 混凝土泵的自适应节能控制系统开发与试验研究[J]. 机电工程技术,2021,50(4):138-141.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

石 峰,王 琛,丁海港,等. 液控式泵送系统的运行规律与时序分析[J]. 机电工程,2022,39(9):1262-1268.

SHI Feng, WANG Chen, DING Hai-gang, et al. Operation law and time sequence analysis of hydraulic control pumping systems[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(9):1262-1268.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1226 页)

参考文献(References):

- [1] 高永强. 轴向柱塞液压马达效率的分析[J]. 起重运输机械,2008(7):51-54.
- [2] 黄新辉,宋 磊,沈文轩. 基于 LabVIEW 与 LabShop 的斜轴式马达噪声测试系统[J]. 机床与液压,2020,48(16):27-31.
- [3] 戎瑞亚,章 海,刘全良. 船用外行星摆线针轮液压马达的结构优化设计[J]. 现代制造工程,2011(3):116-119.
- [4] 郭加利. 径向柱塞式液压马达配油机构的流场特性分析[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2013.
- [5] ZHOU Zhong-ning, GU Yong-Xia, Li Na-ma. Study on structural optimization and wear of slipper pair in axial piston hydraulic motor[J]. **Advanced Materials Research**, 2012, 1674(482-484):1495-1499.
- [6] QIAO Wei-zhi, WANG Zhen-yu, GAO Xiang, et al. Design simulation and structure optimization of plunger assembly closing[J]. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021, 2029(1):012012.
- [7] SHI Jin-yan, YANG Wen, XIE Yong-chao. Optimization Design of Valve Plate for Axial Piston Motor of Hydraulic Excavator [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Information Technologies and Electrical. Xian: ACM International Conference Proceeding Series, 2020:220-224.
- [8] SHI Jin-yan. Forces analysis of piston couple in swash-plate axial piston motor [J]. **Advanced Materials Research**, 2013, 834-836:1319-1322.
- [9] GAO You-shan, HUANG Wei-nan, QUAN Long, et al. The distributed parameter model of hydraulic axial piston motor and its application in hydraulic excavator swing system[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, 2017, 231(5):395-413.
- [10] 江 浩. 一种锥形柱塞结构的斜轴式定量马达的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学流体控制及自动化系,2017.
- [11] 申文强,聂松林,尹方龙,等. 一种新型低速大扭矩水液压马达结构设计及仿真分析[J]. 液压与气动,2019(6):17-21.
- [12] 刘等卓. 基于 VPT 的四配流窗口轴向柱塞液压马达仿真分析[D]. 太原:太原科技大学机械工程学院,2018.
- [13] 张 阳. 钻机机电液一体化系统性能优化关键技术研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2020.
- [14] 吴永源. 斜轴式轴向柱塞马达的振动传递与噪声辐射研究[D]. 福州:福州大学机械工程及自动化学院,2018.
- [15] 姚广山,徐建江. 基于壳体的液压轴向变量柱塞泵轻量化研究[J]. 液压气动与密封,2018,38(8):39-42.
- [16] 何存兴. 液压元件[M]. 北京:机械工业出版社,1988.
- [17] 徐晓瑜,郭永进. 电动低速汽车车身结构刚度约束拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究,2010,26(2):110-113.
- [18] 郑飞杰,叶荣冠,高 浩. 自适应尺寸纸箱切割拆痕包装机的设计[J]. 包装与食品机械,2022(1):36-40.
- [19] 陈岩松,冯志华,张健康. 旋转式吹瓶机机架结构优化[J]. 包装与食品机械,2020(6):36-40.
- [20] 李正祥. 柱塞闭死容积对柱塞泵出口流量脉动的研究[J]. 液压气动与密封,2022(2):16-19,15.

[编辑:雷 敏]