

超高压海水泵配流阀动态特性仿真研究

韦春辉¹ 冀宏^{1,2} 张培珍¹ 刘世琦¹ 朱奕¹

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃省液压气动工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对超高压海水泵配流阀运动滞后所引起海水泵容积效率降低的问题。分析了导致配流阀滞后的主要原因,建立了数学模型,运用 AEMSim 软件进行仿真。研究结果表明:随着余隙容积的增大,配流阀开启滞后现象越明显。随着吸液阀阀芯质量增加,对阀芯开启滞后影响较小,关闭滞后影响较大。在设计超高压海水泵时,要尽量减小柱塞腔的余隙容积和减小配流阀阀芯质量。

关键词: 超高压; 海水泵; 配流阀; 动态特性

中图分类号: TH137; TH322 文献标志码: A 文章编号: 1008-0813(2020)03-0010-03

Dynamic Characteristics of Distributing Valves in Super-high Pressure Seawater Pump

WEI Chun-hui¹, JI Hong^{1,2}, ZHANG Pei-zhen¹, LIU Shi-qi¹, ZHU Yi¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
(2. Research Center for Hydraulics and Pneumatics of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Focus on the problem that the volume efficiency of the super-high seawater pump decreases due to the lag of the valve movement of super high pressure seawater pump. The main reasons leading to the lag of the valve are analyzed, and the mathematical model is established. The simulation is carried out by using AEMSim software. The results show that with the increase of clearance volume, the opening lag of distributing valves becomes more obvious. With the mass of the suction valve spool increases, the influence on the opening lag of the spool is small, and the closing lag has a greater influence. When designing the super-high pressure seawater pump, the clearance volume of the plunger cavity and the mass of the pool should be reduced as much as possible.

Key words: super-high pressure; seawater pump; distributing valves; dynamic characteristics

0 引言

水液压传动技术,以海水和淡水为工作介质,具有绿色环保、不燃、价格低廉、与环境相容等优点,在食品机械、消防、海水淡化和海洋装备等领域取得了广泛应用^[1-3]。海水泵是海水液压系统的关键动力元件,是整个海水液压系统的核心^[4]。由于阀的抗污染能力强,密封性较好,能保证较高的输出压力,因此在超高压海水泵中通常采用阀配流的方式^[5]。配流阀作为超高压海水泵的核心部件,高效性、同步性、可靠性是海水泵实现连续输出高压海水的必要条件。文献[6-8]对水液压柱塞泵配流阀的配流特性和动态特性做了大量研究。但是对超高压下海水泵配流阀动态特性未见相关研究内容。本文针对余隙容积对超高压海水泵配

流阀动态特性的影响进行仿真研究。

1 海水泵配流阀滞后原因分析

超高压海水泵配流阀设计主要考虑以下几点:

- (1) 配流阀能及时启闭,和柱塞的运动协调一致,响应速度快;
- (2) 配流阀工作平稳,没有振动,关闭时和阀座没有严重的撞击现象;
- (3) 根据海水介质的性质和深海工作环境,选择相应的材料,保证足够的强度、刚度和寿命;
- (4) 配流阀在关闭状态,应具有良好的密封性;
- (5) 结构简单、工艺性好。

超高压海水泵中配流阀的运动滞后,是指配流阀的开启和关闭与柱塞往复运动不一致。配流阀运动滞后的主要原因有两种,一是在结构上两个阀的设计参数不同,阀芯受力和机械限位不同,在转速过高或阀芯质量较大时,阀芯会带来一定的惯性力,造成运动的滞后;二是工作介质的可压缩性,在排液和吸液过程中的

收稿日期: 2018-08-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0304800)

作者简介: 韦春辉(1991-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要从事现代液压元件方面的科研工作。

柱塞腔的压力是一个渐变过程,柱塞腔压力的变化导致介质收缩或膨胀,无论是容积减小还是容积增大,都会引起配流阀动作的滞后^[9]。

2 配流阀数学模型

配流阀主要有锥阀、球阀、平板阀三种结构形式。球阀可以直接选用硬度高、耐腐蚀性好的陶瓷球作阀芯,与耐腐蚀合金相比,能较好地抵御高压水下海水介质的气蚀、流体侵蚀及腐蚀磨损,且结构简单^[10]。因此,本文所研究的超高压海水泵采用球配流结构。现将海水泵柱塞与吸液阀和排液阀的结构模型简化为图1所示。为了便于分析,作如下假设:

- (1) 满足流体连续性条件;
- (2) 阀芯的自重忽略不计;
- (3) 柱塞腔泄漏忽略不计。

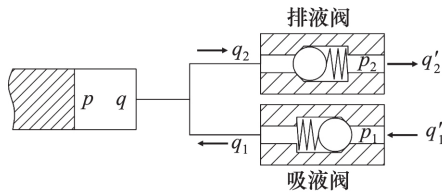


图1 配流阀简化模型

以柱塞腔容积最大(即行程最大)时的上死点作为柱塞运动的计算起点,那么柱塞的运动速度方程为:

$$v = R\omega \tan \gamma \sin \omega t \quad (1)$$

柱塞腔流量连续性方程为:

$$q_1 = q_2 + A \frac{dx}{dt} + \frac{V + AR_0 \tan \gamma (1 + \cos \omega t)}{E} \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

吸液阀流量连续性方程为:

$$q'_1 = q_1 + A_1 \frac{dy_1}{dt} \quad (3)$$

排液阀流量连续性方程为:

$$q_2 = q'_2 + A_2 \frac{dy_2}{dt} \quad (4)$$

吸液阀阀口流量方程为:

$$q_1 = \text{sign}(p_1 - p) C_d A'_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (|p_1 - p|)} \quad (5)$$

排液阀阀口流量方程为:

$$q'_2 = \text{sign}(p - p_2) C_d A'_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (|p - p_2|)} \quad (6)$$

吸液阀阀芯受力平衡方程为:

$$m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} = (p_1 - p) A_1 - k_1 (y_{10} + y_1) -$$

$$B \frac{dy_1}{dt} - 2C_d C_v A'_1 |p_1 - p| \cos \alpha_1 \quad (7)$$

排液阀阀芯受力平衡方程为:

$$m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} = (p - p_2) A_2 - k_2 (y_{20} + y_2) -$$

$$B \frac{dy_2}{dt} - 2C_d C_v A'_2 |p - p_2| \cos \alpha_2 \quad (8)$$

式中 R 为柱塞分布圆半径, m ; γ 为斜盘倾角, $^\circ$; ω 为斜盘旋转角速度, rad/s ; q_1 、 q_2 分别为吸液阀、排液阀流出流量, m^3/s ; A 为柱塞腔受力面积, m^2 ; V 为柱塞腔余隙容积, m^3 ; E 为海水体积弹性模量, Pa ; p 为柱塞腔压力, Pa ; A'_1 、 A'_2 分别为吸液阀、排液阀开启后有效过流面积, m^2 ; k_1 、 k_2 分别为吸液阀、排液阀弹簧刚度, N/m ; y_{10} 、 y_{20} 分别为吸液阀、排液阀弹簧预压缩量, m ; B 为阀芯粘性阻尼系数, $N/(m/s)$; C_v 为阀口流速系数; α_1 、 α_2 分别为吸液阀射流角, $^\circ$ 。

3 配流阀动态特性仿真分析

3.1 模型的建立

为了研究超高压海水泵配流阀的动态特性,根据上述配流阀数学模型,运用 AMESim 软件搭建了超高压海水泵单柱塞与配流阀的动态仿真模型,如图2所示。

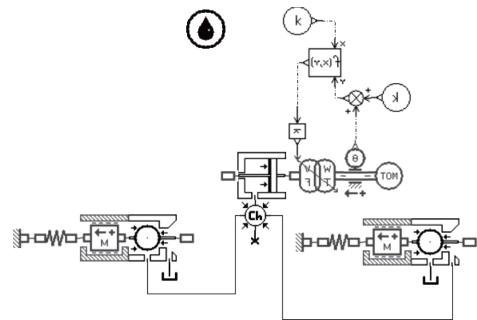


图2 配流阀 AMESim 动态仿真模型

表1 仿真模型主要参数

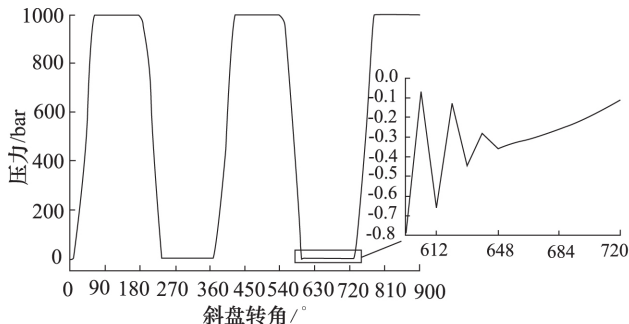
参数	吸液阀	排液阀
阀芯直径/m	9.5×10^{-3}	6.7×10^{-3}
阀座孔直径/m	6.2×10^{-3}	3.4×10^{-3}
阀芯质量/kg	1.29×10^{-3}	0.67×10^{-3}
弹簧刚度/ $N \cdot m^{-1}$	1.21×10^3	1.12×10^3
弹簧预压缩量/mm	1.5×10^{-3}	1.3×10^{-3}

3.2 配流阀滞后现象分析

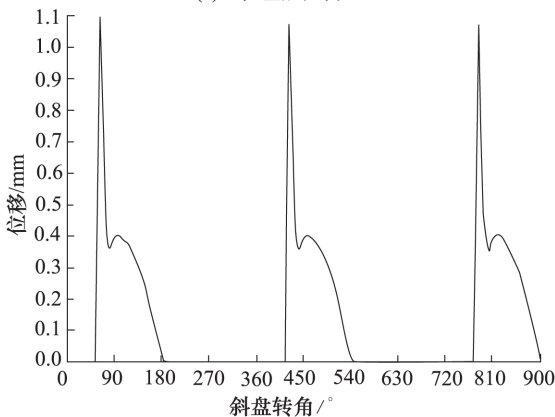
超高压海水泵入口压力为压载舱压力,出口压力

为深海环境压力,当压载舱压力为大气压,深海环境压力为 100 MPa 时,此时海水泵处于极限工况。

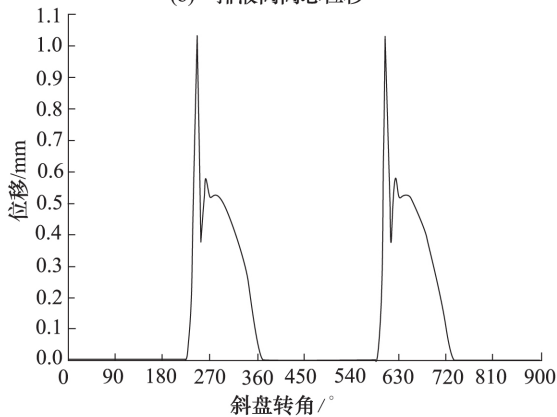
以柱塞吸行程结束向压行程转换作为仿真的起始点。



(a) 柱塞腔压力



(b) 排液阀阀芯位移



(c) 吸液阀阀芯位移

图 3 配流阀的配流特性

图 3 为超高压海水泵配流阀特性曲线,包括柱塞腔压力曲线和吸排液阀阀芯运动曲线。从图 3a 可以看出,当柱塞处于吸行程时,腔内会形成一定的负压,在一定温度下,当负压达到海水的汽化压力时,将产生汽蚀。从图 3b 和图 3c 可以看出,吸排液阀存在明显的滞后现象,排液阀的开启滞后角约为 63° ,吸液阀的开启滞后角约为 54° 。除此之外,吸排液阀在开启过程中阀芯位移跳动量很大。造成这些现象的主要原因是

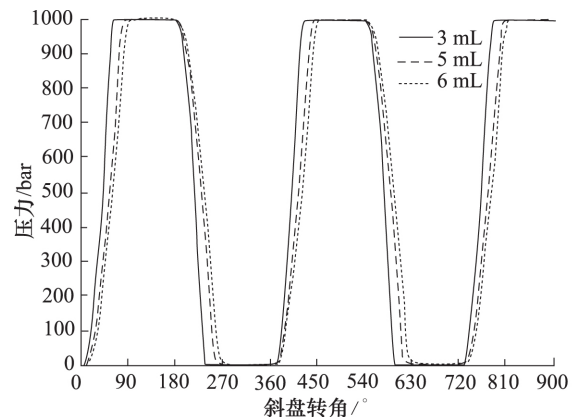
系统工作介质具有一定的压缩性以及阀芯的惯性。

3.3 配流阀动态特性影响因素分析

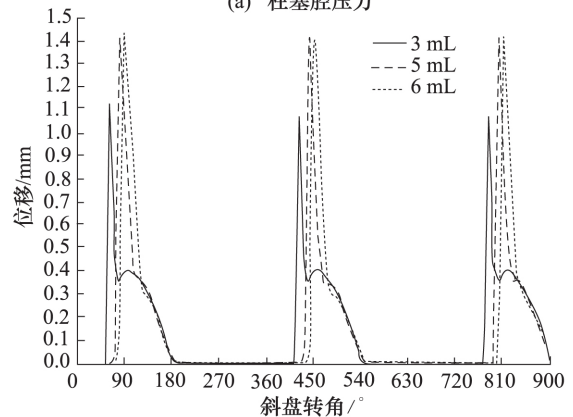
根据上文所述配流阀运动滞后原因的分析,针对余隙容积以及阀芯质量两因素,对配流阀动态特性进行仿真研究。

1) 余隙容积对动态特性的影响

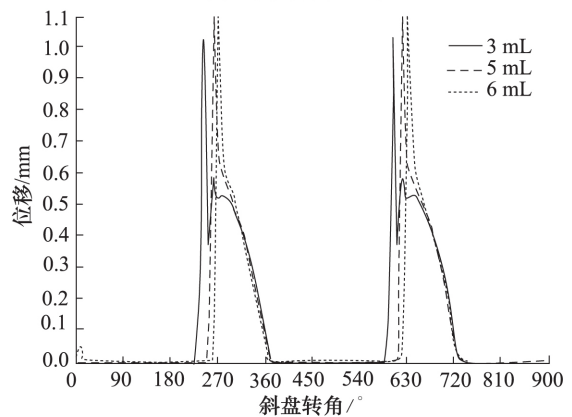
图 4 为不同余隙容积时,柱塞腔压力曲线以及吸排液阀阀芯位移曲线。从图中可以看出,随着余隙容积的增大,柱塞腔建立压力以及卸载压力变慢。当余隙容积分别为 3 mL、5 mL、6 mL 时,排液阀的开启滞后



(a) 柱塞腔压力



(b) 排液阀阀芯位移



(c) 吸液阀阀芯位移

图 4 余隙容积对配流阀特性的影响

角分别约为 63° 、 81° 、 90° ，吸液阀的开启滞后角分别约为 54° 、 81° 、 90° ，但对吸排液阀的关闭滞后影响却很小。

随着余隙容积的增大，阀的开启滞后越严重。阀开启时，阀芯存在一定的振动现象，余隙容积越大阀开启时跳动量就越大，阀芯的运动越不稳定。阀的开启滞后是由工作介质的压缩性造成的，而阀的关闭滞后主要是由阀芯的惯性引起的。因此，在设计过程中，要尽可能减小柱塞腔的余隙容积，从而减小配流阀的开启滞后。

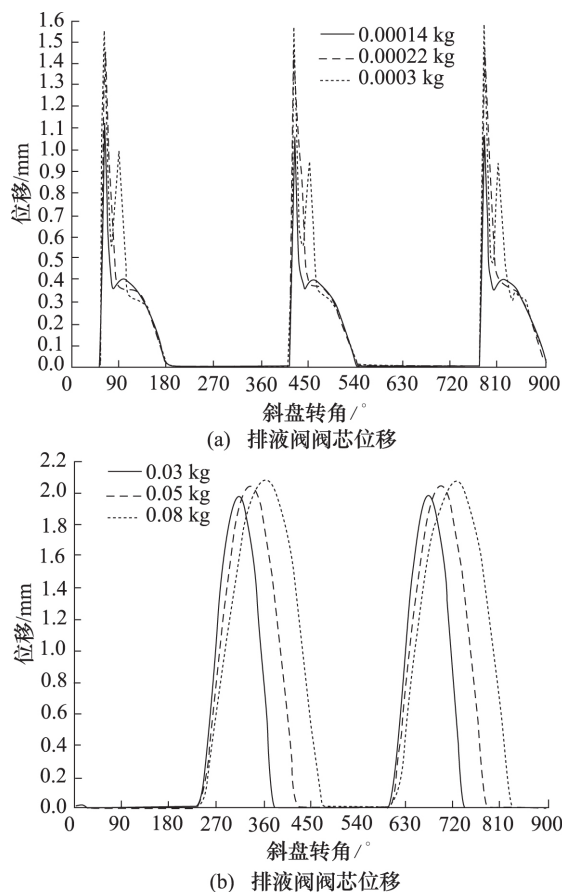


图5 阀芯质量对配流阀特性的影响

2) 阀芯质量对动态特性的影响

图5为不同阀芯质量时，吸排液阀阀芯位移曲线。当排液阀阀芯质量为0.00014 kg、0.00022 kg、0.0003 kg时，因为排液阀阀芯质量较小，所以增加排液阀阀芯质量对阀芯的开启和关闭滞后影响较小。当吸液阀阀芯质量为0.03 kg、0.05 kg、0.08 kg时，开启滞后角几乎相同，关闭滞后角分别为 18° 、 63° 、 108° 。随着阀芯质量的增加，会加剧阀芯的关闭滞后现象，且阀芯开启时位移跳动量也越大，导致配流阀关闭滞后的主导原因是惯性力。故在设计时，可以通过减小阀芯的质量来减小关闭滞后，以提高配流阀的响应速度，

增加其平稳性。

4 结论

本文通过建立超高压海水泵配流阀的数学模型，运用AMESim软件对单柱塞与配流阀组成的系统进行动态特性仿真分析。分别通过柱塞腔压力、吸排液阀阀芯位移曲线得到了超高压海水泵配流阀存在滞后现象。并分析了余隙容积和阀芯质量对配流阀动态响应的影响，得出以下结论：

(1) 由于工作介质的可压缩性，随着余隙容积的增大，吸排液阀开启滞后现象越明显。因此，在设计时应尽可能减小超高压海水泵柱塞腔的余隙容积。

(2) 排液阀阀芯质量对阀芯的开启和关闭滞后影响较小。增加吸液阀阀芯质量，对阀芯的开启滞后影响较小，对阀芯的关闭滞后影响较大。无论是吸液阀还是排液阀，增大阀芯质量会增大阀芯位移的跳动量。因此，在设计时应尽量减小配流阀阀芯质量。

参考文献

- [1] 翟江, 金聪, 罗凯, 等. 海水淡化轴向柱塞泵样机的性能试验及应用[J]. 机床与液压, 2011, 39(17): 1-3.
- [2] KRUTZ G W, CHUA P. S. K. . Water Hydraulics—Theory and Applications 2004 [R]. Louisville: Workshop on Water Hydraulics Agricultural Equipment Technology Conference (AETC04) 2004.
- [3] 刘银水, 吴德发, 李东林, 等. 海水液压技术在深海装备中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 28-35.
- [4] 李东林, 方梦思, 邓亦攀, 等. 水液压柱塞泵柱塞副材料实验研究[J]. 液压与气动, 2017, (11): 12-16.
- [5] 杨珍. 全水润滑超高压海水泵效率分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [6] 任志刚. 深海水液压泵的结构设计与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [7] Liu Y. S., Wu D. F., Long L., et al. Research on the Port Valve of a Water Hydraulic Axial Pump [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 223(3): 155-166.
- [8] 胡国庆. 深海水柱塞往复泵的研制[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [9] 胡国庆, 李世伦, 葛耀峥. 海水柱塞泵的低泄漏高效率研究[J]. 机电工程, 2011, 28(5): 542-544.
- [10] 贺小峰, 黄国勤, 杨友胜, 等. 球阀阀口流量特性的试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, (8): 30-33.
- [11] 孙怡龙, 王志强, 黄依凡, 等. 带仿生织构的水液压马达配流摩擦副摩擦学特性仿真研究[J]. 机电工程, 2019, (11).