

# 锻机用先导阀芯驱动伺服阀动态特性 AMESim 仿真分析

徐勇光<sup>1</sup>, 刘海瑞<sup>2</sup>, 王 东<sup>3</sup>

(1. 周口职业技术学院 汽车与机电工程学院, 河南 周口 466000; 2. 河南师范大学 物理与材料工程学院, 河南 新乡 453000;  
3. 河南龙腾锻压机械设备有限公司, 河南 郑州 453000)

**摘要:** 为了实现液压机用伺服阀的流量精确控制, 开发了一种以电驱丝杠推动先导阀芯的伺服阀, 以达到高精度控制的效果和显著减弱液压引起的冲击力作用。先导进液阀与主进液阀之间保持相互嵌套的状态, 具有反馈机械位置信息的功能。并利用 AMESim 仿真平台对其进行仿真分析。阶跃响应特性表明: 到达 0.04 s 时, 主进液阀芯开始关闭, 在 0.1 s 时主阀出口流量达到  $282 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 设计满足性能要求。启闭特性表明: 先导阀芯开启后, 主进液阀芯相对先导进液阀芯速度更慢, 引起了明显滞后, 之后达到完全开启状态。级间位置匹配特性表明: 先导进液阀芯关闭, 之后主进液阀芯发生跟随关闭, 同样会产生静差。

**关键词:** 先导阀芯; 比例阀; 流量控制; AMESim 仿真; 阶跃响应; 稳态误差

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.026

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 02-0167-05

## AMESim simulation analysis on dynamic characteristics of servo valve driven by pilot value core in forging machine

Xu Yongguang<sup>1</sup>, Liu Hairui<sup>2</sup>, Wang Dong<sup>3</sup>

(1. School of Automotive and Mechatronic Engineering, Zhoukou Vocational and Technical College, Zhoukou 466000, China;  
2. School of Physics and Material Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China;  
3. Henan Longteng Forging Machinery Equipment Co., Ltd., Zhengzhou 453000, China)

**Abstract:** In order to improve the precision control of flow for the servo valve used in forging hydraulic press, a servo valve with an electric drive screw driving pilot valve core was developed to achieve high precision control effect and significantly reduce the impact force caused by hydraulic pressure, and the pilot inlet valve and the main inlet valve were kept in a nested state to have feedback function of mechanical position information. Then, the AMESim simulation platform was used for simulation analysis. The step response characteristics show that the main inlet valve core closes when it reaches 0.04 s, and the main valve outlet flow rate reaches  $282 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  when it reaches 0.1 s, which meet the performance requirements. The opening and closing characteristics show that after the pilot valve core is opened, the speed of the main inlet valve core is slower than that of the pilot inlet valve core, causing obvious lag, and then reaching the fully open state. The characteristics of position matching between stages indicate that the pilot inlet valve core closes, and then the main inlet valve core follows and closes, which also produces static difference.

**Key words:** pilot valve core; proportional valve; flow control; AMESim simulation; step response; steady state error

液压系统具有力量大的优势, 被广泛应用于锻机设备<sup>[1-4]</sup>。目前, 电液比例技术已经成为一种广泛应用的动力控制方式, 为获得更优的锻机控制效果, 具备更低运行成本以及更高稳定性的电液比例控制系统也逐渐被学者们开发出来<sup>[5-7]</sup>。上述系统

中设置了级放大结构, 可以通过电磁铁对先导级进行驱动, 再利用先导级产生液压能来达到对主级阀芯的控制作用<sup>[8-10]</sup>。

目前, 关于电液比例的文献报道也较多, 例如: Suzuki K 等<sup>[11]</sup>在先导阀和主阀间建立了仿真模型与传递函数, 深入探讨了阀应用阶段产生的死区现象, 并设置了相应的补偿条件, 再以 Simulink 软件依次对动态与静态条件开展了仿真测试, 根据实际测试结果, 再利用分段 PID 算法进行处理, 实现了对死区的最优补偿效果。张勇等<sup>[12]</sup>通过设置不同大流量

收稿日期: 2021-01-20; 修订日期: 2021-04-18

基金项目: 河南省科技厅基金项目 (192102210173)

作者简介: 徐勇光 (1978-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: tr13511us06@126.com

电液伺服阀结构来实现整阀动态性能的调控,同时选择具备独立换向功能的先导阀来减小阀芯质量,实现补偿死区的功能。李胜等<sup>[13]</sup>开发了一种水压数字控制阀,测试了样机的运行控制性能,获得了与理论值相近的压力、流量动态特性。

本文开发了一种以电机驱动丝杠推动先导阀芯的伺服阀,实现了先导阀芯运动状态的控制功能,在主阀控制腔中设置了启动阀芯应满足的压力参数,通过调节使主阀芯到达不同的运动状态,并在主阀上加入节流窗口,由此产生联通流量。根据上述处理要求,完成流量的比例调控,实现控制精度的显著提升。

## 1 结构原理

本文设计的伺服阀选择电机丝杠组成电机械转换结构,可以达到高精度控制的效果,同时能够显著减弱液压引起的冲击力作用。先导进液阀与主进液阀之间保持相互嵌套的状态,具有反馈机械位置信息的功能。伺服阀结构示意图如图 1 所示,从图 1 中可以看到伺服阀的组成结构<sup>[14]</sup>。在比例工作状态下,丝杠 2 通过电机 1 获得驱动力,发生转动,促使先导阀 3 打开先导阀芯 4,油液在高压作用下进入主阀 6 腔中,主阀芯 5 回液口关闭;主阀芯 5 在驱动力作用下右移,在主阀芯 5 打开后,进入流量输出阶段,之后先导阀芯 4 关闭,此时丝杠持续顺时针旋转,主阀芯 5 和先导阀芯 4 表现出优异的异步跟随性能。当主阀芯 5 关闭时,丝杠 2 受到电机驱动继续顺时针旋转,先导阀 3 在丝杠 2 的驱动作用下左移,形成了相连的回液口并与主阀 6 腔体呈连通状态,主阀芯 5 则跟先导阀芯 4 按照异步跟

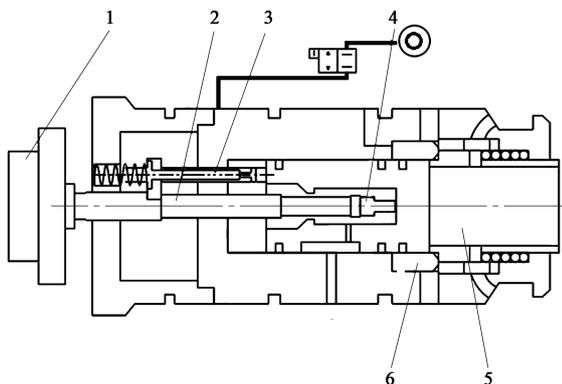


图 1 伺服阀结构示意图

1. 电机 2. 丝杠 3. 先导阀 4. 先导阀芯 5. 主阀芯 6. 主阀

Fig. 1 Schematic diagram of servo valve structure

随方式左移至先导回液阀口完全关闭的程度,从而完成关闭过程的随动控制效果。

为主阀芯安装了探测器来实现对压力、位移参数的快速测试,之后与驱动电路共同完成闭环控制过程。在阀块内集成探测器、先导级、电机械转换器,最终建立比例插装阀组,从而达到多功能集成的功能<sup>[15]</sup>。由于控制阀具有较小的体积,能够完成快速响应,可以保持稳定运行状态与优异动、静态性能。

## 2 仿真分析

### 2.1 整阀结构模型

伺服阀模型的组成结构包含主回液阀、主进液阀、先导回液阀、先导进液阀。考虑到主进液阀与先导回液阀的位移量一致,选取先导进液阀和主回液阀的位置变化作为参考,开展阀芯位置和流量反馈仿真分析。同时考虑先导进液阀芯与阀套间会形成相对位移。由于主阀是一种非全周开口的三角结构,因此,设置了非全周开口子模型。综合以上考虑因素,针对伺服阀建立 AMESim 仿真模型,如图 2 所示。

伺服阀包含了浮动球阀和复位弹簧部分,先导进液阀与主进液阀之间保持嵌套状态。此时,先导级和主级参数具有一定差异,同时,先导级与主级不同环节进行两级位置匹配时也存在区别。随着先导级参数的控制精度逐渐提高后,主阀表现出更精确的控制性能,而增益过大时则会引起系统发生不稳定,因此,需对级间位置匹配影响因素开展更加深入的研究。

### 2.2 设置结构参数

为进一步优化伺服阀模型,根据表 1 设置整阀参数。进行仿真测试的过程中,利用方形波信号调控电机运动状态,将高电平和低电平信号分别通过 1、0 进行表示,具体见图 3。持续仿真测试时间为 0.1 s,间隔为 0.001 s。

## 3 动态特性仿真分析

### 3.1 阶跃响应特性

阶跃响应是对通过时域控制的过程进行测试,在阶跃信号作用下产生阶跃断点,从而形成危险工作信号。根据阶跃信号判断系统动态变化特征,按照伺服阀对阶跃信号变化的适应能力并结合实际运行性能参数判断伺服阀性能。将阶跃控制信号输入

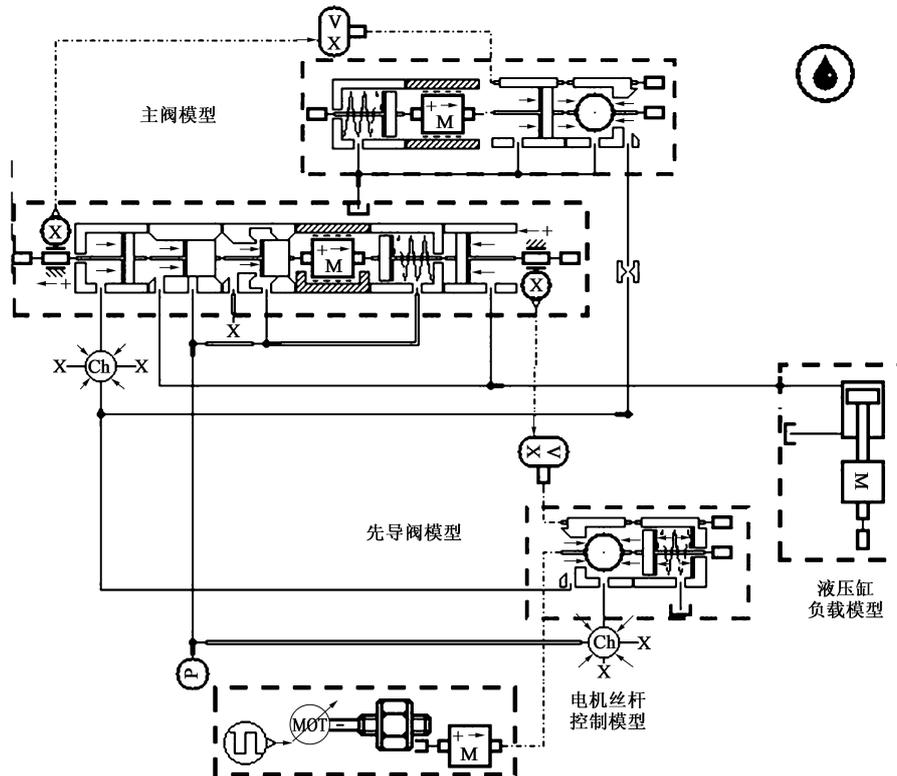


图 2 伺服阀 AMESim 仿真模型

Fig. 2 AMESim simulation model of servo valve

表 1 伺服阀仿真模型相关参数

Table 1 Relevant parameters of servo valve simulation model

参数	数值	
乳化液	动力粘度/( $N \cdot s \cdot m^{-2}$ )	2.93
	弹性模量/Pa	$1.65 \times 10^9$
先导阀	弹簧预紧力/N	22
	弹簧刚度/( $N \cdot mm^{-1}$ )	5.10
	阻尼孔直径/mm	$\phi 0.85$
主阀	芯直径/mm	$\phi 28$
	芯质量/kg	0.15
	控制腔容积/ $cm^3$	4.00
弹簧腔等效直径/mm	$\phi 32$	
系统压力/MPa	32	
锻机液压缸负载/N	1000	

仿真模型对其开展仿真测试，以此得到伺服阀在各部位产生的的阶跃响应曲线，图 4 为伺服阀在阶跃响应状态下的位移和流量曲线。

设置阶跃信号为 5，在一阶系统响应趋势下先导阀芯共运动 5 mm，当先导进液阀芯开启后同时输出  $282 L \cdot min^{-1}$  流量到达主阀控制腔。开启主回液阀芯后，部分流量流入主回液阀，使主回液阀芯推

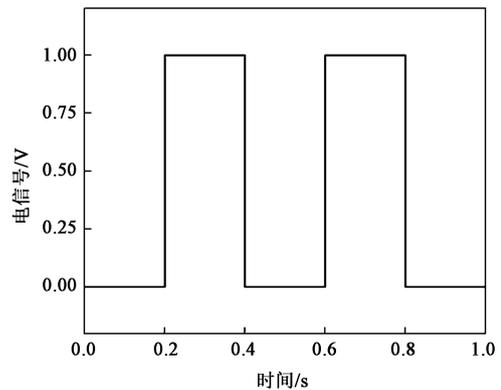


图 3 方波控制信号图

Fig. 3 Signal diagram of square wave control

力增大。到达 0.04 s 时，主进液阀芯关闭，液体持续进入主阀控制腔，形成更高腔体压力，在 0.1 s 时主阀出口流量达到  $282 L \cdot min^{-1}$ ，与预期设计要求相符，由此可以推断本文设计的仿真模型满足仿真性能要求。

### 3.2 启闭特性

在控制信号中设置 100 Hz 的方波信号再进行 1 s 时间的仿真测试，图 5 显示了仿真测试形成的先导阀芯与主阀芯对应的位移与流量曲线。

由图 5a 可以发现，在电机频繁启、闭下，每次

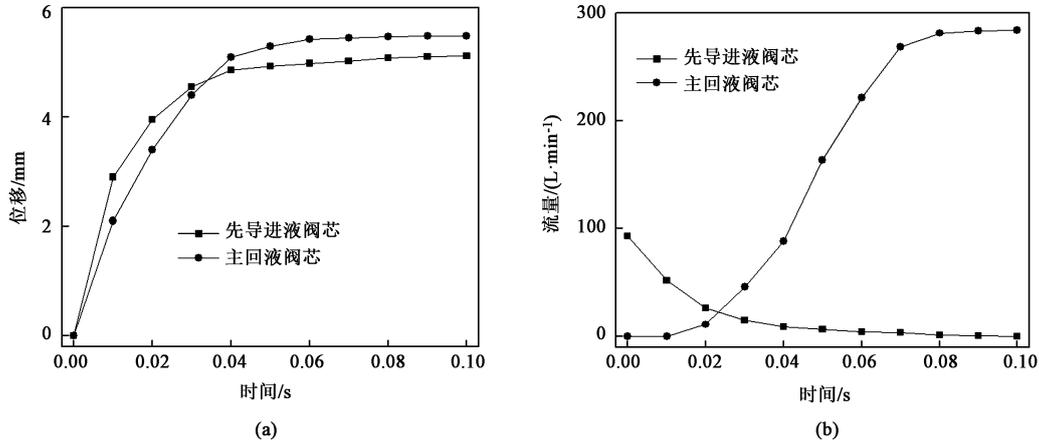


图 4 阀芯位移和流量响应

(a) 位移响应 (b) 流量响应

Fig. 4 Displacement and flow responses for valve core

(a) Displacement response (b) Flow response

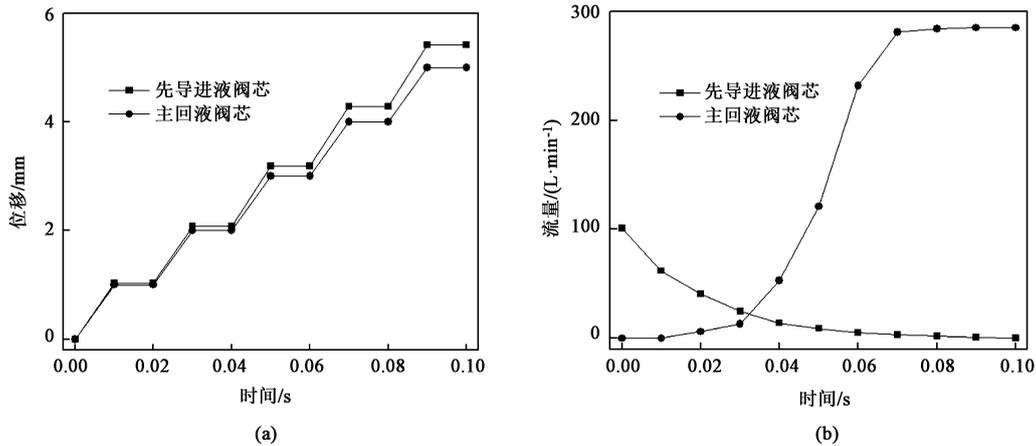


图 5 启、闭信号下阀芯位移与流量响应

(a) 位移响应 (b) 流量响应

Fig. 5 Displacement and flow responses of valve core under opening and closing signals

(a) Displacement response (b) Flow response

丝杠进给信号产生后，就激励先导阀芯形成位移，出现阶梯形态分布的特征。有部分流量最初被分配到主回液阀，并驱动主回液阀芯关闭，这使得主进液阀芯存在明显的滞后性。由图 5b 可知，先导阀芯开启后，主进液阀芯相对先导进液阀芯的速度更慢，从而引起了明显滞后现象，之后达到完全开启状态。

### 3.3 级间位置匹配特性

采用伺服阀可以同时实现比例控制和开关阀控制效果。伺服阀发生启、闭时，其控制状态受到先导进液阀和主进液阀的运动速率、位移等参数的综合影响。

图 6 显示了比例阶跃信号阀芯收到外部信号后，引起先导进液阀芯的快速响应过程。按照阶梯

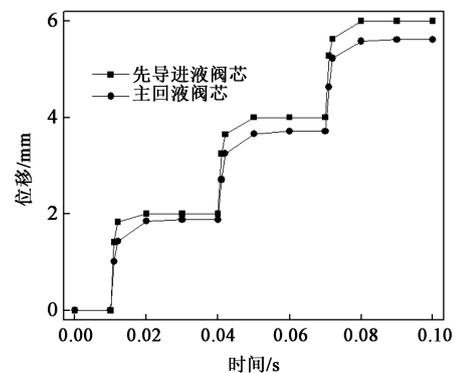


图 6 比例阶跃信号阀芯位移启闭特性

Fig. 6 Opening and closing characteristics of valve core displacement under proportional step signal

位移形式对给定信号进行跟随, 并且主进液阀芯能够在 2 mm 位移范围内完成响应, 与先导进液阀芯共同动作。同时发现, 4~6 mm 位移范围内, 主进液阀芯不能进行响应, 这是因为先导级与主级间受固定液阻影响所导致的。阀芯位移处于较小的开启状态下只需获得少量流量便可以迅速完成响应, 当达到固定液阻饱和和增益条件时, 主进液阀芯在小流量下不能准确完成跟随动作, 产生了小于 1 mm 的位移误差。发生比例关闭时, 先导进液阀芯和主进液阀芯依次关闭, 同样会产生静差。

## 4 结论

(1) 阶跃响应特性表明: 到达 0.04 s 时, 主进液阀芯关闭, 在 0.1 s 时主阀出口流量达到  $282 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 设计满足性能要求。

(2) 启闭特性表明: 先导阀芯开启后, 主进液阀芯相对先导进液阀芯速度更慢, 引起了明显滞后, 之后达到完全开启状态。

(3) 级间位置匹配特性表明: 先导进液阀芯先关闭, 之后主进液阀芯发生跟随关闭, 同样会产生静差。

### 参考文献:

- [1] 王立新, 赵丁选, 刘福才, 等. 电液比例伺服力加载自抗扰控制 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (18): 216-225.  
Wang L X, Zhao D X, Liu F C, et al. Active disturbance rejection control for electro-hydraulic proportional servo force loading [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (18): 216-225.
- [2] 鲁苗, 陈柏金, 柳龙, 等. 泵控锻造液压机控制系统研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 140-145.  
Lu M, Chen B J, Liu L, et al. Research on control system of pump-controlled forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 140-145.
- [3] 陶翠霞, 赵鹏, 孙波. 多缸液压机的滑模变结构智能同步控制 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 142-149.  
Tao C X, Zhao P, Sun B. Intelligence synchronous control on sliding mode variable structure for multi-cylinder hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 142-149.
- [4] 崔刚, 朱学彪, 李扬, 等. 基于 AMESim 冲模机快速闭式液压系统的仿真与研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (1): 119-123.  
Cui G, Zhu X B, Li Y, et al. Simulation and research of fast closed hydraulic system of pressing die based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49 (1): 119-123.
- [5] 华林, 叶德金, 汪小凯, 等. 双伺服驱动高速精冲模机主传动系统的运动规划 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46 (4): 6-11, 34.  
Hua L, Ye D J, Wang X K, et al. Motion planning of main drive system of high speed fine blanking press by double servo drive [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 46 (4): 6-11, 34.
- [6] 陈罡, 李文龙, 董祥义, 等. 100 MN 橄榄式缠绕液压机结构设计与特性研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 166-172.  
Chen G, Li W L, Dong X Y, et al. Structural design and characteristic research of 100 MN olivary winding hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 166-172.
- [7] 郭玉玺, 张利. 大型模锻液压机的混合动力驱动系统 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 124-129.  
Guo Y X, Zhang L. Hybrid power drive system of large die forging hydraulic press [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (10): 124-129.
- [8] 廖瑶瑶, 廉自生, 袁红兵, 等. 液压支架用大流量换向阀振动冲击分析 [J]. 液压与气动, 2015, (5): 79-82, 104.  
Liao Y Y, Lian Z S, Yuan H B, et al. Shock and vibration analysis for the large flow directional valve used on hydraulic supports [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, (5): 79-82, 104.
- [9] Muller M T, Fales R. Design and analysis of a two-stage poppet valve for flow control [J]. International Journal of Fluid Power, 2008, 9 (1): 17-26.
- [10] Samakwong T, Assawinchaichote W. PID controller design for electro-hydraulic servo valve system with genetic algorithm [J]. Procedia Computer Science, 2016, 86: 91-94.
- [11] Suzuki K, Urata E. Development of a water hydraulic pressure-compensated flow control valve [J]. International Journal of Fluid Power, 2008, 9 (3): 25-33.
- [12] 张勇, 黄家海, 权龙, 等. Valvistor 电液比例流量阀稳定性及特性分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36 (2): 340-345.  
Zhang Y, Huang J H, Quan L, et al. Stability and characteristic study of the Valvistor valve [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36 (2): 340-345.
- [13] 李胜, 阮健, 孟彬. 二维电液比例换向阀动态特性及稳定性分析 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (2): 202-212.  
Li S, Ruan J, Meng B. Two-dimensional electro-hydraulic proportional directional valve [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (2): 202-212.
- [14] 刘可, 廖瑶瑶, 廉自生, 等. 矿用大流量比例阀动态特性建模与仿真研究 [J]. 液压与气动, 2020, (1): 112-117.  
Liu K, Liao Y Y, Lian Z S, et al. Dynamic modeling and simulation of large-flow proportional valve for mining [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (1): 112-117.
- [15] Woodacre J K, Bauer R J, Irani R. Hydraulic valve-based active-heave compensation using a model-predictive controller with non-linear valve compensations [J]. Ocean Engineering, 2018, 152: 47-56.