

## 双线圈高速开关阀的水击特性验证

李雨铮<sup>1,2</sup>, 陈福龙<sup>1,2</sup>, 邓少贤<sup>1,2</sup>, 杜恒<sup>1,2</sup>, 生凯章<sup>3</sup>

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108;

2. 流体动力与电液智能控制福建省高校重点实验室, 福州 350108;

3. 四川航天神坤科技有限公司, 成都 610100)

**摘要:** 高速开关阀是航天领域动力系统的核心元件, 需要具备高频响应和高可靠性。然而, 高速开关阀的开关特性会使系统产生水击现象, 降低系统的可靠性, 尤其是在高速开关阀高频切换过程中会产生更多的水击压力波, 致使系统中的水击变得更加复杂。因此, 采用仿真和实验相结合的方法对不同频率下水击压力脉动的变化进行分析, 最终通过对数据时域和频域的分析, 发现了高速开关阀的水击压力脉动规律, 研究成果可在航天动力系统中应用。

**关键词:** 高速开关阀; 水击; 频率; 压力脉动

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 02-0046-07

## Verification of Water Hammer Characteristics of Double-Coil High-Speed On-Off Valve

LI Yuzheng<sup>1,2</sup>, CHEN Fulong<sup>1,2</sup>, DENG Shaoxian<sup>1,2</sup>, DU Heng<sup>1,2</sup>, SHENG Kaizhang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Key Laboratory of Fluid Power and Intelligent Electro-Hydraulic Control in Fujian Province, Fuzhou 350108, China;

3. Sichuan Aerospace Shenkun Technology Co., LTD, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** High-speed on-off valve is a key component of power system in aerospace field, which needs high frequency response and high reliability. However, the switching characteristics of the high-speed on-off valve will make the system produce water hammer phenomenon and reduce the reliability of the system. Especially in the high-frequency switching process of the high-speed on-off valve, more water hammer pressure waves will be generated, which makes the water hammer in the aviation system more complicated. Therefore, the change of water hammer Pressure pulsation at different frequencies is analysed by combining simulation and experiment. Finally, through the analysis of data time domain and frequency domain, the water hammer pressure pulsation. Law of high-speed on-off valves has been discovered, and the research results can be used in aerospace power system applications.

**Key words:** High-speed on-off valve; Water hammer; Frequency; Pressure pulsation

### 0 引言

可重复使用火箭对动力系统阀门等产品提出了严苛的寿命要求<sup>[1-2]</sup>。研究发现, 高速开关阀可以满

足多次使用要求, 实现动力系统数字化和高可靠控制<sup>[3-5]</sup>。高速开关阀通过调节 PWM 信号的占空比来改变输出的离散化流体流量, 实现对回路系统的调节与控制, 其工作频率为 400 Hz 以上<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2023-12-11; 修订日期: 2024-03-14

基金项目: 国家研发计划项目 (2019YFB2005103)

作者简介: 李雨铮 (1991—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为流体传动与电液智能控制。

高速开关阀是航天领域动力系统关键元件，能够在高频响工况下对通油量实现高精度控制。高速开关阀的高频启闭会产生复杂的水击压力脉动，而压力脉动是造成元器件提前损坏、引起液压系统故障的主要原因之一。据报道，液压系统故障是直接导致火箭发射延迟甚至失败的重要因素<sup>[7]</sup>。刘建盈<sup>[8]</sup>以某大型空间飞行器的推进系统为研究基础，分析了管路分布和结构参数对水击压力的影响，为推进系统的进一步研究与优化提供了参考依据。奚斌<sup>[9]</sup>通过实验方法，发现阀门的高频启闭会产生大量水击压力波，导致更多水击压力脉动的峰值作用于管壁，降低了整个系统的可靠性。因此，随着高速开关阀在航天领域的广泛应用，对高速开关阀产生的水击压力脉动研究尤为重要。

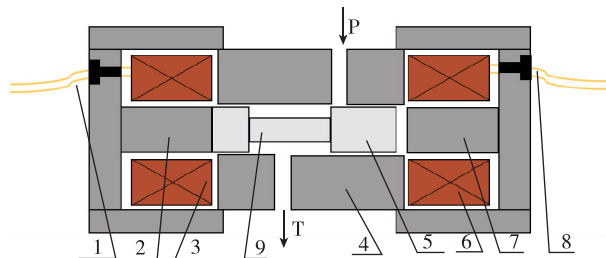
然而在对水击压力调研中发现，当前对水击的研究主要集中在单个水击压力波影响分析<sup>[10]</sup>、水击方程及其计算方法<sup>[11]</sup>、工程防护<sup>[12]</sup>等方面，对高速开关阀持续高频启闭产生的水击研究罕见，尤其是当前水击理论研究本身的局限性无法完全准确估算高频启闭下产生的水击压力<sup>[13]</sup>。提出使用实验与仿真相结合的方法对双线圈高速开关阀高频启闭产生的水击压力脉动进行研究，通过搭建水击压力脉动测试试验台和多物理场模型获得水击压力脉动，然后通过时域、频域的分析发现水击压力脉动随高速开关阀频率的增加呈现先增后减的趋势变化。

### 1 高速开关阀的结构与工作原理

双电磁铁驱动的高速开关阀，其主要结构特点为两端均利用电磁铁来实现高速开关阀的开启和关闭。该形式相较于传统的弹簧、液压力复位的高速开关阀，具有可控性高的优点。双线圈高速开关阀工作时，通过控制施加在其两端电磁铁上的激励信号，即可控制其开启、关闭的工作过程。

工作原理如图 1 所示。以阀芯恰好在左端的情况为例，开启时左端关闭电磁铁断电，右端开启电磁铁通电产生电磁力，吸引阀芯向右运动，进油口 P 随之打开，经过阀腔与回油口 T 连通，油液得以通过。当阀芯运动至最右端时，P 口全开，输出流量达到最大；关闭时右端开启电磁铁断电，左端关闭电磁铁通电至关闭电磁力克服剩余开启电磁力后，吸引阀芯向左运动，进油口 P 随之开始关闭。当阀

芯运动至最左端时，P 口全关，与 T 口断开，油液无法通过。以此方式循环工作，在开启、关闭 PWM 激励信号控制下完成周期性的快速开关动作。



1-关闭电磁铁外接导线；2-关闭电磁铁铁芯；3-关闭电磁铁线圈；4-阀座；5-阀芯凸肩；6-开启电磁铁线圈；7-开启电磁铁铁芯；8-开启电磁铁外接导线；9-阀杆

图 1 双电磁铁高速开关阀的基本结构示意图  
Fig. 1 The basic structure diagram of double electromagnetic high-speed on-off valve

### 2 设计水击压力脉动测试试验台

水击压力脉动测试试验台的系统原理如图 2 所示，变量柱塞泵在电机带动下，将油液泵送至流量计后，从双电磁铁高速开关阀进油口流入，出油口流出，再经过节流阀截止阀后回油箱。涉及的双电磁铁高速开关阀为两位两通无被动复位的高速开关阀，因此在非工作状态下阀芯可能由于外力作用悬停在某一位置，导致阀口部分打开。因此在非工作状态下为防止液压回路导通，需要在阀后加装截止阀，保证液压回路断开。

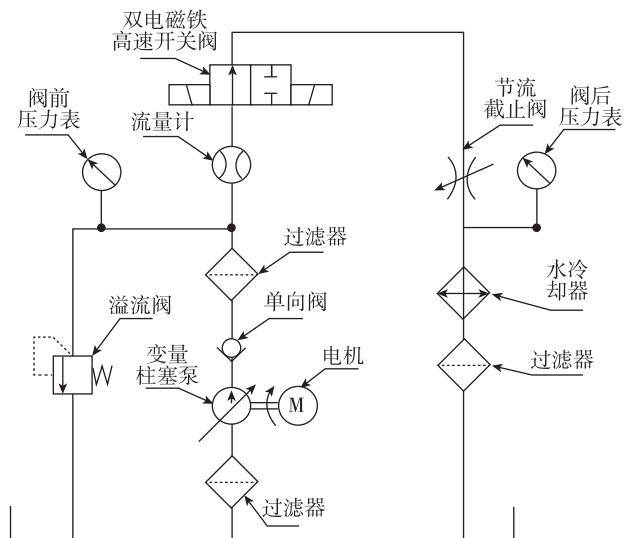
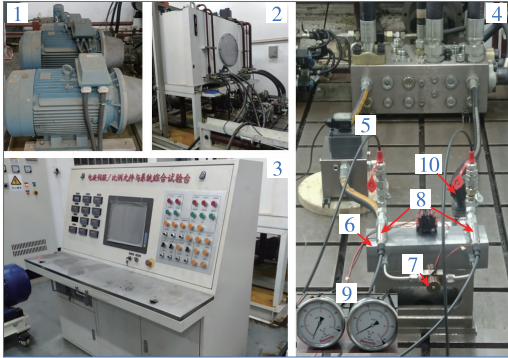


图 2 液压测试系统原理图  
Fig. 2 Hydraulic test system schematic diagram

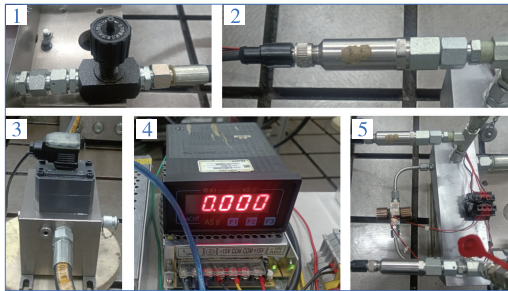
为了实现对高速开关阀水击压力脉动研究,根据设计的液压回路,搭建了压力脉动测试试验平台,如图3所示。通过电液系统控制试验台控制电机的转速实现对液压泵输出压力源的调节,液压泵输出最大流量为200 L/min,最大压力为35 MPa。介质为抗磨液压油。双线圈高速开关阀液压测试系统中的主要元件如图4所示。表1为部分液压元件的主要参数。



1-电机与变量泵; 2-油箱; 3-电液系统控制试验台;  
4-双电磁铁高速开关阀液压回路; 5-流量计;  
6-测试阀块; 7-双电磁铁高速开关阀; 8-压力传感器;  
9-压力表; 10-节流阀

图3 高速开关阀水击压力脉动液压试验平台

Fig. 3 High-speed on-off valve water hammer pressure pulsation hydraulic test platform



1-节流截止阀; 2-硅压阻式压力传感器;  
3-齿轮流量计; 4-流量数显模块; 5-测试阀块

图4 液压测试系统部分元件

Fig. 4 Some components of hydraulic test system

最终,利用阿列维提出的水击压力脉动周期连锁方程对搭建的压力脉动测试试验台进行计算,见式(1),获得试验台中高速开关阀产生的压力脉动的固有频率  $f$  为 89 Hz。

表1 液压系统部分元件主要参数

Tab. 1 Main parameters of some components of hydraulic system

元件	参数	数值
节流截止阀	通径/mm	12
	最高工作压力/MPa	35
	油温范围/°C	-30~80
	黏度范围/(mm <sup>2</sup> /s)	10~800
压强传感器	压强范围/MPa	0~25
	测量精度(20°C)	≤±0.1%
	环境温度/°C	-40~85
齿轮流量计	最大工作压力/MPa	40
	环境温度/°C	-15~80
	测量范围/(l/min)	0.16~16
	精度	±0.3%
管道	长度/mm	1 700
	外径/mm	19.1
	内径/mm	13.9

$$f = \frac{\sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (K/E)(D/e)}}}{4L} \quad (1)$$

式中,  $K$  为介质的体积模量,  $\rho$  为介质密度,  $E$  为管壁的弹性模量,  $D$  为管道内径,  $e$  为管道壁厚,  $L$  为管道长度。

### 3 建立试验台仿真模型

#### 3.1 电路模型

高速开关阀的电磁线圈可以等效为  $RL$  串联电路。而且高速开关阀实际工作过程中,阀芯长时间处于运动状态,电磁铁的工作气隙频繁变化,磁阻随之变化,电感为非定值。推导出阀芯运动时电路的平衡方程为

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

式中,  $U$  为电路总电动势,  $I$  为电流,  $R$  为等效电阻,  $L$  为电感。

$RL$  电路为一阶惯性系统,其电流在时间为无穷大时才能达到稳态值,可推导电流从 0 上升至任意电流值的时间为

$$t = \frac{L}{R} \ln \frac{U-0}{U-IR} \quad (3)$$

### 3.2 磁路模型

磁路主要由电磁铁, 阀芯及工作气隙几部分组成, 通过电流与磁路模型的关联, 将电磁铁产生的内部磁场近似为均匀磁场, 则有

$$F = \frac{B}{\mu} l = \frac{\Phi}{\mu S} \quad (4)$$

式中,  $B$  为磁感应强度,  $\mu$  为磁导率,  $l$  为磁路等效长度,  $S$  为磁路的横截面积,  $\Phi$  为磁通。

磁阻由电磁铁的铁芯、工作气隙与阀芯共同产生, 所以可得到

$$R_m = \frac{\delta_0 - x}{\mu_0 S} + \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} \quad (5)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\delta_0$  为初始工作气隙,  $x$  为阀芯位移,  $\mu_r$  为相对磁导率。

高速开关阀的工作气隙极小, 因此可将磁感线看作沿积分表面均匀分布, 则磁路产生的电磁力为

$$F_m = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (6)$$

### 3.3 机械模型

机械模型主要涉及阀体运动部件, 即阀芯的动力学解析, 本文仅研究双电磁铁高速开关阀阀芯轴向为水平方向的工作状态, 进行轴向受力分析时不考虑阀芯重力, 开启过程中阀芯的动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{m1} + F_t + F_s - F_{r2} - F_b \quad (7)$$

式中,  $m$  为阀芯质量,  $F_{m1}$  为开启电磁力,  $F_{r2}$  为剩余关闭电磁力,  $F_b$  为油液惯性力、黏性力与摩擦力等阻力总和。

关闭时的阀芯动力学方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{m2} - F_{r1} - F_t - F_s - F_b \quad (8)$$

式中,  $F_{m2}$  为关闭电磁力,  $F_{r1}$  为剩余开启电磁力。

### 3.4 液压模型

液压模型主要分析不同情况下阀口处的液压力与液动力, 高速开关阀为滑阀式阀口结构, 阀口全闭时基本不受轴向的液压力与液动力。根据流体的连续性方程, 在阀口全开时阀芯所受的稳态力为

$$F_s = 2C_d C_v (A_{T_{in}} \Delta P_{in} + A_{T_{out}} \Delta P_{out}) \cos \theta \quad (9)$$

式中,  $C_d$  为流量系数,  $C_v$  为流速系数,  $A_{T_{in}}$  和  $A_{T_{out}}$  分别为进、出节流口面积,  $\Delta P_{in}$  和  $\Delta P_{out}$  分别为进、出口节流腔压差。

阀芯在运动过程中所受的瞬态力为

$$F_t = \rho L \frac{dq}{dt} \quad (10)$$

式中,  $L$  为进油口节流腔的轴向长度,  $q$  为流量。

综上, 通过电路和磁路模型中的线圈电感、电流, 磁路和机械模型中的电磁力、阀芯位移, 液压和机械模型中的稳态、瞬态力, 将多个物理场耦合, 最终获得仿真模型, 如图 5 所示。

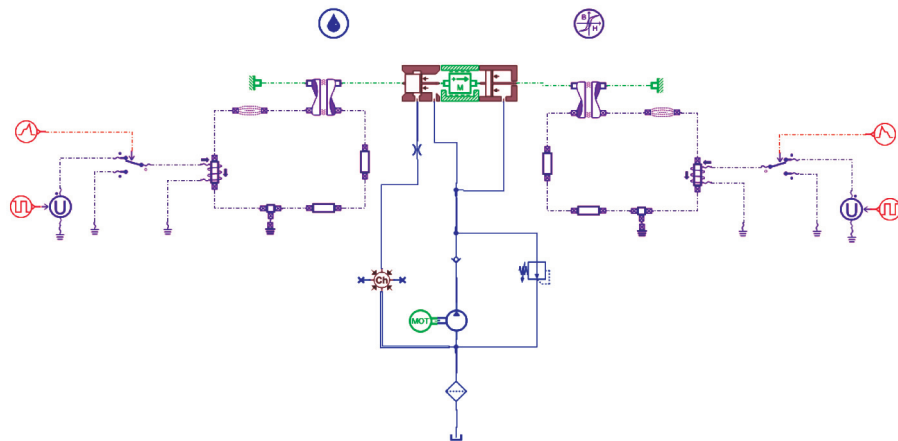


图 5 试验台仿真模型

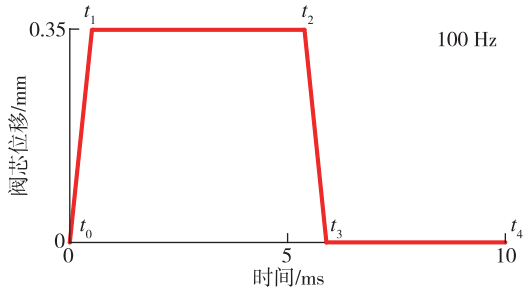
Fig. 5 Test bench simulation model

## 4 时域分析

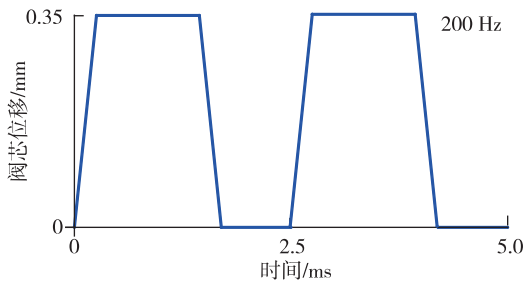
双电磁铁高速开关阀为产生水击压力脉动的

关键部件, 阀的开启响应时间为 0.49 ms, 阀的关闭时间为 0.394 ms。利用仿真与实验分析了高速开关阀在压强差 8 MPa 下不同驱动频率的水击压

力脉动。其中驱动频率的变化不影响高速开关阀的开/关响应时间,仅改变阀的开/关有效时间,如图6所示。



(a) 驱动频率 100 Hz 下的阀芯位移示意图



(b) 驱动频率 200 Hz 下的阀芯位移示意图

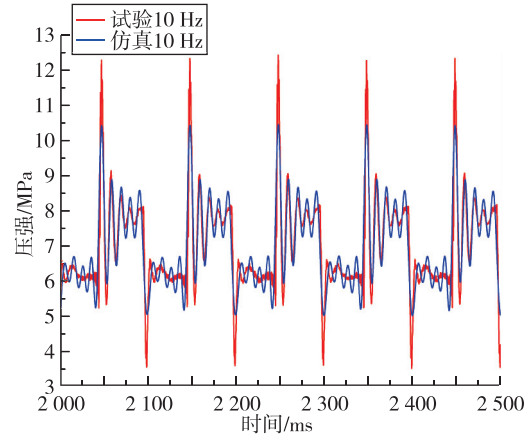
图6 不同频率下阀芯位移随时间变化示意图

Fig. 6 The valve core displacement change with time at different frequencies diagram

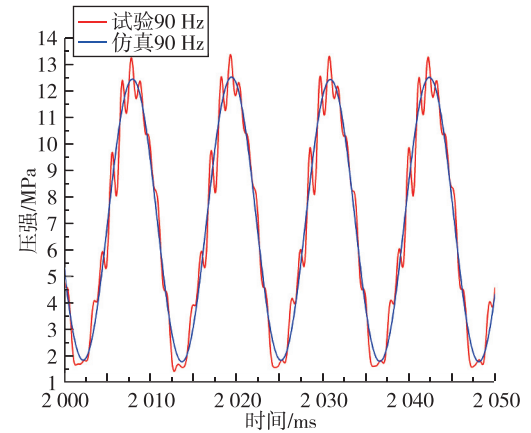
图6为高速开关阀驱动频率为100 Hz和200 Hz时阀芯位移变化示意图。 $t_1$ 和 $t_0$ 之间的时间段代表阀门开启的响应时间, $t_2$ 和 $t_1$ 之间的时间段代表阀门的有效开启时间, $t_3$ 和 $t_2$ 之间的时间段代表阀门关闭的响应时间, $t_4$ 和 $t_3$ 之间的时间段代表阀门的有效关闭时间,分析的数据均是在无负载且驱动频率占空比为50%的情况下获得,并通过成熟的控制策略保证阀的运动频率。

分析了高速开关阀不同驱动控制频率下水击压力脉动变化,其中试验获得的压力脉动数据经过了低通滤波处理,可以通过的最高频率为500 Hz,确保2次谐波的存在。最终分析结果如图7所示,图中水击压力脉动幅值随频率的增加呈先增加后减小的趋势,其中在高速开关阀驱动频率为90 Hz时,压力脉动的幅值达到最大值。

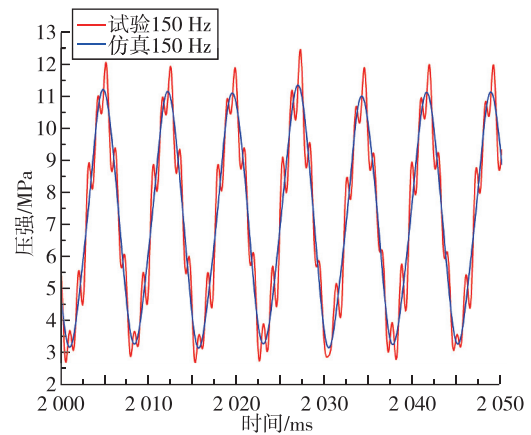
如图7所示,高速开关阀驱动频率在低频时,每一个周期内的水击压力脉动的波形中存在很多小的波动,随着驱动频率的增加,这些小的波动逐渐减少,达到90 Hz时已经没有了小的波动,



(a) 驱动频率 10 Hz



(b) 驱动频率 90 Hz



(c) 驱动频率 150 Hz

图7 不同频率下的压力脉动时域分析

Fig. 7 Time domain analysis of pressure pulsation at different frequencies

只有一个主要的水击压力脉动,此时压力脉动频率与高速开关阀的驱动频率相重合。

如图8所示,试验中随着驱动频率的增加,流

量也呈现一个先增加后减小的趋势，与压力脉动的变化完全一致，在 90 Hz 时也出现了最大的流量 14.9 L/min。流量的变化进一步验证了压力脉动的变化趋势。

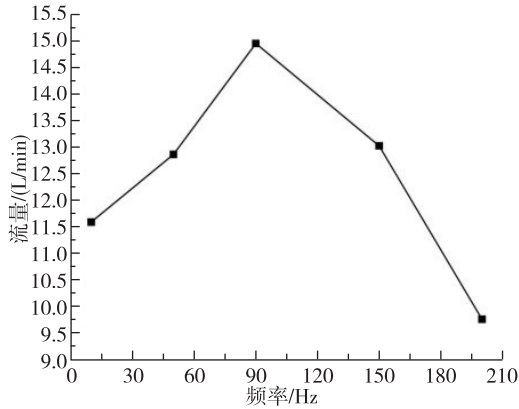
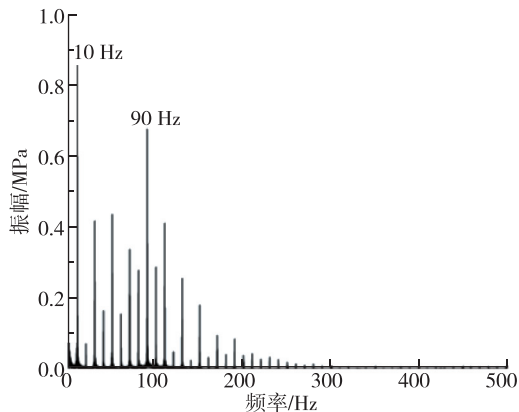


图 8 不同频率下的流量

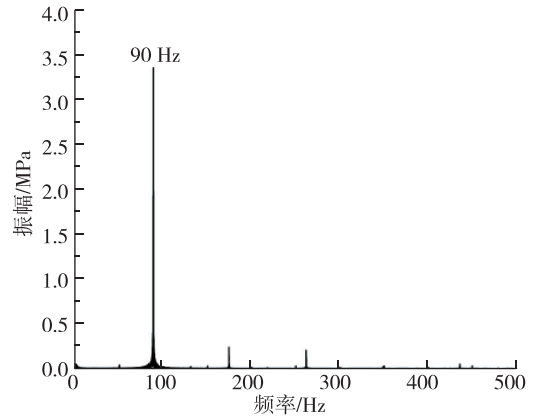
Fig. 8 Flow at different frequencies

## 5 频域分析

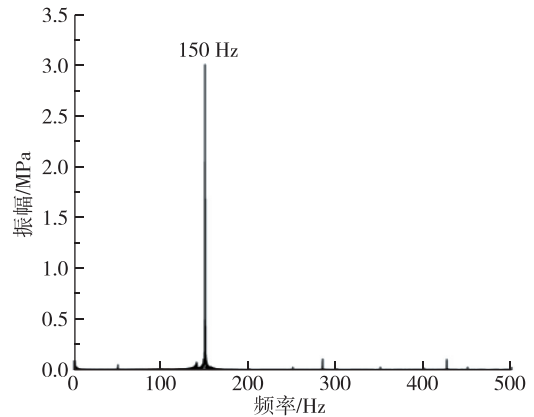
为了进一步分析在 90 Hz 出现水击压力脉动最大的原因，首先对试验中测量的水击脉动压力数据进行傅里叶变换，获得了如图 9 所示不同驱动频率下的频域图。驱动频率为 10 Hz 时可以看出，主要的压力脉动频率依然是由高速开关阀驱动频率影响的，但在 90 Hz 时有一个很明显的次要频率，这是水击压力波本身的频率。除此之外，还会存在因为反射、管道振动产生的其他频率。这种现象也与图 7 时域图显示的波形一致。当驱动频率不小于 90 Hz 时，基本只存在一个主要频率，此时的频域图中显示频率与驱动频率一致，与图 7 水击压力脉动周期变化一致。从图 9 中还可以看到，在 90 Hz 时振幅是最大的与图 7 在 90 Hz 存在



(a) 驱动频率 10 Hz



(b) 驱动频率 90 Hz



(c) 驱动频率 150 Hz

图 9 不同驱动频率下的压力脉动频域分析

Fig. 9 Frequency domain analysis of pressure pulsation under different driving frequencies

最大水击压力脉动幅值也是重合的。由此可以得出，在固定的数字液压系统中存在一个特定驱动频率使得产生的压力脉动达到最大值。当高速开关阀的驱动频率超过试验台本身产生的水击压力脉动周期时，其他的脉动频率影响很小，可以忽略不计。

## 6 结论

基于双电磁铁高速开关阀搭建了一个水击压力脉动测试试验台，通过对测试试验台获得的水击压力脉动数据进行时域和频域分析，并与搭建的仿真模型进行相互验证，结论如下。

1) 数字液压系统中，水击压力脉动随高速开关阀频率的增加，呈现一个先增后减小的趋势。

2) 试验系统中高速开关阀频率为 90 Hz 时，水击压力脉动存在最大值。

3) 当高速开关阀的频率超过 90 Hz 时，影响系统的水击压力脉动只有一个主要的脉动频率，

其他频率下的脉动影响很小,可以忽略不计。

在航天领域动力系统追求高精度、高可靠的背景下,通过分析其关键部件——高速开关阀——产生的水击压力脉动的真实特征,为系统的压力脉动抑制或设计提供了重要的参考。

### 参考文献

- [1] 何巍,牟宇,朱海洋,等.下一代主力运载火箭发展思考[J].宇航总体技术,2023,7(2):1-12.
- [2] 马红鹏,吴帅,焦宗夏,等.垂直起降运载火箭多执行装置系统优化研究[J].导弹与航天运载技术,2022(3):53-59.
- [3] Yang H Y, Pan M. Engineering research in fluid power: a review[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16(6): 427-442.
- [4] Wang F, Gu L Y, Chen Y. A continuously variable hydraulic pressure converter based on high-speed on-off valves[J]. Mechatronics, 2011, 21(8): 1298-1308.
- [5] 杨华勇,王双,张斌,等.数字液压阀及其阀控系统发展和展望[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(5):1494-1505.
- [6] 罗樟,朱玉川.智能材料驱动的高速开关阀[J].压电与声光,2019,41(4):575-581.
- [7] 薛国.航天发射塔液压系统任务可靠性设计及故障仿真技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [8] 刘建盈.大型空间飞行器推进系统水击影响因素及抑制方法研究[D].镇江:江苏大学,2021.
- [9] 奚斌.石油工程中环空流道液流失速水击特性的实验研究[D].大庆:东北石油大学,2015.
- [10] 胡斌.水力锤击压力波在水系中传播特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [11] 孟影.均质圆管水击计算方法的改进与求解[D].郑州:郑州大学,2021.
- [12] 张焱炜.管道输水工程水击防护设计及优化研究[D].济南:山东大学,2020.
- [13] Walters T W, Leishear R A. When the joukowsky equation does not predict maximum water hammer pressures[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019, 141(6): 060801.

引用格式:李雨铮,陈福龙,邓少贤,等.双线圈高速开关阀的水击特性验证[J].宇航总体技术,2024,8(2):46-52.

Citation: Li Y Z, Chen F L, Deng S X, et al. Verification of water hammer characteristics of double-coil high-speed on-off valve[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024,8(2):46-52.