



机械科学与技术  
*Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*  
ISSN 1003-8728, CN 61-1114/TH

## 《机械科学与技术》网络首发论文

题目: 球阀式高速开关阀的建模与实验研究  
作者: 田爽, 朱玉川, 李林飞  
DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20250037  
网络首发日期: 2025-04-16  
引用格式: 田爽, 朱玉川, 李林飞. 球阀式高速开关阀的建模与实验研究[J/OL]. 机械科学与技术. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250037>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 球阀式高速开关阀的建模与实验研究

田爽<sup>1</sup>, 朱玉川<sup>1, 2, \*</sup>, 李林飞<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学无锡研究院, 无锡 214000)

**摘要:** 高速开关阀是数字化、智能化液压系统的重要组成部分, 其性能决定了数字液压系统的整体控制精度。本文首先深入探究了高速开关阀磁路分布特征, 并建立了其精确的等效磁路模型和仿真模型。其次, 通过仿真详细分析了高速开关阀电磁特性和动态特性。然后, 研制了高速开关阀样机, 并设计电磁力测试实验台对其电磁特性进行验证。实验结果表明, 不同电流、气隙长度下高速开关阀电磁铁输出电磁力仿真与实验数据具有较高的吻合度, 充分验证了等效磁路模型的准确性。最后, 搭建高速开关阀测试实验台其静态压力-流量特性和动态特性进行验证。实验结果表明, 该高速开关阀关闭延迟时间为 1.1ms, 总关闭时间为 1.7ms, 开启延迟时间为 0.5ms, 总开启时间为 2.6ms。在 4MPa 供油压力下, 最大输出流量为 2.83L/min。

**关键词:** 高速开关阀; 数字液压; 等效磁路模型; 电磁力; 静动态特性

中图分类号: TH137

## Modeling and Experimental Research on Ball Type High-Speed On/Off Valve

Tian Shuang<sup>1</sup>, Zhu Yuchuan<sup>1, 2, \*</sup>, Li Linfei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Wuxi Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** The high-speed on/off valve(HSV) is an important component of the digital and intelligent hydraulic system, and its performance determines the overall control accuracy of the digital hydraulic system. In this paper, the magnetic field distribution characteristics of the HSV are deeply explored, and an accurate equivalent magnetic circuit model and simulation model are established. Secondly, through simulation analysis, the electromagnetic characteristics and dynamic characteristics of the HSV are thoroughly explored. Then, a prototype of the HSV is developed, and an experimental platform for electromagnetic force testing is designed to verify the electromagnetic characteristics. The experimental results show that the simulated and experimental data of the electromagnetic force output of the HSV's electromagnet under different current and air gap lengths have a high degree of consistency, fully verifying the accuracy of the equivalent magnetic circuit model. Finally, an experimental platform for HSV testing is set up to experimentally verify its static pressure-flow characteristics and dynamic pressure characteristics. The experimental results show that the HSV has a closing delay time of 1.1ms, a total closing time of 1.7ms, an opening delay time of 0.5ms, and a total opening time of 2.6ms. Under a 4MPa supply pressure, the maximum output flow rate is 2.83L/min.

**Key words:** High-speed on/off valve; Hydraulic circuit; Equivalent magnetic circuit model; Electromagnetic force; Static and dynamic characteristics

电液伺服阀作为传统电液伺服控制系统的核心元件, 具有精度高、死区小、高动态响应和控制性

能好等优点。然而, 在极端工作条件下, 伺服阀易遭遇卡死和啸叫等问题, 难以维持长期的可靠性<sup>[1]</sup>。数字液压技术凭借其成本低廉、高度可靠以及出色的抗污染能力等优势, 成为传统电液伺服技术在飞机刹车系统、起落架等多个航空领域中的有力替代

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 52375059); 江苏省重点研发项目(项目号 BE2021034)

作者简介: 田爽(2000-), 硕士研究生, SX2205088@nuaa.edu.cn

\*通信作者: 朱玉川, 教授, 博士生导师, meeyczhu@nuaa.edu.cn

方案<sup>[2,3]</sup>。高速开关阀(HSV)作为数字液压系统中的关键控制元件<sup>[4]</sup>，通常采用脉宽调制信号(PWM)进行控制，使阀芯在全开与全关状态之间高频切换，实现输出流量的高效、连续且比例可控，其性能对系统的控制精度具有直接影响。因此，高速开关阀成为近年来数字液压领域的研究重点<sup>[5,6]</sup>。

高速开关阀启闭响应时间是评价其性能的重要指标，同时其响应时间也决定了数字液压系统的控制精度<sup>[7]</sup>。为了提高高速开关阀响应速度，国内外学者将超磁致伸缩材料<sup>[8]</sup>、压电陶瓷材料<sup>[9]</sup>等智能材料应用于高速开关阀上，取得明显效果，但智能材料成本高、行程小，限制了其应用范围。相反，使用电磁铁作为高速开关阀电-机转换器，不仅节约了成本，而且能保证其具有较快的响应速度。Matti和Miika等人<sup>[10]</sup>相继设计了第一代和第二代球阀式水液压高速开关阀，该阀启闭时间小于2ms。满军等人<sup>[11]</sup>通过在高速开关阀中加入永磁体增加磁通量和磁感应强度，最终提升其动态性能。吴帅等人<sup>[12]</sup>设计了一种空心柱塞式高速开关阀，并采用粒子群优化算法优化了其关键结构参数，最终阀芯启闭时间为2.4ms和2ms左右。杨梅生等人<sup>[13]</sup>通过对高速开关阀磁场和结构的优化减小其整体尺寸，并且阀芯切换时间小于1.5ms。徐纯洁等人<sup>[14]</sup>通过研究不同电磁铁线圈构型对高速开关阀响应时间的影响，结果表明采用叠加式线圈构型能够使其性能更优。

为了提高电磁式高速开关阀的响应速度，上述学者从结构、材料等方面进行了深入的研究，并取得了显著的成果。然而，高速开关阀尺寸的变化，不可避免的导致电磁力发生变化<sup>[15]</sup>，而这一点在上述的研究中并未得到具体测量。鉴于电磁力作为影响电磁式高速开关阀响应速度的关键因素<sup>[16]</sup>，为了准确评估其对响应速度的影响，对高速开关阀的电磁力进行精确测量也是至关重要的。

本文针对高速开关阀特性进行分析，首先建立了高速开关阀精确的等效磁路模型与仿真模型，然后通过仿真分析了其动态特性和关键参数对其电磁特性的影响规律。最后，设计实验对高速开关阀的电磁力和动态特性进行了准确测量。

## 1 结构与工作原理

本文所研究的高速开关阀为二位二通常开式，其结构示意图和实物图分别如图1、2所示。从图中可以看出，阀座与阀体、阀体与外壳之间均采用螺纹连接，调节螺丝可调节气隙长度和阀口开度。阀芯采用球阀结构，可有效防止泄露和减小流体流动

阻力。

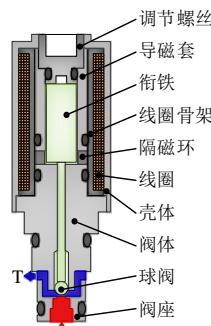


图1 高速开关阀结构图  
Fig.1 Structure schematic of high speed on/off valve



图2 高速开关阀实物图  
Fig.2 Photograph of high speed on/off valve

高速开关阀的具体工作原理为：在关闭阶段，线圈通电，阀体与衔铁之间产生电磁力，衔铁在电磁力的作用下带动球阀往下运动，球阀与阀座形成的节流口关闭，进油口P和出油口T隔断，高速开关阀关闭；在开启阶段，线圈断电，阀体与衔铁之间的电磁力消失，球阀与衔铁在进油口液压力的作用下往上运动，使得球阀与阀座形成的节流口，高速开关阀打开，进油口P和出油口T连通。

## 2 数学模型

### 2.1 等效磁路模型

采用Maxwell 2D有限元软件对高速开关阀磁路进行仿真分析，得到不同电流下磁路分布特征如图3所示。从图中可以看出，高速开关阀磁路不同电流下保持相对稳定，可采用一个等效磁路模型对高速开关阀进行分析。

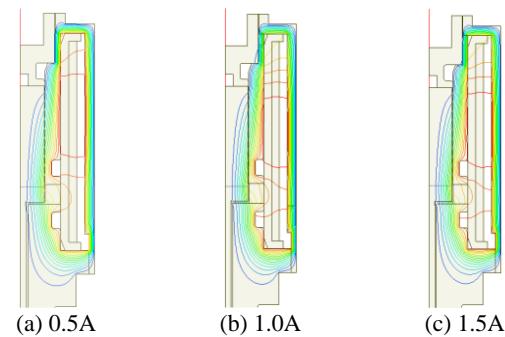


图3 高速开关阀磁路分布

Fig.3 Magnetic circuit distribution of HSV

高速开关阀简化几何图如图4所示，等效磁路模型如图5所示。图中  $R^* i$  表示等效磁阻，其中\*表示高速开关阀中各元件， $f$  表示壳体， $s$  表示导磁套， $a$  表示衔铁， $v$  表示阀体， $g$  表示气隙， $c$  表示线圈， $i$  表示元件的不同部分，并以数字表示。 $U_m$  表示磁动势， $\phi_i$  表示各支路磁通量，其中  $\phi_{10}$  为工作气隙处磁通量，可以通过它计算出作用在阀芯上

的电磁力。根据基尔霍夫定律, 等效磁路模型中 10 个支路的磁通量可由公式(1)的 10 个方程求解。

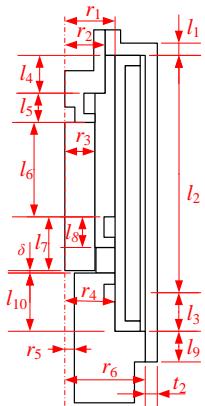


图 4 高速开关阀几何图  
Fig.4 Geometry diagram of HSV

$$\begin{cases}
 \phi_1 + \phi_3 - \phi_2 = 0 \\
 \phi_4 + \phi_5 - \phi_2 = 0 \\
 \phi_6 + \phi_7 - \phi_2 = 0 \\
 \phi_9 + \phi_{10} - \phi_6 = 0 \\
 \phi_8 + \phi_3 - \phi_7 = 0 \\
 \phi_1 R_1 + \phi_8 R_r - \phi_3 R_1^c = 0 \\
 \phi_3 R_1^c + \phi_4 R_3^s + \phi_2 R_2 + \phi_5 R_2^c - U_m = 0 \\
 \phi_5 R_2^c - \phi_4 R_3^s = 0 \\
 \phi_9 R_{gl} - \phi_{10} R_g = 0 \\
 \phi_6 R_4 - \phi_7 R_3^s - \phi_8 R_r + \phi_{10} R_g = 0
 \end{cases} \quad (1)$$

其中, 支路 1、支路 2、支路 4 和支路 6 的总磁阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_4$ 、 $R_6$  可表示为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R} = & \begin{bmatrix}
 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
 R_1 & 0 & -R_1^c & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\
 0 & R_2 & R_1^c & 0 & R_2^c & 0 & R_3^s & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -R_4 & R_2^c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{gl} & -R_g \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 & -R_3^s & -R_r & 0 & R_g
 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{U} = & [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ U_m \ 0 \ 0 \ 0]^T \\
 \boldsymbol{\phi} = & [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4 \ \phi_5 \ \phi_6 \ \phi_7 \ \phi_8 \ \phi_9 \ \phi_{10}]^T
 \end{aligned} \quad (7)$$

磁动势可表示为:

$$U_m = NI \quad (8)$$

式中  $N$  为线圈匝数,  $I$  为线圈电流。

因此, 高速开关阀各部件的磁感应强度可由下式计算:

$$B_i = \phi_i / S_i \quad (9)$$

$$\begin{cases}
 R_1 = R_1^v + R_2^v + R_3^v + R_1^f + R_2^f + R_3^f \\
 R_2 = R_2^s + R_4^s + R_4^f \\
 R_4 = R_1^s + R_5^f + R_6^f + R_7^f \\
 R_6 = R_1^a + R_4^a + R_1^s
 \end{cases} \quad (2)$$

根据图 4 中定义的 HSV 尺寸, 等效磁路中的 22 个磁阻可由公式(3)~(5)计算得出<sup>[17]</sup>:

$$R_{\text{axial}} = \frac{l}{\mu S} \quad (3)$$

$$R_{\text{radial}} = \frac{1}{2\pi\mu L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

$$R_{\text{elliptical}} = \frac{\pi}{4\mu L} \quad (5)$$

式中,  $R_{\text{axial}}$  为轴向磁阻,  $R_{\text{radial}}$  为径向磁阻,  $R_{\text{elliptical}}$  为椭圆形磁阻;  $l$  为磁通路径长度,  $\mu$  为材料磁导率,  $S$  为磁通路径截面积;  $r_2$ 、 $r_1$  和  $L$  分别表示结构件的外径、内径和厚度。

通过对高速开关阀元件各部分磁阻的计算, 等效磁路模型以用矩阵表示:

$$\boldsymbol{\phi} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{U} \quad (6)$$

其中, 磁阻矩阵  $\mathbf{R}$ 、磁动势矩阵  $\mathbf{U}$  及磁通量矩阵  $\boldsymbol{\phi}$  具体如公式(7)所示。

式中,  $\phi_i$  为高速开关阀元件各段磁通量,  $S_i$  高速开关阀元件各段横截面积。

本文选用 DT4C 作为高速开关阀的导磁材料, 为了更精确的计算高速开关阀的磁场, 在模型中需考虑软磁材料的非线性磁导率。可用公式(10)拟合得到软磁材料磁导率与磁感应强度关系:

$$\mu = m_1 e^{-\left(\frac{B-n_1}{z_1}\right)^2} + m_2 e^{-\left(\frac{B-n_2}{z_2}\right)^2} \quad (10)$$

式中  $m_1, m_2, n_1, n_2, z_1, z_2$  为拟合参数。

根据图 6 所示磁导率数据, 可以得到  $m_1=1.147 \times 10^{-3}$ ,  $m_2=2.565 \times 10^{-3}$ ,  $n_1=1.162$ ,  $n_2=0.677$ ,  $z_1=0.4134$ ,  $z_2=0.8004$ 。拟合曲线的相关指数  $R^2$  为 0.9923, 说明公式 (10) 对描述 DT4C 磁化特性具有较高的拟合精度。

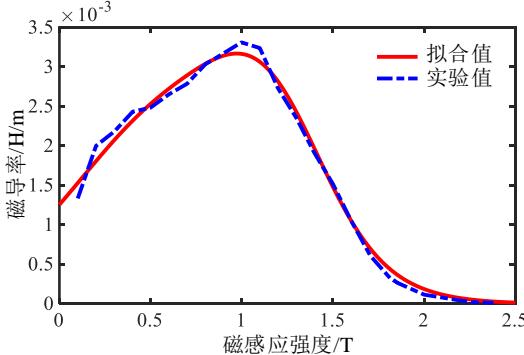


图 6 DT4C 磁导率与磁感应强度数据及其拟合曲线

Fig.6 Curve of permeability versus flux density of DT4C

高速开关阀的电磁力可表示为:

$$F_m = \frac{S_0 B_g^2}{2\mu_0} \quad (11)$$

式中,  $B_g$  为气隙处磁感应强度。

## 2.2 电场模型

高速开关阀通过 PWM 电压信号驱动, 其电场数学模型如下所示:

$$U = IR_e + \frac{d\psi}{dt} = IR_e + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (12)$$

式中,  $U$  为驱动电压,  $R_e$  为线圈电阻,  $L$  为线圈电感,  $\psi$  为磁链。

根据公式 (12), 线圈中瞬时电流可表示为:

$$i(t) = \frac{U}{R_e} + (i_0 - \frac{U}{R_e}) e^{-\frac{R_e t}{L}} \quad (13)$$

线圈电感可表示为:

$$L = \frac{N\phi_2}{I} \quad (14)$$

式中  $\phi_2$  为磁路总磁通。

## 2.3 阀芯动力学模型

根据牛顿第二定律, 阀芯动力学模型可表示为:

$$m\ddot{x} = F_m + F_s + F_t - \Delta p A - kx \quad (15)$$

式中,  $m$  为运动部件质量,  $x$  为球阀位移,  $k$  为阻尼系数,  $F_s$  为稳态液动力,  $F_t$  为瞬态液动力,  $\Delta p$  为进油口和出油口的压差,  $A$  为压力作用面积。

## 2.4 阀口流量模型

高速开关阀阀口结构简图如图 7 所示。球阀流量方程如下:

$$Q = C_d A_s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (16)$$

$$A_s = \frac{\pi d^2}{4} \left( \frac{1/\tan^2 \alpha + 1 - (D/d)^2}{\sqrt{1/\tan^2 \alpha + 1}} \right) \quad (17)$$

$$\frac{1}{\tan \alpha} = \frac{2x}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \quad (18)$$

式中:  $C_d$  为流量系数,  $A_s$  为过流面积,  $\rho$  为油液密度,  $D$  为钢球直径,  $d$  为阀座内孔直径,  $\alpha$  为半锥角。

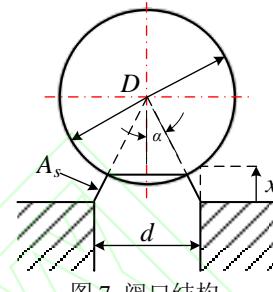


图 7 阀口结构

Fig.7 Orifice structure

阀芯受到稳态液动力  $F_s$  和瞬态液动力  $F_t$  可通过以下公式计算<sup>[15]</sup>:

$$F_s = 2C_v C_d A_s \Delta p \cos \alpha \quad (19)$$

$$F_t = C_d w L_d \dot{x} \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (20)$$

式中:  $C_v$  为流速系数,  $w$  为面积梯度,  $L_d$  为阻尼长度。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型

根据公式(1)~(14)搭建高速开关阀电-机转换器仿真模型, 根据公式(15)搭建其动力学仿真模型, 根据公式(16)~(20)构建其阀口流量仿真模型, 最终得到高速开关阀整阀 Simulink 仿真模型如图 8 所示。仿真模型关键参数如表 1 所示。

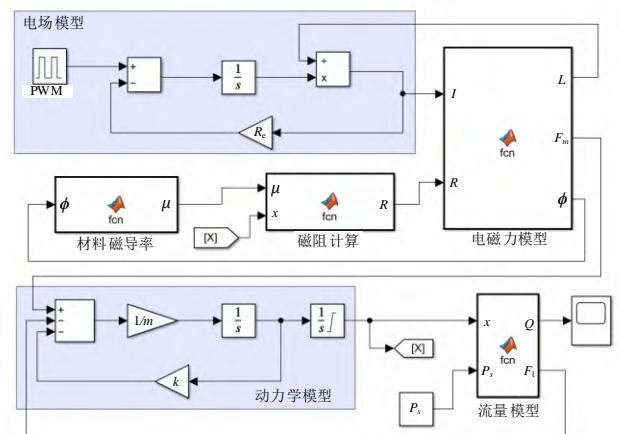


图 8 高速开关阀仿真模型

Fig.8 Simulation model of HSV

表 1 高速开关阀关键仿真参数

Table.1 Key simulation parameters of HSV

序号	参数	数值
1	运动部件质量	3.3g
2	球阀直径	2.5mm
3	阀座内孔直径	1.5mm
4	阀芯行程	0.2mm
5	油液密度	870kg/m <sup>3</sup>
6	阀芯阻尼系数	10N/(m/s)
7	流速系数	0.9
8	流量系数	0.65
9	线圈匝数	400
10	空气磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$ H/m
11	线圈电阻	7.8Ω
12	最大工作气隙	0.3mm

### 3.2 电磁特性分析

图 9 所示为不同电流下，电磁力随气隙长度变化曲线。

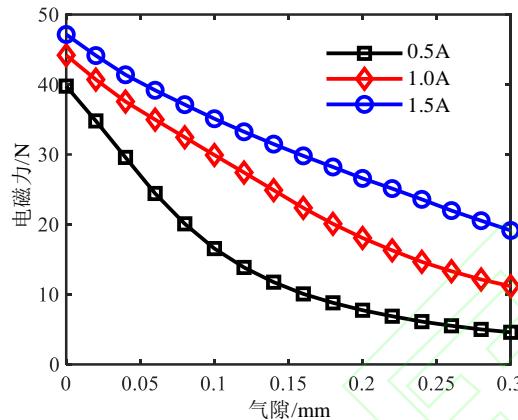


图 9 不同电流下电磁力随气隙长度变化曲线

Fig.9 The curves of magnetic force under different current with respect to the air gap

从图中可以看出，当线圈电流一定时，输出电磁力随着气隙长度的增加而逐渐减小，这是因为气隙长度增加导致磁路总磁阻变大，从而导致气隙处磁通变小，并且漏磁效应愈发严重。此外，随着输入电流的增加，电磁力随气隙长度变化的趋势逐渐变得线性化，且气隙长度变化所引起的电磁力变化范围变小。这是因为输入电流较小时，软磁材料磁感应强度远未达到磁饱和区，此时磁感应强度随气隙长度变化较为剧烈，因此电磁力随之快速变化；电流较大时软磁材料快速到达磁饱和区，此时磁感应强度变化缓慢，电磁力变化也变缓。

### 3.3 动态特性分析

为了提升高速开关阀的动态特性，采用三电压 PWM 控制信号驱动高速开关阀，如图 10 所示。具体工作过程为：关闭过程中，先通短暂的 24V 电压加速阀芯关闭，4ms 后减小到 5V，在开启时施加持续时间为 0.8ms，幅值为-24V 的反向电压，使电流

快速下降，实现阀芯的快速开启。

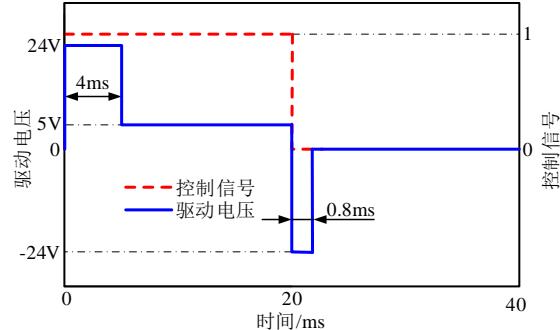


图 10 高速开关阀控制算法

Fig.10 The control algorithms of HSV

在仿真模型中设置控制信号频率为 25Hz，占空比为 0.5，供油压力为 4MPa，仿真得到一个周期内高速开关阀的动态响应曲线如图 11 所示。

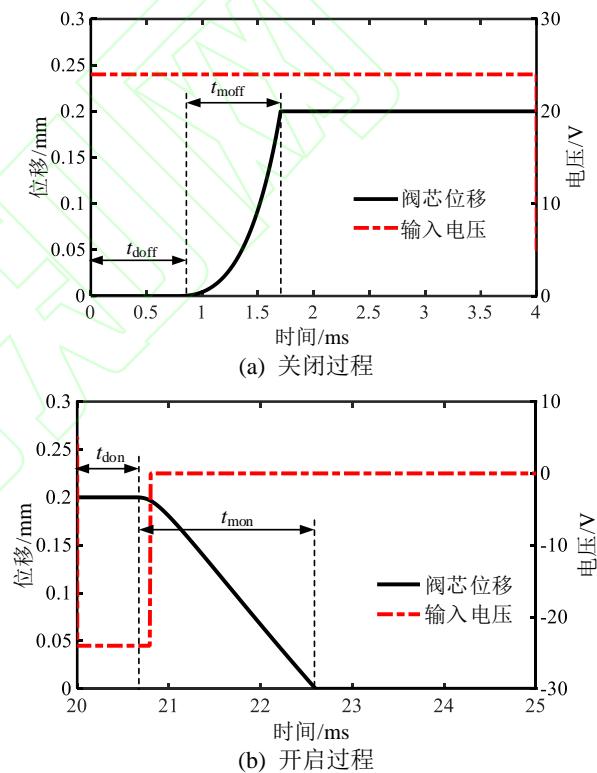


图 11 高速开关阀动态响应曲线

Fig.11 Dynamic response curves of HSV

从图中可以看出，在 4MPa 供油压力下，高速开关阀阀芯最大位移 0.2mm，由于线圈电感的存在以及软磁材料的磁滞非线性特性，高速开关阀关闭延迟时间位 0.9ms，总关闭响应时间为 1.7ms；开启时延迟时间为 0.7ms，总关闭相应时间为 2.6ms。

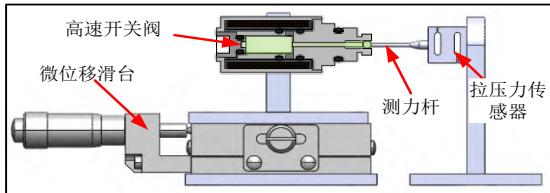
## 4 实验研究

### 4.1 电磁力测试实验

#### (1) 实验系统组成及原理

高速开关阀电磁力测试系统如图 12 所示，测试平台由高速开关阀、支架、微位移滑台、测力杆、

直流电源、示波器、电流传感器、激光位移传感器以及拉压力传感器等部件组成,具体参数如表2所示。高速开关阀固定在微位移滑台支架上,通过旋转微位移滑台的旋钮使高速开关阀左右运动,激光位移传感器用于测量高速开关阀的运动距离。安装时,需保证高速开关阀和测力杆轴线处于同一高度。



(a) 测试原理图

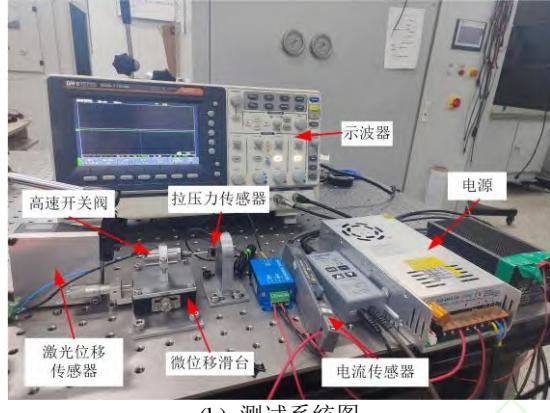


图 12 电磁力测试系统

Fig.12 Electromagnetic force test system

表 2 电磁力测试设备性能参数

Table.2 Performance Parameters of Electromagnetic Force Test Equipment

名称	型号/规格	技术参数
电流传感器	CP8000	带宽 50Hz, 上升时间<7ns
激光位移传感器	CD5A-N	量程±1.5mm, 精度 1μm
拉压力传感器	DYLY-109	量程 0-100N, 精度 0.2%
示波器	GDS-1104B	带宽 100M, 采样率 1G/s

测量时先调节微位移平台使高速开关阀向右运动,使得测力杆左端与阀芯接触,并保持气隙长度处于初始值  $\delta_0$ ,同时观察示波器中拉压力传感器的示数,使其保持在 0 附近。然后调整微位移滑台使高速开关阀向左运动,激光位移传感器测量出移动的距离  $x_2$ ,此时可计算出气隙长度:  $\delta = \delta_0 - x_2$ 。然后调节驱动电压大小,使电流大小达到设定值,最终便可得到特定气隙长度、特定电流下高速开关阀的输出电磁力。

## (2) 实验结果分析

图 13 和图 14 分别是不同电流下高速开关阀电磁力与气隙长度关系的实验数据与仿真数据对比曲线和电磁力相对误差曲线。从图 13 中可以看出,不

同驱动电流下,电磁力与气隙长度关系曲线实验结果与仿真结果趋势基本吻合,但同一电流下,电磁力实验值均小于仿真值,这是因为实验过程中,衔铁与导磁套之间存在摩擦力以及实际加工所采用材料特性与模型中材料特性的差异性导致的。从图 14 中可以看出,不同电流下电磁力相对误差大部分情况下均小于 10%,说明等效磁路模型的准确性以及电磁力测试方法的可行性。

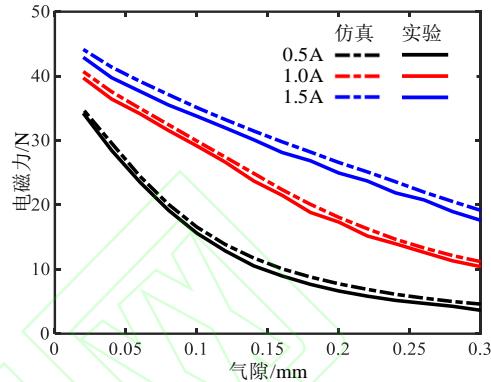


图 13 电磁力实验值与仿真值对比曲线

Fig.13 Comparison curve between experimental and simulation of electromagnetic force

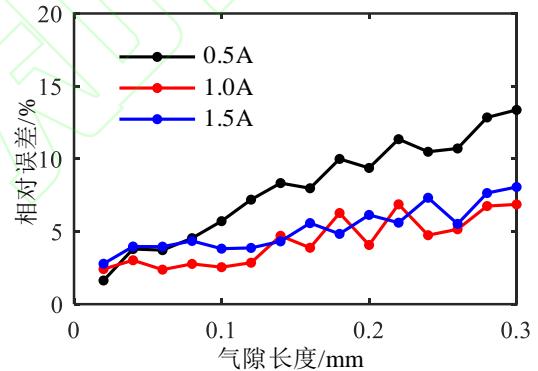


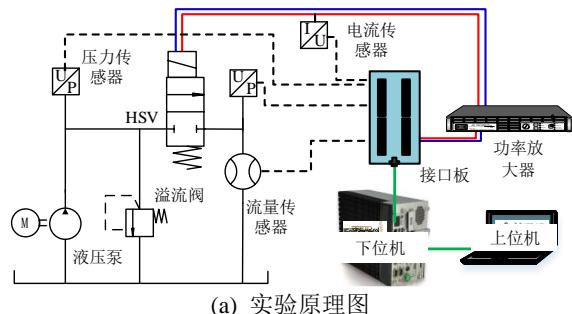
图 14 电磁力相对误差曲线

Fig.14 Curve of relative error of electromagnetic force

## 4.2 高速开关阀性能测试

### (1) 实验系统组成及原理

设计高速开关阀性能测试系统如图 15 所示,压力传感器分别安装在高速开关阀进出油口,用于测量进出油口压力,流量传感器用于测量出口流量,功率放大器用于放大实时仿真系统输出电压来驱动高速开关阀。



(a) 实验原理图



图 15 高速开关阀性能测试系统  
Fig.15 The performance testing system of HSV

实验系统主要设备及其技术参数如表 3 所示。

表 3 高速开关阀性能测试设备技术参数

Table.3 Technical Parameters of High-speed on/off Valve Performance Testing Equipment

名称	型号/规格	技术参数
灵思创奇	Box-03	-
数据采集卡	PCI6259	-
功率放大器	LYB5010	放大范围 $\pm 30V$
高频压力传感器	CYG1401F	量程 0~10MPa, 精度 0.1%
流量传感器	FGR200	量程 0.2~25L/min, 精度 0.5%
电流传感器	CP8000	带宽 50MHz, 上升时间 < 7ns
液压泵站	-	额定压力 10MPa, 额定流量 10L/min

## (2) 静态特性实验

高速开关阀输出流量是其重要指标, 改变进出油口压差测得阀口开启时的流量实验与仿真结果对比如图 16 所示, 相对误差曲线如图 17 所示。

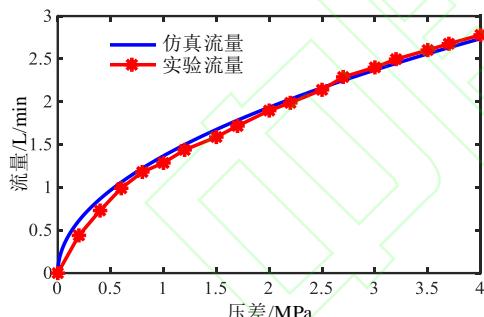


图 16 压差-流量特性曲线  
Fig.16 Pressure-flow characteristic curve

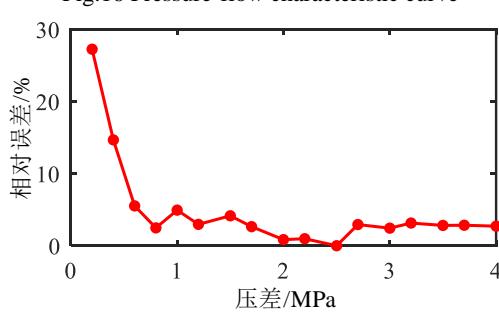


图 17 流量相对误差曲线

Fig.17 Relative error curve of flow rate

由图 16 可以看出, 仿真结果与实验结果具有相同的变化趋势, 当压差达到 4MPa 时, 高速开关阀

最大流量为 2.83L/min。由图 17 可知, 当压差小于 0.5MPa 时, 输出流量的相对误差值较大, 这是由于本文所用压力传感器的非线性误差导致的。其余部分的相对误差均在 7% 以内。

## (3) 动态特性实验

在实际作过程中, 无法直接测量阀芯启闭动态响应时间。因此, 本文采用压力间接测量方法, 即在进油口安装压力传感器, 通过监测进口压力响应时间近似得出阀芯启闭动态响应时间。定义给定阀口开启或关闭信号后, 压力上升到第一个波峰或下降到第一个波谷的时间间隔为启闭响应时间<sup>[18]</sup>。

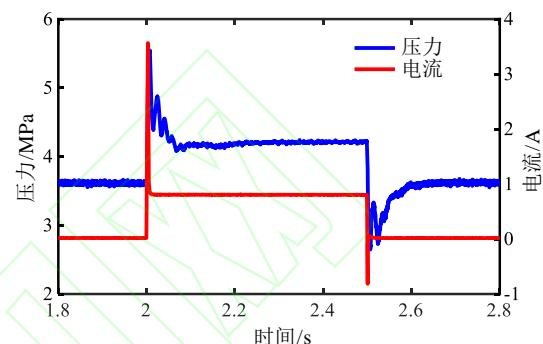
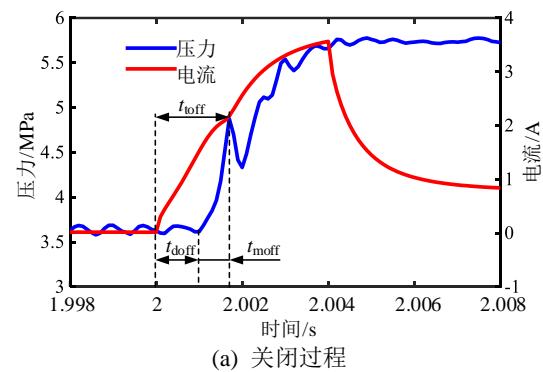


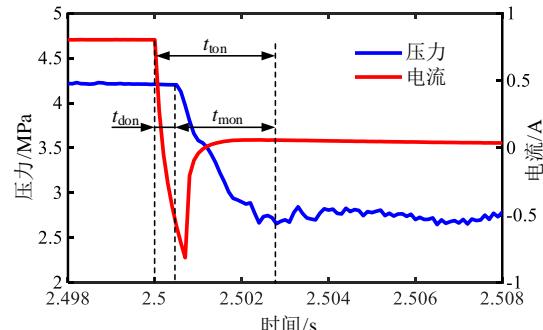
图 18 电流和压力变化曲线

Fig.18 Current and pressure variation curves

如图 18 所示为工作压力为 4MPa 时高速开关阀在一个周期内进油口压力和线圈电流实验曲线。从图中可以看出, 阀芯在关闭和开启时压力会出现超调现象, 这是因为高速开关阀阀芯快速启闭, 油液在惯性力的作用下流动状态剧烈变化导致。



(a) 关闭过程



(b) 开启过程

图 19 高速开关阀动态响应曲线

Fig.19 Dynamic response curve of HSV

图 19 所示为高速开关阀在关闭和开启过程中电流和压力响应曲线。从图中可以看出,高速开关阀关闭延迟时间  $t_{doff}$  为 1.1ms, 关闭运动时间  $t_{moff}$  为 0.6ms, 总关闭响应时间  $t_{off}$  为 1.7ms; 开启延迟时间  $t_{don}$  为 0.5ms, 开启运动时间  $t_{mon}$  为 2.1ms, 总开启响应时间  $t_{on}$  为 2.6ms。

## 5 结论

(1) 建立了高速开关阀精确的等效磁路模型和仿真模型,并通过仿真分析得到高速开关阀电磁力特性和动态特性。

(2) 设计了对高速开关阀电磁力测试方案,得到不同电流下电磁力与气隙长度变化趋势的实验结果与仿真结果基本吻合,验证了仿真模型的准确性。

(3) 测试了高速开关阀的静动态特性,在 4MPa 供油压力下,高速开关阀打开时流量为 2.83L/min,其关闭延迟时间为 1.1ms,总关闭响应时间为 1.7ms; 开启延迟时间为 0.5ms, 总开启响应时间为 2.6ms。

## 参考文献

- [1] Huova M, Plöckinger A. Improving resolution of digital hydraulic valve system by utilizing fast switching valves[C]//Proceedings of the Third Workshop on Digital Fluid Power, October 13-14 2010, Tampere, Finland. 2010: 79-92.
- [2] Jiao Z, Liu X, Shang Y, et al. An integrated self-energized brake system for aircrafts based on a switching valve control[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 60: 20-30.
- [3] Yao J, Wang P, Dong Z, et al. A novel architecture of electro-hydrostatic actuator with digital distribution[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(05): 224-238.
- [4] 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(05): 1494-1505.  
YANG H Y, WANG S, ZHANG B, et al. Development and prospect of digital hydraulic valve and valve control system[J]. Journal of Jilin University (Engineering Science), 2016, 46(05): 1494-1505 (in Chinese).
- [5] Wang F, Gu L, Chen Y. A hydraulic pressure-boost system based on high-speed on-off valves[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2012, 18(2): 733-743.
- [6] Zeng Y, Wang D, Zi B, et al. Dynamic characteristics of priority control system for high-speed on-off digital valve[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(4): 1687814015582098.
- [7] 钟麒, 何贤剑, 李研彪, 张斌, 杨华勇, 陈波. 自适应供油压力变化的高速开关阀控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(06): 224-235.  
Zhong Q, He X J, Li Y B, et al. Research on Control Algorithm for High-speed on/off Valves that Adaptive to Supply Pressure Changes[J]. Journal of Mechanical Engineerin, 2021, 57(06): 224-235. (in Chinese)
- [8] 罗樟, 朱玉川, 高强. GMM 高速开关阀用液压放大器建模与实验[J]. 压电与声光, 2019, 41(02): 265-268+274.  
Luo Z, Zhu Y C, Gao Q. Modeling and experiment on hydraulic amplifier for GMM high-speed on offvalve[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(02): 265-268+274. (in Chinese)
- [9] 王玉文, 朱玉川, 凌杰, 等. 滑阀式压电高速开关阀特性研究[J/OL]. 航空动力学报, 1-9[2024-09-29]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220426>.  
Wang Y W, Zhu Y C, Ling J, et al. Research on characteristics of spool type high-speed on/off valve driven by piezoelectric[J]. Journal of Aeronautical Propulsion, 1-9[2024-09-29]. (in Chinese)
- [10] Paloniitty M. Novel water hydraulic on/off valves and tracking control method for equal coded valve system[D]. Tampere University of Technology, 2018, 85
- [11] Man J, Ding F, Li Q, et al. Novel high-speed electromagnetic actuator with permanent-magnet shielding for high-pressure applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(12): 4030-4033.
- [12] Wu S, Zhao X, Li C, et al. Multi objective optimization of a hollow plunger type solenoid for high speed on/off valve[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3115-3124.
- [13] Yang M, Zhang J, Xu B. Experimental study and simulation analysis on electromagnetic characteristics and dynamic response of a new miniature digital valve[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1-8.
- [14] 徐纯洁, 谢方伟, 凡榕瑞, 等. 考虑电磁铁线圈构型的高速开关阀动态特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(04): 211-220. DOI:10.7652/xjtxb202404020  
Xu C J, Xie F W, Fan R R, et al. Dynamic Characteristics Analysis of the High-Speed on/off Valve Considering Electromagnet Coil Configurations[J]. Journal of Xi'an

Jiaotong University, 2024, 58(04): 212-220.

DOI:10.7652/xjtuxb202404020. (in Chinese)

- [15] Zhong Q ,Wang J , Xu E, et al. Multi-objective optimization of a high speed on/off valve for dynamic performance improvement and volume minimization[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2024,37(10):435-444.
- [16] 陈淑梅,陈绍荣,李启正,等.多狭缝高速开关阀的电-机械转换器动态特性[J/OL].北京航空航天大学学报,1-17[2024-09-30].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0594>.
- Chen S M, Chen S R, Li Q Z, et al. Dynamic characteristics of electro-mechanical transducer with slits of high speed on/off valve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-17[2024-09-30]. (in Chinese)
- [17] Chen L, Zhu Y, C, Ling J, et al. Correction to: Theoretical modeling and experimental evaluation of a magnetostrictive actuator with radial-nested stacked configuration[J]. Nonlinear Dynamics,2022,109(3):1277-1293.
- [18] 姚静,杨帅,王梦阳,等.一种低功耗数字阀建模、性能分析及试验验证 [J/OL]. 航空学报,1-15[2024-12-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240909.0929.004.html>.
- Yao J, Yang S, Wang M Y, et al. Modeling, Performance Analysis, and Experimental Verification of a Low-Power Digital Valve[J/OL]. Journal of Aeronautical, 1-15 [2024-12-27].(in Chinese)

