

离散线圈磁致伸缩直驱阀功率驱动设计与试验研究

张梦昊,朱玉川,陈 龙

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要: 针对一种离散线圈式磁致伸缩直驱阀,为实现其高频驱动,基于 SPWM 调制原理设计了一款八通道开关式恒流功率驱动器,并建立其数学模型,利用数学模型分析了功率驱动器在驱动单个线圈时的输出特性。加工样机并搭建试验系统进行试验研究,试验测得功率驱动器在进行单线圈驱动时频响可达 2072 Hz,多线圈驱动时受线圈间感应电流影响导致输出能力下降,但驱动频响仍超过 550 Hz,使用该功率驱动器驱动离散线圈磁致伸缩直驱阀进行压力调节时,在供油压力 2 MPa,平均流量 2 L/min 下可以实现 200 Hz,0.66 MPa 的振荡压力调节。

关键词: 磁致伸缩直驱阀;离散线圈;SPWM 调制;功率驱动

中图分类号: TH137 **文献标志码:** B **文章编号:** 1008-0813 (2026)03-0030-07

Design and Experimental Study of Power Drive for Discrete Coil Magnetostrictive Direct Drive Valve

ZHANG Meng-hao, ZHU Yu-chuan, CHEN Long

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

Abstract: To achieve high-frequency driving of a discrete coil magnetostrictive direct drive valve, an eight channel switch type constant current power driver was designed based on SPWM modulation principle, and its mathematical model was established. The output characteristics of the power driver when driving a single coil were analyzed using the mathematical model. Process a prototype and build an experimental system for experimental research. The experimental results show that the frequency response of the power driver can reach 2072 Hz when driven by a single coil. When driven by multiple coils, the output capability decreases due to the induced current between the coils, but the driving frequency response still exceeds 550 Hz. When using this power driver to drive a discrete coil magnetostrictive direct drive valve for pressure regulation, it can achieve oscillation pressure regulation of 200 Hz and 0.66 MPa at an oil supply pressure of 2 MPa and an average flow rate of 2 L/min.

Key words: magnetostrictive direct drive valve; discrete coil; SPWM modulation; power driver

0 引言

目前,航空发动机燃烧振荡严重威胁着航空发动机的使用寿命以及使用安全^[1-2],利用高频燃油阀进行供油调节是抑制燃烧振荡的有效途径^[3-4]。但现有的电磁阀^[5]难以满足燃烧振荡主动控制的高频驱动需求,相比之下,磁致伸缩执行器因其响应速度快,输出功率高等特点,在高频燃油阀领域有着广阔应用前景^[6]。为了提升磁致伸缩执行器输出性能,一些学者提出了离散线圈结构的磁致伸缩执行器^[7-8]。离散线圈结构通过将传统的单个线圈分解为多个独立的线

圈,并对每个线圈分别进行驱动,从而提升了执行器的驱动频响。在这种结构中,不同位置的线圈可以独立控制,为执行器提供了更高的灵活性和更多的控制自由度。然而,这种设计也带来了挑战,即需要更多的功率驱动器来支持各个线圈的独立操作,因此实现功率驱动器的小型化尤为重要。美国 AE 公司的商用功率放大器可以满足驱动需求,但其质量和体积较大,不利于航空领域应用。

国内外学者基于研究需求开展了大量功率驱动器相关研究,一些学者基于连续式原理进行功率驱动器设计,杨兴等^[9]用功率 MOS 管为放大元件研制了超磁致伸缩执行器功率电源,输出电流 $-3 \sim 3$ A 可调,驱动频响可达 320 Hz。李跃松等^[10]为超磁致伸缩伺服阀研制了功率电源,输出电流为 2 A,频率可达 1000 Hz。王彦文等^[8]通过运放加并联 MOS 管设计伺服功率放大器,可以驱动离散线圈可以实现 8 A,1000 Hz 输出。

收稿日期: 2024-12-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52375059)

作者简介: 张梦昊(2000-),男,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向为航空电液系统。

基于连续式原理设计的功率驱动器存在效率低、发热严重的问题,需要加装散热装置。一些学者采用发热少、效率高的开关式原理进行功率驱动器设计。王松等^[11]基于 DSP 设计了超磁致伸缩换能器驱动电源,试验验证可实现 20 kHz 高频输出。李志丹^[12]同样基于 DSP 设计超磁致伸缩换能器驱动电源,对不同换能器负载可通过阻抗匹配电路使换能器工作在谐振点,驱动频率 500 ~ 30 kHz。李永等^[13]基于 PWM 逆变器设计了超磁致伸缩致动器功率驱动器,其静态输出电流可达 10 A,动态驱动频率 100 Hz。张明杰等^[14]基于 PSOC3 芯片设计了磁致伸缩作动器驱动电源,输出信号 20 ~ 200 Hz 可调。基于开关式原理设计的功率驱动器多使用 DSP 芯片生成开关信号,这有利于丰富驱动器的功能,但 DSP 芯片及其外部配置电路在一定程度上限制了驱动器的小型化。

本研究以离散线圈磁致伸缩直驱阀为研究对象,开展其功率驱动设计与试验研究。为了实现功率驱动器的小型化,选择不需要额外散热装置的开关式原理进行功率驱动器设计,并且选择体积较小的基础模拟电路实现其驱动功能。基于电路原理建立功率驱动器数学模型,最后搭建试验平台测试功率驱动器的输出性能以及磁致伸缩直驱阀高频振荡压力调节能力。

1 原理介绍

离散线圈磁致伸缩直驱阀构型原理如图 1 所示,是以离散线圈磁致伸缩执行器带动直驱式滑阀,工作时,由功率驱动器为磁致伸缩执行器的八维离散线圈输入驱动电路,再由磁致伸缩执行器带动滑阀阀芯前后运动实现压力流量调节,阀芯与阀套的相对位置决定了阀口的开度,通过调节阀套初始位置可以使该直驱阀工作在一定初始开度位置下,输出杆连接阀芯便于监测阀芯位移,该磁致伸缩执行器由八维离散线圈驱动,需要功率驱动器提供八个通道的独立输出。

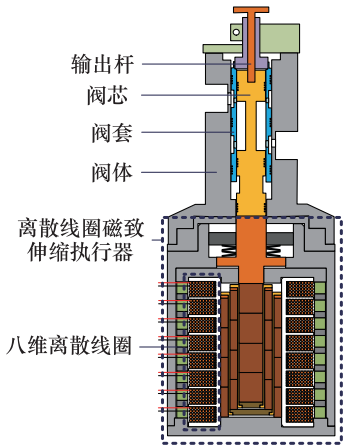


图 1 离散线圈磁致伸缩直驱阀构型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of discrete coil magnetostrictive direct drive valve configuration

基于开关式原理设计的单个通道功率驱动器电路原理如图 2 所示,包括逆变主电路和控制电路两个模块。控制电路中的 PI 控制电路用于确保驱动器的恒流输出;SPWM 调制电路将控制电路输出的控制信号转换为相应频率的 SPWM 信号;隔离驱动电路实现电气隔离并产生带死区的驱动信号;反馈电路采集通过磁致伸缩执行器的电流并转化为反馈信号,用于 PI 控制器输入。逆变主电路首先通过逆变电路实现驱动信号的功率放大;滤波电路将逆变电路输出信号进行滤波,输出驱动电压用于激励磁致伸缩执行器。

2 功率驱动器电路设计

2.1 逆变主电路

逆变主电路如图 3 所示,包括高频逆变电路,匹配滤波电路以及负载电路。功率驱动器的负载为离散磁致伸缩执行器的线圈,在电路中表示为电阻 R0 与电感 L0 串联,高频逆变电路由四个 MOS 管构成全桥逆变电路。电感 L1、电容 C1、电容 C2 与电阻 R1 共同构成 LCCR 滤波器,在实现普通 LC 滤波器滤波功能的同时增加了阻尼抑制了 LC 滤波器的谐振,增强了电路的稳定性。

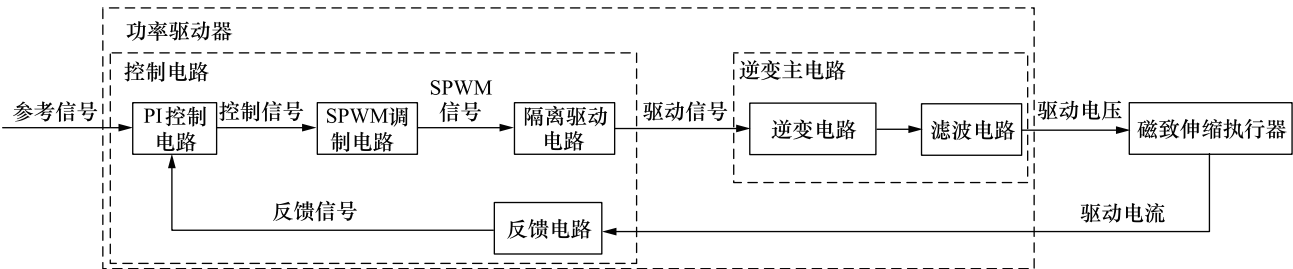


图 2 功率驱动器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of power driver

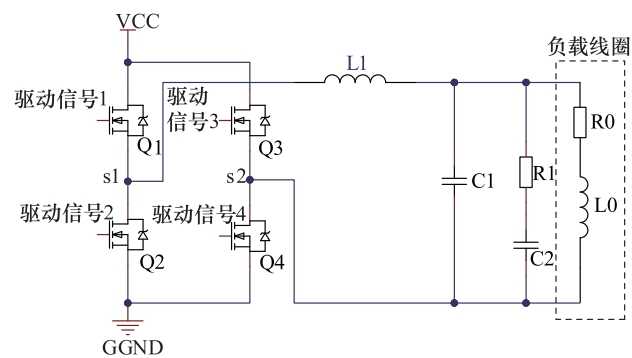


图 3 逆变主电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of inverter main circuit

2.2 控制电路

控制电路由 PI 控制电路,SPWM 调制电路,隔离驱动电路以及反馈电路组成。

PI 控制电路如图 4 所示,电阻 R2、R3、R4、R5 与 NE5532 运放芯片构成减法电路,得到目标信号与电路反馈信号的差值,电阻 R6、R8,电容 C4 与比较器芯片构成比例积分电路,D1、D2 为两个稳压二极管,作用是限制控制信号的幅值避免其幅值超出载波信号影响 SPWM 调制。

SPWM 调制电路如图 5 所示,控制信号与三角载波信号经 LT1361 比较器比较后生成 SPWM 调制信号,R9、R12 为上拉电阻,R10、R11 用于限制电路电流大小,D3、D4 为两个二极管,用于限制 SPWM 信号幅值。SN74HC04 高速非门电路用于整形 SPWM 波。C5、C6、R15、R16 与高速与非门芯片 SN74HC08 构成延时电路,用于产生死区时间^[15]防止主电路同侧 MOS 管导通发生短路。

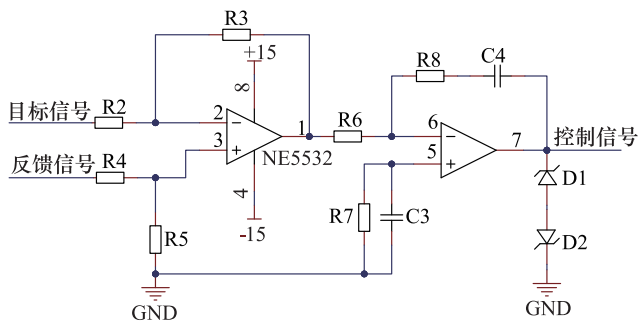


图 4 PI 控制电路原理图

Fig.4 Schematic diagram of PI control circuit

隔离驱动电路如图 6 所示,隔离电路选用光电耦合隔离芯片 TLP250, R17、R18 用于限制输入信号电流。MOS 管驱动芯片选用 L6388 栅极驱动芯片,电容 C7、C8 为自举电容,用于维持在高端的开关器件开通过程中电压值不变。电阻 R19、R20、R21、R22 为驱动电阻,可以阻尼走线电感及功率管结电容产生的震荡。

反馈电路如图 7 所示,为确保电路恒流输出,选用 LA25-NP 霍尔电流传感器监测电路电流信号并反馈给 PI 电路用于恒流控制,电阻 R24、R25、R26、R27 与运放芯片 NE5532 构成信号调理电路调整输出信号的幅值。电阻 R28 与 C10 构成 RC 低通滤波电路,用于滤去测量信号中的高频干扰。

3 功率驱动器建模与仿真分析

3.1 功率驱动器数学建模

输入电压-输出电流信号转换模型如图 8 所示。

系统传递函数 $G_0(s)$ 表达式如下:

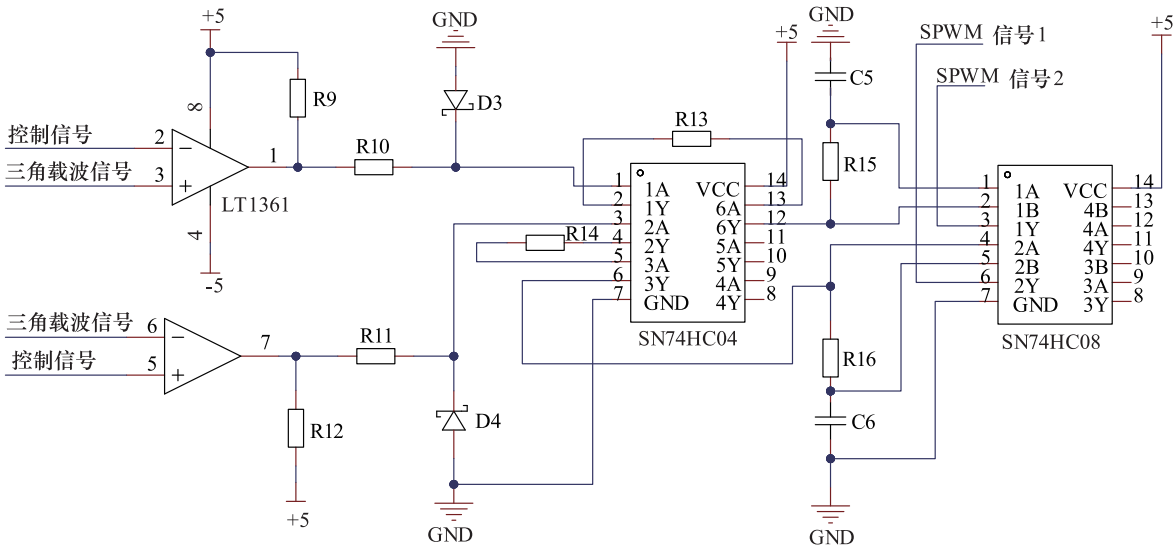


图 5 SPWM 调制电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of SPWM modulation circuit

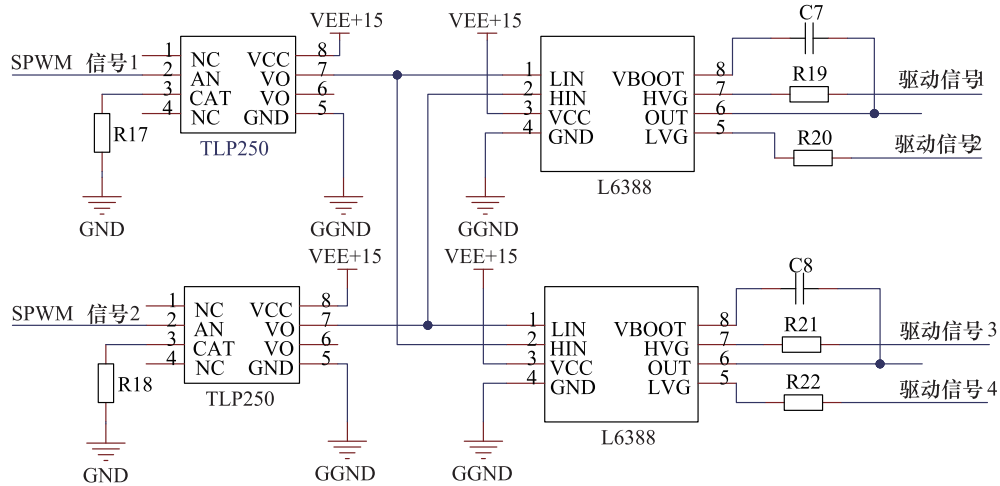


图6 隔离驱动电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of isolated drive circuit

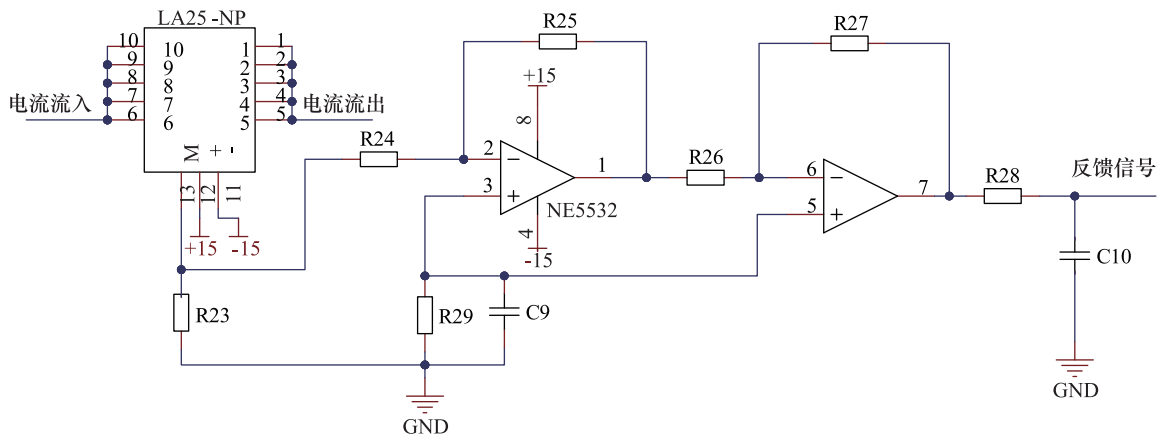


图7 反馈电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of feedback circuit

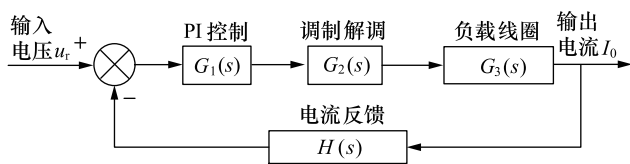


图8 输入-输出信号转换模型

Fig. 8 Input-output signal conversion model

$$G_0(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)H(s)} \quad (1)$$

式中: $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$ 、 $H(s)$ 分别为电路各部分传递函数。

$G_1(s)$ 为 PI 控制电路传递函数, 输入信号为输入电压与反馈信号的差值, 输出信号为控制电压, 该过程传递函数表达式如下:

$$G_1(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} \quad (2)$$

式中系数表达式:

$$K_p = \frac{R_8}{R_6} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{1}{C_4 R_6} \quad (4)$$

$G_2(s)$ 为调制解调部分传递函数, 包括 SPWM 调制, 隔离驱动以及 LCCR 滤波, 输入信号控制电压, 输出信号为 MOS 管驱动电压, 该部分表达式如下:

$$G_2(s) = \frac{V_{cc}}{V_{tr}} \frac{As^2 + Bs + R_0 + CR_0}{Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + R_0} \quad (5)$$

式中: V_{cc} 为 MOS 管供电电压, V_{tr} 为三角载波幅值, 各系数表达式如下:

$$A = L_0 C_2 R_1 \quad (6)$$

$$B = C_2 R_1 R_0 + L_0 \quad (7)$$

$$C = L_1 L_0 C_1 C_2 R_1 \quad (8)$$

$$D = L_1 C_1 C_2 R_1 R_0 + L_1 L_0 C_1 + L_1 L_0 C_2 \quad (9)$$

$$E = L_1 C_1 R_0 + L_1 C_2 R_0 + L_1 C_2 R_1 + L_0 C_2 R_1 \quad (10)$$

$$F = L_1 + L_0 + C_2 R_1 R_0 \quad (11)$$

$G_3(s)$ 为负载线圈传递函数,输入为 MOS 管驱动电压,输出为驱动电流,该部分传递函数如下:

$$G_3(s) = \frac{1}{sL_0 + R_0} \tag{12}$$

$H(s)$ 表示电流反馈电路传递函数,通过采集经过负载线圈的电流信号得到相应反馈电压信号,该过程表示为:

$$H(s) = a \frac{R_{25}R_{27}}{R_{24}R_{26}(R_{28}C_{10}s + 1)} \tag{13}$$

式中: a 为电流传感器灵敏度。

数学模型中关键参数取值如表 1 所示。

表 1 数学模型关键参数

Tab.1 Key parameters of mathematical model

符号	单位	取值
R_8	Ω	2.5×10^3
R_6	Ω	1×10^3
C_4	F	2×10^{-7}
L_0	H	0.35×10^{-3}
R_0	Ω	1.8
L_1	H	220×10^{-6}
R_1	Ω	5
$C_1、C_2$	F	3.3×10^{-6}
$R_{24}、R_{25}$	Ω	1×10^4
$R_{26}、R_{28}$	Ω	1×10^3
R_{27}	Ω	5×10^3
C_{10}	F	2.2×10^{-7}
V_{CC}	V	20
V_{Tr}	V	5
A		0.1

3.2 动态特性仿真

根据建立的功率驱动器数学模型,利用 MATLAB 绘制其 bode 图如图 9 所示,观察仿真结果可以发现在当前参数下该系统幅频宽为 1840 Hz,相频宽为 4760 Hz。

4 离散线圈磁致伸缩直驱阀试验研究

离散线圈磁致伸缩直驱阀试验系统如图 10 所示,该系统包括上位机、实时仿真机、离散线圈磁致伸缩直驱阀、功率驱动器以及一些传感器和供电电源,利用该试验系统对功率驱动器的输出性能进行测试。

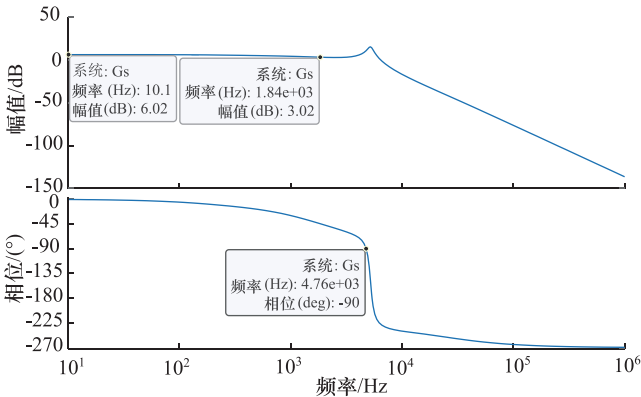


图 9 功率驱动器模型 bode 图

Fig. 9 Bode diagram of power amplifier model

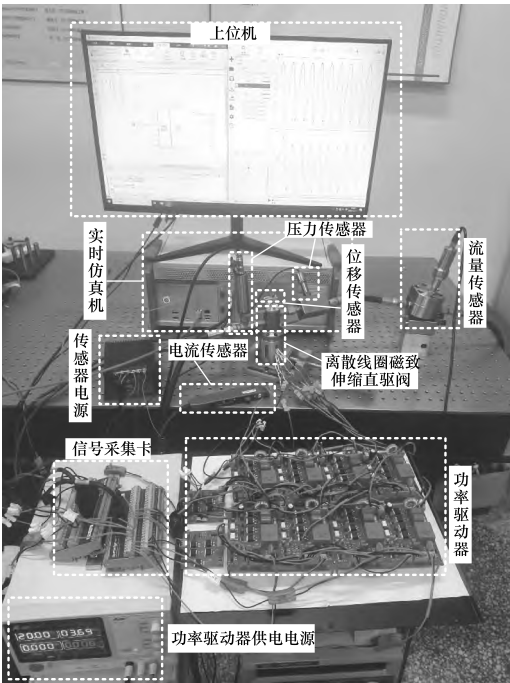


图 10 离散线圈磁致伸缩直驱阀试验系统

Fig. 10 Experimental system of discrete coil magnetostrictive direct drive valve

首先对功率驱动器的输出特性进行测试,试验过程中为单个负载线圈通电,测量不同控制电压 u_r 下输出电流 I_0 的大小,采用最小二乘法拟合静态特性曲线,试验结果与拟合结果如图 11 所示。

得到的拟合曲线方程为:

$$I_0 = 2.241u_r + 0.027 \tag{14}$$

试验结果与拟合直线之间的偏差为:

$$\Delta = |I_0 - I_e| \tag{15}$$

式中: I_e 为不同控制电压下拟合曲线电流, I_0 为不同控制电压下试验测得电流,计算得到最大误差 $\Delta_{\max} = 0.0966 \text{ A}$,试验测得功率驱动器最大输出电流 $I_{0\max} = 4.67 \text{ A}$,进一步计算非线性度为:

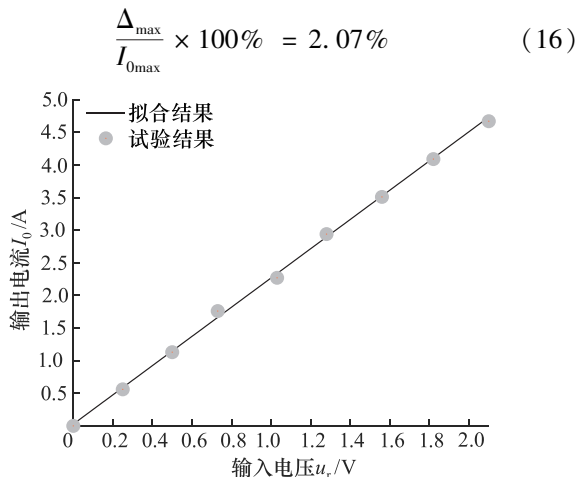


图 11 功率驱动器静态特性试验与拟合曲线
Fig. 11 Static characteristic experiment and fitting curve of power amplifier

接着对驱动器动态特性进行试验,驱动信号为 1 ~ 8000 Hz 扫频信号,驱动单个负载线圈,测量驱动电流大小,处理试验数据得到系统 bode 图,幅值衰减 3 dB、相位滞后 90° 位置已标出,可以得到驱动器频响为 2072 Hz,仿真与试验结果对比如图 12 所示,可以发现二者较为接近,可以认为仿真模型具有一定准确性。

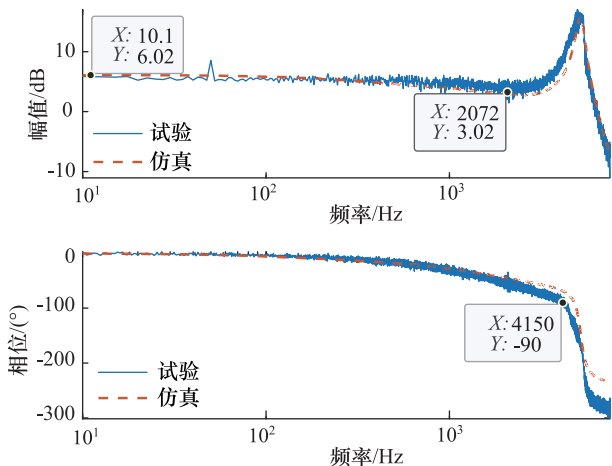


图 12 单线圈驱动扫频试验结果
Fig. 12 Experimental results of single coil drive sweep frequency

对多个线圈同时驱动工况下驱动器输出性能进行测试,多线圈驱动不同线圈之间互感现象会降低驱动器的输出效果,试验结果如图 13 所示,幅值衰减 3 dB 位置已在图中标出,可以发现,多线圈驱动时驱动器频响下降严重,但频响仍超过 550 Hz。

使用该功率驱动器驱动直驱阀测试其调节能力,系统供油压力为 2 MPa,调节平均流量为 2 L/min,由于流量传感器无法测得高频信号,利用两个压力传感器测得直驱阀进出口压差评价其高频调节能力。驱动器

输入幅值正负 1 V 的标准正弦信号,测试得到不同频率下直驱阀进出口压差如图 14 所示,观察试验结果可以发现,低频(10 Hz)驱动信号下产生振荡压力幅值为 0.75 MPa,驱动频率提高到 200 Hz,仍能实现 0.66 MPa 的振荡压力调节。

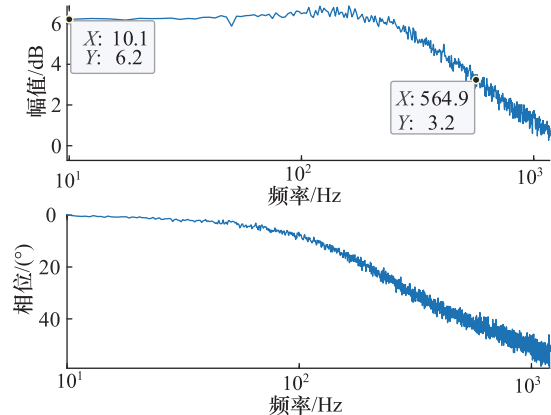
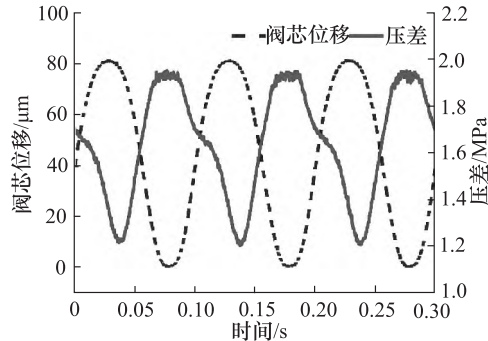
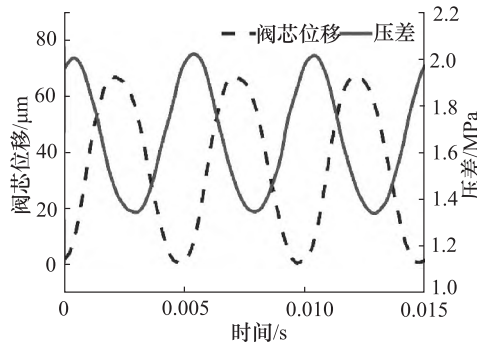


图 13 多线圈驱动扫频试验结果
Fig. 13 Experimental results of multi coil drive sweep frequency



(a) 驱动频率 10 Hz
(a) Driving frequency 10 Hz



(b) 驱动频率 200 Hz
(b) Driving frequency 200 Hz

图 14 振荡压力调节试验结果

Fig. 14 Experimental results of oscillation pressure regulation

5 结论

基于开关式原理研制了离散线圈磁致伸缩直驱阀用功率驱动器,开展了相关仿真与试验研究。

(1) 对功率驱动器不同功能模块分别进行分析得

到各部分数学模型,同时在建模过程中考虑线圈负载的影响,最终得到与各部分元件参数相关的驱动器数学模型。

(2) 通过对功率驱动器的性能测试试验得到其非线性度为 2.07%,驱动单线圈时频响达到 2072 Hz,多线圈同时驱动时频响超过 550 Hz。

(3) 利用该功率驱动器开展离散线圈磁致伸缩直驱阀驱动试验,结果表明该系统在供油压力 2 MPa,平均流量 2 L/min 下可以实现 200 Hz,0.66 MPa 的振荡压力调节。

参考文献

- [1] POINSOT T. Prediction and Control of Combustion Instabilities in Real Engines [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017,36(1):1-28.
- [2] 戴胡伟. 航空发动机燃烧室失效机理及寿命预测研究[D]. 天津:天津大学,2020.
DAI Huawei. Research on Failure Mechanism and Life Prediction of Aircraft Engine Combustion Chamber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [3] TACHIBANA S, ZIMMER L, KUROSAWA Y, et al. Active Control of Combustion Oscillations in a Lean Premixed Combustor by Secondary Fuel Injection Coupling with Chemiluminescence Imaging Technique [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(2):3225-3233.
- [4] HATHOUT J, FLEIFIL M, ANNASWAMY A, et al. Combustion Instability Active Control Using Periodic Fuel Injection [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002,18(2):390-399.
- [5] 王俊丽,张枫林,周文渊,等. 某型火箭发动机用高速大流量电磁阀动态响应特性研究[J]. 液压气动与密封,2023,43(12):114-118.
WANG Junli, ZHANG Fenglin, ZHOU Wenyuan, et al. Research on the Dynamic Response Characteristics of High-speed and High-flow Solenoid Valves for a Certain Type of Rocket Engine [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(12):114-118.
- [6] JOHNSON C E, NEUMEIER Y, NEUMAIER M, et al. Demonstration of Active Control of Combustion Instabilities on a Full-scale Gas Turbine Combustor [C]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2001,78514:V002T02A062.
- [7] CHEN L, ZHU Y, LING J, et al. Development and Characteristic Investigation of a Multidimensional Discrete Magnetostrictive Actuator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022,27(4):2071-2079.
- [8] 王彦文,朱玉川,陈龙. 离散驱动磁致伸缩执行器用伺服放大器理论与实验研究[J]. 机械科学与技术,2024:1-6.
WANG Yanwen, ZHU Yuchuan, CHEN Long. Theoretical and Experimental Study on Servo Amplifier for Discrete Driven Magnetostrictive Actuators [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024:1-6.
- [9] 杨兴,贾振元,武丹,等. 基于功率 MOSFET 的超磁致伸缩执行器驱动电源[J]. 压电与声光,2001(1):33-36.
YANG Xing, JIA Zhenyuan, WU Dan, et al. Study on Driving Power of Giant Magnetostrictive Actuator Based on Power MOSFET [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2001(1):33-36.
- [10] 李跃松,朱玉川,吴洪涛,等. 超磁致伸缩伺服阀用伺服放大器的设计及分析[J]. 压电与声光,2013,35(1):76-79.
LI Yuesong, ZHU Yuchuan, WU Hongtao, et al. Design and Analysis of Servo Valve Driven by Giant Magnetostrictive Actuator [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2013, 35(1):76-79.
- [11] 王松,赵祥模,惠飞,等. 基于 DSP 的超磁致伸缩换能器驱动电源设计[J]. 电子设计工程,2012,20(12):96-98.
WANG Song, ZHAO Xiangmo, HUI Fei, et al. Design of Rare-earth Magnetostrictive Transducer Based on DSP [J]. Electronic Design Engineering, 2012,20(12):96-98.
- [12] 李志丹. 磁致伸缩换能器驱动电源的设计与制作[D]. 天津:河北工业大学,2015.
LI Zhidan. Design and Fabrication of Driving Power for Magnetostrictive Transducer [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [13] 李永,林明星,张承瑞,等. 超磁致伸缩致动器功率驱动器设计[J]. 电机与控制学报,2013,17(7):22-26.
LI Yong, LIN Mingxing, ZHANG Chengrui, et al. Power Driver Design of Giant Magnetostrictive Actuator [J]. Electric Machines and Control, 2013,17(7):22-26.
- [14] 张明杰,李华峰,夏孝云. 基于 PSoC3 的超磁致伸缩作动器驱动电流源[J]. 振动、测试与诊断, 2013,33(S2):174-177,228.
ZHANG Mingjie, LI Huafeng, XIA Xiaoyun. Research on GMA Drive Current Source Based on the PSoC3 [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013,33(S2):174-177,228.
- [15] 庞佑兵,吕果,马朝骥. 脉宽调制放大器死区技术研究[J]. 微电子学,2014,44(4):459-462.
PANG Youbing, Lǚ Guo, MA Chaoji. Study on Dead Time Technique for PWM Amplifier [J]. Microelectronics, 2014, 44(4):459-462.

引用本文:

张梦昊,朱玉川,陈龙. 离散线圈磁致伸缩直驱阀功率驱动设计与试验研究[J]. 液压气动与密封,2026,46(3):30-36.
ZHANG Menghao, ZHU Yuchuan, CHEN Long. Design and Experimental Study of Power Drive for Discrete Coil Magnetostrictive Direct Drive Valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2026,46(3):30-36.