

尺蠖型超磁致伸缩旋转驱动器驱动信号设计与试验

周景涛 何忠波 刘国平

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 为了解决传统的“信号发生器+功率放大器”产生的信号无法满足尺蠖型旋转驱动器多路、正方波波形需求的问题,设计了一种通过Cmos控制脉冲模块“通-断”时机的信号控制器,从而得到特定时序的3路正方波信号。通过这种方案得到的3路驱动信号为正方波电流信号,从而避免了超磁致伸缩材料的“倍频”现象的发生。通过设置信号周期、占空比和延迟等参数,能够输出设定时序的三路正方波驱动信号。根据电压定律,将正方波简化成阶跃波形,建立了驱动信号的电流模型,并进行了参数辨识。在工作频率范围内,电流解析式能准确地表示电流信号。搭建试验平台进行了试验测试,试验结果表明,在工作频率范围内,信号控制器输出的正方波波形优于“信号发生器+功率放大器”产生的方波信号,设定的3路信号能够驱动尺蠖型旋转驱动器产生步进旋转运动。通过优化驱动信号时序,将旋转驱动器最大工作频率由160 Hz提至210 Hz。

关键词: 超磁致伸缩; 旋转驱动器; 正方波; 信号时序; 尺蠖型

中图分类号: TM131; TM303

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0452-07

OSID:



Driving Signal Design and Experiment of Inchworm Giant Magnetostrictive Rotary Actuator

ZHOU Jingtao HE Zhongbo LIU Guoping

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to solve the problem that the signal generated by traditional “signal generator + power amplifier” cannot meet the demand of multi-channel and square wave waveform of inchworm rotary driver, a signal controller was designed to generate multiple square waveforms by on-off of a Cmos control pulse module. The three driving signals obtained through this scheme were square wave current signals, which can avoid the occurrence of “frequency doubling” phenomenon in giant magnetostrictive materials. By setting the parameters such as the period, duty cycle and delay of the signal, the three-channel square wave driving signal with set timing can be output. According to the voltage law, the square wave was simplified to step wave. The current model of driving signal was established, and the parameters were identified. The current analytical formula can accurately represent the current signal within the operating frequency range. The experimental platform was built and tested, the experimental results showed that the square wave output by the signal controller was better than that by the traditional scheme in the working frequency range, and the set three-way signal can drive the inchworm rotary driver to generate step-by-step rotation motion. The angular displacement response of the rotating actuator was analyzed. By optimizing the timing of the driving signal, the maximum operating frequency of the rotary driver was increased from 160 Hz to 210 Hz.

Key words: giant magnetostriction; rotary actuator; square wave; signal timing; inchworm

0 引言

超磁致伸缩材料(Giant magnetostrictive

material, GMM)是一种在交变磁场下长度变化特别大的新型智能稀土材料,具有输出功率大、能量密度高和响应速度快等优点^[1],广泛应用在超精密加

收稿日期: 2023-09-20 修回日期: 2023-10-24

基金项目: 陆军工程大学基础前沿创新基金项目(KYSZJKQTZQ23003)

作者简介: 周景涛(1981—),男,讲师,博士,主要从事超磁致伸缩致动器及驱动技术研究, E-mail: luori810115@163.com

通信作者: 何忠波(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事智能材料及应用研究, E-mail: hzb_hcl_xq@sina.com

工^[2]、精密定位^[3]、减噪降噪^[4]和换能器^[5]等领域。但 GMM 的磁致伸缩系数较小(1×10^{-3}),利用材料本身的磁致伸缩性能研制的直接驱动器^[6-7]输出位移范围小,工程应用受到一定限制,通常通过放大机构^[8-10]增大位移输出范围,但在位移放大的同时也同比例减小了输出力,驱动器性能受到一定的影响。尺蠖型驱动器以尺蠖虫的步进运动形式^[11]为原理,通过钳紧和驱动机构间的相互配合,可以实现累积的直线位移或角位移输出^[12-13],在保证精度的同时实现了大行程位移输出。

超磁致伸缩驱动器通过交变电流信号产生的交变磁场进行工作,驱动信号对驱动器静态和动态特性有重要的影响^[14-15]。莫杭杰等^[16]设计了线性度为 0.105%、时漂为 3 mA/h、频率可达 500 Hz 的大功率程控电驱系统,可以对超磁致伸缩驱动器的微振动进行实时精密控制。葛荣杰等^[17]采用连续调整型恒流源的原理,以通用运算放大器为基础,研制了在 $-3 \sim 3$ A 范围内连续可调的大功率恒流功率放大器驱动电源。还有学者利用 PWM 逆变器^[18]和磁感应强度作为负反馈控制量^[19],设计了相应的高精度驱动电源。KIM 等^[20]基于有限元技术对超磁致伸缩驱动器线圈进行改进,并设计了三相电源的局部激励方案,减小了驱动器功率损耗。薛光明等^[21-22]针对驱动信号的幅值和上升、下降时间直接影响驱动器输出力和响应时间问题,建立了基于一阶 RL 线性电路的电流模型,并借鉴大电压开启方法,提出了参数设计方案。

由于 GMM 的位移应变与磁场方向无关,即 GMM 在激励磁场的正负 2 个方向上都表现出伸长性能,所以产生应变的频率是驱动电流频率的两倍,这就是“倍频”现象。通常采用直流线圈或永磁体的形式来叠加一个偏置磁场 M_0 ,使磁场方向始终保持不变,从而避免“倍频”现象。目前,驱动信号大多采用“信号发生器 + 功率放大器”的形式,但功率放大器的非线性^[23-24]会造成信号的失真,其输出的交变信号一般采用永磁铁^[25]或直流线圈^[26]进行偏磁来解决“倍频”现象。这种形式存在结构复杂、偏置磁场难以准确控制、与激励线圈相互影响等问题。

本文针对尺蠖型旋转驱动器的多路、正方波波形的需求,设计一种通过 Cmos 控制脉冲模块“通—断”时机的信号控制器,以期得到特定时序的三路正方波信号,从根源上解决“倍频”问题。通过对比分析驱动信号性能,建立驱动信号的电流模型,优化信号时序以提高驱动器的工作频率。

1 驱动器工作原理

尺蠖型旋转驱动器主要由上、下钳紧机构和驱动机构组成,分别由 3 个均布的 GMM 棒组成,GMM 棒外部套有线圈,线圈上电时,GMM 棒伸长;线圈掉电时,GMM 棒收缩。当 3 组线圈按照图 1 时序工作时(V_1 、 V_2 和 V_3 分别表示施加在上、下钳紧机构和驱动机构的信号),旋转驱动器工作过程如图 2 所示,过程如下:

- (1)上钳紧:0 时刻, V_1 上电,上钳紧机构钳紧转子。
- (2)下松开: t_1 时刻, V_2 掉电,下钳紧机构松开转子。
- (3)驱动: t_2 时刻, V_3 上电,驱动机构伸长,通过上钳紧机构带动转子转动角度 θ 。
- (4)下钳紧: t_3 时刻, V_2 上电,下钳紧机构钳紧转子,防止转子回转。
- (5)上松开: t_4 时刻, V_1 掉电,上钳紧机构松开转子。
- (6)复位: t_5 时刻, V_3 掉电,驱动机构收缩,恢复到初始位置。

在一个周期内,通过以上 6 个动作,旋转驱动器完成一次步进运动,转子旋转角 θ 。不断重复上述动作,即可实现系统的步进式角位移输出。

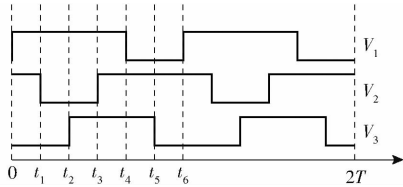


图 1 驱动信号时序

Fig. 1 Input signals for mechanisms

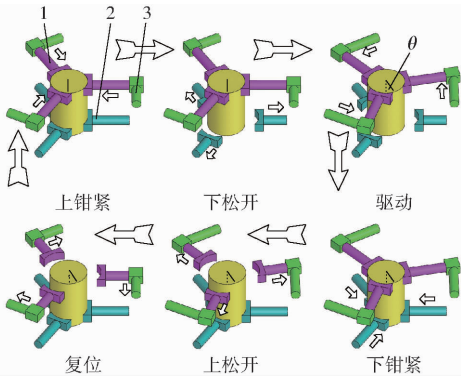


图 2 尺蠖型旋转驱动器工作原理图

Fig. 2 Principle of inchworm rotary actuator

1. 上钳紧机构 2. 下钳紧机构 3. 驱动机构

2 驱动信号设计

信号控制器主要由脉冲模块、控制模块和交互

模块组成,如图 3 所示。脉冲模块通过光耦开关的“通-断”产生方波信号,控制模块用于控制脉冲模块按预先设定的时序工作,交互模块用于显示和设置信号参数。其工作流程为:首先由交互模块设置各路信号周期、占空比和延迟等参数,模块控制器根据参数设置通过 Cmos 控制脉冲模块的“通-断”时机,从而得到特定时序的 3 路正方波信号。通过这种方案得到的 3 路驱动信号为正方波电流信号,从而避免了“倍频”现象的发生,信号电压通过直流电源进行调节,通过人机交互模块的触摸屏可以设置 3 路信号的周期、占空比和高电平延迟等参数,可以分析不同时序的信号对旋转驱动器性能的影响。

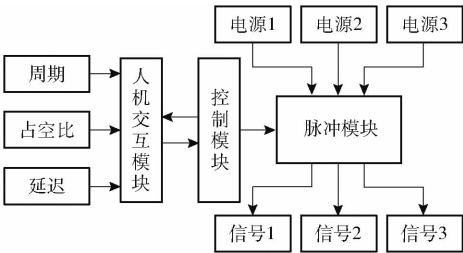


图 3 信号控制器组成和原理图

Fig. 3 Composition and principle of signal controller

3 试验

3.1 试验系统

测试的旋转驱动器如图 4 所示,驱动机构共有 3 个驱动单元,由 GMM 棒、线圈和轭铁组成;上、下钳紧机构各有 3 个钳紧单元,结构相同,上下层布置,由 GMM 棒、线圈和轭铁组成;3 路信号分别驱动上、下钳紧机构和驱动机构。

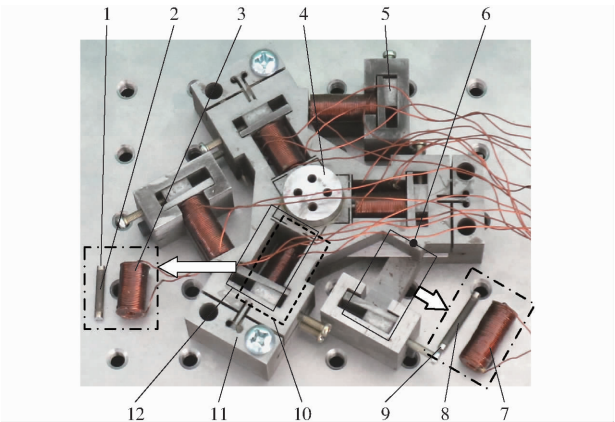


图 4 尺蠖型旋转驱动器样品

Fig. 4 Prototype of inchworm rotary actuator
1.9. 轭铁 2. 钳紧 GMM 3. 钳紧线圈 4. 转子 5. 预紧机构
6. 驱动机构 7. 驱动线圈 8. 驱动 GMM 10. 下钳紧机构 11. 底座 12. 上钳紧机构

驱动信号和旋转驱动器性能测试原理如图 5 所示。信号控制器可设置 3 路驱动信号的周期、占空比和延迟等参数,3 个直流电源可输出连续的稳态

电压,经过信号控制器后产生设定时序的正方波电压信号,激光位移传感器用于测量旋转驱动器输出位移,电流钳用于测量激励线圈的瞬时电流,通过示波器采集显示电压和电流。

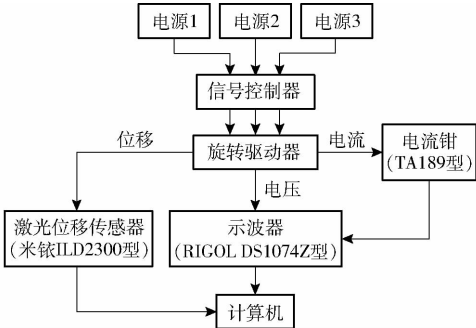


图 5 旋转驱动器测试方案

Fig. 5 Test scheme of rotary actuator

3.2 性能对比

由于信号发生器产生的信号功率很小,不足以驱动负载工作,通常需要功率放大器对信号进行放大,但功率放大器有一定的频带范围,超过频带范围,再加上负载影响,就会产生波形失真现象。负载为激励线圈,占空比为 50% 的方波信号经功率放大器(GF-20W 型)后电压电流曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,在频率较低时(1 Hz),方波信号放大后已经完全失真;在频率达到 10 Hz 时,电压曲线和电流曲线才逐渐呈现出方波形状;但频率达到 250 Hz 时,由于负载线圈电感和功率放大器非线性

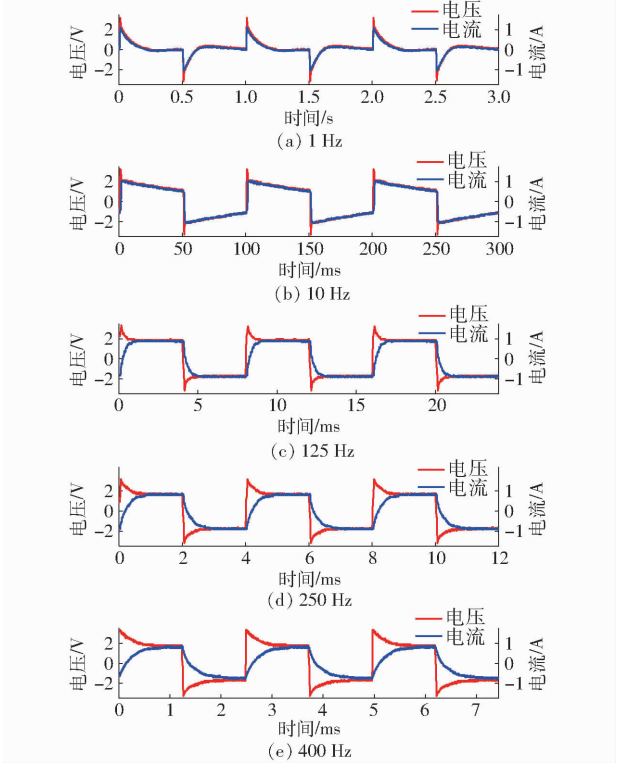


图 6 方波信号放大后电压电流曲线

Fig. 6 Voltage and current curves of square wave signal after amplification

的影响,在信号上升和下降阶段,电流波形延迟现象逐渐变得明显;当频率达到 400 Hz 时,电流波形已接近三角波,完全失真。

图 7 为本文设计的驱动电源产生的电压电流曲线,在频率较低时,能够保持规则的方波形状。同样受负载线圈电感的影响,在频率达 250 Hz 时,电流曲线阶跃上升阶段开始出现明显的延迟现象,但在信号下降阶段,仍能保持快速下降,波形优于放大器产生的信号。在高频率时,信号能够快速下降,保证旋转驱动器能够迅速复位(图 2 复位动作),不会影响下一步动作。本文设计的驱动电源的另一个优点是直接产生正方波信号,不用额外设置偏置磁场,能够简化结构,有助于系统输出稳定性的提高。

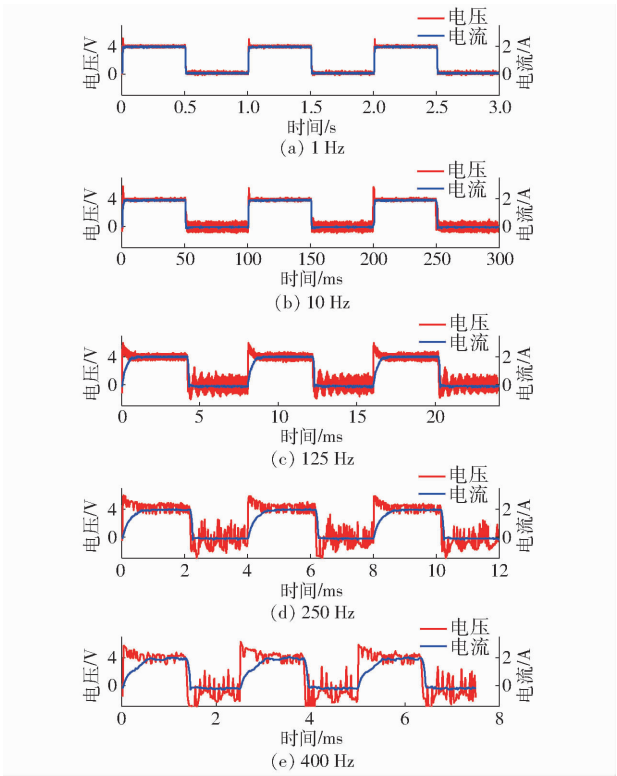


图 7 驱动电源产生的电压电流曲线

Fig.7 Voltage and current curves generated by driving power supply

综上所述,在系统工作频率范围内(210 Hz),本文设计的驱动电源能产生规则的正方波信号,其性能优于“信号发生器 + 功率放大器”产生的方波信号。

3.3 等效电路和瞬态特性

驱动信号采用正方波信号,信号跃升时,驱动机构产生“驱动”动作;在驱动信号下降阶段,系统复位,不输出角位移,故系统输出特性只受信号跃升阶段(图 1 中的 t_2 至 t_3 时刻)的影响,将正方波信号的单个阶跃信号用 $U(t)$ 来表示

$$U(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ U_0 & (t \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_0 ——阶跃信号幅值

激励线圈上电瞬间,电场中电荷聚集和释放需要一定的时间,导致电流变化滞后于电压变化。为准确描述电流响应特性,将线圈电路等效为电阻 R 和电感 L 的串联电路,如图 8a 所示。文献[15]中认为,随着频率的增加,线圈的趋肤效应越来越明显,电阻逐渐增大,可对 RL 电路进行改进,在电感 L 两端并联一适当电阻,如图 8b 所示。

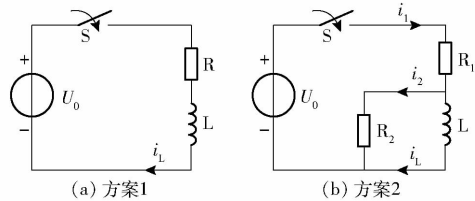


图 8 线圈的两种等效电路

Fig.8 Two equivalent circuits of coil

对于方案 1 的等效电路,开关闭合前的电流为零,即 $i_L(0_-) = 0$ 。开关闭合的瞬间,由于电感 L 中电流不能跃变,所以 $i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0$,在电压 U_0 的作用下,电流 i_L 逐渐增大,直至达到稳定状态 $i_L = U_0/R$ 。

$t \geq 0$ 时,由基尔霍夫电压定律(KVL)得

$$U_0 = u_R + u_L \quad (2)$$

由 $i_R = i_L$ 、 $u_L = L \frac{di_L}{dt}$ 得 i_L 的微分方程为

$$U_0 = i_L R + L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

电感电流 i_L 的通解为

$$i_L = \frac{U_0}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} \quad (t \geq 0) \quad (4)$$

式中 A ——待定常数

将初始条件 $i_{L1}(0_+) = i_{L1}(0_-) = 0$ 代入式(4),得 $A = -U_0/R$,线圈电流 I 的响应为

$$I = i_L = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \frac{U_0}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) & (t \geq 0) \end{cases} \quad (5)$$

同理对于方案 2 的等效电路,由于 $i_1 = i_L + i_2$, $u_L = L \frac{di_L}{dt} = i_2 R_2$,可得电感电流 i_L 的微分方程为

$$U_0 = i_L R_1 + \frac{R_1 + R_2}{R_2} L \frac{di_L}{dt} \quad (6)$$

求得线圈电流 I 的响应为

$$I = i_L = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \frac{U_0}{R_1} [1 - e^{-\frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)L}t}] & (t \geq 0) \end{cases} \quad (7)$$

分别在 1、10、125、250 Hz 条件下,测试驱动线圈的电流响应,使用软件 Matlab 中的参数辨识方法确定式(5)和式(7)的参数值,辨识结果和 2 种方案电流平均误差如表 1 所示。

表 1 参数辨识结果						
Tab.1 Parameter identification results						
方案	电阻辨识	电感辨识	电流平均误差/%			
	值/ Ω	值/mH	1 Hz	10 Hz	125 Hz	250 Hz
方案 1	1.933 9	41.22	2.421 5	2.025 8	3.013 7	2.564 6
方案 2	1.933 9/ 23 060	41.21	2.421 5	2.025 8	3.013 7	2.563 3

由表 1 可知,2 种方案平均误差基本相同。由于系统最大工作频率只有 210 Hz,线圈趋肤效应不明显,在频率 250 Hz 时,方案 2 的平均误差只比方案 1 小 0.001 3 个百分点,方案 1 形式更简单,计算更方便,所以选择方案 1 作为线圈的等效电路,即式(5)作为电流信号的解析式。图 9 为不同频率下,电流响应曲线的模拟值和试验值。从图 9 中可以看出,在频率小于 250 Hz 的范围内,模拟值和试验值基本吻合,从而验证了式(5)可以作为电流响应的解析式。

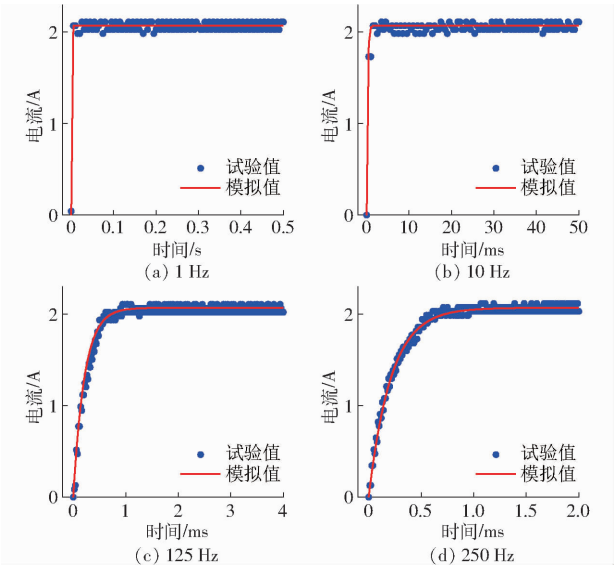


图 9 电流响应模拟值和试验值曲线

Fig.9 Simulated and experimental curves of current response

3.4 驱动效果

图 10 为旋转驱动器的性能特性曲线,图 10a 为信号控制器输出的 3 路驱动信号的电压和电流曲线, V_1 、 V_2 和 V_3 的占空比分别为 66.7%、66.7% 和 50%, V_2 和 V_3 相对 V_1 的高电平延迟分别为 $T/2$ 、 $T/3$,从图 10 中可以看出,3 路正方波信号的波形良好,信号时序和图 1 完全一致,表明设计的信号控制器可以输出所需正方波信号。单个驱动单元在正方波信号 V_3 的驱动下输出正方形波形位移,如图 10b 所

示。在 3 路信号的驱动下,上、下钳紧机构和驱动机构相互配合,实现阶梯状角位移输出,如图 10c 所示。表明在设计驱动信号的驱动下,旋转驱动器可以进行尺蠖运动,实现累积式角位移输出。

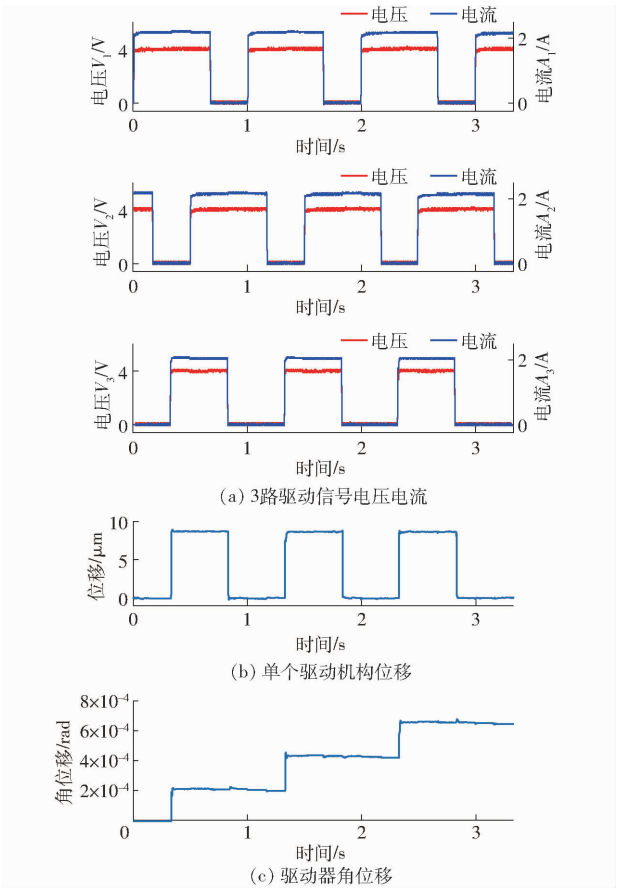


图 10 旋转驱动器的特性曲线

Fig.10 Characteristic curves of rotary actuator

3.5 驱动信号时序优化

钳紧机构钳紧块和转子紧密接触,可以看成通电瞬间钳紧机构就能钳紧转子,假设钳紧机构没有延迟,只考虑驱动机构角位移响应。由于电流滞后和系统阻尼等影响,旋转驱动器输出的角位移会滞后于驱动电压信号。电压信号为正方波波形时,电流和角位移响应曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出,角位移的响应落后于电流响应,电流在 0.7 ms 时达到稳定,而角位移在 1.5 ms 后才达到稳定。

按图 1 中的时序设置驱动信号时,钳紧机构在 Δt_3 时刻钳紧转子 ($\Delta t_3 = t_3 - t_2 = T/6$),随着频率的增加, Δt_3 逐渐减少,当 $\Delta t_3 < 1.5$ ms 时,在驱动机构没达到正常输出位移时,钳紧机构已经钳紧转子,驱动机构继续输出位移至稳定状态,此时钳紧机构就会产生扭曲变形吸收部分能量,在 t_3 时刻,驱动机构掉电后,钳紧机构复位带动转子回转,影响角位移输出。所以,通过调整驱动信号的时序,增大 Δt_3 可以提高系统工作频率。

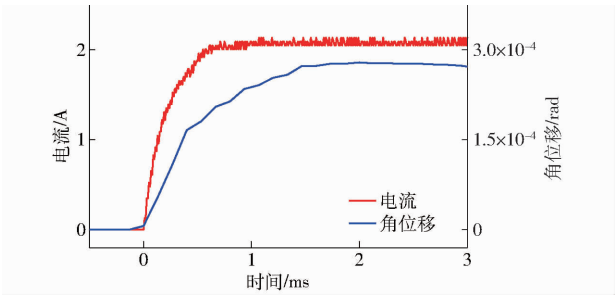


图 11 电流和角位移响应曲线

Fig. 11 Response curves of current and angular displacement

按表 2 的时序设置激励信号时,不同时序下的单步角位移随频率变化规律如图 12 所示。从图 12 可以看出, Δt_3 由 $T/6$ 增加到 $2T/10$ 时,系统稳定工作频率由 160 Hz 提至 180 Hz, Δt_3 增加到 $3T/10$ 时,稳定工作频率提至 210 Hz,但当 Δt_3 增大到 $4T/10$ 时,其它动作时间减至 $T/20$,系统不能有效地完成其它各个动作,输出速度反而大幅下降,所以在

表 2 3 路信号的时序设置

Tab. 2 Timing settings for three-way signals

时序	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5	Δt_6
1	$T/6$	$T/6$	$T/6$	$T/6$	$T/6$	$T/6$
2	$3T/20$	$3T/20$	$2T/10$	$3T/20$	$3T/20$	$2T/10$
3	$2T/20$	$2T/20$	$3T/10$	$2T/20$	$2T/20$	$3T/10$
4	$T/20$	$T/20$	$4T/10$	$T/20$	$T/20$	$4T/10$

注: $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ 。

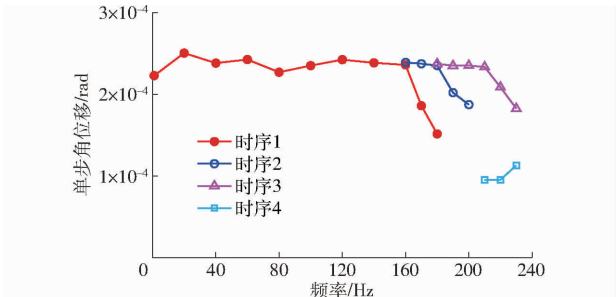


图 12 信号时序对频率的影响

Fig. 12 Influence of time sequence on frequency

$\Delta t_3 = 3T/10$ 时,系统工作频率达到最大值 210 Hz。

4 结论

(1)设计的信号控制器通过光耦控制电路的“通-断”能够输出 3 路正方波信号,可以进行周期、占空比、延迟等参数设置,避免了“倍频现象”,能够满足尺蠖型旋转驱动器的需求。

(2)设计的驱动信号波形优于传统方案,对建立的电流模型进行了参数辨识,得到了驱动信号电流解析式,在工作频率范围内,电流解析式能准确表示电流信号。

(3)分析了旋转驱动器角位移响应,通过优化 3 路驱动信号时序,将旋转驱动器最大工作频率由 160 Hz 提至 210 Hz。

参 考 文 献

[1] HONG C C. Application of a magnetostrictive actuator[J]. Materials and Design, 2013, 46:617 – 621.

[2] HARRIS P, NOLAN S, O'DONNELL U E. Energy optimisation of pneumatic actuator systems in manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 72(6):35 – 45.

[3] YU Caofeng, WANG Chuanli, DENG Haishun, et al. Hysteresis nonlinearity modeling and position control for a precision positioning stage based on a giant magnetostrictive actuator[J]. RSC Advances, 2016, 64(6):59468 – 59476.

[4] YAN Rongge, LIU Weiying, WU Yuechao, et al. Reactor vibration reduction based on giant magnetostrictive materials[J]. Aip Advances, 2017, 7(5):1 – 6.

[5] 赵能桐, 高兵, 宁倩, 等. 考虑温度扰动的超磁致伸缩换能器电-磁-热-机耦合特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16):6116 – 6125, 6185.

ZHAO Nengtong, GAO Bing, NING Qian, et al. Electrical – magnetic – thermal – mechanical coupling characteristics of giant magnetostrictive transducer considering temperature disturbance[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(16): 6116 – 6125, 6185. (in Chinese)

[6] GHODSI M, HOSSEINZADEH N, ÖZER A, et al. Development of gasoline direct injector using giant magnetostrictive materials [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1):521 – 529.

[7] 荣策, 何忠波, 薛光明, 等. 喷油器用超磁致伸缩致动器结构设计及输出特性实验研究[J]. 磁性材料及器件, 2023, 54(1):50 – 59.

RONG Ce, HE Zhongbo, XUE Guangming, et al. Structural design and output performance testing of giant magnetostrictive actuator for electronic controlled fuel injector[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2023, 54(1):50 – 59. (in Chinese)

[8] KAO C, FUNG R. Using the modified PSO method to identify a scott-russell mechanism actuated by a piezoelectric element[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23:1652 – 1661.

[9] 李翠红, 叶子申, 孟永钢, 等. 超磁致伸缩-压电直线式蠕动机构的设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(8):1055 – 1057.

LI Cuihong, YE Zishen, MENG Yonggang, et al. Linear inchworm mechanism based on giant magnetostrictive and piezoelectric materials[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(8):1055 – 1057. (in Chinese)

[10] CHKRABARTI S, DAPINO M. Coupled axisymmetric finite element model of a hydraulically amplified magnetostrictive actuator for active powertrain mounts[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 60:25 – 34.

[11] 刘旭辉,宋浩然,吴雁,等. 超磁致伸缩微位移放大机构的设计与性能研究[J]. *机床与液压*, 2022, 50(12):90 – 93.
LIU Xuhui, SONG Haoran, WU Yan, et al. Design and performance analysis of micro-displacement amplifier of giant magnetostrictive actuator[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(12):90 – 93. (in Chinese)

[12] 赵冉,卢全国. 基于惯性冲击的磁致伸缩电机及其运动性能[J]. *磁性材料及器件*, 2016, 47(1):27 – 31.
ZHAO Ran, LU Quanguo. Magnetostrictive motor and its motion behavior based on impact drive principle[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2016, 47(1):27 – 31. (in Chinese)

[13] ZHOU Jingtao, HE Zhongbo, RONG Ce, et al. A giant magnetostrictive rotary actuator:design, analysis and experimentation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 287:150 – 157.

[14] 王博文,曹淑瑛,黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008:227 – 228.

[15] 祝志芳,黄永东,王强,等. 基于超磁致伸缩材料旋转驱动器的设计及实验[J]. *机械设计与研究*, 2022, 38(6):7 – 10.
ZHU Zhifang, HUANG Yongdong, WANG Qiang, et al. Design and experimental research of rotary actuator based on giant magnetostrictive material[J]. *Machine Design & Research*, 2022, 38(6):7 – 10. (in Chinese)

[16] 莫杭杰,杨斌堂,喻虎,等. 超磁致伸缩微振动电驱系统设计与实现[J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(2):33 – 37.
MO Hangjie, YANG Bintang, YU Hu, et al. Design and implementation of the electric drive system for giant magnetostrictive micro-vibration control[J]. *Noise and Vibration Control*, 2017, 37(2):33 – 37. (in Chinese)

[17] 葛荣杰,邬义杰,徐君,等. 基于通用运放的GMA用大功率恒流驱动源设计[J]. *机床与液压*, 2008, 36(2):5 – 7.
GE Rongjie, WU Yijie, XU Jun, et al. Study on great power constant current power amplifier of GMA based on general operational amplifier[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(2):5 – 7. (in Chinese)

[18] 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. (in Chinese)

[19] 张文,陈伟民,夏哲. 磁感应强度控制的超磁致微位移器电源研究[J]. *压电与声光*, 2005, 27(3):270 – 273.
ZHANG Wen, CHEN Weimin, XIA Zhe. Study on giant magnetostrictive actuator driving power [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2005, 27(3):270 – 273. (in Chinese)

[20] KIM W J, SADIGHI A. A novel low-power linear magnetostrictive actuator with local three-phase excitation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 15(2):299 – 307.

[21] 薛光明,何忠波,李冬伟,等. 超磁致伸缩棒磁场强度建模及线圈优化分析[J]. *纳米技术与精密工程*, 2014, 12(2):85 – 90.
XUE Guangming, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Magnetic field intensity model for giant magnetostrictive rod and coil optimization analysis[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 12(2):85 – 90. (in Chinese)

[22] 薛光明,张培林,何忠波,等. 超磁致伸缩致动器的等效电路研究及驱动波形设计[J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(3):20 – 28.
XUE Guangming, ZHANG Peilin, HE Zhongbo, et al. Equivalent circuit and driving voltage suitable for giant magnetostrictive actuator in electric injector[J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(3):20 – 28. (in Chinese)

[23] 王宇晨,刘训春,郝明丽,等. 一种降低宽带射频大功率放大器谐波失真的方法[J]. *电子器件*, 2006, 29(4):1172 – 1174.
WANG Yuchen, LIU Xunchun, HAO Mingli, et al. A method for reducing the harmonic distortion of broadband RF high power amplifier module[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(4):1172 – 1174. (in Chinese)

[24] 阎敬业,姜景山,张云华. 功率放大器非线性对 Chirp 信号的影响及预补偿方法研究[J]. *电子学报*, 2005, 33(12):2139 – 2143.
YAN Jingye, JIANG Jingshan, ZHANG Yunhua. Research on nonlinear effects of power amplifier on chirp and methods for precompensation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(12):2139 – 2143. (in Chinese)

[25] 刘洋,孟建军,汤瑞,等. 基于COMSOL的超磁致伸缩作动器磁路仿真及优化[J]. *兰州交通大学学报*, 2023, 42(3):79 – 84,131.
LIU Yang, MENG Jianjun, TANG Rui, et al. Magnetic circuit simulation and optimization of giant magnetostrictive actuator based on COMSOL[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2023, 42(3):79 – 84,131. (in Chinese)

[26] ZHANG Heng, ZHANG Tianli, JIANG Chengbao. Design of a uniform bias magnetic field for giant magnetostrictive actuators applying triple-ring magnets[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(11):115009.