



引用格式: 杜 闻,王志乾,沈铖武,等. 电磁作动器信号特性分析及建模[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10795-10800

Du Wen, Wang Zhiqian, Shen Chengwu, et al. Analysis and modeling of signal characteristics of electromagnetic actuators [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10795-10800

电工技术

电磁作动器信号特性分析及建模

杜 闻^{1,2}, 王志乾^{1*}, 沈铖武¹, 刘绍锦¹, 杨文昌^{1,2}, 李勤文^{1,2}, 宋卓达^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘 要 为对一款实验所用的定制电磁作动器进行数学建模, 对电磁作动器进行大量实验和测量来采集信号数据, 并通过将数据进行降噪处理和积分转换等方法分析研究了电磁作动器输入输出信号, 研究拟合其数据结果, 建立了此电磁作动器的数学模型。结果表明, 建立的直观表达输入输出信号之间关系的电磁作动器数学模型满足后续工程使用要求。

关键词 电磁作动器; 减振控制; 信号处理; 相位差; 振动幅值

中图分类号 TM154.1; **文献标志码** A

Analysis and Modeling of Signal Characteristics of Electromagnetic Actuators

DU Wen^{1,2}, WANG Zhi-qian^{1*}, SHEN Cheng-wu¹, LIU Shao-jin¹,
YANG Wen-chang^{1,2}, LI Qin-wen^{1,2}, SONG Zhuo-da^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. School of Materials Science and Opto-electronics Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[Abstract] In order to build a mathematical model of a custom-made electromagnetic actuator which is used in the experiment, a large number of experiments and measurements were carried out to collect the signal data, and the input and output signals of the electromagnetic actuator. The signals were analyzed and studied by means of noise reduction processing and integral conversion, and the data results were studied and fitted, and the mathematical model of the electromagnetic actuator was established. Results show that a mathematical model of electromagnetic actuator is established to express the relationship between input and output signals intuitively, and meets the requirements of subsequent engineering.

[Key words] electromagnetic actuator; vibration damping control; signal processing; phase difference; vibration amplitude

作动器是使用较为广泛的一种主动执行机构, 经常在振动工程和减振控制中使用。近些年, 中国有很多关于作动器结构设计和特性建模的研究。宗晓萍等^[1]针对作动器的迟滞特性提出逆模型前馈补偿方法; 杨坤鹏等^[2]从内部阻尼力和弹簧力着手建立减振系统模型并对其特性进行分析; 乔继红^[3]针对作动器的迟滞特性, 设计基于滑膜控制观测器的反演控制器对输出信号进行跟踪。上述文献均对作动器的结构或特性进行了有效的研究分析和建模。对作动器的研究是当下实际振动控制工程的热点问题之一, 也是振动实时控制技术中的重要部分。

现针对一款应用在光电车载测量项目隔振系统中的定制的电磁作动器进行实验和分析。在车

载测量过程中, 车辆发动机的振动干扰会影响准直测量精度, 所以采用以电磁作动器为主动执行机构的主动隔振系统进行减振控制。但是在实际工程中, 电磁作动器的实际模型和理论模型有一定的偏差, 会影响整体项目的精度。因此, 掌握该电磁作动器的特性, 对该电磁作动器进行实验分析及数学建模是十分重要的环节。

实验建模时经常使用物理模型和唯像模型这两种建模方法: 物理模型主要针对系统的材料进行建模^[2,4-5]; 而唯像模型主要是依据系统数据信号进行建模^[1,6]。唯像模型因其更加直观且影响其精度的因素更少, 在近些年中广泛使用。现采用唯像模型建立法, 采集并处理电磁作动器输入输出信号, 通过处理信号数据并分析结果, 建立此电磁作动器

收稿日期: 2019-10-21; 修订日期: 2020-02-29

基金项目: 吉林省技术攻关项目(20190302086GX); 吉林省科技攻关计划(20170204050GX)

第一作者: 杜 闻(1993—)男, 满族, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生。研究方向: 信号处理。E-mail: eddynd1@163.com。

* 通信作者: 王志乾(1969—)男, 汉族, 吉林吉林人, 博士, 研究员。研究方向: 光电测量及数字信号处理。E-mail: wangzhiqian@ciomp.ac.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

关于输入输出信号间逻辑关系的数学模型。该模型将内部材料物理特性作为定值参数,且相比于物理模型更加直观以及有更高的精度。为后续振动控制工作提供理论依据和支持。

1 电磁作动器的工作原理

作动器是控制系统中重要的部分之一,其作用是通过控制其自身的振动规律,进而对被控对象施加振动控制或振动抵消^[5]。实验所采用的电磁作动器是通过内部励磁线圈输入电压信号来产生电磁力,衔铁在电磁力与弹簧弹力的共同作用下进行运动(图1)。通过改变输入信号电压及频率的大小可改变生成电磁力的大小,从而控制衔铁振动位移^[7]。

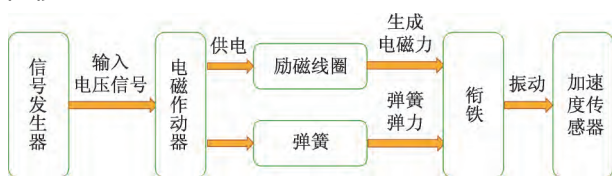


图1 电磁作动器原理

Fig. 1 Schematic of electromagnetic actuator

信号发生器向电磁作动器输入正弦电压信号,电流经过励磁线圈,并在磁场作用下产生电磁力 F 。

$$F = \frac{\mu_0 S_0}{8} \left[\frac{D^2 U}{\rho(d_1 + d_2)\delta} \right]^2 \quad (1)$$

式(1)中: μ_0 为导磁率 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; S_0 为气隙面积 mm^2 ; D 为漆包线直径 mm ; U 为输入信号电压 V ; ρ 为铜电阻率 $\Omega \cdot \text{mm}$; d_1 为绕线内径 mm ; d_2 为绕线外径 mm ; δ 为气隙长度 mm 。其中,导磁率及气隙面积等参数均为固定值,对上述公式进行进一步处理,可将电压信号与电磁力之间的关系简化为

$$F = K_0 U^2 \quad (2)$$

式(2)中: K_0 为电压与电磁力的转化参数, $\text{N}/(\Omega \cdot \text{A})^2$ 。

实验所用的电磁作动器的负载不对系统施加额外作用力,只是作为惯性负载出现在系统之中。电磁力 $f(t)$ 随输入电压的时变而产生时变,负载在平衡位置附近产生反复振动,其相对于平衡位置的位移变化为 $s(t)$ 。则其运动方程可写为

$$m \ddot{s}(t) + r \dot{s}(t) + ls(t) = f(t) \quad (3)$$

式(3)中: m 为电磁作动器负载的质量; l 为弹簧弹性常数; r 为振动系统的阻尼系数。

式(3)还可写成

$$\ddot{s}(t) + 2\xi\omega_0 \dot{s}(t) + \omega_0^2 s(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (4)$$

对式(4)方程两边进行傅里叶变换,得:

$$(\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\xi\omega_0\omega) X(\omega) = \frac{F(\omega)}{m} \quad (5)$$

傅里叶变换后的位移 $s(t)$ 和力 $f(t)$ 分别为

$$\begin{cases} S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \\ F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \end{cases} \quad (6)$$

由式(5),位移与电磁力之间关系可表示为

$$S(\omega) = F(\omega) H_d(\omega) \quad (7)$$

式(7)中:

$$H_d(\omega) = \frac{1}{m(\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\xi\omega_0\omega)} \quad (8)$$

式(8)称为位移频响函数,该函数描述了振动时位移与电磁力在频域 ω 内的对应关系。

2 电磁作动器信号采集与处理

2.1 信号采集

实验所采用的电磁作动器的输入电压范围为 $2.5 \sim 5 \text{ V}$,频率范围为 $30 \sim 60 \text{ Hz}$,振幅为 $0 \sim 5 \text{ mm}$,采样频率为 10 kHz 。

实验采用VT-300电动式振动台为激振器,电磁作动器为主动执行机构,用压电式加速度传感器拾取系统的振动信息(图2),通过信号发生器输入正弦电信号,利用LA-100线性功率放大器给电磁作动器励磁供电,并通过YMC-9800动态数据采集器传回电脑端(图3)。

图4、图5所示分别为 3 V 、 40 Hz 及 4 V 、 60 Hz 条件下采集到的信号。

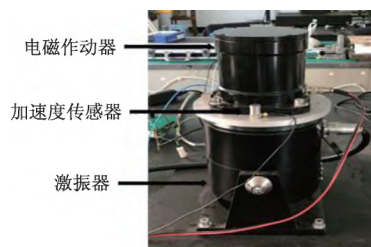


图2 实验执行机构

Fig. 2 Experimental actuator



图3 信号源及处理系统

Fig. 3 Signal source and processing system

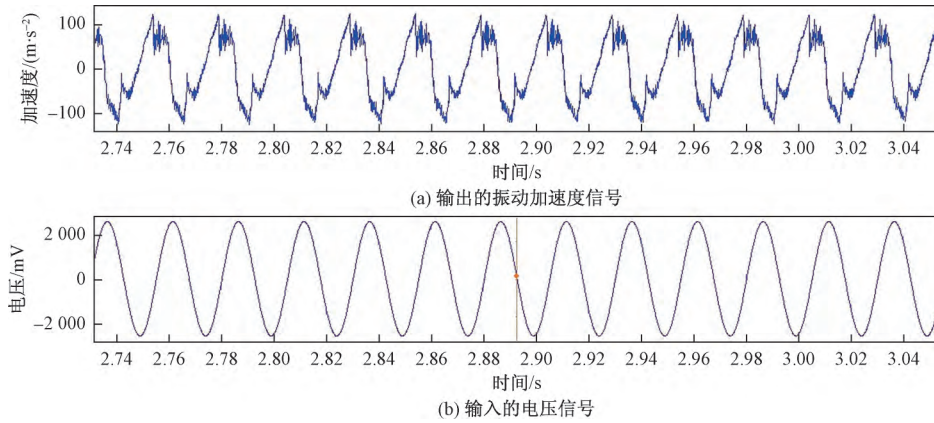


图4 3 V、40 Hz 信号
Fig. 4 Signal at 3 V 40 Hz

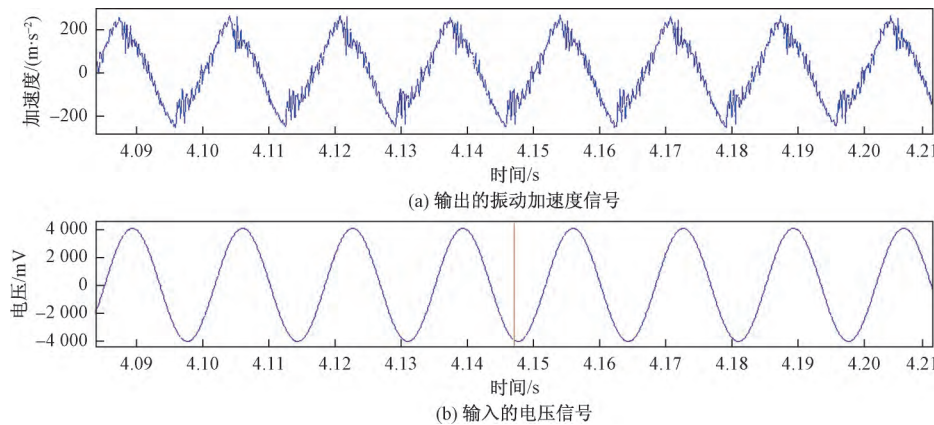


图5 4 V、60 Hz 信号
Fig. 5 Signal at 4 V 60 Hz

2.2 信号降噪处理

采集到的振动信号数据往往叠加有噪声信号,在对加速度积分转化成位移时,会产生偏离坐标轴的趋势项,给实验带来误差。实验设备受到外界影响,会产生其中某个数据点的采样信号相对于整体基线有较大偏移的现象,曲线形状产生不规则的趋势项。为了减少噪声信号带来的影响,使信号更加平滑,就必须对实验数据降噪^[8-9]。在信号降噪的方法中,滑动平均法是一种十分有效的方法。在对信号多次降噪后,会获得一条光滑曲线,将初始曲线减去处理后的曲线,即降低了噪声带来的误差^[10]。采用五点法进行降噪,其公式为

$$p_i = \sum_{m=-M}^M y_m p_{i-m}^0, \quad i = 1, 2, \dots, x \quad (9)$$

式(9)中: p^0 为采样数据; p 为平滑处理结果; x 为数据点数; $2M+1$ 为平均点数; y 为加权平均因子。

简单平均法中 $y_m = 1/(2M+1)$ ($m = 0, 1, \dots, M$), 有

$$p_i = \frac{1}{2M+1} \sum_{m=-M}^M p_{i-m}^0 \quad (10)$$

使用五点加权平均时,可取:

$$\{y\} = (y_{-2} \ y_{-1} \ y_0 \ y_1 \ y_2) = \frac{1}{9}(1 \ 2 \ 3 \ 2 \ 1) \quad (11)$$

使用最小二乘法对数据降噪,五点法($M=2$)的计算公式为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{1}{5}(3p_1^0 + 2p_2^0 + p_3^0 - p_4^0) \\ p_2 = \frac{1}{10}(4p_1^0 + 3p_2^0 + 2p_3^0 + p_4^0) \\ \vdots \\ p_i = \frac{1}{5}(p_{i-2}^0 + p_{i-1}^0 + p_i^0 + p_{i+1}^0 + p_{i+2}^0) \\ \vdots \\ p_{m-1} = \frac{1}{10}(p_{m-3}^0 + 2p_{m-2}^0 + 3p_{m-1}^0 + 4p_m^0) \\ p_m = \frac{1}{5}(-p_{m-3}^0 + p_{m-2}^0 + 2p_{m-1}^0 + 3p_m^0) \\ i = 3, 4, \dots, m-2 \end{cases} \quad (12)$$

部分采集信号降噪处理结果如图6和图7所示。经对比可以看出,降噪后有明显的效果。

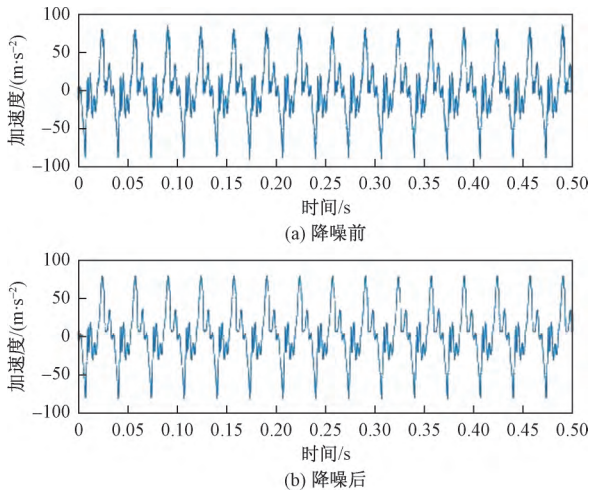


图6 3 V、30 Hz 信号处理
Fig. 6 Signal processing at 3 V, 30 Hz

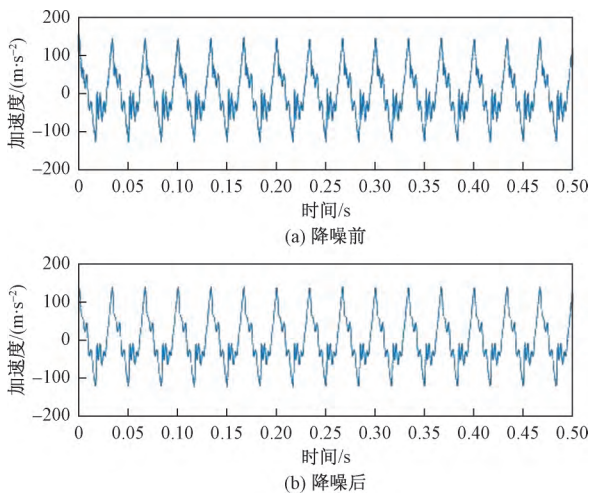


图7 5 V、30 Hz 信号处理
Fig. 7 Signal processing at 5 V, 30 Hz

2.3 加速度信号积分处理

采集到的实验数据是加速度信号,而为了更方便地进行后续信号处理和建模,以及直观地表述振动信号随频率和电压变化而产生的振动的变化,需要将加速度信号转变为振动位移信号。

将实验传感器采集到的加速度信号进行傅里叶变换,然后在频域内将变换结果进行积分运算,最后经傅里叶逆变换得到积分后的时域信号^[11]。

加速度信号的傅里叶分量可以表达为

$$a(t) = Ae^{j\omega t} \quad (13)$$

式(13)中: $a(t)$ 为频率 ω 内加速度信号的傅里叶分量; A 为 $a(t)$ 对应的系数。

当初速度及初位移分量都是零时,将信号傅里叶分量进行两次积分处理,可得到:

$$s(t) = \int_0^t \left[\int_0^\beta a(\alpha) d\alpha \right] d\beta = \int_0^t V e^{j\omega\beta} d\beta =$$

$$\frac{V}{j\omega} e^{j\omega t} = -\frac{A}{\omega^2} e^{j\omega t} = S e^{j\omega t} \quad (14)$$

式(14)中: $s(t)$ 为频率 ω 内位移信号的傅里叶分量; S 为 $s(t)$ 对应的系数。

二次积分的数值计算公式为

$$y(\gamma) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{j2\pi i \Delta f} H(i) S(i) e^{j2\pi i \gamma / N} \quad (15)$$

式(15)中:

$$H(i) = \begin{cases} 1, & f_l \leq i\Delta f \leq f_h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: f_l 是下限截止频率; f_h 是上限截止频率; $S(i)$ 是 $s(\gamma)$ 的傅里叶变换; Δf 是频率分辨率。

部分加速度信号积分结果如图8、图9所示。

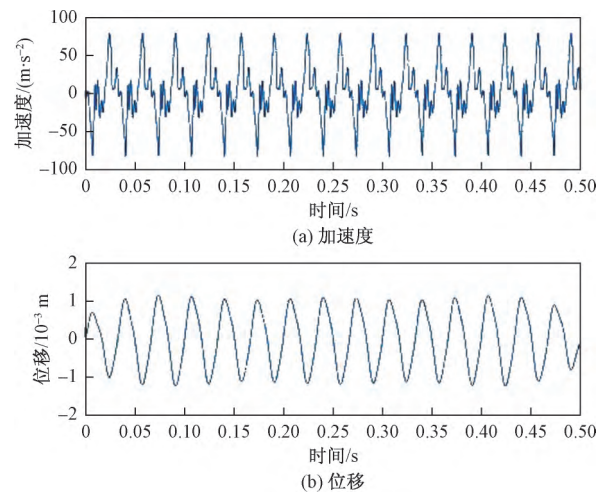


图8 3 V、30 Hz 信号积分结果
Fig. 8 Signal integration result at 3 V, 30 Hz

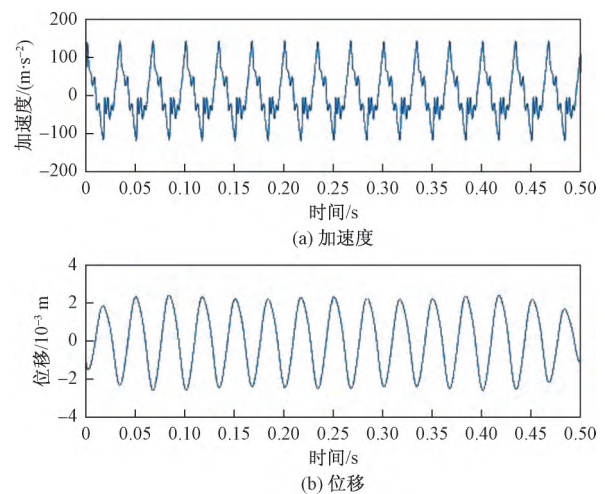


图9 5 V、30 Hz 信号积分结果
Fig. 9 Signal integration result at 5 V, 30 Hz

3 电磁作动器建模与分析

本次建模采用的是唯像模型建立法,从信号特

征着手,只根据系统的输入输出的信号数据来进行建模。唯象模型避开了系统内部的材料物理特性,相对于物理模型更加直观,应用更加广泛。

在正弦信号输入情况下,处理并分析采集到的振动信号后可知,电磁作动器在不同输入电压和频率作用下的振动位移也符合正弦规律,对其进行拟合,得到其位移公式为

$$S(t) = S_0 \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (17)$$

式(17)中: S_0 为位移幅值,mm; f 为频率,Hz; φ 为相位角,rad。

位移幅值 S_0 及相位角 φ 的大小是由输入的电压和频率而定的。对位移信号进行拟合和分析,得到在不同电压与频率下的位移幅值与相位角的值,如表1、表2所示。

表1 位移幅值

Table 1 Displacement amplitude

频率/ Hz	位移幅值/mm					
	2.5 V	3.0 V	3.5 V	4.0 V	4.5 V	5.0 V
30	0.384 2	0.891 0	1.388 0	1.715 0	2.094 0	2.416 6
35	0.492 7	1.101 0	1.587 0	1.966 0	2.325 0	2.652 0
40	0.468 7	1.241 0	1.943 0	2.534 0	3.042 0	3.580 0
45	0.796 1	1.517 0	2.278 0	2.997 0	3.675 0	4.267 0
50	0.640 0	1.345 0	2.023 0	2.826 0	3.520 0	4.123 0
55	0.547 2	0.982 5	1.398 0	1.916 0	2.328 0	2.723 0
60	0.319 5	0.572 3	1.022 0	1.333 0	1.723 0	2.067 0

表2 相位角

Table 2 Phase angle

频率/ Hz	相位角/rad					
	2.5 V	3.0 V	3.5 V	4.0 V	4.5 V	5.0 V
30	0.610 0	0.585 1	0.529 0	0.468 0	0.417 0	0.385 0
35	0.871 1	0.847 3	0.776 0	0.728 0	0.686 0	0.654 0
40	1.120 0	1.095 2	1.020 0	0.976 0	0.884 0	0.855 0
45	1.418 3	1.402 8	1.362 0	1.306 0	1.253 2	1.225 1
50	1.565 6	1.759 0	1.821 5	1.861 2	1.902 6	1.935 2
55	1.690 1	1.939 2	2.093 4	2.189 7	2.270 7	2.309 1
60	1.767 2	2.074 0	2.238 9	2.343 2	2.433 2	2.502 8

对上述数据进行拟合分析,提出位移幅值 $S_0(u, f)$ 与相位角 $\varphi(u, f)$ 的数学公式。

在实际工程中,数值的拟合方法多采用最小二乘法。又因为电磁作动器本身存在滞回非线性这一动态特性^[1,6],在正弦电压信号输入时,振动会产生轻微的滞回现象,在位移信号的相位角计算时会产生偏差。所以,在拟合相位角的数学模型时,在最小二乘法基础上引入正弦公式来修正偏差^[12]。最终得到的振动位移幅值为

$$S_0(u, f) = a_1 + b_1 u^2 + c_1 u + d_1 f^2 + e_1 f \quad (18)$$

相位角为

$$\varphi(u, f) = a_2 + b_2 u^2 + c_2 u + d_2 f^2 + e_2 f + m \sin u +$$

$$n \sin(f/180) + h^{(2u+f/5-9)} \quad (19)$$

由表1可知,由于电磁作动器自身材料特性,当频率在40~55 Hz时,作动器振动幅度随电压增加而明显增大。所以,为了提高模型精度,将模型分三段拟合,得出:

$$S_0(u, f) = \begin{cases} 0.405 2 - 0.106 2u^2 + 1.685u + \\ 0.004 718f^2 - 0.263 4f, & 30 \text{ Hz} \leq f < 40 \text{ Hz} \\ -27.79 - 0.079 76u^2 + 1.92u - \\ 0.011 54f^2 + 1.06f, & 40 \text{ Hz} \leq f < 55 \text{ Hz} \\ 0.910 7 - 0.035 22u^2 + 1.082u - \\ 0.000 7121f^2 - 0.012 14f, & 55 \text{ Hz} \leq f \leq 60 \text{ Hz} \end{cases} \quad (20)$$

由表2可知,在低频率信号输入时,相位角随电压增加而减小,而在高频信号输入时,相位角随电压增加而增大,拟合数据,得出:

$$\varphi(u, f) = \begin{cases} -7.793 - 0.042 65u^2 + 0.420 2u - 0.0116 7f^2 + \\ 21.65f + 0.165 2 \sin u - 3 812 \sin(f/180) + \\ 0.948 3^{(2u+f/5-9)}, & 30 \text{ Hz} \leq f \leq 45 \text{ Hz} \\ -5.304 - 0.172 7u^2 + 1.728u - 0.000 1273f^2 + \\ 0.010 17f + 0.18 \sin u + 10.5 \sin(f/180) + \\ 0.650 6^{(2u+f/5-13)}, & 45 \text{ Hz} < f \leq 60 \text{ Hz} \end{cases} \quad (21)$$

对模型进行验证,采集符合实验条件下的不同电压和频率的信号数据,并将数据处理后代入上述模型。经计算,振动幅值误差最大为3.32%,最小为0.06%;相位差误差最大为3.61%,最小为0.87%。

4 结论

针对电磁作动器的信号输入输出特性进行实验研究,对该电磁作动器进行数学建模。通过使用该电磁作动器的数学模型,可以得出当需要抵消某种振动干扰时所需要输入的电信号的电压及频率的大小。模型经过验证能够满足项目工程的使用精度要求,也为后续控制工作提供理论依据。

参 考 文 献

- 宗晓萍,张 娜,王培光. 基于 Preisach 逆模型的迟滞非线性系统自适应滑模控制[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 199-202.
Zong Xiaoping, Zhang Na, Wang Peiguang. Adaptive sliding mode control of hysteretic nonlinear system based on Preisach inverse model [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 199-202.
- 杨坤鹏,樊文欣,朱家萱. 金属橡胶隔振器的非线性响应特性

- [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 176-180.
Yang Kunpeng, Fan Wenxin, Zhu Jiaxuan. Nonlinear response characteristics of metal rubber isolators [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(28): 176-180.
- 3 乔继红. 压电陶瓷驱动器的滑模观测器反演控制 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 257-260.
Qiao Jihong. Sliding mode observer inversion control of piezoelectric ceramic actuator [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 257-260.
- 4 马建国, 帅长庚, 李彦. 旋转机械主被动混合隔振虚拟样机技术及实验研究 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 285-291.
Ma Jianguo, Shuai Changgeng, Li Yan. Virtual prototype technology and experimental research on active passive hybrid vibration isolation of rotating machinery [J]. Vibration and Shock, 2019, 38(9): 285-291.
- 5 王贞艳, 贾高欣. 压电陶瓷作动器非对称迟滞建模与内模控制 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(10): 2484-2492.
Wang Zhenyan, Jia Gaixin. Asymmetric hysteresis modeling and internal mode control of piezoelectric actuator [J]. Optical Precision Engineering, 2018, 26(10): 2484-2492.
- 6 毛伯永, 谢石林, 苏建军, 等. 新型弹簧支撑介电弹性作动器的力学特性建模及参数响应分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(28): 88-93.
Mao Boyong, Xie Shilin, Su Jianjun, et al. Mechanical characteristics modeling and parameter response analysis of a new spring supported dielectric elastic actuator [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(28): 88-93.
- 7 Roll J A, Cheng B, Deng X Y. An electromagnetic actuator for high-frequency flapping-wing microair vehicles [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(2): 400-409.
- 8 Wei J M, Zhang Y A, Sun M M. Adaptive iterative learning control of a class of nonlinear time-delay systems with unknown backlash-like hysteresis input and control direction [J]. ISA Transactions, 2017, 70: 79-92.
- 9 Nie Z E, Liu R J, Wang Q G, et al. Novel identification approach for nonlinear systems with hysteresis [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 2: 246-251.
- 10 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2006.
Wang Ji, Hu Xiao. Application of MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2006.
- 11 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2001.
Hu Shousong. Principle of automatic control [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2001.
- 12 Merca M. The cardinal sine function and the Chebyshev-Stirling numbers [J]. Journal of Number Theory, 2016, 160: 19-31.