

6-4-2020

Modeling and Simulation of Magnetostrictive Impact Drive Mechanism

Zhao Ran

1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive And Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;;2. Department of Power Electrical, Hebei University of Technology, Tianjin 220000, China;

Quanguo Lu

1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive And Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Magnetostrictive Impact Drive Mechanism

Abstract

Abstract: *A model of magnetostrictive impact drive mechanism (IDM) was built to predict the step size and velocity, in which the dynamical model and the second order non-linear model of magnetostrictive material based on Jiles-Atherton model were considered.* The simulation model was developed by utilizing MATLAB /Simulink software, and the data of IDM's displacement and velocity was obtained based on the model. The experimental system was built to testify the given model. The results illustrate that the error between experiment and simulation results are less than 15% within the range of driving current 0.2~0.4A and working frequency 10~100Hz. The proposed model can be used to predict the motion performance of magnetostrictive impact drive mechanism.

Keywords

impact drive mechanism, magnetostrictive materials, non-linear model, dynamic model

Recommended Citation

Zhao Ran, Lu Quanguo. Modeling and Simulation of Magnetostrictive Impact Drive Mechanism[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1547-1552.

磁致伸缩惯性冲击电机建模与仿真

赵冉^{1,2}, 卢全国¹

(1.南昌工程学院江西省精密驱动与控制重点实验室, 南昌 330099; 2.河北工业大学电气工程学院, 天津 220000)

摘要: 将磁致伸缩式惯性冲击电机的动力学模型与基于 Jiles-Atherton 模型的磁致伸缩材料非线性本构模型相结合, 建立磁致伸缩惯性冲击电机的步长及速度预测模型。利用 MATLAB / Simulink 软件搭建仿真系统, 通过仿真可得到惯性冲击电机的位移及速度。搭建实验系统对模型进行验证。仿真与实验结果表明, 在驱动电流 0.4~4A、驱动频率 10~80 Hz 的工作区间内, 模型预测值与电机实际输出之间的误差不超过 15%, 能够对磁致伸缩惯性冲击电机的运动性能进行准确预测。

关键词: 惯性冲击电机; 磁致伸缩材料; 非线性模型; 动力学模型

中图分类号: TM381 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 07-1547-06

Modeling and Simulation of Magnetostrictive Impact Drive Mechanism

Zhao Ran^{1,2}, Lu Quanguo¹

(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive And Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

2. Department of Power Electrical, Hebei University of Technology, Tianjin 220000, China)

Abstract: A model of magnetostrictive impact drive mechanism (IDM) was built to predict the step size and velocity, in which the dynamical model and the second order non-linear model of magnetostrictive material based on Jiles-Atherton model were considered. The simulation model was developed by utilizing MATLAB /Simulink software, and the data of IDM's displacement and velocity was obtained based on the model. The experimental system was built to testify the given model. The results illustrate that the error between experiment and simulation results are less than 15% within the range of driving current 0.2~0.4A and working frequency 10~100Hz. The proposed model can be used to predict the motion performance of magnetostrictive impact drive mechanism.

Keywords: impact drive mechanism; magnetostrictive materials; non-linear model; dynamic model

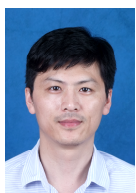
引言

惯性冲击电机是利用惯性冲击来实现精密位移的一种精密驱动机构, 具有运动范围大、位移分辨率高、结构简单的优点, 在光学定位, 微纳操控等领域得到了一定的应用。

目前, 惯性冲击电机主要采用压电材料和磁致

伸缩材料作为驱动元件^[1-5]。压电式惯性冲击电机具有工作频率高、位移精度高的优点, 但由于压电材料伸缩系数小, 功率密度低, 导致压电式惯性冲击电机难以用于较大行程、负载的应用场合。而磁致伸缩式惯性冲击电机能提供较大的步进和输出力, 弥补了压电式惯性冲击电机的不足。

为提高惯性冲击电机的输出精度, 很多文献都对压电式惯性冲击电机模型^[6-8]进行了分析, 这些模型能够很好的预测电机的步长输出, 实现闭环控制。而磁致伸缩式惯性冲击电机采用磁场驱动, 结构及模型更为复杂。文献[4]针对一种磁致伸缩直线电机提出了简单的步长及速度预测公式, 文献



收稿日期: 2015-10-14 修回日期: 2015-12-07;
基金项目: 国家自然科学基金(51165035), 江西省青年基金(20133BAB21004), 江西省科技落地计划(KJLD14094), 高校科技落地计划(KJLD14096);
作者简介: 赵冉(1982-), 男, 河南开封, 博士, 讲师, 研究方向为磁致伸缩材料及器件。

<http://www.china-simulation.com>

• 1547 •

[5]针对所开发的钳位式直线电机建立了基于 J-A 模型和一阶非线性本构模型的仿真模型,对电机步长的预测较为准确。然而,还没有文献针对滑动式磁致伸缩惯性冲击电机进行建模研究。

针对这一问题,论文提出了一种磁致伸缩式惯性冲击电机的步长、速度预测模型,该模型采用基于 J-A 模型的二阶非线性本构方程对磁致伸缩棒伸长量进行计算,并充分考虑了摩擦力的非线性特征。根据模型设计了基于 MATLAB / Simulink 软件的仿真模块,得到了仿真曲线。最后搭建实验系统进行实验,结果表明,仿真曲线能够很好地符合实验数据,所建立的模型可用于预测惯性冲击电机的运动性能。

1 理论建模

磁致伸缩惯性冲击电机如图 1 所示,分为电机主体滑块(图 1 中②)、磁致伸缩棒(在主体滑块内部、配重块(如图 1 中①)、以及导轨(如图 1 中③)4 部分。电机中磁致伸缩棒一端固接惯性质量块,另一端固接主体滑块,棒体外部绕有驱动线圈用以产生磁场。为消除连接间隙,结构中加入了预紧装置,通过预紧弹簧提供一定的预压力。当驱动线圈内电流逐渐减小,磁致伸缩棒回缩时,预紧弹簧将产生回拉力,使配重块与磁致伸缩棒始终保持紧密接触。



图 1 磁致伸缩惯性冲击电机

磁致伸缩惯性冲击电机为利用驱动线圈所产生的磁场进行驱动。当施加快速上升缓慢下降或缓慢上升快速下降的锯齿波信号时,磁致伸缩棒和配重质量将会对电机主体产生惯性冲击力。当该冲击力大于主体滑块与导轨间的摩擦力时,电机主体就可以产生运动;当惯性冲击力小于或等于移动体与

外界的摩擦力时,电机主体保持静止。通过改变驱动电流的频率和幅值,能够实现不同步长的双向连续步进运动。根据磁致伸缩惯性冲击电机在运动过程中各部分受力情况,可以利用弹簧-阻尼-质量模型^[9-10]建立电机的动力学模型(如图 2)。其中 F 为锯齿波激励信号所产生的电磁驱动力; f 为机构运动过程中所受摩擦力; m_1 为主体滑块; m_2 为配重块; x_1 为主体滑块位移、 x_2 为配重块的位移; c 为系统等效阻尼系数; k 为等效刚度系数。

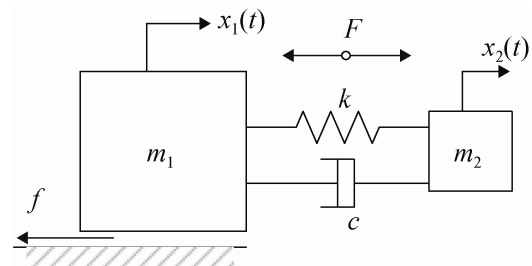


图 2 弹簧-阻尼-质量模型

根据所建立的动力学模型,可以得到系统的运动平衡方程如下,其中 \square_1 、 \square_1 为主体滑块的速度和加速度, \square_2 和 \square_2 为配重块的速度及加速度。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) + F - f \\ m_2 \ddot{x}_2 = -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k(x_2 - x_1) - F \end{cases} \quad (1)$$

根据 Caramen 提出的磁致伸缩材料本构模型^[11],可以得到一个非线性二阶方程,其中 ε 为磁致伸缩棒单位长度应变, E 为杨氏模量, σ 为单位应力, d 为磁致伸缩系数, H 为磁场强度, r 是磁致伸缩棒的磁弹性系数。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + dH^2 + r\sigma H^2 \quad (2)$$

忽略磁弹性对磁场造成的影响,即取 $r=0$ 时,可得到:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + dH^2 \quad (3)$$

利用二次畴转模型和 J-A 磁滞模型可以求得磁致伸缩系数 d 如(4)式所示^[12]。其中 a 、 α 分别为畴壁相互作用系数、磁化强度形状系数。

$$d = \frac{3\lambda_s}{2M_s^2} \left(\frac{M_s}{3a - M_s \alpha} \right)^2 \quad (4)$$

根据安培环路定律, 磁致伸缩驱动器所产生的磁场强度 H 如(5)式所示^[13]。

$$H = \left[\frac{\mu_r}{1 + \mu_r (A_r / A_m)} \right] \left(\frac{NI}{l_r} \right) \quad (5)$$

式中, μ_r 为材料相对磁导率, I 为驱动电流最大值, A_r 、 A_m 分别为磁致伸缩棒截面积和磁场截面积, N 为线圈匝数, l_r 为磁场长度(与磁致伸缩棒的长度相同)。

由(5)式当取预应力 $\sigma = 0$ 时, 可以求得磁场作用下磁致伸缩棒所产生的推力^[14]:

$$F = \frac{EA_r dH^2}{l_r} \quad (6)$$

根据 Coulom 摩擦力模型^[9,15], 物体在滑动时所受摩擦力大小与其运动速度有关, 如式(7)。其中 μ_s , μ_0 分别为静摩擦系数和滑动摩擦系数, δ 表

示粘滞系数, g 为重力加速度, $\text{sgn}(\dot{x}_1)$ 为电机运动方向的符号函数。

$$f = \text{sgn}(\dot{x}_1)(\mu_c + (\mu_s - \mu_c)e^{-\delta \dot{x}_1})(m_1 + m_2)g \quad (7)$$

2 仿真模型

根据前文所推导的摩擦力方程、磁致伸缩驱动力方程以及弹簧-阻尼-质量块系统运动方程(式(1), (6), (7))可以得到磁致伸缩建惯性冲击电机运动状态的微分方程并据此构建电机仿真系统。如图 3 所示, 仿真系统主要包括本构模型子模块(用于计算驱动信号作用下磁致伸缩棒所产生的推力)、摩擦力子模块(用于计算电机在运动过程中所受摩擦力)以及电机运动方程三部分。系统输入为锯齿波电流信号, 输出为惯性冲击电机的位移和速度。

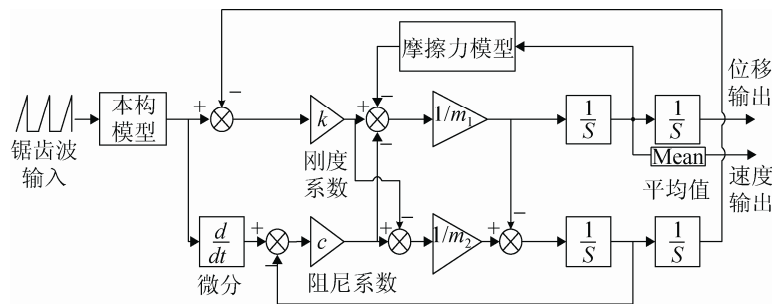


图 3 惯性冲击电机仿真系统

在 MATLAB/Simulink 中依据图 3 中的系统搭建仿真模块, 模型采用变步长四阶/五阶 Runge-Kutta 积分法(ODE45), 相对误差限设定为 0.001, 绝对误差限由算法在积分过程中自动调整。仿真模块中所采用的电机相关参数、磁致伸缩棒相关物理量在表 1 中给出。

表 1 系统仿真相关参数

Name	Value	Name	Value
l_r	50 mm	m_2	0.23 kg
A_r	200.96 mm ²	m_1	1.08 kg
A_m	1 256 mm ²	N	1 000
σ	0 N	μ_r	12
E	26.5 GPa	c	3×10 ⁶ Ns/m ²
k	33×10 ⁶ N/m	μ_0	0.4
λ_s	1 000 ppm	μ_s	0.3
M_s	765 kA/m	δ	10

3 仿真实验结果与分析

利用上文所建仿真模块可以仿真电机在任意驱动电流频率及幅值下的位移曲线, 对电机步长及运动速度进行预测。为了对仿真模型进行验证, 搭建了实验系统对电机实际运动性能进行测试, 并将实验结果与仿真结果进行对比。实验中所采用的磁致伸缩惯性冲击电机如图 1 所示^[16], 尺寸为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$, 滑轨长度为 400 mm。系实验系统利用信号发生器产生 0~1 V 的锯齿波控制信号, 通过功率放大器放大为 0~4 A 的驱动电流, 激光位移传感器对惯性冲击电机的运动过程进行测量。根据电机的实际工作性能, 取电机的工作电流为 0.2~4 A, 工作频率为 10~100 Hz。

电机进行步进运动的仿真曲线如图 4 所示, 图中驱动信号为占空比为 0.5 的等时间间隔锯齿波电流, 其频率为 10 Hz, 幅值为 0.8 A。在此条件下, 电机步长为 $0.98 \mu\text{m}$, 速度为 $9.7 \mu\text{m/s}$ 。

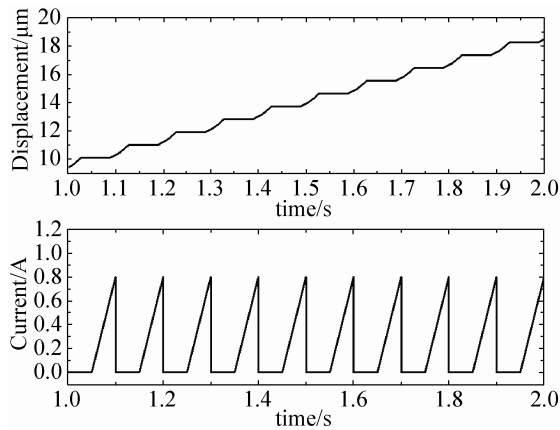


图 4 电机仿真位移曲线

同样在 10 Hz, 0.8 A 驱动电流条件下, 将电机位移的实验数据与仿真数据进行对比。如图 5 所示, 电机的实际步长为 $0.960 \mu\text{m}$, 仿真步长为 $0.980 \mu\text{m}$, 步长误差仅为 $0.02 \mu\text{m}$ 。图中实验波形存在波动是由于电机在收缩步进过程中的振动现象所造成。

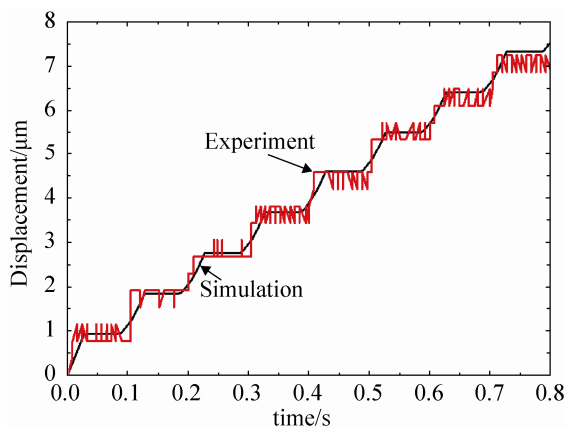
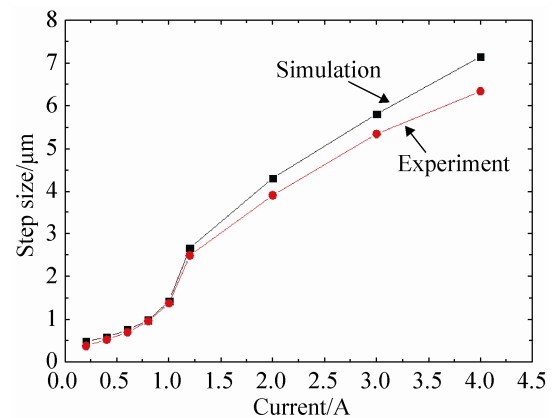


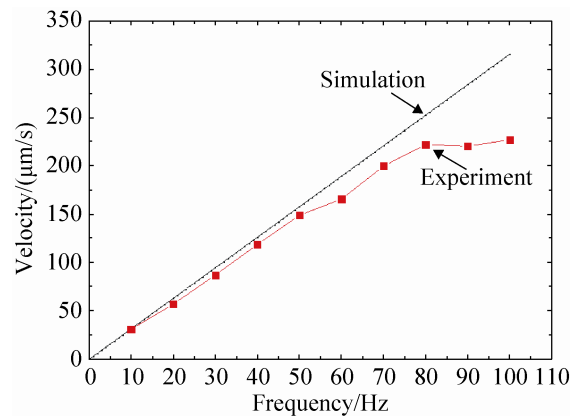
图 5 步长的仿真与实验波形

为了进一步验证模型, 在惯性冲击电机的整个工作区间内进行实验, 并对比仿真实验数据。图 6.a 为 10 Hz 工作频率下, 电流幅值在 0.2~4 A 范围内变化的电机步长仿真与实验数据。由图可知, 随着电流幅值不断增加, 实验值与仿真值偏差加大,

当达到最大工作电流时(4 A), 步长误差达 $0.8 \mu\text{m}$ 。产生误差的主要原因在于模型未考虑驱动电流在电机驱动线圈中产生的损耗, 并且该损耗随电流增加而增大^[17-18]。图 6.b 为驱动电流幅值 1.2 A 条件下, 工作频率在 10~100 Hz 范围内变化的电机速度仿真与实验数据。由图 6 可知, 随着电机工作频率的不断增加, 电机的实际速度曲线逐渐偏离仿真曲线, 预测误差逐渐增大, 这是由于随着驱动磁场频率升高, 磁致伸缩棒所产生的涡流损耗逐渐加大, 导致磁致伸缩棒的伸缩量变小, 磁滞效应增强所造成。



(a) 步长随电流变化曲线



(b) 速度随频率变化曲线

图 6 惯性冲击电机步长、速度的仿真与实验数据

根据电机模型预测误差随电流幅值、工作频率逐渐增大的规律(见图 6), 为保证电机模型预测精度, 利用电机步长、速度的相对误差曲线来确定模型的有效预测区间。图 7 所示为速度、步长的相对

误差百分比曲线。步长误差百分比在电流幅值 0.2~0.4 A 时较大, 在 0.2 A 时相对达到了 28%, 与图 6.a 中变化规律有异, 这是由于在较小驱动电流时电机的步长很小, 因此造成了相对误差较大的现象。而速度误差百分比在工作频率 80~100 Hz 时较大, 在 100 Hz 时已达 40%, 相对误差随频率逐渐增大, 与图 6.b 中变化规律相同。当以相对误差不超过 15% 为基准进行考虑时(如图 7 所示), 可选取图中区域 I 为电机速度的有效预测区间, 选取图中区域 II 为电机的步长有效预测区间。综上, 选取模型的有效预测区间为频率 10~80 Hz, 电流 0.4~4 A。

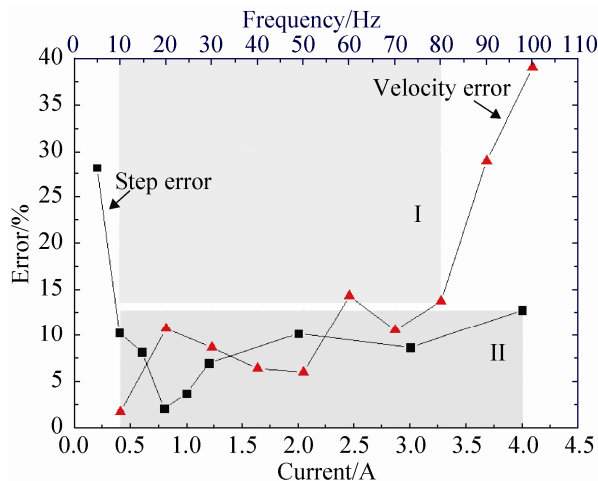


图 7 误差随电流、频率变化曲线

4 结论

本文提出了一种磁致伸缩式惯性冲击电机模型, 并根据模型设计了仿真模块, 该仿真模块可以仿真计算不同驱动电流幅值、频率下的电机位移曲线。最后搭建实验系统, 对惯性冲击电机的实际运动性能进行测试。结果表明, 仿真曲线能够很好地符合电机实际的运动轨迹, 在 10~80 Hz、0.4~4 A 的工作区间内, 模型的预测误差不超过 15%。因此, 电机模型能够运用于磁致伸缩惯性冲击电机的步长预测, 将其应用在电机的闭环控制系统中, 将能够进一步提高电机的步长分辨率及定位精度。此外, 模型仍存在一定的不足, 由于未考虑电流损耗及磁致伸缩材料的涡流损耗, 模型在驱动电流幅值

较大、工作频率较高时预测误差较大, 在以后的研究中可以通过在模型中引入损耗计算来解决这一问题。

参考文献:

- [1] Takeshi Morita, Takuma Nishimura, Ryuichi Yoshida, Hiroshi Hosaka. Design for the resonant type SIDM (Smooth Impact Drive Mechanism) actuator [J]. Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (S0021-14922), 2012, 33(11): 77-78.
- [2] Takuma Nishimura, Hiroshi Hosaka, Takeshi Morita. Resonant-type Smooth Impact Drive Mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped Langevin transducer [J]. Ultrasonics (S0041-624X), 2012, 52(1): 75-80.
- [3] 卢秋红, 高志军, 颜国正, 等. 压电型惯性微驱动器研究 [J]. 压电与声光, 2004, 26(2): 112-115.
- [4] Won-jong Kim, Ali Sadighi. A Novel Low-Power Linear Magnetostrictive Actuator with Local Three-Phase Excitation [J]. IEEE/ASM Etransactions on Mechatronics (S1083-4435), 2010, 15(2): 299-307.
- [5] 许文秉, 杨斌堂, 孟光, 等. 大负载精密驱动超磁致伸缩直线电机动力学建模与仿真 [J]. 上海交通大学学报(自然科学版), 2012, 46(3): 480-486.
- [6] Jianjun Zhou, Yuliang Pan, Min Huang. A Novel Magnetostrictive Drive Rotary Motor [J]. Solid State Phenomena (S1662-9779), 2007, 121(3): 1203-1206.
- [7] Göran Engdahl. Handbook of Giant Magnetostrictive Materials [M]. San Diego, USA: Academic Press, 1999.
- [8] 刘品宽, 孙立宁, 刘涛, 等. 惯性冲击式运动原理的理论分析与仿真 [J]. 中国机械工程, 2015, 15(24): 2217-2221.
- [9] 姜楠, 刘俊标. 惯性冲击马达的建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(24): 7711-7714.
- [10] Chia-Feng Yang, Shyr-Long Jeng, Wei-Hua Chieng. Motion behavior of triangular waveform excitation input in an operating impact drive mechanism [J]. Sensors and Actuators A: Physical (S0734-2101), 2011, 166(12): 66-77.
- [11] G P Camran, M Miotrvic. Nonlinear Constitutive Relations for Magnetostrictive Materials with Application to 1-D Problems [J]. J Intelligent Mat Syst. & Stm. (S1045-389X), 1995, 6(5): 673-684.
- [12] 曹淑英. 超磁致伸缩驱动器的磁滞动态模型及控制技术 [D]. 天津: 河北工业大学, 2004.

(下转第 1560 页)