

考虑附加涡流损失的超磁致伸缩执行器动态模型

赵章荣, 邬义杰, 顾新建, 葛荣杰, 徐 君
(浙江大学现代制造工程研究所, 浙江省 杭州市 310027)

Dynamic Model of Giant Magnetostrictive Actuator Considering Excess Eddy Current Loss

ZHAO Zhang-rong, WU Yi-jie, GU Xin-jian, GE Rong-jie, XU Jun

(Institute of Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The losses in giant magnetostrictive actuator not only include magnetic hysteresis loss and eddy current loss, but also include excess eddy current loss of giant magnetostrictive actuator at high frequency. A dynamic model of magnetostrictive actuator is developed, which accounts for inertial effects and mechanical dissipation as the actuator deforms, eddy current losses and excess losses in addition to the classical eddy current loss for Terfenol-D rod. The magnetic behavior is characterized by considering the Berqvist and Engdahl' stress dependent magnetic hysteresis model for ferromagnetic hysteresis. The nonlinear properties of Terfenol-D, obtained from static material characterizations, is used as numerical input to the models. The model is solved by finite difference method and the model block diagram is constructed in Matlab/Simlink module. A comparison between the calculating result and the experimental result at different frequency for the actuator is carried out and it is found that they are in agreement well. This indicates that the model can describe the relation between the applied current and the output displacement. The model can be used for the optimization design of giant magnetostrictive actuator.

KEY WORDS: giant magnetostrictive actuator; excess eddy current loss; dynamic model; Terfenol-D rod

摘要: 超磁致伸缩执行器在高频下工作时, 能量损失不仅包括磁滞损失、Terfenol-D棒涡流损失, 还包括Terfenol-D棒附加涡流损失。该文考虑到执行器的惯性、阻尼、Terfenol-D棒涡流损失及附加涡流损失, 建立了超磁致伸缩执行器的动态模型。其磁滞特性由Berqvist和Engdahl磁滞模型来描述, 材料非线性由输入到模型静态实验数据体现。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50575205); 国家 863 高技术研究计划项目(2006AA04Z233); 浙江省自然科学基金项目(Y104243; Y105686); 浙江省科技攻关项目(2006C11234)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50575205); The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2006AA04Z233).

模型求解使用有限差分方法, 在Matlab/Simulink中建立相应模型仿真结构框图。对执行器不同工作频率情况进行模型的仿真计算, 并与实验结果对比, 发现模型与实验吻合较好。表明所建立动态模型能较好地描述执行器输出位移与驱动电流之间的关系。该模型对优化设计超磁致伸缩执行器有指导意义。

关键词: 超磁致伸缩执行器; 附加涡流损失; 动态模型; Terfenol-D棒

0 引言

超磁致伸缩材料是一种在驱动磁场作用下产生磁致伸缩变形的新型智能材料, 用它作驱动器, 不但能提供较大的驱动力, 而且还有体积小、反应敏捷等优点, 广泛应用于液体和阀门控制、减振、机器人、航空器、潜艇控制和微定位领域。当输入信号频率达到一定值时, 信号的频率将对超磁致伸缩材料的涡流效应、磁弹性动态效应和磁滞效应产生较大的影响^[1-2], 而许多应用场合超磁致伸缩执行器需要对外场的变化做出快速反应, 这就要求它工作频率范围宽和动态性能好。鉴于此, 要优化设计和控制超磁致伸缩执行器的动态性能, 必须建立完整描述它动态性能模型。已有不少学者开展了GMA动态模型方面的研究工作, Xiaobo Tan^[3]提出了超磁致伸缩执行器动态磁滞模型; Venkataraman 和 Krishnaprasad^[1]提出了用Preisach算子和一个线性系统来模拟超磁致伸缩执行器; D.Davino等^[4]利用Preisach模型描述磁滞建立GMA动态模型。但他们都仅仅考虑磁滞损失和Terfenol-D棒的涡流损失, 没有考虑到当频率达到一定值时的附加涡流损失。描述磁滞可用Preisach模型, 但建立Preisach模型需测试大量一阶逆向实验曲线来识别大量的非物理参数, 所以其实现较复杂, 而且大量实验结果^[5-8]表明

不同机械负载和不同频率信号输入下驱动器滞回非线性不一样。黄文美^[9]根据D.C.Jile^[10]提出的附加涡流损失,利用Jiles-Atheron磁滞模型建立了考虑涡流的超磁致伸缩执行器动态模型,模型需要辨识参数较多且较难测定。Berqvist和Engdahl^[11-14]建立了与应力相关的磁滞模型,并证明能成功模拟Terfeno-D磁滞,该模型仅有少量参数。本文在文献[1-3]工作的基础上,利用Berqvist和Engdahl提出的磁滞模型,建立了考虑磁滞损失、Terfenol-D棒涡流损失以及高频下附加涡流损失的超磁致伸缩执行器动态模型,并用实验加以验证。

1 动态模型的建立

超磁致伸缩执行器工作原理:由高频电源产生高频电流施加于执行器激励线圈上,超磁致伸缩棒 Terfenol-D在交变的磁场作用下产生伸缩变化,将高频电能转换成同频率的机械振动。执行器输入是电流,输出是机械位移和力。其结构简图如图1所示。

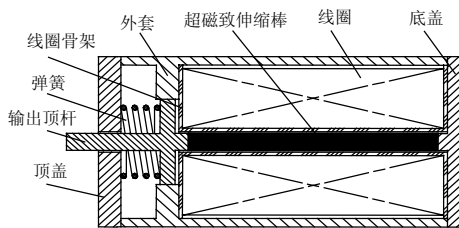


图 1 直动型超磁致伸缩执行器的结构简图
Fig. 1 Basic structure of straightway GMA

执行器在工作时, Terfenol-D棒上存在涡流损失,而且在高频下存在附加涡流损失^[15]。考虑这部分能量损失,超磁致伸缩执行器能量损失由4个部分组成:驱动线圈电阻热损失、磁滞损失、Terfenol-D棒内涡流损失和Terfenol-D棒上附加涡流损失。为了表征这4部分能量损耗,可用电路图来类比:外界输入的能量用电压源表示;励磁线圈热损失用电阻 R 表示;磁滞损失、Terfenol-D棒涡流损失和附加涡流损失可用电感线圈、电阻 R_{rod} 和电阻 R_{excess} 3个并联电路来表示。执行器能量损失结构框图如图2所示。

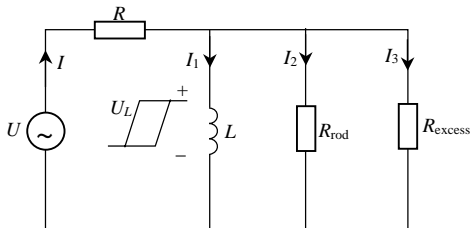


图 2 超磁致伸缩执行器能量损失结构图
Fig. 2 Energy representation of energy losses of GMA

Bertotti、Fiorillo 和Novikov^[16-17]提出了软磁材料在交变磁场作用下损失附加涡流功率,将其应用到超磁致伸缩棒得到:

$$P_{excess} = \left(\frac{GdwH_0}{\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{dB}{dt}\right)^{3/2} \quad (1)$$

式中: d 为磁致伸缩材料尺寸(圆柱体时为直径,切片时为片厚度); ρ 为材料的电阻率; G 为与尺寸无关的常数; w 为切片的宽度; H_0 为与畴壁有关的参数。Venkataraman和Krishnaprasad给出了Terfeno-D棒的损失涡流功率为 $P = I_{eddy}^2 2\rho\pi/l_m$,由此可得到Terfeno-D棒涡流损失对应电阻为 $R_{rod} = 2\rho\pi/l_m$ 。其中, ρ 为材料的电阻率; l_m 为Terfeno-D棒的长度。根据楞次定律, Terfeno-D棒上电感线圈电压为 $U = N_m A_m dB/dt$,其中, N_m 、 A_m 分别为励磁线圈匝数和Terfeno-D棒的横截面积。又Terfenol-D棒上的附加涡流功率为 $P_{excess} = U^2/R_{excess}$,结合式(1)可得到Terfenol-D棒对应的附加涡流损失电阻 $R_{excess} = [(N_m A_m)^2 / (GdwH_0 / \rho)]^{1/2} \cdot (dB/dt)^{1/2}$ 。对于图2电路,由基尔霍夫定律可得到:

$$\left(c_0 H + N_m A_m \frac{dB}{dt} \frac{1}{R_{rod}} + \text{sign}(U_L) N_m A_m \cdot \left(\frac{dB}{dt} \frac{1}{R_{excess}}\right) R + N_m A_m \frac{dB}{dt}\right) = u \quad (2)$$

式(2)反映了执行器的输入电压和磁场强度的关系。由于GMA驱动特性决定激励线圈驱动都是电流源驱动方式,所以本文中用输入电压来表示输入的电流^[18-19]。Venkataraman和Krishmaprasad根据能量守恒原理提出执行器磁滞模型,包括用来描述磁滞的与频率无关的Preisach算子和GMA内部传递函数。由于Preisach模型需要测试大量一阶逆向实验曲线来识别大量的非物理参数,所以其实现较复杂。Berqvist和Engdahl建立了与应力相关的磁滞模型,模型经证明有效,而且很容易得出仅有的少数几个参数。使用Berqvist模型描述磁滞,另外考虑到外加预应力作用,可得到超磁致伸缩执行器新的模型结构框图如图3所示。

Berqvist磁滞模型是描述超磁致伸缩材料磁机

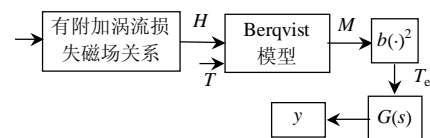


图 3 Berqvist 磁滞模型表示的 GMA 器结构
Fig. 3 Model structure of an GMA used Berqvist hysteresis model

本构关系的唯象模型, 它将磁滞效应类比为一组理想的微粒间机械干摩擦。具体公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n S_{\text{exp}}(\alpha_i \tilde{H}, \alpha_i \tilde{T}) \zeta(\alpha_i) \quad (3)$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_{\text{exp}}(\alpha_i \tilde{H}, \alpha_i \tilde{T}) \zeta(\alpha_i) \quad (4)$$

$$B = \mu_0 H + \sum_{i=1}^n M_{\text{exp}}(\alpha_i \tilde{H}, \alpha_i \tilde{T}) \zeta(\alpha_i) \quad (5)$$

$$\zeta(\alpha_i) = A \exp[-(\alpha_i - 1)^2] + \lambda \delta(\alpha_i) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \zeta(\alpha_i) = 1 \quad (7)$$

式中: $S_{\text{exp}}(H, T)$ 、 $M_{\text{exp}}(H, T)$ 分别为实验测得应变和磁化强度曲线; $\delta(\alpha_i)$ 为狄拉克函数; λ 、 A 为参数。考虑到执行器的质量、阻尼以及能量守恒^[1], 得到执行器运动方程:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_1 \frac{dy}{dt} + c_2 y = b M^2 + T \quad (8)$$

式中 m 、 c_1 、 c_2 和 b 分别表示 Terfenol-D 棒等效质量、等效阻尼、等效刚度和磁弹性系数。式(2)~(8) 构成了考虑磁滞损失、Terfenol-D 棒涡流损失和附加涡流损失的 GMA 动态模型。

2 模型计算与实验验证

本文模型是一个二阶微分方程, 可用有限差分法来求解。将 Terfenol-D 棒沿轴向和半径方向划分成单元。L Kvarnsjo^[20] 给出了执行器动态分析的有限差分模型, 本文在其基础上, 将 Terfenol-D 棒按照轴向和半径方向划分, 式(8)的空间差分以及磁场的空间差分公式如下:

$$m \frac{d^2 u_{i,j}}{dt^2} = T_{i,j} - T_{i+1,j} + 2\zeta \left\{ \frac{d}{dt} (u_{i-1,j} - u_{i,j}) \sqrt{\rho Y_{i,j}} - \frac{d}{dt} (u_{i,j} - u_{i+1,j}) \sqrt{\rho Y_{i+1,j}} \right\} + c_1 (u_{i,j} - u_{i+1,j}) + M_{i,j} \quad (9)$$

$$Y_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{S_{0i,j} - S_{i,j}} \quad (10)$$

$$S_{i,j} = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j} - l_0}{l_0} \quad (11)$$

$$\frac{H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}}{w_s^2} + \frac{1}{w_s(j-0.5)} \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j-1}}{2w_s} = \sigma \frac{dB_{i,j}}{dt} \quad (12)$$

式中: $Y_{i,j}$ 、 l_0 、 w_s 、 ρ 和 σ 分别为划分单元的杨氏模

量、划分单元的原始轴向长度、划分单元半径方向宽度、Terfenol-D 棒密度和材料电导率; 下标 i 和 j 分别表示轴向和半径方向单元数。差分模型机械边界条件为棒底端机械位移 $u_{0,j} = 0$ 和棒顶端受到预压应力 $T_{i,j} = T_{\text{ex}}$ 。

为了运用 Berqvist 模型, 必须先由实验数据拟合 $S(H, T)$ 、 $M(H, T)$ 和 $B(H, T)$ 函数关系。实验数据是在预压应力一定时, 静态测得不同磁场强度情况下的应变和磁感应强度值。使用数据拟和软件工具 DataFit8.1 拟合, 它使用非线性回归分析建立拟合函数, 所建立函数关系如图4所示。

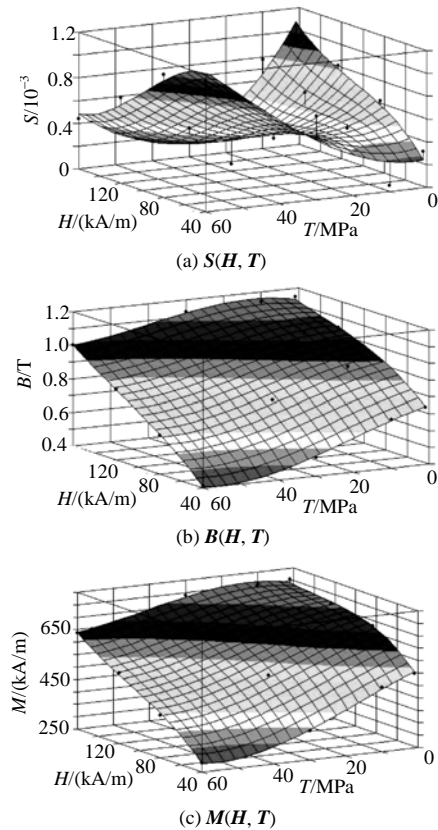


图4 实验数据得出的拟合关系

Fig. 4 Approximation of the experimental data

将拟合 $S(H, T)$ 、 $M(H, T)$ 和 $B(H, T)$ 函数关系写入到 Simulink 中的 S-function 中, 利用 Berqvist 磁滞模型建立磁滞子系统。对于 Terfenol-D 棒划分的一个单元, 利用差分公式(9)~(11)建立动态模型的等效线路模型。

棒的位移、应力及磁场强度仅仅考虑轴向分量, 这样半径方向的划分单元之间没有应力作用并且这些单元的轴向位移相等。轴向单元之间磁场强度相等。将整个 Terfenol-D 棒沿轴向划分为4个等份, 半径方向划分为3等份, 这样就由12单元组成了执行器

的动态模型，输入Terfenol-D棒磁场由式(2)及磁场沿轴向分布特性决定，半径方向单元磁场联系通过有限差分公式计算。模型磁场输入通过磁场子系统(magnetic subsystem)来实现。

模型参数：线圈匝数 N_m 为 1 200，线圈导线截面积 $A_m = 2.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ，激励线圈电阻 $R = 6.6 \text{ } \Omega$ ，Terfenol-D棒电阻率 $\rho = 5.8 \times 10^{-7} \text{ } \Omega/\text{m}$ ，Terfenol-D棒半径 $R = 6 \text{ mm}$ ，长度 $l_{\text{rod}} = 60 \text{ mm}$ ，等效质量 $m = 0.06 \text{ kg}$ ，阻尼系数 $c_1 = 22 \text{ 000 N}_s/\text{m}$ ，刚度系数 $c_2 = 6.3 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，预压应力 25 MPa，Terfenol-D棒涡流损失对应电阻 $R_{\text{rod}} = 80 \text{ } \Omega$ 。实验测试由信号发生器产生正弦信号，通过功率放大器输入到执行器，由位移传感器检测到输出位移。实验结构框图和实验测试平台如图5、6所示。

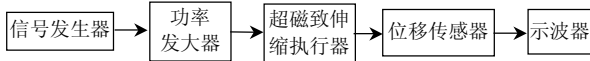


图 5 动态实验结构框图
Fig. 5 Dynamic experimental structure diagram

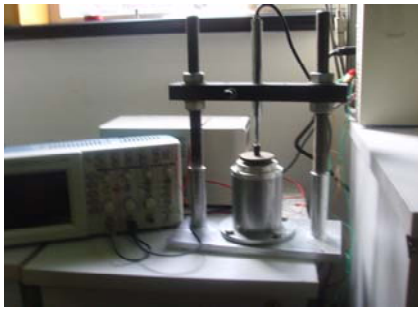


图 6 超磁致伸缩执行器动态实验平台
Fig. 6 Dynamic experimental platform for GMA

当输入电流频率分别为 10、50、150、250 和 300 Hz 时，执行器输出位移的仿真计算结果与实验对比如图 7 所示。

由图 7 可见，在频率 250 Hz 以下时，模型的动态仿真计算结果与实验变化趋势一致，吻合较好，说明本文建立的模型有效。在频率高于 250 Hz 时，模型仿真与实验结果有一定的误差，这是由于 Terfenol-D 棒的涡流大小是随着频率的变化而变化，相对应的涡流电阻 R_{rod} 也随驱动电流频率而变

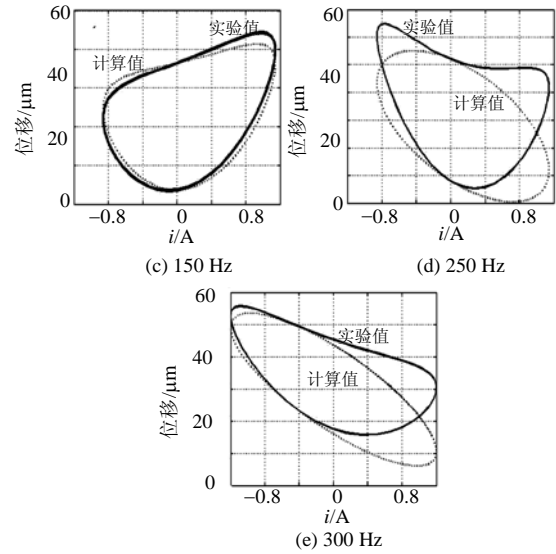
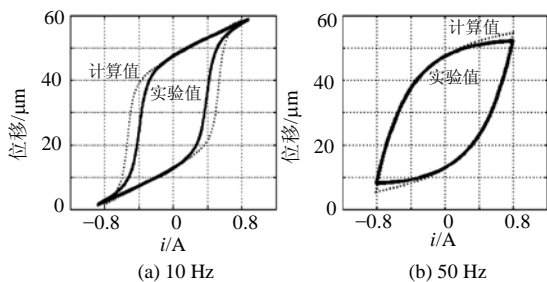


图 7 不同频率下模型计算与实验结果对比

Fig. 7 Model comparison between calculation and experiment

化，而本模型中使用 R_{rod} 仅用几个频率来辨识，再有其它的模型参数也可能会随频率的变化而变化，还需要进一步研究参数的辨识。

3 结论

从能量守恒原理出发，考虑到Terfenol-D棒上涡流损失和附加涡流损失，建立了GMA的动态模型。采用有限差分法，在Matlab的Simulink模块中建立仿真结构模型。对于超磁致伸缩材料的磁滞非线性特性，使用Berqvist和Engdahl提出磁滞模型来描述。仿真计算结果与实验数据相吻合，这说明所建立的动态模型能很好地描述超磁致伸缩执行器输出位移与驱动电流之间的关系。本模型的提出以及使用有限差分方法求解，对超磁致伸缩执行器优化设计具有指导意义。

参考文献

- [1] Venkataraman R. Modeling and adaptive control of magnetostrictive actuators[D]. USA: Maryland University, 1999.
- [2] Venkataraman R, Krishnaprasad P S. A model for a thin magnetostrictive actuator[C]. The 32nd Conference on Information Sciences And Systems, Princeton, NJ, Princeton, 1998.
- [3] Tan Xiaobo, Baras J S, Krishnaprasad P S. A dynamic model for magnetostrictive hysteresis[C]. The American Control Conference, Denver, Colorado, 2003.
- [4] Davino D, Natale C, Pirozzi S. Phenomenological dynamic model of a magnetostrictive actuator[J]. Physica B, 2004, 343(4): 112-116.
- [5] Tan X B, Baras J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1469-1480.
- [6] Hu H, Mrad R B. A discrete-time compensation algorithm for hysteresis in piezoceramic actuators[J]. Mechanical Systems and Signal

- Processing, 2004, 18(1): 169-185.
- [7] Cavallo A, Natale C, Pirozzi S, et al. Effects of Hysteresis compensation in feedback control systems[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2003, 39(3): 1389-1392.
- [8] Cavallo A, Natale C, Pirozzi S, et al. feedback control systems for micropositioning tasks with Hysteresis compensation[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2004, 40(2): 876-879.
- [9] 黄文美, 王博文, 曹淑瑛, 等. 计及涡流效应和应力变化的超磁致伸缩换能器的动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 132-136.
Huang Wenmei, Wang Bowen, Chao Shuying, et al. Dynamic model of giant magnetostrictive transducer considering eddy current effects and veriational stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 132-136(in Chinese).
- [10] Jiles D C. Modeling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1994, 30(6): 4326-4328.
- [11] Bergqvist A, Engdahl G. A model for magnetomechanical hysteresis and losses in magnetostrictive materials[J]. J. Appl. Phys, 1996, 79(8): 6476-6479.
- [12] Bergqvist A, Engdahl G. A phenomenological magnetomechanical hysteresis model[J]. J. Appl. Phys. 1994, 75 (10): 5496-5498.
- [13] Wei Zhongguo, Engdahl G, Sillesjo F. Simulations of magnetostrictive actuators for ultrasonic applications[C]. SPIE in mart Structures and Materials, Newport Beach, CA, USA, 2000.
- [14] Bergqvist A. Magnetic vector hysteresis model with dry friction-like pinning[J]. Physica B. 1997, 233(4): 342-347.
- [15] Engdahl G, Bergqvist A. Loss simulations in magnetostrictive actuators[J]. J. Appl. Phys. 1996, 79 (8): 4689-4691.
- [16] Bertotti G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations[J]. J. Appl. Phys, 1985, 57(6): 2110-2117.
- [17] Fiorillo F, Novikov A. Power losses under sinusoidal, trapezoidal and distorted induction waveform[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1990, 26(5): 2559-2561.
- [18] Tiberg H, Bergqvist A t, Engdahal G. Evaluation of a magnetostrictive drive element model[J]. J. Appl. Phys. 1993, 73 (10): 5851-5853.
- [19] Tiberg H, Bergqvist A, Kvarnsjo L, et al. A method of computing electro-mechanical transfer function for magnetostrictive function units [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1992, 28(5): 2808-22810.
- [20] Kvarnsjo L, A bergqvist nonlinear 2-D transient modeling of terfenol-D rods[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1990, 27(6): 5349-5351.



赵章荣

收稿日期: 2007-12-29。

作者简介:

赵章荣(1973—), 男, 博士研究生, 从事智能材料建模与控制, zhaozhangrong@sina.com;

邬义杰(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能材料结构、数控技术、高速精密加工等研究;

顾新建(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化制造、制造业信息化等研究。

(责任编辑 王剑乔)