

基于 DIC 的交流电激励 IPMC 形变响应分析*

刘红光¹, 唐晓雅¹, 田诗阳¹, 洛松¹, 熊克²

(1. 江苏大学土木工程与力学学院 镇江, 212013)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 对交流电 (alternating current, 简称 AC) 激励作用下离子聚合物金属复合材料 (ionic polymer metal composites, 简称 IPMC) 悬臂型驱动器微尺度横侧面上的变形特征进行实验分析研究。采用数字显微系统记录交流电激励作用下的 IPMC 悬臂结构微尺度横侧面弯曲形变过程, 通过数字图像相关 (digital image correlation, 简称 DIC) 方法分析 IPMC 的位移和应变响应特性。实验结果表明: IPMC 的振荡中心会发生偏移振动, 偏移振动的频率远低于激励频率, 且随着激励频率的降低而降低; 弯曲挠度的振动幅值随着激励电压的增大而线性增大, 随着激励频率的增大呈指数衰减; 纵向应变沿试样厚度方向线性分布, 并随着激励电压的增大而增大, 随着激励频率的增大而降低, 近似呈线性关系。

关键词 离子聚合物金属复合材料; 驱动器; 交流电; 形变响应; 数字图像相关

中图分类号 TB333; TH145.4

引言

IPMC 是在离子交换膜表面沉积形成金属电极构成, 具备驱动和传感等功能, 具有密度小、形变大、响应快和激励方式简便等特点^[1], 是一种典型的智能软材料, 在人工肌肉^[2]、软机械手^[3]、仿生机器人^[4]和医疗器具^[5]等领域具有广泛的应用前景。

IPMC 受电激励作用时, 均匀分布的水合阳 (阴) 离子向材料阴 (阳) 极迁移, 引起溶剂重布而使材料向阳 (阴) 极一侧弯曲, 产生非线性弯曲大变形^[6]。IPMC 的形变过程是电能、机械能和化学能之间的相互耦合作用, 影响因素较多。为简化分析模型, 多数研究通常采取一些假设。例如, 假设 IPMC 材料的弹性模量固定不变、变形为定曲率弯曲等^[7]。然而, 溶剂重布使材料力学性能发生改变, 表面电极电阻引起激励场强沿 IPMC 材料长度方向降低, 使其弯曲曲率变化。因此, 掌握 IPMC 电激励作用下的形变响应规律对其数学模型的建立与发展至关重要。

IPMC 柔软、轻薄 (通常小于 1 mm) 的特性使千分表/应变片等接触式测试方法不适用。激光位移传感器能实现非接触式位移测量, 但不能满足位移和应变场的测试需求。DIC^[8] 是一种非接触式位

移/应变场分析测试技术, 配合显微系统可用于微、纳尺度形变分析^[9]。Punning 等^[10] 利用扫描电镜并结合 Matlab 中建立的 DIC 方法, 计算了离子型电致动聚合物轴向与横向应变。文献 [11-12] 将超景深数字显微系统和 DIC 方法相结合, 研究了 IPMC 在直流电激励作用下的表面应变分布规律。

激励作用下 IPMC 的形变响应更为复杂, 应用更为广泛。本研究利用超景深数字显微系统记录激励下 IPMC 驱动器的微观形变, 通过 DIC 方法分析其位移、应变分布和变化规律。

1 方法及实验

DIC 方法基本理论是通过相关算法对比变形后与变形前采集的试样表面观测区域散斑图, 追踪散斑特征点由变形前位置 (x_i, y_i) 到变形后位置 (x'_i, y'_i) 的变化, 得到全场位移和应变。笔者采用的相关系数为

$$\hat{C} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\frac{h(x_i, y_i) - h_m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [h(x_i, y_i) - h_m]^2}}}{g(x'_i, y'_i) - g_m} \right\} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目 (12072133); 江苏大学自制实验仪器设备资助项目 (ZZYQSB202110)

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-08-09

其中： h, g 为变形前、后的灰度函数； h_m 和 g_m 为均值。

实验采用溶液浇筑法制备的全氟磺酸基铂电极 IPMC 试样。根据基膜厚度计算全氟磺酸溶液(杜邦,质量百分比为5%)的量,注入定制的玻璃模具内,置于常温烘箱(型号为YAMATO, DKN412C)中在60°C下浓缩至20%。在浓缩后的溶液中滴加添加剂二甲基亚砜(沸点为189°C),二甲基亚砜与Nafion溶液的体积比约为1:40。混合后的溶液在真空烘箱(型号为SmartLab, SV-64B)中升温至60°C并保温约3h,溶液变黏稠,几乎无法流动后,阶段升温至100°C并保温约4h,直至薄膜完全固化成型。电极制备采用化学沉积法,反应主原料为二氯四氨合铂($Pt[(NH_3)_4]Cl_2$),还原剂为硼氢化钠($NaBH_4$),电极沉积时注意反应温度和时间^[13]。IPMC试样尺寸为39mm×10mm×0.7mm。

图1为DIC测试系统示意图。IPMC试样测试平台主要由Keyence VHX-2000超景深数字显微系统、Aglient 33120A型信号发生器和商用VIC-3D DIC测试与分析系统构成。

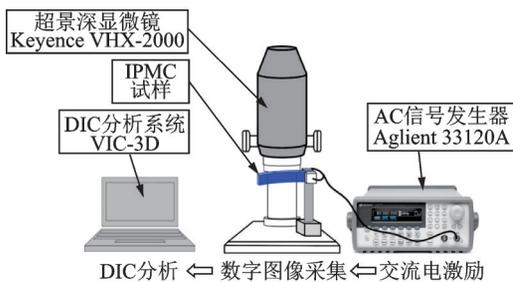


图1 DIC测试系统示意图

Fig.1 Schematic of the DIC experimental setup

图2为IPMC的DIC测试视场。IPMC试样厚度平面经细砂纸打磨并清洗,形成具有自然纹理的散斑观测面,将其一端由2片10mm×10mm×5mm的正方形银电极夹持形成悬臂驱动结构,在施加交流电激励前先采集形貌图作为参考图片。为避免固定端加持对试样形变的影响,选取的DIC测试视场中心距离IPMC试样固定端7mm。

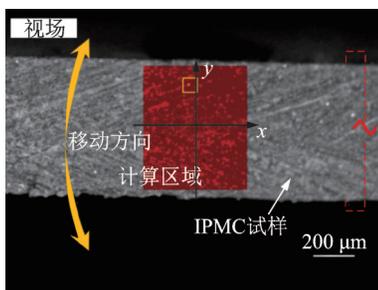


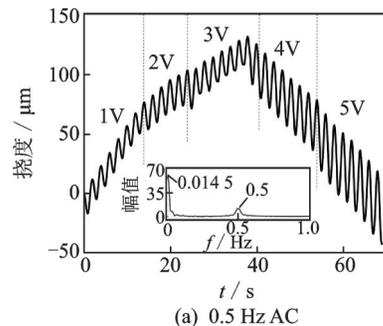
图2 IPMC的DIC测试视场

Fig.2 Field of view for DIC testing of IPMC

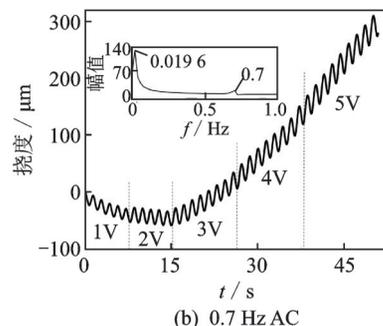
显微采集系统放大倍数设定为150倍,视场大小为2.3mm×1.73mm,图像分辨率为1600×1200像素,采集速度为15帧/s,通过Matlab抓取图片,1个像素对应1.44μm。DIC分析中子窗和步长设定为61和20,计算误差为±0.0288μm。IPMC电致动测试实验在室内空气中进行,环境温度为20°C,相对湿度为60RH。IPMC材料的致动诱因为水合阳(阴)离子的迁移,其驱动频率较低,实验研究中通常取1Hz以内,且基于数字图像的采集速度,笔者选取的交流电激励频率为0.05~0.9Hz。

2 结果与讨论

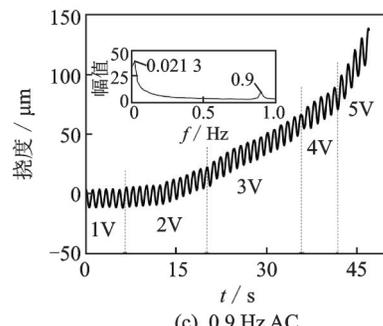
在不同频率交流电作用下,计算区域(aero of interest, 简称AOI)中心挠度如图3所示。可见:IPMC悬臂型驱动器发生与交流电激励频率一致的正弦振动;试样的振荡中心以远低于激励频率的频率发生偏移振动,偏移振动的频率(0.0145, 0.0196



(a) 0.5 Hz AC



(b) 0.7 Hz AC



(c) 0.9 Hz AC

图3 计算区域中心挠度

Fig.3 Deflection of the center of calculation region

和 0.021 3 Hz)随着激励频率(0.5, 0.7 和 0.9 Hz)的增大而增大;弯曲挠度振动幅值随着激励电压的增大而增大,随着激励频率的增大而降低。

IPMC 振荡中心发生频移振动主要是由致动机理所致。在交流电作用下水合阳离子在两电极间往复迁移,导致 IPMC 弯曲振动,带动产生的溶剂迁移重布速度远低于水合阳离子的移动速度。此外,IPMC 试样在实验过程中存在一定的失水现象,也会对其中心位置产生影响。

为了更好地显示 IPMC 弯曲挠度跟激励电压的关系,获取不同激励频率下 AOI 区域中心点处的挠度幅值与交流电激励幅值的关系,如图 4 所示。可见,振动幅值 A 随激励电压 U 的变化呈线性关系,即

$$A = aU + b \quad (2)$$

其中: a, b 为常数。

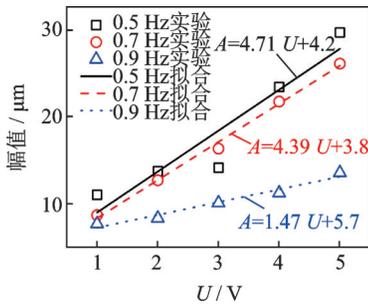


图 4 挠度幅值与交流电激励幅值的关系

Fig.4 The relationship between amplitudes of deflections and amplitudes of AC excitations

图 5 为 3 V 交流电激励下 IPMC 的弯曲挠度。可见,IPMC 的振动中心发生频移振动的现象仍存在,在交流电激励作用下 IPMC 试样发生弯曲振动变形,挠度随着激励频率的增大而显著降低。

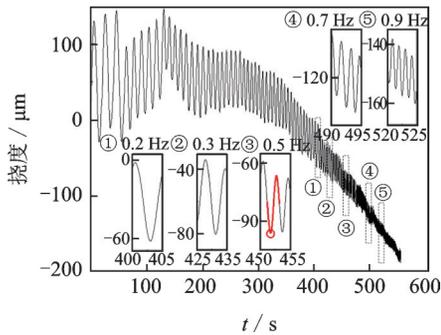


图 5 3V 交流电作用下 IPMC 的弯曲挠度

Fig.5 Deflection of IPMC sample under 3V AC applied

图 6 为挠度幅值与交流电激励频率的关系。AOI 中心的振动挠度幅值随着激励频率的增大近似呈指数衰减,即

$$A = ke^{-cf} + d \quad (3)$$

其中: k, c, d 为待定常数,通过数据拟合求得。

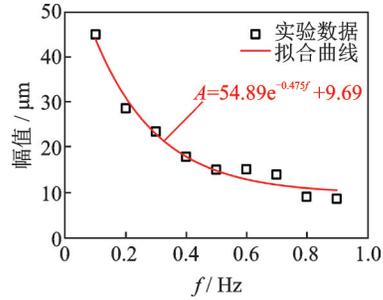


图 6 挠度幅值与交流电激励频率的关系

Fig.6 Relationship between amplitudes of deflections and frequencies of AC excitations

3 V 交流激励作用下,在 IPMC 振动挠度响应中从频率为 0.5 Hz 时段选取 1 个周期,绘制 1/8, 1/4 和 3/8 周期时刻 AOI 在 x, y 方向的位移场云图。图 7 为 3 V, 0.5 Hz 交流电激励作用下不同时刻 AOI 的位移场云图。可见:IPMC 在交流电激励下的位移场图呈线性,说明试样发生面内弯曲变形(试样宽度远大于厚度,离面位移可以忽略);1/4 周期处 y 方向的位移(弯曲挠度)显然大于其他时刻。

以截取周期起始时刻截图为参考图片进行 DIC 分析,研究 IPMC 在交流电激励下的应变分布规律,得到对应 1/8, 1/4 和 3/8 周期时刻 AOI 区域 x, y 方向的应变场云图。图 8 为 3 V, 0.5 Hz 交流电激励作用下不同时刻 AOI 的应变场云图。可见:线应变 ϵ_x 和 ϵ_y 均与 y 坐标有关;截面上部应变为负,截面下部应变为正,IPMC 试样向上弯曲; ϵ_x 沿厚度线性分布,但零点不在截面中间位置,中性轴上移; ϵ_y 沿厚度非线性分布,峰值在截面偏下位置($y < 0$ 区域),这是由于此时段 IPMC 试样内溶剂迁移重布集中于 $y < 0$ 区域所致。

x 方向的线应变 ϵ_x 对于描述弯曲变形最为重要。为了直观地显示其沿 y 轴的分布规律,绘制 IPMC 试样 $x=0$ 截面的 ϵ_x 应变分布如图 9 所示。可见: ϵ_x 与坐标 y 呈线性关系;1/4 周期(即波谷)时刻的, ϵ_x 对于 y 的斜率最小,应变值范围($\Delta\epsilon_x = \epsilon_x^{\max} - \epsilon_x^{\min}$, 即最大值与最小值之差)最小。

每种交流电激励作用下均选取 IPMC 试样的 1 个振动周期,得到其波谷时刻线应变 ϵ_x 分布的范围 $\Delta\epsilon_x$, 研究交流激励电压对 IPMC 试样应变分布的影响规律。图 10 和图 11 分别为试样振动波谷处弯曲应变与电压和频率的关系。可见, $\Delta\epsilon_x$ 与激励电压和频率均近似呈线性关系,即随着电压值的增大而增大,随着频率的增大而降低。

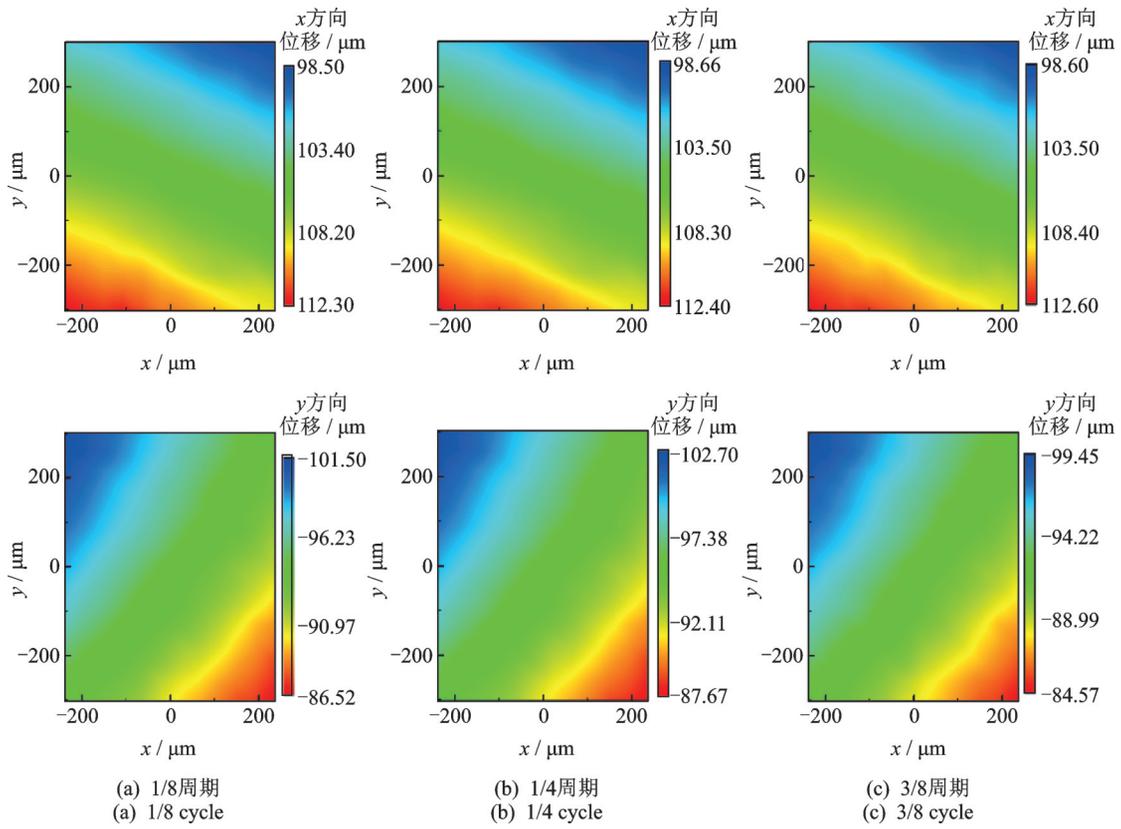


图7 3 V, 0.5 Hz 交流电激励作用下不同时刻 AOI 的位移场云图

Fig.7 Displacement contours of AOI under 3 V, 0.5 Hz AC excitation at different time

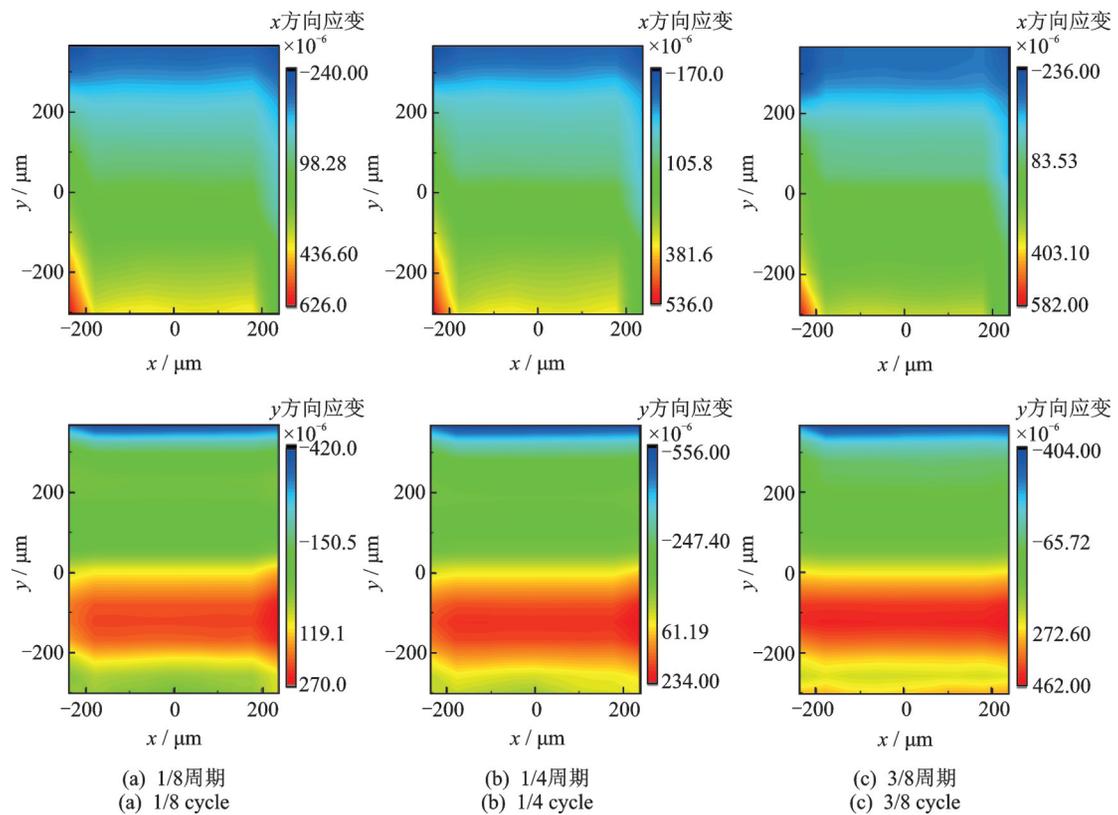


图8 3 V, 0.5 Hz 交流电激励作用下不同时刻 AOI 的应变场云图

Fig.8 Strain contours of AOI under 3 V, 0.5 Hz AC excitation applied at different time

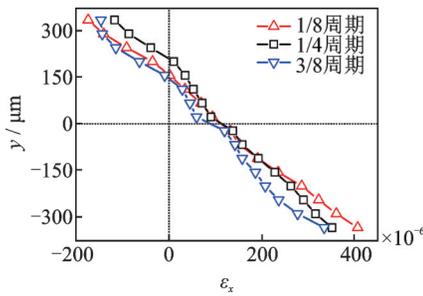
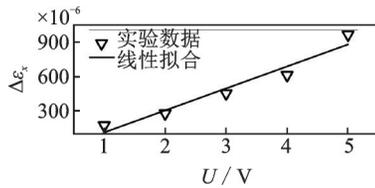
图9 试样 $x=0$ 截面的 ϵ_x 应变分布Fig.9 Strain distributions of the sample at $x=0$ location

图10 弯曲应变与电压的关系

Fig.10 Relationship between bending strains and voltages

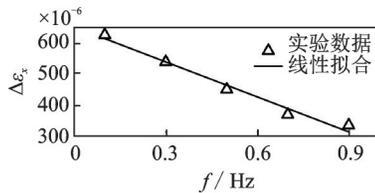


图11 弯曲应变与频率的关系

Fig.11 Relationship between bending strains and frequencies

3 结 论

1) DIC 技术适用于柔性材料 IPMC 厚度方向截面在交流激励下的动态位移/应变场响应测试。

2) IPMC 材料的振荡中心以远低于激励频率的频率发生频移振动,且频率随着激励频率的提高而提高。

3) IPMC 悬臂结构弯曲振动的挠度幅值随着激励电压值的增大而线性增大,随着激励频率的增大呈指数衰减。

4) 在交流电激励下,IPMC 悬臂结构横截面上(厚度截面)的弯曲线应变 ϵ_x 随着沿试样厚度方向呈线性分布,随着激励电压的增大而增大,随着激励频率的增大而降低。

参 考 文 献

- [1] LUCA V D, DIGIAMBERARDINO P, PASQUALE G D, et al. Ionic electroactive polymer metal composites: fabricating, modeling, and applications of postsilicon smart devices [J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2013, 51:699-734.
- [2] MIRVAKILI S M, HUNTER I W. Artificial muscles: mechanisms, applications, and challenges [J]. Advanced Materials, 2018, 30: 1704407.

- [3] SHINTAKE J, CACUCCILO V, FLOREANO D, et al. Soft robotic grippers [J]. Advanced Materials, 2018, 30: 1707035.
- [4] CHANG L, LIU Y, YANG Q, et al. Ionic electroactive polymers used in bionic robots: a review [J]. Journal of Bionic Engineering, 2018, 15:765-782.
- [5] CHANG X L, CHEE P S, LIM E H, et al. Radio-frequency enabled ionic polymer metal composite (IPMC) actuator for drug release application [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28: 015024.
- [6] 于甜,李树锋. IPMC 软体驱动材料研究进展 [J]. 化工新型材料, 2020, 48(2): 6-9.
- YU Tian, LI Shufeng. Research progress on the IPMC soft actuating material [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(2): 6-9. (in Chinese)
- [7] ALICI G, HUYNH N N. Predicting force output of trilayer polymer actuators [J]. Sensors Actuators A, 2006, 132: 616-625.
- [8] PAN B. Thermal error analysis and compensation for digital image/volume correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 1-15.
- [9] ZHU J, YAN G, HE G, et al. Fabrication and optimization of micro-scale speckle patterns for digital image correlation [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 015203.
- [10] PUNNING A, VUNDER V, MUST I, et al. In situ scanning electron microscopy study of strains of ionic electroactive polymer actuators [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(8): 1061-1074.
- [11] LIU H G, XIONG K, WANG M, et al. Experimental study on strain distribution of ionic polymer-metal composite actuator using digital image correlation [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26: 025004.
- [12] 熊克,刘红光. 直流电激励下的 IPMC 弯曲大变形力-电耦合模型 [J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1033-1038.
- XIONG Ke, LIU Hongguang. An electromechanical model of large deflection for IPMC Actuators under DC voltages applied [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2020, 40(6): 1033-1038. (in Chinese)
- [13] TRUONG D Q, AHN K K. Modeling of an ionic polymer metal composite actuator based on an extended Kalman filter trained neural network [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23: 074008.



第一作者简介:刘红光,男,1981年2月生,博士。主要研究方向为智能材料与结构力学、实验力学。曾发表《Large nonlinear deflection behavior of IPMC actuators analyzed with an electromechanical model》(《Acta Mechanica Sinica》2019, Vol.35, No.5)等论文。

E-mail: honggliu@ujcs.edu.cn