

基于 Levy 辨识法的 IPMC 等效电路迟滞建模与验证^{*}李 森¹ 安 坤¹ 郭立山¹ 李 宁¹ 范 东¹ 孟 江²

(1. 中北大学电气与控制工程学院 太原 030051; 2. 中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘 要:离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer-metal composite, IPMC)是一种新型柔性智能材料,但其致动机理尚不明确,位移跟踪困难。针对 IPMC 悬臂梁器件在低频交流驱动电压下具有明显的迟滞非线性、建模困难的特点,测试了 IPMC 悬臂梁在低频交流电压下的致动特性,分析了 IPMC 在 0.1~10 Hz、2~5.5 V 的增益与相位,并使用 Levy 辨识法建立了驱动电压到致动位移的三阶传递函数模型。基于已建立的传递函数模型,提出了 IPMC 的非线性等效电路与一阶传递函数的分段建模方法,改进了 IPMC 的等效电路模型无法预测致动位移的缺点。通过实验对比,结果表明,在 IPMC 悬臂梁器件在 0.1~5 Hz、2~5.5 V 的低频正弦驱动电压下,可使用等效电路加一阶传递函数代替 IPMC 复杂的动力学过程,整体误差低于 0.3 mm,平均相对误差 2.89%,满足应用条件。可以用作 IPMC 的低频交流用途,提高了 IPMC 位移跟踪精度。

关键词:IPMC 迟滞特性; Levy 辨识; 传递函数; 等效电路建模

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Hysteresis modeling and verification of IPMC equivalent circuits
based on Levy identification methodLi Sen¹ An Kun¹ Guo Lishan¹ Li Ning¹ Fan Dong¹ Meng Jiang²

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Ionic polymer-metal composite (IPMC) is a new flexible smart material, but its mechanism is not clear and its displacement tracking is difficult. In view of the obvious hysteresis nonlinearity and modeling difficulties of IPMC cantilever beam device under low frequency AC drive voltage, this paper tests the actuation characteristics of IPMC cantilever beam under low frequency AC voltage, and analyzes the gain and phase of IPMC at 0.1~10 Hz and 2~5.5 V. The third order transfer function model from driving voltage to actuating displacement is established by Levy identification method. Based on the established transfer function model, a pieceby-step modeling method of IPMC's nonlinear equivalent circuit and first-order transfer function is proposed, which improves the defect that IPMC's equivalent circuit model cannot predict the actuated displacement. The results show that under the low frequency sinusoidal drive voltage of 0.1~5 Hz and 2~5.5 V, the IPMC cantilever device can be replaced by equivalent circuit + first-order transmission. The overall error is less than 0.3 mm, and the average relative error is 2.89%, which meets the application conditions. It can be used for low-frequency AC use of IPMC to improve IPMC displacement tracking accuracy.

Keywords: IPMC hysteresis; Levy identification; transfer function; equivalent circuit modeling

0 引 言

离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer-metal composite, IPMC)是一种电话性聚合材料,利用其固有的

电气和机械耦合性,可以直接用作传感器和执行器^[1]。由于研究和工业用途的增加,IPMC 技术正在迅速发展,在广泛的应用中具有巨大的潜力,如机器人、仿生学和医疗设备等^[2]。与传统执行器相比,IPMC 器件具有低质量、

收稿日期:2023-11-03

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61774138)项目资助

低功耗、高灵活性和良好生物相容性,能为特定应用量身定制几何形状^[3]。但目前仍有许多关键问题需要克服,如其易受外界环境影响,变形存在很大不确定性,低频输入时因其迟滞性、非线性而建模困难等^[4]。为确保 IPMC 器件的广泛应用,必须建立准确的数学模型来描述其非线性行为,以便在实际应用中模拟和评估其性能^[5]。

Moeinkhah 等^[6]和 Chang 等^[7]通过物理和电致动过程分析将执行器的金属电极等效成电学元件电阻,将水合阳离子在执行器的迁移过程等效成电容元件,建立了分布式等效电路模型。Cha 等^[8]根据 IPMC 执行器的电阻性和电容性建立了等效 RC 电路模型。然而上述模型只考虑了 IPMC 的电容性行为,所构建模型都为线性,不能描述执行器的非线性现象。Bonomo 等^[9]借助反向二极管提出了一种非线性电路的动力学模型。上述模型虽然描述了 IPMC 器件从电压到电流的非线性转化过程,但其缺少从表面电流到致动位移的关键步骤。

国内对 IPMC 建模的研究起步比较晚。熊克等^[10]建立了阶梯电压下 IPMC 膜内水合阳离子的力电耦合模型,但一般只能用作直流激励。陈岚峰等^[11]和陈靖威等^[12]建立了 IPMC 的分数阶模型,提高了跟踪精度,但是模型复杂,参数整定困难。对于材料的迟滞非线性补偿与建模,因无法明确内部机理,直接建立“黑箱”模型的较为常见,如潘明建等^[13]的神经网络建模以及周民瑞等^[14]的广义 Bouc-Wen(EBW)模型,这种模型虽精度较高,但是不能体现 IPMC 内部激励情况。因而建立一个能够提高 IPMC 精度且能反映其内部机理的数学模型而促进它的实际应用开发具有很高的研究价值,并对于生产、生活和国防事业具有重大意义。

本文提出其输入驱动电压和输出致动位移可近似视为高阶动态系统的“黑箱”模型,通过实际测量不同频率下的位移,使用 Levy 辨识法建立从电压到迟滞位移的高阶动态模型;然后在所建立的高阶模型基础上,再基于“灰箱”方法建立从驱动电压到表面电流的非线性电路和从表面电流到致动位移的传递函数构成的分段模型,最后对两种模型的准确性进行验证。所建立的模型适用于低频交流驱动电压,解决了以往的模型只适用于直流电压的情况,且适用范围几乎涵盖了 IPMC 悬臂梁常见的应用频率范围。

1 IPMC 驱动特性实验

驱动特性实验设备包括信号发生器、功率放大器、示波器、数据采集卡,激光位移传感器等。所采用待测量 IPMC 悬臂梁器件尺寸为 30 mm×8 mm×0.1 mm。首先用导电胶粘住导线端与电极,并夹持上端作为悬臂梁固定端,另一侧的自由端伸入去离子水杯中。选用松下公司 HG-C1030 激光位移传感器实时测量 IPMC 末端 5 mm 处致动位移,实验流程如图 1 所示。

IPMC 采用幅值为 2~5.5 V 的正弦递增交流驱动电

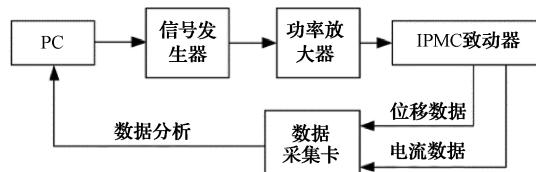


图 1 数据采集流程

Fig. 1 Data acquisition flow chart

压,采集不同频率下的输入驱动电压、表面电流和致动位移信号,其中 1 Hz 测试结果如图 2 所示,采样频率为 100 Hz。

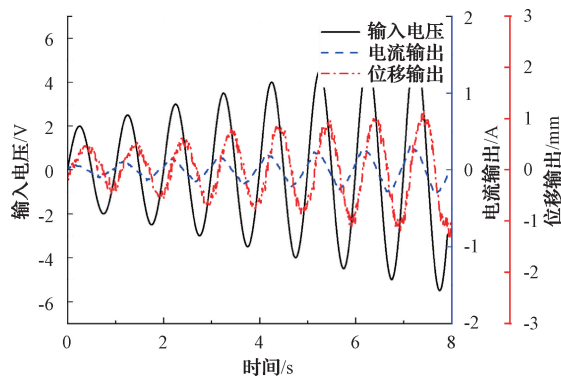


图 2 IPMC 在 1 Hz 下测试曲线

Fig. 2 IPMC test curve at 1 Hz

从图 2 可以看出,随着低频正弦交流驱动电压从 2 V 逐渐递增至 5.5 V,在频率不变的情况下,表面电流和致动位移随着驱动电压的增大而增大,且表面电流和致动位移均呈现近似正弦曲线。表面电流相对驱动电压相位有所超前,致动位移相对于输入驱动电压的相位是滞后的,符合 IPMC 悬臂梁器件本身所特有的迟滞特性^[15]。

2 Levy 辨识法建模

Levy 辨识是通过采集不同频率的 IPMC 悬臂梁器件致动位移,利用系统的频率的实部和虚部数据,辨识 Bode 图,也可通过和其他算法结合进行辨识^[16],通过假定传递函数模型结构,运用求极值方法得到模型传递函数的未知参数。

2.1 Levy 辨识法

以频率 ω 为自变量的 s 域系统传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + 1} \quad (1)$$

系统辨识的目的,即估算传递函数的待定系数 a_i 和 b_j ,使得频率响应 $G(j\omega)$ 与实验数据之间误差平方和最小。其中,模型阶次要求 $n > m$ 。设实验所得 N 组频率数据 $(\omega = \omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_N)$, $\omega = \omega_k$ 时实际测量的频率响应 $G^*(j\omega_k)$ 与所求得的传递函数 $G(j\omega_k)$ 误差(拟合误

差)为:

$$\varepsilon_k = G^*(j\omega_k) - G(j\omega_k) = G^*(j\omega_k) - \frac{B(j\omega_k)}{A(j\omega_k)} \quad (2)$$

式中: $G(j\omega)$ 是 s 用 $j\omega$ 取代后的结果, 为 ω 的复变函数。设 $E(j\omega)$ 为全部采样频率 ω_k 的误差 ε_k 的平方和, 即:

$$E(j\omega) = \sum_{k=1}^N \varepsilon_k^2 \quad (3)$$

为了确保后续求解的方程组是关于参数的线性方程组, 可定义广义误差 e_k :

$$e_k = \varepsilon_k A(j\omega_k) = G^*(j\omega_k) A(j\omega_k) - B(j\omega_k) = e_{ik} + e_{jk} \quad (4)$$

若将 $G^*(j\omega_k)$ 表示为复数形式:

$$G^*(j\omega_k) = \text{Re}(\omega_k) + j\text{Im}(\omega_k) \quad (5)$$

式中: 实频特性 $\text{Re}(\omega)$ 为 $G(j\omega)$ 实部, $\text{Im}(\omega)$ 为 $G(j\omega)$ 的虚部。则广义误差可定义为:

$$e_k = [\text{Re}(\omega_k) - j\text{Im}(\omega_k)][1 + \sum_{i=1}^n a_i (j\omega_k)^i] - \sum_{j=1}^m b_j (j\omega_k)^j \quad (6)$$

定义误差准则 J 为全部采样频率 ω_k 上误差 e_k 的平方和, 则对于 N 组数据:

$$J = \sum_{k=1}^N e_k^2 = \sum_{k=1}^N (e_{ik}^2 + e_{jk}^2) \quad (7)$$

为使 J 最小, 令 J 对 a_i 、 b_j 分别求偏导为 0, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a_i} = \sum_{k=1}^N [2e_{ik} (\frac{\partial e_{ik}}{\partial a_i}) + 2e_{jk} (\frac{\partial e_{jk}}{\partial a_i})] = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial b_j} = \sum_{k=1}^N [2e_{ik} (\frac{\partial e_{ik}}{\partial b_j}) + 2e_{jk} (\frac{\partial e_{jk}}{\partial b_j})] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$

为化简上述表达式, 定义如下元素:

$$\begin{cases} V_i = \sum_{k=0}^N \omega_k^i, T_i = \sum_{k=0}^N \omega_k^i \text{Im}(\omega_k) \\ S_i = \sum_{k=0}^N \omega_k^i \text{Re}(\omega_k) \\ U_i = \sum_{k=0}^N \omega_k^i [\text{Re}(\omega_k)^2 + \text{Im}(\omega_k)^2] \end{cases} \quad (9)$$

式(9)可以表示为:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{Q} \quad (10)$$

式中:

$$\mathbf{X} = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_m \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n]^T$$

$$\mathbf{Q} = [S_0 \quad T_1 \quad S_2 \quad \dots \quad 0 \quad U_2 \quad 0 \quad \dots]^T$$

$$\mathbf{P} =$$

$$\begin{bmatrix} L_0 & 0 & -L_2 & \dots & T_1 & S_2 & -T_3 & \dots \\ 0 & L_2 & 0 & \dots & -S_2 & T_3 & S_4 & \dots \\ L_2 & 0 & -L_4 & \dots & T_3 & S_4 & -T_5 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_3 & -S_4 & -T_5 & \dots & U_4 & 0 & -U_6 & \dots \end{bmatrix}_{k \times k}$$

矩阵 \mathbf{P} 是满秩矩阵, 即 \mathbf{P}^{-1} 存在。因此上述公式适用于不同阶次传递函数的 Levy 算法数学模型。由此可计算传递函数的待定系数 a_i 和 b_j 的值。

使用驱动电压 3 V、频率 0.1~10 Hz 的正弦交流电压, 得到 IPMC 系统响应及相关检测分析结果如图 3 所示。

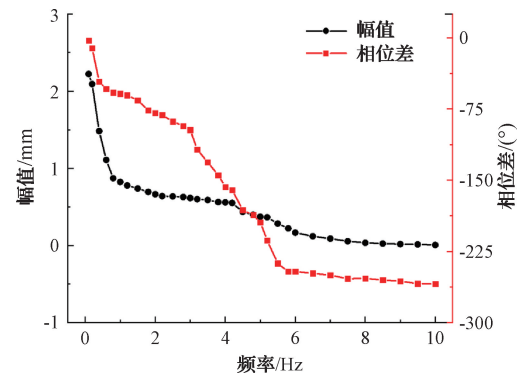


图3 IPMC 致动器系统频率测试

Fig. 3 IPMC actuator system frequency test

由图 3 可知, 当频率从 0.1 Hz 增加至 10 Hz 时, 幅值逐渐从最大 2.223 mm 降至接近 0, 幅值在 0.1~1 Hz 这一阶段下降较快, 当频率 > 10 Hz 时, 滤波后幅值不明显, 说明 IPMC 悬臂梁器件适用于 10 Hz 以下的低频用途; 输入输出相位差随频率增大, 逐渐由 0° 变为 -270° 并保持, 说明 IPMC 的滞后性大小和频率有很大关系, 且滞后最大不超过 270°^[17]。

2.2 IPMC 致动器的模型建立

Levy 辨识法需要确定系统阶数, 由 2.1 节所推导驱动器模型线性简化结论, IPMC 悬臂梁器件 n 阶线性传递函数模型表达式为:

$$G(s) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{\sum_{i=0}^n a_i s^i} \quad (n > m) \quad (11)$$

式中: a_i 、 b_j 分别为传递函数的待辨识参数。

辨识前需先确定该模型的大致阶数, 根据实测频率数据确定阶数取值范围, 所绘制的频率特性曲线如图 4 所示。

对数幅频特性曲线的渐近线的斜率主要为 0、±20、±40 dB/dec 线等。根据图 4 的频率特性测试曲线, 在 0.1~10 Hz, 从低频向高频延伸, 渐近线斜率为 0、-20、0、-40 dB/dec。因此该传递函数由一个一阶环节和一个二阶环节构成, 且分子分母相差 3 阶。故辨识时可令 $m/n = 0/3$ 、 $m/n = 1/4$ 、 $m/n = 2/5$ 等分别进行辨识, 以此确定最佳阶次。

接下来通过采取递阶辨识的方法, 先辨识低频环节得出结果, 从数据中修正掉已辨识出的低频环节; 然后按同样方法进行中、高频环节的辨识; 最后, 将各个低阶子系统

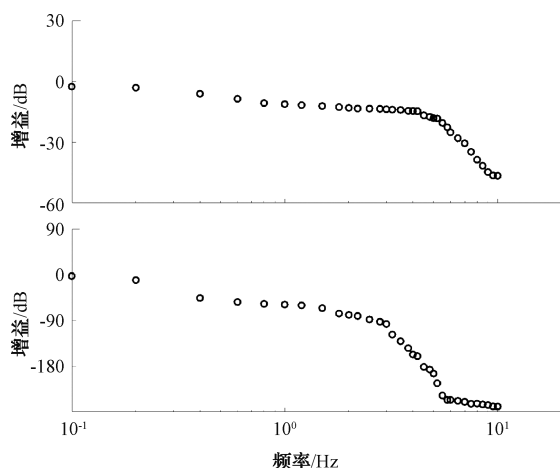


图4 IPMC 频率特性曲线

Fig. 4 IPMC frequency characteristic curve

相乘得到完整的系统传递函数^[18]。根据 IPMC 悬臂梁器件实测数据,将采样频率分为 0.1~1 Hz 和 1~10 Hz 两阶段进行辨识。结果如图 5 所示。

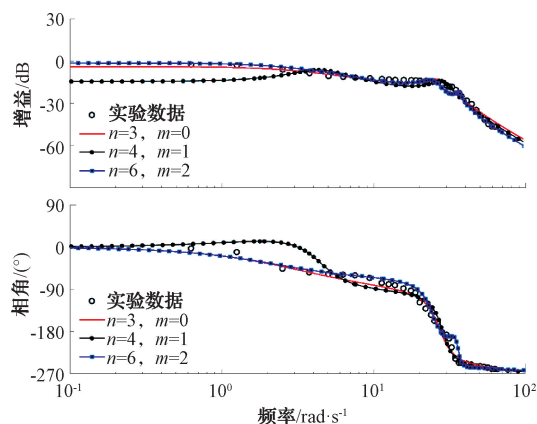


图5 拟合结果对比

Fig. 5 Comparison of fitting results

图 5 分别辨识了传递函数的 3、4、6 阶模型(5 阶误差较大),可以看出在 $m/n=0/3$,即分母 3 阶、分子 0 阶时,使用 Levy 辨识法拟合的传递函数拟合程度较高,误差较小。此时所辨识传递函数为:

$$G(s) = \frac{1\ 402.83}{s^3 + 12s^2 + 760.9s + 2\ 232.3}$$

3 正向分段模型

一个合理的 IPMC 悬臂梁器件的“灰箱”电路模型在能完整反应执行器性能的同时,应考虑到其复杂程度对实际应用的影响。为能更加细致地描述 IPMC 悬臂梁器件的致动情况,将建模分为两步,如图 6 所示^[19]。

首先建立 IPMC 器件的非线性电路模型,将驱动电压转化为可测量得到的表面电流,IPMC 的非线性将在这一步被描述,所建立的等效电路模型可视为二阶系统。其次

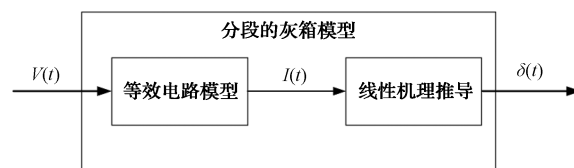


图6 分段建模示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sectional modeling

将表面电流作为输入,致动位移作为输出,通过电荷 $q(t)$ 这一中间变量,建模为一阶线性传递函数。最终将该二阶电路模型和一阶传递函数串联后得到完整的三阶系统模型。

3.1 等效电路建模

通过 IPMC 悬臂梁器件的总电流是由电子电流(支路 1)、位移电流(支路 2)和离子电流(支路 3)的总和。因此,可通过两个阻抗支路和一个非线性支路来分别对应模拟。

等效电路模型如图 7 所示, R_1 为 IPMC 材料的表面电阻,阻值可以由四探针检测法测出;伪电容由各单元电极之间的并联电容 C 来模拟。电导 L 表示电极和离聚体的横向离子电导率。在频域条件下,电容 C 的阻抗 Z 可表示为 $Z = 1/Cs$,当一个电容和电阻串联时,可以看作是一个惯性环节;根据宋丹^[20]提出的电学参量具有尺寸效应的情况下,该等效电路可分为 2 段($H=2$)。于是将两个电容并联的等效电路作为二阶系统。

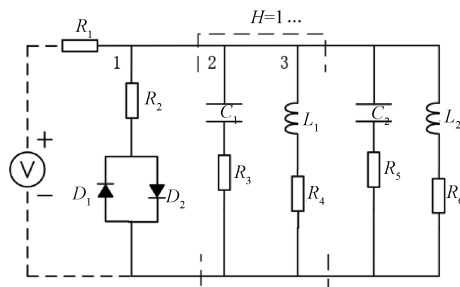


图7 分布式等效电路

Fig. 7 Distributed equivalent circuit diagram

除电子电流支路外,每段由位移电流项和离子电流项构成,且各段电学参数互不干扰。另外,电子电流项的两个反向二极管描述了 IPMC 的阈值电压。如果施加的电压低于阈值,则电子电流可以忽略不计,这个阈值代表了足以激发电子进入传导带的最小值,因此它是非线性的。和杜野将阈值电压设置为 1.5 V 不同,通过实测阈值电压为 1.2 V,如图 8 所示^[21]。

确定等效电路后,根据实际输入驱动电压与输出表面电流情况,使用参数估计选择不同算法,直接估计出电路参数,如表 1 所示。

3.2 电流与位移的线性建模

现阶段,对于 IPMC 悬臂梁器件的致动机理的研究尚

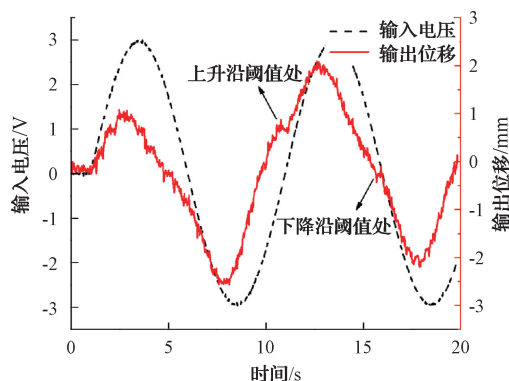


图8 IPMC 阈值电压示意图

Fig. 8 Schematic diagram of IPMC threshold voltage

表1 等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameter

电路参数	数值	电路参数	数值
表面电阻 R_1/Ω	10.0	离子支路电感 L_1/H	356.3
电子支路电阻 R_2/Ω	22.5	位移支路2电阻 R_5/Ω	10.22
位移支路电阻 R_3/Ω	46.1	离子支路2电阻 R_6/Ω	16.65
离子支路电阻 R_4/Ω	5.8	位移支路2电容 C_2/F	0.011
位移支路电容 C_1/F	0.003	离子支路2电感 L_2/H	204.2

不明确。目前具有代表性的 IPMC 致动机理有 3 种,水合阳离子机理、离子静电力作用机理以及库仑力作用机理。无论哪种作用机理,都离不开阴阳离子的迁移或结合。而导体中的电流 $I(t)$ 是电荷 $q(t)$ 的定向移动形成的。其关系如下:

$$I(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (12)$$

根据 Park 等^[22]等研究可将 IPMC 悬臂梁器件的电荷 q 与弯曲角 θ_B 的关系近似为:

$$q(t) \approx \alpha\beta\eta \frac{\pi}{180} \theta_B(t) \quad (13)$$

式中: α 是耦合常数;厚度 η 和宽度 β 为 IPMC 的几何参数。由此可用聚合常数 P 将上式重写为:

$$q(t) = P\theta_B(t) \quad (14)$$

由于 IPMC 器件在位移时会发生弯曲,弯曲角与位移 $\delta(t)$ 呈近似线性关系,可在两者之间增加一个系数 Q :

$$\theta_B(t) = \delta(t) + Q \quad (15)$$

经拉普拉斯变换,得到位移 $\delta(t)$ 与电流 $I(t)$ 的传递函数:

$$G(s) = \frac{\delta(s)}{I(s)} = \frac{M}{s + D} \quad (16)$$

式中: D 、 M 均为常系数,因假设表面电流与位移之间是线性的,根据实测数据并使用最小二乘法可以直接估计大小, $D=1.378$, $M=33.22$ 。由此建立起 IPMC 悬臂梁器件驱动电压到表面电流和表面电流到致动位移的分段“灰箱”模型。

4 系统仿真与结果分析

在对 IPMC 悬臂梁器件建立等效电路与传递函数的分段模型后,在 Simulink 中搭建系统模型,通过 NI 数据采集卡将低频交流电压信号直接输出给 IPMC 悬臂梁,并将采集回的数据和该分段模型的结果一同输出,进行半实物仿真与测试,验证该模型在不同频率、不同幅值下的准确性,1 Hz 测试结果如图 9 所示。

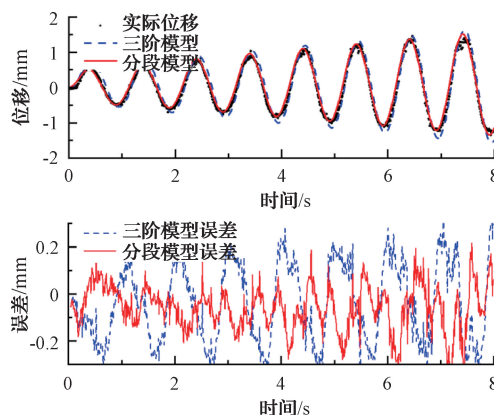


图9 1 Hz 下输出与误差结果

Fig. 9 1 Hz modeling and error results

由图 9 可知,该输入电压从 2~5.5 V 的变幅值正弦电压,电压每周期上升 0.5 V,采样频率为 100 Hz,基本覆盖 IPMC 悬臂梁器件所有工作驱动范围。两种方法所建立的模型输出结果与实际输出基本吻合,稳定后误差基本在 0.2 mm 以内。

通过不同频率的变幅值数据,对实验结果进行验证,结果如图 10 所示。

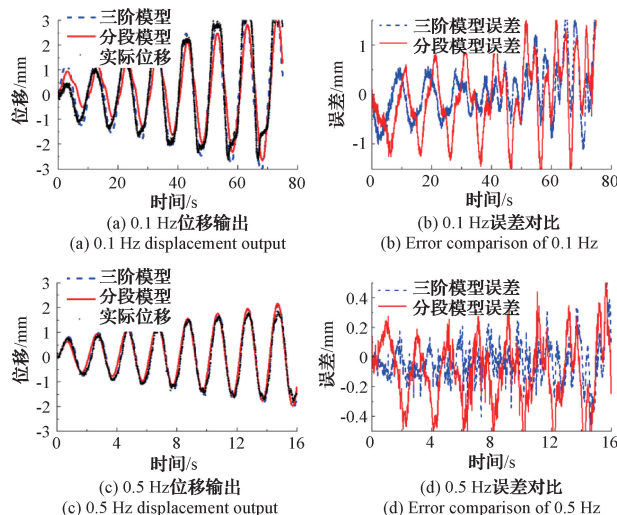


图10 低频下的输出与误差结果

Fig. 10 Output and error results at low frequency

图 10(a)、(b) 为 0.1 Hz 下的仿真与实际位移输出和

误差对比;图10(c)、(d)为0.5 Hz下的仿真与实际位移输出和误差对比;可以看出当输入电压频率在0.1 Hz时,由于频率较低,误差较大,绝对误差在0.5 mm左右;当输入电压频率在大于0.1 Hz小于1 Hz时,绝对误差一般保持在0.3 mm以内,平均相对误差低于3%,模型相对准确。

对高频输出结果进行验证,结果如图11所示。

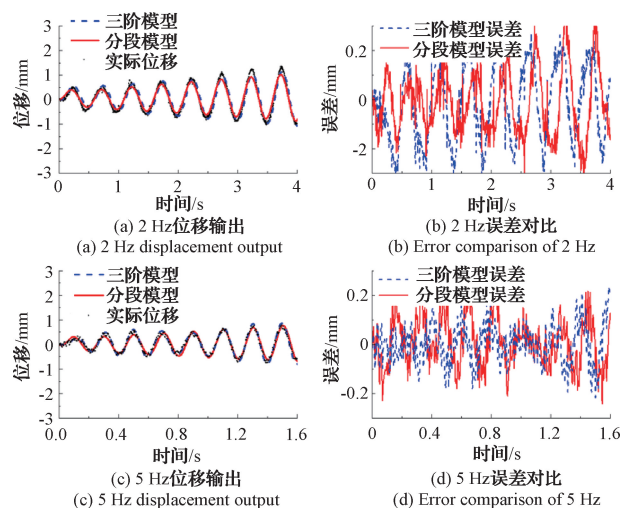


图11 高频下的输出与误差结果

Fig. 11 Output and error results at high frequency

由图11可知,在频率大于1 Hz并逐渐增大时,两种建模方法拟合结果良好,绝对误差大部分低于0.2 mm,平均相对误差低于2.6%,能够较好地满足实际运用需求。但在频率大于5 Hz后,由于实际位移低于0.5 mm,同时迟滞非线性加大,此时相位差大于 180° ,所建模型误差较大,存在误差的原因一方面在于Levy法非无偏估计,辨识方法本身存在误差。另外,驱动器存在非线性特性(迟滞现象及漂移现象)及噪声干扰也会对辨识结果产生影响。因此该模型不适用于5 Hz以上结果。

对上述不同频率下的分析与验证,可以发现,通过Levy辨识法建立的高阶模型误差较小,在此基础上建立和改进的IPMC等效电路+传递函数的“灰箱”模型吻合度较高。在频率为0.1~5 Hz,2~5.5 V的低频交流驱动电压下,其误差基本低于0.3 mm,基本满足使用要求。

5 结论

本文测试并分析了IPMC悬臂梁器件在变幅值(2~5.5 V)和不同频率(0.1~10 Hz)的频率特性和幅相特性,使用Levy辨识法建立了驱动电压到致动位移的高阶传递函数模型;接着针对某一特定频率下的输入,在所建立的高阶模型的基础上,通过改进只能描述线性关系的等效电路模型,提出可以表征非线性行为的分布式等效电路模型,又通过表面电流与电荷、弯曲角等的关系,最终建立驱动电压—表面电流—致动位移的“灰箱”分段模型。最终通过实验验证了该模型在不同频率下的准确性。

结果表明,在输入为2~5.5 V、0.1~5 Hz的低频交流驱动电压下,该高阶模型和分段的等效电路模型均能够较好地描述IPMC悬臂梁器件的实际致动位移,绝对误差小于3 mm,平均相对误差为2.89%,有效改善了IPMC悬臂梁器件的迟滞非线性,能够满足实际要求。

参考文献

- [1] MOHDISA W H, HUNT A, HOSSEINIA S H. Sensing and self-sensing actuation methods for ionic polymer-metal composite (ipmc): A review[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3967.
- [2] 杨静,田爱芬,张东升,等. 新型Cu-IPMC的制备与性能测试及在软体驱动方面的应用[J]. *功能材料*, 2019, 50(6): 6019-6022.
YANG J, TIAN AI F, ZHANG D SH, et al. Preparation and performance test of novel Cu-IPMC and its application in software drive [J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(6): 6019-6022.
- [3] AABLOO A, BELIKOV J, KAPARIN V, et al. Challenges and perspectives in control of ionic polymer-metal composite (IPMC) actuators: A survey [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 121059-121073.
- [4] 于甜,李树峰. IPMC软体驱动材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(2): 6-9, 14.
YU T, LI SH F. Research progress on the IPMC soft actuating material [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(2): 6-9, 14.
- [5] TIAN A F, SUN Y, LI J H, et al. Interface electrode and enhanced actuation performance of SiO_2 -GO/PFSA-based IPMC soft actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(3).
- [6] MOEINKHAH H, REZAEPAZHAND J, AKBARZADEH A. Analytical dynamic modeling of a cantilever IPMC actuator based on a distributed electrical circuit [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(5): 055033.
- [7] CHANG Y, KIM W. An electrical model with equivalent elements in a time-variant environment for an ionic-polymer-metal-composite system [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2017, 15: 45-53.
- [8] CHA Y, AURELI M, PORFIRI M. A physics-based model of the electrical impedance of ionic polymer metal composites[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(12): 124901-124901-14.
- [9] BONOMO C, FORTUNA L, GIANNONE P, et al. A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 16(1): 1.

- [10] 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): 1033-1039, 1226.
- XIONG K, LIU H G. An electromechanical model of large deflection for IPMC actuators under DC voltages applied[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2020, 40(6): 1033-1039, 1226.
- [11] 陈岚峰,薛定宇. 离子型聚合物金属复合材料最优分数阶建模[J]. 控制工程, 2018, 25(6): 1122-1126.
- CHEN L F, XUE D Y. The optimal fractional-order modeling of IPMC[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(6): 1122-1126.
- [12] 陈靖威,黄梁松,李甜甜,等. 离子型金属聚合物复合材料的分数阶建模及二阶滑模控制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2778-2785.
- CHEN J W, HUANG L S, LI T T, et al. Fractional modeling and second order sliding mode control of ionic polymer metal composites[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2778-2785.
- [13] 潘明健,安坤,李健宏,等. 基于 CMAC 神经网络的超磁致伸缩非线性控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 182-188.
- PAN M J, AN K, LI J H, et al. Nonlinear control of giant magnetostriction based on CMAC neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 182-188.
- [14] 周民瑞,周振华,刘鑫,等. 压电执行器的非对称动态迟滞特性建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(04): 108-120.
- ZHOU M R, ZHOU ZH H, LIU X, et al. Modeling of asymmetric dynamic hysteresis characteristics of piezoelectric actuators[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 108-120.
- [15] ZAMYAD H, NAGHAVI N, BARMANI H. A combined fuzzy logic and artificial neural network approach for non-linear identification of IPMC actuators with hysteresis modification[J]. Expert Systems, 2018, 35(4): e12283.
- [16] 唐朝国. 基于改进 Levy 飞行的 PSO 湿度传感器补偿算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 119-125.
- TANG CH G. PSO humidity sensor compensation algorithm based on improved Levy flight[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 119-125.
- [17] 王丽娜. 基于干扰观测器的压电陶瓷迟滞补偿控制[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(6): 89-93.
- WANG L N. Hysteresis compensation control of piezoelectric based on disturbance observer[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(6): 89-93.
- [18] 朱萌,曹国武,张志伟,等. 基于 Levy 法的气动舵机系统辨识[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 69-72.
- ZHU M, CAO G W, ZHANG ZH W, et al. The system identification of pneumatic actuator based on Levy method [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(6): 69-72.
- [19] PUGAL D, KIM K J, PALMRE V, et al. Physics-based electromechanical model of IPMC considering various underlying currents[C]. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012. SPIE, 2012, 8340: 181-190.
- [20] 宋丹. IPMC 力电耦合关系中的分布式等效电路模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- SONG D. Research on the distributed equivalent circuit for coupled electro-mechanical analysis of IPMC[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [21] 杜野. 碳纳米管复合电极多孔基膜结构 IPMC 电致动性能及等效电路模型研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2020.
- DU Y. Study on Electroactuation performance and equivalent circuit model of IPMC with carbon nanotubes composite electrode and porous membrane[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [22] PARK K, LEE H K. Evaluation of circuit models for an IPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) sensor using a parameter estimate method[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2012, 60: 821-829.

作者简介

李森, 硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 器件迟滞电路设计及控制的研究。

E-mail: lisen0529@qq.com

安坤(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为 MEMS 器件系统设计等。

E-mail: ankun@nuc.edu.cn