引用格式：王红，杨亮，杨延宁. 高柔性离子聚合物金属复合材料的动态响应建模及其传递函数优化[J]. 材料工程，2026，54(6)：105-114.
WANG Hong, YANG Liang, YANG Yanning. Dynamic response modeling and transfer function optimization of high-flexibility ionic polymer-metal composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(6): 105-114.

高柔性离子聚合物金属复合材料的动态响应建模及其传递函数优化

王　红，杨　亮*，杨延宁
（延安大学 物理与电子信息学院，陕西 延安 716000）

摘要：离子聚合物金属复合材料作为一种高柔性大变形的新型智能材料，凭借其独特的电致变形特性，在柔性机器人、微机电系统和生物医学工程等领域展现出广阔的应用潜力。然而，其固有的非线性动态响应特性以及复杂的动力学行为，给精确控制带来了重大挑战，极大地限制了其在高性能系统中的应用范围。为突破这一瓶颈，本工作基于等效理论开展了高柔性大变形离子聚合物金属复合材料动态响应模型的构建及其传递函数优化研究。通过对材料非线性特性的深入分析，建立了物理系统与数值模型之间的精确本构关系。进一步地，为实现从无限维模型到有限维模型的降阶转化，定义了适用于该材料大变形特性的辨识准则，并采用3种不同的辨识方法对其电致变形行为进行系统辨识。结果表明，改进的加权迭代算法在辨识性能上表现出显著优势，辨识准确率超过98%。研究还发现，在电致变形过程中，材料的动态响应幅度和相位角随电阻增大而减小，而随电容增大而增大。本工作提出的优化模型能够有效指导离子聚合物金属复合材料的设计与制备，并实现对其大变形行为的高精度控制，为该材料控制系统的开发提供了坚实的理论基础，对推动其在高性能领域中的柔性应用具有重要的科学意义和工程价值。

关键词：离子聚合物金属复合材料；动态响应；驱动特性；传递函数；软体机器人
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000411　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000411
中图分类号：TB381　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0105-10

Dynamic response modeling and transfer function optimization of high-flexibility ionic polymer-metal composites

WANG Hong, YANG Liang*, YANG Yanning
(School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract: As a novel class of smart materials with high flexibility and large deformation, ionic polymer-metal composites (IPMCs) exhibit exceptional electro-actuated deformation characteristics, demonstrating significant potential in flexible robotics, micro-electro-mechanical systems, and biomedical engineering. Nevertheless, their inherent nonlinear dynamic responses and complex kinetic behaviors pose substantial challenges to precise control, severely limiting their deployment in high-performance systems. To overcome this bottleneck, the present study establishes a dynamic response model for high-flexibility, large-deformation IPMCs and optimizes their transfer function based on equivalent-circuit theory. Through an in-depth analysis of the material's nonlinear properties, a precise constitutive relationship between the physical system and the numerical model is established. To achieve model-order reduction from an infinite-dimensional to a finite-dimensional representation, identification criteria tailored to the large-deformation characteristics of the material are formulated, and three distinct identification methods are employed for systematic identification of its electro-actuated deformation behavior. Results indicate that the refined weighted-iterative algorithm offers markedly superior identification performance, achieving an accuracy exceeding 98%. Additionally, the study reveals that during electro-actuated deformation, the amplitude and phase angle of the material's dynamic response decrease with increasing resistance but increase with

increasing capacitance. The optimized model proposed herein can effectively guide the design and fabrication of IPMCs while enabling high-precision control of their large-deformation behavior. This work provides a solid theoretical foundation for the development of control systems for such materials and holds significant scientific and engineering value for advancing their flexible applications in high-performance domains.

Key words: ionic polymer-metal composite; dynamic response; actuation characteristic; transfer function; soft robot

随着全球科技的飞速发展,机器人技术已成为各国科技政策的重要组成部分。近年来,各国纷纷出台政策支持机器人技术的研发与应用,旨在推动制造业升级、改善人类生活质量以及拓展机器人在复杂环境中的应用能力。在这一背景下,软体机器人作为一种新兴的机器人技术,因其独特的柔韧性和适应性,受到了广泛关注[1-2]。与传统刚性机器人相比,软体机器人能够更好地适应复杂多变的环境,实现与人类和自然环境的安全交互。其在医疗康复、灾难救援、柔性制造等领域展现出巨大的应用潜力,成为机器人技术未来发展的关键方向之一[3-5]。然而,软体机器人的性能仍受限于现有材料的响应速度、能量效率和可控性,亟须开发新型高性能智能材料与优化控制策略。

离子聚合物金属复合材料(ionic polymer-metal composite,IPMC)是一类基于离子迁移实现机电转换的新型智能材料,可在低电压下产生大变形、快速响应与精确形变,因而被视为软体机器人的理想柔性构件[6-7]。凭借轻量化、低能耗和仿生运动特性[8-9],IPMC在人工肌肉、仿生机械手和微型机器人等领域获得了广泛关注[10]。然而,IPMC的动态响应呈现显著的非线性、迟滞和时变特性,导致传统PID控制策略难以实现高精度调控。现阶段对于IPMC的驱动建模技术主要有黑箱模型、灰箱模型以及白箱模型。

黑箱模型未考虑IPMC内部的物理结构和机理,其采用数据驱动的方法[11-14],如多项式拟合[15]、神经网络[16]等,建立输入与输出之间的映射关系。这种模型缺乏可解释性,对数据的质量和数量要求较高。灰箱模型结合了已知的物理机理与数据驱动方法,可以从不同角度对IPMC的动态行为进行建模,涉及力与位移关系[17]、动力学模型[18]、微元电路[19]、分布式RC电路[20]、分析机电模型[21]、黏弹性动力学模型[22]等。此外,基于离子液体凝胶的机电耦合模型[23]、电阻-电容-Warburg元件(RCW)等效策略[24]、微观团簇理论模型[25]等也被提出,这些模型在一定程度上提高了对IPMC动态响应的预测精度。而白箱模型则从微观的离子传输[26]、电化学反应[27],到宏观的力学变形[28]等多物理场耦合的角度出发,建立物理方程组来描述IPMC的动态驱动行为[29],但是该模型计算复杂度较高,较少用于工程应用。

综上,IPMC的控制与建模受到模型精度不足、参数辨识复杂、非线性响应等问题制约,往往难以准确预测和表征其动态驱动特性。电化学耦合物理等效电路模型被认为是一种较为有效且易于实现的解决方案。基于此,本工作首先对IPMC的动态响应特性进行了系统分析,并基于等效电路理论构建了非线性本构关系模型。随后,依据动力学原则对IPMC驱动变形的传递函数模型进行了推导,并采用加权迭代优化算法对其进行了辨识降阶。通过对比不同方法的辨识性能,验证了本工作提出的辨识优化算法的准确性与优势,并进一步探讨了不同电阻和电容参数对IPMC驱动性能的影响。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

Nafion,购自中国上海三爵实业有限公司;铂氨溶液,纯度98%(质量分数,下同),购自上海思域化工科技有限公司;硼氢化钠,纯度98%,购自天津市福晨化学试剂厂;羟胺盐酸盐,纯度98.5%,购自广东光华科技股份有限公司;肼水合物,纯度80%,购自天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 IPMC驱动器制备

高柔性IPMC驱动器是通过化学沉积法制备而成。首先,将离子交换聚合物膜(Nafion)切割成长×宽为50 mm×10 mm试样,并用砂纸打磨两侧以增加表面粗糙度,从而提高后续金属层的附着力。接着,膜经过超声清洗、酸洗和去离子水冲洗,以去除杂质并进一步活化表面。然后,将膜浸入铂氨溶液中24 h,使铂氨络合物通过离子交换过程扩散进入聚合物膜内。随后,膜被置于去离子水中,在逐步升温至60 ℃的过程中,每10 min添加2 mL硼氢化钠溶液,同时加入适量的羟胺盐酸盐和肼水合物,促使铂离子还原为金属铂,并最终沉积在膜上形成均匀的铂层。整个过程中,膜经历了多次浸泡、加热和化学反应,确保铂能

够均匀且牢固地附着在聚合物膜上，从而制备出具有优良电活性性能的IPMC驱动器试样。

1.3　实验装置组装

实验装置包括IPMC驱动器试样，信号发生器、数据采集模块，数据处理模块，并采用振幅为5 V、频率为0.5 Hz的正弦驱动信号进行验证。

2　IPMC动态响应模型

IPMC独特的电致变形机制使其在柔性驱动领域具有不可替代的优势。IPMC的驱动原理基于离子在聚合物基体中的迁移和电荷的重新分布，这种机制使其能够在低电压下实现较大的弯曲变形，且响应速度快、能耗低。离子聚合物是IPMC的重要组成部分，为离子的迁移和运动提供了通道。通常选用Nafion作为IPMC的基底膜[30]，其结构主要包括疏水性的主链高分子和亲水性的全氟磺酸官能团。在电场的作用下，这种特殊的亲水疏水基团会在水溶液中有序排列，形成团簇，可移动的水合阳离子会通过网络团簇进行迁移，使得阳极收缩，阴极膨胀，导致IPMC发生形变，见图1所示。

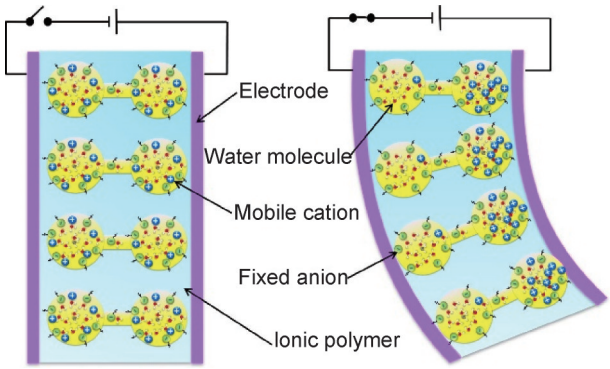


图1　IPMC的驱动变形机制

Fig.1　Actuation deformation mechanism of IPMC

IPMC在电压激励下发生变形，阳离子会带动水分子从阳极向阴极移动，阴离子不发生变化，使得IPMC内部形成浓度差，从而引起阳极收缩、阴极膨胀，最终导致IPMC向阳极一侧弯曲变形[31]。基于前期传输线理论和驱动动力学研究[32]，IPMC的整个驱动变形过程可以定量等效为RC电路模型，其等效电路如图2所示。施加在固定端的电压为U，电流为I，驱动器的长度为l。IPMC的电极总电阻为R，其是在长度方向和宽度方向外电阻与内电阻之和。C是总电容，包括界面电容、阳离子运动与储存在膜内部的电容。离子拖曳水分子会受到阻滞力的作用，从而造成能量损失的部分看做电阻R_b，离子聚合物的电阻表示为R_p。

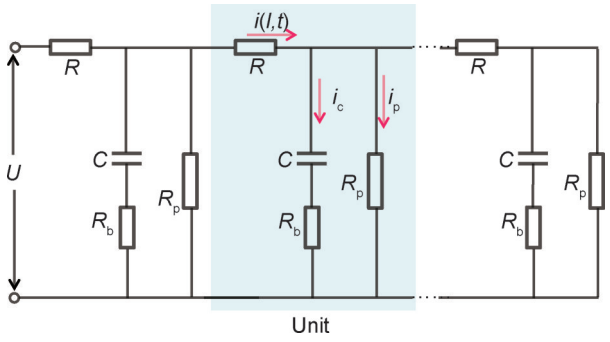


图2　IPMC等效电路示意图

Fig.2　Schematic diagram of equivalent circuit of IPMC

驱动变形过程涉及的各参数被认为是IPMC单个传输线单元的离散元素，电流信号从时域(t域)上转换为复频域(s域)。那么在(l,s)处的满足条件，如式(1)所示：

$$h\int_0^{\infty} i(l,s)\mathrm{e}^{-hl}\mathrm{d}l+\mathrm{e}^{-hl}i(l,s)+\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)hR_p}u(0,s)+\frac{R\left(1+R_bCs+R_pCs\right)}{(1+R_bCs)hR_p}\left[\mathrm{e}^{-hl}\int_0^{l} i(l,s)\mathrm{d}l-\int_0^{\infty} i(l,s)\mathrm{e}^{-hl}\mathrm{d}l\right]=0 \tag{1}$$

式中：h为拉普拉斯变量。

随后进一步推导，得到电荷密度$\rho(l,s)$和电荷量$q(l,s)$的计算公式，如式(2)～(4)所示：

$$\rho(l,s)=\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}\frac{U(s)N(l,s)}{WHs} \tag{2}$$

$$q(l,s)=\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}\frac{U(s)N(l,s)}{s} \tag{3}$$

$$N(l,s)=\cosh\left(\sqrt{R\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}}\,l\right)-\tanh\left(\sqrt{R\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}}\,L\right)\times\sinh\left(\sqrt{R\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}}\,l\right) \tag{4}$$

式中：W和H分别为IPMC的宽度与厚度。

为了简化其表征的复杂程度，根据IPMC发生形变的特点，其弯曲角(θ)计算如式(5)所示：

$$\theta(l,s)=\frac{1+R_bCs+R_pCs}{(1+R_bCs)R_p}\frac{\lambda U(s)N(l,s)}{s} \tag{5}$$

式中：λ定义为驱动变形系数，其与IPMC的尺寸和弹

性模量等参数相关。

3 IPMC传递函数构建

在IPMC的驱动变形过程中，由于涉及电场、力场、化学场等多个场相互作用，其中的变换详情很难确定。对于IPMC的有效控制，确定和研究整个的驱动过程的机电变化对于其后期的研发和设计有重要的意义。为了将IPMC驱动的结果和非线性控制相结合，发挥传递函数在控制方面的潜力，对驱动模型结构进行优化，并表征和辨识其传递函数。

3.1 传递函数表征

从IPMC驱动变形的物理系统出发，构建其对应的数学模型。当外界激励电压施加于IPMC的电极两侧时，产生电场，对应输入电压U。在电场的作用下，IPMC内部发生水合阳离子迁移进而引起电荷浓度与密度变化，对应数学模型中的传递函数的构建框架。最终IPMC内部发生膨胀与收缩导致的弯曲变形便造成了弯曲角度θ的存在。为了提高准确性，根据文献增加级联函数[33]，得到IPMC的传递函数结构，如图3所示。

在IPMC驱动器位置L处，其弯曲变形的传递函数，如式(6)所示：

$$T(s)=\frac{\theta(L,s)}{U(s)}\frac{1}{a_1s^2+a_2s+1} \tag{6}$$

式中：a_1和a_2为常数。传递函数可以进一步变换，如式(7)所示：

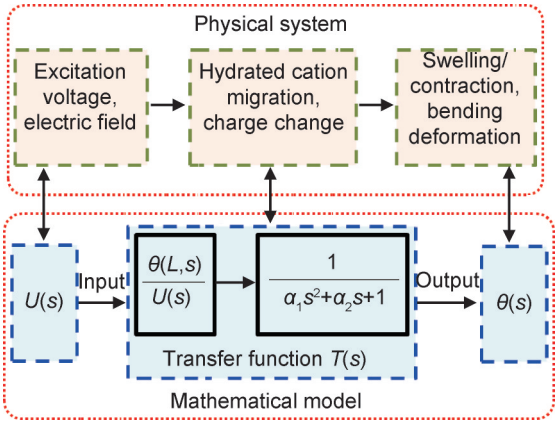


图3 IPMC传输模型结构

Fig.3 Transmission model structure of IPMC

$$T(s)=\lambda\left(1+R_bCs+R_pCs\right)/\left[R_p\left(a_1s^3+a_2s^2+s\right)\left(1+R_bCs\right)\cosh\left(\sqrt{R\frac{1+R_bCs+R_pCs}{\left(1+R_bCs\right)R_p}}L\right)\right] \tag{7}$$

3.2 传递函数辨识

基于以上分析，可以看出式(7)包括了双曲余弦函数cosh，尽管可以表征传递函数的变化趋势，但是此时的弯曲角度的驱动模型为无限维，不利于后期的表征的传递，随后采用不同的迭代算法进行无限逼近。图4给出了IPMC的物理系统近似示意图，其中TEM、LSIM及WLSIM分别表示泰勒展开法、最小二乘迭代法及加权迭代优化法。

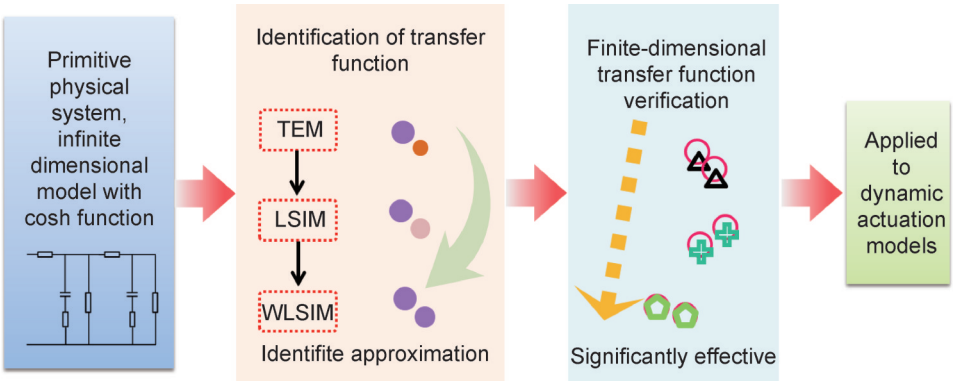


图4 IPMC物理系统近似示意图

Fig.4 Schematic diagram of the physical system of IPMC

3.1.1 传统降阶算法实现

根据双曲余弦函数的泰勒公式[34]，对IPMC的动态驱动模型传递函进行表征，如式(8)所示：

$$\hat{T}_{\text{Taylor}}(s)=\lambda\left(1+R_bCs+R_pCs\right)/\left[R_p\left(a_1s^3+a_2s^2+s\right)\left(1+R_bCs\right)\sum_{n=0}^{m}\frac{\left(\sqrt{R\frac{1+R_bCs+R_pCs}{\left(1+R_bCs\right)R_p}}L\right)^{2n}}{(2n)!}\right] \tag{8}$$

对传递函数辨识参数进行修正，对应相关系数分别为a_1=0.0008、a_2=0.007。提取了曲线40个频

率点作为需要辨识的频域。不同的阶数 m 条件下，对比 IPMC 弯曲角度的传递函数和理论模型函数的差异，IPMC 弯曲变形的角度伯德图见图 5 所示。

如图 5 所示，不同的阶次对于幅值图和相角图没有很明显的差异。从细节看 m=1，2 时有细微的偏差，而在 m=3 时的函数曲线几乎完全逼近 IPMC 理论驱动模型。

从传递函数公式可以知道泰勒变换后的传递函数阶数为 7，此时阶数相对较高，这必然会增加后续变换的复杂性。另外一方面，这样高阶次的传递函数反推 IPMC 驱动模型时，通常会出现无法进行反拉普拉斯变换，甚至无法得到有效解。因此，使用泰勒公式处理尽管可以解决无限维的问题，但是并不是理想的 IPMC 驱动函数模型。

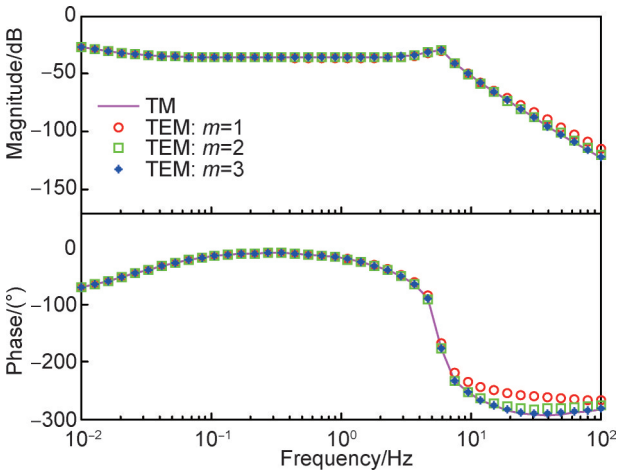


图 5　基于泰勒展开法的不同阶数对驱动响应的影响

Fig.5　Influence of different orders of Taylor expansion method on the actuation response

基于 LSIM 在数据拟合精度、收敛稳健性以及参数可解释性上的综合优势，对 IPMC 的动态模型进行辨识。那么模型辨识的传递函数对应的频率响应，如式(9)所示：

$$\hat{T}_{LSIM}(\mathrm{j}\omega)=\frac{(b_0-b_2\omega^2+b_4\omega^4-\cdots)+\mathrm{j}\omega(b_1-b_3\omega^2+b_5\omega^4-\cdots)}{(1-a_2\omega^2+a_4\omega^4-\cdots)+\mathrm{j}\omega(a_1-a_3\omega^2+a_5\omega^4-\cdots)}=\frac{\alpha(\omega)+\mathrm{j}\beta(\omega)}{\varsigma(\omega)+\mathrm{j}\tau(\omega)}=\frac{N(\mathrm{j}\omega)}{S(\mathrm{j}\omega)} \tag{9}$$

式中：$a_k(k=1,2,3,\cdots,n)$ 和 $b_k(k=1,2,3,\cdots,m)$ 为辨识的系数；m 和 n 为待确定的阶次；α 和 ς 为实部的系数；β 和 τ 为虚部的系数。

模型之间的均方差的平方计算，如式(10)所示：

$$E=\frac{1}{p}\sum_{e=1}^{p}\left|S(\mathrm{j}\omega_e)T(\mathrm{j}\omega_e)-N(\mathrm{j}\omega_e)\right|^2 \tag{10}$$

式中：p 是辨识时所取的频率点个数。随后利用式(10)对 $a_k(k=1,2,3,\cdots,n)$ 和 $b_k(k=1,2,3,\cdots,m)$ 分别求导，求解 E 的最小值，以便得到传递函数的最优解。为了简化模型参数表示的复杂程度，用 $T_{\mathrm{R},e}$ 和 $T_{\mathrm{I},e}$ 分别代表 $T(\mathrm{j}\omega_e)$ 的实部与虚部，并对矩阵求解，如式(11)，(12)所示：

$$\begin{bmatrix}
A_0 & 0 & -A_2 & 0 & \cdots & C_1 & B_2 & -C_3 & -B_4 & \cdots \\
0 & A_2 & 0 & -A_4 & \cdots & -B_2 & C_3 & B_4 & -C_5 & \cdots \\
A_2 & 0 & -A_4 & 0 & \cdots & C_3 & B_4 & -C_5 & -B_6 & \cdots \\
0 & A_4 & 0 & -A_6 & \cdots & -B_4 & C_5 & B_6 & C_7 & \cdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\
C_1 & -B_2 & -C_3 & B_4 & \cdots & D_2 & 0 & -D_4 & 0 & \cdots \\
B_2 & C_3 & -B_4 & -C_5 & \cdots & 0 & D_4 & 0 & -D_6 & \cdots \\
C_3 & -B_4 & -C_5 & B_6 & \cdots & D_4 & 0 & -D_6 & 0 & \cdots \\
B_4 & C_5 & -B_6 & -C_7 & \cdots & 0 & D_6 & 0 & -D_8 & \cdots \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots &
\end{bmatrix}
-B
\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix} B_0 \\ C_1 \\ B_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ 0 \\ D_2 \\ 0 \\ D_4 \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
A_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i \\
B_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i T_{\mathrm{R},e} \\
C_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i T_{\mathrm{I},e} \\
D_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i (T_{\mathrm{R},e}+T_{\mathrm{I},e})
\end{aligned} \tag{12}$$

求解得到 IPMC 弯曲角度的动态驱动模型结构形式，解决了传递函数从无限维到有限维的转变。图 6 为不同 m 和 n 值的 IPMC 模型的伯德图，辨识模型的幅值图和相角图在高频率段与理论数据比较匹配，但是在低频阶段可以明显看出局部的不一致，影响了整体 IPMC 的动态驱动模型的拟合精度。通过尝试改变不同的 m 和 n 值，但是拟合的传递函数曲线并没有发生变化。这可能是最小二乘迭代方法的不足，较高频率的误差权重较大，而较低频率数据对于误差的影响比较小以致于在低频阶段拟合效果较差。为此，从简化模型、降低阶数的角度出发，选择 m=3，n=4 时的传递函数。

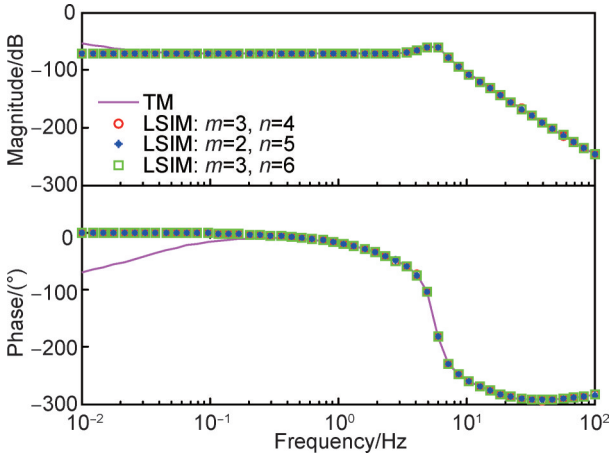


图6 不同阶数下IPMC理论曲线和辨识模型的伯德图

Fig.6 Bode plots of theoretical curves and identification models of IPMC at different orders

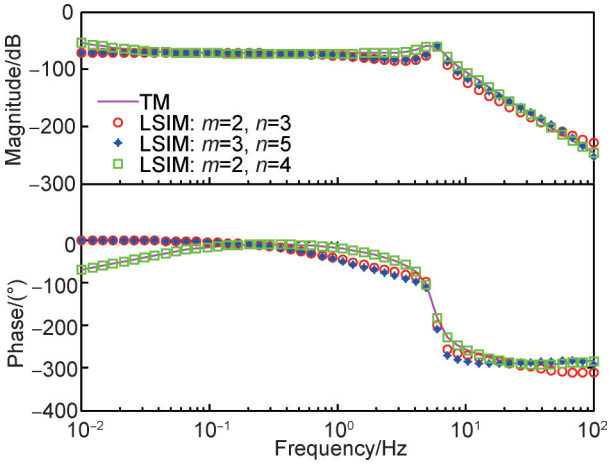


图7 不同阶数的WLSIM优化模型响应图

Fig.7 Response graphs of improved weighted iterative optimization models of different orders

3.1.2 加权迭代优化法

采用LSIM时，低频段数据在目标函数中的残差权重过低，导致该频段拟合误差显著。为了解决此问题，进一步的扩大频率的范围，在前期研究的基础上，尝试通过迭代法消除误差权重的不平衡。式(10)变换，如式(13)所示：

$$E=\frac{1}{p}\sum_{e=1}^{p}\left[W_e\left|S(\mathrm{j}\omega_e)T(\mathrm{j}\omega_e)-N(\mathrm{j}\omega_e)\right|\right] \tag{13}$$

定义权重因子 W_e，如式(14)所示：

$$W_e=\frac{1}{\omega_e^{n-m}} \tag{14}$$

对应的矩阵求解式(10)，(11)的项，如式(15)所示：

$$\begin{aligned}A_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i W_e\\ B_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i T_{\mathrm{R},e} W_e\\ C_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i T_{\mathrm{I},e} W_e\\ D_i&=\sum_{e=0}^{p}\omega_e^i (T_{\mathrm{R},e}+T_{\mathrm{I},e}) W_e\end{aligned} \tag{15}$$

经过加权迭代优化算法计算，在阶数值低的情况下，理论曲线和辨识曲线也在低频阶段有一些差异。在阶数值 $m=2$，$n=5$ 时，辨识模型各个频率段已经与理论曲线几乎完全重合，见图7所示。本文提出的WLSIM可以有效捕获IPMC的驱动特性，进而得到比较理想的IPMC动态模型的传递函数。

4 结果与分析

4.1 实验验证

对通过加权迭代优化算法得到的传递函数进行反拉普拉斯，得到的IPMC的动态响应模型，将模型的预测值和实验值进行比较，如图8所示。随着时间变化，IPMC的输出位移和预测位移在整体趋势上吻合较好，平均相对误差约为5%，表明模型具有较好的预测精度。主要误差可能来源于测量设备的精度限制与环境因素的干扰、简化假设捕捉复杂动态行为有限以及模型参数优化不够准确等。为提高模型的可信度，后期需要进一步优化材料参数的标定方法，并考虑引入环境因素的动态补偿机制，以减小预测偏差。

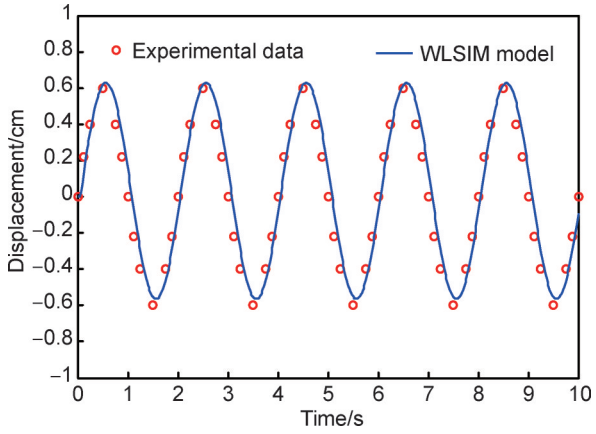


图8 IPMC动态响应实验值和预测值的比较图

Fig.8 Comparison chart of experimental and predicted values of the dynamic response of IPMC

4.2 不同辨识方法比较

为了定量显示拟合效果，比较辨识方法的优劣，定义评定辨识能力的指标为辨识度id，其定义为1减去实际模型与辨识模型的相对误差，如式(16)所示：

$$\mathrm{id}=1-\frac{\left|T(s)-\hat{T}(s)\right|}{\left|T(s)\right|}\times 100\% \tag{16}$$

同时本工作对Li等[35]的工作进行了实现，其论文中定义的权重函数和迭代公式，如式(17)，(18)所示：

$$W_e^V = 1/\left|S_{V-1}(\mathrm{j}\omega_e)\right|^2 \tag{17}$$

$$E^V = \frac{1}{p}\sum_{e=1}^{p} W_e^V \left|S(\mathrm{j}\omega_e)_V T(\mathrm{j}\omega_e)_V - N(\mathrm{j}\omega_e)_V\right|^2 \tag{18}$$

式中：V是迭代次数；S_{V-1}为前一次迭代的分母。

表1为不同辨识方法的辨识度和阶数比较。尽管各种方法的相对误差较为接近，但绝对误差存在明显差异，这表明改进的加权迭代优化算法相较于其他方法具有更高的辨识度，并且模型阶数更低。改进的加权迭代优化算法能够有效捕捉IPMC的非线性特性和驱动特点，为IPMC驱动模型的建立提供了更精准的工具。该算法不仅在当前IPMC体系中表现出色，还具有一定的通用性和拓展性，有望应用于其他电驱动类型的材料体系或复杂系统中。此外，该算法得到的驱动模型可以推广到PID控制器中，用于精确控制驱动器的微小弯曲变形，为控制系统的设计和搭建提供了有力依据，对实现具体化和精确化控制具有重要意义。

表1　不同辨识方法的辨识度和阶数

Table 1　Identification degree and order of different identification methods

Methods	Identification degree	Maximum order
TEM	99.17%	7
LSIM	80.71%	4
WLSIM	98.71%	5
Li[35]	80.05%	4

3.3　不同电极电阻对IPMC驱动特性的影响

根据本工作提出的改进加权迭代优化方法，通过改变电极电阻值，研究不用电极电阻对IPMC动态驱动性能的影响。较低的表面电极电阻一方面有利于激励电压在IPMC的电极层传递，提高传导速率和缩短IPMC驱动变形的响应时间，另一方面提供有力的离子迁移环境，迁移数量大大增多[36]。这些使得IPMC最终的驱动输出角度增大，驱动输出位移增大。依据提出的加权迭代优化方法，正如图9所示，可以明显看出不同电极电阻对IPMC动态驱动性能的影响主要体现在频率大于0.1 Hz的范围。随着电极电阻的增大，IPMC动态驱动响应的幅值和相角都减小，当电阻较小时，IPMC的驱动性能越理想。在相同尺寸与约束条件下，具有低表面电阻的Ag基IPMC在1.5 V驱动电压下即可产生90°变形，而表面电阻较高的Pt型与Pt-Ag型IPMC分别在3 V和4 V驱动电压下仅能产生60°变形，这一实验结果直接验证了电极电阻与驱动性能的反比关系[37]。为了进一步提升IPMC驱动器的动态响应，建议在实际应用中选择低电阻材料作为电极，并优化电极与聚合物膜之间的界面设计，以减少接触电阻。此外，通过引入先进的制造工艺如纳米技术，可以进一步增强电极的导电性和稳定性，从而显著改善IPMC的整体动态响应。

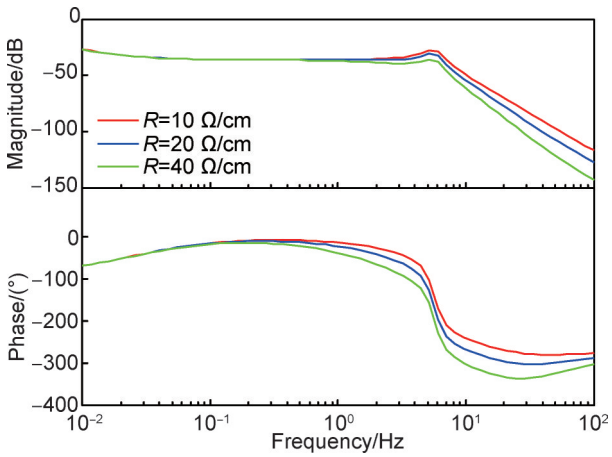


图9　不同电极电阻对IPMC驱动响应的影响

Fig.9　Influence of different electrode resistances on the actuation response of IPMC

3.4　不同电容对IPMC驱动特性的影响

如图10所示，不同电容值对IPMC驱动特性的影响。在0.01～0.4 Hz的频率范围，电容的值越小，IPMC的动态驱动响应的幅值和相角越小。在0.4～10 Hz的频率范围，随着电容的值减小，幅值在减小，而相角却越大。频率大于10 Hz时，IPMC的动态驱动响应比较复杂。IPMC的驱动幅值随着电容值的增大而增大，而相角随着电容值的增加表现出先增大后较小的趋势，其驱动特性也依赖的不同的频率范围。IPMC的变形机制主要是依赖于离子电荷的迁移和分布。较大的电容值，提高了IPMC内部储存电荷的能力，诱导内部应力产生，促使离子电荷的有效迁移，提高了IPMC的驱动性能。为了更好控制IPMC的动态响应，必须深入理解电容值对系统频率响应的影响。在高频范围内，较高的电容值能够提供更多的储能，但可能导致相角滞后，从而影响系统的实时响应能力。因此，在实际应用中，需要根据具体的使用场景选择合适的电容值。例如，在需要快速响应的应用中，应选择较小的电容值以减少相角滞后；而在要求较高驱动力的应用中，则可以选择较大的电容值以增加驱动幅值。此外，结合反馈控制系统，可以动态调整电容值，以实现最佳的驱动性能。通过对不同电容值的模拟结果进行比较分析，可以发现通过调节电容来优化IPMC的动态响应特性是一种有效的策略，这

为后期的设计和应用提供了宝贵的参考。未来的研究还可以进一步探索如何通过集成智能控制算法来自动调节电容和其他参数，从而实现更高效的IPMC驱动器驱动性能。

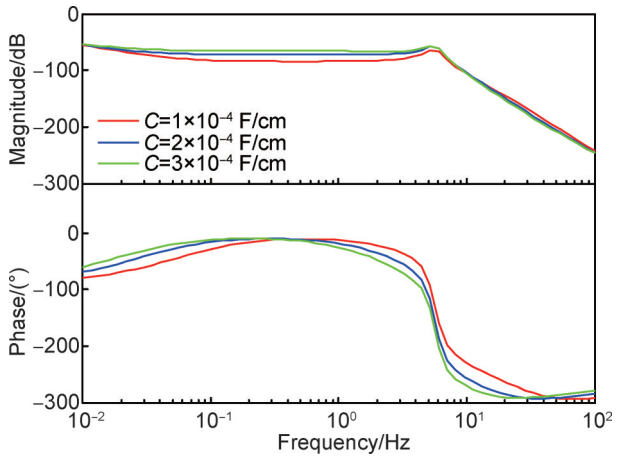


图10 不同电容对IPMC驱动响应的影响

Fig.10 Influence of different capacitances on the actuation response of IPMC

基于上述分析，可以得出一些关于IPMC动态响应控制的重要见解。首先，电极电阻的选择对于IPMC的驱动性能至关重要。低电阻电极不仅能够加快电压传递速度，还能有效促进离子迁移，从而提高整体驱动效率。其次，电容值的优化同样不可忽视。适当的电容配置可以在不牺牲响应速度的前提下，显著提升IPMC的驱动幅度和稳定性。为了进一步提升IPMC的动态响应性能，未来的研究可以考虑以下几个方向：第一，电极材料与结构优化：开发新型低电阻、高稳定性的电极材料，并优化电极结构，以减少接触电阻和提高电荷传输效率。第二，智能控制系统：引入自适应控制算法，实时监测并调整电极电阻和电容值，以应对不同的工作条件和需求。第三，多物理场耦合模型：建立更加精确的多物理场耦合模型，综合考虑电学、力学及化学效应，全面预测和优化IPMC的动态响应特性。通过以上措施，不仅可以显著提升IPMC的动态响应性能，还能拓展其在更多领域的应用潜力。希望这些讨论能为读者提供有价值的参考，并激发更多关于IPMC动态响应优化的研究思路。值得一提的是，近年来机器学习凭借其自动特征提取与复杂模式建模的核心能力，在与IPMC驱动的智能材料体系深度融合中展现出显著优势，这一交叉领域的研究为智能材料的结构响应优化及软体机器人自主控制算法的突破提供了关键驱动力，将成为推动该领域快速发展的重要创新方向。

4 结论

(1)构建了IPMC的动态驱动模型与传递函数，确定了输入激励电压与输出驱动变形角度之间的物理关系。并采用加权迭代优化算法对传递函数进行辨识和验证，确保了模型的准确性和可靠性。

(2)通过进行辨识度和最高阶数的比较，提出的加权迭代优化算法对驱动传递模型的辨识度最高，辨识能力最强，有效反映了IPMC的非线性特性和驱动特点，所建立的模型预测值与实验值吻合良好。

(3)电阻和电容对IPMC的动态响应特性具有显著影响，其动态驱动响应的幅值和相角随着电阻的增大而减小，而随着电容的增大而增大。电容对驱动响应的增强作用更为显著。

(4)该模型为预测IPMC离子驱动器的驱动位移、电阻和电容的影响提供了有力工具，改进的加权迭代优化算法可推广应用于其他类型的驱动器。

(5)加权迭代优化算法在工程应用中可能面临数据质量依赖性、计算资源需求和参数敏感性等挑战，这些因素可能影响算法的适用性和效率。

参考文献

[1] SU J T, HE K, LI Y Z, et al. Soft materials and devices enabling sensorimotor functions in soft robots[J]. Chemical Reviews, 2025, 125(12): 5848-5977.

[2] 蒋冯逸，邵宇，张文彬. 智能物质的创制与应用[J]. 科学通报，2024，69(26)：3914-3924.
JIANG F Y, SHAO Y, ZHANG W B. Intelligent matter: from scientific concept to emerging applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(26): 3914-3924.

[3] YANG L, WANG H, ZHANG D S, et al. Large deformation, high energy density dielectric elastomer actuators: principles, factors, optimization, applications, and prospects [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 489: 151402.

[4] 刘文博，王韫，朵有宁，等. 基于柔性传感的软体机器人交互研究进展[J]. 机器人，2024，46(2)：195-218.
LIU W B, WANG Y, DUO Y N, et al. Recent progress of soft robot interaction based on flexible sensing[J]. Robot, 2024, 46(2): 195-218.

[5] YIN S K, YAO D R, SONG Y, et al. Wearable and implantable soft robots[J]. Chemical Reviews, 2024, 124(20): 11585-11636.

[6] LU C, CHEN W, ZHANG X H. Highly efficient ionic actuators enabled by sliding ring molecule actuation [J]. Nature Communications, 2025, 16: 2480.

[7] ZHAO C, TANG G Q, JI Y J, et al. High-performance ionic polymer actuators with triple-layered multifunctional electrodes[J]. Materials & Design, 2023, 229: 111882.

[8] LEE S, HWANG L, LEE J Y, et al. Multiday operable ionic

polymer-metal composites prepared using a stacking method for practical actuator applications[J].Sensors and Actuators B:Chemical,2022,372:132616.

[9] WANG H, YANG L, YANG Y N, et al. Highly flexible, large-deformation ionic polymer metal composites for artificial muscles: fabrication, properties, applications, and prospects[J].Chemical Engineering Journal,2023,469:143976.

[10] 张德海,许宸语,郭东杰,等.面向驱动器的离子聚合物-金属复合材料研究进展[J].精密成形工程,2025,17(5):123-131.
ZHANG D H, XU C Y, GUO D J, et al. Advances in drive-oriented ion-exchange polymer-metal composite [J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2025,17(5):123-131.

[11] BAO X Q,BAR-COHEN Y,LIH S S.Measurements and macro models of ionomeric polymer-metal composites (IPMC) [J]. Smart Structures and Materials 2002:Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD),2002,4695:220-227.

[12] HANAWA T, WANG A, DENG M, et al. Operator-based robust nonlinear control for an ionic-polymer metal composite with hysteretic properties compensation[C]// The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Tokyo: IEEE, 2012:12-17.

[13] ANNABESTANI M, NAGHAVI N. Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2014,209:140-148.

[14] HAO L N,CHEN Y,SUN Z Y.The sliding mode control for different shapes and dimensions of IPMC on resisting its creep characteristics [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24 (4): 045040.

[15] YANG L,ZHANG D S,ZHANG X N,et al.Models of displacement and blocking force of ionic-polymer metal composites based on actuation mechanism [J]. Applied Physics A, 2020, 126 (5):365.

[16] YANG L,ZHANG D S,ZHANG X N,et al.Prediction of the actuation property of Cu ionic polymer-metal composites based on backpropagation neural networks[J]. ACS Omega, 2020, 5(8): 4067-4074.

[17] MCDAID A J, AW K C, HAEMMERLE E, et al. A conclusive scalable model for the complete actuation response for IPMC transducers[J].Smart Materials and Structures,2010,19(7):075011.

[18] KRUUSMAA M, HUNT A, PUNNING A, et al. A linked manipulator with ion-polymer metal composite (IPMC) joints for soft- and micromanipulation[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena: IEEE, 2008: 3588-3593.

[19] PUNNING A, JOHANSON U, ANTON M, et al. A distributed model of ionomeric polymer metal composite[J].Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2009,20(14):1711-1724.

[20] MOEINKHAH H, REZAEEPAZHAND 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.

[21] LIU H G, XIONG K, BIAN K, et al. Experimental study and electromechanical model analysis of the nonlinear deformation behavior of IPMC actuators[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(2): 382-393.

[22] SAMPOUR S, MOEINKHAH H, RAHMANI H. Electrochemical viscoelastic modeling to predict quasi-static and dynamic response of IPMC actuators[J]. Mechanics of Materials, 2019, 138: 103172.

[23] ZHANG C H, ZHANG C G, TIAN G P, et al. Electromechanical coupling model for ionic liquid gel soft actuators[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2024, 2024: 8369544.

[24] BISWAS A, SINGH M K, BHATTACHARYA B. Modeling and study of actuation of IPMC from the viewpoint of small-scale manipulator development[C]//2024 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS). Delft: IEEE, 2024: 1-8.

[25] 王红,杨亮,杨延宁.基于团簇微观结构分析的离子电活性聚合物驱动特性[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(1):106-115.
WANG H, YANG L, YANG Y N. Actuation characteristics of ionic electroactive polymers based on cluster microstructure analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(1): 106-115.

[26] NEMAT-NASSER S. Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(5): 2899-2915.

[27] CHA Y, PORFIRI M. Mechanics and electrochemistry of ionic polymer metal composites[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 71: 156-178.

[28] STALBAUM T, PUGAL D, NELSON S E, et al. Physics-based modeling of mechano-electric transduction of tube-shaped ionic polymer-metal composite[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(11): 114903.

[29] SHEN Q, PALMRE V, LEE J, et al. A physics model of the multi-degree freedom ionic polymer-metal composite cylinder actuator[J]. Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2016, 9800: 98001B.

[30] HORIUCHI T, KATO Y, SUGINO T. Three-layer ionic polymer - metal composite actuator with functionalized carbon nanotubes incorporated into Nafion [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 352: 114178.

[31] YANG L, WANG H. High-performance electrically responsive artificial muscle materials for soft robot actuation[J]. Acta Biomaterialia, 2024, 185: 24-40.

[32] 杨亮,王红,田爱芬,等.基于传输线理论和驱动动力学的柔性驱动器动态特性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(12):4442-4451.
YANG L, WANG H, TIAN A F, et al. Dynamic characteristics analysis of flexible actuator based on transmission line theory and actuation dynamics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(12): 4442-4451.

[33] CHEN X K, SU C Y. Adaptive control for ionic polymer-metal composite actuators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(10): 1468-1477.
[34] MURESAN C I, BIRS I, DE KEYSER R. An alternative design approach for fractional order internal model controllers for time delay systems[J]. Journal of Advanced Research, 2021, 31: 177-189.
[35] LI Y, YU S. Frequency domain identification of non-integer order dynamical systems[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2007, 23: 47-50.
[36] YANG L, ZHANG D S, ZHANG X N, et al. Performance analysis of IPMC electrode based on the densest packing principle[J]. Journal of Materials Research, 2021, 36(6): 1295-1305.
[37] 陈骐, 熊克, 卞侃, 等. Ag型IPMC柔性驱动器的制备及性能[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(3): 426-429.
CHEN Q, XIONG K, BIAN K, et al. Fabrication and properties of Ag based IMPC flexible actuator[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(3): 426-429.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52365069); 陕西省重点研发计划项目(2025CY-YBXM-099); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0472); 延安大学科研专项项目(2023JBZR-005, 2023HBZ-013)
收稿日期: 2025-07-12; **录用日期**: 2025-08-26
通讯作者: 杨亮(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为柔性智能材料、仿生人工肌肉以及机器人技术, 联系地址: 陕西省延安市圣地路580号延安大学(716000), E-mail: yangliang20070126@163.com

(本文责编: 齐 新)