

· 综述 ·

电活性聚合物柔性智能驱动材料的建模、控制及应用综述

王思蛟*, 曹凯明, 田慧慧, 陈梦梦
(西安工业大学机电工程学院, 西安 710021)

摘要:随着电活性聚合物(EAP)在仿生机器人、柔性传感器、能源等领域的广泛应用,对其研究也日益深入。本文对 EAP 智能驱动材料建模、控制及应用方面的研究进展进行了系统性的梳理,为后续材料应用奠定基础。首先,对 EAP 材料的分类和电致动原理进行了概述,然后整理了 EAP 驱动材料模型建立以及控制器设计,最后归纳了 EAP 在材料性能、智能结构设计、系统建模和运动控制策略方面存在的研究难题,并展望了未来的研究方向。

关键词:智能驱动材料;电活性聚合物;建模;控制方法

Review on Modeling, Control and Application of Electroactive Polymer Flexible Intelligent Driving Materials

WANG Si-jiao*, CAO Kai-ming, TIAN Hui-hui, CHEN Meng-meng
(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: With the wide application of electroactive polymer (EAP) in bionic robots, flexible sensors, energy and other fields, the research on EAP is also increasing. This paper systematically describes the research progress of EAP intelligent driving materials in modeling, control and application, laying a foundation for the subsequent material application. Firstly, the classification and electro actuation principle of EAP materials are outlined. Then, the modeling and controller design of EAP driving materials are sorted out. Finally, the existing research difficult problems of EAP in material properties, intelligent structure design, system modeling and motion control strategy are summarized, and the future research directions are prospected.

Keywords: Intelligent driving material; Electroactive polymer; Modeling; Control method

近年来,柔性智能驱动材料因其具有受外界刺激而发生形变的特性,得到了迅速发展。目前研究较为广泛的智能材料主要包括:形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)、压电陶瓷(piezoelectric ceramics, PC)、电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)等,其中 EAP 是智能材料领域研究的一个重要分支,EAP 又可分为电子型和离子型,电子型以介电弹性(dielectric elastomer, DE)

材料最为典型。离子型以离子聚合物金属复合材料(ionic polymer metal composites, IPMC)为典型^[1]。EAP 材料具有电致变形大、柔顺性好、快速响应等优点,在仿生机器人、能源、医疗等领域具有极大的应用价值^[2~4]。但是柔性智能材料具有非常强的非线性特性,这就会造成驱动器在控制和定位时受到影响,还可能造成系统不稳定,尤其是迟滞特性会对驱动器和控制系统造成较为严重

收稿:2022-01-26;修回:2022-04-28

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(21JK0676),陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JQ5176),西安市未央区科技计划(K20210161)

* 通讯联系人:王思蛟(1986-),女,讲师,博士,主要研究方向为纳米功能材料与器件,智能柔性材料的制备与应用。
E-mail: wangzijiao9999@163.com

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2023.01.002

的影响。在实际的工程应用中,根据材料特性对其建立相关模型的同时,还要考虑频率、应力、温度等因素对系统的影响。综合以上,本文首先论述了 EAP 柔性智能驱动材料电致动原理及分类,然后整理了近年来 EAP 驱动器建模、控制及应用方面所取得的成果,最后归纳了柔性智能驱动材料的研究瓶颈以及未来的应用方向。

1 电活性聚合物柔性智能驱动材料的原理及分类

EAP 是一种受电激励而发生形变的智能驱动材料,根据作用机理可将其分为两大类:电子型 EAP 和离子型 EAP^[5]。

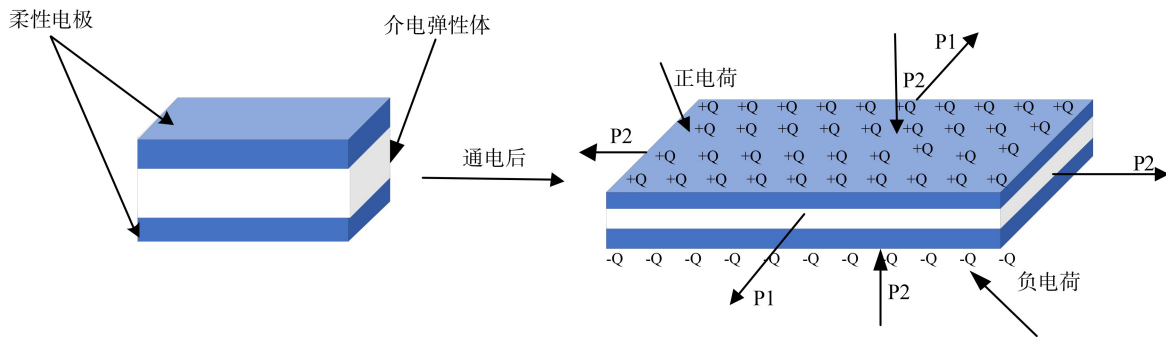


图 1 DE 电致动形变原理

Figure 1 DE principle of DE electro actuated deformation

1.2 离子型 EAP

离子型 EAP 是在电化学的基础上,将电能转化为机械能,这类材料一般由两个电极和电解液组成,特点是驱动电压低,大多需要施加 $0 \sim 10$ V 低电压。离子型 EAP 包括碳纳米管(CNT)、离子聚合物金属复合材料(IPMC)、导电聚合物(CP)等^[6]。其中 IPMC 是由离子交换膜和其上下表面的金属电极构成的聚合物,对其两侧的金属电极层施加电压后,聚合物中的水合阳离子就会向阴极移动,水分子的浓度差就会使离子交换膜向阳极方向弯曲,从而使材料在电场作用下发生形变^[8],其电制动原理如图 2 所示。

电子型 EAP 和离子型 EAP 的作用机理不同。电子型 EAP 是在电场产生的麦克斯韦应力下发生的形变,所以电子型 EAP 向外输出的力较大,适合作为中型仿生机器人的动力源。离子型 EAP 是在其内部正负电子之间的相互作用下发生的形变,所以离子型 EAP 向外输出的力较小,只适合作为微型机器人的动力源。

1.1 电子型 EAP

电子型 EAP 是在电场的作用下,将电能转化为机械能,输出的力较大,需要的激励电场较高,大多需施加 $0 \sim 2.5$ kV 级别的高压。电子型 EAP 包括:介电弹性体(DE)、液晶弹性体(LCE)、电致伸缩接枝弹性体(ESGE)等^[6]。DE 主要是丙烯酸类、硅橡胶类及聚氨酯类等构成的聚合物,当在 DE 两侧柔性电极上施加电压时,正电荷和负电荷分别积聚在两个柔性电极上,此时正电荷与负电荷会沿 DE 薄膜厚度方向上产生麦克斯韦应力,由于体积不变,薄膜会在平面上发生扩张变形,在厚度上发生压缩变形^[7],其电致动原理如图 1 所示。

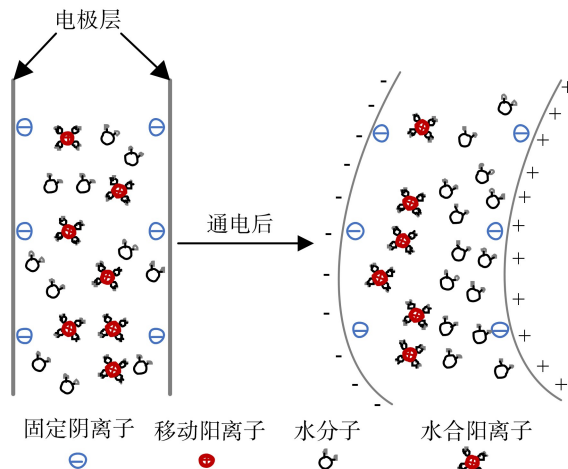


图 2 IPMC 电制动变形原理

Figure 2 Principle of IPMC electro actuated deformation

2 电活性聚合物柔性智能驱动材料的建模

目前,EAP 材料的主流研究方向是利用 EAP 材料研制柔性驱动器,并将其应用在仿生机器人

领域。由于 EAP 材料中存在迟滞特性和蠕变特性,严重影响了柔性驱动器的跟踪控制和定位精度。因此,需要对 EAP 材料建立精确的迟滞模型和蠕变模型。

2.1 本构模型

EAP 材料的应力应变本构模型的建立是设计性能优异 EAP 驱动器的基础。研究人员为建立精确的本构模型,对其投入了大量的研究。朱银龙团队^[9]结合超弹性理论阐述了在 Yeoh 形式下构建 EAP 驱动器的非线性机电耦合本构模型的原理,该模型可解释延伸率、电压以及应力与智能驱动材料形变之间的关系。刘立武团队^[10]结合热力学的理论建立了介电弹性体的本构模型,并阐述了在介电弹性体中,介电常数与拉伸率之间的非线性关系,该团队还对 DE 的机电稳定性做了深入

的研究。Kumar 等^[11]在对 EAP 材料进行三种不同模式的拉伸实验中,提出了一种通用的逆幂律关系,以推广和标准化介电常数拉伸依赖性的表征及对数——对数曲线拟合,使 EAP 材料本构模型的建立更加精确。

本构模型的建立不仅解释了柔性智能材料的变形原理,还解释了柔性智能材料的迟滞特性和蠕变特性,更为后续的系统控制器的设计奠定了基础。

2.2 迟滞模型

迟滞是指材料具有记忆性,当输入作用于系统时,它的输出表现为一定的滞后。研究人员为预测系统输出或补偿迟滞非线性,对迟滞进行了理论建模,其模型的建立方法大致分为三类:物理法、唯象法和其他方法。常见的迟滞模型的建立方法如图 3 所示。

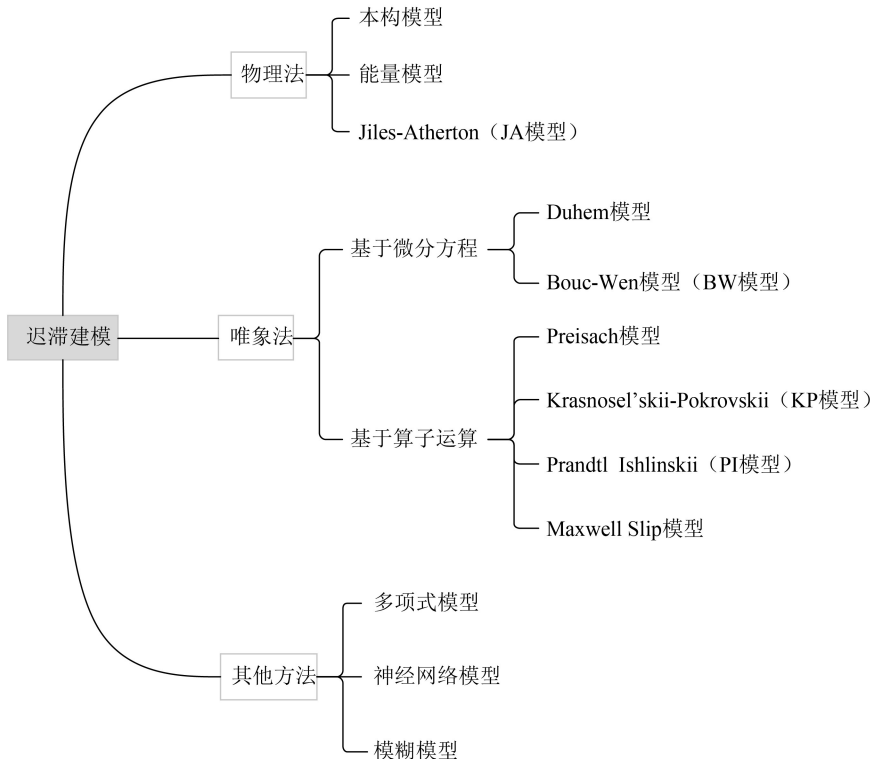


图 3 迟滞模型的建立方法

Figure 3 Establishment method of hysteresis model

文中只对目前应用和研究较为广泛的几种关于柔性智能材料驱动器迟滞建模方法进行综述:

(1) Jiles-Atherton(JA)模型

JA 模型是由 Jiles 和 Atherton 提出的一种基于一阶微分方程的静态物理模型,优点是计算量小、算法稳定、参数的物理意义明确等,主要用于磁致伸缩驱动器的建模^[12]。Ragunathan 等^[13]

把与温度相关的迟滞性参数代入到 JA 模型中,从而提出了一种基于 JA 模型与温度相关的迟滞非线性模型。Jiles 等^[14]在研究磁化强度和磁致伸缩的耦合效应时,为了对其建立精确的模型,对 JA 模型进行了改进,使改进后的 JA 模型不仅可以描述耦合效应而且使用范围更加广泛。

(2) Duhem 模型

Duhem 模型是由 P. Duhem 提出的,该模型的优点是函数表达式明确,逆模型容易建立,缺点是模型参数很难获得^[15]。Coleman 和 Hodgdon 等^[16]为了使 Duhem 模型可以描述压电陶瓷的迟滞行为,对 Duhem 模型进行了改进,其表达式如式(1)所示。

$$\frac{dw}{dt} = \alpha \left| \frac{dv}{dt} \right| [f(v) - w] + \frac{dv}{dt} g(v) f(x) \quad (1)$$

其中, α 为常数, v 为输入, w 为输出, $f(v)$ 和 $g(v)$ 是给定的连续函数。

(3) Bouc-Wen(BW)模型

BW 模型是 Bouc 提出的一种迟滞的半物理建模方法,由 Wen 对其进行改进,形成了由一阶非线性微分方程表述的迟滞模型,此模型的优点是通过少量的参数就可描述多种迟滞材料^[17]。广义的 BW 模型的表达式如式(2)所示。

$$\frac{dz}{dt} = A \frac{dv}{dt} - \beta \frac{dv}{dt} |z|^n - \alpha \left| \frac{dv}{dt} \right| |z|^{n-1} z \quad (2)$$

其中, v 为迟滞系统的输入, z 为迟滞系统的状态变量, A, α, β 为描述迟滞环的形状参数。

Wang 等^[18]提出了 Hammerstein-BW 混合模型,使用 Hammerstein 模型描述率相关的特性,通过 PSO 算法辨识出其动态模型,使用 BW 模型描述迟滞特性,通过 RLS 算法描述其静态模型。

(4) Preisach 模型

Preisach 模型是 Preisach 建立的一种经典的迟滞算子模型,由简单的迟滞算子环相互叠加而成,对系统的迟滞非线性特性进行拟合^[19]。其数

学表达式如式(3)所示。

$$y(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \gamma_{\alpha\beta} [u(t)] P(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (3)$$

式(3)中: $u(t)$ 为模型的输入, $y(t)$ 为模型的输出, $\gamma_{\alpha\beta} [u(t)]$ 为矩形算子, $P(\alpha, \beta)$ 为权函数, α, β 为描述矩形算子形状的参数。

Mayergoyz 等^[20]在 Preisach 模型的基础上建立了 EAP 材料迟滞模型,此模型的缺点是迟滞算子需要双重积分,模型参数很难在线调整,导致模型误差较大。念龙生等^[21]对模型进行了改进,把擦除性数值实现方法引入 Preisach 模型之中,使模型在施加复杂电压的情况下具有较高的精度。

(5) Krasnosel' skii-Pokrovskii(KP)模型

KP 模型是由 Preisach 模型改进而来的,是由两个有界的分段连续的 Lipschitz 函数构成,使 Preisach 模型在实际迟滞非线性系统中得到了应用^[22]。Banks 等^[23]将 Relay 算子进行修正和改进,通过叠加方法来取代积分,并提出一种新的算子即 KP 算子。KP 模型输出由若干个 KP 算子叠加而成,其表达式如(4)所示。

$$x(t) = \int_s [k_p(v, \xi_s)](t) d\mu(s) \quad (4)$$

式(4)中: $k_p(v, \xi_s)$ 为 KP 算子, $x(t)$ 为模型输出, s 为积分域数学,表达式如式(5)所示。

$$[k_p(v, \xi_s)](t) = \begin{cases} \min(\xi_s, r(v - s_1)) \dot{v}(t) < 0 \\ \max(\xi_s, r(v - s_2)) \dot{v}(t) > 0 \\ k_{p0} \dot{v}(t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: $\dot{v}(t)$ 为系统输入。

综上所述,对各模型优缺点整理如表 1 所示。

表 1 各模型优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of each model

迟滞模型	优点	缺点
Duhem 模型	结构简单、计算量小	无解析模型、无法获得逆模型、参数辨识困难、模型精度依赖权重函数
BW 模型	参数少、控制器简单	模型拟合精度低
Preisach 模型	可描述大多数率无关迟滞	参数多、存在双重积分、计算复杂、难以在工程中的应用
KP 模型	拟合精度高	参数多、计算庞大

2.3 动态迟滞模型

基于算子的唯象法建模大都是静态建模,没有考虑外部因素的影响,而在实际应用中,需要考虑频率、应力和温度等外部因素,因此需要对模型建立相应的动态迟滞模型。

张伟等^[24]在对超迟滞伸缩驱动器的迟滞特性

进行研究时,基于模糊树提出了频率相关 Hammerstein-like 模型,该模型可同时描述不同频率输入信号的迟滞特性,精度极高。Ma 等^[25]在研究超磁致智能材料的动态特性时,基于模糊树方法对应力相关的密度函数进行改进,使得所建模型在表示应力相关的迟滞模型时精度极高。

Sutor 等^[26] 基于 Preisach 模型, 对其权重函数进行改写, 使其与温度函数成线性关系, 使得所建模型可表征与温度相关的迟滞模型时精度极高。

目前对 EAP 材料动态迟滞特性的研究, 只针对单方面影响因素的研究居多, 而在实际的工程应用中需要考虑多方面因素的影响, 以后研究的主要方向应是多影响因素下的动态迟滞特性建模。

2.4 蠕变模型

在智能驱动材料的研究中, 研究人员对 EAP 材料蠕变特性研究较少, 大多集中在对压电陶瓷蠕变特性的研究。Zou 等^[27] 在对 DE 柔性驱动器的蠕变特性进行研究时, 通过设计蠕变补偿器的方法, 减少蠕变特性对系统控制精度的影响。Zhang 等^[28] 基于 KVM 模型建立了 DE 驱动器的蠕变模型, 减少了 DE 粘弹性对系统控制精度的影响。

虽然蠕变特性对智能驱动材料控制精度的影响较小, 但是在一些要求高精度控制的场合中, 就会限制智能驱动材料驱动器的应用。在未来的研究中, 应该对蠕变特性进行深入的研究建立相关的蠕变模型, 并将其与迟滞模型相结合, 以提高整个系统的控制精度和定位精度。

3 电活性聚合物柔性智能驱动材料驱动器的控制

目前, 研究人员将已有的控制方法与迟滞非线性模型进行结合, 使得 EAP 柔性驱动器能在跟踪和定位控制系统中得到高效应用^[29]。根据控制方法和原理, 可将 EAP 柔性驱动器的控制方法分类如图 4 所示。

3.1 基于迟滞逆补偿的控制方法

迟滞逆补偿控制就是把求解出的迟滞逆模型串联到迟滞系统中, 以达到减小或消除迟滞特性对系统影响的效果。

Aijanaideh 等^[30] 在对智能驱动材料的迟滞特性进行研究时, 基于 PI 迟滞模型提出了一种开环控制的方法, 把频率对系统的影响考虑到所建模型之中, 使得迟滞特性问题得到了有效的解决。Zou 等^[27] 在对 DE 驱动器建模研究时, 基于 EAP 材料的蠕变模型, 提出了一种开环控制的方法, 有效地提高 DE 驱动器的控制精度。郑金文等^[31] 基于自适应滑模控制的思想, 设计了两种自适应滑

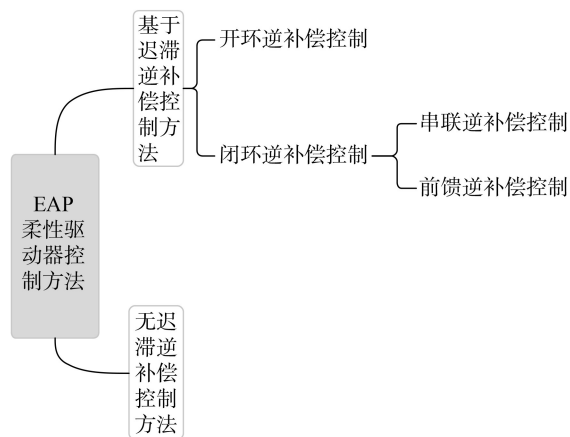


图 4 EAP 柔性驱动器的控制方法

Figure 4 Control method of EAP flexible actuator

模控制器, 一种在输入端加入了积分器, 可有效地抑制抖振, 另一种采用在线迟滞补偿, 优点是可以不用迟滞建模, 并且两种控制器都具有很强的鲁棒性。Zhang 等^[32] 在研究 PI 迟滞模型与频率相关的特性时, 通过前馈逆补偿 PID 反馈控制器对驱动器进行跟踪控制, 使迟滞系统具有理想的跟踪控制和强鲁棒性能。Qiu 等^[33] 通过把滑模控制方法引入到 PI 模型描述的 EAP 柔性驱动器中, 不仅可以得到迟滞逆补偿, 还可以对系统进行精确跟踪, 确保系统的稳定性。

综上所述, 复杂的迟滞系统很难解析出其逆模型, 这就限制了 EAP 柔性驱动器在实际工程中的应用。在未来的研究中, 在压力、频率、温度等因素共同作用下, 如何建立结构简单、计算量小及实时在线调整和控制的动态迟滞逆模型就显得尤为重要了。

3.2 无迟滞逆补偿的控制方法

无迟滞逆补偿控制方法不需要解析出其迟滞模型, 直接通过控制器对迟滞系统进行控制。

Zou 等^[34] 将系统中 Preisach 迟滞算子模型转化为线性时变不确定系统, 通过自适应控制实现对不确定迟滞系统的实时跟踪控制。Liu 等^[35] 基于 Backlash-like 迟滞模型, 把构造的神经网络权值和动态表面控制引入到迟滞系统的控制方法中, 提高了迟滞系统的跟踪精度。Jiang 等^[36] 基于神经网络和广义预测的方法对 EAP 驱动器的控制进行了研究, 通过此方法使得模型的计算量大大减小, 所建的模型更加精确, 控制精度也大幅提高。

目前, 对 EAP 柔性驱动器无迟滞逆补偿控制方法的报道较少, 一些研究人员通过观测器来处

理迟滞模型,但这种方法很难对非线性系统的稳定性进行分析。通过引入神经网络进行智能控制是未来研究的主要内容。

4 电活性聚合物柔性智能驱动材料的应用

近年来,研究人员对 EAP 材料和 EAP 柔性驱动器进行了深入的研究,使其在仿生机器人等领域得到了广泛的应用。

4.1 在仿生机器人领域的应用

目前,研究人员设计出了多种形式的 EAP 驱动器,主要包括:圆柱形、锥形、堆叠形、菱形、多段形、球形等。美国斯坦福大学的 Pei 等^[37]研制了圆柱形驱动器,并设计制作了一种六足爬行仿生机器人,该机器人在 5.5 kV 驱动电压下,运动速度可以达到 13.6 cm/s,可实现向前和向后的行走运动,展示了 EAP 驱动器作为多功能仿生关节的发展潜力。南京航空航天大学的汪洋^[38]基于圆柱形 EAP 驱动器设计制作了双驱动单元的仿生爬行机器人,该机器人在混凝土地面上速度可达 2.69 mm/s,在草地上速度可达 2.33 mm/s。Li 等^[39]基于 DE 薄膜和柔性橡胶,研制了一种仿生机器鱼,该仿生机器鱼在 9.5 kV 和 5 Hz 的条件下可达到最佳游动速度,速度为 64 mm/s,该机器鱼在实现快速运动的同时,其续航能力也得到了大幅提升。瑞士的 JS 团队基于 DE 研制了一款微型机器鱼,该机器鱼在驱动电压为 5 kV,驱动频率为 0.75 Hz 的条件下可达到最佳游动速度,流速为 37.2 mm/s,该机器鱼具有结构小、机动性好、效率高等优点,可实现在三位空间种的游动控制^[40]。北京化工大学 Luo 等^[41]基于 DE 材料,制作了堆叠形驱动器,在此基础上设计了一种跳跃机器人,在电压为 7 kV 时输出力为 30 N,位移为 13.9 mm,最大应变为 18.57%,跳跃高度可达到 45 mm。该跳跃机器人的缺点是需要储能循环加载 60 s 后才能实现跳跃动作。哈尔滨工业大学的

李金嵘^[42]研制了三爪式柔性抓取装置以及仿尺蠖式爬行机器人,当外加电压为 5 kV 时,抓取装置的拉出力为 228.3 mN,当外加正弦信号幅值为 0~6 kV、频率为 20 Hz 时,其爬行机器人的速度可以达到 26.3 mm/s,该柔性抓取装置实现了特征动作的驱动,为基于 EAP 驱动仿生机械手方面的研究奠定了基础。

4.2 在其他领域的应用

在航空航天领域,美国国家航天局通过 IPMC 驱动器设计了一款空间除尘器,此除尘器可对空间站的摄像头、屏幕及视窗等进行清理工作。Li 等^[43]设计了一种流体驱动的“人工肌肉”结构,此结构为低成本制造空间探索的驱动器结构打开了大门。瑞士宇航研发中心研发了用于清理空间碎片的抓取装置,该装置是由 DE 制作的多段柔性机构,其质量仅为 0.65 g,最大弯曲角度大于 60°^[44]。目前,EAP 材料的研究和应用还处于初级阶段,但其独特的性能,使得 EAP 材料在航空航天领域的应用前景非常广阔。在能源领域,振动耗散是能量浪费的主要方式,该领域的研究者利用 EAP 材料的特性,对其进行了一系列的研究。鄂世举等^[45]发明了一种利用潮汐能的 DE 发电机结构,该结构可将潮汐能转化为电能收集起来。任贯华等^[46]设计了一种基于介电弹性体阵列的风力能量转化装置,在 DE 材料应变变量达 230%,充电电压为 925 V 时,单个周期内的发电量可达到 17.06 mJ,该装置为 DE 阵列大规模发电的应用提供了参考。在医疗器械领域,Kovacs 等^[47]基于 DE 材料,设计制作了一种手指康复治疗仪,该治疗仪可输出 8.5 N 的力,伸缩区间范围为 0~6 mm。除此之外,Lee 等^[48]研制了可以检测微小压力变化的柔性传感器。Huang 等^[49]设计了测量腕关节运动的可穿戴式柔性传感器。该类材料在智能手机的振动器和触摸传感设备、可变焦距镜头、扬声器等领域也得到了广泛的研究和应用^[50]。表 2 对 EAP 驱动器及应用进行了总结。

表 2 EAP 驱动器的结构及应用对比

Table 2 Structure and application comparison of EAP drive

驱动类型	结构特性	应用场合
圆柱形驱动器	DE 膜卷绕形成	地面移动机器人、柔性仿生机器人等
多段形驱动器	平面分段式结构	收集太空垃圾等
堆叠形驱动器	DE 堆叠而成	弹跳机器人、驱动康复设备等
锥形驱动器	将锥形面制作为驱动器	医学、能量转换器等
球形驱动器	通过充气的方法使 DE 形成球形或半球形	天线、扬声器等

5 存在问题和展望

EAP 智能材料具有质量轻、柔顺性好、能量密度大及独特的机电性能等优点,在仿生机器人等领域具有广阔的应用前景。但此类智能材料所输出的力矩较小,并伴有迟滞特性和蠕变特性,使得大部分的研究成果只是停留在实验室,而不能在实际的工程中得到应用。因此,未来的研究方向主要为:EAP 材料性能和驱动器结构设计、EAP 材料建模、EAP 驱动器控制以及驱动器应用等方面。

材料性能方面,电子型 EAP 在电场下的形变量取决于 EAP 的能量转换效率,研究人员应该在提高电子型 EAP 能量转换效率上进行更为深入的研究;离子型 EAP 在电场下的形变量及性能取决于离子交换膜的成分和电镀工艺,研究人员应该对离子交换薄膜的组成成分、电极的电镀工艺等进行改善,设计出离子传输的有效路径。驱动器结构设计方面,对驱动器结构进行优化,使其输出力矩增大,同时能够具有多功能性和稳定性,使得驱动器在各种工作环境中都可达到预期效果。

在 EAP 材料建模方面,目前的研究停留在实验室阶段,无法避免外界因素(频率、温度、应力等)对模型的影响,使得模型在实际的工程中无法直接应用。因此在建立系统模型的过程中,要把外界各种因素考虑在内,在此基础上建立精确的迟滞模型和逆模型。

在 EAP 驱动器控制方面,迟滞逆补偿控制中,控制精度取决于迟滞逆模型建立的准确性,研究人员应对复杂的迟滞系统进行深入研究,建立其精确及结构简单、计算量小及实时在线调整和控制动态迟滞逆模型。在无迟滞逆补偿的控制方法中,此方法无需迟滞模型,研究人员要把计算机智能控制系统方法论引入到 EAP 驱动器控制中来,以此来实现对系统有效而精准的控制。

在仿生机器人方面,单个驱动器输出的力较小,为达到输出效果,往往需要将多个驱动器进行串联或者并联,这会使建模和控制的难度加大,从而造成理论模型不准确,限制了 EAP 柔性驱动器的应用。在今后的研究中,不仅要对现有的结构设计进行改进和优化,还要广泛地研究生物特性来提高驱动器的效率和仿生机器人的环境适应性,将柔性传感器与柔性仿生机器人相结合,在实时监测仿生机器人运动状态的同时,进一步提高

控制精度。

参考文献:

- [1] Rahman, M. H.; Werth, H.; Goldman, A.; Hida, Y.; Diesner, C.; Lane, L.; Menezes, P. L. Recent progress on electroactive polymers; synthesis, properties and applications. *Ceramics*, **2021**, 4(3), 516-541.
- [2] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 张自强. 仿生机器人研究现状与发展趋势. *机械工程学报*, **2015**, 51(13), 27-44.
- [3] 伍伟敏, 刘怀民. 电活性聚合物致动器机电响应特性研究. *自动化仪表*, **2018**, 39(12), 22-25.
- [4] 彭冬雪, 刘茜. 电活性聚合物材料的研究进展. *现代化工*, **2019**, 39(2), 22-26.
- [5] 吴枫, 韩亚丽, 李沈炎, 糜章章, 周伟杰. 柔性仿生驱动器研究综述. *现代制造工程*, **2020**, (7), 146-156.
- [6] 卢婷婷, 刘茜, 辛三法. 介电弹性体的研究进展. *高分子通报*, **2018**, (10), 10-18.
- [7] 王亚午, 叶雯珺, 张一龙, 赖旭芝, 吴敏, 苏春翌. 基于介电弹性体驱动器的软体机器人建模与跟踪控制. *控制理论与应用*, **2020**, 37(4), 871-880.
- [8] Liu, L. P.; Huang, Y. F.; Zhang, Y. H.; Allahyarov, E.; Zhang, Z. B.; Lv, F. Z.; Zhu, L. Understanding reversible Maxwellian electroactuation in a 3M VHB dielectric elastomer with prestrain. *Polymer*, **2018**, 144, 150-158.
- [9] 黄青云, 王化明, 朱银龙, 杨位东. 弯曲型介电型电活性聚合物驱动器的建模研究. *压电与声光*, **2016**, 38(1), 19-23.
- [10] 刘立武, 李金嵘, 吕雄飞, 李丰丰, 刘彦菊, 冷劲松. 电活性介电弹性体的本构理论和稳定性研究进展. *中国科学: 技术科学*, **2015**, 45(5), 450-463.
- [11] Kumar, A.; Patra, K. Proposal of a generic constitutive model for deformation-dependent dielectric constant of dielectric elastomers. *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, **2021**, 24(6), 1347-1360.
- [12] Jiles, D. C.; Atherton, D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis (invited). *J. Appl. Phys.*, **1984**, 55(6), 2115-2120.
- [13] Raghunathan, A.; Melikhov, Y.; Snyder, J. E.; Jiles, D. C. Modeling the temperature dependence of hysteresis based on Jiles-Atherton theory. *IEEE Trans. Magn.*, **2009**, 45(10), 3954-3957.
- [14] Jiles, D. C.; Atherton, D. L. Theory of ferromagnetic hysteresis (invited). *J. Appl. Phys.*, **1986**, 61(1-2), 48-60.

- [15] Oh, J. ; Bernstein, D. S. Semilinear Duhem model for rate-independent and rate-dependent hysteresis. *IEEE Trans. Autom. Control*, **2005**, 50(5), 631-645.
- [16] Coleman, B. D. ; Hodgdon, M. L. On a class of constitutive relations for ferromagnetic hysteresis. *Arch. Rational Mech. Anal.*, **1987**, 99(4), 375-396.
- [17] Wen, Y. K. Method for random vibration of hysteretic systems. *J. Engrg. Mech. Div.*, **1976**, 102(2), 249-263.
- [18] Wang, Z. Y. ; Zhang, Z. ; Mao, J. Q. ; Zhou, K. M. A Hammerstein-based model for rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuator. 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, China, **2012**, 1391-1396.
- [19] Preisach, F. Über die magnetische nachwirkung. *Z. Physik*, **1935**, 94(5), 277-302.
- [20] Mayergoyz, I. Mathematical models of hysteresis. *IEEE Trans. Magn.*, **1986**, 22(5), 603-608.
- [21] 念龙生, 隆志力, 王哲琳, 张璐凡, 方记文. 一种改进 Preisach 模型数值实现方法. *压电与声光*, **2014**, 36(2), 255-259.
- [22] Hu, H. ; Ben Mrad, R. On the classical Preisach model for hysteresis in piezoceramic actuators. *Mechatronics*, **2003**, 13(2), 85-94.
- [23] Banks, H. T. ; Kurdila, A. J. ; Webb, G. Identification of hysteretic control influence operators representing smart actuators part I: formulation. *Math. Probl. Eng.*, **1997**, 3(4), 287-328.
- [24] 张伟, 柳萍, 刘青松, 张臻, 毛剑琴, 周克敏. 基于模糊树的 Hammerstein-like 模型对超磁致伸缩作动器的建模与控制. *振动与冲击*, **2013**, 32(15), 184-189.
- [25] Ma, Y. H. ; Mao, J. Q. On modeling and tracking control for a smart structure with stress-dependent hysteresis nonlinearity. *Acta Autom. Sin.*, **2010**, 36(11), 1611-1619.
- [26] Sutor, A. ; Rupitsch, S. J. ; Bi, S. S. ; Lerch, R. A modified Preisach hysteresis operator for the modeling of temperature dependent magnetic material behavior. *J. Appl. Phys.*, **2011**, 109(7), 07D338.
- [27] Zou, J. ; Gu, G. Y. ; Zhu, L. M. Open-loop control of creep and vibration in dielectric elastomer actuators with phenomenological models. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, **2017**, 22(1), 51-58.
- [28] Zhang, J. S. ; Ru, J. ; Chen, H. L. ; Li, D. C. ; Lu, J. Viscoelastic creep and relaxation of dielectric elastomers characterized by a Kelvin-Voigt-Maxwell model. *Appl. Phys. Lett.*, **2017**, 110(4), 044104.
- [29] Rizzello, G. ; Naso, D. ; York, A. ; Seelecke, S. Modeling, identification, and control of a dielectric electro-active polymer positioning system. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, **2015**, 23(2), 632-643.
- [30] Aljanaideh, O. ; Janaideh, M. A. ; Rakheja, S. ; Su, C. Y. Compensation of rate-dependent hysteresis nonlinearities in a magnetostrictive actuator using an inverse Prandtl-Ishlinskii model. *Smart Mater. Struct.*, **2013**, 22(2), 025027.
- [31] 郑金文. DEAP 柔性仿生驱动器的建模与控制研究. 北京: 北京理工大学, **2016**.
- [32] Zhang, X. L. ; Tan, Y. H. ; Su, M. Y. ; Xie, Y. Q. Neural networks based identification and compensation of rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators. *Phys. B Condens. Matter*, **2010**, 405(12), 2687-2693.
- [33] Qiu, D. H. Adaptive RBF neural network sliding mode control for a DEAP linear actuator. *Int. J. Perform. Eng.*, **2017**, 13(4), 400-408.
- [34] Zou, X. T. ; Luo, J. ; Cao, C. Y. Adaptive control for uncertain hysteretic systems. *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, **2014**, 136(1), 011011.
- [35] Liu, L. ; Wang, Z. S. ; Shen, Z. W. Neural-network-based adaptive dynamic surface control for MIMO systems with unknown hysteresis. 2014 IEEE Symposium on Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning (ADPRL), Orlando, FL, USA, **2015**, 1-6.
- [36] Network, N. ; Jiang, Z. G. ; Wang, Q. L. ; Li, Y. Generalized predictive control of DEAP actuator based on RBF. 2017 11th Asian Control Conference (ASCC), Gold Coast, QLD, Australia, **2018**, 1632-1637.
- [37] Pei, Q. B. ; Rosenthal, M. ; Stanford, S. ; Prahlad, H. ; Pelrine, R. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators. *Smart Mater. Struct.*, **2004**, 13(5), N86-N92.
- [38] 汪洋. 基于介电型 EAP 的地面移动机器人研究. 南京: 南京航空航天大学, **2017**.
- [39] Li, T. F. ; Li, G. R. ; Liang, Y. M. ; Cheng, T. Y. ; Dai, J. ; Yang, X. X. ; Liu, B. Y. ; Zeng, Z. D. ; Huang, Z. L. ; Luo, Y. W. ; Xie, T. ; Yang, W. Fast-moving soft electronic fish. *Sci. Adv.*,

- 2017**, 3(4), e1602045.
- [40] Shintake, J.; Cacucciolo, V.; Shea, H.; Floreano, D. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators. *Soft Robot.*, **2018**, 5(4), 466-474.
- [41] Luo, B.; Li, B. Y.; Yu, Y.; Yu, M.; Ma, J. Q.; Yang, W. M.; Wang, P. F.; Jiao, Z. W. A jumping robot driven by a dielectric elastomer actuator. *Appl. Sci.*, **2020**, 10(7), 2241.
- [42] 李金嵘. 介电弹性体驱动器在软体机器人领域的应用与设计研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, **2020**.
- [43] Li, J. Z.; Ma, W. J.; Song, L.; Niu, Z. Q.; Cai, L.; Zeng, Q. S.; Zhang, X. X.; Dong, H. B.; Zhao, D.; Zhou, W. Y.; Xie, S. S. Superfast-response and ultrahigh-power-density electromechanical actuators based on hierarchical carbon nanotube electrodes and chitosan. *Nano Lett.*, **2011**, 11(11), 4636-4641.
- [44] Araromi, O. A.; Gavrilovich, I.; Shintake, J.; Rosset, S.; Richard, M.; Gass, V.; Shea, H. R. Rollable multisegment dielectric elastomer minimum energy structures for a deployable microsatellite gripper. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, **2015**, 20(1), 438-446.
- [45] 鄂世举, 李佳玲, 曹建波, 陈亦开, 潘欣, 竺振才, 兰猛, 陆刚强, 包昆伟. 基于介电弹性体的海洋能发电装置的研究进展. *压电与声光*, **2019**, 41(5), 733-739.
- [46] 任贯华, 陈洁, 崔春华, 赵丰刚, 李宝权. 一种基于介电弹性体阵列的能量转换装置. *压电与声光*, **2020**, 42(2), 248-251.
- [47] Kovacs, G.; Düring, L.; Michel, S.; Terrasi, G. Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission. *Sens. Actuat. A Phys.*, **2009**, 155(2), 299-307.
- [48] Lee, B. Y.; Kim, J.; Kim, H.; Kim, C.; Lee, S. D. Low-cost flexible pressure sensor based on dielectric elastomer film with micro-pores. *Sens. Actuat. A Phys.*, **2016**, 240, 103-109.
- [49] Huang, B.; Li, M. Y.; Mei, T.; McCoul, D.; Qin, S. H.; Zhao, Z. F.; Zhao, J. W. Wearable stretch sensors for motion measurement of the wrist joint based on dielectric elastomers. *Sensors (Basel)*, **2017**, 17(12), 2708.
- [50] Wiranata, A.; Maeda, S. A deformable linear dielectric elastomer actuator. *Key Eng. Mater.*, **2021**, 884, 430-436.