

控制与决策

Control and Decision

介电弹性体驱动系统建模及控制方法综述

李智, 陈国强, 徐泓智, 陈新开, 陕晋军, 张秀宇

引用本文:

李智, 陈国强, 徐泓智, 陈新开, 陕晋军, 张秀宇. 介电弹性体驱动系统建模及控制方法综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2283–2300.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0388>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述](#)

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems
控制与决策. 2021, 36(2): 283–294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

[基于能量分析的桥式起重机防摆控制方法](#)

Anti-swing control method of bridge crane based on energy analysis
控制与决策. 2021, 36(12): 3091–3096 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0694>

[基于数据驱动的非线性网络系统自适应迭代学习控制](#)

Data driven adaptive learning control of nonlinear network system
控制与决策. 2021, 36(6): 1523–1528 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1182>

[基于影响度介数中心性的多智能体牵制控制算法](#)

Multi-agent pinning control algorithm based on betweenness centrality with influence degree
控制与决策. 2021, 36(6): 1442–1448 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1106>

[基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定](#)

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization
控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

介电弹性体驱动系统建模及控制方法综述

李智¹, 陈国强¹, 徐泓智¹, 陈新开², 陕晋军³, 张秀宇^{4†}

(1. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 2. 芝浦工业大学 电子与信息系, 埼玉县 3378570; 3. 约克大学 地球及空间科学技术系, 多伦多 Y010; 4. 东北电力大学 自动化工程学院, 吉林省吉林市 132012)

摘要: 介电弹性体驱动系统是一种基于介电材料的形变特性来驱动机械系统的新型柔性驱动装置, 利用介电弹性体驱动与控制机器人成为当前软体机器人领域的研究热点. 鉴于此, 围绕介电弹性体驱动系统的核心关键问题, 即驱动系统的建模与控制方法进行回顾与展望. 首先, 阐述介电弹性体驱动系统的结构与驱动过程, 对介电弹性体驱动原理进行详细介绍; 然后, 针对介电弹性体驱动系统所展现出的复杂非线性特性, 从建模与控制两个方面展开综述, 详细分析不同建模方法与控制策略的优势与局限性; 最后, 探讨介电弹性体建模和控制中存在的问题及未来的研究方向.

关键词: 介电弹性体驱动系统; 力电耦合模型; 回滞非线性建模; 开环逆补偿控制; 闭环反馈控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0388

引用格式: 李智, 陈国强, 徐泓智, 等. 介电弹性体驱动系统建模及控制方法综述[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2283-2300.

A review of modeling and control methods for dielectric elastomer actuator systems

LI Zhi¹, CHEN Guo-qiang¹, XU Hong-zhi¹, CHEN Xin-kai², SHAN Jin-jun³, ZHANG Xiu-yu^{4†}

(1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Department of Electronic and Information Systems, Shibaura Institute of Technology, Saitama 3378570, Japan; 3. Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Toronto Y010, Canada; 4. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: A dielectric elastomer actuated system is a novel flexible actuator based on the deformation property of dielectric material to actuate mechanical systems, and the use of a dielectric elastomer to actuate and control robots has become a current research hotspot in the field of soft robotics. Therefore, the core key issues of a dielectric elastomer drive system, namely, the modeling and control methods of the dielectric elastomer actuated system, are reviewed and presented in a comprehensive manner. Firstly, the structure and the actuating process of dielectric elastomer actuated systems are described, and the actuation principle of dielectric elastomer drive is explained in detail. Then, the complex nonlinear characteristics of dielectric elastomer actuated systems are reviewed in the aspects of modeling and control, with detailed analysis of the advantages and limitations of different modeling methods and control strategies. Finally, the issues in modeling and control of dielectric elastomers and future research progress are discussed.

Keywords: dielectric elastomer actuated system; force-electricity coupling model; hysteresis nonlinearity modeling; open-loop inverse compensation control; closed-loop feedback control

0 引言

介电弹性体(dielectric elastomer, DE)是一种电活性聚合物,能够将电能转换为机械能,从而实现驱动功能^[1]. 介电弹性体驱动系统的驱动机理最早由 Wilhelmm 于19世纪发现^[2],并于1880年首次对介电弹性体的驱动原理进行了实验^[3]:当输入驱动电压增

大时,介电弹性体薄膜会呈现表面积增大、厚度减小的现象. 介电弹性体具有高能量密度、大应变、轻质量和低成本等诸多优点^[4],为柔性驱动系统的设计与控制提供了全新的解决方案. 在实际应用中,介电弹性体展现了巨大的潜力^[5-6],例如,麻省理工学院利用具备自愈能力的介电弹性体驱动单元成功设计了

收稿日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-06-21.

责任编辑: 杨涛.

†通讯作者. E-mail: zhangxiuyu@neepu.edu.cn.

一种抗损伤飞行的微型柔性扑翼机器人^[7]. 清华大学也研制了一种基于介电弹性体驱动的柔性仿生管道机器人^[8], 该机器人能够在亚厘米级的管道内进行爬行操作. 这些创新性的应用展示了介电弹性体在机器人技术领域的潜在价值. 然而, 由于介电弹性体驱动系统具有驱动原理复杂、不同介电材料性能差异性大、系统输入输出关系非线性强等特点, 使得基于介电弹性体驱动系统的建模和控制仍然是研究的难点^[9-10]. 因此, 如何建立精确描述介电弹性体驱动系统的模型, 以及如何设计控制策略实现介电弹性体驱动系统的高精度控制是亟待解决的科学问题.

介电弹性体驱动过程是一个多物理场耦合的能量转化过程, 同时受到材料介电常数、弹性模量以及黏弹性等自身属性以及材料所处频率、温度、预拉伸倍数等外界因素影响, 导致介电弹性体驱动系统的非线性特性非常复杂^[11]. 因此, 介电弹性体驱动系统的建模存在非常多的问题和挑战. 根据不同的建模方式, 针对介电弹性体驱动系统的建模可以分为两类: 机理建模和唯象建模^[12]. 机理建模主要基于第一原理理论, 利用物理原理分析介电弹性体驱动机理和应变规律, 并构建理论分析模型^[13]. 例如, 哈佛大学基于热力学理论提出了针对介电弹性体驱动系统的非线性场理论, 并以自由能形式给出非线性本构方程组, 成为目前介电弹性体驱动器理论研究的基础^[14-15]. 但是, 机理建模的数学表达形式非常复杂, 难以直接应用于控制器设计^[16], 因此, 唯象建模方法得到更多的关注. 唯象建模是一种通过对已知数据和观测结果进行分析和建模的方法, 相比考虑复杂的物理原理, 唯象建模方法仅需输入输出数据和经验关系^[5], 因此在针对介电弹性体驱动系统非线性特性建模方面得到了广泛应用^[17-19]. 例如, Li等^[20]利用基于分数阶的backlash-like唯象模型描述介电弹性体蝶形回滞非线性特性. 但是, 现有描述介电弹性体的唯象模型仅可以描述驱动系统静态非线性输入输出关系, 缺乏机理知识的可解释性和系统动态特性的描述^[12]. 如何结合两种建模方式的优势, 构建结构简单可解释性强的系统动态模型是介电弹性体驱动建模的关键问题.

由于介电弹性体驱动系统表现出的非线性特性会降低控制性能并导致系统振荡, 甚至使系统不稳定^[21], 需要通过控制的方法消除非线性特性给系统带来的影响. 目前, 针对介电弹性体驱动系统的非线性特性的控制方案可以大体分为开环逆补偿方案和闭环控制方案^[9]. 开环逆补偿方法通过构造所建立

非线性模型的逆模型, 或者构造直接逆补偿器来补偿回滞特性. 开环逆补偿控制的优点^[22]是: 1) 结构简单; 2) 节约成本, 可避免使用传感器. 然而, 开环逆补偿控制精度完全取决于回滞模型的精度^[17], 并且逆补偿是开环控制, 在系统存在扰动和参数变化的情况下难以保证控制精度^[19]. 闭环控制方法是另一种常用于消除回滞特性的方法, 根据是否考虑逆补偿控制可分为不考虑逆补偿器和考虑逆补偿器的反馈控制方法^[23]. 不考虑逆补偿器的反馈控制方法即不对回滞特性进行逆补偿, 将非线性特性看作未建模动态或者分解为线性部分加未建模动态进行控制器设计, 其优势在于避免了对回滞模型逆函数的计算^[24]. 然而, 在实际控制应用中, 这些控制方法会导致较大的控制输入幅度, 而这是希望避免的^[25]. 考虑逆补偿器的反馈控制方法对回滞特性进行有效的抵消, 从而实现幅值的有效降低, 同时显著缓解了控制信号的震荡现象^[26]. 然而, 该方法的限制在于逆补偿器的构造问题. 因此, 研究能够与闭环控制相融合的逆补偿框架是亟待解决的控制难题.

本文旨在综述介电弹性体驱动系统建模与控制方法研究的进展和最新成果, 分析驱动系统建模与控制面临的科学问题和挑战, 并对其未来发展趋势和研究方向进行探讨和展望. 首先介绍介电弹性体驱动系统的构造和驱动原理; 然后, 从机理建模和唯象建模两个方面综述介电弹性体非线性特性建模的方法; 接着, 针对介电弹性体驱动系统所展现出的复杂非线性特性, 阐述当前的控制方案并详细分析不同控制策略的优缺点; 最后, 探讨存在的挑战及未来发展方向.

1 介电弹性体驱动系统驱动原理及应用

介电弹性体材料是一类典型的电活性聚合物材料, 在外加电场的作用下, 能够产生较大变形, 从而产生力或运动, 以实现电能和机械能的相关转换^[11], 因其具有柔性、能量密度高、应变大、质量轻、价格低等优点被广泛研究^[6]. 介电弹性体驱动系统为3层结构, 由上下两层柔性电极和介电弹性体基膜组成^[27], 如图1所示.

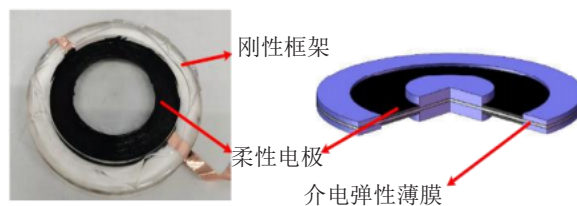


图1 介电弹性体结构

介电弹性体驱动过程是指在电场作用下介电弹性体发生体积变化从而产生机械运动的过程^[6]. 当介

电弹性体驱动系统被施加驱动电压时,介电弹性体驱动系统可以被视为一个柔性可变电容器.由于正负电荷相互吸引,介电弹性体基膜两侧的电极会产生Maxwell应力,从而挤压介电弹性体基膜.由于介电弹性体材料理论上是体积不可压缩的材料,介电弹性体基膜在受到Maxwell应力的作用后会变薄,从而导致介电弹性体驱动系统的面积扩大^[11].当撤去介电弹性体驱动系统中的电压时,介电弹性体驱动系统会由于其弹性性能的作用而快速收缩,重新恢复其原始形状.介电弹性体驱动系统的驱动过程见图2^[28].

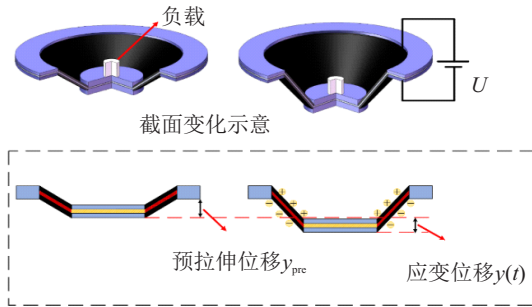


图2 介电弹性体驱动过程

通过设计不同的驱动系统结构或硬质框架结构,结合介电弹性体驱动系统的驱动机理,可以实现介电弹性体的弯曲、往复、扩张等不同运动方式^[9-10],从而实现多种驱动形式和不同的实际应用功能.介电弹性体材料作为基础的驱动单元已经被广泛应用于柔性机器人^[8,29-34]、柔性电动机^[35]、液态镜头^[36]以及微流泵^[37]等多种应用场景,如图3所示.



图3 不同结构的介电弹性体驱动系统及应用

2 介电弹性体驱动器的建模研究

为了满足不同实际场景的应用需求,需要研究介电弹性体驱动系统的变形规律并实现对其高精度

控制,因此必须合理地建立其理论分析模型^[25].然而,介电弹性体材料间性能差异较大,材料本质机理较为复杂^[27],传统的分析法和归纳法难以全面描述材料性能,也不便于理解材料的本质机理.因此,国内外学者大多采用分析与归纳相结合的方法研究介电弹性体驱动系统,即从已有材料模型出发,推导介电弹性体驱动系统的形变理论模型,并通过实验测量与数值分析相结合的方法获取模型参数,从而得到理论模型^[11].另一方面,由于理论模型较难建立,同时需要对介电弹性体驱动系统所表现出的非线性进行描述和补偿,研究人员从唯象建模的角度对介电弹性体驱动器的输入输出特性进行了建模研究^[17-19,38].本节将从机理建模和唯象建模两个角度对介电弹性体驱动系统的建模研究进行详细介绍.

2.1 介电弹性体驱动器机理模型研究

最早用来描述介电弹性体驱动系统力电耦合特性的物理模型由Pelrine等^[39-40]提出,其建立了介电弹性体驱动系统所产生的静电应力与材料介电常数和外加电场的数学方程.随着介电弹性体材料性能的提升,介电弹性体驱动系统的应变程度得到大幅度提升,所建立的物理模型并不能对于介电弹性体驱动系统的大应变非线性特性进行准确的建模以及对系统的黏弹性特性进行合理的解释^[9].

在之后的研究中,研究人员使用基于能量守恒的分析方法对介电弹性体驱动系统进行机理建模分析^[41-44],通过将静电学原理与超弹性大变形原理相结合来描述电致变形特征.这种分析方法对于介电弹性体驱动系统的大应变非线性特性具有良好的建模效果^[9],但是缺乏一个完整的框架进行物理层面的机理阐述.哈佛大学在热力学理论的基础上通过自由能的形式建立了介电弹性材料的热力学框架^[45-47]:当电压信号施加到介电弹性体驱动系统时,根据材料内部的能量平衡原理结合超弹性材料模型构建力电耦合关系模型^[45].在理想状况下即不考虑系统能量耗散过程所建立的力电耦合关系模型称作平衡热力学方程,但实际应用的介电弹性体驱动系统存在明显的黏弹性特性,存在能量耗散过程^[48].为了考虑介电弹性体驱动系统的耗散行为从而实现系统的精确建模,建立了非平衡热力学方程,通常在非平衡热力学方程的基础上使用流变模型来表征介电弹性体驱动系统的黏弹性特性^[9].

本节将分别对热力学框架、应变能函数模型、黏弹性模型以及针对介电弹性体驱动系统的机理建模研究进行详细阐述.

2.1.1 介电弹性体驱动器热力学框架

介电弹性体热力学框架是描述介电弹性体物理行为的理论框架,该框架基于热力学理论和连续介质力学理论^[9],考虑介电弹性体在温度、压力、电场等外界条件下的热力学性质和物理行为,以及介电弹性体在电场下的极化和应变.根据是否考虑介电弹性体驱动系统的能量耗散行为,可以分为基于平衡热力学理论的介电弹性体机理模型以及基于非平衡热力学理论的介电弹性体机理模型^[48].

1) 基于平衡热力学理论的介电弹性体机理模型.

2010年,Suo^[14]提出了介电弹性体驱动系统的经典热力学框架.通过分析介电弹性材料在力电耦合过程中静电能与自由能的转化过程给出了介电弹性体驱动系统的非线性本构方程组.将介电弹性体材料视为一个热力学系统来分析系统内部能量转化关系,为介电弹性体驱动系统的机理建模提供了一个完整框架^[11].以理想条件下平面介电弹性体驱动系统为例,对基于热力学的机理模型进行简要叙述如图4所示.

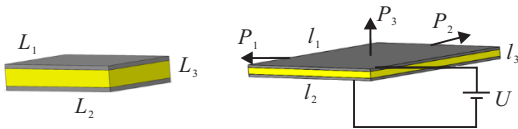


图4 平面介电弹性体驱动系统

在不施加电压的情况下,介电弹性体驱动器的尺寸为 $L_1 \times L_2 \times L_3$,在施加输入电压 U 和3个方向的作用力 P_1 、 P_2 、 P_3 后,介电弹性体驱动器的尺寸变为 $l_1 \times l_2 \times l_3$,假设正负电极上的电荷均为 Q ,介电弹性体驱动器的Helmholtz自由能为 F .介电弹性体驱动器、3个垂直方向的机械力以及电压形成了一个完整的热力学系统,根据能量平衡定理,热力学系统的自由能变化量 ΔF ^[9]可以表示为

$$\Delta F = P_1 \Delta l_1 + P_2 \Delta l_2 + P_3 \Delta l_3 + U \Delta Q. \quad (1)$$

定义Helmholtz自由能密度为

$$W = F / (L_1 L_2 L_3). \quad (2)$$

定义介电弹性薄膜沿3个方向的拉伸率为

$$\begin{cases} \lambda_1 = l_1 / L_1, \\ \lambda_2 = l_2 / L_2, \\ \lambda_3 = l_3 / L_3. \end{cases} \quad (3)$$

用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 代表单位介电弹性材料在3个垂直方向的实际应力,有

$$\begin{cases} \sigma_1 = P_1 / l_2 l_3, \\ \sigma_2 = P_2 / l_1 l_3, \\ \sigma_3 = P_3 / l_1 l_2. \end{cases} \quad (4)$$

用 D 和 E 分别定义介电弹性材料的真实电位移和真实电场,有

$$E = \frac{U}{l_1}, \quad D = \frac{Q}{l_1 l_2}. \quad (5)$$

根据以上定义可得到介电弹性体驱动器自由能密度的变化量为

$$\Delta W = (\sigma_1 + ED) \lambda_2 \lambda_3 \Delta \lambda_1 + (\sigma_2 + DE) \lambda_1 \lambda_3 \Delta \lambda_2 + \sigma_3 \lambda_1 \lambda_2 \Delta \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 E \Delta D. \quad (6)$$

由此,Helmholtz自由能的名义密度可表示为拉伸率和真实电位移的函数,即

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, D). \quad (7)$$

由式(6)和(7)得到介电弹性体驱动系统本构方程为

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\partial W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, D)}{\lambda_2 \lambda_3 \partial \lambda_1} - DE, \\ \sigma_2 = \frac{\partial W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, D)}{\lambda_1 \lambda_3 \partial \lambda_2} - DE, \\ \sigma_3 = \frac{\partial W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, D)}{\lambda_1 \lambda_2 \partial \lambda_3}, \\ E = \frac{\partial W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, D)}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \partial D}. \end{cases} \quad (8)$$

因介电弹性材料在理想条件下可视为具有不可压缩性^[14],拉伸率之间满足 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$,因此 λ_3 由 λ_1 和 λ_2 表示为

$$\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2}. \quad (9)$$

介电弹性材料在电场作用下具有线性的极化关系^[11],可以得到真实电位移与真实电场之间的线性关系为

$$E = \frac{D}{\varepsilon}, \quad (10)$$

其中 ε 为介电弹性体薄膜的介电常数.

介电弹性体驱动系统Helmholtz自由能的名义密度可以表示为应变能 W_s 和静电能的组合形式,即

$$W(\lambda_1, \lambda_2, D) = W_s(\lambda_1, \lambda_2) + \frac{D^2}{2\varepsilon}. \quad (11)$$

根据上述条件,可以得到介电弹性材料在力电耦合下的平衡状态方程组

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = \lambda_1 \frac{\partial W_s(\lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_1} - ED, \\ \sigma_2 - \sigma_3 = \lambda_2 \frac{\partial W_s(\lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_2} - ED. \end{cases} \quad (12)$$

经过上述推导可以得到,介电弹性体驱动系统在热力学框架下系统模型的构建精度取决于应变能函数 $W_s(\lambda_1, \lambda_2)$.

2) 基于非平衡热力学理论的介电弹性体机理模型.

平衡热力学方程的建立是在理想情况下,即介电弹性体驱动系统与外界环境不存在热量交换的过

程^[11],同时仅考虑介电弹性体驱动系统的弹性变形,未考虑介电弹性体材料包括黏弹性特性在内的非线性特性对建模精度的影响^[19].但介电弹性体驱动系统在受到外界力和电压时产生的响应是随时间耗散的过程^[49-51],主要包括黏弹性松弛、介电松弛、导电松弛等非线性效应.在Suo等^[46]工作的基础,Zhao等^[15]建立了非平衡的热力学方程,用以描述介电弹性材料在力电载荷下的能量耗散行为.

根据非平衡热力学原理,式(1)可转换为^[48]

$$\Delta F \leq F_1 \Delta l_1 + F_2 \Delta l_2 + F_3 \Delta l_3 + \phi \Delta Q. \quad (13)$$

在介电弹性体驱动系统的自由能密度表达式中,将应变能 W_s 中引入内部变量 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 来表征介电弹性体驱动系统中与耗散过程相关的自由度,将介电弹性体驱动系统的自由能密度函数(11)转化为

$$W(\lambda_1, \lambda_2, D, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = W_1(\lambda_1, \lambda_2, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) + \frac{D^2}{2\epsilon}. \quad (14)$$

在满足热力学不等式以及限制条件的前提下,通过合理给定自由能函数建立介电弹性体驱动系统的非平衡热力学模型.

通常使用弹簧和阻尼组合而成的流变模型来描绘黏弹性松弛效应,使用电阻和电容模型描述介电松弛效应^[48].其中黏弹性松弛效应对介电弹性体驱动

系统的能量耗散行为影响最为显著,将在第2.1.3节对常用的流变模型进行总结归纳.

2.1.2 介电弹性体驱动系统应变能函数模型

介电弹性体驱动系统应变能函数模型是描述介电弹性体驱动系统的能量函数,也称为势能密度函数或弹性势能函数^[52-53].它是描述介电弹性体力学行为的重要组成部分,能够描述介电弹性体在外界力驱动下的弹性变形行为.研究人员为了更加精确地表征介电弹性材料变形中的应力-应变状态,将超弹性理论中的应变能函数运用于介电弹性材料的机理建模中^[11].

介电弹性材料的超弹性应变能函数模型可以分为基于高斯分布的和基于非高斯分布的函数模型^[11].基于高斯分布的模型包括Neo-Hookean模型^[54]、Ogden模型^[55]、Yeoh模型^[56]、Mooney-Rivlin模型^[57-58]等,这类模型认为介电弹性材料中高分子链之间的端距可以用高斯统计分布的方法得到;而基于非高斯分布的超弹性应变能函数模型则认为材料中高分子链之间的间距用非高斯统计的方法进行研究,例如Arruda-Boyce模型^[59].目前,应用最广的介电弹性材料应变能函数模型为Neo-Hookean模型、Ogden模型以及Gent模型^[60].表1对这3种应变能函数模型的数学表达形式和主要特点进行了详细总结.

表1 应变能函数模型

模型名称	数学表达式	主要特点
Neo-Hookean模型 ^[54]	$W = \frac{1}{2}\mu_0(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)$, 其中 μ_0 是与杨氏模量有关材料常数 ^[9]	1) 考虑了材料的非线性响应,可准确描述应力-应变关系 ^[11] ; 2) 结构简单,仅有一个材料参数; 3) 不能精确描述大应变下介电弹性体驱动系统的应力-应变状态 ^[9]
Ogden模型 ^[55]	$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3)$, 其中: μ_p 和 α_p 为通过材料确定的材料参数, N 为模型的整体阶数	1) 具有较高的参数灵活性,通过调节系数和指数的值,可描述材料的非线性特性; 2) 参数需要依赖实验数据进行拟合,对于介电弹性体材料的内部机理缺乏解释性 ^[9,61-63]
Gent模型 ^[9]	$W = -\frac{1}{2}\mu_0 J_m \ln \left(1 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3}{J_m} \right)$, 其中: μ_0 为材料常数, J_m 为用来描述应变-硬化效应的常数 ^[9]	1) 可以在较大应变范围内精确描述材料非线性响应; 2) 参数具有实际的物理含义,参数基于材料的物理性质进行选择 ^[64-65]

2.1.3 黏弹性模型

介电弹性体驱动系统的黏弹性模型描述了介电弹性体在外界力驱动下的弹性变形和电极化的动态响应,包括介电弹性体的弹性和黏性特性^[48].在理想状态下,介电弹性体驱动系统没有考虑能量耗散^[46],但为了建立介电弹性体材料精确的机理模型,描述系统的黏弹性特性必不可少.

早期的研究中研究人员采用线性黏弹性模型,然而在材料发生较大变形的情况下,该模型的整体精度会受到严重影响^[9].因此,建立用于描述介电弹性体

的黏弹性特性的数学模型对于驱动系统的设计和驱动控制具有重要意义.在黏弹性理论中,聚合物的黏弹性特性可以通过弹簧与阻尼器组合而成的流变模型进行描述^[66],流变模型也被广泛应用于描述介电弹性体驱动系统的黏弹性特性^[67-70].

用于描述黏弹性模型的基本单元包括弹性元件和黏性元件,这两个基本元件可以通过适当的组合方式构建不同的黏弹性力学模型,用于对材料的黏弹特性进行建模和分析^[66].在介电弹性体驱动系统的黏弹性特性建模中,常用流变模型包括:Burger模型^[67]、

广义 Maxwell 模型^[68]、广义 Kelvin 模型^[69] 以及 Bond Graph 模型^[70], 其中广义 Kelvin 模型和广义 Maxwell 模型由于其通用性和灵活性得到了广泛应用, 整体结构如图 5 所示. Huang 等^[16] 利用图 5(a) 所示的广义 Maxwell 模型建立了介电弹性体驱动系统的非线性黏弹性模型, Xiao 等^[71] 利用图 5(b) 所示的广义 Kelvin 模型描述了介电弹性体驱动系统的黏弹性特性.

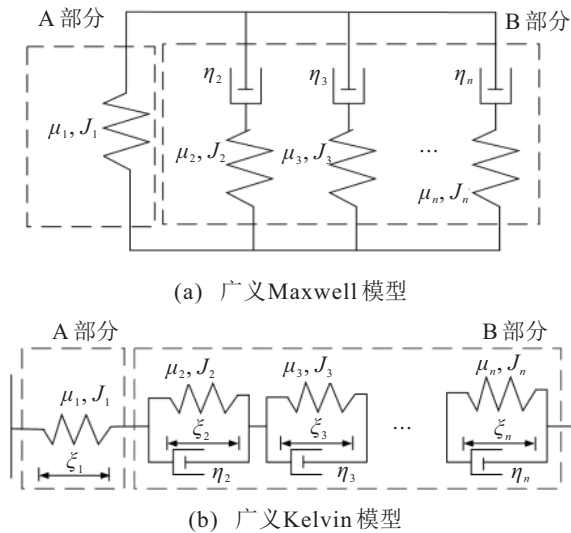


图 5 黏弹性模型

2.1.4 机理模型研究进展

基于以上应变能函数以及形状复杂的各类介电弹性体驱动系统, 研究人员在热力学理论的基础上, 针对球形介电弹性体驱动系统、锥形介电弹性体驱动系统以及平面介电弹性体驱动系统等进行了深入的机理分析^[72-76].

对于球形介电弹性体驱动系统, Chen 等^[72] 于 2015 年对压力和周期电压联合作用的球形介电体驱动系统进行了机理分析, 使用 Gent 模型作为介电弹性体驱动系统的应变能函数模型, 综合能量变化过程中大气压力、内压、电场力以及惯性力所做的功, 推导出高度非线性的球形介电弹性体驱动系统的运动方程. 该方程不仅涉及准静态状态, 还包含动态状态, 并分析了材料失效对球形驱动器驱动能力的影响.

对于锥形介电弹性体驱动系统的研究, Cao 等^[73] 于 2018 年基于热力学框架选用 Ogden 模型作为锥形介电弹性体驱动系统的应变能函数模型, 提出了一个准静态分析模型, 用于分析该系统中不均匀的应变和应力分布. 然而, 针对锥形介电弹性体驱动系统忽略惯性力的影响可能严重影响建模精度, Huang 等^[16] 于 2020 年针对以聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 材料作为介电弹性薄膜的圆锥形介电弹性体驱动系统, 提出了一个基于非平衡热力学原理的动力学模型. 选取 Gent 模型作为介电弹性材料的应变能函数, 使用广

义 Maxwell 模型描述驱动系统的黏弹性特性, 在热力学框架下考虑惯性力的影响, 并开发了一个动态模型, 能够精确预测圆锥形介电弹性体驱动系统运动轨迹.

对于平面介电弹性体驱动系统, Gu 等^[74] 于 2017 年提出了一个通用的建模框架, 用于定量表征介电弹性体驱动系统在循环加载电压下的非线性时变机电响应. 该框架使用广义 Maxwell 模型描述介电弹性体驱动系统的黏弹性特性, 并使用 Gent 模型作为系统的应变能函数模型, 以描述介电弹性体驱动器的应变-硬化效应, 通过实验证明所建立的非线性黏弹性模型可以准确预测不同模式循环电压下的机电响应. Xiao 等^[71] 于 2022 年针对平面的介电弹性体驱动系统提出一个动态模型, 用于准确描述介电弹性体驱动系统的回滞、蠕变以及率相关等非线性特性. 在热力学框架下, 该模型利用广义 Kelvin 模型描述介电弹性体驱动器黏弹性特性, 采用 Gent 模型作为介电弹性体驱动系统的应变能函数模型, 并通过微分演化算法辨识模型参数, 以准确预测其机电响应.

机理模型建模方法的研究提高了对介电弹性体驱动系统应力-应变的预测精度, 然而, 面向控制的机理建模方法仍相对不足. Lu 等^[75] 通过基于机理和控制的模型, 使用两步识别算法获取参数, 并应用状态观测器和鲁棒控制算法解决强非线性和未测量状态问题, 在高频信号下获得了良好的控制性能. Liu 等^[76] 针对复杂多层介电弹性体管状驱动系统建立了包含黏弹性特性的机理模型, 并提供了状态空间表示形式, 这些研究为面向控制的机理建模方法的发展奠定了基础.

2.2 介电弹性体驱动系统回滞特性唯象建模研究

与机理建模方法不同, 唯象建模方法主要依赖于实验数据, 通过数学方式描述驱动器数据集中输入与输出间的经验关系, 而不考虑物理原理^[77], 这种建模方法广泛应用于智能材料的非线性特性建模中^[12,78-79]. 与机理建模相比, 唯象建模方法的优势在于它不需要了解系统的内部结构和物理原理, 只需关注输入与输出之间的经验关系. 这使得唯象建模方法更加灵活和简便, 尤其适用于复杂系统或缺乏详细物理知识的情况^[18,20].

蠕变特性和回滞特性是介电弹性体驱动系统存在的典型的非线性特性^[21,80], 其中蠕变是指随时间漂移的输出现象^[81]. 对于介电弹性体驱动系统, 建立蠕变特性的模型旨在提高在长时间应力加载情况下的建模精度, 常用的模型包括对数蠕变模型和线性蠕

变模型. 相比于前者复杂模型表达和参数辨识困难的特点^[82], 后者通过蠕变算子的叠加或传递函数的形式描述蠕变现象, 具有数学表达简单和实际应用方便的特点. 在针对介电弹性体驱动系统的蠕变特性建模中, 线性蠕变模型得到了更广泛的应用. Zou等^[83]基于线性蠕变模型提出了一种相对蠕变模型来描述介电弹性体驱动系统的蠕变特性, Huang等^[23]和Wang等^[12]利用线性蠕变模型描述介电弹性体驱动系统的蠕变特性.

介电弹性体驱动系统的回滞特性是指输入电压信号与输出位移之间产生的环状有记忆特性的非线性现象^[77]. 回滞特性是介电弹性体驱动系统中最明显、对系统建模精度影响最大的非线性特性之一, 具有多值性和非局部记忆的特点^[77]. 在现有的唯象模型中, 主要有基于算子的唯象模型和基于微分方程的唯象模型^[84].

基于算子的唯象模型通过算子的叠加实现对回滞特性的描述^[85], 用于对回滞特性建模的算子模型包括Preisach模型^[86]、Prandtl-Ishlinskii (PI)模型^[87]和Krasnoselskii-Pokrovskii (KP)模型^[88-89]. 然而, 基于算子的唯象模型存在一个建模精度与算子个数成正比的问题, 这也导致使用基于算子模型实现高精度建模需要沉重的计算代价^[90]. 相比之下, 基于微分方程的回滞模型是有限维的, 可以通过调整少量模型参数实现对回滞特性的描述^[77], 其中Bouc-Wen模型^[91]、Duhem模型^[92]以及backlash-like模型^[24]是最常用的微分方程回滞模型. 虽然这类唯象模型只需要有限的参数, 但是会导致较大的模型误差.

介电弹性体驱动系统具有独特的驱动原理, 其特性在不同的输入信号下表现出不同的回滞行为, 当输入信号为正时呈现出单回路回滞特性; 而为正、负时, 由于电致应力与输入电压的平方成正比, 系统展现出双环蝶形回滞特性^[20]. 由于介电弹性体驱动系统在不同输入信号下表现出的单环回滞特性和双环回滞特性各不相同, 因此对其进行建模面临着巨大的挑战. 下面将详细介绍介电弹性体驱动系统单环回滞特性建模方法和蝶形回滞特性建模方法的研究进展.

2.2.1 单环回滞特性建模研究

目前, 对于单环回滞特性建模的研究主要基于传统的刚性智能材料驱动系统, 例如压电陶瓷驱动系统和超磁致伸缩驱动器^[77]. 然而, 介电弹性体驱动器所表现出的单环回滞特性具有较强的非对称性和蠕变的非线性特性^[23], 因此基于微分方程的回滞模型由于其参数较少, 在介电弹性体驱动系统的建模研究中

应用较少^[93]. 相比之下, 基于算子的回滞模型因其具有较强的非线性拟合能力而广泛应用于介电弹性体驱动系统的建模研究中^[17-19]. 下面详细介绍基于算子的回滞模型在介电弹性体驱动系统建模中的应用.

1) Preisach模型.

Preisach模型^[86]广泛应用于描述回滞特性, 最早由Preisach于1935年提出. 作为一种唯象模型, Preisach模型通过对relay算子和对应的密度函数进行二重积分, 能够准确地描述复杂的回滞特性, 其数学定义^[90]如下:

$$y(t) = \int_{\beta \geq \alpha} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha, \beta}[u](t) d\alpha d\beta. \quad (15)$$

其中 $\hat{\gamma}_{\alpha, \beta}[u](t)$ 为relay算子, 定义为

$$\hat{\gamma}_{\alpha, \beta}[u](t) = \begin{cases} +1, & u(t) > \beta; \\ -1, & u(t) < \alpha; \\ \hat{\gamma}_{\alpha, \beta}[u](t^-), & \alpha \leq u(t) \leq \beta. \end{cases} \quad (16)$$

这里: α 和 β 为relay算子的阈值, $u(t)$ 为输入信号, $\mu(\alpha, \beta)$ 为Preisach模型的密度函数.

Hwang等^[94]于2008年首次利用Preisach模型描述介电弹性体系统中的单环回滞特性, 并利用实验数据验证了Preisach模型的一致性和擦除性特征. 然而, 由于介电弹性体驱动系统具有复杂的回滞特性, 建立精确的Preisach模型需要大量的权值参数, 对于介电弹性体驱动系统单环回滞的描述, Preisach模型的应用受到了限制.

2) PI模型.

PI模型^[84]由Prandtl和Ishlinskii于20世纪50年代提出, 广泛应用于控制系统、材料科学和力学等领域. PI模型是Preisach模型的一个特例, 主要优点是结构简单, 通过对play算子单重积分即可描述回滞特性, 其数学表达式如下:

$$w(t) = p_0 u + \int_0^R p(r) F_r[u](t) dr. \quad (17)$$

其中: p_0 为常数; $R \geq 0$ 为积分上界; $p(r)$ 为权值函数且满足 $p(r) \geq 0$, $\int_0^\infty rp(r) dr < \infty$; $F_r[u](t)$ 为play算子, 表达式为

$$\begin{cases} F_r[u](0) = f_r(u(0), 0), \\ f_r[u](t) = f_r(u(t)w(t_i)), \end{cases} \quad (18)$$

这里 $f_r(u) = \max(u - r, \min(u + r, u))$.

经典的PI模型只适用于描述对称的回滞特性曲线, 即回滞特性曲线关于中心点对称. 而介电弹性体驱动系统由于其黏弹性和其他复杂非线性特性, 其回滞特性呈现非对称性. 因此, 经典PI模型无法直接应用. 为解决该问题, Wang等^[91]使用广义PI模型用

于描述管状介电弹性体驱动系统中的非对称回滞特性. 此外, 考虑到介电弹性体驱动系统的单向变形特性, Wang等^[17]进一步设计具有正输出的单边play算子, 通过结合死区模型构建了非对称回滞模型, 并使用线性蠕变模型描述介电弹性体驱动系统中的蠕变特性.

介电弹性体驱动系统的回滞特性具有率相关性, 其行为会随着输入速率的变化而变化. 这种率相关回滞特性会使系统响应时间增大, 非线性增强, 进而导致系统无法实现精准定位^[95]. 因此, 为了描述介电弹性体驱动系统中具有率相关的回滞特性, Zou等^[18]引入依赖于输入电压和导数的动态包络函数描述率

相关的回滞特性, 同时使用四阶多项式和输入的二阶导数描述系统的非对称回滞特性. 另外, Zhao等^[38]提出了级联结构的Hammerstein模型, 该模型能够描述系统的非对称和率相关回滞特性, 通过结合四阶多项式与PI模型表征非对称回滞特性, 并基于有限脉冲响应的自适应滤波器构建系统的动力学部分, 以描述率相关的回滞特性. 此外, Huang等^[23]在单边play算子模型的基础上引入输入信号的五次多项式, 可以更准确地描述非对称回滞特性. 通过将线性蠕变模型与描述回滞曲线率相关特性的线性系统串联, 构建了能够描述系统非对称和率相关回滞特性以及蠕变特性的动态模型. 以上提到的模型总结于表2.

表2 PI模型的扩展回滞模型

文献	改进的PI模型	系统整体模型	作用
Wang等 ^[17]	$H_{PI}[v](t) = \sum_{j=1}^{n_D} \Psi_j S_{d_j}[y](t).$ <p>其中: $S_d[y](t) = \begin{cases} \max\left\{\sum_{i=1}^{n_H} p_i F_{or_i}[u](t) - d, 0\right\}, & d > 0; \\ y(t), & d = 0. \end{cases}$</p> <p>$\Psi_j$为死区阈值是$d_j$的算子权值, $F_{or}[u](t)$为单边play算子</p>	$F[v](t) = H_{PI}[v](t) + C[v](t).$ <p>其中: $H_{PI}(t)$为描述非对称性的回滞模型, $C[v](t)$为线性蠕变算子模型</p>	描述非对称回滞特性和蠕变特性
Huang等 ^[23]	$H_{PI}[v](t) = \sum_{i=1}^{n_H} p_i F_{or_i}[v](t).$ <p>其中: $F_{or}[v](t)$为单边play算子, 有</p> $\begin{cases} F_{or_i}[v](0) = \max\{v(0) - or_i, \min\{v(0), 0\}\}, \\ F_{or_i}[v](t) = \max\{v(t) - or_i, \min\{v(t), F_{or}[v](t - T)\}\} \end{cases}$	$F[v](t) = (H_{PI}[v](t) + Q + C[v](t))G(s).$ <p>其中: $H_{PI}[v](t)$为基于单边play算子的回滞模型, $Q = g_1 v^5(t) + g_2 v^3(t) + g_3 v(t) + g_4 \sqrt[3]{v(t)} C[v](t)$为线性蠕变算子模型, $G(s)$为线性系统模型</p>	描述非对称、率相关的回滞特性以及蠕变特性
Zou等 ^[18]	$H_{PI}[v](t) = \sum_{i=1}^N a_i F_{or_i}^h[V](t).$ <p>其中: $F_{or}[v](t)$为单边play算子, 有</p> $\begin{cases} F_{or_i}^h[v](0) = f_{or}^h(v(0), y(0)), \\ F_{or_i}^h[v](t) = f_{or}^h(v(t), F_{or}^h(t - T)). \end{cases}$ $f_{or}^h(v(t), w(t)) = \max\{h_l(v(t), \dot{v}(t)) - r, \min(h_r(v(t), \dot{v}(t)), w(t))\}.$ <p>$h_l(v(t), \dot{v}(t))$和$h_r(v(t), \dot{v}(t))$为play算子包络函数</p>	$F[v](t) = H_{PI}[v](t) + Q.$ <p>其中: $H_{PI}[v](t)$为率相关性的play算子; Q为关于输入的多项式, 有</p> $Q = p_1 v(t) + p_2 v^2(t) + p_3 v^3(t) + p_4 v^4(t) + q\ddot{v}(t)$	描述非对称、率相关的回滞特性
Zhao等 ^[38]	$H_{PI}[v](t) = \sum_{i=1}^N a_i F_{or_i}^h[V](t).$ <p>其中: $F_{or}[v](t)$为单边play算子, 有</p> $F_{or}[v](t) = \begin{cases} h_{or}(v(0), 0), & t = 0; \\ h_{or}(v(t), H_{or}[v](t_i)), & t_i < t, \dots, t + i + 1. \end{cases}$ $h_{or}(v, w) = \min(v - r, \min(v, w))$	$F[v](t) = Q + H_{PI}[v](t) + G(z).$ <p>其中: Q为关于输入的多项式, 有</p> $Q = \sum_{i=1}^4 \gamma_i v^{4-i}(t);$ <p>$H_{PI}[v](t)$为基于单边play算子的PI模型; $G(z)$为基于自适应滤波器的动力学模型, 且有$G(z) = \sum_{i=0}^{K-1} w_i(t_k) z^{-i}$</p>	描述非对称、率相关的回滞特性

2.2.2 蝶形回滞特性建模研究

与单环回滞曲线不同,介电弹性体驱动器的蝶形回滞现象是指当施加在驱动器的电压是一个输入幅度为正、负交替的周期信号时,介电弹性体执行器的输入和输出响应呈现出由一个交叉点连接的两个方向相反的单环回滞曲线^[93],输入输出间的关系形状如图6所示.蝶形回滞右侧回路A → B → C → A展现出逆时针方向,左侧回路A → D → E → A展现出顺时针方向.

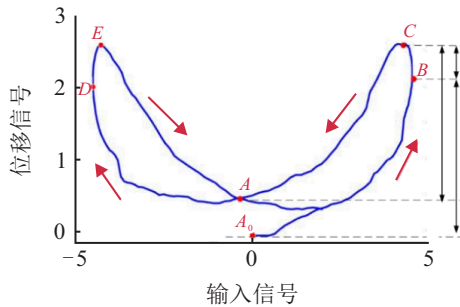


图6 蝶形回滞输出曲线

Drini等^[96]于2011年研究了单环回滞与蝶形回滞之间的关系,表明通过单峰映射可以进行单环回滞曲线与蝶形回滞曲线之间的转化.而在2021年,Vasquez-Beltran等^[97]研究了使用Preisach模型描述多环回滞特性的方法,并提出了描述蝶形或者多环回滞特性的加权函数条件.

目前,针对蝶形回滞特性的描述方法均是基于单环回滞曲线描述方法发展起来的.Zhang等^[93]提出了描述蝶形回滞曲线的算子模型,该模型由蝶形play算子、蝶形KP核和蝶形非对称位移算子模型3部分构成.由于介电弹性体驱动系统的强非线性和未建模的动力学模型,采用GRU神经网络计算算子权值,并预测未建模的动力学模型.模型整体结构如图7所示,其能够更准确地描述介电弹性体驱动系统的蝶形回滞特性.

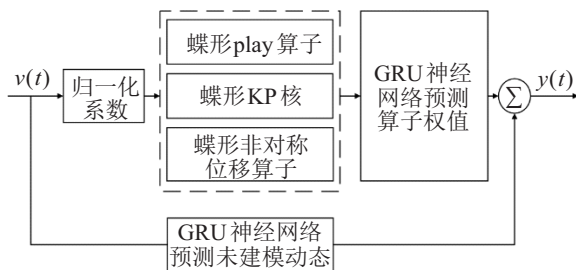


图7 蝶形回滞建模结构

现有的基于微分方程的回滞模型主要描述单环回滞特性,不能描述蝶形回滞曲线.针对这一问题,Li等^[20]提出一种蝶形分数阶backlash-like回滞模型建模方法,该方法建立了一种可以使单环回滞转化为双

环蝶形回滞特性的翻转机制,其中翻转机制定义为

$$H_b \left[v, \frac{dv}{dt}, \left| \frac{dv}{dt} \right| \right] \rightarrow H_s \left[|v|, \left| \frac{dv}{dt} \right| \right]. \quad (19)$$

其中: $H_b[\cdot]$ 为backlash-like模型的回滞表示方式, $H_s[\cdot]$ 为蝶形回滞模型.经过翻转变形,将backlash-like模型

$$\frac{dy}{dt} = \alpha \left| \frac{dv}{dt} \right| [cv - y] + B_1 \frac{dv}{dt} \quad (20)$$

转换为可以描述蝶形回滞的表达式

$$\frac{dy}{dt} = \alpha \left| \frac{dv}{dt} \right| \left(c|v| - y + \frac{B}{\alpha} \right). \quad (21)$$

针对基于微分方程回滞模型建模精度低的问题,可以将分数阶微分模型与蝶形回滞模型结合以提高建模精度,具体表示形式如下:

$$\frac{dy}{dt} = \alpha_B \left| \frac{dv}{dt} \right| (c|v| - y) + B |^{RL} \xi^\lambda v|, \quad (22)$$

其中 $|^{RL} \xi^\lambda$ 为Riemann-Liouville分数阶微分形式.

尽管现有的单环回滞和蝶形回滞模型已被应用于描述介电弹性体驱动系统中的回滞特性,但对于介电弹性体驱动系统中高频输入信号下的率相关特性、温度相关特性以及蠕变等动态特性的回滞建模研究相对较少.此外,由于介电弹性体驱动系统的回滞特性较为复杂,且受到负载、温度、输入信号频率等因素的影响,所表现出的回滞特性会发生变化.复杂的回滞特性可能导致介电弹性体驱动系统不稳定和系统震荡等问题,同时也会影响对介电弹性体驱动系统的控制精度^[80].因此,需要利用控制的方法消除复杂回滞非线性特性的影响,以提高驱动系统的定位精度.

3 介电弹性体控制方法研究进展

目前,针对介电弹性体驱动系统的控制算法可以分为3类:开环逆补偿控制、不考虑逆补偿的反馈控制以及考虑逆补偿的反馈控制,具体结构见图8.3类控制算法的优缺点见表3.下面对3类控制算法在介电弹性体驱动系统上的应用进行分类综述.

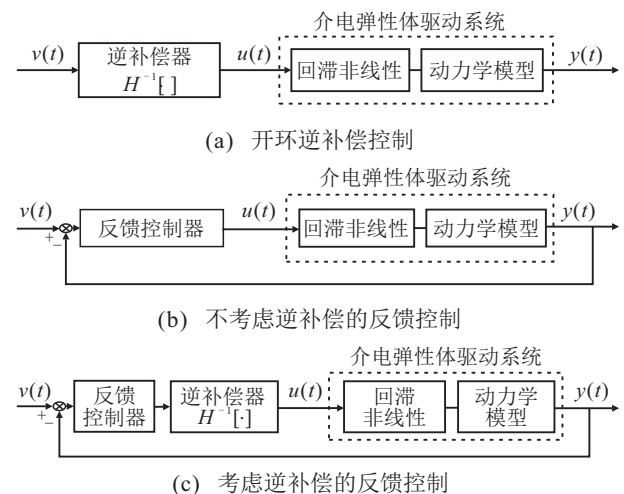


图8 介电弹性体回滞特性控制方法

表3 控制算法优缺点比较

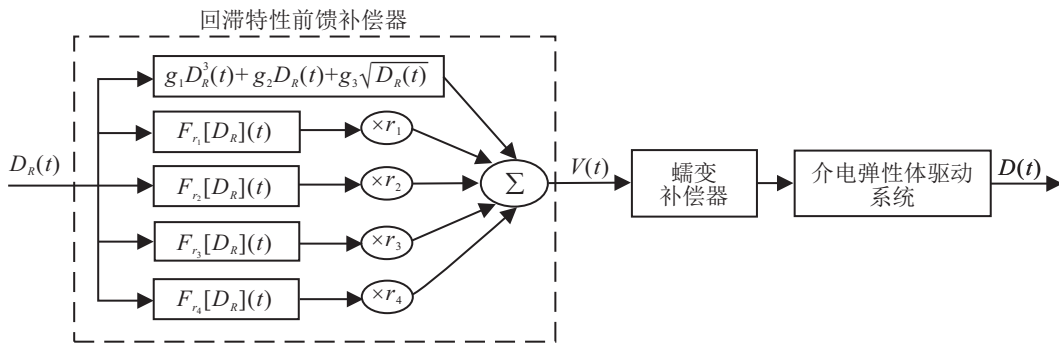
控制方法类别	典型控制方法	特点
开环逆补偿控制	PI回滞逆模型 ^[83] ; KP回滞逆模型 ^[89]	1)结构简单,不需要引入反馈环节 ^[77] ; 2)控制精度取决于逆补偿模型精度 ^[83] ; 3)针对复杂的回滞模型难以获得逆模型
不考虑逆补偿的控制方法	鲁棒PID控制算法 ^[98-100] ; 滑模控制器 ^[101-103] ; 自感知控制算法 ^[104-105]	1)将回滞特性看作未建模动态,避免了对回滞模型逆函数的计算; 2)可能导致较大的控制输入幅度 ^[77]
考虑逆补偿的反馈控制方法	前馈-PI控制算法 ^[17,106] ; 考虑逆补偿的滑模控制 ^[107] ; 模型预测控制 ^[23]	1)能够有效降低控制信号幅值 ^[17] ; 2)通过逆补偿,使传统线性反馈控制方法适用于介电弹性体驱动系统; 3)逆补偿器难以构造且模型复杂,而构建非线性模型增加了计算复杂性和实时性要求 ^[106]

3.1 开环逆补偿控制方法

为了实现对介电弹性体驱动系统的精确控制,开环逆补偿控制方法被认为是一种可行的解决方案.然而,由于介电弹性体驱动系统的驱动机理较为复杂,难以建立准确的机理模型,这使得基于机理模型的开环控制方案设计变得困难^[108].相反,基于唯象模型的开环控制方法可以通过在被控对象前级引入回滞逆补偿器来消除回滞等非线性效应^[83],整体控制结构如图8(a)所示.

由于介电弹性体所具有的回滞非线性表现出复杂的特性,如率相关和蠕变等,需要针对不同特性的回滞非线性构建相应的回滞逆补偿器,以实现介电

弹性体驱动系统中的开环逆补偿. Zou等^[83]针对介电弹性体驱动系统所表现出的率相关与蠕变特性的回滞非线性,提出了一种开环控制方法.该方法包括率相关回滞特性逆补偿器和蠕变特性逆补偿器的设计.针对率相关回滞特性,通过对改进PI模型求逆的方式,构建率相关回滞逆补偿器,而对于介电弹性体驱动系统中的黏弹性蠕变非线性,通过对所建立的相对蠕变模型求倒数的方式构成蠕变逆补偿器.这种方法能够有效克服介电弹性体驱动系统中的率相关回滞特性和蠕变特性对系统性能的影响,为系统的控制和优化提供了有效手段,完整的开环逆补偿控制框图如图9所示.



3.2 反馈控制方法

开环逆补偿控制方法通过求解回滞模型的解析逆进行实现,该方法的逆补偿误差较小,但求解回滞模型的解析逆通常较难,并且对于外界的扰动和未建模动态的补偿问题无法克服,限制了其应用范围^[12].针对具有复杂特性的回滞模型,仍然缺乏有效而精确的逆补偿方法.反馈控制方法是另一种补偿回滞非线性的方法,可以分为不考虑逆补偿器与考虑逆补偿器两种反馈控制方法.

3.2.1 不考虑逆补偿器的反馈控制方法

介电弹性体驱动系统的复杂回滞特性给回滞逆模型的建立带来了挑战.针对这一问题,研究人员提出了不考虑逆补偿器的反馈控制方法,主要包括PID控制^[98-100]和滑模控制^[101-103]等,通过增强算法鲁棒性、模型线性化以及建立近似动力学模型等方式实现对介电弹性体驱动系统的反馈控制.并且,由于介电弹性体具有自感知属性,通过自感知控制可实现对介电弹性体的控制^[104-105].这些方法的应用旨在提高

系统的控制性能并克服回滞特性带来的挑战。

1) PID控制。

PID控制算法因其结构简单、可靠性高和可调性强的优点,在工程领域得到了广泛应用[109]。因此,研究人员将PID控制算法应用于针对介电弹性体驱动系统的控制中。针对介电弹性体定位系统,Rizzello等[98]建立了机理分析模型,使用状态空间模型在预定义平衡点周围得到介电弹性体驱动系统的线性化模型用于设计PID控制器,实现了定位系统的跟踪控制。Rizzello等[99]进一步对建立的模型进行扩展,旨在描述驱动系统中的非线性效应,并且在控制器前级联线性一阶滤波器以减弱模型中导数存在所引起的高频效应,利用线性时变参数控制理论和线性不等式进行鲁棒控制器设计,实现了系统在定位范围内的稳定控制,如图10所示。

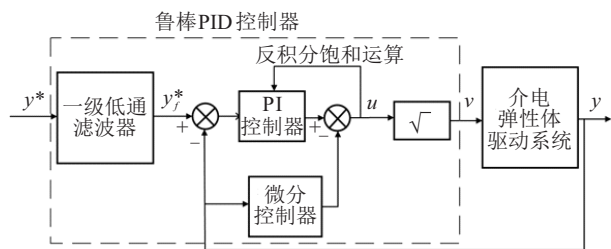


图10 鲁棒PID控制器

介电弹性体驱动系统存在复杂的非线性特性,传统PID控制算法不能实现高精度控制,虽然在文献[98]中通过模型线性化的方式,PID控制算法在介电弹性体驱动系统运动范围内达到了一定的控制效果,但是模型的近似线性化降低了驱动器的控制精度。因此,非线性PID控制算法被应用于介电弹性体驱动系统。Huang等[100]在Hammerstein-Wiener模型框架下建立锥形介电弹性体驱动系统的动态模型,设计了一个非线性PID控制器以实现介电弹性体驱动器的跟踪控制,所设计控制器包括3个部分:轨迹微分器、瞬态过程和非线性误差反馈组合器。其中:轨迹微分器用于解决位移传感器无法检测速度的问题;瞬态过程用于当介电弹性体驱动系统的参考轨迹发生突变时得到平滑的瞬态轨迹轮廓;非线性误差反馈组合器实现对介电弹性体驱动系统的精确跟踪控制。所构建的非线性PID控制器算法框图见图11。

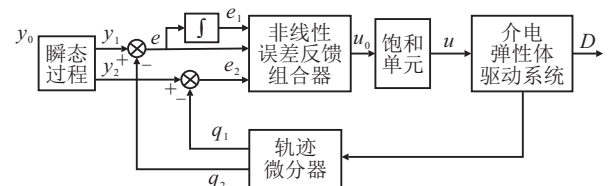


图11 非线性PID控制器

介电弹性体具有自传感属性,可以感知外界电场或机械应力,并做出相应的响应,这为实现自感知控制提供了可能性[105]。研究人员在介电弹性体驱动系统中利用其自传感属性,将系统自身产生的信号作为控制算法的反馈信号,进而实现自感知控制。为此,Wang等[110]设计了一种适用于介电弹性体驱动器的自传感机构,利用高探测频率下的电容变化作为致动器的自感知组件,同时测量电容与介电弹性体管状执行器位移之间的关系,并实时估计位移,建立基于物理的自感知模型。通过与PID控制器结合成功验证了介电弹性体驱动系统在反馈控制中的自感知能力,实现了对介电弹性体驱动器的自感知控制,整体控制框图如图12所示。

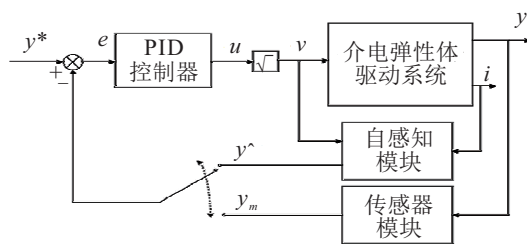


图12 自感知PID控制器

2) 滑模控制。

尽管PID控制器能够对介电弹性体系统进行较精准的控制,但是由于介电弹性体驱动系统中存在复杂的非线性特性,如应力相关、负载相关和温度相关等,使得PID控制很难实现对介电弹性体驱动系统的高精度控制。为了应对介电弹性体驱动系统中的强非线性,研究人员广泛采用滑模控制方法进行控制研究[101]。Zou等[103]提出了一种基于“代理”的无模型滑模控制方法,以减轻粘弹性非线性,通过结合小定位误差PID控制和大误差滑模控制的优点建立基于代理的滑模跟踪控制器,并对其稳定性进行分析,最终实现了介电弹性体驱动系统的高精度跟踪控制,整体控制框图如图13所示。

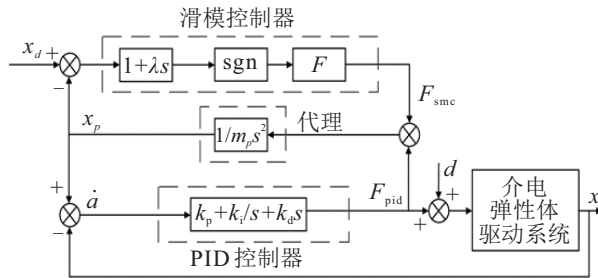


图13 基于“代理”的滑模控制器

MacLean等[101]提出了一种针对介电弹性体驱动系统的滑模控制方法,通过对小时间步长内的系统动力学模型局部近似的方式,实现对介电弹性体驱动

系统的有效控制. 类似地, Kassim 等^[102]提出了基于趋近律的滑模控制方案, 利用具有指数分母的高斜率饱和函数降低系统震动确保滑动模式控制器的稳定性, 通过李雅普诺夫候选渐近稳定算法验证了其稳定性, 该方法能够有效减小系统震动, 保持系统稳定.

3.2.2 考虑逆补偿器的反馈控制

与不考虑逆补偿器的反馈控制相比, 考虑逆补偿器的反馈控制具有更好的控制精度并可以有效降低控制输入幅值^[77]. 同时, 逆模型的构建可以抵消非线性部分对控制系统的影响, 将系统的非线性输入问题转化为传统的线性输入问题. 因此, 传统的线性反馈控制方法, 如自适应反馈控制^[111]、自适应滑模控制^[112], 可以被应用于介电弹性体驱动器的控制系统中以提升控制性能和精度.

1) 考虑逆补偿器的PID控制.

随着对介电弹性体驱动系统回滞逆补偿器的研究不断深入, 人们提出了一系列回滞逆补偿器对介电弹性体驱动系统中的回滞特性进行补偿, 并结合PID控制方法实现对介电弹性体驱动系统的精确控制. Wang 等^[17]提出了一种基于动力学模型的逆动态前馈补偿控制方法, 旨在实现对介电弹性体驱动系统的精准控制. 该方法由前馈补偿器和PI反馈控制器组成, 前馈补偿器基于系统的回滞非线性模型和蠕变模型构建而成. 通过与PI反馈控制器的结合, 能够实现对介电弹性体驱动系统的精确控制, 减小回滞特性和蠕变特性对系统性能的影响. 该控制方法能够更好地预测和补偿回滞和蠕变特性, 从而提高控制精度并增强系统的稳定性, 总体控制框图如图14所示.

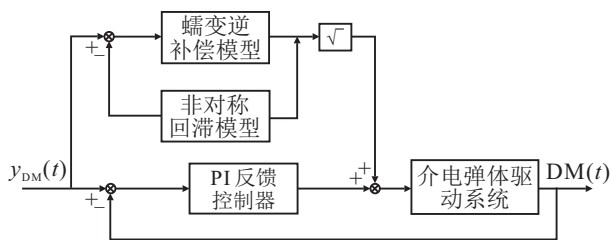


图14 前馈-PI控制算法

分数阶控制器相较于整数阶控制器具有更好处理回滞记忆特性和增强系统动态响应的优点^[113], 在介电弹性体驱动系统高精度控制方面具备较好的优势. Wu 等^[106]提出了一种基于分数阶控制的方法, 针对系统的回滞和蠕变特性进行建模和控制. 该方法采用分数阶模型准确描述材料的复杂记忆特性, 并引入分数阶逆模型作为前馈控制器, 结合分数阶PI控

制器实现对介电弹性体驱动系统的精确控制, 有效克服了回滞和蠕变特性对系统性能的影响, 整体控制框图如图15所示.

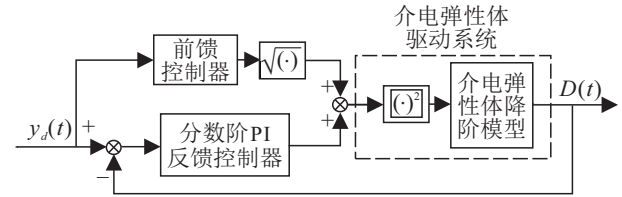


图15 分数阶前馈-反馈控制器

神经网络因其较高的拟合精度和鲁棒性广泛应用于描述序列数据的记忆特征. 在介电弹性体驱动系统中, Zhang 等^[114]基于GRU神经网络构建了锥形介电弹性体驱动系统的逆动力学模型, 并将该逆动力学模型应用于前馈补偿控制器中以补偿介电弹性体驱动系统的蠕变和回滞特性, 如图16所示. 通过利用神经网络的学习能力, 能够有效捕捉介电弹性体驱动系统的非线性特性, 并提供精确的前馈补偿控制, 从而改善系统的控制性能. 与传统方法不同, 使用所提出方法可以直接构建补偿控制器, 避免对动力学模型解析逆运算的复杂计算, 因此所提出智能建模和跟踪控制方法具有优越性.

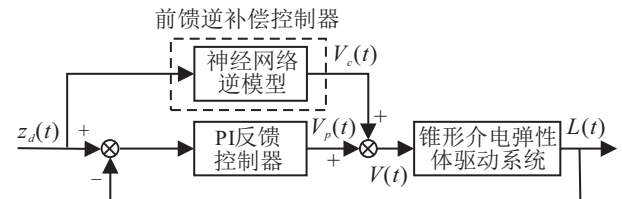


图16 神经网络逆补偿PID控制器

2) 考虑逆补偿器的滑模控制.

通过将滑模控制与回滞逆补偿器相结合, 可以实现对介电弹性体驱动系统的快速控制和对干扰性能的提升. Zhang 等^[107]首先构建系统的动态模型, 包括非对称回滞特性、蠕变特性和回滞率相关特性, 并基于这些模型设计逆补偿前馈控制器以补偿系统的非线性特性. 为了应对系统的不确定性, 设计扩展状态观测器估计介电弹性体驱动系统的不可测状态以及包括建模误差、参数扰动和外部干扰在内的不确定性, 同时结合逆补偿前馈控制器设计滑模反馈控制器, 通过李雅普诺夫方法证明了扩展状态观测器和整个控制系统的收敛性. 通过对比实验, 与仅使用逆补偿前馈控制器的情况相比, 实验表明所提出控制算法可以在跟踪控制的初始阶段减小系统的震荡, 在高频下提高跟踪曲线的频率, 实现了介电弹性体驱动系统的高精度跟踪控制, 控制框图如图17所示.

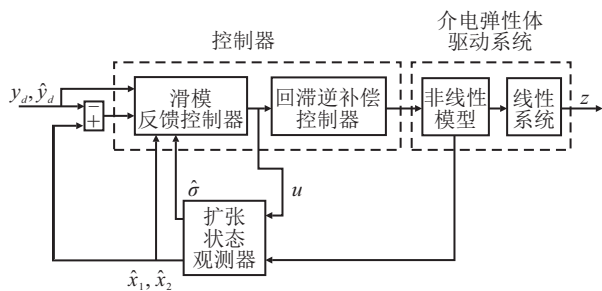


图 17 滑模控制器

3) 考虑逆补偿器的模型预测控制.

模型预测控制在智能材料驱动系统的控制方法研究中具有建模简单、鲁棒性强和可预测性等优点. Huang等^[23]提出了一种基于动力学模型的控制方法,将逆补偿器与模型预测控制器相结合,用于实现介电弹性体驱动系统的精确控制.所构建的系统动力学模型由3部分组成:基于单边play算子与关于输入的四阶多项式的非对称回滞模型、基于线性蠕变算子的蠕变模型、描述率相关回滞特性的线性系统模型.通过计算回滞模型与蠕变模型的逆模型构建逆补偿控制器,结合模型预测控制器可以克服建模误差、模型参数扰动以及外部干扰对于控制精度的影响.系统能够根据实时测量的状态信息和模型预测的未来状态进行优化控制,控制框图如图18所示.

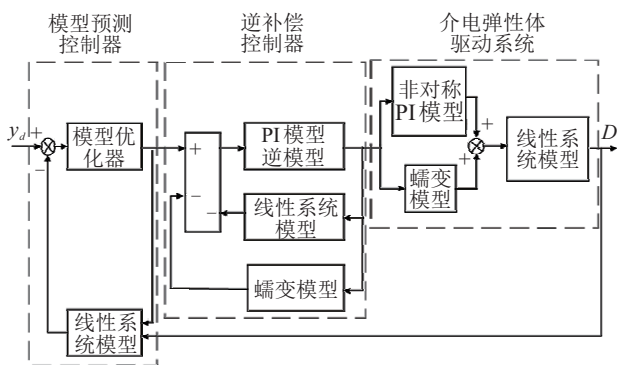


图 18 模型预测控制器

4) 隐逆控制.

隐逆补偿控制方法通过从回滞临时控制信号中寻找逆补偿的最佳值实现,该方法不需要构建显式逆补偿模型,也不需要确定的密度函数或权重描述回滞模型. Chen等^[115]提出了一种针对回滞特性的隐逆控制算法,将PI算子模型的隐逆纳入自适应控制器的设计中.在此基础上, Wang等^[116]提出了一种基于蝶形回滞模型的自适应神经网络隐逆补偿控制方法,用于补偿介电弹性体驱动系统中的蝶形回滞.实验结果表明,自适应隐式控制方案能够有效缓解蝶形回滞特性,控制框图如图19所示.

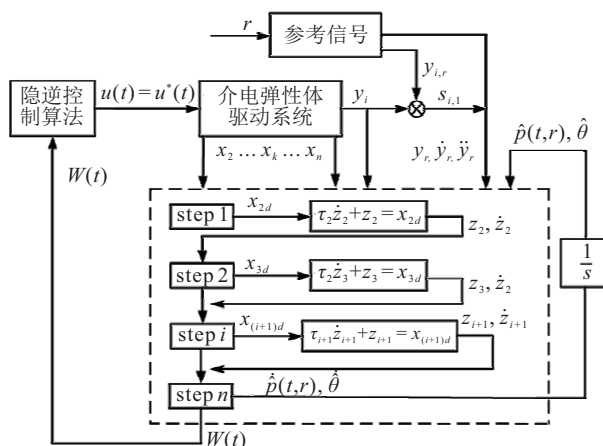


图 19 蝶形回滞隐逆控制算法

4 研究展望

针对介电弹性体驱动系统的非线性特性进行建模和补偿控制是该领域研究的重要问题,尽管在介电弹性体回滞特性建模和补偿控制方面已经取得了一些进展和研究,但现有方法仍存在不足,一些核心难题尚待解决.因此,需要进一步深入研究和探讨,以推动该领域的发展.

1) 复杂动态回滞非线性建模方法研究. 介电弹性体驱动系统的回滞受多种因素影响,包括应力、温度和电场等,这些因素导致介电弹性体驱动系统具有非线性、非对称性的静态回滞特性以及复杂的动态特性,如率相关特性、温度相关特性和负载相关特性.为了准确描述这些特性,未来可以研究的方向之一是通过考虑速率、温度和负载等参数将它们引入现有模型中.此外,智能建模方法(如深度学习和强化学习)具备强大的非线性拟合能力,并能处理不确定性和非线性关系,因此将智能建模方法与现有模型相结合,对其进行改进以预测复杂的动态非线性特性是未来需要进一步探索的方向.

2) 基于数据驱动的回滞非线性逆补偿方法研究. 在介电弹性体驱动系统中,回滞非线性表现出多种特性,如率相关、负载相关以及温度相关等.传统的单一特性相关的回滞逆补偿方法难以有效补偿系统的复杂非线性行为,而同时建立多个逆补偿模型会增加计算复杂度并难以保证实时性和稳定性.因此,利用历史数据构建数据驱动的回滞逆补偿方法成为未来研究的可行手段.

3) 介电弹性体驱动系统控制理论问题研究. 介电弹性体驱动系统涉及到电场、机械和热场等多种物理场的耦合作用,这些物理场之间相互影响.未来的研究需要综合考虑多种物理场的影响,并进行相应的控制,以提高控制精度和系统稳定性.此外,随着输

入频率的增加,介电弹性体驱动系统所表现的回滞特性变得更加复杂.为了克服这一挑战,研究人员可以探索设计适应高频操作的回滞控制算法,包括结合高斜率饱和函数和滑模控制的方法,以实现更好的系统响应并减小震动.最后,提高介电弹性体驱动系统的控制精度和鲁棒性也是需要关注的问题.这可以通过应用自适应控制、鲁棒控制和优化控制等技术,结合实时状态估计和参数估计,实现对系统内不确定性和外部扰动的抑制和补偿.

5 结语

介电弹性体驱动系统是当前软体智能材料领域研究的热点之一.尽管在提高介电弹性体材料性能、设计驱动系统结构以及驱动器在柔性驱动系统中的应用方面已经进行了许多研究,但对于该系统的建模和控制方面的深入研究仍然不足.鉴于此,本文针对介电弹性体驱动系统的动态系统建模方法、复杂非线性逆补偿方法以及介电弹性体非线性控制理论3个方面进行了详细阐述,并总结了当前研究取得的进展和存在的问题,这将有助于推动介电弹性体驱动系统在高精度控制和实际应用方面取得更多进展.

参考文献(References)

- [1] Chidsey C E, Murray R W. Electroactive polymers and macromolecular electronics[J]. *Science*, 1986, 231(4733): 25-31.
- [2] Wissler M, Mazza E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 138(2): 384-393.
- [3] Keplinger C, Kaltenbrunner M, Arnold N, et al. Röntgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(10): 4505-4510.
- [4] Romasanta L J, Lopez-Manchado M A, Verdejo R. Increasing the performance of dielectric elastomer actuators: A review from the materials perspective[J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, 51: 188-211.
- [5] Gupta U, Qin L, Wang Y Z, et al. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(10): 103002.
- [6] Guo Y G, Liu L W, Liu Y J, et al. Review of dielectric elastomer actuators and their applications in soft robots[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(10): 2000282.
- [7] Ren Z J, Kim S, Ji X, et al. A high-lift micro-aerial-robot powered by low-voltage and long-endurance dielectric elastomer actuators[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(7): 2106757.
- [8] Tang C, Du B Y, Jiang S W, et al. A pipeline inspection robot for navigating tubular environments in the sub-centimeter scale[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): eabm8597.
- [9] Gu G Y, Zhu J, Zhu L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(1): 011003.
- [10] Youn J H, Jeong S M, Hwang G, et al. Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenges[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 640.
- [11] 陈花玲, 周进雄. 介电弹性体智能材料力电耦合性能及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (Chen H L, Zhou J X. Mechanical-electrical coupling properties of dielectric elastomer smart materials and its application[M]. Beijing: Science Press, 2017.)
- [12] Wang Y W, Huang P, Wu J D, et al. Modelling and compound control of intelligently dielectric elastomer actuator[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 126: 105261.
- [13] Kollosche M, Zhu J, Suo Z G, et al. Complex interplay of nonlinear processes in dielectric elastomers[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(5): 051801.
- [14] Suo Z G. Theory of dielectric elastomers[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 549-578.
- [15] Zhao X H, Koh S J A, Suo Z G. Nonequilibrium thermodynamics of dielectric elastomers[J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2011, 3(2): 203-217.
- [16] Huang P, Ye W J, Wang Y W. Dynamic modeling of dielectric elastomer actuator with conical shape[J]. *PLoS One*, 2020, 15(8): e0235229.
- [17] Wang Y W, Zhang Y, Wu J D, et al. Tracking control of dielectric elastomer actuators for soft robots based on inverse dynamic compensation method[J]. *Information Sciences*, 2022, 583: 202-218.
- [18] Zou J, Gu G Y. Modeling the viscoelastic hysteresis of dielectric elastomer actuators with a modified rate-dependent prandtl-ishlinskii model[J]. *Polymers*, 2018, 10(5): 525.
- [19] Wang K, Zhang Y, Jones R W. Modelling of hysteresis in smart actuators using the generalised prandtl-ishlinskii operator[C]. ICCAS. Gyeonggi-do, 2010: 261-266.
- [20] Li Z, Li Z K, Xu H Z, et al. Development of a butterfly fractional-order backlash-like hysteresis model for dielectric elastomer actuators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(2): 1794-1801.
- [21] Zou J, Gu G Y. High-precision tracking control of a soft dielectric elastomer actuator with inverse viscoelastic hysteresis compensation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(1): 36-44.
- [22] Gu G Y, Zhu L M. Comparative experiments regarding approaches to feedforward hysteresis compensation for piezoceramic actuators[J]. *Smart Materials and*

- Structures, 2014, 23(9): 095029.
- [23] Huang P, Wu J D, Zhang P, et al. Dynamic modeling and tracking control for dielectric elastomer actuator with a model predictive controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1819-1828.
- [24] Su C Y, Tan Y H, Stepanenko Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems preceded by an unknown backlash-like hysteresis[C]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, 2002: 1459-1464.
- [25] Cao J W, Liang W Y, Ren Q Y, et al. Modelling and control of a novel soft crawling robot based on a dielectric elastomer actuator[C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, 2018: 4188-4193.
- [26] Li Z, Su C Y, Chai T Y. Compensation of hysteresis nonlinearity in magnetostrictive actuators with inverse multiplicative structure for preisach model[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(2): 613-619.
- [27] Lu T Q, Ma C, Wang T J. Mechanics of dielectric elastomer structures: A review[J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 38: 100752.
- [28] Xu H Z, Li Z K, Li Z, et al. Modeling of butterfly-shaped hysteresis in dielectric elastomer actuators[J]. AIP Advances, 2021, 11(12): 125303.
- [29] Zhu Y B, Liu N, Chen Z Q, et al. 3D-printed high-frequency dielectric elastomer actuator toward insect-scale ultrafast soft robot[J]. ACS Materials Letters, 2023, 5(3): 704-714.
- [30] Li G R, Chen X P, Zhou F H, et al. Self-powered soft robot in the mariana trench[J]. Nature, 2021, 591(7848): 66-71.
- [31] Chen Y F, Zhao H C, Mao J, et al. Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles[J]. Nature, 2019, 575(7782): 324-329.
- [32] Gu G Y, Zou J, Zhao R K, et al. Soft wall-climbing robots[J]. Science Robotics, 2018, 3(25): eaat2874.
- [33] Nguyen C T, Phung H, Hoang P T, et al. A novel bioinspired hexapod robot developed by soft dielectric elastomer actuators[C]. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, 2017: 6233-6238.
- [34] Godaba H, Li J S, Wang Y Z, et al. A soft jellyfish robot driven by a dielectric elastomer actuator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016, 1(2): 624-631.
- [35] Yin L J, Zhao Y, Zhu J, et al. Soft, tough, and fast polyacrylate dielectric elastomer for non-magnetic motor[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1-10.
- [36] Carpi F, Frediani G, Turco S, et al. Bioinspired tunable lens with muscle-like electroactive elastomers[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(21): 4152-4158.
- [37] Chee P S, Mah C K, Ali M S M. Soft dielectric elastomer actuator for micropump application[C]. 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Shanghai, 2016: 561-564.
- [38] Zhao Y H, Meng G, Zhang W M. Characterization and modeling of viscoelastic hysteresis in a dielectric elastomer actuator[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(5): 055019.
- [39] Pelrine R E, Kornbluh R D, Joseph J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 64(1): 77-85.
- [40] Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q B, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%[J]. Science, 2000, 287(5454): 836-839.
- [41] Wissler M, Mazza E. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 120(1): 184-192.
- [42] Plante J S, Dubowsky S. Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(25/26): 7727-7751.
- [43] Goulbourne N C, Frecker M I, Mockensturm E. Electro-elastic modeling of a dielectric elastomer diaphragm for a prosthetic blood pump[C]. Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices. San Diego, 2004, 5385: 122-133.
- [44] Kim H, Oh S, Hwang K, et al. Actuator model of electrostrictive polymers (EPs) for microactuators[C]. Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices. Newport Beach, 2001, 4329: 482-490.
- [45] Zhao X H, Suo Z G. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(6): 061921.
- [46] Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008, 56(2): 467-486.
- [47] Zhao X H, Suo Z G. Theory of dielectric elastomers capable of giant deformation of actuation[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(17): 178302.
- [48] 锁志刚, 曲绍兴. 介电高弹聚合物理论[J]. 力学进展, 2011, 41(6): 730-750.
(Suo Z G, Qu S X. Theory of dielectric elastomers[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 730-750.)
- [49] Plante J S, Dubowsky S. On the performance mechanisms of dielectric elastomer actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 137(1): 96-109.
- [50] Ha S M, Wissler M, Pelrine R, et al. Characterization of electroelastomers based on interpenetrating polymer networks[C]. Electroactive Polymer Actuators and Devices. San Diego, 2007, 6524: 78-87.

- [51] Lochmatter P, Kovacs G, Wissler M. Characterization of dielectric elastomer actuators based on a visco-hyperelastic film model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): 477-486.
- [52] Boyce M C, Arruda E M. Constitutive models of rubber elasticity: A review[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2000, 73(3): 504-523.
- [53] Marekman G, Verron E. Comparison of hyperelastic models for rubber-like materials[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2006, 79(5): 835-858.
- [54] Boyce Mary C, Arruda Ellen M. Constitutive models of rubber elasticity: A review[J]. *Rubber chemistry and technology*, 2000, 73(3): 504-523.
- [55] Ogden R W. Large deformation isotropic elasticity-on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences*, 1972, 326(1567): 565-584.
- [56] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1990, 63(5): 792-805.
- [57] Rivlin R S, Sawyers K N. Nonlinear continuum mechanics of viscoelastic fluids[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1971, 3: 117-146.
- [58] Mooney M. A theory of large elastic deformation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582-592.
- [59] Arruda E M, Boyce M C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1993, 41(2): 389-412.
- [60] Gent A N. A new constitutive relation for rubber[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1996, 69(1): 59-61.
- [61] Goulbourne N, Mockensturm E, Frecker M. A nonlinear model for dielectric elastomer membranes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(6): 899-906.
- [62] Plante J S, Dubowsky S. On the properties of dielectric elastomer actuators and their design implications[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2): S227-S236.
- [63] Kofod G. The static actuation of dielectric elastomer actuators: How does pre-stretch improve actuation?[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(21): 215405.
- [64] Zhu J, Kollosche M, Lu T Q, et al. Two types of transitions to wrinkles in dielectric elastomers[J]. *Soft Matter*, 2012, 8(34): 8840-8846.
- [65] Akbari S, Rosset S, Shea H R. Improved electromechanical behavior in castable dielectric elastomer actuators[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(7): 071906.
- [66] 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 13-31.
(Yang T Q, Luo W B, Xu P, et al. *Viscoelastic theory and application*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 13-31.)
- [67] David N V, Gao X L, Zheng J Q. Constitutive behavior of a twaron δ /natural rubber composite[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2010, 17(4): 246-259.
- [68] Gu J P, Xie Z M, Wang S X, et al. Thermo-mechanical modeling of woven fabric reinforced shape memory polymer composites[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2019, 26(12): 1042-1052.
- [69] Acton K, Weick B. Orthotropic viscoelastic behavior of polymer tape in a wound roll[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2014, 21(1): 53-66.
- [70] Berselli G, Vertechy R, Babi M, et al. Dynamic modeling and experimental evaluation of a constant-force dielectric elastomer actuator[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, 24(6): 779-791.
- [71] Xiao H, Wu J D, Ye W J, et al. Dynamic modeling of dielectric elastomer actuators based on thermodynamic theory[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(11): 1543-1552.
- [72] Chen F F, Wang M Y. Dynamic performance of a dielectric elastomer balloon actuator[J]. *Meccanica*, 2015, 50(11): 2731-2739.
- [73] Cao C J, Conn A T. Performance optimization of a conical dielectric elastomer actuator[J]. *Actuators*, 2018, 7(2): 32.
- [74] Gu G Y, Gupta U, Zhu J, et al. Modeling of viscoelastic electromechanical behavior in a soft dielectric elastomer actuator[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5): 1263-1271.
- [75] Lu X J, Lin Y K, Hu T T. Physic-based and control-oriented modeling based robust control for soft dielectric elastomer actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(3): 035026.
- [76] Liu N, Martinez T, Walter A, et al. Control-oriented modeling and analysis of tubular dielectric elastomer actuators dedicated to cardiac assist devices[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 4361-4367.
- [77] Gu G Y, Zhu L M, Su C Y, et al. Modeling and control of piezo-actuated nanopositioning stages: A survey[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1): 313-332.
- [78] Li Z, Shan J J, Gabbert U. Inverse compensator for a simplified discrete preisach model using model-order reduction approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6170-6178.
- [79] Zhang X Y, Jing R J, Li Z W, et al. Adaptive pseudo inverse control for a class of nonlinear asymmetric and saturated nonlinear hysteretic systems[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 8(4): 916-928.
- [80] Zhang X Y, Xu H Z, Chen X K, et al. Modeling and adaptive output feedback control of

- butterfly-like hysteretic nonlinear systems with creep and their applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 5182-5191.
- [81] Sabarianand D V, Karthikeyan P, Muthuramalingam T. A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106634.
- [82] Devasia S, Eleftheriou E, Reza Moheimani S O. A survey of control issues in nanopositioning[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(5): 802-823.
- [83] Zou J, Gu G Y. Feedforward control of the rate-dependent viscoelastic hysteresis nonlinearity in dielectric elastomer actuators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2340-2347.
- [84] Visintin A. *Differential models of hysteresis*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [85] Krasnosel'skii M A, Pokrovskii A V. *Systems with hysteresis*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [86] Mayergoyz I D, Friedman G. Generalized preisach model of hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, 24(1): 212-217.
- [87] Kuhnen K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified prandtl-ishlinskii approach[J]. *European Journal of Control*, 2003, 9(4): 407-418.
- [88] Krejci P, Kuhnen K. Inverse control of systems with hysteresis and creep[J]. *IEE Proceedings—Control Theory and Applications*, 2001, 148(3): 185-192.
- [89] Li Z, Shan J J, Gabbert U. Inverse compensation of hysteresis using krasnoselskii-pokrovskii model[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(2): 966-971.
- [90] Li Z, Shan J J, Gabbert U. Development of reduced preisach model using discrete empirical interpolation method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 8072-8079.
- [91] Ismail M, Ikhrouane F, Rodellar J. The hysteresis bouc-wen model, a survey[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2009, 16(2): 161-188.
- [92] Macki J W, Nistri P, Zecca P. Mathematical models for hysteresis[J]. *SIAM Review*, 1993, 35(1): 94-123.
- [93] Zhang X Y, Xu H Z, Li Z K, et al. Development of a butterfly hysteresis structure for dielectric elastomer-actuated systems[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(12): 125006.
- [94] Hwang H, Kim C J, Kim S J, et al. Preisach modeling of dielectric elastomer EAP actuator[C]. *Electroactive Polymer Actuators and Devices*. San Diego, 2008, 6927: 692-698.
- [95] Al Janaideh M, Rakheja S, Su C Y. Experimental characterization and modeling of rate-dependent hysteresis of a piezoceramic actuator[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(5): 656-670.
- [96] Drini B, Tan X B, Bernstein D S. Why are some hysteresis loops shaped like a butterfly?[J]. *Automatica*, 2011, 47(12): 2658-2664.
- [97] Vasquez-Beltran M A, Jayawardhana B, Peletier R. On the characterization of butterfly and multiloop hysteresis behavior[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 67(7): 3494-3506.
- [98] Rizzello G, Naso D, York A, et al. Modeling, identification, and control of a dielectric electro-active polymer positioning system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(2): 632-643.
- [99] Rizzello G, Naso D, Turchiano B, et al. Robust position control of dielectric elastomer actuators based on LMI optimization[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(6): 1909-1921.
- [100] Huang P, Wu J D, Su C Y, et al. Tracking control of soft dielectric elastomer actuator based on nonlinear PID controller[J]. *International Journal of Control*, 2022: 1-11.
- [101] MacLean J, Zou J, Gu G Y, et al. Sliding-mode control of a dielectric elastomer actuator featuring non-invertible dynamics[C]. *The 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. Shanghai, 2022: 1-6.
- [102] Kassim S O, MacLean J D, Aphale S S. A new sliding-mode control law for a planar dielectric elastomer actuator to track wide-band trajectories[C]. *The 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. Midzysdroje, 2022: 442-447.
- [103] Zou J, MacLean J D J, Ren J J, et al. Proxy-based sliding-mode tracking control of dielectric elastomer actuators through eliminating rate-dependent viscoelasticity[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(10): 104002.
- [104] Chuc N H, Thuy D V, Park J, et al. A dielectric elastomer actuator with self-sensing capability[C]. *Electroactive Polymer Actuators and Devices*. San Diego, 2008, 6927: 260-267.
- [105] Jung K, Kim K J, Choi H R. A self-sensing dielectric elastomer actuator[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 143(2): 343-351.
- [106] Wu J D, Xu Z C, Zhang Y, et al. Modeling and tracking control of dielectric elastomer actuators based on fractional calculus[J]. *ISA Transactions*, 2023, 138: 687-695.
- [107] Zhang Y, Huang P, Zhang P, et al. Modeling and tracking control for dielectric elastomer actuator with sliding mode feedback controller[C]. *IEEE 7th International*

- Conference on Control Science and Systems Engineering. Qingdao, 2021: 185-194.
- [108] Gu G Y, Gupta U, Zhu J, et al. Feedforward deformation control of a dielectric elastomer actuator based on a nonlinear dynamic model[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(4): 042907.
- [109] Cavanini L, Ferracuti F, Monteriù A. Optimal error governor for PID controllers[J]. International Journal of Systems Science, 2021, 52(12): 2480-2492.
- [110] Wang S B, Kaaya T, Chen Z. Self-sensing of dielectric elastomer tubular actuator with feedback control validation[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 075037.
- [111] Astrom K J. Adaptive feedback control[J]. Proceedings of the IEEE, 1987, 75(2): 185-217.
- [112] Bartolini G, Ferrara A, Utkin V I. Adaptive sliding mode control in discrete-time systems[J]. Automatica, 1995, 31(5): 769-773.
- [113] Xu Z C, Wu J D, Wang Y W. Fractional order modeling and internal model control of dielectric elastomer actuator[C]. 2022 13th Asian Control Conference. Jeju, 2022: 1068-1072.
- [114] Zhang Y, Wu J D, Huang P, et al. Inverse dynamics modelling and tracking control of conical dielectric elastomer actuator based on GRU neural network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 118: 105668.
- [115] Chen X K, Hisayama T, Su C Y. Adaptive control for uncertain continuous-time systems using implicit inversion of prandtl-ishlinskii hysteresis representation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(10): 2357-2363.
- [116] Wang Y, Zhang X Y, Li Z, et al. Adaptive implicit inverse control for a class of butterfly-like hysteretic nonlinear systems and its application to dielectric elastomer actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 731-740.

作者简介

李智(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能材料驱动系统的建模与控制、液态镜头与机器视觉等研究, E-mail: lizhi@mail.neu.edu.cn;

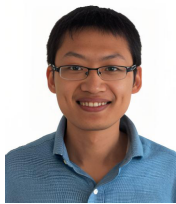
陈国强(1999—), 男, 硕士生, 从事智能材料驱动系统设计及回滞非线性建模的研究, E-mail: 2100714@stu.neu.edu.cn;

徐泓智(1996—), 男, 博士生, 从事智能材料驱动系统非线性回滞建模和自适应控制的研究, E-mail: 2210383@stu.neu.edu.cn;

陈新开(1966—), 男, 教授, 博士, 从事鲁棒非线性控制、自适应控制、运动控制和机器视觉等研究, E-mail: chen@sic.shibaura-it.ac.jp;

陕晋军(1975—), 男, 教授, 博士, 从事多智能体系统动力学及控制、智能材料及结构、空间工程及空间有效载荷设计等研究, E-mail: jishan@yorku.ca;

张秀宇(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事非线性系统鲁棒自适应控制、智能材料驱动器中回滞非线性建模等研究, E-mail: zhangxiuyu@neepu.edu.cn.



特邀专家 李智, 教授, 博士生导师, 2009年获得东北大学模式识别与智能系统专业硕士学位, 2015年获得加拿大康考迪亚大学机械工程专业博士学位, 2019年5月入职东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室。国家青年海外高层次人才, 德国洪堡学者, “兴辽英才计划”青年拔尖人才。主要从事智能材料驱动器的动力学建模与控制 and 软体机器人等研究, 在国际重要刊物和学术会议上发表论文80余篇, 其中IEEE汇刊/IFAC会刊26篇。担任国际期刊“IEEE Transactions on Industrial Electronics”《计算机仿真应用》的编委, 曾获T. J. Tarn’s最佳应用论文奖, 加拿大Carolyn & Richard Renaud教育奖。

专家寄语 值此东大百年校庆之际, 衷心祝贺这一历史性时刻! 作为校友, 自豪之情溢于言表。百年来, 东大秉持自强不息、知行合一之精神, 推动学科发展与创新。愿东大继续蓬勃发展, 开启百年新征程!