软机器动力学建模与仿真研究进展

罗凯*, 田强, 胡海岩

北京理工大学宇航学院力学系, 北京 100081

*联系人, E-mail: kailuo@bit.edu.cn

收稿日期: 2020-04-20; 接受日期: 2020-06-11; 网络出版日期: 2020-08-07

国家自然科学基金(编号: 11902028, 11722216, 11832005)和国防科技创新特区基金(编号: 18-163-00-TS-004-051-01, 2019-ZT-003-01)资助项目

摘要 软机器是以软材料、软构件为主要部件的机械系统, 具有可大变形的软依从性特点, 可提供传统机器不具备的功能, 并带来与人类亲密交互和协同工作的可能性. 因此, 软机器是人工机器的重要补充, 也是未来先进机器发展的重要分支方向. 力学建模和分析是软机器设计与研制过程中必不可少的环节, 而动力学建模与仿真分析则为复杂软机器的系统设计和控制提供有效方法. 本文综述和分析了软机器动力学建模与仿真的研究进展. 首先, 概述了其研究现状, 包括运动学描述、非线性软材料建模、柔性体接触动力学、瞬态动力学高效计算和动力学控制五个方面; 其次, 分析了研究中存在的问题与挑战及其原因, 提出了需注意的平衡关系; 最后, 根据研究现状和问题, 预测并展望了软机器动力学与控制研究的潜在发展方向.

关键词 软机器, 软体机器人, 动力学建模与仿真, 动力学控制

PACS: 46.15.-x, 46.25.-y, 45.40.-f, 45.20.-d, 45.80.+r

1 引言

机器是可利用输入能量、输出载荷或控制运动以实现和拓展功能的机械系统. 人类一直试图创造机器, 以代替人完成重复或复杂的工作. 工业革命以来, 大量的现代化机器被发明和制造, 如加工制造设备、交通工具、计算设备、机器人等. 这些机器多数以金属等刚硬材料为主要部件, 因此可称为“硬机器”. 然而, 自然创造的生命系统多为“软机器”. 其柔软大变形带来的很多功能难以由硬机器实现, 且多数情况下软硬机器无法协同工作. 受大自然启发和应用需求推动, 人们开始研究人工软机器. 例如, 受植物双稳态失稳机

理的启发, Baumgartner等人^[1]设计和研究了可高速大变形的软体机器人作动器; 受软体动物爬行的启发, Shepherd等人^[2]设计和研究了多步态软体机器人; 受人和软体动物抓取的启发, 各种软抓取作动器^[3]成为研制热点.

研制软机器的物质基础是受外界刺激后能产生响应的软材料. 响应型软材料包括: 形状记忆合金(SMAs)、压电材料(Piezoelectrics)、介电弹性体(DEAs)、离子型电活性聚合物(IEAPs)、气动(Pneumatics)和液压(Hydraulics)系统、形状记忆聚合物(SMPs)、水凝胶(Hydrogel)及液晶聚合物(LCEs)和液晶网络(LCNs)^[4]. 通过合成、加工或打印, 将软材料制

引用格式: 罗凯, 田强, 胡海岩. 软机器动力学建模与仿真研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 090006

Luo K, Tian Q, Hu H Y. Advances in dynamic modeling and simulation of soft machines (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 090006, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0136

成各种各样的几何或结构构型, 如丝、线圈、薄膜、管、单晶或双晶片、折纸结构、打印单元等^[4], 以实现不同的力学响应和拓展机器功能. 例如, 利用形状记忆聚合物, 可设计温度控制下自动折展的三维折纸结构^[5]、太阳帆结构^[6]. Wang等人^[7]利用液晶聚合物和碳纳米管复合材料作为人工肌肉, 替代张拉整体机器人^[8]的拉索, 实现了该机器人在光控下自主运动. 李铁风团队^[9]利用介电弹性体作为驱动模块, 并与刚性结构集成, 研制了刚柔耦合的仿生机器鱼, 具有良好的机动性能.

软机器人的设计和研制需借助力学理论和仿真分析, 如均匀大变形分析、稳定性分析及非均匀大变形有限元分析. 例如, Wang等人^[10]利用有限元商用软件验证和分析了预拉伸软抓手作动器的软结构构型设计和性能. Jiang等人^[11]在设计蜂窝式气动软作动器时, 利用有限元软件进行数值实验, 分析和评估结构柔性与承载能力的平衡关系, 优化几何尺寸以达到更好的性能. Suo^[12]指出, 为了设计和实现软机器人功能, 需研究软材料的大变形、本构、失稳、破坏等力学机理, 并通过结构设计实现软硬材料混合软机器人的大变形. 同时, 响应型软材料大变形与其他物理场的耦合效应表征和分析仍是目前有限元软件待开发的模块. 因此, 静力学分析是实现软机器人部件设计与分析的重要手段和环节.

对于复杂软机器人的系统设计、动力分析及运动控制等, 则需更复杂的力学分析手段, 即动力学建模与仿真分析. 例如, Chen等人^[6]对太阳帆折纸结构的折叠收拢过程进行动力学分析时发现, 折叠过程中存在动力学分岔行为, 折叠速度不同导致折叠后形状变为圆锥形或圆盘形, 通过设计其旋转中心可确保系统折叠至需要的收拢构型. 同时, 利用基于有限元的动力学仿真可对其形状记忆聚合物铰链的展开动力进行分析. Liu等人的团队^[13]对柔性太阳帆在离心力作用下自旋展开过程进行动力学模拟时发现, 薄膜的微小弯曲刚度对整个结构能否完全展开具有不可忽略的影响; 对大型空间环形桁架天线进行展开动力学分析, 则揭示了动力衰减导致其展开不同步的力学机理^[14]. 此外, Rus和Tolley^[3]在对软体机器人的综述中指出, 目前针对机器人整体的控制算法将系统假设为刚体系统, 无法捕捉软体机器人的动力学特性, 需基于动力学模型改善和拓展当前系统的计算和控制能力.

2 研究现状

软机器人的动力学建模与仿真面临几何非线性、物理非线性、界面非线性等多个方面的计算挑战^[15], 本节从软机器人运动学描述、软材料建模、柔性部件接触、瞬态动力学计算方法、软机器人控制五个方面归纳总结相关研究进展.

2.1 软机器人大变形运动学描述

由于软材料和软部件在运动过程中可发生大变形, 软机器人属于含几何非线性和大应变的多柔体动力学系统, 其运动学描述可通过多柔体动力学建模方法实现.

多体系统分为多刚体系统与多柔体系统(包括线性弹性多体系统和非线性弹性多体系统)^[16]. 对于多柔体系统, 其部件的运动包含大范围的刚体运动和局部的部件变形(位移和转动). 通过引入浮动标架, 可将弹性体的运动分解为两部分, 即浮动标架的刚体运动及其叠加在该运动上的弹性变形.

线性弹性多体系统与非线性弹性多体系统的主要区别在于应变场的特征不同. 对于线性弹性多体系统, 弹性体的应变-位移关系保持为线性且任意时刻的应变分量保持为小量($\epsilon \ll 1$), 因此可通过相对于浮动标架的低阶弹性模态展开, 近似描述其弹性变形位移场. 对于非线性弹性多体系统, 弹性体的应变-位移关系变为非线性或应变分量不再是小量, 即面临几何非线性或材料非线性(2.2节论述)问题, 此时通过低阶模态展开来描述位移场会导致分析精度和可靠性降低, 需采用有限单元或其他类似方法离散弹性体的位移场. 显然, 软机器人属于非线性弹性多体系统.

为了描述多柔体系统的大范围刚体运动与大变形的耦合, 要求有限单元能精确描述任意的大位移和大转动, 即小转角假设不再适用或需通过中间坐标系转换, 因此大转动和大变形分析需采用几何精确单元(Geometrically Exact Method, GME)^[16,17]、绝对节点坐标单元(Absolute Nodal Coordinate Formulation, ANCF)^[18,19]及等几何单元(Iso-Geometric Analysis, IGA)^[20]等非线性有限单元. 上述三类单元的区别在于对梁、板/壳等有限单元的运动插值函数选取不同, 从而导致描述位移场的广义坐标不同. GEM与传统有限元类似, 采用单元节点位移坐标和转角坐标作为广义

坐标; ANCF采用单元节点位置坐标和位置梯度坐标作为广义坐标; IGA则采用CAD (Computer-Aided Design)中的几何控制点作为广义坐标. 对于三维实体单元, 它们与传统有限元方法基本类似, 仅需采用节点位移矢量作为广义坐标. 采用以上非线性有限单元, 可精确描述大变形、大转动问题, 而当考虑大应变时, 还需计入Green应变的高阶项. ANCF单元具备高阶插值函数, 可描述更复杂耦合变形, 因此更适用于软材料或液体材料复杂运动学描述, 但其计算效率低和闭锁问题还需改善. 此外, 基于李群李代数运动学描述的多体动力学问题已引起人们关注^[21,22], 该描述方法与几何精确单元本质相似, 形式与计算处理更简洁, 本文不再叙述.

为了研究大变形薄膜软机器系统的动力学特性, 本文作者团队^[23]建立了可描述大范围运动与大变形耦合效应的ANCF和IGA非线性有限单元, 实现了大变形后屈曲高效分析和大变形、大转动耦合的多体动力学分析^[24], 如端部刚性约束圆柱壳受压大变形分析(图1(a))、充气薄膜圆环后屈曲分析(图1(b))及薄膜太阳帆自旋展开动力学分析(图1(c)).

此外, 为了高效模拟复杂软结构动力学行为或实现软体机器人的控制, 常采用简化的运动学描述. 例

图1 (网络版彩图)超弹性薄壳/膜大变形分析. (a) 端部刚性约束圆柱壳受压变形非线性分析; (b) 充气薄膜圆环后屈曲分析; (c) 太阳帆自旋展开动力学分析(来自文献[24], 已获授权)

Figure 1 (Color online) Large deformation analysis of hyper-elastic shells or membranes. (a) Nonlinear statics of a pinched cylindrical shell with rigid end diaphragms; (b) post-buckling analysis of an inflated torus membrane; (c) deployment dynamics of a spinning solar sail (adapted with permission from ref. [24]. Copyright 2016, Springer Nature).

如, Schenk和Guest^[25]在研究折纸结构折叠过程仿真分析时, 为了考虑结构变形, 提出了折纸结构简化的铰接杆桁架模型, 并引入板平面和折叠线的弯曲刚度, 可实现折纸过程高效运动学分析和刚度分析. Rimoli^[26]利用集中参数系统等效出了连续杆的动力学降阶模型. 该模型较好地捕捉了杆的屈曲特性和横向振动一阶固有模态, 可用于张拉整体结构和格栅材料的动力学分析. 再如, 在连续型机器人的运动学描述和控制中, 采用了一系列梁的运动学假设, 如Euler-Bernoulli梁常曲率假设、分段常曲率假设等. 在Euler-Bernoulli梁运动学假设下, 受端部力矩作用的梁沿轴向各截面的弯矩 M_b 为常数, 即其变形后曲率 $\kappa=M_b/(EI)$ 为常数; 实现该常曲率变形的方式是平行于梁中心轴线安装作动器, 通过作动器对梁端部垂直于轴线的固定夹具施加载荷, 即产生端部力矩^[27,28]. 在分段常曲率假设下, 连续型机器人被分为不同曲率的多个常曲率段, 对每个常曲率段圆弧, 可仅由3个独立几何参数(即圆弧所在平面转角、弧长和曲率)描述, 并可分别构建构型空间(曲线几何参数)与任务空间(曲线空间坐标)之间的映射和构型空间与作动器空间(作动器几何参数或驱动力)之间的映射, 以实现连续型机器人的正逆运动学描述和控制^[28]; 构型空间与作动器空间之间的映射依赖于具体的机器人设计, 对于连续型软体机器人, 该映射需引入软作动器非线性材料模型和非均匀大变形的几何关系^[29].

上述简化运动学描述可使实时运动学仿真和实时闭环控制得以实现, 特别是分段常曲率方法是目前连续机器人研究中最常用的方法. 然而, 当需考虑重力等外载荷、惯性、输出载荷、复杂耦合变形等因素时, 则宜采用基于有限元的描述方法. 例如, Renda等人^[30]提出了离散的Cosserat非线性杆模型, 即分段常应变模型, 并基于李群李代数理论建立了分段软体机器人动力学模型. 该模型除了可描述杆的弯曲曲率和轴向变形外, 还引入了剪切和扭转变形; 进一步, 基于几何精确的Cosserat梁单元和Cosserat壳单元, 建立了统一的水下软体机器人多软体动力学模型, 可有效预测章鱼型软体机器人水下自推进动力学行为^[31]. 再如, Shabana等人^[32]基于ANCF实体单元或四面体单元, 利用单元节点的位置梯度坐标离散描述任意点的曲率, 进而构造了不同单元间曲率连续的线性约束条件, 因此消除或缩小了单元节点上的位置梯度不连续性, 基

本保证了软材料或液体材料动力学建模中单元节点上应变、应力及内力的连续性,提高了模型的几何描述精度.

2.2 非线性弹性软材料建模

软材料是指具有与生物材料(如肌肉、皮肤、软骨等)相同量级弹性模量(小于1 GPa)的材料^[3]. 在描述软机器大变形柔性部件的应力-应变关系时,许多研究采用St. Venant-Kirchhoff本构模型. 该本构模型是在考虑几何非线性前提下对各向同性线弹性材料模型的扩展,其杨氏模量仍为常数. 采用该模型可以准确描述大变形、小应变的柔性部件. 然而,对于具有大变形、大应变的软体,如天然或合成橡胶、生物组织膜等,其应力-应变关系属于各向同性的非线性超弹性本构模型,即杨氏模量不再为常数. 例如,在单轴拉伸橡胶时,其应力-应变曲线在小应变阶段近似为线性,但随着应变增大呈现出明显的非线性. 这类材料还具有高延伸性和低模量的特性,允许的最大拉应变可达500%–1000%,杨氏模量量级为10 MPa^[33]. 基于交联聚合物链的统计热力学规律,Rivlin^[34]首先对不可压超弹性材料提出了最简单的本构模型,即neo-Hookean模型. 该模型描述的应力-应变关系初始为线性,但在某一点后达到平台期. 之后,Rivlin^[34]和Mooney^[35]还发展了与实验数据拟合得更好的Mooney-Rivlin模型. 然而,当材料中的聚合物链被拉伸至交联共价键所允许的最大点,即材料的拉伸极限时,会引起弹性模量急剧增大,以上模型无法预测这一现象. 此时,需采用引入拉伸极限为变量的Gent模型^[36]. 当拉伸极限趋于无穷时,Gent模型可退化为neo-Hookean模型. 此外,超弹性材料模型一般分为可压和不可压,其他本构模型还包括Arruda-Boyce模型、Ogden模型、Yeoh模型等^[33,37]. 为了实现软材料弹性和超弹性力学特性的测量,Sheng等人^[38]提出了一种局部拉伸的表征方法,基于neo-Hookean模型、Mooney-Rivlin模型或Arruda-Boyce模型,通过量纲分析和有限元仿真建立了软材料局部拉伸测试的力-位移关系. 对于超弹性材料静力学或准静态问题的力学分析,在有限元领域已有较多研究^[39,40];但对超弹性部件的大变形、大应变与大范围运动的耦合动

力学问题,目前的研究相对较少. Jung等人^[41]、Orzechowski和Frączek^[42]基于全参数的ANCF梁单元,利用不可压非线性本构模型,如neo-Hookean模型、Mooney-Rivlin模型和Yeoh模型,对超弹性梁进行了动力学分析,并采用罚函数方法施加不可压条件. 本文作者团队^[24]基于ANCF薄壳单元,引入可压和不可压的neo-Hookean模型、Mooney-Rivlin模型,对超弹性薄壳和薄膜进行了动力学分析.

另一方面,在研究水凝胶、介电弹性体、形状记忆聚合物等智能软材料及其应用时,需要在本构模型中考虑应力-应变与化学势、pH、温度场、电场、磁场等外激励的耦合关系. 例如,Hong等人^[43]考虑水凝胶内部和外界环境的溶剂化学势平衡与假设溶剂分子不可压的条件,引入聚合物网络拉伸、聚合物网络和溶剂混合产生的两部分自由能,将其作为材料的Helmholtz自由能,提出了水凝胶在受到载荷或几何约束下并在溶剂中达到平衡状态的非均匀溶胀力学模型,并通过在ABAQUS有限元软件中导入自定义子程序,分析了水凝胶溶胀引发的变形、接触、分叉等力学问题. Suo等人^[44,45]基于连续介质力学和热力学提出了理想介电弹性体的本构模型和大变形理论,分析了介电弹性体的力-电稳定性和电场作用下产生大变形的机理^[46],并通过ABAQUS软件实现了介电弹性体作动器可编程变形的仿真分析^[47]. Garnell等人^[48]建立了介电弹性体平衡态附近的线性动力学方程,研究了介电弹性体扬声器的声学振动特性. 本文作者团队在ANCF框架下提出了多层介电弹性体作动器与弹性薄膜材料复合的非线性有限单元,建立了力-电耦合的大变形多柔体动力学模型,分析了含介电弹性体驱动铰链的薄膜系统大范围运动和大变形动态特性(图2)¹⁾;通过实验和仿真计算,研究了介电弹性体三角形抓手结构在高电压作用下的动力学响应(图3).

2.3 柔性体接触动力学

在软机器运动过程中,绳索、薄膜等柔性部件不仅会发生大变形,而且可能发生与自身、其他部件及外界环境的接触或碰撞,绳索甚至可能发生缠绕、打结等,需建立精确的接触/碰撞模型. 软机器的动力学

1) Luo K, Tian Q, Hu H Y. Dynamic modeling, simulation and design of smart membrane systems driven by soft actuators of multilayer dielectric elastomers. Submitted to *Nonlinear Dynamics*.

图2 (网络版彩图)介电弹性体软铰链驱动的薄膜软机器系统在不同电压下的动力学构型

Figure 2 (Color online) Dynamic configurations of a membrane soft machine system driven by dielectric elastomer joints under different voltages.

图3 (网络版彩图)介电弹性体软抓手在不同电压下的动力学构型. (a) 实验结果; (b) 仿真结果

Figure 3 (Color online) Dynamic configurations of a soft gripper driven by dielectric elastomer actuators under different voltages. (a) Experimental results; (b) simulation results.

响应还受到非线性运动副约束、运动副间隙等的影响, 需要考虑运动副间隙这样小尺度空间内的接触、碰撞、摩擦、润滑等与系统大尺度运动的耦合关系.

模拟柔性体接触/碰撞时, 所涉及的两个主要问题如下: 一是提出高效的接触检测算法, 二是建立准确的接触/碰撞力模型. 柔性体的接触检测方法包括点-点接触、点-线接触、点-面接触、面-面接触等, 且高效接触动力学计算还依赖于异步多尺度、网格自适应等算法^[49-52]. 接触/碰撞法向力的计算方法包括罚函数方法、非光滑动力学方法等^[53-56]; 接触/碰撞切向力由摩擦产生, 其机理非常复杂, 目前多采用简单的Coulomb模型、考虑Streback效应的LuGre模型等. Zhu等人^[57]通过分析线接触结构的屈服机理, 提出了弹塑性线接

触的理论模型, 用于准确预测线接触结构在接触屈服变形过程中的全局力学行为. 本文作者团队^[49,50]针对基于ANCF描述的两根细梁作大范围运动时相互接触问题, 提出了多区域检测算法, 采用罚函数法和LuGre摩擦模型, 研究了绳索在运动中发生接触/碰撞、缠绕等现象. 对于薄膜等柔性部件, 基于区域分解和拉格朗日乘子空间的Motar有限元方法可描述其复杂的面-面接触问题^[51,52]. 此外, 建立含间隙运动副的多柔体系统动力学模型, 也是软机器研究的一个重要方面. 本文作者团队研究了具有多个含间隙转动副的柔性空间机械臂动力学与控制问题^[58]; 还研究了考虑润滑特性的含间隙多柔体动力学问题^[59,60], 同时提出了基于ANCF的弹流润滑圆柱铰与球铰模型, 可应用于人工髋关节的动力学建模^[61,62].

此外, 新型软抓取和爬行机器人采用微观或小尺度结构实现软接触和黏附, 例如受壁虎爪微观结构启发的软黏附抓手^[63,64]、利用静电吸附的爬行机器人^[65]等. 此类机器人在无人操作、自主运动的环境下可发挥其巨大优势, 具有良好的应用前景, 如应用于大型空间结构自主组装, 而研究含接触、黏附的机器人整体动力学行为则需引入更为精细的动力学模型.

2.4 瞬态动力学高效计算

基于有限元方法建立软机器的多柔体系统动力学模型, 计算其瞬态动力学问题导致了高昂的计算成本. 一方面, 与多刚体系统或采用模态降阶描述的多柔体系统相比, 基于非线性有限元描述的多柔体系统具有极多的自由度数或广义坐标数; 另一方面, 由于计算涉及高阶弹性模态, 时间积分算法要求较小的步长且很大程度上依赖于隐式算法.

提高计算效率的常用手段有两种: 一是基于并行计算机设计并行算法, 二是提出模型降阶算法. 并行计算是将计算任务分解到不同计算线程或节点上实现同步计算操作的方法. 常用的并行平台包括OpenMP (Open Multi-Processing, 属共享存储式并行)、MPI (Message Passing Interface, 属分布存储式并行)等. 并行计算一般不损失精度, 但存在如下困难: 一是在不同线程上拆分非线性有限元计算任务比较困难, 拆分界面的单元间耦合性较强, 导致线程之间通信较多; 二是需要根据特定的模型位形设计算法和拆分任务等^[14]; 三是并行计算依赖于线程或节点间的数据传输

速度. 模型降阶则通过构造合适截断基向量来近似表示系统的高维动态位形, 通过损失一定的计算精度来提高计算效率. 模型降阶在小变形的多柔体系统动力学建模计算中得到广泛关注和研究, 常用方法包括: 模态综合法(Component Mode Synthesis)^[66,67]、全局模态参数化方法(Global Modal Parameterization)^[68]、Krylov子空间法^[69]等. 然而, 上述方法难以扩展到大变形多柔体动力学问题.

对于大变形多柔体系统动力学降阶问题, 目前的研究尚处于起步阶段. Boer等人^[70,71]在多体系统运动范围内等距地选择若干个参考位形, 经线性化后采集各参考位形的局部模态, 再通过奇异值分解(SVD)构造出适用于非线性模型降阶的基向量. 基于ANCF方法, Kobayashi等人^[72]假设缩减梁单元轴向发生小应变, 推导了常数弯曲刚度阵, 提出了一种基于模态综合法的平面梁机构降阶方法; 但该方法不够通用, 仅适用于某些特定的多柔体系统, 且难以推广至材料非线性问题. 对于含大范围运动与大变形耦合的多柔体系统, 特别是同时计入材料非线性效应时, 其动力学降阶具有极大的挑战性. 基于本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)的模型降阶方法被用于研究多种非线性动力学问题, 其本质上是一种数据驱动(Data-Driven)的降阶方法, 主要优势是实现系统输出响应与其降阶模型的某种距离最小化, 以实现系统在其位形空间线性子流形上的最佳近似^[73]. POD降阶模型的构造主要依据原系统已有计算或实验结果的统计规律, 首先提取系统输出结果的部分数据以组成快照(Snapshot)矩阵, 然后采用SVD或神经网络算法等对系统快照进行处理, 构造降阶基向量(或称正交模态), 最后通过Galerkin或Petrov-Galerkin等方法将系统力向量、刚度矩阵及质量矩阵等映射到其线性子空间. 由于建立POD降阶模型的前提是至少完成系统全模型的一次计算, 因此它仅对多次计算任务有意义, 特别适用于系统含有多个变化参数的仿真. 出于这样的考虑, Amsallem等人^[74,75]针对变参数系统, 利用流形插值建立了参数化降阶模型并应用于气动弹性力学问题. 针对非线性动力学模型降阶的计算效率, 需近似表示系统的向量和矩阵向其子空间映射时的乘法运算(该近似称为Hyper Reduction), 以提高系统非定常向量和矩阵反复映射操作的计算效率. 例如, Farhat等人^[76]提出一种保能量的取样和加权Hyper Reduction方法.

在多体动力学领域, Baumann等人^[77,78]将参数化模型降阶应用于由浮动坐标标架描述的多柔体系统的移动载荷、材料移除等计算问题. Kim等人^[79]利用刚度估计(Stiffness Evaluation)和POD降阶方法, 针对由ANCF描述的多柔体系统, 提出了非线性内力向量和刚度矩阵的高效计算方法. 本文作者团队^[80]基于POD提出了大变形多柔体系统的模型降阶方法, 分别对系统的广义坐标和约束坐标进行了维数缩减, 并通过并行算法提高了计算缩减刚度矩阵和缩减广义力的效率; 利用流形插值对多柔体系统进行参数化降阶, 且提出了快慢变动力学的参数化降阶方法, 减少了采样次数, 进而提高了变参数多柔体系统瞬态动力学求解的计算效率. 进一步, 利用部件位形快照的POD模态, 还提出了多柔体系统部件级动力学降阶方法, 并利用Greedy算法提高了参数化降阶模型的鲁棒性^[81]. 此外, 结合结构动力学研究中的降阶思路, 将多柔体系统在一系列瞬态动力学计算中的准静态平衡构型上进行局部线性化, 利用Craig-Bampton方法将局部线性化系统的位移增量映射到其局部模态子空间, 并利用动力学积分算法确定该局部线性化系统的初始条件, 从而构造了时变且维数可变的的多柔体系统动力学降阶模型, 具有较高的计算精度和效率^[82].

2.5 软机器控制问题

研究软机器的动力学控制问题, 需先确定软机器通过何种作动方式实现控制. 目前已有大量关于软作动控制器的研究, 如Kotikian等人^[83]利用3D打印的液晶聚合物设计软铰链结构以实现变形被动控制; Li等人^[84]结合气动式软作动器和被动颗粒阻塞结构来控制软抓手的变形和刚度; Rothmund等人^[85]设计了一种气动双稳态阀以实现软作动器的自动控制, 在此基础上Preston等人^[86]设计了软机器的气动式逻辑门控制器以实现更复杂系统的控制.

为了实现软机器运动或变形的准确控制, 需对软控制器进行力学建模和分析, 如本文作者团队与哈佛大学锁志刚教授团队合作^[87], 采用有限元仿真与实验结合的方法, 对图4所示的弯折软阀控制器进行了失稳和密封性的力学特性分析. 为了实现软机器的动力学控制, 常需采用简化的动力学模型. 例如, Chen等人^[88]基于气动式软作动器在不同压强下阶跃响应的实验数据, 发现该系统在达到稳态曲率(变形假设为常

图4 (网络版彩图)弯折软阀气流控制原理. (a) 当弹性圆管弯曲但不发生弯折失稳时, 允许气流通过; (b) 当弹性圆管发生弯折失稳时, 阻断气流通过 (来自文献[87], 已获授权)

Figure 4 (Color online) Air flow control of a soft kink valve. (a) A bending but not kinked elastomeric tube allows air to flow through it; (b) a kinked elastomeric tube prevents the air flow (adapted with permission from ref. [87]. Copyright 2019, Elsevier).

曲率弯曲)前呈现振荡衰减和对数衰减的动力学特性, 从而推断该系统的线性化模型是一个振荡衰减的欠阻尼系统和一个对数衰减的过阻尼系统的叠加, 即系统特征根为左半复平面的一对共轭复根和一个负实根. 为进一步简化, 仅保留共轭复根实部(由此引起的模型摄动可在控制器中考虑), 将系统响应近似为两个过阻尼系统响应的线性叠加, 即系统动力学方程为非线性二阶常微分方程(方程的非定常系数依赖于输入压强变化, 可通过拟合实验数据得到), 并对方程系数中输入压强的高阶项进行一阶Taylor展开近似; 最终, 基于历经一系列近似简化的动力学方程, 实现了该软作动器的变结构滑模控制器设计. 再如, Marchese等人^[29,89]对含分布式气动作动器的连续型软体机器人, 基于分段常曲率假设建立了分布作动器驱动压强、曲线构型、末端执行器空间坐标相互之间的正逆运动学映射, 从而基于轨迹优化算法设计了该连续型软体机器人的实时闭环控制器.

3 问题与挑战

软机器或软体机器人是一个新颖和活跃的研究领

域, 其动力学建模和仿真则存在很多问题和挑战. 首先, 由于软机器运动的复杂性、软材料和软接触的非线性, 使得建模和仿真面临严峻的计算挑战; 其次, 由于软机器设计的多样性, 难以建立通用的计算模型, 往往需要根据设计功能和特定工况引入或考虑新的力学模型; 最后, 由于软机器动力学控制的特定需求, 动力学建模无法简单地追求模型精确性, 需考虑复杂模型的降阶近似问题. 为了更好地解决这些问题和挑战, 在软机器动力学与控制研究中需考虑以下平衡关系.

第一, 运动学描述的通用性和特定性的平衡. 若采用有限元方法, 可较通用地描述多数软机器的运动学特性, 所建立的模型相对比较精细或精确, 但带来的问题是建模难度大、分析效率低和控制设计难等. 而若依据特定的软机器模型引入运动学假设, 或在软机器设计过程中基于假设增加运动限制(如在描述线状连续型软体机器人时, 常采用分段常曲率假设, 无疑便于建立运动学映射关系, 进而实现闭环控制), 但带来的问题是模型仅适用于描述一种或一类系统、无法分析复杂变形和难以考虑惯性和外载荷引起的动力学效应等.

第二, 模型精确性与计算高效性的平衡. 若建立软机器的精确动力学模型, 如考虑复杂运动的几何非线性、材料非线性、界面非线性等, 仿真计算变得十分耗时, 难以进行拓扑优化等设计, 设计周期也无法满足要求; 若采用软机器的简化或近似动力学模型, 可大大提高计算效率, 但往往损失分析精度或忽略小尺度效应.

第三, 模型复杂性与控制可操作性的平衡. 一般而言, 建立的动力学模型自由度越多、考虑的细节越复杂, 分析精度越高, 但控制律设计越困难或甚至无法实施. 目前常用的闭环控制方法一般仅适用于自由度较少的简单系统, 主要是由线性常微分方程组所描述的系统, 而软机器的动力学方程一般为高维的非线性偏微分方程组或微分-代数方程组, 要进行一系列的近似简化才能实现控制, 但简化过程会带来模型不确定性和失真等.

第四, 有源自由度与无源自由度的平衡. 软部件柔顺性导致其运动多样性, 产生了硬部件无法比拟的优势, 同时也造成建模和控制的困难. 在软机器设计中, 一般需对软部件的运动加以限制, 如常曲率变形设计, 或采用分布式作动器对其实施控制, 降低其灵活性, 导致受控后的有源自由度与非受控的无源自由度具有不

同的运动可能性. 因此, 需根据软机器人的功能和实际工况平衡运动灵活性与可控性的比例.

第五, 基于动力学模型的不同控制策略的平衡. 若采用包含更多系统动力学特性的复杂动力学模型, 可利用基于精确动力学预测的开环控制策略, 但控制的时效性较低或鲁棒性不足; 若采用含系统主要动力学特性的简化模型, 可设计基于近似动力学预测的闭环控制律, 但该方法的通用性较差, 仅适用于特定的软机器人系统.

4 总结与展望

本文综述了软机器人动力学建模与仿真的研究进展, 主要从动力学与控制、多柔体系统动力学的研究角度, 分别针对软机器人运动学描述、非线性软材料建模、柔性体接触动力学、瞬态动力学高效计算、软机器人控制五个科学问题, 阐述了国内外研究现状, 进而分析了存在的问题和挑战, 指出了在研究中需考虑的五个平衡关系.

对于软机器人动力学建模与仿真的未来研究, 基于以上研究现状、问题及挑战, 作者预测今后一个时期内该领域的潜在研究方向包括: 针对软机器人运动学描述的科学问题, 一是考虑复杂几何、智能复合材料、粘接及组装的动力学建模方法, 二是软机器人三维有限空间的运动轨迹优化和复杂工况定位技术; 针对软材料建模的科学问题, 一是软材料的力、热、磁、电、光、化学势等多场耦合动力学建模, 二是通过动力学分析, 预测软机器人快速、重复、大变形运动工况中的软材料屈服、断裂和疲劳失效等行为; 针对柔性体接触动力学的科学问题, 一是高效接触检测动力学仿真

技术, 二是自适应时间积分算法; 针对瞬态动力学高效计算的科学问题, 一是用于长时间仿真的高效保能量算法, 二是动力学模型降阶方法和实时仿真技术; 针对软机器人控制的科学问题, 一是软机器人动力学控制的新方法, 二是软机器人运动过程中几何传感和力传感技术; 针对软机器人系统动力学设计的科学问题, 一是软机器人输入载荷分布与大小的设计和输出载荷的确定, 二是惯性、外载荷和耦合变形对软机器人动力学特性的影响, 三是分布式软作动器、末端执行器工作和非受控(或无源)自由度运动导致的部件或系统振动问题.

目前, 软机器人在医疗装备、复杂装配等领域已有较强的应用需求, 但多数研究尚处于部件级的原型样机设计阶段, 分析方法往往仅依赖于商用有限元软件的静力学分析手段. 基于动力学模型的仿真分析和预测, 为提升软机器人复杂度、拓展其功能和促进系统级设计提供理论基础和技术支撑. 同时, 新型软机器人的研制也为动力学与控制学科发展提供新的机遇和挑战, 促进理论、计算和实验研究的有机结合, 推动动力学与控制新方法、新技术的探索和应用.

未来, 作为工业机器人重要补充和与人类亲密合作的软机器人, 具有广阔的研究和应用前景. 通过软材料介质交叉、多尺度交叉、刚柔交叉、网络空间与物理空间交叉等, 交叉力学的研究为软机器人的设计和实现提供了无限可能^[90]. 微纳材料与结构的力学理论突破与跨尺度关联, 为软机器人新材料或新结构研制和智能控制提供自上而下的创新动力^[91]. 同时, 结合人工智能、柔性电子、智能软材料等先进技术的高速发展, 软机器人系统研究和动力学与控制研究也将碰撞出更精彩的火花.

参考文献

- 1 Baumgartner R, Kogler A, Stadlbauer J M, et al. A lesson from plants: High-speed soft robotic actuators. *Adv Sci*, 2020, 7: 1903391
- 2 Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 20400–20403
- 3 Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, 521: 467–475
- 4 McCracken J M, Donovan B R, White T J. Materials as machines. *Adv Mater*, 2020, 32: 1906564
- 5 McBride M K, Podgorski M, Chatani S, et al. Thermoreversible folding as a route to the unique shape-memory character in ductile polymer networks. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 22739–22745
- 6 Chen T, Bilal O R, Lang R, et al. Autonomous deployment of a solar panel using elastic origami and distributed shape-memory-polymer actuators. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 064069
- 7 Wang Z, Li K, He Q, et al. A Light-powered ultralight tensegrity robot with high deformability and load capacity. *Adv Mater*, 2018, 31: 1806849

- 8 SunSpiral V, Gorospe G, Bruce J, et al. Tensegrity based probes for planetary exploration: Entry, descent and landing (EDL) and surface mobility analysis. In: Proceedings of 10th International Planetary Probe Workshop. San Jose, 2013. 13
- 9 Liang Y M, Cao X N, Chen X P, et al. Bio-inspired rigid-soft coexisting robotic fish (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2018, 48: 1295–1301 [梁艺鸣, 曹许诺, 陈祥平, 等. “刚-柔”共融型仿生机器鱼. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1295–1301]
- 10 Wang Z, Torigoe Y, Hirai S. A prestressed soft gripper: Design, modeling, fabrication, and tests for food handling. *IEEE Robot Autom Lett*, 2017, 2: 1909–1916
- 11 Jiang H, Liu X, Chen X, et al. Design and simulation analysis of a soft manipulator based on honeycomb pneumatic networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Qingdao: IEEE, 2016. 350–356
- 12 Suo Z. Mechanics of stretchable electronics and soft machines. *MRS Bull*, 2012, 37: 218–225
- 13 Liu C, Tian Q, Yan D, et al. Dynamic analysis of membrane systems undergoing overall motions, large deformations and wrinkles via thin shell elements of ANCF. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2013, 258: 81–95
- 14 Li P, Liu C, Tian Q, et al. Dynamics of a deployable mesh reflector of satellite antenna: Parallel computation and deployment simulation. *J Comput Nonlinear Dyn*, 2016, 11: 061005
- 15 Hu H, Tian Q, Liu C. Computational dynamics of soft machines. *Acta Mech Sin*, 2017, 33: 516–528
- 16 Bauchau O A. Flexible Multibody Dynamics. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010
- 17 Simo J C, Vu-Quoc L. On the dynamics in space of rods undergoing large motions—A geometrically exact approach. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 1988, 66: 125–161
- 18 Shabana A A. Dynamics of Multibody Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 19 Shabana A A. An absolute nodal coordinate formulation for the large rotation and large deformation analysis of flexible bodies. Technical Report. Department of Mechanical Engineering, University of Illinois at Chicago, 1996. MBS96-1-UIC
- 20 Hughes T J R, Cottrell J A, Bazilevs Y. Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2005, 194: 4135–4195
- 21 Chevallier D P, Lerbet J. Multi-Body Kinematics and Dynamics with Lie Groups. Amsterdam: Elsevier, 2017
- 22 Brüls O, Cardona A, Arnold M. Lie group generalized- α time integration of constrained flexible multibody systems. *Mechanism Machine Theor*, 2012, 48: 121–137
- 23 Luo K, Liu C, Tian Q, et al. An efficient model reduction method for buckling analyses of thin shells based on IGA. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2016, 309: 243–268
- 24 Luo K, Liu C, Tian Q, et al. Nonlinear static and dynamic analysis of hyper-elastic thin shells via the absolute nodal coordinate formulation. *Nonlinear Dyn*, 2016, 85: 949–971
- 25 Schenk M, Guest S D. Origami folding: A structural engineering approach. *Origami*, 2011, 5: 291–304
- 26 Rimoli J J. A reduced-order model for the dynamic and post-buckling behavior of tensegrity structures. *Mech Mater*, 2018, 116: 146–157
- 27 Gravagne I A, Rahn C D, Walker I D. Large deflection dynamics and control for planar continuum robots. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2003, 8: 299–307
- 28 Webster III R J, Jones B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review. *Int J Robotics Res*, 2010, 29: 1661–1683
- 29 Marchese A D, Rus D. Design, kinematics, and control of a soft spatial fluidic elastomer manipulator. *Int J Robotics Res*, 2016, 35: 840–869
- 30 Renda F, Cacucciolo V, Dias J, et al. Discrete cosserat approach for soft robot dynamics: A new piece-wise constant strain model with torsion and shears. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon: IEEE, 2016. 5495–5502
- 31 Renda F, Giorgio-Serchi F, Boyer F, et al. A unified multi-soft-body dynamic model for underwater soft robots. *Int J Robotics Res*, 2018, 37: 648–666
- 32 Shabana A A, Zhang D. ANCF curvature continuity: Application to soft and fluid materials. *Nonlinear Dyn*, 2020, doi: 10.1007/s11071-11020-05550-11075
- 33 Treloar L R G. The Physics of Rubber Elasticity. New York: Oxford University Press, 1975
- 34 Rivlin R S. Large elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory. *Philos T R Soc A, Math Phys Sci*, 1948, 241: 379–397
- 35 Mooney M. A theory of large elastic deformation. *J Appl Phys*, 1940, 11: 582–592

- 36 Gent A N. A new constitutive relation for rubber. [Rubber Chem Tech](#), 1996, 69: 59–61
- 37 Shabana A A. *Computational Continuum Mechanics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018
- 38 Sheng J Y, Guo H Y, Cao Y P, et al. Regional stretch method to measure the elastic and hyperelastic properties of soft materials. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2018, 61: 024611
- 39 Kiendl J, Hsu M C, Wu M C H, et al. Isogeometric Kirchhoff-Love shell formulations for general hyperelastic materials. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2015, 291: 280–303
- 40 Basar Y, Ding Y. Finite-element analysis of hyperelastic thin shells with large strains. [Comput Mech](#), 1996, 18: 200–214
- 41 Jung S P, Park T W, Chung W S. Dynamic analysis of rubber-like material using absolute nodal coordinate formulation based on the non-linear constitutive law. [Nonlinear Dyn](#), 2011, 63: 149–157
- 42 Orzechowski G, Frączek J. Nearly incompressible nonlinear material models in the large deformation analysis of beams using ANCF. [Nonlinear Dyn](#), 2015, 82: 451–464
- 43 Hong W, Liu Z, Suo Z. Inhomogeneous swelling of a gel in equilibrium with a solvent and mechanical load. [Int J Solids Struct](#), 2009, 46: 3282–3289
- 44 Suo Z, Zhao X, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics. [J Mech Phys Solids](#), 2008, 56: 467–486
- 45 Suo Z. Theory of dielectric elastomers. [Acta Mech Solid Sin](#), 2010, 23: 549–578
- 46 Zhao X, Suo Z. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers. [Appl Phys Lett](#), 2007, 91: 061921
- 47 Zhao X, Suo Z. Method to analyze programmable deformation of dielectric elastomer layers. [Appl Phys Lett](#), 2008, 93: 251902
- 48 Garnell E, Rouby C, Doaré O. Dynamics and sound radiation of a dielectric elastomer membrane. [J Sound Vib](#), 2019, 459: 114836
- 49 Wang Q, Tian Q, Hu H. Dynamic simulation of frictional contacts of thin beams during large overall motions via absolute nodal coordinate formulation. [Nonlinear Dyn](#), 2014, 77: 1411–1425
- 50 Wang Q, Tian Q, Hu H. Dynamic simulation of frictional multi-zone contacts of thin beams. [Nonlinear Dyn](#), 2016, 83: 1919–1937
- 51 McDevitt T W, Laursen T A. A mortar-finite element formulation for frictional contact problems. [Int J Numer Meth Engng](#), 2000, 48: 1525–1547
- 52 Seitz A, Farah P, Kremheller J, et al. Isogeometric dual mortar methods for computational contact mechanics. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2016, 301: 259–280
- 53 Gilardi G, Sharf I. Literature survey of contact dynamics modelling. [Mechanism Machine Theor](#), 2002, 37: 1213–1239
- 54 Flores P, Machado M, Silva M T, et al. On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics. [Multibody Syst Dyn](#), 2011, 25: 357–375
- 55 Pfeiffer F, Foerg M, Ulbrich H. Numerical aspects of non-smooth multibody dynamics. [Comput Methods Appl Mech Eng](#), 2006, 195: 6891–6908
- 56 Wang Q, Zhuang F F, Guo Y Y, et al. Advances in the research on numerical methods for non-smooth dynamics of multibody systems (in Chinese). [Adv Mech](#), 2013, 43: 101–111 [王琪, 庄方方, 郭易圆, 等. 非光滑多体系统动力学数值算法的研究进展. [力学进展](#), 2013, 43: 101–111]
- 57 Zhu H, Zhao Y, He Z, et al. An elastic-plastic contact model for line contact structures. [Sci China-Phys Mech Astron](#), 2018, 61: 054611
- 58 Liu C, Tian Q, Hu H. Dynamics and control of a spatial rigid-flexible multibody system with multiple cylindrical clearance joints. [Mechanism Machine Theor](#), 2012, 52: 106–129
- 59 Tian Q, Zhang Y, Chen L, et al. Simulation of planar flexible multibody systems with clearance and lubricated revolute joints. [Nonlinear Dyn](#), 2010, 60: 489–511
- 60 Tian Q, Liu C, Machado M, et al. A new model for dry and lubricated cylindrical joints with clearance in spatial flexible multibody systems. [Nonlinear Dyn](#), 2011, 64: 25–47
- 61 Tian Q, Xiao Q, Sun Y, et al. Coupling dynamics of a geared multibody system supported by ElastoHydroDynamic lubricated cylindrical joints. [Multibody Syst Dyn](#), 2015, 33: 259–284
- 62 Tian Q, Lou J, Mikkola A. A new elastohydrodynamic lubricated spherical joint model for rigid-flexible multibody dynamics. [Mechanism Machine Theor](#), 2017, 107: 210–228
- 63 Hawkes E W, Jiang H, Cutkosky M R. Three-dimensional dynamic surface grasping with dry adhesion. [Int J Robotics Res](#), 2015, 35: 943–958
- 64 Jiang H, Hawkes E W, Fuller C, et al. A robotic device using gecko-inspired adhesives can grasp and manipulate large objects in microgravity. [Sci Robot](#), 2017, 2: eaan4545
- 65 Wang H, Yamamoto A, Higuchi T. A crawler climbing robot integrating electroadhesion and electrostatic actuation. [Int J Adv Robotic Syst](#), 2014,

11: 191

- 66 Pechstein A, Reischl D, Gerstmayr J. A generalized component mode synthesis approach for flexible multibody systems with a constant mass matrix. *J Comput Nonlinear Dyn*, 2013, 8: 011019
- 67 Holzwarth P, Eberhard P. SVD-based improvements for component mode synthesis in elastic multibody systems. *Eur J Mech-A/Solids*, 2015, 49: 408–418
- 68 Bruls O, Duysinx P, Golinval J C. The global modal parameterization for non-linear model-order reduction in flexible multibody dynamics. *Int J Numer Meth Engng*, 2007, 69: 948–977
- 69 Lehner M, Eberhard P. A two-step approach for model reduction in flexible multibody dynamics. *Multibody Syst Dyn*, 2007, 17: 157–176
- 70 Boer S E, ten Hoopen D, Aarts R G K M, et al. Model reduction for efficient time-integration of planar flexible multibody models. *Int J Non-Linear Mech*, 2013, 53: 75–82
- 71 Boer S E, Aarts R G K M, Hakvoort W B J. Model reduction for efficient time-integration of spatial flexible multibody models. *Multibody Syst Dyn*, 2014, 31: 69–91
- 72 Kobayashi N, Wago T, Sugawara Y. Reduction of system matrices of planar beam in ANCF by component mode synthesis method. *Multibody Syst Dyn*, 2011, 26: 265–281
- 73 Kerschen G, Golinval J, Vakakis A F, et al. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: An overview. *Nonlinear Dyn*, 2005, 41: 147–169
- 74 Amsallem D, Farhat C. Interpolation method for adapting reduced-order models and application to aeroelasticity. *AIAA J*, 2008, 46: 1803–1813
- 75 Amsallem D, Cortial J, Carlberg K, et al. A method for interpolating on manifolds structural dynamics reduced-order models. *Int J Numer Meth Engng*, 2009, 80: 1241–1258
- 76 Farhat C, Avery P, Chapman T, et al. Dimensional reduction of nonlinear finite element dynamic models with finite rotations and energy-based mesh sampling and weighting for computational efficiency. *Int J Numer Meth Engng*, 2014, 98: 625–662
- 77 Baumann M, Eberhard P. Interpolation-based parametric model order reduction for material removal in elastic multibody systems. *Multibody Syst Dyn*, 2017, 39: 21–36
- 78 Fischer M, Eberhard P. Application of parametric model reduction with matrix interpolation for simulation of moving loads in elastic multibody systems. *Adv Comput Math*, 2015, 41: 1049–1072
- 79 Kim E, Kim H, Cho M. Model order reduction of multibody system dynamics based on stiffness evaluation in the absolute nodal coordinate formulation. *Nonlinear Dyn*, 2017, 87: 1901–1915
- 80 Luo K, Hu H, Liu C, et al. Model order reduction for dynamic simulation of a flexible multibody system via absolute nodal coordinate formulation. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2017, 324: 573–594
- 81 Hou Y, Liu C, Hu H. Component-level proper orthogonal decomposition for flexible multibody systems. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2020, 361: 112690
- 82 Tang Y, Hu H, Tian Q. Model order reduction based on successively local linearizations for flexible multibody dynamics. *Int J Numer Methods Eng*, 2019, 118: 159
- 83 Kotikian A, McMahan C, Davidson E C, et al. Untethered soft robotic matter with passive control of shape morphing and propulsion. *Sci Robot*, 2019, 4: eaax7044
- 84 Li Y, Chen Y, Yang Y, et al. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers. *IEEE Trans Robot*, 2017, 33: 446–455
- 85 Rothmund P, Ainla A, Belding L, et al. A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators. *Sci Robot*, 2018, 3: eaar7986
- 86 Preston D J, Rothmund P, Jiang H J, et al. Digital logic for soft devices. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 7750–7759
- 87 Luo K, Rothmund P, Whitesides G M, et al. Soft kink valves. *J Mech Phys Solids*, 2019, 131: 230–239
- 88 Chen W, Xiong C, Liu C, et al. Fabrication and dynamic modeling of bidirectional bending soft actuator integrated with optical waveguide curvature sensor. *Soft Robot*, 2019, 6: 495–506
- 89 Marchese A D, Tedrake R, Rus D L. Dynamics and trajectory optimization for a soft spatial fluidic elastomer manipulator. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle: IEEE, 2015. 2528–2535
- 90 Yang W, Wang H T, Li T F, et al. X-Mechanics—An endless frontier. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 014601
- 91 Xu Z P, Zheng Q S. Micro- and nano-mechanics in China: A brief review of recent progress and perspectives. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 074601

Advances in dynamic modeling and simulation of soft machines

LUO Kai^{*}, TIAN Qiang & HU HaiYan

Department of Mechanics, School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Soft machines are a sort of mechanical systems mainly composed of soft materials and soft structures. Its soft compliance enables motion of large deformation, which results in a series of functionalities that traditional machines are not capable to achieve and the possibility to interact closely with humans. Therefore, soft machines are not only important complement to artificial machines but also a fascinating branch in future development of advanced machines. Mechanical modeling and analysis offer essential ways to designing and manufacturing soft machines. Dynamic modeling and simulation become increasingly effective and necessary for systematic design and motion control. This paper reviews and analyzes advances in dynamic modeling and simulation of soft machines. First, recent developments are overviewed from five aspects, namely kinematics, modeling of soft material, contact dynamics of flexible bodies, efficient computation of transient dynamics, and dynamic control. Second, problems and challenges are discussed. Several balances in the research of dynamics of soft machines are proposed. Third, potential directions in future research are predicted according to the current developments and challenges. Summary and prospects on dynamics and control of soft machines are given.

soft machines, soft robotics, dynamic modeling and simulation, dynamic control

PACS: 46.15.-x, 46.25.-y, 45.40.-f, 45.20.-d, 45.80.+r

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0136](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0136)