



# 机械工程学报<sup>®</sup>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专栏：纪念张启先院士诞辰95周年

客座主编：于靖军 教授

 中国机械工程学会 主办

万方数据

56卷 **19**期 **半月刊**  
2020年10月





## /// 特邀专栏 ///

### 纪念张启先院士诞辰 95 周年

客座主编：于靖军 教授（北京航空航天大学）

策划编辑：罗晓琪（《机械工程学报》编辑部）

#### 1 继承和弘扬启先精神，共迎机器人机构学明天——纪念张启先院士诞辰 95 周年

#### 2 基于机构运动的大变形超材料

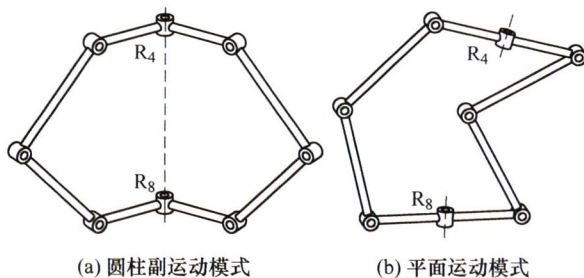
陈 焱



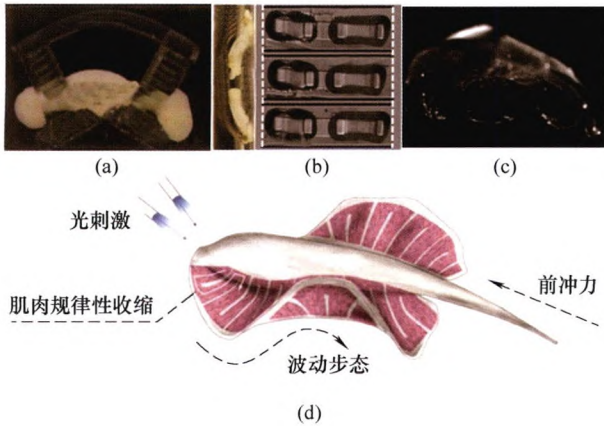
**摘要：**超材料是一类新型人工复合材料或复合结构，特殊的微观或宏观内部结构设计使它们具有自然材料不具备的超常物理性质。超材料的发展经历了二维电磁超表面到三维机械、热学、声学、光学超材料的发展之后，正进入可编程、可调控的阶段，近年来涌现出各种各样具有大变形能力的超材料，以实现物理性能的设计预期与主被动适应。对大变形超材料的设计、功能、制造等方面的发展现状进行了简要的综述，分析这类超材料研究当前存在的主要问题与发展趋势，为多功能超材料的编程与调控研究提供借鉴与参考。

#### 14 多模式机构研究进展

于靖军 刘 凯 孔宪文

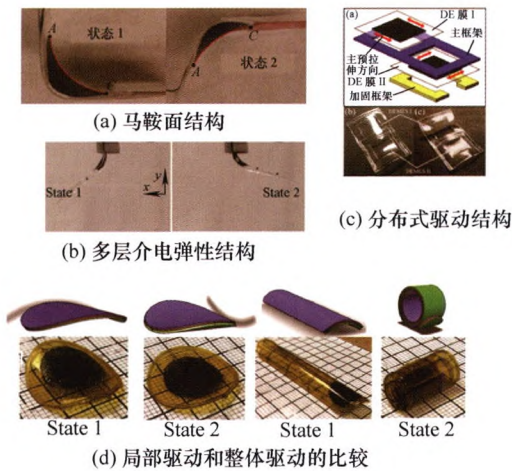


**摘要：**多模式机构作为可重构机构的一个重要分支具备运动模式转换时间短、所需驱动器少等优点，在各个领域都极具应用前景。经过 20 年的发展，虽然涌现出一系列多模式机构的设计、分析方法，但是多模式机构的研究仍面临诸多挑战。根据不同运动模式下的几何、结构特征，概括并详述了多模式机构利用关节轴线、杆件和多模式单元进行运动模式切换的三种形式；从方法和技术的角度，综述了多模式机构在构型设计、运动模式分析以及应用方面的国内外研究现状，并对多模式机构面临的挑战与发展趋势进行了展望。



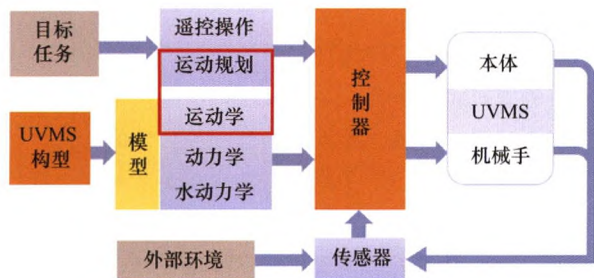
**摘要:** 受软体材料、制造工艺、核心部件的限制,大多数的软体机器人负载能力较低,不能随机携带控制和能量硬件系统,不得不通过管路和线路系留在外部硬件上,这严重限制了软体机器人的作业范围和应用领域。在众多的软体机器人中,软体抓持机器人发展较快,主要包括两类:一类是软体末端,主要配合机械臂、水下机器人、无人机、人体等完成抓取任务;另一类是以抓持功能为主兼具位姿变换功能的运动软体夹持器,实现了自身抓持结构特性与运动功能的巧妙融合。针对软体机器人技术领域无系留与大负载的共性话题,聚焦应用前景广阔的软体抓持机器人,从无系留驱动与系统集成、负载力提升等方面分析了软体抓持机器人发展过程中所取得的显著成果和存在的不足之处,系统总结了无系留大负载软体抓持机器人研发技术和面临的主要挑战,为软体抓持机器人发展方向与性能提升提供参考,推动软体机器人进入实际应用领域。

43 电活性双稳态机构及其在软体机器人中应用的研究进展



**摘要:** 电活性双稳态机构兼具电活性材料的仿人工肌肉的快速电致变形能力及双稳态机构在两个位置上精准定位的特性,是新一代具有主动响应能力的机械机构,在航空航天、医疗康复、生物仿生等机器人领域中具有重要的应用前景。综述梳理和分析近十五年内电活性双稳态机构的研究成果,按照运动方式可分成面内运动与离面运动,按照结构设计可分成一体化与非一体化。通过增加额外的机械机构,可将电活性双稳态扩展为三稳态,将静态驱动扩展为动态谐振驱动。基于电活性双稳态机构的软体机器人具有更精准的位移输出和更迅速的运动响应,可实现多物体的自适应抓取、仿生弹舌驱动,变刚度等功能,以及发展具有在陆地、水下和空中的运动的柔性软体机器人。目前的电活性双稳态机构在设计方法、控制机制、稳态状态调控、制造技术中存在诸多前沿问题,需要机械、力学、材料等多学科知识的交叉融合。

53 水下机器人-机械手系统研究进展: 结构、建模与控制



**摘要:** 水下机器人-机械手系统(Underwater vehicle-manipulator systems, UVMS)可以完成除观测之外的水下采样、抓取、操作等任务,在海洋科学考察、海洋工程等领域得到广泛应用。通过对近年来国内外 UVMS 的研究现状进行综述,介绍了不同的 UVMS 本体结构与机械手构型,总结了 UVMS 的运动学、动力学和水动力学的建模方法,分析了人机交互式遥控操作控制方式,针对 UVMS 的自主控制中的运动规划、位置与轨迹跟踪、独立与协调控制、运动补偿控制、力/位置混合控制、视觉伺服控制等问题做了分类阐述。最后总结并对 UVMS 未来发展方向进行了展望,以期对相关研究人员提供参考。

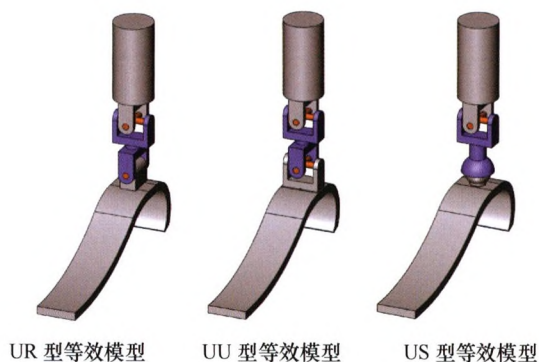




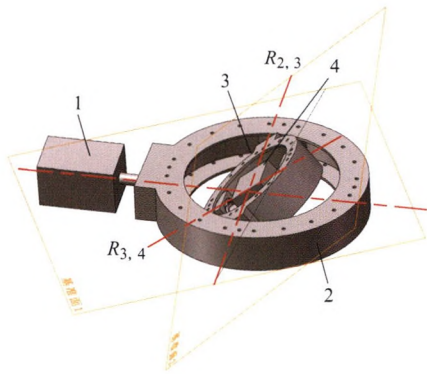
**摘要:** 大型复杂构件是航空航天、能源、船舶等领域装备的核心结构件，此类构件通常具有尺寸大、形状复杂、刚性弱等特点。传统“分体离线加工-在线检测”模式存在工艺不稳定、过程复杂、柔性差、周期长等问题，以龙门式多轴数控机床加工为代表的“包容式”加工模式，难以适应大型复杂构件的高效高质量加工制造需求。提出一种基于移动式 and 吸附式机器人的多机协同原位加工新模式，通过多机器人系统自主寻位、精确定位加工与加工质量原位检测，实现大型复杂构件多安装面并行铣削、制孔与打磨等作业。多机器人系统包括移动式混联机器人、吸附式并联机器人、移动式串联铣削机器人、移动式双臂加工机器人和移动式打磨机器人。构建多机协同原位加工模式，需要揭示多机器人协同原位加工行为与大型弱刚性结构件质量控制的交互机理，面临着本体、测量、工艺和集成四个方面的挑战，需要设计高灵活、高刚度的移动式 and 吸附式加工机器人，解决移动机器人自主准确寻位和超大结构件原位高精检测难题，攻克加工变形误差在线补偿和振动抑制技术，通过集成实现多机协同高效高精加工，为大型复杂构件的高效高质量制造提供创新技术及装备，并实现此类构件制造核心技术及装备自主可控。

## 79 面向踝部康复的广义球面并联机构型综合

刘承磊 张建军 戚开诚 牛建业 李为民 郭士杰

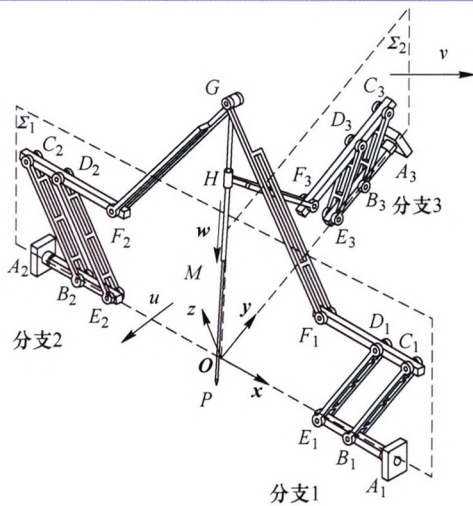


**摘要:** 针对现有踝关节康复机器人难以充分拟合踝关节复杂运动，人机相容性较差的问题，提出一系列与踝关节实际骨结构匹配程度更高的串联等效拟合模型。为满足踝关节串联等效拟合模型对康复机器人机构本体的功能需求，给出一种具有串联等效拟合模型的广义球面并联机构型综合方法。首先枚举出广义球面机构的基本构件及运动副，并依此构造出广义球面支链。继而基于螺旋理论分析单支链以及多支链组合对动平台的约束性能，给出支链的组合条件与原则，阐明不同支链在机构中作用的异同，并依此归纳出位置支链和姿态支链两类广义球面基本支链。最后基于基本支链的约束特性，根据支链组合条件，综合出一系列适用于踝关节康复机器人本体研究的广义球面并联机构，并通过螺旋理论证明其与踝关节串联等效拟合模型的自由度数及性质具有一致性，为此类康复机器人本体设计提供理论依据。



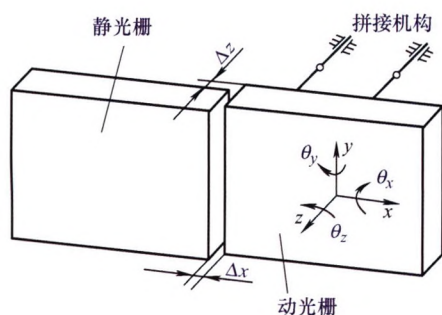
**摘要:** 为了拓展变胞机构的种类, 提出了一种变胞运动单元, 该变胞单元采用三个旋转关节, 并且三个旋转关节可以通过位置调节形成等效球铰、虎克铰以及转动副。与传统的锁定运动副来实现变胞功能的变胞单元相比, 此变胞单元三种构型的切换只需对轴线位置调整, 无需额外增加关节锁死电机。通过研究由线矢量构成的螺旋系统的相关性, 揭示了变胞运动单元构态变化的基本原理。提出了可用于构造新型变胞并联机构的支链构型设计方法, 并基于螺旋的互易性分析了各支链构型所必须满足的几何约束条件。提出了两种变胞并联机构, 通过不同的支链装配形式可将其从6自由度构型转换为3自由度构型, 并对支链安装形式进行改进, 构造出了具有3自由度平移模式和3自由度转动模式的并联机构。对变胞支链作为中心支链组装而成的并联机构的构型及对应的运动类型进行了分析, 获得了六种不同构型的并联机构。

103 一种可用于微创手术的并联机构运动学与性能优化



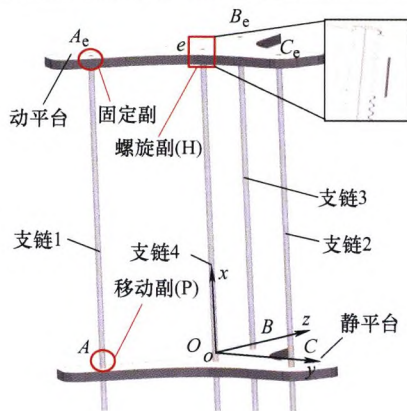
**摘要:** 与串联机构相比, 并联机构具有刚度好, 精度高, 响应快等优点, 适合用于医疗领域。微创穿刺活检等手术要求机器人机构能够输出远中心运动。提出了一种用于微创手术的新型远中心并联机构, 其分支内部包含平行四边形闭环子链。采用螺旋理论对机构自由度进行了分析, 证明其能输出两个转动运动和一个移动运动, 且所有运动均通过远端固定中心。对机构进行位置分析, 建立了驱动参数与末端参数之间的映射。通过速度分析建立了雅可比矩阵, 并分析得到了机构的奇异位形, 包括逆解奇异、正解奇异和混合奇异。应用搜索法分析了机构的工作空间。采用运动/力传递指标对机构进行了性能分析, 绘制工作空间内的性能图谱。以优质空间大小为目标对机构进行了尺度优化。

113 大负载高精度光栅拼接柔顺并联机构的设计方法



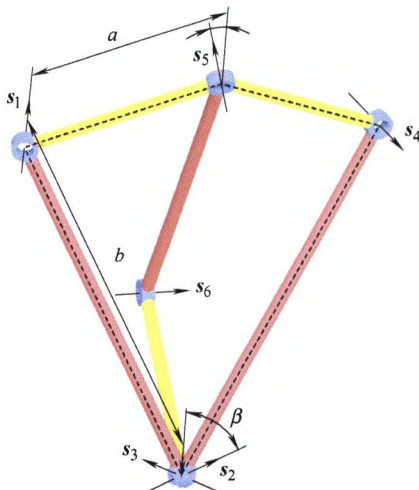
**摘要:** 由于加工工艺的限制, 通常采用多块小口径光栅机械式拼接的方法来制备大尺寸光栅。为保证打靶成功, 要求光栅拼接机构可以实现纳米级的运动精度。基于压电陶瓷驱动的柔顺并联机构可以达到纳米级的运动精度, 但是柔性关节的引入降低了机构的承载能力。为解决柔顺并联机构中存在的“大负载”与“高精度”之间的矛盾, 引入驱动与承载单元解耦的思想, 基于约束设计法提出一种满足大口径光栅拼接机构大行程、大负载、高精度要求的新型光栅拼接柔顺并联机构, 该机构具有刚柔混合、串并混联、三面正交、单点支撑、存在一条恰约束被动支链的特点。为实现光栅拼接机构的高精度运动, 对设计的新型光栅拼接机构进行运动学分析, 并搭建试验系统测试拼接机构的运动精度。试验结果表明利用所提设计方法设计的光栅拼接柔顺并联机构能满足拼接机构的任务要求。





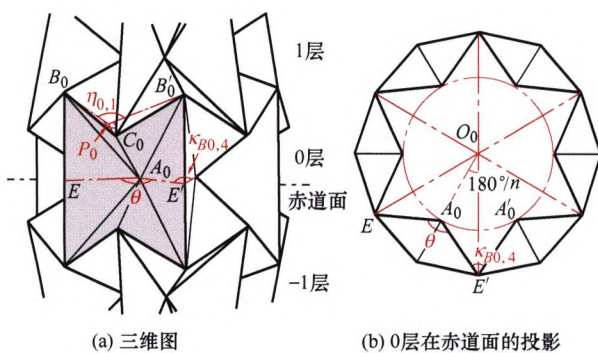
**摘要:** 提出了一种新型 4-DOF 柔性并联连续体机构, 将该机构与末端绳驱动的抓手相结合, 设计完成具有灵活抓取性能的操作手。将该柔性机构通过柔性支链等效的方式等效为传统刚性连杆的并联机构, 并且运用螺旋理论对该机构进行自由度分析; 采用经典的 Cosserat Rod 模型对机构进行运动学建模; 通过对比分析三种并联连续体机构的可操作度, 4-DOF 并联连续体机构由于具有一个额外的扭转自由度, 使得操作手能够更加灵活地抓取物体, 在此基础上给出了一组操作手抓取的仿真实例。最后通过试验验证机构自由度以及运动学模型的数值解, 并且实现操作手灵活抓取的性能。

132 基于 FIS 理论的 Myard 环形组网机构运动学分析



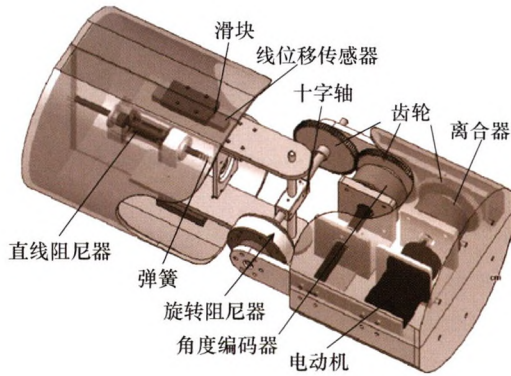
**摘要:** 为揭示折展机构连续与瞬时运动的本质与代数关联, 将有限瞬时旋量理论(FIS 理论)应用于一类过约束折展机构的分析中, 提出包括折展单元及其组网机构的运动学分析方法。首先介绍了 FIS 理论的基本原理、Myard 机构和 Myard 环形组网机构的组成原理。其次对于 Myard 机构, 通过选定合适的初始位形, 以构建有限旋量闭环方程的方式解决了折展单元的关节运动参数映射, 基于旋量三角积与螺旋运动的定义提出了基于有限旋量的轨迹求解方法, 随后由有限与瞬时旋量的微分映射关系得到 Myard 机构的速度模型。在此基础上, 结合参数化的等效广义副将 3-Myard 环形组网机构简化为单闭环机构, 以求解机构的参数映射关系, 随后借助与 Myard 机构相同的分析流程便得到组网机构的位移与速度模型。提出折展单元及其环形组网机构的关节参数映射、运动轨迹和速度模型的分析方法, 丰富了折展机构的运动学分析理论, 为解决折展单元及其组网机构的运动学分析问题提供了新选择。

143 广义 Waterbomb 折纸管的刚性折叠运动特性



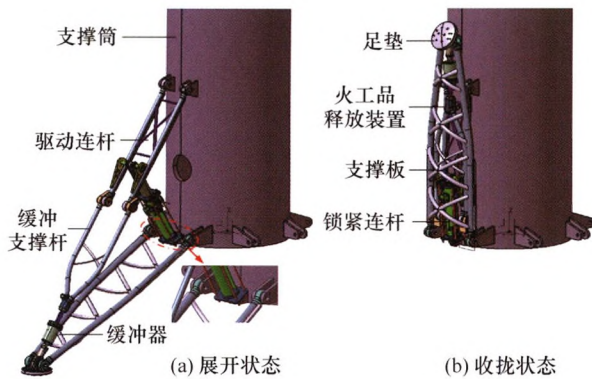
**摘要:** 对折叠模式的精确描述是折纸结构工程应用的前提, 但现有的理论和方法无法全面地分析大多数折纸结构的刚性折叠过程。以广义 Waterbomb 折纸管为研究对象, 基于球面机构运动学理论系统地分析了其折叠行为与运动协调条件, 推导了折叠管刚性收缩和扭转运动的两套解析运动学方程。研究了各种几何设计参数对 Waterbomb 折纸管刚性折叠行为的影响, 并讨论了该折纸结构折叠过程中的分岔行为与可能的物理干涉, 及其引起的刚性折叠与结构形变的转化。此工作为基于广义 Waterbomb 折纸管的可编程超材料、可变形结构和机器人的设计与控制奠定了理论基础和设计依据, 同时为复杂折纸结构的运动学分析提供了有效的手段。





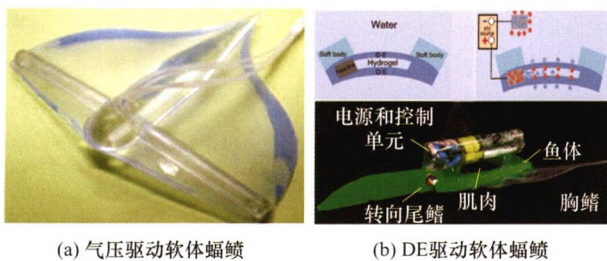
**摘要:** 星载抓捕机构在空间目标捕获任务中发挥着重要作用, 然而空间捕获时的对接碰撞很容易导致抓捕机构失稳。针对空间捕获软对接问题, 设计了一种双模传动软接触关节, 既能实现双自由度刚性传动, 同时可通过阻尼吸振实现空间六维碰撞的缓冲和卸载。在 ADAMS 仿真软件中建立单关节星载抓捕机构模型, 通过空间单维和六维碰撞下的仿真研究, 验证了软接触关节缓冲和卸载空间六维碰撞的原理及其对基座与关节稳定的有效性。进一步建立三关节星载抓捕机构模型, 通过空间六维碰撞下的仿真试验, 说明了双模传动软接触关节在多关节抓捕机构中应用的有效性。

171 一种垂直起降运载器着陆支腿设计与展开控制

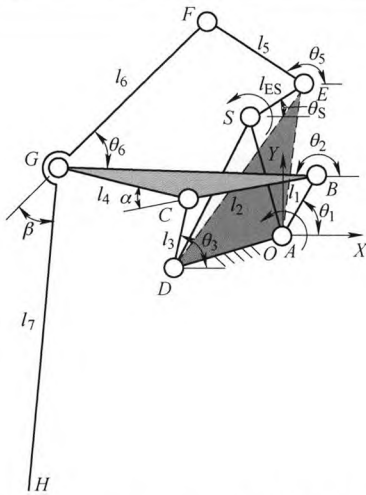


**摘要:** 目前, 实现垂直起降运载器可重复使用是降低发射成本的有效途径之一。当运载器完成着陆场返回后, 需依靠着陆支撑机构的展开、锁定及缓冲吸能三阶段的协同配合, 最终实现平稳软着陆。针对运载器着陆支撑机构, 提出一种六杆式支撑机构构型, 通过四连杆机构实现展开与收拢动作, 利用双锁紧机构型式实现锁定动作, 依据机构自锁原理完成单向运动。通过对实际展开工况进行分析, 提出主动+随动控制方式和全程作动控制方式。在着陆支撑机构展开过程动力学建模的基础上, 分别对两种展开运动控制策略进行优化。并完成不同控制方案对比分析, 最终确定合理展开驱动方案, 为运载器支撑机构的研制和展开控制提供技术支持。

182 仿蝠鲼机器鱼软体胸鳍建模与仿真

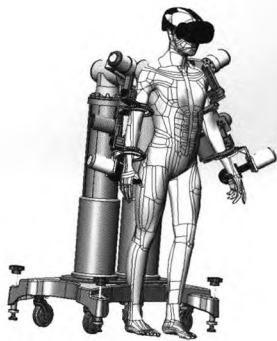


**摘要:** 介绍一种仿蝠鲼机器鱼上使用的软体胸鳍推进器, 具有三维立体翼型并集成多个软体致动单元, 具备更高形态及运动仿生度。分析提取了生物原型翼缘曲线并建立扑翼运动学模型, 解耦描述胸鳍俯仰-摆转复合运动模式; 对比了不同致动器数量的软体胸鳍运动特性与控制策略, 并通过样机静态加载试验验证了有限元模型可靠性; 基于格子-玻尔兹曼方法实现复杂曲面动态边界的流固耦合, 在仿真环境中分析了单/多自由度软体胸鳍在不同工况下的扑翼推升力特性; 数据对比表明多自由度胸鳍平均推力为单自由度的 7.2 倍, 性能优势显著, 为进一步水动力试验研究与机器鱼平台整合提供了数据预测与方向指导。



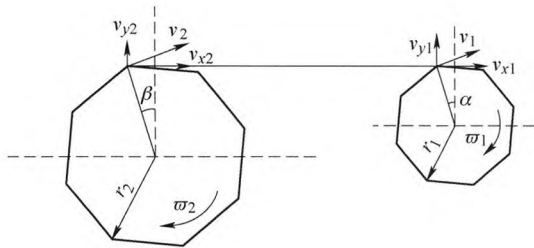
**摘要:** 针对单自由度闭链腿部机构足端轨迹单一导致机器人的地面适应性不足, 提出一种新型可调整闭链腿部机构。以 Klann 六杆机构为构型基础, 增加一个使其机架铰链转动的自由度, 实现了铰链位置的调整。用此方法获得足端轨迹的连续性变化, 从而可在纵向上提高抬腿高度以增强越障能力, 同时可在横向上改变跨步距以实现逼近目标点的规划, 并且还可通过切地角度的调节降低爬坡过渡段的足端冲击。此种腿部机构在行走时由一个电动机驱动, 可维持其单自由度特性, 在少驱动数目、高结构刚度以及大承载能力方面具有性能优势。进行腿部机构的构型设计、运动学分析以及以最大抬腿高度为目标的参数优化。在此基础上构建八足机器人, 建立足端轨迹簇并进行轨迹的参数分析, 开展行走策略的研究。制作一台样机, 针对典型地面环境开展适应性试验, 验证了设计的可行性。

200 上肢外骨骼机器人的阻抗控制与关节试验研究



**摘要:** 外骨骼机器人穿戴于人体上, 可以作为一种助力、增强或者交互的工具, 应用于康复、遥操作等领域。针对上肢外骨骼机器人的人机交互控制问题, 提出一种上肢外骨骼机器人的阻抗控制模型, 并建立了一体化关节的动力学模型, 详细设计了单关节的阻抗控制方法。基于外骨骼机器人在人机交互控制中的随动任务特性, 设计了基于力的阻抗控制方法以及基于位置的阻抗控制方法。针对阻抗控制模型为二阶系统的特点, 提出了阻抗控制参数优化分析的方法。建立了单关节阻抗控制的数值仿真模型, 通过仿真试验分析了惯性参数、阻尼参数、刚度参数以及人机接触刚度对阻抗控制性能的影响。开展了单关节系统的阻抗控制硬件试验。试验结果表明单关节系统的触碰检测、重力补偿以及阻抗控制均可实现, 并且操作者与关节系统可以实现协同运动。

210 基于试验与仿真联合分析的喷涂机器人轨迹精度可靠性研究

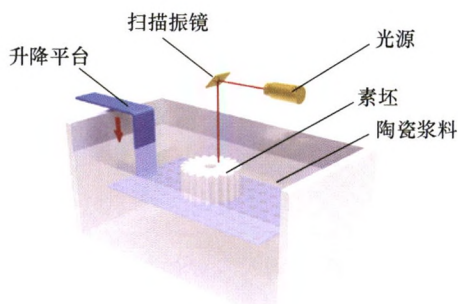


**摘要:** 采用链驱动的喷涂机器人易于实现本体的轻量化、末端高灵活度与正压防爆系统设计, 从而满足家具、钢结构等一般涂装行业对喷涂机器人工作空间与腕部灵活度的要求, 深入分析链驱动机器人的运动可靠性对喷涂质量和效率的提高具有重要意义。针对链驱动喷涂机器人的运动可靠性问题, 采用一种基于试验与仿真联合分析的机器人末端轨迹精度可靠性分析方法。以旋量法为基础建立了喷涂机器人本体和喷枪的运动学模型, 从工业机器人的操作臂性能和运动规律的角度出发, 研究了喷涂机器人运动精度的影响因素。分析了链驱动喷涂机器人的优缺点和末端轨迹精度的影响状况, 并结合机器人本体的运动学参数, 建立了基于随机变量的喷涂机器人运动误差模型。通过试验结果的分析来确定影响喷涂机器人运动误差的随机变量的分布特征, 从而对机器人末端轨迹精度的运动可靠性进行更加精确的仿真分析。最后, 通过喷涂机器人工作平台对末端轨迹精度的运动误差进行试验验证并与传统的仿真分析方法进行对比, 结果显示该分析方法更准确。研究成果为进一步分析喷涂机器人的机构优化、轨迹规划和漆膜质量提供试验基础和理论依据。



## 221 陶瓷光固化技术及其应用

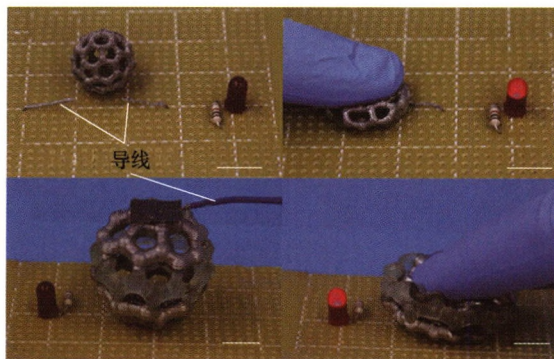
吴甲民 杨源祺 王 操 何逸宁 石 婷 甘 恬 陈 双 史玉升 王 卫



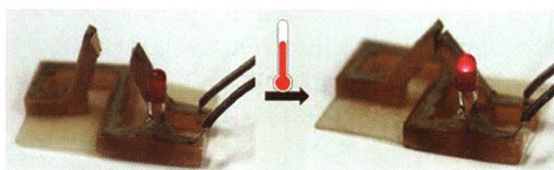
**摘要:** 陶瓷材料因具有高硬度、高强度、耐高温、抗腐蚀等优异性能,被广泛应用于航空航天、生物医疗等领域,但是应用于上述领域的复杂结构陶瓷的制造仍然是一个重要的挑战。增材制造技术通过逐层堆积材料的方式来获得实体,在制造复杂结构陶瓷方面具有传统成形方式所无法比拟的优势。在众多陶瓷增材制造技术中,陶瓷光固化技术因其理想的成形质量而受到广泛关注和重视。在介绍立体光固化、数字光处理这两种主流陶瓷光固化技术的原理和特点的基础上,系统地介绍和分析了立体光固化技术和数字光处理技术的研究现状、应用以及存在的问题。最后,对陶瓷光固化技术及其应用进行了总结和展望。

## 239 柔性触觉传感器的三维打印制造技术研究进展

汪延成 鲁映彤 丁 文 梅德庆



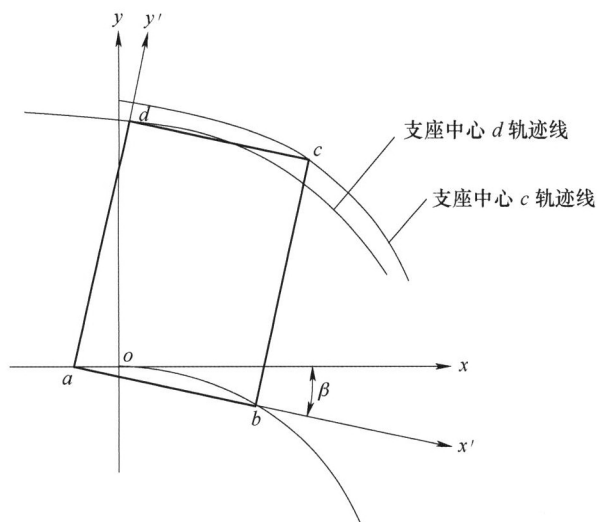
(a) DLP 打印的 C<sub>60</sub> 三维结构<sup>[48]</sup>



(b) DLP 制造具有形状记忆特性的柔性电路结构<sup>[49]</sup>

**摘要:** 聚合物基柔性触觉传感器在智能机器人、人工假肢与人体健康状态监测等领域有着广泛的应用,将三维打印技术应用于柔性触觉传感器的制造过程可以克服传统制造方法加工周期长、复杂聚合物基微结构制造困难等缺陷。因此发展聚合物基触觉传感器的三维打印制造技术及工艺是当前学科研究热点,具有广阔的发展前景。首先,在阐述柔性触觉传感器的传感检测原理和性能指标的基础上,重点阐述了柔性触觉传感器三维打印制造技术方面的最新研究进展,包括聚合物基柔性触觉传感器的结构设计、三维打印材料的分类和应用、以及传感器的打印制造方法及工艺等。然后,还总结预测了基于新材料制备和新制造工艺的柔性触觉传感器设计与制造的发展趋势,并对柔性触觉传感器的三维打印制造技术未来的发展趋势进行了展望。





**摘要:**为解决有轨起重机在转弯时出现的啃轨、卡轨问题,提出了基于贝塞尔曲线的起重机非圆曲线轨道方案。方案选用四次贝塞尔曲线作为转弯内轨曲线,针对起重机单轮和多轮情况,通过起重机大车行走机构的几何关系计算出外侧前后点的轨迹。以外侧前后点最小偏差量为优化目标函数,利用多始点启发式全局优化算法搜寻最优的贝塞尔曲线参数,并通过 Hermite 插值法拟合出外轨轨迹。计算结果表明,与传统圆弧转弯轨道相比,以非圆贝塞尔曲线作转弯轨道时在起重机转弯过程中出现的外侧前后点最大偏差量大幅减小。此外还分析得出,偏差量会随着基距和轨距的增大而增大,随着圆弧内轨半径和直轨道夹角的增大而减小。另外,通过计算比较非圆四次贝塞尔曲线轨道曲率半径与圆弧轨道情况下单轮和 2 轮台车卡轨时极限曲率半径,验证了起重机大车转弯的实际通过性,最后利用 ADAMS 进行动态仿真实验论证。



## **CONTENTS**

- 2 Review on Kinematic Metamaterials**  
CHEN Yan
- 14 State of the Art of Multi-mode Mechanisms**  
YU Jingjun LIU Kai KONG Xianwen
- 28 Untethered, High-load Soft Gripping Robots: A Review**  
LI Haili YAO Jiantao ZHOU Pan ZHAO Wumian XU Yundou ZHAO Yongsheng
- 43 Research Progress of Electroactive Bistable Mechanism and Its Application in Soft Robots**  
LI Bo SUN Wenjie JIANG Lei MA Fulei CHEN Guimin
- 53 Research Progress of Underwater Vehicle-manipulator Systems: Configuration, Modeling and Control**  
CHANG Zongyu ZHANG Yang ZHENG Fangyuan ZHENG Zhongqiang WANG Jiliang
- 70 Novel Mode and Equipment for Machining Large Complex Components**  
XIE Fugui MEI Bin LIU Xinjun ZHANG Jiabo YUE Yi
- 79 Synthesis of Generalized Spherical Parallel Manipulations for Ankle Rehabilitation**  
LIU Chenglei ZHANG Jianjun QI Kaicheng NIU Jianye LI Weimin GUO Shijie
- 92 Structural Design and Configuration Analysis of Parallel Mechanism with Metamorphic Joint**  
JIA Pu LI Duanling LI Haiyuan YAN Xiaojie GE Zhenghao
- 103 Kinematics Analysis and Performance Optimization of a Parallel Manipulator for Minimally Invasive Surgery**  
YE Wei XIE Zhentao LI Qinchuan
- 113 Structure Design Method of Complaint Parallel Mechanism for Grating Tiling with Heavy Load Capacity and High Precision**  
WU Shilei SHAO Zhongxi SU Haijun FU Hongya
- 122 Design and Analysis of a Dexterous Gripper Based on Flexible Parallel Continuum Manipulator**  
WANG Peiyi GUO Sheng WANG Xiangyang SONG Majun LIN Huajie



- 132 Kinematic Analysis of Myard Circular Network Based on FIS Theory**  
GUO Ruifeng LIAN Binbin SONG Yimin QI Yang SUN Tao
- 143 Rigid Folding of Generalized Waterbomb Origami Tubes**  
FENG Huijuan MA Jiayao CHEN Yan
- 160 Design and Simulation of Dual-mode Transmission Joint for Spatial Soft Capture**  
XU Sheng CHU Ming ZHANG Xiaodong SUN Hanxu
- 171 Design and Deployment Control of Landing Leg for a Vertical Takeoff and Landing Vehicle**  
TIAN Baolin GAO Haibo YU Haitao LIU Zhen LI Nan DING Liang DENG Zongquan
- 182 Modeling and Simulation Research on Soft Pectoral Fin of a Bionic Robot Fish Inspired by Manta Ray**  
CHEN Lingkun QIAO Tao BI Shusheng REN Xingwei CAI Yueri
- 191 Design and Analysis of a Novel Adjustable Closed-chain Multi-legged Robot**  
WANG Sen YAO Yanan WU Jianxu
- 200 Research on Impedance Control of an Upper Limb Exoskeleton Robot and Joint Experiments**  
LI Haiyuan LIU Chang YAN Lutao ZHANG Bin LI Duanling ZHANG Qinjian
- 210 Research on Reliability of Spray Robot Trajectory Accuracy Based on Conjoint Analysis of Experiment and Simulation**  
PAN Jingfeng ZI Bin WANG Zhengyu WANG Daoming ZHENG Lei YOU Wei
- 221 Photopolymerization Technologies for Ceramics and Their Applications**  
WU Jiamin YANG Yuanqi WANG Cao HE Yining SHI Ting GAN Tian CHEN Shuang  
SHI Yusheng WANG Wei
- 239 Recent Progress on Three-dimensional Printing Processes to Fabricate Flexible Tactile Sensors**  
WANG Yancheng LU Yingtong DING Wen MEI Deqing
- 253 Optimization Design of Non-circular Curve Track of Crane Turning Based on Four Times Bezier Curve**  
LIANG Gang WU Zhangjie YU Weikun

# 《机械工程学报》第十一届编委会

## 名誉主任

钟群鹏(院士) 路甬祥(院士) 潘际銮(院士)

## 名誉委员

王玉明(院士) 石治平(研高) 叶声华(院士) 宁汝新(教授) 过增元(院士) 刘大响(院士)  
刘友梅(院士) 刘宏民(教授) 李圣怡(教授) 周祖德(教授) 胡正寰(院士) 柳百成(院士)  
钟掘(院士) 闻邦椿(院士) 耿荣生(教授) 徐金梧(教授) 徐滨士(院士) 熊有伦(院士)

## 主任

陈学东(院士)

## 副主任

王国彪(教授) 邓宗全(院士) 李奇(编审) 陈超志(教授级高工) 邵新宇(院士)  
黄田(教授) 黄庆学(院士)

## 国内委员

丁汉(院士) 王雪(教授) 王田苗(教授) 王华明(院士) 王庆丰(教授) 王时龙(教授)  
王树新(教授) 王海斗(教授) 王润孝(教授) 王耀南(院士) 孔祥东(教授) 卢秉恒(院士)  
史玉升(教授) 冯吉才(教授) 权龙(教授) 曲兴华(教授) 朱胜(教授) 朱荻(院士)  
朱向阳(教授) 华林(教授) 刘强(教授) 刘少军(教授) 刘军山(研究员) 刘志军(教授)  
刘辛军(教授) 刘检华(教授) 刘雪峰(教授) 刘献礼(教授) 刘德顺(教授) 孙伟(教授)  
孙汉旭(教授) 孙逢春(院士) 严新平(院士) 杜雪(教授) 杜朝辉(教授) 李大勇(教授)  
李荣德(教授) 李涤尘(教授) 杨永强(教授) 杨华勇(院士) 杨兆军(教授) 杨绍普(教授)  
何存富(教授) 沈功田(研究员) 张峥(教授) 张义民(教授) 张卫红(教授) 张立军(教授)  
张宪民(教授) 陈新(教授) 陈文华(教授) 陈兵奎(研究员) 陈雪峰(教授) 苑世剑(教授)  
苑伟政(教授) 范志超(研究员) 林京(教授) 林峰(教授) 林忠钦(院士) 周仲荣(教授)  
周华民(教授) 单忠德(院士) 项昌乐(院士) 赵杰(教授) 赵继(教授) 赵韩(教授)  
赵丁选(教授) 赵宏伟(教授) 赵国群(教授) 柯映林(教授) 钟志华(院士) 段吉安(教授)  
段宝岩(院士) 姜澜(教授) 洪军(教授) 宫声凯(院士) 姚建华(教授) 姚振强(教授)  
袁巨龙(教授) 袁寿其(教授) 都东(教授) 贾振元(院士) 夏长亮(院士) 钱林茂(教授)  
徐西鹏(教授) 殷国栋(教授) 高金吉(院士) 郭万林(院士) 郭东明(院士) 涂善东(院士)  
陶飞(教授) 黄卫东(教授) 黄传真(教授) 黄明辉(教授) 梅雪松(教授) 彭艳(教授)  
彭芳瑜(教授) 葛世荣(教授) 韩旭(教授) 焦宗夏(教授) 温激鸿(研究员) 谢建新(院士)  
雒建斌(院士) 廖维新(教授) 谭建荣(院士) 翟婉明(院士) 熊蔡华(教授) 融亦鸣(教授)  
戴一帆(教授)

## 国际委员

Bi Zhang(美国)	Denis Cavallucci(法国)	Dong-Pu Cao(英国)
Duc Truong Pham(英国)	Erhan Budak(土耳其)	Guang-Bo Hao(爱尔兰)
Gui-Yun Tian(英国)	Hai-Jun Su(美国)	Han Huang(澳大利亚)
Hong-Chao Zhang(美国)	Jian-Sheng Dai(英国)	Jie (Peter) Liu(加拿大)
Jin Wang(英国)	Jorge Angeles(加拿大)	Jun Wang(澳大利亚)
Kai Cheng(英国)	Kazushi Sanada(日本)	Lian-Xiang Yang(美国)
Li-Hui Wang(瑞典)	Marco Ceccarelli(意大利)	Ming-Jian Zuo(加拿大)
S.S. Park(加拿大)	Shao-Ping Bai(丹麦)	Shin Usuki(日本)
Tamás Insperger(匈牙利)	Wei Gao(日本)	Wei-Dong Li(英国)
Wei-Ming Shen(加拿大)	Xian-Wen Kong(英国)	Xiao-Ping Du(美国)
Xi-Chun Luo(英国)	Xu-Dong Zhao(英国)	Xun Chen(英国)
Y. Lawrence Yao(美国)	Yan Jin(英国)	Ye-Hwa Chen(美国)
Yong Huang(美国)	Yong-Bo Deng(德国)	Yu-Chun Xu(英国)
Zhao-Jie Ju(英国)		



ISSN 0577-6686



9 770577 668200

19