



ISSN QK2016724  
CODEN CHHKA2

# 机械工程学报®

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

特邀专刊：航天重器——空间大型可展机构与装备

客座主编：刘荣强教授



中国机械工程学会 主办

万方数据

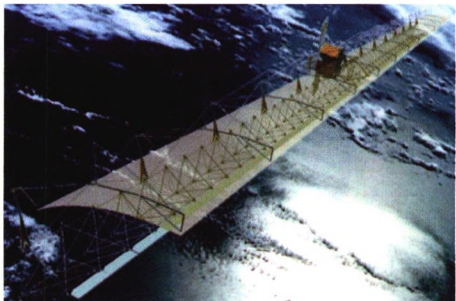
2020年56卷5期 半月刊

## /// 航天重器——空间大型可展机构与装备专刊 ///

客座主编：刘荣强 教授（哈尔滨工业大学）  
策划编辑：罗晓琪（《机械工程学报》编辑部）

### 1 空间可展开天线机构研究与展望

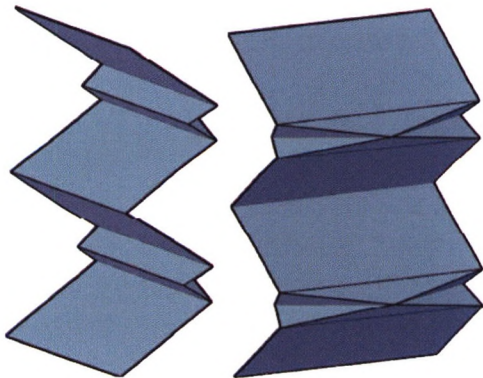
刘荣强 史 创 郭宏伟 李冰岩 田大可 邓宗全



**摘要：**空间可展开天线机构是近年来快速发展的研究方向之一，是支撑大型空间天线的关键装备，其发展趋势是高展收比、高精度、高刚度、轻量化。经过近 30 年的发展，空间可展开天线已获得大量实际应用，随着天线的超大型化需求，经典的结构形式不易满足天线日益增长的性能要求，近年来出现了以百米级尺度为目标的可展开天线机构形式，如协同展开式天线、环柱式天线、薄膜天线等。介绍空间可展开天线机构的典型结构形式、应用案例、最新的技术进展，对可展开天线机构的构型设计、优化设计、动力学分析的研究现状进行了综述，分析可展开天线机构研究当前存在的主要问题与发展趋势，为开展空间可展开天线机构研究提供借鉴与参考。

### 13 大型空间薄膜遮阳罩折展构型设计与分析

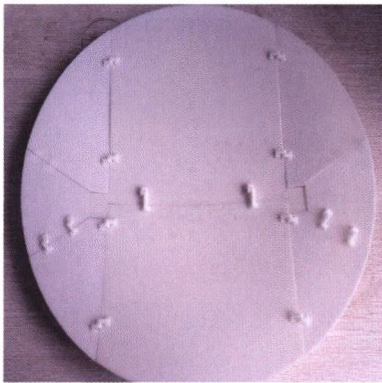
林秋红 张 骞 贾文文 邱 慧 王馨玉 蔡建国



**摘要：**将折纸技术应用于空间薄膜结构构型设计并在展开全过程进行应力优化，设计折纸型充气管结构组合使用，完成大型空间薄膜遮阳罩折展构型设计。基于光学系统遮阳需求，采用杆系等效方法分析了两种薄膜折痕方案折展过程中的应力改变水平，并进行了遮阳罩薄膜结构的参数设计。考虑到充气管与薄膜结构的点连接和同步折展问题，采用单顶点六折痕模式改进了传统的 Z 字型充气管设计方案并进行了通气性能分析。采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真计算了薄膜结构和充气管结构的展开全过程，并进行了应力水平和气压分析，最终通过样机模型进行了展开试验验证。结果表明，组合采用改进薄膜折痕方案和改进 Z 字型充气管方案，大型空间薄膜遮阳罩的展开路径明确，收纳比高且不会造成遮阳薄膜损伤。

## 21 抛物面式固体反射面天线结构的展开设计

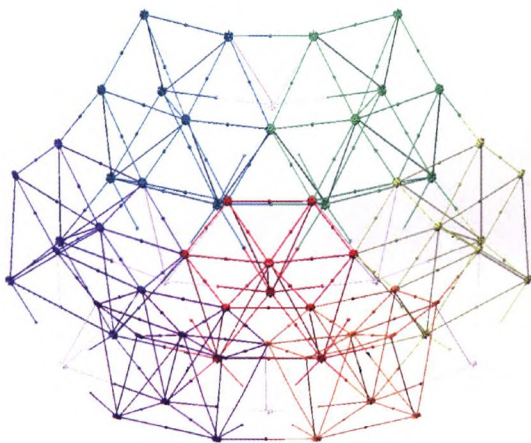
张 骞 李 萌 江 超 蔡建国 冯 健



**摘要:** 针对固体反射面可展天线结构的分块数量和包络尺寸等实际需求,对抛物面刚性可展天线结构进行分块优化和连接设计。依据可动性分析,分块优化选用双自由度的单顶点五折痕模式,但是通过约束折痕转动实现反射面运动路径可控。采用平面单位圆模型定性分析分块节点的几何参数对机构收纳比的影响。以收纳比为优化目标函数,以刚性约束、碰撞约束和可动性约束为优化约束条件,建立抛物面刚性可展天线结构的优化框架,并采用 1stOpt 结合简面爬山法结合通用全局优化算法计算分块参数。针对面板转动过程碰撞问题,进行了面板连接节点和转动轴设计。仿真分析和 3D 打印分块模型结果说明该方法的可行性和合理性。

## 29 基于螺旋理论的三棱锥折展机构构型综合与组网

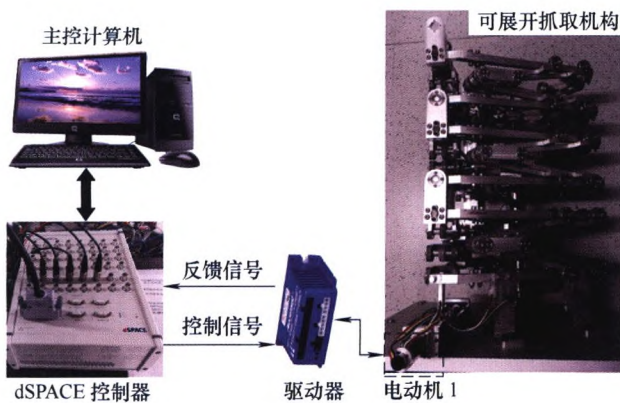
朱佳龙 黄志荣 郑士昆 许允斗 段玉柱 马小飞



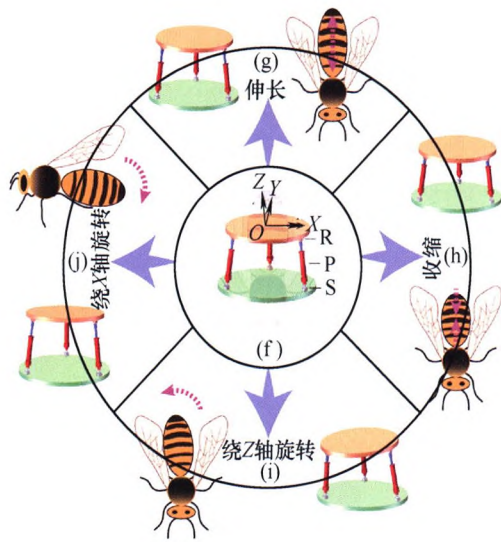
**摘要:** 研究折展单元机构构型综合对于可展开天线机构创新设计具有重要意义。根据三棱锥折展单元机构多运动输出期望公共运动和期望同步运动自由度要求,基于螺旋理论约束综合法,完成机构公共运动和耦合同步运动支链的构型综合,获得了多种基本折展单元构型,并结合实际应用确定一种优选三棱锥折展单元机构。根据 3RR-3RRR 单元折展机构的组网方式和组网运动的要求,采用螺旋理论进行了运动副的构型设计和优化,综合出一种具有耦合自由度的高刚度三棱锥折展单元组网机构。所采用的构型综合方法实现了螺旋理论约束综合法在折展机构构型综合中的应用,为具有多运动输出部件耦合运动要求的机构综合研究提供参考。综合得到的机构适用于星载构架天线反射器等空间曲面支撑类机构应用需求,具有广泛的应用前景。

## 39 桁架式可展开抓取机构展开动力学建模及其自适应鲁棒控制

李国涛 李 兵 郭宏伟 黄海林

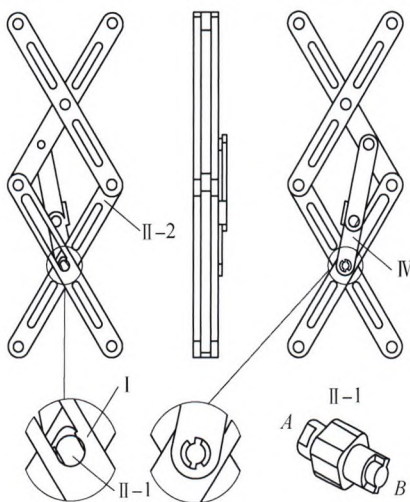


**摘要:** 针对一种新型桁架式可展开抓取机构的展开运动,提出该机构的动力学建模方法并设计考虑过约束等非线性因素的控制策略以提高其运动性能。对该桁架式可展开抓取机构进行简要描述,利用拉格朗日力学并通过递归的方法建立该机构展开运动的动力学模型。利用动力学模型的已知信息,设计扩张状态观测器以估计机构中的过约束等非线性因素引起的动力学项。使用扩张状态观测器作为补偿项,提出改进型的自适应鲁棒控制器,其中,通过设计非连续映射自适应控制律来估计机构的惯性参数,通过设计自适应滑模控制律来克服传统自适应鲁棒控制器中的问题。搭建可展开抓取机构的试验平台,通过与现有的不同控制器的比较试验来验证提出的控制器的有效性。



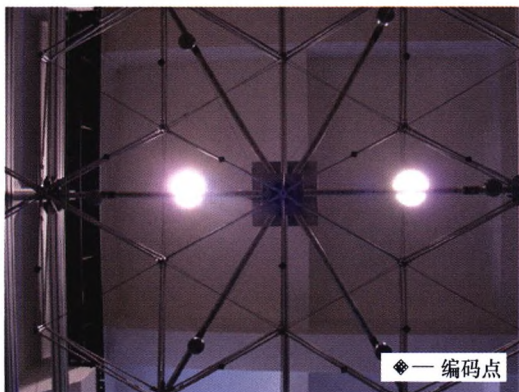
**摘要:** 头锥在空天飞行器气动外形的优化中起着重要作用, 基于蜜蜂腹部的变体机制, 设计了仿生变体头锥。利用 X 射线断层扫描技术和 Amira 软件对蜜蜂腹部分别进行全息无损扫描与三维重构, 试验结果表明, 相邻体节之间共有 12 束肌肉, 通过等效将相邻体节间的生理结构演化为并联机构, 利用基于螺旋理论的给定末端运动约束的型综合方法对上述机构进一步优化, 根据变体头锥的技术指标, 选择 2(3-SPR) 并串联机构作为变体头锥的变形驱动机构, 并进行了运动学分析。利用扫描电子显微镜试验研究了节间褶的形态特征和分布规律, 通过机构异化将其演化为锥面变胞折展机构。综合 2(3-SPR) 变形驱动并串联机构、锥面变胞折展机构和壳体, 设计了具有分节结构的仿生变体头锥, 以适应空天飞行器在不同飞行阶段的构型需求。

## 55 剪叉弯曲折展变胞机构的设计与分析

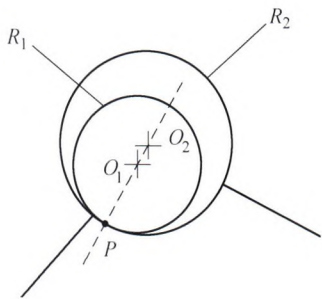


**摘要:** 提出了一种基于剪叉机构单元的剪叉弯曲折展变胞机构单元, 给出了构造该变胞机构的约束条件。建立了该机构单元运动的数学模型, 通过计算分析了该机构的自由度和运动形式。提出了剪叉弯曲折展机构单元在剪叉机构运动和弯曲机构运动状态转变的工程实现方法, 并通过计算分析得到了实现该方法所需的杆长约束条件和角度初始条件。提出了控制机构单元弯曲曲率的方法, 通过数值计算得到了限位连杆长度与弯曲曲率的定量关系。该机构单元可以串联组合用于大尺寸物体的抓取。建立了单个机构单元以及两个机构单元组合的三维模型, 进行了运动仿真模拟, 验证了设计的可行性。

## 63 模块化构架式空间可展天线支撑桁架展开精度测量与分析



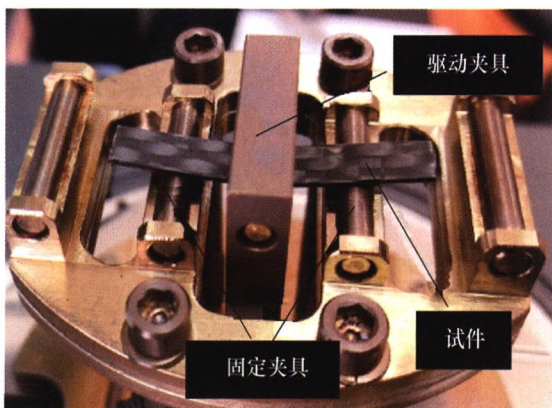
**摘要:** 为研究金属网面式可展天线支撑桁架对反射器表面形面精度的影响, 开展模块化构架式空间可展天线支撑桁架展开精度测量试验及分析研究, 根据支撑桁架的结构特点, 基于机器人学基本理论, 建立关键节点空间数学模型, 设计悬吊随动式微重力展开试验装置, 采用数字近景摄影测量原理, 对支撑桁架的展开精度进行测量试验, 并从支撑桁架的形面精度、重复展开精度和关键节点误差等 3 个方面进行分析。试验结果表明: 支撑桁架上关键节点的均方根误差 (RMSE) 值较小, 由关键节点构成的曲面其形面精度较高; 支撑桁架在多次重复展开试验中, 关键节点中最大误差小于 1 mm, 结构展开的一致性较好; 完全展开后, 关键节点的实测值与理论值接近, 支撑桁架的制造及安装精度较高。提出的测量和分析方法为其他类型金属网面式可展天线支撑桁架展开精度的研究提供了借鉴和参考。



**摘要:** 受装配与展开需求的影响,空间可展开结构的铰链中普遍存在着间隙。空间可展开结构展开到位锁死后,由于铰链间隙的存在,可展开结构在外载作用下的静力平衡位置不唯一,即存在静力多稳态现象。为了揭示静力多稳态现象的内在机理,以某伞状可展开天线为研究对象,利用无质量杆间隙模型对含间隙可展开结构进行静力学建模。分析了间隙尺寸、摩擦因数与杆长配置等对含间隙可展开结构静力平衡位置的影响规律。分析结果表明,间隙与摩擦是静力多稳态现象产生的原因;间隙尺寸越大,摩擦因数越大,含间隙可展开结构在特定外力下的静力平衡位置越多;不同位置的间隙与摩擦因数对静力多稳态现象的影响程度不同;杆长配置影响静力多稳态现象;通过施加合适的预紧力,可有效控制静力多稳态现象。

## 80 织物增强形状记忆复合材料大型空间可展桁架研究进展

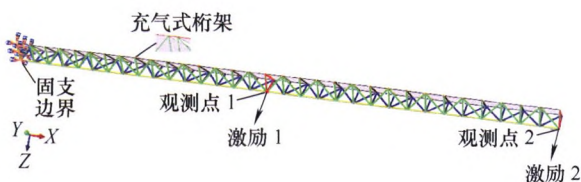
高冀峰 房光强 余兵 樊鹏玄 陈务军 赵兵 曹争利



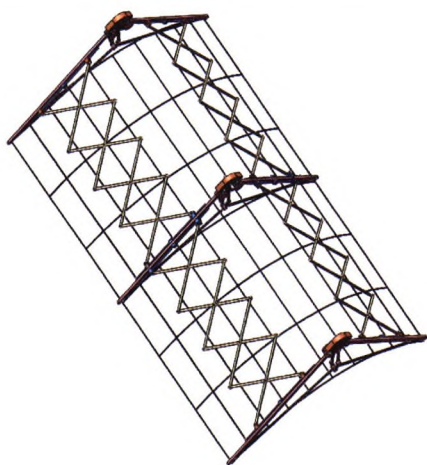
**摘要:** 围绕新型织物增强形状记忆复合材料空间可展桁架,总结了材料研制、结构制备、形状记忆行为、多尺度力学模型和地面试验的相关研究进展。可展桁架纵杆为织物增强复合材料制成的薄壁管,复合材料是将二维碳纤维织物添加到环氧形状记忆树脂中制备而成,通过调整基体树脂和固化剂的配比可控制材料的形状记忆性能。基于相变理论构建了形状记忆本构模型,并应用三点弯曲试验验证。通过微观、细观、宏观多尺度方法,计算了复合材料的均匀 ABD 刚度矩阵,依据 Kirchhoff 假设推导了薄壁管等效空间梁单元。搭建地面技术演示平台,验证形状记忆可展桁架单元收纳比达到 50:1,形状恢复率约为 100%。

## 93 大尺度充气式桁架太阳能阵列设计及动力学分析

卫剑征 张鹏飞 马瑞强 陈雪岩 谭惠丰



**摘要:** 提出充气式桁架展开大尺度太阳能阵列结构设计方法,具有热固化复合材料充气铰实现高效折叠收拢,以及展开后提高结构刚度的特性。研制了原理样机,并进行了地面展开试验,验证了充气展开及其充气式桁架的性能。可展开桁架结构设计特色是将可折叠充气支撑管与刚性碳纤维杆相结合使用,减少热功耗并提高结构刚度。考虑可展开桁架的腹管设计以及材料固化前后对大尺度结构动态特性的影响,对太阳能阵列的半结构进行有限元建模,并采用 Block Lanczos 法求解结构的模态,计算分析了不同激励位置时结构阻尼对结构的振动响应。结果表明,所设计的充气式桁架展开大尺度太阳能阵列采用热固化方法,能实现大尺度结构从柔性大转动展开向高刚度结构特性的改变;且对低频结构具有振动抑制效果,其振动响应能受到激励幅值和载荷的影响,并显著改变结构的动力学性能。



**摘要:** 可展收抛物柱面天线可用于卫星系统中, 实现无线通信、深空探测以及空间目标搜索等功能。近年来随着航天事业的迅猛发展, 对空间可展天线的成形精度要求越来越高。提出并设计了一种可展收抛物柱面天线机构, 该机构主要由网面支撑机构、柔索、金属丝网、轴向驱动与锁定装置、径向驱动与定位锁定装置组成。其中, 网面支撑机构包括径向和轴向展收机构。研究中提出了一种新型平面可展收机构作为径向展收机构的组成单元实现天线的径向展开收拢。对可展收机构的等效机构进行了优化设计。利用剪式单元可展机构实现了轴向展收机构的设计。完成了可展收抛物柱面天线机构的驱动组件设计, 在 Solidworks 中完成建模, 对天线机构进行了运动学仿真。

## 108 太阳翼驱动机构的故障模式影响分析与时变可靠性研究

李彦锋 黄洪钟 黄意贤



**摘要:** 作为航天器在轨运行时能量与信号的传输通道、姿态的调节器, 太阳翼驱动机构的可靠性直接决定了航天器的工作寿命。传统机械可靠性分析并没有考虑到太阳翼驱动机构性能退化和载荷既具有随机性又具有时间相关性的因素, 从而导致常规基于广义应力-强度的可靠性分析方法只能得到一个确定的可靠度值, 这并不能完全反映太阳翼驱动机构可靠性随时间变化的情况。在对太阳翼驱动机构进行不确定性分析及故障模式影响分析的基础上研究了其失效判据, 建立了一个高精度且与实际更相符的时变可靠性模型, 从而构建起一体化的时变可靠性模型技术体系和理论方法, 为实现太阳翼驱动机构可靠寿命设计一体化目标以及其质量提升提供理论基础和技术支撑。

## 116 空间柔性天线展开臂的半主动振动控制研究

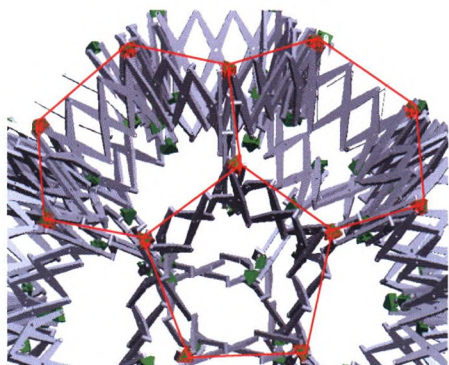
王晓宇 王浩威 闫雪梅 从强 季宏丽 裘进浩



**摘要:** 大型柔性天线展开臂结构由于其尺寸大, 阻尼和刚度小, 其振动呈现明显的低频特性, 且很难在短时间内迅速衰减, 从而影响天线工作性能。传统的被动控制大都采用阻尼材料, 通过增加阻尼的方法来进行控制, 这种控制方法对低频柔性结构的控制效果是有限的。因此研究带负载的复合材料柔性展开臂结构的振动抑制问题, 提出用压电元件粘贴在展开臂结构表面作为传感器和驱动器, 用基于同步开关阻尼技术的自适应半主动振动控制方法控制压电驱动器, 从而对展开臂结构实现振动控制。完成了展开臂模型的建立和仿真分析, 建立了展开臂结构的开关阻尼半主动控制试验平台, 设计并制作了控制电路, 针对需要控制的结构一阶弯曲模态进行压电元件的合理布设。对不同激励下的振动进行了展开臂结构的控制试验, 试验结果显示该方法对带负载柔性天线展开臂结构的振动具有良好的抑制效果, 对于初始位移为 100 mm 的瞬态激励振动工况, 受控系统等效阻尼比由 0.6% 增加至 4.03%; 对于稳态振幅为 50 mm 的稳态振动工况, 系统控制后结构端部振动幅值降低至 10 mm, 稳态振动幅值降低了 16.843 dB。在大型柔性结构中具有很好的应用前景。

### 123 基于正棱锥可展单元的球形雷达校准机构的设计方法及研究

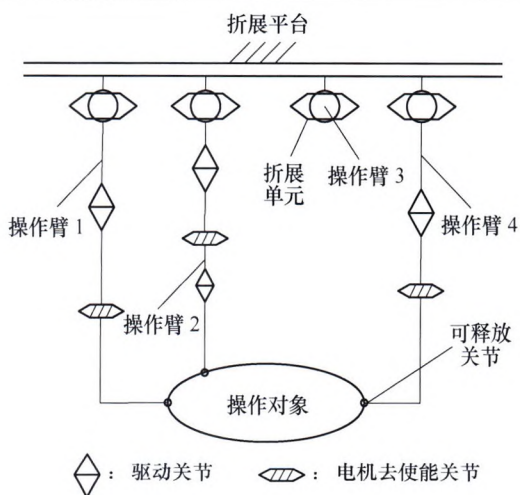
李端玲 董凯捷 刘利捷 王兴泽 张问采 葛正浩



**摘要:** 地面雷达监测是目前对空间碎片最为有效的监测方法之一, 为了保证地面雷达测量精度, 需要对其进行鉴定、校准。校准装置需要具有恒定的外形, 尽可能接近球形, 同时为满足发射时体积包络要求, 亟需一种具有小折展比的可展开球形雷达校准机构。通过对成角杆剪式单元进行分析, 提出了一种成角杆正棱锥剪式单元, 该单元能够实现空间放缩; 通过对空间多面体的研究, 分析了球形多面体的构造方法; 根据所构造的球面构型, 通过模块化的正棱锥可展单元组合的方法构成球形可展机构。总结了一种用于设计球形可展机构的理论方法, 并通过原理样机验证了方法的可行性, 将为我国第一颗雷达校准卫星研制打下良好的基础, 具有很好的应用前景。

### 133 空间多臂机构折展性及其结构配置设计

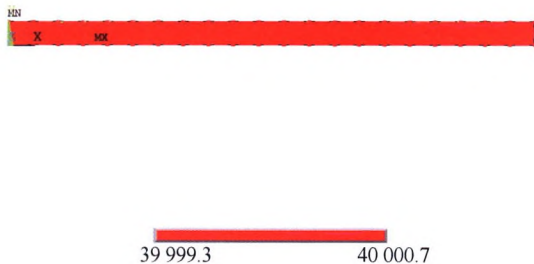
赵福群 郭盛 曲海波 张程煜



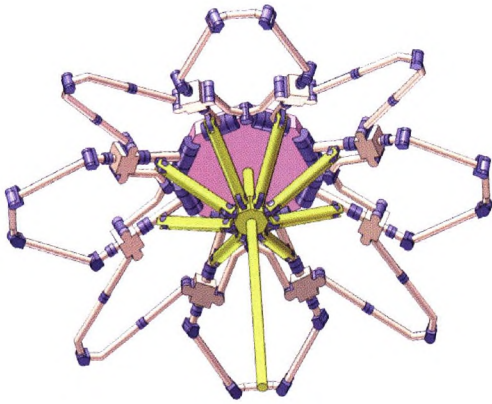
**摘要:** 为提高空间多臂机构折展特性和操作特性等运动性能, 通过多臂机构与操作物体可组成并联机构拓扑形式的设计思想, 提出了一类具有折展特性和多种操作能力的空间多臂机构。定义了用于叠放折展支链的区域及策略, 提出了折展支链的延伸性判别条件。基于指定区域的尺度限制, 设计了具有不同自由度且满足特定叠放要求的折展支链。其次, 以拓扑形式分解的方法将操作物体工作模式进行分解表达, 给出了多臂机构的结构配置形式。结果表明, 基于所提方法, 空间多臂机构可通过与操作物体自主释放与组合, 改变拓扑形式, 实现兼具折展性能和多种操作模式的设计目标。

### 141 大型平面薄膜天线找形及张拉成形数值分析

项平 丁潇 吴明儿 从强 邱慧 林秋红



**摘要:** 大型平面薄膜天线具有质量轻、收纳比高、环境适应性好等优点, 在航天领域受到了愈加广泛的关注。针对一大型平面薄膜天线结构, 考虑一级张拉与二级张拉两种张拉系统, 利用 ANSYS 有限元软件对该薄膜天线进行了找形分析, 并分别推导了两种张拉系统计算薄膜花边索形状的理论公式。利用找形分析的结果, 在 ABAQUS 软件中建立了张拉成型分析模型, 探究在张拉过程中, 考虑拉索和花边索套之间摩擦力的情况下, 膜面和拉索的应力状态。研究结果表明, 在考虑摩擦力的情况下, 膜面应力会有所增大, 与此同时, 膜面应力也变得不均匀, 摩擦因数越大, 应力不均匀程度越大。对于二级张拉系统, 由于内外索连接点附近的膜面产生了应力集中现象, 使膜面的有效面积率低于采用一级张拉系统时膜面的有效面积率。



**摘要:** 雨伞的连杆机构是最经典的可展机构之一,它是由多个平面连杆或悬臂杆构建而成,呈现出来的是一种低刚度和低耦合性的肋式支撑结构。到目前为止,可用来构建高刚度伞状可展机构的空间闭环连杆可展单元很少。为此,开发一类含三转动副(3R)耦合支链的两层两环空间连杆,并以它们为单元构建多环耦合的伞状可展机构。基于自由度和对称性特征分析了此类两层两环空间连杆机构的结构形式。提出了一种简洁高效的模块化组合方法来综合两层两环空间连杆可展单元;根据机构的单自自由度要求和结构的对称性建立了单元间的可动连接方式;根据综合得到的可展单元和单元间的可动连接方式构造出一族新型伞状可展机构。不同于传统的雨伞机构,这些新型伞状可展机构呈多环耦合状的桁架式结构,在航天装备、建筑结构、艺术结构等领域具有良好的应用前景。

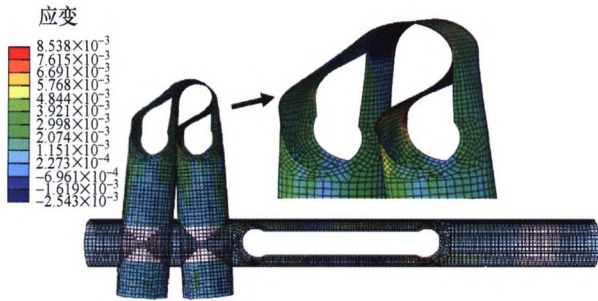
## 161 考虑共因失效的折叠翼展开机构可靠度分析

王博文 谢里阳 樊富友 马洪义 赵丙峰 李海洋



**摘要:** 共因失效问题是系统可靠性研究的重要内容之一,而在目前的机构运动可靠性分析中往往忽略了共因失效效应。由于影响机构运动的外部因素(载荷)与机构运动参量(运动所需时间)是不同量纲的物理量,因此目前还没有类似于“应力-强度”干涉模型这样简单有效的机构可靠度模型。通过试验与仿真相结合的方式建立折叠翼展开机构虚拟样机,并用 Monte-Carlo 仿真方法验证了多组折叠翼展开机构组成的系统存在共因失效现象,提出一种新的考虑共因失效效应的机构系统可靠度模型。新模型根据概率统计平均的意义重新解释了两个随机变量干涉分析的基本概念,并将其拓展为给定风速下的折叠翼展开机构条件可靠度的随机风速加权平均模型,从而得到单个折叠翼可靠度计算模型。又因为在确定的风速下系统中各折叠翼展开时间为独立同分布随机变量,将系统中各折叠翼条件可靠度在全部可能的风速范围内进行统计平均即可得到机构系统可靠度模型。算例分析表明新模型可以在考虑共因失效的条件下精确计算展开机构系统可靠度,并且在应用时只需要得到几个确定性风速下展开时间的分布来预测系统可靠度,便于工程应用。

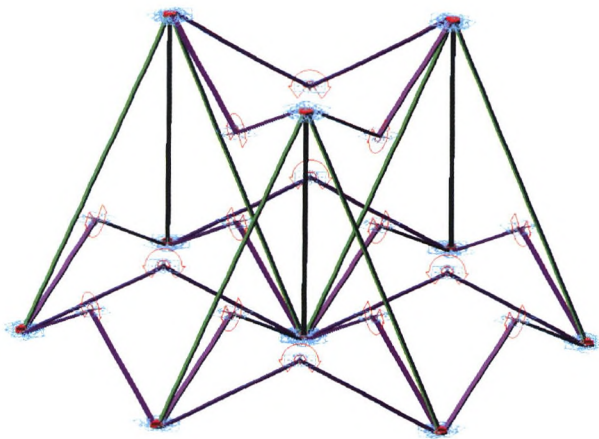




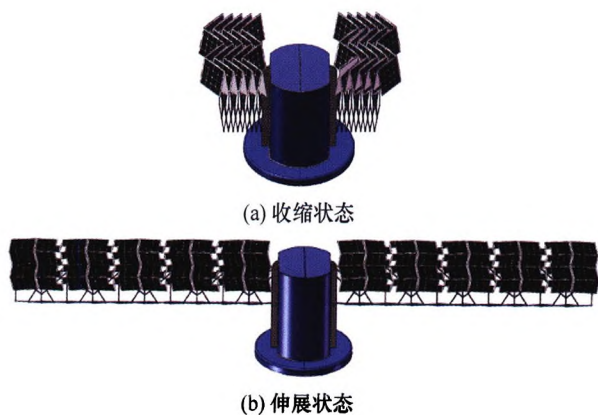
**摘要:** 研究了一种带有两个细长槽的复合材料管铰链空间可展结构的力学行为。基于二维 HASHIN 失效判断准则, 分析管铰链在弯曲折叠过程中可能出现的失效模式和力学行为, 研究其折叠过程中失效危险点位置。验证了将复合材料应用于管铰链的可行性。同时, 进一步研究了管铰链的槽长、槽宽以及端圆直径对其折叠力学性能及损伤特性的影响规律。基于响应面方法, 建立了以应变能最大与临界弯矩最小为目标, 以复合材料失效因子为约束, 以管铰链几何参数为设计变量的优化模型。采用非支配排序遗传算法对优化模型进行求解, 获得了可行解分布, 最后依据工程实际采用权重法求解优化模型, 得到了优化结果。研究结果对于设计新型运行稳定可靠的空间可展结构具有一定的理论意义。

## 181 被动输入过约束四面体可展天线机构动力学分析

刘文兰 许允斗 郭金伟 姚建涛 赵永生



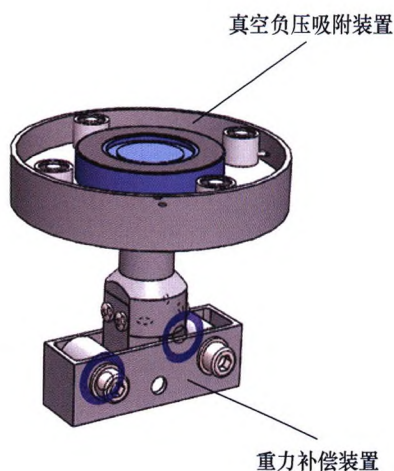
**摘要:** 建立了一种由 3RR-3RRR 四面体单元组成的被动输入过约束可展天线机构的动力学模型, 分析了驱动元件(扭簧)的数量、刚度、初始压缩量对机构展开运动的影响。基于 3RR-3RRR 四面体单元组成的可展机构的结构特点和空间坐标变换关系建立了机构展开/收拢过程中各构件质心位置与机构展开角之间的关系, 得到了各构件的速度解析表达式。根据机构自由度性质, 将机构展开/收拢过程中构件的运动分为平移运动、定轴转动、平面运动和复合运动四类。为便于建立 3RR-3RRR 四面体单元组成的被动输入过约束可展机构的动力学模型, 进一步将构件的复合运动分解为平面运动和沿该平面法线方向的平移运动。基于拉格朗日法建立了单元可展机构 3RR-3RRR 和组合可展机构 3(3RR-3RRR)-3RRR-3RRR 的动力学模型, 得到了机构中扭簧刚度与机构展开角之间的表达式, 并讨论了扭簧刚度和数量对机构展开运动的影响。基于 ADAMS 仿真软件建立了 3(3RR-3RRR)-3RRR-3RRR 被动输入过约束可展机构的仿真模型, 通过添加不同数量、不同刚度的扭簧对机构进行了动力学仿真分析, 并讨论了扭簧初始压缩量对机构展开运动的影响, 仿真结果验证了理论分析的正确性。研究结果可为由 3RR-3RRR 四面体单元组成的大型被动输入过约束可展天线机构的协调控制提供理论指导作用。



**摘要:** 将直线机构与折纸机构相结合, 设计出一种新型空间可展机构, 并对其运动分析。运用抽象思维将折纸纸板的四条边线抽象为构件, 将相邻边线间的拐点抽象为转动副, 提出一种二自由度折纸七杆机构, 采用几何证明的方式, 对机构执行构件实现直线运动的条件进行研究, 结合运动支链为末端执行构件提供约束的本质, 通过引入平行约束的方式, 设计得到多种单自由度折纸直线机构。以折纸直线机构为基础构造可展单元, 阐述模块化组成折纸直线可展机构的原理和过程。根据三浦折纸机构的运动几何特性和面对称性, 在运动学分析的基础上, 提出一种通过改变对称面上共线等距点的间距来实现机构折展的驱动方式, 经由折纸直线可展机构予以实现后, 建立整体空间可展机构的虚拟样机模型, 研究机构的运动干涉问题及其影响因素, 绘制折展率性能图谱, 得到了该空间可展机构的折展率随着板厚  $h$  的减小和切除长度  $c$  的增大而增大的结论, 为机构的结构设计和工程应用提供参考依据。

## 202 基于真空负压吸附的太阳翼重力卸载技术

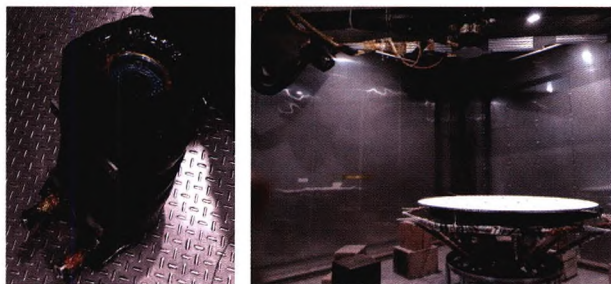
张加波 王 辉 李 云 姜力元 李德勇 何鹏鹏



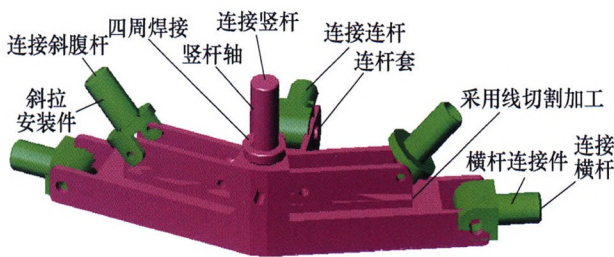
**摘要:** 空间可展开机构在地面装配和模拟展开试验过程中受到重力作用而产生应力或变形, 在太空环境下重力消失引起应力释放, 造成空间机构的性能发生变化影响其在轨可靠运行。针对太阳翼等空间可展开机构地面装配和展开试验的重力卸载需求, 提出基于真空负压吸附的重力卸载方法, 通过对太阳翼的展开动力学分析, 建立卸载重力的太阳翼动力学模型; 分析摩擦因数对真空负压吸附系统运动性能的影响规律和重力补偿系统的跟随响应特性, 实现重力卸载系统在水平面内的自由移动和快速跟随。试验结果表明, 真空负压吸附重力卸载系统的接触界面摩擦因数小于 0.08, 在 40 N 的太阳翼载荷下重力补偿系统的响应误差为  $\pm 5\%$ , 综合重力卸载精度可以达到 94.6%。因此, 基于真空负压吸附的重力卸载方法具有很高的自由度和跟随响应速度, 能够满足太阳翼等空间可展开机构精密装配和模拟展开试验的需求。

## 211 热变形摄影测量相机防护方法

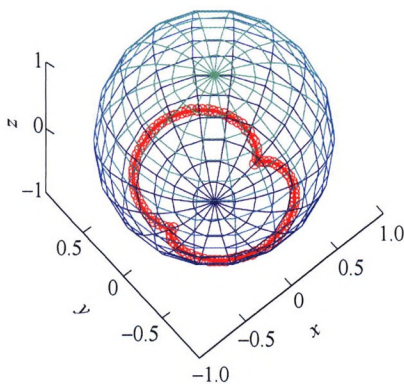
柏宏武 刘博学 孙 炜 马小飞 刘 盈



**摘要:** 为了保证高精度星载天线的在轨性能, 在其研制阶段需要进行热变形测量试验, 试验过程中测量设备在高低温环境中的防护问题一直以来都是热变形测量研究的重点。基于热变形自动摄影测量的方式, 区别于传统的真空测量环境, 设计提出了一种适用于常压高低温环境的测量相机防护方法, 采用相机防护罐与高透石英玻璃整体组成正压密闭防护结构, 配合温度、压力传感器, 通过自动调节控制系统由冷却气体设备对常压高低温环境下测量相机的温度进行控制, 维持稳定的正常工作温度, 保证其高精度测量环境。理论分析结果证明了该相机防护设计方法的合理性和有效性, 实践结果表明提出的测量相机防护方法满足在高温 100 °C 和低温 -70 °C 下相机温度维持  $(20 \pm 10)$  °C 的正常工作温度的能力。



**摘要:** 分析双圈六面体环形桁架可展开结构的展开原理, 计算完全展开状态下结构振动频率, 说明结构具有较好的刚度。进行展开过程动力学计算, 优化展开驱动机构、节点、驱动方式及连杆等结构模型的设计, 制作缩比模型, 试验证明结构能顺利展开, 从而验证模型设计的有效性。计算分析和试验结果表明: 双圈六面体环形桁架式可展开天线结构形式简单, 收缩比小, 具有较好的刚度, 在扭簧和电动机拉索力驱动下, 能顺利展开, 可作为可展开天线结构的有效支撑形式。



**摘要:** 提出可展曲面及其折展结构的空高斯映射数学建模方法与分析理论, 实现空间折展特性分析与折纸曲面的离散化研究, 并继而可以进一步引申到可展曲面的等效数学模型的空间机构学研究。通过建立可展曲面的高斯映射方法, 建立空间折展曲面与复杂折展结构的高斯球面曲线, 实现三维空间折展结构降维到二维球面曲线, 且以高斯映射方法建立可展折纸曲面的数学模型基础理论, 并通过曲线曲面理论, 将三维的可展曲面问题转化为高斯球面曲线的数学分析。继而通过折展曲面与折展单元的高斯球面曲线的对应研究分析, 且由球面曲线的离散得到折纸曲面的近似多面体折展结构, 并为其等效机构学特性研究奠定基础, 进一步将曲面折展转化为平面折展可对应的现有机构和机器人学问题, 实现曲面折展问题与平面折展问题对接, 并探讨其工程应用依据。

**CONTENTS**

- 1 Review of Space Deployable Antenna Mechanisms**  
LIU Rongqiang SHI Chuang GUO Hongwei LI Bingyan TIAN Dake DENG Zongquan
- 13 Deployable Configuration Design and Analysis of Large Space Membrane Sunshield Structures**  
LIN QiuHong ZHANG Qian JIA Wenwen QIU Hui WANG Xinyu CAI Jianguo
- 21 Deployment Design of the Parabolic Solid Reflector Antenna Structure**  
ZHANG Qian LI Meng JIANG Chao CAI Jianguo FENG Jian
- 29 Configuration Synthesis and Networking Design of Triangular Pyramid Deployable/Foldable Mechanism**  
ZHU Jialong HUANG Zhirong ZHENG Shikun XU Yundou DUAN Yuzhu MA Xiaofei
- 39 Deployment Dynamic Modelling and Adaptive Robust Control of Truss-shaped Deployable Grasping Mechanism**  
LI Guotao LI Bing GUO Hongwei HUANG Hailin
- 47 Bionic Design of Morphing Nose Cone for Aerospace Vehicle Based on the Deformable Mechanism of Honeybee Abdomen**  
LIANG Youjian ZHAO Jieliang YAN Shaoze
- 55 Design and Analysis of a Scissor-bending Deployable and Foldable Mechanism**  
XU Kun QIAO Anwei DING Xilun
- 63 Deployment Accuracy Measurement and Analysis of Truss Structure for Modular Space Deployable Truss Antenna**  
TIAN Dake LIU Rongqiang YANG Xieliu DENG Zongquan
- 72 Static Multiple-stable-state Analysis of Deployable Structures with Clearance Joints**  
CHEN Congcong LI Tuanjie MA Xiaofei
- 80 Recent Progress on Weave-reinforced-shape-memory-composite Based Space Deployable Truss**  
GAO Jifeng FANG Guangqiang YU Bing FAN Pengxuan CHEN Wujun ZHAO Bing CAO Zhengli
- 93 Design and Dynamics of Large-scale Solar Arrays with Inflatable Mast**  
WEI Jianzheng ZHANG Pengfei MA Ruiqiang CHEN Xueyan TAN Huifeng
- 100 Structural Design and Analysis of a Deployable Parabolic-cylinder Antenna**  
QIN Bo LÜ Shengnan LIU Quan DING Xilun

- 108 Failure Mode and Effects Analysis and Time Varying Reliability of Solar Array Drive Assembly**  
LI Yanfeng HUANG Hongzhong HUANG Yixian
- 116 Semi-active Vibration Suppression of Space Flexible Antenna Arm**  
WANG Xiaoyu WANG Haowei YAN Xuemei CONG Qiang JI Hongli QIU Jinhao
- 123 Design Method and Research of Spherical Radar Calibration Mechanism Based on Positive Pyramid Expandable Unit**  
LI Duanling DONG Kaijie LIU Lijie WANG Xingze ZHANG Wencai GE Zhenghao
- 133 Design of Deployable Space Multiple-arm Mechanism and Its Structure Configuration**  
ZHAO Fuqun GUO Sheng QU Haibo ZHANG Chengyu
- 141 Numerical Analysis of Form-finding and Tension Forming of Large Planar Membrane Antenna**  
XIANG Ping DING Xiao WU Minger CONG Qiang QIU Hui LIN Qihong
- 150 Type Synthesis of a Family of Umbrella-shaped Deployable Mechanisms Based on New Two-layer and Two-loop Linkages**  
YANG Donghao CAO Wena DING Huafeng
- 161 Reliability Analysis of Folding Wing Deployable Mechanism Considering Common Cause Failure**  
WANG Bowen XIE Liyang FAN Fuyou MA Hongyi ZHAO Bingfeng LI Haiyang
- 172 Quasi-static Folding Mechanical Behavior Analysis and Optimization Design for Composite Tube Hinge**  
YE Hongling LI Bowen SHI Xuesong ZHANG Yang
- 181 Dynamics of Passive-input Overconstrained Deployable Antenna Mechanisms Composed of 3RR-3RRR Tetrahedron Units**  
LIU Wenlan XU Yundou GUO Jinwei YAO Jiantao ZHAO Yongsheng
- 192 Motion Analysis of Spatial Deployable Mechanism Driven in Straight Line**  
CHANG Boyan YANG Shuai JIN Guoguang ZHANG Zhuan ZHU Yongjie
- 202 Gravity Compensation Technology of Solar Array Based on Vacuum Negative Pressure Adsorption**  
ZHANG Jiabo WANG Hui LI Yun JIANG Liyuan LI Deyong HE Pengpeng
- 211 Protection Method for Photogrammetric Camera of Thermal Deformation Measurement**  
BAI Hongwu LIU Boxue SUN Wei MA Xiaofei LIU Ying
- 218 Design of Deployable Antenna of Double-loop Hexahedron Truss**  
WU Xinyan GUAN Fuling
- 226 Gauss Map Based Developable Surface Discretization**  
ZHANG Liping PENG Yanping

