

2026 年度陕西省技术发明奖公示信息

项目名称			空间大尺度高精度薄膜结构与制备关键技术						
提名者			中共陕西省委军民融合发展委员会办公室						
提名意见									
我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求对该项目的基本情况进行了公示，公示期间无异议。 项目组突破了空间大尺度薄膜可展结构高收纳比低损伤折叠构型设计、高精度形态设计与调控、高可靠制备等技术瓶颈，成果应用于空间薄膜遮光罩、薄膜天线、柔性太阳翼、太阳帆等关键空间装备，助力了我国在该领域的技术突破。 根据《陕西省科学技术厅关于 2026 年度省科学技术奖提名工作的通知》，参照技术发明奖评定条件和评定标准，提名该项目参评陕西省技术发明一等奖。									
主要完成人情况									
排名	姓名	技术职称	工作单位				完成单位		
1	张逸群	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
2	蔡建国	教授	东南大学				东南大学		
3	李萌	研究员	中国空间技术研究院				中国空间技术研究院		
4	胡乃岗	副教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
5	钟旺	助理研究员	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
6	张骞	讲师	东南大学				东南大学		
主要完成单位									
排名	单位名称								
1	西安电子科技大学								
2	东南大学								
主要知识产权和标准规范等目录									
序号	知识产权（标准）类别	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准发布部门）	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）有效

									状态
1	发 明 专 利	DEPLOYABLE MESH ANTENNA BASED ON DOME-TYPE TENSEGRITY	美国	US11791 563B1	2023-10- 17	US 117915 63B1	西 安 电 技 子 科 大 学	张逸群； 刘顺畅； 蔡建国； 李萌；全 奕多；孙 梓涵；曹 鹏；李志 远	已授权
2	发 明 专 利	一种考虑膜片 褶皱的索膜电 极面形面精度 的估计方法	中国	ZL20171 0347619. 3	2020-01- 14	第 366558 7 号	西 安 电 技 子 科 大 学	张逸群;朱 日升;杜敬 利;杨 东 武;张 树 新;李 申; 李娜	已授权
3	发 明 专 利	星载静电成形 薄膜反射面可 展开天线电极 防放电粘贴方 法	中国	ZL20161 0670262. 8	2019-04- 26	第 335241 0 号	西 安 电 技 子 科 大 学	张逸群;谢 靛;朱 日 升;李 娜; 杜敬利;李 申;杨 东 武;方 栋; 李军	已授权
4	发 明 专 利	星载平面薄膜 阵列天线的地 面装调装置及 方法	中国	ZL20231 0074392. 5	2023-09- 22	第 634661 4 号	西 安 电 技 子 科 大 学	熊吉川;张 逸 群;钟 旺;杨 东 武;蔡 建 国;冯 健; 何永喜;胡 乃 岗;李 娜;李萌	已授权

5	发 明 专 利	一种小曲率旋转抛物面薄膜的折叠设计方法	中国	ZL202110517536.0	2023-08-04	第6211424号	西 安 电 子 科 技 大 学	钟旺;杜敬利;张逸群;谷永振	已授权
6	发 明 专 利	基于自适应采样的天线性能波动区间分析方法及相关设备	中国	ZL202510753983.4	2025-09-23	第8810793号	西 安 电 子 科 技 大 学	胡乃岗;张逸群;孙梓涵;李娜;许万业;钟旺;李鹏	已授权
7		一种环形桁架式可展开天线薄膜反射面与桁架的连接机构。	中国	ZL201510488975.8	2018 年 2 月 16 号	第2821766号	西 安 电 子 科 技 大 学	张逸群;刘帅杰;杨东武;赵泽:段宝岩;张树新;杨癸庚	已授权
8		一种航天用可折叠太阳能电池薄膜及电池板	中国	ZL202011367637.6	2021-12-21	第4858429号	东 南 大 学	张 骞; 蔡建国; 冯健; 王硕	已授权
9		一种具有刚性压杆的可折叠柱面索膜结构	中国	ZL201610237054.9	2018-01-30	第2796066号	东 南 大 学	蔡建国;王馨玉;冯健;周宇航	已授权

10		一种径向伸缩网壳-膜组合结构	中国	ZL201610832179.6	2019-03-01	第3272773号	东南大学	蔡建国；吴森坤；冯健；陆栋；朱奕锋	已授权
客观评价									

1、项目验收

2024 年 1 月 12 日，国家自然科学基金委工程与材料学部在北京组织召开航天先进制造技术研究联合基金重点支持项目“空间大尺度高精度天线薄膜结构展开与制造基础问题”（项目批准号：U1937202）结题验收，项目由东南大学、北京空间飞行器总体设计部、西安电子科技大学共同承担。项目形成综合评价意见：全面完成计划，研究工作取得突出进展(等级 A)。

2、成果评价

2025 年 8 月 30 日，召开“空间大尺度高精度薄膜结构设计与制备关键技术”项目成果评价会。由中国科学院院士李杰教授担任组长的评价委员会认为，该项目总体达到国际先进水平，其中航天大尺度薄膜结构折叠自动设计方法、高精度调控技术达到国际领先水平。

3、代表性第三方检测报告

2021 年 11 月，国家级软件测评中心-西安 863 软件孵化器有限公司软件测评中心依据 GB/T25000.51-2016《系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价(SQuaRE)第 51 部分:就绪可用软件产品(RUSP)的质量要求和测试细则》，针对于太阳帆折叠展开技术仿真分析软件进行检测，检测报告(XA863-JCBC-2021-1104)结论：对东南大学送测的“太阳帆折叠展开技术仿真分析软件”进行了功能性检测，所测项目功能表现均通过。

4、代表性同行评价

该项目完成团队在本领域国际权威期刊上发表 SCI 论文 21 篇。

关于提出的不连续薄膜折痕-褶皱耦合分析理论被中国科学院院士李东旭教授(Thin Wall Struct. 2026, 222)引用作为建立不均匀太阳帆推力模型的重要基础。韩国科学技术院院长 Han Jae-Hung 多次引用所提薄膜结构调控方法设计了抛物面薄膜天线的折叠策略和凹陷金字塔折纸方法。

关于非刚性折纸结构运动全过程运动路径追踪的论文(J. Mech. Des. ASME 2015, 137 和 J. Mech. Robot. ASME 2016, 8)被包括 3 篇 Nature (2021, 592a, 592b; 2021, 598)、2 篇 Sci. Adv. (2024, 10a, 10b)等正面引用。该成果同时被美国工程院院士 Paulino Glaucio 教授(Proc. R. Soc. A 2017, 473)和中国科学院院士段慧玲教授(Proc. R. Soc. A 2022, 478)引用作为研发非刚性折纸力学行为分析的重要基础。

中国工程院院士邓宗全教授(Aerosp. Sci. Technol. 2022, 123)正面引用了团队在平面缠绕展开结构设计分析的研究工作，认为申请人“providing an efficient method for modeling...”。世界著名折纸大师 Lang Robert J.和杨百翰大学 Howell Larry L.教授引用了申请人提出的柔性折纸折痕图案设计方法应用于折纸卫星结构设计(IEEE J. Antennas Propagation 2021, 2)

5、应用单位评价

项目成果成功应用于空间可展开结构各领域的 10 余家单位，得到了一致好评，近两年直接经济效益 1.30 亿元。完成单位外的部分应用单位评价如下：

西安空间无线电技术研究所：“项目系统性解决了空间天线在“大尺度、高精度、高收纳比”设计目标下的结构设计与制造难题，项目成果已成功应用于多个工程样机的研制任务中，...，样机在结构性能与型面精度方面表现优异，实测 RMS 满足高精度空间任务需求。...微高分辨对地观测、深空探测与高通量通信等空间任务提供了有利的工程支撑，进一步推动了我国新一代空间天线技术的发展”。

项目简介

随着我国深空探测、天基观测、载人航天等重大航天工程的实施，对大型空间可展结构“高精度、大口径、轻量化、高收纳比”的需求日益迫切，现有刚性可展开结构难以满足，薄膜结构是星载大型可展开结构的最佳解决方案。薄膜结构具有柔性大、非线性强、运动范围大等特点，导致其在结构刚度、展开过程、型面精度、制备方法等方面面临极大挑战。国际上仅美国等少数航天强国掌握，但技术和产品均对我国实施严密封锁。项目研究初期我国在可展开薄膜结构方面起步较晚，与国外存在巨大差距。

项目组在国家重点研发计划、国家自然科学基金航天先进制造联合基金重点项目/优青项目、基础科研等项目的支持下，历经 10 余年攻关，突破了空间大尺度薄膜可展结构高收纳比低损伤折叠构型设计、高精度形态设计与调控、高可靠制备等技术瓶颈，成果应用于空间薄膜遮光罩、薄膜天线、柔性太阳翼、太阳帆等，实现了我国在该领域从追赶到领跑的突破。取得了以下创新性成果：

（1）高收纳比低应力折展薄膜结构设计技术

发明了高收纳比低应力折展平面和空间薄膜结构。建立了薄膜结构折叠模式拓扑演化生成方法和数字化平台；攻克了考虑折叠应力、薄膜厚度、附加电子元件分布等导致的折痕偏移和损伤难题，设计的太阳翼收纳比是同类产品的 3.2 倍；发明了斜切多边形柱面薄膜遮光罩结构，研制了我国首个空间大型薄膜遮光罩并成功在轨飞行，收纳比达到同类产品最大。

（2）空间薄膜结构高精度形态设计与调控技术

提出了航天薄膜结构高精度形态设计与调控方法。建立了非连续薄膜的力学本构模型，构建了折痕-褶皱耦合变形的精准高效预示方法，提出了折痕缝隙单元和正交椭圆孔零泊松比单元的薄膜消皱技术；提出了索杆膜协同形态分析方法和非连续薄膜应力分配策略，发明了薄膜结构二级张拉自适应调控系统，天线形面精度可由 7.85 mm 提升至 2.86 mm；发明了基于多场耦合建模的薄膜天线型面调整方法和斜拉绳索振动抑制装置，研制了我国首个百平方米级（121.96 平方米）平面薄膜天线样机，型面精度可达 2.2 mm。

（3）大尺度空间薄膜结构高可靠制备技术

建立了大尺度航天薄膜结构高可靠制备技术体系。提出了多层薄膜真空隔热高强度复合方法，发明了刚度均匀化薄膜热塑工艺，实现了大面积多功能复合薄膜的国产化制备；发明了大尺度航天薄膜结构低应力有序自动折叠工装系统，效率提高 12 倍，有效支撑了我国首个扇形折展柔性太阳翼（天问二号探测器）的地面重复展开试验验证和成功在轨展开；提出了大尺度薄膜天线样机制备技术和空天一致性测试系统，实现了我国首部高精度 5m 口径静电成型薄膜天线制作和型面调整。

项目获授权发明专利 33 件（美国专利 1 件），发表 SCI 收录论文 31 篇。经中国振动工程学会组织的科技成果评价：该项目总体达到国际先进水平，其中航天大尺度薄膜结构折叠自动设计方法、高精度调控技术达到国际领先水平。

成果成功应用于我国首个可展开薄膜遮光罩、我国首个扇形折展柔性太阳翼（天问二号探测器）、我国最大的薄膜离轨帆（25 平米）、我国首个百平米级平面薄膜天线样机等多个航天任务。研制的可展开薄膜遮光罩使“新技术试验九号”卫星单日观测有效时间从 10 小时提升至 22 小时；“高分十三号”02 星首次实现了 0.5 米分辨率全色成像，显著提升在轨光学卫星观测能力。近两年经济效益超 1.3 亿元，应用前景广阔。

1. 应用情况

(1) 代表性工程应用：薄膜遮光罩

高分十三号 02 星于 2023 年 3 月成功发射，在新技术试验九号卫星遮光罩基础上，展开尺寸进一步扩大至 6m 以上。采用了“遮光薄膜分区透波设计”技术、“薄膜有序折叠和压紧”技术，将展收比达到了 16.9:1，相机在轨单日有效观测时间从 10 小时提升至 22 小时，相机在轨观测质量大幅提高，首次实现了 0.5 米分辨率全色成像。团队研制了目前我国在轨应用的所有大型可展开薄膜遮光结构，实现我国在高轨光学卫星领域从跟跑到领跑的跨越。

(2) 推广应用

薄膜天线：在天津航天机电设备研究所参与研制的我国首个百平米级平面薄膜天线中（天线面积 121.96 平方米），采用本项目的大尺度柔性薄膜高精度形态设计理论、柔性薄膜高可靠褶皱预示与振动抑制技术，型面精度可以达到 2.2mm~3.435mm。西安空间无线电技术研究所 1m 口径静电成型薄膜反射面天线和 2m×1m 的张拉薄膜相控阵天线，实测型面精度 RMS 分别优于 0.4 mm 和 0.1 mm，满足高精度空间任务需求。

柔性太阳翼：本项目提出的薄膜拼接技术成功应用在我国首个扇形折展太阳翼（天问二号探测器），保证了柔性太阳翼地面验证与成功在轨展开。薄膜结构折痕设计厚度效应修正方法，成功应用于火星取样返回探测器（天问三号）可展太阳能电池阵方案设计中，考虑厚度进行折痕修正后，电池片布片率提升了 35%。

2. 经济效益和社会效益

(1) 经济效益

本项目近两年经济效益为 1.30 亿元，主要是将本项目技术应用于相关装备生产单位和企业，所产生的新增收入与利润。其中北京吾天科技有限公司应用“高收纳比低损伤折叠方案设计平台”技术，新增输入 500 万元，新增利润 140 万元；耕宇牧星（北京）空间科技有限公司应用“高收纳比低损伤折叠方案设计平台”和“大面积天线结构振动抑制技术”新增收入 3127 万元，新增利润 469.5 万元；天津市天缘电工材料股份有限公司应用“薄膜拼接技术、非均匀薄膜力学分析与表征技术”新增收入 9940 万元，新增利润 518 万元。

(2) 社会和环境效益

(1) 服务国家重大战略需求。随着深空探测、卫星通信需求的增长，国家亟需具备高精度、大口径、轻量化的可展开结构。本项目组通过对薄膜结构的高效率收纳、高精度形态设计和高可靠制备技术的攻关，为国家各类航天任务提供了重要的技术支持。例如，研制出具有竞争力的遮阳罩、空间太阳帆、柔性太阳翼等关键部件，提升了我国在实际航天任务中的能力和技术水平，助力我国实现航天任务自主可控的目标，实现了从追赶到引领的转变。

(2) 促进了技术体系超越。本项目突破了空间大尺度薄膜可展结构高效率折展、高精度成型和高可靠制备等技术瓶颈，研究成果填补了国内外在相关领域的技术空白。针对于薄膜折展设计，从基于经验反复迭代计算到搭建了薄膜折叠设计平台，设计效率提升 95%。针对于高精度形态设计，使 10m 幅宽薄膜天线样机型面精度提升 3 倍，首次实现了对折痕薄膜、金属贴片薄膜进行褶皱预示与抑制，研制的百平方米级薄膜天线样机。针对于高可靠制备，提出了大面积多功能复合薄膜结构制备技术，发明专用折叠工装，效率相对于传统方法工提升 8 倍以上。本项目的研究成果推动了空间大尺度薄膜结构设计理念的创新和我国航天器整体性能的提升，实现了技术体系的超越。

(3) 助力于创新人才培养。项目培养了一大批专业科技人才，研究团队成员先后入选教育部长 CJ 者奖励计划、国家自然科学基金委优秀青年基金（2 名）等，为培养空间可展开结构领域的一流新工科卓越人才做出了突出贡献。

完成人合作关系说明

完成人张逸群、胡乃岗、钟旺同为西安电子科技大学机电工程学院教师，蔡建国、张骞为东南大学土木工程学院教师，李萌为中国空间技术研究院研究员。张逸群，李萌、胡乃岗和钟旺共同参与了基础科研项目“考虑多场耦合建模的薄膜天线敏捷设计技术”的研究。同时，张骞和胡乃岗共同参与了基金委联合基金重点项目，“空间大尺度高精度天线薄膜结构展开与制造基础问题”的研究。各完成人在参与项目研究过程中通力协作，获多项共同知识产权与合著论文，包括：共同立项项目 2，共同发明专利 5 项。结合技术攻关，课题组研制了多个天线样机模型，在此过程中，项目完成人均参与到了样机的方案设计、零部件细节设计、加工与实验流程讨论与实践，为最终取得良好的样机指标奠定了基础。