•可展开结构及其在航天工程中的应用•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500742

本刊网刊

张拉成形平面薄膜结构及其振动模态特征

曹思娴[1],邱　慧[2],项　平[1*],从　强[2],吴明儿[1],林秋红[2],王　虎[3]

(1.同济大学 土木工程学院,上海 200092;2.北京空间飞行器总体设计部,北京 100094;3.兰州空间技术物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘　要:空间薄膜阵面天线具有质量轻、收纳比高、环境适应性好等优点,因此在航天领域的应用与研究受到越来越多的关注。平面薄膜结构作为柔性张力体系,其几何形状和预应力水平对结构的刚度、动力特性等具有重要影响。针对大面积可展开平面薄膜天线的研发需求,本文设计制作了大型平面薄膜试验模型,并对其进行了振动模态测试。本文详细阐述了平面薄膜试验模型的找形与张拉成形分析,通过有限元分析探讨了边索和花边索套之间的摩擦接触对薄膜膜面应力分布的影响。结果表明:摩擦力导致膜面主应力方向由无摩擦时的法线方向转变为切线方向,并导致膜面应力不均匀,具体表现为张拉点附近的膜面Mises应力减小,而跨中边缘处的膜面Mises应力增大;同时,通过有限元软件对该模型进行了模态分析,并考虑了空气附加质量的影响;总结了试验模型在不同荷载工况下的褶皱分布形貌和模态测试结果,并将其与数值分析结果进行比较。研究发现,薄膜褶皱程度随张力增加逐渐降低,测得的褶皱方向、模态频率及振型与数值仿真结果基本一致,验证了平面薄膜张拉方案的有效性和数值分析结果的可靠性。

关键词:平面薄膜;张拉成形分析;滑移摩擦接触;薄膜基频;薄膜褶皱;模态测试

中图分类号:V414　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0059-10

当前,太空探索是科学发展的重要主题,空间技术因此成为大国重点关注的核心领域,其发展能够推动太空资源的开发。随着航天科技的突飞猛进,航天器作为科研任务的主要载体,所承担的任务也愈发复杂多样,这对航天器的尺寸和功能提出了更高的要求[1]。为满足多功能和大载荷容积的需求,空间可展结构成为理想选择,其代表性形式之一即平面薄膜天线。平面薄膜天线具有柔性、质轻、收纳比高、在轨展开面积大等优点,是未来空间天线发展的重要方向[2]。

平面薄膜天线主要由薄膜阵面、张拉系统、边框支撑结构3部分组成。其中,薄膜阵面一般采用Kapton、Mylar等高比刚度、高比模数的宇航材料;张拉系统常通过设置恒力弹簧向薄膜阵面和边索提供预张力;边框支撑结构则利用铰链、豆荚杆等机构实现可收展功能[3−5]。Huang等[6]设计制作了SAR薄膜天线模型。随后,Huang等[7−8]也制作了以聚酰亚胺为薄膜材质,以充气管为边框支撑结构的平面薄膜天线。Straubel等[9]对P波段的SAR薄膜天线开展研究,制作了矩形平面薄膜天线样机。汪有伟[10]研制了2 m×2 m的双向展开反射阵天线,阵面天线采用联合张拉法。谢超等[11]利用自动化裁剪、弹性隔件组装等制造工艺,制作了20 m×5 m的平面薄膜天线样机,试验结果表明一体化制造工艺提高了天线平面度。Harvey等[12]主导的无线电频率风险可展示卫星(R3D2)成功展开,验证了聚酰亚胺作为薄膜天线材料的可行性。潘粮今[13]设计并制备了33 m^2的薄膜样机。谢超等[14]设计并成功展开了有效面积为2 m×4 m的“浦江二号”卫星AIS/VDE薄膜天线。

在薄膜天线的动力特性研究方面,Fang等[15]对3 m口径平面薄膜的展开性能和动力特性进行了模拟和分析,验证了所设计天线良好的技术性能。Young等[16]建立了有限元分析模型,将数值模拟得到的平面薄膜天线模态与实际试验测得的模态进行比

收稿日期:2025−09−23　　**修回日期:**2026−01−19　　**网络出版日期:**2026−03−04

基金项目:国家自然科学基金叶企孙联合基金项目(U2341202);上海市教委极端环境建造未来学科项目(0200121006/032)

作者简介:曹思娴(2002—),女,博士生. 研究方向:平面薄膜折展结构. E-mail:2310458@tongji.edu.cn

* **通信作者:**项　平,研究员, E-mail:p.xiang@tongji.edu.cn

较，指出了空气附加质量是影响薄膜天线动力性能的重要因素。刘志全等[17]将天线整体结构等效模型基频的解析解和数值仿真结果进行了对比。Liu 等[18]、Fan 等[19]、刘翔[20]和蔡国平[21]模拟了 20 m×5 m 的 5 层薄膜天线样机在张拉过程中的褶皱情况，但其有限元模型中的索与膜面采用固定连接。曹鹏等[22]提出了在边界悬索与薄膜之间设置 0 长度弹簧单元以考虑其相对滑移的非线性有限元建模方法，但该方法不能完全考虑边索与索套之间的法向接触与切向摩擦。项平等[23]模拟分析了大尺度平面薄膜天线样机的找形和张拉，通过建立索套并设置通用接触，考虑了索与索套之间的摩擦。Cai[24]和 Zhang[25]等考虑了薄膜的褶皱特性，对剪切和拉伸状态下的六角形薄膜进行了研究，分析了薄膜的褶皱行为。Chandraul 等[26]总结了包括薄膜天线在内的空间膜结构动态响应研究的各种方法，探讨了膜厚度、材料特性、宽高比、载荷类型、载荷比、边界条件、空气附加质量、执行器类型及其布置方式等多种参数对膜结构动力特性的影响。

在薄膜天线的结构设计方面，Park 等[27]设计并制作了一个 4 层的张拉薄膜天线模型，通过试验验证了在 whipple tree 张拉机构下多层薄膜张拉的可重复性和膜层间的张力均匀性。关富玲等[28]对折叠卷收式反射阵天线的平面精度开展试验和理论分析，得出了最优边界形状为圆弧的结论。徐彦等[29]设计了由负刚度非线性弹簧和正刚度线性弹簧组合而成的可调节恒力装置，该装置可应用于平面薄膜天线的张拉系统。Zhang 等[30]将薄膜的折痕设计在避开反射器的位置，保证了薄膜天线的电气性能。Ma 等[31]对国内可展结构的最新进展进行了总结，提出拓扑结构、几何布置、张力分布是影响薄膜天线精度和稳定性的重要因素。

综上，目前国内外关于平面薄膜天线样机研制的相关理论和试验研究仍待深入开展。本文设计制作了平面薄膜天线结构试验件，包括花边形状索套、张拉系统等，并从理论数值分析和试验考察两个方面对其张拉成形后的应力均匀性与动力特性进行了深入研究。理论数值分析包含膜面找形分析、摩擦力对膜内应力分布影响分析、试验模型模态分析，试验考察方式为地面模态测试。

1 平面薄膜结构理论及数值分析

平面薄膜天线结构为索膜张拉结构，通过向边索和薄膜阵面施加预张力，使其具有刚度并承担外荷载，是一种柔性张力体系。其主要设计指标有刚度、有效面积率、支座反力等，这些设计指标主要取决于边缘几何外形和预应力水平。因此，在满足刚度、有效面积率等要求下，合理地确定薄膜阵面边缘的几何形状及索膜的预张力值十分重要。

为使平面薄膜天线上覆设的电子设备能够有效工作，膜面的应力应保持良好的均匀性。索膜结构在实际张拉成形过程中，由于边索与花边索套之间存在滑移和摩擦力的作用，因此索力不能按照理想情况传递给膜面，本文将通过张拉成形数值分析，考察张拉过程中摩擦等接触作用对薄膜阵面应力状态的影响。

平面薄膜天线作为新兴的结构形式，通过模型试验验证其数值分析结果十分必要。薄膜的振动模态及自振频率是试验研究的主要内容。当模型放置在空气中时，附加质量对薄膜的振动特性有明显影响，因此本文在模态数值分析中考虑了空气附加质量的影响。

1.1 试验模型找形分析

不同于传统的结构形式，索膜结构为柔性结构，即在无应力的状态下索膜结构本身不具备刚度，必须施加一定的预应力使其产生刚度，同时形成结构初始平衡形状。在给定初应力条件下，为了确定索膜结构的初始平衡形状，必须对其进行找形分析，以保证膜面平整，不出现褶皱现象。同时，后续张拉成形分析也以此为基础。本文研究的平面薄膜天线模型初始设计方案有两种，分别为短跨半圆形与短跨非半圆形。薄膜阵面长度方向共设 3 跨（包括 2 个边跨和 1 个中间跨），宽度方向为 1 跨。薄膜采用聚酰亚胺（Kapton）膜材，厚度为 0.05 mm；平面薄膜采用一级张拉系统，该系统包括恒张力系统和边索，其中恒张力系统连接在外框架上，通过张拉边索向膜面施加张拉力。

由于有限元软件 ABAQUS 具有强大的非线性求解器，本文采用该软件对以上两种模型方案进行找形分析，其有限元模型如图 1 所示。图 1 中，1、2、3 分别为索的编号。各支座处平动位移约束，采用小弹模法进行迭代找形。薄膜边界与边索之间设定为绑定约束，找形收敛条件为最大位移<0.1 mm。找形分析参数和找形完成后索的预张力值分别如表 1、2 所示。图 2 展示了找形完成后膜面应力云图。由图 2 可知，找形完成后短跨非半圆形膜面的应力分布更均匀，而短跨半圆形膜面在短跨角部位应力分布不均匀，且半圆花边形状与理论形状存在误差，难以通过找形得到理论上的半圆形状。因此，实际试验样机的形状选用短跨非半圆形设计方案。



(a) 短跨半圆形找形初始形状



(b) 短跨非半圆形找形初始形状

图 1　找形分析有限元模型

Fig. 1　Finite element model of form-finding analysis

表 1　找形分析参数

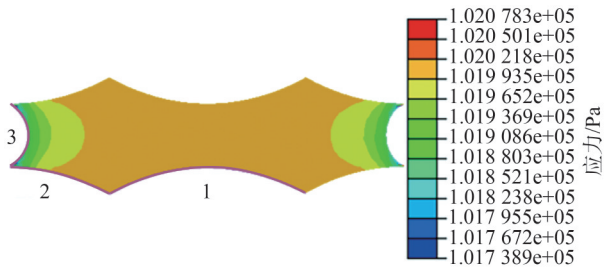
Tab. 1　Parameters of form-finding analysis

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/mm	直径/mm
薄膜	1 540	3.5	0.35	0.05	
边索	1 400	131.0	0.35		1.2

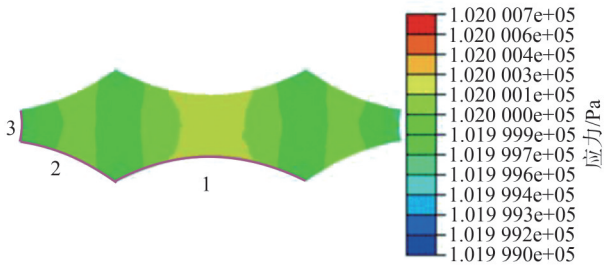
表 2　索的预张力值

Tab. 2　Cable pretension values

索的编号	短跨半圆形/N	短跨非半圆形/N
1	32.895	32.895
2	32.895	34.598
3	2.958	4.187



(a) 短跨半圆形



(b) 短跨非半圆形

图 2　找形完成后膜面应力云图

Fig. 2　Membrane stress contour after form-finding

1.2　考虑摩擦接触的张拉成形分析

为研究张拉成形过程中膜面应力的分布状态，本文在通用有限元软件 ABAQUS 中建立张拉成形分析模型。模型中的膜面边界形状采用第 1.1 节找形分析所得结果，并在薄膜边缘建立索套。索套沿薄膜花边扫掠而成，分别沿其环向和长度方向划分网格，索套数值模型如图 3 所示。膜面和索套均采用 membrane 单元模拟，边索则采用 truss 单元模拟。通过在支座处张拉每根索的端点，模拟实际张拉过程；为模拟恒张力系统的作用效果，在张拉成形分析中，施加于边索索端的张力始终保持恒定，该定值为表 2 经找形分析得到的边索预张力值。在模型中，通过设置通用接触模拟索与索套之间的相互作用，考虑索与索套之间法向接触与切向摩擦的通用接触，摩擦系数 μ 取 0.3。

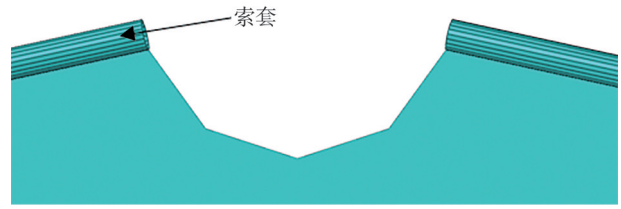
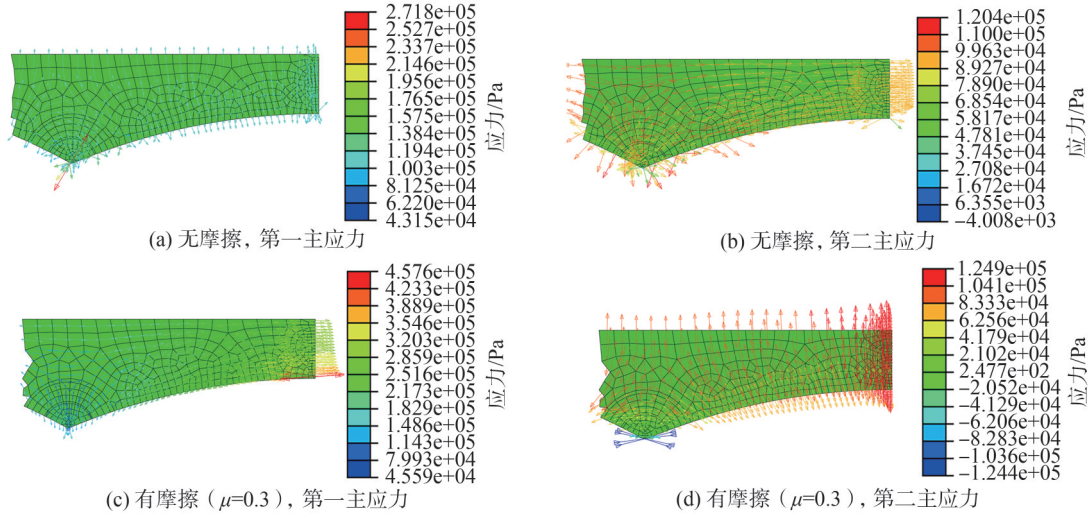


图 3　索套数值模型

Fig. 3　Numerical model of cable sleeve

通过张拉成形分析发现，摩擦力的存在会改变膜面主应力的方向及大小，如图 4 所示。在不考虑摩擦力的情况下，索套与边索之间只有法向的接触力，此时膜面第一主应力方向为法线方向（图 4(a)）；在考虑摩擦力的情况下，索套与边索之间除了法向力外，还存在切向摩擦力，且该力起控制作用，因此膜面第一主应力方向转变为切线方向（图 4(c)）。

图 5 展示了张拉成形后膜面及边索的应力。表 3 列出了张拉成形后各应力在无摩擦和有摩擦的参数对比。由图 5 可知：对于索套附近膜面，Mises 应力的最小值出现在张拉点附近，最大值则位于跨中膜面边缘处；索段中间应力最小，索端应力最大。由表 3 可知：膜面中心单元的 x 向正应力较无摩擦情况显著增大，而 y 向正应力较无摩擦情况略有增加；索端应力与无摩擦情况下近似一致，但由于摩擦力的存在，各段索中部的应力较无摩擦情况有所降低。通过对膜面及边索取隔离体进行内力分析，可解释上述结论。由于模型双轴对称，取 1/4 模型进行分析，如图 6 所示。图 6 中，F_x、F_y、F'_x、F'_y 为施加于索端的外力，F_c、F'_c 为边索跨中索力，f、f' 为边索与索套之间的切向摩擦力，F_N、F'_N 为边索与索套之间的法向接触力。以模型中间截面为例（图 6 最右侧），该截面处单元水平方向合力增加量为

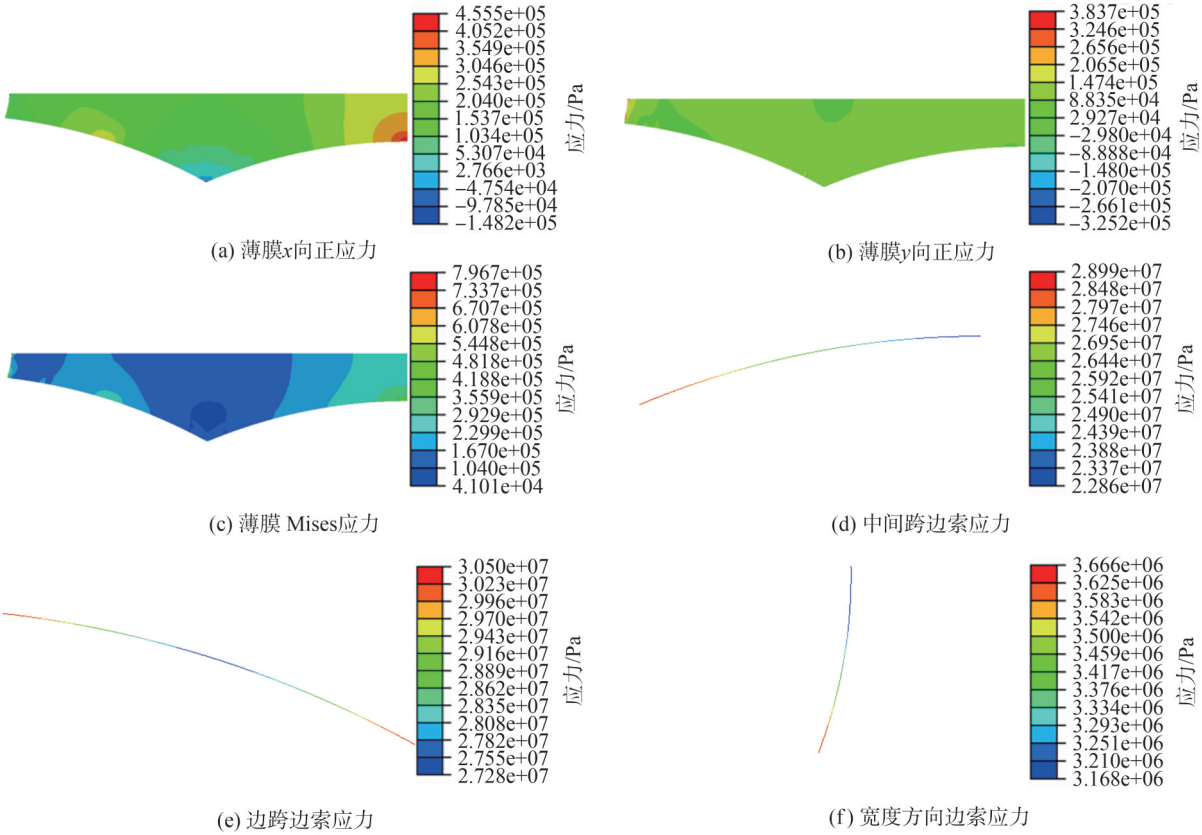


(a) 无摩擦，第一主应力　(b) 无摩擦，第二主应力

(c) 有摩擦（μ=0.3），第一主应力　(d) 有摩擦（μ=0.3），第二主应力

图4　膜面主应力大小及方向

Fig. 4　Magnitudes and directions of membrane principal stress



(a) 薄膜x向正应力　(b) 薄膜y向正应力

(c) 薄膜 Mises应力　(d) 中间跨边索应力

(e) 边跨边索应力　(f) 宽度方向边索应力

图5　张拉成形后膜面及边索应力

Fig. 5　Stress contour of membrane and edge cables after tension forming

表3　无/有摩擦张拉成形后膜面及边索各应力对比

Tab. 3　Comparison of stresses in the membrane and edge cables after tension forming with and without friction

参数	无摩擦应力/Pa	有摩擦应力/Pa
膜面中心单元x向正应力	1.020×10^5	2.930×10^5
膜面中心单元y向正应力	1.020×10^5	1.250×10^5
宽度方向边索应力	3.697×10^6（应力均匀）	3.666×10^6/3.168×10^6（最大/最小应力）
长度方向边跨边索应力	3.059×10^7（应力均匀）	3.050×10^7/2.728×10^7（最大/最小应力）
长度方向中间跨边索应力	2.909×10^7（应力均匀）	2.899×10^7/2.286×10^7（最大/最小应力）

F'_x–F'_c。由于各段跨中索力F'_c最小，导致跨中差值最大，因此跨中膜面单元应力最大。对于y方向，合力增加量为F_y–F_c，但对于长度远大于宽度的模型而言，该力对长度方向边索附近膜面单元影响较小。由此可见，索与索套之间切向摩擦力的增大改变了膜面应力状态，使得跨中膜面应力大于两端。随着摩擦系数的增大，膜面单元x方向正应力显著增加，而y方向正应力略有增加，因此Mises等效应力也随之增大。

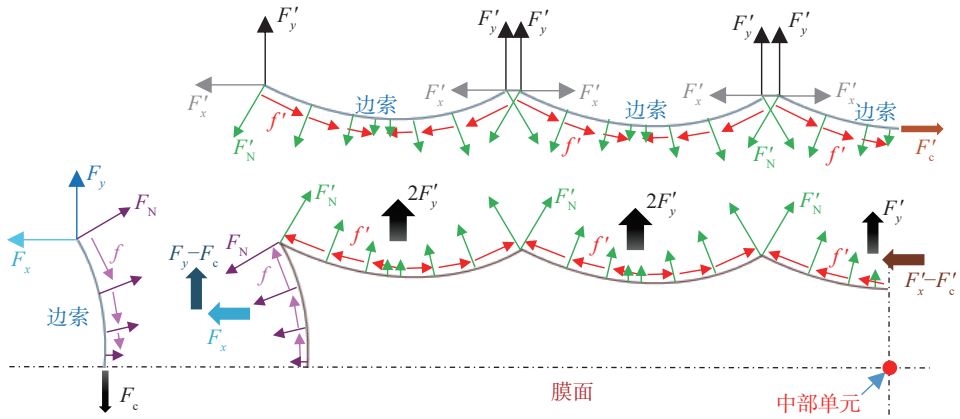


图6　内力分析图

Fig. 6　Internal force analysis diagram

1.3　试验模型模态分析

薄膜在空气中振动时，会带动周围空气一起振动，这部分空气质量即薄膜振动的空气附加质量。空气附加质量对试验结果影响显著，在模态分析中必须加以考虑。空气附加质量计算方法为：当薄膜振动时，空气附加质量的分布相当于各振型区域上均匀分布0.65倍该区域特征长度的空气质量[32]。其中，区域特征长度取该区域内切圆直径，即：

$$m_a = 0.65\rho l \tag{1}$$

式中：m_a为空气附加质量；ρ为空气密度，本文空气密度取标准条件下（0 ℃，1 个标准大气压）的空气密度，即ρ=1.29 kg/m^3；φ为1阶振型区域的内切圆直径，如图7所示，综合考虑索套出口与弹簧之间索段长度后，φ取2.110 m。由式（1）可计算得膜面1阶振型的空气附加质量为1.769 kg/m^2。

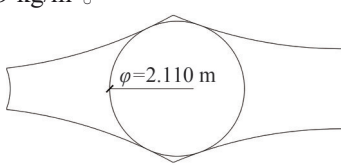


图7　1阶振型区域内切圆直径

Fig. 7　Diameter of tangential circle in the first-order mode region

在ABAQUS中建立模态分析模型，索套厚度设置为150 μm，模态分析时，边界条件设置为约束边索端点x、y、z 3个方向的平动自由度。同时，在考虑模型自重及空气附加质量的前提下，基于摩擦系数为0.3的索套与边索之间张拉成形分析，以及模型在自身重力场作用下变形与应力结果，加上空气附加质量进行模态分析，得到膜面基频为0.517 Hz，如图8所示。

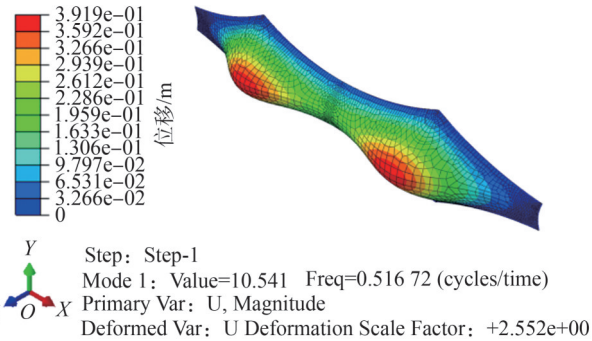


图8　摩擦系数为0.3时考虑重力及空气附加质量试验件的1阶振动模态

Fig. 8　First-order vibration mode of the test specimen with friction coefficient of 0.3 and considering its own gravity and additional air mass

2　平面薄膜试验件测试

张拉平面薄膜试验件张力工况是对平面薄膜试验件在3种工况下分别进行张拉与模态测试，分别为初始预张力工况（取短跨非半圆索预张力的10%）、小张力工况（取短跨非半圆索预张力值）、大张力工况（取短跨非半圆索预张力的2倍），如表4所示。同时，将试验测得的

表4　张拉平面薄膜试验件张力工况

Tab. 4　Tension loading cases for tensioned planar membrane specimen

工况	索的编号	索力/N
初始预张力工况	1	3.290
	2	3.460
	3	0.419
小张力工况	1	32.895
	2	34.598
	3	4.187
大张力工况	1	65.790
	2	69.196
	3	8.374

膜面褶皱分布情况和模态测试结果与数值分析结果进行比较，以验证数值分析方法的可靠性。张拉状态下的平面薄膜试验件如图9所示。

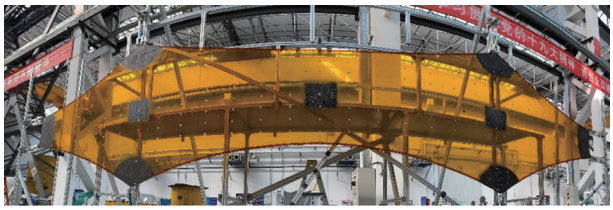


图9 张拉状态平面薄膜试验件

Fig. 9 Test specimen of tensioned planar membrane

2.1 褶皱形貌

由于膜面跨度较大且未进行0重力卸载，导致膜面在竖向安装张拉后出现褶皱，尤其在初始预张力工况下较为明显，褶皱分布情况如图10所示。由图10可知，随着膜面张力的增大，膜面褶皱情况得到改善，膜面平面度逐步提高：在初始预张力工况下，膜面中上部存在较多较大褶皱，下边缘沿索套内侧密集分布微小褶皱；在小张力工况下，膜面中上部褶皱明显减少，但仍有一定数量的褶皱存在，下边缘索套内侧微小褶皱较为密集；在大张力工况下，中上部较大褶皱的数量相对小张力工况继续减少，但下边缘索套内侧微小褶皱依旧存在。

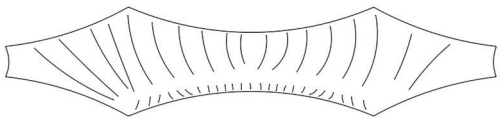


图10 初始预张力工况下试验件褶皱分布情况

Fig. 10 Wrinkle distribution pattern on the specimen under initial pretension

薄膜褶皱沿膜面最大主应力方向延伸。将试验中观察到的褶皱分布情况与考虑褶皱修正的膜单元本构模型的有限元计算结果进行对比。图11为试验件1/2模型在重力和初始预张力荷载作用下，考虑重力的初始预张拉力情况下膜面最大主应力方向。在边跨范围内，最大主应力方向为左上–右下倾斜，与试验现象一致；在中间跨中上部和下边缘索套内侧靠近跨中范围内，最大主应力方向基本为竖直方向，与试验现象基本相符。

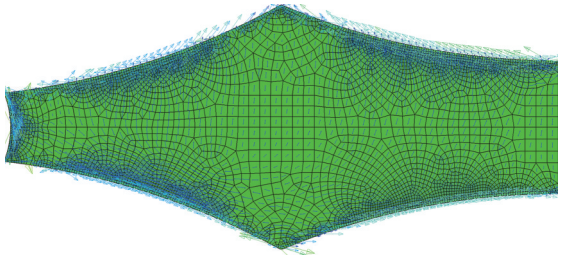


图11 考虑重力的初始预张力工况下膜面最大主应力方向

Fig. 11 Membrane's max principal stress direction under initial pre-tension loading with gravity

2.2 模态测试

为进行模态测试，需在膜面布置测试靶点。为尽可能减小靶点对膜面局部模态的影响，靶点采用质量可忽略的贴纸测点。膜面基频测试靶点布置如图12所示，在平面薄膜上均匀粘贴约128个靶点，作为非接触测量的目标点。采用分辨率为0.005 Hz的扫描式激光测振仪对模型进行模态测试。膜面的加振点设置为c_1、c_2和c_3这3个点，其中c_2为膜面中心点，c_2左右两侧设置加振点c_1、c_3。激振方式为敲击c_1、c_2和c_3这3个加振点，为膜面施加面外初始位移。

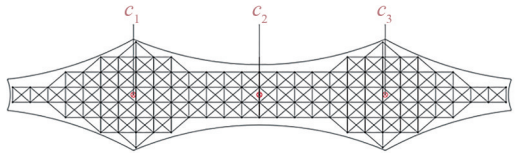


图12 膜面基频测试靶点布置

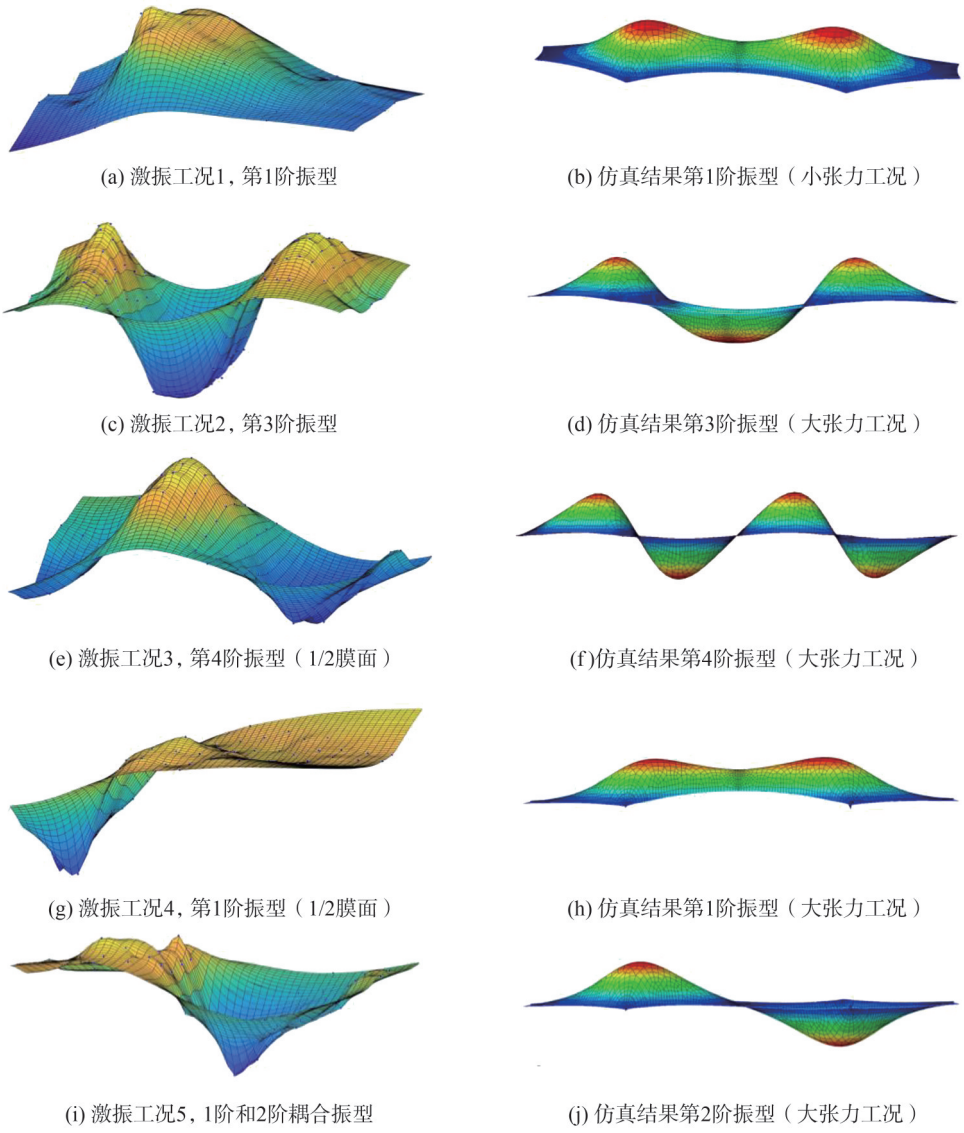
Fig. 12 Target arrangement of membrane fundamental frequency testing

现场共开展了5次模态测试，具体的测试加振工况及各阶频率结果如表5所示。表5中，激振工况1的膜面张力对应小张力工况，激振工况2～5的膜面张力对应大张力工况。试验测得的模态振型与数值仿真结果的对比如图13所示。分析结果表明，在几何和张力近似对称的条件下，薄膜不同方向和不同半波数的振型具有非常接近的频率。同时，由于薄膜只靠面内拉力提供刚度，缺乏抗弯机制，激发高阶模态所需的能量增量很小，导致高阶频率并没有显著增加。因此，在较低频段就会出现大量模态，表现为模态密度高。试验中，第1阶和第2阶频率的差值很小，在小张力工况下仅相差约0.02 Hz，在大张力工况下相差约0.06 Hz。由于前两阶频率相差很小，很容易发生振型耦合，因此试验中有时会测得这两种振型的叠加态，如激振工况5。而对于第3阶和第4阶振型，测得的模态频率及其对应的振型均与数值仿真结果较为一致，如激振工况2和3。总体来看，对应两种张力状态，试验测得的基频均与数值分析结果较为接近，数值结果的误差均在10%之内，这验证了第1.3节中模态分析方法的可靠性。

表5 模态测试结果与数值仿真结果对比

Tab. 5 Comparison of modal test results with numerical simulation results

工况序号	激振位置	测试结果/Hz	数值仿真结果/Hz	误差/%
1(小张力1阶)	c_1、c_2、c_3	0.500	0.517	3.4
2(大张力3阶)	c_1、c_3	0.875	0.902	3.1
3(大张力4阶)	c_2	1.000	1.050	5.0
4(大张力1阶)	c_1、c_2、c_3	0.625	0.685	9.6
5(第1、2阶耦合振型)	c_1、c_2、c_3	0.690		



(a) 激振工况1，第1阶振型　(b) 仿真结果第1阶振型（小张力工况）

(c) 激振工况2，第3阶振型　(d) 仿真结果第3阶振型（大张力工况）

(e) 激振工况3，第4阶振型（1/2膜面）　(f)仿真结果第4阶振型（大张力工况）

(g) 激振工况4，第1阶振型（1/2膜面）　(h) 仿真结果第1阶振型（大张力工况）

(i) 激振工况5，1阶和2阶耦合振型　(j) 仿真结果第2阶振型（大张力工况）

图13　模态试验与仿真结果振型对比

Fig. 13　Comparison of mode shapes between modal test and simulation results

3　结　论

基于对平面薄膜结构的理论数值分析和试验考察，可得出以下结论：

1）短跨非半圆形平面薄膜结构的找形分析结果与理论分析结果一致。

2）索与索套之间的摩擦力对膜面应力分布起主导作用，是导致膜面应力不均匀的主要因素，甚至改变主应力的方向，导致张拉点附近的膜面Mises应力减小，而跨中边缘处的膜面Mises应力增大。

3）随着张力的逐渐增大，膜面褶皱程度逐渐降低，膜面平面度逐渐提高。

4）试验模型整体形态与设计预期相符。实测的频率及振型不仅验证了数值分析方法的可靠性，也验证了试验件张拉系统方案设计与安装的有效性。

参考文献：

[1] Fang Guangqiang,Yun Weidong,Liu Lujiang,et al.Advances in large-area membrane drag sail technology for standardized application on launch vehicle upper stages[J]. Aerospace Science and Technology,2025,166:110617.

[2] Wu Haisheng, Tian Guizhi, Xu Ting, et al. Research on the preparation technology of metal circuits on space membrane SAR antenna[J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(6):71–76.[武海生,田桂芝,徐挺,等. 空间薄膜SAR天线阵面金属电路制备技术研究[J]. 空间电子技术,2020, 17(6):71–76.]

[3] Xiao Weiwei, Chen Wujun, Fu Gongyi. Pre-stress introduction effects and influence factors investigation for the space planar film reflect-array[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 845–849.[肖薇薇,陈务军,付功义. 空间薄膜阵面预应力导入效应及影响因素[J]. 宇航学报,2010,

31(3):845–849.]

[4] Shen Yinxiang, Xiang Ping, Wu Minger, et al.Research on tension-keeping system and dynamic characteristics of deployed roll-out solar array[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(1):34–40.[沈银祥,项平,吴明儿,等.滚卷式太阳毯结构张力保持系统与动力特性研究[J].载人航天,2020, 26(1):34–40.]

[5] Ma Xiaofei,An Ning,Cong Qiang,et al.Design,modeling,and manufacturing of high strain composites for space deployable structures[J].Communications Engineering,2024,3:78.

[6] Huang Jeff,Fang Houfei,Lovick R,et al.The development of large flat inflatable antennna for deep-space communications [C]//Proceedings of the Space 2004 Conference and Exhibit. Reston:AIAA,2004:AIAA2004–6112.

[7] Huang J. The development of inflatable array antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine,2001,43(4):44–50.

[8] Huang J, Lou M, Feria A, et al. An inflatable L-band microstrip SAR array[C]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1998 Digest Antennas: Gateways to the Global Network Held in Conjunction with:USNC/URSI National Radio Science Meeting(Cat No 98CH36).Piscataway:IEEE,1998,4:2100–2103.

[9] Straubel M, Huehne C, Arlt C, et al. Design and sizing of a 40 m^2 deployable membrane SAR space antenna[C]//12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing.Noordwijk:ESASP,2012:126–131.

[10] Wang Youwei. Structural design and analysis of thin film planar array antenna[D].Hangzhou:Zhejiang University, 2009.[汪有伟.薄膜平面阵天线的结构设计与分析[D].杭州:浙江大学,2009.]

[11] Xie Chao, Yan Biao, Liu Yu, et al. High precision manufacturing technology for space-based membrane antennas[J]. Manned Spaceflight,2018,24(1):79–83.[谢超,严飙,刘钰,等.大型星载薄膜天线高精度制造技术研究[J].载人航天,2018,24(1):79–83.]

[12] Harvey T J, Wiens M T, et al. Deployable structure for use in establishing a reflectarray antenna:U.S.Patent 10283835 [P].2019–5–7.

[13] Pan Liangjin.Research on folding method and splicing strategy of discontinuous membrane structure[D]. Nanjing: Southeast University,2021.[潘粮今.非连续薄膜折叠方法和拼接策略研究[D].南京:东南大学,2021.]

[14] Xie Chao, Zhang Enjie, Yan Biao, et al. Configuration design and demonstration of a spaceborne deployable membrane array antenna[J].Journal of Mechanical Engineering, 2024,60(3):11–19.[谢超,张恩杰,严飙,等.空间可展薄膜阵列天线构型设计与验证[J].机械工程学报,2024,60(3): 11–19.]

[15] Fang Houfei, Lou Michael, Huang Jeff, et al. Development of a three-meter ka-band reflectarray antenna[C]//Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston:AIAA,2002:AIAA2002–1706.

[16] Young L G,Ramanathan S,Hu J Z,et al.Numerical and experimental dynamic characteristics of thin-film membranes[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005,42(9/10):3001–3025.

[17] Liu Zhiquan,Qiu Hui,Li Xiao,et al.Optimal design of catenary system and model analysis for a planar membrane antenna structure[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(4): 344–351.[刘志全,邱慧,李潇,等.平面薄膜天线张拉系统优化设计及天线结构模态分析[J].宇航学报,2017,38(4): 344–351.]

[18] Liu Xiang, Zhang Hua, Lv Liangliang, et al. Vibration control of a membrane antenna structure using cable actuators[J]. Journal of the Franklin Institute,2018,355(5):2424–2435.

[19] Fan Liang,Lv Liangliang,Peng Fujun,et al.Coupled structural-electromagnetic modeling and analysis of active membrane phased array antenna[J].Advances in Space Research,2020,66(4):760–770.

[20] Liu Xiang. Dynamic modeling and active vibration control of space membrane antenna structure[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2021.[刘翔.空间薄膜天线结构的动力学建模与振动主动控制研究[D].上海:上海交通大学,2021.]

[21] 蔡国平.航天器电池阵/天线动力学与控制[M].北京:科学出版社,2023.

[22] Cao Peng,Bao Hong,Du Jingli,et al.Cable-membrane modeling and shape optimization of the space membrane antenna[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2018,45(2):54–58.[曹鹏,保宏,杜敬利,等.空间薄膜天线索膜结构建模与形状优化[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2018,45(2):54–58.]

[23] Xiang Ping,Ding Xiao,Wu Minger,et al.Numerical analysis of form-finding and tension forming of large planar membrane antenna[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(5):141–149.[项平,丁潇,吴明儿,等.大型平面薄膜天线找形及张拉成形数值分析[J].机械工程学报, 2020,56(5):141–149.]

[24] Cai Jianguo,Ren Zheng,Ding Yifan,et al.Deployment simulation of foldable origami membrane structures[J]. Aerospace Science and Technology,2017,67:343–353.

[25] Zhang Qian,Zhong Yihan,Wang Zizhe,et al.Analytical model and general calculation procedure for wrinkled membrane parameters[J].International Journal of Mechanical Sciences,2022, 221:107168.

[26] Chandraul A,Murari V,Kumar S.A review on dynamic analysis of membrane based space structures[J].Advances in Space Research,2024,74(2):740–763.

[27] Park J E, Brown G C, Arya M, et al. Multilayer tensioned membrane structures for radio-frequency lenses[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2024 Forum.Reston: AIAA,2024:AIAA2024–2043.

[28] Guan Fuling,Wang Youwei,Yang Chaohui.Design and fabrication of new type reflect array antenna[J].Journal of Engineering Design,2008,15(6):466–471.[关富玲,汪有伟,杨超辉.新型折叠卷收式反射阵天线的设计与制作[J].工程设计学报,2008,15(6):466–471.]

[29] Xu Yan, Xu Yixian, Fang Qin, et al. Shape optimization of nonlinear spring and design of adjustable constant force device[J].Journal of Astronautics,2020,41(12):1499–1506.[徐彦,许怡贤,方琴,等.非线性弹簧形态优化及可调节恒力装置设计[J].宇航学报,2020,41(12):1499–1506.]

[30] Zhang Yunce, Qiu Xinghan,Wang Changguo.Design and analysis of large-area membrane antenna reflector for CubeSats[J].AIAA Journal,2022,60(10):6036–6040.

[31] Ma Xiaofei,Li Tuanjie,Ma Jingya,et al.Recent advances in space-deployable structures in China[J].Engineering,2022,17:207–219.

[32] Wang Lei, Li Yuanqi, Shen Zuyan. Experimental investigation on the added mass of membranes vibrating in air[J]. Journal of Vibration Engineering,2011,24(2):125–132.[王磊,李元齐,沈祖炎.薄膜振动附加质量试验研究[J].振动工程学报,2011,24(2):125–132.]

Tension–Formed Planar Membrane Structure and Its Dynamic Mode Characteristics

CAO Sixian[1], *QIU Hui*[2], *XIANG Ping*[1*], *CONG Qiang*[2], *WU Minger*[1], *LIN Qiuhong*[2], *WANG Hu*[3]

(1.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;
3.Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract:

Objective Space membrane antennas possess several inherent advantages that make them highly appealing for aerospace applications: Their very low mass reduces spacecraft launch weight and cost; their high packing efficiency allows compact folding and storage, which is critical when launch volume is limited; and their good environmental adaptability enables operation under extreme temperatures, vacuum, and radiation. Motivated by the growing interest in large planar membrane antennas, a dedicated planar membrane model was designed and fabricated, and a dynamic modal test was conducted to evaluate its tension–formed structural performance.

Methods Firstly, the form-finding process was used to determine the initial equilibrium shape of the membrane structure under a prescribed prestress, and the subsequent tension–forming process was used to tension the membrane to the target stiffness and geometry; both processes were simulated using the nonlinear finite element method (FEM). The tension–forming analysis explicitly modeled sliding-friction contact between the cables and their sleeves. To compare with the observed wrinkle patterns, an additional finite element analysis incorporating a wrinkling-corrected membrane constitutive model was performed to obtain the directions of the maximum principal stress under self-weight and initial pre-tension loads. A modal analysis of the test specimen was then conducted using FEM considering the added mass of the surrounding air in ground tests. Finally, the planar membrane specimen was tensioned and tested under three loading cases: Initial pre-tension, low tension, and high tension. The measured wrinkle distributions and modal properties were compared with the numerical results.

Results and Discussions The form-finding results showed that the short-span non-semicircular membrane had a more uniform stress distribution, whereas the short-span semicircular membrane exhibited relatively nonuniform stress near the corners, and its catenary radii deviated from the theoretical value. Therefore, the short-span non-semicircular configuration was adopted for subsequent finite element analyses and for the test specimen. In the tension–forming analysis, friction between the cables and sleeves altered both the direction and magnitude of the membrane principal stresses. The first principal stress shifted from the direction normal to the membrane edge toward the tangential direction. Friction also caused the minimum stress to occur at the cable mid-span and the maximum stress at the cable ends, while membrane stresses in the central region exceeded those near the ends. Compared with the friction-free case, the stress at the cable ends remained almost unchanged, whereas the mid-span cable stress decreased. The normal stress in the *x*-direction of the central membrane element increased substantially, while the normal stress in the *y*-direction increased slightly relative to the friction-free case, and the von Mises equivalent stress increased with increasing friction coefficient. Modal analysis, which included the model's self-weight and an added air mass of 1.769 kg/m^2, yielded the specimen's natural frequencies and mode shapes. Through the tensioning and modal tests, wrinkle distributions and modal frequencies were measured. Under initial pre-tension, numerous relatively large wrinkles formed in the upper central region, with fine, dense wrinkles along the inner side of the sleeves near the lower edge; increasing tension progressively improved membrane flatness. The wrinkle orientations agreed well with the directions of the maximum principal stress predicted by the wrinkling-corrected membrane constitutive model. Due to the geometric symmetry of the specimen

and the high modal density resulting from the membrane's low bending stiffness, the first and second natural frequencies were very close, leading to easy mode coupling; apart from these coupled modes, the measured mode shapes and frequencies matched the numerical results closely, with frequency errors within 10%. These outcomes verify the reliability of the numerical methodology.

Conclusions Friction between the cables and sleeves has a decisive influence on the stress distribution in both the membrane and the cables. The dynamic modal tests clearly captured the model's vibration characteristics under different load levels, and the results were compared with those from the finite element analyses. A detailed comparison between tests and simulations confirms that the tensioning system performs as intended and that the numerical model can reliably predict the actual structural response.

Key words: planar membrane; tension–forming analysis; slip-friction contact; fundamental frequency of membrane; membrane wrinkling; modal test

（编辑　周　璇）

引用格式: Cao Sixian,Qiu Hui,Xiang Ping,et al.Tension–formed planar membrane structure and its dynamic mode characteristics [J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):59–68.[曹思娴,邱慧,项平,等 . 张拉成形平面薄膜结构及其振动模态特征 [J]. 工程科学与技术,2026,58(3):59–68.]