•可展开结构及其在航天工程中的应用•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500132

本刊网刊

大型可展开网状天线反枕效应研究进展

贺乃馨[1],宋燕平[1*],李团结[2],张大羽[1],黄鹏飞[1],李怡晨[1],曾家琛[1]

(1.中国空间技术研究院 西安分院,陕西 西安 710100;2.西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071)

摘　要:网状天线具有高收纳比、低面密度和高型面精度等优点,被广泛应用在星载天线中。然而,金属索网的弯曲刚度较低,在预张力作用下会引起反枕效应,导致天线型面变形,进而影响天线远场特性并造成增益下降。反枕效应已成为制约网状天线向大口径、高精度发展的主要瓶颈之一。本文系统总结了当前反枕效应的解决方案,主要包括:基于薄壳无矩理论的解决方案(施加面外载荷、优化边界形状和调整薄膜内力比)、基于薄壳理论的解决方案(减小薄壳厚度或减小薄壳杨氏模量),同时指出这些方案均存在一定的局限性。在此基础上,结合超材料的最新研究进展,提出将二维负泊松比材料制成薄板,并将其弯曲形成抛物反射面,负泊松比材料的曲率弯曲同向性可以保证弯曲形成的曲面为正高斯曲率曲面,从而解决反枕效应。由于应用于网状天线上的负泊松比材料需要是面内各向同性的,本文探索了目前文献中二维面内各向同性的负泊松比材料,针对现有负泊松比材料拉伸载荷下容易失效、难以匹配张拉系统的问题,提出了一种新型预收卷六韧带手性材料,新型材料对缓解反枕效应、简化天线结构、缩减天线质量具有显著潜力,并在此框架下展望了未来负泊松比材料应用于网状天线的发展趋势和亟待解决的关键问题。

关键词:网状天线;反枕效应;负泊松比材料;面外刚度;薄膜结构

中图分类号:V11　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)03-0069-13

星载天线被广泛应用于通信、电子侦察、导航、遥感、深空探测及射电天文等领域[1–2]。在通信卫星方面,C–Ku频段的固定业务和广播业务卫星、Ku–Ka频段的宽带业务卫星通常需要5～8 m口径的天线。移动业务则需要L、S频段25 m口径的天线。在卫星遥感方面,基于大口径反射面体制的综合孔径雷达在天线效率、带宽、重量、功耗、复杂度及费用方面具备明显优势。在卫星导航方面,中国BD–3卫星导航系统中的高轨卫星使用口径为5 m的天线以支持短报文业务,并使用同等口径的天线实现了星基导航增强。在电子侦察方面,为了实现对敌方信息远距离、大范围、全天候实时监测,天线口径的需求已从早期的3 m发展到了150 m[3]。在深空探测方面,地外天体遥感也需要大口径天线。在射电天文方面,大的天线口径会显著提高射电望远镜的灵敏度和角度分辨率,在在轨8 m口径的射电望远镜(VSOP)与地面大口径射电望远镜组成的甚长基线干涉测量系统(VLBI)中已经得到实际应用。

随着通信卫星的不断发展,星载天线为了获取更微弱的发射功率信号,需要进一步提高天线增益,导致对更大口径天线的需求进一步提升。然而,受运载火箭整流罩的限制,口径超过4 m的天线必须设计成可折叠/展开的形式,卫星发射时折叠收纳于运载火箭整流罩内,入轨后展开至工作状态。根据不同的应用场景,国内外的航天科研机构已经设计出多种形式的大型可展开天线来适应不同的行业需求。以天线的反射面的特征为分类标准,大型可展开天线可分为分片固面可展开天线、网状可展开天线、充气天线、柔性自回弹天线和壳膜天线等[2]。其中,网状天线具有面密度小、收纳比高、展开口径范围大(可以达到6～150 m)等优点,且在一定范围内增大天线口径不会改变天线的结构形式及成比例地增加天线总重量。因此,网状天线成为目前星载可展开天线中应用较为广泛的一类。

收稿日期:2025－03－04　　**修回日期:**2025－04－17　　**网络出版日期:**2025－06－09

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B2001;12494564)

作者简介:贺乃馨(1995—),博士生. 研究方向:大型可展开天线结构设计与分析. E-mail:he_naixin@qq.com

* **通信作者:**宋燕平,研究员,E-mail:yanping_song@qq.com

随着通信任务的需求不断提高，卫星天线向着高频段发展，因此对反射面的表面精度要求愈加严苛。例如：Ka 频段天线的表面均方根误差为 0.15～0.22 mm，由于柔性金属网自身缺乏弯曲刚度，导致在预张力作用下肋间网面不是具有同向曲面性质的旋转抛物面，而是具有反向曲面性质的径向外凸、周向内凹的特殊曲面，上述曲面特性被称为反枕效应。反枕效应是网状天线型面设计误差的主要来源之一，口径为 8 m 的 HALCA 天线反枕效应引起的误差达到了 0.3 mm，引起了天线型面偏离理想抛物面曲面，导致电磁信号反射散乱、指向误差增大、方向图产生畸变，降低天线增益和辐射效率，从而严重影响天线的电磁性能，使得卫星通信性能受到影响[4–5]。为了深入探究反枕效应的解决方案，本文综述了主流的反枕效应的研究方案，并提出利用负泊松比的同向弯曲特性解决网状天线反枕效应的创新思路。

1 反枕效应

由于柔性金属网缺乏弯曲刚度，在预张力作用下肋间网面不是具有同向曲面性质的旋转抛物面，而是具有反向曲面性质的径向外凸、周向内凹的特殊曲面，这就是所谓的反枕效应，期望反射面与实际反射面的对比示意图如图 1 所示。网状天线的反枕效应可用数学中的高斯曲率表示，同向曲面高斯曲率为正，反向曲面高斯曲率为负。反枕效应是膜结构的固有属性，柔性金属网性质与薄膜类似，因此，反枕效应为网状天线一种固有属性。

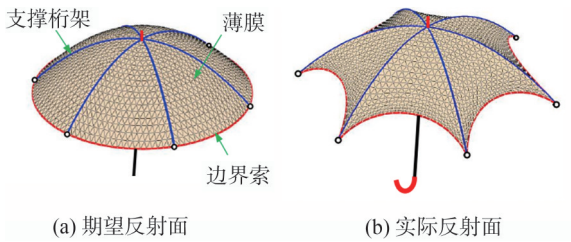


图 1 期望反射面与实际反射面对比示意图

Fig. 1 Schematic diagram between the expected reflecting surface and the actual reflecting surface

从工程实际出发，减小伞状天线反枕效应最直接的方法是增加径向肋的数量[6]。TRW 公司为 FLTSATCOM 通信卫星系统研制的 4.9 m 的固网结合反射器，工作在 UHF 频段，对型面精度要求不高，其肋的数量为 12。而 ATS–6 缠绕肋天线的工作频率被提高到 S 频段，肋的数量需要增加到 48 根才能满足型面精度的要求。

假定存在一种金属网，其沿反射器径向的拉伸刚度为 0，则两相邻肋间的曲面的高斯曲率为 0。在肋的数量确定的情况下，可以推导出抛物柱面是相对于要求的旋转抛物面均方根误差最小的曲面[7]。如果肋的数量可变，当肋数量趋于无穷大时，型面误差的均方根值将逼近于 0（假设肋的形状误差为 0）。当然，此时的天线不再是网状可展开天线，而是固面天线了。

缠绕肋天线的金属网首先被剪裁成梯形网片，梯形的两斜边分别与两相邻肋缝接，由与肋外端相连的悬链线索段对宽底边金属网施加径向张力，窄顶边缝接在天线的中心圆毂边缘。由于缠绕肋从展开态到收拢态要绕根部转动 90°，靠近肋根部的金属网将承受非常大的剪应变，这个剪应变会使金属网发生局部扭曲或褶皱，影响天线型面精度。为了减小这个剪应变，使用了一种泊松比接近于 0 的平纹网，使得其张紧后在肋间形成了近似抛物柱面，即 0 高斯曲率曲面。

然而，通过增加肋数量来提高伞天线型面精度，必然增加展开机构的复杂性，降低天线的可靠性，导致天线重量急剧增加。减小金属网一个方向的拉伸刚度，或者采用 0 泊松比的金属网，可将肋间曲面由负高斯曲率曲面改进为 0 高斯曲率曲面，然而对反射面型面精度的提高有限。

2 基于薄壳无矩理论的解决方案

在弹性力学中，无矩理论的薄壳平衡微分方程为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial}{\partial\alpha}(BF_{\mathrm{T1}})-\dfrac{\partial B}{\partial\alpha}F_{\mathrm{T2}}+\dfrac{\partial A}{\partial\beta}F_{\mathrm{T12}}+\dfrac{\partial}{\partial\beta}(AF_{\mathrm{T21}})+ABq_1=0,\\ \dfrac{\partial}{\partial\beta}(AF_{\mathrm{T2}})-\dfrac{\partial A}{\partial\beta}F_{\mathrm{T1}}+\dfrac{\partial B}{\partial\alpha}F_{\mathrm{T21}}+\dfrac{\partial}{\partial\alpha}(BF_{\mathrm{T12}})+ABq_2=0,\\ (k_1F_{\mathrm{T1}}+k_2F_{\mathrm{T2}})-q_3=0\end{cases}\tag{1}$$

式中，α、β 均为曲面上正交曲率线，A、B 为拉梅系数，F_{T1}、F_{T2}、F_{T12} 和 F_{T21} 均为薄壳中的内力，q_1、q_2 和 q_3 均为薄壳所受外载荷，k_1、k_2 为薄壳中面沿着 α、β 方向的主曲率。式（1）成立的前提是薄壳的弯曲刚度小到可以忽略不计，而金属网的弯曲刚度非常小。没有弯曲刚度的金属网要保持一定的形状，必须处于预张力状态，即式（1）第 3 式中的 F_{T1}、F_{T2} 为正。如果金属网没有横向载荷的作用，即式（1）中 $q_3=0$，显然两个主曲率 k_1、k_2 必然异号，高斯曲率 $\kappa=k_1k_2$ 必为负，曲面为负高斯曲率曲面。显然，令 $q_3\neq0$，即给金属网（薄膜）施加面外载荷，则有可能使 k_1、k_2 同号。

2.1 施加面外载荷的方案

2.1.1 均布载荷方案

均布载荷方案有充气天线和静电成型天线两种。充气天线有气密性要求，静电成型天线则有高压静电场防泄漏要求，导致两种天线均不能采用带孔隙的金

属网。

1）充气式天线

充气天线在航天器上较早得到采用，20 世纪 50 年代 NASA Langley 研究中心开发的 Echo 卫星为直径超过 30 m 的充气球体（图 2），球体表面金属化具备反射电磁波的能力，成为一个空间无源天线。Echo2 卫星甚至具备展开后的自硬化能力，使得球体不依赖于内部气压也可保持其形状[8]。Echo2 的自硬化不是依赖于树脂材料的固化，而是依赖于粘贴在气球内外表面的铝箔在施加薄膜内力后的刚度提高。



图 2　Echo 卫星

Fig. 2　Echo satellite

1996 年美国的 IN–STEP（In–Space Technology Experiments Program）项目进行了充气天线在轨实验[9]，成为第一个在轨飞行的充气天线（图 3）。由于该项目为实验测试，没有寿命要求，因此并没有为天线提供补充充气设备。对于需要一定工作寿命的充气天线，为维持气囊气压，需要提供专门的补气系统。

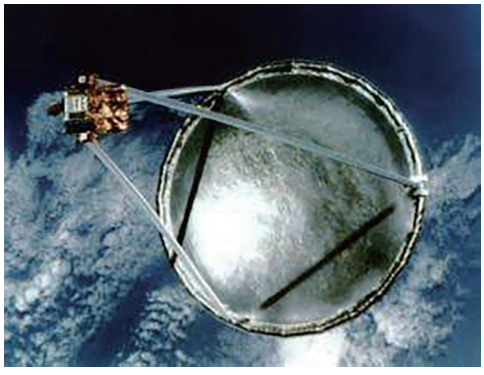


图 3　IN–STEP 在轨试验

Fig. 3　IN–STEP on–orbit experiments

欧洲空间局从 20 世纪 80 年代开始进行充气天线的研究，瑞士的 Contraves 公司开发了自固化充气天线（图 4），其自硬化方式包括热固化和化学反应固化（在充入气囊的气体中添加固化催化剂）等。欧洲空间局和 Contraves 公司也研究了紫外线固化方式[10]。

为了提高充气天线反射器的型面精度和展开后

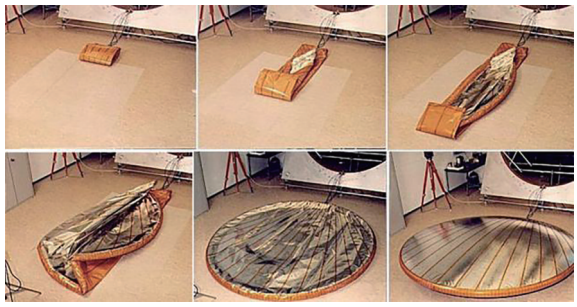


图 4　Contraves 公司开发的自固化充气天线

Fig. 4　Self-curing inflatable antenna developed by the Contraves Corporation

的刚度，将形状记忆合金网架与薄膜气囊复合，通过加热和充气相结合的方式将反射器展开[11]。测试表明，反射器展开后，即便气囊失压，其型面精度也不受影响。

虽然充气天线的研究时间已经超过了 40 a，气压保持与补气技术、自固化技术仍然存在着难以解决的问题，进而限制了充气天线的实用化[12]。

2）静电成型天线

静电场也是较易想到的均布载荷施加方式，20 世纪 80 年代，静电成型天线得到了较深入的研究。

NASA 的“下一代空间雷达 NIS（NEXRAD in Space）”项目需要口径为 35 m 的可展开天线，为满足雷达对天线型面精度的要求，SRS 公司与 JPL 实验室联合开展了静电成型可展开天线反射器的攻关，完成了 5 m 样机的研制[12]。反射面采用聚酰亚胺薄膜，用 216 个电极实现对反射面的精度调控，图 5 为静电成型反射器。

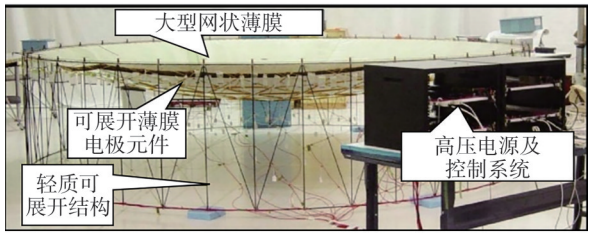


图 5　静电成型反射器

Fig. 5　Electrostatic forming reflectors

然而，静电成型方案的技术成熟性有待进一步提高，距离实用的要求仍然有一定差距。一方面，型面精度要求提高时，静电电极的数量也随之增大，天线的重量和复杂性随之增大。另一方面，空间环境对维持反射面与支撑结构之间的静电场的稳定性有很大影响，充放电问题也不容忽视。

综上所述，金属网（薄膜）施加均布载荷的方案均存在部分尚未完全解决的问题且可靠性不足，制约了上述技术方案的实用性。

2.1.2　分布载荷的方案

严格满足式（1）中第 3 式的面外载荷是均布载荷。

由于均布载荷难以实现，因此可采用离散载荷代替均布载荷。虽然从理论上并不能满足式(1)中第3式的要求，在工程上仍不失其实用性。

1)双层网方案

当工作频率较低时，伞天线采用单层网方案即可满足型面精度的要求。单层网伞天线中的金属网直接张紧在抛物线形弯曲肋上。当工作频率提高时，双层网方案被提了出来。

双层网伞天线在单层网的基础上，利用肋厚度提供的空间，在肋背面增设一层网，分别称为前、后网。前后网之间设置一组牵拉索，其作用是对金属网施加横向载荷，实现对式(1)第3式中 q_3 的近似。通过调整牵拉索的长度实现对前网型面的调整。第2节已经提到金属网的弯曲刚度可以忽略不计，然而当金属网张紧在径向肋上时，金属网中的膜应力产生的应力刚化效应赋予金属网弯曲刚度，因此，双层网伞天线可用有限个牵拉索实现对前网型面进行调整。一般情况下，施加给金属网的张力并不大，应力刚化效应有限，所以要实现高精度反射面，牵拉索数量就需增多，调整工作量随之增大。更深层次的问题是：每一次调整都会带来金属网膜应力的变化，进而改变金属网弯曲刚度，高度的非线性导致调整过程必然是一个迭代过程，进一步增大调整工作量。

一个改进方案是使用周向索伞天线，在径向肋正、反面布置成对的周向索，周向索之间设置一组牵拉索，通过调整牵拉索使前周向索(前索)调整点牵拉到抛物面上，再将预拉伸的金属网缝在前索上。图6[13]、7[14]分别为一代TDRSS周向索伞天线和周向索伞天线的组成结构示意图。在这个方案中，前、后索和牵拉索组成的牵拉系统对金属网施加横向载荷，实现对式(1)第3式中 q_3 的近似。周向索能够承受的张力远大于金属网，因此可以用较少的牵拉索实现较高的型面精度。

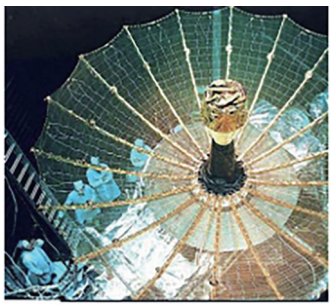


图6 一代TDRSS的周向索伞天线[13]

Fig. 6 Circumferential parachute antenna of the first generation of TDRSS[13]

即便如此，在周向索之间，金属网仍然呈现负高斯曲率的特性，反枕效应仍然存在，只不过程度略轻。当需要更高精度反射面时，必须加密周向索，而这给系统带来了复杂性和调整工作量的增大。

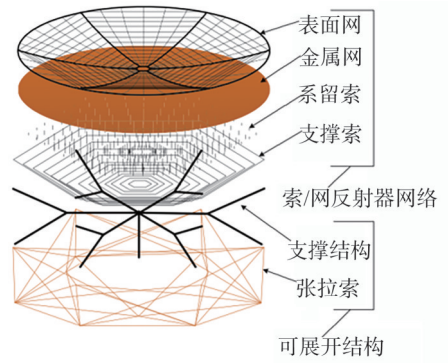


图7 周向索伞天线的组成结构示意图[14]

Fig. 7 Schematic diagram of the composition structure of a circumferential umbrella antenna[14]

反枕效应的根本原因为：①金属网缺乏弯曲刚度；②弯曲边界的存在。伞天线中的弯曲边界即抛物线形的径向肋。周向索伞天线的前索在牵拉点之间虽为直线，但对于两相邻前索之间的金属网，两前索整体上仍为弯曲边界。

图7中的前索构成了多个四边形，但不能保证每个四边形的4个角处于同一平面内，因此，在每个四边形内，金属网仍不能避免地存在反枕效应。

2)张力杆天线

将前索(图7)的每个四边形的一对对角用一条索段相连，则前索变为一个三角形索网，索网的每个结点都位于所要求的抛物面上。将前索网张紧，然后将预拉伸的金属网缝制在前索网上，由于每个三角形内的金属网被张紧在同一平面内的三条直线边界上，该部分金属网的形状为一个三角形平面，抛物面被划分为一系列三角形小平面。显然，金属网面局部的高斯曲率为0(每个三角形小平面内)，而整体上则表现为正高斯曲率，反枕效应得到有效抑制。这就是张力杆天线诞生的思路。

将抛物面划分为三角形平面组成的网架是由NASA Langley空间中心的研究人员提出的[15]，其灵感来源为地面大型穹顶建筑的设计。然而，上述网架如果采用刚性杆铰接的方式实现，则其收拢/展开较为复杂，而大量铰链的存在导致反射面的型面精度难以保证[16]。将刚性杆铰接网架改为柔性索组成的索网，并借鉴地面充气结构，在索网结点处施加面外力使所有索段张紧，形成由张紧索段组成的网架结构，即所谓的张力杆，将预拉伸的金属网缝制在张力杆上，即形成张力杆天线。只要索的拉伸刚度足够大，不需要太大的面外力即可形成所要的抛物面(只要保证所有索段均受张力)，由小三角形平面逼近抛物面的误差，仅

由张力杆的杆长决定[17–19]。张力杆天线[20]首先应用在日本于1997年发射的Halca卫星上（图8），主反射器口径为10 m[21]。

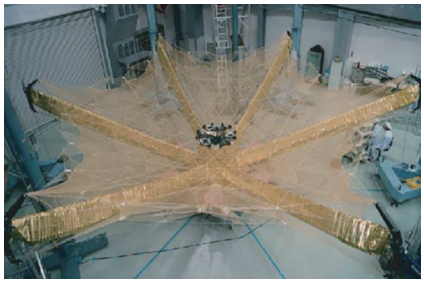


图8　Halca卫星上的张力杆天线

Fig. 8　Tension rod antenna on the Halca satellite

针对张力杆天线，Lai等[22]进一步研究了肋的根数、张力杆的几何构型、张力杆在肋上的支撑方式等对型面精度的影响，以所有索段均受拉力、各索段拉力差尽可能小等准则，保证张力杆天线的静定结构的要求。

AstroMesh反射器也是张力杆天线的一种形式（图9）[23]。



图9　AstroMesh天线反射器

Fig. 9　AstroMesh antenna reflector

对张力杆天线型面精度的研究极为丰富。研究围绕的核心是：提高张力杆天线的型面精度，减小三角形的面积，也就是增加索网网格的密度。然而，过密的网格密度会带来结构的复杂性，从而导致天线重量的增加。

2.2　优化边界形状方案

当$q_3=0$时，式（1）中第3式变为：

$$k_1F_{T1}+k_2F_{T2}=0 \tag{2}$$

常用的柔性金属网大多采用经编工艺制成，其承受面内剪切的能力可忽略不计，则式（2）中的F_{T1}与F_{T2}相等，则有$k_1=-k_2$，即张紧后金属网所形成的曲面平均曲率H为：

$$H=\frac{1}{2}(k_1+k_2) \tag{3}$$

简而言之，经编柔性金属网张紧在弯曲边界上的型面精度问题本质上是一定边界条件下的最小曲面问题。因此，减小反枕效应可以通过优化边界的几何形状来实现。

Meyer[24]采用线性薄膜理论，研究了四边形网格划分的抛物柱面反射器和轴对称反射器的型面精度问题。四边形网格的产生方式如下：首先，在抛物面顶点切平面内划分正方形网格；然后，将网格投影在抛物柱面或轴对称抛物面上。研究的基准是假定将金属网张紧在按上述方法划分的四边形网格上所形成的局部曲面为平面，理想抛物柱面和轴对称抛物面均采用上述四边形平面逼近。研究结果表明：在抛物柱面或轴对称抛物面法线方向采用弯曲四边形网格的边界，四边形内的金属网将变为非平面，采用上述非平面的面片逼近理想抛物面，可以得到比用平面面片更小的型面误差（RMS）。Fichter[25]、Furuya[26]、Kato[27]和Meshkovsky[28]等也开展了相同思路的研究。

尽管上述研究工作的目的不是减小反枕效应，但通过改变金属网边界支撑的形状来改变实际曲面的思路，对缓解反枕效应也是有效的。然而，预设形状的边界或者是刚性的，或者需要复杂的牵引索保持，因此，到目前为止并没有得到实际应用。

2.3　调整薄膜内力比方案

如果金属网的面内剪切刚度不为0，则会出现式（1）第3式中$F_{T1}\neq F_{T2}$的情况。Prata等[29–30]分别对正馈伞天线和偏馈伞天线中两相邻肋间金属网反枕效应的情况进行了分析。金属网沿抛物面径向和周向施加相同张力时，反枕效应存在；而当径向张力与周向张力的比值为0时，反枕效应消失。Huang等[31]研究了更多径、周向张力比的情况，得出了相同的规律。

Furuya[26]、Kato[27]等的研究表明：调整网面两个方向的张力比可以减小反枕效应，其降低效果与矩形分片的长宽比、矩形分片偏离抛物面轴线的距离、抛物面顶点的曲率等因素有关。Kato[27]在研究中还考虑了矩形分片相对于抛物面径向夹角的变化对型面精度的影响。

在基于薄壳无矩理论的各种解决方案中，得到工程应用的只有分布载荷方案，即索膜反射器方案。然而，为了提高索膜反射器的型面精度，最终的解决方案仍然需要提高索网密度，减小分片面积[32]。

3　基于薄壳理论的解决方案

典型的固面天线反射器由于弯曲刚度足够大，通过加工形成的天线反射器无需预应力即可保持形状。然而，由于反射器的弯曲刚度高，无法通过弹性变形的方式将固面天线反射器收拢。固面天线可以实现分片展开，然而受运载火箭整流罩尺寸的限制，目前允许的固面分片可展开天线的最大口径为10 m。

一种解决思路为：减小固面天线的弯曲刚度，在外载荷的作用下，实现保持小应力的情况下得到大应

变,从而将反射器收拢。

各向同性连续体薄壳弯曲刚度D的表达式如下:

$$D=\frac{Et^3}{12(1-\upsilon^2)} \tag{4}$$

式中:E为薄壳杨氏模量,即面内弹性模量;t为薄壳厚度;υ为薄壳的泊松比。显然减小t会减小壳体的弯曲刚度,柔性自回弹天线反射器就是基于上述原则进行设计的。

3.1 柔性自回弹天线

图 10 为柔性自回弹天线反射器。该反射器是由单一的单层碳纤维 TWF(triaxial woven fabric)增强环氧复合材料制成,在反射器口面边缘对称点施加约束力,可以将反射器单向弯曲并收拢到较小的体积,在撤除约束力后,反射器可在自身储存的弹性应变能的驱动下展开至工作状态,即所设计的旋转抛物面形状[33–35]。工作状态的反射器完全靠自身的弯曲刚度保持设计的形状,并且还能提供抵抗外部各种扰动(天线的指向调整、微振动、热应力等)所需的刚度裕度,因此,弯曲刚度仍然大到反射器不能双向或多向弯曲,所以其收纳比较小,天线口径难以大型化。另外,由于反射器初始形状为抛物面形状,其允许的最大口径还会受到模具和加工设备(热压罐)的限制。

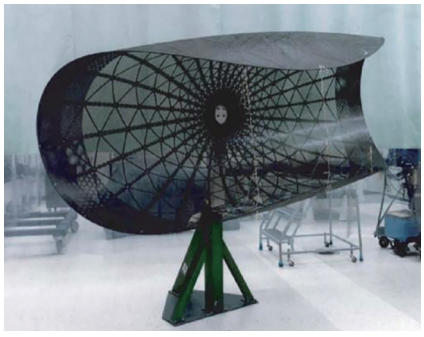


图 10 柔性自回弹天线反射器

Fig. 10 Flexible self-deployable antenna reflector

柔性自回弹天线由于具备一定的弯曲刚度,无需预加载即可保持正高斯曲率,因此,不存在反枕效应的问题。然而,由于柔性自回弹天线为单一的薄壳,虽然通过在薄壳上集成加强筋并适当增厚边缘来增加刚度,但是反射器的刚度仍然较低。考虑到反射器还要兼顾可收拢性,显然不宜进一步增加刚度。另外,反射器的加工工艺与传统碳纤维复合材料层合板、壳工艺相同,其能够达到的制造精度为 R/1 000(R 为反射器口径)[36]。上述不利因素导致柔性自回弹天线在近 30 a 的时间内仅在有限的场合得到应用。

3.2 柔性壳膜天线

在保持柔性自回弹天线反射器壳体厚度不变的前提下,减小面内弹性模量E,可使薄壳弯曲刚度进一步减小。柔性壳膜天线(flexible shell membrane antenna)[37–38]就是基于这一概念产生的,实物如图 11 所示。柔性壳膜天线反射器由单层碳纤维 TWF 增强硅橡胶制成,仍然保持单一薄壳的特征。由于硅橡胶的弹性模量远小于环氧树脂的弹性模量,单层碳纤维 TWF 增强硅橡胶的等效弹性模量小于柔性自回弹天线反射器,弯曲刚度也比柔性自回弹天线更低。上述特征使得柔性壳膜天线在更小的应力水平上实现更大应变,因此,其可以多向收拢从而实现比柔性自回弹天线更大的收纳比。但是,在外部约束去除后,收拢状态储存的弹性势能不足以将壳膜自主展开至工作状态,需要额外的展开机构。柔性壳膜天线展开方式如图 12 所示。

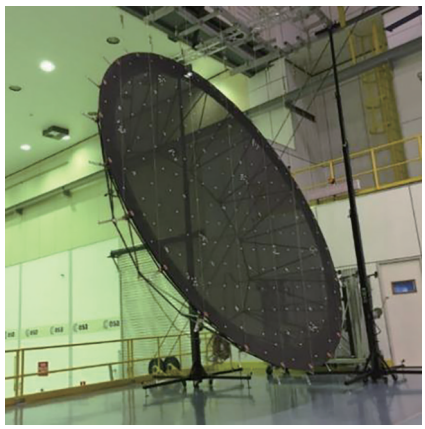


图 11 柔性壳膜天线

Fig. 11 Flexible shell antenna

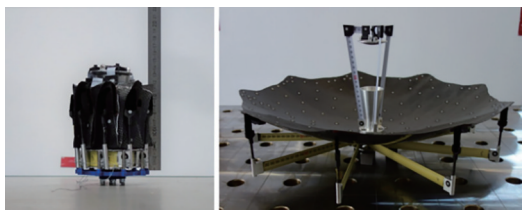


图 12 柔性壳膜天线展开方式

Fig. 12 Flexible shell antenna deployment method

壳膜天线工作状态的型面仍然靠反射器自身弯曲刚度保持,反射器的初始形状是旋转抛物面,需要在模具上成型固化,因此不存在反枕效应的问题。虽然硅橡胶可在常温下固化,不需要热压罐,但反射器口径仍然受模具尺寸的限制。此外,展开机构的误差和变形通过与柔性壳膜反射器的连接点传递给壳膜,导致壳膜变形。同时,碳纤维三向编织物增强硅橡胶复合材料的面内拉伸模量较高,几乎不可延展,当承受的外载荷引起面内应力时,极易发生褶皱,导致在轨精度保持困难。

通过减小薄壳的厚度t和薄壳的面内弹性模量E,柔性自回弹天线方案和柔性壳膜天线方案都消除了反枕效应。但两种方案均为单一薄壳结构,且反射器

都需在模具上固化成型,模具尺寸和热压罐尺寸限制了这两种方案适用的天线最大口径。

综上,目前缓解反枕效应的解决方案总结如表1所示。

表1　缓解反枕效应解决方案总结

Tab. 1　Summary of solutions to mitigate the anti-pillow effect

解决方案		天线形式	适用频段	优缺点
基于薄壳无矩理论的解决方案	均布载荷	充气天线	L、S	自固化技术和气压保持技术难以解决,未实现工程应用
		静电成型天线	Ku、Ka、Q/V	空间环境中静电场稳定性难以控制,充放电问题难以攻克,未实现工程应用
	分布载荷	双层网天线	X、Ku、Ka	应力刚化效应有限,提供预张力有限,迭代过程复杂
		周向索伞天线	L、S、X	周向索承受张力较大,但在小平面内反枕效应仍然存在
		张力杆天线	X、Ku、Ka	反枕效应较小,是目前较为理想的网状天线形式,但天线口径难以进一步增大
	优化边界形状			对缓解反枕效应有效,但预设刚性边界需要复杂牵拉索保持
	调整内膜比方案			可以一定程度上缓解反枕效应
基于薄壳理论的方案		柔性自回弹天线	X、Ku	展开方式简单但收纳率不高并且展开口径受模具尺寸限制
		柔性壳膜天线	X、Ku	热稳定性好、形式较简单、收纳比较好,口径进一步增大受限

如果采用分片柔性壳膜+径向肋方案,则天线口径的限制可以相对变大,但是仍受模具及热压罐尺寸限制。而且,瓜瓣形薄壳的刚度比完整的旋转抛物面薄壳刚度更小,需要径向肋提供刚度才能保持其形状。

为了降低天线口径对模具和热压罐的依赖,需要将材料的初始形态制成薄板。将平面状态的薄板材料铺设到抛物线形状的肋上时,薄板受弯形成一个空间曲面。中国空间技术研究院西安分院的弱刚度复合膜正是基于这一思路,在保持反射面柔性的同时,赋予材料较小的弯曲刚度,但复合膜弯曲刚度仅靠膜的厚度调节,弯曲刚度需求较大时,增加膜厚导致反射面重量增加,收拢展开性能也会受到一定影响,并且一般情况下,矩形薄板受弯形成的曲面为反向曲面,其高斯曲率为负。这种情况下,曲面向远离抛物面轴线的方向偏离,其与反枕效应偏离的方向相反,上述偏离同样造成型面精度的降低。

上述结果是材料的泊松比为正导致的。1987年,Lakes[39]在具有内凹结构的聚氨酯泡沫中发现了负泊松比效应,立即引起材料领域研究人员的极大兴趣。

如果能够找到或综合出一种二维结构,具有面内各向同性且泊松比为负,则可利用该结构制成平面薄板,将这种平面薄板沿伞天线的径向肋弯曲,则可形成同向曲面。上述思路是既可以突破传统薄壳无矩理论降低反枕效应的框架,又能够摆脱模具和热压罐限制的极具前景的解决方案。

4　基于负泊松比材料的解决方案

大多数负泊松比材料(NPR)的泊松比都是各向异性[40],然而,各向异性材料在使用时必须进行精细的对准,否则实际使用的性能与原先设计的性能会出现巨大的差异,因此,真正有实用价值的NPR材料或结构应该是各向同性的[41]。

4.1　面内各向同性的平面NPR材料

任鑫等[42]对NPR材料进行了较为详细的综述,NPR材料被分为天然负泊松比材料、胞状负泊松比材料和结构、金属负泊松比材料和结构、多重负泊松比材料和负泊松比复合材料等大类。胞状负泊松比材料和结构又细分出8种结构,这些结构都可以以二维形式存在,有些还有对应的三维形式,详细分类如表2所示。

表2　负泊松比材料详细分类

Tab. 2　Detailed classification of negative Poisson's ratio materials

材料类型	材料名
天然NPR材料	NPR分子材料、NPR生物材料
胞状NPR材料和结构	内凹结构(二维和三维)、旋转多边形、手性结构(二维和三维)、片状褶皱结构、穿孔板结构、联锁多边形结构、纺织材料相关结构、其他结构
金属NPR材料和结构	具有NPR微观结构的金属、NPR泡沫金属、金属基材制作的NPR结构
多重NPR材料和NPR复合材料	多种普通基材的NPR材料、NPR材料和非NPR材料复合形成的NPR材料

对负泊松比材料各向同性性能的研究分为周期性结构和非周期性结构两种。周期性结构可以通过微观的胞元是否各向同性来确定宏观是否各向同性，也有研究者试图找出胞元排列的对称性与宏观各向同性性能之间的关系[43]；非周期性结构则通过胞元的随机分布实现各向同性性能。其中：周期性结构中，平面周期性NPR结构可分为两大类，第1类是对称性内凹结构（如内凹蜂窝结构[44–46]、星形结构[47–49]、花瓣形结构[50–51]等）；第2类是变形时产生旋转的非对称结构，或称为“旋转对称”结构（如旋转刚体或半刚体结构[52–53]、手性结构[54–58]、缺失肋结构[59–61]等）。大多数NPR结构都是各向异性的，例如标准的内凹结构[62]、四韧带手性结构和反四韧带手性结构[56]、旋转四边形结构[63]、四花瓣结构[50,64]、四缺失肋结构[61]和反四缺失肋结构[60]等。其他具有各向同性性能的，也仅在小变形时才成立，随着变形的增大迅速变为各向异性（例如六韧带手性结构[65]）。

4.1.1 内凹结构

内凹结构在对六边形蜂窝结构的研究中被提出[66–67]，图13为传统外凸六边形蜂窝结构，其中，h为胞元高度，l为胞元边长，θ为胞元内角。当$h/l=2$、$\theta<0$时，外凸六边形蜂窝变为内凹六边形结构（图14）；当$h/l=2$、$\theta=-30°$时，$v_1=v_2=-1$（v_1、v_2为面内两正交方向的泊松比）。不过这种结构并不是面内各向同性的。20世纪90年代，Evans等[68]对内凹六边形蜂窝结构进行了全面研究，总结了内凹六边形结构材料性能的4种分析模型：弯曲模型、拉伸模型、弹性铰链模型和综合模型。Masters等[69]在此基础上研究了4种模型的面内各向同性性能，结果表明：弯曲模型和弹性铰链模型不具有面内各向同性性能，拉伸模型不是面内各向同性的，但在$\theta=-60°$时表现出近似的各向同性。

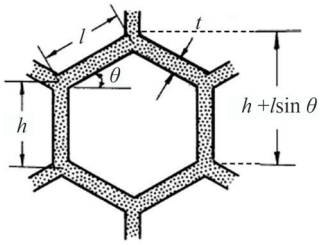


图 13 传统六边形蜂窝结构

Fig. 13 Traditional hexagonal honeycomb structure

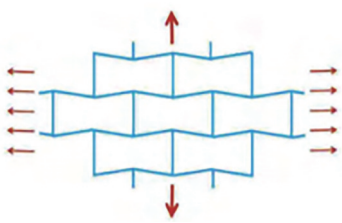


图 14 内凹六边形蜂窝

Fig. 14 Concave hexagonal honeycomb

4.1.2 手性结构

二维负泊松比手性结构是由按一定规则排列的胞元组成，每个胞元包含一个一般为圆柱形的中心结点，多个沿圆周均匀分布且与圆周相切的韧带[70]。根据相切韧带的数量，可分为三韧带手性结构、四韧带手性结构、六韧带手性结构等。胞元可以是右手性的，也可以是左手性的，组合成宏观蜂窝结构时，每个胞元都具有相同手性，因此，宏观上也表现出手性特性。将手性单元通过镜像组合可形成反手性结构。六韧带手性材料胞元的几何构型满足六阶旋转对称，结构如图15所示。

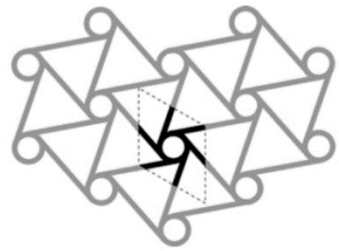


图 15 六韧带手性结构

Fig. 15 Hexa-ligament chiral structure

Dirrenberger等[71]对六韧带手性结构、四韧带反手性结构、弧形六韧带手性结构的各向同性性能进行了研究，其中，六韧带手性结构和弧形六韧带手性结构是面内各向同性的，四韧带反手性结构是正交各向异性的。

Grima等[57]利用手性韧带结构的基本元素，适当放宽旋转对称方面的限制，提出了“超手性（meta-chirals）”结构，通过改变杆长、韧带与结点的夹角等参数，可以得到在很大范围内变动的泊松比。由于降低了对称性，超手性结构是各向异性的。

4.1.3 旋转刚体结构

旋转刚体结构是由顶点铰接的刚性图形阵列得到（图16），例如旋转四边形或旋转三角形等[72]，旋转四边形结构在四边形完全刚性的前提下，得到的泊松比为−1，且沿任意方向加载，泊松比均不变。为了赋予结构面内刚度，需要赋予铰链一定的弹性，但这会引入剪切刚度，导致结构的对称性降低，使得结构变为正交各向异性。旋转铰接等边刚性三角形结构在三角

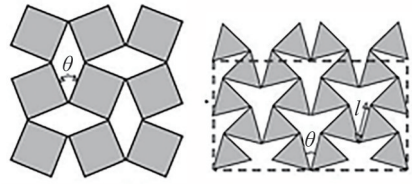


图 16 旋转刚体结构

Fig. 16 Rotate the rigid body structure

形完全刚性的高度理想化条件下泊松比也为−1，但当考虑三角形本身弹性变形时，甚至当这个变形占据主导地位时，结构可能变为正泊松比。

穿孔板结构中的孔洞表现出与旋转刚体类似的效果[73]。

4.2　负泊松比薄膜结构在空间天线上的应用

几乎所有谈及NPR材料应用的文献，都涉及了航空航天领域，特别是作为同向曲面型蜂窝夹层结构的蜂窝芯。在空间可展开天线方面，Hassan[74]、Jacobs[75]和Rossiter[76]等利用六韧带手性结构的拉涨特性，提出了可展开形状记忆合金天线的概念。上述概念重点强调的是结构的可收拢展开特性，并未利用NPR结构受弯时的同向曲面特性。

Zhao[77]、赵航[78]等开展了将六韧带手性结构和内凹六边形结构薄板（负泊松比）和星型薄板（零泊松比）用于可重构天线反射器的研究，采用有限元模拟的方法，验证了可重构天线的可行性。但经典的六韧带手性结构在承受面内拉力时，负泊松比性能将很快消失，因此，反射器的调整量受到很大限制，而内凹六边形结构又不具备面内各向同性性能，所以效果并不理想；此外，也没有分析材料微观结构对面外弯曲性能的影响。徐斌[79]、Xu[80−81]等以可重构天线反射器中应力最小为目标，分析了泊松比的最佳取值，并在此基础上设计了穿孔板结构。

曾家琛等[82]提出了一种预收卷六韧带手性薄膜结构，并将这种材料应用于伞天线实验，结果表明：采用更少的调整点就可以达到网状天线同样的型面精度，且反枕效应有所缓解，证实了负泊松比材料解决网状天线反枕效应的可行性。

5　展　望

网状天线的反枕效应一直是影响天线型面精度的主要设计误差之一，影响了天线大型化、高频段、高精度发展，本文总结了以往解决反枕效应的研究方案，并根据现有研究热点超材料的内容，结合材料特性，立足工程应用，将负泊松比材料的曲面弯曲同向特性与网状可展开天线反枕效应的解决融合起来，极有可能大幅度减少现有伞状天线调节点数量，简化天线结构，缩减天线质量。未来要想落实到工程实际中，还需要进行以下方面的研究。

5.1　负泊松比材料设计与优化

反枕效应属于网状天线固有属性，以往的方法在解决反枕效应方面效果并不十分满意，负泊松比材料的面内弯曲同向性在解决网状天线反枕效应有着潜在的应用前景。在此基础上，研究面内各向同性的负泊松比材料变形机理并对材料进行结构优化设计以满足可展开网状天线的使用场景，从而实现更精确的性能调节和创新应用，是未来的发展趋势。

5.2　宏观均质化研究

大多数有关负泊松比材料的实验研究都是基于较小尺寸的物理样品或者较少数量的胞元验证，虽然理论上随着尺寸增加周期性微结构的有效特征并不会发生变化，但实际上要将负泊松比材料应用在反射面天线上这种大型结构上时，材料宏观尺寸（反射面直径）远大于胞元尺寸，需要采用均质化理论建立微观尺度变形和宏观尺度变形之间的关系，以此拓展到几米甚至几十米的天线尺度。

5.3　材料面外刚度

负泊松比材料制成的薄板结构需要弯曲成抛物面再贴合在反射面上工作，反枕效应产生的根本原因是网状材料缺乏弯曲刚度，因此，材料的面外刚度也需要关注，而负泊松比材料的面外刚度被长期忽视，并没有进行深入研究，未来应结合材料的性质给出面外刚度的机理解释。

5.4　负泊松比材料网状天线样机制作

在以上对负泊松比材料进行优化设计的基础上，以新材料构型进行加工并铺设反射面天线，实现负泊松比材料在可展开网状天线反射面上的应用，并对样机进行型面精度测试，以验证该材料在解决反枕效应方面的进展。

参考文献：

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

[2] Wang Bing,Zhu Juncheng,Zhong Shuncong,et al.Space deployable mechanics:A review of structures and smart driving[J].Materials & Design,2024,237:112557.

[3] Song Yanping. American signal intelligence reconnaissance satellite[J].Space Electronic Technology,1999(1):46–55.[宋燕平. 美国的信号情报侦察卫星[J]. 空间电子技术,1999(1):46–55.]

[4] Zhang Shuxin,Li Peng,Yang Dongwu,et al.EM performance prediction for mesh deployable antennas considering pillow deformation[J]. Acta Electronica Sinica, 2014,42(7):1446–1451.[张树新,李鹏,杨东武,等. 考虑枕效应的网状可展开天线电性能预测[J]. 电子学报,2014,42(7):1446–1451.]

[5] Tang Yaqiong,Li Tuanjie,Ma Xiaofei.Pillow distortion analysis for a space mesh reflector antenna[J].AIAA Journal,2017,55(9):3206–3213.

[6] Angevain J C,Ihle A,Rodrigues G.Spaceborne unfurlable

reflector antenna technologies in Europe:Current status and future outlook[C]//Aerospace Europe CEAS 2020 Conference. Bordeaux:CEAS,2020:1–10.

[7] Lopatin A V,Rutkovskaya M A,Gantovnik V B. Accuracy analysis of the reflective surface of the umbrella-type antenna[J]. Journal of Spacecraft and Rockets,2008,45(1):149–151.

[8] Litteken D A. Inflatable technology:Using flexible materials to make large structures[C]//Proceedings of the Electroactive Polymer Actuators and Devices(EAPAD) XXI. Denver:SPIE,2019:1096603.

[9] Chandra M,Kumar S,Chattopadhyaya S,et al. A review on developments of deployable membrane-based reflector antennas[J]. Advances in Space Research,2021,68(9):3749–3764.

[10] Cadogan D,Scarborough S. Rigidizable materials for use in gossamer space inflatable structures[C]//Proceedings of the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference.Anaheim:AIAA,2001:AIAA2001–1417.

[11] Tao Qiang,Wang Changguo,Wang Ke,et al.Mixed triangle lattice reinforced membrane antenna reflector:Design and analysis[J].AIAA Journal,2020,58(4):1897–1900.

[12] Chodimella S,Moore J,Otto J,et al.Design evaluation of a large aperture deployable antenna[C]//Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures,Structural Dynamics,and Materials Conference. Newport: AIAA,2006:AIAA2006–1603.

[13] Liu Ruiwei,Guo Hongwei,Liu Rongqiang,et al. Shape accuracy optimization for cable-rib tension deployable antenna structure with tensioned cables[J].Acta Astronautica,2017,140:66–77.

[14] Liu Ruiwei,Guo Hongwei,Liu Rongqiang,et al. Structural design and optimization of large cable-rib tension deployable antenna structure with dynamic constraint[J].Acta Astronautica,2018,151:160–172.

[15] Yang Dongwu,Zhang Shuxin,Li Tuanjie,et al. Preliminary design of paraboloidal reflectors with flat facets[J]. Acta Astronautica,2013,89:14–20.

[16] Shi Hang,Yuan Sichen,Yang Bingen.New methodology of surface mesh geometry design for deployable mesh reflectors[J].Journal of Spacecraft and Rockets,2018,55(2):266–281.

[17] Miura K. Tension truss concept and formation of geodesic shapes in space[J]. International Journal of Space Structures,1990,5(3/4):331–340.

[18] Miura K,Miyazaki Y.Concept of the tension truss antenna [J].AIAA Journal,1990,28(6):1098–1104.

[19] Mitsugi J,Yasaka T,Miura K. Shape control of the tension truss antenna[J].AIAA Journal,1990,28(2):316–322.

[20] Miura K,Tanizawa K. Tension truss antenna—Concept,reality and future[C]//IUTAM – IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications. Dordrecht: Springer,2000:291–300.

[21] Gurvits L I.Space VLBI:From first ideas to operational missions[J].Advances in Space Research,2020,65(2):868–876.

[22] Lai C Y,Pellegrino S.Umbrella-type furlable reflector based on tension-truss concept[C]//Proceedings of the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference.Anaheim:AIAA,2001:AIAA2001–1481.

[23] Xu Wei,Zhu Hao,Zhang Xinyu. Thermal-mechanical coupling performances and parameters sensitivity analyses of a deployable Astromesh antenna under different heat radiations[J].Applied Thermal Engineering,2025,259:124732.

[24] Meyer R X. Precision of mesh-type reflectors for large space-borne antennas[J]. Journal of Spacecraft and Rockets,1985,22(1):80–84.

[25] Fichter W B. Reduction of root-mean-square error in faceted space antennas[J].AIAA Journal,1984,22(11):1679–1684.

[26] Furuya H,Miura K.Effects of tension and configuration in surface errors of membrane space antennas[J].International Journal of Space Structures,1991,6(3):219–226.

[27] Kato S. Effects of tension upon the surface accuracy of a rectangular membrane element of a space reflector[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences,Space Technology Japan,2005,3:23–32.

[28] Meshkovsky V,Sdobnikov A,Churilin S,et al.Numerical investigations of shape of the reflecting surface made of knitted mesh fabric being pulled on the curvilinear frame [J].EPJ Web of Conferences,2019,221:01031.

[29] Prata J A, Rusch W V T. Mesh pillowing in deployable front-fed umbrella parabolic reflectors[C]//Digest on Antennas and Propagation Society International Symposium. San Jose:APS,1989:254–257.

[30] Prata J A,Rusch W V T,Miller R K.Mesh pillowing in deployable offset paraboloidal umbrella reflector antennas [C]//Proceedings of the Antennas and Propagation Society Symposium 1991 Digest.London:IEEE,2002:662–665.

[31] Huang Pengfei,Song Yanping,Liu Xiaoqi,et al.Analysis of pillow effect for isosceles triangular membranes of mesh reflector antenna by the weak form quadrature element method[J].AIP Advances,2022,12(3):035013.

[32] Yuan Sichen. Review of root-mean-square error calculation methods for large deployable mesh reflectors[J].International Journal of Aerospace Engineering,2022,2022(1):5352146.

[33] Tan L T,Pellegrino S. Stiffness design of spring back reflectors[C]//Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/ASCE/

AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.Denver:AIAA,2002:AIAA2002–1498.

[34] Soykasap O, Tan L T. High-precision offset stiffened spring-back composite reflectors[J]. AIAA Journal, 2011, 49(10): 2144–2151.

[35] Tan L T, Soykasap O, Pellegrino S. Design & manufacture of stiffened spring-back reflector demonstrator[C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Austin:AIAA,2005:AIAA2005–2048.

[36] Soykasap O, Karakaya S, Gayretli A, et al. Preliminary design of deployable flexible shell reflector of an X-band satellite payload[C]//Proceedings of the 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference.Kissimmee:AIAA,2015:AIAA2015–0945.

[37] Datashvili L, Baier H, Wehrle E, et al. Large shell-membrane space reflectors[C]//Proceedings of the 51st AIAA/ASME/AHS/ASE Structure, Structural Dynamies, and Materials Conference.Orlando:AIAA,2010:AIAA2010–2504.

[38] Datashvili L, Baier H, Schimitschek J, et al. High precision large deployable space reflector based on pillow-effect-free technology[C]//Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.Honolulu:AIAA,2007:AIAA2007–2186.

[39] Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio [J].Science,1987,235(4792):1038–1040.

[40] Hou X, Silberschmidt V V. Metamaterials with negative Poisson's ratio:A review of mechanical properties and deformation mechanisms[M]//EngineeringMaterials.Berlin:Springer Nature,2015:155–179.

[41] Shan Sicong, Kang S H, Zhao Zhenhao, et al. Design of planar isotropic negative Poisson's ratio structures[J]. Extreme Mechanics Letters,2015,4:96–102.

[42] Ren Xin, Zhang Xiangyu, Xie Yimin. Research progress in auxetic materials and structures[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 656–687. [任鑫,张相玉,谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. 力学学报,2019,51(3):656–687.]

[43] Mitschke H, Schröder–Turk G E, Mecke K, et al. Symmetry detection of auxetic behaviour in 2D frameworks[J]. EPL (Europhysics Letters),2013,102(6):66005.

[44] Wang Tao, Wang Liangmo, Ma Zhengdong, et al. Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method[J].Materials & Design,2018,160:284–293.

[45] Wang Huan, Lu Zixing, Yang Zhenyu, et al. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance[J].Composite Structures,2019,208:758–770.

[46] Peng Xiang, Zhou Kaiming, Han Yang, et al. Compression performance analysis of hexagonal and re-entrant hybrid honeycomb structures[J].Polymer Testing,2025,145:108745.

[47] Grima J N, Gatt R, Alderson A, et al. On the potential of connected stars as auxetic systems[J]. Molecular Simulation,2005,31(13):925–935.

[48] Mizzi L, Mahdi E M, Titov K, et al. Mechanical metamaterials with star-shaped pores exhibiting negative and zero Poisson's ratio[J].Materials & Design,2018,146:28–37.

[49] Lin Liulan, Zhang Haodong, Fan Chenchen. The study on the properties of a metamaterial composed of star-shaped auxetic and curved-beam multi-stable structure[J].Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2024, 31(29): 11979–11995.

[50] Wang Zhenpei, Poh L H, Dirrenberger J, et al. Isogeometric shape optimization of smoothed petal auxetic structures *via* computational periodic homogenization[J].Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 323: 250–271.

[51] Wang Yingjun, Liao Zhongyuan, Shi Shengyu, et al. Data-driven structural design optimization for petal-shaped auxetics using isogeometric analysis[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences,2020,122(2):433–458.

[52] Sorrentino A, Castagnetti D. Geometrically tunable architected materials designed from prismatic rotating units[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L:Journal of Materials:Design and Applications,2024, 238(9):1690–1704.

[53] Zhang Xiaofan, Shan Xiaobiao, Sui Guangdong, et al. Enhancing piezoelectric energy harvesters with rotating triangular auxetic structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2025,289:110081.

[54] Prall D, Lakes R S. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of – 1[J]. International Journal of Mechanical Sciences,1997,39(3):305–314.

[55] Kolken H A, Zadpoor A A. Auxetic mechanical metamaterials[J].RSC Advances,2017,7(9):5111–5129.

[56] Alderson A, Alderson K L, Attard D, et al. Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading[J]. Composites Science and Technology,2010,70(7):1042–1048.

[57] Grima J N, Gatt R, Farrugia P S. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures[J]. Physica Status Solidi(b), 2008,245(3):511–520.

[58] Luo Yifei, Dai Fulun, Shen Jing, et al. Negative Poisson's ratio lattice structure with chiral and re-entrant properties[J]. Applied Sciences,2023,13(24):13097.

[59] Clausen A, Wang Fengwen, Jensen J S, et al. Topology optimized architectures with programmable Poisson's ratio

over large deformations[J]. Advanced Materials,2015,27(37): 5523–5527.

[60] Liu Jianxing,Zhang Yihui. Soft network materials with isotropic negative Poisson's ratios over large strains[J]. Soft Matter,2018,14(5):693–703.

[61] Zhu Yilin,Jiang Songhui,Lu Fucong,et al. A novel enhanced anti-tetra-missing rib auxetic structure with tailorable in-plane mechanical properties[J].Engineering Structures, 2022,262:114399.

[62] Feng Huichang,Cai Kun,Shi Jiao. Large-deformation elastic hardening of a structured graphene kirigami nanospring with re-entrant honeycombs[J]. Computational Materials Science,2024,244:113180.

[63] Hassani F, Javanbakht Z, Malek S. Large deformation behavior and energy absorption of rotating square auxetics [J].Composites Part B:Engineering,2024,283:111596.

[64] Wang Zhenpei,Poh L H,Zhu Yilin,et al. Systematic design of tetra-petals auxetic structures with stiffness constraint [J].Materials & Design,2019,170:107669.

[65] Zhu Yilin,Wang Zhenpei,Poh L H. Auxetic hexachiral structures with wavy ligaments for large elasto-plastic deformation[J].Smart Materials and Structures,2018,27(5):055001.

[66] Luo Huichen,Ren Xin,Zhang Yi,et al. Mechanical properties of foam-filled hexagonal and re-entrant honeycombs under uniaxial compression[J].Composite Structures,2022, 280:114922.

[67] Pang Lisha, Ma Yuqin, Song Xuding, et al. Experimental and simulation study on effects of material and loading direction on the quasi-static compression behavior of re-entrant honeycomb structure[J]. Materials Today Communications,2024,39:109005.

[68] Evans K E, Alderson A, Christian F R. Auxetic two-dimensional polymer networks. An example of tailoring geometry for specific mechanical properties[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 1995, 91(16): 2671–2680.

[69] Masters I G,Evans K E.Models for the elastic deformation of honeycombs[J].Composite Structures,1996,35(4):403–422.

[70] Wu Wenwang,Hu Wenxia,Qian Guian,et al.Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review[J]. Materials & Design,2019,180: 107950.

[71] Dirrenberger J,Forest S,Jeulin D,et al. Homogenization of periodic auxetic materials[J]. Procedia Engineering, 2011, 10:1847–1852.

[72] Grima J N,Evans K E. Auxetic behavior from rotating triangles[J]. Journal of Materials Science,2006,41(10):3193–3196.

[73] Slann A, White W, Scarpa F, et al. Cellular plates with auxetic rectangular perforations[J]. Physica Status Solidi(b), 2015,252(7):1533–1539.

[74] Hassan M R, Scarpa F, Ruzzene M, et al. Smart shape memory alloy chiral honeycomb[J]. Materials Science and Engineering:A,2008,481:654–657.

[75] Jacobs S,Coconnier C,DiMaio D,et al. Deployable auxetic shape memory alloy cellular antenna demonstrator:Design, manufacturing and modal testing[J]. Smart Materials and Structures,2012,21(7):075013.

[76] Rossiter J,Takashima K,Scarpa F,et al. Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness[J]. Smart Materials and Structures,2014,23(4):045007.

[77] Zhao Hang, Fang Houfei, Santer M J, et al. The selection and optimization of the reconfigurable shaped reflector structure material[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 175:01024.

[78] Zhao Hang, Zhang Huazhen, Lan Lan, et al. Parametric finite element modeling method and shape analysis of lattice material parabolic structure[J]. Mechanical Engineer, 2019(1):153–156.[赵航,张华振,兰澜,等. 点阵材料抛物面结构的参数化有限元建模方法及赋形分析[J]. 机械工程师,2019(1):153–156.]

[79] Xu Bin, Zhang Huazhen, Hou Yangqing, et al. Application research on negative Poisson's ratio material for reconfigurable antenna reflector[J]. Aerospace Manufacturing Technology,2021(3):8–14.[徐斌,张华振,侯仰青,等. 负泊松比材料于可重构天线反射面的应用研究[J]. 航天制造技术,2021(3):8–14.]

[80] Xu Bin,Fang Houfei,He Yangqin,et al.Design of a morphing surface using auxetic lattice skin for space-reconfigurable reflectors[C]//Human Centered Computing.Cham: Springer, 2021:55–67.

[81] Xu Bin, Fang Houfei, Jiang Shuidong, et al. Geometry reconfiguration of a reflector with an auxetic material surface[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego:AIAA,2022:AIAA2022–1459.

[82] Zeng Jiachen,Song Yanping,Huang Pengfei. Parameter design of a circular thin plate with Negative Poisson's ratio [J]. Space Electronic Technology,2024,21(1):46–52.[曾家琛,宋燕平,黄鹏飞. 负泊松比手性结构圆薄板的参数设计[J]. 空间电子技术,2024,21(1):46–52.]

Research Progress on the Anti-pillow Effect of Large Deployable Mesh Antennas

HE Naixin[1], *SONG Yanping*[1*], *LI Tuanjie*[2], *ZHANG Dayu*[1], *HUANG Pengfei*[1], *LI Yichen*[1], *ZENG Jiachen*[1]

(1.Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;
2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract:

Significance With the continuous development of communication satellites, antennas are required to achieve higher gain and larger apertures in order to receive weaker transmitted signals. With the improvement of communication quality, the operating frequency band of satellite antennas also needs to be further increased, leading to increasingly stringent requirements for reflector surface accuracy. Mesh antennas are currently the most widely used type of deployable antenna due to their advantages of a high stowage ratio, low area density, and high profile accuracy. Among these, the pillow effect is one of the main sources of design error in mesh antennas. It causes the antenna surface to deviate from the ideal paraboloid, affects the far-field characteristics of the antenna, and consequently degrades the communication performance of the satellite.

Progress The pillow effect can be described mathematically as a surface with negative Gaussian curvature. The mechanical behavior of the metal mesh can be explained using the moment-free thin-shell theory in elasticity. Applying a uniform load to the metal mesh can make the principal curvatures have the same sign, thereby forming a surface with positive Gaussian curvature. Inflatable antennas and electrostatic forming antennas represent the most ideal uniform loading modes. However, the gas inside inflatable antennas is prone to leakage in space. Supplying an air source is expensive, and self-curing technology is not yet mature, making it difficult to achieve uniform curing in orbit; therefore, such systems have not been widely applied in practice. As achieving an ideal uniform load is challenging, distributed loading can provide a similar effect. Initially, a group of traction cables is added along the rib thickness direction of single-layer mesh antennas to achieve an equivalent distributed load; however, the tension provided by this method is limited. Therefore, based on double-layer mesh structures, circumferential cables are arranged in pairs along the front and back sides of the radial ribs to further increase the applied tension. The tension capacity of the circumferential cables is much higher than that of the metal mesh, allowing fewer traction cables to achieve higher profile accuracy. However, the front cables of circumferential cable umbrella antennas form small quadrilaterals, and the pillow effect cannot be avoided within each quadrilateral. The tension rod antenna connects the diagonals of these quadrilaterals, transforming the structure into a triangular cable network and enabling finer surface segmentation. However, further improvements in profile accuracy require increased cable mesh density, which leads to greater structural complexity and higher weight. Beyond the moment-free thin-shell theory, reducing the bending stiffness of the shell is another approach to mitigating the pillow effect. Self-resilient antennas, achieved by reducing the shell thickness t, and membrane antennas, achieved by reducing the elastic modulus E, can both eliminate the pillow effect. However, the diameter of self-resilient antennas is limited by autoclave manufacturing constraints, and membrane antennas cannot be deployed independently, requiring additional deployment mechanisms; moreover, their surface accuracy is easily affected by these mechanisms. The size of these single-shell structures is also limited by mold constraints and cannot be further increased. Traditional materials subjected to concentrated loads tend to form surfaces with negative Gaussian curvature, whereas materials with a negative Poisson's ratio exhibit the opposite behavior, forming surfaces with positive Gaussian curvature under external loading. This property provides a new approach to mitigating the pillow effect. Two-dimensional in-plane negative Poisson's ratio materials, such as re-entrant honeycomb structures, chiral structures, and rotating rigid body structures, have been investigated. Hexagonal chiral honeycomb materials exhibit in-plane isotropy and are promising candidates for deployable reflector antennas. Through optimization of traditional hexagonal chiral honeycomb structures, it has been demonstrated that negative Poisson's ratio materials can effectively alleviate the pillow effect in mesh antennas and are feasible for use in mitigating this effect in reflector antennas.

Conclusions and Prospects This paper summarizes previous research approaches for mitigating the pillow effect and, based on recent results from the authors' research group, explores the feasibility of using the curved-surface bending characteristics of negative Poisson's ratio materials to address this issue. This approach is expected to reduce the number of adjustment points in existing mesh antennas, optimize the antenna structure, and reduce overall mass. In the future, the following aspects require further investigation: 1) design and optimization of negative Poisson's ratio materials; 2) macro-scale homogenization analysis; 3) investigation of the out-of-plane stiffness of the materials; and 4) prototype development and experimental validation.

Key words: mesh antenna; anti-pillowing effect; negative Poisson's ratio material; out-of-plane stiffness; membrane structure

（编辑　吴芝明）

引用格式: He Naixin,Song Yanping,Li Tuanjie,et al.Research progress on the anti-pillow effect of large deployable mesh antennas[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(3):69–81.[贺乃馨,宋燕平,李团结,等.大型可展开网状天线反枕效应研究进展[J].工程科学与技术,2026,58(3):69–81.]