Website: ycyk.brit.com.cn Email: ycyk704@163.com

星载柔性复合材料壳面可展开天线研究进展

刘 昊,杨留义,沈永正,杨雨田,史永康 (北京遥测技术研究所北京 100076)

摘要:柔性复合材料壳面可在一定曲率半径范围内弹性弯曲收纳,展开后具有一定的自支撑能力,可为星载可展 开天线研制提供新型解决途径。随着高应变薄壁碳纤维复合材料结构的发展,关于柔性壳面可展开天线的应用研究日 益增多。综述了几类典型柔性壳面可展开天线反射面实现形式,分析了影响柔性壳面可展开天线发展的关键技术,为 该类型天线反射面的研制提供了参考。

关键词:复合材料;可展开结构;柔性壳面;天线反射面

中图分类号: V423.4+5 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)04-0004-08 DOI: 10.12347/j.ycyk.20210315001

引用格式: 刘昊,杨留义,沈永正,等. 星载柔性复合材料壳面可展开天线研究进展[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 45-52[20XX-XX-XX]. http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210315001.

Advances of spaceborne deployable reflector based on flexible composites shells

LIU Hao, YANG Liuyi, SHEN Yongzheng, YANG Yutian, SHI Yongkang

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Thin-walled shells made of flexible composites can be folded in a small radius with its elasticity, and can bear small compression load once deployed. These features enable these structures to be used for some certain spaceborne reflectors. Deployable reflectors made of flexible composites shells have received intensive research with the development of high strain thin-walled composites. Several typical reflectors made of flexible composites shells are reviewed in this paper, and the key technologies needed for the development of the flexible shell deployable reflectors are analyzed.

Key words: Composite materials; Deployable structure; Flexible shell reflector; Antenna reflector

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210315001

Citation: LIU Hao, YANG Liuyi, SHEN Yongzheng, et al. Advances of spaceborne deployable reflector based on flexible composites shells [J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 45–52[20XX-XX-XX]. http://ycyk.brit. com.cn/ycyk/article/abstract/20210315001.

引 言

可展开天线是解决星载大口径天线需求和运载工具承载限制这一典型矛盾的有效措施。对于空间可 展开反射面天线,根据其折展结构的形式,可分为固面可展开天线、网状可展开天线、充气可展开天线 以及两种或多种方式组合可展开天线等类型^[1]。其中,网状可展开天线是目前研究应用的热点,该类型 天线又可以细分为径向肋式、缠绕肋式、环柱形式、构架式以及周边桁架式等可展开天线^[1,2]。径向肋式 可展开天线又称为伞状可展开天线,具有结构简单、质量小、可靠性高、制造成本低等优点。目前,比 较典型的伞状可展开天线应用有:美国喷气推进实验室(JPL)研制的 Ka 频段 0.5 m 口径可展开天线^[3,4], 以色列 TECSAR 搭载的 3 m 口径可展开天线^[5],日本 VSOP-2 项目采用的 4 m 口径模块化可展开天线^[6], 国内航天五院西安分院为"鹊桥"中继卫星研制的 4.2 m 口径可展开天线等^[7]。

受限于金属丝网面形面精度提升难题,目前,能够应用于 Ka 频段及更高频段的金属丝网面可展开

天线较少。针对金属丝网反射面天线,为提高其形面精度,主要有两种方法:其一是增加背部支撑肋的

数量,如美国 CubeSat 应用的 0.5 m 口径可展开天线,为 实现 Ka 频段应用,采用了 30 条支撑肋的设计方案,如 图 1 所示;其二是增加背部张力绳索数量,如周边桁架 可展开天线,通过增加张力索网节点数量提高形面精度 等。该类天线具有研制成本高、装调工作量大等问题^[8]。

随着复合材料技术的发展,基于柔性复合材料技术 的柔性壳面可展开反射面日益受到国内外研究人员的重 视^[9,10]。从结构形式看,柔性复合材料壳面是具有一定厚 度的薄壳结构,其展开状态类似于固面反射面,而相比 传统固面反射面,又具有较高的收纳效率和较轻的结构 重量;相比金属丝网面,该类柔性壳面具有局部抗压承 载能力,具有在较少支撑情况下的高精度保形能力。基 于柔性壳面的可展开反射面天线具有结构简单、形面精 度高等优势,是可展开天线发展的一个重要方向。



图 1 美国 0.5 m Ka 频段金属丝网 可展开反射面天线^[4]

1 柔性复合材料薄壳弯曲性能

对于一定厚度薄板,在纯弯曲状态,其外侧受最大拉应力,内侧受最大压应力,产生的最大应变与 薄板的厚度和弯曲的曲率半径间关系为:

$$f_{\max} = t/(2R_{\min}) \tag{1}$$

式中, ε_{max} 为薄板最大应变, t 为薄板厚度, R_{min} 为薄板最小弯曲半径。根据式(1),降低壳面厚度, 或提高材料的最大弹性应变均可以减小最小弯曲半径,从而提高薄壳结构的弯折收纳效率。

由于碳纤维复合材料具有比刚度、比强度高,热膨胀系数低等优势,采用碳纤维复合材料研制柔性 壳面结构是目前的主要研究方向。相比单向布铺层复合材料成型的壳面,采用织物复合材料成型的壳面 具有对称性好、层间抗剪切能力强、热残余变形小等优势。目前的柔性壳面通常采用平纹织物复合材料 成型^[11],典型碳纤维平纹织物弯曲性能见表 1。

Table 1 Minimum radius of T300/913 woven composites				
性能参数	单层		双层	
铺层方向	0°/90°	$\pm 45^{\circ}$	0°/90°	$\pm 45^{\circ}$
<i>t</i> /mm	0.22	0.22	0.43	0.43
$\mathcal{E}_{max}/\%$	2.71±0.05	$2.29{\pm}0.02$	$1.89{\pm}0.09$	1.77 ± 0.03
R_{\min}/mm	4.1	4.8	11.3	12.6

2 柔性壳面反射面国内外研究现状

柔性壳面反射面天线随着高应变薄壁碳纤维复合材料的发展而逐渐得到研究人员的重视。根据柔性 壳面反射面成型方式、收纳与展开驱动形式不同,可大致分为整体弹性展开反射面天线、依靠多片柔性壳 面组合成型的组合式柔性壳面反射面、依靠背部支撑结构驱动展开的碳纤维增强有机硅 CFRS (Carbon Fiber Reinforced Silicone)柔性壳面反射面、形状记忆柔性壳面反射面等。

2.1 整体弹性展开反射面

整体弹性展开反射面天线又称为自回弹天线 SBR (Spring Back Reflectors),该类天线背部支撑结构与柔性壳面一体化成型,整体可以进行对向弯曲收纳,收纳时存储弹性能;解锁后,依靠自身存储弹性能实现整体弹性展开。TAN等^[12-14]采用有限元方法研究了不同背部支撑增强形式对展开刚度和基频的影响,并提出了通过增加周向裙边增强和局部开缝的方案,提高了整体弹性展开反射面的展开刚度。

• 46 •

Fig. 1 0.5 m Ka-band deployable mesh reflector antenna in USA

美国休斯公司(现波音公司)采用薄壁碳纤维复合材料作为刚度增强支撑肋,并采用三轴向织物作为 反射面,通过在模具上整体成型,研制了整体弹性展开反射面天线,并应用于美国跟踪与数据中继卫

星系统 TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System), 如图 2 所示。美国研制的整体弹性展开反射面天线平均面密 度约 0.7 kg/m²,口径通常在 6 m 以内,主要应用于 S 频段和 Ku 频段。

整体弹性展开反射面天线背部增强支撑布置形式、复合材 料增强纤维弹性模量和基体的热特性等均对该类型反射面展 开行为存在较大的影响^[15]。国内航天五院西安分院针对该类 型反射面也开展了大量研究,研制了多种口径和不同增强结构 形式的反射面样机,并开展了力学性能测试和电性能测试^[16]。

2.2 组合式柔性壳面反射面

整体弹性展开反射面天线需要制作大型模具,收纳效率偏低,尺寸可扩展能力较弱。与整体弹性展开反射面天线不同, 通过将壳面分解成若干一致或相近的薄壳结构,形成组合式柔 性壳面反射面,可以大幅提高反射面的收纳效率,从而提高柔 性壳面反射面的尺寸可扩展能力。根据组合式柔性壳面反射面 的收纳与展开方式不同,可分为径向分片卷绕式展开、径向分 片伞状展开、模块化卷绕展开等方式。



图 2 整体弹性展开反射面天线^[15] Fig. 2 Spring back reflector in folded state

2.2.1 径向分片卷绕展开反射面

面向微纳卫星需求,针对口径在 0.3 m~1 m 之间的可展开反射面天线需求,STILES 等^[17]为提高收 纳效率,提出了将柔性壳面沿径向采用螺旋式路径分成多个壳面的径向分片卷绕方案,如图 3 所示。验 证样机口径为 1 m,采用 2 层平纹织物成型,共分为 24 片壳面,卷绕收纳直径约 16 cm。通过螺旋式壳 面设计,实现每个壳面收纳状态处于纯弯曲状态,避免剪切载荷引起的壳面形面精度变化。为实现展开 过程的同步性,每片壳面的周向边缘采用类似剪刀铰方案连接在一起。由于单片刚度偏弱,地面重力载 荷作用下变形过大,该样机仅在成型模具上开展了展开验证试验。单片刚度提升和展开行为控制是该类 壳面反射面需要解决的重要问题。



图 3 径向分片卷绕展开壳面反射面收纳状态与展开状态^[17] Fig. 3 Folded state and deployed state of coiling reflector with radial pieces

2.2.2 径向分片伞状展开反射面

面向星载 SAR (Synthetic Aperture Radar)天线需求,SCHID 等^[18,19]提出了 3 m 口径径向分片伞状 展开天线反射面方案。反射面采用 30 块薄壳面板组装而成,壳面厚度约为 0.4 mm,形面精度约为 0.5 mm RMS,单块面板重量约 200 g。各面板通过背部布置径向支撑肋实现展开与收纳。每个支撑肋的转轴与 支撑肋的截面法向存在一定的夹角,收纳时,背部支撑肋绕转轴转动,使得壳面收纳时发生倾斜和纯弯 曲,各相连壳面间相互重叠,从而提高收纳效率。3 m 口径反射面收纳直径小于 1 m,重量约 10 kg。展 开后各面板分别独立成型为抛物面的一部分,面板间存在 0.5 mm 左右的间隙,避免了各面板间由于尺

寸不匹配带来的形面精度降低的问题。径向分片伞状展开反射面展开过程示意图如图 4 所示。该方案可用于 X 及以上频段,适用口径范围为 3 m~6 m。



Fig. 4 Deployment process diagram of radial rib deployable reflector

2.2.3 模块化卷绕展开反射面

为解决柔性壳面可展开天线大型化问题,TYLER 等^[20]提出了自由弹性展开结构 FEDS(Freely Elastic Deployable Structure)方案。该方案采用模块化薄壳组装而成,每个薄壳均按设计位置分别成型;收纳时各薄壳首先分别卷曲收纳,然后通过四通可弯折高精度柱壳铰实现模块间的收纳,大幅提高了反射面的收纳效率。该方案各薄壳仅靠 2 个点支撑,背部支撑结构相对容易实现。模块化卷绕展开反射面工作原理见图 5,单个模块尺寸为 0.7 m×0.7 m,展开状态曲率半径约为 5 m~11 m,设计收纳直径为 2.5 cm,原理样机收纳时截面直径约为 10.5 cm。



图 5 模块化卷绕展开壳面反射面工作示意图^[20] Fig. 5 Deployment diagram of deployable reflector with modularized shells

单个模块壳面释放约束绳索后,依靠自身储存的弹性能展开,单个壳面展开过程如图 6。

组合式复合材料壳面,截面厚度通常在 0.5 mm 以内,收纳时主要发生弹性纯弯曲变形。研究表明, 碳纤维增强环氧树脂体系复合材料壳面收纳时长期处于高应变状态,树脂基体存在松弛的现象,导致展 开后形状与设计形状存在一定的差别,影响了展开后的形面精度。针对柔性壳面收纳曲率半径控制方法、 高应变情况下的粘弹性行为、高刚度收纳情况下的壳面展开非线性变形预报等仍需开展进一步研究。

2.3 CFRS 柔性壳面反射面

相比其他树脂基体,硅树脂基体具有低泄漏率、低挥发性能、不吸湿、耐紫外辐射、耐原子氧腐蚀、固化过程收缩小等优势。DATASHVILI等^[21]研究人员,通过采用硅树脂体系结合织物复合材料的方案,提出了一种新型的具备局部自支撑能力的 CFRS 柔性壳面。CFRS 基体材料常温下弹性模量比环氧树脂体系低 2 个数量级,因此,在相同厚度下,采用 CFRS 的柔性壳面具有更小的收纳曲率半径,且可以大

幅减小收纳状态松弛现象的影响。采用 CFRS 柔性壳面研制的周边桁架式可展开反射面 1.6 m 口径缩比 验证样机见图 7,该样机形面精度优于 0.5 mm RMS。





采用 CFRS 的柔性壳面可展开天线反射面 具有较好的热稳定性。以某 5 m 口径反射面为 例,在温度范围为-200℃~+100℃时,仿真分 析热变形引起的形面精度偏差不大于 0.1 mm RMS。需要指出的是,硅树脂玻璃化转变温度 约为-110℃,低于玻璃化转变温度后,树脂的 弹性模量将会增加,因此,该类型柔性壳面的 展开温度需要高于玻璃化转变温度。采用 CFRS 柔性壳面的反射面综合了柔性复合材料 壳面和金属丝网面的优势,具有结构形式简 单、收纳效率高、形面精度高等优势,为大型 空间可展开结构实施提供了新的技术途径。国 内航天五院西安分院针对 CFRS 柔性壳面的刚 度预报开展了部分研究^[22],从细观角度提出了 有限元分析模型,为工程应用提供了指导。



图 7 CFRS 壳面可展开天线: (a) 收纳状态; (b) 部 分展开状态; (c) 完全展开状态^[21] Fig. 7 CFRS deployable reflector: (a) Folded state; (b) Deployed partly state; (c) Deployed state

2.4 形状记忆可展开柔性反射面

形状记忆聚合物 SMP(Shape Memory Polymer)是一种新型智能材料,通过感知外界环境变化而产生主动响应,除发挥结构承载作用外,还可以通过驱动装置实现主动变形。碳纤维增强的形状记忆聚合物复合材料具有轻质、回复变形大、比强度与比刚度高等优势,在空间可展开结构中具有广泛的应用前景^[23]。

Barrett 等^[24]采用形状记忆条带作为驱动装置,结合柔性复合材料壳面,提出了一种低成本、高收纳效率、精度适中的柔性壳面可展开反射面,收纳与展开状态如图8所示。4m口径反射面形面精度约0.5mm RMS,收纳尺寸为 *Φ*1.4 m×2 m。

4m口径形状记忆柔性壳面可展开反射面采用加热驱动展开,其工作原理如下:在展开状态加热,

待超过玻璃化转变温度 T_g 后,树脂基体进入柔性状态,此时将形状记忆驱动条带按 18 个凸褶向中心折 弯收纳,壳面反射面折叠收纳;然后,收纳存储在低于玻璃化转变温度的环境下;展开时,将反射面外

圈形状记忆驱动条带重新加热到转变温 度 T_g以上后,在复合材料形状恢复力的 驱动下,展开到初始无应力状态。采用 形状记忆可展开柔性反射面,具有驱动 方式简单、展开锁定后冲击小的优势。 关于形状记忆柔性壳面的变温粘弹性行 为及展开后性能仍需进一步研究。



3 柔性壳面反射面关键技术

星载可展开天线涉及微电子、微波、 结构设计、先进材料、极端环境热控、 展开动力学等多学科内容,属于典型的 多学科交叉领域,具有集成度高、创新 性强、关键技术多的特点,代表着国家 航天的先进技术水平。

与国外相比,我国在空间可展开天线领域的研究起步相对较晚。目前,国外在柔性复合材料壳面技 术方面已有大量的研究工作,典型的研究单位有德国慕尼黑工业大学、美国喷气推进试验室、日本航空 航天局等。采用柔性壳面技术的天线型号项目正在快速推进。相比之下,我国在柔性复合材料壳面可 展开天线方面的研究相对滞后,在壳面细观预报模型分析方法、碳纤维编织技术、硅树脂体系研制、 柔性壳面成型工艺和高精度组装等方面目前仍处于研究和关键技术验证阶段,整体技术水平有待进一 步提高。

针对硅树脂体系的柔性复合材料壳面技术,攻克柔性壳面的研制和高可靠收纳展开,将为高精度大口径天线的实现提供创新解决途径,为我国空间可展开天线领域发展提供有力支撑。实现高精度柔性壳面需要重点关注的关键技术如下。

3.1 高精度柔性壳面天线设计技术

面向实际应用需求,提出展开有效口径、形面精度、收纳尺寸、结构动态特性、结构重量等指标。 结合柔性复合材料壳面技术特点,建立柔性复合材料壳面细观力学代表性体积单元,开展高精度多尺度 分析。依靠柔性复合材料壳面局部刚度自支撑能力,改变反射面保精度方法,创新背部支撑结构构型, 提出高精度轻质柔性壳面可展开天线设计方案。开展在轨极端热环境影响分析,识别影响热变形精度的 关键区域,制定合理的热控措施,保证在轨高精度工作。

3.2 柔性复合材料壳面成型工艺技术

柔性复合材料薄壳厚度较小,成型过程中产生的残余应力对壳面精度具有重要影响。结合高精度横 观准各向同性柔性壳面实现方案,开展合理的铺层设计和基体配方设计,针对工艺过程开展控制,研制 适用于 Ka 频段及以上频段的高精度可展开天线的柔性壳面材料。开展耐低温树脂体系研制,实现柔性 壳面极端低温工况下的展开能力,为该类型产品的扩展应用提供保障。开发专用高精度组装工装,实现 柔性壳面与背部支撑结构的高精度匹配成型。

3.3 高可靠展开与控制技术

柔性壳面反射面在地面试验时需要进行重复收纳与展开,且多次展开后的形面精度稳定性要求高。 为保证展开可靠性,需要引入同步装置,控制展开过程行为,引入特定阻尼装置,控制多条支撑肋或支 撑结构间的展开过程行为,保证展开到位可靠性,并针对不同环境温度下的展开需求,重点攻克基于摩 擦片形式的阻尼装置,减小温度对阻尼装置的影响限制,实现大范围内的可靠展开性能,保障系列化产 品的环境适应能力。

4 结束语

柔性复合材料壳面可展开反射面天线具有展开可靠性高、支撑结构简单等优势,是星载可展开天线 研究的一个重要方向。结合柔性壳面局部自支撑特点,掌握柔性壳面高精度成型和展开工艺,创新支撑 结构构型是实现高精度可展开柔性壳面反射面的关键技术。通过综述国内外几类典型柔性壳面可展开天 线实现形式,为柔性壳面可展开天线设计、精度控制等提供了参考。

参考文献

- [1] 马小飞,李洋,肖勇,等. 大型空间可展开天线反射器研究现状与展望[J]. 空间电子技术, 2018(2): 16-26.
 MA Xiaofei, LI Yang, XIAO Yong, et al. Development and tendency of large space deployable antenna reflector[J]. Space Electronic Technology, 2018(2): 16-26.
- [2] MARK W T. AstroMesh deployable reflectors for Ku and Ka-band commercial satellites[C]//20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit, 2002.
- [3] SAUDER J, CHAHAT N, HIRSCH B, et al. From prototype to flight: qualifying a Ka-band parabolic deployable antenna (KaPDA) for CubeSats[C]//4th AIAA Spacecraft Structures Conference, 2017.
- [4] CHAHAT N, SAUDER J, THOMSON M, et al. Ka-band deployable mesh reflector antenna compatible with the deep space network[C]//11th European Conference on Antennas and Propagation, 2017.
- [5] SHARAY Y, NAFTALY U. TECSAR: design considerations and program status[J]. IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(2): 117–121.
- [6] HIGUCHI K, KISHIMOTO N, MEGURO A, et al. Structure of high precision large deployable reflector for space VLBI(very large baseline interferometry)[C]//50th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2009.
- [7] 张立华, 熊亮, 孙骥, 等. 嫦娥四号任务中继星"鹊桥"技术特点[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(2): 138–146.
 ZHANG Lihua, XIONG Liang, SUN Ji. et al. Technical characteristics of the relay communication satellite "Queqiao" for Chang'e-4 lunar farside exploration mission[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(2): 138–146.
- [8] YANG G, YANG D, ZHANG Y, et al. Form-finding design of cable-mesh reflector antennas with minimal length configuration[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 63: 9–17.
- [9] MURPHEY T W, FRANCIS W, DAVIS B, et al. High strain composites[C]// 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015.
- [10] 谭惠丰,杨留义,卫剑征,等.双稳态复合材料可折展柱壳研究综述[J]. 应用力学学报,2017,34(2):269-274.
 TAN Huifeng, YANG Liuyi, WEI Jianzheng, et al. Review on the bistable composite deployable slit tubes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(2): 269-274.
- [11] YEE J C H, PELLEGRINO S. Folding of woven composite structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(2): 273–278.
- [12] TAN L T, PELLEGRINO S. Stiffness design of spring back reflectors[C]//43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2002.
- [13] TAN L T, PELLEGRINO S. Thin-shell deployable reflectors with collapsible stiffeners part 1: approach[J]. AIAA Journal, 2006, 44(11): 2515–2523.
- [14] TAN L T, NORAGER S. Deployable slotted shell reflector antennas[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007.
- [15] SOYKASAP O, KARAKAYA S, GAYRETLI A, et al. Preliminary design of deployable flexible shell reflector of an X-band satellite payload[C]// 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015.
- [16] 李怡晨, 宋燕平, 胡飞. 碳纤维三向织物复合材料研究现状与未来展开[J]. 空间电子技术, 2019(3): 87–96.
 LI Yichen, SONG Yanping, HU Fei. Research status and future prospect of carbon fiber tri-axial woven fabric composites[J].
 Space Electronic Technology, 2019(3): 87–96.
- [17] STILES L, GARRETT J. Development of deployable aperture concepts for CubeSats[C]// 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2010.

- [18] SCHMID M, BARHO R. Development summary and test results of a 3 meter unfurlable CFRP skin antenna reflector. Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2003.
- [19] YOON S S, LEE J W, LEE T K, et al. Insensitivity characteristics in the dual polarization of deployable CFRP reflector antennas for SAR[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2018, 66(1): 88–95.
- [20] TYLER J K, BANIK J A. Stowage and deployment strength of a rollable composite shell reflector[C]//52nd AIAA/ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011.
- [21] DATASHVILI L, BAIER H. Derivation of different types of antenna reflectors from the principle of highly flexible structures[C]//The 8th European Conference on Antennas and Propagation, 2014.
- [22] 李怡晨, 宋燕平, 胡飞. 面向空间天线的 TWF 复合材料性能研究 [J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(3): 25–35.
 LI Yichen, SONG Yanping, HU Fei. Research on performance of TWF composites for space antenna[J]. Chinese Space Science and technology, 2020, 40(3): 25–35.
- [23] IM E, THOMSON M, FANG H, et al. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites[C]//AIAA Space 2007 Conference & Exposition, 2007.
- [24] BARRETT R, TAYLOR R, KELLER P, et al. Deployable reflectors for small satellites[C]// Small Satellite Conference, 2007.

[作者简介]

- 刘 吴 1976年生,博士,研究员,主要研究方向为大型天线与微波技术。
- 杨留义 1988年生,博士,工程师,主要研究方向为大型可展开结构、柔性可展开天线。
- 沈永正 1990年生,博士,工程师,主要研究方向为空间可展开天线。
- 杨雨田 1982年生,高级工程师,主要研究方向为天线结构设计技术。
- 史永康 1979年生,研究员,主要研究方向为天线设计技术。

(本文编辑:潘三英)