

柔性自回弹天线反射器及其优化设计

柏宏武 宋燕平 马小飞 郑士昆

中国空间技术研究院 504 所

西安市 165 信箱, 邮编: 710000, baihw@cast504.com

摘要 本文首先介绍了柔性自回弹天线反射器的概念及在国内外的研究应用情况, 然后总结了一套适应该反射器收拢时的非线性分析方法。最后分别采用正交试验设计法和改进的可行方向法对反射器加强筋宽度和反射器的结构厚度进行了优化, 优化提高了反射器展开状态的刚度, 使得反射器质量减小 20%, 基频从 0.6Hz 提高到 1.0Hz 以上。

关键词 柔性自回弹天线反射器; 非线性分析; 正交试验设计; 改进的可行方向法

1 引言

随着卫星和通信技术的不断发展, 对星载天线提出了更高更新的要求。卫星天线反射器有了两个新的发展方向: 一是大口径, 二是高精度。大口径天线反射器可以接收宽频段小功率的信号, 从而满足移动通信卫星、电子侦察卫星、数据中继卫星和深空探测器等的需要。由于火箭运载风罩有效包络空间的限制, 大口径天线一般需采用空间可展开结构。国内外对各种空间可展开天线都作了大量的研究和开发。可展开天线按结构划分已经形成了固面可展开天线(Solid Deployable Surface Antenna)、网状可展开天线(Mesh Antenna)、充气式天线 (Inflatable Antenna) 和柔性自回弹天线 (Spring Back Antenna) 等四种基本形式。

柔性自回弹天线反射器 (Spring-back Antenna Reflector) 采用具有一定柔性和一定自回弹性能的薄膜材料形成天线反射面, 为提高反射器型面精度, 反射面背面还使用高回弹柔性材料背架, 此外在天线背面采用了一套型面精度调整机构, 使得反射器的型面精度能进一步得到提高。柔性自回弹天线由于不需要复杂的展开机构, 其质量得以大幅减小, 可靠性得以大大提高, 又由于结构具有一定的刚性, 反射器的型面精度也比网状天线更容易得到保证。因此, 该天线由于在质量、可靠性和型面精度方面的优势, 使其成为 3.5~6m 口径天线反射器领域最好的选择之一。反射器收拢和展开示意如图 1 所示。

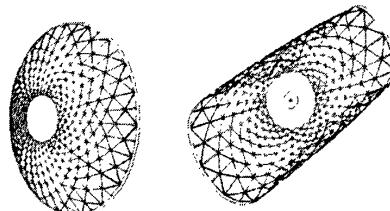


图 1 柔性自回弹天线反射器展开和收拢状态示意

2 柔性自回弹天线反射器在国内外的研究和应用情况

2.1 反射器在国外的应用

柔性自回弹天线反射器由休斯公司发明, 目前已经在多颗卫星上得到了成功地应用。

柔性自回弹天线最早用在北美移动通信系统 MSAT 中的 MSAT-1 和 AMSC-1 (MSAT-2) 卫星上 (如图 2), 每副天线重 45 磅, 展开尺寸大小是 22.3×17 英尺(6.8m×5.25m), AMSC-1 于 1995 年的 4 月 7 日发射成功, MSAT-1 于 1996 年的 4 月 20 日发射成功, 四副天线均展开成功。

柔性自回弹天线在美国第二代 TDRS 卫星系统 TDRS-H、I、J 上的应用将柔性自回弹反射器技术推向了一个新的高度, 首次将该反射器用在了 Ka 频段。TDRS-H 在 2000 年 6 月 30 日成功发射, 天线成功展开, 服役期是 15 年, 反射器口径 4.9m, 工作频段是 S/Ka。TDRS-I (如图 3) 和 TDRS-J 分别在 2002 年 3 月和 12 月发射成功, 天线均展开成功。

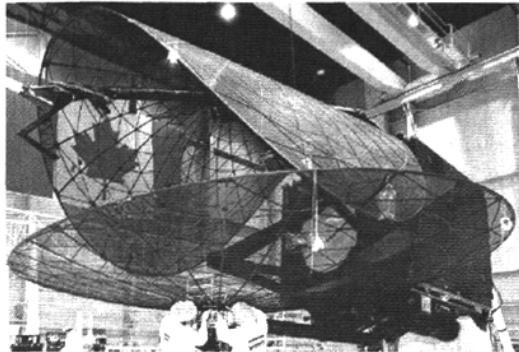


图 2 测试状态的北美移动通信卫星

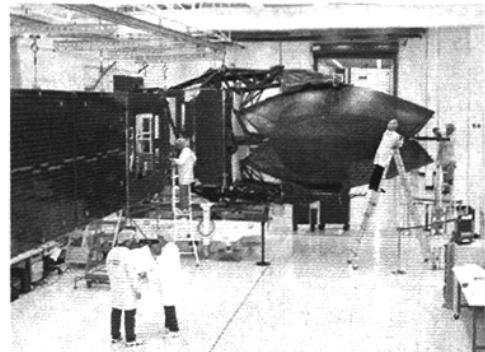


图 3 测试状态的 TDRS-I 卫星

2.2 反射器在国内的研制情况

航天 504 所自 2000 年开始启动柔性自回弹天线反射器的研制工作。先期研究已经取得了一定的成绩，在大变形过程的计算与分析、柔性碳纤维 TWF 薄膜的设计与制取、反射器型面精度的地面测试方法、反射器锁紧与释放装置的研制等方面都取得较好的成绩。制成了 620mm 和 4200mm（如图 4）反射器原理样机，并对其进行了必要的测试和试验。对 4200mm 反射器的测试表明我们生产出的反射器较好地吻合了设计要求，在反射器口径向上有重力作用时其型面精度达到了 3.316mmRMS。

此外，笔者还在已经设计加工完成的 4200mm 反射器原理样机的基础上，采用正交试验设计法和改进的可行方向法对反射器加强筋的宽度和结构厚度进行了优化设计，进一步提高反射器的展开状态的刚度的同时减小了反射器质量。

3 反射器收拢时的非线性分析

柔性自回弹天线反射器收拢时采用 Kevlar 绳索在其口面对边施力拉紧即可，是一个大变形的几何非线性过程。在反射器设计之前必须采用有限元软件对其进行收拢时的非线性分析，以获得反射器收拢时的力/位移曲线，并考察反射器的收拢到位后的应力集中情况和最大应力水平。

采用工业领先的有限元前后置处理软件 Patran2005 建立反射器的有限元模型。在三维 CAD 软件中以曲面的形式建立反射器的几何模型，导入 Patran2005，用三节点三角形单元（TRIA3）对整个模型进行有限元划分（如图 5），然后将边缘加强带、单层反射面、横向和径向加强筋、中心实面分别归入 4 个组（Group）中，分别进行材料和几何特性的定义。

非线性分析是结构力学领域研究的一个热点，也是一个难点。本文借助于有限元软件 Nastran2005，采用增量法将施加的外力从初始值逐步增加到所需的大小，获得了反射器收拢时的力/位移曲线（如图 6）和变形图（图 7），结果和文献[1]基本吻合，证明了分析方法的可行性。

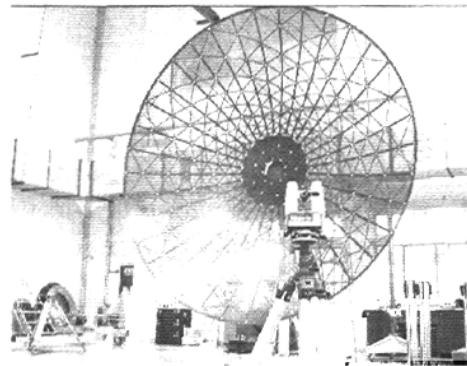


图 4 测试状态的 4200mm 反射器原理样机

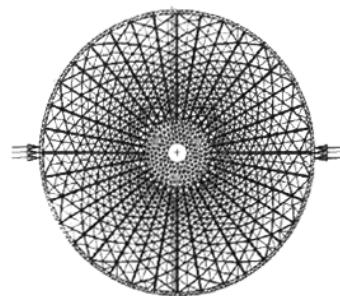


图 5 反射器的有限元模型

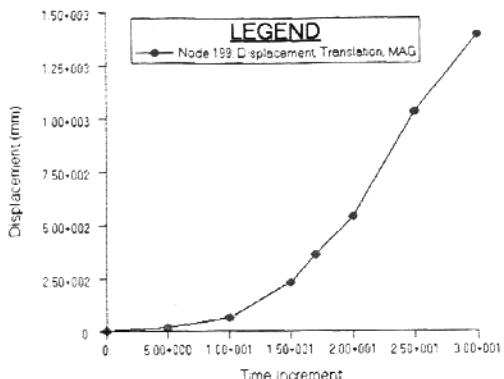


图 6 反射器收拢时施力节点的位移图

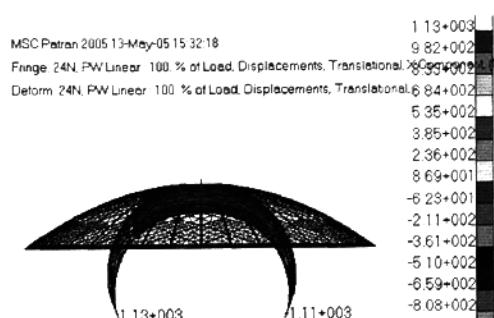


图 7 反射器收拢时的变形图

4 4200mm 反射器结构厚度的优化

以反射器质量最轻为目标，采用改进的可行方向法并借助有限元软件 Nastran2005 对反射器一阶固有频率和外力作用下节点位移进行约束来优化柔性自回弹天线反射器的结构厚度。反射器结构组成如图 8 所示。

设计变量如表 1 所示。

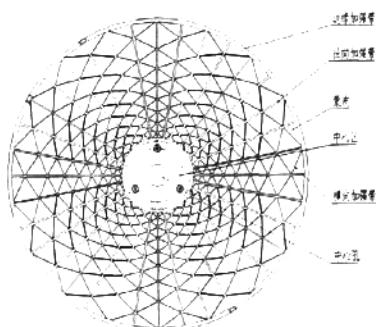


图 8 4200mm 反射器结构组成

表 1 设计变量 (mm)

| 设计变量 | 物理含义 | 初始值 | 下限 | 上限 |
|-------|---------|-----|-----|----|
| t_1 | 中心实面厚度 | 2.2 | 1.5 | 5 |
| t_2 | 横向加强筋厚度 | 2 | 1 | 6 |
| t_3 | 径向加强筋厚度 | | | |
| t_4 | 边缘加强筋厚度 | 4 | 1.5 | 10 |

经过 6 次迭代优化达到收敛，各量的变化曲线如图 9 所示。优化结果如表 2 所示。

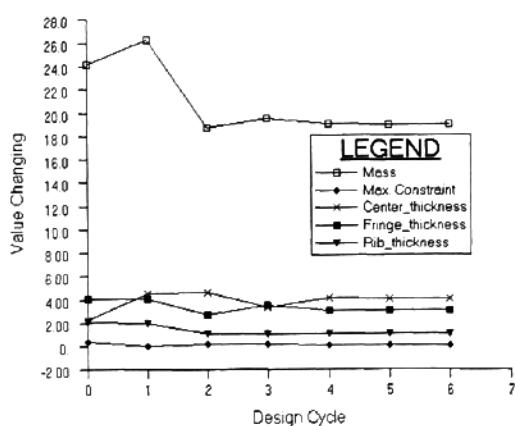


图 9 各量变化曲线

表 2 优化结果

| 变量 | 物理含义 | 初始设计值 | 优化值 |
|------------------|---------|---------|--------|
| t_1 | 中心实面厚度 | 2.2 | 4 |
| t_2 | 横向加强筋厚度 | 2 | 1 |
| t_3 | 径向加强筋厚度 | | |
| t_4 | 边缘加强筋厚度 | 4 | 3 |
| 质量 (kg) | | 24.13 | 19.02 |
| 一阶固有频率 f (Hz) | | 0.66681 | 1.0056 |
| Node 191 位移 (mm) | | 26.2 | 20.6 |

从表 2 可以看出，通过优化设计使反射器的基频提高到 1.0Hz 以上，质量减小了 20%。对反射器优化前后的模型分别进行收拢时的非线性分析，得到数据如表 3 所示。结果表明优化增加了收拢所需外力，提高了反射器刚度，但是收拢时的最大应力水平增加得并不多，在材料的可承受范围之内。

表 3 优化前后反射器收拢时的分析结果

| 反射器状态 | 沿外力方向最大位移 (mm) | 所需外力 (N) | 最大 Von Mises 应力水平 (MPa) | 最大剪应力 (MPa) |
|-------|----------------|----------|-------------------------|-------------|
| 优化前 | 1050 | 31.8 | 102 | 56.4 |
| 优化后 | 1050 | 35.4 | 134 | 76.4 |

5 反射器加强筋宽度的优化

在对反射器结构厚度进行优化之后，需要对反射器加强筋的宽度进行优化设计，目的是在提高基频(刚度)的情况下尽量减轻反射器的质量。针对该反射器的特点，采用了正交试验设计的方法。采用正交表 $L_{25}(5^6)$ ，试验的因素水平如表 4 所示。试验的指标为反射器的质量、基频和刚度(采用在一定外力作用下的节点位移来表示)。

注：边缘加强筋宽度指加强筋在反射面口径面内的投影宽度。

试验的结果如表 5 所示。

表 4 试验的因素水平

| 因 素 | 水 平 (mm) |
|-----------|--------------------------|
| 边缘加强筋宽度 A | 60、70、80、90、100 |
| 径向加强筋宽度 B | 27.4、26.4、25.4、24.4、23.4 |
| 横向加强筋宽度 C | 7、8、9、10、11 |

表 5 正交试验试验结果

| 试验号 | A(mm) | B(mm) | C(mm) | 质量(kg) | 基频(Hz) | 位移(mm) |
|-----|-------|-------|-------|--------|---------|--------|
| 01 | 60 | 27.4 | 7 | 21.56 | 0.67038 | 855 |
| 02 | 60 | 26.4 | 8 | 21.69 | 0.70223 | 772 |
| 03 | 60 | 25.4 | 9 | 21.90 | 0.70193 | 737 |
| 04 | 60 | 24.4 | 10 | 22.06 | 0.68029 | 815 |
| 05 | 60 | 23.4 | 11 | 22.33 | 0.6796 | 798 |
| 06 | 70 | 27.4 | 11 | 24.18 | 0.66656 | 586.5 |
| 07 | 70 | 26.4 | 7 | 22.42 | 0.69343 | 621 |
| 08 | 70 | 25.4 | 8 | 22.62 | 0.65629 | 700.5 |
| 09 | 70 | 24.4 | 9 | 22.84 | 0.66957 | 654.5 |
| 10 | 70 | 23.4 | 10 | 23.04 | 0.65338 | 683 |
| 11 | 80 | 27.4 | 10 | 24.90 | 0.65224 | 505 |
| 12 | 80 | 26.4 | 11 | 25.11 | 0.65717 | 476 |
| 13 | 80 | 25.4 | 7 | 23.35 | 0.64365 | 580 |
| 14 | 80 | 24.4 | 8 | 23.56 | 0.6561 | 550.5 |
| 15 | 80 | 23.4 | 9 | 23.77 | 0.65327 | 532 |
| 16 | 90 | 27.4 | 9 | 25.59 | 0.65405 | 393.5 |
| 17 | 90 | 26.4 | 10 | 25.80 | 0.65755 | 357 |
| 18 | 90 | 25.4 | 11 | 26.01 | 0.62915 | 437 |

续表

| 试验号 | A(mm) | B(mm) | C(mm) | 质量(Kg) | 基频(Hz) | 位移(mm) |
|-----|-------|-------|-------|--------|---------|--------|
| 19 | 90 | 24.4 | 7 | 24.27 | 0.66648 | 387.5 |
| 20 | 90 | 23.4 | 8 | 24.46 | 0.65956 | 389.5 |
| 21 | 100 | 27.4 | 8 | 26.30 | 0.64274 | 336 |
| 22 | 100 | 26.4 | 9 | 26.50 | 0.63815 | 330 |
| 23 | 100 | 25.4 | 10 | 26.69 | 0.63607 | 333.5 |
| 24 | 100 | 24.4 | 11 | 26.91 | 0.64522 | 310 |
| 25 | 100 | 23.4 | 7 | 25.19 | 0.65076 | 333 |

从表 5 可以看出加强筋宽度的变化对反射器基频的影响很小，故将基频指标暂不考虑，问题就变成 2 指标的正交试验设计问题。分别采用综合评分法和功效系数法对试验的结果进行处理，得到了 3 种较优的参数组合作为本次优化结果，如表 6 所示。通过对数据的处理可以得出，反射器边缘加强筋的宽度相对于其他两个因素来说是主要因素，在设计时应重点考虑，其他两个因素可以根据需要来选取。对优化之后的结果进行收拢时的非线性分析，发现优化将反射器的刚度提高了 2~3 倍，同时反射器收拢时的应力水平提高了 17% 左右，在材料的允许范围之内。

表 6 加强筋宽度优化得到三种较好参数组合

| 代号 | A (mm) | B (mm) | C (mm) |
|----|--------|--------|--------|
| F1 | 100 | 26.4 | 7 |
| F2 | 90 | 24.4 | 7 |
| F3 | 60 | 23.4 | 7 |

6 总结

本文首先介绍了柔性自回弹反射器的概念以及在国外的应用情况，然后介绍了反射器在国内的研究状况，接下来介绍了笔者采用改进的可行方向法和正交试验设计法对反射器的结构厚度和反射器加强筋宽度进行优化的情况。优化提高了反射器的展开状态刚度，这对于使反射器获得和维持较高的型面精度至关重要。

柔性自回弹天线反射器是一种新型的反射器，具有质量轻、可靠性高和型面精度高等的优点，可以满足我国移动通信卫星、新一代数据中继卫星、军用通信卫星等对口径 3.5~6m 口径反射器的需要。同时该反射器亦可用于口径小于 3m 的场合，此时反射器在发射前无需收拢，型面精度可以更高。

参 考 文 献

- [1] Lin Tze Tan, Sergio Pellegrino. Stiffening Method for “Spring-back”Refelctors. Computation Methods for Shell and Spatial Structures. IASS-IACM 2000.
- [2] Lin Tze Tan, Sergio Pellegrino. Stiffness Design of Spring Back Reflectors. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 22-25 April 2002, Denver, CO.
- [3] NASA Facts. Three Newly Designed Tracking and Data Relay Satellites To Help Replenish Existing On-Orbit Fleet. FS-2001-9-025-GSFC. Goddard Space Flight Center.
- [4] Lin Tze Tan, Sergio Pellegrino. Ultra Thin Deployable Reflector Antennas. 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 19-22 April 2004, Palm Springs, California.
- [5] Lin Tze Tan, Omer Soykasap, Sergio Pellegrino. Design & Manufacture of Stiffened Spring-Back Reflector Demonstrator.

Spring-back Reflector and Its Optimization Design

Bai Hongwu, Song Yanping, Ma Xiaofei and Zheng Shikun

Xi'an Institute of Space Radio Technology

P. O. Box 165, Xi'an, 710000, baihw@cast504.com

Abstract This paper introduces the concept of spring-back reflector and the researches and applications of the reflector firstly. Secondly, an especial nonlinear analyse method suitable for the reflector is summarized. Finally, the structure thicknesses are optimized using modified feasible direction algorithm and the stiffener wideness are optimized using the orthogonal experimentation method. A conclusion derived from the optimization is that the mass of a 4.2m reflector can be decreased by 20% and the natural frequency can be increased from 0.6Hz to 1.0Hz.

Key words Spring-back reflector; Nonlinear analysis; Orthogonal experimentation design; Modified feasible direction algorithm

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>