

空间充气可展抛物面天线反射面设计与精度分析

肖薇薇, 陈务军, 付功义

(上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200030)

摘要:空间充气可展抛物面天线由于其显著的优点正得到日益广泛的研发关注. 该文提出了基于理想抛物面逆向分瓣裁切粘合成形的反射面设计法, 分析了引入形面误差的因素, 给出了形面误差参数定义, 研究了反射面分瓣数、裁切逼近方式和数值网格划分等对形面误差的影响. 分析了微重力、放置方式对形面精度的影响. 论文所研究的内容对空间充气可展天线设计研究具有参考价值.

关键词:空间充气可展天线; 反射面分瓣粘合成形法; 双曲面二次展开法; 反射面形面误差

中图分类号:V214;O312 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7043(2010)02-0257-05

Analysis of the design and precision of an inflatable deployable parabolic reflector space antenna

XIAO Wei-wei, CHEN Wu-jun, FU Gong-yi

(Space Structures Research Centre, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Inflatable deployable parabolic space antennas have received increasing attention from researchers due to their remarkable advantages. The authors proposed a process to form a reflective surface with an inverse cutting formation. A number of gores were designed that would form an ideal parabolic surface, flattened sequentially, cut, and then the seams were glued together inversely to form a whole reflector surface. The factors causing deviations from the expected ideal surface, that is, surface errors, were investigated thoroughly. Surface error parameters were carefully defined, such as the root mean squared (RMS) of variations in form accuracy, volume, and area. The influences of the number of gores, the fitting procedures and the number of discrete shapes were comprehensively evaluated. Finally, the effects on the precision of the stressed surface were analyzed with respect to the microgravity of the film, the spray-paint and the support structure. This work should be valuable in the design of inflated space antennas.

Keywords: Inflatable deployable space antenna; reflector gore formation; double-curve surface two-step deployment; reflector surface error

空间充气展开结构正受到越来越广泛的关注, 并开始应用于太阳能收集器和天线反射面. 重量轻、收纳率高、可靠性高和费用低是充气展开结构的显著特点. 展开性、耐久性和工作性能是决定充气展开结构技术成功应用的3个关键因素. 充气展开结构的高表面精确度是基本要求, 而实际构型曲面与理想抛物面存在偏差, 这将影响结构性能和任务性能, 如电信号旁瓣、增益、结构薄膜屈曲强度等^[1]. 反射面设计与成形工艺是决定形面误差的根本因

素, 主要有2种方法, 即分瓣裁切粘合成形法和整体浇铸薄膜成形法, 这2种方法的形面误差来源、特点不一致. Carreras等(1999年)研究了浇铸成形过程形面误差^[2], Naboulsi(2004年)研究了荷载、边界条件对形面精度的影响^[3], 国内学者研究了复合膜特性^[4], 并对空间充气可展天线反射面作了初步的研究^[5].

本文详细介绍了基于理想抛物面分瓣裁切设计粘合成形的方法, 深入分析了误差因素, 并分析了误差特点.

1 抛物面反射面形面设计与误差

目前抛物面反射面的成形方法主要有两种: 整

收稿日期: 2008-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878128, 50808122).

作者简介: 肖薇薇(1976-), 女, 博士研究生, E-mail: vivianxww@sjtu.edu.cn;

付功义(1957-), 男, 教授, 博士生导师.

体浇铸成形和基于理想抛物面的分瓣裁切粘合成形. 基于理想抛物面的分瓣裁切粘合成形法是用预先裁切下来的平面膜片拼接粘合成设计的构型抛物面,其实质是用可展面近似逼近非可展面^[6-8].

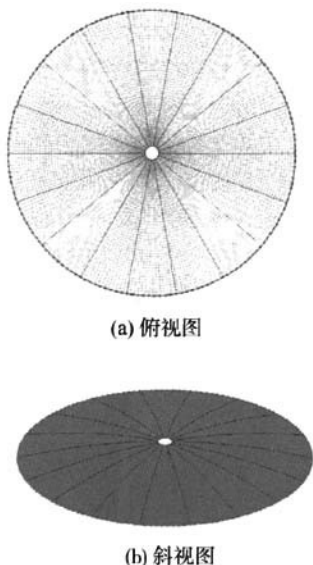


图1 抛物面分瓣裁切原理图

Fig.1 Conception of parabolic surface cutting procedure

近似逼近展开法是将非可展面细分,使每一部分接近于某一可展曲面(如柱面或锥面)或平面,然后按可展曲面或平面展开,概括为双曲面二次展开法.如图1^[9-10],采用抛物柱面近似逼近可展天线的抛物面反射面.

在曲面近似展开中2次产生误差.第1次是可展开曲面逼近非可展曲面的裁切设计,主要与曲面划分方式(分瓣数和逼近位置)有关,此误差非连续收敛.第2次是展开可展曲面,其大小随展开范围的增大非线性积累,主要取决于展开基点和单元选择,此误差连续收敛.

在用可展曲面逼近非可展曲面时,因为可展曲面沿展开方向上的各条边为直线,这样就用可展曲面各单元的沿展开方向上的直线代替非可展曲面上对应曲面单元的曲线,由此将产生裁切误差,其大小则与柱面对原曲面的近似逼近程度有关.柱面与回转曲面间的位置关系有如图2所示3种.

抛物柱面作为复合曲面,采用经纬型四边形和三角形网格模拟曲面.网格节点位于理想解析曲面,四边形、三角形的边线不在抛物面上,网格离散模拟将引入离散误差,网格愈小,离散误差愈小^[9-13].

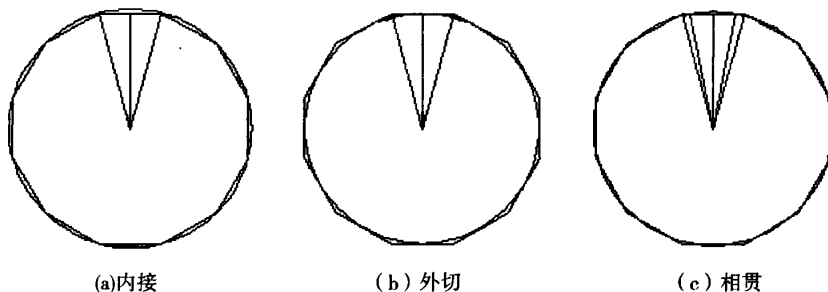


图2 抛物柱面近似逼近方式

Fig.2 Fitting procedure of parabolic cylinder

平均焦距误差 μ :

2 形面误差分析及初始误差分析

根据理想抛物面裁切设计粘合成的实际反射面构形,其误差概括为3个参数:焦距误差,表面积误差,体积误差.任何误差又可分为2部分:裁切误差和离散误差.

焦距误差是反映抛物面形面精度的关键指标,引入3个特征参数:

最大焦距误差 δ_{\max} :

$$\delta_{\max} = \max(\delta_f), \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{fi}}{n}, \quad (2)$$

焦距误差均方差 σ (RMS):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{fi} - \mu)^2}{n}}. \quad (3)$$

以3.0 m口径抛物面天线为参数分析模型,设母线方程为 $y^2 = 2px = 13\ 212.619x$,分析其设计形面误差及特征.首先借助 Visual Basic 语言在 CAD

平台上构造构型抛物面,取其一瓣作为分析对象;然后计算该瓣构型抛物面上若干点的焦距及对应理想抛物面上点的焦距;最后计算焦距误差.

下面给出 3 种情况下的形面焦距误差:

1) 抛物柱面外切,分瓣数 n 为 6、9、12、15、18、21、24. 图 3 为形面焦距误差分布曲线.

2) 分瓣数 $n = 18$, 抛物柱面分别为内接、外切、相贯(考虑不同相贯角 α). 图 4 为形面焦距误差分布曲线.

3) 分瓣数 $n = 18$, 抛物柱面为外切, 离散网格分别为三角形和经纬型四边形. 表 1 为相应形面误差值.

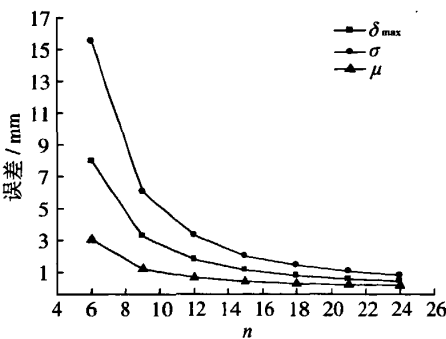


图 3 不同膜片数下形面误差曲线图
Fig. 3 Error with the number of gores

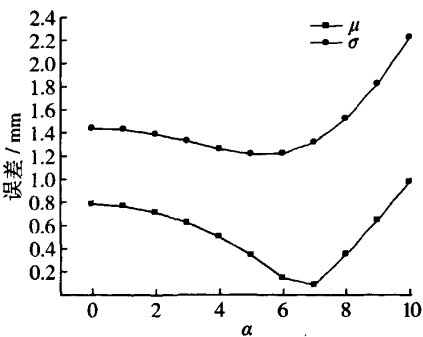


图 4 不同相贯角下形面误差曲线图
Fig. 4 Error with truncated angles

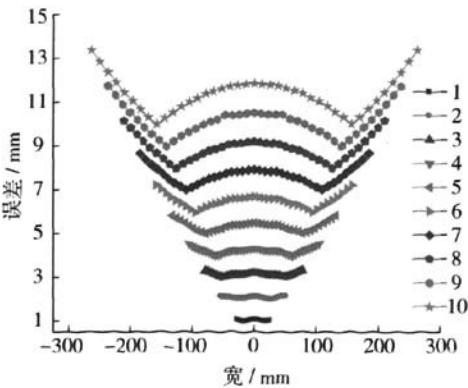
图 3 中,最大焦距误差、平均焦距误差及焦距误差 RMS 均随着分瓣数增加而减小,RMS 下降趋势尤为显著.但在分瓣数大于 12 以后,误差值减小趋势明显变缓.

由图 4 可见,焦距误差均值和 RMS 均随着相贯角的增加先减小后增大,在相贯角等于 6° 附近达到最小值.

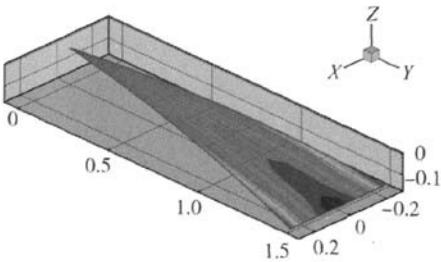
由表 1 可见,采用三角形单元离散时,无论是焦距误差、表面积误差还是体积误差均小于经纬型四边形单元.

表 1 不同网格单元误差分析
Table 1 Errors with different discrete element

网格	δ_{\max}/mm	A/mm^2	V/mm^3	$\sigma(\text{RMS})/\text{mm}$	$\delta_A/\%$	$\delta_V/\%$
三角形	5.080 75	399 284. 19	337 786 15. 79	7. 098 43	0. 63	$5. 3 \times 10^{-3}$
四边形	5. 284 64	393 769. 58	331 030 43. 47	8. 613 12	2	2



(a) 形面误差曲线图



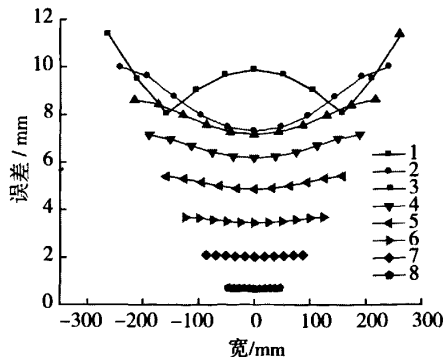
(b) 形面误差云图

图 5 构造抛物面无应力形面误差
Fig. 5 Surface error of constructed non-stress parabolic surface

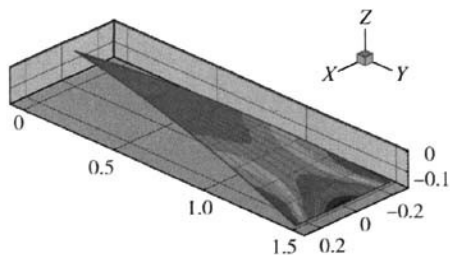
图 5(a) 为构造无应力形面误差纬向分布图, 1~10 是近似抛物面从顶点到口边缘间不同位置纬线上点的焦距误差分布曲线, 各纬线投影沿径向均匀分布. 曲线均呈“W”型, 且从抛物面口边缘到顶点, “W”形幅度逐渐减小. 图 5(b) 为对应的焦距误差分布云图.

3 应力形面误差的分析

重力对天线反射面误差具有一定影响. 本文分析了内压、自重、膜面喷漆以及放置方式和边界约束等对充气天线反射面形面精度的影响. 膜面采用 Kpton HN 型膜材; 喷漆密度 $0.5 \times 10^3 \text{ kg/mm}^3$, 厚度 0.025 mm. 首先在 ANSYS 中对构型抛物面作结构分析, 采用 SHELL 41 四边形单元, 约束口缘 Z 向位移; 然后将形面上若干点的坐标取出并计算焦距误差. 图 6 给出了初始无应力膜面在 5 Pa 内压作用下并考虑自重时的形面误差分布, 1~8 是近似抛物面从顶点到口边缘间不同位置纬线上点的焦距误差分布曲线, 各纬线投影沿径向均匀分布. 由图 6 可见, 在内压作用下, 膜面由于充气变形, 焦距误差整体有所增大, 其平均值由 0.784 mm 增至 0.849 mm. 但误差分布较均匀, 与图 5 比较, “W”形变得平坦, 焦距误差均方差 RMS 由 1.437 mm 减少至 1.098 mm. 顶点在内压及自重作用下下移, 焦距误差出现负值. 充入气压时不会导致形面精度降低, 但内压较大时, 形面变形较大. 当内压 25 Pa 时, 焦距误差均值已达 3.708 mm. 当内压 50 Pa 时, 误差均值则达 6.866 mm.



(a) 形面误差曲线图



(b) 形面误差云图

图 6 5 Pa 时形面误差

Fig. 6 Surface error of differential pressure 5Pa

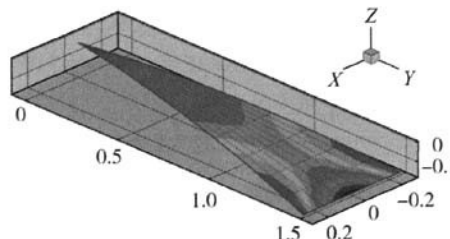


图 7 5 Pa 内压作用下考虑重力及喷漆且反射面凸面向下放置时形面误差云图

Fig. 7 Surface error view under 5 Pa differential pressure, self-weight, spray-paint and facing downwards

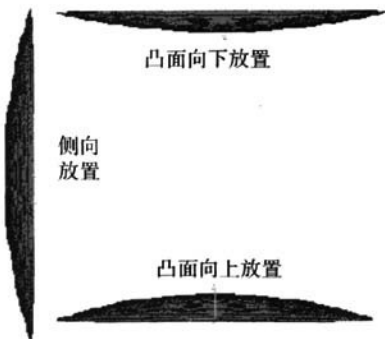


图 8 反射面放置方式

Fig. 8 Mounting ways of reflector

因膜面和漆箔密度很低, 反射面在不同摆放位置下形面精度接近. 凸面向上放置时, 焦距误差均值为 0.834 mm, RMS 为 1.098 mm, 均略有减小. 侧向放置时, 上半面被压缩, 下半面拉起. 而最易受影响的顶点附近区域, 由于在侧向放置时, 重力作用方向与膜面方向几乎平行, 所受影响很小. 焦距误差均值为 0.856 mm, RMS 为 1.087 mm. 凸面向下放置时, 形面误差有所增大. 焦距误差均值为 0.946 mm, RMS 为 1.100 mm. 图 7 给出了 5 Pa 内压下, 考虑重

力及漆箔且反射面凸面向下放置时的形面焦距误差分布图。反射面的不同放置方式见图8。

比较图5~7可知,在内压作用下,反射面整体形面误差增大,但形面误差沿经纬线分布更均匀。抛物面口径膜片底边以及两侧边是非自由边,因此,这三处附近区域变形受到了限制,内压作用下的误差变化较小,且小于膜片中央区域。膜片对称线附近区域误差增大最显著。顶点及附近区域在内压作用下,位置下移,出现负向形面误差。

4 结束语

采用基于理想抛物面的分瓣裁切粘合成形法构造反射面,通过控制相关参数,可获得较高形面精度的构型抛物面。分瓣数 ≥ 12 、相贯角 $\approx 6^\circ$ 可显著减小裁切误差;采用三角形网格单元模拟抛物面,离散误差较小。初始无应力构造抛物面在加上内压后,整个形面误差分布趋于均匀,径向和纬向的误差分布都成W形。膜面自重以及漆箔重力和反射面摆放方式对于形面误差改变较小,但侧放较好。此外,随着分瓣数的增加,拼接缝数增加,由此引入的操作误差增大,但其具体影响规律还有待于进一步研究确定。

参考文献:

- [1] NATORI M C, HIGUCHI K, SEKINE K. Advanced concepts of inflatable rigidized structures for space applications [C]//The 35th AIAA/ASME/AHS/ASC, Structure, Structure Dynamics, and Materials Conference. Washington, DC, USA. 1994.
- [2] CARRERAS, RICHARD A, MARK D K. Deployable near-net-shaped membrane optics, high-resolution wave-front control: methods, devices, and applications [C]//Proceedings of SPIE. Washington, DC, USA. 1999.
- [3] NABOULSI S. Investigation of geometric imperfection in inflatable aerospace structures [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2004, 17(3): 98-105.
- [4] 王长国,杜星文,王志敏. 空间充气天线反射器受冲击气体质量损失分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(4): 507-509.
- WANG Changguo, DU Xingwen, WAN Zhimin. Internal gas mass loss analysis of inflatable space antenna reflector subjected to impact [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(4): 507-509.
- [5] 徐彦,关富玲,管瑜. 充气可展天线精度分析和形面调整[J]. 空间科学学报, 2006, 26(4): 292-297.
- XU Yan, GUAN Fuling, GUAN Yu. Precision analysis and shape adjustment of inflatable antenna [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(4): 292-297.
- [6] GALASKO G A. Comparison of several cutting pattern methods [J]. Int J Space Structure, 1997, 12(1): 9-18.
- [7] BISHIP J A. Shape correction of initially flat membranes by a genetic algorithm [C]//The 39th AIAA/ASME/AHS/ASC, Structure, Structure Dynamics, and Materials Conference. Washington, DC, USA. 1998.
- [8] FREELAND R E, BILYEU G. In-step inflatable antenna experiment [C]//The 43rd Congress of the International Astronautic Federation. Paris, France. 1992.
- [9] 陈务军. 空间充气可展天线反射面模型研制报告[R]. 上海:上海交通大学, 2007.
- [10] 姜伟. 空间充气可展天线反射面设计、分析与试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007: 51-68.
- JIANG Wei. Design, analysis and experimental researches for space inflatable antenna reflectors [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 51-68.
- [11] GRESCHIK G, MIKULAS M M. Approximations and errors in pressured axisymmetric membrane shape prediction [C]//The 39th AIAA/ASME/AHS/ASC, Structure, Structure Dynamics, and Materials Conference. Washington, DC, USA. 1998.
- [12] GRECHIK G, PALISOC A, MIKULAS M M. Approximating paraboloids with axisymmetric pressured membranes [C]//The 39th AIAA/ASME/AHS/ASC, Structure, Structure Dynamics, and Materials Conference. Washington, DC, USA. 1998.
- [13] UTKU S, KUO C P, WADA B K. Shape control of inflatable reflectors [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(4): 550-556.

[责任编辑:陈峰]

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，一直致力和专注于微波、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>