

卫星天线研制中反射面型面精度和尺寸稳定性研究

沃西源 房海军 谭 放

北京空间机电研究所 北京 100076

摘要 文中简述了卫星天线的组成、制造工艺过程，着重对影响天线反射面型面精度和尺寸稳定性有关内容，从材料特性、铺层分析、成型模具材料和产品质量控制等内容进行了分析。

关键词 卫星天线 研制 反射面 型面精度 尺寸稳定性

Abstract: This paper introduced the form of satellite antenna, the manufacturing engineering of antenna, also emphasized the influencing factors which effect precision and dimensional stability of reflecting surface, in ways as characteristic of materials, analysis of layer, material of mould and quality control.

Keyword: manufacture satellite antenna reflecting surface precision of reflecting surface dimensional stability

1. 前言

天线是任何卫星都不可缺少的星载设备，天线一般均安装于卫星外表面，当观察一颗卫星时，天线往往是最容易看到的部分，不同用途的卫星通常需要不同用途的天线，即便同一颗卫星，为了完成不同的功能要求，往往需要多种天线，如美国 ACTS 卫星上包含着各种用途的反射天线、接收天线、遥控天线和 C 波段全向天线等，见图 1。

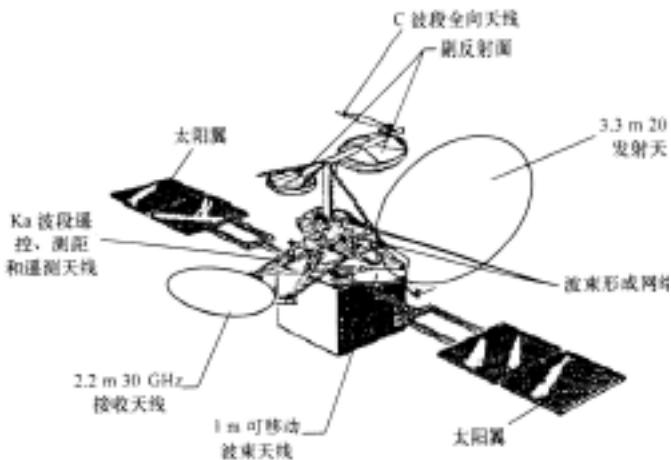


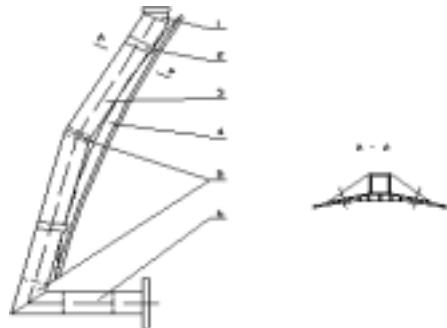
图 1 美国 ACTS 卫

天线有多种分类方法，按天线形状分类，通常可分为线天线、喇叭天线、反射面天线和阵列天线等。无论是哪种类型的天线，由于其反射面的型面精度和尺寸稳定性会直接影响天线的增益，因此天线反射面研制过程中一个重要任务是如何来保证反射面的型面精度和尺寸稳定性。本文对卫星天线中应用最为普遍的蜂窝夹层结构复合材料抛物面天线（以下简称抛物面天线）作为典型天线，分别从选材和材料特性分析、天线面板铺层分析、反射面的重量控制和反射面成型模具设计等内容

进行分析，为确保天线反射面型面精度与尺寸稳定性控制奠定基础。由我所研制某型号抛物面天线着重对上述内容开展各项研究工作，研制成功的产品经受多次飞行试验考验，取得令人满意的结果。

2. 抛物面天线的组成

抛物面天线一般由反射器及支撑结构组成。反射器由碳/环氧面板、铝蜂窝和各种预埋件等零件采用胶接成型工艺复合成一整体结构，其抛物面方程为 $Y^2+Z^2=984X$ ，型面精度均方根差 0.3 mm。支撑结构由碳/环氧薄壁方形管件、角接头、法兰和玻璃钢耳片等胶接零件采用胶接成型工艺复合成一整体结构，然后将支撑结构定位于专用工装，再将反射器用经纬仪检测调试按要求组装于指定的部位，其组装后结构形式见图 2。



3. 主要研究内容

图 2 制品结构示意图

3.1 抛物面天线的制造工艺

1—铝法兰；2—玻璃钢耳片；3—支承杆；
4—反射器；5—碳纤维角接头；6—钛合金法兰

抛物面天线主要由反射器和支撑结构组成。本文着重介绍其反射面型面精度和尺寸稳定性控制，根据我单位承担某型号任务要求，其反射面的制造工艺流程，见图 3。

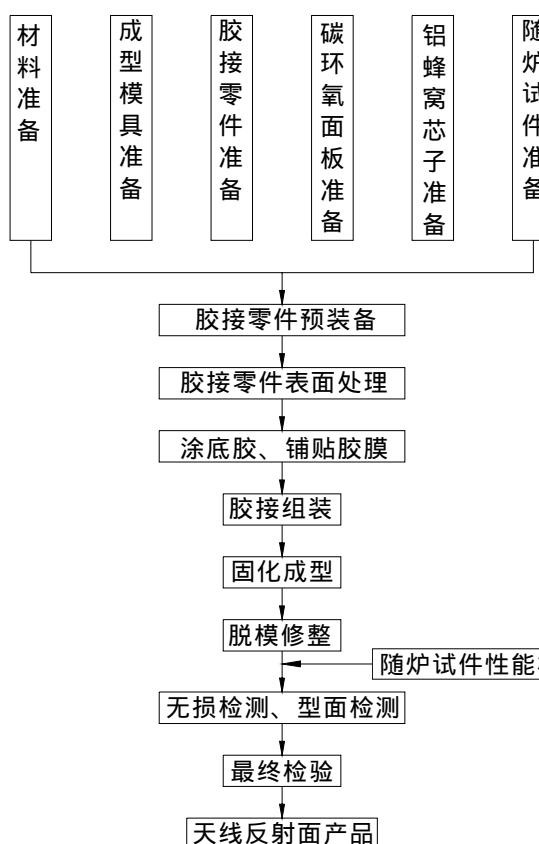


图 3 反射面的制造工艺流程

3.2 选材和材料特性分析

由于抛物面天线反射面必须能够反射电磁波，蜂窝夹层结构复合材料中面板材料必须由导电材料制成。碳纤维具有良好的导电性能，而且具有良好的力学性能且沿高模量碳纤维轴向的热膨胀系数为 $-0.7 \times 10^{-6}/\text{°C}$ ，而其垂直于纤维方向的热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 。它具有明显各项异性特点，可通过工艺设计，满足各种抛物面天线反射面的性能要求。实践表明碳纤维是天线面板材料的理想选择之一。Kevlar-49 纤维同样具有良好的力学性能。从结构性能角度考虑也是天线面板材料的理想选择。但由于其不导电，当用于天线反射面时，必须对其反射表面进行金属化处理。由此可知，抛物面天线的结构设计与所用材料性能有着密切的关系，而选用不同的材料会使抛物面天线的结构特性有很大的差异，为了满足某型号抛物面天线结构的设计要求，在进行了大量的材料性能试验的前提下，最终选用材料的性能测试结果列于表 1 至表 5 中。

表 1 碳纤维复丝力学性能测定结果

纤维类别	单丝直径/ μm	密度/(g/cm^3)	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂延伸率%
M40-3000-40A	6.5	1.85	2390	370	0.72
M40-3000-40B	6.5	1.85	2210	393	0.62

表 2 环氧 648/三氟化硼单乙胺浇注体性能

内 容	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	泊松比	热膨胀系数 $1/\text{°C}$
性能	34.3	3.04	0.28	28×10^{-6}

表 3 J-47B+C 与 J-47D 泡沫胶力学性能测定结果

J-47B+C 中温固化结构胶	J-47D 泡沫胶
室温胶接剪切强度	28.0 MPa
80 胶接剪切强度	19.3 MPa
室温板—板剥离强度	28 N/cm

表 4 J-133 室温固化胶粘剂性能测定结果

胶 名	室温胶接剪切强度	80 胶接剪切强度
J-133 室温固化胶	29.3 MPa	15.4 MPa

表 5 蜂窝芯性能测定结果

蜂窝规格	蜂窝节点强度	平压强度	平压模量
0.03 × 4	15.7 N/cm	0.42 MPa	120 MPa

除此之外，根据结构设计对 M40/环氧 648 面板铺层设计和分析要求，对 M40/环氧 648 单向层板工程常数测定结果，见表 6。

表 6 M40/环氧 648 单向层板工程常数测定结果

项目	试验值	试验方法	项目	试验值	试验方法
0 °拉伸强度 σ_{1T}/MPa	1090 (4.1%)	GB3354	90 °拉伸强度 σ_{2T}/MPa	26.5 (11.9%)	GB3354
0 °拉伸模量 E_{1T}/GPa	206 (5.6%)	GB3354	90 °拉伸模量 E_{2T}/GPa	9.02 (9.2%)	GB3354
0 °拉伸泊松比 ν_{12}	0.30 (11.1%)	GB3354	0 °压缩强度 σ_{1C}/MPa	925 (6.4%)	GB3856
± 45 °面内剪切强度 τ_{12}/MPa	47.8 (7.8%)	GB3355	90 °压缩强度 σ_{2C}/MPa	102.9 (8.6%)	GB3856
± 45 °面内剪切模量 G_{12}/GPa	7.8 (10.6%)	GB3355	纤维体积含量 %	57.8	重量法

3.3 M40/环氧 648 单向板纵向热膨胀系数检测

M40/环氧 648 单向板纵向热膨胀系数检测参照 QJ1522-88《刚性固体低温线性热膨胀系数测试方法》进行，检测试样的外形尺寸 $60 \text{ mm} \times 20 \times \text{mm}$ $20 \times \text{mm}$ 。

检测装置见图 4，试样放置在石英内管和外管之间，外管被固定，内管与示差装置相联。测试装置放入温度场中。首先记录下室温状态下的长度，然后以 1 ± 0.2 的升温速度对试样加热，记录温度 T 与其相应杆件的膨胀量 ΔL ，直至所需温度。热膨胀系数计算公式为：

$$\alpha_{L_{t1-t2}} = \frac{\Delta L}{KL_0 \Delta t} + \alpha_{\text{石英}}$$

其中 K 为试样伸长测量装置的放大倍数。

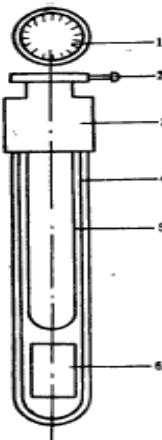


图 4 石英管示差法热膨胀装置示意图

1-指示器；2-固定螺丝；3-连接杆；4-石英外管；
5-石英内管；6-试样

实测 M40/环氧 648 单向板纵向热膨胀系数为 $-0.26 \times 10^{-6}/$ 。

根据单向板检测出热膨胀系数和复合材料热膨胀系数计算公式，可按产品结构特点、热膨胀性能要求选择不同的纤维增强材料和树脂基体材料含量和各种铺层形式，充分发挥各向异性特性，可以组成不同热膨胀性能纤维增强复合材料，这给卫星天线工艺设计优化提供了更大自由度。

3.4 天线面板铺层分析

在传统的蜂窝夹层结构复合材料天线反射面中，碳纤维通常以制备成预浸无纬布或平纹织物预浸料使用。由于面板和蜂窝芯子各异性容易造成反射面在外载荷下产生翘曲变形，所以反射面面板一般按准各向同性铺层设计要求进行选择。预浸无纬布一般选择以 $[0/\pm 45/90]T$ 或 $[0/\mu 45/90]T$ 铺层形式，平纹碳布选择 $[0/45]T$ 铺层形式。蜂窝夹层结构还应设计研制成沿中面对称铺层。一般情况下正六边形的蜂窝芯子的各向异性对反射面型面精度的影响是不可忽略的。在研制中一般采取将蜂窝芯子加工成分片结构，然后在专用型面模具上将各片蜂窝芯子进行拼接，其蜂窝夹层结构纵向热膨胀系数为 $1.62 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，横向热膨胀系数为 $1.84 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

3.5 反射面的重量控制

卫星结构对天线分系统重量有严格要求，抛物面天线反射面的研制过程中一个重要的内容是在保证其型面精度和尺寸稳定性的前提下，尽可能减少抛物面天线反射面的重量，主要控制如下内容：

- a 为减少抛物面天线反射面在制造过程中和在轨温度环境下的变形，如采用平纹织物，至少需2层平纹织物布；如采用预浸无纬布至少需4层，以保证其准各向同性铺层形式。
- b 抛物面天线结构的面板与蜂窝芯子之间采用中温固化结构胶粘剂胶接，一般均采用底胶和胶膜。为严格控制反射面重量，应对胶膜的厚度要求和底胶用量加以严格控制。
- c 为确保反射面的结构刚度，通过优化选择蜂窝芯子的规格和高度来控制反射面的重量。
- d 为了减小反射面不同部位在轨温度梯度，必须采取热控措施，为此还应严格控制热控材料或零件的使用重量。

3.6 反射面的成型模具

抛物面天线结构中面板与蜂窝芯子胶接通常采用中温（120 ~ 130 $^\circ\text{C}$ ）固化结构胶粘剂体系与其脱模温度（室温）存在较大差异。若固化成型工艺过程中使用模具材料热膨胀系数较大，则会造成反射面加工中较大的残余变形，故对一般精度要求的反射面可采用铸铁模具，对精度要求高的反射面则应采用殷钢或复合材料模具。

4. 结语

卫星天线被人们比喻为其耳目，为了提高卫星天线性能，减少信号损失，对卫星运行过程中天线反射面的型面精度和尺寸稳定性提出了严格的要求。通过本研究工作，从卫星天线的结构设计、制造工艺过程等内容分析表明充分利用复合材料轻质高强、可设计性的特点，进行合理选材、制定合理可行的工艺方案和性能控制规范，为卫星天线反射面的型面精度和尺寸稳定性的要求保证奠定了基础。由我所研制的某型号卫星蜂窝夹层结构复合材料抛物面天线严格按工艺技术流程开展各项工作，严格进行工艺过程中质量控制，其产品的型面精度可控制在均方根差精度为 0.2 mm，研制成功产品经受多次飞行试验考验，各项技术指标均达到设计要求，为我国卫星蜂窝夹层结构复合材料抛物面天线的研制和应用做出了贡献。

参考文献

1. 袁家军 卫星结构设计与分析 中国宇航出版社 2004
2. R.A.stonier 13th National SAMPE Technical Conference October 13-15 1981
3. 欧洲航天局编 丁惠梁、沈真等译 空间结构用复合材料设计手册 航空航天部第四研究院 1992
4. 赵稼祥 碳纤维的现状与新进展 材料工程 1997 ;(12)

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>