

星载微带相控阵天线游离板结构设计

韦娟芳 梁新海 范乃康 王勇

(西安空间无线电技术研究所空间微波技术国家级重点实验室,西安 710000)

摘要 文章针对星载微带相控阵天线的结构,首先对非对称蜂窝夹层板加边框、非对称板加平衡铜箔层以及对称蜂窝夹层板三种阵面设计方案进行了分析、总结,指出了三种方案的不足之处。然后介绍了游离板设计的原理,建立了单板的有限元模型,进行了加工成型变形和在轨热变形分析。根据星载微带阵天线的结构指标要求,通过分析比较,得出游离板设计方案具有热变形最小、可以满足星载微带阵天线的结构性能指标的结论。

主题词 天线 复合材料 有限元法 热变形 结构设计

0 引言

大型星载微带阵天线一般由多块子阵板构成,发射时折叠,在轨展开。每块天线子阵由电气板、结构板和微波传输馈线(TEM线)组成。电气板由上层铜箔辐射单元、中间铜箔单元和下层铜箔地层组成;结构板为碳纤维铝蜂窝板,主要提供一定的结构刚度。电气板和结构板的截面示意图如图1所示。天线阵面表面的铜箔单元分布如图2所示。

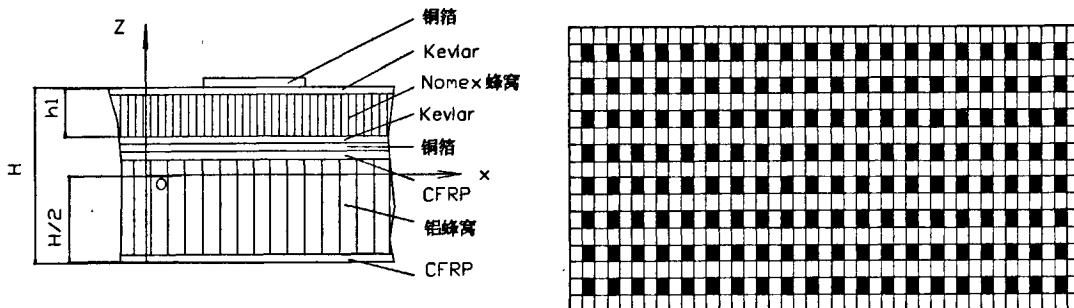


图1 微带阵天线板结构示意图

图2 微带阵天线表面的铜箔单元

天线板相对于几何中心面是非对称的,根据层合板的理论,非对称板存在拉伸-弯曲耦合效应^[1],即在面内载荷作用下,板也会发生弯曲。电气板的表面铜箔单元、中间铜箔单元和地层铜箔的热膨胀系数都很大,在温度变化时,电气板的热变形会成为结构板弯曲的一个重要因素。根据不同波长,可以确定变形的最大限度。按照天线使用频段,要求在轨变形小于25mm。按照总误差的平方等于分误差的平方和,分解得出天线阵面的机械变形和热变形均要求峰-峰值小于17mm。

为了减少电气板固化成型后的机械变形和热变形,要进行天线板结构的铺层设计和结构优化。优化分析的判据是根据热变形和刚度是否能够同时满足指标要求。

1 三种天线板结构方案

1.1 抗变形边框方案

在一定的温度环境变化范围内,调整板的截面铺陈结构,可以获得不同的热变形量值。为了降低天线板的热变形,首先针对图1所示的微带阵结构,结合铜箔单元厚度和其他材料的机械性能参数,进行了铺层材料厚度优化设计,设计后各层材料的厚度如下:

- (1) 铜箔辐射单元(不连续): $t = 0.1\text{mm}$
- (2) Kevlar 布(两层): $t = 0.2\text{mm}$
- (3) Nomex 蜂窝芯子: $t = 6.0\text{mm}$
- (4) Kevlar 布(两层): $t = 0.2\text{mm}$
- (5) 连续铜箔地层: $t = 0.1\text{mm}$
- (6) CFRP 单向带(两层): $t = 0.26\text{mm}$
- (7) 铝蜂窝芯子: $t = 15.8\text{mm}$
- (8) CFRP 单向带(两层): $t = 0.26\text{mm}$

对于缩比尺寸板($2100\text{mm} \times 1450\text{mm}$,单元分布为 5×8 ,见图3),分析了当温度从 120°C (固化温度)到室温 20°C 的加工成型变形,热变形分析结果达到了 36.5mm ,均方根达到了 9.1mm (RMS),这样大的变形无法满足天线的要求。为了降低热变形,首先借鉴日本的JERS-1卫星天线板的设计方案,提出在此板四周加边框,边框的结构如图4所示,边框材料为碳纤维铝蜂窝板,边框的上表面与电气板平齐,下表面比结构板要上移一个间距 δ ,目的是使在连接处,板与边框的拉-弯耦合阵相互抵消,这样可以使热变形最小。

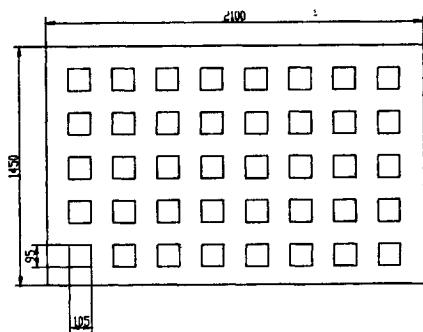


图3 缩比天线板(5×8 子阵)

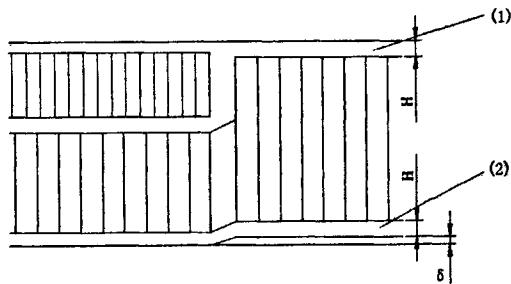


图4 边框的结构示意图

计算结果:若边框厚度 $H = 0.25\text{mm}$ 则 $\delta = 4.0\text{mm}$;若 $H = 0.3\text{mm}$ 则 $\delta = 3.3\text{mm}$ 。

按照上述计算结果加工的板,由于只是边缘的拉弯耦合刚度阵为零,而内部的拉弯耦合刚度阵仍然存在,因此实际加工的板的变形仍然很大,达到了20多毫米,证明此方案不可行。

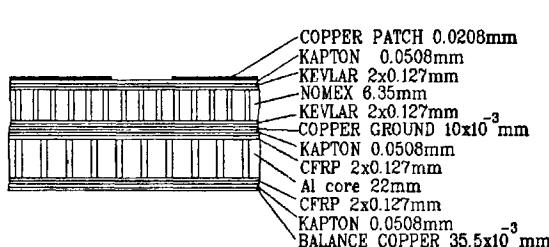


图5 非对称板加平衡层铺层图

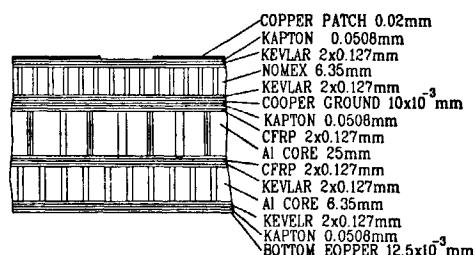


图6 对称板结构铺层图

1.2 非对称板加平衡层方案

非对称板加平衡层方案指仍采用常规的非对称结构,但为了平衡表面铜箔单元层引起的热变形,在底层加了一层铜箔,其铺层方式如图5所示。对平衡层铜箔的厚度进行了优化,目的是使其热变形最小。4种不同厚度平衡铜箔的分析结果列于表1。从表中可以看出铜箔的最佳厚度为0.035mm,板的尺寸为3500mm×1800mm。

表1 非对称结构板的热变形分析结果

平衡铜箔厚度(mm)	120℃~20℃(mm)	单板质量预算(kg)
$H=10\times10^{-3}$	20.9	25.33
$H=15\times10^{-3}$	16.5	25.71
$H=30\times10^{-3}$	4.44	26.54
$H=35\times10^{-3}$	0.5	26.84

由于铜箔的厚度很薄,加工时很难保证铜箔的厚度一致,因此会有误差。为了分析非对称结构的稳定性,将平衡层铜箔的厚度变化±10%,进行了敏感性分析,分析结果见表2。由表2的分析结果可以看出,当厚度波动时,单板的热变形达到了3.98mm,说明非对称板加平衡层方案具有加工的不稳定性,在工程上不可行。

表2 非对称结构板的敏感性分析结果

平衡铜箔厚度偏差	120℃~20℃(mm)	单板质量预算(kg)
$H+10\%$ 误差	3.98	26.73
$H=35\times10^{-3}$ mm	0.5	26.84
$H-10\%$ 误差	-3.35	26.95

1.3 对称板结构方案分析

一种最直接的优化方案是在非对称板的下方再多加一层Kevlar/Nomex蜂窝板,使截面成为一个对称的结构。在此对称结构最下面一层表面仍然加起平衡作用的铜箔层,其厚度根据均匀温度变化时变形最小的原则确定。分析得出最佳厚度为 12.5×10^{-3} mm,具体截面铺层结构如图6所示。分析了加工成型变形,也分析了在轨时板上、下表面有温差的情况,分析结果列于表3。从分析结果可以看出,虽然对称板对于均匀温度场变化较非对称板加平衡层方案改善一半以上,但对于上、下表面有温差的梯度工况,变形仍然达到4.59mm,因此,此方案仍然不可行。

表3 对称板结构的热变形分析结果

平衡层铜箔厚度偏差	120℃~20℃(mm)	20℃~60℃(下) ~30℃(上)(mm)	20℃~60℃(下) ~90℃(上)(mm)
$H+10\%$ 误差	-1.95	-3.35	4.59
$H=12.5\times10^{-3}$ mm	-0.39	-3.85	3.81
$H-10\%$ 误差	1.77	-4.36	3.03

2 游离板结构设计方案

结构板与电气板通过柔性件连接,每个柔性件刃片的法向均指向电板小分块的中心点,以使电气板可以相对于结构板自由热膨胀。电气板和结构板除了用柔性件连接外,还有刚性件连接,刚性件电气板的几何中心如图7、图8所示。

刚性件的作用是提高结构板和电气板的连接刚度,因此截面积较大。同时,刚性件位于结构板的中部,柔性件在刚性件周围沿圆周的切向分布。柔性件沿半径方向弯曲的柔度很好,可以释放电气板



图 7 刚性件、柔性连接件分布图

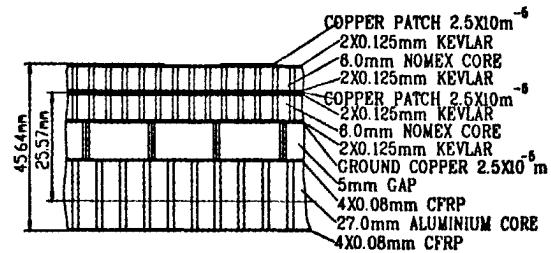


图 8 游离板结构铺层图

由于铜箔热胀冷缩产生的变形。同时柔性件沿切向的弯曲刚度也很好,可以提高结构板与电气板的连接刚度,使天线板的刚度满足天线收拢状态基频的要求。

根据表 4 列出的天线板在轨展开后的实际工作温度,计算了单板自由热膨胀的变形,结果如表 5 所示。从分析结果可以看出,最大变形为 2mm,满足了单板热变形小于 3mm 的指标要求。游离板结构在空间低温下的变形图见图 9。

表 4 游离板结构热变形分析结果

温度工况	电气板底部	电气板顶部	结构板底部	结构板顶部	热变形
最差高温工况	0.0°C	-3.0°C	41.0°C	42.0°C	0.5 mm
最差低温工况	-50.0°C	-51.0°C	16.0°C	-16.0°C	2.0 mm

3 结束语

星载微带阵天线板在非对称结构方案、加边框结构方案、加平衡铜箔层方案及对称板结构的基础上,最终选择电气板和结构板采用游离件连接的方案。这个方案在后续试验中证明了其热变形确实很小^[2],满足了该天线的电性能要求。

参考文献

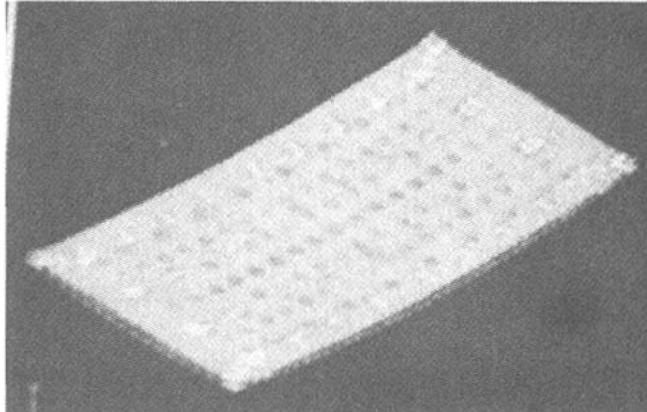


图 9 游离板在轨低温工况下的热变形

- 1 韦娟芳. 非对称蜂窝夹层板的热分析. 空间电子技术, 1993(2)
- 2 韦娟芳, 关富玲, 赵人杰等. 星载微带阵天线的热变形分析及试验验证. 中国空间科学技术, 2002(6)

作者简介

韦娟芳 1964 年生,浙江大学工学博士,研究员,博士生导师。主要研究方向为空间天线结构分析及结构实验技术。

梁新海 1962 年生,西安电子科技大学工学学士,研究员。主要研究方向为空间天线总体设计及结构设计技术。

范乃康 1968 年生,哈尔滨工业大学工学学士,高级工程师。主要研究方向为空间天线结构设计技术。

王 勇 1975 年生,东北大学工学学士,工程师。主要研究方向为卫星有效载荷系统工程及集成技术。

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>