0254-6124/2014/34(6)-894–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Fan Wenjie, Li Xiaopeng, Chen Bo. Structure design and thermal deformation analysis of large spaceborne flat slotted antenna (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 894-898, doi:10.11728/cjss2014.06.894

星载大型平板缝隙天线结构设计及热变形分析*

范文杰 栗晓鹏 陈 博

(中国科学院空间科学与应用研究中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

摘 要 以空间应用需求日益广泛的大型平板缝隙天线为研究对象, 介绍了其结构组成. 为减小天线热变形, 对天线外侧 4 个安装角的连接方式做了改进设计, 并在极高温和极低温两种工况下进行热变形分析, 得到改进前后两个方案的变形结果. 在极高温工况下, 天线阵面 Y 向热变形均方根值从改进前的 0.52 mm 减小到 0.3 mm; 在极低温工况下, 天线阵面热变形均方根值从改进前的 0.35 mm 减小到 0.1 mm. 结果表明改进后的方案满足设计要求, 从而确保了天线在轨电性能的指标.

关键词 热变形, 平板缝隙天线, 结构设计

中图分类号 V 414, TP 391.72

Structure Design and Thermal Deformation Analysis of Large Spaceborne Flat Slotted Antenna

FAN Wenjie LI Xiaopeng CHEN Bo

(*Key laboratory of microwave remote sensing, Center for Space Science and Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Large spaceborne flat slotted antennas recently boom rapidly in the field of space applications. The structural element of large flat slotted antenna is introduced. A new connected scheme of antenna is put forward and unidirectional floating fixing method is applied to outside four flange of antenna. This fixing method could ensure that antenna move along one certain direction freely when temperature rises or drops. Thermal deformation is analyzed in ultimate high temperature and ultimate low temperature. The results are thermal deformation RMS value in Y direction decreases from 0.53 mm to 0.3 mm in ultimate high temperature and decreases from 0.33 mm to 0.1 mm in ultimate low temperature. It shows that the thermal deformation RMS values satisfy the design requirements on board, so electrical performance can be assured.

Key words Flat seam antenna, Heat deformation, Structure design

* 空间科学预先研究项目资助 (XDA0407970002)

2013-12-04 收到原稿, 2014-02-25 收到修定稿

E-mail: fanwenjie@mirslab.cn

0 引言

随着无线通信技术的广泛应用和发展, 作为无线通信中发射与接收器件的天线, 其性能显得日益重要. 在移动通信系统和观测卫星运用中, 为提高天线的抗干扰性能, 往往要求其具有窄波束低副瓣或极低副瓣的性能, 缝隙天线是实现此项要求的优选形式 [1−3]. 目前中国尚未有大型平板缝隙天线在轨运行的实例, 航天器设备在入轨后要经受高低温的考验, 天线阵面将会产生一定形变, 进而影响到天线的电性能指标 [4]. 天线热变形的试验测量和实施具有很大局限性, 因此热变形仿真分析显得尤为重要. 本文介绍了大型平板缝隙天线的结构组成, 对天线的安装角采取游离设计, 热变形分析结果表明, 天线在轨热变形均方根值满足小于 0.35 mm 的设计要求.

1 平板缝隙天线结构

如图 1 所示, 天线整体结构由天线反射面、背板、支架、支架连接角条及波导组成.

天线反射面尺寸为 1200 mm×400 mm, 图 2 所示为天线阵面, 阵面上开有 1180 个矩形缝隙. 阵面材料为防锈铝合金 3A21. 为减小高低温工况下的天线热变形, 天线背板及支架材料采用碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层结构, 起连接支撑作用, 蒙皮由碳纤维环氧单向带制成, 铝蜂窝规格为 4 mm (边长) ×0.05 mm (壁厚); 支架连接角条材料为硬铝合金 2A14, 起连接支撑作用. 图 2 为天线俯视图, 从中可以看到阵面上的缝隙阵, 共有 1180 个矩形缝隙, 每个缝隙的尺寸为 10 mm×2 mm.

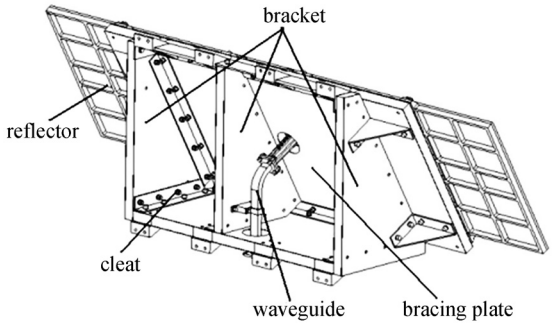

图 1 天线结构组成

Fig. 1 3D model of antenna structure element

天线阵面与支架背板 8 个安装点的常规连接方式如图 3(a) 所示, 为减小金属阵面在高低温工况下的热变形, 对外侧 4 个安装点 (图 2 中圆圈标注的 4 个安装角) 进行了改进, 图 3(b) 所示为改进后的游离方案, 支撑套将垫片与天线安装角上表面之间支起约 0.05 mm 的间隙, 并在安装角上下表面各增加一个 MoS_2 润滑垫片.

2 平板缝隙天线有限元模型

有限元模型如图 4 所示, 为更准确地模拟实际天线结构, 反射面、背板、支架、连接角条、波导等均用壳单元离散, 各部件间的螺接采用刚性单元模拟. 复材板的蒙皮按照实际铺层顺序及各层纤维方向角和厚度定义, 芯子材料用二维正交各向异性材料赋予材

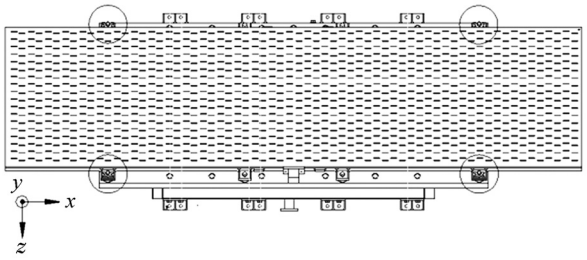

图 2 天线缝隙阵面

Fig. 2 Slotted array of antenna

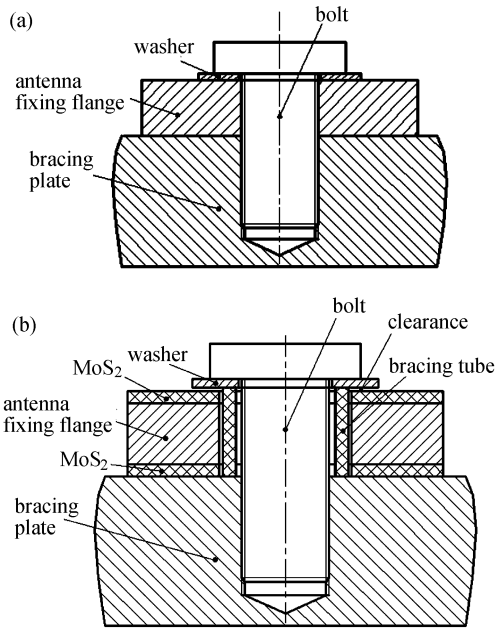

图 3 天线安装角固定方案

Fig. 3 Diagram of antenna fixing flange

料属性. 预埋件质量采用集中质量模拟, 添加在实际位置上.

天线阵面与支架背板外侧的 4 个安装点采用两种方式建模, 分别模拟采用和未采用游离措施的两种方案.

3 天线在轨热分析

β 角为太阳入射光线与卫星轨道面的夹角, 其是卫星各面外热流情况的主要决定因素. 依据在轨情况, β 角最大为 65°, 此时为整星的低温工况; β 角最小为 10°, 此时为整星的一般高温工况; β 角为 30° 时是整星的高温工况. 表 1 列出了天线热分析结果中极端高温和极端低温的温度分布.

4 天线在轨热变形分析

依据天线在轨热分析结果, 选取极端高温和极端低温两个最恶劣的瞬时工况进行热变形分析, 同时还对采用游离方案后的热应力分布情况进行了分析.

4.1 极端高温工况

在极端高温工况下, 未采用游离方案时, 天线最大变形为 1.49 mm, 位于天线阵面一端, 如图 5(a) 所示; 采用游离方案后, 天线最大热变形为 0.81 mm, 如图 5(b) 所示.

采用游离方案后, 天线阵面最大应力 84.7 MPa, 安全裕度为 0.1, 应力分布如图 6 所示. 天线金属支

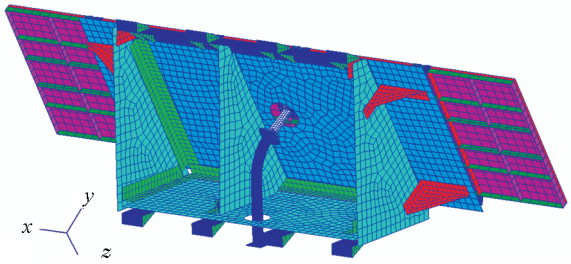

图 4 天线结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of antenna

表 1 极高温和极低温时天线温度分布

Table 1 Temperature distribution in ultimate high temperature and ultimate low temperature

	极端高温工况/(°C)	极端低温工况/(°C)
天线整体温度分布	40.46~59.51	−29.87 ~3.869
天线阵面温度分布	56.81~59.51	0.461~3.869
支架温度分布	44.94~57.11	−19.47 ~ −1.399
波导温度分布	40.46~54.17	−29.87 ~ −1.871

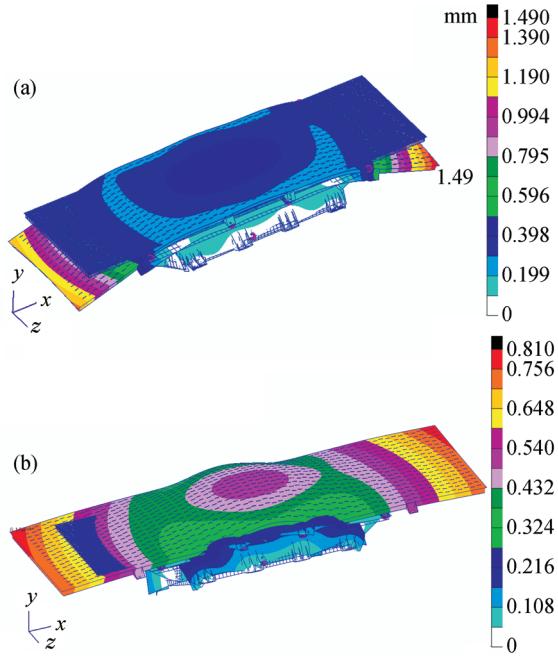

图 5 极端高温工况天线结构变形云图

Fig. 5 Deformation contour of antenna in ultimate high temperature

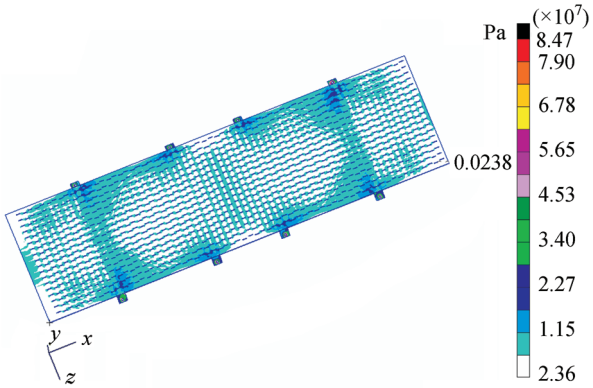

图 6 极端高温工况下天线本体应力分布

Fig. 6 Stress distribution of antenna in ultimate high temperature

架部分最大应力为 180 MPa, 安全裕度为 0.8, 如图 7 所示. 复材支架最小安全裕度为 0.96, 裕度分布如图 8 所示.

4.2 极端低温工况

在瞬态低温工况下, 未采用游离方案时, 天线最大变形为 1.37 mm, 位于天线阵面的一端, 如图 9(a) 所示; 采用游离方案后, 天线最大热变形为 1.1 mm, 如图 9(b) 所示.

采用游离设计方案后, 天线阵面应力分布如图 10 所示, 最大应力为 58 MPa, 强度余量为 0.4. 天线支架金属部分最大应力为 166 MPa, 强度裕度为 0.7, 如图 11 所示.

瞬态低温工况下, 复材支架最小安全裕度为 1.2, 裕度分布如图 12 所示.

为更全面了解天线热变形情况, 取阵面上 27051 个样本点分别计算沿三个坐标轴方向的阵面热变形均方根值, 结果列于表 2.

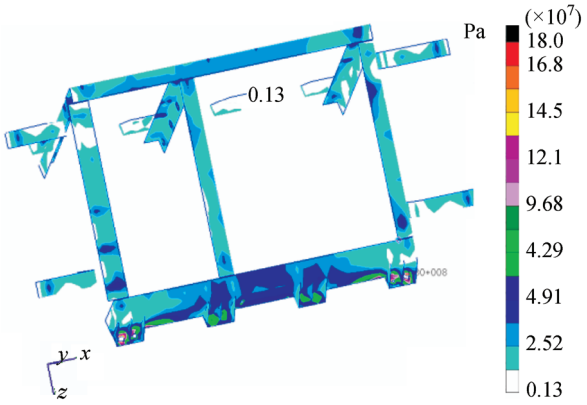

图 7 极端高温工况下天线角条应力分布

Fig. 7 Stress distribution of antenna cleat in ultimate high temperature

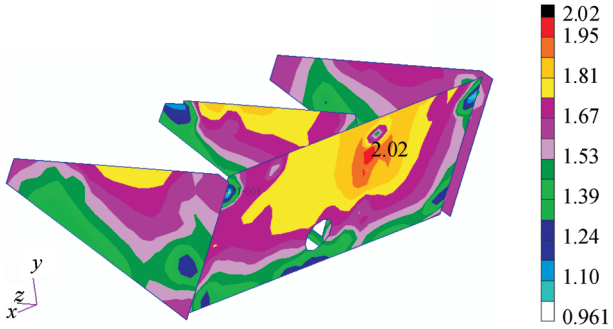

图 8 极端高温工况复材支架安全裕度

Fig. 8 Safe margin of composite brace in ultimate high temperature

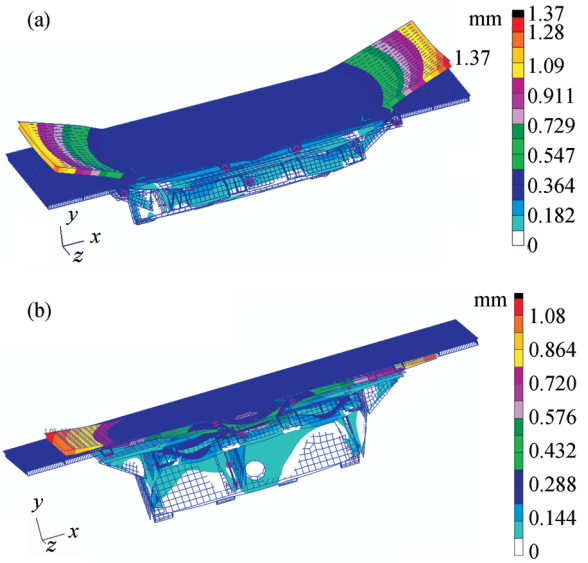

图 9 极端低温工况变形云图

Fig. 9 Deformation contour of antenna in ultimate low temperature

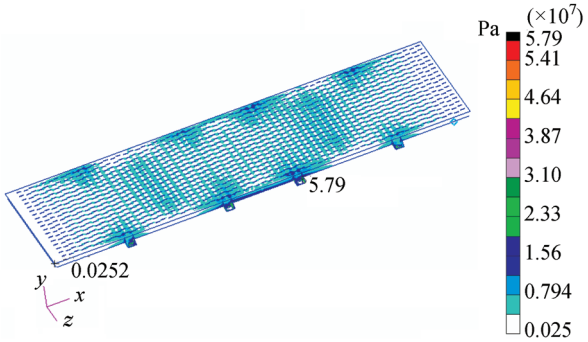

图 10 极端低温工况阵面应力分布

Fig. 10 Stress distribution of array in ultimate low temperature

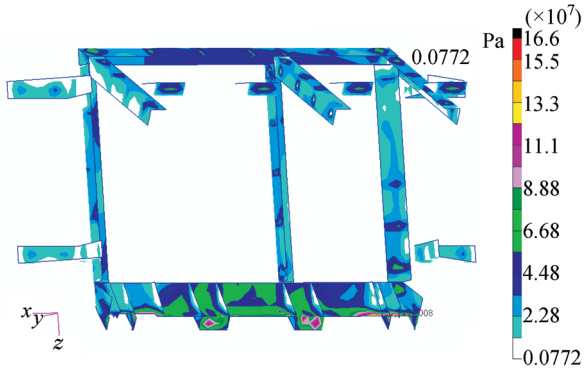

图 11 极端低温工况天线角条应力分布

Fig. 11 Stress distribution of antenna cleat in ultimate low temperature

从表 2 计算结果可以看出, 采取改进的游离设计方案后, 天线阵面 Y 向热变形均方根值有较为明显的改善, 能够满足天线在轨阵面热变形均方根值小于 0.35 mm 的要求.

5 结论

随着星载大型平板缝隙天线应用需求的增加, 对其在轨热变形的研究也愈加迫切. 由于其材质为金属, 尺寸较大, 因此在轨热变形的影响不容忽视. 本文以某大型平板缝隙天线为研究对象, 介绍了其结构组成, 提出了减小热变形的游离方案, 并对采取该方案前后的变形情况进行比较. 天线在极端高温工况下 Y 向热变形均方根值减小 0.22 mm, 在极端低温工况下 Y 向热变形均方根值减小 0.23 mm. 分析结果表明, 采用游离方案后天线在轨热变形 RMS 值满足设计要求, 强度裕度也满足要求. 所提出的天线热变形游离设计方案可以推广应用于各类星载天线的热设计中.

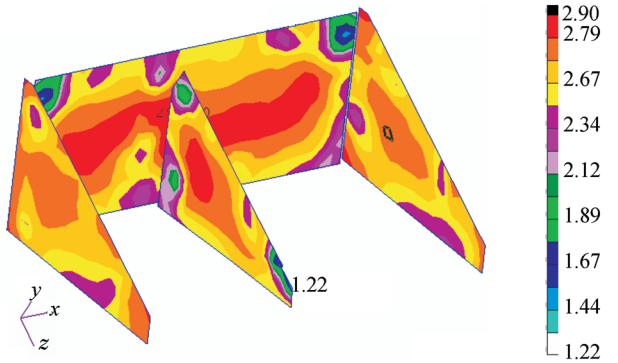

图 12 极端低温工况复材支架安全裕度

Fig. 12 Safe margin of composite brace in ultimate low temperature

表 2 天线阵面热变形均方根值

Table 2 Antenna array heat deformation RMS

	阵面各向热变形均方根值/mm					
	未采取游离方案			采取游离方案后		
	X	*Y*	*Z*	X	Y	Z
瞬态高温	0.29	0.52	0.1	0.28	0.3	0.11
瞬态低温	0.15	0.35	0.06	0.14	0.1	0.07

参考文献

[1] Zhao Huaicheng, Wu Xidong, Wu Weng. Design method of large millimeter-wave waveguide slot array [J]. *J. Nanjing Univ. Sci. Technol.: Nat. Sci.*, 2010, **34**(1):113-116. In Chinese (赵怀诚, 吴锡东, 吴文. 大型毫米波波导缝隙天线阵设计方法研究 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2010, **34**(1):113-116)

[2] Wang Wenxiu, Wang Jian, Peng Zhongwei. Analysis and design of Ka-band monopulse large waveguide longitudinal slot array antenna [J]. *Res. Progr. SSE*, 2013(1):57-62. In Chinese (王文秀, 王建, 彭中卫. Ka 波段大型单脉冲平板缝隙天线的分析与设计 [J]. 固体电子学研究与进展, 2013(1):57-62)

[3] Li Long, Zhang Yu, Li Jianying, Liang Changhong. Analysis and design of large waveguide longitudinal slot in Chinese arrays [J]. *J. Microwaves*, 2002(1):11-14. In Chinese (李龙, 张玉, 李建瀛, 梁昌洪. 大型波导纵缝阵列天线的分析与设计 [J]. 微波学报, 2002(1):11-14)

[4] Yang Yulong, Guan Fuling. Thermal-structural analysis of deployable truss antenna [J]. *Chin. J. Space Sci.*. 2005, **25**(3):235-240. In Chinese (杨玉龙, 关富玲. 可展桁架天线温度场与热变形分析 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(3):235-240)