

高精度伞状天线热设计优化及热平衡试验验证^①

王波,程建,徐向阳,张建波,王耀霆

(中国空间技术研究院西安分院,西安 710000)

摘要:高精度伞状天线温度场影响天线在轨运行型面精度,而天线肋组件作为天线型面保持最重要的部件,其热控设计合理性对保证天线在轨正常工作尤为关键。通过对天线肋组件采取保温、加热设计,在热控实施过程中控制影响漏热的主要因素,使得天线肋温度满足在轨使用要求,通过整机热平衡试验验证了天线肋热设计的合理性。

关键词:高精度伞状天线;热设计;热平衡试验

中图分类号:TN98 文献标识码:A 文章编号:1674-7135(2020)06-0044-04

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2020.06.008

Thermal Design Optimization and Test Verification of High Accuracy Umbrella-like Antenna

WANG Bo, CHENG Jian, XU Xiangyang, ZHANG Jianbo, WANG Yaoting

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: The temperature field of reflector affects the high accuracy umbrella-like antenna in space. As the main part of antenna surface, the thermal control design of antenna rib assembly is very important. Through the thermal insulation and heating for antenna rib, the main factors affecting heat leakage are controlled in the process of thermal implementation, so that the temperature of antenna rib can meet the requirements of on orbit use. The rationality of thermal design of antenna rib is verified by thermal balance test of the whole antenna.

Key words: High accuracy antenna; Thermal design; Thermal balance test

0 引言

大型可展开天线是实现很多例如遥感、中继、深空探测、测控等空间任务卫星的重要载荷,随着用户电性能要求的提高,此类天线在轨工作的型面精度要求也越来越高。在空间冷背景(约 -269°C)和各种复杂外热流(太阳直射、地球反照和地球红外)等共同作用下,在轨运行的天线处于周期性的冷热交变中^[1]。如果天线热设计不合理,将会导致天线产生较大的热变形,从而影响在轨工作性能,尤其是对热变形精度要求较高的天线。控制天线在轨热变形最直接的手段是通过热控设计缩小天线关键部件的

在轨温度范围及温度梯度,国内外学者对此类天线热控设计^[2]、仿真分析^[3],在轨热变形均作了大量的研究^[4]。

伞状天线是大型可展开天线其中的一种类型,其反射面主要由肋组件和索网组件构成,此类天线具有尺寸大、收纳比高、轻质、结构复杂等特性,同时这些结构特性决定了其在轨温度变化速率快,温度分布复杂,特别是在在轨受照条件下、天线各组件之间产生相互遮挡及温度影响,这种不规则且极端的热载荷使得此类型天线反射器在轨型面复杂多变。

对于高精度伞状天线,由于作为直接接收和反

^① 收稿日期:2020-07-31;修回日期:2020-10-28。

作者简介:王波(1982—),硕士,主要从事卫星天线热设计工作。E-mail:bobo906@163.com

射电磁波的金属网无法进行任何表面处理(包括喷白漆、包多层等常用热控措施),肋组件热设计的合理性直接影响天线在轨型面稳定及正常工作。通常认为卫星在运行至地影处(最长约72min)会对舱外部件,尤其是天线造成整体低温,从而影响到天线型面精度。而星体对天线的遮挡作用也不应忽视,其对天线部分位置,尤其是影响型面精度的部件也会产生长时间的遮挡作用,造成天线反射器上出现更低的温度及更大的温度梯度。同时,通过对高轨卫星平台上的高精度伞状天线进行在轨热分析及在轨热变形分析得出的结论,天线型面精度最恶劣的时刻通常处于在轨长时间受星体遮挡(约4h),反射面上产生的较大范围低温时刻。通过指标核算,天线在轨运行过程中温度范围保持在 -65°C 以上时才能满足使用要求。因此控制肋组件使其在轨受遮挡时温度保持在合理的范围至关重要。

本文对此类高精度伞状天线肋组件的热设计方案及控制措施进行了详细描述,并通过天线整机热平衡试验验证了热设计。

1 肋组件结构及热阻定义

肋组件主要由肋、肋板条和调节柱组成,其中肋板条用于安装金属网。在天线研制过程中,调节柱用于对天线型面进行调整,以满足天线型面精度的要求。出于轻量化设计及力学性能综合考虑,肋及肋板条均由碳纤维制成。

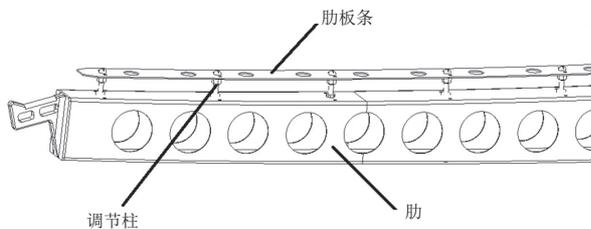


图1 肋组件示意图

Fig. 1 Rib assemble configuration

由于肋板条正面覆盖金属网,限于电性能的要求,其外表面不能覆盖多层这种有效缩小在轨温度的办法,因此调节柱作为肋与肋板条之间导热的通道,必须进行隔热设计。

肋和肋板条连接局部的示意图如图2所示。

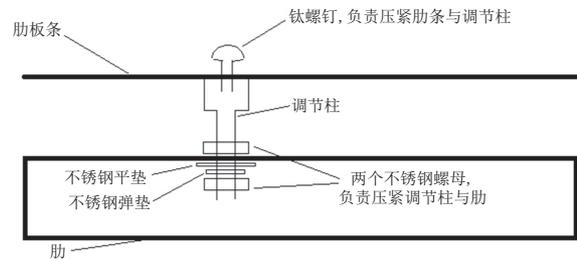


图2 肋组件热阻示意

Fig. 2 Thermal resistance of rib assemble

热阻的含义及计算公式如下:

R1:肋板条与调节柱的接触热阻:

$$R1 = (h_1 A_1)^{-1} \quad (1)$$

R2:调节柱的导热热阻(粗):

$$R2 = L_1 / (\lambda_1 A_2) \quad (2)$$

R3:调节柱的导热热阻(细):

$$R3 = L_2 / (\lambda_1 A_3) \quad (3)$$

R4:调节柱与上不锈钢螺母的接触热阻

$$R4 = (h_2 A_4)^{-1} \quad (4)$$

R5:螺母的导热热阻

$$R5 = L_3 / (\lambda_2 A_5) \quad (5)$$

R6:上不锈钢螺母与肋的接触热阻

$$R6 = (h_1 A_5)^{-1} \quad (6)$$

A_1 为肋板条与调节柱接触面积, A_2 为调节柱较粗部位截面积, A_3 为调节柱较细部位截面积, A_4 为调节柱与不锈钢螺母的接触面积, A_5 为螺母截面积。 λ_1 为调节柱导热系数, λ_2 为螺母导热系数。 L_1 为调节柱较粗部位长度, L_2 为调节柱较细部位长度, L_3 为螺母厚度。计算中压紧面之间的接触传热系数 h_1 取 $3500\text{W}/\text{m}^2\text{C}$, 螺母与螺钉间的接触传热系数 h_2 取 $1000\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 。

总热阻 $R_{\text{总}} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$

表1 三种调节柱材料的热阻计算结果

Table 1 Thermal resistance of different screw materials

热阻编号	铝合金 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	钛合金 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	聚酰亚胺 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
R1	0.07	0.07	0.07
R2	1.83	39.3	712.3
R3	8.46	182.0	3301.0
R4	53.2	53.2	53.2
R5	7.0	7.0	7.0
R6	14.2	14.2	14.2
R	84.6	295.8	4087.8

通过热阻计算表明,对肋与肋板条之间相互漏热影响最大的是调节柱的导热热阻,虽然聚酰亚胺的漏热影响最小,但是考虑到天线力学性能,最终选择钛合金作为调节柱的材料。

2 肋组件热设计优化

肋采用多层隔热组件进行整体包覆,考虑到肋上安装有调节柱、张力绳索等,多层的开缝处会产生漏热,在第一次天线整机的热试验中暴露出天线肋降温速率过快的问题,见下图3。肋的温度在2h内从20℃降至-100℃,而天线在轨地影时长达72min,个别肋由于星体遮挡时间可达约4h,可知多层漏热严重。通过单独肋组件的热平衡试验,此时多层的当量发射率 $\varepsilon_{\text{eff}}=0.5$,即多层已失去其保温能力。

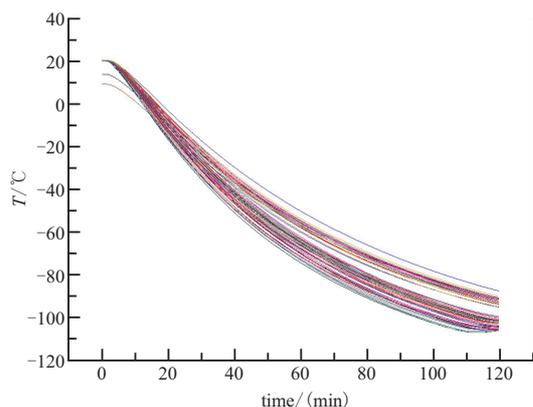


图3 热平衡试验天线肋降温曲线

Fig.3 Temperature curve of rib in thermal balance test

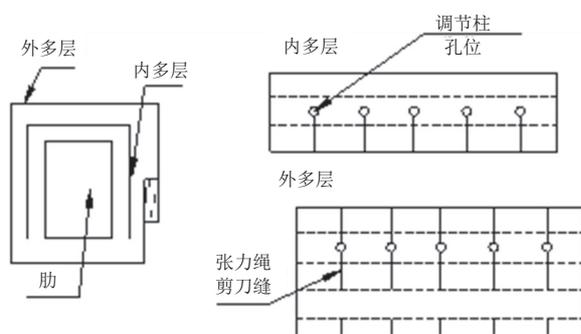


图4 肋多层设计示意图

Fig.4 MLI design of rib

为了减小多层漏热,肋上包敷的多层分为内(调节柱处开缝)、外(张力绳处开缝)两部分(每部分均为5单元),见图4。同时在包覆多层时将内、外两部分多层在张力绳、调节柱开口处错开,使得开缝被多层完全覆盖。为进一步确保肋在轨保持在合适的

工作温度,减小肋之间的温差,每根肋上安装的加热功率为5.5W的电缆加热器用于在轨温度调节。

为缩小肋板条在轨温差,在肋板条凹面用线缝上一层F46膜(膜面朝外),背面包敷5单元多层。

3 热设计优化后天线整机热平衡试验

在天线整机进行热真空试验中低温工况时关闭所有红外加热笼和其他加热工装,仅开启天线肋加热器直至温度平衡。通过天线肋降温曲线及可知,在降温4h后,天线肋的温度 $>-55^{\circ}\text{C}$,离指标要求的 -65°C 仍有 10°C 余量,即热控设计及实施过程控制满足性能要求,见下图5所示。

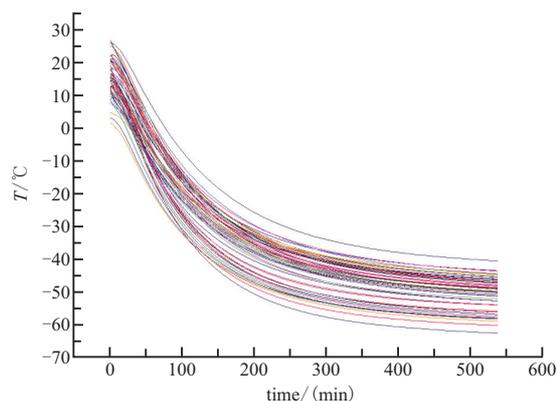


图5 热平衡试验天线肋降温曲线

Fig.5 Temperature curve of rib in thermal balance test

另外,肋在达到 -65°C 平衡温度时肋加热功率未饱和,见表2,说明天线肋的加热功率设计合理。

表2 天线肋达到温度平衡时使用功率

Table 2 Thermal compensation power of rib in different test case

工况	平衡温度 ($^{\circ}\text{C}$)	设计功率 (W)	达到温度平衡 时的功率(W)
1	-65	99	92.04
2	-65	99	93.92
3	-65	99	94.02
4	-65	99	92.82

4 结论

本文对高精度伞状天线肋的传热路径及热阻进行分析,采用“主动”加“被动”热控设计方法解决了高精度天线在轨严格的热控要求,结论如下:(1)调

节螺钉对天线肋的漏热有较大影响,在设计时应兼顾力学和热性能;(2)对于空间大型薄壁复杂结构上使用的多层隔热组件,由于开缝较多,边界漏热效应增大,应对其隔热性能进行试验验证,确保主动控温功率设计的正确性。

参考文献:

[1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991:1-18.

[2] Tsuyuki G, Reeve R. Galileo high-gain antenna deployment anomaly thermal analysis support [J]. Journal of ThermoPhysics and Heat Transfer, 1995, 9(4): 771-777.

[3] Marco Gottero, Enrico Sacchi, Lorenzo Scialino G, Sergey V. Reznik, Dmitry Yu. Kalinin. The Large Deployable Antenna(LDA), A Review of Thermal Aspects [C]//35th International Conference on Environmental Systems (ICES) Rome, 2005, 01: 2895.

[4] 陈志华, 关富玲. 星载抛物面天线热变形敏感性分析[J]. 工程设计学报, 2010, 17(4): 263-267.

著作权使用声明

本刊为万方数据电子出版社入选期刊,同时已被CNKI中国期刊数据库等其他数据库全文收录;其作者文章著作权使用费与本刊印刷版稿酬一次支付。

为适应我国信息化建设需要,扩大本刊及作者知识信息与学术交流渠道,本刊已与相关期刊数据库合作,尤其以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊所发表文章如作者没有特殊说明,将视为同意发表在数据库中。若作者不同意文章被数据库收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将作适当处理。

本刊编辑部