

文章编号:1001-893X(2012)07-1143-04

机载 0.45 m 卫星通信天线结构设计*

米宏伟¹, 常立新²

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081; 2. 总参信息化部驻石家庄地区军事代表室, 石家庄 050081)

摘 要:根据载机平台的工作模式和环境要求, 论述了机载 0.45 m 卫星通信天线的结构设计过程, 包括天线关键结构件的重量、几何尺寸、刚度强度等的优化设计, 采用有限元方法对天线结构模型进行了力学计算和仿真分析, 并通过实验进行了验证。研究结果表明, 优化设计后的天线结构各项特性均能满足设计要求。该研究结论可推广至其他机载天线的结构设计中。

关键词:卫星通信; 机载天线; 结构设计; 机载工作环境; 仿真分析

中图分类号: TN927; TN80 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.019

Structure Design of an Air-borne 0.45 m Satellite Communication Antenna

MI Hong-wei¹, CHANG Li-xin²

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China; 2. The Military Representative Office of The General Staff Department of Information in Shijiazhuang, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: According to the work mode and environment requirement of airplane platform, the process of an air-borne 0.45 m satellite communication antenna structure design is discussed, involving the optimization of weight, dimensions, stiffness and strength for the antenna's key structural parts. Mechanics calculation and simulation analysis of FEA(Finite Element Analysis) to the antenna structure model is performed, and the result is confirmed by experiment. The results show that all properties of the optimized antenna's structure components meet designed requirements. The conclusion can be of great significance to other airborne antenna structure design.

Key words: satellite communication; air-borne antenna; structure design; air-borne work environment; simulation analysis

1 引 言

0.45 m 卫星通信(简称卫通)天线项目系某型多用途载机首次安装如此大尺寸、高带宽的卫通天线, 国内尚无类似产品装备可参考, 并且其使用环境条件复杂, 这些都对天线结构设计提出了重大挑战。

天线结构设计过程重点考虑了各结构件在载机实际工作环境下的刚度、强度问题。其中许多关键部位的结构件, 起着支撑天线、固定通信馈线及执行

伺服驱动的作用, 同时承担和隔离载机产生的振动和冲击, 并实现天线的转动、定位和定向。天线结构件的刚度、强度、重量、转动惯量, 直接影响到天线系统的精度和可靠性^[1]。在天线结构整体设计阶段, 采用了 ProE 三维设计软件进行结构设计, 采用有限元法利用大型结构设计仿真软件 MSC.Patran/Nastran 对天线结构进行结构力学分析和仿真, 加强和优化主结构件关键部位。仿真和实验结果以及实际飞行使用效果显示, 天线的结构特性均能满足技术指标和使用要求。

* 收稿日期: 2012-04-11; 修回日期: 2012-05-28

2 系统和整机要求

根据系统要求,天线系统在飞行过程中要实现准确地手动/自动跟踪卫星功能,依赖于天线座结构应具有足够的刚度、强度和传动精度,以保证整个伺服系统的结构谐振频率,提高伺服带宽,增加系统的稳定性、动态响应和传动精度。此外,根据载机实际工作环境要求,在最大限度减轻载机负担(即减轻天线重量)的前提下,应采取合理布局的设计思路以优化结构设计,使天线在使用过程中能够排除和降低载机工作环境对其产生的不利影响,保证其可靠性,达到指标要求^[2]。

3 总体结构设计 with 优化

根据载机实际情况,在保证性能的前提条件下,要求天线的尺寸和重量到达最小,对此进行了大量的优化工作,使得0.45 m卫通天线外形安装尺寸(直径×高度)自最初方案提出的740 mm×600 mm(天线罩),重量约为50 kg,优化为700 mm×500 mm(天线罩),重量约为40 kg,如图1所示。其总体优化过程如下:天线的反射体为降低安装高度,放弃了传统的抛物面天线,采用了最新研发成功的低剖面波导阵列天线;座架则仍采用典型的方位-俯仰型结构以保证跟踪的可靠性;为了减轻重量,除关键传动部件采用40Cr合金钢外,其余结构件全部选用高强度轻质铝合金2A12-T4;由于铝合金螺纹连接处强度不够,且重复拆装性不好,参考已有航空设备安装措施,装入钢丝螺套以提高螺牙强度;天线与机体安装平台间装有隔振装置以降低机体振动带给天线的影响;天线罩为降低重量,在保证抗风强度的前提下,弃用传统的环氧玻璃布结构,采用最新的纸蜂窝夹层结构,大大降低了安装重量;所有电缆和波导则为保证气密性而经密封处理后通过安装孔进入机舱内部。

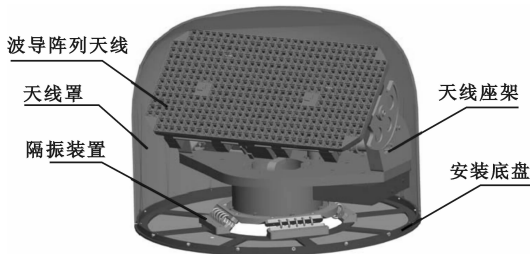


图1 0.45 m 天线结构
Fig.1 Structure of 0.45 m antenna

按照以往的工程经验,此类机载通信/雷达天线在类似的环境和使用要求下,一般应超过此重量与尺

寸。因此,与以往工程设计的不同之处之一,即在设计之初就对各结构件进行了反复的比对和二次优化。

3.1 天线结构介绍

波导阵列天线的结构尺寸为597 mm×300 mm×17.5 mm,四周切角以减小回转半径;经过减重处理后的重量约8 kg,电气性能与0.45 m口径抛物面天线等效,而高度和厚度则大大低于传统的抛物面天线。采用这种天线的优势包括剖面低、辐射效率高、口径分布控制精确、低副瓣、波束指向稳定、功率容量大、刚度和强度好、结构紧凑、厚度薄、相对重量轻、可靠性高等优异的电气和结构性能等。

3.2 天线座架结构与优化

天线座架采用典型的方位-俯仰形式,结构紧凑,受力情况合理,调整方便;设计选定承载能力强、刚度好、重量轻、结构紧凑的转台式结构;因而从整体几何尺寸的优化满足了最小安装空间的要求。

俯仰机构的转动支撑采用了圆锥滚子轴承,可同时承受径向力和轴向力,以最轻质最紧凑的结构满足天线支撑的需要。关键件俯仰支臂用厚铝板加工而成,其主要受力部位为轴承孔及与方位转盘的连接面,因此必须在保持结构强度要求的前提下,对支臂的非承力部分进行减重优化设计,具体做法如下:整体按照最小几何尺寸布置;保留轴承孔周边最小结构尺寸;与方位转盘、驱动、轴角装置的连接面相应保留足够厚度;保留一侧面的相对完整,另一面完全成空腔结构;增加与轴承孔的两道同心加强环筋,并根据此零件结构力学特性将其布置在最优强度位置。此外,根据以往工程设计经验,俯仰支臂与方位机构的连接根部和俯仰传动链末级两处通常是整个座架结构的最薄弱环节,因此在这两点处预先进行了局部二次加强,加厚并尽可能圆滑支臂的连接根部,其优化过程如图2所示。

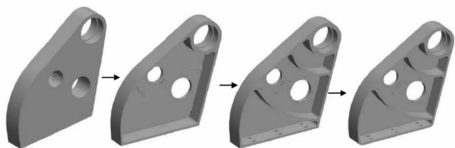


图2 俯仰支臂结构优化过程
Fig.2 Optimization of elevation arm structure

方位机构的核心传动部件转盘轴承,优选了应用广泛的带外齿的四点接触球轴承,使天线座架在保持紧凑的结构和较轻的重量的前提下,能同时承受较大的轴向载荷、径向载荷、倾覆力矩和双向推力

载荷,还优化了方位总传动比。另一重要部件滑环,采用具有超长寿命、免维护、无需润滑、外形紧凑的空心轴多路滑环。

方位运动的另一核心部件方位转盘同样用厚板材加工而成,负担着天线和俯仰支撑的重量,并要具备足够的刚度,其优化思路过程与俯仰支臂相似,也包括轴承结构保留、连接面强化、空腔化减重及同心加强环筋的布置,其优化过程如图 3 所示。

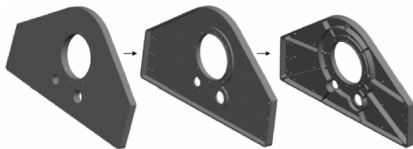


图 3 方位转盘结构优化过程
Fig.3 Optimization of azimuth plane structure

方位驱动和俯仰驱动均选用轻质、紧凑、高输出扭矩的直流减速电机,末级增加间隙调整装置,可调节传动回程间隙。

将经过优化设计的结构模型再由力学仿真进行分析验算。

4 天线结构的力学分析

由于天线的质量分布很复杂,很难用解析的方法得到其解析解,因此采用专业有限元分析软件 MSC. PATRAN/NASTRAN 进行力学分析和仿真。

4.1 有限元模型的建立

天线整体结构的有限元模型包括反射体、座架结构、俯仰齿轮及其连接支撑结构、方位转动机构等。为降低软件的计算量和复杂度,先对天线整体结构进行简化,去掉冗余节点,再采用 MSC. PATRAN 软件单独对其组成零件划分网格,最后将划分好的网格进行组装。采用了映射网格划分方法,面上网格全部为四边形,体则全部为六面体,这种划分能够更准确地描述天线座架结构的应力和位移情况^[3]。

模型的约束条件如下:天线座架的 2 个俯仰轴系各有一点的 3 个转角自由度释放,方位轴系释放绕垂直轴转角自由度及垂直方向位移自由度,约束其余 4 个自由度。

模型的材料属性如下:天线座架的各轴、轴承、齿轮定义属性为钢 40Cr,而其他零件定义属性为硬铝 2A12-T4。

建立的天线结构有限元模型如图 4 所示。

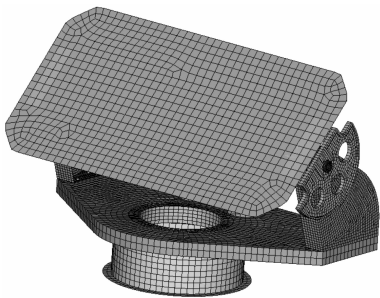


图 4 0.45 m 天线有限元模型

Fig.4 FEA model of 0.45 m antenna

4.2 模态分析

天线座架是一个复杂的弹性系统,如果其结构固有频率与伺服带宽靠近甚至落入伺服带宽之内,各种伺服噪声就会激发系统发生谐振,造成伺服系统不稳定,无法工作,甚至使结构破坏。为保证伺服系统的稳定性,并有足够的稳定裕度,通常要求结构固有频率高于伺服带宽 3~5 倍^[4]。

通过计算得到天线结构模型的固有频率,在第 1、2、3、4 阶模态下,其值分别为 28.7 Hz、29.2 Hz、51.4 Hz、60.8 Hz,而本天线伺服系统的带宽为 2.7 Hz 左右,可见固有频率远大于伺服系统的带宽,因此,天线的伺服系统拥有足够的稳定裕度。

4.3 冲击振动分析

依据实际环境使用要求,冲击环境条件为:采用半正弦脉冲,峰值加速度 15 g,脉冲宽度 11 ms,3 个互相垂直轴,6 个轴向施加。

对模型施加冲击载荷并进行有限元分析,得到了如下分析结果:最大应力出现在 z 轴(图 5),可以看出最大应力处位于俯仰支臂的连接根部位置,最大应力值为 109 MPa,小于材料的屈服极限 $\sigma_{0.2} = 275$ MPa。所以,在给定的冲击载荷条件下,结构满足强度要求。

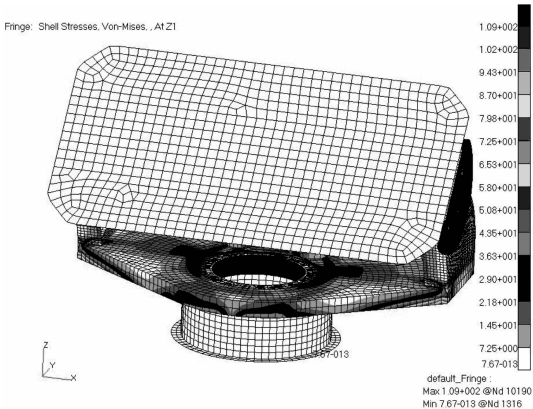


图 5 沿 z 轴冲击时天线的应力云图

Fig.5 Stress cloud chart of impact on z direction

振动条件见图 6 振动谱,其中额外迭加的 4 处定频振动峰值依次为1.6 g、2.5 g、1.7 g、1.5 g。

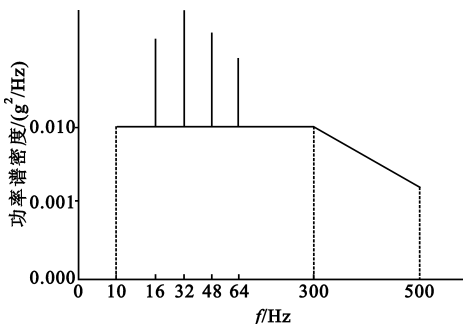


图 6 天线振动谱
Fig.6 Vibration spectrum of antenna

对模型施加振动载荷并进行有限元分析,得到了如下分析结果:最大应力出现在 y 轴(图 7),同样位于俯仰支臂的连接根部位置,其高斯分布规律的应力 3σ 值为178 MPa,小于材料的屈服极限值 σ_{0.2} = 275 MPa。所以,在给定的随机振动条件下,结构满足强度要求。

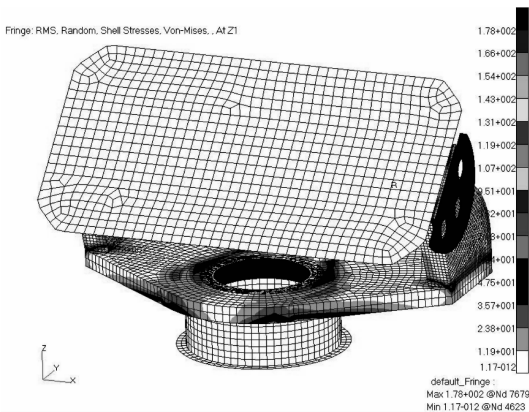


图 7 沿 y 轴随机振动时天线的 3σ 应力云图
Fig.7 Stress cloud chart of random vibration on y direction

4.4 实验结果验证

按照要求对完成的设备进行冲击振动实验,从结果来看:主结构件经优化过的关键部位未出现以往相似工程中出现的刚度、强度不足的问题;改用轻质材料或采取减重措施的零部件受力情况与分析结果基本一致,均能满足设计要求;天线整体频响特性较好,在功能实验全程中运行正常,能够满足跟踪要求。

5 结 论

在 0.45 m 机载天线的设计中,对载机的工作模式和环境特点进行了较为深入的研究,找出了结构设计过程中需要增强或优化的多个关键点,验证了天线

结构的力学性能对伺服系统的重要性。在天线结构的设计与优化过程中,采用专业软件较好地解决了天线结构尺寸重量强度的优化设计,载机环境适应性等主要问题。天线系统精度较高,结构性能良好,从实际飞行过程中的具体通信效果来看,电气、伺服、结构等各项性能指标均完全满足系统要求。

由于国内机载卫星通信应用尚处于初步阶段,0.45 m机载天线的研究结果对类似的机载雷达/通信天线的研发可以提供相应的技术参考和借鉴。需要指出的是,各种载机平台拥有各自不同的特性,对天线结构的要求也相应有所不同,建议今后对不同的载机平台,应进一步增加针对性的设计工作。

参考文献:

[1] 洪长满,段勇军.机载雷达天线座结构的刚度性能评估[J].现代雷达,2011,33(6):72-75.
HONG Chang-man, DUAN Yong-jun. Performance Evaluation of Stiffness and Strength of Antenna Pedestal Structure in an Airborne Radar[J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 72-75. (in Chinese)
[2] 南雁,郭建平,张娅妮.某机载电子设备总体结构设计[J].航空计算技术,2011,41(3):97-100.
NAN Yan, GUO Jian-ping, ZHANG Ya-ni. Structure Design of Airborne Electronic Equipment for a Certain Aircraft [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(3): 97-100. (in Chinese)
[3] 赵汝嘉.机械结构有限元分析[M].西安:西安交通大学出版社,1990.
ZHAO Ru-jia. Finite element analysis of mechanical structure [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990. (in Chinese)
[4] 叶尚辉,李在贵.天线结构设计[M].西安:西北电讯工程学院出版社,1986.
YE Shang-hui, LI Zai-gui. Design of antenna structure [M]. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1986. (in Chinese)

作者简介:

米宏伟(1978—),男,河北石家庄人,2004 年于西北工业大学获硕士学位,现为工程师,主要从事天线总体结构和伺服传动结构设计工作;

MI Hong-wei was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1978. He received the M.S. degree from Northwestern Polytechnical University in 2004. He is now an engineer. His research concerns antenna overall structure and structure design of the servo drive.

Email: howardmee@163.com

常立新(1985—),男,辽宁鞍山人,2007 年于哈尔滨工业大学获学士学位,现为助理工程师,主要从事卫星通信方面的研究工作。

CHANG Li-xin was born in Anshan, Liaoning Province, in 1985. He received the B.S. degree from Harbin Polytechnical University in 2007. He is now an assistant engineer. His research concerns satellite communication.