



径射状可展天线反射器结构设计与动力学分析

张 春, 王三民, 袁 茹

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

张 春

摘要: 结构动力学分析是大口径空间天线研制工作的重要组成部分。本文将多级剪刀机构与复式螺旋机构组合, 提出了一种新型的径射状可展天线反射器结构, 设计了 18 m 口径的天线反射器, 并建立了工作状态时的天线反射器结构有限元模型。采用 ANSYS 软件计算了径射状天线反射器的固有频率、谐响应和冲击响应, 并研究了索网拉力、材料阻尼等对冲击响应的影响规律, 为该天线的结构参数优化和阻尼设计提供了依据。

关键词: 大口径空间天线; 径向可展; 动力学响应

中图分类号: TH123 文献标识码: A 文章编号: 1003-8728(2007)04-0494-04

Structural Design and Its Dynamics Analysis of Space Radial Deployable Antenna Reflector

Zhang Chun, Wang Sanmin, Yuan Ru

(College of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Structural dynamics analysis is important for developing a big-caliber space antenna. Combining a multi-stage shear mechanism with a twin-screw thread mechanism, the paper presented a new big-caliber space antenna with radial deployable ribs, designed an antenna reflector with the caliber of 18 meters and established its finite element model under working conditions. It also calculated its inherent frequency, harmonic response and impact response using the ANSYS and studied the influence of cable strain and damping of materials on impact response, which is of help for the antenna's structural parameter optimization and damping design.

Key words: big-caliber space antenna; radial deployable; dynamics response

随着移动通信、空间科学、对地观测等事业的迅猛发展, 对大型空间天线的需求变得愈加迫切。为了提高传输信号带宽和信号增益, 并简化地面接收装置, 希望天线的口径越来越大。但由于运载火箭有效载荷仓和整流罩尺寸的限制, 要求大型天线在发射阶段应以折叠压缩状态固定在运载工具有效载荷舱内, 待航天器进入轨道后, 再由地面控制中心指令其在空间轨道按设计要求, 逐步完成展开动作, 最后锁定并保持为工作状态。空间大型可展开天线是在近几十年内随着航天科技的发展需要而诞生的一种新型空间构造物, 其技术理论是大型桁架结构理论体系的一个重要分支。

在上世纪 80 年代后期, 美国在其航天发展规划中就提出了对天线展开机构与结构的研发需求, 目

前已研发成功了花瓣状、伞状和环柱状等可展天线结构, 并对其展开动力学与结构动力学进行了理论分析与试验研究^[1]。日本也于 2002 年研发出了大型网状伞形卫星天线, 并在地面进行了模拟展开实验^[2]。俄罗斯也在可展结构设计与应用方面做出了巨大的成绩^[3]。此外, 我国近几年也开展了大型可展天线的研制工作, 并取得重要进展^[4,5]。由于大型空间可展天线的尺寸大、刚度低、柔性大, 所以卫星调姿对天线造成的周期激励, 以及随星体运行时太空垃圾对天线产生的撞击激励等, 都会对天线的工作性能和稳定性造成极大的影响。为了减低天线与卫星间的不良耦合振动, 以及提供天线结构振动的稳定性等, 结构动力学分析是大型可展天线研发过程中的重要研究内容之一, 也是天线结构动态

优化设计的基础,所以受到人们极大关注^[6]。

目前研究较多的环形可展天线反射器,采用首尾相接的平行四边形机构构成周长可变的环,通过驱动绳索使平行四边形机构对角线变短以实现天线展开。虽然环形可展天线具有质量小、口径大等优点,但由于其在结构上存在虚约束,且质量主要分布于外周,故导致其存在展开驱动力大、转动惯量大、固有频率低、刚度差等缺点。本文将多级剪刀机构与复式螺旋机构组合,提出了一种新型的径射状可展天线结构,并设计了18 m口径的天线反射器结构,并建立了工作状态时的天线反射器结构模型。研究了索网拉力、材料阻尼等对结构固有频率和瞬态响应的影响规律,为该天线的结构参数优化和阻尼设计提供了依据。

1 天线反射器结构

图1为复式螺旋机构与剪刀机构组合形成的可展天线的展开单元机构。在电动机M的驱动下,丝杠旋转,丝杠上有两段螺旋方向相反的螺纹,分别与螺母A、B旋合,驱使剪刀机构ABCDE中的A、B两点沿Z轴方向靠近,AC、BC两杆夹角∠ACB不断减小,C、F两点沿X轴正向移动。如此便实现了天线的径向展开。

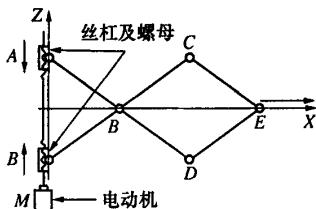


图1 天线展开机构示意图

该径射状天线反射器展开机构无需同步与锁止装置,结构简单,可靠性高;质量沿径向分布,刚性好,索网反射面精确度高。支撑装置与驱动系统位于天线顶点处,这不仅减小了系统转动惯量,提高了固有频率,而且也利于馈源与天线连接。径射状天线反射器展开后的结构如图2所示。

天线展开到预定位置后,展开电机停止转动。由于螺母丝杠的自锁作用,整个桁架结构处于锁死状态,忽略各铰链处间隙,认为桁架结构各杆相互焊接,无相对位移。

在ANSYS下建立如图2所示有限元模型。桁架结构采用BEAM4单元,周向索、索网采用LINK10单元,展开螺母丝杠采用SOLID45单元。天线口径为18 m,展开丝杠螺母密度为7800 kg/m³,各杆件为矩形截面梁,截面长0.1 m、宽0.03 m,材料弹性模量为

70 GPa,密度为2700 kg/m³,泊松比为0.31。抛物面焦距为20 m,索网及周向索弹性模量为20 GPa,直径为0.012 m,密度为1440 kg/m³泊松比为0.087。划分网格后形成有限元模型,共计304个BEAM4单元,624个LINK10单元,120个COMBIN14单元。

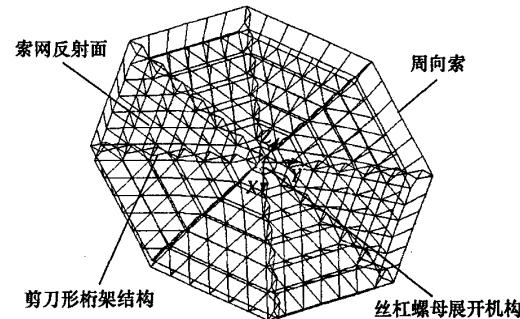


图2 天线整体展开的有限元模型

2 结构动力学分析

2.1 固有模态分析

在不考虑阻尼时,天线反射器结构的自由振动方程为

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{0\} \quad (1)$$

式中: [M]为天线质量矩阵; [K]为天线刚度矩阵; {X}为天线各节点加速度向量; {X}为天线各节点位移向量。

如果令

$$\{X\} = \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

则有

$$\{\ddot{X}\} = -\omega^2 \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

代入运动方程可得结构振动的特征方程,即

$$([K] - \omega^2[M])[\phi] = 0 \quad (4)$$

模态分析就是计算该特征方程的特征值 ω_i 及其对应的特征向量 $\{\phi_i\}$ 。

运用ANSYS中Block Lanczos提取法计算天线反射器模态,前5阶固有频率如表1所示。

表1 天线反射器的固有频率

模态阶数	1	2	3	4	5
固有频率(Hz)	0.3779	0.4064	0.4165	1.952	2.436

表2 添加索网及周向索后天线固有频率

模态阶数	1	2	3	4	5
固有频率(Hz)	2.1405	2.3930	3.1300	4.3660	6.2666

在反射器基础上添加索网及周向索,由于索网及周向索产生预紧作用,使其固有频率增大。如表2所示。

将两种情况下的固有频率与相应的环形天线的固有频率比较如图3所示。

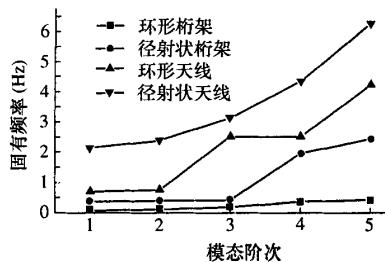


图3 径射状与环行前五阶固有频率对比图

通过图3可以看出,与口径大致相当的环形天线(15 m)相比,径射状的每一阶固有频率都大于环形可展开桁架结构。径射状结构天线在添加索网及周向索等后,各阶固有频率仍然大于环形固有频率,尤其是关系到天线稳定与否的第一、二阶固有频率。

2.2 谐响应分析

天线在工作过程中,卫星调姿会引起天线的周期性振动。为研究及计算的方便,这里将这种周期激励简化为简谐激励,即

$$F_z = A \sin(\omega t)$$

式中: ω 为外激励频率; F_z 为Z方向的激励; A 为激励振幅,本文取 $A = 0.001$, ω 从1 Hz增加到10 Hz。

采用完全法对上面天线结构进行分析,获得天线反射器边缘节点随频率不断增加的位移响应曲线如图4所示。由图4可以看出,天线反射器边缘节点位移幅值在某一特定频率下达到最大值,在远离这些频率时,幅值急剧下降。

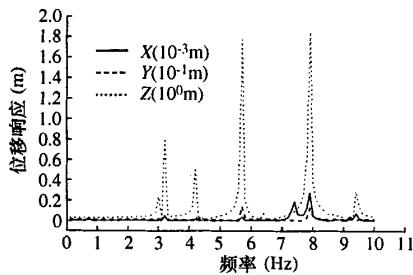


图4 天线反射器边缘节点位移随外载荷频率变化

由图4可见,X方向(周向)上4个共振频率为3.2 Hz、5.7 Hz、7.2 Hz和7.8 Hz。但是从图中可以发现在X方向的共振幅值小于 10^{-4} ,认为对天线可靠性及稳定性影响不大。在Y方向(半径方向)4个

共振频率为3.2 Hz、4.2 Hz、5.7 Hz和7.9 Hz,同样可由图可以发现Y向位移响应值较小,数量级为 10^{-2} 。在Z方向(天线轴向)上的位移响应都比较大,共振频率有6个,分别为3.0 Hz、3.2 Hz、4.2 Hz、5.7 Hz、7.9 Hz和9.4 Hz。由以上数据可以看出,天线及反射面在频率为3.0 Hz、3.2 Hz、4.2 Hz、5.7 Hz、7.9 Hz和9.4 Hz时整个天线系统位移响应较大。在天线展开及调姿过程中应避免工作在这些频率下。

一般情况下,在线性系统中,共振频率为某阶固有频率。

2.3 冲击响应分析

卫星在太空运行时受到多种随机因素的干扰,而其观测的目标瞬息万变,这就要求人造卫星的眼睛——天线受到干扰后能够在短时间内重新达到平衡状态,更不能失稳。天线在受到如陨石、太空垃圾等(其中太空垃圾是其最重要外来冲击之一)冲击后的响应,对整个天线的精度乃至整个卫星的平稳性都有着非常重要的意义。在ANSYS中冲击响应分析是采用瞬态响应分析来实现的。分析中以卫星为天线系统的基础,即假设卫星为固定的,计算整个天线受到5.00 s开始持续0.01 s的冲击激励下的响应。将该激励施加在整个天线索网最外圈,即施加在节点1上。因为此处相对于天线固定点的力矩最大,受冲击对整个天线的稳定性影响最大。

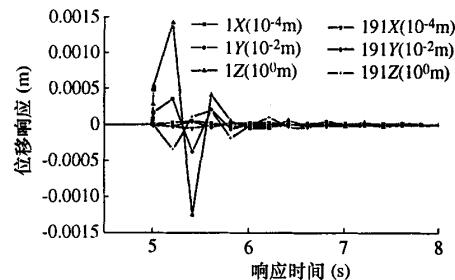


图5 节点1和节点191沿坐标轴方向的位移响应曲线

假设材料阻尼比为0.05,在图5中分别给出天线节点1和其关于固定中心对称节点191的X、Y、Z方向上的响应曲线。由于给出的冲击激励是沿Z方向,因此天线系统的位移响应在Z向最大,X、Y向位移响应远小于Z向位移响应。如果计算时考虑索网预紧力,则索网平衡位置并不是在初始平衡位置,而是平衡在抵消预应力后的位置。

天线能否在可以接受的时间内趋于稳定与结构的阻尼有着很大的关系。本文假设仅受材料阻尼特性影响,即认为组成天线结构的材料阻尼是可以改变的。在误差为5%时,系统稳定时间以及最大冲

击位移与材料阻尼之间的关系如图6,图7所示。

由图6可以看到在阻尼比小于0.05时增加阻尼可以有效地减小系统收敛时间,但是当阻尼比大于0.1时,系统的收敛时间并没有随着阻尼比的增加而单调减小,反而在一定范围内有少量的增加。

由图7可以看出当材料阻尼在小于0.01的范围内增加时,最大位移并没有随阻尼增加而减小,在大于0.02的范围内增加时,最大冲击位移随阻尼增大减小的较快。

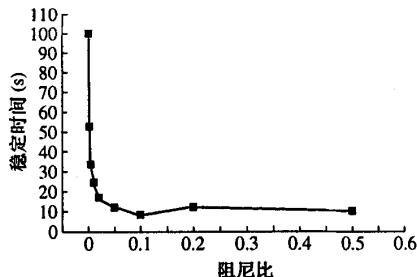


图6 系统收敛时间与材料阻尼关系图

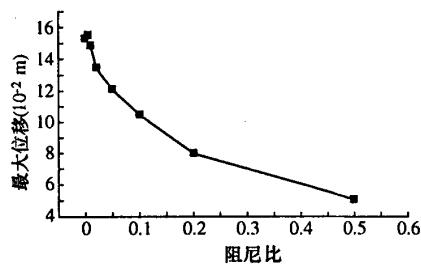


图7 天线最大冲击位移与材料阻尼关系图

在阻尼比一定情况下,索网预紧力对天线稳定性也有一定的影响,主要表现在对振幅及天线平衡位置的影响上。ANSYS中link单元的预应力是通过预应变给出的,在这里只考察节点1的Z向静平衡位置和最大位移(包含静平衡位移)响应与预应变的关系,如图8所示。

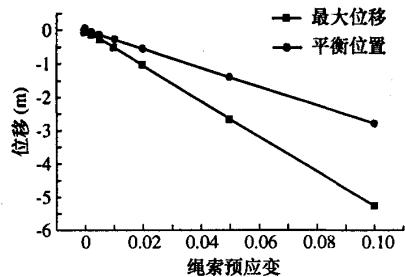


图8 最大位移/平衡位置与预应变关系图

由图8可以看出,平衡位置与索网预应变基本

呈线性关系,最大位移在索网预应变大于0.0002时与索网预应变基本呈线性关系,但在预应变小于0.0002时最大位移随着预应变的增加有所减小,因此仅考虑索网预应力影响的情况下,预应变取0.0001较为合理。索网预应变对天线的稳定时间也有一定的影响,随着预紧力增加,收敛时间有所缩短,但其影响没有材料阻尼明显。

3 结论

桁架结构一阶固有频率为0.3779 Hz,天线系统一阶固有频率为2.1405 Hz,与环形天线相比有很大提高。

天线系统共振频率有6个,分别为3.0 Hz、3.2 Hz、4.2 Hz、5.7 Hz、7.9 Hz和9.4 Hz。卫星调姿等动作时应尽量避免工作在这些频率附近。

天线系统材料阻尼比选取在0.04到0.12间较佳,系统收敛时间较短。天线最大位移在材料阻尼小于0.05时受阻尼比影响较小。

索网预应变较小时对平衡位置和最大位移影响较小,当预应变小于0.0001对平衡位置和最大位移影响可不计。与材料阻尼相比,索网预应变对系统收敛时间影响较小。

[参考文献]

- [1] Masayoshi M, Akihito O. Analytical and experimental frequency verification of deployed satellite antennas [A]. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference [C], Norfolk, VA; USA; 7-10 Apr. 2003
- [2] Kimura S, Takeuchi M, Fukase Y. A deploying process analysis using the sub-pixel cross-correlation method-An application for a deploying experiment with a small-scaled model of the ETS-VIII deployable antenna[J]. Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2002, 50(12): 20~27
- [3] Pankow D, Besuner R, Wilkes R. Deployment mechanisms on the fast satellite: magnetometer, radial wire, and axial booms[J]. Space Science Reviews, 2001, 98: 93~111
- [4] 谭全芹,陈庚超,李小平.大型网状可展开天线模态分析[J].飞行器测控学报,2005,24(2):21~24
- [5] 万小平,袁茹,王三民.环形可展开卫星天线的多目标结构优化设计[J].机械科学与技术,2005,24(8):914~916
- [6] 马兴瑞,杨卫,周志成主编.卫星结构与机构技术发展[M].北京:清华大学,2003
- [7] Freeland R E, Helms R G, Willis P B. Inflatable space structures technology development for large radar antennas[A]. 55th International Astronautical Congress 2004[C], Vancouver, Canada, 4-8 Oct. 2004: 1~14

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>