

径向肋可展开天线动力学特性试验研究^{*}

张辰¹, 韦娟芳¹, 戚学良¹, 方永刚², 杨军²

(1. 浙江大学空间结构研究中心 杭州, 310058) (2. 西安空间无线电技术研究所 西安, 710100)

摘要 研究包带预紧力和限位间隙对天线收拢发射状态动力学特性的影响。设计并加工径向肋可展开天线的简化模型并进行振动试验, 试验控制的变量为包带预紧力和限位间隙的大小, 考察结构的基频和响应与自变量的关系。试验证明, 包带预紧力在正常范围内对天线的基频没有影响, 增加预紧力可以小幅度降低结构响应。肋条与限位盘的间隙大小与肋条的一阶固有频率和响应大小无关, 且随着振动量级增加, 肋条的共振峰后移。

关键词 径向肋; 可展开天线; 包带; 限位; 振动试验; 间隙; 碰撞

中图分类号 V416.2

1 问题的引出

随着空间无线电技术的发展, 卫星天线结构正朝着大口径、高精度、轻质量方向发展^[1], 大型可展开天线结构已成为一种新的发展趋势。可展开空间天线按照反射面材料的不同可分为固体反射面、网状反射面和充气式反射面 3 类。其中, 网状反射面可展开天线因其质量轻、收拢体积小且技术较为成熟而应用最为广泛。

径向肋可展开天线(又称伞状天线)属于网状反射面可展开天线的一种, 主要由中心部件(馈源、支架及驱动装置等)、径向辐射状肋条和索网反射面 3 部分构成。在发射时呈收拢状态, 入轨后通过电机驱动展开成工作状态后锁定, 没有任何附加精度调整系统^[2]。图 1 为美国喷气推进实验室(JPL)研发的 6U CubeSat^[3]。该卫星采用立方星和径向肋可展开天线相结合的方式, 是一个低成本的 Ka 波段近地轨道卫星。图 2 为 1989 年 NASA 发射的伽利略号木星探测器, 载有一副 4.8 m 口径的高增益 X 波段径向肋可展开天线^[4]。中国空间研究院第 504 所已经完成了 4.2 m 口径的径向肋可展开天线原理样机的研制。可见, 径向肋可展开天线是 4~10 m 口径常见的卫星天线形式。

径向肋可展开天线在收拢发射时通过包带连接将天线端部与支座固定。由于发射阶段动力学环境

恶劣, 因此研究包带的动力学特性十分必要。同时, 包带对天线肋条起限位作用, 为保证在轨天线顺利展开, 天线肋端部与限位盘卡槽和包带之间应留有间隙。这就导致在振动环境中肋条会与限位盘内壁和包带发生碰撞。在碰撞过程中, 限位间隙的大小是否对天线整体结构的基频产生影响。因此, 研究包带预紧力大小和限位间隙对天线收拢发射状态的力学特性具有重要的工程意义。

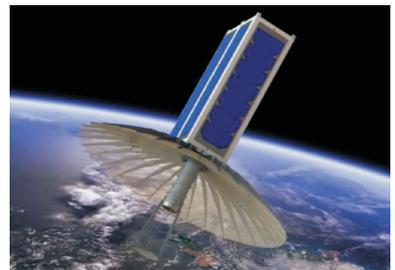


图 1 6U CubeSat 结构示意图
Fig. 1 Diagram of 6U CubeSat



图 2 伽利略号木星探测器
Fig. 2 Galileo jupiter orbiter probe

^{*} 中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助项目(JSKFJ201604120011)
收稿日期: 2016-12-26; 修回日期: 2017-02-22

2 径向肋天线模型

2.1 包带连接装置

2.1.1 星箭连接分离机构的包带连接装置

该结构用于卫星与火箭的连接,由 1~3 条包带通过爆炸螺栓连接,包带内用螺栓连接一圈 V 形夹块,卫星与火箭上分别连有对接框,将上下对接框嵌入夹块,在包带上施加预紧力将上下对接框连接。分离时爆炸螺栓起爆,包带松开,上下对接框分开,即卫星脱离火箭^[5-8],如图 3 所示。国内对于第 1 类包带连接装置的研究较为成熟。文献[9]用单元节点力等效包带预紧力,通过有限元分析得到:包带预紧力越小,结构基频越低且非线性越明显。

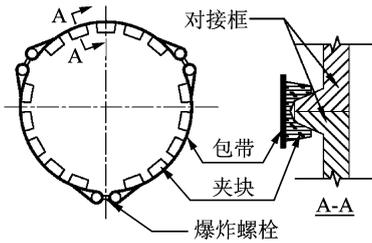


图 3 星箭分离包带连接装置示意图

Fig. 3 Diagram of satellite-rocket clamp band device

2.1.2 用于可展天线收拢捆扎的包带连接装置

径向肋天线的肋条一端通过铰链锁紧装置与中心连接,另一端悬空使其可以绕中心旋转展开。在可展天线结构中,振动造成的机构磨损、索网缠绕等均有可能造成展开故障^[10]。因此,利用带有卡槽的限位盘、刚性支架以及带有一定预应力的包带将天线肋固定,如图 4 所示。天线肋收拢时嵌入限位盘的卡槽内,再由两条 1/4 圆弧形包带和支架将天线肋包住,约束其发射状态的空间包络,起到固定作用,进入轨道后爆炸螺栓起爆,包带依靠自身回复力弹开,天线肋由根部电机驱动展开。笔者针对第 2 类包带装置的动力学特性进行了研究,文中提到的包带连接均指第 2 类用于可展开天线收拢捆扎的包带连接。

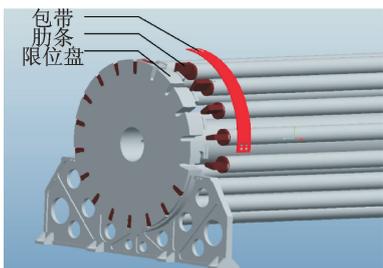


图 4 可展开天线收拢捆扎用包带装置

Fig. 4 Clamp band device for deployable antenna

2.2 试验件设计

本试验为了研究包带预紧力以及限位间隙对天线动力学特性的影响,将径向肋可展开天线结构中的馈源组件、副反射器和支撑桁架等简化为中心粗圆管;抛物线形肋条简化为细圆管;底部展开机构简化为平板。包带为 16 mm 宽、2 mm 厚的钢带,两段 1/4 圆弧钢带的端部各连接一直角转接头,通过螺栓连接控制包带预紧力大小。天线肋钢管端部连接一个 U 形块接头,与限位盘卡槽契合,加工时 U 形块的尺寸略有不同,以此形成不同的间隙,如图 5 所示。试验件的肋条、中心圆管和包带的材料为钢,其余均为铝,整体质量为 8.60 kg。



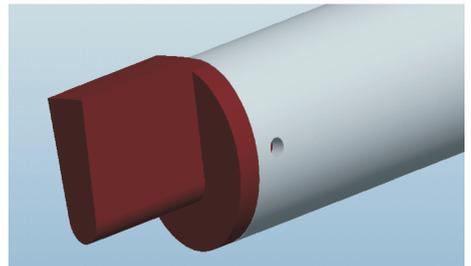
(a) 试验件收拢状态

(a) Test piece in tucked



(b) 包带预紧力调节装置

(b) Control of clamp preload



(c) 天线肋限位端

(c) Limited end of rib

图 5 径向肋可展开天线试验件

Fig. 5 Test pieces of a radial rib deployable antenna

3 包带预紧力试验

3.1 试验设计

本试验研究了在不同包带预紧力条件下,不同振

动量级时结构共振频率及加速度响应情况。试验时在限位盘上布置测点,考查整体结构共振频率,在杆件上布置测点,考查杆件的响应情况,如图6所示。

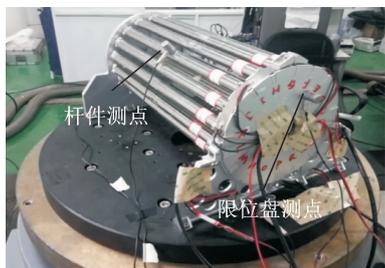


图6 垂直方向振动试验状态图

Fig. 6 Diagram of vertical vibration test

本试验使用国产苏试振动台,振动输入采用单点控制,沿垂直方向(y 向)进行扫频试验,加速度输入量级按照 $1g \rightarrow 4g \rightarrow 6g \rightarrow 8g$ 递增,扫频范围为 $20 \sim 500$ Hz,扫描频率为 4 oct/min。

根据工程经验,包带预紧力的范围为 $250 \sim 1\,000$ N,下限值是为了保证在振动过程中包带始终处于受拉状态。包带预紧力值可以通过测量包带应变间接得到,本试验研究预紧力分别为 750 N 和 250 N 两种情况下的共振频率及响应。

3.2 分析与结论

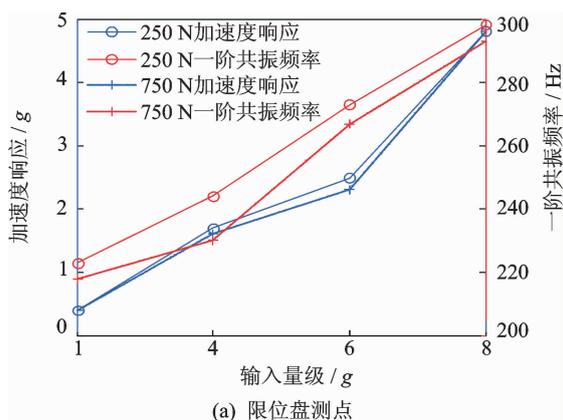
限位盘、中心筒和前后支座由螺栓固定连接,可看做刚性连接,且天线重量主要分布于此,因此限位盘中部采集的加速度响应值可以反映径向肋天线模型整体的响应情况。在小量级($1.0g$)扫频试验中,限位盘测点的一阶共振频率可以近似看做结构基频。图7为不同包带预紧力、不同输入量级条件下的各测点一阶共振频率及加速度响应。

通过对比可以得出以下结论。

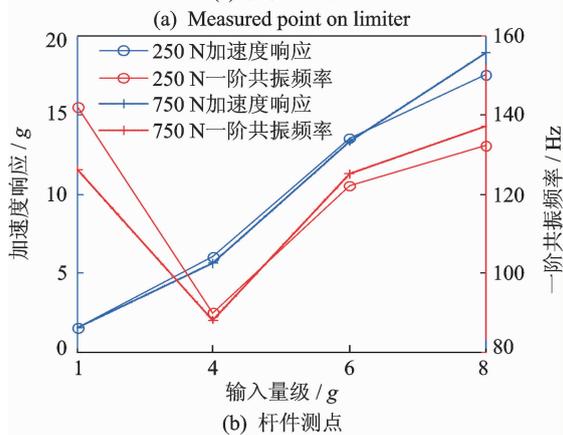
1) 包带预紧力在正常范围内变化时,在小量级振动试验中,包带预紧力对结构整体和局部杆件的一阶固有频率无影响。

2) 天线结构中含有很多带有间隙的机构,在大量级振动试验时,接触和碰撞会使天线的刚度呈现一定程度的非线性规律。因此,包带预紧力从 250 N 增加到 750 N,限位盘加速度响应第1峰值频率略有减小,变化幅度不超过 5.7% ,加速度响应值减小幅度不超过 8% 。

3) 大量级振动试验时,包带预紧力从 250 N 增加到 750 N,杆件的加速度响应变化幅度小于 $\pm 7.4\%$ 。



(a) 限位盘测点



(b) 杆件测点

(b) Measured point on rib

图7 第1峰值加速度响应及频率对比图

Fig. 7 First-peak acceleration response and frequency

4 限位间隙试验

4.1 试验设计

限位连接既可保证部件之间在一定状态下的连接,又可以实现某些自由度的释放。为了保证在天线解锁时天线肋可以顺利从限位盘的卡槽中脱开,防止卡死现象,限位盘与天线肋之间应留有一定的间隙。本试验研究了限位间隙、振动量级与被限位结构的振动响应关系。

如图8所示,在包带预紧力不变的条件下依次

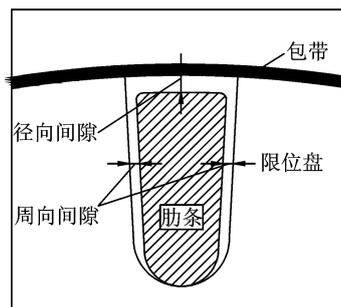


图8 限位间隙示意图

Fig. 8 Diagram of clearance in limiters

更换不同的肋条安装到相同位置,用塞尺测量限位卡槽和肋条之间的径向间隙和周向间隙并记录。最终选取 3 根间隙差别较大的肋条作为试验对象(依次编号为①~③),在加速度输入量级依次为 1g→4g→8g 的条件下沿竖直方向进行扫频振动试验,如表 1 所示。

表 1 肋条端部间隙值

Tab. 1 Clearance between heads of ribs and limiters

肋条编号	径向间隙/mm	周向间隙/mm
①	1.5	1.5
②	1.8	1.8
③	2.0	2.0

4.2 分析与结论

由于间隙的存在,振动过程中肋条端部会与限位盘卡槽壁以及包带发生持久碰撞,使共振幅频曲线转弯、共振区变宽^[11],表现出多种周期运动以及复杂的分岔和混沌动力学行为^[12-13]。根据广义 Hertz 接触理论,将碰撞振动系统等效为无质量弹簧-阻尼系统,可将肋条端部碰撞系统简化为图 9 所示的含有三侧间隙碰撞模型,其基本运动方程^[14-15]为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin\omega t + F_R$$

其中: m, c, k 分别为碰撞振子的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $F_0 \sin\omega t$ 为简谐激振力; F_R 为碰撞振子之间的广义 Hertz 接触碰撞力。

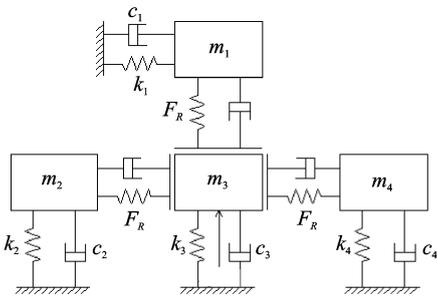


图 9 含三侧间隙碰撞振动模型

Fig. 9 Dynamic model of the impact-vibration system with triple-side clearance

包带和限位盘结构的一个重要作用是保护肋条在收拢发射过程中不被破坏,因此需要考察在不同振动量级环境下肋条的加速度响应情况。表 2 为试

表 2 肋条最大加速度响应值及放大倍数

Tab. 2 Rib's maximum acceleration response and magnification

肋条编号	输入量级		
	1g	4g	8g
①	1.49g	8.75g	21.82g
②	2.19g	6.47g	20.23g
③	1.79g	11.86g	25.41g
最大放大倍数	2.19	2.97	3.18

验得到的不同间隙情况下肋条的最大响应值及放大倍数。

图 10 为 1g, 4g 和 8g 振动输入条件下,不同间隙肋条的加速度响应曲线。可以看出,由于碰撞冲击的存在,振动响应曲线呈毛刺状,很难准确判断第 1 峰值所在的频率,但可以根据曲线整体包络趋势大致估计峰值频率所在范围。

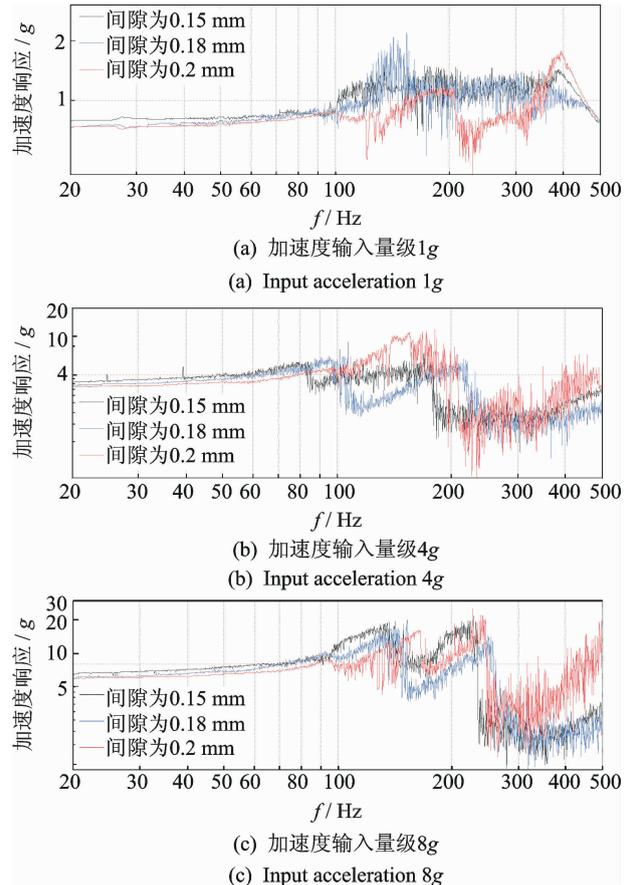


图 10 不同间隙肋条竖直方向振动加速度响应曲线
Fig. 10 Vertical acceleration response curves of ribs with different clearance

由试验数据可得出以下结论:a. 肋条最大响应值与间隙大小无关,随着输入量级的增大,肋条的响应放大倍数逐渐增大;b. 天线肋条第 1 峰值的频率及加速度响应放大倍数与限位间隙大小无明显相关性,但可以判断出杆件竖直方向一阶固有频率在 100~160 Hz 范围内;c. 竖直方向振动时,随着振动量级的增大,第 1 峰值所在频率呈递增趋势。

5 结束语

径向肋可展开天线在收拢发射状态下的动力学特性直接影响了之后的在轨展开过程,维持收拢状态的最重要部件就是包带和限位盘。笔者通过对模

拟试验件的一系列振动试验,证明了:a.包带预紧力在正常范围内对天线的基频没有影响,在大量级振动中,预紧力的增大对加速度响应的降低程度也十分有限;b.肋条与限位盘之间的间隙大小对肋条的一阶固有频率和最大响应值没有影响,单根肋条的一阶固有频率在100~160Hz之间,且随着振动量级的增加,肋条的共振峰后移。

参 考 文 献

- [1] 刘荣强,田大可,邓宗全.空间可展开天线结构的研究现状与展望[J].机械设计,2010,27(9):1-8.
Liu Rongqiang, Tian Dake, Deng Zongquan. Research actuality and prospect of structure for space deployable antenna [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9):1-8. (in Chinese)
- [2] 赵人杰,王峰斌.径向肋天线反射面精度调整方法的研究[R].北京:中国电子学会空间电子学年会,2000.
- [3] Nacer C, Richard H, Jonathan S, et al. CubeSat deployable Ka-band mesh reflector antenna development for earth science missions [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(6):2083-2093.
- [4] 邵锦成.伽利略空间探测计划[J].世界导弹与航天,1990(3):22-25.
Shao Jincheng. Exploration program of Galileo spacecraft [J]. Missiles & Spacecraft, 1990(3):22-25. (in Chinese)
- [5] 康士朋,唐杰,宋林郁,等.温度变化对包带装置预紧力影响分析与验证[J].宇航学报,2016,37(9):1122-1128.
Kang Shipeng, Tang Jie, Song Linyu, et al. Analysis and verification of the effect of temperature variation on the preload of clamp band device [J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(9):1122-1128. (in Chinese)
- [6] Rome J, Goyal Y, Martino N. Techniques for finite element analysis of clamp band systems [C]// 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California; AIAA, 2009:1-9.
- [7] 白绍竣,尉飞,郑钢铁,等.包带连接建模与非线性动力学特性分析[J].振动与冲击,2010,29(5):5-10.
Bai Shaojun, Wei Fei, Zheng Gangtie, et al. Modeling of a marman clamp band joint and its nonlinear dynamic analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5):5-10. (in Chinese)
- [8] 谭雪峰,阎绍泽.包带式星箭连接结构动力学模拟及故障分析[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(8):1205-1209.
Tan Xuefeng, Yan Shaoze. Dynamic simulations and failure analysis of a clamp band system for spacecraft [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(8):1205-1209. (in Chinese)
- [9] 白绍竣,梁鲁,张静,等.包带连接力学分析与建模[J].上海航天,2011,28(6):43-48.
Bai Shaojun, Liang Lu, Zhang Jing, et al. Modeling and analysis of marman clamp joint [J]. Aerospace Shang Hai, 2011, 28(6):43-48. (in Chinese)
- [10] 董富祥,周志成,曲广吉.国外空间大型网状天线在轨展开故障与对策[J].航天器工程,2012,21(6):119-123.
Dong Fuxiang, Zhou Zhicheng, Qu Guangji. Review of deployment failure and recovery techniques for spacecraft large cable-net antenna [J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(6):119-123. (in Chinese)
- [11] 刘习军,陈予恕,侯书军.展开式卫星天线在发射时的非线性振动分析[J].宇航学报,2000,21(2):16-21.
Liu Xijun, Chen Yushu, Hou Shujun. Nonlinear vibration analysis of the deployable satellite antenna during launching stage [J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(2):16-21. (in Chinese)
- [12] 伍新,文桂林,徐慧东,等.三自由度含间隙碰撞振动系统 Neimark-Sacker 分岔的反控制[J].物理学报,2015,64(20):89-96.
Wu Xin, Wen Guilin, Xu Huidong, et al. Anti-controlling Neimark-Sacker bifurcation of a three-degree-of-freedom vibration system with clearance [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(20):89-96. (in Chinese)
- [13] 金栋平,胡海岩.碰撞振动与控制[M].北京:科学出版社,2005:32-34.
- [14] 卢绪祥,刘正强,黄树红,等.含间隙碰撞振动系统的非线性振动特性[J].动力工程学报,2012,32(5):388-393.
Lu Xuxiang, Liu Zhengqiang, Huang Shuhong, et al. Nonlinear vibration characteristics of a vibro-impact system with clearance [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(5):388-393. (in Chinese)
- [15] 艾延廷,翟学,王志,等.法相接触刚度对装配体振动模态影响的研究[J].振动与冲击,2012(6):171-174.
Ai Yanting, Zhai Xue, Wang Zhi, et al. Influences of normal contact stiffness on an assembly's vibration modes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012(6):171-174. (in Chinese)



第一作者简介:张辰,女,1993年5月生,硕士生。主要研究方向为卫星可展开天线相关技术。曾发表《卫星电子设备振动试验用超高基频夹具设计》(《航天器环境工程》2016年第33卷第1期)等论文。

E-mail: chenchenzju@163.com

通信作者简介:韦娟芳,女,1964年9月生,研究员、博士生导师。主要研究方向为飞行器天线的结构设计与分析。

E-mail: weijf@zju.edu.cn