

基于六自由度运动平台的大型空间结构 低频力学环境模拟研究

于新战¹, 肖勇¹, 黄超², 方永刚¹, 雷艳妮¹

(1. 中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100;

2. 武汉华中航空测控技术有限公司, 武汉 430023)

摘要: 空间结构的大型化、复杂化导致其固有频率降低、模态密集, 也使得低频动力学环境对其结构特性的影响日益严重。文章以大型环形网状可展开天线反射器为例, 研究了大型空间结构的低频力学特性及其失效模式, 分析了航天器动力学环境的低频特点, 提出了基于六自由度运动平台的低频多轴力学环境模拟方法。

关键词: 大型空间结构; 低频力学环境; 六自由度运动平台

中图分类号: V416.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2015)01-0034-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.01.006

Low-frequency mechanical environment simulation of large space structure based on 6-DOF kinetic platform

Yu Xinzhao¹, Xiao Yong¹, Huang Chao², Fang Yonggang¹, Lei Yanni¹

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

2. Wuhan Huazhong Aeronautical Measurement and Control Technology Co. Ltd, Wuhan 430023, China)

Abstract: The effect of the low frequency dynamical environment on a large space structure is increasingly a serious issue. This paper studies the low frequency mechanical characteristics and the failure mode of large space structures, with a large-loop-net-antenna as an example, and analyzes the characteristics of the low frequency environment of spacecraft. The simulation method for the low frequency and multi-axis mechanical environment is put forward based on the 6-degree-of-freedom kinetic platform.

Key words: large space structure; low-frequency mechanical environment; six degree-of-freedom kinetic platform

0 引言

低频环境一直存在于航天器的研制和发射过程中。例如产品在运输过程中将会经受 0.5~60 Hz 频率范围的振动载荷; 火箭竖立在发射台上时, 由于风的激励导致火箭产生横向低频振动; 航天器发射过程中非正常气动载荷会造成火箭整体以低阶模态响应为主的跨声速抖振, 其振动频率范围在 0.2~6 Hz。另外发动机点火和关机时的推力变化是一种阶跃载荷, 在阶跃载荷中低频分量也占主要成分^[1]。

小型空间结构一般采用一体化方式, 固有频率

较高。而大型空间结构由于展开环节多、铰链多、无法安装更多锁紧/释放装置等原因导致固有频率较低, 有时甚至低于力学试验考核验证的频率下限^[2]。如何确定低频环境下大型空间结构的动力学行为以及动力学环境适应能力, 除了进行充分的仿真分析外, 试验研究也是非常必要的。

大型环形网状可展开天线反射器是目前采用较多的大型空间结构, 具有轻质、高收纳率、固有频率低、模态密集、柔性大、阻尼小及间隙多等特点。该种天线展开后口径可达 6~150 m; 随着反

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“大型空间结构动力学与控制的地面模拟实验”(编号: 11290154)

射器口径增大, 其质量不会成比例增加, 基本结构也不会改变。

本文从试验验证角度出发, 以大型环形网状可展开天线反射器作为典型大型空间结构进行分析研究, 针对其结构的力学特性以及所经历的低频动力学环境特点, 提出了基于六自由度运动平台开展低频力学环境模拟的试验方法。

1 大型环形网状天线反射器结构的力学特性

大型环形网状天线反射器由前张力网、金属网、张力阵、环形桁架、后张力网等组成。在卫星发射时, 反射器处于收拢状态; 入轨后, 在地面指令下依次进行反射器解锁、展开、到位锁定等动作, 最终展开到设计的工作位置, 如图 1 所示。

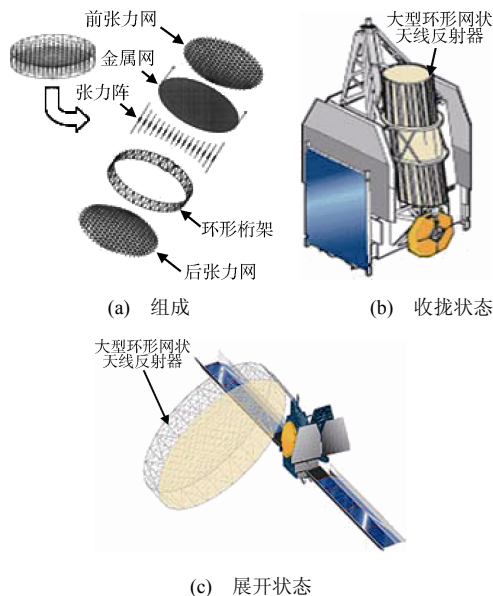


图 1 大型环形网状天线反射器示意

Fig. 1 General view of large-hoop-net-antenna reflector

环形网状天线反射器的突出优点是质轻、高收纳率, 然而其缺点是网面缺乏刚性支撑, 而且高收纳率使得收拢后出现了大量的网面冗余, 如图 2 所示。展开状态的网面系统因预拉力作用处于绷紧状态且各绳索位置固定, 而收拢时很难保证索网构件的空间位置, 同时由于网面冗余的存在使得收拢状态网面系统的固有频率很低。在发射过程中, 低频激励会引起收拢状态柔性索网构件产生振动, 从而可能发生索网构件之间的接触和缠绕, 严重时会影响其顺利展开。例如: 美国 Harris 公司为 NASA 的伽利略计划研制的一种直径 5 m 的空间径向肋

天线于 1989 年随卫星发射入轨后, 天线部分肋条未能展开, 从而导致整个天线失效; 日本曾为其移动通信卫星 ETS-VIII 研制了一种大口径模块式网架天线, 2000 年在“阿里安 5 号”火箭上进行了搭载飞行试验, 由于天线结构解锁时引起大幅度抖动而导致网面与桁架发生钩挂, 致使天线展开失败, 如图 3 所示^[3]。

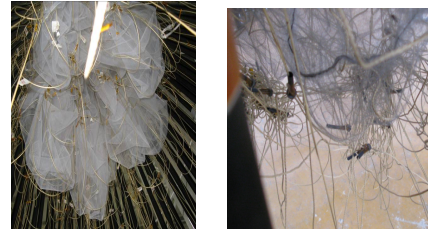


图 2 大型环形网状天线反射器收拢状态网面系统

Fig. 2 Cable-net system of large-hoop-net-antenna reflector in the stowed state

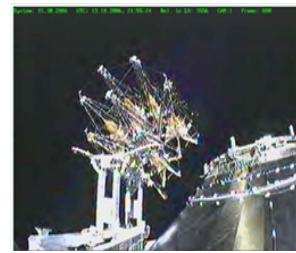


图 3 模块式网架可展开天线反射器在轨展开失败

Fig. 3 On-orbit deployment failure of large deployable net-frame antenna reflector

由此可见, 对于大型环形网状天线, 在其经历恶劣的力学环境 (特别是大位移运动、大角度摆动时, 网面系统状态可能发生改变, 出现缠绕/钩挂等失效模式, 而诱因主要是卫星发射过程中的低频动力学环境。

2 航天器低频动力学环境多轴模拟的必要性

航天产品在实际使用过程中所经受的振动是多方向的, 既有三个正交方向的平移振动分量, 也有绕三个正交轴的旋转分量, 而且不同振动分量对结构响应均有贡献。实践证明, 采用单轴振动试验技术通过三个正交轴依次进行产品的考核, 未必能暴露产品的一些潜在故障。对于大型可展开天线反射器而言, 模拟低频环境下动力学行为更应考虑多轴的同时作用。

国内外均开展了多轴振动试验设备的研究, 建立了一些多轴振动试验系统, 例如欧空局的 ESTEC 中心的 HYDRA 的多自由度液压振动系统,

其试验频率范围为 2~100 Hz (原则上可以从 0.1 Hz 开始,但是在控制上受限制)^[4]。5 Hz 以上的振动试验一般在电磁振动台实现,0.2~5 Hz 的振动试验在液压振动台进行^[5]。然而液压振动台系统构成复杂,且存在噪声、发热、泄漏等缺点^[6-7]。液压系统或者电磁系统在实现低频大振幅运动时将会引入更多、更强的非线性因素(振动台支撑弹簧非线性、磁场泄漏等),从而可能加剧振动台面扭曲、谐波失真等。

3 六自由度运动平台

六自由度运动平台具有承载能力强、刚度大、精度高、动态响应快和累积误差小等优点,在机器人、运动模拟器、新型机床和飞船对接器等领域获得了越来越广泛的应用^[8]。该平台主要构件是六自由度瞬时运动的传动机构,由计算机实时控制并能提供 3 个线位移和 3 个转角。该机构最早是由 D. Stewart 提出并构建。

六自由度运动平台由控制软件部分、电控部分、机械部分(运动平台台体)组成,如图 4 所示。

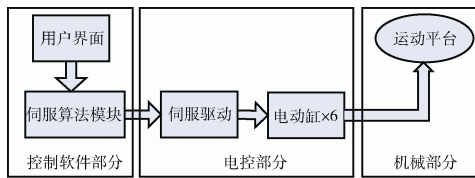


图 4 六自由度运动平台组成框图
Fig. 4 Block diagram of the 6-DOF kinetic platform

被试产品安装在六自由度运动平台上,平台的动力学激励水平由电动缸上的编码器监测得到,同时反馈到伺服算法模块与用户要求的激励谱进行对比,如果不一致则调整运动平台的激励输入。

六自由度运动平台使用了 6 根驱动杆(电动缸),负载较大时可增加 3 根气动动作筒。这 6 根驱动杆分别用球铰或虎克铰与上下平台连接,它们都可以独立地自由伸缩,这样上平台对于下平台就可以实现 6 个方向独立运动。控制软件部分可完成平台运动的解算、控制指令的发送,并对采集的数据进行处理和分析。电控部分可对平台的各种状态进行监视。系统的工作流程如图 5 所示。

电控部分由工控机、数据采集板卡、通信卡、I/O 板卡、接口电路板、伺服驱动器、伺服电机、

变压器、输入输出滤波器、限位开关及相关电气元件等组成,其主要作用是接收控制系统输出的指令数据,并将其传输给伺服驱动器;然后,驱动器将信号放大后控制电机运动,进而带动电动缸运动,最终使台体实现各种姿态。此部分的工作原理如图 6 所示。

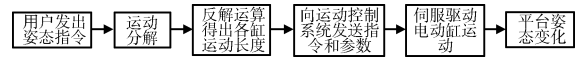


图 5 六自由度运动平台工作流程
Fig. 5 The flow chart and principle of the 6-DOF kinetic platform

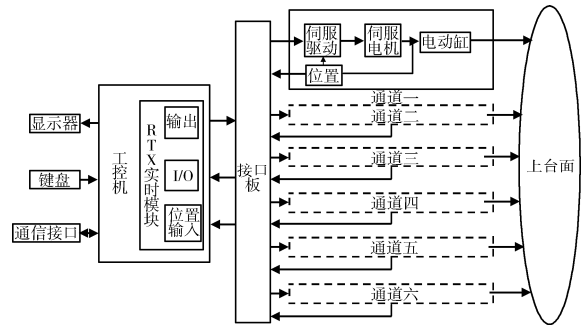


图 6 电控部分工作原理
Fig. 6 Working principle of the electrical control module

机械部分包括上台面、上连接铰、下连接铰、电动缸、辅助支撑气缸和底座等。平台由电动缸驱动,实现 3 个正交方向的平移和绕 3 个正交轴的转动,如图 7 所示^[9]。

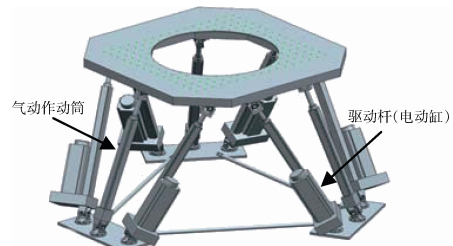


图 7 六自由度运动平台
Fig. 7 The 6-DOF kinetic platform

六自由度运动平台的性能指标如表 1 所示^[9-10],其具备以下特性:

- 1) 采用模块化的结构设计,可维护性强;
- 2) 简单的人机界面和友好的交互方式,更加贴近用户的使用要求;
- 3) 结构优化,功耗降低,工作噪声小。

由此可见,六自由度运动平台可以作为传统的正弦振动试验、随机振动试验的低频补充试验系统,使得试验的频率下限拓展至 0.2 Hz 甚至更低。同时该平台所产生的振动环境是多轴同时作用的,更能反映出航天产品经受的实际环境。

表 1 六自由度运动平台典型性能指标
Table 1 Typical characteristics of the 6-DOF platform

参数	指 标					
	纵向	侧向	垂向	滚转	俯仰	偏航
最大行程	±0.4 m	±0.4 m	±0.4 m	±23°	±23°	±23°
最大速度	±0.5 m/s	±0.5 m/s	±0.4 m/s	±25(°)/s	±25(°)/s	±25(°)/s
最大加速度	±1g	±1g	±1.2g	>200(°)/s ²	>200(°)/s ²	>200(°)/s ²
最大荷载	2500 kg					
工作频率范围	0.2~10 Hz					
接口尺寸	1.5 m×1.5 m					
最大倾覆力矩	20 kN·m					
最大偏心力矩	18 kN·m					

4 结束语

本文分析了大型空间结构的低频动力学行为, 提出了基于六自由度运动平台的低频振动环境的模拟方法, 所模拟的振动频率下限扩展至 0.2 Hz 甚至更低。六自由度运动平台可输出多轴同时作用的大位移、大角度的低频力学环境, 有助于诱发大型空间结构低频段的各阶模态, 从而达到充分验证产品低频段动力学行为的目的。

目前, 由于航天器发射过程的低频力学环境实测数据较少, 低频传感器技术和发射过程中低频数据的采集技术仍是短板。为了提高低频力学环境的模拟验证工作有效性, 建议后续进一步加大这方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] 夏益霖, 吴家驹. 航天发射的低频振动环境及其模拟[J]. 强度与环境, 1998(1): 1-8
Xia Yilin, Wu Jiaju. The low frequency vibration environment and simulation during spacecraft launch[J]. Structure & Environment Engineering, 1998(1): 1-8
- [2] Puig L, Barton A, Rando N. A review on large deployable structures for astrophysics missions[J]. Acta Astronautica, 2010, 67(1/2): 12-26
- [3] Meguro A, Shintate K, Usui M, et al. In-orbit deployment characteristics of large deployable antenna reflector onboard engineering test satellite VIII[C]//Proceedings of the 58th International Astronautical Congress. Hyderabad, India, 2007
- [4] 金恂叔. 航天器动力学环境试验的发展概况和趋势[J]. 航天器环境工程, 2003, 20(2): 15-21
Jin Xunshu. The development status and trends of spacecraft dynamic environment testing[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2003, 20(2): 15-21
- [5] 关广丰, 王海涛, 熊伟, 等. 6 自由度液压振动台运动学分析及控制策略[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 89-93
Guan Guangfeng, Wang Haitao, Xiong Wei, et al. Kinematic analysis and control strategy of 6-DOF hydraulic vibration table[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 89-93
- [6] 吴国永. 液压传动系统的缺点及故障[J]. 魅力中国, 2009(19): 91-98
Wu Guoyong. The disadvantage and failure of hydraulic drive system[J]. Charming China, 2009(19): 91-98
- [7] 张立成, 吕新, 冯晓涛, 等. 液压伺服系统的研究[J]. 北京电力高等专科学校学报, 2010, 27(5): 160-163
Zhang Licheng, Lü Xin, Feng Xiaotao, et al. Study on the hydraulic servo system[J]. Journal of Beijing College of Electric Power, 2010, 27(5): 160-163
- [8] 马永晓. 并联六自由度运动平台动力学分析及最优控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010
- [9] 武汉华中航空测控技术有限公司. 六自由度电动运动平台使用手册[G], 2014
- [10] E2M 公司. 六自由度电动运动平台 Em6-640-3000 使用手册[G], 2012

(编辑: 肖福根)

作者简介: 于新战 (1974—), 男, 研究员, 主要从事空间天线力学分析、空间环境适应性评估及试验方法研究; E-mail: yuxz504@yeah.net. 肖勇 (1967—), 男, 研究员, 主要从事空间天线系统设计、结构及机构设计等方面研究。