

# Random Vibration Fatigue Analysis of a Spaceborne Phased Array Antenna Based on NX Nastran

Qiuju Zhu, Xumin Cao, Wenbin Xu, Mao Zhang, Yi Huang

Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai  
Email: zhuqiuju0626@163.com

Received: Nov. 20<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Dec. 13<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The finite element model of a spaceborne phased array antenna is created by CAE tool NX Nastran, and its modal analysis is carried out to obtain the random vibration simulation. Through simulation analysis, the fatigue life of the product can be predicted in the design stage, the weak links of the product can be mastered in time, and the environmental adaptability of the product can be evaluated, which can provide the design direction for the structural optimization of the product.

## Keywords

NX Nastran, Phased Array Antenna, Random Vibration, Fatigue Analysis

---

# 基于NX Nastran的某星载相控阵天线随机振动疲劳分析

朱秋菊, 曹旭民, 徐文彬, 张 茂, 黄 一

上海航天电子技术研究所, 上海  
Email: zhuqiuju0626@163.com

收稿日期: 2017年11月20日; 录用日期: 2017年12月6日; 发布日期: 2017年12月13日

---

## 摘 要

通过CAE工具NX Nastran对某型号星载相控阵天线结构创建有限元模型, 并对其进行模态分析, 在此基

础上进行随机振动仿真分析。通过仿真分析,可以在设计阶段预测产品的疲劳寿命,及时掌握产品的薄弱环节,评估产品的环境适应性,为产品的结构优化提供设计方向。

## 关键词

NX Nastran, 相控阵天线, 随机振动, 疲劳分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

星载相控阵天线在制造、运输、发射等阶段都经历着不同的振动环境,尤其在可靠性试验验证阶段,该产品结构需经受最为严酷的鉴定级随机振动试验环境,为保证该产品的高可靠性,可应用有限元仿真手段在产品的设计阶段对其结构进行设计验证[1] [2]。

利用计算机软件平台对产品进行仿真分析一直是不可或缺的途径,它在缩短开发周期、提高产品质量、节约研发经费等方面发挥了巨大作用。随着计算机技术的发展,在产品的设计过程中通过计算机软件对设计方案进行仿真分析的需求越来越大。相对于直接将产品放振动台上做振动试验获取响应结果,通过计算机进行随机振动仿真分析具有以下优势[3] [4]:

- 1) 产品在设计阶段即可进行计算机仿真分析,分析结果对设计改进具有指导意义;
- 2) 只需建立产品的有限元模型,即可进行不同条件的随机振动仿真分析;
- 3) 在给定的随机振动条件下可提取产品任意位置的响应加速度和应力、应变、位移等情况;
- 4) 可随意更改产品的结构、印制板厚度、元器件安装高度、随机振动试验条件等,并很方便对各种条件下产品的随机振动响应结果进行对比分析;
- 5) 分析结果可查看产品模型上任意位置的动态过程信息;
- 6) 节约产品测试成本,节省人力物力,缩短产品设计周期。

产品随机振动仿真分析过程见图 1 所示[5]。

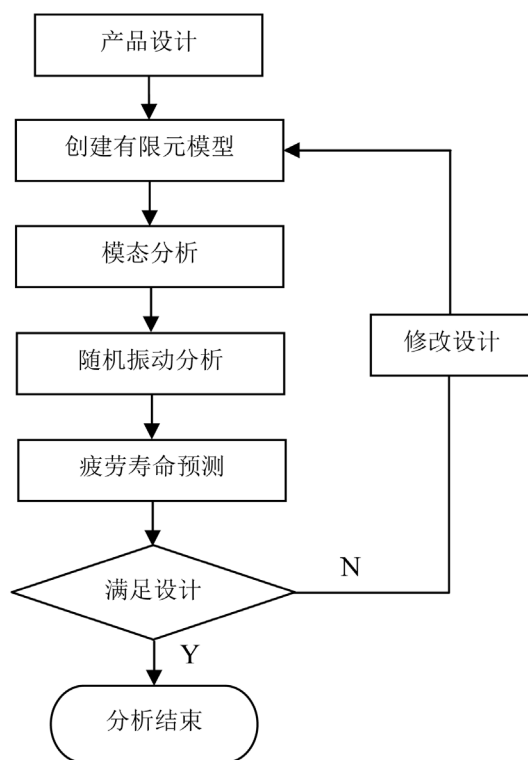
## 2. 星载相控阵天线有限元建模

星载相控阵天线由 T/R 组件、天线阵面、结构框架等组成。其结构形式如图 2 所示。

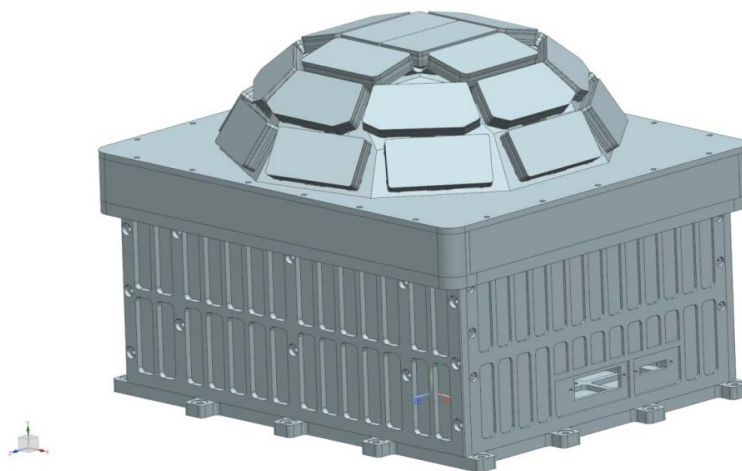
图 2 中,结构框架作为主要承力部件,通过若干螺钉连接成四方形闭合结构,具有较高的刚度;其内部通过楔形锁紧机构将各 T/R 组件锁紧在导向板上;其上支撑着天线阵面的结构件,呈帽状,支撑着天线阵面。其中,结构框架材料为铝合金 2A12, PCB 为覆铜环氧玻璃布板,天线阵面等效为复合材料。各材料力学性能如表 1 所示。

考虑到解的精度和计算量,对三维模型进行一定简化,去除不影响结构的倒角和小安装孔等细小特征,对模型的各个部分分别划分网格,其中,不规则结构选用 10 节点 CTETRA 单元,采用自动划分法划分网格,规则结构选用 8 节点 CHEXA 单元,采用 3D 扫掠网格,共划分了 507684 个单元。划分网格后的相控阵天线结构有限元模型如图 3 所示。计算坐标系为模型上显示的坐标系。

整个相控阵天线结构在使用和环境试验中,通过底板 14 个螺钉孔与整星仓板连接,激励输入处即为



**Figure 1.** Random vibration analysis process  
**图 1.** 随机振动分析流程



**Figure 2.** Structure model of the phased array antenna  
**图 2.** 相控阵天线结构模型

**Table 1.** Mechanical properties of materials  
**表 1.** 材料力学性能参数

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松比
铝合金 2A12	2794	73,119	0.33
覆铜环氧玻璃布板	3000	22,000	0.28
复合材料	2500	16,000	0.28

14个固定螺钉孔处,为减少响应仿真过程中的约束情况,在模型底部空间创建一个节点,将该节点作为激励输入源节点,通过创建MPC连接与14个固定螺钉孔相连。各零件间通过螺钉紧固连接,在有限元模型中零件间螺钉连接区域简化为单元面间面对面粘连,楔形锁紧面简化为单元面间面对面粘连。

### 3. 模态分析及随机振动分析

模态分析是随机振动仿真分析的基础,可用于确定结构的固有振动特性,获取结构的固有频率和模态振型。利用UG10.0对有限元模型进行模态分析,获得结构的基频为284 Hz,见图4。由于相控阵天线结构的随机振动频率范围为20 Hz~2000 Hz,为了保证随机振动分析精度,模态分析频率超过2000 Hz。

新建响应仿真解算过程,设置结构阻尼系数为0.04,查看响应仿真局部放大图,确保产品响应仿真各向有效质量大于85%,见图5。

对相控阵天线结构进行随机振动仿真分析,其鉴定级随机振动工况见表2。

输入表2中的加速度功率谱,对结构进行随机振动响应仿真分析得到三个方向的最大均方根应力图,见图6。

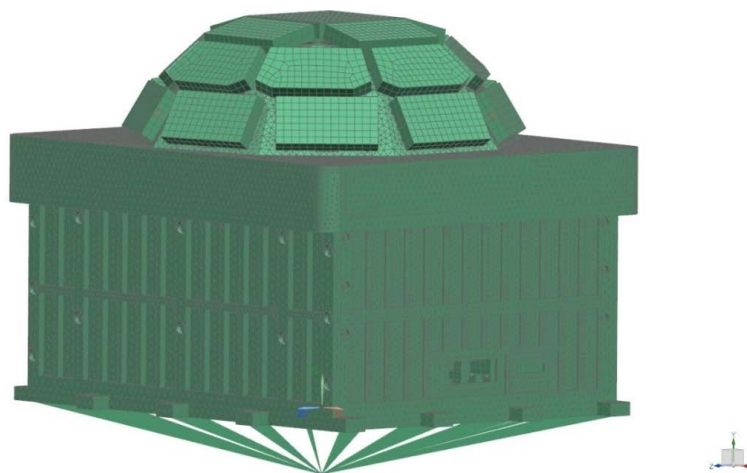


Figure 3. Finite element model of the phased array antenna

图3 相控阵天线有限元模型

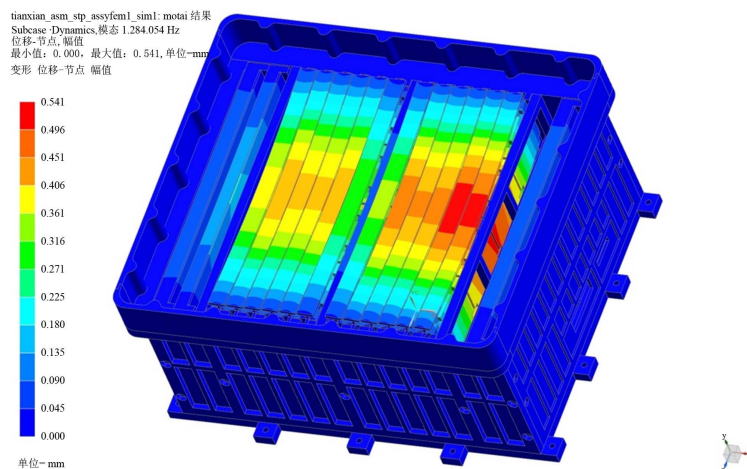


Figure 4. The first order mode shapes of module

图4. 结构第一阶模态振型图

响应仿真局部放大图

模态数	频率	阻尼频率	%Viscous	%Hysteretic	%X_Mass	%Y_Mass	%Z_Mass
* 1	2.841e+002	2.838e+002	4.00000	0.00000	49.35361	0.00129	0.03522
* 2	2.962e+002	2.959e+002	4.00000	0.00000	0.00183	0.00030	0.00024
* 3	3.105e+002	3.103e+002	4.00000	0.00000	0.23779	0.00016	0.00508
* 4	3.207e+002	3.204e+002	4.00000	0.00000	0.07240	0.03736	0.04717
* 5	3.331e+002	3.328e+002	4.00000	0.00000	0.06767	0.00007	0.00026
* 6	3.340e+002	3.338e+002	4.00000	0.00000	0.00210	0.00081	0.00522
* 7	3.365e+002	3.362e+002	4.00000	0.00000	0.00119	0.00009	0.00095
* 8	3.394e+002	3.391e+002	4.00000	0.00000	0.05623	0.00187	0.06102
* 9	3.410e+002	3.407e+002	4.00000	0.00000	0.01691	0.00105	0.00830
* 10	3.425e+002	3.422e+002	4.00000	0.00000	0.11999	0.00186	0.08635

有效质量总计 : X: 90.99844% ; Y: 97.21246% ; Z: 92.30465% ; Rx: 98.90716% ; Ry: 87.47396% ; Rz: 97.84160%;

Figure 5. Effective quality view of response simulation

图 5. 响应仿真有效质量查看

Table 2. Qualification conditions for random vibration test

表 2. 随机振动试验鉴定级条件

	参数值		
频率范围/Hz	20~100	100~600	600~2000
功率谱密度	+3 dB/oct	0.16 g <sup>2</sup> /Hz	-9 dB/oct
总均方根加速度值	11.46 grms		
加载方向	三个轴向		
时间	每向各 2 min		

从图 6(a)-(c)可以看出, X、Y、Z 三个方向的均方根应力分别为 45.44 Mpa, 48.03 Mpa 和 57.73 Mpa, 最大应力处均在铝合金框架上。根据随机振动的概率统计, 三个方向振动时的最大应力有可能是均方根应力的 3 倍, 但其概率也只有 0.26%, 其值为 173.19 MPa, 小于铝合金的屈服极限 275 Mpa。最大应力处主要出现在底板螺钉连接凸台的根部, 根据圣维南原理, 底板螺钉连接凸台的根部为应力集中区域, 该处的应力计算值比实际应力值偏大, 实际应力值会小于计算值。由此可以判定 Z 向随机振动时相控阵天线结构随机振动比较剧烈, 但不会因此对结构造成破坏。如果设备中有均方根响应加速度较大的元器件, 应根据其可用工艺采取加固措施(四周点胶或四角点胶)。

#### 4. 疲劳寿命分析

参考文献[2]和[6], 应用 Miner 疲劳损伤累计理论及三带宽技术的疲劳破坏率计算方法对结构随机振动疲劳寿命进行估算可得:

$$N_{1\sigma} = 1000 \times \left( \frac{275}{1 \times 57.73} \right)^{6.4} = 21815204$$

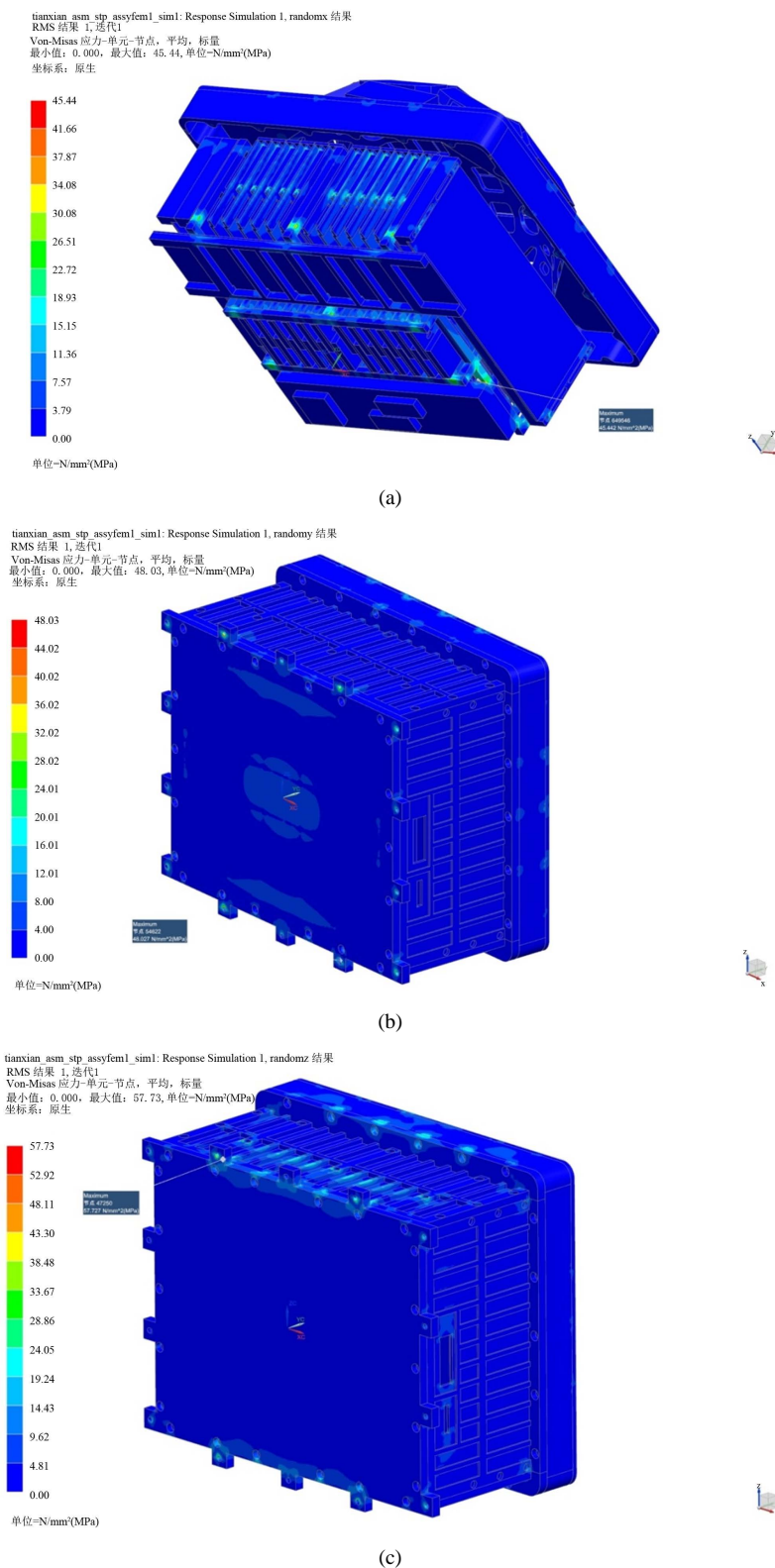
$$N_{2\sigma} = 1000 \times \left( \frac{275}{2 \times 57.73} \right)^{6.4} = 258326$$

$$N_{3\sigma} = 1000 \times \left( \frac{275}{3 \times 57.73} \right)^{6.4} = 19283$$

$$n_{1\sigma} = 284 \text{ Hz} \times 60 \times 6 \text{ min} \times 0.683 = 69830$$

$$n_{2\sigma} = 284 \text{ Hz} \times 60 \times 6 \text{ min} \times 0.271 = 27707$$

$$n_{3\sigma} = 284 \text{ Hz} \times 60 \times 6 \text{ min} \times 0.0433 = 4427$$



**Figure 6.** The root mean square stress Response diagram of the module in three directions  
**图 6.** 结构三个方向均方根应力响应图。(a) X 向均方根应力响应云图; (b) Y 向均方根应力响应云图; (c) Z 向均方根应力响应云图

相控阵天线结构的破坏率  $R$

$$R = \frac{n_{1\sigma}}{N_{1\sigma}} + \frac{n_{2\sigma}}{N_{2\sigma}} + \frac{n_{3\sigma}}{N_{3\sigma}} = 0.34 < 1,$$

可知 6 分钟随机振动仅消耗其疲劳寿命的 1/3, 说明该结构形式的疲劳安全裕度足够, 该产品已顺利通过试验验证。

## 5. 结论

文章简要介绍了产品随机振动仿真分析的流程, 详细介绍了产品有限元建模和仿真过程。通过试验验证了文中随机振动疲劳分析过程的可行性, 其计算结果可作为判断设计方案是否合格及优化设计方案的参考依据, 一般电子设备可参考论文中的仿真分析过程进行随机振动仿真和疲劳分析。

## 项目基金

国家自然科学基金资助项目 61640010。

## 参考文献 (References)

- [1] 代锋, 唐德效, 石敏. 星载电子设备元器件随机振动疲劳分析[J]. 空间电子技术, 2011, 8(1): 76-80.
- [2] (美)戴夫·S. 斯坦伯格(Dave S. Steinberg), 著. 电子设备振动分析[M]. 第 3 版. 王建刚, 译. 北京: 航空工业出版社, 2012.6: 152-155.
- [3] 黄凯, 沈石松, 张发洋, 娄宵. 弹载相控阵天线结构随机振动与疲劳分析[J]. 制导与引信, 2016, 2(37): 24-27.
- [4] 吴焕, 赵润生, 唐勇. 随机振动的描述及其试验与仿真[J]. 环境技术, 2015(6): 6-10.
- [5] 郭建平, 任康, 杨龙, 南雁. 基于 MSC. Fatigue 的电子设备随机振动疲劳分析[J]. 航空计算技术, 2008, 4(38): 48-50.
- [6] 朱秋菊, 潘自民, 李晟昊, 吴晟. 宇航单机元器件随机振动疲劳分析[J]. 力学研究, 2017, 6(3): 141-150.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)