http://www.seejournal.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

统计能量分析方法用于卫星天线结构声振 响应预示的有效性研究

陈 曦, 刘 刚, 谢伟华, 林勇文, 刘 波 (中国空间技术研究院 通信卫星事业部,北京 100094)

摘要:鉴于有限元法(finite element method, FEM)在求解中高频段天线结构振动噪声问题中的局限性,引入统计能量分析(statistical energy analysis, SEA)方法进行天线结构全频段的噪声分析:以卫星天线反射面为研究对象建立统计能量模型;将声振响应分析结果与卫星天线噪声试验结果进行对比,发现当内损耗因子≤1.0%时,二者吻合良好,0.5%是最佳内损耗因子。以上验证了统计能量分析方法可有效应用于卫星天线结构预示,并可作为卫星型号研制过程中天线结构动力学分析的有益补充。

关键词:卫星天线;统计能量分析;声振响应;噪声试验

中图分类号: O327; TB115 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2019)04-0335-05 **DOI:** 10.12126/see.2019.04.006

The prediction of vibro-acoustic response of satellite antenna based on statistical energy analysis

CHEN Xi, LIU Gang, XIE Weihua, LIN Yongwen, LIU Bo (Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The vibro-acoustic analysis of large and flexible structures is challenging and time-consuming under the frame of the conventional finite element method (FEM). To solve this problem, this paper proposes a method based on the statistical energy analysis(SEA) for the mid- and high-frequency vibro-acoustic analysis. The dependency of the internal loss factor on the model is determined in the case of a satellite antenna reflector. It is shown that the analytical result agrees quite satisfactorily with the test data when the internal loss factor ranges from 0.1% to 1.0%, and an assignment of 0.5% is advisable. This study may provide a helpful reference for the dynamic analysis of satellite antenna structures in the development process.

Keywords: satellite antenna; statistical energy analysis; vibro-acoustic response; acoustic test

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-07-13

引用格式: 陈曦, 刘刚, 谢伟华, 等. 统计能量分析方法用于卫星天线结构声振响应预示的有效性研究[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(4): 335-339

CHEN X, LIU G, XIE W H, et al. The prediction of vibro-acoustic response of satellite antenna based on statistical energy analysis[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(4): 335-339

0 引言

航天器在发射主动段的动力学环境十分严酷, 其中包括高量级的振动环境和高声压级的噪声环 境,噪声频率从低频 10 Hz 到高频 10 000 Hz。整流 單内的噪声环境会使航天器,尤其是具有较高结构 系数(结构面积与其质量之比)的结构产生较大 的加速度响应^[1]。

卫星天线是典型的高结构系数部件,是卫星结构中对噪声环境最为敏感的部件之一。在卫星天线的研制过程中,需要采用噪声试验来考核天线结构强度,进而验证结构设计方案的正确性;而在试验前开展噪声环境预示,可以指导单机试验、结构设计等工作,尽早发现问题,减少损失。

NASA于 2001 年发布的 NASA-HDBK-7005 《动力学环境准则》^[2], 在噪声分析中引入边界元法, 将有限元方法(FEM)拓展到高频,将统计能量分 析(SEA)方法拓展到瞬态动力学范围,提高了 SEA 耦合损耗因子的估计精度,在声学空穴分析中 发展了填充系数法等。由此可知,噪声预示需要结 合运用有限元、边界元以及统计能量法等进行全频 段分析。目前,国外先进卫星制造商在天线设计过 程中,大都在进行天线噪声试验前先进行噪声分 析,而且分析结果与试验结果吻合较好^[3]。

我国对噪声环境预示分析也开展了很多研究



式中: ω_c 为中心频率; $E_i(i = 1, 2, \dots, N)$ 为子系统*i*的能量; $n_i(i = 1, 2, \dots, N)$ 为子系统*i*的模态密度; $P_i(i = 1, 2, \dots, N)$ 为子系统*i*的输入功率; $\eta_i(i = 1, 2, \dots, N)$ 为子系统*i*的内损耗因子; $\eta_{ij}(i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N)$ 为子系统*i*与子系统*j*的耦合损耗因子。

由式(1)可以看到,复杂系统在应用统计能量 方法时需要确认的参数包括模态密度、输入功率、 内损耗因子以及耦合损耗因子。参数确定后即可求 解方程(1),得到各子系统的能量,再将能量换算成 相应的加速度 工作。文献 [4-5] 介绍了航天器噪声环境预示方法, 包括有限元分析法、边界元方法、统计能量法等,同 时推荐了噪声分析软件,包括 VA One、Auto SEA 等。文献 [6] 利用 SEA 方法进行了卫星太阳翼的声 振力学环境预示,介绍了 SEA 方法的分析步骤和 参数选取,验证了该方法的可行性。文献 [7-8] 利 用 SEA 方法进行声振分析,并对参数选取进行了 研究。

本文以卫星天线为例,在有限元分析中引入 统计能量方法,建立天线的 SEA 模型,研究统计 能量参数对计算结果的影响,通过与试验结果进 行对比,确定统计能量参数的取值范围,并验证该 声振响应方法用于天线结构噪声振动响应预示的 有效性。

1 统计能量分析方法理论

统计能量分析方法的理论基础是室内声学和 统计力学,主要应用于较高频段的振动分析。为了 建立能量平衡方程,将结构按照其模态特性划分为 多个子系统,并建立各子系统之间的能量输入、传 递以及损耗的关系,求解各子系统的能量,最终得 到系统的响应^[9]。

N个子系统有 N个能量平衡方程, 它们的矩阵 形式为

$$\cdot -\eta_{1N}n_{1} = \begin{bmatrix} \frac{E_{1}}{n_{1}} \\ \frac{E_{2}}{n_{2}} \\ \vdots \\ \cdot \left(\eta_{N} + \sum_{j=1}^{N-1} \eta_{Nj}\right)n_{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_{1}}{n_{1}} \\ \frac{E_{2}}{n_{2}} \\ \vdots \\ \frac{E_{N}}{n_{N}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1} \\ P_{2} \\ \vdots \\ P_{N} \end{bmatrix} .$$
(1)
$$a^{2} = \frac{4\pi^{2}f^{2}E}{M},$$
(2)

就完成了响应预示工作。式(2)中:f为天线子系统的固有频率;M为天线子系统的有效质量。

文献 [10] 利用统计能量法,将某小卫星划分为 26 个子系统和 97 个连接,然后对整星的宽带声振力学环境响应进行了预示。该文献给出的复杂结构的 SEA 步骤如下:

1)按照共振模态将结构划分为不同的子系统
 单元;

2) 确定各子系统之间的连接方式:

3)确定子系统的模态密度、输入功率、内损耗 因子和耦合损耗因子:

4) 求解子系统能量;

5) 计算出子系统的动力学响应。

2 卫星天线声振响应分析建模

图 1 为卫星天线在混响室进行噪声试验的状 态,图2以1~9的编号标注了天线上的测点位置。



图 1 天线噪声试验现场 Fig. 1 Antenna under acoustic test





目前,天线的动力学响应分析计算局限于有限元 方法,但由天线反射面模态密度(图3)可见,天线 在中高频区域的结构模态比较密集:为了更加准确 地描述结构高频模态振型,在建立 FE 模型时需要 将网格划分得非常密集,带来巨大的计算量。为降 低计算压力,建立 SEA 模型进行天线的声振分析。

采用统计手段分析出子系统的平均响应,建立 子系统的 SEA 模型, 获得子系统的 SEA 参数—— 模态密度、内损耗因子和耦合损耗因子等,建立功 率流平衡方程;然后通过求解方程得到子系统的平 均能量,进而计算得到子系统的位移、速度和加速 度响应。



统计能量分析方法建模中,子系统划分是基于 子系统在关注的频带内所有共振的模态之间能量 等分的假设,其中子系统的特性是根据统计手段获 得的,故而精度不高,但已经符合工程要求,可以用 于天线反射面的 SEA 建模。

SEA 建模时,将卫星天线反射面划分为1个子 系统, 混响声场划分为2个半无穷声场 (semiinfinite field, SIF) 子系统, 用 VA One 软件^[11] 建立卫 星天线反射面的声振响应分析模型,如图4所示。



2.1 声场模型

建立整星声场统计能量模型,用半无穷声场和 混响声场(diffuse acoustic field, DAF)模拟混响场, 模型声压与天线噪声试验条件(表1)保持一致。

表 1 卫星	星天线噪声试验条件	
Table 1 Aco	ustic test level of antenna	
倍频程中心	声压级/dB	
频率/Hz	(参考声压:2×10 ⁻⁵ Pa)	
31.5	120	
63.0	126	
125.0	132	
250.0	136	
500.0	135	
1 000.0	132	
2 000.0	127	
4 000.0	123	
8 000.0	116	
总声压级/dB	141	

337

混响声场产生的随机压力谱以面载荷的形式 作用在天线表面,建立声场模型后,计算可得到结 构的输入功率,如图 5 所示。



Fig. 5 Power input of the acoustic field for the satellite antenna structure

2.2 结构统计能量分析模型

天线反射面是由复合材料面板和铝蜂窝芯子 组成的夹层板结构,在 VA One 软件中建立此类结 构板的 SEA 模型。其中,结构板的模态密度可计算 得到;本文将天线反射面划分为1个子系统,故不 存在耦合损耗因子。

在 SEA 中,内损耗因子是结构的临界模态阻 尼比的 2 倍^[12],因此结构的随机响应受内损耗因子 影响比较大。目前,在工程研制中,卫星天线的结 构内损耗因子主要依据经验或者试验结果来确定, 其数值一般在 1% 左右;也可以根据其他类似结构 的噪声试验结果来反推。在考虑声场对结构的影响 时,子系统的内损耗因子还需要加上结构声辐射损 耗因子,因此总的损耗要比结构的阻尼大很多。在 VA One 软件中,声辐射的损耗因子由软件自行分 析计算得出,而结构的内损耗因子作为影响统计能 量计算的参数需要合理给出。

下文选取一组不同的结构内损耗因子,计算天 线反射面的平均加速度响应,通过与试验结果对比 获得合适的内损耗因子参数值。

3 卫星天线声振响应分析预示

建立统计能量分析模型,选取不同的结构内损 耗因子,分别计算天线反射面的声振响应,得到不 同的响应加速度。并将声振分析结果与天线噪声试 验响应结果的平均值进行对比,方均根加速度对比 见表 2,功率谱密度对比见图 6。由表 2 可以看出, 内损耗因子选为 0.5% 时,卫星天线的方均根加速 度响应分析结果与试验结果间的相对误差最小。

表 2 不同内损耗因子下声振预示与试验结果对比

Table 2 Comparison of analytical and test results for vibroacoustic response (in g_{rms}) with different damping loss factors

内损耗	VA One软件	天线噪声	误差/
因子/%	分析结果/g _{rms}	试验结果/ g_{rms}	%
5.0	26.01		33.4
2.0	32.72		16.3
1.0	36.76		5.9
0.8	37.80	39.08	5.1
0.5	39.57		1.3
0.3	40.94		4.8
0.1	42.49		8.7



图 6 不同内损耗因子下声振分析与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between analytical and test results for vibro-acoustic response (in PSD) of an antenna with different damping loss factors

由图 6 可以看出,功率普密度分析结果与试验 结果在内损耗因子取值≤5.0%时相差不大,内损耗 因子≤1.0%的3条曲线间差别细微。

综合表 2 和图 6 分析结果与试验结果的对比 可知, 对类似第 2 章所分析结构的反射面天线, 取 内损耗因子为 0.5% 结果较优。

4 结束语

本文开展了卫星天线的统计能量分析建模及 声振响应分析,并将计算结果与试验结果进行对 比,表明统计能量分析方法可以有效应用于卫星天 线声振响应预示,但需要选取合适的结构内损耗因 子。本文所分析的反射面天线在内损耗因子取 0.5%时结果较优。这一结论亦可应用于类似结构 的声振分析预示。

参考文献(References)

[1] 周志成,曲广吉.通信卫星总体设计和动力学分析[M].
 北京:中国科学技术出版社,2012:309-316

- [2] Dynamic environmental criteria: NASA-HDBK-7005[S]. NASA, 2001: 88-90
- [3] LARKO J M, COTONI V. Vibroacoustic response of the NASA ACTS spacecraft antenna to launch acoustic excitation: NASA/TM-2008-215168[R], 2008: 1-15
- [4] 马兴瑞,于登云,韩增尧,等. 星箭力学环境分析与试验 技术研究进展[J]. 字航学报, 2006, 27(3): 323-331
 MA X R, YU D Y, HAN Z Y, et al. Research evolution on the satellite-rocket mechanical environment analysis & test technology[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(3): 323-331
- [5] 张瑾, 马兴瑞, 韩增尧, 等. 中频力学环境预示的 FE-SEA 混合方法研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 206-214

ZHANG J, MA X R, HAN Z Y, et al. FE-SEA hybrid method for the mid-frequency dynamic prediction[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 206-214

- [6] 韩增尧,曲广吉.统计能量分析在太阳翼噪声分析上的应用[J].中国空间科学技术,2001,2(1):52-56
 HAN Z Y, QU G J. Application of noise analysis on solar array by statistical energy analysis[J]. Chinese Sapce Science and Technology, 2001, 2(1): 52-56
- [7] 张红亮, 王海明, 秦江. 小卫星太阳电池阵结构声振响应 分析研究[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(5): 521-526

ZHANG H L, WANG H M, QIN J. Structural vibroacoustic response analysis of small satellite solar array[J]. Spacecraft Enviroment Engineering, 2015, 32(5): 521-526

- [8] 向树红, 王大均, 于丹, 等. 统计能量分析参数的综合确 定方法及应用[J]. 振动工程学报, 2004, 17(4): 477-482
 XIANG S H, WANG D J, YU D, et al. Comprehensive method of SEA parameter determination and its applications[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(4): 477-482
- [9] 骆寰宇, 邓忠民, 孙兰, 等. 飞行器声振动力学环境响应 预示方法[J]. 战术导弹技术, 2012, 10(6): 22-27
 LUO H Y, DENG Z M, SUN L, et al. The method of the response prediction of aircraft under acoustic vibration environment[J]. Tactical Missile Technology, 2012, 10(6): 22-27
- [10] 谢久林,杨松,张俊刚,等. 航天器声振动力学环境响应 分析[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 83-85
 XIE J L, YANG S, ZHANG J G, et al. The response prediction of the spacecraft under acoustic vibration environment[J]. Spacecraft Enviroment Engineering, 2006, 23(2): 83-85
- [11] VA One 2014 user' s guide[G]. ESI Group, 2014: 45-160
- [12] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 68-79

(编辑:张艳艳)

作者简介: 陈 曦(1989—), 女, 硕士学位, 主要研究方向为航天器结构动力学和大型环境试验。E-mail: xiao-jiumei@163.com。