

航天器声振动力学环境响应分析

谢久林, 杨松, 张俊刚, 耿丽艳, 贾雅琦
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 动力学环境试验技术已得到了广泛的应用, 但是动力学环境预示技术还没有得到很好的重视和发展。文章在简要概述了统计能量法 (SEA) 的基础上, 以某卫星为例, 划分为 26 个子系统和 97 个连接, 对整星的宽带声振力学环境的响应进行了估计。经过与试验结果的对比, 验证了上述方法的可行性。

关键词: 动力学环境; 统计能量分析; 响应分析; 声振试验

中图分类号: V416.2; V415.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-1379 (2006) 02-0083-03

1 引言

航天器在发射的主动段会受到发动机推进系统及喷气噪声和气动噪声引起的声振环境的影响, 特别是在航天器再入大气层超高速飞行时产生的气动噪声会对结构造成高达 50g 的均方响应加速度, 其频率范围为 20~10 000 Hz。为验证在这种宽带声振动力学环境下的可靠性, 必须先在地面对其进行声振试验。

迄今为止, 除试验手段外, 尚没有用于航天器声振环境的预示非常令人满意的理论分析方法, 而且声振试验是在航天器初样以后才能进行, 使得环境条件设计大大滞后于航天器的整体设计。目前声振动力学环境的预示方法主要有 3 种: 相似结构外推法、传统的模态法和统计能量法 (SEA)。相似结构外推法对相似参数和质量载荷影响的处理很粗略, 误差较大。由于航天器发射时所受的噪声激励中高频丰富, 传统模态法也不适用于航天器声振环境预示。

20 世纪 60 年代发展起来的统计能量分析方法, 能够克服前两种方法的缺点, 成为近年来解决工程问题, 特别是对于解决复杂系统宽带高频动力学问题的有力工具^[1]。

2 统计能量分析的含义与假设

统计能量分析 (SEA) 是研究复杂结构系统

与声场相互作用动力学问题的有效方法之一, 它的提出与发展为结构噪声的分析开辟了新的前景。“统计”是指允许有较粗略的系统模型参数, 这样可以较快地提供声振环境的预示。“能量”是指用能量描述各种动力学子系统的状态, 使用功率流平衡方程描述子系统间的相互作用关系。使用能量作为统计能量分析中独立的动力学变量就可以统一处理固体结构和流体声场间的耦合动力学问题, 从而沟通了传统机械振动与声学间的联系, 分析中先要进行子系统的能量预示, 然后再转换成所需要的加速度等动力学参数。分析的含义是指一些 SEA 参数都是所研究子系统的几何、材料和介质特性的函数, 对这些要进行分析研究^[2]。

对统计能量分析而言, 非保守耦合仅具有增加个别子系统的内部损耗因子的净效应, 只有当耦合阻尼相当大时才计入其比例系数, 所以可以按照保守耦合来建立统计能量分析模型, 同时对于复杂的系统, 还需要做出一系列相应的假设, 如: 在不同的子系统之间具有线性守恒的耦合, 适用互易原理; 在给定的子系统中, 给定的频带内所有共振模态之间具有能量等分等。

3 统计能量分析

统计能量分析的建模, 一般是将整个结构划

收稿日期: 2006-01-16; 修回日期: 2006-03-16

作者简介: 谢久林 (1977-), 男, 工程师, 工学硕士, 现从事航天器总装与环境工程的科技管理工作。联系电话: (010) 68746579。

分成若干个具有相同模态的子系统。通常建立一个复杂结构的 SEA 模型大致经过以下过程:

- (1) 将复杂结构划分成为能够储存能量的子系统单元;
- (2) 确定子系统间的连接方式和能量的传递路径;
- (3) 推导子系统的功率流方程;
- (4) 确定各子系统的模态密度、耦合损耗因子、内损耗因子和输入功率参数;
- (5) 计算出各个子系统的响应级。

3.1 子系统单元的划分

统计能量分析方法的建模比较困难。由于统计能量分析需要做出较多的假设,子系统的划分需要综合考虑各方面的因素,使得每个子系统能尽量满足 SEA 所做的假设,而且还要权衡子系统数量的多少对预示精度的影响。在实际操作过程中,这一步骤非常困难,因为理想的建模是希望尽量细化,这样可以克服许多不确定因素对响应的影响,但是越多的子系统必然使得子系统的连接成倍增长,因此统计能量分析方法的建模是一个系列的过程。本文将整个卫星划分为 26 个子系统,混响室为激励源,内声场、上下储箱为体形单元,其他板结构为板单元,承力筒为柱壳单元,天线、氦气瓶、电池及电线和电缆等仪器设备作为均布质量作用在相应的板面上。

3.2 子系统的连接

统计能量分析方法中功率流的传递就是通过子系统之间的连接来进行的,子系统之间的连接方式有 3 种:面连接、线连接和点连接。本文将内外声场与上下储箱和板面之间的连接为面连接,其中各板面上的附加质量就是通过这些面连接作用在相应的板面上的,太阳翼与南北板、天线与东、西板之间的连接为点连接,对有 26 个子系统组成的模型共建立了 97 个连接。

3.3 参数确定

统计能量分析中需确定子系统模态密度、内损耗因子、耦合损耗因子和输入功率 4 个主要参数。

3.3.1 子系统的模态密度

模态密度 $n(f)$ 是统计能量分析中最重要的参数之一。卫星上大部分都是蜂窝夹心板结构,对蜂窝夹心板结构模态密度的研究比较著名的公式是 Erickson 公式^[3]。Erickson 通过试验证实典型的蜂窝夹层结构,内核的横向剪切非常重要,而转动惯量和面板弯曲刚度的影响可以忽略,考虑了蜂窝夹心板两个方向不同的剪切模量 G_x 、 G_y 后,整个夹心板的模态密度为^[4]

$$n(f) = \frac{\pi^2 a}{2\omega_0 b} \left\{ r + \frac{1 + 0.5r^2}{[1 + 0.25r^2]^{0.5}} \right\}, \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为面板的长和宽; $r = 2\pi f \sqrt{Dm/D_{Q_x}D_{Q_y}}$; $\omega_0 = (\pi^2/b^2)\sqrt{D/m}$ 。其中: $D = E_f t_f t_c^2 [1 + t_f/t_c]^2 / 2(1 - u^2)$; m 为整个夹心板单位面积的质量; E_f 、 u 、 t_f 、 t_c 分别为面板材料的弹性模量、泊松比、面板和夹心的厚度; $D_{Q_x} = G_x t_c (1 + t_f/t_c)^2$, $D_{Q_y} = G_y t_c (1 + t_f/t_c)^2$; f 为频率。

3.3.2 内损耗因子

内损耗因子大部分来自试验结果,它反映了子系统的阻尼损耗特性,与结构阻尼机制有关。对于金属平板材料,一般其内损耗因子可取为 0.003~0.008^[5]。

对于自由阻尼层复合结构,其内损耗因子为:

$$\eta_i = \eta_2 \frac{E_2}{E_1} \frac{h_2 b_2 H_{21}^2}{I_1}, \quad (2)$$

式中: η_2 、 H_{21} 为阻尼层的内损耗因子和阻尼层中性轴的距离; E_2 、 h_2 、 b_2 为阻尼层的弹性模量、厚度和宽度; E_1 、 I_1 为基本结构的弹性模量和界面惯性矩。

3.3.3 耦合损耗因子

波传播分析是计算耦合损耗因子最成功的方法,两个直线连接结构元件间的耦合损耗因子为:

$$\eta_{ij} = \frac{LC_{gi}}{\pi\omega A_i} \tau_{ij}, \quad (3)$$

式中： L 为耦合直线长度； C_{gi} 为第*i*个子系统的波速； A_i 为第*i*个子系统的面积； τ_{ij} 为两个子系统的传递函数。当结构与声场耦合时，结构的声辐射损耗因子变成耦合损耗因子：

$$\eta_{ij} = \frac{\rho_0 C \sigma}{\omega \rho_s} \quad (4)$$

式中： ρ_0 、 ρ_s 、 σ 分别为声场密度、面积质量和结构辐射比。

3.3.4 功率输入

卫星的输入功率来自混响室的激励，一般声

$$\omega_c \begin{bmatrix} (\eta_1 + \sum_{j=2}^N \eta_{1j})n_1 & -\eta_{12}n_1 & \Lambda & -\eta_{1N}n_1 \\ -\eta_{21}n_2 & (\eta_2 + \sum_{j=1, j \neq 2}^N \eta_{2j})n_2 & \Lambda & -\eta_{2N}n_2 \\ M & M & M & M \\ -\eta_{N1}n_N & -\eta_{N2}n_N & \Lambda & (\eta_N + \sum \eta_{Nj})n_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_1}{n_1} \\ \frac{E_2}{n_2} \\ M \\ \frac{E_N}{n_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ M \\ P_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： ω_c 为频率带宽的中心频率； $\eta_i = 2\xi_i$ 为子系统的内损耗因子； E_i 为各个子系统的能量； P_i 为外部输入功率，当只有子系统 1 受到激励时， $P = P_{1, in} \neq 0, P_2 = P_3 = \Lambda = 0$ 。

对于受挡耦合损耗因子，有互易原理关系式

$$n_i(\omega)\eta_{ij} = n_j(\omega)\eta_{ji} \quad (7)$$

这样就可以求得各子系统的能量。

3.3.6 动力学响应估计

求解方程(1)~(7)可得到各子系统的能量，然后求得用能量表示的速度和加速度的均方值：

$$\langle \overline{v^2} \rangle_i = \frac{E_i}{M_i}, \quad \langle \overline{a^2} \rangle = \frac{E_i \omega^2}{M_i} \quad (8)$$

式中： M_i 为整个板的质量。

4 计算结果和试验结果的比较与分析

应用统计能量法分析软件，计算得到 31.5~8 000 Hz 频率范围内各部件的加速度响应均方根值，与试验结果比较如表 1。

场对板壳的输入功率为^[2]

$$P_{in} = \frac{2\pi^2 C_a^2 n_s(\omega)}{\omega^2 \rho_s} \sigma_{rad} \langle \overline{p_a^2} \rangle < D(\Omega) >_{inc} \quad (5)$$

式中：混响室方向函数 $D(\Omega)_{inc} = 1$ ； σ_{rad} 、 $n_s(\omega)$ 、 $\langle \overline{p_a^2} \rangle$ 分别为辐射比、板壳模态密度和声压均方值。

3.3.5 能量计算

对于 N 个子系统，有下列功率流平衡方程^[2]：

表 1 部分部件加速度均方根响应值和试验结果 (g)
Table 1 The acceleration response prediction and experimental results for some assemblies

子系统单元	计算结果	试验结果	误差 (%)
上板面	8.1919	9.8601	16.92
中板面	9.4002	10.6093	11.40
东上板	31.4621	30.9567	1.632
东下板	41.6413	33.9331	22.72
西上板	31.4622	29.0082	8.460
西下板	41.6431	32.202	29.32
南太阳翼	10.8879	10.2031	6.712
北太阳翼	10.8879	10.6015	2.702
西隔板	5.1621	7.4523	30.73
东隔板	5.0837	7.6565	33.60
下板面	11.5169	11.0622	4.110

5 结论

本文利用统计能量分析方法完成了整星在宽带声振的响应预示研究，经过与试验结果的比较，验证了这种方法的可行性，并对计算结果与试验结果的偏差进行了理论分析，为进一步的深入研究打下了基础。

参考文献 (References)

- [1] Lyon R H, Maidanik G. Power flow between linearly coupled scillators[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(5):623~639
- [2] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京理工大学出版社, 1995.[Yao Deyuan, Wang Qizheng. The theory and application of Statistical Energy Analysis[M]. Beijing Institute of Technology Press, 1995]
- [3] Erickson Larry L. Modal density estimates for sandwich panels: theory and experiment[R]. NASA TND-5771, 1979
- [4] Hideyuki K. Mathematical models for analysis of ship collision risk[J]. Navigation , 1986 , 87:23~33
- [5] Kuniji K, Sadaharu K, Kazuhiko T. An expert system for collision avoidance and its application to traffic simulations under traffic lane regulation[J]. The Journal of Japan Institute of Navigation, 1990, 84:165~171

The Response Prediction of the Spacecraft under Acoustic Vibration Environment

XIE Jiulin, YANG Song, ZHANG Jungang, GENG Liyan, JIA Yaqi

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In contract with the experimental technology of dynamics environment simulation, the prediction technology has not been paid due attention. Based on the Statistical Energy Analysis (SEA), the response of a spacecraft is estimated under a wide-band acoustic vibration environment in this paper, which is divided into 26 subsystem and 97 connections. The results show that the predictions agree with the experimental results well.

Key words: dynamic environment; statistical energy analysis; response analysis; acoustic experiment