

随机振动试验和噪声试验的有效性分析

李春丽, 陈强洪, 蒲永飞

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 文章首先从频率范围、输入能量、振动模态和传递路径等四个方面对随机振动试验和噪声试验的差异进行了详细分析; 之后从内声场和结构传递振动两方面对组件级试验的有效性进行初步评估, 着重讨论组件级振动试验项目的优化选择方法; 通过综合考虑, 对航天器系统级振动试验项目的选择提出了合理建议。

关键词: 随机振动试验; 噪声试验; 裁剪; 组件级; 系统级

中图分类号: TB534+.3; V416.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-1379(2007)03-0187-03

1 前言

随机振动试验和噪声试验都是鉴定航天器高频振动环境的关键试验项目, 两种试验方法是不能完全代替的。为了保证航天器的高可靠性, 最好是既做随机振动试验又做噪声试验。但是, 这一做法不仅要增加研制成本, 还可能对航天器造成不必要的累积疲劳, 因此我们必须对这两种试验的差异进行分析, 然后确定对振动试验项目的合理裁剪。

2 随机振动试验和噪声试验的差异分析

两种试验的本质区别在于能量输入方式和输入位置的不同。随机振动试验的能量是通过振动台底座输入到试件, 而且只是从一个方向输入, 引起的结构振动也主要是单一方向上的; 而噪声试验的声激励是直接作用在试件表面上, 是空间激励, 从各个方向作用到试件上, 引起的结构振动也是多维的。能量输入方式和输入位置的不同使两种试验在很多方面存在明显的区别, 主要区别如表1所示。

表1 随机振动和噪声试验的主要差异

Table 1 Primary differences between random vibration tests and acoustic tests

| 项目 | 试验类型 | |
|------|------------------|-----------------|
| | 噪声试验 | 随机振动试验 |
| 频率范围 | 30~10 000 Hz | 20~2 000 Hz |
| 能量输入 | 能量输入多少与结构的表面积成正比 | 能量输入多少与振动源的能量有关 |

续表 1

| 项目 | 试验类型 | |
|------|--|------------------------------------|
| | 噪声试验 | 随机振动试验 |
| 传递路径 | 有两种方式: 一种通过结构传递的振动, 还有一种通过内声场直接作用于试件表面。后者属于声振激励, 可能存在声振耦合现象。 | 在试件中的传递过程只依赖于试件的相关连接结构, 是一个结构传递路径。 |
| 振动模态 | 对类平板结构的激励效果明显 | 对类弹簧质量结构的激励效果明显 |

导致以上区别的主要原因为:

(1) 频率范围不同

在随机振动试验中, 振动能量是从振动台通过传力连接件、滑板、夹具传到试件底部, 这种传递结构相当于一个低通滤波器, 在其基础频率以上的激励频率开始衰减, 来自于初始输入的高频振动模态被过滤掉。在声学试验中, 声学能量是直接作用在结构表面的, 在结构和激励源之间没有类似低通滤波器的传递结构存在, 这样输入的高频能量不会衰减或衰减很少。

(2) 输入能量不同

在随机振动试验中, 振动能量是通过试件底部输入到试件上的, 不依赖于表面面积。声学能量是通过试件表面传递到结构上的, 更大的面积将接受更多的能量输入。因此, 组件的面积/质量比越小, 随机振动试验给予的能量越多; 相反, 组件的面积/质量比越大, 噪声试验提供的能量更多。

(3) 振动模态不同

在随机振动试验中, 振动输入是通过试件底

收稿日期: 2007-03-06; 修回日期: 2007-05-15

作者简介: 李春丽 (1975-), 女, 工程师, 主要从事动力学环境条件研究。联系电话: (0816)2485475; E-mail: lichunli99@yahoo.com.cn.

部传递到试件上的,这种传递结构的有效行为类似于弹簧,因此随机振动激励对类弹簧-质量类型的模态效果更好。对于多模态的类平板结构来说,噪声激励是最好的选择,因为在噪声试验中这种结构的高频特性不会衰减或衰减很少。

3 组件级振动试验项目的优化选择

虽然气动噪声和发动机噪声对航天器来说非常严酷,但是这种高强度随机声激励只作用于航天器外部壳体。振动的壳体一方面通过连接结构传递振动,另一方面引起内部空气扰动,形成内声场。内声场和结构传递振动在航天器内部形成恶劣的动力学环境,引起内部结构和组件的振动^[1]。因此,对于内部结构和组件来说,直接的激励源是结构传递振动和内声场。本文不考虑声振耦合,只考虑结构传递振动和内声场独立作用于组件上的情况。

3.1 结构传递振动

对于结构传递振动来说,随机振动试验的考核效果更好;但是由于随机振动试验设备能力的限制,无法考核2 000 Hz以上的振动环境,需要借助于噪声试验;因此选择哪种试验方法取决于组件经历的振动环境的频率范围。

结构传递振动对组件的影响主要取决于组件安装结构的频率敏感性,因为安装结构的频率特性直接影响着组件振动环境的频率特性。

(1) 如果安装结构对2 000 Hz以上频率敏感,那么安装结构的基础频率将高于2 000 Hz,对振动输入中的高频成份具有放大作用,在实际飞行中组件将经历高频振动环境。相比而言,只有噪声试验能考核到组件的这种高频振动环境(2 000 Hz以上)。在这种情况下进行的噪声试验应该注意一个问题,即噪声环境只能激励对噪声敏感的组件。如果组件的面积/质量比率大,则其对噪声比较敏感,直接将其悬挂在声学场中就能激励其高频响应;但是,如果组件的面积/质量比率小,直接的噪声不能激励其高频响应,这时就需要将组件安装在一个平板上,这个平板的面积分布和动态特性必须与安装结构相似,才能给组件提供一个更真实的高频振动环境。

(2) 如果安装结构对2 000 Hz以下频率敏感,那么安装结构的基础频率低于2 000 Hz,相当于一个低通滤波器,把振动输入中的高频成分过滤掉了,传递到组件上的振动频率低于2 000 Hz,因此随机振动试验就可满足频率要求。

3.2 内声场

内声场直接作用于航天器的内部组件,对组件的影响主要取决于组件的噪声敏感性。

(1) 如果组件的表面积/质量比大,则其对噪声敏感,内声场对其影响大,噪声试验比随机振动试验更能暴露组件的潜在失效模式。

(2) 如果组件的表面积/质量比小,则其对噪声不敏感,内声场对其影响不及结构传递振动大,随机振动试验更能暴露组件的潜在失效模式。

众所周知,表面积大、质量轻的结构对噪声敏感,但是表面积/质量比究竟为多少时,可以认为组件对噪声敏感呢?在此介绍一种利用Miles方程来评估组件噪声敏感性的方法^[2],通过该方法可以估算出一个平衡比。当组件的表面积/质量比大于这个平衡比时,组件对噪声敏感;反之,小于这个平衡比时,组件对噪声不敏感。

Miles方程表示为

$$G_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\pi}{2} f_n Q D_{\text{p,s}}}, \quad (1)$$

式中: f_n 为固有频率,Hz; Q 为品质系数, $Q=1/2\zeta$, ζ 为阻尼比; $D_{\text{p,s}}$ 为在 f_n 点的输入功率谱密度值。

现在假设一个样本组件,其固有频率为 $f_n=200$ Hz,质量为 $M=10$ kg,品质系数为 $Q=10$,随机振动输入谱和噪声输入谱分别如图1和图2所示。分别利用Miles方程计算出样本组件在随机振动试验和噪声试验中固有频率点上获得的能量。

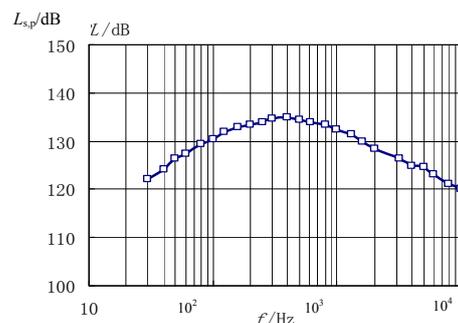


图1 典型的随机振动试验频谱

Fig.1 Typical random vibration test spectrum

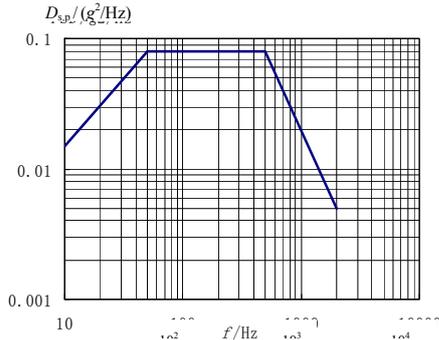


图2 典型的噪声试验要求

Fig.2 Typical acoustic test requirements

3.2.1 随机振动响应计算

在200 Hz频率处, 样本组件的功率谱密度值 $D_{p,s}$ 为 $0.08 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 。利用Miles方程计算样本组件的均方根加速度 G_{rms} 为 16 g 。

3.2.2 声学响应计算

在200 Hz频率处, 样本组件的声压级 $L_{s,p}=133.5 \text{ dB}$, 首先计算样本组件在固有频率点上的声压频谱密度 P_s 。

$$P_s = P^2 / \Delta f, \quad (2)$$

式中: P_s 为声压频谱密度, Pa^2/Hz ; P 为声压, Pa ; Δf 为频率带宽, Hz , $1/3$ 倍频程的 Δf 为 $0.231f_n$ 。

声压 P 是从声压级 $L_{s,p}$ 中推导出来的。

$$P^2 = P_0^2 \times 10^{L_{s,p}/10}, \quad (3)$$

式中: $L_{s,p}$ 为声压级, dB ; P_0 为基准声压, Pa , 通常 $P_0=2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

均方根声压 P_{rms} 的计算公式为

$$P_{\text{rms}} = (\pi/2 \times P_s \times f_n \times Q)^{1/2}, \quad (4)$$

式中: P_{rms} 的单位为 Pa 。

将已知参数分别代入公式(2)~(4)中, 得到样本组件的均方根声压 P_{rms} 为 780 N/m^2 。

3.2.3 平衡比率

均方根加速度除以均方根声压得到平衡比, 在200 Hz频率处样本组件的平衡比为 $G_{\text{rms}}/P_{\text{rms}}=0.201 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。对于不同的组件, 平衡比是不一样的。

如果组件的表面积/质量比大于 $0.2 \text{ m}^2/\text{kg}$, 噪声试验将更有效; 如果其值小于 $0.2 \text{ m}^2/\text{kg}$, 随机振动试验将更有效; 如果其值接近 $0.2 \text{ m}^2/\text{kg}$, 则任何一个试验都不比其他试验更有效, 有可能两个试验都要进行。

4 系统级振动试验项目的优化选择

航天器结构和组件有些易受随机振动影响, 有些易受噪声影响, 因此选择任何一种试验方法都不可能暴露所有的潜在失效模式。为了充分暴露航天器的潜在故障又不造成航天器的累积疲劳, 可以选择将组件级试验和系统级试验进行综合考虑, 使它们在暴露失效模式方面能相互补充。

易受噪声影响的组件放在组件级试验中考核。因为噪声是通过表面直接作用于组件的, 与组件在航天器上的安装位置没有必然的联系, 在组件级就可以对组件的噪声环境进行充分的考核。

而对于易受随机振动影响的组件来说, 应该放在系统级振动试验中考核。因为组件的随机振动环境与组件在航天器上的安装位置有密切关系, 边界条件的模拟程度影响着组件级试验的考核效果。事实上, 边界条件很难完全真实地模拟, 这就使组件级随机振动试验不能完全到达考核目的, 需要在系统级试验中补充考核。

5 结束语

通过对噪声试验和随机振动试验差异的分析, 决定了前者在以下两种情况下比后者更有效: (1) 考核2000 Hz以上的高频振动环境; (2) 考核噪声环境。因此组件级振动试验项目的选择首先需要对组件真实振动环境进行分析, 确定组件是否经历了高频振动环境, 是否经历了噪声环境, 经历了噪声环境的组件是否对噪声敏感等, 根据这些分析结论来选择组件及振动试验项目。对于航天器系统级来说, 关键是确定航天器需要暴露的主要失效模式, 再进行针对性的选择。

不管是对以上哪种情况进行判断, 都需要对航天器及其组件的结构细节及固有频率有详细的了解, 并需要借助于大量的试验研究。只有基于试验经验的理论分析才更具有工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 黄寿康, 等. 流体动力·弹道·载荷·环境[M]. 北京: 宇航出版社, 1991 [Huang Shoukang, et al. Hydrodynamics·trajectory·loads·environment[M]. Beijing: Astronautics Press, 1991]
- [2] Forgrave J C, Man K F, Newell J M. Acoustic and random vibration test tailoring for low-cost missions[C]// IEST Proceedings, 1998