

文章编号:1006-1355(2017)06-0131-04+162

结构星噪声与振动组合环境激励试验及效应研究

晏廷飞, 方贵前, 刘沫

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要:受地面试验技术条件的限制,目前对卫星发射及飞行过程所经历的复合环境采用单项环境模拟试验来实现,通常是进行随机振动试验或者噪声试验。实际上,无论单独的随机振动试验还是单独的噪声试验都难以准确模拟卫星在发射飞行状态所经历的复合环境,在不同频段会存在“过”或“欠”试验的问题。以某型号结构星为对象,开展噪声与振动组合试验技术研究,对声振组合试验、随机振动试验、噪声试验的有效性及其耦合效应进行分析与总结,为后续卫星产品开展相关试验提供参考。

关键词:振动与波;声振组合;噪声试验;随机振动;耦合效应

中图分类号:O327;TK417;V214

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.06.027

Random Vibration and Acoustics Combined Testing and Effect Analysis of Satellites

YAN Ting-fei, FANG Gui-qian, LIU Mo

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

Abstract: Due to the limitation of ground environment test technique, only the single-item environment test is used currently to simulate the combined environment during the period of satellite launch and flight. In general, random vibration test or acoustics test is carried on individually. In fact, it is difficult to precisely simulate the combined environment by using either of these methods since the over-tests or under-tests may occur very often in different frequency bands. In this study, with a type of the satellite structure as the object, the acoustics and vibration combined test technique is discussed. The effectiveness and coupling effect of the acoustics and vibration combined test, random vibration test and acoustic test are analyzed and summarized. This study can give some reference for similar test for other satellite products.

Key words: vibration and wave; acoustics and vibration combination; acoustic test; random vibration; coupling effect

卫星发射及飞行过程中,受到运载传至卫星的随机振动载荷激励和从空间传到卫星的噪声载荷激励。目前对卫星发射及飞行过程经历的复合环境采用单项环境试验模拟的方法来实现,通常是随机振动试验或者噪声试验选择一项进行^[1]。一般对于结构紧凑的、不超过450 kg的质量密集型卫星,可采用随机振动试验代替噪声试验^[2],而规模较大的卫星则开展噪声试验。从卫星所经历的实际环境分析来看,无论单独的随机振动试验,还是单独的噪声试验都难以准确模拟卫星在发射飞行状态所经历的复合环境,卫星结构在不同频段会存在“过试验”或“欠试验”的问题^[3]。

由于长期缺乏充分、深入的基础研究,对卫星的振动、噪声等环境没有准确的认识和把握,近年来对于超过450 kg接近1 000 kg的中小卫星,对其应进行随机振动试验还是噪声试验产生了很大争议^[4]。

本文以某型号结构星为对象,开展声振组合试验技术研究,对声振组合、随机振动试验、噪声试验的有效性及其耦合效应进行分析与总结,为相关卫星开展声振试验提供参考。

1 理论及方法

1.1 组合激励加载方法

噪声与振动组合加载时,加载方法基本与单独试验相同^[5],如振动控制采用4个加速度点峰值平均控制^[6],控制点安装在卫星与振动工装连接的四个底座上,呈对称分布。噪声试验采用4点声压级平均控制,声传感器位置距试件外表面约0.5 m处^[7],高度与卫星质心位置基本处于同一水平面上,呈对

收稿日期:2017-03-24

基金项目:总装共性技术资助项目(B112345678)

作者简介:晏廷飞(1975-),男,北京市人,硕士,主要研究方向为航天器动力学环境模拟技术。

E-mail: 1951294335@qq.com

称分布。与单项试验不同的是,需考虑振动自检噪声及噪声与振动同步加载控制。

1.2 结构响应数据采集处理

随机振动试验或噪声试验中结构受激励而产生的响应数据均具有稳态特征,因此采样时可用统计平均的方法进行处理。根据实践经验,随机振动试验或噪声试验响应数据处理差异主要在于分析带宽,随机振动试验中分析带宽一般为10 Hz~2 000 Hz,噪声试验中数据处理分析带宽一般为20 Hz~4 000 Hz。

1.3 受声振组合激励结构响应耦合分析

结构受到振动台产生的随机荷载激励和混响室的漫射声场激励时,根据随机信号分析原理,采用谱分析的方法定性分析随机载荷作用下结构的动力学响应。由于输入、输出均具有随机特性,进行如下假设^[8-9]:

(1) 随机激励过程为平稳随机过程(忽略输入的微小动态变化);

(2) 混响声场中的声能量流由具有随机相位的平面波叠加而成,并且各向传播概率相同,声能密度处处相等;

(3) 混响声场中的各个平面波互不相干。

则随机振动与混响声场两个随机环境激励下,结构输入输出功率谱密度关系为

$$(x+a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$\begin{bmatrix} S_{uu} & S_{qu} \\ S_{uq} & S_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{F_r F_r} & S_{F_r F_a} \\ S_{F_a F_r} & S_{F_a F_a} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}^H$$

$$\begin{bmatrix} S_{uu} & S_{qu} \\ S_{uq} & S_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{F_r F_r} & S_{F_r F_a} \\ S_{F_a F_r} & S_{F_a F_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}^H \quad (1)$$

式(1)中 $\begin{bmatrix} S_{F_r F_r} & S_{F_r F_a} \\ S_{F_a F_r} & S_{F_a F_a} \end{bmatrix}$ 为输入功率谱矩阵, $\begin{bmatrix} S_{xx}^r & S_{yx}^r \\ S_{xy}^r & S_{yy}^r \end{bmatrix}$ 表示结构响应功率谱矩阵, $S_{F_r F_a}$ 、 $S_{F_a F_r}$ 表示随机振动和混响声场的互谱密度, S_{uu} 为结构响应位移功率谱, S_{qq} 为结构响应测点处压力跳变的功率谱。

经过验证,噪声场对随机振动信号影响有限,而随机激励对噪声场的影响远小于声场激励的强度,因此可假定随机激励与噪声激励互不相关,则有

$$S_{F_r F_a} = S_{F_a F_r} = 0 \quad (2)$$

代入式(1)整理得到结构位移响应谱密度为

$$S_{uu} = H_{11} S_{F_r F_r} H_{11}^T + H_{12} S_{F_a F_a} H_{12}^T \quad (3)$$

其中 H_{11} 、 H_{12} 分别为随机激励和声激励对结构位移响应的传递函数。

采用实测试验数据进行分析时, H_{12} 用单独噪声试验的数据进行计算得到, H_{11} 则用单独振动试

验的测试数据进行计算得到。利用式(3),对于同样的结构,可分别测出单独振动、单独噪声、声振共同激励下结构响应的传递函数,然后通过三个传递函数进行耦合分析。

2 研究对象及技术条件

2.1 研究对象

用于研究的对象为某型号结构星。星体包络尺寸为2 566 mm×1 507 mm×3 174 mm,卫星为未加注状态,质量约为980 kg,其为一颗接近1 000 kg左右的典型卫星,具有较好的代表性。图1所示为卫星的外形示意图及坐标系定义。

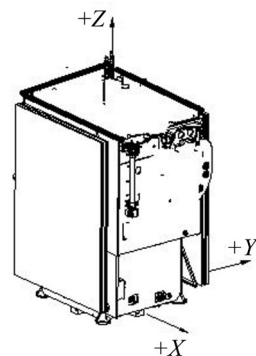


图1 卫星坐标系定义

卫星安装边界与随机振动试验时一致,采用4个抗箭锥套及M12的连接螺钉与振动试验工装连接。工装底板通过力传感器、转接件与卫星底座连接在一起,示意图见图2。

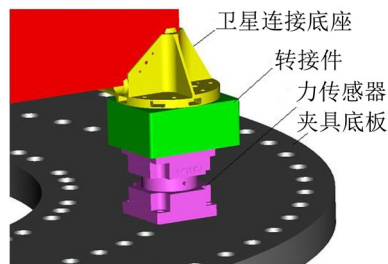


图2 工装与卫星连接局部示意图

2.2 试验条件

由于目前制定的随机振动试验条件与噪声试验条件具有等效性,因此试验条件选择该型号典型的随机振动试验条件(见表1)和噪声试验条件(见表2)。

表1 随机振动试验条件 单位:g²/Hz

频率范围/Hz	试验量级
10~150	+6 dB/Oct
150~600	0.01 g ² /Hz
600~2 000	-6 dB/Oct
总均方根值	3.389 grms

表2 噪声试验条件/dB

中心频率/Hz	试验量级
31.5	121
63	126
125	131
250	135
500	130
1 000	126
2 000	125
4 000	124
8 000	119
总声压级	138.5

振动环境对次级结构产生的载荷频率范围一般低于 300 Hz^[10],因此声振组合试验振动加载控制谱频率范围一般为 10 Hz~300 Hz,谱密度与表中规定一致。

3 结果与分析

3.1 噪声试验与随机振动试验等效性分析

噪声试验时将卫星放置于高声强混响室中,由发声器(喇叭)提供噪声来模拟卫星经历的声振环境。随机振动试验则是通过转接工装将卫星固定在振动台上,由振动台提供机械激励来模拟卫星经历的声振环境,二者存在明显差异。最主要的区别在于能量输入方式和输入位置的不同^[4-5,11]。随机振动试验的能量是通过振动台输入到试件,通过机械结构进行传递,为点或面激励;而噪声试验激励则是直接作用在试件表面上,为空间激励,从各个方向作用到试件上。从产品结构响应来看,噪声试验对类平板结构的激励效果明显,而随机振动试验则对类弹簧质量结构的激励效果更明显。

卫星推进舱单机安装处随机振动激起的响应普遍高于噪声试验,典型测点响应在随机振动试验中为 9.57 grms,在噪声试验中为 2.38 grms。从功率谱密度曲线(见图 3(a))分析来看,大部分频段随机激励产生的响应比噪声试验中激励产生的响应大。图 3(b)为卫星太阳帆板的结构响应曲线,噪声试验的量级明显大于随机振动试验,说明对于处于外部声

场,对声比较敏感的薄板结构噪声试验更为有效。另外噪声试验的响应与随机振动试验的响应存在明显的分界点。图 3(c)为卫星天线的结构响应曲线,随机振动试验中激起的两个结构响应共振峰,在噪声试验结构响应中并没有出现。说明随机振动试验与噪声试验不等效。

3.2 卫星声振组合激励试验效应分析

声振组合激励下的响应基本包括随机振动和噪声试验激励的响应。推进舱、平台舱上的结构响应 450 Hz 前与随机振动响应一致,450 Hz 后则与噪声试验一致。载荷舱、侧舱板上的结构响应 200 Hz 前与随机振动试验响应一致,200 Hz 后与噪声试验一致。正如预计,组合试验响应在 100 Hz 以内相对较大。这是由于低频振动激励出了卫星舱板的模态。卫星的侧舱板上也反映出低频部分的响应有明显增加。这说明板状结构的正交耦合很大。这些结果在整个结构上都有体现。

从加速度响应分析来看(曲线见图 4),依据前文给出的分析方法开展了耦合效应分析。

对于离振动激励较近且质量分布较为集中的推进舱等,全频段声振耦合作用不明显(见图 4(a)),响应主要体现为随机激励产生的机械结构响应。对于离振动激励稍远的平台舱及载荷舱,其部分测点在 200 Hz~350 Hz 组合激励响应略高于单项试验响应。进一步分析其传递函数,比较三种不同的声振组合试验响应传函(见图 5),并利用式(3)进行计算,在小于 200 Hz 的低频段,顶板的第二个响应峰值处(138 Hz)全频段声振组合试验的传函最大,说明该处响应是由噪声激起的;在大于 400 Hz 的高频段,200 Hz 分频和 400 Hz 分频声振组合响应传递函数基本一致,但同全频段声振组合传函相比存在差异,说明在高频段随机振动与噪声激励频率重叠,结构响应存在一定的耦合作用,后者未出现明显的波峰和波谷。

对于侧舱板(见图 4(b))、太阳帆板(见图 4(c))等表面暴露且远离机械激励源的结构,由于随机振动响应与噪声激励的响应分界频点较为明显,100 Hz 前与随机振动响应一致,100 Hz 后则与噪声试验响

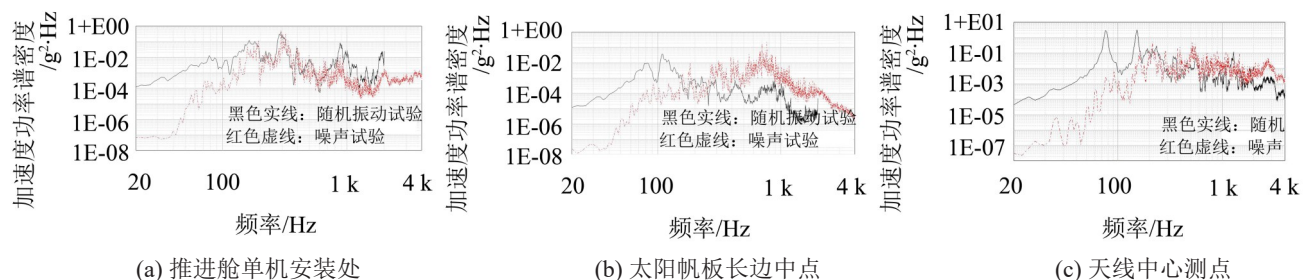


图3 随机振动试验与噪声试验加速度响应谱对比

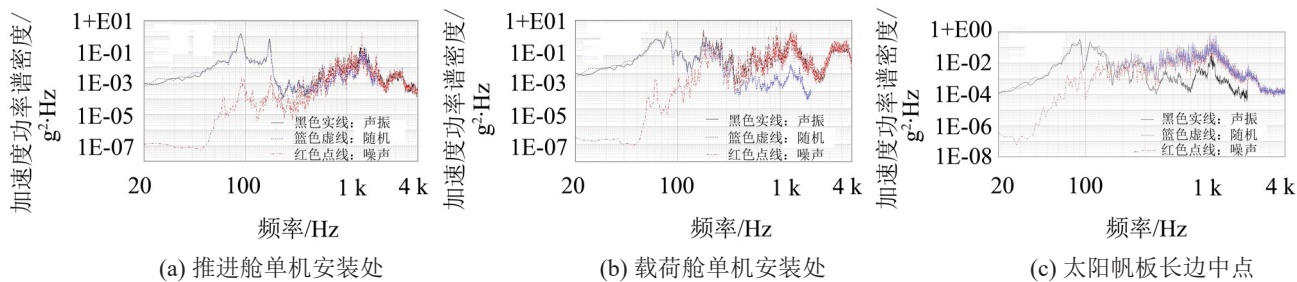


图4 声振组合试验与单项试验加速度响应谱对比

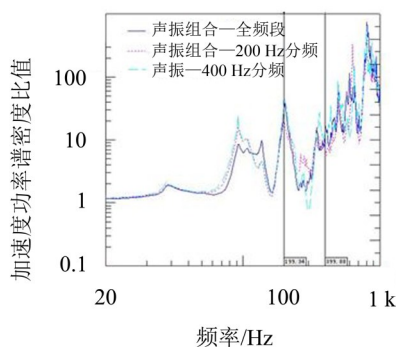


图5 不同声振组合试验结构响应传递函数

应一致,组合激励耦合作用不明显。

一个奇怪的现象是对大多数测点而言,组合激励试验时与单独噪声试验相比,高频部分存在明显削弱。纯噪声激励产生的结构响应总均方根值甚至高于声振联合试验的结果,这说明低频部分增加了较大的随机振动后,板子的高频部分响应被削弱。高频响应的少量削弱反映在一个很宽的频带上,它足以抵消掉低频部分幅值的增加对总均方根的影响。

国外相关文献^[2]也有类似的发现,并对高频部分的衰减进行了初步研究,发现声振组合试验在低频部分产生的巨大偏差增加了蜂窝板的非线性阻尼,从而降低了蜂窝板高频部分响应。另一个可能性在于板子的噪声特性以及振动在低频部分到底受哪些因素影响大,如声耦合效应和大型板表面的声辐射作用等。在卫星噪声试验中对太阳帆板和舱板间的反射声场进行声测量(布置图见图6),发现在中心频率125 Hz、250 Hz处的响应及总声压级比激励声谱高出5 dB以上,说明太阳帆板与舱板间形成空气腔,在声场激励下空腔出现声反射及辐射叠加的情况。

无论如何,如果高频衰减比较明显,则极可能当飞行环境中的随机振动载荷很大时,单噪声试验中高频段的响应测量结果是较为保守的。

4 结 语

本文以某卫星结构星为研究对象,通过试验验证及耦合分析计算,研究对比了声振组合试验、随机

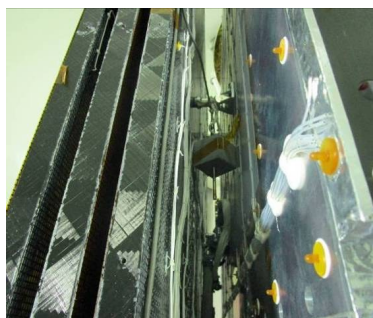


图6 太阳帆板与舱板间的声测点位置图

振动试验、噪声试验中卫星的结构响应以及声振组合试验的有效性及其耦合效应,研究结果表明:

(1) 随机振动试验与噪声试验并不等效,声振组合试验是模拟发射环境的一种较为可行的方法。它在结构上同时加载随机激励和噪声载荷,并且可以输入整个谱型的能量。输入载荷激励产生的耦合效应会对高频段有所影响,而这种现象在单噪声试验中则不会出现;

(2) 从大多数测点响应分析来看,在低频部分,随机激励激起的响应占主要部分,而在相对高频的部分,混响声场激起响应占主要部分。混响声场激起的模态数要多于随机振动试验中激起的模态数,这是由于混响声场激励为多维声振激励,能激发产品结构各方向的模态,使结构响应具有比单轴振动试验响应更为丰富的共振峰;

(3) 通过声振组合试验与单项试验的对比分析,声振组合激励不仅弥补了噪声试验在低频段激励“欠”的问题,还能在高频段弥补远离激励源随机振动传递衰减的问题,这与卫星经历的发射飞行环境更接近。

(4) 由于它用一种更为可行的方式描述了卫星发射飞行环境,因此在有效载荷作用下初样结构的声振组合试验中测量到的响应数据,可以用于修正部件单机级的随机振动试验条件,该试验条件能更好反映单机经历的真实环境。

本文研究的声振组合试验是单轴振动与噪声试验组合,随着多维振动试验技术的成熟和广泛应用,更为可行的是开展多轴低频随机振动与噪声组合试

(下转第162页)