

随机振动加速度功率谱密度带外超差问题分析

邱大芦[†] 次永伟 邵小平 付乐平

(上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘要 随机振动试验中存在的加速度功率谱密度带外超差问题对普遍采用的随机振动试验非常重要, 本文分析了功率谱密度带外超差出现的原因、征兆、对试验产生的影响以及采取的解决措施, 并且分析了常用随机振动试验和振动试验计量检定标准中对功率谱密度带外超差的规范要求。

关键词 随机振动, 加速度功率谱密度, 带外超差

DOI: 10.6052/1672-6553-2014-054

引言

目前在各型号分系统、组件单机的随机振动试验过程中, 许多产品设计师、工艺师以及试验师对产品试验条件的制定、试验方法选用、试验过程控制、试验标准规范等均存在迷惑和误解。现在仍有很多工程技术人员在进行振动试验时单纯依据功率谱密度是否超差来衡量试验成功与否, 有的则依靠总均分根加速度的容差限来衡量振动试验成功与否。忽略了不同试验频带上谱的信息, 特别是忽略了随机振动试验功率谱密度带外超差的问题^[1-5]。

1 带外加速度功率谱密度

在任何一种随机振动试验中, 振动信号都具有一定的频率带宽, 可分为工作频带内、外两个部分。工作频带以内部分的频率分量是有效的, 振动试验控制过程就是使工作带宽以内的频率分量达到精度要求。带外频率分量在理想情况下被认为是零而不加控制, 但是这种理想情况是不存在的^[6,7]。

1.1 振动试验系统对带外信号的“滤波”

在振动试验控制准备工作过程中, 控制设备输给振动台的激励信号是按照试验规范给出的工作频带内的 PSD 值(功率谱密度)来设置的, 激励信号在频谱的带外设置为零。对于理想的传递函数为 1 的系统, 这样的信号作用于振动台产生的振动响应

信号, 其工作频带之外的频率成份应该为零。但由振动台、夹具、试件组成的系统的非线性和在带外的共振频率等因素的影响, 振动响应信号带外的频率成份并不为零, 有时还可能很大, 一般控制系统是在理想情况下按照采样定理, 将信号量化的采样率设置外最高工作频率的两倍, 同时考虑到滤波器衰减带斜率达不到理想状态, 工程上将采样频率设为最大工作频率的 2.56 倍。在实际试验过程中, 当带外出现频率成份时, 按照最高工作频率的 2.56 被采样仍然会出现频率混淆。带外频率成份仍将会混淆到带内并叠加在带内频率成份上, 使信号的频谱出现正误差。此时控制系统会把频率混淆产生的这种正误差误认为是工作频带内谱线超差而进行修正使驱动谱减小, 从而使实际的振动试验出现欠试验。如果我们采用截止频率与信号工作频率相同的低通滤波器将采样信号带外工作频率成份滤除掉, 就可以解决上述问题。

1.2 加速度功率谱密度带外超差原因分析

A. 低通滤波器性能降低, 导致高频信号混入

常用的低通滤波器的指标应做到: ①不能对 A/D 模数转换器原有的幅频特性造成影响, 滤波器的带内波动应被限制在 0.3dB 以内; ②滤波器的带内噪声应低于 -65dB; ③低通滤波器过渡带的斜率大于 112dB/oct。

B. 振动系统动态特性下降

其中又分三种情况, 一是系统老化性能下降;

二是系统结构出现改变,导致系统动态特性变化;三是振动台、夹具、夹具组成的系统动态特性差.这三种原因都导致了振动系统的动态特性下降,固有频率降低.例如:曾有振动台安装调试过程中,动圈与台体连接时,由于连接面为锥形,垫片在连接面上发生偏移,动圈与台体没有紧密连接,导致带外超差的发生.

1.3 加速度功率谱密度带外超差带来的影响

- (1)造成功率谱控制困难;
- (2)降低振动测试系统动态范围,如图1所示;
- (3)忽略了带外高频能量,造成产品过试验,如图3所示;
- (4)如果带外频率混淆到带内频率成份上,使系统误认为带内超差,降低驱动信号来进行平衡,则会造成欠试验.

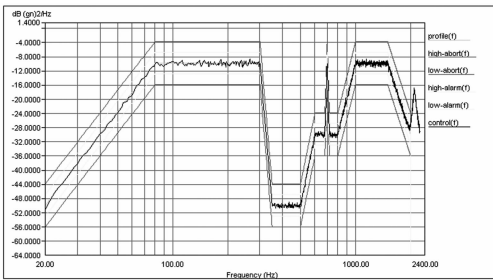


图1 振动试验系统40dB动态范围检定

Fig.1 40 db dynamic range of vibration test system verification

如图2所示,某运载型号单机振动试验系统在进行40dB动态范围检定时,1950Hz~2000Hz处带外超差,造成该频率处出现超差,间接降低了振动试验系统的动态范围.

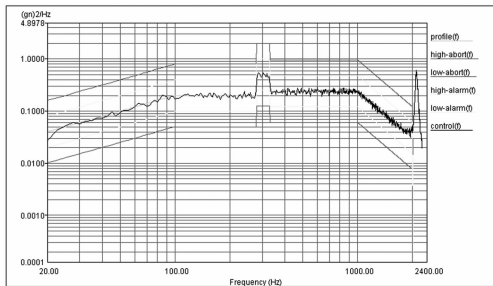


图2 振动试验加速度功率谱带外超差实例

设定总均方根加速度值:17.935grms
控制总均方根加速度值:19.122grms

Fig.2 Vibration test acceleration power spectrum band out - of - tolerance instance

在20~2000Hz频带上观察频谱图时,一般情

况下技术人员会依据总均方根加速度来判断试验是否符合要求,试验的总均方根加速度控制值超过设定值一定水平,只要符合相关试验标准的要求,便认为试验是符合要求的,即便高频略有超差,依据标准也是符合试验容差要求的.但是,如果将频带放宽至2000Hz以上,就可以清楚的看出其中的带外超差.

表1 某型号单机振动试验条件

Table 1 A single vibration test conditions

Frequency (Hz)	ASD(g ² /Hz)	RMS(g)
20 ~ 100	+3dB/oct	-
100 ~ 280	0.2	-
280 ~ 330	0.5	17.93
330 ~ 1000	0.24	-
1000 ~ 2000	-9dB/oct	-

如图2所示振动试验过程中,带外加速度功率谱密度达到了0.6g²/Hz,带宽为100Hz左右,表1中的振动条件280~330Hz处加速度功率谱密度为0.5g²/Hz,带宽仅为50Hz,因此可以看出高频的带外能量是相当大的.该试验条件要求总均方根加速度值为17.93grms,实际试验过程中总均方根加速度值为19.12grms,带外超差6.64%,从能量角度看,高频过试验是相当严重的,由于相对整个试验频带来看带外超差带宽较窄,所以反映在总均方根加速度上的值相对较小,特别容易被技术人员忽略.但是这仍然是一个需要考虑的“过试验”问题.

1.4 加速度功率谱密度带外超差征兆

- (1)试验过程中发现高频功率谱密度超差,控制曲线异常,此时需确认是否出现带外超差问题,如图2所示;
- (2)功率谱密度在容差范围内,控制曲线正常,但总均方根加速度与设定值相差较大,如图2所示,总均方根加速度相差6.64%;
- (3)在倍频程斜率较大时,加速度功率谱密度带外超差问题容易出现;
- (4)振动试验台进行搬迁、结构整体拆装维修,可能改变系统动态特性时,造成加速度功率谱密度带外超差.

1.5 加速度功率谱密度带外超差解决措施

- (1)提高振动试验系统的削波因数.

理论上自由度数越大,控制精度越高.控制谱PSD统计自由度(DOF)经典计算公式为:

$$DOF = 2K(2N - 1) \tag{1}$$

其中, K: 每个测量通道的一次闭环控制过程中独立采样次数(置信因子),也叫削波因数;

N: 平均加权系数;

因此提高削波因数 K, 可以提高振动系统的控制精度, 降低加速度功率谱密度带外超差率. 如图 3、图 4 所示, 某型号产品进行振动摸底试验, 采用 3σ 削波因数时, 加速度功率谱密度带外峰值为 $0.11g^2/Hz$, 设定总均方根加速度值为 11.979 grms , 控制总均方根加速度值为 12.294 grms , 采用 4σ 削波因数时降低到 $0.08g^2/Hz$, 设定总均方根加速度值为 11.979 grms , 控制总均方根加速度值为 12.251 grms 降低了 27.3% .

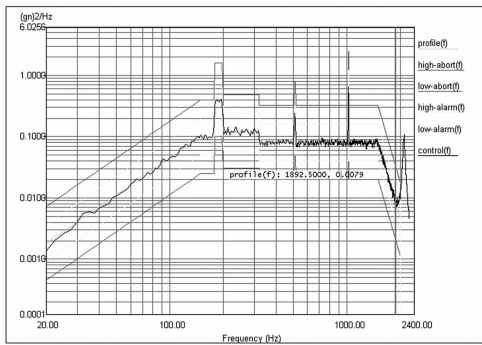


图 3 采用 3σ 削波因数单点控制的加速度功率谱密度

Fig. 3 The ASD using 3 sigma clipping factor of single point of control

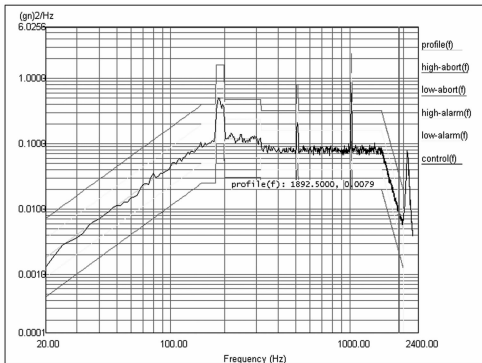


图 4 采用 4σ 削波因数单点控制的加速度功率谱密度

Fig. 4 The ASD using 3 sigma clipping factor of single point of control

2 带外加速度功率谱密度的规范标准

随机振动试验标准的分析比较:

(1) 采用多点控制方式进行随机振动试验. 如图 5 所示, 采用 4σ 削波因数多点控制方式后, 加速度功率谱带外密度为 $0.067g^2/Hz$, 设定总均方根加速度值为 11.979 grms , 控制总均方根加速度值为 12.210 grms . 与 3σ 削波因数单点控制方式的 $0.11g^2/Hz$ 相比, 降低了 39% .

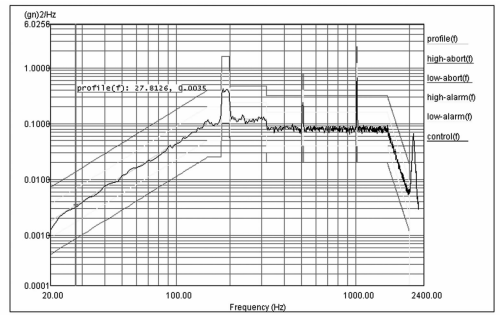


图 5 采用 4σ 削波因数多点控制的加速度功率谱密度

Fig. 5 The ASD using 4 sigma clipping factor of multipoint control

表 2 三种不同控制方式的均方根加速度与加速度功率谱带外峰值

Table 2 The RMS and ASD peak value of the three different control way

The control mode	Enactment RMS	Control RMS	ASD peak value
3σ clipping factor and single point control	11.979 grms	12.294grms	0.11g ² /Hz
4σ clipping factor and single point control	11.979 grms	12.251 grms	0.08g ² /Hz
4σ clipping factor and multipoint control	11.979 grms	12.210 grms	0.067g ² /Hz

综合对比图 3 ~ 图 5 三种不同控制方式, 由表 2 数据分析来看, 与 3σ 削波因数单点控制相比, 采用 4σ 削波因数的带外峰值可以降低 27.3% , 而同时采用 4σ 削波因数和多点控制, 带外峰值可以降低 39% , 可以看出提高振动试验系统的削波因数和采用多点控制方式可以显著降低加速度功率谱带外超差的峰值.

由表 3、4 可以看出, 随机振动试验标准和振动试验系统检定标准中只有 GB/T2423 和 JJG948 从带内带外总均方根加速度之比的角度对加速度功率谱带外超差问题进行了较为宽松的规定. 其中计量检定标准 JJG948 中只有 A 级振动台要求相对较高 ($\leq 5\%$), B 级、C 级要求相对较低; 振动试验标准中, GB/T2423 要求的带外均方根加速度值为 25% ; 其他标准未对该问题进行规范. 现行的标准一般是从上世纪八九十年代的试验经验总结而来, 当时的振动试验机和振动控制仪器水平相比落后, 对于此项指标的要求较低, 目前不管是国产和进口振动试验系统已经能够完全满足比现行标准更高的要求, 很多振动台在出现故障时, 在动圈性能降低的情况下依然能够满足现行标准, 所以需要加速度功率谱密度带外超差问题进行进一步研究和规范.

表3 常用环境试验标准中对随机振动功率谱密度容差、总均分根加速度容差、带外功率谱密度控制精度的相关规定和规范

Table 3 ASD and RMS tolerance commonly used in environmental testing standard

	ASD tolerance	RMS tolerance	ASD tolerance outside the frequency bandwidth
	$\pm 3\text{dB}(5 \sim 2000\text{Hz})$		
GJB150	$\pm 6\text{dB}(5\%$ of the total bandwidth is not greater than the frequency range)	$\pm 1.0\text{dB}$	-
GJB150A	$+2\text{dB} \sim -1\text{dB}(<500\text{Hz})$ $-6\text{dB} \sim +3\text{dB}(\geq 500\text{Hz})$	$\pm 1.0\text{dB}$	-
GB/T2423	$\pm 3\text{dB}$	$\pm 1.0\text{dB}$	Less than 25% of RMS (From the maximum frequency to 10kHz or to 10 times of the maximum frequency)
GJB899	$+3\text{dB} \sim -1.5\text{dB}(\leq 500\text{Hz})$; $\pm 3\text{dB}(500\text{Hz} \sim 2000\text{Hz})$ -6dB (Accumulative analysis bandwidth within 100Hz)	-	-
GJB1032	$\pm 3\text{dB}(20 \sim 1000\text{Hz})$ $\pm 6\text{dB}(1000\text{Hz} \sim 2000\text{Hz})$ -6dB (Accumulative analysis bandwidth within 100Hz); -9dB (Accumulative analysis bandwidth within 100Hz)	-	-
GB/T 4857	$\pm 3\text{dB}$ (Accumulative total bandwidth within 10Hz)	$\pm 15\%$ ($-1.4\text{dB} \sim 1.2\text{dB}$)	-

表4 常用振动试验系统检定标准中对随机振动功率谱密度、总均分根加速度、带外功率谱密度控制精度的相关规定和规范

Table 4 ASD and RMS tolerance commonly used in measurement standard of vibration test system

	Grade	ASD tolerance	RMS tolerance	ASD tolerance outside the frequency bandwidth
JJG948	A	$\pm 1\text{dB}$	$\pm 0.5\text{dB}$	$\leq 5\%$ B
	B	$\pm 2\text{dB}$	$\pm 1\text{dB}$	$\leq 10\%$ C
	C	$\pm 3\text{dB}$	$\pm 1.5\text{dB}$	$\leq 20\%$
GB/T13310			-	
JJG1000			-	

3 结论

(1)在随机试验中带外能量有时是很大的,虽然反应在总均方根加速度值上的变化不大且符合相关试验标准要求,但是仍可能造成高频“过试验”,因此是不能忽视的。

(2)随机振动试验中带外加速度功率谱密度超差可以通过总均方根加速度值与设定值的偏差来提前发现,并通过具体的功率谱图形来进行判断分析。

(3)可以通过提高振动试验系统的削波因数和采用多点控制方式来降低加速度功率谱带外超差的峰值。

(4)目前相关标准没有对带外加速度功率谱密度控制精度方面进行详细的规范和说明,需要对该问题进行进一步研究和规范。

参 考 文 献

1 胡志强. 随机振动试验应用技术. 北京: 中国计量出版社, 1996年 (Hu Z Q. The application technology of ran-

dom vibration test. Beijing: China Metrology Publishing House, 1996 (in Chinese))

2 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析. 北京: 清华大学出版社, 2008 (Li D B, Lu Q H. Engineering vibration test analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 2008 (in Chinese))

3 张明, 苏小光. 力学测试技术基础. 北京: 国防工业出版社, 2004 (Zhang M, Su X G. Mechanical test technology. Beijing: National Defence Industry Press, 2004 (in Chinese))

4 金恂叔. 航天器环境试验的有效性. 环境技术, 1998, 2: 1 ~ 12 (Jin X S. The validity of spacecraft environment test. *Environment Technology*, 1998, 2: 1 ~ 12 (in Chinese))

5 张小达, 荣克林. NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》分析. 航天器环境工程, 2009, 26(5): 32 ~ 36 (Zhang X D, Rong K L. An analysis of the standard of NASA-HDBK-7005. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(5): 32 ~ 36 (in Chinese))

6 张小达. 航天器与运载火箭验证技术标准化探讨. 航天标准化, 2009(3): 48 ~ 53 (Zhang X D. An analysis of Spacecraft and launch vehicle standardization. *Aerospace*

Standardization, 2009(3): 48 ~ 53 (in Chinese))

- 7 冯咬齐, 崔俊峰. 航天器动力学环境试验综合测试系统的设计思路. 航天器环境工程, 2003, 20(4): 34 ~ 39 (Feng Y Q, Cui J F. The design of integrated measurement

system for spacecraft dynamic environment testing. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, 20(3): 34 ~ 39 (in Chinese))

ANALYSIS IN THE WINDAGE OF ASD OUTSIDE THE FREQUENCY BANDWIDTH IN RANDOM VIBRATION TESTING

Qiu Dalu[†] Ci Yongwei Shao Xiaoping Fu Leping

(Eighth general design department, China Aerospace Science & Technology Corporation, Shanghai Aerospace equipment manufactory, Shanghai 200245, China)

Abstract Random vibration test is very important to the aerospace equipment. The windage of ASD outside the frequency bandwidth was analyzed. The reason, premonition, affection and effective way were given. And the commonly used random vibration test and vibration test metrology standard for the ASD outside the frequency bandwidth were analyzed.

Key words random vibration, acceleration spectrum density(ASD), ASD outside the frequency bandwidth