

单轴向与多轴向随机载荷下星载单机的疲劳损伤研究

张雨,董好志,任海林

(中国电子科技集团第三十八研究所,安徽 合肥 230088)

摘要:基于随机振动频域理论,采用“ 3σ 法则”和等效应力-应变的疲劳分析方法,对比研究单轴、多轴载荷下某星载单机的疲劳损伤,评估两种试验方案的等效性。结果表明:该单机对 z 向激励敏感, z 向随机载荷造成的疲劳损伤远大于 x 、 y 向载荷;多轴向随机载荷作用下单机的最大等效应力、疲劳损伤累积均大于单轴向随机载荷作用;3个正交轴下的单轴依次振动替代多轴随机振动试验的等效方案为欠试验方案,需要从定量角度优化试验方案。

关键词:星载单机;随机振动;单、多轴向载荷;疲劳损伤累积

中图分类号:TB534+.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0068-04

Fatigue Damage Study on Satellite Single Machine under Uniaxial and Multi-axial Random Loads

ZHANG Yu, DONG Haozhi, REN Hailin

(The 38th Research Institute of CETC, Hefei 230088, China)

Abstract: Based on frequency domain theory of random vibration, fatigue damages of a satellite single machine under uniaxial and multi-axial loads were compared and studied by 3σ principle and fatigue analysis method of equivalent stress-strain, and the equivalence of these two test schemes was assessed. The results show that the satellite single machine is sensitive to z direction excitation, and the fatigue damage of the single machine caused by z direction random load is much larger than that caused by x and y direction loads; the maximum equivalent stress and fatigue damage accumulation of the single machine under multi-axial random load are higher than that of uniaxial random load, the equivalent scheme of uniaxial sequential vibration under three orthogonal axes replacing multi-axis random vibration experiment is insufficient, which requires optimization of experimental scheme from quantitative perspective.

Keywords: satellite single machine; random vibration; uniaxial and multi-axial loads; fatigue damage accumulation

0 引言

为应对卫星发射期间复杂严苛的振动环境,保证单机性能的高可靠性,各星载单机在设计、制造阶段需要完成相应力学试验,评估单机的使用环境承受能力。

单轴向随机振动载荷表示结构在随机运动过程中承受单一轴向载荷,多轴向载荷表示结构承受2个或3个正交轴向载荷的耦合作用。卫星发射阶段,星载单机承受多轴向随机振动载荷。在多轴试验台不普及和多轴振动试验标准不成熟的现状下,工程实践中采用依次进行3个正交轴的单轴振动试验来等效多轴随机振动。1990年,CHANG K Y等首次提出单轴振动等效替代多轴振动存在故障形式不同、振动耦合无法体现等缺陷^[1]。WHITEMAN W E等分别对试棒施加单轴向和多轴向随机载荷,试验表明多轴振动会激发结构的多向模态,产生更大的应力^[2]。FRENCH R M等以典型阶形梁的单轴和多轴随机振动试验为例,发现在单、多轴向载荷作用下,典型梁的疲劳寿命和断裂位置均有差别^[3]。

现有统计数据表明,在服役工程结构件中,随机疲劳损伤破坏约占80%以上^[4]。预测结构的随机疲劳寿命主要有时域法和频域法^[5]。时域法以雨流计数法为核心,需要实测获取危险点的时间历程谱,精度高但工作量大。频域法通过提取循环加载特性,估算结构疲劳寿命,具有较高的统计精度,并且计算简单。在高周疲劳研究中,多轴疲劳主要有等效应力准则、临界面准则和最大主应力准则,其中,等效应力准则评估结构疲劳损伤最为保守^[6],在工程实践中被广泛采用。代锋等^[7]、HAN S H等^[8]分析电子设备元器件管脚、焊点等薄弱区的随机疲劳,评估元器件的疲劳损伤。胡亚冰等^[9]基于试验数据,对标准试验件进行相同时间下单轴、多轴随机振动损伤累积研究,指导航天产品选取合适的振动试验方式。

本文以某星载单机为研究对象,分别施加相同时间的单轴向和多轴向随机载荷,采用频域法、“ 3σ 法则”和等效应力-应变法,对比评估单轴、多轴载荷下单机的疲劳损伤和预期寿命,评估两种试验方式的等效性,以期指导航天单机级产品的结构设计和力学试验。

1 频域随机疲劳理论

1.1 随机振动载荷

与确定性振动不同,随机振动无法给出确定性的函数,但其服从概率统计规律。在频域法中,功率谱密度(PSD)作为随机载荷输入,是一种基于概率统计的谱分析技术,包含了随机振动的能量和频率信息。

PSD的表达式如下:

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\tau} d\tau$$

式中: f 为频率; $R_{xx}(\tau)$ 为自相关函数。

1.2 Miner 线性累积损伤理论

Miner 线性累积损伤理论是目前在理论研究和工程实践中应用最为普遍的疲劳损伤理论,根据材料吸收净功原理,随机载荷下疲劳线性损伤累积的表达式如下^[10]:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}$$

式中: D 为总损伤值; N_i 为应力水平 σ_i 下的结构寿命; n_i 为应力水平 σ_i 下的结构实际循环次数。

当总损伤值 $D < 1$ 时,表示结构在该随机载荷下未达到疲劳破坏水平, D 越小,损伤越小,剩余寿命越长;当总损伤值 $D = 1$ 时,结构疲劳强度不能满足要求,可能会发生疲劳破坏。

基于 Miner 线性累积损伤理论和应力正态分布假设,STEINBERG D S 提出“ 3σ ”法则^[11],该法则将应力分布划分为 3 个区域,如图 1 所示。瞬态应力响应值落在 $[-1\sigma, +1\sigma]$ 、 $[-2\sigma, +2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, +3\sigma]$ 区间的概率分别为 68.26%、95.44% 和 99.74%,超出 $\pm 3\sigma$ 区间的响应值概率仅为 0.26%,为极小概率事件。因此,基于“ 3σ ”法则评估结构随机疲劳强度可满足工程计算精度要求。

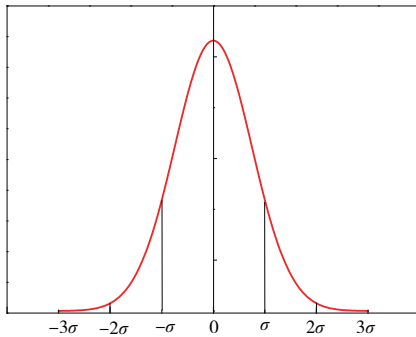


图 1 正态分布的概率密度曲线

2 数值建模

2.1 有限元模型

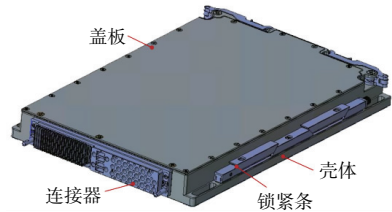
某星载单机主要有壳体、盖板、PCB 接口板、连接器、锁紧条和单机内部器件等结构组成,其中盖板、PCB 板和

内部器件与壳体通过螺钉连接,锁紧条和起拔器安装在单机外侧,所有螺钉均用螺纹胶防松处理。单机的外形尺寸为 233 mm×160 mm×24 mm,整体结构做轻量化处理,如图 2 所示。综合考虑计算精度和效率,建立有限元模型时需要对单机结构做以下简化:

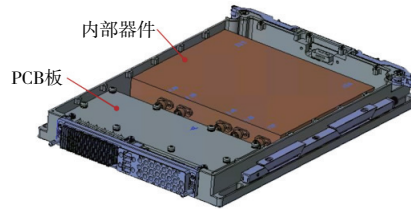
1) 单机主体结构详细建模,忽略部分倒角和小圆孔,连接器、内部器件等结构采用质量点简化;

2) 主体结构选用高阶实体单元 solid95,简化质量点选用 rbe3 单元与安装孔连接,保证简化前后的模型质量分布一致;

3) 盖板与壳体采用螺钉点胶加固连接,并且航天类单机的螺钉设置较密,因此螺钉连接面不发生相对滑移和分离。在有限元分析时,连接面采用绑定接触处理,忽略螺钉结构和预紧力。



(a) 某单机外形图



(b) 某单机内部图

图 2 某单机结构示意图

将简化后星载单机模型导入前处理软件 Hypermesh 中进行网格划分,图 3 给出单机有限元模型和对应坐标系, x 、 y 、 z 方向分别表示为单机长度、宽度和高度方向。



图 3 单机有限元模型和对应坐标系

2.2 材料参数

单机盖板、壳体采用 2A12 铝合金,PCB 接口板采用 FR4 材料,各材料的性能参数如表 1 所示。

表 1 材料性能参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	极限强度/MPa
2A12	69	0.32	2 700	410
FR4	21	0.26	1 800	300

2.3 边界条件

单机通过两侧锁紧条固定在机箱内部,有限元分析时,相应锁紧位置施加全约束。表 2 给出单机鉴定级随机振动条件。

表 2 鉴定级随机振动条件

频率/Hz	加速度功率谱密度	总方均根加速度×g	试验条件
20~50	+6(dB/oct)		
50~800	0.25×g ² /Hz	17.6	x、y、z 3 向各 4 min
800~2 000	-6(dB/oct)		

现有试验假定 x、y、z 向各 4 min 的单轴随机振动造成的单机疲劳损伤累积等效于单机 3 轴向同时随机振动 4 min 的疲劳损伤。有限元分析时,分别计算 x、y、z 单轴向载荷和 3 轴向载荷同时作用的随机振动,对比两种方式下单机的疲劳累积损伤和预估寿命,评估其等效性。

3 计算结果

3.1 振动模态分析

采用 Block Lanczos 法提取结构模态,计算单机在试验频率(20~2 000 Hz)范围内的全部模态。图 4 给出该星载单机的各阶固有频率。图 5 给出单机的基频振型图。

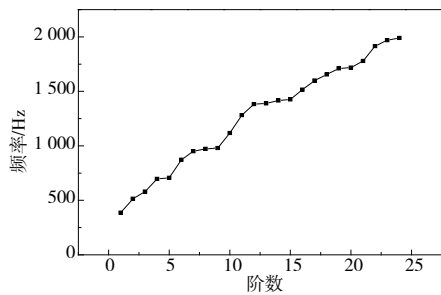


图 4 单机的固有频率(20~2 000 Hz)

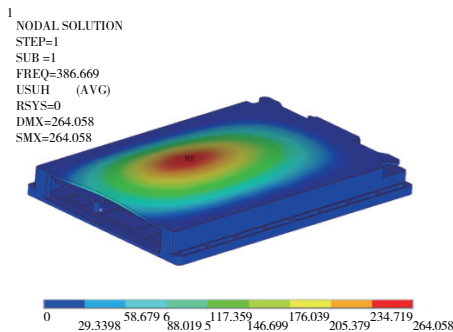


图 5 单机基频振型图

由图 4、图 5 可知,单机的基频为 387 Hz,满足星载单机基频不小于 100 Hz 的设计要求。提取单机的各阶固有频率下的振型分析发现,试验频率(20~2 000 Hz)范围内各阶振型均以 z 向的弯曲、扭转变形为主,说明该单机主

要对 z 向激励敏感。

3.2 随机振动分析

结合单机的结构模态参数,分析其随机振动响应,提取对应载荷工况下 1σ 位移解(应力、应变等)。表 3 给出单机在各方向随机载荷作用下的 Von-Mises 应力,其中 xyz 方向表示多轴向载荷同时加载。

表 3 各方向随机振动下 Von-Mises 应力 单位:MPa

方向	1σ	2σ	3σ
x	3.87	7.74	11.61
y	3.55	7.10	10.65
z	21.32	42.64	63.96
xyz	36.93	73.86	110.79

由表 3 可知,对单机造成振动疲劳损伤的主要是 z 向载荷,与模态分析结果一致。多轴向随机载荷作用下的单机最大等效应力明显大于单轴向载荷作用,最大等效应力均位于 PBC 板与壳体连接支撑柱的底部,此区域为单机结构的薄弱区域,但 3σ Von-Mises 等效应力均小于 2A12 的屈服强度 265 MPa,并且具有较大的安全裕量。图 6、图 7 分别给出 z 向单轴载荷和 xyz 多轴向载荷下单机等效应力云图。

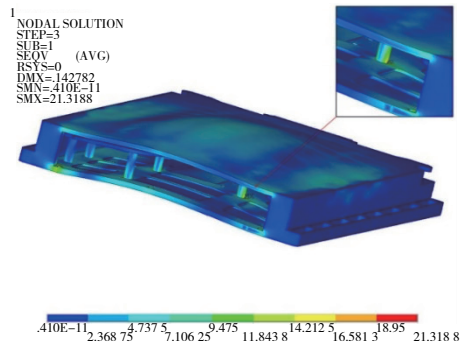


图 6 z 向随机载荷下单机等效应力云图

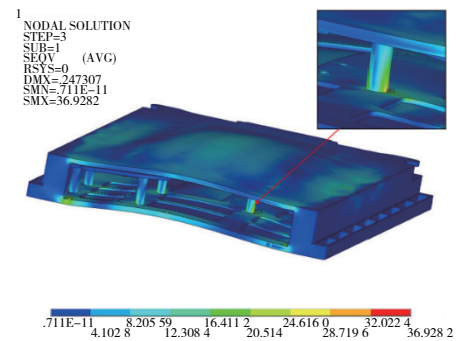


图 7 多轴向载荷下单机等效应力云图

3.3 疲劳寿命分析

依据 ANSYS 随机振动计算结果,以多轴向载荷为例,分析该单机的随机振动疲劳。

根据模态分析得到该星载单机在随机载荷谱频率范

围内的统计学平均频率 v_0^+ 为 1 272 Hz, 单机振动时间 T 为 240 s, 则各频域的实际振动次数为

$$n_{1\sigma} = 68.26\%v_0^+T = 208\ 384$$

$$n_{2\sigma} = 27.18\%v_0^+T = 82\ 975$$

$$n_{3\sigma} = 4.3\%v_0^+T = 13\ 127$$

单机的最大 Von-Mises 应力发生在壳体支撑柱区域, 材料为 2A12, 根据材料的应力寿命关系方程:

$$N_1 = \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_1} \right]^m N_0$$

式中: 铝合金 2A12 的疲劳极限 σ_{-1} 为 109.8 MPa; 金属材料疲劳极限循环次数 N_0 为 6×10^7 ; 寿命指数 m 取 3。

各应力状态下对应材料的循环寿命为

$$N_{1\sigma} = \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{1\sigma}} \right]^3 \times N_0 = 1.58 \times 10^9$$

$$N_{2\sigma} = \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{2\sigma}} \right]^3 \times N_0 = 1.97 \times 10^8$$

$$N_{3\sigma} = \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{3\sigma}} \right]^3 \times N_0 = 5.84 \times 10^7$$

该星载单机在 xyz 多轴向随机载荷下振动 4 min 的疲劳线性损伤累积为

$$D_{xyz} = \frac{n_{1\sigma}}{N_{1\sigma}} + \frac{n_{2\sigma}}{N_{2\sigma}} + \frac{n_{3\sigma}}{N_{3\sigma}} = 7.78 \times 10^{-4}$$

在该多轴向随机载荷谱作用下, 单机的预估寿命为

$$L_{xyz} = \frac{T}{D_{xyz}} = \frac{240/3\ 600}{7.78 \times 10^{-4}} = 85.7 \quad (\text{h})$$

单轴随机载荷作用下单机的疲劳损伤累积和寿命预估计算方法相同, 得到如表 4 所示的单轴、多轴向随机载荷下单机的疲劳损伤累积和预估寿命。

表 4 单机疲劳损伤累积和寿命预估表

方向	疲劳损伤累积		预估寿命/h
	单向分量	总量	
x	8.96×10^{-7}		
y	6.91×10^{-7}	1.51×10^{-4}	440.5
z	1.50×10^{-4}		
xyz		7.78×10^{-4}	85.7

由表 4 可知, 在单轴向随机载荷作用下, z 向激励造成的疲劳损伤远大于 x, y 向激励, 这与单机主要对 z 向激励敏感的结论一致。3 个正交轴向的随机载荷分别作用 4 min 对单机造成的疲劳损伤累积, 小于 3 轴向同时振动 4 min 造成的疲劳损伤, 单机在单轴鉴定级随机振动叠加状态下预估寿命 440.5 h, 而多轴向随机振动下预估寿命仅为 85.7 h, 相差较大。因此, 从损伤定量分析, 现有单轴随机振动叠加的做法属于欠试验, 为保证单机级鉴定试验

的准确性, 建议采用多轴振动试验进行评估, 或从定量角度进一步优化试验方案, 保证替代方案的等效性。

4 结语

基于随机振动频域理论, 分析某星载单机在试验频率 (20~2 000 Hz) 范围内的固有频率和结构强度, 表明该星载单机对 z 向激励敏感, z 向随机载荷导致的单机疲劳损伤远大于 x, y 向载荷。

多轴向随机载荷作用下的单机最大等效应力明显大于单轴向载荷作用, 最大应力区域相同。多轴向单机疲劳损伤大于单轴向随机疲劳损伤累积, 预估寿命相差较远。

现有工程中采用的依次进行 3 个正交轴的单轴振动试验来替代多轴随机振动试验的等效方案为欠试验方案, 建议单机级力学鉴定评估采用多轴试验方案, 或从定量角度进一步优化试验方案, 评估其等效性。

参考文献:

- [1] CHANG K Y, FRYDMAR A M. Three-dimensional random vibration testing definition and simulation [C]// Proceedings of the 36th Annual Technical Meeting of the Institute of Environmental Science, NEW ORLEANS, LA: [s.n.], 1991.
- [2] WHITEMAN W E, BERMAN M S. Fatigue failure results for multi-axial versus uniaxial stress screen vibration testing [J]. Shock and Vibration, 2002, 9: 1097-15.
- [3] FRENCH R M, HANDY R, COOPER H L. A comparison of simultaneous and sequential single-axis durability testing [J]. Experimental Techniques, 2006, 30(5): 32-37.
- [4] 周兴广. 多轴随机振动环境的疲劳损伤机理浅析 [J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 723-726, 673.
- [5] 戴江梁, 熊飞, 刘静, 等. 基于某车型动力电池包的随机振动疲劳分析与结构设计改进 [J]. 机械强度, 2020, 42(5): 1266-1270.
- [6] 黄文科, 潘亦苏. 基于频域的多轴随机振动疲劳寿命预测 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(6): 46-49.
- [7] 代锋, 唐德效, 石敏. 星载电子设备元器件随机振动疲劳分析 [J]. 空间电子技术, 2011, 8(1): 76-80.
- [8] HAN S H, AN D G, KWAK S J, et al. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 48: 170-177.
- [9] 胡亚冰, 苏华昌, 张鹏飞. 典型结构单轴与三轴振动损伤特性探讨 [J]. 导弹与航天运载技术, 2015(3): 74-78.
- [10] 王文伟, 程雨婷, 姜卫远, 等. 电动汽车电池箱结构随机振动疲劳分析 [J]. 汽车工程学报, 2016, 6(1): 10-14.
- [11] STEINBERG D S. Preventing thermal cycling and vibration failures in electronic equipment [J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2001, 21: 35.

收稿日期: 2022-01-27