

卫星运输过程疲劳等效分析

付国庆^{1,2}, 陈丽², 张利², 王克寒²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海卫星装备研究所, 上海 200240)

摘要: 利用当前广泛应用的雨流计数法原理结合 Miner 法则, 在全程实测某卫星运输至发射场各路段载荷谱的基础上, 利用雨流计数法对载荷谱进行预处理, 然后给出基于 Miner 法则对运输过程产生疲劳进行分析和评判的应用实例。为基于加速度信号的路谱载荷提出了一种切实可行的疲劳等效分析方法, 为在各种运输条件下, 评估产品所经受的力学环境和可能产生的疲劳损伤提供依据。

关键词: 疲劳等效; 雨流计数; 振动; 隔振器; 加速度

中图分类号: V415.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0015-06

Fatigue Equivalent Analysis of Satellite in Transport Process

FU Guo-qing^{1,2}, CHEN Li², ZHANG Li², WANG Ke-han²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: The loading spectra of various road sections of satellite transport to launch site were measured based on the principle of current widely used rain flow counting method combined with Miner's rule. Pretreatment was carried out on the loading spectra using rain flow counting method. The application instance of analysis and evaluation on fatigue generated by the transport process based on Miner rule. A practical fatigue equivalent analysis method based on the acceleration signal spectrum loading for various transport conditions was put forward. The purpose was to provide reference for assessment of products withstanding mechanical environment and fatigue damage.

Key words: fatigue equivalent; rain flow counting; vibration; isolator; acceleration

卫星产品在从研制到最终发射的过程中,除了在各阶段要经历各项常规的力学试验考核之外,还要经历火车、汽车或者飞机等运输过程中产生的复杂而连续的力学考核。其中发射前的进场运输一般采用火车专列进行,整个过程往往长达几天时间,而

且路况复杂,整个过程往往无法通过路谱试验充分模拟。过程中由于持续经受随机载荷力学环境,需要对产生疲劳和潜在损伤进行分析和评判,以便确定卫星产品力学可靠性^[1]。

随机载荷作用下的疲劳等效分析方法有时域分

收稿日期: 2012-04-14

作者简介: 付国庆(1979—),男,高级工程师,主要从事航天器动力学试验技术研究。

析方法和频域分析方法两种。时域分析的基本方法是对随机应力进行循环计数,目前公认最准确、有效并且应用最广泛的是雨流计数法。疲劳寿命的时域分析法具有直接、相对准确等优点。

1 雨流计数法与疲劳等效方法

1.1 雨流计数法

雨流计数法将整个载荷历程等效为各种单次载荷循环的组合表达。工程应用中,往往将经过修正和无效载荷剔除后的实测随机载荷历程,通过雨流计数法处理为可以还原到时域的雨流矩阵。利用处理后获得的载荷幅值、累积次数、频谱信息等可以进一步估算载荷造成的疲劳损伤程度^[2]。

由于对载荷的处理方式类似于沿屋檐而依次流淌下的雨滴(如图1所示),故称为雨流计数法。

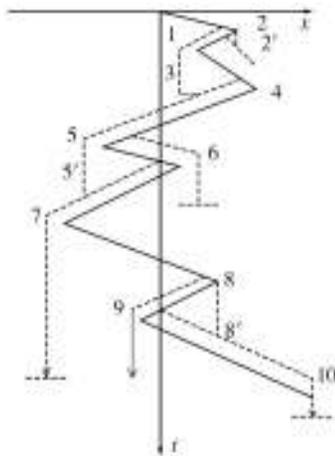


图1 雨流计数法

Fig. 1 Rain flow counting method

1.2 疲劳等效方法

进行环境试验时,必须考虑所采用的试验方法能否产生与实际环境相同的效应,即对产品产生相同的破坏或失效模式,这就是所谓等效问题。动力学环境对结构产生的破坏机理多种多样,要做到完全等效是不可能的,只能根据不同的破坏机理求得不同的等效关系。动力学环境模拟中最常用的等效关系为累积损伤等效和量值等效。累积损伤等效是以材料破坏理论为基础的等效^[3]。在材料经受交变

载荷时,每个加载循环都会在材料内部造成损伤。当损伤积累到一定量时,材料被破坏。

1) S-N曲线。对于不同的材料通过试验可以得到不同的疲劳寿命曲线,该曲线给出了材料经受的应力值S与在该应力值导致材料破坏所需应力循环次数N之间的关系,如图2所示。N值随着S值变化,成为材料的疲劳寿命,当S低于某一值时,材料不会产生疲劳破坏,该值成为材料的耐久极限。在曲线中段S-N的关系为: $NS^b=C$, b值在3~25之间变化,因材料而异,C是常数。当b已知,同时知道曲线上某点(N_0, S_0),则对应任意 S_i ,都可以求得 N_i , $N_i = N_0 \left[\frac{S_0}{S_i} \right]^b$ 。有的材料没有明显的耐久极限,此时取 $N=10^7$ 的应力值为耐久极限。

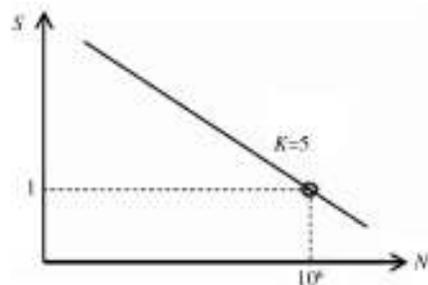


图2 典型S-N曲线

Fig. 2 Typical S-N curve

2) Miner法则。当材料受多种应力交变载荷作用时,Miner法则是估计材料累积损伤最常用的公式,见式(1)。它假定材料疲劳损伤程度正比于每次应力循环作用的能量,材料极限损伤量为常数,是与加载次序无关的单次循环载荷损伤量的累积。

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

式中:D为消耗的疲劳寿命; n_i 为经受应力 S_i 的载荷循环次数; N_i 为相应材料S-N曲线上对应的破坏循环次数;m为不同应力值的数目。

不同应力值和不同加载次序组合进行试验,得出D值在0.3~3.0之间变化,一般取D=1作为平均值,设计中往往取D=0.3作为保守寿命估计。

应用Miner法则和材料S-N曲线可以解决加速试验中不同振幅振动应力的等效关系。通过换算用提高试验量值的办法缩短试验时间,对于运输振动环境来说特别有用。对两种不同幅值的振动应力,

其时间上的等效关系可以表示为:

$$\left[\frac{A_1}{A_2}\right]^M = \frac{t_2}{t_1} \quad (2)$$

式中: A_1, A_2 为对应不同幅值振动应力的振动环境量值; t_1, t_2 为相应振动环境作用时间; M 为与材料、振动环境类型有关的系数。

MIL-STD-810D方法中规定,当 A_1, A_2 为正弦振动峰值加速度时,取 $M=6$;当 A_1, A_2 为随机振动加速度功率谱密度时,取 $M=4$ 。

根据此次试验情况, t_1, t_2 分别为120, 126 600 s; A_1 取正弦试验量级1.0g(准鉴定),此时利用经验公式求得与之等效的 A_2 取值范围($0.1754 \leq A_2 \leq 0.3134$)。

这里需要说明的是 M 的取值具有很大的材料和力学环境的相关性,相关取值见表1。

表1 MIL-STD-810F关于 M 的取值规定

Table 1 The MIL-STD-810F provisions on the value of $M^{(4)}$

应用对象	参数	
	正弦 M/g	随机 $M/(g^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$
空军电子设备	6	4
导弹	6.6	3.25
空间项目	3	2
恶劣环境	6.5	6

2 卫星运输载荷谱的采集和预处理

一般产品进行的路谱模拟试验,以实际采集数据作为振动台输入条件。为了保证与实际进场运输时所经历的振动效果相近,需要预先采集产品运输过程的实际载荷谱,进而建立运输载荷谱数据库。作为卫星产品显然不可能进行常规的加速试验来验证长途运输过程的安全性,这就要求通过一定手段对积累的典型测点载荷谱数据进行分析,确定其可能造成的潜在疲劳损伤。典型特定路况包括匀速平直路况、颠簸路况、弯道路况、启动刹车路况等。作为卫星产品,一般在产品进场发射前没有条件获取完整专列运输实测数据。这就依赖于原有型号产品测试数据的大量累积。

对于卫星运输过程现有疲劳分析中的问题主要有两个。

1) 现有疲劳损伤分析一般针对应变或者应力循环的测量值进行计数统计,将应力-应变简化为一系列的波峰、波谷进行计数,将复合循环或半循环计数^[5],进而获得 $S-N$ 曲线,完成对产品的疲劳评估。而卫星产品运输或者振动试验中的测量以加速度信号为主,无法通过现有软件或者传统方法获取 $S-N$ 曲线,仅仅通过加速度信号雨流计数无法准确评估产品疲劳状况。

2) 一般对产品的疲劳等效分析中用的各项参数最终转换为相应材料的特性参数,而卫星产品内各种结构部件组成材料复杂,难以简单等效,无法利用现有成熟有限元和疲劳分析软件进行等效分析。

为了解决这两个难点,利用Miner法则采用相对损伤的概念,给定一种固定材料参数自定义截距值的标准损伤单元,针对卫星产品常规振动试验中的台体界面输入和实际运输过程中隔振器上方相对于卫星的界面输入时域数据进行雨流处理分析。

定义: τ 为基准损伤单元(固定材料、自定义截距值、单位); X 为卫星常规振动试验中卫星输入界面时域响应; Y 为卫星进场运输过程中隔振机构上方相对卫星输入界面时域响应。分别对两种时域数据雨流计数求出相对 τ 的损伤量:

$$X(Y) \xrightarrow{\text{雨流计数}} X_R(Y_R) \xrightarrow{\text{相对损伤量}} \tau_X(\tau_Y)$$

$$R_d = \frac{\tau_Y}{\tau_X}$$

式中: R_d 为随机载荷 Y 相对正弦试验量级 X 的比例。

一般卫星或者其他大型航天产品的力学评估是通过其验收级和鉴定级的正弦扫频试验来进行,通过这种方式可以获得从0.1g特性振动到验收级甚至鉴定级的完整相对损伤序列。

以鉴定级作为假定极限破坏量值,可以根据Miner法则得到各个正弦试验以及运输过程对应的疲劳循环次数进而获得 $S-N$ 曲线。

2.1 测点布置及试验仪器设备

选取2009年某卫星采用火车专列进场时的全程路谱载荷数据,总计时间历程 1.266×10^5 s(35.2 h)。信号的采样和数据处理采用Ncode公司的Somat数据采集软件和Glyphworks分析软件。信号涵盖了完整运输历程,测试总里程约3000 km。得到

卫星产品输入界面加速度-时间历程如图3所示,卫星输入界面细化样本如图4所示。

剔除停顿数据段和异常毛刺,保留了100 Hz内的所有时频信息。

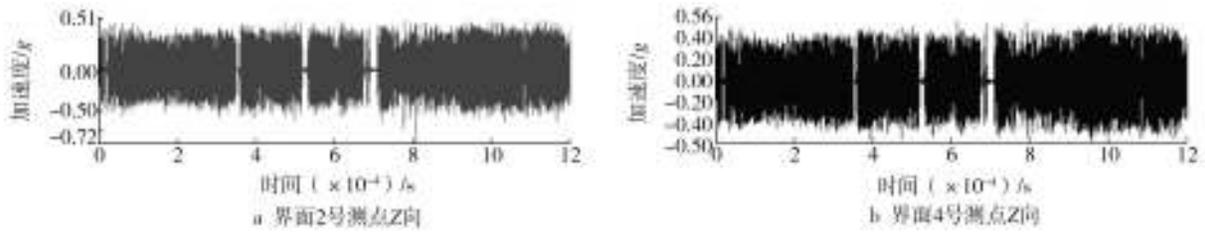


图3 卫星输入界面完整历程 1.266×10^5 s

Fig. 3 Complete course of satellite input interface 1.266×10^5 s

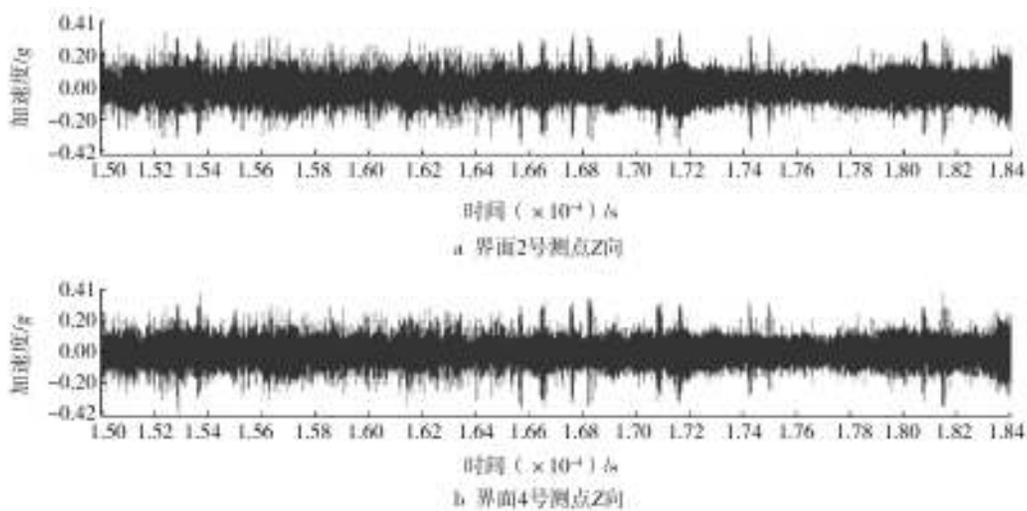


图4 卫星输入界面3600 s细化样本

Fig. 4 Satellite input interface 3600 s refined sample

2.2 载荷谱修正

载荷谱采集完成后,需要完成必要的修正过程。

1) 对响应测点时域数据进行正态分布、测量精度、畸变数据等项目检测和校核。

2) 剔除异常数据,消除趋势飘移。

3) 根据工程经验选定低通滤波的门槛频率,忽略对产品疲劳和强度影响都较小的高频信号。

3.2 雨流矩阵压缩

通过删除疲劳损伤的微小贡献量来加速试验,以产品输入界面的加速度-时间信号为例,一般可以删除对疲劳贡献不大的小载荷。测试分析过程分别采用全频段无压缩统计和根据无效幅值标准去掉对疲劳没有贡献的绝对值小于0.2g的加速度幅值的统计方法,滤波前后的雨流计数如图6所示。

3 基于Miner法则的疲劳等效分析

3.1 载荷谱的统计比较

试验中进行了遍历采集,选择完整时间历程样本进行分析,保证数据完整、真实、有效,与鉴定级试验的全统计比对如图5所示。

3.3 相对疲劳分析

采用Ncode-Glyphworks的R-D(Relative Damage)模块,对实测产品输入界面(四点平均控制)正弦振动试验实测数据进行相对疲劳分析。验收鉴定条件见表2,相对损伤分析见表3。

根据上述试验结果得到正弦振动试验量级与相对损伤值的关系曲线如图7所示。

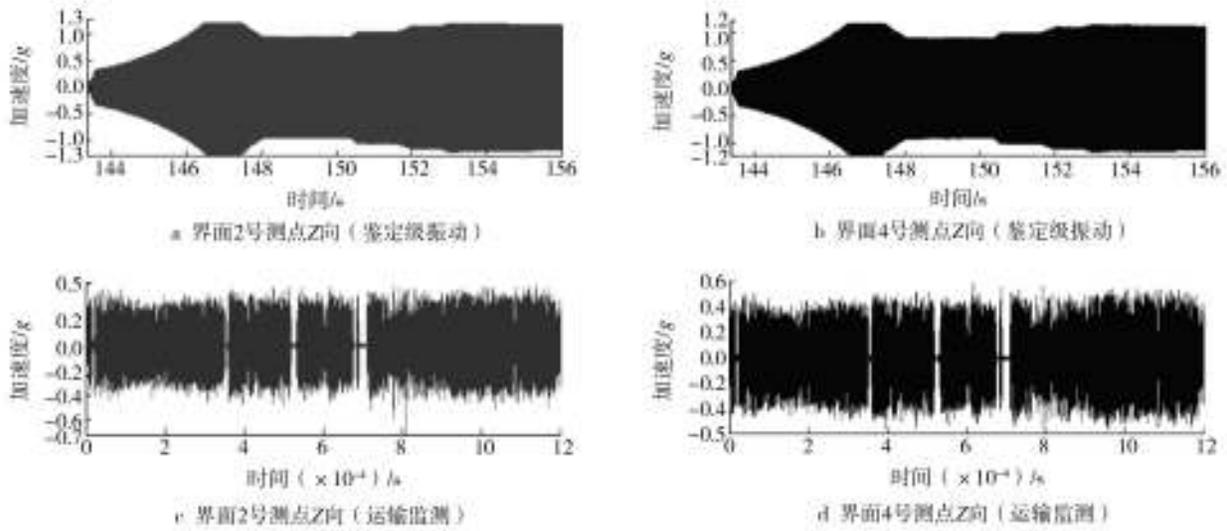


图5 与鉴定级试验的全统计比对
Fig. 5 Comparison with the statistics of identification test

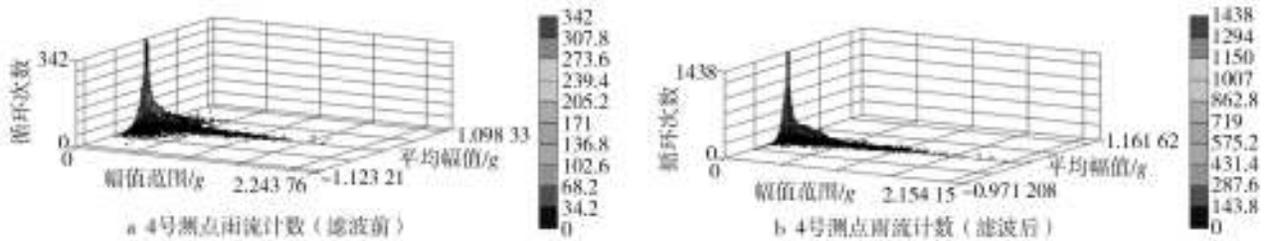


图6 滤波前后的雨流计数
Fig. 6 The rain flow counting before and after filtering

表2 典型型号卫星鉴定级振动试验条件

Table 2 Test conditions of typical model satellite identification level vibration

频率/Hz	5 ~ 10	10 ~ 12	12 ~ 14	14 ~ 24	24 ~ 25	25 ~ 32	32 ~ 35	35 ~ 42	42 ~ 44	44 ~ 100
幅值	3.0 mm	1.2g	1.2g降到0.9g	0.9g	0.9g升到1.0g	1.0g	1.0g升到1.1g	1.1g	1.1g升到1.15g	1.15g

表3 控制界面正弦振动各量级相对损伤序列

Table 3 Relative damage sequence on control interface of sinusoidal vibration with different order of magnitude

试验量级	控制1	控制2	控制3	控制4	R-D 平均相对损伤	R-D 修正损伤
0.1	0.0371	0.0316	0.0395	0.0370	0.0363	0.0013
0.2	0.2971	0.2530	0.3157	0.2961	0.2905	0.0844
0.3	1.0028	0.8539	1.0655	0.9993	0.9804	0.9611
0.4	2.3768	2.0240	2.5256	2.3687	2.3238	5.4000
0.5	4.6420	3.9532	4.9328	4.6264	4.5386	20.5988
0.6	8.0220	6.8311	8.5238	7.9945	7.8428	61.5101
0.7	12.7390	10.8475	13.5355	12.6949	12.4542	155.1077
0.8	19.0150	16.1922	20.2046	18.9499	18.5904	345.6039
0.9	26.8440	22.8982	28.5325	26.8323	26.2768	690.4676
1.0	36.8230	31.4105	39.1393	36.8070	36.0450	1299.2384
1.2	47.7660	40.6980	50.6170	47.5690	46.6625	2177.3889

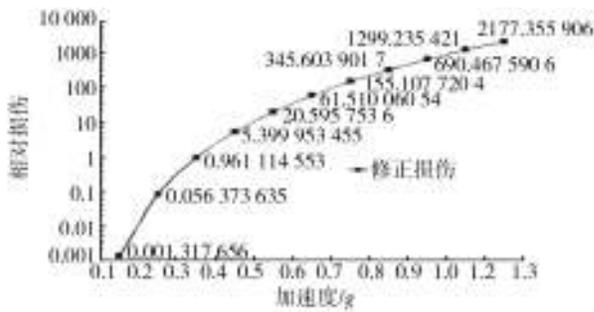


图7 台体四点平均控制所得等效损伤拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of equivalent damage by four points average control

根据 Miner 法则假定以鉴定级振动试验所产生的疲劳损伤(或其整数倍)作为极限疲劳损伤量,可得到响应的各个量级下的破坏循环次数。如图8所示(取1倍鉴定级作为极限疲劳损伤量)。

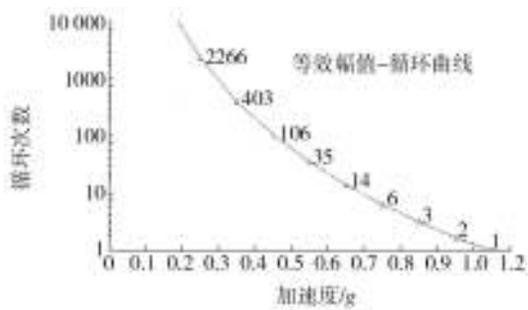


图8 以鉴定级作为极限损伤量级的量级-循环次数曲线

Fig. 8 M-T curve based on max damage of identification level

同样利用 Ncode-Glyphworks 的 R-D 模块求得相同参数下,进场运输过程中卫星输入界面的修正损伤量为 355.32(全频全幅未滤波),相当于鉴定级振动试验损伤量的 1/6;对 50 Hz 以后高频无损段滤波后得到修正损伤量为 73.62(全频全幅 50 Hz 低通滤波),相当于鉴定级振动试验损伤量的 1/30。

4 结论

通过基于实测数据利用 Miner 线性疲劳损伤理论和雨流计数法对卫星产品常规振动载荷和运输随机振动载荷影响下的疲劳特性分析是一种有效可行的办法。

在假定鉴定级振动试验为极限疲劳量级试验条件下,获得的 S-N 曲线相对保守。今后对瞬态冲击

信号、准周期激励信号和随机信号所造成的疲劳损伤量分类处理后综合比较分析,可进一步精确量化损伤程度。

随着卫星产品向高精度、高可靠、长寿命的方向快速发展,针对卫星运输过程所产生疲劳效应的分析、预测和抑制都有了迫切的需求。通过雨流计数法对运输过程疲劳载荷进行分析和处理,并利用相对比较法量化随机载荷的疲劳效应,为卫星疲劳寿命损伤分析提供了一种简单有效的方法。

参考文献:

- [1] 张阿舟, 诸德超, 姚起杭, 等. 实用振动工程(3): 振动测量与试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [2] 王一临, 罗兰. 提高武器装备运输环境的适应性[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 55—56.
- [3] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [4] MIL-STD-810F, Environment Test Methods and Engineering Guides[S].
- [5] NEWLAND D E. An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis[M]. Harlow: Longman, 1984.