

全轴振动试验与传统振动试验激励特性研究

姚军

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 目前可靠性强化试验的振动激励一般由气锤式全轴振动台实现,传统可靠性试验的振动激励由电磁台实现。针对产品的累积损伤,建立了简化力学模型,分析了全轴台与电磁台的振动激励特性,通过在MATLAB环境下的仿真试验分析了二者差异。并在此基础上指出,如要充分发挥全轴台的强化激励特性,必须按振动理论合理设计全轴台的试验夹具和安装方式。

关键词: 可靠性; 强化试验; 振动

中图分类号: V216.2⁺1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0001-04

Study on Excitement Characteristics of All-axis and Traditional Vibration Tests

YAO Jun

(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: At present vibration excitement in reliability enhancement test is often generated by repetitive all-axis vibrator, versus that in traditional reliability test by electromagnetic vibrator. A simplified model describing the cumulative damage of product was built, and an analysis on the excitement characteristics of the two types of vibrator was carried out. The difference between them was also analyzed with help of a simulation test in MATLAB environment. The results showed that it is only when fixtures and installations on all-axis vibrators are reasonably designed according to vibration theory that the excitement characteristics of all-axis vibrator can be fully utilized.

Key words: reliability; enhancement test; vibration

随着科技的进步,对产品的质量要求也越来越高。为了提高产品可靠性,实验室可靠性试验越来越被国内外可靠性工程界所重视。经过几十年的发展,产品研制阶段的环境应力筛选、可靠性增长、可靠性鉴定等试验技术已日趋成熟。但是由于费用

高、试验时间长,传统可靠性试验已不能满足日益激烈的市场竞争的需要,必须研究新的试验技术和方法。在这种背景下,20世纪90年代初美国波音公司提出了可靠性强化试验(RET)。

可靠性强化试验一般适用于小型试件,特别是

收稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家863项目(2007AA04Z413)

作者简介: 姚军(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为可靠性和环境试验。

板级试件,其目标主要针对产品设计缺陷或设计薄弱环节,旨在通过强化试验手段查找设计薄弱环节,分析原因,采取改进措施,从而提高产品固有可靠性。传统可靠性试验为环境模拟试验,其特点是尽可能地模拟产品的典型真实环境,再加上设计裕度来确保产品可靠性。与传统可靠性试验的思路相反,可靠性强化试验是一种激发试验,通过人为施加高试验应力的方法,加速激发产品潜在缺陷来达到提高可靠性的目的。因此,试验时不是考核是否“通过”,而是要激发出潜在缺陷,越多越好。

全轴台是随可靠性强化试验发展起来的,专门针对强化试验设计,具有很强的缺陷激发能力,且设备价格低廉。全轴台的主要缺点是无法控制随机振动的频谱,只能控制振动加速度均方根值。电磁台是传统可靠性试验中应用最广泛的振动激励设备,其优点是波形失真小,控制方便,但设备价格昂贵。全轴台与电磁台都是振动中常见的基础激励形式,无论全轴台还是电磁台都能对产品产生多轴向的振动响应。全轴台的一个优点是台面是柔性的,由于产品的运输和工作平台通常也为柔性的,它理应比刚性的电磁台能更好地模拟实际产品的安装形式,反映产品实际的振动与损伤情况。

国外可靠性强化试验提出后,相继在各工业部门推广应用,取得显著效果。目前国内对此项技术的研究尚处于起步阶段,虽然相关单位引进了试验设备,但相关理论与试验技术有待进一步研究,如强化效率、应力加载、产品夹具设计和安装方式。

RET的意义在于它可以在较短时间内激发出产品潜在故障,即“强化”作用,所以产品的损伤机理研究就显得尤为重要。一般认为,RET中产品失效类型为疲劳损伤和一次峰值破坏,文中以疲劳损伤为例,通过仿真计算电磁台和全轴台振动激励对产品的累积损伤,分析了2种振动激励对产品作用的差异。为充分发挥强化效果,指出应对产品进行模态分析、对夹具系统和安装方式进行动力学优化设计。

1 仿真试验

1.1 概述

由于电磁台与全轴台振动控制方式不同,在仿

真中获得二者模拟振动激励信号的方法也有所不同。在电磁台振动试验中,振动频谱是可控的,其激励信号的时域描述符合正态分布,所以激励信号可以根据控制频谱由计算机生成。全轴台振动激励信号采用实际测量的加速度值,在实测中台面上有模拟夹具和产品的负载。

按照以上方法得到振动激励的时域波形,然后根据系统的传递函数算出系统时域响应,再根据Basquin方程得到产品的疲劳寿命(以试验循环次数表示),最后根据Miner线性累积损伤模型计算出系统破坏所需的试验时间。

1.2 模型

为简化计算,采用单自由度系统,激励方式为模拟产品实际试验时的基础加速度激励,动力学模型如图1所示。

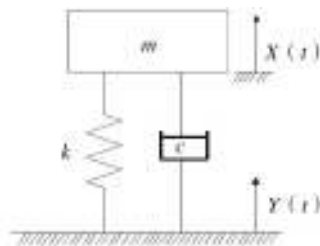


图1 产品动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of product

根据以上模型得出系统运动方程为:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (1)$$

式中: m 为产品质量; c 为阻尼; k 为刚度; $X(t)$ 为产品响应位移; $Y(t)$ 为基础激励位移。

系统固有频率 f 和阻尼比 ζ 分别为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2)$$

系统加速度激励-位移响应传递函数为:

$$H(s) = \frac{cs + k}{(ms^2 + cs + k)s^2} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s^2} \quad (3)$$

式中: ω_n 为系统的固有角频率; s 为拉氏算子。由式(3)可以计算出系统的位移响应,分析系统由位移造成的疲劳损伤。

系统加速度激励-加速度响应传递函数为:

$$H(s) = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

由式(4)可以计算出系统的加速度响应,分析系统由加速度造成的疲劳损伤。

系统的疲劳失效模型采用经典的Basquin方程:

$$NS^M=C \quad (5)$$

式中: S 为循环应力; N 为产品在循环应力作用下达到破坏时的循环次数; C, M 为常数。

Miner线性累积损伤假设是振动疲劳分析中最常见的累积损伤理论。设产品经受 M 个交变应力的作用,幅值分别是 S_i ,各应力的实际循环次数分别是 n_i ,则总的累积损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

式中: N_i 为产品在循环应力 S_i 作用下达到破坏时的循环次数; D 为常数,一般可取1,1.5或2,在本试验中取2。

Miner线性累积损伤模型忽略了各次应力循环

作用之前已有损伤的历史,也没有考虑多次应力作用的次序及其他因素的影响。尽管Miner假设很粗糙,但产品疲劳寿命有巨大的分散性,没有任何一种累积损伤模型能得出普遍适用的寿命预计,所以Miner线性累积损伤模型是疲劳损伤分析最常用的模型,文中试验采用了此模型。

2 仿真实例与仿真结果

为对比分析不同模态频率产品的响应与疲劳情况,选择了多组不同频率(详见表1)进行响应与疲劳分析。考虑一般实际情况,系统阻尼比定为0.01。

2.1 全轴台实例

输入激励信号为实测的全轴台振动时域信号,设置的控制值为30g。激励信号的频域如图2a所

表1 全轴台与电磁台疲劳累积破坏时间

Table 1 Cumulative damage time of all-axis vibrator and electromagnetic vibrator

产品模态频率 /Hz	加速度疲劳累积破坏时间/s		位移疲劳累积破坏时间/s	
	全轴台累积破坏	电磁台累积破坏	全轴台累积破坏	电磁台累积破坏
100	68 267	3 378	80 493	9 232
175+	578	1 012	8 120	13 002
224-	13 459	747	268 883	17 985
300	6 652	398	184 869	12 554
592+	38	127	18 494	35 268
1 000	233	51	219 807	38 402
1 136-	175	41	842 15	48 003
1 500	61	26	183 872	41 808
1 856-	64	18	231 877	46 294
2 224+	6.0	170	163 847	53 440
3 500	51	441	174 840	55 603
5 000	63	518	241 898	43 721
10 000	45	568	191 419	53 541

注:表中列出的是振动台对产品造成相同程度破坏所需时间,时间越短表示激励效率越高。表中所列产品模态频率后的“+”表示该频率上全轴台激励能量较强,“-”表示能量较低。

示,对应不同模态频率产品的位移与加速度响应计算结果见表1。图2b给出了以 $\zeta=0.01, f=1\,500\text{ Hz}$ 为例的加速度响应。

2.2 电磁台实例

输入激励信号为电磁台振动时域信号,设置的控制值为30g。激励信号频域图是15~2 000 Hz的平

直谱。对应不同模态频率产品的位移与加速度响应计算结果见表1。图2c给出了以 $\zeta=0.01, f=1\,500\text{ Hz}$ 为例的加速度响应。

3 仿真结果分析

全轴台的汽锤对台面激励为宽带随机,但是从

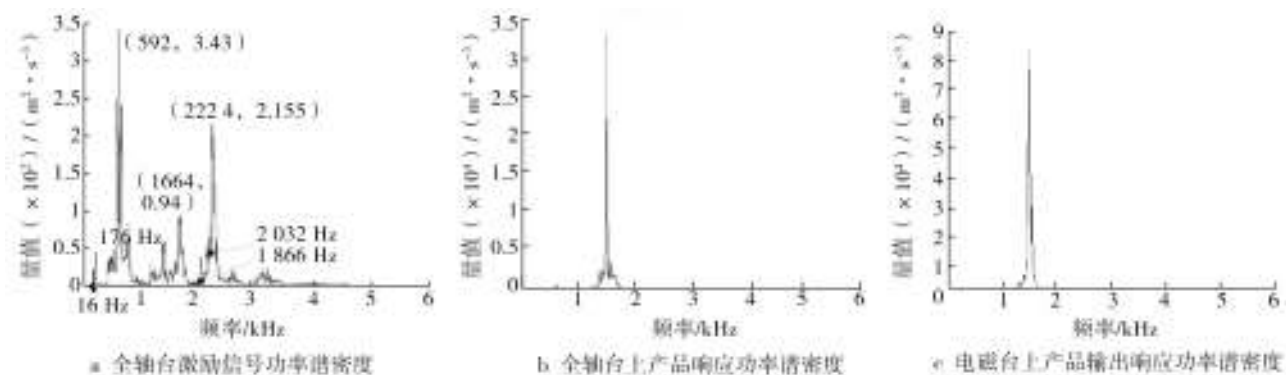


图2 输入输出频域

Fig. 2 Input and output frequency domain

图2a可以看出全轴台对产品激励表现为若干强烈的窄带随机加1个微弱的宽带随机,这是因为柔性的台面和夹具相当于机械带通“滤波器”,只有部分频带的能量能够起作用。电磁台的台面和夹具刚度较大,因而电磁台对产品的激励为宽带随机,但是电磁台激励的频率范围比全轴台窄。

从表1可以看出对于加速度敏感产品,当产品的模态频率在电磁台的频率范围内,一般情况下电磁台对产品损伤要快于全轴台,但是如果产品的模态频率在全轴台窄带随机激励频带内,如175, 592 Hz处,全轴台对产品的损伤要明显快于电磁台。对于模态频率高于2 kHz的产品,全轴台对产品的损伤要快于电磁台。这是因为超过2 kHz,电磁台便没有激励的缘故。

对于位移敏感产品,只有当产品模态频率在全轴台若干强烈的窄带随机范围内,如175, 592 Hz处,全轴台对产品疲劳破坏有一定的“强化”作用,但“强化”效果没有对加速度敏感产品明显;对于模态频率高于2 kHz的产品,全轴台对产品的损伤要慢于电磁台。这是因为位移响应主要由低频激励所产生,而电磁台的低频激励能量相对于全轴台更强。

上述分析可得出以下结论。

1) 当产品模态频率在全轴台窄带随机频带附近,可靠性强化试验对产品振动累积损伤有显著的“强化”作用。为了发挥强化试验的“强化”优势,应使全轴台振动激励的窄带随机频带与产品模态频率相匹配。在工程中,可以通过合理添加配重和用动力学设计夹具等方法使全轴台激励窄带随机频带与产品关键阶次模态频率相匹配。

2) 台面、夹具系统和安装方式对全轴台影响较大,要想发挥全轴台对产品损伤的“强化”作用,一方面必须对台面、夹具系统和安装方式进行动力学优化设计分析,在试验前进行充分的动态特性测试;另一方面,还应对受试产品进行模态分析,以便于夹具系统和安装方式的优化设计。模态分析可采用模态试验或“Ansys”等专业软件进行。

3) 在全轴台上,由于不同力学特点的夹具有不同的频率特性(相当于不同频带的滤波器),它们能改变最终传递到产品上能量的频率特性,导致产品的失效模式产生改变。也就是说,在柔性的全轴振动台上,不同的夹具将会使产品产生不同的失效模式。所以,分析产品的模态特性,合理地设计夹具,应是强化振动实验的重要组成部分。

参考文献:

- [1] HOBPS K G. Highly Accelerated Stress Screens -hass[C]//Proceedings-IES. North Caroling: Inst of Environmental Sciences, 1992: 3—18.
- [2] ROBERT W D, EDWARD O M. Reliability Enhancement Testing (RET)[C]//Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium. Anaheim: IEEE, 1994: 91—98.
- [3] 姜同敏. 可靠性强化试验[J]. 环境技术, 2000(1): 3—6.
- [4] 陈俊勇, 陈循, 任志乾. 可靠性强化试验及其在某通信产品中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(4): 509—512.
- [5] 陈循, 陶俊勇, 张春华. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 29—32.
- [6] 鞠杨, 樊承谋. 疲劳累积损伤研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 27(5): 115—120.