

文章编号 :1001 - 2486( 2005 )01 - 0026 - 04

## 宽频带随机振动环境的疲劳强度强化机理\*

蒋培,张春华,陈循,温熙森

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** :全轴随机振动环境的疲劳强化机理问题是可靠性强化试验研究的关键技术之一。针对该振动环境的宽带特性对疲劳失效的强化作用进行了讨论,首先研究影响随机应力疲劳强化效能的相关统计参数,然后分析随机应力的频谱带宽如何影响这些统计参数,最后得到频谱带宽对疲劳强化效能的影响,由此揭示全轴随机振动环境宽频带特性的疲劳强化机理。

**关键词** :可靠性强化试验;疲劳损伤;随机应力;功率谱

中图分类号 :O324 文献标识码 :A

## Fatigue Enhancement Mechanism of the Broadband Random Vibration Environment

JIANG Pei, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun, WEN Xi-sen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Fatigue enhancement mechanism of the omni-axis random vibration environment is one of the key techniques to carry out the reliability enhancement testing. This paper studies the fatigue enhancement mechanism of its broad bandwidth characteristic. At first related spectral parameters of random stresses to influence fatigue are studied. Then it is analyzed how the bandwidth affects the above parameters. Finally the fatigue enhancement mechanism of the broad bandwidth characteristic is illustrated.

**Key words** :reliability enhancement testing; fatigue damage; random stresses; power spectral density

20 世纪 90 年代,可靠性强化试验作为一种新型的可靠性试验技术在西方发达国家发展并日益成熟,在航空、航天、国防等部门取得了成功的应用。可靠性强化试验(Reliability Enhancement Test, RET)通过对产品施加极限环境应力,激发产品设计和工艺缺陷,寻求相应的改进措施,使产品研制的可靠性得到增长,以此达到健壮设计的目的。目前可靠性强化试验采用了一种新型的超高应力试验系统,能够施加振动、温度、湿度“三综合”的超高应力环境,特别是三轴六自由度的机械振动,即全轴随机振动环境。在实际工程应用中,这种利用反复冲击机(Repetitive Shock, RS)实现的全轴随机振动环境对产品缺陷,特别是疲劳缺陷,表现出很高的激发效能。目前有关全轴随机振动环境强化失效的机理还是尚未解决的理论问题,构成了可靠性强化试验技术深入研究的技术瓶颈,已经引起了可靠性工程界的广泛关注<sup>[1]</sup>。

文献[2]中归纳出全轴随机振动环境的三个主要特性:多轴同步加载、宽频带以及超高斯幅值分布。RS机的这种多轴同步加载方式比传统的单轴依次加载方式有更高的疲劳激发效能。文献[3]中美国喷气推进实验室比较三个一分钟的单轴试验(一次一轴)和一分钟的三轴同步试验造成的累计疲劳损伤的差别,结果表明三轴同步激振一分钟对试件产生的累积疲劳损伤高于三轴分别激振一分钟产生的累积疲劳损伤。RS机的多轴同步加载特性不管从应力水平以及作用时间都明显优于传统的单轴依次加载方式。因此,本文针对全轴随机振动环境的宽频带特性开展疲劳强化机理研究,通过比较同等

\* 收稿日期 2004 - 09 - 15

基金项目:国家部委重点资助项目

作者简介:蒋培(1975—),男,博士生。

均值和量级 (RMS 值) 的宽带随机应力和窄带随机应力对疲劳强化作用的差异, 来分析随机应力频谱带宽对疲劳强化效能的影响。

## 1 影响疲劳失效的随机应力频域参数

随机应力的疲劳损伤估计方法有三个相关统计参数: 期望峰值循环总数、期望零正交叉率、频谱形状不规则因子<sup>[4-6]</sup>, 都是应力功率谱的泛函。

(1) 期望峰值循环总数

$$E[P] = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^4 S(f) df}{\int_0^{\infty} f^2 S(f) df}} \quad (1)$$

(2) 期望零正交叉率

$$N_r = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 S(f) df}{\int_0^{\infty} S(f) df}} \quad (2)$$

(3) 频谱形状不规则因子

$$\alpha = \sqrt{\frac{[\int_0^{\infty} f^2 S(f) df]^2}{[\int_0^{\infty} S(f) df][\int_0^{\infty} f^4 S(f) df]}} \quad (3)$$

其中,  $S(f)$  是随机应力的功率谱。通过分析  $E[P]$ 、 $N_r$  和  $\alpha$  对单位时间内的期望疲劳损伤  $E[D]$  的影响, 得到以下三条引论:

引论 1 同等均值和量级的随机应力, 期望峰值循环总数越大, 其疲劳强化作用越显著。

引论 2 同等均值和量级的随机应力, 期望零正交叉率越大, 其疲劳强化作用越显著。

引论 3 同等均值和量级的随机应力, 频谱形状不规则因子越小, 其疲劳强化作用越显著。

## 2 随机应力的频谱带宽对疲劳失效的强化机理

根据功率谱密度分析的相关理论<sup>[7]</sup>, 构造出两个具有相同均值和量级, 且幅值概率分布相同的随机应力信号  $x(t)$  和  $x(k \cdot t)$  ( $k > 1$ )。如果  $x(t)$  的功率谱为  $u(f)$ , 频谱带宽为  $b$ , 则  $x(k \cdot t)$  的功率谱为  $\frac{1}{k} \cdot u(\frac{f}{k})$ , 即频谱带宽扩展为  $k \cdot b$ 。本文通过  $x(t)$  和  $x(k \cdot t)$  这两个随机应力信号的相关频域参数

( $E[P]$ 、 $N_r$ 、 $\alpha$ ) 来分析频谱带宽对疲劳失效的强化机理。

### 2.1 宽带对期望峰值循环总数 $E[P]$ 的影响

首先, 计算  $x(t)$  的期望峰值循环总数

$$E[P]_{x(t)} = \sqrt{\frac{\int_0^b f^4 \cdot u(f) \cdot df}{\int_0^b f^2 \cdot u(f) \cdot df}} = \sqrt{\frac{\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n b^2 \cdot \frac{i^4}{n^5} \cdot u(\frac{i \cdot b}{n})}{\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{n^3} \cdot u(\frac{i \cdot b}{n})}} \quad (4)$$

然后, 计算  $x(k \cdot t)$  的期望峰值循环总数

$$E[P]_{x(k \cdot t)} = \sqrt{\frac{\int_0^{k \cdot b} f^4 \cdot \frac{1}{k} \cdot u(\frac{f}{k}) \cdot df}{\int_0^{k \cdot b} f^2 \cdot \frac{1}{k} \cdot u(\frac{f}{k}) \cdot df}} = k \cdot \sqrt{\frac{\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n b^2 \cdot \frac{i^4}{n^5} \cdot u(\frac{i \cdot b}{n})}{\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{n^3} \cdot u(\frac{i \cdot b}{n})}} \quad (5)$$

比较  $E[P]_{x(t)}$  和  $E[P]_{x(k \cdot t)}$ , 显然

$$E[P]_{x(k \cdot t)} > E[P]_{x(t)} \quad (6)$$

即  $x(k \cdot t)$  的期望峰值循环总数大于  $x(t)$  的期望峰值循环总数。

## 2.2 宽带对期望零正交叉率 $N_r$ 的影响

首先,计算  $x(t)$  的期望零正交叉率

$$N_{r, x(t)} = \frac{\sqrt{\int_0^b f^2 \cdot u(f) \cdot df}}{\sqrt{\int_0^b u(f) \cdot df}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{1}{R(0)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i^2 \cdot b^3}{n^3} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)} \quad (7)$$

然后,计算  $x(k \cdot t)$  的期望零正交叉率

$$\begin{aligned} N_{r, x(k \cdot t)} &= \frac{\sqrt{\int_0^{k \cdot b} f^2 \cdot \frac{1}{k} \cdot u\left(\frac{f}{k}\right) \cdot df}}{\sqrt{\int_0^{k \cdot b} \frac{1}{k} \cdot u\left(\frac{f}{k}\right) \cdot df}} \\ &= k \cdot \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{1}{R(0)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i^2 \cdot b^3}{n^3} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

比较  $N_{r, x(t)}$  和  $N_{r, x(k \cdot t)}$  显然

$$N_{r, x(k \cdot t)} > N_{r, x(t)} \quad (9)$$

即  $x(k \cdot t)$  的期望零正交叉率大于  $x(t)$  的期望零正交叉率。

## 2.3 宽带对频谱形状不规则因子 $\alpha$ 的影响

首先,计算  $x(t)$  的频谱形状不规则因子

$$\begin{aligned} \alpha_{x(t)} &= \frac{\sqrt{\left[\int_0^b f^2 \cdot u(f) \cdot df\right]^2}}{\sqrt{\left[\int_0^b u(f) \cdot df\right] \left[\int_0^b f^4 \cdot u(f) \cdot df\right]}} \\ &= \frac{\lim_{n \rightarrow +\infty} b \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{i^2}{n^3} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)\right]^2}{\sqrt{\lim_{n \rightarrow +\infty} R(0) \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{i^4}{n^5} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)\right]}} \end{aligned} \quad (10)$$

然后,计算  $x(k \cdot t)$  的频谱形状不规则因子

$$\begin{aligned} \alpha_{x(k \cdot t)} &= \frac{\sqrt{\left[\int_0^{k \cdot b} f^2 \cdot \frac{1}{k} \cdot u\left(\frac{f}{k}\right) \cdot df\right]^2}}{\sqrt{\left[\int_0^{k \cdot b} \frac{1}{k} \cdot u\left(\frac{f}{k}\right) \cdot df\right] \left[\int_0^{k \cdot b} f^4 \cdot \frac{1}{k} \cdot u\left(\frac{f}{k}\right) \cdot df\right]}} \\ &= \frac{\lim_{n \rightarrow +\infty} b \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{i^2}{n^3} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)\right]^2}{\sqrt{\lim_{n \rightarrow +\infty} R(0) \cdot \left[\sum_{i=1}^n \frac{i^4}{n^5} \cdot u\left(\frac{i \cdot b}{n}\right)\right]}} \end{aligned} \quad (11)$$

比较  $\alpha_{x(t)}$  和  $\alpha_{x(k \cdot t)}$  显然

$$\alpha_{x(k \cdot t)} = \alpha_{x(t)} \quad (12)$$

即  $x(k \cdot t)$  和  $x(t)$  的频谱形状不规则因子相等,从而可得,随机应力频谱带宽变化不影响频谱形状不规则因子的大小。

结合引论 1、2、3 及式(6)、式(9)和式(12)可知,同等均值和量级以及相同幅值概率分布的随机应力,频谱带宽越大,其对疲劳强化作用越显著。

## 3 数值算例

为了对以上分析给出一个直观的说明,针对同等均值和量级以及相同幅值概率分布,不同频谱带宽的随机应力计算了  $E[P]$ 、 $N_r$  和  $\alpha$  并求得了随机应力在单位时间内引起的疲劳损伤  $E[D]$ <sup>[4]</sup>。表 1 给出了结构材料常数  $b=12$  时的计算结果,与本文的分析结论完全吻合。

表1 不同频谱带宽随机应力疲劳激发效能的数值比较

Tab. 1 Fatigue efficiency of different bandwidth of random stresses

统计项目	随 机 应 力 相 关 统 计 参 数				单位时间内的 期望疲劳损伤
	<i>Bandwidth</i>	$E[P]$	$N_r$	$\alpha$	$E[D]$
应力 $\alpha(t)$	1kHz	389.8086	294.6470	0.7559	0.4596
应力 $\alpha(2 \cdot t)$	2kHz	779.6173	589.2940	0.7559	0.9191
应力 $\alpha(5 \cdot t)$	5kHz	19490e+003	1.4732e+0.03	0.7559	2.2978
应力 $\alpha(8 \cdot t)$	8kHz	3.1185e+003	2.3572e+003	0.7559	3.6765
应力 $\alpha(10 \cdot t)$	10kHz	3.8981e+003	2.9465e+003	0.7559	4.5956

#### 4 小结

针对影响随机应力疲劳强化效能的相关统计参数(期望峰值循环总数、期望零正交叉率和频谱形状不规则因子),分析了随机应力的频谱带宽如何影响以上三个统计参数,最后得到频谱带宽对疲劳强化效能的影响,由此揭示了RS机全轴随机振动环境宽频特性的疲劳强化机理。

#### 参考文献:

- [1] 蒋培,陈循,张春华,等. 可靠性强化试验技术综述[J]. 强度与环境, 2003(1).
- [2] 蒋培,陈循,张春华,等. 一种新的全轴随机振动试验环境特性研究[J]. 中国机械工程, 2004(2).
- [3] 金恂叔. 21世纪航天器的环境试验[J]. 国际太空, 1995(5):19-20.
- [4] Robson J D. 随机振动引论[M]. 谢世浩,译. 长沙:湖南科技出版社,1980.
- [5] Bishop N W M, Feng Q, Schofield P. Spectral Fatigue Analysis of Shallow Water Jacket Platforms[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, August 1996:118-191.
- [6] Hu J M. Life Prediction and Damage Acceleration Based on the Power Spectral Density of Random Vibration[J]. Journal of the IES, Jan/Feb 1995.
- [7] 温熙森,陈循,唐丙阳. 机械系统动态分析理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.

