

文章编号: 1001 - 2486(2004)03 - 0099 - 04

超高斯随机振动环境的疲劳强化机理*

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:针对可靠性强化试验的全轴随机振动环境的超高斯幅值分布特性开展其疲劳强化机理研究。首先通过理论分析表明RS机振动激励下试件应力仍保持超高斯分布,然后证明了同等量级下的超高斯分布比高斯分布随机应力具有更高的疲劳强化效能,从而揭示RS机全轴随机振动环境超高斯幅值分布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: TB114.3; TB543.3 **文献标识码:** A

Fatigue Enhancement Mechanism of the Super-Gaussian 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: This paper studies the fatigue enhancement mechanism of the super-Gaussian amplitude distribution characteristic. At first it is demonstrated that the response stresses amplitude distribution is super-Gaussian in the repetitive shock machine. Then it is proved that the super-Gaussian random stresses have higher efficiency to stimulate fatigue failure than Gaussian random stresses of the equivalent level. Finally the fatigue enhancement mechanism of super-Gaussian amplitude distribution 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 testing, 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随机振动,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^[1]。

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。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。其多轴同步加载和宽频带特性的疲劳强化机理已经在另文中论述,因此本文将针对全轴随机振动环境的超高斯幅值分布对疲劳的强化机理展开研究,分析RS机振动激励下试件的响应应力,然后比较了同等量级下的超高斯分布与高斯分布随机应力的疲劳强化效能,从而揭示RS机全轴随机振动环境超高斯幅值分布特性的疲劳强化机理。

1 响应应力的幅值分布

超高斯分布是指随机过程 X 的四阶累积量恒大于零,并且关于其均值对称分布。相对于高斯分

* 收稿日期: 2003 - 12 - 16

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。

布,超高斯分布的随机过程分布区域较宽,呈现较宽的拖尾。工程中对于超高斯过程常常只指明其偏斜度为零,峭度大于零,即

$$k_r = \frac{E[X - E(X)]^4 - 3 \cdot \{E[X - E(X)]^2\}^2}{\{E[X - E(X)]^2\}^2} > 0 \quad (1)$$

文献[2]通过对全轴随机振动环境的表征证明了RS机随机振动具有超高斯幅值分布的特性,本文首先对RS机振动激励下试件响应应力幅值分布特性进行研究。

在实际工程中振动疲劳是以高周疲劳失效为主,系统工作在弹性范围内,因此本文采用线性系统分析方法来讨论RS机振动激励下的疲劳问题。著名的有限元分析软件ANSYS和MSC中Fatigue模块在处理振动疲劳问题时就是采用线性系统分析方法。考虑图1所示的动态响应系统,输入信号是振动试验的振动环境,记作 $x(t)$,输出信号是试件对振动环境的响应应力,记作 $y(t)$ 。假设其为线性系统,脉冲响应函数为 $h(t)$ 。下面讨论在 $x(t)$ 为非高斯信号的情况下响应 $y(t)$ 的幅值分布特性。

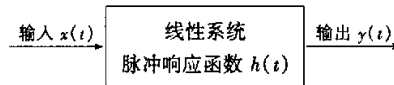


图1 振动激励和响应应力的时域表示

Fig. 1 Relation between vibration input and response stresses

根据线性系统理论,则系统输出

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

首先,计算 $y(t)$ 的四阶累积量

$$\begin{aligned} C_{y,4}(t_1, t_2, t_3, t_4) &= E[y(t_1) \cdot y(t_2) \cdot y(t_3) \cdot y(t_4)] - E[y(t_1) \cdot y(t_2)] \cdot E[y(t_3) \cdot y(t_4)] \\ &\quad - E[y(t_1) \cdot y(t_3)] \cdot E[y(t_2) \cdot y(t_4)] - E[y(t_1) \cdot y(t_4)] \cdot E[y(t_2) \cdot y(t_3)] \\ &= E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_2 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_3 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_4 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \\ &\quad - E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_2 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \cdot \\ &\quad E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_3 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_4 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \\ &\quad - E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_3 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \cdot \\ &\quad E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_2 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_4 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \\ &\quad - E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_1 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_4 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \cdot \\ &\quad E\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t_2 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t_3 - \tau) \cdot h(\tau) \cdot d\tau\right] \\ &= \iiint\limits_{R^4} h(\tau_1) \cdot h(\tau_2) \cdot h(\tau_3) \cdot h(\tau_4) \cdot C_{x,4}(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2, t_3 - \tau_3, t_4 - \tau_4) \cdot \\ &\quad d\tau_1 \cdot d\tau_2 \cdot d\tau_3 \cdot d\tau_4 \quad (3) \end{aligned}$$

由于 $x(t)$ 为超高斯分布,其四阶累积量恒大于零,即 $C_{x,4}(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2, t_3 - \tau_3, t_4 - \tau_4) > 0$,且 $C_{x,4}$ 是连续函数,并且 $h(\tau_1) \cdot h(\tau_2) \cdot h(\tau_3) \cdot h(\tau_4) \geq 0$,因此 $y(t)$ 的四阶累积量 $C_{y,4}(t_1, t_2, t_3, t_4) > 0$,响应应力 $y(t)$ 是超高斯分布的随机应力。

2 超高斯和高斯幅值分布随机应力疲劳强化效能的比较

除了时域雨流计数法^[4],现有的随机应力疲劳损伤估计方法都是基于应力高斯分布前提条件的。

因此,本文从随机应力疲劳损伤最基本的理论开始推导,来比较同等均值和量级以及频谱带宽的超高斯和高斯分布随机应力的疲劳损伤激发能力,最后并采用时域雨流计数法进行数值算例验证。

首先比较同等均值和量级以及频谱带宽的超高斯分布随机应力的联合概率密度函数 $\rho_{sup}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 和高斯分布随机应力的联合概率密度函数 $\rho_{nor}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 。超高斯分布中, y_1, y_2, y_3 的四阶统计特征 $E(y_1^4) - 3 \cdot b_{11}^2, E(y_2^4) - 3 \cdot b_{22}^2, E(y_3^4) - 3 \cdot b_{33}^2, E(y_1^3 y_2) - 3 \cdot b_{11} \cdot b_{13}, E(y_3^3 y_1) - 3 \cdot b_{33} \cdot b_{13}, E(y_1^2 y_2^2) - b_{11} \cdot b_{22}, E(y_2^2 y_3^2) - b_{22} \cdot b_{33}, E(y_2^2 y_1 y_3) - b_{22} \cdot b_{13}, E(y_1^2 y_3^2) - 2 \cdot b_{13}^2 - b_{11} \cdot b_{33}$ 均大于零,而高斯分布中 y_1, y_2, y_3 以上统计特征均为零。因此 $\rho_{sup}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 分布区域较 $\rho_{nor}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 宽,呈现较宽的拖尾,如图 2 所示。图 3 为 $\rho_{sup}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 和 $\rho_{nor}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 在空间中以概率密度轴所在面为切面的剖面图。 $\rho_{sup}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 和 $\rho_{nor}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 在三维空间中相交成两条空间曲线,它们在 y_1 和 y_3 组成的平面中投影为两条封闭曲线,不妨记为 $l_a(y_1, y_3) = 0$ 和 $l_b(y_1, y_3) = 0$,如图 4 所示。

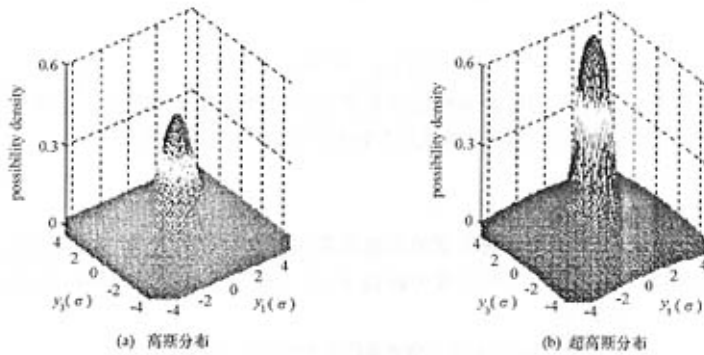


图 2 y_1 和 y_3 的联合概率密度示意图
Fig.2 Joint possibility density function of y_1 and y_3

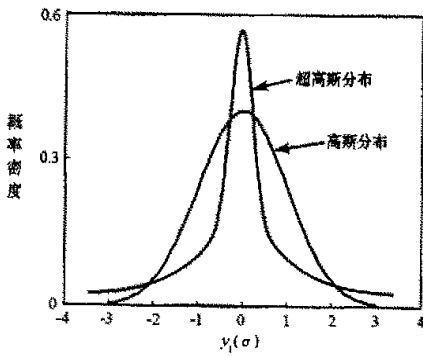


图 3 概率密度剖面示意图
Fig.3 Section of possibility density

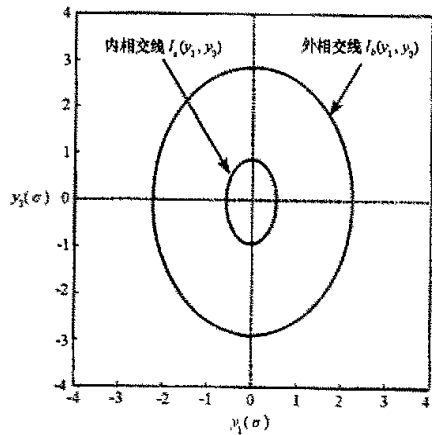


图 4 空间相交线的投影示意图
Fig.4 Projection of intersection lines

从图2、图3可以看出

$$\begin{cases} \rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} > \rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} & l_a(y_1, y_3) < 0 \\ \rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} = \rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} & l_a(y_1, y_3) = 0 \\ \rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} < \rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} & l_a(y_1, y_3) > 0 \ \& \ l_b(y_1, y_3) < 0 \\ \rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} < \rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} & l_b(y_1, y_3) = 0 \\ \rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} < \rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} & l_b(y_1, y_3) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

通过随机应力疲劳损伤估计基本理论^[3],得疲劳损伤评估表达式

$$E[D] = -\frac{1}{C} \cdot \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^0 y_1^b \cdot y_3 \cdot \rho^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} \cdot dy_3 \cdot dy_1 \quad (5)$$

由于 $\rho_{\text{sup}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 和 $\rho_{\text{nor}}^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0}$ 对称分布,故式(5)可转换为

$$E[D] = \frac{1}{C} \cdot \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} y_1^b \cdot y_3 \cdot \rho^*(y_1, y_2, y_3)_{y_2=0} \cdot dy_3 \cdot dy_1 \quad (6)$$

经推导可得

$$E[D]_{\text{sup}} > E[D]_{\text{nor}} \quad (7)$$

即同等均值和量级以及频谱带宽的超高斯幅值分布随机应力对疲劳损伤的强化程度高于高斯分布随机应力,从而揭示全轴随机振动环境超高斯幅值分布特性对疲劳失效的强化机理。

3 数值算例

针对三组同等均值和量级以及频谱带宽的的超高斯幅值分布和高斯幅值分布随机应力,采用时域雨流计数法计算它们在单位时间内引起的疲劳损伤 $E[D]$,表1给出了结构材料常数 $b = 12$ 时的计算结果,与本文分析的结论完全吻合。

表1 超高斯和高斯分布随机应力疲劳激发效能的比较

Tab.1 Fatigue efficiency of super-gaussian and gaussian random stresses

应力组别	单位时间内的期望疲劳损伤 $E[D]$	
	超高斯随机应力	高斯随机应力
第一组(量级1)	1.8196	0.3819
第三组(量级2)	3245.8	917.6745
第三组(量级3)	6.0782e+006	9.7263e+004

4 小结

首先分析证实了RS机振动激励下试件响应应力的超高斯分布特性,然后比较了同等量级下的超高斯分布和高斯分布随机应力的疲劳强化效能,得出超高斯分布具有更强的疲劳激发效能的结论,并进行了数值算例验证,从而揭示RS机全轴随机振动环境超高斯幅值分布特性的疲劳强化机理。

参考文献:

- [1] 蒋培,陈循,张春华,陶俊勇.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,陶俊勇.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] Robson J D.随机振动引论[M].谢世浩,译.长沙:湖南科技出版社,1980.
- [4] 高镇同,熊峻江.疲劳可靠性[M].北京:北京航空航天大学出版社,2000.

