

典型结构单轴和三轴振动响应对比研究

庞家志, 李果, 张双俊

(中国航天科工集团第二研究院二〇一所, 北京 100854)

摘要: **目的** 研究单轴振动与三轴振动对典型结构振动响应的不同影响。**方法** 通过单轴振动及三轴振动的对比实验, 以典型结构悬臂梁为研究对象, 利用加速度响应测量法及动应变测量法, 从不同角度研究单轴振动和三轴振动对试品造成的不同影响。**结果** 相比于单轴振动, 在三轴振动下试品谐振点发生改变的同时, 谐振峰响应也更为明显。另外, 由于三轴同振叠加耦合作用的影响, 三轴振动下试品的响应量级也略大于单轴振动。**结论** 单轴振动与三轴振动对试品会产生不同的考核效果。

关键词: 三轴振动; 谐振峰; 响应量级

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.017

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)01-0080-06

Comparative Study on Vibration Response of Typical Single-axis and Three-axis Vibration Tests

PANG Jia-zhi, LI Guo, ZHANG Shuang-jun

(Institute 201 of the Second Academy of China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100854, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate influences of single-axis vibration test and three-axis vibration test on vibration response of typical structure. **Methods** Through comparing the single-axis vibration test and the three-axis vibration test to the cantilever beam, influences of single-axis vibration and three-axis vibration on specimen from different perspectives were researched with acceleration response and dynamic strain. **Results** Compared with the single-axis vibration, the three-axis vibration changed the resonance frequency and the amplitude of the beam obviously. In addition, due to the cumulative vibration in three axes, the beam showed more resonance level than in single-axis vibration. **Conclusion** Single-axis vibration and three-axis vibration have different influences on the specimen.

KEY WORDS: three-axis vibration; resonance frequency; resonance level

振动试验是检验产品结构和性能及工艺质量、暴露产品的早期故障、提高产品可靠性的有效方法。一方面, 随着对产品可靠性要求越来越高, 对于真实环境的模拟需求也逐渐提升, 产品真实经历的振动环境从本质上讲都是多维振动, 目前常以三个正交轴依次进行的单轴振动近似等效多维振动, 这种等效模式是建立在产品性能和响应服从线性假设基础上的。对于实际情况而言, 产品在多个方向上的振动响应是相互干涉的, 通常具有较大的非线性, 因而用单轴振动并

不能完全等效多维振动, 而是存在欠试验或过试验等多方面的问题^[1-3]。另一方面, 由于产品从较大刚度的笨重件到精巧化的发展趋势愈发明显, 产品不再体现出单一方向的共振峰, 而是表现出多模态振动及多自由度共振峰, 利用单轴振动并不能完全激发结构在不同方向的模态^[4-5]。目前对多轴振动虽然已经有多方面研究^[6], 但对多轴振动在工程中的实际应用及对产品的考核效果等方面的研究还不够深入。因此, 开展多轴振动试验研究对考核产品质量可靠性十分必要。

收稿日期: 2017-09-04; 修订日期: 2017-10-06

作者简介: 庞家志(1986—)男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境与可靠性。

文中利用加速度响应测量法及动应变测量法，通过对含裂纹的悬臂梁结构开展单轴及三轴振动，分析了不同振动方式对悬臂梁结构响应的不同影响。研究结果有助于加深对三轴振动的理解及认识，为产品可靠性考核开辟新的研究思路及途径，为三轴振动推向实际应用奠定了一定的研究基础。

1 实验

1.1 实验对象

研究所用试件为各向同性树脂材料的悬臂梁结构，为增加试件的响应特性，在悬臂梁根部制造人工裂纹，悬臂梁试件如图 1 所示。



图 1 含裂纹悬臂梁试件

1.2 实验方法

采用响应测量法及动应变测量法对单轴及多轴振动环境下的悬臂梁试件进行测量，观察并记录试件在振动过程中的响应特性。

1.2.1 响应测量法

实验时以扫频的方式确定悬臂梁的共振峰，同时在悬臂梁顶端粘贴加速度传感器检测点进行实时监控（如图 2 所示），记录检测点的频谱特性。

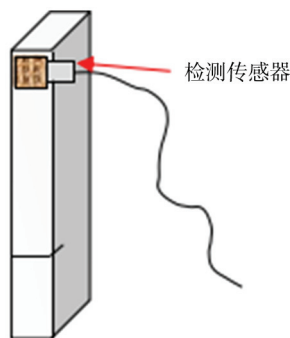


图 2 响应测量法测量模型

1.2.2 应变测量法

在外部载荷作用下，裂纹处最易发生破坏及变

形，在裂纹附近区域粘贴应变片（如图 3、图 4 所示）。在实验时利用动应变测试技术，实时采集裂纹附近动应变数值大小，判断试件的变形响应情况。

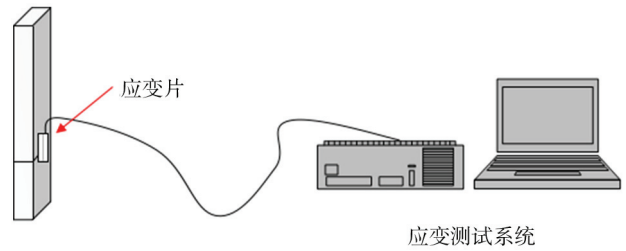


图 3 动应变测试



图 4 实验用应变片

1.3 实验过程

振动控制及应变测试实验系统如图 5 所示。实验时，将贴有应变片及三向传感器的悬臂梁固定在振动台台面上（如图 6 所示），首以 1g 的量级在 20~50 Hz 频带内进行扫频，实验条件见表 1。扫频的同时检测加速度传感器测量值及应变测量值，观察数据随扫描频率的变化情况，寻找试件（悬臂梁）共振点。

表 1 实验条件

实验条件	实验方向		实验时间	
	单轴	三轴	单轴	三轴
扫频：20~50 Hz, 1g, 1 oct/min	x, y, z 方向依次进行	x, y, z 方向同时进行	每轴向依次单循环	三轴同时单循环

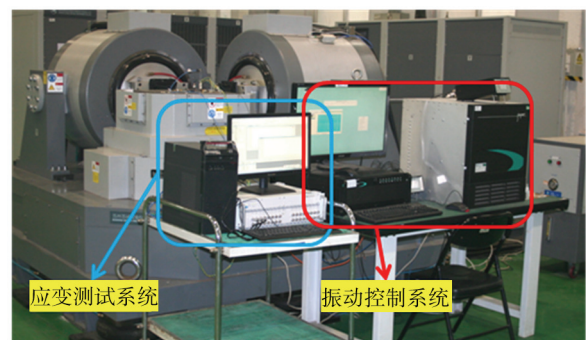


图 5 振动控制系统及应变测试系统

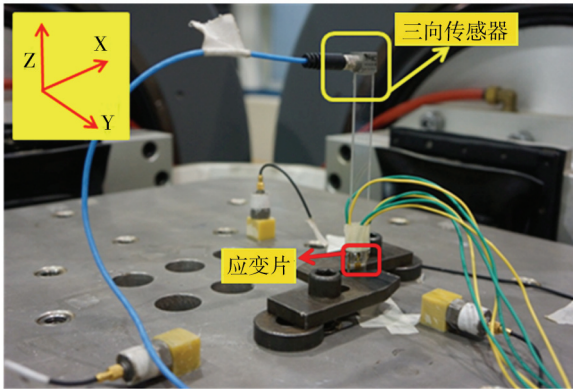


图6 悬臂梁三向传感器粘贴点及应变测量点

2 结果与分析

2.1 实验结果

单轴及三轴实验所得到的台面控制曲线及悬臂梁顶端测量得到的在 x 向、 y 向及 z 向的加速度响应曲线、悬臂梁裂纹附近应变曲线如图7—图10所示。

首先对单轴及三轴振动条件下的悬臂梁顶端加速度响应进行分析。由加速度响应曲线图可以看出，悬臂梁在 20~50 Hz 间存在两个共振峰，在不同的振动方式下，其共振频率及响应量级数值、裂纹处的应变数值见表2。

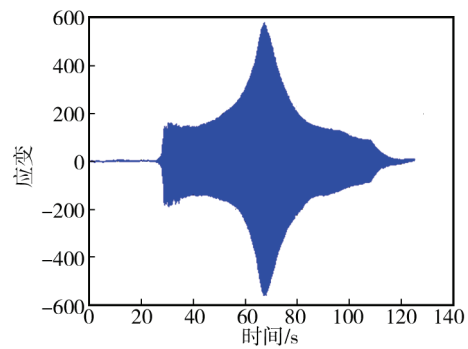
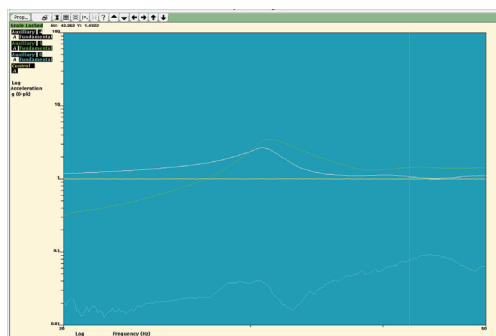


图7 x 方向振动时图悬臂梁顶端各方向加速度响应及裂纹附近应变响应

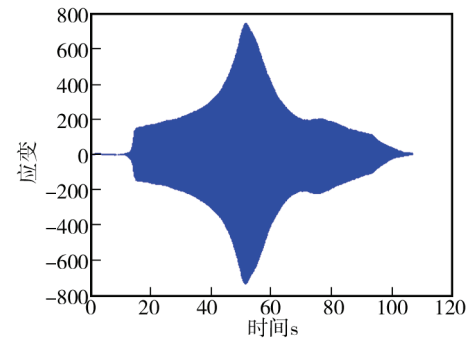
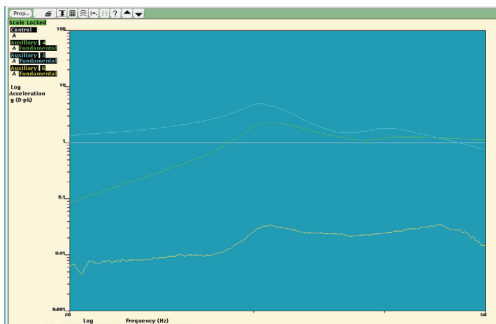


图8 y 方向振动时图悬臂梁顶端各方向加速度响应及裂纹附近应变响应

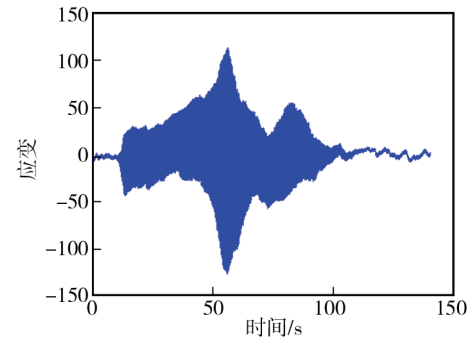
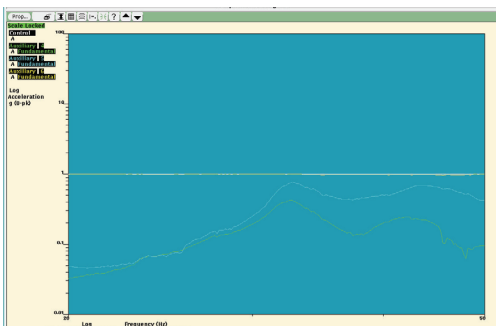


图9 z 方向振动时图悬臂梁顶端各方向加速度响应及裂纹附近应变响应

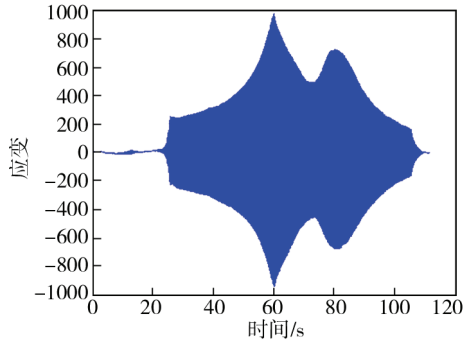
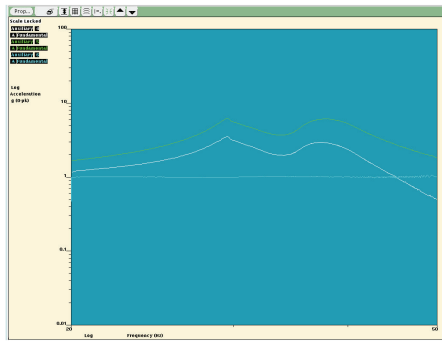


图 10 三轴同振时悬臂梁顶端各方向加速度响应及裂纹附近应变响应

表 2 不同振动方式下悬臂梁顶端测量点共振频率及在该点的响应值

振动方向	测量方向	一阶频率/Hz	响应值/g	二阶频率/Hz	响应值/g	应变峰值 (一阶频率时刻)
x向	x	30.83	2.67	40.27	1.13	579.28
	y	31.26	3.51	43.15	1.45	
	z	30.69	0.04	44.36	0.09	
y向	x	30.97	2.28	41.97	1.27	747.07
	y	30.41	4.99	40.27	1.82	
	z	31.12	0.003	45.18	0.04	
z向	x	32.58	0.42	42.36	0.25	127.92
	y	32.73	0.77	43.55	0.69	
	z	/	/	/	/	
xyz三向同振	x	29.57	3.54	37.34	2.97	977.06
	y	29.57	6.25	37.78	6.15	
	z	/	/	/	/	

由上述分析可知，针对含裂纹的悬臂梁试件，通过单轴与三轴振动数据对比分析，可得到以下结论：在谐振频率上，相比于单轴振动，在三轴振动下试件的谐振频率均有降低的趋势；从响应量级上，相比于单轴振动，在三轴振动下试件在谐振频率上的响应量级有增大的趋势；从振动模态上，相比于单轴振动，在三轴振动下试件出现了更为明显的二阶频率，并且在二阶频率处试件的振动响应值明显大于单轴振动时的响应；通过在一阶频率处测量得到的应变峰值大小可以看出，在三轴振动下裂纹处的应变峰值大于单轴振动时的应变大小，由此说明在三轴振动下试件发生了较大变形，经历了比单轴振动下更大的载荷作用。

2.2 结果分析

下面以矩形截面梁为例，针对上述实验结论进行分析。为简化力学分析，根据力的叠加原理，现将三

轴同振先简化为二维平面进行分析，其结论同样适用于三轴同振状态。如图 11 所示，在 xy 平面内的矩形梁刚度可表示为：

$$K=EI \tag{1}$$

式中： E 为弹性模量； I 为惯性矩，其大小与截面形状及中性轴有关。矩形截面 I 值可表示为：

$$I=bh^3/12 \tag{2}$$

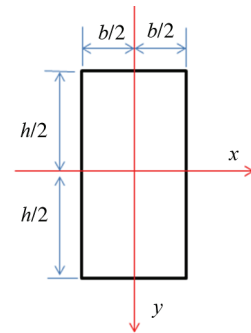


图 11 矩形截面梁刚度分析

由式 (2) 可知，矩形截面时，长轴方向的刚度大于短轴方向的刚度。

实验时试件固定方向如图 12 所示，在单轴及三轴状态下试件运动方向如图 13 所示。由图 13 可以明显观察到，在 xy 方向同振时，由于力（或运动）的叠加作用，使试件截面弯曲中性轴发生改变，进而导致试件刚度的下降。

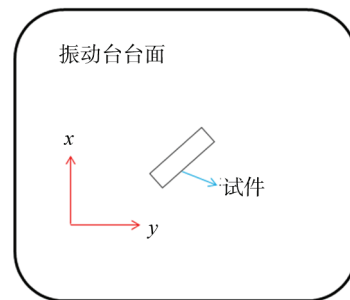


图 12 试件在振动台面上的固定方位

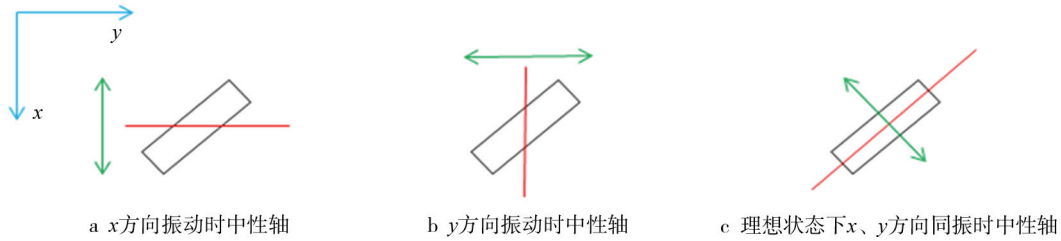


图 13 试件振动方向及对应状态下的中性轴

结构的谐振频率可近似表示为：

$$f = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3)$$

式中： K 为结构的刚度。由此可以看出，结构刚度的下降会导致其固有频率的降低。因此，在三轴同振状态下，试品由于截面中性轴的改变，而导致其结构在振动方向上刚度的下降，进而导致其谐振频率较单轴振动状态下更低。同时刚度的改变会导致结构不同阶谐振频率的改变，因而在三轴状态下，试品的二

阶频率振动响应相比单轴振动下更为明显。

下面对试品的响应量级进行分析，试品在不同振动方式下的受力如图 14 所示，由力的合成原理可知，在 x, y 方向同振时，试品所受的力为其单轴分别振动时力的矢量叠加，即：

$$\vec{f}_{XY} = \vec{f}_X + \vec{f}_Y \quad (4)$$

试品在三轴振动时受到的力的作用理论上是大于单轴时受到的力的作用，因而在对试品响应测量时，在三轴时测试得到的数值是大于单轴时测试数值的。

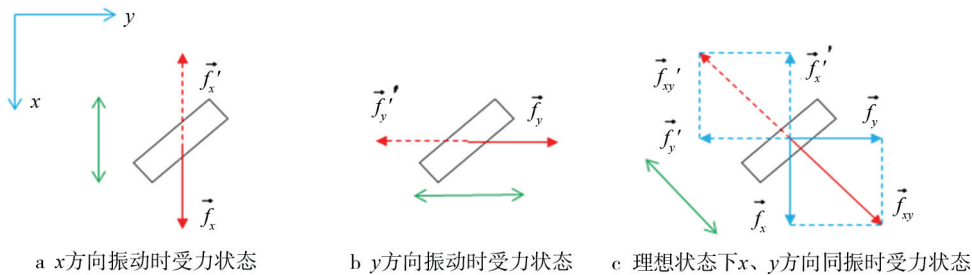


图 14 试品在不同振动方式下的受力

3 结论

依据单轴振动及三轴振动的特点，以含裂纹的悬臂梁为研究对象，结合加速度响应测试技术及动应变测试技术，对比分析了不同振动方式对试品结构及响应的影响，结果表明：相比于单轴振动，在三轴同振状态下，由于试品截面中性轴的改变，试品的谐振频率及响应量级较单轴振动状态下均会有所改变。在三轴振动状态下，试品具有不同于单轴振动时的谐振峰，且在悬臂梁这种结构及固定方式下，其谐振频率较单轴时有所下降（可以推论，若改变试品结构及固定方式，三轴振动下的谐振频率也有可能增加，谐振频率大小与试品不同方向上的弯曲刚度及结构组成相关）。在三轴振动下，由于力的叠加原理作用，试品承受的载荷作用要大于单轴振时的作用载荷，试品在谐振频率上表现出来更为明显的共振峰及变形大小，因而，相较于单轴振动，在三轴振动下试品会受到更为严酷的结构强度考核。

另一方面，从能量输入的角度，单轴振动与三轴振动对试品的能量输入基本类似（控制输入量级相同），三轴振动能量仅是单轴振动在时间轴上的累积。

对于响应输出，由于试品结构组成的复杂性，其刚度在不同的试验量级及不同的方向均有不同层次的变化，因而相对于单轴振动，试品在三轴同振时其表现出的响应更为复杂和敏感。

4 展望

开展多轴振动环境试验是未来产品开展质量考核的一个发展方向。相比于单轴振动，对于考核效果，三轴振动更能真实地模拟试品实际使用中的多维振动环境；对于考核效率，三轴振动能保持试品在三个方向的同时振动，比单轴振动节约了 2/3 的时间效率，因此具有传统上单轴振动所无法比拟的优势。另一方面，由于三轴振动试验技术是一种新兴的试验技术，目前的一些标准规范中仍没有关于三轴振动试验技术的相关具体要求。同时一些工程技术人员也未充分认识到三轴振动对产品考核的必要性及重要性，因而三轴振动试验技术还远不如单轴振动应用广泛，目前还仅仅应用于对试品的技术指标摸底或试验验证等方面。随着武器装备技术的快速发展及对产品质量考核严酷性的增加，开展三轴振动试验是未来对产品质量考核的一种发展趋势，在产品研制及生产过程中，

应加强对产品多轴振动试验性能的考核, 分析产品在多轴振动环境下的失效模式及机理, 这不仅是产品质量可靠性考核的要求, 也符合“天地一致性”地面试验验证的发展需要

参考文献:

- [1] 王梦魁. 多维振动环境实验的实践[J]. 装备环境工程, 2005, 2(3): 22-25.
- [2] 张殿坤, 邱杰, 王建军. 多维振动环境实验技术及应用[J]. 战术导弹技术, 2008(2): 34-37.
- [3] 陈颖, 朱长春, 李春枝, 等. 某结构的多轴随机振动试验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(1): 35-41.
- [4] 陈颖, 朱长春, 李春枝. 典型结构在单多轴随机振动下的动力学特性对比研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(4): 386-390.
- [5] 赵保平, 王刚, 高贵福. 多输入多输出振动实验应用综述[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 25-32.
- [6] 胡亚兵, 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.
- [7] 王晓飞, 王刚, 高贵福. 一种系统级多维振动试验技术[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(5): 516-521.
- [8] 农绍宁, 田光明, 赵怀耘. 多维激励下结构随机振动响应分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 124-128.
- [9] 贺光宗, 陈怀海, 贺旭东. 多轴随机振动下结构疲劳失效的判定方法[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 448-452.
- [10] 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.
- [11] 邱吉保, 张正平, 李海波, 等. 全尺寸航天器振动台多维振动试验的天地一致性研究(上)[J]. 强度与环境, 2015, 42(1): 1-11.
- [12] 邱吉保, 张正平, 李海波, 等. 全尺寸航天器振动台多维振动试验的天地一致性研究(下)[J]. 强度与环境, 2015, 42(2): 1-12.