

浅析振动试验中结构非线性引发的现象

王东升, 周桐, 张志旭

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 火箭、卫星、导弹等航天产品普遍存在着结构非线性。在这些产品的振动试验中常常出现固有频率漂移、谐波响应等现象, 并且会带来部件间固有频率耦合、碰撞振动、振动试验控制超差等问题。文章从结构非线性入手定性地分析了引发这些现象的原因, 并介绍一些解决措施, 为振动试验中类似问题的分析和解决提供参考。

关键词: 振动; 试验; 非线性; 频率响应; 控制

中图分类号: V416.2; O322

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2007)05-0314-04

1 引言

真实的动力系统几乎都含有各种各样的非线性, 如结构零件间的间隙、干摩擦, 材料弹塑性等。在振动载荷作用下结构还会出现螺栓松动、粘弹性材料的松弛、预紧结构接触面受载荷作用后由不稳定状态变为稳定状态等情况。在振动试验中, 由于结构的非线性往往会出现一些与线性系统不同的现象, 其中典型的现象就是随着振动量级的增加或试验时间的加长, 试件固有频率会出现升高或下降的“漂移”现象。如美国 NASA 于 1997 年发射的“卡西尼”(Cassini) 土星探测器在 1995 年试验时就曾发现存在较大幅度的频率漂移^[1,2]。我国运载和航天器研制单位也普遍遇到过这样的现象, 如经常发现 1g 的最初共振检查试验件的共振频率与高量级考核试验的不同。陈昌亚等^[3,4]对卫星一阶频率随振动量级增大而下降的现象进行了理论和试验研究, 明确了结构非线性是造成这一现象的原因。文献[5]针对导弹刚度随载荷变化这一情况, 介绍了一种新的动特性试验技术途径—加载试验技术, 即在全弹动特性试验中, 模拟外界载荷工况, 依次考察不同量级载荷对全弹动特性的影响。螺栓、楔型环等接触式连接件会随着试验的进行发生松动或连接状态的改变, 进而引起整体刚度、阻尼的变化也会造成试件固有频率及响应的改变。由此可见振动试验中的频率“漂移”现象是结构非线性的外在

表现。此外, 由于结构的非线性, 在振动试验中还会出现谐波及次谐波响应、碰撞振动等现象。

结构的非线性可能会带来一些严重的问题。如卫星的频率漂移后有可能会使卫星和运载火箭的频率耦合, 导弹战斗部与发动机的频率发生耦合, 这都将产生毁灭性的后果^[3]。导弹飞行过程的姿态控制要考虑其弹性振动, 动特性是导弹控制设计的原始依据, 频率漂移会给导弹飞行姿态控制带来影响^[5]。振动环境试验中结构连接件松动除了会引发频率漂移, 还会导致部件间的低速往复碰撞形成碰撞振动, 这种往复循环的碰撞行为可能导致机械系统在局部区域发生结构的疲劳损伤, 或使系统发生非稳定的运动^[6]。结构部件间的碰撞振动会影响整个产品的响应, 甚至由于能量传递导致控制点响应与控制均衡中的估算有很大误差而超差^[7], 最终导致过试验、试件破坏。了解振动试验中结构非线性引发的常见现象及其原因, 对于分析和解决产品结构设计和环境试验中出现的问题以及防患于未然是有必要的。

2 非线性系统与线性系统的比较

在线性系统中, 弹性力与弹簧的变形成正比, 阻尼力与物体的速度成正比, 惯性力与物体的加速度成正比。但对于实际的振动系统, 弹性力、阻尼力或惯性力在不能进行线性化处理时, 就必须按照非线性系统进行分析。

收稿日期: 2007-02-12; 修回日期: 2007-07-09

作者简介: 王东升(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事振动环境工程的研究工作。联系电话: (0816) 2485406。

在振动试验中惯性力为非线性的较为少见。对于阻尼为非线性的情况,在关注固有频率及非共振幅值的情况下可将其线性化,甚至略去不计,但如果关注共振幅值时就必须考虑阻尼的非线性特性。弹性力为非线性的情况在振动试验中最为常见,刚度非线性是其根本原因也是本文讨论的重点。

非线性振动系统有一些与线性振动系统不同的特性,如对于非线性系统叠加原理不成立。在线性振动试验中常利用低量级数据简单地预估高量级响应为测试系统量程设置等提供依据,对于非线性系统则要慎重。这里,与振动试验关系密切的有2点:

(1) 在线性系统中,受迫振动的频率与干扰力的频率相同;而在非线性系统中,由谐波干扰力引起的定常振动,除有与干扰力相同频率的成分外,还有呈倍数频率的成分存在;

(2) 在线性系统中,固有频率与初始条件及振幅无关;而在非线性系统中,其频率一般与振幅有关。

3 非线性系统的试验现象

3.1 振动试验中的谐波及次谐波响应

在某导弹部件的1g正弦扫频振动试验中,扫至258 Hz左右时控制超差,并且试件发出明显的碰撞振动的声音。对超差时间段的测量数据分别进行了时域、频域分析。图1为该时段的加速度时间历程,图2为相应的幅值谱。由时间历程曲线可以看出正弦波形有明显畸变;幅值谱中除了有与激振力频率相同的频率,还有258 Hz的谐波响应。

分析认为:由于结构内部的接触式连接属于刚度非线性,因而产生了谐波响应。对试件拆检发现结构内部的接触连结部位有明显的损伤,这说明由于存在间隙在载荷作用下部件间发生了碰撞振动。正弦振动控制通常有滤波器、最大值和均方根值3种算法,但无论哪种算法最终修正的都是基频。由图2可以看出结构的多个谐波响应大于基频响应,谐波响应的能量很高且由于结构碰撞影响控制点处的响应,输入与响应之间的关

系已不再是一个稳定的频响函数,控制均衡中的估算有很大误差因而造成了控制超差。谐波及次谐波响应现象在随机振动试验中也可能出现。

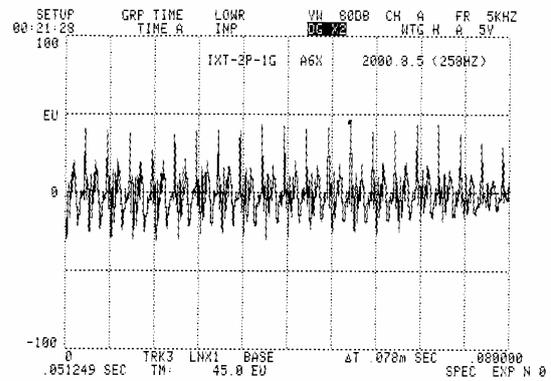


图1 时间历程

Fig.1 Time course of acceleration

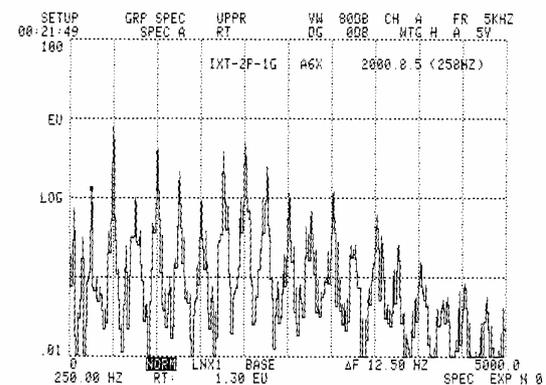


图2 幅值谱

Fig.2 Spectrum of vibration amplitude

3.2 固有频率与振幅相关

固有频率与振幅相关的一个常见现象就是固有频率随试验量级的升高发生漂移。设物体距平衡位置的位移为 x 时, $k = df/dx$ 为刚度,若 k 为非常数就是非线性弹性力的情况。如 k 随 $|x|$ 增加而增加,则弹性力为硬特性的,在振动试验中与之相对应的现象是随着振动量级的提高固有频率提高。反之, k 随 $|x|$ 增加而减小则弹性力为软特性的,相应的试验现象是随着振动量级的提高固有频率下降。

为了研究某导弹部件的预紧力、固有频率随试验量级的变化情况,对该部件分别进行了1g、2g、3g及4g的正弦扫描振动试验。在结构预紧力基本不变的情况下,固有频率随振动试验量级的升高而降低,如图3和表1。另外在某导弹战

斗部横向试验中还出现过固有频率随振动试验量级的升高而升高的现象, 该现象在振动试验中是较少见的, 固有频率变化情况见表 2。

非线性结构除了固有频率与振幅有关外, 在振动试验中还会对控制产生影响。如低量级振动试验正常, 高量级正弦试验却由于碰撞振动引起控制超差。某导弹 1g 最初共振检查试验控制正常, 高量级的正式试验引发结构的碰撞振动、控制超差如图 4。其原因是较低的激励幅值不足以使结构具有足够的克服惯性和阻尼的加速度, 因此没有产生碰撞振动^[6], 当振动幅值超过某一临界值时则会发生碰撞振动。

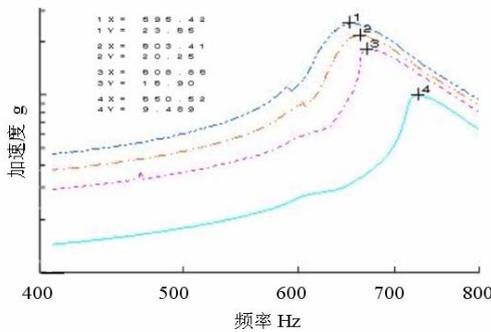


图 3 不同试验量级下试件响应曲线
Fig.3 Response curve of the specimen test under different test level

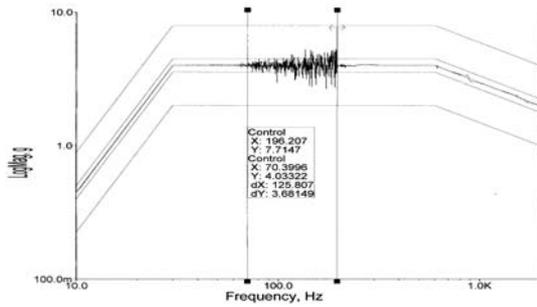


图 4 高量级试验控制曲线
Fig.4 Control curve under high test level

表 1 固有频率随振动试验量级的升高而降低
Table 1 Natural frequency decreases with increased test level

试验量级	1g	2g	3g	4g
共振频率/Hz	650	608	603	595

表 2 固有频率随振动试验量级的升高而升高
Table 2 Natural frequency decreases with increased test level

试验量级	1g	4g	0.06g ² /Hz	0.12g ² /Hz
共振频率/Hz	156	165	158	163

3.3 连接结构松动引起固有频率变化

在某些非线性系统中, 弹性力、阻尼除了与结构自身的特性有关还与时间有关。随着振动时间的推移, 连接螺栓、受预紧力的垫层松弛或回弹均会引起结构刚度和阻尼的改变, 这也会引起试件固有频率和响应的变化。导弹的耐久飞行试验及模拟公路运输试验时间往往较长, 尤其是运输试验即使采取加速试验的方法, 试验时间一般也要数小时。在数据分析时为了了解导弹固有频率在运输过程中的变化情况, 往往要对不同时间段的数据进行分析。图 5 和表 3 为某导弹上某一测点在不同时间段的加速度功率谱及共振频率。虽然试验的量级没有变化, 但随着试验时间的增长, 共振频率出现了下降。与振幅相关引起的固有频率漂移是暂时的、可恢复的, 但结构松动引起的固有频率漂移则往往是永久的、不可恢复的。如果在考核试验前后分别进行最初共振检查和最终共振检查试验, 则可以分析是哪种因素作用的结果, 但在工程结构中往往是二者兼而有之。

表 3 不同时间段的共振频率

Table 3 Resonance frequency in different time intervals

时间段	1 阶共振频率/Hz	2 阶共振频率/Hz
首段	99.5	123.5
中段	95.0	104.5
末段	95.0	104.5

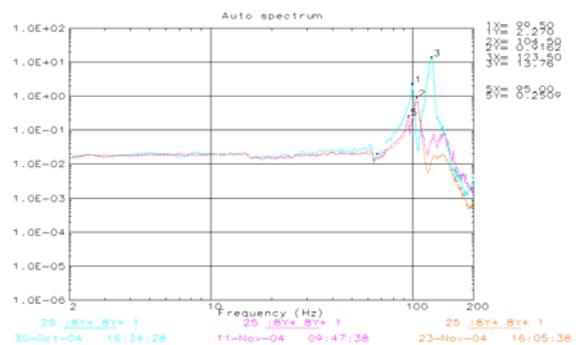


图 5 不同时间段试件响应曲线
Fig.5 Response curves in different time intervals

4 解决措施

在振动试验中结构非线性带来的主要是碰撞振动、控制超差等问题, 可以从振动加载控制和产品结构入手予以解决。文献[6]对这两个方面的研究工作进行了总结。模糊控制、混沌控制

应用于碰撞振动控制效果较好, 通过对梁之间碰撞振动的研究表明: 该方法能够有效地抑制碰撞引起的过大振动。但由于模糊控制及混沌控制尚不成熟, 缺乏商品化的产品且工程结构的复杂性, 其应用于工程尚有很长的一段路要走。

非线性的根本原因是结构本身造成的, 因此从产品入手改进连接结构设计, 着力解决连接件松动问题, 适当增大含间隙部件间的预紧力和阻尼是另外一种解决措施。针对数次导弹及其部件振动试验中出现的碰撞振动、控制超差等问题, 采取了以上措施后解决了问题, 表明这种措施简单可行而且效果显著。

5 结论

结构的非线性是造成振动试验中产品固有频率漂移、谐波响应等现象的原因, 并且会带来部件间固有频率耦合、碰撞振动、振动试验控制超差等问题。试验结果表明: 改进产品连接结构设计, 适当增大含间隙部件之间的预紧力和阻尼是一种简单而行之有效的解决办法。

通过对结构非线性引发的振动试验现象的研究得出: 一方面要在产品设计阶段把握非线性对其动力学特性及响应的影响, 并采取相应的措施以避免试验阶段的碰撞振动和控制超差等问题; 另一方面由于非线性与振动幅值的相关性, 应在产品设计时考虑抑制振动。

参考文献 (References)

- [1] Carney K. et al. Nonlinear dynamic behavior in the Cassini spacecraft modal survey[C]//15th International Modal Analysis Conference. Part 1(of 2). CT, USA, 1997: 811-817
- [2] Smith Kenneth S, et al. Modal test of the Cassini spacecraft[C]// 15th International Modal Analysis Conference. Part 1(of 2). CT, USA, 1997: 804-810
- [3] 陈昌亚, 等. 卫星振动试验中固有频率“漂移”现象初步研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 23-25 [Chen Changya, et al. Preliminary research on natural frequency drift in satellite vibration test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003, 22(4): 23-25]
- [4] 陈昌亚, 等. 随机振动量级增加卫星结构频率下移的分析[J]. 上海航天, 2004, 3: 44-47[Chen Changya, et al. The Preliminary research about natural frequency decrease in satellite vibration test when excitation level increased[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 3: 44-47]
- [5] 王建民, 等. 带有连接结构的导弹动特性试验研究方法[J]. 强度与环境, 2006, 33(1): 52-58[Wang Jinmin, et al. The research for the dynamic characteristics of the missile with the jointed structure by the test method[J]. Structure & Environment Engineering, 2006, 33(1): 52-58]
- [6] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005[Jin Dongping, Hu Haiyan. Vibro-impacts and control[M]. Beijing: Science Press 2005]
- [7] Moon F C, Li G X. Experimental study of chaotic vibrations in apin-jointed space truss structure[J]. AIAA Journal, 1990, 28(5): 915-921