# 典型结构振动-加速度综合环境试验研究

### 周桐,张志旭,任万发,邓志刚

(中国工程物理研究院 总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:目的研究多种典型结构在振动 - 加速度综合环境下的响应规律,证明开展振动 - 加速度综合环境合环境试验的必要性。方法采用试验研究的方法,对比单一振动环境和振动 - 加速度综合环境下典型结构响应特征的差异。结果试验结果表明,振动 - 加速度综合环境下结构表现出的响应特征可能会与单一振动环境下的完全不同。结论振动 - 加速度综合环境更加接近产品的真实使用环境,综合环境试验能够发现单一环境无法暴露的问题,在产品研制中的作用无可替代。 关键词:振动;加速度;综合环境 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.05.008 中图分类号:TJ05; V416 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0050-06

# Experimental Research on Typical Structure under Vibration–Acceleration Combined Environment

ZHOU Tong, ZHANG Zhi-xu, REN Wan-fa, DENG Zhi-gang (Institute of Systems Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the dynamic response of typical structure under vibration–acceleration combined environment and demonstrate the necessity of experiments in the vibration–acceleration combined environment. **Methods** The difference in the dynamic response of typical structure under single vibration environment and vibration–acceleration combined environment was studied by experiment. **Results** The dynamic response under vibration–acceleration combined environment may be totally different from those under single vibration environment. **Conclusion** Vibration–acceleration combined environment could simulate the actual environment more realistically than single environment. Some special problems could only be exposed under combined environment test instead of single environment. As to its special significance, the combined environment test could not be replaced by other tests. **KEY WORDS**: vibration; acceleration; combined environment

振动环境和加速度环境是许多武器装备尤其是 飞行器都将经历的环境,为了确保装备在此类环境下 结构的完整性和功能的可靠性,研究人员开展了大量 的地面单一环境振动试验和单一环境加速度试验,在 装备研制中发挥了重要作用。

对于一些特殊的任务剖面,装备可能会同时经历 振动载荷和加速度载荷的作用,这两种载荷均会导致 结构的相对运动、变形甚至功能失效,内部应力相互

Received: 2015-07-29; Revised: 2015-08-20

Biography: ZHOU Tong(1975—), Male, from Suzhou, Jiangsu, Ph.D., Researcher, Research focus: combined environment testing.

收稿日期: 2015-07-29;修订日期: 2015-08-20

作者简介:周桐(1975—),男,江苏苏州人,博士,研究员,主要从事综合环境试验技术、减隔振技术研究。

叠加超过承受能力则会导致破坏。美军标 810F<sup>11</sup>中 5.12节和 GJB 150.1A—2009<sup>121</sup>中 3.13节均指出,综合环 境试验可能比—系列连续的单个试验更能代表实际 环境效应,使用环境中遇到这些条件时,鼓励进行综 合环境试验。GJB 8384—2015《核战斗部振动-加速 度试验方法》<sup>131</sup>中,也列举了如下 8类可能会由振动-加 速度综合环境导致的结构故障模式:磨损、紧固件或 元器件松动、断续的电气接触;隔振器件传递特性改 变;结构裂纹或断裂;光学仪器或机械设备的失调;结 构变形和断裂致使试件失效或损坏;密封泄漏;压力 和流量调节数值变化;伺服阀滑阀移位引起错误和危 险的控制系统响应。

与单一环境时相比,综合环境下结构参数出现明显的非线性变化,是导致单一环境试验与综合环境试验出现不同结果的根本原因。受仿真能力和试验技术手段的限制,我国在综合环境试验技术方面进展较缓慢,对许多机理性的问题认识还不充分<sup>[4]</sup>。国内一些学者<sup>15—7]</sup>采用理论分析和有限元仿真方法对惯导系统中的陀螺仪开展了初步研究,结果表明,振动-加速度综合环境下的结构响应特征是无法用单一环境描述的。

制约国内该领域试验研究工作的瓶颈在于电动 振动台在离心机上工作需要突破多项关键技术,通过 调研国外在该领域的研究进展,并开展独立的研究工 作<sup>[8—11]</sup>。目前国内西安交通大学、浙江大学、北京强度 环境研究所等单位已经具备了不同规模的振动-加速 度综合环境试验能力,但这方面的试验研究成果鲜见 报道。

文中通过对多个不同类型典型部件在振动-加速 度综合环境下的响应特征进行试验研究,发现部件在 综合环境下的响应特征与单一环境下的特性可能会 出现明显不同,希望可以使更多的研究人员了解到开 展此类综合环境试验的必要性。

1 带隔振器试验件一

### 1.1 试验件结构

为了研究某带隔振器组件在不同隔振器受力状态、不同边界刚度、不同边界倾角、不同载荷状态时的加速度响应,设计了如图1所示的典型试验件。试验件通过橡胶隔振器与支撑结构连接,隔振器的剖面形状在图2中给出。隔振器理论上为三向等刚度,但实测的隔振器受力变形曲线如图3所示。可以看到,受拉时呈

现刚度硬化,而受压时刚度先软化再硬化,而且两个方向承载能力差异很大。这就会导致系统在不同的过载环境下出现不同的动态响应,甚至会出现由于变形过大导致试验件与其他相邻部件碰撞的现象。



Fig.3 Relation of force and displacement

#### 1.2 响应规律

图4给出的是不同隔振器受力状态(Y表示受压, L表示受拉)、不同加速度量级时(字母后的数字表示 加速度g值)试验件主振向(y向)的振动响应(激励均 为6g均方根值,10~2000 Hz随机激励)。可以看到, 试验件的一阶共振频率发生了明显的变化,对应试验 件的加速度均方根值依次为1.3g,1.5g,1.7g,2.3g, 2.7g,2.9g,3.4g,变化同样显著,这就可能对试验件的 功能产生影响。







图5给出的是试验件安装在靠近L型边界根部、 隔振器受拉状态、0°倾角时,试验件上测点非主振向 (z向、x向)响应。可以看到,加速度不同时,测点的功 率谱密度曲线在共振频率附近也发生了明显变化。



图5 振动响应 Fig.5 Vibration response

到,随加速度量级的增加,试验件的共振频率逐渐增 大,振动响应也逐渐增大,隔振器的性能有明显降 低。如果只进行单一的振动试验或加速度试验,是难 以发现这样的问题的。



图 6 四角隔振的试验件 Fig.6 Test piece with isolator at four corners



图 7 载时的振动响应 Fig.7 Vibration response with over load

# 2 带隔振器试验件二

试验件的外观如图6所示,试验件在四个角上通 过橡胶隔振器与边界连接。x向、y向加速度过载时试 验件上的加速度功率谱密度曲线如图7所示,可以看 在本次试验中,加速度过载分别为15g,40g和 55g,宽带随机激励的量级大约为Gms=10.2g,而最恶劣 情况下试验件的响应也已接近10g。在一定程度上可 以认为隔振器已经失效,但是如果经过分析,认为400 Hz以下的响应放大不会对试验件造成影响,只要高频 部分响应衰减即可,则也可以选择该隔振器。 试验采用的是类似图8所示的T型橡胶隔振器, 试验后隔振器基本完好,但另外一个采用T型隔振器 的试验件在试验后出现了严重的隔振器损坏,如图9 所示。该试验件曾经开展过单一的振动试验和加速 度试验,未出现异常。该试验结果表明,综合环境下 应力叠加对试验件具有更强的破坏作用,通过了单一 环境考核的试验件可能会在综合环境下暴露出故障。



图 8 T型橡胶隔振器 Fig.8 T-type rubber isolator



图9 试验后隔振器被破坏 Fig.9 The destroyed isolator

### 3 回转体试验件一

#### 3.1 试验件结构

工程结构中某部件近似为多层回转结构,不同层 的刚度有明显差异,内层受到的约束仅为层间摩擦 力,最外层与边界相连接,层与层之间靠预紧力保持 相对位置。由于层间的约束相对较弱,所以可能会在 振动环境激励下发生内层结构绕对称轴的相对转动, 这是结构功能设计所不希望的。

图 10 是经过简化后的试验件模型,共分为上中下 三层,每层均为圆饼状,层与层之间有薄弹性垫层材 料。上层与下层之间有限位装置,上层相对下层只能 沿中间对称轴上下运动,不能转动,理论上只有一个 自由度。中间层既可以沿中间对称轴上下运动,又可 以绕对称轴转动,理论上有两个自由度。垫层的作用 是防止不同层在轴向运动时发生明显撞击,同时可以 提供一定的摩擦力阻止中间层的旋转运动。上层和 中间层靠预紧力压紧在下层上,试验时在下层的部位 进行随机振动激励,关注中间层开始发生相对转动时 的振动量级和预紧力大小。



图 10 三层试验件原理 Fig.10 Structure of the three-layer test piece

#### 3.2 响应规律

试验时先给试验件施加规定的预紧力,再逐步 提高下层受到的随机激励量级,每一个随机激励量 级保持2min。激励前、后如果预紧力没有明显降低, 则认为该试验状态有效,否则重新施加预紧力和随 机激励,最终记录每个预紧力下,中间层发生转动现 象所需的最低振动量级(或称临界量级)。凭经验通 常会认为预紧力越大,发生转动现象的最低振动量 级也会越高。

图 11 给出的是发生转动时测得的位移(近似用 直线位移代替旋转角度),可以看到,旋转不一定是 连续发生的,可以是阶梯状间歇式的,而且转动的方 向也不一定是单向的,可以是往复的,这在一定程度 上说明转动与偏心质量的关系不大。猜测转动的原 因可能与试验时激励的不均匀性或中间层存在轻微



图 11 转动位移 Fig.11 Rotational displacement

绕面内对称轴转动,不是理想两自由度运动等因素 有关。

图12给出的是预紧力与临界量级之间的关系,可 以看到,只进行单一振动环境试验时(实线),随预紧 力增加,临界转动量级也随之增加,而且是近似线性 的。当有加速度过载环境存在时,临界的振动量级竟 然不随预紧力发生变化,这一点非常匪夷所思,有待 理论分析给出合理的解释。





# 4 回转体试验件二

试验件模型如图13所示,中间球体上有两圈平行 限位槽,薄壁锥筒与球体接触后,球体只能够绕中心 对称轴转动,上、下盖的作用是给结构整体进行限位 并提供预紧力。



图 13 圆锥和球体组合试验件 Fig.13 Combined test piece of circular cone and sphere

首先给试验件同时施加x向的加速度过载和随机振动,发现中心球体出现了非常明显的绕对称轴转动的现象,而且转动的力非常大,造成了测量传感器的损坏。进行y向加速度过载和随机振动综合试验时,中心球体却基本没有出现绕对称轴转动的现象。

# 5 继电器试验件

继电器是一种常用的电子元器件,其主要功能是 用一个较弱的信号控制另一个电路的通断。试验用 继电器如图14所示,其物理模型如图15所示。



图 14 实验用继电器 Fig.14 Relay used in the experiment



图 15 继电器理论模型 Fig.15 Theoretical model of relay

当没有电磁力作用时,上触点处于导通状态,电 磁力作用后下触点导通。在振动-加速度综合环境 下,如果加速度过载方向与电磁力方向一致,则当加 速度足够大时惯性质量力超过弹簧力,就会使上触点 导通转变为下触点导通,此时并无电磁力控制信号。 如果再叠加上振动信号,就会在更弱些的加速度过载 环境下由振动引起触点导通的变化,而且是多次的断 续导通(如图16所示)。这些都将引起系统的误触发, 甚至会影响到全系统的功能。

当加速度过载方向与电磁力方向相反时,如果 电磁力较弱,则会出现电磁力无法抵消惯性质量力 与弹簧力合力的现象,导致系统无法触发应有的动 作。这些问题在选择继电器的时候都应该进行考 虑。





# 5 结语

文中通过试验研究的方法,研究了多种典型结构 在振动-加速度综合环境下的响应规律,结果表明:

1)在振动-加速度综合环境下,结构表现出的动力学特性与单一振动环境下的特性会出现一定程度上"量"的不同,尤其是含有弹性材料的部件。

2)综合环境下由于结构内部约束特性的变化,试验件的动力学特性可能也会出现"质"的不同,这种差异是在单一振动环境下无法进行模拟的。

3) 在振动-加速度综合环境下,由于应力叠加效 应,结构的内部应力会比单一环境试验时大,因此通 过了单一环境考核的部件可能就会在综合环境时出 现破坏。

#### 参考文献:

- MIL-STD-810F. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [2] GJB 150.1A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第1部分:通用要求[S].
   GJB 150.1A—2009, Laboratory Environmental Test Methods

for Military Materiel—Part 1: General Requirements[S].

[3] GJB 8384—2015,核战斗部振动-加速度试验方法[S].

GJB 8384—2015, Vibration–acceleration test method for nuclear warhead[S].

- [4] 张正平,王宇宏,朱曦全.动力学综合环境试验技术现状和 发展[J].装备环境工程,2006,3(4):7—11.
  ZHANG Zheng-ping, WANG Yu-hong, ZHU Xi-quan. Current State and Developing Trend of Combined Dynamic Environmental Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006,3(4):7—11.
- [5] 王跃钢,彭云辉. 过载-振动复合环境下液浮积分陀螺仪动 力学分析[J]. 中国惯性技术学报,2003,11(6):80—83.
  WANG Yue-gang, PENG Yun-hui. Dynamics Analysis for the Liquid Floated Integral Gyro under Over Loading and Vibration Compound Dynamical Environment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2003,11(6):80—83.
- [6] 马越,王跃钢. 过载振动复合环境下惯性仪表误差建模方法研究[J]. 电光与控制,2005,12(3):60—62.
  MA Yue, WANG Yue-gang. Study on Modeling of Inertial Instrument in Composed Overloading-vibrating Environment [J]. Electronics Optics & Control,2005,12(3):60—62.
- [7] 吴瑾颖,刘光斌.力学复合环境下挠性陀螺仪的动力学分析[J].中国惯性技术学报,2006,14(5):58—61
  WU Jing-ying, LIU Guang-bin. Dynamics Analysis for Dynamically Tuned Gyro under Overload-vibration[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2010,7(6):243—246.
- [8] 吴建国,李海波,张琪,等.综合离心环境试验技术研究进展[J].强度与环境,2014,41(1):1—9.
  WU Jian-guo,LI Hai-bo,ZHANG Qi, et al. Advances in Synthesis Centrifugal Environment Test[J]. Structure & Environment Engineering,2014,41(1):1—9.
- [9] 朱先辉,闫桂荣,牛宝良. 离心力场中电动振动台的建模
  [J]. 振动与冲击,1999,18(3):37—44.
  ZHU Xian-hui, YAN Gui-rong, NIU Bao-liang. Modeling of Electric Vibration Table in Centrifugal Environment[J]. Journal of Vibration and Shock,1999,18(3):37—44.
- [10] 曹小波. 离心环境下振动台运动部分及其导向结构受力分析[J]. 强度与环境,2012,39(6):48—51.
  CAO Xiao-bo. Force Analysis of Moving Element and Arma-ture Steering Structure of Vibrator Working in Centrifugal Environment[J]. Structure & Environment Engineering, 2012, 39(6):48—51.
- [11] 沈润杰,何闻,梅德庆,等. 离心力场下电动振动台及动圈
   纠偏系统特性的研究[J]. 浙江大学学报,2002,36(1):92—
   96.

SHEN Run-jie, HE Wen, MEI De-qing, et al. Study of Armature Correction System of Electrical Vibration Table with High-linear-acceleration[J]. Journal of Zhejiang University, 2002, 36(1):92—96.