多轴动态加速度试验夹具设计方法研究

欧阳智江,张平,邓志刚,欧峰,陆家富

(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 针对多轴动态加速度试验的特点探索一种适合多轴动态加速度试验的夹具设计新方法。方法 分别采用传统经验设计法和新方法对同一简单模型进行力学仿真分析,并进一步对比 两种方法所得结果的差异。结果 新方法所得结果更具全面性,在多轴动态加速度试验过程中更 有利于保证夹具的安全性,适合推广应用。结论 多轴动态加速度试验与传统的单一稳态加速度 试验差异较大,在相应夹具设计时更应该注重试验的全过程。

关键词:多轴动态;夹具;设计;仿真 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.05.027 中图分类号:TJ05;V416 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2015)05-0151-05

Fixture Design Method for Multiaxial Dynamic Acceleration Test

OUYANG Zhi-jiang, *ZHANG Ping*, *DENG Zhi-gang*, *OU Feng*, *LU Jia-fu* (Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: Objective To explore a new method for the fixture design suitable the test according to the characteristics of multiaxial dynamic acceleration test. **Methods** The traditional experiential design method and the new method were applied to the mechanic simulation analysis of the same simple model, and the differences in the results by the two methods were compared. **Results** In the process of multiaxial dynamic acceleration test, the new method could achieve more comprehensive results and guarantee the safety of the fixture, which was suitable for popularization and application. **Conclusion** There is a big difference between the multiaxial dynamic acceleration test and the traditional single static acceleration test, the whole process of the test should be concerned in the corresponding fixture design. **KEY WORDS**: multiaxial dynamics; fixture; design; simulation

产品或零部件在运输和使用过程中可能会承受 加速度环境的作用,为考核产品在加速度环境下的功 能适应性及评定其结构的完好性,在研制过程中必须 进行加速度试验^[1]。通过离心机旋转产生加速度是加 速度试验的一种常用手段,在离心加速度试验过程 中,夹具对试验的成败起着关键性的作用^[2-3]。

传统的单一稳态离心加速度试验夹具基于恒定的 单轴向加速度载荷,各个试验状态只需单独考虑¹⁴⁻⁶¹。

收稿日期:2015-07-03;修订日期:2015-08-01

Received: 2015-07-03; Revised: 2015-08-01

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B0203030)

Fund: Supported by the Technology Development Foundation for China Academy of Engineering Physics(2013B0203030)

作者简介: 欧阳智江(1987—),男,福建漳州人,硕士,助理工程师,主要研究方向为机械设计与仿真。

Biography: OUYANG Zhi-jiang(1987-), Male, from Zhangzhou, Fujian, Master, Assistant engineer, Research focus: machine design and simulation.

而多轴动态加速度试验的加速度在整个时间历程中 不断变化,夹具的受力情况较复杂,需要综合考虑,如 导弹的加速变轨过程试验等^[8-12]。

目前中国工程物理研究院在研的高动态离心机 可进行多轴动态加速度试验,这就要求设计出与之相 适应的夹具^[13]。多轴动态加速度试验过程中加速度的 大小和方向处于变化之中,夹具设计时就不能只考虑 单一方向,且由于离心机旋转仓的空间有限,夹具的 大小也会受到限制,因此迫切需要一种全新的夹具设 计方法。

1 多轴动态加速度试验与传统方法求解

1.1 多轴动态加速度试验简介

多轴动态加速度试验的离心机是在普通离心机的 基础上进行改进的。普通离心机在单次试验时,其转 臂和法兰处于固定状态,即对试验产品只能产生固定 方向的加速度作用^[14-16]。对于多轴动态加速度试验的 离心机,在试验过程中转臂上的法兰可绕着法兰连接 轴旋转,而法兰上的吊篮还可绕着吊篮连接轴旋转,最 终吊篮中的试验品受到的加速度可沿任意方向变化。

为便于对比研究,以某简单结构为例(如图1所示),该结构中底板的尺寸为200 mm×100 mm×20 mm,中间对称的两根立柱尺寸为20 mm×20 mm×100 mm,立柱内侧间距为80 mm,上横梁的尺寸为20 mm×20 mm×120 mm。

在加速度试验过程中,传统情况下结构的底面与 离心机的法兰盘固定连接,离心机的法兰相对于转臂 固定不动,即加速度方向是固定的;而对于多轴动态加 速度情况,试验过程中法兰、吊篮可根据需要绕着连接 轴做旋转运动。为简化分析过程,在此仅考虑两轴情 形,即假设动态加速度试验时离心机提供的加速度大 小恒定为10g,而加速度的方向在图1中的xy平面内绕 着z轴匀速缓慢旋转,角加速度的影响可忽略不计。

1.2 传统分析方法求解

针对上述动态加速度试验过程,基于作者以往关 于传统加速度试验夹具的设计经验,初步认为加速度 沿x向时,整体结构中的最大应力最小,即结构最安 全;而加速度沿y向时整体结构中的最大应力最大,即 结构最危险。基于此,对该结构展开力学仿真分析。

经过分析,当加速度沿着+x向时的Mises应力结果如图2所示,从图2中不难发现,整个结构的最大



图 1 基本结构 Fig.1 Basic structure diagram

Mises应力在+x方向的角点处,为2.268 MPa。



图2 加速度沿+x向的分析结果 Fig.2 Analysis result of acceleration in the +x direction

当加速度沿着+y向时,整个结构的Mises应力结 果如图3所示。可以发现,其最大Mises应力在+y方 向的角点处,为3.671 MPa。



图 3 加速度沿+y向的分析结果 Fig.3 Analysis result of acceleration in the +y direction

2 新分析方法探索

在上述问题中,虽然加速度的大小不变,但其方

向处于变化之中,仅凭经验认为x向最安全而y向最 危险存在不妥之处,很有必要对其他方向也展开力学 分析,以进一步确认结构最危险的加速度方向。

利用分析软件进行力学分析时,无法直接设置方向变化的加速度,因此需要将加速度进行分解。该问题中加速度的大小恒定为10g,若假设加速度的方向与+x轴的夹角为 α (即沿+x向时 $\alpha=0^{\circ}$,沿+y向时 $\alpha=90^{\circ}$),那么加速度在x向和y的分量为:

$$\begin{cases} a_x = 10\cos\alpha \tag{1}$$

$$la_y = 10\sin \alpha$$

式(1)对应的加速度大小分解曲线如图4所示。 当 α =0°时, a_x =10g,对应图2的分析结果;当 α =90° 时, a_y =10g,对应图3的分析结果。以一定步长选取图 4中的数据,再分别加载在x向和y向上,即可获得加 速度沿每个方向的分析结果。



图4 加速度分解曲线 Fig.4 Resolution curve of the acceleration

由于加速度试验夹具需要保证整个试验过程的 安全性,重点应该关注最危险的位置,故提取加速度 沿+y向时的最大Mises应力角点(见图3)进行分析,最 终该点的Mises应力随的变化结果如图5所示。



图5 Mises应力随的变化结果 Fig.5 Result of Mises stress changing with

从图5可见, α 为60°或240°左右时该点的Mises

应力最大,超过了4 MPa,即结构最危险;而当为150° 或330° 左右时该点的Mises应力最小,低于1 MPa。

提取为60°左右的分析结果进行对比,发现当时整个结构中的最大 Mises 应力达到最大值,为4.235 MPa,其结果如图6所示。此时最危险的点与传统分析方法的结果不在同一位置。



图 6 $\alpha = 58^{\circ}$ 时的分析结果 Fig.6 Analysis result when $\alpha = 58^{\circ}$

同理,对比分析结果,发现整体结构在 $\alpha \in [0^{\circ}, 360^{\circ}]$ 范围内的最大 Mises 应力最小时 $\alpha = 0^{\circ}$ 或 $\alpha = 180^{\circ}$,刚好与传统分析方法的结果一致。

3 传统方法与新方法结果对比

将传统分析方法与新分析方法得到的结果进一步整理,见表1。

表1 传统方法与新方法结果

Table 1 Results of the traditional method and the new method

类别	属性	最大Mises应力/MPa	α /(°)
传统方法	最危险	3.671	90/270
	最安全	2.268	0/180
新方法	最危险	4.235	58/238
	最安全	2.268	0/180

由表1发现,不管是传统方法还是新方法,最危险 和最安全情况下的最大 Mises 应力差异都比较大(传 统方法偏差62%、新方法偏差87%)。说明在结构设 计过程中不能任意选取特殊加速度方向进行简单分 析就下最终结论。

在最安全情况下,传统方法和新方法的结果一致, 说明设计动态加速度试验夹具时可以借鉴传统的经 验。通过进一步计算发现,在最危险情况下,新方法得 到的最大 Mises 应力比传统方法增加了15%,偏差了 32°。由此可见,对于动态加速度试验,夹具设计过程 中也不能完全凭借经验仅选择特殊角度进行分析。

在多轴动态加速度试验过程中,最关心的是最 危险情况下夹具的安全性。通过以上对比发现,传 统方法已不能满足设计要求,需要采用新方法分析 夹具在整个动态过程中的受力情况,以确保试验全 程的安全。

4 夹具设计新方法应用

为进一步确认上述多轴动态加速度试验夹具设 计新方法的适用性,基于某动态加速度试验任务,根 据对方提供的加速度数据,将其分解到坐标系的结果 如图7所示。



图 7 试验所需加速度分解结果 Fig.7 Resolution result of the acceleration

基于以往的加速度试验夹具设计经验以及产品 接口、试验设备接口、空间约束等情况,初步设计出相 应的夹具,再采用新方法对夹具连同产品模型展开动 态加速度过程的力学分析(只需将方法中的角度分量 改为时间分量),最终寻找到最危险点在整个过程中 的Mises应力变化情况如图8所示。



图8 最危险点的Mises应力变化结果

Fig.8 Result of Mises stress at the most dangerous spot

由图 8 可见,最危险点在185 s 左右的 Mises 应力 超过了 200 MPa,已经非常接近 Q235 的屈服应力,其 安全系数太低,因此有必要对夹具进一步优化。

通过不断优化与动态加速度过程分析,最终最危险点 Mises 应力的安全系数达到了2.5,这一结果在后期基于现有的单一稳态离心机选取特殊角度的预试验过程中也得到了验证。说明文中提出的多轴动态加速度试验夹具设计新方法适合推广应用。

5 结语

通过探索多轴动态加速度试验夹具设计新方法, 结果发现:

1) 动态加速度试验情况下,不能任意选取特殊加 速度时刻的分析结果来判定夹具是否安全可靠。

 2)多轴动态加速度试验夹具的设计可以借鉴以 往的经验,但不能完全依靠经验解决所有动态加速度 问题。

 多轴动态加速度试验夹具的设计需要考虑整 个试验过程,通过不断优化与全程受力分析才能设计 出最合理的试验夹具。

参考文献:

- GJB 150.15A—2009,军用装备实验室环境试验方法第15 部分:加速度试验[S].
 GJB 150.15A—2009, Laboratory Environmental Test Meth-
- ods for Military Materiel—Part 15: Acceleration Test[S]. [2] 张雷雨,杨洋,王璐.复杂机载装置的离心加速度试验夹具 设计[J]. 机械设计,2011,28(11):76—80. ZHANG Lei-yu, YANG Yang, WANG Lu. Design of Centrifugal Acceleration Test Fixture for Complex Airborne Device[J]. Journal of Machine Design,2011,28(11):76—80.
- [3] 高玉玲,宋丽君,张峰,等. 离心加速度试验样品装卡改进 及试验影响分析[J]. 环境试验,2012(5):15—18.
 GAO Yu-ling, SONG Li-jun, ZHANG Feng, et al. Centrifugal Acceleration Test Samples Loaded Card Improvement and Impact Test Analysis[J]. Environmental Technology, 2012(5): 15—18.
- [4] SJ 20115.8—92, 机载雷达环境条件及试验方法恒加速度 试验[S].
 SJ 20115.8—92, Environmental Conditions and Test Methods for Aircraft Radar Constant Acceleration Test[S].
- [5] GB/T 2423.15—2008,电工电子产品环境试验第二部分:试验方法试验Ga和导则:稳态加速度[S].
 GB/T 2423.15—2008, Environmental Testing for Electric and Electronic Products—Part 2; Tests Methods—Test Ga and

Guidance: Acceleration, Steady[S].

 [6] 邢天虎,王涌泉,雷平森,等. 力学环境试验技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社,2003.
 XING Tian-hu, WANG Yong-quan, LEI Ping-sen, et al. Mechanical Environment Test Technology[M]. Xi'an: Northwest-

ern Polytechnic University Press, 2003.

- [7] 郁南,马贵贤. 离心式恒加速度试验系统基本参数研究[J]. 飞机设计,2009,29(1):64—70.
 YU Nan, MA Gui-xian. Research on the Basal Parameter of Centrifugal Constant Acceleration Test System[J]. Aircraft Design,2009,29(1):64—70.
- [8] 谷良贤,龚春林,吴武华. 跳跃式弹道方案设计和优化[J]. 兵工学报,2005,26(3):353—356.
 GU Liang-xian, GONG Chun-lin, WU Wu-hua. Design and Optimization of Wavy Trajectory for Ballistic Missile[J]. Acta Armamentaria,2005,26(3):353—356.
- [9] 张永军,夏智勋,孙巫忠,等. 跳跃式导弹弹道设计和优化
 [J]. 固体火箭技术,2006,29(5):313—316.
 ZHANG Yong-jun, XIA Zhi-xun, SUN Wu-zhong, et al. Design and Optimization on Trajectory of Skip Missile[J]. Journal of Solid Rocket Technology,2006,29(5):313—316.
- [10] 高普云,张广明,唐乾刚. 弹道导弹在被动突防的脉冲式轴向加速方法[J]. 宇航学报,2008,29(4):1126—1130.
 GAO Pu-yun, ZHANG Guang-ming, TANG Qian-gang. The Method of Increasing Velocity Along its Original Velocity Direction by the Impulse Firing for the Ballistic Missile to Penetrate the Anti-missile System in the Passive Ballistic Curve[J]. Journal of Astronautics,2008,29(4):1126—1130.
- [11] 关世义,张克,吐震飚,等. 反舰导弹突防原理与突防技术 探讨[J]. 战术导弹技术,2010,16(4):1—6.
 GUAN Shi-yi, ZHANG Ke, TU Zhen-biao, et al. Discussions on Penetration Principles and Technologies for Anti-ship

Missile[J], Tactical Missile Technology, 2010, 16(4): 1-6.

 [12] 张斌,任军学,王一白,等. 弹道导弹在被动段轴向加速变 轨弹道设计与优化[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36
 (6):650—653.

ZHANG Bin, REN Jun-xue, WANG Yi-bai, et al. Design and Optimization on Trajectory of Increasing Velocity along its Original Velocity Direction by Impulse Firing for Ballistic Missile to Penetrate Anti-missile System in Passive Ballistic Curve[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(6):650-653.

- [13] 王珏,宋琼,牛宝良. 高动态离心机系统建模与仿真[J]. 装备环境工程,2010,7(6):285—287.
 WANG Jue, SONG Qiong, NIU Bao-liang. Modeling and Simulation of High Dynamic Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering,2010,7(6):285—287.
- [14] 宫建华,朱卫良,吕栋,等. 埋砂法恒定加速度试验的受力 分析[J]. 电子与封装,2004,4(2):45—47.
 GONG Jian-hua, ZHU Wei-liang, LYU Dong, et al. Inter-sand Method of Centrifugal Test[J]. Electronics & Packaging,2004,4(2):45—47.
- [15] 陈胜来,朱长春,邓志刚. 某油箱离心试验吊篮动平衡分析
 [J]. 装备环境工程,2010,7(6):243—246.
 CHEN Sheng-lai, ZHU Chang-chun, DENG Zhi- gang. Dy-namic Balance Analysis of Suspended Basket in Centrifugal Test of Gasoline Tank[J]. Equipment Environmental Engineer-ing,2010,7(6):243—246.
- [16] 陈胜来,刘谦. 离心机吊篮耳轴扭矩测试技术[J]. 装备环境 工程,2013,10(1):102—104.
 CHEN Sheng-lai, LIU Qian. Technology of Torque Measurement on Trunnion of Centrifuge Suspended Basket[J]. Equip-

ment Environmental Engineering, 2013, 10(1):102-104.