

有限元分析在三轴六自由度振动系统设计中的应用

徐文正, 孙建勇

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: 简要说明了三轴六自由度振动试验系统建设的现状、意义和主要内容, 介绍了虚拟振动试验技术的发展和作用, 并通过应用案例阐述了虚拟振动试验技术在三轴六自由度振动试验系统建设上的应用, 结果表明虚拟振动试验技术对六自由度振动试验系统的设计优化具有重要的支持作用。

关键词: 振动; 虚拟试验; 六自由度; 系统

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)01-0021-03

Application of Virtual Vibration Test Technique in Building Three-axis Six Degrees of Freedom Vibration Test System

XU Wen-zheng, SUN Jian-yong

(China Aero Poly-technology Establishment, Beijing 10028, China)

Abstract: Present status, significance and contents of three-axis six degrees of freedom vibration test system were reviewed. The development and application of virtual vibration test technique was introduced. A case study was used to demonstrate the application of virtual test technique in three-axis six degrees of freedom vibration test system. It was concluded that virtual test technique can be important support for six degree of freedom vibration test system in design optimization.

Key words: vibration; virtual test; six degrees of freedom; system

MIL-STD-810G《环境工程考虑和实验室试验》方法 527“多激励器试验”提出了多激励多轴向(MEMA)试验方法, 其中最有代表性的是三轴六自由度振动试验, 它主要用于模拟空间飞行器高速飞行过程中诱发的复杂的多自由度振动。与传统的单轴向单点激励试验(SESAs)相比, 它具有下列优点:

1)更真实地模拟实际飞行环境; 2)解决了传统SESAs试验无法激发出对振动轴向敏感的故障模式的问题; 3)避免了传统SESAs试验按3个轴向分别进行试验, 导致产品经受3倍的试验时间而出现不应有的故障模式的情况。

某些发达国家非常重视三轴六自由度振动系统

收稿日期: 2010-07-29

作者简介: 徐文正(1982—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电子产品的力学仿真分析工作。

的研制。美国从20世纪80年代开始建设大型三轴六自由度电动振动试验系统,美国Hill空军基地、美国Wyle实验室、波音公司等先后建立了自己的三轴六自由度振动试验系统。我国在振动试验设备研制上滞后于发达国家,目前国内尚无该系统。

三轴六自由度振动试验系统通常由多达8~12个振动台通过静压轴承与工作台面组装而成,系统组成复杂、研制难度很大。为确保系统在2 kHz频率范围内能够实现预定六自由度振动,需要开展非常精细的设计工作,事先采用振动虚拟试验技术等手段建立振动系统虚拟模型,对系统的结构动特性进行全面分析,协助确认系统设计的合理性。

1 三轴六自由度振动试验系统开发

三轴六自由度振动试验系统是涉及多学科的大型复杂系统,其工作原理是:首先使用多输入多输出(MIMO)振动控制器对试验系统进行系统识别,确定系统的频响函数矩阵,然后根据事先设定的六自由度参考谱产生多达8~12路(振动台数量)的初始驱动电压信号,这些驱动信号通过对应的功率放大器进行放大,驱动各个振动台,在振动台工作台面上激发六自由度振动响应,再经由相应的控制加速度计进行采集,并通过电荷放大器进行信号调理,随后输入振动控制器进行振动控制。MIMO振动控制器、振动台、功率放大器、静压轴承、工作台面、传感器、电荷放大器等部分均是三轴六自由度振动试验系统的重要组成部分。按照系统原理,三轴六自由度振动试验系统的开发主要分为3大部分。

1) 三轴六自由度振动平台系统。该平台由振动台、静压轴承、振动台面等组成,各部分通过螺栓刚性连接为一体,能够实现六自由度运动,是试验系统建设的关键所在。

2) 试验系统控制部分。三轴六自由度振动试验系统运动台面尺寸较大,通常并非是完全的刚体,需要通过构建扭转运动、弯曲运动等反应弹性体振动模态特征的自由度,来实现振动台面控制。

3) 其它辅助部分。包括高压油源系统、振动台面调平系统、水冷、供气以及其它辅助系统。

通过上面试验系统开发涉及的3大部分内容可以看出,该系统组成非常复杂,在没有经验借鉴的情

况下,简单按照设计方案盲目地进行系统搭建必将存在极大的风险。建设这样一套系统的费用是非常高的,若不预先评估系统的结构动特性,后果可能很严重。因此,在开发此系统前,引入虚拟振动试验技术开展仿真分析,得到系统的结构动特性,发现振动系统可能存在的问题,从而可为系统的设计开发提供指导。

2 虚拟振动试验方法探讨

2.1 有限元仿真分析方法

有限元仿真分析方法是对问题的一种物理近似法,它是把连续的弹性体设想为由许多有限个单元组成,这些单元形状简单,每个单元上有若干个节点,各个单元仅在节点处按一定方式相互联系,相互作用^[1]。与此同时,把用连续形式描述的边界条件看作是只需在边界上若干个节点应当遵守的条件。此外,还把结构所受的各种载荷按一定方法化为等效的节点载荷。实际上,这就是把无限自由度的连续体的力学计算变成在有限多个节点上某些参数的计算,可以分析出振动台面的响应情况,为试验夹具的设计提供依据,使夹具的设计能够尽量优化。

2.2 振动虚拟试验仿真方法

随着计算机技术的发展,振动的仿真分析方法也有了新的进展。目前,振动虚拟试验技术的概念逐渐被人们接受,并且应用越来越广泛,该方法针对的是整个振动试验系统。振动虚拟试验仿真方法主要是指由虚拟控制器、虚拟振动台、虚拟试验件组成的用于模拟振动环境试验的方法。该方法包括各学科的相关软件及其耦合集成,能够实现控制、有限元方法、多体动力学、失效物理等多学科的机电耦合闭环分析^[2]。该平台应包括以下4种功能。

1) 虚拟控制器建模与分析能力。平台应具备对振动试验系统的MIMO振动控制器、功率放大器和信号传输系统等电子控制系统的建模能力。

2) 虚拟振动台建模与分析能力。平台应具备振动台电磁线圈和机械结构的建模能力,并实现其中“电压信号—电磁激振—台面机械振动—振动反

馈”的信号传递与能量转换过程。

3) 虚拟试验件建模与分析能力。平台应具备 CAD 模型导入和有限元建模能力,能够准确地模拟试验件(包括夹具和试验产品等复杂柔体结构)在振动过程的应力响应状态。

4) 振动虚拟试验系统集成能力。平台应具备刚柔耦合建模能力,机械与电磁集成仿真的能力。

振动虚拟试验方法的集成关系如图1所示。

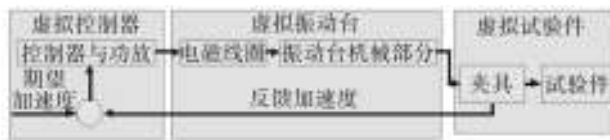


图1 虚拟试验方法流程

Fig. 1 Virtual test flowchart

上述方法是振动分析中常用的仿真分析方法,各有优劣。有限元法相对简单,而且应用范围较广;振动虚拟试验方法分析的学科范围全面,但整个平台建设非常复杂。三轴六自由度振动试验系统初期设计首先要了解其振动特性,并没考虑控制分析,所以通过有限元法进行振动分析是一种高效的方法。

3 应用案例

三轴六自由度振动试验系统建设的重要内容振动平台系统设计,中国航空综合技术研究所应用有限元法在振动平台系统设计上进行了尝试,下面对此进行介绍。

3.1 振动台面的设计优化分析

振动台面作为三轴六自由度振动运动的平台,是三轴六自由度振动试验系统建设的关键。本项目振动台面设计目标:安装面几何尺寸为 1.6 m × 1.6 m,在满足该几何尺寸要求的情况下,尽可能提高其固有频率,降低台面质量。根据此要求,优化条件如下。

如图2所示,设计参数:筋厚度为 S_1, S_2, S_3 ; 开孔直径为 D_1, D_3 ; 支撑圆台直径为 D_2 。

优化目标:模态的一阶固有频率。

约束条件:台面质量小于 1 000 kg。

应用比利时 LMS 公司 Virtual.Lab Optimization 软件工具进行结构优化,台面材料选用镁合金,优化结果见表1。

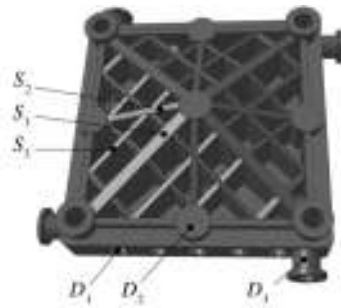


图2 台面设计

Fig. 2 Platform design

表1 结构尺寸优化设计参数

Table 1 Structural parameters for design optimization

参数	改进前/mm	改进后/mm
S_1	80	70
S_2	50	40
S_3	40	32
D_1	160	140
D_2	125	100
D_3	125	120

经过优化之后,质量由最初设计的 883.9 kg 减少到了 828.4 kg;一阶频率经过优化后由 322.3 Hz 提高到 358.5 Hz。可以看出,经过仿真优化后的台面质量减轻了,且模态频率有了提高。

3.2 振动平台系统结构动特性分析

本项目三轴六自由度振动系统是由 8 个 UD 振动台组成的大型复杂系统,通过仿真手段对其进行建模分析,研究其结构动特性对于整个系统的设计是至关重要的。文中把振动平台系统作为一个整体进行了分析,建立了由 8 个 UD 振动台、8 个静压轴承和振动台面构成的虚拟模型,通过分析可以看出,对于整个系统而言存在很多由振动台自身空气弹簧诱发的刚体模态,其固有频率都低于 5 Hz,如图 3a, b, c 所示。当频率达到 358.5 Hz 时,出现振动台面的一阶模态,如图 3d 所示。进一步响应分析表明,由于这些刚体模态频率很低,不会对试验系统的振动(试验频率 > 10 Hz)产生影响。

采用有限元分析方法对试验系统进行结构动特性分析,使得研制人员对系统的振动特性有了深刻了解,可以为设计的改进提供很好的参考。

(下转第 28 页)

船体间电位差显著减小;船体舳部辅助阳极由于需要保护船艏等较远部位船体,驱动电压较高,因此外加电流保护时,船体舳部的稳态电场强度和腐蚀相关磁场强度要明显强于船体艏部稳态电场和腐蚀相关磁场强度。由于辅助阳极附近电位梯度和电流密度均较大,因此,外加保护导致的稳态电场和腐蚀相关磁场的特征峰位置与辅助阳极的安装位置相关。对比3种状态下的稳态电场和腐蚀相关磁场强度可知,外加电流保护导致的稳态电场和腐蚀相关磁场强度最强,牺牲阳极保护次之,无保护时的稳态电场和腐蚀相关磁场强度最小。

4 结论

外加电流保护导致的腐蚀相关电磁场强度要明显强于牺牲阳极保护导致的腐蚀相关电磁场强度,而牺牲阳极保护导致的腐蚀相关电磁场强度要稍强于无保护时由于电偶腐蚀导致的腐蚀相关电磁场强度。

无保护和牺牲阳极保护时,稳态电场和腐蚀相关磁场最大值出现在船体艏部,并呈现窄尖峰特征;而在船体舳部和舳部,牺牲阳极保护时稳态电场和腐蚀相关磁场呈现锯齿波动特征。

外加电流保护系统导致的稳态电场和腐蚀相关

磁场的特征峰数量与辅助阳极对数量相同,且船体舳部的腐蚀相关电磁场强度要强于船体艏部的腐蚀相关电磁场强度。

参考文献:

- [1] JEFFREY I, BROOKING B. A Survey of New Electromagnetic Stealth Technologies[C/OL]//Signature Management——The pursuit of stealth[2001-02-22]. http://www.wrDavis.com/docs/pub/lowering_warship_signatures.pdf. 余不详
- [2] 程锦房, 龚沈光. 电场引信的动作判据分析[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(4): 27-30.
- [3] 邓涛. 认识和利用腐蚀相关的磁场[J]. 水中兵器, 2003(3): 58-61.
- [4] SANTANA-DIAZ E, ADEY R, BAYNHAM J, et al. Optimisation of ICCP Systems to Minimise Electric Signatures[C/OL]//7th International Marine Electromagnetics conference [2001-06-23]. <http://www.beasy.com/images/pdf/publications/papers/marelec2001.pdf>. 余不详
- [5] ADEY R, BAYNHAM J. Predicting Corrosion Related Electrical and Magnetic Fields using BEM[C/OL]//UDT Europe 2000[2003-05-23]. <http://www.beasy.com/images/pdf/publications/papers/UDT2000.pdf>. 余不详
- [6] SANTANA-DIAZ E, ADEY R. Optimisation of the Performance of an ICCP System by Changing Current Supplied and Position of the Anode[M]. Southampton UK: WIT Press, 2003: 1-16.

(上接第23页)

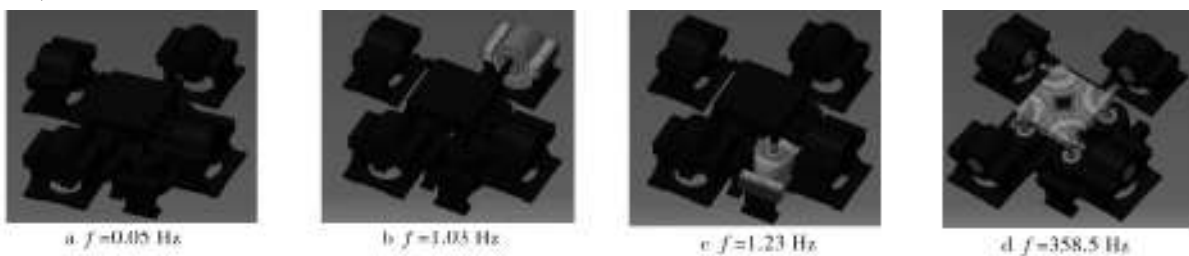


图3 振动平台系统模态
Fig. 3 Modes of vibration platform system

4 结论

三轴六自由度振动试验系统是当前国际上最为复杂和先进的试验系统之一,该系统的建立非常复杂,存在极大的技术难度。文中探讨了有限元分析方法在三轴六自由度系统建立上的初步应用,实例计算结果表明,有限元方法可以为振动台面的优化和整个振动系统的设计提供很好的技术支撑。对于

整个试验系统的建立还需引进振动虚拟试验方法以对其作更深入的研究。

参考文献:

- [1] MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [2] 隋允康, 杜家政, 彭细荣. MSC Nastran有限元动力分析与优化设计使用教程[K]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 万晓峰, 刘岚. LMS Virtual LabMotion入门与提高[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.