

简单光学系统抗振性能的数值模拟与实验分析

邵 珺, 叶景峰, 胡志云, 张振荣, 黄梅生

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 针对应用于可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术研究中的一种简单的集成化光学系统, 利用 ANSYS 有限元分析方法, 建立系统有限元模型, 分析了系统模态和谐响应特性; 通过振动台实验测试了系统结构的动力学特性, 获得系统结构在不同动力载荷作用下的幅频曲线。结合数值模拟和测试结果, 分析获得系统抗振性能, 给出了系统所能承受的环境振动频率范围。结果表明: 该光学系统在 900 Hz 以内的振动环境下具有良好的抗振性能, 可以应用于现场测试诊断。

关键词: 抗振性能; 振动台实验; 有限元分析

中图分类号: TH212 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)11-2990-06

Data simulation and experimental analysis on anti-vibration performance of simple optical system

Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, Huang Meisheng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: With ANSYS software, the finite element analysis of the integrated optical system based on tunable diode laser absorption spectroscopic technology(TDLAS) was built, numerical modal and harmonic response were analyzed. Based on the shaking table test result, the system structural dynamic properties, the amplitude-frequency curves under different dynamic loadings were measured in experiments. Then, combined with calculation results and test results, anti-vibration performance of optical system was analyzed, and frequency swing of environment vibration in which system can work was got. Result shows that system can work within 900 Hz environment vibration. It has the capability of testing and diagnosis outside the lab.

Key words: anti-vibration performance; shaking table test; finite element analysis

收稿日期: 2013-03-08; 修订日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(D51176159)

作者简介: 邵珺(1984-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: sj_opt@163.com

0 引言

现代激光诊断技术已经广泛应用于测量航空发动机内多种参数,如发动机进口流场温度、燃烧室内的雾化、射流掺混、燃烧产物浓度等,为发动机设计和故障诊断带来了极大便利。但实际应用现场环境比较恶劣,如强振动和大冲击等,振动成为影响光学诊断系统稳定性和测试精度的主要因素之一,因此,需要解决系统的抗强振动设计问题以及系统稳定性和抗振性能分析评估的问题。研究工作对象的抗振性能是一项非常有意义的工作^[1-4]。工程设计者们在水利、机械等领域,开展了大量抗振性能相关的数值模拟和实验技术研究。李志来在空间光学遥感器结构设计中^[5],通过采用合理的支撑方式,较好地抑制了动力学环境干扰,确保相机稳定成像。孟照魁探讨了固胶对改善光纤环抗振性能的综合影响^[6]。这两篇文献在考察结构的抗振性能方面都采用了数值模拟、振动测试的方法,启发了工作思路。文中结合参考文献的研究成果,采用建立动力学模型和正弦振动分析来模拟工作状态下系统所经历的动力学环境,考察系统抵抗外界振动干扰的能力。

文中结合数值模拟和振动实验对简单光学系统的抗振性能进行分析研究。针对应用于可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术研究中的一种简单光学系统,建立系统有限元计算模型,开展了系统的模态和谐响应相关的数值模拟^[7]和测试分析^[8],进行系统抗振性能的理论^[9-10]和实验分析,为后续的抗振性能优化设计奠定基础。

1 简单光学系统抗振性能数值计算

基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的简单光学系统(见图 1)是由发射端和接收端组成,其中发射

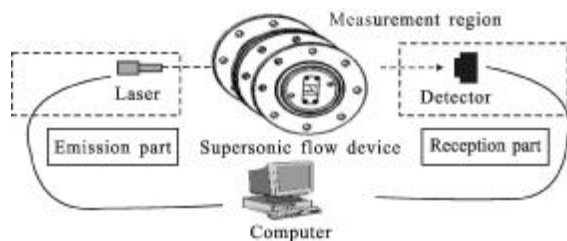


图 1 简单光学系统

Fig.1 Image of integrated optical system

端包括激光器和光纤准直器,接收端即采集系统。发射端输出的激光穿过待测区到达接收端,然后由接收端的探测器测量激光与待测区作用后的变化情况,最后通过光谱计算分析获得测量区域的温度信息,如图 1 所示。实验观察,环境振动会引起光线扰动,而光线扰动会导致系统测量不确定度的增加,为了满足复杂实验现场的需要,有必要提高系统的抗振性能。

利用 ANSYS 有限元分析软件,在对模型形状、尺寸、工况条件分析的基础上,首先用几何图形和布尔操作产生基本几何特征,定义结构材料属性。系统的发射端和接收端都是由上下两部分构成,中间通过螺钉连接,下半部组成为接杆、杆架和压板,其中接杆材质为不锈钢,其他为铝合金;上半部分别是由光纤导引头和探测器组成,材质均为铝合金。计算模型时,不锈钢材料直接利用手册中给出的材料参数作为模型参数,铝合金参数是结合模态实验结果和手册参数修正后的结果,材料参数见表 1。然后采用 20 节点三维实体单元对几何模型进行网格划分,对产生的节点和单元,加上约束方程,同时简化了模型结构中的螺纹和倒角细节,最后建立了如图 2 所示的光学系统有限元模型,进行了模态和谐响应计算。

表 1 材料属性一览表

Tab.1 List of material attribute parameters

Components	Material	Density /g · cm ⁻³	Poisson ratio	Elastic modulus/GPa
Detector	Aluminum alloy	2.82	0.3	74.8
Hander	Stainless steel	7.88	0.3	200
Others	Aluminum alloy	2.76	0.3	74.8

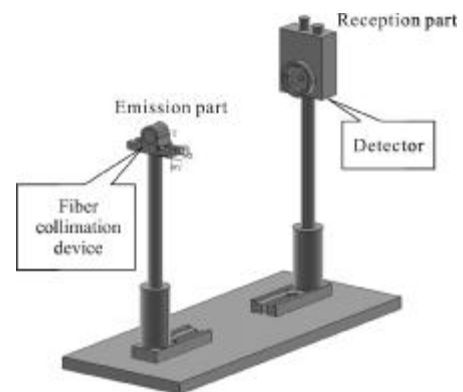


图 2 简单光学系统的有限元模型

Fig.2 Finite element analysis model of integrated optical system

计算得到的模型振型如图 3 所示。可以看出,一



图 3 简单光学系统的有限元模型振型

Fig.3 Finite element mode shapes of integrated optical system

阶频率 174 Hz, 振型为光纤准直器和探测器的沿光轴方向的前后相对摆动, 其中以光纤准直器的摆动为主; 二阶频率 798 Hz, 振型与一阶相似, 只是以探测器的摆动为主; 三阶频率 916 Hz, 振型为光纤准直器和探测器在垂直于光轴方向上的左右摆动, 其中以光纤准直器摆动为主; 四阶频率 1 087 Hz, 振型与三阶相似, 不同的是以探测器的摆动为主; 五阶频率 1 173 Hz, 振型以光纤准直器扭动变形为主。根据模拟结果分析: 由于探测器的光敏面直径只有 5 mm, 所以当环境振动激发出系统第三阶振型, 系统发射端和接收端的变形姿态是在垂直与光轴的方向上的交叉摆动, 再加上一定的传输距离造成的光线失调, 光线很有可能会出光敏面, 导致系统无法正常工作。下面结合测试结果进一步评估系统的抗振性能。

2 简单光学系统抗振性能实验分析

2.1 振动测量装置

光学系统抗振性能由外因和内因共同制约。结合外界环境的振动信息, 抗振性能可以由自身结构的模态参数来表征。文中搭建相应的振动测量装置, 通过振动实验来测量评估其抗振性能的优劣。

搭建的振动响应测量装置由振动传感器、电荷放大器以及数据采集装置组成。振动传感器为压电式加速度传感器(CA-YD-126)用于测量结构的振动响应, 放大器为 YE5853B 型组合式电荷放大器将电荷信号转换成电压信号, 数据采集装置由 NI USB-6215 数据采集卡和自行编制的振动测量软件组成。

该装置可实现对振动加速度参数的在线测量,通过积分运算和频谱分析,可得到相应的速度、位移、振动频率、振幅、相位等参数,示意图如图 4 所示。

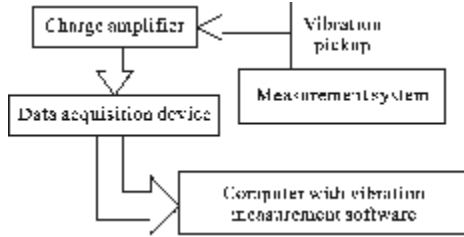


图 4 测量振动响应示意图

Fig.4 Image of testing vibration response

2.2 振动台实验

通过搭建振动测量装置对简单光学系统进行了振动台测试,如图 5 所示。实验结合系统的工作环境,加载垂直于底面方向的加速度激励为振源激励,通过扫频方式对系统进行谐响应分析,实验得到的频幅曲线如图 6、7 所示。通过在光纤准直器、探测器



图 5 振动台实验图

Fig.5 Image of shaking table experiment

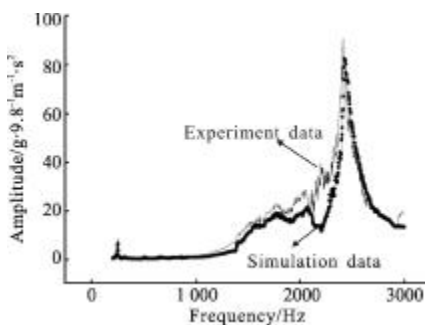


图 6 实验和模拟的频幅响应曲线对比

Fig.6 Comparison of simulation amplitude-frequency curve and experimentation amplitude-frequency curves

上布置的加速度传感器,对振动响应进行监测。同时,通过采集探测器接收到的光强信号判断光路的

失调情况。图 6 对比了加载振动信号幅值 80 m/s^2 , 频率范围 $20\sim 3000 \text{ Hz}$ 时,模型理论计算的和探测器测得的频幅曲线。

图 7 为加载振动信号幅值 200 m/s^2 , 频率范围为 $20\sim 2000 \text{ Hz}$ 时,实验测得的光强信息和振动响应随频率变化的曲线,从图 7 提取出模型的 1~5 阶固有频率与模拟计算得到的结果如表 2 所示。

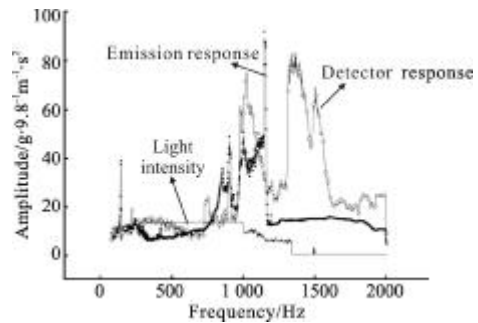


图 7 实验测得的频幅曲线

Fig.7 Image of experimentation amplitude-frequency curves

表 2 系统的模态参数实验和模拟结果对比表

Tab.2 Comparison of analysis modal parameter and testing modal parameter

Step	Simulation frequency/Hz	Experiment frequency/Hz	Deviation/%
1	147.80	145.64	1.4
2	798.30	751.96	6.1
3	916.85	902.72	1.5
4	1 087.9	1 085.8	0.2
5	1 172.0	1 146.7	2.2

从图 6 和表 2 可以得到,模拟计算得到的系统频率频幅曲线与实验分析结果吻合较好,数据可靠。在此基础上,结合系统的振动测试结果和模拟结果,对简单光学系统进行抗振性能分析。

2.3 抗振性能分析

为了检验系统的抗振动性能,分别对光学系统做了幅值为 80 m/s^2 、 150 m/s^2 、 200 m/s^2 , 频率范围为 $20\sim 2000 \text{ Hz}$ (振动环境频率范围)的谐响应振动测试。探测器接收到的光强随频率的变化如图 8 所示。从图中可以看出:

(1) 如上图所示在 150 Hz 附近,光强明显减弱,说明在该处入射激光在探测器光敏面上产生了较大偏移,与上述分析结论中该处为系统的一阶固有有频

率相符,参考表 2;(2) 频率高于 900 Hz 后,光强经过激烈变化后降为零。这是由于在实验中,出现强烈的共振,光纤准直器固定螺钉变松,导致了整个光路严重失调,这与分析中该处为系统三、四、五阶固有频率的结论是相符的。900 Hz 后,干扰后激光出射方向随机、无序,探测器接收到的信号也无规律可循,在螺钉没有完全脱落之前,探测器有可能接收到不稳定的信号,正如图 8 中 900~1 200 Hz 区间 3 个曲线的走势;(3) 二阶固有频率在光强频率曲线上没有明显的反映,笔者认为这是由于二阶振型以探测器的摆动为主造成的。虽然一阶和二阶振型摆动方向基本一致,但由于一阶振型以光纤准直器的摆动为主,而系统是否能正常工作是以探测器接收到的光强信号为主要依据。激光从准直器出射在入射到探测器光敏面的过程中,摆动造成的光线失调量迭加上传输距离得到了进一步放大,而以探测器的摆动为主的二阶振型没有该放大过程,只要光线的失调没有偏出探测器的光敏面,就不会对探测到的光强信号产生明显影响。

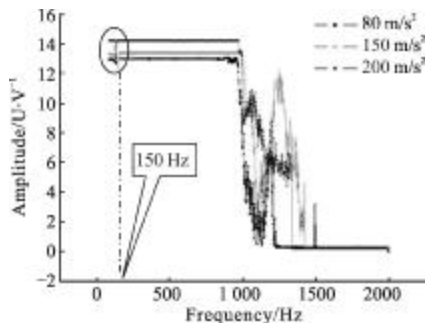


图 8 系统信号随频率的变化曲线

Fig.8 Curve of system signal vs frequency

通过对简单光学系统振动性能的模拟计算和实验研究,对系统的整体抗振性能有了初步了解,考察系统在振动噪声频率为 20~2000 Hz 实验环境中的工作状态,发现当振动频率低于 900 Hz 时,系统具有较好的稳定性。在考察的频率范围之外,当环境振动高于 2 000 Hz 时,也有可能激起系统更高阶的振型,由于不是系统关心的环境振动范围,没有进行相应的实验验证。

3 结论

通过上述研究工作,笔者对该光学系统在振动

环境中的特性有了较为详细的认识 and 了解,为满足激光诊断系统在现场应用的需求,对系统中抗振动性能设计提出以下设想。

(1) 在工程应用设计前,进行振动测量和分析,充分了解振源的振动特性。如果振动环境主频段在 900 Hz 以上,可以采用振动隔离的方式,消除或减弱振源对诊断系统的影响,达到从源头上解决振动干扰的效果。

(2) 在系统设计阶段,利用模拟计算的方法,研究系统设计方案的振动特性,并针对振源特征,对元件以及固定连接方式进行优化改进,针对这个简单系统,可以改进发射端光纤导引头的结构设计以及整体的连接方式(考虑把发射端和接收端做成一个整体)调整其质量分布,改变其频率,避免共振。

(3) 对系统进行振动台实验考核,模拟实验现场振动环境,验证系统的抗振动性能,并进行改进完善。

(4) 结合实验和模拟结果,给出系统所能承受的环境振动频率范围,即可给出系统正常工作的环境指标。

参考文献:

- [1] Lv Yinhan, Cui Weixin, Zhang Tao, et al. Analysis on environmental adaptability of wide-angle infrared objective [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (3): 884 - 895. (in Chinese)
吕银环,崔维鑫,张涛,等. 广角长波红外物镜环境适应性分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(3): 884-895.
- [2] Wu Yanji, Huang Xianlin. Influence of mechanical vibration on FOG and reducing measure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 363-365. (in Chinese)
吴衍记,黄显林. 机械振动对光纤陀螺的影响及其减小措施. [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 363-365.
- [3] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2201-2206. (in Chinese)
舒建涛,李绪友,吴磊,等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2201-2206.
- [4] Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun. Technology of active damping based on fast-response mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 734-738. (in Chinese)

- 邵珺, 叶景峰, 胡志云. 快速响应反射镜主动减振技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 734-738.
- [5] Li Zhilai, Xue Donglin, Zhang Xuejun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2485-2490. (in Chinese)
李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [6] Meng Zhaokui, Shao Hongfeng, Xu Hongjie, et al. Effect caused by coating adhesive on polarization-maintaining fiber coil [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 958-960. (in Chinese)
孟照魁, 邵洪峰, 徐宏杰, 等. 固胶对保偏光纤环的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8): 958-960.
- [7] Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, et al. Numerical calculation of misaligned optical system under interference vibration[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 530-533. (in Chinese)
邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 振动干扰下光路失调的数值计算[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(3): 530-533.
- [8] Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, et al. Modal test and vibration analysis of mechanical structure under different boundary constraint conditions [J]. Applied Physics, 2011, 2(4): 344-348. (in Chinese)
邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 不同约束条件下机械结构的模态测试与振动分析[J]. 应用物理, 2011, 2(4): 344-348.
- [9] Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, et al. A numerical simulation method for misaligned optical mirror mount under interference vibration[J]. Applied Physics, 2012, 3(2): 127-132. (in Chinese)
邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 基于光学镜座的振动失调模拟计算方法[J]. 应用物理, 2012, 3(2): 127-132
- [10] Shao Jun, Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, et al. Design and implementation of a simulation platform based on optimal optical components [J]. Laser Technology, 2011, 35(4): 511-514. (in Chinese)
邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 基于光学元件结构优化的仿真平台设计与实现[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 511-514.