

文章编号 1004-924X(2011)03-0529-07

# 振动干扰下光路失调的数值计算

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:**为了给燃烧诊断光学系统中机械振动对光学性能的影响提供预测评价方法,对振动干扰下光路失调数值的精确计算进行了研究。利用 ANSYS 有限元分析软件建立了光学振动失调物理模型,通过瞬态动力学分析得到了反射镜在振动激励下的位移响应。基于矩阵光学、几何光学理论和机械振动理论,分析了反射镜的振动失调光束传输变换矩阵,建立了振动失调光路传输理论模型,推导出了振动激励下光路失调数值计算方法,并通过实验对该计算方法进行了验证。实验结果显示,水平和垂直方向的仿真计算结果与实验测试结果的相对误差分别为 4.1% 和 0.8%,表明该计算方法具有很高的精度。

**关键词:**光学系统;光学失调;振动;瞬态动力学;ANSYS;数值计算

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111903.0529

## Numerical calculation of misaligned optical system under interference vibration

SHAO Jun, YE Jing-feng, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, HUANG Mei-sheng

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

**Abstract:** For the purpose of providing a method to estimate the effect of vibration on the optical performance of a burning diagnosis optical system, a numerical calculation method for the misaligned optical system under interference vibration was proposed. Based on the finite element analysis software ANSYS, the physical model of misaligned optical system under interference vibration was developed and the transient dynamic analysis was inspired by a reflector displacement in the vibration response. Then, the dynamic response of the reflector was obtained by transient dynamic analysis. On the basis of the matrix optics, geometrical optics theory and the mechanic vibration theory, the vibration misalignment matrix of planar reflector was analyzed, and the vibration misalignment model was also built. Meanwhile, the method of simulating calculation of misaligned optical system under interference vibration was inferred. Furthermore, an experiment was carried out to validate the method. The results show the the relative error of simulating calculation and experimental data can reach 4.1% and 0.8% in the horizontal and vertical directions, respectively.

**Key words:** optical system; optical misalignment; vibration; transient dynamics; ANSYS; numerical calculation

收稿日期:2010-02-25;修订日期:2010-05-10.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目

## 1 引言

随着光学系统的应用领域不断扩展,一些复杂的光学系统逐渐从实验室走向实际应用现场,然而,使用环境中各种动态干扰的影响,如环境温度变化、大气湍流、灰尘烟雾、以及由各种原因引起的机械振动都会不同程度地影响光学系统的性能,从而阻碍光学系统的实用化进程。机械振动对光学系统的成像质量、测量精度和目标跟踪瞄准精度的影响是不可回避的,它已成为实际应用现场中影响光学系统稳定性的主要干扰因素之一,因此,抗振性能的评估已成为光学系统现场应用的一个研究重点。

研究光学系统在恶劣环境中的工作性能,完善光学系统工作稳定性的措施是一项非常有意义的工作。以色列 Ben-Gurion 大学的 Arnon 等人建立了振动环境下激光通信的数学模型,分析了振动对卫星光通信网络性能的影响,并研究了相关的解决方案<sup>[1-2]</sup>;陈云亮等人研究了随机振动对探测器接收信号的影响<sup>[3]</sup>;文献<sup>[4]</sup>指出,卫星平台振动的干扰问题是在激光星间链路实用化之前必须解决的关键问题。

为了满足现场诊断实验的要求,围绕现有光学诊断实验室系统集成化、小型化、工程化的问题,本文开展了对振动失调光学系统光线传输数值计算的相关研究,以便为光学系统在燃烧诊断中的现场应用提供技术储备。

## 2 振动失调物理模型动力学计算

### 2.1 振动失调模型的建立

#### 2.1.1 有限元模型的建立

以光学系统中常用的反射镜及镜架作为分析计算对象,通过瞬态动力学分析求解其在振动激励下的位移响应。由于影响瞬态动力学分析结果的主要因素为研究对象的质量及结构刚度分布,因而在保证元器件的质量属性和总体结构特征的前提下,在实际建模中忽略了一些局部微小特征,如倒角、螺纹等。这些局部特征对动力学分析结果的影响很小<sup>[5-9]</sup>,却会使计算量显著上升,因此这种简化是合理和经济的。

反射镜实体模型作为研究对象是通过 PTC

公司的三维实体造型软件 Pro/E 按照图纸建立的,如图 1 所示。反射镜的有限元模型建立在 ANSYS 环境下,如图 2 所示。单元类型采用 SOLID92,材料属性如表 1 所示。



图 1 反射镜实体模型

Fig. 1 Entity model of reflector

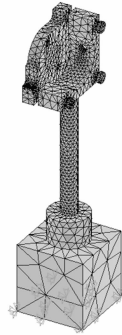


图 2 反射镜有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of reflector

表 1 材料属性参数一览表

Tab. 1 List of material property parameters

零件	材料	密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 /GPa
镜片	石英玻璃	2.2	0.15	72
镜架	铝合金	2.82	0.3	74.8
立柱	不锈钢	7.88	0.3	200
底座	铁	7.85	0.3	206

#### 2.1.2 振动激励下反射镜动力学分析

瞬态动力学分析用于计算结构在方位或大小随时间任意变化的载荷作用下的动力学响应<sup>[10-12]</sup>,研究方法采用模态叠加法。通过瞬态动力学分析可以得到模型任意节点上的位移响应,本文选取图 3 所示的 A、B、C 3 点。图 4 为模型的振动激励,图 5 为 A、B、C 3 点的位移响应。

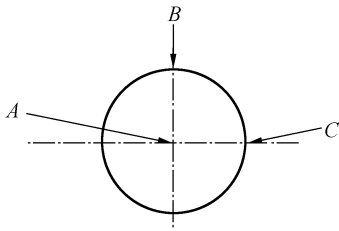
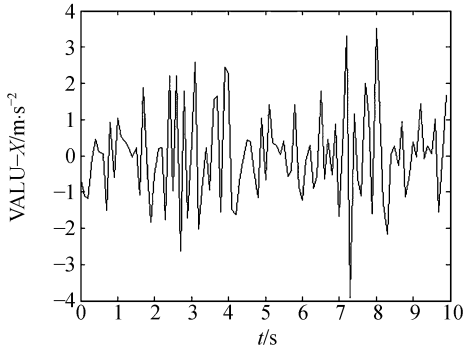
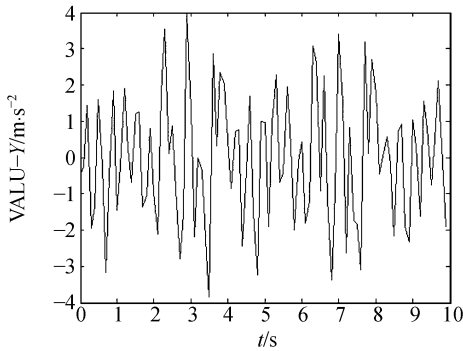


图 3 反射镜镜面参考点图示

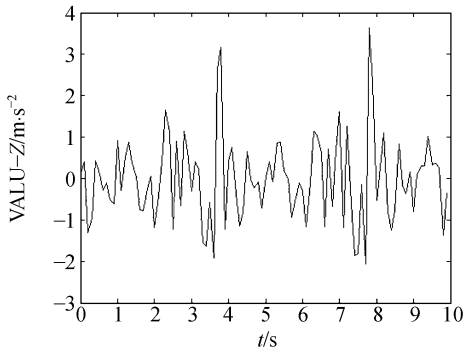
Fig. 3 Image of reference points on reflector surface



(a)在 X 方向上加载的加速度  
(a) Acceleration in X direction



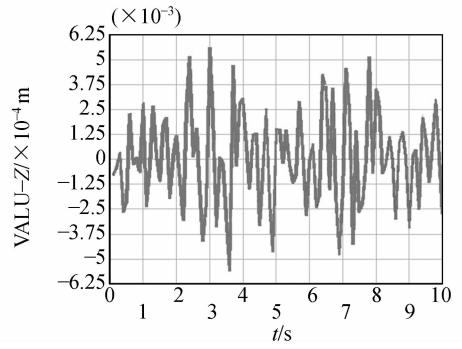
(b)在 Y 方向上加载的加速度  
(b) Acceleration in Y direction



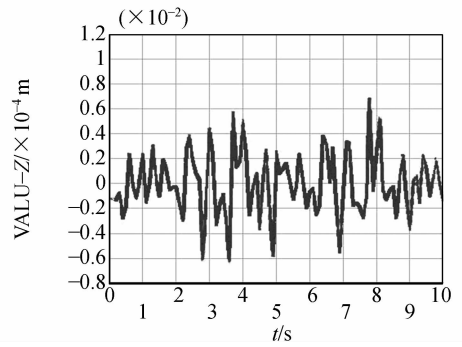
(c)在 Z 方向上加载的加速度  
(c) Acceleration in Z direction

图 4 加载模型上的振动激励信号

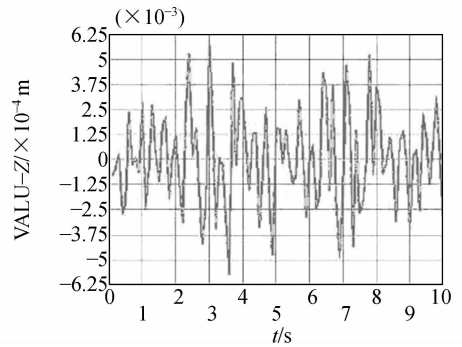
Fig. 4 Vibration exciting signals loaded on model



(a) A 点位移随时间变化图  
(a) Image of point A



(b) B 点位移随时间变化图  
(b) Image of point B



(c) C 点位移随时间变化图  
(c) Image of point C

图 5 参考点在 Z 方向上随时间振型的变化

Fig. 5 Vibration model changes of reference points in Z direction

## 2.2 振动失调模型的计算

反射镜模型的镜面偏转角和偏移量是将振动失调模型的输出和光路追迹模型的输入关联起来的参量。在振动激励作用下,镜面的变形很小。镜面的偏转角可以由镜面上参考点 A, B 的相对偏移量计算,如图 6 所示。反射镜面  $\gamma$  在无干扰

的初始状态下位于  $XOY$  坐标面内,那么在振动干扰下某时刻,镜面  $\gamma'$  在  $YOZ$  面上的投影角为  $\theta$ ,即镜面的偏转角。图 7 为镜面垂直两点经振动干扰后的几何关系图; $z_A, z_B$  为初始状态下  $A, B$  在  $Z$  轴上的位置; $z_A', z_B'$  为扰动后某时刻  $A, B$  在  $Z$  轴上的位置; $\theta$  为此时刻镜面产生的偏转角。

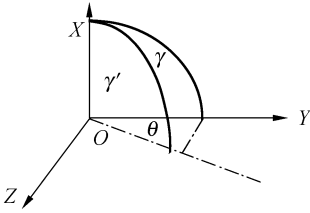


图 6 镜面转动坐标图

Fig. 6 Coordinate of rotational reflector

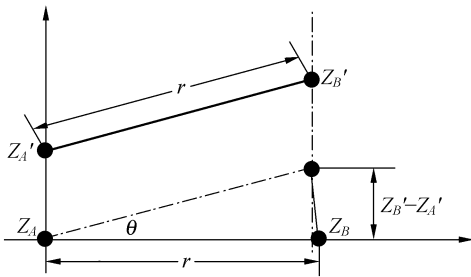


图 7 镜面垂直两点经振动干扰后的几何关系图

Fig. 7 Geometric image of two points on vertical reflector surface after vibration interfering

根据图 7 的几何关系可得:

$$\tan \theta = \frac{(z_B' - z_A')}{r}, \quad (1)$$

镜面偏转角  $\theta$  很小,所以有:

$$\theta = \tan \theta. \quad (2)$$

计算某时刻某坐标系上的偏转角可以通过振动后  $A, B$  两点的位置差与反射镜的半径相除得到。以第 3 s 的数据为例: $z_A' = 4.4095 \times 10^{-4}$  mm,  $z_B' = 5.5688 \times 10^{-4}$  mm,  $r = 25$  mm, 由式 (1), (2) 可得  $YOZ$  面的偏转角  $\theta = 4.6375 \times 10^{-5}$  rad。

根据光学原理进行分析表明,在振动引起的微小动作下,造成光路失调的角度失调量主要是反射镜左右转动角和俯仰角,即在  $YOZ$  面和  $XOZ$  面的投影偏转角  $\theta$  和  $\eta$ ,而  $XOY$  在面内的投影可以忽略不计。

通过参考点  $A, C$  的振动响应可得到  $\eta$ 。同样以第 3 s 的数据为例,  $XOZ$  面的偏转角  $\eta = 5.4488 \times 10^{-6}$  rad。反射镜出光口的偏移量即参考点  $A$  的偏移量见图 5,仍以第 3 s 的数据为例,  $\Delta z_A = 5.5688 \times 10^{-3}$  mm。

### 3 光路追迹物理模型的建立与计算

#### 3.1 光路追迹模型的建立

以几何光学及矩阵光学为基础<sup>[13-16]</sup>,理论分析了光学系统的振动失调光束传输变换矩阵。针对机械振动引起的近轴光学系统的光束指向在三维位移失调下的传输方程,建立了光学系统的三维振动失调光束传输模型。

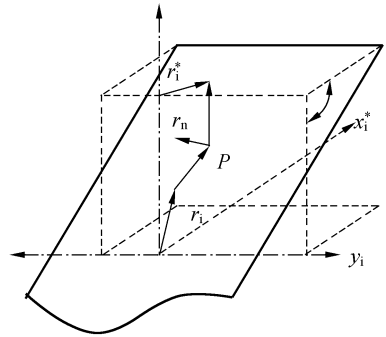


图 8 平面反射镜光线传输示意图

Fig. 8 Light-transmitting image of plane mirror

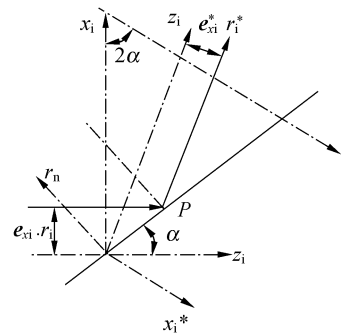


图 9 入射面与出射面之间的位置关系

Fig. 9 Image of positional relation between entrance and exit planes

对于三维失调光线传输,为了便于与其它光学元件实现沿着光传输方向的传输变换,规定反射镜的入射面  $X_i O Y_i$  与入射方向  $Z_i$  垂直,出射面  $X_i* O Y_i*$  与出射方向  $Z_i*$  垂直,入射面与出射面



上,数据采集系统同时监测和处理振动传感器测得的反射镜底座受激加速度数据和 CCD 采集的失调光路光斑图像。

振动传感器测得在机械泵振动激励下反射镜 3 个坐标方向的加速度如图 4 所示。这个激励就是在 ANSYS 瞬态分析时加载的外部激励信号。该信号由 CCD 接收,通过对接收到的光斑进行定位处理,给出光斑中心偏移量。(实验中采用的 CCD 型号为 SONY ICX419ALL)。

实验得到光斑中心的最大失调量为:2 pixel (H)×18 pixels(V),即  $19.680\ \mu\text{m}\times 183.96\ \mu\text{m}$ 。实验中的振源激励主要提供的是垂直方向上的振动,但由于反射镜各个零部件的材料属性不同,各个部位的振型不一致,从而引起镜面的俯仰和偏转,使反射镜反射光线经过传输的失调量不仅仅在垂直方向,而是在水平方向上也有分量,但这个分量远远小于垂直方向的值。实验测试与仿真计算结果对比如表 2 所示。仿真计算和实验测试结果符合较好,相对误差分别为 4.1%和 0.8%。

## 参考文献:

- [1] ARNON S, KOPEIKA N S. The performance limitations of free space optical communication satellite network due to vibrations-analog case[J]. *IEEE*, 1996,84:287-290.
- [2] ARNON S, KOPEIKA N S. Laser satellite communication network. \_vibration effect and possible solutions[J]. *IEEE*, 1997,85:1646-1661.
- [3] 陈云亮,马晶,谭立英,等. 高斯光束特性对卫星光通信的影响分析[J]. *中国激光*, 2004, 31(S): 393-395.  
CHEN Y L, MA J, TAN L Y, *et al.*. Analysis of the effects of gaussian beam on intersatellite optical communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(S): 393-395.
- [4] 谭立英,马晶. 卫星光通信技术[M]. 北京:科学出版社, 2004.  
TAN L Y, MA J. *Intersatellite Optical Communication Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [5] 陈贵敏. 振动环境下光束指向稳定及其光机电一体化关键技术[D]. 西安:西安电子科技大学, 2005.  
CHEN G M. *Pointing stability of light-beam in*

表 2 仿真计算和实验测试结果对比表

Tab. 2 Contrast between simulated calculations and experimental results

	水平方向	垂直方向
	/μm	/μm
仿真计算	18.875	185.49
实验测试	19.680	183.96
相对误差	4.1%	0.8%

## 5 结 论

本文建立了几何光束在失调光学系统中传输的理论模拟,完成了在加载振源信号下光学元器件振动性能的动力学数值计算,实现了光路在振动失调情况下的数值仿真,并通过振动实验验证了仿真计算具有较高的精度。该模型已经初步应用于光学系统的结构抗振性能评估及机械结构优化设计。

*vibration environment and its key techniques of opto-mechatronics*[D]. Xi'an: Xidian University, 2005 (in Chinese)

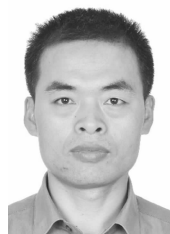
- [6] 范国滨. 光束稳定与振动控制的光机电一体化系统研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2004.  
FAN G B. *Light-beam stability and vibration control of opto-mechatronics systems*[D]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)
- [7] 范国滨,贾建援,陈贵敏,等. 机械振动对光学系统指向精度的影响[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(2): 104-106, 111.  
FAN G B, JIA J Y, CHEN G M, *et al.*. Vibration effects on pointing precision of optical system [J]. *China mechanical engineering*, 2005, 16(2): 104-106, 111. (in Chinese)
- [8] 车录锋,卢云,徐志农. 铰链式高冲击微加速度传感器封装的有限元模拟[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(2): 199-205.  
CHE L F, LU Y, XU ZH N. Finite element simulation on packaging of hinged high-gmicromachined accelerometer. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 199-205. (in Chinese)
- [9] YAN W, ZHANG X D, XU F, *et al.*. Two and a half dimension hexahedral meshing for MEMS de-

- sign [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1449-1452.
- [10] 赵建文. 空气弹簧在光学平台隔振系统中的应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2006.  
ZHAO J W. *Research on the Application of Air Springs for the Vibration Isolation System of an Optics Platform* [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)
- [11] 汪玉, 赵建华, 杜俭业. 基于多体动力学有限元计算的一种船用柴油机抗冲击性能仿真[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(11): 88-90.  
WANG Y, ZHAO J H, DU J Y, *et al.*. Simulation on antishock performance of a marine diesel engine by using finite element calculation based on multibody dynamics[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(11): 88-90. (in Chinese)
- [12] 姚廷强, 迟毅林, 王立华, 等. 球轴承柔性多体动力学分析与接触振动研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 158-162.  
YAO T Q, CHI Y L, WANG L H, *et al.*. Contact vibration and flexible-multibody dynamic analysis of a ball bearing[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10): 158-162. (in Chinese)
- [13] 季小玲. 高功率畸变激光的传输特性和光束控制研究[D]. 成都:四川大学, 2004.  
JI X L. *Study on the Propagation Properties and Beam Control of High-power Lasers with Distortions* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [14] FEI W, CHEN X F, ZENG X L, *et al.*. Generation of multi-wavelength light sources for optical communications in aperiodic optical superlattice [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(12): 708-711.
- [15] LIANG X X, BAN S L. Optical vibration modes and electron-phonon interaction in ternary mixed crystals of polar semiconductors[J]. *Chinese Physics*, 2004, 13(1): 71-81. (in Chinese)
- [16] 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 314-320.  
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 314-320. (in Chinese)

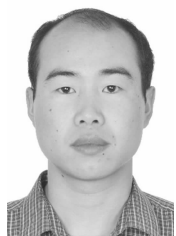
#### 作者简介:



邵 珺(1984—)女,安徽蚌埠人,助理工程师,2006年、2009年于军械工程学院分别获学士、硕士学位,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: sj\_opt@163.com



张振荣(1974—)男,陕西人,助理研究员,1997年于西安工业大学获硕士学位,主要从事激光光谱技术的研究。E-mail: nintzrzr@163.com



叶景峰(1979—)男,河南人,助理研究员,2004年于国防科学技术大学获硕士学位,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: leafey1979@163.com



黄梅生(1970—)女,福建人,实验师,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: 43443204@qq.com



胡志云(1969—)男,河南人,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthzy@163.com