

光学器件微振动引起的光束指向稳定性分析

刘芳^{1,2} 徐嘉^{1,2} 张燕^{1,2} 孙明营^{1,2} 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 提出一种可以从时域和空域两个方面更准确地表征光束指向稳定性的动态方法, 解决大型光学系统中光学器件微振动对光学系统的影响的描述问题。基于实际应用中机械结构的模态分析及微振动对光束的影响, 将机械模态和光学系统有机地结合起来, 建立了光学器件微振动模型。然后以神光II装置中的空间滤波器为研究对象, 分析了空间滤波器出射光角度的时间分布和空间分布。

关键词 光学器件; 光束传输; 微振动; 概率分布

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1120001

Analysis on Beam Directing Stability Problem Caused by Micro-Vibration of Optical Components

Liu Fang^{1,2} Xu Jia^{1,2} Zhang Yan^{1,2} Sun Mingying^{1,2} Zhu Jianqiang¹

(¹ Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A dynamic method is proposed to analyze the beam directing stability in both time and space domains aiming at solving the expression of the effects caused by micro-vibrations of optical components. Based on the structural modal analysis and vibration effects caused by optical components, the vibrational models of optical components are built by combining structural modality and optical system. A spatial filter in SG-II facility is numerically simulated as an example based on the method, and the temporal distribution and spatial distribution are analyzed.

Key words optical devices; beam transmission; micro-vibration; probability distributions

OCIS codes 200.1130; 200.4880; 200.4860

1 引言

用于惯性约束聚变(ICF)实验的高功率激光装置是一个非常精密的大型光学系统,其光束指向稳定性对打靶精密物理实验有着巨大的影响。装置中,多路高功率光束需要经过长距离传输,最终聚集在一个微小的靶丸上,其精度要求达几十微米^[1,2]。由于受到环境振动、声波激励、风振或热应变等干扰,光束传输过程中的光学器件会产生相应的振动或蠕动,这些误差极大地影响了光束指向稳定性^[3],

降低了打靶的精度和实验成功率。为了提高美国国家点火装置(NIF)、神光II和神光III装置的光束指向稳定性,研究人员做了很多的研究,主要的思路是分析微振动的来源,根据光束聚焦到靶丸所需的精度,进一步反推出各种微振动所需达到的指标^[2,4~7];另外,一些新型隔振方法^[8]和测量稳定性的方法^[9]也被应用到类似的系统。但是,他们没有考虑各个器件之间的耦合关系。实际上,各个光学器件的微振动是动态过程,因此,对于惯性约束核聚

收稿日期: 2011-04-07; **收到修改稿日期**: 2011-06-20

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)资助课题。

作者简介: 刘芳(1985—),男,博士研究生,主要从事振动控制及振动对光学系统的影响等方面的研究。

E-mail: funlau@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等方面的研究。E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

变系统,聚集在靶丸上的光束位置也是时变的动态过程。而以上的研究方法都集中在空间方面,给出的只是静态的误差区间,不能描述光束在该误差区间内的动态分布规律。

本文提出一种在时空域内描述光学系统的动态方法,不仅可以表征光束静态的误差区间,而且可以描述光束在该区间内随时间的变化过程,从而更精确地描述光学器件微振动对光束指向稳定性的影响,并可以根据误差区间内的动态分布更细致地得到各光学器件的误差或稳定性要求。基于实际应用中结构模态分析及微振动对光束的影响,建立了单

个光学器件微振动的运动学模型,分析了光学器件扰动的时间分布。然后以神光II装置中的空间滤波器为研究对象,讨论了共焦双透镜光学系统中出射光束的指向稳定性。

2 光学器件微振动模型

神光II装置中的光束经过长距离传输聚集在靶室,如图1所示。由于大型光学系统的光学器件大部分安装在桁架上,桁架受到环境干扰,导致入射光束随时间变化,光束在目标位置来回移动,如图2所示。

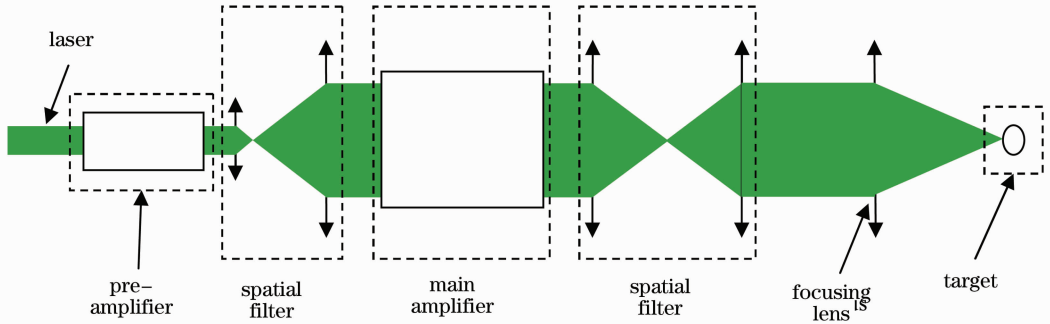


图1 神光II装置激光传输路径

Fig. 1 Laser transmission path in Shenguang (SG)-II facility

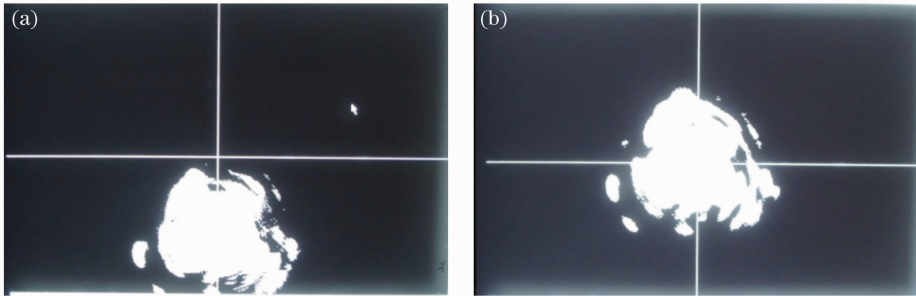


图2 光斑位置随桁架微振动而变化

Fig. 2 Position of optical spot varies as the optical truss vibrates

当桁架受到外界的激励时,将根据其自身的模态做相应的运动。对于安装在地面的桁架,根据地面振动的特点,可忽略桁架中幅度相对较小的高阶模态^[10],桁架可以简单地根据其一阶摆动模态(固有频率为 ω_p)和一阶扭转模态(固有频率为 ω_t)来响应外界激励。当受到外界冲击或者白噪声微振动时,桁架的运动是频率为 ω_p 的简谐摆动和频率为 ω_t 的简谐扭转运动的合成。对应的,安装在桁架上的光学器件则是频率为 ω_p 的简谐平动和频率为 ω_t 的简谐转动的合成。但是实际应用中桁架引起的透镜转动对近轴光束影响很小,桁架引起的反射镜平动对近轴光束影响很小^[9],对于单类光学器件,只需考虑一个模态,为简单起见,本文只考虑频率为 ω_p 的摆动

模态。

光学器件的简谐平动如图3所示,其中 x 方向的振动对应的固有频率为 ω_p ,振幅为 a ,初始相位为 φ ,则对光束传输有关的光学器件在 x 方向的微振动 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = a \sin(\omega_p t + \varphi), \quad (a > 0) \quad (1)$$

用 X 描述光学器件在 x 方向偏离理想位置的分布,根据概率的定义,光学器件在区间 $[x, x + dx]$ 的概率 $dP_1(x, x + dx)$ 是很长一段时间 t_a 内,光学器件的位置在 $[x, x + dx]$ 区间的的时间 t_{dx} 与整段时间 t_a 的比值。对应于图4所示的简谐运动,有

$$dP_1(x, dx) = \frac{dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4 + \dots}{t_a}. \quad (2)$$

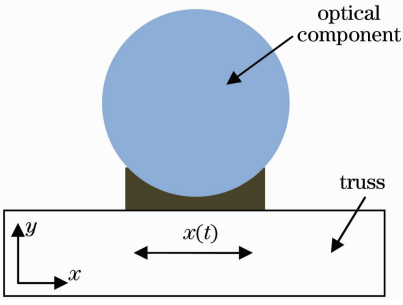


图 3 光学器件平移示意图

Fig. 3 Schematic of optical component's translation

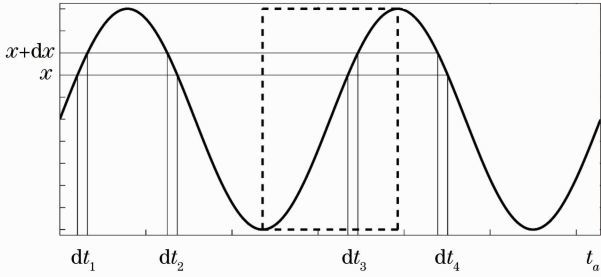


图 4 正弦运动概率计算示意图

Fig. 4 Schematic of probability calculation for sinusoidal motion

根据简谐运动的对称性,只需考虑粗线框内的半个周期,(2)式可以简化为

$$dP_1[x, dx] = \frac{dt_3}{T/2}, \quad (3)$$

式中 T 为简谐运动周期。

根据(1)式,有

$$dt_3 = \frac{dx}{\omega_p a \cos(\omega_p t + \varphi)} = \frac{dx}{\omega_p \sqrt{a^2 - x^2}}, \quad x \in [-a, a], \quad (4)$$

代入(3)式得

$$dP_1(x, x + dx) = \frac{dx}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}, \quad x \in [-a, a]. \quad (5)$$

进一步得到 X 的概率密度为

$$f_1(x) = \frac{dP_1}{dx} = \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}}, \quad x \in [-a, a]. \quad (6)$$

在实际应用中,关心的是光学器件偏离平衡位置的距离,并不关心它是从哪个方向偏离的,因此,常用 $X_d = |X|$ 来描述光学器件偏离中心距离的分布, x_d 为其中的某个值,由(6)式可得 X_d 的概率和概率密度分别为

$$P_{1d}(x_d) = \int_{-x_d}^{x_d} \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} dx = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{x_d}{a}, \quad x_d \in [0, a], \quad (7)$$

$$f_{1d}(x_d) = \frac{dP_{1d}(x_d)}{dx_d} = \frac{2}{\pi \sqrt{a^2 - x_d^2}}, \quad x_d \in [0, a]. \quad (8)$$

对于相应的简谐转动,可以得到类似的结论。

归一化后(7),(8)式的曲线分别如图 5(a),(b)所示。由图 5 可知,对于单个光学器件:

- 1) 在平衡位置附近,光学器件的概率密度基本相同,因此在平衡的附近(小于 2/3 倍的振幅)光学器件的分布可以近似为均匀分布;
- 2) 概率密度随偏离平衡位置的距离增加而增加,意味着光学器件偏离理想位置的概率比靠近理想位置的概率大;
- 3) 受到微振动的影响,光学元器件处在理想位置附近的概率大大降低,影响了光束指向性。

计算可知,偏移量小于振幅一半的概率仅 $P_{1d}(0.5a) = 1/3$ 。

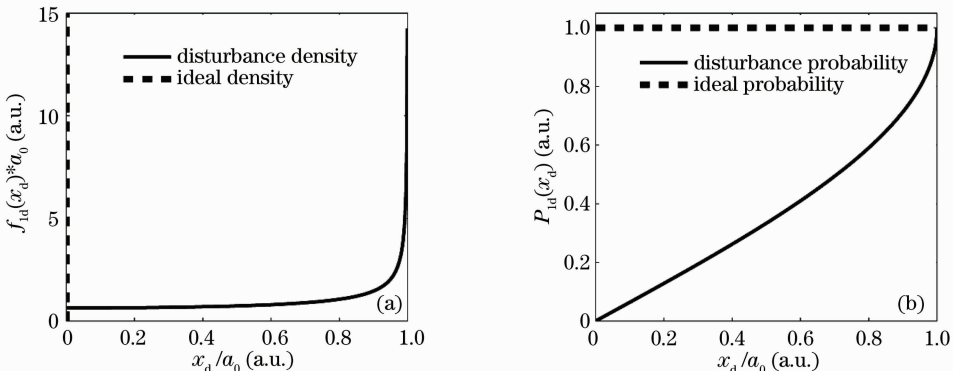


图 5 归一化后光学器件距离分布的(a)概率密度和(b)概率

Fig. 5 Normalized distribution of distantial (a) density and (b) probability of an optical component

考虑光学器件对近轴光学系统的影响,可以将光学器件偏离理想光轴位置的距离和角度看成动态失调量。具有失调的光学系统的光束描述,一般通过在没有失调的光学系统(理想光学系统)光束描述的基础上加上失调量对光学系统光束的影响来实现。对于二维光学系统,可以通过增广矩阵来描述^[11]:

$$\begin{bmatrix} x' \\ \theta' \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & E(t) & F(t) \\ C & D & G(t) & H(t) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $\begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}$ 是输入光信息; $\begin{bmatrix} x' \\ \theta' \end{bmatrix}$ 是输出光信息;

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 是光学器件在理想光轴位置的传输矩阵,只与光学系统参数相关; $\begin{bmatrix} E(t) & F(t) \\ G(t) & H(t) \end{bmatrix}$ 是由于光学器件偏离理想光轴产生的失调量引起的光束的变化量,它包括结构安装误差等静态失调和光学器件微振动引起的动态失调,与光学系统参数和失调量相关。

3 神光 II 装置空间滤波器光学系统

3.1 滤波器结构

神光 II 装置中某扩束比为 m 的空间滤波器如图 6 所示。入射光束依次经过空间滤波器中共焦的薄透镜组 L_1, L_2 。

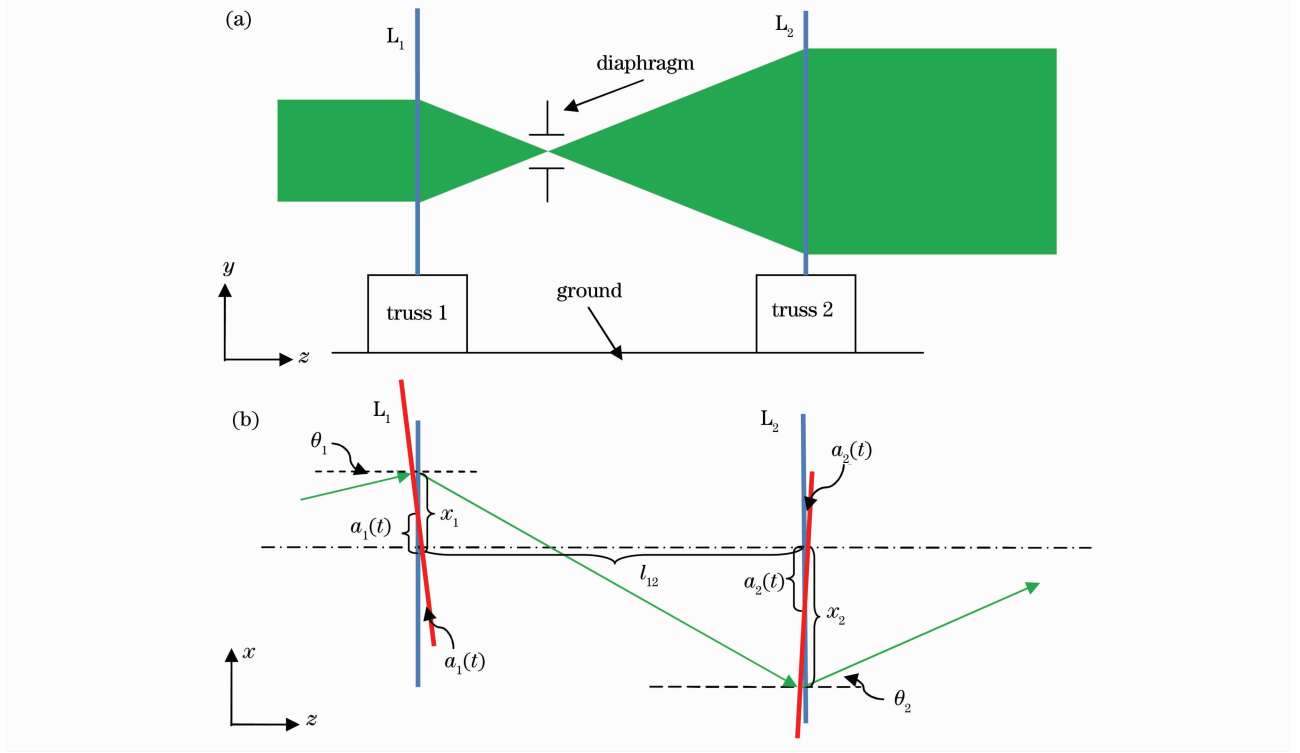


图 6 神光 II 装置空间滤波器示意图。(a)前视图;(b)俯视图

Fig. 6 (a) Front and (b) top views of spatial filter in SG-II facility

根据光路传输原理^[8],考虑其中一束光,则 L_2 的出射光可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - l_{12}/f_1 & l_{12} & l_{12}a_1(t)/f_1 & 0 \\ -(1/f_1 + 1/f_2 - l_{12}/f_1f_2) & 1 - l_{12}/f_2 & a_1(t)/f_1 + a_2(t)/f_2 - l_{12}a_1(t)/f_1f_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$l_{12} = f_1 + f_2, \quad (11)$$

$$f_2 = mf_1, \quad (12)$$

式中 $\begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ 分别为 L_1 的入射光和 L_2 的出射光信息; f_1, f_2 分别是 L_1, L_2 的焦距; l_{12} 是 L_1 到 L_2 的距离; $a_1(t), a_2(t)$ 分别是 L_1, L_2 因微振动偏离理想光轴位置随时间的变化关系。由(10)式可知,增广矩阵和 $a_1(t)$

及 $\alpha_2(t)$ 无关,说明薄透镜的角度失调对光束指向稳定性没有影响。

根据第 2 节的建模,假设 L_1, L_2 的微振动可以表示为

$$\begin{bmatrix} a_1(t) \\ \alpha_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \sin(\omega_{11}t + \varphi_{11}) + a_{11} \\ \alpha_{10} \sin(\omega_{12}t + \varphi_{12}) + \alpha_{11} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} a_2(t) \\ \alpha_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{20} \sin(\omega_{21}t + \varphi_{21}) + a_{21} \\ \alpha_{20} \sin(\omega_{22}t + \varphi_{22}) + \alpha_{21} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中 $a_1(t), a_2(t), \alpha_1(t)$ 及 $\alpha_2(t)$ 分别为 L_1, L_2 的平动和转动的运动位移和偏转角; $a_{10}, a_{20}, \alpha_{10}$ 和 α_{20} 分别为 L_1, L_2 的平动和转动振幅; $a_{11}, a_{21}, \alpha_{11}$ 和 α_{21} 分别为 L_1, L_2 偏离光轴位置和角度的静态失调量; $\omega_{11}, \omega_{21}, \omega_{12}$ 及 ω_{22} 分别为 L_1, L_2 的平动和转动频率; $\varphi_{11}, \varphi_{21}, \varphi_{12}$ 及 φ_{22} 分别为 L_1, L_2 的平动和转动初始相位。

考虑 L_2 出射光角度的变化, 联立 (10)~(14) 式得

$$\theta_2 = -\frac{1}{m}\hat{a}_1 \sin(\omega_{11}t + \varphi_{11}) + \frac{1}{m}\hat{a}_2 \sin(\omega_{21}t + \varphi_{21}) - \frac{1}{m}\theta_1 + \frac{1}{m}(-\hat{a}_{11} + \hat{a}_{21}). \quad (15)$$

式中 $\hat{a}_1 = a_{10}/f_1, \hat{a}_2 = a_{20}/f_1$ 分别为薄透镜 L_1, L_2 的微振幅当量; $\hat{a}_{11} = a_{11}/f_1, \hat{a}_{21} = a_{21}/f_1$ 分别为薄透镜 L_1, L_2 的静态失调当量。

由(15)式可知, L_2 的出射光角度实际是以 $-\frac{1}{m}\theta_1 + \frac{1}{m}(-\hat{a}_{11} + \hat{a}_{21})$ 为中心角度的来回振荡。其出射光信息由三部分组成: 一部分为静态量 $-\frac{1}{m}\theta_1$, 它是在薄透镜无失调情况下出射 L_2 的角度, 称为理想出射角度; 一部分是静态量 $\frac{1}{m}(-\hat{a}_{11} +$

$\hat{a}_{21})$, 它是由于光学器件在安装过程中的误差造成的, 为静态误差, 可以通过调整光路消除; 一部分是动态量 $-\frac{1}{m}\hat{a}_1 \sin(\omega_{11}t + \varphi_{11}) + \frac{1}{m}\hat{a}_2 \sin(\omega_{21}t + \varphi_{21})$, 它由 L_1, L_2 的微振动引起, 是影响光束指向性最重要的部分。由于安装引起的静态误差可以通过进一步调整消除, 因此, 本文为了简化分析, 安装误差不予考虑, 即 $a_{11} = 0, a_{21} = 0$, (15)式可以简化为

$$\theta_2 = -\frac{1}{m}\hat{a}_1 \sin(\omega_{11}t + \varphi_{11}) + \frac{1}{m}\hat{a}_2 \sin(\omega_{21}t + \varphi_{21}) - \frac{1}{m}\theta_1. \quad (16)$$

用 A_1, A_2 分别表示 L_1, L_2 的当量位移的分布, Θ_2 表示光束出射 L_2 时角度偏离理想角度绝对值的分布, 则

$$\Theta_2 = \left| \frac{1}{m}A_1 - \frac{1}{m}A_2 \right|. \quad (17)$$

在以下的数值分析中, 取 $m = 2.45^{[6]}$ 。

3.2 两个薄透镜相关情况

当 L_1, L_2 直接通过刚性结构相连接时或者受到同一个激励源激励, L_1, L_2 的振动频率一致, 相位差恒定, 此时, 称 L_1, L_2 是相关的。(16), (17)式可以简化为

$$\theta_2 = \frac{1}{m}\hat{a}_0 \sin(\omega_1 t + \varphi_{11} + \Delta\varphi) - \frac{1}{m}\theta_1, \quad (18)$$

$$\hat{a}_0 = \sqrt{\hat{a}_2^2 + \hat{a}_1^2 - 2\hat{a}_1\hat{a}_2 \cos \Delta\varphi}. \quad (19)$$

式中 $\Delta\varphi = \varphi_{21} - \varphi_{11}$ 是 L_1, L_2 的微振动相位差; $\omega_1 = \omega_{11} = \omega_{21}$ 是 L_1, L_2 的微振动频率; $\Delta\gamma = \arcsin\left[\frac{\hat{a}_2 \sin \Delta\varphi}{\hat{a}_0}\right]$ 。由(18), (19)式可知, 出射光的角振幅为 a_0/m , 对比(18)式和(1)式, L_2 出射光的角度分布如图 7 所示。

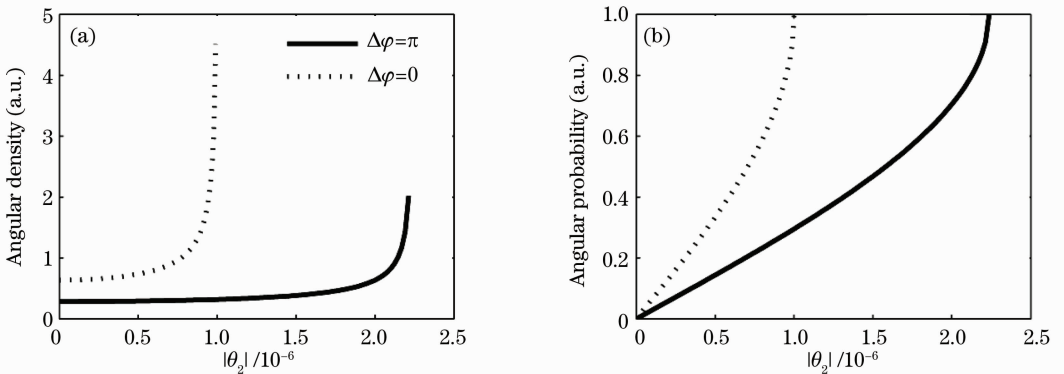


图 7 L_1, L_2 相关情况下, $m = 2.45$ 时 Θ_2 的 (a) 概率密度和 (b) 概率

Fig. 7 (a) Probability density and (b) probability of Θ_2 when $m = 2.45$ and L_1, L_2 are correlated

3.3 两个薄透镜不相关情况

当 L_1, L_2 通过不同的桁架支撑时,在白噪声激励下, L_1, L_2 的振动频率不同,此时 L_1, L_2 不相关,

即 A_1, A_2 相互独立。结合(6)式和(17)式,得到 Θ_2 的概率密度为^[12]

$$g(\theta_2) = \frac{2}{\pi^2} \int_{\max(-m\theta_2 - a_2, -a_1)}^{\min(-m\theta_2 + a_2, a_1)} \frac{1}{\sqrt{(\hat{a}_1^2 - t^2) \left[\frac{1}{m^2} \hat{a}_2^2 - \left(\theta_2 + \frac{1}{m} t \right)^2 \right]}} dt, \quad \theta_2 \in C, \quad (20)$$

$$C = [0, \theta_{\max}], \quad (21)$$

$$\theta_{\max} = \frac{1}{m} (\hat{a}_1 + \hat{a}_2), \quad (22)$$

式中 θ_{\max} 即为光束偏离理想位置的最大角度。 θ_2 的取值区间 C 即为 L_2 出射光偏离理想角度大小的空间分布, $g(\theta_2)$ 即为 L_2 出射光偏离理想角度大小的时间分布。

做出 L_2 出射光在不同情况下 Θ_2 分布曲线如图 8 所示。

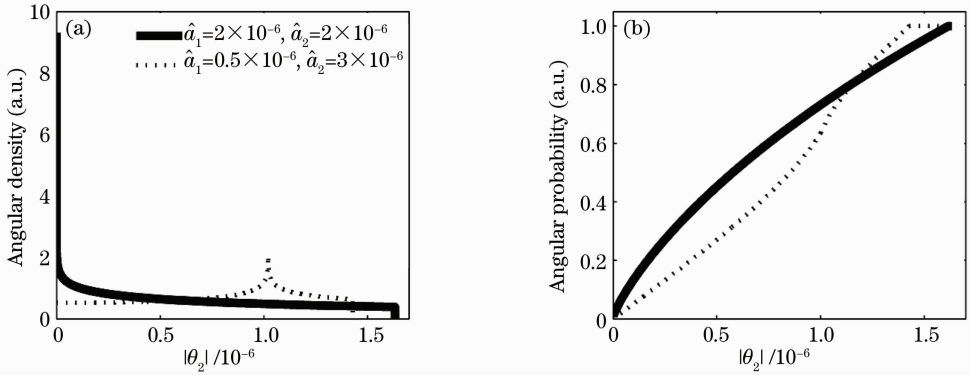


图 8 L_1, L_2 不相关情况下, $m=2.45$ 时 Θ_2 的(a)概率密度和(b)概率

Fig. 8 (a) Probability density distributions and (b) probability distributions of Θ_2 when $m=2.45$ and L_1, L_2 are uncorrelated

3.4 讨 论

当透镜 L_1, L_2 相关时,由(19)式和图 7 可知,当 L_1, L_2 的微振动相位相同时,出射光角振幅最小,相应的角振幅为 $\frac{|\hat{a}_2 - \hat{a}_1|}{m}$, 并且若同时满足 $\hat{a}_1 = \hat{a}_2$ 即 L_1, L_2 的微振幅相等时,角幅度为 0,即 L_2 的出射光无动态的角度摆动。因此,对于 L_1, L_2 相关的空间滤波器系统,要通过调整机械结构阻尼等优化结构模态的方法尽量使 L_1, L_2 的振动相位一致且微振幅相等。

当 L_1, L_2 不相关时,由图 8(a)可知,由于两个薄透镜的微振动, Θ_2 的概率密度有一个峰值。根据第二节的结论,单个光束简谐运动,其在两端的概率最大,因此联合分布概率最大值应该出现在两个透镜同时出现概率最大值的角度,有两种情况:1)两个透镜位置出现在同侧端点;2)两个透镜出现在异侧端点。对于透镜在同侧的情况,根据(16)式,两值相减,故在 $\frac{|\hat{a}_1 - \hat{a}_2|}{m}$ 处,而对于两透镜在异侧的情

况,根据(16)式,则两值相加,在 $\frac{\hat{a}_1 + \hat{a}_2}{m}$ 处。由于 $\frac{\hat{a}_1 + \hat{a}_2}{m}$ 处必须是两个透镜在异侧的最外端才能出现,而 $\frac{|\hat{a}_1 - \hat{a}_2|}{m}$ 处除了两透镜在同侧端点处满足外,其他只需满足 $a_1 - a_2 = \pm(\hat{a}_1 - \hat{a}_2)$ 情况的都在 $\frac{|\hat{a}_1 - \hat{a}_2|}{m}$ 处,因此在 $\frac{|\hat{a}_1 - \hat{a}_2|}{m}$ 处的概率比在 $\frac{\hat{a}_1 + \hat{a}_2}{m}$ 处的概率高,所以, Θ_2 的概率密度的峰值出现在 $\frac{|\hat{a}_1 - \hat{a}_2|}{m}$ 处。当 $\hat{a}_1 = \hat{a}_2$ 时, Θ_2 的概率密度峰值出现在理想位置。

图 8(b)显示,虽然实线情况的误差角度范围(空间分布)比虚线情况大,但是在偏离理想角度较小的情况下,实线的情况比虚线的情况所占的概率要高,即在偏离角度较小的情况下,实线对应的情况比虚线更好。因此,要提高光束指向稳定性,不仅要降低各个光学器件的微振幅,各个光学器件微振幅

的相对分布也有一定的关系,对于空间滤波器等共焦透镜系统,在保证降低微振幅的前提下还可以通过调整机械结构阻尼或优化结构模态等方法尽量使得各个光学器件的微振幅幅度相等。

4 结 论

运用新提出的光束指向稳定性的分析方法,对神光Ⅱ装置中空间滤波器系统的分析,得出如下结论:

1) 薄透镜相对光轴的角度失调对光束指向稳定性无影响;

2) 当空间滤波器的两个透镜是通过刚性结构连接在一起时,可以对刚性结构进行结构模态优化如增大刚性结构厚度或者提高阻尼等,使得两个透镜所处位置的微振动相位一致,微振幅尽量接近;

3) 当空间滤波器的两个透镜分别放置在不同的桁架上时,首先应该尽量增大桁架刚度和阻尼使得桁架振动的幅度尽量低,其次,要尽可能地调节两个桁架振动的幅度使其一致,以提高光束出现在理想出射角度的概率。

在神光Ⅱ装置光学系统中,因为环境干扰(气流、车辆和行人等)引起的随机动态扰动,是影响光束指向稳定性最关键的部分。本文以神光Ⅱ装置中空间滤波器为模型分析光束指向稳定性的方法,可以推广到神光Ⅱ装置中的其他光学系统,将神光Ⅱ装置光学系统分成若干个透镜、反射镜组合子系统进行分析,从而更加精确地描述动态扰动对神光Ⅱ装置光束指向稳定性的影响。

致谢 非常感谢刘德安研究员、刘志刚研究员及张艳丽博士在论文撰写过程中给予的指导和帮助。

参 考 文 献

1 D. J. Trummer, R. J. Foley, G. S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:

363~371

- 2 Huang Hongbiao, Zeng Taiying, Liu Zhigang *et al.*. Stability design and analysis of target chamber system in SG II upgrade facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1986~1990
黄宏彪, 曾台英, 刘志刚等. 神光Ⅱ升级装置中靶室系统的稳定性设计与分析 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1986~1990
- 3 E. A. Swensen, A. A. Barron, C. R. Farrar *et al.*. Random vibration sensitivity studies of modeling uncertainties in the NIF structures [C]. *SPIE*, 1996, **3089**: 1172~1180
- 4 G. L. Tietbohl, S. C. Sommer. Stability design considerations for mirror support systems in ICF lasers [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 649~660
- 5 S. C. Sommer, E. S. Bliss. NIF Systems Engineering Systems Control Engineer [R]. Chapter 11 of Beam Positioning: NIF Laser System Performance Ratings. UCRL-ID-131115, LLNL, CA, July 1998
- 6 Zeng Taiying. Stability Analysis for Some Key Elements and Systems on High Power Laser Driver in ICF [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 55~78
曾台英. 高功率激光驱动器中若干关键器件及部分系统稳定性分析研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2007. 55~58
- 7 Zhang Junwei, Zhou Yi, Zhou Hai *et al.*. Influences of switchyard mirror mount on beam direction under micro vibration excitation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(5): 779~783
张军伟, 周 忆, 周 海等. 微振动激励作用下编组站镜架对光束指向的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(5): 779~783
- 8 F. Liu, Z. G. Liu, X. Y. Pang *et al.*. Negative-stiffness vibration isolation [C]. *Nanoelectronics Conference*, 2010, 154~155
- 9 Wang Dahui, Zhao Jun, Zhao Xueqing *et al.*. Measurement and analysis on structure stability of optical mirror mounts with small aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 308~311
王大辉, 赵 军, 赵学庆等. 小口径光学支撑镜架结构稳定性测试及分析 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 308~311
- 10 Ou Jinping, Wang Guangyuan. Random Vibration of Structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998
欧进萍, 王光远. 结构随机振动 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- 11 Lü Baida. Laser Optics: Laser Beam Propagation and Beam Quality Control [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 339~346
吕百达. 激光光学: 激光束的传输变换和光束质量控制 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 339~346
- 12 Chen Xicu. Probability and Statistics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004. 89~94
陈希孺. 概率论与数理统计 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 89~94

栏目编辑: 谢 婧