

基于动态分布的高功率激光器光束指向稳定性分析

徐嘉^{1,2} 刘芳^{1,2} 杨朋千^{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 将光束动态分布的概率分析加入到传统稳定性设计过程之中,提出了一种基于动态分布的光束稳定性分析方法,并以大型激光驱动器中的空间滤波器为分析对象,讨论了在不改变光学参数的基础上,如何利用该方法对滤波器的结构特性进行优化。结果表明,该方法能够对元件间的相对参数值提出要求,有别于传统方法仅着眼于提升单个元件的稳定性设计思路。与传统方法共同运用,同时对光束的动态范围和分布类型进行优化,能够进一步改善系统的稳定性,为装置运行提供稳定可靠的基础平台。

关键词 激光器;光束稳定性;高功率激光器;概率分布;振动

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1002001

Beam Pointing Stability Analysis Based on Dynamic Distribution for High Power Laser Facility

Xu Jia^{1,2} Liu Fang^{1,2} Yang Pengqian^{1,2} Zhu Jianqiang¹

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

Abstract The probability analysis of dynamic distribution of beam positioning in high power laser facility is added to traditional stability design, and a stability analysis method based on dynamic distribution is proposed. Taking spatial filter in large laser facility as object, we discuss how to optimize its structural parameters by this method, with its optical parameters being constant. This method is aiming to constraint the relative stability of components in spatial filter, and it is different from the traditional method which is focused on the absolute stability of single components. Together with the traditional method, optimization can be achieved in dynamic range and distribution pattern of the beam at the same time, and a stable and reliable structure will be provided for facility operation.

Key words lasers; beam pointing stability; high power laser; probability distribution; vibration

OCIS codes 140.3295; 220.4880; 080.3620; 080.2730

1 引言

随着惯性约束核聚变(ICF)技术的发展,快点火技术逐渐受到关注^[1]。其将压缩与点火分离的思想,在大大降低对驱动激光的能量要求的同时,提高了对装置光束指向稳定性的要求,使得光束指向的稳定性成为制约打靶命中率的主要性能指标^[2]。为

此,需要对装置的结构进行稳定性设计和优化,通常需要经过以下两个步骤:首先对整体装置的稳定性要求进行细致分配^[3,4],将其分解成单个光学元件的设计指标;而后再利用这些指标指导元件的设计和优化^[5~8]。然而,这种做法实质上仅针对单一元件进行了优化设计,具有一定的局限性。首先,不适

收稿日期: 2011-04-08; 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项目(2010DFB70490)资助课题。

作者简介: 徐嘉(1984—),男,博士研究生,主要从事光机结构稳定性分析与设计等方面的研究。

E-mail: xujia008@gmail.com

导师简介: 朱健强(1964—),男,研究员,主要从事激光驱动器总体光学设计、结构设计等方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

用于分析整体装置的光束指向性误差。光束指向性误差指的是光束偏离理想位置的偏差,具体表现为光束空间位置的动态变化信息^[9]。但传统方法仅对这一动态变化的统计量进行讨论,因此不能用于建立从单元结构特性到光束指向分布的分析模型。其次,不适用于优化整体装置的结构稳定性。由于传统方法未能建立起整体装置光束指向误差的分析模型,只能对元件结构逐一进行稳定性分析和优化,这就忽视了元件之间的相互关系以及子系统内在的规律性,所生成的方案往往不是最优结果。最后,ICF激光装置正朝着更高打靶精度、更多元件的方向发展,将会对结构稳定性提出更高的要求,然而单元件的结构稳定性优化却渐渐进入设计瓶颈。要进一步提升性能,更应该从整体系统的层面进行改进。

为此,本文在原有方法的基础上做了新的探索,用概率密度分布代替指向误差的方差值来描述光束空间位置的动态变化情况。尝试将光束指向性误差的动态分布加入到ICF装置光束稳定性的分析过程中去,以期实现系统的整体优化,为进一步提升装置的光束稳定性提供理论基础。

2 基于动态分布的光束指向稳定性

针对单个元件的传统稳定性分析技术路线如图1所示。光束指向稳定性用光束偏离理想位置的方差值(σ^2)衡量,根据ICF装置内元件排布和元件定位误差分析,将稳定性指标分解成每个光学元件的设计指标(σ_i^2),用于指导元件的结构设计,优化结构特征参数(ω_i, ζ_i, \dots)。

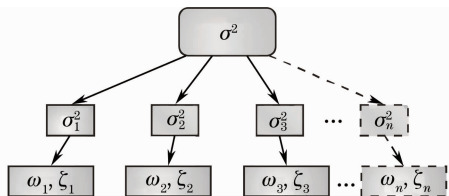


图1 ICF装置结构稳定性分析技术路线

Fig.1 Structural stability analysis in ICF facility

基于动态分布的光束指向稳定性分析方法,是利用概率密度分布(Φ)代替误差的方差值(σ^2)来描述光束空间位置的动态变化情况,如图2所示。分析光束通过单元件和多元件之后弹着点的概率密度分布(φ_i 和 Φ_n),建立起光束指向误差的分析模型,并利用它来分析总体分布(Φ)与结构特性(ω_i, ζ_i, \dots)之间的联系。

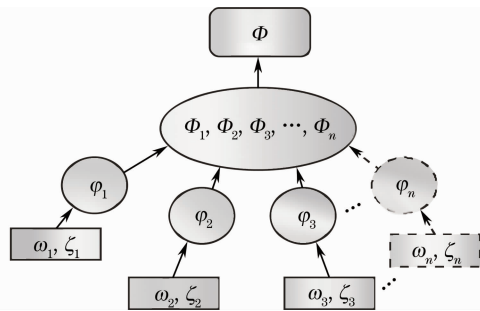


图2 基于动态分布的光束稳定性分析

Fig.2 Dynamic beam stability analysis

3 单元件光束指向的动态分布

振动微扰下,光学元件的空间位置会随时间发生动态变化,使得光束的传输偏离理想位置而产生误差,如图3所示。通常将光学元件 L 的位移分解为其光轴 z' 偏离理想光轴 z 的线位移 $\epsilon(t)$ 和角位移 $\alpha(t)$ 。图中, $\begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$ 为入射参考面 P_1 处的光线矢量; $\begin{bmatrix} x_2(t) \\ \theta_2(t) \end{bmatrix}$ 为出射参考面 P_2 处的光线矢量; $\begin{bmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}$ 为理想情况下,出射参考面 P_2 处的光线矢量。

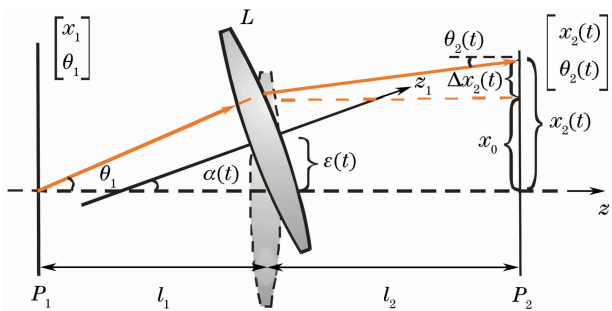


图3 振动微扰下单元件的光束传输

Fig.3 Beam propagation through single lens under vibration perturbation

理想情况下,传输过程(图3虚线)可表示为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为理想情况下 P_1 与 P_2 间的系统传输矩阵,且

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在振动影响下,光学元件偏离理想位置,系统的传输矩阵可以用光轴失调系统的增广矩阵公式^[10]来表示。在考虑位移量 $\epsilon(t)$ 和 $\alpha(t)$ 的影响下,(2)

式可转化为如下 4×4 增广矩阵,其描述了振动微扰下光学系统的光束传输特性:

$$\begin{bmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & \boldsymbol{\varepsilon}(t)/f & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

相应的传输过程表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_2(t) \\ \boldsymbol{\theta}_2(t) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \boldsymbol{\theta}_1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

无论系统内的元件数目多少,都可用(4)式来描述振动微扰下系统的光束传输过程,区别在于 A, B, C, D, E, F, G, H 数值的不同。写成更一般的形式即

$$\begin{cases} \mathbf{x}_2(t) = (A\mathbf{x}_1 + B\boldsymbol{\theta}_1) + (E + F) = \mathbf{x}_0 + (E + F) \\ \boldsymbol{\theta}_2(t) = (C\mathbf{x}_1 + D\boldsymbol{\theta}_1) + (G + H) = \boldsymbol{\theta}_0 + (G + H) \end{cases}. \quad (5)$$

在分析光束的动态分布时,两种位移的分析过程具有很强的相似性,因此仅用线位移矢量 $\mathbf{x}_2(t)$ 来说明光束动态分布的分析过程。

从图 3 和 (5) 式都可以看出, $\mathbf{x}_2(t)$ 由 \mathbf{x}_0 、 $\Delta\mathbf{x}_2(t)$ 两部分组成,则由(5)式可知

$$\Delta\mathbf{x}_2(t) = \mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_0 = E + F, \quad (6)$$

式中 $\Delta\mathbf{x}_2(t)$ 为光线偏离理想位置 \mathbf{x}_0 处的线位移,是光束运动去除静态成分后的动态部分,以下提到的位移皆表示偏离理想位置 \mathbf{x}_0 处的线位移。

由(3)式可求得各参数值为

$$\begin{cases} E = \frac{l_2}{f}\boldsymbol{\varepsilon}(t) \\ F = H = 0 \\ G = \frac{1}{f}\boldsymbol{\varepsilon}(t) \end{cases}. \quad (7)$$

代入(6)式得

$$\Delta\mathbf{x}_2(t) = E + F = \frac{l_2}{f}\boldsymbol{\varepsilon}(t). \quad (8)$$

可见,剔除静态成分的影响后,光束动态分布 $\Delta\mathbf{x}_2(t)$ 仅与透镜自身的位移响应 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 有关(光学参数 l_2/f 为一待定常数),而与其他参数无关。可以认

为光学系统将结构的运动 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 线性放大到光束在观察面 P_2 上的光束弹着点运动 $\Delta\mathbf{x}_2(t)$ 。因此,对光束位置的概率分布分析可以等价为对结构位移响应的概率分布分析。

对于任意一个工作在白噪声激励下的光学元件 i ,其一阶模态下的模态响应对系统物理坐标下的响应具有显著贡献,可以将元件的位移响应函数简化为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i(t) = a_i \sin(\omega_i t + \psi_i), \quad (9)$$

式中 a_i, ω_i, ψ_i 分别为元件 i 运动的振幅、固有频率以及初始相位。

同样将任一元件 i 引起的观察面 P_2 处的光束弹着点位移表达成更为通用的形式,并用新符号 $\xi_i(t)$ 表示为

$$\Delta\mathbf{x}_2(t) = \xi_i(t) = m_i a_i \sin(\omega_i t + \psi_i), \quad (10)$$

式中 $\xi_i(t)$ 为弹着点的位移, m_i 是由光学参数决定的常数。(10)式中 $\xi_i(t)$ 的相应的概率密度为^[11]

$$\varphi_i(\xi_i) = \frac{1}{\pi \sqrt{(m_i a_i)^2 - \xi_i^2}}, \quad -|m_i a_i| \leq \xi_i \leq |m_i a_i| \quad (11)$$

(11)式所表示的概率分布如图 4 所示(其中, $u_i = m_i a_i$),其横轴为偏离理想位置的位移 ξ_i ,纵轴为相应的概率密度,此类分布常被称为反正弦分布。

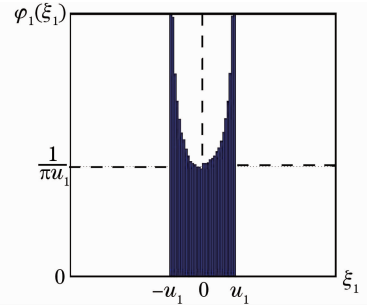


图 4 透镜 L 引起的 P_2 处弹着点位移的概率分布
Fig. 4 Probability distribution of displacements in P_2 induced by a lens L

以上通过分析失调光学系统的传输特性和元件结构的位移响应,获得了单元件系统光束弹着点的概率密度分布 φ_i 。通过类似的分析过程,可以建立起结构运动与光束指向性之间的关系,并由此获得光束动态分布的更多细节。

4 空间滤波器光束指向的动态分布

大型高功率激光核聚变装置中,空间滤波器的成像作用无论是从几何光学^[12],还是从物理光学^[13]的角度,都已经有了完善的理论解释。它的工作原理已为人们所熟知,它的光学结构也非常简单,即一

对共焦透镜 L_1 、 L_2 和一个加在公共焦点处的滤波小孔,如图 5 所示。

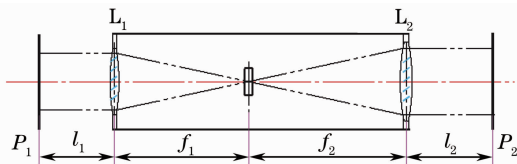


图 5 空间滤波器示意图

Fig. 5 Spatial filter

图中 P_1 面为前端传来的像传递中继面,在此级空间滤波器中可以看成一物面,它距 L_1 的距离为 l_1 ,两透镜焦距分别为 f_1 、 f_2 ,观察面 P_2 距 L_2 的距离为 l_2 。如图 6 所示,将透镜 i 的位移分解为偏离理想光轴的线位移 $\boldsymbol{\varepsilon}_i(t)$ 和角位移 $\boldsymbol{\alpha}_i(t)$ 。

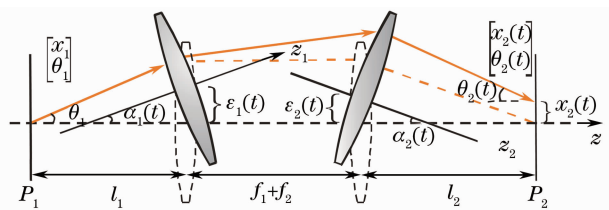


图 6 振动微扰下空间滤波器光路示意图

Fig. 6 Beam propagation through spatial filter under vibration perturbation

系统的传输增广矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & f_1 + f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/f_2 & 1 & \boldsymbol{\varepsilon}_2(t)/f_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} E = (1 - l_2/f_2 + f_2/f_1)\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) + (l_2/f_2)\boldsymbol{\varepsilon}_2(t) \\ F = 0 \end{cases}. \quad (13)$$

与单透镜分析式(6)式类似,将 P_2 处弹着点位移量分解成静态与动态两部分,其动态成分为

$$\Delta \boldsymbol{x}_2(t) = E + F = (1 - l_2/f_2 + f_2/f_1)\boldsymbol{\varepsilon}_1(t) + (l_2/f_2)\boldsymbol{\varepsilon}_2(t), \quad (14)$$

式中 $\Delta \boldsymbol{x}_2(t)$ 为观察面 P_2 处光束弹着点的总体动态位移,含 $\boldsymbol{\varepsilon}_1(t)$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_2(t)$ 的两个分量可以认为是由透镜

L_1 、 L_2 位移响应分别引起的 P_2 处的光束位移量。可见光束经过振动微扰的系统后,观察面上光束弹着点的位移是系统内各光学元件结构位移响应的线性叠加。将(10)式代入(14)式,得到双透镜系统光束动态位移为

$$\Delta \boldsymbol{x}_2(t) = \boldsymbol{\xi}_1(t) + \boldsymbol{\xi}_2(t) = u_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + u_2 \sin(\omega_2 t + \psi_2), \quad (15)$$

式中 $\boldsymbol{\xi}_1(t)$ 、 $\boldsymbol{\xi}_2(t)$ 分别表示观察面处由透镜 1 和透镜 2 位移响应引起的光束动态位移分量,且

$$\begin{cases} u_1 = m_1 a_1, u_2 = m_2 a_2 \\ m_1 = (1 - l_2/f_2 + f_2/f_1), m_2 = l_2/f_2 \end{cases}, \quad (16)$$

m_1 、 m_2 是与光学参数有关的常数量, a_1 、 a_2 是与元件位移响应的幅值,其值的大小与元件所处环境、元件结构特征值有关,下文将对其做详细分析。

类似地,可以获得 $\boldsymbol{\xi}_1(t)$ 、 $\boldsymbol{\xi}_2(t)$ 的概率密度分布图,如图 7 所示(假设 $u_2 \geq u_1$)。

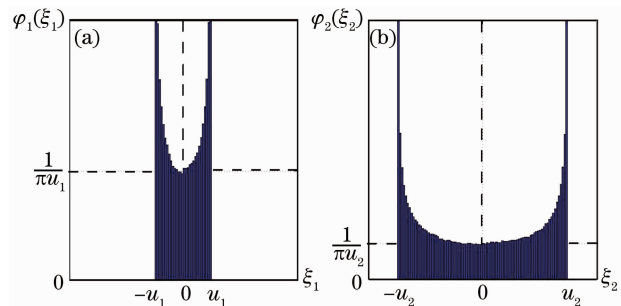


图 7 P_2 处光束位移分量的概率分布。(a) L_1 引起; (b) L_2 引起

Fig. 7 Probability distribution of displacement in P_2 .

(a) Induced by lens L_1 ; (b) induced by lens L_2

由于整体动态位移 $\Delta \boldsymbol{x}_2(t)$ 是位移分量 $\boldsymbol{\xi}_1(t)$ 、 $\boldsymbol{\xi}_2(t)$ 之和,想要获得光束通过双元件后弹着点的概率密度,则需要利用求随机变量之和的概率密度卷积公式^[14]。当 $\varphi_1(\xi_1)$ 、 $\varphi_2(\xi_2)$ 相互独立时, $\Delta \boldsymbol{x}_2(t)$ 的概率密度为

$$\Phi_2(\xi) = \varphi_1(\xi_1) * \varphi_2(\xi_2). \quad (17)$$

图 8(a)所示为 P_2 处弹着点动态位移的概率分布的一般情况。显然,分布的范围、极值等信息与幅值 u_1 、 u_2 密切相关。由(16)式可知, u_1 、 u_2 的大小又是由代表光学参数的 m_i 和代表结构参数的 a_i 共同决定的。当视 m_i 为常量时,可以通过调整元件的结构特性,改变观察面上光束的概率分布情况,进行以下优化:

1) 改变分布范围

光束分布的范围通常是传统稳定性分析的主要目标,它表示的是光束运动的动态范围。通常光学

系统的各项光学参数是在光学设计阶段预先设定好的,即 m_i 不变,可以通过优化结构减小 a_i 值,进而减小 u_i ,从总体上实现缩小光束漂移范围的目的,提高稳定性。

2) 优化分布类型

基于概率分布的稳定性设计,有别于传统稳定性设计中仅考虑分布范围的思路,进一步对概率分布的细节加以考虑,对光束的分布类型进行优化。

从图 8(a)可以看出,在 $\pm(u_2 - u_1)$ 两处会出现峰值,即概率最大处。若 $u_1 + u_2$ 保持不变,调整 u_1 、 u_2 的相对大小,就能够使得峰值位置发生改变。当 $u_2/u_1 = 1$ 时,分布如图 8(b) 所示。与图 8(a) 相比,其分布明显集中在小位移区域(靠近理想位置),光束的稳定性水平得到显著提升。以 $K = u_2/u_1$ 为自变量,以区间 $R = [-(u_1 + u_2)/3, (u_1 + u_2)/3]$ 内的概率值 $P_R(K)$ 为因变量,能够更为直观地看出 u_1 、 u_2 的相对大小对系统光束稳定性的影响,如图 9 所示。

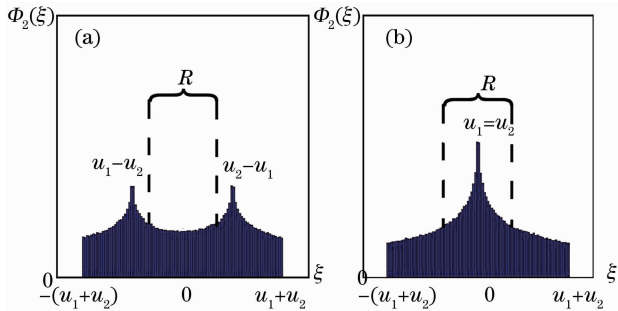


图 8 P_2 处光束总位移的概率分布。(a) 优化前;
(b) 优化后

Fig. 8 Probability distribution of displacements in P_2 .
(a) Before optimization; (b) after optimization

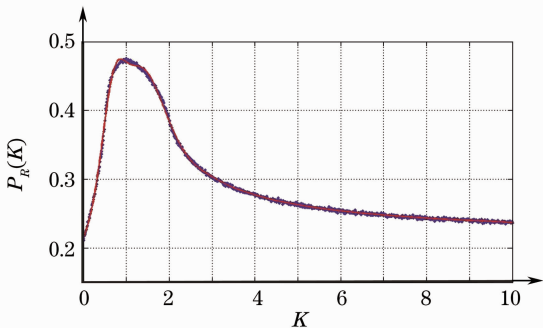


图 9 区间 $R = [-(u_1 + u_2)/3, (u_1 + u_2)/3]$ 内, 概率 $P_R(K)$ 随 $K = u_2/u_1$ 值的变化关系

Fig. 9 Probability in interval $R = [-(u_1 + u_2)/3, (u_1 + u_2)/3]$ versus the ratio $K = u_2/u_1$

可见,基于动态分布的光束稳定性分析提供了一种分析手段和优化思路。利用该方法,可以了解到光束通过空间滤波器系统后,光束位移的概率分

布细节,使得从整体上优化系统稳定性成为可能。同时,该分析考虑了系统内多个元件间的相互关系以及系统光路的特征,是一种更具规律性与针对性的分析方法。

5 基于光束动态分布的结构稳定性优化

在光束稳定性分析的基础上,提出基于光束动态分布的结构稳定性优化的概念。有别于传统稳定性设计以减小 u_1 、 u_2 值的绝对大小为目的,基于光束动态分布的结构稳定性优化为稳定性设计提供了一种新的思路——优化概率分布,即尽可能让光束的动态运动集中在其动态范围内偏离理想位置的一个小区间中。在此需要加以说明的是,基于概率分布的稳定性设计方法不能代替传统方法,而是对传统方法加以补充,是在现有基础上进一步完善稳定性设计。

从图 9 中不难看出,优化的方法是通过调整滤波器的光学参数和结构参数,使各参数间满足最优化关系式:

$$K = \frac{u_2}{u_1} = \frac{m_2 a_2}{m_1 a_1} = 1, \quad (18)$$

式中 m_2/m_1 是与系统前期光学设计相关的常数,为叙述简洁起见,取观察面 P_2 位于透镜 2 的焦平面处,并以“神光 II”装置某级空间滤波器的设计参数为例:

$$\begin{cases} f_2 = l_2 = 3372.5 \text{ mm} \\ f_1 = 2404.8 \text{ mm} \end{cases} \quad (19)$$

代入(16)式得

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{f_2}{f_1} = 1.4 \quad (20)$$

(18)式中, a_i 仅仅是元件的运动参数,不能够直接对透镜的结构优化起到指导作用。为此,利用单自由度系统在白噪声下的振动响应分析,建立起元件运动参数与结构特征参数之间的数学联系。白噪声下单自由度系统响应的方差值为^[15]

$$\sigma_i^2 \approx \frac{W_i}{8\zeta_i \omega_m^3}, \quad (21)$$

式中 σ_i^2 为元件在振动微扰下位移的方差值, W_i 为白噪声下环境的功率谱, ζ_i 为阻尼比, ω_i 为结构固有频率,它们是进行结构设计与优化的重要参数。

对于同类型的分布,其运动的幅值 a_i 与标准差 σ_i 之间的近似关系为^[11]

$$\frac{a_2}{a_1} \approx \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{1/2} \left(\frac{\zeta_1}{\zeta_2}\right)^{1/2} \left(\frac{\omega_{1n}}{\omega_{2n}}\right)^{3/2} = \left(\frac{K_W}{K_\zeta K_\omega}\right)^{1/2}, \quad (22)$$

式中 K_i 代表的是空间滤波器内两个透镜的特征参数值之比,其中 K_w 为环境的功率谱之比, K_ζ 为阻尼比之比, K_ω 为固有频率值之比。

从(18)式的最优化关系式可以知道当 $\frac{a_2}{a_1} = \frac{m_1}{m_2}$

时,系统具有最优的光束稳定性性能。将(20)和(22)式代入得

$$\left(\frac{K_w}{K_\zeta K_\omega^3}\right)^{1/2} = 1.4 \quad (23)$$

由于两透镜物理位置相近,受到的环境激励功率谱相当,有 $K_w \approx 1$,则类似系统的最优化约束式为

$$K_\omega = \left(\frac{C_M}{K_\zeta}\right)^{1/3} \text{ or } K_\zeta = \frac{C_M}{K_\omega^3}, \quad (24)$$

式中 C_M 是与系统光学参数有关的常数。此例中, $C_M = 0.51$ 。

至此,获得了(24)式所示的最优化约束式。它对影响结构动态性能的特征值,包括固有频率和阻尼比提出约束。与传统方法约束单元件固有频率、阻尼比值的绝对大小不同,(24)式是对元件之间特征值的相对大小,即固有频率比 K_ω 、阻尼比之比 K_ζ 做出约束。从前文的分析可以看出,这样做能够进一步对系统的光束指向稳定性性能进行优化。

6 结 论

就如何分析光束在弹着点位置的动态分布进行了讨论,提出一种基于动态分布的光束稳定性分析方法。利用该方法,能够对多个元件在振动微扰的影响下,光束指向的动态分布进行分析,并基于此类分析获得 ICF 激光装置中空间滤波器的光束稳定性最优化约束式,以此来指导结构的优化和设计。作为传统优化方法的补充,能够进一步改善系统的稳定性,为装置运行提供既稳定又可靠的基础平台。此外,该方法同样适用于其他类似系统,具有一定的通用性和实用意义,可望进一步推广应用于其他光学系统。

参 考 文 献

1 R. Kodama, P. Norreys, K. Mima *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition

[J]. *Nature*, 2001, **412**(6849): 798~802

2 Zhu Jianqiang, Zeng Taiying, Pang Xiangyang *et al.*. Primary discussion on engineering stability[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 16~23
朱健强,曾台英,庞向阳等. 工程稳定性中的几个基本问题[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 16~23

3 G. L. Tietbohl, S. C. Sommer. Stability design considerations for mirror support systems in ICF laser [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 649~660

4 S. C. Sommer, E. S. Bliss. Beam positioning[C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 112~135

5 Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1425~1428
赵东峰,戴亚平,尹宪华等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1425~1428

6 R. M. Hamilton, G. L. Tietbohl. Design of a ϕ 94 cm mirror mount for the Petawatt Project on Nova[R]. UCRL-ID-122342, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, October 1995

7 Hongbiao Huang, Taiying Zeng, Tao Zhang *et al.*. Research on the stability of large aperture mirror mounts using cross-flexure pivots in ICF lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5** (S1): S60~S63

8 Huang Hongbiao, Zeng Taiying, Zhang Tao *et al.*. Stability design and analysis of target chamber system in SGII upgrade facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1986~1990
黄宏彪,曾台英,张涛等. 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

9 Taiying Zeng, Hongbiao Huang, Tao Zhang *et al.*. A novel method of error analysis for opto-mechanical system based on space and time stability[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5** (S1): S9~S12

10 Lü Baida. Laser Optics Beam Describe, Transmission Transform and Light Cavity Technical Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003

11 Fang Zhongyan, Li Yan. Quality engineering and measuring technology foundation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002
方仲彦,李岩. 质量工程与计量技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

12 J. Hunt, J. Glaze, W. Simmons *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(13): 2053~2057

13 Fan Dianyuan. The Fresnel number in terms of ray matrix elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, **3**(4): 319~325
范滇元. 用光线矩阵元表达的菲涅耳数[J]. *光学学报*, 1983, **3**(4): 319~325

14 Liu Jianping. Engineering Mathematics: Linear Algebra, Probability and Mathematical Statistics[M]. Shanghai: ECUST Press, 2003
刘剑平. 工程数学: 线性代数、概率论与数理统计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2003

15 C. De Silva. Vibration and Shock Handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005