

基于主动吸振控制的神光装置打靶偏差研究

崔文辉^{1,2*}, 朱健强^{1**}, 何媛琦^{1,2}, 刘志刚¹, 樊全堂¹, 林炜恒^{1,2}, 董子铭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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了解决由振动引起的神光 II 系列装置光束指向精度变差的问题, 提出光机耦合主动吸振理论, 实现了控制参数的自适应调控和打靶偏差的更小输出。建立神光 II 系列装置全链路光束传输系统模型, 搭建空间滤波器光机耦合主动吸振系统, 设计自适应模糊 PID 控制器, 分析主动控制参数对输出光角响应峰值的影响并优化控制参数, 分析各装置空间滤波器打靶偏差在自适应模糊 PID 控制主动阻尼动力吸振作用后的控制效果。结果表明, 当主动阻尼动力吸振器调谐到最优阻尼时, 其打靶偏差较传统方法降低了 75.9%, 同时被动阻尼动力吸振器也具有降低打靶偏差的功能, 其打靶偏差较传统方法降低了 31% 左右。主动阻尼动力吸振器可根据打靶偏差大小调节速度反馈增益, 使控制效率在 31.0%~75.9% 范围内变化, 实现了自适应调节的反馈功能, 实验结果与预期一致。

关键词 物理光学; 光机耦合; 动力吸振; 神光 II; 打靶偏差

中图分类号 TP29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2401003

1 引言

惯性约束聚变(ICF)高功率激光装置是一个超精密、长光路、精密元件多的大科学工程, 任何由环境振动、声振动或热梯度引起的光学干扰都会造成该装置的瞄准精度降低, 从而降低瞄准成功率^[1]。近些年各国都在竞相建设拍瓦(PW)量级激光装置^[2], PW 激光装置的焦斑小、能量高, 对指向稳定性有更高要求^[3-4]。

近年来, 越来越多的科研团队关注光学装置的光束抖动抑制问题, Homoelle 等^[5]和 Mahdich 等^[6]均对振动影响下的光学系统失调影响光束质量进行分析。Wang 等^[7]提出一种通过校准光束指向路径和光束位置路径的光束校正原理, 利用旋转角度与位置敏感器件(PSDs)信号之间的关系来校正光束漂移。Chang 等^[8]提出一种基于长短期记忆网络(LSTM)和门控循环单元(GRU)的干扰分类方法, 通过选择合适的控制参数来达到光束指向稳定控制的目的。最近, 在 III-V 族

半导体微机械系统的实验中实现了一种无腔光机耦合方案, 这为功能集成光机器件的发展提供了启示^[9]。在文献[1]中, 利用有限元模型对国家点火装置(NIF)的结构振动进行了分析; 文献[10]中讨论了 NIF 反射镜支撑系统的稳定性。最新的相关度较高的研究是通过假设结构振动已知, 对光束指向稳定性进行分析^[11], 但未对激励作用下的结构传递特性进行分析。神光 II 系列装置和 PW 激光装置中最重要的部件是空间滤波器中的共焦透镜对, 针对长光路空间滤波器共焦透镜对存在光束传输偏离理想光轴而造成指向稳定性变差的问题, 已有的解决方案是加工更高精度的光学元件或者利用稳束技术, 这两种解决方案都不是从根源着手, 真正影响光束指向稳定性的是光机结构的振动响应。因此, 需要从光机结构的振动控制角度着手对光束指向收敛精度进行研究。

综合考虑占空比和实验布局等合理性因素后, 运用动力吸振器抑制空间滤波器光机结构的

收稿日期: 2021-05-13; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-05-28

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(181231KYSB20170022)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020304)

通信作者: *whcui@siom.ac.cn; **jqzhu@siom.ac.cn

振动。相比其他种类的减振器件,动力吸振器具有体积小、质量轻、安装便捷及效能高等优点,缺点是吸振频带较窄,若激励频率改变,减振效果会变差,甚至会使主系统的振动变大。为了解决吸振频带窄带来的问题,可适当引入阻尼元素,在一定程度上拓宽吸振频率,同时减小主系统的振幅。Asami 等^[12]研究了主系统存在阻尼时动力吸振器的优化问题,他们利用摄动法得到动力吸振器的最优参数。随着动力吸振器设计理论的不完善,主动式动力吸振器得到了很大的发展,主动式动力吸振器能够根据主系统振动频率或者激励等的变化对自身结构参数进行及时的调整,在较宽的频带范围内都有着较好的减振效果^[13]。主动阻尼吸振器(ADVA)在主系统和阻尼吸振器之间直接施加作用力,可以在附加质量较小的情况下获得良好的吸振效果。

当光束穿过高功率激光系统的许多部件时,不可避免地产生和增加由结构激励、热激励等引起的固有但不希望有的偏差。偏差由远场中的光束定位误差表征,并随主动阻尼动力吸振作用的增强而减小。主动阻尼动力吸振也可以用来分析高功率激光系统的光束稳定性,但理论分析尚未见报道。本文建立了神光 II 系列装置的全链路光束传输模型,给出了基于主动阻尼动力吸振原理的空间滤波器光机耦合系统,推导了空间滤波器

输出光角响应峰值公式,设计了自适应模糊 PID 主动控制器,实现控制参数的自校正;分析了主动控制参数对输出光角响应峰值的影响,定义了控制效率并优化了控制参数,通过自适应模糊 PID 控制算法来实现阻尼的自适应调谐,这对光机耦合系统随机振动响应有很好的抑制作用;对神光 II 系列装置打靶偏差进行了主动阻尼动力吸振控制,推导出空间滤波器打靶偏差计算公式;以神光 II 装置、神光 II 高能激光系统和神光 II 升级装置为例,分析了各装置中空间滤波器打靶偏差在利用自适应模糊 PID 控制主动阻尼动力吸振作用前、后的控制效果,结果表明自适应模糊 PID 控制算法可获得更小的打靶偏差。

图 1 为神光 II 系列激光装置总体光路排布示意图,该装置内含多级传输空间滤波器,传输空间滤波器的输出性能会影响最终的打靶精度。神光 II 系列装置主要由光学系统中的反射镜和空间滤波器组成,每个空间滤波器有两个共焦凸透镜。在不考虑反射镜的情况下,神光 II 系列装置的全链路光束传输模型如图 2 所示,空间滤波器编号为 $SF_i (i=0, 1, \dots, n)$,两个共焦凸透镜分别命名为 $L_{i,1}$ 和 $L_{i,2}$ 。为了更好地理解,将光束传输分为 $n+2$ 步:将前 $n+1$ 步视为扩束过程,激光束通过每个空间滤波器 SF_i ;在最后一步中,激光束通过聚焦透镜 L_T 聚焦到靶丸上。

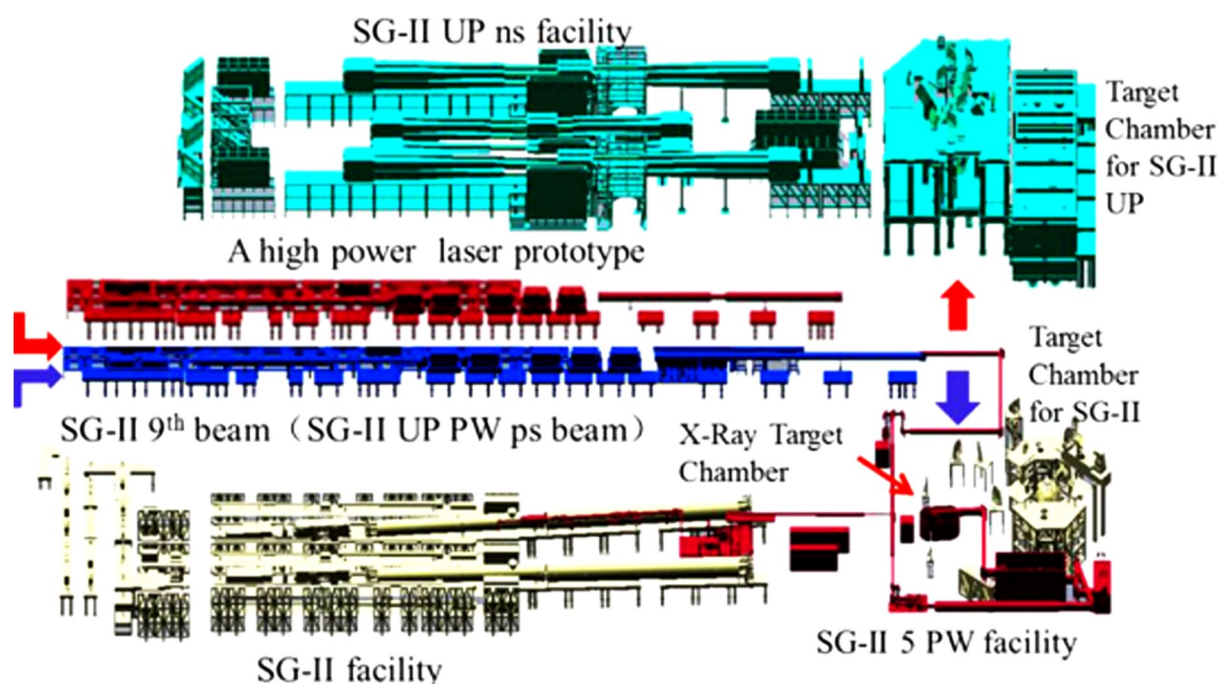


图 1 神光 II 系列激光装置总体光路排布示意图

Fig. 1 Schematic of overall optical path arrangement of SG-II series laser facility

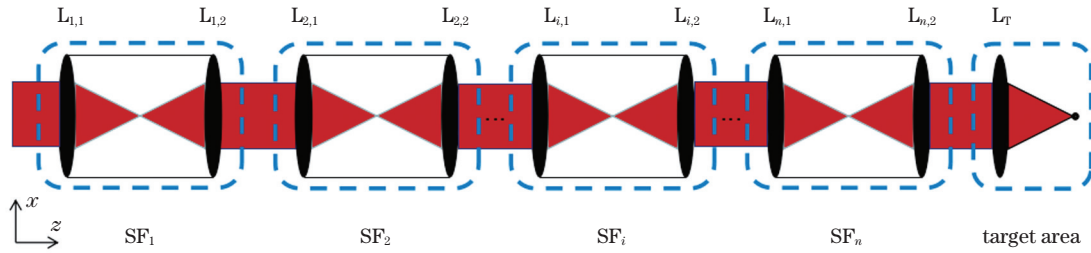


图 2 神光 II 系列装置全链路光束传输模型

Fig. 2 Full link beam transmission model of SG-II series facility

2 光机耦合主动吸振系统原理

空间滤波器光机耦合主动吸振系统如图 3 所示。空间滤波器传输系统由物面 (Obj.)、前级透镜 ($L_{i,1}$)、滤波小孔 (filter pinhole)、后级透镜 ($L_{i,2}$) 及像面 (Img.) 组成。物面反映的是入射光信息,与前一级空间滤波器的后级透镜 ($L_{i-1,2}$) 输出光有关;像面反映的是输出光信息,与后一级空间滤波器的前级透镜 ($L_{i+1,1}$) 输入

光有关。将空间滤波器支撑桁架简化为质量-刚度-阻尼单自由度平动模型 ($m_2 - k_2 - c_2, m_3 - k_3 - c_3$),在空间滤波器传输系统的两级透镜支撑桁架上施加动力吸振器 ($m_a - k_a - c_a - f_a, m_d - k_d - c_d - f_d$),构建光机结构响应与动力吸振器主动控制参数的耦合关系,以及光机结构响应与光束指向之间的耦合关系,通过两级耦合系统建立动力吸振器主动控制参数与光束指向的点对点连接,以提高光束传输空间滤波器的输出精度。

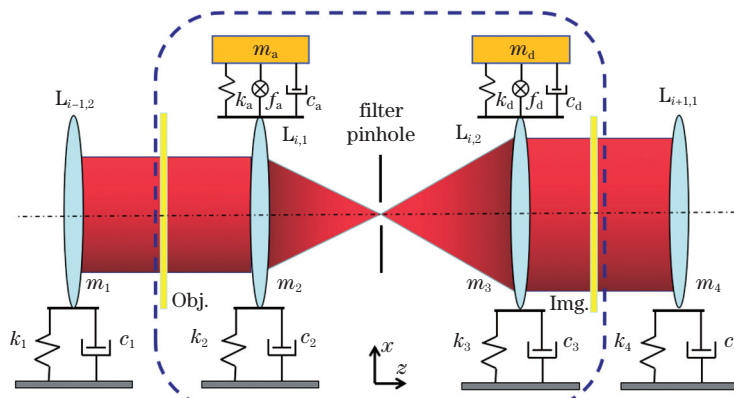


图 3 空间滤波器光机耦合主动吸振系统

Fig. 3 Optomechanical coupling active vibration absorption system in the spatial filter

空间滤波器光机耦合系统的敏感方向是 x 方向,分析 x 方向的模态振型,简化支撑桁架可得到图 4 所示的光机耦合动力吸振系统模型。在本实验

所设计的光机系统动力吸振方案中,两支撑桁架完全相同,前、后透镜支撑桁架均采用主动吸振,且两桁架的主动控制律相同。

根据模态理论,光机耦合动力吸振系统的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) + \\ c_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + k_d(x - x_d) = -f_c \\ m_d\ddot{x}_d + c_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) = f_c \end{cases}, \quad (1)$$

主动控制律为

$$f_c = -\left(g_P + \frac{g_I}{s}\right)(\dot{x}_d - \dot{x}), \quad (2)$$

光机结构的位移传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{X}{X_0} = \frac{B_2s^3 + C_2s^2 + D_2s + E_2}{A_1s^4 + B_1s^3 + C_1s^2 + D_1s + E_1}, \quad (3)$$

$$B_2 = m_d c, \quad (4)$$

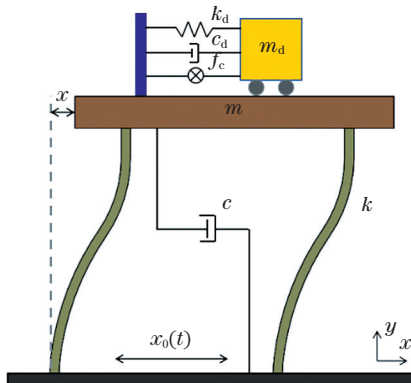


图 4 光机耦合动力吸振系统模型

Fig. 4 Model of optomechanical coupling dynamic vibration absorption system

$$C_2 = c(c_d + g_p) + m_d k, \quad (5)$$

$$D_2 = c(k_d + g_1) + k(c_d + g_p), \quad (6)$$

$$E_2 = k(k_d + g_1), \quad (7)$$

$$A_1 = m m_d, \quad (8)$$

$$B_1 = m(c_d + g_p) + m_d(c + c_d + g_p), \quad (9)$$

$$C_1 = m(k_d + g_1) + (c + c_d + g_p)(c_d + g_p) + m_d(k + k_d + g_1) - (c_d + g_p)^2, \quad (10)$$

$$D_1 = (c + c_d + g_p)(k_d + g_1) + (k + k_d + g_1) \times (c_d + g_p) - 2(c_d + g_p)(k_d + g_1), \quad (11)$$

$$E_1 = (k + k_d + g_1)(k_d + g_1) - (k_d + g_1)^2, \quad (12)$$

式中： m 为模态质量； c 为模态阻尼； x_0 为地脉扰动； x_d 为动力吸振器位移； k_d 为动力吸振器刚度； s 为拉普拉斯算子； c_d 为动力吸振器阻尼； m_d 为动力吸振器质量； g_1 为位移反馈增益； g_p 为速度反馈增益。以周期信号为扰动源，当激励作用于光机耦合动力吸振系统时，两透镜的偏移量为

$$\begin{cases} a_1(t) = G(s)A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \\ a_1(t) = G(s)A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (13)$$

图 5 为空间滤波器光束传输失调示意图，根据光束传输原理^[14]，考虑其中一束光，则出射光可以表示为

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l_{12}}{f_1} & l_{12} & \frac{l_{12}a_1(t)}{f_1} & 0 \\ -\left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l_{12}}{f_1 f_2}\right) & 1 - \frac{l_{12}}{f_2} & \frac{a_1(t)}{f_1} + \frac{a_2(t)}{f_2} - \frac{l_{12}a_1(t)}{f_1 f_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} l_{12} = f_1 + f_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}, \quad (15)$$

式中： $a_1(t)$ 和 $a_2(t)$ 分别为某级空间滤波器两个透镜 L_1 和 L_2 在 x 方向的动力吸振光机结构的位移响应； f_1 和 f_2 分别为透镜 L_1 和 L_2 的焦距； l_{12} 是 L_1 到 L_2 的距离。

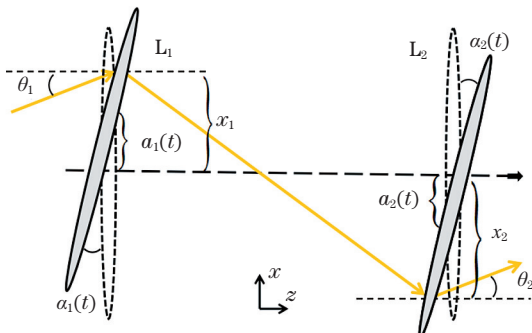


图 5 空间滤波器光束传输失调示意图

Fig. 5 Diagram of beam transmission misalignment of spatial filter

理想情况下，光束会平行光轴射出；微振动会使光轴偏离理想位置，光学系统出现失调；引入主动控制参数修正光束传输矩阵，可以降低光学系统的失

调程度，提高光束指向的收敛精度。

本实验中考虑透镜 L_2 的出射光角度变化，联立 (13)~(15) 式得：

$$\begin{aligned} \theta_2 = & -\frac{1}{m}\theta_1 - \frac{1}{m f_1}a_1(t) + \frac{1}{m f_1}a_2(t) = \\ & -\frac{1}{m}\theta_1 + \frac{1}{m f_1}[a_2(t) - a_1(t)]. \end{aligned} \quad (16)$$

由 (16) 式可知，空间滤波器传输系统的出射光角度实际是以 $-\frac{1}{m}\theta_1$ 为中心角度来回波动。出射光角度信息由两部分组成：第一部分为静态量 $-\frac{1}{m}\theta_1$ ，它是光束传输系统在透镜无失调情况下的 L_2 光束的出射角，称为理想出射角；第二部分为动态量 $\frac{1}{m f_1} \times [a_2(t) - a_1(t)]$ ，是由空间光滤波器的透镜组在微振动及主动控制作用下引起的，是影响光束指向最重要的部分。

记输出光动态角位移 $\Delta\theta_2 = \frac{1}{m f_1} [a_2(t) - a_1(t)]$ ，则有

$$\Delta\theta_2 = -\left\{ \frac{G(s)}{m f_1} \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]} \right\} \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}t + \varphi\right). \quad (17)$$

由(17)式可知,输出光的动态角位移具有谐波属性,且振幅与时间相关,具有一定的工况复杂性和多变性。在分析时重点关注输出光动态角位移的幅值,用 Θ 表示输出光偏离理想角度的峰值,则

$$\Theta = \frac{G(s)}{mf_1} \cdot \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)]}, \quad (18)$$

在以下数值分析中,取 $mf_1 = f_2 = 16m^{[15]}$ 。

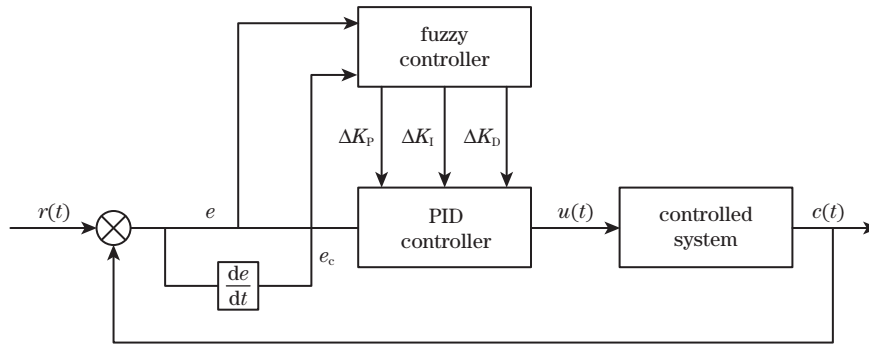


图 6 自适应模糊 PID 控制流程

Fig. 6 Control flow of adaptive fuzzy-PID

PID 校正输入误差值为空间滤波器支撑桁架的振动响应偏差,通过控制两共焦透镜支撑桁架的振动响应偏差对光机耦合输出的光角偏差进行控制。分别探测空间滤波器支撑桁架的振动响应,即利用传感器测量每级空间滤波器两支撑桁架的振动响应偏差,再根据光机耦合关系推算出各级空间滤波器的光角偏差,由于已选型号的空间滤波器光学参数是固定的,因此空间滤波器支撑桁架振动响应和光角偏差的对应关系是确定的,通过控制空间滤波器支撑桁架的振动响应偏差即可控制光角偏差。

3.2 模糊化

自适应模糊 PID 控制器使用的模糊控制器为一个二输入(e, e_c)三输出($\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$)控制器,但是在模糊控制器设计中,无法直接识别这 5 个参数,因此在模糊控制器设计中,首先将这 5 个参数转化为 7 个模糊变量——NB、NM、NS、ZO、PS、PM 和 PB,分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,这一步称为模糊化。在控制器设计中根据系统的振动特性(输入变量隶属函数取值区间应视无主动控制时光机结构响应区间及其变化量的区间选取,输出变量的隶属函数取值区间主要由执行元件所能提供的最大控制力决定)定义输入值和输出值的取值范围,计算中 $e, e_c, \Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 5 个参数的论域分别为 $[-6, 6], [-6, 6], [-3, 3], [-3, 3]$ 和 $[-3, 3]$ 。

3 自适应模糊 PID 主动控制器设计

3.1 模糊 PID 控制器结构

将光机结构的输入误差 $e = r(t) - c(t)$ 和误差变化率 $e_c = de/dt$ 作为模糊控制器的输入,模糊控制器的输出为反馈系数的修正值 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$,改进 PID 控制器的参数,使用修正的 PID 控制器驱动音圈作动器工作以减小光机结构振动。自适应模糊 PID 控制流程如图 6 所示。

3.3 模糊控制规则

根据信号与系统振动理论,当激励信号作用于光机结构时会产生响应信号,两者的方向一致。由此设定 $\Delta K_P, \Delta K_I, \Delta K_D$ 的模糊规则,如表 1~3 所示。

表 1 ΔK_P 模糊控制规则
Table 1 ΔK_P fuzzy control rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 模糊控制规则
Table 2 ΔK_I fuzzy control rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_D 模糊控制规则
Table 3 ΔK_D fuzzy control rules

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

规则 1: 当光机结构的位移输入误差为正, 且其变化量为正时, 光机结构位移正偏离参考值, 故应加入负的控制作用, 使其向参考值靠近。

规则 2: 当光机结构的位移输入误差为正, 且其变化量为负时, 光机结构位移正靠近参考值, 故应加入小的负控制作用或者无需加入任何控制, 使其加速向参考值靠近。

规则 3: 当光机结构的位移输入误差为负, 且其变化量为正时, 光机结构位移正靠近参考值, 故应加入小的正控制作用或者无需加入任何控制, 使其加速向参考值靠近。

规则 4: 当光机结构的位移输入误差为负, 且其变化量为负时, 光机结构位移正偏离参考值, 故应加入正的控制作用, 使其向参考值靠近。

49 条模糊规则如下:

1) if (e is NB) and (e_c is NB), then (ΔK_P is PB), (ΔK_I is NB), and (ΔK_D is PS);

2) if (e is NB) and (e_c is NM), then (ΔK_P is PB), (ΔK_I is NB), and (ΔK_D is NS);

⋮

49) if (e is PB) and (e_c is PB), then (ΔK_P is NB), (ΔK_I is PB), and (ΔK_D is PB).

3.4 参数修正

在模糊模块中, 重力模型和 Mamdani 算法被用来实现模糊变量的去模糊化。根据模糊控制率得到参数修正量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D , 因此经过模糊模块修正后 PID 控制器的 3 个参数分别为

$$K_P = K_{P0} + \Delta K_P, \quad (19)$$

$$K_I = K_{I0} + \Delta K_I, \quad (20)$$

$$K_D = K_{D0} + \Delta K_D, \quad (21)$$

式中: K_{P0} 、 K_{I0} 、 K_{D0} 为 PID 中比例参数、积分参数和微分参数的初始取值。通过模糊策略, 在控制过程中在线实时调节控制参数 K_P 、 K_I 、 K_D , 使得 PID 控制器更适用于激励变化的系统。自校正工作流程

如图 7 所示。

由于主动控制律采用的是速度反馈, 在本节主动控制器的设计中积分参数 K_I 对应第 2 节中的速度反馈增益 g_P , 比例参数 K_P 对应第 2 节中的位移反馈增益 g_1 , 接下来的分析中将通过自适应模糊 PID 对最优阻尼调谐下的神光系列装置光束指向进行分析。

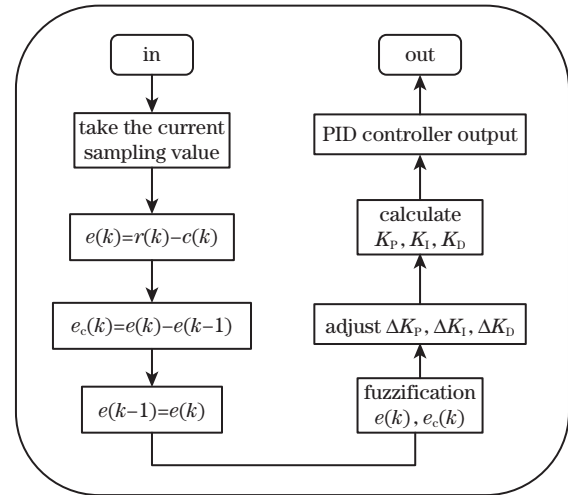


图 7 自校正工作流程图

Fig. 7 Self-calibration flow chart

4 数值分析及参数优化

4.1 控制参数对输出光角响应峰值的影响

当 $A_1 = 1 \mu\text{m}$ 、 $A_2 = 2 \mu\text{m}$ 、 $\omega_1 = \omega_2$ 、 $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ 时, 分析控制参数 g_P 和 g_1 对光机耦合主动吸振系统输出光角响应峰值的影响。

由图 8(a) 可知, 随着激励频率 f_{excit} 和速度反馈增益控制参数 g_P 的变化, 输出光角响应峰值从两共振峰退化为一个共振峰, 输出光角响应峰的最大值随控制参数的增大呈现先变小再变大的变化趋势, 说明存在最优速度反馈增益使得输出光角响应峰值最小, 可将全频段的响应幅值控制在最优参数作用的峰值以下。由图 8(b) 可知, 输出光角响应峰值随激励频率和位移反馈增益控制参数 g_1 的变化在 18~20 Hz 和 28 Hz 以上呈正相关, 在 18 Hz 以下和 20~28 Hz 范围内呈负相关, 整体调谐控制幅度不大, 窄带激励频带甚至会使输出光角响应峰值变大。

4.2 控制效率及参数优化

定义光机耦合动力吸振系统输出光角响应峰值的控制效率为

$$\eta = \frac{\Theta_{\text{NC}} - \Theta_{\text{C}}}{\Theta_{\text{NC}}} \times 100\%, \quad (22)$$

式中: η 为控制效率; Θ_{NC} 为未安装动力吸振器时输

出光角的响应峰值; θ_c 为安装动力吸振器后输出光角的响应峰值。

为了使控制效率最优,需要利用自适应模糊 PID 控制算法进行参数优化,分析结果如图 9 所示。

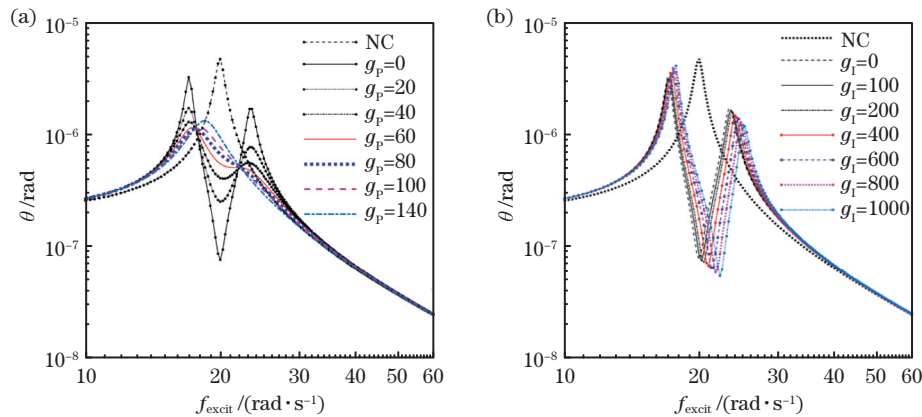


图 8 参数调控下光机耦合主动吸振系统输出光角响应峰值变化规律。(a)速度反馈增益 g_p 作用分析; (b)位移反馈增益 g_1 作用分析

Fig. 8 Variation rules of output light angle response peak value of optomechanical coupling active vibration absorption system under parameter regulation. (a) Effect analysis of velocity feedback gain g_p ; (b) effect analysis of displacement feedback gain g_1

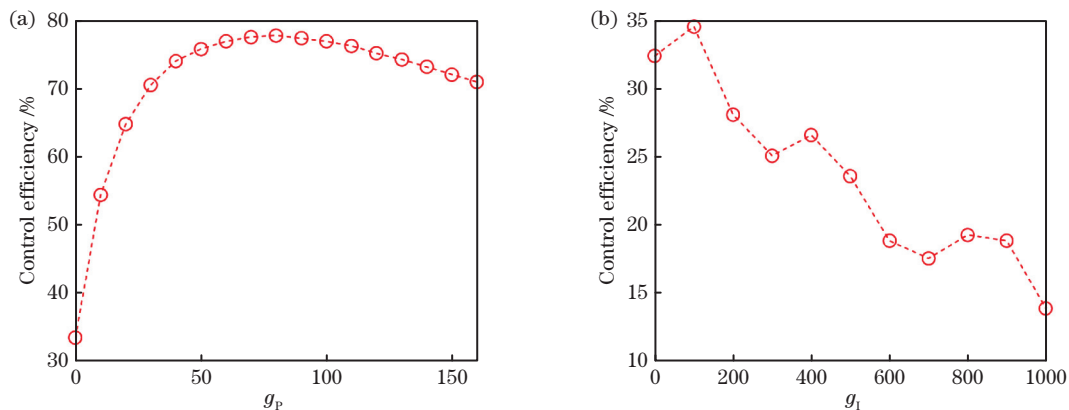


图 9 利用光机耦合主动吸振系统控制参数优化。(a)速度反馈增益 g_p 优化;(b)位移反馈增益 g_1 优化

Fig. 9 Control parameter optimization using the optomechanical coupling active vibration absorption system.

(a) Optimization of velocity feedback gain g_p ; (b) optimization of displacement feedback gain g_1

从图 9(a)可以看出,随着速度反馈增益控制参数 g_p 的增大,控制效率先变大再变小, g_p 取 80 左右时参数最优且控制效率最高,达到 75.9%。从图 9(b)可以看出,输出光角响应峰值控制效率随位移反馈增益控制参数 g_1 的增大而变小。从全频域控制来看,角响应峰值随位移反馈增益控制参数的增大而减小,因此位移反馈增益控制参数调制方法不适用于全频域输出光峰值控制。

由数值分析和参数优化结果可知,通过控制速度反馈增益控制参数能实现全频域输出光角响应峰值的控制,且存在最优阻尼控制参数使得输出光角响应峰值最小。为了进一步说明这个问题,对使用 P 控制、I 控制和 PI 控制方式的输出光角响应峰值

的控制效果进行了对比分析,结果如图 10 所示。由对比结果可知:第一共振峰处 P 控制的效果最好,在反共振峰处 I 控制效果最佳,而在第二个共振峰处 PI 控制的综合效果最优;从全频域来看,P 控制能实现对响应峰最大值的最好控制。在具体工况中分析问题时,要考虑激励的频带范围,如果是窄带激励,则需要根据激励所落频带区域启动最优的控制方式,实现局部最优控制;若是全频带激励,则选取 P 控制方式可实现全局最优控制。

实际工况中,作用于系统的激励是宽频带且具备随机性,因此本实验利用 P 控制来实现输出光角响应峰值的动态控制,使用自适应模糊 PID 控制算法来实现阻尼的自适应调谐,以实现光机耦合系

统随机振动响应的有效抑制。

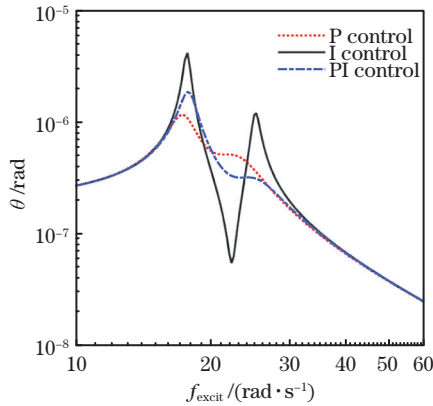


图 10 三种控制方式的输出光角响应峰值控制效果对比
Fig. 10 Comparison of output angle response peak control effects of three control modes

5 神光 II 系列装置打靶偏差的主动阻尼动力吸振控制

5.1 神光 II 系列装置打靶偏差分析

各级空间滤波器设计完成后,靶场聚焦透镜的焦距、微振动透镜的焦距及微振动透镜到聚焦透镜

的光束放大倍数都是确定且不可变的,此时打靶偏差取决于透镜的微振幅(空间滤波器共焦透镜的振幅差),设计的支撑桁架模态参数相同,激励振幅和相位的变化会造成空间滤波器两透镜的振幅差变化,进而导致打靶偏差变化。

为了控制打靶偏差,从光机结构的振动响应控制出发,减小两透镜的振幅差。因此,本实验着手分析由自适应模糊 PID 控制的主动阻尼动力吸振器作用于各级空间滤波器时对打靶偏差的影响,并与传统方法和被动阻尼动力吸振器的作用效果进行对比,发现当主动阻尼动力吸振器调谐到最优阻尼时,其打靶偏差较传统方法降低了 75.9%,同时被动阻尼动力吸振器也具有降低打靶偏差的功能,其打靶偏差较传统方法降低了 31% 左右。主动阻尼动力吸振器可根据打靶偏差,通过调谐速度反馈增益使控制效率在 31.0%~75.9% 范围内变化,以实现自适应调节的反馈功能。

图 2 为神光系列装置光束传输示意图,经过前 $n+1$ 个有微振动的空间滤波器后到达靶场聚焦透镜的入射光满足:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ \theta_{n+1} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -m_n & k_n & p_n \\ 0 & -\frac{1}{m_n} & g_n \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} -m_i & k_i & p_i \\ 0 & -\frac{1}{m_i} & g_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} -m_0 & k_0 & p_0 \\ 0 & -\frac{1}{m_0} & g_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ \theta_0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

最终,经过靶场聚焦透镜聚集在靶丸上的输出光信息满足

$$\begin{pmatrix} x_{out} \\ \theta_{out} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_T \\ \theta_T \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f_T & a_T \\ -\frac{1}{f_T} & 1 & \frac{a_T}{f_T} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ \theta_{n+1} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

式中: $\begin{pmatrix} x_{out} \\ \theta_{out} \\ 1 \end{pmatrix}$ 即 $\begin{pmatrix} x_T \\ \theta_T \\ 1 \end{pmatrix}$, 是光束聚焦到靶场聚焦透镜焦点处的输出光信息; $a_T(t)$ 为靶场聚焦透镜在 x 方向的振动。光束传输系统在 x 方向的振动可表示为

$$x_{out} = \frac{(-1)^{n+1}}{\prod_{i=0}^n m_i} f_T \theta_0 + \left\{ \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} q_i [a_{i,1}(t) - a_{i,1}(t)] \right\} + a_T(t), \quad (25)$$

$$q_i = \frac{1}{\prod_{j=i+1}^{n+1} m_j} \frac{f_T}{f_{i,2}}, \quad (26)$$

式中: q_i 为光束聚焦靶丸过程中由第 i 个空间滤波器微振动引起的位移灵敏度。

由 (25) 式可知: 等号右边第一部分为静态量 $\frac{(-1)^{n+1}}{\prod_{i=0}^n m_i} f_T \theta_0$, 它是光束传输系统在透镜无失调情况下的位移, 称为理想出射位移; 第二部分为动态量 $\sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} q_i [a_{i,1}(t) - a_{i,2}(t)]$, 是由各级空间滤波器的透镜组在 x 方向的振动所引起的, 本实验使用主动阻尼动力吸振器进行能量吸收, 使其收敛于理想位置附近; 第三部分为动态量 $a_T(t)$, 通过主动临界阻尼控制可将其降低到第二部分动态量的偏差量级以下, 成为高精度打靶的次要影响因素。

由上述分析可知, 光束聚焦靶丸过程中各级空间滤波器微振动引起的位移偏差可以表示为

$$\Delta x_i = q_i [a_{i,1}(t) - a_{i,2}(t)], \quad (27)$$

式中: $a_{i,1}(t)$ 和 $a_{i,2}(t)$ 分别为空间滤波器 SF_i 的第

一个透镜 $L_{i,1}$ 和第二个透镜 $L_{i,2}$ 产生的偏差。

系统设计安装完成后,靶场聚焦透镜的焦距、空间滤波器微振动透镜的焦距和光束放大倍数是常数,在确定工况下为了获得更高的打靶精度,只能通过控制空间滤波器微振动透镜的微振幅来实现这个目标。空间滤波器共焦透镜的振动采用自适应模糊 PID 控制的主动阻尼动力吸振器进行控制,下面分析神光 II 装置、神光 II 高能激光系统和神光 II 升级

装置在主动阻尼动力吸振器作用下的打靶偏差控制效果。

5.2 神光 II 装置空间滤波器参数及打靶偏差控制

通过神光 II 装置设计报告查找空间滤波器参数,并计算无动力吸振器、被动阻尼动力吸振器和主动阻尼动力吸振器作用于神光 II 装置各空间滤波器的打靶偏差控制指标,如表 4 和图 11 所示。

表 4 神光 II 装置空间滤波器参数及打靶偏差控制指标

Table 4 Spatial filter parameters and target deviation control indexes of SG-II facility

Spatial filter	$f_{i,2} / \text{m}$	m_i	q_i	$\Delta x_{\text{tradit}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{PDVA}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{ADVA}} / \mu\text{m}$
SF ₀	1.000	2.000	0.0034	0.252	0.172	0.060
SF ₁	1.956	2.455	0.0043	0.319	0.219	0.075
SF ₂	1.860	3.014	0.0137	1.020	0.697	0.240
SF ₃	4.600	3.433	0.0190	1.410	0.967	0.504
SF ₄	1.752	1.000	0.0499	3.710	2.540	0.874
SF ₅	3.950	1.819	0.0403	2.990	2.050	0.706
SF ₆	3.231	1.430	0.0704	5.230	3.580	1.230
SF ₇	9.856	2.243	0.0518	3.850	2.640	0.907
SF ₈	14.502	1.470	0.0517	3.840	2.630	0.906

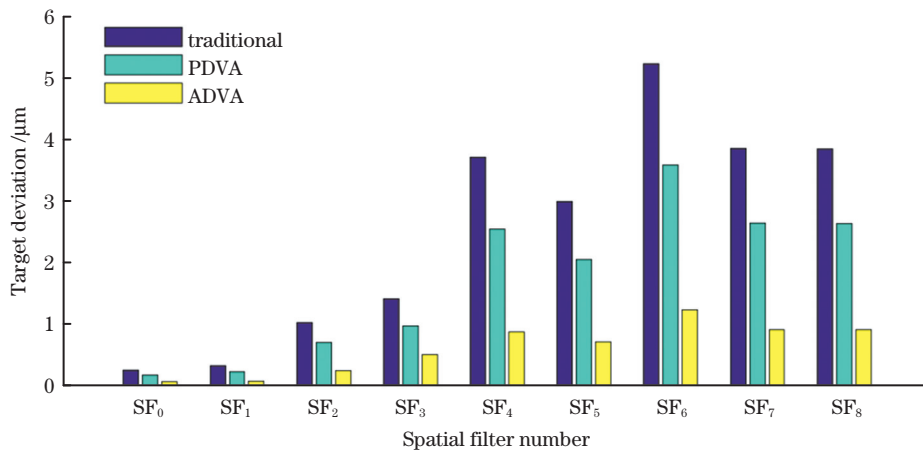


图 11 神光 II 空间滤波器打靶偏差控制结果对比

Fig. 11 Comparison of shooting error control results of spatial filter in SG-II spatial filter

由表 4 和图 11 可知:神光 II 空间滤波器的最大打靶偏差出现在第 6 级,主动阻尼动力吸振达到最优控制后输出偏差为 1.23 μm ;相比后面几级空间滤波器,第 0、1、2 级空间滤波器可不用动力吸振器,第 3 级仅需被动阻尼动力吸振器即可实现打靶偏差控制功能;通过各级空间滤波器打靶偏差的正负叠加,可实现更小的打靶偏差输出。

5.3 神光 II 高能激光系统空间滤波器参数及打靶偏差控制

通过神光 II 高能激光系统设计报告查找各级空间滤波器参数,并计算无动力吸振器、被动阻尼动力

吸振器和主动阻尼动力吸振器作用于神光 II 高能激光装置各空间滤波器的打靶偏差控制指标,如表 5 和图 12 所示。

由表 5 和图 12 可知:神光 II 高能激光系统空间滤波器的最大打靶偏差出现在第 7 级,主动阻尼动力吸振最优控制后输出偏差为 4.52 μm ;相比后面几级空间滤波器,第 0、1、2 级空间滤波器可不用动力吸振器,第 3 级仅需被动阻尼动力吸振器即可实现打靶偏差控制功能;通过各级空间滤波器打靶偏差的正负叠加,可实现更小的打靶偏差输出。

表 5 神光 II 高能激光系统空间滤波器参数及打靶偏差控制指标

Table 5 Spatial filter parameters and target deviation control indexes of SG- II high-energy laser system

Spatial filter	$f_{i,2} /m$	m_i	q_i	$\Delta x_{\text{tradit}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{PDVA}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{ADVA}} / \mu\text{m}$
SF ₀	1.0000	2.000	0.0061	0.45	0.31	0.107
SF ₁	1.9559	2.455	0.0076	0.57	0.39	0.133
SF ₂	1.8600	3.014	0.0241	1.79	1.23	0.421
SF ₃	2.3825	2.960	0.0556	4.13	2.83	0.974
SF ₄	1.9971	2.000	0.1327	9.86	6.75	2.320
SF ₅	4.0808	1.500	0.0974	7.24	4.96	1.710
SF ₆	4.8643	2.120	0.1733	12.90	8.82	3.040
SF ₇	5.6547	1.730	0.2579	19.20	13.10	4.520
SF ₈	8.4876	1.080	0.1856	13.80	9.44	3.250

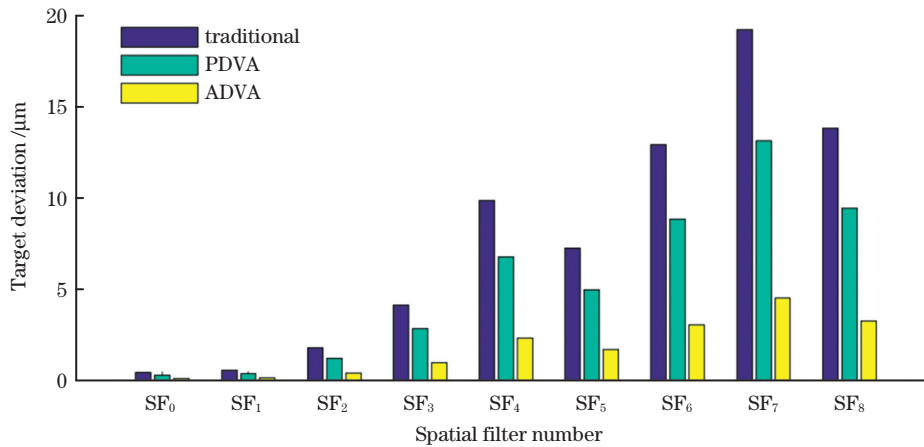


图 12 神光 II 高能激光系统空间滤波器打靶偏差控制结果对比

Fig. 12 Comparison of shooting deviation control results of spatial filter in SG- II high-energy laser system

5.4 神光 II 升级装置空间滤波器参数及打靶偏差控制

通过神光 II 升级装置设计报告查找各级空间滤波器参数,并计算无动力吸振器、被动阻尼动力吸振器和主动阻尼动力吸振器作用于神光 II 升级装置各空间

滤波器的打靶偏差控制指标,如表 6 和图 13 所示。

由表 6 和图 13 可知:神光 II 升级装置空间滤波器的最大打靶偏差出现在第 5~8 级,主动阻尼动力吸振最优控制后输出偏差为 3.29 μm;通过各级空间滤波器打靶偏差的正负叠加,可实现更小的打靶偏差输出。

表 6 神光 II 升级装置空间滤波器参数及打靶偏差控制指标

Table 6 Spatial filter parameters and target deviation control indexes of SG- II upgrading facility

Spatial filter	$f_{i,2} /m$	m_i	q_i	$\Delta x_{\text{tradit}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{PDVA}} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{\text{ADVA}} / \mu\text{m}$
SF ₀	1.800	1.0000	0.0400	2.97	2.04	0.70
SF ₁	2.080	1.6000	0.0554	4.12	2.82	0.97
SF ₂	2.850	1.5000	0.0607	4.51	3.09	1.06
SF ₃	2.600	2.0000	0.1330	9.88	6.77	2.33
SF ₄	16.000	6.4584	0.1396	10.40	7.10	2.45
SF ₅	11.117	0.9355	0.1880	14.00	9.57	3.29
SF ₆	11.883	1.0689	0.1880	14.00	9.57	3.29
SF ₇	11.117	0.9355	0.1880	14.00	9.57	3.29
SF ₈	11.883	1.0689	0.1880	14.00	9.57	3.29
SF ₉	16.000	1.0000	0.1396	10.40	7.10	2.45

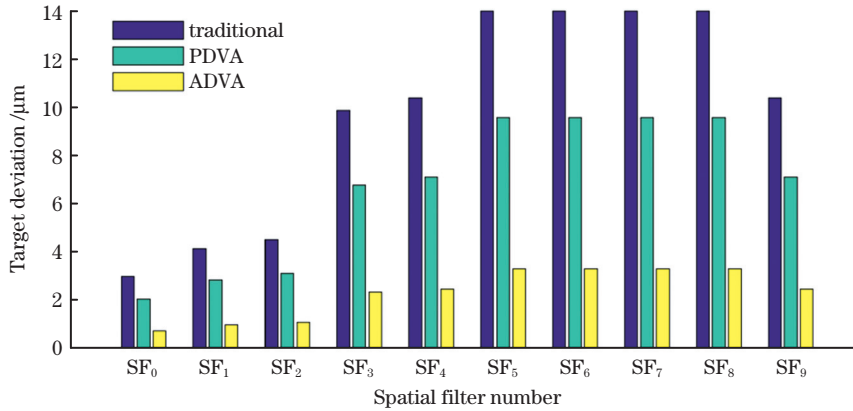


图 13 神光 II 升级装置空间滤波器打靶偏差控制结果对比

Fig. 13 Comparison of target shooting deviation control results of spatial filter in SG-II upgrading facility

5.5 神光 II 系列装置打靶精度测试分析

神光 II 系列装置各级空间滤波器的共焦透镜组在 x 方向的振动会引起装置的打靶偏差,本实验使用主动阻尼动力吸振器对光机结构能量进行吸收,分别与被动阻尼动力吸振器及传统无控制工况进行对比,使其更快收敛于平衡位置。光束经包含 x 方向振动的各级空间滤波器传输后,打靶精度可表示为

$$\Delta x_{out} = \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} q_i [a_{i,1}(t) - a_{i,2}(t)] = \sum_{i=0}^n (-1)^{n-i} \Delta x_i \quad (28)$$

表 7 所示为神光 II 系列装置打靶精度的测试数据,证明了主动阻尼吸振器性能的优越性。

表 7 神光 II 系列装置打靶精度测试数据

Table 7 Shooting accuracy test data of SG-II series facilities

Test system	$\Delta x_{tradit} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{PDVA} / \mu\text{m}$	$\Delta x_{ADVA} / \mu\text{m}$
SG-II facility	5.41	3.73	1.30
SG-II high-energy laser system	7.67	5.31	1.87
SG-II upgrading facility	6.52	4.50	1.57

由表 7 可知,经主动阻尼吸振器控制后神光 II 装置的打靶精度由 $5.41 \mu\text{m}$ 降到 $1.30 \mu\text{m}$,神光 II 高能激光系统的打靶精度由 $7.67 \mu\text{m}$ 降到 $1.87 \mu\text{m}$,神光 II 升级装置的打靶精度由 $6.52 \mu\text{m}$ 降到 $1.57 \mu\text{m}$ 。被动阻尼吸振器设计完成后阻尼不可调谐,主动阻尼吸振器可以根据具体工况调谐阻尼且可以调谐到最优阻尼值,因此可得到比被动阻尼动力吸振器更好的效果。

6 结 论

搭建了光机耦合主动吸振系统,推导了空间滤波器输出光角响应峰值公式,实现了控制参数与光束指向的二级耦合对应。设计了自适应模糊 PID 主动控制器,通过模糊策略实现了控制参数的自校正;分析了主动控制参数对输出光角响应峰值的影响,并优化了控制参数、速度反馈增益控制参数,实现了全局最优控制,存在使控制效率最高的最优参数值,而位移反馈增益控制参数不适用于全频域输出光峰值控制,仅可实现局部最优控制。分析讨论了神光 II 系列装置空间滤波器打靶偏差在自适应模糊 PID 控制主动阻尼动力吸振作用后的控制效果,发现并非所有空间滤波器都需要动力吸振器控制,要根据各装置空间滤波器打靶偏差的大小来确定。当主动阻尼动力吸振器调谐到最优阻尼时,其打靶偏差较传统方法降低了 75.9%,同时被动阻尼动力吸振器也具有降低打靶偏差的功能,其打靶偏差较传统方法降低了 31%左右。主动阻尼动力吸振器可根据打靶偏差大小调节速度反馈增益,使得控制效率在 31.0%~75.9% 范围内变化,实现了自适应调节的反馈功能。本文方法可为现役激光装置的打靶性能提升提供重要参考。

参 考 文 献

- [1] Cui W H, Zhu J Q, Liu Z G, et al. Optomechanical coupling active control for improving beam pointing accuracy of spatial filter in PW laser facility [J]. Applied Sciences, 2021, 11: 5017.
- [2] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(3): e54.
- [3] Liang X, Xie X L, Kang J, et al. Design and

- experimental demonstration of a high conversion efficiency OPCPA pre-amplifier for petawatt laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(4): e58.
- [4] Zhu J Q, Xie X L, Sun M Z, et al. Analysis and construction status of SG-II 5PW laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6(2): e29.
- [5] Homoelle D, Baker K L, Patel P K, et al. Interferometric adaptive optics for high-power laser beam correction in fast ignition experiments [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(3): 032007.
- [6] Mahdih M H, Shirmahi M, Alavi-Nejad M. Beam quality in unstable optical resonators and the effects of misalignment [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 6157: 61570X.
- [7] Wang J, Huang L H, Hou L Y, et al. Study of active beam steering system with a simple method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(8): 081405.
- [8] Chang H, Ge W Q, Wang H C, et al. Laser beam pointing stabilization control through disturbance classification[J]. *Sensors*, 2021, 21(6): 1946.
- [9] Okamoto H, Watanabe T, Ohta R, et al. Cavity-less on-chip optomechanics using excitonic transitions in semiconductor heterostructures[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-6.
- [10] Zeng T Y. 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: 55-78.
- [11] Liu F, Xu J, Zhang Y, et al. Analysis on beam directing stability problem caused by micro-vibration of optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1120001.
- 刘芳, 徐嘉, 张燕, 等. 光学器件微振动引起的光束指向稳定性分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1120001.
- [12] Asami T, Nishihara O, Baz A M. Analytical solutions to H_∞ and H_2 optimization of dynamic vibration absorbers attached to damped linear systems [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2002, 124(2): 284-295.
- [13] Wang J J. Inertial active vibration absorbing system design and characteristic research [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- 王佳静. 惯性式主动吸振系统设计及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [14] Lü B D. Laser optics: laser beam propagation and beam quality control[M]. 2nd ed. Chengdu: Sichuan University Press, 1992.
- 吕百达. 激光光学: 激光束的传输变换和光束质量控制 [M]. 2 版. 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [15] Liu F. Analysis and improvement of beam pointing stability of high power laser facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 刘芳. 高功率激光装置光束指向稳定性分析及改进 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012.

Target Deviation of SG Facility Based on Active Vibration Absorption Control

Cui Wenhui^{1,2*}, Zhu Jianqiang^{1**}, He Yuanqi^{1,2}, Liu Zhigang¹, Fan Quantang¹,
Lin Weiheng^{1,2}, Dong Ziming¹

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective The high power laser facility for inertial confinement fusion (ICF) is a large scientific project with ultraprecision, long optical path, and many precision components. Any optical interference caused by environmental vibration, acoustic vibration, or thermal gradient reduces the aiming accuracy and success rate. The confocal lens pair in the spatial filter is the most important component of SG-II series devices. Considering the phenomenon where the beam propagation of the confocal lens pair of the long optical path spatial filter deviates from the ideal optical axis and causes poor pointing stability, the existing solutions involve processing the optical elements with higher accuracy or using the beam stabilization technology. Neither of the two solutions starts from the root, and the vibration

response of the optomechanical structure affects the beam-pointing stability. The beam-pointing stability has been analyzed by assuming that the structure's vibration is known but the structure's transmission characteristics under excitation have not been analyzed. Further, active damping dynamic vibration absorption can be used to analyze the pointing stability of the ICF facility, but the theoretical analysis has not been reported. Therefore, studying the beam-pointing convergence accuracy from the perspective of optical mechanical structure vibration control is necessary.

Methods The full link beam propagation model of SG-II series facilities was established, and an optomechanical coupling system of spatial filter based on active damping dynamic vibration absorption principle was provided. The peak value formula of the spatial filter's output optical angular response was derived, and an adaptive fuzzy proportional-integral-derivative (PID) active controller was designed to realize control parameter self-tuning. The influence of active control parameters on the peak value of output optical angular response was analyzed. The control efficiency was defined, and the control parameters were optimized. The adaptive fuzzy PID control algorithm realized the adaptive tuning of the damping. The active damping dynamic vibration absorption control was conducted for the shooting deviation of SG-II series facilities. The calculation formula of the shooting deviation of the spatial filter was derived. It analyzed the control effect of space filter shooting deviation of SG-II series facilities before and after active damping dynamic vibration absorption by adaptive fuzzy PID control.

Results and Discussions The peak value of output optical angular response degenerates from two formants to one formant with the change of excitation frequency, and velocity feedback gains control parameter g_p . With increasing control parameters, the maximum value of output optical angular response first decreases and then increases, indicating that there is an optimal velocity feedback gain to minimize the peak value of output optical angular response. The response amplitude of the entire frequency domain is controlled below the optimal parameter's peak value [Fig. 8(a)]. When g_p is 80, the parameters are optimal, and the control efficiency is the highest, reaching 75.9% [Fig. 9(a)]. When the excitation frequency and the displacement feedback gain control parameter g_1 change, the peak value of the output optical angle response is positively correlated in 18–20 Hz and above 28 Hz and negatively correlated below 18 Hz and in 20–28 Hz. The overall tuning control amplitude is small, and the narrow-band excitation frequency band even increases the peak value of the output optical angle response, making it unsuitable for peak value control of the output optical in the full frequency domain [Figs. 8(b) and 9(b)]. The maximum target deviation of the spatial filter of the SG-II facility appears in the sixth stage, and the output deviation after optimal control of active damping dynamic vibration absorption is $1.23 \mu\text{m}$ (Table 4 and Fig. 11). The maximum target deviation of the spatial filter of the SG-II high-energy laser system appears in the seventh level, and the output deviation after the optimal control of active damping dynamic vibration absorption is $4.52 \mu\text{m}$ (Table 5 and Fig. 12). Compared with the later spatial filters, the 0-, 1-, and 2-stage spatial filters can achieve the function of shooting deviation without dynamic vibration absorber, and the 3-stage spatial filter only requires a passive damping dynamic vibration absorber. The maximum target deviation of the SG-II spatial filter upgrading facility appears in the fifth to eighth level. After optimal control of active damping dynamic vibration absorption, the output deviation is $3.29 \mu\text{m}$ (Table 6 and Fig. 13). After controlling the active damping absorber, the shooting accuracy of the SG-II facility is reduced from $5.42 \mu\text{m}$ to $1.30 \mu\text{m}$, the shooting accuracy of the SG-II high energy laser system is reduced from $7.67 \mu\text{m}$ to $1.87 \mu\text{m}$, and the shooting accuracy of SG-II upgrading facility is reduced from $6.52 \mu\text{m}$ to $1.57 \mu\text{m}$. After designing the passive damping absorber, the active damping absorber can tune the damping to the optimal value according to the specific working conditions. Therefore, the effect of dynamic vibration absorbers is better than that of passive damping (Table 7).

Conclusions When the active damping dynamic vibration absorber is tuned to optimal damping, the shooting deviation is reduced by 75.9% compared with the traditional method. At the same time, the passive damping dynamic vibration absorber reduces shooting deviation by about 31% compared with the traditional method. Additionally, the active damping dynamic vibration absorber can adjust the velocity feedback gain based on the shooting deviation. Consequently, the control efficiency varies from 31.0% to 75.9%, which realizes the feedback function of adaptive adjustment. Therefore, this method has a good application prospect for improving the shooting performance of laser facilities in service.

Key words physical optics; optomechanical coupling; dynamic vibration absorption; SG-II; target deviation

OCIS codes 140.3490; 220.4880; 220.3630