



·惯性约束聚变物理与技术·

平响应 X 射线二极管复合滤片参数的算法优化^{*}

赵恒炜¹, 陶 毅¹, 袁 鹏¹, 郑 坚^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 核科学技术学院 等离子体物理与聚变工程系, 合肥 230000; 2. 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 在间接驱动激光聚变研究中, 平响应 X 射线二极管是 X 射线辐射能流测量的主要探测器。为了获得理想的平响应效果, 采用传统方法需要花费大量时间优化二极管的复合滤片参数, 为此引入了粒子群优化算法, 将之用于平响应 X 射线二极管复合滤片参数的优化, 该方法可更快捷、更准确地得到复合滤片的优化参数。提出了新的滤片组合方式, 并优化其平响应特性, 得到了比传统滤片组合更优的参数配比。该项工作为平响应 X 射线二极管复合滤片参数的寻优提供了一种更高效的方法。

关键词: 惯性约束聚变; X 射线二极管; 平响应滤片; 平响应度; 粒子群优化算法

中图分类号: 0536

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220406

Optimization algorithm for compound filter parameters of flat response X-ray diode

Zhao Hengwei¹, Tao Tao¹, Yuan Peng¹, Zheng Jian^{1,2}

(1. Department of Plasma Physics and Fusion Engineering, School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Collaborative Innovation Center of IFSA, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the study of indirectly driven laser fusion, the flat response X-ray diode is the main detector for the measurement of X-ray radiation energy flux. To obtain ideal flat response effect, it usually costs a lot of time to optimize the composite filter parameters of the detector. In this paper, the particle swarm optimization algorithm is developed and applied to optimize the parameters of compound filter of flat response X-ray diode. Compared with the previous work, the method developed in this paper can get the optimized parameters of composite filter more quickly and accurately. On this basis, this paper proposes a new filter combination mode, optimizes its flat response characteristics, and obtains a better parameter ratio than the traditional filter combination. The work in this paper provides a more efficient method for searching the parameters of the composite filter of the response X-ray diode

Key words: inertial confinement fusion, X-ray diode, flat response filter, flat responsivity, particle swarm optimization algorithm

在间接驱动惯性约束聚变研究(ICF^[1-3])中, 高功率激光脉冲入射到高 Z 材料(如金、铀)制成的腔靶后, 经过腔壁物质的吸收和再发射, 转换为能谱接近黑体辐射^[4]的高温 X 射线辐射场, 进而驱动聚变靶丸内爆压缩, 最终实现聚变点火。辐射温度是表征黑腔辐射场驱动强度的重要指标^[5], 故而 X 射线能流的绝对测量十分重要。由于腔内的 X 射线能谱接近黑体辐射, 通过绝对测量 X 射线的能流就可以推断辐射场温度这一关键参数^[6-7]。

目前国内实验中常用的 X 射线能流测量装置是平响应 X 射线二极管(XRD), 其具有体积小、结构简单的特点^[8]。传统的平响应 X 射线二极管^[9]使用金(Au)阴极, 在 0.1~1.5 keV 的光子能量范围内达到平响应。然而在美国国家点火装置等大型激光聚变实验平台上的点火实验中^[10], 对平响应的能量范围提出了更宽的要求, 需要将平响应 X 射线二极管的能量上限扩展到高于 3 keV^[2]。为此, 2010 年李志超等人开发了一种全金的新型 X 射线二极管^[9,11], 其平响应范围为 0.1~4 keV。在辐射场温度为 300 eV 的情况下, 4 keV 以下的光子能量已经包含了总光子能量的

* 收稿日期: 2022-12-25; 修订日期: 2023-06-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA25010200); 中央高校基本科研业务费专项(WK2140000014)

联系方式: 赵恒炜, zhw77@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 陶 毅, tt397396@mail.ustc.edu.cn。

99% 以上。因此选择 4 keV 作为平响应的能量上限是合理且有意义的。然而复合滤片的厚度以及占空比等参数的选取并不容易,李志超等人通过大量的模拟以及实验得到了一组较好的滤片参数,即滤片厚度分别为 400 nm、50 nm, 占空比为 1/6。2017 年车兴森等人在此基础上以更小的步长改变滤片厚度和占空比进行测量,得到了使平响应度更低的滤片参数^[12]。这一结果表明,在获得最佳滤片组合时,传统优化方法给出的结果还有提升空间。

针对上述问题,本文引入粒子群优化算法。采用该方法,在给定滤片的片数、滤片材料元素的前提下,以得到最佳的平响应曲线为判别条件,在滤片厚度以及占空比组成的高维参数空间中,高效率地得到复合滤片的优化参数。为了进一步展示优化算法的优越性,本文在双滤片组合的基础上引入第三片滤片,通过优化算法,得到了更好的平响应值。最后,本文通过海森矩阵研究了平响应值与复合滤片参数之间的敏感依赖关系,为滤片加工精度的要求提供了物理依据。

1 计算模型

1.1 X 射线二极管结构

目前实验中最常用的 X 射线探测装置是 XRD, 即金属阴极的真空 X 光二极管, 见图 1。X 射线二极管产生的电流信号 $S(t)$ 可由下式表示

$$S(t) = M \int I_{\varepsilon}(\Omega, t) R(\varepsilon) d\varepsilon d\Omega \quad (1)$$

式中: $I_{\varepsilon}(\Omega, t)$ 表示在 t 时刻单位立体角 $d\Omega$ 内的 X 射线辐射流; $R(\varepsilon)$ 为二极管的谱响应函数, 一般来说是入射光子能量 ε 的函数; M 为外部元件的整体增益, 一旦测量装置搭建完毕, 在数据处理中可将 M 近似为常数; 当 X 射线辐射接近黑体辐射时, 有 $T_r^4 \propto \int_0^{\infty} I_{\varepsilon}(\Omega, t) d\varepsilon$, 这里 T_r 是辐射温度; 若二极管的响应函数 $R(\varepsilon)$ 是不依赖于入射光子能量的常数, 那么由二极管输出的信号可直接得到辐射温度。所谓平响应, 就是响应函数 $R(\varepsilon)$ 在测量能段内接近常数^[13-14], 此时 $R(\varepsilon)$ 几乎不随入射光子能量的改变而改变, 式(1)可以改写为

$$S(t) = M\bar{R} \int I_{\varepsilon}(\Omega, t) d\varepsilon d\Omega \quad (2)$$

式中: \bar{R} 表示响应函数平均值。当谱响应函数值随能量点的变化而变化时, 由于其涨落值很小, 即能量的改变并不会对测量结果产生显著影响时, 式(2)成立。

本文所优化的 X 射线二极管包括平响应复合滤片和 Au 阴极两部分。Au 阴极的响应函数随 X 射线能量呈降低趋势^[15], 复合滤片的透过率谱线随 X 射线能量呈上升趋势^[9]。由于两者整体互补, 进而可实现二极管对 X 射线的平响应^[16]。Henke^[17-19] 首次提出这种对滤片阴极组合整体谱响应函数的描述方法

$$R(\varepsilon) = R_c T_f \propto [1 - e^{-\mu_c t_c}] \prod_{i=1}^n e^{-\mu_i(\varepsilon) t_i} \quad (3)$$

式中: R_c 表示阴极的谱响应函数; T_f 表示复合滤片的总透过率, 复合滤片是多滤片组合, 各个滤片的透过率之间为乘积的关系; μ_c 为阴极所选材料的线性吸收系数; μ_i 表示滤片所选材料的线性吸收系数; t_c 和 t_i 分别表示阴极和滤片厚度; 下标 i 表示第 i 个滤片所对应的参数。通过改变金属阴极材料和复合滤片的数量、材料种类与厚度等参量, 可以得到不一样的响应函数 $R(\varepsilon)$ 。但由于元素材料放射性、稳定性、制备难度、成本等方面的因素, 真正用于实际制作的材料种类选择并不多, 所以仅利用式(3)无法得到完全满足所需能量段 X 射线的平响应函数。因此在式(3)的基础上, Henke 引进了一个新的变量来进行参数空间的扩展, 其表达式为

$$R(\varepsilon) = R_c T_f \propto [1 - e^{-\mu_c t_c}] \prod_{i=1}^n (b_i e^{-\mu_i(\varepsilon) t_i} + 1 - b_i) \quad (4)$$

式中: b_i 为权重, 它的定义是未打孔面积与滤片总面积之比。实验中常常引入占空比这一参量来代替权重, 权重与占空比的加和为 1。权重可以通过改变厚滤片的分布从而对实验测量和计算时固定的 X 射线进行权重的重新组

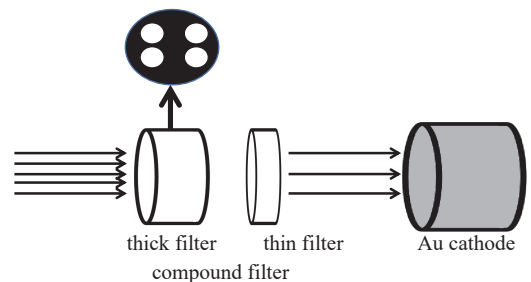


Fig. 1 Simplified device of X-ray diode

图 1 X 射线二极管简化装置

合,进而对复合滤片的响应函数进行修正。同时,新的参量也可以改变针孔的尺寸和金属层间的纵向面积。在确定参数时,除了要根据表达式和模拟程序提供的线吸收系数来选择参数,同时对滤片的材料是否易于制备、加工、保存和运输也提出了要求,常用的材料有铝(Al)、钪(Sc)、金(Au)。

X 射线二极管平响应性能的优异通过平响应度 F 来定义

$$F = \frac{\int_{E_1}^{E_2} (R - \bar{R})^2 dx}{(E_2 - E_1) \bar{R}^2} \quad (5)$$

式中: R 为 X 射线二极管的整体响应函数; \bar{R} 为响应曲线在选定能量段的响应平均值, E_1 和 E_2 为所研究能量段的边界值。在本文寻优工作中, E_1 为 0.1 keV, E_2 为 4 keV。 F 的数值越小,则表明响应曲线在选定能量段的平整度越好。

1.2 寻优算法模型

粒子群算法是 Eberhart 和 Kennedy 两人于 1995 年提出的一种种群智能算法^[20],它的核心思想是利用群体中的个体对信息的共享使整个群体的运动在问题求解空间中产生从无序到有序的演化过程,从而获得问题的可行解。粒子群算法在所需要的多维空间中生成一系列的粒子,粒子在具有位置参量的同时还具有一定的移动速度,粒子的位置即本次优化中复合滤片的厚度与权重,移动速度则表示了点移动的快慢,每个点在移动过程中其方向既受到自身数值的影响同时也会受到其他点数值的影响,通过一定次数的迭代,随机生成的点最终会找到全局的最优解。粒子群算法的核心迭代表达式为

$$v(d) = \omega v(d-1) + C_1 r_1 (pbest(d) - x(d)) + C_2 r_2 (gbest(d) - x(d)) \quad (6)$$

式中: C_1 表示粒子下一次迭代中自身经验所占的权重; C_2 表示粒子下一次迭代中其他粒子经验所占的权重; $v(d-1)$ 是第 $d-1$ 代的速度, $v(d)$ 是第 d 代速度。 r_1 、 r_2 是区间 [0 1] 内的随机数,增加搜索的随机性。 $pbest(d)$ 是粒子个体的最优解, $gbest(d)$ 是种群的最优解, C_1 和 C_2 并没有固定的值,常根据经验设置。若 C_1 过小则容易陷入局部极值点,若 C_2 过小,则粒子之间不存在关联性,导致孤立寻优; ω 为惯性因子,其值具有非负性,惯性因子较大,则全局寻优能力强,局部寻优能力弱。惯性因子较小,全局寻优能力弱,局部寻优能力强。在实际算法中,常常采用线性递减权值(LDW)策略,其表达式为

$$\omega = (\omega_{ini} - \omega_{end})(N - n)/N + \omega_{end} \quad (7)$$

式中: ω_{ini} 为初始的惯性权值; ω_{end} 为最大迭代次数时的惯性权值; N 为最大迭代次数。 ω 的存在使得粒子群算法性有了极大的提高和更广的适应范围,同时针对不同的搜索问题调整全局和局部搜索的能力也得到提升。

2 基于现有模型的参数优化

基于李志超等人提出的滤片组合,我们选取 Au 作为阴极和滤片组合的材料进行滤片参数的寻优处理。金属阴极^[21]数据由中国高能物理研究所同步辐射装置(BSRF)上标定所得。金属滤片数据来源于 XOP^[22-23]。

针对滤片参数的粒子群寻优算法的基础是能够得到连续厚度的透过率曲线。但无法直接调用 XOP。因此以 XOP 提供的数据为基础,结合透过率随滤片厚度呈指数衰减的关系编写了函数 Thickness。Thickness 可以根据输入的任何厚度计算复合滤片的透过率曲线。

为了确定 Thickness 函数的准确性,将李志超等人在中国高能物理研究所同步辐射装置标定所得到的滤片数据和从 XOP 直接计算出的数据以及算法计算出来的滤片数据对比发现(图 2),直接从 XOP 导出的滤片数据与 Thickness 函数计算所得数据吻合程度很好,偏差在万分之一。在 1 keV 能量以上,三者数据拟合较为良好。在 1 keV 能量以下, XOP 的数据与实际有很大区别,原因在于这个能量段已经属于低能量段。此时光与物质相互作用的总截面不仅仅与光电效应、康普顿散射和电子对产生截面有关,还受到了瑞利散射等其他过程的影响,最终导致低能量的透射率计算相对复杂一些。劳伦斯利弗莫尔实验室提供了能量从 1 eV~100 GeV

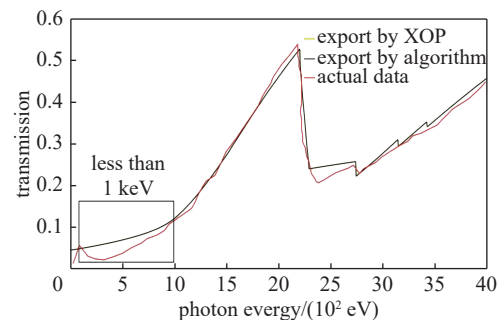


Fig. 2 Comparison of filter transmittance curves obtained under the conditions of 400 nm, 50 nm filter thickness and weight 0.8333

图 2 在滤片厚度 400 nm、50 nm、权重 0.8333 参数条件下所得到的滤片透过率曲线对比。

入射光子的相关数据,可用于分析低于 1 keV 的软 X 射线在材料中的沉积。由于 Thickness 函数是基于 XOP 数据库所得,因此在实际研究问题中使用更精确的数据库即可实现 Thickness 函数与探究问题的自洽。

在初始的算法中,为了扩大参数的搜索范围,我们将滤片 1 的厚度设在 0~1 000 nm 之间,滤片 2 的厚度设在 0~1 000 nm 之间。然而对于如此大范围且连续性的参数空间,找到唯一一个确定完全收敛的点并不实际。与此同时,平响应的关键点在于滤片与权重的相互组合配比,因此无法得到一个唯一确定的点是合理的。但是通过算法寻优,可以得到落在极值点极小领域内的点集。

表 1 双层金复合滤片组合算法优化结果

Table 1 Optimization results of combination algorithm of double gold composite filter

| flat | thick filter thickness/nm | thin filter thickness/nm | weight (thick filter) | weight (thin filter) |
|----------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| 0.012 13 | 360.2 | 71.0 | 0.829 3 | 1 |
| 0.012 19 | 363.1 | 72.2 | 0.828 4 | 1 |
| 0.012 18 | 364.0 | 71.6 | 0.829 2 | 1 |

通过表 1 数据的对比可以发现,优化得到的参数精度在 nm 量级。同时考虑到实际加工,该结果对于实验中滤片参数组合的选取有很好的借鉴意义。在寻优过程中,可以根据工艺需要对优化范围进行缩小或者扩大来得到想要的参数组合。比较表格中的三组数据,可以发现平响应的相对偏差在千分之一的量级,因此这三组滤片参数的组合都可当作最终的优化结果。选取第三组作为优化的最终结果,与之前的工作进行比较,即厚滤片厚度 364.0 nm,薄滤片厚度 71.6 nm,权重为 0.8292,此时平响应度达到了 1.218%。比较结果如图 3 所示:黑色线代表最早的参数组合;红色线代表 2017 年优化所得参数组合;蓝色线是本次算法优化参数组合。

从图像上就可以直观地看到经过算法优化后的滤片参数组合平响应度更好。诚然,由于 XOP 所导出的数据在低能量段与经过标定的数据点有所差异,但是在高于 1 keV 能量的波段下,该方法为滤片参数的优化提供了极大的便捷。

由于精度的问题,虽然直接运用该算法无法得到一个绝对的最小值,但是通过表格数据可以看出,所得到的极值点差异在千分之一量级,偏差很小。因此这个程序可以提供一个可选取的范围或者一个极值点的领域。与此同时在实际的滤片加工中也存在精度问题,因此寻优算法的结果具有很好的参考和实际价值。

3 复合三滤片结构

平响应度的大小反映的其实是滤片组合相互的匹配程度,当引入更多的参量时会导致滤片厚度权重的多样性分配,即随着打孔滤片个数的增加,理论上可以使平响应度降低,因此在已有滤片模型的基础上,引入第三个滤片,并对前两个滤片进行打孔从而降低平响应度。本次优化选取 Al 作为第三个滤片的材料。

在双滤片打孔的情况下,需要考虑滤片的组合问题,即存在四种情况:打孔和未打孔;打孔和打孔;未打孔和打孔;未打孔和未打孔。但是在实验过程中,要求 X 射线最多一次通过打孔面,即双滤片的占空比加和小于 1,因此对问题进行了简化。同时,打孔面积要小于总面积的 50%,即权重要大于 0.5,其结构如图 4 所示。

根据 Henke 提出的滤片阴极组合整体谱响应函数的描述方法,双打孔三层滤片组合的透过率关系表达式为

$$T_f = [(a+b-1)e^{-\mu(\epsilon)(t_1+t_2)} + (1-a)e^{-\mu(\epsilon)t_1} + (1-b)e^{-\mu(\epsilon)t_2}]e^{-\mu(\epsilon)t_3} \quad (8)$$

式中: T_f 为复合滤片的总透过率; a 为第一个滤片的权重; b 为第二个滤片的权重; 其余物理量与前述公式相同。

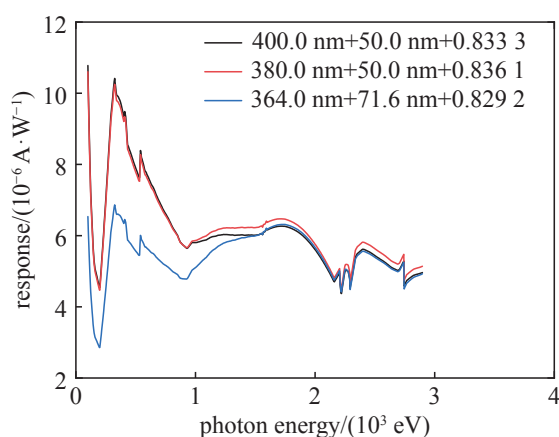


Fig. 3 Comparison of filter transmittance curves obtained under the conditions of 400 nm, 50 nm filter thickness and weight 0.833 3

图 3 在滤片厚度 400 nm、50 nm、权重 0.8333 参数条件下所得到的滤片透过率曲线对比

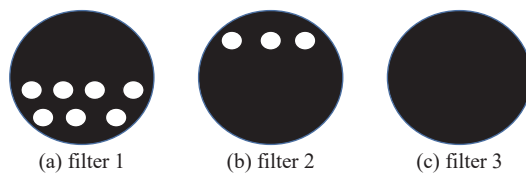


Fig. 4 Schematic plan of three filter combinations

图 4 三滤片组合各滤片平面示意图

为了验证三滤片组合的可能性,我们将提出的两层 Au 滤片和一层 Al 滤片的新结构进行参数寻优,经过三次优化得到如表 2 所示数据。三组数据中响应度的收敛性很好,达到了 1.052%。相比与之前的“Au+Au”复合滤片响应度又有了进一步的改善,因此新的三滤片结构在满足平响应这一标准上具有更好的优势。图 5 为引入 Al 滤片后得到的三滤片谱响应函数与传统复合滤片的谱响应函数的对比:黑线为双金滤片组合;红线为三层滤片组合的组合。所选取的滤片参数为厚滤片 406.8 nm,薄滤片 64.1 nm,滤片 3 厚度为 185.9 nm,厚滤片权重 0.849 6,薄滤片权重 0.847 2。

表 2 双层金滤片与单层铝滤片组成的复合滤片参数优化结果

Table 2 Parameter optimization results of composite filter composed of double-layer gold filter and single-layer aluminum filter

| flat | thick filter 1 (Au) thickness/nm | thin filter 2 (Au) thickness/nm | filter 3 (Al) thickness/nm | weight (thick filter 1) | weight (thin filter 2) | weight (filter 3) |
|---------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|
| 0.01052 | 399.1 | 63.6 | 186.0 | 0.848 6 | 0.888 0 | 1 |
| 0.01052 | 406.8 | 64.1 | 185.9 | 0.849 6 | 0.847 2 | 1 |
| 0.01053 | 412.3 | 63.6 | 189.2 | 0.851 5 | 0.851 6 | 1 |

4 优化参数的海森矩阵分析

对表 2 优化后的参数进行分析,发现薄滤片 (Au) 的收敛性是最好的,其他参数的收敛性较差一些,但是不同组合所得到的平响应度又十分相近,是否可以说明薄滤片 (Au) 对平响应度的影响要大于其他参数呢?为了验证这一猜想,本文采用海森矩阵对数据进行分析。

海森矩阵^[24]是由多元函数的二阶偏导数构成的方阵。海森矩阵描述了多元函数在极值微小区域的曲率。海森矩阵最早于 19 世纪由德国数学家 Ludwig Otto Hesse 提出,并以其名字命名。数据处理中常利用海森矩阵来判定多元函数的极值点及极值附近性质。多元函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的海森矩阵表达式如式 (9),海森矩阵是由多元函数的二阶偏导数构成的 $n \times n$ 矩阵, n 为自变量参数的个数。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

当 A 的特征值都为正数时,则多元函数在该点处取极小值。当 A 的特征值都为负数时,则多元函数在该点处取极大值。对于其他情况通过海森矩阵并不能判断极值点。与此同时特征值越大,在其所对应的特征向量方向上,多元函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 变化越陡峭,反之则变化平缓。

在整个寻优算法中,定义编写了 flat 函数,作为平响应度的输出函数。flat 函数属于多元函数,其自变量包含了阴极元素材料、滤片元素材料、滤片厚度、滤片权重及能量范围。而在阴极和复合滤片结构确定,以及能量范围确定的条件下,flat 函数的自变量就仅剩三个滤片的厚度,以及两个滤片的占空比。因此,对所得到的第二组数据进行海森矩阵化处理,最终得到 5×5 矩阵,五个维度分别为厚 Au 滤片厚度、薄 Au 滤片厚度、Al 滤片厚度、权重 1、权重 2。海森矩阵的特征值和特征向量如图 6 所示。

由图 6(a)可以确定在所求数据点处,其海森矩阵具有正定性。因此可以得到多元函数 flat 在该点处取得极小值。与此同时,我们可以得到第五个特征值最大,因此在第五个特征向量方向极值变化最陡,第一个特征值最小,因此在第一个特征向量方向变化最缓慢。通过图 6(b),可以看出在第五个特征值所对应的特征向量中第二项绝对值最大,说明薄 Au 厚度对平整度影响最大。因此在实验设计中,对于薄 Au 滤片的加工需要特别注意,其精度的偏差往往会带来较大的实验误差。

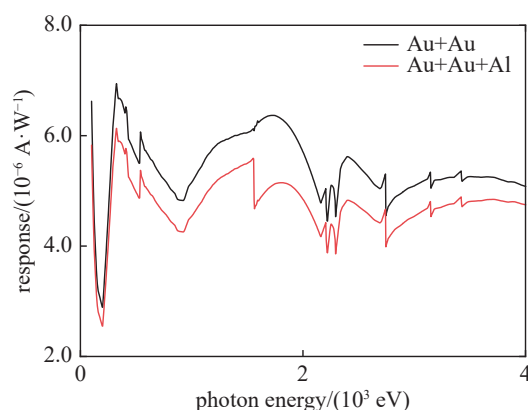


Fig. 5 Comparison of spectral response results

图 5 谱响应结果对比

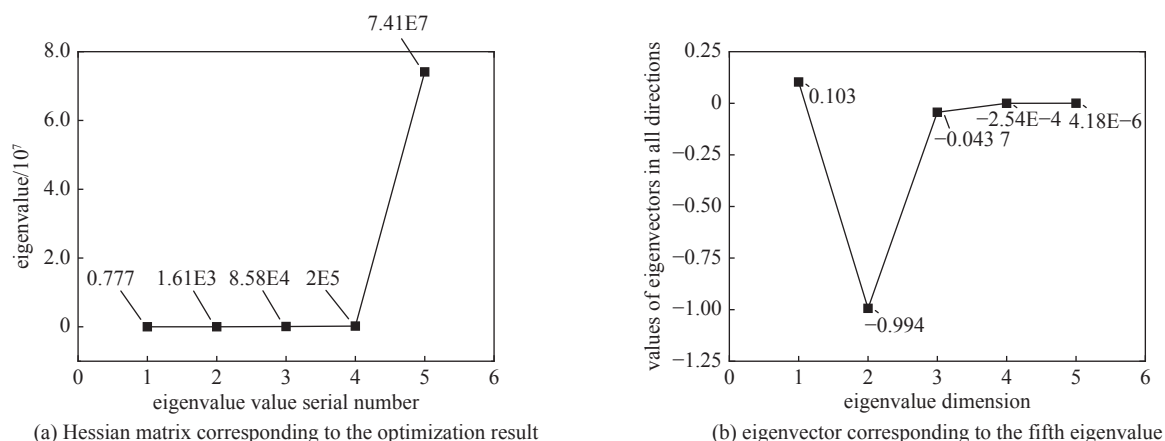


Fig. 6 Eigenvalues of the Hessian matrix obtained at the optimized parameter points and eigenvectors corresponding to the fifth eigenvalues

图 6 在优化所得参数点处所得到的海森矩阵特征值和第五个特征值所对应的特征向量。

5 结 论

作为平响应 X 射线二极管的重要组成部分,复合滤片的参数是实现平响应的关键。传统的优化方法是经过大量的实验模拟以及重复实验来得到一组较为优良参数组合,或者是在已经提出的滤片结构基础上进行离散处理。即对滤片的厚度以几个 nm 为步长,不断寻找更优化的参数配比,这种方法不仅耗时,同时还消耗了大量精力。本文所采用的粒子群算法为今后的复合滤片参数寻优提供了一种更简便且精度更高的方法。本文利用优化算法对前人提出的复合滤片结构进行进一步的优化,得到了平响应度更低的滤片参数。即对于两层 Au 滤片,其参数为厚滤片厚度 364.0 nm,薄滤片厚度 71.6 nm,权重为 0.829 2,此时平响应度达到了 1.218%。在已有结构的基础上,本文又提出了三滤片组合的方式,即在原有的基础上增加新的滤片并对其中一个滤片进行打孔,得到了更优良的滤片参数:平响应值比双层 Au 滤片的平响应值更加平坦。滤片参数为厚滤片 406.8 nm,薄滤片 64.1 nm,滤片 3 厚度为 185.9 nm,厚滤片权重 0.849 6,薄滤片权重 0.847 2,平响应度达到了 1.052%。本文工作为以后寻找满足不同能量波段的复合滤片组合提供了一种更快捷更精确的方法。

参 考 文 献:

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [2] Dewald E L, Glenzer S H, Landen O L, et al. First laser-plasma interaction and hohlraum experiments on the National Ignition Facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2005, 47: B405.
- [3] Glenzer S H, MacGowan B J, Meezan N B, et al. Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 085004.
- [4] 汪志诚. 热力学-统计物理[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2013. (Wang Zhicheng. Thermodynamics-statistical physics[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2013)
- [5] Meezan N B, Atherton L J, Callahan D A, et al. National Ignition Campaign Hohlraum energetics[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17: 056304.
- [6] Betti R, Chang Poyu, Spears B K, et al. Thermonuclear ignition in inertial confinement fusion and comparison with magnetic confinement[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17: 058102.
- [7] Dewald E L, Suter L J, Landen O L, et al. Radiation-driven hydrodynamics of high-Z hohlraums on the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95: 215004.
- [8] Li Zhichao, Jiang Xiaohua, Liu Shenye, et al. A novel flat-response X-ray detector in the photon energy range of 0.1-4 keV[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 073504.
- [9] Kornblum H N, Slivinsky V W. Flat-response, subkiloelectronvolt X-ray detector with a subnanosecond time response[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1978, 49(8): 1204-1205.
- [10] Clery D. Fusion's great bright hope. *Science*, 2009, 324(5925): 326-330.
- [11] Li Zhichao, Zhu Xiaoli, Jiang Xiaohua, et al. Note: Continuing improvements on the novel flat-response X-ray detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 106106.
- [12] 车兴森, 侯立飞, 杨轶濛, 等. 用于平响应X光探测器的复合滤片参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46: 1017008. (Che Xingsen, Hou Lifei, Yang Yimeng, et al. Parameter optimization of compound filters applied for flat-response X-ray detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46: 1017008)
- [13] Guo Liang, Li Sanwei, Zheng Jian, et al. A compact flat-response X-ray detector for the radiation flux in the range from 1.6 keV to 4.4 keV[J]. *Measurement*

- [Science and Technology](#), 2012, 23: 065902.
- [14] 郭亮. 空腔M带X光辐射能流研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012. (Guo Liang. The precise measurement and modeling of M-band radiation flux from void hohlraums[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012)
- [15] Bentley C D, Simmons A C. Spectral response calibrations of X-ray diode photocathodes in the 50-5900 eV photon energy region[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2001, 72(1): 1202-1204.
- [16] 郑志坚, 丁永坤, 丁耀南, 等. 激光惯性约束聚变综合诊断系统[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1073-1078. (Zheng Zhijian, Ding Yongkun, Ding Yaonan, et al. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2003, 15(11): 1073-1078)
- [17] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K. The characterization of X-ray photocathodes in the 0.1-10-keV photon energy region[J]. [Journal of Applied Physics](#), 1981, 52(3): 1509-1520.
- [18] Henke B L, Smith J A, Attwood D T. 0.1-10-keV X-ray-induced electron emissions from solids—Models and secondary electron measurements[J]. [Journal of Applied Physics](#), 1977, 48(5): 1852-1866.
- [19] Henke B L, Lee P, Tanaka T J, et al. Low-energy X-ray interaction coefficients: Photoabsorption, scattering, and reflection: $E= 100-2000$ eV $Z= 1-94$ [J]. [Atomic Data and Nuclear Data Tables](#), 1982, 27(1): 1-144.
- [20] Shi Yuhui, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer[C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98TH8360). Anchorage: IEEE, 1998: 69-73.
- [21] 王传珂, 李晋, 杨鸣, 等. 平响应X射线光阴极的理论设计与计算模拟[J]. [光子学报](#), 2017, 46: 0523001. (Wang Chuanke, Li Jin, Yang Ming, et al. Theoretical design and numerical simulation of flat response X-ray photocathode[J]. [Acta Photonica Sinica](#), 2017, 46: 0523001)
- [22] Del Rio M S, Dejus R J. XOP v2.4: recent developments of the X-ray optics software toolkit[C]//Proceedings of SPIE 8141, Advances in Computational Methods for X-Ray Optics II. 2011: 814115.
- [23] Del Rio M S. Advances in computational methods for X-ray and neutron optics[C]//Proceedings of SPIE 8141, Advances in Computational Methods for X-Ray Optics II. 2004: 814101.
- [24] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (Zhang Xianda. Matrix analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004)