

激光与光电子学进展

一种非线性拟合的激光损伤测试点分配方法

周家玮^{1,2}, 程旺², 殷晨轩^{2,3}, 郭广妍^{2,3}, 廖利芬^{2,3}, 张宏¹, 李裔¹, 郝强强¹, 王乐^{1**}, 麻云凤^{2,3*}¹中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;²中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;³中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 激光诱导损伤阈值(LIDT)是光学元件发展中不可或缺的一项重要指标,提高其测量结果的准确性仍是当前人们致力于研究的方向。基于蒙特卡罗法提出了一种损伤测试点优化分配方法,以提高LIDT拟合结果的准确性。针对测试样品有限的辐照测试面积及辐照光斑大小,模拟了一种非线性简并缺陷损伤模型,对不同通量水平下测试点变化对拟合LIDT结果的影响进行了敏感性分析。根据设定的损伤模型参数建立模型生成相关损伤数据,通过控制变量法对每次指定通量水平处的测试点数进行变更,在其余通量处测试点数不变的情况下,采用蒙特卡罗法对所有损伤数据进行多次模拟计算,绘制拟合结果均方根误差和测试点的关系曲线图。计算其相应测试点对损伤阈值拟合结果标准差的敏感性。从而以此敏感性为权重对各通量下的测试点进行更合理的分配。结果表明,该敏感性权重法的拟合结果的标准差为 0.272 J/cm^2 ,相比于标准平均分配方法的标准差 0.395 J/cm^2 减小了约31%。

关键词 激光诱导损伤阈值; 蒙特卡罗; 敏感性分析; 非线性拟合

中图分类号 O348.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222868

An Allocation Method of Laser Damage Test Point Based on Nonlinear Fitting

Zhou Jiawei^{1,2}, Cheng Wang², Yin Chenxuan^{2,3}, Guo Guangyan^{2,3}, Liao Lifen^{2,3},
Zhang Hong¹, Li Yi¹, Zhu Qiangqiang¹, Wang Le^{1**}, Ma Yunfeng^{2,3*}¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;²Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;³School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As an indispensable indicator in the development of optical components, laser-induced damage threshold (LIDT) is still the direction of research to improve the accuracy of its measurement results. In this paper, an optimal allocation method of damage test points based on Monte Carlo method is proposed to improve the accuracy of LIDT fitting results. According to the limited irradiation test area and irradiation spot size of the test sample, a nonlinear degenerate defect damage model is simulated, and the sensitivity analysis of the influence of test points change on the fitting LIDT results at different fluence levels is analyzed. Then, according to the setting parameters of damage model, a model is established to generate relevant damage data. The number of test points at each specified fluence level is changed by the control variable method, with the number of test points unchanged at the rest of the fluences. The Monte Carlo method is used to perform multiple simulation calculations on all damage data. The relationship curve between the standard deviation of the fitting results and the test points is drawn, so as to calculate the sensitivity of the corresponding test points to the standard deviation of the damage threshold fitting result. Finally, a more reasonable allocation of test points under each fluence is carried out with this sensitivity as the weight. The results show that the standard deviation of the fitting result of the sensitivity weight method is 0.272 J/cm^2 , which is about 31% lower than the standard deviation of 0.395 J/cm^2 in the standard distribution method.

Key words laser-induced damage threshold; Monte Carlo; sensitivity analysis; nonlinear fitting

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2022-12-15; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(Y2021048)、国家自然科学基金(62075203)、浙江省杰出青年基金(LR19F050001)、浙江省重点研发计划(2022C01127)

通信作者: *mayf100612@aircas.ac.cn; **calla@cjlu.edu.cn

1 引言

随着光学器件制造工艺的不断完善和激光技术的飞速发展,激光器功率从拍瓦级向更高功率迈进已成为未来的发展趋势^[1],而光学材料及器件的激光诱导损伤阈值(LIDT)仍然是其发展道路上的重要阻碍之一^[2-3]。为了提升光学元件对强激光辐射的抵抗性能,人们在提高光学器件的LIDT及其准确评估方面都做了大量研究。目前已经研究出了多种LIDT的损伤数据处理方法来拟合或计算损伤阈值,如损伤概率法(DFM)、二元搜索法(BST)、累积损伤概率法(Cumulative damage probability method)、最大似然法(MLE)等均已被用于1-on-1或S-on-1测试^[4-7]。徐均琪等^[8]通过对激光损伤阈值测试系统误差的溯源分析和计算机模拟,分析了激光能量和激光光斑大小对损伤概率线性拟合结果的影响,给出了优化方向来降低测量结果的不确定度。Arenberg^[9]在重复性和准确性方面比较了DFM和BST两种方法,结果表明DFM在平均意义上更为准确,而BST的重复性更好。Zorila等^[10]将DFM与累积损伤概率法及其极限情况进行了比较,分析了4种反向技术和3种损伤概率分布函数生成的12组测试数据拟合的结果,研究表明DFM的准确性最好(1.1%),累积法极限情况的精确性最佳(0.23%)。Bataviciute等^[11]分析了DFM方法中线性拟合会导致的系统误差,提出了一种基于变核和极大似然拟合技术的参数回归新概念,将通量波动纳入到损伤模型计算的考虑中,结果表明,该方法与DFM线性拟合方法相比,得到的LIDT评估更具可重复性。

综上所述,BST因其定义LOD(Lowest Observed Damage)的原理缺陷难免会对损伤阈值真值产生过高估计,但该方法在狭窄通量空间内可产生高重复性的结果,故而在生产环境中的质量保证及监测环节具有应用潜力。累积损伤概率法依据三个物理假设,将所有通量间隔的测试点都纳入单一间隔损伤概率的计算中,这样看似增加了损伤概率点计算中的测试点数量并降低了统计不确定性,但在计算损失概率接近于0的概率点时,额外的非损伤点会导致计算结果偏小,而在计算损失概率接近于1的概率点则相反,偏移误差会使损伤曲线梯度变陡,从而致使损伤阈值结果偏高、准确性降低。最大似然法作为一种无偏的阈值计算方法,近来发现拥有较大的发展潜力,但该方法还需要更多的研究去验证在不同损伤模型以及实际测试中的可行性。DFM作为国际标准ISO-21254中所描述的推荐方法,是通过损伤概率点的最小二乘(LS)拟合来外推出0概率损伤阈值的,虽然其计算结果对测试细节比较敏感,但在准确性、实用性等方面综合表现良好,仍是当前光学器件研发人员最常使用的测试方法。然而,最近的研究结果表明,DFM方法中的线性回归结果的准确性受到限制^[11-13]。考虑到LS直线拟合对实

际损伤情况的线性近似、LS对损伤概率分布的有偏估计以及激光通量波动等因素,线性拟合过程中都会引入额外的误差,造成结果准确性变差。且在小孔径(辐照面积有限)的光学元件表面进行损伤测试时,一般无法收集到充足的统计损伤数据来进行损伤概率拟合,上述问题就会愈发凸显^[13]。而非线性损伤模型可以更好地描述损伤数据的特征变化,且对激光通量波动不那么敏感,其虚拟模型更接近实际测量情况^[10-12]。

当前的研究大多致力于改善LIDT测量方法本身,如优化激光损伤测量中的损伤模型及损伤数据的评估方法。而ISO-21254中的评估程序并没有准确地描述非线性损伤模型中通量间隔数的选择以及用于数据回归的概率点的数量,因此测试人员需要主观处理数据,这将导致计算的LIDT结果没有可比性,此外,损伤测量中通量选择不佳也会导致拟合结果的准确性受限^[6-9]。针对这一突出问题,主要研究了在测试样品辐照面积有限的情况下损伤测试点数的分配方案。根据蒙特卡罗方法建立损伤模型生成损伤数据,利用损伤概率法对计算的概率点进行拟合,在总测试点相同的情况下,研究不同通量水平下测试点的分配对损伤阈值拟合结果的影响,结果表明,合理地分配测试点有助于改善LIDT拟合结果。

2 研究背景及介绍

2.1 DFM的原理及背景

简述DFM的测试流程是先根据标准测试程序及实际情况确定测试点总数,通过类似样品的历史数据或实际样品的表面测试来确定能量密度区间,即最高和最低的能量密度水平 H_{top} 和 H_{bottom} ,能量密度区间必须足够宽,以覆盖损伤概率为0以及损伤概率为100%的能量密度水平。再按照测试程序来划分该能量密度区间:将其划分为 $I-1$ 个等宽 ΔH 的能量密度间隔,对应的激光光斑能量密度为 $H_i(i=1,2,\dots,I)$, $H_1 < H_2 < \dots < H_I$,一共 I 个能量密度水平。一般将总测试点数平均分配给每个能量密度等级进行测试,把样品表面分割为测试点总数为 N_{tes} 个独立部位,对每个部位使用特征良好的激光进行辐照,辐照后用诺玛斯基显微镜观察样品判断损伤,其他损伤判别方法这里不做讨论。在 H_i 能量密度下的损伤概率为损伤的测试点个数 n_i^D 和总的测试点个数 n_i 的比值,根据 I 个能量密度计算出的损伤概率点 P_i 进行线性或非线性拟合从而得出损伤阈值 T 。

原则上,DFM适用于不同能量密度下的单次辐照LIDT测试(1-on-1)或多脉冲辐照测试(S-on-1)^[4]。在非线形损伤模型方面,当前的国际标准中没有提供明确的方法去确认损伤测试的通量水平阶级数 I ,所以主观选择的通量水平阶级数 I 对计算拟合损伤阈值具有很大的影响。标准中也同样没有明确规定如何选择测试点分配有助于提高非线性回归拟合结果的准确性,这都导致了测试的激光诱导损伤数据拟合出的结果有

很大差异。

由实验数据计算获得的 LIDT 数值的准确性是目前非常重要的计量问题,需要在测试样品辐照面积有限(总测试点数有限)的情况下尽可能地提高测量结果的准确性。一般来说,测试此类样品的 LIDT 需要事先了解相关的知识经验,从而确认该材料的缺陷分布集成模型,使用适当的物理损伤模型进行损伤概率拟合。以往的研究也表明,非线性拟合获得的 LIDT 结果的准确性和可重复性对许多测试参数高度敏感^[6-7,9],通过优化选定的测试模型的测试参数,可以改善 LIDT 的测试拟合结果。

2.2 基于简并缺陷集成的损伤概率模型

光学器件及材料的纳米缺陷是在制造过程(抛光、清洗、涂层、沉积等)中就存在的一种固有现象,这种损伤前驱体在受到纳秒激光辐照时可能会由于光吸收而损伤^[14-15]。表面缺陷和激光通量在 20 世纪 80 年代早期由 Porteus 和 Seitel^[16]提出,多年来人们又研究提出了狄拉克退化、幂定律^[16]、高斯定律^[14]形式的损伤模型。更完整复杂的损伤概率模型需要更多的损伤统计数据,显然这在小孔径、有限的辐照测试面积上是难以实现的。为了证明实际效果且保持模型尽可能的简单,本文选用了损伤缺陷的简并模型。该模型中所有缺陷都被视为是相同的,即具有相同的损伤阈值 T_{defect} 以及相同的辐照激光高斯分布,对应于损伤缺陷的简并集合。如果局部通量水平超过 T_{defect} ,表面缺陷就会发生损伤。假定样品的表面缺陷平均密度为 D 。对于这种常见的非线性损伤模型,本文所提的原理及启发可以扩展到其他损伤模型和缺陷分布中。

假设目标平面上的一个旋转对称聚焦高斯激光光斑的局部通量 $F(r)$ 表示为

$$F(r) = F_0 \exp\left[-(r/w)^2\right], \quad (1)$$

式中: F_0 为峰值能量密度; r 为高斯激光光束相应的径向距离; w 为通量水平 F_0 在 $1/e^2$ 级处的高斯光束半径。当峰值通量 F_0 发生变化时,辐照圆形光斑对应的局部通量水平 $F(r) = T_{\text{defect}}$ 的面积也会发生变化,其大小可以表示为

$$A_{\text{eff}}(w, F_0, T_{\text{defect}}) = \pi w^2 \ln(F_0/T_{\text{defect}}). \quad (2)$$

辐照区域内缺陷的平均损伤数量 $\gamma_d = A_{\text{eff}} \cdot D$, 随着峰值通量 F_0 的增大,辐照光斑面积 A_{eff} 及缺陷平均损伤数量 γ_d 也会增大。这样在单次激光辐照过程中,激光辐照到 A_{eff} 区域缺陷的概率 $P(F_0)$ 可以由泊松统计得到。当缺陷的平均损伤数量为 γ_d 时,辐照区域 A_{eff} 中精确辐照到缺陷数目为 d 的概率为

$$P_s(d) = \frac{(\gamma_d)^d}{d!} \cdot \exp(-\gamma_d). \quad (3)$$

辐照后样品的损伤和不损伤的概率总和为 1,即

$$P + P_{\text{ND}} = 1. \quad (4)$$

从式(3)中推导出损伤的缺陷数目为 0(即无缺陷

损伤)时的概率 $P_{\text{ND}} = P_s(0)$, 就可以得出辐照区域内至少有一个缺陷损伤的概率 P 表示为

$$P = 1 - P_{\text{ND}} = 1 - P_s(0) = 1 - \exp(-\gamma_d). \quad (5)$$

由式(5)可以推导出在理想辐照条件下,表面缺陷的损伤概率分布式为

$$P(F_0) = \begin{cases} 0, & F_0 \in [0, T_{\text{defect}}) \\ 1 - \left(\frac{F_0}{T_{\text{defect}}}\right)^{-A \times D}, & F_0 \in [T_{\text{defect}}, F_M] \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $A = \pi w^2$ 是样品上辐照光斑对应通量水平 F_0 在 $1/e^2$ 处的面积; F_M 为该损伤模型计算概率用的最大通量; 将 $F_0 > F_M$ 时的损伤概率 P 视为 1; T_{defect} 为激光损伤阈值。以此非线性损伤模型为基础进行后续的蒙特卡罗模拟。

2.3 统计损伤概率误差

考虑到测试样品有限的辐照面积(测试点数),损伤测试中频率估计与实际概率值的偏差不可被忽略,这对 LIDT 拟合结果的准确性有着重要影响。一般来说,光学器件的激光损伤测试可以被视为一个伯努利试验,即可能有“1(损伤)”或者“0(无损伤)”这两种结果,每次测试的试验结果是相互独立、互不影响的,重复 n 次相同条件下的实验 P_{ND} , 就可以计算出在给定辐照条件下损伤点个数 n_i^D 与总测试点个数 n_i 的比值 n_i^D/n_i 来评估损伤概率。当实验次数 n 足够大时,就可以把测试的频率估计,即比值 n_i^D/n_i 视为一个具有标准差的正态分布^[17],

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}. \quad (7)$$

式(7)表示以 n 个测试点估计的损伤概率与损伤概率真值 p 的标准偏差。当损伤概率 p 接近中间水平 0.5 时,即将损伤概率的分布视为正态分布; 当损伤概率向 0 或 1 逼近时,其概率分布形状会逐渐偏离正态呈偏斜状。而标准差 σ_p 表示测试的数据点以相同概率分布在平均值两端,这种情况下测试的误差条就可能存在小于 0 或大于 1 的问题,这显然与测量概率的实际情况不符。该问题可以通过另一种方法来解决,即 Hildenbrand 等^[18]发表的关于二项式分布数据的贝叶斯解释,虽然之前提到的损伤概率 p 的计算是由泊松统计量推导出的,但 DFM 的损伤测试中只有两种结果(损伤及未损伤),因而其概率分布本质上可以由 n 次独立重复的伯努利试验来解释(即二项分布)。假设成功造成激光损伤的概率为 p , 经过 n 次试验后恰好获得 k 次成功损伤结果的概率可以由概率密度函数来定义,

$$P_{\text{BD}} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}. \quad (8)$$

如式(8)所示,二项分布试验的结果是不确定的,理论上存在 $n+1$ 次结果,且在 $p \neq 0.5$ 时,其统计分布也是不对称的,呈偏态分布。在测试点 n 有限的情况下,损伤概率 p 的二项分布随概率增大的变化如图 1 所

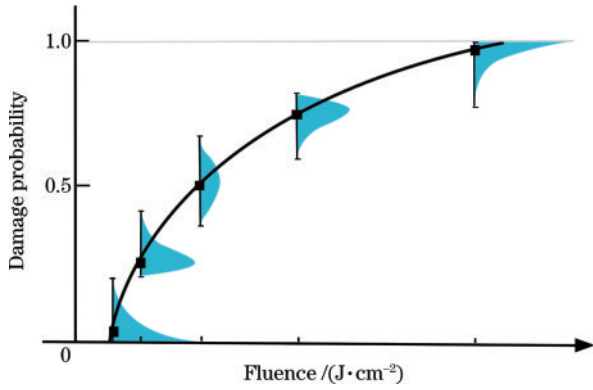


图1 非线性损伤概率曲线中不同通量水平处对应的概率分布
Fig. 1 Probability distribution corresponding to different fluence levels in nonlinear damage probability curve

示,损伤曲线由上述简并缺陷损伤模型得出。

在现实测试中,不同通量水平下理想的(泊松)损伤概率真值 P_{ide} 是无法得知的,需要将实际LIDT实验中测试的 $P_{est}=k/n$ 作为对 P_{ide} 的估计值,这样就可以将 P_{est} 中的 n 和 k 值结合二项式分布对 P 在 $0\sim 1$ 区间的所有可能性进行计算。在这种情况下,式(8)的结果(P_{BD})在 $P=P_{est}$ 时是最大的,可以从这种二项分布计算出更接近真实情况的误差条,该方法可以从数值方法中得以证明。当损伤概率接近0或1时,根据二项式公式得到的分布及误差条是不对称的,呈偏态分布,这种性质也正好适用于物理损伤概率模型。

3 蒙特卡罗实验方法

3.1 损伤模型的建立

对于损伤概率曲线的拟合,研究更多关注的是0概率LIDT,因而主要目标在于提高LIDT拟合结果的准确性。以全部拟合结果与损伤阈值真值的标准差来表示准确性,与测试点数相关影响损伤概率曲线拟合的主要因素有两个:1)式(7)表示的频率估计的标准偏差,虽然在损伤概率向0或1逼近时其概率呈偏态分布,但也可以通过式(7)近似表示其偏离程度;2)在不同通量水平处损伤概率 P 估计的偏差对LIDT拟合结果的敏感性。最后各通量水平处测试点变化对LIDT拟合结果准确性的影响是研究的重点。对损伤数据进行非线性LS拟合运算的数学分析较为复杂,如果选用更加完整的多参数非线性损伤模型,其敏感性分析就愈发困难。因而提出了利用蒙特卡罗方法分析各通量水平下测试点变化对LIDT拟合结果的敏感性,当模拟次数足够多、统计数据充足时,之前所述的模拟拟合结果与LIDT真值的标准差将趋于定值,该数值表现了当前测试点分配方案拟合结果的整体性能。将选定通量水平下的测试点数作为输入变量,多次拟合的损伤阈值结果与LIDT真值的标准差作为输出绘制关系曲线进行观察,便可以跳过中间复杂的数学分析研究其敏感性,从而合理地分配测试点数提高损伤阈值拟

合结果的准确性。

鉴于实际测试中难以收集到充足、无人为误差的统计数据,且由激光器稳定性、测量仪器性能及测试环境等实验因素产生的测量误差难以避免,建立了一个基于蒙特卡罗的非线性损伤模型进行模拟,研究了在有限损伤测试点的情况下,各通量下测试点分配对0概率损伤阈值拟合结果的影响。所提模型模拟了一个覆盖随机均匀缺陷的样品表面,缺陷的面平均密度为 D ,单个缺陷可以理解为表面上随机均匀生成坐标的点,而所有缺陷都具有相同的损伤阈值 T_{defect} ,只有当辐照的局部通量水平高于设置的缺陷损伤阈值时,缺陷才会发生损伤。缺陷的起始损伤阈值即0概率损伤阈值 T_{defect} 设置为 20 J/cm^2 ,样品的表面平均缺陷密度设置为 3500 counts/cm^2 ,为了指定辐照激光光斑的大小,在实验中设置辐照光斑面积 A_{eff} 为 $1.27 \times 10^{-3}\text{ cm}^2$,对应激光峰值通量 $1/e^2$ 处的高斯光束半径 $\omega=200\text{ }\mu\text{m}$ 。考虑到常用的光学镜片直径尺寸为 25.4 mm ,在这样有限的辐照样品面积下,设定损伤测试点的总数 $N_{tes}=200$ 。实验中的测试通量范围 $[F_0, F_M]$ 设置为 $[20.5, 40]\text{ J/cm}^2$,对应的损伤概率 P_D 约为 $[0.103, 0.953]$ 。为了减少每个概率点的统计不确定性应尽量减少概率点个数,但考虑到需保证拟合曲线数据点的充足统计而避免偶然性,选用了10个概率点进行曲线拟合。

3.2 结合实际测试

之前的研究表明ISO 21254标准中描述的对每个通量水平下的测试点进行平均分配的方法并不是评估损伤阈值的最佳方法^[6-7],而如果需要对不同通量水平下的测试点重新分配,在没有进行实际的LIDT损伤测试之前,一般无法得知每个通量水平下对应的损伤概率等损伤信息,因此也难以评估该通量水平下测试点数对拟合结果标准差的敏感性。

为了解决上述问题,可以采用相同样品的历史数据,获得对应通量水平下的损伤概率 P_{est} 进行敏感性分析。或者分配出一部分必要的测试点对各个通量水平下的损伤概率进行先验测试,每个通量水平至少选取10个测试点进行辐照,此部分测试点分配也可以参考类似样品的历史数据,但因为统计数据较少,若直接使用先验测试数据计算损伤概率 $P_{pre}=n_{D-pre}/(n_{D-pre}+n_{ND-pre})$, n_{D-pre} 和 n_{ND-pre} 分别为先验测试的损伤点数和未损伤点数,以此作为对各通量下损伤概率真值 P_{ide} 的估计可能会导致误差过大。因而采用先验测试拟合的损伤概率曲线来计算对应通量水平下的损伤概率 $P_{fit-pre}$,以此来取代 P_{pre} 即可对该通量水平下的 P_{ide} 有一个较为准确的估计。实际测试中无法得知该器件材料的LIDT真值,即无法准确计算模拟运行结果的标准差来评估整体性能,这也同样可将相同样品的历史数据或先验测试数据拟合的损伤阈值近似作为真值。根据先前计算的 $P_{fit-pre}$ 进行敏感性分析后再分配剩余的测试点数,在各通量下辐照完剩余的测试点,并结合之前

的测试数据即可得到该通量水平下的最终损伤概率 $P_{fit-final} = (n_{D-pre} + n_{D-aft}) / (n_{D-pre} + n_{ND-pre} + n_{D-aft} + n_{ND-aft})$, n_{D-aft} 和 n_{ND-aft} 为后续测试的损伤点数及未损伤点数,拟合各通量水平处的损伤概率 $P_{fit-final}$ 即可得到 LIDT。

3.3 模拟计算结果及分析

以 ISO 21254 标准中的损伤测试流程为基础,对每个通量水平设置最少 10 个测试点作为起始,每次进行控制变量,改变该通量水平下的测试点数而其余通

量水平处的测试点数量不变,变化区间为 [10, 60], 步长为 10。基于式(6),利用 MATLAB R2021a 软件编写了相关程序生成了损伤数据。当统计数据充足时其拟合结果与 LIDT 真值的标准差就会趋于定值,而该定值也正能体现当前测试点分配方案的性能。研究的损伤阈值经过 50 万次模拟拟合后计算出标准差,绘制不同通量水平处测试点变化与拟合结果标准差的敏感性关系曲线图。拟合结果的曲线图如图 2 所示。

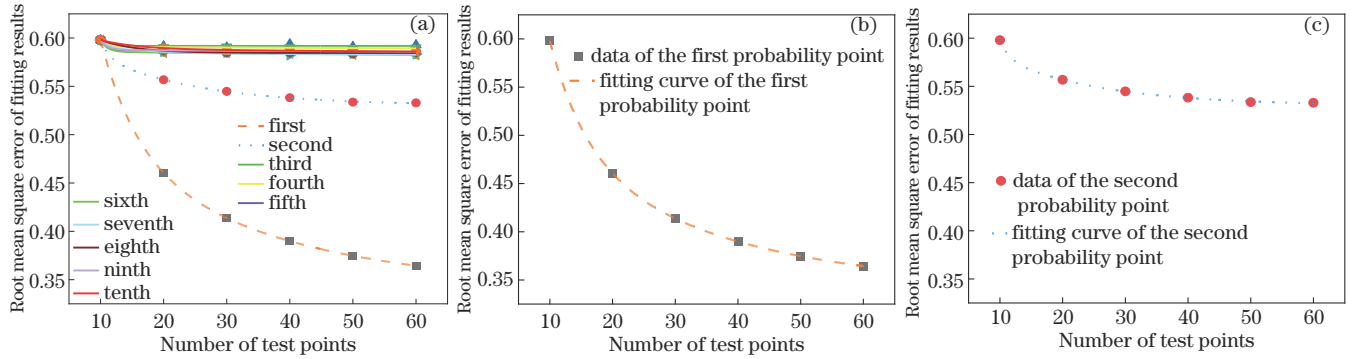


图 2 10 级通量水平下测试点变化与拟合结果均方根误差之间的灵敏度关系曲线图。(a)10 级能量密度下不同测试点数与 LIDT 拟合结果均方根误差的曲线图;(b)第一级能量密度下不同测试点数对应的曲线图;(c)第二级能量密度下不同测试点数对应的曲线图

Fig. 2 Sensitivity relationship curve between the change of test point and the root mean square error of fitting results under the level of 10 fluences. (a) Curve between the different test points and the root mean square error of fitting results under the level of 10 fluences; (b) corresponding curve to different test points under the first level energy density; (c) corresponding curve to different test points under the second level energy density

从图 2(a)可以看出,以曲线斜率表示不同通量水平处的测试点数量对损伤阈值拟合结果标准差的敏感性。为了便于区分不同通量水平处的敏感性曲线,第一和第二级通量水平处即图 2(b)、(c)使用了不同线型,而其余通量水平的曲线差异较小即全部用实线表示。敏感性曲线的分析需要对模拟计算的数据点进行拟合,拟合函数的选取也会影响敏感性曲线。考虑到曲线趋势、非线性损伤模型以及之前所述的两个主要因素,选用了二项的指数函数形式进行拟合 $y = A_1 \times \exp(-x/t_1) + A_2 \times \exp(-x/t_2) + y_0$ 。从拟合曲线图 2(b)、(c)中看出第一和第二级通量水平处的测试点对损伤阈值拟合结果较为敏感,而第 3~10 级通量水平处的敏感性较差,为了保证

损伤阈值拟合结果的准确性,最好使各通量水平处分配的测试点对应的敏感性总和最高。经计算第 3~10 级通量水平处敏感性较低,只需分配最低的 10 个测试点,而将剩余的 120 个测试点分配给第一和第二级通量水平。对相应敏感性曲线进行简单规划求解即可得出所要分配的测试点数量,第一和第二级通量水平处分别分配了 78、42 个测试点。各通量水平下测试点分配如表 1 所示。再根据表 1 中的测试点分配进行模拟计算,50 万次模拟后的结果如表 2 所示,发现敏感性权重法的损伤阈值拟合结果的标准差为 0.272 J/cm²,相比于 ISO 标准中的平均分配法的 0.395 J/cm²减小了约 31%,其平均值及整体分布相较平均分配方法也更为准确。

表 1 两种方法在不同通量下的测试点分配方案

Table 1 Test point allocation schemes of two methods under the different fluences

Item	Energy density / (J·cm ⁻²)									
	20.5	22.6667	24.8333	27	29.1667	31.3333	33.5	35.6667	37.8333	40
Damage probability / %	10.29	42.33	61.40	73.28	80.98	86.12	89.66	92.15	93.94	95.26
Sensitivity weight distribution method	78	42	10	10	10	10	10	10	10	10
Average distribution method	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

如图 3 所示,在精确性和重复性方面将非线性拟合下的标准平均方法与敏感性权重分配法进行了比较,损伤模型为上述提到的简并缺陷损伤模型。进行了 50 万次蒙特卡罗损伤测试模拟,以收集充足可靠的统计数据。结果表明,ISO 标准中的平均分配方法拟

合计算的 LIDT 统计分布较为广泛,其精确性和重复性较差,导致了较大的置信区间和低置信度。而敏感性权重分配方法与之相比,其重复性和精确性有所改善,在相同的置信区间内可以确保更高的置信水平。虽然敏感性权重分配方法在整体平均意义上是准确

表 2 两种方法在 50 万次模拟后的结果

Table 2 Results of two methods in five hundred thousand simulations

Item	Standard average distribution method / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Sensitivity weight distribution method / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Model parameter estimation $D / \text{cm}^{-2}, T_{\text{defect}} / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
Average value	19.999	19.984	$2000 \leq D \leq 7000$
Standard deviation of 500000 simulation results	0.272	0.395	$15 \leq T_{\text{defect}} \leq 30$

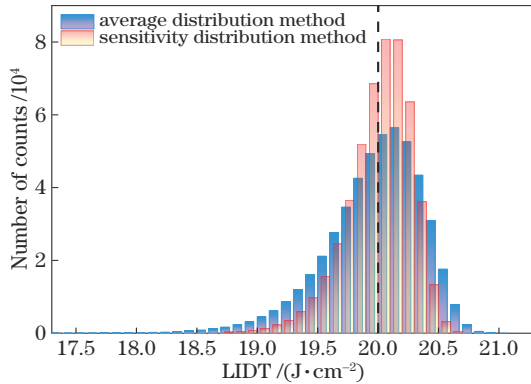


图 3 平均分配方法及敏感性权重法在非线形拟合中的 LIDT 结果分布

Fig. 3 LIDT distribution of average distribution method and sensitive weight distribution method under nonlinear fitting

的,但两种方法在损伤阈值真值附近的置信区间都有所偏移,整体的统计分布呈右偏态。这可能是由于统计数据不足时损伤概率接近于 0 或 1 的概率呈偏态分布,以及损伤模型的曲线特性在非线形 LS 拟合时导致拟合结果的分布偏移,此部分误差是损伤概率法方法本身缺陷导致的,难以避免。

4 结 论

在测试点数有限的情况下,本文研究了一种非线性简并缺陷损伤模型的测试点分配方法,通过蒙特卡罗法及控制变量法研究指定通量下测试点变化对损伤阈值拟合结果标准差的影响,从而根据计算的敏感性权重合理地分配测试点数量。该敏感性权重方法相比于 ISO 标准中的平均分配方法,在总测试点数不变的情况下,计算拟合结果的准确性有了明显提升。结果表明,该方法模拟计算结果的标准差为 0.272 J/cm^2 , 比平均分配方法的标准差 0.395 J/cm^2 降低了约 31%。受限于损伤概率法的自身缺陷,两种方法在一定置信区间内拟合结果的分布都有所偏移,但敏感性权重法的整体结果在平均意义及置信水平方面都更为可靠。在拟合敏感性曲线的过程中考虑拟合函数的选取较为重要,本文根据影响因素选用了二项的指数函数进行拟合。结合实际测试情况,在敏感性分析过程中对损伤概率以及损伤阈值真值的估计都不可避免地会产生一定误差,DFM 的测试细节如拟合损伤概率曲线函数的参数估计范围等也会影响 LIDT 的拟合结果。本文

结合实际测试选取了相同的、较为宽泛的模型参数估计范围,未来将继续开展此方面的研究工作。该方法可以推导扩展至其他复杂完整的非线性损伤模型,对与 DFM 类似的损伤阈值测试方法也具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
Li F Q, Han W, Wang F, et al. Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
- [2] 吴权, 樊仲维, 余锦, 等. 纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060004.
Wu Q, Fan Z W, Yu J, et al. Research progress of nanosecond regime pulsed fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060004.
- [3] 赵元安, 邵建达, 刘晓凤, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(1): 011004.
Zhao Y A, Shao J D, Liu X F, et al. Tracking and understanding laser damage events in optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(1): 011004.
- [4] Technical Committee ISO/TC 172, Optics and photonics, Subcommittee SC 9, Electro-optical systems. International Organization for Standardization: ISO 21254.2—2011, Lasers and laser-related equipment: test methods for laser-induced damage threshold, Part 2: threshold determination [S]. Switzerland, Geneva, 2011.
- [5] Arenberg J W. Accuracy and precision of laser damage measurements made via binary search techniques[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2714: 80-89.
- [6] Schrameyer S, Jupé M, Jensen L, et al. Algorithm for cumulative damage probability calculations in S-on-1 laser damage testing[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8885: 88851J.
- [7] Arenberg J W, Thomas M D. Improving laser damage threshold measurements: an explosive analogy[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8530: 85301L.
- [8] 徐均琪, 苏俊宏, 葛锦蔓, 等. 光学薄膜激光损伤阈值测量不确定度[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 0806007.
Xu J Q, Su J H, Ge J M, et al. Measurement uncertainty of laser-induced damage threshold of the optical thin films[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 0806007.

- [9] Arenberg J W. Direct comparison of the damage frequency method and binary search technique[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(12): 121819.
- [10] Zorila A, Stratan A, Nemes G. Comparing the ISO-recommended and the cumulative data-reduction algorithms in S-on-1 laser damage test by a reverse approach method[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(1): 013104.
- [11] Bataviciute G, Grigas P, Smalakys L, et al. Revision of laser-induced damage threshold evaluation from damage probability data[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 045108.
- [12] Arenberg J W, Thomas M D. Benefits from a change in the fitting function in the damage frequency method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5991: 599127.
- [13] Melninkaitis A, Bataviciute G, Sirutkaitis V. Numerical analysis of laser-induced damage threshold search algorithms and their uncertainty[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7504: 75041D.
- [14] Krol H, Gallais L, Grèzes-Besset C, et al. Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing[J]. *Optics Communications*, 2005, 256(1/2/3): 184-189.
- [15] Carr C W, Bude J D, DeMange P. Laser-supported solid-state absorption fronts in silica[J]. *Physical Review B*, 2010, 82(18): 184304.
- [16] Porteus J O, Seitel S C. Absolute onset of optical surface damage using distributed defect ensembles[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(21): 3796-3805.
- [17] Arenberg J W. Calculation of uncertainty in laser-damage thresholds determined by use of the damage-frequency method[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 7504: 75041D.
- [18] Hildenbrand A, Wagner F R, Akhouayri H, et al. Accurate metrology for laser damage measurements in nonlinear crystals[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(8): 083603.