

基于太赫兹时域光谱技术的多层涂层 高效可靠测厚方法

曹丙花^{1*}, 郑德栋¹, 范孟豹², 孙凤山², 刘林³

¹中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221000;

²中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221000;

³北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076

摘要 为实现基于太赫兹技术的多层涂层的快速与可靠测厚, 提出了一种自适应教与学优化算法, 改进了标准 Kent 混沌映射, 提高了初始种群多样性; 并基于步长调节优化和次优个体优化, 改进了教阶段与学阶段, 提高算法寻优精度和效率。将该算法与太赫兹波测量多层涂层厚度的理论模型结合, 建立了涂层厚度求解方法。最后, 制备了多层涂层样件, 开展了太赫兹无损检测实验。实验结果表明: 建立的涂层厚度求解方法相比于全局最优算法的效率提高了 1 倍, 单次实验仅需 50 s 左右便可快速得到多层涂层的厚度、折射率和消光系数, 测量所得的多层涂层厚度的相对误差在 1.5% 以内, 且标准差最大不超过 1.7 μm 。基于太赫兹测量信号, 所提方法可以高效、准确及可靠地计算多层涂层的厚度。

关键词 测量; 太赫兹; 厚度测量; 多层涂层; 教与学优化算法; 理论模型

中图分类号 O433.4; TB96

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0112001

Efficient and Reliable Thickness Measurement Method for Multilayer Coatings Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy Technology

Cao Binghua^{1*}, Zheng Dedong¹, Fan Mengbao², Sun Fengshan², Liu Lin³

¹School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China;

²School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, China;

³Beijing Institute of Aerospace Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China

Abstract To realize a fast and reliable thickness measurement of multilayer coatings based on terahertz technology, an adaptive teaching-learning-based optimization algorithm was proposed. In this algorithm, the standard Kent chaotic mapping was improved to increase the initial population diversity. Moreover, the teaching and learning phases were enhanced based on step adjustment optimization and suboptimal individual optimization to achieve improved optimization accuracy and efficiency of algorithm. Then, the proposed algorithm was combined with a theoretical model for measuring multilayer sample thicknesses with terahertz waves. A method for determining the thickness of the coatings was developed. Finally, multilayer coatings were prepared and terahertz nondestructive testing experiments were performed. Results show that the efficiency of the proposed method is twice that of the global optimal algorithm. The thickness, refractive index, and extinction coefficient of the multilayer coatings can be obtained quickly in a single measurement in only ~ 50 s. The relative error of the measured multilayer coating thickness is within 1.5%, and the maximum standard deviation is no more than 1.7 μm . Based on the terahertz measurement signal, the proposed method can be used to efficiently, accurately, and reliably determine the thickness of

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-31; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(62071471)

通信作者: *caobinghua@cumt.edu.cn

multilayer coatings.

Key words measurement; terahertz; thickness measurement; multilayer coatings; teaching and learning optimization algorithm; theoretical model

1 引言

防护涂层被广泛应用于汽车、轮船以及航空等领域,对提高产品的耐高温、耐腐蚀和防水等性能起着至关重要的作用^[1-2]。防护涂层的厚度是表征涂层性能与质量的重要指标之一^[3]。因此,准确测量涂层厚度对评价涂层性能具有重要意义。通常,金相法和电镜法被广泛应用于涂层厚度的检测^[4],但都需要对样品进行破坏,以便在显微镜下观察涂层的横截面,才能获得涂层厚度,然而这两种方法耗时较长且难以实现在线检测。因此,有效快速的涂层无损检测在实时控制产品质量方面具有重要的意义^[5-6]。

近年来,无损检测方法的发展十分迅速,并且在工业生产中得到广泛的应用^[7-9]。例如,涡流、超声、红外热成像和 X 射线等都可实现涂层厚度检测。然而,这些传统检测方法往往具有局限性。涡流检测^[10]要抑制提离,且待测试件必须能够导电;超声^[11]测厚往往需要在探头与试件之间添加有利于超声传播的耦合剂;而红外热成像法^[12]要对待测样品进行加热,且对热辐射率较低的材料进行检测时,需要粘贴石墨涂层;X 射线^[13]甚至会对人体健康有害。相较于上面叙述的传统检测技术,THz 时域光谱技术是一种新型的无损检测技术。由于 THz 具有瞬态性、宽带性、穿透性、相干性及低能性等独特特性,近些年来在物质定量分析、成像、雷达探测、厚度检测等无损检测领域得到广泛的应用^[14-15]。目前,基于 THz 技术的涂层测厚主要基于飞行时间与理论模型。基于飞行时间的测厚常用于单层涂层厚度检测^[16];基于理论模型的测厚方法利用优化算法对各层涂层厚度进行迭代求解,直至理论模型产生的太赫兹仿真信号与实验信号幅值差异小于设定阈值或达到最大迭代步数^[17]。2016 年,Nguyen 等^[18]使用传统的最小二乘优化算法来求解多层涂层的厚度,由于传统优化算法易陷入局部最优解,且求解结果强烈依赖于初始值,所得结果误差较大;2017 年,Krimi 等^[19]利用广义的 Rouard 模型来模拟任意多层薄膜内的太赫兹波与物质的相互作用,然而使用的遗传优化算法有收敛速度慢、控制变量较多等问题;2020 年,Cao 等^[20]建立了任意层涂层的等效反射系数的模型,并使用全局最优算法进行厚度的迭

代优化,获得了较高精度的各层厚度值,但受限与算法以梯度遍历的方式寻优,该算法获得结果所需的时间较长,效率低。

模型法获得材料参数过程本质上是优化参数,而优化过程中各个参数之间往往具有耦合性,会导致优化时陷入局部最优解,从而使得算法的精度和效率降低。2011 年,Rao 等^[21]提出了教与学优化(TLBO)算法,标准 TLBO 算法的初始化过程存在种群个体多样性差、求解过程易陷入局部最优的问题。Chen 等^[22]评价了学生个体多样性,并基于高斯分布生成新个体,但未考虑算法跳出局部最优策略,难以保证稳定性。Shukla 等^[23]通过迭代步数构建了局部与全局寻优能力调节函数,以提高寻优性能,但该算法未将调节能力与适应度更新情况相关联,容易导致调节错误,引起过早收敛问题。

鉴于上述传统优化算法与群智能优化算法存在的问题,本文提出了自适应 TLBO 算法,在保证测厚精度的同时,提高了测厚的效率,从而实现了可靠与高效测厚。

2 THz 波测量多层样品厚度的理论模型

2.1 THz 波测量多层样品厚度理论模型的建立

检测材料参数的前提是建立 THz 波测量多层样品厚度理论模型,当 THz 波入射单层涂层时,THz 波在单层模型中传播的过程如图 1 所示。由菲涅耳公式可得涂层界面的反射和透射系数为

$$r_{01} = \frac{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_1 \cos \theta_1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1}, \quad (1)$$

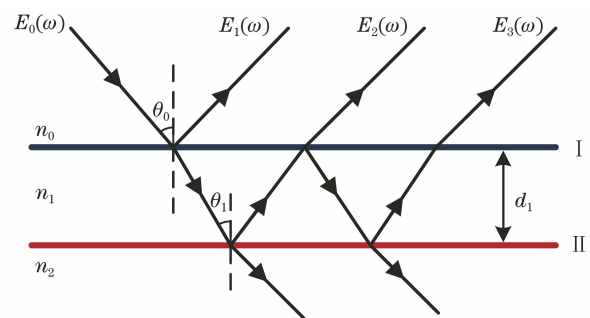


图 1 单层模型中 THz 波传播示意图

Fig. 1 Schematic of THz wave propagation in a single-layer model

$$t_{01} = \frac{2\tilde{n}_0 \cos \theta_0}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1}, \quad (2)$$

式中： \tilde{n}_0 、 \tilde{n}_1 和 \tilde{n}_2 分别表示介质 0、介质 1 和介质 2 的复折射率； r_{01} 、 r_{12} 为太赫兹波在介质 0/介质 1、介质 1/介质 2 界面的菲涅耳反射系数； t_{01} 为太赫兹波在介质 0/介质 1 界面的菲涅耳透射系数。

由 Rouard 等效界面理论^[24]可得样品的 THz 总信号为

$$E_R(\omega) = \frac{r_{01} + r_{12} e^{i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{i\beta_1}} E_0(\omega), \quad (3)$$

式中： $E_0(\omega)$ 为入射信号；相位因子 $\beta_1 = -\frac{2\tilde{n}_1 \omega d_1}{c}$ ；

单层模型的等效反射系数 $r_{eq} = \frac{r_{01} + r_{12} e^{i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{i\beta_1}}$ 。

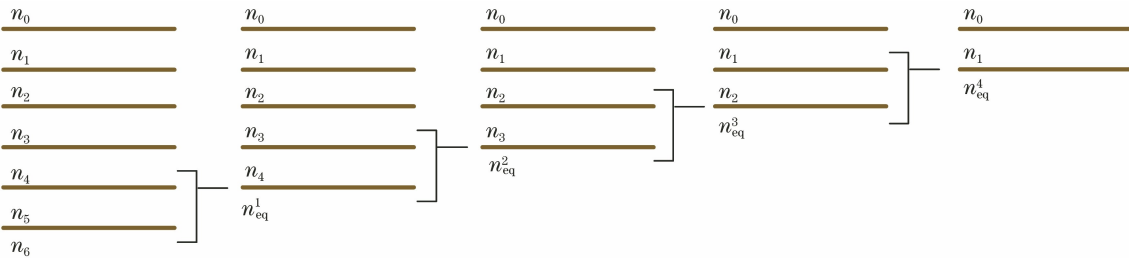


图 2 多层结构推导等效反射系数示意图

Fig. 2 Schematic of multi-layer structure deriving equivalent reflection coefficient

2.2 THz 波测量多层样品厚度理论模型的修正

若电磁波入射到光滑表面则会发生全反射。但当表面为粗糙表面时，由于散射作用，反射波的振幅减小。电磁波在粗糙表面的反射可由 Kirchhoff 近似^[25]给出：

$$R_s = R_0 e^{-(4\pi\delta/\lambda)^2}, \quad (5)$$

式中： R_s 为粗糙表面的镜面反射率； R_0 为镜面反射率和漫反射系数之和； λ 为光的波长； δ 为均方根粗糙度。

引入粗糙度的影响，对模型进行修正后，修正后的多层模型等效反射信号模型为

$$E_{total}(\omega) = \frac{r_{01} e^{-8(\pi\delta_1/\lambda)^2} + r_{eq}^l e^{i\beta_1}}{1 + r_{01} e^{-8(\pi\delta_1/\lambda)^2} r_{eq}^l e^{i\beta_1}} E_0(\omega), \quad (6)$$

此时的第 l 层与第 $l-1$ 层界面等效反射系数 $r_{eq}^l =$

$$\frac{r_{l-1,l} e^{-8(\pi\delta_l/\lambda)^2} + r_{l,l+1} e^{i\beta_l}}{1 + r_{l-1,l} e^{-8(\pi\delta_l/\lambda)^2} r_{l,l+1} e^{i\beta_l}}$$

3 TLBO 算法

3.1 标准 TLBO 算法

教与学优化算法是一种新型启发式算法，通过

图 2 为多层结构获得等效反射系数的过程，对于 l 层的多层结构，可以看作在 $l-1$ 层的底层上再添加一层，应用 Rouard 等效界面理论，从底层往上，将第 l 层、 $l-1$ 层、... 依次等效为具有等效反射系数的界面，利用等效反射系数来表示电磁波在多层结构中的传播。等效反射系数 r_{eq}^l 随着层数 l 的变化而变化，最终可以获得多层结构的等效反射信号模型：

$$E_{total}(\omega) = \frac{r_{01} + r_{eq}^l e^{i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{eq}^l e^{i\beta_1}} E_0(\omega), \quad (4)$$

式中：第 l 层与第 $l-1$ 层界面的等效反射系数 $r_{eq}^l =$

$$\frac{r_{l-1,l} + r_{l,l+1} e^{i\beta_l}}{1 + r_{l-1,l} r_{l,l+1} e^{i\beta_l}}$$

建立老师指导学生与学生间相互学习的数学模型来完成对优化问题的迭代求解，获取最优参数，具体步骤如下。

1) 种群初始化

TLBO 算法初始化过程中明确了求解域上、下界，并基于随机方式赋予个体初值，数学模型为

$$x^i = l_m - r_{rand} \cdot (u - l_m), \quad (7)$$

式中： x^i 为第 i 个粒子初值； r_{rand} 为 $[0, 1]$ 之间的随机数； l_m 为搜索空间上界； u 为求解域下界。

2) 教阶段

以最优个体作为教师，指导其余学生完成种群适应度更新，数学表达式为

$$x_{t+1}^i = x_t^i - r_i \cdot (x_T - F_T \cdot \bar{x}), \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^i, \quad (9)$$

式中： x_T 为最优个体； x_t^i 为第 t 次迭代中学生个体 i 处于搜索空间的位置； r_i 为学习步长，取值范围为 $[0, 1]$ ； F_T 为教学因子，为 $[1, 2]$ 之间的随机整数； \bar{x} 为适应度均值。

3) 学阶段

为进一步提升寻优结果精度，增强学生个体间

相互学习的过程以促进适应度提高,可表示为

$$x_{t+1}^i = \begin{cases} x_t^i - r_1 \cdot (x_t^i - x_t^j), & f(x_t^i) < f(x_t^j) \\ x_t^i - r_1 \cdot (x_t^j - x_t^i), & f(x_t^i) > f(x_t^j) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: r_1 为学习因子,取值为 $[0,1]$; $f(x_t^i)$ 为第 t 次迭代中学生个体 i 的适应度; $f(x_t^j)$ 为第 t 次迭代中学生个体 j 的适应度。

3.2 自适应 TLBO 算法

标准 TLBO 为双阶段寻优算法,相比传统粒子群等单阶段优化算法,具有求解精度高、收敛速度较快等优点。然而,厚度反演参数取值差异大且具有极强耦合性,导致标准 TLBO 初始化过程存在种群个体多样性差、求解过程容易陷入局部最优的问题,求解精度与稳定性较差。为此,基于上述几个方面对 TLBO 算法进行改进。

为提高求解效率,设置适当个体数,然而标准 TLBO 基于随机化方式进行种群初始化,难以保证学生个体均匀分布在搜索空间中,导致算法过早收敛,稳定性降低。目前,研究结果表明 Kent 混沌映射产生的变量具有较强的遍历性^[26],能够提高初始种群的多样性。标准 Kent 混沌映射为

$$\begin{cases} z_{q+1} = \frac{z_q}{\mu}, & z_q \in (0, \mu) \\ z_{q+1} = \frac{(1 - z_q)}{1 - \mu}, & z_q \in [\mu, 1) \end{cases}, \quad (11)$$

$$x^i = l_m - z_{q+1} \cdot (u - l_m), \quad (12)$$

式中: μ 为 $[0,1]$ 之间的随机数; z_q 为第 q 个混沌变量,取值范围为 $[0,1]$ 。

标准 Kent 混沌映射能够保证小个体数目条件下搜索范围每个区间均含有学生个体,但受 μ 为随机数的影响,分布均匀性仍需提高。为此提出改进的 Kent 混沌映射,将分布最集中区间混沌变量转移至较少区间中,保证了均匀性,提高了初始种群多样性,具体公式为

$$z_{q+1}^{\text{new}} = \begin{cases} l_{\min} + (l_{\max} - l_{\min}) \cdot r_{\text{rand}}, \\ \text{if num}(z_{q+1}^{\text{old}}) = V_{\max}, \lambda > 0.5, \\ z_{q+1}^{\text{old}}, \text{ else} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: l_{\min} 为个数最小区间下界, l_{\max} 为最小区间上界; $\text{num}(z_{q+1}^{\text{old}}) = V_{\max}$ 表示当前混沌变量处于个数最多区间内。

设置 $\mu = 0.2$, 选取标准 Kent 混沌映射与改进的 Kent 混沌映射进行对比,均产生 20 个混沌变量,两者分辨均匀对比结果如图 3 所示。由图 3 可知,

改进的 Kent 混沌映射将 1 号与 10 号区域的混沌变量均匀地转移到其他区域,展现了更优的遍历性。因此,基于改进 Kent 混沌映射进行种群初始化,公式为

$$x^i = l_m - z_{q+1}^{\text{new}} \cdot (u - l_m). \quad (14)$$

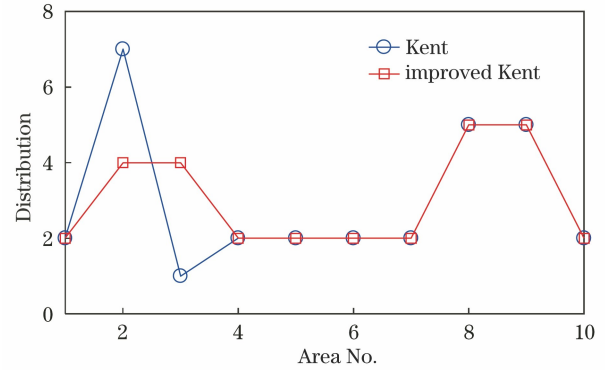


图 3 标准 Kent 与改进的 Kent 混沌映射遍历性比较
Fig. 3 Comparison of ergodicity between standard Kent chaotic map and improved Kent chaotic map

教阶段中,学生个体均依据教师进行适应度更新,导致空间位置不断聚拢。然而,反演问题中局部极值较多,聚拢现象容易引起算法陷入局部最优点,降低求解精度。为此,处于迭代计算后期时,学生个体适应度不及平均值,增加学习步长,增强全局寻优能力,从而获取更大搜索空间,具体表达式为

$$\begin{aligned} x_{t+1}^i &= x_t^i - \gamma \cdot r_i \cdot (x_T - F_T \cdot \bar{x}), \\ & \quad x_t^i < \text{mean}(x_t), \end{aligned} \quad (15)$$

式中: γ 为 $[2,3]$ 之间的随机数,用于调大学习步长。

学阶段中,通过随机方式进行学习间的互助学习获取进步。然而,适应度大的学生个体与适应度较小个体进行学习时,不利于种群向最优解逼近。为此,本文改进了学阶段,引入次优个体与适应度更新情况监督学阶段性能,若处于迭代计算后期且适应度连续 m 代未更新,说明算法逼近最优解能力弱,应采用次优个体帮助种群进步,具体为

$$x_{t+1}^i = x_t^i - r_1 \cdot (x_t^i - x_t^j) - r_2 \cdot (x_t^i - x_t^{\text{suboptimal}}), \quad (16)$$

式中: $x_t^{\text{suboptimal}}$ 为第 t 次迭代中次优个体; r_2 为监督因子,用于表征次优个体对学阶段性能的影响程度,取值范围为 $[0,1]$ 。

图 4 为自适应 TLBO 算法流程图,具体步骤如下:

- 1) 基于 Kent 混沌映射进行参数初始化;
- 2) 若迭代进入后期且适应度不及平均值,即 $t \geq 0.5t_{\max}$ 且 $f(t) \leq \text{mean}[f(t)]$, 则进入基于步长优化的教阶段,否则跳转到步骤 3);

- 3) 使用标准的教阶段进行寻优;
- 4) 若迭代进入后期且适应度有连续 m 代未更新, 即 $t \geq 0.5t_{\max}$ 且 $f[x_T(t-m)] = f[x_T(t)]$, 则进入基于次优个体优化的学阶段来产生新的种群, 然后进入步骤 5), 否则直接跳转到步骤 5);
- 5) 标准的学阶段;
- 6) 若适应度函数值达到阈值或到达最大迭代步数, 则输出模型最优参数, 否则返回步骤 2);
- 7) 获得优化后的参数。

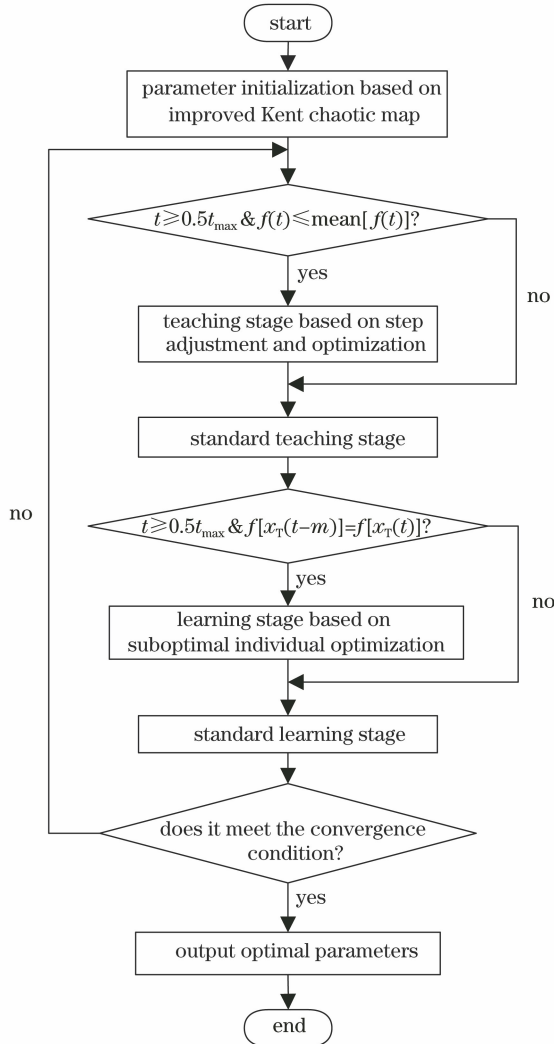


图 4 自适应 TLBO 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive TLBO algorithm

4 基于模型的多层涂层测厚算法

为了检测多层涂层各涂层的厚度, 将所建立的太赫兹多层理论模型与自适应 TLBO 算法相结合, 使用基于理论模型的反演算法, 模型法测厚的流程如图 5 所示, 具体步骤如下。

- 1) 处理后的样品实验信号。

2) 以建立的 THz 波测量多层涂层厚度理论模型为基础, 使用自适应 TLBO 算法对 THz 波测量多层涂层厚度理论模型中的折射率、消光系数、纸张和空气隙厚度等参数进行迭代寻优。

- 3) 将算法优化后得到的模型仿真信号与实验信号对比, 得到目标函数:

$$f(t) = \sum_{t=t_1}^{t_2} |E_{\text{experiment}}(t) - E_{\text{theory}}(t)|, \quad (17)$$

式中: $E_{\text{experiment}}(t)$ 为时域实验信号; $E_{\text{theory}}(t)$ 为理论模型理论信号; t_1, t_2 为时域中选取的两个时间点。

- 4) 若目标函数不满足收敛条件, 则返回步骤 2); 反之, 结束测厚流程。

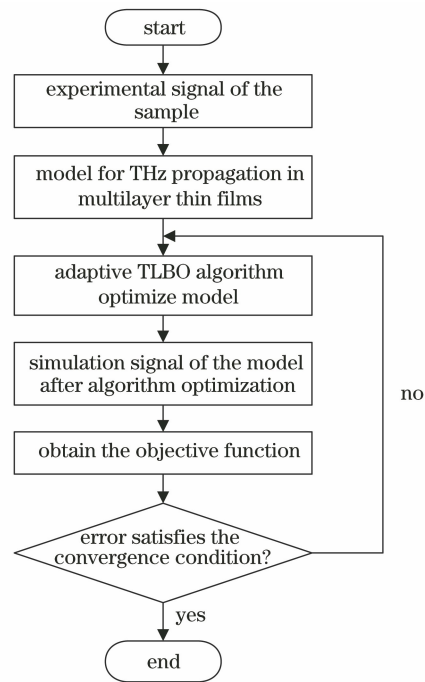


图 5 模型法测厚流程图

Fig. 5 Flow chart of thickness measured by model method

5 实验结果与分析

5.1 测量实验装置

实验系统采用具有反射模式的太赫兹时域系统 (T-Ray 5000, TeraMetrix 公司, 美国), 如图 6 所示。图 7 为太赫兹时域系统 (THz-TDS) 的原理图, 该 THz-TDS 的激光源为光纤激光器, 输出功率为 20 mW, 脉冲峰值功率为 2.5 kW, 脉冲宽度为 80 fs, 重复频率为 100 MHz, 波长为 1050~1080 nm, 探测频谱宽度为 0.2~2.5 THz, 峰值频率处动态范围 50 dB。非球面 THz 透镜焦距为 75 mm, 可以将太赫兹光聚焦成直径约为 2 mm 的点。该系统激光器产生的飞秒脉冲激光经色散补偿后被分束镜分成

两束。一束是泵浦光,它入射在光电导天线(PCA)发射器上,并通过偏置电压产生 THz 脉冲,用准直透镜和非球面聚焦透镜聚焦后,THz 脉冲准直并聚焦在样品上。另一束光束是通过光纤延迟线入射到 PCA 检测器上的探测光,通过测量 THz 电场的变化来获得 THz 时域波形。最后,计算机通过 A/D 转换器收集 THz 信号。

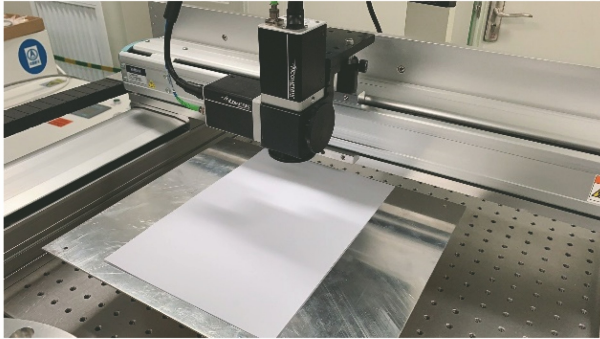


图 6 THz-TDS 图

Fig. 6 THz-TDS diagram

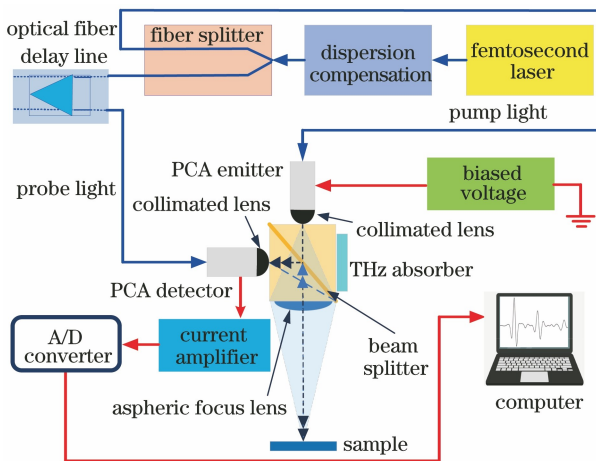


图 7 THz-TDS 原理图

Fig. 7 Schematic of THz-TDS principle

5.2 样品

首先,使用 70 g/m^2 的打印纸制备了两组不同的样品,用于验证所提方法的可行性。制备时打印纸压平放在 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的不锈钢板上,再使用胶带固定。使用上述方法可以制备两组不同类型的样品,第一组,将单层打印纸固定在金属板上,可以看作打印纸-空气隙-金属基体三层结构;第二组,在金属基体上固定两张打印纸,这个样本将由打印纸-空气隙-打印纸-空气隙-金属基体五层结构组成。多层样品结构如图 8 所示。

此外,为验证所提方法在实际涂层测厚中的高效性与可靠性,采用等离子喷涂法制备了航空发动机热障涂层(TBC)。如图 9(b)所示,外层为陶瓷层

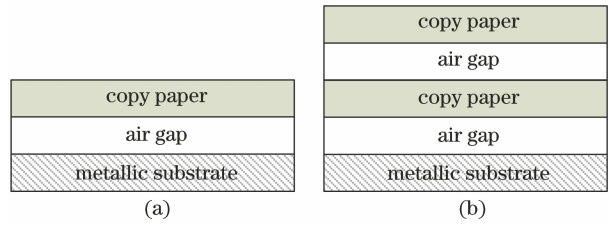


图 8 多层样品示意图。(a)单层纸固定在金属基板上;
(b)双层纸固定在金属基板上

Fig. 8 Schematic of multilayer samples. (a) Single-layer paper sheet fixed on the metallic substrate;
(b) double-layer paper sheet fixed on the metallic substrate

(TC),次层为金属粘结层(BC)。为了得到热障涂层中 TC 的实际厚度,对其进行了破坏性检测。图 9(c)为涂层制备公司提供的 Leica DMI3000M 型电子显微镜在 $200\times$ 下观察的 TBC 试样图像,测得陶瓷层厚度为 $305.3 \mu\text{m}$ 。

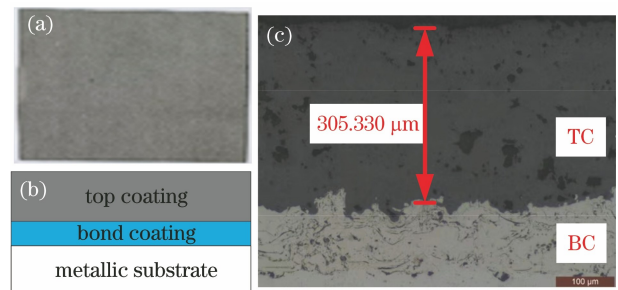


图 9 热障涂层。(a)顶层涂层的表面形貌;
(b)结构示意图;(c)电子显微镜图

Fig. 9 TBC. (a) Surface morphology of top coating;
(b) structure diagram; (c) electron microscope image

5.3 结果与分析

使用 THz-TDS 对制备的两种样品进行了检测,获得了两种样品的 THz 检测信号,如图 10 所示。试样 1 各个界面的首次回波脉冲分为三种,标号依次是空气-打印纸、打印纸-空气隙、空气隙-钢板界面的反射,如图 10(a)所示;样品 2 中有空气-打印纸、打印纸-空气隙、空气隙-打印纸、打印纸-空气隙、空气隙-钢板界面共 5 种界面反射,如图 10(b)所示。接下来,只需将理论模型与优化算法相结合,不断进行迭代寻优,使理论模型输出的反射信号尽量与样品的实验信号匹配,以获得准确的厚度。

应用于理论模型反演的自适应 TLBO 算法和标准 TLBO 算法的迭代步数为 220,种群个数为 30,样品 1 待优化参数为 4 个,样品 2 待优化参数为 8 个。理论模型反演算法在 Matlab2016b 环境编写,并在处理器为 Inter Corei5-7300H、显卡为 GTX1050、内

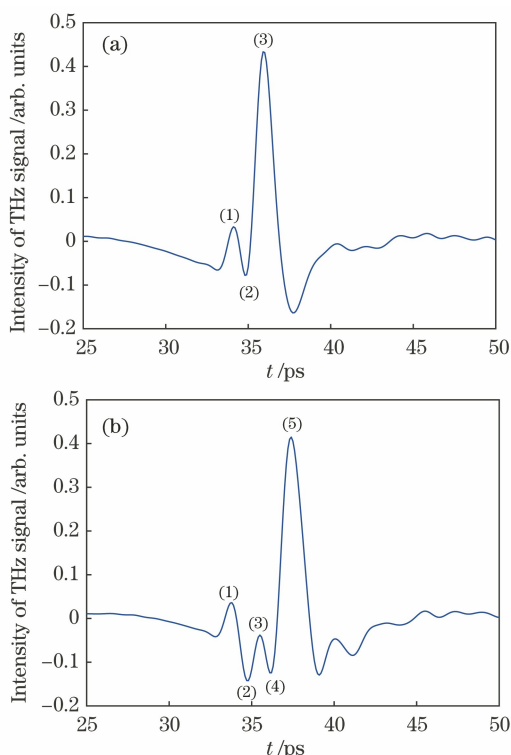


图 10 THz 检测信号。(a)样品 1；(b)样品 2

Fig. 10 THz measurement signal. (a) Sample 1; (b) sample 2
 存为 12G 的计算机上进行实验。样品 1 在三种方法处理下的最优个体适应度如图 11 所示,可以看出,自适应 TLBO 算法的收敛速度快于标准 TLBO,且由于迭代计算的后期容易陷入局部最优解,在迭代步数 110 步后,自适应 TLBO 算法中改进的教阶段与改进的学阶段发挥作用,增大搜索空间,帮助算法跳出局部最优解(如图 11 虚线框所示),从而自适应 TLBO 算法的最优个体适应度减小,向全局最优解收敛,说明了自适应 TLBO 算法的

快速性与准确性。

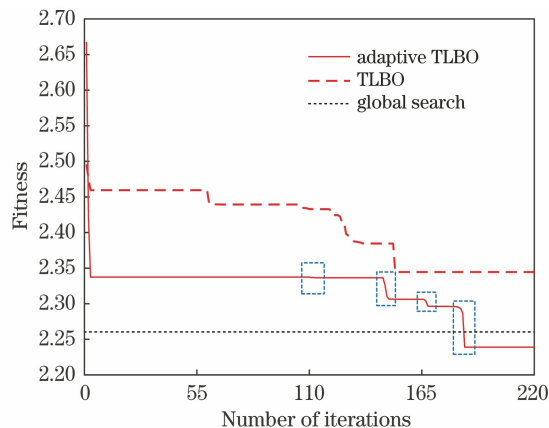


图 11 自适应 TLBO、标准 TLBO 与文献[20]中全局搜索的适应度比较

Fig. 11 Comparison of fitness between adaptive TLBO algorithm, standard TLBO, and global search in Ref. [20]

为验证该自适应 TLBO 算法的性能,对两样品各进行了 50 次求解样品厚度的实验,统计这 50 次实验中自适应 TLBO 算法发挥作用的次数,结果如表 1 所示,表中效率的定义为自适应 TLBO 算法在计算厚度过程中发挥的作用,跳出局部最优解的次数与算法全部运行次数之比。由表 1 可知,两种样品的实验中,自适应 TLBO 算法的有效率均达到了 80% 以上,其中在样品 2 的实验中自适应 TLBO 算法有效率达到了 90%;相较于样品 2 的实验,样品 1 实验中,该算法有效率较低的可能原因为样品 1 为三层结构,比样品 2 的优化参数少,所以陷入局部最优解的可能性降低,使得自适应 TLBO 算法有效率下降。同时此算法单次求解厚度所需时间仅为 50 s 左右,效率大幅度提高。

表 1 自适应 TLBO 算法发挥作用统计表

Table 1 Adaptive TLBO algorithm functioning statistics table

Sample	Number of experiments	Number of times which adaptive TLBO algorithm has worked	Effectiveness / %	Run time / s
Sample 1	50	42	84	48.3
Sample 2	50	45	90	49.7

对两种打印纸样品进行厚度优化后获得的波形拟合结果如图 12 所示。图 12(a)、(b)分别为样品 1 和样品 2 的测量信号与模拟信号的对比,‘measurement’为测量信号,‘TLBO’为标准 TLBO 的模拟信号,‘adaptive TLBO’为自适应 TLBO 算法的模拟信号,‘Residual’为测量信号与模拟信号的残差。测量信号与模拟信号的残差较小,采用模型法拟合出的模拟信号与实验测量的波形基本一

致,说明理论模型可以准确地描述 THz 波与样品的相互作用,而且自适应 TLBO 算法所拟合的信号残差小于标准 TLBO 的结果,此时自适应 TLBO 算法优化所得的厚度参数相较于标准 TLBO 的结果更加准确。

表 2 和表 3 分别为自适应 TLBO 算法下样品 1 和样品 2 的测量参数,打印纸实际厚度由千分尺测量获得,测量厚度为 50 次实验结果的均值。从两表

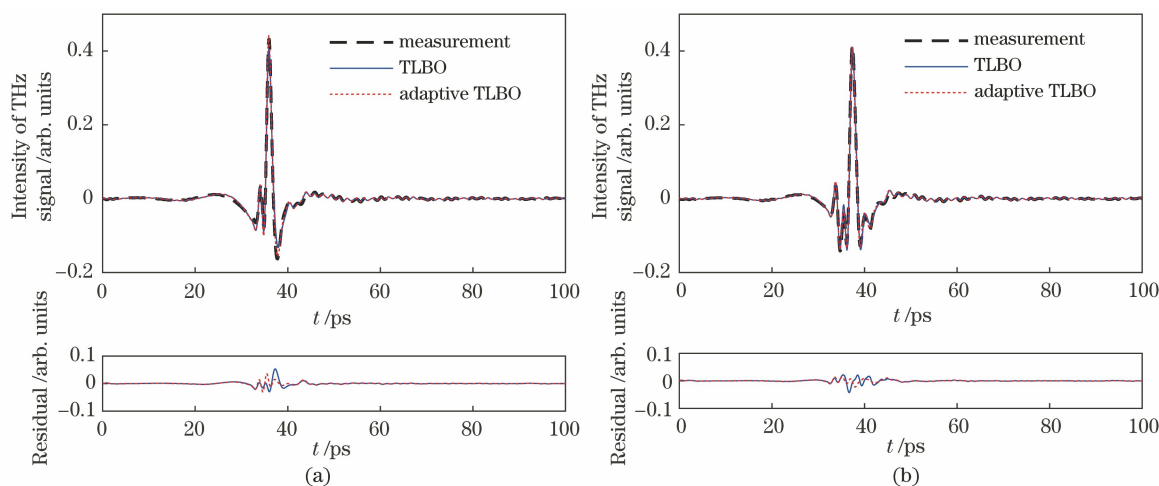


图 12 测量信号与模拟信号的比较。(a)样品 1; (b)样品 2

Fig. 12 Comparison of measurement signal and simulation signal. (a) Sample 1; (b) sample 2

表 2 自适应 TLBO 算法下样品 1 的测量参数

Table 2 Measurement parameters of sample 1 under the adaptive TLBO algorithm

Layer	Refractive index	Extinction coefficient	Actual thickness / μm	Measured thickness / μm	Relative error /%
Layer 1	1.44	0.048	92 ± 1.1	92.5 ± 1.48	0.54
Layer 2			Unknown	116.8	

表 3 自适应 TLBO 算法下样品 2 的测量参数

Table 3 Measurement parameters of sample 2 under the adaptive TLBO algorithm

Layer	Refractive index	Extinction coefficient	Actual thickness / μm	Measured thickness / μm	Relative error /%
Layer 1	1.45	0.048	92 ± 1.1	93.3 ± 1.61	1.41
Layer 2			Unknown	103.8	
Layer 3	1.46	0.050	92 ± 1.1	93.3 ± 1.54	1.41
Layer 4			Unknown	129.6	

可知,自适应 TLBO 算法获得的打印纸测量厚度与实际厚度的误差在 1.5% 以内,测量厚度的标准差不超过 $1.7 \mu\text{m}$,这表明该算法得到的测量厚度是比较准确的,且结果具有一定的可靠性。样品 2 厚度的误差大于样品 1 的可能因为样品 2 优化参数较多,使测量厚度的精度不如样品 1。对于不同基重的打印纸,折射率通常为 $1.3 \sim 2.0$,消光系数为 $0 \sim 0.1$ ^[17],这与本文所得的结果吻合较好。

表 4 和表 5 是两种样品在三种不同算法下得到

的测量厚度,相比标准 TLBO 算法,自适应 TLBO 算法与文献[20]的方法均可得到准确的厚度平均值,自适应 TLBO 算法的结果最好,相对误差在 1.5% 以内;而且该算法标准差最小,文献[20]方法次之,标准 TLBO 算法最差。由表 6 可以得出,三种算法中自适应 TLBO 算法效率最高,相较于文献[20]方法,自适应 TLBO 算法效率提高了 1 倍。综上可知,在保证精度的同时,自适应 TLBO 算法大幅度提升了效率,兼具高效性、可靠性和精确性。

表 4 三种算法下样品 1 的厚度结果

Table 4 Thickness results of sample 1 under the three algorithms

Layer	Actual thickness / μm	TLBO		Adaptive TLBO		Method in Ref. [20]	
		Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%
Layer 1	92 ± 1.1	94.2 ± 1.68	2.39	92.5 ± 1.48	0.54	92.7 ± 1.55	0.76
Layer 2	Unknown	113.1		116.8		118.9	

表 5 三种算法下样品 2 的厚度结果

Table 5 Thickness results of sample 2 under the three algorithms

Layer	Actual thickness / μm	TLBO		Adaptive TLBO		Method in Ref. [20]	
		Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%
Layer 1	92 \pm 1.1	94.4 \pm 1.84	2.61	93.3 \pm 1.61	1.41	93.4 \pm 1.66	1.52
Layer 2	Unknown	104.5		103.8		103.1	
Layer 3	92 \pm 1.1	94.8 \pm 1.71	3.04	93.3 \pm 1.54	1.41	93.3 \pm 1.62	1.41
Layer 4	Unknown	128.4		129.6		130.4	

表 6 三种算法单次运行耗时

Table 6 Time consumption of the three algorithms

Sample	in a single run			unit: s
	TLBO	Adaptive TLBO	Method in Ref. [20]	
Sample 1	40.4	48.3	118.3	
Sample 2	40.6	49.7	119.1	

因此,从信号和反演结果来看,原文样品分别是双层和四层结构。从太赫兹角度来看,不同涂层的厚度、折射率和结构虽然与打印纸样品有差异,但检测算法原理是一致的。为了进一步证实上述想法,使用制备的热障涂层进行了实验。

验证自适应 TLBO 算法在其他类型涂层测厚中的高效性与可靠性的结果如下。TBC 样品的信

号如图 13 所示,图 13(a)中标号依次是空气-TC 界面、TC-BC 界面的反射、TC-BC 界面的回波。对 TBC 样品进行厚度优化后,获得的波形拟合结果如图 13(b)所示,此时采用模型法拟合出的模拟信号与实验测量的波形依然基本一致,说明理论模型可以准确地描述 THz 波与 TBC 样品的相互作用,验证了自适应 TLBO 算法对涂层测厚的适应性。表 7 是 TBC 在自适应 TLBO 算法下得到的测量结果,其测量厚度与实际厚度的相对误差最大仅为 1.38%,且所需时间仅为 48 s 左右。表 8 为自适应 TLBO 算法对陶瓷层的测量参数。表 9 为三种算法对 TBC 的单次运行耗时。综上可知,自适应 TLBO 算法在对 TBC 进行测厚时也可以大幅度提升效率,同时兼具高效性、可靠性和精确性。

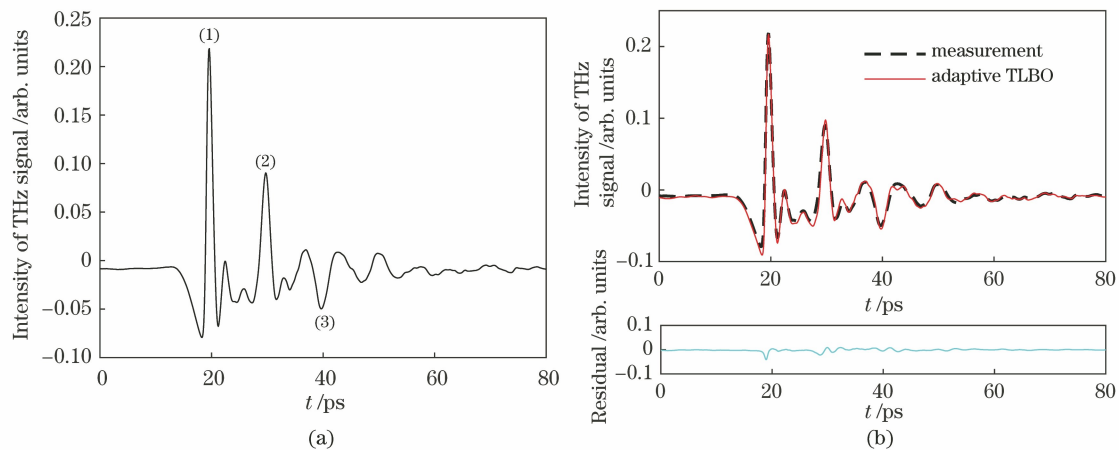


图 13 TBC 样品的信号。(a) TBC 检测信号;(b) TBC 测量信号与模拟信号的比较

Fig. 13 Signal of TBC sample. (a) THz measurement signal of TBC; (b) comparison of measurement signal and simulation signal of TBC

表 7 三种算法下 TBC 的厚度结果

Table 7 Results of TBC's thickness under the three algorithms

Sample	Actual thickness / μm	TLBO		Adaptive TLBO		Method in Ref. [20]	
		Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%	Measured thickness / μm	Relative error /%
TBC	305.3	312.2 \pm 1.77	2.26	301.1 \pm 1.52	1.38	300.4 \pm 1.56	1.60

表 8 自适应 TLBO 算法下陶瓷层的测量参数

Table 8 Measurement parameters of TC under the adaptive TLBO algorithm

Sample	Refractive index	Extinction coefficient	Actual thickness / μm	Measured thickness / μm	Relative error of thickness /%
TC	4.90	0.072	305.3	301.1 \pm 1.52	1.38

表 9 三种算法对 TBC 的单次运行耗时

Table 9 Single running time of three different algorithms for TBC unit: s

Sample	TLBO	Adaptive TLBO	Method in Ref. [20]
TBC	40.1	46.2	114.8

6 结 论

提出了一种基于理论模型和自适应 TLBO 算法的多层涂层测厚方法。针对反演中算法易陷入局部最优和收敛速度较慢,导致测厚精度低和效率低的问题,从种群多样性、步长调节优化和次优个体优化三个方面对 TLBO 算法改进,降低了算法陷入局部最优的可能性。自适应 TLBO 算法相较于标准的 TLBO 算法,提高了寻优精度和效率,而对比文献[20]的方法,在保证精度的同时,大幅度提高了算法的效率,仅需 50 s 左右便可获得误差精度在 1.5% 以内的多层涂层厚度值,实现了高效与可靠的多层涂层测厚。

目前,自适应 TLBO 算法仅应用在单一材料的涂层样品中,未验证泛用性。因此,后续研究工作聚焦于将所提方法应用在不同材料且结构复杂的多层涂层测厚问题上,以进一步测试方法的精度与效率,使其更符合实际工程需求。

参 考 文 献

- [1] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [2] Cheng B, Ren J J, Gu J, et al. High-precision thickness detection of coatings based on terahertz propagation simulation model[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1312001.
程滨, 任姣姣, 顾健, 等. 基于太赫兹传播仿真模型的涂层高精度厚度检测 [J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1312001.
- [3] Dong Y, Lawman S, Zheng Y L, et al. Nondestructive analysis of automotive paints with spectral domain optical coherence tomography [J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3695-3700.
- [4] Bargraser C, Mohan P, Lee K, et al. Life approximation of thermal barrier coatings via quantitative microstructural analysis [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 549: 76-81.
- [5] Yasui T, Yasuda T, Sawanaka K I, et al. Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film [J]. Applied Optics, 2005, 44(32): 6849-6856.
- [6] Yasuda T, Iwata T, Araki T, et al. Improvement of minimum paint film thickness for THz paint meters by multiple-regression analysis [J]. Applied Optics, 2007, 46(30): 7518-7526.
- [7] Zheng R H, Ellingwood B R. Role of non-destructive evaluation in time-dependent reliability analysis [J]. Structural Safety, 1998, 20(4): 325-339.
- [8] Yong L, Chen Z M, Mao Y, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique [J]. NDT & E International, 2012, 50: 29-35.
- [9] Zhou T Y, Li L J, Ren J J, et al. Pulsed terahertz nondestructive testing of glass fiber reinforced plastics based on FDTD [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1226002.
周桐宇, 李丽娟, 任姣姣, 等. 基于 FDTD 的玻璃纤维增强复合材料脉冲太赫兹无损检测 [J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1226002.
- [10] Wang Z, Zhang Y W, Yu Y, et al. Depthtest of pipeline defects by active thermal excitation and infrared thermography [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0912003.
王卓, 张云伟, 喻勇, 等. 主动热激励式红外热成像管道缺陷深度检测 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912003.
- [11] Drinkwater B W, Wilcox P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review [J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [12] Abdel-Qader I, Yohali S, Abudayyeh O, et al. Segmentation of thermal images for non-destructive evaluation of bridge decks [J]. NDT & E International, 2008, 41(5): 395-405.
- [13] Liu D, Qiang P F, Li L S, et al. Multilayer-nested X-ray focusing optical device [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0834002.
刘舵, 强鹏飞, 李林森, 等. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834002.
- [14] Jackson J B, Labaune J, Bailleur-Lesuer R, et al.

- Terahertz pulse imaging in archaeology[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2015, 8(1): 81-92.
- [15] Xiong W H, Li L J, Ren J J, et al. THz multi-feature parameter imaging of bonding defects of high temperature composite materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1711001.
熊伟华, 李丽娟, 任姣姣, 等. 耐高温材料胶接缺陷 THz 多特征参数成像研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1711001.
- [16] White J, Fichter G, Chernovsky A, et al. Time domain terahertz non-destructive evaluation of aeroturbine blade thermal barrier coatings [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1096: 434-439.
- [17] van Mechelen J L M, Kuzmenko A B, Merbold H. Stratified dispersive model for material characterization using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3853-3856.
- [18] Nguyen D T, Weber K, Volker W, et al. Non-destructive measurement of thickness and refractive index of multilayer coating on metal substrate [C] // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 25-30, 2016, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE Press, 2016.
- [19] Krimi S, Torosyan G, René B G. Advanced GPU-based terahertz approach for in-line multilayer thickness measurements [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-12.
- [20] Cao B H, Wang M Y, Li X H, et al. Noncontact thickness measurement of multilayer coatings on metallic substrate using pulsed terahertz technology [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(6): 3162-3171.
- [21] Rao R V, Savsani V J, Vakharia D P. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems [J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(3): 303-315.
- [22] Chen D B, Lu R Q, Zou F, et al. Teaching-learning-based optimization with variable-population scheme and its application for ANN and global optimization [J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 1096-1111.
- [23] Shukla A K, Singh P, Vardhan M. An adaptive inertia weight teaching-learning-based optimization algorithm and its applications [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 77: 309-326.
- [24] Lecaruyer P, Maillart E, Canva M, et al. Generalization of the Rouard method to an absorbing thin-film stack and application to surface plasmon resonance [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(33): 8419-8423.
- [25] Jagannathan A, Gatesman A J, Giles R H. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 1927-1929.
- [26] Tavazoei M S, Haeri M. Comparison of different one-dimensional maps as chaotic search pattern in chaos optimization algorithms [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 187(2): 1076-1085.