DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412487

新型窗函数适配的热障涂层太赫兹盲反卷积方法*

龚云丽1,曹丙花1,孙凤山2,范孟豹2,叶 波3,4

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221116; 2. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116; 3. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 4. 昆明理工大学云南省人工智能重点实验室 昆明 650500)

摘 要:热障涂层太赫兹信号严重混叠导致反射峰辨识困难,降低了厚度测量精度。为此,提出了新型窗函数适配的盲反卷积 方法,通过增强窗函数与脉冲特征的相似性,提高反卷积信号的重建精度。首先,基于解析模型探究了热障涂层太赫兹反射峰 特征,应用互相关理论与群智能算法构建新型窗函数,提升了其与波形相似性,据此设计有限脉冲响应(FIR)滤波器消除信号 混叠。然后,提取前3次回波获取飞行时间与折射率计算得到陶瓷层厚度,利用 Kirchhoff 近似表征陶瓷层表面粗糙度影响,修 正折射率,降低了测厚误差。最后,通过实验验证了方法的有效性。结果表明,相较于频域小波反卷积和最大相关峰度反卷积, 本文方法折射率测量精度分别提升 76.32%、83.51%,厚度测量精度分别提升 76.20%、89.67%。

关键词:太赫兹无损检测;新型窗函数;盲反卷积;热障涂层;厚度测量

中图分类号: TH744 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

A blind deconvolution method for terahertz thermal barrier coating adapted by novel window function

Gong Yunli¹, Cao Binghua¹, Sun Fengshan², Fan Mengbao², Ye Bo^{3,4}

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

4. Yunnan Key Laboratory of Artificial Intelligence, Kunning University of Science and Technology, Kunning 650500, China)

Abstract: The seriously overlapped terahertz (THz) signals of thermal barrier coatings (TBCs) result in unrecognizable echoes and reduce the accuracy of thickness measurement. Therefore, the blind deconvolution method for THz thermal barrier coating adapted by the novel window function is proposed in this article. The similarity between the window function and the echo is enhanced to improve the reconstruction precision of the deconvolution signal. Firstly, the features of THz echo of TBCs are explored based on the analytical model. A novel window function is presented to improve the similarity between the window function and the THz echo by cross-correlation theory and swarm intelligence algorithm. The FIR filter with the novel window function is used to separate the overlapped echoes. Secondly, the time of flight and refractive index are obtained by the first three echoes to calculate the thickness of TBCs, and the Kirchhoff approximation is employed to characterize the influence of the rough surface of TBCs, followed by correcting the refractive index to reduce the thickness measurement errors. Finally, experiments are implemented to evaluate the effectiveness of the proposed method. Compared with frequency wavelet domain deconvolution and the improved maximum correlated kurtosis deconvolution, the results show that the refractive index measurement accuracy of the proposed method is improved by 76. 32% and 83. 51%. The thickness measurement accuracy is improved by 76. 20% and 89. 67%, respectively.

Keywords: terahertz nondestructive testing; novel window function; blind deconvolution; thermal barrier coating; thickness measurement

收稿日期:2024-02-06 Received Date: 2024-02-06

^{*}基金项目:国家自然科学基金项目(62071471)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24_2772)、中国矿业大学研究生创新计划项目 (2024WLKXJ086)资助

0 引 言

航空发动机涡轮等核心热端部件一般是以高温合金 为主要骨架,外部需要涂敷热障涂层(thermal barrier coatings, TBCs)来降低基底温度保证其在高温服役环境 下正常工作^[1-3]。TBCs通常由陶瓷层、金属粘结层以及 基底组成。陶瓷层厚度是影响涂层隔热性能的关键因 素,受制备工艺影响,涂层厚度存在不均匀现象。因此, 陶瓷层厚度的准确测量尤为重要。目前微波^[4]、超声^[5]、 涡流^[6]、X射线^[7]等无损检测方法都被应用于热障涂层 陶瓷层厚度测量。然而,在实际生产中,由于热障涂层材 料高孔隙率的自然属性,其制造和质量控制仍具有极大 的挑战性。

太赫兹波(terahertz, THz)是频率位于0.1~10 THz, 波长处于0.03~3 mm 的电磁波段^[8-10],处于微波和红外 光波之间,具有非接触、非电离、穿透性强等特点,利用该 技术能够对陶瓷层厚度进行测量^[11-13]。Fukuchi等^[14-16] 研究了热障涂层太赫兹波传播规律,基于前3次回波分 别从时域和频域获取飞行时间与折射率信息计算得到 陶瓷层厚度,而 THz 信号严重混叠会导致较大的测厚 误差。当前消除信号混叠的方法主要为小波变换和反 卷积^[17-18]。

小波变换通过 THz 原始信号与小波基函数作卷积运 算,突出局部特征来提高分辨率。Dai 等^[19]利用 Gaus2 小波基增强信号细节信息,以小波系数重构图像,有效识 别了多层胶接结构脱粘界面。Zhang 等^[20]通过连续小波 变换对太赫兹时域信号进行处理,实现了绝缘子内部缺 陷智能识别。Wang 等^[21]提出了一种基于显著区分析和 小波多尺度变换相结合的 THz 和 CT 无损检测数据融合 算法,用于检测 GFRP 复合材料的分层和夹杂缺陷。以 上研究均采用传统的小波基处理信号,其与 THz 反射峰 的低相似性导致处理后信号存在波形失真。针对该问 题,Sun 等^[22]采用改进的萤火虫算法优化小波参数,构建 新型小波基对 THz 检测信号进行处理,准确识别了热障 涂层脱粘缺陷。为了实现缺陷智能识别,Sun 等^[23]构建 了互相关启发残差网络,嵌入自定义高斯小波基层在高 噪声背景下自动提取脉冲涡流信号微弱特征。

反卷积是基于信号与被测材料之间的相互作用机理 重构脉冲响应函数,主要包括自回归频谱外推法、稀疏反 卷积和频域小波反卷积。Zhai 等^[24]提出了一种基于改 进协方差的自回归谱外推法,避免了反卷积后单峰分裂 以及频谱偏移的现象。该方法涉及有效频段的选取,在 强噪声和信号严重混叠的情况下无法判别信号的有效频 段。为此,Mei 等^[25]利用稀疏反卷积方法识别了复合绝 缘子气隙和夹杂缺陷,由于稀疏过程需要进行迭代计算, 因此该方法计算效率较低。Zhai 等^[26]针对深层结构界 面反射峰难以识别的问题,采用频域小波反卷积和考虑 色散的互相关方法对 2~12 mm 厚的聚碳酸酯和聚甲基 丙烯酸甲酯材料进行了层析成像。然而,水蒸气的吸收 会导致采集的参考信号波形失真,从而降低了频域小波 反卷积的解混叠性能。

有限脉冲响应(finite impulse response, FIR)盲反卷 积通过设计一个 FIR 滤波器,从实测信号中恢复脉冲响 应函数^[27]。Mcdonald 等^[28]利用最大相关峰度设计 FIR 滤波器,实现了齿轮和轴承故障检测。在此基础上, Miao 等^[29] 通过计算包络信号的自相关系数来估计迭代 周期,同样以最大相关峰度为标准选取最终的滤波信号。 上述研究均采用自定义或随机生成的脉冲信号初始化 FIR 滤波器,该方式迭代收敛速度慢且信号处理效果不 佳。为此, Miao 等^[30]研究发现利用窗函数初始化滤波器 相较于随机脉冲能加快收敛速度并提升信号处理的效 果。Zhang 等^[31]利用高斯拟合窗函数修正滤波器系数, 显著提高了故障诊断的噪声适应性。Miao 等^[32]采用汉 宁窗初始化 FIR 滤波器,随后构建最大相关峰度反卷积 深度网络提取机械故障特征。Duan 等^[33]提出了改进的 自适应形态学盲反卷积方法,利用 Morlet 小波初始化滤 波器,采用对角切片频谱处理去除了带内噪声和残余噪 声。然而,传统窗函数与回波信号之间相似性低导致处 理后信号波形失真较为严重。

本文通过探究陶瓷层 THz 回波特征创新设计了新型 窗函数,降低波形失真程度,实现 THz 回波信号准确分 离,定量表征陶瓷层厚度。

1)依据信号解混叠运算原理分析窗函数与 THz 信 号反射峰之间的相似性机理,明确信号解混叠效果和窗 函数与 THz 反射峰相似性正相关。

2)基于解析模型探究 THz 陶瓷层反射峰特征,应用 互相关理论与群智能算法构建新型窗函数,提升其与 THz 波的相似性,并据此设计 FIR 滤波器消除信号混叠。

3)根据 THz 波在热障涂层中的传播机理,从处理后 的 THz 信号中获取飞行时间与折射率计算得到陶瓷层厚 度,用以评价所提方法的信号解混叠性能。

1 理论方法

THz 系统中心波长远大于陶瓷层厚度导致检测信号 严重混叠。当前反卷积解混叠技术采用的传统窗函数与 THz 脉冲特征相似性低,导致重构的脉冲响应函数仍存 在波形失真。为此,本文提出了新型窗函数适配的盲反 卷积方法,如图1所示。首先,基于解析模型,利用互相 关理论与群智能优化算法构建新型窗函数,提高窗函数 与 THz 回波相似性,降低波形失真程度。然后,据此设计 FIR 滤波器消除信号混叠。最后,根据热障涂层 THz 传播机理定位前3次回波获取飞行时间与折射率计算得到

陶瓷层厚度。基于此,考虑粗糙度影响,修正折射率,降 低测厚误差。



图 1 新型窗函数适配的盲反卷积方法 Fig. 1 The blind deconvolution method adapted by novel window

1.1 THz 信号解析模型

窗函数是反卷积解混叠性能的关键因素,其与 THz 信号脉冲特征的相似性直接影响着回波信号分离的准确 性。为此,基于热障涂层 THz 信号解析模型探究反射峰 特征^[34],据此设计窗函数,如图 2 所示。





由图 2 可知, THz 波垂直入射到 TBC 中, 会发生反射 与透射, 将参考信号记为 $E_0(\omega)$, 第 *i* 次回波信号记为 $E_i(\omega)$ (*i* = 1,2,3,…,*n*)。根据菲涅尔公式可以得到 THz 脉冲在介质中传播的透射和反射系数为:

$$t_{ij} = \frac{2\tilde{n}_i}{\tilde{n}_i + \tilde{n}_j} \tag{1}$$

$$_{ij} = \frac{\tilde{n}_{j} - \tilde{n}_{i}}{\tilde{n}_{i} + \tilde{n}_{i}}$$
(2)

式中: \tilde{n}_i 、 \tilde{n}_i 为 THz 波在介质 i,j中的折射率; t_{ij} 、 r_{ij} 为 THz 波由介质 i向介质 j 传播时的透射和反射系数。鉴于 THz 波对金属材料不具有穿透性,会在粘结层表面发生 全反射,其频域回波信号可表示为:

$$E_{k}(\omega) = \begin{cases} r_{01}E_{0}(\omega), & k = 1\\ t_{01}r_{01}^{k-2}r_{12}^{k-1}t_{10}e^{i(k-1)\beta}E_{0}(\omega), & k \ge 2 \end{cases}$$
(3)

式中: $\beta = -\frac{2n\omega d}{c}$ 为相位因子; ω 为角速度;d是陶瓷层厚度;c为光速。将式(3)中各次回波相加,通过反傅里叶变换可得到时域总反射信号为:

$$E_{\text{sum}} = \text{IFFT}(r_{\text{total}}E_{0}(\omega))$$

$$r_{\text{total}} = r_{01} + \frac{t_{01}r_{12}t_{10}e^{i\beta}}{1 - r_{12}r_{10}e^{i\beta}}$$
(4)

1.2 粗糙度修正策略

考虑到陶瓷层表面粗糙度会引起 THz 波散射,利用 Kirchhoff 定律来表征粗糙度对 THz 波的影响:

$$R_{\rm c} = R_{\rm o} e^{-\left(\frac{4\pi \sigma f}{c}\right)^2} \tag{5}$$

式中:f为频率; σ 为陶瓷层表面粗糙度; R_0 为总反射率; R_s 为镜面反射率。通过式(5)粗糙度修正后,频域回波



$$\begin{aligned} & f_{01}^{*} C = -E_{0}^{*} (\omega)^{*}, & k = 1 \\ & f_{01}^{*} (r_{01} e^{-8\left(\frac{\pi \sigma f}{c}\right)^{2}})^{k-2} r_{12}^{k-1} t_{10} e^{i(k-1)\beta} E_{0}(\omega), & k \ge 2 \\ & E_{sum} = \text{IFFT}(r'_{\text{total}} E_{0}(\omega)) \\ & r'_{\text{total}} = r_{01} e^{-8\left(\frac{\pi \sigma f}{c}\right)^{2}} + \frac{t_{01} r_{12} t_{10} e^{i\beta}}{1 - r_{12} r_{10} e^{-8\left(\frac{\pi \sigma f}{c}\right)^{2}} e^{i\beta}} \end{aligned}$$
(6)

热障涂层 THz 信号如图 3 所示,其中 1 次回波为空 气/陶瓷层界面反射峰,2 次回波是陶瓷层/粘结层界面 反射峰。由于陶瓷层折射率大于空气介质折射率,导致 THz 波极性发生改变,因此第 3 个反射峰为负峰。



图 3 热障涂层 THz 信号 Fig. 3 THz signal of TBCs

根据飞行时间原理计算可得陶瓷层厚度为:

 $d = \frac{c\Delta t}{2n} \tag{8}$

由式(8)可知,飞行时间 Δt 与陶瓷层折射率 n 为热 障涂层厚度测量的两个必要参数。 Δt 为1次回波与2次 回波之间的时间延迟,由于陶瓷层表面粗糙的微观结构 不均匀性会引起折射率变化,考虑粗糙度影响,依据 式(6),利用前3次回波可计算得到折射率 $n^{[14]}$ 。

$$\frac{E_1(\omega)E_3(\omega)}{E_2(\omega)^2} = -\frac{(n-1)^2}{4n} e^{-16\left(\frac{\pi\omega}{c}\right)^2}$$
(9)

1.3 反卷积原理

混叠的 THz 信号反射峰辨识困难致使测厚误差大, 利用反卷积技术可以重构脉冲响应函数 h(t)实现回波 信号分离,如图 4 所示。频域小波反卷积是通过参考信 号与实测信号求解得到 h(t),并在频域上采用窗函数 w(n)来抑制高频噪声。FIR 盲反卷积是通过设计滤波器 f_{ine} 直接从实际检测信号中恢复 h(t)。

由图 4 可知,利用窗函数构造的 FIR 滤波器与实测



Fig. 4 Principle of deconvolution

信号做卷积得到解混叠信号,卷积本质上是滑动的内积 运算,从几何角度来看,内积是一种相似性度量,如图 5 所示。





将 THz 回波分别与 1 阶高斯窗、4 阶高斯窗及其本 身做内积,然后计算各自之间的互相关系数。

$$\hat{R}(x,y) = \frac{CC(x,y)}{\sqrt{Var(x)} \sqrt{Var(y)}}$$
(10)

式中: x、y为信号;CC为交叉协方差;Var为方差。

由图 5 可知,两向量之间夹角越小,内积值与互相关 系数越大,即相似性越高。THz 回波与自身内积值最大, 相似性最高,互相关系数为 1,符合内积相似性度量原 理。因此,窗函数与 THz 回波的相似性越高,能更好的还 原信号特征。

1.4 新型窗函数

传统的窗函数与 THz 回波间的相似性较低致使解混 叠性能不佳。为此,基于解析模型生成仿真信号探究 THz 回波特征,据此设计窗函数,仿真参数设置如表1所示。

表 1 仿真参数 Table 1 Simulation parameters

参数	陶瓷层表面粗糙度/μm	陶瓷层厚度/μm	陶瓷层折射率
数值	5	300	4. 5-0. 08i

由图 3 可知,2 次回波为 THz 波在陶瓷层内传播后 产生的首次回波,携带着陶瓷层结构信息,因此采用互相 关系数为评价指标,以2次回波为基准构建与THz反射 峰更相似的窗函数。

THz 回波具有高斯尖峰脉冲的特性,为了定量评估 其高斯特性,分别计算了4种常用窗函数与THz 回波的 互相关系数,如表2所示。

表 2 窗函数相似系数 Table 2 Cross-correlation of window function

窗函数	高斯窗	汉宁窗	凯撒窗	矩形窗
互相关系数	0.68	0.58	0.58	0.49

由表2可知,高斯窗与THz回波相似性最高,因此本 文基于高斯函数来构建窗函数:

$$Gauss = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}\right)^{(k)}$$
(11)

式中: µ 为平移因子; σ 为带宽因子; k 表示 k 阶导数。

为了提升窗函数与 THz 反射峰的相似性,本文采用 鲸鱼优化算法^[35]对式(11)中的参数进行寻优,种群个体 与最大迭代步数分别设置为 10 和 100,将互相关系数作 为适应度函数:

fitness = $\hat{R}(Gauss(n), Echo(n))$ (12)式中: Gauss(n)和 Echo(n)分别为高斯窗和 THz 回波。

2 结果与讨论

2.1 样件制备与实验系统

为验证所提方法的有效性,使用大气等离子喷涂技术制备了阶梯式热障涂层样件,样件尺寸为2 cm×4 cm, 涂层喷涂区域尺寸为2 cm×2 cm,如图6 所示。



Fig. 6 TBCs

利用 THz 时域光谱系统对每个样件涂层喷涂区域中 心点进行检测,得到 8 条实验信号。实验系统为光纤集 成式太赫兹时域光谱系统 T-Ray5000,如图 7 所示。该系 统采用钛蓝宝石激光器发射激光源,激光脉冲宽度 80 fs,激光波长1050~1080 nm,重复频率为100 MHz,谱 宽 0.2~2.5 THz,采样间隔 0.1 ps,时间窗口宽度为 700 ps。太赫兹时域光谱系统光路原理如图 8 所示。







由于制备样件为阶梯式,因此可使用台阶仪对涂层 样件厚度进行测量,如图9所示。分别测量检测点与基 底厚度,二者做差即可获得涂层厚度。各涂层样件检测 点厚度如表3所示。





2.2 新型窗函数适配的 FIR 滤波器

构建新型窗函数适配的 FIR 滤波器流程如图 10 所示。在窗函数参数寻优过程中,以窗函数与 THz 反射峰

2	7	5
4	/	J

次 3 件件他网点序度				
Table 3	Thickness of detected points			
样件编号	厚度/µm			
样件1	321.48			
样件 2	332. 26			
样件 3	345.00			
样件 4	355. 30			
样件 5	426. 98			
样件 6	435. 80			
样件 7	446. 11			
样件 8	456.06			

拦供协测上 6 亩

± 1

互相关系数为目标函数,利用鲸鱼优化算法对式(11)中 窗函数参数寻优,其迭代收敛过程如图 11 所示。获取优 化窗函数后,用它来构建 FIR 滤波器。



Fig. 10 Constructing process of FIR filter



由图 11 可知, 迭代步数为 55 时达到收敛, 此时 式(11)中平移因子 μ =2,带宽因子 σ =5,阶数k=5,互相 关系数为 0.89。所构建的新型窗函数与 THz 回波如 图 12 所示,可以看出,基于高斯函数构建的新型窗函数 与 THz 回波具有较高的相似性。由表 2 可知,传统窗函 数与 THz 回波相似性不高于 0.68。而窗函数与 THz 回 波相似性越高,信号重构效果越好。因此,构建的新型窗 函数能够提升信号混叠消除能力。



2.3 实验验证

实验对热障涂层 THz 信号进行处理,探究设计的滤 波器解混叠性能。首先通过太赫兹时域光谱系统获取实 验信号,并利用台阶仪测量检测点实际厚度。然后,用 2.2 节构建的新型窗函数适配的 FIR 滤波器对实验信号 进行处理。最后,引入折射率与厚度定量评价信号解混 叠效果,如图 13 所示。



Fig. 13 Process of experiment

由于水蒸气对 THz 波具有强吸收特性,因此测得的 实验信号既存在混叠,还有水蒸气吸收带来的噪声干扰, 如图 14 所示。

利用频域小波反卷积^[26] (frequency wavelet domain deconvolution, FWDD),最大相关峰度反卷积^[29]





(improved maximum correlated kurtosis deconvolution, IMCKD)以及本文方法对采集的8条实验信号进行处理, 样件1、样件4和样件8的结果如图15所示。

为了评价所提方法对热障涂层 THz 信号的解混叠性能,引入最大相对误差(MRE)和平均相对误差(MARE) 评价指标,如表4 所示。

根据处理的信号结果,定位前两次回波的峰值得到 飞行时间,用实际厚度算出理论折射率。通过傅里叶变 换将时域信号转换至频域,利用 Fukuchi 方法获取实验 折射率,再由式(7)计算可得陶瓷层厚度。由于陶瓷层 表面粗糙的微观结构不均匀性会引起折射率变化,因此, 在本文方法的基础上,考虑式(4)的粗糙度影响对折



图 15 样件 1、样件 4 和样件 8 的反卷积信号 Fig. 15 Deconvolution signals of sample 1, sample 4 and sample 8

射率进行修正,降低测厚误差,折射率与厚度的相对误差如图 16 所示。

为了定量评估所提方法的信号分离效果,结合表 4 的评价指标,分别计算了 FWDD^[26]、IMCKD^[29]和本文方

法的折射率与厚度最大与平均相对误差,如表5所示。

由表5可知,FWDD^[26]中采用的基于汉宁窗的频域 小波反卷积方法折射率最大和平均相对误差分别为 22.54%和15.96%。IMCKD^[29]的最大相关峰度反卷





修正的相对误差 Fig. 16 Relative error of FWDD^[26]、IMCKD^[29]、our method

and our method+roughness correction

表 5 方法比较

Table 5	Metho	d compar	rison	(%)
	折射率误差		厚度误差	
方法	最大相 对误差	平均相 对误差	最大相 对误差	平均相 对误差
FWDD ^[26]	22. 54	15.96	29.11	16.72
IMCKD ^[29]	47.94	22.92	92.09	38. 53
本文方法	9.55	5.06	10.56	5.40
本文方法+粗糙度修正	7.74	3.78	8.39	3.98

积方法折射率最大和平均相对误差分别为47.94%和22.92%。这两种方法分别采用传统窗函数与自定义初始化滤波器系数的方式进行滤波处理。未考虑其与波形的相似性,处理后的信号脉冲存在严重失真现象(图15)。因此导致计算得到的折射率偏差很大,进而产生较大的厚度误差。厚度最大相对误差分别高达29.11%和92.09%,平均相对误差分别为16.72%和38.53%。本文所提方法信号分离效果最好,基于互相关理论与鲸鱼优化算法,构建与THz反射峰更相似的新型窗函数,能更好的还原信号特征。折射率最大和平均相对误差分别为9.55%和5.06%,厚度最大和平均相对误差分别为10.56%和5.40%。

由于热障涂层陶瓷层表面粗糙,会引起 THz 波散射, 影响折射率测量精度,进而造成厚度测量误差,因此利用 式(5)表征粗糙度对 THz 波的影响,考虑粗糙度影响后, 折射率最大和平均相对误差分别降至 7.74% 和 3.78%。 厚度误差也随之降低,最大相对误差降至 8.39%,平均相 对误差由 5.40%降至 3.98%。

3 结 论

基于热障涂层太赫兹信号解析模型,结合互相关理 论与鲸鱼优化算法构建新型窗函数,提升了窗函数与 THz回波的相似性。根据新型窗函数设计 FIR 滤波器消 除信号混叠,实现了热障涂层太赫兹信号的准确分离,利 用粗糙度修正折射率,降低了测厚误差。

1) 探究了 FIR 盲反卷积解混叠运算的相似性度量机 理,通过解析模型提取陶瓷层 THz 反射峰,研究了不同窗 函数与 THz 回波的相似性,基于相似性最高的高斯窗函 数构造新型窗函数。

2)以陶瓷层 THz 回波为基准,依据互相关理论和群智能算法优化高斯窗参数获取新型窗函数,提升了窗函数与 THz 回波的相似性,利用新型窗函数构造 FIR 滤波器,提高了反卷积解混叠性能。

3)引入折射率和厚度的最大和平均相对误差评价指标,定量研究了所提方法 THz 信号解混叠效果。相较于频域小波反卷积和最大相关峰度反卷积,本文所提方法 信号分离效果最佳,厚度最大和平均相对误差分别为 10.56%和5.40%,经粗糙度修正后,厚度最大和平均相 对误差分别为8.39%和3.98%。

后续研究重点为制备薄涂层样件,实验检测信号混 叠现象更严重,需进一步优化当前窗函数,抑制反射峰变 形,提升厚度测量精度,以验证本文方法的适配性与有 效性。

参考文献

[1] SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. Terahertz based

thickness measurement of thermal barrier coatings using long short-term memory networks and local extrema[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(4):2508-2517.

 [2] 王一丹,郭谦,周琪杰,等.先进航空发动机高温功能 涂层研究进展[J/OL].航空材料学报,1-39[2024-09-24].

WANG Y D, GUO Q, ZHOU Q J, et al. Research progress in high temperature functional coatings for advanced aerongines [J/OL]. Journal of Aeronautical Materials, 1-39[2024-09-24].

- [3] CUI Z Y, REN J J, LI L J, et al. Defocusing recovery technology of terahertz image based on 3-D PSF simulations [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:5021910.
- [4] RAHMAN M S, MUSTAPHA A A, ABOU-KHOUSA M A. Accurate thickness evaluation of thermal barrier coatings using microwave resonator sensor[J]. NDT & E International, 2024, 147:103195.
- [5] 金士杰,张波,王志诚,等. 自适应解卷积方法抑制管 道 TOFD 周向 扫查 盲区 [J]. 仪器仪表学报,2022, 43(5):227-234.

JIN SH J, ZHANG B, WANG ZH CH, et al. Reducing dead zone for TOFD circumferential scan of pipeline by the adaptive deconvolution method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):227-234.

- [6] LI CH, FAN M B, CAO B H, et al. Thickness measurement of thermal barrier coating based on mutual inductance of eddy current system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(7): 8102-8112.
- [7] 蔡玉芳,李屏懿,王珏,等. 板壳结构物体计算机分层 成像检测技术研究进展[J]. 仪器仪表学报,2020, 41(1):11-25.

CAI Y F, LI P Y, WANG J, et al. Recent advances in computed laminography for nondestructive testing of plateshell objects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1):11-25.

- [8] CUI Y Q, XU Y F, HAN D H, et al. Hiddeninformation extraction from layered structures through terahertz imaging down to ultralow SNR [J]. Science Advance, 2023, 9(40):1-9.
- [9] NSENGIYUMVA W, ZHONG SH C, ZHENG L H, et al. Sensing and non-destructive testing applications of terahertz spectroscopy and imaging systems: State of-theart and state-of-the-practice [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72(10):1-86.
- [10] 李迎,张朝晖,赵小燕,等. 非金属涂层缺陷的太赫兹

时域谱检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (11): 129-136.

LI Y, ZHANG CH H, ZHAO X Y, et al. Terahertz time-domain spectrum detection of non-metallic coating defects [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(11):129-136.

- [11] 孙凤山,范孟豹,曹丙花,等. 基于混沌映射与差分进 化自适应教与学优化算法的太赫兹图像增强模型[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):92-101.
 SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. The terahertz image enhancement model based on adaptive teachinglearning based optimization algorithm with chaotic mapping and differential evolution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4):92-101.
- [12] CAO B H, YANG D L, FAN M B. A terahertz fast imaging method for debonding defects of thermal barrier coatings based on dual-channel convolutional neural network [J]. Materials Evaluation, 2023, 81 (5): 41-50.
- GONG Y L, CAO B H, ZHANG H, et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using hybrid machine learning [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2023, DOI:10.1080/10589759. 2023.2167991.
- [14] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Topcoat thickness measurement of thermal barrier coating of gas turbine blade using terahertz wave [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 189(1):1-8.
- [15] FUKUCHI T, FUSE N, FUJII T, et al. Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves[J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183(4):1-9.
- [16] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Measurement of refractive index and thickness of topcoat of thermal barrier coating by reflection measurement of terahertz waves [J]. Electronics and Communications in Japan, 2013, 96(12):37-45.
- [17] LI T F, ZHAO ZH B, SUN CH, et al. Wavelet KernelNet: An interpretable deep neural network for industrial intelligent diagnosis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Systems, 2022, 52(4):2302-2312.
- [18] WALKER G C, BOWEN J W, LABAUNE J, et al. Terahertz deconvolution [J]. Optics Express, 2012, 20(25):27230-27241.
- [19] DAI B, WANG P, WANG T Y, et al. Improved terahertz nondestructive detection of debonds locating in layered structures based on wavelet transform [J].

Composite Structures, 2017, 168(5):562-568.

- [20] ZHANG ZH H, DING D W, WANG L M. THz wave defect detection technology based on attention autoencoder and semisupervised ladder network [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8);8961-8972.
- [21] WANG J, XU T, ZHANG L, et al. Nondestructive damage evaluation of composites based on terahertz and X-ray image fusion[J]. NDT & E International, 2022, 127:102616.
- [22] SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. High-resolution terahertz imaging of de-bonding defects in thermal barrier coatings using an optimal wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72(7):1-11.
- [23] SUN F SH, FAN M B, CAO B H, et al. Crosscorrelation inspired residual network for pulsed eddy current imaging and detecting of subsurface defects [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12):12860-12871.
- [24] ZHAI M, LOCQUET A, ROQUELET C, et al. Nondestructive measurement of mill-scale thickness on steel by terahertz time-of-flight tomography [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393:125765.
- [25] MEI H W, JIANG H Y, YIN F H, et al. Detection of small defects in composite insulators using terahertz technique and deconvolution method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(10):8146-8155.
- [26] ZHAI M, CITRIN D, LOCQUET A, et al. Pulsed THz imaging for thickness characterization of plastic sheets [J]. NDT & E International, 2020, 116:102338.
- [27] MIAO Y H, ZHANG B Y, LIN J, et al. A review on the application of blind deconvolution in machinery fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163:108202.
- [28] MCDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated Kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33(11):237-255.
- [29] MIAO Y H, ZHAO M, LIN J, et al. Application of an improved maximum correlated kurtosis deconvolution method for fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 92(9):173-195.
- [30] MIAO Y H, ZHANG B Y, LI CH H, et al. Feature mode decomposition: New decomposition theory for rotating machinery fault diagnosis[J]. IEEE Transactions

on Industrial Electronics, 2023, 70(2):1949-1960.

- [31] ZHANG Z ZH, WANG J R, LI SH M, et al. Fast nonlinear blind deconvolution for rotating machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 187;109918.
- [32] MIAO Y H, LI CH H, SHI H F. Deep network-based maximum correlated kurtosis deconvolution: A novel deep deconvolution for bearing fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 189:110110.
- [33] DUAN R K, LIAO Y H. Morphological analysis based adaptive blind deconvolution approach for bearing fault feature extraction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(7):7864-7875.
- [34] CAO B H, DENG T, FAN M B, et al. Physical constraints-based terahertz thickness measurement method of thermal barrier coating[J]. NDT & E International, 2024, 143:103058.
- [35] NADIMI-SHAHRAKI M H, ZAMANI H, VARZANEH Z, et al. A systematic review of the whale optimization algorithm: Theoretical foundation, improvements, and hybridizations[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(7):4113-4159.

作者简介



龚云丽,2019年于齐鲁工业大学获得 学士学位,2022年于河北科技大学获得硕 士学位,现为中国矿业大学博士研究生,主 要研究方向为太赫兹无损检测信号处理方 法。

E-mail: gongyunli163@163.com

Gong Yunli received her B. Sc. degree in 2019 from Qilu University of Technology, received M. Sc. degree in 2022 from Hebei University of Science and Technology. Now, she is a Ph. D. candidate in China University of Mining and Technology. Her current research interests include signal processing of terahertz non-destructive testing.



曹丙花(通信作者),2004 年于电子科 技大学获得学士学位,2009 年于浙江大学获 得博士学位,现为中国矿业大学副教授,博 士生导师,主要研究方向为太赫兹与涡流无 损检测理论及应用。

 $\operatorname{E-mail:caobinghua@cumt.edu.cn}$

Cao Binghua (Corresponding author) received her B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2004, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2009. Now she is an associate professor and Ph. D. supervisor at China University of Mining and Technology. Her main research interests include terahertz and eddy current non-destructive testing theory and application.