脉冲调制涡流检测涂层系统的减薄缺陷检出概率分析

苏冰洁[1] 李 勇[1,2,3*] 王艺融[1] 赵 桢[1] 陈振茂[1,2,3]
1.复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室,西安,710049
2.陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心,西安,710049
3.西安交通大学航天航空学院,西安,710049

摘要:针对热障涂层系统中的涂层减薄缺陷,采用线性回归模型分析了不同频率的脉冲调制波与脉冲调制波载波频率对应的正弦波对涂层减薄缺陷的涡流检测结果,确定了脉冲调制涡流检测的优势。建立了热障涂层系统涂层减薄缺陷的脉冲调制涡流检测仿真模型,并基于仿真结果构建了三种回归模型拟合实验数据,所提模型能较好地表征实验数据与缺陷尺寸之间的关系。对回归结果进行检出概率分析,通过接收者操作特征曲线确定了检出概率的阈值,并绘制了检出概率曲线。检出概率分析结果表明,95%低置信边界上90%检出概率对应的缺陷尺寸为50.62 μm。

关键词:电磁无损检测;脉冲调制涡流检测;涂层系统;涂层减薄缺陷;检出概率
中图分类号:TG115.28
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Analysis of POD for Pulse-modulation Eddy Current Testing of Thickness Reduction in Coating Systems

SU Bingjie[1] LI Yong[1,2,3*] WANG Yirong[1] ZHAO Zhen[1] CHEN Zhenmao[1,2,3]
1.State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an, 710049
2.Shaanxi Engineering Research Centre of NDT and Structural Integrity Evaluation, Xi'an, 710049
3.School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

Abstract: This paper addresses the detection of thickness reduction defects in thermal barrier coating (TBC) systems. It compares eddy current testing responses obtained by pulse-modulation waves at different frequencies with those from corresponding sinusoidal waves via linear regression analysis, demonstrating the advantages of pulse-modulation eddy current testing. A numerical simulation model for coating thinning defects in TBC systems is established. Based on the simulation results, three regression models are developed to fit the experimental data, and these models effectively characterize the relationship between the measured signals and defect size. Probability of detection (POD) analysis is performed on the regression results. The detection threshold is determined using the receiver operating characteristic curve, and the POD curve is constructed. The POD analysis results indicate that a 90% POD corresponds to a defect size of 50.62 μm, with a 95% lower-confidence bound.

Key words: electromagnetic nondestructive testing; pulse-modulation eddy current testing; coating system; thinning defect; probability of detection

0 引言

涂层系统由涂层和金属基体组成,涂层涂覆在金属基体表面用于保护金属。热障涂层(thermal barrier coating,TBC)是涂覆于高温合金表面的特种功能涂层,具有优异的隔热和抗腐蚀性能,广泛用于航空发动机叶片、燃气轮机叶片、燃烧室内壁、聚变堆水冷包层等能源装备的高温部件。典型的TBC系统由陶瓷层、金属黏结层和金属基体组成。陶瓷层通常具有低导热率、高熔点等特性,能有效阻隔热量传递,降低金属基体的工作温度。金属黏结层的主要作用是增强陶瓷层与金属基体之间的结合力,并在高温环境下形成热生长氧化物,从而提高TBC系统的服役稳定性。TBC在长期服役过程中受高温、热循环、氧化、腐蚀、机械应力等多种因素的影响,逐渐形成裂纹并最终剥落,严重影响其隔热性能和使用寿命。近年来,研究人员通过优化TBC材料、改进制备工艺来提高其抗损伤性能,同时利用无损检测技术检测TBC的厚度及损伤状态,以提高其服役可靠性并延长使用寿命。

涡流检测具有探头体积小、灵敏度高和耐高温等优点[1-2],已广泛用于TBC厚度评估。针对

收稿日期:2025-07-25
基金项目:国家自然科学基金(52177007,52311540018);科技部磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03130003)

TBC厚度反演问题，有学者采用支持向量机、随机森林、BP神经网络等算法实现了陶瓷层与黏结层厚度的高精度评估[3-4]。此外，LI等[5]基于互感与变压器模型测量了陶瓷层厚度，同时有效抑制了黏结层和金属基体的干扰。GUO等[6]通过数值模拟优化探头构型，使厚度的评估误差小于10 μm。上述研究表明，涡流检测在TBC厚度测量领域具有良好的应用前景。

检出概率(probability of detection，POD)为某一尺寸缺陷在特定检测条件下被检出的概率，是评估无损检测方法和检测系统可靠性的重要指标[7]。目前，POD已广泛用于裂纹、腐蚀及减薄等缺陷的可靠性评估[8-12]。现有研究主要针对金属内部裂纹和腐蚀缺陷，针对微米级涂层厚度评估的POD研究仍相对较少。

暂态涡流检测(如脉冲涡流检测)采用宽频带激励信号，检测响应包含丰富的频率成分，能提取与缺陷相关的更多特征参数[13]。为减小方波激励信号中无效直流分量的影响，提出了脉冲调制涡流检测方法。该方法利用正弦载波调制方波激励信号，使电磁场能量集中在载波频率附近，并保留多频谐波信息，从而获取试件在深度方向的“电磁指纹”，为提取缺陷深度信息提供更多依据，具有提高检测灵敏度和信噪比的潜力[14-16]。TBC系统目前主要采用传统的涡流检测方法，脉冲调制涡流检测在TBC减薄缺陷评估中的应用及POD分析尚缺乏系统研究。

本文针对TBC系统中的涂层减薄缺陷开展研究。首先，采用线性回归模型对比分析脉冲调制涡流检测结果与脉冲调制波载波频率对应的正弦波检测结果。然后，利用脉冲调制涡流检测系统仿真模型所得数据构建拟合实验数据的回归模型，并通过赤池信息准则选取最优回归模型。最后，基于接收者操作特征(receiver operating characteristic，ROC)曲线确定POD计算阈值，完成涂层减薄缺陷的POD分析。

1 实验研究

如图1所示，实验系统包含信号发生器、功率放大器、探头、信号放大器、示波器、计算机。实验中，探头由同轴放置的一个激励线圈和一个检测线圈组成，探头中的弹簧可保证每次检测对试件的按压力度相同。测试件为包括陶瓷层、黏结层和金属基体的燃气轮机叶片样板。陶瓷层为不导电的非铁磁性材料，为精确模拟陶瓷层的减薄缺陷，用聚酰亚胺薄膜模拟厚度0～600 μm的陶瓷层，其中，无缺陷的厚度为600 μm。

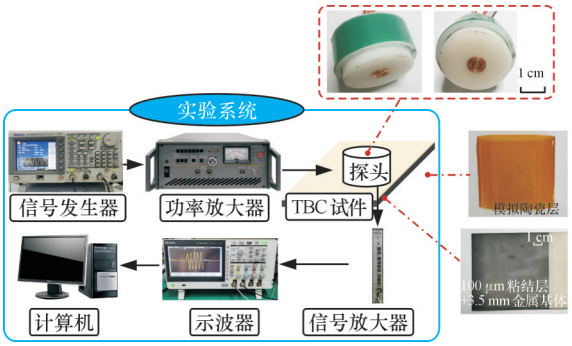


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

实验中，脉冲调制激励波的峰-峰值为200 mV，占空比为50%，脉冲重复频率设为5 kHz、10 kHz和20 kHz，正弦载波的频率为脉冲重复频率的10倍。涂层减薄缺陷属于表层缺陷，因此更适合采用具有较小趋肤深度的高频信号检测。频率越高，探头激励线圈的阻抗越大、电流越小，激励能量和检测信号越小，检测信号的信噪比减小。为探究脉冲调制波的频谱信息，对脉冲调制激励信号进行傅里叶变换，脉冲重复频率为10 kHz的脉冲调制波波形图及其频谱见图2。

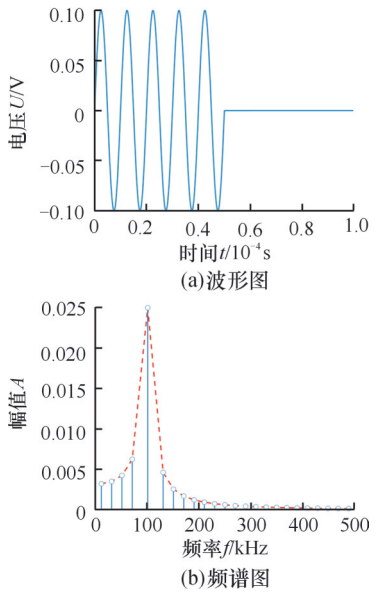


图2 脉冲重复频率为10 kHz的脉冲调制波波形图及其频谱图

Fig.2 Pulse-modulation wave and its spectrogram at a pulse repetition frequency of 10 kHz

由图2b可看出，脉冲调制波的频谱能量集中在载波频率附近，载波频率对应的谐波分量幅值最大。因此，实验比较脉冲调制波与其载波频率对应的正弦波对涂层减薄缺陷的检测结果。正弦波的激励频率为脉冲调制波的载波频率，即50 kHz、100 kHz和200 kHz。检测时，薄膜层厚

度从600 μm减小至0，每次减少一层薄膜（厚度50 μm）。同时，为减小实验噪声对检测结果的影响，将试件表面9个随机采集点的检测信号作为实验数据。

对于正弦波激励，将信号峰值U_{PV}作为信号特征；对于脉冲调制波激励，将检测信号正弦部分的峰值平均值U_{APV}作为信号特征。不同涂层厚度的信号特征如图3所示，对图中数据进行简单线性回归分析。分析的回归模型为

$$\hat{a}=\beta_0+\beta_1 a+N(0,\sigma^2) \tag{1}$$

式中：$\hat{a}$为信号特征值；a为缺陷尺寸；$N(0,\sigma^2)$为服从均值为0、标准差为σ的正态分布噪声项。

用极大似然估计法求解模型中的未知参数[17]。为衡量模型的拟合质量，计算回归结果的决定系数R^2和均方根误差RMSE[18]。

由图3可看出，信号特征值与涂层减薄厚度之间存在良好的相关性。随着涂层厚度的减小，信号幅值逐渐减小。这是因为涂层的减薄即探头与金属基体之间的距离减小时，激励信号在金属基体内的感应涡流增强，涡流场对线圈磁场的削弱作用也增强，导致信号幅值减小。对比脉冲调制波与其载波频率对应的正弦波激励结果可发现，脉冲调制波的线性回归结果具有更大的R^2和更小的RMSE，这说明模型对数据的拟合性能和预测精度更高，也说明数据受噪声的影响更小，信噪比更大。脉冲重复频率不同的脉冲调制波检测结果中，频率20 kHz下的检测结果最好，数据的回归结果评价指标最优、信噪比最大，因此选取脉冲重复频率20 kHz下的检测结果开展后续分析。

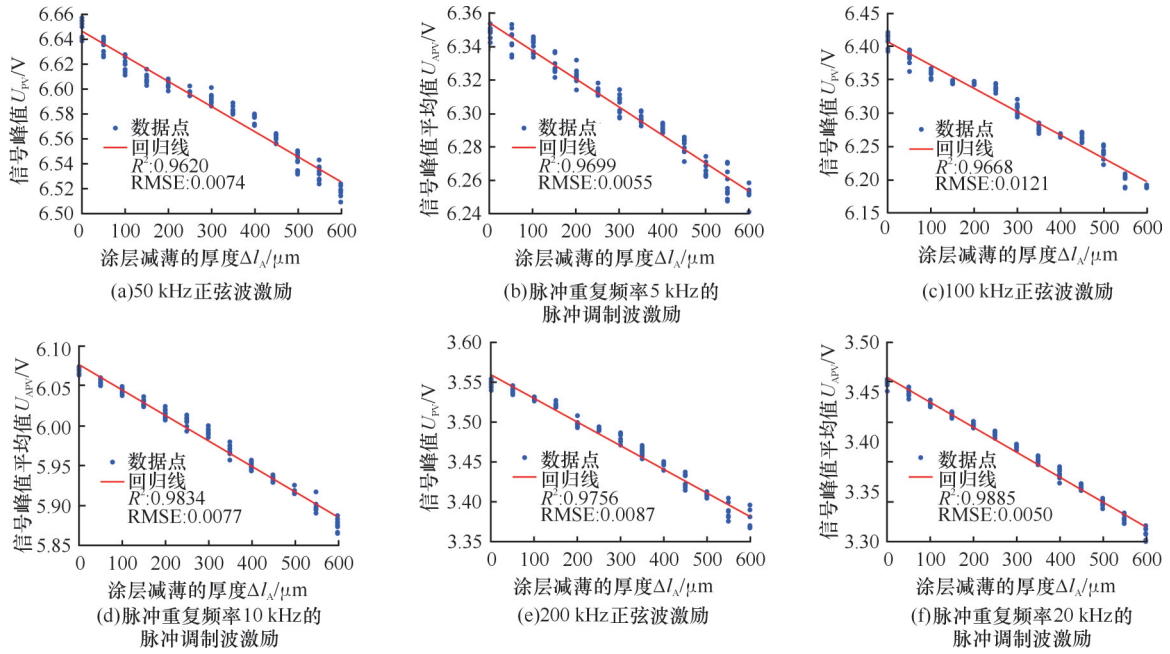


图3　不同厚度涂层减薄缺陷下的信号特征散点图及线性回归结果

Fig.3　Scatter plot of signal features and linear regression results under coating thinning defects of different thicknesses

2　基于有限元仿真的实验数据回归分析

2.1　仿真模型及计算结果

由图3所示的线性回归结果可看出，信号特征与涂层厚度减小量不是简单的线性关系，采用简单线性回归模型拟合数据时，拟合精度不高。为更好拟合数据，在回归模型中引入仿真结果，对实验结果进行基于仿真数据的回归分析。

图4所示的二维轴对称有限元仿真模型的尺寸与电磁参数见表1。其中，d为线圈直径，h为线圈高度，l为材料厚度，下标Ⅰ、Ⅱ分别表示检测线圈和激励线圈，下标o、i分别表示外径和内径，下标A、B、C分别表示陶瓷层、金属粘结层和金属基体。探头与试件的仿真参数与实验参数一致，脉冲调制波的脉冲重复频率为20 kHz。激励线圈、检测线圈的线径分别为0.10 mm和0.18 mm，匝数都为341。

根据不同的涂层厚度对应的检测线圈电压信号，以及实验信号放大器的增益得到检测信号，如

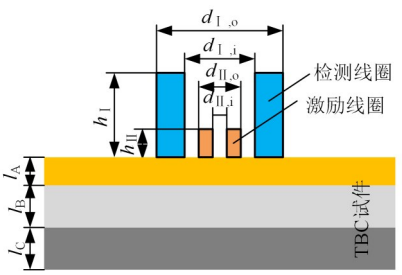


图4　仿真模型示意图

Fig.4　Simulation model schematic diagram

表1 仿真模型尺寸与电磁参数

Tab.1 Simulation model dimensions and electromagnetic parameters

参数	值	参数	值	参数	值
$d_{\mathrm{Ⅱ},i}$/mm	0.3	$h_{\mathrm{Ⅰ}}$/mm	6	μ_{B}	1
$d_{\mathrm{Ⅱ},o}$/mm	3	l_{A}/μm	0～600	μ_{r3}	1
$d_{\mathrm{Ⅰ},i}$/mm	4	l_{B}/μm	100	σ_{A}/(MS·m^{-1})	0
$d_{\mathrm{Ⅰ},o}$/mm	8.22	l_{C}/mm	3.5	σ_{B}/(MS·m^{-1})	0.40
$h_{\mathrm{Ⅱ}}$/mm	3	μ_{A}	1	σ_{C}/(MS·m^{-1})	0.67

图5a所示；进一步提取各涂层厚度下检测信号的APV信号特征，如图5b所示。图5中，检测信号幅值和APV均随涂层厚度减小量Δl_1的增大而减小，该变化规律与图3f所示的实验结果一致。仿真结果与实验结果具有较好的一致性，因此可基于图5所示的仿真数据构建实验数据与缺陷尺寸之间的回归模型。

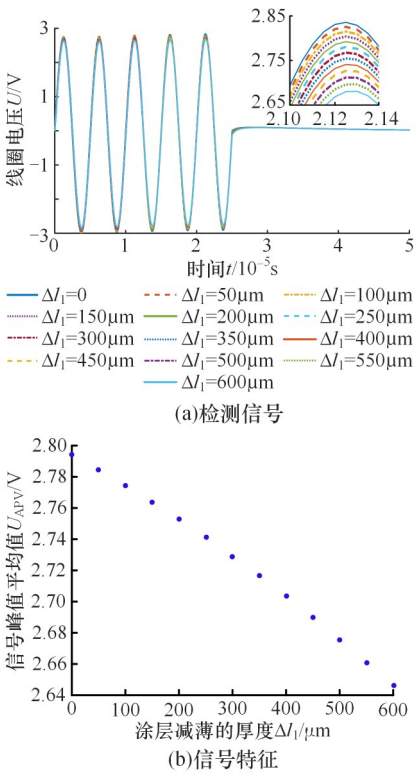


图5 仿真中不同涂层厚度下的检测信号及信号特征

Fig.5 Testing signals and signal features under different coating thicknesses in simulation

2.2 基于仿真结果的回归分析

为提高实验结果的拟合度，提出基于仿真数据的3个回归模型[19-20]：

$$\hat{a}_1 = a_{\mathrm{sim}} + N(\mu_1, \sigma_1^2) \tag{2}$$

$$\hat{a}_2 = A a_{\mathrm{sim}} + N(0, \sigma_2^2) \tag{3}$$

$$\hat{a}_3 = a_{\mathrm{sim}} N(\mu_2, \sigma_3^2) + N(\mu_3, \sigma_4^2) \tag{4}$$

式中：a_{sim}为缺陷尺寸的仿真结果；A、μ、σ为待定系数。

利用极大似然估计法求解模型中的未知参数，利用Bootstrap方法求解95%置信区间[21]，计算结果如图6所示。

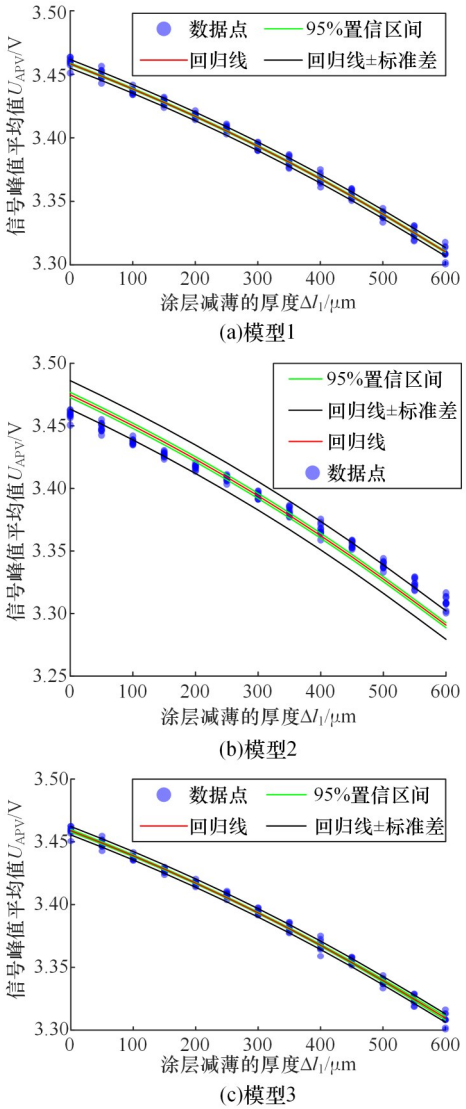


图6 基于仿真数据的回归结果

Fig.6 Regression results based on simulation data

由图6可知，基于仿真数据的模型可更好地拟合实验数据，更利于提高缺陷的预测精度。为比较3个模型的性能，通过赤池信息量准则(Akaike information criterion，AIC)[22]

$$V_{\mathrm{AIC}} = 2k - 2\ln L \tag{5}$$

式中：V_{AIC}为AIC值；k为模型的参数数量；L为模型的最大似然估计值，即模型参数的最优估计对应的似然值。判断最优模型。

AIC中，$\ln L$表示模型对数据的拟合优度，拟合越好，$\ln L$越大；$2k$是惩罚项，表示模型的复杂度，参数越多，模型越复杂，$2k$越大。模型1～3的V_{AIC}分别为－996.0、－711.4、－993.6，V_{AIC}最小的模型最优，因此模型1为最优模型。

2.3 对真实TBC系统涂层减薄厚度的评估

为验证聚酰亚胺薄膜层模拟TBC系统陶瓷层的可行性及其对真实试件检测的可靠性，在脉冲重复频率20 kHz下检测真实的TBC系统。实

验设置与前文一致。实验TBC试件1～4的陶瓷层厚度分别为170 μm、300 μm、400 μm和500 μm，对应涂层减薄的厚度分别为430 μm、300 μm、200 μm和100 μm。涂层试件的尺寸为100 mm×100 mm，实物如图7所示。

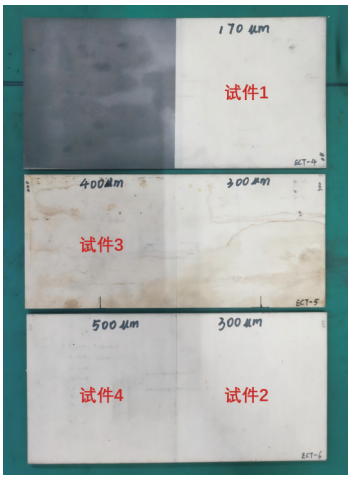


图7　真实TBC试件的照片

Fig.7　Image of the real TBC specimen

检测试件时，在试件中心区域采集9个均布点的信号，以避开边缘效应的干扰。提取检测信号的APV，并将其与聚酰亚胺薄膜层的检测结果放在一张图内，如图8所示。由图8可看出，真实TBC试件与聚酰亚胺薄膜层模拟涂层试件的检测结果很接近。采用回归结果评估真实试件的陶瓷层厚度减小量的预测值与实际值的差值，首先对回归模型1进行插值、建立连续预测曲线，随后计算每种工况9个测点信号的特征均值，最后在回归模型中找到特征均值对应的涂层厚度减小量即真实TBC试件的陶瓷层厚度减小量的预测值。4个试件的涂层厚度减小量的预测值、实际值及差值见表2。可看出，差值的最大值小于12 μm，表明用聚酰亚胺薄膜层代替真实涂层具有可行

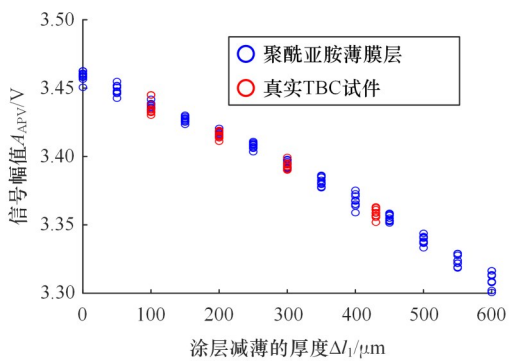


图8　真实TBC试件与聚酰亚胺薄膜层模拟涂层试件的检测结果

Fig.8　Testing results of the real TBC specimen and polyimide film layer simulated coating specimen.

表2　真实TBC系统的减薄厚度

Tab.2　Thickness reduction of the actual TBC system　μm

试件编号	预测值	实际值	差值
1	434.62	430	4.62
2	301.72	300	1.72
3	206.23	200	6.23
4	111.73	100	11.73

性，因此基于聚酰亚胺薄膜层获得的实验结果可用于真实TBC系统涂层厚度减薄量的定量评估。

3　POD分析

基于模型1的回归结果，通过计算信号特征$\hat{a}$小于阈值$\hat{a}_{th}$的概率得到POD：

$$P_{POD}=\int_{-\infty}^{\hat{a}_{th}} g(\hat{a})\mathrm{d}\hat{a} \tag{6}$$

式中：$g(\hat{a})$为信号特征的概率密度函数。

模型1服从正态分布，所以POD的计算公式可改写为

$$P_{POD}=\Phi\left[\frac{\hat{a}_{th}-(a+\mu)}{\sigma}\right] \tag{7}$$

其中，$\Phi(\cdot)$为标准正态分布的累积分布函数，μ、σ已被求解。由式(7)可知，求解POD需要选择一个合理的阈值$\hat{a}_{th}$，本文通过绘制接收者操作特征(receiver operating characteristic，ROC)曲线确定阈值[23]。ROC曲线通过设置不同的阈值来绘制真正率与假正率之间的关系图。ROC曲线越接近左上角，模型的性能越好。本文中，真正率为POD，假正率为误报率(probability of false alarm，PFA)：

$$P_{PFA}=\int_{-\infty}^{\hat{a}_{th}} p(n)\mathrm{d}n \tag{8}$$

式中：$p(n)$为噪声信号特征的概率密度函数。

实验采集的检测信号包含实验系统和环境等引入的噪声成分，为拟合噪声的分布，提取无缺陷(涂层减薄厚度为0)的信号特征，并用正态分布函数拟合噪声的直方图，如图9所示。

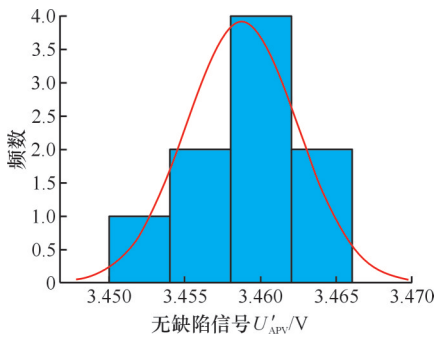


图9　无缺陷信号的噪声直方图与拟合的正态分布曲线

Fig.9　Histogram of noise for defect-free signals and fitted normal distribution curve

将正态分布拟合曲线的均值、标准差记为μ_{noise}和σ_{noise}，则PFA的计算公式变为

$$P_{\mathrm{PFA}}=\Phi\left(\frac{\hat{a}_{\mathrm{th}}-\mu_{\mathrm{noise}}}{\sigma_{\mathrm{noise}}}\right) \tag{9}$$

不同的缺陷尺寸有对应的ROC曲线，涂层厚度减小50 μm、100 μm的ROC曲线见图10，曲线上最接近左上角的点对应的POD最大、PFA最小，因此该点的阈值为最佳阈值。

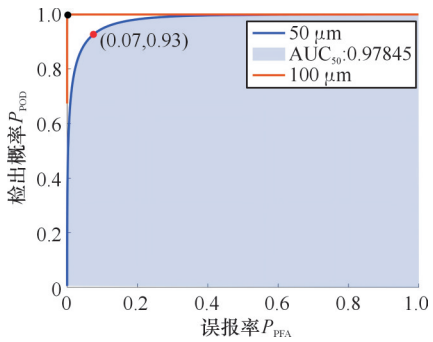


图10 涂层厚度减小50 μm和100 μm的ROC曲线

Fig.10 ROC curves for coating thickness reductions of 50 μm and 100 μm

图10中，缺陷尺寸（涂层厚度减小量）100 μm的ROC曲线更接近左上角，表明模型在识别100 μm缺陷时具有更高的分类准确性与预测能力，与常识相符。缺陷尺寸50 μm的ROC曲线上，最佳阈值的POD大于90%、PFA小于10%，表明模型能识别大部分50 μm的缺陷，并能在较小的误报率下预测，对缺陷尺寸50 μm的分类效果非常好。50 μm缺陷尺寸ROC曲线下的面积（area under the curve，AUC）大于90%，表明系统检测该缺陷的性能较好，能稳定且较准确地作出分类决策[24]。

图10中，缺陷尺寸（厚度减小量）50 μm、100 μm对应ROC曲线的最佳阈值分别为3.4535（红点）和3.4482（黑点），表明最佳判决阈值随缺陷尺寸的增大而略有减小。从原理上来看，小尺寸缺陷与无缺陷对应的信号特征分布重叠程度较高。为保证小尺寸缺陷的检出率，最佳判决阈值通常需要更接近无缺陷的信号特征，因此小尺寸缺陷的最佳判决阈值相对较大。结合式(6)、式(8)可知，较大的阈值虽然有利于提高小尺寸缺陷的检出概率，但会导致误报概率增大。相反，采用较大尺寸缺陷对应的最佳阈值能减小误报概率，但会降低小尺寸缺陷的检出概率，增加漏检风险。

因此，为兼顾小尺寸缺陷的检出能力和误报控制能力，本文选取50 μm缺陷ROC曲线对应的最佳阈值作为绘制POD曲线的全局阈值，基于该阈值得到的POD曲线见图11。

图11中，缺陷尺寸超过100 μm的POD趋近于1，95%低置信边界上90%POD的缺陷尺寸为50.62 μm。该结果表明涂层减薄缺陷的尺寸大于50.62 μm时，缺陷可被搭建的脉冲调制涡流检测系统可靠检出。

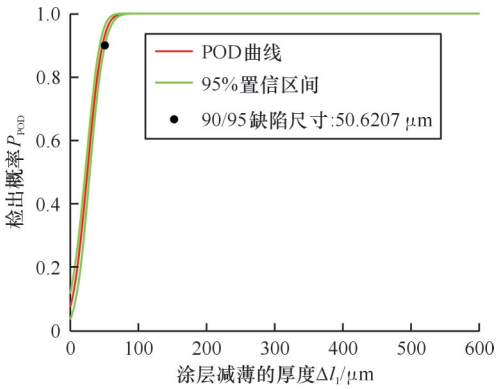


图11 不同缺陷尺寸的POD

Fig.11 POD for different defect sizes

4 结论

本文针对TBC系统的涂层减薄缺陷建立了实验检测系统，比较了脉冲调制涡流检测与对应载波频率下传统涡流检测的结果。线性回归分析表明，相比于传统涡流检测的峰值特征，脉冲调制涡流检测的峰值均值特征具有更高的拟合优度和信噪比，对涂层减薄缺陷表现出较好的表征能力。建立了与实验系统对应的仿真模型，仿真结果与实验结果有一致的变化规律。基于仿真结果构建了实验数据回归模型。通过AIC指标选取的最优回归模型能较好地描述实验数据的非线性特征，并对涂层厚度减小量具有较高的预测精度。结合ROC曲线确定了POD的计算阈值，完成了对涂层减薄缺陷的POD评估。POD分析结果表明，在95%置信水平下，90%POD对应的缺陷尺寸为50.62 μm。综合实验、仿真分析、POD评估结果可知，脉冲调制涡流检测方法在TBC系统涂层减薄缺陷检测与定量评估中具有良好的应用潜力。

后续研究将进一步优化探头结构与检测系统，提高检测灵敏度和信噪比，并开展复杂工况下TBC系统在役检测技术的研究。

参考文献：

[1] SHE Saibo, ZHENG Xinnan, SHAO Yuchun, et al. An Innovative Eddy Current Sensor with E-core Ferrite Resistant to Lift-off and Tilt Effects[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39(8): 2170-2188.

[2] 徐昊，包俊，黄国勇，等. 飞机多层金属铆接结构缺陷检测的新型电涡流探头仿真设计[J]. 电子测量与仪器学报，2024，38(5)：178-187.
XU Hao, BAO Jun, HUANG Guoyong, et al. Simulation

Design of a New Eddy Current Probe for Defect Detection of Aircraft Multi-layer Metal Riveting Structure[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 178-187.

[3] 宋凯，李子璇，陆灵峰，等. 航空发动机关键部位热障涂层厚度智能反演算法[J]. 中国测试，2023，49(12)：8-15.
SONG Kai, LI Zixuan, LU Lingfeng, et al. Research on Inversion of Thermal Barrier Coating Thickness in Key Parts of Aero-engine[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(12): 8-15.

[4] 范文茹，昌勇. 热障涂层厚度的脉冲涡流检测反演方法[J]. 计量学报，2024，45(6)：819-826.
FAN Wenru, CHANG Yong. Inversion Method of Pulsed Eddy Current Detection for Thermal Barrier Coatings Thickness[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(6): 819-826.

[5] LI Chao, FAN Mengbao, CAO Binghua, et al. Thickness Measurement of Thermal Barrier Coating Based on Mutual Inductance of Eddy Current System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(7): 8099-8109.

[6] GUO Wei, ZHAO Yingsong, QIAO Liang, et al. High Precision Thickness Evaluation of Thermal Barrier Coating with High Frequency Eddy Current Testing Method[J]. NDT & E International, 2023, 140: 102963.

[7] 王超，周俊丽. 脉冲涡流-电磁超声复合检测方法的可靠性评估[J]. 兵器材料科学与工程，2024，47(5)：130-137.
WANG Chao, ZHOU Junli. Reliability Evaluation of Pulsed Eddy Current and Electromagnetic Ultrasonic Composite Detection Method[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(5): 130-137.

[8] 舒建鹏，左万君，晏晨辉. 基于缺陷检出概率的钛合金缺陷涡流检测可靠性研究[J]. 计量与测试技术，2024，51(4)：53-55.
SHU Jianpeng, ZUO Wanjun, YAN Chenhui. Research on Reliability of Eddy Current Detection of Titanium Alloy Defects Based on Probability of Detection[J]. Metrology & Measurement Technique, 2024, 51(4): 53-55.

[9] 代威珏，敖波，刘海强，等. 金属增材制件射线检测缺陷检出概率分析[J]. 航空动力学报，2024，39(4)：135-142.
DAI Weijue, AO Bo, LIU Haiqiang, et al. POD Analysis of Defect in Radiographic Testing of Metal Additive Parts[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(4): 135-142.

[10] 段志荣，张晓明，井德强，等. 复合缺陷电磁-声一体化检测方法的可靠性评估[J]. 固体力学学报，2025，46(1)：27-38.
DUAN Zhirong, ZHANG Xiaoming, JING Deqiang, et al. Reliability Evaluation of Electromagnetic-acoustic Integrated Testing Method for Composite Defects[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2025, 46(1): 27-38.

[11] YUSA N, SONG Haicheng, IWATA D, et al. Probabilistic Evaluation of EMAR Signals to Evaluate Pipe Wall Thickness and Its Application to Pipe Wall Thinning Management[J]. NDT & E International, 2021, 122: 102475.

[12] TOMIZAWA T, YUSA N. Bayesian Data Fusion of Eddy Current Testing for Flaw Characterization with Uncertainty Evaluation[J]. NDT & E International, 2024, 141: 102996.

[13] LE M, PHAM P H, TRUNG L Q, et al. Enhancing Corrosion Detection in Pulsed Eddy Current Testing Systems through Autoencoder-based Unsupervised Learning[J]. NDT & E International, 2024, 146: 103175.

[14] LIU Zhengshuai, LI Yong, SU Bingjie, et al. Feature Fusion for Pulse-modulation Eddy Current Imaging and Evaluation of Defects in Layered Conductors[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(S1): S283-S293.

[15] YAN Bei, LI Yong, LIU Zhengshuai, et al. Pulse-modulation Eddy Current Imaging for 3D Profile Reconstruction of Subsurface Corrosion in Metallic Structures of Aviation[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(24): 28087-28096.

[16] YAN Bei, LI Yong, LIU Zhengshuai, et al. Pulse-modulation Eddy Current Imaging and Evaluation of Subsurface Corrosion *via* the Improved Small Sub-domain Filtering Method[J]. NDT & E International, 2021, 119: 102404.

[17] XU Anxing. Research and Analysis of MLE Based on Maximum Likelihood Estimation[J]. Theoretical and Natural Science, 2025, 92(1): 166-171.

[18] KORKMAZ M. A Study over the General Formula of Regression Sum of Squares in Multiple Linear Regression[J]. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2021, 37(1): 406-421.

[19] YUSA N, SONG Haicheng, IWATA D, et al. Probabilistic Analysis of Electromagnetic Acoustic Resonance Signals for the Detection of Pipe Wall Thinning[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2021, 36(1): 1-16.

[20] YUSA N, CHEN Weixi, HASHIZUME H. Demonstration of Probability of Detection Taking Consideration of both the Length and the Depth of a Flaw Explicitly[J]. NDT & E International, 2016, 81: 1-8.

[21] 郭庆光，李新民. Bootstrap模型平均置信区间[J]. 应用数学进展，2021，10(11)：3802-3810.
GUO Qingguang, LI Xinmin. Model-averaged Bootstrap Confidence Interval[J]. Advances in Applied Mathematics, 2021, 10(11): 3802-3810.

[22] 鄂琳. 探究变量选择的常见方法[J]. 通讯世界，2019，26(3)：205-206.
E Lin. Explore the Common Methods of Variable Selection[J]. Telecom World, 2019, 26(3): 205-206.

[23] 邓飞，张荣稳，余靖，等. 基于ROC曲线的逻辑回归切割值寻优方法研究及应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2023，48(1)：53-57.
DENG Fei, ZHANG Rongwen, YU Jing, et al. Cutting Value Optimization Method of Logistic Regression Based on ROC Curve[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 48(1): 53-57.

[24] NAHM F S. Receiver Operating Characteristic Curve: Overview and Practical Use for Clinicians[J]. Korean Journal of Anesthesiology, 2022, 75(1): 25-36.

（编辑　张　洋）

作者简介：苏冰洁，女，1998年生，博士研究生。研究方向为电磁无损检测。发表论文4篇。E-mail：Subingjie@stu.xjtu.edu.cn。

李　勇*（通信作者），男，1978年生，教授、博士研究生导师。研究方向为机械结构无损定量检测及完整性评估。发表论文200余篇。E-mail：yong.li@mail.xjtu.edu.cn。

本文引用格式：

苏冰洁，李勇，王艺融，等. 脉冲调制涡流检测涂层系统的减薄缺陷检出概率分析[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1541-1547.

SU Bingjie, LI Yong, WANG Yirong, et al. Analysis of POD for Pulse-modulation Eddy Current Testing of Thickness Reduction in Coating Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1541-1547.