

7-2-2020

Computed Terahertz Wave Propagation in Marine Protective Coating

Wanli Tu

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;;2. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;;3. Fujian University Engineering R&D Centre for Design and Manufacturing of Marine Engineering Equipment, Fuzhou 350108, China;;

Shuncong Zhong

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;;3. Fujian University Engineering R&D Centre for Design and Manufacturing of Marine Engineering Equipment, Fuzhou 350108, China;;

Zhou Qing

2. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;;

Ligang Yao

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;;3. Fujian University Engineering R&D Centre for Design and Manufacturing of Marine Engineering Equipment, Fuzhou 350108, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Computed Terahertz Wave Propagation in Marine Protective Coating

Abstract

Abstract: The propagation of terahertz radiation in marine protective coatings was investigated based on Finite-difference time-domain method. *The theoretical framework using terahertz waves for the detection of marine protective coatings was established; also, both intact and defected coating system were modelled and analyzed.* The reflected radiation properties were recorded for quantitative characterisation of marine protective coating thickness. Furthermore, diagnostic analysis was done for the defects of the coating system, such as bubbling and oxidation of rust. The Finite-difference time-domain model provides some theoretical basis for nondestructive testing and evaluation of marine protective coating system by terahertz pulsed imaging technology and will benefit the effective maintenance to avoid coating failure and for protective coating design.

Keywords

marine protective coatings, multilayered structures, finite-difference time-domain method, terahertz, nondestructive testing and evaluation

Recommended Citation

Tu Wanli, Zhong Shuncong, Zhou Qing, Yao Ligang. Computed Terahertz Wave Propagation in Marine Protective Coating[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 19-26.

太赫兹波在船舶防护涂层系统的传播特性研究

涂婉丽^{1,2,3}, 钟舜聪^{1,3}, 周卿², 姚立纲^{1,3}(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021;
3. 海洋工程装备设计制造福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要: 基于有限时域差分法研究太赫兹波在船舶防护涂层系统的传播特性。建立了太赫兹波在船舶防护涂层系统的脉冲检测模型, 并进行了涂层系统中无缺陷和有缺陷情况的仿真研究。对多层结构涂层中各涂层厚度进行定量分析, 并对涂层中存在的气孔、涂层氧化物等缺陷进行诊断分析。仿真结果表明, 有限时域差分模型为基于太赫兹脉冲成像的船舶防护涂层系统的无损检测和评估提供理论支撑, 有利于提供及时有效的维护措施以及涂层设计具有借鉴作用。

关键词: 船舶防护涂层; 多层结构; 有限时域差分法; 太赫兹; 无损检测和评价

中图分类号: TL214+.6 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 01-0019-08

Computed Terahertz Wave Propagation in Marine Protective Coating

Tu Wanli^{1,2,3}, Zhong Shuncong^{1,3}, Zhou Qing², Yao Ligang^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China;

3. Fujian University Engineering R&D Centre for Design and Manufacturing of Marine Engineering Equipment, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The propagation of terahertz radiation in marine protective coatings was investigated based on Finite-difference time-domain method. *The theoretical framework using terahertz waves for the detection of marine protective coatings was established; also, both intact and defected coating system were modelled and analyzed.* The reflected radiation properties were recorded for quantitative characterisation of marine protective coating thickness. Furthermore, diagnostic analysis was done for the defects of the coating system, such as bubbling and oxidation of rust. The Finite-difference time-domain model provides some theoretical basis for nondestructive testing and evaluation of marine protective coating system by terahertz pulsed imaging technology and will benefit the effective maintenance to avoid coating failure and for protective coating design.

Keywords: marine protective coatings; multilayered structures; finite-difference time-domain method; terahertz; nondestructive testing and evaluation

引言

在海洋恶劣环境因素的影响下, 船舶腐蚀防护涂层会发生变质、老化或失效。在失效的过程中,

涂层的某些物理性能和化学性能会发生变化, 在涂层体系中会形成一些微观或宏观的缺陷。由金属界面产生的腐蚀引起涂层外观变化主要形式有起泡、生锈、脱落。由涂层自身化学的、物理的变化, 引起的破坏形式有粉化、变色、起泡、龟裂等^[1-5]。因此使用快速、可靠的无损检测方法检测涂层体系的性能变化以及可能存在的缺陷, 获得与涂层性能相关的信息, 进一步对涂层性能进行有效的评价,



收稿日期: 2014-07-29 修回日期: 2014-09-28;
基金项目: 福建省杰出青年基金滚动项目(2014J07007);
福建省教育厅资助科技项目(JA13180);
作者简介: 涂婉丽(1982-), 女, 泉州, 博士生, 讲师, 研究方向为太赫兹无损检测和评估技术, 机电检测技术等; 钟舜聪(通讯作者 1976-), 男, 漳州, 研究员, 博导, 研究方向为光学、太赫兹及无损定量评价等。

<http://www.china-simulation.com>

对提供及时有效的维护措施进而避免因涂层失效引起的严重后果有很大帮助。目前对涂层下金属的腐蚀以及涂层防护系统动态信息的无损检测方法主要是电化学方法,如电化学阻抗谱法(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)^[6-7]、电化学噪声法(Electrochemical Noise, EN)^[8-9]等。其中 EIS 只能提供整个界面的平均响应,只能评价环境的腐蚀性和材料的均匀腐蚀程度,对于涂层局部破坏或局部缺陷不够敏感,不能确定失效位点,而涂层的失效(腐蚀、剥离、起泡等)通常起始于局部。EN 法能够进行局部腐蚀检测,但该方法存在信号数据量大、噪声物理意义不清楚、定量解析困难等特点,在数据分析处理方面未形成统一理论,无法连续监测分析。

太赫兹波,是指频率在 0.1~10 THz (1 THz=10¹² Hz,对应真空中波长为 3 000~30 μm)范围内的电磁波,它在电磁波谱中位于微波与红外之间,具有高穿透能力、无损、安全的优点^[10]。采用太赫兹脉冲成像技术检测多层介质结构时,介质结构中的化学、结构变化最终反映为电磁性质变化,这些变化能够在接收到的透射或反射信号中反映出来,最终能够从介质内部无损地获得高质量横断面图像,能够更好地表征介质的状态。目前太赫兹脉冲成像技术已成功用于合成药片、生物组织、牙齿结构、航天复合材料等多种多层介质的检测中^[11-16]。而太赫兹脉冲成像技术用于检测船舶防护涂层的研究处于起步阶段,David J. Cook 采用时域太赫兹技术(Time-Domain Terahertz Technology)对新涂装的船舶有机涂层干膜的厚度进行了检测实验^[17],提出了太赫兹脉冲成像技术对船舶防护涂层系统检测的可行性。

要更进一步分析太赫兹波对船舶防护涂层的检测结果,更好地应用太赫兹脉冲成像检测技术对防护涂层的界面缺陷(如剥离、起泡和腐蚀等)进行迅速检测定位和定量分析,为船舶防护涂层的维护工作提供及时可靠的信息,还需要更多更深的理论依据。目前已有关于太赫兹波在各种多层介质结构

中辐射传播的理论研究,如生物组织^[18]、燃料箱泡沫板^[19-20]、飞机隔热层泡沫材料^[20]、药片^[21-23]、复合材料^[24-25]、大气粉尘^[26]等介质,但还没有关于太赫兹检测船舶防护涂层的理论分析。

由于太赫兹脉冲成像技术中采用的是瞬态的高频脉冲,所以采用时间域的方法如有限时域差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)法要比频率域方法更适用。太赫兹波属于电磁波,其在介质中的传播过程本质上是电磁波与物质的相互作用过程,而 FDTD 法是直接求解麦克斯韦方程以得到电磁波电场解的数值计算方法,是直接对电磁工程问题进行计算机模拟的基本方法^[27],尤其是在解决有关非均匀介质、任意形状和复杂结构的散射体以及辐射系统的电磁问题中更加突出^[28]。如已有学者采用 FDTD 方法来研究飞行器强散射中心涂敷的吸波材料,分析涂层目标的电磁散射问题^[29]。此外采用 FDTD 算法对于任何形式的输入都适合,可以是高斯脉冲也可以是正弦波。我们之前采用高斯脉冲的输入形式对覆有涂层的缓释药片进行了太赫兹的脉冲检测模拟和分析^[22-23]。比起正弦波,高斯脉冲的宽频特点能够用来设置覆盖到我们感兴趣的频率。本文将采用高斯脉冲作为太赫兹辐射波的形式,对船舶防护涂层系统建立仿真模型,该方法对于分析复杂结构尤其是非规则形状模型更适合、更灵活。本文以目前船舶典型的环保型防护有机涂层系统作为研究对象,介绍船舶防护涂层的结构及组成,接着采用 FDTD 算法建立防护涂层系统构成的多层介质结构的模型并研究太赫兹波在其中的传播特性,对涂层干膜厚度进行检测与定量分析,对涂层系统中的气孔、氧化物缺陷进行检测诊断。

1 船舶防护涂层的太赫兹波脉冲检测模型

船舶防护有机涂层按照功能通常可分为 2 种:(1)防腐涂料;(2)防污涂料。一般情况下船体吃水线上下的船壳部位式最易腐蚀的部位。这个地方由

于靠泊、过船闸和拖轮顶推, 油漆通常脱落, 同时水线部位又处于湿交替条件下, 供氧充足, 导致该部位最易腐蚀。对于吃水线以下的部分, 壳体长期与海水接触, 受到海水的腐蚀, 而海洋生物的附着使船舶的航速下降船壳腐蚀速度加快, 需要涂覆各种海洋防污涂料, 通常采用的是“防污涂料+防腐涂料+碳钢基体”的形式; 而吃水线以上的部分, 主要以防腐蚀防紫外线等引起的老化为主, 常采用防腐涂料+碳钢基体的形式。实际防护涂层涂装时, 采用的是多道涂层涂装, 即每喷涂一层涂料后, 等干膜厚度检测完成, 然后进行下一层涂料的喷涂。此处模拟检测也采用这种方法, 即每涂装一层涂料就进行一次太赫兹脉冲检测, 采集样品信号, 并做进一步分析^[7]。在进行模拟计算时, 将船舶防护有机涂层系统作为检测介质, 模拟时域太赫兹脉冲反射成像系统进行检测。图 1 为太赫兹波对船舶吃水线以下的防护涂层进行脉冲检测的示意图。碳钢基体上依次为防腐涂料层和防污涂料层, 此处涂层介质被看作是线性、各向同性的均匀介质, 忽略电介质的色散, 磁导率为真空磁导率。假设涂层被检测面为 oxy 平面, 外部激励源为平面太赫兹波, 波形为高斯脉冲形式。太赫兹波的入射方向由如图所示的 θ 角和 ϕ 角决定, θ 角是指入射波与 z 轴正向的夹角, ϕ 角是指入射波在 xy 平面的方位角, 电场极化可以选择水平极化或垂直极化。当太赫兹波入射到船舶防护涂层界面时, 各层涂料由于化学性质以及结构不同引起折射率和介电性能不同, 所以在涂层界面处将产生反射, 反射情况取决于检测介质的电磁性质。通过在时域内采集太赫兹脉冲反射信号就能够对船舶防护涂层系统进行分析。

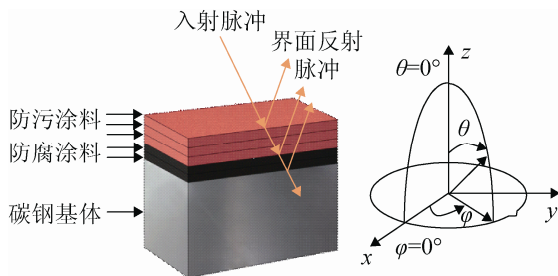


图 1 利用太赫兹波检测船舶防护涂层

利用线性各向同性介质的本构关系, 可得到含时间变量的麦克斯韦旋度方程^[28]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H - \frac{\sigma}{\varepsilon} E; \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E. \quad (2)$$

式中: E , H , ε , σ 和 μ 分别为电场强度、磁场强度、介电常数、电导率和磁导率。

根据 FDTD 理论, 模型计算域采用 Yee 元胞的方法, 对电磁场分量即电场强度 E 和磁场强度 H 分量在时间和空间上采用半步长交替网格的离散形式。应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场^[27]。对于三维立方体 Yee 元胞, 立方体边长即为空间步长。考虑到稳定性和数值色散条件^[30], 此处空间步长和时间步长设置为满足下列关系 $\delta \leq \lambda/10$ 和 $\Delta t \leq \delta/\sqrt{3}c$ 。其中: δ 表示空间步长; λ 表示介质中的波长; Δt 表示时间步长; c 表示真空中的光速。而为了在有限计算区域模拟无界空间中的电磁问题, 必须在计算区域的截断边界上设置吸收边界条件^[28]。以下是空间坐标系下电磁场分量的时间步进表达式^[30]:

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_x)_{i+\frac{1}{2}, j, k}^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_x)_{i+\frac{1}{2}, j, k}^n + \frac{\Delta t}{\delta\varepsilon} \left[(H_z)_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} - (H_z)_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} - (H_y)_{i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + (H_y)_{i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_y)_{i, j+\frac{1}{2}, k}^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_y)_{i, j+\frac{1}{2}, k}^n + \frac{\Delta t}{\delta\varepsilon} \left[(H_x)_{i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (H_x)_{i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (H_z)_{i, j, k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + (H_z)_{i, j, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_z)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\varepsilon}\right) (E_z)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n + \frac{\Delta t}{\delta\varepsilon} \left[(H_y)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (H_y)_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - (H_x)_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + (H_x)_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_x)_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_x)_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\delta\mu} \left[(E_z)_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - (E_z)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - (E_y)_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n + (E_y)_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \right] \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_y)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_y)_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\delta\mu} \left[(E_x)_{i+\frac{1}{2},j,k+1}^n - (E_x)_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - (E_z)_{i+1,j,k+\frac{1}{2}}^n + (E_z)_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \right] \quad (7)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2\mu}\right) (H_z)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\delta\mu} \left[(E_y)_{i+1,j+\frac{1}{2},k}^n - (E_y)_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - (E_x)_{i+\frac{1}{2},j+1,k}^n + (E_x)_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \right] \quad (8)$$

式中： i, j, k 分别表示 Yee 元胞节点， n 是指计算时间步长。

2 船舶防护涂层的太赫兹检测仿真与分析

2.1 涂层干膜厚度的太赫兹脉冲检测

模型模拟计算采用 XFDTD 7.3 版 FDTD 软件。首先以文献[7]中实验检测的船舶防护涂层系统为

例，进行仿真计算，并将结果与实验结果进行比较分析。模型中，碳钢基体为半径为 5 mm、厚度 1.7 mm 的圆柱体，其上的涂层模拟船舶吃水线以下的防护涂层体系，碳钢基体上先被涂上两层 152 μm 的 Amercoat 235 多功能环氧防腐涂料，折射率为 1.74，接着涂上三层各 127 μm 的 Interspeed 640 无锡自抛光防污涂料，折射率为 1.87。模型空间划分为边长为 0.03 mm 的立方体网格，时间步长 $\Delta t = 0.0577$ ps。入射波形采用高斯脉冲，覆盖频率范围 0.1~1 THz，脉冲宽度分别为 $t_0 = 2$ ps。入射角度为 $\theta = \phi = 0^\circ$ ，即太赫兹波是垂直入射到检测介质表面，电场极化选择垂直极化。采用 PML 完全匹配层吸收边界^[31]，程序运行 1024 步以保证收敛。仿真软件中远区场传感器设置在 $\theta = \phi = 0^\circ$ 的位置，用来得到远区场的时域特性。当太赫兹波垂直入射到多层结构介质表面时，将在各层介质界面间产生一系列脉冲反射，而远区场传感器负责采集这些信号。

图 2 是按照每涂一层涂料就进行一次检测的 FDTD 计算结果，用远区场特性表示。从图中能够看出：在空气-涂层界面处、防污涂层-防腐涂层的分界面处、涂层与碳钢基体分界面处均产生回波，这是因为不同成分涂层的化学、结构的不同引起的。在从碳钢基体分界面处产生强反射信号后，还存在一些明显的振荡，这是二次反射现象^[7]。

船舶防护涂层的涂装过程中，涂层干膜厚度的控制和检测是重要的一个环节。接下来将对模拟检测得到的各涂层厚度进行分析。在太赫兹脉冲成像系统中，反卷积^[11-12,32]经常被用来获取样品脉冲函数用于后续的成像或者光谱分析。为此，每次得到涂层样品的太赫兹反射信号后，都相应把涂层系统换成金属材质进行模拟计算，以得到相应的反射信号，即参考信号。将每次的样品信号和参考信号进行反卷积，就可以得到脉冲响应函数，如图 3(a) 所示。

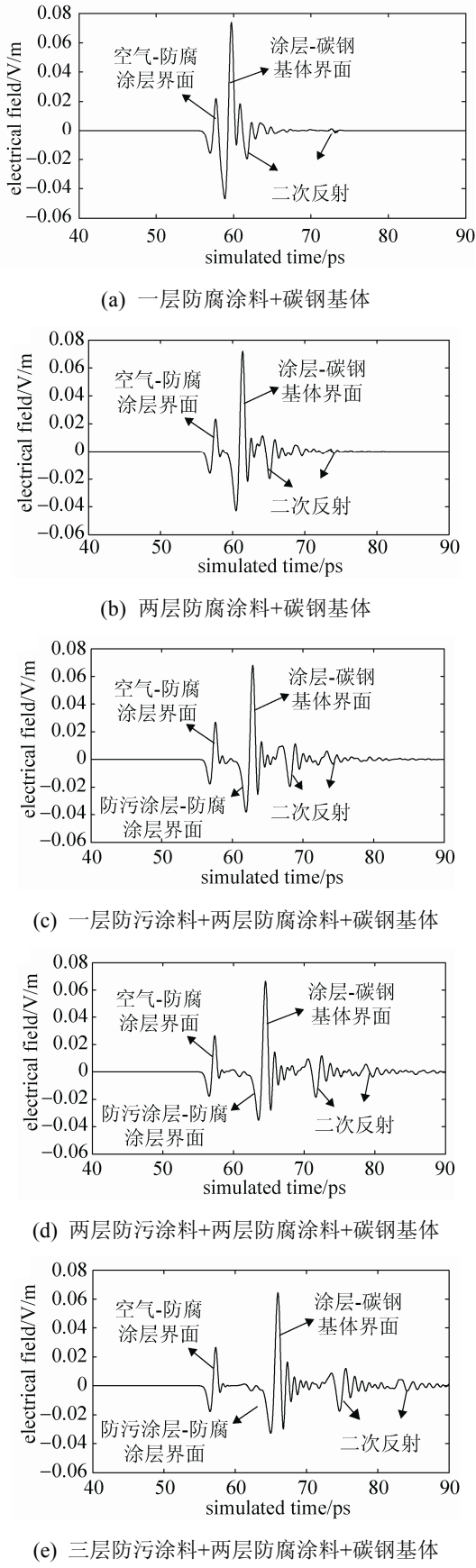
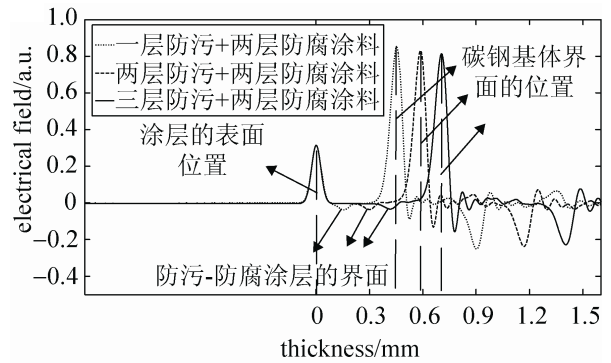
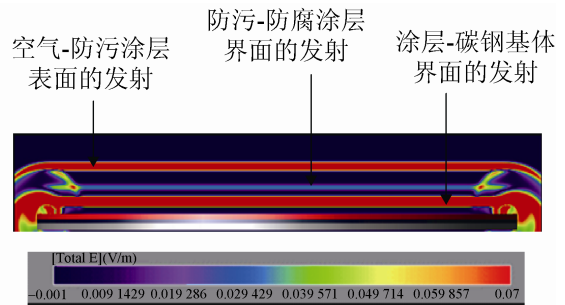


图 2 对不同涂层结构的太赫兹脉冲检测

图 3(a)中横轴代表沿着涂层方向的厚度, 以每次涂装完最上面涂层表面作为厚度 0 mm 基准面。图中分别是以下 3 种情况的反卷积结果: 一层防污涂料+两层防腐涂料+碳钢基体、两层防污涂料+两层防腐涂料+碳钢基体、三层防污涂料+两层防腐涂料+碳钢基体。涂层干膜厚度的计算公式可参考 $d = c(t_2 - t_1) / (2n_{\text{coating}})$, 其中 d 是所计算涂层的厚度, c 是真空中光速, n_{coating} 是所计算涂层的折射率, $(t_2 - t_1)$ 是了各界面上反射脉冲的时间间隔^[21]。就一层防污涂料+两层防腐涂料(两层防腐涂料模拟 304 μm , 一层防污涂料模拟 127 μm)的模拟检测分析, 从图 3(a)可得到两层防腐涂料的厚度为 305.3 μm 和 129.4 μm 。从结果可知太赫兹脉冲检测具有对各涂层厚度进行较为精确的定量分析的能力。此外, 图 3(b)为涂层太赫兹检测的电磁场图, 从中可以很直观得到各个界面的信息。这里需要指出的是, 由于在样品两边边缘的区域由于散射损失^[33]比较严重, 这些区域的波形在实际中不能被采用。



(a) 3 种不同涂层的太赫兹检测信号的脉冲响应函数



(b) 涂层太赫兹检测的电磁场图

图 3 船舶防护涂层太赫兹检测的结果

2.2 涂层下缺陷的太赫兹脉冲检测

涂层下方船体的腐蚀常常无法直接看出来,属于结构内部的缺陷。实际上涂层本身有微孔存在,所以海水仍可缓慢穿过涂层在金属基体上产生化学腐蚀,腐蚀物的缓慢增多最终导致涂层被破坏,并最终失效。另外,在涂层之前那些未除尽的氧化皮、锈蚀物、污物、水分、盐类等,也会对涂层产生一些破坏作用。涂装时漏涂等施工缺陷也会加速腐蚀进程,从而过早破坏涂膜。涂膜损坏后,将产生前述各种腐蚀。不管是涂层自身受到化学或物理作用而引起的结构变化还是涂层/金属界面的腐蚀而造成涂层的破损及其相应的外观变化,最终都反映为介质的电磁性质的变化。当太赫兹脉冲辐射到防护涂层时,缺陷引起的电磁性质的变化会对反射信号产生影响,从中可以得到一些涂层缺陷信息。

本小节在之前已介绍的无缺陷涂层的太赫兹检测模型的基础上,进一步进行带缺陷样品的太赫兹脉冲检测的计算模拟。图 4 是对防污涂层中有气孔缺陷的样品进行太赫兹脉冲检测的计算模拟,其中嵌入气孔缺陷的大小为半径 3 mm,高度 0.1 mm,距离防污涂层表面 0.17 mm。从图 4 可以得到气孔缺陷的位置信息。

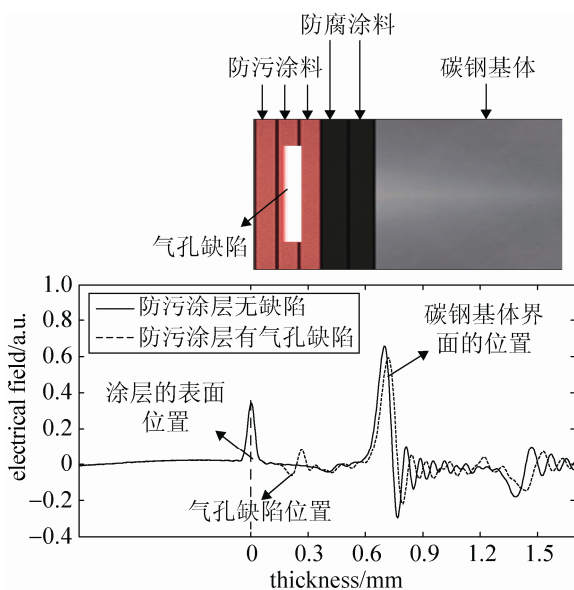


图 4 防污涂层中有气孔缺陷的太赫兹检测的脉冲响应函数

针对碳钢基体界面有未清除的氧化物的情况也作了 FDTD 模拟。图 5 是对碳钢基体在涂防护涂层前有未清除的氧化物的缺陷的太赫兹脉冲检测结果,其中碳钢基体上的氧化物的半径 3 mm,高度 0.1 mm。氧化物采用氧化铁作为介质,折射率有 3.01。从图 5 可知,样品中缺陷的存在会对反射信号产生影响。经过反卷积得到脉冲响应函数,碳钢基体界面有氧化物的情况跟没有氧化物的情况实际差别很明显,主要体现在原碳钢基体界面位置(现为氧化物)上的反射和之后的反射。因此太赫兹脉冲检测能诊断气孔、涂层氧化物等缺陷,在检测船舶涂层防护系统的无损检测和定量评价上具有重要的价值。

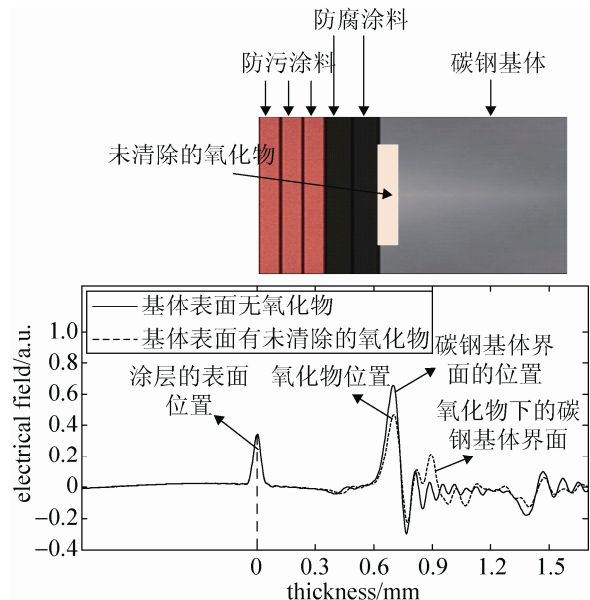


图 5 碳钢基体界面有未清除的氧化物的太赫兹检测的脉冲响应函数

3 结论

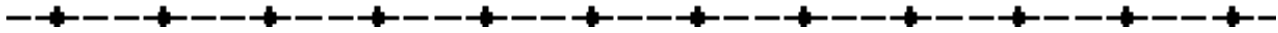
船舶防护涂层系统的状况对于保持船舶结构起到关键的作用,一旦防腐蚀涂层受到破坏,随之而来的腐蚀将使船舶结构的完整性受到破坏,因此需要适时检测涂层体系。船舶防护涂层系统的无损检测的目的是快速、可靠的获取涂层体系的性能变化以及可能存在的缺陷,获得与涂层性能相关的信息,进一步对涂层性能进行有效的评价,对提供及

时有效的维护措施进而避免因涂层失效引起的严重后果有很大帮助。本研究选择船舶防护涂层系统为多层介质结构, 研究基于 FDTD 的太赫兹波在其中的传播和反射特性, 并结合太赫兹脉冲响应函数进行多层结构涂层分析。从模拟结果可知太赫兹脉冲检测可以对各涂层厚度进行定量分析, 并且能够对气孔缺陷、涂层氧化物等缺陷进行诊断。该模型为基于太赫兹脉冲成像的船舶防护涂层系统的无损检测和评估提供理论支撑, 为提供及时有效的维护措施以及涂层设计具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] Soares C G, Garbatov Y, Zayed A, et al. Influence of Environmental Factors on Corrosion of Ship Structures in Marine Atmosphere [J]. *Corrosion Science* (S0010-938X), 2009, 51: 2014-2026.
- [2] Samimi Amir, and Soroush Zarinabadi. An Analysis of Polyethylene Coating Corrosion in Oil and Gas Pipelines [J]. *Journal of American Science* (S1545-1003), 2011, 7(1): 1032-1036.
- [3] 许立坤, 王朝臣. 我国海洋腐蚀与防护领域发展展望 [C]//2008 年材料腐蚀与控制学术研讨会论文集, 青岛, 2008: 1-3.
- [4] Morcillo M. Soluble Salts: Their Effect on Premature Degradation of Anticorrosive Paints [J]. *Progress in Organic Coatings* (S0300-9440), 1999, 36: 137-147.
- [5] Akpan Unyime O, Koko T S, Ayyub B, et al. Risk Assessment of Aging Ship Hull Structures in the Presence of Corrosion and Fatigue [J]. *Marine Structures* (S0951-8339), 2002, 15: 211-231.
- [6] Amirudin A, Barreau C, Hellouin R, et al. Evaluation of Anti-corrosive Pigments by Pigment Extracts Studies, Atmospheric Exposure and Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. *Progress in Organic Coatings* (S0300-9440), 1995, 25: 339-355.
- [7] Amirudin A, Thierry D. Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Study the Degradation of Polymer-coated Metals [J]. *Progress in Organic Coatings* (S0300-9440), 1995, 26: 1-28
- [8] Bertocci U, Huet F. Noise Analysis Applied to Electrochemical System [J]. *Corrosion* (S0010-9312), 1995, 51: 131-134.
- [9] Legat A, Leban M, Bajt Ž. Corrosion Processes of Steel in Concrete Characterized by Means of Electrochemical Noise [J]. *Electrochimica Acta* (S0013-4686), 2004, 49: 2741-2751.
- [10] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 2-8.
- [11] Zhong Shuncong, Shen Yaochun, Ho Louise, et al. Nondestructive Quantification of Pharmaceutical Tablet Coatings Using Terahertz Pulsed Imaging and Optical Coherence Tomography [J]. *Optics and Lasers in Engineering* (S0143-8166), 2011, 49(3): 361-365.
- [12] Parrott Edward P J, Sy Stanley M Y, Blu Thierry, et al. Terahertz Pulsed Imaging in Vivo: Measurements and Processing Methods [J]. *Journal of Biomedical Optics* (S1083-3668), 2011, 16(10): 1-8.
- [13] Crawley David, Longbottom Christopher, Wallace Vincent P, et al. Three-dimensional Terahertz Pulse Imaging of Dental Tissue[J]. *Journal of Biomedical Optics* (S1083-3668), 2003, 8(2): 303-307.
- [14] Stoik Christopher, Bohn Matthew, Blackshire James. Nondestructive Evaluation of Aircraft Composites Using Reflective Terahertz Time Domain Spectroscopy [J]. *NDT&E International* (S0963-8695), 2010, 43: 106-115.
- [15] Jackson J B, Labaune J, Mourou G A, et al. Pulsed terahertz investigation of corroded and mineralized copper alloy historical artifacts [C]// 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011: 1-2.
- [16] 周燕, 牧凯军, 张艳东, 等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测[J]. *无损检测*. 2007, 29(5): 266-268.
- [17] Cook D J, Sharpe S J, Lee S, et al. Terahertz Time Domain Measurements of Marine Paint Thickness [Z]. *Optical Terahertz Science and Technology*, OSA Technical Digest Series. 2007.
- [18] Pickwell E, Cole B E, Fitzgerald A J, et al. Simulation of Terahertz Pulse Propagation in Biological Systems [J]. *Applied Physics Letters* (S0003-6951), 2004, 84(12): 2190-2192.
- [19] Banks H T, Gibson N L, Winfree W P. Gap Detection with Electromagnetic Terahertz Signals [J]. *Real World Applications* (S1468-1218), 2005, 6(2): 381-416.
- [20] Melapudi Vikram R, Udpa Satish S, Udpa Lalita, et al. Ray Tracing Model for Terahertz Inspection of Spray on Foam Insulation (SOFI) [C]//12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 2006: 421.
- [21] Shen Yaochun, Taday Philip F. Development and

- Application of Terahertz Pulsed Imaging for Nondestructive Inspection of Pharmaceutical Tablet [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (S1077-260X), 2008, 14(2): 407-415.
- [22] Tu Wanli, Zhong Shuncong, Yao Haizi, et al. FDTD-based Computed Terahertz Wave Propagation in Multilayer Medium Structures [C]// Proc. of SPIE. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Terahertz Technologies and Applications, 8909: 89090Y1. USA: SPIE, 2013.
- [23] Tu Wanli, Zhong Shuncong, Shen Yaochun, et al. FDTD-based Quantitative Analysis of Terahertz Wave Detection for Multilayered Structures [J] J. Optical Society of America A(S1084-7529), 2014, 31: 2285-2293.
- [24] 张雯. 隐藏腐蚀脉冲太赫兹无损检测的建模与分析[J]. 无损检测, 2009, 31(10): 790-795
- [25] Lopato Przemyslaw, Chady Tomasz, Sikora Ryszard, et al. Full Wave Numerical Modelling of Terahertz Systems for Nondestructive Evaluation of Dielectric Structures [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (S0332-1649), 2013, 32(3): 736-749.
- [26] 孟坤, 李泽仁, 刘乔. 太赫兹波在介质中传播的 FDTD 分析[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(3): 277-279.
- [27] Taflove Allen, Umashankar Korada R. The Finite-Difference Time-Domain Method for Numerical Modeling of Electromagnetic Wave Interactions [J]. Electromagnetics (S0272-6343), 1990, 10: 105-126.
- [28] Tirkas Panayiotis A, Balanis Constantine A, Purchine Michael P. et al. Barber, Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Radiation, Interference, and Interaction with Complex Structures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (S0017-9375), 1993, 35(2): 192-203.
- [29] Rao Sadasiva M, Cha Chungchi, Cravey Robin L, et al. Electromagnetic Scattering from Arbitrary Shaped Conducting Bodies Coated with Lossy Materials of Arbitrary Thickness[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation (S0018-926X), 1991, 39: 627-631.
- [30] Sullivan Dennis M. Electromagnetic simulation using the FDTD method [M]. New York: IEEE Press, 2000: 79-89.
- [31] Berenger Jean Pierre, A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves [J]. Journal of Computational Physics (S0021-9991), 1994, 114(2): 185-200.
- [32] Woodward Ruth M, Cole Bryan E, Wallace Vincent P, et al. Terahertz Pulse Imaging in Reflection Geometry of Human Skin Cancer and Skin Tissue [J]. Physics in Medicine And Biology (S0031-9155), 2002, 47(21): 3853-3863.
- [33] Russe Isabelle Sophie, Brock Daniela, Knop Klaus, et al. Validation of Terahertz Coating Thickness Measurements Using X-ray Microtomography [J]. Molecular Pharmaceutics (S1543-8384), 2012, 9(12): 3551-3559.



(上接第 18 页)

- [5] 欧阳高翔, 倪茂林, 孙承启等. 航天器的故障建模与应用 [J]. 航天控制, 2011, 29(5): 22-29. (Ouyang Gaoxiang, Ni Maolin, Sun Chengqi, et al. The Fault Modeling and Application to Aerospace Engineering [J]. Aerospace Control (S1006-3242), 2011, 29(5): 22-29.)
- [6] 刘新彦, 常建松. 某型动量轮精细化故障建模研究 [C]// 全国第十六届空间及运动体控制技术学术会议论文集, 北京: 北京控制工程研究所, 2014: 535-541.
- [7] 吕超, 刘爽, 王世明. 基于机构原理的设备模块划分与耦合决策方法 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(4): 739-743. (Lv Chao, Liu Shuang, Wang Shiming. Method of Module Division and Coupling Decision Based on Mechanism Theory [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(4): 739-743.)
- [8] Liu Rui, Zhou Jun, Li Peng. A Method for Components Fault Model Building [C]// 2012 4th International Conference on Mechanical and Electronics Engineering. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012: 156-159
- [9] 张孝功, 任章. 一种卫星故障诊断的定性/定量混合建模新方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(5): 38-42. (Zhang Xiaogong, Ren Zhang. A New Modeling Method of Satellite Fault Diagnosis Based on the Qualitative/ Quantitative Hybrid Model. Aerospace Control and Application (S1674-1579), 2009, 35(5): 38-42.)
- [10] 常建松, 郭建新, 李艳华, 等. IGSO 卫星地球敏感器受南极红外辐射波动影响分析 [C]// 中国宇航学会飞行器总体专业委员会第 12 届学术研讨会论文集, 北京: 中国空间技术研究院, 2012: 206-209.