

海上风电场电磁散射特性研究方法研究进展

刘荣达¹, 刘尊年^{1*}, 姜 杰², 宋豪楠², 刘 静¹, 张瑞琪¹, 卢一红¹

(1. 青岛理工大学理学院, 山东 青岛 266033;

2. 交通运输部北海航海保障中心烟台通信中心, 山东 烟台 264000)

摘 要: 随着海上风电场的快速建设和布局, 大量风力机、升压站和集电系统等风电相关设备在工作过程中会对周边产生电磁干扰。为降低海上风电场干扰带来的负面影响, 须着重了解风力机的电磁特性。本文聚焦于海上风电场电磁散射特性分析, 系统梳理了当前海上风电场电磁散射特性分析的主要方法, 包括实验测量法、高频近似方法(矩量法、物理光学法、物理绕射法、几何光学法和几何绕射法)以及全波数值方法(有限元法和时域有限差分法)。通过对比分析几种方法的适用特性, 提出引入多径效应分析、扩大模型适用范围、结合深度学习技术以提高计算效率, 并强调综合多种方法以实现更精准的电磁特性分析等未来研究方向, 以期为海上风电场的优化布局和电磁兼容性研究提供重要参考, 助力海上风电技术的智能化和可持续发展。

关键词: 电磁特性; 散射点叠加法; 矩量法; 物理光学; 有限元法

中图分类号: P752; TM614

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2025)02-0139-14

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20240319001

引用格式: 刘荣达, 刘尊年, 姜杰, 等, 2025. 海上风电场电磁散射特性研究方法研究进展[J]. 海岸工程, 44(2): 139-152. LIU R D, LIU Z N, JIANG J, et al, 2025. Progress on the method for studying electromagnetic scattering characteristics of offshore wind farms[J]. Coastal Engineering, 44(2): 139-152.

海上风力发电作为一种技术成熟且规模较大的新能源发电形式, 在全球范围内受到广泛关注和快速发展。随着近年来海上风电场的快速建设和扩张, 其对周边通信系统、雷达、船舶通信系统等用频系统的电磁干扰问题日益凸显(Theil et al, 2010)。这些干扰可能导致风速特征的错误识别、气象现象的错误表征, 以及雷达效能的降低。海上风电场的电磁散射特性(Weinmann et al, 2020)是指风电场结构对电磁波的反射、折射和散射效应, 这些效应是造成电磁干扰的主要因素。因此, 深入研究海上风电场的电磁散射特性, 对于降低电磁干扰、优化风电场布局、提高雷达系统准确性和通信系统稳定性等具有重要的实际意义和理论价值。

在海上风电场电磁散射特性研究领域, 国际学术界已形成较为完善的研究体系。以美国麻省理工学院 Brenner 团队(2008)为先驱, 系统建立了风电场与航管雷达的电磁干扰评估框架, 随后英国曼彻斯特大学 Authority(2010)通过实测数据验证了风力机多普勒效应对气象雷达的干扰机制。此外, 德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)研究所 Toth 等(2011)开发了混合算法, 首次实现了大型风电场的全波电磁仿真。相比之下, 国内在海上风电场电磁散射特性方面的研究起步较晚, 最早可追溯到 2011 年左右, 哈尔滨工程大学的王利民教授团队针对风力涡轮机的电磁散射特性进行了建模和仿真分析, 研究了其对无线电信号传播的影响(王利民等, 2011); 次年, 华北电力大学王菁团队提出矩量法-物理光学混合算法(王菁, 2012); 之后, 武汉大学唐波等开展了一系列研究(唐波等, 2017a, 2017b, 2017c, 2019a), 系统构建了包含叶片旋转效应、塔架二次散射和阵列耦合效应的多尺度模型。

收稿日期: 2024-03-19 网络首发日期: 2025-04-16

作者简介: 刘荣达(1999—), 男, 硕士, 主要从事无线电物理方面研究. E-mail: 2060266641@qq.com

* 通信作者: 刘尊年(1974—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事无线电物理方面研究. E-mail: 597665791@qq.com

(责任编辑 王 燕)

近年实验研究表明, 风力发电机组的复合散射效应会导致周边区域形成直径约 500 m 的信号盲区, 且接收信号动态范围可达 30 dB(袁汉钦等, 2020)。然而, 已有研究在数值模拟与实测数据的空间一致性验证方面仍存在显著差距, 特别是海上多径散射效应的建模精度有待进一步提升。

经典电磁散射分析方法的发展可追溯至 20 世纪中叶理论体系的奠基阶段。国外学者 Harrington (1968) 创立了矩量法(Method of Moments, MoM), 首次实现了导体目标的严格电磁建模; 随后 Kouyoumjian(1974)发展了几何绕射理论(Geometrical Theory of Diffraction, GTD), 为复杂结构散射分析提供了高效解决方案。这些理论框架在我国研究实践中经历了本土化演进, 如冯庚(2021)在其关于快速多极子算法异构并行加速技术的研究中指出, 引入快速多极子加速算法可显著提升矩量法(MoM)的计算效率, 最高可达两个数量级。进一步地, 基于 CPU-GPU 异构平台的并行化实现, 不仅有效提升了算法的执行效率, 还扩展了其在大规模电磁问题求解中的应用范围。

尽管经典电磁散射分析方法在特定场景下具有良好的工程适用性, 其固有局限性仍制约着现代电磁散射分析, 表现在: ①矩量法(MoM)在 GHz 频段的计算复杂度呈 $O(N^2)$ 增长, 单次全尺寸风机仿真需消耗超过 10^4 CPU 小时(Fu et al, 2023); ②物理光学(Physical Optics, PO)方法对边缘衍射效应的忽略导致预测精度离散度达 $\pm 15\%$ ^①; ③几何绕射理论(GTD)在近场区的失效问题尚未完全解决, 特别是在叶片-塔架耦合区域误差超过 8 dB(Ke et al, 2015)。

为克服这些挑战, 近年来研究者们开始探索融合深度学习等先进技术的新方法, 以提升计算效率并提高分析精度。例如, Sun 等(2019)提出了一种新的基于遗传算法的多目标电磁分析, 以在恢复密钥时充分利用信息, 并在实际运用中减少约 42.72% 的计算资源。未来, 进一步优化现有方法, 并开发更加高效、精准的电磁散射特性评估工具, 将成为研究的重点方向。

深度学习技术在信号处理、图像识别等领域的成功应用表明, 其在处理复杂电磁信号的多径效应和非线性问题方面具有显著优势。将深度学习与电磁散射特性分析相结合, 有望降低计算复杂度, 扩展分析模型的适用范围, 提高预测精度和计算效率。然而, 传统方法仍然具有不可替代的价值, 尤其在数据不足或需要严格物理约束的情况下, 全波方法仍然是重要的基准工具, 而高频近似方法则在大尺度问题上依然具有应用价值。因此, 本文将按照从实验测量到理论建模, 再延伸至高精度数值计算的逻辑顺序, 系统梳理和分析研究海上风电场电磁散射特性的传统分析方法, 对比这些方法的优缺点, 并探讨更为准确和高效的海上风电场电磁特性分析方法。

1 实验测量法

1.1 实验测量法原理

实验测量法是一种基于比例缩放的计算机三维模型, 在不同电磁求解器中预测雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)特性的数值模拟方法(Zhang, 2011), 其基本流程如图 1 所示。该方法要求将风力涡轮机结构的几何特征进行电磁学简化, 并将缩比模型置于可控实验环境中进行测量。然而, 研究(Zhang, 2011)表明, 缩比模型的预测结果与实际观测值存在显著偏差, 主要源于两方面局限性: 首先, 针对大型结构的全波解析方法受限于计算复杂度, 仅适用于低频段、简单电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)场景或单体叶片分析; 其次, 材料特性的尺度等效转换尚未建立完善的理论体系。值得注意的是, 通过合理选材实现缩比系统与全尺寸系统的电磁场等效映射,

^①NGUYEN M D, 2021. Accuracy evaluation of physical optics approximation for edge diffraction by conducting wedge. Annual Report of Graduate School of Science and Engineering, Chuo University.

在理论上可建立有效的尺度转换模型。因此, 构建有效的风力涡轮机缩比模型需满足 4 项基本条件: ①模型应该足够小, 以保证其电磁散射特性接近远场目标; ②模型应该保留必要的特征细节, 方便进行散射场验证计算; ③模型必须能够通过标准接口实时改变叶片信息, 如风叶旋转速度、方位角以及桨距角等; ④模型的尺寸和材料应与测量频率、测量的多普勒频率以及散射测量设备相匹配。

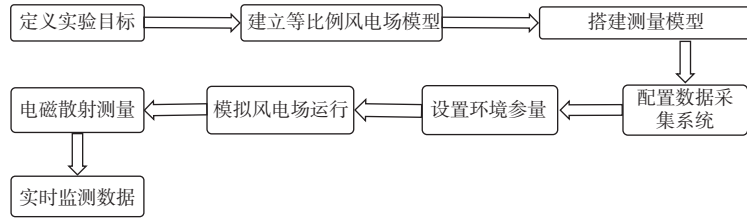


图 1 实验测量法流程

Fig. 1 Flow sheet of experimental measurement method

在实验测量法的建模过程中, 首先需要明确全尺寸系统(full-scale system, 简称为 f)与缩放模型系统(scaled model system, 简称为 m)之间的关系。全尺寸系统是实际应用中的目标, 而缩放模型系统则用于实验室环境下的测试和分析。由于直接对全尺寸系统进行实验测量往往成本高、操作复杂, 因此研究时通常采用缩放模型系统来模拟实际情况, 从而降低实验成本并提高测试可行性。

在构建缩放模型系统时, 电磁场参数及其他关键物理参数(如几何尺寸、材料特性和激励信号)都需要从全尺寸系统转换而来(Sinclair et al, 1948)。根据相似性原理, 相似性要求是实验测量法的核心, 这样可以确保缩比模型的测量结果能够有效用于推断全尺寸系统的实际电磁散射特性, 从而提高实验的准确性并增强其在工程应用中的可靠性。为了确保缩放模型能够准确再现全尺寸系统的电磁散射特性, 其坐标系、位置矢量 \mathbf{r} 、电场强度 \mathbf{E} 和磁场强度 \mathbf{H} 、工作频率 ω , 以及磁导率 μ 、介电常数 ε 和电导率 σ 等材料参数必须满足一定的缩放关系(胡艳等, 2004), 该缩放关系为:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_m = k_l \mathbf{r}_f \\ \omega_m = k_\omega \omega_f \\ \mathbf{E}_m = k_E \mathbf{E}_f \\ \mathbf{H}_m = k_H \mathbf{H}_f, \\ \sigma_m = k_\sigma \sigma_f \\ \varepsilon_m = k_\varepsilon \varepsilon_f \\ \mu_m = k_\mu \mu_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{r}_m 和 \mathbf{r}_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的位置矢量; ω_m 和 ω_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的工作频率; \mathbf{E}_m 和 \mathbf{E}_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的电场强度; \mathbf{H}_m 和 \mathbf{H}_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的磁场强度; σ_m 和 σ_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的电导率; ε_m 和 ε_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的介电常数; μ_m 和 μ_f 分别为缩放模型系统和全尺寸系统的磁导率; k_l 为几何比例常数; k_ω 为频率比例常数; k_E 为电场比例常数; k_H 为磁场比例常数; k_σ 为电导率比例常数; k_ε 为介电常数比例常数; k_μ 为磁导率比例常数。这些比例常数共同确保了缩放模型在电磁特性上能够准确模拟全尺寸系统, 使实验测量结果能够正确推导出全尺寸系统的电磁散射特性, 其数值是根据实验设计和物理原理确定的, 并在特定的缩比模型与全尺寸模型之间保持固定的比例关系。此外, 两个系统中的场满足麦克斯韦方程(金桂玉等, 2012):

$$\nabla_i \times \mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i) = -j\omega_i \mu_i(\mathbf{r}_i) \mathbf{H}_i(\mathbf{r}_i), \quad (2)$$

$$\nabla_i \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}_i) = \sigma_i(\mathbf{r}_i) \mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i) + j\omega_i \mu_i(\mathbf{r}_i) \mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i), \quad (3)$$

式中： i 为两个不同的系统状态，即 f 或 m； $\nabla_i \times \mathbf{E}_i(\mathbf{r}_i)$ 为电场 \mathbf{E}_i 在位置 \mathbf{r}_i 的旋度； $\nabla_i \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}_i)$ 为磁场 \mathbf{H}_i 在位置 \mathbf{r}_i 的旋度； j 为虚数单位，用于描述电磁波的复数形式。当 i 代表缩放模型系统(m)时，将式(1)代入式(3)，可以得到各个 k 系数之间的关系：

$$\begin{cases} k_\sigma = \frac{k_H}{k_i k_E} \\ k_\varepsilon = \frac{k_H}{k_i k_\omega k_E} \\ k_\mu = \frac{k_E}{k_i k_\omega k_H} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)建立的缩放因子(k 系数)之间的关系，确保了实验室缩放模型是全尺寸系统的真实模拟。通常情况下磁场不受人工控制，但系统材料均使用非磁性材料，故可以假设 $k_E = k_H$ ，并且 $k_i k_\omega = 1$ 。系统全尺寸系统和缩放系统满足式(4)，所以全尺寸系统的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)与缩放模型的 RCS 有以下关系：

$$\sigma_m = k_i^2 \sigma_f \quad (5)$$

1.2 实验测量法的应用

在构建实验室缩放模型时，需要密闭的实验室环境和材料相同的等比例缩小风力机模型，并需要解决建模中海上风电场电磁干扰问题。风力机结构的物理精确建模对研究海上风电场电磁干扰十分有效，该结构能够按电磁参数(如尺寸、频率、材料特性)进行等比例缩放计算，并通过电机精确控制风力机叶片的旋转速度与角度，使其尽可能接近实际风力机运行状态。然而，由于受高频测试设备的性能和缩放模型材料特性的限制，该方法的构造成本较高。

海上风力机属于电大散射体结构，但大多数电磁干扰问题发生在近场范围内。然而，许多电磁求解器基于远场假设进行计算，可能无法准确测定风力机在近场范围内的电磁散射特性，例如电场强度分布、散射回波特性等。因此，实验室测量近场数据成为可行的补充手段(Bieñkowski et al, 2001; Trzaska, 2001; Wei et al, 2020)，并可用于验证和对比数值模拟的近场与远场计算结果。

在风电场电磁散射特性分析领域，实验测量法已被用于提高模拟精度。例如，美国学者 Kong(2011)和上海聚星仪器有限公司(俞一鸣, 2015)采用实验测量法进行模拟，其测量结果与实际情况的偏差小于 5%，精度较高。Zhang(2011)提出了一种基于等比例缩放模型的全尺寸风力机电磁散射特性预测方法，在给定雷达参数的情况下，利用三维计算机模型结合不同电磁求解器进行计算，以预测风力机的雷达散射截面(RCS)。

2 数值算法

随着计算机技术和数值算法的不断发展，多种数值计算方法相继被提出，并广泛应用于电磁散射特性分析，特别是在复杂电磁环境建模方面，这些方法为解析电磁波在海上风电场中的传播与散射方面提供了关键的理论支撑，其中高频近似方法与全波数值方法尤为重要，它们在精确刻画电磁波特性方面发挥着至关重要的作用。本节将系统梳理数值算法的基本原理、实现步骤及其在海上风电场电磁散射特性分析中的应用情况，并重点对比高频近似方法与全波数值方法的适用性和计算性能，以评估不同数值计算方法的优劣，为海上风电场的设计与优化提供理论支撑。

2.1 高频近似方法

在海上风电场电磁散射特性分析中，高频近似方法通过简化计算在目标尺寸远大于波长的场景

下广泛应用, 其分类基于理论基础、绕射处理能力和数学形式, 主要包括矩量法(MoM), 几何光学法(Geometrical Optics, GO)、物理光学法(PO)、几何绕射理论(GTD)、物理绕射理论(Physical Theory of Diffraction, PTD)以及散射点叠加模型法。这些方法在效率与精度间各有侧重: GO 和 PO 计算速度快但忽略绕射效应, 适用于光滑表面; GTD 和 PTD 通过修正边缘绕射提升精度, 但计算公式复杂或计算量增加。

2.1.1 矩量法

矩量法(MoM)的核心思想是数值拟合, 它将未知函数在一组已知的基函数空间上展开, 通过求解得到的代数方程组来确定未知系数, 从而得到未知函数的近似解。这种方法在处理电磁散射问题尤其在处理复杂结构的电磁散射问题时, 能够提供较为精确的数值解。矩量法包括离散化、取样检测和矩阵求逆三个基本过程。离散化过程为在算子定义域中选择适当的与线性无关的基函数, 再将待求解函数表示为基函数的线性组合, 利用算子的线性特征将算子方程转化为代数方程。取样检测过程为在算子的值域内选择一组线性无关的权函数, 对权函数与代数方程取内积进行 N 次抽样检验, 再利用算子的线性和内积的特性将 N 次抽检的内积方程转化为矩阵方程。矩阵求逆过程为将积分方程化为差分方程或者将积分方程积分为有限求和, 从而建立代数方程组的过程, 该过程主要借助计算机编程求解代数方程组。

MoM 具有高精度和广泛适用性, 特别适用于处理复杂几何结构和多种材料特性的电磁散射问题, 因此, 在海上风电场的电磁特性研究中具有重要价值。此外, MoM 广泛应用于目标雷达散射截面(RCS)计算、电磁散射特性分析、电子对抗、隐身设计及目标识别等领域。通过将连续的积分方程离散化为矩阵方程, MoM 能够提供高度精确的数值解, 在求解复杂结构的电磁散射问题时尤为关键。

不容忽视的是, MoM 也存在着一些缺点, 其中最为突出的问题在于其计算效率和存储方面的需求。MoM 生成的阻抗矩阵为稠密阵, 存储量级是 $O(N^2)$, 通常使用迭代法求解这样的 MoM 矩阵方程, 其计算量级是 $KO(N^2)$, 其中 N 为 MoM 求解过程中离散网格上的未知电流分布量的数量, K 为迭代次数。如此大的存储量和计算量高度制约了 MoM 的应用范围, 也对计算机资源提出了更高的要求。随着计算目标的尺寸逐渐增大, MoM 的计算效率却急剧下降, 尤其在计算时间方面, 由于传统矩量法需计算二重积分, 其直接求解和间接求解的计算复杂度分别为 $O(N^3)$ 和 $O(N^2)$, 所以计算负担较大。为此, 黄力等(2024)提出了一种基于改进矩量法的风力机无源干扰的电磁散射特性计算方法, 对比分析了该方法计算结果与电波暗室风电机缩比模型实验结果, 结果表明, 该方法计算的结果与实验测量结果较为一致, 验证了该方法的准确性及有效性; 与传统矩量法相比, 该方法在矩阵元素计算内存上降低为原来的 $1/34.64$, 矩阵元素求解效率提高了 37.95 倍, 显著提高了计算效率, 并为后续广域空间下风电场中大规模风电机阵列动态电磁散射理论研究奠定了理论与技术基础。

2.1.2 物理光学法和物理绕射法

物理光学(PO)法是一种在高频近似中广泛使用的电磁散射分析方法, 其基本原理建立在将物体表面视为感应电流源的基础之上。该方法认为, 当电磁波入射到物体表面时, 物体表面会被激发出感应电流, 这些电流作为次级辐射源, 再次辐射电磁波形成散射场。物理光学法的核心在于, 它假设感应电流密度与入射波的电场强度成正比, 并且散射场可以视为这些感应电流产生的场的叠加。该方法特别适用于表面光滑、尺寸较大的物体, 如海上风电场中的风力发电机叶片和塔架。

PO 法的优点在于其计算效率较高, 尤其在处理大型结构时。相比于全波数值方法, PO 法可以显著减少计算资源的消耗, 而且该方法基于直观的物理概念, 易于理解和实现。在高频情况下, PO 法提供了一种有效的近似, 能够处理波长与物体尺寸相当或更小的情况, 这使得它在处理海上

风电场等大型结构的电磁散射问题时非常适用。唐波等(2017c)提出了一种基于塔架近似建模的快速 RCS 计算方法,该方法针对风力机塔架结构采用等效电流分布假设与局部场积分简化策略,其计算效率较传统纯物理光学法提升约 88%(计算资源消耗显著降低)。然而,该近似模型仅适用于塔架主导散射场景,在叶片旋转动态效应、复杂边缘绕射等精细化电磁散射特性求解中存在明显局限性,须结合时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法或多层快速多极子方法(Multi Level Fast Multipole Method, MLFMM)等全波数值方法实现高精度分析。朱艳菊等(2014)提出利用改进物理光学法结合计算机技术,通过引入绕射效应修正和高效算法优化,显著简化复杂目标的电磁散射计算。

然而, PO 法在物体阴影区域的应用存在局限性,归因于利用 PO 法无法计算阴影区域的感应电流分布,导致散射场计算的准确率较低(Grande et al, 2015)。在计算远场电磁散射特性的过程中,由于积分函数具有高振荡特性,计算量呈几何级数增长,从而增加了实际分析的复杂度。值得注意的是, PO 法不满足互易定理,即入射场和散射场之间的关系并非对称,该问题在阴影区域尤为突出,面对 PO 法的这一缺陷, Ufimtsev 于 2007 年提出了物理绕射理论(PTD),即通过引入边缘绕射电流项来修正 PO 法在阴影区域的计算误差(Ufimtsev, 2007)。与传统 PO 法相比, PTD 的计算量主要受其辐射积分影响,并与工作频率直接相关,在高频条件下仍能保持较高的计算精度。

PTD 的基本原理是将边缘和尖点视为绕射源,通过引入边缘电流和顶点电流描述电磁波在这些区域的散射特性。电磁波在物体的边缘和尖点处会产生额外的绕射效应,这些效应对整体的散射场有着重要的贡献,尤其在物理光学法无法准确预测的阴影区域。鉴于边缘和顶点的几何特性, PTD 计算出相应的绕射系数,并将这些系数与 PO 法中得到的散射场相结合,从而得到更完整的散射场预测。这种方法能够有效地处理高频情况下的电磁波散射问题(尤其在处理复杂形状的物体时), PTD 能够提供比 PO 法更准确的结果。

物理绕射理论的优点在于其能够提供比物理光学法更高的计算精度,尤其在处理具有尖锐边缘和顶点的物体情况时。PTD 能够计算出阴影区域的散射场,这是物理光学法所无法做到的。此外, PTD 在处理高频电磁波散射问题时,能够提供较为准确的结果,这对于海上风电场等复杂结构的电磁散射特性分析尤为重要。

物理绕射理论也存在局限性。首先, PTD 的计算过程相对复杂,需要计算额外的边缘电流和顶点电流,必然增加了计算的难度和时间。其次, PTD 对于低频情况下的电磁波散射问题可能不够准确,因为它主要针对高频情况下的绕射现象。再者, PTD 的应用范围受限于其理论假设,对于非常复杂的几何结构或者非均匀材料等某些特殊情况, PTD 可能无法提供满意的结果。因此,尽管 PTD 在提高散射场预测精度方面具有明显优势,但在实际应用中可能需要与其他方法结合使用,以克服其局限性并提高分析的准确性。

2.1.3 几何光学法和几何绕射法

几何光学(GO)法的基本思想是由于高频电磁波的传播近似于光,而波的传播问题可以采用射线追踪(Ray-Tracing),再根据波前表面的形状来确定场的振幅。但是,使用 GO 法会造成阴影区域中的场完全为零;而被照亮区域中的场为单独的入射场或入射场与反射场的叠加,物体边沿和尖劈的衍射场被完全忽略。总场有两处具有非物理的不连续性:一处是在亮区和阴影区之间的边界,称为入射阴影边界(Incidence Shadow Boundary, ISB);另一处是在反射区和反射不能到达的区域之间的边界,称为反射阴影区(Reflection Shadow Region, RSB)。

GO 法的优点在于其计算方便、简单明了且可靠,因此得到了广泛应用。然而, GO 法也有明显的局限性,如它基于光线模型,忽略了光的波动性质,在处理光的衍射和干涉现象时无能为力。此外, GO 法在预测光束限制后的传播现象时存在一定误差,特别是当光束通过小孔或接近波长尺

寸的物体时,这种误差变得更加显著。

几何绕射理论(GTD)是基于几何光学法的扩展理论,旨在弥补几何光学在分析绕射现象时的局限性,其核心思想是将射线概念推广到绕射场中,通过引入绕射射线系统描述电磁波或声波在遇到障碍物边缘、尖顶、曲面不连续等结构时的绕射行为。这种绕射射线可以在散射体表面上有几种或物理参数不连续的区域产生,也可以产生于凸曲面上的掠入射点处。绕射射线不仅能够进入几何光学照明区,也能够进入几何光学阴影区,这说明它可以计算几何光学不能存在的阴影区的场。因此,GTD克服了几何光学在阴影区失效的缺点,同时也使照明区中的解更加完善。图2是较为常见的几何绕射模型。

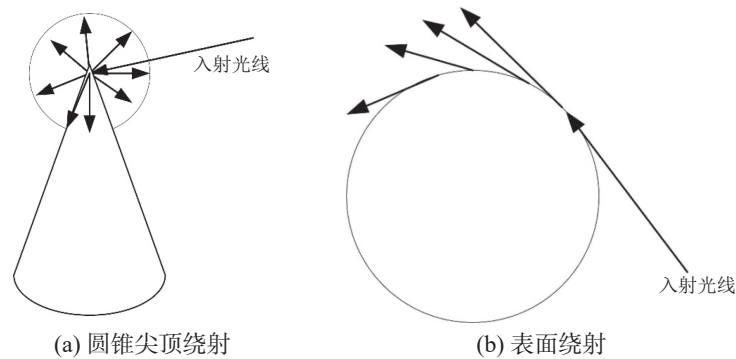


图2 常见的几何绕射模型

Fig. 2 Common models of geometric diffraction

然而,这种基于射线光学的理论,在几何光学的照明区和阴影区边界处失效。因此,在电大尺寸目标的电磁散射特性分析中几乎不单独使用。例如,武郭珊等(2023)在双舰船目标的电磁散射特性研究中使用几何光学和物理光学、物理绕射的混合算法,最终计算结果与单独算法相比数据一致性较好;李宏伟等(2007)在几何绕射法的基础上,采用一致性几何绕射法完成了对完美刚性光滑曲面表面绕射声场高频近似计算,为海上风电场等电大尺寸目标的电磁散射特性分析提供了新的思路。

2.1.4 散射点叠加模型法

散射点叠加模型法是将海上风电场作等效处理,建立散射点模型对雷达回波进行仿真的方法。结构上,海上风力机由风叶、塔架和机舱组成;在远场情况下,风叶可以近似为细长圆柱体,即由一系列均匀的圆组成,将每个圆的中心近似为一系列符合数学连续的散射点,而叶片回波等效为多散射电回波的叠加。塔架和机舱等效为静止点目标,其雷达回波分析方法与风叶雷达回波的分析方法相似。散射点叠加模型法主要来源于直升机、船舰等电大尺寸散射体对雷达回波的仿真(蒋相闻等,2014;陈永彬等,2016),该方法的主要流程如图3所示。

Rashid等(2007)最早将等散射点法引入到海上风电场对雷达的干扰研究中,并将风力机等效为一系列离散的散射点,对RCS进行求解,从而对风电场回波的特性进行分析。吴仁彪等(2013)在研究航管一次雷达抗风电场干扰中,通过使用散射点模型法得到了雷达与风电场处于同一平面的雷达回波数据,并以此为基础,进行抗干扰研究。何炜琨等(2015,2017)通过改进散射点叠加模型对雷达与风电场处于不同平面的雷达回波进行计算,并在散射点叠加模型的基础上,将单基地回波模型拓展到双基地模型,进而结合散射点模型与仿真软件的优点,实现不同位置的电磁散射特性计算和多普勒特性分析。唐波等(2019b)建立了风叶散射中心等效模型,基于散射点模型的缺陷,提出了散射中心的概念,将风叶整体回波等效为若干散射中心回波叠加的思想,求解风叶雷达回

波。从目前已有研究来看, 散射点模型已经被广泛应用于风电场雷达回波的求解过程中, 但是, 由于在其积分过程中的散射点沿叶片轴线等几何间距、散射强度均匀分布等假设, 忽略了散射点的数学离散性, 使其受限于定性分析。

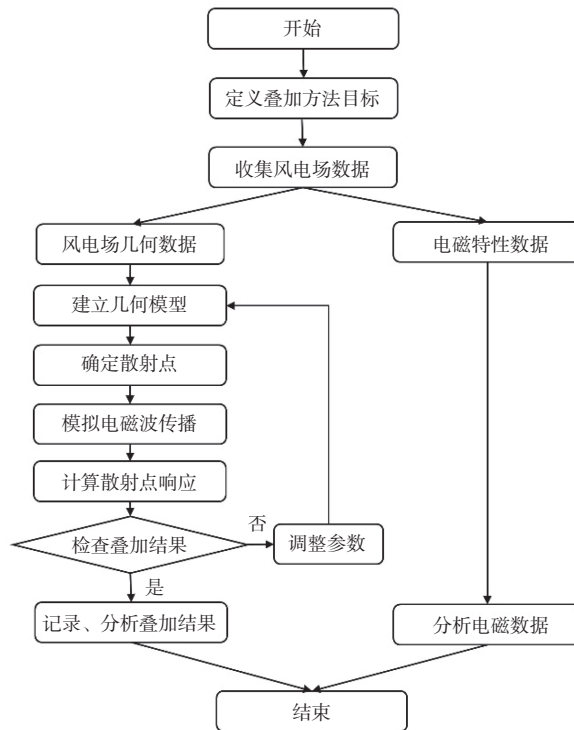


图3 散射点模型计算和分析流程

Fig. 3 Flow sheet of calculation and analysis of the scattering point model

散射点叠加模型可以实现在任意观测点处对风电场雷达回波的分析, 并分析其时域、频域特性, 为海上风电场的电磁特性分析提供理论依据。该模型通过将风力机每部分的几何中心等效成散射点, 建立简化风电场模型, 并将其与物理光学方法、矩量法对比, 可知风力机雷达回波信号的数学模型计算量更小, 是分析海上风电场电磁特性最方便、快捷的方法, 但准确度较低。提高模型的精度是未来海上风电场电磁特性分析的研究热点之一, 忽略电磁波在风力机叶片和塔架的电磁散射特性(反射系数、绕射系数等参数)对雷达回波的影响, 是造成模型精度低的主要因素。未来在电磁特性分析中, 应考虑雷达入射波到风力机的初相位、入射波方位角以及俯仰角对雷达回波的影响, 或者与其他分析方法相结合, 进而提高散射点叠加模型的精度。

2.2 全波数值方法

2.2.1 有限元分析法

有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)法是将复杂问题降维后再求解的一种电磁散射特性分析方法。其将求解域看成是由许多称为有限元的小互连子域组成, 对每一单元假定一个合适的近似解, 然后推导求解满足这个域的总条件, 从而得到问题的解(金燕, 2007)。FEA法在解决二维问题方面较为成熟, 虽然该方法在实际中并不存在二维的理想情形, 但其能用二维模型很精确地描述各种复杂形状, 并且计算精度高, 从而成为行之有效的工程分析手段。图4是一种典型的使用有限元法分析电磁散射特性的示意图。

FEA 法是以里兹方法和伽辽金加权残差方法作为基础,以变分原理为基本理论依据的分析方法。场变量的求解步骤可归纳为 4 步(周辰,2023):①给出与待求解的边值问题相对应的泛函及其等价变分问题;②用有限元剖分求解区域,并选取相应的插值函数;③将变分问题转化为相应的多元函数极值问题,并导出离散化的矩阵方程;④求解该稀疏矩阵方程,得到问题的解。

FEA 法是一种适用性很强的全波数值方法,能够满足电大尺寸目标几何结构与材料的变化。彭文峰(2013)在分析复杂媒质目标电磁散射特性时,采用 FEA 法建立了一种具有通用形式的双各向异性媒质的有限元泛函,并证明了该方法的准确性和通用性。袁军等(2008)基于混合适量有限元和多层快速多极子提出了一种快速算法,极大程度上降低了计算损耗。平兰兰等(2020)采用时域有限元法计算了一些典型二维目标的双站雷达散射截面,深入分析算法的计算精度以及内存消耗问题,为三维时域有限元算法提供了新思路。

2.2.2 时域有限差分法

时域有限差分(FDTD)法直接采用有限差分方式代替麦克斯韦时域旋度方程中的微分方式,用具有相同电参数的空间网格去模拟被研究体。通过选取合适的场初值计算空间的边界条件,得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解法,进而得到三维空间的频域解。FDTD 法在划分网格之后,电场与磁场未知量所在的空间结构被称为 Yee 元胞(陈星光,2017),如图 5 所示。

对于简单的目标,FDTD 法能够直接完成网格划分,并进行电磁参数计算,而对于结构复杂的目标,如电大尺寸目标,利用 FDTD 方法却难以对目标直接描述。许鑫等(2015)建立了一种电磁参数描述文件,使 FDTD 法可以通过调用该文件实现对电大尺寸目标的电磁散射特性分析。目前 FDTD 法的主要发展方向为提高计算精度,增加模拟复杂结构的能力,减少计算机内存和计算时间。随着 FDTD 法的不断发展完善,其在计算雷达散射截面面积方面的应用将越来越广泛。

3 讨 论

风能的快速发展带来了一系列环境影响,其中一个重要方面是对通信、监视和导航系统的潜在干扰。海上风电场可能对用频系统的电磁波造成遮挡、散射以及调制,进而降低系统的工作效能。因此,研究海上风电场的电磁特性,不仅有助于改进风电场杂波抑制技术,还能提升通信系统的稳定性,并提高雷达系统的探测精度,为相关技术优化提供理论支持。不同的分析方法在风电场电磁散射特性研究中的适用性各有优劣,如表 1 所示。在实际分析中,应根据具体需求选择合适的方法。例如,在定性分析风轮机雷达回波信号特征时,若需要快速提取雷达回波信号特征,可选用计算量较小、计算速度快的散射点叠加模型,进而分析已提取的特征。然而,在对风电场复杂

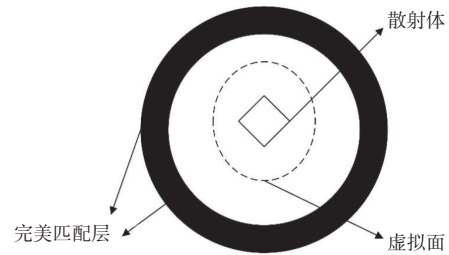
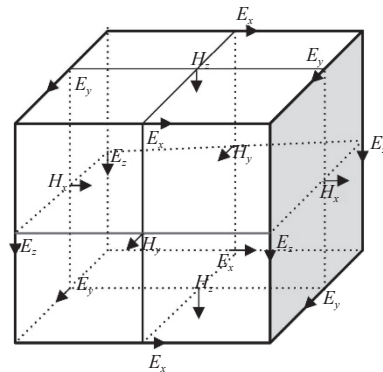


图 4 三维目标的散射

Fig. 4 Scattering of three-dimensional targets



注: E_x 、 E_y 、 E_z 为电场分量; H_x 、 H_y 、 H_z 为磁场分量。

图 5 电磁场分量在 Yee 格点网格中的分布示意图

Fig. 5 Sketch diagram of the electromagnetic field component distribution in the Yee grid

结构进行精细建模,且无须实时获取电磁散射特性时,则可采用高频近似方法,借助电磁仿真软件提高散射特性计算的精度。

表1 风电场电磁特性分析方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of the methods for analyzing electromagnetic characteristics of offshore wind farms

分析方法	优点	缺点
实验测量法	准确度高	成本高,不易修改参数
矩量法	快速、高效	不能处理电大尺寸目标的电磁问题
物理光学法	在平整光滑表面适用度高	计算量大,阴影区不满足互易定理
物理绕射法	计算量与频率相关,准确度高	不能直接计算雷达散射截面
几何光学法	在均匀媒质平面波下对能量传播和散射机理方面独有的处理优势	计算量大,抗干扰能力弱
几何绕射法	物理图像清晰,计算较简单	应用范围小,不能计算散焦区的场
散射点叠加法	计算量小,便于分析	准确度较低
有限元法	严格的数学推导,结果完全正确,误差小	计算时间长
时域有限差分法	直接时域计算,适用范围广	对电大尺寸目标的电磁问题不适用,网格划分单一

4 结语与展望

尽管目前针对海上风电场电磁特性的研究方法较多,但这些方法仍存在一定局限性。例如,散射点叠加模型法和数学解析式拟合法主要用于近似分析,可能影响对风力机电磁散射特性的定性判断;实验测量法虽然精度较高,但实验成本昂贵,并易受外界环境因素影响,导致测试结果不稳定;而大部分数值计算方法在实际应用中对硬件资源要求较高,计算量庞大,难以满足大规模风电场的精确建模需求。因此,为了更准确地分析海上风电场的电磁特性,并为无线通信、导航、监视等电子设备的优化提供理论支持,需要在分析方法上进一步改进和优化。本研究围绕海上风电场的电磁散射特性进行了系统性分析,并得出以下结论。

1)海上风电场的电磁散射特性会对周边的无线通信、导航和雷达系统产生潜在干扰,影响信号质量和系统稳定性。

2)现有的电磁散射分析方法主要包括实验测量法和数值计算法,两者在精度、计算复杂度和适用范围上各有优缺点。

3)实验测量法虽然具有较高的准确性,但受环境因素影响较大,实验成本较高,难以大规模应用。

4)数值计算法能够模拟复杂电磁环境,但计算量巨大,对计算资源要求较高,尤其在大规模风电场建模中存在明显挑战。

5)针对海上风电场的电磁特性分析,需要综合考虑方法的精度、计算效率和适用性,以降低风电场对周边用频系统的干扰,优化风电场布局,为风电场与周边通信系统的兼容性提供理论支撑。

针对现有方法的局限性,未来海上风电场电磁特性分析方法可发展的方向为:①应充分考虑电磁信号的多径效应,对风机叶片的反射特性和多路径传播造成的杂波干扰进行定量分析,以提高建模的准确性;②由于风电场的地理位置、海洋环境及风机结构存在较大差异,未来应构建适用于不同工况的通用分析模型,以涵盖不同俯仰角和方位照射下的电磁散射特性;③面对电磁散射分析中计算量大的问题,可结合深度学习和神经网络技术,提升计算效率,降低计算复杂度;④不

同分析方法各具优势和局限,未来可探索多模型融合分析,综合利用实验测量法、数值计算法和机器学习模型,以提高整体分析精度。通过这些改进,海上风电场电磁特性研究将更加精准高效,为风电场的合理规划和周边用频系统的优化提供更有力的支持。

参考文献 (References):

- 陈星光, 2017. 随机媒质的时域有限差分法电磁特性分析[D]. 南京: 南京理工大学. CHEN X G. 2017. Analysis of electromagnetic characteristics of finite-difference time-domain method for random media[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- 陈永彬, 李少东, 杨军, 等, 2016. 旋翼叶片回波建模与闪烁现象机理分析[J]. *物理学报*, 65(13): 287-297. CHEN Y B, LI S D, YANG J, et al, 2016. Modeling of rotor blade echo and analysis of scintillation mechanism[J]. *Acta Physica Sinica*, 65(13): 287-297.
- 冯庚, 2021. 快速多极子算法的异构并行加速技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学. FENG G, 2021. Research on heterogeneous parallel acceleration techniques for fast multipole algorithm[D]. Xi'an: Xidian University.
- 何炜琨, 石玉洛, 王晓亮, 等, 2015. 风轮机雷达回波的仿真与分析[J]. *系统仿真学报*, 27(1): 50-56. HE W K, SHI Y L, WANG X L, et al, 2015. Simulation and analysis of wind turbine radar echoes[J]. *Journal of System Simulation*, 27(1): 50-56.
- 何炜琨, 石玉洛, 郭双双, 等, 2017. 风轮机雷达散射特性仿真及微多普勒特征分析[J]. *电波科学学报*, 32(1): 103-111. HE W K, SHI Y L, GUO S S, et al, 2017. Simulation of radar scattering characteristics and analysis of micro Doppler characteristics of wind turbines[J]. *Journal of Radio Science*, 32(1): 103-111.
- 胡艳, 时振栋, 唐璞, 等, 2004. 电磁相似性在计算基本散射体RCS方面的应用[J]. *应用科学学报*, 22(1): 46-49. HU Y, SHI Z D, TANG P, et al, 2004. Application of electromagnetic similarity in calculating the Radar Cross Section (RCS) of basic scatterers[J]. *Journal of Applied Sciences*, 22(1): 46-49.
- 黄力, 陈新宇, 唐波, 等, 2024. 基于改进矩量法的风电机无源干扰快速计算[J]. *高电压技术*, 50(2): 737-748. HUANG L, CHEN X Y, TANG B, et al, 2024. Fast calculation of passive interference of wind turbine based on improved moment method[J]. *High Voltage Technology*, 50(2): 737-748.
- 蒋相闻, 招启军, 孟晨, 2014. 直升机旋翼桨叶外形对雷达特征信号的影响[J]. *航空学报*, 35(11): 3123-3136. JIANG X W, ZHAO Q J, MENG C, 2014. The influence of helicopter rotor blade shape on radar characteristic signals[J]. *Journal of Aeronautics*, 35(11): 3123-3136.
- 金桂玉, 2012. 目标近场电磁散射特性计算与应用[D]. 南京: 南京理工大学. JIN G Y, 2012. Calculation and application of electromagnetic scattering characteristics in the near field of targets[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- 金燕, 2007. 基于有限元方法的电磁散射计算[D]. 西安: 西北工业大学. JIN Y, 2007. Electromagnetic scattering calculation based on finite element method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- 李宏伟, 陈克安, 姜建伟, 2007. 基于一致性几何绕射理论的曲面表面绕射声场解[J]. *声学技术*, 26(4): 618-622. LI H W, CHEN K A, JIANG J W, 2007. Solution of diffracted acoustic field on surface surface based on uniform geometric diffraction theory[J]. *Acoustic Technology*, 26(4): 618-622.
- 彭文峰, 宛汀, 郁美艳, 2013. 复杂媒质目标电磁散射问题的有限元分析[J]. *电波科学学报*, 28(1): 74-79. PENG W F, WAN T, YU M Y, 2013. Finite element analysis of electromagnetic scattering problem of complex media target[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 28(1): 74-79.
- 平兰兰, 吴东升, 甘桂华, 2020. 时域有限元法电磁散射特性分析[J]. *枣庄学院学报*, 37(5): 11-17. PING L L, WU D S, GAN G H, 2020. Analysis of electromagnetic scattering characteristics of time-domain finite element method[J]. *Journal of Zaozhuang University*, 37(5): 11-17.
- 唐波, 刘任, 张建功, 等, 2017a. 于动态RCS的风电机叶片多普勒特性[J]. *高电压技术*, 43(10): 3435-3442. TANG B, LIU R, ZHANG J G, et al, 2017a. Doppler characteristics of wind turbine blades based on dynamic RCS[J]. *High Voltage*

- Technology, 43(10): 3435-3442.
- 唐波, 叶莉, 孙睿, 等, 2017b. 基于PO算法的风电机塔架RCS快速求解[J]. 电工电能新技术, 36(6): 76-82. TANG B, YE L, SUN R, et al, 2017b. Rapid solution of wind turbine tower RCS based on PO algorithm[J]. New Technology of Electrical Energy, 36(6): 76-82.
- 唐波, 邹芳, 孙子昂, 等, 2017c. 大地背景下风电机雷达回波信号的仿真与分析[J]. 太原理工大学学报, 48(6): 939-945. TANG B, ZOU F, SUN Z A, et al, 2017c. Simulation and analysis of wind turbine radar echo signals underground background[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 48(6): 939-945.
- 唐波, 陈昊, 黄力, 等, 2019a. 基于电磁散射中心的风电机叶片雷达回波仿真与分析[J]. 中国电机工程学报, 39(24): 7375-7384, 7510. TANG B, CHEN H, HUANG L, et al, 2019a. Simulation and analysis of wind turbine blade radar echoes based on electromagnetic scattering centers[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 39(24): 7375-7384, 7510.
- 唐波, 郝斌, 张建功, 等, 2019b. 基于电磁散射点间距的风电机雷达回波仿真[J]. 高电压技术, 45(8): 2652-2661. TANG B, HAO B, ZHANG J G, et al, 2019b. Simulation of wind turbine radar echoes based on electromagnetic scattering point spacing[J]. High Voltage Technology, 45(8): 2652-2661.
- 王利民, 崔文辉, 马玉坤, 2011. 风力发电机电磁散射特性的研究[J]. 红外与激光工程, 40(3): 519-522. WANG L M, CUI W H, MA Y K, 2011. Study on electromagnetic scattering characteristics of wind turbines[J]. Infrared and Laser Engineering, 40(3): 519-522.
- 王菁, 2012. 光学区雷达目标散射中心提取及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学. WANG J, 2012. Extraction and application of radar target scattering centers in optical regions[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.
- 武郭珊, 王富林, 赵晔, 等, 2023. 基于GO-PO/PTD方法双舰船目标的电磁散射特性研究[C]//中国电子学会. 第十八届全国电波传播年会, 山东青岛. WU G S, WANG F L, ZHAO Y, et al, 2023. Study on electromagnetic scattering characteristics of dual-ship target based on GO-PO/PTD method[C]//Chinese Institute of Electronics. Proceedings of the 18th National Annual Conference on Radio Wave Propagation, Qingdao, Shandong, China.
- 吴仁彪, 毛建, 王晓亮, 等, 2013. 航管一次雷达抗风电场干扰目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 35(3): 754-758. WU R B, MAO J, WANG X L, et al, 2013. Target detection method for wind farm interference resistance of air traffic control primary radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 35(3): 754-758.
- 许鑫, 朱安石, 杨勇, 等, 2015. 基于FDTD方法的复杂目标RCS数值计算[J]. 无线电工程, 45(7): 62-66, 90. XU X, ZHU A S, YANG Y, et al, 2015. Numerical calculation of RCS for complex target based on FDTD method[J]. Radio Engineering, 45(7): 62-66, 90.
- 俞一鸣, 2015. 时频分析简介及应用[J]. 国外电子测量技术, 34(6): 12-15. YU Y M, 2015. Introduction and application of time frequency analysis[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 34(6): 12-15.
- 袁汉钦, 田贤峰, 2020. 海上风电场电磁特性试验[J]. 舰船电子对抗, 43(5): 112-115. YUAN H Q, TIAN X F, 2020. Electromagnetic characteristics test of offshore wind farm[J]. Ship Electronic Countermeasures, 43(5): 112-115.
- 袁军, 刘其中, 郭景丽, 2008. 一种基于矢量有限元与多层快速多极子技术的电磁散射快速并行算法[J]. 电子学报, 36(3): 520-526. YUAN J, LIU Q Z, GUO J L, 2008. A fast parallel algorithm for electromagnetic scattering based on vector finite element and multilayer fast multipole technology[J]. Acta Electronica Sinica, 36(3): 520-526.
- 周辰, 2023. 随机粗糙面与目标电磁散射的有限元方法[D]. 成都: 电子科技大学. ZHOU C, 2023. Finite element method of stochastic rough surface and target electromagnetic scattering[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China.
- 朱艳菊, 江月松, 张崇辉, 等, 2014. 应用改进的物理光学法和图形计算电磁学近似算法快速计算导体目标电磁散射特性[J]. 物理学报, 63(16): 182-188. ZHU Y J, JIANG Y S, ZHANG C H, et al, 2014. Rapid calculation of electromagnetic scattering characteristics of conductor target by using improved physical optics method and graphical computational electromagnetism approximation algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 63(16): 182-188.
- AUTHORITY C A, 2010. CAA policy and guidelines on wind turbines[EB/OL]. [2025-12-10]. <https://www.caa.co.uk>.
- BIEŃKOWSKI P, TRZASKA H, 2001. Electromagnetic field measurements in the near field[M]. Atlanta GA: Noble Pub-

- lishing Corporation.
- BRENNER M, CAZARES S, CORNWALL M J, et al, 2008. Wind farms and radar[R]. Mclean, VA, USA: MITRE Corp, JASON Program Office.
- FU H, LI P, FU X P, et al, 2023. Compact real-time simulator with spatial-temporal parallel design for large-scale wind farms[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 9(1): 50-65.
- GRANDE O, ANGULO I, JENN D, et al, 2015. Analysis of wind turbines radar cross section for analyzing the potential impact on weather radars[C]//Proceedings of the 9th European Conference on Antennas and Propagation. Lisbon, Portugal: IEEE.
- HARRINGTON R F, 1968. A new method for solving integral equations of electromagnetic scattering[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 269(3): 333-352.
- KE S T, GE Y J, WANG T G, et al, 2015. Wind field simulation and wind-induced responses of large wind turbine tower-blade coupled structure[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(8): 571-590.
- KONG F, ZHANG Y, PALMER R, et al, 2011. Wind turbine radar signature characterization by laboratory measurements[C]//Proceedings of the 2011 IEEE Radar Conference. Kansas MO, USA.
- KOUYOUJIAN R G, PATHAK P H, 1974. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface[J]. *Proceedings of the IEEE*, 62(11): 1448-1461.
- RASHID L S, BROWN A K, 2007. Impact modelling of wind farms on marine navigational radar[C]//Proceedings of the 2007 IET International Conference on Radar Systems. Edinburgh, UK.
- SINCLAIR G, 1948. Theory of models of electromagnetic systems[C]//Proceedings of the Institute of Radio Engineers Conference. New York, USA.
- SUN S F, ZHANG H X, DONG L, et al, 2019. A novel multi-objective electromagnetic analysis based on genetic algorithm[J]. *Sensors*, 19(24): 5542.
- THEIL A, SCHOUTEN M W, DE JONG A, 2010. Radar and wind turbines: a guide to acceptance criteria[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Washington D C, USA.
- TOTH M, JONES E, PITTMAN D, et al, 2011. DOW radar observations of wind farms[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(8): 987-999.
- TRZASKA J, 2001. A new method for the solution of electromagnetic scattering problems[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 49(9): 1365-1374.
- UFIMTSEV P Y, 2007. Fundamentals of the physical theory of diffraction[M]. New York: John Wiley and Sons: 11-25.
- WEI X C, 2020. Review of near-field EMI measurement[C]//2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shanghai, China.
- WEINMANN F, 2020. An overview of wind turbine interference research activities at Fraunhofer FHR[C]//Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark.
- ZHANG Y, HUSTON A, PALMER R D, et al, 2011. Using scaled models for wind turbine EM scattering characterization: techniques and experiments[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(4): 1298-1306.

Progress on the Method for Studying Electromagnetic Scattering Characteristics of Offshore Wind Farms

LIU Rongda¹, LIU Zunnian¹, JIANG Jie², SONG Haonan², LIU Jing¹, ZHANG Ruiqi¹, LU Yihong¹

(1. *School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;*

2. *Yantai Communication Center, Beihai Navigation Support Center, Ministry of Transport, Yantai 264000, China*)

Abstract: With the rapid construction and deployment of offshore wind farms, large number of wind power related facilities such as wind turbines, substation platforms and power collection systems can generate electromagnetic interference to the surrounding environment during their operation. To mitigate the negative impacts of such interference, it is crucial to focus on the electromagnetic characteristics of wind turbines. Therefore, the analysis of electromagnetic scattering characteristics of offshore wind farms is focused on and the main methods currently used for this analysis are systematically reviewed. These methods include experimental measurement methods, high-frequency approximation methods (such as method of moments, physical optical method, physical diffraction method, geometrical optical approach and geometric diffraction method) and full-wave numerical methods (such as finite element method and time-domain finite-difference method). Through comparative analysis of the applicable characteristics of several methods and for improving the computing efficiency as well, it is proposed to introduce multipath effect analysis, expand the scope of model application and combine deep learning techniques, and it is also proposed that the future research direction should be to combine multiple methods to achieve more accurate electromagnetic characteristic analysis. All these can provide important references for the optimization of offshore wind farm deployment and the study of electromagnetic compatibility, thus facilitating the intelligent and sustainable development of offshore wind power technology.

Keywords: electromagnetic characteristics; scattering point superposition method; method of moments; physical optics; finite element method

Received: March 19, 2024 **Online:** April 16, 2025