第 50 卷 第 2 期：737-749 高电压技术 Vol.50, No.2: 737-749
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221875

基于改进矩量法的风电机无源干扰快速计算

黄 力[1,2]，陈新宇[2]，唐 波[1,2]，唐嘉晖[2]，廖梓榕[2]，刘 鹏[2]
（1. 湖北省输电线路工程技术研究中心，宜昌 443002；2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002）

摘 要：准确快速计算风电机的散射电场，是解决风电机无源干扰的基本前提。采用传统矩量法求解电大尺寸风电机散射电场时，需要极为庞大的计算资源导致难以求解。为此，考虑风电机工作时叶片的周期对称性以及风电机叶片大曲率、复杂的异形曲面，改进了传统矩量法中求解风电机无源干扰的面元剖分方法，引入基于曲面三角面元的矩量法基函数，并且利用叶片结构的对称性简化阻抗矩阵填充过程，准确快速计算出了风电机表面感应电流产生的散射电场，实现了风电机无源干扰的快速计算。为验证所提方法的正确性及有效性，开展了基于电波暗室风电机缩比模型实验，结果表明，该方法计算的结果与实验测量结果较为一致。以实际金风 GW82/1500 型风电机为例，将所提方法计算的不同方位角下风电机叶片无源干扰水平与传统矩量法相比，表明该方法与其吻合良好，所提方法矩阵元素计算内存减少了 34.64 倍，矩阵元素求解效率提高了 37.95 倍。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。

关键词：叶片对称结构；无源干扰；电磁散射；矩量法；分块循环矩阵；快速计算

Fast Calculation of Reradiation Interference of Wind Turbine Based on Improved Method of Moments

HUANG Li[1,2], CHEN Xinyu[2], TANG Bo[1,2], TANG Jiahui[2], LIAO Zirong[2], LIU Peng[2]
(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Yichang 443002, China;
2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: For the purpose of resolving the reradiation interference of a wind turbine, accurate and quick calculation of the scattered electric field of a wind turbine blade is a fundamental requirement. In order to solve the distributed electric field of electricity large size of wind turbine using the conventional method of moments, enormous computational resources are needed, which makes the problem difficult to solve. In this study, we improve the surface element dissection method of the conventional method of moments to solve the reradiation interference of wind turbine. We also introduce the basis function of the method of moments based on the surface triangular surface element, and use the periodic symmetry of the blade to simplify the impedance matrix filling procedure. The method is used to determine the scattered electric field induced by the surface induction current of a wind turbine. It is possible to quickly calculate the reradiation interference of wind turbine. In order to confirm the accuracy and efficiency of the method proposed in this paper, experiments were carried out based on the wind turbine scaling model of anechoic chamber. The findings reveal that the results calculated using the method in this paper are in good agreement with the experimental measurements. When the reradiation interference level of a wind turbine blade is computed using the suggested method and the conventional method of moments at various azimuth angles, it is demonstrated that the methods accord well. The computing memory of matrix elements in the proposed method is reduced by 34.64 times, and the solving efficiency of matrix elements is increased by 37.95 times. The proposed method can provide theoretical and technical foundations for the further theoretical investigation of the dynamic electromagnetic scattering from massive wind turbine arrays in wide space.

Key words: wind turbine blades symmetrical structure; reradiation interference; electromagnetic scattering; method of moment; block circulant matrix; fast calculation

基金资助项目：国家自然科学基金(51977121)；清华大学国家重点实验室开放基金(SKLD21KZ03)
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977121), Tsinghua University State Key Laboratory Open Fund(SKLD21KZ03).

0 引言

作为清洁能源的一种形式，风力发电机被广泛使用[1-2]。由于风电场建设选址和雷达台站、通信导航设备等在地理位置上易产生重叠，风电场不可避免的会对其电子设备产生电磁干扰[3-6]。对风电场无源干扰的有效评估，成为风电场的建设与管理的关键问题[7-9]。

以往关于风电场无源干扰的研究，主要关注于提取风电场中各风电机的电磁散射特征，从而有针对性地为雷达台站滤波提供理论支持[7,10]。目前，获取风电机电磁散射特征的方法可分为实验测量和数值计算两类。在实验测量方面，Zhang 和 Kong 等利用风电机缩比模型，测量了其无源干扰的大小，分析了风电机无源干扰的部分特征[11-13]。但是风电机缩比模型制作周期长，而且其参数修改困难，因此实验测量的方法一般难以系统性的开展分析研究。现有的研究更加倾向于利用数值计算的方法来得到风电机的电磁散射特征。

利用数值计算方法获取风电机电磁散射特征可分为全波数值方法和高频近似方法[14]。其中，全波数值方法是基于 Maxwell 方程组推导的电磁散射模型，具有较高的计算精度。文献[15]和文献[16]分别采用了全波数值计算方法中的有限元、时域有限差分方法计算目标散射体电磁散射特征，但上述方法在应用时需要使用截断边界条件限制求解区域，会引入截断误差和色散误差，影响计算精度。然而，全波数值计算方法中基于积分方程的矩量法通过格林函数直接表述求解域中的相互作用自动满足边界辐射条件，不存在上述微分方程方法的缺陷[17-19]。文献[18]采用矩量法来计算风电机的无源干扰，通过基于传统 RWG 基函数(由 Rao、Wilton、Glisson 于 1982 年提出的基于三角面对的分域基函数)的矩量法离散风电机无源干扰电场积分方程，当雷达频率增加时，其生成的阻抗矩阵为稠密矩阵导致消耗的计算资源将急剧增加，显然现有计算平台硬件条件已较难支撑其电磁散射特性的计算。为克服计算电大尺寸目标所需资源过大的问题，国内外学者相继采用诸多高频近似电磁散射求解算法[20-25]，如物理光学法、几何绕射理论以及混合求解算法等。但上述高频近似方法都有着一定的适用条件，该类方法不适合于分析风电机这类电大尺寸目标电磁散射特性。此外，为了简化计算模型，文献[26]提出基于散射点模型，利用一系列的等几何间距、等散射强度的点源来等效结构复杂的风电机，该方法实际上属于一种近似电磁散射系数的数值方法，忽视了散射点存在的客观离散性导致求解结果过于理想化，停留在定性分析阶段[26-27]。文献[28]提出采用散射中心的方法，虽解决了散射点模型存在的问题，但该方法散射中心参数集的确定困难，精确表征风电机电磁散射特性的流程复杂过程繁琐[28-29]。因此，亟需寻求一种准确快速计算风电机无源干扰的方法。

考虑到风电机的叶片尺寸随着容量的增长而增大，并且具有大曲率和复杂的异形曲面结构，在传统的矩量法计算中，所生成的阻抗矩阵过于庞大，导致后续计算和存储具有较高的时间复杂度和空间复杂度。为此，本文改进了传统矩量法中求解风电机无源干扰的面元剖分方法，引入基于曲面三角面元的矩量法基函数，并且利用风电机叶片旋转时的周期对称性，简化了阻抗矩阵元素的填充过程，为准确快速求解风电机产生的散射电场提供了新的思路，开展了风电机缩比模型实验，验证了本文所提方法的正确性及有效性，分析了风电机叶片表面感应电流及其散射电场的分布，结果表明其与强散射区域密切相关，为后续广域空间下风电机电磁散射理论的研究奠定了理论与技术基础。

1 基于矩量法的风电机无源干扰计算

1.1 风电机无源干扰产生机理

在雷达台站探测目标的过程中，当电磁波照射到风电机时，风电机作为电大尺寸散射体其表面产生的感应电流会产生散射电场向空间中二次散射出电磁波，此时，风电机将被动产生对周围邻近雷达台站的无源干扰，进而影响雷达台站的正常工作。风电机的无源干扰计算模型可简化为如图 1 所示。

假设风电场中风电机为理想导体，位于坐标原点 O 上，入射电磁波 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{inc}}$ 以某一角度(α,β)照射到风电机上，风电机任一点处的感应电流密度为 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$，该感应电流产生的散射电场为 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{sca}}$，雷达台站位于场点 $\boldsymbol{r}$ 处。其中方位角α为雷达视线与风电机在空间坐标系中与 x 轴的夹角，俯仰角β为雷达视线与风电机在空间坐标系中与 z 轴的夹角，旋转角γ为风电机叶片旋转后与初始时刻位置的夹角。根据 IEEE 标准，风电机无源干扰[30]定义为：

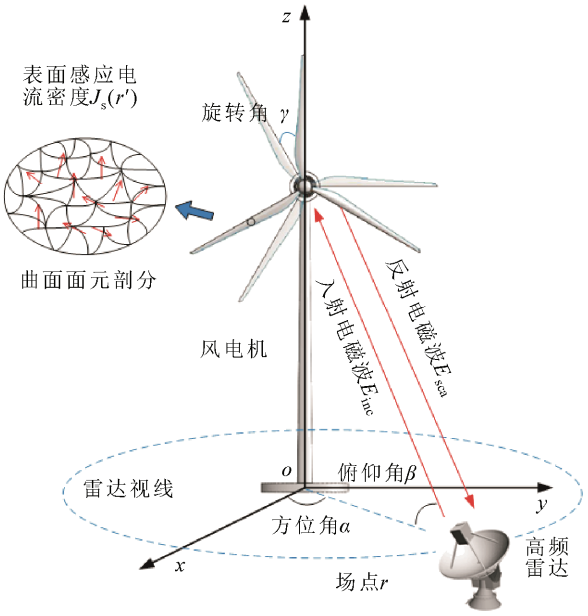


图 1　风电机无源干扰机计算模型

Fig.1　Calculation model of reradiation interference of wind turbine

$$S = 20\lg\frac{|\boldsymbol{E}_{\mathrm{w}}|}{|\boldsymbol{E}_{\mathrm{nw}}|} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{w}}$ 为考虑风电机影响时观测点的空间电场强度；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{nw}}$ 为无风电机时观测点的空间电场强度。因此，研究风电机无源干扰的关键是求得有风电机时的散射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{sca}}$。

1.2　传统矩量法的计算过程

计算风电机无源干扰时，需先求解出风电机的散射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{sca}}$。在风电机表面建立散射电场积分方程(electric field integral equation, EFIE)，表达式如下：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{sca}}(\boldsymbol{r})\big|_{\tan} = \mathrm{j}\omega\mu\int_s(\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')+\frac{1}{k^2}\nabla(\nabla'\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')))G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\mathrm{d}\boldsymbol{r}'\Big|_{\tan} \tag{2}$$

式中：ω为角频率；μ为磁导率；$G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$为格林函数，表示由点源产生的场；$k$ 为波数；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$为感应电流密度。其中 $\boldsymbol{r}$ 为场点坐标，$\boldsymbol{r}'$为源点坐标；s 表示散射体表面面元；tan 表示三角函数中的正切值。

在传统矩量法中，首先需建立风电机三维几何模型，并赋予风电机模型材料属性，定义雷达台站激励源类型、工作频率和求解边界条件，然后对风电机复杂的异形曲面进行面元剖分，选取平面 RWG 基函数来描述风电机表面的感应电流分布，采用伽略金检验方法使得最小加权余量逐渐趋于零，通过内积的方式将待求风电机的散射电场积分方程离散转换得到如下矩阵方程：

$$\boldsymbol{ZI} = \boldsymbol{V} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{Z}$ 为阻抗矩阵，其为复数对称矩阵；$\boldsymbol{V}$ 称为激励向量，其表示入射的雷达电磁波激励信号；$\boldsymbol{I}$ 为感应电流，其表示在目标散射体表面的感应电流。最后对式(3)进行求解得到风电机表面感应电流分布，从而计算出其散射电场得到风电机的无源干扰。

从上述采用传统矩量法求解风电机无源干扰的思路来看，风电机无源干扰计算的准确性在于计算网格的剖分。由于风电机叶片为大曲率、复杂的异形曲面，需采用较多的平面三角面元来描述。此外，密集的面元还会导致阻抗矩阵的某些行和列的元素大小过于接近，阻抗矩阵的条件数变差甚至出现奇异矩阵，使得后续矩阵方程难以求解。

2　基于改进矩量法的风电机无源干扰计算

风电机主要由桅杆、机舱和叶片 3 部分组成。在风电机运行过程中，桅杆和机舱仅会对雷达信号产生遮挡和反射作用，其产生的无源干扰较易解决[7-9]。但风电机叶片会对雷达信号产生调制效应，其产生的无源干扰成为风电机无源干扰研究的重点[8-10]。考虑到风电机叶片为大曲率、复杂的异形曲面，利用曲面三角面元来描述风电机叶片表面电流分布，同时利用叶片的对称性简化阻抗矩阵元素填充过程。

2.1　曲面面元及其基函数构建

为有效地解决上述平面型面元存在的问题，通过采用曲面三角面元来离散待求风电机叶片感应电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$，相较于平面三角面元而言，曲面三角面元能够更光滑的模拟风电机叶片结构，减少离散时模型的失真，同时所需要的面元数量更少，从而相应的减少基函数的数量。图 2 所示为风电机叶片采用平面型面元与曲面型面元剖分的示意图。

基于曲面面元的矩量法基函数，可将面元剖分时的网格边长的要求放宽至 1 个入射电磁波波长左右。一般情况下，描述风电机叶片 1 个平方波长左右面积的表面感应电流 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$只需要 20 个这样的曲面基函数即可，这将显著降低在利用矩量法计算风电机无源干扰时阻抗矩阵的规模。

在对风电机无源干扰的求解计算时，面元剖分完毕之后基函数选择是一个非常重要的环节。使用矩量法求解风电机无源干扰，首先需要对基函数进行构建。该曲面三角面元包含有 6 个节点，与普通平面三角面元相比除了 3 个顶点之外，还在每条边

的中点定义了描述曲边的信息。

在曲面三角面元的构建过程中，如图 3 所示在直角坐标系(x, y, z)中，曲面三角形上的任何一点$r(x, y, z)$可转化到参数坐标系 $r(\xi_1,\xi_2)$，其表达式为：

$$\boldsymbol{r}(x,y,z)=\boldsymbol{r}\left(\xi_1,\xi_2\right)=\sum_{i=1}^{6}\varphi_i\left(\xi_1,\xi_2,\xi_3\right)r_i \tag{4}$$

式中：φ_i为参数坐标系(ξ_1,ξ_2)下的形函数，表示为：

$$\varphi_i=\begin{cases}\xi_i\left(2\xi_i-1\right), & i=1,2,3\\ 4\xi_i\xi_{i-2}, & i=4,5,6\end{cases} \tag{5}$$

在参数坐标下，ξ_1和ξ_2的变化范围为 0 到 1，且满足如下约束条件：

$$\xi_1+\xi_2+\xi_3=1 \tag{6}$$

该曲面基函数是定义在曲面三角形单元上的，其定义式如下：

$$f_q(\boldsymbol{r})=\begin{cases}\Lambda, & \boldsymbol{r}\in S_n^+\\ -\Lambda, & \boldsymbol{r}\in S_n^-\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

式中：S_n^+表示一对三角形单元中的上半部分；S_n^-表示一对三角形单元中的下半部分。Λ的定义式随着曲面三角形单元 3 个顶点局部编号的不同而略有不同，定义在曲面三角形第 i 个顶点对应的第 i 条边上的Λ_i的表达式为：

$$\begin{cases}\Lambda_1(\boldsymbol{r})=\dfrac{1}{J}\left(\left(\xi_1-1\right)\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_1}+\xi_2\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_2}\right)\\ \Lambda_2(\boldsymbol{r})=\dfrac{1}{J}\left(\xi_1\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_1}+\left(\xi_2-1\right)\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_2}\right)\\ \Lambda_3(\boldsymbol{r})=\dfrac{1}{J}\left(\xi_1\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_1}+\xi_2\dfrac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_2}\right)\end{cases} \tag{8}$$

上式(8)中，J为雅可比因子，表达如下：

$$J\left(\xi_1,\xi_2\right)=\left|\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_1}\times\frac{\partial\boldsymbol{r}}{\partial\xi_2}\right| \tag{9}$$

相比于平面基函数而言，其定义在异形曲面上式(7)所示的曲面基函数能更加精确的离散风电机叶片曲面单元上的感应电流$J_s(r')$，能够利用更少的三角面元来描述风电机叶片的形状，为减少矩阵的存储提供了便利条件。

2.2 风电机叶片的阻抗矩阵元素填充

风电机工作时旋转的叶片具有周期对称性，其中的一支叶片结构可通过旋转一定的角度得到另一支叶片结构。即只需要对第 1 支叶片进行建模剖分，其它叶片可由其几何位置关系推导出来。

如图 4 所示，风电机叶片绕过坐标系原点 O 的任意轴 l 旋转，第 1 支叶片区域 V_1 上点的向量为 $\boldsymbol{r}_1$，

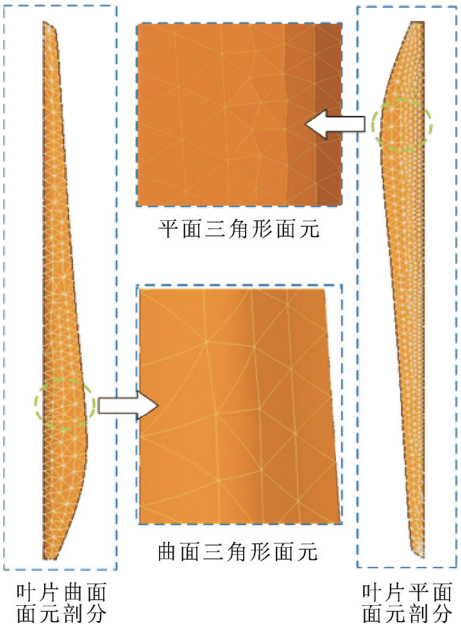


图 2 风电机叶片面元剖分示意图

Fig.2 Schematic diagram of wind turbine blade surface element

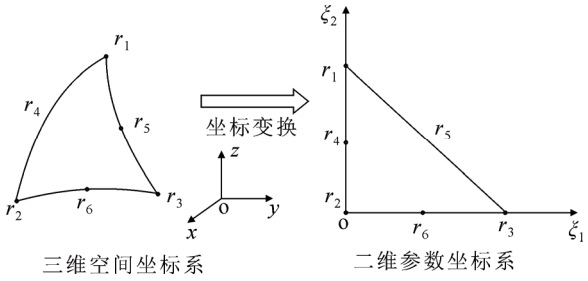


图 3 曲面三角面元计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of curved triangular surface elements

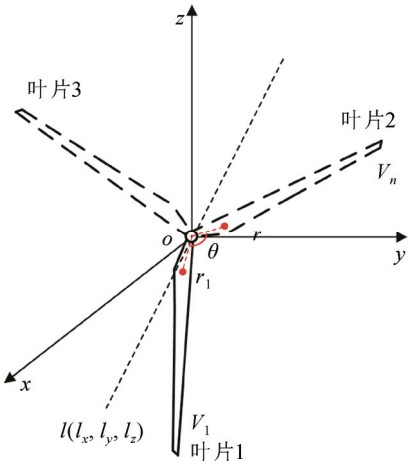


图 4 风电机叶片对称结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of wind turbine blade symmetrical structure

那么第 n 支叶片上的区域 V_n 上对应点的向量 $\boldsymbol{r}$ 可表示如下：

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{R}^{n-1}\cdot\boldsymbol{r}_1,\quad \boldsymbol{r}_1\in V_1 \tag{10}$$

其中

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} l_x^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & l_xl_y(1-\cos\theta)+l_z\sin\theta & l_xl_z(1-\cos\theta)-l_y\sin\theta \\ l_xl_y(1-\cos\theta)-l_z\sin\theta & l_y^2(1-\cos\theta)+\cos\theta & l_yl_z(1-\cos\theta)+l_x\sin\theta \\ l_xl_z(1-\cos\theta)+l_y\sin\theta & l_yl_z(1-\cos\theta)-l_x\sin\theta & l_z^2(1-\cos\theta)+\cos\theta \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中：l 为过坐标系原点 O 的旋转轴，l_x、l_y、l_z 分别为其在空间直角坐标系下的坐标分量；θ为风电机相邻两只叶片之间的夹角。由数学推导有：

$$\begin{aligned} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{l},\theta)^{-1}&=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{l},\theta)^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{R}(\boldsymbol{l},\theta)^{n}&=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{l},n\theta) \end{aligned} \tag{12}$$

因此，利用风电机叶片的周期对称性，其表面感应电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$可表示为：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')=\sum_{n=1}^{N}\sum_{q=1}^{Q}I_q^n f_q\left(\boldsymbol{R}^{n-1}\cdot\boldsymbol{r}_1'\right),\quad \boldsymbol{r}_1'\in V_1 \tag{13}$$

式中：f_q 为曲面基函数；I_q 为待求的感应电流系数；n 为风电机叶片编号；N 为风电机叶片数量；Q 为每支叶片区域上的基函数数量。

定义新的编号 t，$t=m-n$，其中 m 表示阻抗矩阵的行，n 表示阻抗矩阵的列，由 R 的数学性质式(11)可以得到：

$$[Z]_{-t}=[Z]_{N-t} \tag{14}$$

将式(14)代入式(2)中，并利用式(3)可以推导出如下形式矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} [Z]_0 & [Z]_1 & \cdots & [Z]_{N-1} \\ [Z]_{N-1} & [Z]_0 & \cdots & [Z]_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z]_1 & [Z]_2 & \cdots & [Z]_0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} [I]_1 \\ [I]_2 \\ \vdots \\ [I]_N \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} [V]_1 \\ [V]_2 \\ \vdots \\ [V]_N \end{bmatrix} \tag{15}$$

其中，阻抗矩阵元素 Z_{mn}^{pq} 和右边激励向量 $\boldsymbol{V}_q^n$ 具体形式如下：

$$\begin{aligned} Z_{mn}^{pq}=&\mathrm{j}\omega\mu\int_{T_p}f_p(\boldsymbol{r})\left(\int_{T_q}f_q(\boldsymbol{r})G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\mathrm{d}\boldsymbol{r}'\right)\mathrm{d}\boldsymbol{r}+ \\ &\frac{1}{\mathrm{j}\omega\varepsilon}\int_{T_p}\nabla\cdot f_p(\boldsymbol{r})\left(\int_{T_q}\nabla'\cdot f_q(\boldsymbol{r}')G(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\mathrm{d}\boldsymbol{r}'\right)\mathrm{d}\boldsymbol{r} \end{aligned} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{V}_n^p=\int_{T_p}\boldsymbol{E}_{\mathrm{inc}}\cdot f_p(\boldsymbol{r})\mathrm{d}\boldsymbol{r} \tag{17}$$

式中：T_q 表示基函数积分区域；f_q 表示对应的基函数；T_p 表示权函数积分区域；f_p 表示对应的权函数。

上述阻抗矩阵为分块循环矩阵，对于 Z 中元素的填充，只需要填充第一行子矩阵中的元素，即只需要填充风电机叶片第 1 个区域 V_1 的自作用矩阵元素以及与其它区域互作用的矩阵元素。此外，可用分块循环系数的划分方法对该矩阵方程进行迭代求解，具有较高的计算效率。与传统矩量法的阻抗矩阵计算相比，只需要计算其中三分之一的元素即可。因此，由于不必填充整个阻抗矩阵 Z 的所有元素，这将显著节省在计算风电机无源干扰时矩阵存储消耗的内存和填充矩阵的时间。

3　基于电波暗室的风电机缩比模型实验

为验证上述叶片对称结构下风电机无源干扰计算方法的正确性及有效性，进行了风电机无源干扰测量实验。由于实际尺寸的风电机属于电大尺寸散射体，叶片结构复杂且长度有数几十米，同时现场真型实验对空间地形、测量仪器以及实验员的要求均较高，往往较难得到准确的风电机无源干扰数据。因此，采用风电机缩比模型进行实验测量，即将实际风电机按一定比例进行缩小制作出缩比模型，在电波暗室中对其电磁散射特性进行测量获取风电机无源干扰数据。

根据文献[31]，对目标散射体进行缩比模型实验测量时，为获得与全尺寸模型相同的电磁散射特性，如果将目标散射体的尺寸缩小至δ倍，需将目标的电导率减小至全尺寸模型的 1/δ倍，并且将激励电磁波的频率扩大δ倍。

3.1　主要测量仪器及实验场景布置

金风 GW82/1500 型风电机在内蒙古巴彦淖尔风电场被广泛使用，考虑到实际工程意义，以典型的金风 GW82/1500 型风电机为例，风电机的叶片长度为 41 m，桅杆的高度为 92 m。考虑到缩比模型的保真性、运输问题以及实验测量设备的选取，最终将实际风电机按 1:65 的比例进行等比缩小，即风电机缩比模型的叶片长度为 0.63 m，桅杆的高度为 1.41 m。

风电机缩比模型实验在电波暗室中的场景布置示意图见附录 A 中图 A1 所示，在图 A1 中电磁波信号发射喇叭天线与接收喇叭天线处于同一水平高度，且与风电机叶片轴心的高度一致。由于实验的收发电磁波信号的喇叭天线分体，即将单站条件转变为双站条件。为保证缩比实验的结果贴近工程实际，发射喇叭天线和接收喇叭天线的中心线夹角需小于 10°，即满足单双站等效定理[32]。现场电波

暗室场景布置及相关实验仪器分别如附录 A 中图 A2 与图 A3 所示。本次缩比模型实验中所用到的主要实验装置及测量仪器有矢量网络分析仪 AGILENT E8363A、微波功率放大器 EXAIR AV3860B、喇叭天线 HD-100HA20、风电机缩比模型等，其中转台高度为 3.8 m，风电机缩比模型与喇叭天线水平距离为 18 m。此外，在测量风电机缩比模型的电磁散射特征之前，需要进行定标操作。即在图 A3 中风电机处放置定标球，首先测量定标球在电波暗室中的电磁散射数据，然后再测量风电机缩比模型的电磁散射数据，最后用后者减去前者，即可得到风电机缩比模型的实际电磁散射场数据。定标操作不仅可以滤除环境噪声对测量的影响，而且还可以设定合适的距离门防止周围其它散射体对实验结果的干扰。

3.2 实验结果分析

为保证缩比实验验证结果更具代表性，选取对电磁散射影响最为严重的工况条件，即初始相位φ为 0°，频率f为 10 GHz 的垂直极化平面波作为场源激励信号，选取雷达台站入射电磁波方位角α分别为 0°、30°、45°、60°、90°，观测风电机叶片一个旋转周期内的 RCS 变化。图 5 为风电机转速为 20 r/min 时方位角α分别为 0°、30°、45°、60°、90°下缩比模型实验测量雷达散射截面(radar cross section, RCS)结果与本文方法和传统矩量法数值计算 RCS 结果对比。

如图 5 所示，在不同方位角α下本文方法计算结果与缩比实验、传统矩量法结果之间整体趋势相同，具有良好的一致性。不同方位角α下实验测量 RCS 与本文方法和传统矩量法计算 RCS 结果的平均值之间以及峰值的位置和大小之间较为吻合。随着方位角α从 0°~90°增加，RCS 均值以及最大值和最小值也逐渐增加，呈现出正相关的趋势。

风电机叶片结构如图 6 所示，结合叶片本体结构特征分析可知，由于风电机叶片为大曲率、复杂的异形曲面，在不同的方位角下 RCS 结果在图 5 中体现出较大的差异性。在风电机叶片动态旋转过程中，当入射电磁波方向与风电机叶片最大弦长位置异形曲面垂直时刻，叶片所提供的有效照射范围达到最大值，叶片二次散射的电磁波也达到最大，从而在图 5 中体现出峰值，可为工程实际中抑制无源干扰提供参考。

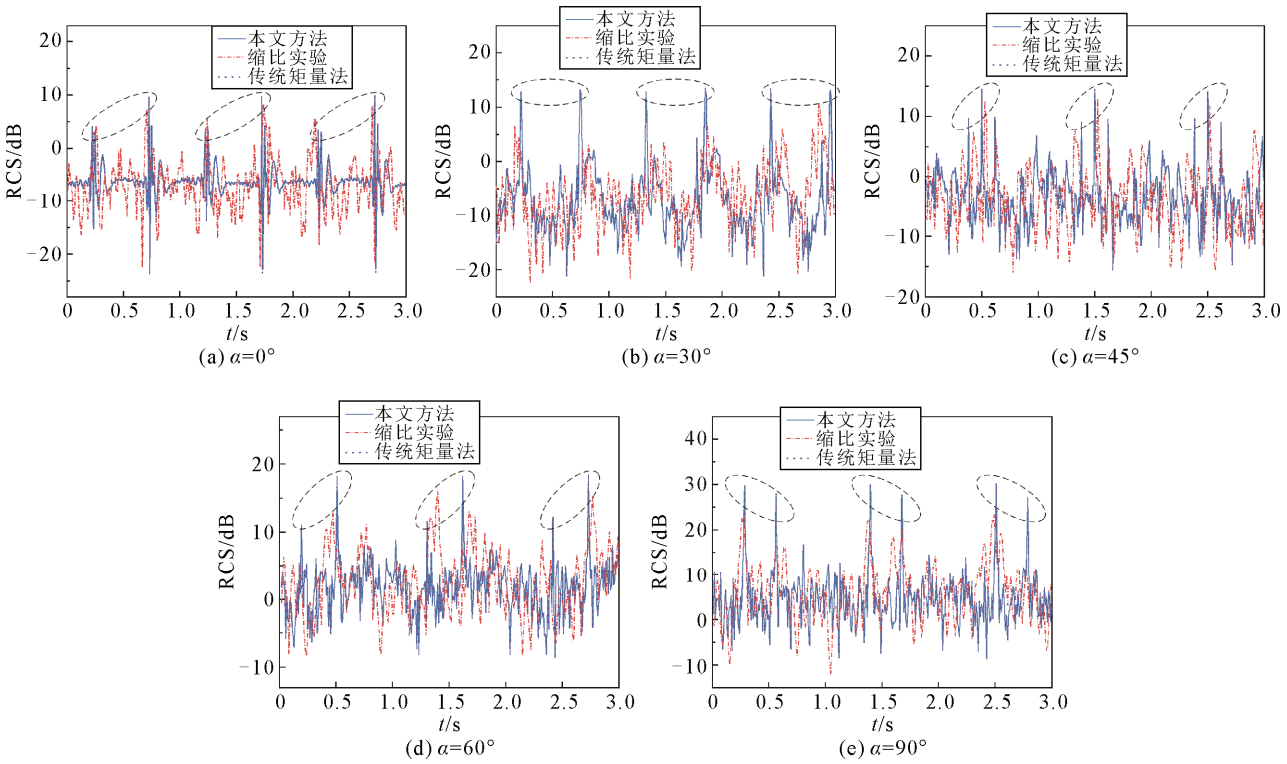


图 5 不同方位角下风电机转速为 20 r/min 时缩比实验测量与数值计算 RCS 结果

Fig.5 Comparison of RCS results of scale experimental measurement and numerical calculation of wind turbine for speed of 20 r/min at different azimuths

由于风电机叶片结构关于旋转轴对称分布，从图 5 中可以观察到 RCS 结果具有明显的周期性。在一个旋转周期内，每支叶片将有两次被入射电磁波垂直照射的时刻，则整个风电机叶片将有 6 个角度域下出现峰值。在方位角α分别为 0°、30°、45°、60°和 90°时，RCS 的峰值也存在差异。在上述不同的方位角下，当电磁波照射到叶片的前缘、后缘时，由于叶片前后缘的差异以及角度的不同，叶片提供的有效照射范围不同，叶片前缘 RCS 主要来自于表面的镜面反射的贡献而叶片后缘的 RCS 主要来自于后缘劈边的贡献，导致峰值存在差异。

4　风电机算例分析

4.1　风电机叶片无源干扰数值算例分析

为了充分利用风能，风电机叶片的旋转平面会实时发生变化。因此，有必要对风电机在不同方位角α下观测点的无源干扰水平 S 进行分析。

以典型的金风 GW82/1500 型风电机为算例，建立叶片全尺寸模型，其中叶片长度 L 为 41 m。风电机叶片与雷达的位置关系如图 6 所示。以风电机叶片轴心为坐标原点 O，以垂直于叶片旋转面的方向为 x 轴建立如图 6 所示的坐标系。其中，R'为雷达视线上的点 R 在 xoy 平面上的投影。雷达台站发射信号中心频率 f_c 为 1 GHz，雷达台站距风电机的距离为 10 km，选取初始相位φ为 0° 垂直极化平面波作为入射场源激励信号。

图 7 为采用传统 RWG 基函数矩量法和本文方法计算的在 xoy 平面内围绕风电机旋转一周时，叶片处于静止状态下不同方位角观测点无源干扰水平结果。分析图 7 中可以发现，本文所提计算方法与传统矩量法计算结果一致，拥有与传统 RWG 矩量法类似的计算精度。为验证与分析本文方法的有效性，以传统 RWG 矩量法为参考，采用全局平均绝对偏差和全局极值最大相对偏差对本文方法计算的风电机无源干扰水平进行误差分析。其中，全局平均绝对偏差 M_{ad} 计算公式为：

$$M_{\mathrm{ad}}=\frac{\sum_{\tau=1}^{T}\left|\sigma_\tau-\sigma_\tau^*\right|}{T} \tag{18}$$

全局最大相对偏差$\Delta_{\max}$计算公式为：

$$\Delta_{\max}=\max_{\tau\in P}\left|\sigma_\tau-\sigma_\tau^*\right| \tag{19}$$

式中：σ_τ 为第 τ个方位角下本文方法计算的无源干扰水平；σ_τ^* 为对应的第τ个方位角下传统矩量法计算的无源干扰水平；T 为方位角α的数量；P 为所有极值点构成的集合。

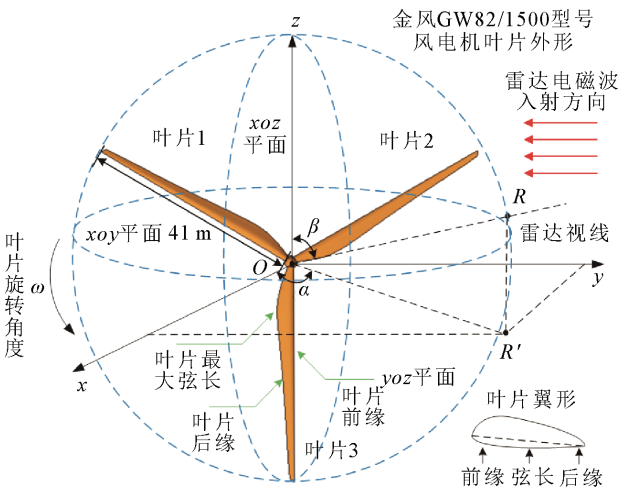


图 6　风电机叶片结构及其与雷达的位置关系

Fig.6　Schematic diagram of wind turbine blade structure and its position relationship with radar

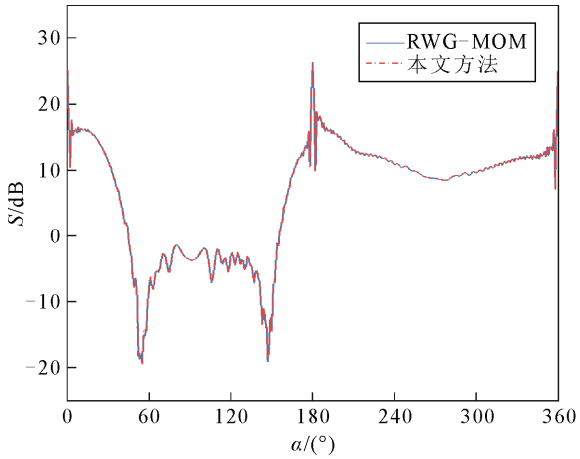


图 7　不同方位角α下观测点无源干扰水平 S

Fig.7　Reradiation interference values of different azimuth observation points

结合表 1 分析可知，本文所提方法与传统矩量法计算的风电机无源干扰水平的全局平均绝对偏差仅为 0.08 dB，全局最大相对偏差为 1.72 dB，究其原因为将平面三角面元改进为曲面三角面元时带来了这部分计算误差。上述主要分析了本文所提方法与传统方法计算精度与准确性，下面对比分析本文方法与传统 RWG 矩量法在某一方位角观测点下的计算效率。

采用本文方法计算时，风电机模型被划分为 14 722 个曲面面元，所剖分面元边长为 0.83λ(λ表示入射电磁波 E_{inc} 波长)，阻抗矩阵元素求解未知量为

22 083，采用单精度复数计算时需要内存约为 3.72 GB。作为对比，在传统 RWG 矩量法中，所需求解矩阵元素未知量为 129 962，采用单精度复数计算时所需内存约为 128.86 GB。结合表 2 可知，本文所提方法相比于传统矩量法面元大小增大了 10.38 倍，面元数量减少了 83.01%，矩阵元素计算内存减少了 34.64 倍，矩阵元素计算效率提高了 37.95 倍。

综合以上分析，本文所提方法适用于风电机叶片无源干扰水平快速评估与分析。

4.2 风电机叶片表面感应电流及散射电场分析

为进一步分析风电机无源干扰机理，根据图 7 不同方位角下观测点无源干扰水平，选取具有代表性的入射电磁波方位角 α=0°、α=90°、α=180°、α=270°分析风电机叶片表面感应电流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}(\boldsymbol{r}')$的分布情况和远区散射电场 $\boldsymbol{E}_{\mathrm{sca}}$ 分布情况，如图 8 和图 9 所示。

当入射电磁波方位角α=0°时，风电机叶片感应电流比较均匀的分布在其表面。当入射电磁波方位角α=90°时，入射电磁波垂直照射到风电机叶片 1 和叶片 2 的前缘以及叶片 3 的后缘，感应电流主要集中在入射电磁波垂直照射的叶片区域。当入射电磁波方位角为α=180°时，与入射电磁波方位角α=0°类似，其感应电流较均匀的分布在每支叶片的背面。当入射电磁波方位角为α=270°时，由于电磁波在此入射角度下风电机叶片 1 对叶片 2 与 3 存在遮挡，其感应电流主要集中分布在叶片 1 的最大弦长位置及尖端、叶片 2 的尖端后缘和叶片 1 的前缘部分区域。

综合上述分析，在不同的方位角下，由于风电机叶片为复杂的异形曲面，每支叶片所提供的电磁波有效照射面积不尽相同[33]，导致每支叶片上的表面感应电流存在较大差异，这也体现了本文所提方法曲面三角面元更适合于分析风电机叶片复杂异形曲面的无源干扰特性。

表 1 本文方法与传统 RWG 矩量法误差分析

Table 1 Error analysis of this method and RWG-MOM

变量	M_{ad}/dB	$\Delta_{\max}$/dB
数值	0.08	1.72

表 2 本文方法与传统 RWG-MOM 计算效率对比

Table 2 Comparison and Analysis between the computational efficiency of this method and the traditional RWG-MOM

计算方法	面元边长	面元数量/个	矩阵元素计算内存/GB	矩阵元素计算时间/s
RWG-MOM	0.08λ	86 662	128.86	40 952.45
本文方法	0.83λ	14 722	3.72	1079.57

当入射电磁波方位角为α=0°与α=180°时，风电机叶片表面远区散射电场 E_{sca} 幅值呈现出极大值，这恰好与前文方位角α=0°与α=180°时风电机表面感应电流以及无源干扰水平出现极大值相对应。当入射电磁波方位角α=90°与α=270°时，在此情况下电磁波垂直照射到风电机每支叶片的位置有所不同，导致叶片的强散射区域有所差异。当入射电磁

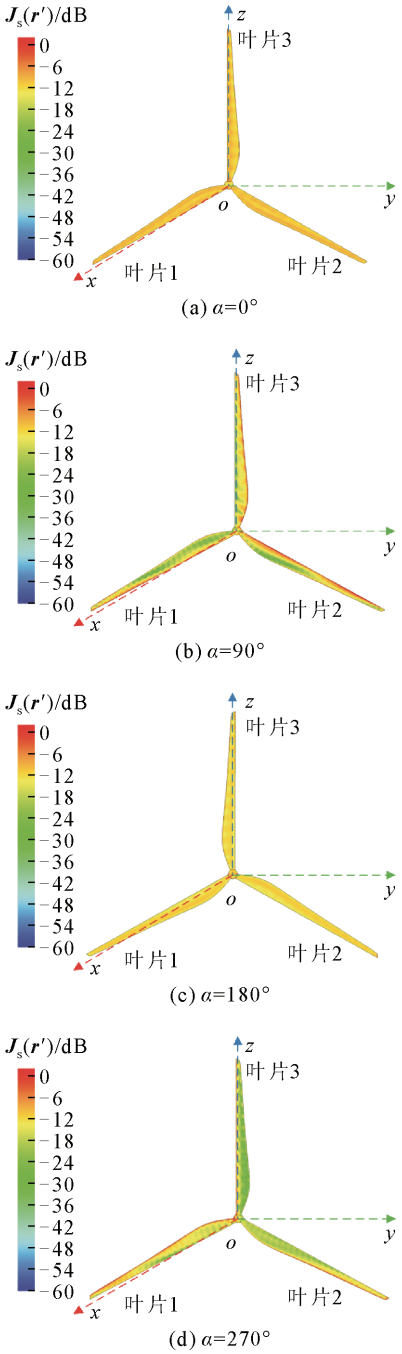
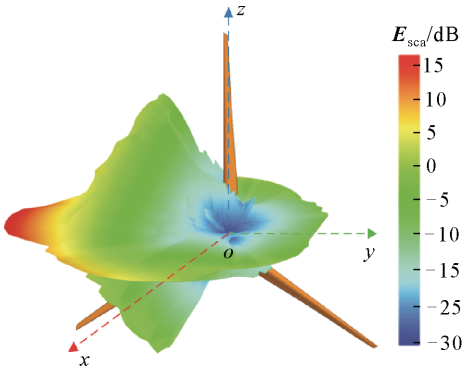
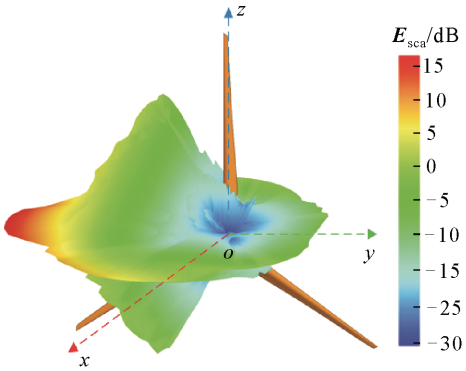


图 8 风电机叶片表面感应电流密度分布

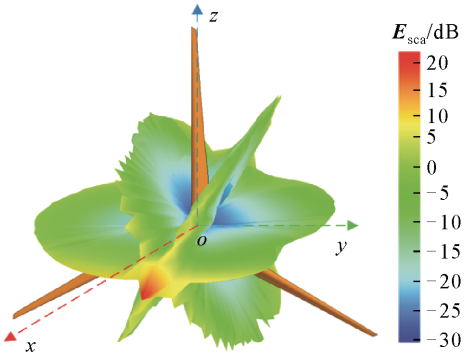
Fig.8 Distribution of induced current density on blade surface of wind turbine



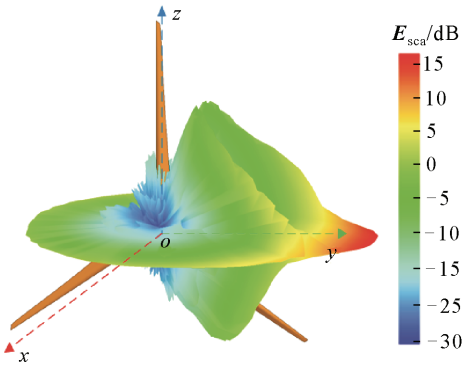
(a) α=0°



(b) α=90°



(c) α=180°



(d) α=270°

图 9　风电机叶片表面远区散射电场分布

Fig.9　Scattering electric field distribution in the far field of wind turbine blade surface

波方位角α=90°时，风电机叶片的强散射区域主要集中在叶片 2 的最大弦长位置的前缘和尖端的前缘部分以及叶片 3 的后缘部分区域。当入射电磁波方位角α=270°时，风电机叶片的强散射区域主要集中在叶片 1 的后缘与尖端位置以及叶片 2 的尖端后缘部分区域。通过上述分析可知，图 7 方位角α=90°与α=270°时的无源干扰水平出现差异主要是由于风电机叶片强散射区域的位置及面积大小不同。

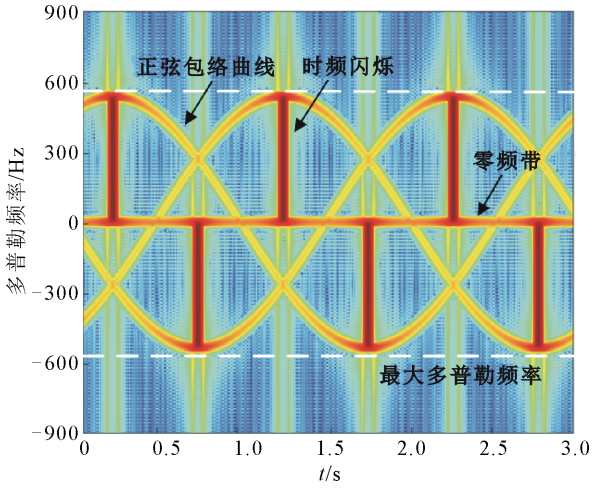
综合上述分析，在不同的方位角下，风电机每支叶片所提供的有效散射面积不同[33]，强散射区域有所差异。在同一方位角下，风电机无源干扰水平大小与此时远区散射电场的分布相对应。

4.3　风电机叶片多普勒效应分析

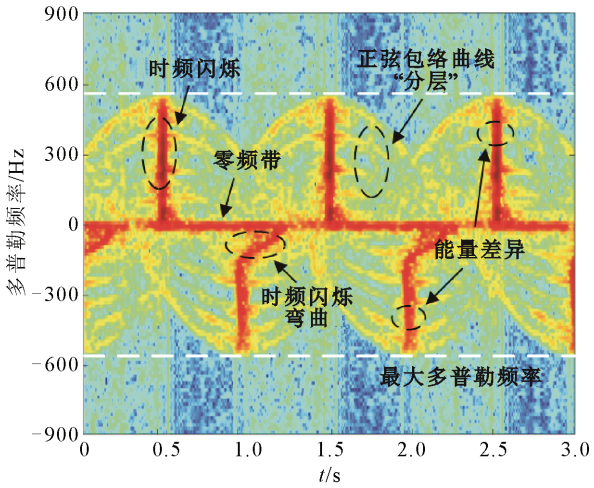
在工程实际中，由于风电机叶片的动态旋转，叶片与雷达台站的相对位置会发生实时、周期性地迁移会对雷达入射电磁波进行调制，产生多普勒效应。为此，选取风电机叶片转速f_{rot}为 20 r/min，即旋转角速度ω为(2π/3)rad/s，采样步长Δt为 1/2000 s，脉冲重复频率为 2000 Hz，观测时间 t 为 3 s，雷达入射波方位角为 90°，其他计算参数与 4.1 节相同，采用本文所提方法计算风电机叶片的散射电场，利用短时傅里叶变换得到风电机叶片的多普勒特征。分别与文献[26]散射点模型积分算法和文献[3]现场实测数据的多普勒特征进行对比，如图 10 所示。

通过对比图 10 中(a)、(b)可知，散射点模型积分算法和本文方法两者均出现了能量较强的零频带、多普勒时频闪烁以及正弦包络曲线等多普勒特征。其中，零频带是由于风电机叶片轴心与雷达相对静止导致的。正弦包络曲线是由于风电机叶片的叶尖部分做圆周运动产生的。当风电机叶片与雷达视线垂直时，其被电磁波信号完全照射，叶片的贡献达到峰值，便体现出时频闪烁现象。在一个旋转周期内，每支风电机叶片有两次被入射电磁波垂直照射的时刻，则在整个旋转周期内将出现六次时频闪烁现象。而正负交替时频闪烁则是由于风电机叶片靠近或远离入射电磁波所导致的，当风电机叶片靠近入射电磁波时，多普勒频率为正值；当风电机叶片远离入射电磁波时，多普勒频率为负值。

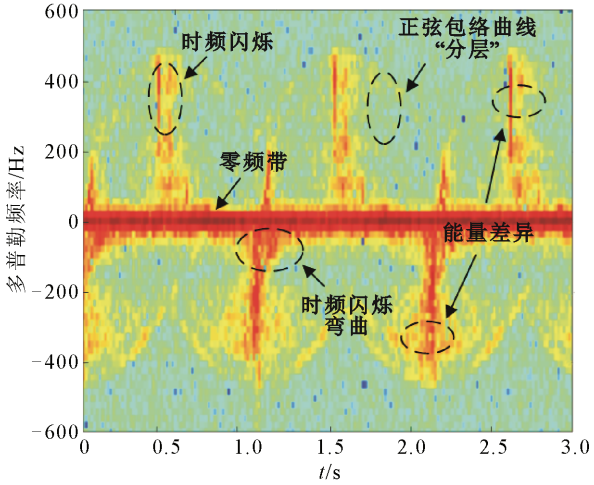
通过分析图 10 中(c)实测结果可知，实际风电机叶片除了具有上述相同的多普勒特征外，还应具有正负多普勒时频闪烁能量差异、时频闪烁弯曲现象、正弦包络曲线存在“分层”现象等多普勒特征。这些特征在图 10(a)中均未能体现，究其原因是由于



(a) 文献[26]散射点模型积分算法



(b) 本文方法



(c) 文献[3]实测数据

图 10 不同方法获得的风电机叶片多普勒特征对比

Fig.10 Comparison of the doppler characteristics of wind turbine blades obtained by different methods

散射点模型积分算法采用一系列的点源来等效结构复杂的风电机，导致结果过于理想化，但本文所提方法的结果与实测特征完全一致。结合图 6 风电机的叶片结构分析可知，出现正多普勒时频闪烁能量差异主要是由于风电机叶片前后缘的厚度存在较大差异导致的。时频闪烁弯曲这一现象是由于风电机叶片在最大弦长位置的异形曲面曲率急剧变化所导致[22]。结合图 8 风电机叶片表面电流分布可知，正弦包络曲线存在“分层”是由于风电机叶片异形曲面上提供强散射源的位置分布不同，进而其在叶片旋转时所作圆周运动的半径不同，从而体现出正弦包络曲线分层现象。

综合上述分析，时频闪烁弯曲、正弦包络曲线“分层”等这些风电机叶片多普勒特征可为后续雷达台站滤波理论提供参考。

5 结论

1）为准确快速评估风电机无源干扰水平，本文改进了传统矩量法中求解风电机无源干扰的面元剖分方法，引入基于曲面三角面元的矩量法基函数，利用风电机叶片旋转时的周期对称性，简化了阻抗矩阵元素的填充过程，求解了风电机散射电场，实现了风电机无源干扰的准确快速计算。

2）为验证本文所提方法的正确性及有效性，开展了基于电波暗室的风电机无源干扰缩比模型实验，实验测量结果与本文方法计算结果较为一致。结果表明，RCS 结果具有明显的周期性。随着方位角的增加，RCS 均值以及最大值和最小值也逐渐增加，呈现正相关的趋势。

3）以实际金风 GW82/1500 型风电机为例，计算了不同观测点下风电机的无源干扰水平，本文方法与传统矩量法相比吻合良好。以传统矩量法计算效率为参考，本文所提方法矩阵元素计算内存减少了 34.64 倍，矩阵元素求解效率提高了 37.95 倍。分析了风电机叶片表面感应电流及其散射电场的分布，结果表明，由于叶片强散射区域的差异，导致在不同的方位角下其表面感应电流及散射电场显著不同。利用本文方法计算的散射电场获取了风电机叶片的多普勒特征，为后续广域空间下风电机大规模阵列电磁散射理论的研究奠定了一定理论基础。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] LITOV N, FALKNER B, ZHOU H Y, et al. Radar cross section analysis of two wind turbines via a novel millimeter-wave technique and scale model measurements[J]. IEEE ACCESS, 2022, 10: 17897-17907.

[2] 何炜琨，吴仁彪，王晓亮，等. 风电场对雷达设备的影响评估与干扰抑制技术研究现状与展望[J]. 电子与信息学报，2017，39(7)：1748-1758.
HE Weikun, WU Renbiao, WANG Xiaoliang, et al. The review and prospect on the influence evaluation and interference suppression of wind farms on the radar equipment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(7): 1748-1758.

[3] POUPART G J. Wind farms impact on radar aviation interest–final report[R]. Harwell: Future Energy Solutions, 2003: 1-86.

[4] ANGULO I, DE LA VEGA D, CASCÓN I, et al. Impact analysis of wind farms on telecommunication services[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 84-99.

[5] KATSAPRAKAKIS D A. A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2850-2863.

[6] 黄　力，唐嘉晖，唐　波，等. 基于特征模理论的输电线路铁塔无源干扰研究[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2598-2606.
HUANG Li, TANG Jiahui, TANG Bo, et al. Research on reradiation interference of transmission line tower based on characteristic mode theory[J]. High Voltage Engineering, 2023: 2023, 49(6): 2598-2606.

[7] PAKROOH P, SCHARF L L, CHENEY M, et al. Multi-pulse adaptive coherence for detection in wind turbine clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 3091-3103.

[8] ZHOU Z Y, HUANG J. Influence of rotor dynamic scattering on helicopter radar cross-section[J]. Sensors, 2020, 20(7): 20997.

[9] ZHOU Z Y, HUANG J, WANG J J. Compound helicopter multi-rotor dynamic radar cross section response analysis[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105: 106047.

[10] 唐　波，刘　任，张建功，等. 基于动态 RCS 的风电机叶片多普勒特性[J]. 高电压技术，2017，43(10)：3435-3442.
TANG Bo, LIU Ren, ZHANG Jiangong, et al. Doppler characteristics of wind turbine blade based on dynamic RCS[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3435-3442.

[11] CRESPO-BALLESTEROS M, ANTONIOU M, CHERNIAKOV M. Wind turbine blade radar signatures in the near field: modeling and experimental confirmation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(4): 1916-1931.

[12] ZHANG Y, HUSTON A, PALMER R D, et al. Using scaled models for wind turbine EM scattering characterization: Techniques and experiments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1298-1306.

[13] KONG F, ZHANG Y, PALMER R D. Wind turbine radar interference studies by polarimetric measurements of a scaled model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(3): 1589-1600.

[14] 盛新庆. 计算电磁学要论[M]. 3 版. 北京：科学出版社，2018：164-165.
SHENG Xinqing. Essentials of computational electromagnetics[M]. 3rd ed. Beijing, China: Science Press, 2018: 164-165.

[15] 杨明林，吴比翼，黄晓伟，等. 三维电磁散射问题区域分解技术研究进展[J]. 电波科学学报，2020，35(1)：34-42.
YANG M L, WU B Y, HUANG X W, et al. The progress of domain decomposition methods for 3D electromagnetic scattering problems[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(1): 34-42.

[16] 张　童，任新成，朱小敏，等. 有限深度海域海面电磁散射的 FDTD 方法研究[J]. 微波学报，2023，39(2)：88-94.
ZHANG Tong, REN Xincheng, ZHU Xiaomin, et al. Study on sea surface EM scattering in limited depth sea area using finite difference time domain method[J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(2): 88-94.

[17] “电磁计算”专刊编委会. 电磁计算方法研究进展综述[J]. 电波科学学报，2020，35(1)：13-25.
The Editorial Board of Special Issue for “Computational Electromagnetics”. Progress in computational electromagnetic methods[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(1): 13-25.

[18] KRUG F, LEWKE B. Electromagnetic interference on large wind turbines[J]. Energies, 2009, 2(4): 1118-1129.

[19] TANG B, HAO B, HUANG L, et al. Simulation of the Doppler echoes from wind turbine based on scattered electric field calculation[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(11): 2055-2062.

[20] 唐　波，叶　莉，孙　睿，等. 基于 PO 算法的风电机塔架 RCS 快速求解[J]. 电工电能新技术，2017，36(6)：76-82.
TANG Bo, YE Li, SUN Rui, et al. Fast algorithm for solving wind turbine tower RCS based on physical optics[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(6): 76-82.

[21] 唐　波，张　楠，齐道坤，等. 共享铁塔基站天线对在线监测设备的电磁干扰及防护[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4365-4375.
TANG Bo, ZHANG Nan, QI Daokun, et al. Electromagnetic interference of base station antenna to on-line monitoring equipment on shared tower and protection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4365-4375.

[22] 唐　波，郝　斌，张建功，等. 风电机叶片回波模拟及其多普勒特性分析[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3674-3684.
TANG Bo, HAO Bin, ZHANG Jiangong, et al. Echo simulation and doppler characterization of wind turbine blades[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3674-3684.

[23] SETUKHA A V, STAVTSEV S L, TRET'YAKOVA R M. Application of mosaic-skeleton approximations of matrices in the physical optics method for electromagnetic scattering problems[J]. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2022, 62(9): 1424-1437.

[24] 王旭桐，刘　政，秦　锋，等. 球面波传播的电磁脉冲下的架空线缆响应[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2770-2775.
WANG Xutong, LIU Zheng, QIN Feng, et al. Response of overhead cable under the electromagnetic pulse of spherical wave propagation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2770-2775.

[25] TAYEBI A, GOMEZ J, GONZALEZ I, et al. Performance comparison between rigorous and asymptotic techniques applied to the analysis of wind turbines[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2011, 26(2): 115-122.

[26] 何炜琨，石玉洛，郭双双，等. 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，2017，32(1)：103-111.
HE Weikun, SHI Yuluo, GUO Shuangshuang, et al. Simulation on wind turbine radar scattering characteristics and its micro-Doppler analysis[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(1): 103-111.

[27] 唐　波，郝　斌，张建功，等. 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，2019，45(8)：2652-2661.
TANG Bo, HAO Bin, ZHANG Jiangong, et al. Simulation of wind turbine echoes based on electromagnetic scattering point spacing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2652-2661.

[28] 唐　波，陈　昊，黄　力，等. 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，2019，39(24)：7375-7384.
TANG Bo, CHEN Hao, HUANG Li, et al. Simulation and analysis of wind turbine blades radar echo based on electromagnetic scattering center[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7375-7384.

[29] 唐　波，刘　钢，谢黄海，等. 基于多视角属性散射中心的风电机动态叶片雷达回波模拟[J]. 中国电机工程学报，2021，41(18)：

6449-6460.
TANG Bo, LIU Gang, XIE Huanghai, et al. Radar echo simulation of dynamic wind turbine blade based on multi view attribute scattering center[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6449-6460.

[30] 唐　波，肖乔莎，刘兴发，等. 共享铁塔无源干扰水平的求解与分析[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3724-3732.
TANG Bo, XIAO Qiaosha, LIU Xingfa, et al. Calculation and analysis of passive interference level of shared tower[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3724-3732.

[31] 唐　波，张建功，陈　彬. 特高压输电线路无源干扰的基本理论与方法[M]. 北京：科学出版社，2018：123-129.
TANG Bo, ZHANG Jiangong, CHEN Bin. Basic theory and method of reradiation interference on UHV transmission lines[M]. Beijing, China: Science Press, 2018: 123-129.

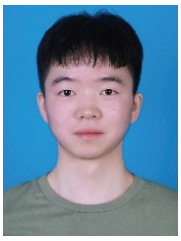
[32] 何国瑜，卢成才，洪家才，等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006：478-484.
HE Guoyu, LU Chengcai, HONG Jiacai, et al. Calculation and measurement of electromagnetic scattering[M]. Beijing, China: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2006: 478-484.

[33] 蒋勇猛. 雷达隐身直升机靶机设计及 RCS 特征评估[D]. 南京：南京航空航天大学，2020：29-39.
JIANG Yongmeng. Design of target drone for radar stealthy helicopter and RCS characteristic evaluation[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020: 29-39.



黄　力
1980—，男，博士，讲师
主要研究方向为超特高压输电技术与输变电工程电磁环境；风电场电磁散射理论与计算
E-mail: huangli@ctgu.edu.cn

HUANG Li
Ph.D.



陈新宇(通信作者)
1998—，男，硕士生
主要研究方向为风电场电磁散射理论与计算
E-mail: 821270895@qq.com

CHEN Xinyu
Corresponding author

收稿日期　2022-11-14　修回日期　2023-10-01　　编辑　陈　蔓

附录 A

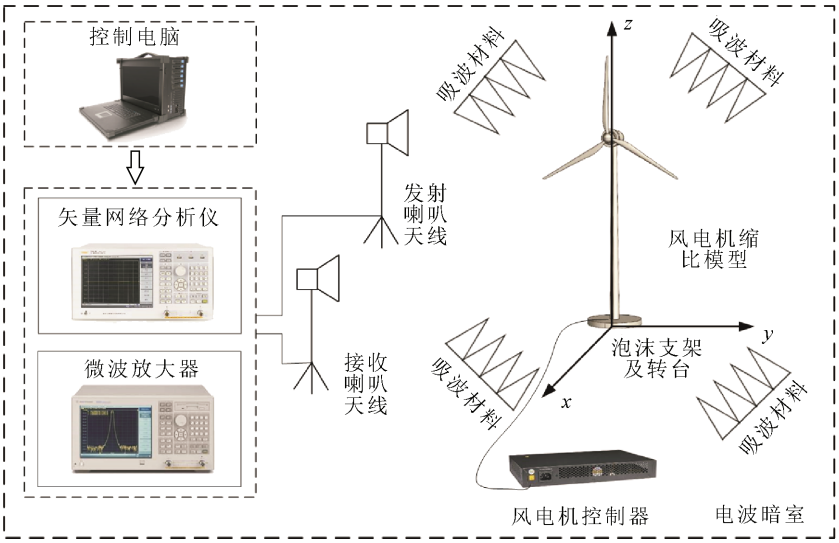


图 A1　风电机缩比实验场景布置示意图

Fig.A1　Diagram of scene layout of wind turbine scale experiment

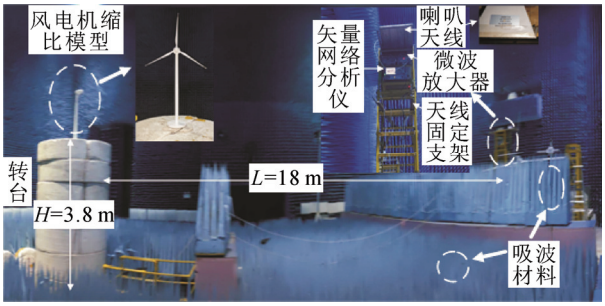


图 A2　电波暗室缩比模型场景布置图

Fig.A2　Diagram of scene layout of anechoic chamber scale model experiment

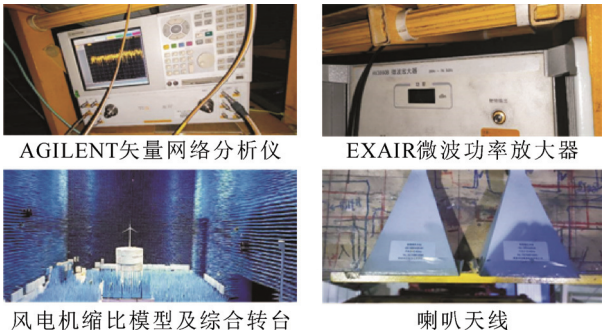


图 A3　主要实验仪器

Fig.A3　Diagram of main experimental instruments