

# 随机风载下双偏置格里高利天线指向误差建模与应用

刘慧珊<sup>1</sup> 裴佳星<sup>2</sup> 吴锦辉<sup>1</sup> 张磊<sup>3</sup> 连培园<sup>4</sup> 陶友瑞<sup>1\*</sup>

1. 河北工业大学机械工程学院, 天津, 300401
2. 河北工程大学机械与装备工程学院, 邯郸, 056038
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄, 050081
4. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安, 710071

**摘要:** 双偏置格里高利天线指向误差研究多依赖仿真软件, 计算效率低, 不利于天线性能优化与抗风扰设计。基于卡塞格伦天线的指向误差模型构建了形式相似的双偏置格里高利天线的指向误差模型, 并通过电磁仿真对其进行了验证。结果表明所建指向误差模型具有较高的准确性和适用性, 为两种天线统一理论框架构建提供了基础。以平方公里阵(SKA)双偏置格里高利天线单元为例, 结合天线结构变形数据和指向误差模型分析了不同随机风载和不同姿态下天线的指向误差变化规律, 结果表明所建立的指向误差模型可以快速评估双偏置格里高利天线在随机风载下的指向误差。

**关键词:** 双偏置格里高利天线; 随机风载; 风致响应; 小型风洞实验; 指向误差

**中图分类号:** TN821

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Modeling and Applications for Pointing Errors of Dual-offset Gregorian Antenna under Random Wind Loads

LIU Huishan<sup>1</sup> PEI Jiaying<sup>2</sup> WU Jinhui<sup>1</sup> ZHANG Lei<sup>3</sup> LIAN Peiyuan<sup>4</sup> TAO Yourui<sup>1\*</sup>

1. College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, 300401
2. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038
3. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang, 050081
4. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, 710071

**Abstract:** Investigation of pointing errors of dual-offset Gregorian antenna primarily relied on simulation software, which was computationally inefficient and not conducive to antenna performance optimization and wind disturbance rejection design. Based on the pointing error model of a Cassegrain antenna, a pointing error model was developed for dual-offset Gregorian antenna with similar formal structure. The model was validated through electromagnetic simulations, and the results demonstrate that the developed pointing error model is both highly accurate and applicable, providing a basis for establishing a unified theoretical framework for both types of antennas. Taking the dual-offset Gregorian antenna element of the square kilometre array (SKA) as an example, the pointing error variation were analyzed by combining antenna structural deformation data and the pointing error model under different random wind loads and different attitudes. The results indicate that the established error model may rapidly assess the pointing errors of dual-offset Gregorian antennas under random wind loading.

**Key words:** dual-offset Gregorian antenna; random wind load; wind-induced response; small wind tunnel experiment; pointing error

### 0 引言

反射面天线作为重要的电磁波信号接收与发射设备, 常被应用于深空探测和射电天文。近年

来, 为提高观测性能, 反射面天线朝着大口径、高频段、高指向精度的方向发展<sup>[1]</sup>。然而, 该类天线常被部署在戈壁或高山等环境复杂的地区, 天线自重及温差和风载环境因素会导致其结构发生变形<sup>[2]</sup>, 严重影响天线的指向精度<sup>[3]</sup>。其中风载引起的天线结构变形时变且难以准确预测, 对指向精度的影响不易预估及补偿, 成为制约天线指向精

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(U23A6017); 邯郸市科学技术研究与发展计划(23422304057)

度的关键因素之一<sup>[4]</sup>。随着天线口径的不断增大,其柔性特征越加显著,风载对天线结构变形及指向精度的影响越加明显<sup>[5]</sup>。因此,快速评估天线随机风载下的结构变形及其对指向精度的影响至关重要。

目前,关于反射面天线风载特性的研究,一般通过风洞实验或数值模拟分析其表面风压、风力系数及结构变形。付丽等<sup>[6]</sup>统计了TM 65 m天线服役环境下所受到的平均风速分布,利用理论公式计算出主反射面所受平均风压。杜强<sup>[7]</sup>采用大气边界层风剖面和工业风洞风剖面作为平均风的入口边界条件,对天线进行了风场数值模拟,得到风力系数随工作高度和风速变化的规律。考虑脉动风的随机性和时变性,易邱寒<sup>[8]</sup>通过将离散的风速曲线分段施加于雷达阵面,获得了天线在不同时间点的风压分布和相应的结构变形。然而,天线风载特性的数值分析研究资料依旧较少,且大多数研究仅考虑了平均风,尚未深入探讨风的复杂性,因此,将随机风作为边界条件进行研究显得尤为必要。

风载引起的结构变形会导致天线波束中心发生偏移,产生指向误差。指向误差的理论计算方法主要有两种:几何光学算法和波束偏移因子算法。这两种算法都是先将天线的结构变形分解为单一变形,例如主反射面的变形、副反射面的横向位移、副反射面的转动以及馈源的横向位移。随后,叠加各变形所引起的单项指向误差得到综合指向误差。魏善祥等<sup>[9]</sup>基于几何光学方法对武清70 m天线在6种虚拟变形工况下的指向误差进行了评估。BAN等<sup>[10]</sup>针对大型卡塞格伦天线的副面校准,提出了简化的几何光学算法。涂标<sup>[11]</sup>基于波束偏移因子分析了TM 65 m天线在热致响应下的指向误差。上述两种方法在卡塞格伦天线的指向误差评估中得到了广泛应用,但针对双偏置格里高利天线的适用性尚不明确。

作为目前世界在建最大的综合孔径射电望远镜,平方公里阵(square kilometre array, SKA)高频天线阵列单元采用了双偏置格里高利天线结构形式,其特殊的偏置结构能避免馈源、支撑结构等对主反射面的遮挡,同时副反射面和焦点之间有较大空间,便于放置多个频段的馈源。然而,作为SKA天线的重要组成部分,约2500面直径15 m的碟形反射面天线计划部署在风载显著的南非卡鲁地区,研究随机风载下双偏置格里高利天线的指向误差尤为必要,可为天线的指向精度补偿提供数据。

为此,本文建立并验证了双偏置格里高利天线的指向误差模型,结合计算流体动力学(CFD)方法定量分析随机风载下SKA天线的变形情况,探讨了SKA天线在不同姿态和风速下的指向误差变化规律,为随机风载下该天线的指向误差补偿提供理论指导。

### 1 双偏置格里高利天线指向误差模型

本文从主反射面变形、馈源横向位移、副面横向位移及副面转动4个方面建立了双偏置格里高利天线(图1)的指向误差模型,并通过电磁仿真软件GRASP验证了该模型的准确性和适用性。然后,对于随机风速建模,通过数值模拟和小型风洞实验获取了随机风载下天线的主面变形、馈源变形及副面变形数据。最后将变形量输入指向误差模型中,评估指向误差结果,分析了随机风载对天线指向误差的影响规律。技术路线见图2。

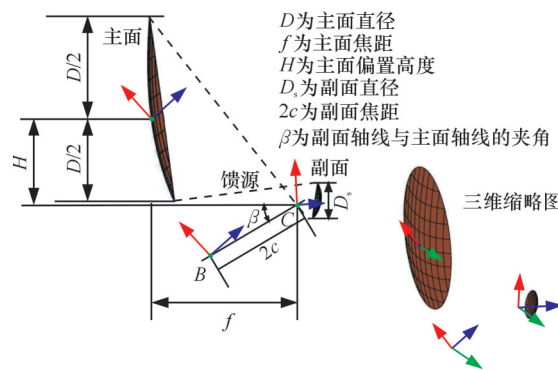


图1 双偏置格里高利天线示意图  
Fig.1 Schematic diagram of dual-offset Gregorian antenna

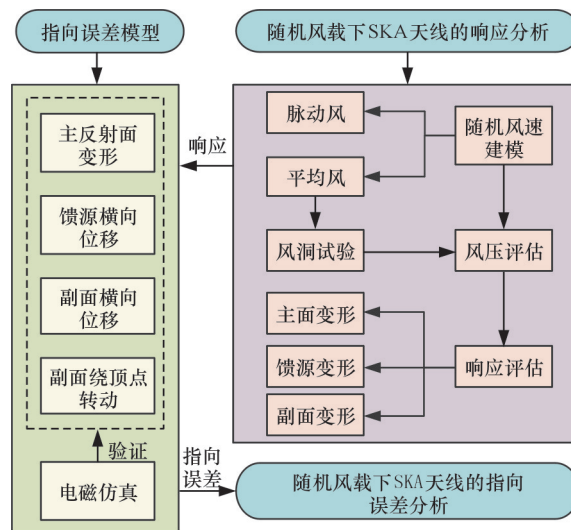


图2 技术路线  
Fig.2 Technical roadmap

本节对双偏置格里高利天线进行指向误差建模,天线的指向误差可以分解为沿俯仰方向的指

向误差和垂直于俯仰方向的指向误差。为便于阐述,将天线投影到俯仰平面( $OXZ$ 面)上,详细分析天线在俯仰方向上的指向误差。

### 1.1 最佳吻合抛物面计算

主反射面的变形分为局部变形和整体位移,前者反映反射面各点间的相对微小变形,后者则影响反射面的位置。鉴于反射面天线的主反射面通常为抛物面,故可通过最小轴向误差原则建立最佳吻合抛物面,评估结构变形对天线指向精度的影响。

抛物面由顶点位置、焦距和开口方向唯一确定。设 $OXYZ$ 为抛物面的坐标系,原点 $O$ 为抛物面顶点, $x, y, z$ 为空间点对 $OXYZ$ 坐标系的坐标。求解最佳吻合抛物面就需求出6个关键参数,即顶点位移偏移量 $dx, dy, dz$ ,焦轴偏移角 $\varphi_x, \varphi_y$ 和焦距偏移量 $df$ 。因此,抛物面方程和最佳吻合抛物面方程可表示为

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (1)$$

$$z = \frac{(x - dx)^2 + (y - dy)^2}{4(f + df)} + dz + y\varphi_x - x\varphi_y \quad (2)$$

式中: $f$ 为焦距。

可得

$$\frac{1}{4(f + df)} \approx \frac{1}{4f} (1 - \frac{df}{f}) \quad (3)$$

$$A_n = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^n \frac{x_s^2}{2f} & \sum_{s=1}^n \frac{x_s y_s}{2f} & -\sum_{s=1}^n x_s & -\sum_{s=1}^n x_s y_s & \sum_{s=1}^n x_s^2 & \sum_{s=1}^n \frac{x_s z_s}{f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s y_s}{2f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s^2}{2f} & -\sum_{s=1}^n y_s & -\sum_{s=1}^n y_s^2 & -\sum_{s=1}^n x_s y_s & \sum_{s=1}^n \frac{y_s z_s}{f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s z_s}{2f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s z_s}{2f} & -\sum_{s=1}^n z_s & -\sum_{s=1}^n y_s z_s & \sum_{s=1}^n x_s z_s & \sum_{s=1}^n \frac{z_s^2}{f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s}{2f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s}{2f} & -n & -\sum_{s=1}^n y_s & \sum_{s=1}^n x_s & \sum_{s=1}^n \frac{z_s}{f} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H_n = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^n (z_s - z_{s0}) x_s & \sum_{s=1}^n (z_s - z_{s0}) y_s & \sum_{s=1}^n (z_s - z_{s0}) z_s & \sum_{s=1}^n (z_s - z_{s0}) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

为了减少取样过程中的误差,引入误差分析权重因子 $d_i$ ,式(9)左乘 $A_n^T D_n$ ,则有<sup>[12]</sup>

$$A_n^T D_n A_n \beta = A_n^T D_n H_n \quad (13)$$

$$D_n = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

求解式(13)可得到最佳吻合抛物面的6个关键参数: $dx, dy, dz, \varphi_x, \varphi_y, df$ 。

### 1.2 主反射面变形

双偏置格里高利天线中由主面变形导致的指向误差 $\theta_p$ 如图3a所示。假设只有主面发生变形,利用上述公式求得变形后主反射面的最佳吻合抛

$$(x - dx)^2 \approx x^2 - 2x dx \quad (4)$$

$$(y - dy)^2 \approx y^2 - 2y dy \quad (5)$$

假设 $(x_p, y_p, z_p)$ 为设计抛物面中 $P$ 点的坐标,将式(1)、式(3)、式(4)、式(5)代入式(2),得到 $P$ 点对应的主面变形后的位置点 $P_0(x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})$ 和最佳吻合抛物面中的位置点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 之间的轴向误差 $Q_p$ :

$$Q_p = z_1 - z_{p0} = z_1 - z_p + \frac{x_p}{2f} dx + \frac{y_p}{2f} dy - dz - y_p \varphi_x + x_p \varphi_y + \frac{z_p}{f} df \quad (6)$$

设采样点数为 $n$ ,第 $s$ 个点变形前后的坐标分别为 $(x_s, y_s, z_s)$ 和 $(x_{s0}, y_{s0}, z_{s0})$ 。当轴向误差 $Q_s$ 的平方和 $T_z$ 最小时即为最佳吻合抛物面,即

$$T_z = \sum_{s=1}^n Q_s^2 \quad (7)$$

若 $T_z$ 最小,则 $T_z$ 对最佳吻合抛物面的6个参数的偏导数为0,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_z}{\partial dx} = 0 & \quad \frac{\partial T_z}{\partial dy} = 0 & \quad \frac{\partial T_z}{\partial dz} = 0 \\ \frac{\partial T_z}{\partial \varphi_x} = 0 & \quad \frac{\partial T_z}{\partial \varphi_y} = 0 & \quad \frac{\partial T_z}{\partial df} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将上述方程写成矩阵形式:

$$A_n \beta = H_n \quad (9)$$

$$\beta = [dx \quad dy \quad dz \quad \varphi_x \quad \varphi_y \quad df]^T \quad (10)$$

物面。相对于设计抛物面,其顶点向上移动 $\delta_{pr}$ ,轴线转动了 $\gamma_p$ 。变形前波束指向 $QA$ 方向,变形后波束指向为 $QA'$ ,其夹角为指向误差 $\theta_p$ 。

相对于最佳吻合抛物面,偏焦距离为 $\delta_{fp}$ ,则由此产生的波束偏转角 $\theta_z$ 如下所示:

$$\theta_z = -K \frac{\delta_{fp}}{f} \quad (15)$$

$$\delta_{fp} = \delta_{pr} - \gamma_p f \quad (16)$$

$$K = \frac{48}{1 + 2\tau} (f/D)^2 \{ [1 - 32(f/D)^2(-1 + \tau) + \tau] + 32(f/D)^2[-1 + 16(f/D)^2(-1 + \tau)] \cdot [-\ln(f/D)^2 + \ln(1/16 + (f/D)^2)] \} \quad (17)$$

$$\tau = 10^{T_r/20}$$

式中: $K$ 为波束偏转因子,与天线的焦距比 $f/D$ 以及锥销

电平  $T_c$  有关<sup>[13]</sup>。

因为最佳吻合抛物面轴线相对于原设计抛物面偏转了  $\gamma_p$ , 所以主面变形产生的指向误差  $\theta_p$  为

$$\theta_p = \gamma_p + \theta_z = (1 + K)\gamma_p - \frac{K\delta_{pr}}{f} \quad (18)$$

### 1.3 馈源横向位移

馈源的实际位移可以分解为沿焦轴方向的位移和垂直于焦轴方向的位移, 其中沿焦轴方向的位移对波束的影响具有对称性, 不会引起指向误差, 但会导致增益下降和旁瓣电平升高。而垂直于焦轴方向的位移, 即横向位移, 则会直接影响指向误差。如图 3b 所示, 双偏置格里高利天线馈源横向位移导致的指向误差为  $\theta_k$ 。馈源由 B 点移动到 B', 位移为  $\delta_{br}$ 。相应的虚焦点 C 移到 C', 位移为  $\delta_{br}/M$ 。由几何关系可知

$$M = \frac{L_1}{L_2} \quad (19)$$

式中:  $L_1$  为副面长半轴与焦距之和;  $L_2$  为长半轴与焦距之差。

因此, 馈源横向位移产生的指向误差  $\theta_k$  为

$$\theta_k = \frac{\delta_{br}}{M} \frac{K}{f} \quad (20)$$

### 1.4 副面横向位移

与馈源的位移类似, 考虑副面的横向位移  $\delta_{sr}$  对指向误差的影响。如图 3c 所示, 假设主面不动, 馈源随副面横向位移  $\delta_{sr}$ , 由此引起的指向误差  $\theta_1$  为

$$\theta_1 = \frac{\delta_{sr}}{f} K \quad (21)$$

再将馈源移回, 位移为  $-\delta_{sr}$ , 由此引起的指向误差  $\theta_2$  为

$$\theta_2 = -\frac{\delta_{sr}}{Mf} K \quad (22)$$

因此, 副面横向位移产生的指向误差  $\theta_{sr}$  为

$$\theta_{sr} = \theta_1 + \theta_2 = \frac{\delta_{sr}(M-1)K}{Mf} \quad (23)$$

### 1.5 副面绕顶点转动

图 3d 为副面绕顶点转动  $\gamma_s$  引起的指向误差  $\theta_{sy}$ , 等效于虚焦点由 C 移动到 C<sub>2</sub>。根据几何关系, CC<sub>2</sub> 的长度为

$$l_{CC_2} = 2N\gamma_s \quad (24)$$

式中:  $N$  为副面的长半轴与焦距之差。

因此, 副面绕顶点转动产生的指向误差  $\theta_{sy}$  为

$$\theta_{sy} = -\frac{2N\gamma_s}{f} K \quad (25)$$

### 1.6 综合指向误差

当天线同时存在以上误差时, 由于误差很小, 可以近似为各项误差叠加<sup>[9]</sup>, 因此, 双偏置格里高

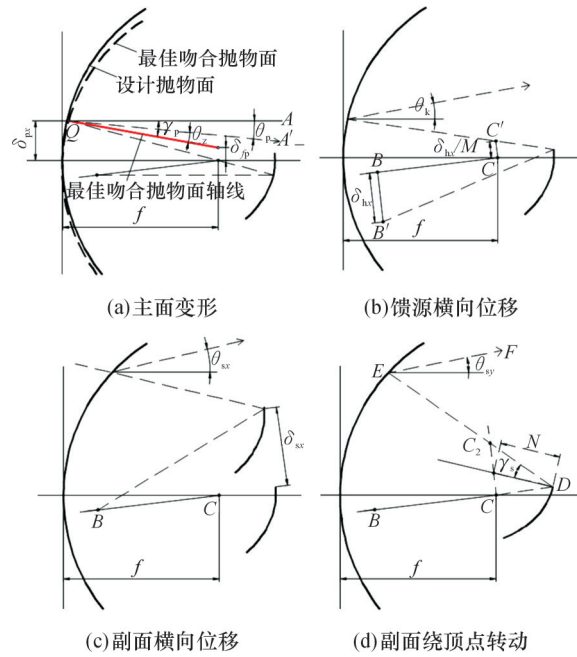


图 3 四项独立变形引起的指向误差

Fig.3 Pointing errors caused by four independent deformations

利天线的指向误差模型可表示为

$$\theta = (1 + K)\gamma_p - \frac{K\delta_{pr}}{f} + \frac{\delta_{br}K}{Mf} + \frac{\delta_{sr}(M-1)K}{Mf} - \frac{2N\gamma_s}{f} K \quad (26)$$

由式(26)可知, 双偏置格里高利天线与卡塞格伦天线的指向误差模型形式相似, 这主要源于两者同为反射面天线所具有的共同特性, 即通过主反射面和副反射面实现电磁波的聚焦与发射, 并且在数学建模上具有相似的光学路径设计。然而, 由于两种天线结构设计的差异, 参数  $M$  和  $N$  的含义有所不同。在卡塞格伦天线中,  $M = (c + a)/(c - a)$ ,  $N = c$ ; 而在双偏置格里高利天线中  $M = (a + c)/(a - c)$ ,  $N = a - c$ 。其中,  $a$  是副面的长半轴,  $c$  是副面的焦距。

### 1.7 误差模型验证

为了验证模型的正确性, 使用文献[14]中双偏置格里高利天线参数在 GRASP 软件中建立仿真分析模型, 假设天线主面顶点位移  $\delta_{pr}$  为 0.3 mm, 绕顶点旋转角度  $\gamma_p$  为 0.001°, 馈源横向位移  $\delta_{br}$  为 1 mm, 副面横向位移  $\delta_{sr}$  为 1 mm 以及副面绕顶点转动角度  $\gamma_s$  为 0.001°, 指向误差电磁计算结果依次为 31.73", 40.17", -79.37", 1.79", 4 种工况对应的远场方向如图 4 所示。

表 1 所示为该假定工况下基于电磁仿真及误差模型的指向误差评估结果, 相对误差小于 3.5%, 验证了模型的准确性。

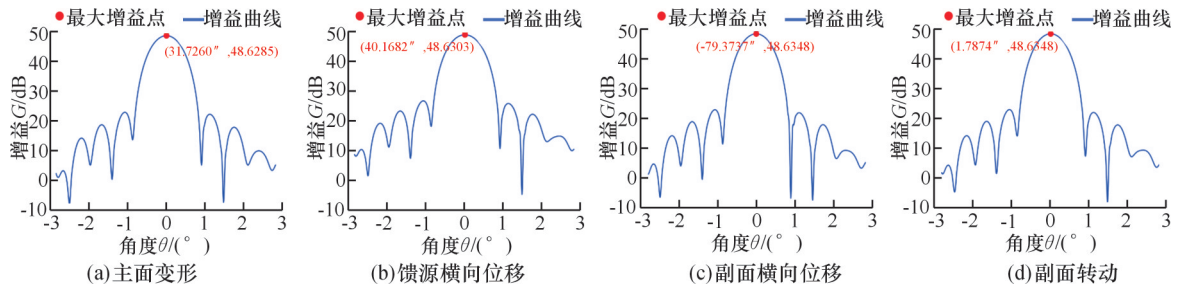


图4 4项独立变形下的天线方向图

Fig.4 Antenna radiation pattern under 4 independent deformations

表1 基于电磁仿真及误差模型的指向误差评估

Tab.1 Pointing error evaluation based on electromagnetic simulation and error model

	主面变形	馈源横向位移	副面横向位移	副面转动	综合指向误差
电磁仿真/(°)	31.73	40.17	-79.37	1.79	-5.69
误差模型/(°)	32.70	39.94	-80.24	1.73	-5.87
相对误差/%	3.06	0.57	1.10	3.35	3.07

2 随机风载下SKA天线的响应分析

2.1 模型构建及实验验证

2.1.1 计算域构建

考虑天线在不同姿态下的风向变化,建立了球形内部计算域模型。通过旋转计算域,即可快速生成不同方位角和俯仰角的天线模型,显著提高建模效率。以天线方位角0°、俯仰角15°为例,天线尺寸为长11.464 m、宽28.281 m、高15.74 m。根据文献[15],为避免阻塞效应对流场造成干扰,计算域尺寸设置为长427.5 m、宽97.5 m、高100 m。此时,天线距速度入口约7L,距出口约21L(L为天线的长度)。天线的计算域模型如图5所示。

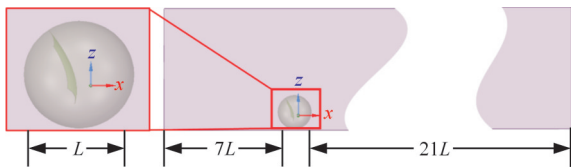


图5 天线计算域模型

Fig.5 Computational domain model of the antenna

基于文献[16],计算得到该天线的计算域模型阻塞率为4.47%。经验证,其余姿态亦满足阻塞率小于5%的要求。

2.1.2 风速建模

随机风由平均风和脉动风组成。平均风变化周期长,可以近似看作不随时间变化;而脉动风则变化周期短,幅值变化大。因此,在一定时间内,平均风只随高度变化,脉动风既随时间变化又随高度变化。一般以10 m高度处的风速为基本风

速,本节取基本风速为10 m/s,粗糙度指数取0.15,生成随高度指数变化的平均风。以Davenport谱为目标谱,采用谐波叠加法生成脉动风,并用空间相关函数来反映不同空间点处脉动风速间的相互影响程度,详细公式见文献[2]。随后,将平均风与脉动风叠加,形成随机风。如图6所示,完成风速入口的18个分区设置,假设各分区内的脉动风速分布在空间上是均匀的,即与Y和Z坐标无关,仅随时间变化。图7展示了18个区域中心点的随机风速时程图,可以看出,各分区的风速波动趋势各不相同,这表明脉动风在18个分区的空间分布差异性。

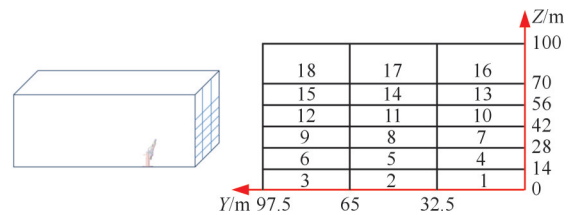


图6 风速入口分区

Fig.6 Wind speed inlet zoning

2.1.3 实验验证

拟选用SSTk-w湍流模型进行数值模拟,为验证CFD方法的有效性,对SKA天线的缩聚模型进行风洞实验。根据已有风洞的研究资料[17-18],模型的缩聚比为1:500,考虑到流场相似性,风速设置为4 m/s。采用流场稳定段某截面风速作为验证指标,对比缩聚模型的仿真结果与实验数据。

对缩聚模型进行数值模拟时,将方位角0°、俯仰角15°时的SKA天线缩小500倍,计算域采用六面体或多面体核心网格,平均质量为0.92,最大偏斜率为0.94,网格质量良好。天线表面风压分布及周围速度场分布如图8和图9所示。

由图8a可以看出,天线迎风面主要承受正压,最大值约11.99 Pa。图8b显示了天线背风面的风压分布,大部分区域压力在-6.69~-2.02 Pa之间。图9表明,迎风面气流速度减小,背风面气流速度增加,根据伯努利原理,迎风面压力升

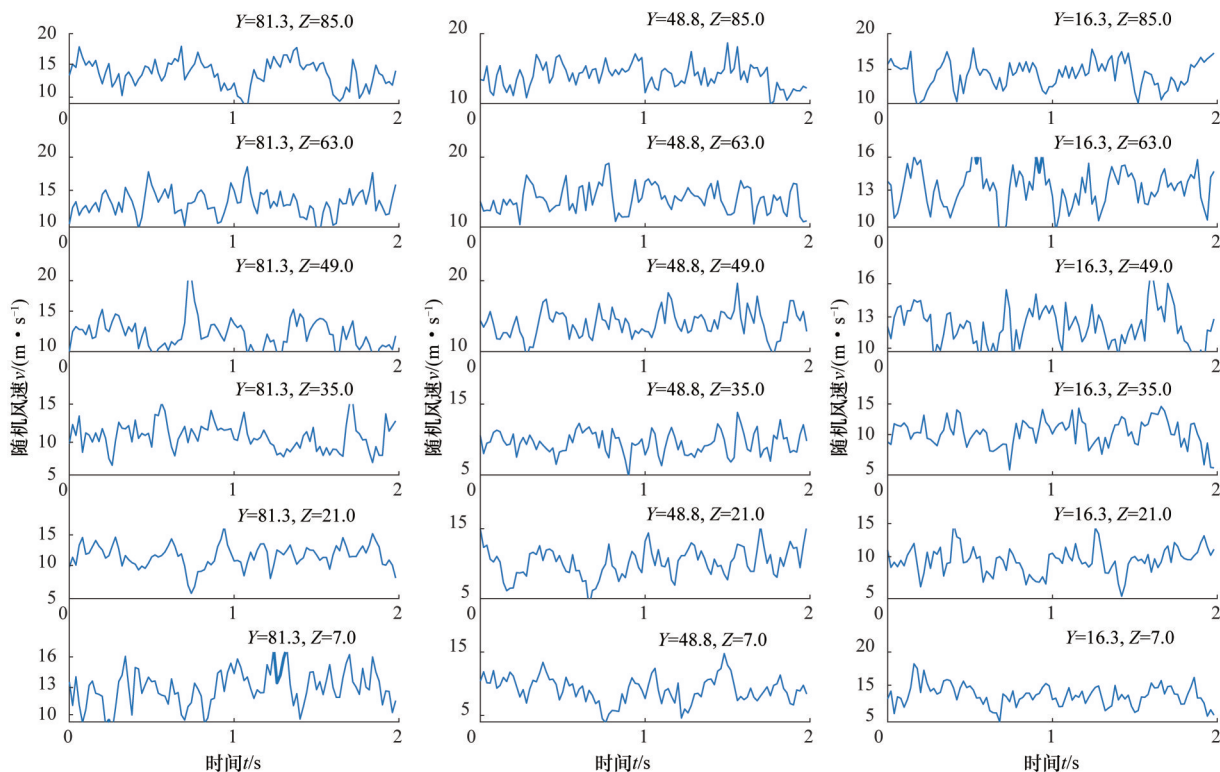


图7 随机风速时程图

Fig.7 Random wind speed time history

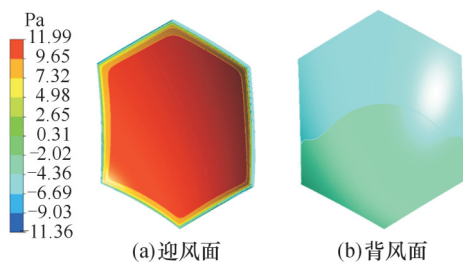


图8 天线风压分布

Fig.8 Wind pressure distribution on the antenna

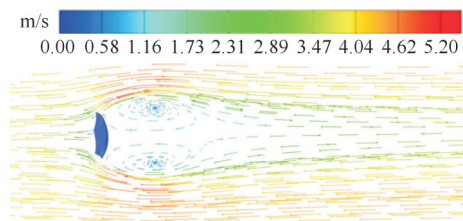


图9 4 m/s 风速下的流线图

Fig.9 Streamline diagram at a wind speed of 4 m/s

高,背风面压力降低。因此,图9所示速度场分布可以明确地解释图8中迎风面和背风面的压力分布成因。此外,天线两侧气流速度较高,表明在近壁处发生了绕流效应,降低了近壁处的压力,甚至形成局部负压。

小型风洞设备如图10a所示,其风速范围为0~20 m/s,可通过变频器调节。风洞全长1.91 m,实验段尺寸为长855 mm、宽195 mm、高200 mm。为满足模型的打印要求,对背架适当简化,简化后

的尺寸为长23.32 mm、宽31.88 mm、高56.76 mm,其实物如图10b所示。

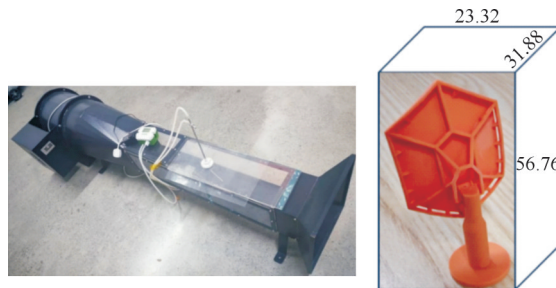


图10 风洞实验设备及天线模型

Fig.10 Wind tunnel experimental equipment and antenna model

如图11所示,在高度 $h$ 为40,45,50,55,60,65,70,75,80 mm处(图中黄线,且长度为45 mm)各均匀布置10个测点,共90个测点,用直径6 mm的皮托管风速仪测出90个点的风速,并拟合生成风速云图。

图12为截面风速分布云图,其中图12a为仿真生成的风速分布云图,最大风速为4.92 m/s。图12b为实验生成的风速分布云图,最大风速为4.58 m/s。两者最大风速的误差为7.42%,在10%以内<sup>[19]</sup>,因此可认为选取的CFD方法有效。

## 2.2 风压评估

边界条件设置如下:入口为速度入口,通过

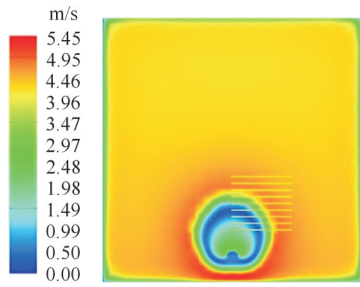


图 11 测点示意图

Fig.11 Schematic diagram of measurement points

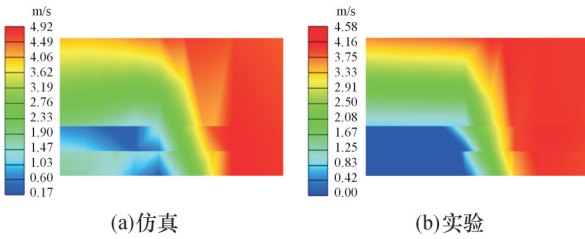


图 12 截面风速分布云图

Fig.12 Contour of wind speed distribution in the cross-section

udf将生成的随机风速与求解器建立数据通信;出口为压力出口,壁面为无滑移壁面。选择SST  $k-\omega$  湍流模型以准确获取天线主面的风压。计算过程中,监测控制方程的迭代残差和关键点风速,当迭代残差小于 $1 \times 10^{-3}$ 且关键点风速稳定时,计算收敛。设置迭代次数为100次,时间步长为0.02 s,最大迭代数为20步,报告间隔为5,Profile数据更新间隔为5,开始计算。

天线主面在4个时间节点下的风压如图13所示。在 $t=0.5$  s时,迎风面的压力分布较均匀,整体为正压,背风面呈现出低压区域,但变化幅度较小。随着时间推移,在 $t=1$  s和 $t=1.5$  s时,迎风面压力开始下降并出现显著的负压区域,背风面的低压区域范围明显扩大且强度加深,特别是在背风面两侧和顶端,涡流效应逐渐增强,形成更复杂的压力分布区域。在 $t=2$  s时,迎风面压力恢复至正压,背风面仍存在一定的压力梯度。

### 2.3 响应评估

以2.2节计算得到的风压作为载荷输入,求解天线结构的变形量,为后续指向误差的分析提供基础数据支持。图14展示了4个时间节点下的轴向变形云图。可以看出,天线的变形分布呈现出一定的规律性,其中边缘区域的结构较为柔软,因此变形较为显著。顶部受风载荷影响较大,始终是变形最为明显的区域,且沿轴向正方向变形。底部支撑结构承受部分副面重力,也出现较为显著的变形,变形方向沿轴向负方向。相比之下,中央区域由于背架支撑能力较强,变形相对较小。

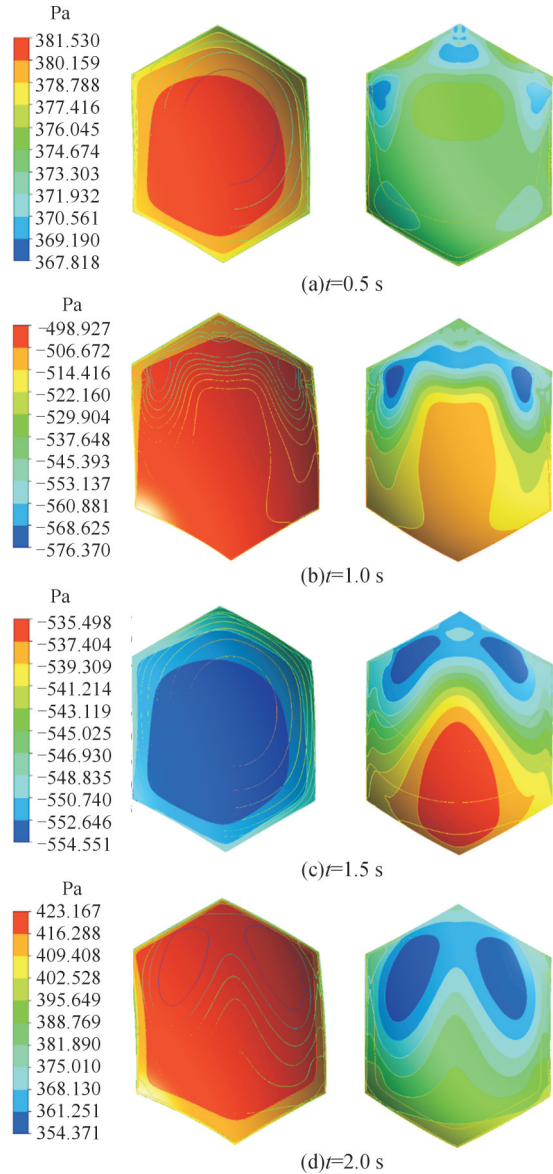


图 13 迎风面(左图)和背风面(右图)风压

Fig.13 Wind pressure on the windward side (left) and leeward side (right)

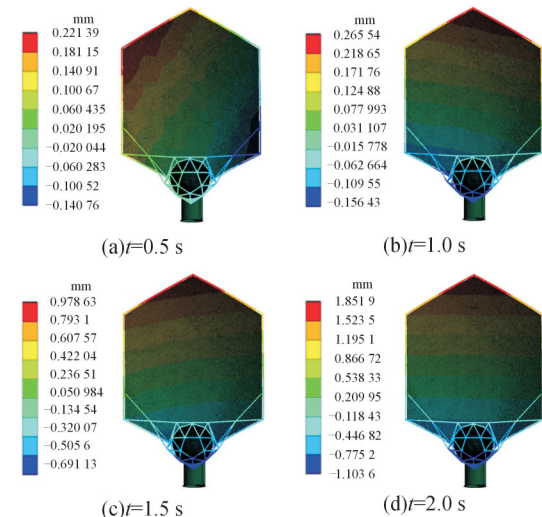


图 14 不同时刻下的轴向变形云图

Fig.14 Axial deformation contour at different time

### 3 随机风载下SKA天线的指向误差分析

针对所研究的SKA天线,本节基于建立的误差模型及获得的变形数据对其指向误差进行评估。SKA双偏置格里高利天线的具体参数为:主面口径15 m,主面焦距5.4 m,副面口径5 m,主面轴线跟副面轴线偏置角48.1°,锥销电平-20 dB,选用的频率为3 GHz。由第2节可获得天线在OXZ面下的主面偏移 $\delta_{pr}$ 、转动 $\gamma_p$ ,馈源横向偏移 $\delta_{hr}$ ,副面横向偏移 $\theta_{sr}$ 、转动 $\gamma_s$ ,图14对应的具体变形工况如表2所示。

表2 SKA不同时刻的变形工况

Tab.2 Deformation conditions of SKA at different time

不同时刻	$\delta_{pr}/\text{mm}$	$\gamma_p/(\text{°})$	$\delta_{hr}/\text{mm}$	$\theta_{sr}/\text{mm}$	$\gamma_s/(\text{°})$
0.5 s	0.1525	0.001 128 9	0.3043	0.4678	0.001 058 7
1.0 s	0.4693	0.002 287 8	1.3536	2.0227	0.003 119 7
1.5 s	0.3072	0.001 495 3	1.0791	1.5951	0.002 960 6
2.0 s	0.2424	0.001 257 2	0.6385	0.9637	0.001 463 0

根据SKA天线的具体参数及表2的变形数据,计算得到指向误差分别为2.19",7.32",6.50",13.17"。为探究随机风对天线指向误差的影响,图15展示了SKA天线方位角为0°、俯仰角为15°时指向误差的绝对值随基本风速的变化趋势。由于脉动风的波形保持不变,不同基本风速下指向误差的波形趋势也表现出相似性。此外,当基本风速较小,指向误差也较小。

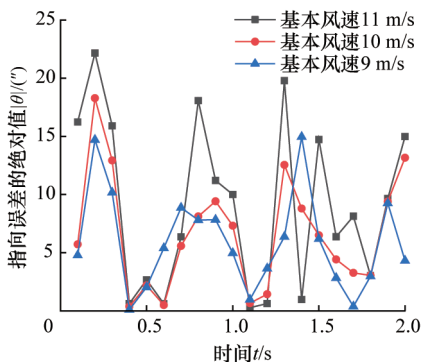
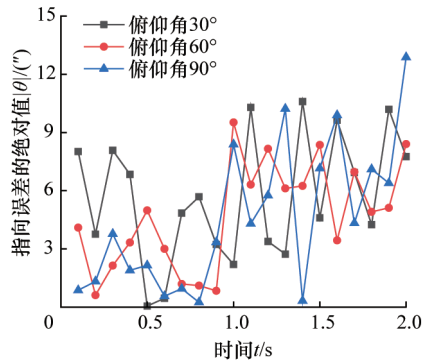


图15 不同基本风速下天线指向误差绝对值

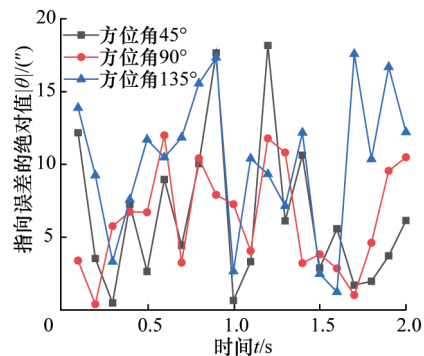
Fig.15 Absolute value of antenna pointing errors for different basic wind speeds

为进一步探究天线姿态对指向误差的影响,图16展示了基本风速为10 m/s时天线不同姿态下的指向误差。图16a展示了方位角为0°时,俯仰角分别为30°、60°和90°3种姿态下的指向误差。结果表明,当俯仰角为30°时,天线的迎风面积最大,因此指向误差较大。图16b展示了俯仰角为15°时,方位角为45°,90°,135°3种姿态下的指向误差。当方位角为90°时,天线的迎风面积最小,

因而指向误差较小。上述分析揭示了不同随机风载和不同姿态下天线指向误差的变化规律,并为天线的指向误差补偿提供理论指导。



(a)方位角为0°,不同俯仰角下的天线指向误差绝对值



(b)俯仰角为15°,不同方位角下的天线指向误差绝对值

图16 不同姿态下天线指向误差绝对值

Fig.16 Absolute value of antenna pointing error for different attitudes

### 4 结论

1)双偏置格里高利天线与卡塞格伦天线的指向误差公式在形式上相似,有助于构建统一的理论框架,使研究者能够借助卡塞格伦天线中较为成熟的误差补偿方法,快速有效地提高双偏置格里高利天线的性能。通过电磁仿真验证模型的准确性和适用性,结果表明,电磁仿真和指向误差模型评估结果的相对误差小于3.5%,即所建指向误差模型能够准确预测双偏置格里高利天线的指向误差。

2)基于该指向误差模型进一步研究了随机风载对SKA天线的影,分析了随机风载下天线结构的变形情况,并揭示了不同风速和不同姿态下天线指向误差的变化规律,结果表明,SKA天线的指向误差随迎风面积和基本风速的增大而增大,为后续SKA天线指向误差的补偿提供了重要的理论支持。

3)本文使用的随机风速数据为理论生成,未来可进一步引入真实环境中的风场数据,以增强研究的实用性。同时,指向误差模型的验证主要

基于仿真评估,后续可以结合实际工程数据,进一步验证其工程适用性和可靠性。此外,可以收集更多的CFD模拟和实测数据,构建代理模型,利用神经网络和支持向量机等方法,快速预测不同工况下的响应和指向误差。

参考文献:

[1] 严粤飞,王从思,李帅,等.大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2022,52(12):5-22.  
YAN Yuefei, WANG Congsi, LI Shuai, et al. Development of Large-aperture Radio Telescopes and Applications of Coupled Structural-electromagnetic Theory[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2022, 52(12): 5-22.

[2] 季熠.雷达天线风载特性的数值分析方法研究[D].南京:东南大学,2020.  
JI Yi. Research on Numerical Analysis Method of Wind Load Characteristics of Radar Antenna [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.

[3] WANG Congsi, DUAN Baoyan, ZHANG Fushun, et al. Analysis of Performance of Active Phased Array Antennas with Distorted Plane Error [J]. International Journal of Electronics, 2009, 96(5): 549-559.

[4] HASHIMOTO I, CHIBA M, OKADA N, et al. Wind and Operation-induced Vibration Measurements of the Main Reflector of the Nobeyama 45m Radio Telescope[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020, 8(6): 909-923.

[5] 栾天,薛松,连培园,等.环境风荷载下大口径反射面天线波束指向分析[J].工程设计学报,2024,31(1):98-106.  
LUAN Tian, XUE Song, LIAN Peiyuan, et al. Analysis of Beam Pointing of Large Aperture Reflector Antenna under Ambient Wind Load[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(1): 98-106.

[6] 付丽,王宇飞,钱宏亮.平均风作用对天马望远镜面形精度和指向精度的影响[J].天文学进展,2019,37(2):187-202.  
FU Li, WANG Yufei, QIAN Hongliang. The Effect of Mean Wind Power on Antenna Surface Accuracy and Pointing Accuracy of the Tian Ma Telescope[J]. Progress in Astronomy, 2019, 37(2): 187-202.

[7] 杜强.雷达天线风载特性的数值计算方法及应用研究[D].成都:电子科技大学,2011.  
DU Qiang. Research and Application on Numerical Method for Characteristic Computation of Wind Loads on Radar Antennas[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.

[8] 易邱寒.相控阵天线电性能有限元仿真与不确定性分析[D].长沙:湖南大学,2020.  
YI Qiuhan. Finite Element Simulation and Uncertainty Analysis of Electrical Performance of Phased Array Antenna [D]. Changsha: Hunan University, 2020.

[9] 魏善祥,王启明,孔德庆,等.大型双反射面天线指向误差评估算法[J].天文研究与技术,2020,17(4):513-521.  
WEI Shanxiang, WANG Qiming, KONG Deqing, et al. Algorithm for Estimating Pointing Error of Large Dual-reflector Antenna[J]. Astronomical Research & Technology, 2020, 17(4): 513-521.

[10] BAN You, WANG Congsi, FENG Shufei, et al. B-spline Surface Fitting and Simplified GO/PO Analysis of Subreflector Correction for Large Cassegrain Antenna Distortion

Compensation[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2018, 18(7): 79.

[11] 涂标.大型射电望远镜基于节点温度热致指向误差补偿研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.  
TU Biao. Research on Thermal-induced Pointing Error Compensation for Large Radio Telescopes Based on Node Temperature[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.

[12] ZHANG Jie, HUANG Jin, QIU Lili, et al. Analysis of Reflector Vibration-induced Pointing Errors for Large Antennas Subject to Wind Disturbance: Evaluating the Pointing Error Caused by Reflector Deformation[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(6): 46-61.

[13] BAARS J W M, SPRINGERLINK. The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication [M]. New York: Springer New York, 2007.

[14] 金莉.双反射面天线的波束扫描和赋形研究[D].西安:西安电子科技大学,2011.  
JIN Li. Study on the Scanning and Shaped Beam of the Dual-reflector Antennas[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.

[15] 王春圆.巨型射电望远镜风荷载特性的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
WANG Chunyuan. Numerical Simulation Study on Characteristics of Wind Loads of Huge Radio Telescope[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[16] 张学敏.桥梁风效应数值模拟研究[D].长沙:湖南大学,2014.  
ZHANG Xuemin. Numerical Simulation Research of Wind Effects on Bridges[D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[17] 周亚萍.高层建筑风效应风洞实验研究[D].长沙:湖南大学,2016.  
ZHOU Yaping. Study of Wind Effects on Tall Buildings by Wind Tunnel Test [D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[18] 贾娅娅.海上风力机运行与台风气动性能及尾流场特性研究[D].天津:天津大学,2017.  
JIA Yaya. Study of the Aerodynamic Characteristics and Wake Flow of the Offshore Wind Turbine under the Operational States and Typhoon States [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

[19] 邵伦海,张胜,刘毛方,等.大跨度体育场风效应的大涡模拟及风洞实验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(4):570-576.  
ZHI Lunhai, ZHANG Sheng, LIU Maofang, et al. Study of Wind Effect on a Large-span Gymnasium Based on Large Eddy Simulation and Wind Tunnel Test[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2024, 47(4): 570-576.

(编辑 王昱玥)

作者简介:刘慧姗,女,2002年生,硕士研究生。研究方向为可靠性分析。E-mail: 202221202060@stu.hebut.edu.cn. 陶友瑞\* (通信作者),男,1973年生,教授、博士研究生导师。研究方向为可靠性分析。E-mail: taoyourui@hebut.edu.cn.

本文引用格式:

刘慧姗,裴佳星,吴锦辉,等.随机风载下双偏置格里高利天线指向误差建模与应用[J].中国机械工程,2026,37(3):595-603.  
LIU Huishan, PEI Jiaying, WU Jinhui, et al. Modeling and Applications for Pointing Errors of Dual-offset Gregorian Antenna under Random Wind Loads[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3):595-603.