中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 299509
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 高频段大口径射电望远镜设计与观测专题

基于分区风力系数预测的百米级大口径反射面天线风扰响应分析与指向控制

薛松[1,2*], 廖志康[1,2], 栾天[1,2], 孔德庆[3], 许谦[4], 王从思[2]

1. 西安电子科技大学, 高性能机电集成制造全国重点实验室, 西安 710071
2. 西安电子科技大学广州研究院, 广州 510555
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
4. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011
*联系人, E-mail: sxue@xidian.edu.cn

收稿日期: 2025-10-28; 接受日期: 2026-02-02; 网络出版日期: 2026-06-08
国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203600)和国家自然科学基金(编号: 52475278, 52275268, U25A20300)资助项目

摘要 百米级大口径反射面天线是指其主反射面的直径达到数百米量级, 是地球上最大的全可动单体工程结构之一, 在引力波探测、深空通信和脉冲星导航系统中发挥重要作用. 为不断提升观测性能和分辨率, 天线口径不断扩展, 对指向精度的要求也随之愈发严格. 然而, 大口径化带来结构刚度降低与风载扰动加剧的问题, 致使天线产生显著柔性变形, 波束指向误差显著上升, 严重制约其性能发挥. 针对上述问题, 本文建立了面向随机风扰输入的大口径反射面天线刚柔耦合动力学模型, 深入刻画风扰引起的柔性模态响应及其对波束偏移的影响机制. 进一步, 提出了一种融合主动结构控制与波束指向补偿的协同控制方法. 构建了高精度分区域风载荷预测模型, 并将其作为扰动输入耦合至控制系统, 实现仿真驱动下的性能验证. 在风扰条件下, 所提方法显著提升了天线指向精度与系统鲁棒性, 为大型天线系统在复杂环境下的稳定运行提供了理论支撑与工程手段.

关键词 反射面天线, 刚柔耦合, 随机风扰载荷, 波束指向补偿

PACS: 84.40.Ba, 07.05.Dz, 07.05.Tp, 43.40.Hb

1 引言

随着深空探测、卫星通信和射电天文的快速发展, 大口径反射面天线作为核心观测设备, 其结构尺寸与工作频段不断提升. 波束指向精度是衡量天线性能的关键指标, 直接影响目标捕获能力、信号质量以及系统总体效能[1]. 然而, 随着天线口径增大, 结构刚度降低、迎风面积显著增大, 天线在服役过程中更易受到随机风载等环境激励, 从而产生柔性变形与结构振动, 引发电性能衰减, 严重制约观测精度与运行稳定性. 因此在复杂随机风场中保证百米级天线的高精度指向, 已成为结构与控制领域亟待解决的关键问题.

引用格式: 薛松, 廖志康, 栾天, 等. 基于分区风力系数预测的百米级大口径反射面天线风扰响应分析与指向控制. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 299509
Xue S, Liao Z, Luan T, et al. Wind-induced response analysis and pointing control of a hundred-meter-class large-aperture reflector antenna based on zonal wind load coefficient prediction (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 299509, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0494

© 2026《中国科学》杂志社

在工程实践中，研究人员已尝试多种减轻风扰的途径，包括结构优化、主动反射面、外罩保护以及先进控制策略. 澳大利亚64 m帕克斯射电望远镜通过采用内实外网的反射面结构有效减小迎风面积，但高频性能受限[2,3]；墨西哥50 m大型毫米波望远镜(LMT)采用封闭式高刚度结构并配置促动器补偿重力和温度变形, 但天线重量较大[4,5]; 美国110 m × 100 m绿岸射电望远镜(GBT)利用2209个促动器实时补偿风扰，但受风的随机性影响, 补偿效果有限[6]; 上海65 m天马望远镜同样采用主动面技术，提升了高风速下的指向精度, 但面临促动器成本高和可靠性不足的问题[7,8]. 班友等人[9]在QTT 110 m天线研究中将简化促动器显式引入主反射体有限元模型, 实现了结构-促动器一体化建模与高精度主动调整分析，但其载荷工况仍主要集中于重力作用下的结构变形问题，对随机风扰诱发的动态柔性响应尚未涉及. 我国天津武清70 m天线(GRAS-4)通过采用LQG (Linear Quadratic Gaussian)伺服控制算法有效抑制风扰, 指向精度达到3.5″[10]; 总体而言，结构优化、主动反射面与先进控制策略的结合已成为提升大口径天线抗风扰性能的主要发展方向. 然而, 现有技术仍受限于系统重量、造价、维护复杂性及柔性响应不足等问题，难以满足百米级天线在复杂风场下的极高精度需求.

风扰作为影响大口径反射面天线稳定性和指向精度的主要外部扰动，具有明显的随机性、非定常性和空间分布不均匀性. 它不仅对反射面施加静态载荷, 还可能激发多阶柔性模态响应，表现出显著的刚柔耦合特性. 传统风载建模与响应预测主要依赖理论分析、风洞试验、现场测量和计算流体动力学(CFD)仿真等方法. 例如，龚振邦[11]提出的风荷载曲线模型和Cohen等人[12]对抛物面结构的风压分析为早期工程应用提供了支持; 美国航空航天(NASA)于1978年对反射面开展了大量风洞试验[13]，Liu等人[14]则率先利用FLUENT软件进行CFD仿真，获得反射面平均风压分布. 这些方法为风载数据积累提供了支撑，但受限于简化假设、模型尺度、边界效应和试验代价，难以全面反映复杂风场、非线性效应及多模态耦合响应.

天线伺服系统通常采用PID (Proportional-Integral-Derivative)或PI (Proportional-Integral)控制器作为基本控制结构. 随着天线口径的增大和运行环境的复杂化, 传统控制方法在动态响应和抗风扰能力方面逐渐暴露出局限性. 为此, 研究人员在经典控制框架基础上引入多种高性能伺服算法，以提升系统的稳定性与指向精度，并在工程实践中取得了良好效果[15]. 在国外研究中，美国喷气推进实验室率先在NASA深空探测网34 m天线上应用LQG控制器，在10 m/s风扰条件下将伺服误差控制在1″以内，显著提高了抗扰性能[16]. 随后，模糊控制与扩展状态观测器(ESO)方法被引入伺服系统设计, 可有效降低超调量并增强系统鲁棒性[17]; Gawronski和Souccar[18]提出的LQG-LQG复合控制方案进一步改善了动态精度；而H_∞与模型预测控制(MPC)算法在复杂风场下表现出更优的稳态性能与成像质量. 国内学者亦在该领域取得重要进展. 天津武清70 m天线采用LQG算法实现抗风扰控制，指向精度达到设计要求[19]；南开大学与东南大学分别基于ESO和H_∞控制理论优化伺服系统, 在高风速条件下显著提升了跟踪精度与系统稳定性[20]. 总体来看，尽管传统伺服算法具有结构简单、实现方便等优点，但其在强随机风扰作用下难以满足百米级天线的超高精度需求. 发展面向复杂风场的鲁棒控制及结构-控制一体化设计, 已成为未来大口径天线控制系统的主要发展方向.

在此背景下，基于统一建模与协同控制的风扰补偿方法逐渐受到关注. 目前多数天线控制方法仍以刚体模型为基础，难以有效刻画风扰诱发的柔性响应及其对波束指向精度的影响. 因此，亟需面向柔性变形特性建立考虑风扰输入的刚柔耦合动力学模型，并发展具备结构-控制一体化能力的主动控制策略与指向补偿算法. 近年来, 国内外学者围绕机电耦合建模、波束误差修正以及结构/热/风扰补偿开展了大量研究. 例如，薛松等人[21]提出融合机电热多场分析与形面重构的调控框架, 显著提升了复杂工况下的系统鲁棒性; 严粤飞等人[1]系统分析了结构误差、馈源位移与风扰模态响应对天线指向控制的耦合影响，推动了多模态精密控制的发展; Smith等人[22]在DSN (Deep Space Network) 70 m天线上采用观测器-前馈联合控制，将10 m/s阵风下的RMS (Root Mean Square)指向误差由95″降至18″；而Hashimoto等人[23]的实测结果表明, NRO (Nobeyama Radio Observatory) 45 m天线在8 m/s风速下主反射面RMS位移仍高达0.4 mm. 这些成果验证了风扰主动补偿的可行性，但仍存在载荷模型空间分布与时变性描述不足、振动抑制与波束控制分离设计，以及缺乏面向百米级望远镜且经多工况验证的综

合方案等问题.

基于上述研究现状与工程需求，本文以新疆QTT 110 m射电望远镜为研究对象，针对其在强随机风扰下结构柔性响应显著、波束指向精度下降的问题，构建了分区风压驱动的刚柔耦合模型，并提出一种融合主动控制与波束补偿的协同控制策略. 该方法基于模态分析提取关键柔性动态特征，设计双层控制机制，实现结构振动抑制与实时指向校正. 仿真分析验证了该方法在随机风扰下的鲁棒性与有效性，为大口径反射面天线在复杂环境中的高精度观测提供了理论基础和技术支撑.

2　研究内容与技术路线概述

本文针对百米级大口径反射面天线在复杂风场下易产生柔性变形、导致波束指向精度下降的问题，构建了从风载预测到协同控制的系统研究流程(图1). 首先，基于CFD仿真获取不同姿态条件下的反射面风压数据，结合极坐标分区方法建立多区域风力分布模型，并利用CNN-Attention-LSTM神经网络实现多姿态、多风向下风载系数的高精度预测，为动力学分析提供实时的风扰动输入；其次，建立考虑柔性变形特性的刚柔耦合动力学模型，通过模态分析提取关键振型，揭示随机风扰诱发的结构响应机理及其对波束漂移的影响；随后，基于物理光学理论与坐标变换方法，构建反射面形变与波束指向误差的数学映射模型，提出实时波束补偿算法，实现风致偏差的动态修正；接着，在ADAMS-Simulink联合仿真环境中设计包含位置、速度与电流多环的伺服控制系统，将风扰预测与刚柔模型协同耦合，实现结构-控制一体化的动态响应与补偿控制；最后，通过多工况仿真对比不同控制策略的性能，验证本文所提神经网络预测与刚柔耦合协同控制方法能显著降低稳态偏差与波束增益损失，提升系统鲁棒性与高精度跟踪能力，为超大口径天线在强风扰环境下的稳定运行提供理论依据与工程支撑

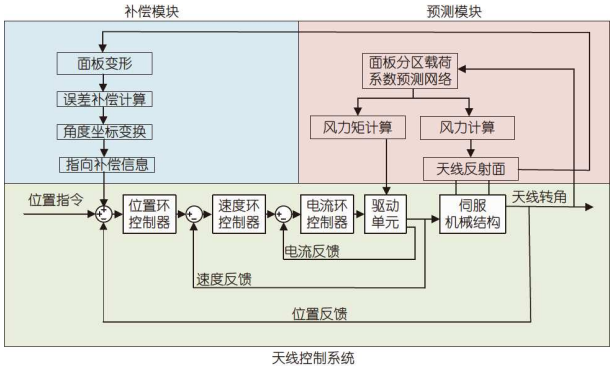


图 1　百米级大口径反射面天线风扰补偿控制系统总体框图

Figure 1　Overall block diagram of the wind disturbance compensation control system for a 100-m-class large-aperture reflector antenna.

3　大口径反射面天线风荷载特征分析

3.1　天线风载荷数值求解

脉动风速建模通常采用频谱反演的时域模拟方法. 在风工程研究中，常用的经验功率谱模型包括Davenport, Kaimal及Harris谱，其中Davenport谱因其物理解释性强与适应性广被广泛应用于水平风分量建模，其公式如下所示[24]:

$$S_v(\omega) = 4800 v_m k \frac{\beta\omega}{(1+\beta^2 w^2)^{4/3}}, \tag{1}$$

其中，w是脉动风的频率，k是地表阻力系数，v_m是平均风速，β=600/(πv_m)，k=1/(2.5ln(z/z_0))^2，z是天线所在高度，z_0是标准高度. 采用基于FFT (Fast Fourier Transform)技术的谐波叠加方法生成的风速谱与目标谱如图2所示[25]. 通过对比可见，两者在整体趋势上高度一致，表明模拟结果具有良好的精度与可信度.

基于风场模型，考虑反射面-背架尺度差异及姿态变化，本文借鉴Wyatt[26]的做法，仅对反射面建模；固定姿态、改变来流风向，对方位0°–180°（间隔10°)与俯

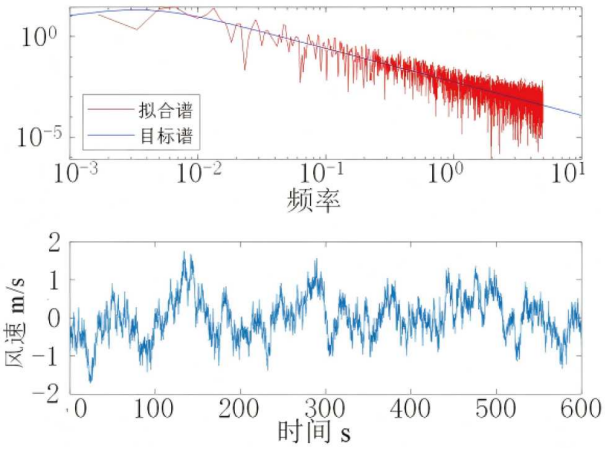


图 2　基于FFT的谐波叠加法模拟的风谱与目标谱

Figure 2　Simulated wind spectrum and target spectrum based on the FFT harmonic superposition method.

仰0°–90°（间隔5°)组合开展CFD计算. 为抑制阻塞效应, 计算域按阻塞率≤3%设置为: 上游$L_1 = 5D$、下游$L_2 = 15D$、宽度$B = 12D$、高度$H = 8D$ (D为面板直径)(图3), 根据文献[27]计算域尺寸:

$$\gamma = \frac{\pi(D/2)^2}{B \cdot H} \times 100\% = 0.8\% < 3\%. \tag{2}$$

SST (Shear Stress Transport)模型对近壁模拟精度较好, 采用该湍流模型对问题进行求解. 动能k、湍流耗散率、比湍流耗散率由式(3)计算得到:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2}{3}(u_z T_i)^2, \\ \varepsilon &= C_\mu^{3/4}\frac{k^{3/2}}{l}, \\ \omega &= \frac{\varepsilon}{kC_\mu}. \end{aligned} \tag{3}$$

经仿真计算后, 利用CFD-POST软件统计每个位姿下反射面的阻力F_d、侧向力F_s和升力F_l. 假设风的方向在笛卡儿坐标系中为水平指向X轴, 那么望远镜在X, Y和Z轴受到的力分别称为阻力F_l、侧向力F_s和升力F_l, 力指向每个轴正方向时取正值. 方位角θ和俯仰角β共同确定反射面迎风姿态(θ, β).

3.2　基于神经网络的风荷载系数预测模型建立

本文构建了一种基于CNN-Attention-LSTM的深度神经网络模型, 用于预测复杂风力分布(图4). 模型整体由卷积层、注意力机制、LSTM网络及全连接层组成, 最终输出各区域的风载荷系数预测值. 首先, 在特征提取阶段, 将风压分布图、方位角与俯仰角等原始数据输入卷积神经网络(CNN), 通过多层卷积与池化操作提取局部空间特征, 形成具有空间模式表达能

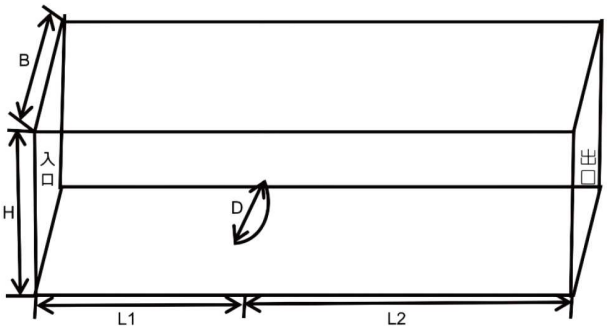


图 3　计算域尺寸. $L_1 = 5D$, $L_2 = 15D$, $B = 12D$, $H = 8D$
Figure 3　Computational domain dimensions. $L_1 = 5D$, $L_2 = 15D$, $B = 12D$, $H = 8D$.

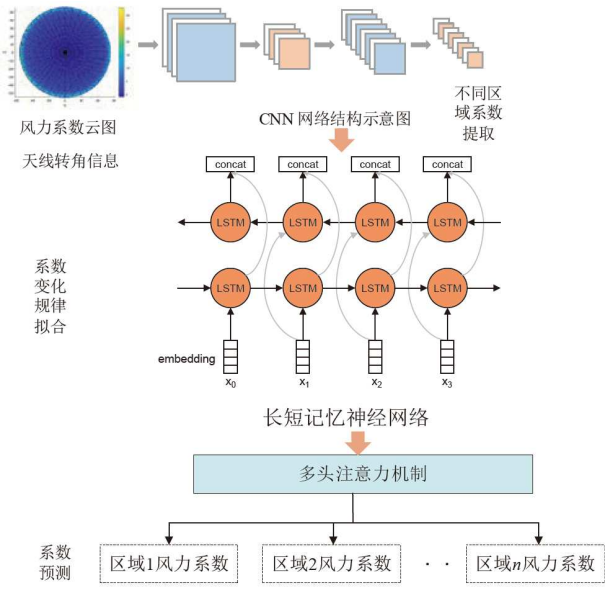


图 4　神经网络模型结构图
Figure 4　Structure diagram of the neural network model.

力的高维特征图. 其次, 进入时序建模阶段, 提取的空间特征序列被输入至双向长短期记忆网络(BiLSTM), 该网络能够同时捕捉时间序列中前向与后向的动态变化规律, 从而充分建模风载荷的时序依赖关系. 最后, 在特征强化阶段, 引入多头注意力机制(Multi-Head Attention Mechanism), 对不同时间步与空间区域的重要性进行动态加权, 以突出关键特征、抑制冗余信息, 从而提升模型对复杂时空耦合关系的学习能力. 整体模型实现了从局部空间特征提取到关键特征强化的有机融合, 有效提升了多变量序列预测的精度, 为复杂风载荷分布的高精度预测提供了可靠的深度学习框架.

本文基于CFD仿真生成不同方位角与俯仰角组合下的风力数据, 并通过极坐标划分方法将反射面离散为若干同心圆环与扇形区域, 如图5所示, 其中反射面被具体划分为10个同心环区和24个方位扇区, 以便更精细地描述风载荷的空间分布特性, 提取各区域的风力响应. 通过统计各区域风力总和及面积, 计算得出阻力系数、侧向力系数与升力系数等无量纲力学指标, 为神经网络提供高质量训练样本.

每个区域总风力与面积分别按以下方式计算:

$$F_j = \sum f_k, \tag{4}$$

$$A_j = \frac{1}{2}\Delta\theta(r_{\max}{}^2 - r_{\min}{}^2), \tag{5}$$

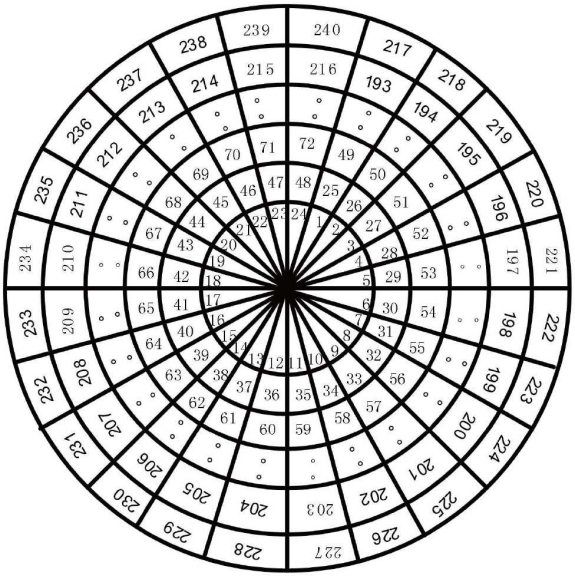


图 5　面板编号示意图
Figure 5　Schematic diagram of panel numbering.

其中, F_j表示第j区域内的风力, f_k表示区域内第k个测点的风力值, A_j表示第j个扇形区域的面积, 其中$r_{\min}$和$r_{\max}$分别为当前区域的内半径和外半径, $\Delta\theta$为每个扇形的角度宽度(以弧度为单位).

为了提高研究结果的通用性, 并确保其不受风速和反射面口径的变化影响, 将每个区域的力系数转换成无量纲的系数, 即阻力系数CF_d、侧向力系数CF_s和升力系数CF_l. 这种转换是通过式(6)–(8)完成的:

$$CF_{dj}=\frac{F_{dj}}{0.5\cdot\rho\cdot A_j\cdot v^2}, \tag{6}$$

$$CF_{sj}=\frac{F_{sj}}{0.5\cdot\rho\cdot A_j\cdot v^2}, \tag{7}$$

$$CF_{lj}=\frac{F_{lj}}{0.5\cdot\rho\cdot A_j\cdot v^2}, \tag{8}$$

其中, CF_{dj}, CF_{sj}和CF_{lj}分别为第j分区的阻力系数、侧向力系数和升力系数, F_{dj}, F_{sj}和F_{lj}分别为第j分区受到的阻力、侧向力和升力, 式中ρ为空气密度(ρ=1.225 kg/m^3), v为计算域入口速度, A_j为第j分区的面积.

以方位角和俯仰角为输入, 输出各区域的风载荷系数. 通过仿真采集不同角度组合下的数据, 并进行归一化处理后输入模型. 卷积层提取局部特征, 注意力机制突出关键时刻信息, LSTM层建模时间依赖, 最终通过全连接层输出预测结果. 模型在训练集上优化参数, 并在测试集上进行性能验证, 实现对风载荷的准确预测.

3.3　风载荷系数预测效果与模型性能分析

本文以方位角为10°、俯仰角为18°的天线姿态为研究对象进行风载荷系数的预测. 图6–9为预测值与仿真值的对比.

模型预测结果显示, 阻力系数、升力系数、侧向力系数、力矩系数的相对误差绝对平均值分别为0.073, 0.071, 0.085和0.058, 均在可接受范围内. 尽管在(10°, 18°)工况下有些区域的系数的相对误差较大, 但

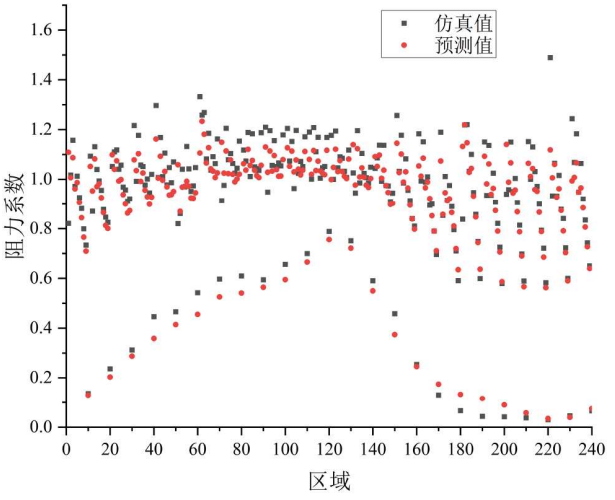


图 6　阻力系数预测值与仿真值的对比图
Figure 6　Comparison of predicted and simulated drag coefficient values.

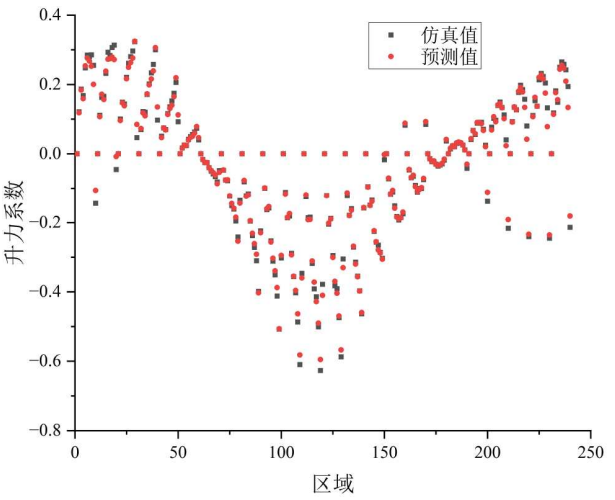


图 7　升力系数预测值与仿真值的对比图
Figure 7　Comparison of predicted and simulated lift coefficient values.

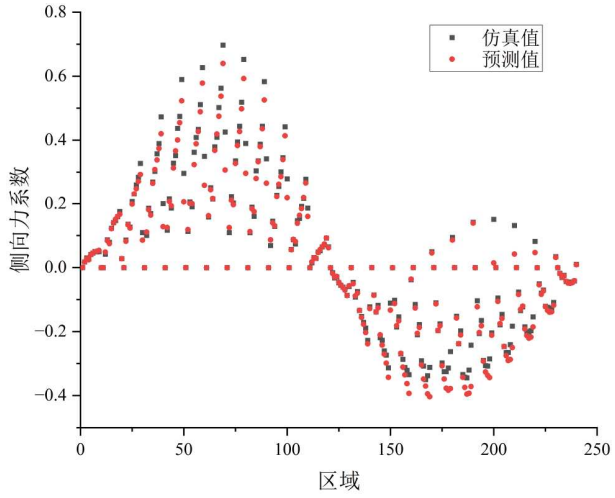


图 8　侧向力系数预测值与仿真值的对比图

Figure 8　Comparison of predicted and simulated side force coefficient values.

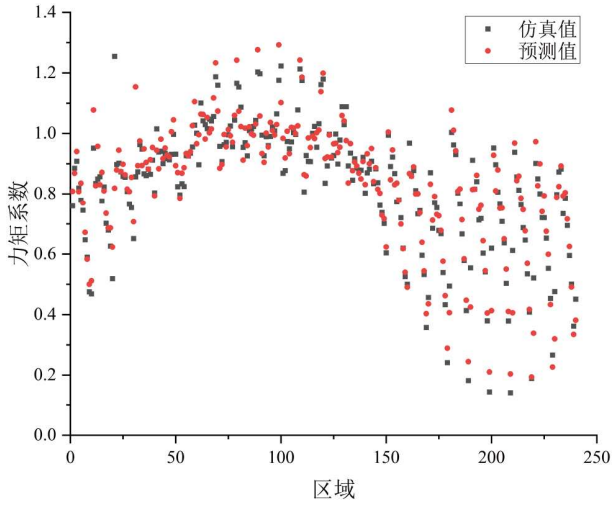


图 9　力矩系数预测值与仿真值的对比图

Figure 9　Comparison of predicted and simulated moment coefficient values.

由于该工况下系数本身较小, 放大效应可被接受. 这种偏保守的预测趋势在工程设计中反而提供了额外的安全冗余, 有助于提高系统的稳定性与可靠性. 因此, 本文方法具备良好的工程应用价值. 模型在不同工况下均表现出较高的预测精度与稳定性, 能够较好地反映气动特性变化趋势. 结合其实测误差水平与工程容限要求, 可认为该方法在复杂流动条件下仍具备较强的鲁棒性和推广潜力, 为后续气动布局优化与性能评估提供了可靠的技术支撑.

如图10所示, 在方位角为10°、俯仰角为18°的天线姿态下, 对比了同一扇区不同环(共10个环区)的阻力仿真值、整体预测值与分区预测值. 可以看出, 三者在整体上呈现出一致的变化趋势, 阻力系数随环区编号增加而逐步上升, 并在中后段区域达到峰值后略有回落, 说明各模型均较好地捕捉了气动力在径向方向上的总体分布规律. 对于超大跨度、全可动射电望远镜, 反射面中心与边缘的结构刚度存在显著差异: 中心部位支撑充分、刚度较高, 而边缘区域悬臂长度大、柔性更强, 因此在相同风场作用下, 不同环区的受力情况和力系数会出现明显差异.

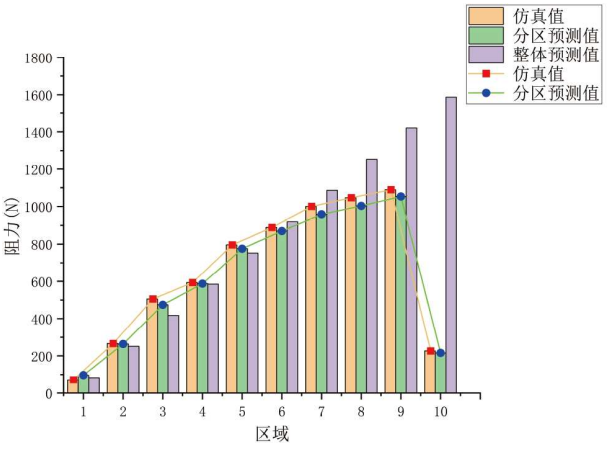


图 10　不同环区风载荷预测结果的对比验证

Figure 10　Comparative verification of wind load prediction results for different annular regions.

整体预测模型在同一网络结构下对整个反射面面板的风载荷系数进行统一预测, 因此预测结果相对平滑, 在不同环区力系数突变较为显著的位置难以完全捕捉其局部变化. 相比之下, 在载荷高度集中的高阻力区域(第8–10环), 分区预测结果与仿真值的拟合更为紧密, 峰值位置与幅度基本一致, 而整体模型则在这些区域表现出一定的弱响应.

总体而言, 整体模型能够较好地反映气动力随区域变化的宏观趋势, 但对于结构刚度分布不均、局部风载变化剧烈的超大口径反射面天线, 分区建模方法在局部细节刻画与预测精度方面具有更明显的优势, 更适合作为风载作用下结构响应分析的可靠工具.

4　风扰作用下波束指向误差分析

4.1　天线刚柔耦合建模

为全面评估柔性结构变形、外界扰动以及伺服系

统非线性因素对天线指向精度的综合影响，有必要构建一个统一的分析模型. 柔性变形的精确捕捉依赖于高保真有限元模型; 扰动效应的准确描述需要建立风载扰动模型及伺服系统动力学模型; 而非线性环节(如摩擦、间隙、驱动器特性等)的刻画则必须依托多体动力学模型. 然而, 目前尚无单一软件平台能够同时满足上述三类模型的构建与求解需求.

基于这一局限, 本文从三类影响机理出发, 分别采用有限元软件ANSYS、多体动力学软件ADAMS和控制系统仿真工具Simulink构建天线的柔性结构模型、刚体动力学模型与伺服控制模型. 随后, 通过各软件提供的联合仿真接口, 将三者进行集成耦合, 形成一个能够综合反映柔性变形、扰动作用及非线性特性的天线虚拟样机模型，实现对复杂系统动态行为的统一分析. 整体建模思路与流程如图11所示.

柔性体结构的建模主要在ANSYS环境中完成. 依据反射面、中心体、背架、副面及馈源等柔性部件的实际几何参数与材料特性，重建结构模型并完成网格划分，从而获得具有准确变形能力的有限元柔性体模型. 非线性因素则在ADAMS中建模, 通过调整齿轮中心距模拟传动间隙，采用库仑摩擦模型刻画摩擦效应, 以反映天线传动系统中常见的非线性行为. 此外, 扰动的建模分别在ADAMS与Simulink中进行: ADAMS主要用于施加由风载引起的结构扰动，而Simulink则用于将风力矩作为扰动输入加载到伺服控制回路中，使结构侧和控制侧的扰动共同作用于系统，便于在联合仿真中呈现真实风载下的动态响应.

在联合仿真的实现过程中，本文在ADAMS中建立了天线机械系统模型，在Simulink中构建了伺服控制系统模型. 为了使两者能够协同运行，需要将机械模型数据实时传递至Simulink，并将控制系统输出返回至ADAMS. 具体而言, 机械系统向控制系统提供天线当前的机械轴角、电轴角和角速度等反馈量; 控制系统则计算出对应的驱动力矩，通过减速器作用于ADAMS多体动力学模型中, 实现天线的动态驱动. 两者之间的信号交互关系如图12所示.

通过该双向耦合机制，建立了一个能够同时考虑柔性变形、风载扰动与非线性传动特性的综合仿真平台, 为天线整体动态性能的深入分析提供了可靠工具.

4.2　反射面变形引起的天线指向误差建模

天线指向误差补偿量计算所需的反射面变形量可以用反射面上采样点的位移来描述，在反射面上取n个采样点，如图13所示. 在天线运动过程中，分别计算理想反射面和ADAMS柔性体反射面上采样点的坐标，取两者的差值作为反射面的变形量. 其中，理想反射面上的坐标信息用于描述变形前的反射面, 可通过坐标变换得到. 柔性体反射面上的坐标信息用于描述在各类扰动下变形后的反射面, 可通过刚柔耦合仿真得到[28].

根据文献[29], 当反射面存在变形时, 将表面变形引入到积分公式中. 由于物理光学法可以准确地分析

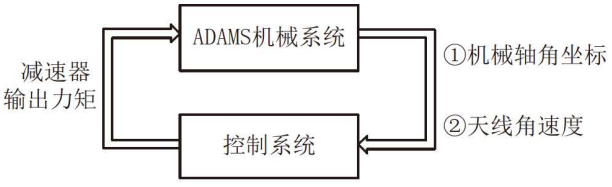


图 12　ADAMS机械系统的输入输出
Figure 12　Inputs and outputs of the ADAMS mechanical system.

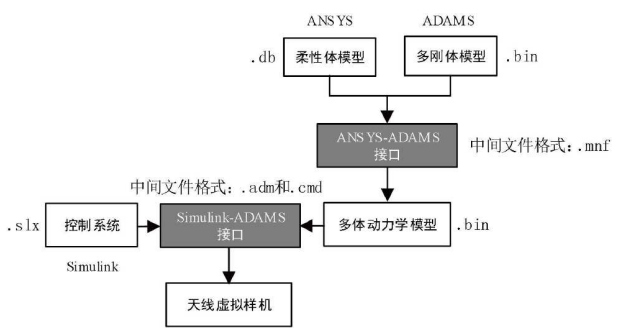


图 11　虚拟样机综合建模方案
Figure 11　Integrated virtual prototype modeling scheme.

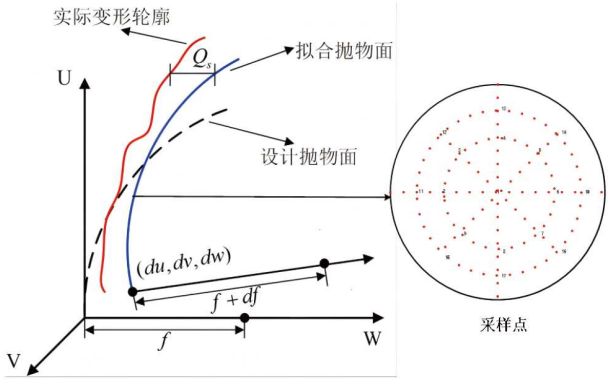


图 13　采样点分布图
Figure 13　Distribution of sampling points.

反射面天线主瓣及副瓣的特性，常用于分析反射面天线的电性能，基于物理光学法的反射面天线远区辐射电场计算公式为

$$\begin{aligned}&\mathbf{E}(\theta,\phi)=-\mathrm{j}k\eta\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kr}}{4\pi r}(\overline{I}-\hat{r}\hat{r})T(\theta,\phi),\\&\mathbf{T}(\theta,\phi)=\int_{\Sigma}\mathbf{J}(\mathbf{r}')\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\mathbf{r}'\cdot\mathbf{r}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta}\mathrm{d}\sigma_A,\\&\delta=k\Delta z(\cos\theta_s+\cos\theta),\end{aligned}\tag{9}$$

其中, $\mathbf{E}$为远区辐射电场, (θ,ϕ)为远场观测方向, $k=2\pi/\lambda$为波数, η为自由空间波阻抗, $\overline{I}$为等效面电流, $\mathbf{r}$为远场观测点指向坐标原点的矢量, $\mathbf{J}$为等效电流密度, δ为口径面的相位误差, σ_A为反射面在口径面上的投影面, Δz为轴向变形.

由公式计算得到的是天线在两个坐标平面xoz及yoz内天线指向的偏差, 但是得到的这两个偏差值并不能直接用于指导天线进行指向调整，需要对其进行转换，得到天线的俯仰方位角的调整量，进而调整天线, 降低变形对天线指向的影响. 其转换的过程如下.

如图14所示，得到天线在xoz和yoz平面内的指向偏差后，需要进行一个坐标转换，来计算天线因变形导致的方位俯仰角的偏差[30].

设局部坐标系下Z轴上一点P_1，局部坐标为(0，0，1), 即表示天线在未发生变形情况时的波束指向, 设天线当前俯仰方位角为θ_0和φ_0，转换到天线坐标系中xoz平面和yoz平面内的角度分别为φ_x和φ_y，某一时刻天线因风扰变形导致天线指向在局部坐标系中xoz平面和yoz平面内的偏差分别为$\Delta\varphi_x$和$\Delta\varphi_y$.

在局部坐标系中，经过计算，得到Z轴上点P_1在指向发生偏差后的坐标位置，记为P_2，其坐标为$(x_{j2},\ y_{j2},\ z_{j2})$, P_2和P_1的坐标关系为

$$\begin{cases}x_{l2}=\dfrac{\tan\Delta\varphi_y}{M},\\y_{l2}=\dfrac{\tan\Delta\varphi_x}{M},\\z_{l2}=\dfrac{1}{M},\end{cases}\tag{10}$$

其中,

$$M=\sqrt{1+(\tan\Delta\varphi_y)^2+(\tan\Delta\varphi_x)^2}.$$

点P_1和点P_2经过坐标转换，得到这两个点在整体坐标系下对应的坐标，分别记为点P_3 $(x_{q3},\ y_{q3},\ z_{q3})$和P4 $(x_{q4},\ y_{q4},\ z_{q4})$, P_1与P_3, P_2与P_4的转换关系如下:

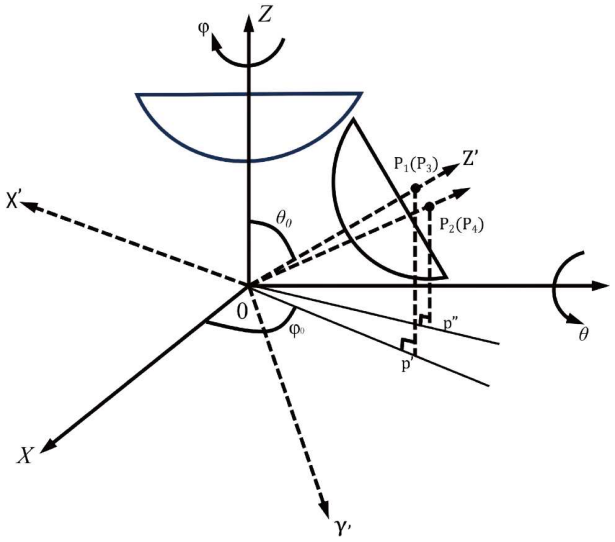


图 14　天线局部坐标系和整体坐标系转化示意图
Figure 14　Schematic diagram of the transformation between local and global coordinate systems of the antenna.

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}x_{q3}\\y_{q3}\\z_{q3}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi_0&\sin\varphi_0&0\\-\sin\varphi_0&\cos\varphi_0&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\0&\cos\theta_0&\sin\theta_0\\0&-\sin\theta_0&\cos\theta_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{f1}\\y_{f1}\\z_{f1}\end{bmatrix},\\\begin{bmatrix}x_{q4}\\y_{q4}\\z_{q4}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi_0&\sin\varphi_0&0\\-\sin\varphi_0&\cos\varphi_0&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\0&\cos\theta_0&\sin\theta_0\\0&-\sin\theta_0&\cos\theta_0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{j2}\\y_{j2}\\z_{j2}\end{bmatrix}.\end{cases}\tag{11}$$

得到整体坐标系下点P_3和P_4的坐标后，利用直角坐标系转换为极坐标系的转换关系，将两个点对应的角度φ_{x3}，φ_{y3}和φ_{x4}，φ_{y4}转换为极坐标系下的角度θ_3，φ_3和θ_4, φ_4, 最终的方位角和俯仰角偏差分别为

$$\begin{cases}\Delta\varphi=\varphi_4-\varphi_3,\\\Delta\theta=\theta_4-\theta_3.\end{cases}\tag{12}$$

将计算得到的$\Delta\varphi$和$\Delta\theta$作为天线的方位角和俯仰角的调整量，调整天线的伺服系统，改善天线的指向精度.

本节基于ANSYS, ADAMS与Simulink分别建立了柔性结构模型、非线性动力学模型和伺服控制模型, 并通过联合仿真构建了能够同时反映柔性变形、风载扰动及传动非线性的天线虚拟样机，实现了对反射面变形、远场电磁偏移及指向误差的统一分析. 目前已有Guljaina等人[31]针对QTT　110 m射电望远镜提出了一种主反射面快速摄影测量方法，可在较短时间内获取多工况下的反射面形变信息，为主动面系统的结构

误差感知与补偿提供了工程可行的数据支撑. 未来工程应用也可通过多源融合进一步提升风致变形的可观测性: 利用加速度计、应变片等结构传感器结合动力学模型估计动态位移; 通过在反射面背部布设少量位移或光纤光栅传感器实现低频大尺度变形监测; 并借助风速风向仪提供外部扰动信息, 即可实现面形误差的可观测与实时补偿, 为大口径天线在风扰环境下的稳定运行提供方法支撑.

5　大口径天线刚柔耦合分析与波束指向控制

5.1　伺服控制系统建模

在ADAMS环境中建立机械系统模型, 控制系统则在Simulink中构建. 为实现联合仿真, 需将机械模型导入Simulink, 与控制系统紧密连接. 机械系统向控制系统反馈天线的轴角坐标和角速度, 控制系统根据反馈计算减速器输出力矩, 并通过传动单元驱动天线运动, 形成闭环数据传递, 确保两系统协同仿真.

首先对天线方位驱动进行建模. 天线方位轴驱动主要包括电机与减速器, 其简化模型如图15所示. 建立的天线方位驱动模型不考虑磁链、磁阻等电机内部具体结构模型, 内部参数等效为电感系数、电枢系数等.

下面将对天线方位电机进行建模. 电机位置(θ_m)由电枢电压(v_a)控制. 它们之间的关系如式(13)所示:

$$v_a = L_a\frac{\mathrm{d}i_o}{\mathrm{d}t} + R_a i_o + k_i\frac{\mathrm{d}\theta_m}{\mathrm{d}t}, \tag{13}$$

其中, L_a为电机电感, i_o为电机电流, R_a为电机电阻, k_i为电机电流反馈常数. 直流电机产生的力矩T_o与电机电流成正比, 有关系式如(14)所示:

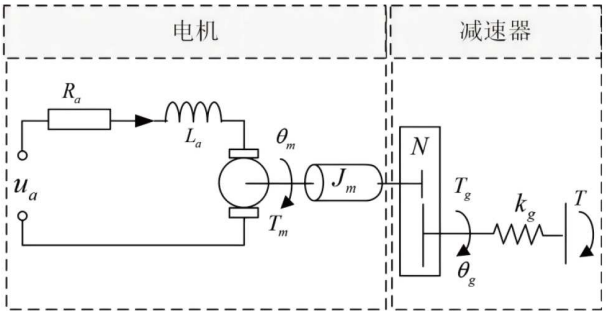


图 15　电机及减速器简化模型
Figure 15　Simplified model of the motor and gear reducer.

$$T_o = k_t i_o. \tag{14}$$

其中, k_t为电机力矩系数. 电机产生的转矩T_o与作用在转矩上的剩余转矩处于平衡状态. 因此,

$$T = T_o - J_m\ddot{\theta}_m, \tag{15}$$

其中, T是驱动器的输出转矩, J_m为电机转子的转动惯量. 最后经过减速器后的输出力矩T和输出角度θ_g可由式(16)和(17)获得:

$$T = k_g\left(\frac{\theta_m}{N} - \theta_p\right), \tag{16}$$

$$\theta_g = \frac{\theta_m}{N}, \tag{17}$$

其中, k_g为减速器等效刚度, N为减速器减速比, θ_p为天线输出角度. 将上述公式进行拉普拉斯变换, 并将画出相应框图, 如图16所示.

按照前文所述建模方法, 以110 m天线方位方向为例进行仿真分析. 系统内各项参数选取如表1所示

本节基于前述分析与建模, 建立了天线伺服控制的简化驱动模型、结构运动学模型及风载荷模型. 随后, 设计了位置环、电流环和速度环控制器, 实现天线伺服系统的指向控制. 鉴于PID控制器结构简单、鲁棒性强且可靠, 广泛应用于工业伺服控制中, 本节采用PID控制器分别实现位置、电流和速度环控制, 并在Simulink中完成110 m天线机电系统的联合仿真.

通常有三种方法建立作用于天线结构的风扰动模型: 第一种是将风载荷等效为作用在反射面上的分布风压; 第二种是将风载荷等效为叠加在驱动力矩上的干扰力矩; 第三种是将风扰作为速度环输入处的扰动信号. 本节采用前两种方法对风载荷进行建模, 即风载荷等效为作用在天线反射面上的风压和叠加在驱动力矩上的干扰力矩. 进一步地, 等效风力矩可按风速分解为稳态分量和脉动分量, 即稳态风力矩和脉动风力矩. 稳态风力矩和脉动风力矩分别与稳态风速和脉动风速相关[28], 可表示为

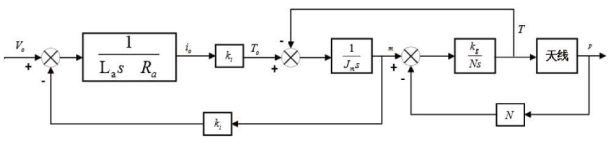


图 16　天线驱动器简化模型框图
Figure 16　Block diagram of the simplified antenna drive model.

表 1　天线驱动模型各参数取值

Table 1　Parameter values of the antenna drive model

符号	物理意义	数值(单位)
L_a	电机电感	0.007 H
R_a	电机电阻	0.52 Ω
k_i	电机电流反馈常数	0.85 V/A
k_t	电机力矩系数	0.89 Nm/A
k_g	减速器等效刚度	1.68×10^7 Nm/rad
J_m	电机转子的转动惯量	0.02 kg/m^2
N	减速器减速比	500

$$T_n=\frac{1}{2}C_M A D\rho V_m^2, \tag{18}$$

$$T_w=C_M A D\rho V_m\Delta v. \tag{19}$$

由于天线大多数处于平地，假设天线受到的风平行于地面吹向天线，则天线与风之间的俯仰风向角为天线俯仰角．天线与风之间的方位风向角，为天线方位角与风的方位角之差．这是由于我们测得的是风的方向角度，而不是风向角．方位风向角的求解方法如式(20)所示:

$$\theta=\begin{cases}\left|\theta_1-\theta_2\right|, & 0^\circ\leqslant\theta_1\leqslant180^\circ\ \&\ 0^\circ\leqslant\theta_2\leqslant180^\circ,\\ \theta_2-\theta_1, & -180^\circ<\theta_1<0^\circ\ \&\ 0^\circ<\theta_2<180^\circ\\ & \&\ \theta_1<\theta_2+180^\circ,\\ 360^\circ+\theta_1-\theta_2, & -180^\circ<\theta_1<0^\circ\ \&\ 0^\circ<\theta_2<180^\circ\\ & \&\ \theta_1\geqslant\theta_2+180^\circ,\\ 360^\circ-\theta_1+\theta_2, & 0^\circ<\theta_1<180^\circ\ \&\ -180^\circ<\theta_2<0^\circ\\ & \&\ \theta_2\leqslant\theta_1-180^\circ,\\ \theta_1-\theta_2, & 0^\circ<\theta_1<180^\circ\ \&\ -180^\circ<\theta_2<0^\circ\\ & \&\ \theta_2>\theta_1-180^\circ,\\ \left|\theta_1-\theta_2\right|, & -180^\circ\leqslant\theta_1<0^\circ\ \&\ -180^\circ\leqslant\theta_2<0^\circ,\end{cases} \tag{20}$$

其中，θ为方位风向角，$\theta\in[0^\circ,\ 180^\circ]$，$\theta_1$为天线方位角，$\theta_2$为风的方位角．根据天线方位角、俯仰角、风的方位角可得到天线与风的风向角，然后根据预测模型可以得到风载荷系数，通过风载荷系数计算实时的风载荷．在Simulink中建立风扰模型．最后通过Simulink模型，为后续抗风扰控制仿真提供外部扰动输入．平均风载荷的模型与脉动风载荷的模型相结合，可以得到天线伺服控制系统受到总的风扰动，并将力矩等效于方位伺服电机的驱动力矩，将风力等效于天线反射面的风压，如图17所示.

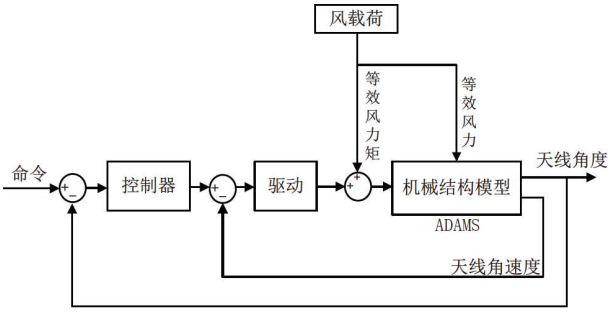


图 17　风扰分析框图

Figure 17　Wind disturbance analysis block diagram.

5.2　仿真结果分析

以110 m口径天线方位方向为例，仅对方位控制器进行仿真，研究风扰对天线指向精度的影响．假设天线角坐标为(10°, 18°)，风从零方位方向吹向天线，平均风速为6 m/s，研究俯仰控制器的跟踪性能．在无扰动情况下对PID控制器进行调参，将闭环打开，先对内环PID控制器进行调参，当性能满足要求时再对外环PID控制器进行调参．用Simulink对上述模型进行仿真，得到如图18所示天线跟踪效果图．具体的PID控制系统性能指标如表2所示.

对比结果显示，系统动力特性在不同结构假设与风载作用下表现出明显差异：当仅考虑结构柔性时，超调量由25.43%增至26.48%，均方根误差上升约0.002°，说明柔性效应降低了系统阻尼，导致瞬态响应更为剧烈；而在刚体模型中施加风载后，超调量几乎不变，但稳态误差却从0.0003°激增至0.0016°，放大了一

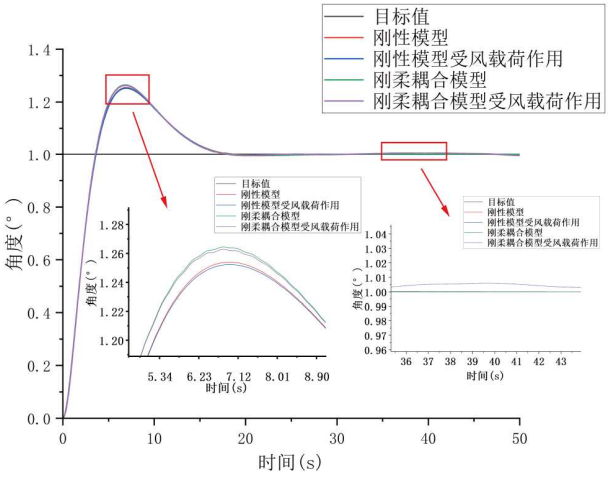


图 18　天线PID控制器方位跟踪曲线

Figure 18　Azimuth tracking curve of the antenna PID controller.

表 2　刚柔耦合控制系统性能指标对比

Table 2　Comparison of performance indicators of the rigid-flexible coupled control system

工况	超调量(%)	均方根误差(°)	稳态误差(°)
刚性模型	25.43	0.1825	0.0003
刚性模型受风载荷作用	25.02	0.1824	0.0016
刚柔耦合模型	26.48	0.1842	0.0002
刚柔耦合模型受风载荷作用	26.06	0.1841	0.0017

个数量级，表明持续风力主要通过静态形变引起指向漂移. 当柔性与风扰同时存在时，稳态误差进一步上升至0.0017°，两种因素叠加使最终指向精度显著恶化. 总体而言，柔性主要影响瞬态性能，而风载主导稳态偏差；要在大型天线中维持亚毫度级精度，必须将柔性振动控制与风载补偿机制协同设计，实现对结构动态与静态误差的同步抑制. 不同风速下，天线PID控制器方位跟踪曲线如图19所示，控制系统性能指标对比如表3所示.

试验结果表明，随着风速由0 m/s提升至15 m/s，系统的瞬态性能基本保持稳定：超调量仅由26.44%略降至25.47%，均方根误差在0.184°左右微小波动，说明风载对系统阻尼与随机误差影响有限；但稳态误差却由0.0002°显著增大至0.0046°，呈近线性增长趋势，增幅超过20倍. 这表明持续风力对天线结构造成的静态偏移是影响指向精度的主要因素. 由此可见，强风环境下，系统稳态精度受风载破坏显著，而瞬态特性变化较小，若要维持亚毫度级精度，必须在传统伺服控制

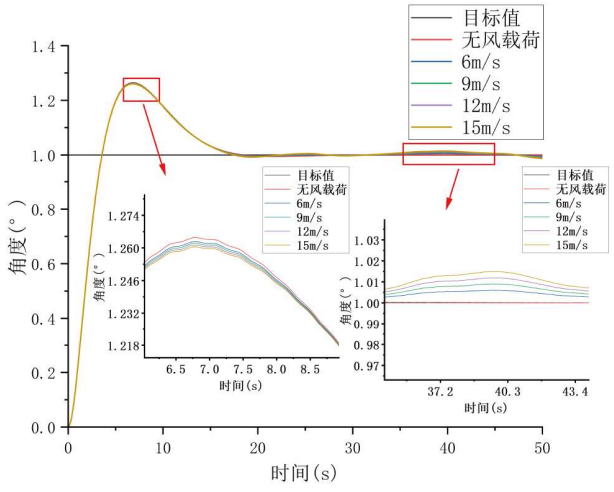


图 19　风扰作用下天线PID控制器方位跟踪曲线

Figure 19　Azimuth tracking curve of the antenna PID controller under wind disturbance.

表 3　不同风速下控制系统性能指标对比

Table 3　Comparison of control system performance indicators under different wind speeds

风速(m/s)	超调量(%)	均方根误差(°)	稳态误差(°)
0	26.44	0.1842	0.0002
6	26.06	0.1804	0.0017
9	25.86	0.1840	0.0027
12	25.68	0.1839	0.0036
15	25.47	0.1840	0.0046

基础上引入风载预测与主动补偿机制，以有效抑制稳态偏差的积累.

综合考虑扰动对转角误差和柔性指向误差的影响，对伺服系统进行设计. 将由柔性体反射面变形计算得到的波束指向误差转化为俯仰和方位的转角误差，并对其进行补偿，其控制框图如图20所示.

以6 m/s风速下俯仰为例，计算所得的补偿量如图21所示，将补偿量加入控制系统中得到天线俯仰的追踪曲线如图22所示. 补偿前后控制系统性能指标对比如表4所示.

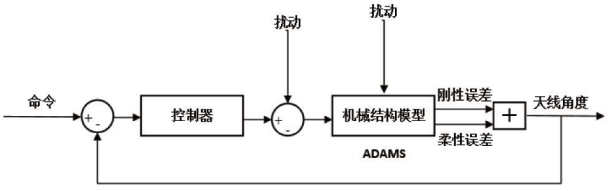


图 20　综合设计控制框图

Figure 20　Block diagram of the integrated control design.

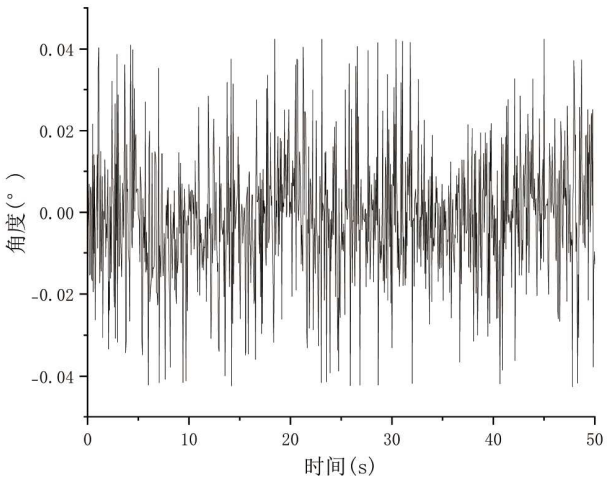


图 21　方位补偿量

Figure 21　Azimuth compensation amount.

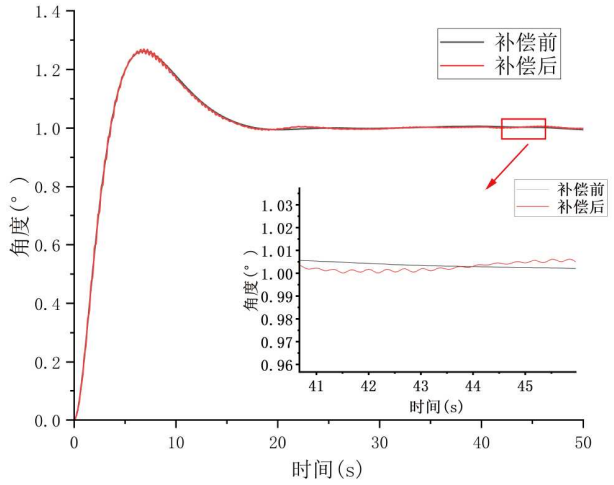


图 22　补偿前后控制效果对比

Figure 22　Comparison of control effects before and after compensation.

表 4　补偿前后控制系统性能指标对比

Table 4　Comparison of control system performance indicators before and after compensation

	超调量(%)	均方根误差(°)	稳态误差(°)
补偿前	26.069	0.1841	0.0017
补偿后	26.807	0.1837	0.00096

取45 s时稳态的天线补偿前后的电性能进行比较, 如表5所示. 波束补偿前后性能指标对比如表6所示.

45 s时刻的比较结果表明, 所提出的补偿算法能够显著改善天线的电性能: E面指向偏差由0.0003°降至0.0002° (降低约33%), 增益损失由−0.06 dB提升至−0.01 dB, 亏损缩小约83%; H面指向偏差由0.0006°减至0.0003° (降低50%), 相应增益损失由−0.04 dB改善至−0.02 dB, 降幅亦接近50%. 这些结果说明, 协同补

表 5　天线补偿前后的电性能对比

Table 5　Comparison of the electrical performance of the antenna before and after compensation

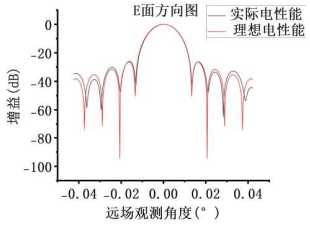
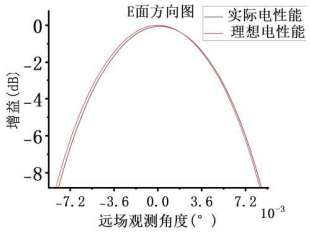
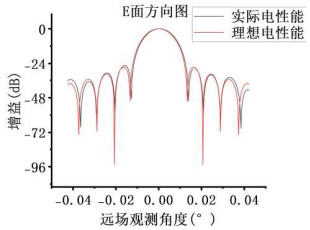
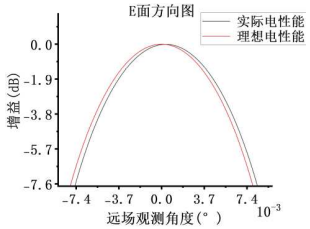
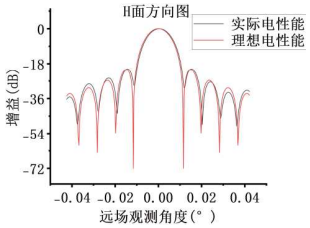
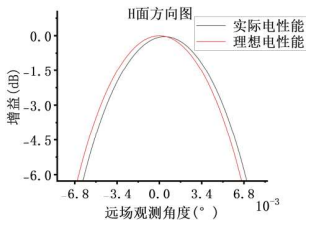
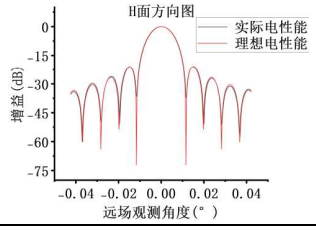
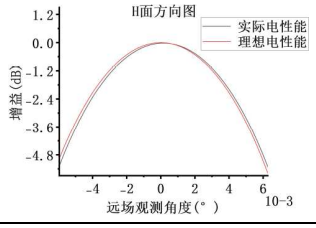
	整体图	主波束局部放大图
E面补偿前		
E面补偿后		
H面补偿前		
H面补偿后		

表 6　波束补偿前后性能指标对比

Table 6　Comparison of performance indicators before and after beam compensation

	E面偏差(°)	E面增益(dB)	H面偏差(°)	H面增益(dB)
补偿前	0.0003	−0.06	0.0006	−0.04
补偿后	0.0002	−0.01	0.0003	−0.02

偿策略在保持系统瞬态稳定性的同时，能够有效抑制风致柔性偏移并恢复波束增益，从而显著提升大口径天线的实际指向精度. 为了进一步保证补偿策略的工程可实施性与长期可靠运行，后续在补偿模块中可引入带通/低通滤波、补偿幅值限制以及预测误差敏感性抑制等机制, 使补偿信号更加平滑且幅值可控, 避免向伺服系统施加过快或过大的附加运动. 此外, 在实际应用中还需综合考虑驱动器力矩裕度、执行机构疲劳寿命以及系统热管理能力，对补偿频率范围与增益进行必要约束，以在提升抗风性能的同时确保设备可靠性, 实现性能与寿命之间的合理平衡.

6　结论

本文针对随机风扰作用下超大口径反射面天线的刚柔耦合动力学特性，建立了结构变形与波束指向偏差的数学映射模型，并设计了融合模态控制与扰动估计的协同控制策略. 通过分区域风载荷建模，实现了对局部结构响应及波束偏差的精准预测和实时补偿.

(1) 本文建立了考虑随机风扰输入的大口径反射面刚柔耦合动力学模型，准确描述了结构刚体运动与柔性模态响应的耦合行为，为控制策略设计提供了理论基础.

(2) 通过分析结构模态响应与波束偏转之间的耦合关系，构建了结构变形对波束指向影响的数学映射模型, 实现了偏差可预测性与补偿.

(3) 由于天线的结构复杂, 本文仅考虑了反射面面板的变化情况，综合考虑其他天线结构是后续需要研究的方向.

仿真验证表明, 该方法有效抑制了结构振动, 显著提升了天线波束的指向精度和系统的鲁棒性. 研究成果为超大口径天线在复杂风载荷环境下的高精度控制提供了理论基础和技术支持，具有重要的工程应用价值.

参考文献

1 Yan Y F, Wang C S, Li S, et al. Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 129501 [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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 129501]

2 Ma K T. Research on Multi-System Regulation and Diagnostic Technology of In-Service Performance of Large Reflector Antennas (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xidian University, 2022 [马开通. 大型反射面天线服役性能多系统调控与诊断技术研究. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2022]

3 Green J A. The Parkes Radio Telescope as a square kilometre array technology pathfinder. Proc SPIE, 2020, 11445: 659–665

4 Smith D R, Souccar K, Magaña C A, et al. Performance testing of the LMT/GTM primary surface actuators. Proc SPIE, 2014, 9151: 788–801

5 Irvine W M, Carramiñana A, Carrasco L, et al. The large millimeter telescope/EL Gran Telescopio Milimétrico: A new instrument for astrobiology. Orig Life Evol Biosph, 2003, 33: 597–607

6 Prestage R M, Anderson R, Brandt J, et al. The Green Bank Telescope: A status update. In: Proceedings of the 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). Boulder: IEEE, 2017. 1–2

7 Dong J, Zhong W, Wang J, et al. Correcting gravitational deformation at the Tianma Radio Telescope. IEEE Trans Antennas Propagat, 2018, 66: 2044–2048

8 Wang C S, Xiao L, Xiang B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 059503 [王从思, 肖岚, 项斌斌, 等. 大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059503]

9 Ban Y, Gao T, Wang N, et al. Structural modeling and analysis method of the active main reflector of the Qitai radio telescope based on a simplified actuator (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219507 [班友, 高涛, 王娜, 等. 基于简化促动器的奇台射电望远镜主动主反射面的结构建模与分析方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219507]

10 Wei S X, Wang Q M, Kong D Q, et al. Evaluation algorithm for pointing error of large dual-reflector antennas (in Chinese). Astron Res Technol, 2020, 17: 513–521 [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. 天文学研究和技术, 2020, 17: 513–521]

11 Gong Z B. Servo Mechanical Transmission Devices (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1980 [龚振邦. 伺服机械传动装置. 北京: 国防工业出版社, 1980]

12 Cohen E, Vellozzi J, Suh S S. Calculation of wind forces and pressures on antennas. Ann New York Acad Sci, 1964, 116: 161–221

13 Levy R, Kurtz D W. Compilation of Wind Tunnel Coefficients for Parabolic Reflectors. Technical Report. Jet Propulsion Lab., 1978

14 Liu Y, Qian H L, Fan F. Reflector wind load characteristics of the large all-movable antenna and its effect on reflector surface precision. Adv Steel Constr, 2016, 12: 380–409

15 Mulla A A, Vasambekar P N. Overview on the development and applications of antenna control systems. Annu Rev Control, 2016, 41: 47–57

16 Gawronski W, Ahlstrom Jr. H G, Bernardo A M. Analysis and performance of the control systems of the NASA 70-meter antennas. ISA Trans, 2004, 43: 597–610

17 Ranka T, Garcia-Sanz M, Ford J M. Extended state observer based controller design for the Green Bank Telescope servo system. In: Proceedings of the ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference. Columbus, 2015

18 Gawronski W, Souccar K. Control systems of the large millimeter telescope. IEEE Antennas Propag Mag, 2006, 47: 41–49

19 Qiu D, Sun M, Wang Z, et al. Practical wind-disturbance rejection for large deep space observatory antenna. IEEE Trans Contr Syst Technol, 2014, 22: 1983–1990

20 Chen W, Wang Z. Robust control of the servo system of Leighton Chajnantor Telescope under high wind speed. In: Proceedings of the Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy X. Montréal: SPIE, 2022. 419–433

21 Xue S, Wang C S, Lian P Y, et al. Service performance regulation technology of high-frequency large-aperture antennas oriented to beam pointing (in Chinese). J Mech Eng, 2022, 58: 16–25 [薛松, 王从思, 连培园, 等. 面向波束指向的高频段大口径天线服役性能调控技术. 机械工程学报, 2022, 58: 16–25]

22 Smith D R, Paglione T A, Lovell A J, et al. Measurements of dynamic pointing variations of a large radio telescope. Proc SPIE, 2000, 4015: 467–475

23 Hashimoto I, Chiba M, Okada N, et al. Wind- and operation-induced vibration measurements of the main reflector of the Nobeyama 45 m Radio Telescope. J Vib Eng Technol, 2020, 8: 909–923

24 Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Quart J R Meteoro Soc, 1961, 87: 194–211

25 Yuan B, Zeng M H, Li X Z. Computer simulation of fluctuating wind based on FFT technique and its implementation in MATLAB (in Chinese). Sichuan Build Sci Res, 2013, 39: 29–32, 42 [袁波, 曾明会, 李霞昭. 基于FFT技术对脉动风的计算机模拟及其MATLAB的实现. 四川建筑科学研究, 2013, 39: 29–32, 42]

26 Wyatt T A. The aerodynamics of shallow paraboloid antennas. Ann New York Acad Sci, 1964, 116: 222–238

27 Luan T, Xue S, Lian P Y, et al. Beam pointing analysis of large-aperture reflector antennas under environmental wind loads (in Chinese). J Eng Design, 2024, 31: 98–106 [栾天, 薛松, 连培园, 等. 环境风载荷下大口径反射面天线波束指向分析. 工程设计学报, 2024, 31: 98–106]

28 Tang X D. Research on virtual prototype of large reflector antennas (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Xidian University, 2018 [汤晓东. 大型反射面天线虚拟样机研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2018]

29 Rahmat-Samii Y. A comparison between GO/aperture-field and physical-optics methods of offset reflectors. IEEE Trans Antennas Propagat, 1984, 32: 301–306

30 Yang C J. Pointing compensation system for thermal deformation of large reflector antennas based on electromechanical coupling (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Xidian University, 2015 [杨崇金. 基于机电耦合的大型反射面天线热变形指向补偿系统. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2015]

31 Guljaina K, Wang N, Xu Q, et al. Rapid photogrammetry method for large-aperture antenna main reflector surface (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219506 [Guljaina K, 王娜, 许谦, 等. 一种用于大口径天线主反射面的快速摄影测量方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219506]

Wind-induced response analysis and pointing control of a hundred-meter-class large-aperture reflector antenna based on zonal wind load coefficient prediction

XUE Song[1,2*], LIAO Zhikang[1,2], LUAN Tian[1,2], KONG Deqing[3], XU Qian[4] & WANG Congsi[2]

[1] *State Key Laboratory of Electromechanical Integrated Manufacturing of High-Performance Electronic Equipments, Xidian University, Xi'an 710071, China*
[2] *Guangzhou Institute of Technology, Xidian University, Guangzhou 510555, China*
[3] *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[4] *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*
**Corresponding author (email: sxue@xidian.edu.cn)*

Hundred-meter-class large-aperture reflector antennas, whose primary reflector diameters reach the order of hundreds of meters, represent one of the largest fully steerable monolithic engineering structures on Earth. They play a critical role in gravitational wave detection, deep-space communication, and pulsar-based navigation systems. With the continuous pursuit of higher observation performance and spatial resolution, antenna apertures have been steadily expanded, leading to increasingly stringent requirements on pointing accuracy. However, the enlargement of aperture inevitably results in reduced structural stiffness and intensified wind-induced disturbances, causing pronounced flexible deformations under wind excitation. These deformations significantly amplify beam pointing errors, thereby severely constraining the operational performance of large-aperture antenna systems. To address these challenges, this study establishes a rigid-flexible coupled dynamic model of a large-aperture reflector antenna subjected to stochastic wind disturbances, enabling an in-depth investigation of wind-induced flexible modal responses and their effects on beam pointing deviation. Furthermore, a cooperative control strategy integrating active structural control and beam pointing compensation is proposed. A high-accuracy zonal wind load coefficient prediction model is developed and incorporated into the control system as disturbance input, allowing for simulation-driven performance evaluation. The results demonstrate that the proposed approach significantly improves antenna pointing accuracy and system robustness under wind disturbance conditions, providing both theoretical support and practical engineering solutions for the stable operation of large-scale antenna systems in complex environments.

reflector antenna, rigid-flexible coupling, stochastic wind load, beam pointing compensation

PACS: 84.40.Ba, 07.05.Dz, 07.05.Tp, 43.40.Hb

doi: 10.1360/SSPMA-2025-0494