

8-15-2024

Digital Twin-Driven Structural Thermal Deformation Compensation System for Radio Telescopes

Zhen Lei

School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710006, China

Yuhua Liu

School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Kai Ding

School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Haoxiang Chen

School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China

See next page for additional authors

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



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

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Digital Twin-Driven Structural Thermal Deformation Compensation System for Radio Telescopes

Abstract

Abstract: The structural thermal deformation of large-scale radio telescopes under solar thermal load cannot be measured in real-time and compensated dynamically. To solve this problem, a digital twin-driven structural thermal deformation compensation method and system is studied. Based on the fusion of measured data and simulation data, a temperature field modeling method is proposed. A simulation and prediction model of structural thermal deformation is established, and a dynamic compensation model of structural thermal deformation is built. A digital twin-driven dynamic structural thermal deformation compensation system for radio telescopes is developed. A micro-experimental model is studied to verify the effectiveness of the proposed method and system. The results show that the application of digital twin technology for largescale astronomical equipment such as radio telescopes realizes the near real-time monitoring and dynamic compensation of structural thermal deformation. The proposed dynamic compensation method has a good time sensitivity, which helps improve the working performance of radio telescopes.

Keywords

digital twin, radio telescope, mechanical structure, deformation compensation, temperature field

Authors

Zhen Lei, Yuhua Liu, Kai Ding, Haoxiang Chen, and Dongwei Li

Recommended Citation

Lei Zhen, Liu Yuhua, Ding Kai, et al. Digital Twin-Driven Structural Thermal Deformation Compensation System for Radio Telescopes[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(8): 1869-1883.

数字孪生驱动的射电望远镜结构热变形补偿系统

雷震^{1,2}, 刘宇华¹, 丁凯^{1*}, 陈浩祥¹, 李东伟²

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 陕西 西安 710006)

摘要: 为解决在日照热载荷作用下大型射电望远镜结构变形无法实测与动态补偿的问题, 研究了一种数字孪生驱动的射电望远镜结构热变形补偿系统。提出了基于实测数据与仿真数据融合的射电望远镜热温度场构建方法, 建立了射电望远镜结构热变形仿真预测机理模型、结构热变形动态补偿机理模型, 开发了射电望远镜结构热变形动态补偿数字孪生系统, 通过微型实体模型实验对所提出的技术与系统进行了有效性验证。结果表明: 将数字孪生技术应用于射电望远镜等大型天文装备, 实现了其结构热变形的近实时监测和动态补偿, 且补偿方案具有良好的时效性, 有助于提升射电望远镜运行性能。

关键词: 数字孪生; 射电望远镜; 机械结构; 变形补偿; 温度场

中图分类号: TP391.9; TH166 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)08-1869-15

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0788

引用格式: 雷震, 刘宇华, 丁凯, 等. 数字孪生驱动的射电望远镜结构热变形补偿系统[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(8): 1869-1883.

Reference format: Lei Zhen, Liu Yuhua, Ding Kai, et al. Digital Twin-Driven Structural Thermal Deformation Compensation System for Radio Telescopes[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(8): 1869-1883.

Digital Twin-Driven Structural Thermal Deformation Compensation System for Radio Telescopes

Lei Zhen^{1,2}, Liu Yuhua¹, Ding Kai^{1*}, Chen Haoxiang¹, Li Dongwei²

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Xi'an 710006, China)

Abstract: The structural thermal deformation of large-scale radio telescopes under solar thermal load cannot be measured in real-time and compensated dynamically. To solve this problem, a digital twin-driven structural thermal deformation compensation method and system is studied. Based on the fusion of measured data and simulation data, a temperature field modeling method is proposed. A simulation and prediction model of structural thermal deformation is established, and a dynamic compensation model of structural thermal deformation is built. A digital twin-driven dynamic structural thermal deformation compensation system for radio telescopes is developed. A micro-experimental model is studied to verify the effectiveness of the proposed method and system. The results show that the application of digital twin technology for large-scale astronomical equipment such as radio telescopes realizes the near real-time monitoring and dynamic compensation of structural thermal deformation. The proposed dynamic compensation method has a good time sensitivity, which helps improve the working performance of radio telescopes.

Keywords: digital twin; radio telescope; mechanical structure; deformation compensation; temperature field

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(12203008); 陕西省自然科学基金(2021JM-150); 中央高校基本科研业务费专项资金(300102253204)

第一作者: 雷震(1988-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为射电望远镜结构设计与优化。

通讯作者: 丁凯(1989-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为数字孪生技术、智能制造系统。

0 引言

大型天文装备是我国宇宙探索、航空航天事业的国之重器,具有结构庞大、尺寸精度高等特点。射电望远镜(或称天线)作为其典型代表^[1-2],通过超大面积的反射面汇聚微弱电磁波信号以测量天体射电的强度、频谱和偏振等量,常用于卫星通信、飞行器导航、地外文明探测等。

随着工作性能要求的提高,射电望远镜正向着大口径、高精度的趋势发展,新一代大口径射电望远镜的型面精度达到亚毫米级,指向精度达到角秒级。然而,重力、风载、日照热等因素往往会引起射电望远镜反射面结构变形,造成口面上场相位误差,使射电望远镜的增益降低、旁瓣电平增高,严重影响运行性能。

目前,国内外对射电望远镜重力变形及其结构补偿的研究较成熟^[2],在建造初期就已具备抵抗静态风载的能力。然而,温度场易受瞬时风速、地面温度、空气清洁度等因素影响,具有时变性、不确定性,造成日照热载荷下结构变形具有随机性与不均匀性。针对该问题,学者们采用包裹背夹结构、布置天线罩、背架通风与液冷、表面涂层等结构温控方法^[3-8],减少射电望远镜结构温度不均匀现象,从而保持型面结构精度,但普适性较差,且往往建造困难、成本较高。

上述研究从改善结构性能的角度来提升射电望远镜对外载荷因素影响的鲁棒性。另一视角是通过完整实测射电望远镜的结构变形并及时调整补偿,动态保证其运行性能。目前,射电望远镜结构热变形测量手段主要是摄影测量和微波全息测量,其中,摄影测量需要在结构上安装巨量靶标点,而后利用吊篮分区拍摄并处理数据;微波全息测量需要在望远镜上附加装备,其运行会干扰天线正常工作。两种方法实施代价均较大且无法做到对射电望远镜结构变形的实时测量。

数字孪生技术^[9-13]的出现,为解决射电望远镜等大型天文装备的运行状态监测、动态调控、运

行维护等难题提供了新的思路。刘志勇等^[14]提出一种大口径射电望远镜天文观测与监控软件系统架构,使天文观测系统成为有机整体;张庆海等^[15]设计开发了中国天眼数字孪生系统,提出虚拟模型创建、数据智能感知、模型实时驱动等方法,提高了大型射电望远镜实时交互和自动化管理水平;张涛等^[16]分析了FAST主动反射面结构,创建了其数字孪生模型,应用于大型科研设施运行维护中。上述学者将数字孪生技术应用于射电望远镜领域,开展了状态监控及运行维护的初步探索。然而,针对射电望远镜在日照热载荷作用下的结构变形动态补偿调控这一关键技术问题,目前尚未开展基于数字孪生技术的相关研究。

本文将数字孪生技术应用于日照热载荷作用下的射电望远镜结构变形补偿中,将物理世界无法实现的射电望远镜结构变形实时测量问题转化为数字世界中实时温度数据与结构热变形机理模型融合的结构变形动态补偿问题。在构建射电望远镜热变形动态补偿数字孪生系统的基础上,通过虚实映射同步,实时监测射电望远镜运行状态;通过实时数据/数字孪生模型融合驱动的多域仿真,得出射电望远镜结构变形量,并预测计算动态补偿量,实现日照热载荷下射电望远镜结构调控,降低对射电望远镜电磁性能的影响。

1 射电望远镜结构热变形动态补偿数字孪生系统架构

射电望远镜性能影响因素如图1所示。根据射电望远镜结构热变形动态补偿需求,设计图2所示的数字孪生系统架构。通过射电望远镜虚实状态同步、多域仿真、结构热变形精准预测调控,为其结构优化与健康提供依据。

1.1 物理层

物理层包含射电望远镜、感知设备等物理实体集合,具备对多源时变数据的感知接入能力,以适应复杂多变的工作环境。采用智能网关和边

缘控制器实现对监测数据的去冗、清洗、滤波等预处理。借助标准数据转换与通信装置, 实现对多源、异构要素的统一转换、封装与传输。其中, 射电望远镜包括结构主体、姿态调整机构、电磁机构、结构调整机构等。

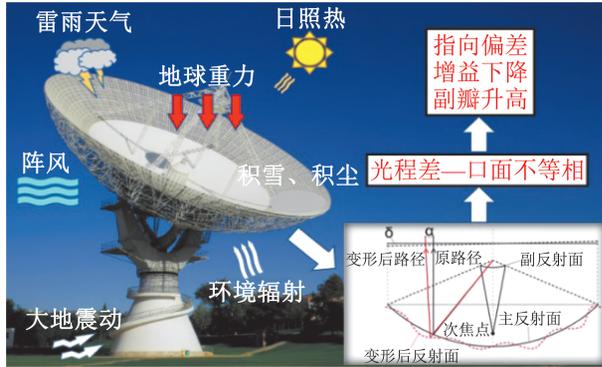


图 1 射电望远镜性能影响因素
Fig. 1 Performance influence factors

感知设备包括: ①实时风速传感器、太阳辐射变送器、日照下结构及环境温度传感器等环境感知设备; ②实测射电望远镜运行角度的运动编码器、主体倾角传感器、控制结构调整量的位移

传感器等结构感知设备。

1.2 模型层

模型层是物理实体的真实镜像, 主要包括射电望远镜几何模型、物理环境模型、结构热变形预测模型、结构变形补偿模型, 从多个维度对射电望远镜进行刻画。其中, 结构热变形预测机理模型是在充分掌握射电望远镜因日照热而导致的变形规律的基础上, 基于热辐射理论和弹性力学理论建立的数值模拟方法, 通过实时数据/机理模型混合驱动, 预测射电望远镜结构变形, 为结构变形补偿提供依据。

结构变形补偿机理模型以射电望远镜结构热变形数据为基础, 计算射电望远镜结构调整量, 并驱动调整机构完成形变补偿, 以减少日照热载荷引起的结构变形对运行性能的影响。

需指出的是, 以数据为纽带, 通过模型层与物理层之间的虚实交互, 可实现射电望远镜物理实体与数字孪生体之间的状态同步, 保证结构变形补偿的准确性。

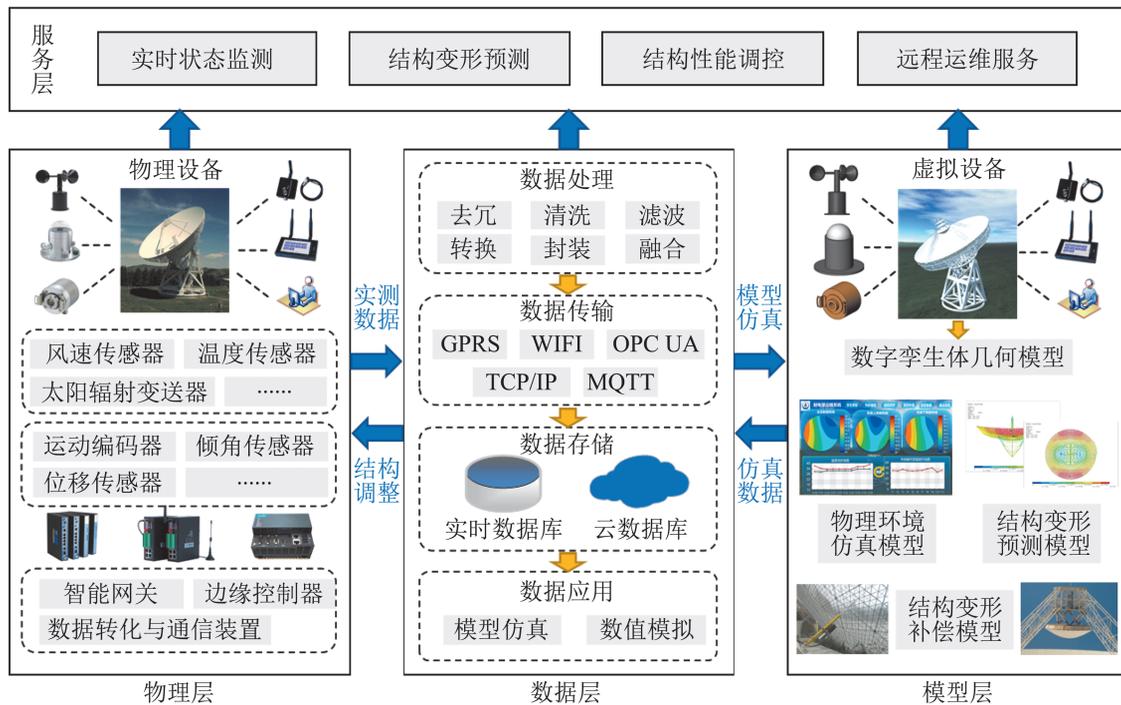


图 2 数字孪生驱动的射电望远镜结构热变形补偿系统架构
Fig. 2 Framework of digital twin-driven structural thermal deformation compensation system

1.3 数据层

如图3所示,射电望远镜孪生数据由物理实体数据、虚拟模型数据、顶层服务数据、领域知识组成。

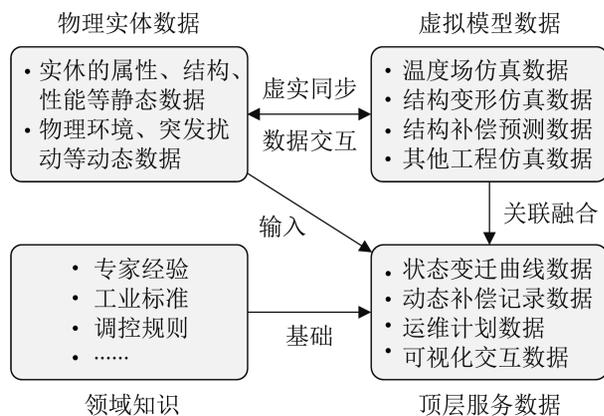


图3 射电望远镜孪生数据
Fig. 3 Twin data of radio telescopes

物理实体数据是指物理空间中射电望远镜物理实体的属性、结构、性能等静态数据,以及传感器采集的物理环境、突发扰动等动态数据。

虚拟模型数据是指数字空间中射电望远镜数字孪生模型仿真过程中生成的温度场、结构变形量、补偿量等工程数据。

顶层服务数据是指射电望远镜状态监测、变形补偿、智能运维等应用服务过程中生成的状态变迁曲线、动态补偿记录、运维计划等数据。

领域知识是指系统中集成的专家经验、工业标准、调控规则等知识,用于支撑射电望远镜运行调控与维护决策。

需指出的是,领域知识是顶层服务的基础,与顶层服务数据关联;物理实体数据与虚拟模型数据互补互用,实现虚实同步交互,并作为顶层服务的输入,支撑顶层服务数据的生成。

在虚实映射过程中,首先,由各类感知设备采集物理实体数据,经处理、传输、存储后,映射至模型层进行可视化显示。然后,以采集数据为基础,对温度场重构、结构变形补偿等模型计算过程中产生的各类数据进行存储,便于查阅历

史数据,回溯射电望远镜运行状态。

1.4 服务层

服务层是系统中各类服务功能的集合,以物理实体、数字孪生体模型为载体,以实时数据为驱动,动态监测射电望远镜实时运行状态,并通过物理实体与数字孪生体之间的关系校准以及模型参数校准,保证射电望远镜虚实同步精度。

(1) 实时状态监测:全面感知影响射电望远镜结构变形的载荷、人为误差、装配误差等实时数据,通过数字孪生虚实映射,实现实时运行状态监测。

(2) 运行状态预测:在感知物理环境和设备运行状态的基础上,分析射电望远镜的运动特性、结构特性、性能约束等机理模型要素,通过实时数据/机理模型融合驱动,对不同工作环境和外载荷下的射电望远镜运行状态进行预测。

(3) 结构性能调控:在状态预测基础上,通过数值模拟、数据驱动的拓扑优化等方法,给出射电望远镜结构变形动态调控方案,消除复杂多变的工作环境对射电望远镜运行性能的影响。

2 射电望远镜温度场构建与结构热变形预测

为预测射电望远镜结构变形,需准确掌握其结构温度场。通过实测或仿真方法,可以获得射电望远镜结构温度场。其中,温度场实测方法,测量点的温度数据较为准确,但限于传感器的布置数目,无法对全部节点进行测量;温度场仿真方法,受到有限元模型精度、边界条件准确度的影响,仿真温度场存在误差,但可以在大尺度上反映温度场特征。

本文提出一种模型仿真和实测数据相融合的温度场构建方法,通过较少数目的传感器实测结构关键节点温度,并进行插值扩展,最后结合温度场仿真全面获取结构实时温度场,减少实测和仿真温度场的单方面数据误差。在此基础上,利用数值模拟多域仿真对射电望远镜的结构变形进

行同步预测, 有助于提高射电望远镜结构变形的预测精度, 如图 4 所示。

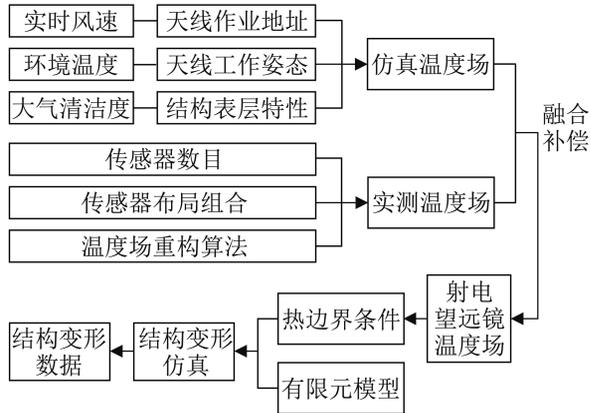


图 4 温度场构建与结构变形预测流程
Fig. 4 Temperature field construction and structural deformation prediction process

2.1 仿真温度场

射电望远镜结构与外界的换热渠道主要包括: 接收太阳的辐射、与空气的对流换热、与地面和远空的辐射换热。这些换热渠道与环境风速、大气清洁度、天空温度、地面温度等因素密切相关, 在上述因素的共同作用下, 射电望远镜结构形成瞬态时变温度场。相关环境数据实时传送到射电望远镜数字孪生体模型, 作为热环境仿真的边界条件。对射电望远镜热环境建模如下。

2.1.1 ASHRAE 晴空模型

基于 ASHRAE 晴空模型^[17], 地面物体接收的太阳辐射主要包括直接辐射、散射辐射和反射辐射, 如图 5 所示。

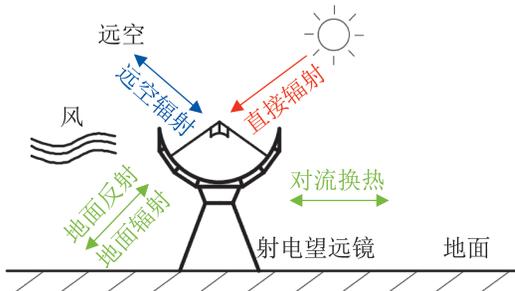


图 5 射电望远镜结构换热渠道
Fig. 5 Thermal exchange channel of radio telescope structure

直接辐射强度为

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta_s)} C_N \cos\theta \quad (1)$$

散射辐射强度为

$$G_{d\theta} = 0.5CG_{ND}(1 + \cos\alpha) \quad (2)$$

地面反射辐射强度为

$$G_R = 0.5\rho_g G_{TH}(1 + \cos\alpha) \quad (3)$$

射电望远镜表面接收到的总辐射强度为

$$G_t = \gamma(G_{ND} + G_{d\theta} + G_R) \quad (4)$$

式中: A 为不考虑地球大气层时的太阳辐射强度 (W/m^2); B 为大气消光系数; β_s 为太阳高度角; C_N 为大气清洁系数; θ 为太阳光线与结构表面法线的夹角; C 为表面散射辐射系数; α 为壁面倾角; ρ_g 为地面反射率, 一般取 0.3^[18]; G_{TH} 为落在壁面前的水平面或地面上的总辐射量; γ 为构件表面的太阳吸收率。

射电望远镜与地面、远空的辐射换热为

$$Q_r = \varepsilon\sigma(F_{wg}(T_g^4 - T_x^4) + F_{ws}(T_{sky}^4 - T_x^4)) \quad (5)$$

式中: ε 为天线表面的长波发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; F_{wg} 、 F_{ws} 分别为天线构件表面对地面、天空的辐射角系数; T_{sky} 为远空温度; T_g 为地面温度。需指出的是, 射电望远镜表面的发射率和吸收率由其表面的涂层材料决定, 常见的射电望远镜表面涂层参数见文献[19]。对于白漆表面, 发射率为 0.87, 吸收率为 0.3。

2.1.2 对流换热模型

射电望远镜结构与环境之间的对流换热可用牛顿换热定律表述为

$$Q_c = h_c(T_s - T_x) \quad (6)$$

式中: $h_c = 4v + 5.6$ 为对流换热系数^[20], v 为风速; T_s 为环境温度; T_x 为结构表面温度。

2.1.3 瞬态温度场

对射电望远镜结构的分析遵循能量守恒定律, 瞬态分析的能量平衡方程为

$$CT(t) + KT(t) = Q(t) \quad (7)$$

式中: C 为比热矩阵; 表示系统内能的增加; $T(t)$

和 $\dot{T}(t)$ 分别表示温度向量及其对时间的导数； K 为热传导矩阵； $Q(t)$ 为节点热流率向量。 K 反映了射电望远镜自身的热传导，但是由于射电望远镜表面主要部件为薄壁结构，自身的导热对温度场分布的影响较小。

2.2 实测温度场

射电望远镜结构尺寸大，在全部结构节点处布置温度传感器不现实。射电望远镜运行时，工作姿态和太阳位置不断发生改变，导致日照下结构温度场不断变化，而结构上的传感器位置是固定不变的，为适应复杂多变的实测环境，需对传感器的布局数目和位置进行全局优化。基于优化布局后的传感器实测稀疏温度数据，采用插值重构方法可扩展得到射电望远镜结构完整温度场。

2.2.1 温度传感器布局优化

传感器布局需要基于结构真实温度场数据，但在测量之前该数据是未知的，故采用仿真温度场数据替代真实温度场数据，进行传感器布局设计优化。仿真温度场虽与真实温度场不完全相同，但仍保留了分布特征，根据这些特征得到的传感器布局能较好地适用于实际温度场的测量。

考虑到日照热载荷和射电望远镜结构的对称性，温度传感器采用对称布局。因射电望远镜位姿与结构温度场复杂多变，以仿真温度场为数据来源，以多个代表性时刻的仿真温度场重构精度

为优化目标，构建传感器布局优化模型如下：

$$\text{find: } (x_1, x_2, \dots, x_M) \in \{X_i | i=1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

$$\text{min: } f = \sum_{j=1}^P \varepsilon_j f_j,$$

$$\sum_{j=1}^P \varepsilon_j = 1 \quad (9)$$

$$f_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{r,j,i} - T_{j,i})^2}$$

式中： N 为结构上所有可布置传感器的节点数目； M 为温度传感器的布置数目； P 为选定的目标温度场数目； $T_{r,j,i}$ 为第 j 个重构温度场中第 i 节点的温度值； $T_{j,i}$ 为第 j 个真实温度场中第 i 节点的温度值。

虽然天线工作姿态和太阳位置不断发生变化，但只要太阳与天线口径面呈一定夹角，结构温度场就会呈现相同的分布特征^[21-22]，因此，固定姿态下半球内的太阳直射即可代表所有载荷工况。同时，考虑天线的圆周对称性，传感器布局也应具有对称性，故在算法中加入对称性约束，只需考虑典型工况求解传感器布局。

对传感器布局来说，温度梯度越大、分布模式越复杂，所需的传感器数目越多。综合考虑结构温度场数值、分布和计算成本，本文选择结构温度梯度及数值较大的三个典型温度场为优化目标进行传感器布局优化如图6所示。实际应用中，可以增加其他时刻的温度场作为优化目标，以获得更好的传感器布局方案。

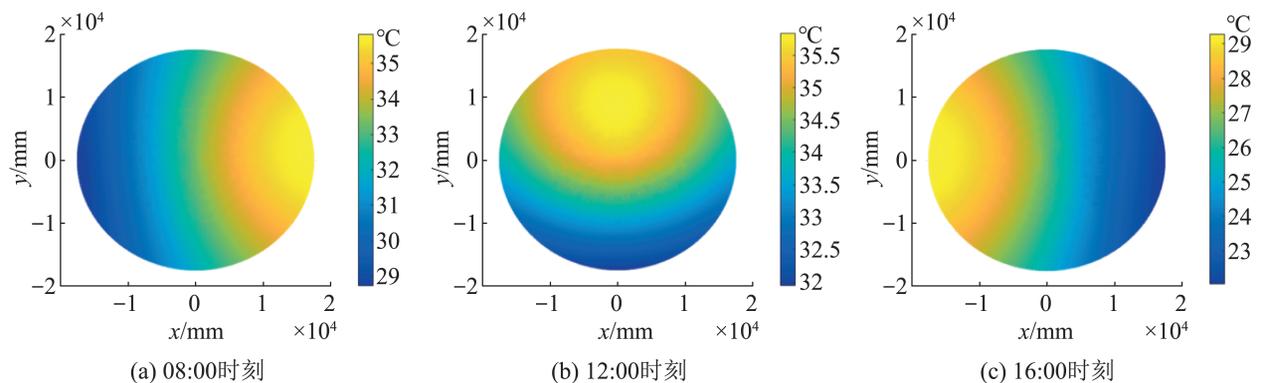


图6 三个典型时刻反射面温度场

Fig. 6 Temperature field of reflector at three typical moments

在邻域搜索算法的基础上, 采用轮盘赌模型, 改进得到多目标对称邻域搜索算法进行求解, 当重构温度场与仿真温度场的误差小于阈值且稳定时, 得到适用于射电望远镜全天温度场重构的温度传感器最优布局。

2.2.2 温度场插值重构

综合考虑温度场复现效果、算法计算速度、算法复杂程度等因素, 本文采用 BARNES 客观分析插值方法^[23]。为衡量 BARNES 插值算法重构温度场的误差情况, 定义结构温度场均方根误差 TRms, 其数值越大, 表明重现温度场与真实温度场误差越大, 温度场复现效果越差。

$$\text{TRms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{r,i} - T_i)^2} \quad (10)$$

式中: $T_{r,i}$ 为结构重构温度场中第 i 节点处的温度值; T_i 为真实温度场中第 i 节点处的温度值。

由 BARNES 插值方法可得, 结构节点 (x_i, y_i) 处的温度值 $T_{r,i}$ 由两次插值计算而来。

第 m 个测量点坐标为 (x_m, y_m) , 温度表示为 $T(x_m, y_m)$, 则对结构第 i 节点, 一次插值结果为

$$T_i^1 = \frac{\sum_{m=1}^N w_m T(x_m, y_m)}{\sum_{m=1}^N w_m} \quad (11)$$

$$w_m = \exp(-d_m^2/c^2) \quad (12)$$

$$d_m = \|x - x_m\| \quad (13)$$

在一次插值的基础上进行二次插值, 结构第 i 节点的插值结果为

$$T_{r,i} = T_i^1 + \frac{\sum_{m=1}^N w_m (T(x_m, y_m) - T_i^1)}{\sum_{m=1}^N w_m} \quad (14)$$

$$w'_m = \exp(-d_m^2/\gamma c^2) \quad (15)$$

以图 6(a) 为基础, 按照最优传感器布局采集实测温度数据, 使用 BARNES 方法插值计算, 结果见图 7。

由图 7 可知, 得到的结构重构温度场与真实

温度场节点最大温差不超过 0.7°C , 且 90% 以上的节点温度误差低于 0.4°C , 均方根误差 TRms 仅为 0.137°C , 重构温度场的精度较高。实际应用中, 可通过设定重构温度场的 TRms 值, 来确定传感器的布局数目和位置。

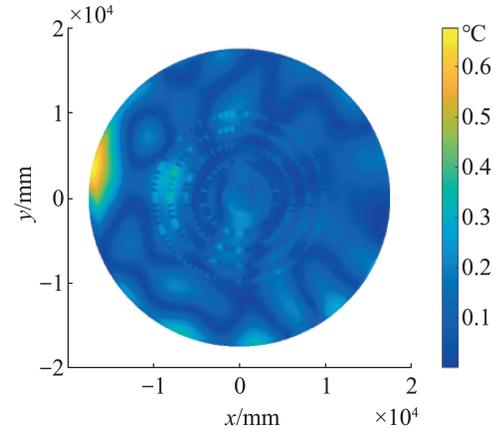


图 7 重构温度场误差

Fig. 7 Temperature field reconstruction error

2.3 结构变形仿真机理模型

将仿真温度场数据和实测温度场数据进行关联、优化与补偿, 得到射电望远镜结构完整温度场。在此基础上, 构建基于数字孪生的射电望远镜结构变形机理模型。通过模型仿真预测, 获得射电望远镜结构变形的预测数据。

获得射电望远镜瞬态时变温度场后, 将因温度产生的载荷转化为等效节点载荷进行结构热-弹性分析。设结构温差为 $\Delta T(x, y)$, 若物体变形不受任何限制, 将会产生应变 $\alpha \Delta T$, 其中, α 为线膨胀系数。若物体变形受到约束, 将会产生应力, 因此应力-应变的关系为

$$\sigma = \mathbf{D}(\varepsilon - \varepsilon_T) + \sigma_0 \quad (16)$$

式中: \mathbf{D} 为弹性矩阵; σ_0 为初始应力。

对任一单元而言, 在单元局部坐标系下, 节点力为

$$\mathbf{F}_e = \iint \mathbf{B}^T \sigma h dx dy \quad (17)$$

式中: h 为单元厚度; \mathbf{B} 为应力-节点位移阵。

$$\delta_e = \mathbf{B} \delta_c \quad (18)$$

等效节点温度载荷为

$$(\mathbf{R}_T)_e = h \iint \mathbf{B}^T \mathbf{D}(\varepsilon_T)_e dx dy \quad (19)$$

把温度载荷的作用转化为等效节点温度载荷后,可按常规的有限元进行求解,在求解出节点位移之后,即可按式(19)求解出各单元应力。

3 射电望远镜结构热变形动态补偿

热载荷作用下射电望远镜结构变形补偿方法包括主反射面补偿和副反射面补偿,如图8所示。

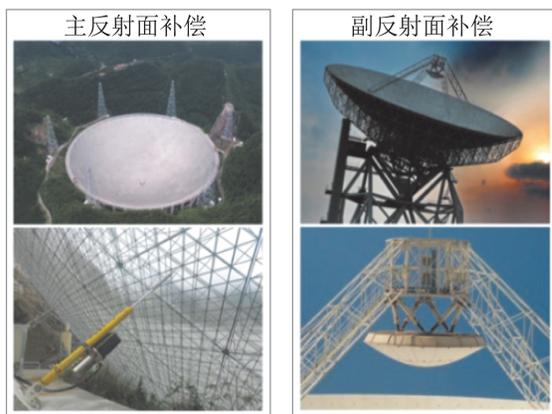


图8 结构变形补偿方法

Fig. 8 Structural deformation compensation

(1) 主反射面补偿:对主面变形进行计算分析后,控制主面背后的促动器来调整主面形状,减少变形误差,提升射电望远镜运行性能。

(2) 副反射面补偿:通过 Stewart 式六自由度并联机构调整副面位姿,使入射电磁波在经过主、副反射面的反射后汇集于副反射面虚焦点,反之,发射电磁波经过副、主反射面后到达主面口径面上时为等相位面,实现结构变形误差补偿。

3.1 主反射面补偿机理模型

主动面整体面形调整方法以面形调整后的口径面光程差的平方和最小为目标,同时充分考虑因反射面调整点位置变化所引起的面板弹性变形及口径面光程差的变化,采用最小二乘矩阵变换快速计算面板调整点的最佳调整量。

首先考虑主动调整面形后误差最小,调整后

的面形误差残差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{W}_0 + \Delta \mathbf{W} = \mathbf{W}_0 + \mathbf{C} \boldsymbol{\delta}_{\text{all}} \quad (20)$$

式中: \mathbf{W}_0 为主面变形误差矩阵; \mathbf{C} 为弹性矩阵; $\Delta \mathbf{W}$ 为因反射面调整引起的形状变化; $\boldsymbol{\delta}_{\text{all}}$ 为调整差。由最小二乘原理可得

$$\sum v_i^2 = \sum (w_{0,i} + \Delta w_i)^2 \quad (21)$$

转换为矩阵形式:

$$\mathbf{V}^T \mathbf{V} = (\mathbf{W}_0 + \mathbf{C} \boldsymbol{\delta}_{\text{all}})^T (\mathbf{W}_0 + \mathbf{C} \boldsymbol{\delta}_{\text{all}}) \quad (22)$$

经过矩阵变换之后,由正规方程求解,得方程的解为

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{all}} = -(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{W}_0 = \mathbf{S} \cdot \mathbf{W}_0 \quad (23)$$

式中: \mathbf{S} 为主动面调整最小二乘矩阵。因射电望远镜电性能变化主要由口径面光程差引起,以主动面调整后的口径面光程差最小为目标,根据表面法向误差和光程差之间的关系,引入反射面表面法向量轴向分量 \mathbf{P} 作为权值,即可得到调整量的最小二乘矩阵表示为

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{all}} = -(\mathbf{C}^T \mathbf{P} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{P} \mathbf{W}_0 = \mathbf{S} \cdot \mathbf{W}_0 \quad (24)$$

根据上述计算过程构建主反射面补偿机理模型,针对复杂外载荷所引起的反射面结构变形,根据式(24)将表面变形误差矩阵与调整矩阵相乘即可获得主反射面最佳调整量。

3.2 副反射面补偿机理模型

射电望远镜反射面节点位移主要是抛物面的刚体运动及抛物面焦距的变化,因此,引入与实际变形后反射面吻合的最佳抛物面,使变形后的反射面对它的均方根值最小,它具有新的焦点和焦距,再将馈源移到新的焦点处,可极大减少反射面因热变形而造成的精度误差。只要确定抛物面顶点的位移 u_A 、 v_A 、 w_A 以及焦轴的方向 ϕ_x 、 ϕ_y 和焦距的变化量 h ,即可求出最佳吻合抛物面。

本文研究对象为卡塞格伦双反射面射电望远镜,其主反射面是旋转抛物面,副反射面是旋转双曲面,馈源的相位中心位于双曲面的实焦点 F_0 处,双曲面的虚焦点与抛物面的焦点 F_1 重合,副反射面的顶点 F_2 距离馈源相位中心为 f_0 。根据最

小二乘法思想, 确定最佳吻合抛物面的六个几何参数 Δx 、 Δy 、 Δz 、 ϕ_x 、 ϕ_y 、 Δf , 通过下式计算可得新的副反射面顶点位置 F'_2 为

$$\begin{cases} x_{F'_2} = \Delta x + (f_0 + \Delta f) \cdot \phi_y \\ y_{F'_2} = \Delta y - (f_0 + \Delta f) \cdot \phi_x \\ z_{F'_2} = f_0 + \Delta f + \Delta z \end{cases} \quad (25)$$

由未变形时副反射面顶点位置 $F_2(x_{F_2}, y_{F_2}, z_{F_2})$

可知, 最终副反射面顶点移动量为

$$\begin{cases} \Delta x' = x_{F'_2} - x_{F_2} \\ \Delta y' = y_{F'_2} - y_{F_2} \\ \Delta z' = z_{F'_2} - z_{F_2} \end{cases} \quad (26)$$

根据上述计算过程, 构建副反射面补偿机理

模型, 新的焦距相对于 x 、 y 轴转动量分别为 ϕ_x 、 ϕ_y , 这样就可以移动副面的位置和指向。

3.3 射电望远镜结构热变形补偿流程

将上述主反射面与副反射面补偿机理模型集成到射电望远镜数字孪生模型中, 以温度场构建和结构变形仿真结果为输入, 根据变形量大小不同, 调用主/副反射面补偿机理模型, 对结构热变形动态补偿量进行计算, 并确定主副面结构补偿转换阈值, 由环境变化程度决定迭代周期长短, 增强射电望远镜对环境突变的响应能力。射电望远镜结构补偿流程如图 9 所示。

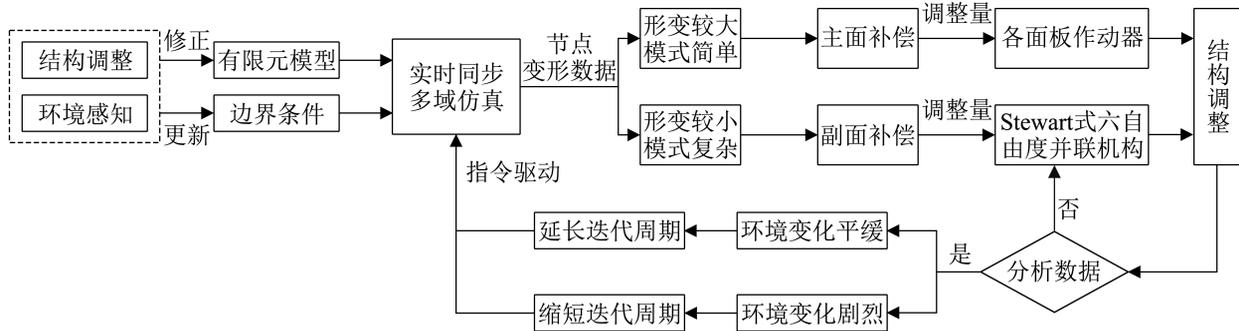


图 9 变形补偿迭代过程

Fig. 9 Deformation compensation iteration process

4 模型试验与分析

4.1 试验平台

为了验证本文提出的结构热变形动态补偿方法, 构建了射电望远镜微型实体模型, 如图 10 所示。对微型实体模型进行有限元分析, 采用前述传感器布局优化算法, 得到温度传感器对称布局方案(图 10 左上角), 用于实时测量射电望远镜结构温度。

结构温度数据是最重要的环境要素, 为保证数据采集的精度和实时性, 选用 NT59-LE 测温装置配合温度网关接收器 EG59-TFT 使用, 采用 1% 高精度芝浦 NTC 热敏电阻采集温度数据, 并将实测温度数据传输至智能网关。选用树莓派作为本地控制下位机, 负责模型的运动控制、工作面数

据的采集。采集的实时数据驱动射电望远镜数字孪生系统迭代优化、智慧运行。



图 10 原型试验系统

Fig. 10 Prototype system

基于 Unity3D 开发射电望远镜数字孪生系统, 以射电望远镜数字孪生体模型为核心, 利用物联网技术实时采集环境数据和设备状态数据, 通过虚实

同步实现射电望远镜实时状态监测。系统运行时，通过调用热变形补偿机理模型得出射电望远镜结构动态补偿方案，进而将该方案以指令形式反馈给射电望远镜实体模型，动态调整射电望远镜结构。

4.2 系统运行过程

4.2.1 射电望远镜实时运行状态

在 2022 年 7 月某天进行了户外试验验证。12:09

时刻测得实时风速为 1.2 m/s，空气温度为 26.7°C，扩展温度数据得到反射面板最高温度为 38.47°C、最低温度为 33.38°C；由太阳辐射变送器测得此时太阳辐射量为 1 000 W/m²；由运动编码器监测射电望远镜运行方位角为 40°，俯仰角为 45°；上述数据通过通信接口实时同步映射至数字孪生体模型，如图 11 所示。

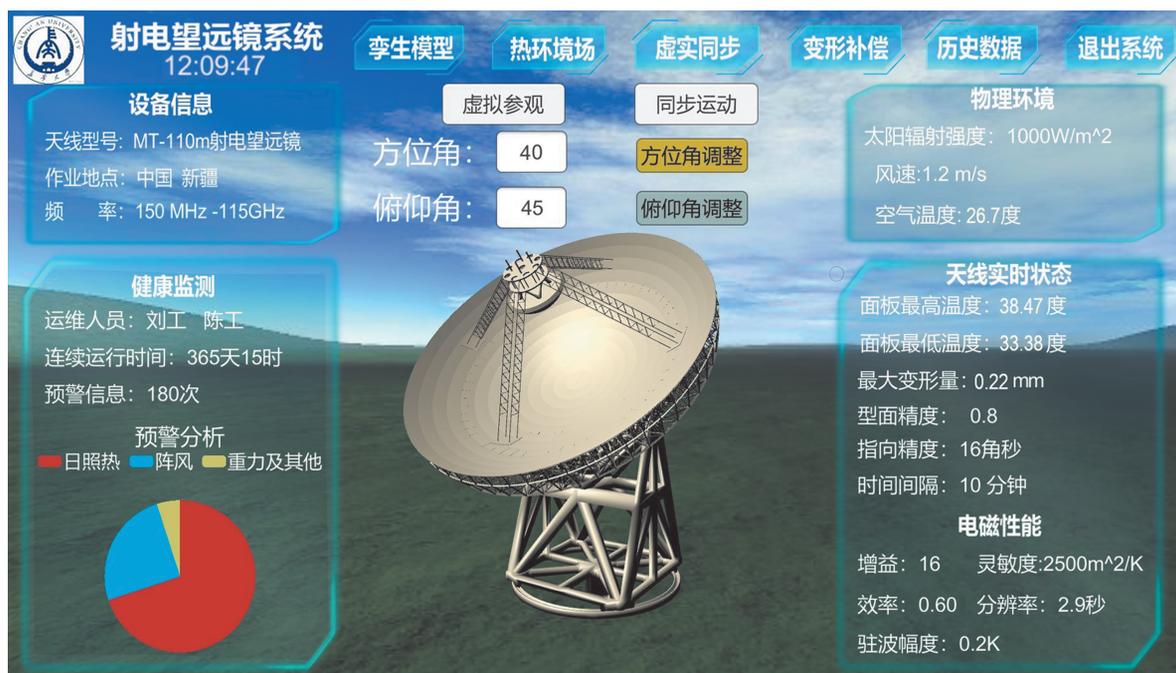


图 11 射电望远镜运行状态
Fig. 11 Radio telescope status

4.2.2 射电望远镜结构温度场动态仿真

12:10时刻射电望远镜运行姿态保持不变，方位角为 40°，俯仰角为 45°，利用传感器精确采集物理环境数据及结构温度数据(图 12 折线图)，插值处理后得到结构实测温度场；进一步结合仿真温度场，通过实测数据与仿真数据融合补偿得到更精确的结构温度场，图 12 上部分展示了射电望远镜主反射面热温度场、桁架上下侧面热温度场分布情况。由图可知，反射面温度场呈阶梯状分布，最大温度值为 38.47°C，位于反射面左侧边缘处，原因是太阳直射桁架与面板边缘，导致温度

较高。重构温度场云图能够直观呈现射电望远镜结构在日照热下的温度分布，便于运维人员掌握主要结构的实时温度状态。

4.2.3 射电望远镜结构变形仿真预测

由实时仿真温度场与实测温度场融合形成结构温度场，即为当前 12:10 时刻下的结构瞬态温度场，以此为热边界条件，利用式(16)~(19)对结构进行热变形仿真计算，得到图 13 所示的射电望远镜反射面及背部桁架结构的应变云图。由图可知，射电望远镜结构 x 、 y 、 z 方向最大变形量分别为 0.08、0.14、-0.22 mm。

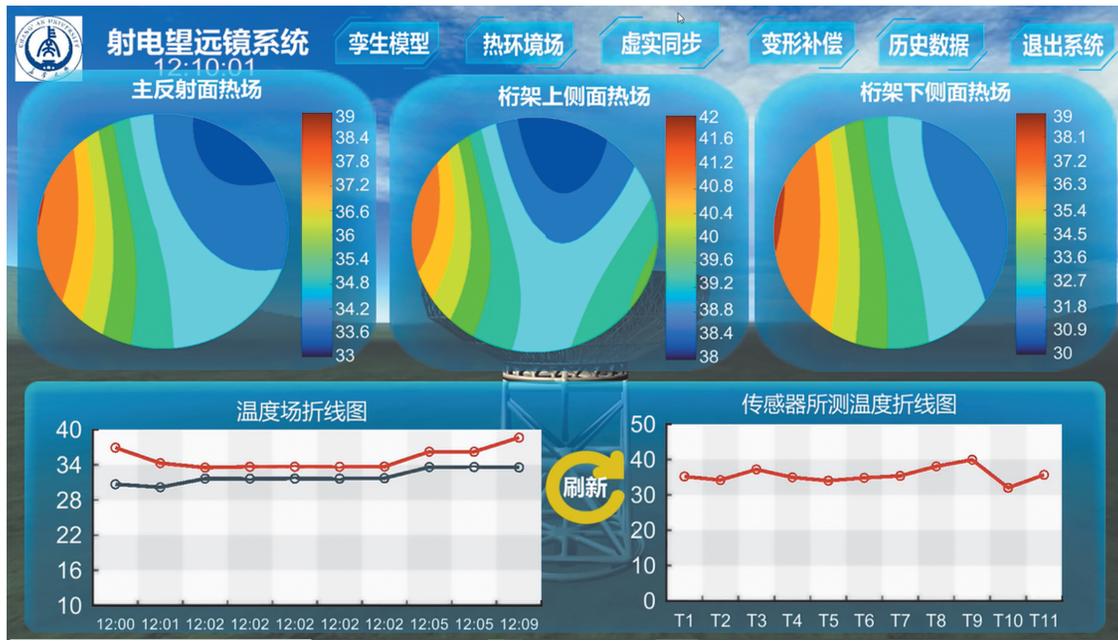


图 12 温度场动态仿真

Fig. 12 Dynamic thermal field simulation

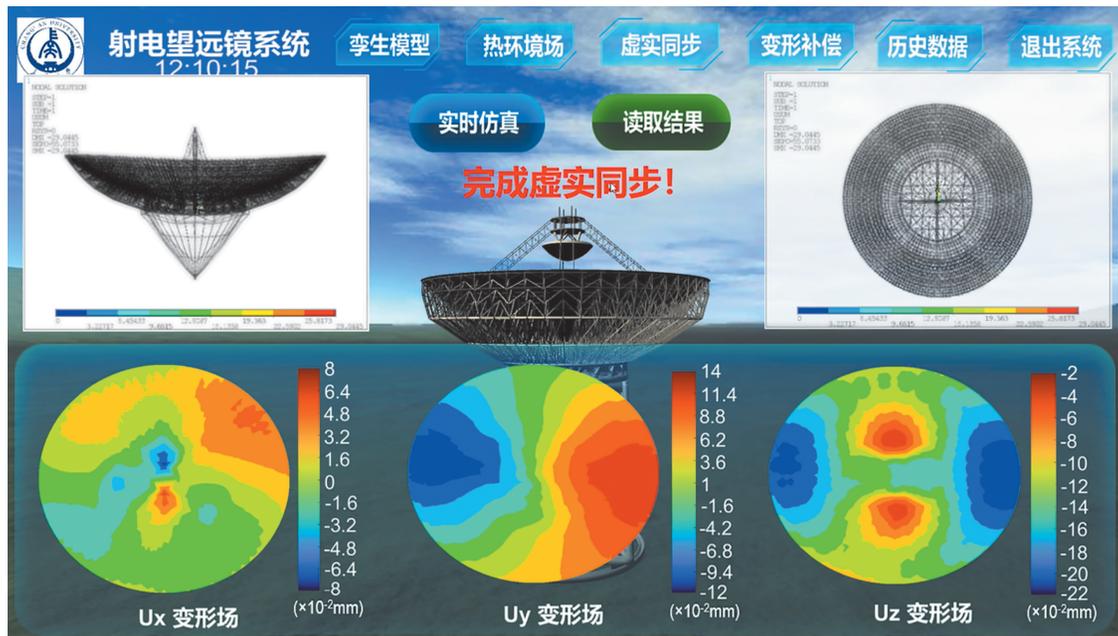


图 13 结构变形预测

Fig. 13 Prediction of structural deformation

由于现实环境下日照温变速度较慢, 射电望远镜在秒级时间的结构热变形量极小。根据工程经验, 将射电望远镜结构热变形补偿的时间间隔设置为 10 min 即可满足工作精度保持的要求。而本系统采用间断采集方式(采集间隔为 1 min), 从

温度传感器采集实测温度数据到调用仿真预测模型进行计算并可视化显示的时间平均为 20 s, 因此, 本系统实现了 1 min 20 s 进行一次结构热变形补偿, 远小于工程经验要求的 10 min, 具有良好的时效性。

基于实测数据与仿真数据融合,可准确计算射电望远镜在日照热载荷下的结构变形数据,解决结构变形量无法准确实测的难题。

4.2.4 射电望远镜结构补偿参数分析

基于结构变形仿真结果,结合结构补偿机理模型进行计算,得到各补偿模式对应的光程差结果分布。图14展示了当前射电望远镜反射面结构

分别在 x 向偏移、 x 向旋转、 y 向偏移、 z 向偏移及焦距变化五种补偿参数下的光程差变化云图、补偿后结构剩余光程差分布图。由图14(e)可知,补偿后结构剩余光程差最大值为0.004 mm,较未补偿时减小80%左右。可见当前的补偿方法较好地对接结构变形导致的光程差进行了补偿,减少了结构变形对射电望远镜性能的影响。

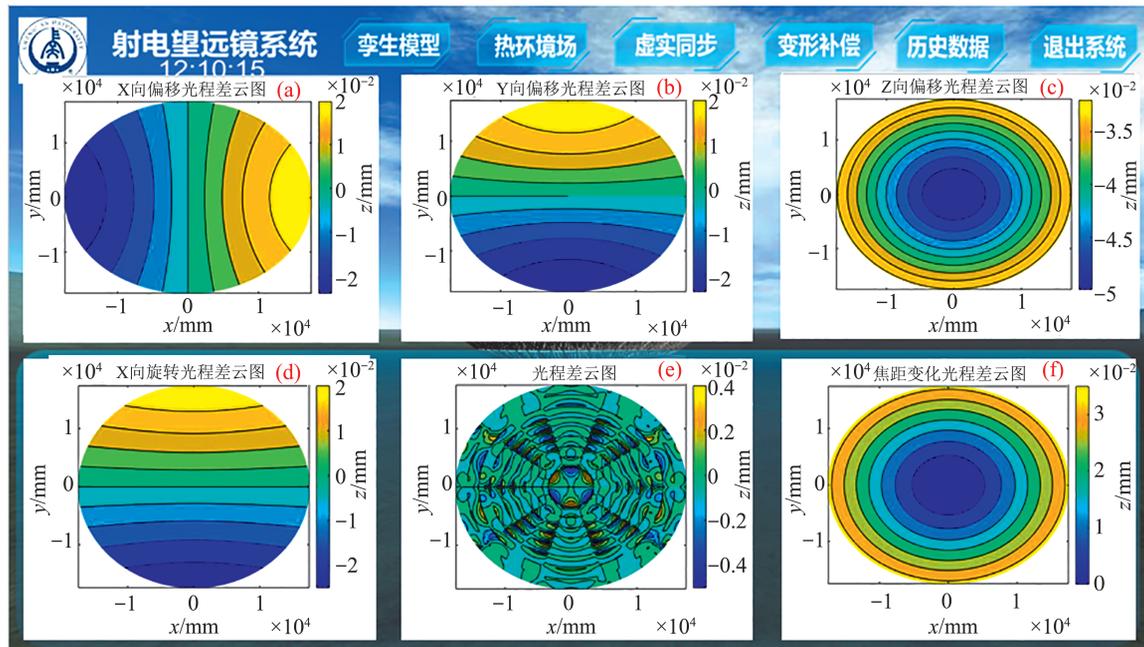


图14 各补偿参数对结构光程差影响

Fig. 14 Influence of compensation parameters on structure optical path difference

对射电望远镜结构光程差的计算与监控,不仅能使运维人员实时掌握射电望远镜在日照热载荷下的结构变形情况,而且明确了各补偿参数对结构光程差的影响云图,呈现各补偿参数对应的真实补偿效果。

4.2.5 射电望远镜结构热变形补偿

以结构变形仿真获得的实时热变形数据为基础,解析结构实时变形数据,根据结构变形模式及量级大小选用合适的补偿方法,实时分析当前环境变化剧烈程度,智能调整变形补偿迭代周期长短,实现射电望远镜结构变形的动态补偿。由结构变形预测结果可知,当前射电望远镜的变形量级较小,模式较简单,且环境温度变化平缓,

采用副反射面补偿方法对结构变形进行补偿,利用式(25)~(26)完成副反射面补偿计算,得到射电望远镜结构在 x 、 y 、 z 三个方向的补偿量及RMS均方根值(表征变形后反射面与最佳吻合抛物面误差程度),如图15所示。由图可知,在12:10时刻,采用副反射面补偿补偿模式,射电望远镜在 x 、 y 、 z 向的偏移补偿量分别为-0.106 5、0.004 47、-0.264 7 mm,通过Stewart式六自由度并联机构调整副面位姿,即可实现对射电望远镜反射面结构热变形补偿。将射电望远镜热变形补偿阶段关键数据的解析计算及可视化显示,便于选用合适补偿模式进行结构补偿,及时调整射电望远镜结构,减少结构变形对工作性能的影响。

4.2.6 射电望远镜历史数据可视化

射电望远镜动态运行时, 热变形补偿过程数据存储于云数据库。用户可随时查看射电望远镜数字

孪生系统中的运动姿态、物理环境、热变形补偿、风速预警等历史数据, 如图 16 所示, 分析影响射电望远镜运行性能的各因素占比饼图, 便于运维人员掌握历史运行状态, 开展全生命周期健康管理。

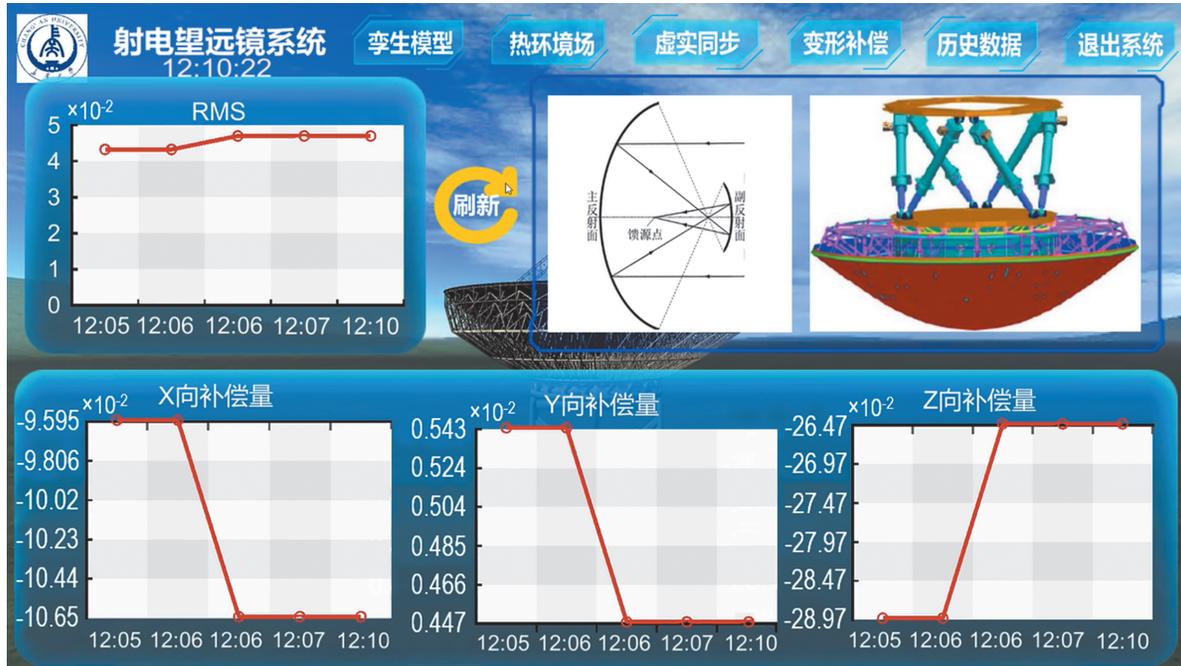


图 15 结构变形补偿

Fig. 15 Structural deformation compensation



图 16 历史数据分析

Fig. 16 Historical data analysis

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

5 结论

针对射电望远镜等大型天文装备在日照热载荷作用下结构变形无法实时测量与动态补偿的难题, 本文提出一种数字孪生驱动的射电望远镜结构热变形动态补偿方法, 构建了基于实测数据与仿真数据融合的射电望远镜结构热变形动态补偿机制, 开发了射电望远镜数字孪生原型系统。通过数据感知、虚实交互、状态可视化、同步多域仿真预测, 在微型实体模型上进行模拟实验, 实现了射电望远镜运行状态实时监测、温度场仿真、结构变形动态补偿, 证明了本文方法的可行性和时效性, 为保障射电望远镜运行性能提供了支撑。

后续将探索日照热与重力、阵风等其他外载荷耦合作用下的射电望远镜结构变形动态补偿方法, 突破基于数字孪生的射电望远镜多域多物理场仿真技术, 实现更精准的运行性能调控。

参考文献:

- [1] 田大可, 刘荣强, 邓宗全, 等. 多模块构架式空间可展开天线背架的几何建模[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 111-116.
Tian Dake, Liu Rongqiang, Deng Zongquan, et al. Geometry Modeling of Truss Structure for Space Deployable Truss Antenna with Multi-module[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 111-116.
- [2] Wang C S, Yuan S, Liu X, et al. Temperature Distribution and Influence Mechanism on Large Reflector Antennas Under Solar Radiation[J]. Radio Science, 2017, 52(10): 1253-1260.
- [3] Mac Donald M E. Measured Thermal Dynamics of the Haystack Radome and HUSIR Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5): 2441-2448.
- [4] Di Carlo A, Chung K H. Radome-enclosed Antenna's Temperature and Velocity Fields[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 437-444.
- [5] Albert Greve, Michael Bremer. Thermal Design and Thermal Behaviour of Radio Telescopes and their Enclosures[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] Alessandro Attoli, Flavio Stochino, Franco Buffa, et al. Sardinia Radio Telescope Structural Behavior Under Solar Thermal Load[J]. Structures, 2022, 39: 901-916.
- [7] Fu Li, Yu Linfeng, Tang Jiansen, et al. Thermal Analysis of the Backup Structure of the Tianma Telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(10): 105011.
- [8] Yan Yuefei, Song Xue, Hu Xinlan, et al. Accurate Data Match and Call Method for the Thermal Compensation Database of the Reflector Antenna[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(5): 100-110.
- [9] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [10] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
Tao Fei, Zhang Meng, Cheng Jiangfeng, et al. Digital Twin Workshop: A New Paradigm for Future Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [11] 肖通, 江海凡, 丁国富, 等. 五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(12): 2880-2890.
Xiao Tong, Jiang Haifan, Ding Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(12): 2880-2890.
- [12] 刘红彬, 申志强, 王轶泽, 等. 数字孪生模型在轴承套圈磨削加工中的应用[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 557-567.
Liu Hongbin, Shen Zhiqiang, Wang Yize, et al. Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 557-567.
- [13] José Ríos, Juan Carlos Hernández, Manuel Oliva, et al. Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft[M]//Advances in Transdisciplinary Engineering. Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2015: 657-666.
- [14] 刘志勇, 李军, 王娜, 等. 大口径射电望远镜天文观测与监控软件系统架构设计[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2019, 49(9): 74-84.
Liu Zhiyong, Li Jun, Wang Na, et al. The Architecture Design of Astronomical Observation and System Monitoring and Control Software for Large Radio Telescope[J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(9): 74-84.
- [15] 张庆海, 武鹏伟, 赵正旭. 大型射电望远镜数字孪生系

- 统架构设计与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 364-373.
- Zhang Qinghai, Wu Pengwei, Zhao Zhengxu. Design and Application of Digital Twin System Architecture for Large Radio Telescope[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 364-373.
- [16] 张涛, 郭阳, 张庆海, 等. FAST反射面单元数字孪生模型的创建[J]. 现代计算机, 2020(25): 15-21.
- Zhang Tao, Guo Yang, Zhang Qinghai, et al. Creation of Digital Twin Model for FAST Reflector Elements[J]. Modern Computer, 2020(25): 15-21.
- [17] Li P, Duan B Y, Wang W, et al. Electromechanical Coupling Analysis of Ground Reflector Antennas Under Solar Radiation[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(5): 40-57.
- [18] Fan Feng, Jin Xiaofei, Shen Shizhao. Effect of Non-uniform Solar Temperature Field on Cable-net Structure of Reflector of Large Radio Telescope-FAST[J]. Advances in Structural Engineering, 2009, 12(4): 503-512.
- [19] K F. 太阳辐射对桥梁结构的影响[M]. 刘兴法, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- Kehlbeck F. Einfluß der Sonnenstrahlung bei Brückenbauwerken[M]. Translated by Liu Xingfa. Beijing: China Railway Publishing House, 1981.
- [20] Albert Greve, Michael Bremer. Thermal Design and Thermal Behaviour of Radio Telescopes and their Enclosures[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [21] 连培园, 朱敏波, 王伟, 等. 一种轴对称反射面天线温度场实时预估方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 165-172.
- Lian Peiyuan, Zhu Minbo, Wang Wei, et al. Estimation Method of Temperature Field of Large Axial Symmetric Reflector Antenna in Real-time[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 165-172.
- [22] 钱宏亮, 柳叶, 范峰, 等. 上海65 m射电望远镜非均匀温度场及其效应[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 970-978.
- Qian Hongliang, Liu Ye, Fan Feng, et al. Non-uniform Temperature Field and Effects of Shanghai 65 m Radio Telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 970-978.
- [23] Barnes S L. Applications of the Barnes Objective Analysis Scheme. Part II: Improving Derivative Estimates[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(6): 1449-1458.