

数模融合驱动的大型可展开天线精度调控研究

姜冬磊¹ 赵强强^{1*} 吴腾飞¹ 马嘉² 贾康¹ 洪军¹

1.西安交通大学机械工程学院,西安,710049

2.上海宇航系统工程研究所,上海,201109

摘要:为高效精准地通过杆系调整提高大型可展开平面天线形面精度,分别从有限元仿真分析和摄影测量两方面实现形面精度预测及准确性验证。根据材料力学原理和温度等效理论构建平面天线形面精度仿真模型,基于摄影测量建立形面精度快速测量系统。结合有限元仿真样本和摄影测量实测样本建立可变信度高斯过程模型,通过贝叶斯优化进行精度优化调整。实现了大型平面天线精度精准预测与现场快速装调,可为大型平面天线正向精度评估与反向优化调整提供仿真分析模型支撑。

关键词:平面天线;静力学仿真;形面精度;工业摄影测量;贝叶斯优化

中图分类号:V465

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Precision Control of Large Deployable Antennas Driven by Fusion of Data and Model

JIANG Donglei¹ ZHAO Qiangqiang^{1*} WU Tengfei¹ MA Jia² JIA Kang¹ HONG Jun¹

1.School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

2.Shanghai Aerospace System Engineering Research Institute, Shanghai, 201109

Abstract: In order to improve the surface precision of large deployable planar antennas efficiently and accurately by adjusting the truss system, the surface precision prediction and accuracy verification were realized from two aspects of finite element simulation analysis and photogrammetry. According to the principle of mechanics of materials and temperature equivalence theory, the simulation model of plane antenna surface precision was constructed. A rapid measurement system of surface accuracy was established based on photogrammetry. The variable confidence Gaussian process model was established by combining the finite element simulation samples and the photogrammetry measured samples, and the precision was optimized and adjusted by Bayesian optimization. The accurate prediction and on-site rapid adjustment of large planar antenna precision were realized, which may provide simulation analysis model support for forward precision evaluation and inverse optimization adjustment of large planar antennas.

Key words: planar antenna; statics simulation; surface accuracy; industrial photogrammetry; Bayesian optimization

0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)能够实现对遥远目标的遥感观测,广泛应用于军事监测、民用生产等领域^[1]。随着 SAR 平面天线向大口径、大平面方向发展^[2],它对自身形面精度的要求越来越高。星载 SAR 天线的形面精度直接决定天线在轨电性能,保障形面精度对星载 SAR 天线实现高性能服役至关重要^[3]。杆系调整是大型星载 SAR 天线保障和提高形面精度的核心环节^[4]。大型星载 SAR 天线可展机构是典型的多环闭链复杂杆系结构,具有强耦合、高非线性 and 过约束的特点,调整难度极大^[5]。现行装

调方法中采用“盲装”“盲调”策略,装调次数多、过程复杂,没有明确误差与精度间的关系,精度保障具有上限^[6],因此,如何通过杆系调整来保障和提高形面精度,实现快速高精度装调,是大型星载 SAR 天线生产制造中亟需解决的难题。

大型星载 SAR 天线采用桁架式可展天线,与其他类型的天线结构相比结构刚度高、精度高、展收比高且质量小^[7]。但随着天线面板数量的增加,天线结构的复杂程度也会增加,导致微小的误差变动就会对天线形面精度产生巨大的影响^[8]。HEDGEPEETH 等^[9]使用逆频率平方的计算方法分析了 SAR 天线可展桁架支撑结构中各杆件杆长误差引起的天线结构表面误差。GREENE^[10]对四面体桁架天线进行了多重有限元结构分析,认为构件数量对形面精度有显著影响。BITT-

收稿日期:2023-12-13 修回日期:2025-01-20

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3304200);国家自然科学基金(52205539, U23B2095, 52075427)

ERA^[11]探究了天线模型的强度和刚度对展开过程精度的影响。MOBREM^[12]基于 Monte Carlo 仿真法对天线形面精度进行分析,采用基于正态模态技术的直接法和间接法计算了形面精度对单个杆件误差的敏感度。丁建中等^[13]采用矩阵分块建模的方法分析了 SAR 天线各铰链间隙对其展开精度的影响。余德文等^[6]通过结构等效转换的方法将 SAR 天线可展机构分为两部分,分别以闭环矢量和虚位移法为基础推导出天线的几何精度模型,最后采用线性叠加的方法建立 SAR 天线可展机构整体装配误差模型。上述研究采用不同的方法建立了天线有限元仿真模型,探究了杆系结构对天线形面精度的影响,但没有进行精准实验验证。南凯刚等^[14]采用误差等效建模方法对桁架天线装配误差进行有限元仿真建模,通过多元线性回归拟合得到桁架天线单元体代理模型,并采用齐次变换法得到桁架天线的整体装配误差传递模型。该研究验证了有限元仿真模型和代理模型的准确性,但实验采用三坐标测量仪,测量过程复杂,无法应用于实际装调过程。

本文从星载 SAR 天线实际工况出发,基于有限元分析建立了大型平面天线形面精度仿真分析模型,并基于摄影测量方法搭建了天线平面度误差快速测量系统,提出了面向形面精度保障的星载平面天线杆系变可信度优化调整模型,实现了大型星载 SAR 天线的精准预测与快速优化装调。

1 问题描述

大型平面天线主要由星体、天线面板、可展支撑桁架机构和锁定铰链等组成^[15],结构如图 1 所示,各天线支撑杆误差变化会对天线形面精度产生影响,直接影响天线在轨电性能,杆系调整是大型平面天线保障和提高形面精度的核心环节。实际精度采用平面度误差作为对比标准,主要表示为变形后天线形面各点距离理论拟合面最大和最小偏移量之差,即

$$W = \max(e_i) - \min(e_i) \quad (1)$$

式中: W 为平面度误差; e_i 为实际点 i 与基准面的偏移量。

以大型星载 SAR 天线为例,其可展机构是典

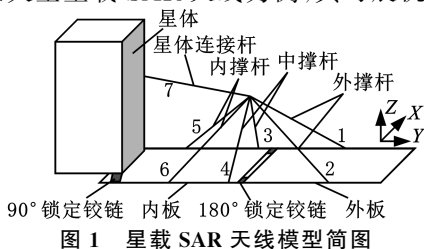


图 1 星载 SAR 天线模型简图

Fig.1 Sketch of satellite-based SAR antenna model

型的多环闭链复杂杆系结构,具有强耦合、高非线性和过约束的特点,调整难度极大,因此,如何通过杆系调整来保障和提高形面精度是大型星载 SAR 天线生产制造中亟需解决的难题。针对这一问题,本文采用有限元仿真分析与实物模型实验验证的方式来实现星载 SAR 天线形面精度的精准预测,并基于该仿真模型建立杆系优化调整模型。

首先,建立大型星载 SAR 天线形面精度仿真分析模型。以实际模型为参考设计缩比模型,利用 ANSYS 建立了该模型的形面精度有限元仿真模型,基于热胀冷缩原理在模型中采用温度变化的方式实现杆件长度变化。基于此模型研究支撑杆长误差与天线形面精度之间的映射规律,获得不同误差组下天线阵面平面度误差,研究各杆件对天线形面精度的影响程度,为形面精度精准预测与后续的杆系优化调整奠定模型基础。

其次,搭建摄影测量系统,结合有限元仿真分析模型进行对比验证。设计了大型星载 SAR 天线形面精度快速测量方案,根据三角测量原理实现天线阵面靶标点快速测量与平面度误差高效求解。在此基础上,采用直线电机控制的方法实现不同杆长误差组合,得到该组误差下的精度仿真结果和实测结果,通过对比分析验证了精度仿真分析模型的准确性。

最后,基于有限元仿真分析数据和实测数据,提出面向形面精度保障的大型星载 SAR 天线杆系优化调整模型。以天线形面平面度误差为优化目标,以杆长调整量为设计变量,基于高斯过程模型建立代理模型,利用贝叶斯优化方法建立天线杆系优化调整模型,通过动态模型优化获得最优杆系调整量。针对大型星载 SAR 天线实际工况进行案例分析,验证多保真度代理模型优化方法的可靠性,为现场工艺人员实现大型星载 SAR 天线精度精准预测与现场快速装调提供理论支撑。

2 星载 SAR 天线形面精度仿真模型构建

本模型将天线面板简化为桁架结构,并直接通过电机的伸缩实现杆系高效调整。以图 1 为例,设定外撑杆为天线支撑杆 1、2,中撑杆为天线支撑杆 3、4,内撑杆为天线支撑杆 5、6,星体连接杆为天线支撑杆 7。如图 2 所示,天线支撑杆由两端连接的整体结构变为三段式结构,采用连杆-电机-连杆的方法组成,通过电机调节杆长误差。

星载 SAR 天线整体选择 3D 打印的方式进行加工,采用 R4600 高精密树脂作为材料,具体参数如表 1 所示。

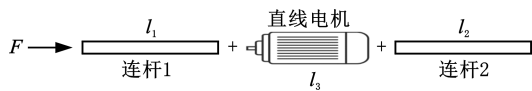


图 2 杆件等效模型

Fig.2 Equivalent model of the rod

表 1 高精度树脂性能参数

Tab.1 High precision resin performance parameters

性能参数	数值
热变形温度(0.46 MPa)/℃	46
邵氏硬度	79
拉伸强度/MPa	35
弹性模量/MPa	2370~2650
弯曲强度/MPa	67
泊松比	0.41
线性膨胀系数/K ⁻¹	1.05×10 ⁻⁴

星载 SAR 天线的形面精度仿真分析模型基于 ANSYS 搭建,简化后主要包括天线形面构建、杆件构建、铰链支座处理、锁定铰链处理四部分。天线面板采用 BEAM188 梁单元结构,依据高精度树脂性能,拉伸强度为 35 MPa,弯曲强度为 67 MPa,泊松比为 0.41。在实际星载 SAR 天线中,90°及 180°锁定铰链承担天线面板收缩和展开的稳定工作,其零件采用特殊加工。当天线展开后,90°锁定铰链与 180°锁定铰链固定在特定角度而不再具有转动自由度,因此铰链对天线形面精度研究实验的影响较小。为减小计算成本,铰链支座及锁定铰链均采用一体化设计,设置 BEAM189 梁单元结构,其中铰链支座通过全耦合的方式实现铰链支座与天线形面的固定。同时采用 X、Y、Z 三个方向位移自由度耦合以及 Y、Z 两个方向转动自由度耦合来实现杆件与铰链支座的连接以及 X 方向的转动。

大型星载 SAR 天线可展开桁架支撑结构一般为杆系结构,仿真中采用梁单元。支撑杆与天线形面之间的连接可以采用刚性连接。实际模型是连杆+电机+连杆的三段式结构,在有限元仿真分析模型中采取整体分析方法,天线支撑杆整体结构(以下简称“天线支撑杆”)的材料参数采用等效计算的方法获取。已知杆件受到外力后的长度变化量与弹性模量,可得

$$\Delta l = \frac{Fl}{EA_s} \quad (2)$$

式中: Δl 为天线支撑杆的长度变化量; l 为天线支撑杆的总长度; F 为天线支撑杆受到的外力; E 为天线支撑杆的弹性模量; A_s 为天线支撑杆的截面面积。

直线电机伸长杆为金属材料,与树脂相比几乎不存在变形,电机的拉伸变形主要由其运动结构产生。如图 2 所示,电机的总长度为 l_3 (l_3 的实际长度为 66 mm),实验使用电机最大推拉力

为 30 N,实现最大推拉力时的误差约为 0.2 mm,实现电机运动部分的圆柱截面直径为 5 mm,可以近似看作在电机承受 30 N 拉力时产生了 0.2 mm 的变化量,即电机伸长杆在拉力作用下的长度变化量 Δl_3 为 0.2 mm。

已知实际杆件为连杆+电机+连杆的三段式结构,该等效模型为不同材料受拉产生变化的整体等效。两段连杆长度分别为 l_1 、 l_2 ($l_1 + l_2 = 340$ mm),两者的性能参数相同,等效计算过程以图 1 中的星体连接杆为案例。由等效模型可得

$$\left. \begin{aligned} l_1 + l_2 + l_3 &= l \\ \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 &= \Delta l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Δl_1 、 Δl_2 分别为连杆 1、连杆 2 在外力 F 下的长度变化量。

由式(2)和式(3)可得

$$\frac{Fl_1}{E_1 A_1} + \frac{Fl_2}{E_2 A_2} + \Delta l_3 = \frac{Fl}{EA_s} \quad (4)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为连杆 1、连杆 2 的弹性模量; A_1 、 A_2 分别为连杆 1、连杆 2 的截面面积。

将具体数据代入式(4)得到整体杆件的弹性模量 E 为 930 GPa,通过整体等效计算可得杆件密度为 1.3×10^{-6} kg/mm³。根据实际情况采用 BEAM188 梁单元结构,完整的星载 SAR 天线精度仿真模型如图 3 所示。

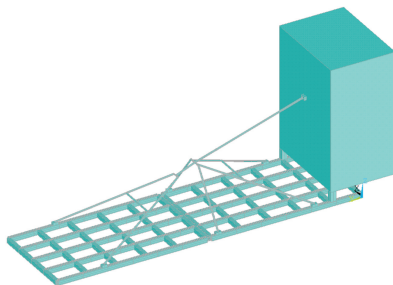


图 3 星载 SAR 天线整体仿真模型

Fig.3 Simulation model of spaceborn SAR antenna

星载 SAR 天线有限元仿真模型采用点连接梁单元模拟天线支撑杆,仿真过程中采用温度等效的方式进行模拟杆长误差,利用热膨胀来实现天线支撑杆的长度调节^[16]。建立大型星载 SAR 天线仿真模型,通过有限元分析可以得到天线形面上各个节点的初始坐标及位移变化量,推导获得变形后天线形面上各个节点的坐标位置,采用最小二乘法拟合平面的方法计算平面度。

星载 SAR 天线形面有限元仿真模型设置节点超过 90 000 个,本文采用平面度误差(即物体实际曲面相对于理想基准面的距离)作对比标准。如图 4 所示,在该天线模型坐标系中,设定天线形面长边方向为 Y 轴方向,天线形面法向量方向为 Z 轴方向,实验中认为天线形面变化主要以 Z 轴

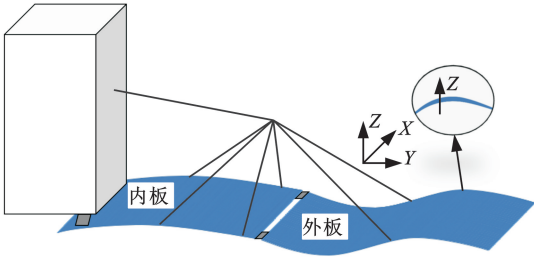


图4 天线形面变形演示

Fig.4 Deformation of antenna profile

方向偏离量为参考。

平面的一般表达式为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (C \neq 0) \quad (5)$$

其中, A、B、C、D 为系数, 设

$$a_0 = -\frac{A}{C} \quad a_1 = -\frac{B}{C} \quad a_2 = -\frac{D}{C} \quad (6)$$

则式(6)可简化为

$$z = a_0x + a_1y + a_2 \quad (7)$$

由仿真得到变形后天线形面上的 $n(n \geq 3)$ 个点 $(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n$ 。通过拟合获得平面方程, 即使原坐标点到拟合平面的距离之和 S 最小, 可表示为

$$S = \sum_{i=1}^n (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2 \quad (8)$$

令 S 最小, 对式(8)进行偏导处理, 得到

表2 杆长误差组及仿真结果

Tab.2 Rod errors and simulation results

mm

实验组号	天线支撑杆 1	天线支撑杆 2	天线支撑杆 3	天线支撑杆 4	天线支撑杆 5	天线支撑杆 6	天线支撑杆 7	平面度误差
1	0.100	0	0.400	-0.500	0.600	-0.100	0	0.247
2	0.474	-0.193	-0.342	-0.395	0.520	0.155	-0.235	0.832
3	-0.343	0.548	-0.347	0.684	-0.559	0.298	0.491	0.439
4	-0.321	-0.811	0.225	-0.507	-0.873	-0.108	0.768	1.246
5	0.269	0.917	-1.129	0.431	0.159	-0.654	-0.217	1.538
6	0.264	0.669	0.299	-0.109	-0.246	0.311	0.383	0.610

3 基于摄影测量的高精度实测模型构建

天线形面精度测量实验的关键在于获取天线形面上若干点的三维坐标, 目前三维坐标测量主要采用三坐标测量仪、测量臂和摄影测量系统等, 其中三坐标测量仪操作简单, 但测量精度及测量场地受限^[17]; 测量臂不受场地限制, 可进行任意空间位置的测量, 但仪器需要手持, 且精度较低^[18]。现有装调实验中仍采用三坐标点接触测量仪, 整个测量装调过程包括机器调试、杆长误差调整、测点标记、打点测量、数据处理五部分, 总耗时约 1 h, 其中, 天线支撑杆不能自动调节, 需对其进行反复拆卸安装, 这将消耗大量时间, 同时也会对天线结构造成不可逆的损伤, 影响装调精度。摄影测量具有智能化、非接触、高可靠性及快速高效的特点, 能够避免测量过程中对天线结构造成

$$\left. \begin{aligned} \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)x_i &= 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)y_i &= 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(9)改写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_iy_i & \sum x_i \\ \sum x_iy_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_iz_i \\ \sum y_iz_i \\ \sum z_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

解方程组即可获得参数 a_0, a_1, a_2 , 将其代入式(8)即可求得平面方程。将该拟合平面作为天线形面基准面, 基于式(8)使用点到平面距离计算方法计算出各个实际点 i 到该拟合平面的偏离量, 其表达式如下:

$$e_i = (z_i - z'_i)\lambda \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{a_0^2 + a_1^2 + 1}}$$

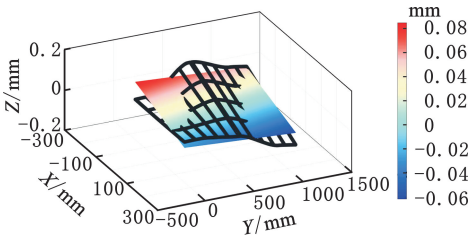
式中: z_i 为实际点 i 在 Z 方向坐标; z'_i 为实际点 i 在基准面上的投影的坐标; λ 为法化因子。

将式(11)代入式(1)即可计算平面度误差。得到部分杆长误差组及仿真结果如表 2 所示, 根据节点坐标拟合理想平面, 选取 4 组模拟结果如图 5 所示。

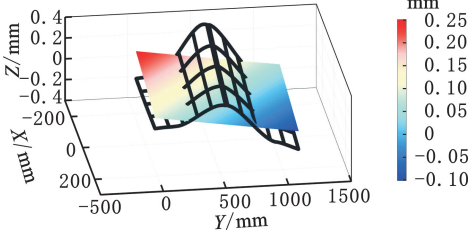
损伤, 并有效缩短装调时间^[19]。

摄影测量系统利用三角测量原理, 通过单目或双目相机在不同角度对同一测量物体进行拍摄, 其基本原理为物方点、投影中心和像点三点共线^[20], 如图 6 所示, 其中 $\{S_w\}(O_wX_wY_wZ_w)$ 为世界坐标系, $\{S_c\}(O_cX_cY_cZ_c)$ 为相机坐标系, $\{S_i\}(O_iX_iY_i)$ 为像平面坐标系。实际成像中主点的像平面坐标值不严格为 0, 而是存在一微小值 x_0, y_0 , 设相机焦距为 f , 将 x_0, y_0, f 统称为像片的内方位元素, 这也是确定相机投影中心相对于像片中心的位置关系参数。所推导出的摄影测量共线条件方程为

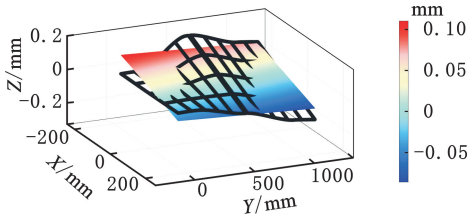
$$\begin{aligned} x_{p1} - x_0 + \Delta x_{p1} &= -f[b_1(x_{pW} - x_s) + \\ & c_1(y_{pW} - y_s) + d_1(z_{pW} - z_s)] / \\ & [b_3(x_{pW} - x_s) + c_3(y_{pW} - y_s) + \\ & d_3(z_{pW} - z_s)] = -fx_{pC}/z_{pC} \end{aligned} \quad (12)$$



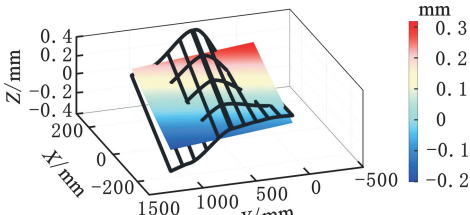
(a) 实验组 1 仿真结果



(b) 实验组 2 仿真结果



(c) 实验组 3 仿真结果



(d) 实验组 4 仿真结果

图 5 天线形面精度仿真结果示例

Fig.5 Antenna profile accuracy simulation results

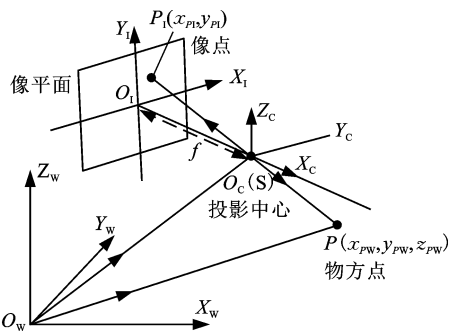


图 6 中心透视投影

Fig.6 Center perspective projection

$$y_{P1} - y_0 + \Delta y_{P1} = -f[b_2(x_{PW} - x_s) + c_2(y_{PW} - y_s) + d_2(z_{PW} - z_s)] / [b_3(x_{PW} - x_s) + c_3(y_{PW} - y_s) + d_3(z_{PW} - z_s)] = -f y_{PC} / z_{PC} \quad (13)$$

其中, (x_{PW}, y_{PW}, z_{PW}) 为物方点 P 在世界坐标系 $\{S_w\}$ 下的坐标; (x_{P1}, y_{P1}) 为物方点 P 在像平面坐标系 $\{S_1\}$ 下投影点 P_1 的坐标; (x_{PC}, y_{PC}, z_{PC}) 为物方点 P 在相机坐标系 $\{S_c\}$ 下的坐标; $(x_s,$

$y_s, z_s)$ 为相机摄站 S 在世界坐标系下的坐标, 是相机的第一个外方位元素, 用于表征相机在摄影瞬间的空间位置与姿态的参数; $b_1 \sim b_3, c_1 \sim c_3, d_1 \sim d_3$ 为相机摄站坐标 (x_s, y_s, z_s) 与世界坐标系的转换旋转角所组成的 9 个旋转矩阵元素; $\Delta x_{P1}, \Delta y_{P1}$ 为成像点坐标相对理论位置的最小偏差量^[21]。

理想双目相机成像原理如图 7 所示, 属于非接触测量, 具有测量精度高、使用方便、受环境影响小等特点^[13]。

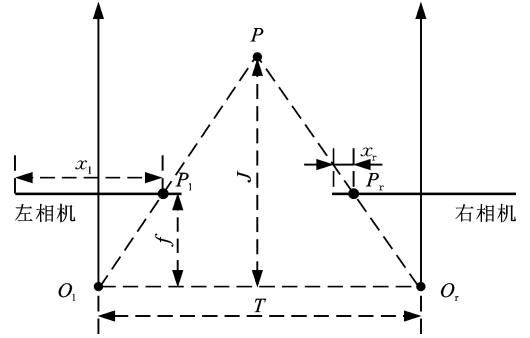


图 7 理想双目相机成像模型

Fig.7 Ideal binocular camera imaging model

图 7 中点 O_l 、点 O_r 分别为左相机和右相机的摄影中心, 两者在同一水平线上, 物方点 P 在左右相机成像于 P_l, P_r 两点, 通过测量可以获得两成像点到相机边缘的距离分别为 x_1, x_r , 理想模型中存在 P, P_l, O_l 和 P, P_r, O_r 共线, 直接由三角形相似原理解算可得

$$J = \frac{fT}{x_1 - x_r} \quad (14)$$

式中: T 为左右相机之间的距离; J 为物方点 P 到左右相机连线的距离。

由式(14)可得, 若已知两相机之间的距离 T 和焦距 f , 即可通过三成像原理计算获得图像的深度图和物方点在世界坐标系下的三维坐标。

在该实验中左右两相机视线存在一定角度, 即构成非平行配置的双目相机立体视觉模型, 如图 8 所示, 其中 $\{S_l^i\} (O_l^i X_l^i Y_l^i)$ 和 $\{S_r^i\} (O_r^i X_r^i Y_r^i)$ 分别为左右相机像平面坐标系, $\{S_p^l\} (O_p^l X_p^l Y_p^l)$ 和 $\{S_p^r\} (O_p^r X_p^r Y_p^r)$ 分别为左右相机像素坐标系。已知空间中存在物方点 P , 同一时刻下左右相机分别从不同角度对 P 点进行拍摄建模。模型中存在世界坐标系和左右相机坐标系, 其中左右相机镜头的有效焦距分别为 f_l, f_r 。

该双目立体视觉测量模型中涉及像素坐标系、图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系等多个坐标系。在相机标定获得内外参后, 通过不同坐标系之间的转换即可实现物体从相机成像的二维

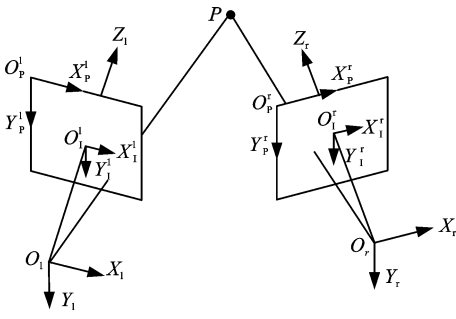


图 8 双目立体视觉测量模型

Fig.8 Binocular stereo vision measurement model

平面转换到三维空间。

1) 像素坐标系与图像坐标系转换。像素坐标系与图像坐标系在同一平面内,但两者的坐标原点和单位不同,两者在同一平面内通过坐标变换实现转换。已知 P 点在像素坐标系下的坐标为 (u, v) ,在图像坐标系下的坐标为 (x_{p1}, y_{p1}) ,设像素坐标系原点 $O_p(0, 0)$ 在图像坐标系(即像平面坐标系 $\{S_1\}$)下的坐标为 (u_0, v_0) ,像素在 X_p 轴、 Y_p 轴上对应的物理尺寸分别为 dx 、 dy ,即 $1 \text{ pixel} = dx \text{ mm} = dy \text{ mm}$ 。转换计算如下:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{x_{p1}}{dx} + u_0 \\ v &= \frac{y_{p1}}{dy} + v_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

2) 图像坐标系与相机坐标系转换。相机坐标系是相机自身的坐标系,以成像平面中心 O_i 为原点。 X_c 轴和 X_c 轴分别与像平面坐标系的 X_1 、 Y_1 轴方向一致且平行, Z_c 轴垂直于成像平面,图像坐标系与相机坐标系的转换如图 9 所示,其中直角坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系,其 $O_c X_c Y_c$ 平面与二维像平面坐标系平行,两坐标系原点之间连线即为当前相机的焦距 f ,即从相机坐标系到图像坐标系存在投影关系。 P 点在相机坐标系下的坐标为 (x_{pc}, y_{pc}, z_{pc}) ,由三角相似原理可知两坐标系的转换关系式为

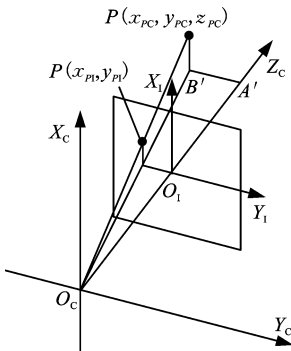


图 9 图像坐标系与相机坐标系转换

Fig.9 Image coordinate system and camera coordinate system conversion

$$\left. \begin{aligned} x_{p1} &= f \frac{x_{pc}}{z_{pc}} \\ y_{p1} &= f \frac{y_{pc}}{z_{pc}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

3) 相机坐标系与世界坐标系转换。世界坐标系是三维空间中某一给定的坐标系,在该实验中可根据星载 SAR 天线形面上若干点在图像中像素的三维坐标点重建其三维面,物体在三维坐标系下不存在固定位置。通常为简化计算,令图像左下角为世界坐标系原点。从世界坐标系到相机坐标系的变换为刚体变换,如图 10 所示,其中 R 为坐标系转换旋转矩阵, T 为偏移向量,均可通过相机内外参数标定获得,则世界坐标系下点 $P(x_{pw}, y_{pw}, z_{pw})$ 在相机坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{pc} \\ y_{pc} \\ z_{pc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pw} \\ y_{pw} \\ z_{pw} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

则空间中任意一点 $P(x_{pw}, y_{pw}, z_{pw})$ 从世界坐标系到像素坐标系的转换计算可表示为

$$\begin{aligned} z_{pc} [u \quad v \quad 1]^T &= \\ \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pw} \\ y_{pw} \\ z_{pw} \\ 1 \end{bmatrix} &= \\ \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pw} \\ y_{pw} \\ z_{pw} \\ 1 \end{bmatrix} & \quad (18) \end{aligned}$$

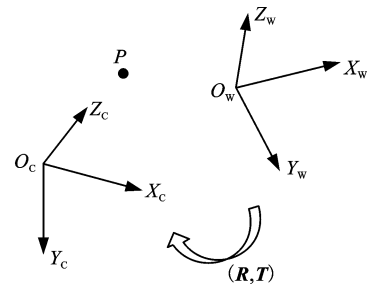


图 10 相机坐标系与世界坐标系转换

Fig.10 Camera coordinate system and world coordinate system conversion

在该实验中使用两个 HIKROBOT CE 系列 CE200-10UC 工业面阵相机完成图像采集。采用 OpenCV 数据库及 MATLAB 程序实现从相机标定到图像采集再到图像处理等一系列步骤,最后完成实验验证。摄影测量试验台如图 11 所示。经过标定后可以得到该双目系统重复定位误差为 0.0509 pixel ,满足实验精度需求。摄影测量主要分为图像捕捉、左右相机标定、图像特征提取、左右相机立体匹配、三角测量五个部分^[22]。

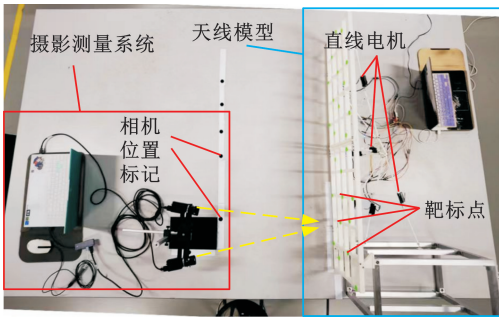


图 11 摄影测量试验台

Fig.11 Photogrammetry system experimental platform

相机摄站确定后采用张正友标定法获得相机内外参数,基于长方形棋盘格标定板进行标定^[23],选用长 10 mm 的 9×12 黑白棋盘格标定板。本实验采用最基础的绿色圆片作为靶标点,根据平面度误差计算需求,内外天线形面各设置 12 个靶标点,如图 12 所示。

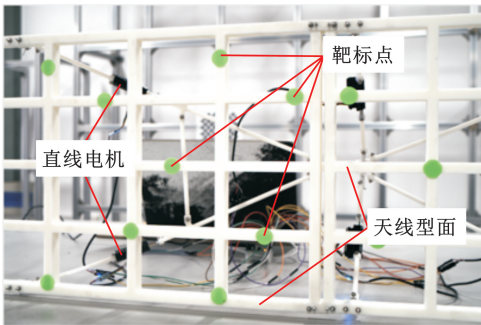


图 12 相机拍摄原图

Fig.12 Camera shot original picture

对采集到的图像依次进行灰度处理、阈值分割、顶帽变换、高斯滤波,结果如图 13 所示,能够直接观察到靶标点以白色圆形出现在图像中。最后采用闭运算填充像素点得到较为完整的图形。

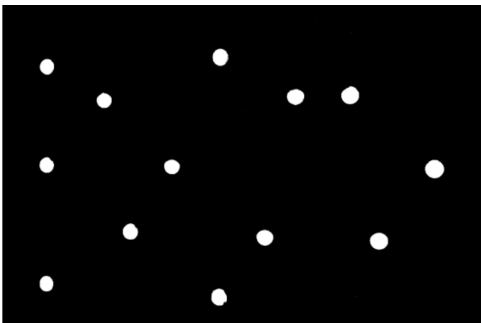
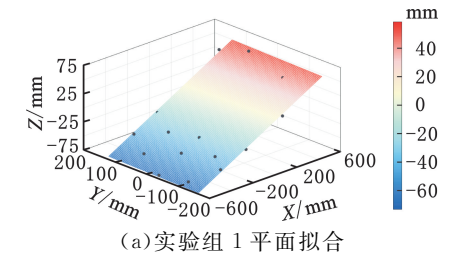


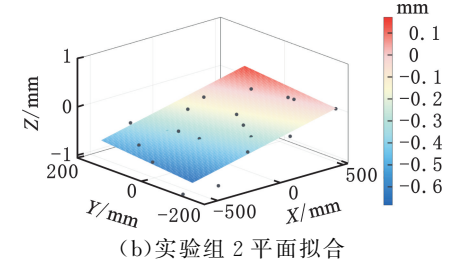
图 13 图像阈值分割结果

Fig.13 Image threshold segmentation results

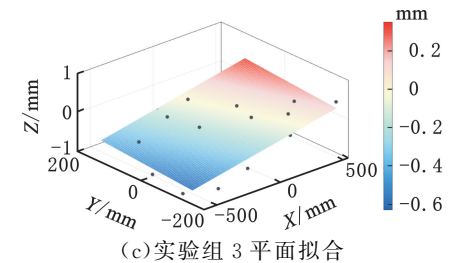
为了去除杂点,对寻找到的图案增加圆度判断,通过圆形筛选、识别圆心的方式获取靶标点坐标,从而实现靶标点的识别及坐标获取。依据第 2 节所述方法将天线靶标点坐标拟合为平面,认为该平面为天线形面基准面,并计算出平面度误差。部分拟合结果如图 14 所示。



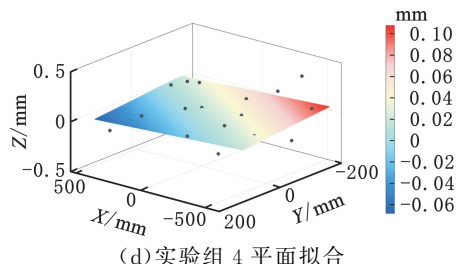
(a) 实验组 1 平面拟合



(b) 实验组 2 平面拟合



(c) 实验组 3 平面拟合



(d) 实验组 4 平面拟合

图 14 摄影测量实验拟合结果

Fig.14 Experimental fitting results for photogrammetry

4 基于变可信度近似模型的形面精度优化调整

星载 SAR 天线杆长误差对形面精度的影响存在非线性、高维度的复杂特性,数学模型复杂,采用传统优化方法调用有限元仿真模型时,需通过数次迭代进行优化,直至收敛或满足约束条件,且需要较高的时间成本^[24]。针对实际工况需求,采用近似代理模型的方法^[25],基于测量样本点建立天线形面精度优化黑箱函数进行优化,可保障精度并有效缩短计算时间。

通过第 2 节建立的有限元仿真分析模型可以快速获得天线形面精度样本点,但精度相比实际情况较差;通过第 3 节搭建的摄影测量平台可以获得精度较高的样本点,但所需时间相比仿真用时较长。在星载 SAR 天线形面精度优化问题中采用变可信度近似模型方法,将有限元仿真分析测量数据作为低保真样本点以减少建立模型的时间成本和复杂性,将测量数据作为高保真样本点

以保证所建立近似模型的精度和性能,选择 80% 的低保真样本和 20% 的高保真样本建立近似模型^[26]。以星载 SAR 天线的 7 根杆长误差为优化过程设计变量,取值范围为

$$-0.2 \text{ mm} \leq \Delta a_l \leq 1 \text{ mm} \quad l = 1, 2, \dots, 7 \quad (19)$$

式中: Δa_l 为第 l 根天线支撑杆杆长的调节量。

选择式(1)计算的星载 SAR 天线形面平面度误差作为优化响应值(即优化目标)。考虑到迅速精准的优化需求,采用贝叶斯优化(Bayesian optimization, BO)方法,以高斯过程(Gaussian processes, GPs)模型代理黑箱函数。

贝叶斯优化也被称为序贯 Kriging 优化(sequential Kriging optimization, SKO)^[27],通过对未知的目标函数 g 获取信息,寻找下一个评估位置,进而找到最大最小化问题的全局最优解^[28]。在天线优化问题中选择动态模型优化方法,采用近似模型管理策略对代理模型进行迭代更新,从而获得更加精准的杆长误差调节量结果,该优化方法的主要流程见图 15^[29]。

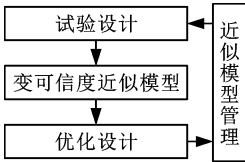


图 15 动态模型优化方法的流程图

Fig.15 Flowchart of dynamic model optimization method

贝叶斯优化通过序贯添加样本点来更新代理模型,其优化过程引用贝叶斯定理:

$$p(g | D_{1:t}) = \frac{p(D_{1:t} | g)p(g)}{p(D_{1:t})} \quad (20)$$

式中: $p(D_{1:t} | g)$ 表示 g 的似然分布; $p(g)$ 表示 g 的先验概率分布,即对目标函数的假设; $p(D_{1:t})$ 表示边缘化 g 的边界似然分布; $D_{1:t}$ 为包含 t 个样本点的已观测集合。

集合 $D_{1:t}$ 的具体表达式如下:

$$D_{1:t} = \{D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_t\} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_j, y_j), \dots, (x_t, y_t)\} \quad (21)$$

$$y_j = f(x_j) = g(x_j) + \epsilon_j$$

式中: x_j 为第 j ($j = 1, 2, \dots, t$) 个样本点的决策向量; y_j 为第 j 个样本点的观测值; ϵ_j 为第 j 个样本点的观测误差。

贝叶斯优化主要包括概率代理模型和采集函数^[30]。在星载 SAR 天线形面精度优化中选择高斯过程作为代理模型,选择上置信边界(upper confidence bound, UCB)策略作为采集函数,其主要优化流程见图 16。

高斯过程模型是一种非参数模型,一个高斯过程模型由均值函数和一个半正定协方差函数构成^[31],可表示为

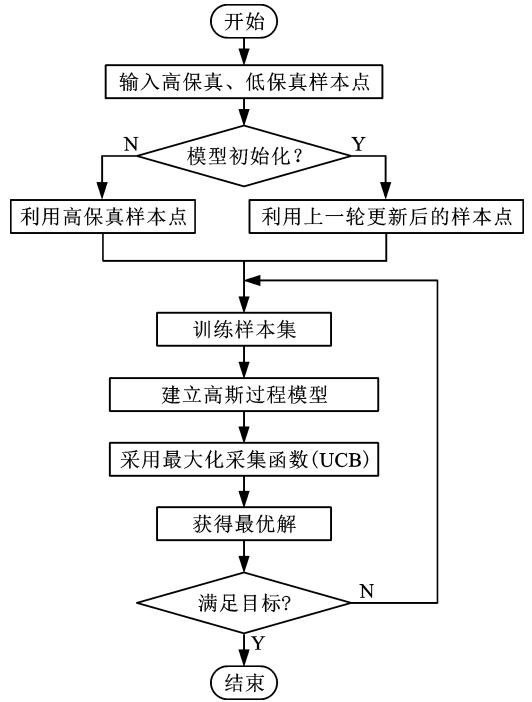


图 16 基于高斯过程模型的贝叶斯优化流程

Fig.16 Bayesian optimization process based on Gaussian process model

$$g(x) \sim GP(m(x), k(x, x_j)) \quad (22)$$

式中: $GP(\cdot)$ 表示高斯分布过程; $m(x)$ 表示初始样本集的均值函数; $k(x, x_j)$ 表示任意点 x 与样本点 x_j 的协方差函数。

输入 t 组初始样本点建立初始高斯过程模型,设为 $D = \{X, y\}$,其中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_t\}$ 为初始样本集, $y = \{f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_t)\}$ 为初始样本集对应的函数值集合。通过优化获得一个新的样本点 x^* ,则它的函数值 $y^* = f(x^*)$ 和 y 服从联合高斯分布。本文优化中分别通过实验测量和仿真分析获得高保真和低保真样本点,并假定不存在观测噪声。通过高斯过程初步建立近似代理模型,获得优化结果,将该结果作为新样本点加入模型的建立过程,新样本点 x^* 的加入会使原高斯过程的协方差矩阵得到扩充更新,可表示为

$$\begin{bmatrix} y \\ y^* \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} m(X) \\ m(x^*) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}(X, x^*) \\ \mathbf{K}(x^*, X) & \mathbf{K}(x^*, x^*) \end{bmatrix} \right) \quad (23)$$

式中: $N(\cdot)$ 表示原样本点与新增加样本点函数值间的联合分布函数; $m(X)$ 为训练数据点的均值向量; $m(x^*)$ 表示新样本点的均值函数; \mathbf{K} 为原样本集的协方差矩阵, $\mathbf{K}(x^*, x^*)$ 为新样本点自身的协方差; $\mathbf{K}(X, x^*)$ 、 $\mathbf{K}(x^*, X)$ 为原样本集与新样本点的协方差向量。

随着新样本点的增加,样本集更新后的随机变量 $X' = \{x_1, x_2, \dots, x_q, \dots, x_t, x_{t+1}\}$,设 $q = 1, 2, \dots, t, t+1$,在观测数据影响下的后验分布的均值 $\mu(x_q)$ 和方差 $\sigma^2(x_q)$ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mu(x_q) &= m(x_q) + \\ &\quad \mathbf{K}(x_q, X)(\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1}(\mathbf{y}(X) - m(X)) \\ \sigma^2(x_q) &= K(x_q, x_q) - \\ &\quad \mathbf{K}(x_q, X)(\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1}\mathbf{K}(X, x_q) \end{aligned} \right\} (24)$$

式中: $\mu(x_q)$ 表示函数在 x_q 处的均值; $\sigma^2(x_q)$ 表示函数在 x_q 处的方差; σ^2 为预测方差; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\mathbf{y}(X)$ 为训练数据点的目标向量。

协方差函数是高斯过程中计算两个数据点之间相似性的函数,它指定了未知目标函数的平滑性和振幅,对高斯过程和数据性质之间的匹配程度具有直接影响。在天线形面精度优化问题中,选择 10 组实际测量的杆长误差和平面度误差作为高保真样本点,基于高保真样本点建立初始高斯过程模型;选择 40 组有限元仿真结果作为低保真样本点,与高保真样本点一起参与后续模型训练。目标函数是由 7 根天线支撑杆长度误差导致的平面度误差,在实际工况中其影响无法直接确定,具有不平稳性,因此采用非平稳协方差函数^[32]。在贝叶斯优化中采用高斯过程模型代理黑箱函数能够有效避免目标函数的复杂性,且具有高灵活性和可扩展性^[33]。

完成代理模型的建立和更新后,下一步的关键是采样函数的选择,贝叶斯优化中主要包含 Explore 和 Exploit 两种采样思路。前者会探索样本点中的新空间,有助于估计更准确的目标函数预测值,后者在已有结果附近进行采样,从而获得更优解。由于前期输入的样本点数量有限,因此在该优化中选择将两种方式结合,采用上置信边界策略^[34],其采集函数为

$$\alpha(x, D_{1:t+1}) = \mu(x) + \sqrt{\beta}\sigma(x) \quad (25)$$

式中: $\alpha(x, D_{1:t+1})$ 表示任意点 x 在当前样本集下的采集函数; β 为平衡参数,用于平衡期望 $\mu(x)$ 和方差 $\sigma(x)$ 。

采用上置信边界策略能够满足星载 SAR 天线问题中对形面精度的优化需求,理想情况下可以实现平面度误差为 0(即为最优),但实际工况下无法实现,在算法中设置多次优化结果不变,即可获得最优解。

5 案例分析

本文建立了一种变可信度贝叶斯优化模型来实现星载 SAR 天线的高效优化调整,以有限元仿真分析模型和摄影测量系统建立变保真度样本集。为验证优化准确性,针对大型星载 SAR 天线实际工况进行案例分析,以实现天线形面精度的高效测量和准确优化。实验中搭建实物缩比模型作为参考,采用桁架结构替代天线面板,保留形面长、宽、高等原始尺寸。天线面板中间桁架采用

12 mm×18 mm、壁厚 3 mm 的中空截面以减小质量。

随机给定若干杆长误差组模拟天线实际工况,以初始天线形面变形对实验过程进行误差修正,基于摄影测量系统获得天线模型上若干靶标点的空间坐标。采用最小二乘法拟合平面计算获得其平面度误差。基于星载 SAR 天线形面精度仿真分析模型获得仿真结果,结合双目视觉测量获得的缩比模型实测数据进行对比验证。最终拟合结果如表 3 所示。

表 3 平面度误差的仿真结果与实验结果对比

Tab.3 Comparison of simulation and experiment results for flatness error

实验组	仿真结果/ mm	实验结果/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
1	0.682	0.814	0.132	16.25
2	2.291	2.664	0.374	14.02
3	1.488	1.721	0.233	13.56
4	10.692	11.966	1.274	10.64
5	2.368	2.083	0.286	13.71
6	0.948	0.801	0.147	18.37
7	1.046	0.883	0.163	18.42
8	2.427	2.047	0.381	18.61
9	1.551	1.298	0.253	19.45
10	3.592	2.962	0.630	21.25
11	2.774	2.274	0.501	22.01
12	1.835	2.261	0.426	18.84
13	12.296	9.998	2.298	22.98
14	1.021	0.827	0.194	23.47
15	0.833	0.667	0.166	24.86

对实验数据进行分析,绘制出仿真结果与测量结果的验证对比图与误差走势图,分别见图 17、图 18。由结果可得,视觉测量实验结果与可变杆长有限元模型仿真结果趋于一致。本次实验结果的最大绝对误差为 2.2981 mm,总体平均误差为 0.3381 mm,相对误差均在 25%以内且误差趋势大致相同,验证了该大型星载 SAR 天线形面精度有限元模型具有一定可靠性。

但由于所有验证实验中有限元仿真结果与实

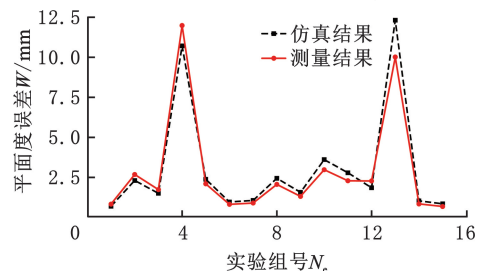


图 17 平面度误差的仿真结果与测量结果验证

Fig.17 Verification of simulation and measurement results for flatness error

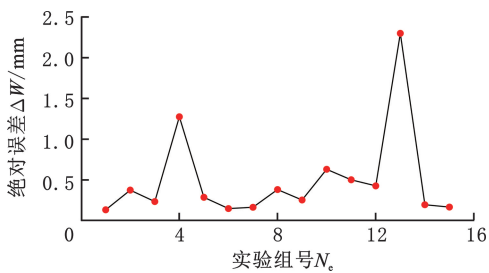


图 18 仿真结果与实验数据误差值

Fig.18 Error values of simulation and experiment results

实际测量结果的误差均大于 10%，认为有限元仿真模型与实际测量依然存在精度不足，因此在代理模型优化设计中将大量有限元仿真模型数据作为低保真样本点，其计算时间短、精度低，并将少量摄影测量数据作为高保真样本点，虽牺牲部分时间成本，但满足模型对高精度准确性的要求。优化中采用 SOBOL 全局敏感性分析，以 7 根天线支撑杆杆长误差作为全局变量，获得了各天线支撑杆杆长误差变化对平面度误差的影响关系，分析结果如图 19 所示，其中 I_S 为敏感性分析一阶影响指数，表示各天线支撑杆对天线形面精度的直接影响， I_{ST} 为总效应指数，表示各天线支撑杆相互作用而产生的影响，评价指标值越大表明影响程度越高。由图 19 可以看出，第 5、6 根天线支撑杆（即内撑杆）误差变化对天线形面平面度误差的影响最大，第 7 根天线支撑杆（即星体连接杆）对天线形面平面度误差的影响最小。

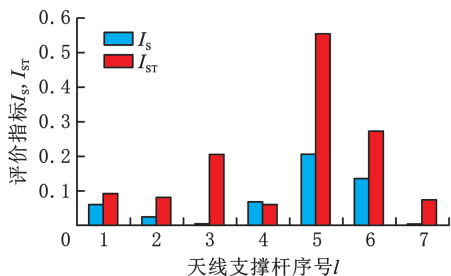


图 19 SOBOL 全局敏感性分析结果

Fig.19 SOBOL global sensitivity analysis results

针对大型星载 SAR 天线杆系优化调整案例，实验分别采用单保真度样本点和多保真度样本点

表 5 原始误差与优化结果对比

Tab.5 Comparison of original error and optimized results

mm

实验组号		天线支撑杆 1	天线支撑杆 2	天线支撑杆 3	天线支撑杆 4	天线支撑杆 5	天线支撑杆 6	天线支撑杆 7	平面度误差
1	原误差	0.432	-0.568	-0.901	0.346	-0.789	-0.235	0.679	0.432
	优化后	0.960	-0.097	0.987	0.969	-0.137	-0.177	-0.192	0.221
2	原误差	-0.055	-0.051	-0.161	-0.420	-0.830	1.506	0.750	1.547
	优化后	0.744	-0.046	0.995	0.152	0.975	-0.188	-0.184	0.320
3	原误差	0.357	-0.103	-0.062	0.745	0.705	0.709	0.336	0.576
	优化后	0.950	-0.102	0.987	-0.054	0.932	-0.126	-0.148	0.240
4	原误差	0.264	0.669	0.299	-0.109	-0.246	0.311	0.380	0.610
	优化后	0.314	0.625	-0.167	0.844	0.185	-0.128	0.208	0.194

建立优化代理模型进行优化，并与实际测量结果进行对比，如表 4 所示。

表 4 平面度误差的优化结果与实验结果对比

Tab.4 Comparison of optimized and experiment results for flatness error

实验组号	实验结果/mm	单保真优化/mm	相对误差(单保真)/%	多保真优化/mm	相对误差(多保真)/%
1	0.270	0.356	31.91	0.221	18.23
2	0.446	0.697	56.28	0.320	28.31
3	0.986	0.396	59.82	0.679	39.28
4	0.274	0.097	64.75	0.240	12.61
5	0.376	0.132	64.79	0.194	48.28
6	0.720	1.195	65.89	0.576	20.04

从优化结果中可以看出，将有限元仿真分析数据作为单保真样本点建立代理模型进行优化得到的结果与实际摄影测量结果存在较大误差，其优化结果不能作为实际星载 SAR 天线装调参数。将有限元仿真分析数据作为低保真度样本点，将实际摄影测量数据作为高保真度样本点，与单保真优化时相比，基于多保真度样本建立代理模型进行优化得到的误差要小很多，更接近于实际测量结果。如图 20 所示，多保真度优化结果与实际测量结果趋势相同，具有可靠性。

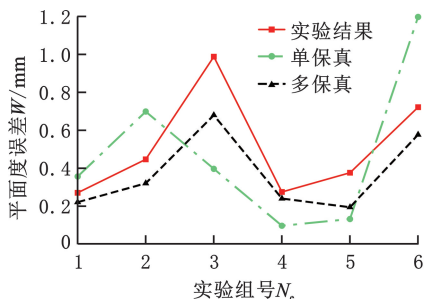


图 20 不同保真度优化结果

Fig.20 Optimization results with different fidelity

依据已知的误差实验数据进行优化计算，通过算法优化后得到的最优杆长调节量及优化后平面度误差如表 5 所示，可以看出对优化后得到的杆长调节量最优解进行调整能够使原始平面度误差至少减小至原来的 50%，且优化时间较短，能

够显著提高星载 SAR 天线的装调速度及精度。以表 5 中实验组 2 为例,其具体迭代优化过程如图 21 所示。

根据优化结果分别绘制出初始状态以及调节后的星载 SAR 天线形面拟合图,见图 22,可以清楚地看到经过优化后的天线形面精度有显著提高,表明该优化算法具有较好的实用性,这为星载 SAR 天线的装调提供了高效精准的辅助工具。

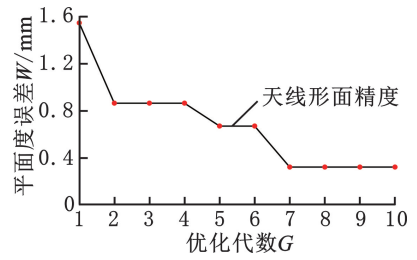


图 21 实验组 2 迭代优化过程

Fig.21 Iterative optimization process of group 2

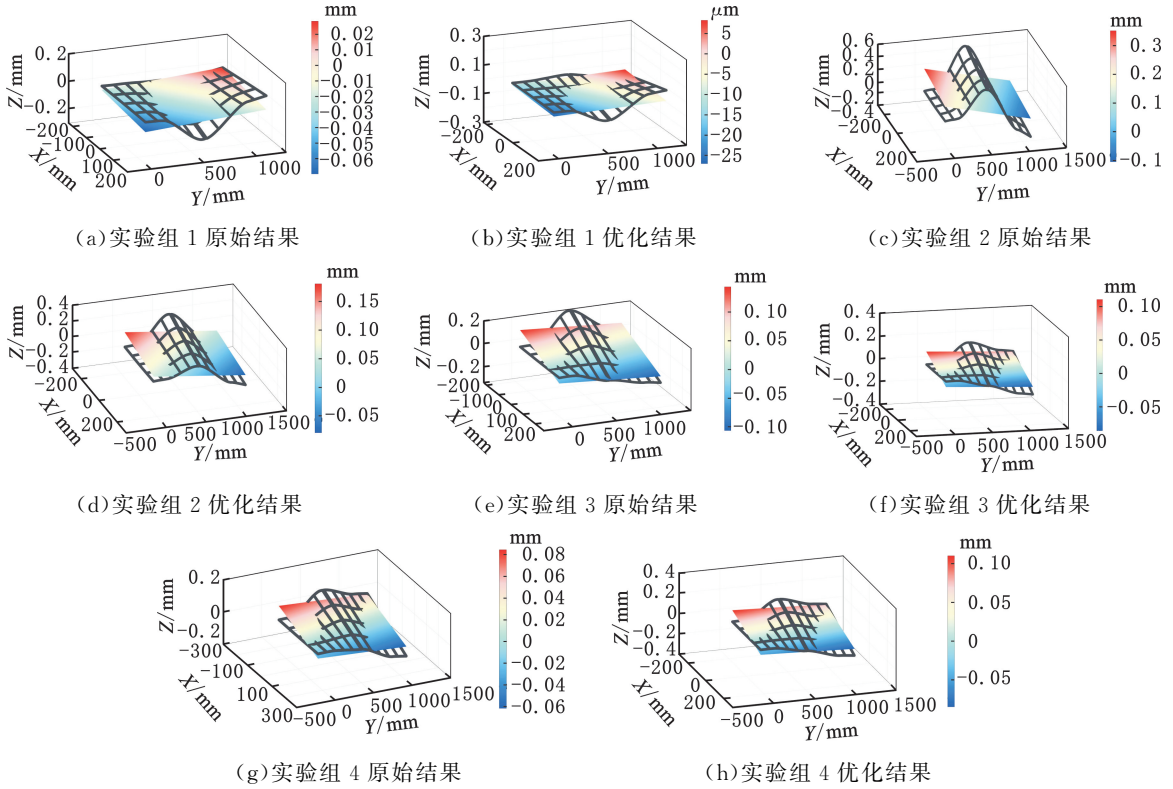


图 22 形面精度优化对比

Fig.22 Comparison of surface precision optimization

6 结论

1)以大型平面天线为基础,考虑可展开铰链和天线形面的简化方法,通过等效温度变化的方式来实现杆长调节,建立了大型平面天线形面精度有限元仿真分析模型,研究了天线支撑杆杆长误差与天线形面精度之间的映射规律。

2)实现了大型可展开平面天线形面精度快速测量。搭建了等比例实物模型与摄影测量系统实验台,采用直线电机控制的方法来模拟杆长调节,通过双目摄影测量获得了对应组误差下的精度实测结果,经过对比分析验证了有限元仿真分析模型的准确性。

3)基于实测样本和有限元仿真样本建立了大型可展开平面天线杆系优化调整模型。采用贝叶斯优化方法,以高斯过程模型代理黑箱函数,通过上置信边界采样策略结合高低保真样本数据建立

变可置信度代理模型,保证准确度的同时减少时间成本,通过多次寻优和模型动态调整优化来获得最优杆系调整量。基于星载 SAR 天线实际案例验证了变可置信度近似模型优化方法的可靠性。

综上,本文所建立的大型可展开平面天线有限元仿真模型和杆系优化调整模型能够实现精度的高效准确测量和现场快速装调,提高天线形面精度与在轨电性能,可为其他大型航天器的装配精度仿真分析与优化调整研究提供参考,具有一定的实际意义与广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] HU Cheng, CHEN Zhiyang, LI Yuanhao, et al. Research Progress on Geosynchronous Synthetic Aperture Radar[J]. Fundamental Research, 2021, 1(3):346-363.
- [2] 陈传志,董家宇,陈金宝,等.空间大型星载抛物面

- 天线研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(1):133-153.
- CHEN Chuazhi, DONG Jiayu, CHEN Jinbao, et al. Large Spaceborne Parabolic Antenna: Research Progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1):133-153.
- [3] 邱慧, 刘志全, 曾惠忠, 等. 航天器可展 SAR 天线结构综述[J]. 宇航学报, 2021, 42(10):1197-1206.
- QIU Hui, LIU Zhiquan, ZENG Huizhong, et al. Review of Deployable SAR Antenna Structures of Spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(10):1197-1206.
- [4] 郭俊康, 余德文, 赵强强, 等. 一种星载 SAR 天线空间可展支撑结构装配精度预测方法: CN109800505A[P]. 2019-05-24.
- GUO Junkang, YU Dewen, ZHAO Qiangqiang, et al. A Method for Predicting the Assembly Accuracy of Spatially Expandable Support Structures for Satellite-based SAR Antennas: CN109800505A[P]. 2019-05-24.
- [5] MATSUZAWA A, SAITO M, IGUCH S, et al. Development of High-accuracy Pointing Verification for ALMA Antenna[C]// SPIE Conference on Ground-based and Airborne Telescopes. Montreal: SPIE, 2014:723-729.
- [6] 余德文, 赵强强, 陈飞飞, 等. 利用结构等效转换的空间可展机构装配误差建模与灵敏度分析[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(4):15-23.
- YU Dewen, ZHAO Qiangqiang, CHEN Feifei, et al. Assembly Error Modeling and Sensitivity Analysis for Spatial Deployable Mechanisms with Structural Equivalent Transformation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(4):15-23.
- [7] 刘荣强, 史创, 郭宏伟, 等. 空间可展开天线机构研究与展望[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5):1-12.
- LIU Rongqiang, SHI Chuang, GUO Hongwei, et al. Review of Space Deployable Antenna Mechanisms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5):1-12.
- [8] 侯国勇, 关富玲, 赵孟良. 桁架式可展开天线的关节运动可靠度分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8):959-963.
- HOU Guoyong, GUAN Fuling, ZHAO Mengliang. Movement Reliability Analysis of Joints in Deployable Truss Antenna[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8):959-963.
- [9] HEDGEPEETH J M, ADAMS L R. Design Concepts for Large Reflector Antenna Structures[M]. Pasadena: California Institute of Technology Press, 1983:12-16.
- [10] GREENE W H. Effects of Random Member Length Errors on the Accuracy and Internal Loads of Truss Antennas[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 1985, 22(5):554-559.
- [11] BITTERA M. Modeling Broadband Wire Antennas with Complex Geometry[J]. Procedia Engineering, 2014, 69:1082-1087.
- [12] MOBREM M. Methods of Analyzing Surface Accuracy of Large Antenna Structures due to Manufacturing Tolerances [C] // 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Norfolk, 2013:508-517.
- [13] 丁建中, 王春洁. 含铰链间隙板式卫星天线展开精度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12):2625-2631.
- DING Jianzhong, WANG Chunjie. Deployment Accuracy Analysis of Planar Satellite Antenna with Joint Clearances[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12):2625-2631.
- [14] 南凯刚, 闫如玉, 李光明, 等. 大型桁架天线装配精度仿真与代理模型的构建[J]. 成组技术与生产现代化, 2021, 38(4):27-36.
- NAN Kaigang, YAN Ruyu, LI Guangming, et al. Assembly Error Simulation and Proxy Model Construction of Large-scale Truss Antenna[J]. Group Technology & Production Modernization, 2021, 38(4):27-36.
- [15] CHIU S. Moving Target Parameter Estimation for RADARSAT-2 Moving Object Detection Experiment(MODEX)[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15):4007-4032.
- [16] WU Tengfei, ZHAO Qiangqiang, JIANG Donglei, et al. System Reliability and Sensitivity Analysis for Extendible Support Structures with Multiple Assembly Failure Modes [J]. Engineering Structures, 2024, 302:1-15.
- [17] VINCENT S, FRANCIS S, RAIMOND K, et al. A Novel Planar Antenna Array for a Ground-based Synthetic Aperture Radar[J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2019, 16(2):195-209.
- [18] ZHANG Guoxing, XIA Xinlu, HOU Yulei, et al. Optimal Design and Trajectory Tracking Experiment of a Novel 3-DOF Parallel Antenna Mechanism[J]. AIP Advances, 2022, 12(2):025321.
- [19] WANG Yimeng, YU Shuyue, REN Shuai, et al. Close-range Industrial Photogrammetry and Application: Review and Outlook [C] // Conference on Applied Optics and Photonics China, Beijing, 2020:152-162.
- [20] 冉险生, 朱才朝, 黄泽好. 工业近景摄影测量中基

- 于非量测镜头的误差分析[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19):2603-2607.
- RAN Xiansheng, ZHU Caichao, HUANG Zehao. Error Analysis Based on Non-metric Lens in Industrial Close-range Photogrammetry [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(19):2603-2607.
- [21] 黄桂平, 吕传景, 王伟峰. 工业摄影测量技术发展及其在航空制造中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(2):5-8.
- HUANG Guiping, LYU Chuanjing, WANG Weifeng. Application of Industrial Photogrammetry Technology and Its Development in Aeronautical Manufacturing[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(2):5-8.
- [22] LIU Zhengzhen, CHEN Tianding. Distance Measurement System Based on Binocular Stereo Vision [C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence. Pasadena:IJCAI, 2009:456-459.
- [23] TSAI R Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3(4):323-344.
- [24] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent Advances in Surrogate-based Optimization [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1):50-79.
- [25] 杨癸庚, 卫鑫鹏, 樊浩, 等. 基于 Kriging 代理模型的环形网状天线展开过程规划[J]. 宇航学报, 2023, 44(7):988-997.
- YANG Kuigeng, WEI Xinpeng, FAN Hao, et al. Deployment Process Planning of Hoop-truss Mesh Antennas Based on Kriging Surrogate Model [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(7):988-997.
- [26] WANG Shuo, LIU Yin, ZHOU Qi, et al. A Multi-fidelity Surrogate Model Based on Moving Least Squares: Fusing Different Fidelity Data for Engineering Design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(6):3637-3652.
- [27] FRAZIER P I. A Tutorial on Bayesian Optimization [EB/OL]. Arxiv, 2018:1807. 02811. <http://arxiv.org/abc/1807.02811>.
- [28] SHAHRIARI B, SWERSKY K, WANG Z, et al. Taking the Human Out of the Loop: a Review of Bayesian Optimization [J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(1):148-175.
- [29] 周奇, 杨扬, 宋学官, 等. 变可信度近似模型及其在复杂装备优化设计中的应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24):219-245.
- ZHOU Qi, YANG Yang, SONG Xueguan, et al. Survey of Multi-Fidelity Surrogate Models and Their Applications in the Design and Optimization of Engineering Equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24):219-245.
- [30] 陈东宁, 侯安农, 姚成玉, 等. 一种新型动态贝叶斯网络分析方法 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(12):1394-1406.
- CHEN Dongning, HOU Annong, YAO Chengyu, et al. A Novel Dynamic Bayesian Network Analysis Method [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(12):1394-1406.
- [31] RASUMUSSEN C E, WILLIAMS C K I. Gaussian Processes for Machine Learning [M]. Cambridge:MIT Press, 2005:18-22.
- [32] PACIOREK C J, SCHERVISH M J. Nonstationary Covariance Functions for Gaussian Process Regression [C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. British Columbia:NeurIPS Foundation, 2003:273-280.
- [33] LI Jianxing, YANG An, TIAN Chunming, et al. Multi-fidelity Bayesian Algorithm for Antenna Optimization [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(6):1119-1126.
- [34] HOFFMAN M, SHAHRIARI B, FREITAS N. On Correlation and Budget Constraints in Model-based Bandit Optimization with Application to Automatic Machine Learning [C]// International Conference on Artificial Intelligence and Statistics. Reykjavik:AISTATS, 2014:365-374.

(编辑 胡佳慧)

作者简介:姜冬磊,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为机器视觉测量。E-mail:jiangdl@stu.xjtu.edu.cn。赵强强*(通信作者),男,1993年生,副教授。研究方向为精密装配与计算力学、机器视觉测量和大型航天柔性/刚性可展开机构精度调控等。E-mail:qzhao21@xjtu.edu.cn。

本文引用格式:

姜冬磊,赵强强,吴腾飞,等. 数模融合驱动的大型可展开天线精度调控研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(5):898-910.

JIANG Donglei, ZHAO Qiangqiang, WU Tengfei, et al. Research on Precision Control of Large Deployable Antennas Driven by Fusion of Data and Model [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(5):898-910.