

● 装配·检测

基于实测模型的波导馈电网络装配定位与补偿技术研究

毛喆 苏永胜 张海峰 杨红 施家金
(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 波导馈电网络装配质量是影响天线信号传输的关键因素, 传统的反复试装和拆卸重装的装配方法越来越难以满足当前多频段复合波导馈电网络的装配要求。为提高装配精度和装配效率, 开展了基于实测模型的波导馈电网络装配定位与补偿技术研究。探索了波导稳健拟合重构方法, 定义了波导重构模型的装配定位基准, 分析了波导间隙表现形式并给出了相应的补偿措施。最后在某复杂波导馈电网络上进行了应用验证, 结果表明, 该方法可以有效提高装配效率, 避免因间隙补偿不足而导致的装配变形及性能超差等问题。

关键词: 模型重构; 装配定位; 虚拟装配; 垫片补偿

中图分类号: V465 **文献标识码:** A

Research on Assembly Positioning and Compensation Technology for Waveguide Feeding Network Based on Measured Model

Mao Zhe Su Yongsheng Zhang Haifeng Yang Hong Shi Jiajin
(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: The assembly quality of waveguide feeding networks is a critical factor affecting the signal transmission of antennas. The traditional trial assembly and reassembly is increasingly difficult to meet the assembly requirements of current multi-band composite waveguide feeding networks. In order to improve assembly accuracy and efficiency, a waveguide feeding networks assembly positioning and compensation method based on the measured model was proposed. The waveguide robust fitting reconstruction method was explored, the assembly positioning reference of the waveguide reconstruction method was defined, the manifestation of waveguide gaps was analyzed, and compensation measures were given. Finally, the method was applied on a complex waveguide feeding network. The results show that this method can effectively improve the assembly efficiency and avoid assembly deformation and performance deviations caused by insufficient gap compensation.

Key words: model reconstruct; assembly positioning; virtual assembly; shim compensation

1 引言

波导馈电网络是卫星通信系统中的重要组成部分^[1], 具有传输损耗低、功率容量高、抗干扰能力强、

结构紧凑等优点, 在多频段信号传输方面具有显著的优势。近年来卫星探测频段的不断拓宽和功能要求的不断完善, 使得波导馈电网络由简单的串联结构逐渐演变为串并联相结合结构, 复杂度和集成度进一步提

高。负公差和垫片补偿是波导馈电网络典型的装配协调方式，由于波导之间以法兰面作为设计分离面顺次连接，装配间隙会随着波导连接数量增多逐渐放大。装配间隙补偿不足而导致的装配变形、微波泄漏、性能超差等问题频繁发生。现行装配方法：装配间隙频繁测量、垫片的反复试凑和拆卸重装等，占据了装配周期的四分之一以上，已成为制约波导馈电网络装配精度和装配效率的重要因素。

近年来，国内外学者在飞行器数字化装配协调技术方面展开了大量研究^[2-3]。浙江大学提出飞机组件位姿协调控制方法，开发了垫片数字化设计软件；南京航空航天大学面向复合材料壁板装配间隙开展了模型重构与仿真研究^[4]。洛克希德·马丁公司面向 F-35 战机开展了基于实测点云数据的加垫补偿技术研究^[5]。Yang Ye 等^[6]采用激光扫描和特征建模方法预测装配间隙并进行了应用验证。当前，塞尺是波导馈电网络装配间隙的主要测量工具，具有效率低、重复性差、

测量结果不稳定等缺点，严重制约着产品的研制周期。基于此，开展基于实测模型的装配定位与补偿技术研究，对波导三维扫描数据进行重构和修正，在三维空间内进行虚拟装配，生成间隙量化补偿方案，快速服务于波导馈电网络的高质量装配。

2 波导模型重构

为了使重构模型在三维空间虚拟装配时微波通道严格对中，对波导装配对接面和微波通道轮廓线进行重构。波导装配对接面均为平面，微波通道为平面或柱面，微波通道轮廓线为微波通道与波导装配对接面交线，为矩形或圆形。波导馈电网络局部如图 1 所示，采用三维扫描仪对波导零件装配对接面和微波通道可见特征进行扫描，获取三维点云数据。对三维点云数据进行分割及去噪^[7-8]，可得到各个平面特征点云 $P_m(x_m, y_m, z_m)$ 和柱面特征点云 $C_n(x_n, y_n, z_n)$ 。

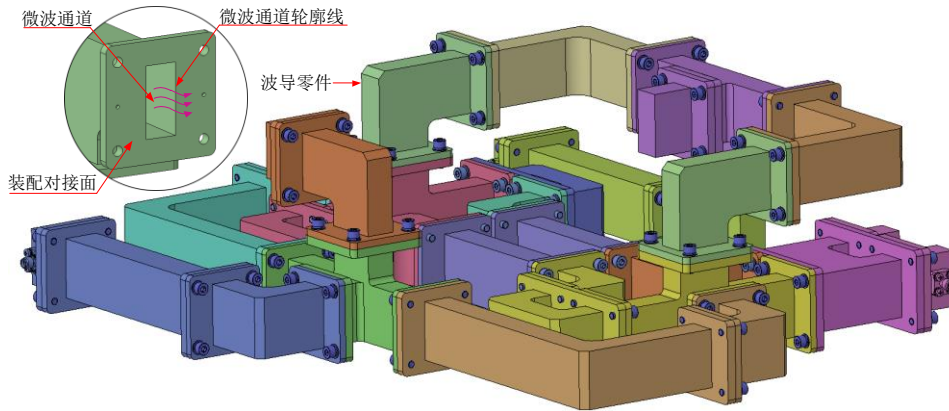


图 1 波导馈电网络局部图

考虑到扫描仪测量数据存在粗差点或异常点，传统的特征拟合方法缺乏对这些杂点进行识别和清除的措施，采用稳健拟合对平面和柱面特征参数进行估计^[9]。平面和柱面参数可分别由 $f_p(a, b, c, d)$ 四个参数和 $f_c(x_0, y_0, z_0, i, j, k, r)$ 七个参数表示，采用特征值法和 QR 分解法可计算出平面初始参数和柱面初始参数^[10]。基于平面初始参数和柱面初始参数可构造初始平面 P^0 ，初始柱面 C^0 。

计算平面特征点云 $P_m(x_m, y_m, z_m)$ 至初始平面 P^0 距离 d_m ；柱面特征点云 $C_n(x_n, y_n, z_n)$ 至初始柱面 C^0 圆心距离与半径差值 d_n ，由 d_m 和 d_n 可计算出距离的标准差 σ_m 和 σ_n 。当 d_m 和 d_n 大于两倍标准差时，认为该点是异常点进行剔除。将保留下来的点重新拟合

为平面或柱面，获取稳健的平面和柱面拟合参数。对拟合的平面和柱面参数构造为平面和柱面特征，将平面或柱面特征求交线即可获得微波通道轮廓线重构特征。

3 波导装配定位

销孔和波导装配对接面构成的“一面两孔”是波导馈电网络装配过程中最常见的定位特征，这些定位特征相对于微波通道中心平面具有精密级的位置度要求。由于销孔尺寸仅为 $\Phi 1.5 \sim 2$ mm，难以准确地测量和重构，因此基于重构的波导装配对接面和微波通道轮廓线，定义波导零件在三维虚拟空间中的装配基

准，约束波导的六个自由度。

微波通道轮廓线为圆形时，以对接面作为第一定位基准；过轮廓线圆心平行于螺钉，通过孔连线并垂直于对接面的平面作为第二和第三基准。微波通道轮廓线为矩形时，以对接面作为第一定位基准；过矩形中心线并垂直于对接面的两个面作为第二和第三定位基准；当对接面有两个或多个矩形孔时，取所有矩形孔的中间平面作为第二和第三定位基准。根据六个自由度定位原则，三个定位基准之间应相互垂直。

图 2 所示为重构的波导法兰面特征分布， $Q_i(i=$

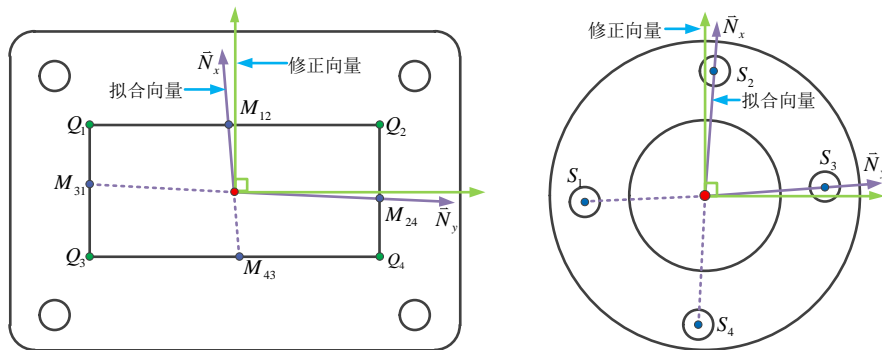


图 2 波导装配定位基准

4 波导虚拟装配及补偿

受波导馈电网络电气性能影响，波导垫片必须安装在某些特定设计的波导对接面上，这些对接面称为垫片安装面，垫片安装面与理论模型的偏差是指导垫片补偿的重要数据指标。需要对波导进行虚拟装配后才能分析垫片安装面的偏差情况。根据波导装配定位

1~4) 为矩形微波通道轮廓线的角点； $S_i(i=1\sim 4)$ 为重构圆的中心点； $M_{ij}(i,j=1\sim 4)$ 为相邻 Q_i 之间的中点； \vec{N}_x 和 \vec{N}_y 为由 M_{ij} 或 S_i 构成的向量；过 \vec{N}_x 和 \vec{N}_y 并垂直于对接面的平面即为二基准和第三基准。考虑重构特征与理论特征之间存在一定偏差，使得 \vec{N}_x 和 \vec{N}_y 之间为非理想的垂直状态，需要对其进行修正。 \vec{N}_x 和 \vec{N}_y 修正采用平均分配原则，即 \vec{N}_x 和 \vec{N}_y 之间同时向内或向外旋转相同角度，使二者垂直。

基准在三维空间中对重构的波导零件进行虚拟装配，使各波导零件的六个自由度被完全约束，构建波导馈电网络实测装配体。将实测装配体与理论装配体进行对比，分析确实测装配体与理论装配体之间的偏差情况，并确定波导垫片的补偿形式和补偿量。实测装配体与理论装配体之间的偏差主要有距离偏差、角度偏差和混合偏差 3 种，如图 3 所示。

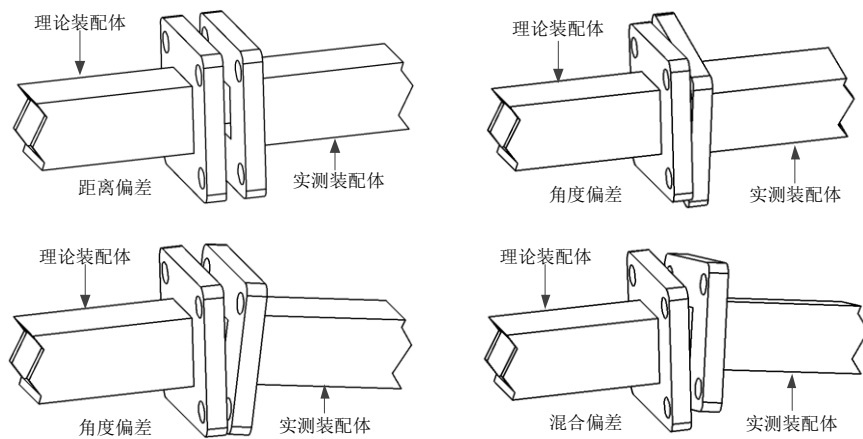


图 3 装配偏差图示

距离偏差主要包括轴向偏差、径向偏差和轴向径向混合偏差。轴向偏差是最常见的偏差形式，主要是

由于负公差连续累积而成，一般采用等厚度垫片进行补偿；径向偏差主要是由于微波通道与螺钉安装孔相

对位置在径向方向的偏差而出现的错位现象，该偏差往往较小，一般可通过波导螺钉过孔与螺钉之间的间隙得到自适应调节，当径向偏差超出自身调节能力时需要进行扩孔或更换；轴向径向混合偏差是指轴向偏差和径向偏差同时出现，可分别采用两种偏差的补偿方法逐一进行补偿。

角度偏差主要包括旋转角度偏差、倾斜角度偏差和旋转角度倾斜角度混合偏差。旋转角度偏差是由于螺钉安装孔相对于微波通道绕轴线旋转产生的错位现象，该偏差补偿方法与距离偏差中的径向偏差一致；倾斜角度偏差主要是由于波导对接面平行度或垂直度超差导致的，考虑到测量和重构精度损失并结合装配经验，倾斜角度偏差最大值超过 0.04 mm 时，需要考虑定制楔形垫片进行补偿；旋转角度倾斜角度混合偏

差是指旋转角度偏差和倾斜角度偏差同时出现，可分别采用两种偏差的补偿方法逐一进行补偿。当实际装配时距离偏差和角度偏差同时出现时，需要对偏差逐一进行分解后按照各自偏差的补偿形式进行补偿。

4 试验验证

为验证基于实测模型的波导馈电网络装配定位与补偿方法的可行性和有效性，在某星载天线复杂波导馈电网络上进行应用验证。由具有相同技能等级的不同操作人员分别采用本文装配方法和现行装配方法对同一套波导馈电网络进行装配。用 KSCAN-magic 复合式三维扫描仪对波导零件装配对接面、微波通道可见面及外表面等区域进行扫描，如图 4 所示。

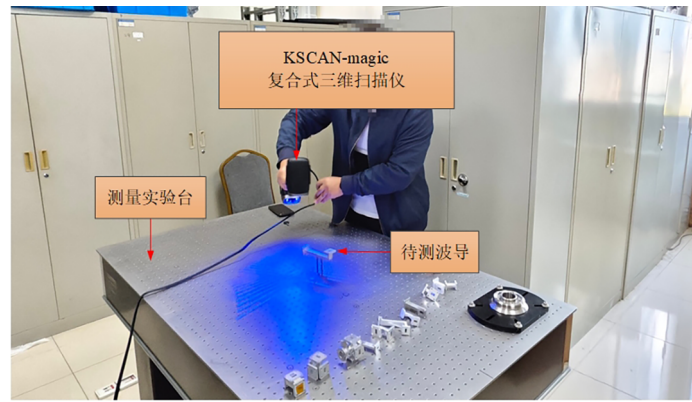


图 4 波导测量

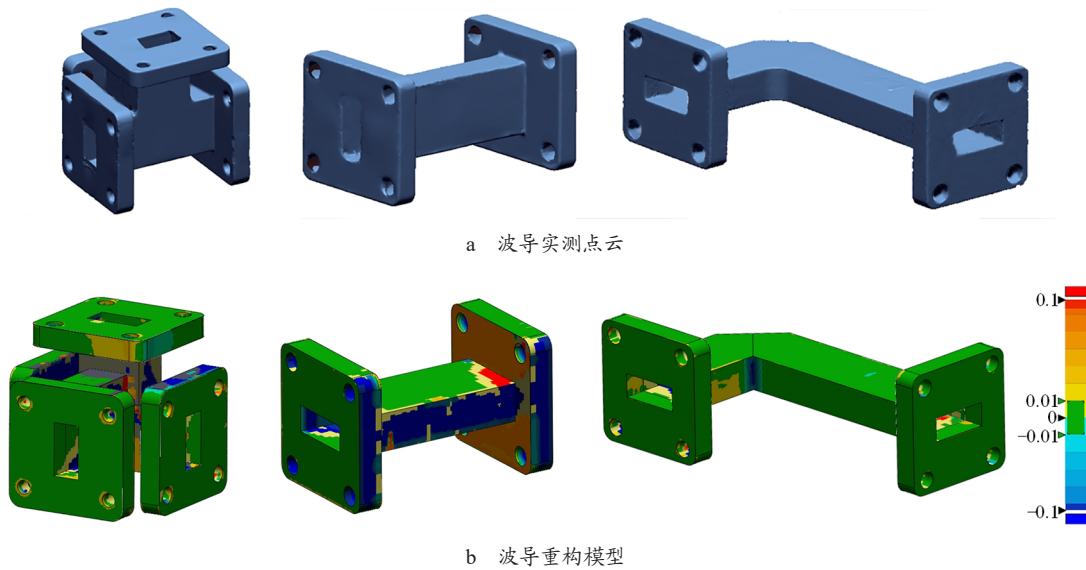


图 5 波导实测点云与重构模型

基于波导实测点云数据对波导对接面、微波通道可见面参数方程进行稳健拟合, 获取波导零件三维重构模型, 如图 5 所示。由图 5 可知, 波导对接面和微波通道可见面的重构偏差优于 ± 0.01 mm, 重构精度较好。微波通道不可见面及波导外表面重构精度较差, 在 0.1 mm 范围内, 但对于后续的装配定位及补偿无显著影响, 零件数量庞大时, 可省略波导外表面的扫描和重构。

在三维空间中对重构的波导进行虚拟装配, 获得实测装配体, 将其与理论装配体进行比对, 获取实测模型与理论模型之间的偏差。图 6 所示的某通道组件

共有三条微波通路, 微波通路 A 实测与理论装配体之间存在轴向距离偏差和倾斜角度偏差, 轴向距离偏差为 0.02 mm, 倾斜角度最大偏差为 0.005 mm, 添加一个 0.02 mm 垫片进行补偿; 微波通路 B 实测装配体与理论装配体之间存在旋转角度偏移, 但其偏移量较小, 通孔可以完全覆盖螺钉孔, 无需扩孔就可进行装配, 不需进行补偿; 微波通路 C 实测装配体与理论装配体之间偏差情况与微波通路 A 相似但偏差值较大, 轴向距离偏差为 0.2 mm, 倾斜角度最大偏差为 0.01 mm, 添加一个厚度为 0.2 mm 的垫片进行补偿。

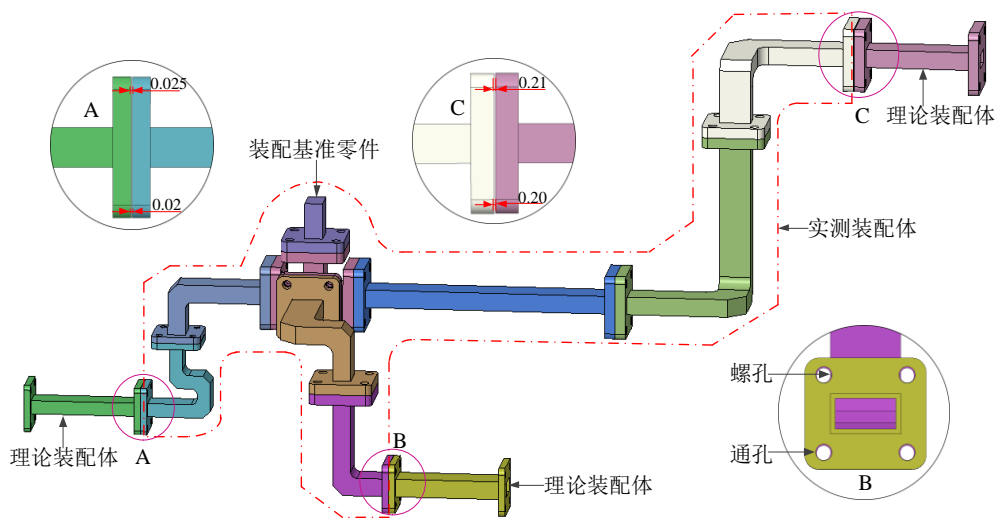


图 6 实测装配体与理论装配体偏差

按照上述方法确定出各组件对接面需要添加的垫片规格后, 进行波导馈电网络整机装配, 装配过程中不再根据经验添加额外垫片。采用现行装配方法和本文装配方法某通道组件各微波通道对接面垫片补偿情况和调整频次如表 1 所示。由表 1 可知两种装配方法

添加的垫片规格基本一致, 但采用现行装配方法装配调整次数明显多于本文装配方法。对两种装配方法所消耗的工时统计发现, 采用本文装配方法可使整机装配时间降低 55% 以上。

表 1 现行装配方法和本文装配方法对比

对比特征	微波通路 A 垫片规格/mm	微波通路 B 垫片规格/mm	微波通路 C 垫片规格/mm	调整频次/次
现行装配方法	0.02	0	0.20	5
本文装配方法	0.02	0	0.20	0

5 结束语

针对波导馈电网络装配过程中因间隙补偿不足导致的装配变形及性能超差等问题, 对基于实测模型的波导馈电网络装配定位与补偿方法开展理论研究与实际应用。主要包括波导零件的平面和柱面特征的稳健

拟合与模型重构、装配定位基准定义、虚拟装配与间隙补偿等几个方面。最后在复杂波导馈电网络上进行应用验证, 结果表明, 本方法可以准确量化装配间隙并给出补偿措施, 有效避免了传统装配过程中反复试装与拆卸重装导致的装配效率低、装配精度差等问题。

参考文献

- [1] 靳向阳, 凌天庆, 张国歌. 一种 Ka 波段阵面馈电网络的设计研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(6): 103-108.
- [2] 郝龙, 刘涵予, 黄翔, 等. 基于实测数据的飞机虚拟预装配技术发展综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 65-77.
- [3] Zhuang Cunbo, Liu Ziwen, Liu Jianhua, et al. Digital twin-based quality management method for the assembly process of aerospace products with the grey-markov model and apriori algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35: 105-127.
- [4] 万欣颖, 赵聪, 安鲁陵, 等. 基于实测数据的复合材料壁板与骨架装配间隙预测方法[J]. 复合材料学报, 2025, 42(10): 6026-6036.
- [5] Smith J. Concept development of an automated shim cell for F-35 forward fuselage outer mold line control[D]. Menomonie: University of Wisconsin-stout, 2011.
- [6] Yang Ye, Jin Yan, Price M, et al. Gap volume prediction for aircraft wing assembly[J]. Procedia Manufacturing, 2021, 54: 227-232.
- [7] 于博. 基于三维激光点云分割的去噪方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2022.
- [8] Xu Zongyi, Huang Xiaoshui, Yuan Bo, et al. Retrieval and alignment based large scale indoor point cloud semantic segmentation[J]. Science China (Information Sciences), 2024, 67(4): 164-180.
- [9] 梁标. 飞机装配几何特征自动识别与重构技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- [10] 毛喆, 孙瑞峰, 郭百森. 基于实测模型的反射面天线装配定位与补偿技术研究[J]. 航天制造技术, 2021(5): 6-11.