

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.055

阵列天线自适应装配系统设计

高鹏辉,田威,王长瑞,廖文和

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对在传统装配模式下阵列天线存在装配状态不可知、装配过程不可控、装配一次成功率低等问题,在分析阵列天线装配需求的基础上,以模块化的形式详细设计一套阵列天线自适应装配装备,并对关键硬件进行选型与校核。设计并编写系统装配流程硬件控制方案与控制程序,结合 Unity 软件开发简易虚拟调试平台,实现了硬件状态实时同步、模型运动干涉仿真、三维仿真环境漫游等功能,验证了机械设计和运动控制方案的合理性。

关键词:阵列天线;装配系统;机械设计;TwinCAT3;装配仿真

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)05-0259-05

Design of Array Antenna Adaptive Assembly System

GAO Penghui, TIAN Wei, WANG Changrui, LIAO Wenhe

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aimed at the unknowable assembly status, uncontrollable assembly process, and low assembly success rate of array antennas in the traditional assembly mode, a set of array antennas adaptive assembly equipment was designed in a modular form on the basis of analysis of assembly requirements of array antennas, and its key hardware was selected and checked. The hardware control scheme and control program of the system assembly process were designed and written, and a simple virtual debugging platform was developed in combination with Unity software, which realized the functions of real-time synchronization of hardware status, simulation of model motion interference, roaming of 3D simulation environment, etc., and verified the rationality of mechanical design and motion control scheme.

Keywords: array antenna; assembly system; machine design; TwinCAT3; assembly simulation

0 引言

随着“星链”、“一网”等国际低轨通信卫星的部署实施以及 5G 与低轨互联网的融合,各国对太空基础设施和服务的依赖性日益凸显,同时对卫星数据传输能力的需求也日益增长^[1-2]。基于卫星平台的有源相控阵天线(active phased array antenna, APAA)突破了传统天线孔径小、增益低等难题,具有大口径轻型结构及高增益、远覆盖距离、快速波束扫描等能力。相控阵天线以阵列天线为基础,每个天线辐射阵元连接了对应的收发组件(transmitter/receiver, T/R),通过控制 T/R 组件中的移相器可以改变天线合成波束的发射方向及天线方向图的最大指向^[3]。

星载阵列天线服役环境特殊、在轨周期长,中等规模的天线由发射、接收等数十个分系统组成,元器件数量达百万级^[4],传统的人工装配效率低、返工量大且难以保证阵列天线装配的一致性及最

终的电性能。因此,亟需研制一种阵列天线自适应装配系统,该系统采用多种传感器及智能决策算法,从而保证阵列天线高质量、高效率的生产装配。

1 阵列天线装配项目需求分析

1.1 阵列天线组成与特征分析

某型高精密一体化阵列天线采用子阵级布局,由成千上万块阵列天线大阵拼接而成,每个阵列天线大阵底板上安装有 4 个子阵组件。天线子阵由散热板、功能母板、天线板 3 层垂直装配而成,如图 1 所示。散热板与天线板由高精度数控铣床对整块铝合金立方体进行加工而成,板体误差对装配的影响可以忽略不计,功能母板由印制电路板(printed circuit board, PCB)、芯片及 SMPM 等元器件组成。印制板的生产过程需要经过显影、刻蚀、层压、钻孔等复杂工序,尺寸精度难以得到保障,PCB 板元器件焊接的装配方式加剧了元

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1710304)

第一作者简介:高鹏辉(1998—),男,辽宁盖州人,硕士研究生,研究方向为智能装配技术,m15541750054@163.com。

器件的位置误差。

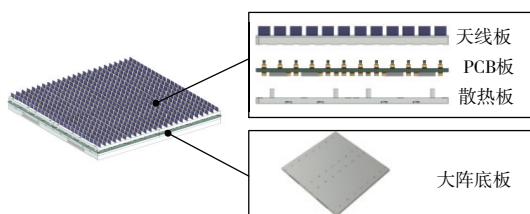


图1 阵列天线大阵示意图

阵列天线子阵采用直式双阴头射频电连接器传输天线板与PCB功能母板之间的信号,某型号的电连接器外形如图2所示。电连接器主要由绝缘子、插孔、壳体等组成。壳体两端的接触头采用6槽簧片结构的涨口工艺。插孔采用两槽簧片的收口工艺,对应的SMPM安装光孔内有插针^[5]。在向光孔内安装电连接器时,光孔插针需要插入电连接器插孔中,且不能使光孔插针发生形变。

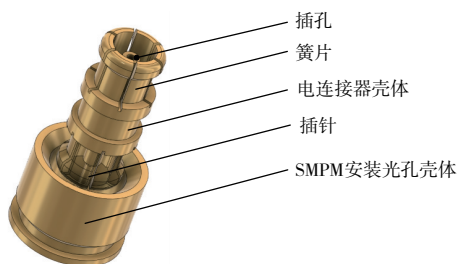


图2 电连接器及安装光孔详细示意图

1.2 自适应装配系统设计分析

根据上文对系列化阵列天线结构的分析,可以得出阵列天线自适应装配系统需要满足以下设计要求。

1) 通用性

系列化阵列天线产品子阵尺寸跨度范围大、元器件分布无规律、电连接器型号多样,这就要求自适应装配系统具有良好的通用性,在不更改设计的前提下,尽可能装配更多型号的天线子阵。

2) 鲁棒性

阵列天线自适应装配系统的故障会直接导致阵列天线装配停机,造成阵列天线交付延期。阵列天线装配系统的设计,需要保证电连接器及螺钉自动供料顺畅,末端执行器抓取及装配稳定,子阵位置精度检测准确,电连接器及天线插装力-位控制精准。

3) 智能化

印制电路板作为系列化阵列天线产品子阵的核心,由于焊接工艺原因,其上元器件一致性难以

保证,阵列天线自适应装配系统需要对待装配的印制电路板等核心零件进行特征识别与特征匹配,确保零件在合理的容差范围内。同时,系统在装配过程中可以根据印制电路板的尺寸及形变、电连接器与螺钉孔的位置布局等特征对装配流程做出合理规划,自适应装配系统同样需要做到自装配、自检测,即通过末端执行器对电连接器、天线板、螺钉等进行装配并采用视觉的方式对装配结果进行检测评估,针对其中装配质量未达标的零件,通过智能控制算法采取相应的解决措施。

4) 高精度

阵列天线子阵中的电连接器在装配时需要将电连接器插孔准确套住光孔内的插针,单个电连接器装配径向容差为 $\pm 0.15\text{ mm}$,轴向容差为 $\pm 0.1\text{ mm}$;子阵装配涉及到两种规格以上的螺钉,自适应装配系统需要对不同型号的螺钉进行高精度转矩控制,保证螺钉拧紧可靠及由螺钉拧紧引起的PCB板形变在容差范围内。

2 自适应装配系统结构设计

2.1 系统总体方案设计

装配系统是系统阵列天线自动化装配的核心,本文以模块化的形式对系统功能进行设计,系统主要包括三维扫描模块、对接装配模块、螺钉装配模块、电连接器装配模块、天线装配模块与零件输送模块,如图3所示。

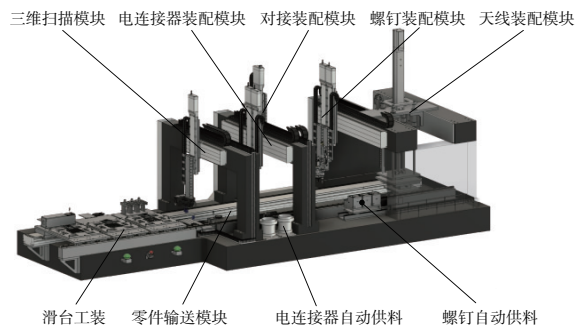


图3 子阵装配系统结构示意图

2.2 三维扫描模块设计

根据阵列天线零件结构特点与扫描精度需求,设计了以大理石门架与直线电机模组为主体、线激光扫描仪为末端的三维扫描模块,如图4所示。某型号电连接器的插针直径是阵列天线的最小设计尺寸,设备的检测精度一般比最小可检测尺寸小1个数量级,故以 0.015 mm 作为三维扫描模块的精度,根据奈奎斯特采样定理,需将当前测

量精度需求的 $1/3$, 即 0.005 mm 作为最终采样精度需求。

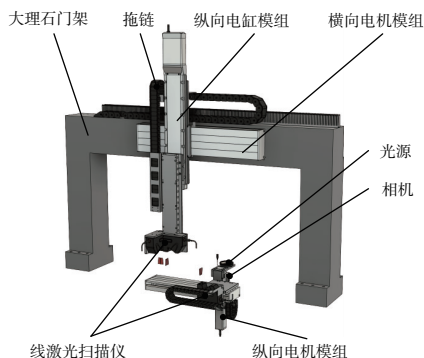


图4 三维扫描模块结构示意图

某型号阵列天线样件的长宽均为 156.5 mm , 根据检测效率需求规划分 5 次完成整个板面的扫描, 故线激光扫描的测量范围需要大于 31.3 mm , 考虑到两次扫描之间需要有一定的点云重叠以便后续的点云拼接, 最终将测量范围(宽度)确定为 35 mm 。三维扫描模块的结构类似于悬臂梁结构, 故进行线扫时速度不能过快, 当运动速度为 50 mm/s 时, 检测样件的总消耗时间为 31.3 s , 满足检测效率的要求。

线激光扫描仪的内部坐标系一般将垂直于线激光且指向激光发射器内部的方向定义为 z 轴正方向, 将投射出的激光线定义为 x 轴, 将激光的运动方向定义为 y 轴。将测量范围与测量精度带入式(1)中可得出最小轮廓采样数据数量为 7 000, 将 y 方向运动速度与 y 方向测量精度带入式(2)中可得采样周期为 10 kHz 。通过查找相关产品手册, 综合考虑高度方向测量范围、价格、耐久性等因素, 最终选择了 LJ-X8080 2D 线激光测量仪, 控制器采用型号为 LJ-X8000ASO 的 3D 开发版控制器, 该控制器搭配所选的线激光可以实现最高 16 kHz 的采样频率, 满足当前精度需求下的采样周期要求。模块中的直线电机模组采用带有光栅尺的直线电机模组, 经校核后满足需求。

$$R = \frac{F_{ov}}{D_x} \quad (1)$$

$$H = \frac{v}{D_y} \quad (2)$$

式中: F_{ov} 为线激光测量范围, mm ; D_x 为 x 方向测量精度, mm ; R 为最小轮廓采样数据量; H 为采样周期, Hz ; v 为 y 方向运行速度, mm/s ; D_y 为 y 方向测量精度, mm 。

2.3 对接装配模块设计

对接装配模块负责散热板与功能母板多轴孔的同时装配以及功能母板与天线板多电连接器的预装配, 故需要在保证足够运动精度的同时, 末端能够提供一定的预装配压力, 对接装配模块主要由大理石门架、直线电机模组、电缸模组、伺服电机、真空吸盘快换夹具、工业相机及其他结构连接件组成, 如图 5 所示。

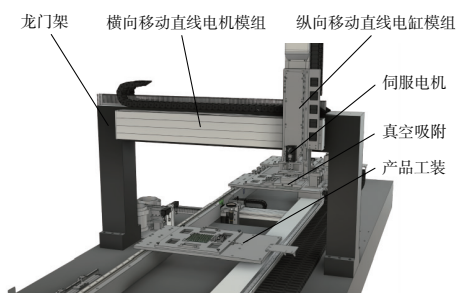


图5 对接装配模块结构示意图

2.4 螺钉装配模块设计

系列化阵列天线产品采用螺钉搭配弹平垫的方式分别实现散热板与功能母板和天线板的连接。为保证螺钉拧紧装置运行的稳定性, 选取 ASG 的螺丝批标准件作为末端执行器, 通过更换不同型号的螺丝批头来装配阵列天线中不同型号的螺钉, 并由相应的标准送钉机供应螺钉。螺钉装配模块结构如图 6 所示。

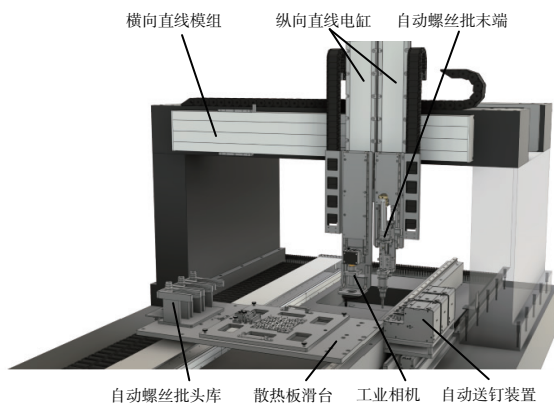


图6 螺钉装配模块结构示意图

2.5 电连接器装配模块设计

电连接器装配是阵列天线装配的核心环节之一, 其装配质量的好坏直接影响着阵列天线的电性能及后续天线板能否顺利装配。电连接器装配模块同样以大理石门架为主体, 通过直线电机控制装配末端运动, 根据电连接器的结构形式, 设计

了3点夹爪抓取电连接器,并在夹爪上方安装力传感器来对电连接器插装过程中的插装力进行实时监测。力传感器安装在换位气缸上实现不同抓取位置的转换,电连接器装配末端结构如图7(a)所示。电连接器采用改装的振动盘进行送料,并由流道流入电连接器治具中,供料装置如图7(b)所示。

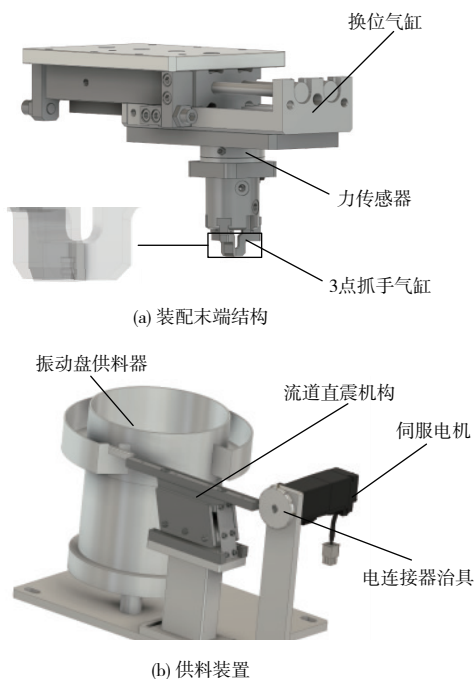


图7 装配末端及供料装置设计方案

2.6 天线装配模块设计

天线装配模块负责将预装配完成的子阵组件压装至最终状态,压装位移影响着电连接器在天线板上 SMPM 插座的插装深度,最终影响着整个天线子阵的电性能。图8所示为天线装配模块的结构,该模块由龙门架、直线电缸模组、力传感器、压装末端、顶升机构和导向机构组成。

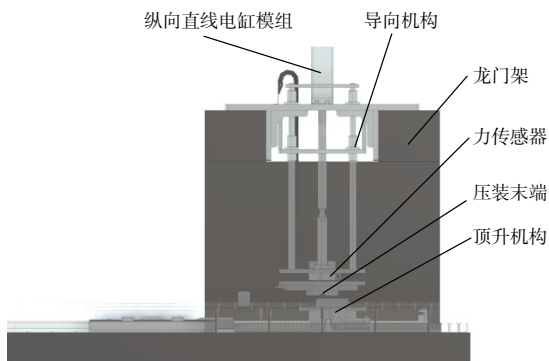


图8 天线装配模块结构示意图

3 硬件控制系统设计与仿真

3.1 硬件控制系统架构

阵列天线自适应装配装备采用孪生平台作为上位机、硬件控制系统作为下位机的控制方法,孪生平台通过通信协议与硬件控制系统进行数据交互。本文采用工业自动化中常用的硬件控制方法,使用 EtherCAT 现场总线模块与装配装备中电机驱动器、接近开关、位移传感器、力传感器、阀岛等硬件进行通信,使用以太网作为相机、线激光扫描仪与孪生平台的通信方式,使用工业自动化软件作为硬件核心控制系统,软件通过读取当前端子模块信号实现硬件状态的获取,并通过写入控制字、控制变量等方式对硬件状态进行控制,组态结构如图9所示。

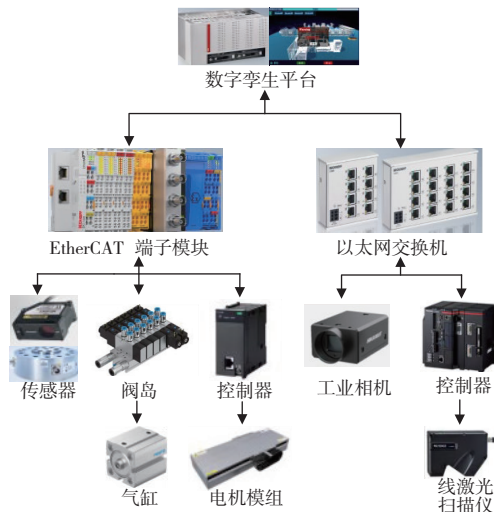


图9 硬件系统组态结构示意图

3.2 硬件控制系统设计

阵列天线各模块主要是由直线模组或电缸组成的滑台与相应的功能末端组成,硬件控制系统根据阵列天线智能化装配流程对各模块滑台与功能末端进行运动控制。通常情况下,一个运动控制系统由控制器、驱动器及执行器3个关键部件组成。控制器是自动化系统的大脑,可根据所需的输入信号控制执行器;驱动器是控制器与执行器之间的桥梁;执行器是运动控制的执行部分,例如直线电机、伺服电机等。本文采用倍福自动化最新的工业自动化软件 TwinCAT3 作为阵列天线自适应装配装备硬件的软 PLC 控制系统,一方面,采用结构化文本编写阵列天线自适应装配系统各功能模块装配流程控制子程序,软 PLC 以一

定的时间周期不断刷新主程序中的子程序,由孪生平台发送某个子程序运行信号,PLC 捕获该信号并跳转执行相应的功能子程序,完成阵列天线相应环节的装配工作;另一方面,通过 TwinCAT 自带功能块实现对阵列天线各功能模块中的 PLC 轴的控制,并通过链接关系将对 PLC 轴的控制映射到 NC 轴上,NC 轴再通过驱动与编码器接口将控制传输到物理轴上。其中,PLC 轴是在 PLC 程序中定义的轴变量,NC 轴是在 NC 配置界面定义的 Axis,物理轴是在 I/O 配置中扫描或者添加的运动执行和位置反馈的硬件^[6],3 层轴的交互关系如图 10 所示。

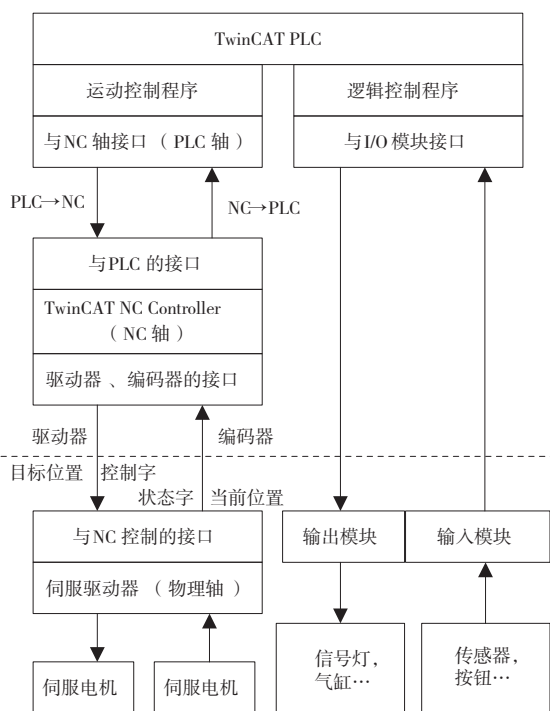


图 10 硬件系统组态结构示意图

3.3 系统运行干涉仿真

阵列天线自适应装配装备涉及到多个功能模块的功能验证与调试,为减少返工量、提高系统调试效率^[7],在 Unity 3D 上开发了一套虚拟调试平台,界面如图 11 所示。该平台可以根据用户需求导入仿真模型,使用倍福 ADS 通信建立与 TwinCAT 软件数据交互,通过实时更新 PLC 程序中电机、气缸等硬件程序的状态,实现 PLC 程序的运行可视化;平台还在 Unity 自带的网格碰撞器的基础上编写干涉碰撞检测功能,以窗口的形式弹出仿真过程中发生干涉的模型名称,可以通过场景漫游的方式观察发生干涉处的细节,然后再

根据具体原因修正机械设计方案或硬件控制的 PLC 程序。

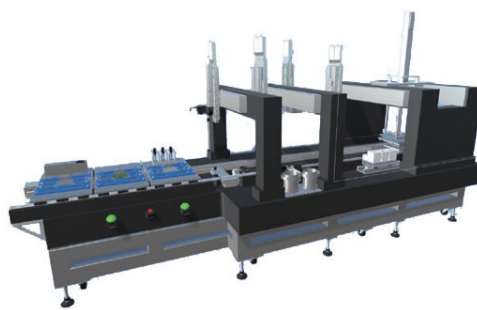


图 11 系统虚拟调试界面示意图

4 结语

本文首先分析了高精度、一体化阵列天线的组成与特征,总结出阵列天线自适应装配系统的设计需求;然后确定了自适应装配系统的总体结构形式,并以模块化的方式对阵列天线子阵装配系统进行了结构设计;最后设计了阵列天线装配系统硬件运动的控制架构,编写了系统硬件运动控制程序,并基于 Unity 进行了运动控制程序仿真,验证了系统设计的合理性。目前,该系统已经完成制造,正在进行调试。

参考文献:

- [1] 肖飞,郑作亚,陆洲,等. 天地一体化信息网络应用需求和模式的研究方法探讨[J]. 中国电子科学研究院学报,2021,16(3):220-226,238.
- [2] 田步宁,王博伟,李岩,等. 星载高集成度有源阵列天线现状与展望[C]//第十三届卫星通信学术年会论文集. 北京:中国通信学会卫星通信委员会,中国宇航学会卫星应用专业委员会,2017:16-21.
- [3] 李靖,王金海,刘彦刚,等. 卫星通信中相控阵天线的应用及展望[J]. 无线电工程,2019,49(12):1076-1084.
- [4] 郭华. 阵列天线综合及子阵列划分的研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.
- [5] 李明,孔祥龙. 一种高精度电连接器自动化装配质量控制研究[J]. 电子机械工程,2021,37(4):47-50.
- [6] 王少甲,高荣慧,翟华,等. EtherCAT 技术在振动台三台阵同步运动控制应用[J]. 机械设计与制造,2018(12):168-171,176.
- [7] 王金江,牛晓彤,黄祖广,等. 数字孪生驱动的数控机床虚拟调试技术研究[J]. 制造技术与机床,2022(10):127-132.

收稿日期:2023-02-20