

自动化技术在卫星天线 高精度装配中的应用研究*

Research on Satellite Antenna Assembly by Applying Automatic Assembly
Technology

北京卫星制造厂 张明 喻懋林 张玉生



张明

中国空间技术研究院北京卫星制造厂研究员, 历任“北斗”、“遥感”等多个平台型号卫星指挥, 长期从事包括复合材料产品在内的多项厂内科研课题技术管理工作。

近年来, 随着我国航天事业的快速发展, 航天器产品的数量和种类不断上升, 对产品装配精度的要求也越来越高。星载天线等高精度结构的装配以往完全依靠传统的手工操作方法, 工作效率低, 技术风险高, 已经不能满足需求。因此, 寻求一种高

效、高精度的产品装配方式便成为航天装配水平提升的当务之急。

本文以卫星固面反射器天线为对象, 开展自动化装配技术在航天器产品高精度装配中的应用研究, 提出了基于 6 自由度工业机器人与激光跟踪仪联动闭环控制的新型高精度装配模式, 是对实现卫星部件高精度装配的一种切实有效的探索。

效、高精度的产品装配方式便成为航天装配水平提升的当务之急。

自动化装配技术已历经半个多世纪的发展, 在汽车、航空等工业领域已开始利用柔性化的工业机器人或定制的自动化装备高效、精准地完成了过去很多人工操作难以完成的工作。因此, 将自动化装配技术引入到卫星部件的精密装调中, 发展高精度的自动化装配技术, 是解决航天产品高精度装配困难的切实有效的途径。本文以卫星固面反射器天线为对象, 开展自动化装配技术在航天器产品高精度装配中的应用研究, 提出了基于 6 自由度工业机器人与激光跟踪仪联动闭环控制的新型高精度装配模式, 是对实现卫星部件高精度

装配的一种切实有效的探索。

自动化装配技术在国外航空航天的典型应用

1 国外航空领域应用

目前, 自动化装配技术在发达国家航空领域已有成熟应用, 从单台自动钻铆机和数控托架组成的自动钻铆系统向自动化装配工装、模块化加工单元、数控定位系统(包括多自由度机器人系统)和数字化检测系统组成的自动化装配系统发展。

美国 ITA 公司和巴西航空工业公司在小型客机自动装配中采用两台重型工业机器人配合 IGPS 测量系统、摄影测量系统和激光雷达协助完成机身装配。

* 国防基础科研项目(A0320132007)资助。

波音 787-41 段生产系统^[1],共布置了 5 台机器人,自动完成机身的制孔和铆接。

以上两个案例是工业机器人在航空领域实现自动化装配的典型应用,证明通过自动化的柔性装备可以实现飞机装配中的很多复杂操作,提升装配精度和效率。

2 国外航天领域现状

与航空产品相比,航天产品具有多品种、多状态、小批量的特点。在自动化技术应用方面,更多地体现在利用机器人技术实现空间环境下作业或高精度部件装配。

加拿大利用太空维护机器人,可以完成多种在轨任务,其中也包括自动化的空间飞行器装配。日本 NASDA 开发的 2.8t 级工程试验卫星,利用其星载空间机器人进行展开/拆卸装配实验以及日本通信研究所计划的天线装配机构实验。研究太空机器人技术,实现在卫星上装配天线^[2]。近年来, NASA 在大型复合材料航天器杆件方面开展了很多研究工作,开展了对于大型航天杆件结构的工业机器人装配技术研究。

通过国外航天领域的自动化装配技术应用实例,可以看出这种先进的装配技术已经在国外同行中得以应用和推广,能够切实推动复杂航天器的地面高精度装调以及在轨复杂空间环境下的无人装配。因此,将自动化的装调技术推广应用到我国航天产品装配中,将具有长远的意义。

卫星天线装配特点

星载天线是卫星有效载荷的关键组成部分之一,对卫星功能的实现有重要意义。它不仅参与了地球与卫星之间无线信道的建立,还参与信号的传递和处理。

卫星天线所使用的构型除常见的抛物面天线外,还包括桁架式可展开天线、平板式天线、径向肋条天线等。其中固面形式的抛物面天线有

着结构简单、精度高、稳定性好的优点,是高精度复合材料天线的主要类型之一。图 1 所示为一个典型的固面形式反射面天线装配后的形式,整个结构上共搭载了 5 副固面反射器。



图1 典型卫星固面天线装配形式

若把图 1 所示的天线装配形式进行任务分解,可得出就单个的固面反射器而言,装配指标分为焦点指标要求和对称面角度指标要求两项。焦点指标要求的由来是因为固面反射器的形面通常为一椭球面方程或抛物面方程,根据方程的参数,会在空间中形成焦点坐标。通常情况下,在装配坐标系下位置精度需满足尺寸公差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内。对称面角度指标的由来是因为固面反射器根据其形面方程,会形成表针其角度特征的对称面。装配过程中需要将对称面调整到装配坐标系下的某一角度内,并且通常情况下角度公差需控制在 0.03° 以内。

根据以上对天线装配两项指标的分析可以看出,由于表针固面反射器天线位置特征的对称面及焦点坐标位于空间虚拟位置,不易测量,装配要求不仅局限于 X、Y、Z 轴 3 个自由度,而且还增加了绕坐标轴转动的旋转轴,即对装配角度有严格要求,这使得天线装调的自由度达到 4~6

个,装配难度大为增加。传统的装配方法,需要操作者站在装配平台上,手持反射器进行位置调整,装配十分困难,必须经验丰富的操作者才能完成。因此迫切需要一种不依赖人工完成的自动化装配手段来完成这样的高精度部件装配。

卫星天线自动化装配系统的构建

卫星天线的自动化装配与目前工业界的大多数自动化装配应用有所不同,其强调更高的位置精度,而不是追求更短的装配时间。因此,在系统的构建上也更强调测量系统在整个系统中运行的重要性。只有建立了

了很精准的测量手段,才能保证装调的位置满足要求。

传统的自动化装配往往采用示教或固定程序运行的模式,适用于大批量生产,装配过程中的变数小,相对稳定。但是航天器产品具有单件小批量的特点,这就决定了在自动化装配系统运行时,传统的相对固定的运行模式行不通。必须采用灵活多变的能够实现自适应的自动闭环控制方式,将测量系统与执行装调操作的调姿机构运动有机联系起来,让调姿执行系统能够根据测量系统传送回来的数据经过解算后自行调姿。这种闭环控制方式是针对卫星产品装配的独有特点建立的新型控制方式,需要通过集成化的中央控制系统来实现。

此外,装配现场还需要通过合理的工位布局来实现各分系统的有效运转。图 2 是整个卫星天线自动化装配系统的构建框架。下面就各个分系统的建立以及最终装配系统的运行模式进行分析论述。

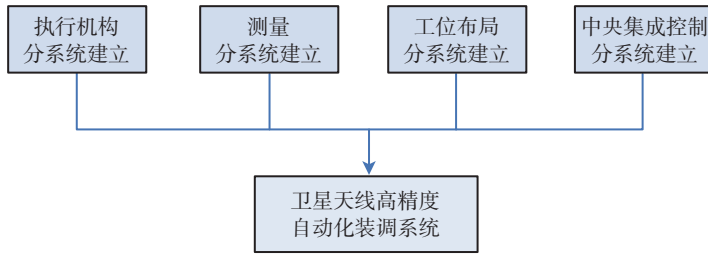


图2 卫星天线自动化装配系统构建框架

1 执行机构分系统的建立

执行机构系统需要选择能够精确调姿的运动机构,配以根据产品特性设计的末端抓取执行装置,抓取产品进行姿态调整,核心是实现6自由度的装调执行机构精确控制。目前运用较多的就是使用工业机器人进行装配。这种机构最大的特点就是操作灵活,可以实现很大空间范围内的装配,并且配合不同的末端执行装置完成不同任务,更适合于卫星天线装调。

工业机器人本身并不具有装配产品的功能,还需要根据产品的外形特定设计专用的机器人末端执行器。该执行器的一端连接在机器人的末端法兰盘上,通常都是通过螺栓拧紧的机械连接方式;另一端则实现对要装配的卫星天线反射器的夹持,并且每次装夹反射器时采用人工安装方式,这样可以充分考虑到每组反射器的外形特点以及装配过程中测量仪器的摆放位置进行合适的装夹,同时避免由于抓取不当造成测量中遮挡视线的问题。

2 测量分系统的建立

测量系统的建立需要考虑自动化装配的自身特点,选择能够不需要人为参与就能准确快速完成产品位置测量的方法和装置。

目前,常用于航空航天自动化装配的测量技术有iGPS技术和激光跟踪仪测量系统。iGPS系统主要应用于较大范围内的全局参数测量。激光跟踪仪是建立在激光技术和自动控制技术基础上的一种新型空间坐标测量系统,适合于较小空间范围内

的动态测量^[3]。

对卫星天线产品的装配属于较小空间范围内的测量。通过由激光跟踪仪组成的测量系统确定装配部件当前的位姿状态信息。具体的工作原理是:利用机械手抓取反射器后,在反射器事先确定的靶标点处安装信号接收器,通过测量系统测量反射器上靶标点位置,获得其位置信息。在激光跟踪仪测量反射器上的靶标过程中,为适应自动化装配的动态测量特性还需要应用跟踪仪的自动寻点测量技术和光路干涉检测分析技术,对仪器设备进行二次开发。自动寻点测量技术的实现如图3所示。

光路干涉检测分析技术则是指在自动寻点测量模式下,激光光束在已知空间点附近的有限区域内进行扫描搜索,只要求该区域内不存在挡光则可以完成测量。该技术可以解决人工手持测量时断光重测的问题。

3 工位布局分系统的建立

工位布局分系统的建立是合理规划产品安装位置、测量设备摆放位置、执行机构安装位置的过程。系统建立过程需要综合考虑产品尺寸大小,执行装置的运动空间范围,精测设备的测量范围等因素,保证产品装配过程中不会因为工位空间布置不合理造成执行机构与产品的位置干涉、测量设备出现遮光无法测量等问题而无法进行装配。

就工位上各设备的移动方式而言,所装配的产品可以通过转台等装备实现位置的调整,执行装调的机器人则可以安装在导轨上实现自身移动,最终满足装配空间的需要。

4 中央集成控制系统的建立

中央集成控制系统的核心是要解决测量与装调的自动调姿闭环控制,其中包含装配过程中自动调姿闭环控制流程设计、各坐标系的建立与相互转换技术、测量数据评估技术、中央控制软件研制等多项关键技术,它是整个自动化装调系统的关键。

4.1 自动调姿闭环控制流程

自动调姿闭环控制的关键是当前位姿状态的检测及运动过程的控制。首先利用先进的测量技术结合准确的计算方法有效检测并反馈装配部件当前的位姿状态。整个自动调姿过程包含数据信息采集、处理;

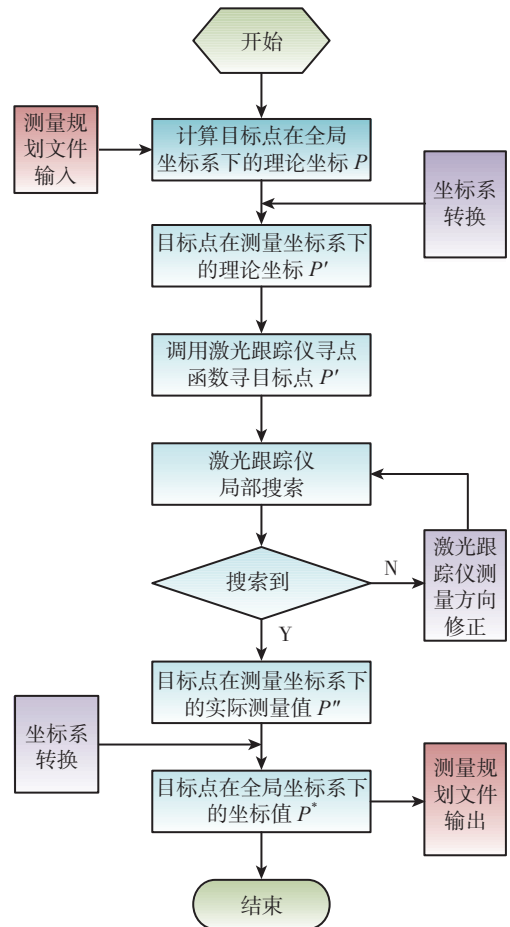


图3 自动寻点测量技术实现流程图

运动轨迹规划及仿真验证;执行机构的运动控制;最终位姿的检测和补偿,如图4所示。

控制流程是首先对各坐标系进行测量标定,获得调姿控制所需要的各种参数;然后,给定天线反射器抓取后的初始位姿与目标位姿,根据该信息规划运动轨迹,将轨迹规划指令输入给机器人控制系统,完成反射器

的运动控制。在完成第一次运动后,利用测量系统测量反馈数据,计算出此时反射器所处的实际位姿参数与目标位姿相比较,确定位姿运动误差,根据此位姿误差制定位姿补偿指令,并传送至机器人。经过多次测量补偿,直到反射器的实际位姿精度满足装配需求。

4.2 各坐标系的建立与相互转换技术

根据装配实际需要,将坐标系及测量点进行合理规划,包括测量坐标系、机器人坐标系、机器人末端坐标系、反射器坐标系(动坐标系)、装配平台坐标系。目标点在坐标系间利用位置向量和姿态矩阵进行坐标转换计算,通过测量目标点在测量坐标系下的坐标,进行目标点在坐标系之间的坐标变换计算。

4.3 测量数据评估技术

实际测量中,由于测量环境、振动噪声以及其他原因等会影响测量结果精度,甚至会出现超差的情况。因此,对待测点的实际测量结果,系统应具有对其进行判定。对实际的测量结果,应先通过直接判断法找出测量环境等因素突变引起的测量异常点,然

后按照莱茵达准则剔除其他异常点。

4.4 中央控制软件的研制

控制软件是自动化装配系统的重要部分,实现数字化测量与自动化装配过程的集成。主要包括测量数据的自动采集、分析与处理,系统数据统一管理,机器人位姿反馈控制,以及装配过程仿真与分析等功能。软件系统所包含的各功能及其相互间关系如图5所示。

4.5 装配系统的运行

卫星天线自动化装配系统建立完成后,精测系统通过测量卫星反射器位置,将坐标信息传递给中央控制系统,控制系统通过一系列误差控制算法,将下一步的微调量翻译成机器人控制语言,并控制机器人进行微调。反复进行精测—计算—微调的反复迭代,直至产品位置满足设计要求,整个过程无需人为干预,实现自动化的闭环调姿控制。

结 论

自动化装调技术在卫星天线装配中的应用研究,可以突破高精度部件装调误差分析技术、测量与调姿的闭环控制技术等多项关键技术。同时,通过对自动化装配系统中执行机构分系统、测量分系统、工位部局分系统和中央集成控制分系统的建立,可以掌握利用工业机器人作为装配执行机构的自动化装配技术。这对于提升国内航天器装配研制水平,加快推进先进的数字化、自动化装配在航天产品中的应用具有重大意义。

参 考 文 献

[1] 邹方. 飞机装配迎来机器人时代. 航空制造技术,2009(24):34-37.
 [2] 郭继峰,王平,崔乃刚. 大型空间结构在轨装配技术的发展. 导弹与航天运载技术,2006(3):28-35.
 [3] 邹爱丽,王亮,李东升,等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用. 航空制造技术,2011(21):72-75.

(责编 深蓝)

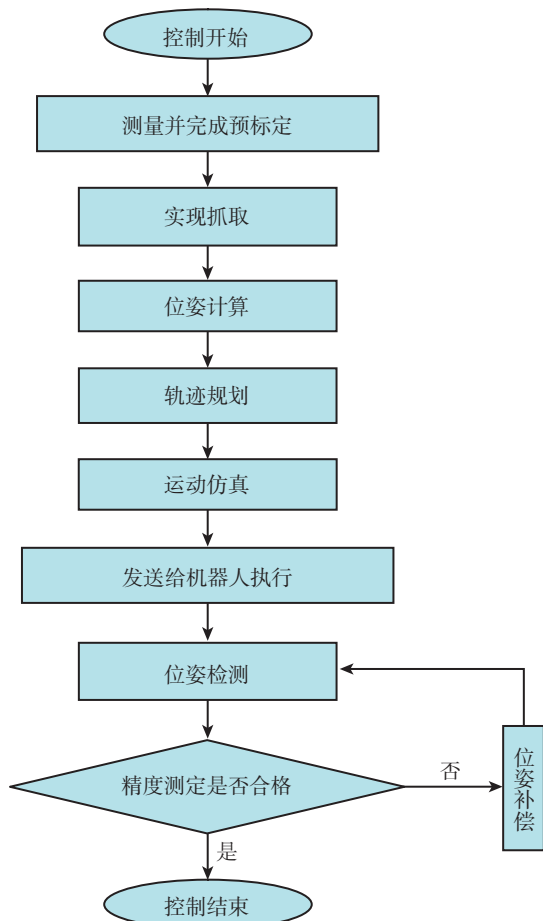


图4 自动调姿闭环控制流程图

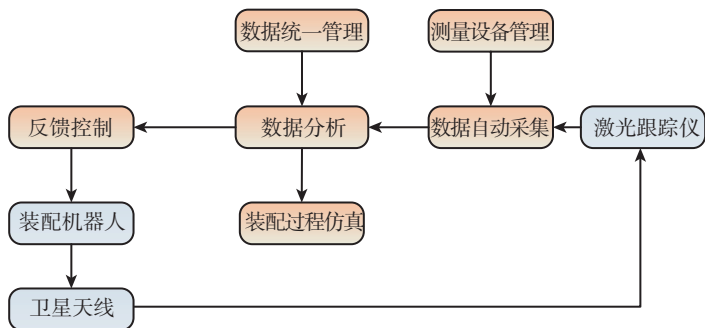


图5 软件系统各功能间的关系