

# 卫星自动对接技术研究

Automatic Docking Technology of Satellite

北京卫星环境工程研究所 熊 涛



熊 涛

北京卫星环境工程研究所高级工程师,主要从事航天器的总装工艺技术工作。

随着卫星总装工艺技术的复杂性越来越高,其对功能和性能指标的要求不断提高,先进制造技术在复杂航天器装配中的作用越来越重要。卫星装配是制造过程中的最后一个环节,也是一个重要环节。卫星的装配,通常先分舱段装配,再进行姿态调整和对接。在此装配过程中,传统的对接装配方法需要采用专用的装配工装,用于定位、支撑各个部件,然后通过人工辅助进行对接装配,这种方法对不同产品的适应性差,降低了装配的质量、柔性 and 效率。

采用数字化手段来提高卫星装配设计和制造的效率和质量是先进制造技术的重要发展方向之一。随

卫星自动对接技术的实施必将彻底改变目前卫星总装主要依靠工艺人员和操作者实践经验的局面,使得总装过程能够依靠数字化柔性装配对接技术实现精确控制,杜绝卫星总装过程人为因素导致的质量事故,从而极大地改善卫星总装工艺技术水平,提高卫星装配质量,增加总装过程的可靠性。

着并联机构研究的日渐成熟,结合多机器人位姿协调控制技术的发展,逐步形成了一种针对大部件对接的数字化柔性装配技术。

数字化装配柔性对接技术应用与卫星舱段自动对接过程的技术基础已经成熟,其成功应用将改变卫星现有总装工艺模式,大大提高卫星总装工艺技术水平。

## 卫星对接技术的现状

目前,我国卫星舱段对接、分解技术、大型有效载荷安装技术等装配技术仍然依靠工艺人员的工程经验和操作人员的个体技能水平,致装配操作具有不稳定性。上述大型对接过程均采用吊装或移动地面工装的方式来移动对接部件双方,辅以人工观察、手扶,并最终将对接部件双方按定位关系进行对接。转配部件的移动路径在整个定位过程中依靠工艺人员的工程经验进行定性判断,属

于边干边看、临时处置的模式指挥吊车进行手工对接或分解,对接分解区域存在许多视线盲区,加之欠缺实时视频监控手段,当配合尺寸比较精确和导向行程较大时,往往发生产品磕碰、擦伤事件,且大多数装配件的最终定位精度也缺乏数字化测量数据的验证,从而导致在卫星研制过程中系统级产品装配质量可靠性低、生产过程安全性差<sup>[1]</sup>。

上述分析看来,传统的大型装配件对接装配操作,就定位过程来说,装配件间相对位置缺乏数字化测量手段,位姿调整不可量化,吊车、地面工装的移动精度不高,稳定性不强,关键对接部位可视性不强,装配件最终定位精度不可量化,同时大量的专用工装也增加了产品的研制成本。因此迫切需要引入数字化柔性装配技术。以波音和空客为代表的现代航空制造企业大力发展数字化装配技术,普遍采用数字化柔性装配工

装<sup>[2]</sup>,大大提高了装配质量及其工作效率,减少了成本。

### 数字化装配技术的组成

数字化柔性装配系统主要由计算机控制的自动化定位器(机械随动定位装置)、测量系统、控制系统及相应的机械系统组成<sup>[3]</sup>。柔性对接装配系统通过整合测量技术、协同运动控制技术、运动仿真技术以及装配信息集成管理技术,实现对装配部件的精确定位和运动控制,如图1所示。

工作时,由测量系统测试出各传感器在装配坐标系中的坐标值,将坐标值信息发送至数据管理系统,利用相关算法计算出此时对接部件的位姿信息,同时用户可以通过运动仿真系统,对即将进行的装配动作进行仿

真,再将该信息作为控制指令发送至控制装置,然后再由控制装置驱动各调姿机构使对接部件达到预定的位置。柔性装配系统组成如图2所示。

#### 1 柔性工装机械机构

柔性装配系统的机械部分一般为能够实现6自由度运动的并联调姿机构。该机构由驱动支链连接装配平台与对接部件,通过各支链的协调运动实现对接平台的不同位姿。

#### 2 测量技术

数字化装配测量技术是实现一定装配精度的重要保障。数字化装配测量系统所要解决的问题是测量对接部件当前所处的确切位置。

##### (1) 数据测量。

工程上常用iGPS系统作为主要的测量工具。该系统属于非接触式

术允许的条件下,可以采用自动测量的方式对部件测量点顺序自动采点,提高装配测量的效率。

其数据采集过程为:首先在结构设计时确定装配件上各定位基准点的位置;然后,在系统工作时,由柔性定位工装来支撑和夹持装配件并在各定位基准点上安装iGPS的目标传感器,由iGPS测量系统测量装配件上各传感器的位置,获得定位基准点位置信息。

##### (2) 位姿计算。

位姿数据用于描述部件在装配坐标系下的空间位置和姿态。部件的空间位姿由3个坐标和3个转角组成,即X, Y, Z坐标和俯仰角、偏转角和滚摆角。位姿计算实质是求解在装配坐标系下部件自身局部坐标系与装配坐标系之间的变换关系。

基于测量特征点一一对应的原则,在结构设计初期就确定传感器各点在对接部件坐标系中的坐标值,结合工作时iGPS所测出的传感器各点在装配坐标系中的坐标值,采用最小二乘法求解最优变换矩阵或通过奇异值分解解算矩阵方程,得出旋转变换矩阵和平移变换向量,从而得出部件的位姿数据。

#### 3 运动规划及控制技术

运动规划及控制技术解决的是对接部件如何从一个位姿运动到另一个位姿的问题。

##### (1) 轨迹规划。

对接系统的轨迹规划就是根据对接的要求来规划对接部件的运动参数,包括位置、速度、加速度和时间 $t$ 的关系。

轨迹规划的起始位姿由iGPS测量系统所测各传感器的位置信息来确定,最终目标位姿由控制系统给定。轨迹规划程序的设定参数包括:最大移动速度、最大移动加速度、最大转动速度和最大转动加速度。

移动一段距离,要实现慢起——匀速——慢停,实际应用中多采用S

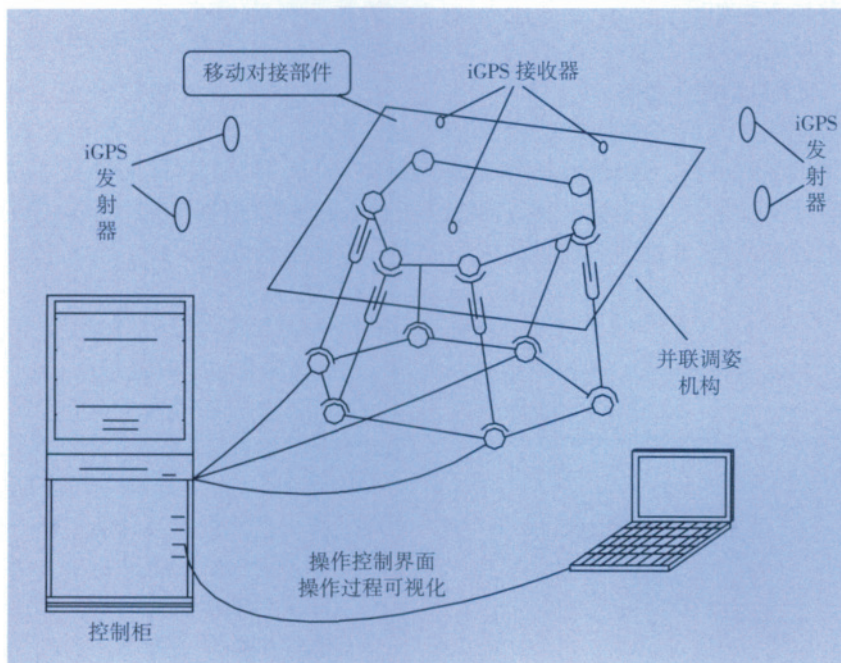


图1 对接系统示意图

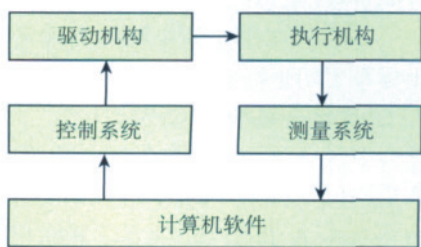


图2 对接柔性装配系统组成

数字化检测设备,可以通过设置地标测量点和产品部件上的传感器定位点,将实测数据和实现标定好的测量点数据进行拟合分析计算,建立精确的装配测量场并计算出部件在测量环境下的空间位姿。

由于对接部件是运动部件,对部件位姿的测量和计算相对频繁,在技

型速度曲线来进行规划。针对不同时间段运动的速度、加速度运动规律,在生成运动曲线时可以待定系数法来确定轨迹曲线方程。

#### (2) 运动协调控制。

对接系统运动轴个数较多,以6-SPS 并联机构为例,一般在6个轴以上,运动的同步性要求高,控制器与上位机数据通讯频繁,而且数据量较大,因此一般采用性能好、可靠性高的多轴运动控制系统,采用以太网与上位机通讯,高速现场总线方式同步协调各运动驱动器的协调运动。

#### 4 模拟运动仿真

用于对接装配的仿真系统,能够将装配现场的数控对接平台和对接部件数模导入仿真环境,结合对接工艺和对接规划生成的运动数据,在实际对接装配之前模拟对接运动过程,分析运动路径规划的正确性和运动到位情况。在对接过程实施阶段可以实时显示部件当时的运动情况和当前位置。

#### 5 数据集成管理

对接集成控制系统涉及到的数

据较多,包括测量数据、数控定位器数据、部件信息数据、对接工艺数据等。涉及到的坐标系包括装配总体坐标系、跟踪仪测量坐标系、每个定位器的局部坐标系、对接目标部件和移动部件也各有局部理论坐标系。

对接系统数据量大、关系复杂,而且对系统的安全性、实时性要求较高。一般采用较高端的数据库系统,如 ORACLE 系统。对接数据包括对接平台和部件理论数模文件以及 PVAT 运动数据等。

### 卫星自动对接系统方案

#### 1 系统组成和 workflow

卫星自动装配定位系统由通用自动调平吊具、iGPS 测量系统、并联调姿系统、控制系统、仿真系统组成。其整体布局如图 3 所示, workflow 如图 4 所示。

#### 2 通用自动调平吊具

通用自动调平吊具是对接装配中上部件的吊装工装,改吊具采用双旋转合成配平法,极坐标系及定轴转动的控制方式,通过两块子配重相互

合成的虚拟配重来进行重心补偿。由于只需要移动配重,而不是整个载荷,因而对电机和配重梁的要求大大放宽了,另外配重块的平滑移动不会引起载荷剧烈摆动,整个系统可处在一个平稳的状态中。

本系统中,需要对上部件吊装至下部件上并进行调平,继而由并联调姿平台调整下部件姿态与上部件进行对接。通用自动水平调节吊具机械部分由:吊具支架、吊环、吊梁、吊索、配平装置等几部分组成。

#### 3 iGPS 测量系统

iGPS 测量系统的作用是将获得的卫星对接时关键部件、工装的位姿数据反馈回私服系统,以实现卫星上下两段的对接。该系统具备对测量点及对接特征的静态测量功能、对部件的动态测量、跟踪功能、坐标系转换功能。

iGPS 系统主要包括激光发射器、iProbe 测针、动态跟踪接收器、工作站、标准杆、三脚架等硬件及 surveyor 解算软件、Spatial Analyzer 第三方测量软件等软件。

##### (1) 配置。

iGPS 测量系统配置情况见表 1。

##### (2) 坐标系规定及测量点。

各部件坐标系如图 5 所示。

测量坐标系为  $O_0-X_0Y_0Z_0$ ;

并联机构静平台坐标系:  $O_1-X_1Y_1Z_1$ , 静平台测量点:  ${}^0A_1, {}^0B_1, {}^0C_1$ ;

并联机构动平台坐标系:  $O_2-X_2Y_2Z_2$ , 动平台测量点:  ${}^0A_2, {}^0B_2, {}^0C_2$ ;

下部件坐标系:  $O_3-X_3Y_3Z_3$ , 下部件测量点:  ${}^0A_3, {}^0B_3, {}^0C_3$ ;

上部件坐标系:  $O_4-X_4Y_4Z_4$ , 上部件测量点:  ${}^0A_4, {}^0B_4, {}^0C_4$ 。

其中各测量点的坐标均为测量坐标系下的坐标值。

#### 4 并联调姿系统

卫星装配调姿平台需要承载 5t, 实现空间 6 自由度的运动,且调姿平台高度要控制在 1m 以下。并联机构具有承载大,自重轻的特点,所以

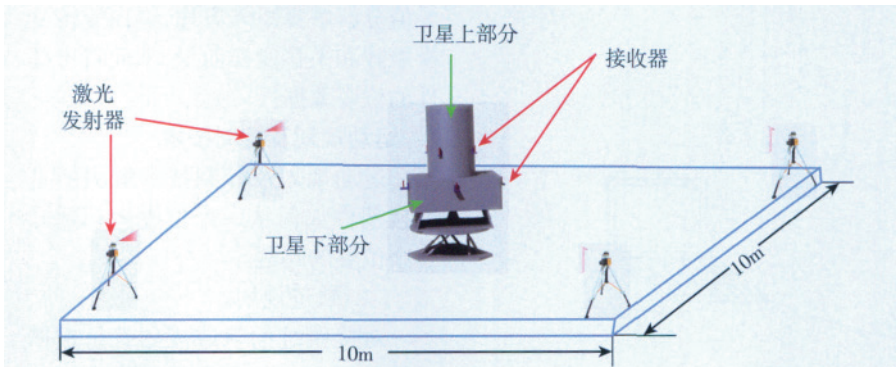


图3 卫星自动对接系统整体布局

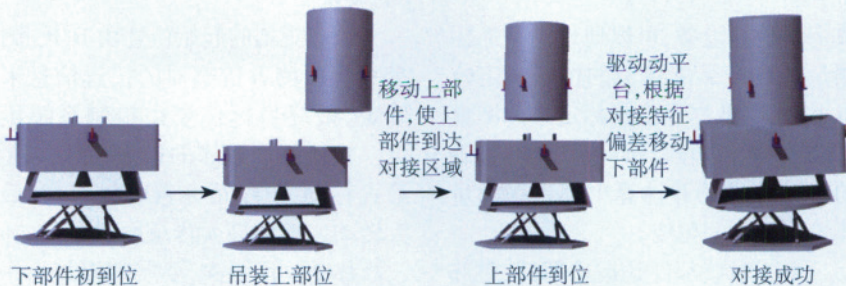


图4 卫星自动对接系统工作流程

表1 iGPS测量系统配置

部件名称	部件数量	备注
发射器	4	用于覆盖整个测量场,确保每个接收器有4个左右可见发射器
动态跟踪套件	4	由于对接装配由2个主要组件组成,每个组件使用2套动态跟踪套件(8个接收器,8个放大器,4个PCE)进行定位
标准杆	1	2m 标准杆用于提供系统标定
iProbe	1	iProbe 用于进行点测量及对接特征的检测

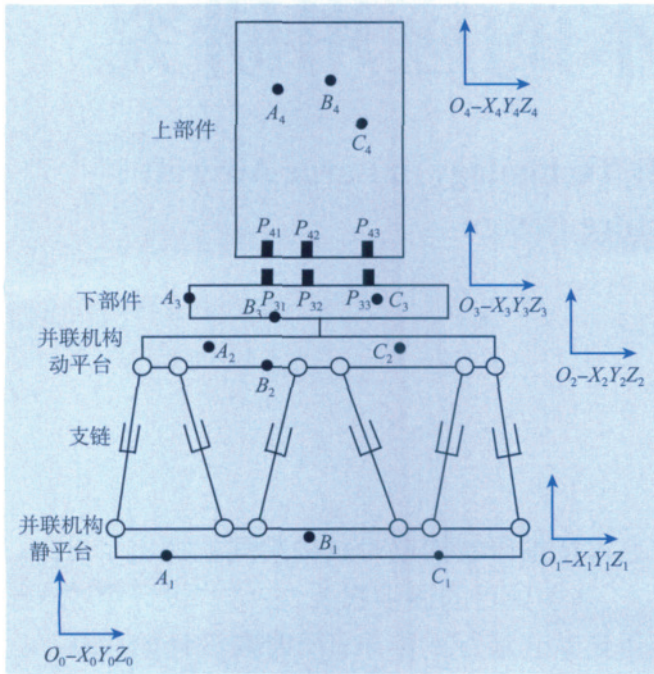


图5 相应坐标系的建立

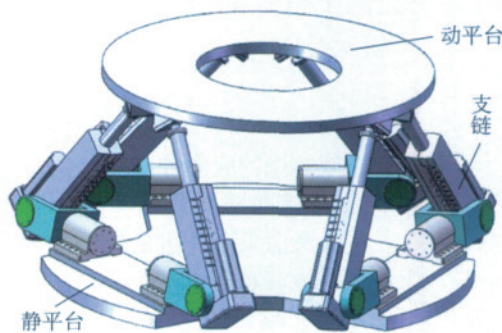


图6 6-SPS并联机构

采用能够实现6自由度的6-SPS并联结构来作为调姿系统的执行机构,其结构如图6所示。

该并联机构包括工装平台(动平台)、静平台和6条支链组成,每条

支链分别通过球铰和虎克铰与动、静平台连接。支链主要由丝杠螺母副组成,在伺服电机的驱动下可以实现伸缩运动,各支链通过协同运动配合来实现动平台空间6自由度位姿的调整。

并联机构中,各支链的线性运动精度是整个系统运动精度的重要保障,所以针对应用场合可选择精度较高的导轨。在各支链上还安装有高精度的光栅尺用来测量及反馈各丝杠的运动效果。装配时,卫星对接部件通过特定工装安装在动平台上,随动平台的运动达到预定的装配位姿。

### 5 控制系统

并联机构数控系统一般采用两种方法构建,一是设计专用的数控系统,二是在现有的开放式数控系统上开发。对于具有较大市场潜力的数控机床等产品,国外采用第一种方式的较多,由于系统的专用性较强,其开放性差,不利于进一步开发、扩展和更新维护。在目前的技术条件下,第二种构建方式更为现实,也更加灵活。如瑞典 Neos Robotics 公司采用西门

子 840D 开放式数控系统。清华、天津大学及东北大学的并联机构均采用以 PC 工控机作为上位机,通过多轴控制器 PMAC 实现对伺服系统的控制。采用这种方式构建的控制系统,在机器人等领域占主流地位。

随着计算机技术的发展,现代数控系统正逐渐采用“PC + 运动控制器”的开放式结构,它具有信息处理能力强、开放程度高、通用性好等特点。

并联机构的控制包括运动学和动力学控制。运动学控制指的是位置控制,动力学控制是指力控制或力和位置的混合控制。

本控制系统采用 IPC + PMAC 运动控制卡的结构形式。系统硬件包括工控机、PMAC 运动控制卡、伺服电机、伺服驱动器及相关检测单元(光栅尺和力传感器)。其核心为运动控制卡,IPC 计算机负责信息流和数据流的管理,以及从运动控制板读取位置数据,并经过计算后发送控制指令。驱动器负责电机的功率驱动,实现位置、速度和力矩的控制。

### 结束语

卫星自动对接技术的实施必将彻底改变目前卫星总装主要依靠工艺人员和操作者实践经验的局面,使得总装过程能够依靠数字化柔性装配对接技术实现精确控制,杜绝卫星总装过程人为因素导致的质量事故,从而极大地改善卫星总装工艺技术水平,提高卫星装配质量,增加总装过程的可靠性。

### 参考文献

- [1] 张伯鹏. 数字化制造是先进制造技术的核心技术. 制造技术与机床, 2000, 22(2): 1-5.
- [2] 郭洪杰. 大型飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2010(18): 52-54.
- [3] 梅忠义, 范玉青. 基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配技术. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 65-69. (责编 小城)