DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2011.22.005

飞机大部件数字化对接关键问题及应用分析

Key Problem and Application Analysis of Digital Alignment for Aircraft Large Part

中航工业北京航空制造工程研究所　　许国康　高明辉　侯志霞　邹冀华　周万勇

许国康

中航工业北京航空制造工程研究所高级工程师，长期从事飞机数字化柔性装配技术和飞机先进机械连接技术研究，先后发表论文和著作 20 余篇。

飞机大部件数字化对接实现了飞机总装过程的数字化、柔性化和自动化，将传统的依靠手工或专用型架夹具的装配方式转变为数字量协调的自动对接装配方式，适应快速研制和生产、高质量及低成本制造要求。

飞机制造过程的重要环节是飞机装配。大部件数字化对接是基于数字量的装配协调方法，借助由数控定位器、激光测量系统和集成控制系统组成的数字化对接系统，按照设计技术要求，将大部件支撑、调姿、定位并连接成更高一级装配件或整机的过程。图 1 显示了大部件数字化对接的数字量协调原理。

飞机大部件数字化对接实现了飞机总装过程的数字化、柔性化和自动化，将传统的依靠手工或专用型架夹具的装配方式转变为数字量协调的自动对接装配方式，适应快速研制和生产、高质量及低成本制造要求。

我国在飞机大部件数字化对接技术方面已取得了一定的技术突破并开始在新一代飞机研制上应用。但总体而言，目前国内飞机装配生产中大部件数字化对接技术的工程应用水平较低。推广应用大部件数字化对接技术，是满足新一代飞机产品高性能和高质量要求、低成本和快速响应研制和生产的重要保障。

数字化对接的关键问题

1　对接系统总体布局

对接系统的总体布局取决于飞机产品结构布局设计、部件支撑接头位置、大部件对接工艺流程、对接系统安装方式（固定或移动）、相关装配工作平台及钻铆设备的布局等，对接系统布局要将上述因素有机地协调在一起。

2　大部件对接姿态调整

大部件对接姿态调整与驱动技术的基本思路是通过定位器与相应的控制软件形成一个闭环控制回路，实时控制大部件的对接过程，满足姿态的实时调整。采用激光跟踪仪等数字化测量系统，对需对接的部件位置进行精确测量，根据测量结果，通过多轴数控系统驱动分布式定位器在 X、Y、Z 方向移动和旋转，将要对接的大部件移动到准确的对接位置并调整好对接姿态。

对接定位器其实就是一种多轴机床，通过带有旋转编码器反馈的伺服电机来完成精确运动。其上的驱动机构中带有测力传感器，能连续测量施加在对接部件上的应力，保证对接过程部件的安全。

姿态调整和驱动控制的算法采取如下思路：一个物体位姿空间有 6 个自由度，即通过 6 个轴就可进行位置和姿态的调整。大部件对接系统

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

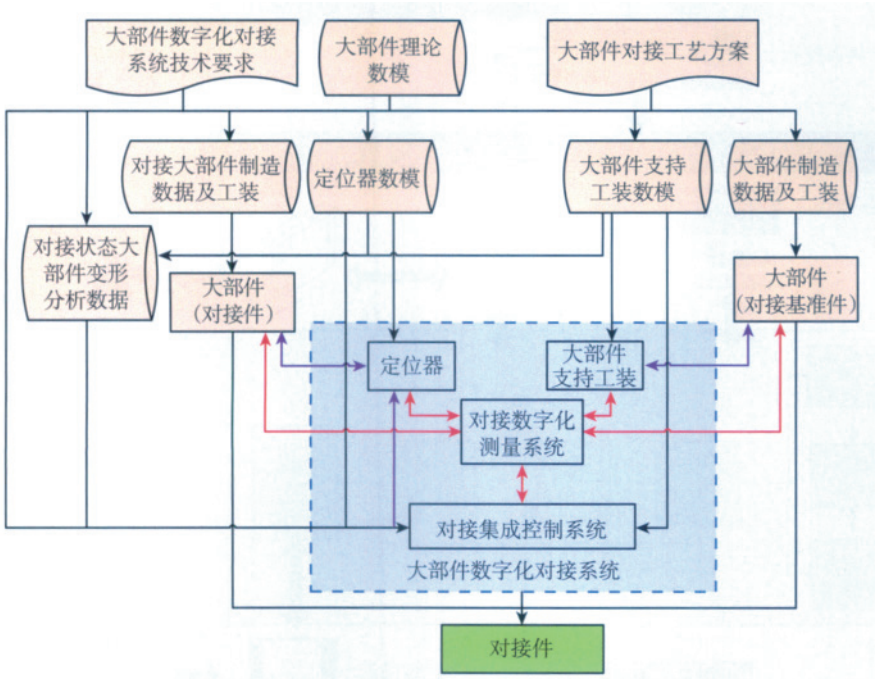

图1 大部件数字化对接装配协调图

有多个数控定位器，仅需 6 个独立的驱动轴，其余驱动轴由这 6 个驱动轴确定。采用并联机构运动学解决两类问题：一是各轴坐标值给定时，要求出部件的位置和姿态，这称为正向运动学问题，利用正解算法；反之，部件的位置和姿态给定时，计算各轴的坐标值，这称为逆向运动学问题，利用反解算法。通过正解和反解算法可确定轴空间与位姿空间的对应关系，用于对接系统的运动控制。

3 对接数字化测量与精确定位

在大部件对接过程中，采用激光跟踪仪等数字化测量系统作为大部件的位置测定与反馈装置，它与自动定位器等机构组成实时闭环控制系统。其具体方案为数字化测量系统捕捉到目标点信号并进行处理，生成大部件的位置信息，然后与对接控制系统通过工业以太网进行通信，控制系统对来自各部件基准点或水平测量点的激光跟踪位置数据进行处理，计算部件的实时位置和姿态，并与部件对接的理论（目标）位姿进行比较，得出部件的位置姿态误差，从而计算出部件各个定位器的所需移动指令值，最后发送给定位器进行姿态调整，使部件实现两两精密对合。

数字化测量系统需要考虑的工作有测量系统的选择、测量环境控制、测量场布置测量点设计和测量数据处理，如图 2 所示。

4 大部件对接过程的集成控制

大部件对接过程的集成控制依靠数字化对接集成控制系统（软件）来实现，如图 3 所示。

集成控制软件系统将测量系统接口模块、姿态数据生成模块、模拟仿真模块、监视系统模块和数据库模块等有机地集合起来，保证整个对接过程数据流的畅通，规范对接流程，实时检测部件空间位姿以及对接系统各个定位器的当前状态，生成调姿路径，在保证部件安全的前提下，通过定位器运动轴的多轴联动，实现部件的准确定位。

装配工艺规划及数据管理模块实现用户管理、任务管理、对接装配流程定制、装配工程数据管理及工艺报表的自动生成。测量模块实现现场装配坐标系的拟合和构建、空间测量点的单点及自动测量、测量数据的评估和处理等。算法模块实现坐标变换、部件空间位姿计算、运动函数规划等。仿真模块实现离线和在线装配仿真和可装配性评估，并生成对接路径。对接过程处理模块提供多种对接自动调姿和手动调姿手段，如按指定路径调姿、点动调姿、按原路返回等。运动控制模块实现定位器单轴运动控制或多轴联动控制等。

5 对接系统的定位精度

大部件的精确对接需要对接系统有足够的定位精度。保证对接系统的定位精度需要控制对接系统定

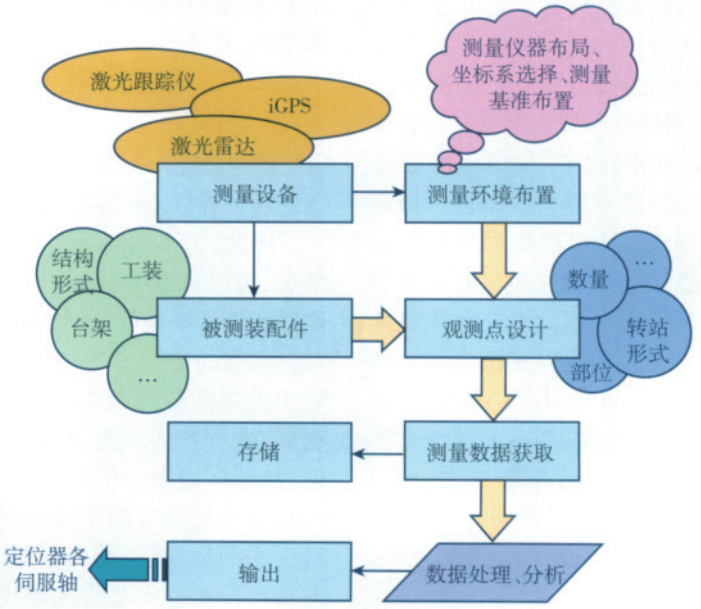

图2 测量系统工作过程

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

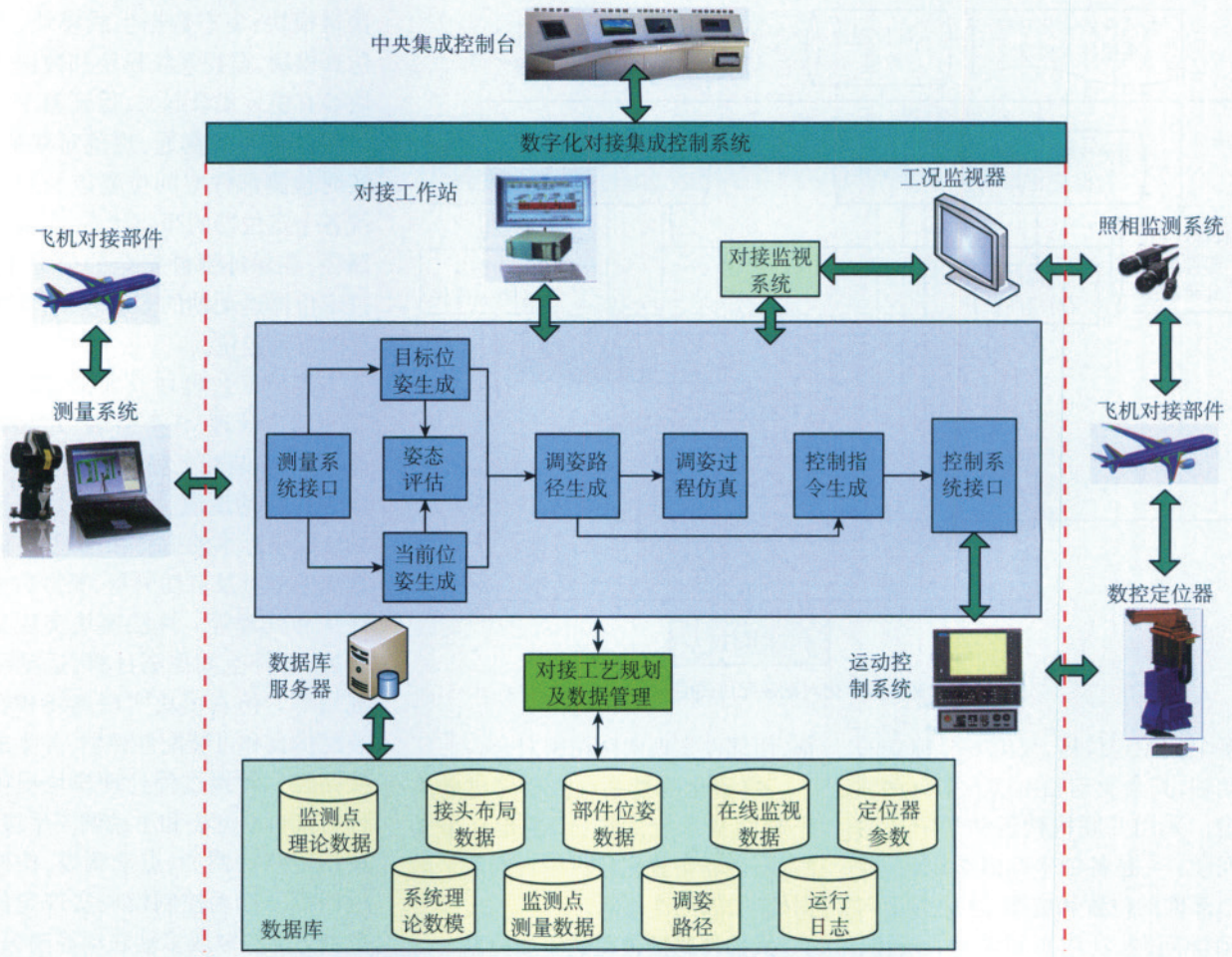

图3 大部件数字化对接的集成控制系统

位精度的各个影响因素。

影响对接系统定位精度 t 的因素包括测量系统测量误差 t_1、定位器系统运动误差 t_2、大部件变形修正误差 t_3 和算法模型误差 t_4 等几个方面。其中，大部件变形修正误差是指在大部件对接状态，由于考虑大部件自重引起的变形而对理论数据进行修正产生的误差；算法模型误差则是由对接调姿算法模型的简化处理和参数标定等因素引起的。外部环境如温度、气流、振动等也是引起对接系统定位误差的重要因素，主要体现在对测量仪器、定位设备、大部件变形等方面的误差影响，在精度计算中不作为一个独立的因素考虑。

对接系统定位精度 t 可表示为：

$$t = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2 + t_4^2} \quad 。 \quad (1)$$

而测量系统的测量误差 t_1 主要来源于4个方面：仪器本身的测量误差 s_1、测量目标（靶标）安装座的定位误差 s_2、测量转站误差 s_3 和地基振动误差 s_4 等。即测量误差 t_1 为：

$$t_1 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + s_4^2} \quad 。 \quad (2)$$

需要说明的是，公式（1）和（2）所体现的是一种误差的空间矢量关系。

因此，为了提高对接系统的定位精度，可以从减少测量误差、提高定位器系统运动精度、准确确定大部件对接状态的变形、采用自适应设计以减少大部件对接调姿过程中的受力变形、减少算法误差、对误差进行补偿、控制环境条件等几个方面入手。而减少测量误差的手段包括选择高精度的测量系统、减少测量时转站、准确定位靶标安装座和减少地基振动等。提高定位器系统运动精度可从设备结构的优化设计、优化运动轴电机的动态响应特性、提高光栅尺的分辨率、消除减速器的间隙及采用软件补偿等方面保证运动精度。

对接系统采用带浮动轴和力反馈控制等措施实现自适应设计，是对接系统实现高定位精度的有效手段。如北京航空制造工程研究所研制的带有自适应设计的某型机大部件数字化对接系统，采用模拟件进行测试，对接系统重复定位精度达到了0.03mm。某些飞机的大部件对接要求对接定位精度达到0.01mm，数字化对接系统采用常规设计方案难以达到此种高定位精度，可采用锥销－接头孔进行销孔导向定位，对接系统定位器通过力反馈控制，支撑部件并浮动，减小部件承受的应力，并实现大部件的精确定位。带预制对接螺

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

栓孔的火箭筒体数字化对接也可采取此项技术。

6 数字化对接系统的安全防护设计

数字化对接系统在使用过程中首先要保证产品、设备和人员的安全。对接系统的安全防护设计需要考虑如下几个方面。

（1）负载裕度设计。对接系统应有足够的动态和静态强度、刚度和抗冲击负载能力，满足大部件的入位、支撑和调整产生的负荷，包括能承受部件对接区装配所增加的人员及工具等载荷。一方面在定位器设计时通过设计计算和有限元分析保证，同时在研制过程中通过负载试验进行检验，包括静态承载和负载运行试验。

（2）硬件限位。按硬件限位措施是为了保证设备安全，即按照定位器的各个轴的运动行程，设计相应的行程开关实现位置限位。在到了极限位置时发出报警并停止运动。运动控制系统本身可判断定位器是否运动到给定位置、电流是否超载等运动异常情况。

（3）自适应设计。对接系统自适应设计包括布置定位器浮动轴和采用力反馈控制等方案。对接系统带动大部件进行位置和姿态调整过程中，大部件本身的运动需要依赖对接系统产生的驱动力实现，由于飞机部件在驱动力作用下的运动与定位器本身各轴的运动有一定时间滞后（不同步），并伴随一定的弹性变形，从而会导致部件内部产生相应的内应力，此应力反过来对定位系统也会有反作用。当这种应力足够大时，会对部件和设备本身造成损伤。在保证定位系统有不少于6个主动轴的前提下，定位器设计有一定数量的浮动轴，使部件在调姿过程中能自动适应弹性变形及其与定位器运动的滞后，可提高对接定位精度。

力反馈控制用于防止对产品和定位器产生过大的力，以保证系统安全。对接系统中每个定位器均设计一个三维力传感器，随时监测调姿过程中 X、Y、Z 3个方向力的大小，与理论数据进行对比分析，判断各方向力值是否在允许的范围内，并采取相应的措施。

（4）软件预测与故障诊断。针对部件和定位器接头位置分布，以及各定位器的行程范围等，计算部件空间调姿范围，并分析从当前位姿达到目标位姿各轴行程是否满足要求。如果超出行程范围，预先进行报警处理。

从装配安全及工艺性考虑，在当前位姿到目标位姿之间，计算出一些关键的中间位姿。经过图形化模拟，对调姿路径进行确认和验证，然后再真正执行对接过程。在执行对接的过程中，系统控制对接平台按照调姿路径的顺序每次移动到下一个姿态位置，并利用测量反馈数据对后续路径进行修正。软件的故障诊断功能对诸如：部件位姿异常、测量系统异常、控制连接中断等故障自动做出判断。

（5）人机工程设计和可靠性。对接系统要考虑人员操作时的便利和安全性，如操作台的人机工效设计、安全防护栏的设计等。从对接系统的机械、电气和软件等几个方面保证对接系统的可靠性，消除由于系统故障可能导致的对部件和对接系统造成的安全问题，在对接系统研制中，采用模拟件通过连续空载运行和负载运行试验检验系统的可靠性，暴露问题并进行改进优化，保证对正式产品进行对接装配时的顺利完成。

（6）工艺仿真验证。对实际对接过程的工艺流程、对接调姿路径、各轴机构移动过程进行仿真，对各项技术参数进行验证，保证实际对接过程的正确性和可靠性。基于实际装配坐标系，实时显示部件当前位姿状态，并针对调姿路径，模拟对接部件移动过程。

7 对接系统移动技术

在装配生产线中，虽然大部分数字化对接系统采用固定不动的安装方案，但在采用移动生产线或节省装配场地要求等情况下，需要将数字化对接系统设计成移动式方案，如波音787等项目的大部件数字化对接。对接系统的移动平台要采用轨道式、自动导引小车（AVG）或气垫移动平台来实现，而对于部件通常还采用吊运和牵引进行移动。

大部件数字化对接技术的应用前景分析

作为飞机数字化柔性装配技术体系的关键组成部分，大部件数字化对接技术对保证我国新一代军民机的高效率、高质量、快速研制和生产有着不可替代有作用。

通过对飞机大部件数字化对接技术的研究和系统研制，目前国内已掌握了飞机大部件数字化对接技术中激光数字化测量、数控定位、集成控制等关键技术。飞机大部件数字化对接技术可推广到新一代飞机机翼各段间、机身段之间、机身和机翼间、尾翼与机身间、运载火箭筒筒体结构间等航空航天产品大部件的数字化对接，同时大中型飞机机身和运载火箭筒体总装阶段的壁板自动定位也可采用大部件数字化对接技术。

结束语

目前国内多家单位已研制了数字化对接系统，初步掌握了其关键技术，但仍需加大投入和重视力度，建议遵循如下发展思路：（1）深化研究和掌握关键的基础技术，形成核心技术能力；（2）系统供应商应配备相应的人才、场地及制造资源，形成系统研制综合配套能力，并在研制过程中与设计所和用户主机厂协同工作；（3）加强国内外交流与合作，走取长补短、集成创新的发展思路；（4）建设和完善售后技术支持和服务体系，保证数字化对接系统全生命周期技术服务，满足用户新机研制和后续批生产需求。 （责编 良辰）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net