

飞机大部件自动对接集成控制技术研究

Integrated Control Technology of Automatic Butt for Aircraft Major Part

北京航空制造工程研究所 侯志霞 梁雪梅 周万勇 王晓丽 李光丽 罗芳 尚可 徐明

[摘要] 自动化对接集成控制技术集测量技术、协同运动控制技术、装配信息集成管理技术、运动仿真技术为一体,是大部件自动对接的关键技术。对飞机大部件自动对接集成控制的关键技术进行探讨,并介绍机翼大部件数字化对接系统的组成结构、功能、处理流程等。

关键词: 大部件对接 集成控制 自动测量 协同运动

[ABSTRACT] Integrated control technology is the pivotal technology for aircraft major parts butt. The Integrated control method includes digital measuring technology, synchronic movement control technology, data management technology for assembly information and the movement simulation technology. these methodologies are focused on. One aircraft wing butt system which is recently designed is introduced, and this system's configuration, main function, the process sequence are illustrated.

Keywords: Major part butt Integrated control Automatic measuring Synchronic movement

传统的大部件装配方式已经不能满足现代飞机研制的要求,飞机大部件自动化对接装配技术是现代飞机制造不可缺少的必备技术。从国际航空业来看,一些领先的飞机公司目前大量采用自动对接系统代替大型的固定对接平台,如波音公司研制的787机型和洛克希德公司研制的F-35联合攻击机的大装配件的装配都采用了这些技术。采用对接平台系统不仅大幅度提高了机体装配质量,而且能够适应不同尺寸的机身机翼结构,通用性强,节省大量装配工装。图1和图2为自动化对接平台及其应用的情况,这些自动对接系统主要由计算机控制的自动化定位器、激光测量系统、控制系统及相应的机械系统组成。

自动化对接集成控制系统通过对测量系统、定位器运动等的集成控制,实现对部件的精确定位和运动控制,是实现自动化对接的关键技术^[1]。

1 对接集成控制关键技术

自动化对接集成控制系统涉及到的关键技术包括



图1 F-35飞机的自动对接
Fig.1 Automatic butt of F-35 parts



图2 波音787的机身段自动对接系统
Fig.2 Automatic butt system of Boeing 787

测量技术、协同运动规划及控制技术、装配信息集成管理技术、运动仿真技术。

利用测量技术可以解决装配测量场的建立问题,部件当前在哪里、将要去哪里的问题;用协同运动规划及控制技术解决部件怎么去的问题;用模拟运动仿真技术实现对接运动规划的正确性验证和优化,保证部件的安全性;用数据集成管理技术实现数据的收集、统计、分析、评估等。

1.1 测量技术

大部件对接装配主要采用非接触式数字化检测设备,通过设置地标测量点和产品部件上的光学靶标点,将实测数据和事先标定好的测量点数据进行拟合分析计算,可以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,利用测量仪的 ADM 测量方式,可以实现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^[2]。

1.1.1 自动测量

自动测量的原理是在实际测量之前先估算出测量点所在位置,发送带有目标位置数据的测量指令,将测量仪的激光打到指定位置,再利用小范围的寻点功能,找到靶标点的精确位置并反馈到测量软件系统。

估算测量点的方法可以根据具体情况决定,可以依据历史测量数据结合新的位移量来推算,也可以利用数控定位器各运动轴的当前位置反馈来计算部件各测量点应该在的位置。在部件入位的情况下,利用第 2 种方法计算较直接而且准确度高。

1.1.2 测量数据评估

利用测量数据进行部件位姿计算或坐标拟合之前需要对测量数据的正确性进行评估,将偏差过大的测量点剔除,避免由于测量误差过大影响对接过程的正常进行。

以部件的测量为例,由于测量点是固定在测量部件上的靶标点,在考虑部件允许变形范围的情况下,不管部件当前处于何种姿态,其测量点的相对位置关系应该是固定的。如果部件上有 n 个测量点,那么每个测量点与其他 $n-1$ 个测量点的距离应该与标定的理论距离一致,挑出距离超差累计最多的点,将该点标记为超差点,如此反复叠代,即可实现对测量超差点的剔除(见图 3)。

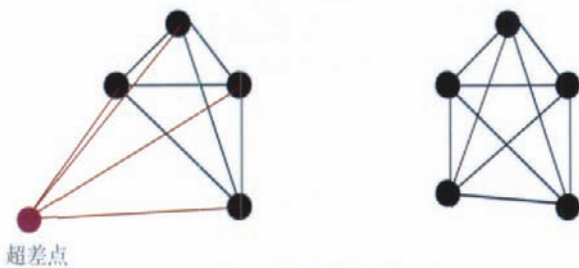


图3 超差点示意图

Fig.3 Oversize point diagram

1.1.3 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测量场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,采用最小二乘法求解最优变换矩阵,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矩阵,从而得出部件的位姿数据。

1.2 运动规划及控制技术

对接运动部件从一个位姿状态运动到另一个位姿状态时,涉及到的运动方式包括平移运动和旋转运动,这些运动的实现都是靠数控定位器各运动轴的协调运动来完成的。

1.2.1 运动轨迹规划

运动轨迹规划就是规划运动物体的运动参数,包括一系列的位置、速度、加速度和时间,简称 PVAT(Position Velocity Acceleration Time)数据,或者是一个表示位移和时间关系的 5 次方运动函数。

为了保证部件运动的安全和平稳,规划部件的运动函数时,一般推荐采用 S 型速度曲线。在完成部件的运动轨迹规划后,把部件运动参数通过连接点变换到装配坐标系下,再转换到定位器各运动轴上。运动轨迹规划处理流程见图 4^[3]。

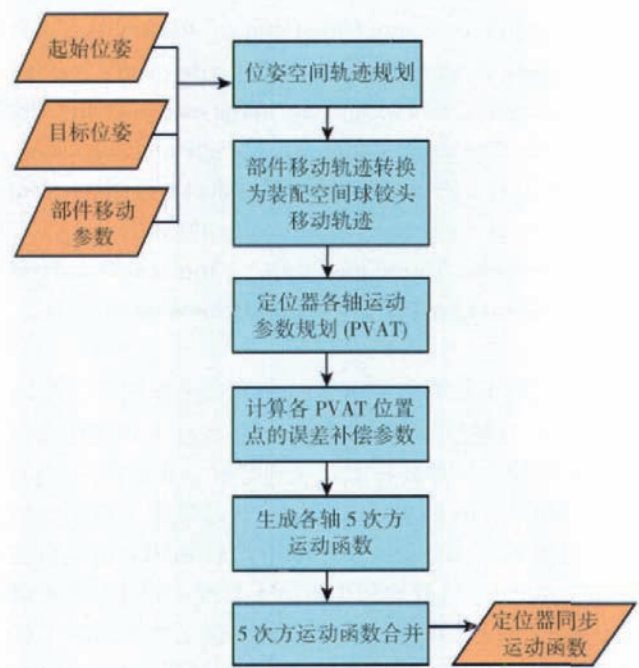


图4 轨迹规划算法

Fig.4 Trajectory planning algorithms

1.2.2 协同运动控制

对接系统运动轴个数较多,以三坐标定位器为例,一般在 9 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,因此建议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。

上位机与控制器的通讯是双向的,上位机发送 PVAT 运动数据和运动控制指令到控制器,控制器发送

系统状态数据、I/O 状态数据、各运动轴位置和运动状态数据等。

1.3 模拟运动仿真技术

对接仿真系统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运动情况和当前位置。

1.3.1 对接仿真环境的建立

在实施对接过程仿真之前,需要建立仿真环境。对接目标部件、移动部件、自动化对接平台、对接区域实测数据(点云或曲面)等运动要素的数模以及它们在装配坐标系下所处的位置姿态等都是建立仿真环境的初始数据。系统通过导入数模并显示到图形视图的相应位置来创建对接仿真的虚拟现场。

1.3.2 对接运动过程的模拟

依据运动轨迹规划产生的各轴运动 PVAT 数据中的时间间隔设置对应的仿真时钟,驱动各装配要素连续运动,实现对装配过程的预先模拟。

1.3.3 实时运动监控

在装配实施过程中,根据控制器实时反馈的各运动轴当前位置以及各仿真元素之间的约束关系,驱动各装配要素运动到当前实际位置,实现对对接装配过程的实时运动监控。

1.3.4 可装配性分析

理论数模与实际物理部件之间的不一致(对接部件的变形等原因)可能导致仿真过程不能精确地反映实际的对接过程。因此,在建立对接装配仿真环境时,将对接区关键点位以及配合面实测扫描数据作为仿真元素之一,在运动模拟仿真时,实测扫描面也一起运动到相应位置,可以在运动过程中分析实测配合面的干涉与碰撞问题,优化对合路径并分析系统可装配性。

1.4 数据集成管理技术

装配过程数据管理负责工艺数据、测量数据、状态数据、过程数据的集成和管理,同时要实现对接过程数据的统计分析和装配质量信息的及时反馈和装配任务的管理等。

1.4.1 对接装配数据组织结构

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。各坐标系通过装配总体坐标系实现数据的变换。部件数据和移动平台之间的数据联系通过接头位置数据点来完成。对接装配系统数据结构图见图 5。

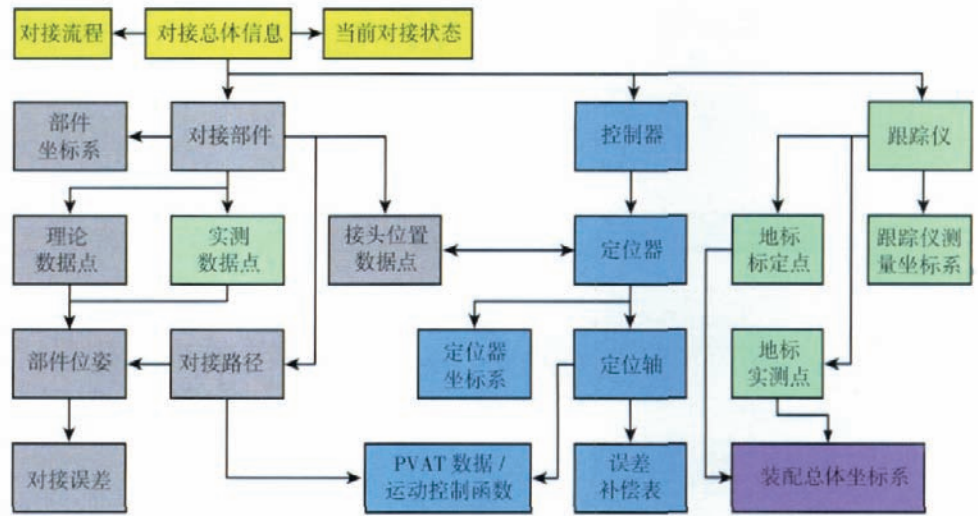


图5 对接装配系统数据结构
Fig.5 Data relations of butt assembly system

1.4.2 数据存储技术

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。建议采用较高端的数据库系统,如 ORACLE 系统。

对接数据包括对接区配合面的扫描数据、对接平台和部件理论数模文件以及 PVAT 运动数据等。针对这类占用较大存储空间的数据,采用二进制大对象数据的分块读写技术,降低对计算机资源的消耗,增强系统稳定性。

1.4.3 统计分析技术

通过对装配过程数据的查询、整合、处理、挖掘,可以形成各种统计分析报告,如对接过程历史数据、对接过程评价数据(超差数据、误差分布等)。通过对相关数据的分析,达到优化对接装配流程、提高对接效率减少变形等目的^[4]。

2 机翼对接集成控制系统

机翼大部件数字化对接系统用于实现左外翼与中央翼的数字化对接。机翼对接时,中央翼用支撑托架进行支撑和定位;外翼用 4 个三坐标的数控定位器进行

支撑,采用数字化对接系统进行位姿调整和送进。外翼每侧配置 2 台激光跟踪仪,用于关键点测量。采用一套十二轴联动的西门子运动控制系统进行数字化集成控制;采用集成控制软件系统实现装配测量环境建立、外翼入位、中央翼和外翼的位姿测量计算、对接调姿路径规划、定位器单轴运动和多轴联动控制、对接装配过程模拟仿真、对接数据统计分析及报表输出等。

2.1 集成控制软件系统组成

集成控制系统的系统组成见图 6。装配工艺规划及数据管理模块管理对接任务、定制对接装配工艺流程、实现对接过程数据的结构化存取、生成运行日志、输

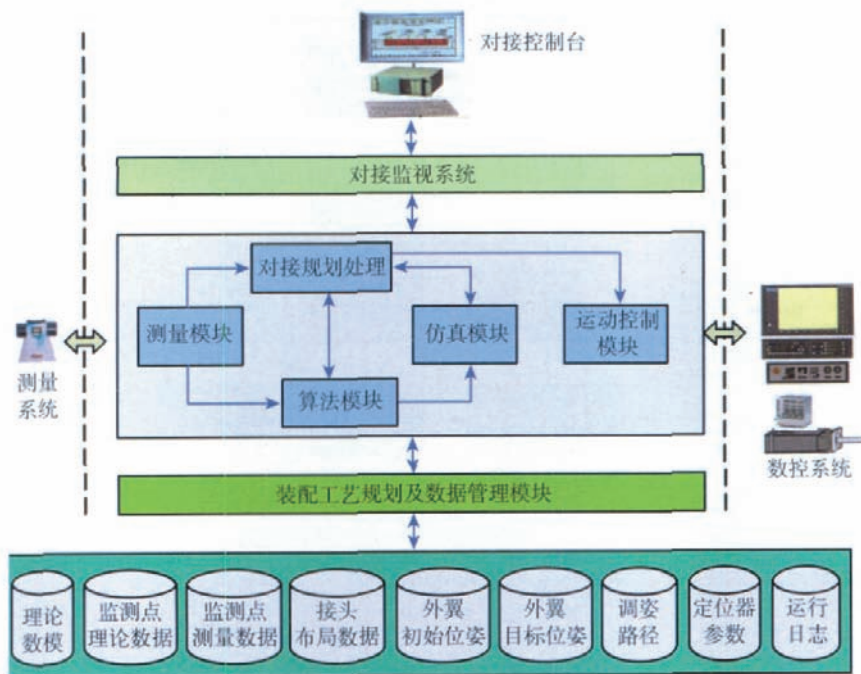


图6 数字化对接集成控制系统组成结构
Fig.6 Structure of digital butt integrated control system

出对接报表等。

测量模块实现数字化对接集成控制系统与测量系统的通讯。集成控制系统设计专有的用户界面,实现与测量系统的连接,用户可以采用干涉测量方式或绝对坐标测量方式采集测量数据,测量数据以结构化数据的形式保存在数据库中,用于后续的分析计算和坐标系建立等。

算法模块为整个系统提供算法支持,如坐标变换、测量数据拟合、位姿计算、12 轴协同运动轨迹规划等。

对接规划处理模块结合对接工艺要求,允许用户采用自动方式、手动方式、点动方式或回退方式进行部件的调姿处理。

仿真模块进行运动数据的仿真验证或运动过程实时监控等。

运动控制模块实现定位器的单轴运动控制和 12 轴

联动数据下传以及联动运动控制等。

2.2 对接调姿处理流程

执行对接调姿任务之前,需要对对接任务进行初始化,初始化包括 3 个方面:(1)定位器安装完成后需要执行的初始化工作为定位器运动轴定位误差标定并导入,地标点、定位器测量点理论数据导入,定位器局部坐标系标定并导入;(2)创建新的对接任务后需要完成部件测量点数据标定并导入;(3)每次连接跟踪仪或跟踪仪位置变化后需要重新拟合装配测量坐标系。

启动对接任务后,首先完成中央翼的安装定位和外翼的安装定位,然后在测量、仿真手段的支持下,实现外翼的对接预装配。预装配过程又分为 2 个阶段,先采用自动方式将外翼调姿运动到接近并正对中央翼对接区的位置,再采用手动或点动方式慢慢将外翼插入中央翼对合区,在确认对合到位后完成制孔,并采用原路返回的方式将外翼与中央翼分离,完成预装配过程。对合区清理涂胶后,启动外翼对接最终装配,系统可以采用原路返回方式、手动方式或点动方式完成对接,在确认对接到位后实现外翼和中央翼的螺栓连接,对接完成部件吊走之前将定位器与外翼分离。

2.3 用户界面

对接集成控制系统主控制界面主要包括:菜单区、工具条区;工艺任务(流程)管理区;与工艺任务相对应的任务控制区(如运动参数设置区、单轴运动控制区、定位器运动控制区、部件运动控制区、测量控制区等);系统状态监视区;信息提示区;图形仿真显示区。

系统可以实现与控制系统与跟踪仪的连接与控制,用户控制权可以在 PC 机与手持控制单元之间切换;对接状态监控区显示当前任务信息、连接状态信息、对接坐标系信息、中央翼状态信息、外翼状态信息、定位器状态信息、控制系统状态信息、当前日期和时间等。提示信息区显示系统的提示信息和错误信息。系统允许用户按工艺流程顺序执行对接控制过程,也可以单独执行某项对接操作。用户界面见图 7。

2.4 系统错误处理和安全防护

为了保证对接过程部件的安全性,对于对接过程中可能发生的故障进行了分析,并尽可能针对性地进行防

(下转第 120 页)

向传动系统把减速器和轴承座做成一体, Z 向减速器座和轴承座则与右箱体做成一体, 既减少零件数量, 又保证加工精度, 还减少加工和装配工时, 节约成本。

3.6 基座系统 3 条导轨方案

一般的传动系统采用 2 条导轨、4 个滑块的组合形式, 有时为增加机床的强度和刚度, 采用 2 条导轨、6 个滑块甚至 8 个滑块等组合方式。

数控定位器的基座系统方案, 设计初期采用 2 条导轨、6 个滑块的组合方式, 经过优化后采用了 3 条导轨、6 个滑块的组合方式, 虽然增加了装配时调整 3 条导轨平行度的工作量, 但加强了数控定位器基座系统的强度和刚度, 加强了数控定位器的基础。结构形式如图 9 所示。

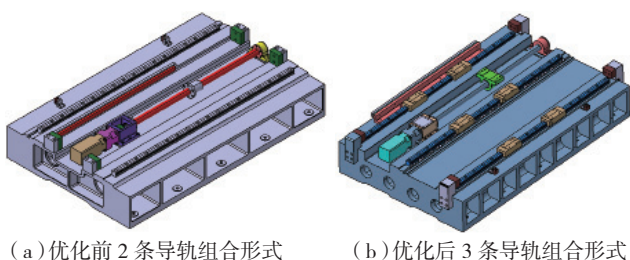


图9 基座系统导轨布置优化前后
Fig.9 Optimization of guideway layout of basic seat system

4 结论

对数控定位器的技术难点研究总结如下:

(1) 结合项目特点, 选择中间支撑方式的塔式数控定位器结构形式。

(2) 选择带预载的高精度滚珠丝杠以及高精度直线滚珠导轨, 不仅满足载荷和使用寿命等技术要求, 还保证系统的运动(传动)精度。

(3) 在尽量提高 Z 向系统的传动效率的前提下, 选择电机抱闸和蜗轮蜗杆的自锁特点, 双重锁定 Z 向系统的工作位置。

(4) 零部件一体化的制造趋势下, 将减速器座和轴承座做成一体, 减少零件数量和加工、装配等工时, 节约成本。

(5) 为提高数控定位器的整体强度和刚度, 优化数控定位器的设计和零部件结构形式, Y 向床身优化成箱体形式, 基座系统采用 3 条导轨的组装方式。

参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):346.
[2] 邹方, 张书生. 飞机总装自动化校准对接系统. 航空制造技术, 2008(7):34.
[3] 邹翼华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究. 计算机集成制造系统, 2007(7):1368. (责编 飞翔)

(上接第 96 页)

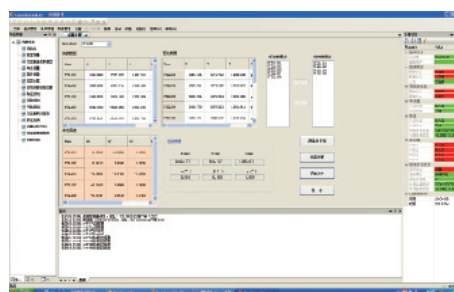


图7 用户界面
Fig.7 Software interface of user

护和安全处理。如:(1)定位器机械故障可能导致系统运动阻力增加或出现卡死现象, 系统通过对各运动轴电流的监控来发现问题并及时报警和中断对接过程;(2)通过对压力传感器、限位开关等各类控制系统传感器反馈信息实时监控, 对电器系统的异常情况及时报警并中断运动过程;(3)针对网络通讯故障也采取即时报警处理的方案, 对运动数据的正确性以及数据传输的正确性进行验证和校验;(4)在用户交互操作时, 对用户的误操作和错误的输入数据的正确性进行事先评估, 发现错误时及时提示。

3 结束语

采用自动化对接技术可以有效地提高飞机对接装配的精度和效率(以文中提到的机翼对接系统为例, 部件对接定位误差能控制在 0.2mm 以内, 重复定位误差控制在 0.1mm), 能适应快速研制生产和低成本制造的要求, 是现代飞机对接装配的必由之路。为了将该技术更好地应用到我国飞机装配生产过程中, 需要开展基于仿真技术的部件产品的变形分析、在允许变形范围内装配对接路线的优化以及动力学仿真分析等问题。自动化对接装配是自动化、柔性化装配的关键环节之一, 为了避免信息化孤岛的局面应将其纳入整个企业信息管理, 实现对装配信息管理系统与企业 PDM、ERP 等信息系统的集成, 并实现与车间生产管理系统的集成, 为后期建立柔性装配生产线, 从根本上改变我国装配技术落后的局面打好技术基础。

参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):42-44.
[2] 王建华. 飞机总装对接技术. 航空制造技术, 2010(2):32-35.
[3] 杜兆才, 邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. 航空制造技术, 2009(24):88-91.
[4] 余锋杰, 王青. 飞机自动化装配过程数据集成与实现. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2):207-212. (责编 良辰)