基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配技术

梅中义 范玉青

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：数字化柔性装配技术是飞机制造领域近期的主要研究方向之一.以飞机部件对接装配定位为研究对象，研究了基于激光跟踪定位的飞机部件对接的数字化柔性装配技术和原理；在激光跟踪仪的二次开发软件包的基础上，开发了激光跟踪测量原型系统；论述了机械随动定位装置和随动伺服控制系统的组成和原理，实现了以位置控制为目的的机械随动伺服控制系统；以图形软件包为基础，建立了部件对接数字化柔性装配系统集成平台，并能够在此集成平台上进行基于激光跟踪测量的部件对接装配的实时仿真.本研究可对近期开展的数字化柔性装配技术研究提供一定借鉴.

关 键 词：柔性装配；激光跟踪；测量；飞机部件；对接

中图分类号：V 262.4

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)01-0065-05

Flexible assembly technique for aircraft parts joining based on laser tracking and positioning

Mei Zhongyi Fan Yuqing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The technique of digital flexible assembly is one of the research directions in the field of aircraft manufacture in recent years. Aiming at aircraft parts positioning and joining, the technique and theory of digital flexible assembly based on laser tracking and positioning were studied. The laser tracking measurement system was developed through using the developing software package of the laser tracker. The frame and theory of mechanism motion and position device and servo control system were discussed. The servo control system of mechanism motion was carried out which could be used to control aircraft position. The integrating system of digital flexible assembly for aircraft parts joining was developed by using one graphics software package. Real-time simulation of aircraft parts joining based on laser tracking measurement was also achieved on the integrating system. This research work can be used for reference to the researching on the technique of digital flexible assembly in recent time.

Key words: flexible assembly; laser tracking; measurements; aircraft parts; joining

近一二十年来以波音和空客为代表的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[1-3].大量的通用性强的柔性工装可以重复使用，不仅可以缩短生产周期，改进装配过程，大大提高装配质量及其工作效率，而且由于其通用性和灵活性可以适用于几种不同飞机产品或部件的装配，大幅度地减少了工装数量.国外在飞机大部段数字化自动对接过程中，使用了集成的激光定位技术，激光光束及其相关的数字化控制系统起到自动准直的作用，十分方便地实现部件间的精确定位，大大地加速了飞机部段的自动对接过程.与国外发达国家的飞机制造行业相比，在飞机的装配技术领域，我国飞机制造企业在数字化柔性装配技术、自动化技术等方面几乎是

收稿日期：2008-02-19

作者简介：梅中义(1968—)，男，江西南昌人，副教授，meizhongyi@buaa.edu.cn.

空白,完全有必要研究采用先进的数字化柔性装配技术.本文结合国防重点学科建设和航空科研项目,研究了基于激光跟踪定位的部件对接的数字化柔性装配技术,并介绍了开发的部件对接柔性装配原型系统.

1 系统组成和原理

部件对接柔性装配系统由机械结构部分、控制系统、测量系统和计算机软件等组成,如图1所示.系统能够实时检测各定位点的位置数据,并自动调整各部件在空间中的位置与方向,实现部件之间的对接.

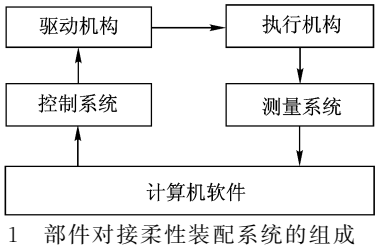

图1 部件对接柔性装配系统的组成

部件对接柔性装配系统由其中的激光跟踪定位系统测量装配后的部件的一些基准点,获得的测量数据经过处理单元处理后,直接反馈到系统计算机,计算机再对实际装配位置与精确数学模型的位置进行比较,获得部件装配位置的修正值,其系统原理图[4]如图2所示.

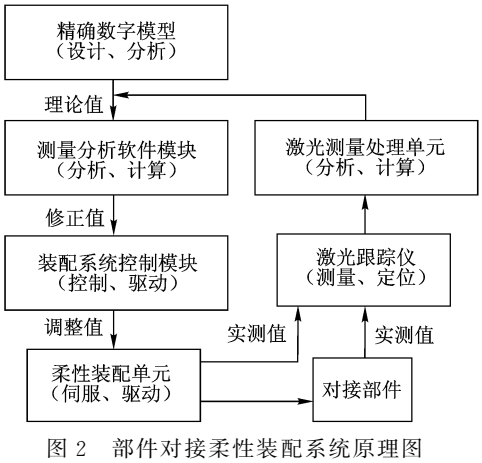

图2 部件对接柔性装配系统原理图

图3为部件对接柔性装配系统工作过程示意图,系统工作时,由柔性定位工装来支撑和夹持飞机部件,多个柔性定位工装组成定位工作站.在飞机部件的定位基准点上安装光学目标反射器,由激光跟踪仪测量飞机部件上的光学目标点位置,获得定位基准点位置信息,该信息与产品数据集下达的飞机部件模型经由数据处理模块比对处理后,将计算数据传递给运动控制部分,从而驱动柔性定位工装工作站调整飞机部件的位姿,并调整定位基准点的位置,直到定位基准点到达公差范围内的目标位置上,实现飞机部件的精确对接定位,然后再进行装配连接.

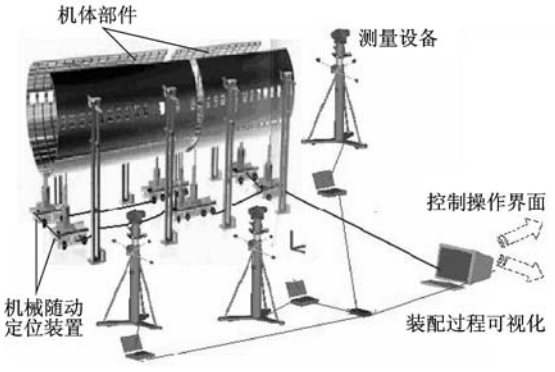

图3 系统工作过程示意图

2 激光跟踪测量系统

由于激光跟踪仪自带的测量软件为一独立软件,为了实现测量系统与整个柔性装配系统的集成,必须以激光跟踪仪提供的二次开发软件包为基础开发新的测量系统,基于激光跟踪仪的测量系统软件主要实现如下功能:

1) 测量系统必须与激光跟踪仪的接口进行通信,初始化仪器;另外测量系统能够实现激光跟踪仪回鸟巢检索功能,这是实现测量系统与激光跟踪仪通信的最基本功能.

2) 能够实现目标点的坐标信息的采集.激光跟踪仪提供实时位置信息和反馈,测量设备既要能够得到现有部件关键点位置信息,也要依据通常由CAD软件提供的数字模型(产品数据集)得到目标点的理论位置信息,在此基础上,比较拟合装配位置,减小误差.激光跟踪仪的最基本功能就是能够采集靶球位置信息,即获取靶球所在位置的水平角、垂直角、距离等数据,经过软件计算,提供给用户显示界面的是靶球位置相对于激光跟踪仪系统坐标系的 x,y,z 坐标值.程序开始后需先选择采集方法,是静态或者动态,两者所需要的参数设置不同.采集数据功能流程图如图4所示.

3) 能进行坐标转换,根据装配需求实现直角坐标与球坐标之间的相互转换,并能实现激光跟踪仪的前视后视检查,及时尽早发现测量误差,提高测量精度.

4) 能够将测量数据和坐标误差传递给控制系统,通过控制系统发出控制指令,控制装配部件调整移动,在有效载荷范围内和安全速度下进行有效运动距离内的部件微小量移动,实现飞机装

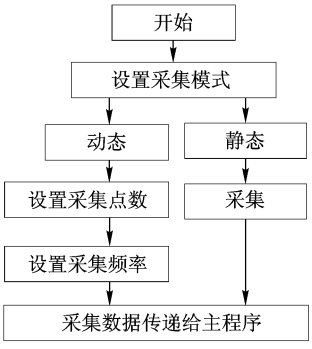

图 4　采集数据功能流程图

配部件的无缝对接和安全对接.同时,以激光跟踪仪测量的装配基准点实时数据为驱动,求解出飞机部件模型每一帧的姿态,作为定位系统实时运动仿真的数据基础,将飞机部件在装配环境中的运动实时地模拟在系统软件中.

3　机械随动定位控制系统

3.1　机械随动定位装置

机械随动定位装置主要由伺服系统、可编程控制器、检测反馈装置和定位器等部分组成.定位器主要起支撑和定位飞机构件的作用,定位器的运动将带动装配体在空间运动,使之达到准确位置,它由电机、轨道、驱动器、传感器和通用支架等部分组成,图 5 为定位器样机的三维数字模型.定位器可以沿 3 个自由度方向运动,各轴伺服电机通过连轴器带动滚珠丝杠,移动配有直线导轨的定位器,并能根据进给量设置主轴的合理转速.由光栅、感应同步器等位置检测装置测得的实际位置反馈信号,随时与给定理论值进行比较,将两者的差值放大和变换,驱动定位器以给定的速度向着消除偏差的方向运动,直到理论位置与反馈的实际位置的差值等于零为止.

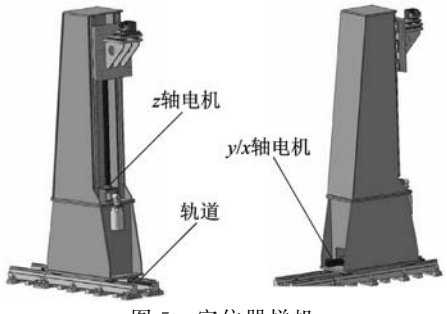

图 5　定位器样机

进行飞机部件对接时,由于部件体积庞大,因此需要组成工作站进行多点支撑,柔性定位总工作站由 3～5 组工作站组成,每组工作站由 3～5 个柔性定位装置构成,如图 6 所示,工作站 3 为支撑中机身的站位,前后机身、尾段和机翼等待装配部件由其他站位的支架支撑.

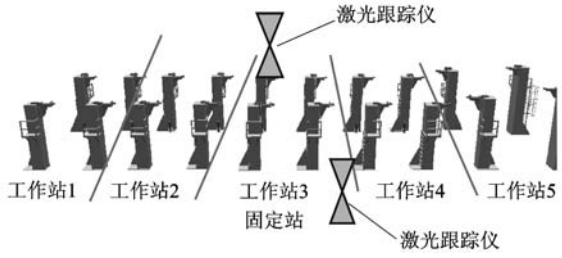

图 6　部件对接柔性定位装置

3.2　机械随动伺服控制系统

机电三轴位置伺服控制系统由运动控制芯片 LM629 芯片和 ATmega128 单片机构成,是一个典型的以位置控制为目的的闭环运动控制系统,控制实现三维自由度的精确位移,其中单个驱动轴的直流伺服系统控制原理图如图 7 所示.

运动芯片 LM629 通过 8 位数据线和 5 根控制线与单片机 ATmega128 的 I/O 口相连,单片机通过数据线向 LM629 发送位置或速度命令、设定 PID(Proportional Integral Differential)调节参数,或者从 LM629 中读取速度、加速度等数值.LM629 输出的脉宽调制幅度信号和方向信号输入电机驱动功率放大芯片 LMD18200,直接驱动直流伺服电动机.增量式光电编码器提供半闭环控制所需的反馈信号,梯形图发生器计算出位置或速度模式下所需控制的运动轨迹,由增量式光电编码器检测电动机的实际位置,其输出信号经过 LM629 四倍频后进行解码,形成位置反馈值,指令值与反馈值的差值作为数字 PID 校正环节的输入.

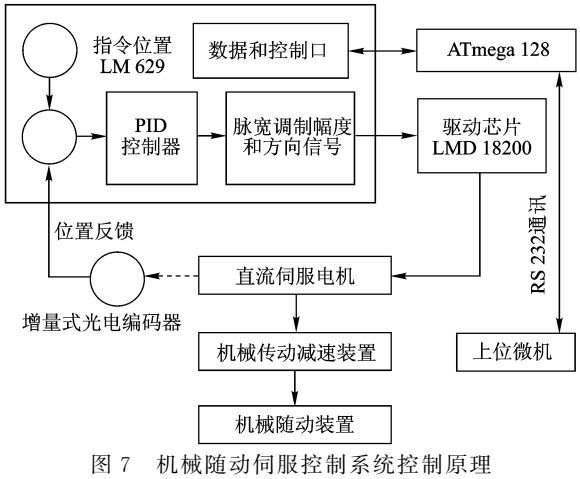

图 7　机械随动伺服控制系统控制原理

3.3　上位机控制软件

上位机控制软件的主要功能一方面是完成对装配定位现场的状态监测与定位动作控制,另一

方面要完成对装配定位过程中的机械随动装置的速度、位置按照事先预定的参数进行变化.其方法是通过经单片机向运动控制芯片发送运动参数,继而运动控制芯片发送脉冲信号和方向信号.一方面各运动轴的速度、位置参数的监测数据通过运动控制卡读入已发送的脉冲数进行计算得到,上位机软件通过实时的发送命令语句将这些数据从运动控制芯片读出,并在上位机中进行显示;另一方面上位机通过相关的控制算法将计算出的速度的控制量重新发送到控制芯片,由控制芯片通过改变发送脉冲数到伺服电机的驱动芯片来完成对机械随动装置运动的速度和位置的实时调节.

4 系统集成平台

系统集成平台底层几何造型采用 Open Cascade 提供的函数库,函数库包含了几何造型和对象操作等功能,实时仿真装配场景的建立由 Open Cascade 提供的类库在 Visual C++.NET 中进行开发.系统集成软件平台主要包括测量模块、数据处理模块、上位机控制模块、实时仿真及交互模块,其中测量模块和上位机控制模块采用集成前面所述的激光跟踪测量系统和上位机控制软件,在此不详述.

4.1 数据处理模块

数据处理模块是软件平台的核心模块,负责装配定位中所有的数据运算和传输,数据处理模块的一个核心内容是建立各激光跟踪测量仪测量坐标系、零部件模型自身零部件坐标系以及装配坐标系之间的转换关系,在此基础之上完成计算装配部件理论值与测量值的偏差,计算装配部件、柔性定位工装的位姿.

定位系统在进行飞机部件对接定位的工作环境中,所涉及到的运动刚体包括柔性定位工装和飞机部件,对该环境进行分析,可以建立一个定位系统工作模型,在此模型描述的工作环境中,存在下述坐标系[5]:

1) 装配坐标系,将柔性定位工装、飞机部件的对接运动所在的空间称为工作空间或全局空间,该空间定义为装配坐标系;

2) 零部件坐标系,在部件对接过程中,称部件在 t 时刻所占据的空间为元件空间,并为该空间定义一个与部件固连的零部件坐标系;

3) 测量坐标系,激光跟踪仪作为定位系统的检测装置,具有自身的测量坐标系,该坐标系原点位于激光跟踪仪内部.

如图 8 所示,在装配部件 P 上建立零部件坐标系$\{P\}$,P_1,P_2,P_3 为 P 中的 3 个装配基准点.在一个刚体上,只有不在一条直线上的 3 个点才能描述这个刚体在空间的姿态,所以至少要在装配部件上选取 3 个装配基准点进行激光跟踪,才能描述出该装配部件的位姿.

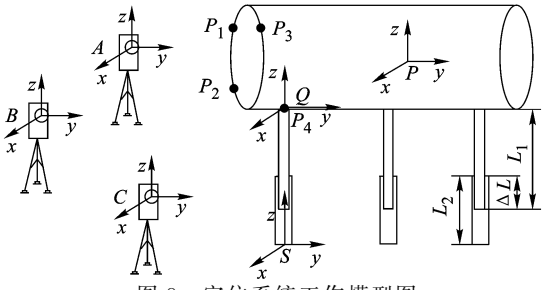

图 8 定位系统工作模型图

以柔性定位工装的上部杆件与装配件的连接点为原点建立零部件坐标系$\{Q\}$,以下部套杆与地面导轨的接触点为原点建立零部件坐标系$\{S\}$.在对接定位工作空间中安置 3 台激光跟踪仪 A,B,C,分别测量点 P_1,P_2,P_3,所测量的坐标值分别对应于测量坐标系$\{A\}$,$\{B\}$,$\{C\}$.选取装配部件 P 的坐标系$\{P\}$定义为系统装配坐标系,再将跟踪仪 A,B,C 所测点的坐标经齐次变换,统一到装配坐标系$\{P\}$中.

定位系统开始工作后,柔性工装开始协调运动,则与$\{S\}$固联的工装组件在$\{P\}$中 x 和 y 两个方向运动,与$\{Q\}$固联的工装组件在$\{P\}$中 z 方向运动,使得与$\{P\}$固联的飞机部件同样在$\{P\}$中调整姿态,使得$\{P\}$中的点 P_1,P_2,P_3 最终到达预先指定的目标位置.

4.2 实时仿真和交互模块

实时仿真和交互模块最主要的功能是在计算机中建立包括飞机部件、机械随动定位装置、激光跟踪测量仪等三维数字模型的虚拟工作场景,将装配定位过程实时模拟在软件窗口中,同时显示操作人员关心的若干工作数据,以直观的图形数据窗口指导操作人员工作,该模块建立的视图同时也是软件平台的主界面.

实时仿真和交互模块从产品工程数据集中获取飞机部件等三维数字模型用于显示,从数据分析处理模块中获取零部件坐标系和装配坐标系的转换矩阵以表示虚拟工作场景的变化,能够实现支持图像的多模式、多视角显示,能够对虚拟装配场景以中性文件格式进行保存.

系统具体实现是利用 Open Cascade 创建一个面向 3D 图形的视窗,用于显示仿真装配场景,

各部件 3D 模型以及基准点的中性文件能够被读入并转换为可交互对象,同时,在视窗中创建一个交互关系,用于对视窗中所有可交互对象的管理和操作.实时仿真及交互操作模块提供面向视图的操作方法,基本操作大致有:平移、旋转、缩放、视角变换、实体/线框模式显示、隐藏线、改变色彩等,通过以上手段完善软件平台的显示效果.

图 9 为实时仿真和交互系统定位工作正在进行的示意图,从主窗口可以观察到激光跟踪测量仪以及装配部件的运动,装配部件的最终目标姿态以线框模式显示.

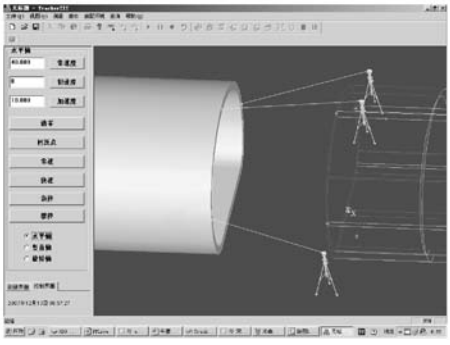

图 9　实时仿真系统工作进行中

4.3　集成软件平台运行流程

图 10 所示为集成的软件平台运行流程.系统软件平台采集、分析和发出数据的过程是一个闭环循环过程,数据起始点是基于 CAD 模型的三维产品数据集,这是理论数据,也是部件最终要到达的位置.测量设备实际测量得到的为实际数据,实际数据表示部件现在所处位置.这两部分数据经过计算机软件平台的分析和计算,得到需要调整的位移、方向等数据,逐层分解后,变成各个工作站的各个立柱每一方向的移动量传递到达立柱移动单元,传递完成后由激光跟踪测量和立柱控制单元进行测量和监控,并得到反馈信息,同时回到计算机软件平台,再次进入计算模块,如果已经满足位置要求,则退出当前工作状态,如果还需要校正,则继续发出指令.

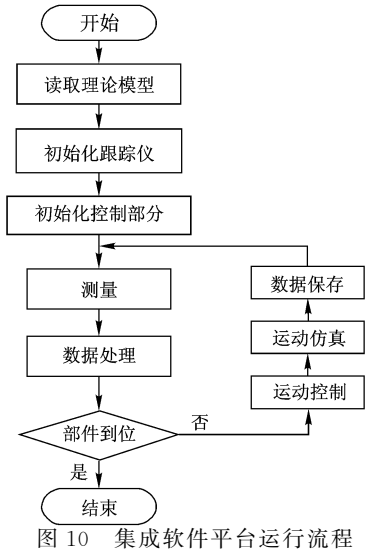

图 10　集成软件平台运行流程

5　结 束 语

本文以飞机部件对接数字化装配定位为研究对象,研究了基于激光跟踪定位的飞机部件对接的数字化柔性装配定位系统组成和工作原理,在此基础上,开发了部件对接数字化柔性装配原型系统和集成平台,总结了所开发的原型系统涉及的测量软件、控制系统、机械随动定位装置、集成仿真平台的设计思想和原理,对促进我国近期开展的数字化柔性装配研究提供一定的参考和借鉴.我国数字化柔性装配定位技术才刚刚起步,有些方面还处于空白,数字化柔性装配定位技术的研究和应用将能够极大地促进我国飞机制造业的发展.

参考文献(References)

[1] Hartmann J, Meeker C, Weller M, et al. Determinate assembly of tooling allows concurrent design of airbus wings and major assembly fixtures[R]. SAE Technical Paper 2004-01-2832, 2004

[2] Hartmann J, Zieve P. Wing manufacturing: next generation[R]. SAE Technical Paper 985601, 1998

[3] Williams G, Chalupa E, Billieu R, et al. Gaugeless tooling [R]. SAE Technical Paper 982147, 1998

[4] 邹方,薛汉杰,周万勇,等.飞机数字化柔性装配关键技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2006(9): 30－35
Zou Fang, Xue Hanjie, Zhou Wanyong, et al. Technique and develop of digital flexible assembly for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(9): 30－35 (in Chinese)

[5] 牛鎏.飞机数字化装配定位系统软件平台研究与实现[D].北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2008
Niu Liu. Research and implementation for the software platform of the digital assembly location system for aircraft[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese)

[6] Zetu D, Banerjee P, Thompson D. Extended-range hybrid tracker and applications to motion and camera tracking in - manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(3): 281－293

(责任编辑:文丽芳)