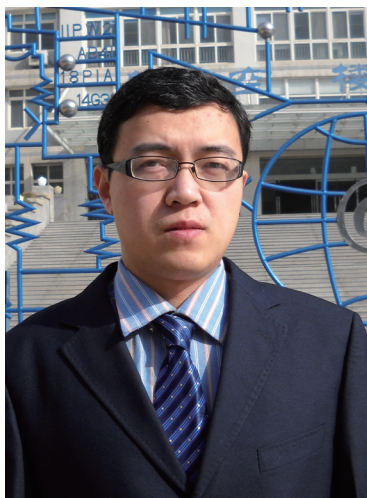


测量辅助飞机装配技术

Measurement Aided Assembly (MAA) Technology of Aircraft

西北工业大学机电学院 熊威 甘忠



熊威

西北工业大学机电学院航空宇航制造工程专业博士研究生,主要研究方向为时效成形。

飞机产品的最终品质在很大程度上取决于装配的质量,装配和安装的劳动量占整个飞机制造总劳动量的50%~60%^[1];飞机零件形状复杂、尺寸大、刚度小、易变形,传统的装配工艺需要采用大量复杂的装配夹具/型架来保证装配的准确度,机械化和自动化程度相对较低,手工劳动比重大,生产率低。随着计算机技术、信息技术和自动化技术的发展,飞机制造也正向数字化、信息化的方向发展,装配作为其中的关键一环,其发

测量辅助装配技术(Measurement Aided Assembly, MAA)是飞机数字化装配技术的重要组成部分,它使用了数字化定义模型和三维数字化测量设备辅助装配工作,将装配现场的零部件信息映射到理论数模中,缩短了尺寸传递路线,减少了对工装夹具的依赖,将飞机装配过程中原本由人工完成的修配、定位安装工作变成使用自动化技术来完成。

展方向也必然是数字化。

测量辅助装配技术(Measurement Aided Assembly, MAA)是飞机数字化装配技术的重要组成部分,它使用了数字化定义模型和三维数字化测量设备辅助装配工作,将装配现场的零部件信息映射到理论数模中,缩短了尺寸传递路线,减少了对工装夹具的依赖,将飞机装配过程中原本由人工完成的修配、定位安装工作变成使用自动化技术来完成,通过数字化三维测量技术获得零部件的真实状态信息,驱动自动化设备(如工业机器人、定位器)完成相应的装配工作,从而提高了飞机制造的柔性、敏捷性,它也受到飞机制造商的广泛重视,多个MAA系统也被随之开发出来。

本文从测量辅助装配技术的基

本概念出发,阐述了该技术在零部件定位、补偿和大部件对接的应用,总结了其关键技术,并对该系统的技术开发提出了建议。

测量辅助装配系统的基本概念

测量辅助装配是基于装配对象的设计数模,依靠数字化三维测量系统,在装配过程中对装配对象进行实时测量,由获得的几何空间信息来指导定位和调整,保证对接工艺。国内的文献一般认为,测量辅助装配技术的系统组成应当包括2个方面^[2-3]:一是数字化测量定位系统;二是机电执行系统。但本文持以下不同意见。

首先,测量辅助装配系统的功能是通过数字化的测量设备将装配现场的几何信息映射到处理器中,同设

计数模进行比较对照,并反馈结果指导装配。系统使用通用的设备实现了装配现场工作与设计数模的协调,从而减少了对传统专用夹具样板的需求,提高了飞机装配的灵活性和敏捷性。从这一点出发,机电执行系统不应当是测量辅助装配系统的必要组成部分。诚然,飞机装配的自动化也是技术发展的必然要求,加上人工操作受到操作者的技术、经验和体力的限制,在实施测量辅助装配时,普遍使用机电执行系统来完成装配操作,但是确实存在人工完成最终装配操作的案例。

其次,虽然使用数字化测量设备是 MAA 的重要特征,但仅有数字化测量系统并不足以完成测量辅助装配系统的全部功能,这项技术的基本功能是实现装配现场零部件空间几何信息和设计数模的对比协调,测量系统只是获得几何信息的技术环节,关键的对比协调环节需要开发相应的软件完成。

综上所述,狭义的测量辅助装配系统应当由 3 部分构成:数字化测量定位系统、数模对比协调系统和反馈系统。其中,数字化测量定位系统由一种或多种数字化测量设备构成,用于提供零部件的空间几何信息;数模对比协调系统是一台或者多台存储有飞机设计数模的计算机,使用相应的应用软件,完成现场几何信息与数模的对比;反馈系统用于向装配执行者反馈对比结果,一般应当具有图形显示终端,将对比结果以图形化的方式显示出来。如果系统附带有机电执行机构,反馈系统应当能够根据对比结果计算相应的装配运动,并产生相应格式的信号驱动机电执行机构动作。考虑到某些飞机装配工作人工较难完成,广义的测量辅助装配系统还应当包括机电执行系统。

测量辅助零部件定位

使用工装夹具定位是传统飞机

批量生产时常使用的定位方法,定位准确度高,能够保证各类结构件的装配准确度要求,缺点是需要大量专用的工装夹具,生产准备周期较长,测量辅助装配技术则为减少准备周期提供了可能的途径。

OMC (Optical Metrology Centre) 项目是 JAM (Jigless Aerospace Manufacture) 项目的一个子项目,目的是在六自由度机器人平台上引入立体照相测量技术,以此验证在生产环境下的实时装配系统。经过和 BAE Systems 公司、Airbus 公司、Bombardier Shorts Brothers 公司、英国国家物理实验所的协作,项目于 2001 年 10 月结束,成功地开发了适于嵌入制造控制循环的立体照相测量系统,成功地将带有 OMC 立体照相测量技术的六自由度工业机器人用于装配和钻孔。

OMC 系统使用 KUKA 工业机器人作为执行机构,但是标准工业机器人的刚度和定位精度不足以应对航空装配的需求,因而 OMC 项目使用 2 个或多个智能摄像机来确定零部件的位置,构成位置控制系统,引导机器人完成装配操作。照相测量系统采用执行终端(end-effector)布局,只测量执行终端附近的区域,这样可以降低对测量精度的要求。为了满足实时测量的需要,OMC 系统使用硬件图像处理器和以太网通信,可以对多达 170 个目标图像的 2-D 位置进行实时计算(每秒 25~50 次),同时使用编码靶标(coded targets)辅助测量。

使用 OMC 测量辅助技术安装翼肋前段,过程分为 2 步:首先,机器人使用吸盘夹持翼肋前段,运送到大致的安装位置,然后在测量系统的引导下将组件安放到精确的位置和机翼前梁进行装配。在上述过程中,摄像机测量机翼前梁上的目标基准面(Target Datum Interface, TDI),并与 CAD 数模中的目标基准面相比较,

得到从数模设计坐标系到摄像机测量坐标系的变换关系。据此对设计数模中的翼肋前端上的 TDI 进行坐标变换,得到其在装配中的位置。该位置连同由摄像机测量确定的机翼前梁 TDI 位置计算出摄像机应当运动的六自由度参数,最后根据机器人中心点进行偏置得到机器人坐标系下的翼肋前端装配运动参数。

OMC 系统能够直接测量零件配合面的几何特征,但是也同时开发了编码靶标作为目标物辅助测量,编码靶标也是 OMC 项目的一项有价值的研究成果,特点是相对于可用的编码数量,靶标的体积小,识别可靠性高。需要指出的是 OMC 系统使用的照相测量技术是其能够在满足实时控制要求的同时测量零件配合面的关键,这种测量技术是现有测量技术中最快的。

上述测量辅助装配技术使用的是单一测量设备以及通用的作为执行机构的工业机器人,而飞机制造企业一般会拥有多种适用于不同测量任务的三维数字化测量设备,即使是同一类型的设备也可能来自不同的供应商,综合运用各种设备有利于发挥各类设备的优势。波音公司的计算机辅助设计制造与测量集成项目综合应用多种测量设备,集成了测量软件和带有公差信息的 CAD 模型,构建测量辅助定位系统,成功地减少了装配飞机零件所需的工装,系统可以以人工或自动 2 种方式完成装配操作。以在翼梁上安装加强件和销轴为例,测量辅助装配系统使用了一台移动式坐标测量系统(PCMM)和 2 台不同型号的激光跟踪仪。系统的图形化软件平台实时动态地显示每一个组件相对于 CAD 数模的移动,一旦操作工(或机电执行系统)移动零件的关键特征到设定的公差范围内,系统就会发出信号,告诉操作工(或机电执行系统)零件处于预定的位置上^[4]。

多设备测量辅助装配技术的实施难点之一在于各设备间的操作软件存在差异。能够熟练操作一种测量设备的技术人员,在操作由不同厂家提供的设备时可能会遇到困难;设备的数据分析功能也不一定能够实现兼容;并且每个设备软件包的 CAD 数据输入输出精度都存在差异^[4]。对此,波音公司开发了集成的测量软件平台,从不同测量设备中获取的测量数据可以同时界面中显示,界面对各种测量设备的操作模式是完全相同的,降低了对人员培训的要求并且提高了硬件设备的利用率^[4]。

在 A380 机翼装配中,测量系统同样由 2 种不同的测量设备构成,分别是激光跟踪仪和激光雷达。其中,激光跟踪仪用于对正运动机械结构;激光雷达用于直接测量配合面的特征和关键特征对正。测量系统和 CAD 数模集成后可以直接根据特征进行装配和检测^[5]。

2007 年,牛鏊等^[6]公布了一个基于激光跟踪技术的数字化装配定位系统的设计原型。原型系统硬件主要由主机、系统软件平台、激光跟踪测量仪和机械随动定位装置构成。

由机械随动定位装置来支承和夹持飞机构件,多个机械随动定位装置组成定位工作站,系统工作示意

图如图 1 所示。构件的定位基准点上安装有光学靶球,激光跟踪测量仪测量这些目标点位置,与由产品工程数据集下达的基准点目标位置,由数据处理模块进行对比处理后,计算修正值,驱动机械随动定位装置调整构件的位姿,实现构件间的精确定位^[6-7]。

测量辅助装配补偿

在飞机结构中存在一些结构复杂,协调尺寸较多的部位,并且某些零件、组合件的刚度较小且装配变形又无法预先估计,在这种情况下,过分地提高零件、组合件的制造准确度和协调准确度在经济上是不合理的,在技术上也难以达到^[8]。在现代数字化的飞机制造中,这个问题依然存在,如果零部件的配合面超过了设计误差,无论是自动化装配设备还是传统的手工装配都无法将其安装到位,需要进行补偿以提高装配的准确度。

空客公司在三维数字测量技术的辅助下,结合其他一些技术,使用通用的自动化设备完成了以往需要人工或使用专用设备才能进行的补偿工作。

以蒙皮和肋板的装配为例,它们会出现 2 种超差不协调的状况:配合

面存在间隙和配合面存在干涉,分别需要使用增加垫片和修整肋板根部的方法来协调装配。

图 2 显示了自动扫描蒙皮和肋板配合面的过程和设备布局,在工装夹具和零件上设计有参考结构,用于确定 2 个零件的配合面。通过三维数字化测量设备,获得关于配合面的形状信息,判断在配合面上存在间隙或者是干涉。如果存在间隙,系统会驱动自动化设备制造合适的垫片;如果存在干涉,系统会根据获得的干涉量和肋板根部的初始位置,生成一个迭代模型,并计算每一步的修整深度,修整的切削工作由工业机器人完成。

测量辅助部段对接

飞机装配可以分为组合件装配、部件装配和部段(大部件)对接 3 类。对接在本质上也是一种装配定位,但是对于尺寸较大的飞机部段而言,其定位、调整和连接都是非常困难的。因而,需要在飞机数字化装配中给以特别的关注。

由于飞机大部件的重量和体积都比较大,因而在应用 MAA 技术时,必须使用机电执行系统(定位器),构成数字化对接系统。目前,数字化对接系统主要有分布式和整体托架式 2 种类型^[9]。

在分布式的对接系统中定位器采用分布式布局,每台定位器与机体部件单独相连,由伺服电机驱动在 X、Y、Z 三个方向上移动。如前文所述的牛鏊等^[6]公布的 MAA 系统就具备升级为大部分对接系统的潜力。

在整体托架式对接系统中,定位器与部件托架相连,通过驱动托架对机体部件进行位姿调整。

在测量设备的选择上,除了采用激光跟踪仪外^[10-11],iGPS 是一项更值得关注的技术,与激光跟踪仪相比,iGPS 在使用中没有掉光问题,也不需要转站,系统一次标定后,就可

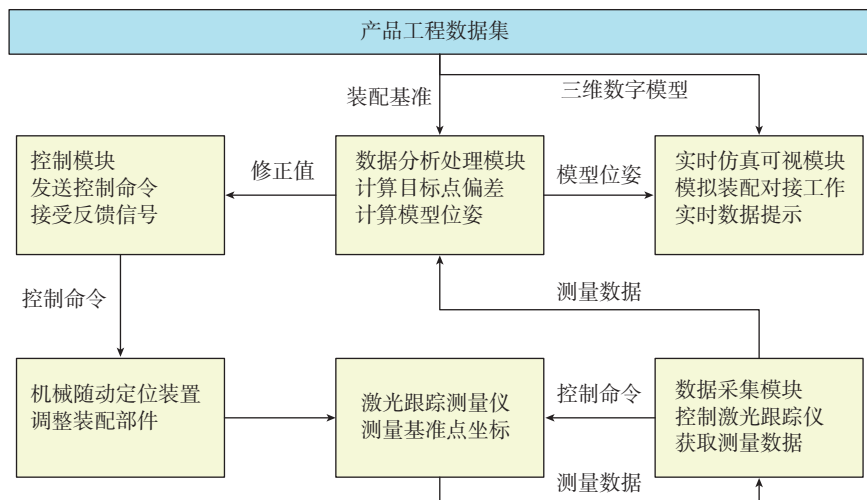


图 1 系统工作示意图

以无限次使用,而且一套 iGPS 系统能够满足多用户同时使用的要求,这对于同时有多架飞机进行装配的生产线尤为重要。

由于 iGPS 的上述优势,波音公司从 1998 年开始研究 iGPS 测量技术,并已应用于从波音 747 到 F/A-18 飞机整机的装配线中^[9]。

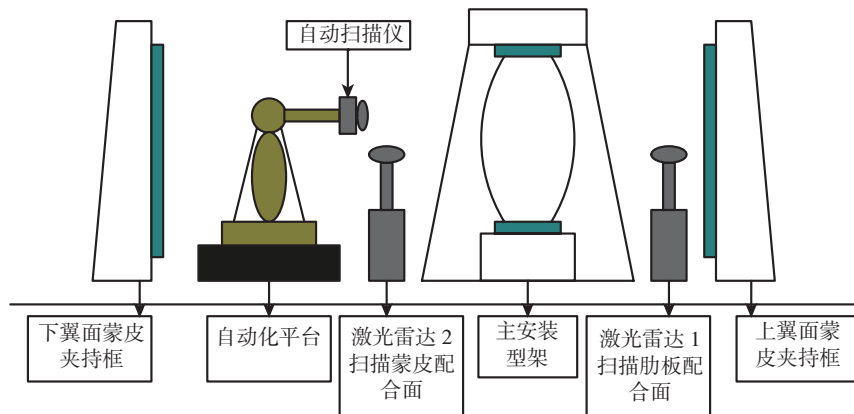


图2 扫描蒙皮和肋板

关键技术与系统开发

总结上述实例,数字化测量设备、机电执行系统都有通用设备,因而,MAA 系统开发的关键在于各种集成软件的开发,包括实时控制和通信、基于设计数模的比对软件和最佳配合位置计算软件。

需要注意到测量、数模设计软件和机电执行系统是来自不同企业的产品,数据格式各不相同,必须进行格式转换。在数模对比一环,在飞机制造业通用的数字化协同平台是 CATIA,它具有专用的数据格式,给对比程序从数模中获取几何信息带来了不便,通常的做法是将格式转换成 Step (Standard for the Exchange of Product) 格式,因为 CATIA 兼容这种格式,在转换时不会损失精度,这对于要考虑配合面几何形状的测量辅助补偿尤为重要。

对于测量设备的选型,关键是在进行需求分析时,判断 MAA 系统需要实现零部件空间位置判断和零部

件配合面几何测量 2 种功能的 1 项或者 2 项。

激光跟踪仪是点位测量仪器,需目标物的配合,因而常用于跟踪目标点的位置;激光雷达则可以实现直接的几何量测量,不需目标物的配合,可以实现激光跟踪仪的功能,而且具有扫描零件几何轮廓的功能,但

激光雷达的价格远高于激光跟踪仪。如果只是用于跟踪特定的目标点以判断零部件的空间位置,激光跟踪仪的综合效果无疑要好于激光雷达。

在需要系统完成补偿或者最佳配合的时候必需对配合面进行测量,在这种情况下照相测量设备具有最快的测量速度,其次是激光扫描仪,激光雷达因为是逐点扫描,它对于零件表面没有特别的要求,前 2 种设备在零件表面反光率很高的情况下不易获得较好的测量效果,比如装配镜面蒙皮。在获取大量数据的同时,比对软件系统要求很高的处理能力,而且通过点云数据判断零部件的空间位置和姿态是很不经济的,在这种情况下使用靶标是明智的选择。

在大部件对接当中, iGPS 具有很大的优势,如果它的接收器可以做到靶标大小,那么在零部件定位中也有应用的可能。

结束语

目前,在国内飞机制造中,对于

三维数字化检测设备的使用方式集中于零件制造精度检验和工装型架的安装检验,对于数字化装配系统的认识也集中于大部件的对接。采用测量辅助装配系统,不仅可以在从组合件装配、部件装配和部段(大部件)对接总装配的飞机装配全过程中提高效率和质量,更可以实现与上游飞机数字化设计,计算机集成制造系统的对接,提升我国航空制造业的技术水平。

参考文献

- [1] 王云渤,张关康,冯宗律,等. 飞机装配工艺学. 北京:国防工业出版社,1990.
- [2] 孟俊涛,王仲奇,殷俊清. 飞机部件精准对接技术研究. 机械制造, 2008, 46 (528): 42-44.
- [3] 邹冀华. 飞机数字化测量辅助装配技术及应用. 航空制造技术, 2009,(24): 48-52.
- [4] RICHEY M C, MCLVOR R S, SANDWITH S C. Computer aided-design-manufacturing & measurement integration. Albuquerque, N. Mex, USA: Coordinate Measurement System Committee, 2001:13-17.
- [5] Geraint Jones, Scott Sandwith. Integrated CAD-Metrology and Alignment of Key Features of A380 Wings. 2004 Coordinate Measurement System Committee.2004.
- [6] 牛臻,孟飙,范玉青. 基于激光跟踪的数字化装配定位原型系统设计. 现代制造工程, 2007,(11):52-55.
- [7] 牛臻,孟飙,范玉青. 基于激光跟踪的数字化装配定位系统实时仿真. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 707-710.
- [8] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.
- [9] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009, (24): 42-45.
- [10] Hubler D, Salerno R, Calkins J, et al. Using Real-Time, 6D Object Tracking to Assemble Large Aerospace Components. Michigan, CMSC Conference Detroit, 2000.
- [11] WILLIAMS G, CHALUPA E, RAHHAL S. Automated positioning and alignment systems. Plano, Tex., USA: Advanced Integration Technology, Inc., 2000.

(责编 泰山)