

浅谈数字化测量技术在飞机装配中的应用

Development of Digital Measurement Technology Based on Aircraft Assembly

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 郭洪杰



郭洪杰

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司飞机装配专业技术专家,主要研究领域为虚拟装配仿真与无图制造技术、数字化柔性装配技术。拥有3项国家专利,现场可视化装配技术研究成果获得国防科技进步奖二等奖。

航空武器装备多品种、小批量和低成本快速研制的需求推动了测量设备在辅助加工、制造和装配中的高度集成。以波音、空客为代表的国外先进飞机装配生产线中,数字化测量技术的应用已由关键零部件的离线

随着我国新一代飞机的设计制造不断向数字化进程迈进,以二维图样和模拟量手段检验产品质量的模式已无法适应新一代飞机的技术发展。零件的数控加工、精准成形和飞机快速自动化装配对数字化测量技术的需求越来越迫切;测量技术已成为飞机快速研制的瓶颈,严重制约了飞机装配技术的进步。基于模型和三维标注的面向装配的数字化测量技术已成为未来飞机检测装配的发展方向 and 主体模式。

检测发展到贯穿于制造和装配的检测过程控制和故障维护等全过程的在线自动化测量,测量依据也由二维图样发展为三维CAD模型^[1-3]。而国内飞机装配中的数字化测量技术应用仅限于激光定位与测量技术在装配工装安装、调整中的初步工程化应用,在辅助飞机协调装配和过程控制方面还是空白,仅在近一两年对产品外形测量有些零星的技术探索。

目前,国内飞机装配过程中的组部件装配定位和检测还是以大型专用工装定位器、卡板和样板等模拟量手段为主;大部件对接过程以及整机装配后的产品外形检测缺乏有效

方法;装配中出现的协调问题原因分析困难,没有详实的测量分析数据为依据,预防问题也无从谈起。

随着我国新一代飞机的设计制造不断向数字化进程迈进,以二维图样和模拟量手段检验产品质量的模式已无法适应新一代飞机的技术发展。零件的数控加工、精准成形和飞机快速自动化装配对数字化测量技术的需求越来越迫切;测量技术已成为飞机快速研制的瓶颈,严重制约了飞机装配技术的进步。基于模型和三维标注的面向装配的数字化测量技术已成为未来飞机检测装配的发展方向 and 主体模式。

数字化测量技术的现状和发展趋势

数字化测量技术在飞机装配技术发展历程中有至关重要的作用,没有有效的测量手段就不可能实现自动化装配。数字化测量技术的发展与飞机装配技术的进步是相辅相成的。下面从飞机装配过程中的数字化协调、关键零件质量控制、部件装配、总装对接和移动生产线等几个主要环节的工程应用说明测量技术的现状和发展趋势。

1 基于精密测量的数字化协调技术

现代飞机装配技术进步的主要特征之一就是数字量协调取代了模拟量协调^[4-5],所谓数字量协调就是以数字量的方式对产品、工装在统一基准下进行精确描述,并采用高精度的数字化加工与测量设备将这些数字量物化为模拟量,最终传递到实物上,实现工装之间、工装与产品之间以及产品之间的互换协调性。在数字化标工协调法中,用数字化光学测量系统(如激光跟踪仪、电子经纬仪、室内GPS等)对装配工艺装备进行安装检验,通过测量工装骨架上的光学工具球孔位置,并与工装数模中的光学工具球孔理论坐标值拟合后,在测量软件系统中建立起工装的设计坐标系^[6-7]。所有其他工装定位器的安装都采用光学测量系统在此设计坐标系中进行,使得装配完成的工装符合设计时的定位功能与协调要求,并使最终装配完成的飞机产品满足设计时的互换协调要求。

在数字化测量技术和加工手段没有达到飞机装配要求的高精度水平以前,装配质量只能依赖大量复杂的专用工装来保证。飞机各部件的协调和装配工装的制造要按模线、样板、标准样件等模拟量来保证;工装的安装和校验要经过上样件、调标工、安装、检测和维修定位器;下样件的过程传递环节长、误差大,装配



图1 空客不来梅工厂机翼装配工装的检测

效率和产品质量很难达到较高水平。因此,一种新机型的研制周期要长达5年或10年以上(制造标准工装的周期通常在1~2年或更长)。数字化技术的应用和测量技术的发展简化了工装的安装和校验的过程,取消了标准样件,并大幅度缩短了工装制造周期,降低了研制成本。早在十几年前激光跟踪仪在国外飞机装配工装的制造和安装中已广泛使用,图1所示为空客不来梅工厂机翼装配工装的检测实例。图2为利用激光跟踪仪Leica T-Mac引导柔性夹具定位的工程应用实例。



图2 Leica T-Mac引导柔性夹具定位的工程案例



图3 Zeiss MMZ测量机检测F-35复材壁板

波音公司在研制装配787客机的过程中,采用了全新的基于模型定义(Model Based Definition, MBD)的技术,取消了全尺寸实物样机,二维图样不再是设计制造过程中所必需的文件,三维模型替代二维图样作为产品制造和检验的唯一依据。质量控制工程师在产品并行设计时根据装配工艺规划制定产品检测规划方案,零件设计时预先定义关键特征和测量基准点,利用这些关键特性和测量数据保证飞机的协调装配,按三维CAD模型自动生成检测规程并通过仿真分析优化测量方案,指导测量设备完成产品检测,控制产品质量,使CAD和CAM(加工、装配、测量、检验)实现真正的高度集成,在产品研制的检测环节实现三维数字量传递,通过三维数字化检测设备直接获取产品质量信息。与产品设计模型比较,实现产品质量控制。目前,国内基于三维CAD模型的数字化检测技术应用研究鲜见报道。

行设计时根据装配工艺规划制定产品检测规划方案,零件设计时预先定义关键特征和测量基准点,利用这些关键特性和测量数据保证飞机的协调装配,按三维CAD模型自动生成检测规程并通过仿真分析优化测量方案,指导测量设备完成产品检测,控制产品质量,使CAD和CAM(加工、装配、测量、检验)实现真正的高度集成,在产品研制的检测环节实现三维数字量传递,通过三维数字化检测设备直接获取产品质量信息。与产品设计模型比较,实现产品质量控制。目前,国内基于三维CAD模型

的数字化检测技术应用研究鲜见报道。

2 关键零件质量控制

测量设备在辅助生产中的应用逐步从过去的固定式离线质量检测向测量与制造过程高度集成的便携式在线测量发展。例如,洛克希德·马丁公司在F-35项目中购买了一台大型的由Zeiss公司生产的MMZ三坐标测量机直接用于生产过程(见图3),而非过去的离线质量检测。固定式三坐标测量机作用是重要的,但便携式系统如激光跟踪仪、激光雷达以

及三坐标测量臂日益成为一种趋势。

复合材料的大量应用已成为飞机发展的主流趋势,与金属合金相比,碳纤维增强材料是不可重塑的,必须在第一次加工正确,由此推动在线测量设备在生产中的应用,否则,在可能返工之前将会报废一个昂贵的零件。洛克希德·马丁公司利用其先进的带有专利的激光超声检测技术,对型面复杂的复合材料零件进行100%的自动检测,目前已用于F-22、F-35的大型油箱、大梁、复合材料进气道、机翼蒙皮等的自动化检测,显著地提高了生产效率,使F-35及F-22计划的全寿命周期的检验成本减少约3亿美元。洛克希德·马丁公司还采用了一种由挪威开发并制造的Metronor便携式计算机辅助红外照相测量系统,与一般的坐标测量机相比,设备成本减少3/4,测量大尺寸曲面部件的检测时间减少56%,而对于小零件则省时64%。对于大尺寸零件来说,通常便携式系统更具有实用性。

3 部件装配中的测量技术

数字化测量技术的出现使无型架装配成为可能,用测量设备取代难以加工的夹具已经成为一种趋势。波音公司在研制JSF的X-32样机和无人机X-45样机时,提出了包括根据零件关键特征以较少的安装工作快速定位不同零件的所谓决定性装配过程(Determinant Assembly)的无型架制造技术,取消了巨大型架,采用一种通用支架支撑样机的主要部件。利用4台Zeiss激光跟踪仪对部件进行空间定位和其他装配工作。大大提高了飞机装配效率和精度。和高难度的加工相比,使用便携的测量设备减少了时间和资金的消耗。

应用测量技术辅助部件装配的过程和实例如图4、图5所示。在数字化装配过程中,光学测量与补偿技术不仅能够准确地获取装配零件的尺寸参数和位置信息,而且将数据传

送到控制系统,进行零件空间坐标的反馈。而待装配部件在装配之前进行固定时,由于实际的装配位置与数学模型的装配位置不一致,必须采用一套定位系统对装配部件进行定位,保证理论位置 and 实际位置具有共同的加工基准点。激光测量仪主要为装配加工及柔性型架找准相应的基准位置。激光跟踪定位仪器测量装夹后的装配部件的基准点,获得的测量数据经过处理单元处理后,被直接反馈到装配系统的控制系统。控制系统通过对实际装配位置与精确数学模型的装配位置进行比较后,获得部件装配位置的修正补偿值,自主地对定位元件的空间位置进行快速调整,实现飞机零部件、装配工装和钻铆系统定位的闭环控制,逐步对定位进行补偿,将精确数学模型的装配位置与实际装配位置统一起来,从而完成快速准确定位、安装与调整。

测量辅助装配的典型案例还有应用工业机器人制孔和焊接装配,测

量系统直接为机器人提供位置信息,在钻孔或者焊接操作前确认每一个位置,精度不受机器人磨损、温度变化以及负载变化的影响。

4 全机对接中的测量技术

激光跟踪测量系统具有测量范围大、精度高、非接触、动态测量、机动性强的特点,根据跟踪头数量的不同,激光跟踪系统分为单站球坐标法、双站三角法和多站距离交会法3种。大型部件对接时,涉及空间范围大,测量精度要求高,采用3路激光跟踪测量系统虽能满足测量要求,但机翼或机身的移动可能会挡住激光束,被迫迁移跟踪仪测量点,并需重新标定基点位置,降低了测量效率。因此,波音公司利用4台激光跟踪仪对部件进行空间定位,较好地解决了测量基点重新标定的问题,提高了测量效率。

为解决大尺寸空间的测量与定位问题,科技人员在GPS的基础上开发出了一种具有高精度、高可靠性

和高效率的iGPS系统。波音和空客公司取消了大型的固定对接平台,采用由计算机控制的自动化定位器、激光测量系统(激光跟踪仪或iGPS系统)和控制系统组成的自动对接方式。典型的应用如波音公司从波音747、F/A18和波音777等飞机整机的总装生产线,大幅度提高了机体装配质量,并且能够适应不同尺寸的机身机翼结构,通用性强,节省了大量装配工装。

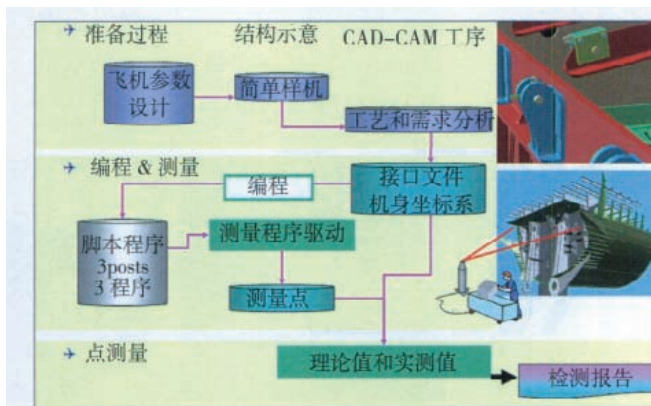


图4 应用测量技术辅助部件装配示意图



图5 基于激光测量的A380装配站

5 移动生产线中的测量技术

波音、空客等航空公司,大量采用 AGV 小车和气垫运输,并与 iGPS 和数控技术相结合,实现飞机部件的运输和装配,进一步提高了工作效率和装配质量。由于各生产环节对测量要求不同,生产线上存在多家不同公司的测量设备,而且各测量仪器附带的软件只能应用于特定的设备,需要生产工程师和工人了解各测量设备的公差测量细节,降低了设备操作方便性。所以,开发多系统异构的集成控制测量软件,将测量数据独立于测量设备,改进设备接口与测量硬件的数据传输,实现多系统异构的集成应用是提高装配效率和质量的关键。

CAD 模型描述是测量辅助生产的重要组成部分,建立三维 CAD 模型描述 GD&T (形状和尺寸公差)的标准和允许公差标准知识库是测量技术的发展趋势。例如,在 CAD 文件中注明 GD&T 已经成为波音的项目标准。当一个操作人员在他的 MCOSMOS 软件中创建一个测量程序时, Mitutoyo 公司提供 GD&T 符号的图像解释,操作者不仅可以看到 CAD 模型,还可以看到调用到屏幕上的 GD&T。操作人员不再需要设计图而是使用 CAD 模型来完成他们的工作,并可添加 GD&T 到模型中。

综合看来,飞机装配对测量技术的迫切需求带动了数字化测量技术的飞速发展,而数字化测量技术的进步也催生了先进的飞机装配工艺方法,大幅提升了飞机装配技术水平。与传统检测比较基于现代飞机装配的测量技术主要经历如下 6 个转变:

(1) 检测依据从二维到三维转变,在产品并行设计时制定三维检测规划,依据三维模型自动生成检测规程并通过仿真分析优化测量方案。

(2) 实物质量控制从制造完成后的产品实物检测向测量、协调、控制、管理模式的全过程转变。

(3) 测量方式从少量关键零部

件固定式离线检测到制造全过程便携式在线测量的转变。

(4) 测量设备从多系统独立运行向多系统系统集成应用的方式转变。

(5) 测量手段从手工干预测量向机械辅助自动化检测转变。

(6) 测量技术在飞机装配中的作用由辅助装配向一体化集成装配转变。

以上转变代表了数字化测量技术的发展方向,可归纳为“五化”,即:依据三维综合化、系统异构集成化、设备便携自动化、数据格式标准化、测量方式在线化。

面向装配的数字化测量技术

面向飞机装配的数字化测量技术是指以飞机装配需求为核心,对装配生产线中各个环节的测量方案、测量设备、测量分析软件、测量方法和相关技术规范进行研究,至顶向下进行数字化检测规划,建立覆盖全局(装配车间)的多系统异构集成测量平台,与数字化工艺装备集成,通过现场测量数据采集定量的分析,驱动控制系统对定位进行补偿和闭环控制,实现提高飞机装配质量和效率的一种综合测量分析技术。重点研究内容应包括以下 5 个方面:

(1) 建立数字化测量技术应用体系。研究面向数字化装配应用的多种数字化测量新方法, iGPS 测量方法、摄影测量方法、激光跟踪测量方法、CNC 数字化经纬仪测量方法等,重点分析各自特点和适应性;研究基于三维模型和数字化检测设备的测量工艺方法和标准规范,搭建多系统异构集成测量规划管理平台。

(2) 系统规划数字化装配测量技术方案。针对不同装配阶段(零组件、部装、大部件对接、全机水平测量等)的测量需求,研究面向设计特征信息提取的测量规划及控制方法、非接触快速标记技术、特征点自动捕捉瞄准技术、高密度点云获取方法等。

(3) 测量数据分析与处理。研究测量控制场支撑下的多任务测量软件平台技术及其二次应用开发技术。将得到的基本测量定位信息处理分类,统一为标准读取格式,生成驱动制造设备的控制信息。

(4) 测量设备与其他制造设备或工艺装备的集成。研究测量信息和设备控制信息的交互接口,实现测量设备和制造设备的集成。

(5) 自动化测量技术。针对典型对象的测量设备在线自动检测方法和辅助装备,实现快速自动测量。

结束语

与国外先进测量技术比较,我国数字化测量技术还处于起步阶段,基于三维综合化模型的数字化装配检测和装配质量控制技术的开展步伐更为迟缓。长期以来我们的检验工作,一直依赖于设计所发出的二维图样。即使是在三代机研制过程中普遍采用数字量协调和模拟量协调混合生产的方式下,飞机产品的主要检验依据仍然是二维图样,所采用的检测手段也是常规设备为主,辅以少量的数控测量设备。究其原因,既有我们检验流程、方式方法的落后所致,还有检验人员素质偏低的束缚和羁绊,但主要还是思想认识的差距所致。这种状况严重地影响着我国飞机制造技术的发展。

数字化测量技术在飞机装配中的应用研究不仅仅是一项单纯的技术进步,而是要深入到技术、生产和质保体系中,彻底改变传统的设计、制造、试验和管理的模式、方法、手段、流程和生产组织,使之形成一体化的数字化测量集成质量管理体系,适应数字化柔性装配生产线的需要。

本文有参考文献 7 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 三丰)