

大尺寸测量技术在航空制造业中的应用及关键技术*

Application of Large-Scale Measurement in Aviation Manufacturing and Its Key Technology

北京航空航天大学 郑联语 朱绪胜
上海飞机制造有限公司 姜丽萍



郑联语

北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士生导师、工学博士。先后在香港城市大学、英国巴斯大学和克兰菲尔德大学留学研修。主要研究方向：数字化设计与制造、先进测量与产品验证、可重构柔性工装。主持和承担国家自然科学基金、国防基金、总装预研、国防基础科研和 863 等项目 10 余项。发表论文 60 余篇。曾获国防和中航工业科技进步二等奖、原航空工业总公司科技进步三等奖。

大尺寸测量系统已经逐渐应用到飞机制造的各个环节当中。采用先进的数字化测量设备,基于三维数模,通过计算机、传感器、数字控制等技术,可以完成对零部件的精确检测,对零部件 / 工装安装位姿的监控与调整,并且可通过离线编程实现测量过程的自动控制,提高航空制造的生产能力及自动化水平。

当前航空制造业朝着高精度、低成本、柔性化、数字化的方向快速发展,飞机零部件的加工和装配越来越依赖于大尺寸测量技术和系统提供的技术保证。因为一方面,飞机产品零部件尺寸越来越大、整体结构越来越多而精度要求越来越高,尤其是其中的关键特性^[1]。另一方面,在航空产品制造的全球协作精益化生产要求的背景下,要求大型复杂零部件能在全世界各地生产并能够无缝集成、统一装配,做到“统一协调、提前预见问题、少无返工”^[2]。同时,随着航空企业生产数字化程度的提高,要求形成产品设计、工艺规划、制造、检验等环节集成于一体的产品闭环制造数字链,对生产的各环节进行有效的

沟通和反馈,保证产品的制造装配质量和产品制造周期中信息的统一性和交互性^[3]。

大尺寸测量技术在航空制造业的应用

航空制造工程中应用的大尺寸测量系统经历了从简单的望远镜和经纬仪到较现代的激光跟踪仪、激光雷达及摄影测量。20 世纪 90 年代随着产品直接测量的逐渐渗入,产品的质量已不完全依赖“硬”工具和夹具保证。最近几年又出现了自动化程度较高的非接触、六自由度测量系统。目前,大尺寸测量系统及技术在国内外航空制造行业得到了广泛的应用。如图 1 所示,利用数字化的测

* 国家自然科学基金项目(51175026)和北京市数字化设计与制造重点实验室项目资助。

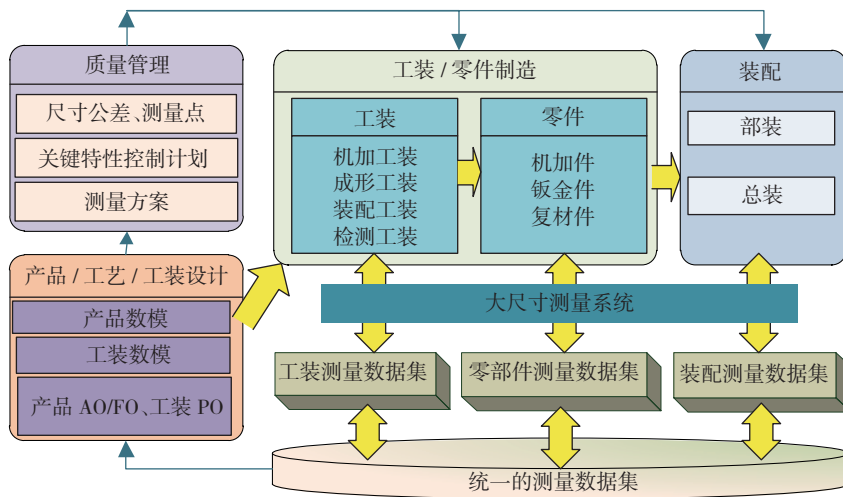


图1 大尺寸测量在飞机制造中的应用阶段

量设备及技术,结合先进的工艺装备技术、计算机技术、传感器技术、机器人技术等,通过使用统一的测量数据集,对飞机的零件加工、工装制造、部件装配和总装对接等各个阶段进行准确操作和严格检测,不仅可以提高检测效率和精度,节省大量成本和时间,而且可以保证生产过程的各阶段信息的互操作性和集成性,将检测信息反馈给上游的工程阶段,对产品、工艺、工装等设计进行修改、优化。概括起来,在航空制造中,大尺寸测量系统及技术主要有以下几个方面的应用。

1 产品及工装性能验证

产品/工装的几何尺寸和形位误差的检测是保证整套机械产品质量的关键。相对于传统的检测工具,大尺寸测量系统具有量程大、精度高、机动灵活等优点,可以对零部件的精度特别是关键特性进行快速验证。基于新一代产品几何量技术规范(GPS)理论,把检验验证阶段的测量值与设计规范值作比较,以确定实际产品/工装是否达到规范要求,并通过不确定度将规范和认证集成,保证设计功能的实现和认证结果的可溯源性,实现产品和工装的快速验证。

2 大型机床的空间误差检定及补偿

飞机壁板、梁框等大型构件的加

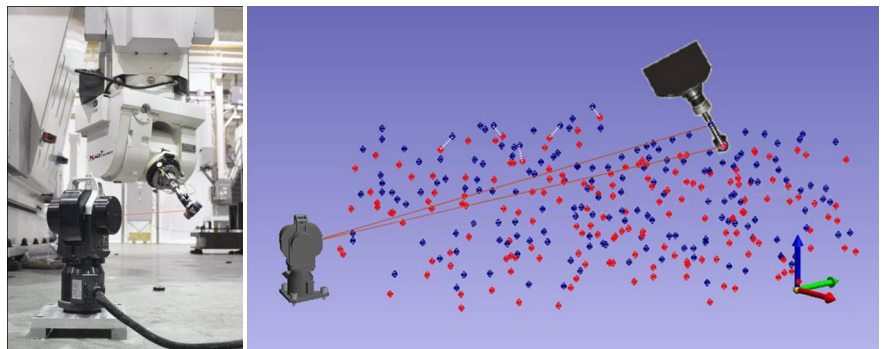


图2 基于T3激光跟踪仪的机床空间误差补偿系统(VEC)

工需要使用大型多轴数控机床。由于滚珠丝杠及齿轮的磨损、金属疲劳等因素会使机床工作时产生误差,大型机床需进行定期调校。传统的21项误差补偿法方法耗时,效率不高。随着大尺寸测量系统的进一步发展,美国国家制造科学中心研究开发了空间误差补偿技术(VEC)(图2),其测量方法简单,测量仪器安装简便,只需对T3激光跟踪仪以及活动靶标进行简单的安装就可解决大型5轴、6轴机床的调校工作,可大幅减小因仪器安装等因素造成的额外误差,提升效率的同时降低热漂移带来的影响^[4]。

3 大尺寸制造系统的在机检测

在机检测技术指测量仪器进入生产现场、融入生产线、监控生产过程,在机床上进行测量,可以方便工

件的安装调整,减少搬运装卸次数,提高生产效率。同时,在机测量可以及时发现制造过程中的问题,通过调整加工工艺参数和引入误差补偿等措施及时修正问题,并将信息反馈到上游设计阶段。大尺寸在机检测技术可以应用于数控切削、水切割、成形等工艺中。例如,三菱重工承担的波音787机翼蒙皮生产系统中,将两台激光雷达放在水切割龙门架上,边切割边测量,形成自动化的闭环制造系统,大大提高了生产效率和精度(图3)。

4 测量辅助装配技术

测量辅助装配技术是先进数字



图3 波音787机翼蒙皮水切割激光雷达在机测量

化测量系统在产品数字化装配中的重要应用,它综合应用产品数字化定义、数字化模拟仿真、自动跟踪测量、自动控制 and 机械随动定位等先进技术,利用大尺寸测量仪器对装配体各部件位姿参考点(基准点)跟踪测量,验证部件间相对位姿是否符合技术要求,并指导调整各部件的位姿,完成装配^[5]。在部段对接装配时,首先在对接部件上设置一些关键特性点,

然后通过数字化测量设备测定这些关键点的坐标值,并通过机械装置、控制系统等进行调整,使关键点的实际坐标值接近理论坐标值,来确保装配关系。

5 零部件及工装的逆向工程

逆向工程可扩大数字技术在备件制造、计算流体动力学模型精度验证以及产品质量保证等领域内的应用。通过大尺寸测量设备及软件将飞机零部件及工装(如模具、样板等)的实物产品转化变成精确的数字模型,可以缩短产品的设计、开发周期,加快产品的更新换代速度,降低开发新产品的成本与风险,加快产品的造型和系列化设计。

6 机器人位姿标定与测量

机器人技术已在飞机大型零部件的自动钻铆、激光焊接、表面材料涂覆、复合材料加工、自动化装配中得到较广泛的应用。在这些应用中,为提高机器人操作臂的绝对定位精度,标定是必需的步骤。机器人标定是指利用先进的测量手段和基于模型的参数识别方法辨识出机器人模型的准确参数,从而提高机器人绝对精度。标定过程中,测量手段是一个极其重要的因素,大尺寸测量系统,如 CCD 照相测量系统,激光跟踪测量系统等,都广泛地应用于工业机器人的标定。

大尺寸测量关键技术

1 大尺寸测量系统的快速现场校准与性能验证技术

工厂的现场温度、湿度等环境因素与在实验室校准时有较大差异,现场校准能更准确地反映测量设备的指标参数和工作状态是否满足工程需要。美国 ASME 制定了激光跟踪仪性能评定方法和评定流程的标准 ASME B89.4.19^[6]。英国国家物理实验室开展了 iGPS 的现场性能验证和不确定度分析^[7]。国内北京长城计量测试技术研究所研制了一种用于

激光跟踪仪现场快速评定装置,能够实现激光跟踪仪在工业现场的快速评定^[8]。这些成果为大尺寸测量仪器的现场性能评定提供了重要依据或参考。

2 测量场建模及仿真技术

在复杂航空制造现场环境下,建立合理的测量场模型是大尺寸测量规划与系统优化配置的基础和关键。总体上,测量场模型要根据测量任务的要求及现场环境知识而建立,其中应包括工作空间、零部件、工装、障碍物、测量目标、测量仪器、测量空间内的环境因素等信息。对测量系统按照不同布局或配置方案组合,通过仿真将形成不同的测量场结果,由此可以在现场实际测量实施之前评价测量系统的性能参数并得到优化的结构参数。同时,通过测量场模型和上游的产品及工艺设计与现场的测量验证之间的数字链集成起来,并协调关键特性。

3 测量系统优化配置技术

由于零部件的尺寸、现场条件以及测量系统的可视性等约束,采用单台/种仪器测量在实践中往往不可行。综合采用多台相同或不同的测量系统能够着重关注具体的特征或区域,在一次安装中获得感兴趣的更多详细信息,加快测量速度并提高测量精度和可靠性^[10]。这种为完成特定测量任务对多台相同或不同测量仪器进行组合的技术,称为测量系统配置,是大尺寸测量中的关键问题。由于使用多台/种仪器测量,首先需将多传感器获取的数据进行融合,然后以某项指标优化求解测量仪器的位置。精确、快速的测量系统配置方法将是大大尺寸测量中的研究重点之一。

4 测量过程自动化技术

测量是一个耗时间又不会给产品增加直接价值的过程。为了保证产品质量,制造成本随着测量的增多而明显提高。对于应用广泛的激光

跟踪仪而言,传统的手动目标测量,通过人工手持将靶球放到测量点上,进行测量,每测量一个点就需手动引光一次,使激光跟踪仪锁定靶球球心。这种方式自动化程度低,而且耗时耗力。自动目标测量采用“坐标值转换—跟踪仪转动—自动寻靶—数据采集”的方式进行(图4)。首先基于零部件三维数模获取各测量点在设计坐标系下的理论位置,然后根据设计坐标系与测量坐标系的转换关系,获得当前实际状态下各个测点在测量坐标系下的理论坐标值,通过程序控制激光跟踪仪自动定位到要采集的测量点附近,使用跟踪仪的自动寻靶功能进行螺旋搜索,一旦激光点落入靶球范围,激光跟踪仪会自动精确搜寻到靶球靶心,完成测量。

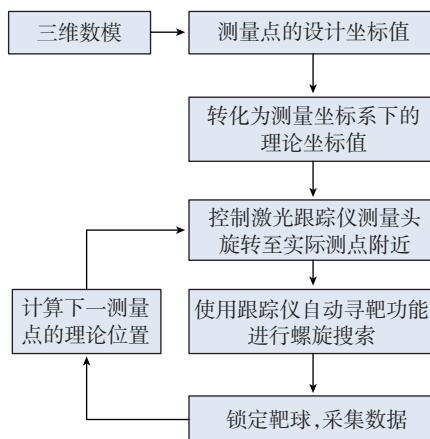


图4 自动测量流程

另外,将测量靶标或者 iGPS 的接收器装载小车或机器人上,通过基于三维数模的控制它们移动到所需空间位置,然后进行实时测量,获得需要的数据,从而实现测量过程自动化。

5 测量数据接口标准化与互操作技术

各种不同仪器测量过程中往往采用不同的通信接口标准,造成数据通信与集成的困难。现今主流接口有 DMIS, ISO/STEP, DML, I++DME 等。规范化测量数据接口标准取决于生产实践及技术发展对于各种接

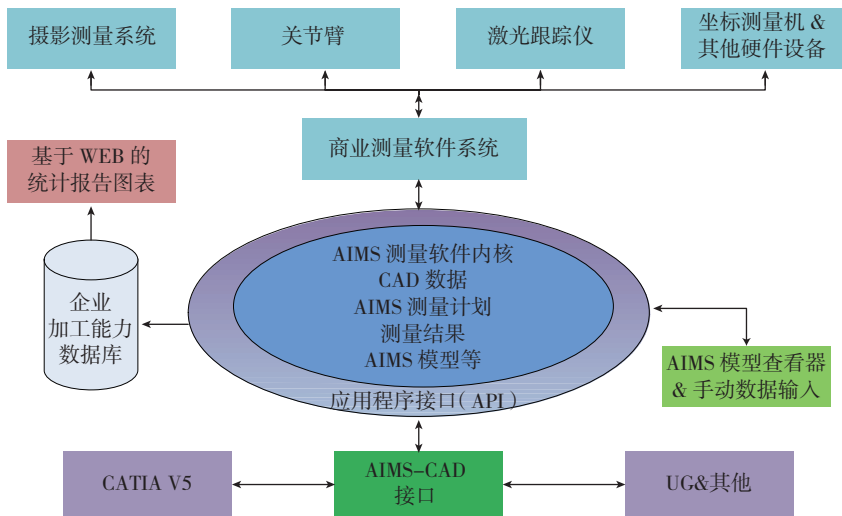


图5 波音AIMS解决方案

口标准的取舍。波音公司开发的测量软件解决方案—AIMS (Advanced Integrated Mathematical System)(图5)为解决此问题提供了一种有效解决方案。它通过对三维CAD软件(如CATIA和UG)二次开发,基于统一的测量内核保证了几何信息、尺寸公差、检测计划和测量结果等信息在相同或不同的硬/软件平台间无缝共享。同时它提供了基于WEB软件系统进行测量结果分析和统计报告输出,从而管理世界范围内的供应商测量数据,实现跨企业的信息集成和闭环反馈。

6 基于MBD的集成测量技术

新一代GPS理论和规范要求在设计阶段就制定产品的测量方案和计划,因此如何在产品设计同时规划产品的测量方案,实现三维环境下的测量工艺规划和设计制造信息的交互,改善产品的制造信息流,是数字化航空制造的关键技术之一。集成大尺寸测量系统(Integrated Large Volume Measurement System, ILVMS)^[9],直接利用产品或工装的三维数模,通过统一的测量数据集实现大

尺寸测量规划、执行、结果分析并与CATIA完全融为一体的集成化测量软件(图6)。它将全部测量信息(含测量目标、测量仪器、站位、测量操作及测量结果等)表示为测量数据集的形式,基于MBD技术,将整个测量数据集集成在CATIA平台下,并存储到CATIA三维模型文件中。采用规范树的方法对测量信息分类组织,实现了测量信息的集成管理,并通过测量仪器通信协议实现CATIA系统与测量仪器的连接,能够将仪器采集的测量数据集集成到软件系统中。

结束语

大尺寸测量系统已经逐渐应用到飞机制造的各个环节当中。采用先进的数字化测量设备,基于三维数模,通过计算机、传感器、数字控制等技术,可以完成对零部件的精确检

测,对零部件/工装安装位姿的监控与调整,并且可通过离线编程实现测量过程的自动控制,提高航空制造的生产能力及自动化水平。在复杂的航空制造现场环境下,目前大尺寸测量应用中的关键技术还未完全解决或不够成熟,包括现场校准与性能验证、测量场建模与仿真、测量系统优化布局、测量数据融合与互操作、基于MBD集成测量、测量过程自动化等,还有待进一步的深入研究与应

参考文献

- [1] Thornton A C. Variation risk management: focusing quality improvements in product development and production. New Jersey: John Wiley and Sons, 2004.
- [2] Maropoulos P G, Guo Y W, Jamshidi J, et al. Large volume metrology process model: A framework for integrated measurement with assembly planning. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 477–480.
- [3] Brecher C, Vitir M, Wolf J. Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, 19(6): 570–580.
- [4] Maxham D. 空间误差补偿技术(VEC)大型机床标定的创新实用方法. 航空制造技术, 2010(13): 46–59.
- [5] 朱绪胜, 郑联语. 基于关键装配特性的大型零部件最佳装配位姿多目标优化算法. 航空学报, 2012, 33(9): 1726–1736.
- [6] ASME B89.4.19 Performance evaluation of laser-based spherical coordinate measurement system. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [7] Muelaner J E, Wang Z, Jamshidi J, et al. Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automation theodolite(R-LAT). Proc of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(8): 217–229.
- [8] 马骊群, 王继虎, 曹铁泽, 等. 激光跟踪仪测角误差的位移标定法. 计量学报, 2009, 30(5A): 76–78.
- [9] 郑联语, 邵建, 朱绪胜. 集成于CATIA的大尺寸测量软件系统. 航空制造技术, 2012(11): 42–44.

(责编 良辰)

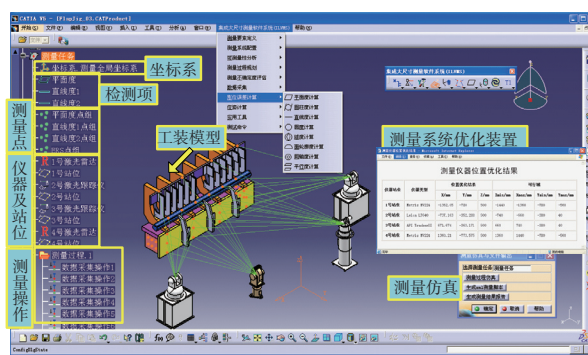


图6 基于MBD的集成大尺寸测量技术