

飞机装配中的数字化测量系统

Digital Measurement System for Aircraft Assembly

南京航空航天大学机电学院 李泷杲 黄翔
上海飞机制造有限公司 方伟 陈磊

[摘要] 阐述了面向飞机装配过程的数字化测量系统相对于传统测量系统具备的特点和优势,对飞机装配中常用数字化测量设备的功能和作用进行了简要介绍,详细论述了数字化测量软件环境的结构框架,研究了测量设备布站规划与仿真、测量点自动搜索跟踪算法、飞机装配测量误差补偿手段以及飞机部件装配质量分析方法。

关键词: 数字化 测量 飞机装配

[ABSTRACT] The characteristics and advantages of digital measurement system for aircraft assembly is expounded. The functions and effects of digital measurement equipment in common use for aircraft assembly is introduced. The framework of digital measurement software environment is discussed in details. Station arrangement planning and simulation, automatic searching and tracking algorithm of measurement points, measurement error compensation methods for aircraft assembly and quality analysis method of aircraft part assembly are researched.

Keywords: Digitization Measurement Aircraft assembly

现代飞机对轻质、经济、安全和长寿命的追求,对飞机制造、安装精度提出了更高的要求,其中飞机部件装配精度在很大程度上决定了飞机的最终质量。传统的飞机部件装配主要依靠工装和工艺补偿来保证零部件之间的协调,依靠模线模板、光学仪器等装备检测装配质量^[1]。这些方法精度差、效率低,已不能适应现代飞机发展的需求。国外先进飞机制造公司已经开始大规模将数字化测量系统引入飞机装配中,利用数字化测量系统高精度的测量、控制和分析系统,提升飞机装配精度。目前国内飞机制造行业,数字化测量技术仍然处于零星的研究和应用状态,存在使用效率低、测量数据可读性和共享性差、无法对装配结果进行合理评估等问题,没有对装配精度提升贡献出原有价值。为此,本课题研究面向飞机装配的数字化测量系统的基本结构及关键技术,以期为提高飞机装配精度,保证装配质量提供技术支持。

46 航空制造技术 • 2010 年第 23 期

1 面向飞机装配的数字化测量系统特点

数字化测量系统是以测量检测软件为核心,以数字化测量设备为实施工具,能够对待测对象实施快速、精确、自动化的测量,获取其准确的空间形状或位姿信息,并能够对测量结果进行分析评估的一整套测量系统。在飞机装配领域,相对于传统测量系统,数字化测量系统主要特征包括^[2]:

(1)测量范围大、精度高。数字化测量设备通常采用有着极好的定向性和相干性的激光发射/接收系统作为其测量单元,在满足飞机装配精度的前提下,测量设备能够实现大空间测量。

(2)测量过程可通过编程控制。数字化测量设备采用机电伺服控制结构,结合其开放的可编程二次开发接口,能够实现对测量工作的数字化控制。

(3)测量数据数字化,可读性好。测量结果以数字量进行表征,可以直接显示、加工和处理。

(4)测量数据具有良好共享性。数字化测量设备采用标准的以太网 TCP/IP 接口,因此测量设备能够很容易地实现与其他系统之间的数据通信,对组建柔性化的数字化装配平台有不可估量的积极意义。

2 飞机装配数字化测量设备

飞机装配中常用的数字化测量设备主要指激光跟踪仪、局域 GPS 和激光雷达等。较之其他测量设备,这些设备精度高,测量范围大,可用于从工装安装定位、部件装配定位、对接装配到装配质量检测等装配环节,是实现飞机数字化装配的主要测量工具。

(1)激光跟踪仪是目前国内使用最为广泛的大空间高精度测量设备,其基本原理是利用激光来跟踪目标反射器,通过自身的测角系统和激光绝对测距系统来确定空间点的坐标。在标准测量条件下,是目前大空间测量精度最高的测量设备^[3]。

(2)局域 GPS 也称 indoor GPS(iGPS),其基本原理及使用方法与全球定位系统类似,只是使用红外脉冲激光发射器代替卫星^[4-5]。iGPS 工作范围不仅可小到 1 个工作单元或大到整个车间,用户数不限,而且可对被测物

进行 360° 空间测量,从而消除转站造成的误差^[6-7]。在大空间中使用时,误差能保证在 70 ~ 100 μm。

(3) 激光雷达是雷达技术与激光技术相结合的产物,以激光束代替微波,投向被测目标,依据目标上大量的反射光线获得被测目标的空间位置。激光雷达工作波长短,测量精度高,10m 范围内其测量不确定度在 0.1mm 左右^[8]。

除了上述数字化测量设备外,还有一些常见的数字化测量设备,如手持式激光扫描设备、数字工业摄影测量系统等。这类设备不能满足大空间高精度测量要求,但由于体积小、便于携带,可用于某些特定装配质量检测指标的检测或辅助精确测量设备进行协同测量。

(1) 手持式激光扫描设备。基于光学三角测量原理,半导体激光发生器发出的光经透镜形成平面光幕,并在物体上形成一条轮廓线,而后将其投影到 CCD 阵列,经信号处理器分析处理得到所需数据。当实施小范围测量时,测量误差小于 0.1mm,可用于蒙皮接缝宽度、阶差等装配质量的现场快速检查。

(2) 数字工业摄影测量系统。通过在不同的位置和方向获取同一物体的 2 幅以上的数字图像,经计算机处理得到部件空间三维模型;或以单台摄像机拍摄单幅或多幅图像提取特定特征。该设备对现场光线及测量对象材质比较敏感,在测量范围较大时误差较大、效率低,因此并不适合大型部件整体装配精度的评估,但仍然可用于特定情况,如通过快速图像识别技术进行飞机蒙皮铆接铆钉数目检测,或使用摄影测量技术检测细节尺寸。

3 飞机装配测量软件环境构建

现代飞机制造结构复杂性以及产量要求,都对装配定位的测量工作在精度和效率 2 个方面提出了极高的要求,为此需要为飞机零部件装配生产线构建专用的测量软件环境,实现测量设备、研发的装配测量辅助软件、飞机数据模型三者之间的快速数据传递,实现各测量环节的有机组合。从数字化、自动化和精确度的角度出发,该软件环境应当具备如图 1 所示基本结构框架。

3.1 测量设备布站规划与仿真

在装配过程中,测量设备所处的位置应当尽可能检测到所有的检测测量点。如果不能,就需要转站或增加测量设备,转站或增加测量设备将提高测量成本、降低测量精度及工作效率。因此,测量软件应当具备对测量设备的布站进行规划仿真的功能,确保使用尽可能少的测量设备在满足测量精度的前提下尽可能多地覆盖测量点。

为便捷地导入所需测量的部件数据模型,测量设备布站规划仿真可采用三维图形环境(CATIA 或者 Open

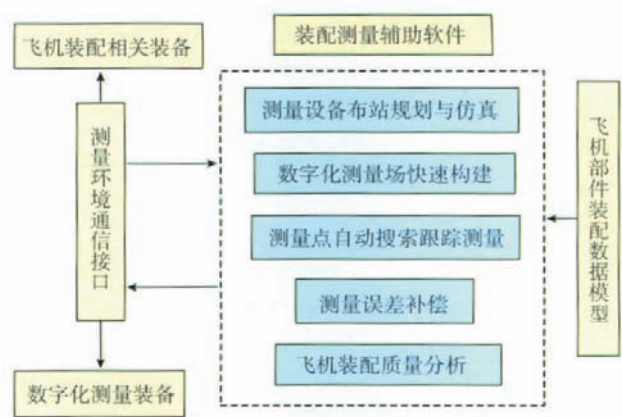


图1 数字化测量软件环境的结构框架

Fig.1 Framework of digital measuring software environment

CASCAD)进行规划仿真。内部构建有测量设备模型库,可以方便地将其布设于预定区域,然后系统依据其位置,结合输入或外部数据文件导入的部件测量点进行计算,并以可视化的形式显示规划结果。

布站规划的核心在于“站位可测性算法”。该算法基本实施过程如下:布站站点与待测点之间构建虚连线;以此连线为轴心构建里面半径 R ,高为测量距离 L (R 依据测量设备确定、 L 为测量点距离)的虚拟圆锥;将虚拟圆锥与部件数字模型求交,若无交点即认为可测,如图 2 所示,有交点表示该测量点处于遮挡状态。当所

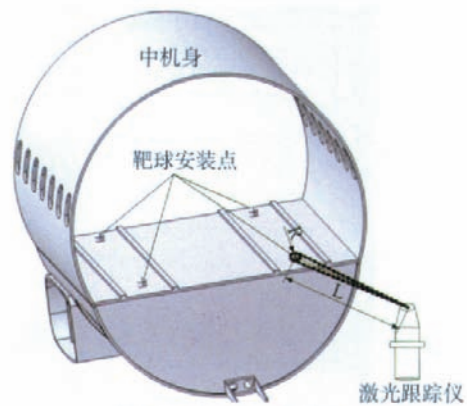


图2 激光跟踪仪可测性

Fig.2 Measurability of laser tracker

有测量点计算完毕后,系统以二维表的形式给出所有测量点的可测性信息,方便进一步判定和调整,并对各测量设备的待测点进行分配。

3.2 数字化测量场构建

飞机装配过程中要将装配件定位到设计位置上,而测量设备标定的是测量坐标系下的测量坐标,因此需将测量坐标快速准确地映射到设计坐标中。对此大都采用通过在测量域内设定固定点加以标定,完成测量坐标与设计坐标系的统一;经过坐标系统一后,自动给出测

量点在设计坐标中的坐标。该方法具有一定通用性,但存在一些问题:由于软件的封装性,缺少与其他系统进行实施交互的接口;无法依据特定飞机部件装配需求,实现大规模测量点可编程自动搜索跟踪测量。这样,就需要针对飞机装配过程中的实际情况,进行专用数字化测量场构建。

数字化测量场构建的关键技术在于“测量坐标系与设计坐标系的映射统一算法”。通过构建固定点的标定设计坐标与实际测量坐标的相互映射关系,建立两者之间的坐标转换方程,而后基于最小二乘原理,结合数值迭代算法,求解出坐标转换方程中坐标转换矩阵中的系数,完成两者之间的坐标转换。

3.3 测量点自动搜索跟踪

当前国内的数字化测量设备,基本都采用手动测量方式,这种测量方式不仅效率低,而且当测量点位置隐蔽时,不便于人工测量,需研究测量点自动搜索跟踪测量算法,提高测量效率,降低劳动强度。以激光跟踪仪为对象,研究测量点自动搜索跟踪算法。图3为激光跟踪仪的自动搜索跟踪算法原理:首先基于部件三维数字模型获取测量点在设计坐标系下的理论位置,然后依据坐标转换,获得当前实际状态下各个测量点在测量坐标系中的理论位置。由于制造及定位误差,测量点并不

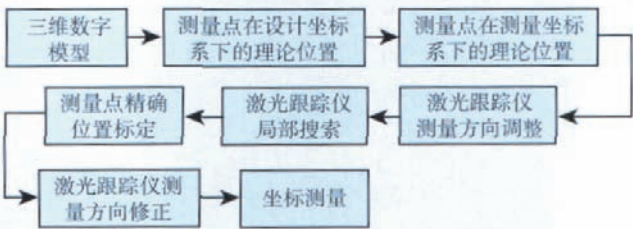


图3 自动搜索跟踪原理

Fig.3 Basic principle of automatic searching and tracking algorithm

与理论位置点重合,但也不会偏离太远;利用激光跟踪仪对周围区域采用局域搜索策略,获得部件各测量点的坐标。

3.4 飞机装配测量误差补偿

飞机装配测量误差主要由3部分构成:零部件制造误差、测量场标定误差、测量设备自身的测量误差。因此要获得更为精确的测量数据,需要从3方面进行误差补偿。飞机零部件制造误差可通过装配测量辅助软件的制造质量分析给予补偿。

测量场标定误差产生于坐标系统一过程中固定点安装误差,可通过坐标系统自校正的方法加以修正。该方法与先前测量场构建的“测量坐标系与设计坐标系的映射统一算法”的原理基本一致,由于该算法本身就内嵌了最小二乘平差方法,因此就带有了误差校正功能。

对于测量设备自身的测量误差,一般可由生产厂商在比较理想的实验室条件下测试后提供。在实际工业测量现场,如果周围环境情况恶劣,可采用“冗余测量法”加以处理,如图4所示。其核心思想是使用2台以上的设备对一点同时进行测量的方法加以校正。由于参与测量的测量设备都有各自的测量坐标系及测量坐

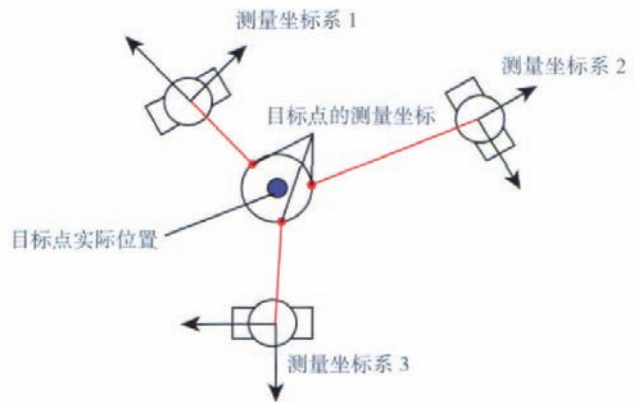


图4 基于冗余测量法的测量误差校正原理

Fig.4 Basic principle of measurement error correction based on redundant measurements

标,当这些测量仪器对同一个点进行测量时,因为测量误差的存在,测得的点坐标被映射到设计坐标系下时其点位并不重合,通过测量点进行加权平均,结合生产厂商提供的设备系统误差参数,可达到减小测量误差的目的。以该方法为基础,在测量域内布设关键插值点进行测量,而后引入人工神经网络等人工智能算法,进而获得整个测量域误差补偿修正值。

3.5 飞机部件装配质量分析

由于飞机部件结构复杂,制造误差控制难度高,因此所有的测量点必定偏离其理论位置,甚至有些点位可能发生超差。依然使用理论特征点作为测量定位依据,

将很有可能发生检测点超差,如果强制装配将造成部件变形,影响装配质量。因此通过引入模型配准算法,如图5所示,使得测量特征点的最终坐标在理论位置的基础上适当调整,以满足装配要求。首先,在三维图形环境中构建实物测量点阵模型;然后根据制造基准点、质量检测点等制造要求不同,分配不同映射权重,建立带权重的映射转换算法,使之与理论点阵模型进行拟合对比,而后对比两者差异,分析其制造误差。

4 结束语

本研究以测量为诉求,详细地讨论了现代飞机装配数字化测量系统所应具备的功能及系统结构,研究了涉及到的关键技术。

(下转第59页)

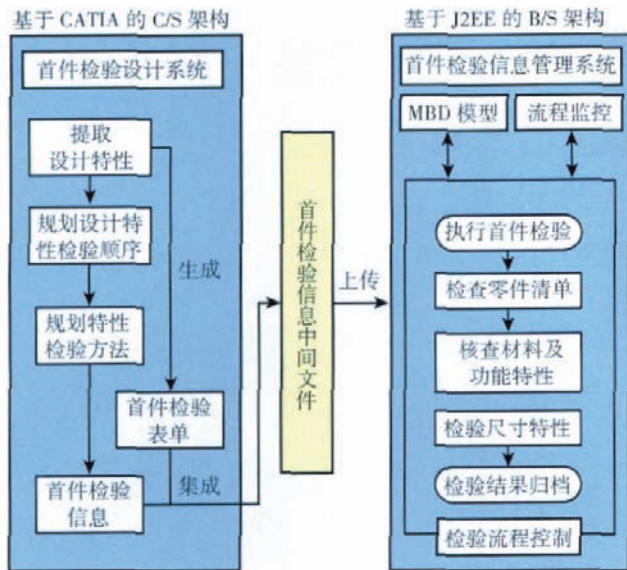


图10 首件检验表单的设计与执行

Fig.10 Design and execution of first article inspection form

时提供对首件检验流程的监控。检验工人登陆信息管理系统开启或继续首件检验流程,依次检验产品的零部件清单及其他设计特性。设计人员可以在信息管理系统中监控产品首件检验的流程,分析检验结果。

4 结论

基于 MBD 的首件检验对航空制造业实现全数字化设计、加工与装配具有重要意义,本研究在分析 MBD 技术应用体系的基础上,对航空首件检验标准进行了研究,总结了在 MBD 环境下实现首件检验的关键技术,并论述了各关键技术的实现方案,为基于 MBD 的航空产品首件检验系统的开发与实施提供了技术支撑和方法指导。

参考文献

- [1] 张魁, 范玉青, 卢鹤, 等. 基于 MBD 制造体系的装配工艺数据集成. 机械工程师, 2009(1): 55-58.
- [2] 余志强, 陈嵩, 孙伟, 等. 基于 MBD 的三维数模在飞机制造过程中的应用. 航空制造技术, 2009(25): 82-85.
- [3] 周秋忠, 范玉青. MBD 技术在飞机制造中的应用. 航空维修与工程, 2008(3): 55-57.
- [4] HB 9102-2008, 航空产品首件检验要求. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2008.
- [5] 李新光. 浅谈军工产品生产过程中的首件检验. 航空标准化与质量, 2003(2): 37-38.
- [6] 卢鹤, 范玉青. 飞机结构产品的数字化定义. 北京航空航天大学学报, 2006, 5: 526-530.
- [7] Ralph G. FAI Training for Global Partners. The Boeing Company, 2007.

(责编 小城)

(上接第 48 页)

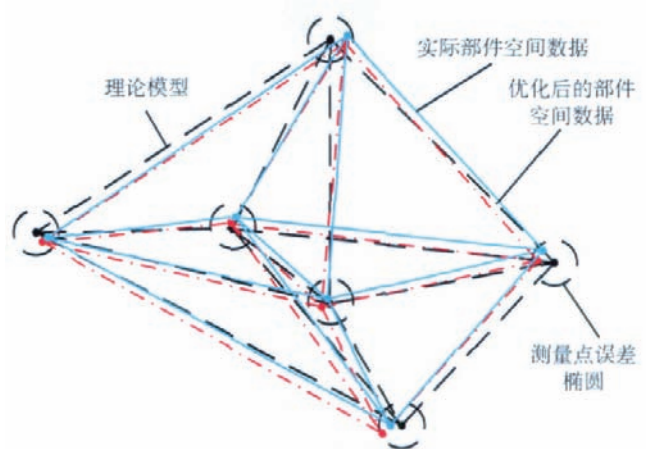


图5 模型配准算法原理

Fig.5 Basic principle of model registration algorithm

从整个飞机数字化装配平台的角度而言,数字化测量系统仍然需要进一步完善。整个数字化装配平台主要包括:面向制造的数字化模型及辅助支持环境、数字化测量系统、数字化柔性装配工装设备及其控制系统、开放的通信架构。面向制造的数字化模型及辅助支持环境是装配实施及质量保证的基础依据;数字化测量系统提供装配所需的现场空间信息并能够对装配质量进行检测分析;数字化柔性装配工装设备及其控制系统实现飞机零部件的合理高精度装配;开放的通信系统确保所有环节间数据流的无缝集成和便捷访问。在完善其中各个环节基础上,如何将数字化测量系统与其他各个环节有效融合,形成统一整体,是下一步数字化测量系统研究的重要方向。

参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001:22-36.
- [2] 邹翼华. 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.
- [3] 张春富, 张军, 许文海, 等. 激光跟踪仪现场测量不确定度的评定. 计量学报, 2005(26):20-22.
- [4] ARC Second, Inc. Product Literature, Company Web Site URL: <http://www.arcsecond.com>, 2003.5.
- [5] Kang S, Tesar D. A noble 6-DOF measurement tool with indoor GPS for metrology and calibration of modular reconfigurable robots, Istanbul, Turkey, IEEE ICM International Conference on Mechatronics, 2004.
- [6] 许国康. 大型飞机自动化装配技术. 航空学报, 2008(3):737-738.
- [7] 吴晓峰, 张国雄. 室内 GPS 测量系统及其在飞机装配中的应用. 航空精密制造技术, 2006,42(5):1-5.
- [8] 李清泉, 李必军, 陈静. 激光雷达测量技术及其应用研究. 武汉测绘科技大学学报, 2000,25(5):387-392.

(责编 小城)