

大型飞机装配中的数字化测量系统分析和研究

Analysis and Research of Digital Measurement System
in Large-Scale Aircraft Assembly

北京航空制造工程研究所 邹冀华 许国康



邹冀华

毕业于北京航空航天大学飞行器制造工程系航空宇航制造工程专业,现工作于北京航空制造工程研究所数字化柔性装配研究室。研究方向为数字化装配、数字化测量和数字化容差分配技术。

现代飞行器设计正在向着结构整体化、零件大型化、制造精密化的方向发展,如大型飞机机身直径可达5m,翼展超过50m,运载火箭芯级直径更是早已超过5m,这不仅加大了零件制造的难度,还提高了对装配的

飞机制造技术迅猛发展,其数字化测量技术在飞机装配中的作用越来越重要,地位越来越凸显。采用数字化测量系统不仅可以大幅度提升现代飞机装配的质量和效率,而且更能适应上层的飞机数字化设计,打通从设计、制造到装配的数字化、一体化流程。

质量要求。

国外装配技术的发展非常迅速,采用先进数字化技术来实现其精准装配,大量使用了数字化定义模型和光学测量定位技术、设备。国内飞机制造和装配方面还较薄弱,主要是因为有很高装配精度要求下没有系统的研究和运用,没有形成一套完整的体系。因此本文将详细论述大型飞机数字化装配中的数字化测量系统(Digital Measurement System, DMS)。

数字化测量系统的特点与原理

数字化测量系统是利用数字化设备和技术,以计算机控制来完成自

动、快速、精准的测量目的、任务和工作的组织体系。其作用和优势主要包括以下几点^[1-4]:

(1) 具有可进行大型测量工作的能力。

这对于当今飞机、宇宙飞船、运载火箭等飞行器的尺寸在不断增大的状况,更有价值。

(2) 虽然DMS比较复杂,成本较高,但是其使用生命周期长,长期运用在高成本的飞行器制造业中,从整个周期成本算来,其成本反而得到极大的节省。

(3) 能够简化工装,使之具有更强的通用性和柔性。如应用激光跟踪仪实现无定位件装配方案。

(4) 能够完成更加复杂的形位

测量任务。其动态实时测量能力可以完成多目标点位置数据的同时反馈与控制。

DMS 采用的数字化测量设备有激光跟踪仪、摄影测量仪、雷达扫描仪和 iGPS 等。它们的测量原理都是通过控制被测物体的 6 个自由度来确定其空间位姿的。在装配设计和制造过程中,在产品或工装的主要平面上预先设计出 3 个光学工具点 (Optical Tooling Points, OTP),并给出该产品或工装在正确位置上时这 3 点的理论坐标值,再由数字测量设备测量这 3 点,并通过计算机计算出各点的实际坐标值。由于实际值和理论值之间存在误差,适当调整装配对象的位置使测量实际值逐渐逼近理论值,当每个点的实际坐标值达到设计给定的理论坐标值的公差范围内时,即确定了产品或工装在装配中的空间正确位置。

数字化测量系统工作时还需坚持 4 个原则,即 3-2-1 原则、自由度分离原则、公差分配原则和主要平面选取原则^[5-6]。

DMS 将计算机、数字化测量设备和其他各种软硬件,以及数字化测

量手段融为一体,共同工作完成装配任务。其在装配中的应用原理如图 1 所示。从该工作流程框架图中可以看到,DMS 大致包含三大块内容:

(1) 计算机辅助测量样机设计系统环境 (Computer Aided Measurement Mock-up Design System Environment, CAMMDSE);

(2) 测量系统环境 (Measuring System Environment, MSE);

(3) 测量使用系统环境 (Measuring Exploitation System Environment, MESE)。

计算机辅助测量样机设计系统环境

CAMMDSE 主要是根据数字化测量需要,以产品(零部件、工装)为核心,对产品设计的三维数字模型库扩展与重组,生成以测量为目的的三维数字模型(数字样机),并包括工装的测量模型定义,初步建立有关测量方案、程序编制等的参数及文件。整套工作以计算机为依托,形成一套完整的设计环境。主要包含以下工作内容:

1 建立测量数字模型库

它是一套包含数字模型的测量数据集,应用于数字化测量的各个环节,也可用做装配后期检验数据集的依据。其建立过程如图 2 所示,建立依据是工程数据集。

从工程数据集中分离出 2 类模型信息:几何信息和非几何信息。几何信息即几何模型,主要是产品的三维空间图形,包括辅助的点、线和面等。

在生成测量用三维数字模型时可以根据需要对这些信息进行增删,提取所需的点线面信息,并基于此生成必要的测量三维数字信息。所有与测量相关的非几何信息都是以属性的形式出现的。根据所需描述的对象不同,可以将非几何信息内容分为以下几个方面:反映装配产品结构的属性信息,反映装配工艺要求的属性,反映测量环境的属性,检验文本和其他属性信息(如反映产品测量材料的属性等)。

另外,所建立和派生出的测量信息,还要经过审查部门和审查人员的校核。校核无误的情况下方可入库,确立测量用装配数字样机。在测量

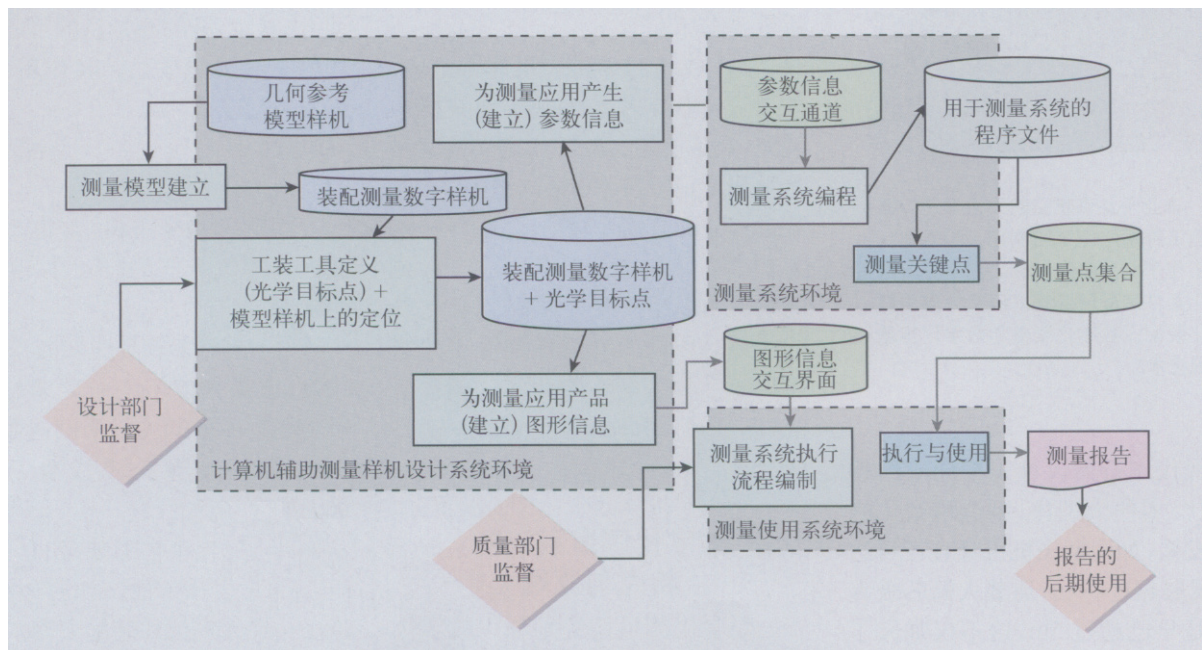


图1 数字化测量体系框架

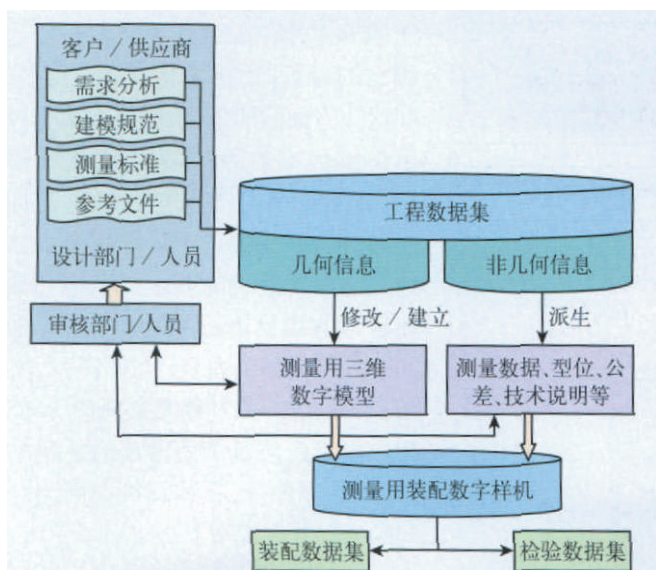


图2 测量数字模型库建立过程

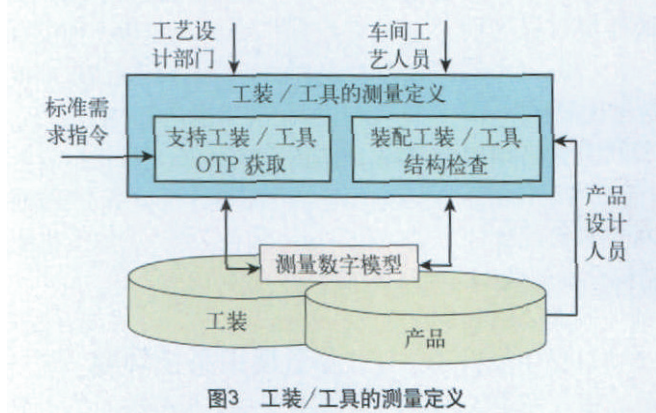


图3 工装/工具的测量定义

数字模型库建立过程中,还可对工程数据集和测量数字模型进行修正。

2 工装与工具定义

工装与工具定义是对工艺人员已经完成的工装、工具的装配模型的补充设计与完善。在飞机制造厂里有专门的工艺结构设计部门或科室,一般各个厂间也都有负责制造和装配的工艺人员组成的团队,他们的工作之一就是设计单位发放的产品工程数据进行工装设计。而这里就是为了完成测量的需要,对这些设计好了的工装、工具数字模型做检查,并补充相关必要测量信息,内容主要包括工装/工具的 OTP 获取和装配工装的结构检查,如图 3 所示。

(1) OTP 获取。

对于采用装配工装完成的装配

过程,OTP 主要设置在工装型架和定位器上,并可根据测量需要做适当调整。

以空客新型 A340-500 的中央翼盒与中后部油舱部件为例,提取中央翼盒的连接长桁与蒙皮的连接长桁装配的需要设计安装定位器时,由于空间非常紧凑,OTP 的测量拟定使用延长杆的方式。对于采用零部件之间直接连接装配的方式,OTP 应设置在零部件上。对于定位销安装零件,则在销钉位置附近设置 2 个 OTP 点。布置和定位情况类同于

用工装及定位器定位时 OTP 的布置情况。第 1 个点要偏离销子表面 8mm,第 2 个点距第 2 个最小偏离值为 25mm,即两点连线在销钉压入孔方向(销钉轴向)的法平面内。只有当销钉轴线方向上产生零件定位影响时,才需要第 2 个点。当然,采用数字化装配系统后,不提倡使用销钉定位,为了提高精度和易检测性,最好使用零件上的定位面来直接定位。

(2) 装配工装结构检查。

此环节主要是由工装设计部门、车间工艺人员和产品设计人员共同参与来完成的。根据设计标准、工艺需求和技术条件等来进行检查,包括装配工装和测量辅助工装的测量基准、OTP 复查、测量所需几何和非几

何结构复查等。例如为了避免测量设备不必要的移动,可将工装按一定顺序依次编号,便于测量。检查结果对测量数据模型会有一定影响。

3 指导性方案文件

主要目的是生成各种后续工作所需的电子或纸质文档,并提供给审核人员、专家及领导审阅。其中包括以下几类。

(1) 操作规程文档。

该文档是以文字形式提供的详细操作方法、技巧经验和注意事项等内容的工艺性文件,用于描述 DMS 测量过程中较为复杂、繁琐或应重点注意的操作项目。

(2) 参数化文件。

主要是记录 DMS 所传递的数字化信息,可以分为 2 类。一类是参数化的几何信息。由于测量过程的复杂性和重复性,对于一些几何信息,有时必须将其数据提取出来,以文件的形式列表记录。另一类是编程需要的规范文件。在 DMS 中,编程主要有 2 方面:一方面是对测量设备厂商提供的现成软件系统进行二次开发或重新编制;另一方面是对测量数据进行后置处理,以及编制与机电控制系统联系的接口控制程序。

(3) 图形文件。

图形文件就是将计算机中三维数字化模型或二维图纸存入磁盘介质,打印、存档、发放并传递,或通过网络共享使用。

测量系统环境

MSE 主要是根据之前 CAMMDSE 的工作结果和初步测量方案,按照指导性方案文件的各种规定,详细制定 DMS 的工作步骤,并进行相关程序的编制的。另外,对数字化测量过程还可进行模拟仿真,预先进行一定程度的定性分析,生成一些可预知结果。这部分的工作流程如图 4 所示。

1 详细测量程序设计

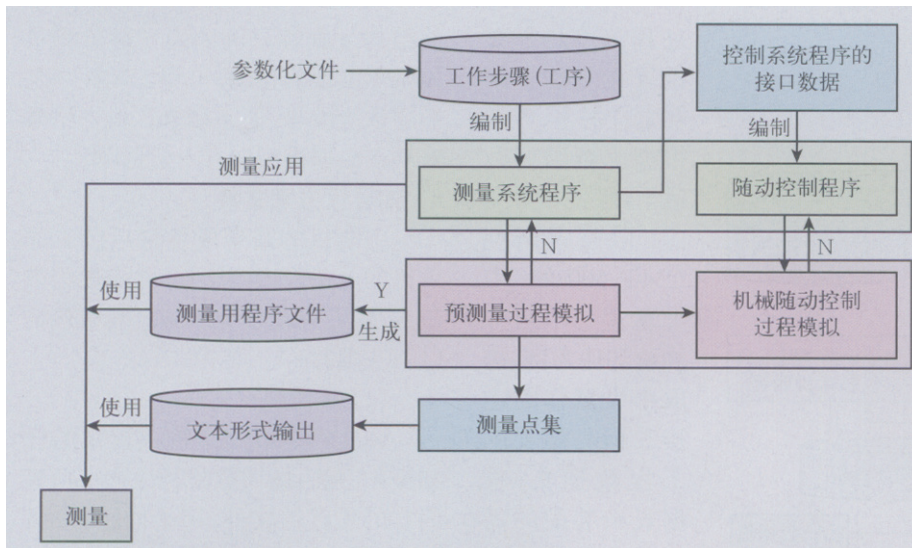


图4 测量系统环境的工程流程

(1) 完善测量计划。

使用DMS必须对其测量流程的每一步环节都进行详细安排和设计,这一项内容就要对所进行的测量工作流程进行详细的设计和完美。可以采用自编软件程序实现测量工作的自动进行,并可根据测量内容的不同更改程序,具有较强的针对性和自主性。其实,在现有大型测量软件中已经考虑到了这个需求因素,因此产生了“测量计划”(Measurement Planning, MP)功能。即先列出每一步功能的计划表,然后在软件的MP列表中添加每一步功能操作,最后保存并运行“执行MP”命令进行工作^[7]。

(2) 装配测量软件编程设计。

由于大型飞行器的测量工作具有一定的复杂性和专用性,现今世界各大航空航天制造厂商都会专门聘请专业设计公司或人员,为其每个机型设计专用的程序系统,包括各种硬件所使用的程序。这种方法虽然缺乏通用性,但是可以更好地完成某些特定工作,特别是对于批量生产的大型飞机制造而言更为合理和划算。这类程序一般可在现有测量软件的基础上,利用测量设备生产厂商提供的接口函数来编制。

(3) 机电控制软件接口程序设计。

在大型飞机的数字化装配中,需要一种能够利用计算机直接自动控制装配运动的功能,而DMS必须能够根据测量数据分析出被装配部件下一步所要运动的精确位移矢量,才能让伺服系统更好地控制调姿机构运动。这就需要一类接口程序与测量软件、伺服控制系统相互完美连接。

2 测量过程模拟分析

(1) 工作模式。

这与飞机制造其他环节的仿真模拟(如设计预装配)具有类似的原则,即通过计算机,将测量软件、测量计划和控制软件相互关联,并建立装配平台的数字化映象,将装配对象的三维数字化模型在计算机中实现装配过程的模拟。对整个装配测量过程的模拟结果进行分析,并根据分析结果修改程序参数、装配过程计划流程以及数字模型结构等,并重复进行测试,直至满足必要的精度和误差等不确定性要求为止。

(2) 模拟分析的内容。

在测量过程模拟中,模拟的确定性是指输入数据的确定性、过程模型结构的确定性以及各个过程对象属

性的确定性。如果这3个方面都是确定的,则称为确定性模拟;反之,在这3方面的因素中,只要有1个因素是不确定的,则称为不确定性模拟,即随机模拟^[8]。这里,输入数据一般为DMS在一次装配测量中初始的已知数据,如装配初始状态和最终状态的测量值。过程模型结构则为装配流程相关内容,如操作规程文档和MP等。而过程对象则是DMS在一次装配测量中所涉及的装配平台、产品零件等,在计算机中则为它们的三维数字模型。

一般地,DMS系统的过程模拟分析应是确定性模拟分析,但不排除在某些因素不完全的情况下也需要进行模拟分析,则称为不确定性模拟分析。后者的分析内容更有限,难度更大,且结果的不确定性影响更多。因此,只明确一般的确定性模拟分析原则上包括了可操作性分析、视线通路分析、误差精度分析、了解工作流程和经济性因素等内容。

测量使用系统环境

MESE是DMS系统的第3个组成部分,其目的就是操纵各软硬件设备实际完成飞机数字化装配中的测量工作,并根据测量方案和实际测量结果进行分析和检查,生成必要的报告,记录数字化测量系统每次工作的情况,以备未来之需。MESE工作的整体框架如图5所示。

1 整合DMS测量流程和执行DMS测量过程是核心内容

整合DMS测量流程由CAMMDSE信息和MSE信息经图形交互界面,确定出用于最终实测的工作流程,例如本次测量需要测哪几个OTP点位,测量过程分哪几步,需要使用哪些图形图象和软件程序等。对DMS测量流程整合时,需要注意以下几点。

(1) CAMMDSE和MSE信息是否完整(正确性应该在前期已经得

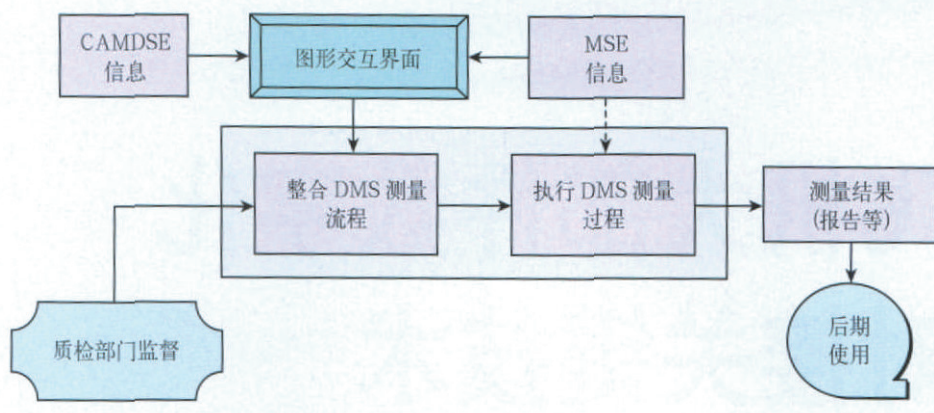


图5 MESE工作框架

对具体的装配环节进行详细的测量设计,如相关程序的编制、测量值对自动调整机构及其控制系统的数据反馈验证等。

飞机制造技术迅猛发展,其数字化测量技术在飞机装配中的作用越来越重要,地位越来越凸显。采用数字化测量系统不仅可以大幅度提升现代飞机装配的质量和效率,而且

更能适应上层的飞机数字化设计,打通从设计、制造到装配的数字化、一体化流程。并且对我国新一代飞机制造技术赶超国际先进水平,增强我国航空制造业国际竞争力,带动飞机生产模式的深刻变革,以及实现飞机敏捷制造,都大有裨益。

参考文献

- [1] Large Scale Mapping & Alignment. Technology Application by Materials & Process Technology. The Boeing Company, 2002.
- [2] John Hartmann, Peter Zieve. Wing manufacturing: next generation. SAE Aerofast Proceedings, 1999(4): 9-14.
- [3] Muske S, Salisbury D, Calkins J. 747 data management system development and implementation. Long Beach: Boeing Large Scale Metrology Conference, 2000.
- [4] ASME Y14.5M-1994 Dimensioning and Tolerancing. American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [5] 刘舒红. 数字化技术在装配工装研制中的应用研究. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [6] 程宝蓁. 飞机制造协调准确度与容差分配. 北京: 航空工业出版社, 1987.
- [7] New River Kinematics. Spatial Analyzer User's Manual. 2004: 474.
- [8] 张莉, 王雷. 过程模拟技术及其支持环境 PMSE. 软件学报, 1997(6): 565-575.
- [9] Miller Susan. F/A-18E/F inner wing skin assembly and the use of laser measurement. St. Louis: The Boeing company, 2002.

(责编 淡董)

到证实)。

(2) DMS 测量流程是否兼顾了 CAMDSE 和 MSE 中的指导性意见, 即最终测量过程不得违背 CAMDSE 和 MSE 中可能提到的各种约束与规则。

(3) 对测量流程的评价。如优劣、难易和专用性程度等, 在未采用预模拟的情况下, 可由专家或有经验的使用者依据经验做一般评定。

(4) 所需各种软硬件等是否齐备。

2 执行 DMS 测量过程(即测量过程的实现)

测量过程应在设计的受控条件下实现, 以满足计量要求。受控条件应包括: 使用经确认的设备; 应用经确认有效的测量程序; 可获得所要求的信息资源; 保持所要求的环境条件; 使用具备能力的装配、测量人员; 产生合适的结果报告方式; 能按规定实施监控等。

在开始执行装配测量工作时还要制定一个时间进度表, 大致规划测量工作每个环节、步骤的时间段长短与节点安排。这样可以做到心中有数, 而且在测量过程中实时参照进度表调整装配与测量的节奏, 在最终完成时也可及时做出总结。例如 F/A-18E/F 战斗机在进行机翼内蒙皮与长桁、梁装配在一起时, 使用数字光学测量设备来保证自动钻铆的位置精度和深度准确, 并制定了测量过

程的工作进度表, 测量装配效率得到极大提高^[9]。

3 质量控制

在 DMS 的使用中, 同样需要优良的质量控制(Quality Control, QC), 即对系统品质进行监督、检查与控制, 使之满足用户或使用者的使用需求。在实际生产、装配中, 工厂或制造部门可以建立专门的质检机构或小组负责此方面的工作。质检应伴随从设计到装配的整个过程。对于现代飞机越来越多地采用数字化装配和测量技术手段的情况, 该项工作就更显尤为重要。

另外, 通过对 MESE 最终测量结果的分析, 还可为后期工作起到指导和参考作用。以前文提到的 F/A-18E/F 战斗机机翼蒙皮壁板装配为例, 从记录的报表和测量结果得知, 实际测量操作时间远远小于前期准备与后期工装设备拆卸时间的总和, 这说明测量难度降低了; 此外, 测试表明, 该机采用数字化装配时的激光测量的重复性精度不超过 0.003 英寸(7.6 道, 0.0076cm), 因而以后可用于该级别精度的装配测量工作。

结束语

本文系统地对数字化辅助装配测量技术进行了阐述, 使之可以更好地运用在飞机装配过程中。根据对 DMS 划分的 3 个部分内容, 就可以