

基于测量数据的飞机数字化预装配技术

Aircraft Digital Preassembly Technology Based on Measured Data

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 罗振伟 梅中义

[摘要] 在大型飞机部件数字化柔性装配过程中,经常出现由于零部件制造误差、工装安装误差、零部件受装配应力变形而导致的干涉问题。通过对每个装配件外形数据进行采集、分析,提取实际关键尺寸数据,构建检测模板,并根据实测数据进行预装配,可以提前发现干涉问题,并能对装配质量进行预评估。

关键词: 数字化预装配 数字化测量 装配干涉

[ABSTRACT] In digital flexible assembly process of the large aircraft component, part and component manufacturing error, equipment installation error, and error created by assembly stress deformation often cause the interference problem. Through collecting and analyzing the shape data of the assembly component, extracting the key dimension data, building checking template and making the preassembly based on the measured data, the assembly interference can be found in advance, and the preliminary evaluation of the assembly quality can be also completed.

Keywords: Digital preassembly Digital measurement Assembly interference

由于现代飞机对轻质、经济、安全和长寿命有更高要求,传统的飞机部件装配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,很难满足需求。现代飞机部件装配精度在很大程度上决定了飞机的最终质量,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^[1]。

在大型飞机数字化装配过程中,传统的数字化预装配是根据统一的三维理论模型进行虚拟装配,进而检测装配过程中出现的干涉情况,提前解决干涉问题。但在实际装配过程中,由于零部件的制造精度、装配精度、工装制造精度、工装安装精度等问题,仍然会出现干涉现象,对此类问题只能通过修配解决。数字化柔性装配过程中,根据零部件的某些关键特性是否到达理论位置决定装配是否完成,而对装配质量的检测则包含更多的要求,如同轴度、轮廓度等。测量点即使达到理论位置也

未必能保证其他指标满足要求,无法对装配结果进行合理评估,没有对装配精度提升贡献出原有价值。

1 实测数据模型预装配技术概述

传统的数字化预装配是在计算机内部,以装配件理论模型为仿真数据模型,进行装配动作仿真,实现对装配操作流程的优化及装配干涉的检测。数字化预装配替代实物形式的预装配过程,方便快捷,可以在一定程度上节约装配成本和时间,能对因设计不当引起的装配干涉作出有效的预测。

基于测量数据的数字化预装配技术(即实测数据模型预装配技术)是针对传统数字化预装配中无法预测实际情况干涉、无法进行装配质量预评估等不足而提出解决方法,是通过提取零件的实际数据,在实测数据的基础上进行装配仿真的技术,如图1所示。

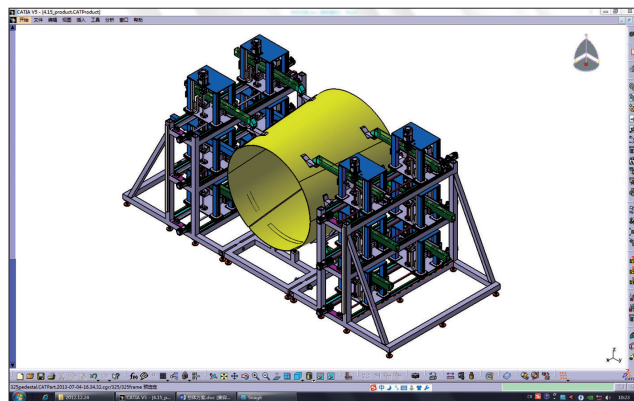


图1 CATIA数字化预装配仿真
Fig.1 Digital preassembly by using CATIA

实测数据模型有两种形式。一种是点云形式,数据来自数字化测量设备采集的零件外形数据,包括关键点、基准点、关键特征外形数据、重要轮廓边界、曲面外形数据等,主要是依据零件精度检测数据集、装配检测数据集,制定点云的测量方案。点云数据经过匹配拼合、按精度需求压缩后,便得到点云形式的实测数据模型。另一种是数模形式,零件外形数据采集和上述方式相同,但获取点云数据后经过测量软件分析。获取关键尺

寸的方法是实测数据,更改数模对应尺寸,即得到实测数据模型。

对于不同形式的实测数据模型预装配方式也不同。对于点云形式的模型是通过点云配准实现装配,基于测量数据进行干涉分析^[2];对于数模形式的模型是采用类似于传统的预装配方式,通过工程软件进行干涉检测。

2 实测数据模型预装配技术的关键技术

传统的数字化预装配过程中,仿真操作对象均为理论模型,并未根据实物零件的情况进行仿真,可能会导致强迫装配,使装配件因装配应力发生变形,后续装配无法进行。

基于实测数据的数字化预装配需要对实际零件进行数据采集、精度检测,根据采集的实际模型信息进行位置配准、实测模型预装配、干涉分析等工作。因此,基于实测数据的预装配技术涉及到数字化测量技术、模型位姿调整方法、数字化精度检测技术和数字化预装配技术。

2.1 数字化测量技术

随着数字化装配技术的在航空领域的推广,数字化测量技术作为其关键技术已经日趋成熟,测量技术种类繁多且各有独到之处。常用的测量设备有室内 iGPS、激光雷达、激光跟踪仪、三坐标测量机、三维摄影技术。测量系统中,配置室内 iGPS 可以满足大尺寸和全覆盖的需要;布置激光雷达可以满足部件外形测绘和检测的需要;引进激光跟踪仪可以满足装配型架调整和工业机器人全位置反馈的需求。结合装配过程中对测量环境的便利性、高速性、精准性、实时性要求,综合几种测量技术的优势,构建数字化测量系统。

2.2 模型位姿调整方法

模型位姿调整是指根据实测位置数据与理论位置数据,调整待装配零件位姿到理论位置,这里的模型位姿调整主要是针对点云数据模型。

点云模型中包含大量的随机点,这些随机点并不是孤立存在,它们之间具有某种内在的联系和规律性。点云模型的统计特征是指能够表达点云模型中大量随机点内在联系和规律性的特征对象。点云数据位姿调整是基于点云的统计特征完全匹配调整的,即通过调整自由模型与固定模型的一个或多个对应统计特征重合或一致来实现模型的调整^[3]。

点云的统计特征主要包括定向特征 p 和定位特征 v 。其中,可以完成完全匹配的特征组合如表 1 所示。在实际的数字化装配过程中,较多以 $3p$ 完全匹配方式完成姿态调整。

表1 完全匹配特征组合表

形状特征组合	包含的统计特征组合
锥面 + 锥面	$p+2v$ 或 $2p+v$
锥面 + 旋转面	$p+2v$
锥面 + 球面	$2p+v$
锥面 + 平面	$p+2v$
锥面 + 拉伸面	$p+2v$
旋转面 + 旋转面	$p+2v$
旋转面 + 球面	$2p+v$
旋转面 + 平面	$p+2v$
3 个球面	$3p$
2 个球面 + 平面	$2p+v$
2 个球面 + 拉伸面	$2p+v$
球面 + 2 个平面	$p+2v$
球面 + 平面 + 拉伸面	$p+2v$
球面 + 2 个拉伸面	$p+2v$
3 个平面	$p+2v$

2.3 数字化精度检测技术

作为数字化测量系统关键部分之一,数字化精度检测技术有很成熟的应用。在软件层面上,如 SA、Power Inspect 等通用测量软件都有很强大的功能,可以完成基本类型公差检测,兼容大部分的测量设备,输入输出文件均能与工程软件 CATIA、UG 等直接兼容。以 Power Inspect 软件为例,软件包括测量工具校准、点云坐标系对齐、几何特征检测、形位公差检测、曲面检测、边缘检测、截面检测、生成检测报告,基本上涵盖了所有检测功能。

2.4 数字化预装配技术

数字化预装配技术是结合现代计算机技术,根据产品数据集中的数字化装配模型信息,通过模拟仿真全面地描述产品装配信息,将产品的装配状态与过程在计算机内进行虚拟实物复现,并进行装配仿真装配规划和装配质量性能验证等。以此验证产品的可装配性,便于及时发现产品装配设计和装配规划中的缺陷与错误,指导设计者进行改进^[4]。

2.5 装配干涉检测技术

装配干涉检测是确定在同一区域内、同一时间下是否有多个物体占有的问题。主要涉及到接触情况分析、接触区域求解、物体间隙距离求解、相互穿透程度求解等问题^[5]。

由于大型飞机蒙皮类零件刚度差且尺寸大,装配过程中容易出现变形,导致产生干涉。一般情况下,对于产品零件数量较多、装配关系复杂、需要大量制造资源的情况,可以通过 CATIA 等工程软件完成干涉检测。但这种检测方式不能反映出真实装配的情况,在实物零

件制造存在误差以及装配时零件产生变形的情况下,仿真所显示的装配情况会与真实装配情况不同。

3 实测数据模型预装配技术的实施过程

实测数据模型预装配技术主要适用于大型部件的装配仿真,如大型飞机机身部件的数字化装配、机身机翼对接等。这些部件尺寸大,由于装配误差的累积、制造误差、刚度差等原因,装配过程中易出现干涉问题。以下结合某飞机机身部件数字化柔性装配系统阐述实施过程。

飞机机身部件数字化柔性装配是结合数字化测量技术,使用机械随动定位装置来支撑和夹持飞机装配件,并在装配件的定位基准点上安装光学靶球,通过激光跟踪测量系统测量装配件上的光学目标点位置,获得定位基准点位置信息,在数据处理系统里将该位置信息与产品工程数据集给出的基准点目标位置进行比对处理,得到装配件装配位置的修正值,将修正值传递给运动控制系统,驱动多个机械随动定位装置协调装配件的位姿,直到装配件的位姿达到公差允许范围内,从而实现装配件间的精确定位^[5],装配系统如图2所示。

大型飞机机身部件数字化装配系统的软件平台包括两个部分,实时动态测量模块和预装配仿真模块。前者是实时测量和监测装配件的位置信息,给装配控制系统提供反馈,以完成高精度的装配工作;后者是在装配之前,对机身部件零件进行数字化预装配仿真,检测装配过程中出现的干涉问题。

针对大型飞机机身部件数字化装配中出现的干涉问题,实测数据模型预装配的实施过程包括数据准备、点云数据采集预处理、建立检测模板、零件精度检测、干

涉检测。图3为实测数据模型预装配实施流程图。

3.1 数据准备

为了便于后续精度检测、模型配准、检测模板制作等工作的顺利进行,先对工程数据集进行数据提取。提取数据主要包括:壁板、底板、底框等待装配件的理论模型,各装配件的质检要求信息及提取装配体的质检要求信息,提取装配基准坐标系信息。

对于基于CATIA二次开发的系统而言,可以直接依据这些数据建立理论基础数据集,供后续数据处理使用。飞机机身部件数字化装配系统是以OCC为二次开发内核,需要预装配理论数据集建立数据库,以管理这些信息。

3.2 零件点云采集

在实测数据模型预装配过程中,数字化测量系统的职能包括采集各待测零件尺寸数据、测量各基准点数

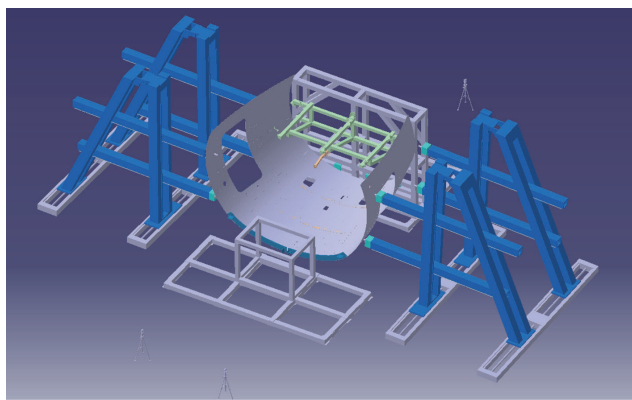


图2 大型飞机机身部件数字化装配系统

Fig. 2 Digital assembly system of large aircraft fuselage component

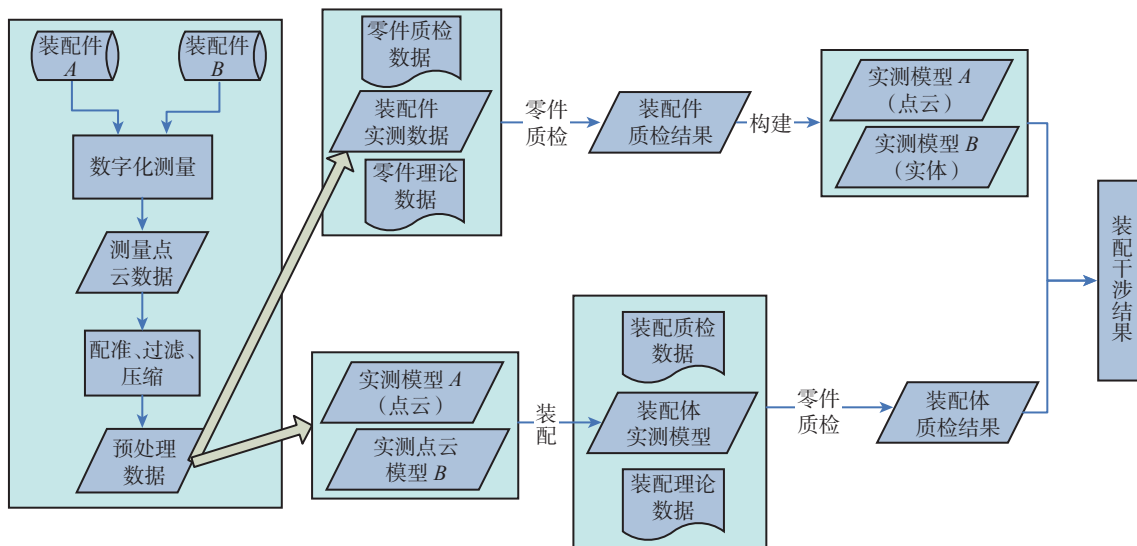


图3 实测数据模型预装配实施流程

Fig. 3 Preassembly process based on measured data model

据。测量系统可以由单一的测量设备组建,也可以由几种测量工具的混合组建。

通过激光跟踪仪、三坐标测量机等测量设备获取关键点、孔、边界的数据,对于有外形要求的零部件可采用三维摄像、激光雷达等测量设备获取曲面点云数据。数据测量完成后,对数据进行编号保存。

点云数据由质检部门提供。在整个飞机制造过程中,为每个主要装配件建立关键尺寸数据库,记录每次质检的结果及检测数据。这样不仅方便质检的审核与管理,也方便装配仿真。

机身部件数字化装配中,主要考虑装配后壁板边界的干涉现象,所以需要对壁板边界轮廓进行测量,此外还有其他一些孔位的测量内容,在不增加测量难度、测量成本的情况下,获取更多的零件外形数据。

3.3 点云数据预处理

装配件的点云数据采集完成后,零件的测量数据可能不止一个文件,比如测量过程中出现转站,测量设备混合使用等,对点云数据配准,一般采用三点式完全匹配法。

此外由于测量设备自身原因、人员操作失误、环境干扰等因素,测量数据中会出现噪点,应对数据进行过滤。如果数据量较大,在不影响检测精度的情况下,对数据进行适当压缩。

3.4 建立检测模板

检测模板是指包含了零件质检要求的数据,通过对点云数据进行分析,获取检测结果。对于同一类型的点云数据,如侧壁板所对应的点云数据,建立一个检测模板,使系统能自动根据导入的点云数据生成质检要求的报告文档。检测模板的依据是检测数据集,针对不同的装配零部件,检测模板是不同的。

在飞机机身部件数字化装配系统中,建立了理论轮廓线、理论平面、理论点位和理论曲面外形等检测模板数模,并在装配系统内建立检测模板数据表、检测报告表,负责管理模板文件及理论数据。模板数据表的属性包括编号、检测批次、检测类型、检测数模名称、检测数模文件路径、检测说明、检测阈值;检测报告表的属性包括编号、检测批次、检测类型、检测值、是否合格、检测日期、检测结果说明。由上述的理论数模和数据库表组成检测模板。

3.5 零件精度检测

装配件的精度检测方法有两种:测量软件检测和系统检测功能模块检测。

对于通用软件检测,常用的通用软件有 SA、Power Inspect 等,这些软件能支持工程软件的数据格式,可以非常方便地建立检测的模板,并对同一类型的点云进行

质量检测,生成的检测报告文件。但由于此类软件一般不开放二次开发接口,很难实现与系统的集成,精度检测过程需要人工干预。

在飞机机身部件数字化装配系统中,精度检测作为系统的一个功能模块。精度检测涉及到基准点位校准、轮廓精度检测和外形检测。通过三点型统计特征完全匹配定位方法完成点云模型与检测模板数模的匹配,根据检测数据表的要求对点云相应部分进行精度检测生成检测报告。

作为系统的附属模块,系统也可直接导入测量软件生成的工程软件格式(如 CATIA 格式)的检测报告文件。操作人员获取预处理点云后,用测量软件进行精度检测后生成报告文件,系统通过对此类文件信息的提取获取检测数据。

3.6 装配干涉检测

在装配系统中,装配干涉检测方法根据实测模型的类型分为两种干涉检测方式,分别是点云数据装配干涉检测和修改模型预装配干涉检测。

在点云数据装配检测方式中,实测模型是预处理点云数据。每个装配件的预处理点云根据统计特征匹配完成位置调整,或根据装配理论数模中测量点的理论位置完成位置匹配。点云数据装配后,对装配点云数据进行质检,分析干涉现象,并对装配质量做出预评估。

在修改模型的装配检测方式中,数据模型先根据各零部件的点云数据的质检结果修改零件模型。修改后的模型导入 CATIA 进行常规的数字化预装配,检测模型装配指标并分析干涉现象。出于系统整体的统一、操作的便捷性要求,系统提供了数模的干涉检测分析功能,如图 4 所示,目前,项目中对干涉的检测主要通过修改数模装配仿真方式实现。

相比较两种装配方法,前者适合模型较为复杂的处

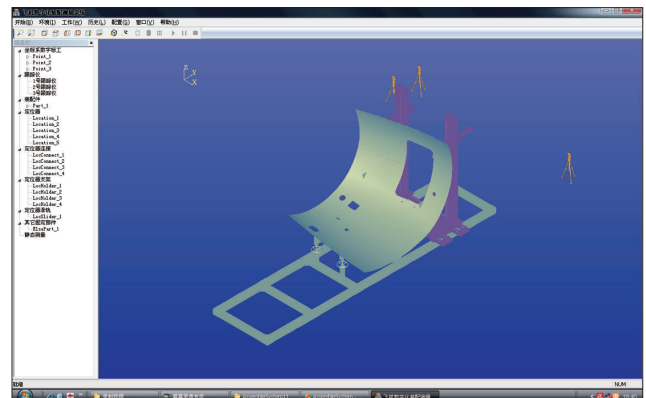


图4 机身部件装配干涉检测仿真
Fig.4 Interference simulation of aircraft fuselage component assembly

(下转第 108 页)

由差压检测仪的旁路充气/配气系统保证。采用带罩盒吸枪法进行检漏(图6),以消除周围环境对检漏区域的影响,吸枪位置及移动速度参考相关标准,并由试验进行验证。

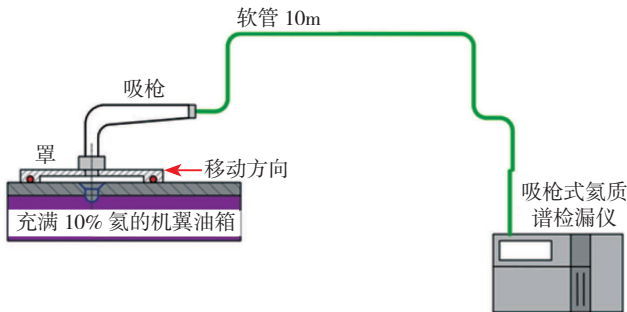


图6 氦质谱带罩盒吸枪法检漏示意图

Fig.6 Diagram of leak testing method using helium mass spectrometer with suction pistol and shroud box

差压法整体检漏大容积油箱充压变形及环境因素等对总漏率影响的消除。主要从以下几个方面来考虑:

(1) 差压检漏时测量温度、压力等对漏率值的影响;

(2) 借助一定的数据处理技术可将测量数据中的漏源和非漏源的因素区别开来,并将非漏源因素消除;

(3) 如经试验发现由于充压变形及温度等环境因素影响造成的数据波动与整体油箱总漏率合格指标相比较小,则其影响可以忽略。

整体油箱差压法总漏率检测检漏条件及合格漏率指标的确定。在进行差压整体检漏时,根据混合气体压力、氦浓度、检测时间、充气时间、平衡时间等的不同组合来进行试验。结合效率、精度和成本等因素的考虑,确定较优的检测条件。根据所确定的检测条件,按照总体方案的途径确定与油密试验压降法压力变化检漏相当的合格漏率指标。

在国内飞机制造中,部分主机厂已经将差压法整体检漏与氦吸枪法单点漏源检漏应用于整体油箱检漏中,并取得了很好的效果,这将促进先进检漏技术与检漏设计技术条件相结合,最终会实现用先进检漏方法取代传统气密试验和油密试验的目标。

5 结束语

航空领域传统的气密试验和油密试验存在着灵敏度低、效率低、操作人员劳动强度大、有安全隐患、没有量化等优点,难以满足新一代航空产品高密封可靠性的需求。在国内航空产品的设计、制造、使用和维护中急需采用先进的检漏方法。航空密封结构应用先进检漏技术和方法,建议采取如下实施措施:

(1) 积极推动先进检漏技术的交流和应用;

(2) 加快航空行业检漏方法标准的制订;

(3) 以航空产品设计院所为主导开展面向先进检漏方法的设计密封技术条件的制订和应用;

(4) 各主机厂等航空产品制造商大力开展先进检漏方法的工程应用研究;

(5) 开展航空密封结构先进检漏规范的制订和应用;

(6) 针对航空产品进行先进检漏系统技术要求的研究、制订和配置;

(7) 航空领域各检漏技术应用单位积极开展和参加航空领域检漏人员的培训和资质认证。

参考文献

- [1] 范玉青,梅中义,陶剑.大型飞机数字化制造工程.北京:航空工业出版社,2011.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局.GB/T 12604.7—1995 无损检测术语 泄漏检测.北京:国家质量监督检验检疫总局,1995.
- [3] 吴孝俭,闫荣鑫.泄漏检测.北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 闫荣鑫.常用密封检漏方法的注意事项.飞机先进泄漏检测技术交流会技术资料集,2013.

(责编 良辰)

(上接第 102 页)

理方式,精度较高,但需要编制复杂的干涉评估程序;后者适用于模型较简单、模型参数修改方便的情况,操作方便、不需要编制程序,当零件复杂时,精度会偏低。

4 总结

在大型飞机机身部件数字化装配过程中,易出现因理论数模和实际装配数据不一致导致的装配干涉现象。通过基于测量数据的数字化预装配方法可以在一定程度上,对干涉情况进行预测,并能对装配质量进行预评估。随着数字化测量技术的普及应用,高精度、自动化地获取装配实测数据越来越容易,基于实测数据数字化预装配技术在飞机装配领域将会得到更为广泛的应用和研究。

参考文献

- [1] 李泷泉,黄翔.飞机装配中的数字化测量系统.航空制造技术,2010(23):46-50.
- [2] 范玉青,梅中义,陶剑.大型飞机数字化制造工程.北京:航空工业出版社,2011:857-859.
- [3] 李剑.基于激光测量的自由曲面数字化制造基础技术研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] 戴国洪.数字化预装配建模与序列规划技术的研究[D].南京:南京理工大学,2007.
- [5] 梅中义,朱三山,杨鹏.飞机数字化柔性装配中的数字化测量技术.航空制造技术,2011(17):43-48. (责编 日午 亦非)