

# 基于不确定度的柔性装配测量方案规划技术

## Measurement Planning Technology Based on Uncertainty for Flexible Assembly

国防科技大学机电工程与自动化学院 李国喜 吴宝中 龚京忠 杨景照

**[摘要]** 目前数字化测量技术已成为飞机柔性装配的关键技术之一,数字化测量过程所引起的不确定度问题是其中的研究热点。基于新一代产品几何技术规范,构建了涵盖不确定度评估、方案规划及测量数据后置处理一体化的测量系统的总体技术框架,并就其中的关键技术做了初步探讨。

**关键词:** 柔性装配 测量方案规划 测量不确定度

**[ABSTRACT]** Digital measurement technology has now become one of the key technologies of aircraft flexible assembly. Uncertainty caused by digital measurement is one of the hotspot. Based on the next-generation geometrical product specification, the overall technical framework of the measurement system is constructed, which covers uncertainty assessment, scheme planning and integration of measuring and data-processing. Some key technologies in the field are discussed

**Keywords:** Flexible assembly Measurement planning Measurement uncertainty

柔性装配技术是一种能适应快速研制和生产及低成本制造要求、设备和工装模块化可重组的先进装配技术。它与数字化技术、信息技术、计算机控制技术相结合,形成了自动化装配技术的一个新领域<sup>[1]</sup>。其中,数字化测量手段(如坐标测量机、激光跟踪仪、iGPS系统等)近年来广泛应用于飞机柔性装配测量中,用于飞机部装、总装过程中辅助定位、装配。测量辅助装配技术(MAA)在波音、空客等公司已经成功应用。但是,数字化测量系统的准确度和测量结果的质量问题还没有得到系统研究,没有形成一套完整的评价体系。目前,飞机柔性装配测量过程中存在的主要问题有:

(1) 测量设备(CMM)、测量环境、测量方法、测量系统和测量程序、计算机表达与数据处理(滤波、拟合、粗大误差剔除等)过程、操作人员的技术水平、被测量的各种随机影响和变化等因素都会带来很大的测量不确定度。因此,测量方案规划是否合理对测量结果有很大影响。如测量坐标系的标定、测量点的数量、测量位置、测

量路径、滤波方式和拟合算法、形位误差计算方法(如最小包容方法与最小二乘法)、计算机截断误差等。

(2) 直接使用CMM供应商系统,只提供了CMM的仪器不确定度,没有针对具体算法和步骤给出不确定度,而实际测量中后者对测量精度很可能产生很大影响。

(3) 数字化测量的不确定度评价与传统不确定度评价所需技术并不完全一样,传统方法对数字化测量并不实用,需要较强的数值稳定性分析能力。

## 1 新一代GPS与不确定度理论

GPS(Geometrical Product Specification and Verification)是几何产品技术规范与认证的简称。新一代GPS以计量数学为基础,将不确定度作为联系几何产品“功能描述、规范设计、检验/认证”的纽带。目前,在飞机柔性装配测量过程中,各种数字化测量手段(如坐标测量机、激光跟踪仪、iGPS等)都会引入相当大的不确定度。其中,测量设备的性能、测量策略和数据处理是影响不确定度的几个至关重要的因素。新一代GPS中对不同的测量设备制定了相应的性能评估标准。在实际测量过程中,可以根据具体的测量任务来选择测量设备并进行评定校准。另外,基于新一代GPS的分离、提取、滤波、拟合、集成、构造、评估等规范和认证操作算子来规划测量方案,指导测量过程的实施,将会大大减小测量的不确定度,提高测量的质量和效率。

## 2 研究方案和技术途径

### 2.1 研究方案

面向飞机柔性装配测量要求,综合考虑坐标测量机(激光跟踪仪、iGPS等)、取点策略(位置、方式、点数等)及第二代产品几何技术规范(GPS)要求,以最小不确定度、最高测量效率等为目标研究测量方案规划技术、不确定度仿真估算技术及后置处理自动化技术,开发飞机柔性装配坐标测量集成系统,从而提高测量结果的可信度,提高测量效率。整体技术方案如图1所示。

对于坐标测量来说,除了传统CMM引入不确定度外,采用不同的算法库代入的不确定度亦不可忽略,而由算法引入的不确定度估算难度较大,且无通用的解决

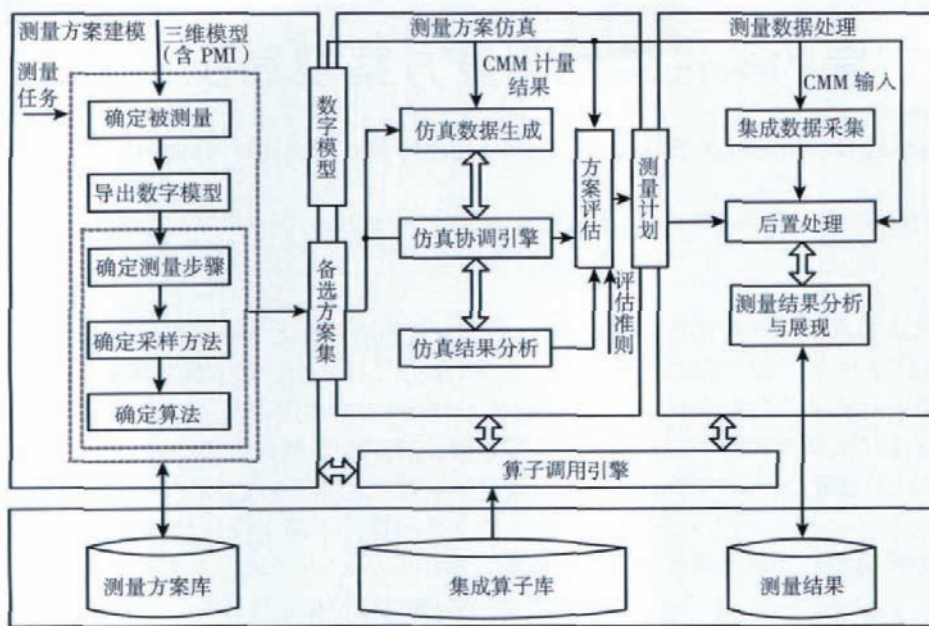


图1 测量方案规划、仿真与后置处理方案

Fig.1 Framework for measurement planning, simulation and post processing

方案,因此引入数值仿真是必然的。

(1) 系统以测量任务和三维模型为基本输入,通过CAD平台二次开发导出被测型面的数字模型,结合已有测量方案实例,确定测量步骤及每步所涉及的采样方式、点数和算法,构建可行测量方案。

(2) 利用CMM系统计算结果、数字模型生成仿真初始数据,利用该数据经仿真协调引擎调用方案所规定的算法,得到测量结果,然后对这些结果进行不确定度的统计估计。

(3) 依照不确定度预估结果及其他评估准则选定一个测量计划。

(4) 开发集成数据采集模块获得CMM输入,进行自动化后置处理,并进行可视化展现。

## 2.2 技术途径

(1) 测量方案建模技术。

对CAD平台进行二次开发,导入产品CAD模型,该模型不仅限于产品模型,还包括装配过程中零部件、柔性工装等场景信息。选择合适的坐标系,导出面型、定位面等关键被测对象的数字模型。该模型对规则表面为参数向量,对于复杂曲线、曲面则为参数矩阵。以上确定的模型为理想模型,可进一步附加产品制造信息(PMI),如公差等。测量步骤的确定通过交互式生成,对于每个步骤均需细化到可运算的算子一级上,即确定采样位置、布点方式数量及滤波、拟合、集成、构造的算法。算法必须在算法库中选择。针对同一被测量,可预设多套测量方案形成方案集。详细方案如图2所示。

(2) 测量过程仿真及不确定度分析技术。

测量过程仿真以 Monte-Carlo 方法为主,辅以矩分析方法。仿真数据生成时综合考虑 CMM 计量数据(主要为标准不确定度和扩展不确定度)和分布类型,利用数字模型加上随机噪声的方式构建。在获得仿真初始数据后由仿真协调引擎根据测量方案调用相关算法,分步执行,直至获得测量结果。利用统计分析方法确定各方案或方案中某一环节的不确定度。仿真时允许通过脚本技术,加入粗大点以验证滤波算法的有效性。方案比较评估可采用

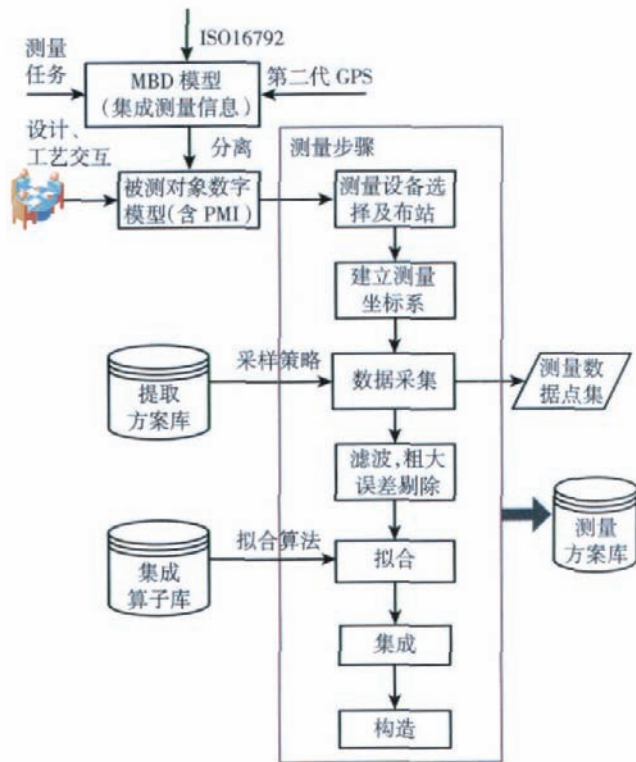


图2 测量方案建模

Fig.2 Modeling of measurement scheme

仅比较不确定度或比较不确定度和测量效率2种方式。详细方案如图3所示。

(3) 测量数据采集技术。

飞机柔性装配过程中涉及不同厂家的多种测量设备、数据采集方法等。为不同设备构建不同的采集协议

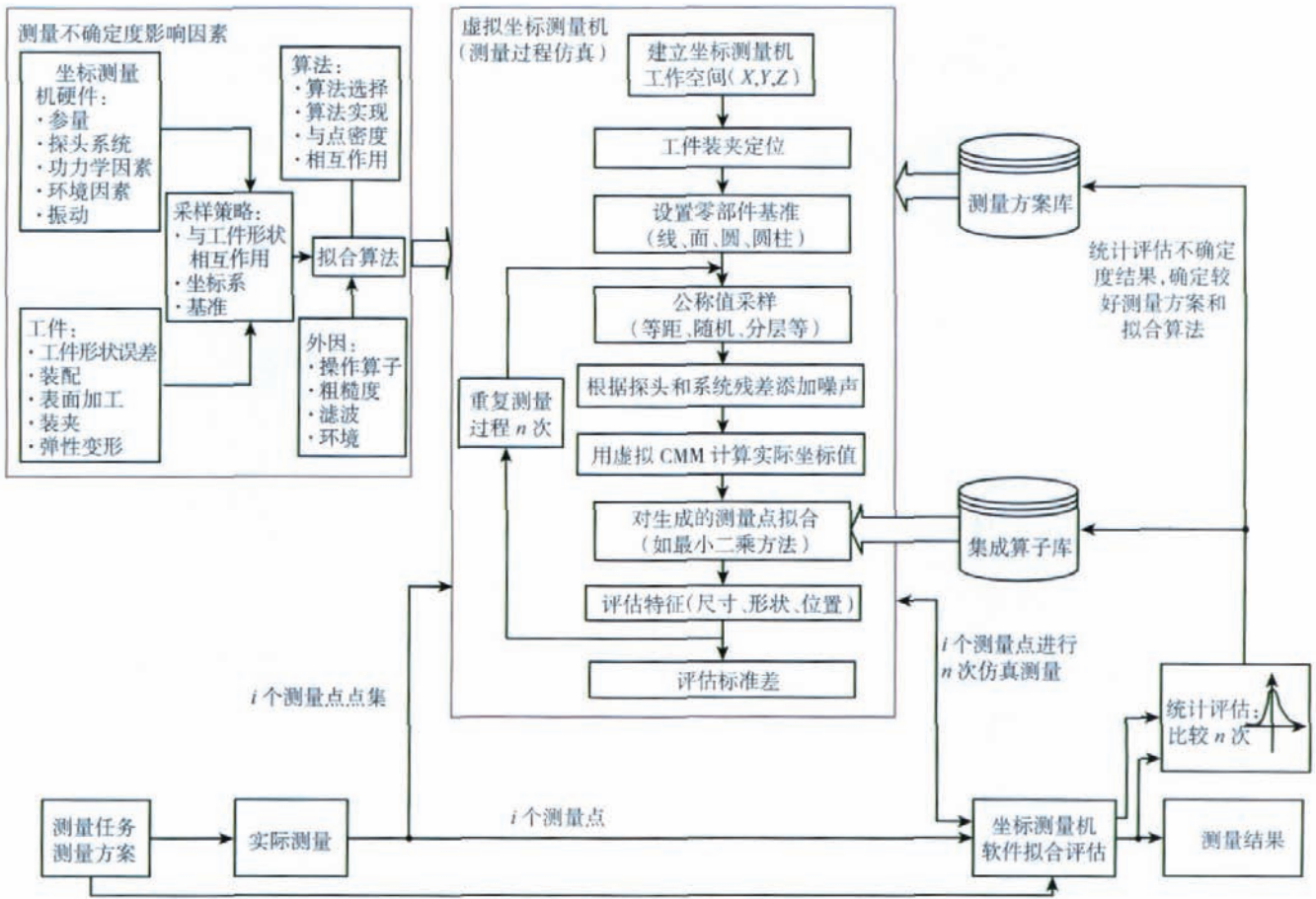


图3 测量过程仿真及不确定度评估  
Fig.3 Simulation of measurement procedure and uncertainty assessment

驱动,该驱动有独立的配置,能将采集结果转换为系统所需的结构。上层采集处理中心统一处理转换后的数据传递、存储等。

(4) 后置处理自动化技术。

以最终确定测量计划为蓝本,以采集的数据为最终输入,通过算法库调用引擎调用算法,调用前生成相关算法的输入包,调用后获取输出数据包,并解码成统一可识别的格式,通过与理论数字模型及其所附的产品制造信息 (PMI) 比较,以报表和可视化的形式展现结果。

(5) 集成算子库技术。

由于现有 CMM 随机软件所给算法不能完全满足应用要求,故算子库中必然需要实现飞机柔性坐标测量所需的算法。但考虑到商用 CMM 系统算法一般经过权威验证,故这一部分算法无需自行开发。不同的算法不具兼容性,因此拟采用增加集成层的方法。集成层将相关调用进行封装或转换为其他软件的宏,实现透明调用。算子库设计方案如图 4 所示。

(6) 基于不确定度的飞机柔性装配测量支持系统。

基于以上研究集成 CAD 平台,CMM 及其随机软件,

构建集成化的测量方案规划、仿真、后置处理自动化及测量数据管理支持系统。

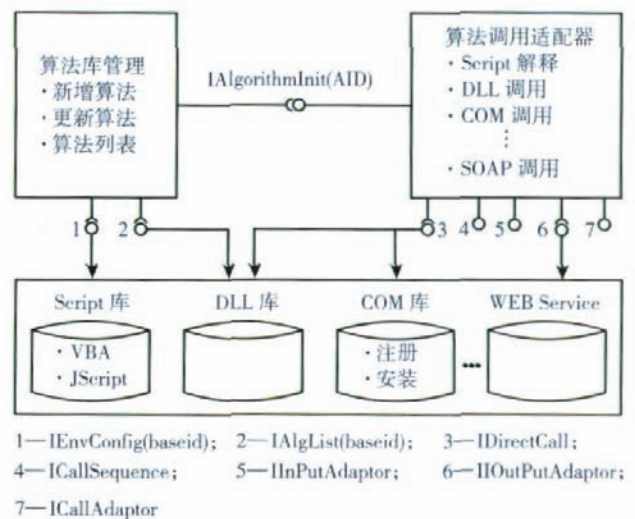


图4 多源算法及环境  
Fig.4 Multi-resource algorithms and environment

(下转第 55 页)

靶球,配合  $\phi 6.35\text{mm}$  的靶球座,且根据对应测量点的孔位状态可采用相应的转接座或衬套。而有的点隐藏较深,根据情况可增加隐藏点转接工具或用 probe 测量。

(2) 支撑定位工装上的测量点采用工装部门设计给定的 T/B 点和 ERS (Enhance Reference System) 点,但是在对接装配中只作为补充使用。一般情况下,可认为部段在工装上安装准确,该工装上的点无需检测。

(3) 自动定位器上的测量点包括定位器底座上的测量点和工艺接头上的测量点。前者是为了确定自动定位器在装配坐标系中的位置,以及用于对接系统在工作一定时间后进行系统检定。后者用于确定对接初始时连接球头球心位置,作为运动算法的输入参考。

### 5.3.3 对接面上的扫描点

在对大部件对接面进行测量时,其表面上制孔的位置精度和孔径精度难以达到测量需要,因此不易布置测量孔位,而改由 Scan 扫描方式测量对接区面。这类点用于对接开始前的仿真分析,以检验对接两端的误差是否在要求范围内,如果超大,不能实施自动对接工作。

## 6 结束语

数字化测量技术正随着飞机数字化柔性装配技术体系的发展而不断发展,其目标是实现高精度、高效率的完全自动化、柔性化装配。因此,该技术的发展和运用必然会极大促进当代飞机新型制造模式的变革。

虽然有资料表明,国外采用数字化测量辅助装配技术已在飞机数字化柔性装配系统中进行了初步工程应用,但其中仍有很多问题存在,有些难点还需投入更多人力、物力去攻克。数字化柔性装配的目标是高精度、高效率,而受到精度限制,还无法完全实现全自动化装配,主要原因如下:(1) 测量设备精度是影响整个 DMAA 过程的基本因素;(2) 数据筛选机制和处理算法的建立很重要,这直接影响到系统精度和稳定性的提高;(3) 变形问题,在越大的飞机装配工程中就越为重要,很好地解决该类问题直接影响装配精度;(4) 多种数字化测量手段的未合理运用。

基于本研究,北京航空制造工程研究所已将该技术在国内外某型机大部件数字化对接装配中进行了开发,并即将用于工程应用。这大大推动了我国数字化柔性装配系统的研制,使之接近国际先进水平。

### 参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术,

2009(24):42-45.

[2] Marguet B, Ribere B. Measurement-assisted assembly applications on airbus final assembly lines. SAE 2003-01-2950, 2003.

[3] DeLand J. Large scale assembly utilizing laser radar & IRGPS. SAE 2004-01-2831, 2004.

[4] 邹冀华. 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.

[5] Zou J H, Xu G K, Li G L, et al. The iGPS measurement technology application for the aircraft flexible joint assembly. SAE 10AMAF-0015, 2010.

(责编 良辰)

(上接第 51 页)

## 3 应用实例

方案在某型导弹装配数字化测量中已经成功应用并取得了较好的效果。图 5 为某型导弹装配精度自动化测量流程建模。

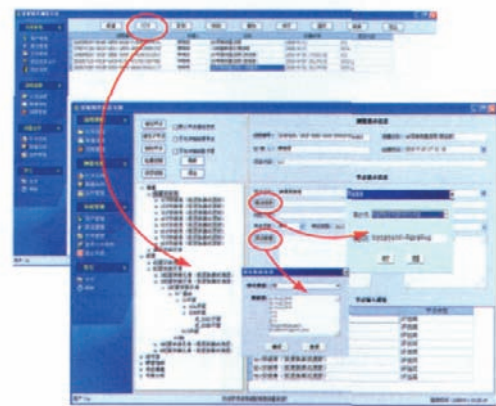


图5 导弹装配精度测量流程建模

Fig.5 Modeling of measurement procedure for missile assembly precision

## 4 结束语

影响飞机柔性装配测量不确定度的因素很多,因此对其不确定度进行分析和评估难度很大。其中的难点和关键技术主要有基于产品数字模型的测量方案建模技术、测量过程分布式仿真及不确定度预估技术、集成测量算子库构建技术、测量后置处理自动化及可视化展现技术等。我国的飞机柔性装配测量技术与国外还有较大差距,对于测量过程中不确定度问题的研究将极大地促进我国飞机数字化柔性装配技术的发展。

### 参考文献

[1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9):29-32.

[2] 邹方, 薛汉杰, 周万勇. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展. 航空制造技术, 2006(9):30-35. (责编 良辰)