

# 飞机数字化装配测量场构建 关键技术研究\*

## Research on Key Measurement Field Building Technology for Aircraft Digital Assembly

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 陈哲涵 杜福洲



陈哲涵

北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士研究生,主要研究领域为大尺度空间数字化测量技术、测量辅助数字化装配技术及其应用。

随着航空工业的市场竞争日趋激烈,飞机产品的生产朝着低成本、高质量、短周期、长寿命的方向发展,使得数字化设计、制造、装配与测量技术越来越多地应用到飞机产品研制的全过程<sup>[1-5]</sup>。飞机数字化装配技术以产品三维模型为依据,以高效率

数字化测量场是在装配过程对零部件几何状态及几何关系进行快速精确测量,实现基于数字量的产品设计数据向实物传输的关键纽带。

高精度的数字化测量为手段,采用伺服控制的柔性工装对零部件进行定位与调姿,实现基于数字量的零部件装配关系协调<sup>[6-8]</sup>。数字化测量场是在装配过程对零部件几何状态及几何关系进行快速精确测量,实现基于数字量的产品设计数据向实物传输的关键纽带;测量场的构建方案直接影响其工作方式和精度,从而对装配过程的效率和产品装配质量产生重要影响。

国内外大量学者对激光跟踪仪、iGPS 测量系统、摄影测量系统、激光雷达等数字化测量仪器进行了研究<sup>[9-11]</sup>;英国巴斯大学 LIMA 实验室对激光跟踪仪与 iGPS 测量系统的测量精度和误差源进行了研究,并对其在飞机装配过程中的应用方法和形式进行了深入探讨<sup>[12]</sup>;朱三山<sup>[13]</sup>、邹冀华<sup>[14]</sup>等对飞机数字化装配过程中的数字化测量系统进行了研究与应用探索;尽管数字化测量技术在飞

机装配过程中得到了局部的应用并取得了一定的成效,但仍然缺乏面向飞机装配的数字化测量场构建方法的系统性研究,这也是阻碍数字化测量技术应用进一步深化、影响测量辅助装配技术发展的主要瓶颈之一。

本文针对飞机数字化装配过程中的数字化测量场(Digital Measurement Field, DMF)构建技术展开研究,提出数字化测量场特性矩阵,对其组成与特性进行论述;对构建数字化测量场的关键技术及其实现方法进行研究;在关键技术研究的基础上,实现了基于仿真的虚拟测量场构建,并对其在飞机装配过程中的应用形式进行说明。

### 飞机装配过程数字化测量场特性矩阵

从几何意义上讲,数字化测量场是存在于飞机装配现场的一个三维虚拟空间;而从其物理结构上讲,则

\* 国家自然科学基金资助项目(50905010)资助。

是一个多维度、多特性的实体。多维度是指测量场由数字化测量设备软硬件、测量目标、测量环境(温度、湿度、气压)、测量工艺、测量过程支持软件 5 个维度的参数构成;多特性是指数字化测量场具有测量精度、测量时间、测量成本、有效测量范围 4 个影响其在飞机装配过程中应用效果的关键特性。

	测量设备	测量目标	测量环境	测量工艺	测量过程
测量精度	$v_{11}$	$v_{21}$	$v_{31}$	$v_{41}$	$v_{51}$
测量成本	$v_{12}$	$v_{22}$	$v_{32}$	$v_{42}$	$v_{52}$
测量时间	$v_{13}$	$v_{23}$	$v_{33}$	$v_{43}$	$v_{53}$
测量范围	$v_{14}$	$v_{24}$	$v_{34}$	$v_{44}$	$v_{54}$

(a) 测量场特性权重矩阵

上述各维度的参数与各特性的值间的耦合关系决定了最终的数字化测量场特性,采用测量场特性矩阵表示,如图 1 (a) 所示。矩阵的列分别是测量场的各维度,矩阵的行分别是测量场的各特性,矩阵各元素的值则表示不同维度参数值对各特性值的影响权重。

	测量设备	测量目标	测量环境	测量工艺	测量过程
测量精度	$a_{11}$	$a_{21}$	$a_{31}$	$a_{41}$	$a_{51}$
测量成本	$a_{12}$	$a_{22}$	$a_{32}$	$a_{42}$	$a_{52}$
测量时间	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{33}$	$a_{43}$	$a_{53}$
测量范围	$a_{14}$	$a_{24}$	$a_{34}$	$a_{44}$	$a_{54}$

(b) 测量场特性值矩阵

图1 数字化测量场特性矩阵

各维度的含义介绍如下:

(1) 测量设备软硬件: 测量设备主机及其附带的控制器、控制软件。

(2) 测量目标: 直接被测对象, 即零部件结构上的光学目标点。

(3) 测量环境: 数字化测量系统的工作环境主要指对测量场特性具有明显影响的温度、湿度、气压等因素。

(4) 测量工艺: 包括测量设备布局、测量顺序、测量要求等。

(5) 测量过程: 主要指测量工艺的实施, 包括技术成熟度、操作人员水平、原始测量数据管理与处理等。

各特性的含义介绍如下:

(1) 测量精度: 测量场内各点的坐标测量精度。

(2) 测量时间: 完成具体测量任务所消耗的时间。

(3) 测量成本: 完成具体测量任务所消耗的成本, 通常包括人力、设备折旧等多方面因素。

(4) 有效测量范围: 测量场的有效工作空间, 此空间内各点测量精度完全满足要求。

上, 给定各维度参数值及其对应的对各特性的影响值, 如图 1 (b) 所示的测量场特性值矩阵, 可以计算出矩阵各行元素的评价结果。该结果反映了所构建的数字化测量场的综合测量能力指数 (Measurement Capability Index, MCI), 如式 (1) 所示:

$$MCI = \left\{ \sum_{i=1}^5 v_{i1} \cdot a_{i1}, \sum_{i=1}^5 v_{i2} \cdot a_{i2}, \sum_{i=1}^5 v_{i3} \cdot a_{i3}, \sum_{i=1}^5 v_{i4} \cdot a_{i4} \right\} \quad (1)$$

测量场的构建过程即通过调整

各维度参数值, 使得基于特性矩阵得到的综合测量能力指数满足数字化测量辅助装配的要求。

## 基于特性矩阵的数字化测量场构建

### 1 面向测量目标选取的产品结构设计

随着数字化测量技术的发展和测量辅助装配技术的广泛应用, 装配过程数字化测量需求对产品结构设计的影响逐渐显露出来, 具体表现为:

(1) 由于采用基于光学的非接触式坐标测量原理, 数字化测量场的测量目标通常为激光靶球或高亮靶标等用于反射激光或被光学设备识别的特定介质, 而将这些介质安装到被测零部件的相应位置, 需要借助特定的工艺结构 (如工艺孔等) 及相应的测量辅助装置。因此, 需要在飞机结构设计阶段即考虑装配过程的数字化测量需求, 预先设计相应的工艺结构, 为飞机装配过程数字化测量场的构建提供支持。针对测量目标的选择与确定, 需要研究并应用面向测量辅助确定性装配的大部件结构设计<sup>[15]</sup>等方法。例如, 空客在 A380 飞机机身分段对接过程中采用摄影测量系统进行对接面的预测量和可测量性分析, 为满足测量过程中测量目标的安装需求, 在结构设计过程, 为机身分段对接面的结构设计了特定

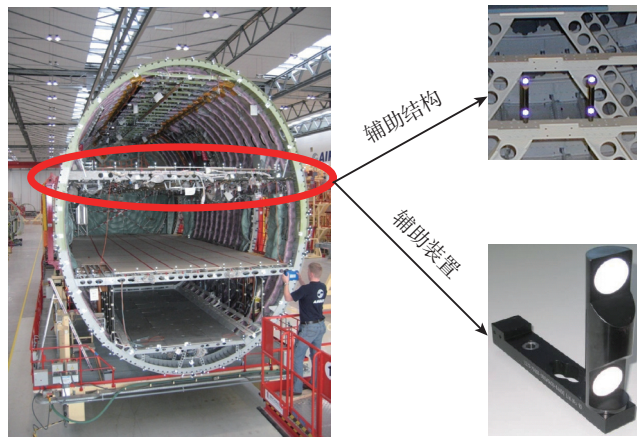


图2 空客A380机身分段对接过程的数字化测量辅助结构与装置

的工艺孔和辅助装置,从而将目标测量点引出,方便摄影测量系统靶标的安装和对接面的测量,如图2所示。

(2)传统飞机产品设计过程主要关注产品的质量特性、装配要求以及关键尺寸公差等,通常给出制造、装配过程中的关键产品特性和关键控制特性。然而,基于数字化测量场实现测量辅助装配的过程中,需要基于测量数据对被测对象几何状态及装配关系进行评估,而评估的依据来源于产品设计要求。因此,在飞机结构设计阶段即基于关键质量特性、控制特性与测量需求的映射关系,确定相应的装配过程关键测量特性<sup>[16]</sup>,用于承载数字化装配测量需求与测量数据,以辅助装配过程中的快速质量评估与装配决策。

## 2 测量设备选型与评估

根据具体测量任务的要求,评价设备的测量能力,合理选择测量设备型号,对测量场构建至关重要。目前,国内外飞机制造企业在数字化装配测量过程中,较少考虑测量设备选型的重要性,经常导致所构建的测量场的有效工作范围或精度难以完全满足测量任务的需求,进而造成重复工作,增加测量成本,延长装配周期。

测量设备的合理选型以测量设备的能力评估为基础,可基于4个属性对设备的综合测量能力进行

评估<sup>[17]</sup>:(1)物理可达性决定了设备的有效工作范围;(2)测量不确定度在很大程度上决定了最终构建的测量场的精度;(3)工作成本是所构建测量场的测量成本的重要组成部分;(4)技术成熟度(Technology Readiness Level, TRL)决定了测量场的可操作性和测量时间。通过测量设备-测量能力矩阵与测量需求-测量能力矩阵建立测量设备型号与测量需求间的映射关系,如图3<sup>[17]</sup>所示,实现测量设备能力评估与选型。

## 3 测量工艺规划与优化

测量工艺、测量环境及测量过程参数的选择和控制通过测量工艺规划实现。按照实施过程,可分为测量设备布局、测量场精度与可测性分析以及测量过程仿真三部分。

### (1)测量设备布局。

由于飞机产品零部件尺寸大、结构复杂,其装配工作空间尺度较大,在数字化装配过程中,一台测量设备或一个测量站位通常难以满足其需求,需要采用多台设备组网或转站的方法扩大测量范围,然而同时也会导致测量时间或测量成本的增加。因此,需要对测量设备或测量站位进行合理布局,确保同时满足测量范围、精度、成本与时间的要求。

### (2)测量场精度与可测性分析。

目前对数字化测量精度的研究多集中于单点坐标测量不确定度研

究与分析,如激光跟踪仪的多站测量数据融合、测量不确定度分析与评定等。然而单点精度特性难以支持测量场构建方案的评估与优化,需对整个测量场的精度分布特性进行研究,支持测量场构建方案的可测性分析,从而为测量场构建与应用提供指导。

传统的可测性分析通过验证法实现,即首先给定测量方案,然后计算各个待测目标点处的精度,判断其是否满足要求。若各点均满足要求,则该测量场可行;反之,修改测量场构建方案,重复验证。使用验证法进行可测性分析的过程操作繁琐,效率较低,难以快速确定合适的方案。

通过进行全测量场精度特性分析,可以实现基于精度碰撞的可测性分析方法<sup>[18]</sup>,其原理如下:利用计算机辅助三维图形环境建立可视化测量场,根据其测量精度分布特性确定空间中各点的精度参数;将被测对象置于虚拟测量场中,并设置其各目标点的测量精度要求;通过后台算法,计算出测量场精度特性与目标点精度要求不符的位置,在三维图形中显示,从而实现快速的可测性分析与测量场构建方案评估。

### (3)测量过程仿真。

与基于精度碰撞的可测性分析方法类似,测量过程仿真是指在三维模型环境中构建虚拟的飞机数字化装配环境,按照测量场的构建方案对

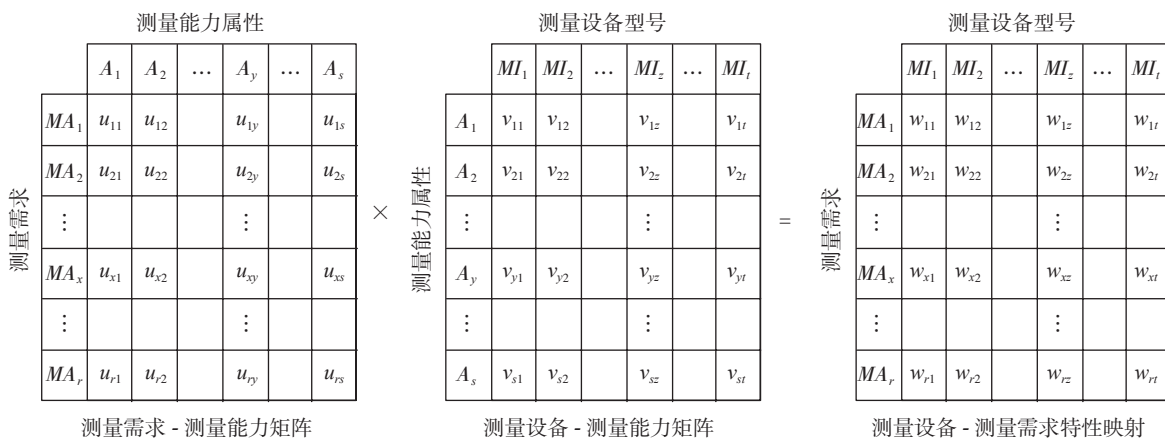


图3 测量能力特性映射

测量设备、测量目标进行布局,并设置虚拟测量环境参数,进而基于仿真测量算法对测量工艺进行仿真,实现虚拟的测量过程,从而能够直观形象地展现测量场实际应用过程中的精度、成本、时间、有效范围等特性。通过基于光路干涉检测和路径碰撞检测算法的可达性验证,对测量工艺进行优化,最终输出测量过程视频及指导手册,以提高测量场的可操作性和人性化程度。

#### 4 测量数据库构建

测量场构建过程中的测量需求分析、测量设备选型、测量过程仿真等操作离不开测量数据库的支持,主要包括硬件参数库、模型与算法库、测量案例库三部分。通过构建测量设备硬件参数库,对企业数字化测量设备进行统一管理和调度,制订设备使用和维护计划,以减少资源浪费,提高利用率,降低测量成本。通过构建测量设备模型与仿真算法库,支持基于三维模型的虚拟环境的构建,从而为测量过程仿真及相关分析提供基础。通过构建测量案例库,将已有的测量场构建方案以知识的形式进行结构化管理,可以为后续测量场构建提供指导和依据。

### 数字化测量场构建过程仿真及应用

在数字化测量场构建过程中,基于虚拟测量场的构建方案仿真分析至关重要。因此,在关键技术研究的基础上,本文选择 iGPS 测量系统作为示例,进行基于三维模型和算法的 iGPS 虚拟测量场构建;并研究其精度分布特性,实现基于精度碰撞的可测性分析,以支持实际装配过程中 iGPS 测量场构建方案的规划与优化。

#### 1 虚拟 iGPS 测量场构建

如图 4 (a) 所示为基于机翼简化模型和 iGPS 测量系统三维模型在 CATIA 环境下构建的虚拟 iGPS 测量场。通过采用 CAA 二次开发技术,

在 CATIA 软件中集成了基于 iGPS 测量系统仿真测量算法的测量数据采集与不确定度分析功能模块,以及基于特征构建、提取与分析操作接口的测量场范围模拟与可达性分析功能模块,从而实现可视化的 iGPS 测量场精度和有效工作范围检验与优化,为数字化测量场特性矩阵中 2 个主要特性的评估提供支持。

#### 2 测量场精度分析及应用

为实现 iGPS 测量场精度分布特性分析,提出 iGPS 单元测量场与网络测量场的概念,首先建立了如图 4 (b) 所示的 iGPS 单元测量场精度分析模型,基于仿真测量试验对其全局精度特性、纵向精度特性和横向精度特性进行研究,并给出 iGPS 单元测量场精度特性方程:

$$\sigma_{L,z} = A_L \times (z - z_T)^2 + B_d \times L + C_d, \quad (2)$$

式中,  $A_L$ 、 $B_d$ 、 $C_d$  为无量纲的特性参数;  $L$  用于描述被测点在水平面上投影的位置;  $z$  为被测点的高度;  $d$  为发射器间距离,  $z_T$  为发射器高度,二者

围间的量化关系,如图 4 (c) 所示。

基于 iGPS 测量场的精度分布特性,在图 4 (a) 所示的虚拟测量场中,实现了基于精度碰撞法的可测性快速分析与评估,如图 4 (d) 所示。

### 结束语

飞机数字化装配测量场构建是实现数字化测量辅助装配,提高飞机装配效率和质量的关键,也是目前阻碍数字化测量技术广泛应用的瓶颈之一。本文针对数字化测量场的构建展开了研究,给出数字化测量场的 5 个维度和 4 个特性,构建其特性矩阵,并针对数字化测量场 5 个维度参数的选取,讨论了相应的关键技术,重点研究了基于关键测量特性的面向测量设计方法、iGPS 测量系统的测量场构建和仿真。数字化测量场的构建是未来测量辅助装配技术研究的重点,在后续工作中将继续展开测量系统选型、测量场的测量能力指数评估等方面研究。

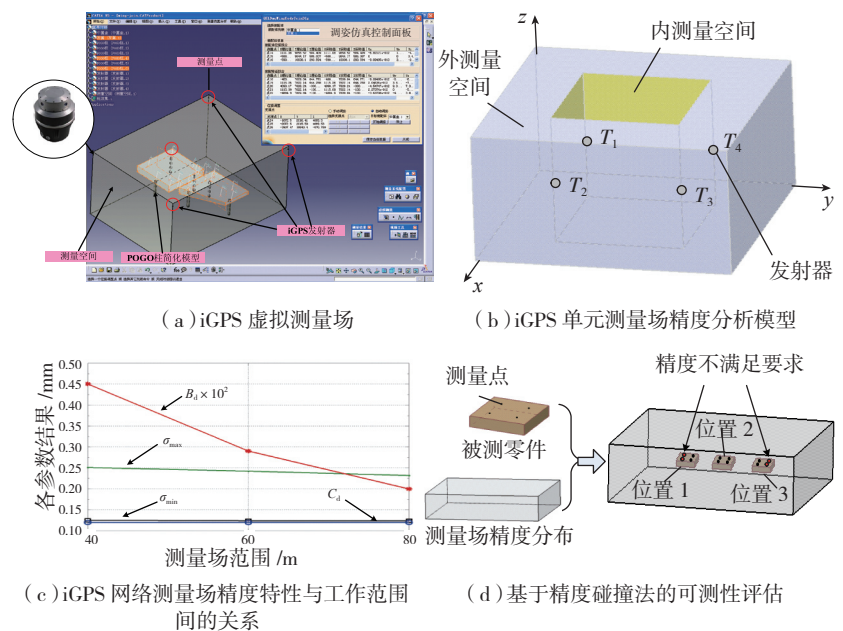


图4 基于仿真的iGPS虚拟测量场及其应用

共同反映了单元测量场的布局方案。

在此基础上,针对测量场有效工作范围的扩张,进一步研究了 iGPS 网络测量场精度特性与有效工作范

本文共有参考文献 18 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)