

面向飞机装配过程的数字化 预装配检测系统

Digital Preassembly Detection System for Aircraft Assembly Process

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 于海涛
北京航空航天大学 毛贝 罗振伟



于海涛

现任中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 DMIR 组长,长期从事航空器制造、质量监督和适航管理工作,曾经历了 Y12F、H410、H425 和 Z15 型机适航取证的制造审查工作。

飞机数字化装配系统采用了激光跟踪辅助测量技术,由激光跟踪仪获取装配环境位置数据及装配件位置数据,控制系统通过对实际装配位置与理论值进行比较后,获得部件装配位置的修正补偿值,自主地对定位元件的空间位置进行快速调整,逐步对定位进行补偿,完成精确定位、安

面向飞机装配过程的数字化预装配检测系统可以在飞机部件实际装配过程之前,对装配件与装配体进行数据采集,用实际采集到的数据取代传统数字化装配仿真分析过程使用的单一理论模型数据,然后在 Open CASCADE 环境下对飞机数字化装配过程中出现的质量问题进行预估,并对数字化装配过程进行仿真分析。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.04.055

装与调整^[1-3]。在数字化装配系统中,整个装配仿真分析的数据源为实测位置数据和理论模型位置数据,当测量点到达理论点位置,则装配过程完成。

然而在数字化装配实际应用中,并非测量点位置和理论点位置重合时装配质量一定达到质量要求,因为飞机许多装配部件由于自身尺寸较大、刚度较低,即使在制造精度满足的情况下仍然会因装配应力和自身重力等因素的影响而发生变形,因此可能会出现装配质量不符合装配质检要求,或者甚至出现装配干涉和测量点无法到达理论点位置等问题。这些问题是无法通过理论模型仿真分析发现的,往往要在装配过程

中才能发现,严重影响数字化装配工作效率,并且在传统的飞机壁板数字化装配过程中,装配系统的主要研究对象为数字化柔性装配工装。如何配合数字化测量设备完成装配件姿态的调整和装配工作,并不包含对装配件关键位置点、装配边界和外形曲面的装配检测分析,如果能在装配系统中补充相关功能,利用实测数据进行预装配仿真,对测量点与理论点的偏差、边界干涉情况和壁板外形等装配质量进行评估,对提高装配效率而言非常有益^[4]。针对上述问题,面向飞机装配过程的数字化预装配检测系统可以在飞机部件实际装配过程之前,对装配件与装配体进行数据采集,用实际采集到的数据取代

传统数字化装配仿真分析过程使用的单一理论模型数据,然后在 Open CASCADE 环境下对飞机数字化装配过程中出现的质量问题进行预估,并对数字化装配过程进行仿真分析。

数字化预装配检测系统概述

本文所研究的面向装配过程的数字化预装配检测系统是建立在数字化预装配过程基础上的,在数字化装配系统装配之前进行检测,数字化装配系统和数字化预装配检测系统之间的关系如图 1 所示。

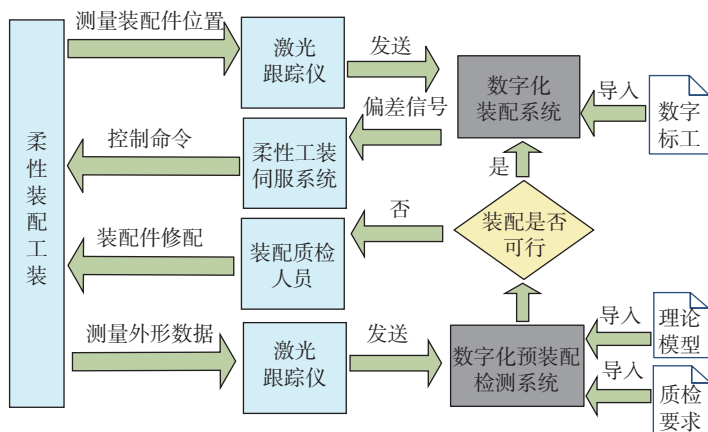


图1 数字化装配系统与数字化预装配检测系统的关系

面向飞机装配过程的数字化预装配检测系统结合现实装配中的需要与测量软件的要求,实现了如下功能。

1 数据采集功能

数据采集功能是数字化预装配检测系统的基础功能。数据采集功能是指在装配件完成吊装定位以后,利用激光跟踪仪对装配件关键位置点、边界以及外形进行测量,获取装配件点云数据,对获取的点云数据进行半径偏置、除噪及压缩等处理,获取预装配检测系统中分析使用的点云数据^[5]。

2 装配检测功能

装配检测功能是数字化预装配检测系统的核心功能。装配检测功能是根据数字化装配检测要求,利用装配件实测点云数据和装配件理论

模型数据对装配件外形质量、几何参数及点云偏差进行检测,利用点云配准方法对装配结合体外形质量、装配干涉、装配间隙及装配阶差等问题进行分析,对数字化装配过程中出现的问题进行提前预测分析。

3 装配仿真功能

装配仿真功能是数字化预装配检测系统提供的简单的三维可视化功能和在线动态仿真功能。装配仿真功能是指系统根据装配件位置数据、装配件点云数据及装配件理论模型对装配状态进行仿真分析,并对装

和装配仿真的数据源,它的功能结构主要由 5 部分组成。

(1) 激光跟踪测量:负责激光跟踪仪导入、连接、回鸟巢、静态点测量及动态点测量等工作。

(2) 测量环境构建:负责测量基准点的导入、坐标系拟合及设置等工作,构建数据测量环境。

(3) 理论模型部分:负责理论模型的导入、设置及显示等工作。

(4) 测量数据处理:负责测量数据的显示、处理及保存等工作,是数据采集功能的主要部分。

(5) 测量报告:负责对测量功能的管理及报告导出等工作。

2 数据采集功能关键技术

在利用激光跟踪仪以靶球测量模式进行数据采集时,直接测量得到的数据并不能直接用于装配检测和装配仿真等工程。首先,测量数据并非目标位置数据,而是目标位置法向偏移一个靶球半径数据,需要对数据进行半径偏置处理;其次,测量数据还存在人为操作误差导致的噪点问题,需要对噪点进行剔除;最后,在进行点云数据保存时,还需要考虑对点云数据的压缩处理^[5]。利用 Open CASCADE 库提供的函数,可以实现对点云半径偏置处理、噪点剔除及点云压缩等操作。

(1) 点云半径偏置处理。

在 Open CASCADE 二次开发建模数据和算法包中,提供了很多几何体运算方法,其中提供了 BRepExtrema_DistShapeShape 类,可以完成几何体之间极值距离计算工作,利用 BRepExtrema_DistShapeShape 类可以完成半径偏置处理工作^[6-7]。利用极值距离求解方法,获取点云数据在理论模型上的投影点云,根据有对应关系的投影点计算投影方向,在投影方向上偏移一个靶球半径后,即可获得半径偏置处理后的点云序列,处理方法如图 2 所示。

配件当前装配质量进行直观显示,对装配干涉问题进行警告提醒。

该系统实现所采用的主要技术有激光跟踪仪二次开发技术、Open CASCADE 图形处理技术、Excel 二次开发技术以及数据库技术等。

本文研究的数字化预装配检测系统,根据功能可以分为数据采集、装配检测及装配仿真 3 个相对独立的功能模块,这些功能模块在 MFC 单文档框架结构的平台下协作完成数据采集、装配质检和装配仿真工作。

数据采集功能结构及其关键技术

1 数据采集功能结构

数据采集功能的目的是获取装配件外形信息,作为后续装配质检

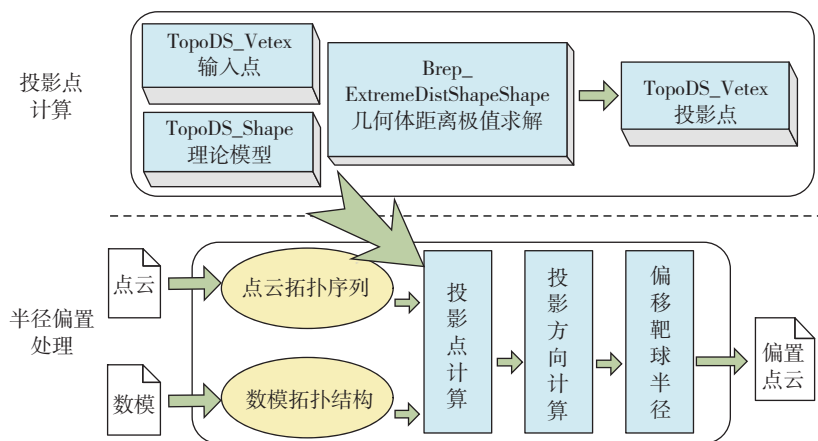


图2 点云半径偏置处理方法

(2) 噪点剔除方法。

利用上述点云半径偏置处理方法中的 BRepExtrema_DistShapeShape 类的投影极值求距方法,也可以完成点云噪点剔除工作。利用极值距离求解方法,获取点云数据在理论模型上的投影点云,求解点云投影距离,根据噪点阈值剔除超差点,方法和图 2 类似。

(3) 点云压缩方法。

在曲面外形数据采集工作中,一般会获取庞大数量的点云数据,点云数据需要进行压缩处理,以便于后续检测和仿真等功能使用。传统的点云数据压缩一般采用空间分割法,本文介绍一种结合 Open CASCADE 曲面网格化方法,针对曲面点云数据的点云压缩方法。具体为利用 Open CASCADE 中曲面分割工具分解曲面

模型,依次对每个曲面网格与点云求解最小距点,得到压缩点云序列,处理方法如图 3 所示。

装配检测功能结构及其关键技术

1 装配检测功能结构

装配检测功能是利用点云数据对装配件自身和装配体进行质检,预先评估装配质量是否满足装配要求。其中,装配检测功能分为两种类型,一类为装配件自身质量检测;另一类为装配体质量检测。装配件检测在检测形式上分为几何参数质检和点云偏差检测两种。装配体检测分为装配体点云偏差检测、装配干涉检测和装配间隙检测。装配检测功能结构主要由 6 部分组成。

(1) 点云数据处理: 包括各类

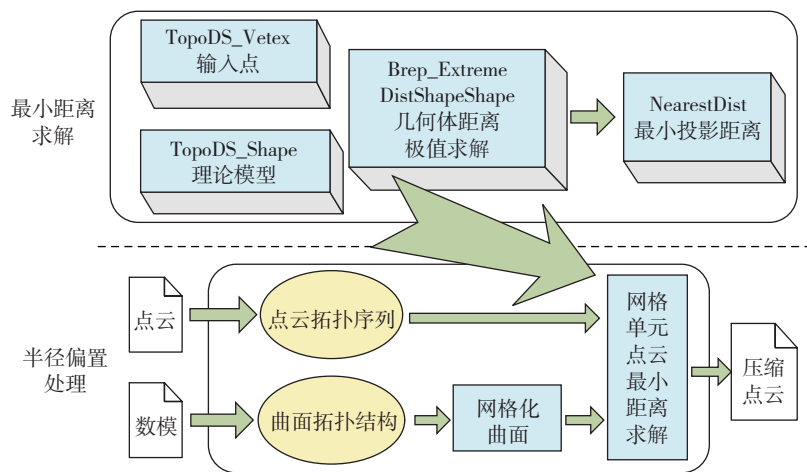


图3 点云压缩处理方法

点、边界及曲面点云数据,负责实测数据的导入和显示等工作,是装配检测功能的主要处理对象。

(2) 检测环境构建: 负责检测基准点的导入、检测环境的构建与显示等工作。

(3) 理论模型部分: 负责理论模型的导入、设置和显示等工作。

(4) 质检模板: 包含装配质检要求的各类型指标要求、局部理论模型数据及检测算法数据,负责对点云数据分割、运算和检测工作,是检测功能模块的主要对象。

(5) 检测结果分析: 主要负责检测结果的显示和分析工作。

(6) 检测报告输出: 负责对检测功能的管理和报告导出等工作。

2 装配检测功能关键技术

2.1 质检模板构建方法

装配检测工程中,不同的装配件和装配体结构与检验指标不同,如外形偏差指标、间隙指标和干涉指标等,实现检验的算法也有较大差异,因此提出了质检模板的概念。质检模板是质量检测过程中连接点云数据和理论模型的检测工具,它包括理论模型的部分结构、质检指标及检测算法描述,以便完成自动质检工作,不同的点云数据质检模板不同,相同点云数据质检类型不同时,质检模板也不相同。

如图 4 所示,以等直段机身壁板点云数据的两种检测模板为例,对于相同的机身壁板点云数据,当进行等直段外形点云偏差分析时,以理论外形面作为模板模型,对点云逐点进行偏差检测计算,当进行等直段轴线参数分析时,以理论圆柱体为模板模型,通过参数拟合的方法进行轴线参数计算,并进行偏差分析。

2.2 几何参数质检方法

装配检测工程中,有时需要对装配件的几何形状和位置参数等指标进行质量检测,这种检测被称为几何参数检测。几何参数检测的一般流

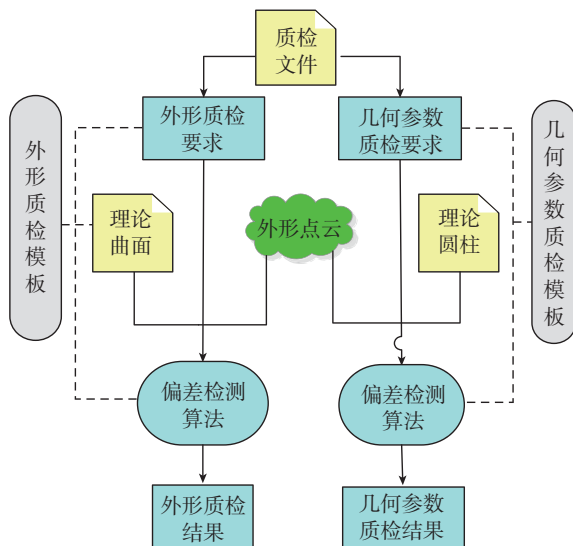


图4 质检模板构建及使用方法

程为：首先对点云数据进行逆向拟合求解相关几何参数；然后根据质检要求对比逆向求解结果和理论模型参数；最终给出检测评价。

球面方程表示为：

$$f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 + 2ux + 2vy + 2wz + d = 0,$$

其中，球心为 $(-u, -v, -w)$ ，半径为 $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 - d$ ，即球面参数方程包含 u, v, w, r 4个独立参数。根据点云数据逆向求解出这几个参数，然后再求出其偏差。

几何参数检测过程中，最主要的问题是点云数据逆向拟合求解问题。针对装配过程中常见的球面、柱面和锥面等基本二次解析曲面逆向拟合求解基本原理：对于方程为 $f(x_i, y_i, z_i) = 0$ 的曲面构建的目标函数是代数距离函数：

$$D_i = f(x_i, y_i, z_i),$$

当点 (x_i, y_i, z_i) 在曲面上时，有 $D_i = 0$ ；

当点云满足 $\sum_{i=0}^n D_i$ 足够小，便认为曲面方程为 $f(x, y, z) = 0$ 为最优化的点云拟合曲面方程，对各参数以如下步骤进行优化计算。

(1) 初始化参数方程各参数。位置参数均设置为点云形心参数，角度参数通过间隔 5° 的一周扫描初步

确定角度参数值，半径参数设置为点和形心最大距离值。长度参数的初始步长设置为点和形心最大距离值，角度参数的初始步长设置为 5° ，并

计算出 $F = \sum_{i=0}^n D_i$ 。

(2) 逐次对方程的每个参数调整。给参数增加一个极小的变量，计算 $\sum_{i=0}^n D_i$ ，如果增大，则负向调整参数；如果减小，则正向调整参数。将参数调整一个步长，计算 $\sum_{i=0}^n D_i$ 。如

果 $\sum_{i=0}^n D_i$ 减小，更新 F 和参数值，并

增大一倍步长，重复计算，直至找到合适的步长 t ，将当前参数调整一个

步长后， $\sum_{i=0}^n D_i$ 增大，更新此参数步

长为 $t/2$ ；如果 $\sum_{i=0}^n D_i$ 增大，将步长

减小 $1/2$ ，重复计算直至找到合适的步长 t ，将当前参数增加一个步长后，

$\sum_{i=0}^n D_i$ 减小，更新 F 和参数值，更新

参数步长为 $t/2$ ；否则，更新 F 和参数值，更新参数步长为 $t/2$ 。

(3) 当目标函数足够小时，算法结束，拟合成功；若各参数步长均小于系统设置的极小值，且目标函数值仍较大，算法结束，拟合失败。

2.3 点云偏差分析方法

点云偏差分析是指利用点云数据和装配件理论数据模型，计算点云中各点到理论位置的偏差值和偏差方向。在数字化预装配检测系统中，点云偏差分析的主要工作包括点云数据各点偏差值计算、偏差方向计算及显示和装配件外形总体偏差效果显示。点云偏差分析既适用于对曲面外形的偏差分析，也适用于边界线的偏差分析。利用Open CASCADE图形处理包中曲面距离求解、曲面分解和曲面逆向等方法，可以非常方便地完成点云偏差分析工作，具体流程如图5所示。

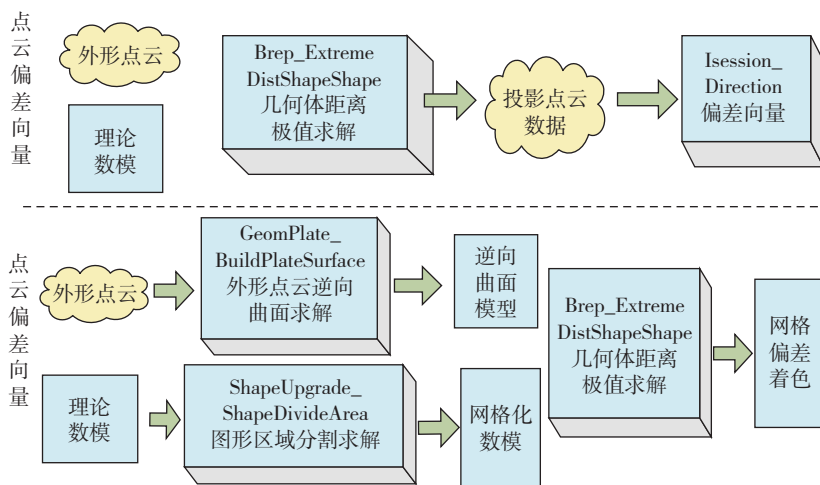


图5 点云偏差分析方法

2.4 装配干涉检测方法

装配干涉检测是指装配件点云数据进行装配配准后,对实测数据进行碰撞干涉分析。在 Open CASCADE 环境中,主要通过对点云数据进行布尔运算求解的方法进行干涉检测,包括 3 个层次的干涉检测,且检测强度逐渐增强,分别为装配包围盒间的干涉分析、点云数据与理论模型干涉分析和逆向模型之间的干涉分析。这种分层分析方法能加速干涉检测过程的进行,方法如图 6 所示。

2.5 装配间隙检测方法

装配间隙检测是指装配件点云数据进行装配配准后,利用装配件实测点云数据对装配件之间的装配间隙情况进行分析。间隙分析包括间隙宽度和阶差两部分内容。在 Open CASCADE 环境中,主要通过对点云边界点数据进行逆向曲线拟合、实体距离极值求解和偏差向量切向法向分解等方法完成间隙检测工作,具体方法如图 7 所示。

装配仿真功能结构

装配仿真功能主要是指在数字化装配过程中,利用点云数据和理论

模型数据对装配过程在线仿真分析,显示各关键点、边界点云、曲面点云与理论位置的偏差情况,并检测装配干涉,主要由 3 部分组成,具体功能如下。

(1) 装配环境建立:负责装配坐标环境的构建和设置等工作。

(2) 模型导入:负责装配件模型、工装模型、数字标工、点云数据导入、显示和处理工作。

(3) 仿真报告输出:负责对装配仿真功能的管理和报告导出等工作。

装配仿真功能的关键技术主要在于坐标系位置的拟合与坐标系的转换,以及图形显示处理等技术,此类技术较为成熟,在此不再详述。

数字化预装配系统应用实例

面向装配过程的数字化预装配系统能实时显示当前的工作状态,具有友好的交互界面,以飞机机身壁板数字化装配项目为背景,结合实例对其部分功能进行阐述。

1 数据采集功能

通过激光跟踪仪获取右壁板的关键点数据、边界点数据和外形数据后,为了便于后续处理应用,需要对点云数据进行偏置处理,点云数据的偏置半径为 10mm,根据不同点云数据类型和理论模型类型,对外形点云匹配外形曲面、边界点云匹配对接边界线、定位点云匹配定位理论点,进行点云偏置处理,部分处理结果如图 8 所示。

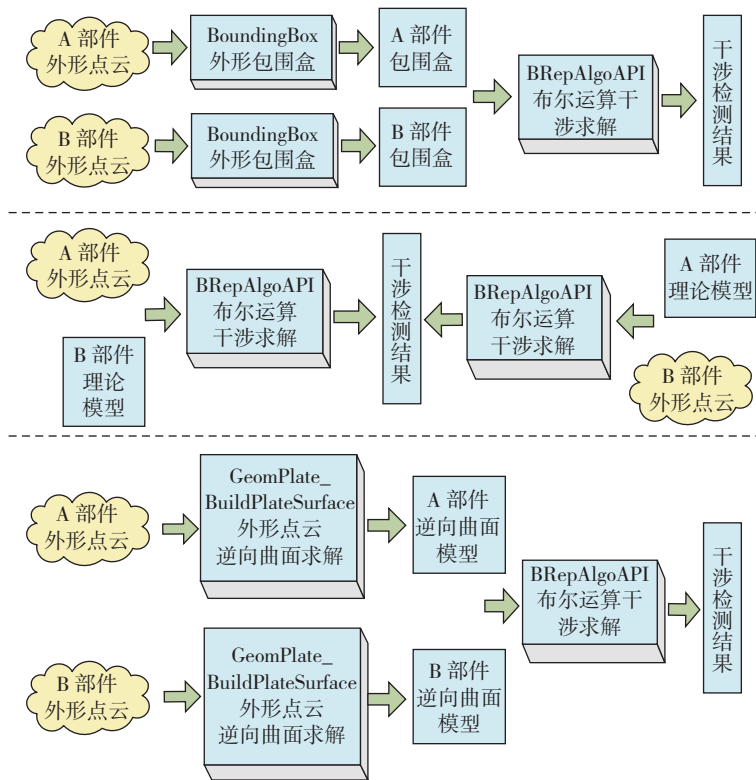


图6 装配干涉检测方法

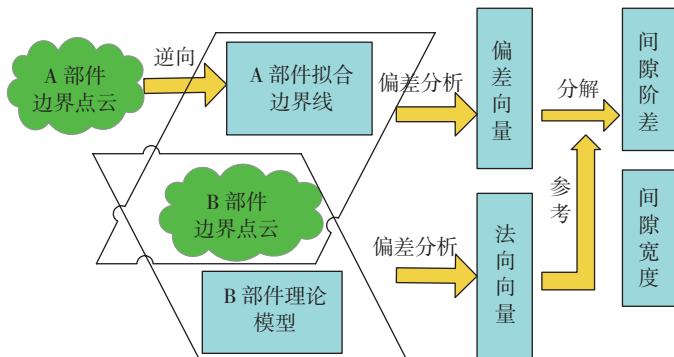


图7 装配间隙检测方法

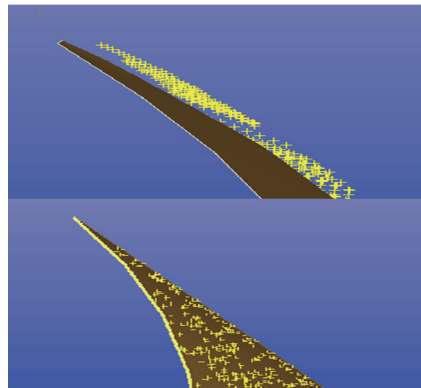


图8 点云靶球半径偏差及偏置处理后效果图

2 装配检测功能

2.1 装配体点云质检

装配体点云质检是指通过点云数据对装配体数据进行质量检测,检测内容主要包括关键数据点位置检测、边界点位置检测及曲面外形检测,在检测形式上分为几何参数质检和点云偏差检测两种。以右壁板为例对几何参数质检进行说明,对于装配体点云偏差检测和装配体点云偏差检测相同。

几何参数质检是指通过点云逆向计算的方法,获取点云的几何统计外形参数。在检测过程中,系统进行了相关几何参数质检功能的验证,图9为对柱面参数的逆向求解。

2.2 装配体点云质检

装配体点云质检是指通过两装配体点云数据匹配,完成装配体点云装配工作,将装配好的点云数据和理论装配模型统一到相同坐标环境,对点云之间和点云理论模型件之间的质量检测。具体内容包括装配体点云匹配、装配体点云偏差检测、装配干涉检测和装配间隙检测4部分内容。

(1) 装配体点云偏差检测。

装配体点云偏差质检是指装配体的匹配点云比对装配体理论模型,进行点云偏差质检分析,目的是反映匹配后的点云与装配体理论模型之间的偏差。在右壁板和底壁板的装配过程中,所采集点云数据来自于壁板外侧曲面轮廓,装配体点云偏差检测主要是对曲面点云的质检,检测效果如图10所示。

(2) 装配体边界间隙检测。

装配体边界间隙检测是指利用边界点云数据对装配体之间的间隙宽度、阶差进行检测。具体方法为利用一侧边界点云数据构建逆向边界曲线,另一侧点云向逆向曲线投影,获取间隙,对点云数据求解所在位置的法矢,间隙距离向法矢方向投影获取点位阶差,间隙值切线方向投影获

取间隙宽度。在右壁板和底壁板的装配过程中,以底壁板右边界点云数据为逆向边界曲线数据源,以右壁板下边界点云为投影数据源,进行装配体边界间隙质检检测效果如图11所示。

(3) 装配体干涉检测。

装配体干涉检测是指利用装配体配准点云数据,对装配体之间的装配干涉情况进行预测。前文介绍了3种层次的检测方法,分别为包围盒检测、点云与理论模型检测和点云逆向模型检测3个层次,这里以点云与理论模型检测为例进行右壁板与底壁板的装配干涉检测。由于装配干涉一般发生在壁板对接边界上,装配体干涉检测过程中,主要利用右侧壁板边界点云数据与底壁板理论模型进行布尔运算,检测是否存在模型重

叠,干涉检测效果如图12所示。

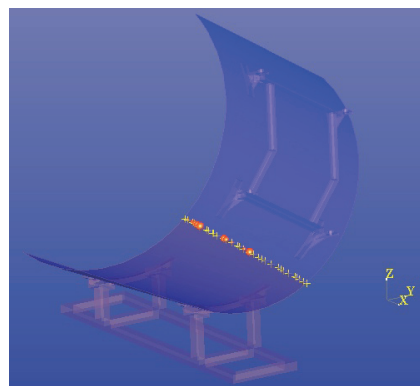


图12 边界干涉检测效果

结束语

面向装配过程的数字化装配预检测系统能够利用实测数据对装配过程质量进行评估与仿真,从而指导操作人员对装配过程做出及时的调整与修正,减少装配出错返修时间,相比直接利用理论模型进行装配仿真更具有优势,作为飞机数字化装配技术的有利辅助手段,对于提高装配的效率具有重要意义。

参考文献

- [1] 梅中义, 范玉青. 基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配技术. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 65-69.
- [2] Williams G, Chalupa E, Rahhal S. Automated positioning and alignment systems. SAE, 2000-01-3014, 2000.
- [3] 王梅, 牛润军. 数字化测量技术在飞机外形检测方面的应用研究. 航空制造技术, 2013(20): 109-112.
- [4] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究. 计算机集成制造系统, 2007, 13(7): 1367-1373.
- [5] 张学昌, 习俊通, 严隽琪. 基于点云数据的复杂型面数字化检测技术研究. 计算机集成制造系统, 2005, 11(5): 727-731, 737.
- [6] 李绍珍, 张渊. 基于 Open CASCADE 的虚拟三维建模平台的开发研究 // 中国工程图学会. 第一届中国图学会暨第十届华东六省一市工程图学学术年会论文集. 北京: 中国工程图学会, 2007: 267-268.
- [7] 袁媛, 王延红, 江凌, 等. 基于 Qt 及 Open CASCADE 的建模技术研究. 现代电子技术, 2013, 10: 74-77.

(责编 玲犀)

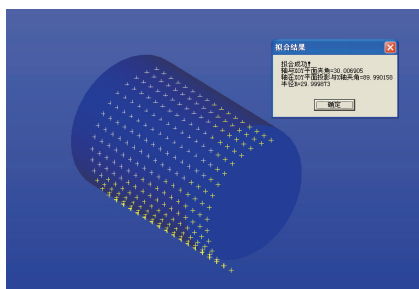


图9 圆柱点云逆向求解

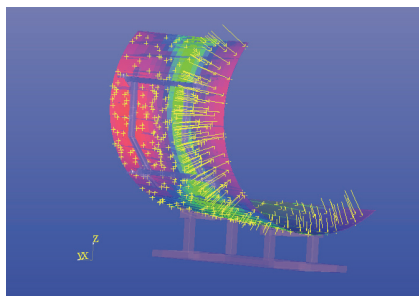


图10 装配体点云偏差质检

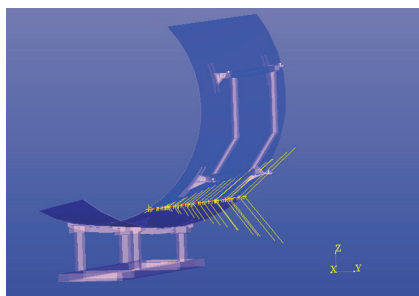


图11 装配体边界间隙质检