

基于模型定义的测量规划与质量 评定应用框架研究*

杜福洲, 郭瑞振

(北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 对零件的三维测量规划技术进行研究,提出了基于多几何特性的测量规划与质量评定框架,并从基于MBD的测量需求表达、测量规划、测量执行与数据预处理、质量综合评定方法等方面进行了研究。最后基于CATIA二次开发平台进行原型系统开发,并进行了初步验证。该研究为基于模型的测量规划技术工程化与综合评定提供了技术支撑和方法指导。

关键词: 测量规划; 质量评定; CATIA; MBD; 数字化检验

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.044



杜福洲

博士、副教授,主要从事制造系统工程、数字化装配与测量技术应用研究及装备研发等。

目前,制造业已基本实现了产品设计的数字化,但产品制造和检测仍以二维图纸作为主要信息载体,

尤其是零件检验这一环节,国内航空制造企业仍然依赖二维图纸表达检验需求。二维图纸与设计过程使用的三维模型导致双数据源现象,容易造成二义性、检验规划与产品设计更改不同步等问题,检验信息的数字化定义、设计及管理需要进一步规范^[1]。

国外先进的航空制造企业,如波音公司依托于CATIA系统,基于MBD技术实现了数字化检验在航空产品中的应用,无论在检验范围、检验精度及检验效率上,数字化检验方法都远远超过了传统方法,有效提高了检验的速度和精度。国内部分高校与航空制造企业基于MBD技术在数字化检验领域进行了研究。秦鹏^[2]通过分析计算机辅助检验规划系统的特点,构建出Prosens原型系统,针对不同的检测特征设计出符合检测精度的测量规划;段桂江等^[3]针对飞机结构件,提出了融合MBD思想的三维检验规划技术应用体系,并从

检验工艺模型定义、数据组织、检验信息管理与应用等方面进行了研究。国内外学者针对产品几何尺寸的质量评定提出了许多算法,Novaski等^[4]提出了基于Voronoi图的圆度误差评价法;Huang^[5]针对大量采样数据,给出了基于凸包的三维直线度和平面误差评价的有效方法;Carr等^[6]在公差数学定义基础上建立了直线度等误差评价的非线性规划模型,将非线性目标函数变换为一系列线性规划问题。当前零件几何尺寸的质量评定主要基于描述理想尺寸的几何学理论开展,难以考虑多几何特性与产品功能要求的关联,因此在描述具有随机特征的加工误差与测量过程中存在不足。

本文通过对MBD技术体系的研究,提出基于多几何特性的测量规划、测量仿真与执行、数据分析与评定的质量检测与评定应用框架,并讨论测量规划与质量评定中的关键技术。

* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2016206B009)。

基于 MBD 的零件测量规划与质量评定框架

以 MBD 规范体系为基础,将测量需求信息定义在三维模型中,可以实现对产品检验信息的全生命周期管理。基于 MBD 的测量规划系统与质量评定方法体系如图 1 所示。本研究将测量规划与评定体系分为 3 个分系统:基于 CATIA 二次开发的测量规划系统、基于 B/S 架构的信息管理系统和基于 MATLAB 算法支持

的质量评定系统。

在该体系中,基于 MBD 的零件测量需求定义和组织是基础,依照 MBD 测量规划体系规范,可以建立集成完整检验信息的模型。计算机辅助测量规划系统识别并提取检验模型中的几何信息与公差信息,制定测量需求。根据测量需求,通过分析选择合理的测量设备,制定测量顺序及其规划,基于所选测量设备进行测量过程仿真,对测量路径进行优化,生成无碰撞的检测路径。规划结果

为 XML 格式文件,经过转换器生成测量程序文件,测量程序文件由后置处理器生成测量设备控制命令,执行测量操作。

通过计算机辅助测量规划系统将检验模型中的几何特征和公差信息转化为测量特征信息,成为集成三维模型、测量任务信息、测量规划信息等的产品测量信息模型,是整个检测系统统一的数据源,减少了由于产品三维模型更改造成的信息数据不一致等现象。

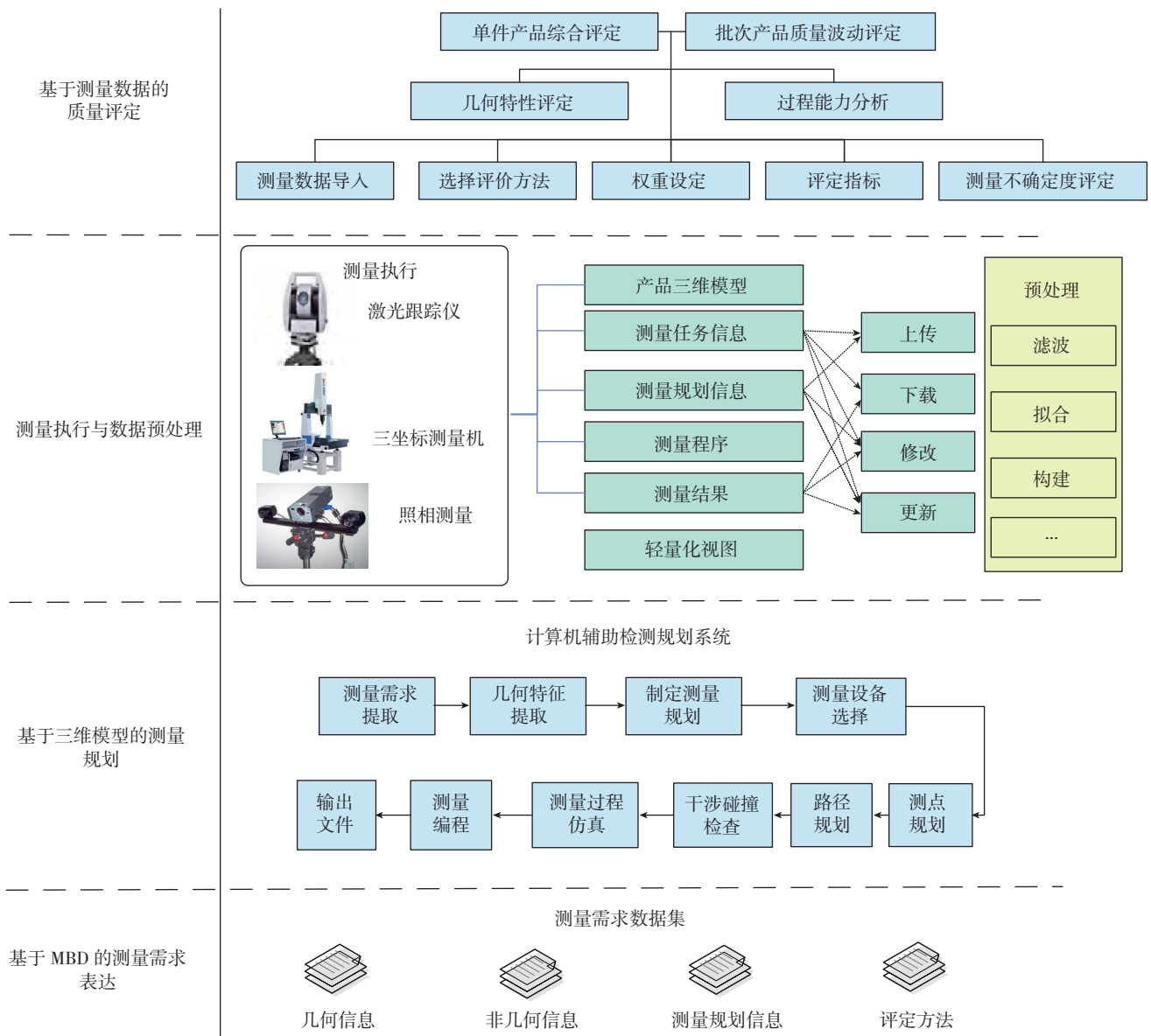


图1 数字化检测与质量评定框架
Fig.1 Digital testing and quality assessment framework

三维数字化检测综合管理系统对产品的三维模型和各种测量信息建立了关联,并支持随着三维模型设计的更改,测量模型自动同步更新。同时针对集成完整检验信息的测量规划模型,利用 3DVIA Composer 等轻量化模型获得轻量化视图,在 B/S 架构系统的界面中可以输出轻量化视图以及各种测量结果的分析报表。此外,该系统还对各种测量设备进行统一管理,以供测量规划系统调用。

在数据测量中,存在着各种随机误差,需要对系统误差、随机误差、粗大误差进行处理。对测量数据进行处理的方法包括:不确定度的算法、稳定点异常点算法等。不同算法针对具体的业务过程实现相应的功能,如测量评价、测点不确定的评估、数字化对接和对接仿真等。在测量数据时,应构建产品评定指标体系,对产品的测量项目进行合理权重,分析测量数据的分布并对产品综合质量进行评定。

关键技术及方法

1 基于MBD的测量需求表达

零件的测量需求以设计模型为基础,除需要包含完整的几何信息外,还需包含完整的非几何信息,如尺寸公差、形位公差、材料、加工工艺等,依托满足 MBD 规范和定义完整信息的三维模型,可以实现对零件全生命周期的管理^[7]。以 MBD 体系规范为定义原则,通过对设计模型进行测量规划信息的添加,形成完整表达测量需求的检验模型,将其上传至检测综合管理系统中,生成相应的检测流程。

MBD 检验数据的定义与组织,需要通过以零件为中心把设计数据(几何模型)、工艺数据和生产数据组织在 BOM 结构树上^[7]。本文采用 CATIA 特征树方式对测量规划信息进行管理,将测量需求信息集成到数模中^[8]。基于特征树对数据进行定

义与组织的关键在于测量规划信息的特征建模,相关特征包括用于存储检测工序信息的工序特征、测量点位信息的测点特征、测量路径信息的路径特征。依照关联关系与操作逻辑对各类特征进行结构的组织,从而完成测量规划信息的特征建模。同时,基于特征树的管理方式实现了数据的导航与显示管理,让用户可以查看、操作需要的数据。

零件测量需求的信息结构如图 2 所示,包括几何信息、非几何信息、测量规划信息和评定方法。其中,检验工序包含检测工序号、检测名称信息。检测对象通常是指与制造要求相关联的几何特征,用于指导现场作业。检测方式分为自动测量和手工测量,使用工具包括激光跟踪仪、三坐标测量机、照相测量、游标卡尺、千分尺等。使用激光跟踪仪时,测量规划的主要内容是测量的布局规划和激光跟踪仪的站位规划。零件测量需求中包含评定方法描述,针对不同的几何特性所选择的评定方法有所不同。

2 测量规划技术

在测量规划阶段需要完成工步设计,具体包括配置测量设备参数、工件坐标系建立、测量规划及路径优化和可达性分析。

目前测量规划的难点主要在于自由曲面的测点规划,针对这个难点研究较多的自由曲面测点规划的算法有截平面法、曲面细分法等^[9]。本文在 UV 布点法的基础上,加入基于

曲线曲率的优化方法,使测点密度与曲面曲率变化相关,实现曲率自适应布点,解决了自由曲面采点密度不合理的问题。通过对几何特征表面进行测点排序,生成了测量路径,其中测点排序实现了按最近距离排序的算法。测量排序结束后,会按照顺序连接各测点生成测量路径。

在虚拟环境下进行测量过程的干涉碰撞检测来验证规划路径的正确性,可以代替现实中的在机试验,避免了设备与工件之间的意外碰撞,使设备或工件不被损坏。在测量规划和运动仿真中,需要通过分析测量对象选择合适的测量设备,不同测量设备的测量仿真内容不同,如表 1 所示。按照测量仪器类型,可将干涉检查分为针对接触式测量的测头碰撞检查和针对光学测量的光路可达性检查。对于测头碰撞检查,可采用扫描体与零件静态干涉进行碰撞检查,将测头沿测量路径运动生成的扫描面与零件表面进行求交运算,若存在交集,则发生碰撞。对于光路可达性检查,可采用求取光源到测点的线段与零件非测量表面交集实现干涉检查。

三维空间物体的干涉检测算法分为静态干涉和动态干涉两类。动态干涉又分为单步检测法和扫描体检测法两类。考虑到计算需要的时间,一般采用单步检测法。静态干涉检测是一个较为复杂的问题,对其研究已经相当成熟,主要算法有层次包围盒法、空间分解法和距离跟踪法。

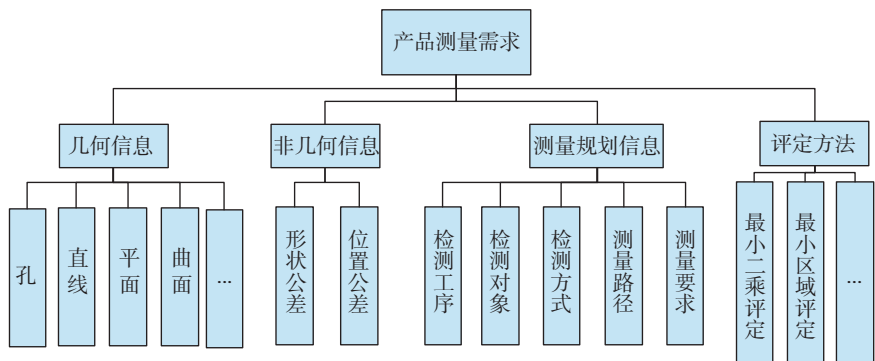


图2 零件测量需求的信息结构

Fig.2 Information structure for part measurement requirements

本文通过单步检测法实现对运动过程动态干涉碰撞的检测。运动仿真与干涉碰撞检测流程如图3所示。

测量规划在CATIA系统中完成后,使用XML中间文件实现测量规划系统与检测综合管理系统的集成。XML中间文件主要包含测量规划系统的测量规划设计结果,其根元素为“Inspection Plans”,包含多个测量规划元素“PLAN”以及测量程序和测量流程的定义。

3 测量数据的管理

通过对测量数据的定义进行统一规范,将零件几何信息与非几何检测信息进行融合。以MBD检验模型作为检验的唯一依据和数据源,更能保证测量规划信息数据的正确性、完整性及设计数据在传递过程中的唯一性。

三维模型设计好后,设计人员在其中定义相关非几何信息,如公差要求等。在三维检验规划系统中打开该模型,进行相应的测量规划,可以生成测量规划模型。测量规划中集成了原有三维模型中的信息(如零件号、几何信息等,还包含测量路径、坐标系等检验信息)。将测量规划模型上传至检测综合管理系统中,由管理系统解析测量规划结果,生成相应的检测流程。

现场测量工人从检测综合管理系统下载相关文件(对于人工测量是工艺文件,对于自动测量是测量程序),根据相应文件执行测量,并将测量数据上传至检测综合管理系统中。设计人员在检测综合管理系统中查看测量状态及测量结果,对数据进行分析,可根据需要修改设计并更新至检测综合管理系统。

4 零件质量综合评定方法

基于多几何特性对零件的质量进行综合评定,具体步骤为:对测量数据进行处理并获取特征值与规范值的操作及算子技术,构建质量指标与权重设计,基于综合评价法对零件

质量进行评定。

质量指标的构建基于各几何特性对性能、成本、预警、市场反馈等的重要程度。对测量数据的各测量项目进行合理权重,权重方法基于综合考虑多几何特性对零件多维度评定角度的影响展开研究,采用层次分析法、熵权法来定量地对各项赋予权重。研究面向多几何特性的质量综合评估方法,是将零件质量综合评定从定性转为定量。

基于多几何特性的综合评定是在对每一项几何特性评定的基础上开展的,常用几何误差的评定方法包括最小二乘法、最小包容区域法等,在本文的综合评定方法中,应该为需

要评定的多几何特性选择合适的评价方法,如表2所示。

对零件几何尺寸的质量进行客观评定,测得的数据带有测量不确定度。针对测量数据有限情况下的非统计测量不确定度,选用灰色系统理论和模糊集合理论来建立测量不确定度的评定模型^[10]。选用最大熵法以及模糊集合理论求解测量概率分布,并用于测量结果的评定,判定原则如图4所示。根据测量结果落在不同区域,可以得到不同的判定结果:当落在一致区域时判定合格,不一致区域判定不合格,灰色区域由供求双方协商决定^[11]。

将基于多几何特性的综合评定

表1 测量规划与过程仿真相关内容

测量设备	规划内容	仿真内容	输出形式	适用场景
激光跟踪仪	点集、测量路径	光路可达性	测点坐标	大尺寸工件尺寸、装配测量
全站仪				精度要求不高的测量任务
iGPS	点集、iGPS 站位	光路可达性	坐标测量、跟踪测量、准直定位、监视装配等	测量精度要求不高的测量任务
数字照相测量	相机位置、姿态	可视性	点云空间坐标	装配件数量检测、动态物体的快速坐标测量
三维激光扫描	点集、站位	光路可达性	点云空间坐标	飞机蒙皮接缝宽度、阶差等装配质量的现场快速检查
三坐标测量机	点集	干涉检查	点云空间坐标	被测物的尺寸、加工误差评定

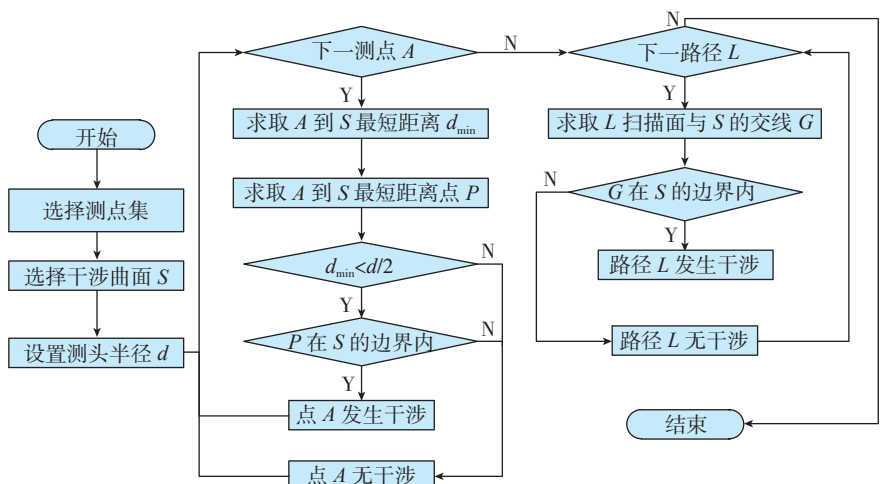


图3 运动仿真与干涉碰撞检查流程图

Fig.3 Motion simulation and interference collision check flow chart

问题分为4个集合：评价指标集、评价等级集、权重系数和评定模型。评价指标集是把总的评价目标分解为各个指标的集合，以便分层逐步评价；评价等级集表示对评价指标划分等级的集合，是评价人员对各层次评价指标所给出的评语集合；权重的计算采用层级分析法；评定模型即各层用于综合评定的数学方法（如模糊综合评价法等），其中针对不同的测量对象和测量设备，测量数据服从不同的分布（如服从正态分布，需根据测量数据的分布区域和密度对几何特性进行分等级或分数的评定）。

应用验证

为了展示基于模型的测量规划与质量评定方法的应用，基于CATIA二次开发平台进行测量规划系统的开发，包括检测需求提取、测量规划创建、测量设备选择、测点规划、路径规划、干涉碰撞检查、测量过程仿真、测量程序导出等；基于B/S架构的管理系统对检验信息进行综合管理，包括测量文件管理、测量结果上传与更新等；基于MATLAB完成对零件的质量综合评定，包括测量数据预处理、测量不确定度评定、质量综合评定等。

本文以大型组合曲面的质量评定为例进行应用验证（图5），曲面的评定方法以实测数据和理论数据为基础，使用面轮廓度评定方法显示实际轮廓面与理论轮廓面的偏差水平，操作过程如图6所示。

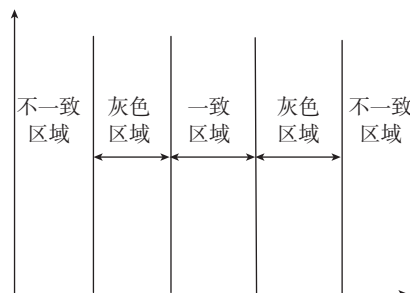


图4 测量不确定度的合格性判定原则

Fig.4 Principle of determining the eligibility of measurement uncertainty

基于理论点云与实测点云的面轮廓度误差评定可以反映实际被测

表2 评定方法选择

形位公差	评价方法
直线度	最小包容区域法、最小二乘中线法
平面度	最小包容区域法、最小二乘平面法
圆度	最小区域法、最小二乘法、最小外接圆法、最大内切圆法
圆柱度	最小区域法、最小二乘法、最小外接圆柱法、最大内切圆柱法
线轮廓度	分割逼近法、最小二乘法
面轮廓度	最小二乘法

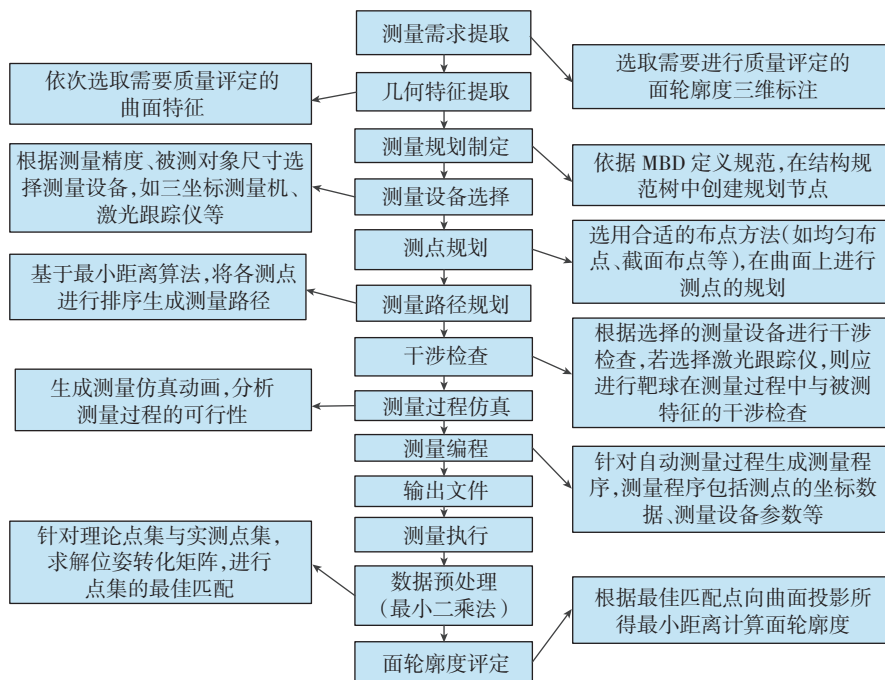
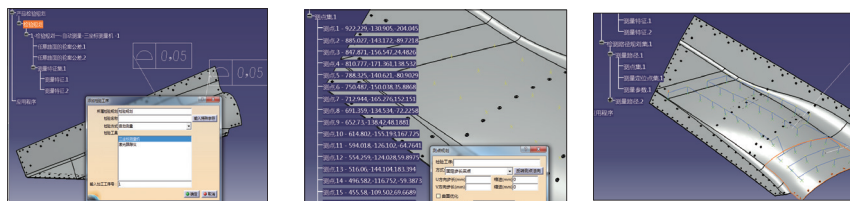


图5 基于模型的测量规划与质量评定过程（以大型曲面的面轮廓度评定为例）

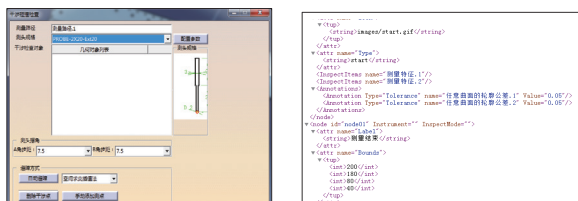
Fig5 Model-based measurement planning and quality assessment process (case study of surface profile assessment of large surfaces)



(a) 测量需求提取

(b) 测点规划

(c) 测量路径规划



(d) 测量过程仿真

(e) 输出文件

图6 实例验证过程

Fig.6 Instance verification

轮廓面与理论轮廓面之间的偏离变动程度,也能总体反映曲面装配的外形质量。本文采用最小二乘法进行面轮廓度误差的评定,在评定过程中需要体现关键质量特性上测量点的重要性,分布在影响装配质量的关键曲面上的测量点对于综合质量影响度要高于非关键点^[8,12],因此在综合评定时,分析不同测量点的重要性,对所有曲面计算面轮廓度值并赋予权重值,以此作为计算大型曲面质量的评定依据^[13]。评定过程如图7所示。

结论

本文提出了基于模型的数字化测量规划与测量数据分析评定的应用框架,并讨论了自由曲面测点规划、干涉碰撞检查等关键技术,在CATIA二次开发平台中实现了检测需求规范性表达与数字化测量规划,并以大型曲面的面轮廓度评定为例在流程和功能上对其进行了验证。本文研究为基于模型的测量规划技术工程化与综合评定提供了技术支撑和方法指导。

参考文献

- [1] 杜福洲,梁海澄. 三维数字化集成检测系统实现关键技术研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(5): 1-5.
- [2] 秦鹏. 计算机辅助检测规划系统的研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
- [3] 段桂江,岑荣. 基于MBD的飞机结构件检验规划技术研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 63-65.
- [4] 段桂江,岑荣. 基于MBD的飞机结构件检验规划技术研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(19): 63-65.
- [5] NOVASKI O, BAREZAK A C. Utilization of voronoi diagrams for circularity algorithms[J]. Precision Engineering, 1997, 20(3): 188-195.
- [6] HUANG J P. An efficient approach for solving the straightness and the flatness problems at a large number of data points[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(1): 15-25.
- [7] CARR K, FERREIRA P. Verification of form tolerances, Part I: basic issues, flatness,

and straightness[J]. Precision Engineering, 1995, 17(2): 131-143.

[7] 周秋忠,范玉青. MBD技术在飞机制造中的应用[J]. 航空维修与工程, 2008(3): 55-57.

ZHOU Qiuzhong, FAN Yuqing. Application of MBD technology in aircraft manufacturing[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2008(3): 55-57.

[8] 卢鹤,韩爽,范玉青. 基于模型的数字化定义技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(3): 80-83.

LU Hu, HAN Shuang, FAN Yuqing. Model based digital definition technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(3): 80-83.

[9] 郑成成,杜福洲. 基于模型的大型曲面外形检测与评定[J]. 制造业自动化, 2016, 38(12): 55-56.

ZHENG Chengcheng, DU Fuzhou. Detection and evaluation of large surface profile based on model[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(12): 55-56.

[10] 刘建坤,朱家平,郑荣华. 测量不确定度评定研究现状及进展[J]. 现代科学仪器, 2013(5): 12-17.

LIU Jiankun, ZHU Jiaping, ZHENG Ronghua. Research status and development of evaluation of measurement uncertainty[J]. Modern Scientific Instruments, 2013(5): 14-15

[11] 吕晓娟,黄美发,孙永厚. 基于模糊集合理论的不确定度评定[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 34-36.

LÜ Xiaojuan, HUANG Meifa, SUN Yonghou. The uncertainty estimation based on fuzzy interval theory[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008(9): 34-36.

[12] 刘志存,邹冀华,范玉青. 飞机制造中关键特性的定义与管理[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(10): 2013-2018.

LIU Zhicun, ZOU Jihua, FAN Yuqing. Definition and management of key features in aircraft manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2007, 13(10): 2013-2018.

[13] 王巍,高雪松,俞鸿均,等. 基于关键测量特性的飞机装配工装在线检测[J]. 制造业自动化, 2016, 38(5): 107-110.

WANG Wei, GAO Xuesong, YU Hongjun, et al. On-line testing of aircraft assembly tooling based on key measurement characteristics[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(5): 107-110.

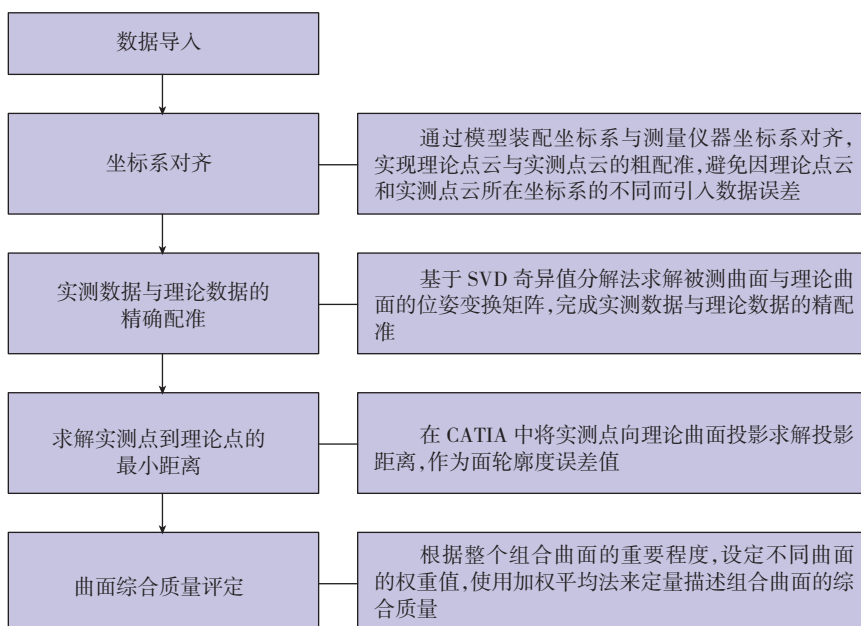


图7 采用最小二乘法进行面轮廓度评定

Fig.7 Surface profile evaluation using the least square method

通讯作者: 杜福洲, E-mail: du_fuzhou@163.com。

Research on Application Framework of Measurement Planning Based on Model Definition and Quality Evaluation

DU Fuzhou, GUO Ruizhen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The technology of three-dimensional inspection planning for parts is studied. An inspection planning and quality assessment framework based on multi-geometric characteristics is proposed. Then it is introduced through measurement requirements expression based on MBD, inspection planning, measurement execution and data preprocessing, and quality assessment. Finally, the prototype system was developed in the CATIA secondary development platform and the preliminary verification was carried out. The research provides technical support and methodological guidance for engineering and comprehensive evaluation of model-based measurement planning technology.

Keywords: Measurement plan; Quality assessment; CATIA; MBD; Digital test

(责编 逸飞)

(上接第36页)

CHEN Songlin^{1,2}, XIA Renbo¹, ZHAO Jibin¹, ZHANG Hongyao^{1,2}, HU Maobang^{1,2}

(1. Equipment Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

[ABSTRACT] Aiming at dealing with the problem of digital detection of flush and gap between aircraft skins, the measurement technology of detection method is studied based on the grating projection technology. Firstly, the dense point cloud data of surface to be measured is obtained using the technology of grating projection; Then, the seam area is positioned from the image, and the point cloud data of the seam area is obtained according to the correspondence between the point cloud and the image; After that, the point cloud data is analyzed and the joint on both sides of a straight line segment is determined. And based on them, the flush and gap are calculated. Compared to the structure line technology, the proposed method can obtain more data. Besides, we can analyze all seams during one measurement and thus, the detection efficiency is very high. The experimental results show that the mean error of the proposed method is less than 0.03mm and the maximum error is less than 0.05mm, which can meet the requirements of aircraft skin seam testing.

Keywords: Aircraft skin; Grating projection measurement; Seam; Flush; Gap

(责编 李丹)

(上接第43页)

machine tool carried the vision sensor to each pre-determined position to grab image of each connection hole. The system software extracted and located the actual information of the connection holes from the image in a parallel processing way. An error evaluation procedure was developed in the software to finally complete the non-contact rapid connection hole inspection. The work flow, software and hardware architecture of the system were introduced. The key techniques such as the calibration of system parameters, the generation of NC inspection codes and the error evaluation method were discussed in detail. The inspection results of actual aircraft parts demonstrate that the efficiency of the developed on-machine vision inspection system is as high as 5s/hole, and the precision is about 0.01mm. It well satisfies the inspection requirements of large quantity of small size connection holes distributed on complex surfaces.

Keywords: Connection hole; On-machine inspection; Vision inspection; Image acquisition; Error evaluation

(责编 逸飞)