

三维模型大尺度坐标测量辅助设计与评估方法*

杨景照,李国喜,吴宝中,龚京忠

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对大尺度产品三维模型坐标测量信息缺乏和面向任务坐标测量结果质量评价困难的问题,引入新一代产品几何量技术规范(GPS),提出了基于CATIA二次开发技术的坐标测量辅助设计方法,设计了CAD与CMM集成的XML数据结构,建立了坐标测量数据的UML模型;实现了符合新一代GPS要求的测量方案脚本化描述,开发了部分数据处理算法;提出了基于Monte Carlo方法的坐标测量不确定度评估方案和流程。基于以上技术开发了基于三维模型的大尺度坐标测量设计与评估系统并应用于飞机装配中的部件位姿测量,结果表明,设计的测量方案能够满足飞机柔性装配对接的要求,验证了上述方法的有效性。

关键词:坐标测量设计;坐标测量评估;测量不确定度

中图分类号:TP391.76 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)04-0140-06

Three dimensional CAD-based computer aided design and assessment method for large scale coordinate measurement

YANG Jingzhao, LI Guoxi, WU Baozhong, GONG Jingzhong

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:To deal with the lack of information for coordinate measurement of three-dimensional model and the difficulty of quality evaluation of task-specific coordinate measuring results, the computer aided design method for coordinate measuring technology based on the secondary development of CATIA system was presented, according to the new generation Geometrical Product Specifications (GPS). The XML data structure for integration of CAD and CMM was designed. The extended data model used UML technology for coordinate measurement was established. The scripted description of measurement process meeting the requirements of new generation of GPS was achieved. Some algorithms for measurement data processing were developed. And method and process of measurement uncertainty evaluation based on Monte Carlo simulation were proposed. Based on the above methods, the special software for three dimensional CAD-based computer aided design and assessment was developed and applied in pose measurement for assembly of aircraft parts. The results indicated that the measurement plan generated by the special software meets the requirements of part docking in aircraft flexible assembly, thus the effectiveness of the method was verified.

Key words: design of coordinate measurement; coordinate measurement evaluation; measurement uncertainty

基于三维模型的坐标测量技术已经成为打通设计、加工、装配、检测各个环节,实现数字化设计制造检测并行工程的核心技术。国内外科研机构、企业和学者对基于三维模型的坐标测量技术进行了广泛而深入的研究,热点主要集中在测量辅助装配、测量工艺规划、测量数据处理等方面,各厂家也纷纷推出功能更加全面的基于三维模型的测量软件。法国 Metrologic Group^[1]开发的 Metrologic Inspection V5 软件完全嵌入 CATIA V5 CAD 软件,可以直接访问三维模型数据并且连接到大部分坐标测量设备进行测量仿真、数据处理与报告输出。欧洲宇航防务集团的 Marguet^[2]介

绍了基于测量的装配在空客飞机总装中的应用,将 MAA (Measurement-Assisted Assembly) 系统划分为基于模型的测量系统、位姿优化软件和集成系统三部分。沈阳飞机工业有限公司冯子明^[3]分析了飞机数字化检测技术的现状和需求,构建了基于三维模型的飞机数字化快速检测技术体系,阐述了实现该系统的关键技术。北京航空制造工程研究所邹冀华^[4]等将飞机柔性装配中的数字化测量系统分为三大块内容:计算机辅助测量样机设计系统环境、测量系统环境和测量使用系统环境,其中首要的就是以产品三维模型为核心,生成以测量为目的的三维数字模型,后续测量

* 收稿日期:2013-11-21

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:杨景照(1989—),男,河南南阳人,博士研究生,E-mail:yjz_203@163.com;

李国喜(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lgx2020@sina.com

计划、测量执行与测量数据处理以测量数字模型为数据输入。北京航空航天大学郑联诤^[5]利用 CAA 对 CATIA 软件进行二次开发,设计开发了集成大尺寸测量软件系统,实现了设计信息与测量信息的统一管理和互操作。

虽然基于三维模型的大尺度产品坐标测量研究取得了不少的成果,但是目前在实际制造过程中还存在一些问题:(1)设计人员、工艺人员与检测人员相对独立。(2)大部分商业测量软件(如 PC-DIMS、CALYPSO、Virtual DMIS 等)没有直接将坐标测量过程数字化描述的功能,不利于计算机辅助测量规划和测量仿真。(3)大尺度坐标测量影响因素众多,不易建立解析模型,面向任务的测量不确定度评估没有成熟的支持软件。(4)在实际应用中,大尺度产品的测量方案主要通过多次试验结果与传统方法或标准仪器的测量结果进行比对来确定,效率低,成本高。

1 大尺度坐标测量分析

基于三维模型的大尺度产品坐标测量过程与传统的坐标测量过程有所不同,如图 1 所示^[6]。

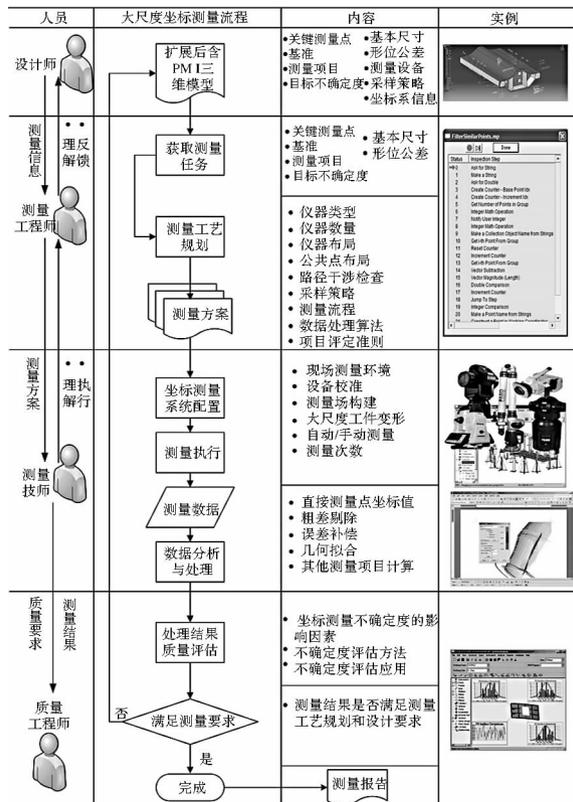


图 1 基于三维模型的大尺度坐标测量过程

Fig. 1 Process of large-scale coordinate measurement based on CAD model

首先测量工程师将设计师生成的零件或产品的三维模型导入测量系统,从三维模型中提取测量信

息,理解设计师的意图,获取测量任务;然后,针对具体的测量任务进行测量工艺规划,包括测量场构建、采样策略、数据处理算法等;规划后确定的测量方案由测量技师在现场实施,包括测量系统配置、测量数据采集、分析与处理等;最后,质量工程师对测量结果进行质量评估,主要是对测量不确定度进行评估,并基于测量结果及其不确定度对产品进行合格判定。

由图 1 分析可知,在产品阶段需要面向坐标测量需求完善与规范坐标测量信息,为后续坐标测量数据获取及数据处理过程提供科学的信息输入。在产品验收阶段,需对测量结果及其质量进行分析与评价,降低产品合格误判的概率。

针对上述需求和研究现状,本文引入新一代 GPS (Geometrical Product Specifications)^[7-10],提出了利用 CAD 软件和测量软件的二次开发技术完善三维模型测量信息的坐标测量辅助设计方法和基于测量过程仿真的测量全程蒙特卡罗不确定度评估方法实现对坐标测量结果质量的评估,提高坐标测量的质量和效率,为产品测量方案的制定和合格判定提供支撑和依据。

2 坐标测量辅助设计方法

2.1 测量任务信息

根据新一代 GPS 规范,坐标测量应包含分离、提取、拟合、构造、集成、评估等操作,而现有 GD&T (Geometrical Dimensioning and Tolerancing) 等几何量测量相关标准仅从几何角度来描述,未考虑坐标测量的特殊性,对坐标测量相关的采样策略、数值算法等未明确,导致数字化测量可信程度不高。譬如在标注时经常使用“面-面”距离,但却没有明确给出符合坐标测量的面面距离定义,导致在测量和评价时标准和方法不统一,给测量结果引入规范不确定度。同样在对形位公差进行评定时,没有按照符合要求的评定准则也会引入规范不确定度。

由上述分析可知,应根据新一代 GPS 规范扩展具体任务的坐标测量信息,主要包括测量项目定义(如 GD&T)、测量基准要素和测点的分布、测量不确定度目标,测量仿真次数等内容,这些信息与三维 CAD 模型相关联。以 CATIA 平台为例,坐标测量定义扩展通过 OLE Automation&VBA 与 CATIA 系统相连,实现测量定义在三维模型上的可视化展现。表面标识 annotation 与相关要素绑定,测量方法与几何公差(GD&T)标注绑定。由于自动识别灵活性不高,且为了表达和形成文档

的方便,测量所涉及的相关表面标识在同一三维模型中不得重复。扩展的可视化坐标测量信息通过 XML 文档与测量软件集成,XML 数据结构见图 2。点、线、面等基本几何元素和新一代 GPS 中

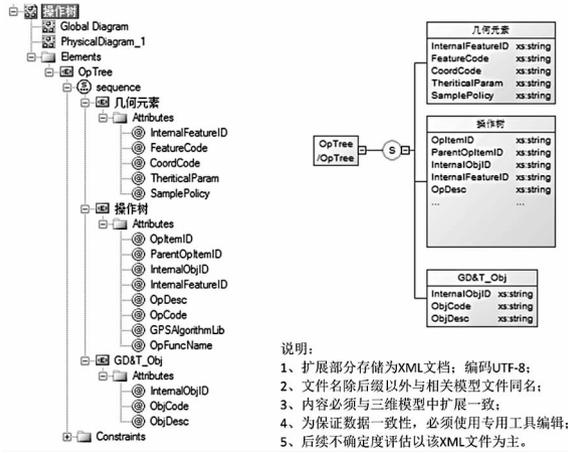


图 2 与测量软件集成的 XML 数据结构

Fig.2 XML structure for integration of CMM

规定的要素方位特征,在坐标测量过程中必须使用统一的表达形式,使得测量任务从定义、拟合到认证的操作唯一规范,减小坐标测量结果的规范不确定度。本文采用表 1 和表 2 所示的关于坐标测量相关要素及其方位特征的统一参数化数据表达方式^[8]。考虑到可扩展性,所有参数均考虑齐次坐标应用,基于此设计出如图 3 所示的坐标测量数据 UML 模型^[11],其中核心数据为 CkdGeoElement,理论数据(data0)与实际数据(data1)均可存储。由于部分几何元素是中间运算结果,可以通过重定义 kdReal 来使用不同的浮点数精度。计算机存储时数据类型采用双精度浮点数,为满足 XML (Extensible Markup Language) 集成需求,将其每个字节转换成十六进制。

表 1 几何要素统一参数化描述

Tab.1 Unified characterization of geometric element

要素	参数	说明
坐标系	(p_0, i, j)	p_0 为原点, i, j 为两轴的正向单位向量
点	(x, y, z)	x, y, z 分别为三个坐标向量
平面	$(p; a)$	p 为平面上一点, a 为平面法向量(单位向量)
直线	$(p; a)$	p 为直线上一点, a 为直线单位方向向量
圆	$(c; a; d)$	c 为圆心, a 为圆单位法向量, d 为直径
圆柱	$(c; a; d)$	c 为圆柱轴上一点, a 为轴线单位方向向量, d 为圆柱的直径
圆锥	$(p; a; \varphi; d_1, d_2)$	p 为圆锥轴线上的一点, a 轴线单位方向向量(指向锥角), φ 为圆锥角, d_1, d_2 为小头和大头直径
球	$(o; d)$	o 为球心, d 为球的直径
其他曲线	$(p_1, p_2, \dots, p_n; desc)$	p_i 为曲线上控制点, $desc$ 为该曲线生成脚本或描述

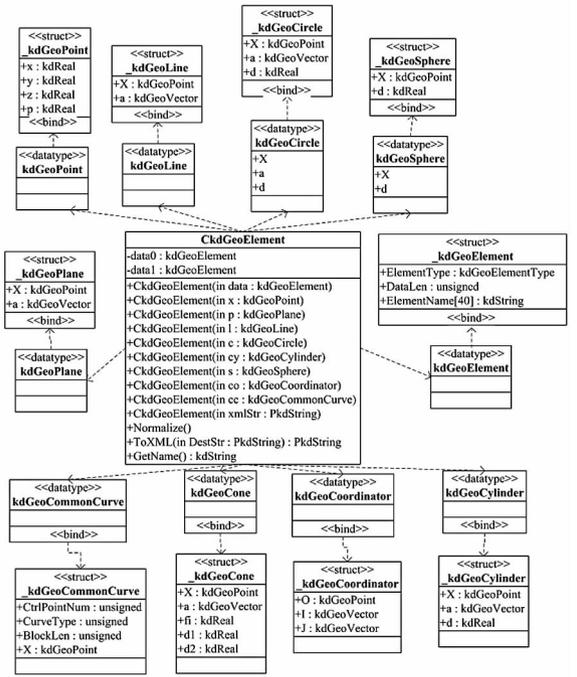


图 3 基于 UML 的坐标测量扩展数据模型

Fig.3 Extended data model based on UML

2.2 测量方案信息

测量方案包括测量仪器类型、数量、布局,公共点数量与布局,用于建立坐标系的基准特征,测量流程、采样策略等。特定测量任务的测点分布可表达为 (F, SD, SP, SN) , 其中 F 为相关特征的采样表面, SD 为选用的测量设备, SP 为采样点分布策略, SN 为采样点数, F 与 CAD 中内部特征 ID 一致。本文提出的测量方案脚本化技术是将测量方案所包含的信息有序规范地表达为计算机能识别和自动运行,同时测量人员容易理解的形式,因此采用基于商业化测量软件 Spatial Analyzer (SA)

表 2 要素方位特征数学描述

Tab. 2 Situation characteristics between features

序号	项目	数学定义	变量含义
1	点点距离	$d(PT_1, PT_2) = PT_1 - PT_2 $	PT :点; SL :直线;
2	点线距离	$d(PT_1, SL_2) = (A_2 - PT_1) \times a_2 $	PL :平面; d :距离;
3	点面距离	$d(PT_1, PL_2) = (A_2 - PT_1) \cdot a_2 $	$angle$:角度;
4	线线距离	$\begin{cases} d(SL_1, SL_2) = (A_2 - A_1) \cdot (a_1 \times a_2) / (a_1 \times a_2) & a_1 \times a_2 \neq 0 \\ d(SL_1, SL_2) = (A_2 - A_1) \cdot a_1 & a_1 \times a_2 = 0 \end{cases}$	A :直线或平面上点;
5	线面距离	$\begin{cases} d(SL_1, PL_2) = 0 & a_1 \times a_2 \neq 0 \\ d(SL_1, PL_2) = (A_2 - A_1) \cdot a_2 & a_1 \times a_2 = 0 \end{cases}$	a :直线的方向向量或平面的单位法向量
6	面面距离	$\begin{cases} d(PL_1, PL_2) = 0 & a_1 \times a_2 \neq 0 \\ d(PT_1, PL_2) = (A_2 - A_1) \cdot a_2 & a_1 \times a_2 = 0 \end{cases}$	
7	线线角度	$angle(SL_1, SL_2) = angle(a_1, a_2)$	
8	线面角度	$angle(SL_1, PL_2) = \pi/2 - angle(a_1, a_2)$	
9	面面角度	$angle(PL_1, PL_2) = angle(a_1, a_2)$	

测量计划 (MP) 文件的测量脚本描述技术^[12], 便于测量过程仿真及测量数据处理。脚本在计算机存储中采用 (ID, Platform, Script) 方式, 其中 ID 为测量任务的标识符, Platform 为测量平台的标识符, Script 为具体测量任务的测量脚本, 存储为 XML 格式。

2.3 算法信息

包括几何要素类型及其相关拟合算法、算法来源、认证机构、版本号、使用平台、URL 及算法库实体。算子序列采用有序树方法, 有序树顶层为测量项目, 此下每一层均为 GPS 算子, 底层为点集; 有序树中的节点分为两大类: 描述类和算子类。子层的算子输出为上一层的算子输入, 同层算子之间是有序的。描述类算子可置于同层任意位置, 不影响算子运行。

3 坐标测量不确定度评估方法

大尺度坐标测量首先由 2.1 节得到的规范三维模型获取测量任务, 根据扩展的测量方案进行坐标测量获取测量数据, 调用自己开发的算法库中的算法和测量软件中的算法进行测量数据处理得到测量任务的参数。

测量不确定度是反映测量结果分散性的参数, 完整的测量结果必须包含测量不确定度, 否则是没有意义的^[13]。因此, 对坐标测量结果进行测量不确定度评定是必要的。本文采用 Monte Carlo 方法^[14]来评价基于三维模型坐标测量结果的不确定度, 如图 4 所示。Monte Carlo 方法是测量不

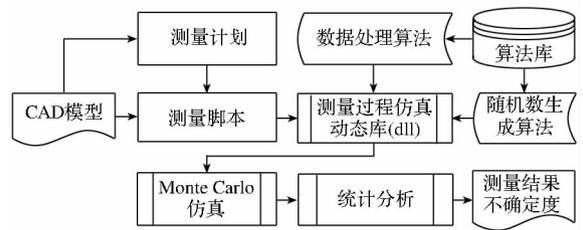


图 4 坐标测量 Monte Carlo 不确定度评估方案

Fig. 4 Monte Carlo method for uncertainty evaluation of coordinate measurement

确定度评定最为有效的方法, 它不需要建立精确的数学模型, 利用计算机不断提高的运算能力, 通过多次仿真来获取输出量的不确定度, Monte Carlo 算法的具体流程如图 5 所示, 其中随机数的生成是关键技术, 本文采用 Mersenne-Twister^[15]方法生成均匀分布的随机数, 然后应用 Box-Muller^[16]方法转换为正态分布的随机数。

4 系统实现及应用实例

采用本文提出的方法开发了基于三维模型的大尺度坐标测量设计与评价系统, 开发工具主要有 Delphi 2010、Oracle 9i、Visual Studio 2010、CATIA CAA 和 SA SDK 工具包等, 主程序开发使用 Delphi 2010, 算法部分采用 C++ 编制, 三维模型信息融合使用 CATIA VBA, 测量方案脚本化使用 SA SDK 和 Visual Studio 2010, 数据库的建表使用 PLSQL Developer。以飞机柔性装配中的部件位姿测量为例来验证本文提出的坐标测量辅助设计与评估方法的应用。

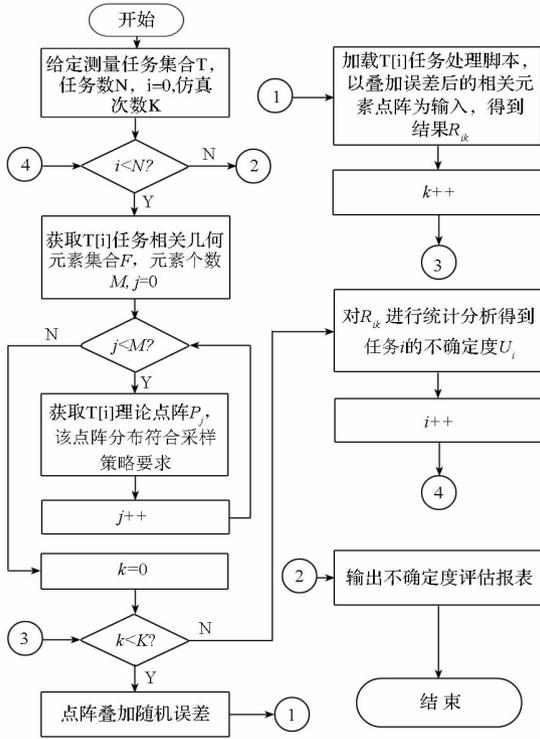


图 5 Monte Carlo 评估算法流程

Fig. 5 Flow of Monte Carlo algorithm

图 6 是翼身融合体坐标测量信息扩展的内容及扩展后的三维模型。经过规范设计的三维模型包含了用于机身对接位姿测量的任务信息、操作算子信息、测量工艺信息及测量方案脚本, 能够辅助测量工程师进行测量方案规划和测量仿真, 提高了测量效率。

通过系统的测量仿真功能多次模拟整个位姿测量过程并自动生成测量过程的误差随机数用于位姿测量数据处理, 图 7 是飞机部件装配位姿仿真测量的数据处理与不确定性评估结果。具体数据见表 3。按照位姿测量结果进行部件调姿后, 对接孔中心的偏差值及不确定性见表 4。根据给定的装配公差要求, 考虑测量不确定性, 可以评价测量方案是否能够满足飞机柔性装配对接的要求。本例中给定销孔公差为 IT9 级精度, 销的公差为 IT8 级精度, 则配合公差为 0.070mm。根据表 4 的数据考虑安全裕度可得, 对接孔中心偏差与 3 倍 sigma 测量不确定性之和小于配合公差, 测量方案可行。

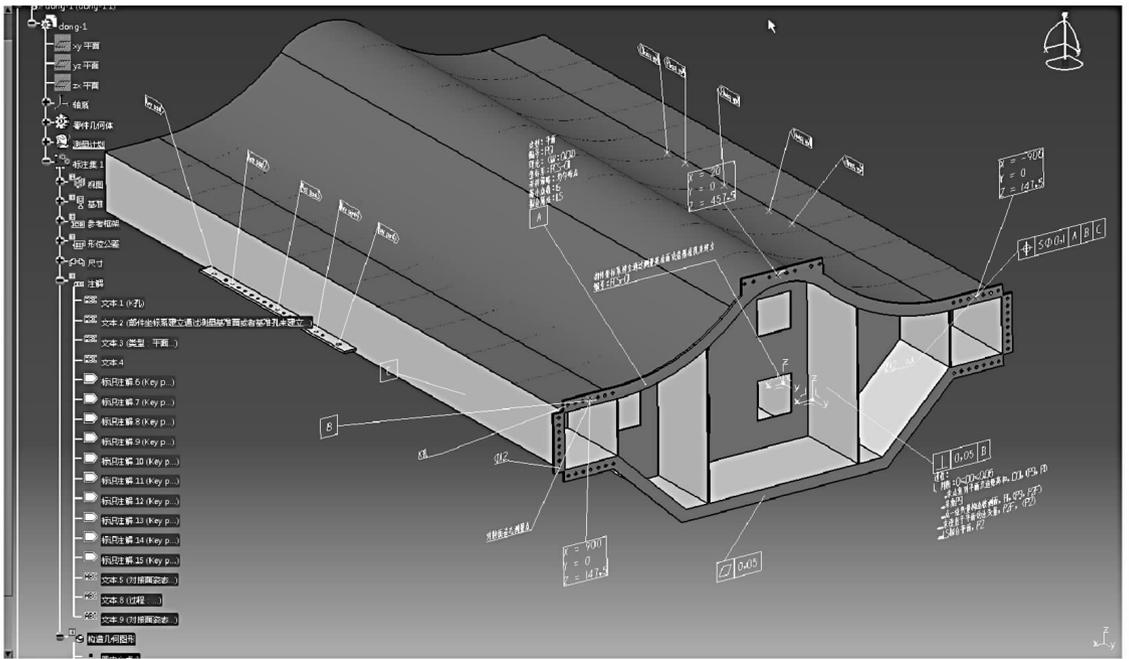


图 6 含规范坐标测量信息的三维模型

Fig. 6 CAD model comprised canonical information for coordinate measurement

表 3 位姿参数测量不确定性

Tab. 3 Measurement uncertainty of orientation and position

平移参数	不确定性	旋转参数	不确定性
δ_x	0.050mm	δ_{rx}	0.000'
δ_y	0.002mm	δ_{ry}	0.000'
δ_z	0.457mm	δ_{rz}	0.000'

表 4 对接孔中心偏差及不确定性 (单位:mm)

Tab. 4 Deviations and uncertainties of butt-joint hole center (unit: mm)

名称	偏差	不确定性
P1	0.0301	0.0127
P2	0.0250	0.0105
P3	0.0189	0.0082

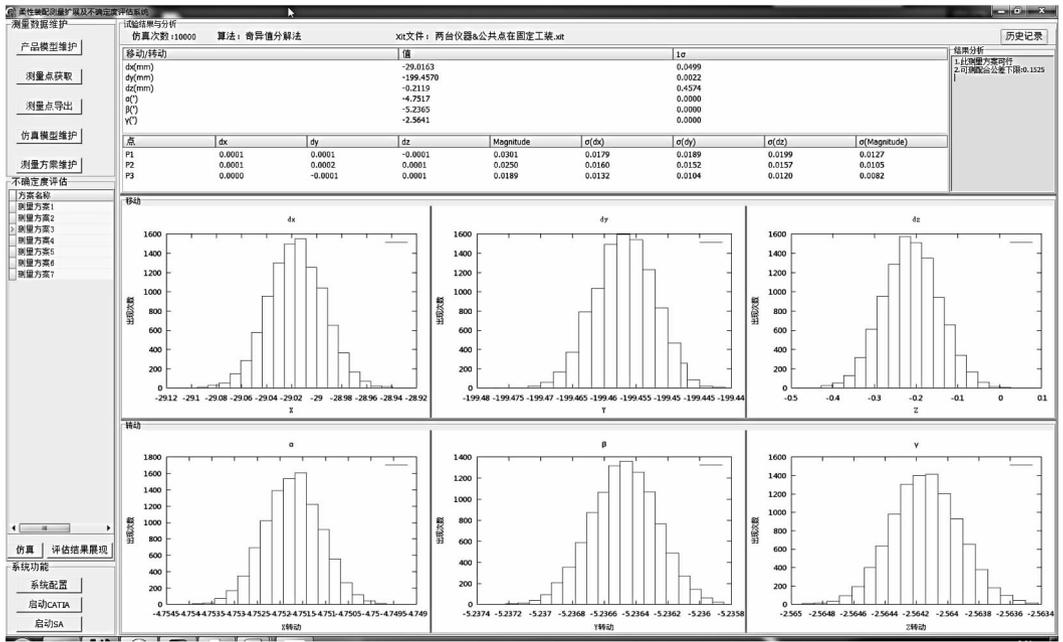


图7 位姿测量不确定度评估结果

Fig. 7 Results of measurement uncertainty of orientation and position

5 结论

本文提出了一种基于三维模型的坐标测量辅助设计和评估方法,并基于该方法开发了相应的软件系统。此类软件系统在大尺度制造领域尚未出现,该方法的应用可以减小基于三维模型大尺度坐标测量的规范不确定度,辅助设计人员改进公差设计和测量人员进行坐标测量规划。应用实例表明了该方法的有效性。该方法和系统可以应用于航空航天、汽车、船舶等领域。

参考文献 (References)

[1] Metrologic Inspection V5 [EB/OL]. http://www.3cmetrology.com.mx/pdf/software/silma_metrolog_V5.pdf.

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

[3] 冯子明. 基于三维模型的飞机数字化快速检测技术研究[J]. 航空制造技术, 2011, 21:32 - 35.
FENG Ziming. Research on digital and rapid inspection technology based on 3D model for aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 21:32 - 35. (in Chinese)

[4] 邹冀华, 许国康. 大型飞机装配中的数字化测量系统分析和研究[J]. 航空制造技术, 2010, 3:49 - 53.
ZOU Jihua, XU Guokang. Analysis and research of digital measurement system in large-scale aircraft assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 3:49 - 53. (in Chinese)

[5] 郑联语, 邵健, 朱绪胜. 集成于CATIA的大尺寸测量软件系统[J]. 航空制造技术, 2012, 11:40 - 42.
ZHENG Lianyu, SHAO Jian, ZHU Xusheng. Large-scale measurement software integrated in CATIA [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 11:40 - 42. (in Chinese)

[6] Overview of Spatial Analyzer [EB/OL]. <http://www.kinematics.com/spatial-analyzer>.

[7] 蒋向前. 现代产品几何量技术规范 (GPS) 国际标准体系 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(12):133 - 138.
JIANG Xiangqian. New generation ISO stand-ard system of GPS [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(12):133 - 138. (in Chinese)

[8] ISO/TS 17450 - 1: Geometrical product specification (GPS)- General concepts Part 1: Model f-or geometric specification and verification [S]. 2002.

[9] ISO/TS 17450 - 2: Geometrical Product Specification (GPS)- General concepts Part 2: General concepts, specifications, operators and uncertainties [S]. 2002.

[10] ISO 14253 - 1: Geometrical product specification (GPS)- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications [S]. 1998.

[11] 张沛. 基于三维模型的坐标测量定义扩展及不确定度评估 [D]. 长沙:国防科技大学, 2011.
ZHANG Pei. Coordinate measurement definition extension and uncertainty evaluation based on 3D Model [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[12] SA User Manual (2013. 03. 22) [EB/OL]. <http://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation>.

[13] Evaluation of measurement data-guide to the expression of uncertainty in measurement [S]. JCGM, BIPM, 2008.

[14] 张福民, 曲兴华, 叶声华. 基于蒙特卡罗仿真方法的大尺寸测量不确定度分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 184 - 187.
ZHANG Fumin, QU Xinghua, YE Shenghua. Uncertainty analysis in large-scale measurement based on Monte Carlo simulation method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(1): 184 - 187. (in Chinese)

[15] Matsumoto M, Nishimura T. Mersenne Twister: A 623-Dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator [J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998, 8(1): 3 - 30.

[16] Box G E P, Muller M E, A note on the generation of random normal deviates [J] The Annals Mathematical Statistics, 1958, 29: 610 - 611.