

智能三坐标测量中的检测信息识别 与获取技术发展

方忆湘,高 婷,黄风山

(河北科技大学机械工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:智能三坐标测量中的检测信息主要包括公差信息和几何信息,其识别与获取是实现计算机辅助设计技术与三坐标测量机集成的关键因素。介绍了智能三坐标测量技术的概念和基本原理,回顾了检测信息获取的发展历程和主要研究工作,基于当前全三维数字化设计技术的发展状况,讨论了一种基于模型定义的检测信息识别和获取方法。结合当前所承担的研究课题,针对通用三维设计软件下建立的零件模型,给出了检测信息识别与获取流程和实现结果。

关键词:智能三坐标测量机;检测信息;识别与获取;基于模型的定义

中图分类号:TP391.7 **文献标志码:**A

Development of technology for recognizing and extracting inspection information in intelligent coordinate measurement

FANG Yixiang, GAO Ting, HUANG Fengshan

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: Inspection information in intelligent coordinate measurement contains tolerance information and geometric information, and the recognition and extraction of the information is the key factor for the integration of computer aided design and coordinate measuring machine. This paper introduces the fundamental principle of intelligent coordinate measurement, and reviews the development of extracting inspection information research work. Based on the current development status of full 3D digital design technology, a model-based definition method of recognizing and extracting the inspection information is proposed. Considering our current research subject and the part model built in general 3D design software, the process and result of information recognition and extraction are presented.

Key words: intelligent coordinate measuring machine; inspection information; recognition and extraction; model-based definition (MBD)

三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)通过将各种尺寸、形状、位置等几何测量统一为坐标测量,利用软件构造所需测量元素,求取所需测量参数,进行误差评定^[1-2]。目前,坐标测量技术作为数字化制造技术的重要组成部分,其技术发展主要体现在智能三坐标测量、非正交三坐标测量、非接触测头测量、纳米三坐标测量等方面^[2]。其中,智能三坐标测量的关键技术在于强调 CMM 与 CAD(computer aided design, 计算机辅助设计)、CAPP(computer aided process planning, 计算机辅助工艺规程规划)、CAM(com-

收稿日期:2013-01-18;修回日期:2013-02-26;责任编辑:陈书欣
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075119)
作者简介:方忆湘(1963-),男,河北石家庄人,教授,硕士生导师,主要从事数字化设计与制造方面的研究。
E-mail:fang_yixiang@163.com

puter aided manufacturing,计算机辅助制造)等技术的信息共享和集成,并寻求实现检测信息获取的自动化和测量决策的智能化。

1 智能三坐标测量技术概念的提出及其基本原理

智能三坐标测量机是正在发展中的新一代三坐标测量机,寻求根据被测对象的工程描述(二维工程图或三维模型)及给定的测量任务,自行正确确定测量策略,自动实现测量编程、测量方案的优化、测量精度的优化等,使测量机的测量过程尽可能减少人为的干预管理^[2]。

智能三坐标测量技术的概念由天津大学张国雄教授等国内外学者提出,主要涉及被测零件检测信息的获取、被测零件位姿自动识别、测量路径规划及测量程序生成等方面。在传统的 CAD 技术应用环境下,智能三坐标测量技术是通常采用的技术手段,其基本原理如图 1 所示^[2]。

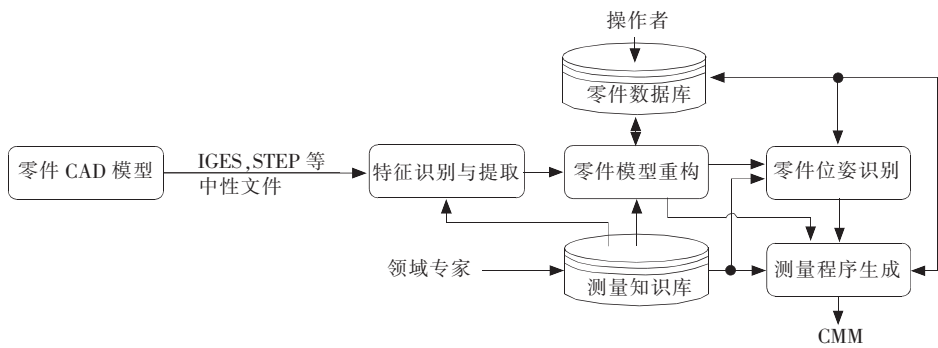


图 1 智能三坐标测量机系统基本原理

Fig. 1 Fundamental principle of the intelligent coordinate measuring machine system

图 1 所示智能三坐标测量技术中,检测信息的获取,通常采用将零件 CAD 模型转换为 IGES(initial graphics exchange specification,初始图形交换规范)、STEP(standard for the exchange of product model data,产品模型数据交换标准)等中性 CAD 文件的方法,通过特征识别与提取,在 CMM 软件环境中重构零件模型,获取所需信息;位姿识别则通过构建专用的自动识别系统,如基于 CCD(charge coupled device,电荷耦合装置)的位姿识别系统等,确定被测零件的安放位置与姿态;测量路径规划包括检测项目、采样策略、测头选择、防碰撞设计和路径优化等,并利用测量机的软件平台生成测量程序。

对复杂零件的智能三坐标测量而言,由于检测信息获取困难,限制了其主要技术环节的有效集成和信息共享。因此,作为智能三坐标测量后续工作开展的数据基础,检测信息的识别与获取,成为智能三坐标测量技术研究亟待解决的问题。

同时,前述智能三坐标测量技术的基本原理构成中,零件检测信息的获取基于传统的 CAD 技术应用,一个重要的关键技术问题是需要通过**重构附带检测信息的零件模型**。随着三维 CAD 技术的发展,尤其是**基于模型的定义(model-based definition, MBD)**技术为 CAD 技术带来的革命性发展,集成了全部设计、制造、检测等信息的零件模型的**MBD 数据集表示**,提供了零件检测信息直观的、可直接读取的数据源表示,零件模型重构的必要性下降并将逐渐被基于零件 MBD 模型的直接数据获取所取代,智能三坐标测量技术中检测信息的识别与获取也迎来了新的实现模式。

2 传统的 CAD/CMM 集成技术回顾

基于被测零件 CAD 模型的检测信息的识别与获取,寻求在 CAD,CAIP(computer aided inspection planning,计算机辅助检测规划)和 CMM 各系统之间实现检测信息的提取、交换、共享和处理的数据基础,即 CAD/CMM 集成,其也是实现智能三坐标测量技术的前提和基础。

目前,智能三坐标测量技术研究中,被测零件检测信息的识别与获取,主要基于传统的 CAD 技术所提供的**零件模型定义和表示技术**,即以二维工程图为主的工程语义表示方式(二维工程图或二维工程图+三维模型)。基于传统的 CAD 技术而进行的零件检测信息的获取,亦可称之为传统的 CAD/CMM 集成技术,其

经历了由二维工程图到三维零件模型的信息提取发展过程^[3]。

智能三坐标测量技术中的零件检测信息的识别与获取研究,首先始于 CAD/CMM 集成系统的**构建模式**及基于零件检测信息提取的测量路径规划等方面。HOPP 等对智能三坐标测量机系统进行了初步探索,给出了一个基于启发式的、测量任务分解技术的 CMM 控制系统结构;通过从 CAD 数据库中提取**公差项和测量项目,驱动测量规划和伺服控制**^[4],但没有进一步论述如何提取公差项、测量项目并进行路径规划。EVERSHEIM 等建立了一个联系 CAD 和 CMM 的集成系统,通过连接程序从 CAD 数据中获取检测信息,进而根据该信息和相应的检测规划逻辑产生零件的测量顺序,由处理模块生成测量控制程序^[5]。EIMARAGHY 等从专家系统的角度提出了一个基于三坐标测量机的集成检测规划系统,系统的输入信息来源于面向特征的零件造型系统,通过造型过程中零件特征和句法模式的识别,达到从几何模型中抽取型面和检测公差等特征的目的^[6]。HELMY 开发了一个由零件的 B-Rep(Boundary representation,边界表示)几何模型提取数据的特征识别模块,并利用这些数据生成 DMIS 检测程序^[7]。此外,文献[8]—文献[9]在针对 CMM 的计算机辅助检测规划系统构建研究中,围绕检测信息获取亦开展了相关研究工作。随后 ZHANG 等提出了建立公差信息与表面特征之间的关联关系的方法^[10];VAFAEESSEFAT 等采用工件的 CAD 模型和公差信息作为定义特征可达性算法的输入^[11];LIMAIEM 等提出基于 CAD 模型和公差要求选择检测特征的方法^[12];HWANG 等提出了基于公差规范由用户选择检测特征的方法^[13]。

近年来,中国以天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室为代表的相关研究单位,围绕智能三坐标测量技术的相关环节开展了较为深入的研究工作。**天津大学王建利**建立了基于 IGES 文件的 CAD/CMM 零件建模系统,能够对待测零件的 CAD 数据自动进行提取与识别,并经处理形成具有检测意义的零件模型^[14];**吴永清**基于实体建模中的混合表示法,采用面向对象技术定义了 CSG 法(constructive solid geometry,构造的实体几何)和 B-Rep 法中的特征模型,建立了特征之间的各种关系^[15];**马新辉**基于二维图形中性文件(IGES 文件),通过构成几何特征的相关几何图元信息的提取重构零件三维模型,并通过与各类公差信息的匹配构建零件测量模型^[16];**赵金才**等在 Pro/E 软件环境下,针对零件模型的相关几何构造历史及其特征构成,基于特征识别技术,利用二次开发实现零件几何信息的获取,并通过与公差信息的匹配建立具有检测意义的零件模型,但零件检测信息的获取主要针对拉伸、旋转等简单几何特征的提取及其公差信息的匹配,对于扫描特征、混合特征等相对复杂的几何特征及其公差信息的获取有待进一步探讨^[17];**任明轩**提出了基于 STEP 文件特征识别系统的开发,根据 STEP 标准对实体信息的描述,从 STEP 中性文件中提取三维产品模型的数据信息并进行 NURBS(non-uniform rational B-spline,非均匀有理 B 样条)处理^[18]。

中国其他大学的相关研究中,**清华大学王健美**等针对零件三维 CAD 模型中几何要素标示唯一的特点,通过建立 STEP 和 QDAS(Q-DAS 制造业统计分析软件数据格式标准)中性文件的匹配,在 Unigraphics(UG)环境下探讨了几何信息和检测信息在 CAD 和 CMM 之间的传递和识别问题^[19]。合肥工业大学刘达新所构建检测规划系统,通过利用 Open CASCADE(法国 Matra Datavision 公司源代码开放的几何驱动引擎,几何造型基础软件平台之一),基于中性文件(STEP,IGES 文件等)将各类通用三维 CAD 软件中构建的零件模型,导入到所构建的专用零件三维显示与编辑环境中,由专用的检测任务获取模块并采用人工点击智能获取的方式,由零件三维模型中提取与检测有关的几何数据^[20],但未提及公差信息的获取方式。

综合国内外相关研究状况,目前,CAD/CMM 集成主要通过 IGES,STEP 等中性 CAD 数据文件的传递实现,通常采用 2 种处理模式:一是**针对零件模型的 CAD 中性文件**,通过开发专用数据接口进行与测量相关的特征识别与提取,然后在 CMM 软件环境下重构附带测量信息和路径规划所需的几何信息的零件测量模型,并在该模型上获取各种检测信息;另外一种处理方式为**直接将零件 CAD 中性文件导入** CMM 软件环境重构整个零件模型,然后通过开发专用数据接口或采用人机交互方式获取各种检测信息。此外,部分研究人员针对传统三维环境下建立的零件模型,采用以几何特征识别与获取为主,辅以公差匹配的方法探讨了相关 CAD/CMM 集成技术。

上述零件检测信息识别与获取方式,基于传统的二维工程图或三维模型+二维工程图的产品定义模式,采用的是传统的 CAD/CMM 集成技术,已难以适应当前数字化设计与制造技术的发展。其零件检测信息获取手段中,均存在零件测量信息定义方式各异、数据传递易丢失、信息获取过程复杂等问题。

3 全三维数字化环境下的检测信息识别与获取

基于模型的定义(model-based definition, MBD)技术的提出,使传统的三维 CAD 技术发展到了全三维数字化环境。产品及其零部件模型的 MBD 数据集表示,给出了全三维环境下零件定义的完整工程表示,提供了 CMM 检测信息识别与获取的数据基础与数据源。

3.1 MBD 技术的提出

在传统的工程表达中,以画法几何为基础的二维工程图纸统治了工程研发的历史进程。作为通用的工程表述语言,如 ASME Y14.1 和 ISO10209 给出的定义,二维工程图纸是“活的工程文档,按照国际标准,通过平面上静态、按比例的花形和图像化的表达方式,以一种明确的形式传递、控制和维的产品定义”^[21]。但由于二维表达在工程应用中存在的诸多问题,在建立以二维工程图作为现代工程表达体系的 200 余年后,人类再次回归与现实世界关联更为紧密和直观的三维表达方式。同时,三维工程表述更符合人类自身的观察、理解和表达问题的思维模式。

近 20 年来,随着数字化设计与制造技术的发展,尤其是以 CAD 技术为代表的计算机辅助工程应用技术的发展,工程界逐渐采用三维模型来表示产品的详细形状信息,并利用计算机模拟装配过程、检查零部件之间的配合和干涉问题,进行各种工程分析等工作。但由于产品设计仍然采用传统的 CAD 技术,即以二维工程图为主的工程语义表示方式(二维工程图或二维工程图+三维模型),三维模型常用以表示产品的详细形状信息,尺寸和形位公差、表面粗糙度、材料、热处理与表面处理方法、检验要求等其他工程信息表示在二维图纸或其他技术文档中,设计和制造人员无法以直观明白的方式获取相关信息,也无法直接使用三维模型进行产品的生产和检验^[21]。基于上述情况,波音公司在波音-747 至波音-777 系列客机设计中,逐步采用以三维产品模型为中心的数字化产品定义技术,并使波音-777 飞机作为世界上第一个采用全数字化定义和无图纸生产技术的大型工程项目,奠定了基于模型定义的全三维数字化设计制造技术的基础^[22]。

基于模型的数字化定义是指在三维模型中集成尺寸、公差等注释性标注,辅以各种设计制造文件对产品进行全面描述的一种方式,并以信息表示完备的三维模型作为唯一的制造依据。借鉴波音飞机公司在产品全三维数字化定义上的经验及其相关标准体系,作为对 MBD 技术的支持,美国机械工程师协会在 2003 年发布了“数字化产品定义数据规范 ASME Y14.41-2003”^[3,23],随后流行的三维 CAD 软件如 CATIA,UG,Pro/E 等开始支持该标准,以提供对 MBD 技术的支撑和创建环境。ISO 和包括中国在内的相关国际组织和国家分别制定了各自的产品数字化定义标准或规范^[24-25]。随后,波音公司在 2004 年启动的波音-787 项目上全面应用基于 MBD 技术的全三维设计,空客 A380 客机、美国联合攻击战斗机(JSF)等项目也相继采用了 MBD 技术。近年来,中国的航空企业在“飞豹”、“枭龙”等战机以及大飞机等项目中,借鉴国外经验开始应用全三维设计技术^[22]。全三维数字化定义技术在航空领域的成功应用,必将对其他行业的 MBD 技术应用产生积极的推动作用。

3.2 零件模型的 MBD 数据集表示

MBD 技术是随着产品定义技术,尤其是以 CAD 为代表的计算机辅助技术的发展而提出的,其为采用一个集成了各种设计和制造信息的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体^[26],详细规定了三维实体模型中产品尺寸、公差的标注规则和工艺信息的表达方法。

依据 MBD 技术规范,在以模型为核心的零件定义中,零件 MBD 模型由设计模型、注释和属性构成,其结构层次如图 2a)所示,其数据集的详细信息构成如图 2b)所示。

在图 2 所示的零件 MBD 模型表示中,设计模型描述了表达设计意图的零件三维几何信息,包括设计基准与精确的三维模型、参考模型、约束条件等;注释是指定义在特定注释平面中的尺寸、公差、标注、文本、符号、制造工艺和精度等内容,其反映了零件加工必需的工艺或检测约束信息,用以形成完整的产品定义,并与实体模型中的相应几何元素关联且能在三维环境下显示;属性是指未包含在注释中的其他零件完善性描述信息,如材料、热处理以及其他制造和测试基本信息等^[27]。在 Pro/E 软件环境下,采用 MBD 技术构建的完整的零件模型定义表示(零件 MBD 数据集),如图 3 所示。

3.3 测量信息的识别与获取流程

零件的 CMM 测量首先需要识别并获取检测项目,进而通过检测规划生成测量程序完成测量任务。零件检测规程通常依据产品设计和检测目的,由零件工程图样(二维或三维模型)上标注的检验尺寸参数、

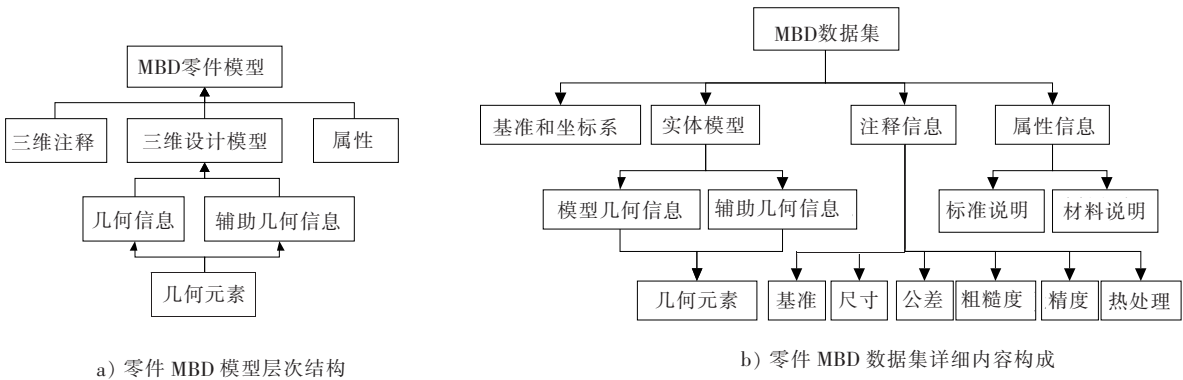


图 2 零件 MBD 表示模型
Fig. 2 Representation model of MBD

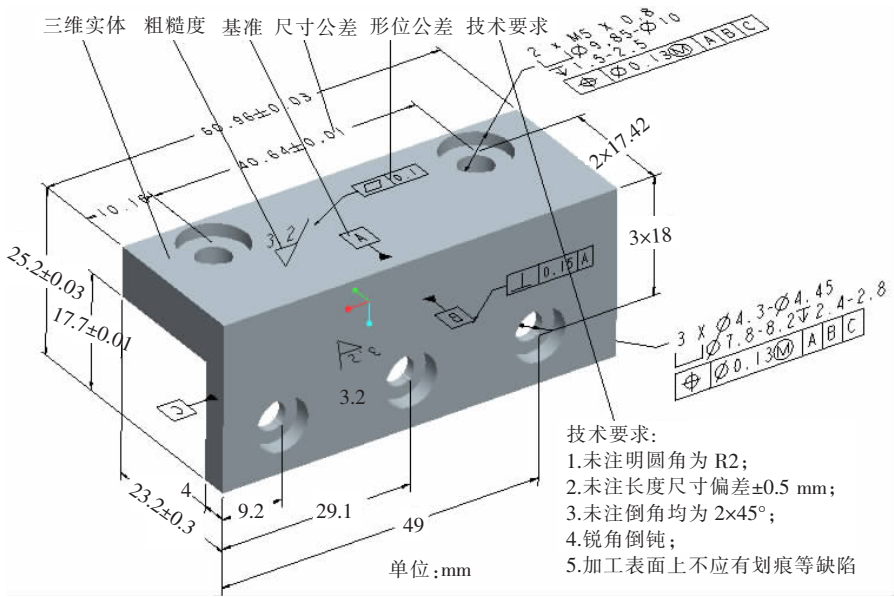


图 3 Pro/E 软件环境下的零件 MBD 模型
Fig. 3 MBD model in Pro/E

检验精度要求,确定检测项目^[1]。因此,由零件 MBD 数据集构成可见,零件检测信息主要包括两方面的内容:三维标注信息和与三维标注信息关联的零件几何信息。此外,一些特殊的检测要求可能以技术要求或其他注释方式给出。

三维标注信息包括尺寸公差、形状公差、位置公差、基准和表面加工与处理要求等,通过这些可见文本或符号反映零件的属性信息。

与三维标注关联的几何信息,包括三维标注的零件几何特征(如孔、圆柱、槽、球、圆环体、多棱体等)及其几何元素(如点、直线、圆、椭圆、平面、曲面等)的外形轮廓信息、位置信息以及测量所需要的其他信息(如几何元素的位置向量、法向量等)。

零件模型的 MBD 数据集提供了公差信息的工程语义表示和与模型实体要素的关联,并成为检测信息获取的唯一数据源。通过识别零件 MBD 数据集中与公差标注项目关联的几何元素信息,可获取待测几何特征及其详细几何信息构成。因此,基于 MBD 技术规范所构建的零件模型,由于其具有传统 CAD 技术无法比拟的直观性和数据直接读取性,无需重构零件检测模型,可通过定制专用数据接口或人机交互方式,实现零件检测信息的直接获取。

以通用三维 CAD 软件 Pro/E 为例,**零件公差标注**是以注释信息方式给出并记录的,其二次开发工具 Pro/TOOLKIT 提供了针对尺寸公差的访问函数,将形状公差和位置公差结合在一起的形位公差访问函数。通过相应访问函数,可以在零件 MBD 数据集中以注释信息给出的公差记录中,得到公差项目集合包含的所

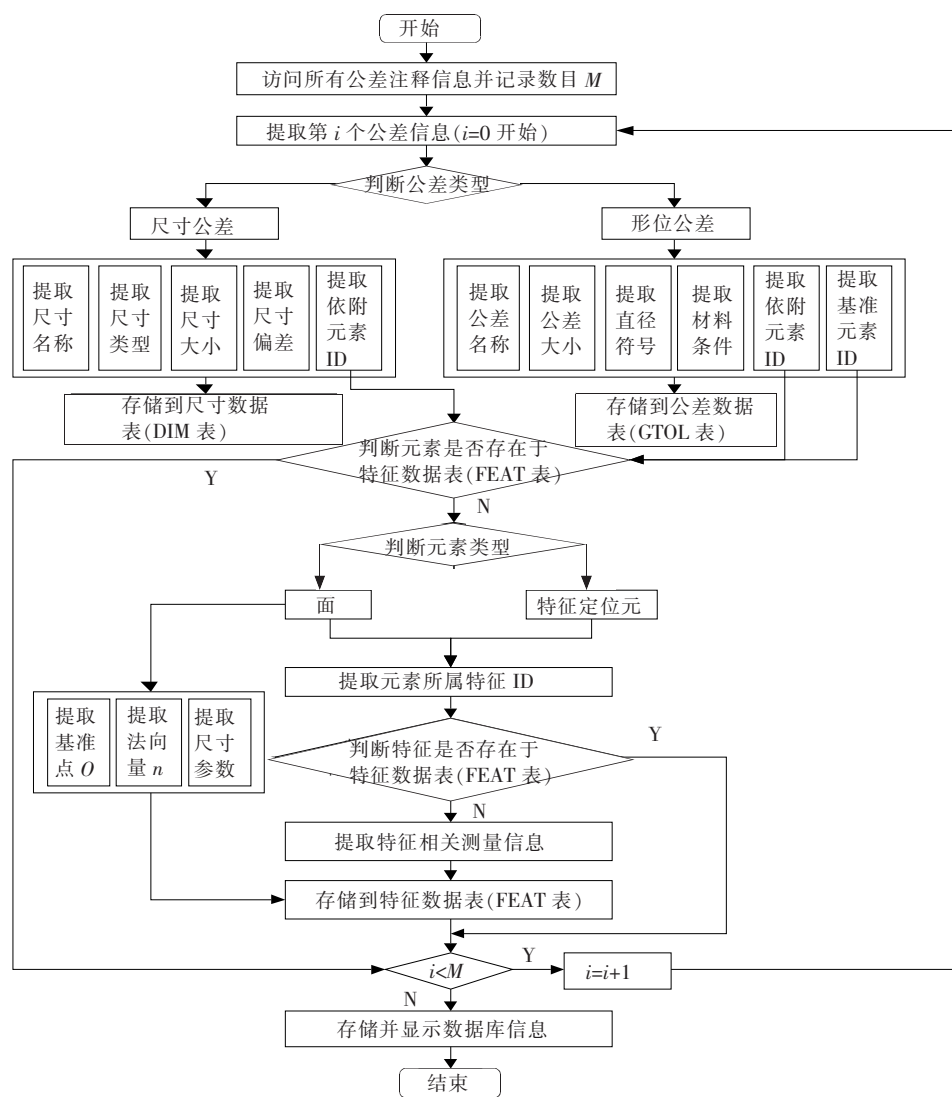


图 4 基于 MBD 的零件检测信息提取流程图

Fig 4 Flow chart of inspection information extraction based on MBD

有公差信息。在此基础上通过公差类型判别分别获取各公差项目的详细信息内容构成及其所依附几何元素,进而获取相关几何信息构成。在 Pro/E 环境下,可给出如图 4 所示的零件检测信息识别与获取流程。

4 基于 MBD 的零件检测信息识别与获取实现

图 3 所示在 Pro/E 下构建的零件 MBD 模型,包括了零件三维几何模型、零件基准及其坐标系以及尺寸公差和形位公差在内的检测信息构成。利用 Pro/E 二次开发工具 Pro/TOOLKIT 提供的相关访问函数,通过定制专用的检测数据提取应用工具,可实现对满足 CMM 测量的相关检测信息的识别与获取。

4.1 尺寸公差及其依附几何特征的获取

尺寸公差的提取原则上只要将含有公差要求的尺寸提取出来即可。利用 Pro/TOOLKIT 提供的尺寸公差访问函数^[28]:ProDimensionSymbolGet(),ProDimensionValueGet(),ProDimensionTypeGet(),ProDimensionToleranceGet(),ProAnnotationelemReferencesCollect()提取有公差要求的尺寸名称(D_Symbol)、尺寸数值(D_Value)、尺寸类型(D_Type)、尺寸偏差(D_Tolerance)和尺寸公差依附特征元素(D_References)。其中,尺寸公差的依附特征元素即为三坐标测量机的待检测几何元素。尺寸公差的信息提取结果如表 1 所示。

表 1 尺寸公差提取信息
Tab. 1 Information of dimension tolerance

序号	尺寸符号	尺寸类型	尺寸值	上偏差	下偏差	依附元素 ID 值
1	ad27	线性尺寸	60	0.03	−0.03	42,49
2	ad45	线性尺寸	18	0.01	−0.01	62,58
3	ad47	直径尺寸	10	0.13	−0.13	230,232
4	ad60	直径尺寸	8	0.15	−0.15	164,166,168

4.2 形位公差及其依附特征的获取

形位公差的提取与尺寸公差类似,但是涉及到的提取内容比较多而且复杂。对于无基准要求的形位公差,利用 Pro/TOOLKIT 提供的形位公差访问函数^[21]:ProGtoldataTypeGet(),ProGtoldataValueGet(),ProGtoldataDiameterGet(),ProGtoldataReferenceGet()分别提取公差类型(G_Type)、公差大小(G_Value)、直径符号(G_diameter)、依附特征元素(G_Reference)。对于有基准要求的形位公差信息(如位置度公差等),需要提取基准特征元素信息,利用函数 ProGtoldataGtoldatumrefGet()获取其相关基准信息(G_datumref)。基准包括 3 种类型:单一基准(由一个要素建立的基准)、组合基准(由 2 个或 2 个以上要素建立的独立基准)和三基面体系(3 个相互垂直的平面构成)。形位公差的信息提取结果如表 2 所示。

表 2 形位公差提取信息
Tab. 2 Information of form and location tolerance

公差类型	公差符号	公差值	直径符号	依附元素 ID	第一基准元素 ID	第一复合基准 ID	第二基准元素 ID	第二复合基准 ID	第三基准元素 ID	第三复合基准 ID
位置度	gp2	0.13	有	230,232	66	—	64	—	42	—
平面度	gp3	0.10	无	66	—	—	—	—	—	—
垂直度	gp4	0.15	无	64	66	—	—	—	—	—

4.3 几何信息的获取

零件 MBD 模型中,公差标注项目的依附特征元素即为三坐标测量机的待检测几何元素。根据零件 MBD 数据集中不同公差的标注类别,其标注约束类型包括面与面、面与线、面与点、线与线、线与点、点与点之间的约束关系。如尺寸公差的标注,其标注的可能是 2 个面之间的尺寸,也可能是 2 个孔中心线之间的尺寸,则其标注约束关系分别为面面约束和线线约束。

公差的标注约束关系定义了公差标注项目依附的几何特征的相关几何元素构成,通过公差项目获取得到的依附特征几何元素 ID 值,利用 Pro/TOOLKIT 提供的对应访问函数,可以提取依附特征及其几何元素的详细几何信息。待测几何特征的提取信息如表 3 所示。

表 3 几何特征提取信息
Tab. 3 Information of geometric feature

元素 ID	类型	特征 ID	特征类型	基准点	法向量	半径/mm	正负	角度	长/mm	宽/mm	高/mm
42	平面	39	伸出项	(0,−12.5,3.5)	(1,0,0)	—	正	—	25	7	—
49	平面	39	伸出项	(−60,−12.5,3.5)	(−1,0,0)	—	正	—	25	7	—
58	平面	39	伸出项	(−30,−10.5,3.5)	(0,0,1)	—	正	—	60	21	—
62	平面	39	伸出项	(−30,−25,25)	(0,0,1)	—	正	—	60	4	—
64	平面	39	伸出项	(−30,−25,−12.5)	(0,−1,0)	—	正	—	60	25	—
66	平面	39	伸出项	(−30,−12.5,0)	(0,0,−1)	—	正	—	60	25	—
164	轴线	265	圆柱	(−30,−25,15)	(0,−1,0)	8	负	—	—	—	4
166	轴线	293	圆柱	(−50,−25,15)	(0,−1,0)	8	负	—	—	—	4
168	轴线	522	圆柱	(−10,−25,15)	(0,−1,0)	8	负	—	—	—	4
230	轴线	660	圆柱	(−10,−10,0)	(0,0,−1)	10	负	—	—	—	7
232	轴线	135	圆柱	(−50,−10,0)	(0,0,−1)	10	负	—	—	—	7

基于上述零件检测信息的获取结果,结合特定三坐标测量机及其测量软件,可将相关数据用于零件检测规划的制定和 CMM 测量程序的生成。

5 结 语

随着数字化设计与制造技术的发展,三坐标测量机作为一种高效的精密测量设备,在产品质量控制中发挥着不可替代的作用。同时,随着 CMM 在制造业的广泛应用,其智能化和自动化亦成为坐标测量技术亟待解决的重要问题,其中,如何实现 CAD 与 CMM 的集成,即零件检测信息的自动获取成为问题的关键所在。

基于模型的定义(MBD)技术的提出和发展,奠定了全三维数字化设计制造体系的基础,代表了 CAD 技术发展的趋势。零件模型的 MBD 数据集给出了全三维环境下零件定义的完整工程表示,提供了 CMM 检测信息识别与获取的数据基础和数据源。利用零件 MBD 数据集中检测项目的公差标注信息与几何信息的关联关系,可直观、便捷的实现零件 CMM 检测信息的识别和获取,避免了基于传统 CAD 技术实现智能三坐标测量所需的零件模型重构,提供了 CAD/CMM 技术集成的新的实现途径。

参考文献/References:

- [1] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.
ZHANG Guoxiong. Coordinate Measuring Machines[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999.
- [2] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(sup): 1-5.
ZHANG Guoxiong. Development orientations of coordinate measuring techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(sup): 1-5.
- [3] VIRGILIO Q, LOUIS R, ROBERT P, et al. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry [J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497-508.
- [4] HOPP T H, HOCKEN R J. CAD-directed inspection[J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1984, 33(1): 357-361.
- [5] EVERSHEIM W, AUGER J. Automatic generation of part programs for CNC-coordinate measuring machines linked to CAD/CAM systems [J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1986, 35(1): 341-345.
- [6] EIMARAGHY H A, GU P H, BOLLINGER J G. Expert system for inspection planning[J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1987, 36(1): 85-89.
- [7] HELMY H A. Feature Recognition and CAD-Directed Inspection Using Solid Geometric Representation [D]. Bethlehem: Lehigh University, 1991.
- [8] YAU H T, MENQ C H. An automated dimensional inspection environment for manufactured parts using coordinate measuring machines [J]. International Journal of Production Research, 1992, 30 (7): 1 517-1 536.
- [9] TANNOCK J D T, COX D R, LEE H, et al. Intelligent inspection planning and computer aided inspection [J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1993, 207(13): 99-104.
- [10] ZHANG S G, AJMAL A, WOOTTON J, et al. A feature-based inspection process planning system for co-ordinate measuring machine [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 107: 111-118.
- [11] VAFAESEFAT A, ELMARAGHY H A. Automated accessibility analysis and measurement clustering for CMMs [J]. International Journal of Production Research, 2000, 38 (10): 2 215-2 231.
- [12] LIMAIE M A, ELMARAGHY H A. CATIP: A computer-aided tactile inspection planning system [J]. International Journal of Production Research, 1999, 37 (2): 447-465.
- [13] HWANG C Y, TSAI C Y, CHANG C A. Efficient inspection planning for coordinate measuring machines [J]. International Journal of Manufacturing Technology, 2004, 23(9/10): 732-742.
- [14] 王建利. 智能三坐标测量机中关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,1998.
WANG Jianli. A Study on Key Techniques in Intelligent CMMs[D]. Tianjin: Tianjin University, 1998.
- [15] 吴永清. 智能三坐标测量机检测规划中若干关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,2001.
WU Yongqing. A Study on Some Key Techniques in Inspection Planning of Intelligent CMMs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2001.
- [16] 马新辉. 智能三坐标测量机的研究[D]. 天津:天津大学,2002.
MA Xinhui. A Study on Intelligent Coordinate Measuring Machines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [17] 赵金才, 刘新凯, 刘书桂. 基于 Pro/Toolkit 的实体模型尺寸信息的提取[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2005(3): 22-24.
ZHAO Jincai, LIU Xinkai, LIU Shugui. Dimension information extracting of solid model based on Pro/Toolkit[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(3): 22-24.
- [18] 任明轩. 基于 STEP 文件特征识别系统的研究[D]. 天津:天津大学,2007.
REN Mingxuan. Study of STEP-based System of the File Character Recognition[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

(下转第 165 页)

- TANG Hong, PANG Yafang, LI Qidong. The study of the modified activated carbon adsorption characteristics of ammonia and trimethylamine [J]. Environmental Chemistry, 2000, 19(5): 431-435.
- [11] PARK S J, KIM K D. Adsorption behaviors of CO₂ and NH₃ on chemically surface-treated activated carbons [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 212: 186-189.
- [12] TAMON H, OKAZAKI M. Influence of acidic surface oxides of activated carbon on gas adsorption characteristics [J]. Carbon, 1996, 34(6): 741-746.
- [13] 韩严和, 全 燮, 薛大明, 等. 活性炭改性研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(1): 33-37.
HAN Yanhe, QUAN Xie, XUE Daming, et al. Advance of research on modified activated carbon [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(1): 33-37.
- [14] OICKLE A M, GOERTZEN S L, HOPPER K R, et al. Standardization of the Boehm titration, Part II: Method of agitation, effect of filtering and dilute titrant [J]. Carbon, 2010, 48, 3: 313-3 322.
- [15] 吴光前, 孙新元, 张齐生. 活性炭表面氧化改性技术及其对吸附性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(6): 955-961.
WU Guangqian, SUN Xinyuan, ZHANG Qisheng. Review of surface oxidizing modification of activated carbon and influence on adsorption capacity [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(6): 955-961.
- [16] 范延臻, 王宝贞, 王 琳, 等. 改性活性炭的表面特性及其对金属离子的吸附性能[J]. 环境化学, 2001, 20(5): 444-448.
FAN Yanzhen, WANG Baozhen, WANG Lin, et al. The surface characteristics of the modified activated carbon and the adsorption properties for the metal ions [J]. Environmental Chemistry, 2001, 20(5): 444-448.
- [17] 范顺利, 孙剑辉, 李红星, 等. 改性活性炭的吸附性能变异探讨[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 1995, 23(4): 48-50.
FAN Shunli, SUN Jianhui, LI Hongxing, et al. The variation investigation of the adsorption properties of activated carbon modified [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 1995, 23(4): 48-50.
- [18] MAROTO-VALER M M, DRANCA I, LUPASCU T, et al. Effect of adsorbate polarity on thermodesorption profiles from oxidized and metal-impregnated activated carbons [J]. Carbon, 2004, 42, 2: 655-2 659.
- [19] 单晓梅, 朱书全, 张文辉, 等. 氧化法改性煤基活性炭和椰壳活性炭的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(6): 729-733.
SHAN Xiaomei, ZHU Shuquan, ZHANG Wenhui, et al. Study on oxidation modified of coal-based activated carbon and coconut shell activated carbon [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(6): 729-733.

(上接第 141 页)

- [19] 王健美, 王君英. 面向三坐标测量机应用的检测特征自动提取和识别[J]. 中国机械工程, 2005, 16(23): 2 098-2 100.
WANG Jianmei, WANG Junying. Automatic inspection feature extraction and recognition in CMM inspection planning [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(23): 2 098-2 100.
- [20] 刘达新. 基于三维 CAD 的智能三坐标测量机检测规划系统的研究与开发[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
LIU Daxin. Research and Development of 3D CAD-Based Inspection Planning System for Intelligent Coordinate Measuring Machines [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [21] 安鲁陵, 金 霞. 基于三维模型定义技术应用的思考[J]. 航空制造技术, 2011(12): 45-47.
AN Luling, JIN Xia. Application of model based definition in aircraft development [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(12): 45-47.
- [22] 宁振波. 数字化产品的过去、现在和未来[J]. 飞机工程, 2003(4): 1-5.
NING Zhenbo. The past, present and future of digital products [J]. Aircraft Engineering, 2003(4): 1-5.
- [23] ASME Y14. 41—2003, Digital Product Definition Data Practices[S].
- [24] BS ISO 16792—2006, Technical Product Documentation: Digital Product Definition Data Practices[S].
- [25] GB/T 24734. 1-24734—2009, 技术产品文件数字化产品定义数据通则[S].
GB/T 24734. 1-24734—2009, Technical Product Documentation Digital Product Definition Data Practices [S].
- [26] 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 Zhongqiu, FAN Yuqing. Application of MBD on airplane manufacturing [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(3): 55-57.
- [27] 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(3): 78-81.
LU Hu, HAN Shuang, FAN Yuqing. Model based digital definition technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(3): 78-81.
- [28] PARAMETRIC T C. Pro/ENGINEER Wildfire 5.0-Pro/TOOLKIT User's Guide[Z]. New York: Parametric Technology Corporation, 2010.