

基于模型的民用航空发动机几何尺寸数字化检测技术研究*

王振兴, 曹 玮, 金 炜, 郑芳芳

(中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司, 上海 201306)

[摘要] 针对传统的零部件几何尺寸检验方式已不能适应未来民用航空发动机的生产模式,研究了 PMI (Product Manufacturing Information) 识别、检测路径创建和三维报告发布等基于模型的数字化检测技术。该技术可节省检测编程时间和降低人员编程经验不足带来的影响,提高检测效率和检测结果的一致性,同时利用设计、工艺与检验间统一的模型数据实现民用航空发动机设计与制造间的快速协同。最后通过案例测试,验证了该方法在民用航空发动机零部件几何尺寸检测应用中的可行性。

关键词: 基于模型的定义(MBD); 民用航空发动机; 几何尺寸; 数字化检测; 产品制造信息(PMI)

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.07.040



王振兴

博士,工程师,研究方向为几何尺寸数字化智能化检测。

民用航空发动机作为高度复杂热力机械动力装备,其系统集成度高、结构设计复杂、安全性和经济性指标要求高、对质量和可靠性追求极致,这要求民用航空发动机的全生命周期都要实行质量的可追溯性。传统基于纸质媒介流转、人工识图、手动测量、单点记录的检验模式因工作重复率高、效率低、测量一致性低、误差大、测量数据缺乏有效管理、过程状态难追溯、历史数据难利用、无法形成有效的质量控制闭环反馈系统等缺陷^[1-3],已不能满足新型民用航空发动机制造质量保证要求。随着 MBD (Model Based Definition) 技术在工业领域的推广和智能制造技术的迅猛发展,航空发动机的研制生产模式发生了新的变化:在设计环节,实现了从单一的三维模型到基于模型的全三维化产品定义的转变;在工艺环节,从纸质的二维手工编制向基于知识的全三维结构化自动设计

方向跨越;在生产环节,已开始逐步实现基于模型的三维装配工艺^[4-5],并开始研究基于模型的数字化检测技术^[6-7]。当前,基于模型的数字化生产方式已开始逐渐在航空发动机研制过程进行推广^[8]。特别是在中国 2025 大背景下,航空发动机及燃气轮机作为“百大工程之首”,未来几年将作为我国制造业领域的重点突破方向,而基于模型智能制造模式已成为民用航空发动机生产方式的发展趋势^[9-12]。传统的零部件几何尺寸检验方式已不能适应未来民用航空发动机的生产模式,开发基于模型的民用航空发动机几何尺寸数字化检测技术势在必行。

目前在基于模型的航空发动机数字化检测技术研究方面,张露等^[6]针对复杂零件中异型特征位置度无法测量的问题,研究了基于 MBD 的数字化检测解决方案,但仅对基于模型的数字化检测技术进行单点应

* 基金项目: 民用飞机专项科研项目(MJ-2016-J-92)。

用介绍,缺少对具体的实施过程的详细论述,本文在此研究的基础上,结合国内民用航空发动机研发生产模式向基于模型的智能生产模式转变的背景^[10-12],针对民用航空发动机零部件几何尺寸检测环节,研究基于MBD模型的数字化检测技术的具体实现过程。

基于模型的几何尺寸检测关键技术

基于模型的民用航空发动机数字化检测技术研究的主要目的为高效协同民用航空发动机设计、工艺和检验等业务流程,提高民用航空发动机正向研发能力。其核心思想为通过将包含产品制造信息 PMI (Product Manufacturing Information) 的 MBD 模型作为单一信息源和连续载体,实现设计、工艺和检验的高效协同,提高产品生产质量管控能力,其总体方案如图 1 所示。通过获取设计和工艺发布标注 PMI 的设计模型和工艺模型,检测端对模型 PMI 进行识别、对零件测量特征进行检测规划、对检测程序进行快速编制、对检测数据进行收集与分析以及报告发布等,从而形成民用航空发动机设计、制造和检测相贯通的全三维数字化生产模式。本文重点对模型的 PMI 识别、检测路径创建等开展了研究,并结合研究开展了面向测量机的代码编译和后处理、三维检测报告发布以及软件二次开发。

1 PMI 识别

识别模型中的有效 PMI 信息是实现基于模型的检测自动编程的基础。PMI 信息的基本识别流程如下:首先,在识别 PMI 信息前,需要对设计模型进行必要的合规性检查和规范化处理,如对几何特征及其关联的 PMI 信息进行编号;然后,通过与设计平台,如 NX 软件共平台的 CMM 模块,读取设计下发的主模型(含几何特征和 PMI);最后,利用

NXCMM 模块中的链接 PMI 功能识别 PMI 信息及相关联的几何特征。PMI 的识别流程如图 2 所示。

识别完成 PMI 信息及其关联的几何特征后,便可为对应几何体创建检测特征和检测路径,并通过读取 PMI 的公差信息控制框自动为几何体创建评价信息,为尺寸测量做准备。

2 检测路径创建

检测路径创建主要包括测量特征创建、单特征测点规划、单特征检测路径规划、多特征间检测路径规划和检测路径发布,其创建基本流程如图 3 所示。

(1) 测量特征创建。

在 PMI 信息识别完成后,通过读取 PMI 信息及其关联的几何特征,

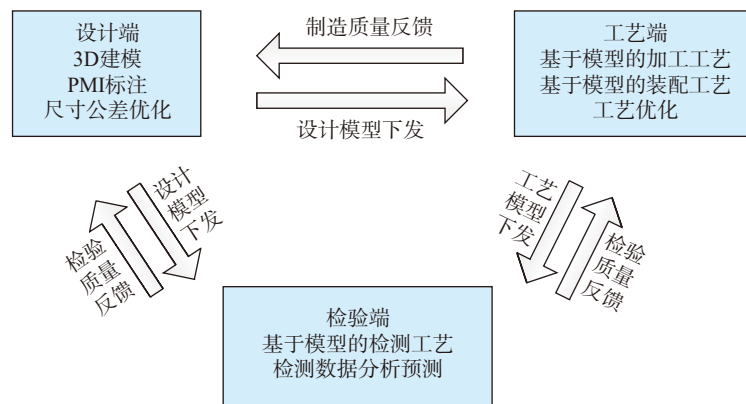


图1 基于模型的产品质量管控

Fig.1 Model-based product quality control

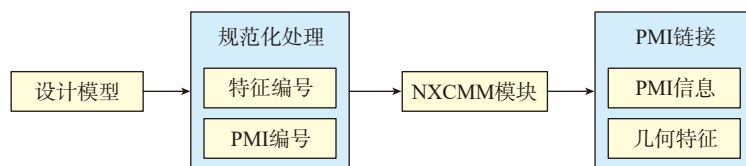


图2 PMI识别流程

Fig.2 PMI identification process

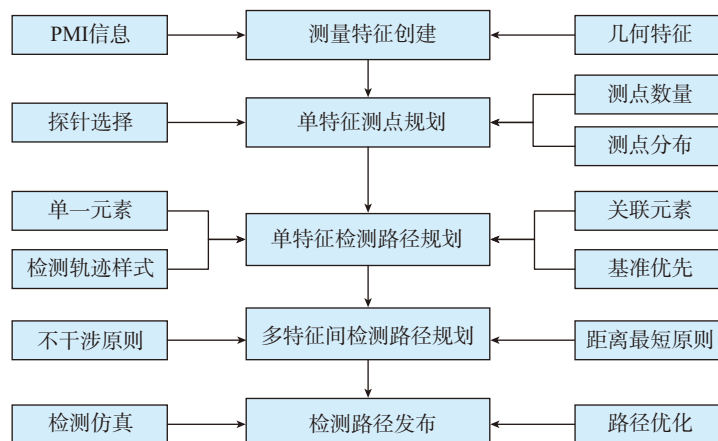


图3 检测路径创建流程

Fig.3 Creation process of inspection path

可进行测量特征创建。基本的测量特征有点、线、面、圆、球和圆柱等几何元素,以及直线度、平面度、圆度、圆柱度、垂直度、倾斜度、平行度、位置度、对称度和同心度等形位公差。当测量特征创建完成后,下一步需要对测量特征的测点和测量路径进行规划。

(2) 单特征测点规划。

对于单特征,需要依据被测特征特点以及尺寸公差的要求,进行测点数和测点分布的合理规划,并在此基础上依据测量可达性,选择合适的测头。单特征测点规划时,应综合考虑各特征的测量精度和效率。此外,对于扫描测量方式,测点的规划只需考虑扫描路径上的起始点、矢量点和终点即可。

(3) 单特征检测路径规划。

对于单一基本几何元素(如点、线、面、圆等)和单一元素的形位误差(如直线度公差、平面度公差、圆度公差、圆柱度公差等),其单特征检测路径在测点规划完成后,通过设置检测轨迹样式,其测点路径将顺次生成。而对于一些较为复杂的关联元素形位公差(如平行度公差、垂直度公差、倾斜度公差、同轴度公差、对称度公差、位置度公差等),其单特征检测路径需要分别先对两个关联元素单独创建测点规划,再进行关联元素间检测路径规划。关联元素间检测路径规划时,应按设计要求的基准优先顺序依次关联。

(4) 多特征间检测路径规划。

通常待测零件上的被检特征为多个,为使检测过程安全高效,多特征间检测路径规划时应首先考虑各特征间切换时测头与零件和夹具等不发生干涉,必要时在各特征间设置安全点,以提高检测过程的安全性;其次,在保证路径安全性前提下,多特征间检测路径规划时应考虑距离最短原则,即多特征间检测路径之和最小,以提高测量效率,减少测头在

各特征间的转换时间。

(5) 检测路径发布。

当单特征和多特征检测路径创建完成后,为确保整个检测过程能够安全高效执行,在检测路径发布前还需要进行仿真和优化。通过仿真可直观地检查各被检特征的测量路径是否合理,测头与机床、工件和夹具间是否干涉。通过仿真还可以对检测路径进一步优化,在考虑安全性的前提下提高测量效率。

3 代码编译和后处理

当被测件的检测路径创建完成后,需要将其路径代码编译成通用的测量机编程语言,以适应不同测量机的要求。DMIS 作为当前主流的三坐标机测量编程语言,可实现跨平台的调用。本文以 DMIS 语言为基础对检测路径代码进行编译,同时考虑具体坐标测量机的特点开发相应的测量程序后处理模块。

4 三维检测报告发布

为使检测结果更加直观地表达,在 MBD 模型上直接标注检测结果信息,形成可视化的三维检测报告,以提高零件检测结果的可读性。为此,在传统报告的基础上,本文进一步研究三维报告输出形式。其基本思路为通过三维标签的形式和虚拟测点的方式在零件模型中展示对应尺寸的检测信息,单尺寸的三维标签通过指引线的方式和特征关联,如图 4 所示。

5 二次开发

为实现上述过程,本文在 VS2015 平台上,结合 NXCMM、VB、Post

Builder 等软件模块,实施了面向基于模型的数字化检测系统的二次开发,二次开发流程如图 5 所示。

本文通过二次开发在 NXCMM 软件中增加了 PMI 链接器和后处理功能、测点数据分析功能和图形报告功能。其中 PMI 连接器功能集成了 PMI 信息的识别、检测路径规划等功能;后处理功能集成了代码编译和后处理功能;测点数据分析功能和图形报告功能可完成三维检测报告的发布。二次开发软件可实现基于模型的检测路径规划和测量代码自动生成,降低人员的检测编程工作强度,显著节省检测编程时间和降低人员编程经验不足带来的影响。此外,二次开发软件还可针对具体零件形成检测模板,规范和统一检测路径和测量参数配置,从而提高不同检测设备和人员间检测结果的一致性。最后,通过与民用航空发动机产品数据管理(Product Data Management, PDM)系统集成,二次开发软件可直接从 PDM 系统中下载设计模型和工艺模型,并将检测结果和报告上传至 PDM 系统,既保证了检测所用模型数据与设计 and 工艺模型数据的统一,又实现了检测结果的快速反馈,从而实现设计与制造间的快速协同。

案例验证

1 验证条件

验证案例采用某型号核心机滑油轴承腔通风管路上的一个典型四通管接头零件,其设计模型如图 6 所示。四通管接头是核心机滑油轴承

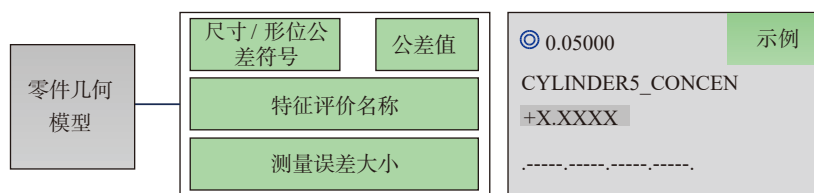


图4 三维检测信息展示

Fig.4 3D inspection information show

腔通风管路上的一类重要零件,主要用于油气混合物的流通,为了保证管接头良好的密封性,该类零件对尺寸精度的要求通常较高,因此,有必要对该类零件的加工尺寸进行检测,以保证零件加工满足设计要求。

为验证所提检测流程的可行性,借助光固化成型机试制了该四通管接头。最终成型后的管接头物理样件如图7所示。

选用的测量平台为复合式影像测量仪,如图8所示,该设备具有光学影像测量和接触式探针测量模式,其中接触式探针测量模式与常规三坐标探针测量模式相同。本文选用该仪器的接触式探针测量模式,其主要技术指标见表1。

2 PMI 识别

考虑复合式影像测量仪的实际测量能力,首先对四通管接头 MBD 设计模型的 PMI 信息进行了一定的甄别,从中选择了较为典型的测量尺寸,并对选中的尺寸进行相应的语法规则检查和规范化处理,以保证后续编程时不会出现因图纸标注错误而产生修改。实际选中的四通管接头设计模型的测量尺寸及对应 PMI 信息识别后的结果如图9所示。

3 检测路径创建

为更加直观地展示检测路径规划过程,本文构建了与实际测量工况相一致的虚拟环境。实际测量工况如图10(a)所示。对实际测量工况进行分析,发现影响测量路径规划的主要因素为测量机测头、工装和四通管接头。为此,本次测量任务所构建的虚拟测量环境如图10(b)所示。

设置完成零件的虚拟检测环境后,便可加载零件的编程模板,通过编程模板可为零件指定粗基准和精基准,实现零件测量坐标系的建立。建立零件测量坐标系后,零件在坐标测量机中的方位便已确定,在此基础上通过链接 PMI 操作,软件自动识别模型上的 PMI 信息,并同步完成

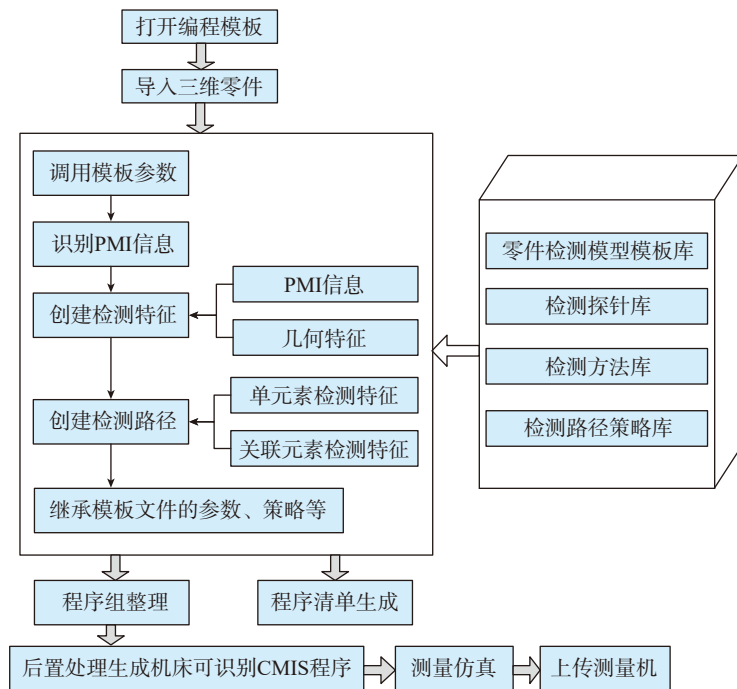


图5 二次开发流程

Fig.5 Secondary development process

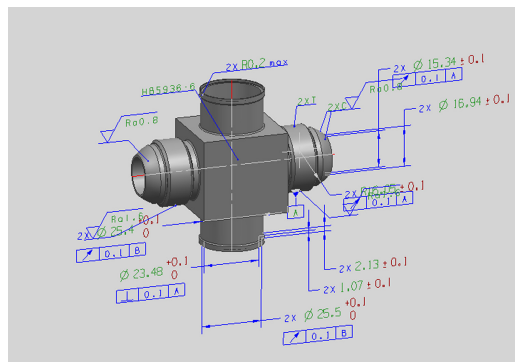


图6 四通管接头设计模型

Fig.6 Design model of four-way pipe joint

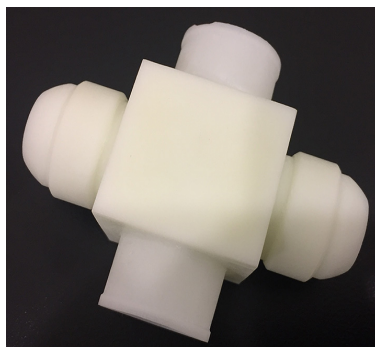


图7 四通管接头实物样件

Fig.7 Physical sample of four-way pipe joint

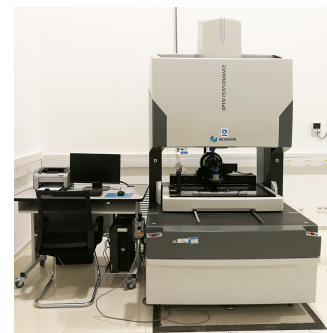


图8 复合式影像测量仪

Fig.8 Composite image measuring instrument

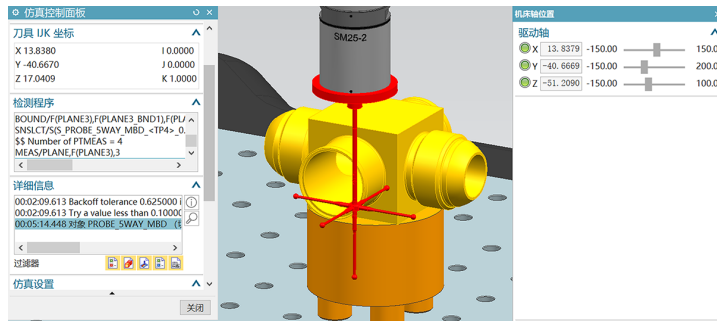


图12 碰撞检测

Fig.12 Collision detection

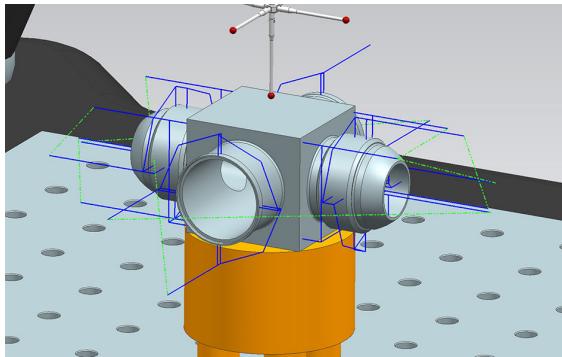


图13 四通管接头检测路径发布

Fig.13 Release of four-way pipe joint inspection path

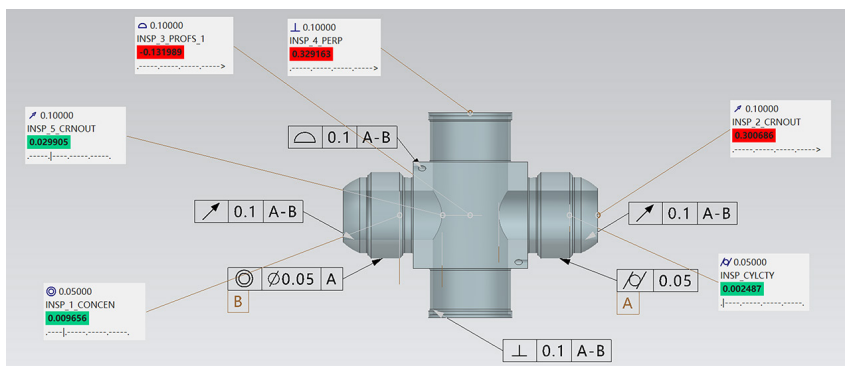


图14 四通管接头三维检测报告

Fig.14 Three-dimensional inspection report of four-way pipe joint

(3) 利用设计、工艺与检验间统一的模型数据,利于实现民用航空发动机设计与制造间的快速协同,为后续基于模型的民用航空发动机设计、制造和检验一体化生产模式的全面推行奠定了重要的技术基础。

不过,本文的研究还仅局限在基于模型的 PMI 信息识别、检测路径

规划和检测结果的三维可视化等几个方面,还不能全面满足基于模型的民用航空发动机设计、制造和检验一体化的需求,后续还需加强以下 3 个方面的研究:

(1) MBD 模型的深度延用研究,通过对前后端检测流程的调研,规划定制 MBD 模型应用服务,拓展

MBD 模型在民用航空发动机制造检测过程中的应用深度和广度;

(2) 检测设备深度集成研究,通过梳理民用航空发动机装配流程所涉及的检测设备及仪器,进一步研究基于模型的检测技术与不同检测设备和仪器的有效集成,以使所涉及的设备和仪器统一采用基于模型的检测模式;

(3) 设计、制造和检验等信息化管理系统的有效集成研究,以二维图纸为核心的传统航空发动机设计、制造和检验的生产方式已无法满足民用航空发动机基于模型的企业(MBE)和智能工厂建设需求,未来将逐步向以标注 PMI 的 MBD 作为唯一核心,以此贯通民用航空发动机设计、制造和检验全流程的生产模式进行转变,故需将基于模型的检测技术更好地集成到企业设计、制造和检验管理系统中,以便实现设计、工艺和检验的深度融合,以及正向研发过程的快速迭代。

参考文献

[1] 刘小方. 复杂武器装备数字化质量检验系统构建分析[J]. 计算机仿真, 2015, 32(3): 19-22.

LIU Xiaofang. Analysis of establishing digital quality inspection system for complicated military equipment[J]. Computer Simulation, 2015, 32(3): 19-22.

[2] 刘检华, 孙连胜, 张旭, 等. 三维数字化设计制造技术内涵及关键问题[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 494-504.

LIU Jianhua, SUN Liansheng, ZHANG Xu, et al. Connotation and key problem of three-dimensional digital design and manufacturing technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 494-504.

[3] 郭建华, 李新保. 基于三维模型的雷达结构件数字化检测技术应用[J]. 电子机械工程, 2019, 35(2): 61-64.

GUO Jianhua, LI Xinbao. Digital inspection technology and application of

- radar structure parts based on 3D model[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2019, 35(2): 61-64.
- [4] 唐秀梅, 李海泳, 徐金梅. 基于 MBD 技术的航空发动机制造数字化工艺准备应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(21): 54-56.
- TANG Xiumei, LI Haiyong, XU Jinmei. Technological planning application of MBD in aeroengine manufacturing enterprise[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(21): 54-56.
- [5] 程振阳. 航空发动机机加工工艺执行可视化技术研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- CHENG Zhenyang. Research and realization on visualization of aero-engine machining process execution[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [6] 张露, 单纯利, 王呈, 等. 基于 MBD 模型的航空发动机零件检测技术[J]. *测控技术*, 2015, 34(2): 144-147.
- ZHANG Lu, SHAN Chunli, WANG Cheng, et al. Inspection technology of aero-engine parts based on MBD model[J]. *Measurement & Control Technology*, 2015, 34(2): 144-147.
- [7] 张露, 陈雷, 张积瑜, 等. 基于模型大扭角叶片的三维矢量测量技术[J]. *航空精密制造技术*, 2016, 52(6): 46-48, 53.
- ZHANG Lu, CHEN Lei, ZHANG Jiyu, et al. 3D vector measuring technology based on model in blades[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(6): 46-48, 53.
- [8] 饶有福. 基于模型的企业(MBE)在航空业的实践与发展[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(18): 89-91.
- RAO Youfu. Application and development of model-based-enterprise (MBE) in aviation industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(18): 89-91.
- [9] 陈冰. 面向智能制造的航空发动机协同设计与制造[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(5): 16-21.
- CHEN Bing. Collaborative design and manufacturing of aeroengine oriented to smart manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(5): 16-21.
- [10] 苏巧灵. 国内外智能制造的发展及对我国商用航空发动机发展的启示[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(18): 54-61.
- SU Qiaoling. Development of intelligent manufacturing and its impact on commercial aircraft engine manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(18): 54-61.
- [11] 张玉金. 基于 MBD 的商用航空发动机数字化设计与制造技术实施方法[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(22): 62-68.
- ZHANG Yujin. Study of construction method for commercial aero-engine design and manufacturing based on MBD[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(22): 62-68.
- [12] 王岭. 商用航空发动机智能制造研究与探索[J]. *航空发动机*, 2019, 45(3): 91-98.
- WANG Ling. Research and exploration on intelligent manufacturing of commercial aeroengine[J]. *Aeroengine*, 2019, 45(3): 91-98.

通讯作者: 王振兴, E-mail: wzx756@163.com。

Research on Digital Inspection Technology of Geometry Size for Commercial Aero-Engine Based on Model

WANG Zhenxing, CAO Wei, JIN Wei, ZHENG Fangfang

(AECC Shanghai Commercial Aircraft Engine Manufacturing Co., Ltd, Shanghai 201306, China)

[ABSTRACT] For the reason that the traditional geometrical size inspection of workpiece was not suitable for the future production of commercial aero-engine, some key digital inspection technologies of geometrical size of commercial aero-engine based on model, including PMI (product manufacturing information) recognition, inspection routing creation, release of the three-dimensional report and so on, were researched in the paper. The method could save the inspection programming time and reduce the impact caused by work staff's lack of programming experience, which could improve inspection efficiency and consistency of inspection results. Meanwhile, the method was good for realizing fast collaboration between design and manufacturing of commercial aero-engine by using the uniform model data among design, technology and inspection. Finally, the applicability of the proposed method for the inspection of workpiece geometrical size of commercial aero-engine was validated by a case verification.

Keywords: Model Based Definition (MBD); Commercial aero-engine; Geometrical size; Digital inspection; Product Manufacturing Information (PMI)

(责编 阳光)