

# 基于 MBD 的飞机结构件检验规划技术研究

## Research on Three-Dimensional Inspection Planning for Aircraft Structural Parts Based on MBD

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 段桂江 岑 荣

**[摘要]** 针对飞机结构件检验规划技术进行研究,提出了融合 MBD 思想的飞机结构件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介绍。最后在 CATIA 二次开发平台 CAA 和 Eclipse RCP 环境开发了三维检验规划系统和检测数据与业务管理信息系统进行了案例验证。

**关键词:** MBD 飞机结构件 三维检验规划 检验工艺模型 三维检验统一模型

**[ABSTRACT]** The technology of three-dimensional inspection planning for typical aircraft structural parts is studied. Firstly, the three-dimensional inspection planning system technical architecture based on the MBD is proposed and its significance is expounded. Then it is introduced through the definition of inspection process model, data organization, inspection information management and application according to inspection requirements and characteristics of the aircraft structural parts. Finally, three-dimensional inspection planning system and management information system are developed based on CAA and Eclipse RCP and a case is provided.

**Keywords:** MBD Aircraft structural parts Three-dimensional inspection planning Inspection process model Unified model of three-dimensional inspection

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.062

现代航空制造业以 CAD 或 VPD (Virtual Product Development, 虚拟产品开发) 技术为平台,在产品研制过程中推广了基于模型的定义 (Model-Based Definition, MBD) 技术,使得产品在设计制造过程中的基础数据定义、信息生成、授权、共享和传递模式发生了根本变化,并将 MBD 模型作为产品设计制造等全生命周期各阶段的唯一依据和数据源。

国际上已经制订了 MBD 技术的相关标准体系,例如美国工程师协会 (ASME) 于 2003 年发布了“数字化产品定义数据实践 Y14.41”,这成为美国的国家标准;ISO 组织则借鉴 ASME Y14.41 标准制定了 ISO16792 标

准等;同时各大 CAD 软件,如 CATIA、NX、Creo 等都支持 Y14.41 标准。国外发达航空企业的成功经验则证明 MBD 模式是数字化设计制造的成功途径,如美国波音公司依托 CATIA 软件系统,在研制波音 787 时采用 MBD 技术实现了产品设计、工艺设计、工装设计、零件加工、装配、检验等环节的高度融合和协同,真正实现了飞机设计制造过程的三维数字化、无纸化,大大缩短了飞机的研制周期。

国内航空工业也在大力推广 MBD 技术,在基于 MBD 的设计、制造等领域都获得了进展。但总体而言,国内基于 MBD 的数字化设计和制造模式还处于探索阶段,产品信息的数字化定义及设计、管理规范需要进一步完善,尤其是在飞机零部件检验这一环节,目前国内航空企业仍然依赖二维图纸表达产品的检验过程信息<sup>[1]</sup>,而设计过程已经实现了三维数字化,这就直接导致产品检验信息具有双数据源,容易引起检验工艺二义性、检验规划与产品设计更改不同步<sup>[2]</sup>,以及信息组织管理难度大、信息量缺失、信息传递不通畅等潜在问题。本文通过对 MBD 技术体系的研究,针对我国航空制造业飞机机加结构件检验过程的特点和需要,探讨基于 MBD 的飞机机加结构件检验规划技术,从而弥合检验规划与数字化设计制造的缝隙。

## 1 基于 MBD 的飞机机加结构件检验规划技术应用体系

### 1.1 基于 MBD 的检验规划的意义

基于模型的定义 (MBD) 是一个用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体,它详细规定了三维实体模型中产品尺寸、公差标注规则和工艺信息表达方法<sup>[3]</sup>。MBD 技术的本质是以产品三维模型为信息载体定义产品设计、制造工艺、工装设计、装配工艺、检验等信息,作为设计、制造、检验等产品全生命周期各阶段的唯一依据和数据源。飞机机加结构件的传统检验规划方式是以二维图纸为主表达尺寸、公差、材料等非几何信息,而通过三维模型表达零部件的几何信息,检验信息分布定义,离散分布于不同的信息载体。而基于 MBD 的检验规划则将产品几何信息以及非几何检验

检测信息进行融合,以 MBD 检验模型作为产品检验的唯一依据和数据源,易于保证检验规划信息数据的正确性和完整性以及与产品设计制造信息的一致性,消除了以往检验工艺二义性、检验规划与设计更改不同步等问题。依据 MBD 模型生成测量程序,驱动数字化测量设备执行检测任务,可以实现数字化检测与设计、制造的有效衔接;通过测量路径优化、干涉检查等计算机辅助手段,可帮助企业摆脱目前数字化测量设备(如三坐标测量机)执行效率低下的现状,并且可充分利用数字化测量设备的测量精度与效率,充分发挥数字化测量技术的优势。

### 1.2 飞机机加结构件的检验特点与需求

飞机机加结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的重要组成部分,主要包括梁、肋、框、壁板、座舱盖骨架等多种类型。它们的品种繁多、形状复杂、材料各异,是由构成飞机气动外形的流线型曲面、各种异形切面、结合槽口、交点孔组合而成的复杂实体<sup>[4]</sup>。飞机结构件检验任务的 80% 以上来源于这些复杂零部件。与一般机械制造业的零部件不同,飞机结构件的检验具有检测任务量大、检测耗时长、检测精度要求高、装夹定位难度大、检测手段复杂多样、对操作人员素质要求高等特点。飞机结构件常见的检测内容、方法、工具及技术见表 1<sup>[5]</sup>。显然,传统的基于二维图纸检验规划方式由于存在数据多源性、人工解读的差异性、人为失误等诸多因素很难完全满足飞机零部件的质量保障需求,并且在检验效率、成本、精度等方面越来越难以满足国内航空工业的要求。

### 1.3 基于 MBD 的检验规划体系

MBD 技术的应用使产品检验过程发生了根本变化,依托满足 MBD 规范的三维数模可以实现对产品检验信息的全生命周期管理。基于 MBD 的三维检验规划体系如图 1 所示。在该体系中,基于 MBD 的检验数据定义和提取是基础,依照 MBD 检验规划体系规范,可以建立聚合完整检验信息的检验规划工艺模型。通过轻量化产品模型获得轻量化视图信息,与产品检验规划工艺模型进行信息融合形成 MBD 检验规划统一模型,根据产品检验过程的需要可以从多个维度对 MBD 检验规划统一模型进行解析,进行多视图的数据展示和应用,从而实现对产品检验过程全方位支持。

## 2 基于 MBD 的检验规划体系应用

### 2.1 MBD 检验规划工艺模型的定义

MBD 检验规划工艺模型以设计模型或工艺模型为基础,除要求设计模型或工艺模型包含完整的几何信息外,还需要包含较为完整的非几何信息,如尺寸公差、形

表1 飞机结构件的检测内容、方法及技术

检测项目	检测内容	主要检测工具或技术
厚度测量	金属件厚度	量具、超声、涡流、射线
	涂层厚度	涡流、射线、超声
硬度检测	热处理、表面处理质量	硬度计
		超声、漏磁场、电导率
表面质量	粗糙度	光学、电磁、超声
	污染度	光学、液体表面张力
形位尺寸检测	零部件形位尺寸线值测量	量具、超声、射线
	线值和角度特种测量	专用检测工具及仪器
	坐标测量	三坐标测量机
	模具、样板的曲面、曲线检测	
缺陷检测	型材、构件裂缝检测	金相宏观分析
	工件裂缝检测	超声、渗透、电磁、射线
		超声、渗透、电磁、射线
	工件表面其他非连续性缺陷检测	渗透、漏磁场、涡流、超声、射线、激光全息、红外等
	工件内部不连续性缺陷检测	力学试验、金相分析
超声、射线、涡流、漏磁场、激光全息、红外等		
物理性能测量	电导率、磁导率、热特性等	物理试验
		涡流、漏磁场、超声、电位

位公差、材料、加工工艺等。在检验规划工艺模型中,不能对设计模型或工艺模型原有信息进行修改、删除操作,只能进行公差、检验规划等相关信息的添加。检验规划工艺模型包含的内容如图 2 所示,图中蓝色部分表示不得修改。

检测工序包含检测工序号、检测名称信息,针对产品工序检验时也包含对应加工工序关联信息,代表该检测工序在某一工序加工结束后进行。检测对象通常是指几何表面,用于指导检测人员现场作业。检测工具分为手工和自动两大类,有游标卡尺、百分表、千分尺、粗糙度标准块、电动轮廓仪、圆度仪、涡流测厚仪、卡板、明胶板、塞规、R 规、角度尺、比较块、三坐标测量机等。测量点位信息是测点规划的结果,记录着测点笛卡尔三坐标值和测点在零件几何表面上的法向量值。测量路径描述的是在三坐标机测量过程中测头运行轨迹,以折线连接的形式在三维模型中展现。检测要求记录的是用于判断检测结果是否合格的信息,如尺寸公差值、形位公差值、按 BAC5946 标准进行硬度检查等。

### 2.2 MBD 检验规划工艺模型数据的组织

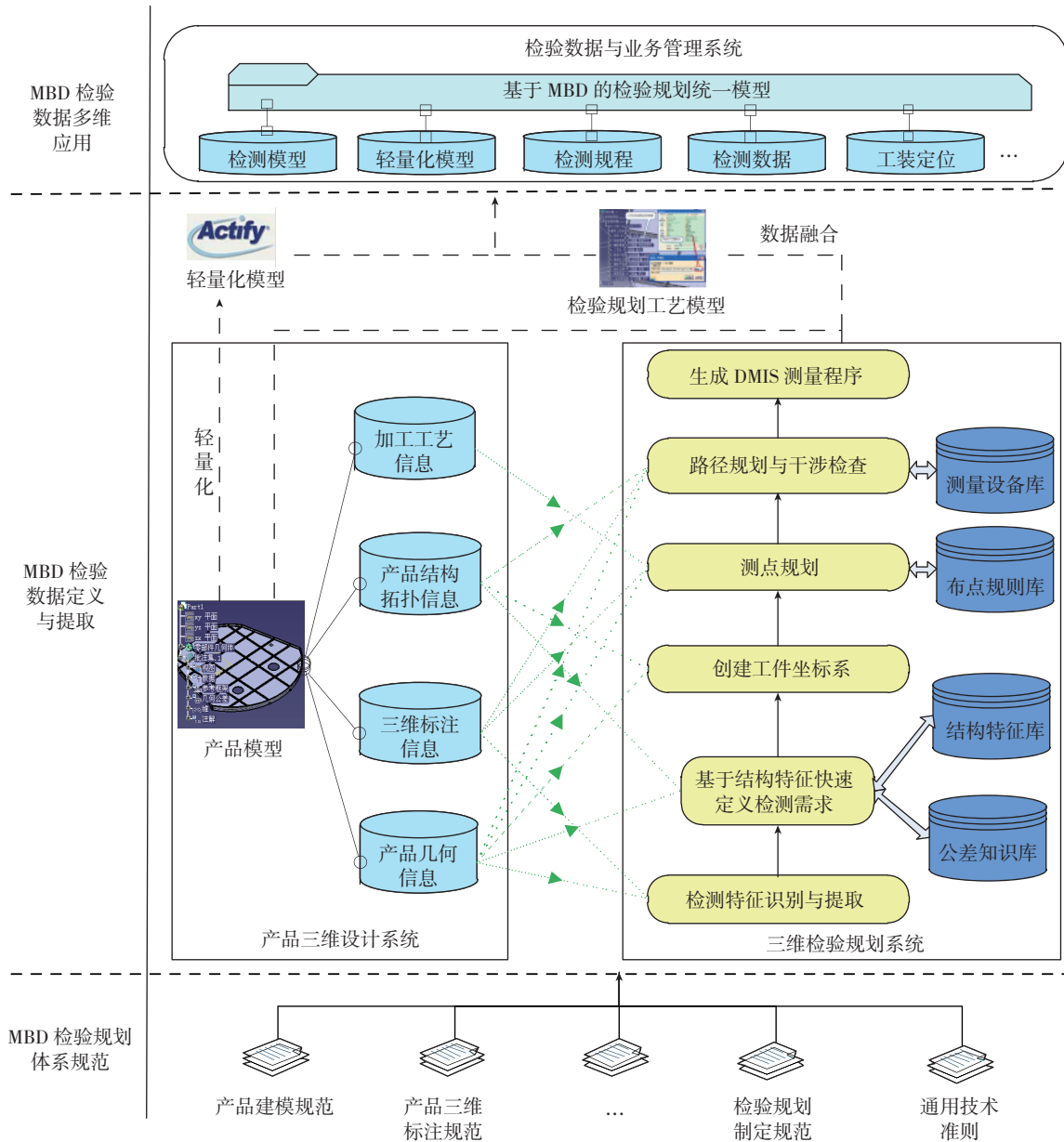


图1 基于MBD的三维检验规划体系

Fig.1 Three-dimensional inspection planning system based on MBD

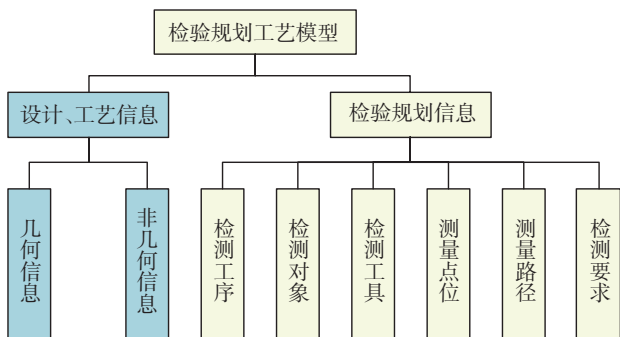


图2 检验规划工艺模型的信息内容

Fig.2 Information of inspection planning process model

MBD 数据的组织与管理中,根据计算机辅助设计系统对应用对象控制方法的不同,可以采用两种管理方式<sup>[3]</sup>:基于特征树的管理方法和基于层及层表过滤器的管理方法。特征树法是指利用建模过程中对产品特征描述的不同,建立相应的特征树,并通过隐藏开关实现对产品信息分类显示阅读的一种方法。层及层表过滤法是指在建模过程中将产品不同类别的信息分布建立不同的层空间中,通过对层空间的关联组合控制,实现对产品信息的分类<sup>[6]</sup>。

考虑到 CATIA 采用的是特征树方式对模型数据进行管理,这里采用特征树方式对检验规划信息进行管

理,将检验规划信息融合到设计或工艺数模中。以特征树方式管理的关键是检验规划信息的特征建模和导航树显示两大部分。依据检验规划工艺模型的定义,归纳总结出一个根特征原型,经扩展得到其余特征原型,例如用于存储检测工序信息的工序特征原型、测量点位信息的测点特征原型、测量路径信息的测量路径特征原型。将各个特征原型按照检验规划信息的内在逻辑和关联关系进行组织,将原型实例化从而完成信息的特征建模。导航树显示是基于特征树管理的另一关键内容,目的是将特征原型经实例化后以结构树的形式组织在一起,使得用户可以查看、操作相应的特征实例。采用特征树方式对检验规划信息进行组织和管理的效果如图3所示。

### 2.3 MBD 检验数据的管理与应用

基于MBD的检验规划体系融合了各类检验信息,为了有效管理和应用检验数据,建立了基于MBD的检验规划统一模型:将检验规划工艺模型、轻量化模型、检验规程、测量程序、检测报告等集成在一个统一的整体信息框架中,实现统一、规范化管理;同时将其作为基于MBD的检验数据与业务管理系统内部集

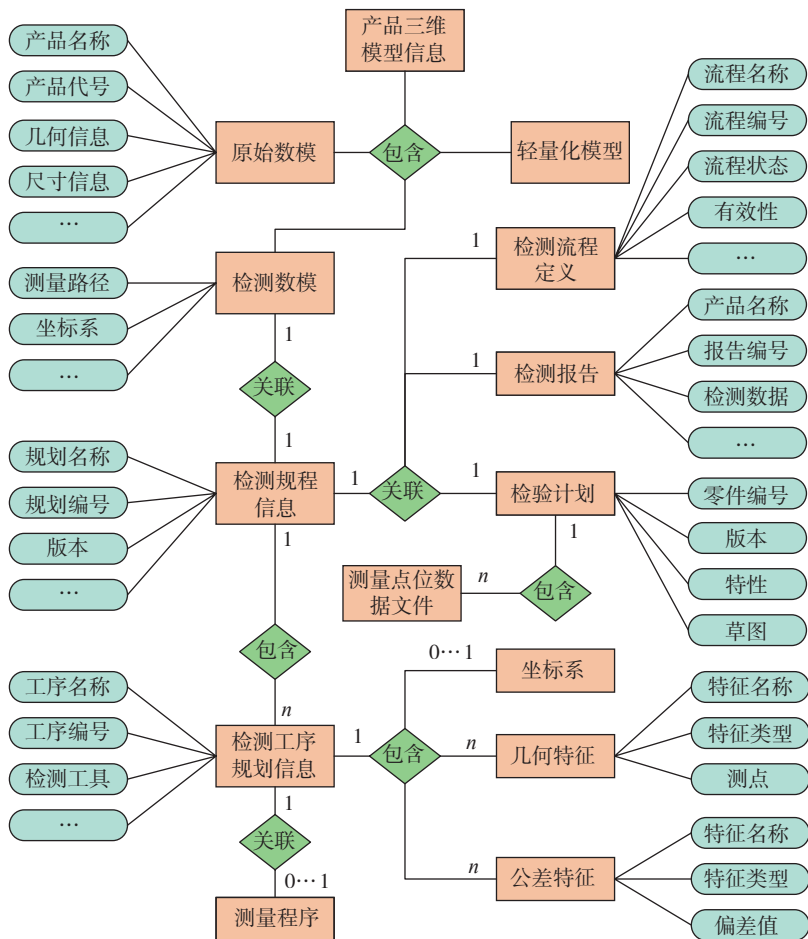


图4 基于MBD的检验规划统一模型

Fig.4 Unified inspection planning model based on MBD

成信息交换源,实现检验规程、检测数据等信息从三维检验规划系统向检验数据与业务管理信息系统的传递。

通过分析检验规划工艺模型、检验规程、测量程序、检测报告等信息,梳理得到其内在关联性,以信息包含、聚合关系为依据,构建基于MBD的检验规划统一模型,如图4所示。基于MBD的检验规划统一模型信息包含原始数模、检验规划工艺模型、轻量化模型3部分内容。原始数模通常为三维设计模型或三维工艺模型。在三维检验规划系统中打开原始数模,经过相应的检验规划,可以生成检验规划工艺数模。检验规划工艺数模不仅包含了原始数模中的已有信息,如产品名称、产品代号、几何信息等,还存储了测量路径、坐标系等检验信息。检验规程信息与检验规划工艺数模相关联,从三维检验规划系统导出,将存储在模型文档中的信息转换到文本文档中。

检验规程信息的生成是实现检验规划相关信息从三维检验规划系统向检验数据与业务管理信息系统传递的关键。检验规程信息包含多个检测工序信息,检测工序信息由工序名称、工序编号、检测工具等组成,对于

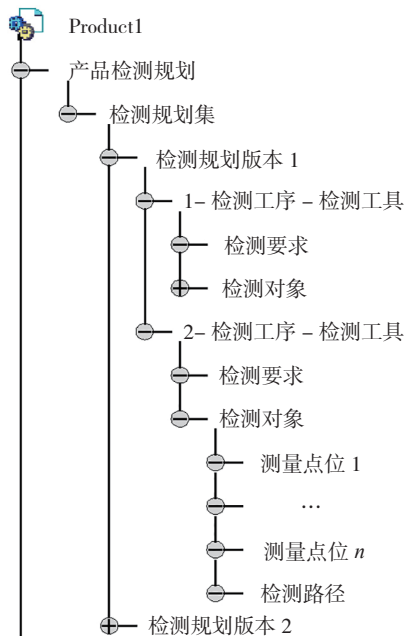


图3 检验规划信息导航树显示的结构示意图

Fig.3 Structure of inspection planning information navigation tree

采用三坐标测量机进行自动检测的工序,还包含测量程序、坐标系信息,这些信息可以指导现场检测作业执行。将测量结果输入到检测报告中,并上传至检验数据与业务管理信息系统,形成检测报告与检测规程信息的一一对应关系。利用检验数据与业务管理信息系统功能,可由检验规程信息自动解析生成检测流程定义和检验计划信息。

检验规划统一模型所包含的信息结构各异,同时信息来源多样,本文采用描述文件记录文档路径、文档存储检测相关信息的方式(如图5所示),建立检验规划统一模型所包含信息的内在关联性,以此实现对检验规划工艺数模、检验计划、检测报告等大量文档的归档管理,达到飞机产品检验过程的可追溯性要求。

### 3 系统实现与案例验证

为了展示基于MBD的检验规划技术的功能,验证系统对飞机机加结构件的适用性,本文基于达索公司的三维设计软件 CATIA V5R18,在集成开发环境 Microsoft

Visual Studio .NET 2005 中利用 CAA、RADE 环境对 CATIA 进行二次开发完成三维检验规划系统,同时在

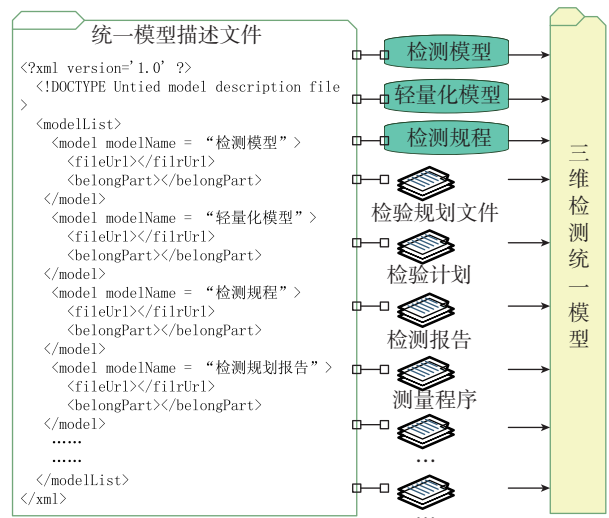


图5 基于MBD的检验规划统一模型的文件描述  
Fig.5 Description of unified inspection planning model based on MBD

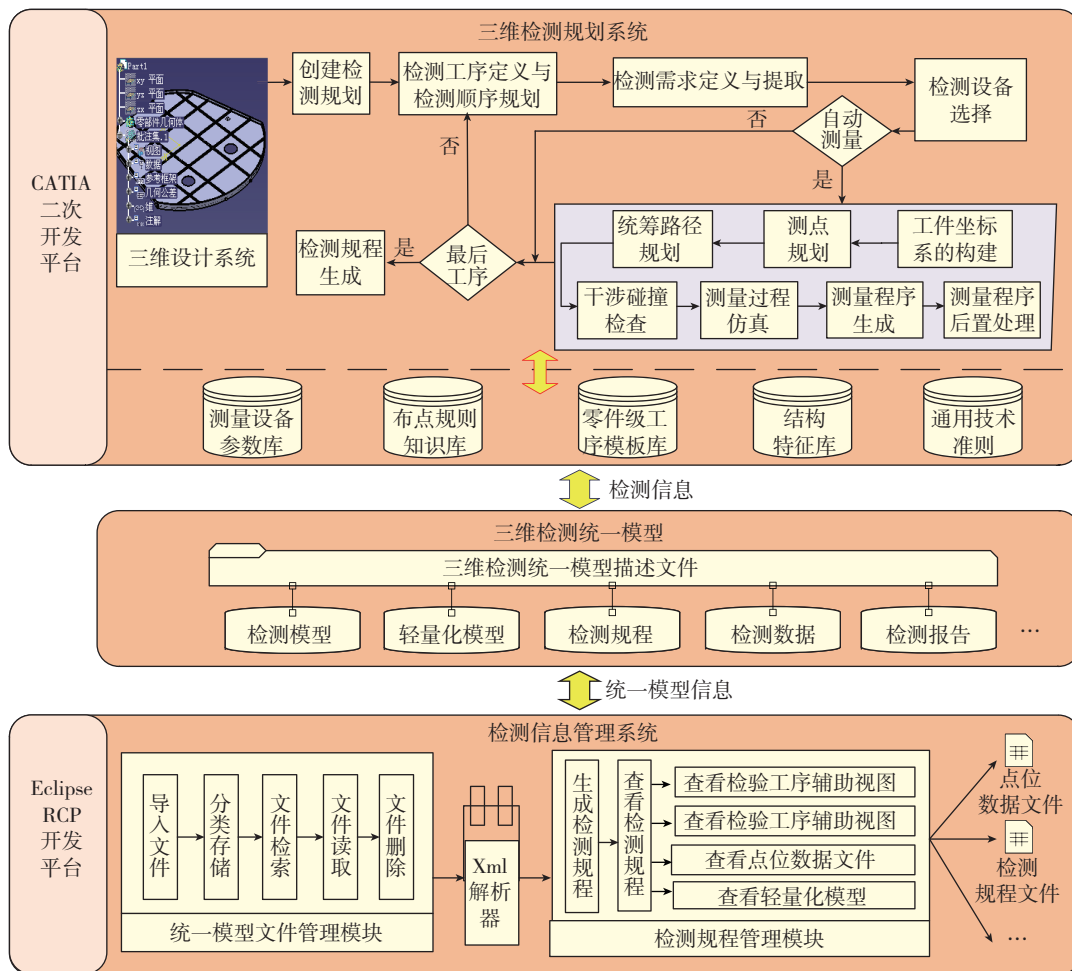
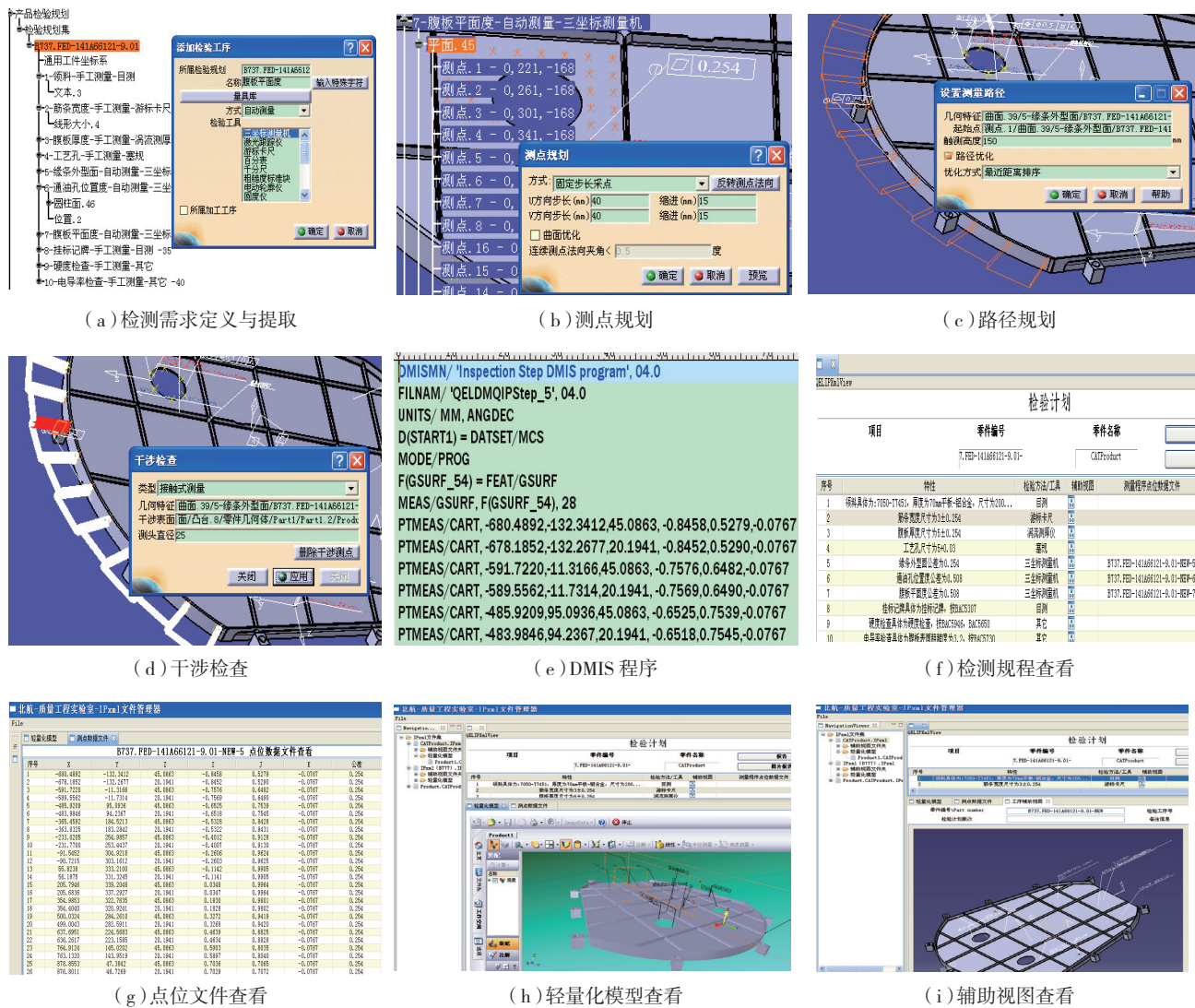


图6 系统实现方案  
Fig.6 System implementation



(a) 检测需求定义与提取

(b) 测点规划

(c) 路径规划

(d) 干涉检查

(e) DMIS 程序

(f) 检测规程查看

(g) 点位文件查看

(h) 轻量化模型查看

(i) 辅助视图查看

图7 系统功能与验证效果

Fig.7 System functions and verification

Eclipse RCP 平台下开发了检验数据与业务管理信息系统,系统的实现方案如图 6 所示。

最后,本文以整体框结构件为实例,从检验工艺规划和检验数据与业务管理两个方面,对系统主要功能进行了介绍和验证。系统功能与验证效果如图 7 所示。

#### 4 结论

基于 MBD 的三维检验规划对航空制造业实现设计、制造、检验等产品全生命周期的无纸化、数字化具有重要意义,本文在分析 MBD 技术应用体系和三维检验规划技术的基础上,提出了融合 MBD 思想的飞机结构件检验规划技术体系,同时对该体系从 MBD 数据定义、组织、管理与应用等方面进行了阐述,最后分别基于 CATIA 和 Eclipse 平台开发了三维检验规划系统和检验数据与业务管理信息系统,并以飞机典型机加结构件整

体框为例进行了验证,为基于 MBD 的检验规划技术工程化应用提供了技术支撑和方法指导。

#### 参考文献

- [1] 张江. 飞机典型结构件三维检测规划技术与系统开发 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- [2] 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. 制造业自动化, 2011, 33(5): 1-5.
- [3] 周秋忠, 范玉青. MBD 技术在飞机制造中的应用. 航空维修与工程, 2008(3): 55-57.
- [4] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001: 453-460.
- [5] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册 - 工艺检测. 北京: 航空工业出版社, 1993: 2-8.
- [6] 卢鹤, 韩爽, 范玉青. 基于模型的数字化定义技术. 航空制造技术, 2008(3): 78-82.

(责编 谷雨)