

MBD 多源检验特性解析的飞机装配件检验计划自动编制方法

胡德雨¹, 张岩涛¹, 苏明², 袁飞²

(1. 中国航空综合技术研究所 数据标准技术研究部, 北京 100028)

(2. 中航成飞民用飞机有限责任公司 质量安全部, 成都 610091)

摘要: 针对飞机装配件具有首件检验计划人工编制效率低、规则依赖经验、输出一致性和追溯性不足等问题, 提出一种基于模型的定义(MBD)多源检验特性解析的飞机装配件检验计划自动编制方法。建立检验特性、检验项、知识规则与输出对象之间的统一信息模型, 研究面向MBD多源信息的检验特性自动识别方法; 设计基于检验知识库的检验项自动编制方法, 基于CATIA V5 CAA二次开发平台开发原型系统, 并在典型民用飞机装配组件上进行案例验证。结果表明: 该方法可实现从MBD数模到检验计划、零组件配套清单、材料核查清单及配套气泡图的自动生成, 在编制效率、完整性、一致性和可追溯性方面表现良好。

关键词: 飞机装配件; 检验计划自动编制; MBD; 检验特性建模; 紧固件识别; 检验知识库; 首件检验

中图分类号: V262.4

文献标识码: A

Research on automatic preparation method of aircraft assembly inspection plans based on MBD multi-source inspection characteristic parsing

HU Deyu¹, ZHANG Yantao¹, SU Ming², YUAN Fei²

(1. Department of Data Standard Technology Research, China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

(2. Department of Quality and Safety, AVIC Chengdu Commercial Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

Abstract: To address the problems of low efficiency, experience dependency, and insufficient output consistency and traceability in manually preparing First Article Inspection (FAI) plans for aircraft assemblies, an automatic preparation method based on Model-Based Definition (MBD) multi-source inspection characteristic parsing is proposed. The unified information model linking inspection characteristics, inspection items, knowledge rules and output objects is established. The automatic identification method for inspection characteristics from MBD multi-source information is developed. The prototype system is developed on the CATIA V5 CAA platform and verified through case studies of typical civil aircraft assemblies. The results show that the proposed method can automatically generate inspection plans, part/fastener checklists, material check lists and ballooned drawings from MBD models, with good performance in efficiency, completeness, consistency and traceability.

Key words: aircraft assembly; automatic preparation of inspection plan; MBD; inspection characteristic modeling; fastener identification; inspection knowledge base; first article inspection

收稿日期: 2026-06-09; 修回日期: 2026-08-01

通信作者: 胡德雨(1992-), 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: hudeyu301@163.com

引用格式: 胡德雨, 张岩涛, 苏明, 等. MBD多源检验特性解析的飞机装配件检验计划自动编制方法[J]. 航空工程进展.

HU Deyu, ZHANG Yantao, SU Ming, et al. Research on automatic preparation method of aircraft assembly inspection plans based on MBD multi-source inspection characteristic parsing[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

基于模型的定义(Model-Based Definition, MBD)以三维数字化模型作为产品全生命周期的唯一数据源,将设计、制造与检验信息集成于同一模型中,已成为航空制造业数字化转型的关键使能技术^[1-2]。首件检验(First Article Inspection, FAI)作为验证制造过程能力、确保产品符合设计要求的 key 质量控制手段,其编制质量直接决定首件鉴定的实施效率与判定准确性。AS9102C^[3]、GJB 908A^[4]、HB 9102^[5]等标准均要求首件检验报告应包含检验计划表、零组件配套清单及气泡图等支撑文件。研究MBD数模驱动下飞机装配件检验计划的自动编制方法,对提升首件检验的规范性与工程化水平具有重要意义。

目前,国内外围绕MBD驱动的检验信息提取与检验规划已开展了较多研究。Quintana等^[2]从航空工业角度分析了MBD替代二维工程图的可行性;Hedberg等^[6]验证了基于模型的制造与检验对数字线索贯通的支撑作用;Goher等^[7]对MBD在企业级应用中的发展现状进行了综述;Lu等^[8]从数字孪生角度讨论了模型驱动制造中的数据组织框架。在具体检验应用方面,郭朝阳等^[9]提出了基于MBD的航空典型零件检验计划自动编制方法;刘元等^[10]研究了基于MBD的数模解析方法在检验数模中的应用;武晓娟等^[11]实现了钣金零件检验计划生成。近年来,国内高校与研究机构在飞机数字化装配与质量检测方面取得了显著进展。隋少春等^[12]提出了飞机整机装配质量的数字化测量技术;在MBD与三维工艺信息建模方面,田富君等^[13]建立了基于模型定义的工艺信息建模方法,张树生团队^[14]进一步研究了面向工艺重用的三维CAD模型检索方法;在紧固件质量检测方面,南京航空航天大学黄翔、李泷杲团队开展了系列工作,包括基于结构光的铆钉齐平度测量^[15]和基于散乱点云的铆钉孔位提取^[16],李迎光团队^[17]则提出了数据驱动飞机结构件加工特征识别方法;此外,面向装配质量控制的数字孪生建模^[18]与深度学习驱动的蒙皮铆接质量检测^[19]等新方法也不断涌现。

上述研究在零件检验、数字化测量、紧固件质量检测、特征识别与质量信息提取等方面取得了较多进展,但应用于飞机装配件首件检验计划自

动编制时仍存在不足:缺少面向装配件检验特性的统一建模,检验特性、检验项与输出文档之间的映射关系不清晰;装配件检验信息主要承载于MBD及其关联R数模,但在模型内部呈多层级、多载体分布,缺少对工程注释、特殊过程定义和紧固件几何等多源信息的协同解析方法;紧固件存在实体化与非实例化两种典型表达^[20],数量大、检验规则差异显著,现有研究对其识别与聚类生成检验项的方法支撑不足;缺少与AS9102C等标准紧密衔接、兼顾检验计划与材料核查的一体化自动编制方案。

针对上述问题,本文提出一种基于MBD多源检验特性解析的飞机装配件检验计划自动编制方法。建立面向装配件首件检验的检验特性信息模型,明确四类检验特性的属性组成及其与检验项、输出对象之间的关系;研究面向MBD多源信息的检验特性自动识别方法,重点解决特殊过程识别和双形态紧固件识别与多维聚类问题;设计基于检验知识库的检验项自动编制方法,实现检验要求、量具和参数的自动组装与标准化输出;基于CATIA二次开发平台开发原型系统,并在典型民用飞机装配组件上完成案例验证。

1 总体技术框架

飞机装配件检验计划自动编制总体技术框架如图1所示,该框架以装配MBD数模为核心数据源,以检验知识库为规则支撑。装配MBD数模涵盖基本属性、装配结构树、零组件信息、工程注释、三维标注、紧固件信息及特殊过程工艺信息等内容,为检验项生成提供完整数据基础;检验知识库则集成紧固件规格表、紧固件安装规范表、特殊过程定义表和检验量具表等标准化知识,为规则匹配、逻辑推理和检验项智能生成提供依据。

系统采用模块化串行处理方式,依次完成基本信息获取、零组件清单获取、工程注释信息获取、特殊过程工艺信息获取、紧固件自动识别和检验项自动计算,逐步形成结构化检验项清单。该清单以表格形式统一组织,包含检验项目、检验要求、检验工具、检验方法、精度范围及AO/FO编号等字段,并细分为工程注释检验项、紧固件检验项和特殊过程检验项。进一步地,系统可自动生成工程注释检验项气泡图和紧固件检验项气泡图,

实现结构树节点定位、视图高亮、标注布局优化及二维截图输出。最终,系统将统一编号后的检验项、装配件基本信息、自动生成的气泡图及零组件

配套清单共同填入AS9102标准模板,生成完整的检验计划与首件鉴定文件。

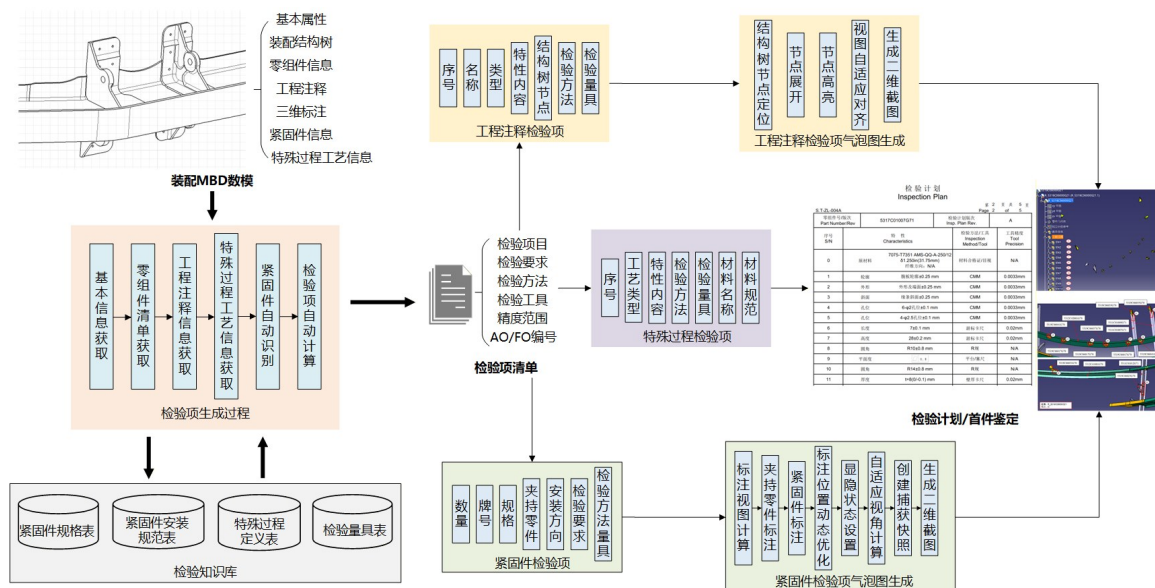


图1 飞机装配件检验计划自动编制总体技术框架

Fig. 1 Overall technical framework of automatic inspection plan preparation for aircraft assemblies

2 面向装配件的检验特性建模

检验特性指能够触发检验活动并可映射为检验项或核查对象的最小语义单元,是连接MBD源信息与检验文档输出的中间表示。结合AS9102

C、GJB 908A等首件检验标准要求与装配件检验工程需要,本文将装配件检验特性划分为零组件特性、工程注释特性、特殊过程特性和紧固件连接特性四类,其分类体系如图2所示。

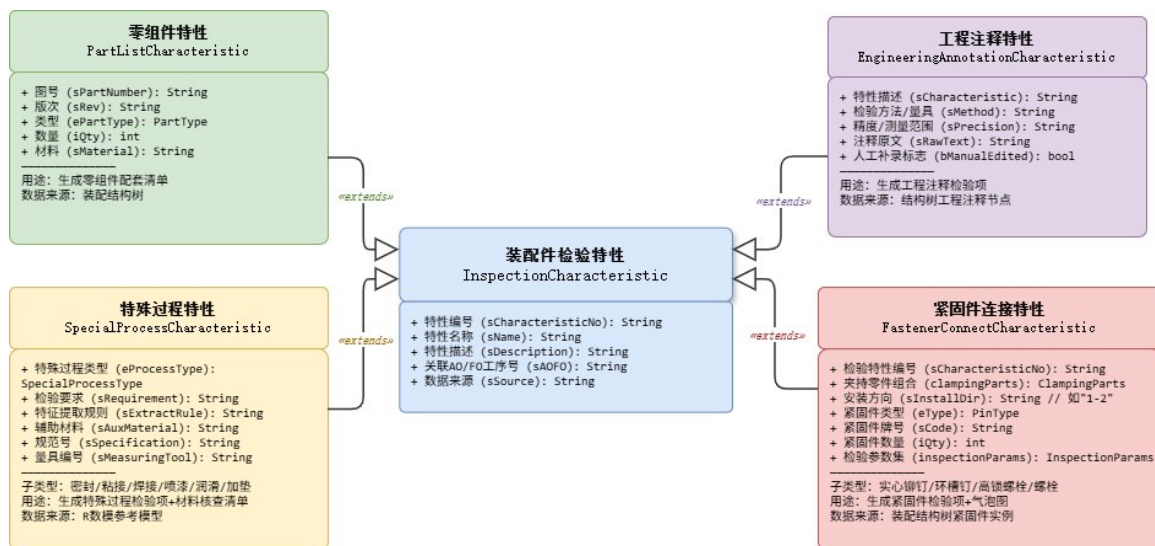


图2 装配件检验特性分类体系

Fig. 2 Classification system of assembly inspection characteristics

1) 零部件特性,指装配组件所包含的零件与紧固件的配套信息,是首件鉴定中零组件核对环

节的核心依据。信息内容包括图号、版次、名称、类型(零件/紧固件)、数量、材料等基本属性。零

组件特性不转化为检验项,而是以零组件配套清单形式独立呈现,供检验人员现场核对零件/紧固件是否齐套。其信息模型以零组件清单条目为核心实体,通过“图号+版次”为合并键对重复条目进行数量累加。

2) 工程注释特性,指工艺设计人员以文字形式标注于MBD模型中的工艺要求与检验要求,典型内容包括间隙/阶差要求、外形轮廓要求、装配标记检查、装配工艺规范引用、多余物检查、外观检查等。其信息模型包含名称、特性描述、检验方法/量具、精度/测量范围、AO/FO工序号等字段,每条注释对应一个独立的检验项。

3) 特殊过程特性,特殊过程从质量检验角度是指其结果不能通过后续监视或测量加以验证、需对过程本身进行控制的加工过程。本文将特殊过程细分为密封、粘接、焊接、喷漆、润滑和加垫六种类型。其信息模型数据来源为MBD装配数模中的R数模参考模型,其中以几何集(Geometrical

Set)形式承载了密封、粘接等工艺定义。每一项特殊过程特性对应一个检验项;同时对所有特殊过程涉及的辅助材料(密封胶、粘接剂、焊料、漆料、润滑剂、垫片等)去重汇总,形成材料核查清单。

4) 紧固件特性,紧固件连接是飞机装配配件最主要的连接方式,紧固件特性是数量最多、规则最复杂的一类检验特性,包括实心铆钉、环槽钉、高锁螺栓、螺栓四种类型。其信息模型以紧固件连接特性类为核心,集成紧固件基本信息(含类型、牌号、轴线几何、安装方向等,从MBD模型提取)、夹持零件组合(聚类分组的核心依据)、检验参数集(含孔径、齐平度、墩头尺寸、钉杆伸出量、间隙要求等,通过查表匹配检验知识库获取)和量具信息4部分,其结构如图3所示。对数量庞大的紧固件实例,系统按“夹持零件集合+安装方向+类型牌号”3个维度进行多维度聚类,每个聚类组对应1个检验项,并同时为该检验项自动生成气泡图。

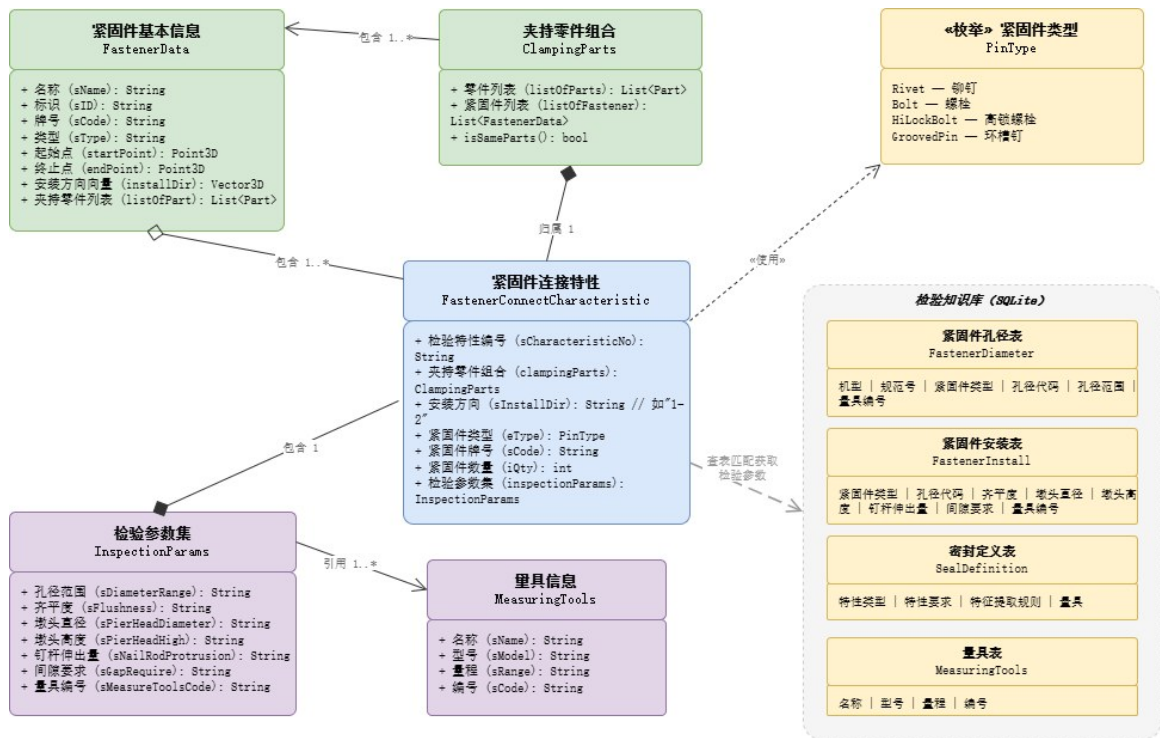


图3 紧固件连接特性信息模型

Fig. 3 Information model of fastener connection characteristics

四类检验特性的定义、来源、关键属性与输出对象如表1所示,可以看出:四类检验特性分别承载于MBD模型中不同的信息载体——零组件特性来自装配结构树的零件实例节点,工程注释特

性来自结构树的工程注释节点,特殊过程特性来自R数模中密封、粘接等专用工艺定义几何集,紧固件连接特性来自实体几何及R数模紧固件几何集。系统按各自载体分类提取,四类检验项由此

相互独立地生成。需要指出的是,不同特性在语义上可能存在交叉,例如密封、粘接等特殊过程要求,有时也会以文字形式出现在工程注释中。对于此类情形,考虑到首件检验强调“应检尽检”、宁可适度重复也不能遗漏关键要求的原则,本文不对跨类的检验要求进行语义比对与合并,而是按

其所在载体各自生成独立的检验项。这一处理以设计端遵循统一的MBD建模规范为前提,即各类检验要求均承载于约定的结构树节点或几何集中,从而保证检验项来源清晰、内容完整且可追溯。

表1 装配件检验特性定义、来源与输出对象
Table 1 Definition, source and output of assembly inspection characteristics

特性类别	来源位置	关键属性	是否直接形成检验项	输出对象
零组件特性	装配结构树零件实例属性	图号、版次、名称、类型、数量、材料	否	零组件配套清单
工程注释特性	结构树工程注释节点文本	名称、特性描述、检验方法/量具、精度/量程、工序号	是	检验计划表、配套气泡图
特殊过程特性	R数模工艺定义几何集	过程类型、特性要求、材料、规范号、量具编号	是	检验计划表、材料核查清单
紧固件连接特性	MBD实体几何及R数模点线表达	类型、牌号、轴线、安装方向、夹持零件集、检验参数集	是(聚类后)	检验计划表、配套气泡图

3 检验特性自动识别方法

本文以装配结构树为主线组织检验特性识别过程,通过结构遍历、工程注释解析、R数模解析和几何分析分别获取4类检验特性。其中,零组件特性与工程注释特性主要来源于装配结构树及其节点属性;特殊过程特性来源于R数模工艺定义几何集;紧固件特性来源于MBD实体几何与R数模点线轻量化表达的结合解析。所有特性最终归并到统一的检验特性集合,作为后续检验项自动编制的输入。

3.1 零组件特性识别

零组件特性识别采用深度优先策略递归展开装配结构树中的所有子装配与零件节点,对每个零件实例读取其图号、版次、名称、材料等属性并构造初始条目。通过名称后缀与紧固件类型关键词匹配判定其类型字段,以“图号+版次”为合并键对条目进行分组聚合并累加数量,最后按标准件优先级排序输出零组件配套清单。

3.2 工程注释特性识别

工程注释特性识别遍历装配结构树中的工程注释节点,通过标注接口获取注释完整文本。基于预定义的字段分隔规则将文本解析为名称、特性描述、检验方法/量具、精度/量程、AO/FO工序

号等结构化字段。对部分字段缺失的条目,界面以可编辑列表呈现解析结果,支持用户手动补录。解析后的工程注释特性数据直接对应检验计划表格中的一个检验项。

3.3 特殊过程特性识别

特殊过程特性来源于MBD数模中的R数模参考模型。R数模以几何集形式组织特殊过程定义。识别流程为:从R数模根节点出发遍历所有几何集,获取其名称与属性;将几何集名称与特殊过程定义表中的特征提取规则进行模式匹配,确定其所属类别与子类;从几何集及其子元素中提取辅助材料名称、规范号、说明等信息,生成一条特殊过程特性记录;基于“特性类型+特性要求+量具编号”三元组对特殊过程记录去重;对所有涉及的辅助材料按“材料名称+规范号”为键去重汇总,形成特殊过程材料核查清单。

3.4 双形态紧固件识别与多维聚类

飞机装配数模中紧固件存在两种典型表达形式:一种是以完整实体几何体表达的实例化紧固件;另一种是依据HB 20295^[20]所规定的非实例化表达方式,以“点+线”等轻量化几何元素组合替代实体几何,承载于R数模的紧固件几何集中。为兼容上述两类表达,本文设计了双形态紧固件识别与多维聚类方法,其流程如图4所示。

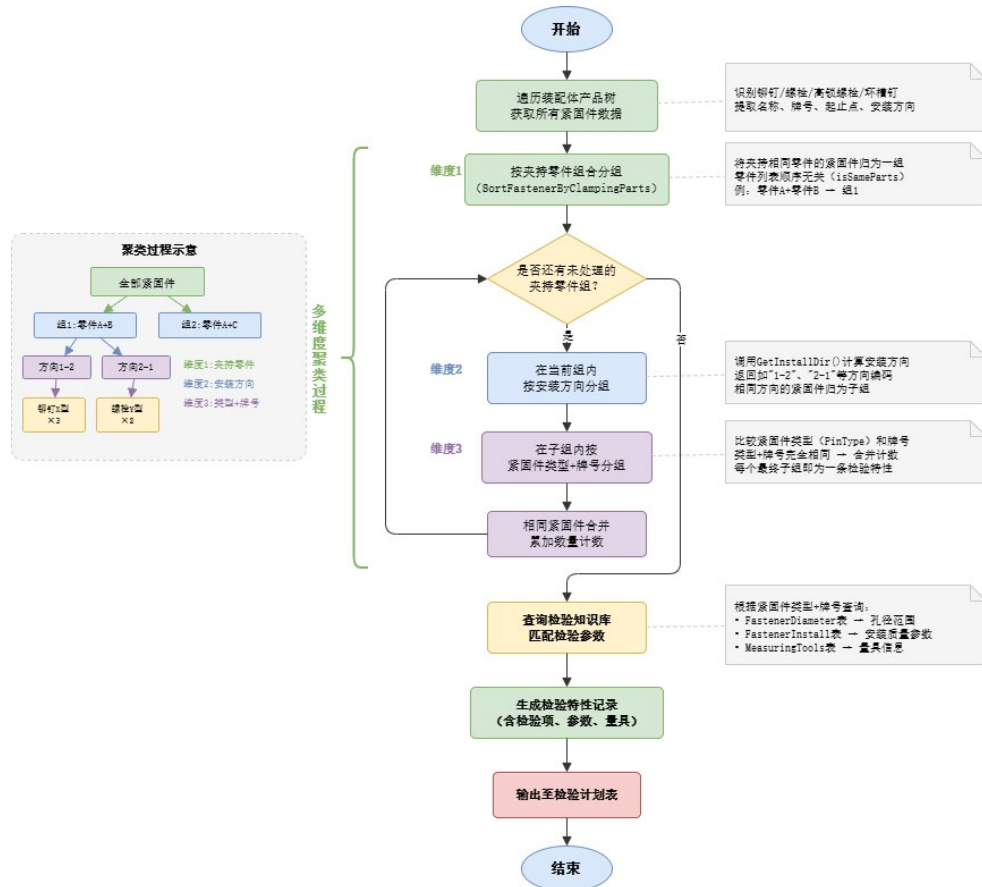


图4 双形态紧固件识别与多维聚类流程图

Fig. 4 Flowchart of dual-form fastener identification and multi-dimensional clustering

设识别得到的紧固件实例集合为 $F = \{f_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, 其中单个紧固件实例表示为 $f_i = (t_i, m_i, l_i, h_i, e_i, v_i, P_i)$ 。式中: t_i 为紧固件类型; m_i 为牌号; l_i 为轴线; h_i, e_i 分别为钉头端点与尾端点; v_i 为安装方向单位向量; P_i 为夹持零件集合。在此基础上, 3.4.1—3.4.4 节分别给出实体化紧固件识别、非实例化紧固件解析、夹持零件匹配以及多维聚类规则。

3.4.1 实体化紧固件识别与轴线分析

对装配结构树中的每个零件实例, 读取其名称属性并与紧固件类型关键词(铆钉、螺栓、高锁螺栓、环槽铆钉等)进行后缀匹配; 进一步获取该零件的实体几何, 提取面积最大的圆柱面(对应紧固件钉杆侧壁曲面)进行几何特征验证。通过“名称关键词匹配+几何特征验证”双重判定, 可有效避免基于CAD平台内置紧固件属性或单一接口判定时容易出现的漏检与误判问题。紧固件轴线方向由最大圆柱面的轴向确定; 进一步收集零件几何中法向与该轴向平行的全部平面, 将圆柱轴上

的某一参考点分别投影至各平面, 取沿轴向距离最远的两个投影点作为紧固件轴线的钉头端 h_i 与尾端 e_i 坐标。

3.4.2 非实例化紧固件解析与轴线重建

针对点线轻量化表达的紧固件, 定位R数模下的紧固件几何集, 递归提取其中表征紧固件轴线的全部直线特征, 每条直线对应一个紧固件实例。再从每个紧固件子集合的参数属性中解析名称、ID号、牌号等基本信息。由于点线表达缺失钉头方向语义, 进一步定位R数模中的“紧固件安装定义”几何集, 获取其中的安装参考点集合 $R = \{r_k\}$ 。设某一直线两端点为 a_i 和 b_i , 则钉头端点 h_i 由 $h_i = \operatorname{argmin} \{x \in \{a_i, b_i\} | (\min \{r_k \in R\} \|x - r_k\|)\}$ 确定。若最小匹配距离小于阈值 ϵ_h , 则将 h_i 判定为钉头端, 另一端点记为 e_i , 安装方向单位向量 $v_i = (e_i - h_i) / \|e_i - h_i\|$ 。该方法避免了对实体几何的依赖, 可显著提升大量紧固件的解析效率。

3.4.3 夹持零件匹配

紧固件的夹持零件是判断其连接质量的核心

信息。设非紧固件零件集合为 $Q = \{q_j\}$, 紧固件轴线为 l_i 。定义零件 q_j 与轴线 l_i 的最小距离为 $d(q_j, l_i) = \min \{x \in q_j, y \in l_i\} \|x - y\|$ 。当 $d(q_j, l_i) < \epsilon_d$ 时, 判定 q_j 属于紧固件 f_i 的夹持零件集合 P_i 。进一步以各夹持零件几何中心相对钉头端 h_i 沿安装方向 v_i 的投影值进行排序, 得到有序夹持零件序列 O_i , 用于后续生成“零件 A → 零件 B → 零件 C”形式的安装方向描述。

需要说明的是, 此处 $d(q_j, l_i)$ 计算的是紧固件轴线到零件实体几何而非几何中心的最小距离。对于紧固件实际穿过的零件, 其实体被轴线贯穿, 最小距离趋近于零; 对于轴线附近但未被穿过的邻近零件, 其实体与轴线的最小距离通常显著大于阈值 ϵ , 因此在规范的装配建模下, 该判据能够有效区分真实夹持零件与邻近零件 (本文取 $\epsilon_d = 2 \text{ mm}$)。对于零件之间紧密贴合、轴线沿零件边缘擦切通过等边界情形, 可进一步结合装配层级关系、零件表面孔特征以及沿轴向的零件厚度等约束加以判别。

3.4.4 多维聚类规则

对任意两个紧固件实例 f_i 和 f_j , 当且仅当满足以下 4 个条件时, 二者属于同一聚类组: 夹持零件集合相同, $P_i = P_j$; 安装方向一致, $v_i \cdot v_j \geq \cos(\epsilon_\theta)$;

紧固件类型一致, $t_i = t_j$; 紧固件牌号一致, $m_i = m_j$ 。据此定义单个紧固件实例的聚类键为 $K_i = (P_i, \text{Dir}(v_i), t_i, m_i)$, 式中 $\text{Dir}(v_i)$ 表示按方向阈值 ϵ_θ 离散后的方向类别。每个具有相同 K_i 的紧固件实例被归入同一聚类组 G_k , 从而将大量实例级紧固件转化为少量规则一致的检验项候选对象。

通过上述步骤, 完成了紧固件识别、夹持零件匹配和规则一致性分组, 为后续紧固件检验项模板化生成提供了结构化输入。

4 基于检验知识库的检验项自动编制方法

检验特性识别完成后, 需将检验特性转化为具体的检验项, 包括确定检验要求文本、选择量具、设定工艺参数等。本文设计了基于检验知识库的检验项自动编制方法, 将检验规则外置为可更新的知识库, 通过查表匹配实现检验项的自动化生成。

4.1 检验知识库结构设计

检验知识库由四类核心数据表构成, 其结构与检验项生成关系如图 5 所示。

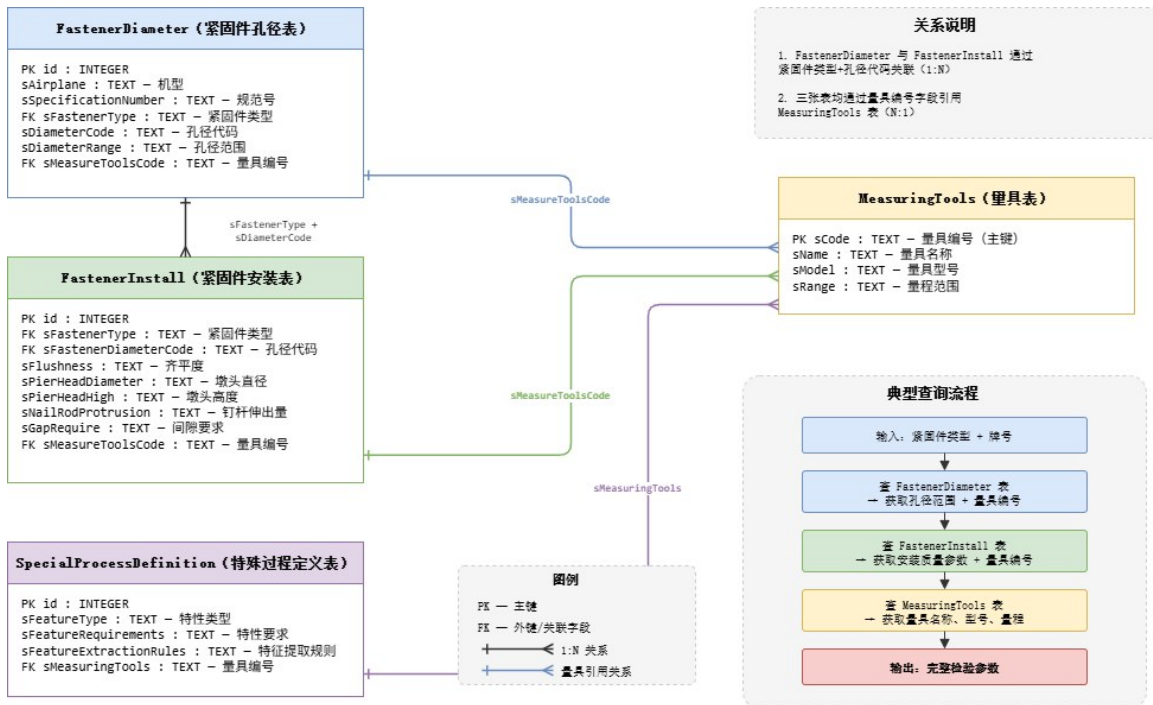


图5 检验知识库结构与检验项生成关系图

Fig. 5 Inspection knowledge base structure and its relation to inspection item generation

检验知识库包含4类知识表:紧固件孔径表(FastenerDiameter),存储机型、规范号、紧固件类型、孔径代码、孔径范围及量具编号等信息;紧固件安装表(FastenerInstall),存储紧固件类型、孔径代码、齐平度、墩头直径/高度、钉杆伸出量、间隙要求、量具编号等安装质量检验参数;特殊过程定义表(SpecialProcessDefinition),存储特性类型、特性要求描述、特征提取规则、量具编号;量具表(MeasuringTools),存储量具名称、型号、量程、量具编号,作为其他三表的引用目标。

4.2 工程注释检验项自动编制

工程注释检验项的生成以字段映射为主:将每条工程注释特性的结构化字段按AS9102检验计划表的列定义直接映射,形成检验项的“特性描述—检验方法/量具—精度/量程—工序号”四元组。对解析过程中字段缺失的条目,由界面可编辑列表提示用户补录后再入表。

4.3 特殊过程检验项自动编制

特殊过程检验项的生成以知识库查表为驱动:以“特性类型”为键,从特殊过程定义表检索对应的检验要求描述与量具编号,再以量具编号为键从量具表获取量具名称、型号与量程,拼装为完整检验项;同时将R数模中解析得到的辅助材料名称与规范号填入检验项的附加信息字段。为避免重复条目,系统采用“检验要求+量具+精度”三元组作为唯一性判据实施去重,确保同类特殊过程在检验计划中仅生成一条记录;对不同工艺类型涉及的相同材料,则通过材料核查清单汇总输出。

4.4 紧固件检验项自动编制

针对四种紧固件类型分别设计检验要求文本模板。以铆钉模板为例:“XX与XX的连接:(N)个XX孔(N)个XX铆钉;安装方向:XX→XX→XX;孔径:XX;齐平度:XX;墩头直径:XX;墩头高度:XX;钉头/墩头下间隙:XX”。模板中夹持零件名称对、按距离排序的夹持零件序列、紧固件数量与牌号取自聚类结果,孔径、齐平度、墩头尺寸及间隙参数依据紧固件类型和孔径代码从紧固件孔径表与紧固件安装规范表查询。针对螺栓、高锁

螺栓和环槽钉,依据其检验参数差异(如以钉杆伸出量代替墩头参数、环槽钉特有的钉套下间隙)设计对应模板。量具自动选型采用两步查询:先从紧固件孔径表查得量具编号,再从量具表查得量具名称、型号和量程。

4.5 检验计划汇总与标准化输出

检验项自动编制完成后,按“工程注释→特殊过程→紧固件”的预定义顺序合并三类检验项并按AS9102标准格式顺序编号;该序号同时用于配套气泡图标注,建立检验计划表与气泡图之间的一一对应追溯关系。检验计划与首件鉴定报告基于AS9102模板以Excel多Sheet形式导出:检验项清单为主Sheet,零组件配套清单和特殊过程材料核查清单为独立Sheet,实现集成输出。配套气泡图依据紧固件聚类结果和工程注释结构树节点定位,通过MBD三维标注与自适应视角计算实现自动生成(限于篇幅,详细算法另文论述),示例如图6所示,图中红色矩形框标注显示了检验项编号与紧固件数量,引线指向对应紧固件位置,零件名称标注标识了涉及的夹持零件。

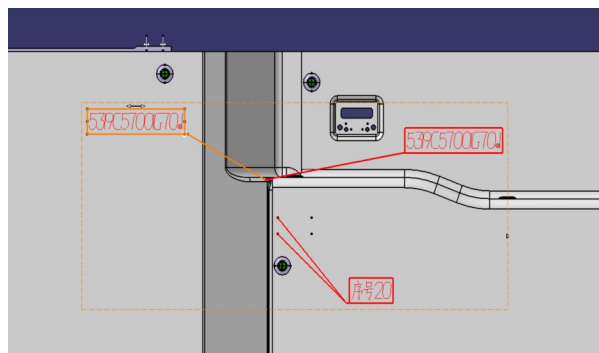


图6 系统自动生成的气泡图实例

Fig. 6 Example of an automatically generated ballooned drawing

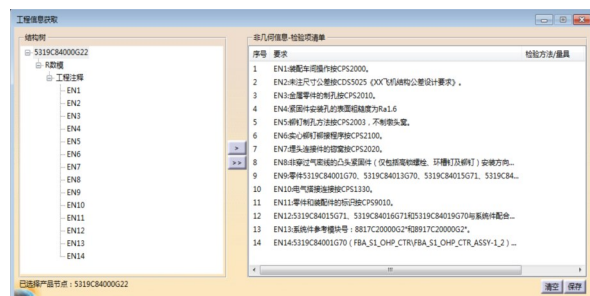
5 系统实现与案例验证

5.1 原型系统实现

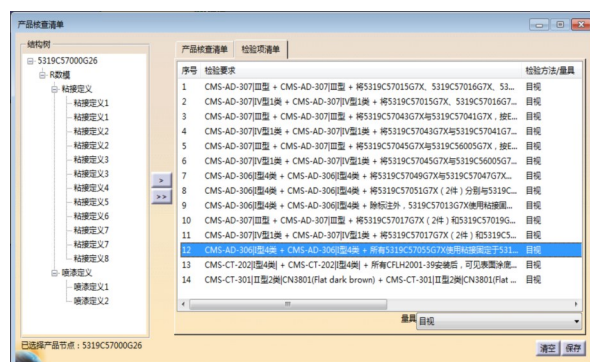
基于上述技术方案,本文以CATIA V5 CAA R2020二次开发平台开发了飞机装配件检验计划自动编制原型系统,以插件形式嵌入CATIA主界面。系统集成基本信息录入、零组件清单提取、工程注释特性识别、特殊过程检验项与材料核查清单生成、紧固件识别与聚类提取以及检验计划预

览与气泡图生成六大功能模块,对应第3节四类检验特性识别和第4节检验项自动编制环节。检验知识库采用SQLite嵌入式数据库实现,检验计划

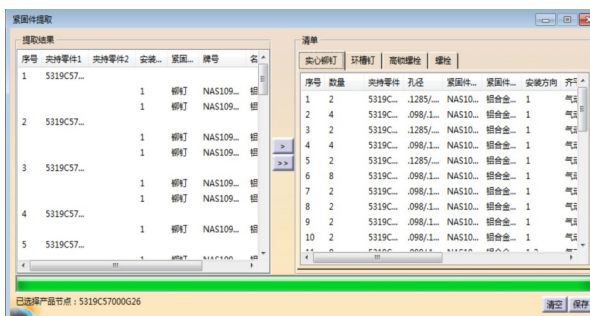
与首件鉴定报告以Excel模板格式导出,气泡图以PNG/JPG格式输出。系统部分界面如图7所示。



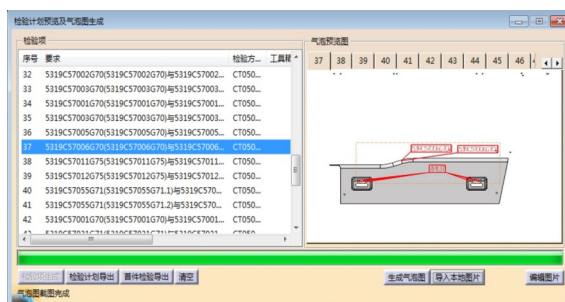
(a) 工程注释特性识别界面



(b) 特殊过程检验项生成界面



(c) 紧固件识别与提取界面



(d) 检验计划预览及气泡图生成界面

图7 检验计划自动编制系统集成界面

Fig. 7 Integrated user interface of the automatic inspection plan preparation system

5.2 案例与结果分析

为验证本文方法在不同复杂程度装配件上的适用性,选取了某型民用飞机的3个典型装配组件作为验证案例。围绕方法在编制效率、完整性、一致性和可追溯性方面的效果,从检验项自动生成数量、结构化解析成功率以及人工/自动编制时间等指标进行量化评价,结果如表2所示,S1、S2、S3分别为中等复杂度蒙皮组件、复杂壁板组件和大型骨架装配件;人工时间为现场工艺人员历史项目编制同类装配件首件检验计划所需的实际工作日数估值;3个样本气泡图标注号与检验项编号均

实现一一对应。从表2可以看出:3类检验项均能稳定生成,结构化解析成功率不低于97.5%,少量失败条目可通过界面提示人工补录;3个样本的人工编制周期由15~30个工作日缩短至15~22 min,效率提升约2~3个数量级,且气泡图标注号与检验项编号一一对应。结果表明,本文方法对紧固件密集型装配件尤为有效,可一体化输出检验计划表、配套清单、材料核查清单及气泡图,但其效果依赖于MBD标注规范性、R数模质量及知识库完备度,对未覆盖的新型紧固件或工艺需先扩充知识库再行编制。

表2 案例对象与自动编制结果统计

Table 2 Statistics of case objects and automatic preparation results

样本	零件数	紧固件数	工程注释数	特殊过程数	表达类型	紧固件聚类项数	解析成功率/%	人工时间/d	自动时间/min
S1	28	156	12	8	实体化	18	100.0	约15	15
S2	47	412	10	15	混合	47	98.7	约25	18
S3	65	738	15	22	非实例化	82	97.5	约30	22

6 结 论

针对飞机装配件首件检验计划人工编制效率低、规则依赖经验、输出一致性和追溯性不足等问题,本文提出了一种基于MBD多源检验特性解析的飞机装配件检验计划自动编制方法,建立了面向装配件的检验特性信息模型,提出了四类检验特性的自动识别技术,设计了基于检验知识库的检验项智能生成方法,实现了从MBD数模到AS9102格式检验计划及首件鉴定报告的端到端自动编制,将编制周期从数周缩短至小时级,显著提升检验计划的完整性、一致性与可追溯性。

参 考 文 献

- [1] Alemanni M, Destefanis F, Vezzetti E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1): 1-14.
- [2] Quintana V, Rivest L, Pellerin R, 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.
- [3] SAE International. Aerospace first article inspection requirement: AS9102C [S]. Warrendale: SAE International, 2023.
- [4] 中国人民解放军总装备部. 首件鉴定: GJB 908A—2008 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.
- [5] General Armaments Department of PLA. First article inspection: GJB 908A—2008 [S]. Beijing: General Armaments Department of PLA, 2008. (in Chinese)
- [6] 中国航空综合技术研究所. 航空产品首件检验要求: HB 9102—2008 [S]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [7] China Aero-Polytechnology Establishment. First article inspection requirements for aviation products: HB 9102—2008 [S]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [8] Hedberg T, Lubell J, Fischer L, et al. Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, 16(2): 021001.
- [9] Goher K, Shehab E, Al-Ashaab A. Model-based definition and enterprise: state-of-the-art and future trends [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(14): 2288-2299.
- [10] Lu Y, Liu C, Wang K I-K, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [11] 郭朝阳, 蒋英吉, 程华龙, 等. 基于MBD的航空典型零件检验计划自动编制方法 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(15): 6538-6547.
- [12] Guo Chaoyang, Jiang Yingji, Cheng Hualong, et al. Automatic compilation method of aeronautical typical parts inspection plan based on MBD [J]. Science Technology and Engi-

- neering, 2025, 25(15): 6538-6547. (in Chinese)
- [10] 刘元, 徐龙, 盛小银, 等. 基于MBD的数模解析方法在检验数模中的研究与应用[J]. 工具技术, 2021, 55(4): 88-90.
Liu Yuan, Xu Long, Sheng Xiaoyin, et al. Research and application of mathematical model analysis method based on MBD in inspecting digital model [J]. Tool Engineering, 2021, 55(4): 88-90. (in Chinese)
- [11] 武晓娟, 唐兴龄, 司朝润. 基于模型定义的钣金零件检验计划生成[J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52(1): 84-87.
Wu Xiaojuan, Tang Xingling, Si Chaorun. Generation of inspection plan for sheet metal parts based on model definition [J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2017, 52(1): 84-87. (in Chinese)
- [12] 隋少春, 朱绪胜. 飞机整机装配质量数字化测量技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(11): 1449-1460.
Sui Shaochun, Zhu Xusheng. Digital measurement technique for evaluating aircraft final assembly quality[J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(11): 1449-1460. (in Chinese)
- [13] 田富君, 田锡天, 耿俊浩, 等. 基于模型定义的工艺信息建模及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 913-919.
Tian Fujun, Tian Xitian, Geng Junhao, et al. Modeling and application of process information based on model based definition [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 913-919. (in Chinese)
- [14] 黄波, 张树生, 黄瑞, 等. 面向宏观工艺重用的三维CAD模型检索方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3386-3398.
Huang Bo, Zhang Shusheng, Huang Rui, et al. Three-dimensional CAD model retrieval method for macro-process reuse [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(12): 3386-3398. (in Chinese)
- [15] 王德重, 黄翔, 李泷杲, 等. 基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(增刊2): 57-65.
Wang Dezhong, Huang Xiang, Li Shuanggao, et al. Rivet flushness measurement method based on binocular multi-line structured light [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(S2): 57-65. (in Chinese)
- [16] 田清廉, 熊天辰, 黄翔, 等. 一种基于散乱点云的铆钉孔孔位提取方法[J]. 航空制造技术, 2022, 65(7): 83-89.
Tian Qinglian, Xiong Tianchen, Huang Xiang, et al. A rivet hole position extraction method based on scattered point cloud [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(7): 83-89. (in Chinese)
- [17] 陆凯, 李迎光, 刘旭, 等. 数据驱动的飞机结构件加工特征识别方法[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 32-40, 57.
Lu Kai, Li Yingguang, Liu Xu, et al. Data-driven machining feature recognition method for aircraft structural parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 32-40, 57. (in Chinese)
- [18] 王蕊, 周光辉, 张超, 等. 数字孪生装配单元建模与质量优化控制框架研究[J]. 西安交通大学学报, 2026, 60(5): 142-152.
Wang Rui, Zhou Guanghui, Zhang Chao, et al. Research on digital twin assembly cell modeling and quality optimization control framework [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60(5): 142-152. (in Chinese)
- [19] 董芳媛, 韩天龙. 基于深度学习的飞机蒙皮铆接质量检测系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(9): 44-46.
Dong Fangyuan, Han Tianlong. Design of aircraft skin riveting quality inspection system based on deep learning [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2025, 61(9): 44-46. (in Chinese)
- [20] 中国航空综合技术研究所. 基于模型的定义 标准件: HB 20295—2016[S]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
China Aero-Polytechnology Establishment. Model based definition—Standard parts: HB 20295—2016[S]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)