

# 质量信息框架在制造业的应用与研究

楚峻溢<sup>①②</sup>, 张祥春<sup>①③</sup>, 任占勇<sup>①③</sup>, 曾照洋<sup>①③</sup>, 彭文胜<sup>①③</sup>, 王四宝<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国航空综合技术研究所, 北京 100028; <sup>②</sup>重庆大学, 重庆 400044;

<sup>③</sup>航空综合环境航空科技重点实验室, 北京 100028)

**摘要:** 质量信息框架(quality information framework, QIF)是一种用于制造业的标准化数据模型,能够在制造过程中确保质量数据的无缝集成和互操作性。首先,详细阐述了QIF的定义、理论基础和组成结构。其次,基于数据、信息、知识、智慧(data, information, knowledge, wisdom, DIKW)模型分析了QIF在制造业中的应用现状,特别关注了数据对齐、语义扩展、预测与决策、全生命周期管理等4个应用场景。再次,对不同的QIF应用方法进行综合讨论,分析了其在实际制造环境中的适用性与应用潜力。最后,对QIF未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 质量信息框架; 产品生命周期管理; 数字线程; 智能制造; DIKW

中图分类号: TH312 文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.06.011



全文在线

## Application and research of quality information framework in manufacturing industry

CHU Junyi<sup>①②</sup>, ZHANG Xiangchun<sup>①③</sup>, REN Zhanyong<sup>①③</sup>, ZENG Zhaoyang<sup>①③</sup>,  
PENG Wensheng<sup>①③</sup>, WANG Sibao<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, CHN; <sup>②</sup>Chongqing University, Chongqing 400044, CHN; <sup>③</sup>Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Combined Environment, Beijing 100028, CHN)

**Abstract:** The quality information framework (QIF) is a standardized data model used in the manufacturing industry to ensure seamless integration and interoperability of quality data during the manufacturing process. Firstly, the definition, theoretical foundation, and structural composition of QIF were elaborated in detail. Secondly, based on the data, information, knowledge, wisdom (DIKW) model, the current application status of QIF in manufacturing was analyzed, attention paid to four application scenarios, namely data alignment, semantic extension, prediction and decision-making, and full life cycle management. Thirdly, various QIF application methods were comprehensively discussed, and their applicability and potential in real-world manufacturing environments were evaluated. Finally, future development trends of QIF were projected.

**Keywords:** quality information framework; product life cycle; digital thread; intelligent manufacturing; DIKW

质量信息框架<sup>[1]</sup>是一种面向制造业的标准化数据模型,其核心目标是确保产品全生命周期中质量数据的无缝集成和互操作性。QIF的出发点在于实现质量数据的标准化和自动化传递,产品全生命周期中涉及多个系统和工具的数据交互,这些数据的格式和语义往往不一致,因此需要一个统一的框架来规范数据交换,从而提高制造过程的效率和数据

的准确性。

正是由于QIF具有提高数据一致性和促进系统集成的优点,与QIF相关领域的研究正逐步引发关注。现有研究表明在工业4.0的实现中,最常见的问题是系统互操作性的缺乏,即执行必要功能的系统之间无法有效通信<sup>[2]</sup>。美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)

一直在积极开发贯穿设计、制造和产品支持流程的数字线程方法、协议和标准<sup>[3]</sup>。LIPMAN R R<sup>[4]</sup>开发了一款软件，用于从 QIF 文件中生成包含产品制造信息（product manufacturing information, PMI）的电子表格。HEDBERG T D 等<sup>[5]</sup>提出了一种在三维模型中嵌入 X.509 数字证书的方法，以实现产品数据的认证、授权和可追溯性。TRAINER A 等<sup>[6]</sup>开展了采用产品模型数据交换标准（standard for the exchange of product model data, STEP）实现基于模型的制造数据互操作性的研究。HEDBERG T D 等<sup>[7]</sup>进行了一项实验，测试 QIF 等开放数据标准通过全面实施基于模型的小型企业来整合工程设计、制造和质量保证生命周期阶段的能力，MICHALOSKI J 等<sup>[8]</sup>使用 QIF 进行测量数据交换，HEDBERG T D 等<sup>[9]</sup>应用基于模型的制造，以及 HELU M 等<sup>[10]</sup>为连接系统的数据处理设计的架构。

虽然已经有很多学者开始探索 QIF 在不同制造环境中的应用和潜力，然而尚未有关于 QIF 的全面综述文章发表。本文从面向 QIF 技术理论出发，从数据、信息、知识、智慧的视角全面梳理了 QIF 在制造业中的应用现状。具体而言，本文依据现有的研究成果，对 QIF 的技术架构、实际案例和实施方式展开介绍，并评估了其在不同制造环境中的适应性，最后提出了未来研究方向和可能的改进策略。

## 1 QIF 简述

本节对 QIF 进行介绍，旨在为读者提供一个全面的视角，以便深入理解 QIF 的基本概念及其在现代制造业中的关键作用。1.1 节详细阐述 QIF 的定义、起源以及发展历程。1.2 节进一步探讨 QIF 的结构，包括其构成要素以及各要素的作用与关联。

### 1.1 理论基础

QIF 的开发是为了应对制造业在数据管理领域面临的两大核心挑战：数据不连续性和数据格式的多样性。随着工业物联网和工业 4.0 技术的快速发

展，制造过程中产生的数据量呈指数级增长。但是，数据可访问性的不足、数据孤岛、不同数据格式间的互操作性缺失的现象仍普遍存在，严重限制了制造企业对这些数据的有效利用和价值挖掘。

为应对这些挑战，数字计量标准联盟（digital metrology standards consortium, DMSC）于 2013 年发布了 QIF V1.0<sup>[11]</sup>，作为一个开放的美国国家标准学会（american national standards institute, ANSI）标准，旨在提供一个统一的框架来规范制造过程中质量信息的表示、交换和互操作性。DMSC 成立于 2005 年，是一个致力于为数字计量领域开发、并支持互操作性标准和质量数据框架的非营利性会员组织。DMSC 和相关工作组会定期评估 QIF 的实际应用效果和行业需求，并对标准进行必要的更新，以支持新兴的技术和应用场景，这包括对现有功能的优化和新功能的引入。

图 1 所示为 QIF 的发展历程，自 QIF V1.0 发布以来，该标准经历了多次版本更新，包括 2014 年的 QIF V2.0、2016 年的 QIF V2.1 和 2018 年的 QIF V3.0 等。每个版本都引入了新的功能和改进，以更好地支持制造数据的互操作性和集成。2020 年 8 月，DMSC 宣布 QIF V3.0 计量标准已获得国际标准化组织（international organization for standardization, ISO）批准，并作为新的 ISO 标准 ISO 23 952:2020 发布。这标志着 QIF 从行业标准发展为国际认可的标准，为全球制造业提供了一个通用的 QIF，进一步推动了制造数据的标准化。目前 QIF V4.0 正在开发中，QIF 的持续开发和更新体现了其作为行业标准的优越性和有效性，使其成为应对制造业数据管理挑战的重要标准之一。

QIF 是一种基于可扩展标记语言（xtensible markup language, XML）的开放式标准模型，旨在实现制造业中质量信息的标准化表示与交换。XML 是一种结构化的标记语言，能够以层次化的方式存储数据，使得数据具有清晰的结构和语义<sup>[12]</sup>。

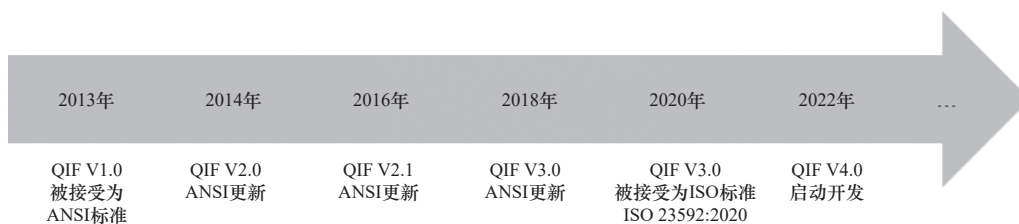


图 1 QIF 的发展历程

Fig. 1 The evolution of QIF

另外 XML 也是一种中性语言，不仅易于机器解析，也方便人类阅读和理解。在制造业领域中这些特性十分关键，因为制造过程中涉及的数据往往结构复杂且层次分明，需要一种能够明确表达数据元素之间关系的标准化方法。

QIF 特征和特性关系如图 2 所示，QIF 的数据格式是基于特征和特性的，特征特指制造和测量中的几何要素，特性则是描述特征的质量要求。该标准定义了特征以及特性数据的 4 个方面：定义、标称、项目和实际值<sup>[13]</sup>。对于特征数据，定义指的是数据的正式定义，标称将附加特征信息添加到特征定义中，项目表示实际部件或计量过程规划阶段的特征实例，实际值指的是提供直接测量或构造的特征信息。图 3 所示为具有孔特征零件对应的 QIF XML 实例代码。

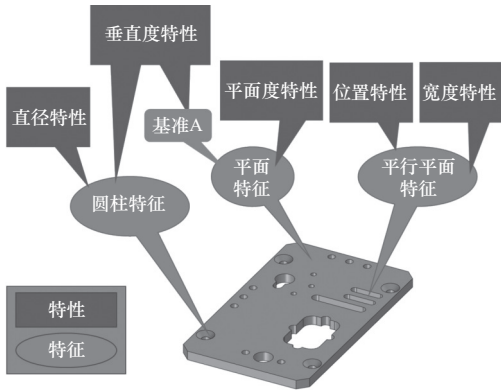


图 2 QIF 特征和特性关系图

Fig. 2 QIF features and characteristics relationship diagram

与特征一样，特性在 QIF 中定义了相同的 4 个方面并且每方面表达的含义一致，其涵盖了几何尺

寸和公差 (geometric dimensioning and tolerancing, GD&T) 与质量工作流程的详细表达。QIF XML 实例文件每个数据对象都有一个唯一的标识符，对象之间的关系通过对标识符的引用来表达，引用顺序如图 4 所示。利用这种统一的语义结构，QIF 不仅能够定义 PMI 的要求，还能在通用数据模型中报告测量结果。这种能力使得测量结果能够与原始设计直接关联，确保了制造过程中各类质量数据的无缝集成与互操作性。这种集成覆盖了整个生产链，从设计、生产到测量和质量控制的每一个环节。

### 1.2 文件结构

图 5 所示为 QIF XML 架构文件的组织方式，QIF 文件的组织结构由 2 个核心部分组成，即 QIF Applications 和 QIF Library。QIF Applications 定义了应用模块的架构，其中每个 .xsd 文件对应一个 XML 结构定义文件，包含一个顶层模式文件 QIF-Document.xsd 和 6 个用于描述顶层模式文件结构和规则的 QIF 应用模块文件，分别是 QIFMeasurementResources.xsd、QIFPlan.xsd、QIFProduct.xsd、QIF-Results.xsd、QIFRules.xsd 和 QIFStatistics.xsd。顶层模式文件包含了上述 6 个应用模块文件，而每个应用模块文件又包含 QIF Library 中的子文件，则顶层模式文件 QIFDocument.xsd 包含所有 QIF 模式文件中定义的所有内容。因此 QIFDocument.xsd 用于生成许多不同类型的实例文件，包括来自一个或多个应用模块的信息。

QIF Library 中包含所有 QIF 应用程序使用的信息项，包括辅助、特性、表达式、特征和通用表达式等，这些核心数据结构定义在不同的 .xsd 文件中，

<pre>&lt;!--具有共享孔直径的圆柱体定义--&gt; &lt;CylinderFeatureDefinition id="11"&gt;   &lt;Diameter&gt;10 &lt;/Diameter&gt; &lt;/CylinderFeatureDefinition id="11"&gt; ...</pre>	代码片段1	<pre>&lt;!--两次测量实例的特征项目--&gt; &lt;CylinderFeatureItem id="50"&gt;   &lt;FeatureNominalId&gt;22&lt;/FeatureNominalId&gt;   &lt;FeatureName&gt;Hole_1&lt;/FeatureName&gt; &lt;/CylinderFeatureItem&gt; &lt;CylinderFeatureItem id="51"&gt;   &lt;FeatureNominalId&gt;23&lt;/FeatureNominalId&gt;   &lt;FeatureName&gt;Hole_2&lt;/FeatureName&gt; &lt;/CylinderFeatureItem&gt; ...</pre>	代码片段3
<pre>&lt;!--若两个孔的特征标称--&gt; &lt;CylinderFeatureNominal id="22"&gt;   &lt;FeatureDefinitionId&gt;11&lt;/FeatureDefinitionId&gt;   &lt;Axis&gt;     &lt;AxisPoint&gt;40 40 0&lt;/AxisPoint &gt;     &lt;Direction&gt;0 0 1&lt;/Direction&gt;   &lt;/Axis&gt; &lt;/CylinderFeatureNominal&gt; &lt;CylinderFeatureNominal id="23"&gt;   &lt;FeatureDefinitionId&gt;11&lt;/FeatureDefinitionId&gt;   &lt;Axis&gt;     &lt;AxisPoint&gt;40 10 0&lt;/AxisPoint &gt;     &lt;Direction&gt;0 0 1&lt;/Direction&gt;   &lt;/Axis&gt; &lt;/CylinderFeatureNominal&gt;</pre>	代码片段2	<pre>&lt;!--一次测量时孔的实际测量值--&gt; &lt;CylinderFeatureMeasurement id="100"&gt;   &lt;FeatureItemId&gt;50&lt;/FeatureItemId&gt;   &lt;Axis&gt;     &lt;AxisPoint&gt;39.967 10.011 0&lt;/AxisPoint&gt;     &lt;Direction&gt;0.009 -0.009 0.999&lt;/Direction&gt;   &lt;/Axis&gt;   &lt;Diameter&gt;10.005&lt;/Diameter&gt; &lt;/CylinderFeatureMeasurement&gt; ...</pre>	代码片段4

图 3 具有孔特征零件 QIF XML 代码片段

Fig. 3 QIF XML code snippets for parts with holes

它们是支持模块间交互和功能扩展的关键。QIF Library 通过提供通用的核心数据结构以及定义，规范了 QIF 各模块中使用的模板，用户能够根据具体需求对这些数据结构进行实例化，从而提升代码的复用性和系统一致性，为模块间的数据共享提供了可靠基础。在实际应用中，QIF 允许用户根据需求灵活实施特定模块，而不需要全面部署整个模型。用户可以通过单独使用某个模块，实现产品质量数据在不同软件系统之间的无缝集成与交换。

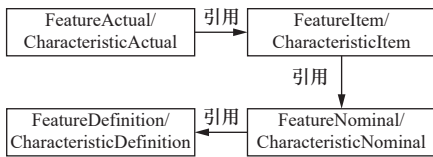


图 4 QIF XML 实例文件中数据对象之间的引用连接

Fig. 4 Reference connections between data objects in QIF XML instance files

```
# QIF XML Schema Directory Structure
QIFApplications
- QIFDocument.xsd
- QIFMeasurementResources.xsd
- QIFPlan.xsd
- QIFProduct.xsd
- QIFResults.xsd
- QIFRules.xsd
- QIFStatistics.xsd
QIFLibrary
- Auxiliary.xsd (辅助)
- Characteristics.xsd (特征)
- Expressions.xsd (表达式)
- Features.xsd (功能)
- GenericExpressions.xsd (通用表达式)
- Geometry.xsd (几何)
- IntermediatesPML.xsd (中间PMI)
- Primitives.xsd (原语)
- PrimitivesPD.xsd (原始产品定义)
- PrimitivesPML.xsd (原始PMI)
- Statistics.xsd (统计)
- Topology.xsd (拓扑)
- Traceability.xsd (可追溯性)
- Units.xsd (单位)
- Visualization.xsd (可视化)
```

图 5 QIF XML 架构文件的组织方式

Fig. 5 Organization of the QIF XML schema file

图 6 所示为 QIF 的 7 个应用模块，分别是 QIF MBD (model-based design)、QIF Plans、QIF Resources、QIF Rules、QIF Execution、QIF Results 和 QIF Statistics。除 QIF Execution，其余依次对应上述 6 个 QIF 应用领域的模式文件 QIFProduct.xsd、QIFPlan.xsd、QIFMeasurementResources.xsd、QIFRules.xsd、QIFResults.xsd 和 QIFStatistics.xsd。目前 QIF 3.0 版本中，QIF Execution 仍在开发，暂时由尺寸测量接口标准 (dimensional measuring interface standard, DMIS) 标准处理。DMIS 是 ISO 22093 标准的一部分，DMIS 5.3 版本已与 QIF 的数据可追溯

机制相兼容，意味着可以在 DMIS 编程和测量过程中直接利用 QIF，实现数据的无缝交换和集成。



图 6 QIF 应用模块

Fig. 6 QIF applications

每个模块在 QIF 框架中扮演着独特且重要的角色，对于确保制造过程中信息的准确传递和追溯性至关重要。QIF MBD 是确保计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 数据可追溯性的核心。基于模型的定义有多种实现方式，QIF MBD 模块并非 QIF 基本用例中的必要部分，但其在产品数据的图形表示方面提供了显著的优势，仍被视为强大的语义 CAD 和 PMI 标准之一。该模块使得用户能够在 QIF 框架内直接查看和分析检测过的零件或组件，从而提高了数据可视化的效率和准确性<sup>[4]</sup>。QIF Plans 提供的详细测量计划信息，具体包括待测特征列表、检查计划、测量资源分配以及采样点的具体位置等。QIF Resources 允许指定可用测量设备的基础信息或详细资料，如三坐标测量机 (coordinate measuring machine, CMM)、探针、卡尺和量具等，且这些数据始终具有上下文的语义相关性。QIF Rules 提供用于创建测量规则实例的模板，例如“如果圆度公差值小于 0.01 mm，则使用至少 100 个测量点的 CMM 方法进行测量”。QIF Results 存储与 MBD 相关的测量数据，涵盖了从公差评估结果到特征的点云数据等。QIF Statistics 引用 QIF 结果集，并指定统计分析方法，可选择是否包含分析结果。

## 2 应用现状

本节通过 DIKW 模型详细阐述 QIF 的实际应用现状。2.1 节首先分析了 QIF 在 DIKW 模型各阶段中的发挥的作用。2.2 节重点介绍 QIF 如何将原始数据转化为有结构的信息。2.3 节进一步介绍 QIF 促进信息向知识的转化，最终实现知识的深化和智慧生成。

### 2.1 DIKW 模型

图7所示为DIKW模型，揭示了QIF如何在制造业中逐步提升企业的运营效率。在制造业中，单纯依赖原始数据进行决策往往需要人工介入，因为这些数据通常是未经处理的、离散的事实。这种依赖不仅使得决策过程变得复杂，而且增加了认知负担和出错的风险，最终可能导致解决方案的成本高昂且缺乏一致性。QIF通过为这些数据提供上下文和结构，使得原始数据能够被有效处理并转化为有价值的信息。这种处理和转化通常是自动化的，这不仅加快了任务的完成速度，还通过减少对劳动力的需求来降低成本。在信息形成后，QIF继续支持企业通过标准化和语义化的互操作性将这些信息应用于实际的制造过程和质量控制。这一过程中，信息的应用不断积累为企业的制造知识，并能够在企

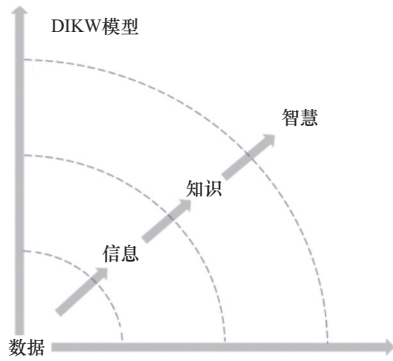


图7 DIKW模型  
Fig. 7 DIKW model

业内部及跨企业之间进行有效的共享最终形成智慧。

参考DIKW模型中的阶段，本文调研了关于QIF研究的高水平论文，并按照数据对齐、语义扩展、预测与决策和全生命周期管理4个QIF应用场景进行了整理分类，见表1。

### 2.2 数据的转化与信息的深化

#### 2.2.1 数据对齐

图8所示为数字线程的3个关键阶段，主要挑战是对齐和映射不同的原始数据，以便为决策提供信息。由于每个阶段接受和生成的数据不同，并且数据的表示方法也不尽相同，因此在从一种数据标准转换到另一种数据标准时，往往会丢失信息。不同标准之间的协调对于实现产品全生命周期内的数据集自动对齐和优化数据挖掘至关重要。

为了解决数据对齐和映射问题，针对产品全生命周期的某一个或多个阶段，国内外机构与研究者开展了众多研究。STEP Tools<sup>[25]</sup>启动了一个O3项目<sup>[26]</sup>，旨在寻求一种解决方案，将STEP、QIF和MTConnect标准的数据合并为一个统一的数据流，用于评估产品的整体质量。2015年，NIST开始制定STEP和QIF之间的映射规范<sup>[27]</sup>。JONES C W等<sup>[28]</sup>针对检验阶段介绍了用于校准可溯源尺寸测量的混合传感器系统的工件和程序，计划针对一种或多种标准化元数据格式进行对齐。MONNIER L等<sup>[29]</sup>通过自动化工具识别，用于映射数控代码（numerical control

表1 文献汇总与对比

Tab. 1 Literature summary and comparison

研究者	具体研究	应用场景
KWON S等 <sup>[15]</sup>	利用知识图谱将QIF与STEP集成到数字线程中	数据对齐
BAO Q W等 <sup>[16]</sup>	引入QIF作为构建知识图谱的广泛模式	
HEDBERG T D等 <sup>[5]</sup>	对QIF模型进行功能扩展	语义扩展
GOPALAKRISHNAN S等 <sup>[17]</sup>	以QIF为核心并改进建立新模型MFIN	
KIM D B <sup>[18]</sup>	在预测模型中使用QIF管理静态信息	预测与决策
HEDBERG T D等 <sup>[19]</sup>	运用QIF关联物理世界的测量信息	
FENG S C等 <sup>[20]</sup>	运用QIF进行质量保证的知识管理方法	
VERNICA T等 <sup>[21]</sup>	将QIF标准化的检验数据可视化集成到AR系统中	
FENG S C等 <sup>[22]</sup>	运用QIF为DME选择提供规则模型	
HEDBERG T D等 <sup>[23]</sup>	在选取的数字线程中QIF数据被用来展示如何追踪和管理产品的质量和检验信息	全生命周期管理
LIU R等 <sup>[24]</sup>	运用QIF搭建了基于模型的集成检验框架	
HEDBERG T D等 <sup>[7]</sup>	探究在整个产品生命周期内利用QIF实施标准化信息集成	

code, NC Code) 形式的计划数据和 MTConnect 形式的执行数据, 将信息从产品全生命周期的下游阶段 (如检测和制造阶段) 传输到上游阶段 (如设计阶段)。QIF 标准因其出色的设计, 应用正在迅速扩展, 但在实现 QIF 和 CAD、MTConnect 等之间的数据自动对齐方面仍面临挑战<sup>[7]</sup>。

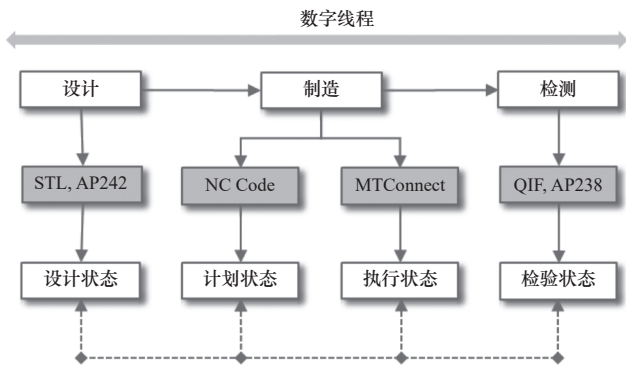


图 8 数字线程  
Fig. 8 Digital threads

知识图谱 (knowledge graph, KG) 能够有效地表示复杂信息, 研究者们利用了知识图谱辅助制造业中多源异构数据的全面一致性表达。KWONS 等<sup>[15]</sup>提出了一种利用 KG 集成制造数据到数字线程中,

该方法通过链接 STEP 和 QIF 的重叠信息来丰富每种数据模型, 从 STEP 设计数据和 QIF 检验数据中创建知识图谱然后映射到一起。图 9 所示为 STEP AP242 和 QIF 之间的重叠信息<sup>[15]</sup>, 图 10 所示为整合 STEP 和 QIF 为知识图谱的集成视图<sup>[15]</sup>。该方法通过本体与知识图谱实现了 STEP 和 QIF 数据的自动化集成, 增强了异构数据在数字线程中的关联性和可追溯性, 支持更好的决策制定和产品质量保证。

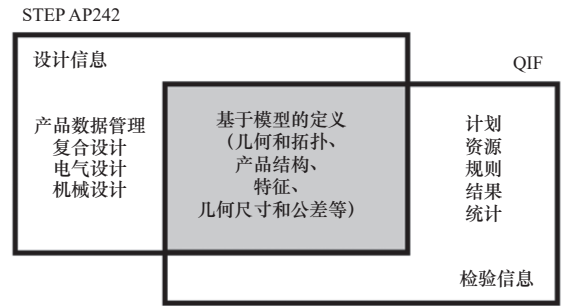


图 9 STEP AP242 与 QIF 交叉点的简化视图  
Fig. 9 Simplified view of the intersection of STEP AP242 and QIF

BAO Q W 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于制造信息模型的加工领域知识图谱构建框架。在几何信息的图形转换方面, 研究引入 QIF 作为广泛采用的模式, 以

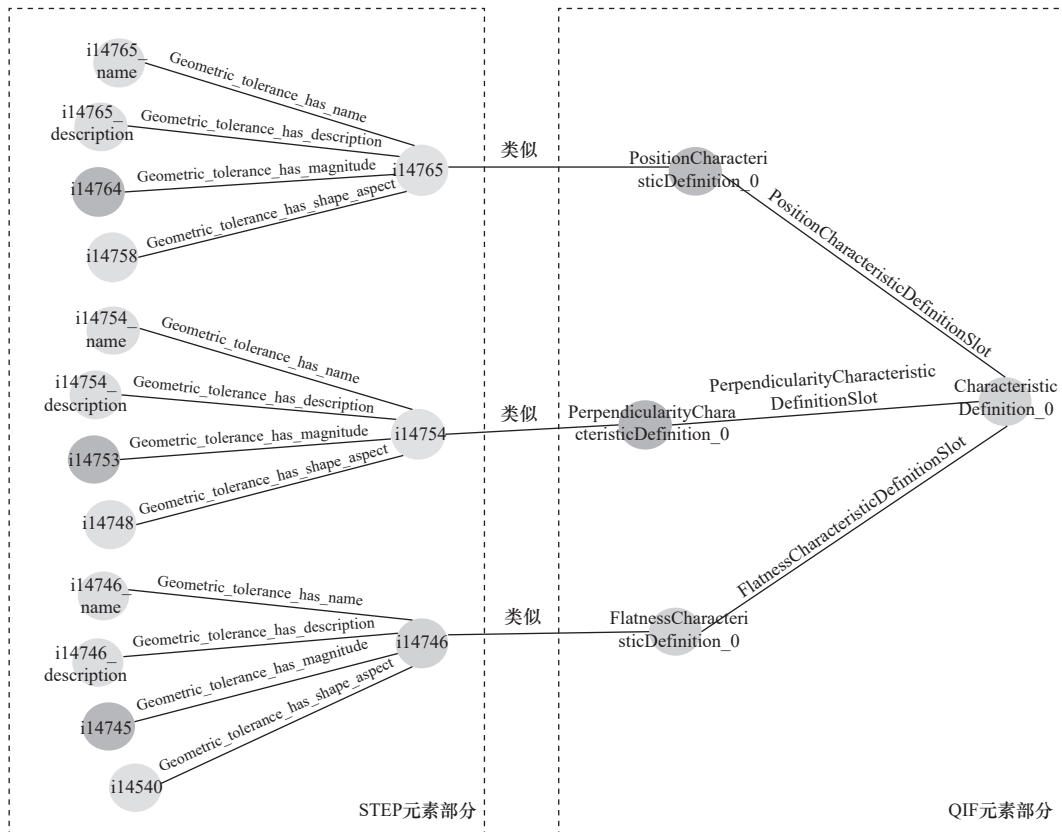


图 10 将 STEP 和 QIF 整合为知识图谱的集成视图  
Fig. 10 Integrated view of STEP and QIF as a knowledge map

实现整个制造质量测量过程中计量数据的有效交换。在这一过程中，几何元素个体的质量信息，如粗糙度和平面度，可以直接作为相关几何元素的属性进行建模。此外，通过在几何元素节点之间建立与加工精度描述相对应的关系和属性，可以在知识图谱中以边的形式来表达设计精度要求和测量质量信息，如图 11 所示<sup>[16]</sup>，涉及两个几何元素的类似整形或定位约束可以通过具有体面属性的等效图节点之间的无向关系来表示，以指示具体值。

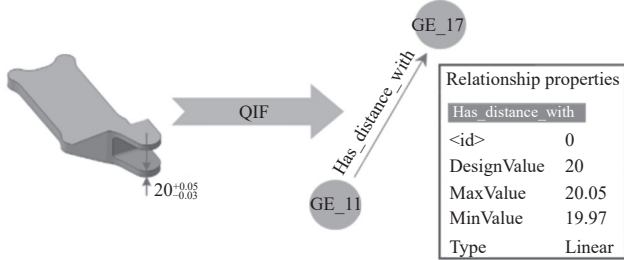


图 11 参考 QIF 的示例建模

Fig. 11 Modeling with reference to the QIF example

### 2.2.2 语义扩展

在制造业中，各个生产环节的独立性和分散性会导致数据整合的不足，这不仅影响了信息交换的完整性，也限制了产品数据的再次利用。为了克服这一挑战，研究者对 QIF 进行了扩展以增强产品全生命周期内的数据管理与追溯能力。HEDBERG T D 等<sup>[5]</sup>研究了在三维模型中集成 X.509 数字证书，促进产品生命周期内的信息交换，提升产品生命周期中数据的可信度。X.509 标准在其他行业应用广泛，主要目的是识别互联网通信和计算机网络中的身份，保护数据传输安全。研究团队开发了开源的数字制造证书工具包，支持 4 种三维模型格式，并扩展了 QIF 标准，以增强产品数据在生命周期中的认证、授权和可追溯性。图 12 所示为扩展后 QIF 架构的 UML 类图<sup>[5]</sup>，描述了如何支持多路径层次签名，并将元数据附加到数字签名中，通过实施多路径层次签名和元数据附加策略，确保了复杂制造环境中的数据来源和处理过程得到可靠追踪与验证，从而提升数据的可信度和质量控制水平。

GOPALAKRISHNAN S 等<sup>[17]</sup>在其研究中开发了一种基于模型的特征信息网络（model-based feature information network, MFIN），用于存储、跟踪和检索与 CAD 模型的几何特征相关的外部存储元数据。MFIN 框架是在 QIF 的基础上扩展开发的，其核心结构由 QIF 数据模型构成，遵循 XML 中性文件格式

式，并以 .qif 文件的形式保存。如图 13 所示<sup>[17]</sup>，通过 MFIN 框架，利用坐标测量数据创建组件 CAD 模型的工作流程：（I）将标称 CAD 模型和 PMI 转为 MFIN XML 格式；（II）将 CMM 测量数据与 MFIN XML 中的表面数据整合；（III）应用表面拟合算法拟合测量数据；（IV）更新 CAD 模型中的表面。

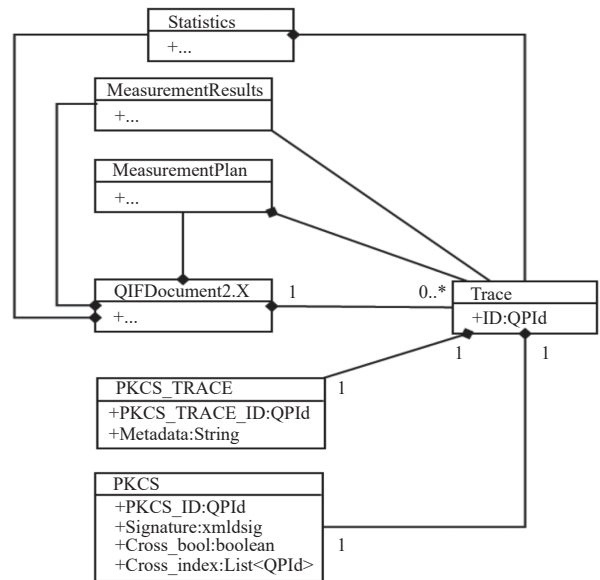


图 12 支持多路径签名策略的 QIF 扩展

Fig. 12 QIF extension supporting multipath signature policy

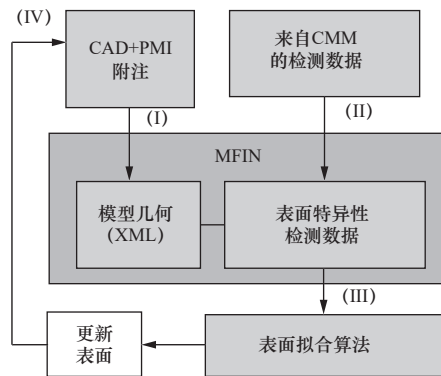


图 13 MFIN 框架创建 CAD 模型的过程

Fig. 13 The process of creating a CAD model in the MFIN frame

MFIN XML 继承了 QIF 标准中的 QIFResults.xsd 元素并加以修改，解决了文件体积庞大且限制了同时访问最新版本和历史数据的问题，创建了几何特征与外部存储的 CMM 数据集之间的链接，生成新的数据元素结构 MeasurementResultSet 将测量的结果进行分组，并在 MeasurementResults 元素中定义子结构，例如关联几何特征的 featureId 以及记录外部文件路径的 ExternalFileReferences，同时补充了描述文件类型、记录用户和测量设备等元数据，

从而增强了数据管理和访问的灵活性,见表2<sup>[17]</sup>。MFIN框架的主要优势在于能够捕获几何和非几何数据,包括特定特性的生命周期信息,这些信息可以通过编程方式提供给多个下游应用程序和系统。

## 2.3 知识的应用与智慧的形成

### 2.3.1 预测与决策

KIM D B<sup>[18]</sup>提出了一种在智能制造环境中从不同的知识源组合预测模型的方法。如图14所示<sup>[18]</sup>,该方法基于3层架构,包括话语领域、问题领域和分析技术领域。在话语领域中,研究者提出与生产资源和流程相关的所有静态信息都可以使用QIF表示。这种架构的主要优点是与许多生产信息标准兼容,便于根据多个决策标准进行复杂决策。

HEDBERG T D等<sup>[19]</sup>提出了在产品生命周期早期使用制造知识的研究方向。STEP AP242描述了在网络空间中定义的“设计”状态;MTConnect和QIF分别代表了“制造”和“测量”状态。三者共同构成了物理世界中产品的“制造配置”。分析这些配置之间的关系有助于开发涵盖整个产品生命周期的鲁棒设计,而不仅限于单一领域,例如制造、质量保证或维护。这种鲁棒设计对产品生命周期的动态特性表现出较低的敏感性,因为生命周期内的数据相互关联,促进了知识的生成,从而支持有效

的决策制定和需求管理。此外,控制方法的应用也变得可行,因为知识的积累有助于理解决策在生命周期中的传播,从而增强了对生命周期管理的诊断和预测能力。

FENG S C等<sup>[20]</sup>提供了一种知识管理方法,以解决智能制造中缺乏整合、共享和更新特定领域知识机制的问题。研究者提供了知识管理在智能制造系统中的作用的案例,其定义的生命周期阶段遵循HEDBERG T D等<sup>[30]</sup>描述的生命周期。其中在检查阶段收集的数据以质量保证为中心,将原生CAD文件导入到坐标测量机软件MiCATPlanner中,其中测量点云以生成模拟的QIF数据,生成了与质量相关的数据。

VERNICA T等<sup>[21]</sup>研究了如何将标准化的设计和检验数据可视化地集成到增强现实(augmented reality, AR)中,以帮助制造商在维护、流程监控和产品组装等多个领域实现价值。传统工程数据表示与AR系统之间缺乏互操作性,这导致了在不丢失上下文和信息的情况下将数据集成到AR系统中存在挑战。研究者通过开发Unity脚本和改进现有的开源工具,展示了如何在AR环境中自动关联QIF检验数据和STEP中的PMI注释,流程如图15所示<sup>[21]</sup>。这项工作有助于提高工业AR的可扩展性。

表2 创建CAD模型的工作流程中使用的基本数据元素、模式 and 应用程序接口功能摘要

Tab. 2 Summary of basic data elements, schemas and application program interface functions used in the workflow shown in the workflow for creating CAD models

数据元素/模式/ API函数的名称	目的/说明	工作流程中使用阶段
QIFDocument	MFIN XML的顶级数据元素,包含作为其子元素的所有其他数据元素	在I中创建
QIFDocument.xsd	定义“QIFDocument”元素结构的模式文件	用于I
QIFDocument.py	Python类包含API函数,便于使用MFIN XML以编程方式链接和检索数据	在整个工作流程中使用
QPIId	记录分配给每个MFIN XML文件的通用唯一标识符(UUID)的数据元素	在I中创建,在整个工作流程中使用
localId	MFIN XML中单个数据元素的本地标识符,用于跟踪和检索	在I中创建,在II、III中使用
QIFResults.xsd	定义检验和测量专用数据元素的模式文件	用于II和III
MeasurementResultSet	捕获与产品中所有测量事件相关信息的数据元素	在II中创建,在III中使用
MeasurementResult	包含特定测量事件相关信息的数据元素	在II中创建,在III中使用
featureId	用于跟踪MFIN XML实例中测量的几何特征的数据元素,其值为特征的“localId”	在II中创建,在III中使用
ExternalFileReferences	捕捉测量结果数据集文件路径的数据元素	在II中创建,在III中使用
MFINAnalysis.xsd	模式文件定义了数据元素,用于捕捉与分析模型几何图形、输入和输出文件的文件链接	在工作流程结束时使用
MeasuredFeature	PMI注释标签,用于跟踪CAD模型中的测量特征	在I中创建,在II、III和IV中使用
CreateBsurfThruPts	NX API功能可在CAD工具中使用控制点坐标生成NURBS曲面	用于IV

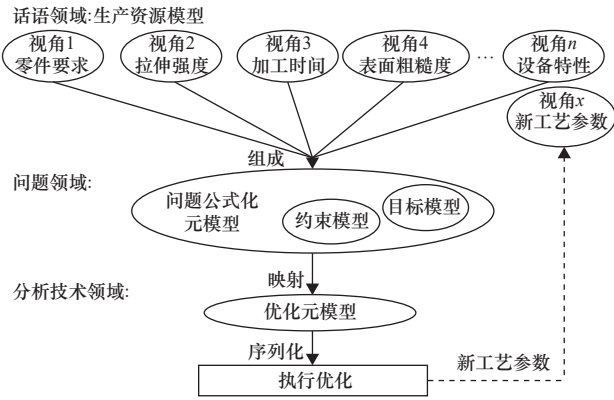


图 14 3层分析法的概念

Fig. 14 The concept of the three-tier analysis method



图 15 将产品定义导入 Unity

Fig. 15 Importing product definitions into Unity

FENG S C 等<sup>[22]</sup> 介绍了一个活动模型，用于为尺寸测量设备（distance measurement equipment, DME）选择标准化的规则类型。在研究中，QIF 被应用于创建一个活动模型，以辅助理解选择 DME、设备和传感器的检验规划要求。具体而言，该模型基于以下几个方面：（1）选择 QIF 资源中指定的 DME 类型；（2）使用 QIF 产品模型定义中指定的设计要求；（3）与 QIF 规则 2.1 版中现有的测量策略规则类型保持一致；（4）包含所有 QIF 部件。

该研究者提出的规则模型已被 QIF 规则工作组采纳，现已包含在 QIF3.0 中。活动模型采用了集成定义功能建模，其优点在于组织清晰且能够简洁地呈现活动。这种应用使得 QIF 在测量设备选择和检验规划中发挥了关键作用。主要尺寸测量设备的选择活动。该活动可分解为 3 个子活动： $A_1$ ， $A_2$ ， $A_3$ ，如图 16<sup>[22]</sup> 所示，在  $A_1$  中 QIF 使得来自零件设计功能的输出，如 CAD 模型、QIF 零件设计或机械绘图，能够作为测量要求的输入。

### 2.3.2 全生命周期管理

HEDBERG T D 等<sup>[23]</sup> 介绍了一种在整个产品生命周期中使用图表形成数字线程来链接和跟踪数据的方法。采用了一个具有代表性的数字线程子集，如图 17 所示<sup>[23]</sup>，它连接了源自 4 个不同存储库的工件：（1）源自需求管理系统的产品需求；（2）源自产品数据管理系统（product data management, PDM）的机械设计模型；（3）源自制造流程规划工具的计算机辅助制造（computer aided manufac-

turing, CAM）模型，其中 MTConnect 数据来自制造机器；（4）源自质量管理体系（quality management system, QMS）的 QIF 中的质量检查报告。并提供了两个查询示例。在研究中，QIF 数据被用来展示如何追踪和管理产品的质量和检验信息，以及如何通过数字线索实现这些信息的快速检索和分析，并使用 QIF 标准生成了首件检验报告（first article inspection reporting, FAIR）和接收与进货检验（receiving and incoming inspection, RII）报告。

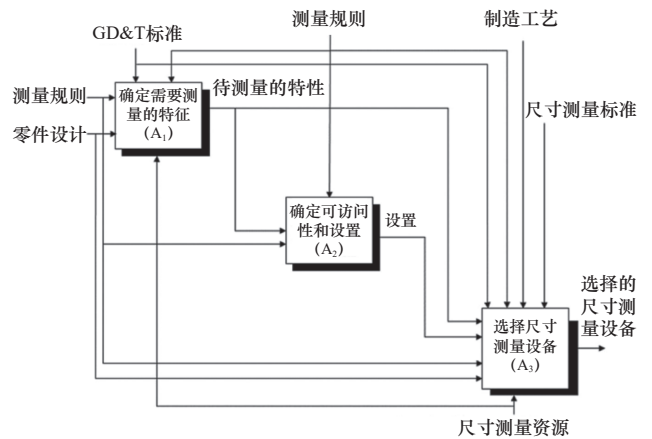


图 16 尺寸测量设备的选择过程

Fig. 16 Selection process of dimensional measuring equipment

LIU R 等<sup>[24]</sup> 提出了一个基于模型的集成检验框架，旨在解决制造业中检验流程与设计、制造等环节之间的信息孤岛问题。该框架由设备层、数据层、应用层和操作层组成。在数据层中，QIF 作为数据模型的基础，用于组织和结构化检验过程中的信息，构建了一个基于模型的巡检数据模型。在 QIF 和 MBD 的基础上，该数据模型涵盖了资源数据模型、规则数据模型和业务数据模型。具体而言，QIF 帮助映射 DME 的属性，包括内置和动态属性，形成资源数据模型。规则数据模型则通过 QIF 描述了检验过程中的各种规则，如设备确定规则和采样点决策规则。业务数据模型利用 QIF 描述了检验过程中生成的数据之间的关系。

HEDBERG T D 等<sup>[7]</sup> 开展了一个实验，目的是评估选定的开放数据标准在全面实施基于模型的小型企业中整合工程设计、制造和质量保证等生命周期阶段的能力。这项研究的核心目标是探究在整个产品生命周期内实施标准化信息集成的潜力和限制，重点讨论了 QIF 标准，该标准有助于系统化地存储和交换检测数据，并能够将数据与设计 and 制造的语义联系起来。在实验中，研究者利用 QIF 标准来管

理和交换质量检测信息，覆盖了从设计、测量到结果评估和统计分析的整个流程链，如图 18 所示<sup>[7]</sup>。通过应用 QIF 标准，研究者能够有效地控制数据流、进行自动编程、实现数据集成，并利用数据挖掘技术来识别影响质量的关键因素，进而提升生产效率。

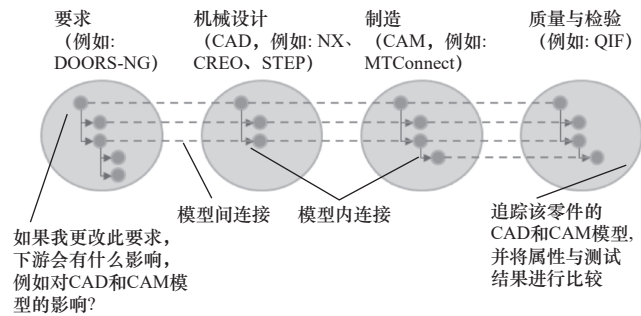


图 17 用于制造的数字线程的一个代表性实例

Fig. 17 A representative example of a digital thread used for manufacturing

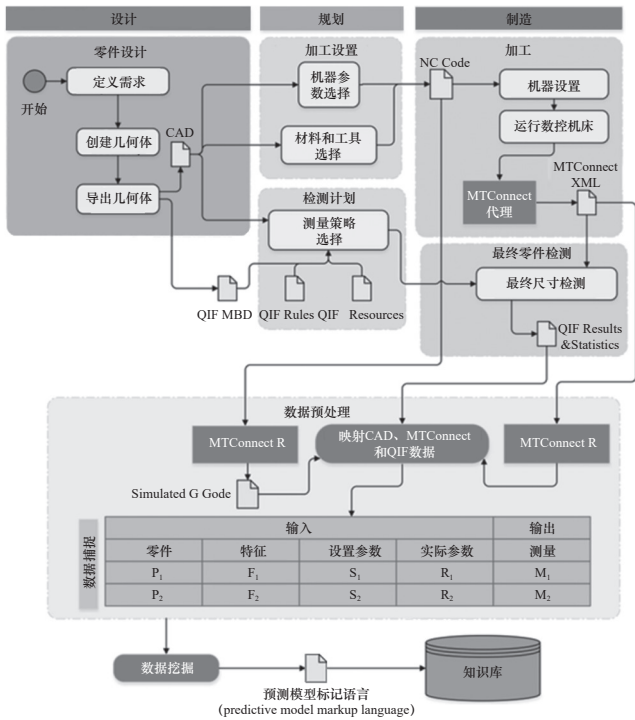


图 18 生命周期内信息流

Fig. 18 Information flow within the life cycle

### 3 结果与讨论

QIF 的应用场景，可以分为 2 种主要类型：一种是聚焦于生命周期的特定阶段，另一种则全面考虑整个生命周期。目前研究大多将 QIF 聚焦于生命周期的特定阶段，尤其是检测阶段。这种现象的原因可以从以下 2 个角度来分析。

(1) 研究者或企业可能由于时间和资金的限

制，只能专注于生命周期的某一个或几个阶段，因为不同阶段通常采用不同的标准。理论上 QIF 标准能够实现产品全生命周期的信息交换从而贯穿整个数字线程，但标准实施同时意味着资源的消耗，周期较长、难度较大。

(2) 随着技术的发展，某些生命周期阶段可能成为研究的热点，研究者可能希望深入探讨 QIF 在生命周期中特定阶段的问题，以便更深入地理解这些阶段的特定挑战和机遇，例如随着 AR 技术的发展，QIF 在设计、检测阶段的研究可能成为热点。

使用一致标准贯穿整个产品全生命周期是必然趋势，因此许多研究通过将 QIF 与其他技术和标准，如 STEP、MTConnect 等结合起来，展示了一个全面的产品生命周期数据管理方法。这些方法允许在设计、制造和质量控制领域之间实现信息的无缝流动和高度互操作性。同时也促进不同标准之间形成合作，例如 EMMER C 等<sup>[14]</sup>正在通过协作方式发展和完善数据管理服务（inspection-plusplus data management services, I++DMS）接口与 QIF 同时使用。不同标准制定者或研究者之间的合作，能增强不同数据模型的优势，建立数据映射以实现多种格式重叠的部分实现自动转换，这种整合对系统提供商和用户都有利。并且研究表明利用持久的通用唯一识别码（universally unique identifier, UUID）来帮助协调跨行业标准的数据元素的统一是一个强大的解决方案<sup>[21]</sup>。在 QIF 中，QPId（quality persistent identifier）被定义为一种持久的 UUID，具有唯一性与持久性，通过 QPId 进行集成和交互异构系统中的数据，可减少系统间集成的复杂性，同时也支持数据的可追溯性，有利于增强跨组织协作效率。

产品全生命周期中标准模型的研究不仅是制造企业提升自身竞争力的重要工具，更是推动全球制造业向可持续、智能化发展的关键。通过系统地研究和优化产品在全生命周期内的各个环节，企业能够实现资源优化、降低成本、提升产品质量，为社会创造更大的价值。

### 4 未来展望

QIF 在制造业中的作用远远超出了单纯的技术标准。它不仅是数据向信息转化的桥梁，也是信息向知识转化的催化剂，最终推动知识向智慧的升华，是实现数字线程的关键技术。随着未来信息技术的迅猛发展，QIF 正迎来新的发展阶段。本节从前沿

技术和工业 4.0 两个角度对 QIF 的未来发展趋势进行了探讨。

#### 4.1 前沿技术的融合

人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的广泛应用将显著提升 QIF 的智能化水平。通过将 QIF 与 AI 技术的深度融合, 制造业可以在数据对齐和处理的各个环节实现更程度的自动化。这种自动化不仅减少了对人为操作的依赖, 还能够显著降低人为错误的发生频率, 进而提升生产效率与质量可靠性。

并且 AI 技术可以充分利用 QIF 所提供的结构化和标准化数据, 进行智能决策、数据分析以及智能预测。基于 QIF 的质量数据, AI 算法可以自动识别潜在的质量问题, 分析异常数据趋势, 并提供实时的质量反馈。这种新模式不仅提高了质量管理的反应速度, 还为企业创造了更为精准的决策支持环境, 使得企业能够及时采取纠正措施, 减少缺陷产品的产生, 从而降低生产成本和提升客户满意度。

增强现实和虚拟现实 (virtual reality, VR) 技术的引入, 为 QIF 的应用提供了全新的应用维度。已有研究将 QIF 与 AR 领域相结合。VR 技术可以基于来自物理世界的 QIF 数据创建虚拟环境, 为企业提供重要的试验和学习机会。这种可视化管理方式将显著提高操作的准确性, 加速基于 QIF 的质量管理过程, 最终也将推进数字孪生技术趋于成熟。

#### 4.2 工业 4.0

目前, 制造业正向工业 4.0 阶段发展, 该阶段强调通过智能技术实现生产过程的全面数字化<sup>[31]</sup>。在此过程中, 数字线程与数字孪生为实现这一目标提供了必要的数据基础和实时反馈机制。

数字线程旨在实现产品生命周期各阶段数据的无缝连接, 而 QIF 通过标准化的质量数据格式和接口, 确保在设计、制造、检测和维护等环节中相关质量信息能够实时流动并有效整合。这种无缝的数据流动为企业提供了全局视角, 有助于构建数字线程, 并帮助决策者更好地理解产品质量与生产过程之间的关系。数字孪生则是物理对象或系统的虚拟表示<sup>[32]</sup>, 其构建依赖于数字线程所提供的数据支撑。通过 QIF 将真实生产过程中采集的质量信息与虚拟模型相结合, 企业能够创建高保真度的数字孪生, 辅助工程师进行设计分析与优化。

最终, 构建的数字线程与数字孪生作为工业 4.0 的关键技术<sup>[33]</sup>, 通过实时监控、预测优化、智

能决策、促进协作和持续改进等方法, 推动制造业的数字化转型与智能化发展<sup>[34]</sup>, 从而帮助企业在激烈的市场竞争中保持领先地位。制造业应积极研究并整合数字线程与数字孪生, 通过 QIF 等开放标准实现数据的无缝流动, 以推动数字化转型和智能化发展。

## 5 结语

QIF 通过整合多源数据, 提升数据管理与分析的效率, 最终达到增强智能制造中质量管理能力的目的。本文以数字线程中的数据交互为切入点, 全面回顾了 QIF 的基本结构、理论基础、发展现状及其核心模块应用, 分析比较了产品全生命周期不同阶段与 QIF 结合的应用效果, 最后给出了 QIF 在智能制造领域的未来展望。希望本综述能够为 QIF 以及相关领域的研究人员提供有益的参考和帮助。

### 参考文献

- [1] ZHAO Y F, HORST J A, KRAMER T R, et al. Quality information framework-integrating metrology processes[C]//IFAC Proceedings Volumes, Sofia: IFAC Secretariat, 2012, 45(6): 1301-1308.
- [2] HARRIS G A, ABERNATHY D, LU L, et al. Bringing clarity to issues with adoption of digital manufacturing capabilities: an analysis of multiple independent studies[J]. Journal of the Knowledge Economy, 2021, 13: 1-22.
- [3] NIST. Digital thread for smart manufacturing[EB/OL]. (2023-07-10) [2025-01-28]. <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing>.
- [4] LIPMAN R R. Software to report product and manufacturing information in QIF files[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2019, 124: 1.
- [5] HEDBERG T D, KRIMA S, CAMELIO J A, et al. 509 digital certificates in three-dimensional models for authentication, authorization, and traceability of product data[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(1): 011008.
- [6] TRAINER A, HEDBERG T D, FEENEY A B, et al. Gaps analysis of integrating product design, manufacturing, and quality data in the supply chain using model-based definition[C]//International Manufacturing Science and Engineering Conference, Blacksburg: American Society of Mechanical Engineers, 2016, 49903: V002T05A003.
- [7] HEDBERG T D, SHARP M E, MAW T M M, et al. Defining requirements for integrating information between design, manufacturing, and inspection[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(11): 3339-3359.
- [8] MICHALOSKI J, HEDBERG T D, HUANG H, et al. End-to-end quality information framework(QIF)technology survey[EB/OL]. (2016-05-09) [2025-01-28]. <https://www.nist.gov/publications/end-end-quality-information-framework-qif-technology-survey>.
- [9] HEDBERG T D, 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.
- [10] HELU M, HEDBERG T J, FEENEY A B, et al. Reference architecture to integrate heterogeneous manufacturing systems for the digital thread[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, 19: 191-195.
- [11] HERRON J. What is New for QIF?[EB/OL]. (2023-06-14) [2025-01-28]. <https://qifstandards.org/wp-content/uploads/2023/07/QIF-at-ISO-202-30614>.
- [12] 唐良运, 邹文景, 甘莹, 等. 基于XML的分布式异构数据同步系统设计[J]. *电子设计工程*, 2023, 31(18): 46-50.
- [13] MORSE E, DANTAN J Y, ANWER N, et al. Tolerancing: managing uncertainty from conceptual design to final product[J]. *CIRP Annals*, 2018, 67(2): 695-717.
- [14] EMMER C, HOFMANN T M, SCHMIED T, et al. A neutral approach for interoperability in the field of 3D measurement data management[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2018, 12: 47-56.
- [15] KWON S, MONNIER L V, BARBAU R, et al. Enriching standards-based digital thread by fusing as-designed and as-inspected data using knowledge graphs[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 46: 101102.
- [16] BAO Q W, ZHENG P, DAI S. Hierarchical construction and application of machining domain knowledge graph based on as-fabricated information model[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 62: 102638.
- [17] GOPALAKRISHNAN S, HARTMAN N W, SANGID M D. A digital engineering framework to facilitate automated data exchange between geometric inspection and structural analysis[J]. *Advances in Engineering Software*, 2023, 183: 103498.
- [18] KIM D B. An approach for composing predictive models from disparate knowledge sources in smart manufacturing environments[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30: 1999-2012.
- [19] HEDBERG T D, HARTMAN N W, ROSCHE P, et al. Identified research directions for using manufacturing knowledge earlier in the product life cycle[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(3): 819-827.
- [20] FENG S C, BERNSTEIN W Z, HEDBERG T D, et al. Toward knowledge management for smart manufacturing[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2017, 17(3): 031016.
- [21] VERNICA T, LIPMAN R, KRAMER T, et al. Visualizing standardized model-based design and inspection data in augmented reality[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2022, 22(4): 041001.
- [22] FENG S C, HORST J A, FEENEY A B, et al. Rule model for selecting dimensional measurement equipment in inspection planning[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2022, 22(1): 011002.
- [23] HEDBERG T D, BAJAJ M, CAMELIO J A. Using graphs to link data across the product lifecycle for enabling smart manufacturing digital threads[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2020, 20(1): 011011.
- [24] LIU R, DUAN G J, LIU J. A framework for model-based integrated inspection[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103: 3643-3665.
- [25] STEP Tools. Awarded "operate, orchestrate and originate (O3)" contract from digital manufacturing and design innovation institute(DMDII) [EB/OL]. (2016-02-10) [2025-01-28]. [https://stepncmachine.com/blog/20160210\\_o3/](https://stepncmachine.com/blog/20160210_o3/).
- [26] Digital Manufacturing and Design Innovation Institute. O3: operate, orchestrate, and originate[EB/OL]. (2014-06-05) [2025-01-28]. <https://members.mxdusa.org/topics/31803/page/overview>.
- [27] FISCHER K, ROSCHE P, TRAINER A, et al. Investigating the impact of standards-based interoperability for design to manufacturing and quality in the supply chain[EB/OL]. (2015-12-09) [2025-01-28]. <https://www.nist.gov/publications/investigating-impact-standards-based-interoperability-design-manufacturing-and-quality>.
- [28] JONES C W, O'CONNOR D. A hybrid 2D/3D inspection concept with smart routing optimisation for high throughput, high dynamic range and traceable critical dimension metrology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 074004.
- [29] MONNIER L, BERNSTEIN W Z, FERRERO V J, et al. An automated approach for segmenting numerical control data with controller data for machine tools[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2024, 24(4): 041003.
- [30] HEDBERG T D, FEENEY A B, HELU M, et al. Toward a lifecycle information framework and technology in manufacturing[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2017, 17(2): 021010.
- [31] 姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(9): 2299-2320.
- [32] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
- [33] 刘然, 刘虎沉. 基于数字孪生的产品制造过程质量管理研究[J]. *现代制造工程*, 2022(7): 50-56.
- [34] 耿建光, 桑国彪, 任江涛, 等. 装备制造企业数字化转型应用支撑平台框架研究[J]. *现代制造工程*, 2023(1): 27-34.
- 第一作者: 楚峻溢, 男, 2002年生, 硕士研究生, 研究方向为智能制造技术。E-mail: 619496096@qq.com
- 通信作者: 张祥春, 男, 1981年生, 研究员, 研究方向为数字化质量与智能检测技术。E-mail: zhangxc215@163.com

(编辑 尹紫楠)

(收修改稿日期: 2025-01-28)