

基于 PMI 领域知识图谱的完备性检查技术研究

王岩岩 张春燕 张胜文 陈世辉

(江苏科技大学机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要:针对产品 MBD 三维模型 PMI 标注形式不统一、标注易出错和人工检查难度大等问题,提出了一种基于 PMI 领域知识图谱的完备性检查技术。该技术采用自顶向下的方法构建了 PMI 领域知识图谱,利用 SWRL 规则构建了完备性检查的规则,从标注的冗余关系、标注的取代关系和标注的矛盾性 3 个方面进行检查,并结合 Java Web 技术实现了知识推理。最后以船用柴油机的机架为对象,验证了该方法的可行性。该技术极大地缩短了检查时间和降低了设计错误率,提高了工作人员的设计效率。

关键词:产品制造信息;领域知识图谱;完备性检查;SWRL 规则推理;Web 开发

中图分类号:TH164 **文献标识码:**A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.02.023

Research on integrity check technology based on PMI domain knowledge graph

WANG Yanyan, ZHANG Chunyan, ZHANG Shengwen, CHEN Shihui

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, CHN)

Abstract: A new completeness checking technique based on PMI domain knowledge map was proposed for solving the problems of non-uniform form of PMI annotation of product MBD 3D model, error-prone annotation, and difficulty of manual checking. The technique uses a top-down approach to construct the PMI domain knowledge map, constructs the rules for completeness checking by using SWRL rules, checks the redundancy relationship of annotation, substitution relationship of annotation, and contradiction of annotation in three aspects, and realizes knowledge reasoning by combining with Java Web technology. Finally, the feasibility of the method was verified by taking the frame of a marine diesel engine as the object. The technique greatly shortens the checking time and reduces design error rate, and improves the design efficiency of the staff.

Keywords: product manufacturing information; domain knowledge graph; completeness check; SWRL rule reasoning; Web development

信息完备性检查是一项辅助性的技术,是自动标注技术发展过程中的一个过渡技术。主要检查产品制造信息(product manufacturing information, PMI)的正确性、完整性及清晰性。正确性是指信息是否符合工艺标准;完整性是指信息是否完整,包括冗余和缺失两方面;清晰性是指信息空间布局是否符合要求。PMI作为产品基于模型定义(model based definition, MBD)三维模型的重要组成部分,由传统的二维标注不断向三维标注发展。但 MBD 模型中的 PMI 往往较为复杂且分散,容易造成可读性差,用户交互性差等问题。为了充分发挥 MBD 模型的优势,减少信息传递过程中的差错,

需要对 MBD 模型中的 PMI 进行完备性检查。

目前的三维自动标注技术尚不成熟,PMI 标注过程主要仍需依赖于人工操作,因此容易导致模型中的 PMI 标注出现冗余、缺失和不合理等问题。在这样的背景下,研究 PMI 的完备性检查技术对于计算机辅助设计(computer aided design, CAD)与计算机辅助工艺规划(computer aided process planning, CAPP)的发展都具有重要的现实意义。

为提高工作效率和 PMI 标注准确率,国内外学者进行了大量研究,并获得阶段性的成果。谭祯^[1]建立空间标注模型,将二维坐标转化为三维空间坐标,实现了多视图的尺寸完备性检查,但是该方法

只适用于二维工程图。程亚龙^[2]等借助于几何约束图,针对顺序标注的三维尺寸标注实现了完备性检查。Luisa Martínez M^[3]提出根据几何约束来求解几何元素的过约束问题,但并没有有效解决尺寸缺失问题。张菲菲^[4]针对航天薄壁件制造特点,构建了基于MBD的信息模型,并以三维模型为主体,进行知识图谱的融合,最终实现信息集成。

在前人研究的基础上,本文结合知识图谱技术,采用自顶向下的方法构造了PMI领域知识图谱,通过标注的冗余关系、标注的取代关系和标注的矛盾性3个方面构建SWRL规则,在此基础上,实现对PMI的完备性检查。

1 PMI领域知识图谱相关概念

知识图谱(knowledge graph, KG)是具有有向图结构的一个知识库,近年来在人工智能领域应用广泛,它以图的形式表现事物间的关系。从本质上看,知识图谱是一种关系网络^[5],以一种通用的语义知识形式化的方法对事物进行描述,其基本单位为三元组。主要采用(实体,属性,关系)和(实体,属性,属性值)两种三元组形式^[6]。知识图谱的逻辑层次,可表达为

$$KG = \langle TBox, ABox \rangle \quad (1)$$

式中:KG表示知识图谱;TBox表示模式层,即本体;ABox为数据层即具体的信息。

领域知识图谱是知识图谱在特定领域中的应用。

本文采用自顶向下的方法构建PMI领域知识图谱,即先构建本体并定义好数据形式,再提取实体进行填充。在知识图谱构造的工具方面,Protégé是一种常用的可视化本体构造软件^[7],相比于其他同类软件,Protégé的优势在于可以进行模块化的设计,并能够实现部分功能对中文的支持,可以实现本体的构造、推理及可视化显示。Neo4j是目前最流行的知识图谱构造软件,它是一款基于Java语言开发的事务型数据库,可以实现图形数据的处理和存储^[8]。

PMI表示产品MBD模型的非几何信息,包含产品的尺寸标注、形位公差、工艺基准、表面粗糙度、零件属性和技术要求等产品制造信息^[9]。它是传统二维图纸中的尺寸、公差和技术要求等标注信息在MBD模型中的可视化集成化的表达^[10],可以将PMI直观地显示在三维模型的表面或剖面中,以此提高使用效率,保证产品质量。图1展示了机架MBD模型中某一视图的PMI实例。

2 PMI领域知识图谱构建

2.1 PMI领域知识图谱模式层构建

PMI标注对象间存在着复杂的联系。要完成模式层的构建,不仅需要对相关术语进行梳理,还需要整理机械工艺手册、工艺卡片和相关标准文件(如GB/T 1958-2017)等资料对PMI相关的知识术语进行抽取。在对各术语进行梳理之后,提炼出

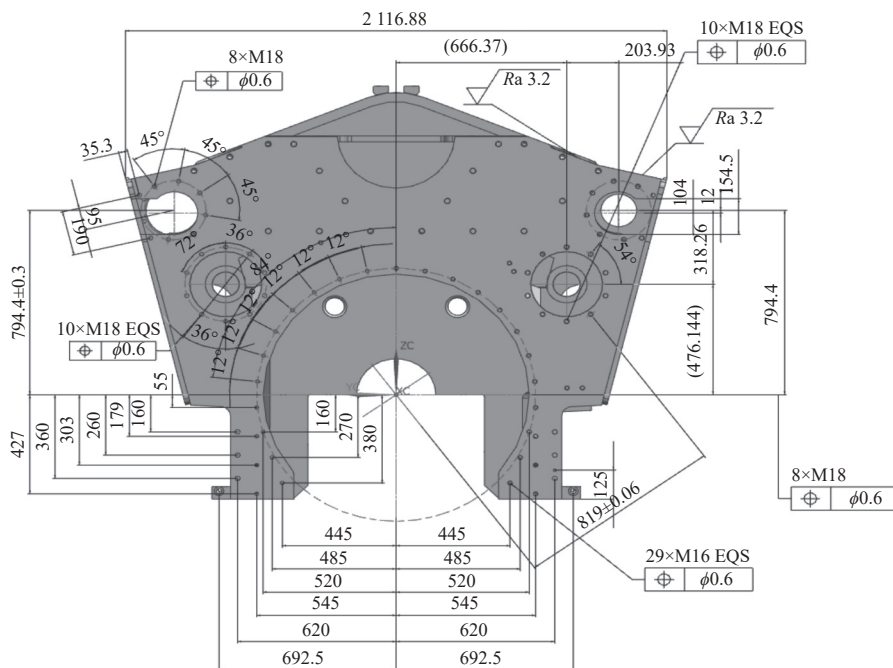


图1 机架MBD模型中某一视图的PMI实例

的 PMI 相关知识术语间的逻辑关系如图 2 所示。

PMI 领域本体是一个复杂的模型, 不仅具有较多的概念, 而且概念间的彼此关系也错综复杂。本文从局部开始采用七步法来构建 PMI 本体, 最后将各局部本体按照相互关系合并为 PMI 的领域本体。本体构建流程如图 3 所示。

这里以形位公差局部本体为例来说明本体的构造过程。其步骤如下:

步骤 1 确定本体所在的领域为 PMI 标注的形位公差部分;

步骤 2 确定相关领域的概念术语。根据形位公差的相关概念在 Protégé 中建立形位公差类;

步骤 3 定义概念层次结构, 对应于 Protégé 中的 Class。顶层概念为“形位公差”, 中间层概念为“形状公差”和“位置公差”, 底层概念为“直线度”、“线轮廓度”、“同轴度”等;

步骤 4 定义概念属性, 概念属性包括对象属性和数据属性两部分。在 Protégé 中, 对象属性对应于 Object Properties, 数据属性对应于 Data Properties。对象属性用于连接两个实体, 表示类与类之间的关系; 数据属性用于连接个体和具体的数据类型值, 表示某个类特有的数据值, 值域是某种数据类型; 通过设置定义域 (domain) 和值域 (range) 对属性进行定义。部分属性及约束列于表 1 所示。

步骤 5 本体评价。结合 Protégé 自带的 Pellet 推理机功能, 完成一致性检查;

步骤 6 本体实例化。对应于 Protégé 中的 Individuals。为给类及子类添加相应的实例;

步骤 7 本体的可视化显示及存储。检验无误后, 保存局部本体。

以同样的方法建立其他局部本体。最后, 将这些局部本体按照逻辑关系进行合并, 形成最终的 PMI 领域本体。在 Protégé 中构造的 PMI 领域知识图谱的本体如图 4 所示。

本体构造完成后, 使用 Pellet 推理机对最终的本体进行一致性检查, 经检验, 所构建的 PMI 领域本体符合要求。

2.2 PMI 领域知识图谱数据层构建

数据层的构建涉及两个方面问题, 即数据的收集和存储。领域知识图谱的主要特点就是“小样本”, 有着较小的数据量和对专业知识库较高的依赖度。因此, 在数据收集方面, 为了更好地反映船用柴油机关键件的特性, 以 PMI 知识库为基础, 结合对船用柴油机典型零件库进行信息提取进行整理归纳。在数据存储方面, 运用图数据库的形式存储生成的知识图谱实现。

由于 MBD 模型中的 PMI 数量繁多, 种类较为分散, 难以进行统一管理, 所以需要根据不同类型, 对 PMI 进行集中分类提取。首先, 读取 MBD 模型中的所有 PMI 标注, 记录 PMI 数目为 N , 分别对每一个 PMI 标注进行处理, 判断其具体类型提取信息。最后, 进行集中存储。

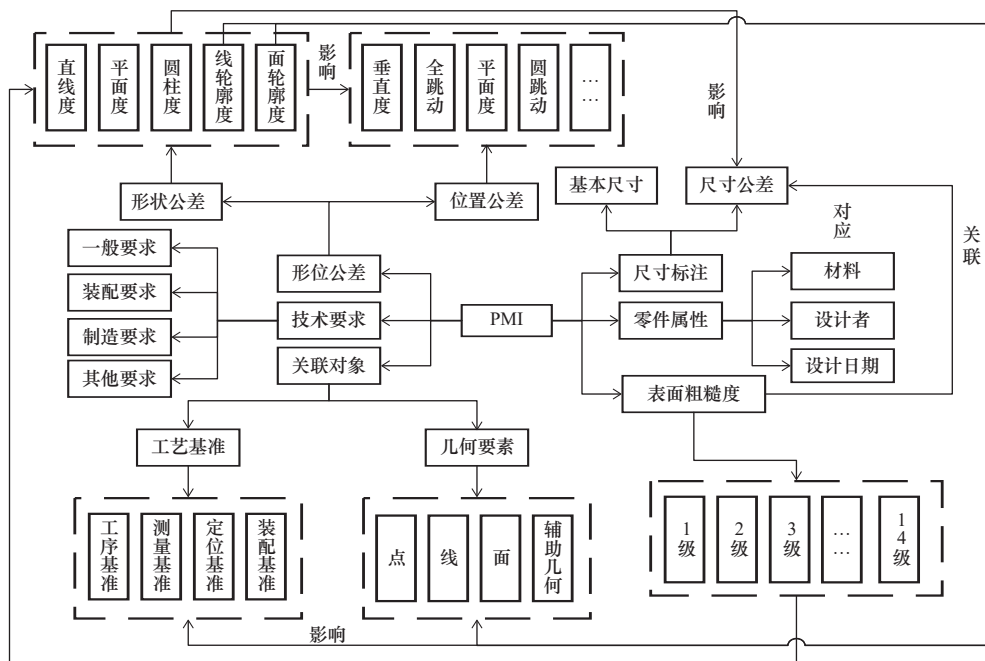


图 2 PMI 知识术语关系图

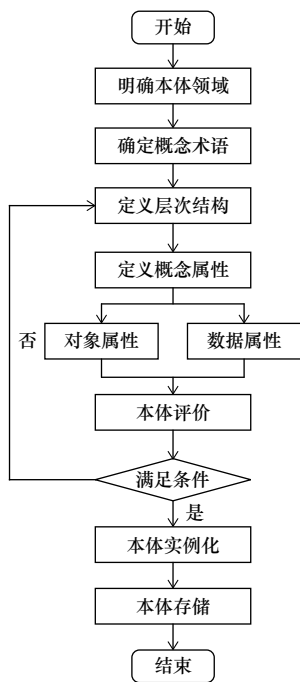


图3 本体构建流程

本文以 C 语言的编程思想为指导，通过伪代码表达 MBD 模型中的 PMI 提取过程。将 PMI 类型（PMI_type）分为尺寸标注类（Dimension）、形位公差类（GeometricTol）、表面粗糙度类（SurfaceRou）、工艺基准类（Datum）、技术要求类（TechnicalReq）进行提取。PMI 分类提取的伪代码如表 2 所示。

表 1 部分属性及约束

属性类型	属性内容	定义域	值域
数据属性	GeoAssValue	GeometricTol	int
	GeoTolValue	GeometricTol	Float
对象属性	HasForm	GeometricTol	Form
	IsFormOf	Form	GeometricTol

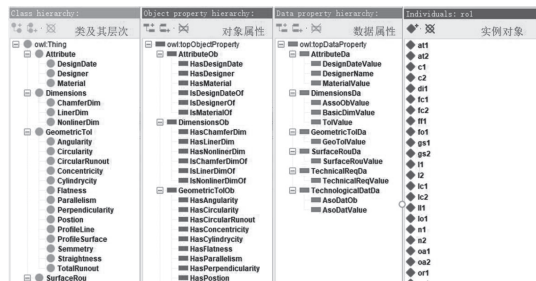


图4 PMI领域知识图谱的本体

2.3 知识融合

知识融合过程分为实体链接和知识合并两个部分^[11]。实体链接是指将数据对象链接到知识图谱中，

知识合并是指将有歧义的实体信息进行处理。知识融合流程如图 5 所示。

表 2 PMI 分类提取的伪代码

输入：MBD模型
输出：PMI数据集
1 if(PMI_type == Dimension)//尺寸标注类
2 获取尺寸类型：线性尺寸、非线性尺寸
3 获取尺寸值
4 if(含有公差信息)
5 获取公差类型：单边公差、双边公差
6 获取上下偏差值
7 else if(PMI_type == GeometricTol)//形位公差类
8 获取形位公差类型
9 获取形位公差值
10 if(含有基准信息)
11 获取工艺基准信息
12 else if(PMI_type == SurfaceRou)//表面粗糙度类
13 获取表面粗糙度类型
14 获取表面粗糙度值
15 获取表面粗糙度关联对象
16 else if(PMI_type == Datum)//工艺基准类
17 获取基准类型
18 获取基准符号
19 else if(PMI_type == TechnicalReq)//技术要求类
20 获取技术要求文本信息

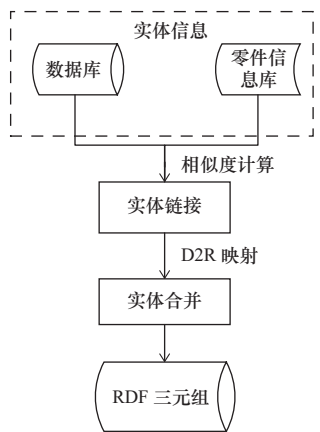


图5 知识融合流程

模式层具有较高的统一性和准确性，因此只需要对数据层进行融合。数据层构造采用了不同来源的数据，需要对知识进行实体链接和实体合并。先对各实体属性信息进行相似度计算^[12]，当相似度超

过设定的阈值时，则进行实体链接消除冗余。对于从数据库中的实体信息 I_A 和从零件中抽取的信息 I_B ，由于数据库实体信息具有更高的置信度，应优先选用 I_A 中的信息进行替换。通过 D2RQ 映射将数据转化为 RDF 格式的三元组格式完成知识融合。最后，利用 Neo4j 对 PMI 领域知识图谱进行储存，将融合后的数据导入 Neo4j，得到 PMI 领域知识图谱的部分可视化显示。

3 基于 SWRL 规则的 PMI 完备性检查规则构建

语义网络规则语言（semantic web rule language, SWRL）是一种专门描述规则的语言，使用规则与 OWL（web ontology language）知识库的结合。通过对本体的实例进行规则推理，实现本体与 SWRL 的结合，有效地弥补了本体推理能力不足的缺陷。

PMI 领域知识图谱中的存在着大量隐含规则，需要通过对已有知识进行知识推理和关系的挖掘。PMI 标注对信息完备性的影响主要体现在 3 个方面：

（1）冗余的标注会影响信息的完整性。（2）矛盾的标注会影响信息的准确性。（3）冗余和矛盾的标注间接影响着信息显示的清晰性。

本文以各标注的关联对象要素作为联系的枢纽，建立具体的完备性检查规则。

（1）标注的冗余关系

建立标注冗余性相关规则如表 3 所示。

（2）标注的取代关系

建立的标注取代性相关规则如表 4 所示。

（3）标注的矛盾关系

建立的标注矛盾性相关规则如表 5 所示。

将 PMI 完备性检查的规则按照 3 种类型编写完成后，在 Protégé 的 SWRLTab 中进行整理，Protégé 中的 PMI 完备性检查规则库如图 6 所示。规则创建完成，在 Protégé 的“Individual by class”模块中创建对应类的实例。通过 Protégé 自带的 Drools 引擎完成规则推理，将 OWL 与 SWRL 合并生成 Drools 规则语言。经 OWL+SWRL->、Run Drools、Drools->OWL 等操作进行推理和 OWL 文件更新。与本体中的类相对应，在前文所创建的实体基础上进行扩充，并为新创建的实体设置属性。PMI 领域的实体通过关联对象产生联系，每个关联对象依据其 xsd:int 类型的 tag 值进行区分，经过推理后生成推理结果。

表 3 标注冗余性相关的 SWRL 规则

	SWRL规则	规则描述
Rule 1-1	$\text{LinerDim}(?a)^{\wedge}\text{LinerDim}(?b)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?a,?e)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?b,?f)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?e,?f)^{\wedge}\text{HasLRepeatability}(?a,?b)$	线性尺寸间如果两个关联对象都相同，则判定为标注冗余
Rule 1-2	$\text{NonlinerDim}(?a)^{\wedge}\text{NonlinerDim}(?b)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{DimAssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasNRepeatability}(?a,?b)$	非线性尺寸如果关联对象相同，则判定为标注冗余
Rule 1-3	$\text{Form}(?a)^{\wedge}\text{Form}(?b)^{\wedge}\text{GeoAssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{GeoAssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasNRepeatability}(?a,?b)$	形位公差如果关联对象相同，则判定为标注冗余
Rule 1-4	$\text{SurfaceRou}(?a)^{\wedge}\text{SurfaceRou}(?b)^{\wedge}\text{SRouAssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{SRouAssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasRoRepeatability}(?a,?b)$	表面粗糙度如果关联对象相同，则判定为标注冗余
.....		

表 4 标注取代性相关的 SWRL 规则

	SWRL规则	规则描述
Rule 2-1	$\text{Orientation}(?a)^{\wedge}\text{Form}(?b)^{\wedge}\text{AssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{AssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasReplaceability}(?a,?b)$	定向公差与形状公差如果具有相同的关联对象，则判定为取代关系
Rule 2-2	$\text{Location}(?a)^{\wedge}\text{Form}(?b)^{\wedge}\text{AssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{AssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasReplaceability}(?a,?b)$	定位公差与形状公差如果具有相同的关联对象，则判定为取代关系
Rule 2-3	$\text{Runout}(?a)^{\wedge}\text{Form}(?b)^{\wedge}\text{AssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{AssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasReplaceability}(?a,?b)$	跳动公差与形状公差如果具有相同的关联对象，则判定为取代关系
Rule 2-4	$\text{Location}(?a)^{\wedge}\text{Orientation}(?b)^{\wedge}\text{AssoValue}(?a,?c)^{\wedge}\text{AssoValue}(?b,?d)^{\wedge}\text{swrlb:equal}(?c,?d)^{\wedge}\text{HasReplaceability}(?a,?b)$	定位公差与定向公差如果具有相同的关联对象，则判定为取代关系
.....		

4 应用与实例

本文中的知识推理功能的实现是基于 Web 网页开发技术，并通过网页的形式实现与 NX 系统的集成。采用 Java 编程语言解决 Web 问题的技术称为 Java Web^[13]，它是 Spring 框架的常用技术。这里知识推理部分将利用 Java Web 进行功能页面的开发。

表 5 标注矛盾性相关的 SWRL 规则

	SWRL规则	规则描述
Rule 3-1	Dimensions(?a)^Form(?b)^DimAssoValue(?a,?c)^GeoAssoValue(?b,?d)^DimTolValue(?a,?e)^GeoAssoValue(?b,?f)swrlb:equal(?c,?d)swrlb:lessThanOrEqual(?e,?f)->HasContradictoriness(?a,?b)	尺寸标注和形状公差如果具有相同的关联对象,且尺寸公差小于形状公差值,则判定为矛盾关系
Rule 3-2	Dimensions(?a)^Location(?b)^DimAssoValue(?a,?c)^GeoAssoValue(?b,?d)^DimTolValue(?a,?e)^GeoAssoValue(?b,?f)swrlb:equal(?c,?d)swrlb:lessThanOrEqual(?e,?f)->HasContradictoriness(?a,?b)	尺寸标注和定位公差如果具有相同的关联对象,且尺寸公差小于形状公差值,则判定为矛盾关系
Rule 3-3	Location(?a)^Form(?b)^GeoAssoValue(?a,?c)^GeoAssoValue(?b,?d)^GeoTolValue(?a,?e)^GeoTolValue(?b,?f)swrlb:equal(?c,?d)swrlb:lessThanOrEqual(?e,?f)->HasContradictoriness(?a,?b)	定位公差和形状公差如果具有相同的关联对象,且定位公差值小于形状公差值,则判定为矛盾关系
Rule 3-4	Location(?a)^Orientation(?b)^GeoAssoValue(?a,?c)^GeoAssoValue(?b,?d)^GeoTolValue(?a,?e)^GeoTolValue(?b,?f)swrlb:equal(?c,?d)swrlb:lessThanOrEqual(?e,?f)->HasContradictoriness(?a,?b)	定位公差和定向公差如果具有相同的关联对象,且定位公差值小于定向公差值,则判定为矛盾关系
		

图 6 PMI 完备性检查规则库

开发过程中运用的 Java Web 是基于 MVC 分层模式进行设计的,采用了 Spring Boot 框架进行业务逻辑控制。通过 Spring Boot 对 Spring 体系框架进行了整合优化,能够利用更简易的配置快速实现 Java Web 的启动。通过采用 MySQL 数据库进行数据存储,结合 Mybatis 框架进行数据库访问^[14],借助提供从数据表到 Java 类的映射实现降低数据传输的复杂性的需求。MVC 分层模式的原理如图 7 所示。

Jena 提供的 API 接口^[15]支持 OWL、RDFS 及 DAML+OIL,可以实现对本体文件数据进行处理,通过读取 OWL 文件,对本体进行拓展应用。

本文以船用柴油机某型号的机架为实例对系统进行验证。首先需要输入机架的 MBD 模型,以机架的 MBD 模型为信息源,所集成的信息包括视图信息、标注信息、特征信息(对应加工工序信息)、几何信息等。点击“数据预处理”,系统对 MBD 模型 PMI 信息进行自动遍历和分类;点击“PMI 信息提取”按钮后,会弹出如图 8 的界面,PMI 的详细信息会以树列表的形式显示,点击“确定”按钮后,后台自动保存。MBD 信息提取的内容,包括尺寸标注、形位公差及表面粗糙度。提取后的信息通过界面显示,同时后台以文件形式进行保存。机架 MBD 模型如图 9 所示。

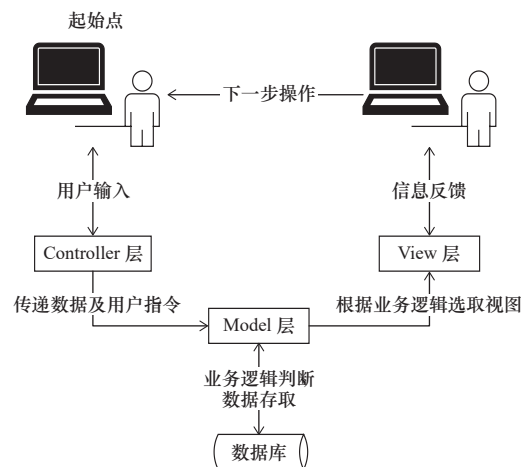


图 7 MVC 分层模式原理

尺寸类型	主尺寸	上偏差	下偏差
线性尺寸	950	0.068	-0.068
线性尺寸	132	0	-0.056
线性尺寸	169	0	-0.062
线性尺寸	106	0.026	-0.026
线性尺寸	238	0	-0.07
线性尺寸	85,5	0	-0.045
线性尺寸	54	0	-0.075
线性尺寸	61,5	0	-0.042
线性尺寸	24	0	-0.03
线性尺寸	30	0.028	0

图 8 PMI 信息提取界面

PMI 完备性检查部分是结合 Web 编程技术,在 Web 网页上实现的。点击“PMI 完备性检查”按钮,会自动通过浏览器进入 PMI 完备性检查平台。PMI 完备性检查包含“关系查询”和“知识推理”两个模块。“关系查询”模块可以通过输入实体名或关系名进行搜索。“知识推理”模块通过读取所提取的模型 PMI 信息,根据 SWRL 规则库对 PMI 标注进行知识推理。PMI 信息包括标注的编号、类

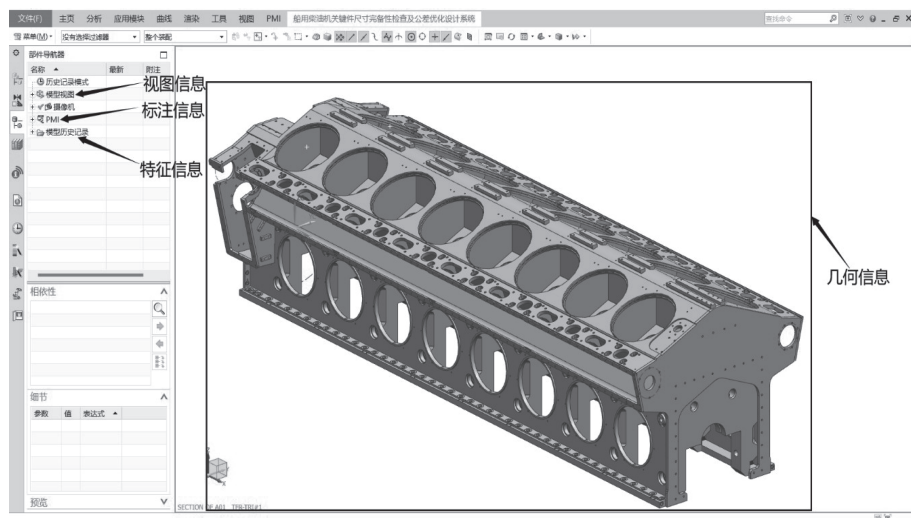


图9 导入 MBD 模型

型、公差值和关联对象编号。点击“开始推理”按钮，自动在所导入的 PMI 信息基础上进行推理。推理完成后，会在界面右侧按照冗余性标注、取代性标注、矛盾性标注 3 种类型自动对推理结果进行归类。详细信息包括尺寸类型及其对应的 tag 值。如图 10 所示。



图10 PMI 完备性检查结果

由推理结果可知，机架 MBD 模型中出现 3 个冗余性标注，2 个取代性标注，3 个矛盾性标注。导出 PMI 完备性检查结果，部分 PMI 完备性检查报告如图 11 所示。在第 1 个平面的第 2 个角度和第 3 个角度存在 2 个取代性标注，分别是 Tag 值为 53 620 和 64 606 的形状公差，这两个形状公差可以相互取代。同理可以通过 Tag 值的不同找到机架 MBD 模型中的冗余性标注和矛盾性标注。经检验，关于尺寸标注、形状公差和表面粗糙度的错误标注均能根据该方法进行检查。

5 结语

本文针对 MBD 模型的 PMI 完备性检查问题展开了研究，结合 NX 平台的相关开发技术，开发了

```
第 1 个平面
有 7 个角度
第 1 个角度有 1 个尺寸
第 2 个角度有 3 个尺寸
第 3 个角度有 1 个尺寸
第 4 个角度有 1 个尺寸
第 5 个角度有 1 个尺寸
第 6 个角度有 1 个尺寸
第 7 个角度有 1 个尺寸

取代性标注的个数为: 1
矛盾性标注的个数为: 0
类型: 线性尺寸
Tag 值: 53810
类型: 非线性尺寸
Tag 值: 53790
类型: 形状公差
Tag 值: 64606
*****
//////////
第 3 个平面
有 4 个角度
第 1 个角度有 1 个尺寸
第 2 个角度有 6 个尺寸
第 3 个角度有 1 个尺寸
第 4 个角度有 2 个尺寸
第 1 个角度
不同的点数为 2 个
*****
第 2 个角度
不同的点数为 10 个
冗余性标注的个数为: 0
取代性标注的个数为: 0
矛盾性标注的个数为: 0

第 1 个角度
不同的点数为 2 个
*****
第 2 个角度
不同的点数为 10 个
冗余性标注的个数为: 0
取代性标注的个数为: 0
矛盾性标注的个数为: 0
```

图11 部分 PMI 完备性检查报告

船用柴油机关键件 MBD 模型的 PMI 完备性检查系统。通过船用柴油机典型零件实例，验证了系统方案的良好性能。针对当前信息标注过度依赖人工、PMI 信息提取及完备性检查困难以及工序模型存储成本较高等问题，提出了以 MBD 模型为唯一数据源的 PMI 完备性检查技术研究方案。将知识图谱技术与完备性检查技术相结合，自顶向下地构建了 PMI 领域知识图谱，并通过 Neo4j 技术实现了信息的可视化及存储。在此基础上结合 SWRL 规则推理建立 PMI 完备性检查的相关规则，实现了 PMI 完备性检查。在完成了系统方案设计及系统关键技术理论研究的基础上，利用 NX 二次开发工具，结合 Visual Studio2012 等编程开发工具，以 C++等编程语言进行了系统的开发。最后通过船用柴油机典型零件实例对系统进行了验证。

参 考 文 献

[1] 谭祯. 二维工程图尺寸完备性检查的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

- [2] 程亚龙, 刘晓军, 刘金锋. 基于轨迹相交的三维顺序尺寸标注完备性检查[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(8): 1799-1806.
- [3] Luisa Martínez M, Féllez J. A constraint solver to define correctly dimensioned and overdimensioned parts[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(13): 1353-1369.
- [4] 张菲菲. 航天薄壁件多尺度MBD模型构建及可视化研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [5] 李玉侠. 知识图谱分析法[J]. *衡水学院学报*, 2014, 16(1): 58.
- [6] 王维伟, 吴亮东, 尤琪. 知识产权全过程管理体系的构建[J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(8): 192-196.
- [7] 章勇, 吕俊白. 基于Protege的本体建模研究综述[J]. *福建电脑*, 2011, 27(1): 43-45.
- [8] 曹皓伟, 徐建良, 窦方坤. 基于Neo4j生物医药知识图谱的构建[J]. *计算机时代*, 2020, 20(6): 35-38.
- [9] 李春燕, 耿其东. PMI技术与三维标注[M]. 上海: 电子工业出版社, 2015.
- [10] 张信淋. 基于MBD的飞机零件快速建模技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.
- [11] 向军毅, 胡慧君, 刘宇, 等. COVID-19物资知识图谱的构建[J]. *武汉大学学报:理学版*, 2020, 66(5): 409-417.
- [12] 李超. 视频侦查的知识图谱构建研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2019.
- [13] 张烈超, 胡迎九. 典型Java Web开发框架模型的研究[J]. *武汉交通职业学院学报*, 2021, 23(4): 122-127.
- [14] 付强. 基于机器学习方法的冷胁迫蛋白识别[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [15] 朱佳. 基于本体与关联规则的煤矿监控预警模型的设计与研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- 第一作者: 王岩岩, 女, 1998年生, 硕士研究生, 研究方向为数字化设计与制造。E-mail: 3273475021@qq.com
- 通信作者: 张春燕, 女, 1976年生, 副教授, 研究方向为绿色智能制造技术。E-mail: 648159778@qq.com
- (编辑 李 静)
- (收稿日期: 2022-06-27)

文章编号: 20230223

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

