

基于语义本体的桥梁结构智能化本体模型

杨建喜¹, 周应新², 戴森昊³

(1. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074; 2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650228; 3. 重庆市交通规划勘察设计院, 重庆 401121)

摘 要: 针对现有 BIM 技术难以实现桥梁运营过程中海量数据的智能化检索和知识推理的问题, 本文提出了基于语义本体的桥梁管养信息智能化本体模型。以连续刚构桥为依托, 在 BIM 模型中, 利用 IFC 标准表达桥梁结构单元与管养信息, 分析 IFC 与 OWL 的信息转换机制, 建立信息转换框架, 获取知识图谱数据来源, 构建桥梁结构、检测信息、监测信息的本体知识图谱, 实现桥梁运维信息的智能化检索和知识推理模型构建; 基于 SPARQL 检索语言实现对模型的验证, 通过语义关系检索, 验证检索信息的正确性, 利用 SWRL 语言和 JESS 推理机, 在 Protégé 软件环境中推理桥梁结构混凝土强度等级, 通过领域共识验证推理结果的正确性。该方法的提出, 为桥梁管养智能化发展提供新的思路, 具有一定的参考价值和实际工程意义。
关键词: 桥梁工程; 管养信息; BIM; 语义本体; 知识图谱; 智能检索与推理
中图分类号: U492.8; U495 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0026-08

Intelligent Ontology Model of Bridge Structure Based on Semantic Ontology

YANG Jian-xi¹, ZHOU Ying-xin², DAI Sen-hao³

(1. School of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co Ltd, Kunming 650228, China;

3. Chongqing Traffic Planning Survey and Design Institute, Chongqing 401121, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing BIM technology is difficult to realize the intelligent retrieval and knowledge reasoning of massive data in the bridge operation process, this paper proposes an intelligent ontology model of bridge management information based on semantic ontology. Based on the continuous rigid frame bridge, in the BIM model, the IFC standard is used to express the bridge structure unit and the custody information, analyze the information conversion mechanism of IFC and OWL, establish the information conversion framework, obtain the source of knowledge map data, build the bridge structure and detect the ontology knowledge map of information and monitoring information, realize the intelligent retrieval of bridge operation and maintenance information and the construction of knowledge reasoning model. The model is verified based on SPARQL retrieval language, the correctness of the retrieval information is verified through the semantic relationship retrieval. The SWRL language and JESS inference engine infers the concrete strength grade of the bridge structure in the Protégé software environment, and verifies the correctness of the inference results through the domain consensus. This method provides a new idea for the intelligent development of bridge management and maintenance, which has certain reference value and practical engineering significance.
Key words: bridge engineering; maintenance information; BIM; semantic ontology; knowledge atlas; intelligent retrieval and reasoning

随着我国桥梁数量和其管理数据的急剧增多,现有桥梁管养手段已无法满足桥梁运营信息管理的要 求,而基于 BIM (Building Information Modeling)模型的桥梁信息智能化管理成为桥梁管养发展的新方向,为此,大量学者^[1~9]对其在桥梁管养中的应用进行了研究。BIM 技术在桥梁运维管理中的应用使得桥梁管养信息能够有效集成并用于分析,但在对海量的桥梁管养信息进行智能化检索和知识推理时,BIM 技术还难以实现;而知识工程中的语义本体技术能将离散化的信息通过语义关系连接,形成知识图谱,从知识图谱中实现信息的检索和推理分析。

文献[10]提出了基于 BIM 建筑成本估算的本体论方法,旨在实现对 BIM 数据的自动检索和推理;文献[11]从 IFC (Industry Foundation Classes) 标准的角度研究 BIM 模型信息的本体中的表示方法;文献[12]针对桥梁检测报告中大量非结构化数据难以发现实质风险的问题,提出一种基于本体的信息提取框架,能够自动提取报告中的非结构化信息,并以结构化的形式进行表示;文献[13]针对 AEC-FM (Architecture Engineering Construction, Facility Management) 中信息集成共享的问题,提出一种基于语义共享本体的建筑信息表示方法,实现了在建筑生命周期内跨领域的信息

集成;文献[14] 开发了基于本体的智能交通系统数据集成框架,实现了对国内高速公路的 ITS (Intelligent Transportation System) 数据集成;文献[15]研究了 EXPRESS 语言与 OWL 语言之间的关联特征,将 IFC 文件映射转换为 OWL 格式,并导入 Protégé 软件中生成本体,从而提出了基于 IFC 标准的自动化建模方法;文献[16]实现了语义层面的建筑运维管理,建立了基于 BIM 模型和本体技术的智能运维管理框架;文献[17]利用 BIM 和语义本体技术,建立了基于本体的施工风险知识管理方法论和框架。

综上所述,将语义本体技术应用于建筑领域的运维管理已开展较深入研究,取得了丰硕成果,但在桥梁运维管理中的应用研究较少。有鉴于此,为实现桥梁管养信息的智能检索和知识推理,本文提出了基于语义本体的桥梁结构智能化本体模型;以连续刚构桥为研究对象进行桥梁的结构体系划分,在 IFC 标准中扩展桥梁结构单元与管养信息的表达框架,分析 IFC 与 OWL 的信息转换机制,建立信息映射框架;基于映射 OWL 构建桥梁管养的本体知识图谱,实现桥梁运维信息的智能化检索和知识推理。基于语义本体的桥梁结构智能化本体模型建立流程如图 1 所示。

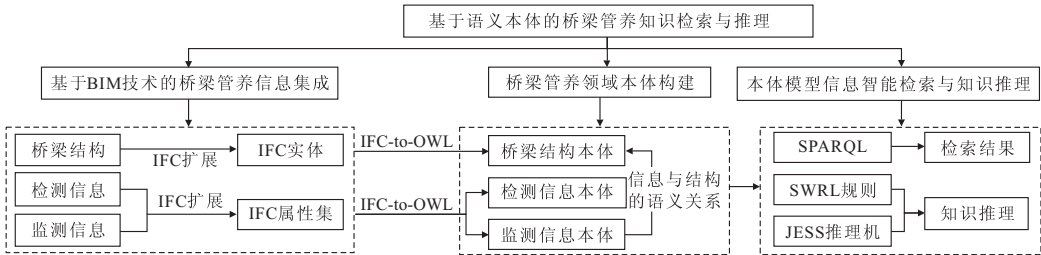


图 1 基于语义本体的桥梁结构智能化本体模型建立流程

1 桥梁运维管理知识图谱建模

桥梁运营阶段会产生检测、监测、日常养护、加固等数据,在信息化管理中需对这些数据信息进行多源异构集成,为便于数据的检索与推理应用,本文依托云南省某连续刚构桥,建立桥梁的管养数据知识图谱,构建智能化模型的基础。

1.1 工程概况

云南省某连续刚构桥为左右分离式,桥梁全长 411.8 m,主桥跨径为 98+180+98 m。主桥主梁采用单箱单室箱型截面,箱梁底板宽 6.5 m,顶板宽 12.5 m;箱梁根部高 10.8 m,跨中及边跨端部箱梁高 3.2 m。主桥下部结构采用空心双薄壁墩,横桥向宽 6.5 m,顺桥向厚 3.0 m,两岸采用重力式桥

台。桥梁立面与横断面如图 2,3 所示。

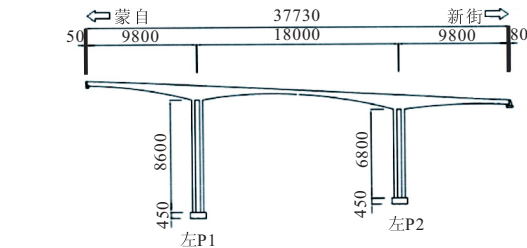


图 2 桥梁立面/cm

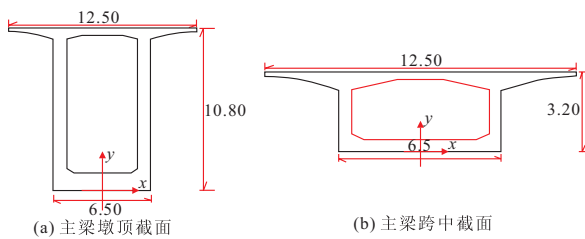


图 3 主梁横断面/m

1.2 基于 IFC 的桥梁养护框架

BIM 模型可实现对模型信息的集成展示,IFC 标准作为 BIM 模型中的模型信息交互方式,用以定义 BIM 模型信息的交互标准。

桥梁管养信息作为养护决策的重要依据可分为检测信息、监测信息两部分,桥梁结构与管养信息应实现一对多的映射关系,而知识图谱中对信息定义要求为一条信息对应一个结构单元,因此,需在 IFC 标准框架下对连续刚构桥构件类型、构件连接关系、构件管养属性进行定义。

(1) 构件类型定义

根据文献[18,19]对连续刚构桥的结构划分方法,将桥梁 BIM 构件库分为 4 个层次:1) 桥梁类型;2) 结构部件;3) 结构构件,即组成结构部件的元素;4) 结构单元,即组成结构构件的元素,为桥梁管养的最小对象。参考 IFC 在建筑领域的结构定义,对桥梁结构进行定义,如图 4 所示。在 IfcSpatialStructureElement 的子类中添加 IfcBridge 和 IfcBridgePart 定义桥梁的结构类型和桥梁的结构部件;在 IfcCivilElement 中添加子类 IfcBridgeElement 定义桥梁的结构构件类型,并在该新增实体中添加连续刚构桥的构件类型,包括主梁节段 IfcGirderSegment、横隔板 IfcDiaphragm、桥墩 IfcPier、桥台 IfcAbutment、伸缩缝 IfcExpansionJoint;在 IfcElementComponent 中添加 IfcBridgeComponent 定义桥梁的最小结构单元,如主梁中的顶板 IfcTopSlab、底板 IfcSoleplate、腹板 IfcWeb、齿块 IfcTrussplate 等结构单元。

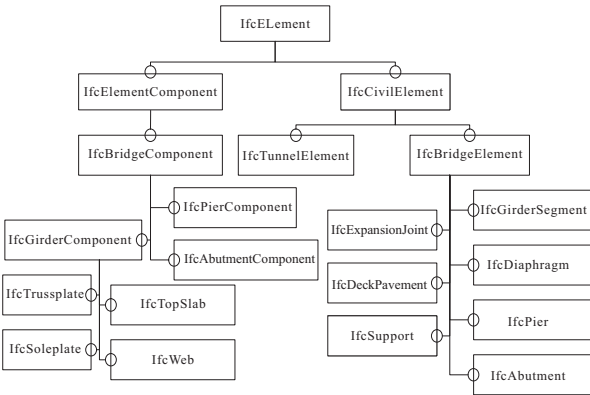


图 4 桥梁结构 G-EXPRESS 图

(2) 构件关系定义

根据文献[20],引用 IfcRelContainedInSpatialStructure 和 IfcRelAggregates 对桥梁构件的空间结构关系和组成关系进行定义。IfcBridgeComponent 中元素组成 IfcBridgeElement 中构件,IfcBridgeElement 中构件在空间中组成 IfcBridgePart 及 IfcBridge。桥梁由多个桥梁部分 IfcBridgePart

在空间中构成,每个桥梁部分由各类桥梁构件 IfcBridgeElement 构成,其中的梁体节段 IfcGirderSegment 又由多个结构单元 IfcGirderComponent 组成,组成关系如图 5 所示。

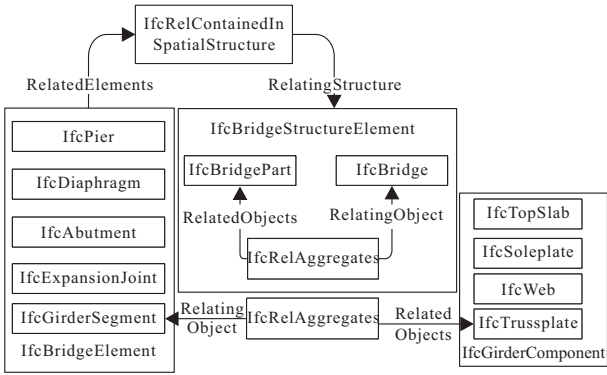


图 5 桥梁构件结构组成关系图示

(3) 构件属性定义

IFC 中既有的属性内容无法满足桥梁在管养阶段的要求,需重新定义管养阶段特有的属性集,从而满足桥梁在管养阶段的信息需求,扩展后的属性集通过 IfcRelDefines 关联至实体,如表 1 示。IFC 中对构件赋予扩展属性集已有定义,本文不做详述。

1.3 IFC-OWL 的信息转换

IFC 标准文件采用 EXPRESS 语言格式描述信息,且利用 XML 数据格式描述数据内容,而 OWL 语言也是基于 XML 数据格式进行存储的。基于这一特性,可构建 IFC 到 OWL 的数据转换方式,将 BIM 模型的信息转换为可构建知识图谱的信息格式。Pauwels 等^[21]提出了一种 EXPRESS 到 OWL 的转换模式,该模式转换的 OWL 本体数据可实现数据的重用和查询、推理。根据该转换模式,对 IFC 中的实体类型和属性关系进行转换,以 IfcGirderSegment 实体为例,其 EXPRESS 表达如下:

```
ENTITY IfcGirderSegment
SUBTYPE OF ( IfcBridgeElement );
PredefinedType: OPTIONAL IfcGirderSegment-
TypeEnum;
WHERE
```

```
CorrectPredefiendType: NOT ( EXISTS ( Prede-
finedType ) ) OR ( PredefiendType <> IfcGirderSEG-
mentTypeEnum. USERDEFIEND ) OR ( Predefiend
Type = IfcGirderSEgmentTypeEnum.USERDEFIEND )
AND EXISTS( SELF\IfcObject.ObjectType ) );
CorrectTypeAssigned: ( SIZEOF( IsTypeBy ) = 0 ) OR
( ' IFCSHAREDBLDGELEMENTS.IFCGIRDERSEG-
```

表 1 IFC 构件的管养属性集定义

属性集名称	属性名称	适用对象	数据类型	说明
	Name		IfcLabel	构件名称
Pset_BridgeCommon (基础信息属性集)	Information_Range	IfcBridge, Element	TypePropertyEnumeratedValue	构件信息等级
	Evaluation_Score		TypePropertySingleValue	构件评定分数
	Operation_Unit		IfcLabel	管养单位
Pset_Bridge Detection (检测信息属性集)	Concrete_Crack	IfcGirder, Segment, IfcBridge, Component	TypePropertyEnumeratedValue	构件裂缝标度评定结果
	Structure_Damage		TypePropertyEnumeratedValue	构件破损标度评定结果
	Steel_Corrosion		TypePropertyEnumeratedValue	构件钢筋锈蚀评定结果
	Concrete_Spall		TypePropertyEnumeratedValue	混凝土破落评定结果
	Structural_Strengh		TypePropertyEnumeratedValue	混凝土强度评定结果
	Structural_Deformation		TypePropertyEnumeratedValue	构件变形评定结果
	Vibration Frequency		TypePropertySingleValue	结构振动频率
Pset_Bridge Monitoring (监测信息属性集)	WindSpeed	IfcGirder, Segment	TypePropertySingleValue	风速
	Vehicle Loads		TypePropertySingleValue	车辆荷载
	Structural Stress	IfcGirder, Segment	TypePropertySingleValue	关键截面应力值
	Annual Temperature Difference		TypePropertySingleValue	构件年温差
	Humidity Average		TypePropertySingleValue	平均湿度
	Deflection	IfcGirder, Segment	TypePropertySingleValue	主梁挠度值

MENTTYPE' IN TYPEOF (SELF \ IfcObject. Is-
TypedBy[1].RelatingType))) ;
END_ENTITY;

转换后 IfcGirderSegment 的 OWL 表达式如下:

```
<owl:Class rdf:ID="IfcGirderSegment">  
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="IfcBridgeEle-  
ment">  
  <owl:Restriction>  
    <owl:OnProperty rdf:resource="#Pre-  
definedType"/>  
    <owl:allValuesFrom rdf:resource="#If-  
cBridgeGirderTypeEnum"/>  
    <owl:cardinality rdf:datatype="xsd:non-  
NegativeInteger">1</owl:cardinality>  
  </owl:Restriction>  
</rdfs:SubClassOf>  
</owl:Class>
```

通过构建 IFC-OWL 的映射框架,并给出梁体节段 IfcGirderSegment 的映射结果,验证了在 IFC-OWL 映射过程中信息转换的完整性,为建立桥梁管养知识图谱提供了可靠的数据来源。

2 知识图谱构建

基于 1.2 节转换得到的桥梁管养信息的 OWL 表达格式,将知识图谱分为三类本体:(1)桥梁结

构本体;(2)检测信息本体;(3)监测信息本体。三类本体之间相互关联,结构本体作为监测信息和检测信息的载体,同时检测信息及监测信息也反应结构在某一时间段内或时间节点的结构运营状态。知识图谱对桥梁结构和检测、监测信息构建语义层面的联系,实现对桥梁管养信息的智能化表达,从知识图谱中发掘桥梁管养知识,对桥梁运营中的养护决策提供有效的意见支持。图 6 为桥梁管养的知识图谱示意图,图中表达了知识图谱中桥梁结构、检测信息、监测信息和基本信息在语义层面的关联。结构单元 BridgeElement 作为结构本体中的最小信息承载单元,能够反应传感器监测到的数据信息 BridgeAlignmet、检测中结构所具有的危害 DiseaseType。

以连续刚构桥为例对知识图谱中三类本体的子类进行细化完善,使得知识图谱在对桥梁管养知识的表达上更加准确。

2.1 桥梁结构本体

连续刚构桥结构本体分为结构部分、结构构件、结构单元三个层次。结构部分可分解为上部结构、下部结构、桥面系、支座系统;结构构件根据所属的结构部分不同,分为上部结构构件、下部结构构件、桥面系构件。结构构件按照管养需求可分解到结构单元层次,结构单元为桥梁管养中最小粒度的结构本体。将连续刚构桥的结构术语概念化,构建连续刚构桥结构本体的类、对象类型属性、数据类型属性。将对象类型属性关联到对应

IFC 标准中的定义,需在逻辑层面上进行相关检验。语义本体中对知识图谱在语义层面及语法层面进行一致性检验,即在语法上对本体的描述符合 OWL 语法规则;在语义上满足逻辑基础的要求。本体中已有逻辑公理的定义,表 2 为本体的逻辑公理集。

表 2 领域本体的逻辑公理集

公理类型	逻辑关系
Axiom1(公理 1)	$\text{SubClassOf}(C_1, C_2) \wedge \text{SubClassOf}(C_2, C_3) \rightarrow \text{SubClassOf}(C_1, C_3)$
Axiom2(公理 2)	$\text{SubClassOf}(C_1, C_2) \wedge \dots \wedge \text{SubClassOf}(C_n, C_1) = \text{False}$
Axiom3(公理 3)	$\text{UnionOfRelation}(C_1, C_2) \wedge \text{UnionOfRelation}(C_2, C_3) \rightarrow \text{UnionOfRelation}(C_1, C_3)$
Axiom4(公理 4)	$\text{UnionOfRelation}(C_1, C_2) \wedge \dots \wedge \text{UnionOfRelation}(C_n, C_1) = \text{False}$
Axiom5(公理 5)	$\text{EquivalentClass}(C_1, C_2) \wedge \text{EquivalentClass}(C_2, C_3) \rightarrow \text{EquivalentClass}(C_1, C_3)$
Axiom6(公理 6)	$\text{SubClassOf}(C_1, C_2) \wedge \text{EquivalentClass}(C_2, C_3) \rightarrow \text{SubClassOf}(C_1, C_3)$
Axiom7(公理 7)	$\text{SubClassOf}(C_1, C_3) \wedge \text{EquivalentClass}(C_1, C_2) \rightarrow \text{SubClassOf}(C_2, C_3)$
Axiom8(公理 8)	$\text{DisjointWith}(C_1, C_2) \wedge (\text{SubClassOf}(C_3, C_1) \vee \text{EquivalentClass}(C_3, C_1)) \wedge (\text{SubClassOf}(C_4, C_2) \vee \text{EquivalentClass}(C_4, C_2)) \rightarrow \text{DisjointWith}(C_3, C_4)$

注:(1)公理 1 表示子类关系的传递性, C_3 为 C_2 的子类, C_2 为 C_1 的子类,那么 C_3 为 C_1 的子类;(2)公理 2 表示子类不循环,假设 C_n 为 C_1 的子类,那么 C_1 为 C_n 的子类这一结论是错误的;(3)公理 3 表示“整体-部分”关系具有传递性, C_3 为 C_2 的部分, C_2 为 C_1 的部分,那么 C_3 为 C_1 的部分;(4)公理 4 表示“整体-部分”关系不循环,假设 C_n 为 C_1 的部分,那么 C_1 为 C_n 的部分这一结论是错误的;(5)公理 5 表示等价关系的传递性, C_3 与 C_2 等价, C_2 与 C_1 等价,那么 C_3 与 C_1 等价;(6)公理 6 与公理 7 表示等价概念具有相同特性,等价的概念具有相同子类与父类;(7)公理 8 表示两个概念互斥,那么他们的子概念或等价概念也同样互斥

对领域本体的一致性检验,实质是对本体模型中的 Tbox(术语库)进行语法和语义的一致性检验,即对构建的本体类进行一致性检验。为了验证桥梁管养领域本体的语义正确性,本节以表 2 中的语义逻辑公理为检验原则,利用 Protégé 软件中自带的 Pellet 推理机对桥梁管养领域本体进行一致性检验。图 10 为 Pellet 推理机对本文构建的桥梁管养领域本体进行了一致性检验,结果说明该领域本体模型符合语义一致性和语法一致性要求。

3.2 知识图谱应用

桥梁管养知识图谱将桥梁管养中所需的检测

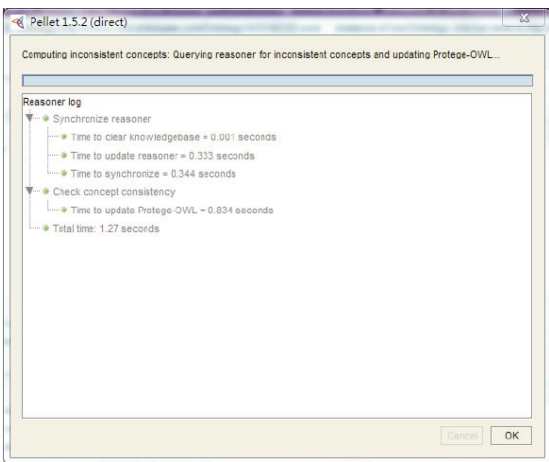


图 10 桥梁领域本体通过一致性检测

信息、监测信息通过语义层面关联,使得计算机能够从桥梁管养信息中发掘知识,在检索、预警、评估等智能化模块工作对桥梁管养知识进行应用。结合实际工程场景,实现对桥梁管养知识图谱在智能检索与评估模块中的应用。

(1)智能检索

利用 SPARQL 检索语言定义信息的关联模式,检索符合用户的目标信息。SPARQL 语言定义 RDF 语句的描述模式,在知识图谱中检索符合描述模式的语义关联信息,并展示检索的目标信息及关联信息。

在 Protégé 软件环境中利用 SPARQL 语言对构件技术状况评定等级的检索结果。定义桥梁管养领域本体为桥梁构件技术状况评定结果的语义检索范围(PREFIX: http://www.semanticweb.org/cqjtu/ontologies/bridge_maintenance#),检索目标信息为构件?Strucutre、技术状况评定结果?RANGE、评定等级?value、评定日期?date,定义 SPARQL 检索中的 RDF 语句模式如下:

```
SELECT ?Structure ?RANGE?value?date
WHERE { ? Structure: hasTERange ?RANGE.
?RANGE:hasValue?value.?RANGE:hasdate ?date }
```

该语句模式表示在桥梁管养领域本体中检索具有以下语义关系的实例:具有技术状况评定结果?RANGE 的桥梁构件?Structure,显示评定结果的等级数值?value;评定的日期?date。根据 RDF 语句检索模式的输出结果如图 11 所示。

(2)智能评估

利用 SWRL 语言自定义逻辑推理规则,然后在 Protégé 环境中利用 Pellet 推理机推理桥梁管养知识图谱中的相关信息。根据文献[18]中对混凝土构件强度等级评定规则,定义混凝土强度评定的 SWRL 规则,如表 3 所示。

推理。

(1)利用 IFC 标准对桥梁结构和管养信息进行了表达,根据 IFC-OWL 的转换模式实现了桥梁管养信息从 BIM 模型到本体模型的转换,并基于转换内容构建了桥梁管养信息的知识图谱。

(2)依托工程应用,基于 SPARQL 检索语言实现了对模型的验证,通过语义关系检索,验证了检索信息的正确性;并利用 SWRL 语言和 JESS 推理机,在 Protégé 软件环境中推理桥梁结构混凝土强度等级,并通过桥梁专家经验及领域共识验证了推理结果的正确性。

(3)本文提出的基于语义本体的桥梁结构智能化检索与知识推理,为桥梁管养领域的智能化发展提供了新思路,具有一定的参考价值和实际工程意义。

参 考 文 献

[1] 崔小芳. 基于 BIM 的高速公路桥梁养护综合管理技术研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 253-257.

[2] 潘永杰, 魏乾坤, 赵欣欣, 等. 铁路桥梁病害库和管养知识库的构建及应用研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(1): 23-27.

[3] 李成涛, 章世祥. 基于 BIM 技术的桥梁病害信息三维可视化研究[J]. 公路, 2017, (1): 76-80.

[4] 许强强, 韩春华, 卢玉韬. BIM 技术在桥梁监测中的应用与探索[J]. 公路, 2018, (1): 232-236.

[5] 李锦华. 基于 IFC 标准的 BIM 技术对桥梁健康监测信息的表达[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, (8): 190-193.

[6] 王欢, 熊峰, 张云, 等. 基于 BIM 的桥梁运维管理系统研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(5): 71-75.

[7] 周洪波, 施平望, 邓雪原. 基于 IFC 标准的 BIM 构件库研究[J]. 图学学报, 2017, 38(4): 589-595.

[8] 武斌, 谭卓英, 张颂娟, 等. 基于 BIM 的在役大跨度桥梁智能化养护管理技术[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016, 28(6): 497-502.

[9] 董莉莉, 谢月彬, 王君峰. 用于运维的桥梁 BIM 模型交付方案——以港澳跨海大桥项目为例[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(6): 45-50.

[10] Lee S K, Kim K R, Yu J H. BIM and ontology-based approach for building cost estimation[J]. Automation in Construction, 2014, 41: 96-105.

[11] Terkaj W, Šojić A. Ontology-based representation of IFC EXPRESS rules: an enhancement of the ifcOWL ontology[J]. Automation in Construction, 2015, 57: 188-201.

[12] Liu K, El-Gohary N. Ontology-based sequence labeling for automated information extraction for supporting bridge data analytics[J]. Procedia Engineering, 2016, 145: 504-510.

[13] Niknam M, Karshenas S. A shared ontology approach to semantic representation of BIM data[J]. Automation in Construction, 2017, 80: 22-36.

[14] 李文雄, 闫茂德, 王建伟. 智能交通系统本体数据集成[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 3038-3045.

[15] 吴蕴泽. 基于 BIM 的建设工程文档上下文信息检索研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[16] 陈贵涛. 基于 BIM 和本体的建筑运维管理研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(2): 29-34.

[17] Ding L Y, Zhong B T, Wu S, et al. Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology[J]. Safety Science, 2016, 87: 202-213.

[18] JTG/T H21—2011, 公路桥梁技术状况评定标准[S].

[19] 张吕伟, 蒋力检. 中国市政设计行业 BIM 实施指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[20] 艾山丁, 毛宁, 贺欣. 基于 IFC4 扩展的轨道 BIM 数据存储标准研究[J]. 铁路技术创新, 2017, (4): 48-54.

[21] Pauwels P, Terkaj W. EXPRESS to OWL for construction industry: towards a recommendable and usable ifcOWL ontology[J]. Automation in Construction, 2016, 63: 100-133.