

基于语义网的电网工程 BIM 模型 完备性审查方法

潘泽宇, 史健勇, 姜柳

(上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 工程各个阶段项目参与各方之间的信息供给和信息需求平衡, 是建筑信息模型(BIM)技术在项目全生命周期管理最大程度发挥作用的重要保证。在交付需求标准化方面, 尽管我国从国家到地方再到企业相继出台了诸多标准, 但尚缺少高效的完备性审查手段以保证交付双方及时有效进行项目信息交付。此外, 当前针对各阶段交付模型信息审查的常规手段是人工校验和机器硬编码审核, 二者分别存在人工成本高且容易漏判和灵活性不足, 且更新困难的问题。考虑到语义网概念及相关技术在知识组织和管理方面的技术优势和应用情况, 结合电网工程现有数字化交付标准成果, 提出一种基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法: 利用 SKOS 建立完备性审查本体、审查对象模型本体; 对交付标准中审查知识和实际模型信息进行图谱化; 二者通过特定关系进行关联, 并在此基础上通过 SPARQL 检索语言实现自动化完备审查。最后通过案例证明此方法的有效性, 并对其他领域工程项目交付完备性审查能够产生借鉴价值。

关 键 词: 建筑信息模型; 模型完备性审查; 语义网; 工业基础类; 建筑信息模型交付标准

中图分类号: TP 399

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2023051021

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2023)05-1021-13

Semantic web-based BIM model integrity checking approach for power grid projects

PAN Ze-yu, SHI Jian-yong, JIANG Liu

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Ensuring a balance between information supply and information demand among all stakeholders at each project stage is crucial for harnessing the full potential of building information modeling technology in project life cycle management. While many standards have been established at national, local, and corporate levels to standardize delivery requirements, there remains a lack of efficient model integrity checking approach to facilitate participants to deliver project information in a timely and effective manner. Currently, the conventional means of checking model information for each stage of delivery was manual and machine hard-coded. However, they suffered from high labor costs, missed judgments, and limited flexibility for updates. Considering the technical advantages and applications of the semantic web concept and related technologies in knowledge organization and management, and combining the

收稿日期: 2023-03-02; 定稿日期: 2023-06-05

Received: 2 March, 2023; Finalized: 5 June, 2023

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5200-202156486A-0-5-ZN)

Foundation items: The Science and Technology Project of State Grid (China) (5200-202156486A-0-5-ZN)

第一作者: 潘泽宇(1996-), 男, 博士研究生。主要研究方向为城市基础设施数字孪生关键技术研究。E-mail: panzeyu@sjtu.edu.cn

First author: PAN Ze-yu (1996-), PhD candidate. His main research interest covers key technologies for infrastructure digital twin.

E-mail: panzeyu@sjtu.edu.cn

通信作者: 史健勇(1975-), 男, 副教授, 博士。主要研究方向为智慧城市数字孪生与土木工程领域知识化信息化。E-mail: shijy@sjtu.edu.cn

Corresponding author: SHI Jian-yong (1975-), associate professor, Ph.D. His main research interests cover smart city digital twin and information and knowledge management of civil engineering. E-mail: shijy@sjtu.edu.cn

results of existing digital delivery standards for power grid engineering, a semantic web-based BIM model integrity checking approach was proposed. It was composed of three parts: 1) establishing integrity checking ontology and model to-be-checked ontology using SKOS; 2) instantiating knowledge in the delivery standard and actual model information to the knowledge graph; 3) correlating the two through specific relationships and automating integrity checking on this basis through SPARQL. Finally, the validity of this method was demonstrated through case studies, showcasing its applicability in engineering project delivery integrity checking in other fields.

Keywords: building information model; model integrity checking; semantic web; industry foundation classes; building information model delivery standard

建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术^[1],自提出至今一直受到广泛关注。通过对建筑全生命周期中产生的各类建筑信息进行有效的数字化集成管理,使其在诸多传统工程信息密集的行业得以发展并展现出其强大的技术优势,特别在工程成本控制^[2]、进度管理^[3-4]、合规检查^[5-8]等知识密集的阶段应用效果显著。

BIM 自动化审查一直是 BIM 技术研究的热门话题。为了更好地区分审查内容, SOLIHIN 和 EASTMAN^[9]将 BIM 自动化审查任务分为以下几个部分:①模型文件的数据语法检查;②合规检查;③个性化要求检查;④施工可行性检查;⑤风险响应能力检查;⑥竣工模型对比审查;⑦信息完备性审查。其中针对各类设计、施工规范的强制性条款的合规检查研究目前受到国内外学者的广泛关注,张吉松等^[10]针对《混凝土结构设计规范》进行的 BIM 结构设计审查方法研究;那扎尔·木拉提别克等^[11-12]针对《建筑抗震设计规范》进行的建筑不规则类型审查;慕尼黑理工的 HÄUBLER 等^[13]通过集成 BIM-BPMN-DMN 建立了一种铁路设计合规审查方法。然而目前合规审查研究大多存在一个隐含假设,即待审查模型是完备的,且能够提供后续合规审查研究中所需的各项信息。为了保证包括合规审查在内的交付模型数据的正常应用,势必需要在正式交付使用之前对交付模型进行信息完备性审查。

从概念上看, BIM 可以作为建筑工程项目全生命周期各个阶段所产生的信息的统一载体,以便在各项目参与者之间进行项目信息的交互。信息的交互,本质上是信息提供者与信息消化者围绕信息进行的供需活动。为了提升信息交互的效率,信息交互参与双方可以制定相应的协议以明确交互内容的载体、种类、表达形式、精细度等交互需求,如从国家到地方再到企业层面的一系列 BIM 交付标准^[14-17]。BIM 交付标准中一般规定

了交付模型文件中所需的模型要素对象类型、对象属性、命名规则、建模深度等信息。然而目前针对交付模型的信息完备性仍缺少有效的自动化审查手段,及充分利用现有交付标准或进一步适应交付标准的更新内容。

信息完备性则是一个相对概念,反映了信息提供者提供了多少消化者所需的信息。针对不同的应用场景,完备性可能有所差异。对于电网工程专业来说,进行 BIM 模型完备性审查的难点反映在 3 个方面:①尽管工业基础类(industry foundation classes, IFC)标准是目前公认的可用于建筑全生命周期信息交互的中间数据标准^[18],但目前最新的 IFC 标准尚未能完全涵盖电网工程项目中所涉及的专业设施设备。这些专业设施设备在特定的建模软件中往往采用自定义族的形式进行定义,如何有效地识别这些专业设施设备以及提取其建筑设计信息,是进行 BIM 模型完备性审查的重要基础。②信息完备性审查要求通常编制成交付标准,而如何让计算机理解这些人类自然语言书写而成的完备性审查规则是重难点之一。③IFC 标准与交付标准之间存在知识异构:IFC 标准中对于专业设施设备实体的描述与交付标准中所使用的分类逻辑存在差异;IFC 标准中缺少交付标准中对于专业设施设备的术语。

语义网是解决上述问题的综合方案之一。其被设想为一个语义网络,对不同的语义领域可以使用有向标记图来表示和组合^[19]。该有向标记图中的每个节点对应一个领域概念或对象实例,每条边则表示概念或对象之间的逻辑关系。语义网将信息统一表示成单一的有向标记图的形式,在适合人类理解的同时能够进一步提升领域知识的机器可读性,提高自动化应用的重用能力^[20]。

语义网技术在发展和演化过程中诞生了 2 个重要的概念,即本体(Ontology)和知识图谱(knowledge graph, KG)。本体一词原为哲学概念,

本义为关于存在的性质或存在的事物种类的特定理论, 而后因语义网概念的提出和发展, 被吸纳成为语义网技术的重要组成部分, 成为了近年信息科学届最热门的词汇之一。本体现含义可引申为对于某个特定领域相关的对象分类、对象属性和对象间关系领域知识的抽象表达^[21], 常视作更加复杂且规范化的领域术语体系(Vocabulary), 可看作知识图谱的数据模式; 知识图谱则是一种可用来描述现实世界中物体、事件、情况、概念等元素以及相互之间关系的网络结构。该术语由 Google 于 2012 年正式提出。在实际应用过程中, W3C 提出并整合了一系列标准, 组成了语义网技术体系, 以支撑本体和知识图谱的知识存储、知识编码、知识检索和知识推理。

在 BIM 模型完备性审查的过程中, 可以利用语义网技术, 采用统一的知识结构(即本体)和知识图谱表示 BIM 模型设计信息和完备性审查规则, 提高相应知识的机器可读性和检索能力。同时, 本体的概念表征和推理能力可以丰富建筑实体的语义, 补全 BIM 模型中用于完备性审查的相关信息。

综上所述, 本文提出基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法, 该方法包括完备性审查图谱生成、审查对象模型图谱生成和审查执行 3 个阶段。首先, 以《电网工程数字化交付标准》为审查依据, 构建完备性审查本体, 并将交付标准的领域知识和审查内容实例化形成完备性审查知识图谱; 其次, 针对完备性审查需要, 简化 IFC

中的模型信息存储方式, 构建审查对象模型本体, 进而不同的交付模型可依此数据结构抽取审查内容进行实例化, 生成对应的审查对象知识图谱; 最后, 建立对应的完备性审查 SPARQL 规则, 通过语义推理执行审查过程, 反馈审查结果。

1 方法

图 1 展示了基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法的逻辑框架。该框架可分为 3 个部分: 即完备性审查图谱生成、审查对象模型图谱生成和审查执行。

首先, 针对电网工程数字化交付标准定义的交付审查要求, 建立完备性审查本体, 并从中提取出电网工程项目要素分类编码系统、属性需求以及命名规则信息形成完备性审查 KG。其次, 针对由电网工程 BIM 建模软件导出的交付模型的 IFC 文件, 通过审查对象抽取生成审查对象模型 KG。完备性审查 KG 和审查对象模型 KG 均基于资源描述框架(resource definition framework, RDF)进行表示, 并利用 RDF 数据库 Ontotext GraphDB 进行存储。RDF 是一种能够描述信息网络的有向标签图数据格式, 借助 SPARQL 查询语言可以实现 RDF 数据的检索、过滤、生成结果子图。因此, 在审查执行阶段, 可以通过特定的 SPARQL 语句抽取审查对象的交付内容以及其对应类型的交付需求, 进一步比对校验确定交付需求满足与否, 最终各个审查对象的审查结果经过汇集后以结构化的形式进行输出。

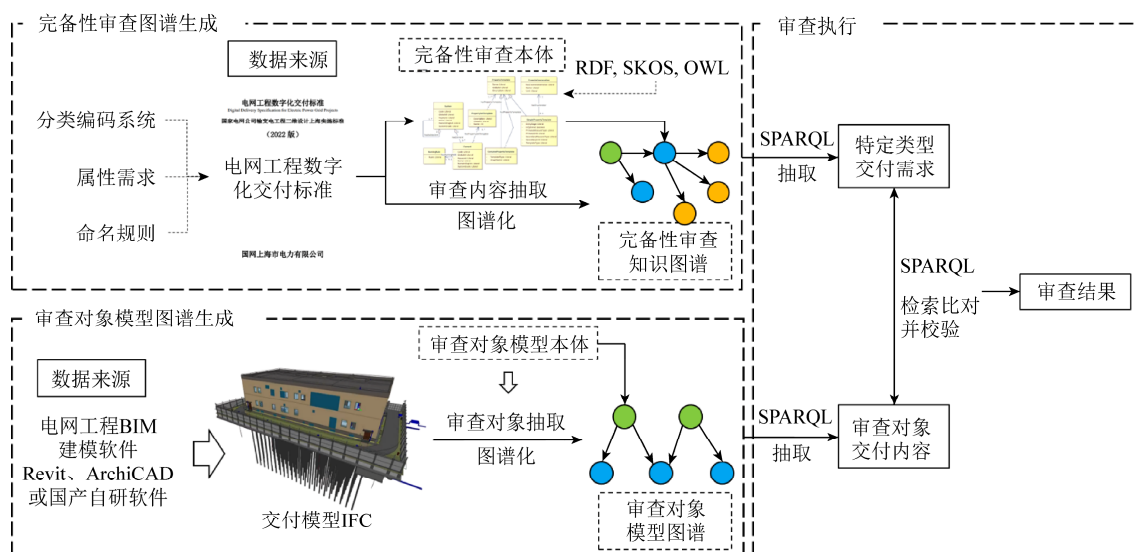


图 1 基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法

Fig. 1 Semantic web-based BIM model integrity checking approach for power grid project

其中,完备性审查本体和审查对象模型本体都是 BIM 模型完备性审查过程中重要的领域知识。为了保证审查方法的扩展性、重用性以及与现有知识组织系统(knowledge organization system, KOS)的集成能力,本研究在简单知识组织系统(simple knowledge organization system, SKOS)技术标准的基础上进行本体开发。SKOS 是万维网联盟(World Wide Web Consortium, W3C)提出的一种用于描述半正式知识组织系统的 RDF 本体结构,面向的 KOS 包括词库、术语表、分类系统等。SKOS 的初衷是提供一种低成本的将现有 KOS 迁移至语义网的方案,且不改变原有 KOS 的使用环境,而通过基于 SKOS 使得相应的 KOS 能够在更加开放、共享的环境中被重用。

1.1 完备性审查图谱生成

1.1.1 构建完备性审查本体

《电网工程数字化交付标准》是国网上海市电力公司联合国网上海电力设计有限公司起草并发布的国家电网公司输变电工程三维设计上海实施标准^[17],经历了 2016 版、2018 版、2022 版 3 个版本的更新迭代。编制该标准的目的是为了促进电网三维数字化模型在电网规划、设计、建设、运行和管理等领域的应用,推进电网三维数字化模型数据的规范化,通过各阶段数据的衔接及共享,实现电网工程的全寿命周期信息的纵深管理。

该标准在《GB/T 51301-2018 建筑信息模型设计交付标准》^[14]的基础上,结合电网工程专业特点,对电网工程数字化交付所涉及的电气专业设施设备建模对象进行系统分类,并明确设施设备建模对象所需的属性信息、命名规则以及建模深度要求。该标准适用于输变电工程初步设计、施工图设计和竣工图设计阶段的三维设计成果的交付。其中与交付模型完备审查密切相关的工程要素分类、属性定义以及命名规则:分类系统的建立有助于进行项目清单管理、造价管控、标准化设备和项目模板开发,同时分类系统也作为属性需求、命名规则等数据完备性需求的载体;属性需求、命名规则是生命周期各阶段交付过程中电网工程 BIM 模型完备性审查的重要检查内容,其中属性需求主要反映交付阶段应用所需的属性数据,命名规则则是电网工程项目标准化的统一需求。

进一步地,在 SKOS 的基础上,根据交付标准中定义的审查需求可以确定电网工程完备性审查本体(power grid ontology, PGO)。PGO 的类图表示如图 2 所示,可分为 3 个部分,即分类系统、命名规则和属性需求,命名规则与属性需求可以分别通过 hasNamingRule 和 hasPropertySetTemplate 对象属性与分类系统进行关联,二者还有共同的逆向属性 ApplicableElement。

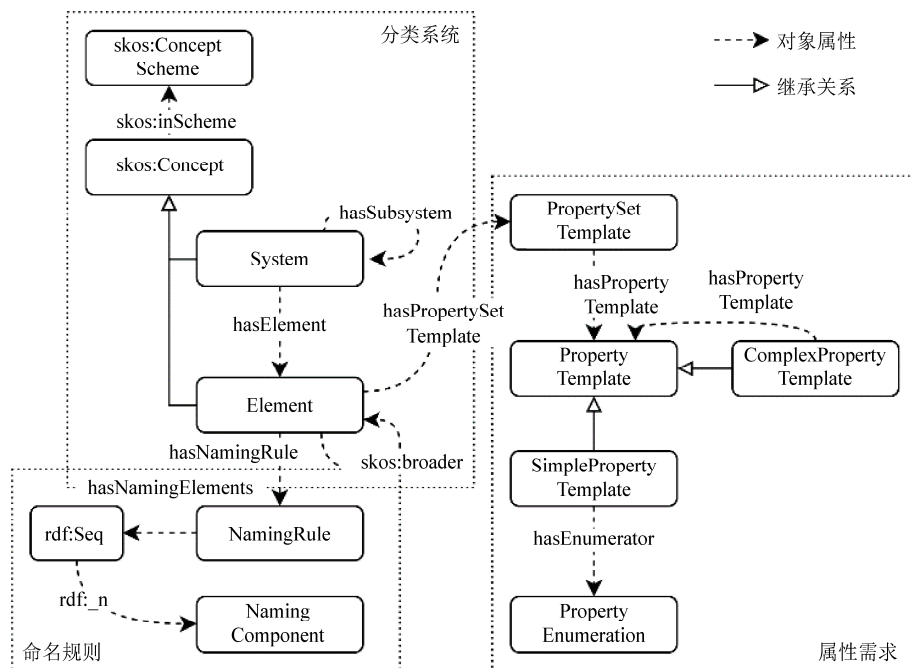


图 2 电网工程模型完备性审查本体(PGO)

Fig. 2 Ontology of model integrity check for power grid engineering model

SKOS 可以在不改变其他知识组织系统的前提下提供知识组织的通用基本元素,其已经在SKOS中明确定义,因而不存在因专业领域、地区约定、语言差异而产生歧义的问题。因此使用这些元素一方面便于提升原有KOS的逻辑性和可解释性,另一方面也有助于将原生KOS与其他领域KOS之间进行概念对齐。下面具体介绍PGO的3个方面以及其中用到的SKOS基本元素。

(1) 分类系统。

a. 类定义。

针对电网工程交付标准中隐含的分类系统信息并结合SKOS对于分类系统的描述,涉及的类包括:

- skos:ConceptSchema (指代当前知识系统);
- skos:Concept (指代领域术语概念);
- pgo:System (指代工程系统及子系统概念);
- pgo:Element (指代系统下属构件概念)。

b. 对象属性定义。

• skos:inScheme (将当前知识系统中的所有概念与当前知识系统关联);

- pgo:hasSubsystem (指代系统从属关系);
- pgo:hasElement (指代系统与构件之间的包含关系);

• skos:broader/skos:narrower (指代构件的概念扩展关系)。

c. 数据属性及注释属性定义。

概念的部分元数据可通过SKOS中定义的注释属性进行描述,包括:

- skos:prefLabel (默认标签);
- skos:definition (定义);
- skos:notation (编码);
- skos:example (示例)。

其他元数据则另外建立数据属性:

- pgo:Keyword (关键字);
- pgo:SystemGrade (系统分级);
- pgo:GUID (全局唯一标识符, Globally Unique Id)。

(2) 属性需求。

a. 类定义。

根据电网工程交付标准中的属性需求并结合IFC4标准中对属性集模板和属性模板的组织运用,涉及的类包括:

• pgo:PropertySetTemplate (指代属性需求分组,如变压器建设参数属性组);

• pgo:PropertyTemplate (指代具体属性需求,如变压器安装日期);

• pgo:SimplePropertyTemplate (指代简单属性需求)、pgo:ComplexPropertyTemplate (指代复合属性需求)继承 pgo:PropertyTemplate;

• pgo:Property Enumeration (适用属性为枚举值的情况)。

b. 对象属性定义。

• pgo:hasPropertyTemplate (描述属性需求分组或复合属性需求与属性需求的包含关系);

• pgo:hasEnumerator (描述属性需求与属性枚举之间的关联关系)。

c. 数据属性及注释属性定义。

与分类系统类似,属性需求分组和属性需求的部分元数据,可分别由SKOS中定义的注释属性描述:

- skos:prefLabel (默认标签);
- skos:definition (定义)。

其余与完备性审查有关的属性需求元数据,通过以下数据属性进行描述:

- pgo:GUID (全局唯一标识符);
- pgo:EntryPhase (应录入阶段);
- pgo:PrimaryMeasureType (度量类型);
- pgo:PrimaryUnit (度量单位);
- pgo:isOptional (必填与否);
- pgo:hasEnumerationValue (属性枚举值)。

(3) 命名规则。

a. 类定义。

根据电网工程交付标准中的命名规则,涉及的类包括:

- pgo:NamingRule (指代命名规则主体);
- pgo:NamingComponent (指代命名组成部分);
- rdf:Seq (队列,辅助组织命名组成部分)。

b. 对象属性定义。

电网工程数字化交付标准中的命名规则通常由一组关键词通过分隔符“_”的方式连接形成,如“类别关键字_电压等级(kV)_设备型号_生产厂家”。

• pgo:hasNamingElements (描述命名规则和命名组成队列之间的关联关系);

• rdf:_n (RDF默认的队列组织关系,命名组成部分和队列之间联系,其中n为自然数,代表队列中的元素顺序)。

c. 数据属性及注释属性定义。

命名相关元数据均采用 SKOS 中的基本元素表示:

- skos:example (示例);
- skos:definition (定义);
- skos:prefLabel (默认标签)。

1.1.2 实例化完备性审查知识图谱

在 PGO 的基础上, 通过抽取交付标准中的分类信息、属性需求以及命名规则进行实例化, 生成完备性审查 KG。

(1) 分类信息的实例化。由于电网工程专业的特殊性, 现有的工程要素分类系统, 如 IFC^[18,22]、BIM 分类和编码标准^[23]等, 不足以涵盖所有电气专业设施设备。因而, 电网工程数字化交付标准提供了一种电网工程系统组成划分原则, 将电网工程按照项目类型分为变电站工程、架空线路工程和电缆线路工程, 每项工程中均包含电气工程和土建工程, 所含设施设备根据所属系统特点可进一步划分为相应的子项。最终形成的分类系统为六级, 每一级系统分组或设备都定义了特定的关键字进行区分。

在电网工程系统组成划分原则的基础上, 为了提高分类系统的检索效率和鲁棒性, 提出电网

工程 BIM 要素的分类编码系统, 如图 3 所示。各级代码均采用数字顺序码, 用 01~99 表示。若未到此系统深度, 则将该级及以后的系统代码设置为空, 如电气一次(III 级)的编码为“10-10.10.10”, 开关柜电压互感器(VI)的编码则为“10-10.10.10.10.13.20”。

10-xx.xx.xx.xx.xx

I II III IV V VI
级 级 级 级 级 级
代 代 代 代 代 代
码 码 码 码 码 码

图 3 电网工程 BIM 要素分类编码规则

Fig. 3 Coding rule for the classification system of electrical engineering BIM

在此基础上, 首先将交付标准中的各系统及系统组成分类信息整理成“编码, 类别关键字, 类别中文, 系统分级, 类别英文”的表格形式, 每一行为分类实例, 见表 1; 其次, 解析表格并根据完备性审查本体中的分类系统概念定义依次进行实例化; 最后, 下级分类与上级分类的扩展关系或从属关系可以利用编码中系统深度的空置特点, 通过检索本级以前的编码所对应的系统或系统组件进行关联, 如前一级检索为空则进一步削减编码深度, 直至检索返回已有分类。

表 1 根据交付标准整理电网工程 BIM 分类信息表(部分)

Table 1 BIM classification information table of power grid project collated according to the delivery standard (partly)

编码	类型关键字	类别中文	系统分级	类别英文
10-10	TSE	变电站工程	1	Transformer substation engineering
10-10.10	EEG	电气工程	2	Electrical engineering
10-10.10.10	PEL	电气一次	3	Primary electrical engineering
10-10.10.10.10	PEE	一次设备	4	Primary electrical equipment
10-10.10.10.10.01	MTF	变压器	5	Transformer
10-10.10.10.10.01.10	MT	主变压器	6	Main transformer
10-10.10.10.10.01.20	ST	站用变压器	6	Station transformer

(2) 属性需求的实例化。交付标准中所定义的要素属性一般是出于交付模型进一步使用的数据交互需求。尽管 IFC 或三维建模软件通常会设置一部分预定义属性集, 但由于不同专业或不同项目的应用需求差异, 预设的属性集可能不能满足实际对建模要素的语义需求。

图 4 以电气一次设备变压器为例, 展示电网工程项目各阶段对此的交付属性要求, 包括国标编码、电力行业识别码等设备编码信息, 设计名称、设计单位、供给方等设计参数信息, 型号、种类、规格、额定电压、额定电流等设备参数信息, 以及管理参数、建设参数、管控参数信息。

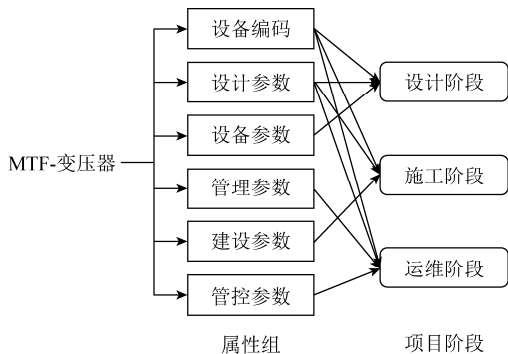


图 4 项目各阶段针对电气一次设备变压器的交付属性需求

Fig. 4 Property requirements for PEE transformer in each phase of the project

其中,《电网工程数字化交付标准》中允许的
属性值度量类型有 8 种: 文本型(Label), 数值型
(Number), 实数型(Real), 整数型(Integer), 标签型
(Identifier), 日期型(DateTime), 逻辑型(Boolean),
枚举型(EnumeratedValue)。录入阶段则为 5 种: 初
步设计、施工图设计、竣工图设计、施工过程管
控和运行。

在此基础上, 首先将交付标准中各系统组件
对应的属性需求分组和相关属性需求整理为“属
性需求分组, 属性需求, 度量类型, 度量单位,
允许枚举值, 必填与否, 应录入阶段”的表格形式,
见表 2; 其次, 解析表格并根据完备性审查本体中的
属性需求概念定义依次对属性需求和属性需求分
组进行实例化; 最后, 将属性需求分组与相关属
性需求以及适用的系统组件类型进行关联。

(3) 命名规则的实例化。电网工程交付标准中

针对每个系统组件类型定义了标准化的命名方
式。以电气一次设备气体绝缘全封闭组合设备为
例, 名称需要由“类别关键字_电压等级(kV)_设备
型号_生产厂家”的方式进行定义。大部分系统组
件的命名规则由四部分构成, 小部分为三部分和
五部分构成。但即便是大部分由四部分构成的命
名规则, 其命名组成部分的含义也一般存在差异,
在实际应用中, 不论是正向设计命名构件还是在
交付审查过程中对构件命名的检查均存在不小的
困难, 图谱化能够有效提高检索效率, 进而降低
相应任务的复杂度。

在此基础上, 首先将交付标准中各系统组件
对应的命名规则整理为表 3 的形式。其次, 解析
表格并根据完备性审查本体中的命名规则概念定
义依次进行实例化; 最后, 将命名规则与其适用
的系统组件类型进行关联。

表 2 变压器属性需求(设备参数分组部分)

Table 2 Property requirements of transformer (code group)

属性需求分组	属性需求	度量类型	度量单位	允许枚举值	必填与否	应录入阶段
设备参数	型号	文本型	-	-	是	施竣
设备参数	相数	列表型	-	单相 三相	是	初施竣
设备参数	高压侧额定电压	文本型	kV	-	是	初施竣
设备参数	交流/直流	列表型	-	AC DC	是	初施竣
设备参数	类型	列表型	-	MT ST	是	初施竣
设备参数	声压级	文本型	dB	-	是	初施竣
设备参数	重量	实数型	吨	-	是	施竣

表 3 接地电阻命名规则

Table 3 The naming rule of grounding resistance

顺序	接地电阻	
	命名组分标签	含义
1	类别关键字	GRT
2	电压等级(kV)	电压等级代码
3	设备型号	采用生产厂家型号, 型号中所有“_”“/”均采用“-”替代
4	生产厂家	采用设备供应商名称的英文字母大写缩写(不大于 4 位字母)
示例		
接地电阻_35 kV_设备型号_上海思源		
GRT_V30_(设备型号英文字母)_SHSY		

1.2 审查对象模型图谱生成

1.2.1 审查对象模型本体

审查对象模型本体(simple information model
ontology, SIMO)旨在结构化表示 BIM 模型文件中的
建筑对象属性和其他元数据。与完备性审查本
体类似, 审查对象模型本体同样利用 SKOS 的基
本元素对有关概念知识进行描述。SIMO 的类图表
示如图 5 所示。其中, isInstanceOf 是审查对象模

型本体和完备性审查本体之间关联的桥梁, 是
BIM 模型和完备性审查要求匹配的关键, 若存在
其他应用场景下的分类系统, 也依然可以通过
isInstanceOf 对象属性进行关联。

a. 类定义。

针对完备性审查需要以及 BIM 信息组织情
况, 这里涉及的类包括:

- simo:AssetInformationModel (指代基于交付

审查目的抽取信息后的子模型本身);

- `simo:ElementInstance` (指代待审查的系统构件);
- `simo:PropertySet` (指代系统构件相关的属性集定义);
- `simo:Property` (指代系统构件属性集包含的属性定义)。

b. 对象属性定义。

以 IFC 数据模式存储的工程项目信息尽管在存储效率上已被广为认可, 但针对特定应用如完备性审查需求, 系统构件相关的属性定义的检索路径过于复杂, 因此需进行简化, 保留部分对象属性:

- `simo:isComposedWith` (描述待审查模型与待审查对象之间的从属关系);
- `simo:hasPropertySet` (描述待审查对象与属性集定义之间的关联关系);
- `simo:hasProperty` (描述属性集定义与属性定义之间的包含关系)。

c. 数据属性及注释属性定义。

SIMO 涉及的数据属性及注释属性定义包括:

- `skos:prefLabel` (默认标签);
- `skos:altLabel` (别名);
- `pgo:GUID` (全局唯一标识符);
- `simo:Unit` (单位);
- `simo:PropertyValue` (属性值)。

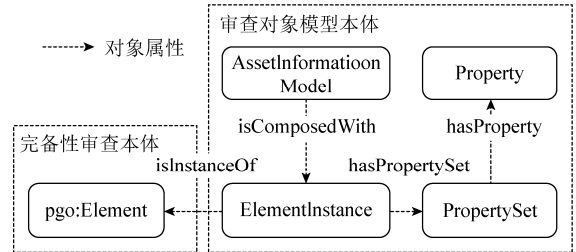


图 5 审查对象模型本体(SIMO)

Fig. 5 Ontology for the asset information model to be checked

1.2.2 审查对象抽取和图谱化

审查对象模型图谱生成需要从各阶段交付模型中抽取审查对象, 并根据 SIMO 进行实例化, 其流程如图 6 所示。其中抽取和图谱化的内容分为 3 个部分: 分类信息、类型属性和实例属性, 下面将分别进行介绍。

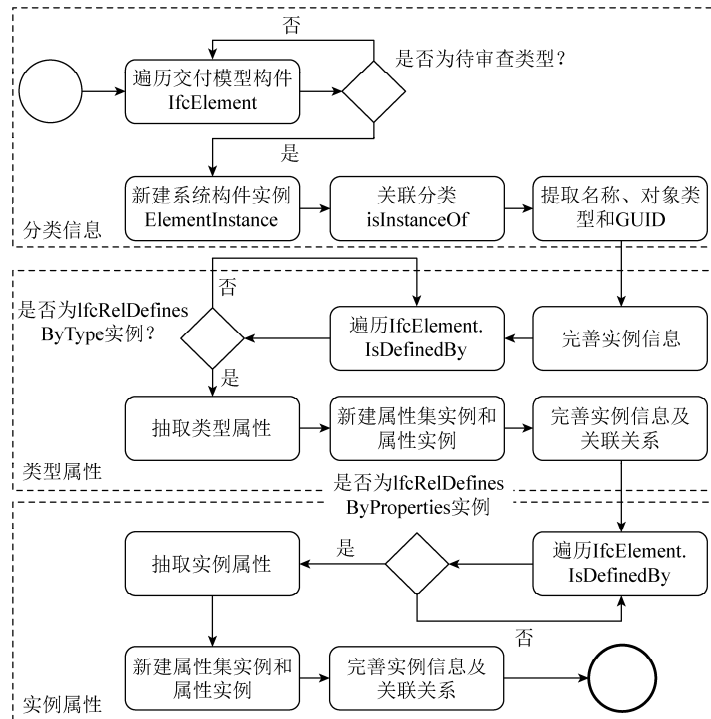


图 6 交付模型审查信息抽取与图谱化过程

Fig. 6 Information retrieval and graph instantiation for the integrity checking from the delivery model

(1) 分类信息的实例化。首先, 明确待审查的系统构件类型范围; 其次, 遍历交付模型中的所有 `IfcElement` 及其子类实例, 确定待审查系统构件类型

范围内的构件; 再次, 新建 `simo:ElementInstance` 实例, 进而将该实例与交付标准分类系统中的构件类型以 `simo:isInstanceOf` 绑定; 最后, 从交付模

型中提取该构件的名称、对象类型和 GUID 等元数据, 完善实例信息。

其中, 确定待审查系统构件类型范围内的构件, 需要借助分类映射方法。IFC 模式中的要素分类系统与审查规则中所使用的分类系统之间可能存在差异, 因此需要对相关的模型要素进行分类映射。本方法借助 `IfcRelAssociatesClassification` 定义将原有实例与任意分类系统中的类型进行关联, 该数据存储方式如图 7 所示。

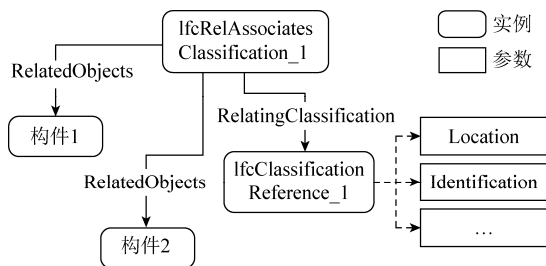


图 7 IFC 模式与其他分类系统的分类映射方法

Fig. 7 Category mapping for IFC schema and other classification systems

(2) 类型属性的实例化。首先, 在确定目标审查对象的基础上, 遍历其逆向属性 `isDefinedBy` 中的元素, 若为 `IfcRelDefinesBy Type` 实例, 则可通过 `RelatingType.HasPropertySets` 链路获取到相关属性集定义; 其次, 进一步遍历每个属性集下的 `HasProperties` 获得属性定义信息; 再次, 根据上述信息新建 `simo:PropertySet` 实例和 `simo:Property` 实例; 最后, 完善实例信息, 并利用 `simo:hasPropertySet` 和 `simo:hasProperty` 建立必要的关联关系。

(3) 实例属性的实例化。首先, 在确定目标审查对象的基础上, 遍历其逆向属性 `isDefinedBy` 中的元素, 若为 `IfcRelDefinesBy Properties` 实例, 则可通过 `RelatingPropertyDefinition` 正向属性获取到相关属性集定义; 后续过程与类型属性的实例化一致, 不再赘述。

需要强调的是, 选择顺序重复遍历而非同步遍历目标审查对象的逆向属性 `isDefinedBy` 中的元素, 是考虑到可能存在实例属性覆盖类型属性的情况, 避免产生信息错误。

生成的完备性审查图谱和审查对象模型图谱中的有关实例通过 `simo:isInstanceOf` 对象属性显式关联起来, 相应地使得审查对象交付内容与命名规则、属性需求在内的审查内容之间产生联系, 如图 8 所示, 为后续审查执行的 SPARQL 检索提供条件。

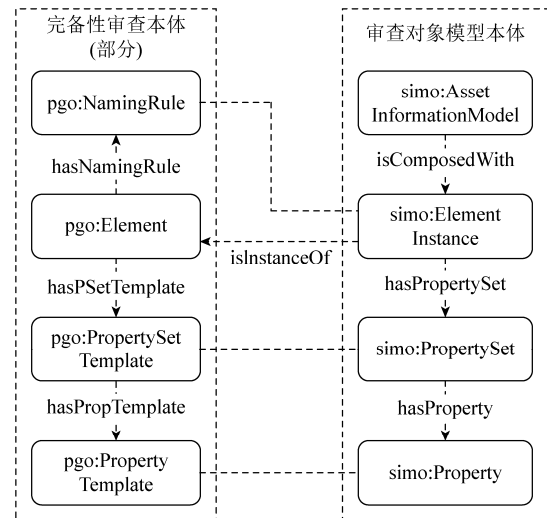


图 8 完备性审查本体与审查对象模型本体的对应关系

Fig. 8 The interactive relationship between PGO and SIMO

1.3 审查执行

审查执行主要是借助 SPARQL 查询语言从图谱中检索并筛选出满足交付要求和未满足交付要求的系统构件实例, 每一项审查结果经过汇集后形成完整的审查报告。在本阶段中, 尽量利用 SPARQL 查询语言的检索优势完成相关审查工作, 而对于难以直接通过 SPARQL 语句检索的任务, 可通过 SPARQL 与编程手段实现。下面将针对图 9 中涉及的基于 SPARQL 的完备性审查执行过程进行详细阐述。

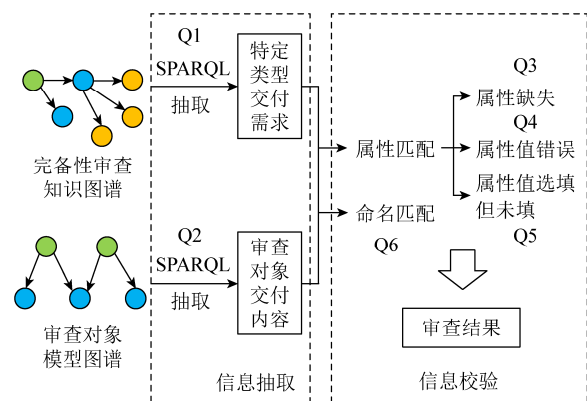


图 9 基于 SPARQL 的完备性审查执行过程

Fig. 9 Integrity checking process based on SPARQL

电网工程 BIM 模型完备性审查任务包含属性匹配、命名匹配, 尽管二者需求有所差异, 但审查执行过程基本一致, 可分为信息抽取和信息校验 2 个部分。其中, 信息抽取是从已得到的完备性审查 KG 和审查对象模型图谱中获取审查对象在交付标准分类系统中对应的分类相关的交付需求以及审查对象的交付内容; 信息校验则是根据

审查任务在上一阶段抽取到的信息基础上进行比对和校验确定是否满足交付需求。图 9 列举了 2 个部分涉及的 5 个核心检索语句 Q1~Q6, 具体

含义及相关 SPARQL 语句见表 4。针对不同的审查任务, 可以通过对这些检索语句进行组合得到各自的结果。

表 4 审查执行涉及的 5 个核心检索语句
Table 4 Five query clauses related to integrity checking

目的	SPARQL 语句
Q1 从完备性审查知识图谱中抽取交付需求	<pre>?s a simo:ElementInstance ; simo:isInstanceOf/skos:broader*/pgo:hasPropertySetTemplate ?psTemplate ; # 属性需求 simo:isInstanceOf/skos:broader*/pgo:hasNamingRule/pgo:hasNamingElements ?nes. # 命名规则 ?psTemplate pgo:hasPropertyTemplate ?propTemplate. ?propTemplate pgo:EntryPhase ?ep ; # 应录入阶段 pgo:isOptional ?optional ; # 必填与否 skos:prefLabel ?ptName ; # 属性名 pgo:PrimaryMeasureType ?pmt. # 度量类型 Optional{?propTemplate pgo:PrimaryUnit ?pu}. # 度量单位 ?nes a rdf:Seq ; ?p ?ne. # 命名组成部分 ?ne skos:definition ?def ; # 命名组成部分定义 skos:prefLabel ?label. # 命名组成部分标签 ORDER BY ?p # 在外部将命名组分顺序化</pre>
Q2 从审查对象模型图谱中抽取交付内容	<pre>?s a simo:ElementInstance ; skos:prefLabel ?sname ; # 构件命名 simo:hasPropertySet/simo:hasProperty ?prop. # 属性 ?prop skos:prefLabel ?propName ; # 属性名 simo:PropertyValue ?value. # 属性值</pre>
Q3 比对某一项目阶段下审查对象缺失哪些交付属性	<pre>FILTER (str(?ep) = " 初步设计 " && str(?ptName) in (" 电力行业标识码 " " 相数 " " 设计名称 " " 短路电流 " " 设计 ID " " 物资编码 ")) # 通过分别对属性需求 和当前属性定义求差集确定缺失的属性对应的属性名, 再进行过滤</pre>
Q4 比对某一项目阶段下审查对象错误的属性值	<pre>FILTER (regex(str(?ep), " 初步设计 ") && str(?propName) = str(?ptName) && (str(?value) = " " && ?optional = false)) # 这里仅列出属性值必填但为空的情况, 其他属性值错误类型 包括数据类型错误、值不在定义域内可类似过滤</pre>
Q5 比对某一项目阶段下审查对象可选但未填的属性	<pre>FILTER (regex(str(?ep), " 初步设计 ") && str(?propName) = str(?ptName) && ((str(?value) = " " && ?optional = true))) # 属性可选填但未填(不属于错误但可以提示)</pre>
Q6 校验审查对象的命名是否满足交付需求	<pre># 获取到对象命名和组分需求后, 通过文本处理确定是否满足条件, 涉及类别关键字、电压 等级(kV)、生产厂家可进一步利用 SPARQL 从图谱中检索和过滤相关信息</pre>

2 案例分析

2.1 案例概述

为了系统展示本文基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法, 此处选择电网工程常用主变压器作为具有代表性的案例模型, 展示其在不同项目阶段的属性录入完备性审查情况和命名规范性, 相应的几何模型如图 10 所示。

其他不同类型的设备审查过程和结果均与此类似, 均可自动执行并生成结构化的审查结果。针对完整项目模型, 通过抽取待审查对象及相关属性信息即可执行相似的完备性审查工作。

2.2 图谱化过程

2.2.1 完备性审查知识图谱

以《电网工程数字化交付标准》2022 版为数据源, 完备性审查本体为知识组织结构, 实例化

后的完备性审查知识图谱统计信息见表 5。

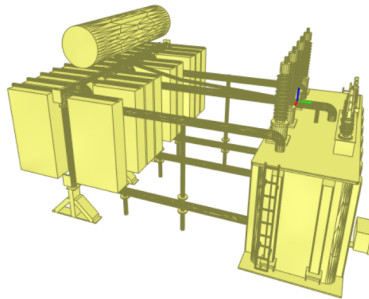


图 10 某变电站项目采用的变压器模型
Fig. 10 A transformer model adopted by a substation project

图 11 展示了变压器的术语定义集交付需求的图谱化形式, 为便于理解, 本文将与变压器构件类型相关的术语定义和交付需求分为 3 个部分, 即分类信息、辅助信息和交付需求。

表 5 电网工程 BIM 模型完备性审查知识图谱统计信息

Table 5 Statistics of the knowledge graph of model integrity check for electrical engineering

统计内容	数值
三元组总数	95 465
系统分组个数(System)	50
V 级要素个数(Element)	165
VI 级要素个数(Element)	473
属性集模板个数	948
属性模板个数	6 903

2.2.2 待审查模型图谱

提取待审查模型中的待审查对象及其属性信息, 部分抽取结果如图 12 所示, 其中属性集被单独赋予独立的 IRI, 而属性则以 BNode 方式进行存储, 可提高可读性, 并简化资源消耗。

2.3 审查结果

表 6~8 分别对应案例模型在电网工程不同项目阶段完备性审查初步结果、在初步设计阶段的属性缺失情况以及命名审查结果。

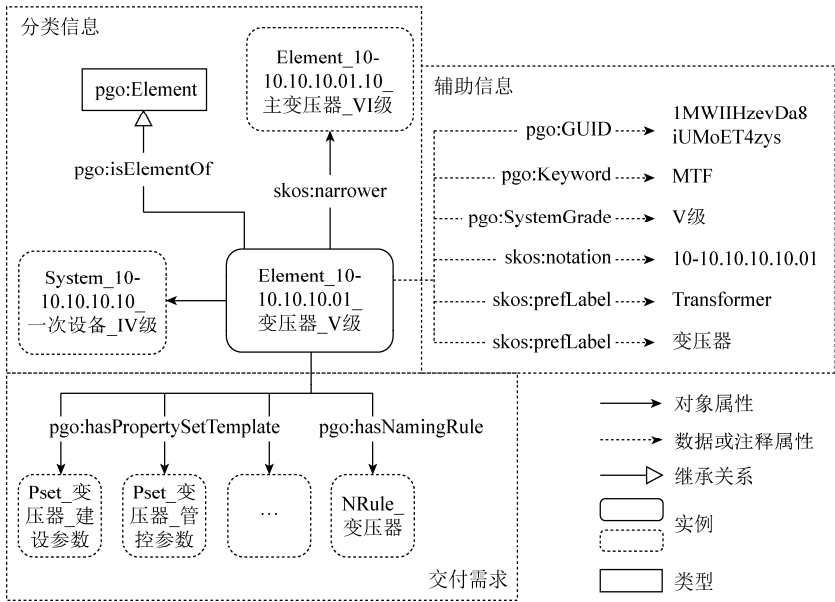


图 11 变压器术语定义及交付需求实例

Fig. 11 Term definition and delivery requirements of ‘Transformer’

```
ex:AIM_变压器 a simo:AssetInformationModel;
simo:isComposedWith ex:EI_主变压器_0jXo6UvhrDaAvIBKqfLoL_ .

ex:EI_主变压器_0jXo6UvhrDaAvIBKqfLoL_ a owl:NamedIndividual,
simo:ElementInstance;
simo:isInstanceOf pgds:Element_10-10.10.10.10.01.10_主变压器_VI级;
skos:prefLabel "MTF_V50_SZ11-80000-110_SDKT";
skos:altLabel "MTF_V50_SZ11-80000-110_SDKT:MTF_V50_SZ11-80000-110_SDKT:7674";
pgo:GUID "0jXo6UvhrDaAvIBKqfLoL_";
simo:hasPropertySet ex:PSet_1, ex:PSet_2, ex:PSet_3,
ex:PSet_4, ex:PSet_5, ex:PSet_6, ex:PSet_7,
ex:PSet_8, ex:PSet_9, ex:PSet_10 .

ex:PSet_7 a owl:NamedIndividual, simo:PropertySet;
skos:prefLabel "文字";
simo:hasProperty [ a simo:Property;
skos:prefLabel "结构型式";
simo:Unit "null";
simo:PropertyValue "水平分体"
], [ a simo:Property;
skos:prefLabel "短路阻抗[中_低]";
simo:Unit "null";
simo:PropertyValue ""
], [ a simo:Property;
skos:prefLabel "制造国家";
simo:Unit "null";
simo:PropertyValue "中国"
```

图 12 图谱化后的变压器属性信息(部分)

Fig. 12 Transformer property information after graph instantiation (Partly)

表 6 电网工程案例模型不同项目阶段
完备性审查初步结果

Table 6 Preliminary results of model integrity check in different project phases of power engineering projects

项目阶段	属性匹配数	属性缺失数	属性值错误数
初步设计	24	6	5
施工图设计	32	13	7
竣工图设计	36	13	7
施工过程管控	7	1	0
运行	8	0	0

表 7 案例模型在初步设计阶段的属性缺失情况

Table 7 Property missing condition of the example model in preliminary design stage

缺失的属性名	应录入阶段	是否必填	应录入的数据类型	应录入单位
相数	初步设计	是	EnumeratedValue	-
短路电流	初步设计	是	String	kA
物资编码	初步设计	否	Identifier	-
电力行业标识码	初步设计	否	Identifier	-
设计 ID	初步设计	否	Identifier	-
设计名称	初步设计	否	String	-

表 8 案例模型命名审查结果

Table 8 Naming check result of the example model

构件名称	命名规则	是否合规
MTF_V50_SZ11-80000-110_SDKT	类别关键字_电压等级(kV)_设备型号_生产厂家	是

以上结果反映了本文基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法的审查能力。为了进一步反映其审查效率,表 9 给出了各审查过程的耗时情况,为不失一般性,各审查过程进行了重复性试验(1 000 次取均值),得到平均耗时结果。

表 9 各审查过程耗时(ms)

Table 9 Time cost of different query procedures (ms)

审查内容	平均耗时
属性匹配	
初步设计阶段属性匹配情况	61
施工图设计阶段属性匹配情况	65
竣工图设计阶段属性匹配情况	61
施工过程管控阶段属性匹配情况	55
运行阶段属性匹配情况	58
属性缺失	
初步设计阶段属性缺失情况	32
施工图设计阶段属性缺失情况	29
竣工图设计阶段属性缺失情况	28
施工过程管控阶段属性缺失情况	21
运行阶段属性缺失情况	16
属性值错误	
初步设计阶段属性值错误情况	66
施工图设计阶段属性值错误情况	65
竣工图设计阶段属性值错误情况	68
施工过程管控阶段属性值错误情况	62
运行阶段属性值错误情况	54
命名审查	
命名审查情况	8

3 结论

综上所述,本文提出了一套完整的基于语义网的电网工程 BIM 模型完备性审查方法,通过利用包括 RDF, OWL, SKOS 和 SPARQL 在内的语义网技术以及电网工程数字化交付标准中的知识,能够有效解决 BIM 交付模型完备性审查问题,并通过自动化的手段提升完备性审查效率。不符合要求的情况可以通过图谱检索的方式进行快速定位。在此基础上,本文方法一方面能够充分利用现有交付标准以及特定分析需求,给交付模型与交付需求之间的信息不匹配问题提供有效的检测手段;另一方面,也能够为正向设计过程中的属性录入提供便利,从而减少交付审查过程中可能产生的不必要的返工。

此外,该方法还具备以下优势:①通用性。该方法可不局限于电网工程这一单一领域模型交付,不同领域交付标准或特定分析需求对应不同的分类系统和属性需求,依然可以通过上述方法进行扩展;②鲁棒性。该方法采用了 W3C 提供的通用语义网技术,特别是建立基于 SKOS 简单知识组织系统的行业分类系统,有助于与其他领域的专业知识进行统一联系。

另外,考虑到与实际应用的结合,目前该方法还存在以下局限和不足:尚未针对设备分类错误的情况进行分析以及尚未针对设备尺寸、建模深度等几何完备性审查。因此,后续工作可从以上不足展开。

参考文献 (References)

- [1] 张洋. 基于 BIM 的建筑工程信息集成与管理研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
ZHANG Y. Research on BIM-based building information integration and management[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009 (in Chinese).
- [2] 张建平, 范喆, 王阳利, 等. 基于 4D-BIM 的施工资源动态管理与成本实时监控[J]. 施工技术, 2011, 40(4): 37-40.
ZHANG J P, FAN Z, WANG Y L, et al. Resource dynamic management and cost real-time monitoring in building construction based on 4D-BIM[J]. Construction Technology, 2011, 40(4): 37-40 (in Chinese).
- [3] 牛博生. BIM 技术在工程项目进度管理中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
NIU B S. Application study on project schedule management base on BIM[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese).
- [4] 王婷, 池文婷. BIM 技术在 4D 施工进度模拟的应用探讨[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 306-311.

- WANG T, CHI W T. Discussion on the application of BIM technology in the field of 4D construction schedule[J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(2): 306-311 (in Chinese).
- [5] SUN H W, KIM I. Automated checking system for modular BIM objects[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2022, 28(7): 554-563.
- [6] LI X W, YANG D J, YUAN J F, et al. BIM-enabled semantic web for automated safety checks in subway construction[J]. *Automation in Construction*, 2022, 141: 104454.
- [7] 吉久茂, 张东升, 王珂. 基于BIM技术的消防疏散合规检查应用研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(S1): 1973-1977.
- JI J M, ZHANG D S, WANG K. Research on application of fire evacuation based on BIM technology[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S1): 1973-1977 (in Chinese).
- [8] ZHANG J S, EL-GOHARY N M. Integrating semantic NLP and logic reasoning into a unified system for fully-automated code checking[J]. *Automation in Construction*, 2017, 73: 45-57.
- [9] SOLIHIN W, EASTMAN C. Classification of rules for automated BIM rule checking development[J]. *Automation in Construction*, 2015, 53: 69-82.
- [10] 张吉松, 赵丽华, 崔英辉, 等. 基于BIM模型的结构设计审查方法研究[J]. *图学学报*, 2021, 42(1): 133-140.
- ZHANG J S, ZHAO L H, CUI Y H, et al. Code compliance checking of structural design based on BIM model[J]. *Journal of Graphics*, 2021, 42(1): 133-140 (in Chinese).
- [11] 那扎尔·木拉提别克, 史健勇, 姜柳, 等. 基于BIM和本体的建筑不规则类型审查[J]. *图学学报*, 2022, 43(5): 918-926.
- NAZHAER M, SHI J Y, JIANG L, et al. Research of BIM and ontology-based irregular building type checking[J]. *Journal of Graphics*, 2022, 43(5): 918-926 (in Chinese).
- [12] 姜柳, 史健勇, 付功义, 等. 基于BIM和深度学习的建筑平面凹凸不规则识别[J]. *图学学报*, 2022, 43(3): 522-529.
- JIANG L, SHI J Y, FU G Y, et al. Identification of the plane irregularity of structures based on BIM and deep learning[J]. *Journal of Graphics*, 2022, 43(3): 522-529 (in Chinese).
- [13] HÄUßLER M, ESSER S, BORRMANN A. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN[J]. *Automation in Construction*, 2021, 121: 103427.
- [14] 住房和城乡建设部. 建筑信息模型设计交付标准: GB/T 51301—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design delivery of building information modeling: GB/T 51301—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese).
- [15] 中国建筑科学研究院有限公司. DBJ 43/T 011-2020 湖南省BIM审查系统模型交付标准[S]. 长沙: 湖南省住房和城乡建设厅, 2020.
- China Academy of Building Research. DBJ 43/T 011-2020 Standard for model delivery on BIM review system of Hunan[S]. Changsha: Department of Housing and Urban-Rural Development of Hunan Province, 2020 (in Chinese).
- [16] 广州地铁集团有限公司. DBJ/T 15-160-2019 城市轨道交通建筑信息模型(BIM)建模与交付标准[S]. 广州: 广东省住房和城乡建设厅, 2019.
- Guangzhou Metro. DBJ/T 15-160-2019 Standard for BIM modeling and delivery of urban rail transit[S]. Guangzhou: Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangdong Province, 2019 (in Chinese).
- [17] 国网上海市电力有限公司. 电网工程数字化交付标准(2022版)[S]. 上海: 国网上海市电力有限公司, 2022.
- State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company. Digital delivery specification for electric power grid projects (Ver. 2022)[S]. Shanghai: State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, 2022 (in Chinese).
- [18] LAAKSO M, KIVINIEMI A. The IFC standard - A review of history, development, and standardization[J]. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 2012, 17: 134-161.
- [19] SOWA J F. Semantic networks[J]. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, 1992: 1493-1511.
- [20] 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.
- [21] POWELL J E, HOPKINS M. A librarian's guide to graphs, data and the Semantic Web[M]. Oxford: Chandos Publishing, 2015: 31-43.
- [22] International Organization for Standardization. Industry foundation classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema: ISO 16739-1: 2018[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑信息模型分类和编码标准: GB/T 51269—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for classification and coding of building information model: GB/T 51269—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).