

基于语义网的 BIM 结构模型合规性审查方法

张吉松¹, 于泽涵¹, 李海江²

(1. 大连交通大学土木工程学院, 辽宁 大连 116028;
2. 卡迪夫大学工学院, 威尔士 卡迪夫 CF24 3AA)

摘 要: 针对目前建筑信息模型(BIM)合规性审查具有耗费人力和自动化程度较低等特点, 提出一种基于语义网的 BIM 结构设计模型合规性审查方法。方法包括规范转译、BIM 模型信息处理和合规审查 3 个子模块。规范转译子模块可实现将半结构化设计规范条款转换为结构化知识并进行灵活查询与推理; BIM 模型信息处理子模块可实现 BIM 模型信息的提取、转换与映射; 合规审查子模块可实现规则的执行和审查报告生成。方法实现从一阶谓词逻辑表示结构设计规范的方式出发, 借助本体构建工具 protégé, 将 BIM 结构设计模型信息和设计规范条款, 通过映射和语义网规则语言(SWRL)转译到采用本体构建的知识库中, 进而实现对 BIM 模型相关信息的查询、推理和设计审查, 最后通过框架结构实例验证了方法有效性和可行性, 为基于 BIM 模型的结构设计自动化合规性审查提供一种参考方法。

关 键 词: 语义网; 合规性审查; 建筑信息模型; 本体; 结构设计

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2023020368

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2023)02-0368-12

Compliance checking approach for BIM structural model under semantic web

ZHANG Ji-song¹, YU Ze-han¹, LI Hai-jiang²

(1. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning 116028, China;
2. Cardiff School of Engineering, Cardiff University, Cardiff Wales CF24 3AA, UK)

Abstract: In view of the labor-intensive and low automation of the building information modeling (BIM) compliance checking process, a semantic web-based compliance checking approach for BIM structural model was proposed. The approach included three sub-modules: specification translation, BIM model processing, and compliance checking. The specification translation sub-module can transform semi-structured design specification clauses into structured knowledge, allowing for flexible query and reasoning. The BIM model processing sub-module can realize the extraction, transformation, and mapping of BIM model information. The compliance checking sub-module can implement the rules and generate checking reports. The method started from the way that the first order predicate logic represented the structural design specification. By deploying the ontology construction tool protégé, the BIM structural model information and design specification clauses were translated into the ontology knowledge base through mapping and semantic web rule language (SWRL), thus enabling the query, reasoning, and compliance checking of the BIM structural model. Finally, the frame-structure project verified the effectiveness and feasibility of the approach. This study could provide a reference method for automatic compliance checking of structural design based on BIM models.

收稿日期: 2022-06-17; 定稿日期: 2022-09-20

Received: 17 June, 2022; Finalized: 20 September, 2022

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220868); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102342514)

Foundation items: General Project of Educational Department of Liaoning Province (LJKMZ20220868); Basic Research Funds for Central Universities of Chang'an University (300102342514)

第一作者: 张吉松(1983-), 讲师, 博士。主要研究方向为 BIM 技术。E-mail: 13516000013@163.com

First author: ZHANG Ji-song (1983-), lecturer, Ph.D. His main research interest covers BIM. E-mail: 13516000013@163.com

Keywords: semantic web; compliance checking; building information modeling; ontology; structural design

在土木工程设计领域, 对于结构设计合规性审查, 我国实行施工图设计审查制度。该制度由当地建设主管单位或经过其资质认定的审查机构对施工图纸进行审查, 审查标准为相关法律法规、公共利益安全、工程建设强制性标准^[1]。整个审查过程是采取人工审查的方法(图纸+计算书), 但人工审查存在自动化程度低、工作量繁重、审查过程规范化不足等问题。审查技术人员自身对规范的主观理解及其从业经验会对审查结果的准确性产生较大影响, 导致审查标准不统一。国家住建部 2022 年 3 月印发《“十四五”住房和城乡建设科技发展规划》, 在第七部分“建筑业信息技术应用基础研究”中, 将“研究建设项目智能化审查和审批关键技术”作为十四五研究重点任务。建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术的出现为人工审查转向机器自动审查提供了技术基础, 更为简便准确的自动合规审查成为今后的发展趋势。

目前对于合规性审查的研究大致可分为 2 个方面: 基于施工图的审查^[2-4]和基于 BIM 模型的审查^[5-8]。基于 BIM 模型的审查涵盖建筑设计^[9]、结构设计^[10]、高层建筑疏散设计^[11]、施工质量控制^[12]、施工模型和进度^[13]、建筑外围护设计^[14]、铁路工程设计^[15]、地下管线^[16]等。同时, 在支持合规性审查方面, 国内外研究人员在规范知识图谱、规则自动转译、自然语言处理等方面^[17-27]开展了大量工作。在审图软件方面, 国外有 Solibri Model Checker (SMC), CORENET 和 SMARTcodes 等, 国内有广联达 BIM 审图软件和广州市施工图设计文件审查管理系统, 见表 1^[28-32]。以上方法(规则硬编码)在针对某一具体条款审查是有效的, 但在应对不断更新的设计条款方面, 需要大量的时间和人力进行维护^[33]。同时, 其灵活性和规则透明性有待提高, 如果涉及架构和模式方面的更改, 需要的代价较大。另外, 规则硬编码在扩展性、互操作性、可移植性、跨领域的链接方面也略显不足。

表 1 国内外 BIM 合规性审查系统

Table 1 Domestic and foreign BIM compliance checking system

名称	国家	简介
Solibri Model Checker (SMC) ^[28]	芬兰	基于 Java 的 BIM 软件应用平台, 能够检查施工之前和之中的设计问题。可以自动查看检查问题及输出报告, 包括 PDF 和 XML 以及可视化等方式, 检查的对象是以 IFC 形式表达的模型
CORENET e-PlanCheck ^[29]	新加坡	使用了挪威的 EDM 模型服务器, 目前已经实现了在建筑规划和建筑服务 2 大类的诸多规范检查, 自动化程度高、扩展方便
Jotne EDMModelChecker (EDM) ^[30]	挪威	提供对象数据库, 并支持开源的 EXPRESS 语言的规范检查开发和复杂扩展, 能一次对大型建筑项目或多个主题实现检查
SMARTcodes ^[31]	美国	国际规范委员会(International Code Council, ICC)开发的 SMARTcodes 规则检查平台, 目前主要用于住宅和商业相关建筑的规范检查, SMARTcodes builders 可以通过事先建立的包含领域概念的领域词典来快速翻译自然语言表达的规则
广联达 BIM 审图软件 ^[32]	中国	广联达 BIM 审图软件能进行针对三维建筑信息模型的空间碰撞、门窗开启、楼梯净高、管线冲突等检查, 能支持 Revit, Tekla 和 Magicad 等主流 BIM 软件的格式
广州市施工图设计文件审查管理系统	中国	该系统是一个人工智能审查平台, 通过插件将各类 BIM 软件所建模型导出为统一格式的标准数据库, 可实现对建筑、结构、水、暖、电、人防、消防及节能等专业的智能审查

语义网技术的出现使得编译规则向软编码方向的发展成为可能。语义网通过一系列有方向和标签的图形而形成的网络来描述特定的概念、对象以及之间的关系^[34], 因此各领域信息可通过其联系起来, 形成人机均可识别的信息网络。语义网采用同一种语言来描述合规性检查的 3 个主要构成部分: 模式(Schema)、实例(Instances)和规则(Rules)^[35]。语义网的优势包括便利的可移植性和互操作性、便捷的跨领域信息链接、便利的扩展性和维护性以及支持复杂逻辑推理与检索查询^[36-38]。其即可以在不同

平台环境执行同样规则, 也不局限于 BIM 格式及其之前的建模工具与环境。

在基于语义网的合规检查方面, 2009 年 YURCHYSHYNA 和 ZARLI^[39]提出一种基于本体(Ontology)合规性检查方法, 包括形式化、语义注释、分类和语义检索 4 个步骤; PAUWELS 等^[40]将语义网和本体技术引入建设方案设计, 提出一种针对建筑设计的语义概念模型, 用于替代基于实体描述(Components-based)的 BIM 模型。在此基础上, 其尝试利用游戏引擎技术, 将 BIM 三维模型和其富

含的信息(主要指由语义网技术生成的信息)进行可视化^[41],并通过路径 IFC-RDF-STL 实现语义网技术对三维模型的数据转换^[42]。REZGUI 等^[43]比较了 STEP 产品数据模型与 Ontology 模型各自特点,提出建筑行业向语义网发展的技术路线;2010 年 HJELSETH 和 NISBET^[44-45]开发了针对规范转译的语义模型,将规范条款标记为 4 类,并提出了 RASE 方法;2011 年 PAUWELS 等^[46]基于语义网规则的合规性检查环境,后续研究基于该环境,采用网络本体语言(web ontology language, OWL)将 IFC 与语义网建立联系,提出 EXPRESS-to-OWL 的转换方法^[47-48]等。2015 年 BEACH 等^[49]采用了规则的语义检查方法,其可以让领域专家自己定义和更新审查规则而无需进行软件开发。2016 年 ZHANG 和 EI-GOHARY^[50]将自然语言处理技术引入合规性审查,实现建筑领域语义文本自动分类和信息提取以支持自动化审查^[51]。VENUGOPAL 等^[52]针对 BIM 在信息交换和互操作性方面的不足,提出了语义丰富模型的框架^[53]、引擎^[54]及相应方法^[55],以支持自动化合规性审查。

以上研究对于采用语义网技术进行合规性审查起到了重要的推动作用。然而,在结构设计模型合规性审查方面,仍然面临一系列问题和挑战,主要包括:①采用语义网技术进行 BIM 结构设计模型合规性审查研究较少;②BIM 结构模型互操作性问题,即 BIM 模型映射到另一种格式后信息不完整、不明确性和语义丢失问题;③结构设计规范表述规则的特殊性导致基于规范的推理和跨领域的链接能力不足;④中文自身的特点,如语言模糊性、量词不同、描述范围等,导致中文设计规范条款转译成计算机可识别语言与英文不同。这些特点导致基于 BIM 结构设计模型审查完全自动化难度较大。

前文所述,语义网技术可以根据信息的语法与语义,对于某一领域的信息(如 BIM 模型和规范)进行精准的逻辑描述和推理。语义网可以通过资源描述框架(resource description framework, RDF)和 OWL 对于工业基础分类(industrial base classification, IFC)的模式和实体进行描述,在其顶层的语义网规则语言(semantic web rule language, SWRL)对规范条款进行描述并进行推理,对于映射后的 BIM 信息和规范信息的管理提供了良好的合规性审查环境^[56]。

因此,本研究在语义网环境下,提出一种 BIM 模型结构设计合规性审查方法。首先,采用

IFC—OWL 格式转换路径,将 BIM 结构设计模型信息自动映射到语义网本体和实例中,构建合规性审查知识库;其次,利用 SWRL 转译结构设计规范条款,采用 Pellet 推理引擎对两方面信息进行推理,构建合规性审查推理机制;再次采用 SQWRL 查询语言实现对构件名称与其合规性审查结果的查询,实现用户界面层功能;最后,通过一个简单 BIM 框架结构模型进行实例验证,证明该方法的可行性和有效性,并探讨了本文方法的局限性和未来的研究建议。本研究贡献在于通过引入语义网和本体技术,构建 BIM 结构设计模型合规性审查的知识库,进而支持针对 BIM 结构模型信息的查询、推理和审查,为今后基于 BIM 模型的结构设计合规性审查的自动化提供一种参考方法。

1 自动合规审查系统的构建

1.1 系统总体设计思路

本系统为实现结构设计规范自动合规审查过程,采用 protégé 构建 BIM 模型和结构设计规范领域知识库,对结构设计规范作用对象进行结构化的处理,同时将结构设计规范转译为计算机可识别的谓词公式形式,利用 FOL(First order logic)语言与 SWRL 规则的互通性,将谓词公式形式的规范条款转换为 SWRL 形式并录入本体知识库内。而后对 BIM 模型信息进行处理,将规范审查所需信息提取并转码录入结构设计规范领域本体内,使其能够与规范条款匹配,最后借助推理引擎实现自动合规审查,并基于语义查询算法输出审查结果,生成审查报告。根据上述设计思路,本系统的总体设计框架如图 1 所示。

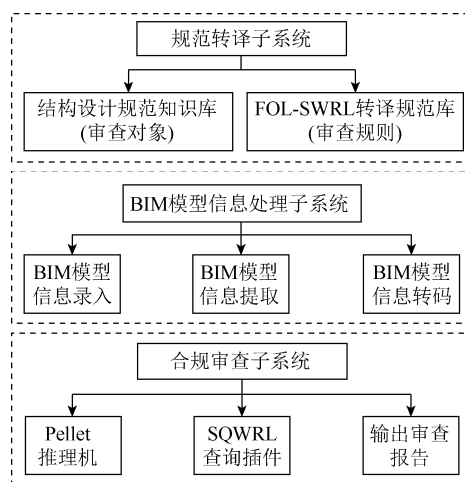


图 1 系统总体设计框架

Fig. 1 Overall design framework of the system

规范转译子模块主要包括 SWRL 形式的规则库以及结构设计规范本体知识库,主要作用为实现结构设计规范的计算机表达,并对审查对象进行结构化整理,提高结构设计知识的重用效率。其中,结构设计规范本体知识库主要作用为实现规范条款的检索、关联及结构化展示,并不参与 SWRL 规则库的推理工作。

BIM 模型信息处理子模块是对结构设计规范进行语义分析的基础上,赋予 BIM 模型所需要的信息,并将提取的信息进行语义转换,以匹配本体知识库中的数据格式。主要作用为提供 BIM 模型实例信息,实现不同平台之间数据互操作。合规审查子模块主要集成了规则的推理与查询算法,将 BIM 模型中的信息与转译后的规范条款相匹配后执行规则的推理,并输出最终审核结果以生成审查报告。

1.2 系统工作流程

BIM 模型作为合规性审查信息来源,为自动合规审查系统提供了数据基础,而结构设计规范本体知识库为合规审查提供了平台,上述 3 个子模块之间涉及的工作流程如图 2 所示。

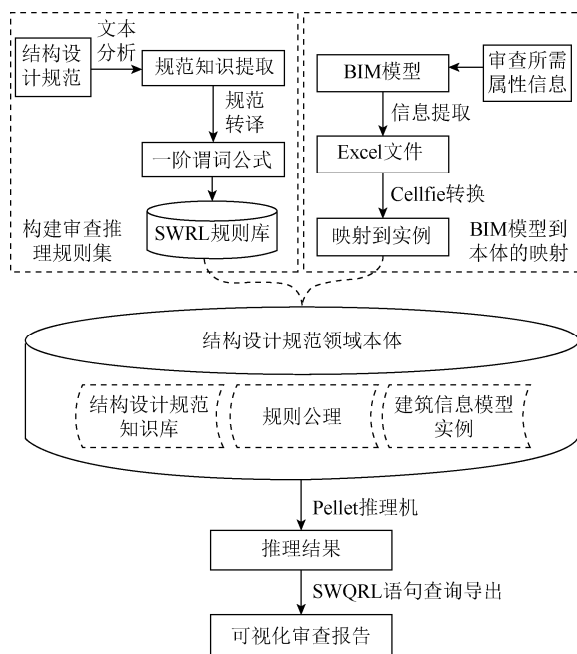


图2 系统总体流程图

Fig. 2 Overall system flow chart

构建审查推理规则集可将我国现行结构设计规范条款转译为计算机能够识别的语言形式,并建立可供审查推理的 SWRL 规则库,本文选取《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010,简称《混规》)[57]中的典型条款进行转译录入。BIM 模型信息到本体实例的映射目前尚无简单有效的插件,本系统通过

Revit 中共享参数的方法为模型信息赋值,进而借助明细表以 Excel 格式导出,同时本体 Cellfie 模块可以直接将表格数据转换成 OWL 语言映射至现有本体中。结构设计领域规范本体包含相关知识库、规则公理以及 BIM 实例,结构设计规范知识库能够将规范条款结构化的表达出来,实现基于语义网的规范检索查询功能;规则公理为规则的推理与执行提供了基础;BIM 实例是由 BIM 模型中的信息映射到本体并以实例的方式展现。在完成本体领域知识结构的构建并将 BIM 数据映射到本体之后,系统借助 Pellet 推理引擎将建筑信息实例执行审查推理规则集并输出最终结果。

2 构建审查推理规则集

2.1 规范转译

目前国内、外关于规范转译的方法较多,从早期的决策表、基于规则、基于逻辑的方式,到近些年基于对象、基于语义和基于本体的方法。其中基于逻辑的规范转译方式其研究工作时间跨度较大,发展较为完善。一阶谓词逻辑由于其与自然语言较高的贴合性,最早被广泛用于知识表示。一阶谓词逻辑表示一条知识是通过将个体词、谓词、量词根据所要表达知识的语义以逻辑联结词相联接,形成谓词公式。

根据文献[58]所述我国近 40 本结构设计规范特点,结构设计规范具体条款可以具有多种划分形式。按照规定性质可以分为定性条款与定量条款,定性条款是指对规定适用范围、设计内容、相关术语进行解释阐述的条款,一般为总则、基本原则、一般规定等条款,此类条款不是规范转译的主体,可以作为规范转译的指导性文件出现;定量条款是指对结构设计具体部位做出明确限制的条款,如限定框架梁截面详细尺寸、箍筋配筋率、加密区长度等条款,针对此类条款的结构设计人工审查费时费力,且易出现错、漏审现象,因此,此类条款是规范转译以及自动化合规审查的主要对象。

同时,规范条款也可以按照谓词逻辑转译规范流程分为直接与间接条款。直接条款是指自然语言表述的条款,可以直接进行语义的转译,形成谓词公式;间接条款是指包含表格或引用其他规范数据的条款,此类条款无法直接转译,需要先进行自然语言表述,进而转译为谓词公式的形式。

按照一阶谓词逻辑表示知识的方法可以将规

范转译的步骤分为 3 步：①定义条款中的个体词与谓词，确定每个谓词及个体的确切含义；②根据所要表达规则条款，将个体词带入每个谓词中的变量；③按照规则条款的具体规定将谓词与个体词进行排序，选取合适的逻辑连接词组成谓词公式。用适当的联接符号将各个谓词联接起来，形成谓词公式。由此可见，不同谓词定义方式可以展现出不同

的规范转译方法，所以在基于一阶谓词逻辑转译结构设计规范时，要灵活选择谓词的定义方式。

本文选取《混规》第 11.3 章、第 11.4 章共计 27 条规范条款进行转译，其中包含结构设计规范中大部分条款类型，较具有代表性，部分转译结果见表 2 (选取《混规》第 11.3.5, 11.4.6 和 11.4.16 条为例)。

表 2 转译结果

Table 2 Translation results

条款	条款原文	转译后	所用谓词和对应描述
11.3.5	(1) 梁截面宽度不宜小于 200 mm	$\forall x(\text{BeamB}(x) \rightarrow \text{More}(x, 200))$	BeamB(x): x 是框架梁截面宽度 BeamH(y): y 是框架梁截面高度
	(2) 梁截面高度与宽度比不宜大于 4	$\forall x \forall y(\text{BeamB}(x) \wedge \text{BeamH}(y) \wedge \text{Divide}(z, y, x) \rightarrow \text{Less}(z, 4))$	BeamL(z): z 是框架梁净跨 More(x, y): x 大于 y
	(3) 梁净跨与截面高度比不宜小于 4	$\forall z \forall y(\text{BeamL}(z) \wedge \text{BeamH}(y) \wedge \text{Divide}(x, z, y) \rightarrow \text{More}(x, 4))$	Less(x, y): x 小于 y Divide(x, y, z): x 是 y 除以 z 的算术商
11.4.6-1	(1) 考虑地震组合的矩形截面且剪跨比 λ 大于 2 框架柱，其受剪截面剪力 $V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.2 \beta_c f_c b h_0)$	$\forall x1 \forall x2(\text{Column}(x1) \wedge \text{ColumnSection}(y1) \wedge \text{Equal}(y1, \text{Rectangle}) \wedge \text{ColumnShearSpanRate}(y2) \wedge \text{More}(y2, 2) \wedge \text{ColumnVc}(x2) \wedge \text{ColumnRre}(z1) \wedge \text{ConcreteBc}(z2) \wedge \text{ConcreteFc}(z3) \wedge \text{ColumnB}(z4) \wedge \text{ColumnH0}(z5) \wedge \text{Multiply}(z6, 0.2, z2, z3, z4, z5) \wedge \text{Divide}(z7, z6, z1) \rightarrow \text{Less}(x2, z7))$	Column(x): x 是框架柱 ColumnSection(y): y 是截面形状 ColumnShearSpanRate(y): y 是剪跨比 ColumnVc(x): x 是受剪截面剪力设计值 ColumnRre(z): z 是承载力抗震调整系数 ConcreteBc(z): z 是砼强度影响系数 ConcreteFc(z): z 是砼抗压强度设计值 ColumnB(y): y 是框架柱截面宽度 ColumnH0(y): y 是框架柱截面有效高度
	(2) 剪跨比 λ 小于 2 时，其受截面剪力 $V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.15 \beta_c f_c b h_0)$	$\forall x1 \forall x2(\text{Column}(x1) \wedge \text{ColumnSection}(y1) \wedge \text{Equal}(y1, \text{Rectangle}) \wedge \text{ColumnShearSpanRate}(y2) \wedge \text{Less}(y2, 2) \wedge \text{ColumnVc}(x2) \wedge \text{ColumnRre}(z1) \wedge \text{ConcreteBc}(z2) \wedge \text{ConcreteFc}(z3) \wedge \text{ColumnB}(z4) \wedge \text{ColumnH0}(z5) \wedge \text{Multiply}(z6, 0.15, z2, z3, z4, z5) \wedge \text{Divide}(z7, z6, z1) \rightarrow \text{Less}(x2, z7))$	Equal(x, y): x 等于 y More(x, y): x 大于 y Less(x, y): x 小于 y Multiply(a, b, c, d, e, f, g): a 是 b, c, d, e, f, g 的算术积 Divide(x, y, z): x 是 y 除以 z 的算术商
11.4.16-1	(1) 框架结构中一级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.65	$\forall x \forall z2(\text{Column}(x) \wedge \text{SeismicGrade}(1) \wedge \text{ColumnAxialLoad}(y1) \wedge \text{ConcreteFc}(y2) \wedge \text{ColumnB}(y3) \wedge \text{ColumnH}(y4) \wedge \text{Multiply}(z1, y2, y3, y4) \wedge \text{Divide}(z2, y1, z1) \rightarrow \text{Less}(z2, 0.65))$	Column(x): x 是框架柱 SeismicGrade(x): 抗震等级为 x ColumnAxialLoad(y): y 是轴压力 ConcreteFc(y): y 是砼抗压强度设计值 ColumnB(y): y 是框架柱截面宽度 ColumnH(y): y 是框架柱截面高度
	(2) 框架结构中二级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.75	$\forall x \forall z2(\text{Column}(x) \wedge \text{SeismicGrade}(2) \wedge \text{ColumnAxialLoad}(y1) \wedge \text{ConcreteFc}(y2) \wedge \text{ColumnB}(y3) \wedge \text{ColumnH}(y4) \wedge \text{Multiply}(z1, y2, y3, y4) \wedge \text{Divide}(z2, y1, z1) \rightarrow \text{Less}(z2, 0.75))$	Less(x, y): x 小于 y Multiply(a, b, c, d): a 是 b, c, d 的算术积
	(3) 框架结构中三级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.85	$\forall x \forall z2(\text{Column}(x) \wedge \text{SeismicGrade}(3) \wedge \text{ColumnAxialLoad}(y1) \wedge \text{ConcreteFc}(y2) \wedge \text{ColumnB}(y3) \wedge \text{ColumnH}(y4) \wedge \text{Multiply}(z1, y2, y3, y4) \wedge \text{Divide}(z2, y1, z1) \rightarrow \text{Less}(z2, 0.85))$	Divide(x, y, z): x 是 y 除以 z 的算术商
	(4) 框架结构中四级抗震等级的框架柱轴压比不宜大于 0.90	$\forall x \forall z2(\text{Column}(x) \wedge \text{SeismicGrade}(4) \wedge \text{ColumnAxialLoad}(y1) \wedge \text{ConcreteFc}(y2) \wedge \text{ColumnB}(y3) \wedge \text{ColumnH}(y4) \wedge \text{Multiply}(z1, y2, y3, y4) \wedge \text{Divide}(z2, y1, z1) \rightarrow \text{Less}(z2, 0.9))$	

2.2 建立 SWRL 规则库

SWRL 是基于 W3C^[59](Open web platform)开发的一种标准规则语言，其能够将谓词逻辑转译的规范条款知识集成本体中。SWRL 语法结构由推理前提(Body)、推理结果(Head)组成，body 通过 SWRL 内置的逻辑比较(Built-ins)关系推理得到 Head，两者由运算符“->”相连。SWRL 是在 OWL 基础上

向一阶谓词逻辑 Horn 子句的扩展，因此很容易实现一阶谓词逻辑的 SWRL 规则映射。

以上述转译结果为例，以每条规定不合规的情况构建 SWRL 规则，11.4.6-1 结果展示如下：

11.4.6-1(1) 框架柱 (?x1)[^]ColumnSection(?x1,?x2)[^]ColumnShearSpanRate(?x1,?x3)[^]ColumnVc(?x1,?x4)[^]ColumnRre(?x1,?x5)[^]ConcreteBc(?x1,?x6

)^ConcreteFc(?x1,?x7)^ColumnB(?x1,?x8)^ColumnH0(?x1,?x9)^swrlb:stringEqualIgnoreCase(?x2,"Rectangle")^swrlb:greaterThan(?x3,2)^swrlb:multiply(?x10,?x6,?x7,?x8,?x9,0.2)^swrlb:divide(?x11,?x10,?x5)^swrlb:greaterThan(?x4,?x11)->Result(?x1,"11.4.6-1(1)-F")

11.4.6-1(2) 框架柱 (?x1)^ColumnSection(?x1,?x2)^ColumnShearSpanRate(?x1,?x3)^ColumnVc(?x1,?x4)^ColumnRre(?x1,?x5)^ConcreteBc(?x1,?x6)^ConcreteFc(?x1,?x7)^ColumnB(?x1,?x8)^ColumnH0(?x1,?x9)^swrlb:stringEqualIgnoreCase(?x2,"Rectangle")^swrlb:lessThan(?x3,2)^swrlb:multiply(?x10,?x6,?x7,?x8,?x9,0.15)^swrlb:divide(?x11,?x10,?x5)^swrlb:greaterThan(?x4,?x11)->Result(?x1,"11.4.6-1(2)-F")

SQWRL 查询语言是对 SWRL Built-Ins 进行了扩展,由此定义了一套查询操作符,因此 SQWRL 能够很好地兼容 SWRL 规则。基于 SQWRL 进行语义查询,结果将返回为一张二维表,表中呈现查询推理后的实例信息^[60]。为实现推理结果的查询并为后续生成审查报告做准备,还需基于 SQWRL 查询语言建立一条查询规则:

审查对象(?x) ^ Result(?x,?结果) -> sqwrl:select(?x,?结果)

至此,审查推理规则集构建完成。

3 构建结构设计规范本体知识库

3.1 本体构建

本体作为语义网的重要组成部分,能够明确描述领域内容的概念、属性、实体等信息,并可用来注释语义,为语义网上的资源提供了通用的、可实现的基础,进而使得不同系统之间的互操作性得到增强^[61]。

本文选取由斯坦福大学提出的“七步法”^[62]来构建结构设计规范本体。首先确定结构设计规范领域本体构建专业内容范畴,对现有结构设计规范领域研究进行文献调研,考查是否可以复用的本体框架;依据《混规》目录框架并参考 IFC 列出结构设计规范领域主要术语;将定义的术语映射到类中自上而下构成等级体系;明确定义结构设计规范体系中类的属性;依据结构设计规范领域数据来源定义属性的分面;将审查所需的模型信息导入为本体的实例。

3.2 类的构建与属性定义

本研究选取 protégé 5.5.0 作为本体构建软件。protégé 是一个免费、开源的本体编辑和知识管理系

统,基于 Java 语言由斯坦福大学开发和维护,是目前应用较广泛的本体开发工具之一^[63]。

以面向结构设计审查为目的,本文将本体的主体分为审查对象与审查规则两部分。其中,审查规则是根据前文提到的设计规范条款转译为 SWRL 规则,并形成具备推理功能的结构设计审查规则库;审查对象为 BIM 模型映射到本体的信息,通过 IFC-OWL 格式转换路径,以类的形式构建,参考 IFC 的分类标准以及结构设计规范具体规定部位,本文将“审查对象”类下分 5 个一级子类:“场地”“材料”“构件”“构造”和“荷载”。一级子类下还可根据实际情况构建新的子类。如“构件”子类下面涵盖了梁、板、柱、墙等结构构件,最终建立的类目体系如图 3 所示。

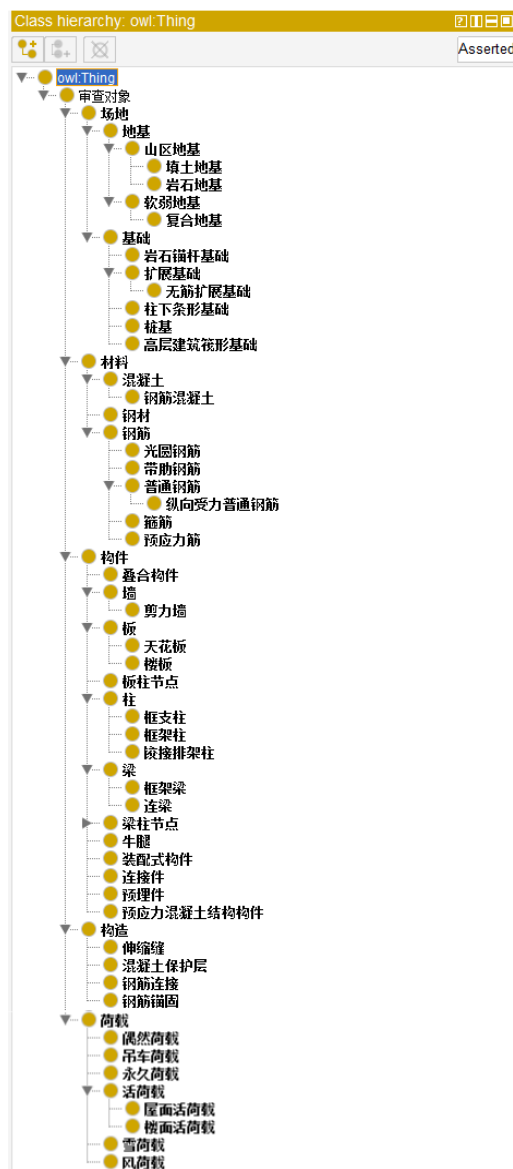


图3 结构设计规范本体类目录

Fig. 3 Structure design specification ontology category

梁, BIM 模型及轴网尺寸标注如图 6 所示。

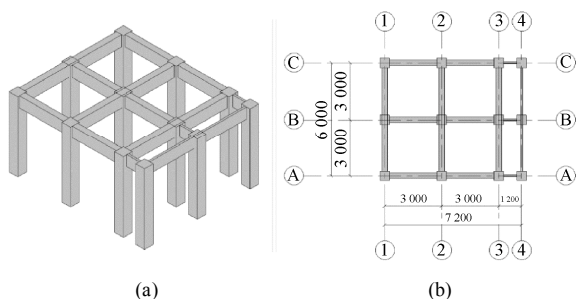


图 6 BIM 模型示意图((a)三维模型; (b)二维平面图)

Fig. 6 Schematic diagram of BIM model ((a) 3D model; (b) 2D drawing)

由于 BIM 模型未包含计算书中相关参数和信息,因此模型创建完成后,对结构计算等受力信息(如弯矩、剪力、轴压比等数据信息)以共享参数方式进行语义丰富。语义丰富是指通过预定义的领域内规则集的方式来推断模型的语义(如模型的实体、属性和关系等)或在特定情境下的含义,进而将该语义补充到模型中并可以直接使用。语义丰富中“语义”的含义可以理解为形式、功能和行为,体现在 BIM 模型中也就是几何信息、材料信息、力学信息、功能分类、位置信息、空间拓扑关系以及聚合关系等等。语义丰富中“丰富”的含义可以理解为补充,即将有用的信息补充到 IFC 模型中以便后续方便使用。本研究以补充属性的方式进行审查前的语义丰富,即以共享参数方式添加了弯矩、剪力、等轴压比等数据信息。按照信息用途将参数分为常规、数据、尺寸标注、结构分析及钢筋集。以框架柱为例,语义丰富完成后部分信息如图 7 所示。



图7 采用共享参数赋值进行结构信息语义丰富

Fig. 7 Semantic enrichment of structural information by shared parameter assignment

为测试本方法对 BIM 结构模型中不符合规范的审查能力, 本文对 BIM 模型做了部分修改, 特意设定了 16 处不合规设计(表 3), 以便于验证其有效性。

调用 protégé 内置模块 Cellfie 将 Excel 数据转换为 OWL 格式, 该模块将以实例的方式将所需信息录入本体内, 期间需要用到 Transformation Rules, 其语法规则需要遵循 MappingMaster DSL。MappingMaster 使用领域特定语言(DSL)定义从电子表格内容到 OWL 本体的映射。该语言基于 OWL 语法, 是用来描述 OWL 本体的领域特定语言^[64]。BIM 模型构件的属性信息表现为不同的数据类型, 如数值数据、字符串数据, protégé 将根据数据类型的不同在 Object Property 或 Data Property 中新增相应属性。至此 BIM 模型上的数据成功映射至本体中, 实现了模型与本体知识库的链接, 结果如图 8 所示。

表3 模型中预设定的16处不合规设计

Table 3 Predefined 16 unconformity of model

编号	具体设计缺陷
KL1	1 受剪截面剪力 1 500(700)
	2 受拉钢筋配筋率 0.4(0.25)
	3 箍筋边缘距 100(40)
KL8	4 混凝土受压区高度 200(120)
	5 截面宽度 100(200)
	6 截面高宽比 5(4)
	7 截面跨高比 3(4)
KL12	8 截面宽度 180(200)
	9 截面高宽比 4.1(4.0)
	10 箍筋加密区长度 500(900)
KZ1	11 柱上端弯矩弯矩 550(500)
	12 柱受剪截面剪力 950(650)
KZ5	13 柱剪力设计值 658(800)
	14 剪跨比 1(2)
KZ7	15 箍筋加密区肢距 350(250)
	16 轴压比 0.9(0.75)

注：括号外为修改后不合规的数据

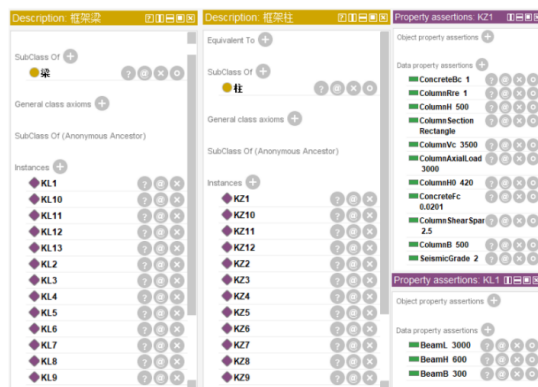


图 8 BIM 模型数据映射至本体

Fig. 8 BIM model data mapping to ontology

将上文构建的 SWRL 审查规则集导入本体内 SWRL Tab, 调用 protégé 中 Pellet 推理引擎对录入的 SWRL 规则进行推理, Pellet 是一种基于描述逻辑的规则推理机, 与 protégé 一样支持 Java 语言,

具有良好的兼容性与推理功能。在推理引擎界面运行推理,推理结果返回到“Individuals”中更新结构设计规范本体知识库。基于 SWRL+Pilet 的推理后,将包含推理结果的本体导出,完成推理。部分结果如图 9 所示。

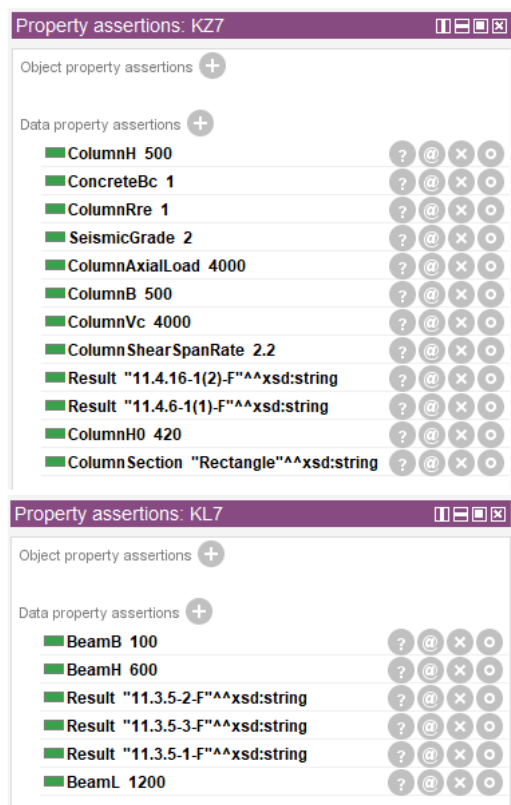


图 9 部分推理结果

Fig. 9 Partial reasoning results

推理完成后基于 SQWRL 查询语言实现对构件名称与其合规性审查结果的查询。将查询结果以 CSV 文件输出,最终的审查结果见表 4。

表 4 合规性审查结果

Table 4 Compliance checking results

编号	设计条款	不合规处
KL1	11.3.3	受剪截面剪力过大
	11.3.6-1	梁端受拉钢筋配筋率过低
	11.3.9-1	梁端箍筋边缘距过大
KL8	11.3.1	梁端混凝土受压区高度过大
	11.3.5-1	截面宽度过小
	11.3.5-2	截面高宽比过大
	11.3.5-3	截面跨高比过小
KL12	11.3.5-1	截面宽度过小
	11.3.5-2	截面高宽比过大
	11.3.6-3.1	梁端箍筋加密区长度过小
KZ1	11.4.1	柱上端截面弯矩设计值过大
	11.4.6	受剪截面剪力过大
KZ5	11.4.3-1	剪力设计值不合规
	11.4.11-2	剪跨比过小
KZ7	11.4.15	箍筋加密区肢距过大
	11.4.16	轴压比过大

4 分析与讨论

Eastman^[32]将基于 BIM 的合规性审查的过程分为规范转译、BIM 模型准备、规则执行和推理、生成审查报告 4 个步骤。从信息和计算的角度,合规性审查的实现基于两方面信息:源于 BIM 模型的“设计信息”和源于设计规范的“条款信息”。合规性审查的本质,是将以上两方面信息导入一个公共的环境进行比较,进而形成审查结果。

语义网技术为上述的比较提供了这样一个环境。将 BIM 模型映射到语义网环境下,可以实现的路径很多,例如 IFC-STL, IFC-OWL, IFC-XML, IFC-JSON 等,本研究只是众多方法中的一种。另外,对于规范的转译,本研究为手工转译,未来可以与自然语言处理技术中的机器学习和深度学习等算法相结合,逐步实现转译过程的自动化。

从相关研究^[38,65]和本文结果来看,仍然有 20%~30%的设计条款,由于其模糊的描述、范围不清以及其他情况,暂时无法采用基于谓词的 SWRL 进行形式化和转译,因此,本文存在以下局限性:

(1) 转译过程中,设计条款主体(实体)的选择,对于转译结果具有一定影响。如有些条款既可以被分在“梁”中,也可以被分在“钢筋”或“材料”中,不同谓词定义方式可以展现出不同的规范转译结果。

(2) 某些语言模糊类设计条款,只能先进行同等含义的“转述”,进而才能进行转译。同时,对于类似于“适当放宽”,适当的范围具体是多少,只能转译人员自己理解其范围。另外,对于表后注释类和条款补充类,由于涉及嵌套和关联较多,部分条款只能选择性进行转译。

(3) 在规范转译过程中的定性条款,如在我国规范中总则、总体规定等定性条款多是阐述规范适用范围、其相关解释及制定标准,在具体设计的过程中主要起指导作用,通常并不在设计模型中具体体现,在 IFC 中也没有相应的实体进行对应。因此对于定性条款和推荐性条款的审查工作,没有在本研究范围之内。未来可以考虑将定性条款通过转述,转译成可审查的定量条款,或采用审查计算书的方式进行人工辅助审查。

针对上面的(1)~(2),如果采用人工转译还可以实现,若未来采用自然语言处理技术,则转译结果误差会比较大。

另外,虽然 SWRL 可以转译大部分计算类的设

计条款,但想要实现深度的结构分析功能(如调整梁和柱弯矩比例等)仍然面临很多挑战。合规性审查系统(软件)是否应该具备结构计算与分析功能,以及具备何种深度的结构分析功能是一个值得探讨的问题。如果具备结构分析功能,则需要考虑与目前结构分析软件功能是否重叠的问题;如果不具备结构分析功能,会导致基于BIM结构模型的审查盲点。因此,建议未来国家层面出台基于BIM模型的审查要点,明确审查内容的具体范围精细度。

5 结束语

本文所提出语义网环境下的BIM模型结构设计合规性审查系统,其核心在于构建结构设计规范本体知识库,该本体对转译后的规范条款以及BIM模型信息都具有较高适配性,可以实现规范条款与所审查模型的匹配连接,完成自动的合规性审查。但同时本系统也具有一定的局限性,系统中规范条款最终是以SWRL语言的形式完成录入,其对精度要求较高的公式处理能力稍显不足。此外,结构设计规范包含的内容较广,该本体的构建是长期不断完善的过程,我国规范也会不断推陈出新、更新换代,需要基于本文的系统在之后的研究中进一步完善。

本文提出基于本体的BIM模型结构设计合规性审查系统,其核心在于对BIM结构设计模型信息和规范条款,通过映射和SWRL转译到采用本体构建的知识库中,实现规范条款与所审查模型的匹配连接,完成自动的合规性审查。本研究选取《混规》中部分设计条款和BIM框架结构模型作为审查实例验证,提出的方法可适用于除《混规》以外其他设计规范,也可将该方法扩展至除框架结构以外其他结构类型进行合规性审查。对于较大工程的审查和分析效率还有待未来进一步验证。该方法能够减少目前我国合规审查工作对专家知识的依赖,降低审查结果的主观性,提高合规审查的效率、准确性和智能化水平,为后续开展更深层次自动合规审查研究提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 蔡亮, 张文玉, 孟岚. 德国建设工程设计审查监管情况介绍与启示[J]. 建设监理, 2017(9): 62-65.
CAI L, ZHANG W Y, MENG L. Introduction and enlightenment of supervision of construction engineering design review in Germany[J]. Project Management, 2017(9): 62-65 (in Chinese).
- [2] 王亚楠, 彭亚萍, 赵劲松. 基于 AutoCAD 的二次开发实现框架结构数字化审核[J]. 工业建筑, 2018, 48: 119-128.
WANG Y N, PENG Y P, ZHAO J S. Realization of digital audit of frame structure based on secondary development of Autocad[J]. Industrial Construction, 2018, 48: 119-128 (in Chinese).
- [3] 龙资. 框架结构施工图审查过程数字化的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
LONG Z. The procedural digital research for construction drawing review of frame structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [4] 褚江. 剪力墙及框架—剪力墙结构施工图审查过程数字化的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
CHU J. The research of construction drawing review digitization about shearwall structure and frame-shearwall structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 孙澄宇, 柯勋. 建筑设计中 BIM 模型的自动规范检查方法研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 140-145.
SUN C Y, KE X. Method of automatic design code checking for BIM models[J]. Building Science, 2016, 32(4): 140-145 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 张荷花, 顾明. BIM 模型智能检查工具研究与应用[J]. 土木工程信息技术, 2018, 10(2): 1-6.
ZHANG H H, GU M. Research and application of intelligent BIM model checking tools[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2018, 10(2): 1-6 (in Chinese).
- [9] 张笑彦. 计算式 BIM 技术在建筑设计合规性审查中的应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
ZHANG X Y. Research on the application of computational BIM technology in the compliance checking for architectural design[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2021 (in Chinese).
- [10] 刘洪. 基于 BIM 的结构设计规范审查方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LIU H. Research on BIM-based examination method of code for structural design[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).
- [11] CHOI J, CHOI J, KIM I. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings[J]. Automation in Construction, 2014, 46: 38-49.
- [12] ZHONG B T, DING L Y, LUO H B, et al. Ontology-based semantic modeling of regulation constraint for automated construction quality compliance checking[J]. Automation in Construction, 2012, 28: 58-70.
- [13] ZHANG S J, TEIZER J, LEE J K, et al. Building information modeling and safety: automatic safety checking of construction models and schedules[J]. Automation in Construction, 2013, 29: 183-195.
- [14] TAN X Y, HAMMAD A, FAZIO P. Automated code

- compliance checking for building envelope design[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24(2): 203-211.
- [15] HÄUBLER M, ESSER S, BORRMANN A. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN[J]. *Automation in Construction*, 2021, 121: 103427.
- [16] XU X, CAI H B. Semantic approach to compliance checking of underground utilities[J]. *Automation in Construction*, 2020, 109: 103006.
- [17] 高歌, 张越美, 刘寒, 等. 基于知识库的 IFC 模型检查方法研究[J]. *图学学报*, 2019, 40(6): 1099-1108.
GAO G, ZHANG Y M, LIU H, et al. Research on IFC model checking method based on knowledge base[J]. *Journal of Graphics*, 2019, 40(6): 1099-1108 (in Chinese).
- [18] 刘毅, 吴浪韬, 梁雄, 等. 知识图谱在 BIM 模型审查中的应用研究[C]//第六届全国 BIM 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 122-126.
LIU Y, WU L T, LIANG X, et al. Research on application of knowledge graph in BIM model review[C]//The 6th National BIM Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 122-126 (in Chinese).
- [19] 周俊羽, 向星磊, 马智亮. 基于知识图谱的 BIM 机电模型构件拓扑关系自动检查方法[C]//第七届全国 BIM 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 479-483.
ZHOU J Y, XIANG X L, MA Z L. Automatic checking method of component topological relationship of BIM electromechanical model based on knowledge graph[C]//The 7th National BIM Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 479-483 (in Chinese).
- [20] 郑哲, 周育丞, 林佳瑞, 等. 基于知识图谱的性能化消防设计审查方法[C]//第七届全国 BIM 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 474-478.
ZHENG Z, ZHOU Y C, LIN J R, et al. Performance based fire protection design review method based on knowledge graph[C]//The 7th National BIM Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 474-478 (in Chinese).
- [21] 吴浪韬, 冷烁, 梁雄, 等. 建筑机电设备知识图谱的构建和应用[C]//第七届全国 BIM 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 489-496.
WU L T, LENG S, LIANG X, et al. Construction and application of knowledge graph of building electromechanical equipment[C]//The 7th National BIM Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 474-478 (in Chinese).
- [22] 姜韶华, 周涵. 支持建设行业合规性检查的语义方法[J]. *土木工程与管理学报*, 2017, 34(5): 60-65, 89.
JIANG S H, ZHOU H. Semantic-based approach for compliance checking of construction industry[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2017, 34(5): 60-65, 89 (in Chinese).
- [23] 林佳瑞, 郭建锋. 基于 BIM 的合规性自动审查[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2020, 60(10): 873-879.
LIN J R, GUO J F. BIM-based automatic compliance checking[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2020, 60(10): 873-879 (in Chinese).
- [24] ZHOU Y C, ZHENG Z, LIN J R, et al. Integrating NLP and context-free grammar for complex rule interpretation towards automated compliance checking[J]. *Computers in Industry*, 2022, 142: 103746.
- [25] ZHENG Z, ZHOU Y C, LU X Z, et al. Knowledge-informed semantic alignment and rule interpretation for automated compliance checking[J]. *Automation in Construction*, 2022, 142: 104524.
- [26] JOAO S J, PATRICIA T, JULIANA P B, et al. Automated compliance checking in healthcare buildings design[J]. *Automation in Construction*. 2021(129): 103822.
- [27] ZHENG Z, LU X Z, CHEN K Y, et al. Pretrained domain-specific language model for natural language processing tasks in the AEC domain[J]. *Computers in Industry*, 2022, 142: 103733.
- [28] SOLIBRI INC. Solibri model checker[EB/OL]. (2018-02-10) [2022-05-01]. <http://www.solibri.com/>.
- [29] GREENWOOD D, LOCKLEY S, MALSANE S, et al. Automated compliance checking using building information models[C]//The Construction, Building and Real Estate Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors. Paris: RICS, 2010: 266-274.
- [30] MALSANE S, MATTHEWS J, LOCKLEY S, et al. Development of an object model for automated compliance checking[J]. *Automation in Construction*, 2015, 49: 51-58.
- [31] EASTMAN C, LEE J M, JEONG Y S, et al. Automatic rule-based checking of building designs[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(8): 1011-1033.
- [32] 王诗旭. 基于 BIM 的规则检查技术辅助建筑设计方法研究: 以四川大学华西医技楼项目为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
WANG S X. A study on the method of architecture design assisted by rule checking technology based on BIM-practice and exploration on the Sichuan university, west China hospital medical technology building project[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [33] 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.
- [34] BERNERS-LEE T, HENDLER J, LASSILA O. The semantic web[J]. *Scientific American*, 2001, 284(5): 34.
- [35] PAUWELS P, ZHANG S J. Semantic rule-checking for regulation compliance checking: an overview of strategies and approaches[C]//The 32th International CIB W78 Conference. Eindhoven: CRC Press, 2015: 619-628.
- [36] DEBORAH L M, FRANK V H. OWL web ontology language overview[EB/OL]. (2004-02-10) [2022-05-10]. <https://static.twoday.net/71desa1bif/files/W3C-OWL-Overview.pdf>.
- [37] GOMEZ-PEREZ A, CORCHO O. Ontology languages for the semantic web[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2002, 17(1): 54-60.
- [38] PAUWELS P, ZHANG S J, LEE Y C. Semantic web technologies in AEC industry: a literature overview[J]. *Automation in Construction*, 2017, 73: 145-165.
- [39] YURCHYSHYNA A, ZARLI A. An ontology-based approach for formalisation and semantic organisation of conformance requirements in construction[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(8): 1084-1098.
- [40] PAUWELS P, VERSTRAETEN R, DE MEYER R, et al. Semantics-based design: can ontologies help in a preliminary design phase?[J]. *Design Principles and Practices: an International Journal-Annual Review*, 2009, 3(5): 263-276.
- [41] PAUWELS P, PLANNING U, DE MEYER R, et al. Visualisation of semantic architectural information within a game engine environment[C]//The 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality. Sendai: CONVR2010 Organizing Committee, 2010: 219-228.
- [42] PAUWELS P, VAN DEURSEN D, DE ROO J, et al. Three-dimensional information exchange over the semantic web for the domain of architecture, engineering, and construction[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2011, 25(4): 317-332.

- [43] REZGUI Y, BODDY S, WETHERILL M, et al. Past, present and future of information and knowledge sharing in the construction industry: towards semantic service-based e-construction?[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(5): 502-515.
- [44] HJELSETH E, NISBET N. Exploring semantic based model checking[C]//The 27th CIB W78 International Conference. Cairo, Egypt: CIB W78, 2010: 54-64.
- [45] HJELSETH E, NISBET N. Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology[C]//The CIB W78-W102 Conference. Sophia Antipolis: CIB W78-W102, 2011: 1-10.
- [46] PAUWELS P, VAN DEURSEN D, VERSTRAETEN R, et al. A semantic rule checking environment for building performance checking[J]. *Automation in Construction*, 2011, 20(5): 506-518.
- [47] 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.
- [48] PAUWELS P, KRIJNEN T, TERKAJ W, et al. Enhancing the ifcOWL ontology with an alternative representation for geometric data[J]. *Automation in Construction*, 2017, 80: 77-94.
- [49] BEACH T H, REZGUI Y, LI H, et al. A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(12): 5219-5231.
- [50] ZHANG J S, EL-GOHARY N M. Semantic NLP-based information extraction from construction regulatory documents for automated compliance checking[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(2): 4015014.1.
- [51] SALAMA D M, EL-GOHARY N M. Semantic text classification for supporting automated compliance checking in construction[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(1): 04014106.
- [52] VENUGOPAL M, EASTMAN C M, SACKS R, et al. Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2012, 26(2): 411-428.
- [53] BELSKY M, SACKS R, BRILAKIS I. A Framework for semantic enrichment of IFC building models[C]//The 30th CIB W78 International Conference. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 514-523.
- [54] BELSKY M, SACKS R, BRILAKIS I. Semantic enrichment for building information modeling[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2016, 31(4): 261-274.
- [55] BLOCH T, SACKS R. Clustering information types for semantic enrichment of building information models to support automated code compliance checking[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2020, 34(6): 04020040.
- [56] PAUWELS P, VAN DEURSEN D, DE ROO J, et al. Three-dimensional information exchange over the semantic web for the domain of architecture, engineering, and construction[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2011, 25(4): 317-332.
- [57] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese).
- [58] 张吉松, 于泽涵, 赵丽华. 基于一阶谓词逻辑的结构设计规范表示方法[J/OL]. *土木与环境工程学报: 中英文*, 2022: 1-10. [2022-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220423.2146.004.html>. ZHANG J S, YU Z H, ZHAO L H. Representation of structural design specifications based on first-order predicate logic[J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022: 1-10. [2022-05-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220423.2146.004.html> (in Chinese).
- [59] World Wide Web Consortium. W3C standards[EB/OL]. (2021-04-24) [2022-05-01]. <https://www.w3.org/standards/>.
- [60] World Wide Web Consortium. A semantic web rule language combining OWL and RuleML[EB/OL]. (2004-10-15) [2022-05-01]. <http://www.w3.org/Submission/SWRL>.
- [61] RODRIGUEZ M A, BOLLEN J, VAN D S. A practical ontology for the large-scale modeling of scholarly artifacts and their usage[C]//The 7th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries. New York: ACM, 2007: 278-287.
- [62] NOY N, MCGUINNESS D L. Ontology development 101[EB/OL]. (2005-07-18) [2022-05-10]. <http://protege.stanford.edu>.
- [63] Stanford University. Protégé[EB/OL]. (2018-03-01) [2022-05-01]. <https://protege.stanford.edu>.
- [64] CONNOR M. Mapping master DSL[EB/OL]. (2020-06-20) [2022-05-01]. <https://github.com/protegeproject/mappingmaster/wiki/MappingMasterDSL>.
- [65] NAWARI N. The challenge of computerizing building codes in a BIM environment[C]//International Conference on Computing in Civil Engineering. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012: 285-292.