

文章编号:

自动审图及智能审图研究与应用综述

林佳瑞, 周育丞, 郑哲, 陆新征

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 审图, 即设计审查, 是保障工程设计安全、环保、舒适、合规的关键环节。针对传统人工审图成本高、主观性强、低效、易错等问题, 智能审图应运而生并被广泛关注与应用。本文对近年来自动化审图和智能审图的研究与应用做了全面调研和综述, 建立了相应的理论研究框架, 并系统总结了智能审图的应用发展路径。当前, 相关研究主要围绕图(或设计)的可计算性与规范(或知识)的可计算性展开, 前者重点解决计算机如何识别、理解设计方案的问题, 后者重点解决计算机如何理解规范知识并进行推理的问题。根据数字化与智能化的方式, 可将智能审图相关应用实践分为数字化、感知智能、认知智能三个维度, 其中审图流程及业务的数字化是基础, 感知智能是 CAD 识图、逆向翻模的技术支撑, 认知智能则是知识推理计算的重要手段。最后, 研究指出智能审图方兴未艾, 在模型语义扩充、复杂工程知识表示学习、性能化设计审查、算法鲁棒性及透明性等方面仍面临着巨大挑战。

关键词: 智能审图; 合规性审查; 信息模型; 知识推理; 发展路径; 综述

中图分类号: TU17 **文献标志码:** A **doi:**

RESEARCH AND APPLICATION ON SMART DESIGN REVIEW

LIN Jia-Rui, ZHOU Yu-Cheng, ZHENG Zhe, LU Xin-Zheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Design review, i.e., design compliance checking, is a key step to ensure the safety, environmental protection, comfort, and compliance of a design. To address the problem of high cost, subjectivity, low efficiency, and error-proneness of manual design drawing review, smart design review (e.g., automated compliance checking) has been proposed and widely studied and applied. This research provides a comprehensive review of the research and application progress of smart design review in recent years, establishes its theoretical research framework, and systematically summarized the development path of its application. Currently, researches are mainly focusing on the computability of drawings (or designs solutions), and computability and reasoning of regulations (or knowledge). The application of smart design review can be classified into three aspects: digitization, perceptual intelligence, and cognitive intelligence. Among them, digitization is the foundation of the design review process, perceptual intelligence is the support of the CAD drawing recognition and modeling, and cognitive intelligence is an important method for knowledge reasoning and computation. Finally, this research pointed out that the smart design review is in the ascendant, and it still faces huge challenges in terms of model semantic extending, complex knowledge representation, performance-based design review, and algorithm robustness and transparency.

Key words: smart design review; compliance checking; building information modelling; knowledge reasoning; development path; review

收稿日期:; 修改日期:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908323, 72091512), 清华大学-广联达 BIM 联合研究中心(RCBIM)

通讯作者: 林佳瑞(1987—), 男, 山东人, 助理研究员, 博士, 主要从事智能建造、数字孪生模型研究(E-mail: lin611@tsinghua.edu.cn)

作者简介: 周育丞(1998—), 男, 贵州人, 硕士生, 主要从事建筑信息化相关的研究(E-mail: zhouyc19@mails.tsinghua.edu.cn);

郑哲(1997—), 男, 四川人, 博士生, 主要从事建筑信息化相关的研究(E-mail: zhengz19@mails.tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 博导, 主要从事数值模拟与防灾减灾研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn)

建筑工程的整个生命周期受各种法规、标准、规范以及各类约定的约束^[1]。作为确保设计质量、保障工程建设的关键环节,审图(即设计审查)当前仍高度依赖人工核对方式。人工审查对相关审查人员的经验与水平要求高,且存在着审查尺度不一、低效漏项易出错、人为操控、成本高昂、流程耗时等问题^[2,3]。为解决上述问题,以自动规则审查(Automated Rule Checking, ARC)或自动合规性审查(Automated Compliance Checking, ACC)为代表的自动审图与智能审图技术方法的许多学者广泛关注与持续探索。

随着工程设计规模与复杂性的不断增加,劳动力成本的增长,智能审图得到了越来越多的关注和研究,其重要性也日益凸显^[4,5]。因此,本文综述了近年来自动审图和智能审图相关的研究与应用方面的进展,提出了未来的智能审图需求与发展方向,以期能够对土木工程领域智能审图的研究与应用提供参考。

1 自动审图及智能审图研究进展

智能审图早期研究以 ARC 为主,最早可以追溯到上个世纪 60 年代,从 Fenves 使用决策表(Decision Table)进行设计规则审查开始^[6]。这些研究采用了各种方法,并侧重于 ARC 不同的目的或领域。例如 Garrett 和 Fenves^[7]提出了一种基于知识的策略并通过使用数据项、决策表、信息网络和组织系统来表示设计标准。Delis 和 Delis^[8]提出了一种通过基于知识的专家系统中对工程规范进行编码的方法,其中规则以 IF-THEN 形式存储。Han 等^[9]提出了一种混合指令/性能审查用于 ARC 的方法,该方法对没有不确定性和冲突的建筑规范指令性语句进行建模,并对剩余的部分采用基于性能化的方法进行检查。Ding 等^[10]提出了一种使用基于对象的规则表示建筑规范和基于 IFC (Industrial Foundation Classes) 模型表示设计的 ARC 方法,以用于无障碍法规的设计审查。

2000 年以后,建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 技术带来了较为全面、丰富的设计信息描述能力^[11-14],结合本体^[15]、一阶逻辑^[16]等规范条文知识、规则的计算机表示,有关学者开展了广泛的研究探索。近年来,基于 BIM 的自动审图方法和软件发展迅速^[2]。本研究结合 Eastman^[17]、Nawari^[18]、El-Gohary^[19,20]、Amor^[21,22]

等相关领域知名学者及其团队的研究成果,总结提出如图 1 所示的自动审图与智能审图研究框架。

如图 1 所示,当前相关研究主要围绕着两部分展开:1) 图或设计信息的可计算性,即解决计算机如何识别、理解设计方案的问题,大致可以分为智能识图、逆向建模、语义模型表达与扩展三部分;2) 规范知识的可计算性,即解决计算机如何理解工程规范知识并进行推理的问题,包括实体与关系识别、规则解译、知识/规则的形式化表达等。下面依次分别展开讨论。

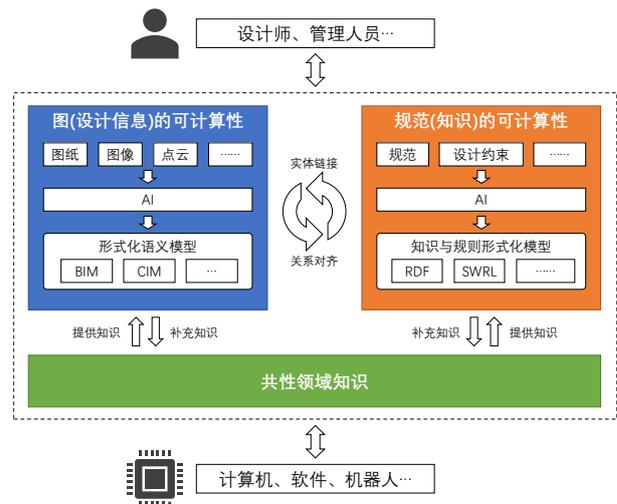


图 1 自动审图及智能审图的研究框架

Fig.1 Research framework of ARC

1.1 图的可计算性

图,是工程设计信息表达的重要载体,是审图或设计审查的核心对象。长期以来,设计信息的表达主要依靠图纸实现,通过 CAD 文件、PDF 文件或图像实现传递和存储。这种方式下计算机仅可获取基本的像素颜色数据或几何线条、图层、附加文本等数据^[21],缺乏构件类型、属性特征及关联信息等丰富语义数据的表达能力。以面向对象数据建模方法为基础,发展形成的 BIM 技术^[23]与 CIM 技术,可以表达构件几何形体、属性特征及逻辑关联等丰富的语义信息(如图 2 中 IfcSpace 的名称、防火分区、楼层、面积等属性)^[24],形成了计算机可以自动识别、理解工程设计信息的形式化语义模型。因此,相较 CAD 图纸, BIM 及 CIM 模型蕴含了更加丰富的信息,可以更好地支持设计方案校审^[17]。

尽管历经多年发展, BIM/CIM 技术仍未完全普及,以 CAD 为代表的二维图纸仍大量应用。综合考虑既有建筑改造与城市更新、管理需求,除了

BIM/CIM 模型之外, 三维点云、影像、CAD 图纸都将是设计信息的重要载体与来源。因此, 围绕自动审图场景, 有关研究主要集中在以下几个方面。

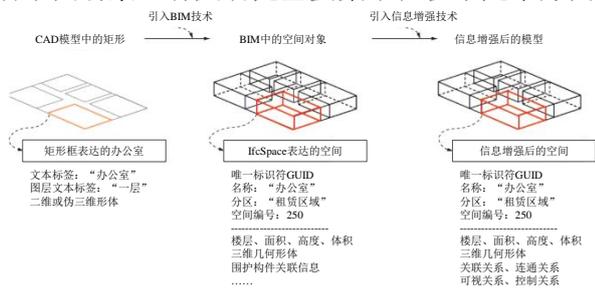


图2 设计信息表达方式的演进^[2]

Fig.2 Evolution of the design information representation^[2]

1.1.1 自动识图

首先, 无论影像图片还是 CAD 图纸, 仅仅包含基本的像素、几何线条及文本信息, 构件类型、属性及关联信息需要专业人员依赖个人经验读图理解得到。自动审图和智能审图的前提就是让计算机具备读图、识图能力。有关研究自人工设计识图规则开始^[25], 随着深度学习掀起的人工智能研究热潮, 近年来大量基于机器学习、深度学习的自动识图得到了广泛的关注和实践。例如, 使用物体检测的深度学习模型从扫描的二维图纸中识别建筑构件^[26], 对既有建筑物的图像和 CAD 图纸进行半自动几何信息抽取与建模^[27], 自动分析识别 CAD 平面图并生成对应的 BIM 模型^[28]等。然而, 由于工程的可靠性要求及图纸内容的复杂性, 如何提高有关算法识别的准确性、种类覆盖多样性、整体有效性及可解释性仍是当前面临的核心难点^[29]。

1.1.2 BIM 逆向建模

如前所述, 鉴于 BIM 在语义信息表达方面的优势, 基于自动识图和三维重建的算法构建 BIM 模型可为后续自动审图及其他建筑工程信息利用场景带来极大的方便。根据 BIM 重建所依赖的数据差异, 可将有关研究分为基于 CAD/图纸的 BIM 重建^[30]与基于点云/图像的 BIM 重建^[31]两类。其中, 前者以自动识图结果为基础, 通过进一步提取形体尺寸信息来重建 BIM 模型; 后者则按照类似的步骤, 首先对点云或图像进行语义分割和识别, 并进一步提取尺寸等信息进行重建。典型的相关研究包括基于二维 CAD 图纸对既有建筑物进行空间拓扑关系挖掘及三维 BIM 模型重建^[32], 根据点云数据使用无监督机器学习模型重建 BIM 模型构件信息^[33]或建筑物室内 3D 信息重建^[34]。

1.1.3 语义模型表达与扩展

同时, 当前 BIM 模型中的信息尚不能完全满足设计检查的需要。例如, 当前的 BIM 尚不支持对可视关系、连通关系、性能化设计等信息的显式表达; 需要进一步引入空间数据分析等信息增强或扩充技术对既有模型结构进行完善和扩展^[35]。例如, Tan 等^[36]提出了一种针对建筑围护结构性能化设计的 BIM 模型扩展框架 Extended BIM (EBIM), 用于集成性能化仿真结果到 BIM 中。Solihin 等^[37,38]提出了一种针对规则语言的 BIM 模型结构 BIMRLSS (BIM Rule Language Simplified Schema); 该方法基于传统的关系型数据库实现了 BIM 空间几何关系的计算与查询, 从而可以解决建筑空间可达性、可视性分析的问题。同时, 考虑性能化设计需要对空间路径、空间封闭性等进行校核^[39], 因此往往需要采用实体模型、表面模型等不同的三维形体表达方式和图结构^[40]、八叉树等加速方法, 以支持高效的规则检查和自动审图需求^[41]。最后, 随着各国逐渐转向性能化设计模式^[42,43], 扩充设计 BIM 模型结构以容纳性能仿真信息, 从而支持面向性能化设计的智能审图也是未来的发展趋势之一^[17,21]。

1.2 规范知识的可计算性

规范, 广义上来说包括所有相关法规、标准、规范、规定、合同约定及其他自定约束, 是审图或设计审查的根本依据, 也是工程经验知识的重要载体。通常情况下, 规范知识以便于人们阅读的方式储存和表达, 如文本、表格或公式。但这种以文本为主的形式并不能满足计算机理解规范、提取知识并进行推理计算的需求。自动从规范中提取知识、解译规则, 建立规范知识的统一形式化表达, 实现复杂工程知识的推理计算是有关研究的主要关注焦点。当前研究主要包括以下几方面。

1.2.1 知识与规则的形式化表达

知识及规则的形式化表达是计算机存储、处理和共享工程知识的关键基础。下面分别围绕知识和规则的形式化表示两部分展开。

1) 知识的形式化表示

围绕知识表示, 有关学者发展出知识本体及语义网技术, 以描述特定领域的关键概念/实体、特征及其相互关系。形式上, 实体、属性及其关系通常被抽象为 RDF (Resource Description Framework) 三元组进行表示, 并可通过 RDF/XML, N-Triples, Turtle, RDFa, JSON-LD 等不同格式进行存储和管理。以 RDF 为基础, 通过扩展其对领域实体类别、

属性及其层级、包含关系的表达能力,逐渐演变出 RDFS 和网络本体语言 (Web Ontology Language, OWL) [16],为领域知识图谱建模奠定了基础。以 OWL 为基础,有关学者结合 IFC 标准构建了建筑业领域知识本体 ifcOWL[44],实现了 BIM 数据向本体知识的映射转换,探索了语义网及知识推理在设计合规性审查、施工安全等场景应用。然而,领域本体通常结合具体应用场景或需求建立,针对不同问题往往会形成不同的知识本体模型,如何有效的整合不同知识本体实现领域知识的统一建模仍然是值得关注的问题。此外,当前在复杂领域知识建模方面仍面临许多挑战,例如缺少对信息抽取整合的框架、处理知识本体建模时的信息不一致和重复等问题[45]。

2) 规则的形式化表示

除了基本领域实体、属性及其相互关系外,特定的工程逻辑约束和规则也是领域知识的重要组成部分。对智能审图来说,设计规则、约束形式化表达显得更加重要。通常情况下,审图规则可视为对特定类别或特定部分的工程实体的约束和限定,因此,有关规则的形式化往往离不开前述领域知识的表示模型或特定的领域数据模型。例如,面向本体的 SWRL 规则语言,以及语义网数据查询的 SPARQL 语言等等,均被用以表达设计审查规则并用以进行自动合规性检查[46,47]。同时,鉴于建筑领域的复杂性,针对已有规则表示方法存在的专业性强、特定表达能力不足等问题,有关学者在领域特定语言 (Domain Specific Language, DSL) [48]、可视化编程 (Visual Programming Language, VPL) [49]、业务流程建模[50]与智能审图的结合方面做了广泛的研究与探索,以改善有关方法的便捷性、透明性与可解释性。此外,为充分利用已有规则推理引擎和工具,也有学者探索利用 RuleML、Prolog 以及 Jess、Drools 等推理引擎的内置语言对审图规则进行建模[3]。可见,尽管有关学者在该领域已做了大量探索,但尚未形成统一的规则表示方法,如何结合智能审图特点构建开放、灵活的规则形式化表达手段仍待继续探索[2]。

1.2.2 规则解译

将规范知识转换为计算机可计算可处理的格式,常通过将规范条文翻译为特定形式的表达方式实现,这一步骤也被称为规则解译[17],同时也是自动审图最复杂且最重要环节之一[5]。

长期以来,规则的解译与更新均依赖领域专家人工实现[51,40],即通过硬编码 (hard-coded) [52]的机制开发规则审查系统。例如,新加坡的 CORENET 项目电子提交系统[17],以及广泛使用的 Solibri Model Checker 软件[53]。这些软件或系统通常是特定领域专用的,维护代价十分高昂且难以修改,也因此通常被称为黑盒方法[54]。

近年来,有关学者开始探索利用自然语言处理、本体论进行规则的自动或半自动解译。经过本文的梳理,现有的规则解译的方法可以分为规范条文浅层结构化和模式匹配方法两大类。下面分别对其分析综述。

1) 规范条文浅层结构化

该类方法旨在捕获规范文本的结构元数据并在浅层解析它们。例如, RASE 方法[55]认为每条规范条文的组成均可分为审查要求 (Requirement)、适用性 (Applicability)、对象选择 (Selection) 和例外情况 (Exception) 四部分,并可通过 R、S、A、E 四个符号标注各部分,从而实现法规文本的软编码,以帮助土木工程领域专家和程序员提取计算机可执行的审查规则。同时, RASE 方法标记的各部分还可以存在简单的逻辑运算关系 (和、或、非)。以该思路为基础,可进一步在块或段落级别实现规范文档的结构化表示[56],并实现基于语义网规则语言 (Semantic Web Rule Language, SWRL) 的规则生成和基于可扩展标记语言 (eXtensible Markup Language, XML) 的规则浅层解析与结构化[57]。我国学者在规范条文结构化等方面也做了初步的探索[58]。

该类方法只能在较粗粒度级别处理规范文本,仅具备句子级别的分析能力,而不能在单词/术语级别进行分析,因此仍然需要较多的人力投入。但该类方法具有较好的可解释性,是规则半自动解译的经典方法之一。

2) 基于语法分析与模式匹配的自动解译

该类方法可实现完全自动化的规则解译,将规范条文自动转换成计算机可处理的规则而无需人工干预。该类方法通常以自然语言处理 (Natural Language Processing, NLP) 方法为基础[59,60],首先通过分词、词性 (Part-of-Speech) 标注[61]、语法分析等手段处理规范条文,并以此为基础人工编制一系列术语映射、逻辑转换的模式和规则,从而自动将规范条文转化为规则逻辑子句,最终将其集成到

某特定系统实现自动规则检查^[3]。鉴于规范条文的专业性和特殊性,通用 NLP 方法往往在应对专业术语、地名及空间关系分析方面往往存在不足,因此往往需引入特定文本预处理措施、自定义术语字典、领域知识本体等手段提升该过程的准确率^[62]。基于该思路,有关学者在建筑节能^[62]、地下空间设施^[63]合规性审查以及领域语义框架^[64]、道义逻辑描述^[65]等方面做了有益的探索。

当前,该类方法仍高度依赖基于正则表达式的模式匹配方法,存在模式匹配规则构建和维护成本高、领域相关度高、通用性较低等不足^[66]。例如,正则表达式存在无法表达递归关系的问题会导致其使用次数的急剧增加,并很容易变得难以维护。因此,结合深度学习等先进人工智能技术,研究面向各类规范条文规则解译的通用方法仍是智能审图的前沿方向之一^[67]。

1.2.3 领域知识图谱构建

当前,自动审图所依赖的领域知识本体或知识图谱仍以人工方式构建为主,或直接基于特定数据模型转换得到^[62]。该方式存在低效易错、更新困难等问题,难以有效支撑未来智能审图发展需求。随着深度学习、光学文字识别等先进信息技术的发展,工程文档和数据积累日益丰富,使得自动从海量数据中学习和抽取知识图谱成为可能。有关研究通常将知识图谱的构建分为两个部分:命名实体识别和关系抽取。其中,前者用以从海量数据中识别和发现领域概念实体,后者则通过算法学习提取不同实体之间的潜在关系。

命名实体识别(Named Entity Recognition, NER)是指从文本中识别具有特定意义的实体^[68]。目前已被广泛应用于工程领域以帮助信息抽取、构建知识图谱等。该类方法通常包括:1)基于规则和词典的方法,即手工构造规则模板并选取特征;2)基于统计的方法,包括隐马尔可夫模型、支持向量机、条件随机场等^[69];3)基于深度学习的方法,如循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)^[68]、长短期记忆网络(Long-Short Term Memory, LSTM)^[70]及其变体等。其中规则与词典的方法具有更高的准确率^[71],而统计和深度学习方法则更具灵活性,实际应用中需针对领域对准确率、召回率的要求灵活设计有关方法。

关系抽取(Relationship Extraction, RE),即实体关系抽取,其主要目的是从自然语言文本中识别

并判定实体对之间存在的特定关系^[72]。有关研究最早通过人工编写的匹配规则和词典的方法实现实体及其关系的抽取^[73],这种方式具有可解释性好、精确率高的优点,但存在人工投入大、可移植性差等问题,且缺乏未知实体及关系的提取能力。随着数据量的增长,隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)^[74]、条件随机场(Conditional Random Field, CRF)^[75]等统计学方法日益得到关注,可有效从大量语料中学习统计规律来识别实体及其相互关系^[76]。但该类方法存在高度依赖文本特征选取、训练开销大等问题,且算法结果受语料库规模和数量影响较大^[72]。

近年来,随着深度学习的提出和大规模语料库的积累,产生了以 BERT (Bidirectional Encoder Representation from Transformers) 为代表的系列大模型,将基于深度学习的知识图谱构建推向了新的高峰^[77]。然而,深度学习方法存在标注成本高等问题,且结果的可解释性、可扩展性仍是制约领域知识抽取应用的关键点之一^[72]。当前,建筑业知识图谱相关的研究和应用仍处于早期阶段^[78],价值巨大但亟待探索。如何兼顾各类人工智能算法高效、准确的特点与可靠、可解释的工程诉求,将是未来智能审图等工程应用的关键挑战。

1.3 图与知识可计算性的融合

同时,应该注意到,当前图的计算性与规范知识的计算性有关研究仍相对独立。在图与规范对信息的描述出现交集的地方,例如对同一个概念实体进行表达时,往往可能存储表述方式不完全一致的问题。因此,需要将两者的描述方式进行连接对应,即应该“说同一套语言”^[79,80]。相关研究包括语义对齐、实体链接等。

语义对齐等方法目前已在各个领域得到广泛研究^[81],可分为三种类型:1)基于规则的方法,2)监督学习方法,3)无监督学习方法。基于规则的方法通常利用字典查找和字符串匹配算法^[82]或人工编写规则来测量提取的词语和本体概念之间的词法相似性^[83]。对于字符串匹配算法,构建包含别名、缩写、替代拼写等的大型名称字典需要耗费大量人工^[81]。且一旦映射表中不包含概念的别名,语义对齐过程将无法完成。对于人工编写规则,需要人工定义文本模式和语义对齐的模式匹配规则。监督学习的方法从有标签的训练数据中学习提取的单词和本体概念名称之间的相似性。近年来,相关学者

开发了一些用于模型训练的开放数据集，基于深度学习的语义对齐方法也被大量研究^[84]。虽然这种方法免除了人为参与模式定义，但仍然需要人工准备训练数据集^[85]。无监督的方法，例如词嵌入模型，可以从大量无标注语料库中学习词的分布式表示，是挖掘语义信息方面非常具有前景的一种方法^[86]。与前两种方法相比，无监督方法在数据准备阶段需要更少的人力。

在自动审图领域中，也有学者在语义对齐等方面对图与知识可计算性的融合进行了研究。自动审图中的语义对齐旨在将文本中提取的命名实体映射到知识库中的相应概念（如本体、知识图谱），以促进对文本的理解^[81,86]。在现有的研究中，将规范知识中的概念/关系与本体或 BIM 中的概念/关系进行对齐和映射主要是通过基于规则的方法，例如使用基于关键字的匹配^[59,62]或手工制作映射表^[85]。使用监督/无监督学习方法的研究则较少。

未来，将这两部分涉及的一些底层的共性领域知识，如领域术语的分类及层次关系等知识进行统一的建模与管理，对图与规范的协同计算、提升智能审图水平具有重要意义。

2 自动审图及智能审图应用实践

近年来，自动审图及智能审图在国内外得到广泛关注，有关政策不断施行、软件研发及应用也蓬勃发展，相关应用实践按数字化和智能化水平可大致分为三个维度，如图 3 所示。1) 数字化维度：采用电子文档交付、线上审图等数字化的审图流程，基于 CAD 图纸或 BIM 进行。2) 感知智能维度：包括图纸识别、逆向建模等内容，大部分基于 CAD 或 BIM，也涵盖部分基于 AI 的智能审图方法。3) 认知智能维度：包括知识推理、规则检查等内容，主要基于三维 BIM 模型进行，包含较多与 AI 智能审图相关的算法。下面分别对与智能审图相关的政策和软件应用等进行综述。

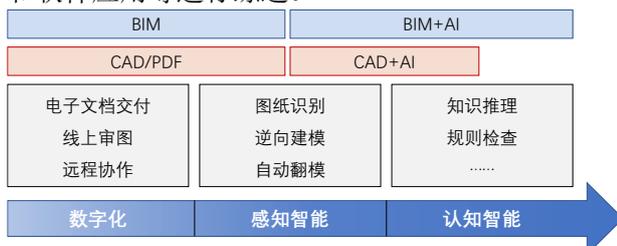


图 3 自动审图及智能审图应用实践的三个维度

Fig.3 Three aspects of the application of smart design review
2.1 国内相关政策

近十年来，随着 BIM 技术的广泛应用，我国与 ARC 相关的应用也开始逐渐增加。2016 年，住建部在发布的《2016-2020 年建筑业信息化发展纲要》^[87]中指出，要深度融合 BIM、大数据、智能化、云计算等信息技术，要加快相关信息化标准的编制，重点编制和完善建筑行业及企业信息化相关的编码、数据交换、文档及图档交付等基础数据和通用标准。2019 年，国务院办公厅发布《国务院办公厅关于全面开展工程建设项目审批制度改革的实施意见》^[88]，提出要精简审批环境，加快探索取消施工图设计文件审查或缩小审查范围，并尽快形成可复制可推广的经验；同时，建立完善工程建设项目审批管理系统，形成形成统一的审批流程、统一的信息数据平台、统一的审批管理体系。

这些政策的发布大大推动了各地政府形成数字化的审图流程系统，即达到图 3 中的数字化层级。同时，在各地发展数字化审图的过程中，部分地区对于更高水平的自动/智能审图也进行了探索。

2020 年，经住建部批准，北京与深圳均开始开展了建设工程人工智能（AI）审图试点的工作^[89]，面向二维 CAD 图纸进行自动审图。湖南省在我国较早启动了自动化审图方面的推广与应用，2020 年湖南省住建厅发布了《关于开展全省房屋建筑工程施工图 BIM 审查试点工作的通知》^[90]，要求全省新建房屋建筑工程（不含装饰装修）施工图自 2020 年 6 月 1 日起分阶段实施 BIM 审查，申报施工图审查时应提交 BIM 模型。近年来，以先进信息技术与人工智能的快速发展为契机，我国各地方政府发布与推进自动审图相关政策数量开始大幅增加，图 4 展示了 2016-2020 年我国各级政府发布与自动化审图相关政策数量变化。

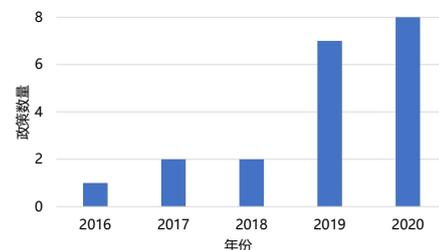


图 4 我国各级政府发布与自动化审图相关政策数量变化
Fig.4 Number of published policies for smart design review in China

2.2 国内应用进展

软件应用方面，自 2010 年后，越来越多的企业，包括新兴企业，开始关注并加入智能审图这一领域，并推出了相关的产品应用。基于有关公开资

料, 本文对截至 2021 年 11 月国内典型软件及其应用情况概述如下。

1) 广联达 BIM 审图

数字建筑平台服务商广联达于 2014 年发布了该公司首款 BIM 审图软件“广联达 BIM 审图”^[91]; 该软件已历经多次迭代更新, 最新版为 v3.3 版, 更新于 2016 年。该软件特点包括本地化的碰撞检测、问题分组显示、云沟通、报表图文并茂。软件以 BIM 三维模型为基础, 可集成并自动审查土建、机电、钢筋、场布等全专业的图纸问题, 支持的常用审查功能包括: 碰撞检查, 楼梯检查(如楼梯碰头, 踏步高度/数量的检测), 房间净高检查等。软件同时支持 Revit、Tekla、MagiCAD、广联达 BIM 算量等 BIM 软件模型文件以及基于国际标准 IFC 的 BIM 模型数据。

广联达推出的 BIM 审图软件是国内最早的面向 BIM 模型的自动审查软件。其在审查内容方面主要聚焦于空间几何关系的审查。

2) PKPM BIM 审查系统

PKPM 是中国建筑科学研究院研发的系列工程管理软件。2016 年前后, PKPM 推出了其在线 BIM 审查系统, 该系统基于云平台以网页形式提供审图服务。历经多次改进, 目前该系统已内置并支持 30 多本专业相关规范的 400 多条条文, 具有多专业 BIM 模型审查能力^[92], 主要功能包括: 1) 云审查平台——采用浏览器端自主轻量化三维展示; 2) 全专业审查——支持建筑、结构、给排水、暖通、电气五大专业, 消防、人防、节能、装配式四大专项智能审查; 3) 智能审查引擎——解析规范条文, 建立规则库, 针对 BIM 模型进行一键智能审查; 4) 标准数据格式——对接行业主流软件, 包含 Revit、PKPM 结构、PKPM-BIM 系列。该软件也已在有关地方政府开展了推广应用, 如基于该软件的开发的湖南省施工图审查平台^[93], 广州智慧城市 CIM 平台等。

3) 万翼科技 AI 审图

万翼科技成立于 2016 年, 是万科集团的全资子公司。2020 年, 万翼科技发布了设计图纸的审查工具——AI 智能审图系统^[94]。该系统旨在帮助建筑设计师提供智能强审和精审服务, 大幅减少图纸审查的繁复工作量。其以网页形式提供 CAD 二维图纸审查服务, 包括图纸一键上传、AI 智能识别图纸、AI 智能审图等功能。系统的审查结果以 PDF 文档

形式导出展示, 并在其中以表格等方式汇报。目前, 该系统已支持企业标准和国家标准规范的智能审查, 覆盖住宅工程的建筑、结构、给排水、暖通、电气五大专业。

2021 年, 深圳市住建局与万翼科技共同研发的 AI 审图系统上线服务, 将用于对未来深圳市房屋建设类施工图纸进行抽查^[95]。目前, 万翼科技官方资料表示, 其 AI 审图系统已具备较好的国家规范自动审查能力, 在全国 40 多家设计院、50 多个试点项目进行了试用, 审图效率大幅提升, 相比人工提效 8.7 倍、节约成本近 90%。

4) 小智审图

小智审图科技有限公司成立于 2017 年。该公司审图软件主要面向 CAD 图纸进行审查^[96], 可以智能识别并提取 CAD 施工图语义特征, 审查建筑、结构、设备专业的规范强条。审查结果包含警告与错误, 并可单独标识需人工复核的部分, 具有错误自动定位、审查结果复现等功能, 据称可覆盖 99% 施工图, 大大降低漏审漏查风险。

该公司测试表明, 其系统在施工图符合国家或行业制图标准并正确设置外部参照或绑定图纸的情况下, 审查结果平均准确率达 95%。对上部建筑施工图一般 30 秒-2 分钟完成审查, 对地下室施工图需要 5-15 分钟, 可节省 90% 以上的校审工作时间。目前, 该审图系统已被 50 多家相关企业采用。

5) 中设数字

中设数字(CBIM)^[97]是由原中国建筑设计研究院 BIM 设计研究中心发展而来, 也在不断探索 AI 在 BIM 设计中的应用。近年来, 中设数字提出了一套用于审查规则推理的技术架构, 可通过领域特定语言将建筑与市政等规范转化为结构化的表示来进行 BIM 模型审查。在该框架下, 可以对 BIM 模型进行空间包围检测, 构件属性值缺失、异常等审查。在此基础上, 中设数字研发了智能 BIM 审批系统, 可以对 BIM 模型进行自动化一键审查并生成 PDF 审批报告文件。2021 年, 该系统被应用于南京市 BIM 规划报建云端智能化审查审批系统, 可提升 20-50% 的审查效率。

2.3 国外应用进展

国外有关自动/智能审图的应用起步较早, 从 21 世纪开始便有相关的系统或软件应用, 且主要面向 BIM 模型开发。早期的应用以纯空间碰撞检查为主, 如 Autodesk Navisworks, Tekla BIMsight 等。近年

来, 国外有关 ARC 的应用也有一些进展, 下面分别对其进行叙述。

1) Solibri Model Checker 软件

芬兰的 Solibri Model Checker (SMC) 软件^[98]是目前国外较为广泛采用的基于 BIM 的规则审查软件之一^[41]。SMC 能够处理各种模型审查规则, 包括建模质量检查、BIM 算量信息提取, 以及逃生路径、无障碍访问等规则检查功能。SMC 自带有数十个规则集 RuleSet, 包含大量可直接使用的规则, 其中每条规则都由参数化定义, 并通过树形结构组织索引。同时, SMC 也允许用户通过更改参数等方式进行添加、修改或删除规则。

目前, SMC 软件已在多个国家有了较为广泛的应用。例如, Malacarne 等^[99]通过分析意大利有关建筑规范条文, 基于 SMC 构建了审查规则库以支持当地建筑设计审查应用。他们的实践表明, 60%以上的审查规则所需数据可直接通过 IFC 或 GIS 格式获取。芬兰近年开展了 CoBIM (Common BIM)^[100]项目, 同样采用 SMC 进行设计审查, 但仅有约 7%的条文可以实现自动化的审查, 按照 Kallinen 和 Virkamäki^[101]对合规性审查按自动化程度的划分, 该项目尚处于智能化的早期, 仍待继续完善。

2) D-COM 规则审查系统

英国的 Digital Compliance (D-COM) 将用于构建一个数字化的生态系统以支持建筑合规性审查^[102], 其支持使用 RASE^[55]方法对文档进行标注, 从而将文本规范逐步转化为计算机可理解的格式, 以对 BIM 模型进行检查。该系统可以将标注后的文档

自动转化为结构化的表格, 并随后自动将结构化的表格转化为 IF-THEN 形式的伪代码。基于上述规则解译方法, 该系统支持自动条文审查, 并且可以根据审查结果进行条文溯源。

由于数据有限, 笔者对部分国内外典型自动审图应用系统/软件进行了总结, 并从数字化、感知智能和认知智能三个维度对其功能进行了梳理, 如表 1 所示。

2.4 国内外应用总结

可见, 近年来国内外在智能审图政策引导、软件研发与工程应用等方面做了丰富的探索实践。总体来看, 设计数据及审图流程的数字化是智能审图的重要基础, 各国及我国各区域根据行业发展现状分别选择了 CAD、BIM 等不同的数字化发展路径。同时, 以数字化为基础, 针对 CAD 图纸在工程语义表达方面的不足, 国内外均在基于 AI 的自动识图、建模方面做了大量探索实践, 已可较好处理常规工程及标准化程度较高的 CAD 图纸。如前所述, 除了设计数据的计算机处理, 工程规范的计算机自动计算推理也是智能审图的关键。当前, 考虑工程的高可靠性要求, 已有软件工具仍以人工编写、录入审图规则为主。各国软件均围绕本国工程规范及实践要求内置了大量的审图规则, 但仍以强制性条文为主, 在用户自定义需求、复杂规则处理等方面仍待持续提升。此外, 在审图规则管理、复杂规则推理等方面尚未形成的技术方案和方法体系, 不同软件结合各自特点采用了不同的实现方式, 总体上呈百花齐放的态势。

表 1 部分国内外自动审图应用系统/软件

Tab.1 Summary of ARC applications

应用	数字化维度	感知智能维度	认知智能维度
广联达 BIM 审图 (v3.3 版, 2016 年)	审图问题批注 云端协同沟通 多种 BIM 格式支持	直接使用 BIM 模型	内嵌规则支持净空、净高以及管道间隙等空间规则的检查
PKPM BIM 云审查 (2020 年)	网页轻量化展示 多种 BIM 格式支持	直接使用 BIM 模型	内置 30 余本规范、400 多条审查规则
万翼 AI 审图	审图问题批注 文件云端存储 审查报告输出	智能识别 CAD 图纸 对图层样式无要求 无需处理图块等信息	支持建筑、结构、给排水、暖通、电气等多个国家规范的审图规则
小智审图	文件云端存储 审查报告输出	智能识别 CAD 图纸 对图层样式无要求 无需处理图块等信息	支持建筑、结构、设备等专业规范的强条规则审查
中设数字 BIM 审批	云端审批协同 审查报告输出 支持多种 BIM 格式	直接使用 BIM 模型	通过领域特定语言支持多个国家规范, 同时支持属性值缺失、异常等数据质量检查
SMC 软件	审图问题批注 云端审批协同 支持 IFC 标准格式	直接使用 BIM 模型	支持参数化定义规则, 具有建模质量检查、逃生路径和无障碍访问等规则审查
D-COM 系统	云端审查流程 支持 IFC 标准格式	直接使用 BIM 模型	通过 RASE 标注支持规则提取, 以支持 BIM 模型自动审查

注: 表中软件版本及其功能信息统计截止时间为 2021 年 11 月

3 结论

审图或设计审查,是保障工程设计质量、提升建造效率的关键环节。鉴于传统人工审图存在的低效易错等问题,自动审图与智能审图被日益关注。本文系统综述了近年来自动审图与智能审图相关的研究与应用现状,指出有关研究可以分为图(或设计)的可计算性与规范(或知识)的可计算性两大类,前者主要关注计算机如何识别理解设计数据的问题,后者重点解决计算机如何理解和利用规范知识的问题。根据数字化与智能化方面的不同,本文将有关应用实践分为数字化、感知智能与认知智能三个维度,并指出三者分别是智能审图的基础前提、技术支持和未来趋势。

然而,审图过程的自动化与智能化仍任重道远。当前,设计信息语义模型在复杂空间关系、性能化数据表达等方面仍有待加强;工程知识与规则表达方面仍未形成统一、开放、灵活的形式化模型,难以有效表达复杂工程知识与规则;且设计数据模型与规范知识模型之间尚缺乏统一的底层共性模型支撑。同时,无论是智能识图、逆向建模还是知识、规则的自动学习提取,都面临着算法准确性与鲁棒性、可靠性、透明性的巨大挑战,实现审图过程的可追溯、结果的可验证将是制约有关研究实践的关键难题。

近年来国内外相关实践应用迅猛发展,但仍然以数字化为主体,智能化仍处于探索阶段,尚未大规模开展。未来仍需筑牢数字化的基础,并在其上结合我国现状同时发展基于感知智能和认知智能的自动与智能审图应用与实践,有效兼顾存量工程与新建工程的需求。

4 致谢

感谢国家自然科学基金项目(51908323, 72091512),清华大学-广联达 BIM 联合研究中心(RCBIM)的资助。

参考文献:

[1] NAWARI N O. Building Information Modeling: Automated Code Checking and Compliance Processes[M/OL]. CRC Press, 2018[2020-08-18]. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351200998>. DOI:10.1201/9781351200998.

[2] 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 Jiarui, GUO Jianfeng. BIM-based automatic

compliance checking[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2020, 60(10): 873-879. (in Chinese)

[3] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Integrating semantic NLP and logic reasoning into a unified system for fully-automated code checking[J/OL]. Automation in Construction, 2017, 73: 45-57. DOI:10.1016/j.autcon.2016.08.027.

[4] BEACH T H, HIPPOLYTE J L, REZGUI Y. Towards the adoption of automated regulatory compliance checking in the built environment[J/OL]. Automation in Construction, 2020, 118: 103285. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103285.

[5] ISMAIL A S, ALI K N, IAHAD N A. A Review on BIM-based automated code compliance checking system[C/OL]//Proceedings of the 5th International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS). Langkawi, Malaysia: IEEE, 2017: 1-6[2020-02-22]. DOI:10.1109/ICRIIS.2017.8002486.

[6] FENVES S J. Tabular decision logic for structural design[J/OL]. Journal of the Structural Division, 1966, 92(6): 473-490. DOI:10.1061/JSDEAG.0001567.

[7] GARRETT J H, FENVES S J. A knowledge-based standards processor for structural component design[J/OL]. Engineering with Computers, 1987, 2(4): 219-238. DOI:10.1007/BF01276414.

[8] DELIS E A, DELIS A. Automatic fire-code checking using expert-system technology[J/OL]. Journal of Computing in Civil Engineering, 1995, 9(2): 141-156. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3801(1995)9:2(141).

[9] HAN C S, KUNZ J C, LAW K H. A hybrid prescriptive/performance based approach to automated building code checking[C/OL]//International Computing Congress. ASCE, 1998: 537-548[2021-08-07]. http://eil.stanford.edu/publications/chuck_han/9810%20IC C.pdf.

[10] DING L, DROGEMULLER R, ROSENMAN M, 等. Automating code checking for building designs - DesignCheck[J]. Clients Driving Innovation: Moving Ideas into Practice, 2006: 1-16.

[11] 林佳瑞, 张建平. 我国 BIM 政策发展现状综述及其文本分析[J]. 施工技术, 2018, 47(06): 73-78.
LIN Jiarui, ZHANG Jianping. Review and Exploratory Text Mining of Building Information Modeling Policies in China[J]. Construction Technology, 2018, 47(6): 73-78. (in Chinese)

[12] LIN J R, ZHOU Y C, ZHANG J P, 等. Classification and Exemplary BIM Models Development of Design Changes[C/OL]//Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). Banff, Canada: IAARC Publications, 2019: 122-127. DOI:10.22260/ISARC2019/0017.

[13] LIN J R, ZHOU Y C. Semantic Classification and Hash Code Accelerated Detection of Design Changes in BIM Models[J/OL]. Automation in Construction, 2020, 115: 103212. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103212.

[14] 张晓洋, 胡振中. 面向结构有限元分析的模型转换方法研究 [J/OL]. 工程力学, 2017, 34(6): 120-127. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2015.12.1014.
ZHANG Xiao-yang, HU Zhen-zhong. Research on Model Conversion Approach Towards Structural Finite Element Analysis[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 120-127. (in Chinese)

[15] ZHOU Y C, LIN J R. Ontology-Based Risk Assessment and Solution During Shield Tunnel Construction[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Innovative Production and Construction

- (IPC). 2019: 10.
- [16] 王向前, 张宝隆, 李慧宗. 本体研究综述[J/OL]. 情报杂志, 2016(6): 163-170. DOI:10.3969/j.issn.1002-1965.2016.06.028.
WANG Xiangqian, ZHANG Baolong, LI Huizong. Overview of Ontology Research[J]. Journal of Intelligence, 2016, 35(6): 163-170. (in Chinese)
- [17] EASTMAN C, LEE J min, JEONG Y suk, 等. Automatic rule-based checking of building designs[J/OL]. Automation in Construction, 2009, 18(8): 1011-1033. DOI:10.1016/j.autcon.2009.07.002.
- [18] NAWARI N O. Automating codes conformance in structural domain[C/OL]/Computing in Civil Engineering. 2011: 569-577. DOI:10.1061/41182(416)70.
- [19] SALAMA D M, EL-GOHARY N M. Semantic modeling for automated compliance checking[C]/Computing in Civil Engineering. 2011: 641-648.
- [20] SALAMA D A, EL-GOHARY N M. Automated compliance checking of construction operation plans using a deontology for the construction domain[J]. Journal of computing in civil engineering, 2013, 27(6): 681-698.
- [21] DIMYADI J, AMOR R. Automated building code compliance checking—where is it at[J]. Proceedings of CIB WBC, 2013, 6: 1.
- [22] DIMYADI J, AMOR R. Regulatory knowledge representation for automated compliance audit of BIM-based models[C]/Proceedings of the 30th CIB W78 International Conference. 2013: 68-78.
- [23] MARTINS J P, MONTEIRO A. LicA: A BIM based automated code-checking application for water distribution systems[J]. Automation in Construction, 2013, 29: 12-23.
- [24] CHOI J, CHOI J, KIM I. Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings[J/OL]. Automation in Construction, 2014, 46: 38-49. DOI:10.1016/j.autcon.2013.12.005.
- [25] 覃川. 基于 PKPM-BIM 平台的工程图纸三维重建设计与实现[C]/2019 全国模板脚手架工程创新技术交流会暨首届工程建设行业杰出科技青年论坛论文集. 天津, 2019: 4[2021-09-21].
QIN Chuan. Design and Implementation of 3D Model Reconstruction for Construction Drawing Based on PKPM — BIM Platform[C]/Proceedings of the National Formwork Scaffolding Engineering Innovation Technology Exchange Conference and First Engineering Construction Industry Outstanding Science and Technology Youth Forum. Tianjin, China, 2019: 4. (in Chinese)
- [26] ZHAO Y, DENG X, LAI H. A YOLO-Based Method to Recognize Structural Components from 2D Drawings[J/OL]. 2020: 753-762. DOI:10.1061/9780784482865.080.
- [27] LU Q, CHEN L, LI S, 等. Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings[J/OL]. Automation in Construction, 2020, 115: 103183. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103183.
- [28] BYUN Y, SOHN B S. ABGS: A System for the Automatic Generation of Building Information Models from Two-Dimensional CAD Drawings[J/OL]. Sustainability, 2020, 12(17): 6713. DOI:10.3390/su12176713.
- [29] ZHAO Y, DENG X, LAI H. A Deep Learning-Based Method to Detect Components from Scanned Structural Drawings for Reconstructing 3D Models[J/OL]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 2066. DOI:10.3390/app10062066.
- [30] 王太阳. 基于 CAD 图纸的建筑物 BIM 模型重建方法研究[J/OL]. 城市住宅, 2020, 27(7): 182-183. DOI:10.3969/j.issn.1006-6659.2020.07.060.
WANG Taiyang. Research on Reconstruction Method of Building BIM Model Based on CAD Drawing[J]. City & House, 2020, 27(7): 182-183. (in Chinese)
- [31] 邓林建, 程效军, 程小龙, 等. 一种基于点云数据的建筑物 BIM 模型重建方法[J]. 地矿测绘, 2016, 032(004): 14-16.
DENG Lin-jian, CHENG Xiao-jun, CHENG Xiao-long, et al. A Method of Building Information Model Reconstruction Based on Point Cloud Data[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2016, 032(004): 14-16. (in Chinese)
- [32] CHO C Y, LIU X, AKINCI B. Automated Building Information Models Reconstruction Using 2D Mechanical Drawings[C/OL]/MUTIS I, HARTMANN T. Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2019: 505-512. DOI:10.1007/978-3-030-00220-6_60.
- [33] BASSIER M, VERGAUWEN M. Unsupervised reconstruction of Building Information Modeling wall objects from point cloud data[J/OL]. Automation in Construction, 2020, 120: 103338. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103338.
- [34] MACHER H, LANDES T, GRUSSENMEYER P. From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings[J/OL]. Applied Sciences, 2017, 7(10): 1030. DOI:10.3390/app7101030.
- [35] LEE J K, LEE J, JEONG Y suk, 等. Development of space database for automated building design review systems[J]. Automation in Construction, 2012, 24: 203-212.
- [36] TAN XIANGYANG, HAMMAD AMIN, FAZIO PAUL. Automated Code Compliance Checking for Building Envelope Design[J/OL]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(2): 203-211. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3801(2010)24:2(203).
- [37] SOLIHIN W, DIMYADI J, LEE Y C, 等. The Critical Role of Accessible Data for BIM-Based Automated Rule Checking Systems[C/OL]/Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction (JC3). Heraklion, Crete, Greece: Heriot-Watt University, 2017: 53-60[2020-02-22]. DOI:10.24928/JC3-2017/0161.
- [38] SOLIHIN W, DIMYADI J, LEE Y C, 等. Simplified schema queries for supporting BIM-based rule-checking applications[J/OL]. Automation in Construction, 2020, 117: 103248. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103248.
- [39] 顾栋炼, 张银安, 刘华斌, 等. 新冠肺炎疫情临时医院排风的环境影响快速模拟方法[J/OL]. 工程力学, 2020, 37(12): 243-249. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.02.0047.
GU Dong-lian, ZHANG Yin-an, LIU Hua-bin, et al. A High-Efficiency Simulation Method for Analyzing the Impact of Exhausted Air from Temporary Hospitals Built for the Treatment of Novel Coronavirus Pneumonia[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 243-249. (in Chinese)
- [40] KANNALA M. Escape route analysis based on building information models: design and implementation[D]. Helsinki University of Technology, 2005.
- [41] SOLIHIN W. A simplified BIM data representation using a relational database schema for an efficient rule checking system and its associated rule checking language[D]. Georgia Institute of Technology, 2015.
- [42] 邱灿星, 杜修力. 一种抗震性能化设计方法及在防屈曲支撑钢框架结构中的应用[J/OL]. 工程力学, 2021, 39: 1. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2021.06.0463.

- QIU Can-xing, DU Xiu-li. A NOVEL PERFORMANCE-BASED SEISMIC DESIGN METHOD AND ITS APPLICATION IN BRB STEEL FRAMES[J]. *Engineering Mechanics*. (in Chinese)
- [43] 徐龙河, 肖水晶. 内置碟簧自复位混凝土剪力墙基于性能的截面设计方法[J/OL]. *工程力学*, 2020, 37(4): 70. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2019.03.0119.
- XU Long-he, XIAO Shui-jing. A PERFORMANCE-BASED SECTION DESIGN METHOD OF A SELF-CENTERING CONCRETE SHEAR WALL WITH DISC SPRING DEVICES[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 70-77,86. (in Chinese)
- [44] PAUWELS P, TERKAJ W. EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology[J/OL]. *Automation in Construction*, 2016, 63: 100-133. DOI:10.1016/j.autcon.2015.12.003.
- [45] AL-ARFAJ A, AL-SALMAN A. Ontology Construction from Text: Challenges and Trends[J]. *International Journal of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 2015, 6(2): 15-26.
- [46] FAHAD M, BUS N, ANDRIEUX F. Towards Validation of IFC Models with IfcDoc and SWRL: A Comparative Study[C]//the Twelfth International Conference on Internet and Web Applications and Services. 2017: 7-13.
- [47] YURCHYSHYNA A, ZARLI A. An ontology-based approach for formalisation and semantic organisation of conformance requirements in construction[J/OL]. *Automation in Construction*, 2009, 18(8): 1084-1098. DOI:10.1016/j.autcon.2009.07.008.
- [48] SYDORA C, STROULIA E. Rule-based compliance checking and generative design for building interiors using BIM[J/OL]. *Automation in Construction*, 2020, 120: 103368. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103368.
- [49] PREIDEL C, BORRMANN A. Automated code compliance checking based on a visual language and building information modeling[C/OL]//Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC): 卷 32. Oulu, Finland: IAARC Publications, 2015: 1-8. DOI:10.22260/ISARC2015/0033.
- [50] HÄUSSLER M, ESSER S, BORRMANN A. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN[J/OL]. *Automation in Construction*, 2021, 121: 103427. DOI:10.1016/j.autcon.2020.103427.
- [51] SOLIHIN W. Lessons learned from experience of code-checking implementation in Singapore[C]//BuildingSMART Conference. 2004.
- [52] HÄUSSLER M, BORRMANN A. Knowledge-based engineering in the context of railway design by integrating BIM, BPMN, DMN and the methodology for knowledge-based engineering applications (MOKA)[J/OL]. *Journal of Information Technology in Construction*, 2021, 26: 193-226. DOI:10.36680/j.itcon.2021.012.
- [53] GREENWOOD D, LOCKLEY S, MALSANE S, 等. Automated compliance checking using building information models[C/OL]//The Construction, Building and Real Estate Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors. Paris: RICS, 2010[2021-08-07]. http://nrl.northumbria.ac.uk/6955/1/Automated_compliance_checking_using_building_information.pdf.
- [54] NAWARI N O. A Generalized Adaptive Framework (GAF) for Automating Code Compliance Checking[J/OL]. *Buildings*, 2019, 9(4): 86. DOI:10.3390/buildings9040086.
- [55] HJELSETH E, NISBET N. Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology[C/OL]//Proceedings of the 28th CIB W78 Conference. Sophia Antipolis, France, 2011: 1-10[2021-08-07]. <http://itc.scix.net/paper/w78-2011-Paper-45>.
- [56] BEACH T H, REZGUI Y, LI H, 等. A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector[J/OL]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(12): 5219-5231. DOI:10.1016/j.eswa.2015.02.029.
- [57] LAU G, LAW K. An information infrastructure for comparing accessibility regulations and related information from multiple sources[C/OL]//Proceedings of the 10th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Weimar, Germany: Professur Informatik im Bauwesen, 2004[2021-08-07]. http://eig.stanford.edu/publications/gloria_lau/icccbe.pdf.
- [58] 林佳瑞, 廖盘宇. 面向法规智能的消防规范图谱构建及应用初探[C]//第六届全国 BIM 学术会议论文集. 山西太原: 中国图学学会建筑信息模型 (BIM) 专业委员会, 2020: 5[2021-07-17].
- LIN Jiarui, LIAO Panyu. Preliminary Study on The Construction and Application of The Law-Oriented Intelligence-Oriented Fire Protection Code Map[C]//Proceedings of the 6th National BIM Academic Conference. Taiyuan, China, 2020: 5. (in Chinese)
- [59] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Automated information transformation for automated regulatory compliance checking in construction[J/OL]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(4): B4015001. DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000427](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000427).
- [60] ZHANG J, EL-GOHARY N M. Semantic NLP-Based Information Extraction from Construction Regulatory Documents for Automated Compliance Checking[J/OL]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2016, 30(2): 04015014. DOI:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000346.
- [61] XUE X, ZHANG J. Part-of-speech tagging of building codes empowered by deep learning and transformational rules[J/OL]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 47: 101235. DOI:10.1016/j.aei.2020.101235.
- [62] ZHOU P, EL-GOHARY N. Ontology-based automated information extraction from building energy conservation codes[J/OL]. *Automation in Construction*, 2017, 74: 103-117. DOI:10.1016/j.autcon.2016.09.004.
- [63] LI S, CAI H, KAMAT V R. Integrating natural language processing and spatial reasoning for utility compliance checking[J/OL]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2016, 142(12): 04016074. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001199.
- [64] XU X, CAI H. Semantic Frame-Based Information Extraction from Utility Regulatory Documents to Support Compliance Checking[C/OL]//Proceedings of the 35th CIB W78 Conference. Chicago, USA, 2018[2021-08-07]. <http://itc.scix.net/paper/w78-2018-paper-027>.
- [65] LAM H P, HASHMI M. Enabling reasoning with LegalRuleML[J/OL]. *Theory and Practice of Logic Programming*, 2019, 19(1): 26. DOI:10.1017/S1471068418000339.
- [66] TOMASSETTI G. The ANTLR Mega Tutorial[EB/OL]//Federico Tomassetti - Software Architect. (2017-03-08)[2020-08-19]. <https://tomassetti.me/antlr-mega-tutorial/>.
- [67] ZHANG R, EL-GOHARY N. A deep neural network-based method for deep information extraction using transfer learning strategies to support automated compliance checking[J/OL]. *Automation in Construction*, 2021, 132:

103834. DOI:10.1016/j.autcon.2021.103834.
- [68] 周育丞, 郑哲, 林佳瑞, 等. 面向智能审图的规范条文命名实体识别[C]/第七届全国 BIM 学术会议. 中国重庆, 2021: 478-482.
ZHOU Yucheng, ZHENG Zhe, LIN Jiarui, et al. Named Entity Recognition of Regulatory Text for Intelligent Design Review. [C]// Proceedings of the 7th National BIM Academic Conference of China. Chongqing, China, 2021. (in Chinese)
- [69] 孙镇, 王惠临. 命名实体识别研究进展综述[J]. 数据分析与知识发现, 2010, 26(6): 42-47.
SUN Zhen, WANG Huilin. Overview on the Advance of the Research on Named Entity Recognition[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2010, 26(6): 42-47. (in Chinese)
- [70] MOON S, LEE G, CHI S, 等. Automated Construction Specification Review with Named Entity Recognition Using Natural Language Processing[J/OL]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(1): 04020147. DOI:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001953.
- [71] WU L T, LIN J R, LENG S, 等. Rule-based information extraction for mechanical-electrical-plumbing-specific semantic web[J/OL]. Automation in Construction, 2022, 135: 104108. DOI:10.1016/j.autcon.2021.104108.
- [72] 李冬梅, 张杨, 李东远, 等. 实体关系抽取方法研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(7): 25.
LI Dongmei, ZHANG Yang, LI Dongyuan, et al. Review of Entity Relation Extraction Methods[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(7): 25. (in Chinese)
- [73] 邓攀, 樊孝忠, 杨立公. 用语义模式提取实体关系的方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(10): 3.
DENG Bo, FAN Xiaozhong, YANG Ligong. Entity Relation Extraction Method Using Semantic Pattern[J]. Computer Engineering, 2007, 33(10): 3 (in Chinese)
- [74] MOR B, GARHWAL S, KUMAR A. A Systematic Review of Hidden Markov Models and Their Applications[J/OL]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(3): 1429-1448. DOI:10.1007/s11831-020-09422-4.
- [75] YU B, FAN Z. A comprehensive review of conditional random fields: variants, hybrids and applications[J/OL]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(6): 4289-4333. DOI:10.1007/s10462-019-09793-6.
- [76] GRISHMAN R. Information extraction[J/OL]. IEEE Intelligent Systems, 2015, 30(5): 8-15. DOI:10.1109/MIS.2015.68.
- [77] CHEN Y, ZHENG D Q, ZHAO T J. Chinese relation extraction based on deep belief nets: Chinese relation extraction based on deep belief nets[J/OL]. Journal of Software, 2012, 23(10): 2572-2585. DOI:10.3724/SP.J.1001.2012.04181.
- [78] HU Z Z, LENG S, LIN J R, 等. Knowledge Extraction and Discovery Based on BIM: A Critical Review and Future Directions[J/OL]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 29: 335-356. DOI:10.1007/s11831-021-09576-9.
- [79] DIMYADI J, PAUWELS P, AMOR R. Modelling and accessing regulatory knowledge for computer-assisted compliance audit[J]. Journal of Information Technology in Construction, 2016, 21: 317-336.
- [80] ZHOU P, EL-GOHARY N. Semantic information alignment of BIMs to computer-interpretable regulations using ontologies and deep learning[J/OL]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101239. DOI:10.1016/j.aei.2020.101239.
- [81] SHEN W, WANG J, HAN J. Entity Linking with a Knowledge Base: Issues, Techniques, and Solutions[J/OL]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2015, 27(2): 443-460. DOI:10.1109/TKDE.2014.2327028.
- [82] MORGAN A A, LU Z, WANG X, 等. Overview of BioCreative II gene normalization[J/OL]. Genome Biology, 2008, 9(Suppl 2): 142-144. DOI:10.1186/gb-2008-9-s2-s3.
- [83] GHIASVAND O, KATE R J. UWM: Disorder Mention Extraction from Clinical Text Using CRFs and Normalization Using Learned Edit Distance Patterns.[C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Semantic Evaluation. 2014: 828-832.
- [84] MOHAN S, ANGELL R, MONATH N, 等. Low resource recognition and linking of biomedical concepts from a large ontology[C]//Proceedings of the 12th ACM Conference on Bioinformatics, Computational Biology, and Health Informatics. 2021: 1-10.
- [85] XU X, CAI H. Ontology and rule-based natural language processing approach for interpreting textual regulations on underground utility infrastructure[J/OL]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 48: 101288. DOI:10.1016/j.aei.2021.101288.
- [86] KARADENIZ İ, ÖZGÜR A. Linking entities through an ontology using word embeddings and syntactic re-ranking[J/OL]. BMC Bioinformatics, 2019, 20(1): 156. DOI:10.1186/s12859-019-2678-8.
- [87] 住房和城乡建设部. 2016-2020 年建筑业信息化发展纲要[J]. 建筑安全, 2017, 32(01): 4-7.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. 2016-2020 Outline for The Development of Construction Industry Informatization[J]. Construction Safety, 2017, 32(01): 4-7. (in Chinese)
- [88] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于全面开展工程建设项目审批制度改革的实施意见[EB/OL]. (2019)[2021-07-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-03/26/content_5376941.htm.
General Office of the State Council. Implementation Opinions of the General Office of the State Council on Comprehensively Carrying out the Reform of the Approval System for Construction Projects[EB/OL](2019)[2021-07-27]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2019-03/26/content_5376941.htm. (in Chinese)
- [89] 王树平, 刘宗宝, 郝庆斌, 等. 全国数字化审图、政府购买服务人工智能(AI)审图情况的调研报告[J]. 中国勘察设计, 2021(02): 68-79.
WANG Shuping, LIU Zongbao, HAO Qinbin, et al. Survey Report on The Situation of National Digital Plan Review and Government Purchase Service Artificial Intelligence (AI) Plan Review[J]. China Engineering Consulting, 2021(02): 68-79. (in Chinese)
- [90] 湖南省住房和城乡建设厅. 关于开展全省房屋建筑工程施工图 BIM 审查试点工作的通知[EB/OL]. (2020)[2021-07-17]. https://zjt.hunan.gov.cn/zjt/xxgk/tzgg/202008/t20200812_13395963.html.
Department of Housing and Urban-Rural Development of Hunan Province. Notice on the Pilot Work of BIM Review of Construction Drawings of Housing Construction Projects in the Province[EB/OL](2020)[2021-07-17]. https://zjt.hunan.gov.cn/zjt/xxgk/tzgg/202008/t20200812_13395963.html. (in Chinese)
- [91] 广联达. 广联达 BIM 审图软件全球首发[EB/OL]. (2014)[2022-03-06]. <https://www.glodon.com/news/143.html>.
Glodon. The releasing of Glodon's BIM drawing review software. [EB/OL]. (2014)[2022-03-06].

- <https://www.glodon.com/news/143.html>. (in Chinese)
- [92] PKPM. BIM 云审查平台[EB/OL]. (2020)[2022-03-06]. <http://www.pkpm.cn/product/productDetail?type=5&id=76>. PKPM. BIM cloud review platform. [EB/OL]. (2020)[2022-03-06]. <http://www.pkpm.cn/product/productDetail?type=5&id=76>. (in Chinese)
- [93] 湖南省勘察设计协会, 中国建筑科学研究院有限公司. BIM 审查系统用户手册 V1[R/OL]. (2020). <http://www.hnbim.cn/upload/202001/06/202001062325269687.pdf>. Hunan Engineering and Consulting Association, China Academy of Building Research. BIM Review System User Manual V1[R/OL]. <http://www.hnbim.cn/upload/202001/06/202001062325269687.pdf>. (in Chinese)
- [94] 万翼科技. 万翼 AI 审图[EB/OL]. (2021)[2022-03-06]. <https://www.vanyitech.com/profession/aidesign>. Vanyi Tech. Vanyi AI drawing review system. [EB/OL]. (2021)[2022-03-06]. <https://www.vanyitech.com/profession/aidesign>. (in Chinese)
- [95] 新华网. 深圳住建局全面应用万翼 AI 审图系统[EB/OL]. (2021)[2022-03-06]. http://www.xinhuanet.com/house/2021-01/18/c_1126994560.htm. Xinhua Net. Shenzhen Housing and Urban-Rural Development Bureau fully applies Wanyi AI plan review system. [EB/OL]. (2021)[2022-03-06]. http://www.xinhuanet.com/house/2021-01/18/c_1126994560.htm. (in Chinese)
- [96] 小智审图. 小智审图 — 施工图智能审查[EB/OL]. (2020)[2022-03-06]. <https://www.xzst360.com>. Xiaozhi Drawing Review. Smart Review of Construction Drawings. [EB/OL]. (2020)[2022-03-06]. <https://www.xzst360.com>. (in Chinese)
- [97] 中设数字. 中设数字 CBIM 首页[EB/OL]. (2022)[2022-03-06]. <http://www.cbim.com.cn>. CBIM. CBIM. [EB/OL]. (2022)[2022-03-06]. <http://www.cbim.com.cn>. (in Chinese)
- [98] SOLIBRI. BIM software for architects, engineers and construction industry[EB/OL]//Solibri. (2021)[2021-07-23]. <https://www.solibri.com/>.
- [99] MALACARNE G. RR3 - Nicholas Nisbet - AEC3 Require1 and D-COM[EB/OL]. (2021-04-22)[2021-07-24]. <https://vimeo.com/540099774>.
- [100] WANGARA J. Quality Management in BIM: Use of Solibri Model Checker and CoBIM Guidelines for BIM Quality Validation[D]. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2018.
- [101] KALLINEN A R, VIRKAMÄKI P. RR3 - Nicholas Nisbet - AEC3 Require1 and D-COM[EB/OL]. (2021-04-22)[2021-07-24]. <https://vimeo.com/540099774>.
- [102] BEACH T. D-COM Network – Driving forward Digitised Compliance Checking in the Built Environment[EB/OL]. (2021)[2021-07-23]. <https://www.dcom.org.uk/>.