

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.031



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于一阶谓词逻辑的结构设计规范表示方法

张吉松, 于泽涵, 赵丽华

(大连交通大学土木工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要:目前,基于BIM模型的合规性审查采用人工方式,工作量繁重且自动化程度低,开展自动合规性审查研究具有重要意义。在结构设计领域能够有效支撑规范知识表示与推理并支持设计审查自动化的设计规范表达方法有待开发。基于一阶谓词逻辑,通过转译《混凝土结构设计规范》中的设计条款,提出一种结构设计规范规则表达和推理方法。该方法可实现将半结构化设计规范条款转换为结构化知识并支持灵活查询与推理,通过“谓词定义”和“函数定义”转译设计规范中语言类、表格类和计算公式类设计条款,提出两种规范条款谓词定义方式。对于语言模糊类、表后注释类和条款补充类的设计条款给出转译解决方案。提出的方法有效地解决了传统一阶谓词对于结构设计条款表示不充分和不精确的问题,进而为设计规范的计算机表达提供一种参考方法。

关键词:结构设计规范;知识表示;一阶谓词逻辑;合规性审查;人工智能

中图分类号:TU17 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)01-0254-09

Representation of structural design specifications based on first-order predicate logic

ZHANG Jisong, YU Zehan, ZHAO Lihua

(School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, P. R. China)

Abstract: At present, the code compliance checking based on BIM model are done manually with heavy workload and low information intelligence. It is of great significance to carry out the research on automatic compliance checking. As an important step, standard translation involves many fields such as philosophy, mathematics, mathematical logic, computer science, artificial intelligence, natural language processing and semantics. It is not only a research issue of interdisciplinary integration, but also a prerequisite for realizing the automation of building design and compliance checking. In the field of structural design, code representation methods which can effectively support knowledge representation, reasoning, and automation of compliance checking needs to be developed. Based on the first-order predicate logic, this paper proposes a method of

收稿日期:2021-12-16

基金项目:辽宁省科技厅博士科研启动基金(2019-BS-041);辽宁省教育厅青年科技人才育苗项目(JDL2019036);辽宁省教育厅基础科研项目(JDL 2019018)

作者简介:张吉松(1983-),男,博士,主要从事BIM技术研究,E-mail:1351600013@163.com。

赵丽华(通信作者),女,博士,副教授,E-mail:zhaolihua1015@126.com。

Received: 2021-12-16

Foundation items: PhD Research Startup Foundation of Department of Science & Technology of Liaoning Province (No. 2019-BS-041); Scientific Talents Breeding Foundation of Educational Department of Liaoning Province (No. JDL2019036); Fundamental Research Foundation of Educational Department of Liaoning Province (No. JDL 2019018)

Author brief: ZHANG Jisong (1983-), PhD, main research interest: building information modelling technology, E-mail: 1351600013@163.com.

ZHAO Lihua (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: zhaolihua1015@126.com.

expression and reasoning of structural design rules by translating the provisions in the “code for design of concrete structures”. Through the definition of “predicate” and “function”, the design provisions, table and formula in design specification are translated. It effectively solves the problem of insufficient and inaccurate representation of structural design clauses by using traditional first order predicates, and thus provides a reference for the computer expression of design specifications.

Keywords: structural design code; knowledge representation; first-order predicate logic; code compliance checking; artificial intelligence

在土木工程设计领域,结构设计规范的计算机表达是实现设计合规性审查的技术基础与前提条件。对于结构设计合规性审查,中国实行施工图设计审查制度,即由政府建设主管部门或其认定的审查机构负责,对施工图是否符合有关法律法规的要求以及对涉及公共利益、公众安全和工程建设强制性标准等内容进行审查^[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。而且,检验结果很大程度上依赖于检验人员对规范的理解和经验,导致检验结果的主观性较强。BIM技术的出现使得基于BIM模型的审查成为未来的发展趋势。国家住建部颁布的《2016—2020年建筑业信息化发展纲要》,提出在未来探索基于BIM模型的合规性审查,提高设计审查效率与设计质量。

目前,对合规性审查的研究大致可分为两个方面:基于施工图的审查^[2-4]和基于BIM模型的审查^[5-8]。Eastman等^[9]将基于BIM的合规性审查的过程分为4个部分:规范转译、BIM模型准备、规则执行和推理、生成审查报告。其中,规范转译是实现自动合规性审查的前提条件和首要步骤。目前关于规范转译的方法大致可以分为:基于本体方法、基于规则引擎方法、基于语言开发方法和基于逻辑方法^[10],每种方法都具有一定的优点以及局限性。其中,基于本体、规则引擎、语言开发的3种方法在对复杂规范进行转译时,常常出现以下问题:规范条款中信息的缺失、较低的灵活性和可维护性、建筑信息模型与规范条款的映射连接性较弱、无法解决模糊语言的转译问题、无法处理各规范条款之间的矛盾。而基于逻辑的规范转译方法经过较长周期的发展显现出了强于其他方法的优势,相较于其他方法,一阶谓词逻辑转译的规范条款可以将建筑元素与规则相连接,并且由于一阶谓词逻辑与自然语言的相通性,对于较为复杂的条款此方法可以依据规范上下文实现嵌套的规则表达,进而实现规则的自动化审查。另外,基于一阶谓词逻辑转移的规范可以很好地转换为SWRL语言的形式,在后续实现规范审查自动化的研究中能够与基于本体以及规则引擎的方法相结合,最大程度发挥各类方法的优势。

合规性审查的自动化推理基于两方面信息:源于BIM模型的设计信息和源于设计规范的设计条款信息。设计信息可以表示为“逻辑事实”,规范条款信息可以表示为“逻辑规则”。采用基于逻辑的信息表示,可以作为推理技术的基础。基于一阶谓词逻辑的推理非常适合于自动化合规性审查,因为:逻辑的二元性(满足或不满足)符合合规性审查的二元性(符合或不符合);形式化定义的逻辑可以充分表示合规性审查(建筑规范信息和BIM模型信息)中的“概念”(或实体)和“关系”;与程序编程语言(例如C语言需要描述解决方案步骤)不同,逻辑编程是描述性的,只需要描述领域内的规则和事实即可,如果设计信息和设计条款信息能够以逻辑形式正确表示,推理就可以以完全自动化的方式进行;各种自动推理技术,例如检索和合一(unification)问题,可以在已经较为成熟的逻辑推理机中(logic reasoners)使用^[11]。

中国土木工程领域的结构设计规范具有4个特点:数量繁多且相互平行嵌套;规范条款中含有模糊语言;时效性;半结构化文档。由于这些特点,结构设计规范的计算机表达转译工作充满了诸多困难,尤其是当规范条款中涉及模糊语言时,由于中文的特殊性,这些条款很难准确地转译为计算机语言,所以选择合适的方法是决定规范转译工作难易的关键所在。笔者基于一阶谓词逻辑,提出一种结构设计规范表达方法,并选取《混凝土结构设计规范》中部分条款进行转译以证明其可行性。首先,通过分析一阶谓词逻辑的特点,将结构设计规范分为语言类明确条款、语言类模糊条款、表格类和公式类。其次,提出了通过“谓词定义”和“函数定义”两种方法,转译设计规范中语言类、表格类和计算公式类设计条款,对结构设计规范条款进行精确表示以便支持后续推理和合规性审查。最后,总结一阶谓词逻辑在规范转译方面的局限性(对于模糊语言处理上)以及未来研究建议。

1 研究现状

关于规范转译的方法大致可以分为4类,分别是

基于本体方法、基于规则引擎方法、基于语言开发方法和基于逻辑方法。在基于本体的方法中,Zarli等^[12]和Wang等^[13]分别利用基于语义网的本体技术构建了施工、风险和解决措施等概念类和关系,并基于其建立了一致性检查的安全规则^[14]。基于规则引擎方法的研究工作开展也较为广泛,如SWRL(Semantic Web Rule Language)规则,Ding等^[15]和Lu等^[16]分别构建了地下风险本体、施工风险本体,利用

本体的概念和属性,在本体中使用插件SWRL规则编辑器直接构建检查规则;目前,商业合规性检查软件有Solibri Model Checker(SMC)和CORENETe-PlanCheck等使用基于规则的方法,中国有广联达BIM审图软件与广州市施工图设计文件审查管理系统。这些审查系统大部分都只针对建筑设计的合规性检查,对于结构设计的合规性检查则涉及较少。有代表性的合规性审查系统如表1所示。

表1 结构审图系统

Table 1 Code compliance checking system

名称	国家	简介
Solibri Model Checker (SMC) ^[17]	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,检查对象是以IFC形式表达的模型。实施检查的规则是将参数化表格硬编码(hard-coded)为电脑可以处理的形式来实现自动化检查,不支持非开发人员的规则扩展。
CORENET e-PlanCheck ^[18]	新加坡	可实现建筑规划和建筑服务两大类的诸多规范检查,自动化程度高、扩展方便。开发人员在检查器中开发了名为FORNAX的对象库,通过检索或扩展IFC模型来创建具体对象获取具体的规则语义,从而实现规则的自动翻译。
Express Data Manager (EDM) ^[19]	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。可基于EDM服务器灵活地开发并建立规则,而建立的规则可以被其他能识别EXPRESS语言的软件所使用。
SMARTcodes ^[20]	美国	目前主要用于住宅和商业相关建筑的规范检查,可通过事先建立领域词典来翻译自然语言表达的规则。其检查过程实现需要被检对象(IFC模型)利用领域词典形成与规则对应的形式,从而实现安全的检查。
广联达BIM审图软件 ^[21]	中国	能够进行针对建筑设计的空间碰撞、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。但其所支持检查的规则为内置,检查的问题还处于初级水平,与其他国家类似平台还有一些差距。
广州市施工图设计文件审查管理系统	中国	该平台将编制BIM相关标准,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,可基本实现对建筑、结构、水、暖、电、人防、消防及节能等专业的智能审查,实现审查结果的输出,很多功能有待进一步完善。

较为典型的是基于语言开发的方法,Eastman等^[9]为了在不同服务器上编辑规则,提出开发一种不受平台环境限制的规则翻译语言,如JAVA、SQL等;而后, Lee等^[22]开发了建筑环境和分析语言(Building Environment Rule and Analysis, BERA),用于对建筑流通和空间规划进行更复杂的代码编码和代码检查,并提出了基于建筑环境规则扩展语言的自动符合性检查,以确保空间规划要求和可视性得到满足。

基于逻辑的规范转译方法研究工作时间跨度较大,其起源可以追溯到古希腊哲学家亚里士多德的三段论。现代最早可追溯到1969年,由Fenves等^[23]开创性地发明了决策表,将复杂的规范条款用精确简练的决策表形式来表示;而后Fenves等^[24]于1987年发明了用于表示和处理设计标准的标准分析、综合和表达(SASE)模型,后续很多学者针对此模型自动化开展大量其他相关研究和开发工作(Nyman等^[25]、Harris等^[26]、Garret等^[27]、Wang^[28]、Dym等^[29]、Cronembold等^[30]、Lopez等^[31])。使用SASE模型进行设计包括3个步骤:确定合适的分类器;根据分类词确定适用条款;使用规则处理规定。其中,第1步和第2步定义了规范组织子模型的处理,第3步定义了标准规范的处理,规范

自动分类在过去没有得到有效的处理,直到1990年左右才开始成为一个研究问题^[32]。同时,步骤2和步骤3的自动化已经被许多研究人员用于结构部件设计。Salama等^[33]从规范性文件 and 文件规定的角度出发,运用逻辑和本体技术实现规则的自动分类和转译。而后,为了提高规范编辑的可读性,Solihin等^[34]提出了一种基于概念图的规则编辑方法,概念图识别规则的概念,分析独立的子规则,总结其约束和属性,最后实现它们的链接,而后基于建筑、工程、施工全领域中的多类规范,引入一个跨应用程序域的通用规则分类,使用其适用于计算机合规审查的所有方面设计标准^[35-36]。

一阶谓词逻辑的基础是数理逻辑,数理逻辑是研究推理逻辑规律的一个数学分支,也被称为符号逻辑。数理逻辑是以符号化为特点的形式化理论,注重形式推理而不重视数值计算,采用特殊的数学符号语言,并给出推理规则来建立推理体系。数理逻辑包含命题演算与谓词演算,而一阶谓词逻辑正是在命题逻辑基础上提出的,比如“凡是A都是B,C是A,所以C是B。”这个推理在命题逻辑中是不能被准确描述的,假设这3个命题分别为 p 、 q 、 r ,则正确的推理形式应为 $(p \wedge q) \rightarrow r$,但是将 p 、 q 、 r 赋予其他值时这个推理则不成立,也就是说、这个推理形式并非重言式,正是由于命题逻辑

的这种局限性,想要进一步剖析简单命题,则必须要引入谓词、变量以及量词的概念,进而研究其逻辑关系,于是构成了谓词逻辑。

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连接,形成谓词公式。谓词逻辑就是研究它们的

形式结构、逻辑性质、谓词关系及从中导出的规律。谓词逻辑在数据库(如用谓词逻辑将关系数据库中的数据子语言表示出来并优化)、教育(如智能答疑系统)、人工智能科学等方面都有很广泛的应用。谓词公式主要由 5 个部分组成,分别是个体词、谓词、量词、逻辑连接词以及语法符号,如图 1 所示。

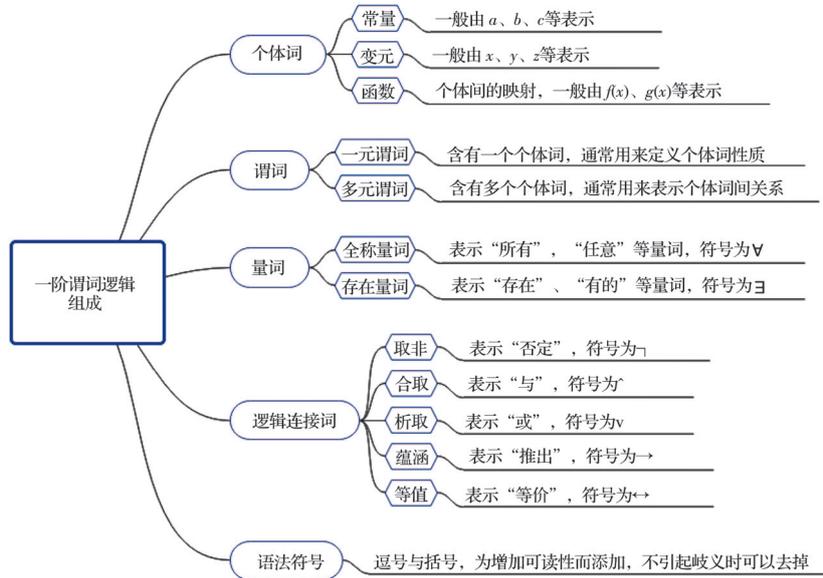


图 1 一阶谓词公式组成

Fig. 1 First order predicate formula composition

2 研究方法

2.1 规范条款分类与选择

目前中国混凝土结构设计涉及的设计规范主要包括:《高层建筑混凝土结构技术规程》(04JGJ 3—2010)、《混凝土结构设计规范》^[37](GB 50010—2010,以下简称《混规》)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)等。在以上规范中所包含的条款种类大体具有 4 个特点:1)数量繁多且相互平行嵌套,中国现在正在施行大约 40 本结构设计规范,包括混凝土、钢结构、木结构、荷载、可靠性、防火等多个方面,且各规范之间关系复杂,既有相互平行关系,同时也存在规范之间的引用与嵌套;2)规范条款中含有模糊语言,在中国很多规范中会出现“适量”“不宜”等概念性词语,此类条款对结构审查的规范性影响较大;3)时效性,大部分的建筑规范都会随时间更新或修订,这就使规范衍生出大量的修订版本与解释性手册,增大了人工规范审查的工作量;4)半结构化文档,不同本规范对同一建筑部位有不同规定,可能会出现条款冲突的情况。

按照一阶谓词逻辑转译的难易程度分为 4 类:

1)语言类明确条款,条款由语言叙述,且规定明确,无模糊语言,可直接转译为一阶谓词逻辑公式,例如《混规》第 11.3.5 条规定,框架梁截面尺寸应符合下列要求:截面宽度不宜小于 200 mm、截面高度与宽度的比值不宜大于 4、净跨与截面高度的比值不宜小于 4;2)语言类模糊条款,条款由语言叙述,但规定不明确,含有“适当”“不宜”等模糊语言,由于此类条款多作为注释出现,所以可利用一阶谓词逻辑的全部量词和存在量词进行转译;3)表格类条款,此类条款需要先转述为语言类条款,再进行转译,例如《混规》第 11.3.6 条中表 11.3.6-1,可将第一格中条款转述为:“一级抗震等级框架梁支座处纵向受拉钢筋配筋率大于 0.4 与 $80f_t/f_y$ 中的较大值”,再转译为一阶谓词逻辑公式;4)计算公式类条款,此类条款由于包含复杂的计算公式,使得其转译难度大大增加,而在转译的过程中对于公式可以有多种处理方式。

根据上述分类情况,可以把利用一阶谓词公式表示规则条款总结为 3 个步骤:首先,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,在定义个体词与谓词时参考现行 IFC 标准对实体进行分类,提高转译结果的兼容性,以便后续在 BIM 模型合规性审查中,条款与模型中实体逐一对应;

其次,根据所要表达规则条款,将个体词带入每个谓词中的变量;最后,根据规则条款的具体语义,用适当的连接符号将各个谓词连接起来,形成谓词公式。由此看出,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。

在结构设计规范中,总则、总体规定等原则性条款多是阐述规范适用范围、该规范的相关解释以及制定标准,不在本文的转译范围内。选取《混规》第 11.3 节、第 11.4 节共计 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,用以验证基于一阶谓词逻辑的结构设计规范表达方法可行性。

2.2 语言类规范条款转译

无论规范条款语言描述明确与否,在针对语言类条款的转译时,都是由自然语言中直接确定条款

的主体,即该条款所规定作用对象,并进行谓词的定义,而后进行限定条件谓词定义,最后以合适的逻辑连接词相连接,进而转译为一阶谓词逻辑公式。由此看出,语言类条款转译较为直接,但不同的谓词定义方式可以展现出不同的转译结果,以《混规》第 11.3.5 条、第 11.3.7 条为例,提出两种谓词定义方式,第 1 种以第 11.3.5 条为例,将限定条件定义为一个整体谓词,这样的定义方式适用于所规定部位较为明确简洁的条款,其优点在于可以减少定义谓词数量,缺点是不便于后续的数据调用;第 2 种方式以第 11.3.7 条为例,将限定条件细化分别定义为多个谓词,这样的定义方式适用于定义规定较为复杂的构件,虽然会增加所定义谓词的数量,但是利于后续调用且规定较为明确具体。转译结果如表 2 所示。

表 2 《混规》11.3.5 和 11.3.7 条转译结果

Table 2 Translation of provision 11.3.5 and 11.3.7 of Concrete Code

条款	条款原文	转译后	所用谓词和对应描述
11.3.5 条款	1)梁截面宽度不宜小于 200 mm	$\forall x(\text{BeamB}(x) \rightarrow \text{More}(x, 200))$	$\text{BeamB}(x)$: x 是框架梁截面宽度 $\text{BeamH}(y)$: y 是框架梁截面高度
	2)梁截面宽度比不宜大于 4	$\forall x \forall y(\text{BeamB}(x) \wedge \text{BeamH}(y) \rightarrow \text{RateLess}(x, y, 4))$	$\text{BeamL}(z)$: z 是框架梁净跨 $\text{More}(x, y)$: x 大于 y
	3)梁净跨与截面高度比不宜小于 4	$\forall z \forall y(\text{BeamL}(z) \wedge \text{BeamH}(y) \rightarrow \text{RateMore}(z, y, 4))$	$\text{RateLess}(x, y, z) / \text{RateMore}(x, y, z)$: x 与 y 的比值小于 / 大于 z
11.3.7 条款	1)梁端纵向受拉钢筋配筋率不宜大于 2.5%	$\forall x(\text{Beam}(x) \wedge \text{Type}(\text{bar}) \rightarrow \exists y(\text{AreaRate}(y) \wedge \text{Less}(y, 0.025))$	$\text{Beam}(x)$: x 是框架梁 $\text{Type}(x)$: 构件类型是 x
	2)沿梁全长顶面和底面至少应各配置两根通长的纵向钢筋	$\forall x(\text{Beam}(x) \wedge \text{Type}(\text{bar}) \wedge (\text{Site}(\text{up}) \vee \text{Site}(\text{down})) \rightarrow \exists y(\text{Count}(y) \wedge \text{More}(y, 2))$	$\text{Site}(x)$: 位置是 x $\text{SeismicGrade}(x)$: 抗震等级为 x
	3)对一、二级抗震等级,钢筋直径不应小于 14 mm,且分别不应少于梁两端顶面和底面纵向受力钢筋中较大截面面积的 1/4	$\forall x(\text{Beam}(x) \wedge \text{Type}(\text{bar}) \wedge (\text{SeismicGrade}(1) \vee \text{SeismicGrade}(2)) \rightarrow \exists y \exists z((\text{Beam}(x) \wedge \text{Type}(\text{bar}) \wedge (\text{Site}(\text{up}) \vee \text{Site}(\text{down}) \wedge \text{Area}(z)) \vee \text{D}(y)) \wedge \text{More}(y, 14) \wedge \text{RateLess}(z, 4, y))$	$\text{AreaRate}(y)$: 面积配筋率是 y $\text{Count}(y)$: 数量是 y $\text{Area}(z)$: 截面面积是 z $\text{More}(x, y)$: x 大于 y
	4)对三、四级抗震等级,钢筋直径不应小于 12 mm	$\forall x(\text{Beam}(x) \wedge \text{Type}(\text{bar}) \wedge (\text{SeismicGrade}(3) \vee \text{SeismicGrade}(4)) \rightarrow \exists y(\text{D}(y) \wedge \text{More}(y, 12))$	$\text{Less}(x, y)$: x 小于 y $\text{RateLess}(x, y, z)$: x 与 y 的比值小于 z

2.3 表格类规范条款转译

由于一阶谓词逻辑与人类思维活动规律及自然语言的贴合性,在转译表格类规范条款时,首先需要针对表格内容将其转述为更易转译的语言类条款,再按照转译语言类条款的方式转译,以《混规》第 11.4.16 条为例(一、二、三、四级抗震等级的各类结构的框架柱、框支柱,其轴压比不宜大于表 11.4.16 规定的限值),表中第 1 条数据可以表述为“在框架结构体系中,一级抗震等级的框架柱轴压比不宜大于 0.65”,其余数据以相同的方式进行转述,转译结果选取语言类规范条款的第 2 种谓词定义方法进行展示。转译结果如表 3 所示。

2.4 计算公式类规范条款转译

计算公式类条款中的语言叙述部分仍然与转译语言类条款相同,不同的是计算公式类条款包含复杂的结构计算公式,而能否更准确地转译计算式是决定此类条款转译成功与否的关键,基于一阶谓词表达计算公式可以有多种方法,根据前文一阶谓词公式组成成分——多元谓词及个体函数,提出两种不同的转译计算公式的方法:1)利用谓词定义计算式,通过定义多元谓词的方式,逐个定义计算公式,将公式中各项变量与常量定义为个体词;2)利用函数定义计算式,在一阶谓词逻辑中,函数表示一个个体到另一个个体的映射,函数没有真值可言,例如《混规》第 11.4.5 条中规定“一级抗震等级

表 3 《混规》11.4.16条(轴压比)转译结果

Table3 Translation of provision 11.4.16 (compression ratio) of Concrete Code

条款原文	转译后	所用谓词和对应描述
1) 框架结构中一级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.65	$\forall x(\text{Column}(x)\wedge\text{structure}(F)\wedge\text{SeismicGrade}(1))\rightarrow\exists y(\text{Rate}(y)\wedge\text{Less}(y,0.65))$	Column(x):x 是框架柱 Structure(x):结构形式为 x SeismicGrade(x):抗震等级为 x Rate(y):轴压比为 y Less(x,y):x 小于 y
2) 框架结构中二级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.75	$\forall x(\text{Column}(x)\wedge\text{structure}(F)\wedge\text{SeismicGrade}(2))\rightarrow\exists y(\text{Rate}(y)\wedge\text{Less}(y,0.75))$	
3) 框架结构中三级抗震等级框架柱轴压比不宜大于 0.85	$\forall x(\text{Column}(x)\wedge\text{Structure}(F)\wedge\text{SeismicGrade}(3))\rightarrow\exists y(\text{Rate}(y)\wedge\text{Less}(y,0.85))$	
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	$\forall x(\text{Column}(x)\wedge\text{Structure}(F)\wedge\text{SeismicGrade}(4))\rightarrow\exists y(\text{Rate}(y)\wedge\text{Less}(y,0.9))$	

框架角柱弯矩设计值为 11.4.1 条中规定的一级抗震等级框架柱弯矩设计值乘以增大系数 1.1”,首先可以定义关系谓词 EQUAL(x,y)表示 x 的值为 y,再定义函数 f(x)=1.1x,则这个命题以一阶谓词逻辑可以表达为“EQUAL(x, father(y))”,x 与 y 分别定义为一级抗震等级框架角柱矩设计值与框架柱弯矩设计值。由于规范中大部分计算公式都是由一个

多项式对构件某些属性进行规定,所以可以把多项式定义为函数供谓词公式调用,这种方法相比于第一种可以大量减少谓词的定义。以《混规》第 11.4.6 条为例列举两种转译方法,转译结果选取语言类规范条款的第一种谓词定义方法进行展示,转译结果如表 4 所示。

表 4 《混规》11.4.6 条(计算公式)转译结果

Table 4 Translation of provision 11.4.6 (formula) of Concrete Code

条款原文	转译后
考虑地震组合的矩形截面框架柱和框支柱,其受剪截面应符合下列条件: 剪跨比 λ 大于 2 的框架柱: $V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}(0.2\beta_c f_c b h_0)} \quad (11.4.6-1)$	方法 1): $\forall x\exists y(\text{ColumnVc}(x)\wedge\text{Section}(R)\wedge\text{ShearSpanRate}(y)\wedge\text{More}(y,2))\rightarrow F1146(x,0.2,b,c,d,e,f)$ $\forall x\exists y(\text{ColumnVc}(x)\wedge\text{Section}(R)\wedge\text{ShearSpanRate}(y)\wedge\text{Less}(y,2))\rightarrow F1146(x,0.15,b,c,d,e,f)$ $\forall x(\text{ColumnSupportVc}(x))\rightarrow F1146(x,0.15,b,c,d,e,f)$
框支柱和剪跨比 λ 不大于 2 的框架柱: $V_c \leq \frac{1}{\gamma_{RE}(0.15\beta_c f_c b h_0)} \quad (11.4.6-2)$	方法 2): $\forall x\forall y(\text{ColumnVc}(x)\wedge\text{Section}(R)\wedge\text{ShearSpanRate}(y)\wedge\text{More}(y,2))\rightarrow\text{Less}(x,F1(x,y))$ $\forall x\forall y(\text{ColumnVc}(x)\wedge\text{Section}(R)\wedge\text{ShearSpanRate}(y)\wedge\text{Less}(y,2))\rightarrow\text{Less}(x,F2(x,y))$ $\forall x(\text{ColumnSupportVc}(x))\rightarrow\text{Less}(x,F2(x,y))$

需要注意的是,方法 2) 中需构造关于自变量 x 与 y 的二元函数 $F1(x,y)=\frac{1}{\gamma_{RE}(0.2\beta_c f_c b h_0)}$ 与 $F2=\frac{1}{\gamma_{RE}(0.15\beta_c f_c b h_0)}$,x 的定义域为截面宽度,y 的定义域为截面有效高度。谓词 F1146(x,a,b,c,d,e,f) 中,个体词 a 的个体域为 {0.2,0.15},b 的个体域为 β_c 的取值,c 的个体域为 f_c 的取值,d 的个体域为截面宽度值,e 的个体域为截面有效高度取值,f 的个体域为混凝土受剪抗震调整系数取值。

3 分析与讨论

基于一阶谓词逻辑提出的结构设计规范表示方法核心在于提取出规范条款的规定主体与限定条件,进而转译为一阶谓词公式,这种转译方式与建筑信息模型(BIM)有较高的契合度与可操作性,所提取出的规定主体可以对应为模型中的实体,限

定条件即为对实体属性的限制。

从算法的角度,基于 BIM 模型的合规性审查,其关键步骤可以分为 3 步:1) 规范转译,即将规范的条款自动提取并转译成相应的“逻辑规则”;2) 模型信息提取,即从 BIM 模型中提取相关信息并转换成“逻辑事实”;3) 将以上的“逻辑规则”与“逻辑事实”进行合规性比较,即采用自动推理机推理“逻辑事实”是否符合“逻辑规则”,得出最终的结论。

一阶谓词逻辑主要应用在上面提到的第 1 步,即将规范中的设计条款转译成计算机可识别的规则。如果与人工智能中的自然语言处理技术相结合,构建专业领域语料库和知识库是前提条件。目前,尽管规范转译的方法有很多,包括基于决策表、基于硬编码(程序编程语言)、基于软编码(语义规则等)、基于对象等,但其大部分都需要手动(或半自动)进行规则提取和编码,至今还没有一种被广泛接受的有效方法。规范转译未来可以与人工智能中的自然语言处理技术、机器学习以及深度学习

等算法相结合,逐步实现转译过程的自动化。目前一阶谓词逻辑转译规范的方法需要较高的专业性,其转译过程目前还需人工干预,由专业人员将规范条款转译为合适的谓词公式形式。但一阶谓词逻辑与其他方法比较的优势在于,如果设计规范条款信息和BIM模型信息能够以逻辑形式正确表示,推理就可以以完全自动化的方式进行,无需人工手动干预。例如将转译后的谓词公式与SWRL语言相结合可编译为SWRL FOL的形式,借助本体构建工具protege可将建筑信息模型与转译后的规则构建成本体的形式。在规范转译的过程中参考IFC标准进行谓词的定义,不仅可以实现转译工作的标准化,而且可以更好地与建筑信息模型结合,再利用基于SWRL语言的推理机进行规则的推理与审查,进而实现建筑信息模型的自动化合规审查。

基于一阶谓词逻辑表示结构设计规范可以极大发挥一阶谓词逻辑的优点,转译的规范条款较准确,可应用性较高,但是在转译过程中也遇到一些问题,总结为3点:

1)基于一阶谓词逻辑转译规范条款时,虽然很好地解决了一部分相对模糊的语言,但都是基于后续注解较为明确的前提,还有部分模糊语言无法实现转译,只能通过精确量化的方式进行转译,这样在转译过程中难免出现误差。在人工审查图纸过程中,对于规范条款中的模糊语言处理方式大多是根据审查人员的从业经验来进行主观判断,如果通过精确量化的方式进行模糊条款转译则其结果与主观判断差别不大,无法实现更加精准的规范审查。所以,对于规范条款中模糊语言的处理方法以

及结构设计规范的标准化问题还有待进一步的研究。

2)虽然对于包含计算公式类的规范条款提出了两种基于一阶谓词逻辑的转译方式,但两种方式工作量较繁重且其实现还需研究与考证。一阶谓词逻辑在知识表示中的应用较广泛,对于计算公式的表示方法层出不穷,其中不乏很多方法可以为规范条款转译提供借鉴与参考,对于公式类条款的转译方式还有很大研究空间。

3)对于规范条款主体提取的方式只是其中两种,并且这两种方式转译都需提供数据庞大的定义对照表,对于主体的提取还可以选取更加细化的方式,使得转译结果更加简洁。不同的主体提取方式或者基于一阶谓词逻辑的不同转译思路,对规范转译的复杂程度影响很大,如需确定基于一阶谓词逻辑表达规范的最方便、快捷的方法,需要做的调查与研究工作还有很多。

从上述转译过程中遇到的问题可以看出,一阶谓词逻辑同样有一定局限性,这种局限性更多地体现在对于模糊语言以及计算公式的处理上,从更严谨的角度来说,规范规定“适当放宽”和“适当减小”,“适当”的范围是多少,并没有明确规定。同时,对于在转译过程中的“一词多义”和“一句多义”等问题,一阶谓词的语法和语义无法直接转译,需要先将该条款所包含的多种含义都罗列出来,将每种可能的含义转译为可量化的条款,进而才能转译成一阶谓词的表达。一些由于一阶谓词逻辑局限性而无法转译或转译困难的条款类型如表5所示。

表5 暂时无法转译的条款类型

Table 5 Types of code that cannot be definition

类型	无法转译原因	示例
语言模糊类	条款中包含模糊性语言,无法直接进行精准地转译	11.3.6条表后注释中“箍筋直径大于12 mm、数量不少于4肢且肢距不大于150 mm时,一、二级的最大间距应允许适当放宽”
表后注释类	存在于表后的注释与补充条款,对表中数据附加特殊限定条件(多数也为模糊语言),无法直接转译	11.4.16条中“对IV类场地上较高的高层建筑,柱轴压比限值应适当减小”
条款补充类	对前文条款进行补充规定,或对不同部位引用前文类似规定,由于需要引用前文限定条件且限定条件不明确,所以转译相对困难	11.4.5条中“各级抗震等级的框架角柱,其弯矩、剪力设计值应在按本规范第11.4.1条~第11.4.3条调整的基础上再乘以不小于1.1的增大系数”

消除这种局限性的办法有很多。第一,可以将设计规范先进行“转述”,再进行相关的转译;第二,可以加强中国规范的结构性,减少类似“适量”“不宜”等模糊语言的出现;第三,一阶谓词逻辑在规范表达领域的研究还可以更加深入,继续研究更多简洁、准确的表达方式与谓词定义方法,也可以与面向对象技术相结合,或利用更高阶的谓词逻辑解决

此类问题。针对“一词多义”和“一句多义”等问题,未来可以借助自然语言处理和机器学习等相关统计算法统计出所有可能性并进行转译。

4 结论

分析中国结构设计规范的主要特点与规范转译的方法,进而可以更好地进行转译,选取一阶谓

词逻辑表示结构设计规范条款。利用一阶谓词逻辑在表达自然语言方面的特点,使其对于结构设计规范的转译工作提供帮助。为证明一阶谓词逻辑转移规范的可行性,选取《混凝土结构设计规范》中部分条款进行转译,并对选取条款按照转译的难易程度进行分类,不同类型条款有不同的转译步骤,相同的条款也可以根据不同的谓词定义方式展现出不同的转译结果。讨论了一阶谓词逻辑在规范转译领域的可行性与局限性。提出的转译方法并不局限于结构设计规范的转译,也可以引申至其他专业设计规范的转译工作。

采用谓词逻辑转译规范看似简单,实则涉及哲学、数学、数理逻辑、计算机科学、自然语言处理、语义学、结构设计等领域,是一个多学科交叉融合且比较复杂的问题。结构设计规范条文的计算机表达对于检验建筑结构合规性的重要程度不言而喻,而随着科技的飞速发展,结构设计的合规性审查被各国愈发重视,想要更好地实现对于建筑结构的自动审查,其关键是准确地转译规范条款。提出一种基于一阶谓词逻辑的结构设计规范表示方法,将结构设计规范转译为计算机可识别的语言,为推动建筑结构设计自动化和审查自动化进程提供一种参考方法。

参考文献

- [1] 邢雪娇,钟波涛,骆汉宾,等. 基于BIM的建筑专业设计合规性自动审查系统及其关键技术[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(5): 129-136.
XING X J, ZHONG B T, LUO H B, et al. Automatic code compliance checking for design drawings of architecture major and its key technologies based on BIM [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(5): 129-136. (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(Sup): 119-120, 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(Sup): 119-120, 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] 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)
- [6] 吕丰. BIM环境下基于本体技术的模型合规性自动检查[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
LYU F. Automatic model compliance check based on ontology technology in BIM environment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [7] 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]. 山东 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, Shandong: Qingdao Tehcnology University, 2021. (in Chinese)
- [8] 陈远,张雨,康虹. 基于专家系统和BIM的建筑设计合规性自动检查系统研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(5): 1-6.
CHEN Y, ZHANG Y, KANG H. Research on automated compliance checking system for architectural design based on expert system and BIM [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12(5): 1-6. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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)
- [11] 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.
- [12] ZARLI A, YURCHYSHYNA A, LE THANH N, et al. Towards an ontology-based approach for formalizing expert knowledge in the conformity-checking model in construction[M]//eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction. London: Taylor & Francis, 2008: 447-456.
- [13] WANG H H, BOUKAMP F. Ontology-based representation and reasoning framework for supporting

- job hazard analysis [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2011, 25(6): 442-456.
- [14] 吴松飞, 邓逸川, 申琪玉, 等. BIM支持的施工安全规范合规检查研究综述[J]. *图学学报*, 2018, 39(6): 1156-1164.
- WU S F, DENG Y C, SHEN Q Y, et al. A review on research and applications of BIM-based construction safety compliance checking [J]. *Journal of Graphics*, 2018, 39(6): 1156-1164. (in Chinese)
- [15] DING L Y, ZHONG B T, WU S, et al. Construction risk knowledge management in BIM using ontology and semantic web technology [J]. *Safety Science*, 2016, 87: 202-213.
- [16] LU Y, LI Q M, ZHOU Z P, et al. Ontology-based knowledge modeling for automated construction safety checking [J]. *Safety Science*, 2015, 79: 11-18.
- [17] CompanySolibri. Model Checker [EP/OL]. [2018-02-10]. <http://www.solibri.com/>.
- [18] LEE Y C, EASTMAN C M, LEE J K. Automated rule-based checking for the validation of accessibility and visibility of a building information model [C]//2015 International Workshop on Computing in Civil Engineering, June 21-23, 2015, Austin, Texas. 2015.
- [19] QI J, ISSA R R A, OLBINA S, et al. Use of building information modeling in design to prevent construction worker falls [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, 28(5): A4014008.
- [20] NAWARI, NAWARI O. Automating codes conformance in structural domain [C]//International Workshop on Computing in Civil Engineering. 2011: 569-577.
- [21] 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)
- [22] LEE J K, EASTMAN C M, LEE Y C. Implementation of a BIM domain-specific language for the building environment rule and analysis [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 79(3/4): 507-522.
- [23] FENVES S J, GAYLORD E H, GOEL S K. Decision table formulation of the 1969 aisc specification [R]. Urbana, Illinois: University of Illinois, 1969.
- [24] FENVES S J, WRIGHT R N, STAHL F I, et al. Introduction to SASE [R]. National Bureau of Standards, 1987.
- [25] NYMAN D J, FENVES S J. Organizational model for design specifications [J]. *Journal of the Structural Division*, 1975, 101(4): 697-716.
- [26] HARRIS J R, WRIGHT R N. Organization of building standards [R]. National Bureau of Standards, 1981.
- [27] GARRETT J H, FENVES S J. A knowledge-based standards processor for structural component design [J]. *Engineering with Computers*, 1987, 2(4): 219-238.
- [28] WANG T J. Generic design standards processing in a knowledge-based expert system environment [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1987, 2(1): 68-87.
- [29] DYM C L, HENCHEY R P, DELIS E A, et al. A knowledge-based system for automated architectural code checking [J]. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(3): 137-145.
- [30] CRONEMBOLD J R, LAW K H. Automated processing of design standards [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1988, 2(3): 255-273.
- [31] LOPEZ L A, ELAM S, REED K. Software concept for checking engineering designs for conformance with codes and standards [J]. *Engineering with Computers*, 1989, 5(2): 63-78.
- [32] LEE S. Knowledge based approach to checking designs for conformance with standards [D]. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1988.
- [33] 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.
- [34] SOLIHIN W, EASTMAN C. A knowledge representation approach in BIM rule requirement analysis using the conceptual graph [J]. *Journal of Information Technology in Construction*, 2016, 21: 370-401.
- [35] ISMAIL A S, ALI K N, IAHAD N A. A Review on BIM-based automated code compliance checking system [C]//2017 International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS). July 16-17, 2017, Langkawi, Malaysia. IEEE, 2017: 1-6.
- [36] SOLIHIN W, EASTMAN C. Classification of rules for automated BIM rule checking development [J]. *Automation in Construction*, 2015, 53: 69-82.
- [37] 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.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)