

基于知识图谱的国内 IFC 研究综述

赖华辉^{1,2}, 侯 铁¹, 钟祖良², 马 聪³

(1. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 建筑领域 BIM 数据存储标准 IFC 旨在促进建筑项目各方的数据交互。随着 BIM 技术的深入应用,IFC 标准开始得到国内学者和业界人士的广泛关注。然而,国内对 IFC 标准的研究与应用起步晚、研究分布零散,系统分析国内 IFC 研究进展,对国内科研人员、企业人员开展相关 BIM 研究和应用具有重要参考价值。本文以 IFC 为主题词采集中国知网 CNKI 数据库的相关文献,运用 CiteSpace 软件统计分析所采集的文献数据,并绘制相应的知识图谱,分别从研究热点、研究演进和研究分布等方面进行分析。分析结果表明,国内 IFC 研究呈现出从自身研究到与人工智能和云计算等新技术集成、从民用建筑领域扩展到市政基础领域、从基础概念研究到系统平台研发等发展特点。

关键词: IFC; BIM; 知识图谱; CiteSpace

中图分类号: TU201.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0096-07

Review of Domestic IFC Research Based on Mapping Knowledge Domains

LAI Hua-hui^{1,2}, HOU Tie¹, ZHONG Zu-liang², MA Cong³

(1. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co Ltd, Shenzhen 518029, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: IFC is a BIM data storage standard in the field of construction. It aims to promote data interaction among all parties of construction projects. With the in-depth application of BIM technology, IFC attracts increasing attention of both scholars and industry professionals in China. However, the research and application of IFC standards start late in China, and the research distribution is scattered. The systematic analysis of domestic IFC research progress has important reference value for domestic researchers and enterprise personnel to carry out relevant BIM research and application. In this paper, IFC is used as the subject to collect the relevant literature of CNKI database of China HowNet, and CiteSpace software is used to analyze the collected literature data, and draw the corresponding mapping knowledge domains. Three aspects of IFC schema, namely, the research hotspot, research evolution and research distribution are analyzed. The analysis results show that the domestic IFC research shows the development characteristics from its own research to integration with artificial intelligence, cloud computing and other new technologies, from civil construction to municipal infrastructure, from basic concept research to system platform research and development.

Key words: IFC; BIM; mapping knowledge domain; CiteSpace

为促进建筑项目各方之间数据的有效共享与
交换,buildingSMART International(bSI,前身为 In-

ternational Alliance for Interoperability,IAI)致力于
研究建筑领域的公共数据标准,即后来的 IFC(In-

收稿日期: 2019-06-09 修回日期: 2019-12-10

作者简介: 赖华辉(1987-),男,广东东莞人,博士,研究方向为建筑项目 BIM 数据标准、数据交换(Email: laihuahui81665@sina.com)

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2019M663115);深圳市市政设计研究院有限公司—重庆大学博士后联合培养项目(230220)

dustry Foundation Classes) 标准。IFC 从 1996 年发布第一版本 IFC1.0 至今,得到国外业界专家的大量关注和投入,至今已正式发布至 IFC4.1^[1]。国外学者的 IFC 研究侧重于底层数据结构及其数据交互,在不断完善 IFC 数据标准的基础上^[2],基于 IFC 标准在结构分析^[3]、能耗模拟^[4]、安全监测^[5]、运维管理^[6]等领域开展大量的数据交互研究,促进了建筑项目全生命周期的数据应用^[7]。

IFC 作为建筑领域一个新兴的数据标准,在我国建筑领域的研究与应用起步较国外晚,但随着 BIM (Building Information Modelling) 技术的广泛应用,开始逐渐得到研究学者和业界人士的关注。国内现阶段关于 IFC 的研究重点和发展趋势与国外的不同,较多地关注工程项目中的 IFC 应用,且国内研究涉及的内容和方法与国外的不尽相同,有必要系统分析国内 IFC 的研究热点及其演进趋势,以期国内学者和业界人士开展 IFC 研究与应用提供借鉴,也为国内 BIM 应用的 IFC 发展提供指引。应说明的是,IFC 标准起源于国外,国外在 IFC 方面开展了大量研究,从基于 IFC 的底层数据研究,到建筑领域不同方向的 IFC 应用。由于篇幅所限,本文聚焦分析国内的 IFC 研究现状,将在下一篇文章中深入分析国外的 IFC 研究,以期国内 IFC 发展提供参考。

1 研究方法

知识图谱是“以知识域为对象,显示科学知识的发展进程与结构关系的一种图形”^[8]。本文主要采用定量和定性相结合的方法分析所收集的文献。定量分析方法主要采用文献计量方法,通过研究关键词、研究演进、研究分布等方面对国内 IFC 研究文献进行统计与分析,并采用 CiteSpace 软件绘制相应的知识图谱;定性分析方法主要基于定量分析结果,深入分析国内 IFC 的研究热点、演进等,并探讨国内 IFC 发展趋势。其中,基于 CiteSpace 的文献计量方法主要步骤如下:

(1)数据源的选取。本文主要分析国内 IFC 研究,因此选取中国知网 CNKI 数据库进行文献数据的采集。

(2)数据采集及清洗。本文采用主题检索方式检索相应资料,主题包括“IFC”“Industry Foundation Classes”“工业基础类”,并剔除“国际金融中心”等与 IFC 缩写相同的词汇,以减少后期的数据筛选工作。检索的时间范围从 1996 年到 2019 年(截止至 2019 年 4 月底)。经 CNKI 的初

步检索,采集得到 2003—2019 年期间 726 条记录。为排除征文通知、新闻报道等无效记录,分别通过文献摘要、文献内容等人工研读方式清洗无效记录,最终得到有效记录 465 条。

(3)知识图谱绘制。本文利用 CiteSpace 绘制相关知识图谱。其中,模块值 Q (Modularity) 和平均轮廓值 MS (Mean Silhouette) 可评估图谱绘制的质量^[9];模块值 Q 表示图谱网络的模块度,当 $Q>0.3$ 时,表明图谱的聚类效果显著;平均轮廓值 MS 可用于评估网络的同质性,当 $MS>0.5$ 时,表明聚类是合理的。

(4)关注点讨论。本文根据绘制的知识图谱,对国内 IFC 研究和应用的关键领域、重要影响、发展趋势、研究分布等方面进行讨论。

2 研究热点分析

关键词是论文研究领域、思想、方法等方面的高度浓缩。可采用关键词绘制知识图谱,以分析 IFC 的研究热点。图 1 展示了采用 CiteSpace 绘制的研究热点知识图谱(类型为“Keyword”)。该知识图谱的 $Q=0.6215$, $MS=0.5335$,符合知识图谱的聚类要求。

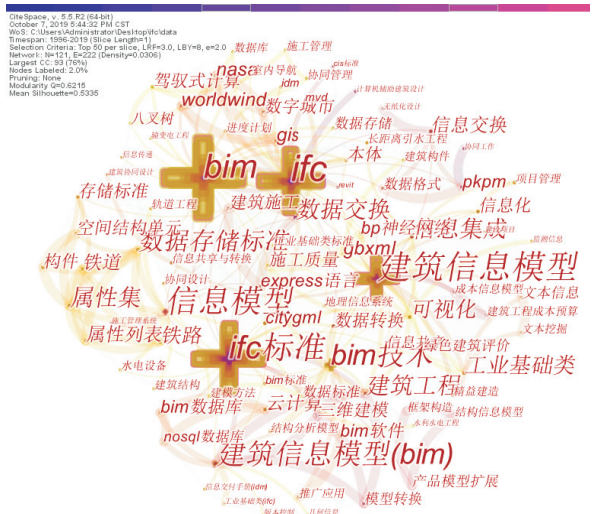


图1 国内 IFC 研究热点知识图谱

图 1 的知识图谱共有 121 个网络节点以及 222 根连线。从图 1 可见,IFC 与 BIM 之间存在非常紧密的关系(图 1 中,BIM 技术与 BIM、建筑信息模型、建筑信息模型(BIM)同义)。BIM 的提出背景是建筑项目各方基于统一模型开展协同工作。IFC 标准作为建筑领域的数据存储标准,奠定了 BIM 应用的数据基础。因此,二者在相关领域存在众多交叉。为进一步分析 IFC 的研究热点,除 IFC、BIM 及其同义词汇,根据频次得到前 20 个关键词,如表 1 所示。

分析图 1 和表 1,除 IFC 和 BIM,其它研究热点分布较分散,频次分布较均匀,各领域之间存在

表 1 国内 IFC 研究热点高频词

序号	关键词	频次	中心度
1	信息模型	26	0.20
2	数据交换	16	0.04
3	信息集成	13	0.04
4	CityGML	9	0.05
5	数据转换	8	0.02
6	信息化	6	0.01
7	GIS	6	0
8	可视化	5	0.05
9	PKPM	5	0.03
10	协同工作	5	0
11	属性集	4	0.01
12	数据存储标准	4	0.05
13	云计算	4	0.03
14	BIM 标准	4	0
15	建筑工程	4	0.02
16	信息交换	4	0.03
17	项目管理	4	0
18	建筑结构	3	0
19	BIM 模型	3	0
20	数据库	3	0

多种交叉。在 2003—2019 年期间,国内的 IFC 研究热点可总结为以下四个方面:

(1)数据交互。IFC 的提出背景是实现建筑领域各软件之间的数据交互。国内很多学者基于 IFC 研究建筑项目数据的共享与交换,“数据交换”“数据转换”“信息交换”等高频词验证了这一现象。特别地,IFC 与城市数据(CityGML)^[10,11]、地理信息(Geographic Information System, GIS)^[12,13]之间的转换研究,突显了 IFC 在城市、建筑、地理之间数据交互过程中所起的重要作用。

(2)数据集成。IFC 定义了建筑项目不同专业信息的表达方法,可用于存储建筑项目全生命周期数据。由于三维模型数据量大、关系复杂,国内部分学者研究“信息集成”“信息化”“数据库”等^[14~16],以优化 IFC 的集成效率与质量。

(3)数据应用。基于 IFC 的 BIM 模型为不同业务应用提供了统一数据,如何有效地将这些数据运用在实际建筑项目的业务应用中,是 IFC 应用过程的重要问题之一。经文献分析,现阶段已出现了基于 IFC 的“进度管理”“成本控制”“施工管理”等^[17~19]应用方面的研究。

(4)新技术结合。随着建筑项目数据量的不断累积,如何更高效地存储、交换、提取和管理这些数据,成为建筑项目信息化过程中必须解决的问题之一。通过分析图 1 的关键词,可发现国内

学者已开始基于“云计算”“神经网络”“本体”等^[20~22]建筑领域的新技术和 IFC 标准开展建筑项目数据处理研究。

3 研究演进探讨

本文搜索了 1996—2019 年范围的 IFC 研究文章,最终得到 2003—2019 年期间的 465 条记录。可见,尽管 bSI 在 1996 年已经发布 IFC1.0,但国内从 2003 年才开始研究 IFC 标准。根据时间跨度整理分析所采集的文献记录,如图 2 所示。从 2003 年开始,我国关于 IFC 的研究文献数量逐年增多。由于采集数据截止至 2019 年 4 月,故 2019 年的文献数量较少。可以预期,随着 IFC 的深入研究和应用,将有更多研究成果得到发布。进一步,根据不同时间段的突现词分析 IFC 研究的演进趋势,如图 3 所示。此处同样以关键词作为突现词,绘制关键词时序图。

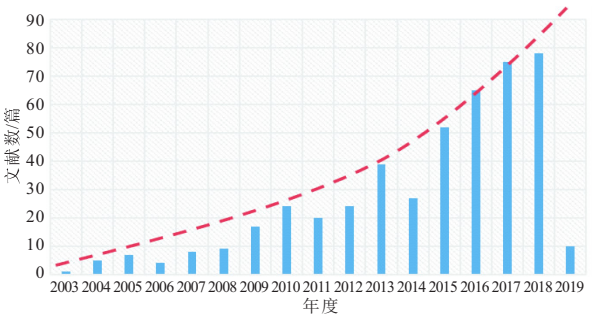


图 2 国内 IFC 研究文献的年发表量

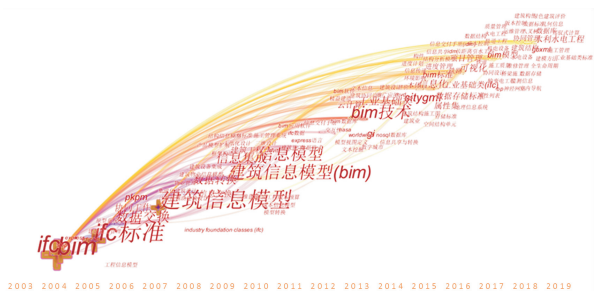


图 3 国内 IFC 研究的关键词时序图

从图 3 可知,我国关于 IFC 的研究可分为三个阶段:基础研究、深入研究、扩展应用。

2003—2010 年是国内 IFC 研究的第一个阶段,即基础研究阶段。国家“十五”重点科技攻关项目专题“基于 IFC 标准的 4D 施工管理原型系统研究与示范应用”(2004—2005 年)^[23]是比较早期的研究课题之一,主要研发基于 IFC 的建筑结构 CAD 软件系统、4D 施工管理系统等原型系统。紧接着,国家科技部批复开展“十一五”科技支撑计划项目“现代建筑设计施工关键技术研究”^[24],并设立“建筑协同设计关键技术研究”^[25]

“建筑设计与施工一体化平台信息共享技术研究^[26]”“绿色建筑全生命周期信息模型研究^[27]”等专题,这些专题研究均涉及了 IFC 研究。可以看到,该阶段的研究以国家政策推动为契机,围绕 IFC 研究建筑项目数据共享与交换等方面的基础问题,并探索性地研发相关的原型系统。

第二阶段(2010—2015 年)是关于 IFC 的深入研究。通过前期的积累,对 IFC 标准已经有了更清晰的定位和关注点。住建部在 2011 年发布《2011—2015 年建筑业信息化发展纲要》,明确要求“加快建筑信息模型(BIM)、基于网络的协同工作等新技术在工程中的应用”,也促进了 BIM 数据标准 IFC 的研究。在此阶段,国内学者对 IFC 数据结构开展了深入研究,如“文本挖掘”“信息交付手册(Information Delivery Manual, IDM)”“模型视图定义(Model View Definition, MVD)”等^[28~30],为建筑项目多方基于 IFC 标准的数据共享与交换提供了技术支撑。

2015 年至今的阶段为扩展应用阶段。国内

学者深入研究了 IFC 在建筑项目全生命周期过程中的应用问题,如“协同设计”“施工监测”“运维管理”等^[31~33]。应注意的是,IFC 标准现阶段主要针对一般建筑,国内早期阶段的研究主要集中在民用建筑。为满足其它类型建筑项目的数据交互需要,部分学者开始研究 IFC 在其它建筑项目中的应用,如“轨道工程”“输变电工程”“水利水电工程”等^[34~36]。这些研究填补了 IFC 在其它建筑类型项目中应用的不足,为 IFC 成为完善的建筑领域数据标准奠定了基础。

4 研究分布分析

4.1 核心文献群

核心文献是指具有权威性的经典文献,其它文献以此为知识基础形成自身的知识体系。根据被引频次,表 2 整理了 17 篇被引频次较高的核心文献,每篇文献的被引频次均在 96 次以上(截止至 2019 年 4 月底)。

表 2 国内 IFC 研究核心文献

编号	文献名称	作者	年份	被引频次	备注
1	基于 BIM 的建筑工程信息集成与管理研究	张洋	2009	397	博士论文
2	基于 IFC 标准和工程信息模型的建筑施工 4D 管理系统	张建平, 曹铭, 张洋	2005	214	
3	面向建筑全生命期的集成 BIM 建模技术研究	张建平, 余芳强, 李丁	2012	207	
4	BIM 国内外标准综述	郑国勤, 邱奎宁	2012	185	
5	基于 BIM 和 4D 技术的建筑施工优化及动态管理	张建平	2010	173	
6	基于 BIM 建筑结构设计模型集成框架应用开发	刘照球, 李云贵, 吕西林, 张汉义	2010	163	
7	BIM 技术研究与应用现状	郑华海, 刘匀, 李元齐	2015	155	
8	基于 IFC 标准的建筑结构模型的自动生成	邓雪原, 张之勇, 刘西拉	2007	147	
9	基于 BIM 技术的建设工程生命周期管理研究	刘晴, 王建平	2010	145	
10	基于 BIM 技术建筑协同平台的初步研究	李犁	2012	125	硕士论文
11	基于 BIM 技术的建筑信息平台的构建	李犁, 邓雪原	2012	122	
12	实现 BIM 价值的三大支柱-IFC/IDM/IFD	何关培	2011	112	
13	BIM 技术在我国研发及工程应用	刘占省, 赵明, 徐瑞龙	2013	106	
14	基于 IFC 的建筑工程 4D 施工管理系统的研究和应用	张建平	2010	106	
15	基于 IFC 的 BIM 三维几何建模及模型转换	张建平, 张洋, 张新	2009	106	
16	IFC 标准在中国的应用前景分析	邱奎宁	2003	96	
17	基于 BIM 的建筑结构模型的研究	李艳妮	2012	96	硕士论文

经分析,表 2 的文献可分为三类:概念研究、基础研究、原型系统研发。IFC 刚引入国内时,还缺乏相关的知识体系,邱奎宁^[37]、何关培^[38]等研究 IFC 的基础知识及其体系,推动 IFC 标准在国内的普及。随着对 IFC 标准的逐渐认识,国内学者开始研究基于 IFC 的 BIM 数据交互,如邓雪原等^[39]、李艳妮^[40]采用 IFC 数据作为中间格式,研究建筑模型与结构模型之间的数据转换;张建平^[41]、张洋^[42]基于 IFC 标准开展建筑工程模型

数据的集成、转换。随后越来越多的学者开始研发基于 IFC 的 BIM 原型系统,以期更高效地管理建筑项目全生命周期的信息。张建平^[23]基于 IFC 建立 4D 信息模型,并研发面向建筑施工的 4D 项目管理系统,可实现进度控制、资源管理、场地布置等;邓雪原^[43]基于 IFC 标准开展建筑多专业协同设计管理的研究,并搭建 BIM 建筑协同管理平台;刘照球^[44]通过分析建筑结构模型基本对象的表达,设计建筑结构信息模型集成框架,

可转换建筑结构信息模型。

4.2 论文来源分析

统计所采集的 465 条文献记录,可得到所有文献的发布来源。根据类型可分为期刊论文、学位论文和会议论文。

经统计,共有 117 种期刊发表了关于 IFC 研究的文献,图 4 汇总了主要的学术期刊(发表文献数量 ≥ 3 篇)。从图中可见,IFC 研究论文发表量最多的期刊包括《土木工程信息技术》、《铁路技术创新》等。其中,《土木工程信息技术》创刊于 2009 年,主要刊登国内土木工程行业信息技术方面的成果与动态,其创刊时间与 BIM 技术广泛应用的时间较吻合,对 BIM、IFC 等方面的关注度较高。《铁路技术创新》由中国铁道科学研究院主办,中国铁路 BIM 联盟在 2014 年正式成立,并借鉴 IFC 标准研究铁路领域的 BIM 数据标准。因此,铁路领域大量的 IFC 研究成果发布在该期刊上。其它期刊发表文献的数量相对较少,说明 IFC 作为建筑领域信息化的新方向,仍需要投入更多的关注,以推动国内的 IFC 发展。

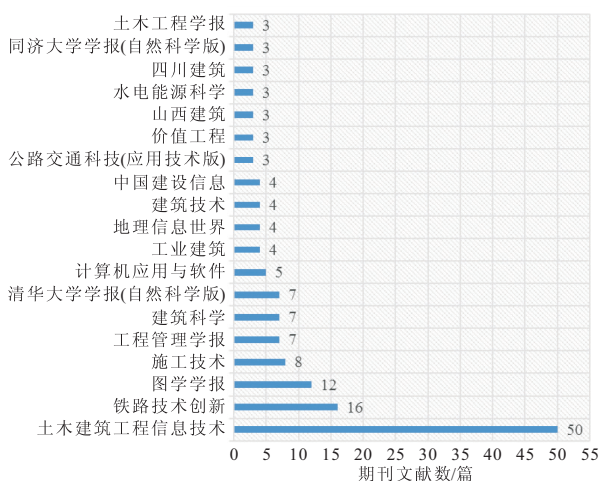


图 4 国内 IFC 研究的发表期刊

学位论文一般是课题团队在某一阶段研究得到的成果,在一定程度上可反映课题团队对该领域发展的重视程度。经统计,共有 50 个高校或研究院发表了与 IFC 相关的学位论文,表明 IFC 研究已得到国内广大学者的重视。其中,正式对外发布与 IFC 相关的学位论文较多的研究机构包括:清华大学(13)、华中科技大学(11)、大连理工大学(10)、天津大学(9)、哈尔滨工业大学(9)、上海交通大学(7)、东南大学(6)、北京建筑大学(5)。研究机构后的数字为学位论文数量,包括硕士和博士学位论文。上述机构形成较多的学位论文,一定程度上表明 IFC 研究已成为上述机构

相关课题组在土木建筑领域发展的重要方向。

对于会议论文,共统计得到 18 项会议论文集收录与 IFC 相关的论文。其中,全国 BIM 学术会议、全国工程建设计算机应用学术会议、工程建设计算机应用创新论坛、建筑业企业信息化应用发展研讨会收录的相关论文最多。上述会议主要以建筑领域信息化为主题,表明 IFC 研究在建筑业信息化发展中的重要作用。另一方面,在 18 项会议论文集的统计结果中,传统主题的会议(如结构工程、岩土工程、绿色建筑等)收录的 IFC 研究论文极少,说明传统方向基于 IFC 的研究与应用仍相对较少。

5 结 论

本文以 CNKI 数据库所得到的国内 IFC 研究文献为数据样本(2003—2019 年),采用知识图谱的方法分析 IFC 的研究热点、研究演进和研究分布等问题。相关结论如下:

(1)在研究热点方面,除 BIM、IFC 等紧密相关的关键词,高频词还包括信息模型、数据交换、信息集成等。进一步分类,现阶段 IFC 研究热点主要集中在数据交互、数据集成、数据应用等方面。同时,一些新技术(如云计算、人工智能)开始应用在建筑项目 IFC 数据研究上,成为 IFC 发展的新方向。

(2)在研究演进方面,国内 IFC 发展经历了基础研究、深入研究和扩展应用等阶段。近年来,IFC 的研究领域已从一般建筑项目扩展到轨道工程、电网工程、水利工程等市政基础项目,促进了国内更多建筑类型项目的 IFC 应用。

(3)在研究分布方面,IFC 的核心文献聚焦在概念研究、基础研究和原型系统研发等方面,综合性文献成果相对较少。在论文发布方面,与建筑领域传统方向相比,IFC 的论文发布来源相对集中,主要分布在与信息化相关的期刊、会议等。

针对上述结论,本文提出以下建议以期促进国内 IFC 的研究与应用:

(1)需要更多的学者关注基于 IFC 的 BIM 技术研究,以解决建筑项目应用的数据存储、交换、管理等问题。同时,需进一步加强各学者之间的合作交流,形成更高效的研究发展生态圈。

(2)将一般建筑的 IFC 研究与应用经验推广至其它类型项目(如市政工程),加快其它项目的 IFC 发展,以实现建筑领域更广泛的数据交互。

(3)在实际项目应用中,建筑领域各企业需

加快落实工程项目的 BIM/IFC 应用,在实际应用过程中发现问题,以加强产学研用结合,加快解决 BIM/IFC 应用的核心问题。

国外对 IFC 标准开展了大量的、深入的基础性研究,涉及建筑项目全生命周期各阶段 BIM 应用,尤其在数据扩展、数据交互、数据转换、数据验证等底层数据研究方面。而国内仍需进一步加强 IFC 标准底层数据方面的研究与应用。为比较分析国内外研究 IFC 的异同,笔者将在下一篇文章中系统分析国外关于 IFC 的研究现状,以期为国内 IFC 研究与应用提供参考,推动 IFC 在国内更广泛、更深入的应用。

参 考 文 献

[1] buildingSMART International. IFC Specifications Database [EB/OL]. [2019-06-01]. <https://technical.building-smart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>.

[2] buildingSMART International. Current Project and Activities[EB/OL]. [2019-06-01]. <https://www.building-smart.org/standards/rooms/infrastructure/>.

[3] Ramaji I J, Memari A M. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models[J]. Automation in Construction, 2018, 90: 117-133.

[4] Kim H, Shen Z, Kim I, et al. BIM IFC information mapping to building energy analysis (BEA) model with manually extended material information[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 183-193.

[5] Theiler M, Smarsly K. IFC Monitor-An IFC schema extension for modeling structural health monitoring systems [J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 37: 54-65.

[6] Shalabi F, Turkan Y. IFC BIM-based facility management approach to optimize data collection for corrective maintenance[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(1): 04016081-1-13.

[7] Zhang C, Beetz J, De Vries B. Towards Model View Definition on Semantic Level: a State of the Art Review[C]//Proceedings of European Group for Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE). Vienna: European Group for Intelligent Computing in Engineering, 2013: 1-10.

[8] 陈悦,刘则渊.悄然兴起的科学知识图谱[J].科学学研究,2005,23(2):149-154.

[9] 陈悦,陈超美,胡志刚,等.引文空间分析原理与应用:CiteSpace实用指南[M].北京:科学出版社,2014.

[10] 王建龙,何望君,刘纪平. IFC 与 CityGML 建筑几

何语义信息转换[J]. 科学技术创新, 2018, (2): 150-151.

[11] 虞铭尧, 庞浩宇, Wardle E. LOD2 和 LOD3 细节层次下 IFC 至 CityGML 的模型转换[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2017, 20(3): 26-30.

[12] 武鹏飞, 刘玉身, 谭毅, 等. GIS 与 BIM 融合的研究进展与发展趋势[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(1): 1-6.

[13] 刘金岩, 刘云锋, 李浩, 等. 基于 BIM 和 GIS 的数据集成在水利工程中的应用框架[J]. 工程管理学报, 2016, 30(4): 95-99.

[14] 胡振中, 田佩龙, 李久林. 基于 IFC 的传感器信息存储与应用研究[J]. 图学学报, 2018, 39(3): 522-529.

[15] 孙增强. 基于 BIM 信息化技术的建筑项目成本管理系统[D]. 天津: 天津大学, 2016.

[16] 周颖, 郭红领, 罗柱邦. IFC 数据到关系型数据库的自动映射方法研究[C]//第四届全国 BIM 学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 311-317.

[17] 张晓勇. 基于 Unity 3D 的施工进度管理系统在河南三淅高速公路中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, (8): 152-153.

[18] 陈向上, 刘金旭. 基于 IFC 标准的造价模型在医院工程中的应用[J]. 建筑技术, 2019, 50(2): 213-216.

[19] 徐圆圆. 基于 BIM 与 IFC 的多目标施工信息优化模型建立及管理研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.

[20] 徐照, 康蕊, 孙宁. 基于 IFC 标准的建筑构件点云信息处理方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 1068-1075.

[21] 李柄静. 基于 BIM 的建筑工程施工质量可视化评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[22] 周文韬. 基于本体的绿色施工评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

[23] 张建平, 曹铭, 张洋. 基于 IFC 标准和工程信息模型的建筑施工 4D 管理系统[J]. 工程力学, 2005, (s1): 220-227.

[24] 本刊编辑. “十一五”国家科技支撑计划重点项目——现代建筑设计与施工关键技术研究[J]. 建设科技, 2011, (13): 51.

[25] 邓雪原, 苏昶, 孙朋, 等. 上海现代建筑设计(集团)建筑协同设计平台研究与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2(3): 96-103.

[26] 张建平, 张洋, 张新. 基于 IFC 的 BIM 三维几何建模及模型转换[J]. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(1): 40-46.

[27] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 建筑结构信息集成的程序实现[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(3): 467-473.

[28] 姜韶华, 张海燕. 基于 BIM 的建设领域文本信息管理研究[J]. 工程管理学报, 2013, 27(4): 16-20.

[29] 丘衍航, 高光林, 曹 国. 语义交换对象在交换模型中的使用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2013, 5(5): 107-109.

[30] 明 星. 基于 MVD 的建筑与结构模型转换研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[31] 赖华辉, 邓雪原, 刘西拉. 基于 IFC 标准的 BIM 数据共享与交换[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 121-128.

[32] 刘训房. 基于 BIM 和 WEB 的隧道动态施工监测信息系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.

[33] 张建平, 何田丰, 林佳瑞, 等. 基于 BIM 的建筑空间与设备拓扑信息提取及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(6): 587-592.

[34] 吴祎菲, 邓雪原, 夏海兵, 等. 基于 IFC 标准的城市轨道交通 BIM(建筑信息模型)数据有效性检查[J]. 城市轨道交通研究, 2019, (4): 109-114.

[35] 周 亮, 蔡 钧, 丁一波, 等. 基于 IFC 的输变电工程三维数字化管理平台研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 7-12.

[36] 潘 飞, 张社荣. 基于 3D WebGIS 的土木水利工程 BIM 集成和管理研究[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(4): 69-74.

[37] 邱奎宁. IFC 标准在中国的应用前景分析[J]. 建筑科学, 2003, 19(2): 62-64.

[38] 何关培. 实现 BIM 价值的三大支柱-IFC/IDM/IFD[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(1): 108-116.

[39] 邓雪原, 张之勇, 刘西拉. 基于 IFC 标准的建筑结构模型的自动生成[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 6-12.

[40] 李艳妮. 基于 BIM 的建筑结构模型的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.

[41] 张建平, 张 洋, 张 新. 基于 IFC 的 BIM 三维几何建模及模型转换[J]. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(1): 40-46.

[42] 张 洋. 基于 BIM 的建筑工程信息集成与管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.

[43] 李 犁, 邓雪原. 基于 BIM 技术的建筑信息平台的构建[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, 4(2): 25-29.

[44] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 基于 BIM 建筑设计模型集成框架应用开发[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 948-953.

(上接第 95 页)

[13] 姜 涛, 张 磊, 王晓萌, 等. 基于 Grasshopper 的自由曲面网壳菱形网格划分(英文)[J]. 空间结构, 2016, 22(2): 92-96.

[14] Garg A, Sageman-Furnas A O, Deng B, et al. Wire mesh design [J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 66-1-12.