

基于工业基础类标准的钢结构 BIM 全数据交互技术

张其林¹, 唐子涵¹, 满延磊²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海同磊土木工程技术有限公司 研发部, 上海 200433)

摘要: 研究了适用于各类钢结构的基于工业基础类标准(IFC)的全数据交互技术,可以导出钢结构模型完整的几何信息与附加属性,使通用建筑BIM软件能够进行模型信息读取并编辑其中的参数化构件;可以将模型全信息导入钢结构主流详图设计软件 Tekla 进行解析并重生成结构模型,实现模型二次编辑与施工出图。经工程实例验证,该成果应用于钢结构建筑信息模型(BIM)数据交互时信息传递完整、模型转换质量高,避免了钢结构不同设计阶段的重复建模,极大提升了设计效率。

关键词: 建筑信息模型;工业基础类标准;全数据交互;钢结构

中图分类号: TU17

文献标志码: A

BIM Full Data-exchange Technology of Steel Structure Based on Industry Foundation Class Standard

ZHANG Qilin¹, TANG Zihan¹, MAN Yanlei²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Tonglei Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: This paper develops a complete data-exchange technology based on IFC standard for various types of steel structures. On the one hand, the complete geometric information and additional attributes of the steel structure model can be derived, so that the universal construction BIM software can parse the model and edit the parameterized components. On the other hand, the complete information can be imported to mainstream detailing design software for steel structures named Tekla, then structure model can be regenerated based on these obtained information, from which the secondary edit as well as the construction drawing can be achieved. Verified by engineering Applications, this technology enhances the integrity of information transfer and the quality of model

transformation when applied to BIM data-exchange of steel structure, avoiding repeated modeling in different design stages and improving design efficiency greatly.

Keywords: building information modeling; industry foundation class standard; full information data-exchange; steel structure

传统建筑行业因高度分散的行业特性、不同参建方技术应用的非一致性等因素,存在较为严重的资源浪费与经济损失现象^[1]。建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)的出现,推动了建筑业信息化变革的浪潮。BIM技术旨在以建筑信息为基础构建计算机建筑信息模型,使建筑设计、建造、管理等各阶段信息高度集成,促进项目各参与方高效协同工作^[2],提高设计施工效率、控制资源浪费。BIM技术发展的核心是在统一的数据管理平台下实现多专业领域、多时间节点的数据共享。然而,由于建筑领域设计软件繁多、不同软件对结构模型的读取与输出机制不同,信息交互仍存在较大阻碍^[3]。迄今为止,国内外仍未能实现基于一套BIM模型完成的全过程正向设计,不同阶段、不同领域的设计人员常需对其他BIM软件传输的模型进行大量修改或二次建模,导致模型信息不集成、不连续,且消耗大量时间、人力成本。为打破不同BIM软件间的信息传输壁垒,国际智慧建筑联盟制订了工业基础类(Industry Foundation Classes, IFC)标准作为国际通用的BIM数据交互标准^[4],对设计信息进行存储、传递、共享。IFC标准采用STEP标准与面向对象的EXPRESS语言描述,具有公开化、结构化、面向对象等特征^[5-6],按照层级进行划分的框架具有较强的可读性与可扩展性^[7],是解决BIM数据交互问题的基础。

钢结构作为当前应较为广泛的建筑结构形式之

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100903)

第一作者: 张其林,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为空间结构、土木工程信息技术。

E-mail: zhangqilin@tongji.edu.cn

通信作者: 唐子涵,硕士生,主要研究方向为钢结构深化设计、BIM数据交互。E-mail: 13258027059@163.com



论文
拓展
介绍

一,由于其体系、构件、连接类型复杂多样,且力学分析、设计验算、结构深化等各阶段相对独立,对高精度性、高效率的BIM数据交互功能的需求较为迫切。但现有的基于IFC标准的数据交互技术对钢结构BIM信息传输的准确性与完整性较低,严重影响了钢结构BIM技术的推广应用。本文提出了基于IFC标准的钢结构BIM全数据交互技术,其中导出技术最大限度保留了钢结构模型信息,可获得较高的BIM软件IFC数据解析支持率;针对Tekla软件开发的专用导入接口,能实现IFC模型全信息读取与编辑,打通了钢结构从计算、深化到出图的全信息交互节点,实现了钢结构BIM技术应用的高精确性与高效率。

1 钢结构行业 IFC 数据交互研究现状及存在的问题

目前,建筑设计阶段对基于IFC标准的数据交互技术的研究主要集中于IFC数据映射、信息集成共享与相关应用开发等方面。Lipman^[8]研究了钢结构设计标准与IFC数据的映射方法,为IFC标准在钢结构设计中的应用打下基础;Wu等^[9]从语义与几何信息的角度出发提出了一种基于BIM数据集的IFC数据映射优化方法;Kang等^[10]设计了基于IFC标准的信息提取、转换与加载框架,并对IFC标准与GIS标准进行了集成研究。诸多研究成果被应用于建筑、桥梁、隧道等多种结构形式的模型转化中^[11-13],使IFC标准的应用范畴得到进一步丰富与扩展。

目前在基于IFC数据交互的应用领域,多数深化设计与实体建模类BIM软件均提供IFC格式模型的导入导出功能,如Revit、Tekla Structure、ArchiCAD、Bentley、Advance Steel等,但其应用效果并不尽如人意。许多学者在研究中指出,IFC数据于不同软件中传输时存在一致性问题,Turk Z等^[3]通过IFC数据转换测试发现以IFC标准描述的建筑信息模型在不同BIM软件间传递会出现信息错误、构件丢失、表达不一致等现象;Ghang Lee等^[15]发现同一模型在不同软件中输出的IFC文件在大小、编号、描述构件所使用的对象类型与属性等方面都存在差异。综上所述,IFC数据在BIM软件间的传输主要存在两方面问题:一是模型IFC数据导出时会出现信息表达错误甚至丢失的现象;二是即使通过IFC文件获取到较为完整的钢结构模型数据,部分BIM软件对模型信息的解析功能仍不够完善,且不同软件间IFC数据到实体模型的映射算法不统一、存在信息表达歧义,难以完整

准确的还原结构模型^[16],影响模型传输效率。

在信息导出错误与丢失方面,以某钢结构框架模型为例,将其在两类BIM软件间以IFC格式进行传输,模型出现了较为明显的杆件缺失(见图1a),且切割过的板件只保留了实体外观,其切割信息、厚度、编号等关键属性均丢失,无法进行参数化二次编辑(见图1b)。

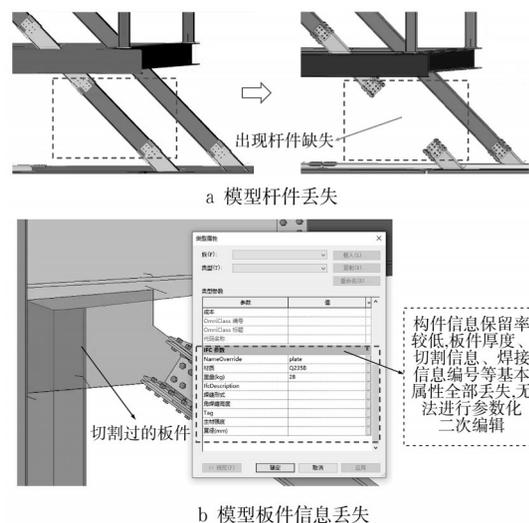


图1 IFC模型信息传输问题

Fig.1 Error in transmission of information from IFC model

在信息解析不完全方面,以钢结构详图设计软件Tekla Structures为例,其内置“参考模型”功能接受*. ifc格式文件导入,但解析所得模型的信息保留率较低,大量零构件出现几何外观表达错误,无法直接用于深化设计与出图。例如,将某圆管柱IFC模型导入Tekla,发现柱身出现了严重的板件、螺栓缺失,如图2a所示。Tekla 2020及以上版本增加了“起始IFC对象转换变更管理”功能,可通过转换、作为挤压转换、作为项转换等选项对构件进行调整,但即使经过转换,模型仍存在构件丢失现象,如图2b所示,且转换无法批量操作,对体量较大的建筑模型,

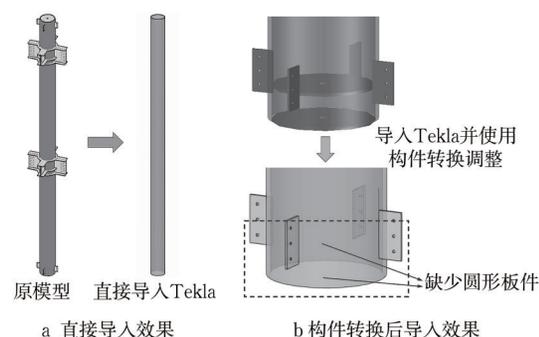


图2 Tekla对IFC模型的表达错误

Fig.2 Wrong expression of IFC model by Tekla

逐一转换调整构件并不现实。综上, 经由 IFC 标准传输的钢结构模型, 常需要工程人员进行大量步骤繁琐的修改调整, 严重影响设计效率。因此提升钢结构 IFC 数据导出的准确性与兼容性, 针对部分 IFC 数据解析能力不足的 BIM 软件创建相应的 IFC 数据解析接口, 已成为解决问题的关键所在。

2 IFC 数据与钢结构模型间的转换

2.1 模型数据到 IFC 数据的转换流程设计

为提升 IFC 数据导出的完整性、准确性与兼容性, 根据 IFC 标准下的模型表达机制, 设计模型数据至 IFC 数据的转换流程, 整体思路可划分为模型几何信息导出与附加属性导出两部分。

2.1.1 模型几何信息导出

模型中构件几何信息可通过 IFC 构件类 *IfcElement* 及其派生类描述。构件在不同软件中 IFC 类转换差异, 是导致几何信息传输错误的一大原因。例如, 梁、柱、板等构件分别可转换为 *IfcBeam* 类、*IfcColumn* 类、*IfcPlate* 类, 也可统一转换为 *IfcBuildingElementProxy* 类, 研究发现多数 BIM 软件对前者有更强的解析能力; 焊缝、螺栓等连接可转换为 *IfcDiscreteAccessory* 类、*IfcMechanicalFastener* 类等, 经测试不同方式导出构件的信息完整度, 决定采用 *IfcDiscreteAccessory* 类描述焊缝连接, *IfcMechanicalFastener* 类描述螺栓等连接, 使模型导出的构件信息拥有最大程度的完整性与兼容性。

导致信息丢失、二次编辑困难的另一原因, 是构件的几何实体项表达方式差异。若构件几何构型规则, 其几何实体项 *IfcGeometricRepresentationItem* 可通过 IFC 拉伸实体 *IfcExtrudedAreaSolid*、IFC 旋转实体 *IfcRevolvedAreaSolid* 等参数化实体表达, 其信息保留率较高, 能够二次编辑。若构件形状复杂, 难以通过既有 IFC 参数化实体表达, 可采用参数化程度较低的 IFC 面片实体 *IfcFacetedBrep* 替代, 面片实体将构件拟合为网格化的三角面片, 能描述实体几何外观, 通用性较强且算法简单, 是目前 BIM 软件对构件的主流转化方式, 但其信息保留率低, 导出后无法二次编辑。对比两种表达方式, 结果如表 1 所示。

为减少 B-rep 面片实体带来的信息丢失, 本研究对复杂构件优先采用 CSG (Constructive Solid Geometry) 体素构造法描述, CSG 将复杂实体视作简单几何实体的布尔运算结果, 其中简单几何实体可采用参数化 IFC 实体描述, 以提高构件信息保留率。例

表 1 IFC 几何实体项表达方式对比
Tab.1 Comparison of IFC geometric entity item expressions

实体类别	IFC 实体类代表	可保存信息	信息保留率	通用性	二次编辑可行性
参数化实体	拉伸实体 <i>IfcExtrudedAreaSolid</i>	拉伸截面、方向、距离、局部坐标等	高	弱	可行
	旋转实体 <i>IfcRevolvedAreaSolid</i>	旋转面、中心轴、旋转角度等			
非参数化实体	球体 <i>IfcSphere</i>	球心、球体半径、局部坐标等	低	强	不可行
	面片实体 <i>IfcFacetedBrep</i>	实体几何外观			

如, 基于 CSG 法创建切割体、被切割体的 IFC 参数化几何实体, 将其视为布尔算子 *IfcBooleanOperand*, 应用 IFC 标准提供的 union/intersect/difference 三种运算符执行布尔运算。若构件经历过线/面切割, 可通过 IFC 标准下的半空间体 *IfcHalfSpaceSolid* 予以描述, 切割面即为半空间体边界面, 切割面法向为半空间体深度方向。模型构件几何信息转换思路如图 3 所示。

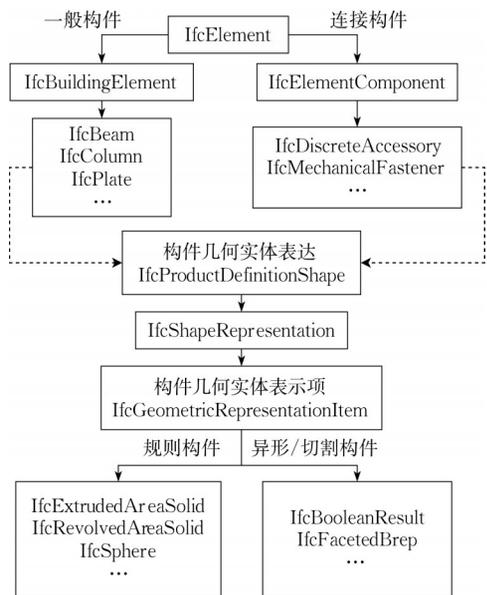


图 3 IFC 构件几何信息转换

Fig.3 Geometric information conversion of IFC elements

2.1.2 模型附加属性导出

模型附加属性包含构件截面、材质、编号、组信息等, 目前多数 BIM 软件对 IFC 附加属性转换处理较少。本文为最大限度保留模型信息, 通过以下三种方式导出其附加属性:

一为材料属性, 可通过 *IfcRelAssociatesMaterial* 关联构件与其材料集 *IfcMaterial* 导出, 经验证此方式可获取较高的 BIM 软件解析支持率。

二为截面、编号等基本属性与常用构件附加属性,可通过属性集 IfcPropetySet 中的 HasProperties 引用单值属性,再以 IfcRelDefinesByProperties 建立构件与属性集间关联的方式导出。其中构件附加属性增加了可导出的信息种类,如对杆件,实现端部定位点重心坐标导出;对板件,实现切角类型、切角尺寸导出;对螺栓、锚栓、铆钉,实现规格、装配类型、排列方式等信息导出;对焊缝,实现类型、角焊缝高度(若为角焊缝)等信息导出。此方式可便捷导出多种自定义属性,且不受表达方式限制,思路如图 4 所示。

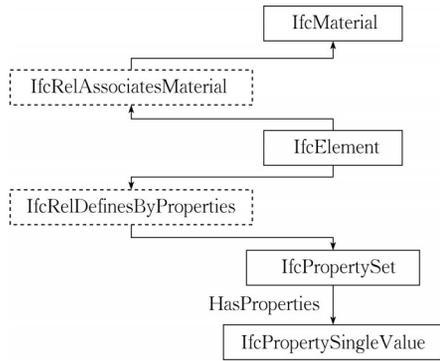


图 4 IFC 构件属性转换

Fig.4 Attribute conversion of IFC elements

三为目前绝大多数 BIM 软件均未考虑的组信息,包括构件组、节点组等。组信息导出最重要的是同时

保留构件自身参数化信息与依附关系,经研究本文采用 IFC 聚合关系类 IfcRelAggregates 描述组,以抽象类聚合元素集 IfcElementAssembly 作为 RelatingObject 提示组关系,以 RelatedObjects 定义组构件集合,该方式使组层级与构件属性均得以保留,实现了高参数化水平的组信息转换,思路如图 5 所示。

综上,设计如图 6 所示的模型 IFC 数据导出流程。

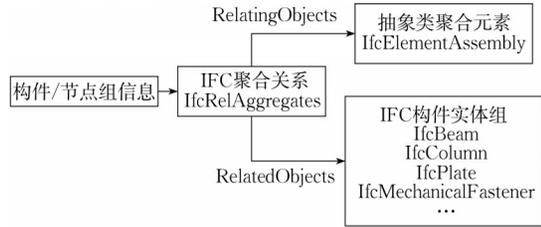


图 5 IFC 模型组信息转换

Fig.5 Group information conversion of IFC model

经上述流程导出的钢结构模型 IFC 文件,可将模型中零构件几何外观、坐标方位、布尔运算过程等几何信息与零构件材料、截面、编号、组关系等附加属性完整准确的表达,且映射算法具有较强的兼容性,能够于主流 BIM 软件中实现准确的几何构型表达与参数化构件二次编辑。

2.2 IFC 数据到模型数据的转换流程设计

为实现模型全数据交互与二次编辑、出图,还需

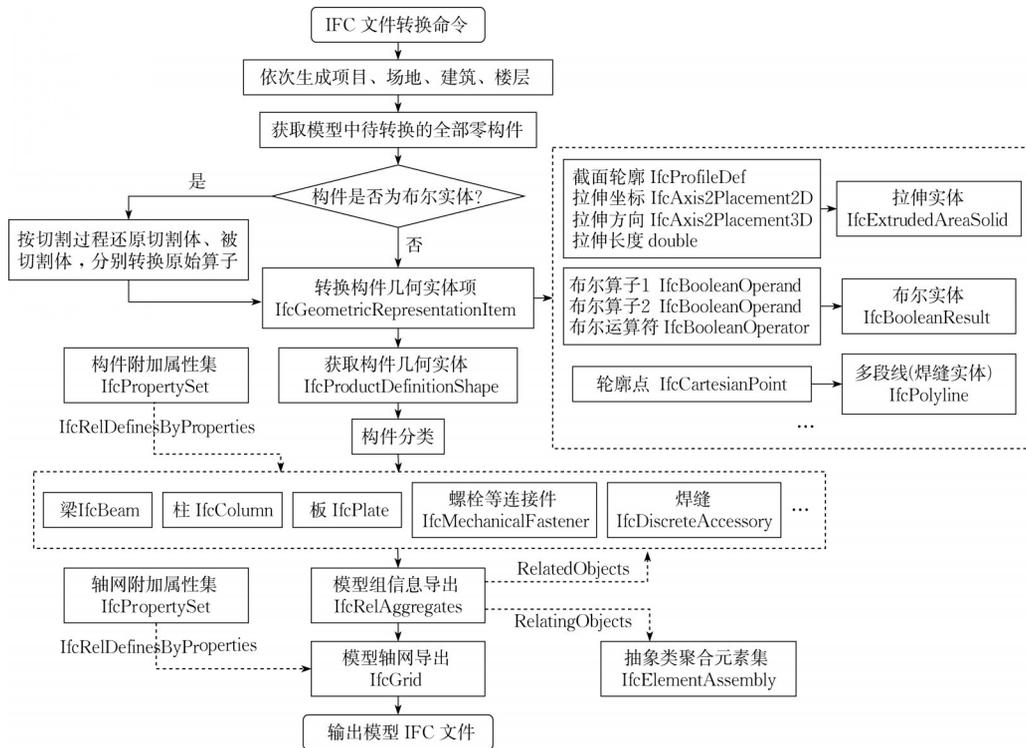


图 6 模型 IFC 数据导出流程

Fig.6 Exporting process of model IFC data

完善 BIM 软件对 IFC 数据的解析功能。本文选取常用于施工图绘制、对模型可编辑性要求较高的 Tekla 软件, 研究针对 Tekla 的 IFC 数据导入接口, 设计 IFC 数据到 Tekla 模型数据的完整转换流程。

IFC 结构模型可通过 IfcProject 表达, 其依次关联模型场地、建筑、楼层信息, 以及模型整体的空间坐标方位。解析 IfcElement 类, 可获得全部建筑构件信息, 遍历其中成员, 可逐一转化构件。

Tekla 中 IFC 构件解析需按一定顺序进行。部分实体存在关联实体, 如切割体、被切割体可视为切割结果的关联实体, 被连接构件可视为连接件的关联实体。以 Tekla 零件切割为例, 执行切割的方式为实例化一个 BooleanPart 对象, 设置已存在的零件为该对象的被切割体 Father 与切割体 OperativePart, 若该对象 Insert 成功, 说明切割成功。因此这部分 IFC 实体解析时, 需满足其关联实体均已生成的先决条件, 考虑采用拓扑排序思路: 对不存在关联实体的构件先行解析, 每解析完成一个构件, 记录该构件 IFC 标识符 GlobalId 与 Tekla 标识符 Identifier 间的哈希映射; 若当前构件存在关联实体, 获取其算子 BooleanOperand 的 IFC 标识符 GlobalId, 判断哈希表中是否已存储该 GlobalId 作为键值, 若否, 说明当前构件存在布尔算

子尚未生成, 无法执行切割操作, 需暂缓解析。所有关联实体单向记录, 即解析不存在环路。

Tekla 构件创建时需要设置属性, 故实例化构件对象前需先通过反向属性 IfcRelDefinesByProperties 获取与当前构件对象 IfcElement 相关联的属性集, 采用数据结构哈希表记录属性名与属性值间的映射关系。考虑到 Tekla 中材料库、截面库设计依据为欧洲规范, 属性解析前先建立国标与欧标间关于材料、截面类型的转换机制。

解析螺栓、锚栓等连接构件时, 由于螺栓群可围绕定位点与定位轴线进行偏移与旋转, 这为栓群位置的确定带来较大困难。本研究采用记录螺栓局部坐标系, 螺栓创建时将模型整体坐标系转换为局部坐标系, 基于构件坐标层次进行螺栓定位, 待创建完毕再还原整体坐标系的方式, 解决了螺栓定位问题。属性赋值阶段先设置螺栓规格、直径、装配类型等基本信息, 再通过关联实体的 IFC 标识符 GlobalId 与此前记录的已生成 Tekla 构件的 GlobalId 到 Identifier 间的哈希映射找到待连接构件, 绑定其为螺栓的 PartToBoltTo 与 PartToBeBolted 对象, 完成螺栓实体导入。零构件创建过程及实例化相应类需赋值的成员变量如图 7 所示。

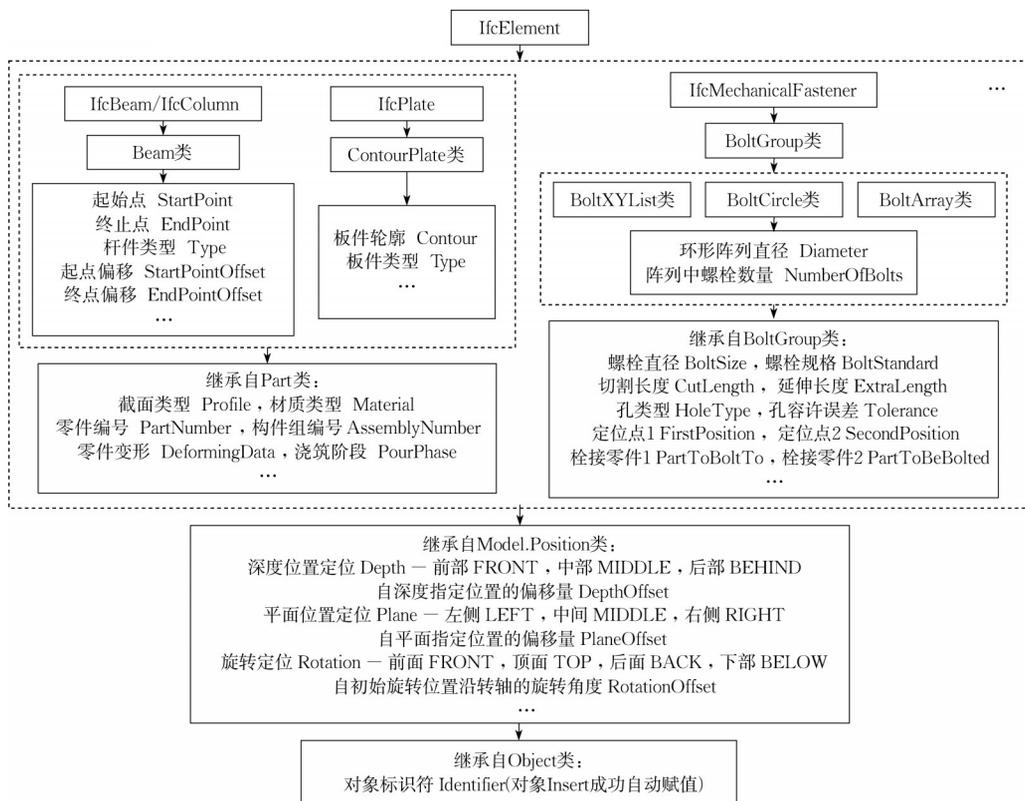


图 7 Tekla 零构件创建与属性设置

Fig.7 Component creation and property setting of Tekla

由于拓扑排序流程确保其布尔算子已拥有 Tekla 实体,解析布尔类型构件时可直接获取相应实体并利用实例化零件切割(BooleanPart)、面切割(CutPlane)等类对象,执行 IfcBooleanOperator 记录的切割或延伸操作,重现并维护构件切割或连接过程。布尔切割流程及实例化相应类需赋值的成员变量如图 8 所示。

解析模型组信息时,从 IfcRelAggregates 类获得组内子构件的 IFC 标识符,利用哈希映射确定对应 Tekla 构件实体,通过 GetAssembly 方法获取主零件的 Assembly 装配对象,再将其余构件加入该装配单元,实现组信息转换。综上,设计如图 9 所示的模型

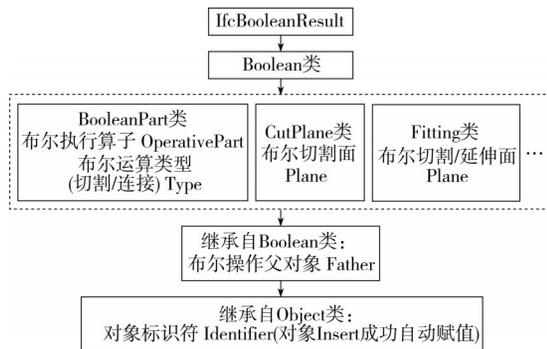


图 8 Tekla 布尔实体创建与属性设置

Fig.8 Boolean entity creation and property setting of Tekla

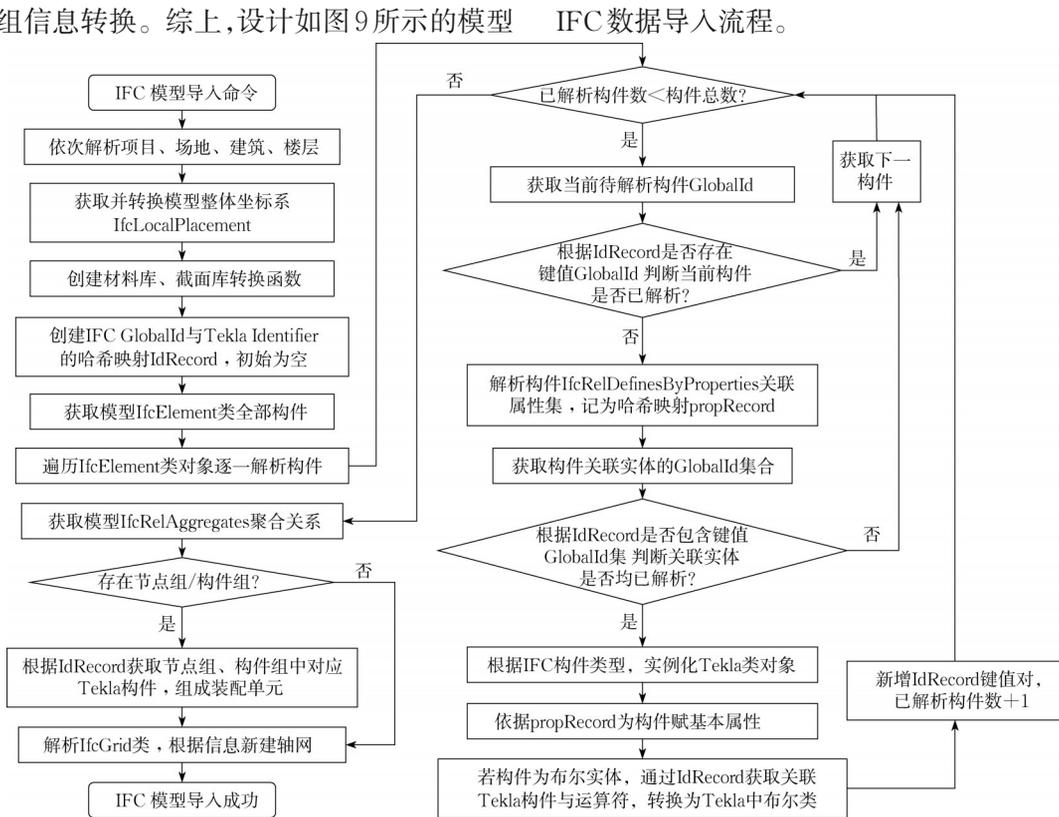


图 9 模型 IFC 数据导入流程

Fig.9 Importing process of model IFC data

由于模型中零构件均根据 IFC 数据重建,效果等同于直接在 Tekla 中手动建模,故经上述流程解析得到的 IFC 模型能够较好的满足二次编辑与出图需求。

3 钢结构 IFC 数据转换技术应用实例

IFC 数据导出技术的程序依托同济大学自主研发的钢结构设计平台 3D3S 实现,能够将常见的钢结构模型导出为 IFC 文件。开发 3D3S 软件系统需要 C++ 编程语言与基于 ObjectArx 的 AutoCAD 二次开发环

境。为将模型信息转换为 IFC 格式数据,使用开源引擎 IfcOpenShell,并通过自主设计的各类转换函数,实现 ObjectArx 中三维实体类 AcDb3dSolid 派生的各类构件实体到 IFC 实体的转换。

IFC 数据 Tekla 专用导入接口的程序则依托基于 C# 编程语言的 Tekla 二次开发实现,由于 IfcOpenShell 解析器没有 C# 版本,使用 Xbim 开源库对 IFC 文件进行解析,并利用 Tekla 官方应用编程界面 TeklaOpenAPI 提供的类库,实现 IFC 实体到 Tekla 模型中 ModelObject 类派生的各类构件实体的转换。

表 2 不同软件导出 IFC 模型的信息转化率对比

Tab.2 Comparison of information conversion rates of IFC models exported by different softwares

IFC 模型信息		不同软件导出 IFC 模型的信息转化率 / %			
信息类型	具体参数	3D3S IFC 数据导出技术	Tekla	Revit	ArchiCAD
几何信息	构件几何构型	100.00	100.00	100.00	100.00
	实体切割信息	90.75	25.16	18.24	0
	构件局部坐标系	86.67	45.34	32.20	31.83
附加属性	截面、材料等基本属性	100.00	84.08	56.40	55.67
	参数化组信息	100.00	0	0	0
	不同类型构件附加属性	82.25	26.25	0	30.16
全部模型信息		95.83	74.17	64.80	52.96

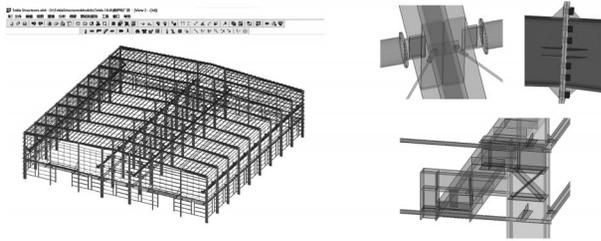


图 13 厂房 IFC 模型于 Tekla 中导入效果

Fig.13 Importing results to Tekla for IFC model of workshop

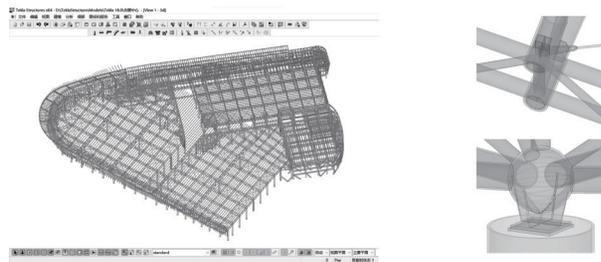


图 14 会展中心 IFC 模型于 Tekla 中导入效果

Fig.14 Importing results to Tekla for IFC model of exhibition center

对比使用 IFC 数据导入接口前后的 Tekla 模型信息转化率,如表 3 所示。使用导入接口后,模型几何构型、切割信息、附加属性等转化率大幅提升,并新增深化设计所需的关系信息与组信息导入,基本满足后续深化设计与图纸绘制需求,显著提升计算模型到深化模型的转化效率。

表 3 使用 IFC 数据导入接口前后模型信息转化率对比

Tab.3 Comparison of model information conversion rates before and after using the IFC data import interface

IFC 数据导入接口	IFC 模型导入 Tekla 后信息转化率 / %					
	几何构型	切割信息	基本属性	附加属性	关系信息	组信息
使用前	78.77	58.23	84.08	29.15	0	0
使用后	99.34	97.55	100.00	92.83	100.00	100.00
信息转化率提升程度	+	+	+	+	+	+
	20.57	39.32	15.92	63.68	100.00	100.00

3.3 全数据交互技术性能分析

从运行效率层面分析,以轻钢厂房模型为例,模型 dwg 文件大小为 216MB,共有 13 666 根杆件、12 076 块板件、1 953 个螺栓、2 482 段焊缝、6 784 组节点,经 IFC 数据导出技术转换得到的 IFC 文件大小为 246MB,导出用时 8min 11s;导入 Revit 软件,用时 8min 46s,导入 ArchiCAD 软件,用时 3min 37s;应用专用数据接口导入 Tekla 软件,用时 5min 32s,表现了全数据交互技术较优的空间性能与运行效率。

从数据格式层面分析,中国建筑科学研究院建筑工程软件研究所研发的工程管理软件 PKPM 同样开发了导出模型至 Tekla 的功能,但其模型存储为 mdb 格式,导出与导入均需特定的转换接口,无法满足导出模型供主流 BIM 软件共享的要求。使用 IFC 格式与其他格式开发数据接口的功能对比如表 4 所示,可知使用 IFC 格式进行数据导出并开发基于 IFC 标准的导入接口通用性较强,且具有“进可攻、退可守”的优势。使用专用接口能够有针对性的将 IFC 模型全部信息导入指定 BIM 软件,无需重复建模即可进行深化设计、施工图出图等流程;使用通用接口则能将 IFC 模型几何构型与参数化构件全部信息导入主流 BIM 软件,实现模型整体基于几何层次的数据交互与参数化构件的二次编辑。

表 4 不同格式下数据接口的对比

Tab.4 Feature comparison of data interfaces in different formats

	使用 IFC 数据格式导出		使用其他数据格式导出
	专用接口	通用接口	
实现功能	<ul style="list-style-type: none"> · 可完整导出模型 IFC 数据 · 有针对性的将 IFC 数据导入特定 BIM 软件,实现全部零构件二次编辑与出图 	<ul style="list-style-type: none"> · 可完整导出模型 IFC 数据 · 实现模型在主流 BIM 软件中的几何构型交互 · 实现参数化构件二次编辑 	<ul style="list-style-type: none"> · 可完整导出模型该格式数据 · 仅在使用相应格式数据解析接口时方可将模型导入至其他 BIM 软件
特征	通用性较强		通用性较差

4 结论

(1) 本文针对现有钢结构BIM软件基于IFC标准下的模型数据交互问题,研发了一种全数据交互技术,克服了国内外现有软件平台在钢结构模型IFC数据导入导出中存在的主要弊端,大幅提升了BIM技术在钢结构设计建造全过程中应用的准确性、经济性与效率。

(2) 为提高IFC模型信息导出的完整性与兼容性,选取BIM软件解析支持率较高的IFC类进行零构件转换,并采用参数化程度较高的IFC实体描述基本构件、CSG体素构造体描述异形构件,减少了因应用面片实体带来的钢构件模型参数大量丢失的现象,提高了模型的可编辑性。除可导出构件材料、截面、编号等基本属性外,还可导出任意类型钢构件重要的附加信息,能够满足钢构件对可导出信息的严苛要求。

(3) 通过专用数据接口的设计,可将IFC模型完整准确的传入Tekla软件,避免了深化设计阶段重复建模,提高了基于BIM技术的钢结构模型深化与出图效率。

(4) 本文研发的IFC数据导出技术具有较强的通用性与普适性,所得IFC模型能够在主流BIM软件中实现基于几何构型层次的数据交互与参数化构件的二次编辑;IFC数据导入接口具有较强的针对性,适用于对模型可编辑性要求较高的情况,通过专用接口开发能够实现模型全信息转换与二次编辑,使BIM模型呈现良好的数据交互效果。

(5) 本文研究的IFC全数据交互技术已成功应用于实际钢结构工程中,与传统方法相比,可将钢结构BIM技术的应用效率提高2-3倍,并避免了重复建模可能带来的人为差错。

作者贡献声明:

张其林:提出研究思路,指导研究方案,设计论文框架,审阅论文并提出修改意见,提供技术及经费支持;

唐子涵:调研及整理文献,参与研究工作,完成程序编写,起草并修订论文;

满延磊:调研及整理文献,参与研究工作,指导程序编写,审阅并修订论文。

参考文献:

- [1] CONNOR A C, DETTBARN J L, GILDAY L T, *et al.* Cost analysis of inadequate interoperability in the U.S capital facilities industry, National Institute of Standards and Technology (NIST): Gaithersburg, MA, USA, 2004.
- [2] SACKS R, KOSKELA L, DAVE A B, *et al.* Interaction of lean and building information modeling in construction[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(9): 968
- [3] PAZLAR T, TURK Z. Analysis of the geometric data exchange using IFC[C]//Proceedings of the fourth European Conference on Product and Process Modelling. Valencia:[s.n],2006:1-10
- [4] Building SMART Internationa Ltd. IFC official website[EB/OL]. [2020-01-20]. <http://www.build-ingsmart-tech.org/>.
- [5] FROESE T, FISCHER M, GROBLER F, *et al.* Industry foundation classes for project management — a trial implementation[J]. ITcon, 1999(4):17.
- [6] 邱奎宁,王磊. IFC标准的实现方法[J]. 建筑科学. 2004, 20(3):76. QIU Kuining, WANG Lei. Implementation method of IFC standard[J]. Building Science. 2004, 20(3):76.
- [7] 陈立春. IFC数据一致性问题研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016. CHEN Lichun. Research on consistency problem of IFC data[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [8] LIPMAN R R. Details of the mapping between the CIS/2 and IFC product data models for structural steel[J]. Journal of Information Technology in Construction, 2009, 14(14):1.
- [9] WU B, ZHANG S. Integration of GIS and BIM for indoor geovisual analytics [J]. ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B2 :455.
- [10] KANG T W, HONG C H. A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration[J]. Automation in Construction, 2015, 54:25.
- [11] 施平望,林良帆,邓雪原. 基于IFC标准的建筑构件表达与管理方法研究[J]. 图学学报, 2016, 37(2):249. SHI Pingwang, LIN Liangfan, DENG Xueyuan. Research on representation and management of IFC-based building components [J]. Journal of Graphics, 2016, 37(2):249.
- [12] 吕凯垣,徐俊. 基于IFC4x1的桥梁信息模型转换研究[J]. 土木工程信息技术, 2019, 11(2):99. LÜ Kaiyuan , XU Jun. Development of IFC4x1- based data transformation for bridge information model [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2019, 11(2):99.
- [13] 钟宇,周少东,陈健,等. 基于IFC标准的盾构隧道结构数据模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2):613. ZHONG Yu, ZHOU Shaodong, CHEN Jian, *et al.* Study on shield tunnel structure data model based on IFC standard [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2):613.
- [14] LEE G. What information can or cannot be exchanged?[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(1):1.
- [15] 张其林,舒沈睿,满延磊. 基于工业基础类标准的参数化实体模型数据交互技术[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):195. ZHANG Qilin, SHU Shenrui, MAN Yanlei. IFC standard-based parametric data-exchange method for solid model[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2021, 49(2):195.