

DOI:10.11918/202406019

# 基于钢结构 BIM 模型的结构分析数据转换和软件开发

赵诗华, 刘 栋, 余香林, 石永久

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 为解决当前在钢结构建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 与结构分析模型之间进行数据转换时存在的  
关键技术问题, 本文在分析工业基础类 (industry foundation classes, IFC) 标准表达方法的基础上, 以 ABAQUS 为结构分析平台,  
开发了钢结构 BIM 模型数据转换算法, 运用 C# 语言和 Xbim 工具包, 实现了结构构件信息提取、构件空间位置调整和分析数  
据自动添加, 并形成了相应的转换软件; 通过钢框架结构实例分析验证了该软件的可靠性和准确性, 并将其应用于安阳市游  
客集散中心的 BIM 模型转换和结构分析。结果表明, 所开发的算法和软件解决了生成的结构分析模型节点不连接和人工添  
加分析数据工作量太大等问题, 实现了 BIM 中的钢结构设计模型或深化设计模型向 ABAQUS 结构分析模型数据的准确转换。  
与传统的在 ABAQUS 中直接建立结构分析模型相比, 本文提出的方法能大大提高复杂钢结构的结构分析建模速度和效率。

**关键词:** 钢结构; 建筑信息模型 (BIM); IFC 标准; 模型转换; 结构分析

中图分类号: TU391; TU17

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)01-0161-09

## Development of BIM-based analysis modeling for steel structures

ZHAO Shihua, LIU Dong, YU Xianglin, SHI Yongjiu

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

**Abstract:** The efficient conversion between building information modeling (BIM) and structural analysis models in  
steel structures is required. The expression method of the industry foundation classes (IFC) standard was analyzed  
in this paper and a BIM-based model conversion algorithm for steel structures was developed and applied to the  
ABAQUS analysis platform. The algorithm can extract the information of structural members, adjust their spatial  
location, and automatically add analysis data. Based on C# language and the Xbim toolkit, a software was  
developed and verified by a steel frame, and then applied to the model conversion and structural analysis of Anyang  
Tourist Transport Center. The results demonstrate that the developed algorithm and software can accurately convert  
the structural data of steel structures from the design BIM models to the structural analysis models of ABAQUS.  
Compared to the traditional approach of directly establishing structural analysis models in ABAQUS system, the  
proposed algorithm can significantly improve the efficiency of structural modeling and analysis for complex  
structures.

**Keywords:** steel structures; building information modeling (BIM); IFC standard; model conversion; structural  
analysis

目前, 建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 已在建筑行业得到广泛应用, 将建筑  
项目的设计、施工、运维等全生命周期内的所有信息  
集成在一个三维模型中, 促进了各参与方之间的信息  
交流与共享<sup>[1]</sup>。同时, 尽管 ANSYS、ABAQUS 等  
通用有限元软件能够很好地解决建筑工程中的复杂  
结构分析问题, 但对于大型复杂结构的建模功能相

对较弱, 耗费时间较长。由于缺少准确高效的模型  
转换途径, BIM 与结构分析模型之间仍存在信息断  
层, 给设计和施工阶段造成大量重复建模工作和成  
本资源浪费, 影响工作效率。因此, 深入研究二者之  
间的数据转换和融合方法, 将 BIM 系统建立的三维  
结构模型精准无缝地导入结构分析平台, 具有重要  
工程意义。

收稿日期: 2024-06-11; 录用日期: 2024-07-22; 网络首发日期: 2024-08-26

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240823.1328.002>

基金项目: 清华大学国强研究院先进建造领域研究项目 (2022GQC0003)

作者简介: 赵诗华 (2001—), 男, 博士研究生; 石永久 (1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 石永久, shiyj@tsinghua.edu.cn

近年来,实现基于 BIM 模型的建筑设计 with 结构分析之间的协同工作和数据融合成为研究热点<sup>[2-4]</sup>。IFC 标准具有统一、规范、应用广泛的优点,因此基于 IFC 的模型转换方法通用性较强,受到的制约较小,被国内外学者广泛研究。Chen 等<sup>[5]</sup>开发了基于 IFC 的 Web 服务器,可用于建筑师和结构工程师的协同设计;邓雪原等<sup>[6]</sup>建立了基于 XML 格式的有限元模型通用表达方法,并从 IFC 模型中提取信息组装成 XML 文件;张建平<sup>[7]</sup>提出了基于 AutoCAD 图形引擎的 IFC 几何实体模型到表面模型的转换方法;刘照球等<sup>[8]</sup>构建了建筑设计和结构分析模型信息的集成框架,开发了 IFC 到 PKPM 的模型转换接口;王勇等<sup>[9]</sup>基于 IFC 标准实现了建筑设计、结构设计、结构分析、工程算量四类模型之间的自动转化;王轩等<sup>[10]</sup>开发了 IFC 结构模型到 3D3S 结构分析模型的转换软件;Hu 等<sup>[11]</sup>基于 IFC 标准实现了 SAP2000、ETABS、ANSYS 和 MIDAS 四种结构分析软件之间的双向模型转换;张晓洋等<sup>[12]</sup>提出了面向结构有限元分析的 IFC-API 模型转换新方法;Park 等<sup>[13]</sup>提出了无网格结构分析模型与 IFC 桥梁模型的集成框架;Wu 等<sup>[14]</sup>提出了 IFC 模型构件信息的不变签名理论,实现了建筑模型向结构分析模型的数据映射。

但是,对于钢结构 BIM 模型数据转换,国内外现有研究工作仍存在问题。1) 在构件连接节点的修正处理方面,张晓洋等<sup>[12]</sup>分析指出,建筑模型向结构模型转换过程中节点处理过程繁琐冗杂。杨党辉等<sup>[15]</sup>研究发现,对于节点处各构件轴线未相交于同一点的结构,当模型从 BIM 软件转换到结构设计软件中时,各构件之间的约束关系难以满足结构计算的需要。Hu 等<sup>[16]</sup>研究了混凝土结构 BIM 模型向结构分析模型的转换,在处理梁柱节点和主梁-次梁节点时采取相邻节点合并的方法。但对复杂钢结构 BIM 模型而言,节点尺度通常比较大,仅通过合并节点无法解决生成的结构分析模型中构件轴线不连续、节点处不相交的问题。2) 在结构分析数据添加方面,Wu 等<sup>[14]</sup>研究指出,将 BIM 用于结构分析的价值-难度比非常低,因为仍需进行大量修改和补充,如 BIM 模型中不包含材料属性、边界条件、荷载等。对于钢结构而言,不同节点连接形式对结

构整体受力性能的影响存在差异,实际工程中大部分节点为半刚性,复杂结构的分析模型往往不能全部简化为刚接节点。而现有研究多集中在构件几何信息的转换,未考虑对节点力学行为的自动添加,导致当前开发的模型转换平台应用于实际工程效率较低。为解决这两个关键问题,本文基于对 IFC 标准表达方法的研究,开发了钢结构 BIM 模型结构分析数据转换算法及相应软件,可实现结构构件信息提取、构件空间位置调整和分析数据自动添加;通过案例验证了所开发软件的准确性和效率,并成功应用于实际钢结构工程项目的结构分析。

## 1 IFC 标准的表达方法

IFC 标准由国际组织 building SMART 于 1994 年牵头制定,经过 30 年的发展,已成为开放的、支持扩展的重要国际标准,用于建筑项目全生命周期内的数据表达和共享。目前,几乎所有 BIM 软件都支持 IFC 格式的导出,使建筑行业的信息交换从依赖于具体系统转变为以 IFC 为中心,从复杂多元变得简单易行。

IFC 标准采用 EXPRESS 语言进行数据定义,通过类型、实体、属性集等一系列单元来描述数据,并使用超类和子类的概念建立实体之间的层级关系,超类派生出子类,子类继承超类的属性<sup>[17]</sup>。核心层中的 IfcRoot 实体是 IFC 中最根本的实体,是绝大多数实体最上层的超类。它进一步向下派生出三大抽象子类:对象定义实体 IfcObjectDefinition、属性定义实体 IfcPropertyDefinition 和关系定义实体 IfcRelationship,分别用于定义建筑项目中的实际或抽象对象(如建筑构件、空间区域等),定义对象具有的各种属性或参数(如长度、重量、材料属性等),定义不同对象之间的关联(如门-墙体,构件-材料等)。这三大子类又能进一步向下派生出各级实体,组成了整个 IFC 数据模型。例如,IfcBuildingElement 抽象实体用于定义建筑元素,其在 IFC 中的实体继承关系见图 1。抽象实体不能被实例化,即不存在于具体的 IFC 物理文件中。该实体进一步派生出 IfcColumn、IfcBeam、IfcMember、IfcSlab、IfcWall 等具象实体,分别用于定义模型中的柱、梁、支撑、板、墙体等建筑和结构构件。

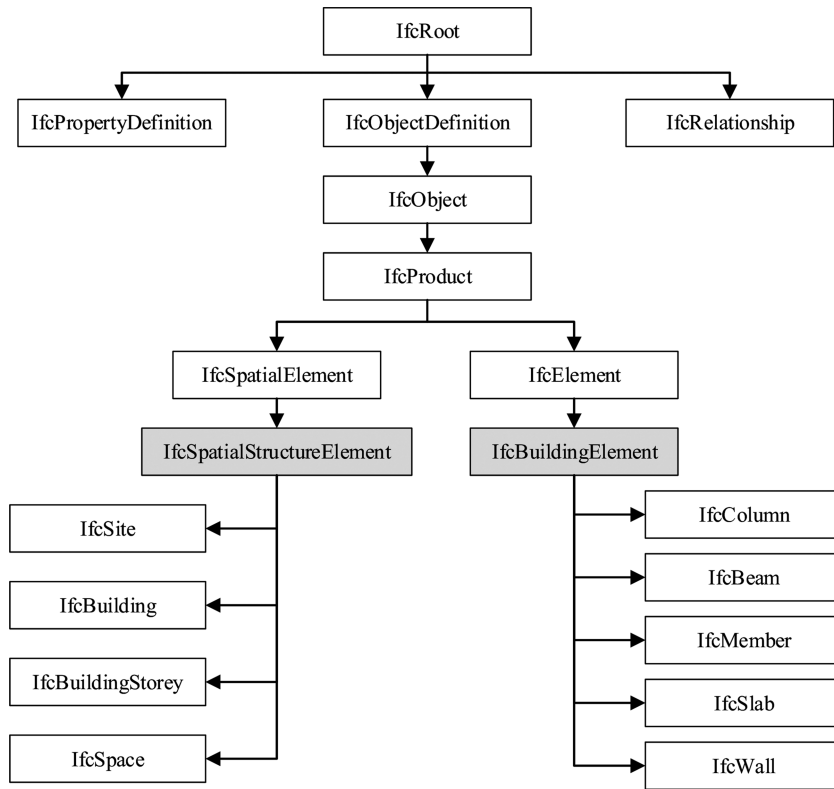


图 1 部分 IFC 实体的继承关系

Fig. 1 Inheritance relationship of IFC entities

## 2 模型数据转换算法

本文基于 IFC 标准,以 ABAQUS 为结构分析平台,研究钢结构 BIM 模型数据转换算法,并在 Visual Studio 2017 平台上运用 C# 语言开发相应软件,将 BIM 结构设计模型转换为结构分析模型。算法运行流程和框架见图 2,整体可分为由上至下的应用层、工作层和工具层三部分。在软件主界面上导入 IFC 文件并输入相关信息后,将传递参数至工作层,先后调用 4 个子程序,最终生成符合 ABAQUS 规则的 INP 文件和相应日志文件。工具层使用了 Xbim 中的开源工具包 Xbim Essentials<sup>[18]</sup>,为提取 IFC 构件信息提供数据解析接口;同时编写了 Tools 类程序,为工作层提供通用函数工具。

### 2.1 结构构件信息提取

从 IFC 文件提取 IfcBuildingElement 实体信息的基本框架以及数据库中相应实体的数据结构见图 3。提取的信息主要包括结构构件的几何、截面和材料信息。对于钢结构,提取的 IfcBuildingElement 实体包括 IfcColumn、IfcBeam 和 IfcMember,但不包括 IfcSlab 和 IfcWall。这些结构构件通常在结构分析模型中表示为二维单元,可以由两个节点的坐标唯一确定,存储在 MemberNodes 中。截面和材料的详细参数和属性分别存储在 Profiles 和 Materials 中。它们通过 ProfileId 和 MaterialId 与每个构件间接关

联,存储在 MemberInfos 中。

其中,构件的几何信息是 IFC 标准对 BIM 模型进行表达的重点。任何一个 IFC 构件都具有 ObjectPlacement(实体位置)和 Representation(几何表达)两个属性。ObjectPlacement 属性引用 IFC 空间位置实体 IfcLocalPlacement,该实体具有 PlacementRelTo 和 RelativePlacement 两个属性,分别定义构件的参考坐标系和局部坐标系,以描述构件整体所处的空间位置。一般而言,构件的局部坐标系以其他对象的坐标系为参考,并存在多层参考的情况。所开发的算法可以通过应用坐标矩阵变换公式,将构件的局部坐标转换为全局坐标。

Representation 属性在构件的局部坐标系中定义构件自身的几何形状,并可采用多种形状表示方法。对于具有规则几何的构件,常采用 SweptSolid 方法进行表达,引用 IFC 拉伸实体 IfcExtrudedAreaSolid,将横截面沿某一方向拉伸指定长度形成几何体。对于具有特殊几何构造的构件,如翼缘和腹板相交处有切角的钢梁,常采用 CSG(constructive solid geometry,构造实体几何)方法进行表达,引用 IFC 布尔结果实体 IfcBooleanResult,将 SweptSolid 方法表达的简单几何构件通过布尔运算组合成复杂构件。基于此,程序可以推导出构件在全局坐标系中的起点(位于截面形心处),并计算出终点的坐标。

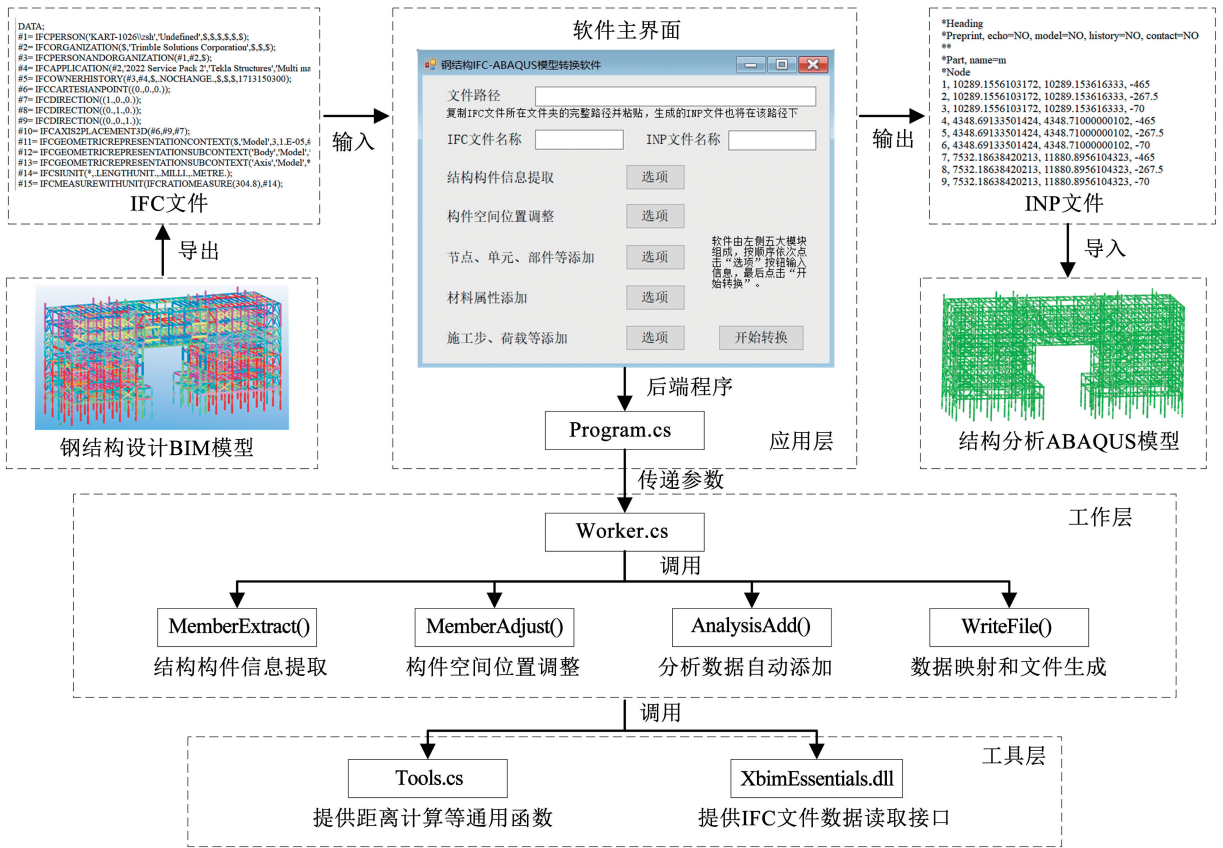


图2 算法运行流程和框架

Fig. 2 Framework and application workflow of the algorithm

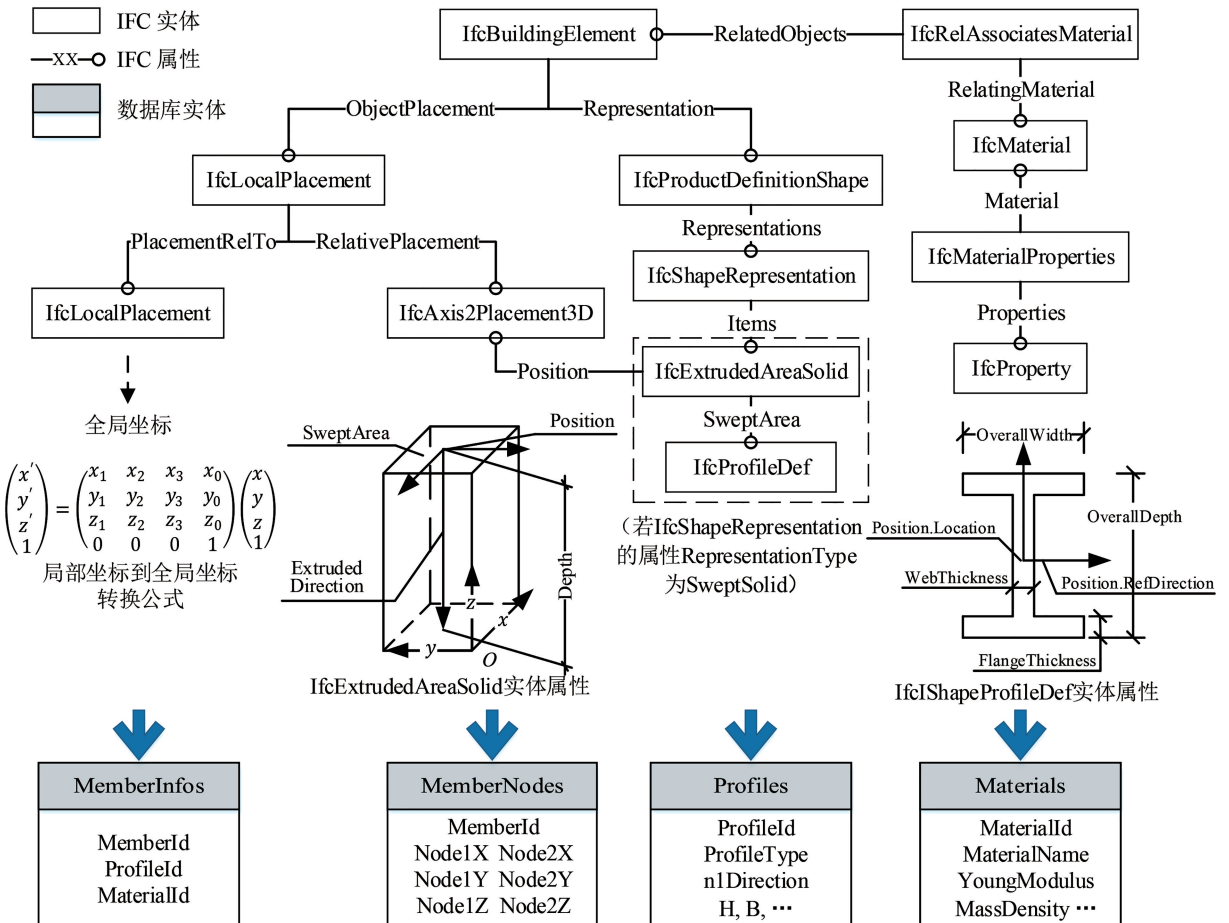


图3 构件信息提取基本框架及相应数据库结构

Fig. 3 Architecture of information extraction and the corresponding database

IfcProfileDef 实体用于定义截面轮廓,它由多个子类组成,如 IfcIShapeProfileDef 子类可用于定义工型截面。程序可将相关信息映射为 ABAQUS 中桁架单元的横截面积,或梁单元的截面类型、几何尺寸参数和截面  $n_1$  方向等。

## 2.2 构件空间位置调整

BIM 模型和结构分析模型在表达上存在较大差异,在提取构件信息后需对构件的空间位置进行修正调整,以生成更准确的结构分析模型。钢结构深化设计模型通常包含复杂详细的节点构造(如连接板、加劲肋、螺栓连接等),实现它们的精准提取非常困难;与此同时,钢结构分析模型仅需建立杆系单元,无需建立节点构造。但是,仅将构件从模型中提取并转换会出现构件轴线不连续、节点处不相交的问题。如图 4 所示,梁和支撑的端部均未支承在柱上,梁-柱节点、支撑-柱节点均未形成。针对这一问题,算法通过推导拓扑关系,对构件轴线进行剪切、延伸,并对相邻的节点进行合并。



图 4 构件轴线不相交问题与调整方法

Fig. 4 Non-intersecting members and adjustment methods

另一方面,结构因平立面对齐的需要,经常会出现偏心布置。楼层平面上,不同高度的钢梁往往上翼缘对齐而轴线不对齐;外立面上,不同宽度的钢柱也往往外端对齐而轴线不重合。若直接提取构件轴线并作转换,也无法在相交处形成节点,结构存在断续。本文对偏心连接作简化考虑,小于偏心容差则简化调整为构件轴线对齐或重合的情况,超出偏心容差则不作调整直接转换,由用户手动在 ABAQUS 中修改。同时为了尽可能减小偏心简化对结构整体分析产生的影响,在柱子调整时,按照空间位置由下至上进行排序,先调整下部的柱,再调整上部的柱;在其他构件调整时,按照截面尺寸由大至小进行排序,先调整大截面构件,再调整小截面构件,如图 5 所示。

算法总体流程概括如下:对于构件的轴线而言,它们之间的拓扑关系有且只有三类——平行、相交和异面(即偏心)。对于某个需要调整的构件(记为 MA),算法先选取序号在其之前的构件为测试构件(记为 ME),遍历 ME,并判断两者轴线间的拓扑关

系。对于平行、相交、异面三类情况,分别计算并选取 ME 端点、轴线交点或轴线最近点,并判断是否满足用户输入的容差,如端点合并容差 MergeTol、轴线延伸容差 ExtendTol、轴线剪切容差 TrimTol、构件偏心容差 OffsetTol 等,当满足容差要求时添加到调整方案中,如图 6 所示。然后,从 MA 的所有调整方案里选出最佳方案,修改 MA 端点到该最佳方案的 ME 端点、轴线交点或最近点处。若不存在最佳调整方案,则再以序号在 MA 之后的构件为测试构件 ME,采取同样方法选出最佳方案,并将 MA 的序号调整到该最佳构件之后,待后续最佳构件调整完后再行调整。

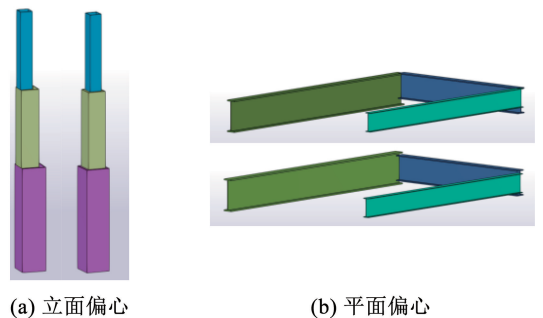


图 5 偏心连接问题与调整方法

Fig. 5 Member offsets and adjustment methods

## 2.3 分析数据自动添加

从 BIM 模型中提取信息并进行构件调整后,可以获得构件准确的几何信息,从而生成结构模型。但是,结构分析模型还应包括边界条件、节点连接、荷载和材料力学性能等分析信息,而它们往往不包含在 BIM 模型中,需要花费大量时间手动输入和补充。本文开发了若干算法及相应人机交互界面,以尽可能缩短手动添加分析数据所需时间。对于一些常规信息,可以根据现行标准或工程经验输入相关参数,如风荷载参数、材料属性等,程序将自动计算、转换并添加到 INP 文件中。

此外,还开发了相关算法,以实现考虑节点力学性能的半自动模型转换和结构分析。程序将提取出的 BIM 模型构件信息以“构件类型-截面-材料”为组别分类显示,可在此修改或输入各构件组的构件类型、材料名称、单元类型、端部连接节点类型和部件名称等(见图 7),由程序自动进行处理。单元类型可选择两节点空间线性梁单元 B31 或两节点空间线性桁架单元 T3D2。节点类型可选择刚接、铰接、半刚接等,程序将据此分别自动添加连接器单元或弹簧单元来建立不同 ABAQUS 部件之间的连接节点。连接器单元采用的连接属性见表 1,其中对于梁单元铰接节点,程序将以切线方向为 Y 轴创建

局部坐标系,并约束绕该方向的扭转自由度 UR2。若节点类型选择半刚接,则会弹出窗口,由用户补充

输入各方向合适的弹簧刚度,以模拟节点的复杂力学行为。

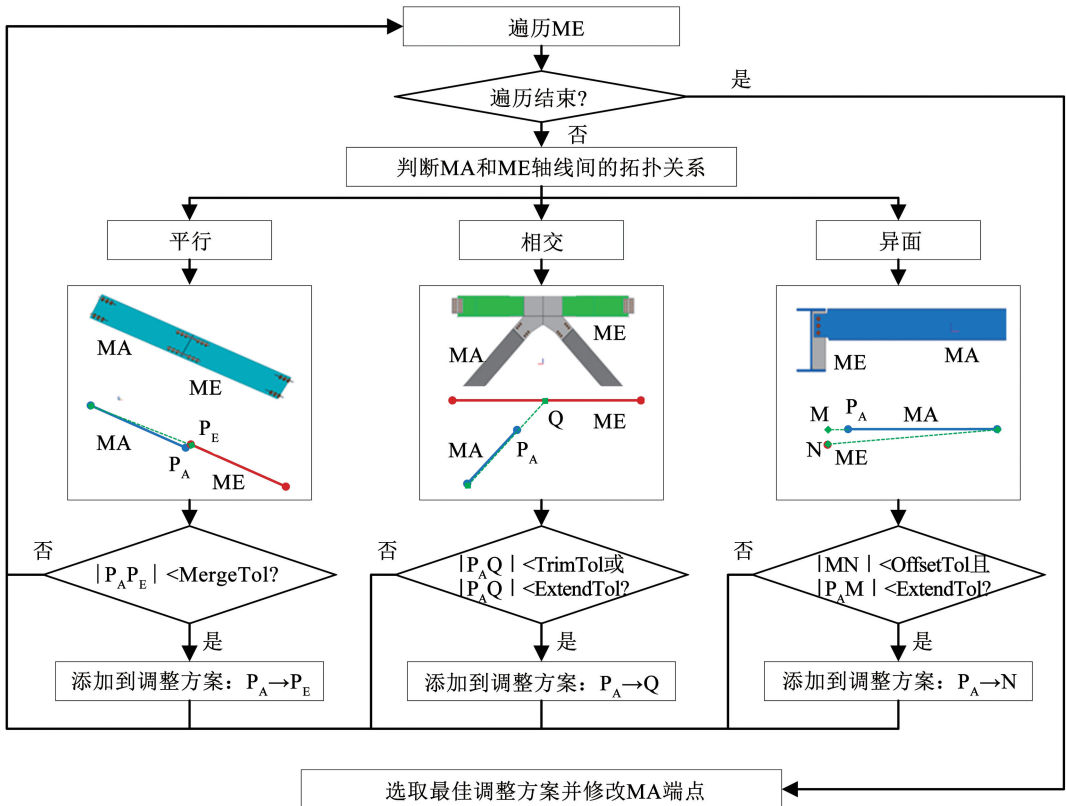


图 6 构件空间位置调整算法流程

Fig. 6 Algorithm flowchart of spatial location adjustment

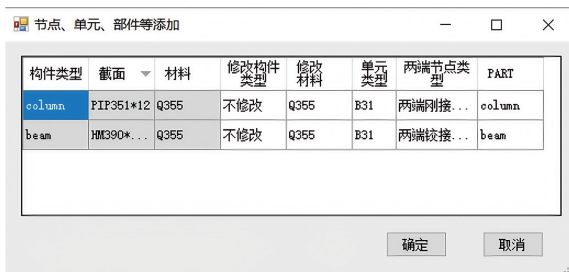


图 7 “节点、单元、部件等添加”程序界面

Fig. 7 Interface of "addition of joints, elements, parts, etc."

表 1 连接器单元的定义

Tab. 1 Definition of connector elements

节点类型	连接属性	约束自由度	释放自由度
桁架单元铰接	Join	U1, U2, U3	UR1, UR2, UR3
梁单元铰接	Join, Universal	U1, U2, U3, UR2	UR1, UR3
梁单元刚接	Join, Align	U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3	—

### 3 算法验证与工程应用

与前人研究相比,本文开发的钢结构 BIM 模型数据转换算法的优势在于,可以自动对深化设计 BIM 模型中不相交的处理,添加连接节点的力学行为,并添加荷载等其他分析数据,以生成准确的结构分析模型。需要用户在软件界面上输入的

参数包括构件调整参数、网格尺寸、材料属性、荷载参数,以及各构件组的构件类型、部件名称、单元类型、节点类型等。Tekla 是一款多功能的 BIM 软件,能快速精确地建立三维钢结构模型,并可以通过参数化建模高效地实现钢节点深化设计。本文的钢结构 BIM 模型均在该软件中实现,并以 IFC2X3 格式文件导出。

将转换软件生成的 INP 文件导入 ABAQUS 后,仅需查阅同时生成的日志文件,对结构分析模型作少量检查、修改和补充,即可提交计算。主要包括: 1) 软件目前暂无法提取 IFC 中以 Brep (boundary representation, 边界表示) 方法描述几何信息的复杂异形构件,如折梁、曲梁、变截面柱等,它们以 IFC 面片实体 IfcFacetedBrep 表达,将构件的外观表面拟合为三角网格面片,但构件端点坐标难以推求。对此,需要在模型中人工补充; 2) 模型中可能存在经构件调整后仍无法实现相交、连通的节点,如超出偏心容差的偏心连接构件。对此,需要手动添加绑定、连接器等相互作用。这两部分内容将在后期进一步研究,以使软件功能更加完善。

#### 3.1 算法验证

为验证模型转换算法的准确性,在 Tekla 中建

立了一个三层框架支撑结构的深化设计模型,并导出为 IFC 文件,见图 8(a)。为模拟实际工程结构存在的各种情况,BIM 模型考虑了因平立面对齐而产生的偏心,同时建立了复杂的节点构造。在转换软件中输入各参数后,自动生成 INP 文件并导入 ABAQUS,见图 8(b)。检查生成的日志文件,所有结构构件均实现准确转换,分析数据也已自动添加,无需人为进行补充。作为对比分析,在 ABAQUS 中另行直接建立了该结构的分析模型,两个模型的物理信息、分析信息及计算结果见表 2。对比结果表明,两个模型的所有信息完全一致,验证了本文算法

的准确性、可靠性。与 ABAQUS 直接建模相比,总用时由 230 min 大幅缩短至 13 min,因此基于 BIM 设计模型自动生成结构分析模型能够显著节省时间并提高工程效率。

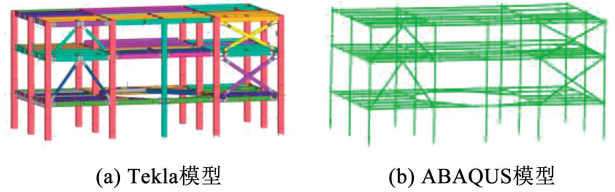


图 8 三层框架模型转换前后对比

Fig. 8 A three-story frame before and after model conversion

表 2 各 ABAQUS 模型信息统计

Tab. 2 Information of each ABAQUS model

模型名称	柱数量	梁数量	支撑数量	节点数量	梁单元数量	桁架单元数量	部件数量	截面数量	材料数量
算法验证模型(直接建立)	26	114	8	5 800	5 812	8	6	21	2
算法验证模型(算法生成)	26	114	8	5 800	5 812	8	6	21	2
工程应用模型(算法生成)	525	1 908	560	96 907	94 352	560	12	39	2

模型名称	荷载数量	连接单元数量	边界条件数量	最大应力/MPa	最大横向位移/mm	最大竖向位移/mm	总用时/min
算法验证模型(直接建立)	41	89	13	37.49	20.38	2.90	230
算法验证模型(算法生成)	41	89	13	37.49	20.38	2.90	13
工程应用模型(算法生成)	232	2 656	58	141.10	73.78	23.64	45

Tekla 软件中 BIM 模型向 ABAQUS 软件中杆系模型的转换,目前在学术界或工业界尚未见有开源的或商业化的接口。因此,本文选取 Tekla 到 SAP2000 和 Tekla 到 Midas Gen 的现有转换方法进行对比论证。SAP2000 支持直接从 IFC 格式导入数据。将该算例模型的 IFC 文件导入 SAP2000 后,出现大量错误,见图 9(a)。这表明 SAP2000 对 IFC 模型的几何复杂度有限制,仅能提取以 SweptSolid 方法描述形状的规则几何构件,且无法准确识别模型中的结构构件和非结构构件,故无法实现钢结构深化设计模型的转换。Midas Gen 通过 Tekla API 开发了模型转换接口,可将 Tekla 模型中所选对象转换为 MGT 文件。但对该钢框架的实例分析发现,若所选对象包含节点,则生成的结构分析模型存在大量问题,如节点板、加劲肋全部以梁单元建模;若所选对象不包含节点,则如图 9(b)所示,模型中构件轴线不连续。因此,工程人员需要对 Tekla 模型进行简化,删除节点构造,按理想情况建立构件并使之直接连在一起,然后再导入 SAP2000 或 Midas Gen 中。这不仅严重影响了工程效率,也失去了 Tekla 在节点深化设计上的优势。

合体(见图 10),主要由地上两栋对称布置的塔楼及塔楼之间的空中连廊等组成,总建筑面积约 72 500 m<sup>2</sup>,地下 2 层,地上 9 层,结构高度 50 m,连廊跨度 32.8 m。工程地上结构采用钢框架+中心支撑结构形式,中心支撑主要布置在塔楼的 4 个角部。构件主要采用箱形和工形截面,最大截面规格为 H1 200 × 400 × 22 × 28,材质为 Q235B 和 Q355B。

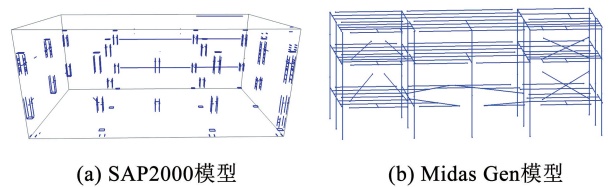


图 9 采用现有方法转换的结构分析模型

Fig. 9 Structural analysis models converted using existing methods

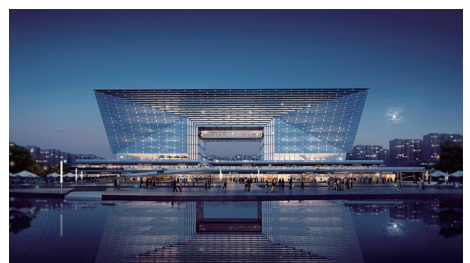


图 10 安阳市游客集散中心建筑效果

Fig. 10 Effect of Anyang Tourist Transport Center

### 3.2 工程案例应用

安阳市游客集散中心项目为装配式钢结构框架综

安阳市游客集散中心的 Tekla 三维钢结构模型中,包含节点深化设计,不考虑楼板和墙体,见图 11(a)。在模型转换软件中根据工程实际情况输入各个参数。其中,荷载主要考虑结构自重、活荷载和风荷载,考虑螺栓、加劲肋等的重量取自重系数为 1.1,安阳市 50 年一遇基本风压  $0.45 \text{ kN/m}^2$ ;网格尺寸为 200 mm,塔楼柱底部固接,约束全部自由度。Tekla 将水平系杆以 IfcBeam 形式输出,在软件中将其类型修改为“支撑”。柱、梁采用 B31 单元模拟,支撑采用 T3D2 单元模拟;梁两端节点类型均选择“端部为柱时刚接其余情况铰接”,支撑则均选择“两端铰接”;模型共划分为 12 个部件。将生成的 INP 文件导入 ABAQUS,见图 11(b)。整个模型的相关信息见表 2,模型转换仅用时 45 min,大大节省了大型复杂结构建立结构分析模型的时间。

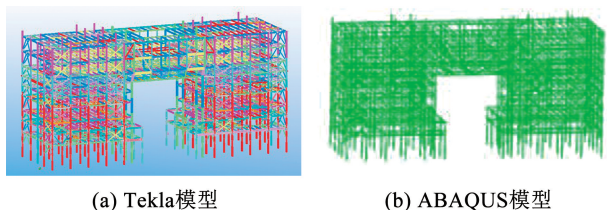


图 11 安阳市游客集散中心模型转换前后对比

Fig. 11 Anyang Tourist Transport Center before and after model conversion

其中,某人字形中心支撑钢框架的转换如图 12 所示,转换后确已符合结构分析的需要。查询软件生成的日志文件,在结构顶层的边跨处,两榀之间有 4 个梁没有转换成功,因为它们在 BIM 模型中被错误地采用折梁等形式构建,并在导出的 IFC 文件中以 Brep 方法描述几何信息,而这在所开发的算法中暂无法提取,需要在生成的 ABAQUS 模型中手动添加。

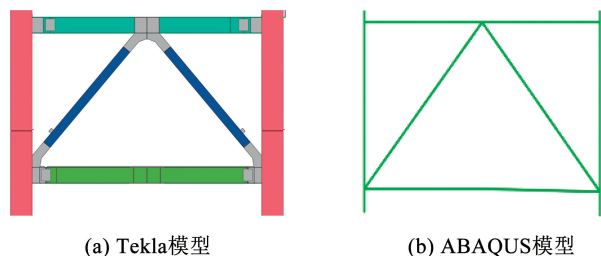


图 12 人字形中心支撑模型转换前后对比

Fig. 12 An inverted-V concentrically brace before and after model conversion

结构应力云图如图 13 所示,最大应力为 141.1 MPa。最大竖向位移为 23.64 mm,小于《钢结构设计标准》<sup>[19]</sup>中的挠度容许值  $L/400$  (37.5 mm,  $L$  为最大竖向位移所在位置梁的跨度)。ABAQUS 计算结果表明,结构整体安全可靠,在承载力和位移方面都具有足够的安全裕量。

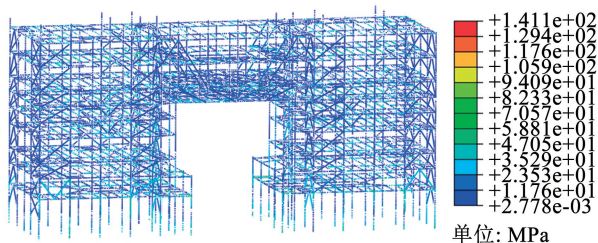


图 13 结构应力云图

Fig. 13 Stress cloud

## 4 结 论

1) 本文通过分析当前钢结构 BIM 模型转换现状和 IFC 标准的表达方法,开发了钢结构 BIM 模型结构分析数据转换算法,可实现钢结构设计模型和深化设计模型向 ABAQUS 结构分析有限元模型的准确转换,能够大大节省直接建立模型所需的时间和精力,提高复杂结构的分析效率。

2) 基于 C#语言和 Xbim 等工具,实现了结构构件信息提取、构件空间位置调整和分析数据自动添加等具体功能的软件开发,解决了生成的结构分析模型节点不连接和人工添加分析数据工作量等工程实际问题,可促进建筑设计过程中的数据融合和协同工作。

3) 选取一个三层框架为案例,将算法生成模型与直接建立模型从各方面进行对比,验证了所开发算法及软件的准确性、可行性、高效性,并成功应用于安阳市游客集散中心项目的钢结构深化设计 BIM 模型转换和 ABAQUS 结构力学分析。

4) 后期将进行扩展研究,以支持更多的结构分析软件,形成统一的钢结构 BIM 模型转换平台。此外,目前算法在对实际结构进行转换时还存在一定局限,仍需人工对模型作少量修改;IFC 标准对复杂异形构件的几何信息表达与提取方法,以及复杂节点构造的调整和处理方法等,还有待进一步研究。

致谢:感谢北京建工建筑产业化投资建设发展有限公司提供安阳市游客集散中心项目钢结构 BIM 模型。

## 参考文献

- [1] EASTMAN C, TEICHOLZ P, SACKS R, et al. BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011: 1
- [2] MULLER M F, GARBERS A, ESMANIOTO F, et al. Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design—a five-year gap analysis [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23 (7): 943. DOI: 10.3846/13923730.2017.1341850
- [3] 张其林, 唐子涵, 满延磊. 基于工业基础类标准的钢结构 BIM 全数据交互技术[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 331  
ZHANG Qilin, TANG Zihan, MAN Yanlei. BIM full data-exchange technology of steel structure based on industry foundation class standard[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2024, 52(3): 331. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.22259
- [4] HUANG Hao, RUAN Bin, WU Xianguo, et al. Parameterized modeling and safety simulation of shield tunnel based on BIM-FEM automation framework[J]. Automation in Construction, 2024, 162: 105362. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105362
- [5] CHEN Pohan, CUI Lu, WAN Caiyun, et al. Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers[J]. Automation in Construction, 2005, 14 (1): 115. DOI: 10.1016/j.autcon.2004.08.013
- [6] 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  
DENG Xueyuan, ZHANG Zhiyong, LIU Xila. Automatic generation of structural model from IFC-based architectural model[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(2): 6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2007.02.002
- [7] 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  
ZHANG Jianping, ZHANG Yang, ZHANG Xin. Methodology of 3D geometric modeling and model conversion of IFC-based BIM [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2009, 1(1): 40. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7461.2009.01.007
- [8] 刘照球, 李云贵, 吕西林, 等. 基于 BIM 建筑结构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  
LIU Zhaoqiu, LI Yungui, LYU Xilin, et al. BIM-based integrated information framework for architectural and structural design model [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2010, 38(7): 948. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.07.002
- [9] 王勇, 张建平, 王鹏翊, 等. 建筑结构设计中的模型自动转化方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4): 53  
WANG Yong, ZHANG Jianping, WANG Pengyi, et al. Model automatic transformation methods in architecture and structure designs [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4): 53. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2012.04.009
- [10] 王轩, 胡筋, 杨晖柱, 等. 基于工业基础类数据标准的结构模型转换技术[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 836  
WANG Xuan, HU Jia, YANG Huizhu, et al. Transformation technique of structural models based on industry foundation classes standard[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(6): 836. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2014.06.003
- [11] HU Zhenzhong, ZHANG Xiaoyang, WANG Hengwei, et al. Improving interoperability between architectural and structural design models; an industry foundation classes-based approach with web-based tools[J]. Automation in Construction, 2016, 66: 29. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.02.001
- [12] 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]. 工程力学, 2017, 34(6): 122  
ZHANG Xiaoyang, HU Zhenzhong. Research on model conversion approach towards structural finite element analysis[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 122. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.12.1014
- [13] PARK S I, LEE S H, ALMASI A, et al. Extended IFC-based strong form meshfree collocation analysis of a bridge structure[J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103364. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103364
- [14] WU Jin, SADRAADDIN H L, REN Ran, et al. Invariant signatures of architecture, engineering, and construction objects to support BIM interoperability between architectural design and structural analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(1): 04020148-1. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001943
- [15] 杨党辉, 苏原, 孙明. 基于 BIM 技术的结构设计中的数据转换问题分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(3): 34  
YANG Danghui, SU Yuan, SUN Ming. Analysis of data exchange issues in structural design based on BIM [J]. Building Science, 2015, 31(3): 34
- [16] HU Zhenzhong, ZHANG Jianping, DENG Ziyin. Construction process simulation and safety analysis based on building information model and 4D technology[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008(Sup. 1): 269. DOI: 10.1016/S1007-0214(8)70160-3
- [17] 马智亮, 滕明焜, 任远. 从 BIM 模型提取建筑能耗监测静态数据的方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 187  
MA Zhiliang, TENG Mingkun, REN Yuan. Method of extracting static data for building energy consumption monitoring from BIM [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(12): 187. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201901014
- [18] LOCKLEY S, BENGHI C, CERNY M. Xbim. Essentials: a library for interoperable building information applications[J]. Journal of Open Source Software, 2017, 2(20): 473. DOI: 10.21105/joss.00473
- [19] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017  
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

(编辑 赵丽莹)