

基于 Dynamo 的 Revit-Midas/Civil 斜拉桥 模型信息转换

蔡金标,刘鸾翔,冯倩[†],何欣,徐荣桥
(浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘 要:BIM 模型不支持有限元计算,且 BIM 模型与有限元分析模型数据交互困难,故 BIM 技术正向设计过程中存在建模效率低、模型修改困难等问题,无法做到 BIM 结构设计与有限元力学分析一体化,增加了结构模型建模与纠错成本.本文依托 Revit 和 Midas/Civil 软件平台,在 Dynamo 环境下采用 IronPython 语言设计了一套 Revit-Midas/Civil 的模型信息转换程序.以博士大桥主桥为对象,通过程序自动实现:1)Revit 模型桥梁构件分解、截面特性计算、拉索及梁塔弹性连接处理,并转换成适用于 Midas/Civil 的语言格式 MCT 文件,实现了 Revit 向 Midas/Civil 模型信息自动转换;2)将有限元计算结果反馈到 Revit 模型中,对作用效应信息按数值大小赋予渐变颜色,实现了在 BIM 模型中显示有限元分析结果的展示功能.本程序可实现 Revit-Midas/Civil 模型信息转换,有效提高了 BIM 正向应用效率,弥补了 BIM 技术在桥梁结构分析方面的不足.

关键词:斜拉桥;模型转换;Dynamo 混合编程;Revit;Midas/Civil

中图分类号:TP312;TU391

文献标志码:A

Model Information Conversion for Cable-stayed Bridge Between Revit-Midas/Civil Based on Dynamo

CAI Jinbiao, LIU Luanxiang, FENG Qian[†], HE Xin, XU Rongqiao

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The BIM model does not support finite element analysis, and data exchange between the BIM model and the finite element analysis model is difficult. As a result, the forward design process using BIM technology faces issues such as low modeling efficiency and difficulty in modifying models. This makes it impossible to integrate BIM structural design with finite element mechanical analysis, thereby increasing the cost of structural model creation and error correction. Based on the Revit and Midas/Civil software platforms, a set of Revit-Midas/Civil model information conversion programs is designed with the IronPython language in the Dynamo environment. Taking the main bridge of Boshi Bridge as an example, the program automatically realizes the following aspects: 1) It becomes possible for component decomposition in the Revit model bridge, section characteristics calculation, cable, and

* 收稿日期:2023-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52408226, U23A20659), National Natural Science Foundation of China(52408226, U23A20659); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C01143), The “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program of Zhejiang(2022C01143)

作者简介:蔡金标(1965—),男,浙江浦江人,浙江大学副教授

[†] 通信联系人, E-mail: fengqian@zju.edu.cn

beam tower elastic connection processing. Then, the processed information was converted into the Midas/Civil language format MCT file, realizing the automatic conversion of the Revit to Midas/Civil model information; 2) The calculation results from the finite element analysis are fed back to the Revit model. The effect information is given a gradient color according to the numerical value, realizing the display function in the BIM model for the results of finite element analysis. This proposed methodology can realize the information conversion between the Revit-Midas/Civil model, which effectively improves the efficiency of BIM forward application and makes up for the lack of BIM technology in bridge analysis.

Key words: cable-stayed bridge; model conversion; Dynamo hybrid programming; Revit; Midas/Civil

在建筑结构尤其是桥梁结构日益大型化、规模化、复杂化的今天^[1], BIM (Building Information Modeling) 技术的正向应用使得信息传递变得更为顺畅、完整^[2-5], 而且携带信息的 BIM 模型可以继续应用于施工和运维阶段, 使得 BIM 不仅可作为设计阶段的工具, 更可作为整个建造周期的工具^[6]. 然而现在的 BIM 建模软件不具备专业有限元分析功能, 且 BIM 模型同有限元软件之间的信息转换并不通畅, 这使得在 BIM 正向应用过程中, 结构设计人员必须分别建立两个模型, 导致时间成本高、重复性强、建模效率低^[7], 而且还可能出现两个模型物理信息不一致的问题.

BIM 模型集成了建筑结构构件的三维尺寸、空间位置、材料特性等几何物理信息^[8-9], 能够较为完整地表达出设计结果, 而有限元软件可以为我们提供构件的应力、应变、位移等力学分析结果, 通过对 BIM 模型的二次开发提取结构分析所需的结构建模信息, 并传递至有限元软件, 可以使 BIM 模型更好地实现正向应用^[10-11].

常用的桥梁工程 BIM 及有限元建模软件分别是 Revit 和 Midas/Civil^[12-14]. 文献[15]利用 Dynamo 将桥梁中心线以及截面信息以 .dxf 格式传输给 Midas/Civil 实现模型转换; 文献[16-17]使用 C# 语言借助 Revit API 获取 Revit 桥梁模型预设的截面参数与材料特性, 实现 Revit 向 Midas/Civil 的信息转换, 但由于没有计算截面特性, 故只能适用于 Midas/Civil 标准截面, 且需要提前在 Revit 模型中预设截面参数; 文献[18]对比了 Revit 和 Midas/Civil 的交互方式, 提出使用 Dynamo 和 MCT 实现两个软件之间的信息交互, 并实现 Midas/Civil 向 Revit 节点信息的转换; 文献[7]提出基于皮尔森系数的区域生长算法, 对 Revit 模型构件进行分解, 将三维的 Revit 构件转换为 Midas/

Civil 杆系模型; 文献[1]在文献[16]的基础上添加了施工阶段信息的传递; 文献[19]提出使用三角单元法实现 Revit 构件截面特性的计算与转换. 关于有限元分析结果反馈至 Revit 模型并且进行可视化展示的研究很少.

本文结合已有方案, 在既有 Revit 桥梁模型的基础上, 提出基于 Dynamo 实现: 1) Revit 模型构件分解、截面特性计算、材料参数提取、拉索及梁塔弹性连接处理, 并将之转换为 Midas/Civil 建模 MCT 格式数据; 2) Midas/Civil 有限元分析结果反馈至 Revit 模型, 实现有限元数据可视化.

1 模型转换程序开发

1.1 开发工具

Revit 除了可以使用 GUI 对构件创建修改外, 其开放的 API 接口为外部程序的访问提供了极大的方便. 基于 Revit API.dll 和 Revit APIUI.dll 程序集, 可以深入访问 Revit 底层数据库, 获取模型的几何和非几何信息. Revit API 是 .NET 类型的, 只要支持 .NET Framework 的语言都可以访问, 故 C#、Visual Basic、Visual C++ 以及安装了 .NET 绑定库的 Python 都可以调用. 采用这些方法访问或修改构件信息, 其本质都是对 Revit API 操作.

本文以 Revit 2022 为 BIM 建模平台, 利用 Revit 扩展应用 Dynamo2.10 访问 Revit API 的方式进行二次开发, 并选择 IronPython2 为编程语言, 提出了一种 Revit-Midas/Civil 模型交互方法 (见图 1).

1.2 开发流程

Midas/Civil 有限元模型的建立要素大致可以分为: 1) 建立节点、单元; 2) 赋予边界条件; 3) 定义截面特性; 4) 选择材料力学参数. 这些信息都可以用程序

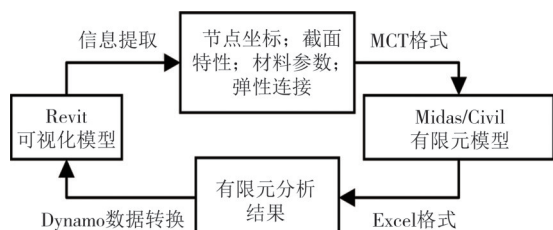


图1 Revit-Midas/Civil模型交互方法

Fig.1 Methodology of Revit-Midas/Civil model interaction

从 Revit 中获取, 利用 Dynamo 二次开发对数据进行提取与转存, 实现 Revit 与 Midas/Civil 之间的模型转换. MCT 是两者之间数据载体, 因此从 Revit 中提取出来的信息必须遵循 MCT 文件规范, 程序开发流程如图 2 所示. 转换具体步骤如下:

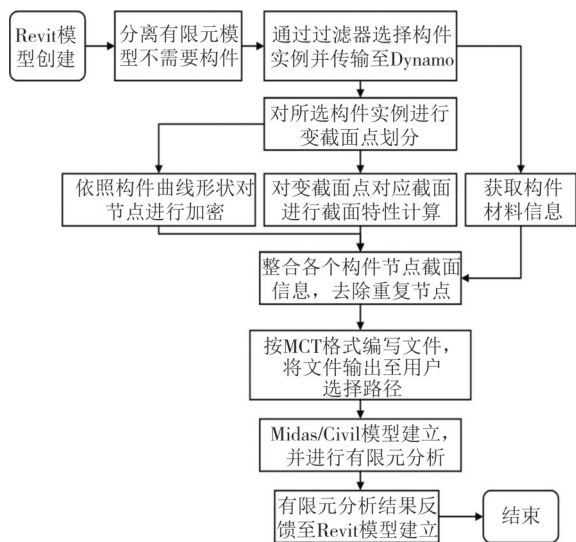


图2 程序开发流程图

Fig.2 Flowchart of program development

1) 模型创建并处理. BIM 模型尤其是钢箱梁桥模型中多了很多有限元模型创建时不需要的构件, 比如过人孔、横隔板加劲等. 这些构件在有限元模型建立中并不必要, 且对后续的构件分解会产生较大影响, 需提前将这些构件从主体结构中分离出来.

2) 材质获取与构件分解. 通过窗口选择并过滤出需要的构件实例, 并将之传输至 Dynamo 空间中. 遍历构件以下信息: ①获取构件的材料信息; ②通过计算 Pearson 系数方式寻找构件变截面点, 截取变截面点处截面轮廓. 具体流程如图 3 所示.

3) 通过三角分块法计算截面特性. 桥梁结构中, 不管是上部结构、下部结构还是桩基础, 构件截面都可以用多个封闭轮廓来表达. 实心截面由一个封闭轮廓构成, 空心截面需要有多多个封闭轮廓, 定义轮廓

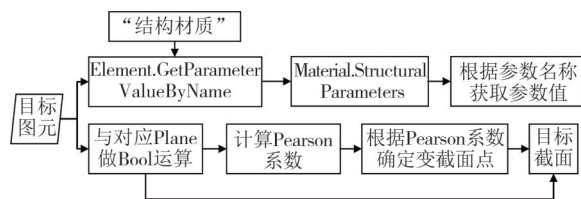
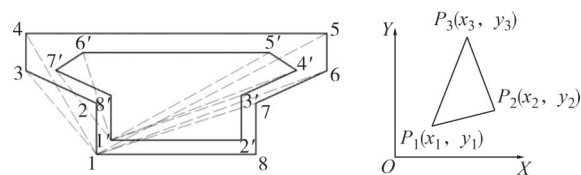


图3 Dynamo获取构件材质以及变截面轮廓

Fig.3 Component materials and variable cross-section profiles obtained from Dynamo

中最外层的为外轮廓, 其余统称为内轮廓. 如图 4(a) 中的箱梁截面, 截面由一个外轮廓、一个内轮廓构成.



(a) 内外轮廓三角单元分块 (b) 三角单元节点坐标示意

图4 按轮廓角点顺序划分三角单元

Fig.4 Dividing triangular units according to contour corners

在三角单元划分完成之后, 在已知三角单元三个角点坐标的情况下[见图 4(b)], 可以计算出该三角单元的面积 A_i 、单元对 X 轴面积矩 S_{xi} 以及单元对 X 轴惯性矩 I_{xi} .

4) 整合构件信息. 获取各个构件的节点坐标、截面特性、材料信息之后, 由于相邻构件建模时紧贴在一起, 故需清除重复信息. 将各构件信息整合在一起, 然后以 MCT 格式输出文件并存放至预先选择路径.

5) 有限元模型建立. Midas/Civil 软件通过读取 MCT 文件建立有限元模型, 对于 Revit 模型中支座、荷载、施工阶段等缺失的信息, 可以在生成的有限元模型上手动添加.

6) 有限元分析及反馈. 有限元计算分析完成后, 将需要的计算结果导出至 Excel 文件中, 通过 Dynamo 读取该文件作为 Revit 原始模型的变化信息, 并对变化信息按数值大小赋予渐变颜色, 实现在 BIM 模型中显示有限元分析结果的展示功能.

2 模型转换方法验证

为验证本文方法的可行性, 以博士大桥主桥为例进行验证. 主桥桥型为独塔双索面斜拉桥, 跨径布置为 2×100 m, 主塔采用人字形, 主梁采用分离式钢箱梁, 斜拉索采用马鞍形索面, 大桥结构采用漂浮体

系,塔墩固结,塔梁分离.建立的全桥以及箱梁 Revit 模型见图 5 和图 6.

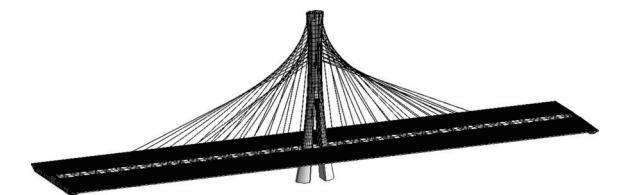


图 5 博士大桥主桥 Revit 模型
Fig.5 Revit model of main bridge of Boshi Bridge

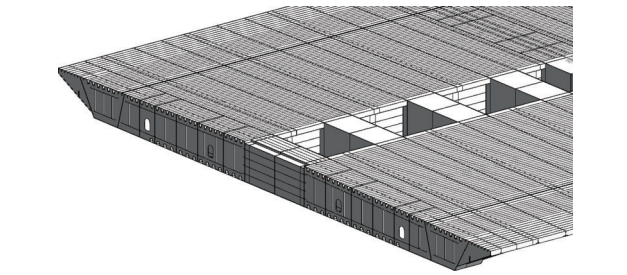


图 6 博士大桥主桥箱梁 Revit 模型
Fig.6 Revit model of box girders for main bridge of Boshi Bridge

2.1 构件材料信息提取

Revit 中族实例的材质属性存储于结构材质这一参数中,该参数是可读可更改的,Revit 开放了该参数的 API 接口,故可以通过 Dynamo 访问修改族实例的材质参数.

博士大桥 Revit 模型钢结构部分为 Q345 材质,混凝土部分为 C50,由程序读取材料参数如表 1 所示.Dynamo 获取材质程序执行过程界面如图 7 所示.

表 1 材料参数
Tab.1 Material properties

材料类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	线膨胀系数 $\alpha/(10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1})$	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
Q345	206	0.3	1.0	77
C50	20.5	0.2	1.0	23.6

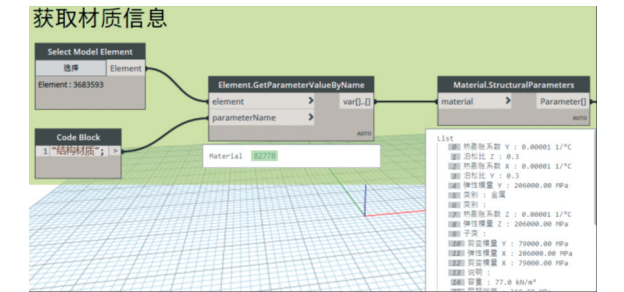


图 7 Dynamo 获取材质程序执行过程界面
Fig.7 Interface of Dynamo's material acquisition procedure

2.2 构件截面信息获取

截取 Revit 模型中钢箱梁(见图 8)为例,用本文程序计算其截面特性,得到本文结果,另采用 CAD 绘制截面导入 Midas/Civil,采用其 SPC 截面特性计算器进行计算,两者计算结果对比如表 2 所示,结果表明计算精度满足要求.

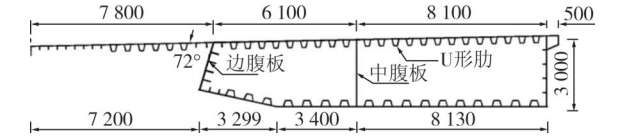


图 8 薄壁钢箱梁截面图(单位:mm)
Fig.8 Cross section of thin-walled steel box girder (unit: mm)

表 2 不同方法下钢箱梁截面特性计算结果对比表
Tab.2 Comparison of calculation results for section characteristics of steel box girders by different methods

截面特性	周长 C/m		面积 A/m^2	惯性矩 I/m^4		截面形心坐标 Z/m	
	外轮廓	内轮廓		对 X 轴惯性矩	对 Y 轴惯性矩	X 坐标	Y 坐标
本文	56.973 27	108.721 22	1.073 58	1.540 89	37.702 50	9.656 42	1.318 39
SPC	56.973 04	108.718 55	1.073 53	1.540 83	37.701 18	9.656 46	1.318 51
相对误差 / %	$4.037\ 0\times 10^{-4}$	$2.455\ 9\times 10^{-3}$	$4.657\ 5\times 10^{-3}$	$3.894\ 0\times 10^{-3}$	$3.501\ 2\times 10^{-3}$	$-4.142\ 3\times 10^{-3}$	$-9.101\ 2\times 10^{-3}$

截面特性计算核心代码如下:

```
def get_section_property (contour_point_lst, judge):  
    # 传入轮廓点  
    area=0  
    p1=contour_point_lst[0]  
    for point_ind in range (1, len (contour_point_lst)-1):  
        p2=contour_point_lst[point_ind]  
        p3=contour_point_lst[point_ind + 1]
```

```
        area+=((p2.Y-p1.Y) * (p3.Z - p1.Z)-(p2.Z-p1.Z) * (p3.Y-p1.Y)) / 2  
        if (area>0 and judge ==0)or (area < 0 and judge =  
= 1):  
            # 当为内轮廓且为顺时针时  
            contour_point_lst = list (reversed (contour_point_lst))  
    p1 = contour_point_lst[0]  
    area, sy, iy, sz, iz = 0, 0, 0, 0, 0
```

```
for point_ind in range(1, len(contour_point_lst)
- 1):
    p2 = contour_point_lst[point_ind]
    p3 = contour_point_lst[point_ind + 1]
    area += ((p2.Y-p1.Y) * (p3.Z-p1.Z) - (p2.Z -
p1.Z) * (p3.Y - p1.Y)) / 2
    sy += area * (p1.Z + p2.Z + p3.Z) / 3
    iy += area * ((p1.Z + p2.Z) ** 2 + (p2.Z +
p3.Z) ** 2 + (p1.Z + p3.Z) ** 2) / 12
    sz += area * (p1.Y + p2.Y + p3.Y) / 3
    iz += area * ((p1.Y + p2.Y) ** 2 + (p2.Y +
p3.Y) ** 2 + (p1.Y + p3.Y) ** 2) / 12
    return [area, sy, iy, sz, iz]
```

2.3 构件分解

基于面积的 Pearson 系数对梁塔这类框架族实例构件进行分解,得到构件变截面点坐标序列,并依照梁轴线对坐标序列进行加密处理,使最终线形贴合 Revit 模型.以某节段主梁为例,分解加密后节点坐标如表 3 所示,表中每行代表一个主梁节点,从左到右数字依次为该节点的 X、Y、Z 坐标, True 标记表示该节点为变截面点, False 标记表示该节点为等截面点.拉索是自适应构件,可通过提取自适应点坐标进行分解.博士大桥主桥的分解整合最终线形如图 9 所示.

表 3 某节段主梁分解加密坐标
Tab.3 Decomposition and encryption coordinate
of a segment in the main beam

X 坐标/m	Y 坐标/m	Z 坐标/m	是否为变截面点
12.300 0	2.994 0	15.979 6	False
13.077 5	2.994 0	15.976 9	False
13.855 0	2.994 0	15.974 1	False
14.632 5	2.994 0	15.971 1	False
15.410 0	2.994 0	15.967 9	True
16.060 0	2.994 0	15.965 2	False

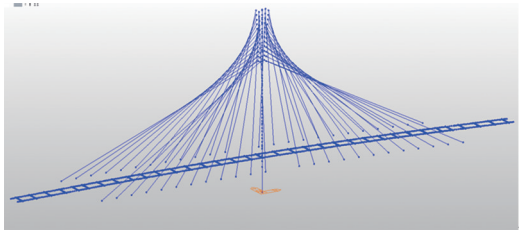


图 9 博士桥主桥线形

Fig.9 Main bridge alignment of Boshi Bridge

2.4 数据整合及有限元计算

由于博士桥为斜拉桥,索塔、索梁间弹性连接较多,手动添加会带来较大的工作量,故程序在索梁、

索塔连接位置添加节点并建立弹性连接.核心程序代码如下:

```
# 找出主梁中与各根拉索最接近点索引
intersect_beam_cable_ind = []
for i in range(len(cable_coordinate_lst)):
    x_coordinate = cable_coordinate_lst[i][0][0]
    for j in range(len(beam_point_lst)):
        tmp_x = beam_point_lst[j][0]
        diff_x = tmp_x - x_coordinate
        if diff_x >= 0:
            intersect_beam_cable_ind.append(j - 1)
            break
# 在主梁节点列表内添加新节点
new_beam_point_lst = []
cross_ind = 0
for beam_point_ind in range(len(beam_point_
lst)):
    point = beam_point_lst[beam_point_ind]
    new_beam_point_lst.append(point)
    if beam_point_ind in intersect_beam_cable_ind:
        next_point = beam_point_lst[beam_point_ind + 1]
        tmp_x = cable_coordinate_lst[cross_ind][0][0]
        tmp_y = point[1]
        diff_x = next_point[0] - point[0]
        diff_z = next_point[2] - point[2]
        tmp_z = point[2] + (diff_z / diff_x) * (tmp_x -
point[0])
        new_point = [tmp_x, tmp_y, tmp_z, "cross_
cable", False]
        new_beam_point_lst.append(new_point)
        cross_ind += 1
# 创建弹性连接
intersect_cable_inode_lst = []
inode_lst = []
inode = 0
for point in point_lst:
    file.write(f"{inode} , {point[0]} , {point[1]} ,
{point[2]}\n")
    inode_lst.append(inode)
    point.insert(-1, inode)
    if point[-2] == "cross_cable":
        intersect_cable_inode_lst.append(inode)
        inode += 1
    i = 0
```

```
for cable_lst in cable_coordinate_lst:
    file.write(f' {link_ino} , {cable_lst[0][ -1]} ,
intersect_cable_inode_lst[i]} , RIGID, 0, NO, 0.5,
0.5,\n")
    link_ino += 1
    i += 1
```

经整合桥梁线形、截面特性、拉索及梁塔弹性连接等数据之后,博士大桥 Midas/Civil 有限元模型如图 10 所示。

手动添加支座、拉索张力等计算参数后,取一

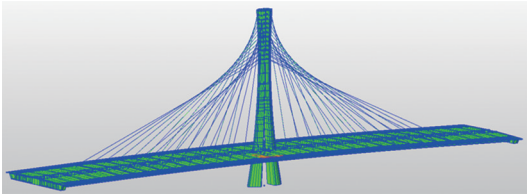


图 10 博士大桥 Midas/Civil 有限元模型
Fig.10 Midas/Civil finite element model of Boshi bridge

次成桥状态进行有限元计算(计算结果见图 11),并将有限元分析结果以 Excel 表格输出。

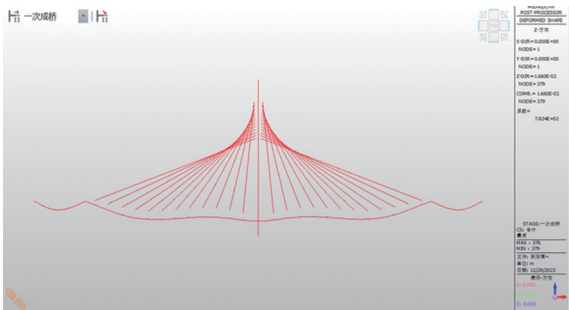


图 11 Z 方向位移有限元分析结果图
Fig.11 Finite element analysis results in Z-direction

为了验证本文模型转换的正确性,与采用 Midas/Civil 软件直接建模分析的结果对比,如表 4 所示.限于篇幅,表中仅列出两种方法计算的主梁挠度、应力最大值、主塔应力和典型索力值,结果表明相对误差基本在 5% 以内,满足计算精度要求。

表 4 有限元分析结果对比表

Tab.4 Comparison results of finite element analysis

有限元分析结果	主梁 Z 向最大 挠度/mm	主梁 Z 向最小 挠度/mm	塔应力最小值/ MPa	梁应力最大值/ MPa	梁应力最小值/ MPa	最外侧拉索 索力值/kN	最内侧拉索 索力值/kN
本文	0.238	-16.314	-53.1	12.2	-19.5	2 261.5	1 693.8
直接建模	0.226	-16.267	-55.0	12.4	-20.0	2 267.1	1 700.8
相对误差 / %	5.31	0.29	-3.45	-1.61	-2.50	-0.25	-0.41

2.5 有限元结果反馈与展示

通过 Dynamo 读取 Excel 表格的计算结果,经格式转换并输入 Revit 模型作为作用效应信息,并将作用效应信息按其数值大小赋予渐变颜色.以一次成桥施工阶段主梁 Z 方向位移沿 X 轴变化情况为例,如图 12 所示,颜色越红表示 Z 方向正向位移越大,由图可知主梁在远离桥塔位置处 Z 向位移大。

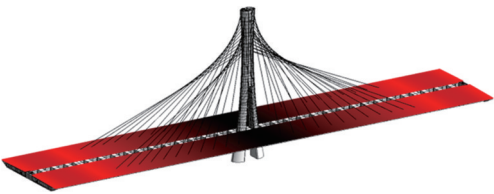


图 12 主梁 Z 方向位移显示
Fig.12 Displacement display of the main beam in Z-direction

据交互方法,即通过 Dynamo-IronPython 访问 Revit API 的方式,编写了模型转换程序,获取 Revit 模型中构件的节点、材料、截面等信息,并将其转换为 Midas/Civil 软件语言格式 MCT 文件,实现了两种模型之间的转换。

2)有限元计算结果导出至 Excel 文件,通过 Dynamo 读取该文件作为 Revit 原始模型的变化信息,并对变化信息按数值大小赋予渐变颜色,实现了在 BIM 模型中显示有限元分析结果的展示功能.通过在博士大桥上的应用,验证了模型转换方法与程序的可行性。

3)由 Revit 模型直接转换为有限元模型,避免了分别建模可能产生模型物理信息不一致的弊端,并且提高了建模效率,也弥补了 BIM 技术在桥梁结构分析方面的不足。

参考文献

[1] 何祥平,王浩,张一鸣,等. Revit-Midas/Civil 模型转换方法及应用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(5):813-818.

3 结论

1)本文提出一种 Revit 与 Midas/Civil 间的模型数

- HE X P, WANG H, ZHANG Y M, et al. Revit-Midas/Civil model conversion approach and its application[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(5): 813-818. (in Chinese)
- [2] VENUGOPAL M, EASTMAN C M, SACKS R, et al. Semantics of model views for information exchanges using the industry foundation class schema[J]. Advanced Engineering Informatics, 2012, 26(2): 411-428.
- [3] OH M, LEE J, HONG S W, et al. Integrated system for BIM-based collaborative design [J]. Automation in Construction, 2015, 58: 196-206.
- [4] LAI H H, DENG X Y, CHANG T Y P. BIM-based platform for collaborative building design and project management [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2019, 33 (3): 05019001.
- [5] ZHENG X, LU Y J, LI Y K, et al. Quantifying and visualizing value exchanges in building information modeling (BIM) projects [J]. Automation in Construction, 2019, 99: 91-108.
- [6] 杜一丛, 王亮. 基于BIM参数化在桥梁工程设计阶段应用初探[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊2): 972-978.
- DU Y C, WANG L. Preliminary exploration on the application of BIM parameterization in bridge engineering design stage [J]. Building Structure, 2019, 49(Sup.2): 972-978. (in Chinese)
- [7] 赵宇璇. 吊杆拱桥BIM模型创建与有限元数据转换方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- ZHAO Y X. Research on BIM model creation and finite element transformation method for suspension arch bridges [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [8] 徐照, 徐夏炎, 李启明, 等. 基于WebGL与IFC的建筑信息模型可视化分析方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(2): 444-449.
- XU Z, XU X Y, LI Q M, et al. Combining WebGL and IFC to create 3D visualization for building information models [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 444-449. (in Chinese)
- [9] GESQUIÈRE C, MANIN A. 3D visualization of urban data based on CityGML with WebGL [J]. International Journal of 3D Information Modeling, 2012, 1(3): 1-15.
- [10] 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): 120-127.
- ZHANG X Y, HU Z Z. Research on model conversion approach towards structural finite element analysis [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(6): 120-127. (in Chinese)
- [11] 宁晓旭, 李健刚, 王磊, 等. 基于BIM设计的有限元模型转化计算方法研究[J]. 公路, 2020, 65(9): 107-113.
- NING X X, LI J G, WANG L, et al. Research on calculation method of finite element model transformation based on BIM design[J]. Highway, 2020, 65(9): 107-113. (in Chinese)
- [12] 何欣. 基于BIM技术的钢桁拱施工监控可视化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- HE X. Research on visual monitoring of steel truss arch construction based on BIM technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [13] 邓达. 基于BIM技术的大跨径连续刚构桥施工监控研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- DENG D. Research on construction monitoring of long span continuous rigid frame bridge based on BIM technology [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [14] РАЙКОВА Л С, АКИМОВ М Б. Выбор автоматизированной системы для проектирования мостовых сооружений [J]. САПР и ГИС автомобильных дорог, 2015, 2 (5): 78-85.
- [15] 陈皓翔. 基于BIM的预应力变截面连续梁桥参数化设计与应用[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- CHEN H X. Parametric design and application of prestressed variable cross-section continuous beam bridge based on BIM [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020. (in Chinese)
- [16] 董卯, 郭乃胜, 王楠, 等. 基于Revit与MIDAS/CIVIL的桥梁结构模型转换方法[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 101-108.
- DONG M, GUO N S, WANG N, et al. Bridge structure model conversion method based on Revit and MIDAS/CIVIL [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 46(3): 101-108. (in Chinese)
- [17] ZHANG X Y, QU Q L, LIANG D, et al. Endowing BIM model with mechanical properties: finite element simulation analysis of long-span corrugated steel web continuous beam bridge [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2215(1): 012006.
- [18] 张红勇. 利用Dynamo进行Midas Civil与Revit空间几何数据交互方法初探[J]. 甘肃科技, 2021, 37(4): 94-96.
- ZHANG H Y. Exploring the method of interacting Midas Civil and Revit spatial geometry data using Dynamo [J]. Gansu Science and Technology, 2021, 37(4): 94-96. (in Chinese)
- [19] 赵天润. Revit与Midas连续梁模型正向数据转化接口研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- ZHAO T R. Research on the forward data conversion interface between Revit and Midas continuous beam models [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)