

## 明清官式木构建筑遗产多元语义模型生成方法

张承文<sup>1,2</sup>, 淳庆<sup>1,2†</sup>, 李盼<sup>1</sup>, 花全均<sup>1</sup>, 林怡婕<sup>1</sup>

[1. 东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096;  
2. 城市与建筑遗产保护教育部重点实验室(东南大学), 江苏 南京 210096]

**摘 要:**为提高明清官式木构建筑遗产建模分析效率,通过多元语义模型参数化生成方法研究,实现同时生成建筑与结构模型.首先,对明清官式木构建筑遗产的基本构件进行分类,并梳理建筑模型和结构模型之间的信息流,采用 Grasshopper 进行二次开发,完成建筑基本构件库.然后,以全国重点文物保护单位北京德胜门箭楼进行技术实践,通过建筑基本构件库自动生成结构分析模型,并进行结构安全分析.研究表明,提出的方法可同时生成用于细节展示的建筑模型,以及可直接用于计算分析的结构模型.研究成果为实现建筑遗产数字化预防性保护提供了理论依据和科学基础.

**关键词:**木构建筑;参数化;有限元;建筑信息模型;结构分析

**中图分类号:**TU366.2

**文献标志码:**A

## Multi-semantic Model Generation Method of Wooden Architectural Heritage Built by Government in Ming and Qing Dynasties

ZHANG Chengwen<sup>1,2</sup>, CHUN Qing<sup>1,2†</sup>, LI Pan<sup>1</sup>, HUA Quanjun<sup>1</sup>, LIN Yijie<sup>1</sup>

[1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Key Laboratory of Urban and Architectural Heritage Conservation(Southeast University), Ministry of Education, Nanjing 210096, China]

**Abstract:** To improve the efficiency of modeling and analysis of wooden architectural heritage built by the government in Ming and Qing Dynasties, a parameterized method of multi-semantic model to achieve simultaneous generation of architectural and structural models is studied in this paper. Firstly, the basic components of wooden architectural heritage built by government in Ming and Qing dynasties were classified, and the information flow between building models and structural models was organized. Grasshopper was used for secondary development to complete the basic building component database. Then, the national key cultural relic protection unit, i.e. Beijing Deshengmen Arrow Tower, was used as an example, and a structural analysis model was automatically generated through the basic component database. The structural safety analysis was conducted automatically. The research results indicate that the proposed method can simultaneously generate building models for detailed display and structural models that can be directly used for computational analysis. The research results provide a theoretical and

\* 收稿日期:2024-03-26

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2022833), Key Research and Development Projects of Jiangsu Province(BE2022833)

作者简介:张承文(1996—),男,江苏靖江人,东南大学助理研究员,博士

† 通信联系人,E-mail:cqnj1979@163.com

scientific foundation for the digital preventive protection of architectural heritage.

**Key words:** wooden buildings; parameterization; finite element; building information modeling; structural analysis

当前,建筑遗产保护观念从“抢救性保护”,逐步向“预防性保护”进行转变.而预防性保护工作的重要前提是实现建筑遗产的数字化与信息化管理.在传统数字化的建筑遗产保护工作流程中,对于建筑模型的建立,一般先根据现场测绘的结果,绘制相应的CAD(计算机辅助设计)图纸,并根据工作要求的信息深度建立建筑模型.而结构模型的建立则在建筑模型完成之后,对构件和节点进行简化分析,确定建筑整体结构模型并用于后续的有限元分析计算.上述工作流程中,建筑和结构之间信息传递较少,两个模型中的共同信息要素需要二次输入,增大了建模工作量.同时,上述工作需要多学科的研究人员共同介入与协作,进一步延长了整个工作流程所需的时间.

BIM(建筑信息模型)是一种实现将结构信息同步到建筑模型上的有效方法<sup>[1]</sup>.HBIM(historic building information model,历史建筑信息模型)这一概念由Murphy等<sup>[2]</sup>提出,从测量学的角度出发,将建筑构件参数化设计与激光扫描数据和图像勘察数据进行映射分析.随后对HBIM建筑建模<sup>[3]</sup>和智能化虚拟展示<sup>[4]</sup>进行了探讨.Logothetis等<sup>[5]</sup>总结了HBIM的工作流程:数据采集、结构细节鉴别、创建参数化构件库、构件库与扫描数据映射、生成勘察图纸、点云文件映射.Banfi等<sup>[6]</sup>从数据采集工作入手,关注如何减少测量和扫描的时间来提高整个流程的工作效率.Esponda等<sup>[7]</sup>通过对劳伦琴山脉木屋进行历史研究,采用数字技术对整体工作进行记录分析.

大多数的研究都集中在BIM模型的建立和展示应用方向.孙伟超<sup>[8]</sup>从图元信息出发,对古建筑构件库的参数化做出了初步探索.李舒静<sup>[9]</sup>以“类型树+结构树”为基本形式完成建筑信息采集,并采用“影子族+详图构件库”进行信息表达.王茹等<sup>[10]</sup>通过分析典型明清历史建筑的构成体系和建造模式,对主要的建筑构件的建模工作进行参数化设计研究,建立尺寸约束关系.王茹等<sup>[11-12]</sup>研究了构件信息标准化和关键信息量化提取的办法,提高构件库的效率,并提出了古建筑保护方法经济性评价指标体系.张

祥<sup>[13]</sup>对古建筑信息化构件的装配模式进行分析,完成构件的信息共享和模型的信息协同.韩婷婷<sup>[14]</sup>提出了明清古建筑构件信息分类编码实现方法,完成三维构件库的设计和信息化管理过程.谭洁等<sup>[15]</sup>以清代官式建筑为例,讨论了基于三维模型的参数化设计在古建筑保护中的应用方法,并采用GDL语言编程,建立相关构件模型.

在HBIM方面,大多数研究都集中在历史建筑信息模型的建立以及后期信息系统的维护,对建筑模型和结构模型的协同工作方面则研究较少.对于明清建筑而言,其构件建筑模型的信息化工作已经基本完善,但由于建筑模型和结构分析模型在建模时考虑的重点存在差异,因此无法从建筑模型直接进行结构模型的转译.基于此,本研究在建筑信息化模型中,考虑到建筑模型和结构模型的协同建模,采用建筑常用的建模软件Rhino为载体,通过Grasshopper开发插件,对明清官式木构建筑遗产的建筑与结构模型协同建模工作做出探讨.本文首先对不同构件类型的结构计算简化模型进行分析,考虑构件模型合理性及整体建筑模型组装的连续性;同时针对明清官式木构建筑遗产的特殊做法,根据其力学特性,编写相应的分析模块.然后以北京德胜门箭楼上部结构为例,分析其建筑特征、结构布置,完成城门楼建筑遗产结构模型自动化生成.最后,基于自动生成模型,实现结构计算分析.

## 1 多元语义模型参数化生成方法

### 1.1 方法整体架构

建筑模型的主要作用是展示建筑现状,表达建筑的形制特征和残损现状;结构模型的作用则是进行结构安全定量分析计算.模型参数化生成方法整体架构如图1所示.首先,根据现场测绘、调研、文献等方式,获取关键信息.其次,在Grasshopper中采用C#进行二次开发,建立四种类对象,扩充Grasshopper中电池块的信息维度.然后,根据获取信息与建立的种类对象,分别对应生成几何属性、定位点、力学属性

等电池块.根据构件的形制信息、材料信息并结合构件结构计算模型,建立模型构件信息库.以建筑主要构件定位信息、建筑三维点云模型等数据,建立建筑模型,并同步生成初始结构模型.通过定义榫卯节点参数信息,并将其与模型位置对应,同时确定建筑的荷载约束条件,完整结构信息输入环节.最后将模型信息通过数据流的形式进行输出,编写基于 Python 中 mapdl 包调用 ANSYS 软件的算法,自动完成结构分析计算.

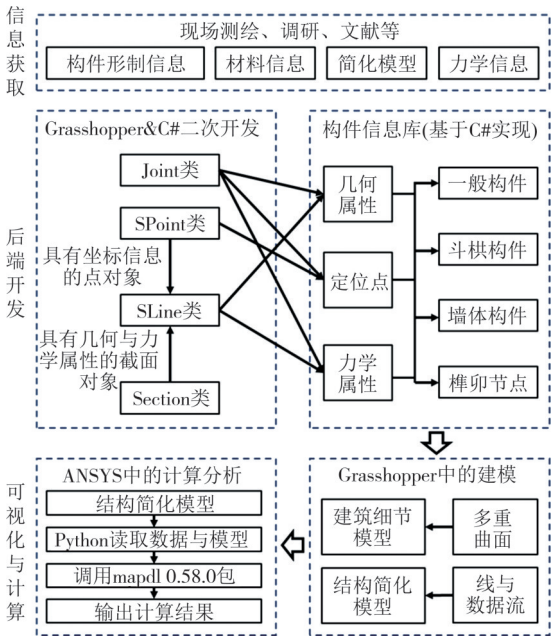


Fig.1 Overall framework of the parametric generation method

1.2 Grasshopper & C#二次开发

Grasshopper 是 Rhino 中的可视化编程插件,其传统的电池块与类对象无法完全满足古建筑建模和结构设计的要求,因此采用 C#语言开发相关的参数化插件.原有电池块仅支持对建筑模型信息的创建和传递,无法同步承载相应的结构信息,因此首先自定义模型数据类型,实现模型信息在平台上的传递,从而为后续构件信息数据库的集成提供接口.

1.2.1 SPoint 类

在原有的点对象的信息基础上,增加一个实例字段代表点的编号,使其变成结构点对象.SPoint 类的属性如表 1 所示.该对象可以为后续建模提供点编号、点坐标等信息.

1.2.2 Section 类

结构模型中的线单元,需创建截面类.Section 类的属性如表 2 所示.

表 1 SPoint 类属性

Tab.1 Property of SPoint class

| 成员   | 名字                            | 释义                |
|------|-------------------------------|-------------------|
| 字段   | double X(Y,Z)                 | 点 X(Y,Z)坐标值       |
|      | int Num                       | 点的编号              |
|      | Point3d Point                 | 结构点具象化为 Rhino 点对象 |
| 构造函数 | SPoint (Point3d)              | 由 Point3d 构造结构点对象 |
|      | SPoint (double double double) | 由点坐标值初始化结构点对象     |

表 2 Section 类属性

Tab.2 Property of Section class

| 成员   | 名字                                        | 释义                           |
|------|-------------------------------------------|------------------------------|
| 字段   | int ID                                    | 截面的编号                        |
|      | SectionType Type                          | 截面的类型                        |
|      | double Width                              | 截面为矩形时截面宽度                   |
|      | double Height                             | 截面为矩形时截面高度                   |
|      | double Radius                             | 截面为圆形时截面半径                   |
| 构造函数 | Section(int, SectionType, double, double) | 截面为矩形时,通过定义编号、类型和截面尺寸初始化截面对象 |
|      | Section(int, SectionType, double)         | 截面为圆形时,通过定义编号、类型和截面尺寸初始化截面对象 |
|      | Section(int)                              | 通过定义截面编号初始化截面对象              |
|      | Info                                      | 以字符串的形式输出截面相关信息              |

SectionType 为一个枚举数据类型,定义 Rectangle 和 CSolid,表示矩形截面和圆形截面.该对象可以为后续建模与计算分析提供不同的截面信息.

1.2.3 SLine 类

在进行结构安全分析时,对于模型中的线单元,需要定义相关的截面信息和材料参数.由于 Rhino 中的线类型不满足结构分析中的要求,存在截面信息和材料参数信息的缺失,因此定义一个线单元类型 SLine 类实现信息的传递.SLine 类的属性如表 3 所示.

其中对于需要满足结构计算的模型,其线单元不存在模型重叠,因此采用中点坐标作为线单元的唯一标识符,用来进行线的区分.ComponentType 是一个枚举数据类型,根据城门楼建筑的构件类型,定义了 Beam、Column、Lin、Fang、DouGong、Wall、Undefined 七个数据.

1.2.4 Joint 类

在木结构有限元计算时,需对榫卯节点进行定义,在建模过程中,需要将相应的节点选出并定义属

| 表 3 SLine类属性                  |                                         |                        |
|-------------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| Tab.3 Property of SLine class |                                         |                        |
| 成员                            | 名字                                      | 释义                     |
| 字段                            | SPoint StartPoint                       | 线单元的起点                 |
|                               | SPoint EndPoint                         | 线单元的终点                 |
|                               | SPoint MidPoint                         | 线单元的中点                 |
|                               | LineCurve StructureLine                 | 将线单元具象化表征为 Rhino 中的线对象 |
|                               | double Length                           | 线单元的长度                 |
|                               | int Number                              | 线单元的编号                 |
|                               | Section Section                         | 线单元的截面                 |
|                               | ComponentType                           | 线单元的构件类型               |
| 构造函数                          | SLine(LineCurve)                        | 通过线对象初始化线单元            |
|                               | SLine(LineCurve, Section)               | 通过线对象和截面初始化线单元         |
|                               | SLine(LineCurve, double, double)        | 通过线对象和截面尺寸初始化矩形线单元     |
|                               | SLine(LineCurve, double)                | 通过线对象和截面尺寸初始化圆形线单元     |
|                               | SLine(Point3d, Point3d, Section)        | 通过线起点、终点和截面初始化线单元      |
|                               | SLine(Point3d, Point3d, double, double) | 通过线起点、终点和截面尺寸初始化矩形线单元  |
| 方法                            | SLine(Point3d, Point3d, double)         | 通过线起点、终点和截面尺寸初始化圆形线单元  |
|                               | Archi                                   | 返回线单元的实体模型             |

性.则定义节点类型 Joint 类,存储需要进行后续半间接处理的节点的信息.Joint 类的属性如表 4 所示.

| 表 4 Joint类属性                  |                                                  |                        |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|
| Tab.4 Property of Joint class |                                                  |                        |
| 成员                            | 名字                                               | 释义                     |
| 字段                            | SLine BaseLine                                   | 节点基准线                  |
|                               | SLine TenonLine                                  | 节点榫卯线                  |
|                               | SPoint BasePoint                                 | 节点基准点                  |
|                               | SPoint TenonPoint                                | 节点榫卯点                  |
|                               | TenonType TenonType                              | 榫卯节点类型                 |
| 构造函数                          | Joint(Curve, Curve, TenonType)                   | 通过线和榫卯类型在节点处定义一个榫卯节点   |
|                               | Joint(List<Curve>, List<Curve>, List<TenonType>) | 通过线和榫卯类型在一个节点处定义多个榫卯节点 |

其中 TenonType 为一个枚举数据类型,主要考虑 6 种榫卯:管脚榫、直榫、燕尾榫、透榫、半榫、馒头榫.

### 1.3 建筑构件信息库

#### 1.3.1 一般构件

##### 1) 建筑模型

一般构件主要包括柱、梁、枋、檩等线性构件.根

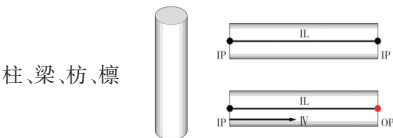
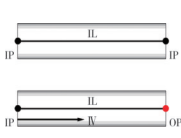
据柱的位置可大致分为落地柱和不落地柱.常见的落地柱有檐柱、金柱、中柱、山柱、角柱.常见的不落地柱有童柱、瓜柱、坨墩、雷公柱、垂莲柱等.梁根据上部檩条数目或者步架数目可用步梁与架梁进行划分.在清代官式建筑中,一般步梁最多三步,架梁最多七架.枋是将构架进行水平连系的构件.檩为布置在梁架之间支撑椽子等的木构件.

##### 2) 结构模型

梁、柱、枋、檩构造较为简单,简化为梁单元.

##### 3) 模型整合

基于上述讨论,对柱、梁、枋、檩进行建筑模型和结构模型信息整合,并根据构件搭接关系确定各构件定位点信息.各构件模型信息如表 5 所示.

| 表 5 各构件模型信息                               |                                                                                      |                                                                                       |           |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Tab.5 Information of each component model |                                                                                      |                                                                                       |           |
| 构件                                        | 建筑模型                                                                                 | 结构模型                                                                                  | 注释        |
| 柱、梁、枋、檩                                   |  |  | 截面尺寸与实际一致 |

注:IP 为模型输入点 Input Point;OP 为模型输出点 Out Point;IV 为模型输入构件向量 Input Vector;IL 为模型输入线 Input Line,图中实线为构件结构模型.下同.

考虑到建模时的情况,采用两种建模方式.其一为已知构件的起点和终点,直接建模;其二为已知构件的起点和长度向量,计算出构件终点,完成建模,并将终点坐标作为其他构件定位点输出.将构件类型信息内置到电池,减少建模中参数输入.

#### 1.3.2 斗拱构件

##### 1) 建筑模型

明清官式木构建筑遗产大多遵循斗口制,斗口用材分为十一等,其中城楼等大型建筑常用四等材、五等材.采用材作为斗拱构件的尺度衡量单位,通过计算斗口大小,进而确定各构件的几何尺寸.对于斗拱构件,考虑较为常用的斗拱类型:一斗三升斗拱和单翘单昂五踩斗拱.

##### 2) 结构模型

斗拱的简化计算模型,主要分为以下几类:

弹簧法:周乾等<sup>[16]</sup>采用弹簧单元对斗拱进行简化模拟分析,这种方法忽略节点间的转动刚度;高大

峰等<sup>[17]</sup>采用弹簧单元组合的形式模拟斗拱节点的半刚性.这一方法能够较为准确地对整体结构性能进行模拟,但由于不考虑其内部构件的具体构造,因此无法对斗拱内部的受力情况分析.

杆件法:薛建阳等<sup>[18]</sup>通过将斗拱铺作层简化为“弯剪杆”来反映结构在地震作用下的动力效应;刘妍等<sup>[19]</sup>将斗拱用斜撑桁架结构进行简化分析,并认为“结构内力沿铺作中连接构件‘斗’的连线斜向传递”.杆件法的计算快速,但难以精确描述构件的转动自由度.

梁单元法:王毅欣<sup>[20]</sup>根据构件中心线采用梁单元对斗拱进行简化建模.Li等<sup>[21]</sup>将斗拱简化为多线性弹性单元和塑性单元,将水平横拱简化为梁单元.梁单元法通过斗拱构件组成情况进行分析,能反映斗拱内部的受力情况,且梁单元也能满足大尺度建筑建模分析的要求.

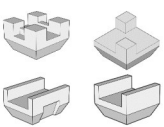
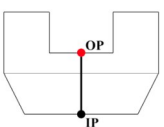
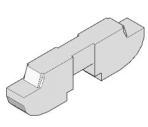
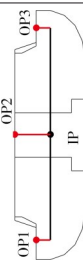
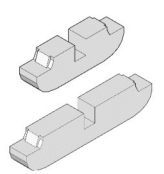
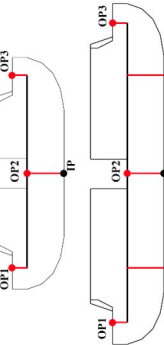
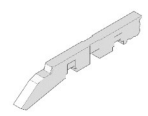
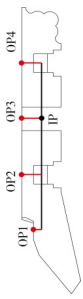
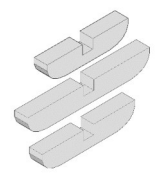
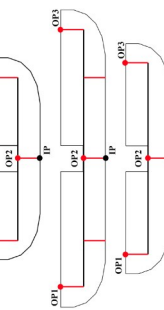
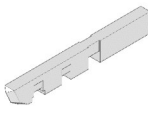
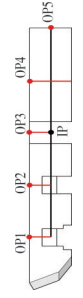
梁-弹簧组合法:高大峰等<sup>[22]</sup>采用杆单元和弹簧单元的组合来模拟斗拱行为;陈志勇<sup>[23]</sup>采用“梁-弹簧”组合模型对应县木塔斗拱进行简化分析,并通过理论计算得出对应弹簧的刚度.梁-弹簧组合法与梁单元法相比较而言,能更好地模拟斗拱的耗能特性,但弹簧的刚度标定与计算较为困难.

综上所述,为了兼顾建模效率、计算效率与参数确定效率,本文采用梁单元法对斗拱进行简化,主要内容如下:将槽升子、十八斗、三才升等简化为竖向杆件,起到竖向连系的作用,其构件截面选取构件底部尺寸;横拱、翘、昂等水平构件则简化为水平梁构件.同时,为了弥补简化前后,因丢失截面信息而造成的高度差问题,水平构件在内部增设竖向传力杆件,形成复合梁杆件体系.

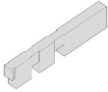
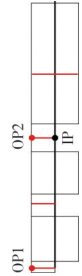
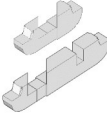
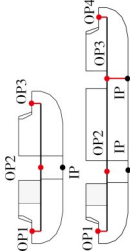
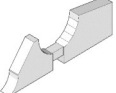
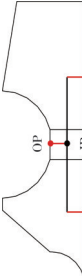
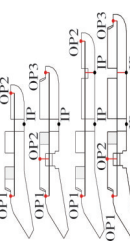
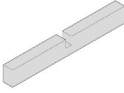
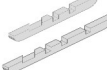
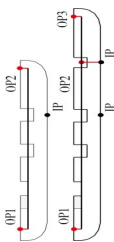
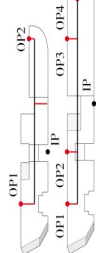
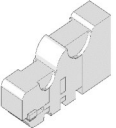
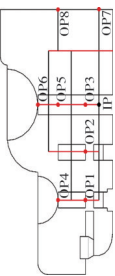
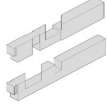
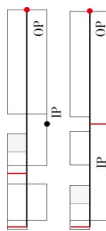
3) 模型整合

斗拱构件的模型如表6所示.

表6 斗拱构件模型  
Tab.6 Dougong component model

| 构件                         | 建筑模型                                                                                | 结构模型                                                                                | 注释                                                                                                        | 构件 | 建筑模型                                                                                 | 结构模型                                                                                  | 注释                                                  |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 大斗;<br>槽升子;<br>三才升;<br>十八斗 |  |  | 斗构件采用统一的简化方法.结构模型截面为矩形,尺寸取一斗口                                                                             | 翘  |  |  | 翘以正心瓜拱作为基点确定构件位置,输出定位点,确定两侧斗和上部正心万拱.截面取足材尺寸         |
| 正心瓜拱;<br>正心万拱              |  |  | 正心瓜拱和正心万拱以构件底部中心点为基点 IP,输出上方斗拱位置点 OP1、OP3,以及翘、昂定位点 OP2.结构模型由中部横杆和竖向连接组成,横杆截面以构件尺寸定,连接竖杆则以斗尺寸定,一般可设定为一斗口方形 | 昂  |  |  | 昂以正心万拱作为基点确定构件位置,输出定位点,依次确定十八斗、上部拱和枋.横梁截面取足材        |
| 单材瓜拱;<br>单材万拱;<br>单材厢拱     |  |  | 单材拱的简化方法和正心拱类似,采用单材横梁和一斗口竖杆结合形式,横梁的尺寸取单材大小                                                                | 耍头 |  |  | 耍头以正心枋作为基点确定构件位置,输出定位点,确定上部拱和枋,OP5为压斗枋定位点.横梁截面取足材尺寸 |

续表

| 构件  | 建筑模型                                                                                | 结构模型                                                                                | 注释                                                                                | 构件                    | 建筑模型                                                                                 | 结构模型                                                                                  | 注释                                                               |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 撑头木 |    |    | 撑头木以正心枋作为基点确定构件位置,输出定位点,确定上部挑檐檩和正心枋.横梁截面取足材尺寸                                     | 翘后带正心瓜拱               |    |    | 翘后带正心瓜拱位于角科斗拱第一层,为翘和正心瓜拱的结合,对于连瓣科则以下方两个大斗作为构件定位点                 |
| 桁椀  |    |    | 桁椀以正心枋作为基点确定构件位置,输出定位点,确定上部正心檩的位置.横梁截面取足材尺寸                                       | 昂后带正心万拱;<br>昂后带单材瓜拱   |    |    | 昂后带正心万拱(单材瓜拱)位于角科斗拱第二层,以斜头翘上的构件定位点为基点,确定构件位置,结构模型可视为昂和拱构件的结合     |
| 枋   |  |   | 枋以下部进深方向构件作为基点确定构件位置,输出定位点,中部定位进深方向构件,两侧连接枋与其余斗拱进行连接.截面取足材尺寸                      | 把臂厢拱                  |  |   | 把臂厢拱位于角科斗拱第三层,以斜头昂上的构件定位点为基点,确定构件位置                              |
| 檩   |  |  | 檩以下部桁椀作为基点确定构件位置,输出定位点,两侧连接檩与其余斗拱进行连接.横梁截面取檩条尺寸                                   | 耍头后带单材万拱;<br>耍头后带正心枋  |  |  | 耍头后带单材万拱(正心枋)位于角科斗拱第三层,以斜头昂上的构件定位点为基点,确定构件位置.对于正心枋则还需要确定后续连接枋的位置 |
| 方梁头 |  |  | 方梁头可以看作耍头、撑头木和桁椀的结合,以正心枋为基点确定构件位置.除了横拱和枋的定位点外,OP4和OP6为檩条定位点,OP7为压斗枋定位点,OP8为框架梁定位点 | 撑头木后带正心枋;<br>撑头木后带外拽枋 |  |  | 撑头木后带正心枋(外拽枋)位于角科斗拱第四层,以斜重昂上的构件定位点为基点,确定构件位置.同时还需要确定后续连接枋的位置     |

1.3.3 墙体构件

1) 建筑模型

建立建筑模型时,以一对梁柱所围合的矩形区域为单元,假定门窗关于单元中轴对称.则可根据门窗与单元顶部梁中心相对位置来确定开洞区域.

2) 结构模型

墙体的简化计算模型,目前采用最多的方法为斜撑法<sup>[24]</sup>.斜撑厚度和弹性模量与填充墙相等.Holmes<sup>[25]</sup>、Paulay等<sup>[26]</sup>均采用斜杆模拟墙体力学行为,分别提出使宽度等于填充墙对角线长度的1/3和1/4.

Buonopane 等<sup>[27]</sup>在此基础上做出了修正.但单压杆模型不能反映构件弯矩、剪力分布特点.因此,Crisafulli 等<sup>[28]</sup>提出双平行压杆模型.Fiore 等<sup>[29]</sup>则提出不平行等效压杆模型.El-Dakhakhni 等<sup>[30]</sup>采用不平行三压杆等效对角模型,该模型能够体现墙体在地震作用下对建筑整体和局部效应的影响.张令心等<sup>[31]</sup>采用双斜撑模型,并计算了破坏状态的指标限值.邓宏宇等<sup>[32]</sup>采用等效单杆斜撑模型,认为传统的对角斜撑模型低估了墙体的水平承载力.华一唯等<sup>[33]</sup>和淳庆等<sup>[34]</sup>在历史建筑中采用了等效斜撑.研究表明,采用斜撑模型时,常将杆件定义为受压斜杆,不承受拉力、弯矩、剪力等内力作用,与实际情况存在差异.

综上,采用梁单元模拟斜撑,两端与框架梁柱固接.当墙体存在门窗洞口时,在宽度上乘以折减系数<sup>[35]</sup>.厚度同围护墙厚度,宽度由式(1)确定.

$$\lambda = \left( \frac{E_w t_w \sin 2\theta}{4E_c I_c H_w} \right)^{1/4}$$
$$D_c = 0.175(\lambda H)^{-0.4} \sqrt{H^2 + L^2}$$
$$R = 0.6\eta^2 - 1.6\eta + 1 \tag{1}$$

式中: $E_w$ 和 $E_c$ 分别为填充墙和框架柱的弹性模量; $I_c$ 为框架柱的惯性矩; $\theta$ 为填充墙对角线与框架梁之间的夹角; $t_w$ 和 $H_w$ 分别为填充墙厚度和高度; $H$ 和 $L$ 分别为框架柱的高度和框架梁的长度; $\eta$ 为开洞面积与填充墙面积的比值.

3) 模型整合

建模时以两侧柱为定位线,柱间插入墙体.

1.3.4 榫卯节点

1) 建筑模型

根据对案例榫卯节点类型的分析<sup>[36]</sup>,如图2所示,榫卯可分为以下6种:管脚榫、直榫、燕尾榫、透榫、半榫、馒头榫.

2) 结构模型

采用三折线模型,以弹簧单元模拟榫卯节点的半刚性行为<sup>[37-40]</sup>,榫卯节点参数见表7.

3) 模型整合

在一个节点处,往往存在一个或者多个梁柱榫卯节点,需要创建一个或者多个节点信息.

2 北京德胜门箭楼算例

2.1 建筑构件信息库

2.1.1 整体结构分析

根据《工程做法则例·卷十六》的记载,重檐七檩

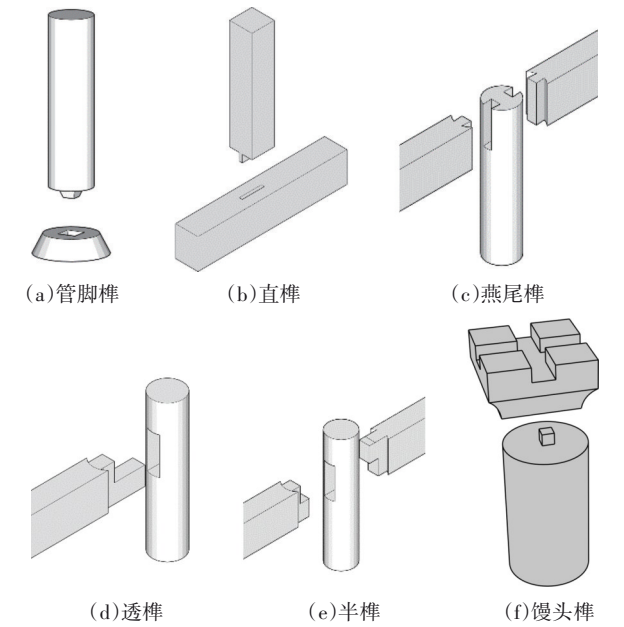


图2 榫卯节点示意图

Fig.2 Schematic diagram of mortise and tenon joints

表7 榫卯节点参数

Tab.7 Parameters for mortise and tenon joints

| 榫卯类型                | 弹性阶段              |                         | 屈服阶段              |                         | 破坏阶段              |                         |
|---------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
|                     | $M_1 /$<br>(kN·m) | $\theta_1 / \text{rad}$ | $M_2 /$<br>(kN·m) | $\theta_2 / \text{rad}$ | $M_3 /$<br>(kN·m) | $\theta_3 / \text{rad}$ |
| 管脚榫 <sup>[37]</sup> | 14.74             | 0.08                    | 15.96             | 0.12                    | —                 | —                       |
| 直榫 <sup>[38]</sup>  | 2.37              | 0.02                    | 3.60              | 0.19                    | 2.15              | 0.23                    |
| 燕尾榫 <sup>[39]</sup> | 0.96              | 0.05                    | 17.13             | 0.08                    | 5.10              | 0.14                    |
| 透榫 <sup>[38]</sup>  | 6.16              | 0.04                    | 8.55              | 0.08                    | 7.94              | 0.11                    |
| 半榫 <sup>[40]</sup>  | 3.79              | 0.04                    | 4.82              | 0.11                    | 4.33              | 0.16                    |
| 馒头榫 <sup>[39]</sup> | 5.44              | 0.02                    | 6.90              | 0.09                    | 6.45              | 0.15                    |

歇山箭楼分为四个部分:主楼下檐、主楼上檐、前檐接二檩雨搭、雨搭接四檩庀座.德胜门箭楼的测绘图如图3和图4所示,总共四层,其中主楼下檐三层,上檐一层.建筑从北向南依次为上檐重檐屋顶、二檩雨搭、四檩庀座.庀座出檐与主楼下檐齐平并围合相交.箭楼平面呈凸字形,灰筒瓦绿剪边重檐歇山顶.主楼部分面阔七间,进深两间,东西长35.35 m,南北宽11.85 m,总高度为19.30 m;庀座面阔五间,进深一间,东西长26.60 m,南北宽7.50 m.建筑南侧开三座过梁式木门,北侧开四层箭窗,每层12个,主楼东西两侧每层各开4个箭窗,庀座在两个扇面各开1个箭窗.从形制上看,德胜门箭楼较好地吻合则例中对箭楼的规定.

2.1.2 斗拱形制分析

箭楼下檐部分设置一斗三升斗拱.主楼上檐部分设置单翘单昂五踩斗拱.面阔方向上,梢间设置

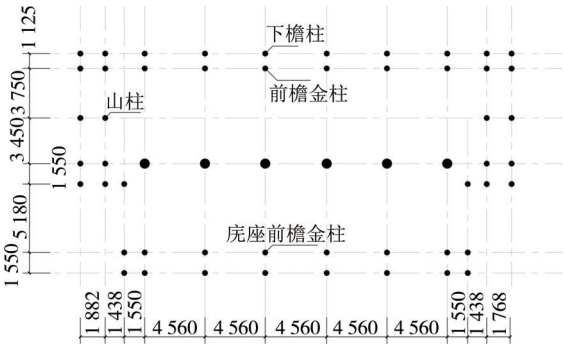


图3 德胜门箭楼首层平面布置图(单位:mm)

Fig.3 Layout plan of the first floor of Deshengmen Arrow Tower (unit:mm)

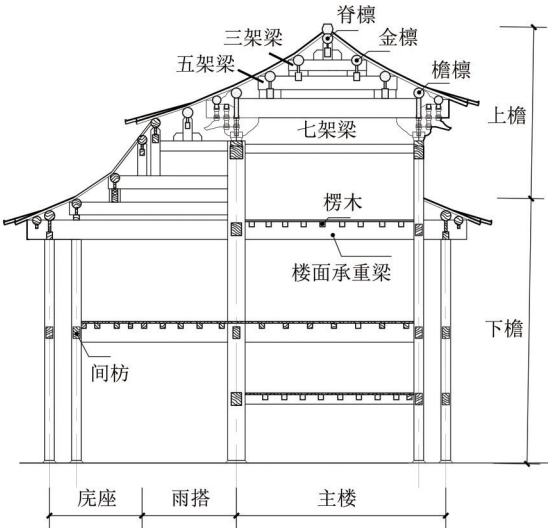


图4 德胜门箭楼木构架

Fig.4 Wood frame of Deshengmen Arrow Tower

平身科斗拱一攒,明间和次间设置平身科斗拱两攒,进深方向上均设置平身科斗拱一攒.角科斗拱采用连瓣做法,三个坐斗并置,且坐斗之间有一定的距离.斗拱内侧采用后尾撒头做法,放置压斗枋于耍头后尾处.按照不同位置,分为单翘单昂五踩平身科斗拱[图5(a)]、单翘单昂五踩柱头科斗拱[图5(b)]、单翘单昂五踩角科斗拱[图5(c)].

2.2 德胜门箭楼模型组装

以德胜门箭楼为实例,进行建模分析,并输出相应的数据信息.参数化建模过程如表8所示.

2.3 德胜门箭楼各工况结构分析

根据自动生成的结构模型和GH输出的模型数据文件,包括几何模型、材料参数、榫卯节点等,首先,基于Python编写文件读取程序;然后,在Python中调用mapdl 0.58.0包,包中内置了ANSYS的各项求解模块,基于该包编写模态与静力分析程序;最后,基于Python编写计算图输出与分析程序.有限元模型如

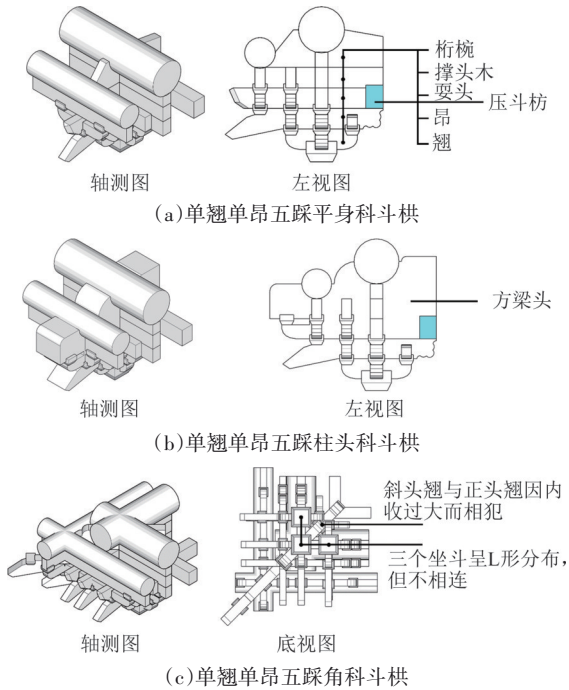


图5 德胜门箭楼典型斗拱

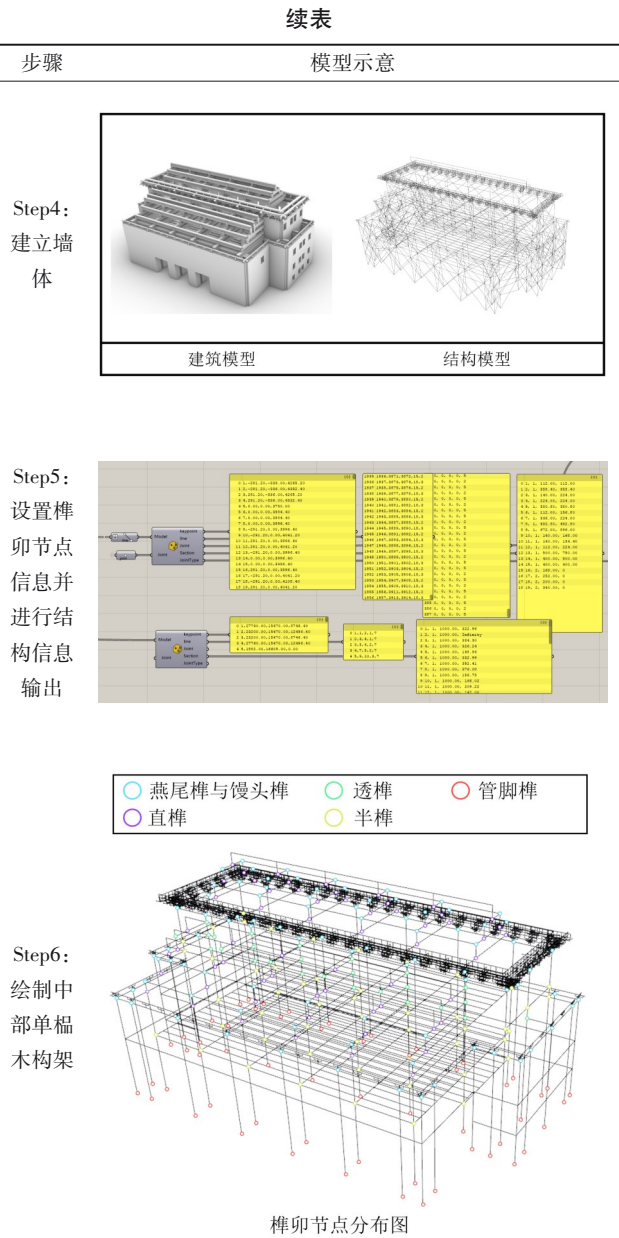
Fig.5 Typical Dougong of Deshengmen Arrow Tower

图6所示.其中梁单元采用Beam189单元,弹簧单元采用Combin39单元.每个构件划分3个单元.无损木材弹性模量为9 000 MPa,密度为500 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为

表8 德胜门箭楼参数化生成过程

Tab.8 Parameterized generation process of Deshengmen Arrow Tower

| 步骤                             | 模型示意                              |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Step1:绘制中部单榫木构架                | <div><div></div><div></div></div> |
| Step2:绘制端部木构架                  | <div><div></div><div></div></div> |
| Step3:在构架之间进行连系,建立楼面、檩条、平身科斗拱等 | <div><div></div><div></div></div> |



0.3;砖的弹性模量为10 180 MPa, 密度为2 200 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为0.3.榫卯节点根据表7按照相似比取值.

对模型进行模态分析.在现场进行动力特性测试,动测布点如图7(a)所示,采用北京三维宇恒科技有限公司提供的加速度传感器,采样频率为100 Hz,采集时长为15 min.测试所得数据采用基于稳定图的随机子空间法<sup>[41]</sup>进行模态参数识别.有限元的前四阶模态如图7(b)~(e)所示.前四阶识别结果与计算结果的模态置信准则<sup>[41]</sup>分别为0.94、0.93、0.90、0.90,因此可以认为计算所得振型与实测值较为吻合.从图7可以看出,德胜门箭楼的振型与一般结构存在差异,第一阶为进深方向平动,第二阶便是扭转,第三阶才是面阔方向平动,第四阶为竖向扭转.

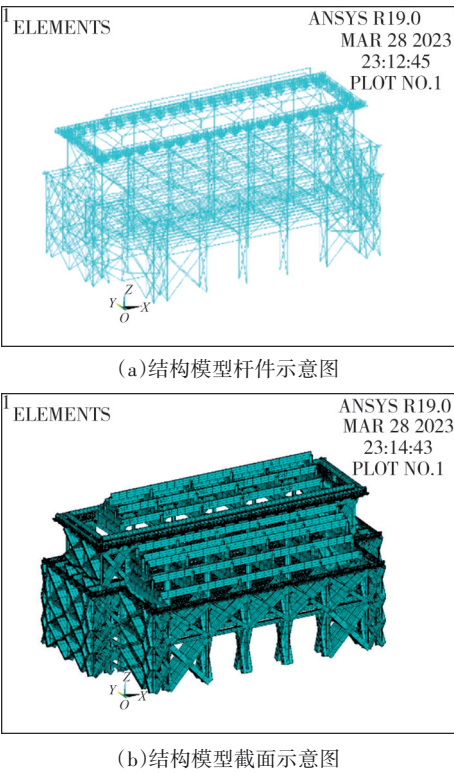
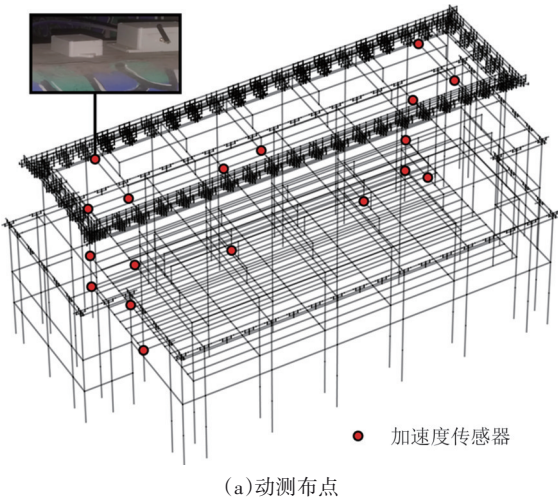


图6 德胜门箭楼结构分析模型

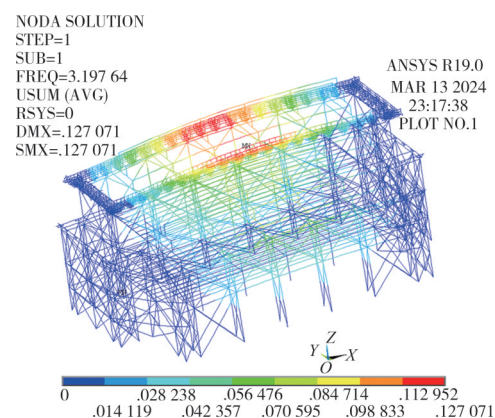
Fig.6 Structure analysis model of Deshengmen Arrow Tower

其主要原因是箭楼填充墙体导致结构在进深方向的刚度比面阔方向大.此外由于存在底座部分,箭楼中部构架数比两端多,中部刚度较大,因此结构扭转提前.

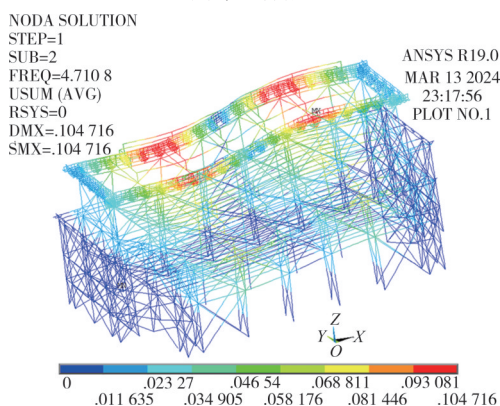
对德胜门箭楼正常使用状态进行结构分析.楼面恒荷载取0.5 kN/m<sup>2</sup>,活荷载取3.5 kN/m<sup>2</sup>;屋面恒荷载取3.0 kN/m<sup>2</sup>,活荷载取0.7 kN/m<sup>2</sup>.根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012),恒荷载和活荷载的分项系数分别取1.3、1.5.将荷载加到檩条和楞木上,结果如图8所示.



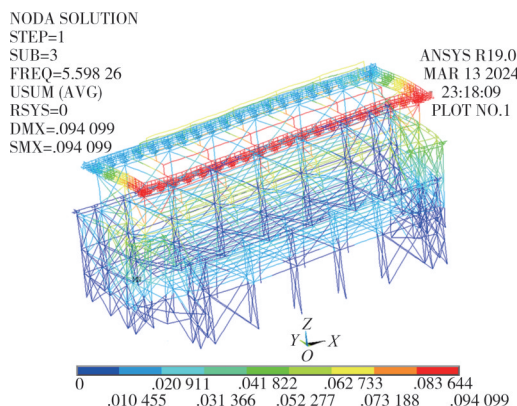
(a)动测布点



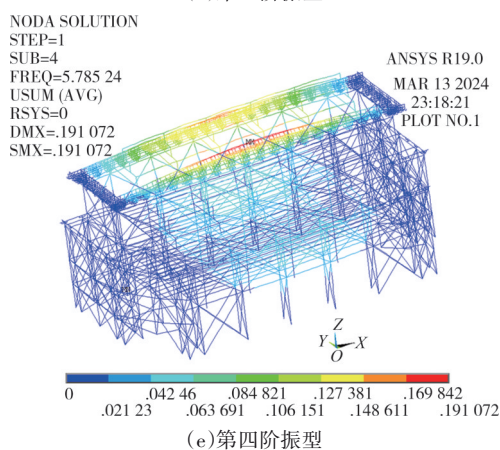
(b)第一阶振型



(c) 第二阶振型



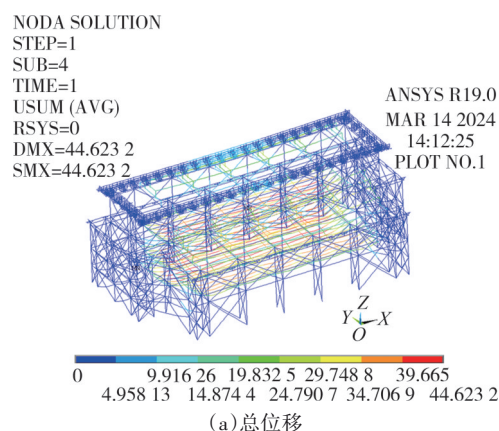
(d)第三阶振型



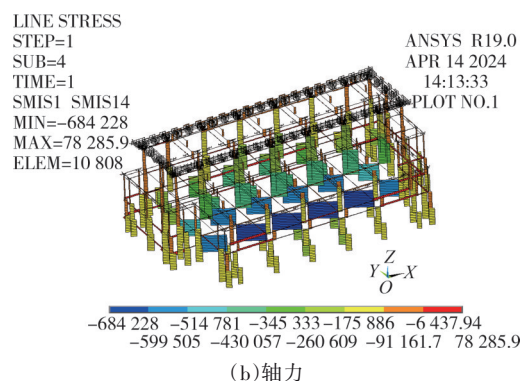
(e)第四阶振型

图7 德胜门箭楼模态分析

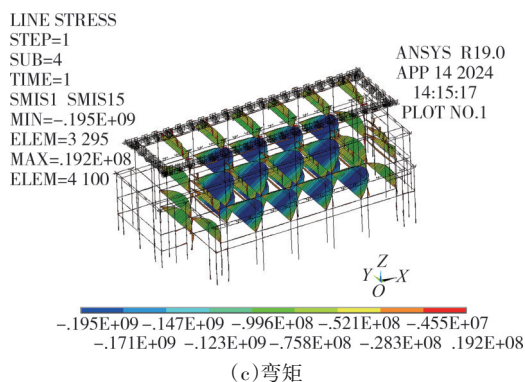
Fig.7 Model analysis of Deshengmen Arrow Tower



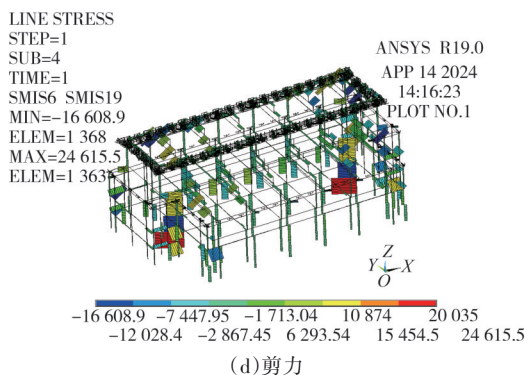
(a)总位移



(b)轴力



(c) 弯矩



(d) 剪力

图8 德胜门箭楼计算结果

Fig.8 Calculation results of Deshengmen Arrow Tower

从位移结果来看,箭楼在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向上的位移最大值分别为3.37 mm、15.43 mm、44.52 mm。 $X$ 方向位移结果呈现出对称性;而 $Y$ 方向上的位移最大值出现在二檐雨搭部分,其在雨搭和庑座部分缺少砖

砌体墙,局部刚度较弱,因此发生了侧向变形;在静力荷载工况下,起主导作用的是竖向位移,此时位移最大值出现在楼面楞木,其主要原因在于楼面楞木跨度较大,且构件截面尺寸较小。

从轴力结果来看,中部构架的内力相差不大,且呈现从上到下逐步增大的现象。轴力最大值出现在中部金柱,约为边柱的1.5倍,但是由于中部金柱的尺寸大于边柱,因此其轴力最不利位置应为边柱。梁弯矩结果与轴力类似,内力最大值出现在中部构架的承重梁;而对于柱端弯矩,整体最大值出现在边框架,而中部木构架则由于底座部分二层梁架的荷载作用,故三层柱的弯矩最大。剪力的最大值则出现在梁柱的端部。

### 3 结论

本文以典型明清官式木构建筑遗产为研究对象,以全国重点文物保护单位北京德胜门箭楼为例,对建筑模型和结构模型的协同建模进行研究。以Grasshopper作为平台进行二次开发,将构件的建筑模型和结构模型进行集成化处理,实现结构模型自动化建模工作与模型信息化,为有限元模拟分析提供结构信息数据。得出如下结论:

1) 基于C#语言对Grasshopper进行二次开发工作,为使结构信息数据能够在软件中进行流动,自定义结构点SPoint、结构线SLine、构件截面Section、交点Joint四种数据类型,存储结构信息数据。

2) 对城门楼建筑进行构件细分,根据构件特点划分为一般构件、斗拱构件、墙体构件,同时考虑到古建筑木结构在交接处的榫卯处理,以及在结构计算分析时节点半刚性,在建模过程中添加榫卯节点部分。针对每一类构件,根据既有研究和构件受力特点,采取了相应的结构简化计算模型,并将其以数据信息的形式内置到建筑模型中。

3) 以德胜门箭楼作为案例进行建模实践,通过构件搭接,完成建筑模型的拼装工作,同步生成相应的结构几何模型,在此基础上,根据建筑做法定义相应的榫卯节点,完成结构模型的生成。

4) 基于得到的结构信息模型,对德胜门箭楼进行结构有限元分析,箭楼在竖向荷载作用下,位移最大值出现在楼面楞木部分。轴力最大值出现在中部金柱,弯矩最大值出现在中部构架的承重梁,剪力的

最大值则出现在梁柱的端部。

在后续研究中,可以进一步完善明清官式木构建筑的形制研究,结合既有的建模新技术进行开发。

### 参考文献

- [1] 王娟,游弘宇,杨庆山,等. BIM在基础设施智能监测中的研究与应用进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8):105-116.  
WANG J, YOU H Y, YANG Q S, et al. Research and application progress of BIM technology in smart monitoring of infrastructure [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8):105-116. (in Chinese)
- [2] MURPHY M, MCGOVERN E, PAVIA S. Historic building information modelling (HBIM) [J]. Structural Survey, 2009, 27(4): 311-327.
- [3] MURPHY M, MCGOVERN E, PAVIA S. Historic building information modelling-adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76: 89-102.
- [4] MURPHY M, CORNS A, CAHILL J, et al. Developing historic building information modelling guidelines and procedures for architectural heritage in Ireland [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, XLII-2/W5:539-546.
- [5] LOGOTHETIS S, DELINASIOU A, STYLIANIDIS E. Building information modelling for cultural heritage: a review [J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, II-5/W3:177-183.
- [6] BANFI F, FAI S, BRUMANA R. Bim automation: advanced modeling generative process for complex structures [J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, IV-2/W2:9-16.
- [7] ESPONDA M, PIRAINO F, STANGA C, et al. Log houses in Les Laurentides. From oral tradition to an integrated digital documentation based on the rediscovery of the traditional constructive-geographical 'repertoires' through digital BIM data archive [J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, IV-2/W2:75-82.
- [8] 孙伟超. 基于Revit Architecture的古建筑信息模型系统设计初探[D]. 天津:天津大学, 2012.  
SUN W C. Design of information model system of ancient buildings based on Revit Architecture [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [9] 李舒静. 信息化测绘背景下基于BIM技术的建筑遗产信息采集与表达[D]. 天津:天津大学, 2014.  
LI S J. Information collection and expression of architectural heritage based on BIM technology under the background of informatization surveying and mapping [D]. Tianjin: Tianjin

- University, 2014. (in Chinese)
- [10] 王茹, 孙卫新, 张祥. 明清古建筑构件参数化信息模型实现技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(4): 479-486.
- WANG R, SUN W X, ZHANG X. Research on parametric information model of ancient buildings of Ming and Qing Dynasties [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45(4): 479-486. (in Chinese)
- [11] 王茹, 张祥, 韩婷婷. 基于BIM的古建筑保护方案经济指标体系构建与评价方法研究[J]. 建筑经济, 2014, 35(6): 110-114.
- WANG R, ZHANG X, HAN T T. Research on building economic indicators system and evaluation methods of ancient architecture protection scheme based on BIM [J]. Construction Economy, 2014, 35(6): 110-114. (in Chinese)
- [12] 王茹, 张祥, 韩婷婷. 基于BIM的古建筑构件信息的标准化及量化提取研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014, 6(1): 25-28.
- WANG R, ZHANG X, HAN T T. Research on the standardization and quantification extraction of ancient building component information based on BIM [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2014, 6(1): 25-28. (in Chinese)
- [13] 张祥. 基于BIM的明清官式古建筑构件参数化及其装配研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- ZHANG X. Research on parameterization and assembly of official ancient buildings in Ming and Qing Dynasties based on BIM [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 韩婷婷. 基于BIM的明清古建筑构件库参数化设计与实现技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- HAN T T. Research on parametric design and implementation technology of component library of ancient buildings in Ming and Qing Dynasties based on BIM [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 谭洁, 汪梦林, 王建华. 参数化设计在古建筑保护中的应用研究: 以清代官式建筑为例[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(3): 266-268.
- TAN J, WANG M L, WANG J H. Research on the protected of ancient building by parametric design technology—Qing Dynasty architecture for example [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(3): 266-268. (in Chinese)
- [16] 周乾, 闫维明, 关宏志, 等. 罕遇地震作用下故宫太和殿抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(增刊1): 25-32.
- ZHOU Q, YAN W M, GUAN H Z, et al. Study on seismic performance of Taihe Hall in the Forbidden City under rare earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(Sup.1): 25-32. (in Chinese)
- [17] 高大峰, 刘经纬, 张锁柱, 等. 西安东岳庙大殿动力特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(2): 36-38.
- GAO D F, LIU J W, ZHANG S Z, et al. Analysis on dynamic characteristics of Xi'an Dongyue Temple [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(2): 36-38. (in Chinese)
- [18] 薛建阳, 张凤亮, 赵鸿铁, 等. 单层殿堂式古建筑木结构动力分析模型[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8): 135-142.
- XUE J Y, ZHANG F L, ZHAO H T, et al. Dynamic analysis model of monolayer hall-style ancient timber structure [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 135-142. (in Chinese)
- [19] 刘妍, 杨军. 独乐寺辽代建筑结构分析及计算模型简化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 887-891.
- LIU Y, YANG J. Structural analysis and modeling simplification of Liao-dynasty structures in Dule Temple [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(5): 887-891. (in Chinese)
- [20] 王毅欣. 古建筑木塔结构线弹性有限元分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- WANG Y X. Linear elastic finite element analysis of ancient wooden tower structure [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [21] LI Y H, DENG Y, LI A Q. Simplified simulation method for hysteretic behavior of wood brackets [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(6): 04021085.
- [22] 高大峰, 丁新建, 曹鹏男. 西安清真寺木牌楼结构特性分析[J]. 天津大学学报, 2011, 44(6): 497-503.
- GAO D F, DING X J, CAO P N. Structural characteristics analysis of timber ornamental gate in Xi'an Great Mosque [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(6): 497-503. (in Chinese)
- [23] 陈志勇. 应县木塔典型节点及结构受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CHEN Z Y. Study on mechanical properties of typical joints and structures of Yingxian Wooden Tower [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [24] POLYAKOV S V. On the Interactions between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall [M]. Moscow: Earthquake Engineering Research Institute, 1956.
- [25] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19(4): 473-478.
- [26] PAULAY T, PRIESTLY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: Wiley-Interscience, 1992.
- [27] BUONOPANE S G, WHITE R N. Pseudodynamic testing of masonry infilled reinforced concrete frame [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(6): 578-589.
- [28] CRISAFULLI F J, CARR A J, PARK R. Analytical modelling of infilled frame structures [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000, 33(1): 30-47.
- [29] FIORE A, NETTI A, MONACO P. The influence of masonry infill on the seismic behaviour of RC frame buildings [J]. Engineering Structures, 2012, 44: 133-145.
- [30] EL-DAKHAKHNI W W, ELGAALY M, HAMID A A. Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames [J]. Journal

- of Structural Engineering, 2003, 129(2): 177–185.
- [31] 张令心, 张明远, 谢贤鑫. 考虑填充墙的 RC 框架结构性能指标限值确定方法[J]. 工程力学, 2024, 41(7): 109–120.
- ZHANG L X, ZHANG M Y, XIE X X. A method to calculate performance index limits for infilled RC frames[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(7): 109–120. (in Chinese)
- [32] 邓宏宇, 孙柏涛. 框架填充墙等效单杆斜撑简化模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 440–447.
- DENG H Y, SUN B T. Equivalent diagonal bracing model of a frame-filled wall[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(2): 440–447. (in Chinese)
- [33] 华一唯, 淳庆. 南京长江大桥桥头堡抗震加固受力性能研究[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(6): 104–111.
- HUA Y W, CHUN Q. Research on a seismic strengthening method for the bridgehead of Nanjing Yangtze River bridge: mechanical behaviors of seismic strengthening of the bridgehead[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2020, 32(6): 104–111. (in Chinese)
- [34] 淳庆, 华一唯, 张承文, 等. 江南传统木构建筑模型修正方法研究: 以津逮楼为例[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 54–63.
- CHUN Q, HUA Y W, ZHANG C W, et al. Research on model updating methods of traditional timber buildings in the Yangtze River Region—a case study of Jindai Building [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(5): 54–63. (in Chinese)
- [35] AL-CHAAR G. Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures [R]. US Army Corps of Engineers, 2002.
- [36] 李珍梅, 周乾. 故宫古建筑梁柱榫卯连接的智慧技术[J]. 建筑技术, 2020, 51(2): 252–256.
- LI Z M, ZHOU Q. Wisdom of application of tenon-mortise connection in ancient buildings in Forbidden City [J]. Architecture Technology, 2020, 51(2): 252–256. (in Chinese)
- [37] XIE Q F, ZHANG L P, WANG L, et al. Lateral performance of traditional Chinese timber frames: experiments and analytical model[J]. Engineering Structures, 2019, 186: 446–455.
- [38] LIN Y J, CHUN Q, ZHANG C W, et al. Research on seismic performance of traditional Chinese hall-style timber buildings in the Song and Yuan Dynasties (960–1368 AD): a case study of the main hall of Baoguo Temple[J]. Journal of Wood Science, 2022, 68(1): 1.
- [39] CHUN Q, YUE Z, PAN J W. Experimental study on seismic characteristics of typical mortise-tenon joints of Chinese southern traditional timber frame buildings [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(9): 2404–2411.
- [40] 淳庆, 潘建伍, 韩宜丹. 江南地区传统木构建筑半榫节点受力性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 124–131.
- CHUN Q, PAN J W, HAN Y D. Research on mechanical properties of ban mortise-tenon joint of the traditional timber buildings in the South Yangtze River regions[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 124–131. (in Chinese)
- [41] ZHANG C W, CHUN Q, LENG J W, et al. Optimal placement method of multi-objective and multi-type sensors for courtyard-style timber historical buildings based on Meta-genetic algorithm [J]. Structural Health Monitoring, 2024, 23(3): 1468–1497.