

基于 Revit 及 Revit API 的应县木塔建模研究

陈庆军^{1,3}, 王永琦¹, 汪 洋², 李名锐¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 奥雅纳工程顾问, 广州 深圳, 518048;
3. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要:近年来, 建筑信息模型(BIM)出现并蓬勃发展, 它实现了建筑、结构、设备、施工及管理等方面的一体化建模, 但关于 BIM 在古建筑中的研究非常少见. 本文基于 REVIT 软件, 选取应县木塔进行古建筑建模技术分析, 以“族”为基础, 建立了阶基、台阶、华拱、泥道拱、栌斗、格子门、勾栏、屋檐、柱子、梁枋、椽、斗拱等族, 完成了较为清晰、系统的模型信息. 并基于 .NET 平台, 结合 REVIT API 提出了斗拱建模的二次开发技术, 降低斗拱创建的难度. 对从 REVIT 中导出的杆系模型, 用等效杆系模型代替斗拱, 得到了有限元分析模型, 通过 SAP2000 分析了木塔在风、地震等外力作用下的整体力学性能. 文章对其他古木建筑的 BIM 建模技术及结构分析具有参考价值.

关键词: 应县木塔; BIM 技术; REVIT API; 斗拱; 力学性能

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0369-06

Research on the modeling of Yingxian wooden tower based on revit and revit API

CHEN Qingjun^{1,3}, WANG Yongqi¹, WANG Yang², LI Mingkai¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology,
Guangzhou 510641, China; 2. Arup, Shenzhen 518048, China;
3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In recent years, Building Information Modeling (BIM) technology was created and boomed because of its ability to integrate the modeling analysis of architecture, structure, facility, construction and management. However, BIM has not been commonly used in creating models of historic timber architecture. The present work used REVIT to create the models of Yingxian wooden tower, on the base of family. Details like Jieji, Taijie, Huagong, Nidaogong, Ludou, Gezimen, Goulan, Wuyan, Zhuzi, Liangfu, Chuan, Dougong were created and clear and systematic model information was established. Based on .NET platform and REVIT API, the method of creating DouGong by parameterization come up, reducing the difficulty of the work. As for the frame system model exported from REVIT, an equivalent member system model was used to replace the Dougong structure and a finite element analytical model was established. Finally, the overall mechanical properties of Yingxian Wooden Tower under earthquake and wind action was analyzed by SAP2000. The paper will work for the application of BIM in modeling and the structure analysis.

Key words: Yingxian Wooden Tower; BIM technology; REVIT API; DouGong; Mechanical Properties

我国有 7000 多年的木建筑历史, 而现存木建筑以明、清时期修建最多, 其中最早的建于晚唐时期^[1]. 随着时间的推移, 我们对于古木建筑这一财富的传承越来越少. 在现存的古木建筑中, 于辽清宁二年(1056 年)建成的高 67.31 m 的应县木塔是世界最高的纯木结构, 塔身包含 54 种斗拱^[2], 在经历 1 000 多年的灾害之后, 仍屹立不倒, 但前景却不乐观. 由于我国古建筑的复杂性以及精细

性, 很少有文字记录的典籍遗留下来供后世参考, 造成了大量宝贵经验及技艺的消失, 这极大地加大了我们对于古建筑的保护及复原工作的难度^[3]. 因此, 我们迫切的需要一种能够系统管理古建筑的方法.

近几年来, 建筑信息模型(BIM)成为了建筑信息存储的第一选择, 通过 BIM, 研究人员可以建立较为清晰、系统的管理信息, 为古建筑的研究

提供了新的途径^[4]。现阶段人们对基于 BIM 的古建筑建模研究较少。朱磊^[5]通过对 BIM 族的假设性分析,以遗产信息管理需求为依据,为基于遗产信息平台程序的开发做了良好的开端;刘昊^[6]针对 BIM 和 GIS 各自的优点和不足,以点云数据为基础,实现了基于 BIM“族”模型建立大木建筑的技术;孙卫新^[7]基于对传统木建筑信息存储方式的缺点,对明清木建筑的模数、构成体系以及向三维构件中添加附加信息的方法进行研究,以实现 BIM 对明清古建筑构件参数化模型的建立。在所查阅文献中并没有发现有关应县木塔基于 Revit 建模技术的研究,本文将针对应县木塔,介绍基于 BIM 的应县木塔建模过程及结构分析结果。

同时,由于古木建筑部件有异于常规建筑,其细节构造经常较为复杂繁琐,若能通过程序二次开发生成这类部件,将能极大地提升 BIM 模型的创建速度。Revit 软件本身开放了 Revit API(应用软件编程接口),但目前对基于 .NET 的 Revit 二次开发相关文献较少。张慎等^[8]通过 C# 实现了 Revit Architecture 中喷头的自动布置;薛中华等^[9]通过 C# 实现了 Revit Structure 中空间网壳的快速建模。但对于古木建筑尚未见相关文献进行阐述。本文将以应县木塔的主要部件——斗拱为例,介绍如何基于 .NET 平台对 Revit 进行二次开发,实现斗拱创建过程的简化。

1 应县木塔基于 Revit 建模过程

1.1 应县木塔简介

应县木塔,塔身呈正八边形,底部内切圆直径为 30.27 m,全塔共 9 层,其中包含 5 层明层以及 4 层位于每两层明层之间的暗层。此外,底层加重檐,并设有回廊,即所谓的“副阶周匝”。在每一暗层之下设屋檐,故全塔为“五层六檐”,如图 1。

文献[2, 10]十分详细的介绍了木塔的实际构造。全塔由称为内槽和外槽的两个桶状结构构成,由外槽斗拱乳栿连接。外檐柱每边分为明间和次间,共三间,内槽柱每边一间,柱间放置格子门。一层外檐柱和内槽柱分别被泥墙包围,在南、北面留出入口。其它明层的布置与首层相比,除了楼梯方位不同之外,完全相同。各层平座层柱子布置与明层相同,各明层外檐柱底部插到下部的斗拱之中,直到相应斗拱的第一跳华拱上部,顶部向内倾斜;内槽柱及暗层内槽柱骑于相应斗拱顶部柱头枋之上,整体向内退入而不倾斜。这样实现了

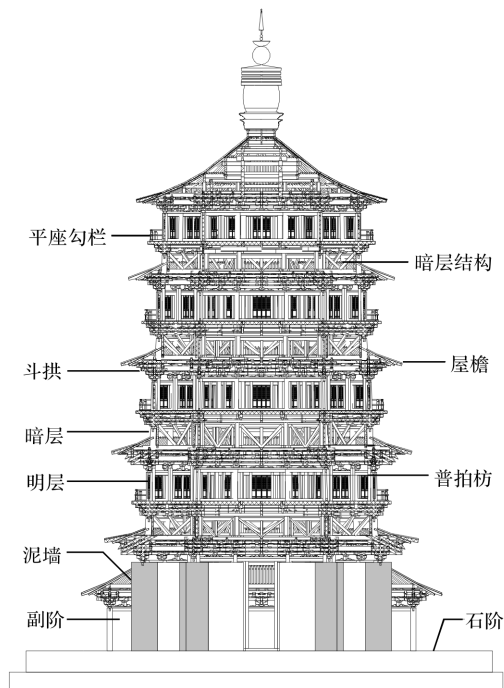
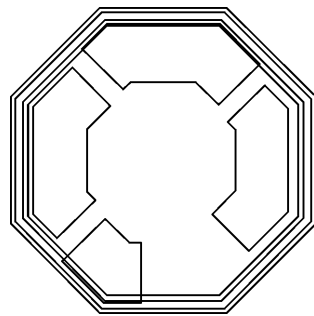


图 1 应县木塔剖面图及部分构件名称

Fig. 1 Part of elements and section of the tower

木塔整体向内收缩的形状,也使得结构更加稳固。各平座层顶部设置梁枋,上承地板,而底部只在上下楼梯之间的距离铺设地板,由乳栿承担,地板分布见图 2。平座层外檐上斗拱出挑部分铺设地板,边缘设置勾栏。各层平座宽度在 1.21 m~1.27 m 之间变化,勾栏高 1.09 m。



注:图中,四个八边形由外到内依次为二~五层明层楼板,另四个多边形从左到右依次为二~五层平座层楼板。

图 2 地板分布图

Fig. 2 Layout of floor

1.2 应县木塔整体建模简介

1.2.1 应县木塔建模过程

Revit 建模是使用基于族的图元,本次建模主要使用基于“公制常规族”的可载入族,部分采用系统族。共创建了 88 个可载入族,通过对族的修改,创建不同的类型,如表 1。整体建模以“层”为单位,以首层到第 2 层的建造过程为例进行说明,如图 3。

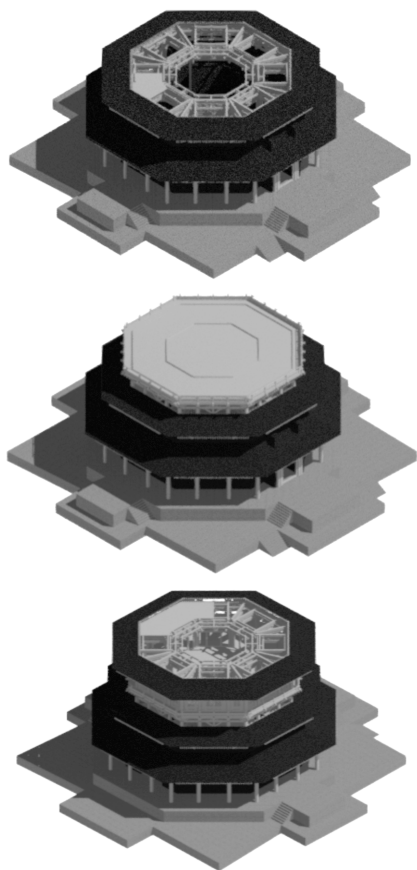


图 3 1 层-2 层平座-2 层建造过程

Fig. 3 Process of first floor-second puzuo floor-second floor

表 1 模型中包含的族

Tab. 1 Family of the model

模型	族类
斗拱种类	副阶柱头铺作, 副阶转角铺作, 副阶当心间补间铺作, 副阶次间补间铺作; 外檐柱头铺作, 外檐转角铺作, 外檐补间铺作, 内槽转角铺作, 内槽补间铺作; 平座内槽补间铺作, 平座内槽转角铺作, 平座外檐转角铺作, 平座外檐补间铺作, 平座外檐柱头铺作; 外檐斜面补间铺作, 外檐正面补间铺作, 内槽斜面补间铺作, 内槽正面补间铺作, 内槽东、西转角铺作, 内槽南、北转角铺作
用于创建斗拱的族	散斗, 替木, 齐心斗, 下昂, 由昂, 驼峰, 耍头, 泥道拱等, 素枋(开口向上), 华拱, 栌斗, 蜀柱, 楔子, 素枋(开口向下)
承重构件族	圆柱, 方柱, 枋, 副阶乳枋, 草枋, 椽, 带拱头乳枋
围护结构及楼梯族	宝刹, 格子门, 飞子, 百叶, 瓦, 踏道, 勾栏扶手, 屋顶, 平座勾栏, 泥层

1. 2. 2 斗拱直接建模过程

斗拱是木塔的主要部件, 由栌斗、交互斗等“斗”以及华拱、泥道拱、令拱等“拱”组成. 在直接建模过程中, 首先创建带有参数驱动的不同“构件族”, 再载入到相应的“斗拱族”中进行组装. 应县木塔使用“二等材”, 其中“材广”为材料的高, “材厚”为材料的宽; 斗拱“铺作数”为华拱和昂的总数加 3. 图 4 为 1 层内槽补间铺作斗拱及部分名词说明.

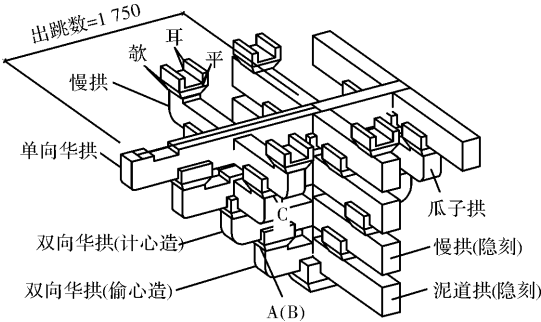


图 4 1 层内槽补间铺作及部分名词

Fig. 4 Bucket for first floor and part names

1. 3 采用二次开发的方式建立斗拱

在完成了直接建模过程后, 本文作者发现不同斗拱的构造及尺寸区别较大, 这在大规模建模中将是一项很繁琐的工作. 为实现简化建模过程、精确设计的目的, 提出了斗拱建模的二次开发技术.

1. 3. 1 Revit 二次开发流程

基于 .NET 环境的 Revit 二次开发, 主要步骤为

- (1)设置 Revit 开发环境, 添加相应于 Revit 版本的 Add-In Manager;
- (2)在 Visual Studio 中新建项目, 添加 Revit 引用 RevitAPI. dll 和 RevitUIAPI. dll, 以便调用相应的函数;
- (3)定义相应的类并编写代码;
- (4)重载 Execute()方法, 将 .dll 文件载入到 Revit 中.

1. 3. 2 斗拱创建及部分代码

首先, 把具有相同特征的部件归纳为同一类. 因此, 泥道拱、慢拱及瓜子拱等可归为一类, 在软件界面中命名为“泥道拱等”; 华拱、栌斗、交互斗以及散斗分别为一类. 同一类部件的创建方法相似, 下面介绍华拱、泥道拱和散斗的创建以及斗拱的组装.

(1) 华拱的创建

华拱分为“单向拱”和“双向拱”，与泥道拱垂直相交或斜交。华拱里转(位于外槽)和外转(位于外部)的“出跳数”一般不同。本文采用定义特殊参考点的方式来确定华拱的相关参数，华拱的创建分为以下两个步骤：

1) 分别定义函数 `Extrusion createShuangHuaGongExtrusion()` 和 `Extrusion createDanHuaGongExtrusion()` 创建双向和单向华拱，使最初创建的华拱底面位于 xy 平面内，长度方向沿 x 轴，Location Point(x, y, z)取值为(0, 0, 0)。REVIT API 中创建拉伸体的函数为 `Extrusion NewExtrusion(bool isSolid, CurveArrayarrayprofile, SketchPlane sketchPlane, double end)`。

2) 定义函数 `void createshuanghuaGong(double a, double b, double c)` 和 `void createdanhuaGong(double a, double b, double c, double angle)` 来分别引用上述函数，用于根据实际要求平移创建好的华拱。对于平移的函数为 `Move Element(Document document, ElementId elementIdToMove, XYZ translation)`。

参数 a 、 b 、 c 以及 $angle$ 分别代表华拱实际位置坐标以及要转动的角度。本文中， x 、 y 坐标为 0，因此 a 、 b 恒为 0。此外，根据华拱“铺作数”，可以按照华拱的每一跳所在平面依次进行创建，这里简称为“每一层”。因此， $z = (\text{歇} + \text{平} + \text{材广}) \times \text{“层数”}$ 。

在程序中输入图 4 中 A、B 点坐标(p, q, r)，其中， p 代表相应点的 x 轴坐标，用于确定华拱的出跳数，规定里转为正，外转为负； q 代表是否有拱头，规定有则取为 1，否则为 0； r 代表华拱是计心造还是偷心造，规定计心造取为 1，偷心造为 0。例如点(500, 1, 1)和(-600, 0, 0)代表的含义为里转出跳数为 500 mm、外转出跳数为 600 mm，拱头位于里转，且里转为计心造、外转为偷心造的单向华拱。

(2) 泥道拱等的创建

泥道拱的创建与华拱相似，但坐标含义不同。初始创建的泥道拱等底面位于与 xy 平面内，长度方向与 y 轴平行，且关于 xz 平面对称，因此仅需输入图 4 中 C 点参数即可。在程序中输入坐标(m, n)，其中 m 代表 C 点的 x 坐标，表示横向拱的位置； n 为拱长的一半。例如，点(0, 500)代表长度

为 1 000 mm 的泥道拱。

(3) 散斗的创建

散斗的创建分为两个部分，一部分为“歇”，另一部分为“平”和“耳”。使 Location Point 属性为(0, 0, 0)。散斗的创建分为以下两个步骤进行：

1) 定义函数 `Blend createSanDouBlend()`、`Extrusion createSanDouSolidExtrusion()` 以及 `Extrusion createSanDouVoidExtrusion()` 分别用于创建“歇”、“平”和“耳”以及对应的空心剪切。在创建好相应的拉伸体之后，通过函数 `Geom Combination Combine Elements (Combinable Element Array members)` 实现空心剪切。

2) 定义函数 `public void createSanDou(double a, double b, double c, double angle)` 来引用上述函数。

参数 a 、 b 、 c 以及 $angle$ 意义和取值同上。

(4) 斗拱的组装

设置斗拱底面中心位于原点，在界面中输入“每一层”中所有参考点的信息，采用 for 循环语句对数据进行访问，完成斗拱的组装。通过读取界面中输入的“斗拱名称”，作为斗拱的“类型名称”，并赋予材质参数，进行关联，通过函数 `FamilyType Current Type(get, set)` 添加族类型。图 5 为本程序界面及应用。

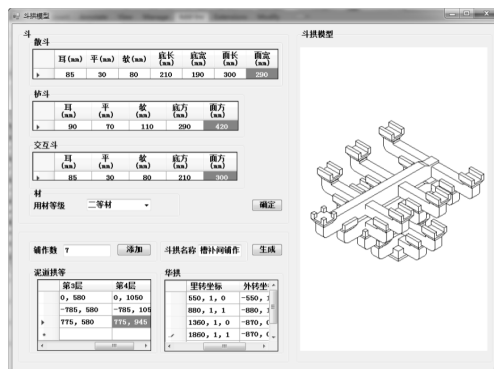


图5 程序界面

Fig. 5 The tab of the program

1.4 两种方法对比

在直接创建斗拱的方法中，需要首先创建好带有大量参数信息的部件，再进行组装，这无疑会增大创建难度。此时，每种斗拱属于一个族；采用二次开发的方法创建斗拱，参考点的信息通过图纸很容易获得。所有的斗拱将作为同一个族，载入到项目中，将大大简化建模过程并有利于族的管理。以下为部分代码：

```
private Result DataInitialize()
{
    _rvtApp=
m_commandData.Application.Application;
    _rvtDoc=
m_commandData.Application.ActiveUIDocument.
Document;
    createGong();
    FamilyManager familyManager =
_rvtDoc.FamilyManager;
    FamilyType currentType =
familyManager.CurrentType;
    if (currentType == null)
    {
string familyName = Convert.ToString(textBox2.Text);
currentType = familyManager.NewType(familyName);
    }
    string paraName = "材质";
    BuiltInParameterGroup paraGroup =
BuiltInParameterGroup.PG_MATERIALS;
    ParameterType paraType = ParameterType.Material;
    FamilyParameter materialParameter =
familyManager.AddParameter(paraName, paraGroup, paraType,
true);
    return Result.Succeeded;
}
```

2 应县木塔结构性能分析

为了进一步了解木塔的结构性能，有必要对应县木塔进行结构分析。在 REVIT 软件中，常规的钢结构或者混凝土结构在建模之后，可以通过导出功能较好地实现与结构分析软件的无缝对接；但对于应县木塔等古木结构，由于其结构部件较为复杂，结构模型在导出之后无法直接计算，需要进行一定的简化及调整方可分析得到较好的结果。本文对此进行了探索研究。

(1)通过 ABAQUS 软件对斗拱进行分析，得到其在弹性工作阶段的刚度，将其等效为杆系模型。对于斗拱物理模型的导出，经过反复试验，得到一种较理想的方式，具体步骤如下：

1)从 Revit 中将斗拱导出为 .sat 数据格式，但这种格式直接导入 ABAQUS 时会有些缺陷产生。

2)将上一步中的 .sat 文件导入到 CAD 软件中，再次导出为 .sat 格式文件。

3)打开 ABAQUS，导入上一步中由 CAD 软件导出的 .sat 文件，即可得到与原模型一致的分析模型。

应县木塔用材为华北落叶松，木材定义为各项异性材料。鉴于文章篇幅，此处不对 ABAQUS 分析过程进行详述，图 6 为四层柱头斗拱应力

云图。

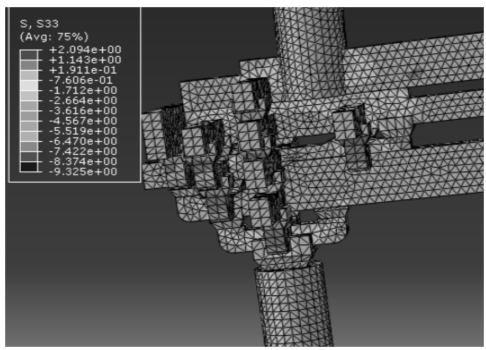


图 6 四层柱头铺作横纹压应力 S33

Fig. 6 Stress S33 of the bucket of the fourth floor

根据有限元分析结果以及文献[11]中确定斗拱刚度的办法，表 2 列出部分斗拱在竖向荷载作用下的刚度。其中，由于在有限元分析中，为节约计算成本，本文将各部件之间的接触定义替换为刚接，造成结果偏大的情况。

表 2 部分斗拱刚度

Tab. 2 The stiffness of part buckets

铺作名称	二层	三层	四层	五层
	柱头	柱头	柱头	柱头
本文刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	42	50	55	49
文献刚度/ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	35	41	49	48

(2)采用 SAP2000 软件进行结构整体分析。

通过 REVIT 软件导出 IFC 结构模型到 SAP2000 中，此时，由于构件较为复杂以及模型建造时的误差，在导入之后节点无法连接，进而无法计算。因此，要对导出的模型进行进一步的修改和简化之后才能作为分析模型使用。具体分为两方面：1)删除不必要的构造部件，比如格子门、瓦片等。2)在杆系结构模型上拖动节点，使各部件相互连接，并在 SAP2000 中增大节点误差范围来进一步减少误差。

本次分析中主要包括了恒载、活载、风荷载、地震作用。荷载工况包括了自重恒载、其它恒载、楼面活载、4 个方向的风荷载(分别为 0° 、 90° 、 180° 及 270°)以及两个方向的地震作用(EX、EY)。得到结构的前六阶模态如图 7，表 3 列出了本文及文献[12]中四种振型的频率比较。可以看出本文结果偏大，分析原因为，本文略去了屋檐等构件，使得结构刚度偏大。

根据分析结果可以看出，木塔在地震作用下

的震动主要发生在第二、三层,因此,该两层也是结构易发生破坏的地方,与文献[2]中指出的实际情况相符合.此外,本文与文献[12]的第一扭转振型均紧随前两个弯曲振型出现,这也间接说明了楼层的木质地板对木塔的约束支撑作用较弱,间接说明本文前面忽略地板作用的正确性.

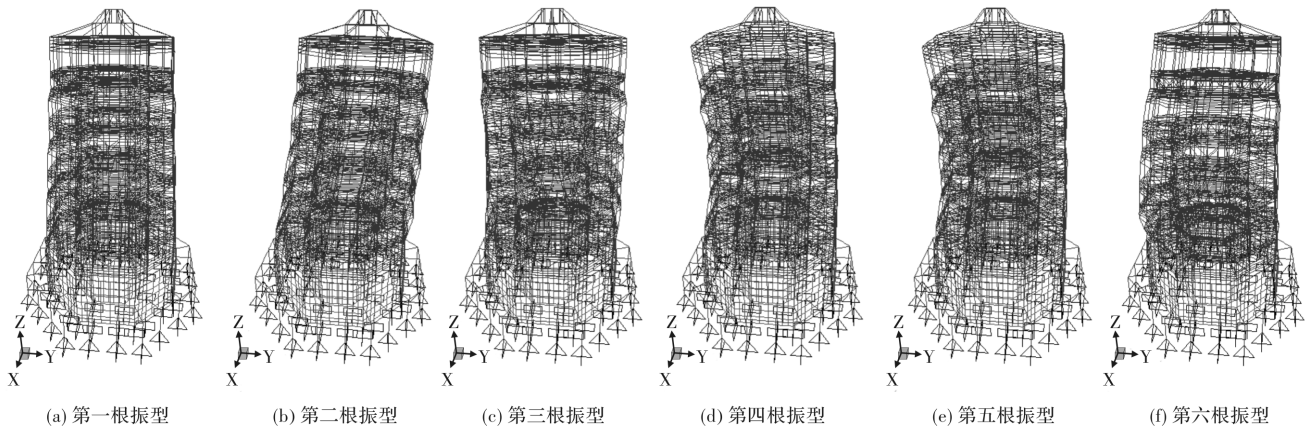


图 7 第 1—第 6 振型图

Fig. 7 Mode 1—Mode 6

3 对基于 BIM 的古建筑建模的体会

使用 BIM 建造古建筑模型,不仅能够准确的还原古建筑本身的样貌,而且能够对古建筑的信息做出进一步的统计. BIM 本身具有结构分析功能,能够实现建筑与结构的共同设计与分析,真正做到“建筑、结构一体化”.

(1)由于图纸信息不完善,对于古建筑的详细建模是一个比较大的挑战.此外,古建筑本身构造较复杂,又年久失修,保存的不是很完好,对于其体现的“玄”数等理念难以挖掘,更增加了研究难度.

(2)基于二次开发的斗拱建模技术,对于简化建模过程以及有效管理文件起到比较大的作用.能够减少设计者的工作量,弥补软件本身的一些不足.

(3)与传统三维软件相比, BIM 建模更加便捷,与行业接触更加紧密. BIM 可以实现对古建筑未来状态较准确的预测,其本身可以囊括大量信息,能够对古建筑的历史信息、材质信息以及尺寸信息做出系统的管理.

(4)通过 BIM 建模,还可以较快地建立起结构分析模型,这对于古建筑的性能评估起着重要的作用.

4 结语

(1)随着社会的进步,对于文化遗产的保护将会逐渐引起人们的重视.一种好的研究方式的提

表 3 部分振型频率					
Tab. 3 The frequency of part modes					
振型频率	第一	第二	第三	第四	扭转第一
本文频率/Hz	0.69	1.73	3.00	3.82	1.01
文献频率/Hz	0.64	1.69	2.92	3.80	0.99

出,将大大简化古建筑的保护工作.在 BIM 技术日益兴起的年代,这无疑为我们提供了巨大的契机.

(2)采用本文基于 REVIT 软件,选取应县木塔进行古建筑建模技术分析,以“族”为基础,完成了较为清晰、系统的模型信息,并基于 .NET 平台,结合 REVIT API 提出了斗拱建模的二次开发技术,降低斗拱创建的难度.

(3)对从 REVIT 中导出的杆系模型,通过 SAP2000 分析了木塔在风、地震等外力作用下的整体力学性能.文章对其他古木建筑的 BIM 建模技术及结构分析具有参考价值.

参考文献 References

- [1] 胡冀现. 中国传统建造术的现代应用_木构篇[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
HU Jixian. Modern Application of Chinese Traditional Building Technology_Wooden Structure[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [2] 陈明达. 应县木塔[M]. 北京: 文物出版社, 1966: 1-251.
CHEN Mingda. Yingxian Wooden Tower[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 1966: 1-251.
- [3] 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 Xiang. Research on Parameters and Assembly of Components of Ancient Official Buildings of Ming and Qing Based on BIM[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.

(下转第 381 页)

- al compression after high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 946-952.
- [19] 徐明, 王韬, 陈忠范. 高温后再生混凝土单轴受压应力—应变关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 158-164.
- XU Ming, WANG Tao, CHEN Zhongfan. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 158-164.
- [20] 冯超, 杨海峰, 宁纪源, 等. 高温后再生混凝土受压强度退化及微观结构性能分析[J]. 混凝土, 2016, 4: 24-27.
- FENG Chao, YANG Haifeng, NING Jiyuan, et al. Compressive strength degradation and micro-structure characteristics of recycled concrete after high temperature [J]. Concrete, 2016, 4: 24-27.
- [21] 万夫雄, 赵鹏辉, 连会杰, 等. 高温后再生混凝土强度与微观机理[J]. 混凝土, 2017, 1: 52-55.
- WAN Fuxiong, ZHAO Penghui, LIAN Huijie, et al. Strength of recycled concrete after high temperature and its microstructure mechanism [J]. Concrete, 2017, 1: 52-55.
- [22] 张冲. 高温后再生混凝土的残余抗压强度及抗冻耐久性试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- ZHANG Chong. Experimental research on residual compressive strength and freeze-thaw durability of recycled aggregate concrete after high temperatures [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [23] 贾福萍, 王永春, 渠艳艳, 等. 冷却方式和静置时间对高温后混凝土残余强度影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 400-405.
- JIA Fuping, WANG Yongchun, QU Yanyan, et al. Influences of various cooling methods and standing time on residual strength of concrete after elevated temperature exposure[J]. Journal of Building Material, 2011, 14(3): 400-405.
- [24] HWANG K, NOGUCHI T, TOMOSAWA F. Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(12): 2269-2276.

(编辑 吴海西)

(上接第 374 页)

- [4] 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): 479-485.
- WANG Ru, SUN Weixin, ZHANG Xiang. Research on Parameters and Assembly of Components of Ancient Official Buildings of Ming and Qing [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013, 45(4): 479-485.
- [5] 朱磊. 中国古代早期木结构建筑信息模型-BIM-建构的实践分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHU Lei. Practice analysis on early ancient chinese wooden structure building information modeling (BIM) [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [6] 刘昊. 基于点云的古建筑信息模型-BIM-建立研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- LIU Hao. Research on Building Ancient Architecture Information Model Based on Point Cloud [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.
- [7] 孙卫新. 基于 BIM 的明清古建筑构件参数化信息模型实现技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- SUN Weixin. Research on parameters and assembly of components of ancient official buildings of ming and qing based on BIM [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2013.
- [8] 张慎. 基于 RevitAPI 建筑消防喷头辅助建模软件开发 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2015, 7(6): 43-47.
- ZHANG Shen. Modeling of fire sprinkler in construction based on RevitAPI [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2015, 7(6): 43-47.
- [9] 薛忠华. RevitAPI 在空间网格结构参数化建模中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(1): 58-63.
- XUE Zhonghua. Application of Revit API in Parametrization Modeling of Spatial Grid Structures [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(1): 58-63.
- [10] 梁思成. 梁思成全集. 第十卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1-162.
- LIANG Sichen. Complete Collection of Liang Sicheng. Volumn 10th [M]. Beijing: China Architecture and Buiding Press, 2007: 1-162.
- [11] 钟永. 应县木塔料拱的力学性能分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHONG Yong. Modelling the structural behavior of Dougong brackets in Yingxian wood pagoda [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [12] 张舵. 木结构古塔的动力特性分析[D]. 湖南: 国防科技大学, 2002.
- ZHANG Duo. Dynamic analysis on struetural charae-teristics of aneient timber tower [D]. Hunan. National University of Defense Technology, 2002.

(编辑 吴海西)