

DOI:10.19701/j.jzjg.LS230281

参数化设计在某复杂外形超高层连体建筑外框结构中的应用

崔济东, 张俊毫, 李雪蕾, 陈寅, 廖耘
(广州容柏生建筑结构设计事务所(普通合伙), 广州 510180)

摘要: 某 320m 超高层连体建筑, 由于存在立面复杂、斜柱多、柱位限制规则多、各层平面轮廓无一相同等特点, 给外框结构模型的准确、高效建立带来了诸多挑战。在此背景下, 研究了外框结构参数化生成技术, 具体包括建筑模型的数据预处理、柱位的算法优化、楼面梁的规则化等, 并基于 Rhino 软件的 Grasshopper (GH) 参数化设计平台及自主研发的外框柱位置优化程序 ColPosOpt, 建立了包括外框柱、外框梁、封边梁、次梁等构件在内的成套外框结构参数化自动建模技术, 并应用在该连体建筑上。结果表明, 该成套技术可有效解决复杂外框高层结构的建模痛点、显著提高设计分析的效率和精确度。

关键词: 超高层连体建筑; 复杂立面; 外框结构生成; 参数化设计; 柱位优化

中图分类号: TU318⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-848X(2026)04-0015-07

[引用本文] 崔济东, 张俊毫, 李雪蕾, 等. 参数化设计在某复杂外形超高层连体建筑外框结构中的应用[J]. 建筑结构, 2026, 56(4): 15-21. CUI Jidong, ZHANG Junhao, LI Xuelei, et al. Application of parameterized design in exterior frame structure of a complex shaped super high-rise connected building[J]. Building Structure, 2026, 56(4): 15-21.

Application of parameterized design in exterior frame structure of a complex shaped super high-rise connected building

CUI Jidong, ZHANG Junhao, LI Xuelei, CHEN Yin, LIAO Yun
(RBS Architectural Engineering Design Associates, Guangzhou 510180, China)

Abstract: A 320m super high-rise connected building, due to its complex facade, multiple inclined columns, many restriction rules of column position and no identical plane contour of each floor, has brought many challenges to the accurate and efficient establishment of the exterior frame structural model. In this context, the parameterized generation technology of exterior frame structures was studied, including data preprocessing of building models, algorithm optimization of column positions, regularization of floor beams, etc. Based on the Grasshopper (GH) parameterized design platform of Rhino software and the independently developed ColPosOpt program for optimizing the position of exterior frame columns, a complete set of parameterized automatic modeling technology for exterior frame structures, including exterior frame columns, exterior frame beams, edge beams, secondary beams and other components was established, and applied to the connected building. The results show that this complete set of technology can effectively solve the modeling pain points of complex exterior frame high-rise structures, significantly improve the efficiency and accuracy of design analysis.

Keywords: super high-rise connected building; complex facade; exterior frame structure generation; parametrized design; column position optimization

0 引言

随着经济与技术的发展, 建筑的造型越来越复杂多样。面对这些造型复杂的建筑, 传统的结构建模方法工作量大、准确性难以保证且效率低下, 难以适应当下结构精细化分析的需求。尤其是在方案阶段, 建筑师经常需要对方案做出调整, 若采用传统结构建模方法, 需要耗费大量时间重新手工建模, 使得结构工程师难以在短时间内反馈建筑的各

种修改, 严重影响结构工程师与建筑师之间的配合与沟通, 结构设计工作也难以有效推进。而参数化建模技术是目前解决上述问题较为有效的途径。建筑结构设计领域中的参数化建模是指综合利用三维图形可视化及编程工具将建筑结构对象数据化和可视化, 并通过定义尽量少的控制参数描述对象几何关系的一种建模方法。这种建模方法的主要优点为: 1) 可快速适配设计过程中的反复修改,

加快设计迭代过程;2)便于实现建筑和结构的一体化,精确反映建筑师的设计意图。

目前,结构参数化技术已在多个超高层及大跨空间结构^[1-8]中得到了应用,也有部分文献^[9-17]通过二次开发的方式,对现有参数化工具进行了扩展,但着重讨论复杂立面超高层外框结构参数化设计的文献依然较少。基于此,本文以某外形复杂的超高层连体建筑为例,基于 Rhino 软件的 Grasshopper (GH) 参数化设计平台^[18]和自主研发的外框柱位置优化程序 ColPosOpt,着重介绍参数化技术在这类复杂立面超高层外框结构自动生成中的应用。

1 复杂体型带来的结构建模难题

本项目所在地块的整体建筑效果如图 1 所示,为多栋塔楼高低位交错连体组成的复杂建筑群,本文主要讨论其中的三塔高位连体建筑(B2C1C2 三连体),其由 B2、C1、C2 三栋塔楼及塔楼之间的高位连桥(C1B2 连桥、C2C1 连桥)组成。C2、C1 塔楼和 B2 塔楼的建筑高度分别约 320、245m 和 266m, C1B2 连桥及 C2C1 连桥的最大跨度约 90m。建筑整体立面为连续流动的设计风格,塔楼各层的平面轮廓也跟随立面逐层变化,无一相同。以最高的 C2 塔楼为例,其各层平面轮廓如图 2 所示。

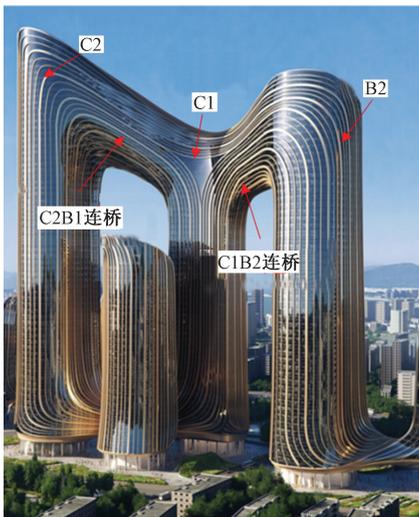


图 1 整体建筑效果图

在方案前期,建筑师和业主对结构外框柱位提出了一系列需遵循的复杂规则,具体如下:

(1)贴边斜柱规则:外框柱需尽量贴近外立面做成斜柱,以免影响建筑内部空间。

(2)最小退距规则:为满足幕墙安装要求,柱离外立面不能太近,柱外皮离楼板边需不小于 1m、离幕墙完成面不小于 1.4m。

(3)结构幕墙对位倾斜规则:立面每隔 12m 左右设有外凸的幕墙装饰条,建筑要求结构外框柱必

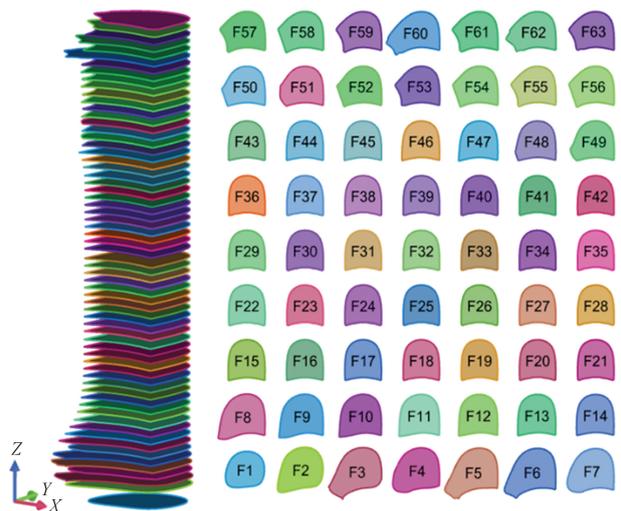


图 2 C2 塔楼各层平面轮廓

须对位藏在幕墙装饰条后,柱的倾斜方向也只能垂直于幕墙装饰条单向倾斜,如图 3 所示。

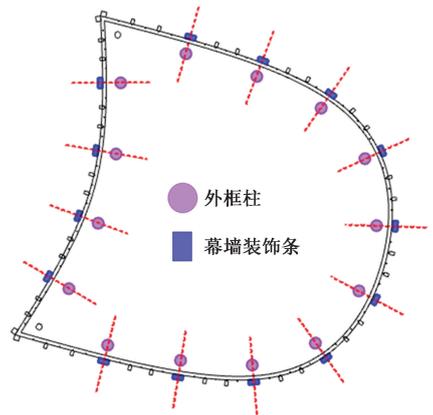


图 3 结构柱位和幕墙装饰条的对应关系

(4)最小斜率规则:外框柱为混凝土柱,如果柱斜率小于 $1/50$,施工比较困难,因此要求控制斜柱的斜率不小于 $1/50$,也即斜柱的最小角度为 1.146° ,小于此斜率的柱需采用直柱(图 4)。

(5)最大斜率规则:斜柱最大斜率为 $1/20$,也即斜柱的最大倾斜角度为 2.86° 。如果大于这个角度,要解决斜柱水平分力带来的拉力问题,需要付出较大的代价。

(6)集中转折规则:斜柱只在各避难层顶板转折,也即每间隔约 50m 变化一次斜率,如图 4 所示。虽然斜柱层层可以更好地适配建筑立面,但施工过于复杂。

通过上述复杂规则确定各层柱位后,需要逐层布置楼面梁,大量斜柱的存在导致框架梁与柱连接的位置层层不同,同时还需要考虑角部大悬挑和核心筒收进的影响(图 5)。因此柱和楼面梁的人工建模工作量极大,难以满足方案节点快速迭代的进度

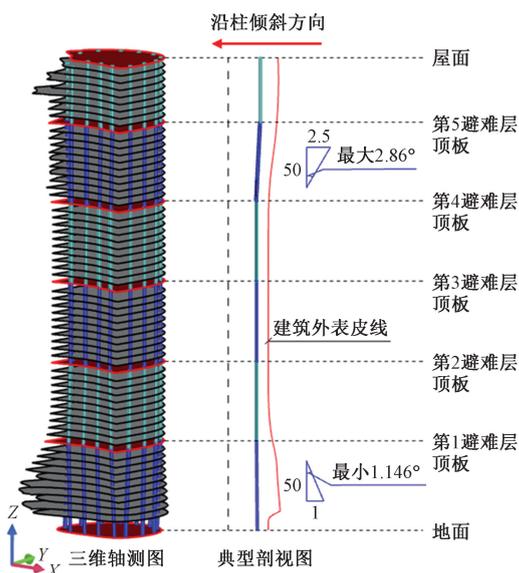


图 4 结构外框柱斜率限值及转折位置示意

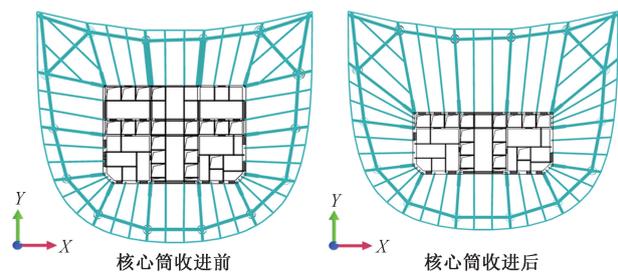


图 5 核心筒收进前后典型平面梁布置图

要求,必须考虑参数化自动建模方案。

2 多平台混合编程建模方案概述

2.1 整体模型分区定义

由于项目为三塔连体结构,首先将整体模型划分为不同的塔楼区域和连体区域,以便于参数化建模,如图 6 所示。本文将着重阐述塔楼区域的参数化建模过程,连体区域从略。

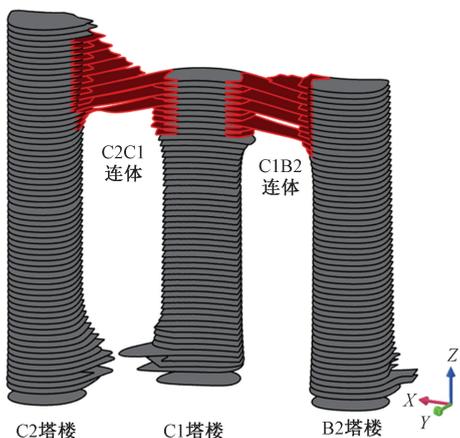


图 6 整体模型分区定义

2.2 解决方案概述及流程图

上述诸多外框柱位规则经过数学建模抽象后,

结构外框柱位优化不再是简单的连续变量优化问题,而需要考虑离散变量的影响;也不再是单一变量优化问题,而具有多个变量和约束条件。因此仅靠 Rhino 软件的 GH 参数化平台难以满足要求,必须采用多平台混合编程技术。

模块划分及流程图见图 7。主要思路为:1) 利用 GH 可视化平台完成建筑模型的数据提取,获得结构外框设计所需的几何数据,并转化为外部程序可读的坐标数据;2) 利用通用编程软件完成对柱位优化问题的数学建模,设计算法求出最优柱位;3) 柱位确定后,再次回到 GH 可视化平台,基于楼面梁系统的布置规则,自动生成封边梁、环向外框梁、径向外框梁、次梁、特殊构件等;4) 导入连体区域模型整合为整体模型后,利用自主开发的接口程序将 Rhino 模型转换为计算模型。



图 7 模块划分及流程图

3 建筑模型的数据预处理

建筑方案提供的 Rhino 模型由点、线、面等几何元素构成,利用 Rhino 软件内置的 GH 平台编制一组前处理程序,将由曲线和曲面表达的建筑几何数据转化为外部程序可读的离散坐标数据。本项目需要输出给外部程序的初始数据主要包括以下四类:以离散点阵表达的各层轮廓线、柱倾斜方向向量、柱转折位置的避难层标高、初始柱位坐标。

3.1 提取楼层平面轮廓线

在 Rhino 中编制专属电池,以建筑的外表皮对象及各楼层的标高数组为输入参数,提取各楼层平面的轮廓线,如图 8 所示。得到塔楼各层轮廓线后,再按某个给定间距(例如 1m)等分各层轮廓线,得到一系列表征平面轮廓的离散点阵,作为后续柱位优化的边界域,如图 9 所示。

3.2 确定柱倾斜方向向量

根据结构幕墙对位倾斜规则,外框柱位必须始终藏于幕墙装饰条之后,这直接限定了柱位只能沿

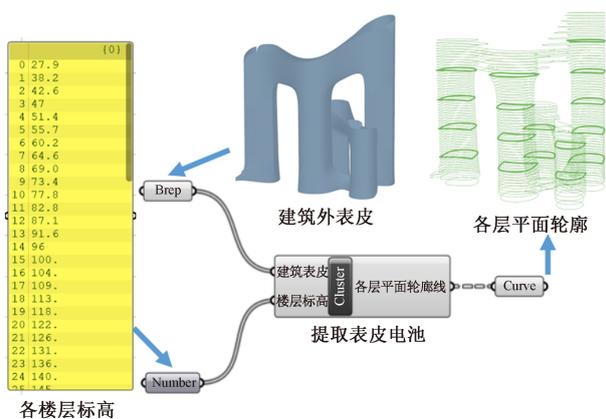


图8 由表皮切出各层平面轮廓

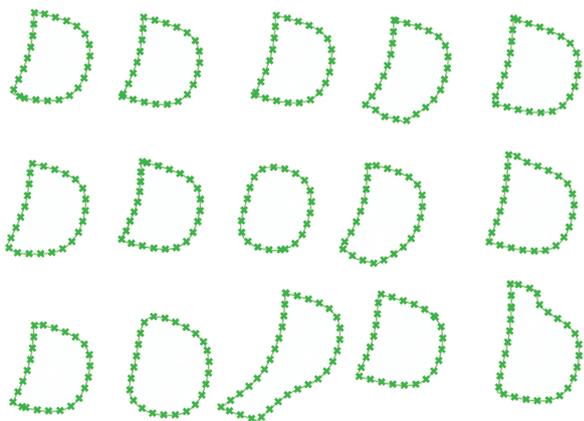


图9 各层平面轮廓离散点阵

垂直于幕墙装饰条的方向变化。以矩形截面幕墙装饰条的几何中心为起点,沿 XY 平面作幕墙装饰条的法向量,得到各柱的倾斜向量,如图 10 所示。

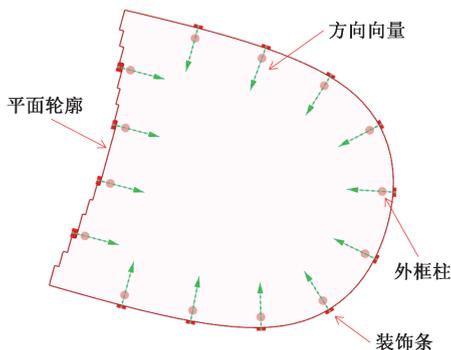


图10 柱位倾斜方向向量示意图

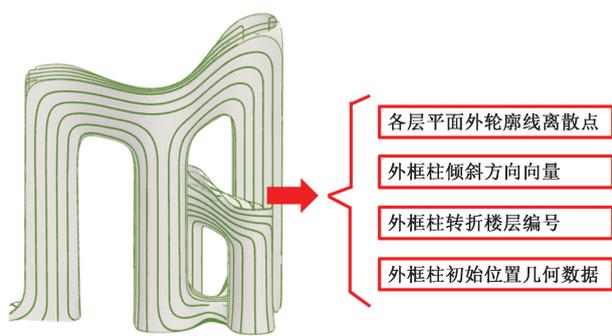


图11 数据预处理过程

3.3 确定初始柱位坐标

获得柱倾斜向量及平面各层轮廓后,沿着柱倾斜向量向各层建筑外轮廓线分别投影得到一系列与外轮廓相交点的坐标矩阵,作为后续各层柱位优化前的初始柱坐标。

3.4 确定柱转折位置

允许柱进行转折的标高位置可通过转折楼层标高数组来直接指定,本项目中转折标高均为各避难层顶板标高。

通过以上多个步骤,结构外框参数化设计需要的所有初始几何数据都已被转化为坐标数据,可供外部程序直接调用,如图 11 所示。

4 柱位的算法优化

4.1 优化算法

本工程外框柱位置的限制条件虽然非常多,但仍然可以从多个方面进行梳理简化,减少优化计算量:1) 每根从下到上的柱都是一个独立的优化问题,其柱位优化与其他柱无关;2) 每根柱的位置取

值范围可由其初始柱位及幕墙完成面完全限定;3) 虽然约束条件非常多,但优化的目标函数只有一个,即满足所有给定约束条件的前提下,各层柱与外轮廓的距离之和最小,用式(1)表达。

$$\min f = \sum_{j=1}^n \Delta_j \quad (1)$$

式中: Δ_j 为第 j 层柱与外轮廓的距离; n 为楼层总数。

记首层柱与外轮廓的距离为 Δ_0 , 从下到上整根外框柱的分段数为 m , 第 i 段柱的斜率为 θ_i , 则柱的位置可由 m 个分段斜率及首层偏离量 Δ_0 完全确定, 即每根从下到上的柱只有 $m+1$ 个独立的设计变量 ($\Delta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$)。根据这 $m+1$ 个设计变量, 结合楼层高可以得到第 j 层的柱与外轮廓的距离 Δ_j 的计算公式, 进一步可将目标函数式(1)整理为式(2)的形式。

$$\min f = \sum_{i=1}^m (\alpha_i \theta_i) + \beta \Delta_0 \quad (2)$$

式中 α_i 和 β 均为常数, 具体数值与楼层层高及外框柱转折位置相关, 其表达式由楼层层高及外框柱转折位置唯一确定。

由式(2)可见, 目标函数为 $m+1$ 个独立设计变量 ($\Delta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$) 的线性组合, 整个柱位优化问

题是凸优化问题,其最优解可由线性规划、遗传算法、蚁群算法等多种成熟算法求得,具体算法原理不再赘述。

4.2 优化程序

根据前述提到的优化算法,采用 C++ 语言^[19] 编制了通用的柱位优化程序 ColPosOpt,程序界面见图 12。

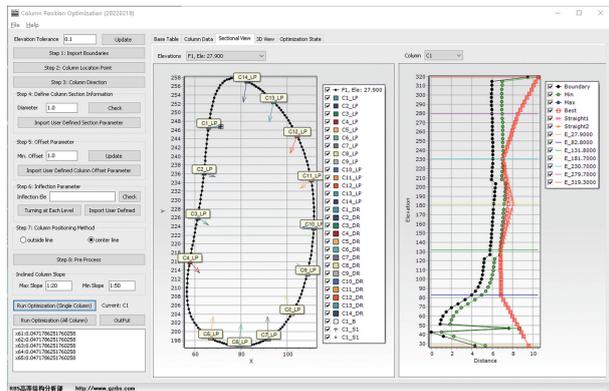
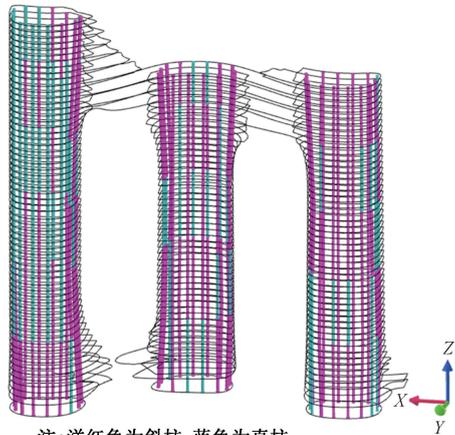


图 12 ColPosOpt 柱位优化程序界面

ColPosOpt 程序允许用户指定柱的截面尺寸、柱与建筑外皮的最小退距、柱的转折楼层位置、柱的距离权重系数、柱的对齐方式(居中对齐或平外皮)、柱的斜率限值等参数,以实现最通用的柱位优化功能。优化后的柱可以通过文本或 cad 文件的形式导出,方便接入 Rhino 软件进行后续外框梁的生成。

将第 3 节预处理的建筑数据导入 ColPosOpt 软件,设置好相关参数,点击运行优化按钮,即可快速完成所有外框柱的柱位优化,得到整栋塔楼与建筑外轮廓距离最近,且满足所有限制条件的最优柱位,如图 13 所示。



注:洋红色为斜柱,蓝色为直柱。

图 13 最优柱位三维图

5 楼面梁的参数化生成

5.1 生成封边梁

在 Rhino 中将各层楼面轮廓线往内偏移某个固定距离 L (L 为楼板退距与 $1/2$ 封边梁宽之和),即可得到各层封边梁中心线,如图 14 所示。

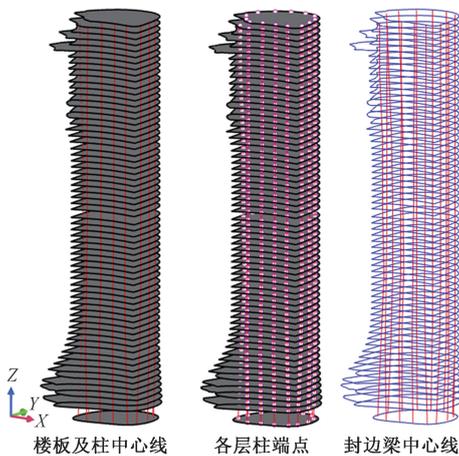


图 14 各楼层柱端点及封边梁中心线示意

5.2 生成框架梁

框架梁按以下规则生成:1)在 Rhino 中导入前述外部程序生成的最优柱位置,得到各层外框柱中心点坐标;2)将各核心筒标准层平面导入 Rhino,提取其外边线并离散化为点集;3)外框柱和核心筒之间的径向框架梁按梁跨度尽量小、优先选择墙肢拐角位置搭梁、连梁上不可搭梁等几个限制条件,通过多目标遗传算法,从点集选出符合连接条件的点,并生成径向框架梁布置;4)沿着各层柱中心连线生成环向框架梁。生成外框梁步骤见图 15。

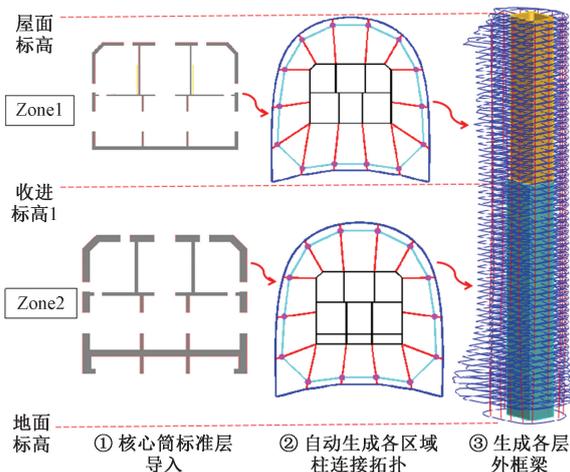


图 15 生成外框梁步骤

5.3 生成楼面次梁

以核心筒外边线、径向框架梁线、封边梁线为

界,可将各层核心筒外楼板分为不同片区类型,并为每种类型指定相应的次梁布置规则,从而得到所有片区的次梁线,如图16所示。例如,A片区为两端均分布梁规则,B片区则为垂直外框梁均分规则,B片区的角部双向悬挑梁最远端交点P则由最小退距原则确定。

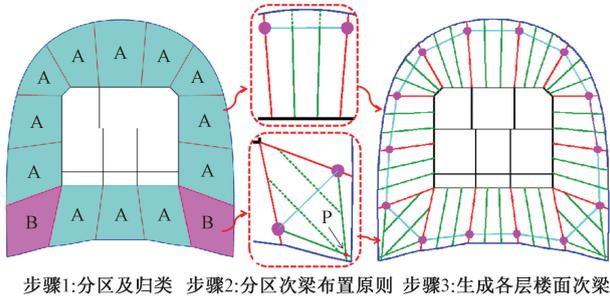


图16 生成次梁步骤

5.4 封边梁分段取直

5.1~5.3节已完成楼面梁系统的参数化建模,但由于建筑外轮廓线为曲线,因此采用固定退距得到的封边梁线也是曲线,无法直接导入结构计算分析软件。因此需要对封边梁进行分段取直拟合修正:1)步骤1,以封边梁和径向主次梁的交点为界,将封边梁断开成几段曲线;2)步骤2,沿曲线端点S、E作直线Line并求其中点 O_1 ,计算其与曲线中点 O_2 的距离 h ,如果 $h > tol$ (tol 为外观允许误差),则将曲线在中点位置断开为两个曲线片段,并将直线Line删除,否则保留直线;3)步骤3,重复步骤2,直至所有直线满足误差要求,此时直线Line的集合为符合外观精度要求且分段最少的封边梁中心线。重建封边梁递归算法步骤示意图见图17。

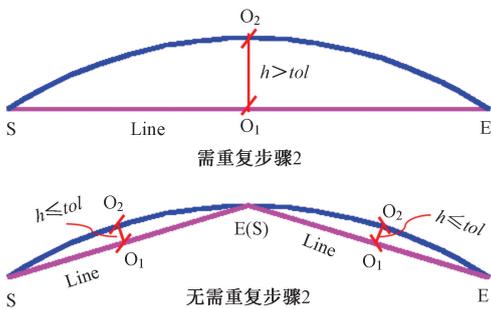


图17 重建封边梁递归算法步骤示意

6 结构模型的整合生成

在完成各塔楼外框模型,并导入同样采用参数化方式生成的连体区域模型后,将各部分模型基于同一世界坐标组合为整体模型,再利用接口程序即可将Rhino模型转换为结构计算模型。最终生成的结构整体模型如图18所示。

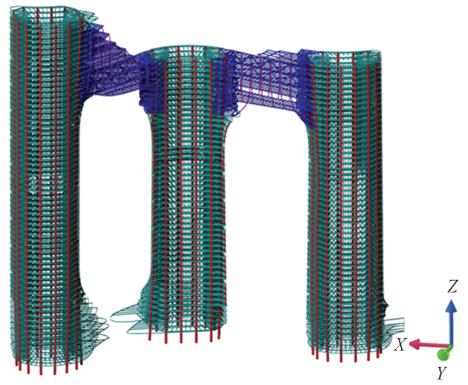


图18 结构整体外框模型示意

7 结论

本文以某320m复杂立面超高层连体建筑为例,讨论了基于Grasshopper参数化设计平台编程和自主研发的外框柱位优化程序ColPosOpt相结合的外框参数化自动生成技术,主要结论有:

(1)Rhino软件及Grasshopper可视化编程插件相结合,能实现便捷的参数化设计,其实时预览功能,让工程师能以“所见即所得”的方式,直观地测试结构方案。

(2)ColPosOpt柱位优化程序允许用户指定柱的截面尺寸、柱与建筑外皮的最小退距、柱的转折楼层位置、柱的距离权重系数、柱的对齐方式(居中对齐或平外皮)、柱的斜率限值等多种参数,可实现最通用的柱位优化功能。

(3)基于Grasshopper参数化设计平台编程和自主研发的外框柱位优化程序ColPosOpt相结合的外框参数化自动生成技术具有通用性,可有效提高结构工程师的工作效率。

参考文献

- [1] 彭武. 上海中心大厦的数字化设计与施工[J]. 时代建筑,2012(5):82-89.
- [2] 邵韦平,陈颖. 数字技术语境下的设计实现——凤凰国际传媒中心数字设计实践[J]. 世界建筑,2013(9):96-100,136,138.
- [3] 程煜,刘鹏,Dorothee Citerne,等. 结构参数化设计在北京CBD核心区Z15地块中国尊大楼中的应用[J]. 建筑结构,2014,44(24):9-14.
- [4] 龙甘,戚向明,胡达敏,等. 复杂超高层建筑结构数字化设计方法探索[J]. 建筑结构,2022,52(19):74-80.
- [5] 王杰,张慎,尹鹏飞. 某超限高层建筑结构方案智能比选[J]. 建筑结构,2022,52(23):107-113.
- [6] 张慎,尹鹏飞. 基于Rhino+Grasshopper的异形曲面结构参数化建模研究[J]. 土木建筑工程信息技术,

- 2015,7(5):102-106.
- [7] 刘凯,陈翔,颜涛. 基于 Grasshopper 参数化设计的异形空间网架结构建模新方法 & 结构比选[J]. 建筑结构,2018,48(21):81-83.
- [8] 高鸣,燕东强,张建亮,等. 参数化建模在空间网格结构中的应用[J]. 建筑结构,2013,43(17):149-151.
- [9] 何铭基,吴轶,黄泰赞,等. 基于 Grasshopper 的空间网格结构快速建模程序编制与应用[J]. 建筑结构,2018,48(11):78-83.
- [10] 张明山,陈可鹏,徐铨彪,等. 基于 C#与 Grasshopper 的空间结构参数化建模程序开发与工程实践[J]. 空间结构,2023,29(4):49-56.
- [11] 张慎,尹鹏飞,王杰,等. 超高层建筑结构方案智能设计工具的开发与实现[J]. 建筑结构,2022,52(23):100-106,138.
- [12] 杨律磊,张谨,孙意斌,等. 参数化技术在超高层结构设计中的应用[J]. 建筑结构,2022,52(20):29-37.
- [13] 乔鑫荣,周东明,马培建,等. 基于 Revit 的钢结构节点参数化建模软件开发与研究[J]. 低温建筑技术,2023,45(2):71-76.
- [14] 董爱平,王海涵,李国杰,等. 基于 Revit 的网架参数化建模[J]. 土木工程建筑信息技术,2018,10(3):57-61.
- [15] 陈柯,李迅涛,吴兵,等. 结构参数化建模在大跨空间钢结构中的应用[J]. 土木工程建筑信息技术,2021,13(2):145-152.
- [16] 文志彬,罗毅,吴琴锋,等. 基于 Dynamo 的桁架钢筋混凝土叠合板参数化设计[J]. 建筑结构,2022,52(18):128-132.
- [17] 车冠宇,毛伟栋. Revit+Dynamo 参数化隧道模型构建体系探析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2018,14(4):246-248.
- [18] 曾旭东,王大川,陈辉. Rhinoceros & Grasshopper 参数化建模[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [19] 普拉塔. C++Primer Plus 中文版[M]. 5 版. 北京:人民邮电出版社,2005.