

基于 BIM 技术的异形空间结构参数化设计

肖时祥^{1,2} 布欣² 王新武²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454003;
2. 洛阳理工学院土木工程学院, 洛阳 471023)

【摘要】设计人员传统的设计思路为根据设计经验对建筑造型和结构进行设计, 而场馆建筑造型独特且复杂, 设计难度大, 传统的设计方法繁琐且需消耗大量的设计资源, 不能很好地解决异形场馆建筑结构中的复杂问题。本文以某异形空间结构为研究对象, 采用参数化技术对该异形空间结构进行设计, 将 BIM 设计理念融入设计中, 解决结构选型分析问题, 运用 Grasshopper 建立该结构的参数化模型, 并运用 Abaqus 对所建立的参数化模型进行计算分析和结构力学特性的优化, 最后利用 BIM 软件进行三维模型应用, 为结构工程师解决异形空间结构的设计提供新的思路和方法。

【关键词】参数化技术; 异形空间曲面; 有限元分析; BIM 技术; 空间节点

【中图分类号】 TU17

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-7461 (2024) 02-0070-06

【DOI】 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2024.02.12

引言

BIM 参数化设计方法作为建筑设计数字化转型过程的重要组成部分, 将在未来一段时间内成为建筑设计领域的热点问题。异形空间建筑结构^[1] 具有很大的非常规性, 在静力学方面主要表现为复杂的空间特性影响了荷载的分布、结构强度、结构刚度和稳定性, 增加了分析与设计的难度; 动力学方面主要表现为空间整体动力特性的复杂程度造成了抗震设计和复杂空间节点的设计难度。参数化研究可以帮助建筑师和工程师更准确地处理异形空间结构的几何问题, 并模拟和分析复杂的空间结构力学特性, 以确保结构的安全和稳定。因此, 参数化研究在异形空间建筑结构设计具有重要的意义。

参数化设计方法适用于自由曲面结构、不规则网格结构、薄壳结构、非欧几里得几何结构等。异形空间结构设计存在刚性假设限制、几何形态复杂、设计和施工协调难等问题。本文采用参数化设计方法^[2] 设置屋面边缘和支撑结构起伏线参数, 以及构件截面尺寸参数, 参数间相互关联并动态调整, 实现有限元批量计算优化结构方案, 具体设计方法的流程如图 1 所示。

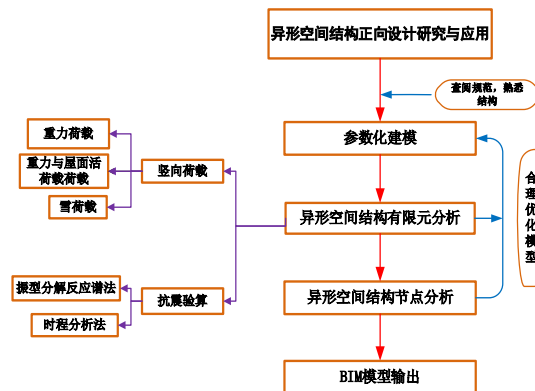


图 1 研究流程图

1 参数化建模

1.1 分析模型概述

本设计案例采用某异形空间钢结构, 包括网架结构、支撑结构及相连接的节点综合而成。空间网架结构和支撑结构的轮廓和高差均由正弦函数控制。上部网架结构采用椭圆形轮廓, 支撑结构为环形, 上下各三组支撑点受力, 且上部三组支撑点连接在网架结构下弦杆的节点上。考虑到支撑结构跨度较大, 增设拉结杆以保证整体稳定性和双支撑的变形一致性。

【基金项目】河南省高校青年骨干教师培养项目 (编号: 2020GGJS244)

【第一作者】肖时祥 (2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构工程数字化研究。

【通信作者】布欣 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 钢结构方面的教学与研究。

1.2 参数化构建模型

为了简化异形空间结构分析并更清晰地研究节点应力分布,采用线条和曲面几何元素建立几何信息模型。上部网架结构用线条表示,并设定杆件截面特性;主体、上部和基础支撑节点则用曲面表示。将模型转化为多尺度有限元模型,结合梁和壳单元,既节省计算资源,又能精确获取结构力学指标。

上部网架结构由间距为 2.1m 的两个异形曲面通过 LunchBox 插件设置曲面间距、弦杆环向长度、弦杆轴向长度和上弦杆中心部位汇交杆件个数四个参数,实现双层空间网架结构中复杂连杆的空间几何关系,弦杆方向表示如图 2 所示。

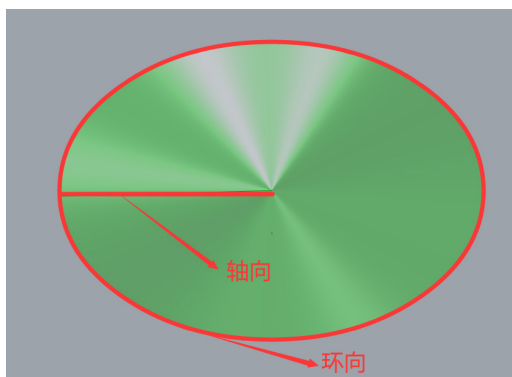


图 2 弦杆方向图

上部网架结构^[3]最外边缘线水平投影为椭圆形,长半轴为 20m,短半轴为 14m,由正弦函数控制环向和轴向曲线起伏,生成异形曲面。采用几何线元素向曲面过渡的方法实现网架与支撑的连接节点部位的设计,网架结构模型如图 3 所示。

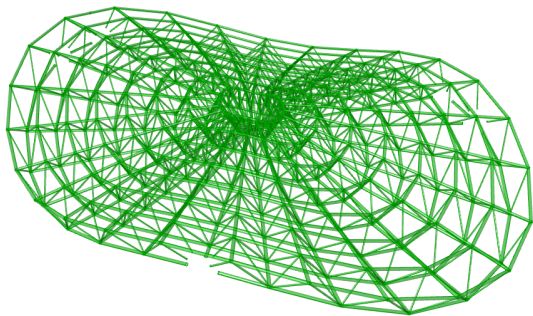
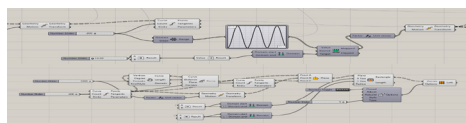
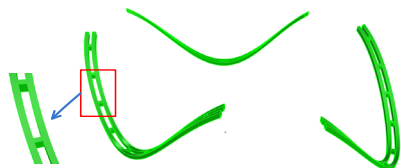


图 3 网架结构模型图

设置支撑起伏高度和间距两个参数,利用遗传算法^[4,5]计算参数最优解,实现支撑结构水平投影为椭圆形。在双支撑间隙中设置控制点数、截面高度和宽度参数,以控制拉结杆的位置和形状,增强双支撑结构的稳定性和变形协调性。支撑结构几何模型的参数化电池组图和支撑结构模型如图 4 (a) ~ (b) 所示。



(a) 支撑结构电池组图



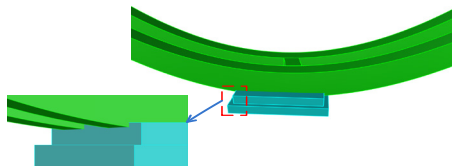
(b) 支撑结构模型图

图 4 支撑结构构建电池组图及模型图

通过设置嵌入厚度参数、支座层高、支座底层与上层放大比例系数、上层支座截面尺寸四个参数来设计支座形状及连接问题。其构建电池组图及结构模型如图 5 (a) ~ (b) 所示。



(a) 支座电池组图



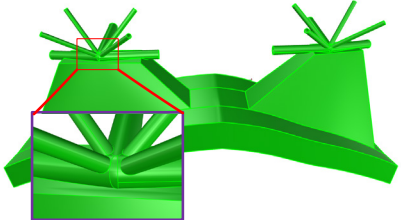
(b) 支座模型图

图 5 支座构建电池组图及模型图

为避免上部网架结构节点处构件出现应力集中和增强该位置结构稳定性,将双支撑之间的间隙通过具有相同弧度的钢板连接。其构建电池组图及结构模型如图 6 (a) ~ (b) 所示。



(a) 节点电池组图



(b) 节点模型图

图 6 节点构建电池组图及模型图

完成上述构建各构件模型后,对构件进行分类整理,并对网架部分进行实体建模,该结构整体计算模型如图 7 所示。

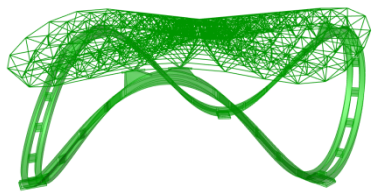


图 7 结构整体计算模型图

2 异形空间结构有限元分析

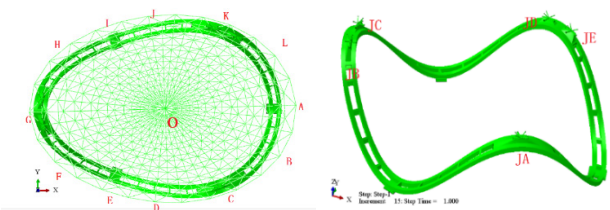
2.1 有限元分析前处理

将参数化几何模型通过 IGES 数据文件传递到有限元软件 Abaqus 中,并赋予相应的材料参数。该异形空间结构各构件均采用 Q345 钢,密度 $\rho=7.89\times 10^{-9}\text{t/mm}^3$,弹性模量 $E=210\text{GPa}$,泊松比 0.33,并考虑随动强化非线性本构模型。该异形空间结构的各构件截面尺寸如表 1 所示。

表 1 各构件截面尺寸表

构件名称	截面尺寸
网架弦杆	半径 100mm,壁厚 16mm 的圆管
网架腹杆	半径 50mm,壁厚 8mm 的圆管
支撑整体	厚度 40mm 的钢板
支座	厚度 38mm 的钢板
节点网架弦杆	厚度 16mm 的钢板
节点网架腹杆	厚度 8mm 的钢板
节点连接构件	厚度 18mm 的钢板

为了方便描述不同工况下结构的响应,以 XOY 为基准面,在模型四周用字母 A-L 编号,中间位置为 O,节点用 JA-JE 编号。其模型编号及节点编号如图 8 (a)~(b) 所示。



(a) 模型编号图 (b) 节点编号图
图 8 模型及节点编号图

2.2 竖向荷载计算

根据相关规范可知,百年一遇雪荷载标准值为

0.4kN/m^2 ,不上人屋面活荷载标准值为 0.5kN/m^2 。该结构在不同荷载工况下的最大应力与最大位移的响应如表 2 所示。

由表 2 分析可知,该结构作用由雪荷载变为重力荷载时,最大位移量增加了 9.84mm,最大应力值增加了 259.88MPa。该结构在各工况作用下,最大位移均出现在 O 节点,最大应力出现在 JC 或 JA 节点附近。

在该荷载作用下最大应力值为 353.50MPa,钢材进入强化阶段。该结构在网架或支座与支撑连接的节点处均出现应力集中,如图 9 所示。

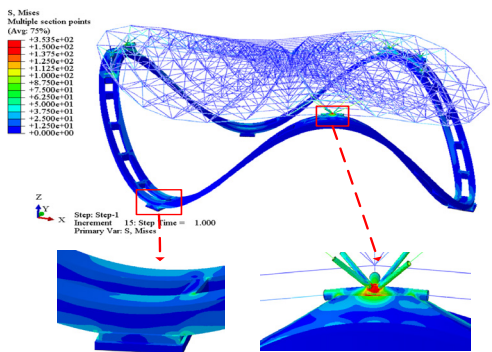


图 9 自重荷载作用下应力云图

满跨活荷载作用下最大位移值为 16.70mm,满足该结构允许挠度。该结构位移较大值主要在 O 点附近,支撑结构变形量呈由连接节点处向支座处先增加再减少的趋势,如图 10 所示。

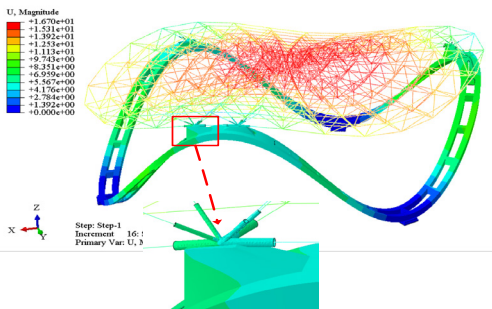


图 10 满跨活荷载位移云图

2.3 结构动力特性分析

对整体结构进行模态分析,取前四阶模态云图,由前四阶频率计算对应的周期,其模态云图及周期分别如图 11 (a)~(d) 和表 3 所示。

表 2 各荷载工况下应力与位移最大值对比分析

工况种类		最大位移/mm	最大位移位置	最大应力/MPa	最大应力位置
雪荷载	100 年一遇	3.37	O 点附近	93.62	JC 节点附近
重力荷载	自重	13.21	O 点附近	353.50	JC 节点附近
自重与活荷载共同作用	满跨	16.70	O 点附近	351.00	JA 节点附近
—	最大值	16.70	—	353.50	—

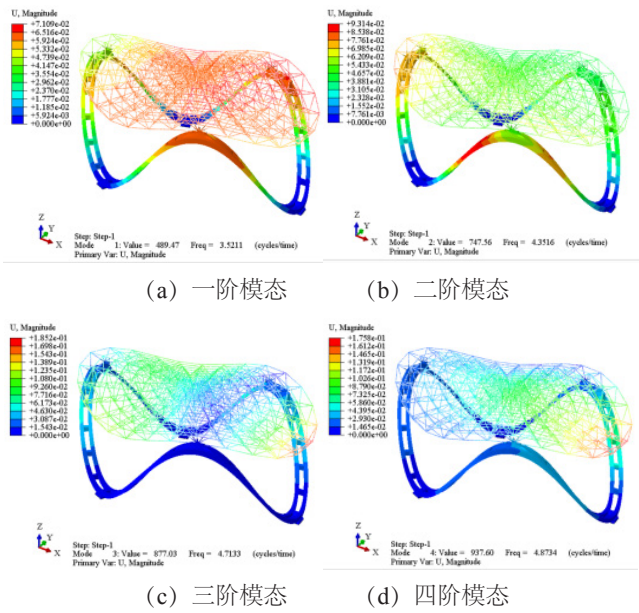
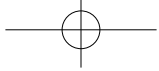


图 11 前四阶模态云图

表 3 前五阶频率与周期表

阶数	振动状态	周期 /s
第一阶	X 向平动	0.284 0
第二阶	Y 向平动	0.229 8
第三阶	转动	0.212 1
第四阶	局部振动	0.205 1

根据计算结果可知，该结构的前三阶振型为平动、平动、扭动，其第三扭转周期与第一平动周期之比为 0.747，满足结构的设计要求。

利用振型分解反应谱法^[6]对结构进行抗震验算，根据抗震规范（GB50011-2010）^[7]，采用场地类别为Ⅱ类，设计地震分组为第二组，设计设防烈度为 7 度（0.15g），特征周期值 T_g 为 0.4s，水平地震影响系数最大值 α_{max} 为多遇地震 0.12、罕遇地震 0.72，建筑结构的阻尼比取值为 0.02。

计算结果如表 4 所示，该结构在长跨罕遇地震下最大应力值最大，应力值为 335.30MPa。该结构在短跨罕遇地震下最大为侧向位移值为 21.45mm，由短跨罕遇地震变为长跨罕遇地震时，其最大侧向位移值减少了 4.44mm，该结构满足设计要求。

为充分研究异形空间结构动力特性^[8]和地震反应，采用时程分析进行验算结构的薄弱部位。选取地震波

时其频谱特性、有效峰值和持续时间均应符合规定，其中频谱特性依据所处的场地类别和设计地震分组确定；有效峰值按规范规定加速度时程最大值调整；有效时间为 15s，时间间隔取 0.02s。本文仅对短跨方向施加多遇和罕遇地震波，结构在地震波作用下的位移时程响应如图 12（a）～（b）所示。

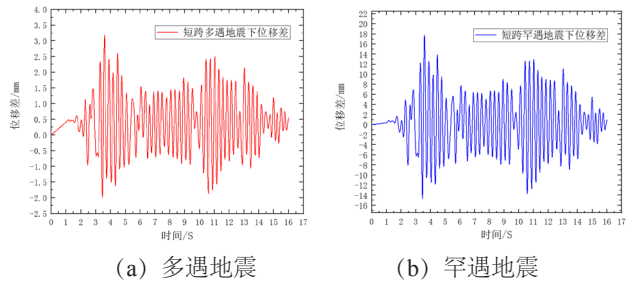


图 12 最大位移时程响应

如表 5 所示，多遇地震计算指标满足抗震设计要求。罕遇地震作用下结构最大应力为位于 JA 节点，最大层间位移角为 1/101，该结构满足设计要求。

表 5 不同工况下最大应力值和最大位移值表

工况类型	最大应力值 /MPa	出现位置	最大位移值 /mm	出现位置
短跨多遇	301.20	JA 节点附近	30.42	靠近节点支撑
短跨罕遇	351.40	JA 节点附近	166.30	靠近节点支撑
差值	50.20	—	135.88	—

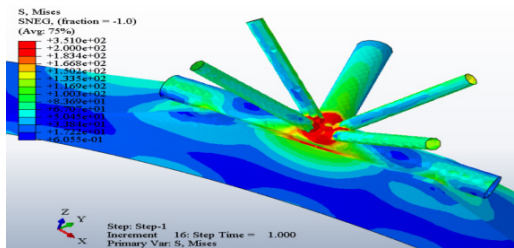
3 异形空间结构节点分析

网架与支撑结构的节点^[9,10]是影响该异形空间结构整体性能的关键，应重点关注节点传力机理及是否满足“强节点弱构件”的抗震设计要求。

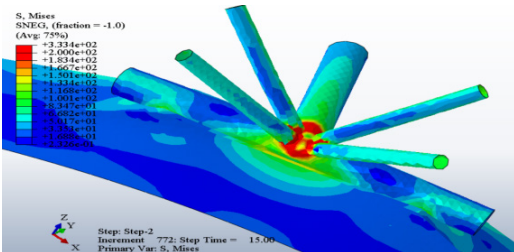
根据计算结果可知，在满跨自重与活荷载共同作用下和短跨罕遇地震作用下对该结构影响最大，且最大应力均在 JA 节点附近，该节点有限元计算结果如图 13（a）～（b）所示。由图可知，在两种工况下，该节点网架杆件汇交处应力值较大，满跨自重与活荷载共同作用下的最大应力值为 351.00MPa。仅在满跨自重与活荷载共同作用下该节点局部位置应力超出钢材屈服强度，但远未达到钢材极限抗拉强度，超出屈服强度位置如图 14 所示。综上可知，该节点在这两种工况下均满足设计要求。

表 4 多遇和罕遇反应谱对比分析表

作用方向	多遇最大应力 /MPa	罕遇最大应力 /MPa	最大应力差值 /MPa	多遇最大位移 /mm	罕遇最大位移 /mm	最大位移差值 /mm
长跨方向	142.50	335.30	192.80	2.83	17.01	14.18
短跨方向	83.37	300.20	216.83	3.58	21.45	17.87
差值	59.13	35.10	—	-0.74	-4.44	—



(a) 满跨自重与活荷载共同作用下应力云图



(b) 短跨罕遇地震作用下应力云图

图 13 JA 节点应力云图

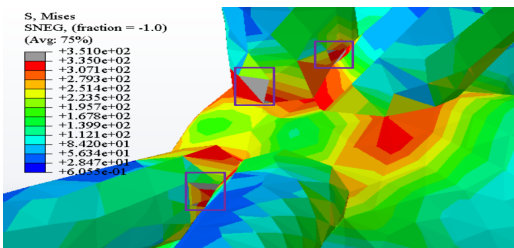
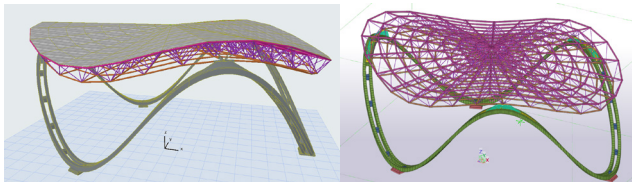


图 14 JA 节点局部应力云图

4 ArchiCAD 和 Tekla 在模型应用上的对比分析

通过计算分析后,将设计合理的结构几何参数在 GH 中更新,最终完成结构的设计,并通过实时联动完成在 ArchiCAD 与 Tekla 中的 BIM 模型,如图 15(a)~(b) 所示。ArchiCAD 软件与 Tekla^[11] 软件在模型上的对比分析如表 6 所示。



(a) GH 与 ArchiCAD 联动模型图 (b) GH 与 Tekla 联动模型图
图 15 联动模型图

表 6 软件对比表

软件	ArchiCAD	Tekla
出图效率	高	一般
联动异形构件难度	易(用壳体联动)	较难(需划分板)
联动流畅度	较卡顿	流畅
联动深化效果	较好	好
联动缺点	异形构件类型单一	无法识别已切割构件
节点设计难度	一般	较强

由表 6 可知,ArchiCAD 软件在结构建模和出图中更为便捷,由于构件数量较多导致软件卡顿现象。在异形构件处理上,ArchiCAD 在该方面处理能力较强,Tekla 中对曲面板构件需要分割为若干个平面构件,在实际模型处理中,对关键节点连接位置的曲梁都需处理为折梁,以便于节点施工下料。整体对比分析可知,ArchiCAD 在异形空间结构设计中更有优势。

5 结论

本文介绍了异形空间结构传统设计方法的难点以及参数化技术为异形空间结构设计带来的优势,详细阐述了参数化建模过程,最后通过有限元软件 Abaqus 对异形空间结构及节点受力分析,验证结构合理性,得出如下结论。

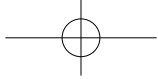
(1) 通过相关参数作为构件控制的变量,减少了一定的重复性工作,为异形空间结构设计提供了新的思路和设计方法;

(2) 对异形空间结构设计可利用 GH 进行参数化建模,对参数化结构模型由 IGES 格式转化到有限元分析软件 Abaqus 中计算分析,对结构中受力不合理的构件返回 GH 中修改,重新导入 Abaqus 计算,以实现结构优化设计,满足设计要求后,由 GH 插件实时联动到 ArchiCAD 软件中,并完成结构三维模型表达,从而实现异形空间结构正向设计;

(3) ArchiCAD 相对于 Tekla 在异形空间结构模型处理上更具优势,其在异形曲面处理后的效果上更加接近实际,同时,ArchiCAD 在节点设计中更为容易。

参考文献

- [1] 张飞.某展示中心异形空间桁架结构设计分析[J].安徽建筑,2020,27(08):85-86.
- [2] 刘倩昆,秦玉兰.基于 BIM 正向设计的异形建筑参数构建方法研究——以吉安高铁新区会展中心为例[J].砖瓦,2022(02):62-63+66.
- [3] 张慎,尹鹏飞.基于 Rhino+Grasshopper 的异形曲面结构参数化建模研究[C]//中国土木工程学会计算机应用分会,中国图学学会土木工程图学分会,中国建筑学会建筑结构分会计算机应用专业委员会.大数据时代工程建设与管理——第五届工程建设计算机应用创新论坛论文集,2015:220-225.
- [4] 骆耀辉.基于优化算法的参数化建筑设计探究[D].西南交通大学,2015.
- [5] 李贺楠.遗传算法在建筑优化设计中的应用[C]//全国高



- 校建筑学学科专业指导委员会, 建筑数字技术教学工作委员会. 计算性设计与分析——2013 年全国建筑院系建筑数字技术教学研讨会论文集. 计算性设计与分析——2013 年全国建筑院系建筑数字技术教学研讨会论文集, 2013:40-43.
- [6] 刘艳华, 严俊, 杨玉坚, 等. 基于反应谱法的胶凝砂砾石坝地震反应有限元分析 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2023,54(S1):68-73.
- [7] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [8] 章静. 带异形钢结构塔冠的超高层建筑动力特性分析 [J]. 山西建筑, 2013,39(17):37-39.
- [9] 李宏伟. 大跨空间钢结构异形节点受力性能分析 [D]. 中国海洋大学, 2015.
- [10] 章伟, 吴波, 王剑非, 等. 钢结构民居关键节点设计 [J]. 钢结构, 2018, 33 (04): 71-74.
- [11] 朱东烽, 解金辉, 黄万禧, 等. Tekla 在装配式建筑工艺深化中的应用与研究 [J]. 广东土木与建筑, 2017,24 (05):68-72.

Parametric Design of Irregular Spatial Structures Based on BIM Technology

Xiao Shixiang^{1,2}, Bu Xin², Wang Xinwu²

(1. Department of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Currently, designers typically rely on their design experience to create building shapes and structures. However, designing the shape of a unique and complex venue can be challenging. Traditional design methods are often time-consuming and require a significant amount of resources, and may not effectively address the complex issues that arise when designing irregular venue structures. This paper focuses on a special-shaped space structure as the research subject, utilizing parametric technology to design the structure. The BIM design concept is integrated into the design process to solve structural selection and analysis problems. A parametric model of the structure is established using Grasshopper. In this process, Abaqus is used to calculate, analyze, and optimize the structural mechanical properties of the model. Finally, a three-dimensional model application is created using BIM software, which can provide new ideas and methods for structural engineers to solve the design challenges of special-shaped space structures.

Key Words: Parameterization Technology; Irregular Spatial Surfaces; Finite Element Analysis; BIM; Space Nodes