

DOI: 10.7672/sgjs2025110077

基于 BIM 的异形表皮参数化驱动分析与优化

王奥磊¹, 罗烨钦², 谭卡¹, 李海龙¹, 王能¹

(1. 中建不二幕墙装饰有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112)

[摘要] 以某超高层复杂曲面幕墙工程为例, 开展 BIM 技术在异形幕墙系统深化设计中的应用。基于 Rhino+Grasshopper 平台开发参数驱动的异形表皮参数化算法系统, 采用遗传算法将异形面板优化为平面或单曲类型的面板, 有效提高了异形建筑幕墙系统深化设计效率, 节约了建造成本。

[关键词] 高层建筑; 幕墙; 建筑信息模型; 遗传算法

[中图分类号] TU973

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0077-05

Parametric Driving Analysis and Optimization of Special-shaped Surface Based on BIM Technology

WANG Aolei¹, LUO Yeqin², TAN Ka¹, LI Hailong¹, WANG Neng¹

(1. China Construction Buer Curtain Wall & Decoration Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China;

2. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200112, China)

Abstract: Taking a high-rise complex curved curtain wall project as an example, the application of BIM technology in the deepening design of a special-shaped curtain wall system is carried out. Based on the Rhino + Grasshopper platform, a parameter-driven, special-shaped skin parameterization algorithm system was developed. The genetic algorithm was used to optimize the special-shaped panel into a flat or single-curve type panel, which has effectively improved the deepening design efficiency of the special-shaped building curtain wall system and has saved the construction cost.

Keywords: tall buildings; curtain wall; building information modeling (BIM); genetic algorithm

0 引言

在异形建筑项目中, 幕墙工程是关键的组成部分, 不仅承载着建筑的美学表达, 更直接影响建筑的使用性能。然而, 异形幕墙特有的复杂几何形态使传统二维设计方法难以满足现代工程的精细化要求。BIM 技术的参数化设计特性为这一困境提供了突破路径, 使幕墙的结构优化和材料利用更加灵活高效, 在异形幕墙系统的应用效果上尤为明显, 具体体现在: ①精确的曲面曲率和翘曲值分析能力; ②参数化调整的表皮优化机制; ③建造阶段的数字化协同管理。国内研究人员已开展了一系列异形幕墙深化设计与施工阶段的研究。阙红军^[1]基于 BIM 技术开展高层建筑双曲面玻璃幕墙设计应用研究, 旨在提升双曲面玻璃幕墙设计的合理性; 周肖飞等^[2]基于 Grasshopper 平台分析了幕墙面

板的曲率, 将部分双曲面幕墙面板优化为平板单元幕墙, 为后期施工创造便利条件; 汪永平等^[3]研究了双曲镀锌板屋面的深化设计方法, 基于 BIM 技术对面板进行划分, 计算起翘值并将其优化为平板, 使整体屋面板起翘值均小于限值, 符合设计外观要求; 应俊^[4]在武汉长江航运中心项目通过分析曲面 UV 方向的曲率, 将塔冠的曲面幕墙分别优化为平板和具有单一半径的单曲面板, 并对异形龙骨进行优化, 完美复现建筑师构思效果的同时大大降低了施工难度, 使建造成本更加合理; 杨英豪^[5]基于 BIM 技术对大浪花造型铝板幕墙系统进行了参数化方案设计及研究, 并对铝板连接系统结构进行了力学分析和优化。

尽管异形幕墙的深化设计已取得阶段性成果, 但 BIM 技术在国内复杂曲面幕墙工程中的深化设计体系尚未成熟。现有研究多采用以直代曲策略, 即通过将双曲型面板优化为平面型面板或单曲圆柱型面板, 但存在优化精度不足、参数关联性弱等

[作者简介] 王奥磊, 助理工程师, E-mail: 919360340@qq.com

[收稿日期] 2025-01-02

缺陷。本文创新性引入遗传算法,构建参数化驱动的多目标优化模型,研究 BIM 技术在塔冠异形表皮参数化驱动分析与优化中的应用,并提出新的解决方案。

1 异形表皮优化方案

1.1 表皮建模

采用 Rhino+Grasshopper(简称 GH)软件创建模型。Grasshopper 可在 Rhino 环境下运行的建模插件,可以通过计算程序算法生成模型^[6]。根据幕墙施工图和初期提供的 BIM 三维模型对幕墙表皮模型进行重建,并利用 GH 进行划分,将分割好的表皮模型作为 BIM 优化的初始模型。

1.2 原始表皮翘曲值分析

在幕墙工程实践中,一般以面板 3 个角点形成 1 个平面,面板边缘到该平面的最大距离作为异形面板的翘曲值。对异形面板进行优化时,要综合考虑对建筑外观效果的影响、板材加工可行性、现场施工难度以及经济效益。通过面板翘曲值的分析可将优化条件量化,提高优化精度和效果。

运用 GH 插件编写曲面翘曲值分析程序(见图 1)。根据面板在曲面 UV 坐标系下的曲率对面板进行分类,把面板分成平面型面板、单曲圆柱型面板和双曲面型面板,并统计数量。分析所有单曲圆柱型面板和双曲面型面板的翘曲值,根据面板类型,按翘曲值取值范围进行分类统计。

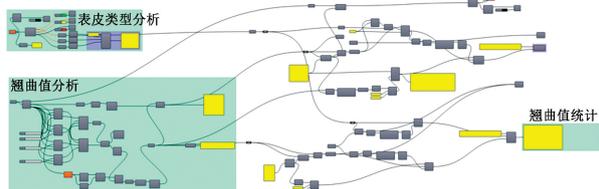


图 1 曲面翘曲值分析程序

Fig. 1 Surface warpage analysis program

1.3 优化目标和约束条件

以铝板为例,双曲面面板是基材根据 2 种不同的弧线曲率经裁剪、折边、弯弧、焊接、喷涂等多道工序加工而成的在曲面 UV 方向均为弧形的产品(见图 2)。双曲面材料制造工艺复杂、生产成本高昂,曲面型面板单价一般是平面型面板的 1.5~3.7 倍^[7]。通过优化曲面面板降低曲面占比,从而大幅降低幕墙工程成本。在提高经济性的同时,还应兼顾整体建筑的功能需求、材料的加工工艺水平以及现场安装难度等影响因素。

根据面板的实际加工工艺,可将双曲面面板优化为单曲圆柱型面板和平面型面板(见图 3)。优化

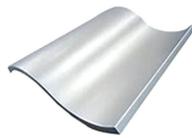


图 2 双曲面型面板

Fig. 2 Double curved panel

后会改变面板的原有造型、边缘曲线和角点位置,现场安装时需通过压弯工艺以达到安装要求^[8],所以优化后的面板与原面板的误差应控制在压弯工艺允许的误差范围内。



图 3 双曲面型面板优化

Fig. 3 Hyperbolic panel optimization

1.4 双曲面面板参数化优化方法

在众多曲面优化方法中,遗传算法是较科学的方法,本项目使用 Grasshopper 自带的单目标优化工具 Galapagos 优化双曲面。该运算器通过设定控制程序,使计算机自动完成在参数驱动下复杂的计算和寻优过程,能在较短时间内获取特定逻辑下的最优结果^[9]。

根据双曲面面板的翘曲值可将面板分为三类:不可优化、可优化为单曲圆柱型面板、可优化为平面型面板,针对优化类型创建对应的优化程序。优化程序流程如下。

1) 双曲面优化为平面,需以双曲面的 3 个角点生成 1 个平面,把原双曲面边线投影到该平面上,生成优化平面。

2) 双曲面优化为单曲面,第 1 步选取双曲面上若干个随机点生成拟合平面,将拟合平面的法平面与原始曲面相切生成交线;第 2 步获取交线的拟合圆曲线,圆曲线向其法线方向两端挤出生成圆柱曲面,把原双曲面边线投影到该圆柱面上生成优化单曲圆柱面板;第 3 步以拟合平面的法平面的角度为优化变量,优化曲面与原曲面的边缘误差为优化条件,运用单目标遗传算法求解出最优结果,优化流程如图 4 所示。

2 应用案例

2.1 项目概况

广州知识塔位于广州市知识城九湖北岸中央,南临九龙湖城市景观,北接广州地铁 14 号线知识城支线知识城站,设计高度达 302m,如图 5 所示。

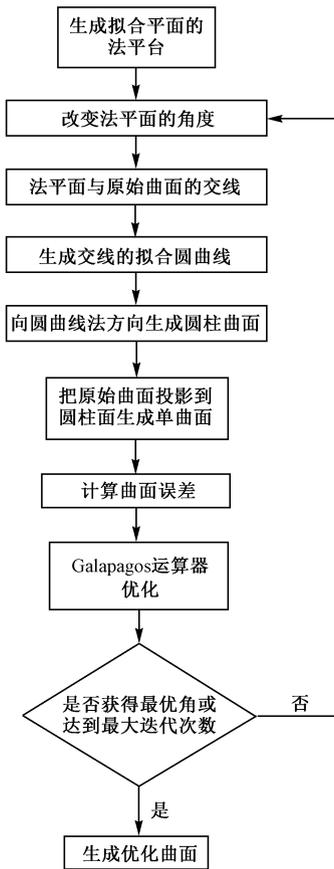


图 4 双曲型面板优化流程

Fig. 4 Optimization process of hyperbolic panel



图 5 塔楼效果

Fig. 5 Tower renderings

塔楼 3 座塔冠顶部幕墙从两端的垂直幕墙向中心的内倾幕墙渐变。塔冠外侧为异形蜂窝铝板,与立面单元体幕墙相接,内侧为异形铝单板(见图 6)。

2.2 塔冠表皮翘曲值分析

1) 表皮建模

使用 Rhino 软件重建塔冠幕墙表皮模型,并划分分格(见图 7)。

2) 原始表皮翘曲值分析结果

根据曲面翘曲值分析程序,先对面板类型进行统计和分类,如图 8 所示。塔冠共有 1 488 块面板,其中平面型面板 336 块,单曲圆柱型面板 2 块,双曲型面板有 1 150 块。



图 6 塔冠模型

Fig. 6 Tower crown model

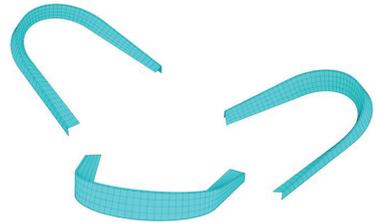
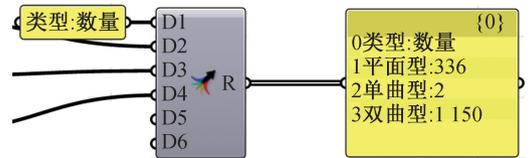
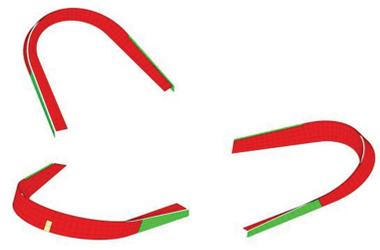


图 7 塔冠原始表皮

Fig. 7 Original epidermis of the crown of the tower



a 面板类型统计



b 面板分类



图 8 塔冠面板分类

Fig. 8 Classification of tower crown panels

分析所有单曲圆柱型面板和双曲型面板的翘曲值。由于塔冠内外侧为不同材质的面板,所以将外侧蜂窝板面板与内侧铝单板面板分别按翘曲值取值范围分类统计。通过 GH 程序分析可知,外侧面板有 744 块,其中有 336 块平板型面板,曲面面板最大翘曲值为 49.5mm,大部分面板翘曲值在 40mm 以下,占比 90%;内侧面板有 744 块,没有平面型面板,面板最大翘曲值为 77.8mm,大部分面板翘曲值在 50mm 以下,占比 83%,小部分面板翘曲值超过 50mm,具体统计结

果如表 1,2 所示。

表 1 外侧面板翘曲值

Table 1 Warpage value of outer side panel

序号	翘曲值范围/mm	板块数量/块	占比/%
1	0	336	45.16
2	0~20	83	11.16
3	20~30	145	19.49
4	30~40	109	14.65
5	40~50	71	9.54

表 2 内侧面板翘曲值

Table 2 Warpage value of inner side panel

序号	翘曲值范围/mm	板块数量/块	占比/%
1	0	0	0
2	0~20	136	18.28
3	20~30	80	10.75
4	30~40	198	26.61
5	40~50	206	27.69
6	50~60	58	7.80
7	60~70	48	6.45
8	70~80	18	2.42

2.3 塔冠表皮优化

1) 程序设计和参数设置

根据铝板和蜂窝板的材料特性,可将翘曲值 < 15mm 的双曲铝单板优化为平板,其余的优化为单曲铝单板,双曲蜂窝板优化为单曲蜂窝板。在 Grasshopper 中,编写对应的程序连接到 Galapagos 运算器,以优化曲面的边缘误差为控制条件,运算器参数设置中,将 Fitness 设为 Minimize,求误差最小值,Threshold 设为 0.5,最大遗传代数设为 50 代,其他均设为默认值,详细参数设置如图 9 所示。

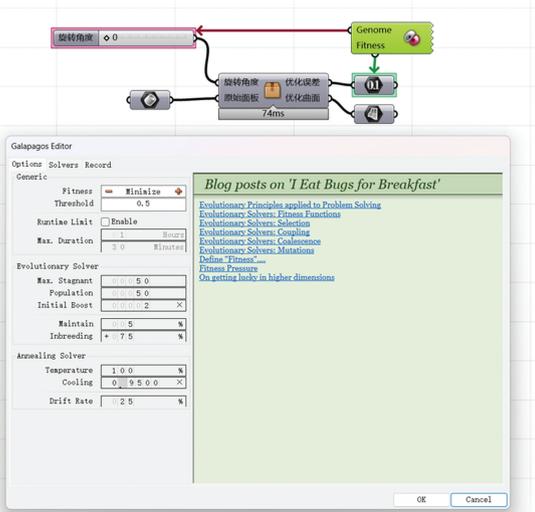


图 9 程序优化和参数设置

Fig. 9 Optimize program and parameter settings

2) 面板优化结果与分析

通过上述程序将双曲型面板迭代优化为与初始面板误差最小的拟合单曲圆柱型面板,计算并记录优化面板的分析数据。由优化面板的分析数据可知,优化后的单曲铝单板与原面板的误差均 < 10mm,优化后的单曲蜂窝板与原面板的最大误差仅 2mm,完全满足现场施工要求。优化后的面板如图 10 所示,经软件统计汇总得出优化后的面板类型,如表 3 所示。由表 3 可知,本项目塔冠的双曲蜂窝板全部被优化为单曲蜂窝板,双曲铝单板 11.8% 改为平面铝单板,88.2% 改为单曲铝单板,节省材料生产制造成本约 60 万元。

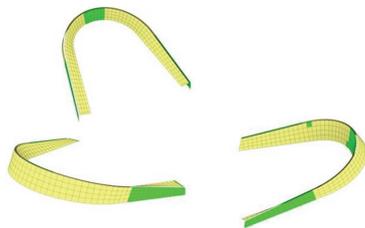


图 10 优化面板分类

Fig. 10 Optimized panel categorization

表 3 面板类型统计

Table 3 Panel type statistics

板块类型	优化前数量/块	占比/%	优化后数量/块	占比/%
平面蜂窝板	336	45.2	336	45.2
单曲蜂窝板	2	0.3	408	54.8
双曲蜂窝板	406	54.6	0	0
平面铝单板	0	0	88	11.8
单曲铝单板	0	0	656	88.2
双曲铝单板	744	100	0	0

2.4 其他 BIM 应用

1) 幕墙材料优化

深化设计初期,塔冠外侧为玻璃幕墙系统,通过分析外侧面板曲率,发现存在大量双曲面板,双曲玻璃幕墙优化和加工难度大,生产成本低。考虑到该位置位于塔楼最顶部,主要起装饰造型作用,对室内采光和建筑隔热性能几乎没有影响,同时经过跟建筑师进行外观效果上的沟通,最终将塔冠外侧的玻璃幕墙系统变更为蜂窝板系统,大幅降低了生产成本。

2) 采用可调节型转接件优化安装技术

运用 BIM 技术可视化的特点,发现塔冠面板安装角度不断变化,为保证安装精度,设计了适应所有面板的转接件(见图 11),进一步提高安装效率,缩短工期,减少材料使用,同时保证外观流畅美观。

3 结语

本研究基于广州知识塔项目的应用实践,优化

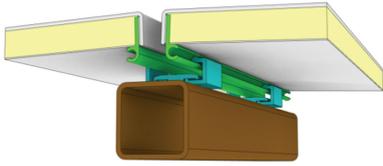


图 11 蜂窝板可调节转接件节点模型

Fig. 11 Cellular panel adjustable adapter node model

了塔冠全部的双曲面面板,形成了深化设计阶段优化异形幕墙面板的解决方案。基于 Rhino 和 GH 平台建立异形幕墙表皮模型,通过分析表皮模型的曲率划分面板类型,在 GH 中编写程序并运用遗传算法工具 Galapagos 优化双曲面面板,降低了曲面幕墙的建造成本,提高了工程效益。

参考文献:

- [1] 阙红军. BIM 技术在高层建筑双曲面玻璃幕墙设计中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(7): 60-62.
QUE H J. Application of BIM technology in the design of hyperbolic glass curtain walls for high-rise buildings [J]. Interior architecture of China, 2023(7): 60-62.
- [2] 周肖飞, 张世豪, 唐干, 等. 埃及新首都 CBD 标志塔外幕墙工程 BIM 技术应用研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(2): 44-49.
ZHOU X F, ZHANG S H, TANG G, et al. Study on application of BIM technology in outer curtain wall project of CBD tower in new capital of Egypt [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2020, 12(2): 44-49.
- [3] 汪永平, 蒋鸿鹄, 蒋洁菲, 等. 双曲钛锌板屋面深化设计方法 [J]. 施工技术, 2020, 49(16): 51-54, 69.
WANG Y P, JIANG H H, JIANG J F, et al. The deepening design method of titanium-zinc hyperbolic panel roof [J]. Construction technology, 2020, 49(16): 51-54, 69.

- [4] 应俊. BIM 技术在复杂异形超高层幕墙项目中的应用——以武汉长江航运中心为例 [J]. 工程建设与设计, 2022(15): 148-150.
YING J. Application of BIM technology in complex special-shaped super high-rise curtain wall project—taking Wuhan Yangtze River shipping center as an example [J]. Construction & design for engineering, 2022(15): 148-150.
- [5] 杨英豪. 济青高铁红岛站主站房外立面实现关键技术研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
YANG Y H. Key technology research on the facade of the main station building of Hongdao railway station in Jiqing high-speed railway [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.
- [6] 汪海英. BIM 工具选择系统框架研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
WANG H Y. Research on the framework of BIM tools selection system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [7] 邹贻权, 黄洲洲, 夏绪勇, 等. 成本导向下基于遗传算法的曲面幕墙设计优化 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(10): 2049-2056.
ZOU Y Q, HUANG H Z, XIA X Y, et al. Design optimization of curved curtain wall based on genetic algorithm under cost orientation [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2022, 56(10): 2049-2056.
- [8] 殷刚, 魏铭江. 一种曲面铝板的现场成型技术探讨 [J]. 建筑机械, 2022(5): 110-113.
YIN G, WEI M J. Discussion on field forming technology of a curved aluminum plate [J]. Construction machinery, 2022(5): 110-113.
- [9] EVINS R. A review of computational optimization methods applied to sustainable building design [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 22: 230-245.

(上接第 23 页)

- [13] SHA F, LI S C, LIU R T, et al. Experimental study on performance of cement-based grouts admixed with fly ash, bentonite, superplasticizer and water glass [J]. Construction and building materials, 2018, 161: 282-291.
- [14] ZHAO Y, LIANG N X, CHEN H, et al. Preparation and properties of sintering red mud unburned road brick using orthogonal experiments [J]. Construction and building materials, 2020, 238: 117739.
- [15] 苗贺朝, 王海, 王晓东, 等. 粉煤灰基防渗注浆材料配比优选及其性能试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 230-239.

- MIAO H C, WANG H, WANG X D, et al. Study on ratio optimization and performance test of fly ash-based impermeable grouting materials [J]. Coal science and technology, 2022, 50(9): 230-239.
- [16] 王晓晨, 刘人太, 杨为民, 等. 考虑水泥浆液析水作用的水平裂隙注浆扩散机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 1005-1017.
WANG X C, LIU R T, YANG W M, et al. Study on grouting mechanism of horizontal fractures considering the bleeding of cement slurry [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(5): 1005-1017.