DOI：10.15986/j.1006-7930.2022.01.009

西安腾讯双创小镇双曲面表皮优化设计研究

艾宏波[1]，车　通[1]，崔百兴[2]

(1. 西安建筑科技大学 设计研究总院，陕西 西安 710055；2. 西安建筑科技大学 建筑学院，陕西 西安 710055)

摘要：双曲面表皮作为当今越来越多应用的表皮形式，创造了与传统建筑造型具有显著差异性的建筑形象，与此同时也带来了诸多如经济性、表皮网格拟合精度差及光热性能适应等方面的问题. 研究从西安腾讯双创小镇的表皮设计入手，在方案创作中融入“新丝绸”和“无穷”的概念，同时基于参数化设计平台 Rhino&Grasshopper 进行双曲面表皮的设计优化. 研究梳理了双曲面表皮实践的优化设计流程，从曲率控制下的曲面形态优化、曲面网格划分及单元优化以及光热性能导向的表皮洞口优化等角度进行深入探究，验证了该流程的适应性和双层表皮系统性能的优越性，构建具有生态特征并符合美观需求的双曲面表皮.

关键词：双曲面；建筑表皮；表皮优化；环境性能优化；参数化设计

中图分类号：TU242. 5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-7930(2022)01-0068-08

Research on optimization design of hyperboloid skin of Tencent “double-innovation” town in Xi′an

AI Hongbo[1], *CHE Tong*[2], *CUI Baixing*[2]

(1. Design and Research Institute, Xi′an Univ. of Arch. & Tech., Xi′an 710055, China;
2. School of Architecture, Xi′an Univ. of Arch. & Tech., Xi′an 710055, China)

Abstract: Hyperboloid skin, as a more and more applied skin form, has created a unique architectural image which is significantly different from the traditional architectural modeling, but at the same time has brought a lot of problems such as economy, poor fitting accuracy of skin mesh and adaptation of light and heat performance. Starting from the skin design of Tencent “double-innovation” town in Xi′an, this research incorporated the concepts of “new silk” and “infinity” into the project creation, and optimized the design of hyperboloid skin based on the parametric design platform Rhino & Grasshopper. The research sorts out the practice of the hyperboloid skin, and made an in-depth exploration from the perspectives of surface shape optimization under curvature control, surface meshing and element optimization, and photothermal performance-oriented skin opening optimization, which verified the adaptability of the process and the performance of the double skin system, and constructs a hyperboloid skin with ecological characteristics and aesthetic requirements.

Key words: hyperboloid; building skin; skin optimization; environmental performance optimization; parametric design

20 世纪以来，随着框架结构和建筑幕墙材料技术的发展，建筑表皮成为可以更灵动自由的表达建筑性格和空间特征的要素. 建筑表皮作为建筑物的围护结构，不仅能表达建筑的精神内涵和文化意义，同时也是建筑与环境交流的主要界面，具有很强的功能性[1]. 在数字技术日益发展的今天，数字设计成为了重要的实践手段[2]，国内外建筑师通过应用参数化设计平台，将各种复杂的双曲面、非线性的建筑表皮进行优化设计并付诸实践[3]，形成了与传统建筑造型具有显著差异性的建筑形象，在视觉上呈现出更加连续流动的建筑风格，成为越来越多的建筑师青睐的表达方式.

双曲面表皮的应用也带来了诸多现实问题：首先，表皮曲率的变大导致施工难度和建筑造价上升、施工精度差的问题；其次，表皮设计中网格划分不合理的让曲面单元之间的拟合精度差，网格嵌板过多也导致经济性差；最后，曲面开洞与网格的一致性、洞口位置与内部功能光热性能

收稿日期：2021-11-15　　**修改稿日期**：2022-01-20
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51878530)
第一作者：艾宏波(1971—)，男，高级工程师，主要研究参数化设计及绿色建筑性能优化. E-mail：41622897@qq. com
通信作者：崔百兴(1994—)，男，硕士生，主要研究参数化设计及绿色建筑性能优化. E-mail：363288583@qq. com

需求的关联性差．当前国内外虽然有较多在双曲面表皮设计构建方面的应用，即通过参数化技术手段完成对大型曲面幕墙和结构的设计实践[4]，但是对以上问题的回应还不够充分．如北京 MAD 事务所设计的哈尔滨木雕博物馆[5]、鄂尔多斯博物馆以及哈尔滨大剧院等，英国建筑师扎哈设计的广州歌剧院、北京银河 SOHO 以及北京大兴国际机场、迪士尼音乐厅[6]等，这些建筑的表皮都具有造型和结构复杂、双曲面表皮曲率变化大以及设计和施工难度大等特点．但是其曲面的经济性差、嵌版的拟合精度不足等问题也让曲面表皮的最终呈现的细节效果有所不足．李晓岸[7]、王力[8]分别以东大门和杭州东站为例进行了双曲面表皮的实践和应用，但是曲面开洞上无法适应室内性能需求．以上问题中，方案设计阶段双曲面表皮的优化设计流程和优化方法的不合理是最主要的原因，因此在方案设计阶段对双曲面表皮设计流程进行梳理，同时应用更合理的优化设计方法成为解决双曲面表皮设计和保证建造效果的重要手段．

本文从西安腾讯双创小镇展示馆方案及双曲面表皮的优化设计入手，应用参数化设计平台 Rhino&Grasshopper，系统梳理双曲面表皮优化设计流程，从形态拟合、表皮分割、表皮光热性能优化等角度进行深入探究，塑造出流动飘逸的建筑形体，构建具有生态特征并符合美观需求的双曲面表皮．

1　项目概况

腾讯双创小镇展示馆位于西安市浐灞生态区灞河西岸，具有优越的生态景观环境．2017 年，腾讯宣称要用数字经济为中国企业铺就一条新“丝绸之路”并提出中国的数字文化产品就是一种“新丝绸”．而西安作为中国古代丝绸之路的起点城市，“新丝绸”的概念具有很强的历史性和现实性，同时给人带来一种灵动飘逸和连续流动的印象．另外，数字和科技的概念更是一种动态、无边界的探索精神的体现，“∞”在数学上表示的是“无穷大”，同时该符号也象征着无穷连续，被认为是一个超越边界而增加的概念，其数学性质呼应了建筑对于科技、智慧的定位——一种动态、持续和无穷的探索．

根据以上两个概念，设计团队将形体采用了莫比乌斯带的形式组合．莫比乌斯带是将一根纸带扭转 180°后，两头再相接，使本身具有两个面的纸带变为一个面，成为具有独特数学和艺术特性的几何体．带两面代表两个独立事物，那么莫比乌斯带在此的意义就是融合科技与文化的碰撞，共建数字丝绸之路的“新丝绸”．以莫比乌斯带为形态概念的基础，在 Rhino 空间中通过逐步推敲和优化设计，形成本次展示馆设计的基本形态，其形态生成过程如图 1 所示．

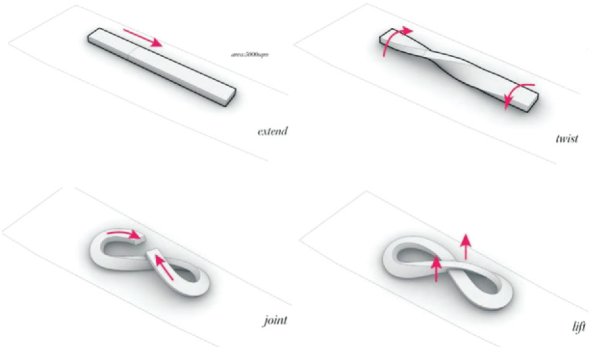


图 1　展示馆生成过程

Fig. 1　Generation process of exhibition hall

建筑基本形态通过逐步的细化来满足展示馆的美学需求和建筑各个尺度在功能上的需求．展示馆共两层，一层为展厅，主要作为数字展示功能，二层作为会议和办公部分供工作人员使用．室内空间适应双曲面的表皮造型形成高低错落的空间特征，通过竖向楼梯和坡道的设计让室内空间也形成了动态的联系；同时形体扭转相接的部位通过抬升，形成架空空间，这些架空空间从不同方向引导人流，形成建筑入口的灰空间和建筑广场，照片如图 2-3．

图 2　展示馆鸟瞰照片

Fig. 2　Bird's eye view of exhibition hall

图 3　展示馆架空空间照片

Fig. 3　Photos of overhead space in the exhibition hall

2 双曲面表皮设计优化

在双曲面表皮设计优化前首先要梳理双曲面表皮设计优化的逻辑流程，来贯通于整个设计优化过程. 设计优化流程包括：概念形体推敲、曲率控制下的双曲面形态优化、曲面网格划分及单元优化以及光热性能导向的表皮洞口优化四个部分，其优化流程图如图 4 所示. 本节将从以上几个步骤对双曲面表皮的设计优化进行详细阐述.

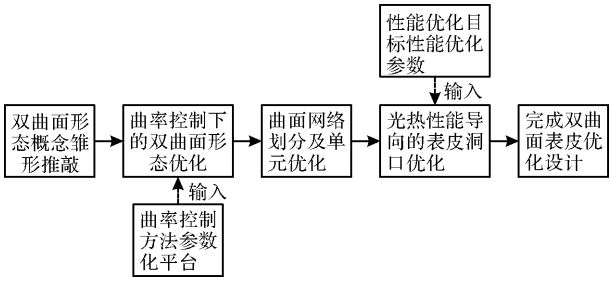


图 4 双曲面表皮优化设计流程图

Fig. 4 Flow chart of hyperboloid skin optimization design

2.1 曲率控制下的双曲面形态优化

前文已经分析了展示馆建筑整体的基本特征，在 Rhino 空间中通过手动细化操作 Nurbs 曲面的形态控制，完成了建筑基本形态的推敲和设计. 展示馆的双曲面表皮在形态上从立面墙体和建筑立面之间互相延伸，屋顶和立面表皮的延续交融使表皮呈现出优美的曲度和流畅的美学特征. 而通过 Rhino 手动建模推敲的曲面虽然也是 Nurbs 曲面，但是其表皮的曲率在手动拉伸的过程中会出现曲率不均匀等问题，同时当建筑高度或面积等设计因素需发生变化来适应设计需求时，该方法也无法快速精确的对表皮形态及大小进行调整，严重降低了设计效率，也为后期各项深化带来了不便. 因此需结合参数化设计平台 Rhino&Grasshopper，以原模型形态作为参考形，再进行表皮雏形的参数化建模，通过参数控制曲率来达到曲面形态优化的目的.

曲率控制下的曲面形态优化目标是通过参数化编程完成双曲面表皮雏形的动态可控精细建模，使模型形态随着曲面曲率参数变化可以迅速变化，便于控制；其优化逻辑是在 Rhino&Grasshopper 参数化设计平台进行点、线、面逐层级的参数化曲率的控制来完成整个双曲面形态的控制，完成整个表皮构建，具体过程如下：

曲率控制下的表皮雏形设计的形态优化逻辑过程，需要首先在 Grasshopper 中通过三维坐标的定位确定整个模型中的特殊定位点，该部分点需要能够对整个表皮模型的主要结构线和整体形态起到主要拟合的作用，优化时需进行特殊点的选择、参数化控制数据输入定位等步骤，是该过程的首要步骤；其次，在第一步各控制点完成的基础上通过该多个控制点拟合生成双曲面表皮主要结构线，其中主要包括的各部分表皮的边缘线、曲面控制线、特殊位置控制线等；最后，各表皮控制线间通过参数化平台强大的数据处理能力完成拟合放样等操作和双曲面表皮雏形的成形，最终完成整体的参数化编程建模. 该过程中可根据拟合双曲面的结果随时转换前一步骤的定位点和定位线的位置，改变双曲面表皮曲率拟合的流畅性. 如图 5-6 所示，Rhino 空间中手动建模和参数化建模下立面曲率的对比，其中颜色相近代表曲率相近. 可以看出，曲率控制下的参数化建模方法可有效提高曲面流畅性.

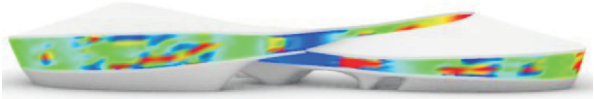


图 5 Rhino 空间中手动建模的立面表皮曲率

Fig. 5 Facade skin curvature manually modeled in Rhino space

图 6 曲率控制下的参数化模型立面表皮曲率

Fig. 6 Facade skin curvature of parametric model under curvature control

结果分析：如图 7 所示，最终的表皮雏形形态可以分为 4 部分，分别为屋顶表皮、二层立面表皮 1、二层立面表皮 2 以及一层立面＋吊顶表皮. 当设计条件局部变化(如建筑面积的增减等)或方案及建筑表皮形态需要局部调整时，这些控制点、控制线以及曲面拟合方式等共通构成的双曲面表皮的曲率控制系统，可以在参数控制下迅速响应并形成更加均匀的曲面曲率，使双曲面表皮雏形还可以在多元的曲率控制系统下完成快速调整变化，适应多元的设计语境，能够有效的提高设计效率[9].

需注意的是，该参数化设计过程中，在保证表皮形态大体不变的情况下，设计过程应尽可能降低各部分表皮曲率，将双曲面的表皮区域减少，提高单曲面表皮等可展开曲面的占比，降低造价和施工难度[1]. 但是并不是所有的双曲面都可以通过曲率控制优化成可展开曲面，如图 8 所示是一层立面＋吊顶层表皮优化后的曲率分布图，可以看

出即使在优化后大部分表皮的曲率是均匀的，但是仍然有多处的曲率在局部位置变化较大(图中绿色和红色的位置)，则该位置属于无法优化的区域，设计中做局部处理即可，保证大部分曲面曲率均匀．与此同时，参数化编程的双曲面表皮设计方法的优越性还可以体现在双曲面表皮雏形的后期深化、表皮性能优化和施工建造上．

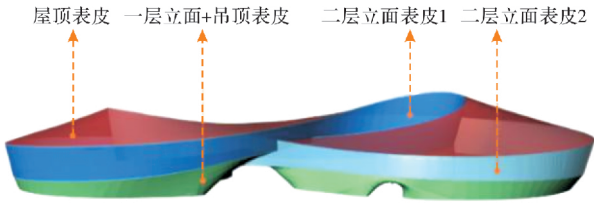


图 7　展示馆表皮雏形分类

Fig. 7　Prototype's types of the exhibition hall

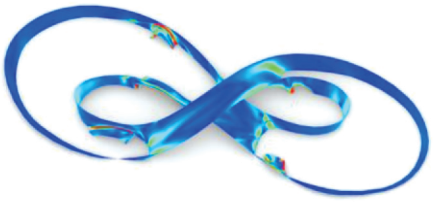


图 8　一层立面＋吊顶层表皮曲率分布

Fig. 8　Curvature distribution of first floor facade ＋celling skin

参数化平台与性能优化模块有较强的数据连通性，可以很便捷的进行各项数据之间的传输，有利于对表皮的各项物理性能有更直观的控制和把控；在表皮单元的分割和加工上，可以运用现有的参数化模型通过 Grasshopper 的工具组进行快速的适应性分割，同时也可以对各个模块的分板单元进行信息提取，为施工建造提供优质条件．该部分将在下文进行详细阐述．

2.2　曲面网格划分及单元优化

在数字技术和参数化设计平台的帮助下，双曲面等复杂曲面的建筑表皮能够生成可视化程度高并且可以加工的技术图纸，为设计和施工提供了极大的便利．复杂的双曲面表皮通过细分分割为若干个表皮分板单元后，才可以将图纸和参数化模型交给工厂进行加工，也更有利于后期的运输和模块化安装．整体上复杂的双曲面表皮，通过细分优化和适应性分割后可以用平面或单曲面等便于加工的曲面进行拟合．同时由于功能或特殊部位的结构要求，部分曲面表皮单元会改变其厚度、材质、形状等属性，完成整个曲面优化过程[7]．本节将对展示馆的双曲面表皮进行单元优化和适应性分割，来达到最大限度的节约造价、为表皮单元的加工和施工建造效果提供保障的目的．

2.1 小节中通过参数化方法完成了双曲面表皮雏形的设计后，在本节的表皮优化阶段可以提供具有详细参数的表皮基本形，能快速将多个整体的表皮细化分割为多个表皮分板单元．优化过程力求在保证整个建筑造型连续流动的效果外，实现对双曲面表皮造价降低及快速加工施工等预期．极小曲面原理是几何学常用的双曲面优化方法之一，即将复杂双曲面优化为多个平面分板单元的组合，从而降低双曲面表皮单元的曲率，进而降低表皮造价．但运用该原理形成的多个平面单元拼接的边缘多数情况下是不规则且无序的，同时分板单元之间的缝隙也是不规则的，这样势必会造成表皮造型细部上的无序．而利用表皮分板单元模块拼接后形成的缝隙实现的表皮肌理作为建筑表皮的重要组成部分[8]，对建筑形象起到至关重要的影响，因此极小曲面拼接的方法并不适合本项目．在表皮分割的过程中，需要更加注重分割后的分板单元之间拼接形成的表皮肌理对整体造型的影响，该肌理应是与双曲面表皮形成呼应关系的、有序且具备适应性效果的．

基于以上分析，设计团队根据双曲面表皮雏形的边缘形状、造型特点和四部分表皮的位置进行了对应的分割方式探索．本次优化在 2.1 小节中曲率控制下的双曲面表皮形态优化结果的基础上进行分板分割的优化设计．在屋顶表皮的分割上(图 9)，通过参数控制将、在环向分割和竖向分割两个方向进行曲线控制分板，将不同部位的分缝肌理位置通过与表皮造型进行呼应，形成放射状的分板组合效果．二层立面表皮 1 和 2 在造型上曲度较小，优化过程中，通过横向和竖向两个方向进行表皮分板(如图 10)，运用多块平板单元拟合成为曲面表皮，大大降低了表皮造价和建造难度．由于展示馆在一层形成了架空空间和入口空间，因此一层＋吊顶层表皮较其他表皮而言更加复杂，表皮曲度更大．如图 11 所示．图中绿色部分是优化后依然呈现双曲面分板单元，其他颜色均为平板单元或单曲面单元分板．可以看出，双曲面的分板单元主要集中在入口部分和架空层部分，同时该部分的表皮分割也需要根据表皮形态进行专项的适应性设计．虽然在优化过程中，设计希望尽可能的将双曲面的分板单元减少，增加可展开曲面和平面分板单元的数量，但是该特殊部位依然需要存在局部的双曲面分板单元来满足流动连续的设计效果，形成表皮经济性和形态美观之间的平衡．

经上述分析和操作，双曲面流线型的表皮最后分割为由若干块形状大小不一的 4 mm 厚穿孔铝板，并在保持整个造型不变的基础上对表皮曲率进行了优化，形成大量的单曲面模块单元，大大降低了整体的表皮造价. 按照最终的表皮分割结果，将每一个分板进行对应的编号(如图 12)，通过参数化平台可以输出每一块板的详细参数信息，包括编号、几何图形、表皮开洞情况以及安装位置等，参数化技术的应用有效的保证了表皮设计加工和安装.

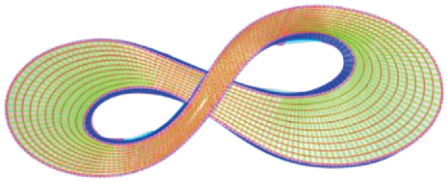


图 9 屋顶表皮分板

Fig. 9 Segmentations of roof skin

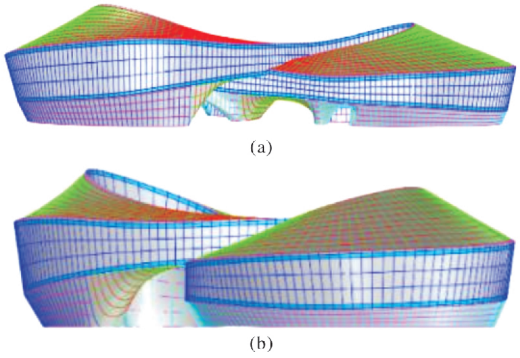


图 10 双曲面表皮分板

Fig. 10 Segmentations of hyperboloid skin

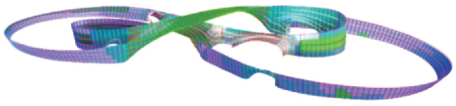


图 11 一层立面＋吊顶层表皮分板

Fig. 11 Segmentations of first floor façade＋ceiling

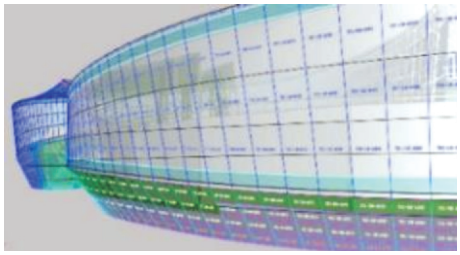


图 12 双曲面表皮分板编号图

Fig. 12 Numbering of hyperboloid skin boards

需注意的是，在优化表皮的同时，表皮的钢结构设计也需同时考虑. 参数化设计程序可以快速确定建筑主体以及表皮龙骨结构的位置参数，保证各个结构之间连接的准确性和精度[10]，使主体钢结构层、龙骨层以及表皮层三者间能有机结合，并对各层级的结构进行准确定位，保证双曲面弧度顺滑[11]，以屋顶为例，其结构如图 13. 最后整合参数化设计、工厂加工和现场调整，形成整个表皮的安装系统，使双曲面表皮幕墙可以快速、安全、美观的呈现(图 14 为施工现场照片).

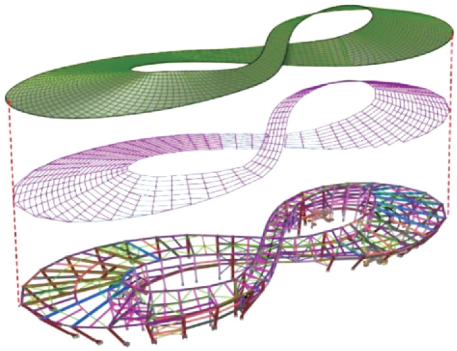


图 13 展示馆屋顶表皮结构

Fig. 13 Roof skin structure of the exhibition hall

图 14 表皮龙骨和表皮单元钢结构施工现场照片

Fig. 14 Photos of skin keel and skin unit steel structure

2.3 光热性能导向的表皮洞口优化

建筑表皮作为室内空间与外界环境直接接触的空间，其物理性能已愈加受到建筑师的重视. 大量实践和资料表明，适宜的建筑表皮运用，可在日辐射的控制和引入自然光间达到一种动态平衡，为室内光热舒适度提升提供有利条件[12]. 因此，表皮的光热性能优化也尤为重要.

在前文表皮曲面形态优化和网格单元优化的基础上，本项目的双曲面表皮系统采用当前使用广泛的双层表皮系统，外表皮采用金属铝板材料，内表皮采用玻璃幕墙，可以更好的满足建筑的绿色生态性能及美观需求；同时金属材料更易于弯曲加工、开洞、切割，并且耐久性较强[13]，更容易进行特殊构件的设计建造，保证表皮完成后的效果[14]. 在展示馆双曲面表皮雏形的后期深

化上，可以根据内部两层的不同使用功能对表皮进行区分，分别根据建筑美学需求进行对应的深化设计．例如一层空间作为展示馆的展厅区域，并不需要进行专门的采光设计，因此其对应的表皮部分可使用不开洞的金属铝板；二层作为办公会议空间则需在双层表皮上进行相应的开洞处理，引入较好的自然光线．因此本次表皮光热性能优化重点以展示馆二层对应的表皮作为优化对象．大量研究表明，办公及会议空间中适宜的自然光线运用不仅可以节约照明能耗，还可以让室内的办公人员拥有良好的工作状态，有利于身心健康[15]．因此在二层立面的双层表皮设计中，金属外表皮通过适宜的开洞处理，形成遮阳板的功能，对于二层的办公和会议空间而言，可有效的降低室内眩光的产生概率，同时自然光通过金属穿孔板外表皮进入室内后，光线也变得更柔和．除此以外，金属外表皮作为遮阳板，可以有效防止西安地区夏季过多的太阳辐射进入室内，降低夏季制冷能耗．需要注意的是，遮阳板开洞方式则通过对不同位置的嵌板通过参数化设计软件与性能模拟工具之间的联动，得到室内性能最佳时开洞的位置及孔径大小，通过将嵌板固定在外表皮金属龙骨上来达到遮阳的效果，铝板的开洞处理直接在工厂加工完成，在现场完成安装即可．

结合上述分析，笔者应用 Rhino & Grasshopper 和 Ladybug & Honneybee 平台[16]对双层表皮对于室内光性能的影响和日辐射遮阳效果通过模拟实验做出对比分析，验证双层表皮系统的绿色性能．实验选取二层西侧的局部空间作为对象(如图 15-16 所示)，对该局部单元进行实验模拟．在室内光性能上，由于二层办公空间比普通的办公空间层高较高，因此设计上更加希望进入室内的自然光线更加均匀，而采光质量通常是较好的．所以采用有效自然采光照度百分比(Useful daylight illuminance，即 UDI)[17-18]作为本次实验的指标，UDI 的值可以反映室内有效自然采光的使用率，同时该值越大则表示室内采光的均匀度越好，产生眩光的概率越低．设计上进行两组实验，分别为 A 组：外表皮为单层玻璃的空间和 B 组：外表皮为金属穿孔板以及玻璃的双层表皮空间作为对比．本次模拟实验根据 GB/T50378-2019《绿色建筑评价标准》中的相关规定，将地面反射比设定为 0.3，墙面设定为 0.6，天花板设定为 0.80，玻璃根据实验情况，设定为 0.7；工作面高度以办公空间为例，设定为 0.75 m 高度．网格精度设定为 1 m×1 m．

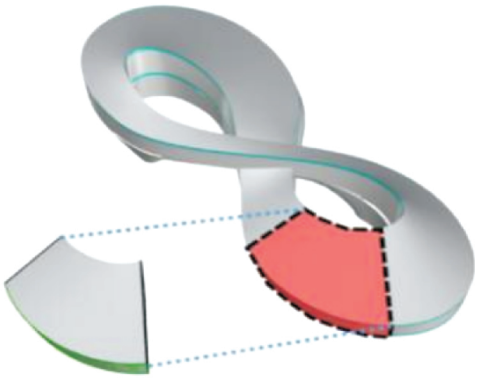


图 15　二层西侧局部空间(模拟对象)选取

Fig. 15　Selection of the local space (simulation object) on the west side of the second floor

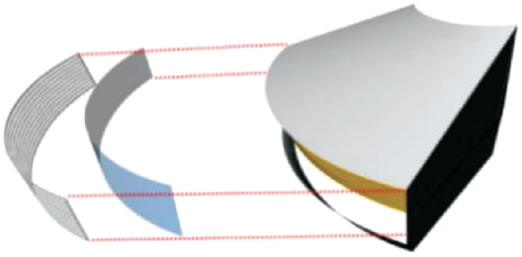
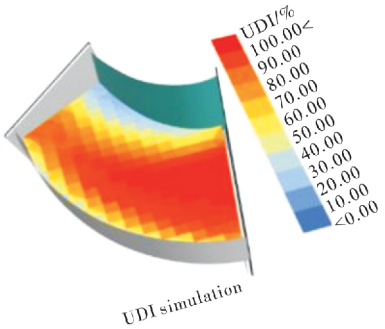


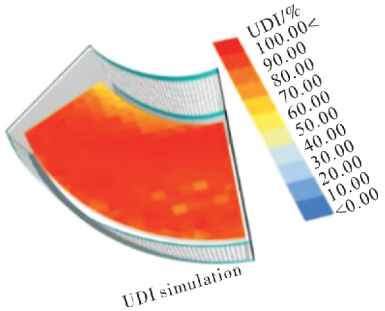
图 16　表皮开洞的双层表皮系统

Fig. 16　Double skin system

根据文献分析实践总结，选取室内自然光照度位于 100lx 和 2000lx 之间的照度为有效照度，在该范围外的照度为无效照度[19]，即 UDI100-2000，该指标越大则表示有效的自然采光效果越好．图 17 为两组实验的室 UDI100-2000 的分布图，同时两组实验的 UDI 平均值分别为 64.32% 和 84.26%，可以看出 B 组的 UDI 平均值与 A 组相比，提高了 19.94%，即表皮开洞的双层表皮系统可以有效提高室内有效自然光的利用率．在夏季日辐射遮阳上，通过对该空间玻璃幕墙上的夏季 6-9 月的累计日辐射量进行实验分析，来判断金属遮阳板的遮阳效果．依然分别对 A、B 组进行日辐射模拟，其日辐射分布图如图 18 所示．从实验结果来看，A 组的日辐射总量为 27 097.87 KW·h，比 B 组的 11 324.77 KW·h 多了 15 773.1 KW·h．从数据对比可以看出，表皮开洞的双层表皮系统可以提供较好的夏季遮阳效果．综上所述，表皮开洞的双层表皮系统与单层表皮相比，可以较好的发挥表皮的绿色性能，创造良好的室内环境[20]．项目落成后，研究将继续检测采光节能各项指标，优化研究方法．



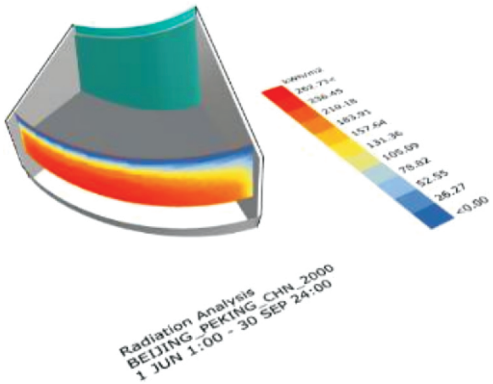
(a)



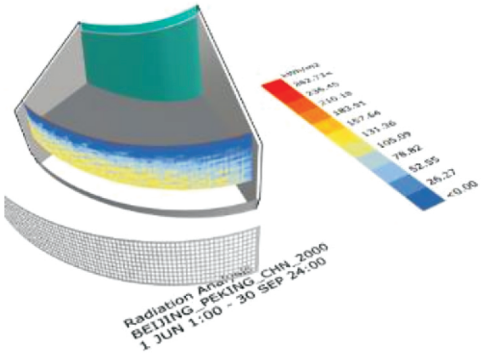
(b)

图 17 A 组和 B 组 UDI 实验模拟数据可视化彩图

Fig. 17 Visualized color map of UDI simulation data of group A and group B



(a)



(b)

图 18 A 组和 B 组玻璃幕墙面实验模拟数据可视化彩图

Fig. 18 Visualized color map of glass curtain wall simulation data of group A and group B

3 结语

本文从西安腾讯双创小镇的方案和表皮设计入手，通过融入“新丝绸”和“无穷”的设计理念，塑造了流动飘逸的建筑形体和独特的建筑形象. 在此基础上，应用参数化设计平台 Rhino&Grasshopper 进行双曲面表皮的设计优化，提出了双曲面表皮实践的优化设计流程，即分为曲率控制下的曲面形态优化、曲面网格划分及单元优化以及光热性能导向的表皮洞口优化三个部分，并验证了该流程的适应性. 曲率控制下的曲面形态优化通过参数化编程建模完成了对曲面曲率精确地控制和优化，可以有效提高表皮模型的调整的适应性、提高设计效率；曲面网格划分及单元优化将不同部位表皮根据表皮的造型需求进行了适应性的分板分割，保证表皮纹理形象的同时，降低了表皮造价；表皮洞口优化以光热性能为导向，将室内物理环境和表皮开洞形成有机结合，赋予了表皮绿色生态的特性. 文章通过完整的优化设计实践展现了该优化方法的有效性，构建具有生态特征并符合美观需求的双曲面表皮，为双曲面表皮设计优化提供了流程和实践参考. 在未来的研究中希望可以继续对不同形式的双曲面表皮进行理论和实践应用，不断完善此方法.

参考文献 References

[1] 庄惟敏，祁斌，林波荣. 环境生态导向的建筑复合表皮设计策略[M]. 北京:中国建筑工业出版社，2014.
ZHUANG Weimin, QI Bin, LIN Borong. Design strategy of building composite skin oriented by environment and ecology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.

[2] FRANK Gehry, MEAGHAN Lloyd, DENNIS Shelden. Empowering design: gehry partners, gehry technologies and architect-led industry change[J]. Architectural Design, 2020, 90(2) : 14-23.

[3] ANTOSIEWICSZ M. Parametric architectural design in geological engineering based on optimization algorithm[J]. Geological Behavior (GBR), 2020, 3(2): 25-28.

[4] PHILIPPE Block. Parametricism's Structural Congeniality[J]. Architectural Design, 2016, 86(2) : 68-75.

[5] MAD Architects. 中国木雕博物馆,哈尔滨,黑龙江,中国[J]. 世界建筑，2013(9):4.
MAD Architects. China wood carving museum, Harbin, Heilongjiang, China[J]. World Architecture, 2013(9):4.

[6] ENEKO Besa. Scharoun versus Gehry : dos opciones metodológicas personales explícitas a partir del análisis

de la Filarmónica de Berlín y el Walt Disney Concert Hall[J]. Cuadernos de Proyectos Arquitectónicos, 2012(5): 86-98.

[7] 李晓岸. 不规则曲面金属表皮的优化设计与建造:以东大门设计广场为例[J]. 建筑技艺, 2015(10): 94-99.
LI Xiaoan. Optimal design and construction of irregular surface metal skin: Taking Dongmen design square as an example[J]. Architectural Techniques, 2015(10):94-99.

[8] 王力, 杨庭. 复杂双曲面建筑外表皮设计实践:以新建杭州东站为例[J]. 华中建筑, 2018,256(9):55-60.
WANG Li, YANG Ting. Design practice of complex hyper bid building exterior surface: Taking new Hangzhou east railway station as an example[J]. Huazhong Architecture, 2018, v. 36; No. 256(9):55-60.

[9] 杨凤祥,王俪葳,段孟,等. 基于 Rhino+Grasshopper 参数化在异形建筑中的研究与应用[A]//. 中国土木工程学会 2020 年学术年会论文集//北京:中国土木工程学会,2020:9.
YANG Fengxiang, WANG Liwei, DUAN Meng, et al. Research and application of Rhino + Grasshopper parameterization in special-shaped buildings[a]//Proceedings of 2020 annual conference of Chinese society of civil engineering//Beijing: Chinese society of civil engineering, 2020:9

[10] 王赛赛, 戴昊, 陈群,等. 提高超高层双曲面幕墙单元体安装定位合格率[J]. 工程质量, 2017, 35(6): 59-63.
WANG Saisai, DAI Hao, CHEN Qun, et al. Improving the qualification rate of installation and positioning of hyperboloid curtain wall unit of super high-rise building[J]. Engineering Quality, 2017, 35(6): 59-63.

[11] 罗敏锋, 姚曙. 双曲结构内表皮系统在深圳机场 T3 航站楼中的应用[J]. 施工技术, 2013(4):68-71.
LUO Minfeng, YAO Shu. Application of hyperbolic struc ture inner skin system in Shenzhen airport T3 terminal[J]. Construction Technology, 2013(4): 68-71.

[12] 郑凯竞. 超高层城市综合体绿色建筑技术与设计研究[D]. 北京:中国建筑设计研究院,2014.
ZHENG Kaijing. Research on green building technology and design of super high-rise urban complex[D]. Beijing: China Architectural Design & Research Institute,2014.

[13] 陈俊松, 李兵, CHEN Junsong,等. 双曲面开放式铝板幕墙精细化施工[J]. 建筑施工, 2014(11): 1248-1249.
CHEN Junsong, LI Bing, CHEN Junsong, et al. Refined construction of hyperboloid open aluminum curtain wall[J]. Building Construction, 2014(11): 1248-1249.

[14] VEREBES T. Technological transitions, industrial innovations and the marching Chinese urban revolution: an interview with Jerry Ku and Philip Vernon of E-Grow, Shanghai[J]. Architectural Design, 2015, 85(6):114-121.

[15] 邴赫亮, 肖辉. 办公空间采光调研分析[J]. 照明工程学报, 2015(1):18-22.
BING Heliang, XIAO Hui. Journal of Lighting Engineering, 2015(1):18-22. (in Chinese)

[16] ROUDSARI M S, PAK M, SMITH A. Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an envi ronmentally-conscious design[C]//Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug. 26-28, 2013: 3128-3135.

[17] 吴蔚, 刘坤鹏. 浅析可取代采光系数的新天然采光评价参数[J]. 照明工程学报, 2012, 23(2):1-7.
WU Wei, LIU Kunpeng. Analysis of new natural daylight ing evaluation parameters that can replace daylighting coefficient[J]. Illuminating Engineering Journal, 2012, 23(2):1-7.

[18] REINHART C F, WIENOLD J. The daylighting dashboard-a simulation-based design analysis for daylit spaces[J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 386-396.

[19] 云朋. ECOTECT 建筑环境设计教程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
YUN Peng. ECOTECT building environment design course[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2007.

[20] 李琳. 公共建筑城市空间的场所开放性研究[J]. 四川建材,2015,41(4):74-75,81.
LI Lin. Research on the place openness of urban space of public buildings[J]. Sichuan Building Materials, 2015,41(4): 74-75,81.

（编辑　桂智刚）