

DOI:10.14188/j.1671-8844.2021-04-008

文章编号: 1671-8844(2021)04-0339-07

# 基于 BIM 的建筑表皮周期性平面镶嵌图案的参数化设计方法

彭正洪<sup>1</sup>, 刘威<sup>1</sup>, 郑启龙<sup>2</sup>, 刘凌波<sup>1</sup>

(1. 武汉大学城市设计学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北大学商学院, 湖北 武汉 430062)

**摘要:** 结合建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术, 针对建筑表皮周期性平面镶嵌的参数化设计方法进行了探讨。解译了周期性平面镶嵌图案的数理特征, 阐述了 Hankin's Method 的基本原理, 并结合周期性平面镶嵌的特性对镶嵌图元进行分类, 定义了单类别镶嵌图元与多类别镶嵌图元 2 种类型。对此 2 种镶嵌类型, 分别在 Revit 软件平台上结合 Dynamo 插件技术, 详细叙述了其参数化设计流程、设计方法, 并给出以此方法产生的具体图案。

**关键词:** 建筑表皮; 周期性平面镶嵌; 建筑信息模型技术; 参数化设计

**中图分类号:** TU 201.4

**文献标志码:** A

## Parametric design method of periodic planar mosaic pattern in building skin based on BIM

PENG Zhenghong<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, ZHENG Qilong<sup>2</sup>, LIU Lingbo<sup>1</sup>

(1. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Business, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Combined with building information modeling (BIM) technology, the specific problem of parametric design method for periodic planar mosaic of building skin is discussed. Based on the explanation of the mathematical characteristics of the periodic planar mosaic pattern and the basic principle of Hankin's Method, the characteristics of the periodic planar mosaic are utilized to classify the mosaic primitives as single-class mosaic primitives and multi-class mosaic primitives. Regarding the two types of mosaics defined, this paper describes in detail the parametric design workflows and design methods on Revit software platform in combination with Dynamo plug-in technology, and gives the specific patterns generated by this method.

**Key words:** building skin; periodic planar mosaic; building information modeling technology; parametric design

平面镶嵌是指用一个或几个平面几何图形连续铺满整个二维平面(如图 1 所示),即使多个相同的平面图形进行无缝关联,理论上这种关联可以是无限的<sup>[1]</sup>。这些相同的平面图形在平面镶嵌中被称为镶嵌图元。平面镶嵌可以分为周期性镶嵌和非周期性镶嵌。镶嵌图元具有平移对称特性的平面镶嵌称为周期性镶嵌,不具备平移对称特性的平面

镶嵌称为非周期性镶嵌<sup>[2]</sup>。

平面镶嵌在设计领域已得到广泛应用,在建筑设计上主要用于建筑表皮的设计,也可用于建筑地面的铺装设计<sup>[3]</sup>。随着计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术的快速发展与应用普及,平面镶嵌在建筑表皮的设计上得到了广泛应用,这些典型案例都是借助计算机技术完成<sup>[4,5]</sup>。随着建筑

收稿日期: 2020-05-31

作者简介: 彭正洪(1967-),男,教授,主要从事数据驱动下的城市研究, E-mail: pengzhenghong@whu.edu.cn。

通讯作者: 刘凌波(1981-),男,讲师,主要从事可持续城市设计与定量城市研究, E-mail: lingbo.liu@whu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 51978535)。

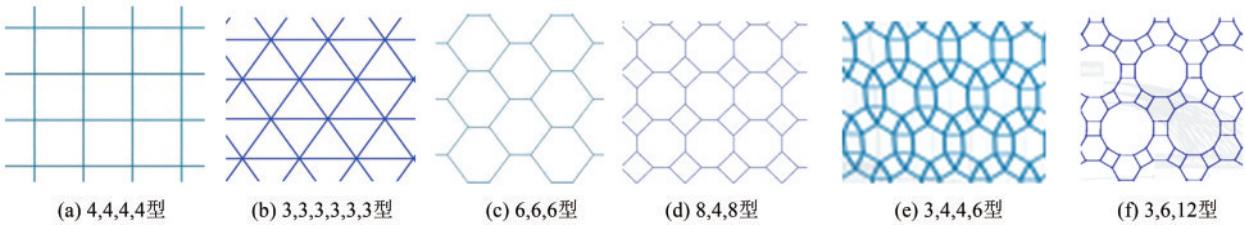


图1 平面镶嵌图案的类型

Fig.1 Types of planar mosaics

信息模型(building information modeling, BIM)技术的快速兴起,基于BIM技术的表皮设计已成为研究热点问题。

1 平面周期性镶嵌图案的数理特征

平面周期性镶嵌的本质是可进行二维平移的网格<sup>[4]</sup>。针对此网格建立一个 $xoy$ 坐标系,如图2所示。根据平面周期性镶嵌的特性,将 $y$ 随 $x$ 或 $x$ 随 $y$ 的变化规律描述为: $f(t)=f(t+\Delta t)$ ,其中 $\Delta t$ 为 $x$ 或 $y$ 方向的变换步长。进一步解释如下:

作如下假定:

$x$ 方向变换步长为 $\Delta x$ ;

$y$ 方向变换步长为 $\Delta y$ ;

$y$ 值随 $x$ 方向以 $\Delta x$ 为步进单位的变换函数为 $f_1$ ;

$x$ 值随 $y$ 方向以 $\Delta y$ 为步进单位的变换函数为 $f_2$ 。

若网格满足以下关系:

$$\begin{cases} f_1(x)=f_1(x+\Delta x) \\ f_2(y)=f_2(y+\Delta y) \end{cases}$$

那么,定义此网格表示的图形具有周期性,称为平面周期性镶嵌图案。

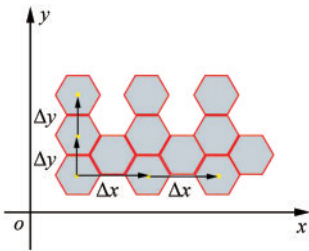


图2 网格坐标示意图

Fig.2 Diagram of grid coordinates

2 镶嵌图元

平面镶嵌中的镶嵌图元是指构成平铺图形的基本图案,有多种类型。为了追求稳定而均匀的效果,实际应用最多的是对称图形的平面镶嵌,其中

以正多边形为基础的图案最为典型<sup>[5]</sup>。因此,本文以正多边形周期性镶嵌作为基础进行论述。

每个正多边形的内角大小为 $(n-2)\times 180^\circ/n$ ,假设一个顶点处有 $k$ 个单类别正多边形镶嵌,可得 $k\times (n-2)\times 180^\circ/n=360^\circ$ ,整理可得, $k=2n/(n-2)$ 。由于 $k, n$ 均为正整数,因此 $n$ 只能为3、4、6。这说明能够做到平面镶嵌的同种类正多边形只有正三角形、正四边形和正六边形,将这种镶嵌方式中的镶嵌图元定义为单类别镶嵌图元,如图1(a)、(b)、(c)所示。此外,不同种类的多边形也可以相互组合完成周期性镶嵌,如图1(d)、(e)、(f)所示,将这种镶嵌方式中的镶嵌图元定义为多类别镶嵌图元。

上述单类别镶嵌图元与多类别镶嵌图元都只是镶嵌图元的外框构造,如果追求简洁的效果,这样就可以实现建筑表皮的平面镶嵌;如果追求图案的丰富多彩,则要进一步完成镶嵌图元的内部构造。内部构造的基本思想是以正多边形为基底,采用Hankin's Method生成镶嵌图元中的内部图案<sup>[6]</sup>。

Hankin's Method是英国细菌学家和自然学家E. H. Hankin在19世纪20年代提出的描述多边形镶嵌的一种算法<sup>[7-9]</sup>,其核心思想如下:

假定基底正多边形的边长为 $d$ ,如图3所示,第 $n$ 条边的2个端点分别为 $p_{1,n}, p_{2,n}$ 。

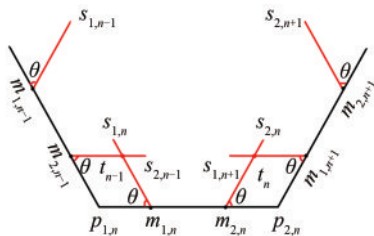


图3 Hankin's Method算法图

Fig.3 Algorithm graph of Hankin's Method

1)在边 $p_{1,n}p_{2,n}$ 上取2个分点 $m_{1,n}, m_{2,n}$ ,使2个端点的距离 $d_{p_{1,n}m_{1,n}}=d_{p_{2,n}m_{2,n}}=t\times d, t\in [0, 1]$ ;

2)分别以 $m_{1,n}, m_{2,n}$ 为端点作射线 $s_{1,n}, s_{2,n}$ ,与

$p_{1,n}$ 、 $p_{2,n}$ 的夹角均为 $\theta$ ,  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ;

3) 求  $s_{2,n-1}$ 、 $s_{1,n}$  的交点  $t_{n-1}$ , 求  $s_{2,n}$ 、 $s_{1,n+1}$  的交点  $t_n$ ;

4) 使用迭代算法依次迭代, 求出多边形的多个

内点  $t_n$ , 这些内点与分点按一定规律连接将构成新的图案。

根据  $t$ 、 $\theta$  的取值不同, 可以产生多种镶嵌图元, 如图4所示。

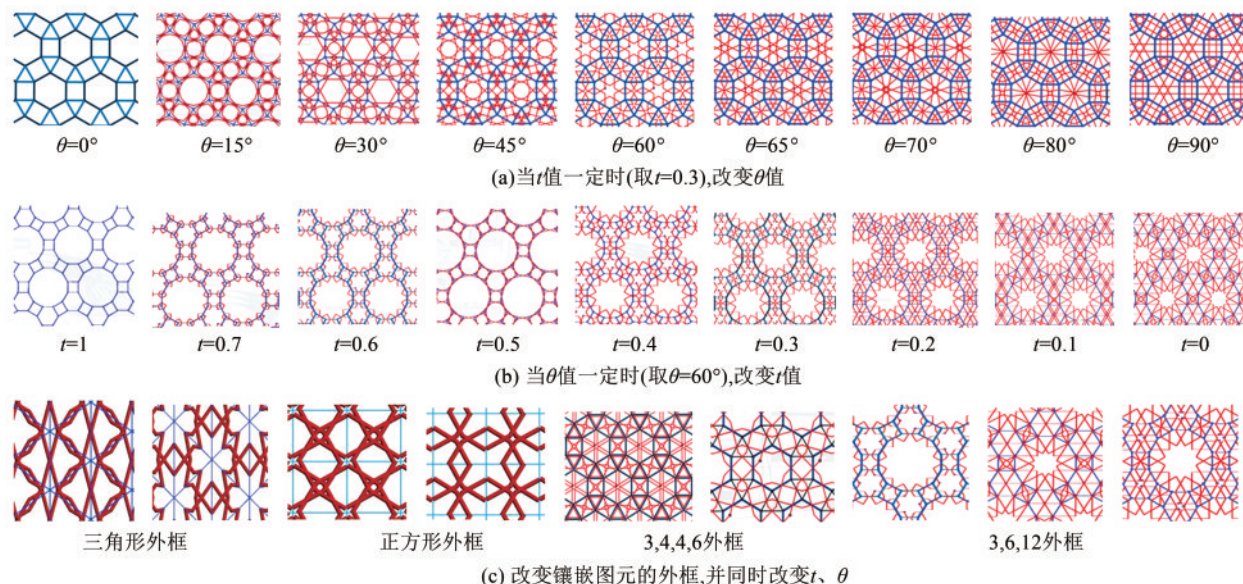


图4 经 Hankin's Method 改造后的平面镶嵌图

Fig.4 Planar mosaic of modified by Hankin's Method

### 3 基于BIM的镶嵌图案设计

基于BIM的平面镶嵌图案, 本文选择 Revit 平台, 同时结合 Dynamo 插件来完成镶嵌图案的设计。

在 Revit 环境中, 首先, 在建立体量模型的基础上完成镶嵌图元的外框构造, 外框的构造有2种方案: 1) 单类别镶嵌图元采用 Revit 自带的功能完成, 实现起来比较简单; 2) 对于多类别镶嵌图元, Revit 自带的功能无法高效实现, 需利用 Dynamo 插件通过参数化设计方法来完成, 设计流程如图5(a)所示。其次, 完成内部图案的设计, 对镶嵌图元是单类别或多类别构成, 内部图案设计有不同的处理方案, 若为单类别镶嵌图案, 利用 Revit 结合 Dynamo 生成; 若为多类别, 则在 Dynamo 环境生成, 见图5(b)。

#### 3.1 单类别镶嵌图元平面周期图案实现

在 Revit 环境中, 用自带的网格分割系统就能完成正方形、三角形、正六边形平面镶嵌图元划分, 将复杂内部图案用自适应嵌板镶嵌在图元上<sup>[10]</sup>, 产生基于基本图元的平面镶嵌图案, 如图6所示。

确定好镶嵌图元外框后, 考虑如何将 Hankin's Method 运用到图元上, 生成复杂内部图案。根据上述, Hankin's Method 中参数  $\theta$ 、 $t$  的不断变换会产生

多种不同图案的嵌板。在 Revit 环境中可以通过人机交互的方式来完成, 但是需耗费大量时间。为提高设计效率, 运用 Dynamo 插件辅助设计, 具体方法如下:

1) 编写一个基于 Hankin's Method 的算法节点包, 该节点包适用于所有正多边形。用参数化电池组实现正多边形边长发出2个对称方向的射线, 定义该节点为 Hankin-Revit 文件。

2) 打开 Revit 自带网格嵌板, 选择正多边形网格嵌板, 根据多边形的边数多次调用节点文件 (Hankin-Revit), 例如正四边形调用4个 Hankin-Revit 文件包, 以此类推。以四边形为例, 运算该节点包, 在 Dynamo 环境中正方形每条边都生成好射线后, 通过剪切不需要的线段生成最后的复杂内框, 最后通过电池组再将 Dynamo 线段转化成 Revit 环境线段。

以正方形为例, 将 Hankin's Method 的算法与 Dynamo 插件结合, 根据  $\theta$ 、 $t$  不断变换产生不同图案, 将图案在 Revit 环境中通过放样生成实体嵌板, 如图7所示, 图中固定  $t$  不变 ( $t=0.5$ ), 通过改变  $\theta$  来更加直观地感受 Hankin's Method 算法转换成实体嵌板的过程。

图8是以正方形为例最终生成的单类别镶嵌图



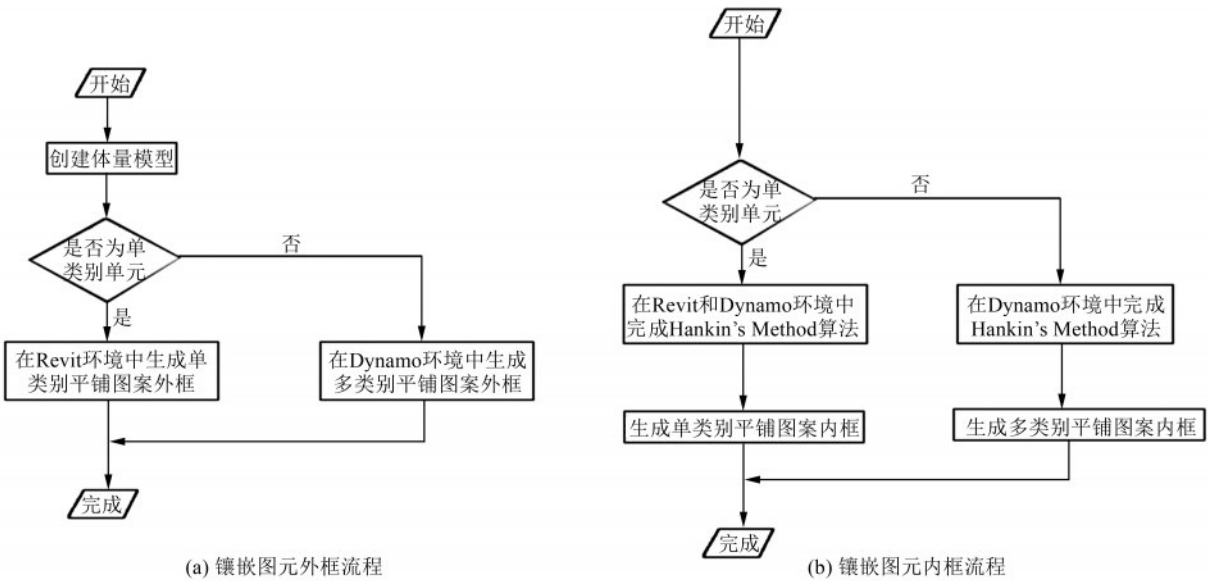


图 5 镶嵌图元外框及内框流程

Fig.5 Flowchart of outside frame and inner frame of mosaic primitives

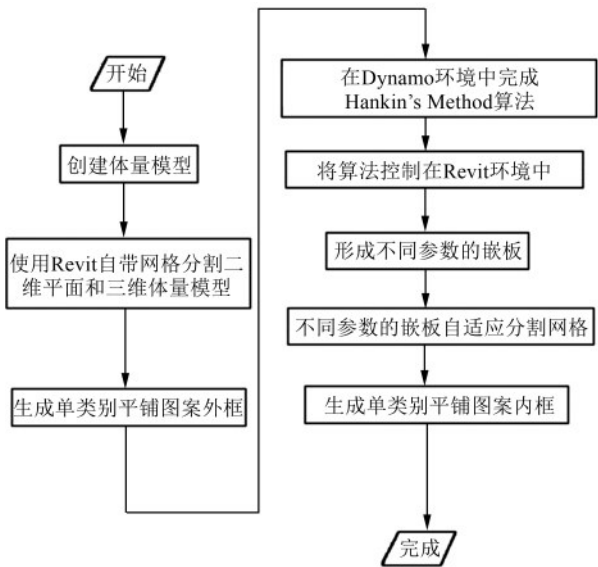


图 6 单类别镶嵌设计流程

Fig.6 Flowchart of single category mosaic design

案效果。对于正三角形、正六边形,其设计思路类同。

3.2 多类别镶嵌图元平面周期性镶嵌图案实现

多类别周期性镶嵌图案的实现不能采用手动网格分割的方式,必须借助 Dynamo 参数化设计插件<sup>[11,12]</sup>,其设计流程如图 9 所示。

对于多类别的周期性镶嵌图案,其组合的方式有多种。以正三角形、正四边形、正六边形的构成为例加以说明:

1)将不同种类的单体拼接成周期性的镶嵌

图元;

2)将镶嵌图元通过 2 个方向的向量平移参数化手段完成在二维平面的平铺;

3)通过 Morph 运算器将二维图案映射到三维体量模型。

生成外框后,考虑如何将 Hankin's Method 理论运用到基本图元上生成复杂内框。由于不能在 Revit 中借助嵌板自适应,不能采用之前单类别的处理方法,只能在空间情况下考虑算法生成,相比平面更为复杂。之前写好算法的电池节点 Hankin-Revit 不能直接使用,需在 Dynamo 环境重新自定义节点,文件命名为“Hankin-Dynamo”,留出 Vector 向量接口,连接所需的空间向量。

Hankin's Method 理论是在平面基础上实现的,但是一些复杂的镶嵌单元可能在空间上并不在同一个平面。需要将三维的镶嵌单元映射到同一个平面上,找到镶嵌单元的平均法向量,然后在空间实现算法<sup>[13,14]</sup>。

取空间上镶嵌外框的所有点,每 3 个点构成一个平面,取得每个平面的法向量,再取  $n$  个法向量的平均向量。运用此方法定义节点包为 3 点平均法向量、4 点平均法向量、6 点平均法向量,供以后调用。

完成了平均法向量的生成后,以该平均法向量生成新的平面,把空间上的外框映射到该新的平面上,设计思想如图 10 所示,在新的平面上完成 Hankin's Method 算法。图 11 为多类别镶嵌图案的效果。

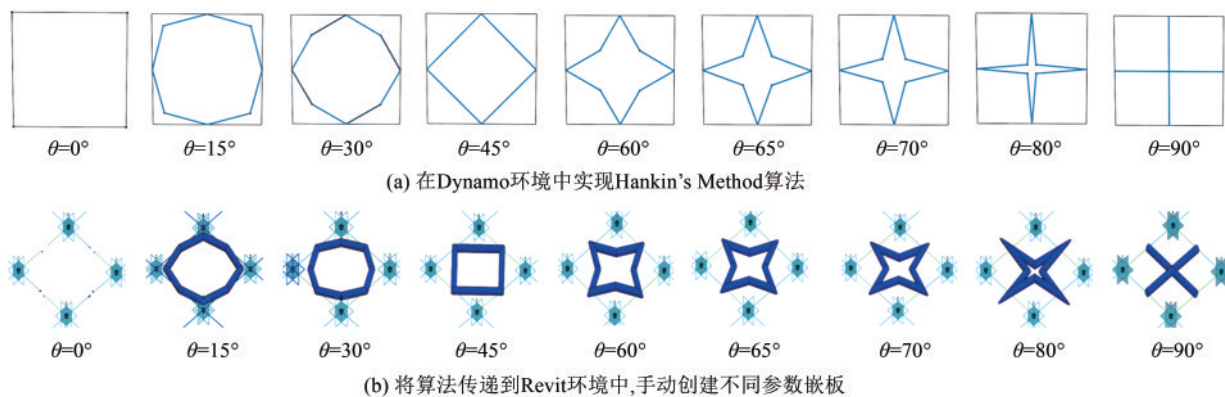


图7 Hankin's Method算法转换成实体嵌板

Fig.7 Hankin's Method algorithm transform solid panel

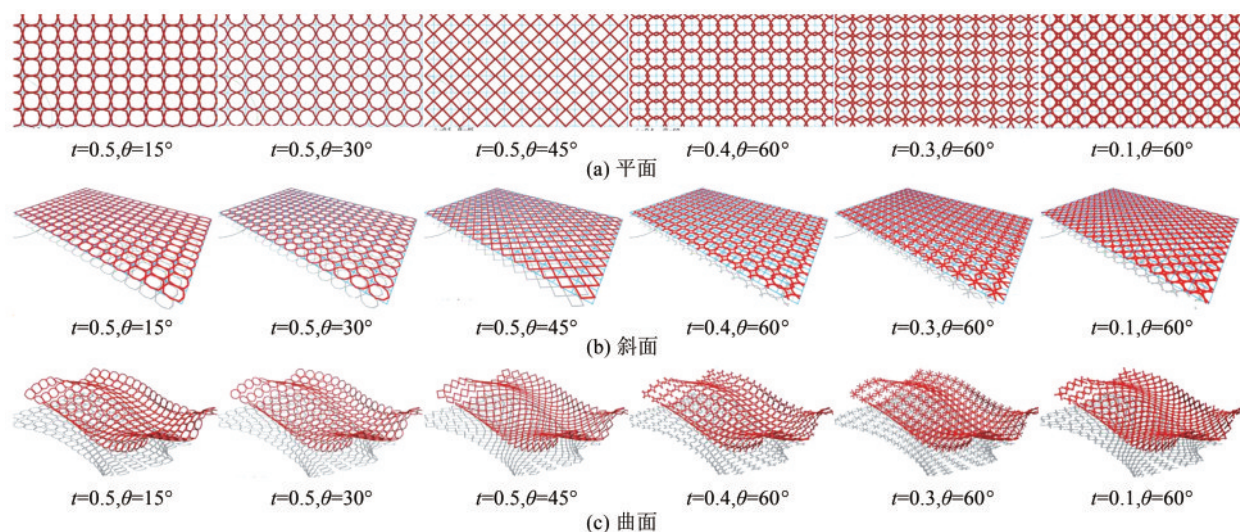


图8 单类别镶嵌图案效果

Fig.8 Design rendering of single category mosaic

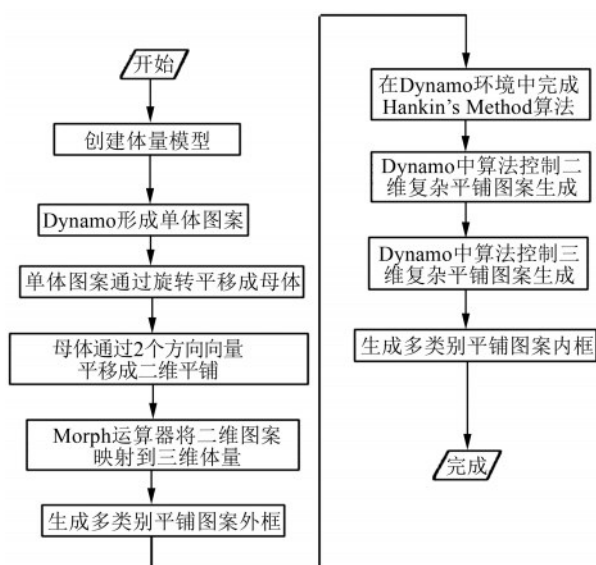


图9 多类别镶嵌设计流程

Fig.9 Flowchart of multi-category mosaic design

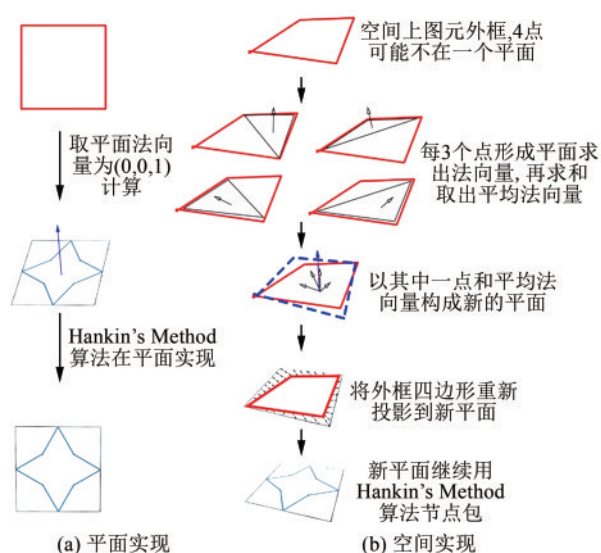


图10 空间上Hankin's Method算法设计思想

Fig.10 Hankin's Method algorithm design thinking in space



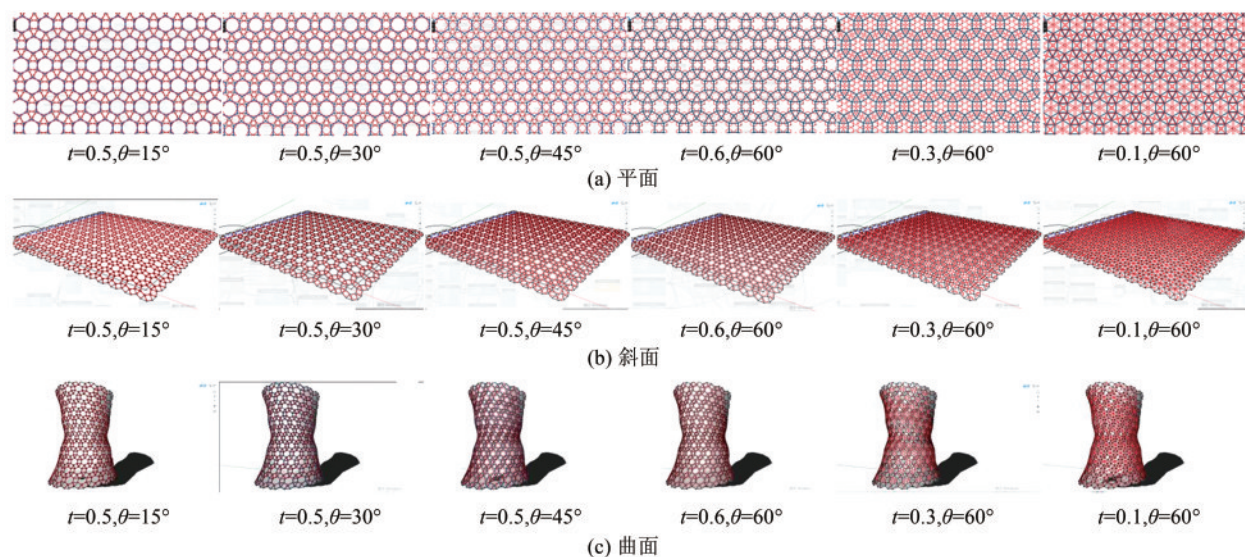


图 11 多类别镶嵌图案效果

Fig.11 Design rendering of multi-category mosaic

## 4 结语

当代建筑设计在不断创新,其表皮赋予建筑更多的个性与内涵。随着设计软件的功能不断提高,参数化设计已让建筑师完成复杂图案的建筑表皮设计成为现实。BIM技术在建筑业快速崛起,以Revit为代表的设计软件被广泛使用,建筑设计师迫切需要熟悉其参数化的设计方法。本文针对周期性平面镶嵌,以Revit软件结合Dynamo插件论述了单类别与多类别周期性平面镶嵌图案表皮设计方法,基于Hankin's Method完成其内部图案的构造。实际上内部图案的构造也可以考虑用其他图案迭代方法来完成。

### 参考文献:

- [1] 王寅杰,刘士兴.建筑表皮中的镶嵌[J].新建筑,2017,(2):76-82.  
Wang Yinjie, Liu Shixing. Inlay in the building skin[J]. New Architecture, 2017, (2): 76-82.
- [2] Garcia M. Prologue for a history, theory and future of patterns of architecture and spatial design[J]. Architectural Design, 2009, 79(6):6-17.
- [3] Zaera-polo A. Patterns, fabrics, prototypes, tessellations [J]. Architectural Design, 2009, 79(6):18-27.
- [4] 胡频飞.平面镶嵌图形系统在建筑面层形态设计中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2013.  
Hu Pinfei. The research of planar mosaic in architectural application and transformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [5] 代芸.BIM技术在建筑方案设计中的应用研究——以晨风小学方案设计为例[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [6] Dai Yun. Research of architectural scheme design based on BIM—the Chenfeng Primary School project as an example[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [7] 苏冲.几何镶嵌找形的参数化设计过程研究[D].天津:天津大学,2012.  
Su Chong. The design process research of parametric design using tessellation form finding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [8] 徐跃家.镶嵌表皮:基于多边形周期性镶嵌的参数化建筑表皮设计方法[J].华中建筑,2019,37(2):31-35.  
Xu Yuejia. Tessellation facade: a parametric design method of architectural facade based on polygon periodic tessellation patterns[J]. Huazhong Architecture, 2019, 37(2): 31-35.
- [9] 徐跃家,郝石盟.镶嵌,折叠——一种动态响应式建筑表皮原型探索[J].设计与研究,2018,(4):114-117.  
Xu Yuejia, Hao Shimeng. Tessellation and folding: discussion of a kinetic and responsive architectural facade prototype[J]. Design and Research, 2018, (4): 114-117.
- [10] Hankin E H. Examples of methods of drawing geometrical arabesque patterns[J]. The Mathematical Gazette, 1925, 12(176): 370.
- [11] Hankin E H. Some difficult Saracenic design II [J]. The Mathematical Gazette, 1934, 18:165-134.
- [12] Hankin E H. Some difficult Saracenic design III [J]. The Mathematical Gazette, 1936, 20:318-319.
- [13] 缪纯乐.Revit自适应构件功能在形体与表皮建模方法上的研究[D].南京:南京大学,2012.

- Miao Chunle. Research on the function of Revit adaptive component in the modeling method of shape and skin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [13] 司秉卉. 基于日照分析的表皮形式设计[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- Si Binghui. Skin form design based on sunlight analysis [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [14] 吴龙杰. 基于参数控制的绿色建筑设计研究——以江苏省残疾人康复中心建筑设计为例[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Wu Longjie. Study on the design of green building based on parametric control——an example of the design of the building for the Disabled Rehabilitation Center of Jiangsu Province[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.



(上接第324页)

- [16] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(4): 38-47.
- Wang Ruimin, Zhao Guofan, Song Yupu. Fatigue of plain concrete under compression[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(4): 38-47.
- [17] Oh B H. Fatigue life distributions of concrete for various stress levels[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(2): 122-128.
- [18] 周宝民. 超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)压缩疲劳性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Zhou Baomin. Experimental study on compressive fatigue properties of UHTCC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [19] 易成, 谢和平, 孙华飞. 钢纤维混凝土疲劳断裂性能与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 59-65.
- Yi Cheng, Xie Heping, Sun Huafei. Fatigue Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2003: 59-65.