



Alexander Schiffner

Evolute 有限公司技术总监。
Evolute有限公司自2008年创建以来，已经积累了丰富的实践技术知识，特别是在复杂几何形状的建设项目方面还建立了一个经验丰富的专家团队，由数学专家、计算机专家与建筑师组成，力图同时实现创新性与实用性。

基于面板方案的自由曲面玻璃幕墙合理化

撰文 Alexander Schiffner Evolute有限公司

简介

数百年前，图纸和铅笔的出现让专业人士可以预先绘制建筑设计图，然后把图纸交给实际施工者。这个 workflows 的结果是专业技术的明显区分——设计师与建造者。而此前，一名建筑师往往也是泥瓦匠、建筑工匠或是指导施工的监工，建筑的结构常依赖于他的构想与经验，很少有现代意义上的规划。

让我们快进数百年的时间，会发现同样的事情也发生在现代数码设计工具带来自由曲面建筑之时。像石墨铅笔一样，数码设计工具维持甚至扩大了设计与施工过程之间的鸿沟。相应的，这就要求其他学科来填补差距并设法解决当代自由曲面建筑设计中产生的几何问题。对于这样的自由曲面设计来说，一个普遍且关键性的任务是建筑元素的面板镶嵌——无论是针对一个屋顶、立墙或是连续的外表面。这个过程提出了一个固有的几何难题：由面板镶嵌而成的表层应该忠于原设计，而这通常意味着保持一个平滑的双向弯曲的外观，与此同时，也需要利用现有的制造和施工技术，建设牢固且造价合理的建筑。

自由曲面外层的面板镶嵌所引出的复杂几何问题并不能用现有的CAD软件解决，这就为新工具与新服务创造了需求空间。在过去的几年中，

这个需求启发了跨学科的研究，数学、工程学与计算机科学共同造就了建筑几何这一新兴学科。这个领域中的几何顾问专家与建筑师、工程师、制造商并肩作战，在复杂几何结构的实现上逐渐起到了核心作用。

在下面的段落里，我们将介绍Evolute的核心技术之一——Evolute特有的面板镶嵌方案，这也是一种可以在自由曲面外层普遍应用的面板镶嵌框架。我们将以近年来Evolute参与过的两个著名建筑项目来说明：法国巴黎埃菲尔铁塔一层重建的台馆以及巴西圣保罗哥林多人体育场（Arena Corinthians）的自由曲面形式的西立面。

实例研究——哥林多人体育场

建筑师：Anibal Coutinho
结构和幕墙设计：RFR
地址：巴西圣保罗市
占地面积：5 400m²
面板数目：855块

哥林多人体育场西立面由建筑师Anibal Coutinho设计，是这所新建于圣保罗市的体育场的入口所在（图1），2014年，巴西世界杯足球赛将在这里开战。

表层设计为一个对称的、双向弯曲的自由曲面，



图1

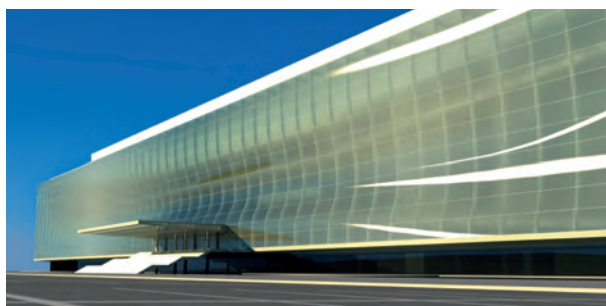


图2

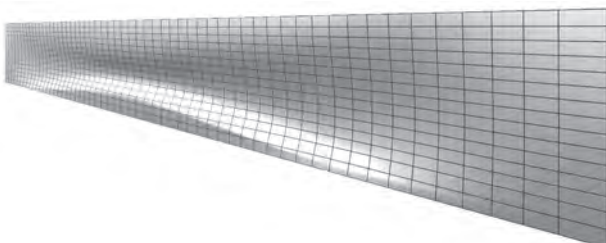


图3

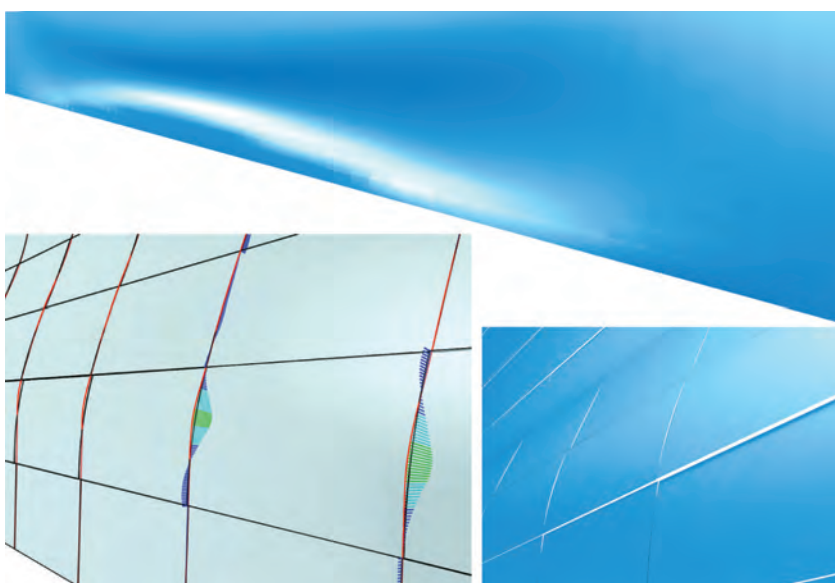


图4

图1 哥林多体育场入口，圣保罗（建筑师Anibal Coutinho提供渲染图）

图2 自由的西立面玻璃（建筑师Anibal Coutinho提供渲染图）

图3 双向弯曲的自由曲面面板接缝由建筑师预先给出，并通过由规整的网格投影到设计曲面上而得到

图4 局部柱面拟合结果

最大面板偏离60mm

外观：面间差角明显，缝隙可见

同参考曲面的最大偏离：50mm

上：外墙全景

右下：面板间隙细节图

左下：与建筑师所给参考缝隙曲线的偏差示例

由855块玻璃面板构建而成（图2）。面板的接缝已经由建筑师预先给出并通过一个规整的网格投影到设计曲面上而得到（图3）。同时，这一过程也在可以制造的前提下尽可能最大化了柱面玻璃面板的尺寸。Evolute受邀用一定的面板镶嵌技术来实现其玻璃外层的几何合理化。

初看上去这份设计图例中的面板镶嵌并不太具有挑战性。然而正如我们试图展示的那样，因为其自由曲面的特性，这样的表层设计为面板镶嵌工作带来了巨大的挑战，主要原因在于此类项目的两个常见目标之间的冲突：为了确保经济方面的可操作性，绝大多数面板应

该采用柱面；与此同时，又需要紧密而平滑地遵循建筑师所提供的参考设计处理面板缝隙（在外边界处更是需要紧密对接），并且面板与面板的偏离距离不能超过6mm，因为只有这样才能在施工现场进一步对面板进行冷弯曲处理。

局部柱面拟合

当前标准的行业解决方案均是基于局部拟合：每段都是独立拟合于一个柱面。

对于自由曲面而言，这种方式无法在满足建筑设计预设的前提下尽可能地探索其几何自由度。图4表明，这种直接的方法并不能保证施工质量。比如，这样得到的柱面面板之间的缝隙会达到数厘米。

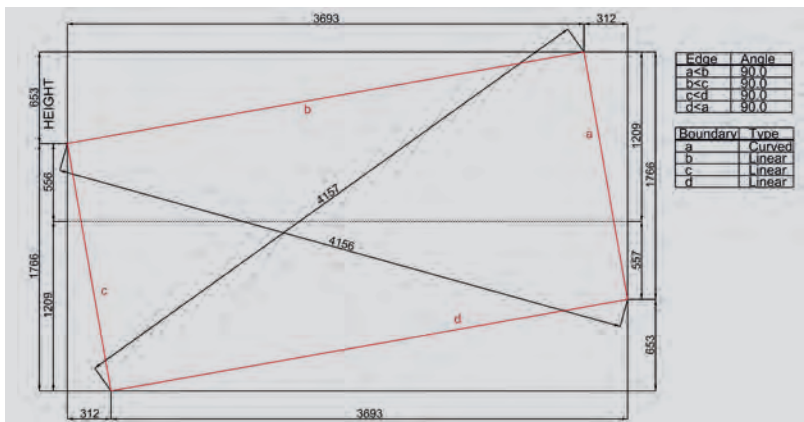


图5

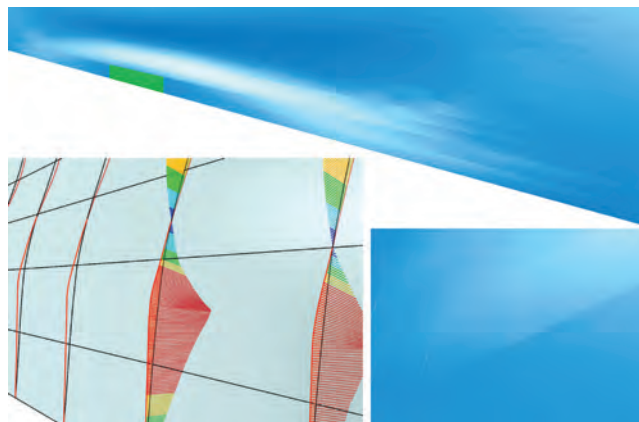


图6

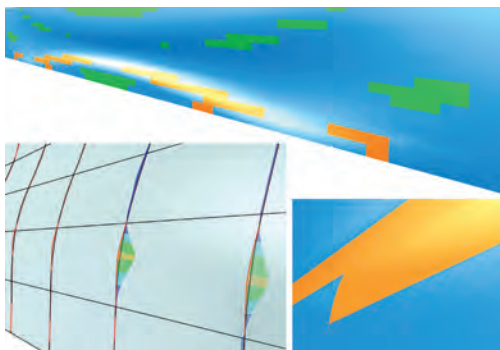


图7

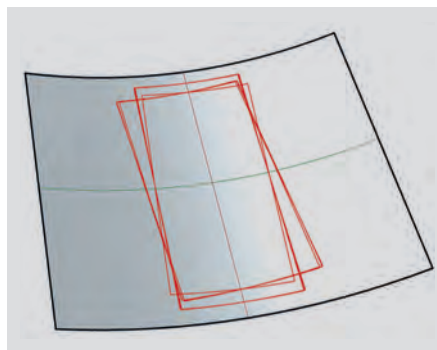


图8

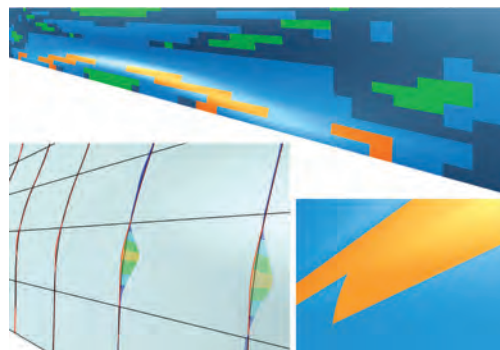


图9

整体柱面拟合

与局部拟合相反，整体拟合时要同时拟合所有面板。为提升整体效果，还可将面板从设计曲面上移开。在哥多林人体育馆的例子中，与原设计图相比，这些面板仅能在内部有偏移，而外边界都需要缝合紧密。同样，为了尽可能重现原始设计，内部的偏差也是越小越好。和局部拟合比起来，即便仅仅将面板从曲面上挪开几厘米，其所能提供的额外自由度也已经能大幅降低面板间的偏离和差角了（图5，6）。

允许少量选用双曲面板

虽然基于整体柱面拟合的面板镶嵌在制造与施工所允许的误差范围内，但若只有柱面面板，曲面外层质量以及与参考设计的接近程度将无法达到建筑师的预期。因此，我们被邀请研究如何只在必需的地方采用少量的双曲面板，从而提升面板镶嵌的质量。这种选择并不是人工的，而是由框架的面板类型选择程序自动确定的。

实际上，这个选择是通过采用满足给定质量要求的最廉价的面板类型所决定的。研究得出了令人吃惊的结果：有策略地在最困难的位置放置极少数几块双曲面板，足以显著提高整体面板镶嵌的质量。52块双曲面板使得周围的柱面板能根据设计曲面更灵活

地选向排布，从而使面板镶嵌方案更光滑且更接近设计初衷（图7）。这就是我们为哥多林人体育馆西立面所选择的最终方案。

模具复用

在哥多林人体育馆项目中，圆柱面板是由意大利帕多瓦市的Sunglass有限公司利用柱面弯曲机制造的，所以，我们不需要尽可能减少面板生产所需不同模具的数量，从而也不用为此对面板进行优化。然而，为了叙述的完整性，我们仍然要在这里展示一下可以对类似大规模面板布局重复使用模具的可能。图8展示了基于图7的结果，区别在于，我们在这里对柱面和双向弯曲的面板都进行了优化，使得它们可以由尽可能少的几件模具制作得到。如图9所示，一般来说，不同的面板来源于模具不同的区域，如果更多的面板属于同一类，那模具可重复使用的几率就更大。对于52块双向弯曲的面板，我们需要38个模具，而对于719块柱面板，我们只需要22个。和前面一节得到的结果相比，这里所能达到的曲面质量完全一样，但只需要61个模具便可制造全部855块面板，这意味着不同形状的数量减少了93%。

下面的案例研究将展示Evolute的面板镶嵌解决方案不仅可以优化最外层面板布局，也可以优化子结构。

图5 典型的自动生成的用于制造弯曲玻璃面板的工程图样

图6 整体柱面拟合结果

偏离：最大处4.6mm

外观：中等地面板化，缝隙难以察觉

上：外墙全景

右下：面板间隙细节图

左下：与建筑师所给参考缝隙曲线的偏差示例

图7 选用了少数几块优化放置的双曲面板镶嵌方案，84块平面（绿）、719块柱面（蓝）及52块双曲（橙）面板被自动选择出来

外观：光滑，缝隙肉眼难以察觉

偏离参考曲面：最大处52mm

上：外墙全景

右下：面板间隙细节图

左下：与建筑师所给参考缝隙曲线的偏差示例

图8 一个柱面模具曲面，红色实线指示了所有由这个模具所制造的面板的边界

图9 我们对图7所示方案进行了模具复用优化后的结果，这个方案使用了相同类型的面板并能达到和图7相同的板镶嵌质量，但只需要61个不同的模具便可以制造总共855块面板，深蓝色所示的是一组由同一个模具所制造出的柱面板

上：外墙全景

右下：面板间隙细节图

左下：与建筑师所给参考缝隙曲线的偏差示例

图10 埃菲尔铁塔台馆效果图



图10

实例研究——埃菲尔铁塔台馆

建筑师：Moatti et Rivière

结构工程师：RFR

地点：巴黎，法国

外墙面积：每台馆175m²

面板数量：每台馆94块

从竞标阶段开始，Moatti & Rivière 建筑事务所就开始在技术方面与RFR公司合作设计埃菲尔铁塔台馆项目的玻璃部分（图10）。与此同时，就台馆外层向埃菲尔铁塔内部倾斜的几何优化问题，他们也同Evolute公司进行了合作。

这个项目还包括了对Gustave Eiffel以及Ferrié台馆的重建：新的电梯顶棚、全景玻璃栏杆以及一个围绕塔中心的全玻璃地板，所有的新结构也都将呼应埃菲尔铁塔原有设计中的梁柱倾斜方向。对于围绕着楼层中心入口而建的台馆透明幕墙来说，这种弯曲是十分具体有形的，使用了一种双向弯曲的自由曲面表层。

这些外层的特定建筑意图是为了强调与体现埃菲尔铁塔的独特设计与优雅风格，包括以不锈钢材料来支撑玻璃。技术要求包括充分的热性能，以及在空间宝贵的情况下足够紧凑的结构。这些外层设计从一开始就建

立在对整体结构的考量上，同时也是基于建筑意图进行几何优化的结果，因此才能达到建筑师的美学目标。

设计方法的选择

自由曲面项目的设计方法大致可分为三种：非合理化、前期合理化及后期合理化。这些分类方法并不那么严格，它们之间的界线也很模糊，当然也有一些项目设计采用了这些之外的方法。

（1）非合理化

根据预算、大小、材料、形状、制造工艺等的不同，即使没有事先的合理化处理，自由曲面也可以被实现。在这种情况下，玻璃样式与结构是可以自由选择的，因此将一组规则的网格平面与设计曲面相交是一种常见的选择方式。这种方式会导出一个双层幕墙的方案，然而，由于空间限制和热性能不佳，这种方案对于埃菲尔铁塔台馆而言并不现实，因而被排除了。

（2）前期合理化

这种方式的原则在于将设计空间局限于特定的几类曲面上。一个著名的例子便是Frank Gehry手工制作的纸张模型。通常使用较多的曲面类型，一般包括平移面或旋转面、通过多次位似变换而得到的曲面以及它们的组合。这样的曲面能直接使用平面四边形或单向

弯曲的（可展）曲面进行合理化。然而，对于埃菲尔铁塔台馆而言，这种方式无法表示建筑设计的初衷，因而不得不被舍弃。

（3）后期合理化

使用这种方法合理化后的结果将非常接近一个给定的理想曲面，又同时能达到既定的合理化标准，这些标准通常强调合理化后曲面与子结构的成本与质量。在后期合理化中，面板布局可以是预先定义的，也可以是合理化过程的一部分，并且常常需要反复多次进行。后期合理化是近年的一个热门研究领域。

三角网格是后期合理化中最简单也是最直接的方式，然而却有着一个巨大的缺陷，就是三角化的自由曲面无法进行规则的法向偏移，这通常增加了节点与子结构的几何复杂程度。

相对于三角化而言，用平面四边形对自由曲面进行面板镶嵌会更难实现。然而，与三角化相比，平面四边形面板镶嵌的主要优势在于可以进行法向偏移，从而降低了子结构的几何复杂程度，减少了面板的数量和切割的余料损失，并缩短了整体节点长度。

然而，无论采用三角形还是平面四边形，用平面镶嵌出的外观注定不适用于台馆的外墙，这使得我们采用了下述的方式，在保证经济可行性的情况下，保持外墙的弯曲特性。

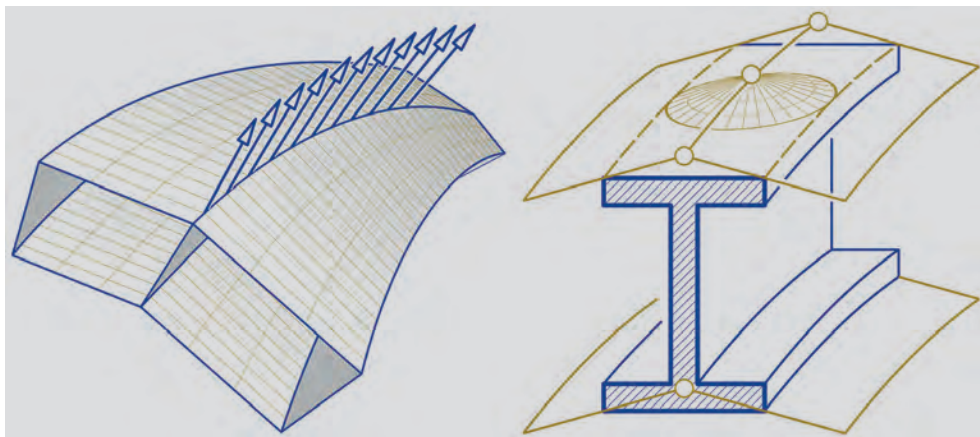


图11

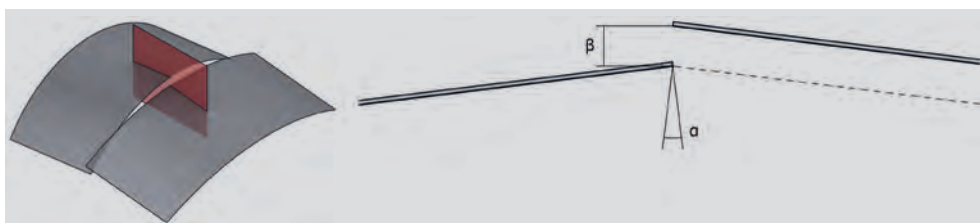


图12

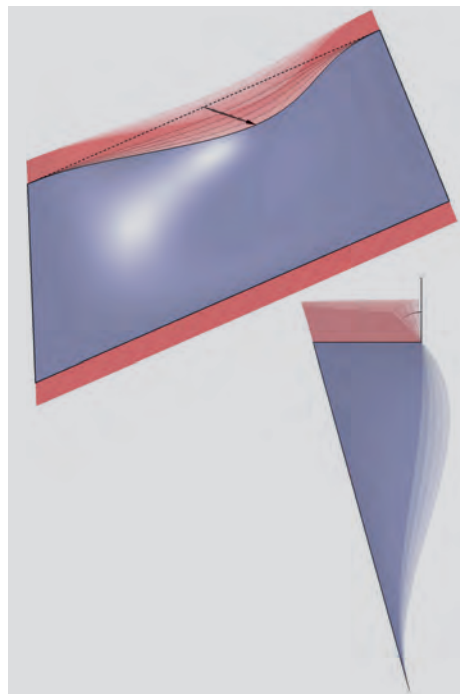


图13

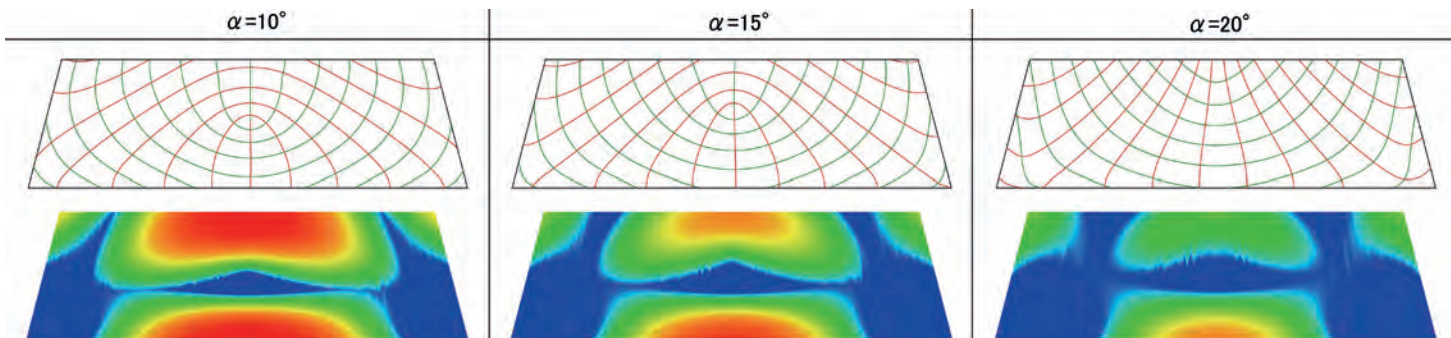


图14

基于可展条带进行的面板镶嵌可以被认为是基于单一方向细分后的平面四边形面板，这两者在结构模式上具有类似的限制和优势。对于埃菲尔铁塔台馆来说，外墙的离散化接近于一个圆锥可展条带模型——这也和光滑曲面上的主曲率线相关。图14展示了台馆设计曲面上的几种主曲率线的样式选择，这些均是在设计过程中不断发展得出的。因为这样的曲面模型能进行规整的法向偏移，从而在布局子结构时有很大的优势，这一性质也在台馆的钢子结构设计中大量使用，其概念示意图可参考图11。

除了用可展曲面简化表面之外，我们还需要更进一步通过使用冷弯曲玻璃或是工业生产的柱状面板来使得玻璃的制造更加经济可行。现代的技术已经可以通过数控弯曲机制造不同半径的钢化柱面玻璃，然而，用柱面玻璃意味着在相邻面板之间存在着两类不连续性：位置与切面（图12）。无论是从建筑的角度还是技术（面板的固定、外墙的密

封等）的角度，最小化不连续性都是一个巨大挑战。全局优化后，位置的不连续性已经几乎完全消除，切面的不连续性则均匀地分布开来。

设计流程

这个涉及台馆玻璃外层建筑与技术概念的设计过程的实现基于一个参数化模型，这个模型协调着建筑、几何和技术方面的限制。接下来将会讨论这个过程中线性与迭代的的不同阶段。

第一阶段：实现一个基于参考表面的参数化模型。这不仅要考虑建筑的意图与限制，也要提供一些尺寸的控制参数，例如面板中部的偏移或是边缘上侧的切向（图13）。

第二阶段：对于每一组参数组合，我们都生成出对应的主曲率线，以及对应的玻璃布局（图14）。为了控制面板的尺寸，布局需要进行调整，而不是严格的沿主曲率方向。这对于相邻面板的吻合程度影响最小，因为它们的衔接都是在最平的区域进行的。

图11 圆锥可展条带模型可以进行规整的法向偏移，从而在布局钢子结构时有巨大优势

图12 在用柱面板进行自由曲面近似时会产生两种不连续性：位置偏离(δ)与切向差角(α)

图13 第一阶段，参考曲面的参数化模型，允许在满足建筑意图与限制的情况下快速的对表面进行修改。上：中部抬升的参数。下：切面方向参数

图14 第二阶段，三个基于参数化模型得到的实例的玻璃布局及曲率分析，最后被选用的是没有中心奇点的方案

图15 第三阶段，设计一个帮助玻璃面板布局微调的工具——这类似于一张扭曲的方格纸

图16 左：第四阶段的优化结果；右：第五阶段的优化结果——柱面的方向被重新排布，以使得切面的不连续集中在竖直条带的方向，以勾勒出埃菲尔铁塔特有的上升感

图17 巴黎铁塔台馆的外墙截面

图18 埃菲尔铁塔台馆的风载力矩图

图19 一个可展箱梁的三维模型、切割图样及实物模型

图20 钢车间里展示的依据三维模型生成的加工几何图样而制造组合成的外墙部件

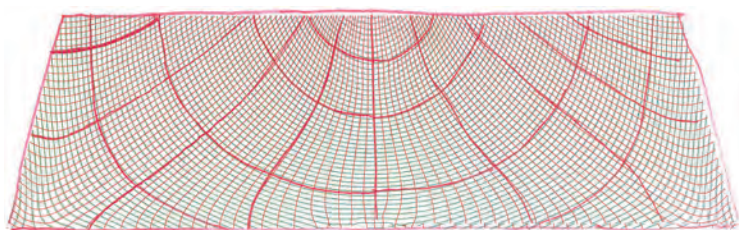


图15

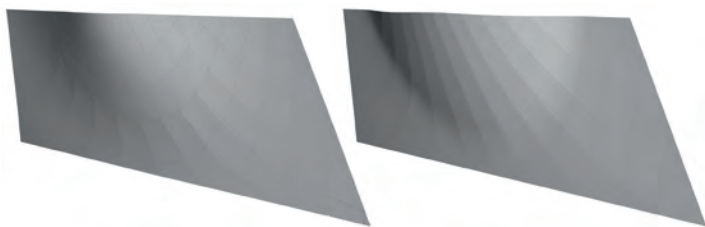


图16

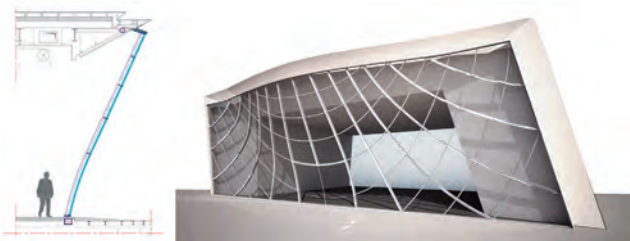


图17

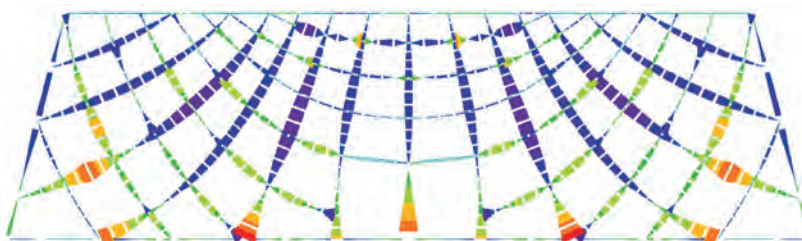


图18

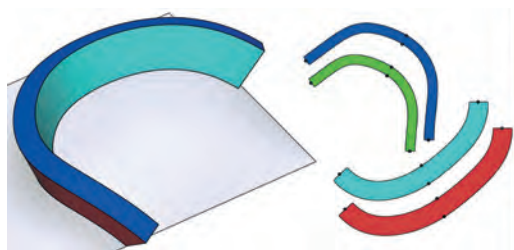


图19

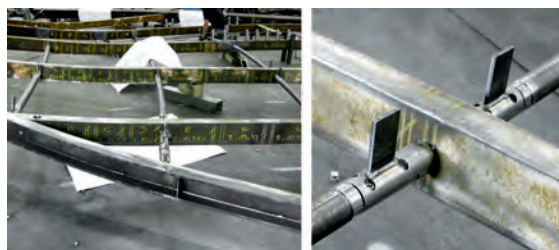


图20

接下来，如何在这些得到的解决方案中进行选择，还需要根据建筑设计的标准以及技术方面的性能，如衔接的相差程度、面板的尺寸大小等来决定。

第三阶段：微调每个面板的尺寸（图15）。该阶段对于中央偏下的区域尤其重要，因为这里需要安装一扇门。从前一阶段选择得到的玻璃布局方向被紧密地细分，就像一张弯曲了的方格纸。接下来，我们和建筑师一起根据已有的参考网格草拟面板的布局。

第四阶段：根据玻璃的样式，我们对柱面面板的半径及排布方向进行了优化，以最大限度地减小相邻面板之间位置与切向的偏差。

第五阶段：从第四阶段得到的结果质量已经非常令人满意，并且最大的位置偏差小于2mm。接下来便是加入附加的建筑学限制进行进一步的优化：柱面的方向都重新排布，这就让切面的不连续集中在竖直条带的方向，以勾勒出埃菲尔铁塔特有的上升感（图16）。

细节设计的演变

（1）玻璃制造

台馆功能所需要的高热性能只有通过采用双层玻璃外层才可能实现，然而，由传统的模具退火处理所制造的双层玻璃让双面玻璃单元的装配变得十分困难并且昂贵，同时还存在着自然破裂的高风险。

埃菲尔铁塔项目所使用的玻璃面板是用数控弯曲机制造的，可以保证玻璃良好的钢化强度、严格控制的制造偏差与合理的成本。在这种方式中，装配弯曲的双层玻璃单元是可行的，并且确保了表层的三种重要质量：对钢化玻璃的利用；因不同活动的举办而在热性能方面的稳定性需求的增加；在空间有限的情况下表层厚度的减少。

（2）结构

埃菲尔铁塔台馆8m高的外墙沿竖直方向布开，并通过边框将荷载传递到建筑物的其他部分（图17）。永久荷载主要通过立柱沿竖直方向传递。立柱的受弯性能使之可以

承受风力荷载，为了减小风力作用下的偏移，立柱的基部由埃菲尔铁塔台馆的主体结构牢牢固定着，这种特定的边界条件可以从图18所示的力矩分布图看出。为了在尽量减少外观影响的前提下让立柱能承受强烈弯矩，我们采用了矩形截面，而其翼缘及腹板则由数控机床切开。立柱的走向是根据玻璃外墙的弯曲节点布局决定的。与位于法国北部城市加来的时尚与蕾丝博物馆不同，那里外墙的立柱仍处于一个竖直平面上，而埃菲尔铁塔台馆的立柱则是三维的，因为它们必须遵守玻璃样式严格的几何逻辑。

由于面板镶嵌选用了可展条带，立柱的4个面也都是可展的，因而其加工成型过程被大大简化。这样的立柱也就是所谓的可展箱梁，其4个面可以分开制造：用激光切割出4块钢板，将它们无扭地弯曲并组合在一起。再接下来，便是将弯曲起来的钢板焊接起来（图19，20）。

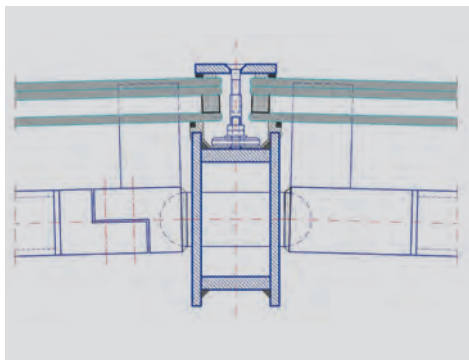


图21

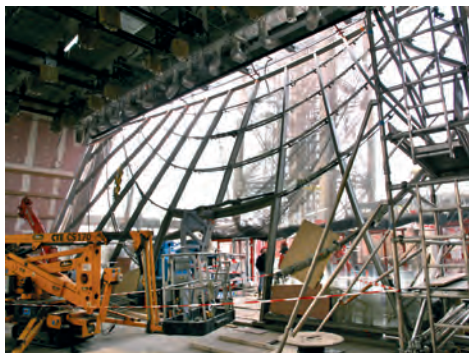


图22



图23

为了能让立柱的相邻面像契合的建筑夹具一样拼接在一起又限定出唯一的形状，立柱每个面的弯曲都是沿特定的路径进行，这样一来，除非是为了质量控制，已经没有使用额外夹具的必要了。

要生成制造每根立柱需要的几何图样，需要以下几个步骤：

1) 根据立柱两侧相邻面板间的均分轴计算一个尽可能接近的可展立柱轴面。由于一对相邻面板间的均分轴到下一对间并不连续，所以计算并不简单。这项任务是通过Evolute为Rhino开发的插件EvoluteTools Pro的优化能力来实现的。由于玻璃的布局很接近曲面的主曲率方向，因而可展曲面的直母线也非常接近外表面的法方向。

2) 通过将立柱轴面向两侧偏移并作适当调整，得到立柱腹板的轴面。这一步骤的理论依据在于将一个可展曲面沿法向进行偏移得到的曲面仍然是可展的。

3) 通过对立柱两侧腹板上适当的对应曲线作蒙皮并优化可展性，计算出对应于上下翼缘的轴向可展曲面。

(3) 玻璃的安装固定技术

埃菲尔铁塔台馆的立柱在三维空间里弯曲而成，其截面的主对称轴总在相邻面板的平分面内。这个表面与支撑结构之间的固有关系及最小化后的接缝偏离与差角，使得在固定面板时可以使用一种标准的连续细部结构。此外，承压板的加工原理与立柱的翼缘一样，也是根据既定的可展曲面从平面板材无扭地弯曲而成的（图21~23）。

结语

这篇文章中提到的两个案例均代表了自由曲面建筑结构基于施工考量的成功设计。这个建立在建筑几何领域最新研究成果上的策略，从一开始就很重视生产技术，它可以创作一种反映建筑意图的设计，从而展示建筑的简洁之美并限制建造成本。

此设计过程是基于技术性与生产性的考量，并采用了一种严格的几何方法。它让不同的建筑意图成为现实，有时甚至成为举世知名的项目，正如哥多林人体育场与埃菲尔铁塔台馆。AT

图21 埃菲尔铁塔台馆的玻璃安装细部，立柱截面的主轴始终过相邻面板的均分面，这使得用于平面幕墙的标准固定细部也可以用在这里

图22 台馆部分完成时的施工现场照片，还没有开始安装玻璃面板

图23 台馆部分完成时的施工现场照片，已经安装了部分玻璃面板