

世博轴技术问题探讨

Discussion on Technical Problems of Expo Boulevard

撰文 卢旦 上海现代建筑设计（集团）有限公司
建设单位 上海世博土地控股有限公司
设计单位 德国SBA公司、上海现代建筑设计（集团）有限公司、上海市工程设计研究总院
用地面积 132 219m²
总建筑面积 251 144 m²
摄影 邵峰

图1 阳光谷

作为2010年上海世博会立体交通组织重要载体的世博轴，由两层地下空间和一层高架步道组成。6个钢结构阳光谷将地下空间和高架护道连为一体。阳光谷采用三角形网格组成的单层结构体系，总面积为31 500m²，每个阳光谷高41.5m，底部直径最大约20m，顶部直径最大近90m。高架护道上覆连续张拉式索膜结构屋顶，总长约840m，最大跨度约97m，总面积近64 000m²，包括支点系统和膜面系统两部分。支点系统通过水平索将31组外桅杆及背索、19个下拉点、18个与阳光谷的拉节点连接成稳定体系。膜面采用国家A级PTFE膜材，由脊索、边索和谷索形成连续的三角倒锥形膜单元。膜结构轻盈飘逸，阳光谷晶莹剔透（图1），然而在实现过程中遇到了诸多的技术问题，通过努力最终实现了技术与艺术的有机融合。

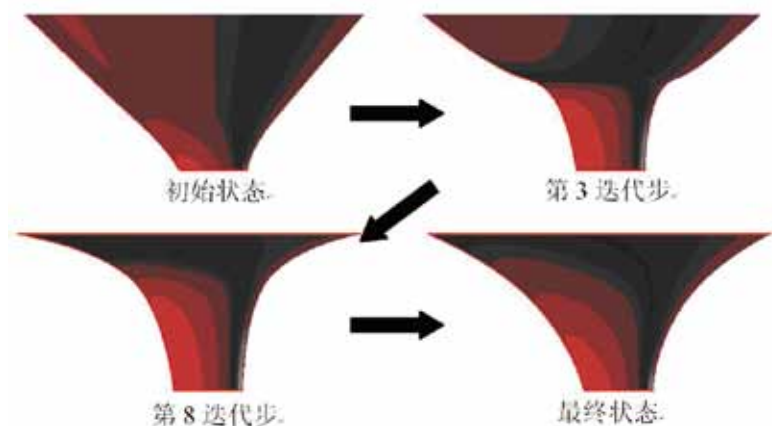


图2 阳光谷曲面优化找形过程

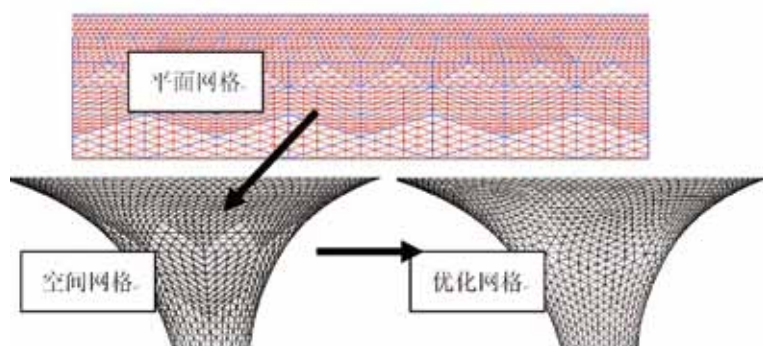


图3 阳光谷网格优化找形过程

1 自由曲面找形

以建立弯曲应力为零、薄膜应力最小的曲面为目标，提出了一种基于计算机辅助几何设计（CAGD）的一体化有限元建模技术与造型优化方法。该方法通过参数联动、模型自动更新等功能，实现了计算机自动进行自由曲面建筑造型的目的（图2）。利用软件自身的二次开发功能，建立了一套CAD软件与有限元软件协同建模与造型优化设计系统。该系统包含了三维参数化动态有限元建模中的若干关键技术，如CAD/CAE集成方法、基于应变能的空间结构优化以及有限元模型参数驱动方法等。该系统可通过调整设计参数（约束条件、空间条件）得到多种合理曲面形态，同时也可以对建筑意图所设定的初始形状进行修改，为基于性能化的自由曲面建筑造型设计提供了新的思路。

2 智能网格布置

单层网格结构的网格划分标准不同于有限元网格的划分，它更侧重于以定性要求为标准的网格质量评价。为满足自由曲面单层网格杆件长度尽量一致、分布尽量均匀、过渡尽量流畅的要求，以自由曲面优化找形为前提，基于网格形状和单元长度的网格质量衡量标准，编制了智能化网格设计程序（图3）。在整个布局设计过程中，首先通过拓扑不变的原则将空间问题转化为平面问题。其次，利用空间映射原理将在平面参考域上布置好的网格映射回三维空间曲面。最后，通过对初始拓扑网格进行智能化的修正和优化，保证所有杆件长度一致、网格布置美观的效果。该方法操作简单，效果理想（图4）。且采用不同拓扑关系布置的网格可以生成同样要求的最终杆件布置效果，供建筑师设计选用。



图4 阳光谷单层钢结构网格

3 建立杆件三维模型

世博轴阳光谷单层网格的节点数量大，杆件空间角度不同，各杆件在节点处存在高差与错边，导致各节点相似却不相同的特点（图5）。人工进行深化设计极易出错且很难发现和校核错误。以“节点相邻面法线合矢量”为原则提出了矩形截面钢管在自由空间曲面上的合理定位方法，并将该方法通过计算机程序实现三维实体模型的自动生成与测评功能，提高了设计效率、规避了出图错误。

4 玻璃的裁剪

世博轴采用明框玻璃幕墙的形式，玻璃之间并非无缝连接，而是存在一定尺寸的边框（图6）。为实现无纸化生产，必须由计算机确定每一块玻璃的实际裁剪尺寸。所有三角形玻璃的三条裁剪边由如下方法确定。首先，每一条玻璃的交线及其对应的梁上表面中心线属于异面直线（图7）。而玻璃的切割线为梁上表面中心线向每个三角形内部平移之后再投影到玻璃表面的线条，由这种方式形成的切割线既保证了平行于梁上表面中心线，又保证了在玻璃表面围合成封闭的三角形。采用计算机编程实现所有玻璃的信息自动计算（图8）。最终，玻璃的裁减非常精确，整体富有韵律，和谐统一（图9）。

5 积水模拟

研究了两项数值模拟技术：CFD技术对降雨的模拟和FEM技术对膜面积水的模拟（图10，11）。其中降水模拟利用了CFD计算中的多项流模型。FEM计算则分别探讨了两类积水状况，提出了膜面分步迭代更新的积水荷载施加办法，即首先按照膜面初始形状布置积水荷载，经过第一次计算后膜面发生位移，根据变形后的膜面重新布置积水荷载进行第二次计算。照此重复，直到前后两次计算的膜面位移的差别小于某一规定值，认为此时为真实的积水荷载。



图9 从地下2层的室内看阳光谷的玻璃

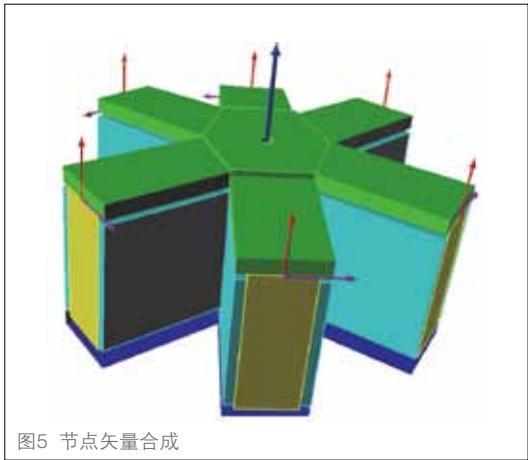


图5 节点矢量合成



图6 明框玻璃效果图

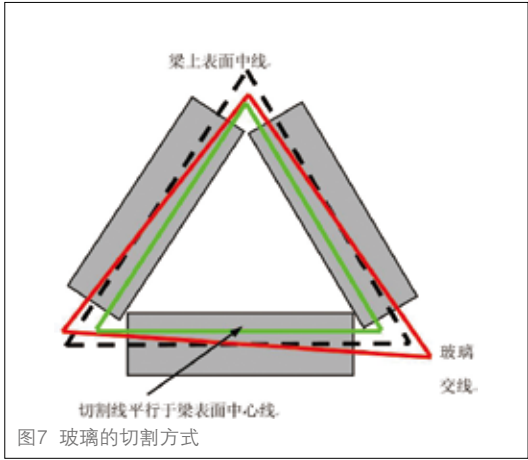


图7 玻璃的切割方式

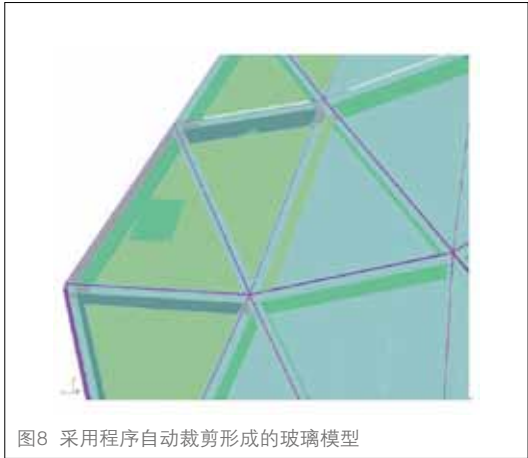


图8 采用程序自动裁剪形成的玻璃模型



图10 膜面积水CFD模拟

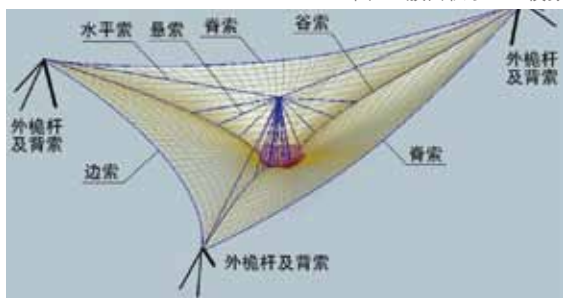


图12 世博轴膜结构示意图

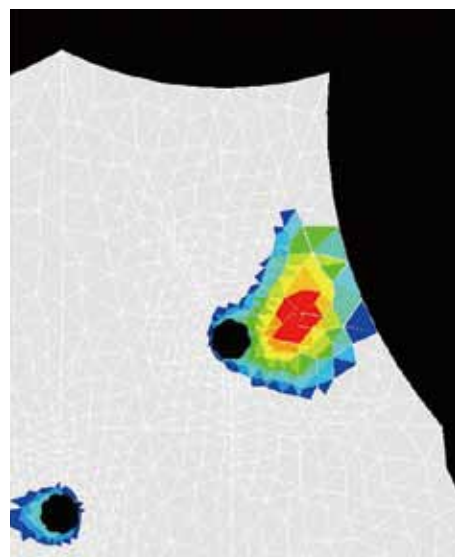


图11 膜面积水有限元计算

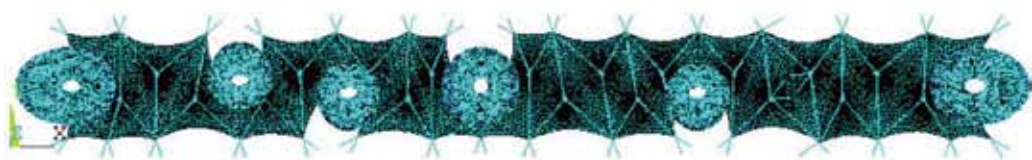


图13 世博轴整体有限元模型

6 Ansys软件在膜结构分析中的应用

相比与普通小品膜结构而言，特大型张拉膜结构的计算分析存在求解收敛性，应力、位移控制，结构自重影响，弹性支座等技术难点（图12）。非线性问题的求解计算困难不在于用什么方法或什么软件，而在于当膜结构本身的边界条件十分复杂，或是膜单元数量非常巨大时，数值计算往往会遇到收敛困难等问题。提出采用分步计算、刚度逐步逼近的方法成功地解决了收敛问题：采用计算流体力学（CFD）中的非稳态计算方法，对世博轴索膜结构表面风荷载进行了数值风洞计算；继而将计算得到的风荷载时程直接加载到有限元模型上，进行结构的动力时程分析，如图13所示为世博轴整体有限元模型。在此基础上，考察了不同结构自重、膜材不同弹性模量以及泊松比对找形及其后续计算结果的影响。此外，还进一步分析了索膜结构与作为其边界条件的柔性支撑结构整体协同工作与非协同工作之间的差异。经过多步计算和分析，最终形成柔美的膜曲线（图14）。



图14 张拉索膜的基部