

CCDR 数字化设计实践

CCDR's Practice in Digital Design

撰文 王斌 水晶石运算化设计研发部 (CCDR)

0 背景

社会发展带来设计环境的复杂多变，人的行为模式、人对建筑的要求发生了本质的变化，促使建筑设计不断地革新与之相适应。参数化、运算化、建筑信息模型 (BIM)、数控建造作为设计建造手段的出现是建筑思潮、技术推动、社会需求的必然结果，本质是计算机技术在建筑领域里的深入应用。

建筑作为一个更大范围的“产品”涉及到社会环境、建造技术的方方面面，其复杂性决定了计算机技术在建筑领域里的应用要比其他行业相对滞后，参数化建模、运算化设计、生成设计、面向组件的信息管理在工业设计领域里已经不是新名词。时至今日，数字设计与建造这个潮流日益从前沿转为主流，技术不断趋于实用。面对设计技术和建造技术的革新，我们起初只是实验性地编写脚本解决复杂几何体的建模，服务于建筑效果图，这种工作方法得到了许多建筑师的认可和支持，水晶石CCDR团队也在此基础上发展起来。但团队不是为某一设计团体服务，而是希望与整个行业交流。这里不对建筑设计理念、概念、空间意向等精神层面上的问题进行过多探讨，更侧重于关注依靠计算机技术对复杂性设计进行研究，以纯粹的工具、技术的方式解决复杂性设计问题。以下结合实例讨论团队主要解决的设计问题，并简要介绍团队的工作流程。

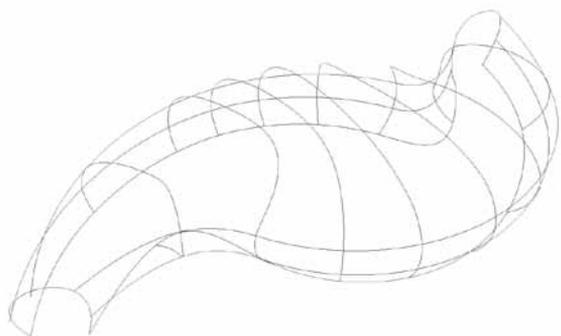


图1 线网得到的曲面



图2 输入参数UV得到表面上的点

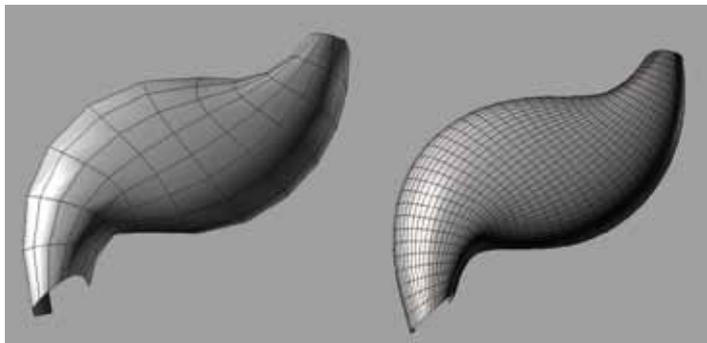


图3 Catmull-Clark细分

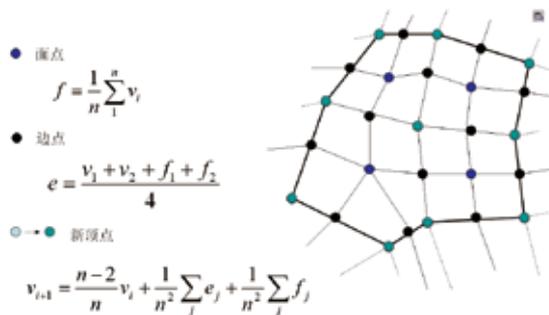


图4 Catmull-Clark细分算法

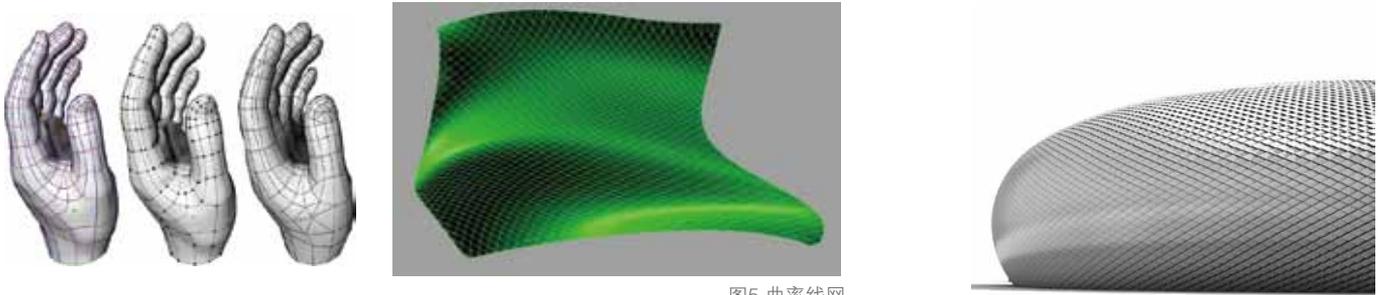
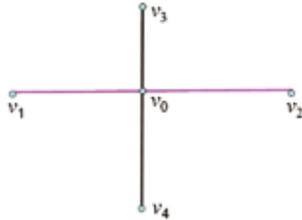


图5 曲率线网

$$f_{fair} = \sum [(v_1 - 2v_0 + v_2)^2 + (v_3 - 2v_0 + v_4)^2]$$



其中, v_1, v_2, v_3, v_4 是以 v_0 为中心的相邻点

网格光顺性的数学表达式, 是两阶差分的离散形式, 几何意义为: fair项越小, 则相邻两向量的方向与尺寸越相近, 从而达到优化网格单元尺寸, 使之尽可能匀质的目的。

图6 网格光顺性优化算法



图7 平锁扣系统金属面板

1 参数化表皮

随着材料使用的创新和建筑构件工业化生产的普及, 在参数化技术支持下, 建筑表皮有了新的表现形式。建筑表皮不再是空间围护的角色, 而是独立连续的组织结构, 试图与承重结构分离, 表达建筑的个性和内涵, 是建筑的重要部分。

软件的发展降低了使用编程语言建构参数化模型的技术门槛, 简单功能模块的组合使以前无法实现的设计想法成为现实, 以至于在曲面上生成构件之类的工作如今已非难事。但是, 简单功能模块生成的构件过于简单和僵化, 如果想要实现设计创意并将方案建成, 就要为复杂的逻辑运算体系开发算法, 处理好实施中的种种问题。

表皮所依附的空间网格是首要定义的工作, 网格定义了构件排列的组织关系, 不同的建造问题需要不同的解决方案。网格的生成有多种方式, 例如根据建筑结构力学原理或者某一数学逻辑生成等, 这里主要介绍以下三种常用的提取曲面网格方法。

(1) 通常在方案阶段, 设计好截面线和轨迹线, 通过“扫掠”、“放样”等方法得到B样条参数曲面(图1), 输入UV参数即可得到曲面上的点(图2), 进而编织各种逻辑网格。这种方法比较方便适合于方案阶段快速地表现设计, 不过由于“点”的位置和曲面的曲率有关, 自由曲面上点的数据一般情况下不能用于实际的建造数据。

(2) 对已有的B样条设计曲面重新提取网格, 得到初始网格后(图3左), 通过细分、优化后得到最终的设计网格(图3右和图4)。这种方法的优点是曲面的连续性好, 方便根据设计需求进行优化, 网格流畅, 容易得到区域性的规格化网格。

(3) B样条设计曲面提取曲率线网, 曲率线网是最大曲率线与最小曲率线叠加后的网格, 形成的网格接近矩形, 非常自然地体现曲面的几何形状, 通过控制采用密度, 一定程度上可以控制网格的单元尺寸。由于曲率线网是由曲面的高阶微分量决定的, 而高阶微分量对噪声很敏感, 计算不稳定, 导致主曲率线在离散网格上的走向复杂(图5)。

基础网格数据确定以后, 根据设计的需要对网格进行优化。优化的内容一般有网格的光顺性、平面四边形的规格化或者基于结构的优化等等。图6所示的优化为网格光顺性算法。最后一步工作就是为不同的构件设计不同的构造节点(图7~9)。

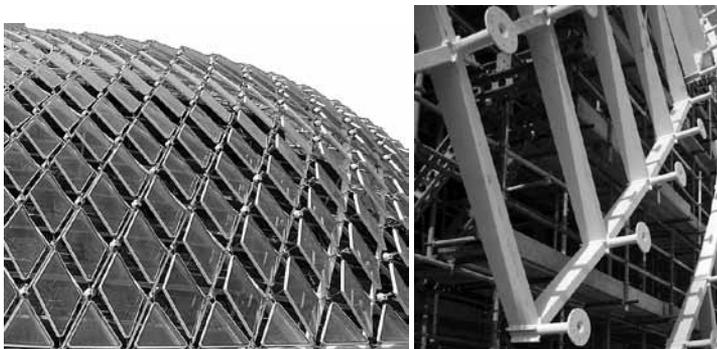


图8 Asymptote设计的阿布扎比yas酒店

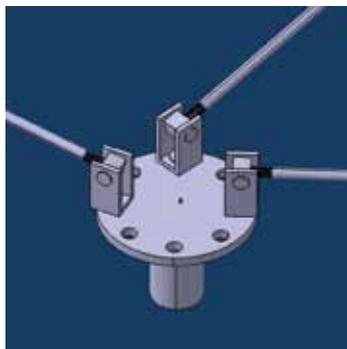


图9 阿布扎比yas酒店幕墙的万向节点（根据资料建模）

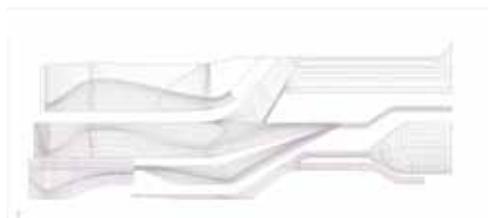


图10 表示韵律关系的线条图

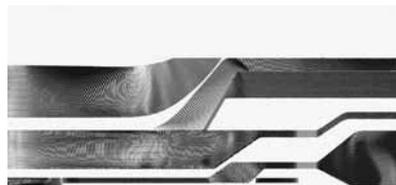
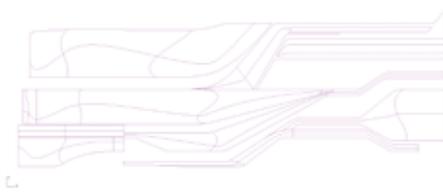


图11 跳舞的圆 (Dancing Circles)

2 案例

(1) 案例一

Amanda Leveté是一位艺术家，她在泰国某商场中的设计概念是跳舞的圆 (Dancing Circles)，希望通过金属圆片这种简单纯粹的几何体编织具有张力和悬念的墙，简约而抽象。彼时身在英国的Amanda通过邮件给了我们表示韵律关系的线条，每片墙都有两条曲线从水平和垂直方向上控制她想要的变化，富有动感的线条将面挤压成“松”与“紧”的对比（图10）。基于这一概念，我们开发算法，将设计师提供的条件作为输入参数，通过计算机算法定义圆片的大小、位置和重叠关系。实验不同参数的组合，选择最优方案，转换成建筑设计语言，以几何实体的形式输出设计。当艺术家遇到参数化，平实的墙可以变得张合有序、生动迷离（图11）。

(2) 案例二

体育场馆的功能设计相对理性，在本涉及项目中，体育馆、游泳馆通过平台连接成整体，呈南北向线性延展。如何通过有效的方式将这些场馆组织起来使得建筑在规划区域中有显著的地位？建筑师的策略是通过一条长长的“飘带”把这些场馆“包裹”起来，这条“飘带”将建筑内部围合了大大小小的室外庭院，使街道形成连续的界面（图12）。“飘带”被众多的菱形网格离散，菱形网格中的3个点确定一个平面，第4个点被投影到这个平面上，形成平面的菱形片。为了让菱形片在视觉上更加生动，丰富多变，根据人的视线结合菱形片在曲面上的高度计算菱形片的旋转角（图13），高的菱形片旋转角大，让人感觉飘逸；位置低的菱形片旋转角小，则呈现重叠的梯度。旋转后的菱形片可以容许一定的重叠，回避了每片不一致的规格问题。统计面板排布的参数，参数经过一系列的逻辑判断拟合优化出几种固定规格的面板，面板类型的最少化节省了幕墙造价。幕墙的支撑体系主要处理的是避免结构杆件发生扭转（图14）、使中心线共轴等问题（图15），简化节点的设计。

(3) 案例三

军艺歌剧院项目通过输入4条城市规划控制线控制建筑整体的走向和体量轮廓，格构柱参数的不同组合实现同一设计构思下不同比例、不同尺度的组合（图16），同时反馈不同形式下石材、幕墙的用量分析。

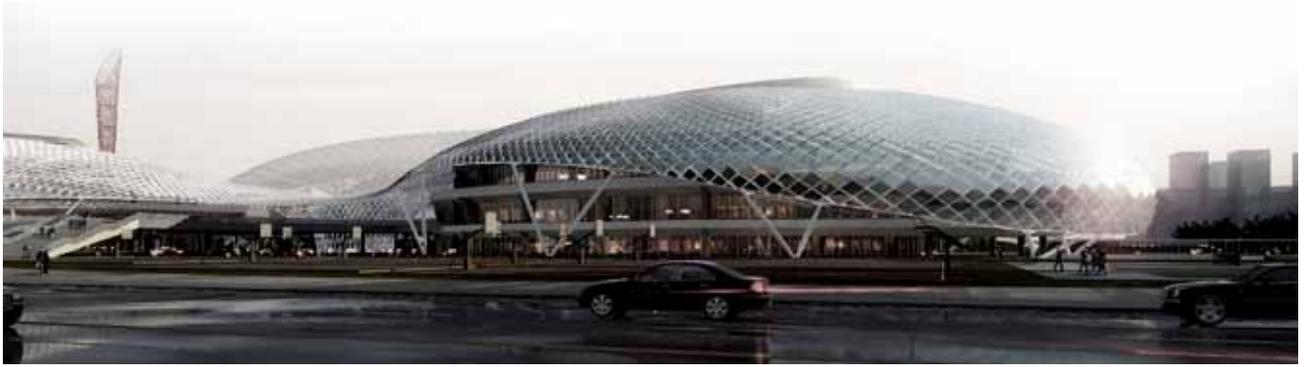


图12 沿街立面



图13 局部

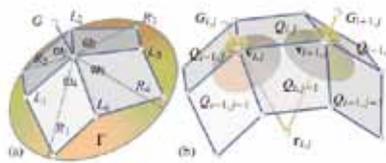


图14

避免结构的杆件发生扭转，必须将四边形网格优化成conical mesh，优化的目标函数是

$$\omega_1 + \omega_3 - \omega_2 - \omega_4 = 0$$

优化后的面具有offset属性。表示成数学表达式就是尽量使得

$$\sum_{i=1}^n \|\omega_i^j + \omega_i^3 - \omega_i^2 - \omega_i^4\|^2 = 0$$

其中n是相邻顶点数为4的点的个数。采用一种优化算法实现这个目标。如图(b)中所示 $V_{i,j}$ 、 $V_{i+1,j}$ 顶点的法线汇集于一点，向量 $G_{i,j}$ 、 $G_{i+1,j}$ 与点 $R_{i,j}$ 形成一公用平面。(图片引用SIGGRAPH 2006 H.Pottmann)

内蒙古演艺中心的方案中，外表皮系统响应建筑功能上的需求，计算开窗率，六边形单元保持着同一拓扑结构下的自我相似性——连续有机（图17）。参数定义了设计的输入条件，变量通过运算与设计结果的输出建立即时的联系，个体单元通过运算建立起连续、多样的复杂整体。这些案例无不体现了新工具对设计流程的改变以及效率的提高。

3 动态空间

动态空间是多元时代的一种新的设计方向，极具颠覆性的建筑墙面、屋面、内饰等把设计的复杂性推向新的阶段，新的空间形式使设计与建造必须使用独特的流程和专业的的方法。我们从设计创意出发，探索不同阶段的解决方案，使用合适的数字设计软件，在3D的世界里实时感知、互动。

首先，在形式化层面的探索中，我们对于曲线、曲面的定义必须脱离可视化的范畴。例如在某剧院项目的辅助设计中，对于剧场的曲面设计，建筑师希望观众厅营造出一种行云流水般自然动态的时尚视听空间。方案初始阶段不同的建筑师采用不同的方式表达设计构思，有草图、物理模型、简单的数字模型等，经过整理后作为底图采用Maya快速建模（图18）。一周多的时间建筑师们一共发展了5个方案，研究讨论后，最终确定了一个方案继续深入发展，至此探索性的尝试结束。随着设计不断地深入，曲面的设计不但要考虑声学、舞台灯光、观众视线、设备布置等诸多因素，而且要符合工业生产标准的数据格式，这时就必须使用更加精确灵活的工业设计软件Catia重新建模（图19）。其他专业的设计咨询机构此时开始介入，给设计增加了约束条件。设计师想要表达的设计更加明确了，协调后的模型反馈给其他专业的设计咨询机构（主要有声学、设备、结构等）（图20），这样反复修改、协调，推进设计的进展。

歌剧院的室内设计最重要的事情莫过于声学设计（图21）、科学合理的剖平面体型、合理的混响时间、场内良好的声场扩散、足够的声容量等。为使剧场内曲面的设计达到声学环境标准，我们整整用了两个多月的时间。视线设计模拟分析也是重点，席位的设计受到视线、空间布局的制约，每次设计条件的变更，使调整1600个席位的布局变得十分繁琐和枯燥。为此，在Catia知识工程环境中（图22、23），把现有国家规范中关于席位排布的规则描述成软件内部的脚本语言，这样一旦外部环境的变量发生变化，知识工程会自动更新。

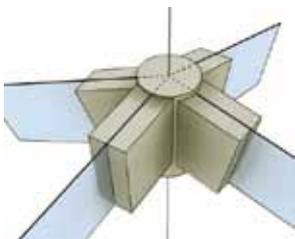


图15 共轴 (H.Pottmann Vienna University of Technology, Austria)

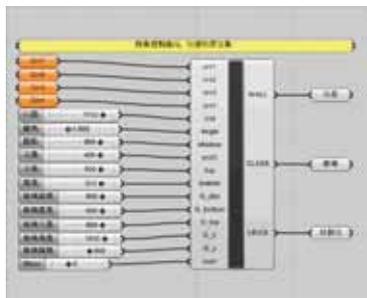


图16 CDDR为建筑师编写的Grasshopper程序

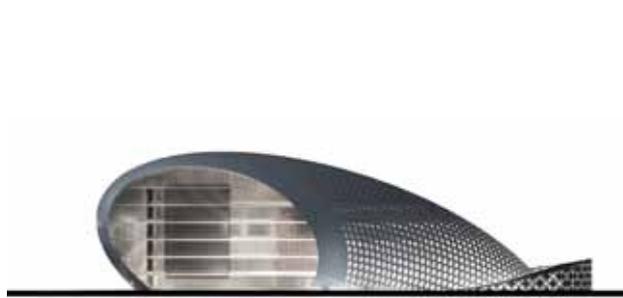


图17 内蒙古演艺中心连续变化的窗洞

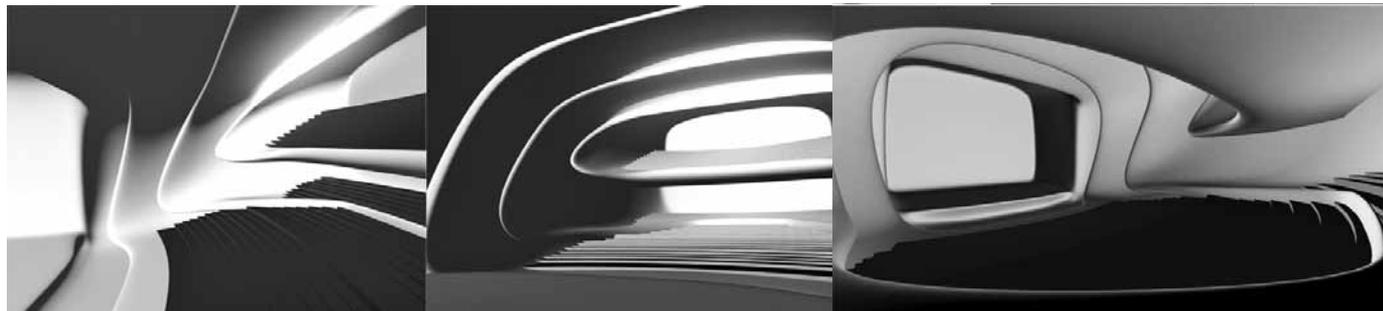


图18 推敲方案的Maya模型

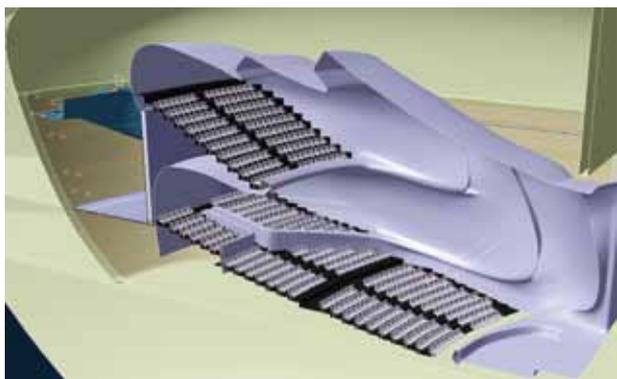


图19 Catia 模型

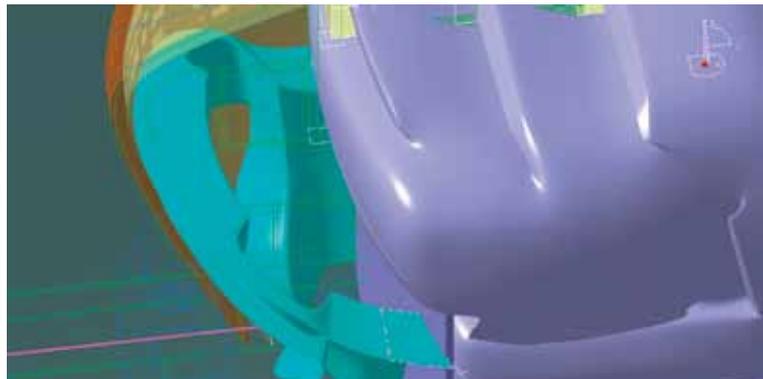


图20 设备预留空间

多学科的团队架构超越了几何、物理、计算机技术能力上的局限，在这一过程中，团队主要的任务是协助建筑设计机构发展设计概念，优化设计方案，分析选型建筑形态。针对每个项目特定的问题进行研究，寻找数理上的逻辑关系，模式化设计语言，建构参数化控制的三维模型，使复杂的项目切实可行。

4 BIM和运算化

BIM是时下十分热门的课题，涵盖的行业和服务的范围十分广泛。BIM系统的应用大大提高了设计师系统处理设计问题的能力，尤其对设计规模宏大、结构复杂的曲面建筑有不可比拟的优势。

在建筑工程设计周期中，搭建建筑信息模型，使用参数化工业设计软件协调项目进行中的各种变化，构件的信息化管理与设计是贯穿始终的重点。在实施过程中，需要处理和分析各专业互相索引的数据，按规则建立一个完整的3D数据库。BIM要兼顾建筑、结构和设备之间的协同工作，而不同专业所需要和关注的结果是不一样的：建筑师关注的是构件曲线是否优美、布置是否匀质，空间是否和建筑总体设计协调；结构工程师需要的是安全合理、便于计算的模型，是点线几何向量关系上的结构分析模型而非几何实体模型（图24）；设备工程师关心的是某个位置结构的杆件截面，能否让设备管道通过。

在内蒙古科技馆项目中（图25），建筑师的创意是草原上的一片云，这片“云”从众多方案中脱颖而出，也给建筑的设计带来了复杂性。首先是这片云的结构支撑体系，合理的骨架支撑体系是还原建筑设计

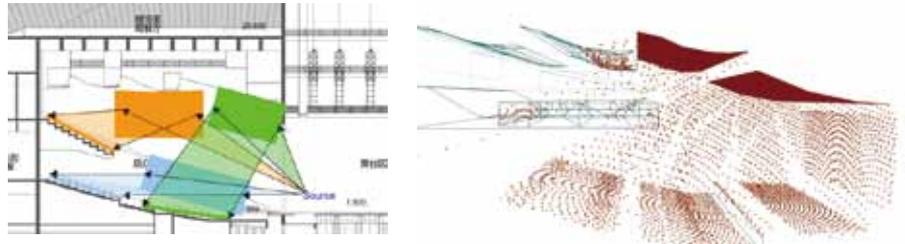


图21 声学设计（马歇尔戴提供）

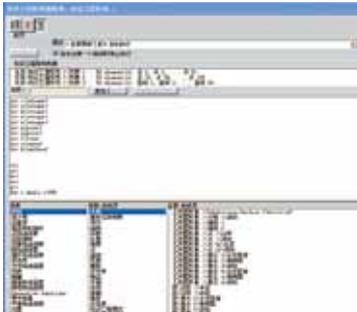


图22 知识工程系统

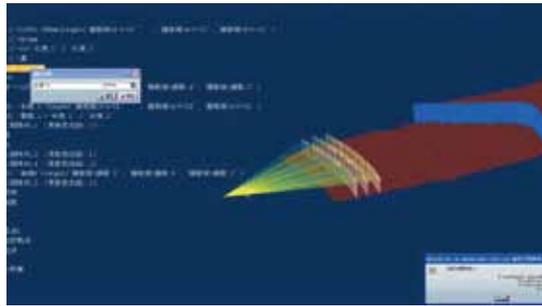


图23 视线分析

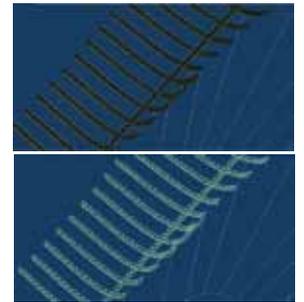


图24 建筑和结构（上图是构件的几何实体，下图是结构计算线）

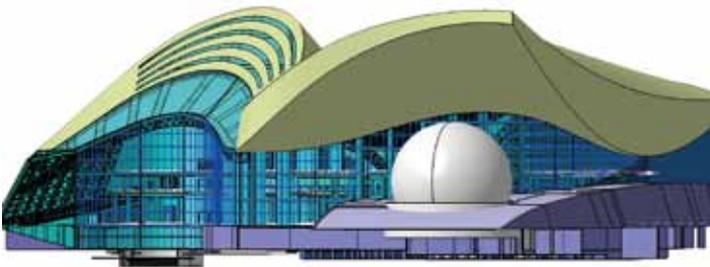


图25 内蒙古科技馆轴测图



图26 网络的权限管理和版本管理

形体的关键，其次是在这片云里得排下功能性用房和设备管道。CCDR团队从初步设计开始介入，在建模的初始，对控制设计的逻辑关系做了“至上而下”的整体骨架布局，对协同设计系统做了基于网络的权限管理和版本管理（图26）。以构件为单位建立组织关系，构件间的参数互相索引，构件继承关系的父子级必须明确，否则最后的模型是一堆几何体的堆积，失去了参数化的意义。建模的开始就和主设计方充分沟通，共同探讨建筑自由曲面的结构支撑体系，确定各专业施工完成面在空间上的站位控制体系。具体的工作包括完成如下两个方面的布局：

（1）明确垂直通道的规划：包括垂直交通系统、电器管道井、上下水、空调专业等管道的空间预留。

（2）建筑曲面的包裹系统：本项目主要是曲面的屋面和吊顶，以此为基础层层偏移得到空间上的站位面。偏移的参数使站位面随外形曲面形态的改变而自动更新（图27）。

在BIM模型搭建中，我们引入运算化设计工具，开发插件实现现有结构计算软件没有的功能。室内空间跨度大，屋顶的结构主要是三角桁架结构，三角桁架是一种几何关系明确、造价经济的结构形式，但复杂曲面屋面下的桁架在布置过程中满足安全性、经济性、施工方便和美观等要求并不容易，我们把这些约束关系用计算机语言描述成运算法则，成为一种结构简单的生成规则，杆件和节点的生成宜减少数量和品种，构造简单，规格整齐划一。个体的单元由一系列简单的四角锥生成复杂的空间桁架结构帮助工程师摆

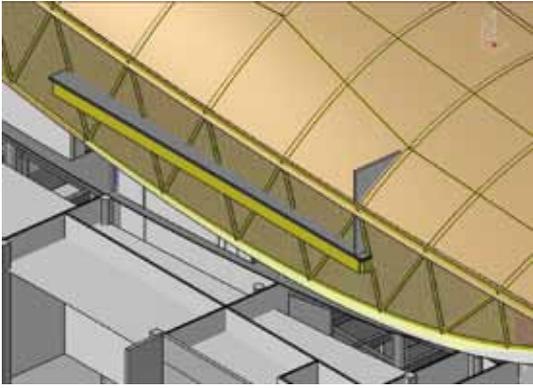


图27 站位控制面（黄色）

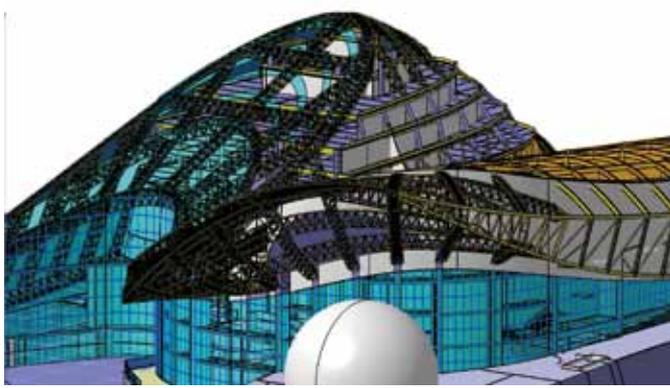


图28 屋面钢结构



图29 钢结构局部1



图30 钢结构局部2

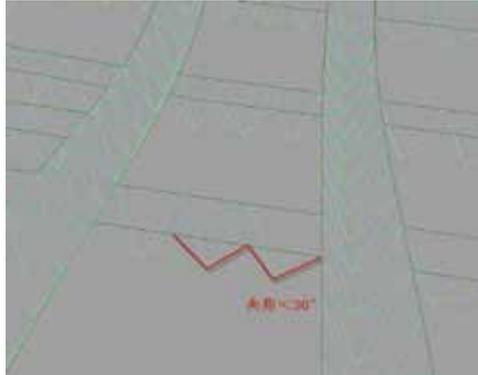


图31 查找不符合规范的杆件



脱繁重的手工建模工作。以前在有曲面复杂形体的建筑中，结构工程师要手工用直线段离散大量的B样条曲线、圆弧段进行计算，这个工作现在也可以由插件的功能实现自动生成（图28~30）。杆件生成后的下一个步骤是检查桁架连杆间的夹角，保证所有的夹角在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间（图31），有良好的力学性能且便于焊接。几万根杆件瞬间即可完成检测。杆件定位的几何数据符合数控加工的标准，对特殊的节点做有限元应力分析。而以前对于这种问题，可能直到钢结构公司出施工详图的时候才能被发现。

自由形式建筑的发展、CAD-CAM 的发展以及在建筑领域里的应用，使得越来越多的建筑构件的施工依赖于工业化生产和优化设计，改变了传统的设计和建造模式，开发优化应用程序占用了大部分时间。内蒙古科技馆公共大厅的玻璃顶棚自由曲面的四边形平板玻璃的离散，使用的是CCDR团队自主研发的计算程序。这个项目曲面网格的划分在概念设计阶段就已被确定，和GRC屋面交接处所有网格的点不能更改，剩下的问题就是面板的平板化问题。目标函数和约束函数确定以后，研究稳定、容易收敛的优化算法成为核心，最后我们选择了牛顿高斯法逐次逼近，通过“扰动”的办法使四边形面板趋于平面化（图32）。离散后的四边面板是完全符合施工公差要求的平面玻璃镶板，相比没有优化的需要开模制造的玻璃面板，节省了造价。特别是双层保温幕墙，平面的玻璃面板比自由曲面的玻璃面板安装要容易得多。

此时的三维信息模型更像是数据库的一种表现形式，对整个建造做双向的输入输出。可视化的预演建造、构件的关联性避免了传统设计模式中无法预知的设计冲突，用统一的平台协调设计和施工，加速了建造进程，节约了造价，进一步拓展了数字化设计服务的范围，最终和实际生产建造产生关联。

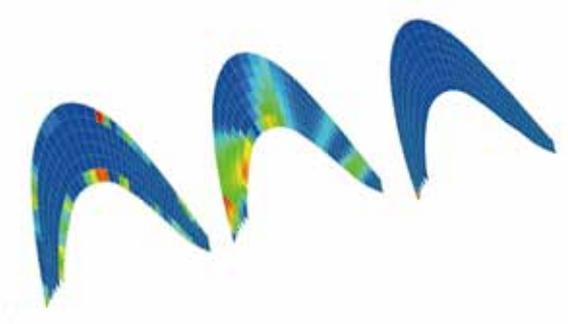


图32 不同输入条件的优化结果（中间是原始曲面，左边是上下边界固定不动，右图是不固定边界）

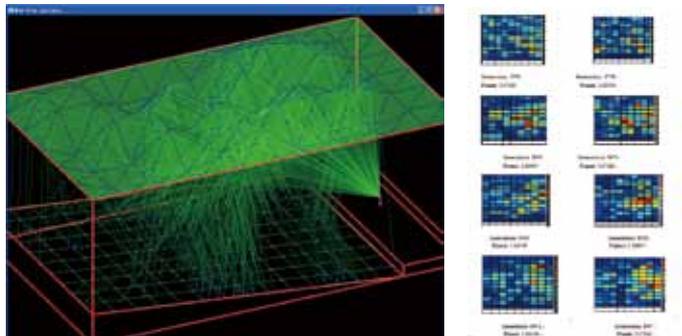


图33 遗传算法在声学里的应用

（数据来源 Chris J K Williams <http://people.bath.ac.uk/absckjkw/>）

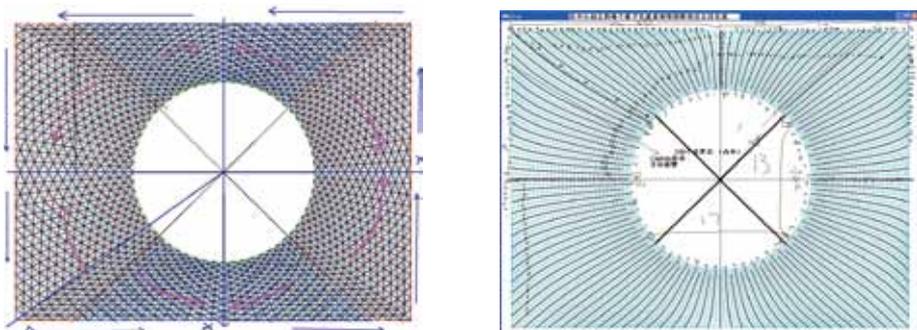


图34 Relax算法

5 展望

我们将继续推广图形学、数学、计算机等学科对建筑设计的支持：例如应用图形学知识用于建筑曲面的离散与建造；研发计算机遗传算法应用于建筑声学中（图33）；将Relax算法应用于结构形式的推导（图34）；探讨建筑密度最优化的数值计算理论；把工业领域里基于特征的建模引入到建筑模型的快速搭建等……。数字技术的革新激发了设计的无限可能，CCDR探索这种新兴的模式，保持对前沿技术的敏锐，不断实现和促进这一过程的创新，给予建筑设计更大的空间。



CCDR简介

作为建筑可视化表现行业的领导者，水晶石一直关注数字建筑技术的发展。2009年，水晶石成立了运算化设计研发部（Crystal Computation Design & Research），团队由一群对运算化设计、数字建构怀有梦想的年轻人组成，成员的专业有建筑、计算机、数学、艺术设计、工业设计等，跨越学科和专业的界限，尝试用多元、外延的知识和建筑师共同探索试验性的设计和建造，旨在研发并开拓新的建筑设计技法，帮助客户应用参数化设计手段，实现创意与建造。

作者王斌系CCDR团队负责人。