

# BASIC METHOD IN DIGITAL ARCHITECTURAL DESIGN 数字化建筑设计方法入门

孙澄宇 著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



# BASIC METHOD IN DIGITAL ARCHITECTURAL DESIGN 数字化建筑设计方法入门

孙澄宇 著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

4

## 内容提要

本书以同济大学建筑学专业本科的专业基础课“数字化建筑设计方法”的讲义为基础,分上下两篇。上篇试图梳理与数字化建筑设计方法相关的各种概念,从而辨析出在设计方法论层面的核心概念——“狭义数字化建筑设计方法”。它以参数化建模技术为基础,根据建筑师设定的机器智能算法,来驱动海量设计方案的自动生成与性能评价循环,以此搜索得到一批优化设计方案,从中建筑师可以选择得到阶段性设计成果。其中,建筑师对于计算机的种种设定被称为“元设计”。它是这种设计方法的核心特征。为了形象地阐述这一概念,本书在下篇中以一个本科课程设计为例,详细地剖析了整个设计思路与设计推进过程。希望以此作为学习数字化建筑设计方法的入门教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

数字化建筑设计方法入门 / 孙澄宇著. -- 上海: 同济大学出版社, 2012.7  
ISBN 978-7-5608-4907-2

I. ①数… II. ①孙… III. ①建筑设计-计算机辅助设计-应用软件 IV. ①TU201.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 136159 号

## 数字化建筑设计方法入门

### Basic Method in Digital Architectural Design

孙澄宇 著

责任编辑 荆华 责任校对 徐春莲 装帧设计 张微

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址: 上海四平路 1239 号 邮编: 200092 电话: 021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 上海盛隆印务有限公司

开 本 787×1092mm 1/16

印 张 6

印 数 1—3100

字 数 149000

版 次 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4907-2

定 价 48.00 元 (附光盘)

本书若有印装问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 序

大约在 30 年前，当人工智能和计算机辅助设计的概念和方法开始大举进入建筑设计行业时，算法语言与形态设计的关系对建筑学界而言还是那么的懵懂迷茫、不明就里。但仅仅过了不到廿载光景，从外在工具性的辅助设计手段，到内在本体性的设计系统要素，事情发生了质的变化。世纪之交以来，计算机辅助设计技术已经将建筑学发展推向了崭新的阶段——数字化建筑设计的时代。无论是现代主义的晚近建筑，如诺曼·福斯特的大英博物馆穹顶广场；还是解构主义的异形建筑，如弗兰克·盖里的古根海姆博物馆，显然都大大受益于数字化技术对建筑设计本身的融入性影响。故而，建筑形态设计的“可生成性”似乎已超越了“可建造性”的局限，看上去正在使建筑学发生着“现代运动”以来的第二次“革命”，即设计思维与方法的根本性转变。

当建筑界对这样的判定尚在捉摸不定之时，建筑数字化技术的影响已迅即扩展到了建筑学的教育领域。随着 REVIT, Rhino, Grasshopper, Ecotect 等数字化设计软件的应用，建筑学子们操弄它们所做出的那些个极富想象力的形态生成设计作业，势头直逼“大师”们想象力的极限。确实，通过对影响形态生成的参量进行编程，便可以得出一个个“数字理性”控制下的奇异建筑形体，这对学子们来说无疑充满了诱惑力。于是“参数化设计”成了建筑设计教学的时髦话语。然而，如何正确理解建筑数字化技术与建筑形态设计，设计主体能动与机器智能算法之间的本质关系，使感性与理性错综交织的建筑设计，不至成为机器智能操控下的片面技术游戏，对建筑数字化教学而言就成了一个首要性的问题。

为了尝试回答这一问题，我系骨干青年教师孙澄宇，以他近年来研究和教学的经验及体会，完成了这本《数字化建筑设计方法入门》教材，意图以通俗的讲述，简明的解析，将设计者与计算机形态生成之间的媒介——“元设计”，作为核心概念贯穿教学全过程，即通过设计参数化模型、构建性能评价指标、规划机器智能算法及其对应的设计循环，驱使计算机根据设计者的意图，在海量潜在设计方案中，自动找出符合性能优化趋势的形态生成方向，最终达成设计目标。本教材以讲解一份学生作业的完成过程作为叙事方式，采取层层递进、循序展开的写法，特别适合于数字化建筑设计方法的入门教学，符合学生的接受习惯，因而是一本值得推介的专业特色教材。

谨此为序。

壬辰仲夏于同济校园

# 前言

近年来，随着计算机辅助建筑设计（Computer Aided Architectural Design, CAAD）研究领域的诸多成果不断被建筑师所接受，并在越来越多的建筑作品的设计过程中得以应用，一个内涵与外延更加庞杂的“数字化建筑设计”概念（亦有时被简称为“数字设计”，更有甚者被误称为“参数化设计”）经常见诸于各种建筑媒体，俨然成为建筑界的又一时尚。这一切不免令当今的一批建筑学学子、前沿建筑师、爱好者感到目不暇接，有时甚至被相互包容的相似或相近的概念所迷惑，不知所措。

本书以同济大学建筑学专业本科的专业基础课“数字化建筑设计方法”的讲义为基础，分上、下两篇。上篇扎根于 CAAD 发展脉络，企图追根溯源梳理与数字化建筑设计方法相关的概念群，从中辨析出在设计方法论层面的核心概念，即被作者称为“狭义数字化建筑设计方法”的概念。它由约翰·弗雷泽（John Frazer）教授于 1995 年在其撰写的 *An Evolutionary Architecture* 一书中，首次从航天航空工程领域引入到 CAAD 领域。而它首次进入建筑师视野，则是在诺曼·福斯特（Norman Foster）的 Great Court in British Museum 项目中的应用（驱动了其中的穹顶设计与优化）。

“狭义数字化建筑设计方法”，是以参数化建模技术为基础，根据建筑师设定的机器智能算法来驱动海量设计方案的生成与性能评价循环，最终搜索到一批优秀的设计方案，再由建筑师选择以作为下一步设计的起点。其中，建筑师对于计算机的种种设定是通过编制程序或脚本来实现的，即称之为“元设计”——它是关于如何开展设计的设计。它被认为是这种设计方法不同于其他方法的核心特征，也是“狭义数字化建筑设计方法”力量的根源。

本书的下篇，是以一个本科生课程设计为案例，对设计者是如何运用这种设计方法完成设计的全过程进行了逐步解析。读者可以跟随本书的讲解，一起亲身实践这一过程，切身体会这种设计方法的特点。同时，在篇末也为读者设计了一个综合性的练习案例，将之前体验过的各种技术与方法进行综合演练。整个案例部分的讲解，努力将设计思路分析与具体操作提示相分离，使得读者可以了解设计者的思考方式，而非埋头于软件。最终，希望能够帮助读者学习“狭义数字化建筑设计方法”，起到入门的效果。

由于体验数字化建筑设计肯定离不开计算机操作，实践“元设计”更加离不开撰写计算机脚本。书中对于软件操作的逐步解析是与对于设计思路的逐层分析相对应的，而非从软件的基础命令讲起。本教材以 Rhino 和 Grasshopper 为基本的实践平台，并假定读者已经能够掌握它们的基本操作。同时，书中涉及的相关软件可以从所附光盘的说明文件（Readme.txt）中获取下载地址，亦可进入同济大学出版社网站查询。

当然，作为一本入门教材，还有很多进阶内容尚未涉及，恳请有兴趣的读者耐心等待后续图书的出版。

编者

2012 年 5 月

# 目录

## 序

## 前言

## 上篇 数字化建筑设计概念浅析

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第1章 概念族谱                | 10 |
| 第2章 狭义数字化建筑设计方法         |    |
| 2.1 基于方案性能评价优选的设计方法     | 11 |
| 2.2 参数化建模技术             | 16 |
| 2.3 计算机生成方案的设计方法        | 17 |
| 2.3.1 计算几何方法            | 18 |
| 2.3.2 群体智能方法            | 20 |
| 2.4 具有机器智能的设计过程         | 22 |
| 2.4.1 可计算设计与基于算法的设计     | 22 |
| 2.4.2 机器智能              | 22 |
| 2.4.3 狭义数字化建筑设计方法之“元设计” | 26 |
| 第3章 广义数字化建筑             |    |
| 3.1 基于规则的非计算机辅助建筑       | 28 |
| 3.2 基于计算机辅助的建筑          | 29 |
| 3.2.1 无纸化设计技术           | 29 |
| 3.2.2 计算机辅助建筑设计         | 33 |
| 3.2.3 计算机辅助建造           | 33 |
| 3.2.4 计算机辅助设施营运         | 36 |
| 第4章 概念慎读                |    |
| 4.1 形态与方法               | 37 |
| 4.2 非线性建筑               | 37 |
| 4.3 数字化建筑               | 38 |

## 下篇 数字化建筑设计过程及其方法详解

### 第5章 案例中的设计任务与基本对策

|                        |    |
|------------------------|----|
| 5.1 设计任务简述·····        | 42 |
| 5.2 设计任务的性能目标与假设·····  | 42 |
| 5.3 设计的基本策略·····       | 42 |
| 5.3.1 “元设计”中的三要素·····  | 42 |
| 5.3.2 设计构思模式与推进步骤····· | 44 |

### 第6章 概念设计阶段

|                        |    |
|------------------------|----|
| 6.1 骨架部件与系统的草图设计·····  | 46 |
| 6.2 骨架关联部件设计·····      | 46 |
| 6.2.1 锚固平面与基本参数设计····· | 48 |
| 6.2.2 固定部分设计·····      | 50 |
| 6.2.3 可调部分设计·····      | 53 |
| 6.2.4 被动细节设计·····      | 54 |
| 6.3 骨架关联系统组装与应用·····   | 57 |
| 6.3.1 简单系统组装·····      | 57 |
| 6.3.2 骨架部件系统应用·····    | 60 |

### 第7章 深化设计阶段

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 7.1 实体部件与系统的草图设计·····    | 69 |
| 7.1.1 实体造型设计·····        | 69 |
| 7.1.2 变形分组规划·····        | 70 |
| 7.2 实体部件设计·····          | 71 |
| 7.2.1 骨架模型的准备作业·····     | 72 |
| 7.2.2 外部变形法·····         | 72 |
| 7.2.3 内部生长法·····         | 81 |
| 7.3 实体关联系统组装与应用练习·····   | 81 |
| 7.3.1 实体系统的总装及其性能管理····· | 82 |
| 7.3.2 静力结构优化应用练习·····    | 83 |

## 附录

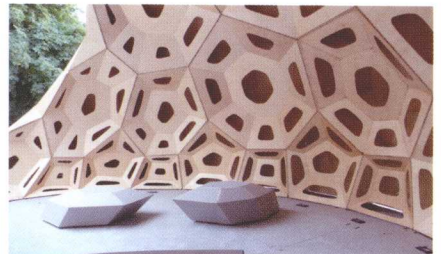
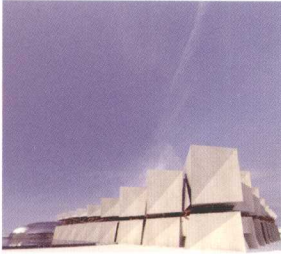
- A. 相关软件的下载安装说明
- B. 相关软件自学教程推荐资源
- C. 引用插图来源

## 参考文献

## 索引

## 后记

## 上篇 数字化建筑设计概念浅析



- 第 1 章 概念族谱
- 第 2 章 狭义数字化建筑设计方法
- 第 3 章 广义数字化建筑
- 第 4 章 概念慎读

随着计算机领域各种新技术的快速发展，建筑设计、施工、营运各环节中也不断出现应用这些技术的工作新方式，甚至有时会出现颠覆性的、思想方法层面的革新。这些建筑领域的新事物构成了数字化设计的相关概念群。本篇将尝试用较为简单、直白的方式，对它们之间的谱系关系作一个介绍，以此一方面可以廓清本书专指的“数字化建筑设计方法”的概念实质；另一方面也对目前纷繁的相关概念加以梳理，提高概念使用的准确性。

## 第1章 概念族谱

通过相关概念的归类与比较,这里将数字化建筑设计领域的诸多概念组成了一张数字化建筑设计相关概念谱系图(图 1-1),本篇之后的介绍都将围绕该图进行。为了便于阅读,将这些概念分为红色、蓝色、灰色、绿色四组,并用两种箭头表明设计方法概念与设计成果的形态特征之间的关系。

其中,红色概念群构成了本书中专指的数字化建筑设计方法概念的核心内涵,将其称为“狭义数字化建筑设计方法”,简称为“狭义数字化”;蓝色部分的概念则是与之相关的数字化建筑概念的外延,两者共同构成了“广义数字化建筑”,简称“广义数字化”。灰色部分的概念则是经常与广义数字化相混淆的异类概念;绿色部分则表示与广义数字化概念逻辑相补的非数字化建筑概念集。

同时，“广义数字化”中的深色背景的概念属于技术类概念，很多都是从数学、计算机科学、工业制造领域借鉴来的，并不直接影响建筑行业，而白色背景的概念则是在这些技术类概念的支撑下，建筑领域发展出的专有概念，它们对整个建筑行业都会产生直接的影响。

这里值得一提的是，红色与蓝色两部分概念群共同构成的广义数字化概念，也就是我们平时泛指“数字化建筑”，而考虑到数字化技术在建筑实践过程中应用的不同阶段、作用、机理，这里有意地从这个庞大的概念群中限定出了一组概念（红色部分），它们构成了狭义数字化——即本书所专指的“数字化建筑设计方法”。

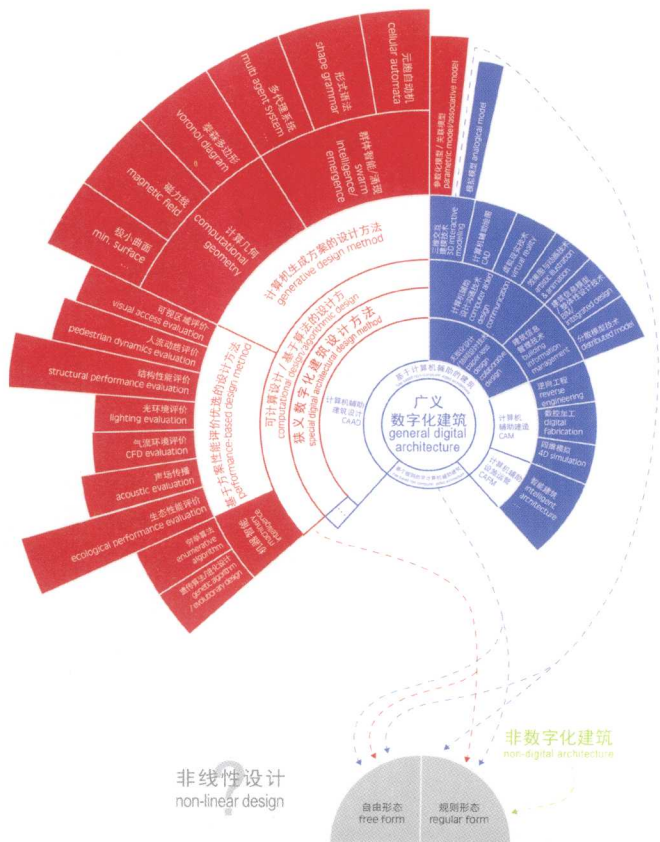


图 1-1 数字化建筑设计相关概念谱系图

## 第2章 狭义数字化建筑设计方法

“狭义数字化建筑设计方法”(Special Digital Architectural Design Method)是指:由建筑师根据其设计问题,选取适当的设计切入因素,构建以参数化模型来表达的设计原型,通过不同的参数组合由计算机自动生成大量不同的设计方案,并根据与设计切入因素对应的计算机性能评价指标来自动比选这些设计方案,在设计目标达到或设计资源耗尽时,由建筑师从众多优化设计方案中选取最终的设计成果。显然,该方法包含四个要素,它们可以被简称为:性能评价、参数模型、方案生成、机器智能及其终止条件。本章将沿着这些概念的发展历程对其分别进行介绍。

### 2.1 基于方案性能评价优选的设计方法

由于计算机具有可高速完成大量计算的本质,计算机技术在建筑设计中的应用也很自然地对其性能计算开始。需要指出,这里建筑设计的“性能”是一个非常宽泛的概念——只要就设计师感兴趣的某一设计属性,计算机可以通过计算,向其提供可用于设计评价的可重复计算结果,这种属性就可以被称为是该设计的一种“性能”。它既可以用数值来表达的某种物理性能,如结构受力性能,也可以用图像来表达的视觉性能,如基于精确光能传递技术的光环境性能。

当计算机可以为建筑师提供对其设计方案的某一性能的评价途径时,得益于强大的计算能力,这种由计算机评价的性能往往是建筑师单凭自身脑力在以往无法付诸评价的。此时建筑师在计算机的辅助下,大大拓宽了自身对于设计方案的评价能力。

如果将建筑师的设计过程抽象为一个周而复始的循环,它包含:定义设计问题、提炼设计切入因素、评价现状或方案、生成或修改方案,判断设计终止条件是否满足,最终选取设计成果等环节。那么,计算机技术与建筑设计结合的起点——“基于方案性能评价优选的设计方法”(Performance-based design method)就是由计算机将建筑师评价现状或方案这一环节拓展为“计算机评价方案”(图2-1)。

以中美可持续发展中心2007年在辽宁省黄柏峪小学的建筑方案设计为例。在教室窗的立面设计中,建筑师面对是否需要添加水平遮阳板这一设计问题,以室内的水平工作面照度质量为设计的切入因素,分别对无遮阳与有遮阳的设计方案进行室内光环境性能模拟评价(图2-2)。即,以照度均匀程度与是否出现直射眩光作为评价指标,在给定的设计周期内,反复多次修改设计方案并展开性能评价,最终选取了一组在窗高三分之一处设置水平遮阳的设计方案。

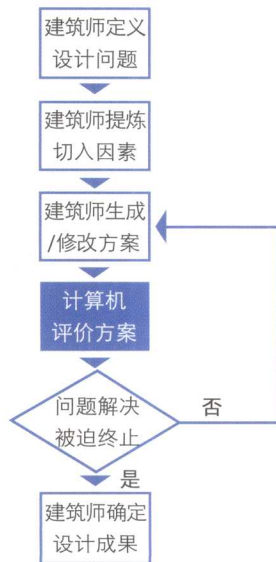


图2-1 基于方案性能评价优选的设计方法

正如前所述，建筑的性能多种多样，下面将对建筑设计中常见的几种性能评价进行介绍。

## 1. 可视区域评价

建筑师在进行建筑空间设计时，常常为了引导使用者的特定行为或者为使用者提供优美的、没有干扰的视觉环境，需要对建筑空间的可视区域进行评价（Visual Access Evaluation）。在没有数字技术辅助时，建筑师常常通过在剖面图、平面图上作视线夹角来进行这一评价。在数字化技术的辅助下，建筑师可以处理大规模、复杂的三维空间，并且就视域的面积（图 2-3）、深度等特定指标作出定量的计算。

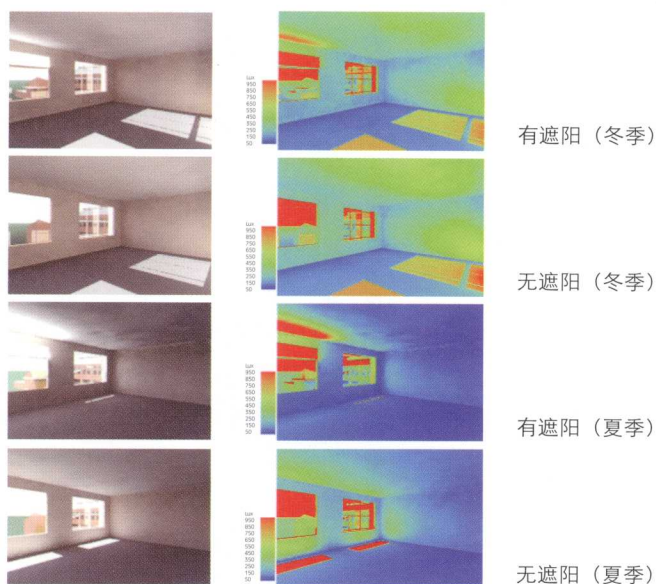


图 2-2 辽宁黄柏峪小学方案设计教室光环境性能比选

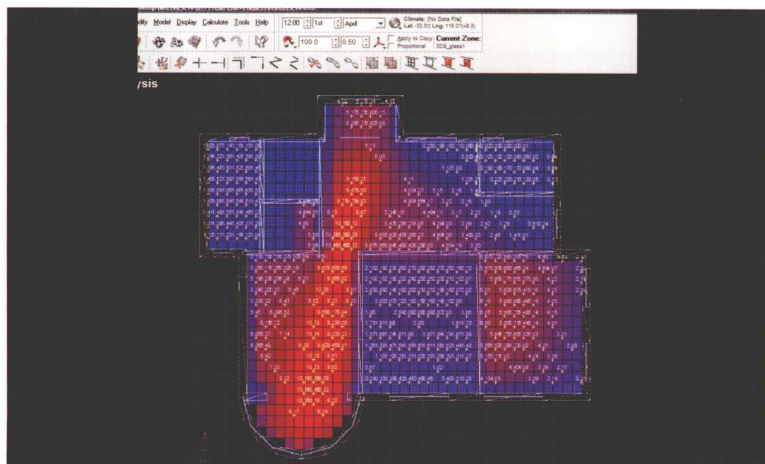


图 2-3 某别墅平面的可视区域面积评价

## 2. 人流动线评价

建筑师在进行方案设计时，总是需要对使用者的人流动线进行预判 (Pedestrian Dynamics Evaluation)，而所有的空间功能布局都是以此为基础的。在没有数字技术辅助时，建筑师会根据自身的经验来进行预测，而这种经验的差异很大程度上决定了设计的优劣。而基于各种人流理论，现在的计算机软件可以以个人行为模型或者群体流动模型为依据，模拟预测人流的动线（图 2-4）。也就是说，在数字技术的帮助下，建筑师可以轻易地对其设计中的人流动线进行评价，并展开后续设计。

## 3. 结构性能评价

受制于有限的结构知识，建筑师一方面经常会被阻隔于其天马行空的创意之外；另一方面又经常感叹于那些结构与形式完美结合的经典案例。而数字化技术中的有限元理论给建筑师带来了希望，他们可以通过将早期的形态模型输入计算机，并根据有限的结构知识来定义结构类型与简单约束，便捷地得到关于其设计结构性能的快速评价（图 2-5）。结构性能评价 (Structural Performance Evaluation) 应该是发展最为成熟、作用最为直接的建筑性能评价。

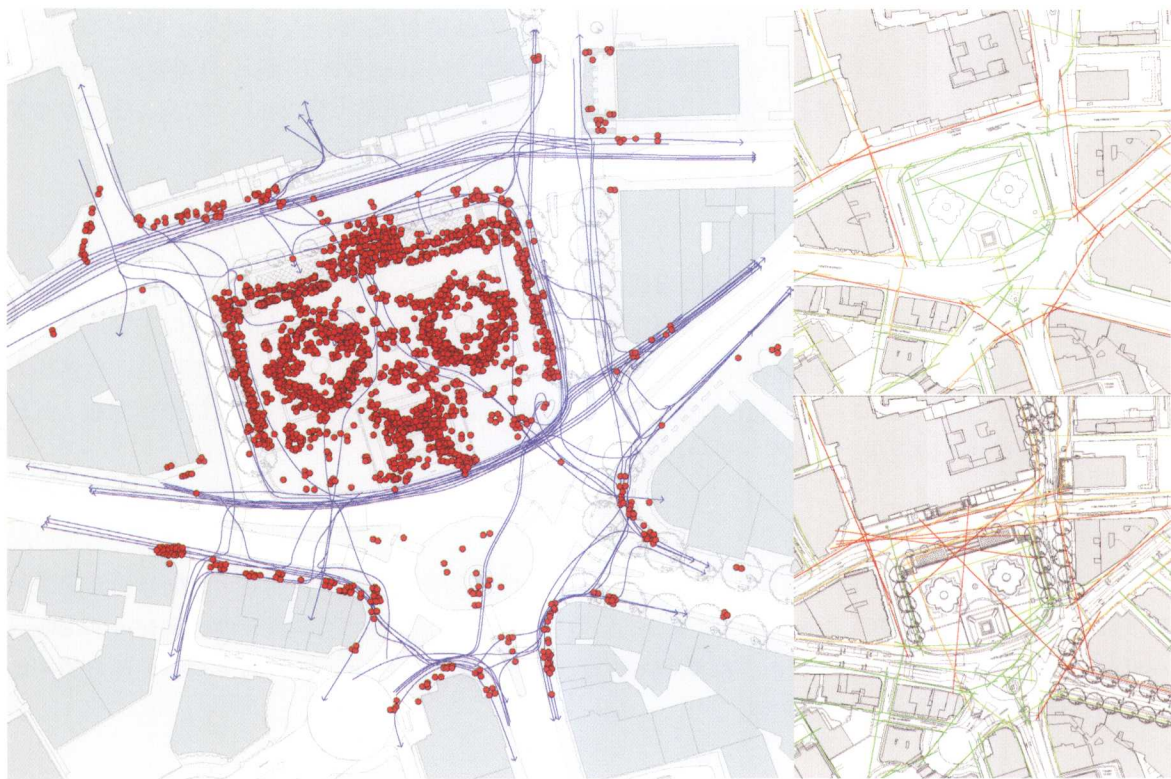


图 2-4 基于空间句法理论的人流动线评价

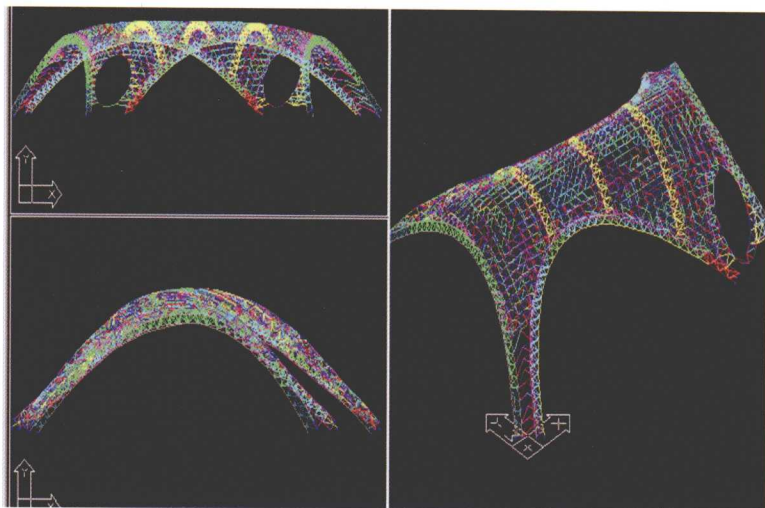


图 2-5 某钢结构杆件受力评价

#### 4. 光环境评价

建筑师经常说建筑是光与影的艺术，目前光环境（包括自然光、人工照明）评价 (Lighting Evaluation) 已经发展出了非常准确的计算机模拟技术。这里建筑师在提供设计方案后，只需要对一些参数，如经纬度、日期、灯具型号等进行设置，就可以获得任意空间截面的阴影（图 2-6）、眩光、照度分布等情况。

#### 5. 气流环境评价

人不可能生活在真空之中，总是离不开温暖、清新、宜人的空气。而建筑作为一个容器，它既会影响其外部的城市风环境，又会在其内部具有特定的空气品质，再加上现代空调通风系统的干预，建筑师就需要在计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的辅助下，对其设计的内外、自然与人工气流环境进行模拟（图 2-7），以此评价设计的气流环境。常见的指标有温度与湿度的空间分布、气压分布、任意位置的气流流速、新鲜空气更换周期等等。

#### 6. 声场评价

由于建筑空间界面对声波的反射作用，不同的建筑腔体会具有不同的声学品质，这同样也是建筑师所关心的问题，这点在影剧院类设计中尤为突出。在数字化技术的辅助下，建筑设计的声场评价 (Acoustic Evaluation) 只需要建筑师将其设计的三维模型与假设的声源信息输入，就可以得到空间中任意点的声场信息，常用的有混响时间（图 2-8）等。

#### 7. 生态性能评价

在绿色建筑理念流行的今天，建筑师必须对其设计的生态性能做出评价 (Ecological Performance Evaluation)。在数字技术的辅助下，建筑师可以方便地对其建筑的能耗荷载情况（图 2-9）、二氧化碳排放量等生态节能指标做出评价。

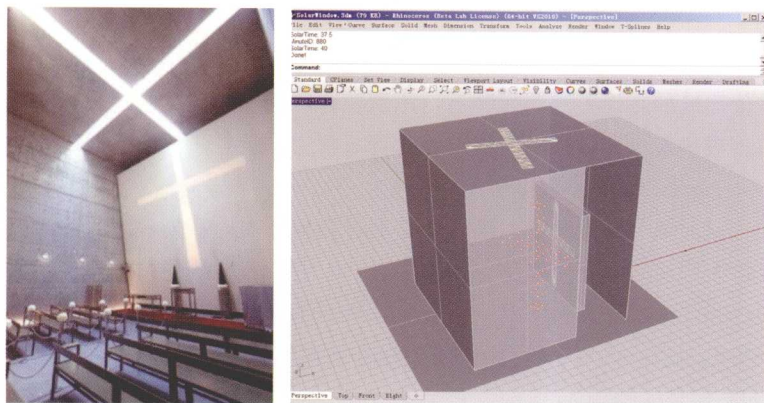


图 2-6 光之教堂室内（左）、逆向光斑设计工具（右）

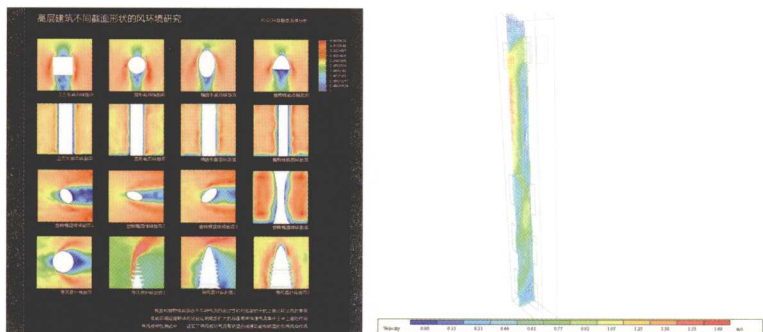


图 2-7 建筑形体对外部空间的气压分布影响（左）、建筑垂直通风井“烟囱效应”气流分布（右）

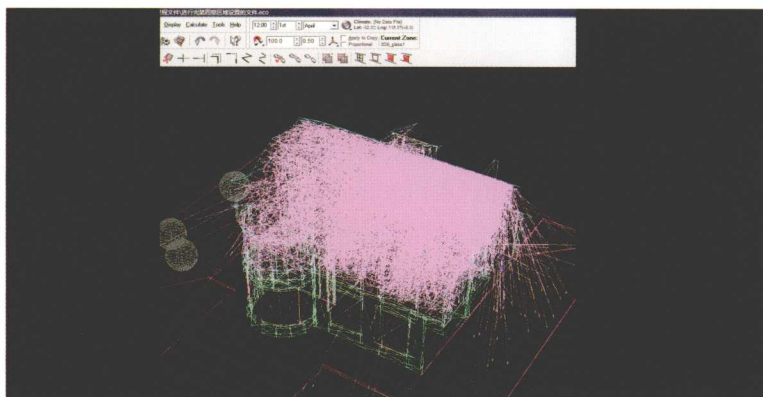


图 2-8 某建筑空间混响时间计算

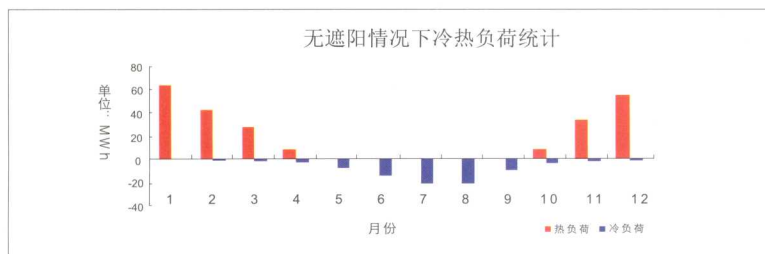


图 2-9 某建筑的全年能耗荷载评价

## 2.2 参数化建模技术

设计师在领略了基于方案性能评价优选的设计方法的优势后，不禁发现，为了实现这一设计方法，就需要不断地调整用以输入计算机的三维建筑设计模型，而这一工作费时费力。于是，他们就向工业设计领域借来了“参数化建模技术”（Parametric Modeling）。

之前那种每次修改都要对模型的几何元素（如点、线、面、体）进行直接操作的建模技术称为“模拟建模技术”（Analogical Modeling）（将在广义数字化中进行介绍）。显然，它最大的缺陷在于几何元素是独立存在的，相互之间不存在空间约束定义，这导致了对一个对象的修改不会触发其他相关对象的自动变化，也就是会出现模型“破裂”的情况。比如修改一个坡屋顶建筑轮廓中右侧墙体高度的过程（图 2-10）：在模拟模型中，该建筑轮廓是由五个带有坐标的点  $A(X_a, Y_a)$ ， $B(X_b, Y_b)$ ， $C(X_c, Y_c)$ ， $D(X_d, Y_d)$ ， $E(X_e, Y_e)$  定义出的五条线段组成。当建筑师需要将右侧墙体的顶点  $B$  调低至  $B'$ ，且保持其它部分不变时，他需要分别编辑受到影响的多条线段。即移动线段  $AB$  的  $B$  点至  $B'$ ；移动线段  $BC$  至  $B'C'$ ；对线段  $B'C'$  与  $CD$  求新的交点  $C''$ ；以新交点为端点重新缩放线段  $CD$  为  $C''D$ 、线段  $B'C'$  为  $B'C''$ 。

相对于上述“模拟建模技术”，“参数化建模技术”给建筑师带来了“参数模型”（Parametric Model），又称为“关联模型”（Associative Model）。一方面模拟模型中直接参与组成模型的几何元素被一组事先定义好的数值参数取代，这样只要调整参数的数值，计算机就会自动根据事先的定义重新生成几何元素，而不需要直接对几何元素进行操作；另一方面在参数模型中，几何元素间的位置约束也被定义为参数，这样当设计人员变动某个几何元素的参数时，由于几何元素发生了变化，它在位置约束的帮助下，又会驱动与其有位置约束的其他几何元素同时产生变化。简单地说，参数模型就是设计者用描述几何特征的参数与描述几何位置约束的参数来间接地控制计算机自动生成模型，所以在对它进行调整时要比模拟模型方便得多。这里再次以上述轮廓的修改为例（图 2-11）：首先轮廓不再由  $A$  至  $E$  五个点来定义，而是由描述几何元素特征的数值参数与描述其相互关系的空间约束参数来定义。这里轮廓被定义为：左侧墙角与坐标原点重合；从该点沿  $Y$  轴正向  $H_1$  距离处到达左侧檐口，沿与该墙体逆时针  $\alpha_1$  夹角出射线；同时，还是从左侧墙角沿  $X$  轴正向经  $W$  距离处到达右侧墙角，再沿  $Y$  轴正向经  $H_2$  距离到达右侧檐口，沿与该墙体顺时针  $\alpha_2$  夹角出射线；上述两条射线的交点为  $P$ ，分别与两侧檐口限定这两条射线成为线段。简单地讲就是由  $H_1$ ， $H_2$ ， $W$  三个数值参数和 1 个点重合约束、2 个线平行约束、2 个夹角约束、1 个交点约束共同组成了该轮廓的参数模型。因为这些参数组成的模型中各几何元素之间存在依赖关系，所以当我们把右侧墙高  $H_2$  的数值改成  $H_2'$  时，整个轮廓中相关的其他几何元素都会被计算机自动更新。即计算机自动计算出新交点  $P'$ ，并重绘整个轮廓。

显然，参数化建模技术较之模拟建模技术具有更好的可快速修改的能力，同时它通过参数进行变化的特点也为用计算机程序自动控制模型的特征提供了渠道。所以，参数化建模技术已经成为狭义数字化建筑设计方法的重要技术基础。目前，能够实现参数化建模的软件工具有三类（图 2-12）：人机交互类工具（如 CATIA 与 Inventor）、可视化脚本类工具（如 Grasshopper 与 Generative Component）、纯代码类工具（如 Rhinoscript、VBA、MEL、Maxscript）。在后文中，为了便于建筑师学习，以可视化脚本工具 Grasshopper 为教学演示平台，但其中的基本原理在其他类型的工具上依然适用。