

建筑设计数字技术研究丛书

建筑生成设计

——基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究



Architectural Generative Design:
Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design

李 飏 著

国家自然科学基金资助项目

建筑生成设计

基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究

李 飏 著

东南大学出版社

南京

内容提要

近年来,计算机生成方法作为一种崭新的建筑设计方法逐步成为CAAD研究的重要分支,其独具匠心的系统模型也必将拓展建筑学方法论。建筑设计生成方法通过对建筑元素的“自组织”优化组合,激发设计者借助传统方法不易获得的思想灵感,它是趋向艺术实践的程序创作系统,并将生成系统作为一种全新的生产方法。

作为多学科非传统手段的合作结晶,当前,建筑设计计算机生成研究在国内建筑设计界缺乏基本的方法,高等建筑教学更没有系统的教学经验。本书基于复杂系统模型,通过作者的编程实践和教学研究,逐步建立建筑设计生成方法系统框架及其研究平台。本书详细阐述细胞自动机系统、遗传进化算法及多智能体模型复杂系统方法基本原理及其程序实践,探索生成艺术在建筑学领域转化过程中的思维特征及操作方式。

本书以复杂系统为建模理论基础,综合建筑学、计算机科学学科特征,运用文献分析、理论探讨与计算机程序相结合的研究方法,借鉴西方国家研究手段,通过分析生成艺术演化机制及国内建筑设计现实需求,初步建立起建筑设计生成艺术理论框架,并将该研究方法拓展至建筑学领域的其他方面。

本书可供建筑设计者、研究者及CAAD教学人员和相关师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

建筑生成设计:基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究/李飏著.--南京:东南大学出版社,2012.10
ISBN 978-7-5641-3402-0

I. ①建… II. ①李… III. ①建筑设计:计算机辅助设计-研究 IV. ①TU201.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第054635号

书 名:建筑生成设计——基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究
作 者:李 飏
责任编辑:戴 丽 魏晓平
装帧设计:皮志伟 刘 立
图案生成:李 飏
责任印制:张文礼

出版发行:东南大学出版社
社 址:南京市四牌楼2号 邮编:210096
出 版 人:江建中
网 址:<http://www.seupress.com>

印 刷:利丰雅高印刷(深圳)有限公司
排 版:江苏凤凰制版有限公司
开 本:700mm×1000mm 1/16 印张:17 字数:402千字
版 次:2012年10月第1版
印 次:2012年10月第1次印刷
书 号:ISBN 978-7-5641-3402-0
定 价:146.00元

经 销:全国各地新华书店
发行热线:025-83791830

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

1978年，我进入南京工学院学习建筑，那时还不知道建筑设计除了手绘图纸外还有什么其他的途径可以完成设计流程。1991年我用申请获准的国家自然科学基金青年基金项目的经费购入386电脑，使自己的研究业务逐步步入电脑辅助时代。记得当时建筑系用世界银行40万美元资助贷款引进了美国Intergraph和Sun工作站，好像当时主要的工作之一便是如何替代手工完成设计效果图的绘制，也算是辅助建筑设计吧。

然而，电子信息技术的发展之快和更新换代之频繁超乎人们的想象。1990年代后，数字技术在建筑学领域中的运用就很快从辅助建筑设计（CAAD）发展渗透到从城市规划、城市设计和建筑设计虚拟、城市和建筑历史研究等各个方面。各种数字技术也层出不穷，其中当前正在成为研究热点的技术包括：

（1）细胞自动机(cellular automata systems)模型。这是一种时间、空间、状态都离散，空间相互作用和时间因果关系皆局部的网格动力学模型，其特点是复杂的系统可以由一些很简单的局部规则来产生。

（2）多智能体(MAS)建模方法。多智能体是复杂适应系统理论、人工生命以及分布式人工智能技术的融合，是进行复杂系统分析与模拟的重要手段。

（3）分形理论。原理就是从自相似性出发去认识描述事物，并由此产生了一个全新的概念——用分形的某个特征量去描述事物自相似性和复杂度。

（4）地理信息系统（GIS）。基于数据库的功能，GIS为城镇形态演变、复杂地形地貌分析、城市空间评价以及城镇规划管理提供了强大的技术支持。

而建筑设计数字技术的发展本身则从计算机技

术应用出发、而后又回归到了建筑设计的行为。以弗兰克·盖里(Gehry)为代表的设计者强调施工和建造过程的数字化，设计者利用CAD/CAM模式将手工艺和标准化工业生产相结合，创造出可批量制造的、数据相关但各不相同的、精巧而精确的建筑产品。而伯克尔(Berkel)、凯诗(Cache)和林(Lynn)等的建筑设计则不仅强调施工和建造过程的数字化，而且设计过程也数字化了，甚至直接编制程序进行设计，也即从计算机辅助设计(CAAD)转向计算机生成设计(Computer Generative Design)，这确是一场深刻的变革。

数字技术显著提高人们对城市和建筑空间的理解能力和科学判断水平，加深并拓展空间研究的深度和广度。通过数字技术，人们可以发展新型城市和建筑空间，依托科技进步逐渐更新现有城市空间和活动组织方式。通过最新数字技术所创造的个性化的新颖空间形态，使视觉审美进入一个广阔的想象空间，并形成“技术—想象力—生产力”链条。从世界范围看，这一领域目前已经成为建筑学科最具成长性的学术前沿领域。

李飏博士是我的学弟好友，他原先擅长建筑设计创作，且是“出活”高手。记不清楚什么时候，他幡然觉悟，决意转向投身代表建筑学发展前沿的数字技术研究。他在近十年里以此为课题开展与瑞士苏黎世联邦理工大学(ETH, Zurich, Switzerland)的合作研究，先后参加多次国际重大CAAD学术会议并发表演讲，并承担了多次基于数字技术的建筑设计教学工作。2008年他在钟训正院士指导下完成了博士学位论文，并先后获得江苏省优秀博士学位论文和全国百篇优秀博士学位论文提名奖。大约从2005年开始，东南大学建筑学院在国家“211工程”二期和“985工程”三期经费投入中增设了数字技术学科平台的建设，并一直坚持不渝。在此过程中，学院也资助“飏哥”带领同学完成了包括前工院北楼门厅ceilingMargin吊顶、Angle_X和Tri_C坐具等几项实验性的数字建造。我们的“城镇与建筑遗产保护教育部重点实验室”建设顺利通过了教育部专家评审，期间，李飏展示了历史街区保护改造动态多智能体方法的研究成果并受到专家们的赞赏。

今天，李飏集多年潜心研究的成果和经验心得，完成了《建筑生成设计：基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究》一书。该书基于复杂系统模型，通过作者的编程实践和教学研究，详细阐述细胞自动机系统、遗传进化算法及多智能体模型复杂系统方法基本原理及其程序实践，探索生成艺术在建筑学领域转化

过程中的思维特征及操作方式，以此逐步建立建筑设计生成方法系统框架及其研究平台，并尝试将该研究方法拓展至建筑学领域的其他方面。应该说该书无论在内容上、还是在学术观点和结论方面都有显著的创新点，该书的出版将为建筑设计范型发展中人们所期待的“技术—想象力—生产力”链条的形成作出基础性的贡献。我愿意毫无保留地向广大读者推荐这本具有建筑学发展前瞻意义的著作，并非常荣幸成为这本书的第一位读者。

是为序。

Handwritten signature in black ink, reading '王建国' (Wang Jian).

2012.7.15

致 谢

钟训正 院士
Prof. Zhong Xunzheng

王建国 教授
Prof. Wang Jianguo

单 踊 教授
Prof. Shan Yong

韩冬青 教授
Prof. Han Dongqing

龚 恺 教授
Prof. Gong Kai

卫兆骥 教授
Prof. Wei Zhaoji

仲德崑 教授
Prof. Zhong Dekun

赵 辰 教授
Prof. Zhao Chen

丁沃沃 教授
Prof. Ding Wowo

翟玉庆 教授
Prof. Zhai Yuqing

Prof. Ludger Hovestadt

Mr. Markus Braach

Mr. Michael Hansmeyer

Mr. Christoph Wartmann

Mr. Benjamin Dillenburger

Prof. Odilo Schoch

Mr. Kai Rüdener,

Prof. Bruno Keller

并以此书献给

长期以来一直支持我研究工作的家人——
李荣博士和带给我无限快乐的女儿李牧文

作者简介：李 飏



哈尔滨工业大学学士
东南大学建筑学硕士
苏黎世联邦理工大学高级硕士 (MAS)
东南大学建筑学博士 (2010年全国优秀博士论文提名)

长期从事与瑞士苏黎世联邦理工大学 (ETH, ZURICH) 建筑系建筑数字技术中瑞科研合作，系统研究计算机程序及复杂适应系统在建筑学领域的前瞻性应用，主要研究方向包括：建筑设计及其理论、计算机编程技术及建筑设计数字技术、建筑物理计算及传感技术开发与应用、建筑数控建造。现任教东南大学建筑学院建筑设计课程建筑设计教研组副教授，兼任全国建筑数字技术教学工作委员会副主任，东南大学建筑学院建筑运算与应用实验室主任，东南大学城市与建筑遗产保护教育部重点实验室主要成员。

目 录

0 绪论	2
0.1 生成方法的建筑学背景	2
0.2 计算机辅助建筑绘图与设计	5
0.3 对机器创作的质疑	6
0.4 从CAAd (Drawing)到CAAD (Design)	7
0.5 建筑设计计算机生成艺术	9
1 计算机生成建筑设计法研究及科学方法	14
1.1 计算机辅助建筑设计及生成方法研究简述	15
1.1.1 计算机与建筑设计发展	15
1.1.2 计算机生成建筑设计方法历程	17
1.2 计算机建模方法	19
1.2.1 模型与计算机建模	19
1.2.2 模型分类与计算机建模方法特点	23
1.3 复杂系统模型与计算机生成建筑设计方法特征	25
1.3.1 复杂适应性系统计算机模型	25
1.3.2 建筑设计生成方法思维模式及相关概念	26
1.3.3 计算机生成建筑设计方法研究特征	29
1.3.4 计算机生成建筑设计方法研究框架	30
1.4 ETHZ建筑生成设计方法教学实践——“X-立方体”	31
1.4.1 设计概念	32
1.4.2 “X-立方体”总揽及脚本语言的选择	33
1.4.3 “X-立方体”的生成	35
1.4.4 “X-立方体”的优化	38
1.4.5 材料选择与装配研究	40
1.4.6 自动化绘图编程方式及结构体装配	43

2	计算机生成建筑设计法研究平台	46
2.1	建筑设计生成方法计算机程序平台	47
2.1.1	“Flash ActionScript”程序平台简介	48
2.1.2	Java专业程序平台简介	50
2.1.3	ActionScript与Java程序平台运行比较	51
2.1.4	“随机”与“规则”	52
2.2	计算机生成建筑设计法教育及其研究团队平台	56
2.2.1	计算机生成建筑设计法教育背景	56
2.2.2	ETHZ-CAAD“数字链”建筑设计生成方法简介	58
2.2.3	建筑设计生成方法教学探索	60
2.3	计算机生成建筑设计法数、理平台简介	66
2.3.1	关于计算几何算法	66
2.3.2	物理学运用	74
3	“细胞自动机系统”模型	80
3.1	细胞自动机简介	82
3.1.1	一维CAS运行机理	82
3.1.2	二维CAS运行机理	86
3.1.3	城市CAS模型中的转换规则	91
3.1.4	建筑设计的多样性挑战及CAS生成模型的多样性	94
3.2	细胞自动机建筑设计生成方法——“happyLattices”、“Cube1001”	96
3.2.1	“happyLattices”生成工具	96
3.2.2	“Cube1001”生成工具	105
3.2.3	CAS模型生成方法总结	118
4	遗传算法及简单进化模型	120
4.1	遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)	121
4.1.1	遗传算法概要	121
4.1.2	遗传算法的机理简述	123
4.1.3	简单进化模型	125
4.1.4	遗传算法程序“TSP”程序实践	126
4.2	简单进化模型与建筑生成方法探索——“keySection”	140
4.2.1	“keySection”开发背景——优化中庭剖面设计	140

4.2.2	采光效果与剖面形式分析	141
4.2.3	Ecotect实验	143
4.2.4	建筑物理基础回顾	144
4.2.5	“keySection”生成工具原理	146
4.2.6	“keySection”程序开发	148
4.2.7	“keySection”程序运行及调试	150
4.2.8	“keySection”建筑化实例	154
4.2.9	“keySection”的缺陷及其进一步发展	154
4.3	遗传算法与建筑生成方法探索之“notchSpace”	158
4.3.1	“notchSpace”开发简介	159
4.3.2	“notchSpace”程序介绍及其遗传算法具体步骤	161
4.3.3	“notchSpace”的建筑实例化	172
4.3.4	“notchSpace”进一步发展及其缺陷	177
5	多智能体系统模型	180
5.1	多智能体系统	181
5.1.1	早期多智能体系统模型	185
5.1.2	多智能体系统的特点	186
5.1.3	“ruleOfLife”多智能体系统程序实践	187
5.1.4	ETHZ-CAAD多智能体系统建筑设计探索	189
5.2	多智能体生成方法探索——“highFAR”	199
5.2.1	“highFAR”开发及相关建筑学背景	199
5.2.2	智能体单元编码	201
5.2.3	宏观控制智能体单元	202
5.2.4	微观设定智能体单元	204
5.2.5	“highFAR”系统流程及编程探索	206
5.2.6	引入真实场地、建立评价体系	208
5.2.7	建筑表皮生成探索	218
5.2.8	“highFAR”生成工具总结	226
5.3	多智能体生成方法探索——“gen_house2007”	226
5.3.1	“gen_house2007”生成工具开发背景	226
5.3.2	“gen_house2007”程序意图	228
5.3.3	“gen_house2007”程序算法探索	231

5.3.4	“gen_house2007” 程序的建筑实践	235
5.3.5	“gen_house2007” 程序总结	237
6	结语	242
	参考文献	249
	后记	256

Introduction



绪
论

0 绪论

0.1 生成方法的建筑学背景

建筑设计包括一系列不同的技巧。传统建筑设计手法通常利用设计草图操控建筑功能及其形式，寻求既定建筑纲要、建筑功能、建筑结构、建筑技术及环境文脉之间的优化平衡。同时，建筑师还必须兼顾美学艺术价值对人们的心理影响。建筑师被期望成为各方面

的大师，这从建筑教育、注册制度涉猎众多领域就可见一斑。然而，建筑设计过程及其结果难以预料，其步骤并非通过既定有序的简单流程可以掌控，设计过程涉及多种信息反馈、方案解决及修正，并由此解决最终的设计问题。

自从Asimow于1962年将建筑设

Architectural
Background

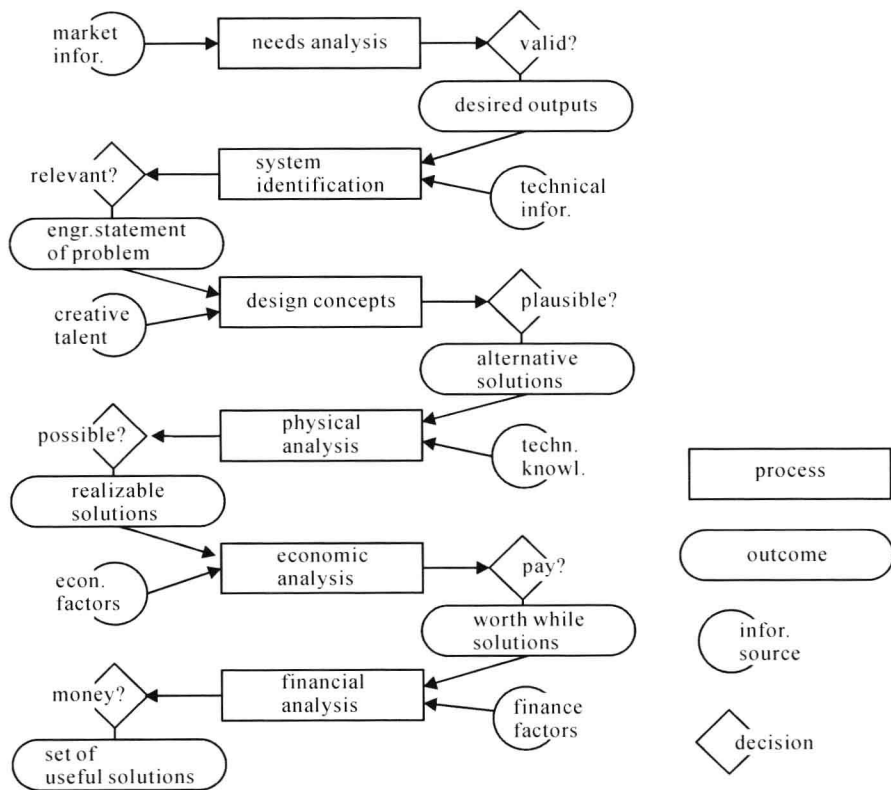


图0-1 Asimow建筑设计六进程
(资料来源: Asimow, 1962)

计步骤划分为明确进程之后，关于建筑设计的各种模型都证明建筑设计是一个反复的过程。如图0-1，Asimow将设计进程分为六部分，每个进程甄选最佳选择。他提出至今仍被广泛认同的三阶段设计流程：分析（Analysis）阶段，着重于了解设计问题与设定设计目标；综合（Synthesis）阶段，致力于替选方案的产生；评估（Evaluation）阶段，依据设计目标，衡量各替选方案的可行性并做选定^①。亚历山大（Alexander，1964）也提出分解建筑问题的方式，“解空间”根据与其他连接关系被分成“适合”（Fit）及“不适合”（Unfit）的评价参数，并针对综合阶段的设计行为，以理性的数学模型来探讨^②，标示以计算机作为设计辅助工具的可能性。20世纪70年代，Eastman^③及Mitchell^④等学者以信息处理的认知理论（Information Processing Theory）为基础，将设计的过程视为问题定义（Specification）、方案生成（Generation）、答案评估（Evaluation）等等系列循环的“问题解决”（Problem-solving）过程^⑤。

其后的大部分模型都会把设计过程分割为若干部分，但同时也提供从各进程与其前、后进程的反馈。然而，通过流程图提出的设计方式通常并不能完全表达实际设计过程的操作顺序，从而也限制了这些流程模型的使用。其有效性通常仅仅限于先例研究分析，当设计师们在建筑实践中遇到具体问题的时候，他们极少利用这些模型来指导自己的建筑设计进程。鉴于建筑设计牵涉众多复杂因素的实际情况，Simon于1973年将建筑设计定义为“病态结构的”（Ill-structured Problem）或者“魔鬼”问题^⑥。

设计师们通过一些披盖着神秘面纱的方法来避免这些近乎邪恶的“魔鬼”。创造力常常被认为是建筑师的内在能力，其内在能力、艺术修养与建筑师的自身冲动密不可分。与此思维模式不同的是，设计师也使用旁敲侧击或分歧性的思考方法，收敛性思维总是向着一个清晰的目标努力，如感性与理性分析共存的可行性探索。建筑设计教育也常采用渗透而非固定的模式，学生通常可以在彻底理解全部内容之前已经能够操作建筑设计过程。这些技巧虽然使得精确地理解设计过程变得混沌，但他们却能使可行性探索成为一个具体的设计问题。此外，对建筑设计问题“随机性”探索也十分重要，“问题解决”（Problem-solving）的空间无穷多，且具有动态的、模糊的边界。然而，在建筑设计过程中，过多的选择反而成为设计进程的绊脚石。在很大程度上，建筑设计就是限制及去除不需要选择分支的甄选过程。但在

① Asimow M. Introduction to Design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1962

② Alexander C. Notes on the Synthesis of Form. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964

③ Eastman C M. Spatial Synthesis in Computer-Aided Building Design. London, England: Applied Science Publishers, 1975

④ Mitchell W J. Computer-Aided Architectural Design. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1977

⑤ Newell A Simon H A. Human Problem Solving. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972

⑥ Simon H A. The Structure of Ill-structured Problems. Artificial Intelligence, 1973, 4:181-200

很多时候，设计师本身也很难客观地断定某一个设计是否就优于另一个，也正因为有太多的手段来体现某一个草案，最终的设计成果经常成为武断的决定，这使得追求完美设计成果的设计师备受挫折。为了去除这一武断，设计师需要优秀的原则来指导他们的设计工作。

长期以来，建筑设计方法学提供了诸多限制原则，它们试图通过理性的规则使得建筑师能够专注于所有可能解决方案的各部分。从神谕赐予所罗门庙的三维数据到阿尔伯蒂（Alberti）的《建筑十书》，从现代主义兴起到衰退，设计师们都一直努力限制可供选择的设计方案，从而找到更理想的设计规则。这些设计步骤被视作建筑设计方法学或建筑学原则，其理论基础便是通过发现解决设计问题的方法及多层限制，并由此引导设计师做出正确的决定。

毫无疑问，在建筑业中，第一层限制来自客户要求。建筑设计方法学，比如功能学，就是决策所必须满足的第一个需求。设计中的最优化也具有相同的问题，方法学还涉及利用心理学来制造并满足客户需求。然而，在绝大多数设计项目中，都存在着各种各样、并未被客户界定的二级或者暗示的需求。此外，建筑设计最终形态还会在很大程度上受政治、社会和经济的影响，在建筑设计过程中，设计师可能不必过多地考虑节省资源的方方面面，以繁华的表现形式来展现其实力也许更为重要，如，体现政体特点的庄严性需求，宗教建筑在满足容纳圣会容量的同时展现其精神等等。如果建筑作品更关注生态，则会提高其公众形象。数学也被用做一种工具来追求设计的完美，当房屋的空间受功能和环境限制很少时，建筑师需要借鉴理想的人体尺寸、和谐的比例，如黄金分割、Fibonacci数列等。算法设计（Algorithmic Design）拒绝猜测、臆断，它依赖于定量的规则限制来决定最终形式，它是最近产生并用于优化设计的方法。

建筑师也被视为艺术家，客户通过建筑师作品集的设计意识来选择合适的设计师。建筑师的设计意识通过其作品展现个人欲望与情趣，从而形成他们的风格，如盖里（Frank Gehry）的设计作品在满足规划需求的同时总展现出雕塑效果。艺术的、哲学的或风格因素的选择显然受设计师个人主观意识控制，且因不同设计师迥异，同时也会随流行风格而改变。它们基于建筑师的个人记忆和经历，展现设计师所领悟的“时代思潮”。这些设计意识提供了设计师在评估设计问题及解决方案中的第一原则。

规划、功能、艺术、风格、时尚、哲学、信仰、经济、心理学、政治以及数学都在设计中扮演各自的角色，它们的的目的都是寻求设计决策的限制条件。达到这一目的最直接的办法就是通过学习已有的案例，跟随设计的脚本，来选择最佳方案。方法的选择极具个人化特征，同时也能反映设计者的水平。阿尔伯蒂（Alberti）的《建筑十书》，亚历山大（Christopher Alexander）的模式语言，甚至“风水”都对如何设计空间给予适当的帮助。尽管这些建议通常都以教条模式出现，且并无严

格逻辑推理，但它们仍然展现出很好的建筑实践原则。特定的项目总需要特殊的方法，而其他的方法可能完全不适合。因而，试图独立地评价某个单独的方法并不可行，对于不同建筑学特定方法的选择也从另一个角度体现设计师创造力。

从《建筑十书》、“模式语言”到将建筑设计进程定义为六部分，均表明建筑学是一门将多学科离散知识及经验信息转变为建筑创作艺术成果的学科。维特鲁威、亚历山大及Asimow均试图提炼建筑学的理性部分为建筑设计创作进程服务。这些既有的建筑学预知“定义”为当今计算机技术提供了广阔的应用平台。建筑师可以借助计算机强大的存储及计算功能，综合建筑学预知“定义”，创建与众不同的程序工具，拓展建筑学研究方法。如今，计算机技术已逐渐应用到建筑设计和建筑教学过程，各类综合软件被用于建筑辅助设计的构思及表达。随着建筑设计与计算机技术的相互渗透，CAAD应用于建筑设计实践必将更加广泛而深入。全新的CAAD操作方式显示建筑应用软件的机械及不足，计算机与建筑师两者之间的关系已经从简单生产关系转移到建筑设计本身的探讨及实验之中。其中，一个具有开创性的领域便是建筑设计生成艺术，建筑设计生成艺术在发展建筑设计应用软件的同时，也将程序算法探索结合至建筑设计的诸多过程，设计师借此可以拓展认识事物的方法，运用特有的工艺来挖掘自身的设计潜能，计算机生成技术被有计划地应用于建筑、建筑师及计算机程序算法的交互作用之中。

0.2 计算机辅助建筑绘图与设计

计算机辅助建筑设计（CAAD：Computer-Aided Architectural Design）具有广泛的概念内涵，泛指运用计算机工具协助完成建筑设计的各种工作。早在20世纪50年代，英国数学家和逻辑学家、电脑理论领域先驱阿兰·麦席森·图灵（Alan M. Turing）便提出“会运算且具智能的机器”概念，他认为复杂的数学可以通过简单的机械原理来运算，其发展的“图灵机”成为现代计算机的雏形。1956年，人工智能（Artificial Intelligence）概念在美国一次研讨会上提出。对于人工智能，图灵提出了重要的衡量标准——“图灵测试^①”。70年代，专家系统、认识性系统及各种新设计方法驱使研究者将“具有运算能力的机器”的测试转化为“会思考的机器”，进而提出“机器是否能做设计”的问题，并引发人们开辟新的设计方法。1972年，计算机辅助设计领域的先驱，美国麻省理工学院媒体实验的主要创始人尼葛洛庞帝（Nicholas Negropontes）在《建筑机器》

Drawing & Design

① “图灵测试”是一个关于机器人的著名判断原则，一种测试机器是否具备人类智能的方法。参见：<http://baike.baidu.com/view/94296.htm>