

基于 GANN-BIM 的 寒地建筑形态 数字化节能设计

The Building Form Digital Energy-efficient Design
for Building in Cold Region
Based on GANN-BIM Model

韩昀松 孙 澄 著

2

中国建筑工业出版社

基于 GANN-BIM 的寒地建筑形态 数字化节能设计

The Building Form Digital Energy-efficient
Design for Building in Cold Region
Based on GANN-BIM Model

韩昀松 孙 澄 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 GANN-BIM 的寒地建筑形态数字化节能设计/
韩昀松, 孙澄著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2018. 2

ISBN 978-7-112-21802-8

I. ①基… II. ①韩… ②孙… III. ①寒冷地
区-建筑工程-数字化-节能设计 IV. ①TU201.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 020071 号

责任编辑: 李 鸽 毋婷娴

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

基于 GANN-BIM 的寒地建筑形态数字化节能设计

韩昀松 孙 澄 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10¼ 字数: 251 千字

2018 年 2 月第一版 2018 年 2 月第一次印刷

定价: 59.00 元

ISBN 978-7-112-21802-8

(31626)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

我国寒地建筑建设量大，单体能耗高，节能潜力巨大。建筑形态作为功能空间与自然环境的交互界面，对于寒地建筑能耗水平控制与室内物理环境舒适度有着重要影响。既有寒地建筑形态节能设计过程在节能设计效率、决策精度和复合性能权衡方面均有待提升。研究旨在提出寒地建筑形态数字化节能设计流程、平台与策略，从而提高寒地建筑形态节能设计效率，提升节能设计决策精度，加强节能设计过程对于复合性能的权衡能力。

研究基于“由思维到流程，循流程建平台，基平台提策略”的思路，综合应用文献归纳、案例分析、抽样调查、统计分析、建筑信息建模、参数化编程、建筑性能模拟、神经网络建模、遗传优化搜索等方法，从设计思维演化、设计流程数字化重构、设计平台数字化革新和设计策略数字化转型四方面解析了建筑形态节能设计数字化趋向；建立了包含建筑与环境信息集成、形态与性能映射关系建构和多目标建筑形态优化三项子流程的寒地建筑形态数字化节能设计流程；研发了寒地建筑环境信息模型、建筑能耗与光热性能预测神经网络模型和遗传优化模型，并通过编写接口程序实现了上述模型的耦合工作，进而研发了 GANN-BIM 数字化节能设计平台；基于寒地建筑能耗与光热性能要求，结合控制变量实验，提出了包含设计目标、设计参量和约束条件的寒地建筑形态数字化节能设计策略；最后，结合某办公建筑设计案例实践验证了寒地建筑形态数字化节能设计流程、平台和策略的应用效果。

研究揭示了建筑形态节能设计思维由“形态塑造”“形态发生”至“性能驱动”的演化脉络，解析了建筑形态节能设计流程、平台与策略的数字化变革趋向，首次系统阐明了数字化节能设计研究的必要性；提出了寒地建筑形态数字化节能设计流程，相比既有建筑节能设计流程，它具备性能驱动设计决策制定、复合性能一体模拟和多学科信息参数化协同三方面技术优势；研发了建筑环境信息模型，实现了多学科交叉信息集成与设计参数协同，验证结果表明该模型能够展开环境信息分析，可对标准与非标准建筑进行建筑信息建模，能够展开建筑能耗与光热性能模拟；构建了寒地办公建筑能耗和光热性能预测神经网络模型，验证结果表明神经网络预测值与目标值相关系数达 0.980 以上，且无过度拟合，相比既有模拟软件可显著降低建筑性能评价耗时；耦合遗传优化模型、建筑环境信息模型和神经网络模型，建立了 GANN-BIM 建筑数字化节能设计平台，在办公建筑设计中的实践应用表明该平台能够有效改善寒地建筑能耗和光热性能，计算出平衡多性能目标要求的非支配解；基于寒地建筑地域特征与性能要求，提出了包含设计目标、设计参量和约束条件的数字化节能设计策略。

研究可提高节能设计效率，提升节能设计决策精度，加强对复合性能要求的权衡考虑，改善寒地建筑形态节能设计效果；同时，本文研发的数字化节能设计平台可用于建筑信息建模、建筑复合性能预测和建筑形态多目标优化，能够提升我国建筑节能设计信息化水平；而且，研究通过抽样调查集成了寒地办公建筑与环境信息，建构符合寒地建筑特征的建筑能耗与光热性能预测神经网络模型，可加强建筑形态节能设计过程对寒地建筑地域性的考虑。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 建筑节能设计背景、目的与意义	1
1.1.1 建筑节能设计的时代背景	1
1.1.2 建筑数字化节能设计研究目的与意义	3
1.2 国内外相关研究	4
1.2.1 国内相关研究	4
1.2.2 国外相关研究	6
1.2.3 文献综述	13
1.3 建筑数字化节能设计研究内容与方法	14
1.3.1 建筑数字化节能设计研究内容	14
1.3.2 建筑数字化节能设计研究方法	16
第2章 建筑形态节能设计数字化趋向解析	19
2.1 建筑形态节能设计思维演化	19
2.1.1 形态塑造节能设计思维	19
2.1.2 形态发生节能设计思维	20
2.1.3 性能驱动节能设计思维	22
2.2 设计流程数字化重构趋向	25
2.2.1 多学科信息交叉	25
2.2.2 复合性能权衡	26
2.2.3 设计决策支持	27
2.3 设计平台数字化革新趋向	28
2.3.1 设计参数协同	28
2.3.2 性能模拟整合	30
2.3.3 遗传优化搜索	33
2.4 设计策略数字化转型趋向	34
2.4.1 由“数形分离”向“数形结合”转型	34
2.4.2 由“单向寻优”向“多维平衡”转型	35
2.4.3 由“结果控制”向“过程控制”转型	36
2.5 本章小结	37
第3章 寒地建筑形态数字化节能设计流程	38
3.1 设计流程构成	38
3.1.1 建筑与环境信息集成	38
3.1.2 形态与性能映射关系建构	39
3.1.3 多目标建筑形态优化	40

3.2 集成建筑与环境信息	42
3.2.1 建筑环境信息集成目的	42
3.2.2 建筑环境信息集成类型	43
3.2.3 建筑环境信息集成过程	44
3.3 建构形态与性能映射关系	45
3.3.1 神经网络映射方法比较	46
3.3.2 形态与性能映射建构原理	47
3.3.3 形态与性能映射关系建构过程	48
3.4 展开多目标建筑形态优化	53
3.4.1 多目标优化方法比较	53
3.4.2 多目标遗传算法比较	54
3.4.3 多目标建筑形态优化过程	55
3.5 设计流程技术特征解析	56
3.5.1 性能驱动设计决策制定	57
3.5.2 建筑复合性能一体化预测	58
3.5.3 多学科信息参数化协同	59
3.6 本章小结	60
第4章 寒地建筑形态数字化节能设计平台	61
4.1 建筑环境信息模型	61
4.1.1 环境信息分析	63
4.1.2 建筑信息建模	65
4.1.3 建筑性能模拟	77
4.2 神经网络模型	81
4.2.1 寒地办公建筑能耗与光热性能预测神经网络模型	82
4.2.2 寒地建筑墙体传热量预测神经网络模型	84
4.3 遗传优化模型	90
4.3.1 遗传优化模型算法	92
4.3.2 遗传优化模型控制参数	93
4.4 本章小结	95
第5章 寒地建筑形态数字化节能设计策略	96
5.1 节能设计目标预判	98
5.1.1 设计目标制定原则	98
5.1.2 能耗设计目标	99
5.1.3 热舒适性能设计目标	101
5.1.4 自然采光性能设计目标	103
5.2 节能设计参量预判	106
5.2.1 影响能耗和热舒适的形态设计参量	107
5.2.2 影响自然采光性能的形态设计参量	110
5.3 节能设计参量对目标影响模拟实验	112

5.3.1	实验模型建构	112
5.3.2	建筑朝向参量实验结果分析与讨论	114
5.3.3	建筑层高参量实验结果分析与讨论	115
5.3.4	进深缩放系数参量实验结果分析与讨论	116
5.3.5	建筑窗墙比参量实验结果分析与讨论	119
5.3.6	建筑窗高参量实验结果分析与讨论	120
5.3.7	建筑窗台高度参量实验结果分析与讨论	121
5.4	数字化节能设计策略制定	123
5.4.1	确定建筑性能设计目标	124
5.4.2	确定建筑形态设计参量	124
5.4.3	确定设计参量约束条件	125
5.5	本章小结	126
第6章	寒地建筑形态数字化节能设计实践	128
6.1	数字化节能设计策略应用	128
6.1.1	设计目标	129
6.1.2	设计参量	130
6.1.3	约束条件	130
6.2	数字化节能设计流程应用	133
6.2.1	建筑与环境信息集成	133
6.2.2	形态与性能映射关系建构	138
6.2.3	建筑形态多目标优化	142
6.3	数字化节能设计结果分析与讨论	142
6.3.1	设计结果分析	142
6.3.2	设计决策验证	146
6.3.3	设计方案选择	151
6.4	本章小结	153
结论		154
后记		156

第 1 章 绪 论

1.1 建筑节能设计背景、目的与意义

1.1.1 建筑节能设计的时代背景

建筑业能耗接近生产活动总能源消耗的 30%，并呈增长势头^①，且相比其他能耗较高的产业，建筑行业节能潜力更大^②。我国建筑节能国策以 1980~1981 年住宅建筑设计能耗为参照数值，执行节能 30%、节能 50%和节能 65%的三阶段路线。自 1986 年第一部节能设计标准颁布至今，已相继出台、修订数十部节能设计标准与规范，节能设计目标也逐步攀升，并已全面执行节能 65%的标准，北京市已率先执行节能 75%的标准（图1-1）。

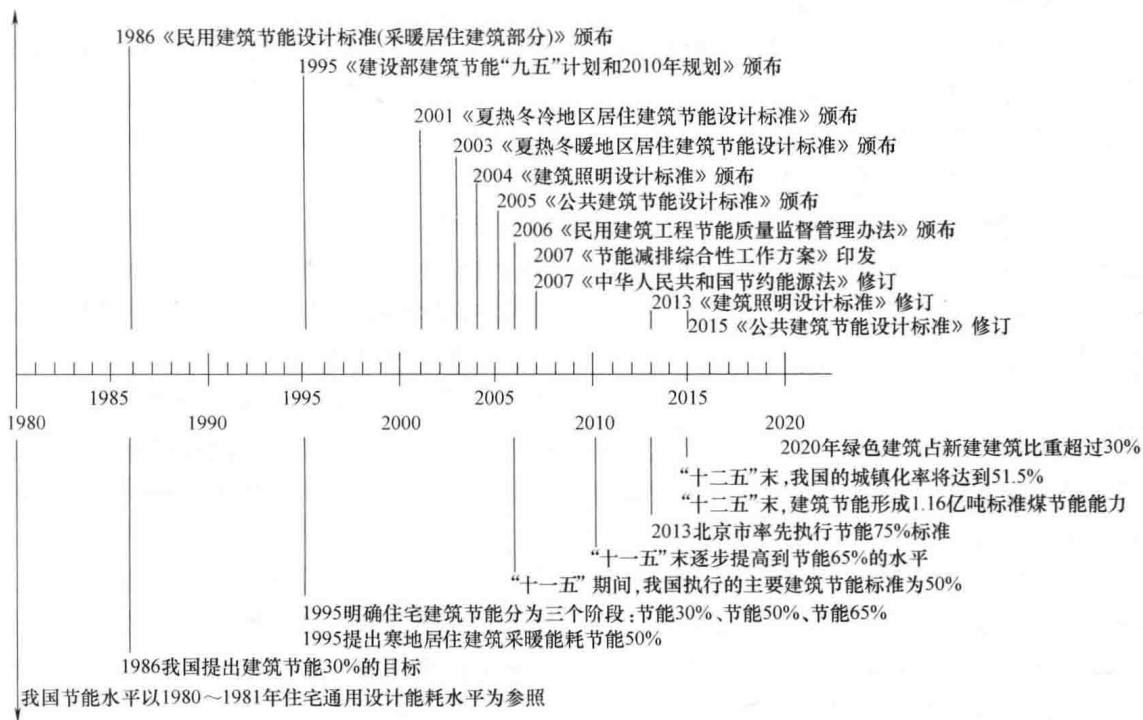


图 1-1 我国节能设计标准与目标发展情况

① Lombard L, Ortiz J, Pout C. A Review on Buildings Energy Consumption Information [J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (3): 394-398.

② Jiang Y. Current Building Energy Consumption in China and Effective Energy Efficiency Measures [J]. Journal of HVAC, 2005, 35 (5): 30-40.

同时,我国公共建筑空间面积增长迅速,单位面积能耗巨大。2000~2010年间,公共建筑建设面积增大了1.4倍,单位面积建筑能耗平均上升了20%,是增长最快的建筑用能分布^①。大型公共建筑能耗多集中于120~150kWh/(m²·a)^②,高于中小型公共建筑,令我国公共建筑能耗呈现为二元分布情况,而公共建筑中尤以办公建筑的建设量最大,其节能研究形势紧迫。

寒地气候恶劣,冬季室内外温差大,建筑能耗水平较高。国务院于2006年发布了《关于加强节能工作的决定》,要求公共建筑执行节能50%标准,对直辖市及有条件地区实施节能65%标准^③,提高了建筑节能设计要求。住房和城乡建设部于2011年提出建筑设计过程需关注建筑形态对于建筑能耗的影响,以避免建筑形态不合理导致的高能耗问题。建筑形态作为建筑空间与自然环境的能量与物质交互界面,首当其冲地成为建筑节能设计研究的对象。

建筑形态节能设计效果受建筑能耗模拟精度和模拟数据对节能设计决策支持程度的影响。我国《民用建筑绿色设计规范》(JGJ/T 229—2010)建议采用计算机模拟方法分析建筑能耗,根据模拟结果调整建筑形态和空间,以此来降低建筑能耗。可见,建筑能耗水平模拟精度与效率,以及模拟结果对建筑节能设计决策的支持程度直接影响着建筑形态节能设计效果。

寒地建筑能耗包括采暖能耗、制冷能耗、人工照明能耗等多项内容,受到日照辐射、环境温湿度、天光亮度和风等多种环境影响。由于寒地建筑能耗计算多以“年”为模拟周期,高精度的建筑能耗模拟耗时较长,制约了性能模拟工具在建筑设计实践过程中的应用;而简化能耗模拟方法又会影响模拟精度,降低建筑节能设计精度。因此,寒地建筑节能设计亟需探索平衡能耗模拟精度与效率的有效手段。

既有建筑形态节能设计实践中,设计者多采用试错法(trial and error method)制定建筑形态节能设计决策,设计寒地建筑形态。试错过程中,设计者根据设计经验,主观提出若干建筑形态方案,随后应用建筑能耗模拟软件计算其对应的能耗水平,进而反复试验、比较建筑形态参数变化对能耗水平的影响,制定节能设计决策。试错过程中,设计者通过对能耗模拟结果的分析,主观判断形态参数与能耗水平的关系,据此制定建筑形态节能设计决策。可见,试错过程中,建筑能耗模拟结果包含的设计参数与能耗目标量化关系需要设计者通过主观转译进行提取,性能模拟结果未量化作用于设计决策过程,而设计者有限的数据分析能力又制约了节能设计决策制定的准确性。

更重要的是,建筑形态节能设计需综合考虑建筑能耗、自然采光和热舒适性能目标,而建筑形态设计参数对于上述性能指标的影响是有差异的,利于某项性能目标改善的设计参数调整可能导致其他性能目标的劣化。例如,寒地建筑外窗面积的降低虽然能减少采暖制冷能耗,但却会影响功能空间自然采光性能,导致人工照明能耗升高。同时,建筑能耗水平与光热性能的改善需要多项形态设计参数的联动,单一参量的数值调整难以有效改善寒地建筑能耗与光热性能,故设计者需根据复合性能目标对寒地建筑形态的多项设计参数

① 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012: 8-9.

② 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011: 28-32.

③ 王建平,王丛莹,杨三超. 低碳建筑使用阶段评价体系浅议 [J]. 建筑节能, 2011, (04): 62-65.

同时调整。如此复杂多维的设计参数调整过程不宜采用试错法。因此，寒地建筑形态节能设计迫切需要找到能够回应多性能目标要求，具有多参数协同调整能力的节能设计方法。

1.1.2 建筑数字化节能设计研究目的与意义

建筑节能设计是“老谈常新”的议题，“老谈”是指既有建筑节能设计研究为后续研究奠定了坚实的理论基础，“常新”则是建筑节能设计要求的不断攀升促进着建筑节能设计方法与技术的变革。本书立足寒地气候环境与建筑功能需求，旨在基于性能驱动建筑形态节能设计思维，综合应用人工神经网络（以下简称为“神经网络”）预测、建筑信息建模、参数化编程和遗传优化搜索等数字化技术，重构节能设计流程，革新节能设计平台，转型节能设计策略，进而实现提高节能设计效率、提升设计决策精度、加强复合性能权衡能力三方面研究目的。

1. 提高节能设计效率

节能设计过程基于性能模拟结果来比较和选择建筑形态节能设计方案。性能模拟是影响节能设计精度的重要方面，也是节能设计过程中耗时较多的工作。本书提出数字化节能设计流程能够建立形态与性能映射关系，应用神经网络预测技术，根据数字化节能设计目标与参量，建立性能预测神经网络模型，发挥神经网络模型的非线性问题预测优势，在保证预测精度的同时大幅降低性能预测耗时。同时，应用建筑信息建模、建筑性能模拟和参数化编程技术生成性能预测神经网络模型训练数据，突破既有训练数据生成瓶颈，进一步提高节能设计效率。

2. 提升设计决策精度

虽然建筑性能模拟技术广泛应用于节能设计过程，但性能模拟数据的分析依赖于设计者的主观转译，未直接影响设计决策过程。既有设计决策制定过程存在较大不确定性和随机性，节能设计决策精度不足。研究基于性能驱动设计思维，提出数字化节能设计流程，建立多目标建筑形态优化子流程，应用遗传优化搜索技术，研发数字化节能设计平台遗传优化模型，应用遗传算法根据性能模拟数据制定设计决策，实现性能模拟与决策制定过程的耦合，并基于数字化节能设计策略展开建筑形态遗传优化，将建筑形态设计过程由“主观造型”过程转变为基于建筑性能模拟数据的“客观找形”过程，从而提升建筑形态节能设计决策精度。

3. 加强复合性能权衡能力

建筑形态节能设计应权衡考虑能耗水平和光热性能复合要求。建筑室内外环境在能量交互过程中存在温度场、能量场的耦合作用，相同的建筑形态调整决策对不同建筑性能的影响效果存在差异。本书提出的数字化节能设计流程包含建筑与环境信息集成子流程，能够应用建筑信息建模技术，研发建筑环境信息模型，集成多学科交叉信息，并应用神经网络模型对建筑复合性能进行一体化预测，根据数字化节能设计策略制定的设计目标和参量，应用遗传优化模型，调用多目标进化算法展开多目标建筑形态优化，以帕伦托解集对优化设计结果进行排序，直观呈现复合性能要求下的建筑形态可行解，从而加强节能设计过程对于复合性能要求的权衡能力。

上述内容涉及的建筑与环境信息集成、形态与性能映射关系建构和多目标建筑形态优化三项子流程构成了数字化节能设计流程；建筑环境信息模型、神经网络模型和遗传优化

模型则构成了数字化节能设计平台——GANN-BIM；而设计目标和参量则源于数字化节能设计策略。

本书所展开的建筑数字化节能设计研究具有以下三方面意义：

1. 改善严寒地区办公建筑形态节能设计效果

研究将基于性能驱动设计思维，提出适于寒地应用的建筑形态数字化节能设计流程、平台和策略，可提高节能设计效率，提升设计决策精度，加强复合性能权衡，将有效改善寒地建筑形态节能设计效果。

2. 提升建筑节能设计信息化水平

研究将综合应用建筑信息建模技术、参数化编程技术、神经网络预测技术和遗传优化搜索技术研发 GANN-BIM 数字化节能设计平台。该平台可用于建筑信息建模、复合建筑性能预测、建筑形态多目标优化等方面，可提升我国建筑节能设计信息化水平。

3. 加强寒地建筑节能设计的地域性考虑

研究将通过寒地建筑方案形态设计参数采样，集成寒地建筑与环境信息，并应用神经网络预测技术，建构符合寒地材料构造特征的建筑能耗与光热性能预测神经网络模型，可加强寒地建筑节能设计过程对地域性的考虑。

1.2 国内外相关研究

1.2.1 国内相关研究

我国节能设计研究已开展数十年，涌现出大量成果。早在 80 年代，胡璘、冯永芳和向松林便对居住和公共建筑形态与能耗的关系展开了模拟计算与分析，结果验证了体系系数、窗墙比等建筑形态设计参数对能耗水平有着显著影响^{①~②}。蔡君馥等模拟了不同居住建筑体量下的建筑能耗水平，结果表明北京、西安和哈尔滨三地的板式建筑在一定数值区间内，其建筑体量与单位面积传热损失成反比^③。宋德萱、张峥通过模拟不同体形系数下的建筑能耗水平，提出了联列递减律、高度反比律和正方极限律^④。梁珍等展开了哈尔滨地区建筑能耗水平抽样调查，分析了不同建筑的能耗构成差异^⑤。余英鹤等对哈尔滨地区民用建筑进行了能耗统计，开发了能耗统计数据库软件，但是该软件仅能作为数据集成端，限于当时的技术局限并不能指导设计实践^⑥。操雪荣应用 DOE-2 分析了建筑平面形式、体形系数和建筑能耗的量化关系，提出了上述建筑形态参数与能耗的回归模型^⑦。王

① 胡璘. 建筑平面、体形、朝向与节能 [J]. 建筑学报, 1981, (06): 37-41.

② 冯永芳, 向松林. 也谈建筑体形与节能 [J]. 建筑学报, 1983, (08): 33-35.

③ 蔡君馥. 住宅节能设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991: 15-21.

④ 宋德萱, 张峥. 建筑平面体形设计的节能分析 [J]. 新建筑, 2000, (03): 8-11.

⑤ 梁珍. 城市民用建筑能耗模拟和统计方案设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001: 25-28.

⑥ 余英鹤. 哈尔滨市民用建筑物能耗统计方案的编制与数据库开发 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003: 35-39.

⑦ 操雪荣. 居住建筑体形系数与建筑节能 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 42-49.

丽娟应用 DOE-2 模拟了北京、西安和拉萨三座寒地城市办公建筑在不同体系系数、窗墙比下的能耗水平,进一步基于主成分分析结果,提出体形系数、窗墙比是影响能耗水平的主要形态参数^①。李爱旗、白雪莲通过正交实验,应用 DeST 能耗模拟数据建立了重庆居住建筑冷、热及全年负荷预测方程,应用模拟数据验证了该方程^②。张恒坤等对比了重庆和北京两地 19 世纪 60 年代至新世纪初的居住建筑形态,结果表明居住建筑体形系数逐渐降低,窗墙比日渐增大,建议以体形系数和窗墙比作为建筑能耗水平控制的形态参数^③。陈淑琴调查了 94 户居住建筑运行和能耗情况,提出建筑年代、建筑朝向和室内热环境满意度是影响重庆地区住宅建筑冬季能耗的定性因素,建筑面积、楼层、人口和采暖设备能源转换率是影响冬季能耗的定量因素^④。刘加平等从建筑平面布局、体形系数和空间分区等方面提出了节能设计策略^⑤。张海滨应用 Design Builder 模拟了寒冷气候区不同平面形式、进深开间尺度和高度下的能耗水平,以回归分析和方差分析对模拟数据进行分析处理,提出了基于形态参数的建筑能耗回归模型^⑥。

上述研究虽能改善节能设计精度,但未利用模拟数据引导设计决策制定过程,不能为节能设计决策过程提供有效支持^⑦。随着优化搜索技术的引入,国内多位学者展开了基于优化搜索技术的建筑形态节能设计理论和实践应用。天津大学闫力、东南大学李飏,以及清华大学黄蔚欣、徐卫国从不同角度探讨了基于参数化建模技术和“生成艺术”理论的建筑形态生成设计方法^{⑧~⑪}。陈飞和苏剑鸣以建筑性能指标为切入点,展示了建筑形态生成方法在节能设计实践中的应用潜力^{⑫~⑬}。清华大学林波荣教授基于遗传算法展开了一系列建筑节能优化设计研究,研发了建筑节能设计工具——MEESG (Most Energy Efficiency Scheme Generator),并分析了照明能耗对建筑节能方案的影响^{⑭~⑮},提出了适于设计前期的节能优化方法,应用遗传算法搜索不同气候条件下的能耗性能相对最优体形系数值^⑯。2012 年,孙澄宇结合某改造设计项目,以日照辐射得热控制为目标,探讨了基

- ① 王丽娟,寒冷地区办公建筑节能设计参数研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学,2007:36-42.
- ② 李爱旗,白雪莲,居住建筑能耗预测分析方法的研究 [J]. 建筑科学,2007,23 (8):32-35.
- ③ 张恒坤,周异嫦,唐鸣放,住宅建筑平面、体形的变化特点 [J]. 重庆建筑,2008,(03):2-3.
- ④ 陈淑琴,基于统计学理论的城市住宅建筑能耗特征分析与节能评价 [D]. 湖南:湖南大学,2008:35-39.
- ⑤ 刘加平,谭良斌,何泉,建筑创作中的节能设计 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009:39-52.
- ⑥ 张海滨,寒冷地区居住建筑体型设计参数与建筑节能的定量关系研究 [D]. 天津:天津大学,2012:15-20.
- ⑦ Negendahl K. Building Performance Simulation in the Early Design Stage: An Introduction to Integrated Dynamic Models [J]. Automation in Construction, 2015, 54 (6):39-53.
- ⑧ 闫力,建筑生成理论研究 [D]. 天津:天津大学,2005:49-54.
- ⑨ 李飏,基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究 [D]. 南京:东南大学,2008:79-90.
- ⑩ 黄蔚欣,徐卫国,参数化非线性建筑设计中的多代理系统生成途径 [J]. 建筑技艺,2011,(1):42-45.
- ⑪ 徐卫国,参数化设计与算法生成 [J]. 世界建筑,2011,(6):110-111.
- ⑫ 陈飞,蔡镇钰,王芳,风环境理念下建筑形式的生成及意义 [J]. 建筑学报,2007,(7):29-33.
- ⑬ 苏剑鸣,梅小妹,基于功能与环境关系评价的生成式计算机辅助建筑设计方法研究 [J]. 南方建筑,2011,(1):84-89.
- ⑭ 周潇儒,基于整体能量需求的方案阶段建筑节能设计方法研究 [D]. 北京:清华大学,2009:89-124.
- ⑮ 余琼,方案阶段建筑节能参数化设计方法研究 [D]. 北京:清华大学,2011:41-50.
- ⑯ 林波荣,李紫薇,面向设计初期的建筑节能优化方法 [J]. 科学通报,2016,(01):113-121.

于遗传优化算法的建筑形态节能设计过程^①。2013年,韩昀松基于日照辐射和风环境对建筑日照得热和自然通风性能的影响,展开了建筑形态节能设计方法研究。通过编写不同平台间的数据接口程序,弥补了性能模拟平台与参数建模平台间的数据传导裂缝^②。2013年,石邢通过整合 Ecotect 和 Rhinoceros 模型,探讨了遗传优化算法引导下的建筑屋面形态节能设计方法^③。上述研究加强了建筑形态对于复杂环境影响的回应力度,有效提高了设计决策精度,但是却多重“形”而轻“理”,对于地域环境影响、建筑性能评价方法、建筑性能模拟技术的关注不足。更重要的是,上述研究采用建筑性能模拟软件来计算建筑形态可行解性能水平,耗时较高,制约了遗传优化算法在建筑节能设计中的应用。

2015年,喻伟基于居住建筑能耗和热舒适目标,展开了夏热冬冷地区居住建筑形态与热工属性优化,采用 NSGA-II 优化算法,以 Energyplus 模拟数据训练遗传优化 BP 神经网络,对优化设计过程中的可行解方案进行评价,对建筑平面形式、朝向、体形系数、楼面积、层数、各朝向窗墙比、窗、墙和屋面传热系数进行优化。结果表明,训练后的神经网络能耗预测平均相对误差低于 1.7%,室内热舒适小时数预测平均相对误差低于 2.1%;优化得出的最优解集能耗和热舒适度性能优于实验参照建筑^④。

1.2.2 国外相关研究

国外建筑形态节能设计研究也经历了由模拟实验分析到遗传优化搜索的发展过程。2002年,Hanna等模拟了居住建筑平面形式与能耗的关系^⑤。Florides应用 TRNSYS 对板式建筑朝向展开模拟,指出板式建筑南北向布置利于节能^⑥。2006年,Roos和Persson模拟分析外窗面积与能耗的关系^{⑦~⑧}。2010年,Mechri等模拟了办公建筑体形系数、建筑朝向、外遮阳情况、表面积系数、太阳辐射强度和建筑内部热容变化对能耗的影响,提出体形系数对建筑采暖能耗影响最大,表面积系数对建筑空调能耗影响最大^⑨。2010年,Okeil针对日照辐射对建筑能耗的影响,在街区尺度层面探讨了建筑间距与能耗之间的关系^⑩。2011年,Wu Y应用 CFD 模拟方法对吉巴乌文化中心展开了自然通风模拟,

① 孙澄宇,数字化建筑设计方法入门 [M]. 上海:同济大学出版社,2012:65-80.

② 韩昀松.基于日照与风环境影响的建筑形态生成方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:72-86.

③ Shi X, Yang W. Performance-driven Architectural Design and Optimization Technique from a Perspective of Architects [J]. Automation in Construction, 2013, 32 (4): 125-135.

④ Yu W, Li B, Jia H et al. Application of Multi-objective Genetic Algorithm to Optimize Energy Efficiency and Thermal Comfort in building design [J]. Energy and Buildings, 2015, 88 (2): 135-143.

⑤ Jedrzejuk H, Marks W. Optimization of Shape and Functional Structure of Buildings as well as Heat Source Utilization [J]. Building and Environment, 2002, 37 (12): 1379-1383.

⑥ Florides G A, Tassou S A, Kalogirou S A et al. Measures Used to Lower Building Energy Consumption and Their Cost Effectiveness [J]. Applied Energy, 2002, 73 (3-4): 299-328.

⑦ Persson M L, Roos A, Wall M. Influence of Window Size on the Energy Balance of Low Energy Houses [J]. Energy and Buildings, 2006, 38 (3): 181-188.

⑧ Persson M L. Windows of Opportunities, the Glazed Area and Its Impact on the Energy Balance of Buildings [D]. PhD Thesis, Uppsala Universitet, 2006: 56-62.

⑨ Mechri H, Capozzoli A, Corrado V. Use of the ANOVA Approach for Sensitive Building Energy Design [J]. Applied Energy, 2010, 87 (10): 3073-3083.

⑩ Okeil A. A Holistic Approach to Energy Efficient Building Forms [J]. Energy and Buildings, 2010, 42 (9): 1437-1444.

指出吉巴乌文化中心的曲线形态对通风效果具有促进作用,若风道面积增加,将取得更好的通风效果^①。2012年,Malkawi探讨了基于通风与热负荷考虑的建筑形态节能设计方法^②。2012年,Caroline探讨了双层独立住宅几何形式、街区密度、基地布局参数与建筑日照能得热、制冷和采暖能耗的关系^③。2012年,Zerefos研究了地中海气候下,长方体和棱柱体建筑能耗情况,结果表明长方体建筑日照得热较少,在地中海气候下能耗较低^④。2013年,Ayşegül基于日照辐射影响,对建筑形态布局与整体能耗间的关系进行了探讨,指出因受到共同阴影干扰,城市尺度的建筑能耗模拟难度大,相关研究有待加强^⑤。

同时,以Caldas、Norford为代表的众多学者也展开了基于进化算法的建筑形态节能设计研究工作。早期研究多以建筑全年能耗和全生命周期能耗最低为目标,针对简单建筑形态,展开建筑朝向和开窗设计参数优化。结果表明,建筑所处气候、建筑朝向和建筑类型对于建筑能耗水平有着重要影响;同时,遗传算法能够在一次运算中获得多个相对最优解^{⑥~⑨}。但是相关研究限于设计工具,在模拟精度和优化效率上均有待提升。

随着建筑性能模拟技术日趋完善,很多学者开始针对前述研究中特殊工况考虑不足的问题展开完善和拓展,同时也展开了对于建筑热舒适性能、自然采光性能的探讨。2007年,Wang等针对新加坡居住建筑自然通风工况下的室内热舒适性能,对建筑形态窗墙比和墙体材料传热系数展开了优化设计研究^⑩。Adamski基于建筑投资回收期,以建筑南向面积与建筑总面积的比值为优化参量,展开了优化设计研究^⑪。Torres和Sakamoto针对

- ① Wu Y, Yang A, Tseng L et al. Myth of Ecological Architecture Designs: Comparison Between Design Concept and Computational Analysis Results of Natural-ventilation for Tjibaou Cultural Center in New Caledonia [J]. Energy and Buildings, 2011, 43 (10): 2788-2797.
- ② Yi Y, Malkawi A. Site-specific Optimal Energy Form Generation based on Hierarchical Geometry Relation [J]. Automation in Construction, 2012, 26 (10): 77-91.
- ③ Hachem C, Athienitis A, Fazio P. Evaluation of Energy Supply and Demand in Solar Neighborhood [J]. Energy and Buildings, 2012, 49 (6): 335-347.
- ④ Zerefos S, Tassas C, Kotsiopoulos A et al. The Role of Building Form in Energy Consumption: The Case of a Prismatic Building in Athens [J]. Energy and Buildings, 2012, 48 (5): 97-102.
- ⑤ Tereci A, Ozkan S, Eicker U. Energy Benchmarking for Residential Buildings [J]. Energy and Buildings, 2013, 60 (5): 92-99.
- ⑥ Caldas L G, Norford L K. A Design Optimization Tool Based on a Genetic Algorithm [J]. Automation in Construction, 2002, 11 (2): 173-184.
- ⑦ Coley D A, Schukat S. Low-energy Design: Combining Computer-based Optimisation and Human Judgement [J]. Building and Environment, 2002, 37 (12): 1241-1247.
- ⑧ Wang W, Rivard H, Zmeureanu R G. Optimizing Building Design with Respect to Life-cycle Environmental Impacts, in: Proceedings of the Building Simulation [C]. Eindhoven; England International IBPSA Conference, 2003: 1355-1362.
- ⑨ Wang W, Zmeureanu R, Rivard H. Applying Multi-objective Genetic Algorithms in Green Building Design Optimization [J]. Building and Environment, 2005, 40 (11): 1512-1525.
- ⑩ Wang L, Wong N H, Li S. Facade Design Optimization for Naturally Ventilated Residential Buildings in Singapore [J]. Energy and Buildings, 2007, 39 (8): 954-961.
- ⑪ Adamski M. Optimization of the Form of a Building on an Oval Base [J]. Building and Environment, 2007, 42 (4): 1632-1643.

建筑空间眩光问题,基于 Radiance 模拟数据,应用遗传算法对建筑遮阳和外窗的 21 项设计参数进行了优化,旨在控制 DGP 指标^①。Kämpf 等同样基于 Radiance 模拟数据,应用遗传算法对固定体积下的建筑形态设计参数进行了优化^②。Znouda 等针对地中海地区办公建筑形态,以建筑能耗最低为目标,展开了建筑形态参数优化^③。Manzan 和 Pinto 以建筑能耗最低为目标,对办公建筑外部遮阳设备位置和尺寸展开了优化,结果表明最优解和参照建筑能耗差值可达 17%^④。Wright 和 Mourshed 将建筑立面划分为多个小单元,随后应用遗传算法对建筑立面材质进行优化,结果表明虽然每次优化得出的最优解中透明材料和非透明材料分布的位置是不同的,但是总体数目是相同的^⑤。Tuhus-Dubrow 和 Krarti 针对美国居住建筑形态,以全年能耗最小为目标,对建筑形态参数进行了优化,结果表明不同形态的能耗水平存在 0.5% 的差异^⑥。Gagne 和 Andersen, Rakha 和 Nassar 针对自然采光性能展开了建筑立面设计参数优化和建筑屋面形态优化^{⑦~⑧}。相比前述研究多关注于建筑能耗水平,这一阶段的研究对于物理环境性能也进行了考虑。

Bambrook 等基于建筑能耗需求对悉尼某独立住宅进行了建筑形态优化设计,以降低建筑成本、暖通空调设备成本、电力成本为目标,对外墙和屋面厚度、外窗类型、内墙厚度、夜间通风换气率展开了优化,结果表明优化得出的居住建筑设计方案相比参照建筑呈现出更低的建造成本^⑨。Albatici 和 Passerini 结合意大利气候,对居住建筑形态南向暴露系数(south exposure coefficient)进行了优化,旨在达成采暖能耗最小目标,结果表明建筑体形系数和南向暴露系数对建筑采暖负荷存在显著影响^⑩。2012 年, Gong 等针对建筑形态对于建筑能耗的影响展开分析,选取了国内 25 座典型城市,应用正交实验法(orthogonal method)和列表法(listing method)探讨了影响居住建筑能耗的建筑形态参数,并以能耗最低为设计目标,对居住建筑外墙厚度、屋顶保温层厚度、外墙保温层厚度、外

- ① Torres S L, Sakamoto Y. Facade Design Optimization for Daylight with a Simple Genetic Algorithm. in: Proceedings of the building simulation [C]. Beijing: International IBPSA Conference, 2007: 1162-1167.
- ② Kämpf J H, Montavon M, Bunyesc J et al. Optimisation of Buildings' Solar Irradiation Availability [J]. Solar Energy, 2010, 84 (4): 596-603.
- ③ Znouda E, Ghrab-Morcos N, Hadj-Alouane A. Optimization of Mediterranean Building Design Using Genetic Algorithms [J]. Energy and Buildings, 2007, 39 (2): 148-153.
- ④ Manzan M, Pinto F. Genetic Optimization of External Shading Devices. in: Proceedings of the building simulation [C]. Glasgow: Eleventh International IBPSA Conference, 2009: 180-187.
- ⑤ Wright J, Mourshed M. Geometric optimization of fenestration [C]. Proceedings of the building simulation, Glasgow: Eleventh International IBPSA Conference, 2009: 152-156.
- ⑥ Tuhus-Dubrow D, Krarti M. Genetic-algorithm Based Approach to Optimize Building Envelope Design for Residential Buildings [J]. Building and Environment, 2010, 45 (45): 1574-1581.
- ⑦ Gagne J, Andersen M. A Generative Facade Design Method Based on Daylighting Performance Goals [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2012, 5 (3): 141-154.
- ⑧ Rakha T, Nassar K. Genetic Algorithms for Ceiling Form Optimization in Response to Daylight Levels [J]. Renewable Energy, 2011, 36 (9): 2348-2356.
- ⑨ Bambrook S M, Sproul A B, Jacob D. Design Optimisation for a Low Energy Home in Sydney [J]. Energy & Buildings, 2011, 43 (7): 1702-1711.
- ⑩ Albatici R, Passerini F. Bioclimatic Design of Buildings Considering Heating Requirements in Italian Climatic Conditions. A Simplified Approach [J]. Building & Environment, 2011, 46 (8): 1624-1631.

窗朝向、窗墙比、外窗类型、阳光房进深开间比进行了优化,结果表明相邻气候区的典型城市对于能耗变化呈现出相同的建筑形态调整趋势^①。2012年,Sahu针对热带气候下的空调房间能耗问题,提出了建筑设计前期遗传优化方法,以建筑能耗最低为优化目标,基于 TRNSYS 建筑能耗模拟数据,对建筑体形、朝向和材料设计参数进行了优化^②。2012年,Eisenhower等尝试引入元模型(meta-model)来简化优化设计问题,以建筑热舒适、能耗水平和造价参数为设计目标,基于 EnergyPlus 建筑性能模拟平台,展开建筑形态设计参数优化,优化结果表明得出的相对最优解相比参照建筑能耗水平降低了45%^③。2012年,Turrin等提出了 ParaGen 模型,该模型整合了参数化模型和遗传算法,以结构性能和日照得热为优化目标对大跨度建筑屋面形态进行优化,结果表明参数化模型的引入能够明显改善建筑形态优化效率,但是该模型在建筑能耗水平模拟方面效率较低^④。2015年,Futrell等针对自然采光性能和热性能权衡问题,以降低采暖制冷和照明能耗为目标,应用 GenOpt 平台,基于集群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm)展开建筑立面设计参数优化,结果表明建筑南向、东西向形态优化结果在自然采光和热性能目标上并没有明显矛盾,而北向优化结果则表现出明显的矛盾关系^⑤。2015年,Yi和Kim也尝试应用遗传优化方法,基于日照辐射影响,展开高层居住建筑形态优化,以代理模型对建筑几何信息进行优化,从而实现更灵活的建筑形态变化,并通过减少优化参量提升遗传优化效率^⑥。

建筑性能仿真工具的进步提升了基于优化算法的建筑形态节能设计精度,但是由于建筑能耗模拟往往需要对全年甚至建筑全生命周期内的能耗与性能指标进行计算,运算资源消耗巨大。为降低优化过程中的建筑性能模拟过程耗时,多位学者尝试引入神经网络模型来提高建筑形态节能优化效率。2008年,Jerome以建筑采暖与制冷能耗最低、建筑室内采光系数和建筑热舒适数值最大为设计目标,对建筑外窗面积、特定朝向建筑遮阳板倾斜角度和自然通风温度等参数进行了优化研究,以人机交互方式应用 Esp-r 模拟数据建立神经网络模型,结果表明神经网络训练数据的数量直接影响着神经网络预测精度,增大建筑外窗面积虽然能够改善建筑内部空间自然采光性能,但是会引起建筑热舒适水平的劣化,两者呈现负相关关系^⑦。该研究存在四方面局限:首先,研究通过设定权重系数,将建筑暖通空调能耗、人工照明能耗和热舒适等性能目标强行合并为一个目标,进行单目标优

- ① Gong X, Akashi Y, Sumiyoshi D. Optimization of Passive Design Measures for Residential Buildings in Different Chinese Areas [J]. Building & Environment, 2012, 58 (12): 46-57.
- ② Sahu M, Bhattacharjee B, Kaushik S C. Thermal Design of Air-conditioned Building for Tropical Climate Using Admittance Method and Genetic Algorithm [J]. Energy & Buildings, 2012, 53 (10): 1-6.
- ③ Eisenhower B, Neill Z, Narayanan S et al. A Methodology for Meta-model Based Optimization in Building Energy Models [J]. Energy & Buildings, 2012, 47 (4): 292-301.
- ④ Turrin M, Buelow P, Kilian A et al. Performative Skins for Passive Climatic Comfort [J]. Automation in Construction, 2012, 22 (4): 36-50.
- ⑤ Futrell B J, Ozelkan E C, Brentrup D. Bi-objective Optimization of Building Enclosure Design for Thermal and Lighting Performance [J]. Building & Environment, 2015, 92 (10): 591-602.
- ⑥ Yi Y K, Kim H. Agent-based Geometry Optimization with Genetic Algorithm (GA) for Tall Apartment's Solar Right [J]. Solar Energy, 2015, 113 (3): 236-250.
- ⑦ Conraud-Bianchi J. A Methodology for the Optimization of Building Energy, Thermal, and Visual Performance [D]. Concordia: Master Thesis of Concordia University, 2008: 42-93.

化,导致优化结果无法反映矛盾设计目标(如能耗控制和自然采光改善)下的建筑设计方案可能性,制约了研究成果对于建筑节能设计决策的支持作用;其次,研究建构的神经网络模型在人工照明能耗预测方面的精度较低;而且,研究在优化过程中建筑与环境信息仍依赖于人机交互,虽然编写了接口程序,但是程序图形界面水平低,不利于推广;最后,研究仅对建筑形态开窗设计参量进行了优化,且相关参量的参数取值不符合我国建筑形态模数要求,导致研究成果对于我国建筑形态节能设计实践的支持作用有限。

2010年,Magnier和Haghighat集成神经网络模型展开居住建筑设计参数多目标优化,应用BP神经网络,结合NSGA-II多目标遗传优化算法,以居住建筑能耗和热舒适性能为优化目标,对居住建筑形态和空调设定参数进行了优化,结果表明神经网络模型的引入大幅降低了优化过程耗时,优化求得的非支配解集在能耗水平和热舒适性能方面,相比参照建筑均有所改善^①。2012年,Stavarakakis等针对建筑外窗设计对于自然通风工况下建筑热舒适度水平的影响,提出了建筑外窗优化设计方法,研究基于场地实测气候数据展开CFD性能模拟,以模拟数据训练RBD神经网络模型,结果表明训练后的神经网络模型能够准确预测室内热舒适性能,优化设计过程可为设计者提供多样化的可行解^②。2013年,Gossard等将神经网络模型与NSGA-II遗传优化算法结合,根据法国南特和尼斯气候特征,以建筑年能耗水平最低和夏季热舒适度最佳为优化目标,对建筑外墙传热系数和墙体密度进行优化,结果表明神经网络模型的引入大幅缩减了优化耗时,同时多目标优化过程也为设计者提供了具有更均衡性能的相对最优可行解^③。

2014年,Asadi针对既有建筑改造材料选择问题,应用NSGA-II优化算法,以TRNSYS模拟得出的950组数据训练BP神经网络,以建筑能耗、改造成本和热不舒适小时数最低为设计目标,对既有建筑改造过程中可采用的外墙保温材料类型、屋面保温材料类型、外窗类型、太阳集热器类型和采暖空调通风系统类型展开了多目标优化设计,实践结果表明训练后的神经网络模型能够准确预测不同改造措施下建筑能耗水平、改造成本和热舒适性能,且可节约大量时间,而建筑外窗和采暖通风空调系统选择对于优化目标的影响大于其他因素,采暖通风空调系统的改善对于室内热舒适度提升最大^④。该研究的局限在于:优化平台缺乏图形界面,不适于建筑师应用;神经网络数据生成过程耗时较长,制约了节能设计效率;神经网络依赖于训练数据,地域条件差异令其不适用于我国严寒地区办公建筑节能设计过程。

神经网络模型的引入,有效提升了建筑形态节能设计效率。但是神经网络模型建构过程需要一定规模的训练数据。既有研究多通过人机交互过程获得神经网络模型训练数据,

-
- ① Magnier L, Haghighat F. Multiobjective Optimization of Building Design Using TRNSYS Simulations, Genetic Algorithm, and Artificial Neural Network [J]. Building and Environment, 2010, 45 (3): 739-746.
 - ② Stavarakakis G M, Zervas P L, Sarimveis H et al. Optimization of Window-openings Design for Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings [J]. Applied Mathematical Modeling, 2012, 36 (1): 193-211.
 - ③ Gossard D, Lartigue B, Thellier F. Multi-objective Optimization of a Building Envelope for Thermal Performance Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Network [J]. Energy and Buildings, 2013, 67 (6): 253-260.
 - ④ Asadi E, Silva M G D, Antunes C H et al. Multi-objective Optimization for Building Retrofit: A Model Using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network and an Application [J]. Energy and Buildings, 2014, 81 (10): 444-456.