

基于节能导向的寒冷地区医院建筑形态 多目标寻优技术研究

王茜¹, 石谦飞¹, 史树一²

(1. 太原理工大学 建筑学院, 山西 太原 030002; 2. 山西省建筑设计研究院有限公司, 山西 太原 030013)

摘要: 建筑设计行业面临着能源需求不断增长的挑战, 建筑模拟被广泛用于后期设计阶段。虽然早期阶段的设计已被证实会对建筑的整体性能产生重要影响, 其在早期阶段设计决策对最终的建筑性能和成本有重大影响, 但其应用仍然是有限的。本文提出了一种新的设计模拟方法, 以节能导向为目标, 遗传算法 Octopus 为工具, 参数化模拟 Grasshopper 为平台, 寒冷地区为背景, 将参数化建模与多目标优化结合起来, 以便实现快速迭代和权衡分析。综合考虑医院建筑功能的特殊性和多项限制条件, 从总图布局、建筑单体和建筑局部三个方面分别进行变量控制, 将节能纳入早期建筑设计的考虑要素中, 并将医院建筑形态多目标寻优技术应用于实际工程项目中, 有助于建立一套目标导向-自动寻优-设计决策的仿真模拟框架, 该框架有利于主动、智能和基于经验的建筑仿真模拟, 有助于在建筑设计早期做出决策。

关键词: 节能设计; 寒冷地区; 医院建筑; 软件模拟; 形态布局; 多目标寻优

中图分类号: TU242

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0604-09

Research on multi-objective optimization techniques of hospital building forms in cold regions based on energy-saving orientation

WANG Xi¹, SHI Qianfei¹, SHI Shuyi²

(1. College of Architecture, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Architectural Design and Research Institute, Taiyuan 030013, China)

Abstract: The building design industry is challenged by growing energy demands, and building simulation is widely used in the later design stages. While early stage design has been shown to have a significant impact on the overall building performance, its application remains limited in the early stages where design decisions have a significant impact on the final building performance and cost. In this paper, a new design simulation method is proposed, with energy-saving as the goal, genetic algorithm Octopus as the tool, parameterized simulation Grasshopper as the platform, and cold regions as the background, to combine parameterized modeling with multi-objective optimization to achieve rapid iteration and trade-off analysis. Considering the particularity of hospital building function and a number of constraints, variable control is carried out from three aspects: general layout, building monomer and building part. Energy saving is incorporated into the consideration elements of early building design, and the multi-objective optimization technology of hospital building morphology is applied to actual engineering projects, which helps to establish a set of goal-oriented-automatic optimization-seeking-design decision-making simulation framework. This framework is conducive to active, intelligent and experience-based building simulation, which is helpful to make decisions in the early stage of building design.

Key words: energy efficient design; cold regions; hospital buildings; software simulation; morphological layout; multi-objective optimization

医院建筑功能复杂,能源形式多样,设施设备运行时间长,部分科室24 h无间断工作且全年无休。其安全要求高、舒适标准高、运行密度高“三高”的特点致使医院建筑的能耗是一般公共建筑的1.6~2.0倍,具有极大的节能潜力^[1]。

考虑到早期设计决策对整体建筑性能的影响,需要开发一种新的建筑设计前期框架和模拟方法。本文提出将参数化设计与多目标优化耦合应用于设计过程的早期阶段。随着计算机技术的不断进步,参数化设计、性能模拟、遗传算法、以及多目标优化已经成为业界趋势。Gerber利用参数化设计和建模进行快速设计迭代;Aish等^[2]研究了如何在参数化设计中自动减少重复设计时间;Rolvink等^[3]通过实践证明了在快速探索设计方案和关联结构性能方面使用参数化建模技术是高效的;Augenbroe^[4]将能耗模拟视为高效设计并对比多种设计形式,从而获得最佳设计;Gerber等^[5]以目标为导向,用遗传算法促进多学科设计领域优化;Magnier等^[6]使用多学科设计优化住宅楼的能耗和热舒适度;Tuhus等^[7]开发了一种模拟优化工具,将遗传算法与建筑能耗模拟相结合,以优化建筑形状和围护结构。在另一项研究中,多目标遗传算法被应用于通过最小化能耗进行经济优化;丹麦技术大学的研究学者介绍了多目标遗传算法在整体建筑设计中的应用,该算法考虑了多个标准:建筑能源使用、资本成本、日光分布和热环境^[8];刘启波等^[9]使用多目标优化平台制定基于室外热舒适的建筑布局自生成实验,为城市建筑布局提供了优化方法策略;袁磊等^[10]以多目标优化为核心,集合参数化建模技术的住区布局形态自动生成集成设计方法;毕晓健等^[11]运用数字化工具研究者办公综合体的节能形态;还有研究者提出了面向方案设计初期的节能优化方法^[12],构建一种以绿色建筑节能性能为导向的智能生成设计方法^[13],总结绿色性能导向建筑数字化节能设计理论下的设计流程^[14]。然而大多数的研究者或是强调单一领域的性能研究,或是缺乏跨其他领域及其分析环境的集成,或是只存在于理论研究阶段,并未应用于实际项目。而当今社会更需要将设计早期的性能决策应用于复杂的建筑形态设计模拟中,并在实际项目中得到验证。

综上所述,能够高效地解决建筑设计早期优化问题的设计流程可简述为:以节约建筑能耗为

目标,人为加入规划条件和特定建筑类型的硬性指标,借助软件模拟建筑性能,聚焦于特定场地的形态布局,对建筑设计进行自动寻优,找到最适合特定场地、适应于当地气候条件的最优节能方案。

1 以GH为平台的性能模拟

1.1 软件平台介绍

Grasshopper是一款在Rhino环境下运行的可视化编程语言,可通过参数调整直接得到方案的可视化结果,在操作简便性和人机交互性等方面具有极大优势,自带多种计算机语言,可供设计师自行编写算法程序,适应性和灵活性较强,且使用门槛较低,可以极大地提升工作效率,因此受到设计人员的青睐。

1.2 建筑寻优系统

建筑节能的目标具有多维度且需并行处理的特点。目前能耗模拟和优化算法的方式纷纭杂沓,选择一种适合的模拟软件和优化算法至关重要。如图1所示对比了性能模拟与多目标优化的三种常用方式。通过优劣对比,本实验模拟借助了GH平台的Ladybug Tools和Octopus。GH的模拟过程及优化方法将建模、模拟和优化等功能集合,调整目标参数的同时可看到建筑形体变化,并且降低不同平台交互操作的错误率。

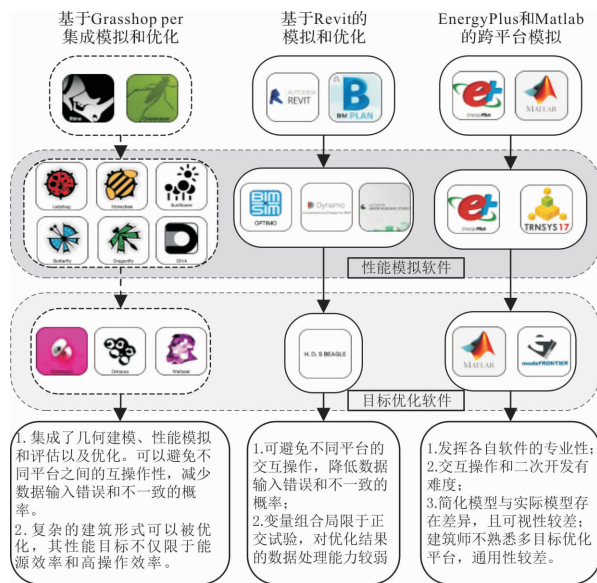


图1 多个寻优平台对比

Fig.1 Comparison of multiple search platforms

Ladybug Tools是环境参数化性能分析的插件包,不仅可以导入城市和气候区的城市标准气象

文件,根据气象文件对建筑进行热辐射、阴影分布、视线分析等,而且可以在同一模型当中计算能耗、建筑日照、风速风向分布、温度、湿度和热舒适度等。Octopus是基于遗传算法的数据处理平台,引入了多目标的帕累托标准,允许一次搜索多个目标,在每个目标的极端之间产生一系列权衡对比的优化方案,实现特定参数多目标优化,提高设计效率,使建筑设计人员可以在短时间内获得一系列目标参数的建筑方案。对比GH自带的单目标优化插件Galapagos工具,Octopus侧重多目标的帕累托原则,在综合考虑多个错综复杂,甚至相互矛盾的目标参数时,可同时优化所有目标,更适用于实验要求。

2 实验设计流程

2.1 以节能为导向的设计策略

2.1.1 对比不同热工设计分区的设计策略

公共建筑的节能设计与当地气候条件息息相关,能耗模拟软件官网提供了我国部分大城市的气象数据,可以直接用于能耗模拟^[15]。利用Ladybug和Honeybee导入气象数据,调用能耗模拟工具引擎EnergyPlus模拟建筑能耗,能够获得不同城市微气候的建筑能耗数据。建筑热工设计分区是依据气候要素对建筑的热作用将建筑设计中可采用相同设计对策和技术措施的区域划为同一个区,其目的是服务于建筑适应气候以保证基本的室内热环境^[16]。

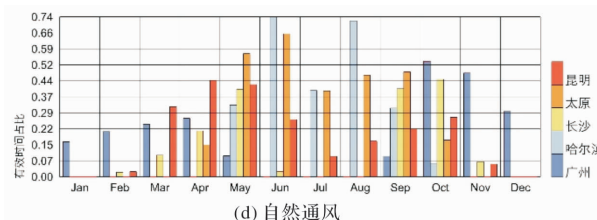
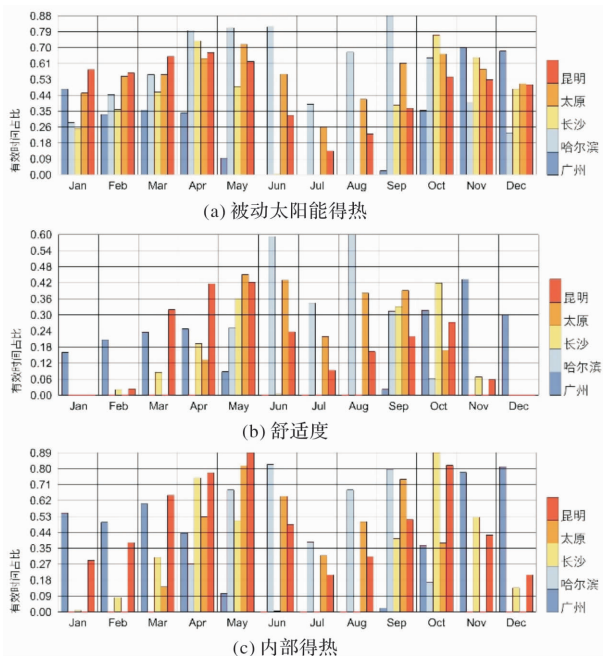


图2 五个气候区典型城市的气候特征分析

Fig. 2 Analysis of the climatic characteristics of typical cities in five climate zones

如图2所示,选取5个代表城市来分析我国五个热工分区适宜的节能策略:严寒地区(哈尔滨)、寒冷地区(太原)、夏热冬冷地区(长沙)、夏热冬暖地区(广州)、温和地区(昆明),分别分析其被动太阳能得热、内部得热、自然通风和舒适度四个指标,对比不同地区的城市节能设计策略。严寒地区夏季最为舒适,通风采光良好,冬季得热少,天气寒冷,舒适度差,4~10月都可利用内部得热,主要解决建筑保温问题;夏热冬冷地区春秋较为舒适,通风良好,内部得热多。冬夏舒适度差,冬季保温和夏季防热都需要考虑;夏热冬暖地区夏季舒适度差,主要考虑防热问题;温和地区冬季舒适度较差,但持续时间短,适当考虑冬季保温。

2.1.2 适应寒冷地区的节能设计策略

建筑能耗一般指人们的日常用能,如采暖、空调、照明、设备等能源消耗之和。根据《中国能源统计年鉴》,寒冷地区的建筑能耗占全国建筑总能耗的三分之一左右,相对其他四个气候分区是能耗较高的分区,并且保持持续增长,因此,寒冷地区的能耗控制尤为重要。用Ladybug分析太原市的室外干球温度,以18℃和26℃作为低温和高温不舒适度的临界值,低于18℃的小时数占全年的65%,高于26℃的小时数占比为11%,春、夏、秋舒适度较好,5~10月可利用内部得热,冬季舒适度差,以低温不舒适为主,应满足冬季保温要求。如图3、图4所示为Ladybug Tools给出的寒冷地区太原市节能设计策略量化评价表。维持建筑室内空间舒适度的主要影响因素是太阳辐射和自然通风。考虑被动太阳能得热的时效性:太阳辐射冬季得热利于节能,夏季温度高要通过遮阳设计控制太阳得热。因此,寒冷地区的建筑设计策略为考虑太阳能辐射得热为主,遮阳和通风设计为辅。

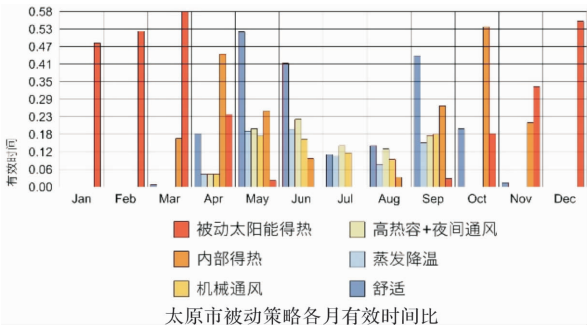


图 3 太原市被动设计策略分析

Fig. 3 Analysis of passive design strategies in Taiyuan

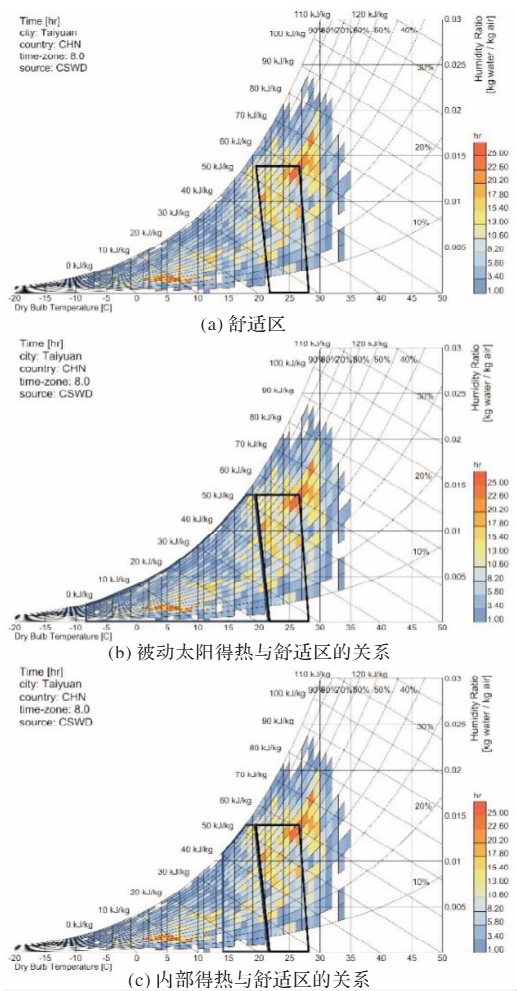


图 4 太原市气候设计分析

Fig. 4 Taiyuan City climate design analysis

2.2 适应医院建筑的方案设计方法

医院建筑作为一种功能性强的建筑类型, 由于

其“医疗体系”所具有的专业性、复杂性、多样性, 以及与社会学医学等多重学科的广泛联系, 使得在医院建筑设计中需要把医疗体系、社会环境和建筑专业的相关知识相结合, 来满足医疗需求。总体设计流程图如图 5 所示。

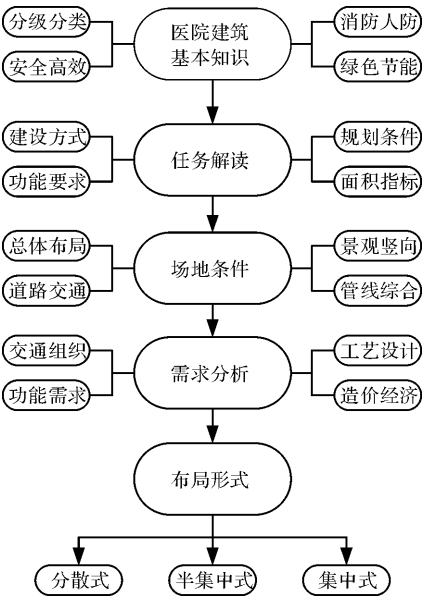


图 5 医院设计流程图

Fig. 5 Hospital design flowchart

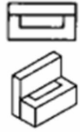
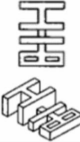
医疗设施的基本建设形态有: 分散式、集中式和半集中式三种^[17], 如表 1 所示。一方面随着城市化的推进, 社会需要更多面向区域人口的医疗城、医疗中心, 除了医疗功能以外还引入疗养、文化、生活、教育、科研等多种功能。医疗建筑采用集中式布局是应对复杂医疗功能组合的平面构成方式之一, 优点是就医流线简短明确、水平及垂直交通联系便捷^[17]。另一方面, 根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015), 严寒和寒冷地区公共建筑体形系数应符合建筑面积 $>800\text{ m}^2$ 时, 建筑体形系数应 ≤ 0.40 ^[18]。基于以上两点设计考虑, 选用集中式作为此次设计的基本建设形态。集中式布局是指医院的主要功能分区通过医院街的形式紧密联系, 建筑体量集中, 交通流线紧凑, 占地面积小, 相对于分散式和半集中式而言体型系数较小, 更有利于节能。

表 1 医疗设施的基本建设形态

Tab. 1 Capital form of medical facilities

类型	图形	简述	优缺点
分散式		门诊、医技、住院及后勤等分幢建造, 水平方向延展布置并以连廊相接。	方便分期建设, 组合灵活, 易于布置园林景观, 有利于组织自然通风与采光。但交通流线及工程管线长, 占地面积大。

续表 1

类型	图形	简述	优缺点
集中式		门诊、医技、病房以及后勤部门集中布置, 竖向发展成建筑综合体。	形体紧凑, 交通流线短, 占地面积小。不利于分期建设, 交通流程组织较难。大进深布局时能耗较大。
半集中式		采用以上两种布局形式的组合形态, 常由高层住院部和多层门诊楼及医技楼的裙房组成	形体较灵活, 易于组织交通。有利于分期建设及组织自然通风与采光, 占地面积适中。

2.3 建筑形式变量设置

在总图设计阶段, 会涉及到建筑退界、建筑密度、周边建筑的遮挡、病房区日照以及消防间距等基本规划条件和规范要求。此外, 对于以节能为目标的总图设计而言, 可通过算法编写, 规避周边建筑的不利影响, 得到太阳辐射和自然通风的最优区域, 减少空调和采暖能耗; 在建筑单体设计中, 根据建筑密度、基本布局形式、功能位置要求、城市规划限高等限定条件作为节能建模的基本形式。将太阳辐射和自然通风作为建筑能耗的影响因素, 编写算法, 目标是将全年建筑的总能耗降至最低; 在建筑局部设计中, 屋面安装太阳能板能有效缓解城市化带来的能源危机^[19]。以屋面太阳能板得到全年最高产值为目标设计太阳能板的最优排布方案; 将建筑立面表皮进行虚实划分来增加高辐射区域传热得到最节能的立面划分形式; 控制中庭形态尺度促进室内的自然通风, 并将室内空间自然采光得热量最高作为设计目标。

3 以某医院为工程案例的应用研究

3.1 案例项目场地概况

项目基地位于山西省晋中市榆次区, 比邻创新科技城和山西高校新校区。场地由文华街分隔成南北两个区域: 北区为医疗区, 拟建 1 500 床的医疗综合楼, 布置门诊、医技、住院等医疗功能, 配套液氧站、污水处理站、锅炉房、汽车库等。南区为行政科教区, 本次模拟实验仅涉及北区。北区用地面积约 9.8 hr, 大致呈“凹”字形, 南侧为文华街, 西侧为中都北路, 紧邻山西医科大学新校区, 西南角为城市公共绿地, 东侧为规划道路。三面环路, 交通便捷。根据城市规划管理条例,

设计条件及周边关系如图 6 所示。

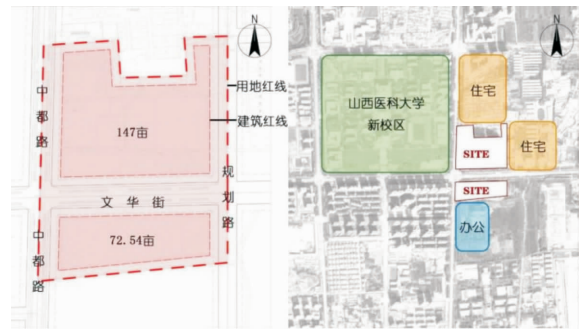


图 6 医院项目设计范围及周边情况

Fig. 6 Hospital project design scope and surroundings

根据医院建筑设计的基本要求, 医疗核心区分为住院区、医技区、门诊急诊区。现代医院把“以人为本, 以病人为中心”作为基本设计要点^[20]。而人性化设计最重要的问题是让患者快速便捷地找到科室位置, 因此, 布局流线应当以功能明确、流线清晰、简洁高效为基本原则。在此项目的总平面布局中, 门诊部、急诊部通常位于交通最便捷的区域即面向主要出入口广场, 并且门急诊部层数较低, 一般位于夏季主导风的下风向; 住院区位置的主要考虑因素是要求最安静的环境和最正确的朝向, 通常位于主要人流车流出入口的后方, 且住院区基本为高层, 层数较多, 一般位于夏季主导风的上风向; 而医技区通常位于两者的中间位置。三者之间常以医疗街作为连接, 形成水平交通流线, 缩短交通流线。

在初步设计前期需要根据设计依据、指导思想、规划条件及建设方要求确定功能分区。模拟实验设定场地拟建医疗综合楼, 需满足容积率不大于 1.2, 建筑密度 $\leq 20\%$, 建筑高度不大于 80 m, 床位数 1 500 床, 绿化率不小于 35% 等规划条件。

3.2 设计策略高效建构

根据任务书要求病房区 $12\times 10^4\text{ m}^2$ 左右, 医技区和门急诊区各 $2.5\times 10^4\text{ m}^2$ 左右(均不包括交通面积), 将医疗综合楼抽象成三个部分: 门诊部在最南面, 为标准层面积在 4 层的长方体, 中间为 5 层的医技部, 最北侧定为高层住院部. 将形体均抽象简化成长方体. 约束条件如表 2 所示.

表 2 项目约束条件列表
Tab. 2 List of project constraints

功能分区	基地位置	层数	层高/m	长×宽/m
门急诊区	最南侧	5	2~5F 4.2~4.8	190×40
			1F 4.8~5.4	(长/宽±6)
医技区	中间位置	4	2~4 4.2~4.8	120×80
			1F 4.8~5.4	(长/宽±6)
病房区	最北侧	18	4~18F 3.6~4.2	240×30
			1~4F 5.1~5.7	(长/宽±6)

在总图设计中, 分析周边建筑遮挡情况, 北侧为住宅, 需要考虑该项目对北侧住宅的日照影响. 如图所示在正负零标高上分别生成太阳辐射最佳区域.

在建筑单体设计中, 以节能为导向的医院建筑设计目标是全年总能耗最小, 能够获得更多的太阳辐射和自然通风, 并保证良好的人体舒适度. 能耗模拟受气候环境、功能布局、自然通风及设备运行等因素影响, 在软件中设置围护结构热工性能、大型设备运行时间、人员工作及照明时间. 由于本文暂不考虑围护结构的构造要求, 所以仅根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)中对寒冷地区围护结构热工设计的规定, 选出方案设计阶段建筑形态的设计参数, 选用各部位传热系数临界值, 如表 3 和表 4 所示.

表 3 围护结构热工性能限值列表
Tab. 3 List of thermal performance limits for the envelope

热工性能限值		热工性能限值	
围护结构	传热系数 [W/(m ² ·K)]	围护结构	传热系数 [W/(m ² ·K)]
屋面	0.45	地下室顶板	1.0
外墙	0.5	屋顶天窗	2.4
楼板	0.5	外窗	2.2

表 4 围护结构热工性能限值列表
Tab. 4 List of thermal performance limits for the envelope

热工性能限值		热工性能限值	
围护结构	保温材料热阻 [W/(m ² ·K)]	围护结构	保温材料热阻 [W/(m ² ·K)]
地下室外墙	0.6	周边地面	1.0

评价指标的选取是分析能耗的重要媒介. 本文选取温度变化率的倒数(保证数据正相关)以及温度的室内外方差作为能耗的衡量指标. 室内外温度差距越大, 温度变化率越低, 说明建筑的保温隔热效果越好. 同时建筑的保温效果越好, 能耗越小.

在建筑局部设计中, 主要分为三个方面. 由于光伏板技术越来越受到人们的重视, 只要将太阳能电池板置于阳光下, 便可以持续输出稳定的电力长达数十年. 但是想要获得足够的电能必须将光伏板组合成大规模阵列, 而在拥挤的城市中, 屋顶便成为太阳能板放置的最佳地点. 首先结合建筑布局形式确定太阳能板的布置范围, 太阳能板不仅能通过光电效应直接或间接转换成电能, 而且在夏季还可以起到遮阳的作用, 减少夏季顶层的空调制冷能耗.

将朝向、倾斜角度和单位面积太阳能板数量作为控制变量, 建立排布方式模型, 以其实现最高产值为设计目标, 生成如图 8 所示太阳能板的排布方案; 其次是建筑的外表皮由于受到太阳辐射的作用会影响建筑的能耗, 如图 7 展示了建筑外表皮的太阳辐射高低区域的情况^[21], 通过对建筑外围护结构单位面积积累的太阳辐射进行计算分析, 高辐射区域开窗, 有利于得热, 低辐射区域为墙体, 降低能量损失; 最后为中庭形态尺度调整, 中庭空间围护结构各个朝向的尺度都会对建筑能耗产生影响, 通过对中庭空间的跨高比以及朝向面积比的变量控制, 得出在跨高比允许的范围内(通常为 1~3)^[22], 尽量选择跨高比较大的方案.

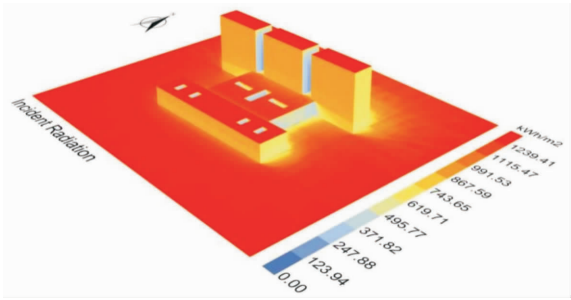


图 7 建筑立面太阳辐射得热情况
Fig. 7 Solar heat gain from building façade

将东南西北四个朝向的边长带来的能耗与建筑采暖能耗相关联,得出中庭空间南向边长最长时,更有利于得到最理想的太阳辐射得热值,其次是东向、西向,北向会产生较大的热负荷。

从总图、建筑单体、建筑局部三个方面分别进行算法模拟计算,得出的最优解和多变量控制下的方案生成过程如图8所示。

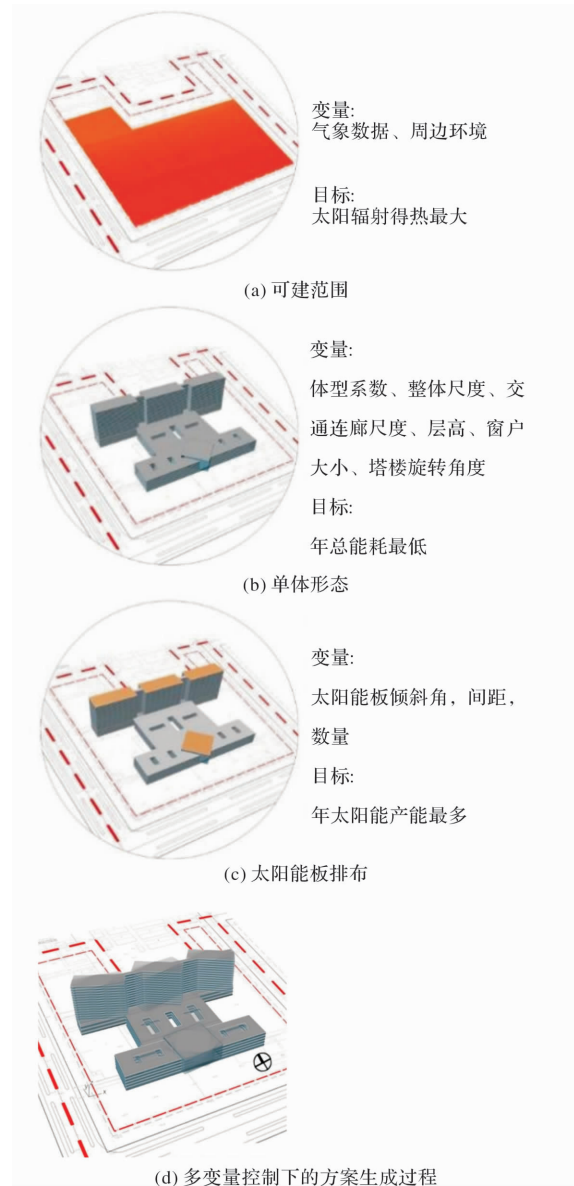


图8 以节能为导向的模拟方案生成过程

Fig. 8 Energy-saving oriented simulation solution generation process

3.3 建筑形态自动生成

形态生成过程以 GH 为平台编写程序创建建筑形态的寻优算法,通过整体尺度、交通连廊尺度、层高、窗户大小、塔楼旋转角度、中庭主要朝向及尺度、太阳能板排布方式、立面虚实划分等8个变量找到一系列自动生成的建筑形态方案。方案的实现以我国规范标准和建设方基本诉

求为依据,如图9所示在平台中通过可视化窗口筛选出能耗较低的形态方案,并建立起初步的参数化设计方法框架。由于遗传算法所生成的方案数量呈指数型增长,文中仅展示部分低能耗方案。

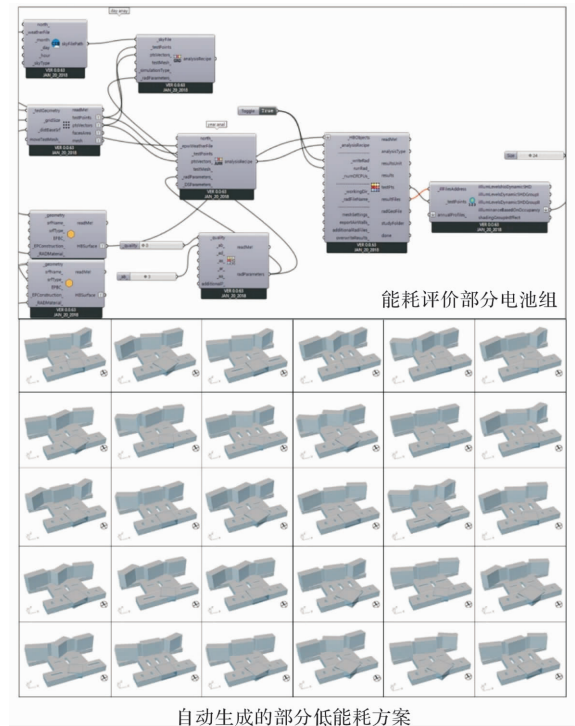


图9 多变量下的建筑形态寻优方案

Fig. 9 Optimization of building form under multiple variables

3.4 节能导向综合决策

从排在前三的最低能耗方案可以看出,由于结构出挑过大、平面异形严重、不规则空间难以满足基本使用需求,无法达到人性化的要求,因此不能采用。在以节能为导向的建筑形态自动寻优的过程中,虽有利于找到最节能的形态,但医院的建成是一个综合考量的过程,大众审美、结构选型、功能划分、工程造价、人性化设计等都是评判的标准。通过 Ladybug Tools 和 Octopus 初步筛选出的低能耗方案还需要再结合建筑设计师的自主创新和审美能力,最终选出能同时满足节能、结构、功能、造价、美观等可行性要求的方案。如图10所示,通过建筑设计师的综合决策选出能耗低且相对合理的方案,经过进一步深化设计,细化为精模,进而指导施工直至建筑建成。通过对最终方案进行再次计算模拟,得出此方案和参照建筑相比将建筑总能耗降低了19.96%,其中形态设计方面可降低总能耗13.67%,屋顶的太阳能板抵消了6.29%的能耗。



图10 以节能为导向的建筑方案形成过程

Fig. 10 The process of forming energy-saving oriented building solutions

4 结论

(1)以 GH 为平台,以 Ladybug Tools 和 Octopus 为工具的能耗模拟和自动寻优的实验方法可为建筑师提供可视化的及时反馈,有助于建立一套目标导向-自动寻优-设计决策的仿真模拟框架,该框架能为建筑设计前期提供大量可靠的节能导向参考方案;

(2)太原市气候以低温不舒适为主,通过算法分析其气象数据的被动设计策略:以优化冬天不舒适为主,夏季得热为辅。因此被动设计策略为考虑太阳能辐射得热为主,遮阳和通风设计为辅。与参照建筑相比,最终的方案将建筑总能耗降低了 19.96%,其中形态设计方面可降低总能耗 13.67%,屋顶的太阳能板抵消了 6.29%的能耗,中庭朝向推荐顺序依次为:南向、东向、西向,北向;

(3)基于参数化平台以节能为导向的医院建筑设计,可应用于不同气候区和不同建筑类型的程序化设计。通过对不同气候区、基地条件、周边环境建筑类型的基本设计要求的粗略分析,编写算法,即可得到一系列低能耗设计方案。由此,通过建筑师的综合把控,更容易生成低能耗又合理美观的建筑。

参考文献 References

[1] 朱永松,罗蒙,甘宁,等.大型综合性医院节能管理的分析与对策[J].中国医院,2011,15(2):73-75.
ZHU Yongsong, LUO Meng, GAN Ning, et al. Analysis and countermeasures of energy saving management in large-scale general hospitals[J]. China Hospital, 2011, 15(2): 73-75.

[2] AISH R, WOODBURY R. Multi-level interaction in parametric design[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 151-162.
[3] ROLVINK A, VAN DE STRAAT R, COENDERS J. Parametric structural design and beyond[J]. Inter. Arch. Comp. 2010,8(3):319-336.
[4] AUGENBROE G. Trends in building simulation[J]. Building and Environment, 2002, 37(8): 891-902.
[5] GERBER D J, LIN S. Synthesizing design performance: an evolutionary approach to multidisciplinary design search[C]//32nd annual conference of the association for computer aided design in architecture, San Francisco, CA: 2021.
[6] 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.
[7] TUHUS DUBROW D, KRARTI M. Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings[J]. Building and Environment, 2010, 45(7): 1574-1581.
[8] NEGENDAHL K, NIELSEN T R. Building energy optimization in the early design stages: A simplified method[J]. Energy and Buildings, 2015, 105: 88-99.
[9] 刘启波,杨雯婷.基于气候特征的居住区室外热舒适多目标优化布局研究——以西安地区为例[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(1): 54-60.
LIU Qibo, YANG Wenting. Research on multi-objective optimal layout of outdoor thermal comfort in residential areas based on climatic characteristics: Taking Xi'an area as an example[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(1): 54-60.
[10] 袁磊,李冰瑶.住区布局多目标自动寻优的模拟方法[J].深圳大学学报(理工版),2018,35(1):78-84.
YUAN Lei, LI Bingyao. A simulation method for multi-objective automatic optimisation of settlement layout[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Technology Edition), 2018, 35(1): 78-84.
[11] 毕晓健,刘丛红.基于 Ladybug+Honeybee 的参数化节能设计研究——以寒冷地区办公综合体为例[J].建筑学报,2018(2):44-49.
BI Xiaojian, LIU Conghong. Research on parametric energy-saving design based on Ladybug+Honeybee: An example of office complex in cold region[J]. Journal of Architecture, 2018(2): 44-49.
[12] 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, 61(1): 113-121.
- LIN Borong, LI Ziwei. A building energy efficiency optimisation method for the early design stage[J]. Science Bulletin, 2016, 61(1): 113-121.
- [13] 张竞予, 刘念雄, 王珊珊, 等. 节能性能导向住宅建筑智能生成设计方法与工具平台[J]. 建筑学报, 2022(2): 22-27.
- ZHANG Jingyu, LIU Nianxiong, WANG Shanshan, et al. Intelligent generative design methodology and tool platform for energy-efficient performance-oriented residential buildings[J]. Journal of Architecture, 2022(2): 22-27.
- [14] 孙澄, 韩昀松. 绿色性能导向下的建筑数字化节能设计理论研究[J]. 建筑学报, 2016(11): 89-93.
- SUN Cheng, HAN Yunsong. Theoretical research on digital energy-saving design of buildings under green performance orientation[J]. Journal of Architecture, 2016(11): 89-93.
- [15] 付昱曦, 李红莲, 王赏玉, 等. 建筑节能分析用典型年数据的获取方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 147-154.
- FU Yuxi, LI Honglian, WANG Shangyu, et al. Acquisition method of typical annual data for building energy efficiency analysis[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 147-154.
- [16] 刘加平, 何知衡, 杨柳. 寒冷气候类型与建筑热工设计对策[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 309-314.
- LIU Jiaping, HE Zhiheng, YANG Liu. Cold climate types and countermeasures for thermal design of buildings[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 309-314.
- [17] 中国中元国际工程有限公司, 哈尔滨工业大学建筑学院. 建筑设计资料集(第6分册): 体育·医疗·福利[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 142-151.
- China Zhongyuan International Engineering Co., Ltd, School of Architecture, Harbin Institute of Technology. Architectural design sourcebook subchapter 6: Sports-Medical-Welfare[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2019: 142-151.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Energy saving design standard for public buildings: GB 50189—2015[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [19] 郝晓龙, 王咏薇, 胡凝, 等. 太阳能光伏屋顶对城市热环境及能源供需影响的模拟[J]. 气象学报, 2020, 78(2): 301-316.
- HAO Xiaolong, WANG Yongwei, HU Ning, et al. Modelling the impact of solar photovoltaic roofs on urban thermal environment and energy supply and demand[J]. Journal of Meteorology, 2020, 78(2): 301-316.
- [20] 都丽婷, 马敬东, 杨丽, 等. 以病人为中心研究的演进路径、热点与前沿分析[J]. 中国卫生事业管理, 2016, 33(12): 886-889.
- DU Liting, MA Jingdong, YANG Li, et al. Evolutionary path, hotspots and frontier analysis of patient-centred research[J]. China Health Care Management, 2016, 33(12): 886-889.
- [21] 郭佳奕, 孙一民. 基于 Ladybug-Honeybee 的建筑节能采光设计及评估——以广州科技图书馆项目为例[C]//2021 全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会. 武汉: 华中科技大学出版社, 2021: 416-427.
- GUO Jiayi, SUN Yimin. Design and evaluation of energy-saving lighting in buildings based on Ladybug-Honeybee: A case study of Guangzhou science and technology library project[C]//Proceeding of the 2021 National Symposium on Teaching & Research of Digital Architecture Technology in Architecture Faculties. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2021: 416-427.
- [22] 耿耿, 耿静, 尹红梅, 等. 严寒地区办公建筑中庭空间参数化节能设计[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 895-904.
- GENG Geng, GENG Jing, YIN Hongmei, et al. Parametric energy-saving design of atrium space in office buildings in cold regions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(6): 895-904.

(编辑 李睿奇)