

# 面向设计初期的建筑节能优化方法

林波荣\*, 李紫微

清华大学建筑学院建筑技术科学系, 北京 100084

\* 联系人, E-mail: linbr@mail.tsinghua.edu.cn

2015-02-22 收稿, 2015-03-09 修回, 2015-03-17 接受, 2015-06-01 网络版发表

国家自然科学基金优秀青年基金(51222814)和国家科技支撑计划(2012BAJ09B03)资助

**摘要** 设计初期的建筑方案决策对于建筑能耗和物理环境性能有重要影响. 原因是随着设计进程的推进, 建筑与节能和物理环境相关的性能可优化余地越来越小, 获得相同收益所投入的成本则越来越高. 本研究针对办公建筑提出了面向方案设计初期的节能优化方法, 建立并完善设计初期建筑能耗快速预测模型, 发展了针对多种建筑体型空间平面造型参数的目标寻优算法, 并在建筑空间平面模型适用类型、天然采光、热体形系数、日照阴影等方面进行了拓展. 在此基础上, 提出了设计初期建筑节能优化的正向计算和反向优化流程. 通过案例, 分析了如何以整体能耗为目标进行建筑体型、空间方案实现反向设计优化并进行了参数敏感性分析. 最后以热体形系数为例, 介绍对单一被动式性能目标进行优化分析的方法.

**关键词** 设计初期, 节能参数化设计, 性能目标, 能耗预测模型

目前建筑能耗所占社会商品能源总消费量的比例已从1978年的10%上升到目前的25%左右<sup>[1]</sup>. 而根据发达国家经验, 随着我国城市化进程的不断推进和人民生活水平不断提高, 建筑能耗的比例将继续增加, 并最终达到1/3以上. 建筑节能将成为提高全社会能源使用效率的首要方面.

建筑能耗性能的优化途径很大一部分决定于建筑设计阶段. 根据国内外的调研和大量实际工程表明, 30%以上的节能潜力来自于建筑方案设计阶段. 在建筑设计过程中, 设计初期是形成建筑形态的关键环节. 根据IEA ANNEX30项目<sup>[2]</sup>“模拟技术在建筑环境系统的应用”(Bring Simulation to Application), 建筑可分为方案设计、初步设计、详细设计、设备招标、施工和调试、运行管理和建筑改造阶段. 设计初期作为第一步, 对于建筑性能的提升, 具有至关重要的作用, 是建筑设计在所有限制因素前提下, 调动所有可能, 做出建筑体型空间平面方案决策的重要阶

段, 在此阶段建筑形体、空间、表皮等参数将会被确定. 这些设计参数一方面极富表达性, 为建筑师所关注, 另一方面也是影响建筑能耗和自然通风、天然采光等物理环境性能的关键.

随着计算机辅助设计方法、绿色建筑性能模拟技术、参数化设计方法和工具的飞速发展, 可以借助于计算机强大的计算能力, 将性能目标纳入到建筑设计初期设计优化过程中去. 近年来国际学术界和工程界已经意识到建筑方案设计阶段通过模拟辅助工具与建筑设计相结合、实现建筑节能的研究和实践, 如de Wilde<sup>[3]</sup>, Hong等人<sup>[4]</sup>和Augenbroe<sup>[5]</sup>等学者分别在相关研究中讨论了方案设计对建筑节能等的重要影响和解决途径. 例如, 著名的英国建筑师诺曼·福斯特在设计伦敦市政厅时, 以降低太阳辐射得热为目标, 将建筑倾斜度、宽度、高度等作为设计参数, 用Microstation调整形体, 生成建筑体型优化方案. Palonen等人<sup>[6]</sup>开发了一种以建筑性能优化为目的的

**引用格式:** 林波荣, 李紫微. 面向设计初期的建筑节能优化方法. 科学通报, 2016, 61: 113–121

Lin B R, Li Z W. Building energy-saving approach in early design stage (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 113–121, doi: 10.1360/N972014-01379

新软件MOBO,可解决带有约束条件的连续变量或离散变量的单目标或多目标优化问题,并能和很多外部(模拟)程序相耦合,能够面向多目标函数并自动处理约束条件. Roudsari等人<sup>[7]</sup>开发了Ladybug环境分析参数化插件,它能够将EnergyPlus标准气象文件(.epw格式)导入三维参数化绘图软件工具Grasshopper中,提供各种2D、3D友好的交互图像,在设计初期为决策过程提供支持. Sargent等人<sup>[8]</sup>基于Rhino和EnergyPlus两个工具提出了一种遮阳设计新方法. 该方法打破了传统遮阳设计从选择遮阳时段到以往的2D形式和欧洲Ecotect软件所使用的模拟方法,将外遮阳所在空间进行细分,针对每个单元计算全年该单元会对窗户产生阴影投射的时刻,基于这些时刻的负荷和太阳辐射得热,对每个单元进行计分,减少冷负荷则加分,增加热负荷则减分,最终去掉负分的单元,保留“有效”的单元,依据此结果来确定最终的遮阳形态. Kim等人<sup>[9]</sup>提出以建筑周围风速为单一目标,进行单体建筑的体型优化. Trubiano等人<sup>[10]</sup>以能耗、采光为综合指标,对中庭形态进行优化. 田志超和石邢<sup>[11]</sup>在其研究中首先强调了建筑能耗计算模型在建筑节能优化设计过程中的重要性,进而介绍了GenOpt、BEop等6种优化设计工具,并从“能耗模型输入”、“优化设计变量定义”、“优化处理能力”和“结果的可视化及输出”等4个方面进行比较.

综上所述,国内外建筑模拟领域内的很多专家学者都重视设计初期对于建筑使用过程中的性能和能耗优化方法的研究和应用. 但是这些研究中也存在着不足: (1) 没有把建筑性能优化的过程和建筑设计习惯、行为和流程密切地结合起来,界面友好性有待提高; (2) 没有在方案设计阶段实现节能、天然采光、通风、日照等多目标或单一目标的性能综合优化.

本研究以设计初期基于节能优化的建筑参数化节能设计为研究对象,探索建立针对设计初期的建筑节能参数化设计方法,把建筑设计的主要要素变成建筑总能耗或与天然采光、太阳得热等某个函数的变量,通过改变函数或算法,获得不同的建筑设计参数方案并进行优化. 通过建立建筑能耗、天然采光等计算模型,并将模型应用于以能耗为目标的正向计算和反向优化两个整体优化流程. 最后以办公建筑为例,通过计算热体形系数指标对办公建筑体型空间方案进行性能评价和优化.

## 1 建筑能耗数学模型的建立与优化

### 1.1 建筑能耗模型

建筑能耗模型由空调供暖能耗和照明能耗两个模块组成. 空调供暖能耗的计算是在围护结构负荷计算模块的基础上,考虑空调系统设备效率计算得到的. 照明能耗模块则包括结合天然采光的照明能耗模型和中庭采光模型.

(i) 围护结构热负荷计算. 基于曾剑龙<sup>[12]</sup>、夏春海<sup>[13]</sup>等对非透光和透光围护结构得热量计算,以及夜间传热和周末蓄热修正的研究基础,建立了围护结构冷热负荷计算模型<sup>[14]</sup>:

$$Q = \beta \cdot \frac{\sum_i \left\{ \left[ (1 - \omega_i) \left( K_{\text{wall},i} + \frac{K_{\text{wall},i} \epsilon_i}{\alpha} \cdot \frac{q_{\text{solar},\tau}^*}{\Delta T^*} \right) + \omega_i \left( K_{\text{win},i} + SHGC_i \cdot \frac{q_{\text{solar},\tau}^*}{\Delta T^*} \right) \right] \cdot A_i \Delta T^* \right\}}{1000 F_{\text{building}}} \cdot \tau_{\text{cooling}}, \quad (1)$$

其中,  $\beta^*$  是考虑周末停机的修正系数;  $\alpha$  是外表面对流换热系数;  $\omega$  是窗墙比;  $K$  是围护结构传热系数,是考虑夜间辐射修正的太阳辐照度;  $A$  是围护结构表面积;  $\Delta T^*$  是室内外综合传热温差,  $SHGC$  是透明围护结构太阳辐射得热率;  $F$  为建筑面积;  $\tau_{\text{cooling}}$  为供冷时间.

考虑到空调系统冷热源型式和设备实际运行效率,空调供暖能耗可以由下式计算:

$$E_{\text{HVAC}} = \frac{Q_{\text{cc}}}{EER_{\text{cc}}} + \frac{Q_{\text{hh}}}{EER_{\text{hh}}} + \frac{Q_{\text{hc}}}{EER_{\text{hc}}}, \quad (2)$$

其中  $Q_{\text{cc}}$  是供冷季负荷,  $EER_{\text{cc}}$  是设备制冷效率,  $Q_{\text{hh}}$  是供暖季热负荷,  $EER_{\text{hh}}$  是设备供热效率,  $Q_{\text{hc}}$  是供暖季内区冷负荷,  $EER_{\text{hc}}$  是设备供冷效率.

(ii) 天然采光优先的照明能耗系统计算. 建筑照明能耗包括采光外区照明能耗和内区照明能耗,可以表达为下面的式子<sup>[15]</sup>:

$$E_{\text{light}} = \sum (1 - DA_i) \cdot \rho \cdot F_{\text{exi}} + \rho \cdot F_{\text{in}}, \quad (3)$$

其中  $DA_i$  为各朝向  $DA$  值(天然采光满足率是计算照明能耗关键参数),  $\rho$  为照明功率密度,  $F_{\text{exi}}$  为外区面积,  $F_{\text{in}}$  为内区面积.

本研究通过设定窗墙比、玻璃透过率和外区进深为影响  $DA$  值的3个自变量,利用天然采光动态模拟软件Daysim计算  $DA$  值. 通过改变设计参数,对得到的不同案例进行模拟,将结果回归拟合得到  $DA$  值与

设计参数(层高进深比  $h/r$  和玻璃透过率  $\delta$ )的关系:

$$DA = \beta_1 + \beta_2 \cdot (h/r) + \beta_3 \cdot \delta + \beta_4 \cdot (h/r)^2 + \beta_5 \cdot \delta^2. \quad (4)$$

拟合得到系数  $\beta$ . 将  $DA$  值代入公式(3), 可快速计算建筑照明能耗.

(iii) 中庭采光模型中庭的体量可以用光井指数  $WI$  (well index)这一综合参量来描述. 光井指数反映了中庭进光区域与表面积的比例. 计算公式如下:

$$WI = \frac{\text{高度} \cdot (\text{宽度} + \text{长度})}{2 \cdot \text{长度} \cdot \text{宽度}}. \quad (5)$$

本研究在夏春海<sup>[13]</sup>研究基础上, 构建了典型地区天然采光满足率与光井指数和顶部透过率的关系. 并提出了针对中庭不同区域的  $DA$  值计算方法:

(1) 中庭底部区域公式.

$$DA = (x_1 - x_2 e^{x_3 WI}) (x_4 - x_5 e^{x_6 \tau_{\text{roof}}}), WI < 1.5, \quad (6)$$

$$DA = x_1 e^{x_2 WI} (x_3 - x_4 e^{x_5 \tau_{\text{roof}}}), WI \geq 1.5. \quad (7)$$

(2) 中庭周边区域公式.

$$DA = x_1 \cdot (\tau_{\text{roof}} + x_2) \cdot (1 + x_3 e^{x_4 WI}), \quad (8)$$

其中,  $\tau_{\text{roof}}$  是顶部透过率.

最终综合了光井指数、中庭位置、顶部窗户透过率对中庭采光满足率的影响, 建立了中庭底部以及周边区域天然采光性能预测模型.

(iv) 能耗模型在建筑空间平面体型适应性方面的拓展. 针对实际设计的复杂性和多样性, 通过完善能耗预测模型和遗传优化算法, 将模型可应用的建筑几何空间平面类型拓展到L形、三角形、矩形双中庭、裙房+塔楼等多种形式, 经测试均可收敛, 并显著提升了模型计算内核的应用范围(图1).

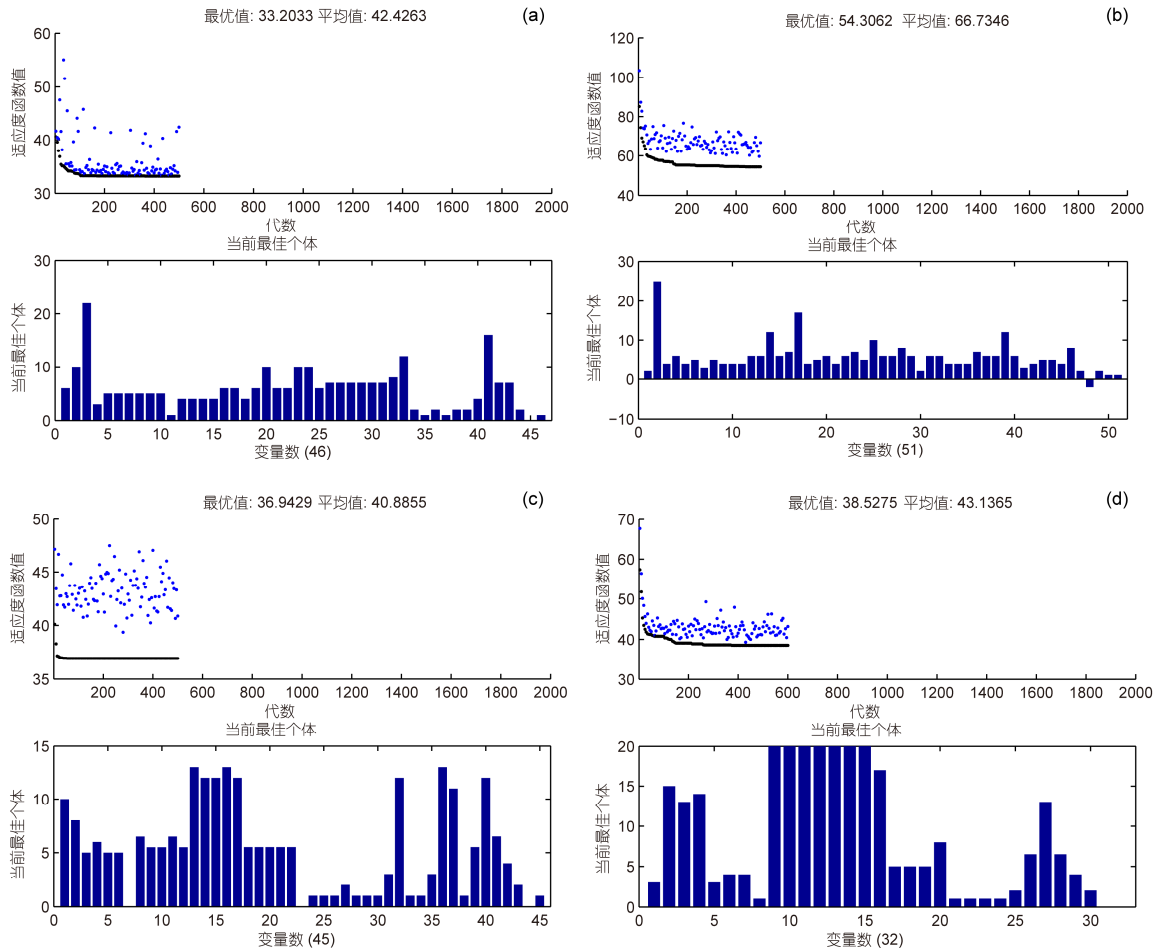


图1 (网络版彩色)建筑能耗预测模型在Matlab中的收敛情况. (a) L形; (b) 裙房+塔楼; (c) 矩形双中庭; (d) 三角形

Figure 1 (Color online) Convergence of building energy consumption prediction model in Matlab. (a) L-shaped building; (b) podium and tower; (c) rectangle building with double atriums; (d) triangle building

## 1.2 优化算法

以建筑总能耗为适应度目标函数,本研究引入了自动反向寻优的遗传算法对建筑方案进行反向优化,生成满足能耗最低的各种建筑空间几何参数、围护结构热工性能以及空调供暖照明系统参数的最优组合。

为了解决收敛到局部最优解而非全局最优解的问题,本研究引入了多岛遗传算法。多岛遗传算法先设立一个初始值,达到初步优化解,然后通过变异、迁徙,在一个新的初始点开始遗传操作。通过这种反复操作,避免了早熟现象的产生,保证了优化解的多样性,能够更大可能地获得全局最优解<sup>[16]</sup>。与传统遗传算法相比,多岛遗传算法可以大大缩短搜索时间。

本研究以建筑总体能耗为适应度函数,所采用的优化算法设定了35个设计目标参数,每一个参数占据遗传个体序列上的一个基因位,对应不同类型参数的特点,共采取A、B、C 3种编码方式。编码方式A利用比例因子进行编码,编码方式B利用对应某种指定形式的整数进行编码,编码方式C利用“0”,“1”开关进行编码。在最低能耗约束目标下,一个完整的建筑方案就可以由所有设计目标参数组合成的基因序列(含数值大小),并通过部分用户指定参数来最终确定。

## 1.3 算法拓展

为了符合实际建筑设计中更加关注与建筑空间、体型、平面设计相关的被动式性能目标,如天然采光、自然通风、建筑与太阳辐射和大气环境之间的热交换特性等单一目标,特设计了天然采光计算、热体形系数计算、日照阴影工具等新模块。这3个新模块是独立于建筑能耗预测模型和遗传优化算法的模块。

(i) 天然采光计算。鉴于天然采光模拟软件Radiance计算速度快、准确性高、开源性好的特点,本研究通过调用Radiance对建筑内部天然采光进行计算。目前可以实现建筑内部工作平面高度采光系数和照度指标的正向计算,用户只需要基于建筑草图绘制软件Sketchup建立的几何模型就可以对天然采光性能指标进行计算,而不需要重复建模输出模拟,节省了效率与时间。下一步将Radiance与遗传优化算法相结合,以采光最优为单一性能指标,反向搜索最

优方案。

(ii) 热体形系数计算。热体形系数(简称TSC)强调围护结构贡献的单位建筑面积全年累计负荷 $Q_{BE}$ (单位: kWh/m<sup>2</sup>)。体形系数是建筑外表面积与体积的比值,仅反映建筑的几何特征,而热体形系数计算中用权重因子 $\lambda$ 区别不同朝向外表面的差异,它综合考虑建筑造型、平面布局、窗墙比与热工参数的影响。此外,利用热体形系数还可以直接计算供冷季通过围护结构的得热量。热体形系数一般大于0,表示整个空调季围护结构以得热为主,只有在非常极端的情况下热体形系数才会小于0,表示空调季围护结构以散热为主。因此,本研究在方案优化过程中,采用计算热体形系数的方法来衡量方案的热特性,从而进行方案的比选和优化。

由于与体形系数相比,热体形系数能够更好地反映建筑造型、平面布局、窗墙比和所有热工参数对于建筑热性能的影响,且计算过程简单快速,能够快速比较出不同方案的热性能差异,用户可以基于计算结果迅速对方案做出调整,所以本研究引入热体形系数计算方法,作为设计初期方案比选不同建筑方案被动式性能的重要依据。

(iii) 日照阴影工具的开发。本研究自主研发了日照阴影计算工具,能够基于建筑基本体块和周边建筑遮挡计算任意时刻建筑表面阴影。传统的阴影计算工具通常需要进行求交计算,计算速度慢,而本研究自主开发的日照工具采用了Shadow Map计算方法,大大提升了计算速度。同时可以依据此模块计算建筑表面辐射太阳辐射得热量,输入到建筑能耗计算中,显著提升建筑能耗预测模型的准确性。

## 2 应用流程

基于上述研究基础,本研究进一步提出了针对设计初期的建筑节能优化设计新流程,包括正向计算流程和反向优化流程。

正向计算流程(图2)指的是,从建筑模型中读取建筑基本信息,对用户所选的性能评价指标进行计算和评价,用户可以根据计算结果调整方案。正向计算流程的关键点在于,它能够为建筑设计师提供一个“即绘即模拟”的机制,用户可以根据实际需求自由选择所关注的建筑性能目标进行评价,计算结果的迅速反馈可以帮助建筑设计师回到方案初期对模型进行调整,再次进行计算和评价。

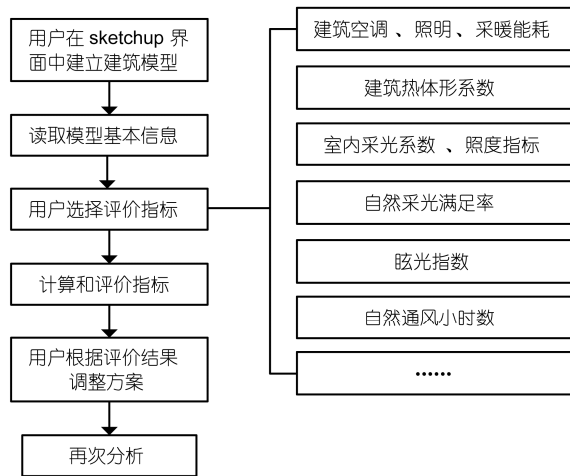


图2 正向计算流程图

Figure 2 Workflow of forward calculation process

反向优化流程(图3)是指用户依据项目任务书限制一部分建筑参数,例如任务书对于建筑面积、红线范围等的硬性要求,而对于剩余与建筑体型空间平面相关的参数,用户只需要给定它们的上限和下限,通过将建筑总体能耗或其他单一性能指标作为适应度函数,调用遗传算法搜索得到性能最优的建筑方案。反向流程的亮点在于,在对方案进行优化计算时,有大量不确定的建筑参数是以性能目标为导向来最终确定的,在提升建筑性能的同时又能够提升方案的多样性。

### 3 应用及讨论

#### 3.1 以能耗为目标对建筑空间体型进行反向优化

(i) 案例设定。依据前文提出的反向优化流

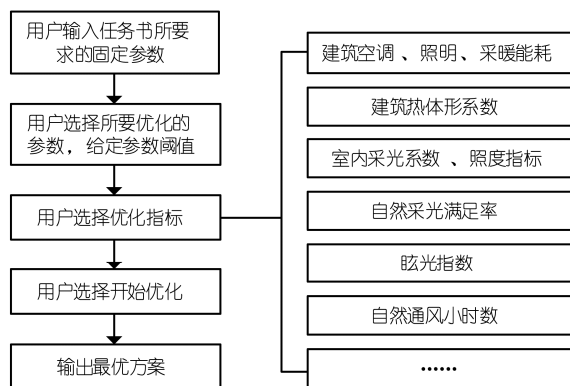


图3 反向优化流程

Figure 3 Workflow of reverse optimization process

程,本研究设计具体案例,选择哈尔滨、北京、上海、广州等4个地区,对建筑方案进行反向优化设计。方法是:将与建筑有关的一部分参数设定为定值,设定剩余其他参数的上下限值,以前文的建筑能耗预测模型为目标函数,调用遗传算法反向搜索得到每个城市的最节能方案。案例设定如表1和2所示。

(1) 固定参数。建筑面积下限为10000 m<sup>2</sup>,上限为25000 m<sup>2</sup>,建筑层高4 m,外区进深6 m。

夏季空调温度为25℃,中庭空调温度为29℃。冬季供暖温度为22℃,中庭供暖温度为15℃,冬季空调温度(冬季内区可能需要空调制冷时的室内设定温度)为24℃。

人员密度为0.1 人/m<sup>2</sup>,人员散热量为7 W/m<sup>2</sup>,灯光散热量为11 W/m<sup>2</sup>,设备散热量为20 W/m<sup>2</sup>,渗透换气次数为0.2 次/h,人均新风量为30 m<sup>3</sup>/(人·h),

表1 可变参数-建筑体型参数

Table 1 Changeable parameter-building geometric parameter

|        | 楼层数 | 南向长度(m) | 西向长度(m) |
|--------|-----|---------|---------|
| 下限     | 8   | 2       | 2       |
| 上限     | 12  | 30      | 30      |
| 单位转化系数 | 1   | 5       | 5       |

表2 可变参数-建筑表皮参数

Table 2 Changeable parameter-building façade parameter

|                             |    | 上限 | 下限 | 单位转化系数 |
|-----------------------------|----|----|----|--------|
| 窗墙比                         | 南  | 8  | 2  | 0.1    |
|                             | 西  | 8  | 2  | 0.1    |
|                             | 北  | 8  | 2  | 0.1    |
|                             | 东  | 8  | 2  | 0.1    |
|                             | 屋顶 | 0  | 0  | 0.1    |
| 外墙K值(W/(m <sup>2</sup> ·K)) | 南  | 12 | 2  | 0.1    |
|                             | 西  | 12 | 2  | 0.1    |
|                             | 北  | 12 | 2  | 0.1    |
|                             | 东  | 12 | 2  | 0.1    |
|                             | 屋顶 | 10 | 2  | 0.1    |
| 外窗K值(W/(m <sup>2</sup> ·K)) | 南  | 15 | 5  | 0.2    |
|                             | 西  | 15 | 5  | 0.2    |
|                             | 北  | 15 | 5  | 0.2    |
|                             | 东  | 15 | 5  | 0.2    |
|                             | 天窗 | 15 | 5  | 0.2    |
| 外窗太阳辐射得热系数SHGC              | 南  | 8  | 3  | 0.1    |
|                             | 西  | 8  | 3  | 0.1    |
|                             | 北  | 8  | 3  | 0.1    |
|                             | 东  | 8  | 3  | 0.1    |
|                             | 天窗 | 8  | 3  | 0.1    |

日工作小时数为9 h, 工作日率为0.714.

空调末端形式为风机盘管+新风, 照明控制开关调节, 窗户类型为独立窗.

(2) 可变参数. 单位转化系数的含义为, 为了减小调用遗传算法反向寻优的计算量, 优化参数上下限的实际取值为表格中的上下限与单位转化系数的乘积, 以表6中的南向长度为例, 南向长度下限的实际取值为 $2\text{ m} \times 5 = 10\text{ m}$ .

(ii) 计算结果. 基于前述约束条件, 选择哈尔滨(严寒地区)、北京(寒冷地区)、上海(夏热冬冷地区)和广州(夏热冬暖地区)等不同地区典型城市, 进行以总能耗最低为目标的办公建筑体型空间反向设计优化, 得到方案如表3及图4所示.

由本次优化结果可以看出, 各方案的体型有了较大的差距, 为了进一步量化这种差距, 笔者计算了4个方案的体型系数, 如图5所示.

从地处严寒地区的哈尔滨, 到夏热冬暖地区的广州, 建筑的体型系数计算结果逐渐增大, 符合由北向南体型系数越来越大的常识, 也从另一个角度为我们验证了能耗预测模型计算结果的合理性. 在建筑的热工参数方面, 不同方案和同一方案的不同朝向的差别并不大.

### 3.2 性能参数敏感性分析

(i) 参数设定. 为了更好地进行优化, 本研究还可对建筑的不同类型性能参数进行敏感性分析. 方法是将其其他所有参数设为定值, 不断变化所要分析的参数, 所有参数的设定值如表4所示.

(ii) 敏感性分析结果. 以上海为例, 通过优化,

表3 反向设计优化结果

Table 3 Results of optimization

|                             | 哈尔滨               | 北京                         | 上海                | 广州                |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| 楼层                          | 10                | 12                         | 22                | 24                |
| 南向长度 (m)                    | 30                | 40                         | 45                | 25                |
| 西向长度 (m)                    | 35                | 30                         | 25                | 40                |
| 南西边长比例                      | 6/7               | 4/3                        | 9/5               | 5/8               |
| 窗墙比                         | 南西东 0.4,<br>北 0.5 | 南东 0.4,<br>北西 0.4          | 南西东 0.4,<br>北 0.5 | 南西 0.4,<br>北东 0.4 |
| 墙体传热系数<br>$W/(m^2 \cdot K)$ | 2.4               | 2.4                        | 2.4               | 2.4               |
| 窗户传热系数<br>$W/(m^2 \cdot K)$ | 3.0               | 3.0                        | 3.0               | 3.0               |
| 窗户 SHGC                     | 南 0.3,<br>其他 0.4  | 南北 0.4,<br>西 0.4,<br>北 0.3 | 东 0.4,<br>其他 0.3  | 0.3               |

可以绘制出建筑整体能耗随各朝向窗墙比、墙体传热系数、窗户传热系数、窗户SHGC、外区进深等参数变化对能耗影响的敏感型曲线, 计算结果如图6所示.

由图6可以看出以下内容:

(1) 随着窗墙比的增大, 建筑总能耗呈现不断增大的趋势, 且对于南向立面窗墙比的变化最为敏感; (2) 随着外墙传热系数的增大, 建筑总能耗缓慢增大, 且屋面传热系数对于建筑总能耗的影响比各立面传热系数更强; (3) 窗户传热系数对于建筑总能耗几乎没有影响; (4) 随着窗户SHGC的增大, 建筑总能耗逐渐增大, 且建筑南向窗户的SHGC对于总能耗的影响明显强于其他立面; (5) 随着外区进深的增大, 建筑总能耗先逐渐降低, 后逐渐升高.

由敏感性分析结果, 可以知道每一个性能参数

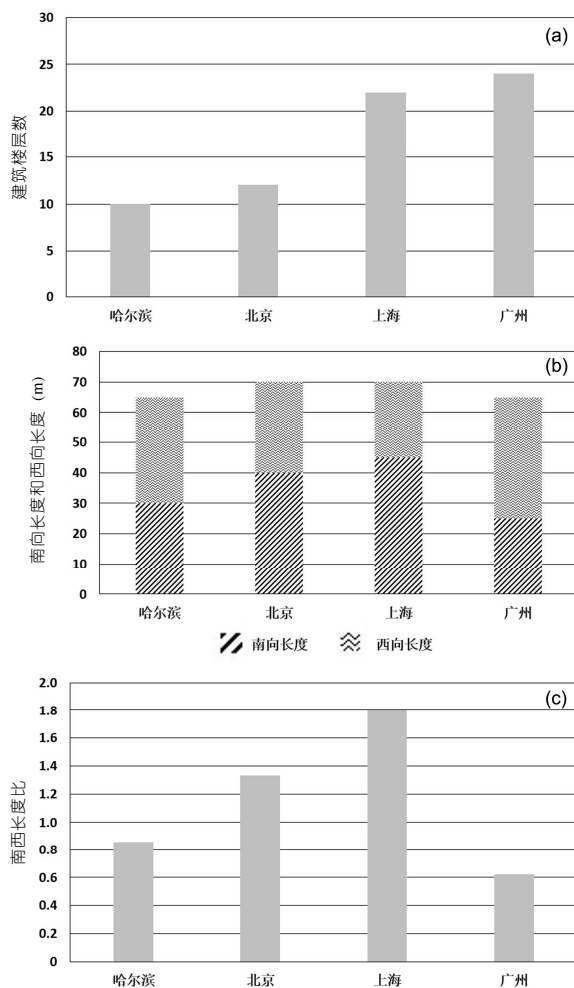


图4 最优方案. (a) 楼层数; (b) 南向长度和西向长度; (c) 南向长度和西向长度比  
Figure 4 Optimal scheme. (a) Storey number; (b) south and west length; (c) ratio of south length and west length

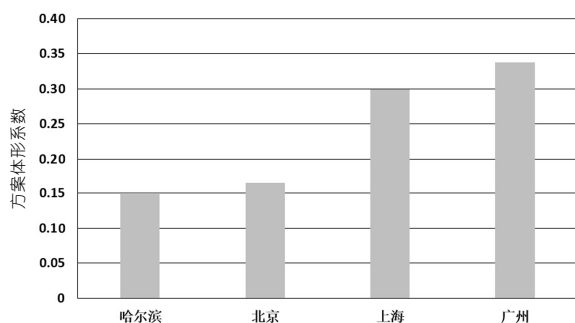


图5 最优方案体形系数

Figure 5 Shape coefficient of optimal scheme

对于建筑总体能耗的影响. 对于某些参数来说, 甚至存在能够使总体能耗最低的最优值. 综上所述, 参数的敏感性分析能够为设计初期的决策提供重要的参考依据.

### 3.3 单一性能目标优化研究

以热体形系数的计算为例, 展示如何对多个建筑体型方案进行优化. 本研究设计了4个建筑面积基

表4 建筑性能参数敏感性分析的参数设定值

Table 4 Settings for building performance parameters' sensitivity analyze

| 项目                 | 数值                                     |
|--------------------|----------------------------------------|
| 楼层数                | 6                                      |
| 南向长度               | 60 m                                   |
| 西向长度               | 30 m                                   |
| 各朝向窗墙比             | 0.3                                    |
| 屋顶窗墙比              | 0                                      |
| 南、西、东外墙 $K$ 值      | $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ |
| 北向外墙 $K$ 值         | $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ |
| 屋面 $K$ 值           | $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ |
| 窗户 $K$ 值           | $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$   |
| 天窗 $K$ 值           | $1.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ |
| 窗户 SHGC            | 0.3                                    |
| 天窗 SHGC            | 0.5                                    |
| 朝向                 | 正南                                     |
| 外区进深 (有外墙的房间的纵向长度) | 6 m                                    |

本相同的方案(方案1~4, 图7), 方案1为参考方案. 外墙传热系数为 $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , 屋顶传热系数为 $0.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . 北向窗墙比为0.3, 外窗传热系数为 $3.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , 遮阳系数为0.7; 其他朝向窗墙比为0.7,

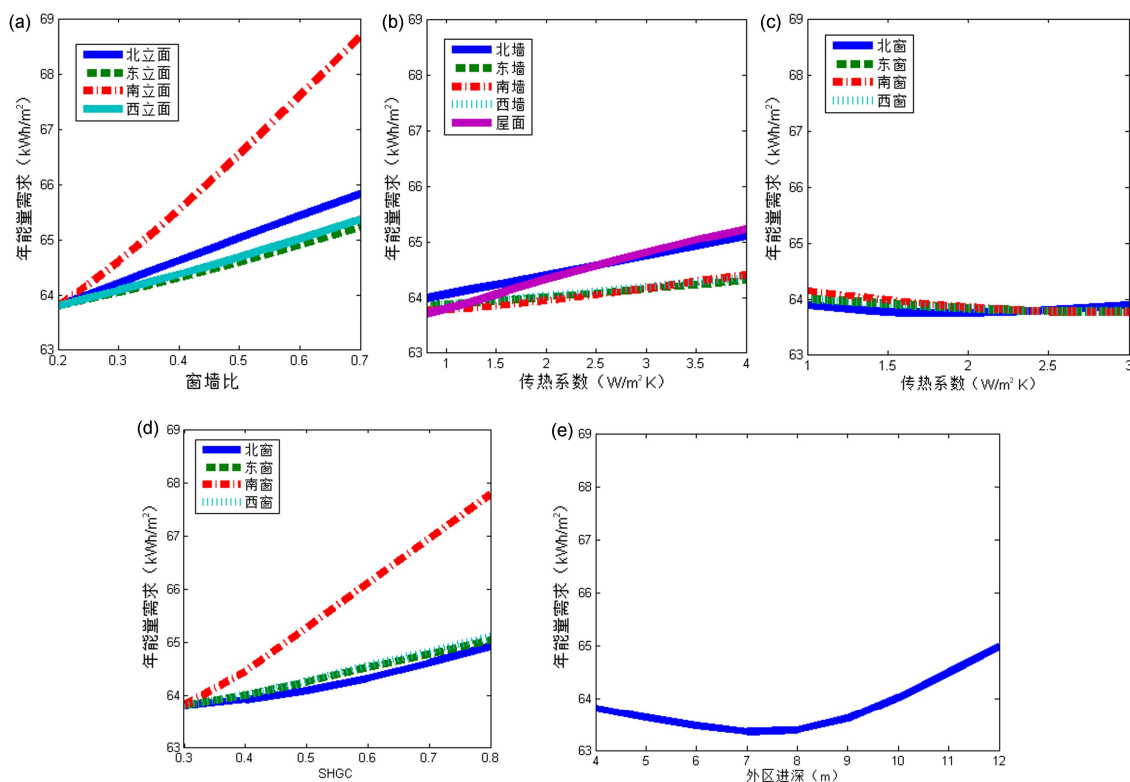


图6 (网络版彩色)敏感性曲线. (a) 窗墙比敏感性曲线; (b) 墙体传热系数敏感性曲线; (c) 窗户传热系数敏感性曲线; (d) 窗户SHGC敏感性曲线; (e) 外区进深敏感性曲线

Figure 6 (Color online) Sensitivity profile. (a) WWR; (b)  $K$  value of wall; (c)  $K$  value of window; (d) SHGC of window; (e) exterior room depth

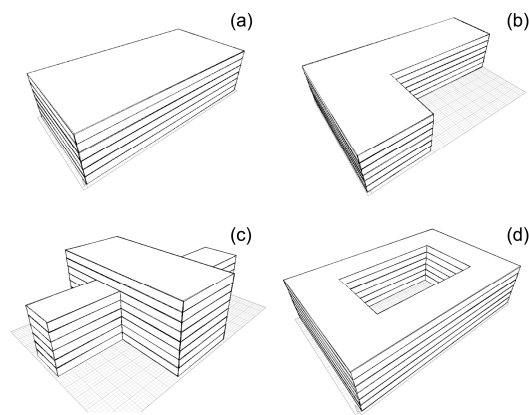


图7 TSC计算案例. (a) 方案1; (b) 方案2; (c) 方案3; (d) 方案4  
Figure 7 Cases of TSC calculation. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4

表5 TSC计算结果

Table 5 TSC calculation results

|                          | 方案1   | 方案2   | 方案3   | 方案4   |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 建筑面积 ( $\text{m}^2$ )    | 14700 | 14688 | 14796 | 14688 |
| TSC ( $\text{m}^{-1}$ )  | 8.42  | 9.57  | 10.79 | 12.89 |
| 体形系数 ( $\text{m}^{-1}$ ) | 0.141 | 0.158 | 0.174 | 0.208 |

外窗传热系数为 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , 遮阳系数为0.5(表5).

除了参考方案(方案1)以外, 方案2~4的体形系数和热体形系数都是从小到大变化, 与方案2和3相比, 由于方案4中间有一个天井, 各朝向的面积都要更大, 所以热体形系数也最大. 这说明在建筑体型相对

常规的情况下, 热体形系数和体形系数所表征的建筑热特性基本一致.

## 4 总结与展望

随着计算机辅助设计方法、绿色建筑性能模拟技术、参数化设计方法和工具的飞速发展, 以能耗或自然通风、天然采光等为目标, 国内外已开展了许多针对建筑设计初期优化方法研究.

本研究通过建立和完善建筑总体能耗的快速预测模型, 拓展建筑空间平面体型适应性, 开发拓展热体形系数、天然采光和日照阴影工具等模块, 提出并建立了面向设计初期的办公建筑节能优化的正向计算流程. 期望帮助建筑设计在较早的阶段就可以实现方案的优化, 实现即绘即模拟. 此外, 还提出了反向优化的思路. 即在大量设计参数不确定的情况下, 以能耗或单一性能参数为目标, 通过遗传优化算法反向寻优, 得到性能最优的建筑方案, 在提升建筑方案多样性和节能性等方面具有很大的潜力.

基于前文所建立的能耗模型和设计流程, 本研究设计具体案例, 展示了如何以整体能耗为目标的反向优化、性能参数的敏感性分析、热体形系数的计算分析工作. 未来将进一步完善建筑能耗和单项性能分析工具的开发和调用、增强性能分析工具之间的关联性、提升算法的运算速度和准确性.

## 参考文献

- 1 Building Energy Conservation Center, Tsinghua University. Research report of China's building energy conservation development 2014 (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 [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 2014. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014]
- 2 Warren P. IEA-BCS ANNEX 30 Final Report: Bring Simulation into Application. Paris: International Energy Agency, 2008
- 3 de Wilde P. Computational Support for Selection of Energy Saving Building Components. Delft: Delft University of Technology, 2004
- 4 Hong T Z, Chou S K, Bong T Y. Building simulation: An overview of developments and information sources. Build Environ, 2000, 35: 347-361
- 5 Augenbroe G. Building simulation trends going into the new millennium. In: Proceeding of Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro: International Building Performance Simulation Association, 2001. 15-27
- 6 Palonen M, Hamdy M, Hasan A. MOBO: A new software for multi-objective building performance optimization. Chambéry: The 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, 2013
- 7 Roudsari M S, Pak M. LADYBUG: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. In: The 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association. Chambéry, 2013
- 8 Sargent J A, Niemasz J, Reinhart C F. SHADERADE: Combining rhinoceros and energyplus for the design of static exterior shading devices. In: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sydney, 2011



- 9 Kim J, Yi Y K, Malkawi A M. Building form optimization in early design stage to reduce adverse wind condition—Using computational fluid dynamics. In: The 12th International Conference of the International Building Performance Simulation Association. Sydney, 2011
- 10 Trubiano F, Roudsari M S, Ozkan A. Building simulation and evolutionary optimization in the conceptual design of a high-performance office building. In: The 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Chambéry, 2013
- 11 Tian Z C, Shi X. Research on comparison between building energy saving optimization design tools (in Chinese). Building Thermal & Energy-saving Academic Conference, Kunming, 2014 [田志超, 石邢. 建筑节能优化设计工具的比较研究. 建筑热工与节能学术年会, 昆明, 2014]
- 12 Zeng J L. Performance-adjustable building envelope research (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2006 [曾剑龙. 性能可调节围护结构研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2006]
- 13 Xia C H. Research on energy conservation design methodology oriented to building's conceptual design stage (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2008 [夏春海. 面向建筑方案的节能设计方法研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2008]
- 14 Zhou X R. Study on building energy-saving design method based on total energy demand in scheme stage (in Chinese). Dissertation for Masteral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2009 [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. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2009]
- 15 Yu Q. Study on building energy-saving parametric design method in schematic stage (in Chinese). Dissertation for Masteral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2011 [余琼. 方案阶段建筑节能参数化设计方法研究. 硕士学位论文. 北京: 清华大学, 2011]
- 16 Shi X H, Meng X Z, Du X D, et al. Optimal configuration of vibration control sensor based on multi-island genetic algorithm (in Chinese). Vib Measure Diagnosis, 2008, 28: 62–65 [石秀华, 孟祥众, 杜向党, 等. 基于多岛遗传算法的振动控制传感器优化配置. 振动、测试与诊断, 2008, 28: 62–65]

## Building energy-saving approach in early design stage

LIN BoRong & LI ZiWei

*Building Science and Technology, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Studies show that, decisions made in early design stage have great influences on building performance. Because in early design stage, building form nearly takes shape, and most of the parameters which can influence building performance are selected. For example, the sunshine hours, daylighting performance, natural ventilation, heating and cooling loads etc. With the promotion of the design process, the performance optimization possibility is smaller and smaller, and cost of the same benefit is higher and higher. Energy-saving optimization approach in view of office building in early design stage has been put forward in this research. The completed work includes that: the fast prediction algorithm of building energy consumption has been established and improved, because the previous algorithm is too simple, only applicable to rectangle buildings, and cannot satisfy architects' higher requirements of architectural form's complexity; and the algorithm has been developed in the aspects of building shape, daylighting analysis, TSC value computation and solar shadow analysis. Then, a forward process of calculation and a reverse process of optimization for energy-saving optimization in early design stage are put forward. In the part of case analysis, standard cases are designed to perform optimization of building form and function layout with the objective of a lowest total energy consumption, and parameter sensitivity analyze of the window-to-wall ratio,  $K$  value of wall,  $K$  value of window, SHGC of window and building exterior zone depth are performed. Four typical building forms are modelled to calculate and compare the shape coefficients and TSC values, then the optimization and analysis approach of single passive performance is introduced. Analysis results show that from Harbin to Guangzhou, building shape coefficient result shows a gradual increasing trend, which is in line with the common sense that building shape coefficient will increase from the north area to the south area in China. This result also verity the energy consumption prediction algorithm's accuracy. And there is so little difference in thermal parameters between different schemes or the same scheme towards different orientations. From the sensitivity analysis results, influence of every parameter on the total energy consumption can be viewed. For some parameters, there even exists the optimal value which can make the lowest energy consumption. So, parameter sensitivity analysis can be regarded as important reference for decisions made in early design stage. Shape coefficient and TSC value show the same trend in representation of building thermal characteristics when building forms are common.

**early design stage, energy-saving parametric design, performance objective, energy prediction model**

doi: 10.1360/N972014-01379