

基于能耗模拟的节能策略优选研究

OPTIMIZATION SELECTION OF ENERGY-EFFICIENT DESIGN STRATEGIES THROUGH THERMAL SIMULATION

——以重庆地区办公建筑为例

—Take an Office Building in Chongqing as an Example

李晓俊、菲利普·琼斯、西蒙·兰侬

Li Xiaojun, Phillip Jones, Simon Lannon

摘要

基于重庆某高层建筑的概念模型，研究设计初期，尤其是概念设计阶段如何有效地选择与组合不同节能设计策略的方法与过程。考虑到不同的节能策略组合，共模拟了4608例节能设计方案，比较和分析模拟结果确定了其中的主要参数，同时基于各项设计参数的综合评价确定了最佳适宜方案的参数组合。基于模拟结果开发的灵敏度工具综合直观、界面友好，可以为该地区同类建筑的节能设计决策提供参考。

关键词

能耗模拟 节能设计 灵敏度

Abstract

Based on the concept model of an office building in Chongqing area, it explores the method and process on how to select and group different strategies during the early stages of design. A total of 4608 simulations were run to consider the combinations of different design strategies. By comparing and analyzing the simulation results, it identified the most effective factors, and the factors set for the best practice case. The sensitivity tool developed on the simulation results is visual, user-friendly, and can aid architects and policy-makers for decision-making at an early stage.

Key Words

Thermal Simulation; Energy-efficient Design; Sensitivity

1 概述

据统计，我国目前平均每年新增建筑面积约20亿 m^2 ，到2020年建筑能耗将达10.9亿吨标准煤^[1]，超出了维持我国经济与 社会正常发展的建筑用能10亿吨标准煤的上限^[2]，进行建筑节能设计，刻不容缓。设计初期，尤其是概念与方案设计阶段的节能设计对落实建筑节能非常重要，我国现有的节能设计规范已提出了适用于不同气候区的节能设计策略，如严寒与寒冷地区建筑节能主要从维护结构保温性能和门窗气密性方面入手，而夏热冬冷地区节能设计则侧重于外窗遮阳和通风设计等方面。然而，在实施过程中，若只有措施导则，缺乏对相应措施的性能预测，尤其是多项节能策略共同作用的综合评价，节能设计将流于形式，甚至千篇一律。鉴于此，本文希望探索设计初期，尤其是概念设计阶段，如何有效地选择与组合不同节能设计策略的方法与过程。研究基于重庆某办公建筑的概念模型，采用卡迪夫大学开发的动态模拟工具HTB2模拟建筑的采暖与制冷能耗，分析各单项设计参数的节能影响力（即灵敏度），同时讨论多项策略共同作用时的节能潜力。研究开发的模拟结果集成软件——灵敏度工具，界面友好，便于分析与比较不同的节能设计方案，以期为该地区同类建筑的节能设计实践提供参考。

本文为重庆科学技术研究院（CAST）二期工程前期研究的成果总结。该项目旨在帮助起草与制定重庆地区办公建筑的低碳设计导则。2010年项目开始之初，该建筑还处于方案设计阶段，设计初期节能研究

的介入有利于节能策略的具体落实。

2 研究方法

重庆属于夏热冬冷地区，夏季制冷和冬季采暖都有需求，且制冷能耗大于采暖能耗，减少建筑能耗应综合考虑夏季遮阳与冬季保温设计。综合考虑地区气候条件，并结合节能设计实践，研究指出该地区可能适用的节能设计策略，主要包括：

- ① 增加维护结构保温隔热性能；
- ② 设计外窗遮阳，减少夏季不利得热；
- ③ 强化夏季及部分通风季节的夜间通风；
- ④ 控制照明、电器和人员等产生的室内得热；
- ⑤ 调整建筑朝向。

其中①②项与维护结构相关，主要研究传热损失与太阳得失热对室内环境的影响；③④项涉及建筑的使用行为与系统设备情况，通过控制通风与设备使用来制冷或供暖；最后一项则是对建筑布局的考虑。需要注意的是，上述策略对建筑用能的影响是综合的：例如增加围护结构保温隔热性能虽然能够降低冬季采暖能耗，但是由于夏季室内热量无法散发出去，也可能增加夏季制冷能耗；设计外窗遮阳虽然能减少夏季不利得热，但同样可能减少冬季有利的阳光入射。

研究采用能耗模拟技术模拟和比较不同节能策略对建筑用能的影响程度，同时辨识不同策略组合的优化设计方案。与这五项设计策略直接相关的节能设计参数有外墙传热系数（U值）、外窗传热系数（U值）、窗户遮阳系数、夜间通风次数、室

内得热密度、建筑朝向，其中窗户遮阳系数采用欧洲通用的G值而非我国常用的SC值，两者换算关系为 $G=SC \times 0.87$ 。考虑到不同设计参数的设置及其组合，包括3项外墙U值、4项外窗U值、4项外窗G值、3项夜间通风次数、4项室内得热密度、8项建筑朝向，研究共模拟了4 608例设计方案。针对模拟结果的灵敏度分析比较了各设计参数对建筑用能的影响程度（即灵敏度），同时开发的可视化的模拟结果集成软件——灵敏度工具，可查询和比较不同设计方案的采暖与制冷能耗的逐月变化及年总能耗，从而优选方案。

研究数据源自重庆市科学技术研究院（CAST）新的办公总部设计，同时参考国家和地方与办公建筑相关的设计标准。本研究采用英国卡迪夫大学自主研发的动态模拟软件HTB2进行能耗模拟，该软件已被广泛应用于各种研究和咨询项目，如香港环境评估方法HK-BEAM(Burnett et al, 1977)，结果可靠。研究还采用了卡迪夫大学高级计算研究中心（ARCCA）的高速运算集群技术（Merlin），该技术可同时进行多个方案的能耗模拟，极大地减少了运行时间。模拟结果为全年逐时数据。

3 研究设计

3.1 概念模型

根据我国常规办公建筑的设计特点，结合重庆科学技术研究院(CAST)提供的案例信息（图1为二期工程C7号办公楼的标准层平面），具体到了重庆，研究创建了一个理想化的概念模型平面，即围绕核心筒布置办公空间、分区简单对称的集中式布局方案（图2），如此划分空间是为了方便

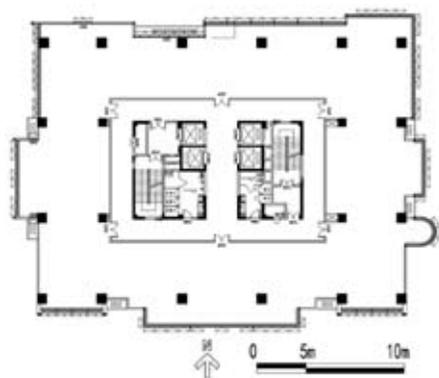


图1 C7号办公楼标准层平面

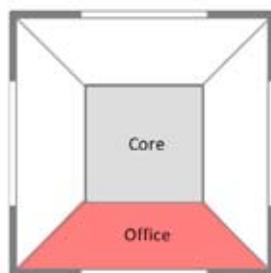


图2 概念模型平面

研究不同朝向对建筑用能的影响，能耗模拟只涉及其中的红色区域。

该概念模型各立面窗墙比为50%，层高3.6m。能耗模拟基于房间或空间层面（图2红色区域），考察外墙U值、外窗U值、外窗G值、夜间通风次数、室内得热和朝向各设计参数对建筑节能性能的影响程度。

3.2 模拟条件

能耗模拟的室内设计条件根据《公共建

筑节能设计标准》（GB50189-2005）和《重庆市公共建筑节能50%设计标准》（DBJ50-052-2006）的有关要求进行设置，气象数据来源于Energyplus能耗模拟的气象数据网站。各节能设计参数的取值如下表1所示，加粗数值为标准方案的参数设置。

4 模拟结果分析与讨论

4.1 模拟结果比较

首先按单项设计参数优化来分析模拟结果，即在标准方案的基础上，只变化其中某项参数取值，而保持其他项不变，所得方案的模拟结果与标准方案比较，比较结果如图3与图4所示。外窗G值、夜间通风和室内得热三者对建筑用能的影响最大。立面朝向方面，北向与西北向的影响较小，东向与东南向的影响较大。而外墙U值，外窗U值对建筑用能的影响较小。

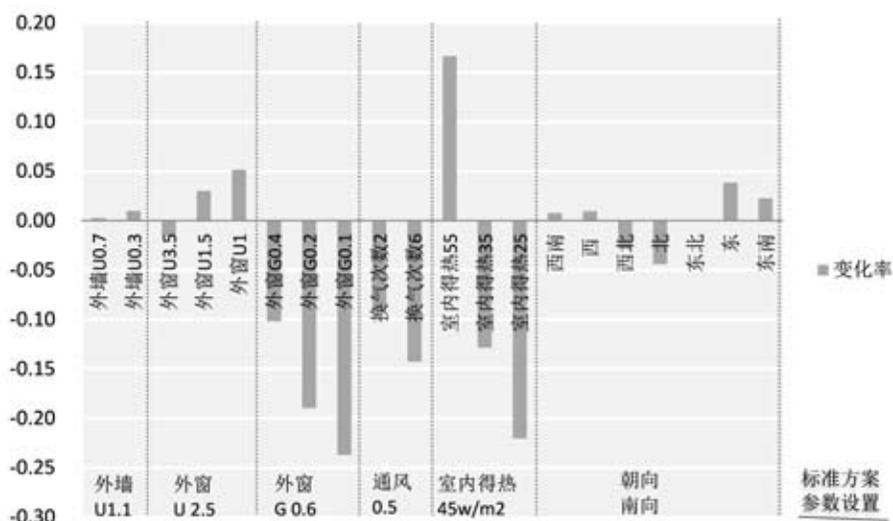


图3 标准方案单项设计参数优化的用能变化（变化率 = (优化后的年能耗 - 标准方案的年能耗) / 标准方案的年能耗 × 100%）

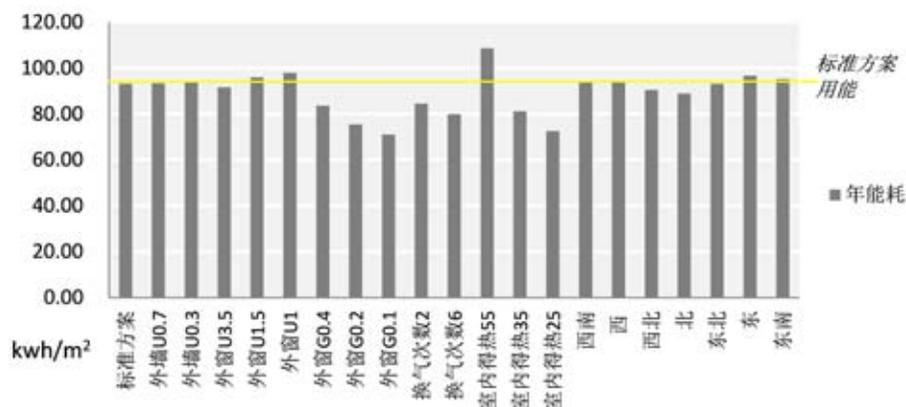


图4 标准方案单项设计参数优化前后的用能总览

表1 各节能设计参数的取值

节能设计参数	取值
外墙U值 (W/m ² K)	0.3 - 0.7 - 1.1
外窗U值(W/m ² K)	1.0 - 1.5 - 2.5 - 3.5
外墙G值	0.1 - 0.2 - 0.4 - 0.6
通风次数 (夏季及部分过渡季节的夜间通风)	0.5 (低) - 2.0 (中) - 6.0 (高)
室内得热 (包括人员、照明和其它设备散热) (W/m ²)	25 - 35 - 45 - 55
朝向	南-西南-西-西北-北-东北-东-东南

为了减少标准方案可能造成的研究局限性，这里还随机选取了另外4例方案，从单项设计参数优化的角度比较其用能变化，从而较为全面总结出各参数优化可实现的节能效率，如表2所示。

4.2 灵敏度分析

图5对4 608例设计方案的模拟结果进行了归纳总结，同时分析了各设计参数影响建筑用能的灵敏程度。总的来说，单位建筑面积全年的采暖能耗在0到35 kWh之间，

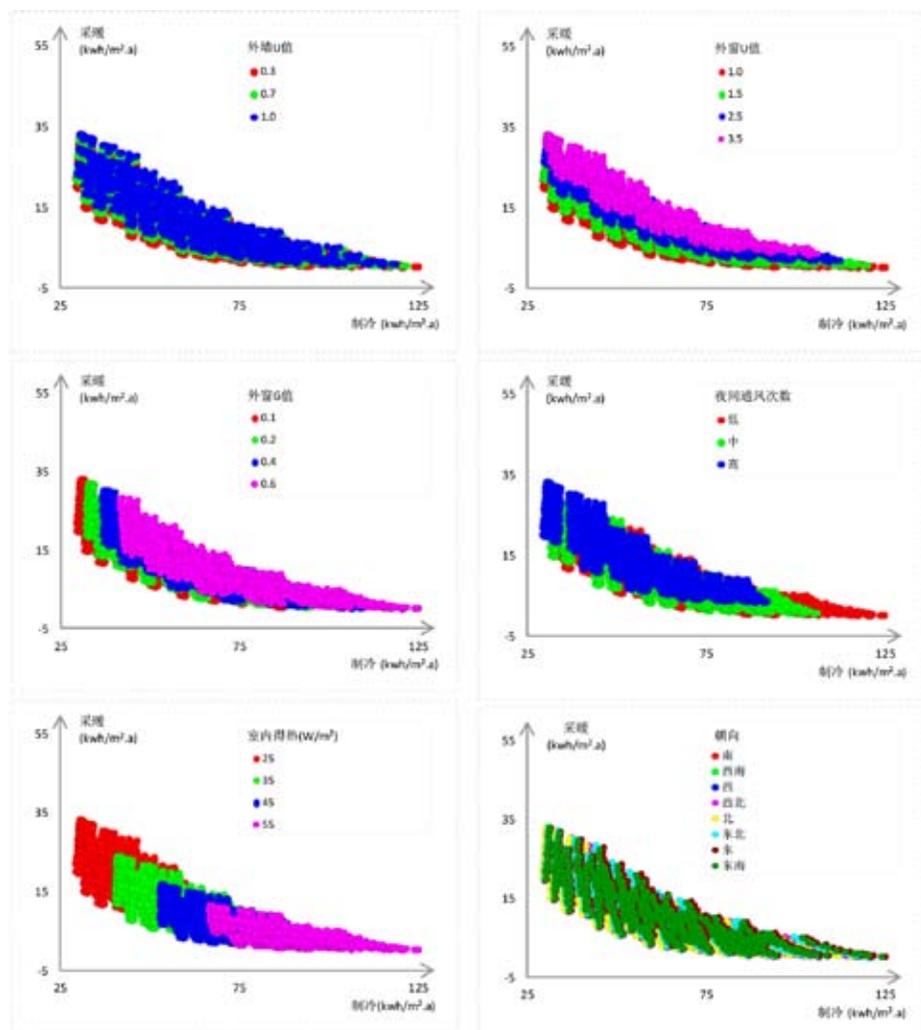


图5 各节能设计参数的灵敏度分析图左上：外墙U值，右上：外窗U值，中左：外墙G值，中右：夜间通风次数，下左：室内得热，下右：朝向。（图片来源：作者自绘）

而制冷能耗则在29到125 kWh之间。各图表中，散点根据对应设计参数的取值着色。图表分析总结如下，

1) 左上图：外墙U值越大（蓝点）采暖耗能越多，趋势并不明显，从各色散点的叠加情况可以看出，外墙U值对建筑用能的影响并不大。

2) 右上图：外窗U值越大（紫色）采暖耗能越多，制冷耗能则越少。与左上图相比较，散点叠加区域减小，趋势相对明显，可见外窗U值对建筑用能的影响比外墙U值大。

3) 中左图：外窗G值越大（紫色），制冷耗能越多，采暖耗能越少。各色散点的叠加区域较小，可见变化的趋势较为明显，即控制外窗G值可达到较好的节能效果。

4) 中右图：夜间通风次数越多（蓝点）采暖耗能越多，而制冷耗能越少，从散点分布可看出，该设计参数有一定的节能影响力。

5) 下左图：室内得热越高（紫色）制冷耗能越多，而采暖耗能越少。这种趋势非常明显，从散点分布可看出，控制室内得热可以达到非常好的节能效果。

6) 下右图：该图所示变化趋势不明显，可见通过控制立面朝向来减少用能，作用不大。

4.3 优选分析与讨论

节能设计参数的优选不应仅比较建筑节能，还应考虑相关的设计策略，分析其在经济与技术上的可行性。下表2总结了各设计参数优化可达到的节能效率，并分析了可能的节能设计策略，及操作的可行性。

在单项参数优选分析的基础上，研究开展了综合多项参数的方案优化。首先比较模拟结果确定其中最节能的设计方案，然后分析与讨论该方案与标准方案的参数设置可确定最佳适宜方案（表3）的参数组合，具体讨论如下：

外墙U值：增加外墙保温层厚度或更换

表2 各节能设计参数的优选分析

设计参数	节能设计策略	节能效率	可行性分析
外墙U值	增加保温层厚度或使用高性能保温材料。	最多6%，平均2%。	节能潜力一般，而且需要资金投入。
外窗U值	使用双玻甚至三层玻璃。	最大12%，平均2%。	节能潜力一般，而且需要投入资金。
外窗G值	使用低透射率或低传导玻璃，亦或双层玻璃内嵌或外覆遮阳百叶。	22%–28%。	节能潜力很好，但需要投入资金。
夜间通风	改进运行时间表，适时的强化夏季和通风季节的夜间通风。	8%–24%。	节能潜力较好，不需要资金投入，容易实现。
室内得热	降低人员密度、设备密度与照明密度，鼓励使用绿色照明与节能电器。	22%–41%。	节能潜力非常好，但需要投入资金。
朝向	基于地方气候分析，并参考相关案例确定具体建筑或房间的适宜朝向。	平均4%。	不需要资金投入，容易实现，但必须在设计初期考虑。

表3 标准方案、最节能方案和最佳适宜方案的设计参数取值总览

节能设计参数	标准方案	最节能方案	最佳适宜方案
外墙U值	1.1 W/m ² K	0.3 W/m ² K	0.7 W/m ² K
外窗U值	2.5 W/m ² K	1.0 W/m ² K	1.5 W/m ² K
外窗G值	0.6	0.1	0.2
夜间通风次数	0.5次/时（低）	2.0次/时（中）	2.0次/时（中）
室内得热	45 w/m ²	25 w/m ²	35 w/m ²
朝向	南	北	南

表4 标准方案、最节能方案和最佳适宜方案的能效性能

方案	年采暖与制冷能耗(kwh/m ² .a)	节能率
标准方案	93.1	0%
最节能方案	46.6	50%
最佳适宜方案	58.8	36.8%

高性能保温材料，外墙传热系数可达0.3 W/m²K，但是建筑性能优化并不明显，需资金投入，性价比不高。最佳适宜方案的外墙传热系数建议取0.7 W/m²K。

外窗U值：使用三层或多层玻璃，外窗U值可降至1.0 W/m²K，但建筑性能优化并不明显，需资金投入，性价比不高。最佳适宜方案建议选择传热系数为1.5 W/m²K的双层玻璃窗。

外窗G值：外窗G值降至0.1并不合理，它在减少了室内太阳得热的同时，也降低了自然采光，室内照明将大大增加。比较而言，使用Low-E双层玻璃带遮阳百叶的设计将G值控制在0.2比较可行，尽管前期有资金投

入，但可以实现非常可观的节能效率。

夜间强化通风：通过控制开窗，夏季与部分通风季节较易达到2.0次/时的夜间通风换气次数，并且没有前期投资要求。

室内得热：将办公空间的室内得热控制在25 w/m²以下，对室内照明等用电设备的效率要求较高，花费会非常可观。比较而言，35 w/m²的室内得热密度较为可行，尽管前期有投资要求，但可实现的节能效率非常可观。

朝向：建筑朝向对建筑用能的影响并不大，这可能跟该地区太阳光的散射性有关。为方便比较，最佳适宜方案的朝向与标准方

案取同，即均为南向。

表3、4比较了标准方案、最节能方案与最佳适宜方案的参数设置、用能情况与节能效率。

由表4可知，最节能方案可降低采暖与制冷能耗50%，所需投资花费较大。而最佳适宜方案在投资成本与技术限制范围内，可节能36.8%。

5 灵敏度工具

研究开发了集成所有模拟结果的灵敏度工具，可以辅助初期设计决策，其用户界面如图6所示。滑动绿色按钮设置不同的设计参数可以迅速获得对应方案的逐月及全年的采暖与制冷能耗，通过比较模拟结果，用户可以大概了解不同的参数优化可实现的节能效率，指导节能策略的优选。图7所示为灵敏度工具显示的标准方案、最节能方案和最佳适宜方案的模拟结果。

6 结论

本文研究了重庆地区办公建筑在单项设计策略和多项策略综合作用下的节能潜力。研究表明，优化外窗遮阳设计、控制夏季与部分通风季节的夜间通风和降低室内得热的节能效果最好。例如，降低外窗遮阳系数可节能22–28%，强化部分季节的夜间通风节能效率可达8–24%，减少室内得热甚至可节能41%。因此，设计初期应主要考虑通过优化外窗遮阳设计、控制夜间

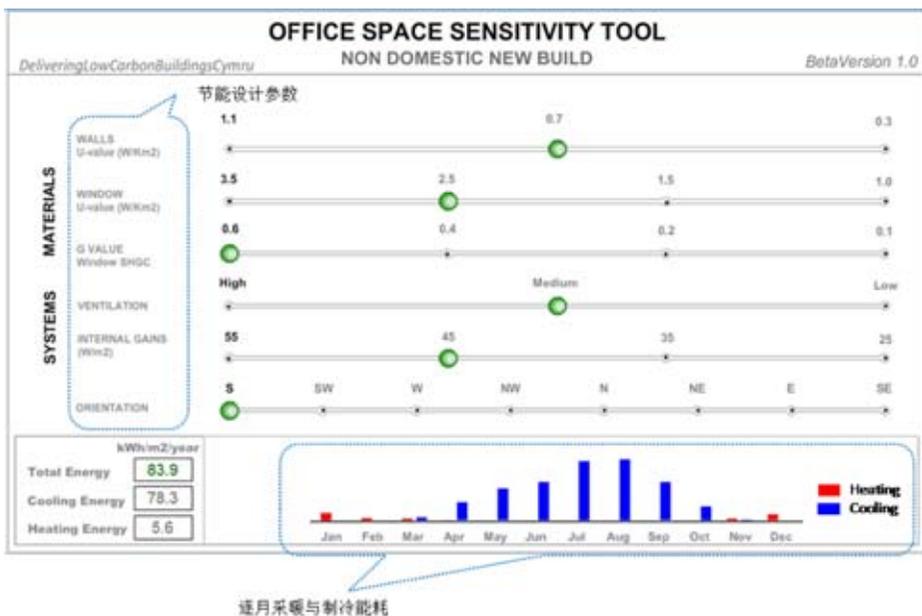


图6 灵敏度工具的用户界面 (图片来源: 作者自绘)

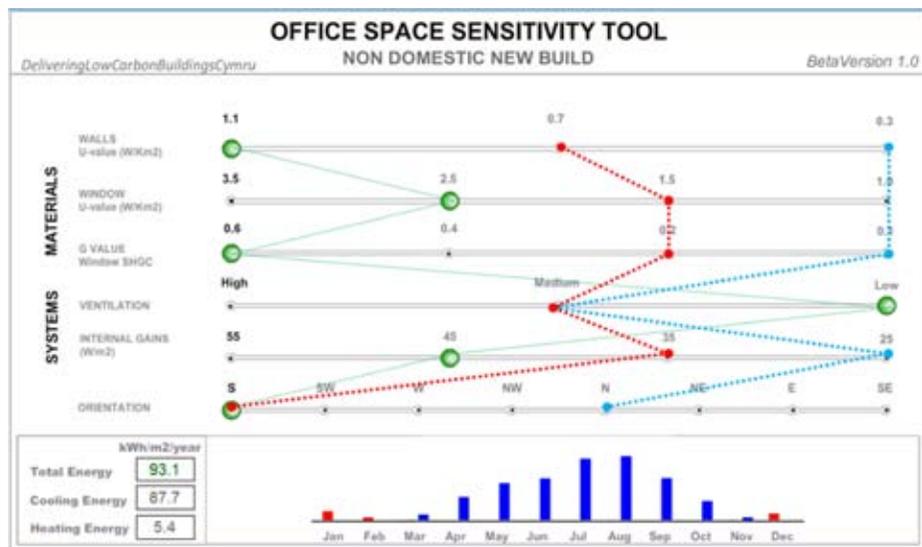


图7 灵敏度工具设置为标准方案(绿色)、最节能方案(蓝色)与最佳适宜方案(红色) (图片来源: 作者自绘)

通风和降低室内得热等措施来减少建筑用能。此外, 研究还表明, 基于多项参数综合优化的最佳适宜方案可实现36.8%的节能效率(与标准方案相比)。研究还开发了灵敏度工具以帮助理解不同设计策略的节能潜力, 提高方案初期对于节能设计的整体认识。

本研究探索了一种节能策略优选的系统化方法, 需要注意的是, 所选案例具有地域、建筑类型的特殊性, 因此在实际应用时, 应根据地域的、建筑的具体情况, 具体分析。

参考文献:

- [1] 肖坚. 促进节能减排的税收政策思考[J]. 新疆财经. 2007(5): 63-67.
- [2] 江亿, 彭琛, 燕达. 中国建筑节能的技术路线图[J]. 建设科技. 2012(17): 12-19.

图片来源:

图1: 由重庆科学技术研究院 (CAST) 提供。

图2-7均为作者自绘。

李晓俊, 天津大学建筑学院博士, 英国卡迪夫大学威尔士建筑学院助理研究员
 菲利普·琼斯(Phillip Jones), 英国卡迪夫大学威尔士建筑学院院长、教授
 西蒙·兰侬(Simon Lannon), 英国卡迪夫大学威尔士建筑学院高级研究员