

重庆某办公建筑能效优化模拟研究

李晓俊^{1, 2}, 菲利普. 琼斯 (英)², 西蒙. 兰侬 (英)²

摘要: 以重庆某办公建筑为例, 探索一种基于能耗模拟技术的系统的节能设计决策与优化方法。按照信息收集-设计分析-能耗模拟-设计优化-可行性分析的设计思路, 模拟预测了概念设计-详细设计-装修阶段各设计阶段的运行能耗和对应的系统和设备用能。概念设计阶段考虑各节能设计要素的综合影响, 共模拟了 134, 400 个方案, 对模拟结果进行统计分析明确其中的主要节能变量, 即室内得热、窗户的太阳得热系数和窗墙比, 同时确定了最佳适宜方案的参数组合, 并以此为依据指导详细设计和装修阶段的设计优化。值得注意的是, 基于模拟结果的灵敏度分析和灵敏度工具, 综合直观, 可以为具体项目节能设计的展开提供参考。

关键词: 能耗模拟; 设计优化; 灵敏度。

Energy Optimization Modeling for an Office Building in Chongqing

Li Xiaojun^{1, 2}, Jones Phillip², Lannon Simon²

Abstract : Taking an office building in Chongqing area as an example, the paper explored a systemic approach for building energy optimization through thermal simulation. Following the design procedure, such as data collection-design analysis-thermal simulation-design optimization-feasibility analysis, the approach informs concept design, detailed design, and the fit out stage. A total of 134400 simulation runs were done at the concept design stage to find out the most sensitive factors in relation to their influence to building energy optimization, which turned out to be internal heat gains, glazing G-value and glazing ratio, as well as to identify the best practical case among all. Based on that, the actual building (C7) was modeled to see its potential for energy saving at the detailed design stage and the fit out stage. Parameter settings of the design factors vary at different stages depending on their alterability. What's more, a sensitivity tool was developed to aid architects and policy-makers in decision-making at the early stage.

Keywords : Thermal simulation; Design optimization; Sensitivity.

¹ 天津大学建筑学院 (天津, 300072)

² 卡迪夫大学威尔士建筑学院 (英国卡迪夫, CF10 3NB)

1 概况

能源和环境问题的出现将节能减排提上了重要议程，作为占世界能源消耗总量 40% 的建筑能耗显示出了巨大的节能潜力^[1]。我国新建建筑的建设量逐年增长，预计到 2020 年将新增房屋建筑面积 300 亿平方米，建筑能耗将达 10.9 亿吨标准煤^[2]，进行建筑节能设计，刻不容缓。目前，建筑节能方面的研究很多，并且往往使用能耗模拟软件模拟和比较不同方案的能效性能，从而辅助设计决策与优化。尽管如此，大部分研究偏向于研究单一要素或某个设计阶段的节能潜力，并未考虑多项节能要素对建筑用能的综合影响、缺乏对设计的整体控制。鉴于此，本文以重庆地区某新建办公楼节能设计为例，探索一种基于能耗模拟技术的系统的节能设计决策与优化方法，以尽可能的提高建筑整体的节能效率。办公类建筑使用时间规律、人员在室率稳定、电器照明能耗大且分布均匀，设计和使用的不确定因素较少，可减少前期预测中主观因素的影响，便于综合调控、减少偏差。

本研究所用模拟工具为卡迪夫大学（Cardiff University）自主研发的能耗模拟软件 HTB2，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），结果可靠。

2 问题的提出

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，减少建筑能耗应同时考虑夏季遮阳与冬季保温设计。综合考虑地区气候条件，并结合地方设计实践，研究指出该地区可能适用的节能设计策略，涉及：

- a) 围护结构保温隔热性能；
- b) 外窗遮阳性能；
- c) 夏季及部分通风季节的强化夜间通风；
- d) 室内照明、电器和人员等产生的室内得热；
- e) 采暖与空调系统类型与能效；
- f) 太阳能利用；
- g) 外立面窗墙比；
- h) 建筑朝向。

其中 a)、b) 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热工环境的影响；c)、d)、e)、f) 项则关注建筑系统优化对建筑用能的影响，涉及自然通风系统、机电设备系统及可再生能源利用系统；最后两项是对建筑形式的考虑。

需要注意的是，上述策略对建筑用能的影响是综合的：如增加围护结构保温隔热性能尽管会降低冬季采暖能耗，也因阻碍夏季室内热量散发，导致制冷负荷的增加；设计外窗遮阳虽然减少了夏季不利得热，也不利于冬季阳光入射，从而导致建筑采暖负荷的增加；夏季室内得热增加往往会增加制冷负荷，而冬季室内得热增加则一般会减少采暖负荷；等等。因此，有必要寻求一种系统的节能设计方法，通过有效地利用和组合不同的节能设计策略以实现建筑能效性能的优化升级。

3 研究设计

研究遵循信息收集-设计分析-能耗模拟-设计优化-可行性分析的设计思路，涵盖概念设计、详细设计和装修设计多个阶段。

概念设计阶段的研究旨在辨析有效的节能设计策略，确定不同设计策略组合的优化方案。首先，收集资料，根据获得的建筑、气候及环境等各项信息开展设计分析，并创建简化模型，确定节能设计的基本条件与重要参数。研究确定的节能设计参数包括外墙传热系数（U 值）、外窗传热系数（U 值）、外窗太阳能得热系数（G 值）、窗墙比、室内得热、夜间通风和建筑朝向。其次，以标准模型为模板模拟建筑的能量需求。考虑到不同的参数组合（8 项外墙 U 值、5 项外窗 U 值、5 项外窗 G 值、3 项夜间通风换气率、4 项室内得热、7 项窗墙比、8 项朝向），研究共模拟了 134, 400 个方案。能耗模拟使用了卡迪夫大学的高速运算集群技术（Merlin），该技术可以同时模拟多例方案，从而大大的缩短了运算时间。最后，通过对模拟结果进行统计、分析和比较（灵敏度分析）明确了其中的主要节能参数，并且开发了可视化的模拟结果集成软件，以辅助具体项目的设计决策。

详细设计与装修设计阶段致力于应用与检验概念设计阶段辨识的节能设计参数。除了关注建筑的能量需求状况，它们还分析比较了不同设计方案的设备系统用能，并且综合考虑了各项节能策略的经济与技术可行性。由于详细设计与装修设计阶段的限制条件不同，建筑的综合节能潜力也各异，因此需要分阶段模拟和修正。

此外，概念设计阶段只涉及建筑的能量需求部分，详细设计和装修设计阶段还考虑了实际的系统和设备用能。建筑物使用终端的能量需求（采暖、制冷、风机、照明及其它用电设备）可经由能耗模拟进行预测，而系统和设备用能则可依据有关的能效系数（空调系统的 COP 和 EER 等）对能量需求进行换算得出。各阶段进行节能设计的一般工作方法如图 1 所示。

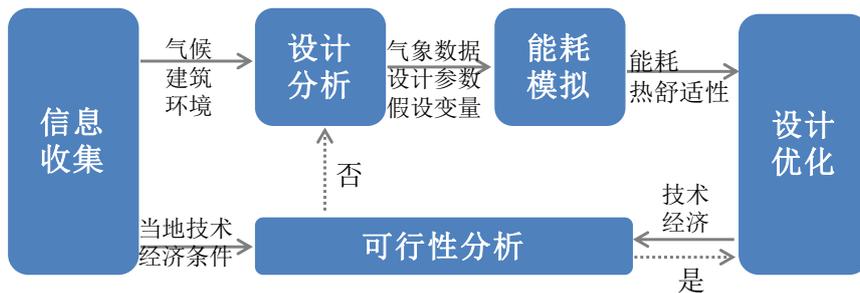


图 1 一般工作方法

本研究的数据主要来源于重庆科学研究院，并结合国家和地方的有关法规，即《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）。气象数据来源于 energyplus 的气象数据库。

4 设计条件

4.1 建筑实例与概念模型

研究根据我国一般办公建筑的设计特点，结合重庆科学技术研究院(CAST)提供的实例信息（如图2所示为C7号办公楼的标准层平面），抽象出一个理想化的概念模型平面，即围绕核心筒布置办公空间且分区简单对称的集中式布局方案（见图3），如此划分空间便于单独研究建筑朝向的节能潜力。概念设计阶段的能耗模拟只针对其中红色标识的标准单元模型，主要考察外墙U值、外窗U值、外窗G值、夜间通风次数、室内得热等设计参数对建筑用能的影响程度。详细设计与装修设计阶段对于建筑实例的能耗模拟，则将其中周边连通的大空间（见图2）按朝向进行了分区（见图4），以比较不同朝向分区的建筑用能。

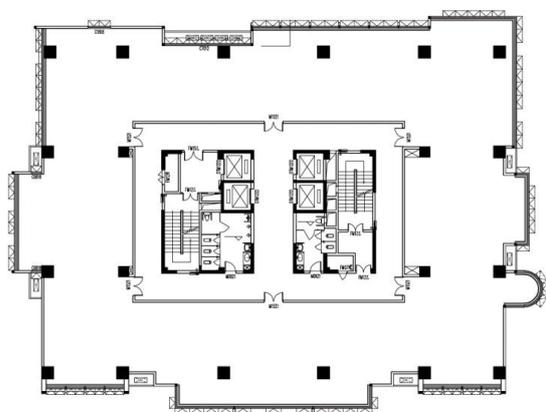


图2 C7号办公楼标准层平面

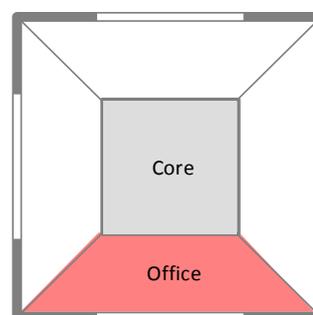


图3 抽象化后的概念模拟平面

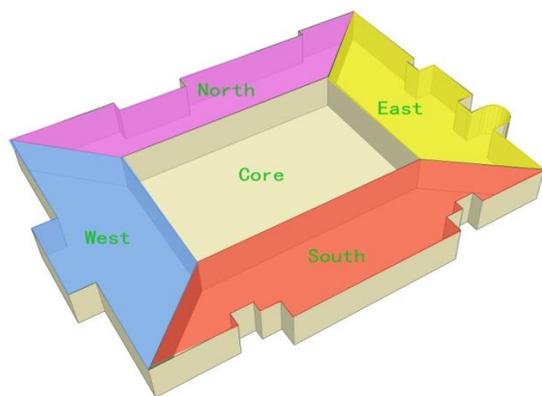


图4 C7号办公楼标准层平面分区示意模型

4.2 模拟条件

各阶段能耗模拟的室内设计条件依据《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。

本研究涉及的节能设计参数主要包括外墙传热系数（U值）、外窗传热系数（U值）、外窗的太阳得热系数（G值）、窗墙比、室内得热、夜间通风（夏季）、建筑朝向和HVAC

系统（见图 5）。研究根据有关规范法规，并参考地方建筑实践，确定了各设计参数的取值范围，同时设置了标准方案的设计参数取值（不含 HVAC 系统），如表 1 所示：

表 1：各节能设计参数的取值范围

外墙 U 值 (W/m ² .K)	2.4-2.0-1.7-1.3-1.0-0.6-0.3-0.15
外窗 U 值 (W/m ² .K)	5.4-3.5-2.5-2.0-1.5
外窗 G 值	0.8-0.6-0.4-0.2-0.1
窗墙比 (%)	80-70-60-50-40-30-20
室内得热 (W/m ²)	55-45-35-25
建筑朝向	南-西南-西-西北-北-东北-东-东南
夜间通风 (次/时)	0.5 (低) -2.0 (中) -6.0 (高)

附注：下划横线者为标准方案的参数值

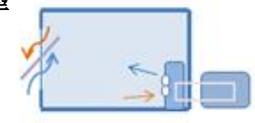
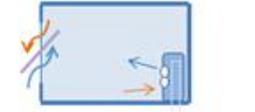
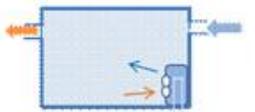
类型		EER	风机功率 (SPF)
1	 分体空调机&自然通风&独立电暖	2.5	
2	 分体空调机&机械通风&独立电暖	2.5	中央机械通风系统 1.8W/(l/s)
3	 全水系统 (水冷冷水机组&独立电暖) &自然通风	4	
4	 全水系统 (水冷冷水机组&独立电暖) &机械通风	4	中央机械通风系统 1.8W/(l/s)
5	 全空气系统 (水冷冷水机组&独立电暖)	4	中央机械通风系统 1.8W/(l/s)

图 5 办公楼常用的 HVAC 系统简化模型

需要注意的是，受设计条件变更的影响，某些概念设计阶段可变的参数在详细设计和装修设计阶段并不可变（见图 6），建筑可预测的综合节能潜力可能发生变化，因此有必要分阶段进行研究和探讨。

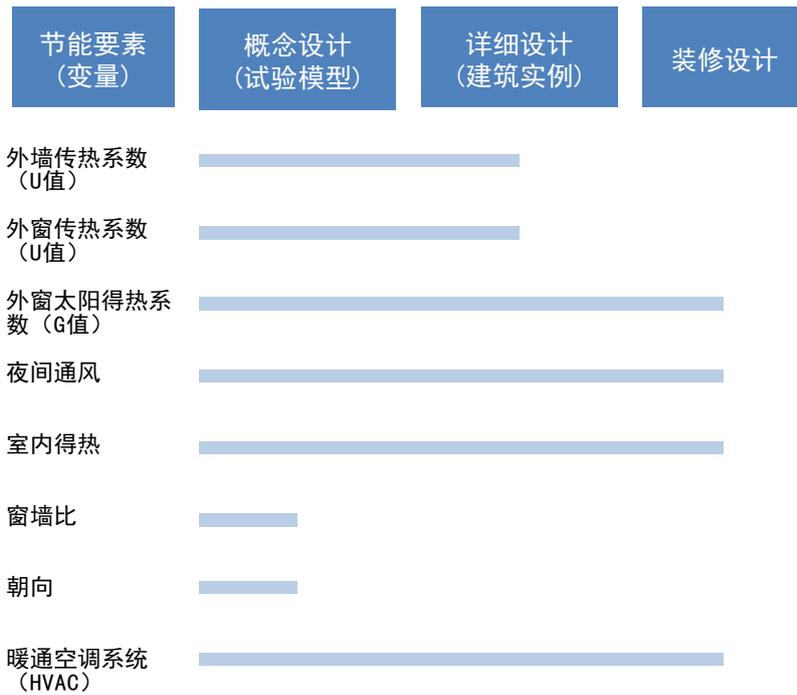


图 6 各主要节能设计参数的可变性分析

本研究所用模拟软件为卡迪夫大学建筑学院自主研发的能耗模拟软件 HTB2，这是一款软件套装，用于模拟和预测建筑的能耗和环境性能，已经在世界范围内广泛使用。

5 模拟结果的分析 and 讨论

5.1 概念设计阶段

概念设计阶段一共模拟了 134,400 例方案，对模拟结果（主要是全年的冷热负荷）进行统计分析可以确定不同设计参数的节能潜力，如图 7 所示的灵敏度分析蛛网图。其中，蓝色覆盖的轴断表示对应参数可变范围内的平均能耗水平。由图 7 可知，外窗 G 值、窗墙比和室内得热的节能潜力最大，其它参数如维护结构传热系数、朝向和夜间通风等因素对建筑用能的影响并不明显。此外，研究还筛选出其中用能最低的方案，并经由合理性分析确定当前设计条件下的最佳适宜方案，其设计参数取值见表 2。

灵敏度分析 - 变量总览

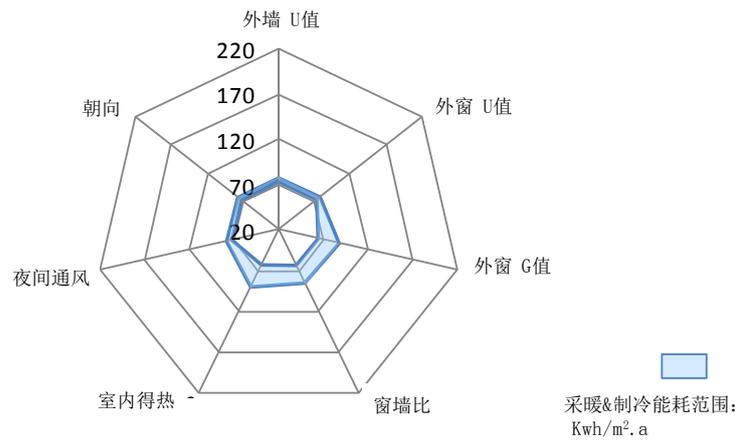


图 7 不同设计要素的灵敏度分析蛛网图

参数	取值	参数	取值	参数	取值
外墙 U 值	0.6W/m ² .K	窗墙比	50%	夜间通风	2.0 次/时
外窗 U 值	2.0W/m ² .K	室内得热	25W/m ²		
外窗 G 值	0.4	建筑朝向	南		

方案	全年总计 (采暖、制冷、照明和其它用电设备)	节能效率
标准方案 (kwh/m ² . a)	177.9	0.0%
最节能方案 (kwh/m ² . a)	83.3	53.2%
最佳适宜方案 (kwh/m ² . a)	100.6	43.4%

标准方案、最节能方案和最佳适宜方案的能量需求状况 (采暖、制冷、照明及其它用电设备) 如表 3 所示。与标准方案相比, 最佳适宜方案可节能 43.4%, 节能效果明显。

5.2 详细设计阶段

基于概念设计阶段的研究发现, 详细设计阶段对 C7 号办公楼的标准方案和最佳适宜方案进行了模拟。需要注意的是, 在详细设计阶段, 建筑的朝向和窗墙比已由实际方案给定, 因而不可变, 其它变量的取值则同表 1 和表 2。两方案的能量需求状况比较如图 8 和 9 所示。

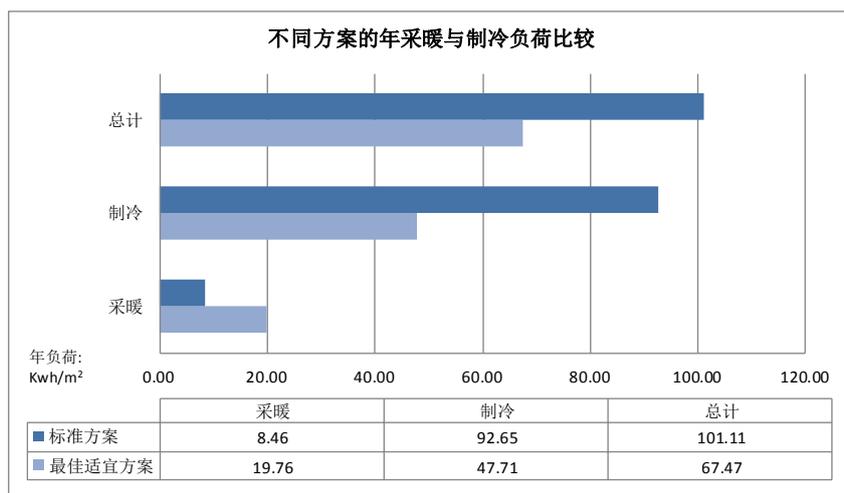


图 8 C7 号办公楼不同方案的年采暖和制冷负荷比较

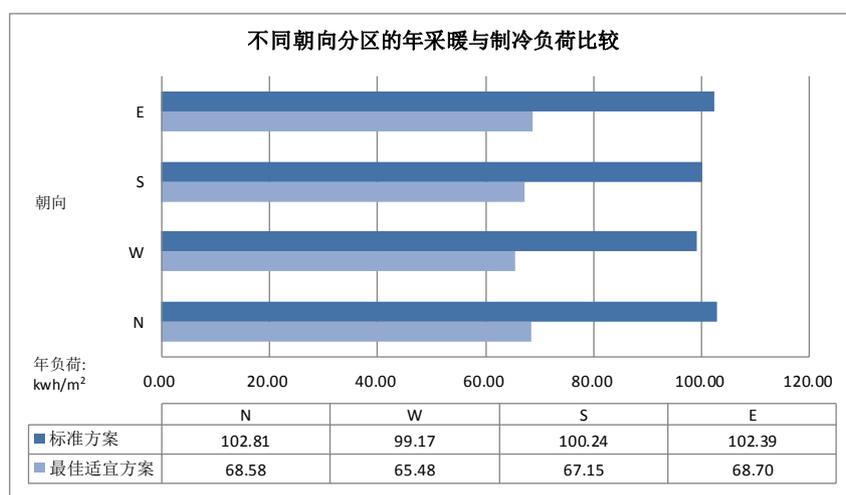


图 9 C7 号建筑各朝向分区（见图 4）的年采暖和制冷负荷比较

由图 8 可知，节能设计后，C7 号办公楼可降低年采暖与制冷负荷 33.3%。图 9 所示的不同朝向分区的采暖和制冷负荷相差不大，可见其受朝向的影响并不大，与概念设计阶段的研究发现一致。此外，若考虑照明和其它用电设备的能耗，该办公楼节能设计后可降低能量需求 36.9%，减少总的设备系统用能 31.1%（以全空气系统为例，即图 5 第 5 类），见表 4。

表 4 详细设计阶段，C7 号办公楼不同设计方案的能量需求与设备系统的用电量

	能量需求 (kwh/m ² ·a)	设备系统用电 (kwh/m ² ·a)
标准方案	102.81	102.39
最佳适宜方案	68.58	68.70

	采暖与制冷	照明与其它用电设备	总需求	暖通空调系统	照明与其它用电设备	总用能
标准方案	101.1	78.3	179.4	48.9	78.3	127.2
最佳适宜方案	67.5	45.7	113.2	41.9	45.7	87.6
节能效率	33.3%	41.6%	36.9%	14.2%	41.6%	31.1%

附注：节能效率是将最佳适宜方案与标准方案作比减少的能量需求或实际用电。

5.3 装修设计阶段

同样基于概念设计阶段的研究发现，装修设计阶段进一步研究和修正了其节能潜力。但是，与详细设计阶段不同的是，在装修阶段，建筑已建成，除建筑的朝向和窗墙比外，其外墙和外窗的传热系数也不可变。这里假定它们都保持标准方案的取值不变，而其它设计要素（外窗遮阳系数、夜间通风和室内得热）的取值则同表 1 和表 2。模拟和分析的结果如图 10 和 11 所示。

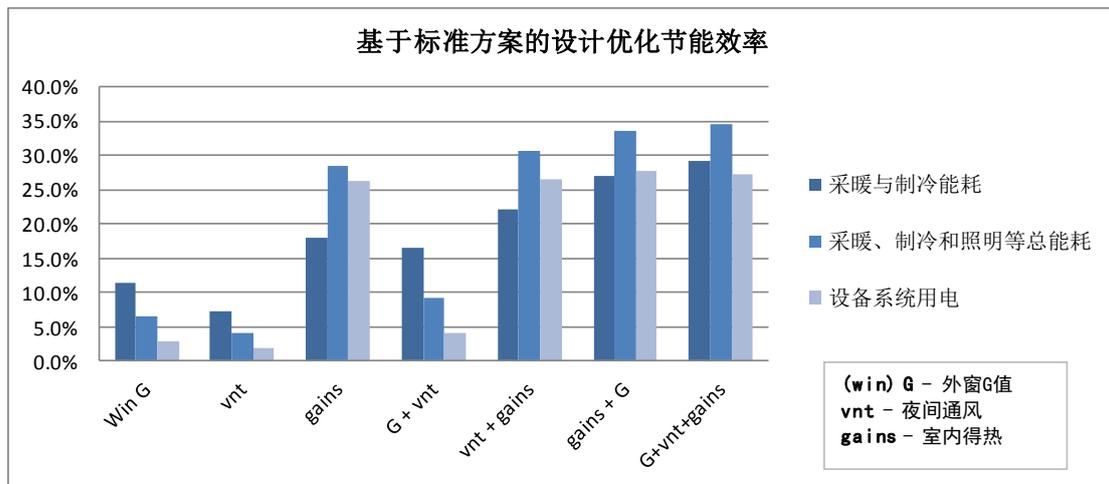


图 10 C7 号办公楼采用不同的节能设计可达到的节能效率（与标准方案相比）

图 10 所示为 C7 号办公楼标准方案采用不同节能设计策略可实现的节能效率。其中，对单项节能要素的设计优化中，降低室内得热至少可降低能量需求 28%，降低系统和设备用电（以全空气系统为例）26%，节能效果最明显；对多项节能要素的设计优化中，三项要素全部达到最佳适宜方案的取值，可节约总能量需求 34.6%，对能量需求的节能效率最高；若仅室内得热与外窗遮阳系数达到最佳适宜方案取值，可节约设备系统用能 28%，对设备系统用能的节能效率最高。

此外，研究还比较了该建筑采用不同的空调系统所消耗的系统和设备用能，图 11 所示，为最佳适宜方案与标准方案相比的节能效率，其中综合考虑了不同空调系统的能效性能。

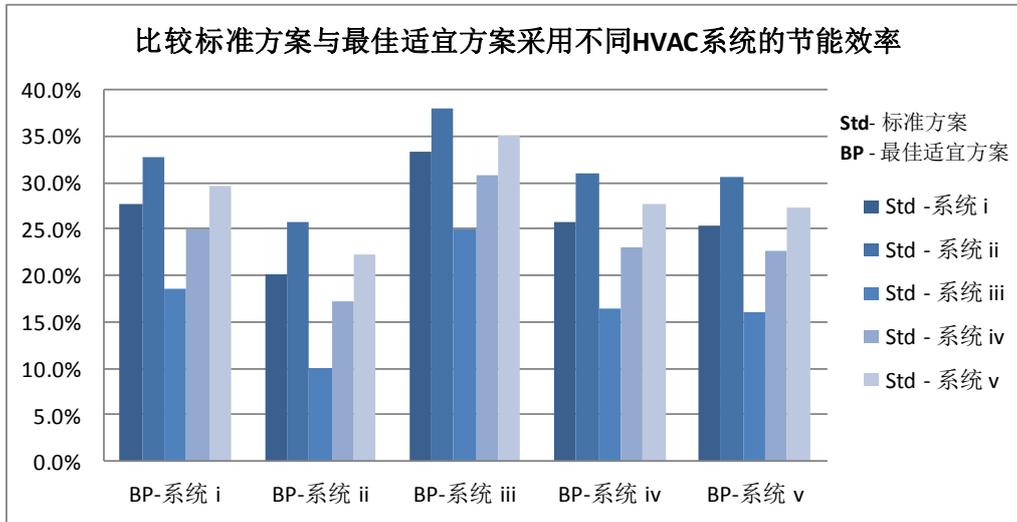


图 11 C7 号办公楼采用不同暖通空调系统的节能效率（系统和设备用能）

由上图可知，总的来说，III 号系统（全水的风机盘管系统和自然通风）的系统和设备用能最低，节能效率可达 38%。

此外，基于上面的模拟结果，并考虑当时当地的技术经济条件，表 5 归纳总结了装修设计阶段各设计变量的节能设计策略和可行性建议。

设计变量	节能设计策略	可行性建议
外墙 G 值 (太阳得热系数)	安装低辐射或低透射率玻璃，或者使用带百叶的双层玻璃；添加遮阳百叶。	有一定的节能潜力，可减少能量需求 6.4% ，降低系统和设备用能（以全空气系统为例） 3.0% ， 前期投资较大 。
夜间通风	调整通风模式，加强夏季和通风季节的夜间通风。	有一定的节能潜力，可减少能量需求 4.1% ，降低系统和设备用能（以全空气系统为例） 1.9% ， 不需要前期投资 。
室内得热	降低人员、设备和照明密度，使用绿色产品，如 LED 灯；有效地控制照明与其它办公设备的运行和使用，如智能开关。	有相当大的节能潜力，可减少能量需求 29.7% ，降低系统和设备用能（以全空气系统为例） 27.4% ，但 需要一定的前期投资 。
暖通空调系统 (HVAC)	使用热回收系统，提高系统效率如 COP 和 EER。由上面的研究可知，该建筑采用全水的风机盘管系统和自然通风（5 号 HVAC 系统方案）的节能效果最	长期来看，有很好的节能潜力，可降低系统和设备用能 17.5% ， 前期投资相当大 。

好。

6 成果输出——灵敏度工具

基于概念设计阶段的模拟结果，研究首先开发了集成模拟结果的设计平台，即灵敏度工具，它可以直观显示所有方案的设计变量取值及不同变量组合方案的用能状况，从而为具体项目的节能设计决策提供指导。灵敏度工具的用户界面如图 12 所示，它除了包含概念设计阶段的节能设计参数，还提供了更多的参数选项，如 HVAC 系统和可再生能源利用（主要是太阳能光伏）。软件操作办法是通过移动图示的蓝色滑块来变化参数取值，从而获得不同的节能设计方案。显示的模拟结果除了全年的冷热负荷和相关电耗，还包括描述冷热负荷逐月变化的柱状图表，可帮助了解全年的具体用能变化。

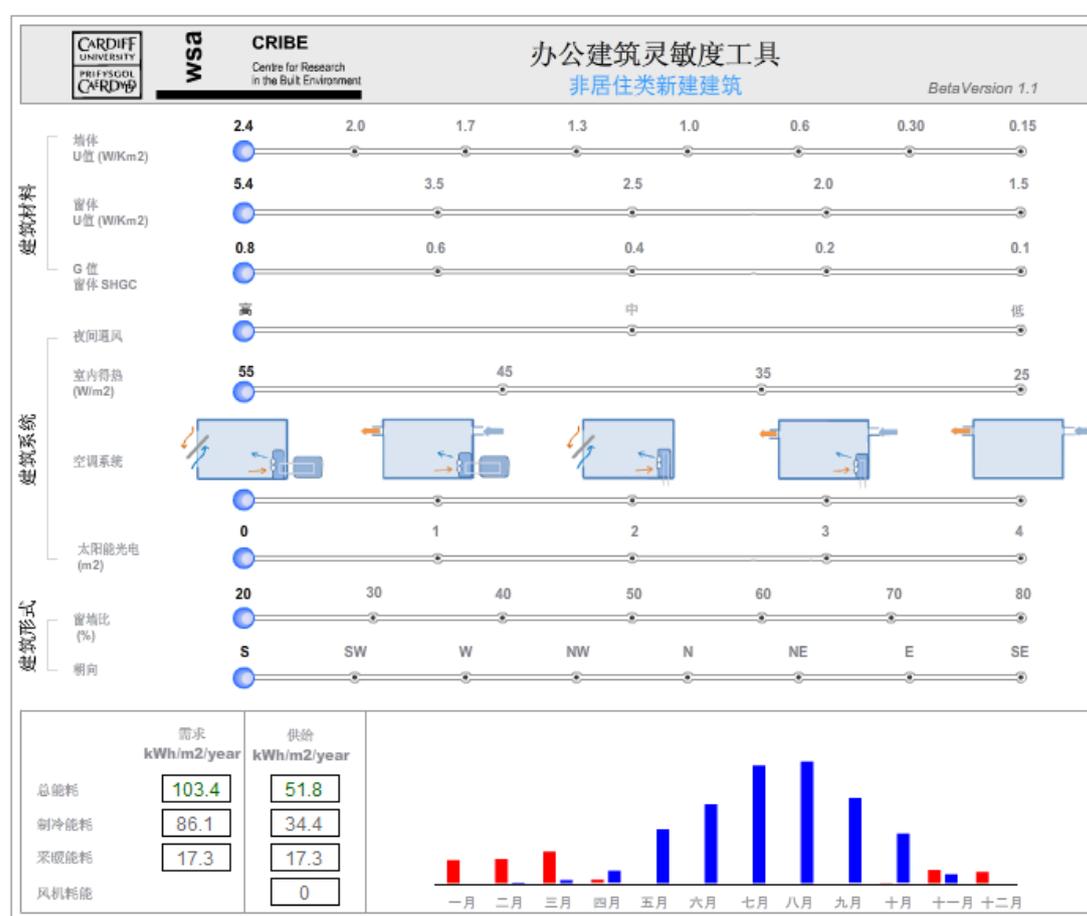


图 12 灵敏度工具的操作界面

7 结论

以重庆某办公建筑的节能设计为例，本研究探索了一种基于能耗模拟技术的系统化的能效优化设计方法。该方法按照信息收集-设计分析-能耗模拟-设计优化-可行性分析的设

计思路，涵盖概念设计-详细设计-装修设计各个阶段，模拟预测了建筑总的能量需求（采暖、制冷、照明与其它用能设备），以及相应的系统和设备用能。研究发现外窗太阳得热系数、窗墙比和室内得热的节能潜力最大。模拟结果表明，概念设计阶段可减少采暖、制冷、照明等能量需求 43.4%，详细设计阶段可减少总能量需求 36.9%、降低设备系统用电 31.1%，装修设计阶段可减少总能量需求 34.6%、降低设备系统用电 38%。

此外，由于概念设计阶段综合考虑了各节能设计参数的可变性，其灵敏度（即其对建筑能耗的影响程度）分析更趋于系统全面，衍生出的灵敏度工具新颖独特、简单直观、可操作性强，可有效的辅助初期设计决策，为该地区同类建筑的节能设计与改造提供参考。

尽管如此，本研究还存在诸多局限，如未考虑经济性能（如节能投资、能源价格等）、使用者行为、智能控制等因素。笔者希望在下一步研究中能够解答这些问题，也希望拓展与系统化节能设计相关的主题，如研究不同地区不同类型建筑的系统化节能设计，或涉及建筑碳排放、隐含能耗、投资回报等方面的内容。

参考文献:

- [1] World Business Council for Sustainable Development. Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings[M]. Switzerland: Atar Roto Presse SA. August 2009: 1.
- [2] 肖坚. 促进节能减排的税收政策思考[J]. 新疆财经. 2007(5): 63-67.

图片来源:

- 图 1、图 3-12: 作者绘制
- 图 2: 重庆科学技术研究院 (CAST) 提供

图片名称:

- 图 1: 一般工作方法
- 图 2: C7 号办公楼标准层平面
- 图 3: 抽象化后的概念模拟平面
- 图 4: C7 号办公楼标准层平面分区示意模型
- 图 5: 办公楼常用的 HVAC 系统简化模型
- 图 6: 各主要节能设计参数的可变性分析
- 图 7: 不同设计要素的灵敏度分析蛛网图

图 8: C7 号办公楼不同方案的年采暖和制冷负荷比较

图 9: C7 号建筑各朝向分区 (见图 4) 的年采暖和制冷负荷比较

图 10: C7 号办公楼采用不同的节能设计可达到的节能效率 (与标准方案相比)

图 11: C7 号办公楼采用不同暖通空调系统的节能效率 (系统和设备用能)

图 12: 灵敏度工具的操作界面