同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

（专业学位）

办公建筑能效评估及节能改造效益快速估算方法

姓　　名：秦冰月

学　　号：1432539

所在院系：机械与能源工程学院

职业类型：工程

专业领域：动力工程

指导教师：潘毅群 教授

二〇一七年三月

同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master

Energy Performance Evaluation and Quick Cost Effectiveness Assessment of ECMs for Office Buildings

Candidate: Bingyue Qin

Student Number: 1432539

School/Department: School of Mechanical Engineering

Discipline: Engineering

Major: Power Engineering

Supervisor: Prof. Yiqun Pan

March, 2017

办公建筑能效评估及节能改造效益快速估算方法

秦冰月　　同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年　　月　　日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年　　月　　日

摘要

对高能耗建筑进行节能改造是降低建筑能耗水平，提高用能系统能源利用效率的有效途径。在节能改造项目决策阶段，对节能措施可能达到的节能效果进行估算，目前国内常用的节能量的估算方法——标准计算法和软件模拟法都各有局限。标准计算法操作简单但准确度不高，且只能计算单一节能措施的节能潜力，未考虑各措施之间的相互影响。软件模拟法虽可以计算各措施对能耗的综合作用，但需详细建模，对操作人员有相当的专业知识要求，非专业人士无法自行操作。因此本文提出一种既考虑改造措施相互影响又无需详细建模的快速节能量估算方法，可快速估算建筑节能改造项目的节能量、改造成本及投资回收期。

本文采用预先模拟数据库法建立适用于夏热冬冷地区办公建筑的节能改造措施与建筑能耗数据库，并基于数据库应用数据驱动法建立节能改造快速估算模型。首先利用 eQUEST 软件建立典型办公建筑模型，提出“H/S——建筑形状系数”概念，与总建筑面积一起作为代表建筑形状和尺寸的参数，模拟分析建筑形状/尺寸对单位面积建筑能耗（EUI, Energy Use Intensity）的影响，并利用多元回归分析法得到“建筑形状/尺寸—EUI”关系。此关系式用于修正采用典型模型计算实际建筑基准能耗时因建筑形状/尺寸不同而引起的能耗偏差。

采用典型办公建筑模型，模拟计算夏热冬冷地区常用的 13 种节能改造措施的节能量，包括 3 种围护结构改造措施、2 种照明系统改造措施、7 种空调水系统改造措施、1 种空调风系统改造措施。同时考虑各个节能措施之间的相互影响，采用回归分析方法得到 “单项节能措施参数—能耗”和“多项节能措施参数—能耗”拟合算法，用于快速估算单项措施及多项措施的建筑能耗与综合节能量。

采用净现值和动态投资回收期，进行节能改造项目经济效益估算。结合节能量算法，开发节能量及经济效益快速估算工具。利用上海地区实际改造建筑数据验证估算方法的准确性。该工具适用于节能改造方案初步筛选阶段，并为业主等无建模经验人员分析节能改造提供可操作性。本文提出的节能量快速估算方法弥补了国内学者对此研究的空缺，为建立适用于我国气候区及用能形式的节能改造快速估算工具提供可靠的技术支持。

关键词：办公建筑，节能量估算，预先模拟数据库，节能措施相互影响，成本经济

ABSTRACT

Energy retrofit of high-energy buildings can significantly reduce the building energy use and improve energy efficiency. In the retrofit strategies-making stage, current domestic approaches to assessing energy effecitive of ECMs (Energy Conservation Measures) include normative calculations method and physics-based energy modeling method. Although initially inexpensive and simple, normative approach lacks accuracy, resulting in retrofit strategies for isolated measures without consideration of interactive effects between measures. Modeling method can calculate the comprehensive effect of the measures, but requires the professional experience to conduct detailed model. Therefore, this thesis, considering the interaction of ECMs packages and without geometry modeling, proposes a quick method to assessing the building energy-saving, the retrofit costs and payback period of office buildings.

Using the pre-simulated database method, this thesis establishes the building energy efficiency performance database for the building in hot-summer-and-cold-winter area in China. Based on the database, we research the quick retrofit calculations using data-driven method. Firstly, we propose the concept of "H/S - building shape factor" as a representative parameter of the shape and size of the building and then establish the typical building models using eQUEST software. We simulate the energy consumption and conduct the multiple regression analysis to get the "building size - EUI"algorithm relationship. This relationship is used to correct the energy deviation from the building size when using the typical model to calculate the energy-saving of the actual building.

We research 13 kinds of ECMs for retrofit analysis, including envelope (3 kinds), lighting system (2 kinds), water-side HVAC system (7 kinds), air-side HVAC system (1 kind), and combinations of interacting measures. The regression algorithm of "individual ECMs—energy"and"packages of ECMs—energy"are used to assess the comprehensive energy saving effect.

The net present value and the dynamic payback period are used to analyze the retrofit economic benefit. Combined with the regression algorithm, the quick retrofit assessment tool is developed for preliminary screening retrofit strateges.The tool provides a platform for estimating energy savings and financial payback for the owners and the people without modeling experience.This rapid energy saving algorithm makes up for the vacancy of domestic research, and provides reliable technical support for the

energy assessment of buldings in China.

Key Words: office buildings, energy-saving assessment, pre-simulated database, interactive effects of ECMs, cost benefit

目录

摘要.....I
第 1 章 绪论.....1
1.1 课题背景.....1
1.2 国内外研究现状.....2
1.2.1 建筑能效评估方法.....2
1.2.2 建筑节能量估算方法.....4
1.2.3 节能改造经济效益评价方法.....11
1.3 研究目的与意义.....12
1.4 研究内容及技术路线.....13
1.4.1 研究内容.....13
1.4.2 技术路线.....14
第 2 章 典型建筑模型的建立.....16
2.1 研究方法.....16
2.1.1 能耗模拟.....16
2.1.2 多元逐步回归分析.....17
2.2 典型建筑模型的建立.....17
2.3 建筑形状/尺寸与能耗算法研究.....20
2.3.1 建筑形状/尺寸参数的选择.....20
2.3.2 建立建筑形状/尺寸与能耗算法.....21
2.4 模型验证.....24
2.5 节能效果对比.....25
2.6 本章小结.....26
第 3 章 单项节能改造措施与能耗算法研究.....28
3.1 围护结构.....28
3.1.1 加装外墙保温材料.....28
3.1.2 更换高性能窗户.....30
3.1.3 加装外遮阳装置.....33
3.2 照明系统.....36
3.2.1 更换高效节能灯.....36
3.2.2 自然采光控制系统.....38
3.3 空调水系统.....42
3.3.1 更换高效锅炉.....42
3.3.2 更换冷凝锅炉.....43

3.3.3 热水锅炉换热泵.....43
3.3.4 更换高效冷水机组.....45
3.3.5 水泵变频.....46
3.3.6 水泵采用高效电机：.....47
3.3.7 冷却塔风机变频.....48
3.4 空调风系统.....49
3.4.1 采用排风热回收系统.....49
3.16 本章小结.....51
第 4 章 多项节能改造措施与能耗算法研究.....53
4.1 相互影响的节能改造措施确定.....53
4.1.1 理论分析.....53
4.1.2 模拟分析.....55
4.2 研究方法.....58
4.3 试验设计.....59
4.4 两项节能改造措施快速估算模型.....60
4.4.1 组合一：“锅炉效率与外窗传热系数—能耗”算法研究.....60
4.4.2 组合二：“锅炉效率与遮阳系数—能耗”算法研究.....61
4.4.3 组合三：“锅炉效率与照明功率密度—能耗”算法的研究.....62
4.4.4 组合四：“冷机性能系数与照明功率密度—能耗”算法的研究..63
4.4.5 组合五：“冷机性能系数与遮阳系数—能耗”算法研究.....64
4.4.6 组合六：“热泵性能系数与照明功率密度—能耗”算法的研究..65
4.4.7 组合七：“热泵性能系数与外窗传热系数—能耗”算法研究.....66
4.5 多项节能改造措施快速估算模型.....67
4.5.1 组合八：“自然采光控制、遮阳系数与照明功率密度—能耗”算法研究.....67
4.5.2 组合九：“窗传热系数、遮阳系数、照明功率密度与锅炉效率（或冷机性能系数或热泵性能系数）—能耗算法”研究.....68
4.6 本章小结.....71
第 5 章 节能量及经济效益快速估算软件的开发与设计.....72
5.1 节能量估算方法.....72
5.2 节能改造经济效益估算模型.....73
5.3 软件开发语言和开发环境简介.....74
5.4 软件设计和运行流程.....75
5.4.1 软件基本框架.....75
5.4.2 软件编程流程.....76
5.5 节能量算法的实例验证.....79

5.5.1 建筑能效评估.....79
5.5.2 节能量算法验证过程及结果.....79
5.6 本章小结.....82
第 6 章 总结与展望.....83
6.1 总结.....83
6.2 不足与展望.....85
致谢.....86
参考文献.....87
附录 A 能耗算法.....90
附录 B 部分编程代码.....93
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....96

第 1 章 绪论

1.1 课题背景

能源是国家发展和社会进步的动力，是人类赖以生存的基础和保障，能源问题是当今世界面临的主要问题之一。在我国，建筑能耗占社会总能源消耗的 20%左右，并且随着人们对室内环境品质需求提高，这一占比将持续上升，如果不采取措施加以控制，将会给我国能源供应、环境保护带来很大压力。

对高能耗建筑进行节能改造是降低建筑能耗水平，提高建筑用能系统能源利用效率的有效途径。在“十二五”期间，财政部、住建部启动一批公共建筑节能改造重点城市示范项目，积极推进高能耗建筑和重点用能建筑节能改造，对围护结构、用能系统等进行单项或多项改造，改造后单位建筑面积实际能耗下降 20%（含）以上的项目，会给予政策性补助[1-5]。节能改造项目一般涉及方案决策阶段、工程施工阶段和节能核验阶段。实际工程中往往在方案决策阶段对节能量预估偏高，而造成在改造完成后进行审核验收时达不到预期节能效果，投资回收期过长，或无法获得政府补贴。因此在节能改造决策阶段，对节能改造措施可能达到的节能量进行准确合理的预估尤为重要[6]。

目前常用的节能量的估算方法有标准计算法和软件模拟法[7]。标准计算法是对节能潜力较大的措施进行基于物理原理的工程算法来估算建筑或设备能耗，包括典型日、逐月或年能耗。通常建立在对用能建筑的能源审计基础上，包括主要的建筑信息、供热系统、空调系统、照明系统、用水系统、以及其他用能系统的能源利用效率、消耗水平、能源经济。标准计算法计算比较简单但凭经验准确度不高，且只能计算单一节能措施的节能潜力[8]。然而实际工程往往是同时采用多种节能措施进行改造，且措施之间如有相互作用，会影响最终能耗大小，并非单项措施及节能量的简单叠加，这一情况标准计算法并未考虑。

软件模拟法通过对建筑几何、围护结构、供热空调等系统搭建理想模型，通过输入建筑及用能系统相关数据，模拟改造前的建筑能耗。对模型进行校验后，这一理想模型可看做接近实际建筑用能水平的建筑基准模型。在基准模型基础上添加节能措施，模拟得到改造后的建筑用能情况，改造前后能耗相差作为改造节能量。通常采用的能耗模拟软件很多，如由美国能源部（Department of Energy, DOE）和美国劳伦斯．伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）共同开发的 EnergyPlus、由美国 Wisconsin-Madison 大学的太阳能实验室

开发的 TRNSYS、清华大学开发的 DeST 等，这些软件可以得到逐年、逐月甚至逐时的能耗结果，得到的能耗可以是整个建筑、也可以是分项的照明、空调能耗等，而且还可以得出建筑中任一区域的用能情况，方便节能改造的分析。以上结果是利用标准计算法无法得到的，是模拟软件计算的优势，但是模拟软件计算法需对建筑进行详细的建模[9]，通常需要 1-3 个星期，若建筑和系统复杂，耗时更大。而且模拟软件对建模能力有要求，通常如业主等非专业人士无法自行操作。

综上所述，标准计算法计算简单，但准确度不高，未能考虑措施之间相互影响的能耗结果，而软件模拟法虽考虑措施间相互影响，但建模过程复杂繁琐，需有一定专业背景和建模能力的人员操作完成。模型只针对一栋特定建筑，分析其他建筑就需重新建模。有时由于可获得的建筑数据有限，对模型校验工作量较大。

因此本文针对节能改造决策阶段，从无建模经验的人员角度出发，探寻一种既考虑改造措施之间相互影响又无需建模的快速节能量估算方法，为既有建筑实现快速节能改造方案决策提供可能。实施节能改造提供可能。

1.2 国内外研究现状

对高能耗的既有建筑进行节能改造是在保证可接受的成本及经济回报期的前提下，通过采取多种节能技术或更换高能效用能设备，从而达到提高建筑用能效率、减少能源浪费、节省能源费用的目的。

首先需详细掌握高能耗建筑用能情况，可帮助锁定能耗较高、能效较低的用能设备、采暖空调及其控制系统，结合能耗计算方法以及经济、环境分析确定节能方案。具体可分为以下步骤：①能源审计，②能效评估，③节能量预测，④经济、能效、环境分析，⑤节能方案确定。

本文对节能改造方案决策阶段涉及到的能效评估、节能量预测方法和节能改造经济性分析三方面进行文献综述。

1.2.1 建筑能效评估方法

建筑能效评估，对既有建筑物当前能源消耗量及其用能系统能源利用效率进行评估，帮助管理者了解建筑运行情况，激励建筑所有者采取相应改造措施，提高能效。能效评估可以是单栋建筑在不同条件下的自身比较，用于节能改造项目中建筑节能量的计算；也可以用于同类建筑之间的横向比较，以此衡量建筑用能所处的水平。国外对建筑能效评估相关的能耗基准定义包括基准线（Baseline）和能耗基准评价（Benchmarking）两种，其中基准线倾向于一种标准化的水平，

一种假设的情景，一般是指单栋建筑不同条件下的自身比较，而能耗基准评价侧重于建筑的实际能耗水平，是与同类型建筑的横向比较[10]。

建筑能效评估的方法可以分为三类：指标法，统计回归模型法和模拟法。前两个方法是利用大量实测能耗数据，建立统计模型和能效指标；模拟法是通过模拟能耗数据，对比实测能耗评价建筑能效[11]。

（一）指标法

指标法[12]是通过划分一个统一度量参数，对类型相同但规模不同的建筑进行能效评价。度量参数的获得基于简单归一化模型，即用服务量（如建筑面积、使用人数等）对建筑全年能耗量（或碳排放量）进行归一化处理，如单位建筑面积的年能耗量，EUI（Energy Use Intensity）（最为常用）；单位人员的平均年能耗量（用于机关办公楼能效评价）；每个床位平均年能耗量（用于宾馆建筑）等。选取既有公共建筑能耗数据库中，建筑的平均能耗水平作为既有建筑的参考用能指标，是较为常用的一种评价方法。我国各省市由于气候及用能习惯等诸多方面不同，各地方规定的能耗指标亦不相同，以商业办公为例，参照《商业建筑合理用能指南》[13]，如下表所示：

表 1.1 各地方能耗指标

建筑类型	省市	指标折算	指标值
商业办公建筑	国家	折合等效电	约束值：110 kWh/(m²・a) 引导值：80 kWh/(m²・a)
	上海	折合标准 折标系数： 0.3kgce/kWh	合理值： 集中空调≤47kgce/(m²・a)； 半集中、分散式空调≤36kgce/(m²・a)； 先进值： 集中空调≤33kgce/(m²・a)； 半集中、分散式空调≤25kgce/(m²・a)；
	深圳	折合等效电	120kWh/(m²・a)

利用指标法进行能效评估操作简单，对数据要求不高，只需能耗和相关参数的数据即可。在评价精度上，依赖于相关定额的设定和阈值的选择。

（二）统计回归模型法

统计回归模型法是利用现有的能耗数据库，从影响建筑能耗的众多因素中选取较为重要的纳入模型进行多元回归，得到特定类型建筑的能耗回归方程。针对

待评价建筑，选择对应建筑类型的能耗回归方程，得到参考建筑能耗，与实际建筑能耗对比，进行能效评价。

Prototype research 工具[14-15]是由美国劳伦斯．伯克利实验室（LBNL）运用统计回归模拟法开发的。该工具以直方图的形式表现出来，X 轴表示能耗指标 EUI，Y 轴表示同类建筑在各能耗指标下所占的百分比。该工具可分析待评价建筑与相似尺寸的同类建筑的能耗差异，并对其能耗情况进行评价。

Energy Star 美国能源之星[16]是一种在线能效评估工具，基于能耗数据库建立不同类型建筑的多元回归线性能耗模型。通过输入的建筑面积、运行时间、逐月能耗等数据，利用回归模型得出待评价建筑能耗，并与数据库中该类建筑的所有能耗数据进行横向比较，按照 1-100 分划分等级，得分越高，表明该建筑能效水平越高。

采用统计回归模型法计算参考建筑能耗属于灰箱法[17]，即不完全依赖物理规则，而以数据驱动为主要方法，并辅以理论指导，得到参考建筑能耗。该方法只有建立在大数据集上才能产生相对合理的结果。

（三） 模拟法

模拟法是利用能耗模拟软件求得参考建筑能耗，并与实测能耗（或模拟的设计能耗）比较，对建筑进行能效评价。模拟软件法属于白箱法，即严格按照物理规则，将能耗的所有影响因素作为输入参数，计算此条件下应产生的能耗量[18]。该方法的准确度取决于输入参数的详细和真实程度。一方面对气象参数、建筑基本参数以及运行策略等信息要求较高，如围护结构基本参数未必详细，采用建造年代下的平均值又会造成偏差。另一方面，建模过程中的主观性也会影响其准确度，如在输入一些没有标准限定的未知参数时，不同的设定得到的结果差距会很大。另外，模型的校验工作也比较繁琐[18]。

1.2.2 建筑节能量估算方法

通过文献调研，总结建筑节能量估算方法主要包含（1）软件模拟法（2）预先模拟数据库法（3）数据驱动的统计模型法（4）标准计算法等。

1.2.2.1 软件模拟法

软件模拟法是利用能耗模拟软件，对改造建筑建立能耗模型，添加节能改造措施，计算改造前后能耗，以此计算节能量。常用的能耗模拟软件有 EnergyPlus、eQUEST、DeST 等如图所示。在利于软件模拟分析节能效果时，如何建立基准模型很关键[20]。通常建立基准模型有两种方法，第一种是针对用能建筑建立模型，建立模型所需的几何尺寸、建筑围护结构、照明、设备、空调系统参数全部取自

用能建筑数据，并通过校验以使模型更接近实际情况。这种方法可以随时修改建筑及系统参数，但只针对某一栋特定建筑，分析其他建筑需重新建模。建模需几个星期完成，且需有建模能力的人员操作完成。另一种是基于标准和大量统计数据的典型建筑模型，可对特定类型的建筑提供节能改造方案建议。但这种情况只着眼于大致节能效果，无法将节能量的具体数值套用在同一类型的所有建筑中。

图 1.1 常用能耗模拟软件

罗静[21]分析了适合西安地区的既有建筑的围护结构节能改造措施，利用 DeST 软件模拟对不同改造方案及保温层厚度对建筑节能效果的影响，并对最佳经济保温层厚度进行计算，分析了改造方案的经济效益。

Huang 等[22]利用美国能源部提供的数据，借助 DOE-2 软件建立典型商业建筑模型用来评估美国主要城市热电联产的潜力。根据建筑规模、几何形状、设备、使用强度、运行条件等特征建立了 481 个典型建筑模型（13 个城市 37 类建筑），基于模拟结果评估美国在降低建筑用能方面存在的节能潜力，以指导美国能源部确立研究和市场方向。

胡俊文[23]等人利用 eQUEST 软件对夏热冬冷地区办公建筑进行节能设计方案评估，探讨包括节能复合墙体、节能玻璃、外遮阳、采光自动控制系统等节能设计方案对办公建筑各项能耗的影响，并优化建筑朝向、窗墙比以选择最优节能方案。

Joe Huang[24]等利用 DOE2.1 软件对上海市长宁区近零能耗建筑进行节能潜力分析，通过建立办公、宾馆、商场三种典型建筑能耗模型，分析确定了节能措施和新能源应用方案的可行性，通过全生命周期经济性分析，确定可行措施的综合节能量和投资回收期。认为办公建筑的综合节能量为 30-40%，宾馆建筑为 43-46%，商场建筑为 35%。

张明[25]等利用 EnergyPlus 软件建立正三角形、正方形、正六边形、圆形平面形状的塔式办公建筑模型，以夏热冬暖地区为气象条件，在建筑面积、围护结构

热工性能及内部热扰均相同的情况下模拟全年能耗。得到随着正 n 边形 n 值的增大，空调能耗逐渐减小，当 n 值无限大，即建筑平面趋于圆形时，空调能耗最小，为被动式建筑节能设计提供参考。

程云[26]等人通过 PBECA 软件模拟对夏热冬冷地区某大学建工楼进行能耗模拟，找出改造节能的重点，并分别从外墙、外窗屋面不同传热系数的节能率来选择最适宜的节能措施及改造策略。

徐哲恬[27]等人利用 COMBAT 软件对上海的商场、宾馆建筑进行节能改造模拟分析，并得到了水泵变频、风机变频、电梯空载变速三种节能措施的节能量，成本及回收期。

1.2.2.2 预先模拟数据库法

预先模拟数据库法（Pre-Simulated Database）[28]依托于典型建筑能耗模型，将可能用到的所有节能改造措施及措施可能取到的所有水平数进行排列组合，用相应的能耗模拟软件预先模拟每个组合的建筑能耗，模拟得到的所有结果作为能耗数据库。当用能建筑进行节能改造分析时，直接访问数据库即可。尽管这个方法有一定的限制——基准建筑模型的几何尺寸无法与实际建筑相匹配等，但预先模拟数据库法可避免建模的繁杂及模拟时间，也无需详细的建筑数据及节能措施数据，可提供节能量的快速估算。

CBES 工具 （Commercial Building Energy Saver）[29]，由美国加州能源委员会 CEC 开发，适用于美国中小型商业（办公、宾馆、商场）建筑节能改造的在线工具。CBES 工具基于 DEEP 数据库开发，利用计算机集群并行计算，计算了近 100 万个模拟算例。用户可通过输入被改造建筑的信息，包括建筑基本信息；围护结构；内部负荷；运行时间；空调系统参数等，得到改造前后的建筑能效情况，节能量的评估和成本分析。该工具可根据输入信息的程度，提供三个水平的改造分析：（1）基于统计模型，作无成本或低成本的改造建议。（2）基于 DEEP 的预先模拟数据库，作初步改造分析。（3）基于 DEEP 数据库及校验模拟，做详细改造分析，可得到更为准确的年一次能耗，年 CO_2 排放量，经济分析，节约成本百分比等。

美国劳伦斯伯克利国家实验室 LBNL 及中国能源组织共同开发的适用于中国各气候区宾馆、商场建筑的 COMBAT 改造工具[30]，该工具是以上海不同商业建筑类型为原始模型，应用 EnergyPlus 能耗模拟软件预先模拟了包括围护结构、照明系统、插座负荷、空调系统、采暖系统、生活热水系统及可再生能源等 90 多种节能措施的不同排列组合，得到建筑性能数据库。COMBAT 考虑用户可以输入用能建筑电耗、汽耗账单，添加校验功能，同时可比较节能措施的节能量、改

造成本及经济回报期。

由 LBNL 开发的另一工具 EnergyIQ[31]，该软件着眼于对中小型公共建筑（面积小于$25,000ft^2$）的能耗基准评价，同时帮助优化节能改造方案。EnergyIQ 的建筑信息数据库收录了加利福尼亚州 CEUS 数据库中 62 个建筑类型中的 2800 多幢建筑，当对全美国范围内的建筑节能分析时，可调用美国能源部的 CBECS 数据库。当进行节能改造分析时，调用 eQUEST 预先模拟完成的：由 50 种节能措施组合的 65,000 项能耗数据库，提供节能量分析计算，节能改造措施建议。

美国芝加哥城市规划部（CMAP）开发的 Encompass 工具[32]利用 EnergyPlus 软件预先模拟能耗结果组成的数据库为基础，包含了 278,000 个芝加哥办公建筑能耗模型，根据输入的用能建筑信息，从数据库中调用最匹配的一个建筑模型作为实际建筑的能耗基准，分析节能量、节水量、改造成本等。该工具适用于芝加哥地区的大型商业建筑，覆盖了市中心高层建筑（面积在 $8,000,000ft^2$ 以上）和郊区办公园区（面积在 $165,000ft^2$ 以上）两大类型建筑。Encompass 可以对用电、照明、围护结构、HVAC、设备、热水、人员或设备运行时间表提出改造建议。

1.2.2.3 数据驱动法

数据驱动法（Data-driven Methods）[33]以历史或经验数据为基础，利用统计学等相关知识对数据进行分析，建立能耗与相关变量间的能耗预测模型。所用数据涉及范围包括建筑设计参数、系统参数、运行数据、能耗数据等。数据来源较为广泛，可来自真实的测量数据、智能电表数据或是模拟所得数据（如预先模拟数据库）。数据驱动方法主要有回归分析法，时间序列法，人工神经网络（ANN）法，支持向量机（SVM）法、灰色理论法等以及各种方法的综合运用。数据驱动方法广泛应用在建筑能耗预测领域，从简单的建筑能耗基准评价（Benchmarking）到较复杂的回归预测模型均有涉及。然而，该方法需注意以下几点：

1）建模前需训练数据。

2）对数学驱动方法拟合得到的回归模型缺少特定的物理解释。

3）数据驱动回归模型与提供该数据的建筑相对应，一般不能适用于其它类型建筑。

数学回归模型来自统计学方法可以解决反演问题（Inverse Problem），不同于传统能耗模拟过程，回归模型的输入可以来自于已知的输出结果，如当能耗已知，推测建筑设计或运行的参数。依靠数据和回归模型帮助工程师快速估算参数信息较少的单栋建筑的能耗，或者帮助学者从全市能耗数据中获得更多信息。

然而，该方法用于节能量估算的局限是：在能耗数学模型中，无法捕捉到一

个改造措施的综合动态影响。比如更换高效节能灯，它不仅有助于减少照明能耗，而且降低了建筑冷负荷，从而有助于减少冷机能耗。对于这一点，数据驱动方法所建立的数学模型是无法体现的[34]。

郑晓卫等人[35]对上海市商用建筑信息数据进行数据处理和挖掘分析，使用回归归因法补充缺失数据，利用库克距离和学生化残差检测异常点，并得到以办公比例、宾馆比例、冷机装机容量、空调运行时间为独立变量的商用建筑 EUI 预测模型。

William Chung 等人[36]以建筑面积、运行时间、人员数量、顾客行为、建造时间为独立变量，建立单位面积能耗（EUI）的多元线性回归方程，对香港地区商场建筑用能情况进行预测。

Signor 等人[37]以建筑大小（层数和尺寸）、立面构造（窗墙比）、传热系数、屋顶吸收率、玻璃遮阳系数、外遮阳系数、立面和屋顶颜色、人员和设备用电强度（照明和设备）8 个参数对空调办公建筑电耗进行分析，得出巴西 14 个城市办公建筑能耗回归预测因子。

Ehsan Asadia 等人[38]利用遗传算法（GA）和人工神经网络（ANN）建立多目标优化模型，定量评估学校建筑改造项目的节能技术。分别以建筑能耗，改造成本和热舒适作为目标函数单独优化，结合多目标优化模型探究各参数之间的相互影响。

姚健等人[39]利用 MATLAB 建立 BP 神经网络，将影响建筑能耗的 18 个因素作为输入参数，进行学习训练，最后通过测试样本点数据预测建筑能耗，并与 DeST 软件能耗模拟结果比较，相对误差在 3.5%以内，验证了该网络模型的可行性。

数据驱动方法广泛应用于能耗评价及节能量分析工具的开发领域。

BPD（Buildings Performance Database）[40]工具由美国劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）、太平洋西北国家实验室（PNNL）与美国能源部（DOE）共同设计开发，是一个面向商业建筑和住宅的节能改造工具。该工具的数据不仅来自公共、私人和政府组织提供的建筑相关数据，还集合了美国的商业建筑能耗调查（CBECS），住宅能耗调查（RECS），和一些地方性建筑数据库，如加利福尼亚州商业建筑能耗调查（CEUS）等。BPD 以单位面积年一次能耗（EUI）作为因变量，以人员密度和运行时间作为数值变量，以建筑建成时间、建筑类型、气候区、围护结构类型、玻璃层数、热源、冷源、照明形式、空调系统控制类型作为分类变量，建立线性多元回归模型。该工具可为用户提供能耗基准评价和节能改造分析两大使用功能，节能改造分析可包括气流控制、制冷、供暖、照明、窗户玻璃

层组成、玻璃种类等 73 项节能改造措施的节能量估算。

FirstFuel[41]工具使用时间序列法估算建筑能耗及改造节能量。工具结合来自公用事业部门的一年逐时用电数据、当地逐时气象参数、建筑信息数据进行建筑末端性能基准评价，运行和改造建议。该工具适合无足够专业知识或充足时间收集分析大量能耗数据的用户，但可提供的改造建议有限。该算法自主研发，不对外公开。

C3 商业工具[42]由 C3 能源开发的一个在线工具，为美国中小型建筑业主提供建筑能耗基准评价和节能改造分析。该工具利用来自智能电表和 CEUS 数据库的区间数据（Interval Data），可与类型相同、面积相当的建筑在逐年、逐月、逐日建筑能耗上进行比较，而节能量算法基于数据驱动的反演能耗模型，利用 DEER 数据库（Database for Energy Efficiency Resources）的改造措施进行数学分析，可输出改造节能量及成本，不过该算法不对外开放。

1.2.2.4 标准计算法

标准计算法即依照现有标准规范的能耗计算方法，通过输入一些简单的建筑信息参数及空调系统参数，得到建筑负荷、分项能耗、一次能耗、排放量的方法，而这种方法实质是不考虑建筑内部复杂的动态变化，而将传热过程简化为准静态热平衡方程的一阶能耗模型。国外标准计算法遵循欧洲标准化委员会（CEN）和 ISO（国际标准化组织）[43] 制定的计算标准，这些标准规范了不同类型建筑的建筑物性参数和建筑系统参数。该计算方法计算不同建筑负荷下的能源使用，一次能耗和排放量。通过简化和统一建模，以标准化和透明化的方式，形成了评估建筑节能性能的基础，可用于能源性能等级评价，大数值节能量估算。标准计算方法不如基于详细物理模型的计算方法准确，但由于计算简单方便、效率高等优势适用于大量的实际工程中。国内的《上海市公共建筑节能改造重点城市示范项目节能量审核办法》[44]中列出了常用改造技术的节能量估算方法，并按照围护结构改造而采暖（或空调）系统不改造、围护结构不改造而采暖（或空调）系统改造、以及采暖（或空调）系统和围护结构都改造三种情况分类描述。

以标准计算法开发的快速节能量估算工具如下：

Chicago Loop Energy Retrofit Tool[45]工具是由美国阿贡国家实验室（ANL）开发，旨在对芝加哥中心商区的建筑进行节能改造分析。其核心是基于实际建筑信息建立模型，运用标准计算法，对建筑群和单栋建筑层面进行节能量计算。建筑群层面的节能量分析，目的在于对建筑群的节能改造方案进行评估，从而得到制定建筑类别的最佳节能改造方式；对单个建筑则通过分析计算，选择最佳节能

改造措施组合。但是该工具的能耗模型的基础是月度得热与散热之间的平衡，这个准稳态的过程忽略了内部空间的动态变化，这使得该工具无法进行动态分析，将 HVAC 系统的控制过程和内部空间的动态变化排斥在外，成为了该工具的一大局限。

Retroficiency[46]工具，由美国一家私营公司开发，为商业建筑业主提供建筑性能评估和能源改造分析报告的工具。该工具 VEA 部分，从智能电表的能耗数据中分析建筑对天气、人员行为和系统运行的相应过程，并提供改造建议。VEA 使用简化规范的计算方法评估建筑能效，并进行全生命周期成本分析，投资回收期分析等。该工具及算法不对外开放。

Sang Hoon Lee[34]等人对目前已开发和正在开发的节能改造工具进行了综述，对工具的开发人、更新时间、适用建筑类型、适用人群、工具类型（能否在线使用）、计算内核进行了汇总，并对工具可提出的改造建议、工具的特点以及工具目前局限等一一进行总结说明。选取部分内容总结如下：

表 1.2 节能改造工具

工具	适用建筑	计算内核	特点	局限
DOE 能效评分工具	美国商业建筑	OpenStudio/ EnergyPlus	1.对建筑当前能效和改造后能效评分；2.提供改造建议	不包含运行时间表、人员行为等参数的改造策略
EnergyIQ	美国商业建筑	eQUEST 预先模拟数据库/CEUS	1.与同类型建筑比较用能系统；2.推荐改造措施分析节能潜力	1.缺少对具体建筑的改造建议；2.缺少改造成本数据；3.CEUS 数据库措施尚未更新
EnCompass	芝加哥市大型商业建筑	EnergyPlus 预先模拟数据库	1.建立 275000 能耗模型可供选择 2.能耗比较评分 3.提供改造分析	只适用芝加哥的大型商业建筑
Evaluator	美国商业建筑	EnergyPlus	可对办公、医院、零售商店、学校进行模拟提出改造建议	缺少改造成本数据

续表

工具	适用建筑	计算内核	特点	局限
COMBAT	中国商场和宾馆	EnergyPlus 预先模拟数据库	1.允许用户输入成本信息 2.提供经济分析	只适合中国商场和宾馆
CBES	美国加州中小型商业建筑	EnergyPlus 预先模拟数据库——DEEP	提出照明、空调系统、围护结构、设备、热水、人员、运行时间表的改造建议	仍在研发中

1.2.3 节能改造经济效益评价方法

常用的建筑经济效益评价方法：

（1）全生命周期成本（LCC）：是指一个建筑物在其生命周期内建造、运行、维护和拆除的所有投入货币的折现总值。广义的建筑全寿命周期成本，是指在建筑的寿命周期内，从概念、决策、设计、施工、使用、维护到拆除的整个周期中，各方关系人（生产者，消费者，公众）等发生的一切成本（建设成本，社会成本，环境成本等），而狭义的全寿命周期成本，仅仅是指与该建筑相关的货币投入折现值。本文关注的是建筑的节能改造项目，与之相关的是狭义全寿命周期成本。

$$LCC = IC + OC + MC\text{-}RC \tag{1.1}$$

IC——初投资成本

OC——运行成本

MC——维护成本

RC——设备折旧成本

运行成本 OC 由能源使用成本构成，可由生命周期能耗估算获得。全寿命周期分析方法可分为现值成本法和年值成本法。在节能改造方案确定阶段，净现值法（NPV）因其考虑了可能的增量成本（包括通货膨胀；利率和能源价格的涨幅）以及资金的时间价值，常常作为评价指标来判断节能改造措施经济的合理性[47]。

刘玉明[48]运用财务评价方法构建了既有建筑节能改造的经济效益评价模型以及评价指标：独立性节能改造方案适用静态投资回收期、内部收益率和净现值评价；互斥型节能改造方案适用增量投资回收期、追加投资净现值、增量内部收

益率评价，从而为既有建筑节能改造的经济效益评价提供了一个基本分析框架。

朱春妃[49]借助全生命周期理论，分析既有居住建筑节能改造项目经济效益，推导了既有居住建筑包括围护结构、HVAC 系统节能改造、冷热源建设以及夏季空调节省在内的经济效益测算公式，最后以唐山某示范工程节能改造项目经济效益分析为实例，用静态投资回收期和内部收益率对示范项目进行经济评价。

张文杰[50]针对上海地区公共建筑借助 eQUEST 能耗模拟软件，研究各因素对建筑能耗的影响特点，提出节能改造措施，并对各项措施进行全生命周期经济性分析，为各类型公共建筑适用节能改造措施提供建议。

（2）价值工程分析法

价值工程的核心在于合理分配资源已获得最大的能效。价值工程表达式：

$$V = \frac{F}{C} \tag{1.2}$$

V 为价值系数，F 为功能评价系数，C 为成本系数。价值工程理论常用于既有建筑改造方案间的优选比较。首先确定价值工程研究对象，如：既有建筑围护结构，其次对建筑围护结构进行功能定义和评价；再次，确定功能评价指标及相应指标权重，最后计算价值系数、成本系数及价值系数，优先选择价值系数较高的改造方案。目前常用的确定权重的方法有两类：主观判断法和层次分析法[51]。在此基础上，也有学者王永祥[52]尝试用三角模糊数法确定权重，对既有建筑节能改造方案进行优选分析

本文着眼于建筑节能改造措施的经济效益评价，因此在狭义全寿命周期理论基础上，选用净现值法和动态投资回收期作为评价指标。在第五章进行讨论。

1.3 研究目的与意义

通览以上研究可以发现，节能量估算方法中，标准计算法不考虑建筑内部复杂的动态特性，估算能耗过于简单。利用模拟软件对单栋建筑进行节能分析的技术较为成熟，并已很好地运用在工程实际，可以作为本课题的技术依据，而由于能耗模拟软件建立详细模型耗时久，且需专业人士操作等缺点，使得快速估算建筑改造的节能量及成本成为了各国研究的重点，这方面国外研究比较多，而国内对此研究较少，因而本文借鉴国外研究方法，用预先模拟数据库法建立适用于夏热冬冷地区的节能改造措施与建筑能耗数据库，并基于数据库应用数据驱动法建立节能改造快速估算模型，弥补国内学者对此研究的空缺，为建立适用于我国气候区及用能形式的节能改造快速估算工具提供可靠的技术支持。

预先模拟数据库方法存在一定局限，比如能耗数据全部基于典型模型的模拟，

而典型模型与被改造建筑的建筑形状/尺寸和性能参数无法完全匹配。建筑性能亦受建筑物理参数（建筑结构、天气、末端系统）和随机参数（与人行为有关的照明、空调系统的控制参数）等多方面影响，模拟的准确程度更是一种挑战，因此本文需要考虑和解决这些问题。

从围护结构、照明系统、空调采暖系统、用能设备、楼宇控制系统等众多方面都存在改造更新的节能潜力，所考虑的节能措施众多，而不同措施不同水平数下的排列组合更是可达几千万种，以一般计算机的运算速度很难在有限时间内完成。针对此问题目前研究领域有两种方法可以借鉴：一种是利用计算机并行计算法。Sang Hoon Lee，Tianzhen Hong[8]等人建立 DEEP 数据库时用 EnergyPlus 软件和计算机集群并行计算结合，计算近 100 万个模拟算例，包括 7 种原始模型，16 个气候，围护结构、照明系统、采暖系统、通风系统、空调系统、插座负荷、生活热水系统在内的多种改造措施组合后的能耗结果。另一种是在保证准确性的前提下，通过一些合理的假设前提，或者根据统计学原理减少需要模拟软件计算的节能措施组合数。如 LBNL 在开发 COMBAT 软件[30]利用负荷与能耗呈线性关系的假设前提外推非空调侧改造措施对空调能耗的影响，进而对同时采用非空调侧与空调侧改造措施组合数进行简化。本文参考第二种方法，探究简化改造措施组合数的方法，并保证预测节能量的准确性。

本文提出改造节能量及经济效益快速估算算法的意义在于，对既有办公建筑进行节能改造分析时，无需对建筑本体建立详细几何、空调系统模型，节省建模时间，可快速估算节能量及成本、回收期等经济分析。其次，有别于经验法对单一措施计算改造节能量，本方法考虑节能措施之间的相互作用，提高准确度。再者，有别于 EnergyPlus、DOE-2 等节能改造软件，本方法操作简单，无需详细建筑数据，减少运算时间。适用于能效评估阶段之后，详细模拟改造阶段之前的简单节能估算阶段，针对节能改造方案初步筛选，对业主等无建模经验人员分析节能改造提供可操作性。

1.4 研究内容及技术路线

1.4.1 研究内容

基于上述分析，本文采用预先模拟数据库法建立适用于我国的节能改造措施与建筑能耗数据库，并基于数据库应用数据驱动法建立节能改造快速估算算法模型。结合改造经济性分析，开发改造快速估算软件。本文的主要研究内容如下：

第二章：利用课题组已有成果结合节能标准，利用 eQUEST 软件建立典型办公建筑模型。提出“H/S——建筑形状系数”概念，从不确定性分析的角度，研究拟合“建筑形状/尺寸—能耗”算法，尝试解决典型模型与实际建筑因建筑形状/尺寸不同而引起的能耗估算偏差问题。

第三章：针对夏热冬冷地区常用节能改造措施，建立改造措施能耗模型，分析每项措施的节能效果。利用回归分析方法，拟合“单项节能措施参数—能耗”算法。

第四章：利用理论分析与软件模拟法，探究节能改造措施之间的相互作用。采用全面试验以及正交试验设计，模拟研究多项措施对能耗的综合影响，拟合“多项节能措施参数—能耗”算法。

第五章：首先利用净现值和动态回收期，建立节能改造经济效益估算算法模型。其次，结合二至四章能耗算法，开发节能量及经济效益快速估算软件。最后利用实际建筑改造数据验证本文算法的准确性。

第六章：阐述整篇论文的主要结论，并对研究工作的不足和尚未完善的工作进行展望。

1.4.2 技术路线

根据上述研究内容，确定本文的研究路线，如图 1.2 所示。

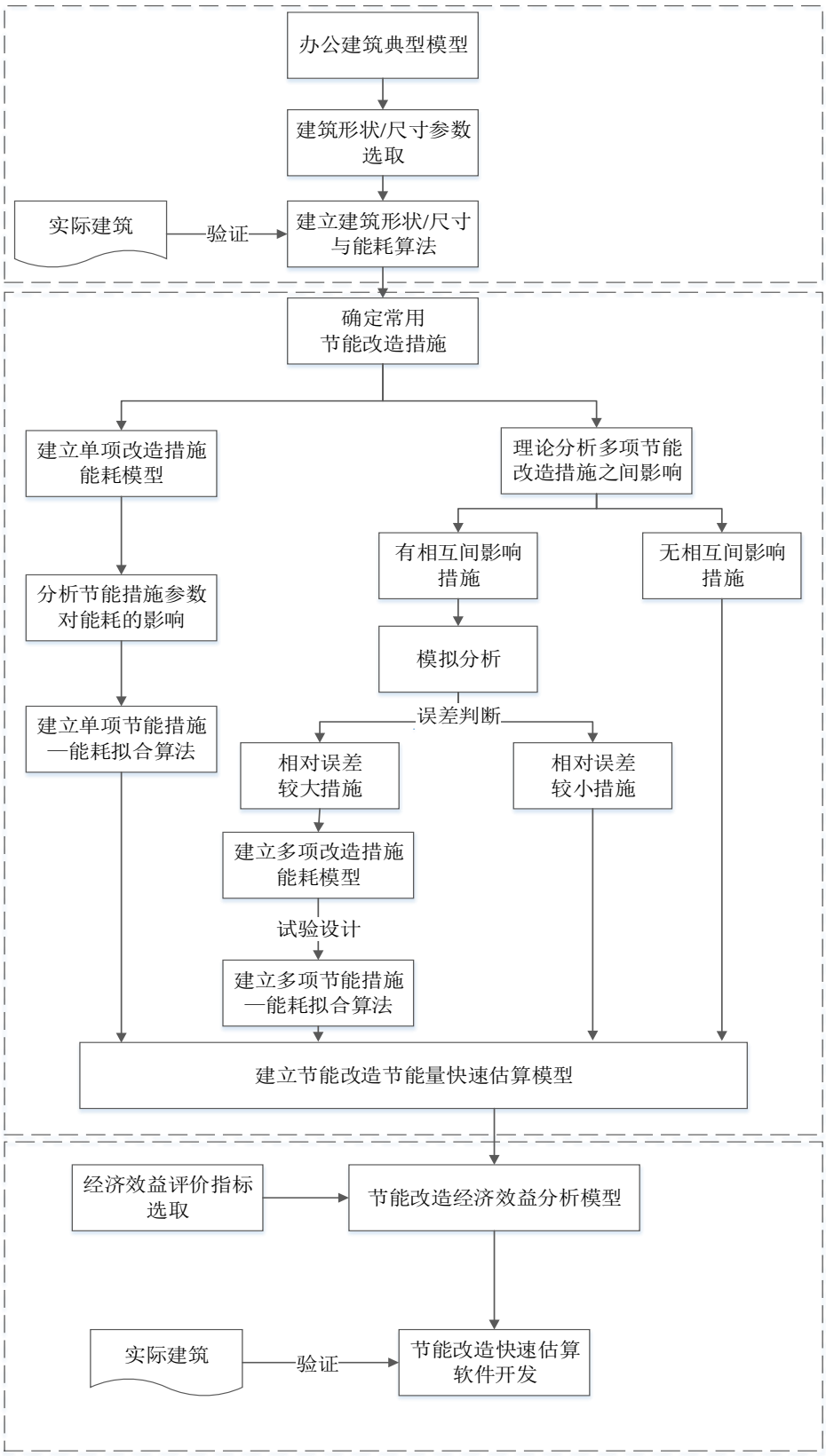


图 1.2 本文的技术路线示意图

第 2 章 典型建筑模型的建立

办公类建筑的能耗非常复杂，涉及到暖通空调、灯光照明、办公设备、电梯、室内人员行为等各个方面，远比住宅的能耗分析要复杂得多。被改造建筑所处气候条件、本身的建筑形状、尺寸、围护结构、空调系统形式、用能情况也不尽相同，因此本章需建立一个能够代表办公建筑典型情况的建筑模型数据库，以典型模型为基准展开节能量估算方法的研究。

由于典型模型的建筑外形和物性参数是固定的，当实际建筑的形状尺寸、物性参数与典型模型不同时，应该如何估算实际建筑的基准能耗？本文的思路是寻找可以描述建筑形状尺寸的参数，以该参数为变量，控制其他因素不变，拟合尺寸参数与 EUI 之间的关系。

本章提出“H/S——建筑形状系数”的概念，并利用参数对办公建筑分类建模，采用能耗模拟软件 eQUEST 对建筑模型进行能耗计算。从不确定性分析的角度，拟合建筑形状/尺寸与建筑能耗算法，尝试解决典型模型与实际建筑之间因尺寸不匹配而造成的能耗估算偏差这一问题。对于物性参数不匹配的能耗估算方法将于第三、四章讨论。

2.1 研究方法

2.1.1 能耗模拟

本文利用能耗模拟软件 eQUEST 建立建筑模型估算能耗。软件计算核心是 DOE2-2，求解建筑热过程的基本方法是反应系数法。eQUEST 软件采用正向思维，根据室外气象参数、维护结构参数计算出室内负荷，根据负荷，对采暖空调房间由选定 HVAC 设备系统提供冷热量。软件计算过程是一个动态平衡的过程，前一时刻的室内温度、负荷以及设备系统耗电量会影响到下一时刻[53]。软件可根据输入的建筑情况（建筑外形、围护结构、室内热扰、室内温湿度设计值）和通风采暖空调系统情况（性能系数、控制策略），动态计算出建筑全年逐时能耗。

eQUEST 软件输出电耗单位 kWh，天然气消耗单位 BTU，是英制热量单位。为便于结合单位燃气价格（元/m^3）进行节能改造经济性分析，本文将英制单位 BTU 转换成国际单位 m^3，根据《天然气》标准[54]中 1Nm^3 天然气热值约为 36MJ/Nm^3， 1BTU（相当于 1055J）对应的天然气量为 2.93×10^{-5} m^3。

在论文第五章判断更换热泵系统与其他改造措施是否有相互影响时，需对其

他改造措施对应的电力消耗以及天然气消耗合计为建筑总能耗，本文考虑不同能源品位的差异，采用等效电法[55]，将不同能源消耗统一转换成等效电耗，天然气的等效电法转换系数为 7.131kWh /m^3。

2.1.2 多元逐步回归分析

本文是基于 SPSS 软件利用逐步回归分析法，通过拟合各参数与模拟结果得到的大量能耗数据，建立“各参数与建筑能耗”算法模型。

多元逐步回归是指含有多个解释变量的回归分析，逐步回归的原理是：首先会根据预测变量对因变量的预测能力的高低排序，即对每一个引入回归方程的变量按照偏回归平方和由小到大依次选入模型。在预先给定的水平下对每一个进入到模型中的变量进行显著性检验，当预测变量的回归系数达到显著水平时，在回归方程中保留该变量，否则，剔除在模型之外。当无变量被引入或被剔除时，终止回归方程[56]。

利用 SPSS 软件作多元逐步回归分析，在本文的所有逐步回归模型中，自变量进入模型的标准是该变量回归系数显著性检验 F 值对应的概率≤0.05，变量剔除的标准是，该自变量引入后，所有引入回归方程的变量的 F 值概率≥0.1。

本文采用拟合优度检验（调整 R^2），回归方程显著性检验（F 检验），回归系数的显著性检验（P 检验），作为回归方程的统计量检验。

2.2 典型建筑模型的建立

本文研究的节能量快速估算算法针对的是能源消耗较大，能源利用率不高，或使用的建筑材料过时、设备陈旧老化的办公建筑。尤其是针对按照 2005 年公共建筑节能设计标准[57]建立完成并且在这 10 年间需要改造的建筑。因此本文建立的办公建筑典型模型外形及各参数主要参照 2005 年公共建筑节能设计标准和课题组用 EnergyPlus 已经建立并校验完成的上海典型办公建筑模型[58]，建筑基本信息和建筑围护结构热工参数见表 2.1-2.3。模拟气象参数用上海市典型气象年数据。

表 2.1 典型建筑模型建筑参数

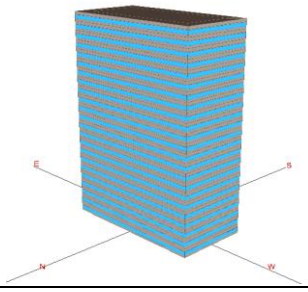
建筑类型	办公建筑	建筑模型
建筑面积	46128 m^2	
窗墙比	0.4	
层数	24	
层高	4m	
是否有遮阳建筑	无	
朝向	南	

表 2.2 建筑围护结构热工参数

围护结构名称	材料	传热系数 W/㎡·k
外墙	20mm 水泥砂浆	0.888
	340mm 砖	
	100mm 加气混凝土	
	20mm 水泥砂浆	
屋顶	20mm 石棉水泥板	0.638
	20m 水泥砂浆	
	XPS-R	
	20mm 水泥砂浆	
	140mm 钢筋混凝土	
	20mm 石灰水泥沙浆	
外窗	双层中空玻璃铝窗框	传热系数 2.73
		玻璃遮阳系数 SC=0.6，

表 2.3 空调系统参数

空调系统类型	制冷	离心式制冷机组
	供热	燃气热水锅炉
	输送及末端设备	风机盘管加新风
系统容量	制冷	根据设计日自动计算
	供热	根据设计日自动计算
系统效率	制冷	额定 COP 为 5
	供热	额定热效率 80%
运行时间	供冷季	6 月 1 日-9 月 30 日
	供热季	11 月 1 日-来年 3 月 31 日
空调控制系统控制	有人时温控设定点	夏季 26℃/冬季 20℃
	无人时温控设定点	夏季 37℃/冬季 12℃
	送风温度	夏季 16℃/冬季 35℃
	冷冻水供水温度	7℃
	热水供水温度	60℃
	冷却塔出塔水温	32℃
	水泵类型	定频
	风机类型	定频

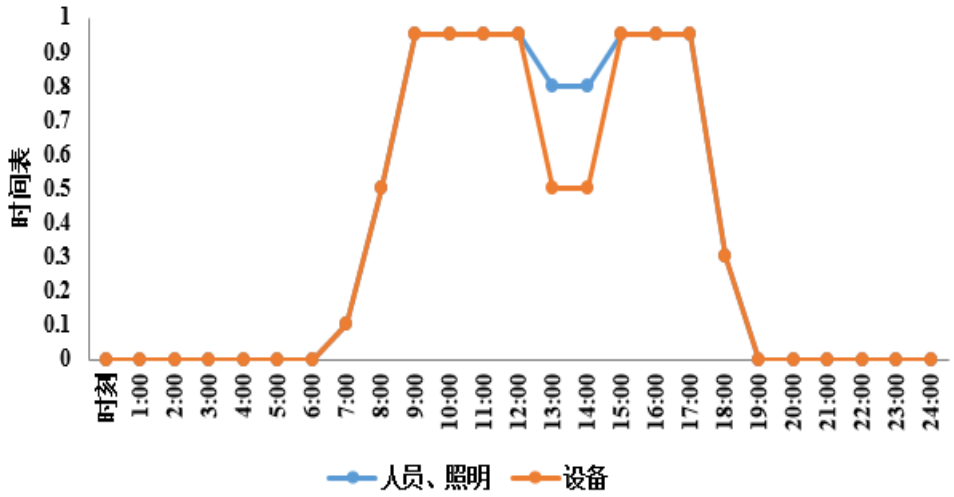


图 2.1 人员、照明、设备时间表

典型建筑模拟分项能耗见表 2.4：单位建筑面积分项电耗见图 2.2，分项能耗占比见图 2.3~2.4。单位建筑面积总电耗值 115.13kWh/m²，单位建筑面积总耗气量值 5.35m³。

表 2.4 典型模型分项能耗

	全年建筑耗电量（MWh）	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）
冷机	1,264.10	27.40
冷却塔	100.4	2.18
风机	386.4	8.38
水泵	352.5	7.64
设备	2,019.00	43.77
照明	1,188.40	25.76
总值	5,310.70	115.13
	全年建筑天然气消耗量（m³）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）
热水锅炉	246,999	5.35
总值	246,999	5.35

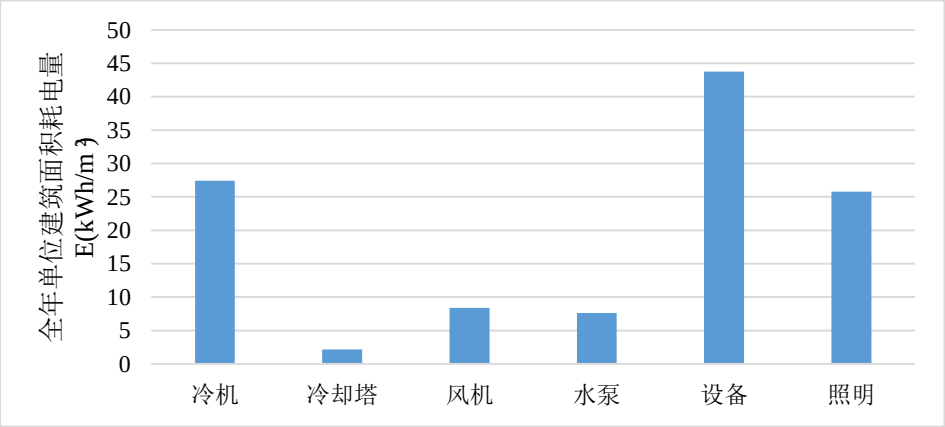


图 2.2 典型模型单位建筑面积全年分项电耗

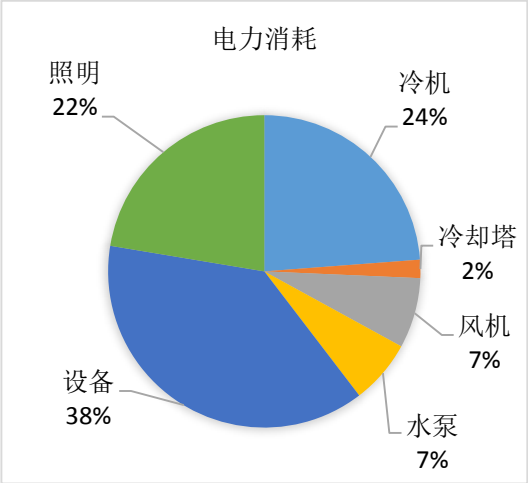


图 2.3 典型模型全年分项电耗占比

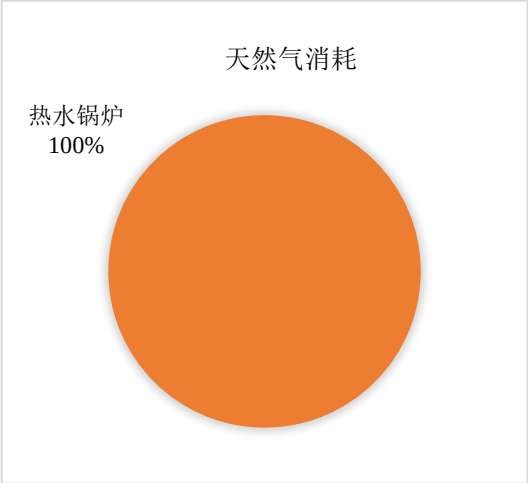


图 2.4 典型模型全年天然气消耗占比

2.3 建筑形状/尺寸与能耗算法研究

2.3.1 建筑形状/尺寸参数的选择

可描述建筑几何尺寸的参数有：建筑高度、建筑总面积、建筑体型系数等。典型的办公建筑几何轮廓可以看成一个近似的“长方体”，不同的长、宽、高度都可以对应相同的建筑总面积，因此建筑总面积不能成为唯一的变量，需对建筑体态加以分类。

本文提出“建筑形状系数——H/S”的概念，将建筑总高度 H 与建筑单层平均面积 S 的比值作为建筑物形状体态分类（即高瘦、矮胖程度）的定性指标，选取 6 个不同的 H/S 值（即 0.03-0.08）分别代表 6 类不同的形状建筑，对每一类建筑又分别建立 7 个总建筑面积不同（层数不同、长与宽比值接近 2:1）的模型，使其建筑长宽值以及体形系数在合理的范围内，共 42 个模型。因国家现行标准中尚未规定夏热冬冷地区办公建筑的体形系数范围，因此体形系数的合理范围参照文献[59]。42 个模型的参数设置：只建筑尺寸参数（建筑长宽高度、层数、总建筑面积）与典型模型不同，其他参数（如照明功率密度、冷机性能系数）等均相同，从建筑外表面 5 m 以内的建筑周边区为外区，部分建筑模型的基本参数见表 2.5，表 2.6。

建筑形状系数与常用的建筑体型系数虽都是对建筑体型的描述，但有着本质的区别。建筑体型系数定义为“建筑物与室外大气接触的外表面积与其所包围的体积的比值”，它反映了一栋建筑体型的复杂程度以及围护结构散热面积的大小，体型系数越大，则建筑体形越复杂，建筑物围护结构传热耗热量就越大，可作为影响建筑物耗热量的指标。本文提出的建筑形状系数 H/S，建筑形状系数值越大，表明建筑越瘦高，相反，建筑越矮胖，反映了一栋建筑的高矮胖瘦程度，该值可

作为建筑物高矮胖瘦体态的分类指标。

表 2.5 建筑模型基本参数 （H/S=0.03）

建筑编号	层数	层高/m	总高/m	底面面积/m^2	总建筑面积/m^2	长/m	宽/m	体型系数/m^{-1}
31	30	4	120	4005	120150	89	45	0.067
32	24	4	96	3200	76800	80	40	0.075
33	20	4	80	2775	55500	75	37	0.081
34	18	4	72	2450	44100	70	35	0.086
35	15	4	60	2016	30240	63	32	0.094
36	12	4	48	1596	19152	57	28	0.107
37	9	4	36	1176	10584	49	24	0.124

表 2.6 建筑模型基本参数 （H/S=0.06）

建筑编号	层数	层高/m	总高/m	底面面积/m^2	总建筑面积/m^2	长/m	宽/m	体型系数/m^{-1}
61	30	4	120	2016	60480	63	32	0.094
62	24	4	96	1568	37632	56	28	0.107
63	21	4	84	1352	28392	52	26	0.115
64	18	4	72	1176	21168	49	24	0.124
65	15	4	60	990	14850	45	22	0.135
66	12	4	48	800	9600	40	20	0.150
67	9	4	36	595	5355	35	17	0.175

2.3.2 建立建筑形状/尺寸与能耗算法

模拟 42 个模型算得单位建筑面积年电（气）耗结果如图 2.5，图 2.6 所示。

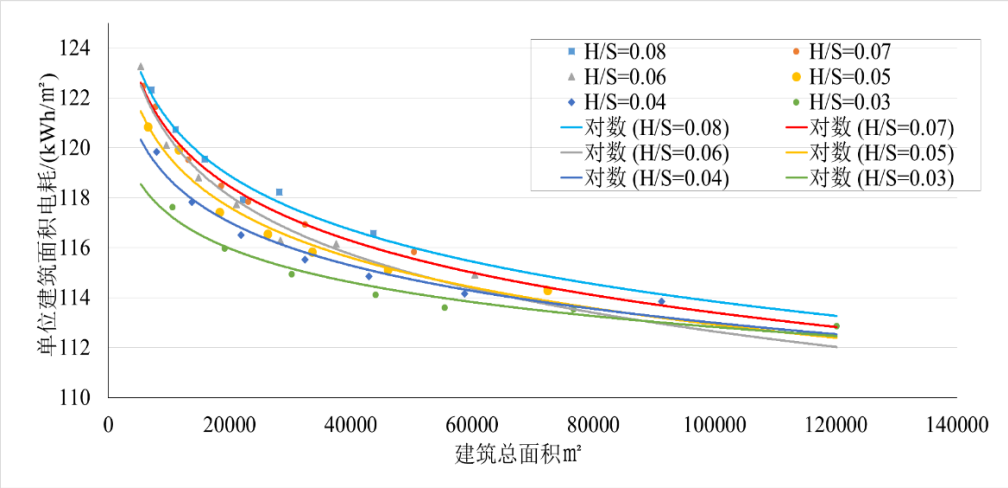


图 2.5 建筑在不同建筑形状系数下的建筑单位面积电耗与建筑总面积关系

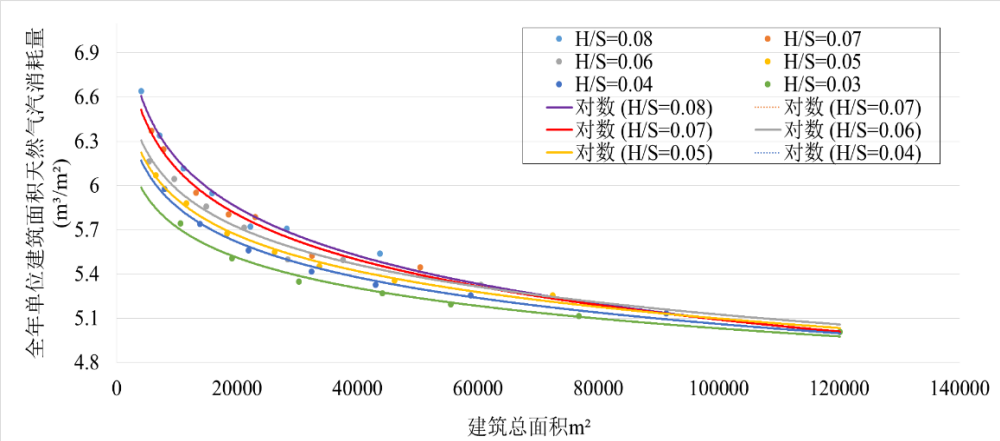


图 2.6 建筑在不同建筑形状系数下的单位建筑面积气耗与建筑总面积的关系

从图中各曲线趋势可知，单位建筑面积能耗（EUI）均随建筑总面积的增加而降低。这个趋势与建筑的类型和体量有关，由于本文的模型是内区比较大，内部负荷也较大的办公建筑，随着建筑总面积增大，内区的比重也增大，而内区的 EUI 往往小于外区。因此，建筑总面积越大，分担到整个单位建筑面积上的 EUI 就越小。其次，不论是电耗图还是气耗图，随总面积增加而 EUI 减小的变化曲线都是呈先陡后缓的趋势。建筑总面积越小的单体建筑，建筑能耗受建筑面积的影响越大。这是因为面积越小的单体建筑，内区也小，整个建筑的能耗受外界环境影响比较明显，建筑面积稍稍改变，能耗变化幅度会较大。再者，建筑总面积一定时，越“瘦高”的建筑（即 H/S 值越大），单位建筑面积的能耗越大。这也说明了如“烟囱”般瘦高的建筑自身能耗较大，利用被动式技术的节能潜力更大，同时为建筑设计提供参考。

从数学角度分析，每条能耗—面积曲线可拟合成对数 $Y=AlnX+B$ 形式，其中 X 为建筑总面积（m^2），图 2.5 的 Y 为建筑单位面积电耗值（kWh/m^2）、图

2.6 的 Y 为单位建筑面积天然气消耗值（m^3/m^2）。拟合的 R^2 均在 0.96 以上。每条对数曲线常数 A 为负值，说明单位建筑面积电（气）耗与总面积呈负相关。每条对数曲线的常数 B 的物理意义是：相同建筑形状系数（该瘦高程度）的建筑，在保持建筑热扰和空调采暖系统各参数与基准模型相同时，无论建筑尺寸（层数、建筑长宽）如何变化，单位建筑面积能耗的上限值为 B。例如，H/S= 0.07 时，电耗曲线拟合为 y = - 3.144ln（x） + 149.6，R^2= 0.99。气耗曲线拟合为，y = 0.444ln（x） + 10.2，R^2= 0.98。2 建筑形状系数为 0.07 的建筑，在保持建筑热扰和空调采暖系统参数固定不变的情况下，无论其建筑尺寸（层数、建筑长宽）如何变化，该建筑的单位建筑面积电耗不会超过 149.6kWh/m2，单位建筑面积气耗不会超过 10.2m3/m2。电耗图所有曲线的常数 B 在 135.35-151.53 kWh/m^2 范围内，气耗图常数 B 在 8.47-10.53m^3/m^2 范围内。

本文采用的是本质线性关系回归分析，所谓的本质线性关系是指函数形式上变量与因变量之间是非线性关系，但可以通过变量转化为线性关系，并最终进行线性回归分析。通过将变量 X、H、S 转化为建筑总面积的自然对数值 *lnX*、建筑形状系数 *H/S*、平方值（*lnX*）^{2}、（*H/S*）^{2} 四个变量，因变量为建筑单位面积电耗值 *E*；单位建筑面积气耗值 E_h，数据导入 SPSS 软件建立逐步线性回归模型。电耗线性回归模型输出结果见表 2.7，表 2.8。

从表中可以看出，在电耗线性回归模型中，自变量（*H/S*）^{2} 的回归系数没有通过显著性检验被剔除在模型外。其余三个自变量 *lnX*；*H/S*；（*lnX*）^{2} 被选入模型，随着自变量被逐步引入回归方程，回归方程的相关系数 R 和判定系数 R^2 逐步增大。说明引入的自变量对电耗 E_e 的作用在增加。这三个自变量对因变量的预测能力分别为 88.2%，8%，2.6%，共同解释了因变量 98.8%（调整 R^2）。*lnX* 对于 E_e 的预测能力要比其他两个自变量强。由于自变量之间存在共线性问题，因而选择调整后 R^2 作为模型拟合度，调整后 R^2=0.988，F=1074.99 说明方程拟合较好。“建筑面积和建筑形状系数—建筑单位面积电耗”拟合算法总结为：

$$E = -15.449LnX + 52.357\left(H/S\right) + 0.631\left(LnX\right)^2 + 205.653 \qquad (2.1)$$

同样方法，得到“建筑面积和建筑形状系数—单位建筑面积气耗”拟合算法，总结该算法为（R^2=0.987，F=1002.12）：

$$E_h = -1.457LnX + 58.747\left(H/S\right)^2 + 0.054\left(LnX\right)^2 + 14.601 \qquad (2.2)$$

E,E_h——单位建筑面积电耗量（kWh/m^2）;单位建筑面积天然气消耗量（m^3/m^2）

X——建筑总面积（m^2）；*H*——建筑高度（m）；*S*——建筑单层面积（m^2）

表 2.7 模型汇总

模型	R	R^2	调整后的 R^2	标准估算的错误
1	0.941[a]	0.885	0.882	0.927
2	0.982[b]	0.964	0.962	0.529
3	0.994[c]	0.989	0.988	0.299

a. 预测变量：（常量），lnX
b. 预测变量：（常量），lnX, H/S
c. 预测变量：（常量），lnX, H/S,$(lnX)^2$
d. 因变量：E

表 2.8 方差分析表

模型		平方和	自由度	均方	F	显著性
1	回归	258.002	1	258.002	300.376	0.000b
	残差	33.498	39	0.859		
	总计	291.500	40			
2	回归	280.862	2	140.431	501.615	0.000c
	残差	10.638	38	0.280		
	总计	291.500	40			
3	回归	288.194	3	96.065	1074.999	0.000d
	残差	3.306	37	0.089		
	总计	291.500	40			

a. 因变量：E
b. 预测变量：（常量），lnX
c. 预测变量：（常量），lnX, H/S
d. 预测变量：（常量），lnX, H/S,$(lnX)^2$

2.4 模型验证

从上海市商用建筑信息数据库中选择两栋建筑对线性回归方程进行验证，结果表明建筑 1 由回归方程预测得到的单位建筑面积电耗值与实际值的相对误差为 15.3%，气耗误差为 3.5%，建筑 2 电、气耗相对误差分别为-8.9%和 23.07%。由于该方程是在其他物性参数与基准模型一致，只改变建筑形状/尺寸参数的前提下得到的，用实际建筑验证时，实际楼宇的内部热扰和 HVAC 系统参数以及运行控制策略复杂多样，与本文模型的设置不可能完全一致，所以可认为该误差结果在合理范围之内。因此认为用以上方法拟合得到的单位建筑面积电（气）耗与建筑总面积、建筑形状系数的线性回归方程较为准确。由于方程在 42 个建筑能耗模型基础上得到，根据模型设置参数范围，可得出该方程适用于建筑面积在 5 千至 12 万 m^2，建筑形状系数 H/S 在 0.03-0.08 范围内夏热冬冷地区的办公类建筑。

表 2.9 模型验证

	总建筑面积 X（m^2）	建筑形状系数 H/S（m^{-1}）	模型验证			
建筑 1	48000	0.06	预测 E（kWh/m^2）	115.04	预测 E_h（m^3/m^2）	7.53
			实际 E（kWh/m^2）	99.78	实际 E_h（m^3/m^2）	7.27
			相对误差	15.30%	相对误差	3.50%
建筑 2	59000	0.04	预测 E（kWh/m^2）	113.63	预测 E_h（m^3/m^2）	7.28
			实际 E（kWh/m^2）	124.74	实际 E_h（m^3/m^2）	5.64
			相对误差	-8.90%	相对误差	23.07%

2.5 节能效果对比

选取了三个典型的办公类建筑模型 1 号、2 号、3 号， 1 号与 2 号建筑形状系数相同，但建筑总面积不同；2 号与 3 号建筑总面积近似相同但建筑形状系数不同；1 号与 3 号建筑总面积和建筑形状系数均不同。除此之外，其他物性参数均相同（比如热扰密度、围护结构传热系数等）。对 3 个建筑采取相同的节能改造方式，模拟三组试验，第一组：都采用更换高效节能灯（LPD 由 11 W/m^2 至 $9W/m^2$）；第二组：都采用更换高效冷机（COP 由 5 至 7）；第三组：都采用更换高效热水锅炉（热效率由 80%至 95%），模拟能耗结果如表 2.11~表 2.13。对比可知，每一组三个建筑的单位建筑面积节能量偏差非常小，可认为近似相等。

由此，得出结论：对于其他参数相同，只是建筑形状/尺寸不同的同一气候区办公类建筑，采取相同节能改造方式，可认为单位建筑面积节能量近似相等，节能效果近似相同。依据这一结论，便可取一个典型建筑模型代替其他不同尺寸的建筑，在典型模型的基础上展开节能量算法的研究。

表 2.10 三个建筑尺寸不同的建筑改造前能耗

	建筑形状系数 H/S	建筑面积㎡	改造前总能耗	
			电 MWH	天然气 m³
建筑 1	0.5	33640	3896.9	183418
建筑 2	0.5	11616	1393.1	68321.74
建筑 3	0.8	11612	1423.2	714162.7

表 2.11 更换高效节能灯单位建筑面积节能量对比

	改造后总能耗		单位建筑面积节能量		节能率	
	电 MWH	天然气 m^3	电 KWH/M^2	天燃气 m^3/m^2	电	气
建筑 1	3715.5	186641	5.3924	-0.0958	4.65%	-1.76%
建筑 2	1330.4	69476.16	5.3977	-0.0994	4.50%	-1.69%
建筑 3	1360.4	72590.75	5.4082	-0.0971	4.41%	-1.58%

表 2.12 更换高效冷机单位建筑面积节能量对比

	改造后总能耗		单位建筑面积节能量		节能率	
	电 MWH	天然气 m^3	电 KWH/M^2	天燃气 m^3/m^2	电	气
建筑 1	3620.2	183418	-0.0082	0	7.10%	0%
建筑 2	1290.1	68321.74	-0.0089	0	7.39%	0%
建筑 3	1324	71462.7	-0.0085	0	6.97%	0%

表 2.13 更换高效锅炉单位建筑面积节能量对比

	改造后总能耗		单位建筑面积节能量		节能率	
	电 MWH	天然气 m^3	电 KWH/M^2	天燃气 m^3/m^2	电	气
建筑 1	3896.9	154411	0	0.8623	0%	15.81%
建筑 2	1393.1	57533.48	0	0.9287	0%	15.79%
建筑 3	1423.2	60179.27	0	0.9717	0%	15.79%

2.6 本章小结

本章以上海地区的气候条件作为夏热冬冷地区的典型代表，建立典型办公建筑能耗模型，以此为基准能耗。

本章提出建筑形状系数——H/S 的概念，将建筑总高度 H 与建筑单层平均面积 S 的比值作为代表建筑形状分类（即高瘦、矮胖程度）的定量指标。基于 eQUEST 模拟的建筑能耗数据，利用逐步线性回归方法得到“建筑形状/尺寸—能耗”拟合算法，并利用两栋实际建筑验证了方程的准确性。该算法适用于对建筑面积在 5 千至 12 万 m^2，建筑形状系数 H/S 在 0.03-0.08 范围内的夏热冬冷地区的办公建筑。

在快速节能改造工具研究以及利用典型模型预测建筑能耗案例中，对与典型模型所用的建筑形状/尺寸不同的实际建筑，可利用该方法估算其能耗，节省了重新建模的步骤，解决了典型模型与实际建筑之间因建筑面积、建筑形状/尺寸不同而引起的能耗估算偏差这一难点。

此外，本章经过模拟计算得出：同一气候区的办公类建筑，在保持建筑热扰和空调采暖系统各参数固定不变的情况下，无论其建筑形状/尺寸（层数、建筑长宽等）如何变化，采取相同节能改造方式，单位建筑面积节能量近似相等，节能效果近似相同。后续节能量算法均依此结论为前提展开。

第 3 章 单项节能改造措施与能耗算法研究

本章以上海地区作为夏热冬冷地区的代表，通过调查 2005-2015 年间建造完成的上海地区办公类建筑的建筑信息、主要改造方向、现行的节能技术等，确定适用于夏热冬冷地区办公类型建筑常用的 13 种节能改造措施。基于典型建筑模型建立对应的节能改造能耗模型，分析能耗及节能效果。利用回归分析方法，对代表单项改造措施的参数变量与建筑能耗的算法进行研究。

3.1 围护结构

3.1.1 加装外墙保温材料

提高建筑物墙体的热工性能，可以降低建筑冷热负荷，减少空调侧用能，对建筑节能起到积极作用。目前来说，提高建筑物墙体的热工性能主要有以下两种途径：①节能保温材料附着于建筑外墙，形成多层复合保温外墙，包括：外墙外保温、外墙内保温、外墙夹芯保温等几类。②利用无机墙体材料自身的高热阻的热工特性来实现外墙自保温。从节能、经济、舒适等诸多方面比较：外墙内保温技术简单，造价便宜但容易产生热桥现象，内表面容易结露、发霉，占用室内使用面积；外墙夹心保温技术施工程序复杂，也容易产生热桥；外墙自保温使用寿命长、施工相对简单，但造价较高，技术适应性差，广泛普及难。外墙外保温对保温材料的耐火性、耐久性要求高，但兼具了节能效果好、避免热桥现象、节约保温材料、不占用建筑空间、保护建筑主体结构、提高建筑热稳定性等诸多优点，并经过屡次技术进步及材料革新，目前在国内已得到广泛应用[61]。

对于加设外墙保温这一节能措施，不同类型的保温材料有不同的导热系数，保温材料的厚度大小同样影响着外墙传热，由于导热系数和厚度都可以用外墙传热系数表示，因此本文将外墙传热系数 K_w 作为描述加装外墙保温措施的物性参数，探究不同外墙传热系数与建筑能耗的关系。能耗结果如表 3.1。

外墙传热系数减小，从而减小了由外墙传热引起的冷热负荷。用等效电法将耗燃气量与耗电量统一单位后比较，传热系数从 2 W/(m^2 K)减小到 0.2 W/(m^2 K)时，总能耗节省了 4.6 kWh/m^2，节能率为 2.4%，分别来看节电率 0.3%，节省燃气率 10%。随着 K_w 减小，单位建筑面积全年电耗量稍有减少，但单位建筑面积的全年燃气耗量明显减少，这也说明，对于夏热冬冷地区，采用外墙保温措施，对供热能耗影响大于供冷能耗。

表 3.1 建筑外墙传热系数与单位建筑面积耗电（气）量

外墙传热系数 K_w[W/(m² K)]	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）	单位建筑面积全年能耗(等效电) EE（kWh/m²）
2.0	154.4	5.8	195.4
1.6	154.2	5.6	194.4
1.4	154.1	5.6	193.9
1.2	154.1	5.5	193.4
1.0	154.0	5.4	192.9
0.8	154.0	5.4	192.4
0.6	154.0	5.3	191.9
0.4	153.9	5.2	191.3
0.3	153.9	5.2	191.1
0.2	153.9	5.2	190.8

从下图中可以看出，不同外墙传热系数与单位建筑面积电、气耗之间存在着近似线性的关系，根据模拟结果，拟合线性回归，得到“外墙传热系数 K_w—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：$E=0.245K_w+153.81$，$R^2=0.974$。“外墙传热系数 K_w—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法 $E_h=0.324K_w+5.12$，$R^2=0.998$。

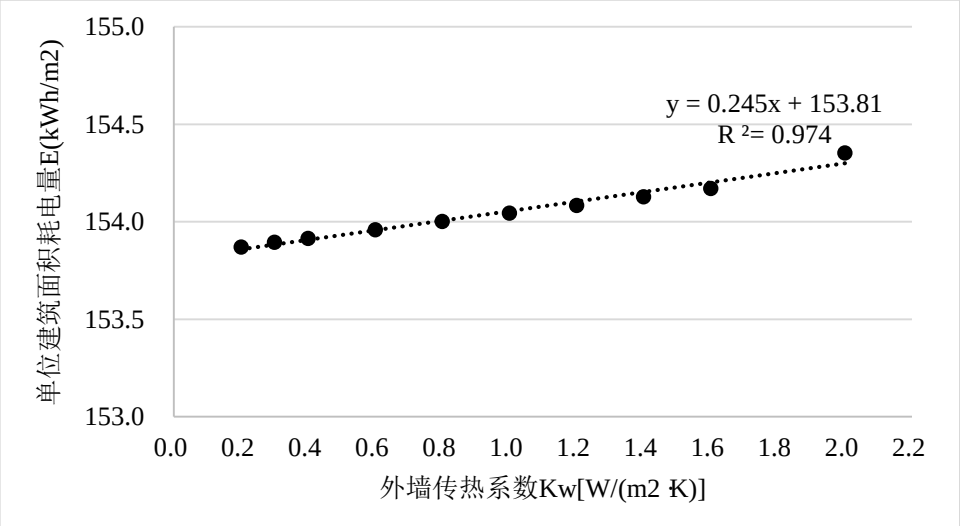


图 3.1 (a) 外墙传热系数 K_w—单位建筑面积电耗拟合算法

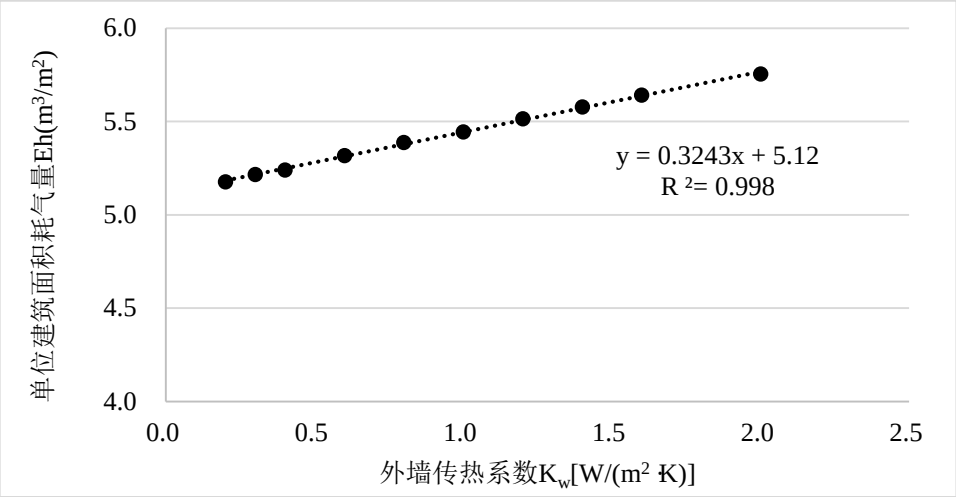


图 3.1 (b) 外墙传热系数 K_w—单位建筑面积气耗拟合算法

3.1.2 更换高性能窗户

高性能窗户可体现在两方面，窗的结构设计和窗玻璃材质选取。首先是窗的结构设计，可分为推拉窗，平开窗，固定窗。下表对比了不同窗结构的通风热交换情况。

表 3.2(a) 窗结构与通风热交换情况

窗的结构	通风情况	热交换
推拉窗	有利于室内通风	窗扇上下留有空隙，形成明显的对流交换，冷热空气的对流形成较大的热损失。
平开窗	室内通风效果较好。	窗扇和窗框间一般均用橡胶密封压条，几乎没有空隙，难形成对流。热量流失主要是窗框、窗扇和玻璃间传导和辐射散热。
固定窗	通风效果较差。	窗框嵌在墙体内，玻璃直接安装在窗框上，接触的四边均密封，很难形成对流，很难造成热的损失。固定窗的主要热损失是玻璃和窗框热传导。

其次是窗玻璃材质的选取。根据调研，上海目前正在进行的旧房改造项目，对玻璃的改造大多数采取单层玻璃改换成双层中空玻璃。而对于上海新建建筑大多数在设计之初就选用了双层中空玻璃，而为了追求更节能更舒适的室内环境，对高性能玻璃材质的需求会更高，比如部分业主选择用 Low-E 玻璃替换双层中空玻璃。

因此本文基准模型采用节能效果和通风效果均较好的平开窗结构，玻璃类型为旧房常用的单层玻璃，建筑窗墙比为 0.4，性能参数为:传热系数 6.3W/(m^2·K)，综合遮阳系数 0.7，可见光透过率 0.9。研究双层中空玻璃、双层 Low-E 玻璃和

三层 Low-E 玻璃相对于基准模型的节能效果。从图 3.2(a)可以看出，采用传热系数和遮阳系数都较低的三层 Low-E 玻璃节能效果最好，可节省 2.86%电耗量和 10.61%燃气耗量。

表 3.2(b) 玻璃性能参数

玻璃类型	外窗传热系数 K_{win} [W/(m^2 • K)]	遮阳系数	可见光透过率
单层玻璃	6.30	1.00	0.90
中空双层玻璃	2.72	0.81	0.78
双层 Low-E 玻璃	1.82	0.69	0.77
三层 Low-E	0.79	0.85	0.66

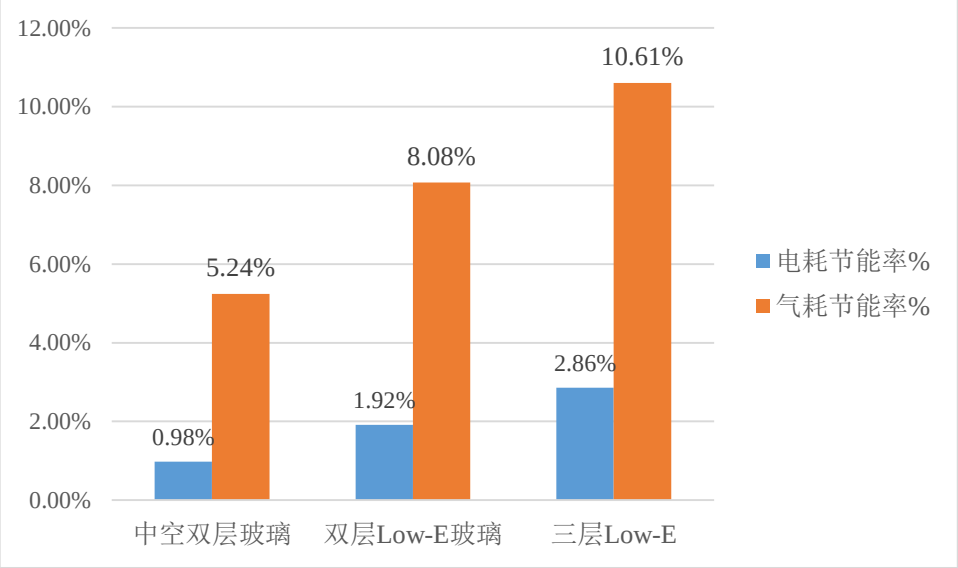


图 3.2 (a) 玻璃类型及节能效果

室外环境通过窗户影响到建筑能耗有两个方面：一方面是透过玻璃窗的太阳辐射给室内造成一部分得热，这部分与玻璃的遮阳系数，内外遮阳形式有关，用外窗综合遮阳系数 SC_w 表示，在 3.1.3 节讨论。另一方面是由于室内外温差的存在，通过玻璃以传热导热方式进行热交换；由于玻璃导热系数较大，热惰性很小，通过玻璃窗的热传导可以按照稳态传热考虑，即 n 时刻通过玻璃的传热量可以用玻璃窗的传热系数、玻璃窗面积、n 时刻室内外空气温差三者的乘积表示。这一部分用外窗传热系数 K_{win} 作为参数表示，在本节中讨论。

更换高效节能窗往往同时改变外窗传热系数和综合遮阳系数，而这两个参数在计算节能量时互不影响，因此对于更换高效节能窗的节能量算法的研究可根据

两个参数各自的节能量相加求得，即更换高效节能窗的节能量＝用本节“窗传热系数 K_{win}—能耗”算法计算的节能量＋利用 3.1.3 节“综合遮阳系数 SC_w—能耗”算法计算的节能量。接下来，研究不同外窗传热系数对建筑能耗的影响。模拟结果见下表。

表 3.2(c) 外窗传热系数与单位建筑面积耗电、气量

外窗传热系数 K_{win}[W/(m²・K)]	单位建筑面积耗电量 E(kWh/m²)	节电率%	单位建筑面积耗气量 E_h(m³/m²)	节省燃气率%
6.3	152.9	0.00%	5.1	0.00%
4	153.5	-0.36%	4.8	4.99%
2	154.4	-0.92%	4.7	7.48%
0.8	155.0	-1.35%	4.6	9.60%

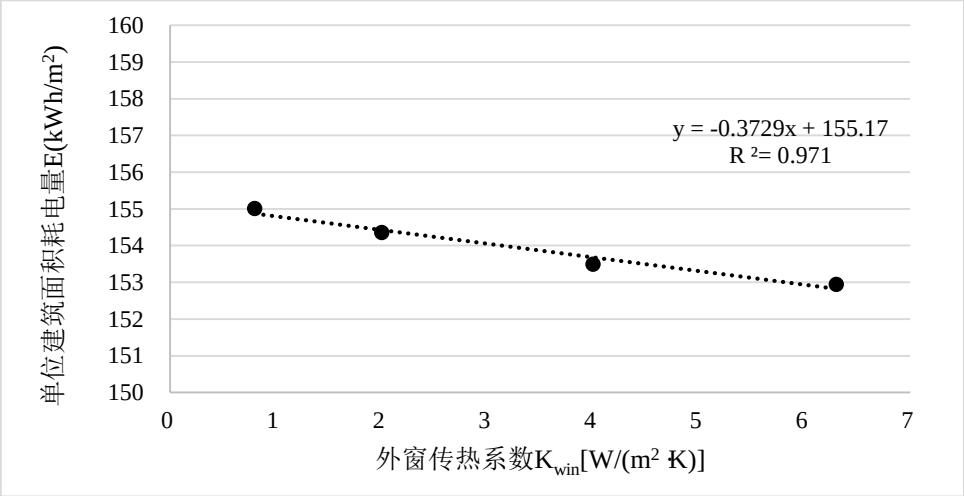


图 3.2(b) 外窗传热系数 Kwin—单位建筑面积电耗拟合算法

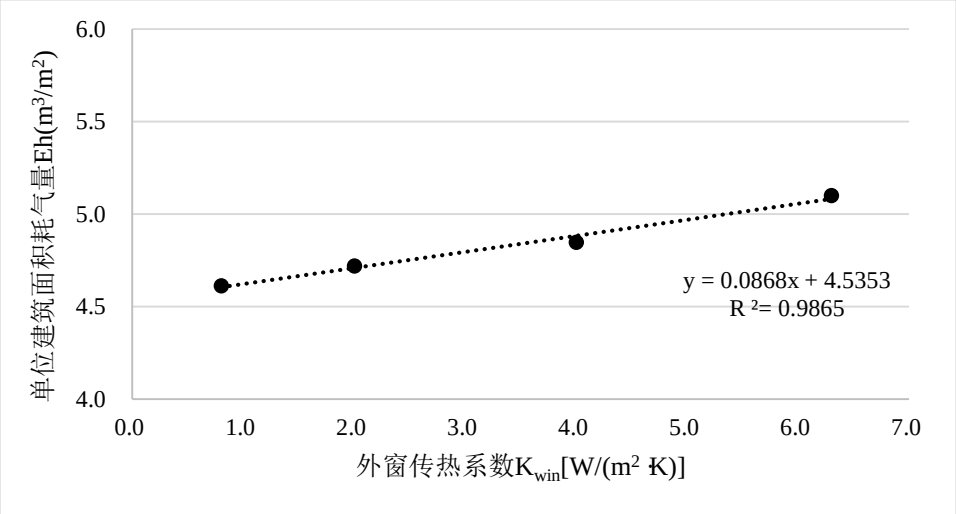


图 3.2(c) 外窗传热系数 K_{win}—单位建筑面积气耗拟合算法

表 3.2(c)得到：随着外窗传热系数的减小，单位建筑面积全年电耗量略有增加，单位建筑面积的全年燃气耗量明显减少。这说明，对于夏热冬冷地区，更换

传热系数较小的高性能窗户，对冷负荷影响较小，对热负荷影响较大。而从图3.2(b)可以看出，外窗传热系数的减小对建筑电耗不降反而略微增加，这是由于夏季白天受到太阳辐射建筑被加热升温，向室内传递热量，夜间外温度往往低于室内温度，向室外散热，即存在建筑围护结构内外表面日夜交替变化方向传热。传热系数越小，使得室内的热量不能很好的向室外散出，从而增大了空调能耗。冬季主要以向外传递热量为主，传热系数越小越有助于加热空气而减小设备制热能耗。

不同外窗传热系数与单位建筑面积电、气耗之间存在着线性关系。根据模拟结果，拟合线性回归，得到 “外窗传热系数 K_{win}—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：$E=-0.373K_{win}+155.17$，$R^2=0.971$。“外窗传热系数 K_{win}—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法 $E_h=0.0868K_{win}+4.5353$，$R^2=0.996$。

3.1.3 加装外遮阳装置

建筑遮阳是为了避免阳光直射室内，防止建筑物的外围护结构被阳光过分加热，从而防止局部过热和眩光的产生，以及保护室内各种物品和有效降低建筑能耗的措施。建筑遮阳主要在两方面对于建筑节能起到重要的作用：一方面，遮阳措施能有效阻挡大量的太阳辐射进入室内，降低建筑物夏季空调制冷负荷；另一方面，遮阳板能将直射阳光转化成柔和的漫射光，改善室内光环境质量，从而减少日间人工照明能耗。

根据《上海市公共建筑节能设计标准》DGJ08-107-2012[62]对外遮阳的规定，外窗（或透明幕墙）综合遮阳系数 SC_w 是外窗（或幕墙的透明玻璃）本身的遮阳效果和窗外部（包括建筑物和外遮阳装置）的综合遮阳效果计算系数，其值为外窗遮阳系数与外遮阳系数 SD 的乘积。外窗遮阳系数透过窗户的太阳辐射得热系数对与透过 3mm 厚透明白玻璃的得热系数比值，其值等于玻璃遮阳系数 SC 与窗框系数 SC_k 的乘积。即外窗综合遮阳系数 SC_w 是外遮阳系数 SD、玻璃遮阳系数 SC 与窗框系数 SC_k 三者的乘积。外遮阳系数 SD 是外窗外部（包括建筑物和外遮阳装置）的遮阳效果的计算系数，建筑外遮阳系数 SD 简化计算；

$$SD = ax^2 + bx + 1 \qquad x = A/B \tag{3.1}$$

式中 SD——外遮阳系数；

x——外遮阳特征值，x＞1 时，取 x=1；

a,b——拟合系数。按附录表 D.0.1 选取

A,B——外遮阳的构造定性尺寸。

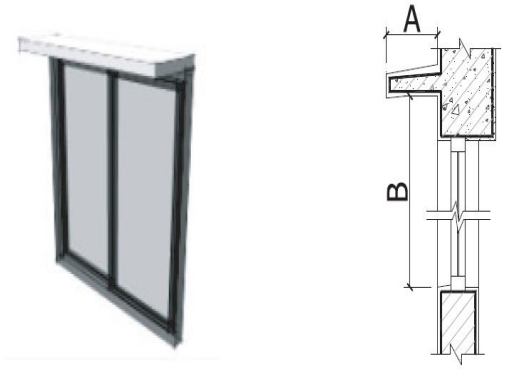


图 3.3 (a) 水平外遮阳特征值

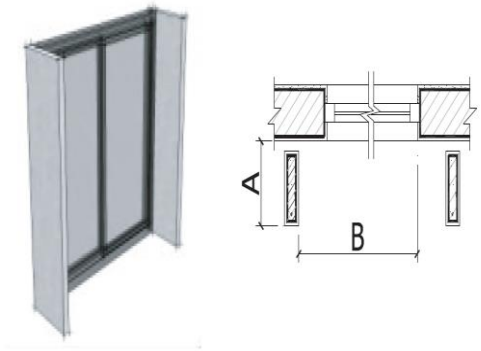


图 3.3 (b) 垂直外遮阳特征值

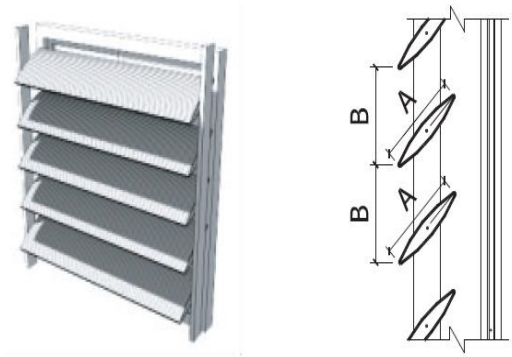


图 3.3 (c) 横百叶外遮阳特征值

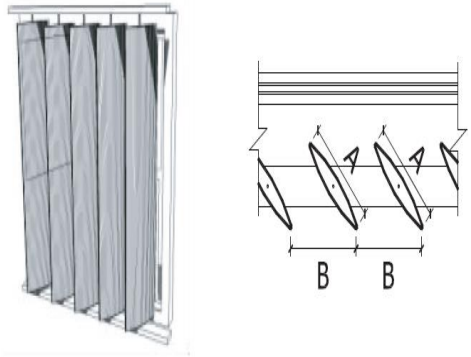


图 3.3 (d) 竖百叶外遮阳特征值

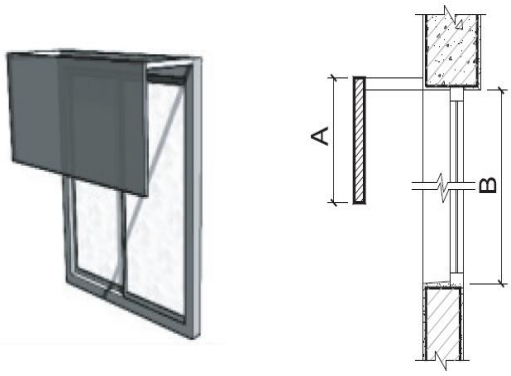
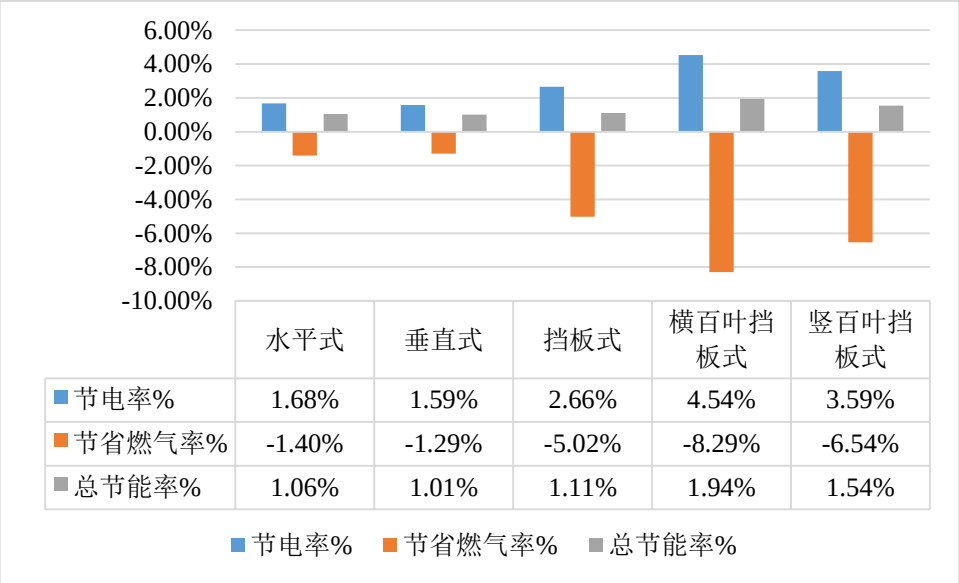


图 3.3 (e) 挡板外遮阳特征值[62]

表 3.3 外遮阳形式及参数[62]

外遮阳形式	外遮阳特征值 X=A/B	外窗遮阳系数 SD	综合遮阳系数 SC_w
无	——	1	0.69
水平式	0.33	0.80	0.55
垂直式	0.33	0.81	0.56
挡板式	0.33	0.50	0.34
横百叶式	1	0.30	0.21
竖百叶式	1	0.40	0.27

本建筑基准模型建筑窗墙比为 0.4，采用最不利窗户形式，单层玻璃窗无外遮阳装置，其中玻璃的遮阳系数 SC 为 0.98，窗框系数 SCk 为 0.7，综合遮阳系数 SCw=SD×SC×SCk=0.69。采取外遮阳措施，探究加装水平式、垂直式、挡板式、横百叶挡板式、竖百叶挡板式五种形式的外遮阳的节能效果，遮阳板特征见图 3.3(a)~(e)，参数见表 3.3，其中外遮阳系数 SD 由东、西、南、北各个朝向的外遮阳系数取平均值得到。不同遮阳形式对应节能效果如图 3.3(f)所示。横百叶式遮阳板节能效果最好。整体来看，采用外遮阳装置，建筑全年能耗减少；电力消耗减少效果明显，主要是因为制冷能耗明显降低；燃气消耗却增加了，这是因为在冬季遮阳板阻挡了建筑对太阳热能的利用。



	水平式	垂直式	挡板式	横百叶挡板式	竖百叶挡板式
节电率%	1.68%	1.59%	2.66%	4.54%	3.59%
节省燃气率%	-1.40%	-1.29%	-5.02%	-8.29%	-6.54%
总节能率%	1.06%	1.01%	1.11%	1.94%	1.54%

图 3.3 (f) 遮阳形式及节能效果

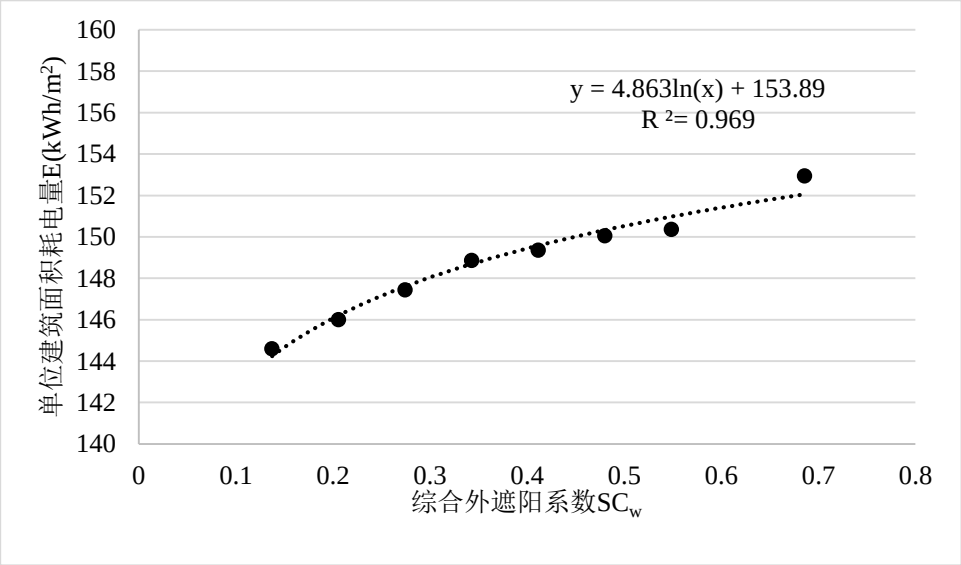


图 3.3 (g) 综合遮阳系数 SC_w 与单位建筑面积电耗拟合算法

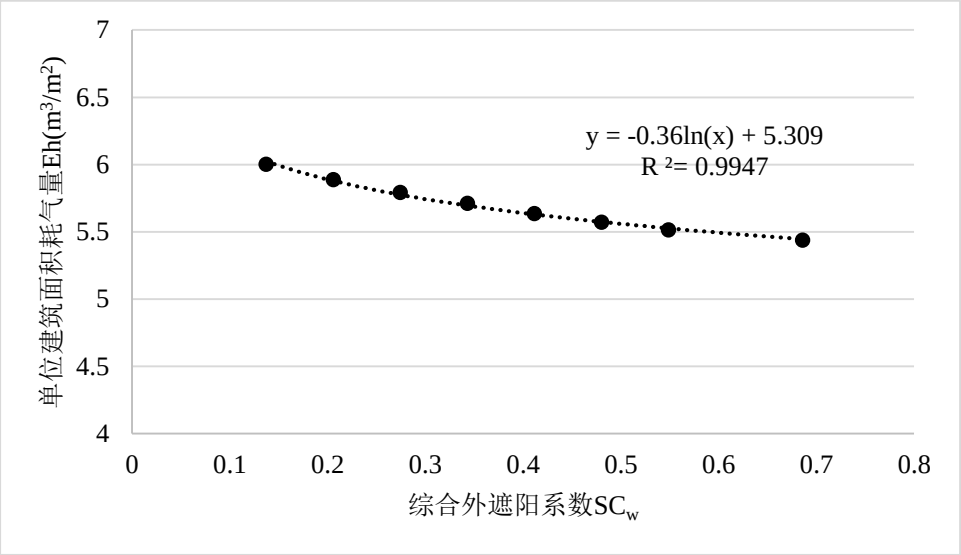


图 3.3 (h) 综合遮阳系数 SC_w 与单位建筑面积气耗拟合算法

从图 3.3(g)~(h)中可以看出，对于夏热冬冷地区的办公建筑加装外遮阳装置，随着遮阳系数的逐渐减小，单位建筑面积电耗量明显减小，说明尤其是夏季，遮阳对建筑起到了很好的节能效果，然而单位建筑面积气耗量也有所增加，说明夏热冬冷地区不易在冬天设置外遮阳装置。因此，建议夏热冬冷地区，采用建筑遮阳措施既要考虑夏天隔热又要兼顾冬天保暖，宜采用百叶等可活动遮阳装置。根据模拟结果看到，综合遮阳系数与单位建筑面积电、气耗之间存在着近似对数的关系，拟合得到“综合遮阳系数 SC_w—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：$E=4.863Ln（SC_w）+153.89$，$R^2=0.969$；“综合遮阳系数 SC_w —单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法 $E_h=-0.36Ln（SC_w）+5.309$，$R^2=0.995$。

3.2 照明系统

我国办公建筑的照明能耗大约占建筑全年总能耗的 20%-30%，是办公建筑能耗重要影响因素之一。当前在国际上照明节能所遵循的原则是在保证照明品质的前提下，尽可能做到对照明能耗的节约，体现在两个方面，一方面，采用高效节能灯具，推广使用高光效光源，由 3.2.1 节讨论。另一方面，建筑照明充分利用天然光节能，完善建筑照明节能控制技术，在 3.2.2 节讨论。

3.2.1 更换高效节能灯

建筑照明中，光效高、寿命长、使用方便的光源有很多，例如：紧凑型节能荧光灯、细管径高光效直管形荧光灯（T5、T8）、金属卤化物灯、无极感应灯、LED 灯等，它们有不同的光效、显色指数、寿命，为了研究不同高效节能灯对建筑能耗的影响，采用照明功率密度 LPD 作为描述更换高效节能灯的性能参数，

基准模型采用荧光灯，不同照明功率密度对应的节能效果如下图所示。

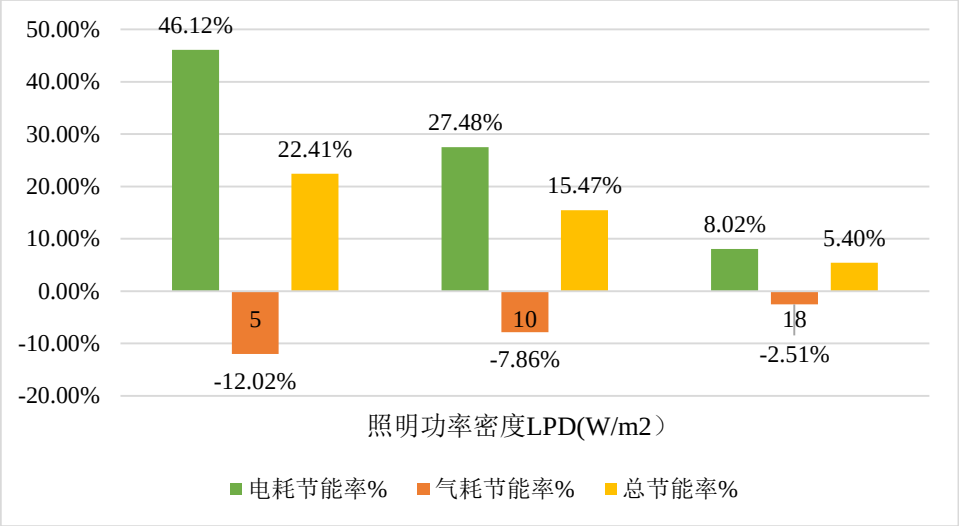


图 3.4 (a) 采用不同照明功率密度的高效节能灯相对于基准建筑（LPD=22 W/m²）的节能量

表 3.4 照明功率密度对能耗的影响

LPD（W/m²）	电耗节能率%	气耗节能率%	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）
5	46.12%	-12.02%	104.67	6.18
10	27.48%	-7.86%	119.98	5.90
18	8.02%	-2.51%	141.59	5.58
22	0.00%	0.00%	152.94	5.44

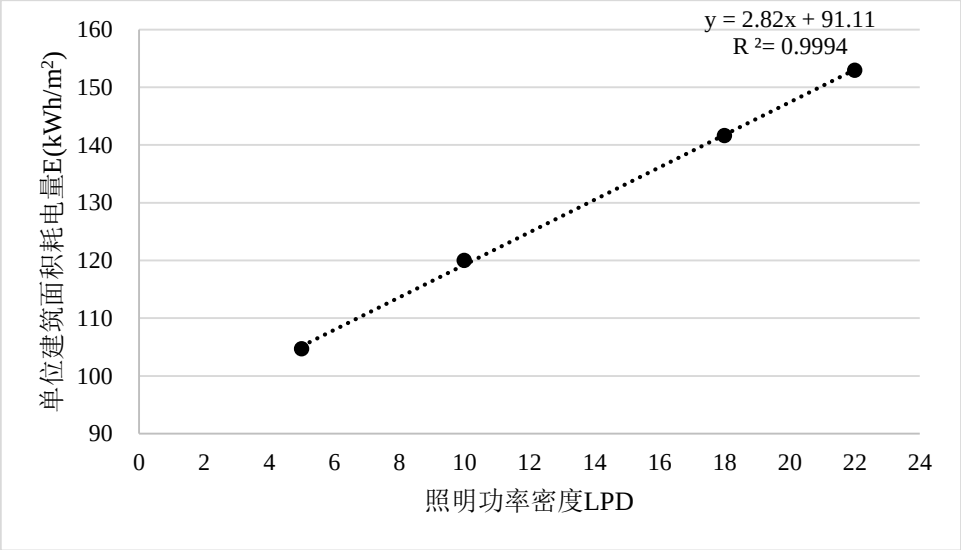


图 3.4 (b) 照明功率密度 LPD—单位建筑面积电耗拟合算法

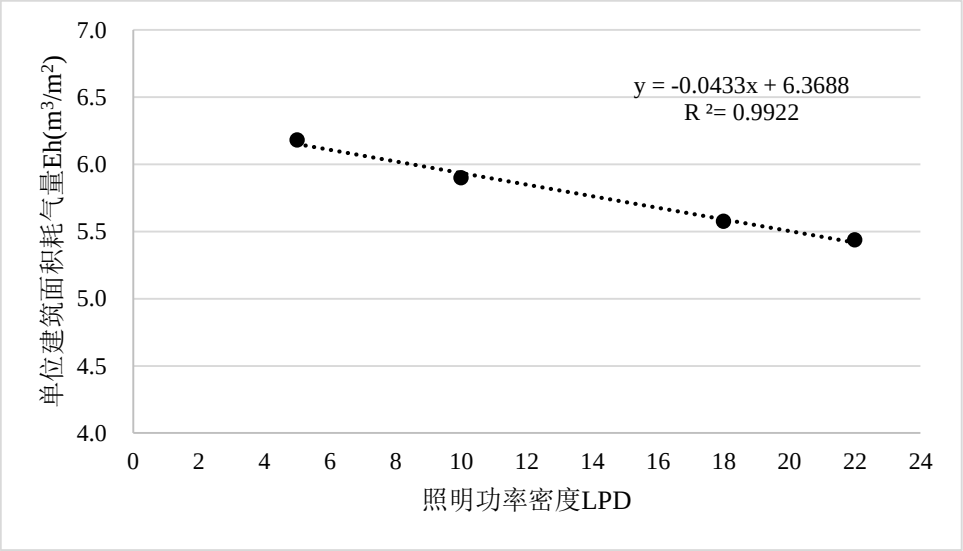


图 3.4 (c) 照明功率密度 LPD—单位建筑面积气耗拟合算法

从图 3.4(b)~(c)中可以看出，随着照明功率密度的降低，单位建筑面积耗电量大幅度减少，即更换高效节能灯对办公类建筑全年耗电的节能效果非常明显。这是因为更换高效节能灯不仅减少了照明用电能耗，同时减少了照明灯具散热量，而散热在夏季会有一部分转化为空调冷负荷，从而减少了空调侧用电能耗，包括冷机、水泵、风机、冷却塔的用电。但同时也能够看出，随着照明功率密度的降低，单位建筑面积耗气量逐渐增加，这是因为照明散热在冬季会抵消一部分空调热负荷，增加设备系统的制热负担。因此，在保证照明品质的前提下，更换高效节能灯，不能一味地追求节电量，也要兼顾冬季制热系统的用能情况，配合使用热源侧的改造措施，节约制热系统的能耗。根据模拟结果发现，照明功率密度与单位建筑面积电、气耗之间存在着近似线性的关系，拟合得到“照明功率密度 LPD-单位建筑面积电耗 E”拟合算法：E=2.82LPD+91.11，R^2=0.999；“照明功率密度 LPD-单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法 E_h=－0.0433LPD+6.3688，R^2=0.992。

3.2.2 自然采光控制系统

自然采光减少了电光源的需要量，相应减少了电力消耗和相关的污染，节能环保。没有光电能量转换过程，而是直接把太阳光导入室内需要照明的地方，太阳能的利用率最高；自然光是取之不尽、用之不竭的巨大清洁、安全的能源，具有照度均匀、持久性号、光色好、眩光的可能性少等特点。利用自然采光，无论是对于生态环境、运行经济、对于人类的健康都有着积极有益的作用，它有着较小的能耗和长远的经济效益，是常用的节能改造措施之一

自然采光控制系统的工作原理是，光传感器测量室内照度，发送信号给控制系统，控制系统比较反馈值与设定值，决定调暗/调亮照明光源或关闭/开启照明

系统。自然采光控制系统包括连续控制（continuous control）、阶梯控制（step control）和开关控制（on/off control）等。

本文采用开关控制方式（on/off control），照度感应器检测室内某参考点的自然光照度，当检测值低于照度设定值时，照明打开；当检测值高于照度设定值时，照明关断。自然采光控制系统只针对外区房间设置，照度感应器设置在外区房间内，距离墙水平 3m，进深 6m，工作面高 0.75m 处，如图 3.5(a)所示，参照我国《建筑照明设计标准》[64]对办公建筑类建筑的照明规定，设置建筑基准模型照度为 500lx，眩光最大值为 19。在基准模型（LPD=22 W/m² ）

表 3.5(a) 办公建筑照明标准[64]

房间或场所	参考平面及其高度	照度标准值（lx）	眩光最大允许值
普通办公室	0.75m 水平面	300	19
高档办公室	0.75m 水平面	500	19
会议室	0.75m 水平面	300	19
视频会议室*	0.75m 水平面	500	19
接待室、前台	0.75m 水平面	200	——
服务大厅	0.75m 水平面	300	22
设计室	实际工作面	500	19
文件整理、复印、发行室	0.75m 水平面	300	——
资料、档案室	0.75m 水平面	200	——

注：1 *垂直照度不宜低于300lx；

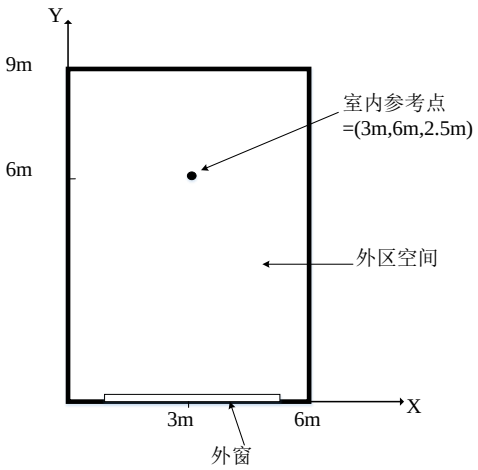


图 3.5 (a) 软件设置的照度感应器参考点位置

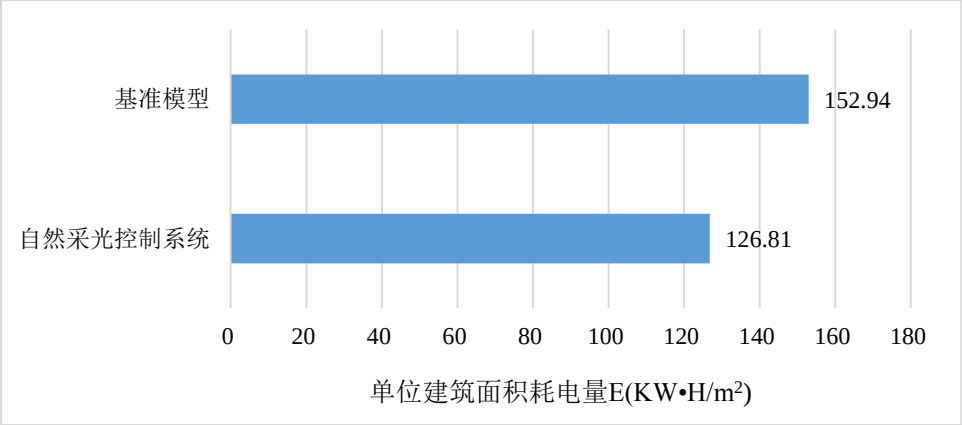


图 3.5 (b) 采用自然采光控制系统对单位建筑面积电耗的影响

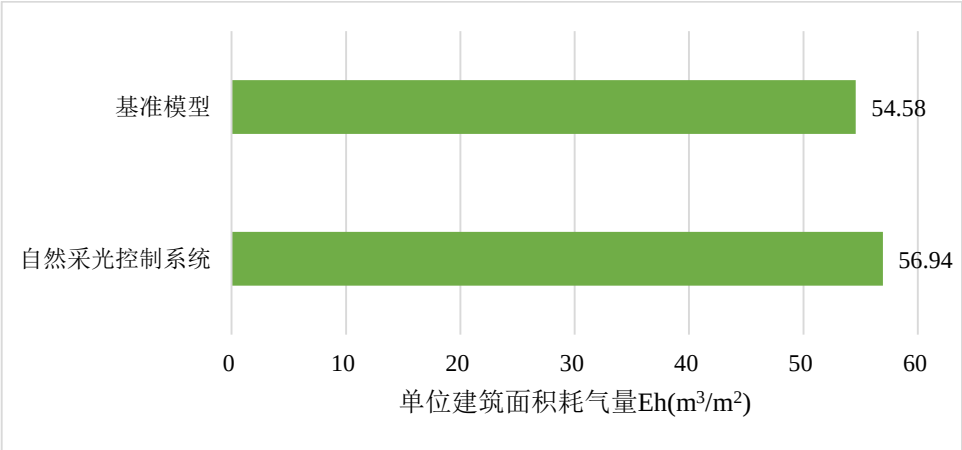


图 3.5 (c) 采用自然采光控制系统对单位建筑面积气耗的影响

由于本文设置的自然采光控制系统是 on/off 控制模式，反映在全年上就是有一段时间是建筑按照正常的照明时间表使用当前照明功率，另一段时间是直接关闭照明。因此在当前照明功率下采用自然采光控制系统的建筑能耗，可以等价地看做减小了当前照明功率的建筑能耗。

自然采光控制系统输入参数只有采用/不采用两个选项，是离散的变量，为方便后文与其他措施相互影响的实验设计和数学算法的研究（详见第四章），我们把自然采光控制系统的输入变量在算法拟合过程中转换为连续变量——“等效照明功率密度”。本文欲建立当前照明密度与等效照明功率密度之间的关系。

具体做法是：在当前照明功率密度下，采用自然采光控制系统，模拟得到单位建筑面积耗电量，将其代入“照明功率密度 LPD-单位建筑面积电耗”拟合算法：E=2.82LPD+91.11 反算照明功率密度值，则反算出的照明功率密度即为与采用自然采光控制系统达到相同电耗效果的等效照明功率密度，称为“电耗等效照明功率密度”，代号 LPD_e。同理，气耗等效照明功率密度 LPD_g 则是代入“照明功率密度 LPD-单位建筑面积气耗”拟合算法：E_h＝－0.0433LPD+6.3688 得到。

等效照明功率密度值见表。

表 3.5(b) 自然采光控制系统等效照明功率密度

当前 照明功率密度 LPD（W/m²）	单位建筑面积 耗电量 E（kWh/m²）	单位建筑面积 耗气量 E_h （m³/m²）	电耗 等效照明功率密度 LPD_e（W/m²）	气耗 等效照明功率密度 LPD_g（W/m²）
5	98.7	6.3	2.7	2.6
10	107.7	6.0	5.9	7.6
18	120.2	5.8	10.3	13.4
22	126.8	5.7	12.7	16.1

结果表明，同一个照明功率密度 LPD 对应的等效 LPD_e 与等效 LPD_g 不同，这说明只采用自然采光控制系统与只降低照明功率密度（更换高效节能灯措施）对消耗电（天燃气）量的影响不同。

根据模拟结果发现，照明功率密度与电（气）耗等效照明功率密度之间存在着近似线性的关系，拟合得到“照明功率密度 LPD-电耗等效照明功率密度 LPD_e”拟合算法：LPD_e= 0.5805LPD-0.0931，R^2=0.999；“照明功率密度 LPD-气耗等效照明功率密度 LPD_g”拟合算法：LPD_g= 0.751LPD-0.87，R^2=0.993。

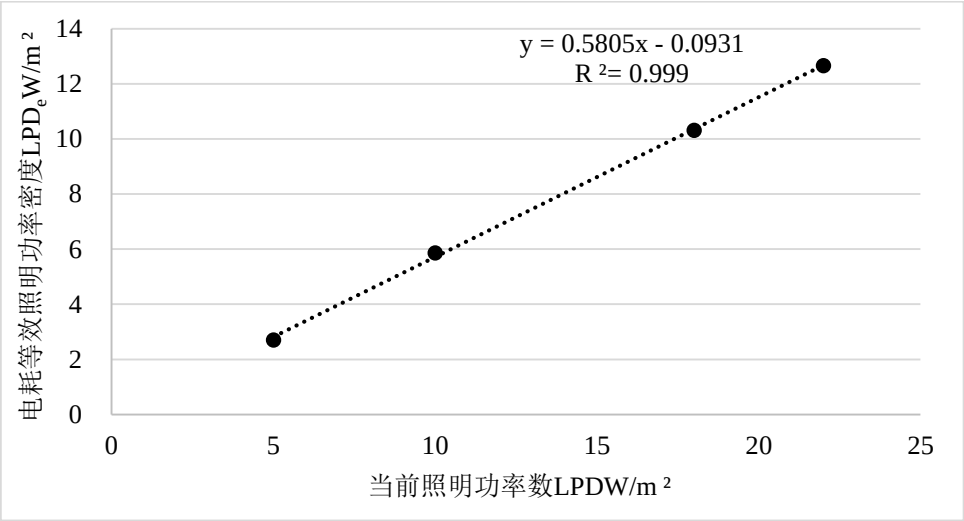


图 3.5 (d) 照明功率密度 LPD-电耗等效照明功率密度 LPD_e”拟合算法

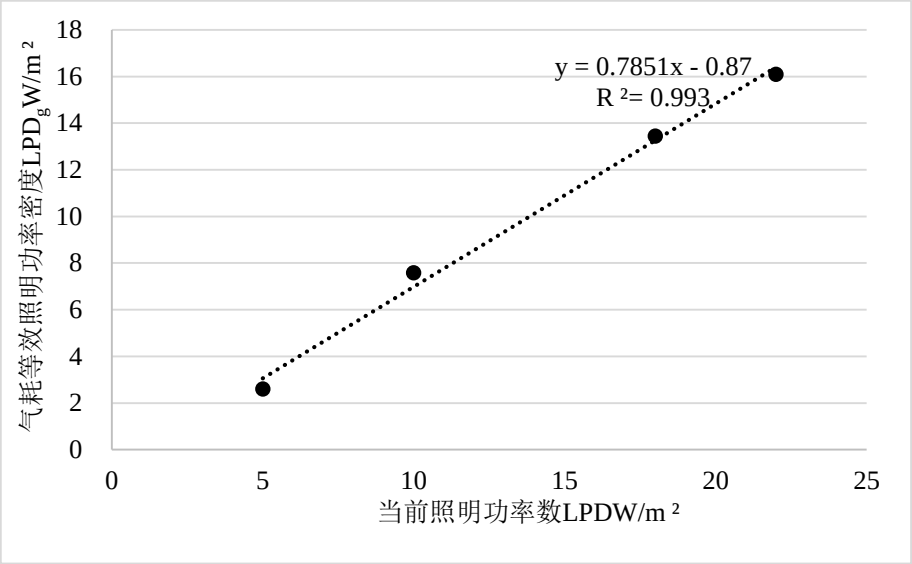


图 3.5 (e) 照明功率密度 LPD-气耗等效照明功率密度 LPD_g 拟合算法

3.3 空调水系统

3.3.1 更换高效锅炉

更换废旧锅炉，采用更高效节能的锅炉在节能改造项目中非常常见。锅炉稳态热效率是指锅炉在额定工况下运行时的热效率，即锅炉输出热量与锅炉输入热量之比。影响锅炉热效率的主要因素有锅炉的结构、炉体保温和锅炉运行状况等。更换高效锅炉，提高锅炉热效率 BE_c，能够使锅炉在提供相同供热量情况下，节省更多燃气消耗量，本文探究提高普通燃气热水锅炉效率及更换冷凝锅炉的节能量。

采用常规燃气热水锅炉，提高锅炉效率只影响天然气消耗量，不影响电力消耗。锅炉效率从 80%变化到 100%时，燃气消耗的节能率可高达 19.98%。说明更换高效燃气热水锅炉节能效果非常明显。

表 3.6 锅炉效率对能耗的影响

热水锅炉效率 BE_c	单位建筑面积耗气量 E_h（m^3/m^2）	节能率
80%	5.4	0.00%
85%	5.1	5.84%
90%	4.8	11.10%
95%	4.6	15.65%
100%	4.4	19.98%

根据模拟结果看到，锅炉热效率与单位建筑面积天然气消耗量之间存在着近似线性的关系，拟合得到“锅炉热效率 BE_c-单位建筑面积气耗量 E_h”拟合算法：E_h＝-5.4102BE_c+9.7333，R^2=0.996。

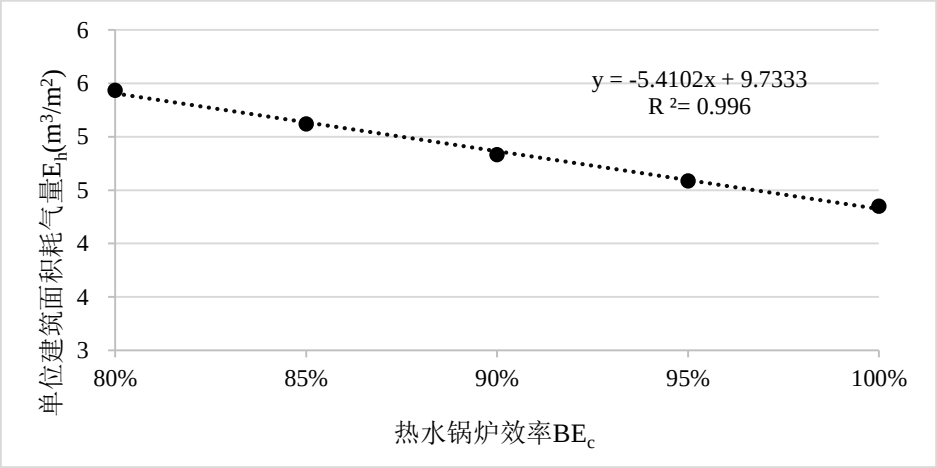


图 3.6 热水锅炉效率 BE_c 与单位建筑面积气耗拟合算法

3.3.2 更换冷凝锅炉

传统锅炉的排烟温度一般高于 150℃，烟气中的水蒸气仍处于过热状态，无法凝结成水而放出汽化潜热。如果降低锅炉的排烟温度，使烟气中呈过热状态的水蒸气凝结成水，释放汽化潜热，并把这一部分的热量仍利用于锅炉，锅炉的热效率会大大提高，燃料消耗量大大减少，节约了能源，这就是冷凝式锅炉的原理。由于烟气降温的显热得以利用，凝结水的汽化潜热也得以回收，此时锅炉的热效率可达到或超过 100%。本文用 110%热效率的冷凝锅炉替换 80%热效率的燃气热水锅炉，节能情况如下表。

表 3.7 冷凝锅炉节能效果

	单位建筑面积耗电量			单位建筑面积天然气消耗量		
	消耗量 E(KW•H/m²)	节省量	节省百分比%	消耗量 E_h(m³/m²)	节省量 (m³/m²)	节省百分比%
基准模型	152.94			5.44		
冷凝锅炉	153.43	-0.49	-0.32%	3.08	2.36	43.39%

从表中看出，采用冷凝锅炉替换原有锅炉，单位建筑面积耗电量略微提高，是因为增加了冷凝锅炉内部引风机把烟气排走的耗电量，由于只变化-0.32%，可认为耗电量基本不变。单位建筑面积耗燃气量大幅降低，节省 43.39%。因此采用冷凝锅炉耗电量基本不变，简单拟合“冷凝锅炉-单位建筑面积耗燃气量 E_h”的算法：$E_h=0.566E_{h\text{-}Base}$。$E_{h\text{-}Base}$ 为单位建筑面积建筑基准耗气量(m^3/m^2)。

3.3.3 热水锅炉换热泵

热泵制热与锅炉制热相比，排放物洁净、不污染环境、没有爆炸危险等优势；

热泵不像锅炉产生热能，而是将热源中不可直接利用的热量，提高其品位，变为可利用的再生高位热源，而且目前市场燃气价格高于电力价格，在建筑空调系统改造项目中，经常考虑将原有热水锅炉更换为高效热泵系统，作为空调节能技术的一种有效手段。常用的热泵系统包括空气源热泵、土壤源热泵、水源热泵等，各热泵在系统布置、改造成本、能源利用率方面均有区别。空气源热泵系统无需机房，占用屋顶或地面面积，改造成本最低，运行维护较为简单；采用水源热泵系统的建筑需附近有可利用的丰富水源，需热泵机房；土壤源热泵系统利用土壤低品位热源，在建筑周围埋设 1-3m 深水平地埋管或 8-180m 深垂直式地埋管，与土壤交换热量，需热泵机房，初投资较高，但运行费用较低。能源利用率在一般情况下，空气源热泵<水源热泵<地源热泵，因此，本文用热泵制热能效比 HPCOP（即额定工况下的制热量与耗电量的比值）作为不同热泵系统的性能参数变量，探究热泵不同能效比对建筑能耗的影响，模型设置为制冷季节 6 月-9 月，由冷机（COP=5）与热泵机组联合供冷，制热季，11 月-3 月由热泵机组制热。不同热泵能效比对建筑能耗影响见表。

表 3.8 不同热泵能效比对建筑能耗的影响

热泵能效比 HPCOP	总电耗（10^3kWh）	单位建筑面积电耗 EE（kWh/m^2）	节能率%
基准模型（无热泵）	8844.01	191.73	0.00%
2	8600.00	186.44	2.84%
3	7510.00	162.81	17.76%
4	6997.90	151.71	26.38%
5	6677.30	144.76	32.45%
6	6485.00	140.59	36.83%
8	6196.5	134.33	42.73%

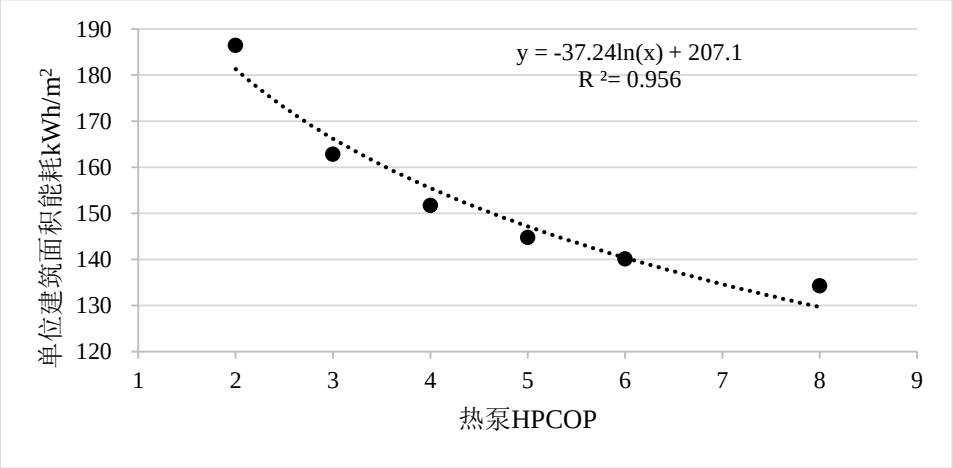


图 3.7 热泵能效比 HPCOP-单位建筑面积电耗拟合算法

从表 3.8 中可以看出，随热泵能效比越高，节能率会越高，节能率可高达

42.73%，从图 3.7 中可以看出，热泵能效比与单位建筑面积总电耗之间有近似对数的关系，随着热泵能效比升高，单位建筑面积总电耗大幅度减少，即更换高效热泵或提高热泵能效比对办公类建筑有非常明显的节能效果。通过对数据的拟合，得到“热泵能效比 HPCOP-单位建筑面积总电耗 EE”拟合算法：EE=－37.24 Ln(HPCOP) + 207.1，R^2=0.956。

3.3.4 更换高效冷水机组

冷机性能系数 COP 是指制冷机组在制冷循环中，所产生的制冷量与所消耗的功率之比，它是体现冷机制冷能效，衡量冷机在制冷方面经济性的评价指标。额定 COP 是指，在额定工况下冷机制冷性能系数值，eQUEST 软件是根据冷机额定 COP 以及建筑部分负荷率选择冷机 COP 曲线，确定当前 COP。为探究不同高效冷水机组措施对建筑能耗的影响，选择冷机额定 COP 作为描述措施“更换高效冷水机组”的性能参数，基准模型设置为制冷季节 6 月—9 月，COP 为 5 的离心式冷水机组。由于改变冷机 COP 只影响空调系统电耗，不改变燃气消耗量。因此“更换高效冷水机组—能耗算法”即研究“不同冷机性能系数与单位建筑面积电耗”的算法，单位建筑面积耗燃气量与基准模型耗燃气量相同。

表 3.9 冷机不同制冷系数对建筑电耗影响

节能改造措施	冷机制冷系数 COP	全年电耗 MWh	单位建筑面电耗 E(kWh/m^2)	节能率
更换高效冷水机组	3	8060.00	174.73	-14.25%
	5	7055.00	152.94	0.00%
	7	6612.30	143.35	6.27%
	9	6369.10	138.07	9.72%

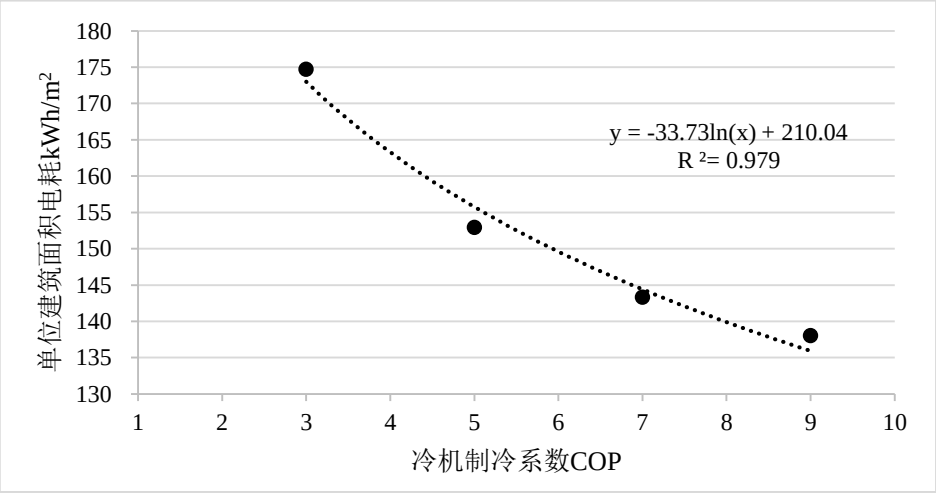


图 3.8 冷机制冷系数 COP-单位建筑面积电耗拟合算法

从表 3.9 中看出，冷机 cop 由 3 提高到 9，建筑电耗减小了 23.97%。节能效果显著。从图 3.8 中可以看出，冷机性能系数与单位建筑面积电耗之间有近似对数的关系，随着冷机性能系数升高，单位时间内制相同冷量，冷水机组用电量减少，因而单位建筑面积总电耗大幅度减少。更换高效冷水机组这一改造措施对冷源侧有非常明显的节能效果。通过对冷机性能系数以及能耗数据的拟合，得到“冷机性能系数 COP-单位建筑面积耗电量 E”拟合算法：E_8=-33.73LN（COP）+ 210.04，R^2=0.979。

3.3.5 水泵变频

在空调水系统中,水泵的选择和冷水机组一样，也是按照空调系统在最不利工况时所需要的最大负荷来选取的，且在定流量下工作运行的。由于空调负荷是根据室外气象条件和室内负荷实际情况随时变化的，而水泵通常以固定功率工作的，不能随负荷的变化而相应变化，这样必然会造成能量的损失。

常用的冷冻水泵变频措施包括一级泵系统冷冻水循环泵变频；二级泵系统中一次泵定频、二次泵变频；二级泵系统一次泵、二次泵均变频等；通过文献[21-23]得知，二级泵系统变频问题较多，如“逆向混水”；冷机效率降低二次泵能耗增大等，而一级泵系统水泵变频节能效果较好，应用较为广泛。当系统的负荷发生变化时，变频水泵流量发生变化，冷水机组改变制冷量，达到主机和水泵均节能的目的，这种系统可以有效的调节水路中出现的大流量小温差的问题。该系统设有的旁通管不同于主机定流量的旁通管作用，主机定流量时的旁通管是用来旁通系统多余或者不足的冷冻水量，该系统的旁通管是为了保证主机的最小安全流量。

因此本文基准模型设置为冷冻水侧为定流量一级泵系统（设水路分流三通阀）。eQUEST 软件设置定频水泵（One-speed），三通阀控制。进入盘管的水量发生变化，而制冷机组流量则不变。多余的流量通过旁通管路，而不进入盘管。冷却水系统、热水系统均设置定频水泵。采用措施“水泵变频”，在基准模型基础上设置冷冻水循环泵、冷却水循环泵、热水循环泵均变频控制，冷机、冷却塔、锅炉改为变流量，用户侧水系统改为二通阀控制，如图所示。模拟建筑能耗结果如图

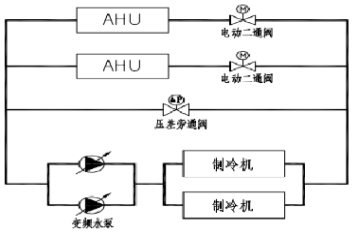


图 3.9(a) 冷冻水侧变流量一级泵系统（主机变流量）

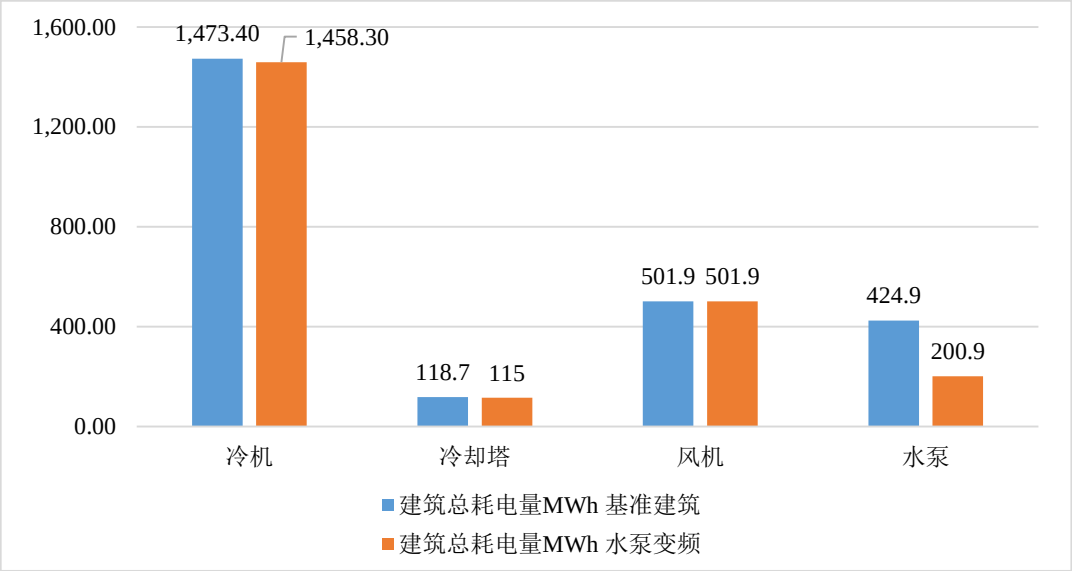


图 3.9(b) 建筑分项耗电量基准模型与水泵变频比较

采用水泵变频措施，冷机和冷却塔耗电量略微减小，水泵耗电量从 429.9 kWh/m²减小到 200.9 kWh/m²，水泵节能率高达 52.7%。从下表可以看出，水泵变频后，单位建筑面积耗电量节省了约 3.22%，耗气量基本不变。简单拟合“水泵变频-单位建筑面积耗电量 E”的算法：$E=0.968E_{Baseline}$。$E_{Baseline}$ 为单位建筑面积建筑基准耗电量（kWh/m²）。

表 3.10 水泵变频节能效果

	单位建筑面积耗电量			单位建筑面积天然气耗量		
	消耗量 E（kWh/m²）	节省量（kWh/m²）	节省百分比%	消耗量 E_h（m³/m²）	节省量（m³/m²）	节省百分比%
基准模型	152.94			5.44		
水泵变频	148.01	4.93	3.22%	5.44	0.00	0.00

3.3.6 水泵采用高效电机：

改进电动机生产工艺结构，减少电动机的铜损、铁损和机械损耗等各种损耗，改变电动机绕组接法，提高电动机的工作效率，从而降低水泵的能耗。用新式节能的水泵电动机来替代老式电机，可达到节能改造的目的。

电动机的效率公式为

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{P_2}{P_1+\Delta P}\times 100\% \tag{3.2}$$

式中，P2 为电动机的输出功率；P1 为电动机的输入功率；ΔP 为电动机的功率损耗。

对于措施“高效电机”，本文只研究采用/不采用两种情况下建筑能耗的变化。结果如下图。

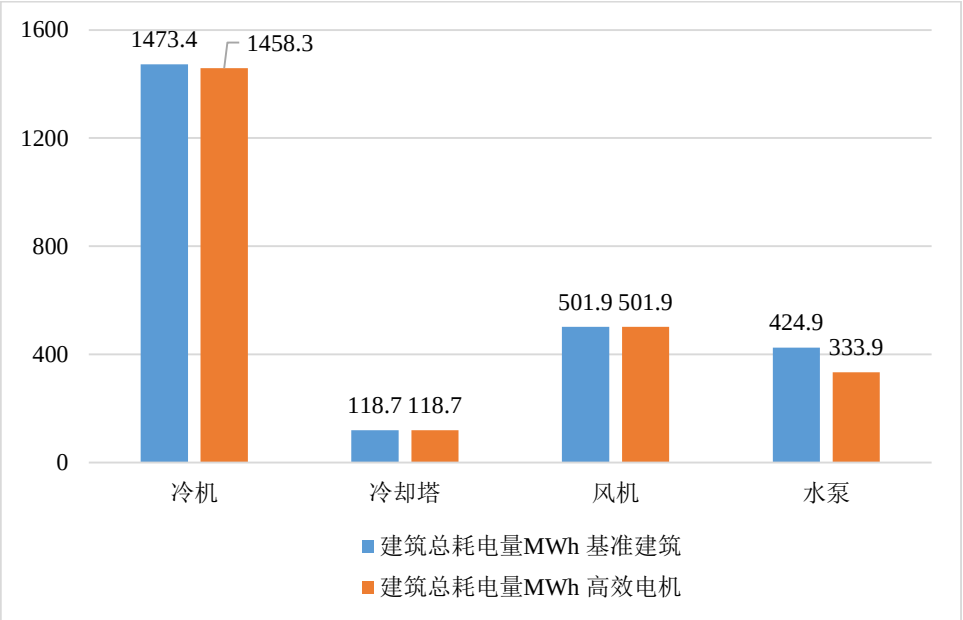


图 3.10 单位建筑面积分项耗电量基准模型与高效电动机比较

表 3.11 高效电动机节能效果

	单位建筑面积耗电量			单位建筑面积耗电量		
	消耗 s 量 E（kWh/m²）	节省量	节省百分比%	消耗量 E_h（m³/m²）	节省量（m3/m2）	节省百分比%
基准模型	152.94			5.44		
高效电机	151.10	1.84	1.20%	5.44	0.00	0.00

采用高效电动机措施，单位建筑面积水泵耗电量（kWh/m²）从 429.9 减小到 339.9，水泵自身节省 20%电耗，建筑全年节省 1.2%电耗。从表可以看出，全年单位建筑面积耗电量有所下降，耗气量基本不变。简单拟合“高效电动机-单位建筑面积耗电量 E”的算法 $E=0.98E_{Baseline}$。

3.3.7 冷却塔风机变频

冷却塔的设计是根据夏季当地气象参数（湿球温度、干球温度、相对湿度、大气压力）、工艺需求（进出水温度）和冷却水流量等条件综合计算确定选型的，而在非炎热季节，用户冷负荷变小，冷却塔风机仍按照设计工艺全速运行，将使冷却水系统出现大流量、小温差的运行状态，造成巨大的能源浪费。因此，在冷却塔风机的实际运行中，部分负荷下使其冷却能力与负荷相匹配，可达到对冷却塔改造节能的效果。

冷却塔的出水温度是通过风机的风量控制，而风量通过风机运行状况控制。安装在冷却塔水池出水总管上的温度传感可识别冷却塔出水温度，将信号反馈给

变频器，控制风机电机的转速调节，维持冷却水的温度在一定的范围内。对冷却塔风机采取变频控制是在建筑物负荷较低，冷却水温差较小的时候，改变电机频率从而降低风机转速，达到大幅度节约冷却塔风机能耗的目的。本文采用冷却塔风机变频控制，简单探究其节能效果。

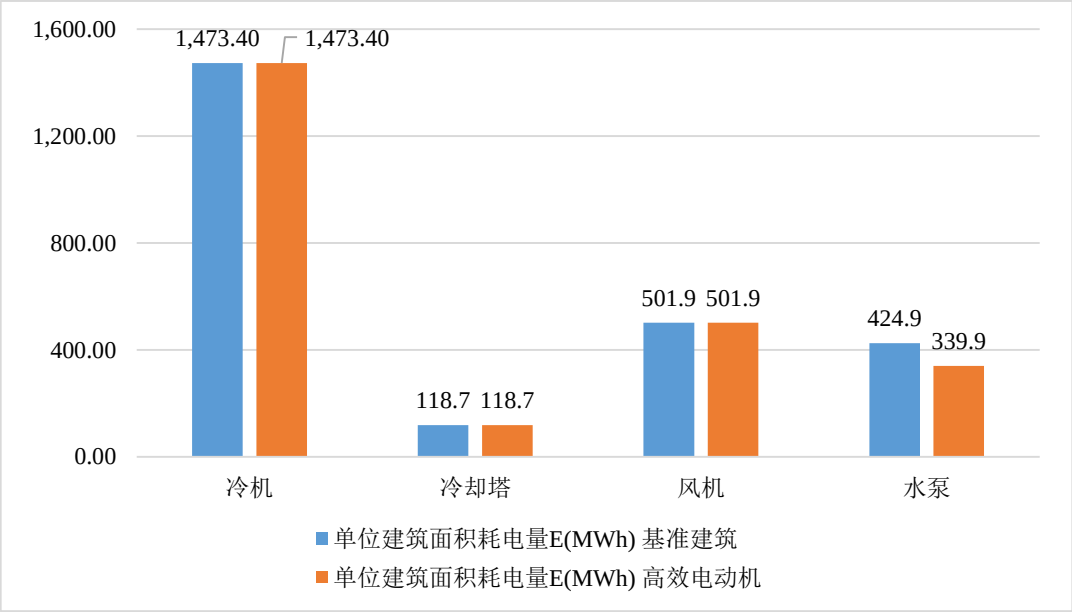


图 3.11 单位建筑面积分项耗电量基准模型与冷却塔风机变频比较

表 3.12 冷却塔风机变频节能效果

	单位建筑面积耗电量			单位建筑面积耗电量		
	消耗量 E(kWh/m²)	节省量 (kWh/m²)	节省百分比%	消耗量 E_h(m³/m²)	节省量 (m³/m²)	节省百分比%
基准模型	152.94			5.44		
冷却塔风机变频	151.53	1.41	1%	5.44	0.00	0.00

从图中看出，采用冷却塔风机变频控制，冷却塔单位建筑面积耗电量（MWh/m²）从 118.7 减小到 53.5，冷却塔节能量高达 54%。从表可以看出，全年单位建筑面积耗电量有所下降，节省建筑总电耗 1%，耗气量基本不变。简单拟合“冷却塔风机变频—单位建筑面积耗电量 E”的算法 $E=0.99E_{Baseline}$。

3.4 空调风系统

3.4.1 采用排风热回收系统

排风热回收就是利用排风中的能量来预冷（预热）新风，在新风进入室内或空气处理机组的表冷器进行热湿处理之前，降低（增加）新风焓值（或温度），从而减小空调系统负荷，减少处理新风的能耗，降低主机负荷以及其他辅助设备

的能耗（冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔、锅炉等），达到节能的目的。排风热回收的选择与当地室外新风的特点是紧密相连的，新风负荷越大，则热回收越有必要，即与室内外的温差Δt、焓差Δh有关。而夏热冬冷地区，该类气候主要位于长江流域，气温日较差小，年降水量大。夏季闷热高湿，最热平均温度26.5-43.5℃；冬季湿冷，最冷月平均气温0-8.6℃。而一般夏季室内设定温度26℃，冬季设定温度 20℃，室内外温差较大，可考虑采用排风热回收系统对该气候区建筑进行节能改造[65]。

本文在基准模型基础上增设排风热回收系统，探究该节能措施对建筑能耗的影响。结合实际热交换器不运行时（尤其是过渡季节），新风可通过旁通风管进入空调系统，以减少压力损失，减少能耗。模型在热交换器回收回风热量处理新风时，设置旁通风管调节，见图 3.12(a)所示为排风热回收系统设置原理图。eQUEST 软件中热交换器的启停控制方式有：风机控制；最小新风量控制；自定义时间表控制；新风与回风温差控制；新风与回风焓差控制启停。本文选择新风与回风焓差控制启停，当新风与回风焓差的绝对值超过2KJ/kg，热交换器开启，反之，关闭。为保证热交换器不会在过渡季节使用，避免了自然冷源的浪费，设置空调系统风机停止运行，热交换器始终关闭。空调系统风机时间表如图。根据文献[65]，夏季新风潜热负荷高于显热负荷，而冬季显热负荷高于潜热负荷，就冬季而言，新风全热回收和显热回收效果差别不大，但夏季使用显热回收的话，则可供回收的能量很小，从全年角度看，夏热冬冷地区设置排风全热回收比排风显热回收节能效果更好。热交换器有转轮式、板翅式、回收式、热管式等，由于转轮式设备紧凑、阻力小、效率较高等特点，本文排风全热回收的模型设置选择转轮式热交换器，空气流动方式为逆流，默认设定显热效率为 76%，潜热效率为74%，利用 eQUEST 软件在基准模型模拟采用排风热回收系统后全年耗电、耗气量，结果如下表 3.13。

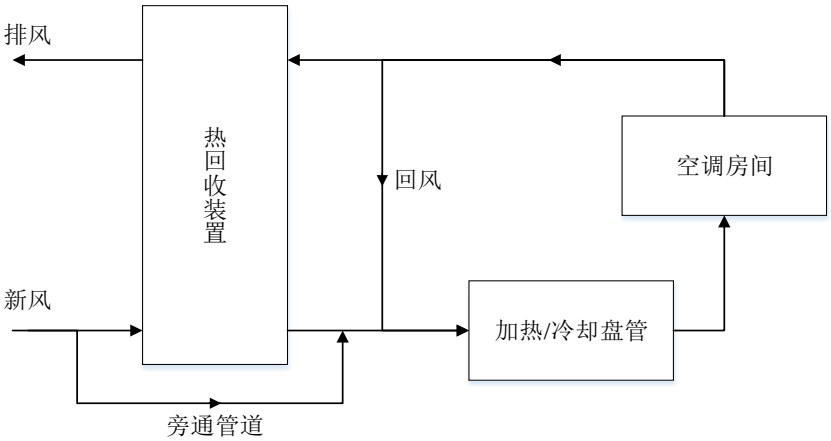


图 3.12(a) 排风热回收系统设置原理图

表 3.13 排风热回收系统对单位建筑面积电、气耗的影响

节能改造措施	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）
基准模型	152.94	5.44
排风热回收	151.86	2.86

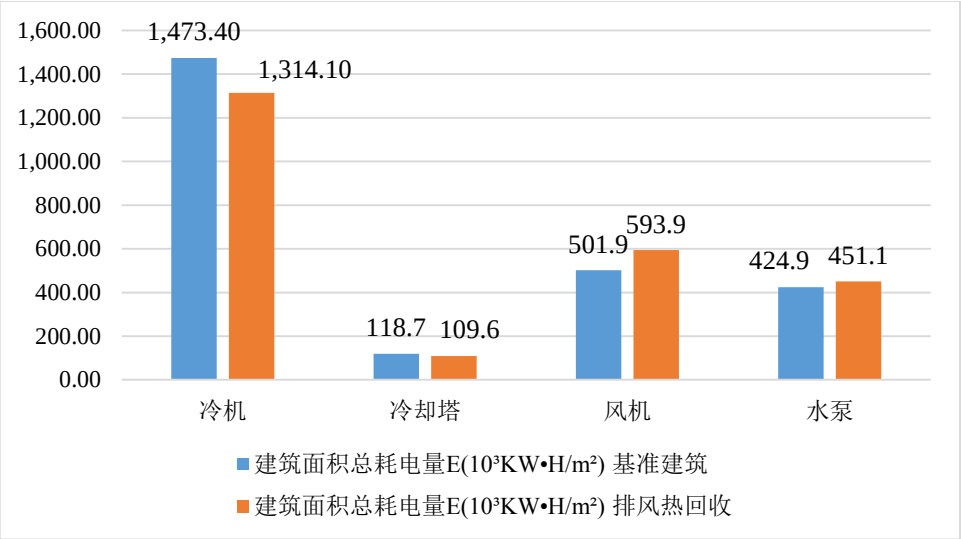


图 3.12(b) 排风热回收系统 vs 基准模型对空调设备能耗的影响

从图中可以看出，虽然热交换器的使用可有效降低新风处理能耗及其他辅助冷冻水泵、冷却水泵、冷机、冷却塔的能耗，但同时也会相应地增加一些辅助设备能耗（溶液热回收系统的循环泵、排风风机等）。因此，单从对单位建筑面积全年耗电量的影响来看，夏热冬冷地区采用排风热回收系统全年节电效果甚微。但对于冬季，利用室内温度较高的热回风加热处理新风，大大节省了锅炉能耗，单位建筑面积耗气量约为基准模型的 53%，节燃气量高达 47%，因此考虑全年能耗节省情况，采用排风热回收系统可视为夏热冬冷地区办公建筑节能改造的有利节能措施。通过能耗结果，简单拟合“排风热回收系统-单位建筑面积耗电量 E”算法：$E=0.98E_{Base}$；“排风热回收系统-单位建筑面积耗气量 E_h”算法：$E_h=0.53E_{hBase}$。

3.16 本章小结

本章以上海地区作为夏热冬冷地区的代表，介绍了夏热冬冷地区办公类型建筑常用的 13 种节能改造措施：1）加外墙保温材料；2）更换高性能窗户；3）加装外遮阳装置；4）更换高效节能灯；5）自然采光控制系统；6）更换高效锅炉；

7）更换冷凝锅炉；8）热水锅炉换热泵；9）更换高效冷水机组；10）水泵变频；11）更换高效电动机； 12）冷却塔风机变频；13）排风热回收；模拟并分析各改造措施节能效果。利用回归分析方法，拟合得到“单项改造措施与单位建筑面积电（气）耗”的算法。当实际建筑（除建筑形状/尺寸外）的性能参数与典型模型参数不同时，利用此算法对实际建筑基准能耗进行修正。该算法同样用于改造后采用单项节能改造措施时，对建筑能耗、节能量的估算，为第五章快速节能量估算软件的开发作准备。

第 4 章 多项节能改造措施与能耗算法研究

第三章确定了夏热冬冷地区办公类建筑常用的 13 种节能改造措施，并建立了单项节能措施性能参数与单位建筑面积电耗、单位建筑面积气耗的数学拟合算法。被改造建筑性能参数（除建筑形状/尺寸外）与基准建筑不同时，利用此算法计算由一个性能参数不同而引起的能耗变化。但是，部分节能改造措施存在相互间的影响，共同作用时对能耗的影响是非线性的，无法只用第 3 章“单项措施——能耗算法”计算综合节能效果。因此本章针对这 13 种节能改造措施利用专业理论与软件模拟结合的分析方式，确定相互影响的改造措施类别，并探究相互影响的改造措施共同作用时的建筑能耗的算法。

4.1 相互影响的节能改造措施确定

4.1.1 理论分析

本文有 13 种节能改造措施，见下表，其中 1-5 措施为非空调侧改造措施，6-13 为空调侧改造措施。从暖通空调专业角度出发，理论分析判断各项措施之间是否存在相互影响，判断的依据是，如果这两种措施在计算能耗的过程中，一种措施引起了第三者的变化，而第三者的变化又影响了另一种措施对能耗的计算（例如高效节能灯影响建筑负荷继而影响更换高效锅炉对能耗的计算），那么认为这两种措施相互影响。

表 4.1 节能改造措施表

非空调侧改造措施	空调侧改造措施	
1.加装外墙保温材料	6.更换高效锅炉	10.水泵变频
2.更换高性能窗户	7.更换冷凝锅炉	11.更换高效电动机
3.加装外遮阳装置	8.热水锅炉换热泵	12.冷却塔风机频；
4.更换高效节能灯	9.更换高效冷机	13.采用排风热回收
5.自然采光控制系统		

（一）非空调侧改造措施之间：

1-5 为非空调侧措施包括：加装外墙保温材料；更换高性能窗户；加装外遮阳装置；更换高效节能灯；自然采光控制系统。这其中，①加装外遮阳装置与自然采光控制系统②更换高效节能灯与自然采光控制系统是相互影响的。

分析①，自然采光系统是根据室内某一点照度值高于设定值时，关闭照明系统利用自然采光，低于设定值时开启照明系统。而采用外遮阳装置会降低室内照度，从而影响自然采光控制系统利用自然光的时间，最终影响照明能耗以及空调能耗。因此，加装外遮阳装置与自然采光控制系统是相互影响的。

分析②，本文中的自然采光控制系统是 on/off 控制模式，当外区某一房间照度满足时，直接关闭该房间所在区域的所有照明，即自然采光控制系统的节能量数值跟该房间的照明功率有关，而房间面积是固定的，即节能量与当前照明功率密度 LPD 有关。本文不同的照明功率密度代表了更换不同的高效节能灯措施，因此更换高效节能灯与自然采光控制系统是相互影响的。

其他例如：外墙保温与更换高性能窗户，都使围护结构传热系数减小，建筑负荷减小，在节能方面，对制冷有利但对采暖不利。但在负荷计算时两者没有关系，可以分开计算，上升到建筑能耗的计算层面亦是如此。更换高效节能灯与建筑外遮阳，首先更换节能灯可以降低照明电耗，但同时降低了室内发热量，对于暖通空调侧节能方面，对制冷有利但对采暖不利。而增设外遮阳只是单纯降低了建筑负荷，对制冷有利但对采暖不利。这两种措施，尽管在影响建筑负荷时有相同的部分（都使建筑负荷降低），但是在物理上，两者是没有关系的。即采用外遮阳措施并不会减少照明灯具散热的热量，反之亦然。

（二）非空调侧与空调侧改造措施之间：

对建筑负荷有影响的非空调侧改造措施都会影响空调侧改造措施的节能量。而本文的 5 种非空调侧措施都影响建筑负荷，即本文的 5 种非空调侧改造措施与空调侧改造措施均相互影响。在探究有相互影响的非空调侧与空调侧改造措施综合节能量算法时，对于空调侧措施本文只考虑更换高效锅炉、更换高效冷机以及更换高效热水泵 3 种，而其他空调侧措施（因其本身节能量较小，单独每项节能量之与综合节能量计算差别不大），不参与讨论。

例如分析外墙保温与更换高效锅炉这一组合，当只采用外墙保温措施时，建筑负荷会减小，从而使锅炉耗燃气量减小。当只更换高效锅炉时，原建筑负荷不变，单单提高锅炉效率，从而使锅炉能耗减小。由于锅炉的性能曲线与部分负荷率和锅炉额定工况下的效率有关，若同时采用这两个改造措施，则是同时改变了部分负荷率和额定工况下的锅炉效率，势必会影响锅炉性能曲线从而影响锅炉的能耗的计算。

而对于自然采光与空调侧改造措施存在相互影响时的能耗算法研究，利用第三章的 3.5 节 “照明功率密度 LPD-电耗等效照明功率密度 LPD_e”算法和“照明功率密度 LPD-气耗等效照明功率密度 LPD_g”算法将自然采光转化为能耗效果相

同的等价照明功率密度，合并在更换节能灯与空调侧措施相互影响的能耗算法研究中，下文将不再讨论自然采光与空调侧改造措施的组合。而对于自然采光与遮阳改造措施，将其与更换节能灯措施合并，探究三者共同作用下的能耗，在 4.5.2 节会详细讨论。

（三）空调侧改造措施之间

①水泵变频与冷却塔风机变频：水泵变频包括冷冻水泵、冷却水泵、热水泵变频。若冷却水泵变频，则冷却水流量减小，冷凝器压力增大；若冷却塔风机变频，风机降速，冷却塔出塔水温增高，冷水机组冷却侧入口水温升高，冷凝压力升高；因此这两种改造措施都影响了冷凝压力，影响冷机能耗，所以相互影响。

如果有相互间影响的措施按照参数的不同水平数组合，这些组合都用能耗模拟软件模拟一遍的话，工程量是较大的。

因此本文采用一种简化方式，通过理论分析，筛选出有相互间影响的措施。我们知道，同时采用有相互间影响的措施，如果单独每项改造措施的节能量之和接近模拟出的实际节能量，即误差在较小范围内，对于节能方案初步筛选阶段，用这些措施的单项节能量之和代替综合节能量的估算是可以接受的。如果误差较大，则需模拟计算。因此本文接下来需对每种相互影响的措施组合进行误差判断，筛选出误差大的组合后使用能耗软件模拟对其作能耗算法研究。

4.1.2 模拟分析

根据上述理论分析，将有相互影响可能性的节能改造措施分组，每两个为一组，通过能耗模拟软件模拟节能改造措施同时采用和分别采用时的节能量，对每组结果进行误差判断。判断依据是：如果两种节能改造措施同时采用的节能量（记为 A）与分别采用时的节能量之和（记为 B）的误差在规定范围内，则可用分别采用这两个措施的节能量之和代替同时采用的节能效果。反之，误差超过规定范围，则需依靠软件模拟同时采用时的能耗结果拟合得到的算法计算。

由于部分节能改造措施可通过对应的性能参数表示，详见表 4.2，而性能参数取水平数不同，所能达到的节能效果亦不同。因此，在做模拟及误差分析判断时，每项节能措施取使节能效果达到最显著的性能参数水平，（例如模拟更换高效节能灯与更换高效冷机两个措施是否相互影响，照明功率密度范围在 5-22 W/m^2，取 5 W/m^2，冷机 COP 范围在 3-9，取 COP=9 参与模拟计算）。按照上述方法，模拟各组措施的节能效果及误差判断见表 4.3。

表 4.2 节能改造措施类别及性能参数范围

	节能改造措施名称	可输入变量	代号	单位	范围
1	加装外墙保温材料	外墙传热系数	K_w	W/(m² ・K)	0.2-1.6
2	更换高性能窗户	外窗传热系数	K_{win}	W/(m² ・K)	0.8—6.3
		遮阳系数	SC_w	——	0.2—1
3	加装外遮阳装置	遮阳系数	SC_w	——	0.2—1
4	更换高效节能灯	照明功率密度	LPD	W/m²	5—22
5	自然采光控制系统	有/无	——	——	——
6	更换高效锅炉	锅炉热效率	BE_c	——	80%—100%
7	热水锅炉换热泵	热泵能效比	HPCOP	——	2—8
8	更换高效冷水机组	冷机性能系数	COP	——	3—9
9	水泵变频	有/无	——	——	——
10	水泵采用高效冷机	有/无	——	——	——
11	冷却塔风机变频	有/无	——	——	——
12	排风热回收系统	有/无	——	——	——

表 4.3 节能改造措施能耗误差判断表

节能改造措施	节能量		节能改造措施	节能量	
	电耗 MWH	气耗 m³		电耗 MWH	气耗 m³
更换高效节能灯	2226.7	-34281	提高遮阳系数	384.7	-26077
自然采光	1205.5	-10841	自然采光	1205.5	-10841
节能量之和	3432.2	-45122	节能量之和	1590.2	-36918
同时采用	2499.9	-37797	同时采用	1596.7	-48638
评判误差%	**37.29%**	**19.38%**	评判误差%	-0.41%	**-24.10%**
更换高效节能灯	2226.7	-34281	外墙保温	-42.7	12013
更换高效冷机	685.9	0	更换冷机	685.9	0
节能量之和	3012.6	-34281	节能量之和	643.2	12013
同时采用	2832.8	-34281	同时采用	645.4	12013
评判误差%	**6.35%**	0.00%	评判误差%	-0.34%	0.00%
更换高效节能灯	2226.7	-34281	外墙保温	-42.7	12013
更换高效锅炉	0	50103	更换高效锅炉	0	50103
节能量之和	2226.7	15822	节能量之和	-42.7	62116
同时采用	2226.7	22854	同时采用	-44.1	60065
评判误差%	0.00%	**-30.77%**	评判误差%	-3.17%	3.41%

续表

节能改造措施	节能量		节能改造措施	节能量	
	电耗 MWH	气耗 m³		电耗 MWH	气耗 m³
提高遮阳系数	384.7	-26077	降低窗传热系数	-95	41606
更换冷机	685.9	0	更换冷机	685.9	0
节能量之和	1070.6	-26077	节能量之和	590.9	41606
同时采用	987.8	-26077	同时采用	619.4	41606
评判误差%	**8.38%**	0.00%	评判误差%	-4.60%	0.00%
提高遮阳系数	384.7	-26077	降低窗传热系数	-95	41606
更换高效锅炉	0	50103	更换高效锅炉	0	50103
节能量之和	384.7	24026	节能量之和	-95	91709
同时采用	384.7	17580	同时采用	-95	83505
评判误差%	0.00%	**36.67%**	评判误差%	0.00%	**9.82%**
水泵变频	227.4	0	——	——	
风机变频	65	0	——	——	
节能量之和	292.4	0	——	——	
同时采用	300.2	0	——	——	
评判误差%	-2.60%	0.00%	——	——	
节能改造措施	节电量 MWH		节能改造措施	节电量 MWH	
更换高效节能灯	1883.89		降低窗传热系数	321.06	
更换高效热泵	3366.58		更换高效热泵	3366.58	
节能量之和	5250.47		节能量之和	3687.64	
同时采用	5554.48		同时采用	3128.18	
评判误差	**-5.47%**		评判误差	**17.88%**	
提高遮阳系数	123.93		外墙保温	77.43	
更换高效热泵	3366.58		更换高效热泵	3366.58	
节能量之和	3490.51		节能量之和	3444.01	
同时采用	3555.38		同时采用	3353.48	
评判误差	-1.82%		评判误差	2.70%	

注：图中，评判误差= $\frac{(\text{单独节能量之和}-\text{同时采用的综合节能量})}{\text{同时采用的综合节能量}}\times 100\%$

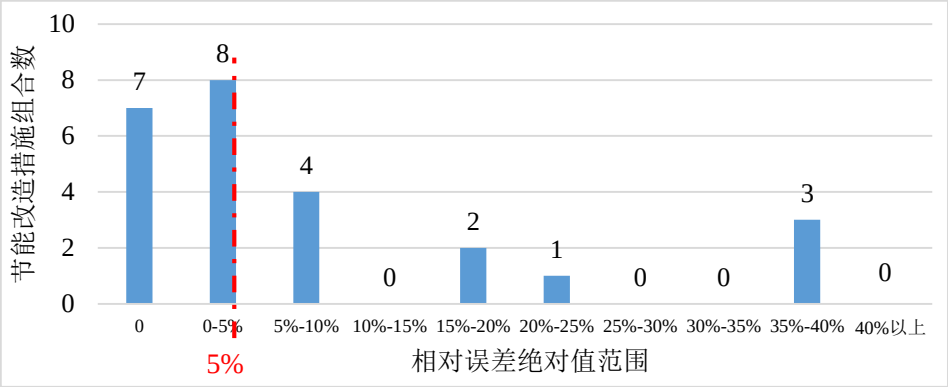


图 4.1 评判误差范围

从表 4.3 的计算结果看出，在数值上，两种节能改造措施的分别节能量之和（节电、节气量）往往要多于同时采用两种措施的综合节能量（占 65%），这也反应了工程上，同时采用多种改造措施，用单独每项改造措施的节能量相加的做法往往高估了实际的节能效果，这会造成实际回报期过长，投资金额无法收回等经济损失。

图 4.1 可以看出，评判误差在 5%以内的情况占所有组合情况的 60%左右，而评判误差在 5%以上的情况占 40%。建筑全年的节能量是很大的，从全年的角度来看，单独每项节能量之和与同时采用多种措施的综合节能量评判误差在 5%以内是可接受的，因此本文以 5%作为误差判断的临界值。由此确定，相互影响且评判误差≥5%的节能改造措施进入到“多项措施与能耗”算法模拟中，包括：①提高综合遮阳系数与自然采光；②更换高效节能灯与自然采光；③更换高效节能灯与更换高效冷机；④更换高效节能灯与更换高效锅炉；⑤更换高性节能灯与更换高性能热泵；⑥提高综合遮阳系数与更换高效冷机；⑦提高综合遮阳系数与更换高效锅炉；⑧降低窗传热系数与更换高效锅炉；⑨降低窗传热系数与更换高效热泵。

4.2 研究方法

为了探究相互影响的节能改造措施同时采用的综合节能量的算法，采用预先模拟方法（Pre-Simulated Method），预先模拟相互间影响的节能改造措施不同水平参数下的建筑能耗，再根据能耗结果拟合具体算法，接下来讨论如何安排试验设计已完成较准确、较全面的模拟。

在试验设计方法中，全面试验设计、正交实验设计和均匀实验设计都是常用的方法。而本文均为两两措施相互影响，对只采用两项相互影响措施的情况进行试验设计时，根据试验因素决定采用全面试验方法。全面试验，即对所选取的试验因素的所有水平组合全部实验一次以上，它适用于要考察的因素和水平都不太

多的场合，主要有单因素和双因素试验。全面试验相较于正交试验最大的优点是所获得的信息量很多，可以准确地估计各实验因素的主效应的大小，还可估计因素之间各级交互作用效应的大小[67]。

在按照试验设计模拟能耗之后，为了建立两个节能措施变量与建筑能耗之间的统计关系，并达到可通过改变节能措施变量对建筑能耗做出预测，估算节能量的目的，本文仍采用逐步回归分析方法搭建两项节能改造措施与能耗的数学模型。利用 SPSS 软件拟合能耗结果，初步设定拟合函数为二元二次非线性方程：$E = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f$，其中 E 为建筑能耗，x，y 分别代表不同节能改造措施的参数，a~f 为常数。

而对于采用多项措施，措施中有两组以上相互影响的情况（如采用三种改造措施 A、B、C，A 与 B 相互影响，B 与 C 相互影响，A 与 C 无相互影响）进行实验设计时，由于多因素多水平决定采用正交试验设计方法。正交试验设计是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验，这些有代表性的点具备了“均匀分散，齐整可比”的特点，正交试验设计可以大大减少模拟次数，是一种高效、快速、经济的实验设计方法[68]。

在建立多个节能措施与建筑能耗之间的统计关系时，初步设定拟合函数为多元二次非线性方程，如四元二次非线性方程：$E = ax^2 + by^2 + cz^2 + dw^2 + exy + fxz + gxw + hyz + iyw + jzw + kx + ly + mz + nw + p = 0$。其中 E 为建筑能耗，x，y，z，w 分别代表不同节能改造措施的参数，a~p 为常数。

4.3 试验设计

本文在基准模型基础上，按照第三章单项节能措施模型的设定方法，搭建多项节能改造措施的能耗模型。各项措施参数及其水平数取值见下表，分别进行双因素四水平全面试验和四因素四水平正交试验设计。

表 4.4 全面试验设计参数表

名称	代号	范围	单位	试验水平数			
外墙传热系数	K_w	0.2-1.6	W/(m²・K)	0.2	0.6	1.2	1.6
外窗传热系数	K_{win}	0.8-6.3	W/(m²・K)	0.8	2	4	6.3
遮阳系数	SC_w	0.2-1.0		0.2	0.4	0.8	1
照明功率密度	LPD	5-22	W/m²	5	10	18	22
锅炉热效率	BE_c	80%-1 00%		80%	85%	95%	100%
热泵能效比	HPCOP	2-8		2	4	6	8
冷机性能系数	COP	3-9		3	5	7	9

4.4 两项节能改造措施快速估算模型

按照上述参数水平设计全面试验表，根据全面试验表利用 eQUEST 软件模拟建筑能耗，再将能耗结果与各改造措施参数利用 SPSS 软件逐步回归法进行拟合，试验设计表、能耗结果以及拟合值、拟合误差汇总在表 4.5~4.13。

4.4.1 组合一："锅炉效率与外窗传热系数—能耗"算法研究

更换高效锅炉只影响了建筑耗气量，不影响建筑的耗电量，因此在有更换高效锅炉措施的组合中，耗电量的变化只与另一个改造措施的参数变化有关，变化量与只采用另一个改造措施时建筑的电耗变化相同，因此，对同时采用降低窗传热系数与更换高效锅炉这一组合，利用第三章"外窗传热系数 K_{win}—建筑耗电量 E"算法估算建筑电耗。

研究"外窗传热系数、锅炉效率—建筑耗气量 E_h"算法，建筑气耗的变化是窗传热系数的降低和锅炉效率的提高两者共同作用的结果，而两者在计算锅炉耗燃气量时又相互影响，因此模拟不同窗传热系数与不同锅炉效率同时作用的建筑耗燃气量，将模拟结果作逐步拟合回归，$K_{win}\times BE_c$, K_{win} ,K_{win}^2, BE_c, BE_c^2 作为初始变量进入到模型逐步回归筛选，通过筛选变量最后拟合得到"窗传热系数 K_{win} 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h"算法，如下式：

$$E_h = 8.381 - 4.935BE_c + 0.152K_{win} \qquad (4.1)$$

E_h—单位建筑面积耗气量 m^3/m^2

BE_c—锅炉热效率;

K_{win}—窗传热系数 $W/(m^2K)$

E_h 拟合值与模拟值的最小误差 0.27%，最大误差 1.83%，F 值 716.5，调整后 R^2=99%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度非常好。

表 4.5 降低窗传热系数与更换高效锅炉模拟及拟合结果

试验序号	锅炉效率 BE_c	窗 K_{win} $W/(m^2K)$	单位建筑面积耗气量 E_h（m^3/m^2）	E_h 拟合值（m^3/m^2）	残差	相对误差%
1	80%	6.3	5.44	5.39	0.05	0.92%
2	80%	4	5.13	5.04	0.09	1.83%
3	80%	2	4.70	4.74	-0.04	-0.75%
4	80%	0.8	4.54	4.55	-0.02	-0.41%
5	85%	6.3	5.11	5.14	-0.03	-0.53%
6	85%	4	4.83	4.79	0.04	0.74%
7	85%	2	4.42	4.49	-0.07	-1.53%
8	85%	0.8	4.27	4.31	-0.04	-0.90%
9	95%	6.3	4.58	4.65	-0.07	-1.47%

续表

试验序号	锅炉效率 BE_c	窗 K_{win} W/(m²K)	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）	E_h 拟合值（m³/m²）	残差	相对误差%
10	95%	4	4.33	4.30	0.03	0.63%
11	95%	2	3.96	4.00	-0.04	-0.96%
12	95%	0.8	3.82	3.81	0.01	0.27%
13	100%	6.3	4.35	4.40	-0.05	-1.13%
14	100%	4	4.10	4.05	0.05	1.26%
15	100%	2	3.76	3.75	0.01	0.32%
16	100%	0.8	3.63	3.57	0.06	1.66%

4.4.2 组合二："锅炉效率与遮阳系数—能耗"算法研究

同组合一的算法研究，同时降低遮阳系数与更换高效锅炉的电耗算法利用第三章单项措施"增设外遮阳 SC_w—建筑耗电量 E"算法计算。

对于其综合作用下的耗气量计算，由于耗气量是综合遮阳系数的降低和锅炉效率的提高两者共同作用的结果，因此模拟不同遮阳系数与不同锅炉效率同时作用的建筑耗燃气量，将模拟结果作逐步拟合回归，$SC_w \times BE_c$, SC_w ,SC_w^2, BE_c, BE_c^2 作为初始变量进入到模型中进行逐步回归筛选，得到"综合遮阳系数 SC_w 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h"拟合算法，如下式：

$$E_h = 10.58 - 5.675BE_c - 0.631SC_w \tag{4.2}$$

E_h—单位建筑面积耗气量 m^3/m^2

BE_c—锅炉热效率

SC_w—综合遮阳系数

E_h 拟合值与模拟值的最小误差 0.10%，最大误差 1.78%，F 值=867.1，调整后 R^2=99.1%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度较好。

表 4.6 提高遮阳系数与更换高效锅炉模拟及拟合结果

试验序号	锅炉效率 BE_c	SC_w	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）	E_h 拟合值	残差	相对误差%
1	80%	0.2	6.00	5.91	0.09	1.48%
2	80%	0.4	5.79	5.79	0.01	0.10%
3	80%	0.8	5.51	5.54	-0.02	-0.39%
4	80%	1	5.44	5.41	0.03	0.53%
5	85%	0.2	5.65	5.63	0.02	0.30%
6	85%	0.4	5.45	5.50	-0.05	-0.98%
7	85%	0.8	5.19	5.25	-0.06	-1.18%
8	85%	1	5.11	5.13	-0.01	-0.22%

续表

试验序号	锅炉效率 BE_c	SC_w	单位建筑面积耗气量 E_h（m^3/m^2）	E_h 拟合值	残差	相对误差%
9	95%	0.2	5.06	5.06	-0.01	-0.12%
10	95%	0.4	4.88	4.94	-0.06	-1.18%
11	95%	0.8	4.64	4.68	-0.04	-0.87%
12	95%	1	4.58	4.56	0.02	0.49%
13	100%	0.2	4.80	4.78	0.02	0.49%
14	100%	0.4	4.63	4.65	-0.02	-0.47%
15	100%	0.8	4.41	4.40	0.01	0.19%
16	100%	1	4.35	4.27	0.08	1.78%

4.4.3 组合三："锅炉效率与照明功率密度—能耗"算法的研究

同组合一的算法研究，同时采用更换高效节能灯与更换高效锅炉的电耗算法用第三章"照明功率密度 LPD—建筑耗电量 E"算法计算。

而同时采用更换高效节能灯与更换高效锅炉的建筑气耗的计算，对照明功率密度与锅炉效率共同作用的能耗作模拟和数学拟合回归，LPD×BE_c, LPD, LPD^2, BE_c, BE_c^2 作为初始变量进入到逐步回归模型中筛选，拟合得到"照明功率密度 LPD 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h"算法，如下式：

$$E_h = 8.311 - 3.196BE_c^{\ 2} - 0.039LPD \tag{4.3}$$

E_h—单位建筑面积耗气量 m^3/m^2

BE_c—锅炉热效率

LPD—照明功率密度（W/m^2）

E_h 拟合值与模拟值的最小误差 0.08%，最大误差 1.93%，F 值=752.6，调整后 R^2=99.0%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度较好。

表 4.7 更换高效节能灯与更换高效锅炉实验设计及拟合

试验序号	锅炉效率 BE_c	LPD（W/m^2）	单位建筑面积耗气量 E_h （m^3/m^2）	E_h 拟合值	残差	相对误差%
1	80%	5	6.18	6.07	0.11	1.74%
2	80%	10	5.90	5.88	0.02	0.35%
3	80%	18	5.58	5.57	0.01	0.09%
4	80%	22	5.44	5.42	0.02	0.35%
5	85%	5	5.81	5.81	0.00	0.08%
6	85%	10	5.55	5.62	-0.06	-1.14%
7	85%	18	5.25	5.31	-0.06	-1.15%

续表

试验序号	锅炉效率 BE_c	LPD（W/m²）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）	E_h 拟合值	残差	相对误差%
8	85%	22	5.12	5.15	-0.03	-0.64%
9	95%	5	5.20	5.23	-0.03	-0.58%
10	95%	10	4.97	5.04	-0.07	-1.46%
11	95%	18	4.69	4.73	-0.04	-0.80%
12	95%	22	4.59	4.58	0.01	0.19%
13	100%	5	4.94	4.92	0.02	0.40%
14	100%	10	4.72	4.73	-0.01	-0.21%
15	100%	18	4.46	4.42	0.04	0.84%
16	100%	22	4.35	4.27	0.08	1.93%

4.4.4 组合四："冷机性能系数与照明功率密度—能耗"算法的研究

更换高效冷机只影响了建筑耗电量，不影响建筑的耗气量，因此更换高效冷机与更换高效节能灯组合模拟时，耗燃气量的变化单单是与另一个措施的参数变化有关，变化量与只采用另一个改造措施时建筑的电耗变化相同，因此，对同时采用更换高效节能灯与更换高效冷机这一组合，利用第三章"照明功率密度 LPD—单位建筑面积气耗 E_h"算法估算建筑改造后的耗气量即可。

建筑电耗的变化是照明功率密度的降低和冷机性能系数的提高两者共同作用的结果，而这两者在计算冷机电耗时又相互影响，因此本文模拟同时采用该组合的建筑电耗情况并将结果作逐步拟合回归，LPD×COP, LPD, LPD^2, COP, COP^2 作为初始变量进入到逐步回归筛选并完成拟合，得到"照明功率密度 LPD 与冷机性能系数 COP—单位建筑面积电耗 E"算法：

$$E = 155.158 + 2.808LPD - 17.489COP + 0.985COP^2 \tag{4.4}$$

E—单位建筑面积年耗电量 kWh/m²

COP—冷机性能系数

LPD—照明功率密度（W/m²）

E 拟合值与模拟值的最小误差-0.07%，最大误差 1.90%，而且 R^2=99.8%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度非常好，F 值为 1603，显著性水平为 0，表示回归模型整体解释总电耗达到显著水平，即所建立的回归方程有效。

表 4.8 更换高效节能灯与更换高效冷机模拟及拟合结果

试验序号	冷机性能系数 COP	LPD（W/m²）	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	E 拟合值	残差	相对误差%
1	3	5	124.22	125.60	-1.38	-1.11%
2	3	10	140.26	139.64	0.62	0.44%
3	3	18	163.03	162.11	0.92	0.56%
4	3	22	174.73	173.34	1.39	0.80%
5	5	5	104.67	106.38	-1.71	-1.64%
6	5	10	119.98	120.43	-0.45	-0.37%
7	5	18	141.59	142.89	-1.30	-0.92%
8	5	22	152.94	154.13	-1.18	-0.77%
9	7	5	96.23	95.05	1.18	1.23%
10	7	10	111.20	109.09	2.11	1.90%
11	7	18	132.36	131.56	0.80	0.60%
12	7	22	143.35	142.79	0.55	0.39%
13	9	5	91.53	91.60	-0.07	-0.07%
14	9	10	106.32	105.64	0.68	0.64%
15	9	18	127.22	128.11	-0.89	-0.70%
16	9	22	138.08	139.34	-1.27	-0.92%

4.4.5 组合五："冷机性能系数与遮阳系数—能耗"算法研究

同组合四的算法研究，同时采用降低遮阳系数与更换高效冷机的气耗算法用第三章单项措施 "遮阳系数 SC_w—建筑耗气量"算法计算。

建筑电耗的变化是遮阳系数的降低和冷机性能系数的提高两者共同作用的结果，而这两者在计算冷机电耗时又相互影响，因此本文模拟同时采用该组合的建筑电耗情况并将结果作逐步拟合回归，得到"遮阳系数 SC_w 与冷机性能系数 COP—单位建筑面积电耗 E"算法，总结如下：

$$E = 206.549 - 17.413COP + 9.913SC_w + 0.981COP^2 \tag{4.5}$$

E—单位建筑面积年耗电量 kWh/m²

COP—冷机性能系数

SC_w—综合遮阳系数

E 拟合值与模拟值的最小误差 0.12%，最大误差 1.32%，F 值=580.4，调整后 R^2=99.1%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度较好。

表 4.9 提高遮阳系数与更换高效冷机模拟及拟合结果

试验序号	冷机性能系数 COP	SC_w	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	E 拟合值	残差	相对误差%
1	3	0.2	163.89	165.12	-1.23	-0.75%
2	3	0.4	167.79	167.10	0.69	0.41%

续表

试验序号	冷机性能系数 COP	SC_w	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	E 拟合值	残差	相对误差%
3	3	0.8	171.26	171.07	0.20	0.12%
4	3	1.0	174.73	172.86	1.87	1.07%
5	5	0.2	144.48	145.98	-1.50	-1.04%
6	5	0.4	147.32	147.96	-0.64	-0.44%
7	5	0.8	150.24	151.93	-1.69	-1.12%
8	5	1.0	152.94	153.72	-0.78	-0.51%
9	7	0.2	136.08	134.69	1.39	1.02%
10	7	0.4	138.50	136.67	1.83	1.32%
11	7	0.8	141.13	140.64	0.49	0.35%
12	7	1.0	143.33	142.43	0.90	0.63%
13	9	0.2	131.41	131.24	0.16	0.12%
14	9	0.4	133.59	133.23	0.37	0.27%
15	9	0.8	136.05	137.19	-1.14	-0.84%
16	9	1.0	138.06	138.98	-0.93	-0.67%

4.4.6 组合六："热泵性能系数与照明功率密度—能耗"算法的研究

热泵系统既供冷又供热，只消耗电能，因此在涉及到更换高效热泵系统的能耗算法拟时，拟合的对象为建筑总能耗 EE。HPCOP, LPD, $HPCOP^2$ 变量进入到模型中逐步回归筛选并完成拟合，得到"照明功率密度 LPD 与热泵能效比 HPCOP—单位建筑面积总能耗 EE"算法：

$$EE = 170.239 - 25.793HPCOP + 2.685LPD + 1.762HPCOP^2 \tag{4.6}$$

EE—单位建筑面积年能耗 kWh/m^2

HPCOP—热泵能效比

LPD—照明功率密度（W/m^2）

EE 拟合值与模拟值的最小误差 0.03%，最大误差 3.07%，而且 R^2=99.3%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度非常好，F 值为 720.6，显著性水平为 0，表示回归模型整体解释总电耗达到显著水平，即所建立的回归方程有效。

表 4.10 更换高效节能灯与更换高效热泵模拟及拟合结果

试验序号	热泵能效比 HPCOP	LPD（W/m^2）	单位建筑面积总能耗 EE（kWh/m²）	EE 拟合值（kWh/m²）	残差	相对误差%
1	2	5	138.74	139.12	-0.38	-0.27%
2	2	10	153.70	152.55	1.16	0.75%
3	2	18	174.95	174.02	0.93	0.53%
4	2	22	186.44	184.76	1.68	0.90%

续表

试验序号	热泵能效比 HPCOP	LPD（W/m²）	单位建筑面积总能耗 EE（kWh/m²）	EE 拟合值（kWh/m²）	残差	相对误差%
5	4	5	105.73	108.68	-2.94	-2.78%
6	4	10	120.24	122.10	-1.87	-1.55%
7	4	18	140.84	143.58	-2.74	-1.95%
8	4	22	151.71	154.31	-2.61	-1.72%
9	6	5	94.76	92.33	2.43	2.57%
10	6	10	109.10	105.75	3.35	3.07%
11	6	18	129.43	127.23	2.21	1.71%
12	6	22	140.13	137.96	2.17	1.54%
13	8	5	89.27	90.07	-0.80	-0.90%
14	8	10	103.52	103.49	0.03	0.03%
15	8	18	123.73	124.97	-1.24	-1.00%
16	8	22	134.33	135.71	-1.37	-1.02%

4.4.7 组合七："热泵性能系数与外窗传热系数—能耗"算法研究

同样方法，模拟并拟合"传热系数 K_{win} 与热泵能效比 HPCOP—单位建筑面积总能耗 EE"算法，总结如下

$$EE = 224.194 - 22.648HPCOP - 0.121K_{win} \times HPCOP + 1.529HPCOP^2 \quad (4.7)$$

EE—单位建筑面积年能耗 kWh/m²

HPCOP—热泵能效比

K_{win}—窗传热系数 W/(m²•K)

EE 拟合值与模拟值的最小误差-0.06%，最大误差 1.69%，而且 R^2=99.1%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度非常好，F 值为 529.3，显著性水平为 0，表示回归模型整体解释总电耗达到显著水平，即所建立的回归方程有效。

表 4.11 降低窗传热系数与更换高效热泵模拟及拟合结果

试验序号	热泵能效比 HPCOP	窗 K_{win} W/(m²•K)	单位建筑面积总能耗量 EE（kWh/m²）	EE 拟合值（kWh/m²）	残差	相对误差%
1	2	6.3	186.44	183.49	2.94	1.58%
2	2	4	186.22	184.05	2.17	1.17%
3	2	2	182.10	184.53	-2.43	-1.33%
4	2	0.8	182.75	184.82	-2.07	-1.13%
5	5	6.3	144.82	145.38	-0.56	-0.39%
6	5	4	144.99	146.77	-1.78	-1.23%
7	5	2	147.82	147.98	-0.16	-0.11%
8	5	0.8	148.13	148.71	-0.57	-0.39%
9	7	6.3	136.88	135.27	1.60	1.17%

续表

试验序号	热泵能效比 HPCOP	窗 K_{win} W/(m²•K)	单位建筑面积总能耗量 EE （kWh/m²）	EE 拟合值 （kWh/m²）	残差	相对误差%
10	7	4	137.14	137.22	-0.08	-0.06%
11	7	2	141.30	138.91	2.39	1.69%
12	7	0.8	141.56	139.92	1.64	1.16%
13	8	6.3	134.39	134.80	-0.42	-0.31%
14	8	4	134.68	137.03	-2.35	-1.74%
15	8	2	139.26	138.96	0.30	0.21%
16	8	0.8	139.50	140.12	-0.62	-0.44%

4.5 多项节能改造措施快速估算模型

4.5.1 组合八："自然采光控制、遮阳系数与照明功率密度—能耗"算法研究

从前文分析可知，当没有自然采光控制系统时，增设外遮阳装置与更换节能灯无相互影响，其共同作用的节能量=只采用外遮阳装置的节能量+只更换高效节能灯的节能量。而增设外遮阳与自然采光之间存在相互影响，即当有自然采光控制系统时，外遮阳装置与更换高效节能灯的综合节能量不能用分别节能量之和估算，对于这种情况，在基准模型上增设自然采光控制系统，同时改变遮阳系数与照明密度值，模拟不同值对应的建筑能耗，并拟合回归算法，结果见下表，得到"采用自然采光控制系统时，当前照明功率密度 LPD、遮阳系数 SC_w—单位建筑面积电耗 E"拟合算法，如下式：

$$E = 80.115 + 1.649LPD - 10.517SC_w \tag{4.8}$$

该式适用于同时采用自然采光控制系统、更换高效节能灯与外遮阳装置的综合能耗计算。其中，

E—单位建筑面积年耗电量 kWh/m²

SC_w—综合遮阳系数

LPD—当前照明功率密度（W/m²）

E 拟合值与模拟值的最小误差-0.01%，最大误差 0.93%，而且 R^2=99.8%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度非常好，F 值为 3768.7，显著性水平为 0，表示回归模型整体解释总电耗达到显著水平，即所建立的回归方程有效。

表 4.12 增设外遮阳装置、自然采光控制系统、更换高效节能灯模拟及拟合结果

试验序号	SC_w	LPD（W/m²）	单位建筑面积耗电量 E（kWh/m²）	E 拟合值	残差	相对误差%
1	0.2	5	89.8	90.5	-0.70	-0.78%
2	0.4	5	92.79	92.6	0.19	0.20%
3	0.8	5	96.06	96.8	-0.74	-0.77%
4	1	5	98.71	98.7	0.01	0.01%
5	0.2	10	98.77	98.7	0.07	0.07%
6	0.4	10	101.75	100.8	0.95	0.93%
7	0.8	10	104.99	105	-0.01	-0.01%
8	1	10	107.63	106.9	0.73	0.68%
9	0.2	18	111.61	111.9	-0.29	-0.26%
10	0.4	18	114.39	114	0.39	0.34%
11	0.8	18	117.59	118.2	-0.61	-0.52%
12	1	18	120.21	120.1	0.11	0.09%
13	0.2	22	118.33	118.5	-0.17	-0.14%
14	0.4	22	121.02	120.6	0.42	0.35%
15	0.8	22	124.2	124.8	-0.60	-0.48%
16	1	22	126.82	126.7	0.12	0.09%

同样方法，得到“采用自然采光控制系统、当前照明功率密度 LPD、遮阳系数 SC_w—单位建筑面积气耗”拟合算法，总结该算法为（R^2=0.99，F=518.7）：

$$E_h = 7.057 - 0.05SC_W \times LPD - 0.494SC_W \tag{4.9}$$

E_h—单位建筑面积年耗气量 m^3/m^2

SC_w—综合遮阳系数

LPD—当前照明功率密度（W/m²）

4.5.2 组合九：“窗传热系数、遮阳系数、照明功率密度与锅炉效率（或冷机性能系数或热泵性能系数）—能耗算法”研究

在 4.1 节已经确定有相互间影响的措施参数组合，即窗传热系数 K_{win}、遮阳系数 SC_w、照明密度 LPD 任意一项参数与锅炉效率 BE_c、冷机性能系数 COP、热泵性能系数 HPCOP 中的任意一项参数的组合。因此为了探究多种非空调侧措施与空调侧措施同时采用的节能量算法，本文对 K_{win}、SC_w、LPD 和 BE_c 四因子进行正交试验设计，模拟及拟合。K_{win}、SC_w、LPD 和 COP; K_{win}、SC_w、LPD 和 HPCOP 方法同理。由于更换高效节能窗一般会同时改变窗传热系数与综合遮阳系数，因此更换高效节能窗与其他措施同时采用时用本节介绍的组合九能耗估算。

同组合一的算法研究，同时采用降低窗传热系数、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效锅炉的建筑电耗算法利用第三章“K_{win}—E”算法、“SC_w—

E”算法、“LPD—E”算法计算。

窗传热系数、遮阳系数、照明功率密度都与锅炉效率在计算能耗时有相互间影响，因此探究同时采用组合九措施的建筑气耗情况，利用 L_{16}（4^5）正交试验表设计四因素四水平的正交试验，正交试验设计表、模拟及拟合结果见下表，用软件模拟能耗并作四元二次逐步拟合回归方程，只有 K_{win}、SC_w、LPD、K_{win}^2、BE_c^2、LPD^2、$BE_c \times SC_w$ 、$K_{win} \times LPD$、$K_{win} \times SC_w$ 通过逐步回归模型的筛选，得到“窗传热系数 K_{win}、综合遮阳系数 SC_w、照明功率密度 LPD 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h”算法，如下式：

$$E_h = 8.929+0.165K_{win}-4.435SC_w-0.040LPD-4.849BE_c^2-0.011K_{win}^2+ 0.001LPD^2+4.388BE_c \times SC_W+0.006K_{win} \times LPD-0.065K_{win} \times SC_W \tag{4.10}$$

E_h—单位建筑面积耗气量 m^3/m^2

BE_c—锅炉热效率

LPD—照明功率密度（W/m^2）

SC_w—综合遮阳系数

K_{win}—窗传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$

E_h 拟合值与模拟值的最小误差 0.03%，最大误差 1.15%，F 值=1060.8，调整后 R^2=99.8%，说明回归方程对能耗样本数据的拟合优度较好。

表 4.13 更换高效节能窗、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效锅炉实验设计及拟合

试验序号	锅炉效率 BE_c	窗 K_{win} [$W/(m^2 \cdot K)$]	SCw	LPD（W/m^2）	单位建筑面积耗气量 E_h（m^3/m^2）	E_h 拟合值（m^3/m^2）	相对误差%
1	0.80	0.8	0.2	5	5.602	5.603	0.07%
2	0.80	2	0.4	10	5.494	5.509	0.10%
3	0.80	4	0.8	18	5.31	5.397	-0.42%
4	0.80	6.3	1	22	5.431	5.529	0.16%
5	0.85	0.8	0.4	18	4.885	4.937	-0.40%
6	0.85	2	0.2	22	5.355	5.412	0.07%
7	0.85	4	1	5	4.891	4.888	0.09%
8	0.85	6.3	0.8	10	5.189	5.214	0.04%
9	0.95	0.8	0.8	22	4.097	4.132	0.44%
10	0.95	2	1	18	4.237	4.261	0.37%
11	0.95	4	0.2	10	4.878	4.870	0.47%

续表

试验序号	锅炉效率 BE_c	窗 K_{win} W/(m²•K)	SCw	LPD（W/m²）	单位建筑面积耗气量 E_h（m³/m²）	E_h 拟合值（m³/m²）	相对误差%
12	0.95	6.3	0.4	5	4.878	4.898	-0.26%
13	1.00	0.8	1	10	3.824	3.853	-0.33%
14	1.00	2	0.8	5	4.097	4.108	-0.08%
15	1.00	4	0.4	22	4.465	4.572	-0.44%
16	1.00	6.3	0.2	18	4.802	4.875	0.12%

同样方法，得到“降低窗传热系数、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效冷机—电耗”拟合算法，总结该算法为（R^2=0.99，F=3880）：

$$E = 139.245 - 18.784COP + 21.095K_{win} + 0.298LPD - 1.172K_{win}^2 + 20.939SC_W^2 + 1.402COP^2 - 3.513COP \times SC_W - 0.198K_{win} \times LPD - 0.454LPD \times SC_W - 0.317COP \times K_{win} \quad (4.11)$$

得到“降低窗传热系数、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效热泵—电耗”拟合算法，总结为（R^2=0.99，F=943）：

$$EE = 156.377 - 25.241HPCOP + 18.962K_{win} + 2.245HPCOP^2 - 0.978K_{win}^2 + 16.673SC_W^2 - 0.386HPCOP \times K_{win} - 5.306HPCOP \times SC_W - 0.224K_{win} \times LPD - 0.984LPD \times SC_W \quad (4.12)$$

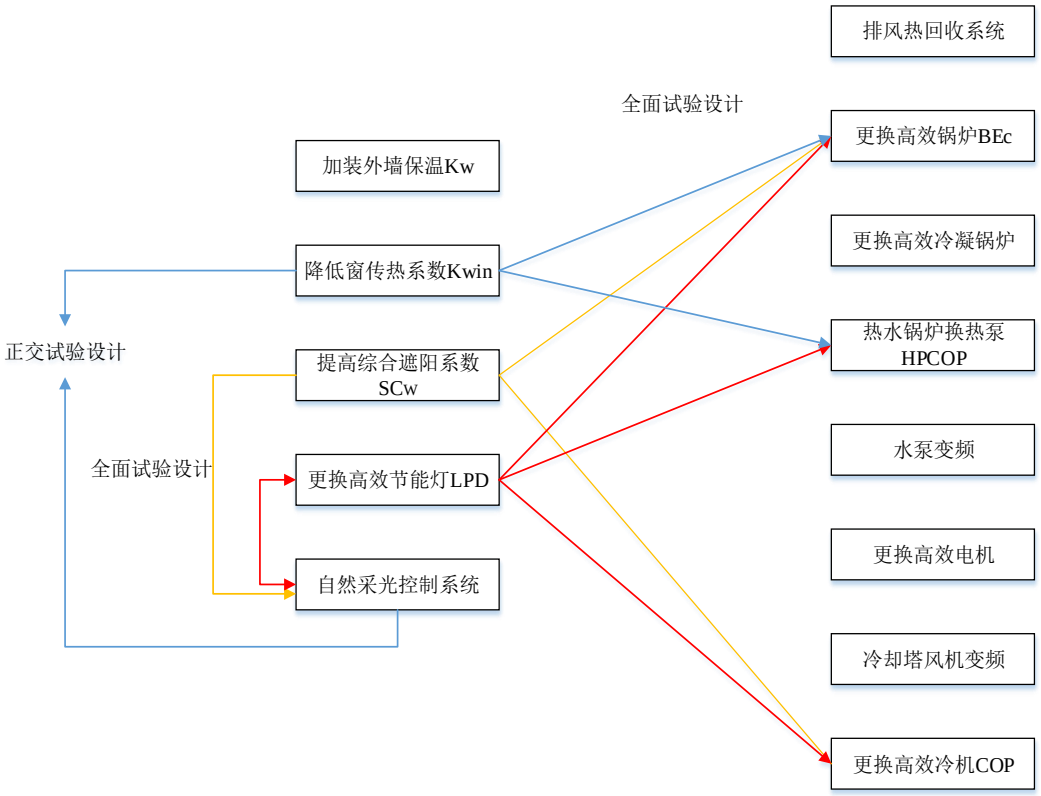


图 4.2 节能改造措施之间的影响及算法研究

4.6 本章小结

本章首先通过理论分析，确定存在相互间影响的节能改造措施。针对这些措施两两组合，利用软件模拟计算每组节能效果。根据单项节能量之和与同时采用的节能量之间的评判误差，筛选出相互间影响且误差较大的改造措施组合。针对这些组合，设计全面试验和正交试验，模拟能耗并拟合得到“多项改造措施与能耗”算法，所有算法见附录 A。通过输入改造前后的物性参数，代入该算法，得到改造前后能耗和节能量。而相互间有影响但误差较小的改造措施以及无相互间影响的措施同时采用时，利用每项改造措施单独的节能量之和来估算综合节能效果。本章所有算法应用于因除建筑形状/尺寸外的物性参数与基准模型不同时的建筑基准能耗修正，以及改造后能耗及节能量的估算。为第五章搭建软件平台提供算法支持。

第 5 章 节能量及经济效益快速估算软件的开发与设计

本章首先采用净现值和动态投资回收期，建立节能改造经济效益估算模型。其次，结合第二至四章“建筑尺寸—能耗”算法、“单项改造措施—能耗”“多项改造措施—能耗”算法，开发节能量及经济效益快速估算软件。最后利用实际建筑改造数据验证本文算法的准确性。

5.1 节能量估算方法

根据前文总结的能耗算法，现对本文节能量估算方法作以下阐述：

同时采用的多种改造措施，若之间无影响，则综合节能量＝∑（每项改造措施单独的节能量）；如更换节能灯与更换变频水泵，可近似认为无相互影响，分别利用“LPD—E”能耗算法与“变频水泵—E”能耗算法计算分别节能量，相加为总节能量。若有影响，分以下 5 种情况：

情况 1：只采用非空调侧改造措施：

利用第 4.5.1 节对应的“自然采光控制、遮阳系数与照明功率密度—能耗”算法计算综合节能量。

情况 2：采用单项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施的综合节能量：

改造措施之间有相互间影响，利用第四章对应的“多项措施—能耗”算法计算综合节能量。

情况 3：单项非空调侧改造措施与多项空调侧改造措施综合节能量：

根据情况 2，得出单项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施的综合节能量。

情况 3 的综合节能量＝∑（单项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施的综合节能量）－∑（只采用单项非空调侧改造措施的节能量）。

例如：同时采用三种改造措施：更换节能灯、更换高效锅炉、更换高效冷机，分别计算更换节能灯与更换高效锅炉综合节能量△E1，更换节能灯与更换高效冷机综合能耗△E2，只更换节能灯单项节能量△E3，则三者综合节能量为△E1+△E2－△E3。

情况 4：多项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施综合节能量：

利用 4.5.2 节“K_{win}、SC_w、LPD 与 BE_c（COP 或 HPCOP）—能耗”算法计算节能量。如同时采用更换节能灯、更换节能窗与更换锅炉的情况，用此算法计算。

情况 5：多项非空调侧改造措施与多项空调侧改造措施综合节能量：

根据情况 4，得出多项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施综合节能量。

情况 5 的综合节能量＝∑（多项非空调侧改造措施与单项空调侧改造措施的综合节能量）－∑（只采用非空调侧改造措施的节能量）。

5.2 节能改造经济效益估算模型

节能改造的目的不单单为了节能减排，在实际工程项目中，同时也要考虑改造成本及投资回收期等经济问题。因此，本文考虑建立节能改造经济效益算法，对改造效果进行经济评价。

对公共建筑进行节能改造，在改造初期投入成本，产生增量成本，在改造后节能建筑的生命周期内节约能源，产生增量效益。节能改造建筑的经济效益，关键在于合理的量化节能改造项目的增量成本与增量效益。节能改造项目的增量成本，即所采用的各项节能改造措施的成本总和。广义的建筑全寿命周期成本，是指在建筑的全寿命周期内，从概念、决策、设计、施工、使用、维护到拆除的整个周期中，各方关系人（生产者，消费者，公众）等发生的一切成本（建设成本，社会成本，环境成本等），而与建筑节能改造有关的是狭义的全寿命周期成本，仅仅是指与该建筑相关的货币投入折现值。本文考虑每项措施的成本为设备或材料的投资成本、改造人工成本、运行维护成本的总和。项目的增量效益即在采取节能改造措施后，建筑能耗减少带来的效益。本文对降低污染治理费用的“减排”效益暂不考虑，而是着眼于能耗减少带来的费用收益。

节能改造项目的经济效益＝增量效益－增量成本[48]。本文选取合理的财务指标：净现值 NPV，动态投资回收期等作为改造项目整体的经济性分析依据。

（1）净现值 NPV：

将项目运营期内所有的可能收益，折现到项目起始时期所得到的一个收益总值。因为通货膨胀的因素，未来的货币价值总是在减少，所以研究一个项目的收益并不能简简单单的计算收入的资金值，而是要将这个资金值除掉它的时间价值，折现到项目投资起始时间进行评估。

$$NPV = \frac{A[(1+I)^n - 1]}{I(1+I)^n} - \sum_{i=1}^{K} C_i \tag{5.1}$$

NPV——净现值

C_i——第 i 种改造措施的总成本（元），包括设备或材料成本、改造人工成本、运行维护成本。

K——该改造项目共采用 k 种措施

I——折现率（%）（折现率是指将未来有限期预期收益折算成现值的比率）

n——评价期（年）

A——每年节约费用（元/年），

A＝△E×P_e＋△E_h×P_g，其中△E 为各项改造措施总节约电力消耗量（千瓦时/年），△E_h 为各项改造措施总节约天燃气消耗量（立方米/年）；P_e 为电力价格（元/千瓦时）；P_g 为天然气价格（元/立方米）；

（2）动态投资回收期

投资回收期从经济学角度分为静态投资回收期和动态投资回收期。静态投资回收期是指项目从投产年算起,用每年的净收益将初始投资全部收回的时间。动态资本回收期是指项目从投产年算起，用每年的净收益现值将初始投资现值全部收回的时间，即到累计折现金流量等于 0 时的时间。相比之下，动态投资回收期考虑了货币的时间价值，可以更直观的反应改造项目的投资可行性。本文采用动态投资回收期作为改造项目的经济评价指标。动态投资回收期以年为单位，即 NPV=0 是的 n 值。

如本文中利用基准模型计算采用变频水泵每年可节省电耗 227,411kWh，电价取 0.8 元/kWh，则每年节省的费用为 18.1 万元。若水泵变频改造的总成本（包括设备、人工改造、运行维护成本）为 12 万元，投资折现率取 6%，则动态投资回收期利用 NPV=0 求得 n=0.67 年，不到一年收回成本。

5.3 软件开发语言和开发环境简介

本文的节能改造快速估算软件是以 Microsoft Visual Studio 作为开发环境，使用 C#语言编写完成的。

Microsoft Visual Studio（简称 VS）是美国微软公司的开发工具包系列产品。它是一个基本完整的开发工具集，它包括了整个软件生命周期中所需要的大部分工具，如 UML 工具、代码管控工具、集成开发环境（IDE）等。VS 可以用来创建 Windows 平台下的 Windows 应用程序和网络应用程序，也可以用来创建网络服务、智能设备应用程序和 Office 插件，使用 VS 编写的代码适用于微软支持的所有平台[69]。Visual Studio 是目前最流行的 Windows 平台应用程序的集成开发环境。

C#语言是微软公司在 2000 年 6 月发布的一种安全、稳定、简单的面向对象的程序设计语言，C#由 C 和 C++衍生出来的，是为生成在.NET Framework 上运行的多种应用程序而设开发的。它在继承 C 和 C++强大功能的同时去掉了一些

它们的复杂特性（例如没有宏和模版，不允许多重继承）。而且 C#综合了 Visual Basic 简单的可视化操作和 C++的高运行效率。C#看似基于 C++写成，但又融入其它语言如 Pascal、Java、VB 等[70]。

5.4 软件设计和运行流程

5.4.1 软件基本框架

以第二至四章总结的能耗算法为核心，结合 5.2 节节能改造经济效益模型，开发一个适用于节能改造方案初步筛选阶段，可估算改造后建筑能耗、改造节能量及投资回收期的快速估算软件，为业主等无建模经验人员快速确定改造方案提供可操作性。

软件第一界面：输入被改造建筑基本信息及空调系统参数，当地能源价格，折现率等。

图 5.1(a) 节能改造快速估算软件第一界面

第二界面：选择节能改造措施，输入改造措施对应的参数、总改造成本。

图 5.1(b) 节能改造快速估算软件第二界面

第三界面：输出改造前后建筑耗电量、耗燃气量、节能量、改造总成本、投资回收期等。

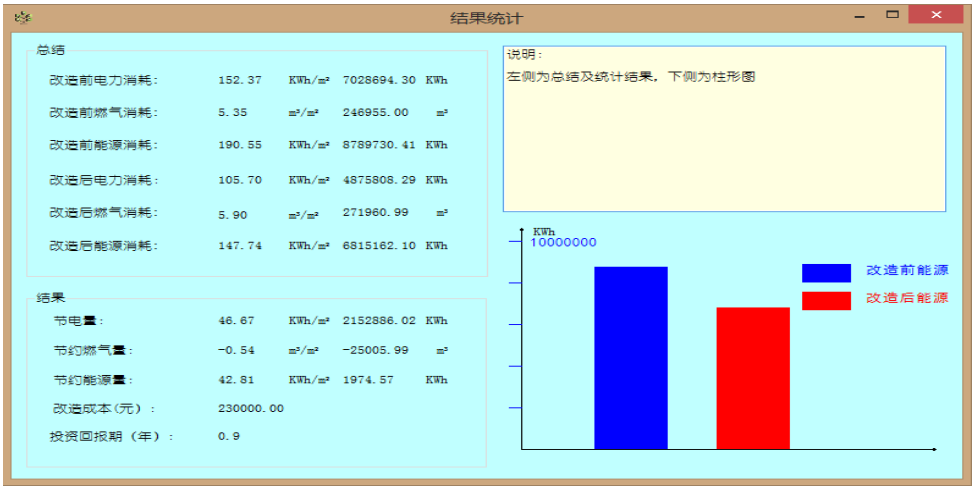


图 5.1(c) 节能改造快速估算软件第三界面

5.4.2 软件编程流程

软件实现节能改造快速估算的编程流程如下：

1）用户根据第一个界面显示的参数要求，输入被改造建筑对应的建筑数据、当地能源价格、折现率。

2）软件读取输入的建筑形状/尺寸数据，代入“建筑形状/尺寸—能耗”算法，计算修正后的建筑基准能耗 E_0，E_{h0}。

3）软件读取输入的建筑物性参数（除建筑形状/尺寸外的参数），代入“物性参数—能耗”算法，计算由于建筑物性参数与基准模型不同时的能耗修正值△E’，△E_h’。此时，根据输入数据，按照“单个物性参数—能耗”和“多个物性参数—能耗”算法计算能耗修正值△E’，△E_h’。

4）计算并保存建筑基准能耗值。单位建筑面积基准电耗值 E_b＝E_0+△E’，单位建筑面积基准气耗值 E_b＝E_0+ΔE_h’；

5）进入第二个界面，用户选择改造措施，输入措施对应的参数数值、成本。

6）软件读取输入的改造措施参数数值，并结合第一界面输入的改造前建筑的物性参数数值，分别代入“物性参数—能耗”算法，计算并保存建筑改造后能耗 E_r 以及改造节能量△E，ΔE_h。（△E＝E_b－E_r；△E_h＝E_{hb}－E_{hr}；）此过程中，软件也需要对输入的改造信息进行判断，如果相互影响的措施对应的参数同时有数值输入，则这些措施对应的参数代入“多个物性参数—能耗”算法计算；互不影响的措施对应的参数代入“单个物性参数—能耗”算法计算。

7）软件读取输入的改造总成本，能源价格，折现率，结合步骤 6）已经计算

的改造节能量，根据 NPV=0，计算并保存动态投资回收期。

8）结合步骤 1）已经输入的建筑总面积，计算建筑总基准能耗值，改造后总能耗，建筑总节能量。

9）完成改造快速估算，输出建筑基准能耗值，改造后建筑总能耗值，建筑总节能量，改造总成本，动态投资回收期。

节能改造快速估算软件原理及流程图见图 5.2。

此节能量及经济效益快速估算软件适用于上海地区办公类建筑，它能够帮助政策制定者，设施管理者和建筑改造专业人员进行快速简单的节能量计算、改造经济分析等。软件可用在建筑能效评估阶段之后，详细改造节能量计算阶段之前的中间环节，即改造方案决策阶段的初期，初步估算节能量，初投资，成本回收期以便确定改造方案。

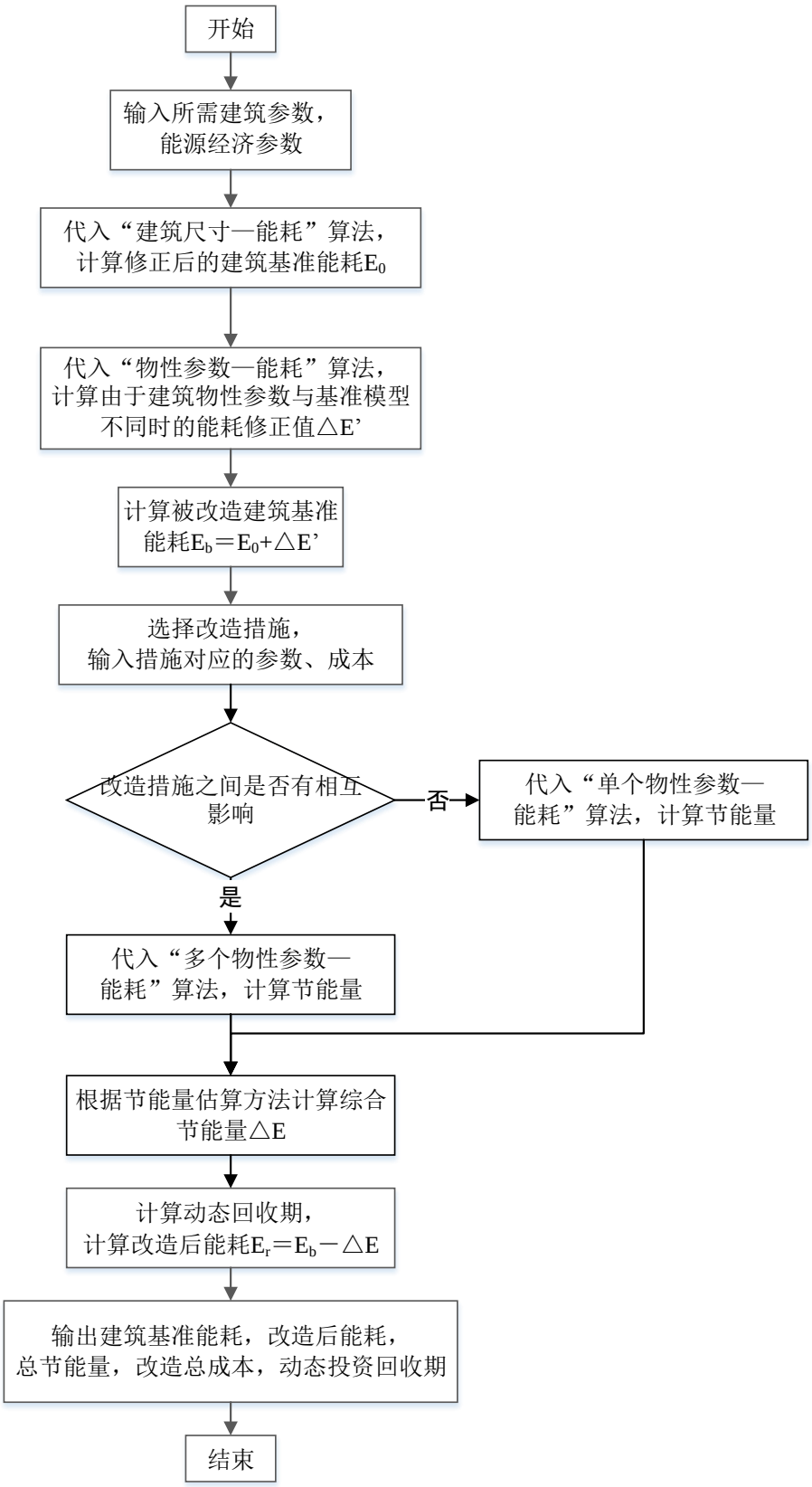


图 5.2 节能改造快速估算软件原理及流程图

5.5 节能量算法的实例验证

为了进一步验证本论文提出的节能量快速估算方法的有效性、准确性，并且为了更清晰地展现节能量算法的估算流程，选择上海市的一栋办公大楼作为改造实例，结合其改造前后实际能耗数据对此算法进行验证。

大楼位于浦东新区，总建筑面积 102,518m^2，大楼总高度 180m，地上 43 层，地下 3 层，主要用于商务办公。建筑主体为钢结构加玻璃幕墙。建筑运行时间为 8:30—17:30。

空调系统冷源由 3 台离心式冷水机组和 2 台蒸汽吸收式溴化锂机组组成。热源由 3 台热效率为 80%的燃气锅炉组成。空调冷冻水系统供回水温度为：7/10℃；热水系统供回水温度为：50/60℃。空调末端系统为风机盘。管加新风系统以及中央空调系统。

5.5.1 建筑能效评估

首先对该栋大楼进行能效评估。该办公大楼在改造前的建筑综合能源消费量为等效电 17243MWh，详见下表。单位建筑面积年综合能耗为 156.88 kWh/(m^{2}a)，参照《综合建筑合理用能指南》[13]中办公建筑功能区用能合理值≤120 kWh/(m^{2}a)，实际建筑能耗低于合理值，能效水平较低，有较大节能潜力。

表 5.1 改造前（2012 年）建筑综合能耗统计表

月份	电力（MWh）	天然气（m^3）	综合能源消费量（等效电 MWh）
1 月	892	73,691	1,419
2 月	1,017	100,173	1,733
3 月	1,064	58,046	1,479
4 月	1,062	0	1,062
5 月	1,132	5,260	1,170
6 月	1,243	695	1,248
7 月	1,592	58,532	2,010
8 月	1,590	19,553	1,729
9 月	1,253	913	1,259
10 月	879	1,233	888
11 月	931	24,946	1,109
12 月	1,054	151,540	2,137
合计	13,707	494,581	17,243

5.5.2 节能量算法验证过程及结果

该建筑节能改造项目的实施时间为 2013 年 11 月至 2014 年 10 月，陆续完成

了三项节能改造：①增设制冷机房群控系统；②更换高效节能灯；③空调水泵加装变频装置。具体描述和参数说明见下表。

表 5.2 项目改造情况

序号		1	2	3
改造内容		增设制冷机房群控系统	更换高效节能灯	空调水泵加装变频装置
具体描述	改造前	先开启溴化锂机组，冷量不足时补充开启离心式冷机。	传统光源照明灯具	冷却水泵、冷冻水泵均为定频
	改造后	高效离心机优先开启，减少使用效率较低的溴化锂机组	LED 光源照明灯具	采用温差和压差两种控制方式，控制水泵频率
参数说明	改造前	冷机综合性能系数 COP=3	LPD=10W/m ²	定频
	改造后	冷机综合性能系数 COP=5	LPD=3.5W/m ²	变频

项目改造后取 2014 年 8 月~2015 年 7 月时间段的建筑能耗数据作为改造后的建筑能耗，审核节能量。改造后建筑年综合能源消费量 13101MWh。总节能量为 4142MWh，节能率为 24%。改造后建筑实际能耗数据见下表。

表 5.3 改造后（2014 年 8 月~2015 年 7 月）建筑综合能耗统计表

月份	电力（MWh）	天然气（m^3）	综合能源消费量（等效电 MWh）
2014 年 8 月	1,283	2,613	1,301
9 月	3,828	747	4,294
10 月		628	
11 月		538	
12 月		63,289	
2015 年 1 月	797	61,376	1,235
2 月	764	45,587	1,090
3 月	904	33,216	1,141
4 月	744	192	746
5 月	985	3,596	1,011
6 月	1,166	1,748	1,178
7 月	1,019	11,751	1,103
合计	11,490	225,281	13,101

接下来，利用本文提出的节能量算法估算该实际建筑节能量，汇总算法所需的建筑参数见表 5.4。改造参数见表 5.2。

表 5.4 算法所需的建筑参数

建筑总面积 m^2	建筑总高度 m	层数	建筑平均单层面积 m^2	建筑形状系数 H/S
102518	180	46	2228.65	0.08
外墙传热系数 K_w[W/(m^2・K)]		外窗传热系数 K_{win}[W/(m^2・K)]		综合遮阳系数 SC_w
1.2		6.3		0.8
照明 LPD W/m^2		冷机 COP		锅炉效率
10		3		80%

节能量算法估算过程：

1）根据实际建筑形状/尺寸数据，代入“建筑形状/尺寸 X、H/S—能耗”算法，到尺寸修正后基准能耗：单位建筑面积电耗 E_0=115.6 kWh/m^2，单位建筑面积气耗 E_{h0}=5.44m^3/m^2。

2）计算由于建筑物性参数与典型模型不同时的能耗修正值。

与基准模型参数不同的物性参数 LPD，COP，代入“LPD、COP—电耗 E”算法：得到 E=139.6kWh/m^2，代入“LPD—气耗 E_h”算法，得到 E_h=5.9m^3/m^2，与典型模型 E_{base}=115.1kWh/m^2，E_{hbase}=5.35m^3/m^2 比较得到电耗修正值△E’=24.5 kWh/m^2，气耗修正值△E_h’=0.09m^3/m^2。

3）实际建筑单位面积基准电耗为 E_0+△E’=140.1 kWh/m^2，单位面积基准气耗为 E_{h0}+△E_h’=5.53m^3/m^2，转换成等效电得到改造建筑基准能耗为 179.5 kWh/m^2，总基准能耗 18,406MWh。

4）同样方法 1、2 改造措施改造后的 LPD、COP 值代入“LPD、COP—电耗 E”算法和“LPD—气耗 E_h”算法，计算改造后电耗、气耗，再与基准电耗、气耗相比，计算节电量 37.5kWh/m^2，节气量-0.28m^3/m^2。折合等效电的节能量为 35.5kWh/m^2。

5）改造措施 3 的节能量代入“水泵变频—耗 E”算法，计算节能量 5.7kWh/m^2。

6）由于改造措施 1、2 与措施 3 无相互影响，因此建筑总节能量为 1、2 措施综合节能量与 3 措施单独节能量的总和，即 41.2kWh/m^2，总节能量 4,224MWh。

7）改造后建筑总能耗（等效电）为 14,182MWh。

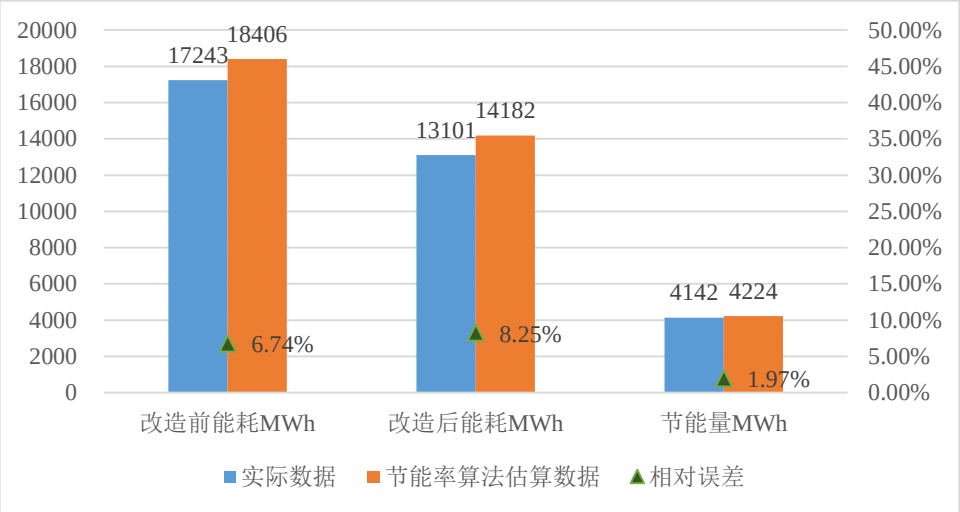


图 5.3 实际数据与节能量算法对比验证

利用本论文提出的节能量算法估算实际建筑的改造前后能耗及节能量，整个估算过程十分清晰，从上表可以看出，节能量估算误差为 1.97%较为准确，改造前后的建筑能耗估算误差分别为 6.74%和 8.25%，估算值较为合理，算法的有效性和准确性得到了验证。

5.6 本章小结

本章首先结合全寿命周期理论并考虑货币的时间价值，将净现值 NPV 和动态投资回收期作为节能改造经济效益的估算算法。其次，结合二至四章能耗算法，设计和开发了改造项目节能量及经济效益快速估算软件。介绍了编程语言 C#、开发环境 Microsoft Visual Studio 的特点，详细论述了软件实现快速节能量、经济效益估算的流程及软件开发界面。最后利用上海某办公大楼实际改造数据对估算方法进行实例验证，证明了此方法的有效性和准确性。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文提出一种既考虑改造措施相互影响又无需建模的快速节能量估算方法，为建筑管理者快速确定节能改造方案提供可能。本文主要采用预先模拟数据库法建立适用于上海地区办公建筑的节能改造措施与建筑能耗的数据库，并基于数据库应用数据驱动法建立节能改造快速估算算法模型，估算多种节能改造措施综合节能量。结合节能改造经济性分析，开发一款节能改造快速估算软件。现对本文的研究及结论作以下总结：

1）提出建筑形状系数——H/S 的概念，将建筑总高度 H 与建筑单层面积 S 的比值作为代表建筑形状分类（即高瘦、矮胖程度）的定性指标，建筑形状系数值越大，表明建筑越瘦高。

2）比较不同建筑形状系数的建筑总面积与单位建筑面积能耗（EUI）发现，不同的建筑总面积与 EUI 之间存在着负对数的关系。EUI 随建筑总面积的增加而减少，且减少幅度呈先陡后缓趋势。建筑总面积越小的单体建筑，建筑面积对建筑能耗的影响越大。总面积相同的建筑，越“瘦高”建筑能耗越大。建议在以上海为典型代表的夏热冬冷气候区，对于办公类建筑等室内负荷影响较大的建筑，避免建立过于“瘦高”的“烟囱”建筑，增加内区以减少其自身能耗。

3）对不同建筑形状系数、总面积与建筑能耗数据进行拟合，可得到 $E=-15.449LnX+52.357\left(H/S\right)+0.631\left(LnX\right)^2+205.653$；$E_{\mathrm{h}}=-1.457LnX+58.747\left(H/S\right)^2+0.0546\left(LnX\right)^2+14.601$，可作为“建筑形状/尺寸参数—EUI 算法”，针对实际建筑与典型建筑模型所用的建筑形状/尺寸（层数、建筑长宽、建筑总面积）不匹配时对建筑能耗的修正。该算法对建筑面积在 5 千至 15 万 m^2，建筑形状系数 H/S 在 0.03-0.08 范围内夏热冬冷地区的办公建筑适用。

4）本文选取了三个只有建筑形状/尺寸参数（建筑面积、建筑形状系数）不同，而其他参数均相同（比如热扰密度、围护结构传热系数等）的办公建筑典型模型，对 3 个建筑模型采取相同的节能改造方式，模拟研究节能效果，发现：在保持建筑热扰和空调采暖系统各参数固定不变的情况下，同一气候区的办公类建筑，无论其建筑形状/尺寸（层数、建筑长宽等）如何变化，采取相同节能改造方式，单位建筑面积节能量近似相等，节能效果近似相同。

5）本文选定了 13 种常用节能改造措施，并模拟措施不同参数水平下的能耗，

发现：单项节能改造措施与能耗的关系中，能耗（电耗和气耗）均呈线性变化的措施有：加装外墙保温；更换高效节能窗；更换高效节能灯。能耗（电耗和气耗）均呈对数关系变化的措施有：增设外遮阳装置。电耗呈线性关系变化的是：水泵变频；水泵采用高效电机；冷却塔风机变频；排风热回收。电耗呈对数关系变化的措施有：更换高效冷水机组；更换高效热泵。气耗呈线性关系变化的有：更换高效锅炉。每项措施与能耗的拟合关系式见附录 A。关系式可作为“单项节能改造措施—能耗”算法。该算法应用于因除建筑形状/尺寸外的物性参数与基准模型不同时对建筑基准能耗的修正，以及改造后能耗及节能量的估算。

6）由于本文设置的自然采光控制系统是 on/off 控制模式，低于照度设定值时，照明打开；当高于照度设定值时，照明关断。因此可认为在当前照明功率密度下采用自然采光系统计算建筑能耗时，相当于降低照明功率密度计算的建筑能耗。根据模拟结果看到，当前照明密度与采用自然采光系统达到同等电（气）耗效果的等效照明密度之间，存在近似线性的关系。拟合得到“照明功率密度 LPD—电耗等效照明功率密度 LPD_e”拟合算法：LPD_e=0.5805LPD-0.0931；“照明功率密度 LPD—气耗等效照明功率密度 LPD_g”拟合算法：LPD_g = 0.751LPD－0.87。

7）在对节能改造措施相互影响分析中，认为这些措施之间有明显相互作用，且对能耗影响较大。这些措施是：①增设外遮阳与自然采光；②更换高效节能灯与自然采光；③更换高效节能灯与更换高效冷机；④更换高效节能灯与更换高效锅炉；⑤更换高性节能灯与更换高性能热泵；⑥增设外遮阳与更换高效冷机；⑦增设外遮阳与更换高效锅炉；⑧降低窗传热系数与更换高效锅炉；⑨降低窗传热系数与更换高效热泵。

8）针对上述节能改造措施组合设计全面试验和正交试验，根据试验设计模拟得出每项措施组合对能耗的综合影响，拟合关系式见附录 A。该关系式可作为“（两种）多种节能改造措施—能耗”算法。该算法应用于因除建筑形状/尺寸外的物性参数与基准模型不同时，对建筑基准能耗的修正，以及改造后能耗及节能量的估算。

9）本文结合全寿命周期理论并考虑资金的时间价值，用净现值 NPV 和动态投资回收期评估节能改造项目的经济效益。结合“建筑形状/尺寸—能耗”算法、“单项节能改造措施—能耗”算法、“多种节能改造措施—能耗”算法设计和开发了改造项目节能量及经济效益快速估算软件。

10）利用上海市的一栋办公大楼作为改造实例，结合其改造前后实际能耗数据对算法进行验证。得到实际节能量与本文算法估算节能量之间的相对误差为 1.97%，估算值较为合理，验证了本论文节能量估算算法的有效性和准确性。

6.2 不足与展望

本文通过预先模拟方法建立了建筑改造措施参数与能耗的算法模型，并对各个改造项目节能效果和经济效益进行了分析，但受时间和精力所限，本论文还存在一些不足之处，可在以下几个方面作进一步研究：

1）本文研究主要结论均基于典型模型，虽对典型模型在建筑形状/尺寸参数、建筑物性参数（包括建筑围护结构参数、照明参数、空调采暖系统参数）与实际建筑不同的情况作了能耗修正，但空调系统的末端形式固定为风机盘管加新风系统，未涉及到其他空调系统。在今后的研究中，可按照建筑常用末端空调系统分类建立典型模型，（比如：按照中央空调集中处理系统、多联机系统、分体式空调等），参照本文的研究方法和流程，对采用其他空调系统形式的建筑节能量算法展开研究。

2）由于软件模拟的局限以及建筑类型、气候条件等因素的限制，尚有一些节能改造措施论文没有涉及，如新风经济器、光伏系统等，其节能效果以及具体算法需进一步研究，补充到方法中。

3）建筑受众多不同因素影响，而尚未考虑的因素如建筑“L 型”“圆形”等办公建筑形状，可按照普遍程度分类建典型模型继续研究，如建筑非南北的朝向等特殊方位或实际改造建筑具备的特殊属性，建议针对该建筑建立详细模型模拟，不在本文快速节能改造研究范畴。

致谢

转眼间，两年多的研究生生涯已接近尾声，回首在同济读研的时光，心中充满了不舍和感激。首先，我要非常感谢我亲爱的导师潘毅群教授。感谢她接纳我进入潘门，带我踏入建筑节能的领域，提供给我一个专业和乐于分享的平台让我时时掌握国内外领域最前沿的变化，培养我专业的思维和能力。潘老师在学术上有着深厚的造诣和广阔的视野，每当我遇到问题自我否定时，她总是给予我悉心的指导及时地化解我的怀疑和不安，让我轻装前行。同样非常感谢课题组的黄治钟老师，每当我的论文走向迷雾，他总是能一针见血的提出意见，如醍醐灌顶般让我及时止损，幡然醒悟，黄老师缜密的思维和极强的洞察力是我学习的榜样。我能够顺利完成论文，少走很多弯路都与两位老师为我倾注的大量心血和汗水有着密不可分的关系，衷心地感谢两位老师给予的帮助。

感谢潘门李玉明老师、朱明亚师姐和王秋涧师兄对我学术上的启发和指导，时常同他们讨论解答了我论文方面遇到的很多疑惑。感谢郁丛、孙勇、林美顺、刘海静、徐蕾、王尉同、潘媛、吕岩、杨一坤等潘门的师兄弟姐妹们，无论是平时学术上的多思进取还是私下玩闹过程中的逗趣欢乐，都为我的硕士生活增添了很多色彩。感谢我的同门侯丹琳、杨陶，他们成熟淡定的处事之风和乐观幽默的生活态度深深地影响着我，感谢他们教会我有趣地生活。感谢我的好朋友王俊、王卉莹、高爽、林立春、夏国青、李璇、康永欣对我一如既往的关爱和支持。感谢同来上海读硕士的高中同学乔羽，在我完成论文的日子里她的鼓励和陪伴让我在异乡不感觉孤单。感谢郑晓卫师兄和刘羽岱师兄对本论文的数据支持。感谢戴苏洋、于利丽等同学在课题的计算模拟及软件编程中提供的帮助。

感谢硕士生涯中关心我，帮助过我的所有老师、同学和朋友。

感谢我的家人们，尤其是我的父母在我生命中无微不至的关心，在我遇到挫折时给予我的信心，让我懂得反转和逆袭。

最后感谢各位老师和专家对本论文的评阅，由于本人学识、精力有限，文中不免有错误和待改进之处，希望各位前辈提出宝贵意见。

秦冰月

2017 年 3 月于同济大学

参考文献

[1] 王乐鹏,卢紫丁,陆青.我国公共建筑能耗调查研究综述[J].能源与环境, 2013,01(01):15-17.

[2] 江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J].暖通空调,2005,35(5):30-40.

[3] 纪凯.既有商业建筑能耗现状分析及节能对策[J].建筑节能,2012, 09(09):64-66.

[4] 何知衡，西安市大型商场能耗现状及节能分析[D].西安:西安建筑科技大学,2009.

[5] 冯莹莹,李晓锋.大型商业建筑节能关键问题分析[J].建设科技,2011(12):42-45.

[6] Fluhrer C, Maurer E, Deshmukh A. Achieving Radically Energy Efficient Retrofits: The Empire State Building Example[J]. Ashrae Transactions, 2010, 116:236-243.8.

[7] Zhao H X, Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6):3586-3592.

[8] Sang H L, Hong T, Piette M A, et al. Accelerating the energy retrofit of commercial buildings using a database of energy efficiency performance[J]. Energy, 2015:1-10.19.

[9] Ma Z, Cooper P, Daly D, et al. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art[J]. Energy & Buildings, 2012, 55(10):889-902.

[10] 仝丁丁.校园建筑能耗基准线及合同能源管理模式研究[D]. 天津大学，2014.

[11] Chung W. Review of building energy-use performance benchmarking methodologies[J]. Applied Energy, 2011, 88(5):1470-1479.

[12] 苑登阔，许鹏. 公共建筑能效指标及评价方法现状分析[J]. 建筑节能, 2014(4):76-80.

[13] DB31/T795-2014,商业建筑合理用能指南[S].上海市质量技术监督局,2014.

[14] Matson NE, Piette MA. Review of California and National Methods for Energy PerformanceBenchmarking of Commercial Buildings[J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

[15] Kinney S, Piette M A. California commercial building energy benchmarking[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2003.

[16] EPA.ENERGY STAR Performance rating technical methodology for office, bank/financial institution, and courthouse [EB/OL].(2007).http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate performance.

[17] 郑晓卫，潘毅群，黄治钟等. 国内外建筑能耗基准评价工具的研究与应用[J]. 上海节能, 2006(6):31-35.

[18] 潘毅群. 实用建筑能耗模拟手册[M]. 中国建筑工业出版社, 2013.

[19] 郑晓卫，潘毅群，黄治钟等. 基于建筑能耗数据库的建筑能耗基准评价工具的研究与应用[J]. 节能与环保, 2006(12):10-12.

[20] 天津生态城绿色建筑研究院. 建筑能耗模拟及 eQUEST & DeST 操作教程[M]. 中国建筑工业出版社, 2014.

[21] 罗静. 寒冷地区既有建筑节能改造及能耗评估的研究[D].西安科技大学, 2008.9 .

[22] Y.J. Huang, H. Akbari, L. Rainer, R. Ritschard, 481 Prototypical Commercial Buildings for 20 Urban Market Areas, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, 1991, LBL-29798.10.

[23] 胡俊文. 夏热冬冷地区办公建筑照明系统及外围护结构节能研究[D]. 湖南大学, 2007.

[24] Joe Huang,Donghyun Seo,Moncef Krarti. Analysis of the Energy Saving Potent ials for Near-Zero Energy Buildings in Shanghai [C]. Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability,ES2011. 2011.12.

[25] 张明，杨柳，冯旭明．基于 EnergyPlus 的几种典型平面形状的塔式办公建筑的能耗差异分析[J]．西安建筑科技大学学报自然科学版, 2013, 45(4):565-569.

[26] 程云.夏热冬冷地区既有公共建筑节能改造技术研究[D].宁波大学,2014.13.

[27] Xu Z, Pan Y, Li Y. Evaluating commercial building retrofit energy saving by using a building retrofit tool e case studies in Shanghai[J].ASim 2012, Shanghai China. 2012.15.

[28] Roth A, Brook M, Hale ET, Ball BL, Fleming K, Long N. Den City: an open multipurpose building energy simulation database building energy simulation datasets[J].ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA.2012.p.251e63.

[29] T Hong,Y Chen,HL Sang,R Zhang.Commercial Building Energy Saver: An Energy Retrofit Analysis Toolkit[J].Applied Energy,2015（159）:298-309.21.

[30] Mark Levine, Wei Feng, Jing Ke. A Retrofit Tool for Improving Energy Efficiency of Commercial Buildings[J]. LBNL Paper LBNL-6553E.2015.6.20.

[31] Mills E. Action-oriented Benchmarking: Using the CEUS Database to Benchmark Commercial Buildings in California[J]. Energy Engineering, 2008, 105(Fall 2008):6-18.

[32] Sang H L, Hong T, Piette M A, et al. Energy retrofit analysis toolkits for commercial buildings: A review[J]. Energy, 2015, 89:1087-1100.

[33] Hong T, Le Y, Hill D, et al. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings[J]. Applied Energy, 2014, 126(C):90-106.

[34] Sang H L, Hong T, Piette M A. Review of Existing Energy Retrofit Tools[J]. Scitech Connect Review of Existing Energy Retrofit Tools, 2014.

[35] 郑晓卫，潘毅群，黄治钟,等．数据挖掘技术在上海市商用建筑信息数据库中的应用[J]．暖通空调, 2008, 38(4):35-38.

[36]]Chung W, Hui Y V, Lam Y M. Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings[J]. Applied Energy, 2005, 83(1):1-14.

[37] Regis Signor，Fernando Simon Westphal，Roberto Lamberts， Regression anylysis of electric energy consumption and architectural variables of conditioned commercial buildings. Seventh International IBPSA Conference.Rio de Janeiro，Brazil. August 13-15,2001.

[38] Asadi E, Silva M G D, Antunes C H, et al. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application[J]. Energy & Buildings, 2012, 44(1):81–87.

[39] 姚健，闫成文，叶晶晶等.基于神经网络的建筑能耗预测.建筑节能. 2007, (10): 31~33.

[40] Walter T, Sohn M D. A regression-based approach to estimating retrofit savings using the Building Performance Database[J]. Applied Energy, 2016, 179:996-1005.

[41] C3 Energy, 2013. C3 Commercial. [EB/OL]. http://www.c3energy.com/product-commercial,2015.12.

[42] FirstFuel Software, 2013.FirstFuel Building Energy Analytics.[EB/OL].http://w ww.firstfuel.com,2015.12.

[43] Roulet C, Anderson B. CEN standards for implementing the european directive on energy performance of buildings. In: Passive and Low Energy Architecture.Geneva, Switzerland; 2006(9):6-15.

[44] 上海市城建交通委员会.[EB/OL].http://www.ciac.sh.cn/newsdata/ news20455.htm,2013.12.
[45] Rysanek A M, Choudhary R. A decoupled whole-building simulation engine for rapid exhaustive search of low-carbon and low-energy building refurbishment options[J]. Building & Environment, 2012, 50(4):21-33.
[46] 周志宇. 采暖地区居住建筑节能改造的成本效益分析[D]. 清华大学, 2014.
[47] Retroficiency, 2013. Building Efficiency Intelligence Platform. [EB/OL] .http:// www.retroficiency.com
[48] 刘玉明, 刘长滨. 基于全寿命周期成本理论的既有建筑节能经济效益评价[J]. 建筑经济, 2009(3):59-62.
[49] 朱春妃. 北方采暖区既有居住建筑节能改造经济效益评价[D]. 北京交通大学, 2010.
[50] 张文杰. 基于能耗模拟的公共建筑节能潜力分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
[51] 周红波, 姚浩, 冯鑫. 基于价值工程的既有工业建筑改造技术经济评价研究[J]. 建筑经济, 2008(1):56-58.
[52] 王永祥, 谢丽. 基于价值工程理论的既有建筑节能改造方案优选分析[J]. 建筑科学, 2011, 27(4):70-74.
[53] 马晓云.建筑能耗模拟软件 eQUEST 及其应用[J].建筑热能通风空调, 2009, 28(6):77-80.
[54] GB 17820—2012,天然气[S].中国标准出版社.2012
[55] 江亿,杨秀.在能源分析中采用等效电方法[J].中国能源,2010,(5):5-11.
[56] 白高峰,张燕君,宣学丽,等.线性回归法在地下水水质分析中的应用[J].地下水, 2014(2):14-16.
[57] GB50189—2005,公共建筑节能设计标准[S].中国工业出版社.2005.
[58] 沙华晶, 许鹏. 中国建筑典型模型的建立[C].上海市制冷学会 2011 年学术年会论文集. 2011.
[59] 林美顺,潘毅群,龙惟定.夏热冬冷地区办公建筑体型系数对建筑能耗的影响分析[J].建筑节能,2015(10):63-66.
[60] 刘登航.浅谈建筑墙体外墙外保温系统[J].山西建筑，2008，34(5)：260-261.
[61] 周思宇.不同气候区围护结构节能技术对办公建筑能耗的影响[D]. 天津大学, 2012.
[62] 张欣苗.天津地区办公建筑窗墙比和自然采光对建筑能耗影响的研究[D]. 天津大学, 2012.
[63] DGJ08-107—2012,上海市公共建筑节能设计标准[S].同济大学.2012.
[64] GB50034—2013,建筑照明设计标准[S].中国建筑工业出版社.中国建筑科学研究院.2013
[65] 王新华, 刘泽华, 金雷,等.空调排风热回收在我国应用节能潜力分析[J]. 节能, 2011, 30(9):17-20.
[66] Gong X, Akashi Y, Sumiyoshi D. Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas[J]. Building & Environment, 2012, 58:46-57.
[67] 关颖男.实验设计方法入门[M].冶金工业出版社,1985.
[68] 何映平.实验设计与分析[M].化学工业出版社,2013.
[69] 传智播客高教产品研发部. C#程序设计基础入门教程[M].人民邮电出版社, 2014.
[70] Karli W, Jacob V H, Jon D Reid,等. C#入门经典(第 6 版)[J].中国科技信息, 2014.
[71] 龙惟定,龙涌.建筑节能技术[M].中国建筑工业出版社 2014.

附录 A 能耗算法

建筑形状/尺寸—能耗算法：

1. “建筑面积和建筑形状系数—单位建筑面积电耗”拟合算法总结为：

$$E = -15.449LnX + 52.357(H/S) + 0.631(LnX)^2 + 205.653$$

2. “建筑面积和建筑形状系数—单位建筑面积气耗”拟合算法，总结该算法为 $E_h = -1.457LnX + 58.747(H/S)^2 + 0.054(LnX)^2 + 14.601$

单项节能改造措施-能耗算法：

1. 外墙保温：

“外墙传热系数 K_w—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：$E=0.245K_w+153.81$，$R^2=0.974$

“外墙传热系数 K_w—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法 $E_h=0.324K_w+5.12$，$R^2=0.998$

2. 更换高效节能窗:

“外窗传热系数 K_{win}—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：

$E=-0.373K_{win}+155.17$，$R^2=0.971$

“外窗传热系数 K_{win}—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法：

$E_h=0.0868K_{win}+4.5353$，$R^2=0.996$

3. 增设外遮阳装置：

“综合遮阳系数 SC_w—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：

$E=4.863Ln(SC_w)+153.89$，$R^2=0.969$

“综合遮阳系数 SC_w —单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法：

$E_h=-0.36Ln(SC_w)+5.309$，$R^2=0.995$

4. 更换高效节能灯：

“照明功率密度 LPD—单位建筑面积电耗 E”拟合算法：

$E=2.82LPD+91.11$，$R^2=0.999$

“照明功率密度 LPD—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法：

$E_h=-0.0433LPD+6.3688$，$R^2=0.992$

5. 自然采光：

“照明功率密度 LPD—电耗等效照明功率密度 LPD_e”拟合算法：

$LPD_e= 0.5805LPD-0.0931$，$R^2=0.9994$；

“照明功率密度 LPD—气耗等效照明功率密度 LPD_g”拟合算法：

LPD_g= 0.751LPD-0.87，R^2=0.9936

6. 高效锅炉：

“锅炉热效率 BE_c—单位建筑面积气耗量 E_h”拟合算法：

E_h＝－5.4102BE_c+9.7333，R^2=0.996

7. 高效热泵：

“热泵能效比 HPCOP—单位建筑面积总电耗 EE”拟合算法：

EE=－37.24 Ln(HPCOP) + 207.1，R^2=0.956

8. 高效冷机：

“冷机性能系数 COP—单位建筑面积耗电量 E”拟合算法：

E=－33.73LN(COP)+ 210.04，R^2=0.979

其他：

9. “高效电动机—单位建筑面积耗电量 E”的算法：E=0.98$E_{Baseline}$
10. “水泵变频—单位建筑面积耗电量 E”的算法：E=0.968$E_{Baseline}$
11. “冷却塔风机变频—单位建筑面积耗电量 E”的算法 E=0.99$E_{Baseline}$
12. “排风热回收系统—单位建筑面积耗电量 E”算法：E=0.98$E_{Baseline}$

“排风热回收系统—单位建筑面积耗气量 E_h”算法：E_h=0.53$E_{h\text{-}Base}$

13. “冷凝锅炉-单位建筑面积耗燃气量 E_h”的算法：E_h=0.566$E_{h\text{-}Base}$

多种节能改造措施能耗算法

1. “窗传热系数 K_{win} 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h”算法：

$E_h = 8.381 - 4.935BE_c + 0.152K_{win}$ F 值=716.5

2. “综合遮阳系数 SC_w 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h”拟合算法：

$E_h = 10.58 - 5.675BE_c - 0.631SC_w$ F 值=867.1

3. “照明功率密度 LPD 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h”算法：

$E_h = 8.311 - 3.196BE_c^2 - 0.039LPD$ F 值=752.6

4. “照明功率密度 LPD 与冷机性能系数 COP—单位建筑面积电耗 E”算法：

$E = 155.158 + 2.808LPD - 17.489COP + 0.985(COP)^2$ F 值=1603

5. “遮阳系数 SC_w 与冷机性能系数 COP—单位建筑面积电耗 E”算法：

$E = 206.549 - 17.413COP + 9.913SC_w + 0.981COP^2$ F 值=580.4

6. “照明功率密度 LPD 与热泵能效比 HPCOP—单位建筑面积总电耗 EE”算法：$EE = 170.239 - 25.793HPCOP + 2.685LPD + 1.762HPCOP^2$ F 值=720.6

7. “传热系数 Kwin 与热泵能效比 HPCOP—单位建筑面积总能耗 EE”

$EE = 224.194 - 22.648HPCOP - 0.121K_{win} \times HPCOP + 1.529HPCOP^2$,F 值=529.3

8. “采用自然采光控制系统时，当前照明功率密度 LPD、遮阳系数 SC_w—单位建筑面积电耗 E”拟合算法（F 值=3768.7）：

$E = 80.115 + 1.649LPD - 10.517SC_w$

9. “采用自然采光控制系统、当前照明功率密度 LPD、遮阳系数 SCw—单位建筑面积气耗”拟合算法，总结该算法为（F 值=518.7）：

$E_h = 7.057 - 0.05SC_W \times LPD - 0.494SC_W$

10. “窗传热系数 K_{win}、遮阳系数 SC_w、照明功率密度 LPD 与锅炉效率 BE_c—单位建筑面积气耗 E_h”算法（F 值=1060.8）：

$$E_h = 8.929 + 0.165K_{win} - 4.435SC_w - 0.040LPD - 4.849BE_c^2 - 0.011K_{win}^2 + 0.001LPD^2 + 4.388BE_c \times SC_W + 0.006K_{win} \times LPD - 0.065K_{win} \times SC_W$$

11. “降低窗传热系数、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效冷机—电耗”拟合算法（F 值=3880）：

$$E = 139.245 - 18.784COP + 21.095K_{win} + 0.298LPD - 1.172K_{win}^2 + 20.939SC_W^2 + 1.402COP^2 - 3.513COP \times SC_W - 0.198K_{win} \times LPD - 0.454LPD \times SC_W - 0.317COP \times K_{win}$$

12. “降低窗传热系数、加装外遮阳装置、更换高效节能灯与更换高效热泵—电耗”拟合算法（F 值=943）：

$$EE = 156.377 - 25.241HPCOP + 18.962K_{win} + 2.245HPCOP^2 - 0.978K_{win}^2 + 16.673SC_W^2 - 0.386HPCOP \times K_{win} - 5.306HPCOP \times SC_W - 0.224K_{win} \times LPD - 0.984LPD \times SC_W$$

附录 B 部分编程代码

1. 第一界面部分代码：

```
if (WallKw < 0.2 || WallKw > 2)
{
MessageBox.Show("外墙传热系数范围为 0.2-2，请重新输入！");
return;
}
if (WinKw < 0.2 || WinKw > 7)
{
MessageBox.Show("外窗传热系数范围为 0.2-7，请重新输入！");
return;
}
if (SC < 0.1 || SC > 1)
{
MessageBox.Show("遮阳系数范围为 0.1-1，请重新输入！");
return;
}
if (CCOP < 2 || CCOP > 10)
{
MessageBox.Show("冷水机组能效比范围为 2-10，请重新输入！");
return;
}
if (LPD < 1 || LPD > 50)
{
MessageBox.Show("照明密度范围为 1-50，请重新输入！");
return;
}
energy[0] = -15.449 * Math.Log(X) + 52.357 * (H / S) + 0.631 * Math.Pow(Math.Log(X), 2) + 205.653;
energyH[0] = -1.457 * Math.Log(X) + 58.747 * Math.Pow(H / S, 2) + 0.054 *
```

```
Math.Pow(Math.Log(X), 2) + 14.601;
    EE0 = energy[0] + 7.131 * energyH[0];
    if (tbxBec.Enabled)
    {
    Bec = Convert.ToDouble(tbxBec.Text);
    if (Bec < 0.5 || Bec > 1)
    {
    MessageBox.Show("热水锅炉效率范围为 0.5-1，请重新输入！");
    return;
    }
    energyH[6] = -5.4102 * Bec + 9.7333;
    }
    else
    {
    HPCOP = Convert.ToDouble(tbxHPCOP.Text);
    if (HPCOP < 2 || HPCOP > 10)
    {
    MessageBox.Show("热泵能效比范围为 2-10，请重新输入！");
    return;
    }
```

2. 第二界面部分代码

```
    if (BEC != 0.8)
    {
    if (WinKw != 6.3 && SC != 1 && LPD != 22 || WinKw != 6.3 && SC != 1 &&
LPD == 22|| WinKw != 6.3 && LPD != 22 && SC == 1 || LPD != 22 && SC != 1 &&
WinKw == 6.3)
    {
    EH2346 = 8.929 + 0.165 * WinKw - 4.435 * SC - 0.04 * LPD - 4.849 *
Math.Pow(BEC, 2) - 0.011 * Math.Pow(WinKw, 2) + 0.0001 * Math.Pow(LPD, 2) +
4.3888 * BEC * SC + 0.006 * WinKw * LPD - 0.065 * WallKw * SC;
    energyH[2] = 0;
    energyH[3] = 0;
    energyH[4] = 0;
    energyH[6] = 0;
```

```
}
if (WinKw != 6.3 && SC == 1 && LPD == 22)
{
EH206 = 8.381 - 4.935 * BEC + 0.152 * WinKw;
energyH[2] = 0;
energyH[6] = 0;
}
if (SC != 1 && WinKw == 6.3 && LPD == 22)
{
EH306 = 10.58 - 5.675 * BEC - 0.631 * SC;
energyH[3] = 0;
energyH[6] = 0;
}
if (LPD != 22 && WinKw != 6.3 && SC == 1)
{
EH406 = 8.311 - 3.196 * Math.Pow(BEC, 2) - 0.039 * LPD;
energyH[4] = 0;
energyH[6] = 0;
}
}
```

3. 第三界面部分算法：

```
label9.Text = Convert.ToDouble(Eb).ToString("0.00");
label10.Text = Convert.ToDouble(EHb).ToString("0.00");
label11.Text = Convert.ToDouble(EEb).ToString("0.00");
label12.Text = Convert.ToDouble(Er).ToString("0.00");
label13.Text = Convert.ToDouble(EHr).ToString("0.00");
label14.Text = Convert.ToDouble(EEr).ToString("0.00");
label15.Text = Convert.ToDouble(Eb - Er).ToString("0.00");
label16.Text = Convert.ToDouble(EHb - EHr).ToString("0.00");
label18.Text = Convert.ToDouble(EEb - EEr).ToString("0.00");
label20.Text = Convert.ToDouble(C).ToString("0.00");
label22.Text = Convert.ToDouble(n).ToString("0.0");
```

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历：

秦冰月，女，1992 年 2 月生。

2014 年 7 月毕业于东北林业大学，建筑环境与设备工程专业，获工学学士学位。

2014 年 9 月入同济大学，动力工程（暖通空调方向），攻读工程硕士学位。

已发表论文：

[1] 秦冰月，潘毅群.基于实测数据与软件模拟的 IT 建筑能耗分析与预测[C].2016 年全国暖通空调模拟学术年会论文集.2016.1

[2] Bingyue Qin., Yiqun Pan. Energy Saving Analysis on Control Strategies of VAV System in an IT Building[C].IAQVEC2016.9th International Conference on Indoor Air Quiality Ventilation & Energy Conservation in Buildings, Sondo, Incheon, Republic of Korea, Oct.2016

[3] 秦冰月，潘毅群，于利丽，黄治钟.探究夏热冷地区办公建筑面积对单位建筑面积能耗（EUI）的影响[J]建筑节能, 2017,45(2):11-16

获奖情况：

第 13 届美的中央空调设计应用大赛杰出设计奖