

分类号\_\_\_\_\_

学号 53240020067867

学校代码 10487

密级\_\_\_\_\_

# 华中科技大学

# 博士学位论文

低碳建筑技术体系与碳排放  
测算方法研究

学位申请人：李 兵

学科专业：工程管理

指导教师：丁烈云 教授

答辩日期：2012年5月18日

获取更多资料 微信搜索蓝领论文

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering**

**Research on the Technology System and the Calculation  
Method of Carbon Emission of Low-Carbon Building**

**Candidate : Li Bing**

**Major : Construction Management**

**Supervisor : Prof. Ding Lieyun**

**Huazhong University of Science & Technology**

**Wuhan 430074, P. R. China**

**May, 2012**

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到，本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李彦

日期：2012年 5月 18日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属  保密，  在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本论文属  保密，  不保密

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：李彦

指导教师签名：[Signature]

日期：2012年 5月 18日

日期：2012年 5月 18日

## 摘要

建筑业是以消耗大量的自然资源以及造成沉重的环境负面影响为代价的,我国建筑能耗占全社会总能耗约 30.2%。据统计:建筑活动使用了人类所使用的自然资源总量的 40%,能源总量的 40%,而造成的建筑垃圾也占人类活动产生的垃圾总量的 40%。建筑建造、使用和拆除过程中对能源的消耗及固体废弃物的处理将带来巨大的温室气体排放量,预计 2030 年建筑业产生的温室气体将占全社会排放量的 25%。因此,加大力度建设低碳建筑迫在眉睫。

本文对英国、美国、德国、日本以及我国低碳建筑的建设情况进行了分析和对比,在借鉴国内外相关研究的基础上,提出构建我国低碳建筑管理模式,应包含低碳目标规划、低碳组织保障、低碳技术保障、低碳节能效果测评等内容。

低碳建筑必须在建筑物的外部条件、技术设备和建筑主体三者相互作用下共同实现建筑物的节能减碳目标。本文分析了低碳建筑的运行机理,构建了低碳技术集成模型,并总结现有低碳技术,将其分为 10 大系统,140 余项技术,建立低碳建筑技术体系,便于建筑物进行低碳技术的选取。在此基础上,深入探讨了低碳建筑技术规划方案的比选方法和优化模型,以实现低碳技术规划方案中设备结构和能源使用结构的最优化。此外,提出对建筑物规划设计方案进行能耗分析的工具、方法和主要内容,使用相关低碳节能分析软件对低碳建筑的规划设计方案进行整体能耗分析不仅是对所选方案低碳性能的验证,还为低碳建筑全寿命周期中使用维护阶段的碳排放测算提供了数据基础。

建筑物碳排放量,是建筑物低碳目标实现与否的首要指标。本文从全寿命周期的角度进行建筑物碳排放测评方法的研究,分别对设计阶段、安全施工阶段、使用维护阶段、拆除清理阶段的碳排放来源进行了盘查,构建低碳建筑碳排放测算模型,明确了各阶段碳排放测算的方法和测算清单,建立了一套完整的低碳建筑物碳排放测算指南,并采用 BIM 技术在施工阶段建立了基于施工方案的动态碳排放测算模型,可实现实时的建筑物碳排放监控。

针对以上研究内容,以武汉国际博览中心项目为案例,从低碳技术规划方案的



# 华中科技大学博士学位论文

---

比选和优化，低碳规划方案的能耗分析以及全寿命周期碳排放测算的角度分别进行了实证分析和研究。

本文构建了全面的低碳建筑技术体系和全寿命周期碳排放测算模型，实现了低碳建筑碳排放的定量化、可视化和智能化。不仅为武汉国际博览中心项目全寿命周期的低碳建设提供了技术保障，也将为我国其他低碳建筑的健康、迅速发展提供强大的理论依据和实践指导。

关键词：低碳建筑 低碳技术 碳排放来源 碳排放测算 全寿命周期  
建筑信息模型

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球

## Abstract

The construction industry is developing at the cost of large consumption of natural resources and negative environmental impacts. In china, building energy consumption accounts for about 30.2% of total energy consumption of the whole society. According to statistics, construction activities have consumed 40% of total human natural resources and 40% of the total human energy. In the meantime, the amount of construction wastes has reached to 40% of the total human activities wastes. Energy consumption and solid wastes treatment will cause tremendous greenhouse gas emissions in construction, use and demolition process. It is estimated that the greenhouse gases generated by construction industry will be 25% of the total social emissions. Therefore, it is extremely urgent to construct low carbon buildings.

The study was based on correlational researches home and abroad, especially the researches in UK、USA、Germany and Japan. In this dissertation, a low-carbon construction management mode was proposed, which includes low-carbon construction object program, low-carbon organization guarantee, low-carbon technology guarantee and low-carbon energy-saving effect evaluation.

The carbon reduction goal of a building should be met based on the interaction among external conditions of the building, technical equipment and the building itself. This dissertation analyzed the operation mechanism of low-carbon construction, built an integrated model of low-carbon energy-saving technologies. Besides, it summarized the existing low-carbon energy-saving technologies, and divided more than 140 technologies into 10 systems, all of which will benefit the efficiency of selecting low-carbon technologies. On this basis, the low-carbon technologies selection methods and the optimization model were deeply studied so as to achieve the optimization of device structure and energy use structure in the low-carbon technologies program.

Carbon emission of a building is the primary indicator of low-carbon construction. This dissertation studied the assessment methods for carbon emissions from the perspective of the whole life cycle of a building. Specifically, the carbon sources were

firstly classified from the design stage, construction stage, maintenance stage to the removal and clean-up stage; And then, carbon emission calculation methods and calculation list at various stages were defined; Based on these steps, a carbon emission calculation model was built and a complete set of carbon emission calculation guide for low-carbon buildings was created. Besides, BIM technology was also used to establish a dynamic carbon emission calculation model at the operation stage of a building on the basis of the construction scheme so as to realize real-time monitoring over carbon emissions of the building.

Taking the Wuhan International Expo Center project as an example, this dissertation conducted empirical analysis and research, including the selection and optimization of different low-carbon technology programs, the calculation of carbon emissions during a building's whole life cycle and the analysis of energy consumption for the low-carbon planning scheme.

In this dissertation, a comprehensive technology system for low-carbon buildings and a whole life-cycle carbon emissions calculation model were established to achieve the objective of quantitative, visual and intelligent low-carbon construction. This model provides technical support for life-cycle low carbon construction in the project of Wuhan International Expo Center. In addition, it also offers a strong theoretical basis and practical guidance for healthy and quick development of low-carbon construction in China.

**Key words:** Low-Carbon Building    Low-Carbon Techniques    Source of Carbon Emission    Carbon Emission Calculation    Life Cycle Assessment    Building Information Modelling

目 录



“制冷百家”  
物性查询, 论文查看, 制冷、暖通最  
好的微信公众号, 关注送论文资料

摘 要 .....	(I)
ABSTRACT .....	(II)
1 绪论 .....	(1)
1.1 研究背景和意义 .....	(1)
1.2 国内外研究现状 .....	(2)
1.3 研究主要内容及技术路线 .....	(13)
2 低碳建筑管理模式的构建 .....	(15)
2.1 低碳建筑概述 .....	(15)
2.2 国内外低碳建筑发展现状 .....	(19)
2.3 国外低碳建筑的建设特点及启示 .....	(38)
2.4 低碳建筑管理模式的构建 .....	(45)
3 低碳建筑技术体系的构建 .....	(51)
3.1 低碳建筑运行机理 .....	(51)
3.2 低碳建筑技术集成模型 .....	(58)
3.3 低碳建筑技术集成体系 .....	(62)
4 低碳建筑技术规划方案比选方法研究 .....	(51)
4.1 低碳建筑技术规划方案比选的基本内容 .....	(67)
4.2 低碳建筑技术规划方案比选指标体系 .....	(69)
4.3 项目低碳建筑技术规划方案比选方法 .....	(71)
4.4 单方案内部能源结构优化 .....	(78)
4.5 实证研究——武汉国际博览城项目二期低碳节能方案比选 .....	(80)

5 低碳建筑规划设计方案能耗分析研究 .....	(103)
5.1 低碳建筑规划设计方案能耗分析的意义 .....	(103)
5.2 低碳建筑规划设计方案能耗分析依据 .....	(104)
5.3 低碳建筑能耗分析内容 .....	(107)
5.4 常用的低碳建筑能耗分析软件 .....	(109)
5.5 实证研究——武汉国际博览中心展馆设计方案能耗分析 .....	(111)
6 基于 LCA 的建筑物碳排放测算方法研究 .....	(123)
6.1 建筑物全寿命周期碳排放理论 .....	(123)
6.2 建筑物全寿命周期碳排放来源 .....	(126)
6.3 建筑物全寿命周期碳排放的计算 .....	(133)
6.4 实证研究——武汉国际博览城展馆碳排放测算与评价 .....	(151)
7 总结和展望 .....	(170)
7.1 结论 .....	(170)
7.2 创新点 .....	(171)
7.3 展望 .....	(172)
致谢 .....	(175)
参考文献 .....	(176)
附录 1 攻读博士学位期间发表论文目录 .....	(184)
附录 2 建筑物全寿命周期碳排放测算清单 .....	(185)

## 1 绪论



“制冷百家”

物性查询, 论文查看, 制冷、暖通最好的微信公众号, 关注送论文资料

### 1.1 研究背景和意义

随着全球的可持续发展观念的推广, 全球各国政府、研究机构以及企业等组织都开展了大量的绿色低碳研究和实践。美国绿色建筑协会、世界绿色建筑协会等专业机构相继应运而生, 相关法律法规和低碳节能技术在不断完善, 这是我们对环境的友好表示, 也是我们渴望与自然的和谐发展。

在全球进入工业化最近 100 年来, 地球平均地表气温上升 0.74℃。20 世纪的 100 年, 是过去千年中最暖的 100 年, 从 1950~2000 年的 50 年, 是千年中最暖的 50 年。如任其发展, 不大声疾呼“低碳减排, 拯救地球!”到 2080 年, 平均气温将上升 2~4℃, 届时将更加加剧供水需求的矛盾, 给经济发展蒙上了阴影。究其根源在于二氧化碳过度排放, 人类活动已经严重危及自身生存的基础。2009 年 12 月, 一场给地球“降温”的联合国气候变化大会在哥本哈根召开, 它给各国领导和世界人民敲响了警钟, 是影响人类发展的重要会议。会上, 我国郑重承诺: 到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%。我国的近期目标, “十一五”期间单位国内生产总值能耗降低 20%, 主要污染物排放总量减少 20%。

我国经济的快速增长使我国成为了世界上新建建筑最多、建材产量最大的国家。1985 年来我国水泥产量连续 20 多年居世界第一, 占世界总产量的 50% 以上, 目前水泥产量超过 19 亿吨, 混凝土产量超过 20 亿立方米。然而建筑业是天然资源和能源资源消耗最高、破坏土地最多、对大气污染最为严重的行为之一。我国建筑能耗占全社会总能耗约 30.2%, 如表 1-1 所示。建筑建造、使用和拆除过程中对能源和资源的消耗及固体废弃物的处理将带来巨大的温室气体排放量, 预计 2050 年建筑业产生的温室气体将占全社会排放量的 25%。

表 1-1 建筑能耗情况

年份	全国能耗消耗总量 (亿吨标准煤)	建筑能耗 (亿吨标准煤)	建筑能耗 所占百分比%
----	---------------------	-----------------	----------------

续表1-1

2001	13.491	3.58	27.5
2002	14.822	4.822	27.6
2005	22.218	6.288	28.3
2006	24.575	7.151	29.1
2007	26.486	7.892	29.8
2008	28.492	8.605	30.2

数据来源:王思茂,刘永辉,鲍学英.基于全寿命周期费用的节能住宅投资决策研究.建筑经济,2010(5):30-33

当前我国低碳建设的发展还处于探索阶段,相关的研究和技术体系还不完善,低碳建设没有形成较为稳固的模式,对建筑物低碳信息的处理和分析也没有必要的技术支持和完善的分析体系,低碳建设的研究和应用都较为盲目和分散,不成体系,与国外相比尚有一定的差距。怎么在建筑的全寿命周期内构建一种和谐的建设管理模式,实现全过程的低碳管理和控制?怎样衡量建筑的低碳度,客观全面的评价建筑物的碳排放?怎么建立低碳节能标准和构建低碳节能分析方法,便于决策者在众多低碳节能技术方案中选取最优方案?怎么集成众多繁杂的建筑信息和低碳信息,实现数据的自动分析,并结合当前流行的虚拟仿真技术实现建筑物碳排放的形象化和可视化?这些都是摆在我们每一位有社会责任感的中国建筑工作者面前的重要问题,也是我们中国建筑能否适应可持续发展的时代大潮,在21世纪重塑辉煌的关键所在。

为使中国建筑可持续发展,低碳建筑的建设势在必行,然而,低碳建筑的研究是在明确其内涵、统一碳排放测算方法的基础上进行的。所以,我们迫切需要建设一种通用的可操作的建筑碳排放量化方法,与此同时将建筑碳排放数据公开化。

对建筑物进行低碳建设模式的研究和应用,构建全面的建筑物低碳集成技术,寻求有效的低碳评价体系和方法,并且实现低碳建设信息的集成化、可视化和智能化。将为我国绿色低碳建筑健康、迅速发展提供强大的理论依据和实践指导。

## 1.2 国内外研究现状

国外关于建筑节能方面的研究较早,上世纪初期,有关学者就进行了建筑节能

方面的研究。国外学者的研究内容主要有建筑节能技术、生态技术、节能评价体系、建筑环境模拟、建筑能耗模拟、可再生能源利用以及相关经济性分析等内容。在建筑节能推广方面也较为成功。我国进入新世纪以来，随着国家对建筑节能的要求，国内学者也投入了大量的精力。

## 1.2.1 节能经济性

首先，研究的重点在明确住宅节能所带来的经济效益上。Petersen, S. R.对既有房屋的节能技术改造的经济性问题进行了研究，探讨特定气候条件、燃料费用和改造费用，基于全寿命周期运营成本的理念，选择特定的节能技术的组合，并利用计算机辅助模型进行了经济性分析<sup>[1]</sup>。

Petersen, S. R.从经济学的角度，对新单户住宅的热设计对气候和经济变量的灵敏度。对房屋的独立的以及相互依存的及节能技术利用按照经济标准进行了检查，充分考虑了气候因素、燃料成本、节约能源成本、贴现率和建筑寿命等因素<sup>[2]</sup>。

Buffington, D. E.对在住宅建筑制冷/采暖采用节能技术进行了经济性分析，对 15 种待选方案进行了基于投资回收期 and 净现值的经济分析，从而判断各种设计和施工方案的经济可行性，对“高耗能”和“低耗能”的住宅进行了经济和能量比较<sup>[3]</sup>。

Ahmed, S. F.介绍了一款用于对设计方案进行能源经济分析的软件（程序）REDO，它具有设计能量分析功能、文件导向功能、用户界面友好、经济优化和输出方式可供选择等优点，文中还对能源计算的基本算法进行了探讨，通过 DOE 2.1 进行了验证<sup>[4]</sup>。Giffin, T.M.指出建筑节能规范已经成为美国建筑法规的不可分割的一部分，研究基于全寿命周期成本的节能经济性评价模型<sup>[5]</sup>。

Amstalden, R. W.站在房屋所有者的角度，研究了政府工具和能源预期价格对瑞士住宅建筑部门的节能改造的盈利能力的影 响。结果表明，瑞士政府目前的政府手段推动了节能改造投资的盈利性，而成本递减对投资收益的影响较小，最重要的因素就是能源预期价格，加入以 2005 年的能源价格作为预期，即使没有政府的支持，节能改造将会是个具有吸引力的投资领域<sup>[6]</sup>。

我国也有人量学者对节能经济性进行了探讨。具有代表性的有：刘玲通过对运



用价值工程原理进行建筑节能设计的必要性、可行性、合理性进行分析；阐述了建筑节能投资和建筑节能使用费用、寿命期、成本三者之间辩证的对立统一关系；结合案例对普通建筑 and 节能建筑的围护结构价值（即功能和费用匹配）进行对比，提出实现围护结构节能的途径，进而运用价值工程进行整个建筑节能设计<sup>[7]</sup>。

刘玉明采用全寿命周期成本理论，界定了既有建筑节能改造项目的全寿命周期概念，分析了既有建筑节能改造项目的全寿命周期成本的组成，建立了既有建筑节能改造项目的经济效益评价模型及评价指标<sup>[8]</sup>。

赵忠超以济南市某公共建筑为对象，以《公共建筑节能设计标准》为依据，并借鉴瑞典进行既有建筑节能改造的成功技术和经验，基于节能、降耗及减排的原则，以应用可再生能源为技术手段，对该建筑进行了节能改造设计。针对不同采用可再生能源的节能技术改造方案所带来的节能效益进行了对比，给出了采用不同节能技术对既有建筑改造的初投资及其回收期的经济分析，对推动既有建筑节能改造具有借鉴作用<sup>[9]</sup>。

## 1.2.2 建筑节能评价研究

王志勇针对暖通空调节能的趋势，分析了建筑环境对暖通空调系统的影响，提出从建筑环境方面考虑问题是暖通空调节能的必要途径，概括地介绍了空调能源的发展方向 and 空调节能的多种手法<sup>[10]</sup>。

范影提出了将蒸发冷却与太阳辐射能的收集利用有效结合的方法，同时讨论了各种应用方式及其利弊。比较了太阳能被动蒸发冷却所分的两类问题（一类是自由水面的蒸发冷却问题，另一类是多孔材料蓄水蒸发冷却问题）对于室内空气温降的不同影响，并根据各个地区气象条件的不同讨论了该地区更适合哪一类太阳能被动蒸发冷却<sup>[11]</sup>。

刘殊雄分析太阳辐射对建筑室内热环境的影响，研究外窗遮阳在建筑节能中的作用，进而提出建筑外窗的遮阳措施<sup>[12]</sup>。

Loxson, F.使用计算机预测一个典型的英国地区住宅在供暖、制冷季节里面的能耗，并利用这些结果来评价建筑节能窗传热的作用<sup>[13]</sup>。

李金平在抽象物理模型基础上,建立散热器采暖房内热环境的三维数值模型,模拟传统采暖房内的热环境,基于新型采暖热舒适性标准分析散热器安装位置对采暖房内热环境的影响.结果表明,按照国家采暖规定,在 $6\text{ m}\times 5\text{ m}\times 3.2\text{ m}$ 的房间内,安装在内墙上的散热器不仅能更好地满足居民热舒适度的需求,而且比安装在外墙上的散热器节能 $7.63\text{ W/m}^2$ <sup>[14]</sup>.

陈飞从高层建筑产生的风环境问题出发进行研究,探索高层建筑的气候适应性特征,寻找建筑节能、通风及防风的相关措施<sup>[15]</sup>.蔡裕盛(2008)通过建立模型和能耗计算,对窗墙面积比、屋顶K值、屋顶天窗等敏感性因数进行定量分析,探讨公共建筑设计中的节能途径.从而为节能公共建筑的设计、建造等提供有益参考<sup>[16]</sup>.

易雁分析了高层建筑供水的基本方式,探讨了供水方式的优缺点及其对能耗的影响,就如何在节能基础上正确选择高层建筑的供水方式进行了研究,以完善高层建筑的给排水设计及施工,具有一定的参考价值<sup>[17]</sup>.

宋晶光运用粗糙集分析方法,在统计分析的基础上,进一步研究了住宅系统中影响住宅能耗的各个相关因素对住宅能耗具体的影响规则,在验证了统计分析结论的同时为节能住宅的建设提供了设计原则和依据<sup>[18]</sup>.李铁庄介绍了建筑设备节能技术与措施<sup>[19]</sup>.

祝百茹结合建筑节能的发展趋势,提出优化采暖系统整体结构,通过智能系统主动控制相关阀门进行流量和压力调节的新型高层建筑采暖系统设计方案,以达到垂直方向和水平方向的水力平衡,降低整个系统的能源消耗和浪费,减少维护费用和管理费用并满足人们对室内环境的热舒适性要求的目的<sup>[20]</sup>.

王剑平在对现场墙体传热系数的检测方法——热流计法、热箱法、非稳态法和红外热像仪法等进行综述的基础上,对现有检测技术存在的问题提出几点看法<sup>[21]</sup>.

李向辉针对建筑墙体节能的重要性,对建筑外围护墙体的节能进行了研究,通过一些实例分析了节能墙体的类型及应用,指出墙体是建筑外围护结构的主体,设计中应尽量减少建筑的体形系数,以促进墙体节能技术的发展<sup>[22]</sup>.

Cai, W.对设计方案的适用性和城市住宅节能技术改造进行了研究,对建筑物的位置、布局、朝向以及绿化等方面对节能的影响进行了分析,对建筑外墙、窗户和

屋顶节能改造的新技术和新方法进行了讨论。结果表明,建筑物的体形系数和热特性直接影响能源的消耗水平,其中窗户是建筑围护结构中对热最敏感的部位<sup>[23]</sup>。

吴金应针对高层建筑给排水节能节水方面进行了探讨,根据高层建筑给排水功能的特点,对高层建筑给排水节水节能技术着重进行了论述<sup>[24]</sup>。

李林提出了一套适用于楼宇的灯光节能方案。文章首先给出了系统总体框架结构,然后具体给出了楼宇光照节能系统中的无线节点:光照度无线传感器,无线开关,无线继电器的设计方案,最后阐述了协议的网络结构并针对协调器、路由器、终端节点进行软件设计。经实验测试该方案可以充分利用 ZigBee 无线技术的优势,减少电能消耗,最终达到节能目的<sup>[25]</sup>。崔子丰从建筑门窗入手,分析了各种门窗材料特性,探讨了门窗的传热特点以及影响门窗节能的因素,介绍了门窗各个方面的节能措施<sup>[26]</sup>。

## 1、建筑节能评价方法

建筑能耗评价方法主要有以下几种:

目前国际上的建筑能效相关的评价方法很多,可以分为三大类:清单列表法,生命周期评价方法和基于建筑能耗计算和模拟的评价方法。

### (1) 清单列表法

清单列表法是将一些带有标记的问题,按照不同的权重分配给一个分类,最后根据提问计算评分。具有操作性强,实施面广的特点,目前美国、英国、日本、澳大利亚、德国、加拿大、俄罗斯等国都有专门的基于清单列表的建筑节能评价方法,具体包括 LEED、BREEAM、CASBEE、SpeAR、ECO QUANTUM, ECO-PRO, EnerGuide。但清单列表法具有权重确定不明显以及打分方法不一致的问题。

### (2) 生命周期评价方法

生命周期评价 LCA (Life Cycle Assessment)是指在项目的全寿命周期,通过对建筑的物质和能量做输入、输出的清单分析。LCA 经过 30 多年的发展,目前已纳入 ISO14000 环境管理系列标准。国内外有关 LCA 评价建筑能耗的方法有:香港商业建筑生命周期成本分析 (LCC, Life Cycle Cost)、美国的 BEE、加拿大的 Athena、法国的 EQUER 和 TEAM。生命周期评价方法需要在详实全面的基础数据上进行的,但

基础数据的缺乏会使其失去评价的先进性与准确性。

### (3) 基于建筑运行能耗计算或模拟的评价方法

通过建筑能耗计算方法或计算机模拟软件对建筑运行阶段的能耗进行计算的方法。目前主要的评价方法是欧盟建筑能效指令 EPBD 2002/91/EC (Energy Performance of Buildings Directive) 框架下的建筑能耗证书制度。基于建筑运行的能耗计算或模拟的评价方法能定量计算建筑能耗, 但是其计算结果因受模拟软件局限性的影响, 常常与实际情况有较大出入。

Berry, J. 开发了一种可供建筑师在可行性阶段判断他们设计的房屋能源需求的设计工具和研究方法, 在使用过程中还能给出设计的指导意见, 并通过一个实例进行了介绍<sup>[27]</sup>。

周正等针对大同市寒冷地区的气候特点, 利用建筑能耗分析软件 DOE-2, 建立典型建筑模型, 分别从建筑体型系数、窗墙面积比、外围护结构传热系数以及大同市可利用天然冷热源和设备性能等方面对住宅节能的途径和方法进行分析探讨, 进行在寒冷地区利用建筑节能的可行性研究<sup>[28]</sup>。

丛娜介绍了国内外建筑能耗及建筑节能评价研究现状, 对建筑节能评价指标体系的设计原则及建筑节能综合评价体系的塔式结构进行了分析。结合北方寒冷地区建筑的特点研究了建筑节能综合评价的指标体系。采用层次分析法确定各指标的权重。通过案例分析计算验证了方法的有效性<sup>[29]</sup>。

马明珠通过对建筑实例采用 LCA, 针对建筑保温性分析进行节能效益与成本方面的研究<sup>[30]</sup>。

肖忠钰, 刘琨和黄茜通过实例研究, 对建筑节能技术包括: 空调采暖、通风节能、照明技术、可再生能源利用技术等方面进行分析, 提出建筑节能技术集成化的建议<sup>[31-33]</sup>。

王靖通过计算机软件模拟, 对单体建筑能耗进行分析, 提出了节能优化方案<sup>[34]</sup>。杜艳琦介绍了建筑能耗平衡的计算方法, 分析住宅建筑使用过程的节能效果, 从而定量评价建筑节能, 为建筑节能控制提供了计算方法, 并提出节能的主要途径<sup>[25]</sup>。

Qela, B. 开发了一套住宅在不同情况下采暖系统效率、能源消耗及费用情况的模

拟器,利用“专家系统”和先进的智能算法实现“智能温控器”<sup>[36]</sup>。吴成东针对神经网络 BP 算法收敛速度慢且容易陷入局部极小值问题,在常规神经网络中引入混沌神经元,建立混沌神经网络建筑节能综合评价模型。结果根据建筑节能综合评价指标体系各量化指标,得出科学合理的评价结果<sup>[37]</sup>。

### 1.2.3 节能技术集成

马伟斌首次在南方地区采用“地源热泵+太阳能+节能型围护结构”的节能集成技术应用于别墅建筑,使得别墅建筑能耗降低 65%。采用能耗模拟计算与实地测试相结合,利用模拟优化过程来指导示范系统优化设计,使得集成系统更为合理。项目实施后将实现建筑能耗降低 65%,这种节能效果是很显著的,为了达到这种指标,需要增加节能集成系统<sup>[38]</sup>。

熊永强介绍了建筑节能技术目前存在的问题和应用状况;讨论了系统集成一体化节能技术在建筑工程中的应用<sup>[39]</sup>。

卞鹏介绍了济南市三个廉租房项目如果进行节能设计,做到以人为本且便于管理,既经济实用又能有效降低后期管理成本,提高项目的整体价值<sup>[40]</sup>。

徐峰介绍了以节能为目标的集成化设计方法;提出了现有绿色建筑工具软件所面临的问题;针对节能建筑集成设计软件系统的开发提出了基本流程框架,并探讨了该框架在不同设计阶段的要求<sup>[41]</sup>。

张冰指出保障性住房的服务对象主要是低收入家庭,保障性住房的建筑面积和建筑造价受到严格控制,但是保障性住房同样要为居住者提供一个良好的人居环境。文章从保障性住房的特点出发,提出上海地区保障性住房适合采用的节能省地技术集成方案<sup>[42]</sup>。

李进通过运用技术集成理论,对建筑节能技术路线进行系统地分析和研究,并提出实现建筑节能技术路线集成创新的可行途径<sup>[43]</sup>。

## 1.2.4 建筑碳排放测算方法

### 1、低碳建筑的碳排放测算范围

低碳建筑的评价范围较广，尽管不同学者由于方法的差异产生了不同的评价范围，多数学者采取低碳建筑全寿命周期（又称全生命周期）评价的观点。

所谓“全寿命周期评价”，据1997年国际标准化组织(ISO)制定的原则与框架，指将某一产品在其寿命周期内的输入输出和潜在环境影响的综合性评价。对建筑而言，即将规划与设计、材料构件生产、建造与运输、运行与维护、拆除与处理全循环过程中物质能量流动所产生的对环境影响的经济效益、社会效益和环境效益的综合评价。

刘念雄在项目的4个不同的阶段(材料准备、施工、运营、拆卸)计算城市住区CO<sub>2</sub>排放量<sup>[44]</sup>；汪洪等认为衡量低碳建筑包括建筑能耗、建筑用水、建筑材料的选择，废弃物的管理和回收、交通，甚至人们的行为举止<sup>[45]</sup>；蔡向荣，等将建筑能耗分为建材能耗、施工能耗、使用能耗、拆除能耗和废旧建材处理能耗，并将建筑材料的从产地运输到施工现场的建材运输能耗和建筑施工过程中的能耗计算于施工能耗内<sup>[46]</sup>；刘军明，等从规划设计（选址与节地、节材与材料利用、节能与能源利用、节水与水资源利用、能量补偿和能源循环等5个方面）、建造与施工、后期使用运营等3个方面探讨低碳建筑的评价体系；李启明，等认为建筑碳排放总量包括建造阶段碳排放量、使用碳排放量和拆除碳排放量三部分，其中建造碳排放量包括材料碳排放量、施工碳排放量和管理碳排放量<sup>[47]</sup>；有学者从时间和空间的角度进行低碳建筑评价，时间层面包括设计阶段、施工建造阶段、运行使用阶段、拆除回收阶段，空间层面包括建筑单体建造和使用需求而产生温室气体排放的所有空间场所的总称，并且将建筑碳排放的空间分为直接空间（建筑单体及其附属公共空间）与间接空间（生产、运输及其他活动）<sup>[48]</sup>；低碳建筑包括建筑材料的开采、运输、加工及建筑产品的规划、设计、施工、使用、维护、修缮、更新、拆除和处理的整个过程<sup>[49]</sup>；张智慧强调了规划设计阶段不产生实物碳排放，具体建筑材料生产和构配件加工、运输、施工与安装、使用期建筑物运行与维护、循环利用、拆除与处置<sup>[50]</sup>；从建筑全生命周期的

物质活动看从进口环节（可再生能源替代）、转化环节（提高能源利用效率）、出口环节（碳汇碳捕捉）理解低碳建筑内涵<sup>[51-52]</sup>；建筑全生命周期包括 6 个阶段：建筑材料准备、建造、使用、拆除、处置和回收<sup>[53]</sup>；我国住宅建筑生命周期碳排放的阶段可以划分为原材料生产、建筑施工、建筑使用、维护、建筑的废弃和处理 5 个阶段，碳排放计算分为原材料生产阶段、建筑使用阶段、维护阶段、建筑的废弃和处理阶段 4 个阶段<sup>[54]</sup>。

国外学者在分析低碳建筑评价范围时也存在一些差异，Leif研究的评定范围是材料，包括其生产、定点建设、运行、拆除和处理<sup>[55]</sup>；Cole将建筑生命周期分为原材料生产（包括运输、定点施工设备消耗和建筑支持措施）、利用原材料建成建筑雏形、建筑的装修和维护、废弃及拆除<sup>[56]</sup>；Gerilla研究分为建设施工、维护、运行、废弃处理<sup>[57]</sup>；Bribian分为生产、建设、使用和结束4个阶段<sup>[58]</sup>；May对建筑物使用阶段产生的碳排放分析认为建筑物使用阶段的碳排放仅由采暖、通风、空调、照明等建筑设备对能源的消耗造成，不包含由于使用各种家用电器设备而导致的能源消耗与碳排放<sup>[59]</sup>；Paumgarten利用产品生命周期成本法估计绿色建筑在整个研究期间所有相关费用的净现值，包括工程施工、保养、维修、和更换成本、能源成本以及剩余价值，研究了绿色建筑的可持续性及其金融效益<sup>[60]</sup>；Deepak建立综合评价网络，包括建筑能源效率模拟，主成分应用（3个主成分分别为生命周期评价、能源利用效率分析和电器性能），以及生命周期各阶段的评价体系。其中生命周期碳排放分为5个阶段：材料生产、建筑建造、材料更换、热、冷设备运行以及建筑的终结<sup>[61]</sup>；Randolph对悉尼12个居住区进行能源与温室气体的排放研究，该研究将建筑建造、材料更换及基础设施生命周期的碳排放计算在内<sup>[62]</sup>；G.Q. Chen对低碳建筑评价时考虑建筑生命周期中的9个阶段，各阶段（建造、装修、设施建造、运输、使用、废物处理、运营、拆除和处理）所有的输入可以归类原材料、设备和能源，以及人类力量<sup>[63]</sup>。Gian认为LCA评价的四个主要阶段：产品阶段（原材料供应、运输和制造），建造阶段（运输和建造-安装过程），使用阶段（维护、维修和更换，翻新，运营能源使用：供暖、制冷、通风、热水、照明和操作用水）和建筑寿命终结阶段（拆除、运输、回收/重用和处置）<sup>[64]</sup>。Tove对相关文献总结后发现LCA评价方法尽管已经国际化，但

在具体应用上也存在一些障碍，一个主要的障碍是LCA有严格的数据要求，工作强度和相应的高费用。而且，LCA作为工具在建筑中的应用需要扎实的知识基础。另外的障碍是在结果的解释中通常存在复杂性、精确性等偏差。进行建筑生命周期评价时两种数据必须考虑：建筑本身的数据，比如建筑材料和能源使用；建筑材料和能源（正常来讲应该包括所用的工具）在生产过程中的碳排放<sup>[65]</sup>。生命周期评价是材料使用、能源流出和产品环境影响评价的量化工具<sup>[66]</sup>，从原材料的生产、过程、制造、使用和最后的处理<sup>[33]</sup>。Huberman认为任何一个建筑能源消耗的综合性评价必须考虑建筑整个生命周期的消耗，可以将评价分为三个部分：使用前阶段（内含能源，EE），使用阶段（运行时能源，OE）和使用后阶段（处置或者可能的回收利用）。他还发现这些年来，减少建筑热能消耗成为了设计者地目标，而内含能源却很少得到关注和研究。究其原因是对内含能源的研究缺乏明确的评价方法和充实的数据，同时多数人认为建筑生产的内含能源要远远小于建筑使用时消耗的能源<sup>[67]</sup>。Bekker强调生命周期方法是分析建筑部门能源和其他自然资源使用的恰当的方法，同样，该方法也可以分析环境的影响<sup>[68]</sup>。Joshua利用能耗模拟和建筑成本数据库计算每个新商业建筑设计里生命周期的成本效益和碳排放量，研究发现通用的能源节约技术能降低能源消耗平均水平达到20%-30%，有些建筑类型和位置节约率超过40%<sup>[69]</sup>。

## 2、建筑生命周期（LCA）评价模型

LCA是按照国际标准ISO14040制定的一个框架体系，用来评估产品、过程或者服务从原始状态到销毁期间对环境的影响<sup>[70]</sup>。

针对不同的生命周期划分方法、建筑类型以及建筑碳排放源清单的详细程度，研究者建立不同的LCA评价模型：

J. Monahan等研究低碳评价方法认为应该将5个方面的碳排放计算在内：建造阶段材料和产品的使用、材料与产品运输、材料生产浪费、废物处理运输、施工期石化能源消耗<sup>[71]</sup>。

能源的价值和碳的持续排放每个国家都不尽相同，原因有很多因素比如：能源的混合使用、过程变换、经济体系的效率以及这些因素随时间推移而产生的变化<sup>[72]</sup>。

刘念雄在考虑负碳排放的基础上，通过量化碳排放因子测定混凝土结构建筑的



各个阶段碳排放量<sup>[44]</sup>。Leif 通过全寿命周期碳流动的平衡的理论,对木结构的碳排放进行测算<sup>[54]</sup>。Gerilla 利用单位货币消费排放的污染物量计算碳排放<sup>[56]</sup>。

李志强等通过建立碳足迹计算公式,采用能源求和分解的理论,对建筑进行低碳评价<sup>[73]</sup>。

## 1.2.5 建筑运行能耗分析研究现状

能源审计(Energy Audit)是指对已存在的建筑进行节能改造,通过对建筑类型、特征、管线系统、建筑能耗、造价、节能、运营维护等情况进行调查分析<sup>[74]</sup>。能源审计方面的研究于 1976 年由英国发起,近年来受到希腊、印度、美国、加拿大等众多国家的关注,目前已有一系列的研究成果。例如,美国建立建筑能耗统计数据库;加拿大通过电话、信件等方式,对全国 60%家庭住宅进行抽样调查,形成建筑温室气体排放、能耗分析以及其发展趋势分析报告;加拿大于美国合作开发相关住宅能耗模拟软件等<sup>[75-77]</sup>。

涂逢祥、魏积义等分别通过调查我国各地区城市(三北地区、重庆、武汉、南京、宜昌、哈尔滨)的建筑相关信息(类型、供暖能耗、热环境、成本、能量效率等),得到相关建筑能耗分析数据,总结有效的建筑节能途径,给出相应的建筑规划设计节能方案<sup>[78-80]</sup>。

龙惟定通过调查上海公共建筑,得出建筑耗能情况,提出用能量效率作为节能评价的指标<sup>[81]</sup>。

李世明、武海斌分别对北京市建筑耗电量、燃料费进行调查和研究,分析比较各建筑用电情况,得出空调用电量概算指标计算公式<sup>[82-83]</sup>;在此基础上,翟超勤利用 DEST(建筑热环境模拟分析软件)测算了全国家用空调耗电<sup>[84]</sup>。

广州大学、建设部科技发展中心以及哈尔滨工业大学也做了类似调查研究,将住宅建筑耗能与户主情况相结合,得出相对应的节能措施<sup>[85]</sup>,为对全国的建筑进行能耗分析打下了基础。

## 1.3 研究主要内容及技术路线

本文的研究内容可以概括为：

### 1、低碳建筑管理模式研究

低碳建设管理是一项庞大的系统工程，不是哪一个部门能够单独完成的，有效的低碳建设管理需要很多部门和单位的共同参与，并共同管理若干低碳技术，在全寿命周期进行碳排放的监测。本文在对国内外低碳建设现状分析的基础上，对建筑物低碳管理的模式的内涵，构建方法和具体内容作出了分析。

### 2、低碳建筑技术体系的构建

本文对建筑物低碳技术体系进行相应的研究，分析了低碳建筑的运行机理，构建了低碳技术集成模型，指出建筑物必须在建筑物外部条件、低碳技术设备以及建筑物本体结构三者共同作用下才能实现建筑物的节能减排目标。总结现有低碳技术，将其分为 11 项子系统，150 余项技术，建立低碳建筑技术体系，便于建筑物进行低碳技术的选取。

### 3、低碳建筑技术规划方案比选和优化研究

为了便于在各种低碳技术的选择上进行科学的分析和比较，本文构建低碳建筑技术规划方案比选的指标体系，采用灰色关联度分析法对低碳技术规划方案进行选取和灵敏度分析，并建立单方案内部能源结构优化的方法，可作为各种低碳技术选取和优化的基础，并采用武汉国际博览城建设项目的低碳技术规划方案作为实例进行了分析和优化。

### 4、低碳建筑规划设计方案能耗分析

提出对建筑物规划设计方案进行能耗分析的工具、方法和主要内容，使用相关低碳节能分析软件对低碳建筑的规划设计方案进行整公能耗分析不仅是对所选方案低碳性能的验证，还为低碳建筑全寿命周期中使用维护阶段的碳排放测算提供了数据基础。并采用武汉国际博览城建设项目的展馆区进行了规划设计方案的能耗模拟分析。

### 5、建筑物全寿命周期碳排放测评技术研究

本文从全寿命周期的角度进行建筑物碳排放测评方法的研究，分别对设计阶段、

安全施工阶段、使用维护阶段、拆除清理阶段的碳排放来源进行了盘查，构建低碳建筑碳排放测算模型，明确了各阶段碳排放测算的方法和测算清单，建立了一套完整的低碳建筑物碳排放测算指南，并采用 BIM 技术在施工阶段建立了基于施工方案的动态碳排放测算模型，可实现实时的建筑物碳排放监控。

基于上述内容，本文研究的技术路线如图 1-1 所示。

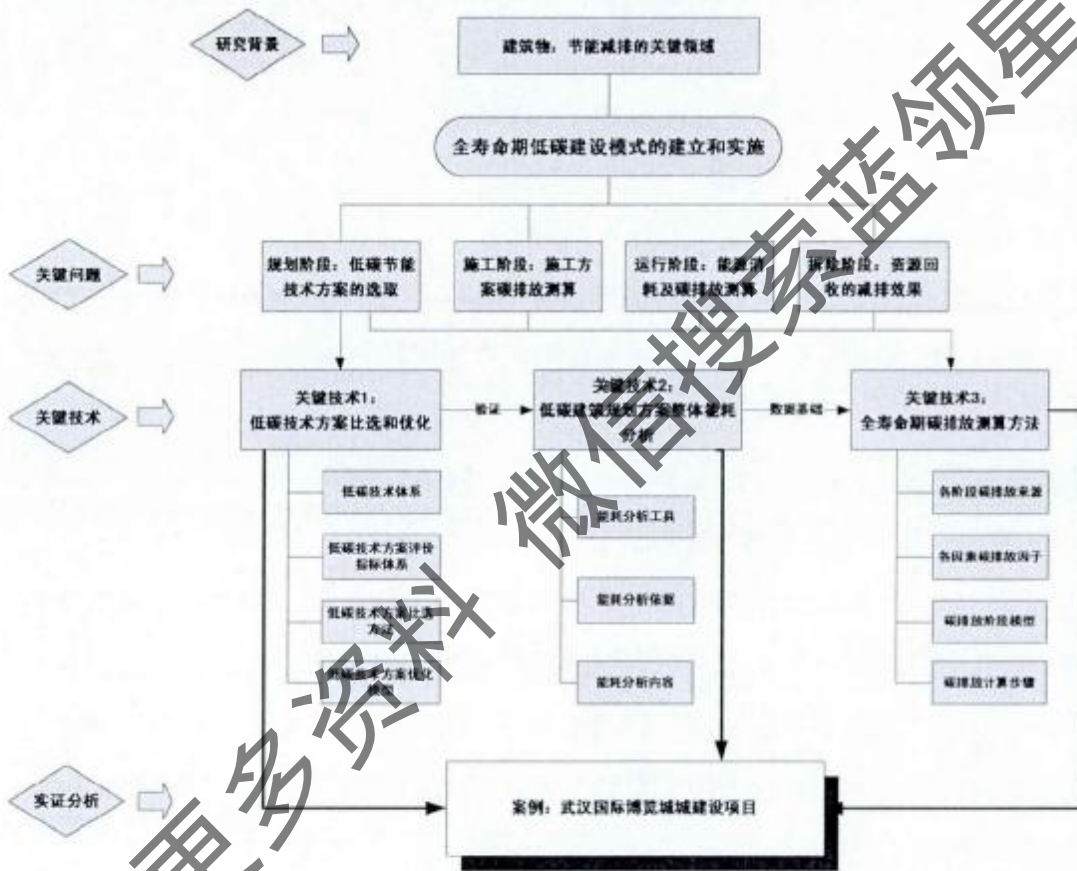


图 1-1 研究技术路线

## 2 低碳建筑管理模式的构建

### 2.1 低碳建筑概述

#### 2.1.1 低碳建筑的内涵

建筑的节能减排经历了三个阶段的发展，第一个阶段是直观的强调建筑节能（Energy saving in buildings）；第二个阶段是强调能量在建筑物中的保持（Energy conservation in buildings），及保持建筑物中能量的平衡，尽量减少能量的二次输入；第三个阶段就是最近经常被提起的能源在建筑物中的高效利用（Energy efficiency in buildings），变消极节能为主动出击，减少能量利用过程中的损失，主要是加大对可再生能源的利用，减少能源利用的中间环节，并对每个环节的剩余能量进行循环利用，从而以最小的能源代价换取最大的经济效益和环境效益，进而促进低碳经济的发展。现在普遍将建筑节能称为“提高能源在建筑中的利用效率”，它是在保证建筑舒适性的前提下，通过科学的合理规划用能，进而达到提高能源使用效率的目的。

建筑节能在实际项目中反映为在建筑物的新建、改造和使用过程中通过科学合理的规划设计，执行新的更高要求的节能标准，采用先进的生产工艺、材料以及设备，来提高建筑物使用过程中的能源利用效率，如提高空调的冷热效率、提高墙体保温材料的性能等，再辅助以科学的用能管理，在保证室内热环境质量达标的基础上，尽量减少对空调、照明、以及热水供应的使用。

低碳（low carbon）是指通过排放比现在水平相比更少的温室气体来获得同样或更多的经济效益。在当前低碳经济形势下，低碳建筑必将成为建筑发展的必然趋势。对于低碳建筑这一词汇，国内外目前的定义尚未统一，但是清华大学建筑学院的栗德祥教授认为：所谓低碳建筑在内涵与基本目标上与绿色建筑并无二致，只是二者的侧重点有所不同，就目前严峻的气候问题及发展低碳经济的热潮而言，低碳建筑无疑更贴切于当今社会的主题。另外还有一些学者从低碳建筑的要求上进行了描述，认为低碳建筑是在其整个生命周期内尽量减少传统能源的使用，并通过高新技术提

高能源在建筑中的利用效率,进而减少温室气体的排放。英国学者 Phil Jones 则认为,发展低碳建筑的基础是建筑产品的地能源需求及可再生能源的高效利用。

总之,建筑节能侧重于建筑物在运行期的低能耗,而低碳建筑的主要目的是为了减少建筑的碳排放。而我国目前已是世界上消耗能源和排放二氧化碳最多的国家之一,能源利用效率低下,浪费严重。我国能源发展的首要问题是节约能耗,提高效率、降低能耗、大力发展可再生能源应用实现减少碳排放。

因此,低碳建筑的内涵,是指建筑具有可持续发展的特性:在建筑节能的基础上,最大限度地减少碳排放,同时增加碳汇(吸收消耗空气中的二氧化碳),减少总的碳排放量,从而减轻建筑对环境的影响;与自然环境的融合和共生,做到人、建筑、自然的和谐、持续发展;提供安全、健康、舒适的生活空间。总而言之低碳节能建筑是指在建筑设计阶段有着明确而详细的减少温室气体排放的方案,在建筑生命期内建筑材料与设备制造、建造、使用和拆除处置各阶段减少碳排放甚至是零碳排放并且在围护结构、能源和设备系统、照明、智能控制、可再生能源利用等方面综合选用各项节能技术,能耗水平低于常规建筑的建筑物,如图 2-1 所示。其目标是在建筑全生命周期内尽量节能减排,减少对气候变化的影响。

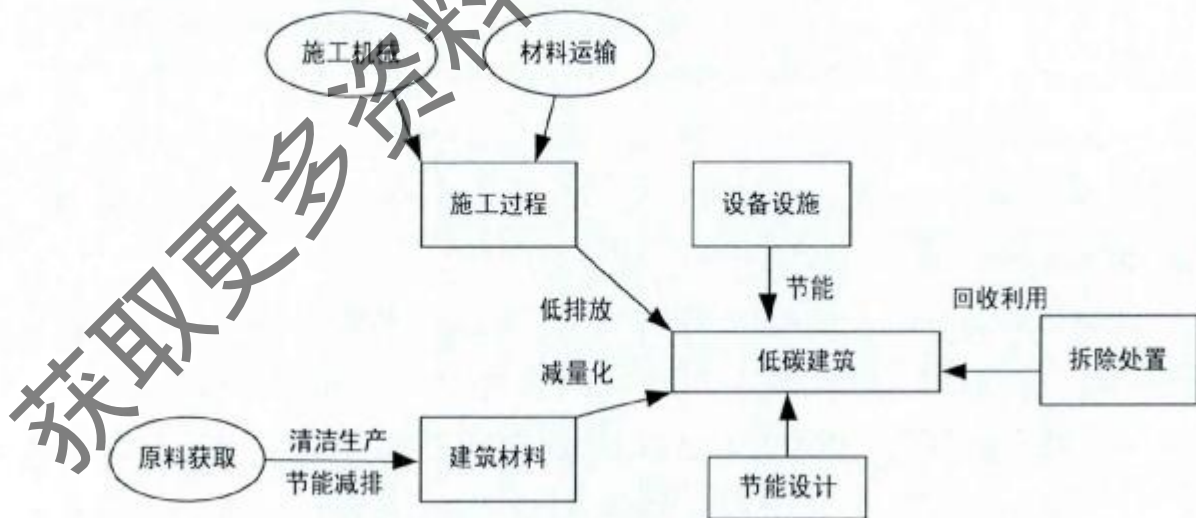


图 2-1 低碳建筑的构成



## 2.1.2 低碳建筑的特点

低碳建筑是指在建筑项目从开始到结束的整个生命周期内，通过科学合理的设计规划，通过使用新技术、新材料、新工艺来减少建筑对传统化石能源的需求，提高能源使用效率，最终实现较低的温室气体排放。

低碳建筑的本质是降低温室气体排放量，其实质是使居住者的生活环境更加舒适，这种舒适不仅表现在建筑本体上，也表现为建筑内部环境的舒适性、宜居性，以及与建筑相关的整个环境的安全性等方面。为了保证室外环境的舒适性，低碳建筑要求其在设计必须要在科学合理的基础上兼顾整体性，通过建筑物的选型、选址来充分利用自然风、自然光，通过使用新能源、水循环来减少碳排放，利用新材料、新工艺来减少对能源的需求，其整体是一个绿色配置的集成。低碳建筑还具有以下六大特点：科学合理的选址及规划、循环高效的资源利用、综合高效的及能环保措施、健康舒适的建筑环境、少量或无废弃物排放、以及灵活多变的建筑功能。建筑的舒适度首先是从室内环境进行判断的，而低碳建筑正是由于其在设计前期的整体性规划设计，可以使得建筑对周边资源进行充分利用，使得建筑与周围环境高度协调，完美融合，进而可以保证室内环境的宜居性，提高居住者的生活质量。

总体来说，低碳建筑主要有 4 个特点：节能、环保、绿色、低排放。

1、节能——尽可能地减少能源消耗量，生产出与原来同样数量、同样质量的产品；或者是以原来同样数量的能源消耗量，生产出比原来数量更多或数量相等质量更好的产品。三要表现在建筑物的设计、建造过程中采用节能型的节能材料、技术措施、结构、器具设备和产品，提高建筑物的保温隔热性能，以达到提高能源利用率，降低建筑能耗。

2、环保——强调的是采用本地的文化、本地的原材料，尊重本地的自然、本地的气候条件，这样在风格上可以完全本地化，所以产生出新的建筑美学。就是向大自然索取最小的也就是最美的，这样，建筑就可以实现兼顾舒适和实用的标准。这样的建筑创造了一种新的美感和人健康舒适的生活条件。

3、绿色——在建筑领域是与环保相对应的词汇，指对环境友好、污染小、节约

资源。通过合理的建筑布局、建筑体形、建筑围护结构设计，充分利用太阳能、天然光和自然风等自然资源，选取零污染或少污染的绿色建材，使整个建筑全寿命周期内对环境的影响降低到最小，达到建筑与环境的和谐。

4、低排放——是指在建筑全寿命周期内减少温室气体的排放，即通过减少化石能源的使用，提高能效，或者通过使用清洁能源，如太阳能、地源热、水源热等新能源替代化石能源，来减少温室气体排放。

与节能建筑、绿色建筑相比，低碳建筑是一个更广泛的概念。首先它包括建筑的整个生命周期内经济和环境两个方面，从项目决策阶段到运营阶段，同时考虑建筑对环境的影响及低碳技术的经济性两个反面，使其达到全局范围内的最优；其次它研究的是一个系统工程，不仅包括建筑本身，还包括与之相关的交通体系、市政配套等，是一个综合项目的低碳。从研究范围上讲低碳建筑的研究覆盖了节能建筑和绿色建筑，是在其基础上的拓展与延伸。

从设计理念上讲，低碳建筑的设计在建筑节能取得进展的同时，是把视野扩展到建筑全过程的资源节约、改善室内空气质量、提高居住舒适度、安全性等更广泛的领域，并且从多个方面进行创新，使建筑与自然和谐，并充分利用可再生资源、水资源和原材料，进一步改善环境，极大地减少对环境的影响。随着此类建筑研究的逐步深入，它们之间的分歧却越来越少，殊途同归的低碳建筑概念越来越清晰。由此可见，低碳建筑实际上是各种各样的学术研究和实践之集大成者，是建筑学领域的一次持久的革命，其意义远远超过能源的节约，环境的友好，是建筑节能与绿色的进一步拓展和优化，并由此逐步形成符合可持续发展要求的低碳建筑的设计理念。

如果说节能建筑是生态建筑走出的第一步，绿色建筑是节能建筑的发展与完善，那么，低碳建筑就是在理念上对为了节能、绿色来做建筑的一个突破，它不仅为了节能和绿色，更是在创造健康、安宁和美好的生活。

## 2.1.3 低碳建筑建设各阶段任务与目标

低碳建筑的建设过程是一项复杂的系统工程，它包括建筑全寿命周期的每一个阶段，不仅包括低碳目标的设定，为达到低碳目标而采取的一切节能减排措施，还包括为保证低碳工作顺利进行而建立的管理体制、工作规划等内容。下面对低碳建设各阶段的任务与目标进行介绍。

从立项到方案制定阶段，应首先确定低碳建设总目标，根据技术经济条件和项目定位确定拟采用的低碳节能技术，写出科研报告及设计招标文件中的低碳节能技术要求。并进行现场调研，对拟采用的技术进行可行性分析。

从初步设计到施工图绘制阶段，对总体目标进行分解，确定各项节能技术的具体目标。按照节能标准和规范，利用模拟分析软件，确定围护结构、能源和设备系统、室内空调末端的方式和参数，通过建筑整体设计，充分利用自然条件，对各项低碳节能措施进行集成与优化，并落实到施工图上，从而得到各项分析计算结果。

从产品采购到施工阶段，低碳建设的任务是严格按照施工图纸及相关文件采购合格的设备和材料（使用新型材料，从而起到提高效率和节约资源材料的作用。提倡使用当地建材，就地取材，以减少运输过程中产生的碳排放），严格按照施工工艺流程完成节能关键部位的施工。然后根据产品型号及说明书认证检查安装情况，确保产品性能及安装达到节能设计要求。根据施工验收标准对关键部位进行验收，确保施工达到设计要求。

从验收到运营阶段，主要任务是配合物业完成季节工况转换，将设备的节能减排效果调节到最优，制定长效节能减排运行制度，编制运行调节策略和节能管理制度。

## 2.2 国内外低碳建筑发展现状

### 2.2.1 英国低碳建筑发展现状

#### 1、英国建筑业节能减排的基本情况



高度重视节能减排工作是历届英国政府的一贯做法，作为一个工业高度发达的国家，应该对气候变化的关注度超过了任何一个国家，它不仅制定了定量的减排目标，而且在实际政策上严格执行。其分阶段减排目标如下：从 2008 年到 2012 年间将降低 12.5% 的温室气体排放量；政府还根据实际对这一目标进行了细化与调整，规定在 2010 年实现碳排放较 1990 年降低 20%。另外在英国新颁布的《气候变化法》中规定：2020 年的碳排放在 1990 年的基础之上降低 28%，到本世纪中叶，实现碳排放降低 80% 的目标。

2007 年英国的二氧化碳排放总量为 5.86 亿吨，居世界第八位，人均排放量 10.6 吨，远高于世界平均水平。其中建筑碳排放所占比例达到惊人的 27%，其年碳排放为 1.5 亿吨。更为糟糕的是，与建造过程及建筑物本身存在对环境的影响相比，其使用过程对环境的影响要大得多，而在英国已有的建筑中至少将存续到 2050 年的达到了 90%，因此改造既有建筑物的能耗现状将决定着英国节能减排的成败。因此，英国政府将 2050 年作为节点，要求 CO<sub>2</sub> 的排放减少到 1980 年的 20%，为了促进这一目标早日实现，英国政府要求自 2007 年 4 月起，所有新建建筑必须满足《可持续住宅规范》(Code for Sustainable Homes) 的要求，所有 2016 年以后的新建建筑必须满足 6 星级以上的要求。在非住宅建筑方面，英国政府也于 2008 年 3 月制定了新目标，规定 2019 年起新建的所有非住宅建筑需要达到零碳排放的标准。这些目标政策反应了英国为了实现建筑的节能减排的坚定的决心和积极的态度。

另外在绿色建筑设计方面，英国的理念比较强调“整体而系统的设计”，认为应该把建筑项目作为一个整体，从选址、选型到保温隔热等具体设计都把它当做一个相互影响的系统来进行考虑。充分利用自然条件，尽量减少能源的输入，使建筑与自然完美融合，实现建筑用能的自给自足，真正做到零能耗。

### 2、英国节能减排技术

作为节能减排的主要推进国之一，英国在节能减排相关方面的工作一直都处于领先的地位，不仅制定了明确的节能减排目标，而且通过不断的提高建筑的节能标准以及开发新的节能技术和材料，来保证目标的实现。按照英国常规节能技术和创

新节能技术的大致分类如图 2-2 所示:

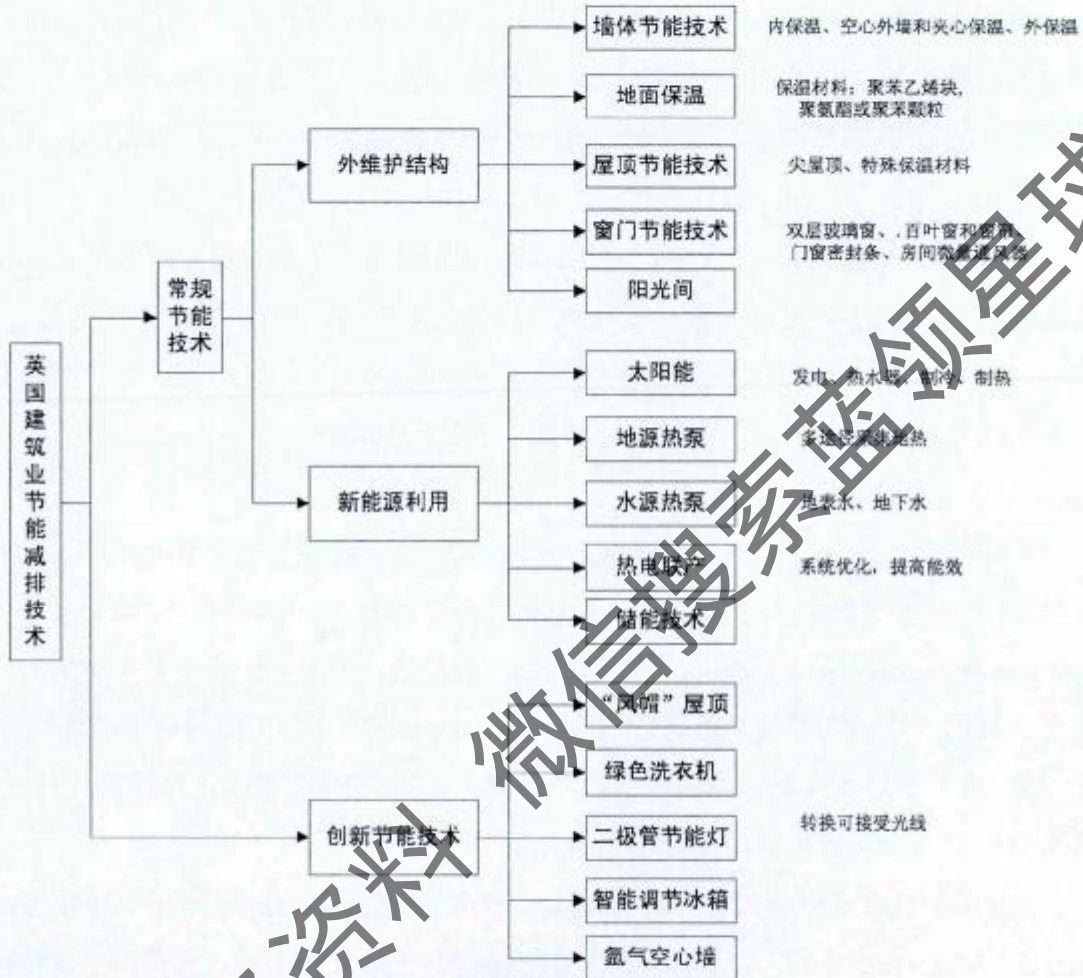


图 2-2 英国节能减排技术

### 3、英国节能减排制度体系

#### (1) 英国节能减排的法律体系

英国政府开始注意节能减排、提高能源利用效率是从两次石油危机开始的, 为了保证本国可以安然度过能源危机, 保证国内的能源供给安全, 英国在 1977 年颁布了第一步有关节约能源的政府性文件《长期节能规划》。

2002 年 1 月 1 日,《可再生能源强制条例》生效。2003 年英国政府第一次制定定量的节能减排目标, 在名为《我们能源的未来——创造低碳经济》的政府能源白皮书中提出, 英国将通过能源使用效率的提高来实现减少 50% 的碳排放的目标, 在改报告中提出英国未来能源政策的主要目标及出发点将放在能源、经济与环境之间

的可持续发展上。

英国在 2007 年公布了《气候变化法案》草案，承诺到 2020 年削减 26%-32% 的温室气体排放，2050 年实现温室气体的排量降低 60% 的目标。2009 年 7 月，英国政府正式发布名为《英国低碳转换计划》的国家战略文件，内容涉及能源、工业、交通和住房等多个方面。该计划标志着英国正式启动向低碳经济转型。

为了早日实现节能减排目标，英国政府将节能减排立法的对象扩大到了家庭以及建筑物等领域，让所有人都参与节能，成为节能义务的承担着。其中《家庭节能法》规定政府必须采取相关措施，使得居民建筑的能耗在 2008 年之前降低到 1997 年基础的 70%，此外还对汽车、家电等做了相应的规定。

## (2) 英国节能减排标准体系

在石油危机发生后不久，英国就已经把注意力开始转向建筑节能工作了，并逐渐加强了建筑节能的相关立法。其中建筑节能法规 (Approved Document L: Conservation of fuel and power) 是一部强制性的法规，旨在降低建筑能耗，另外与其配合执行的《建筑物规章》(the Building Regulations 2000) 在建筑节能方面做了详细的规定，为了满足政府越来越高的节能减排要求，这部法律每隔 4-5 年就会修订一次，每次修订过后都会有更高的标准和要求。

Approved Document L2B: Conservation of fuel and power in existing buildings other than dwellings (2006 版) 于 2006 年 4 月起在英国正式开始实施，规范第一次给出了既有非住宅建筑的相关节能标准。此外，它还通过自我认证来促进建筑施工相关单位来实现自我提高和改进，以此来达到促进建筑节能推广的目的。

此外，针对建筑的整体节能减排，英国建立了一套完整的绿色建筑评价体系 BREEAM。英国的 BREEAM 体系是世界上第一个绿色建筑评价体系，于 1990 颁布第一版办公建筑后，经过了十几年发展，颁布了其他类型建筑的版本同时也在不断的完善，BREEAM 体系主要版本及应用范围如下：BREEAM 已经发行了《2/91 版新建超市及超级商场》、《5/93 版新建工业建筑和非食品零售店》、《环境标准 3/95 版新建住宅》、《BREEAM'98 新建和现有办公建筑》、2003 年版的 BREEAM 商业建筑评估体系，2004 年版 BREEAM 办公建筑评估体系，工业建筑评估及住宅建筑评估体系等，为美国、欧洲许多国家及地方提供借鉴参考。BREEAM 体系主要集中

在办公建筑、商业建筑、工业建筑等公共建筑和生态家园住宅建筑上，是一个经典的建筑物绿色评价系统。

### (3) 英国节能减排认证体系

建筑能耗性能证书制度是欧洲通用的建筑节能认证方法，欧盟建筑能效标签是一种分级比较标签，以建筑能耗性能证书的形式表现。“建筑物能源证书”制度已在欧盟各国推行，2002/91/EC 指令要求，符合节能标准的建筑物应颁发能耗性能证书，有关管理机构要对获得证书的建筑物及其内部使用的锅炉及空调设施等进行定期检查，以评价其节能情况。

此外，英国绿色建筑评价体系 BREFAM 是一个非强制性评估体系，用于评估建筑对环境的影响，从绿色度的角度对建筑的节能减排进行考量，通过英国建筑研究组织或其指定的评估师对其进行打分，并颁发相关的等级证书。此评估体系的主要作用是促进建筑科学节能，适应于各种类型的新建建筑和改建建筑。

## 2.2.2 美国低碳建筑发展现状

### 1、美国建筑业碳排放基本情况

美国是发达工业国家，工业化程度高、规模大，同时它也是 CO<sub>2</sub> 排放量最大的国家，2007 年的排放量达到 58.17 亿吨。美国承诺 2020 年温室气体排放量在 2005 年的基础上减少 17%，据专家测算，这约为在 1990 年基础上减排 4%。另外，美国的减排目标还包括到 2025 年减排 30%，2030 年减排 42%，2050 年减排 83%。

作为美国经济支柱的建筑业，其能源消耗更是达到了总能耗的 35%，一组 USGBC（美国绿色建筑委员会）提供的数据显示，在美国建筑领域的能源占全美能源的比例，电能 65.2%，一次能源 36%。消耗原材料达到 40%-50%，饮用水 12%，木材 25%，产生的废弃物占 30%，每年所占用的土地资源达到 80 万公顷，大型公用建筑的能耗同样惊人，写字楼的年平均能耗为 2379.32MJ/(m<sup>2</sup>·a)，旅馆酒店为 2049.9MJ/(m<sup>2</sup>·a)，医院住院部为 4563.32 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，医院门诊为 2153.05 MJ/(m<sup>2</sup>·a)百货商店为 1893.56 MJ/(m<sup>2</sup>·a)，学校为 1482.28MJ/(m<sup>2</sup>·a)。近年来在住房能源消耗方面美国每年的花费约为 3500 亿美元。

10 多年来美国政府通过制定产业及行业标准，创新技术，开发新能源来推动建



建筑节能的进行，取得了可喜的成就。在 2003 年更是在《能源部能源战略计划》的政府文件中将“提高能源利用率”上升到了国家“能源安全战略”的高度。

此外美国政府还通过减税政策来支持节能建筑的推广，鼓励节能设备在建筑上的使用。如规定新建建筑在 IECC 标准之上节能 30% 及 50% 以上的，每套房可以享受 1000 美元和 2000 美元的减税。由于各地的差异，美国政府还因地制宜在不同的州制定了不同的减免税政策。

## 2、美国节能减排技术

由于美国的建筑大多是单体独立建筑，相比较而言美国更重视建筑相关设备的节能，以及如何通过更优化的能耗控制与管理来降低建筑的整体能耗。另外，在智能监控、建筑热环境的控制等方面美国也走在前列。本文从建筑本体、建筑相关设备和建筑热环境控制三个方面对美国的节能减排技术进行了分类，如图 2-3 所示。



图 2-3 美国节能减排技术

在上而所列举的节能技术中，很多都处于世界先进水平，如利用绿藻层吸收二氧化碳、使用混合节能型电梯、透明太阳能电池等。

### 3、美国节能减排制度体系

(1) 美国节能减排法律体系，如表 2-1 所示。

表 2-1 美国节能减排法律

法律名称	颁布时间	特色
《国家能源案》	1973	包括五大部分，首次提到节能
《国家节能政法》	1978	将最低能耗标准变成强制性要求，并指定住宅节能实施、认证、监管等一系列措施
《能源政策法》	1992	首次量化降低建筑能耗，提出开发可替代燃料的要求
《能源政策法》	2005	量化政策目标，制定具体的财税措施、管理程序和奖惩办法以利于目标的实现。
《节能建筑法案》	2007	建立建筑节能先进技术制度的商业应用程序和示范，规定了实验性的节能建筑认证程序。
《美国能源法》	2007	各个方面规范了能源技术的研究和发展。

(2) 美国建筑节能标准

表 2-2 美国节能减排标准

标准分类	标准名称	特点
国家标准	MEC	
	IECC2006	主要针对底层住宅。
	ASHRAE/IESNA Standard 90.1	主要针对商业建筑和高层住宅。
	LEED	强调建筑节能的同时，综合考虑生态、环境、资源循环利用等因素。
地方标准	各州的节能标准	针对各州具体情况指定节能标准，其中以加州要求最高。
行业标准	各种示范性标准	由全国性组织制定。

除了完备的法律体系之外，美国还有一套完整的建筑节能标准体系。美国的建筑节能标准分为强制性最低能效标准和自愿性能效标准、联邦能效标准和地方各州

能效标准。其最低能效标准通常是由非政府组织或相关第三方来完成，工程测量法是制定标准过程中主要采用的方法，一般比较严格，并以法律法规的形式颁布，具有强制性。近年来美国制定的强制性联邦建筑节能标准法规主要包括：1) 1993 年的美国标准能源法(Model Energy Code)；2) 2000 年颁布的主要针对低层住宅节能的 International Energy Conservation Code(IECC)；3) 主要是针对非住宅建筑的 ASHRAE/IESNA Standard 90.1。标准的针对对象一般是即将进入市场的新产品和建筑，也就是说美国的建筑节能标准与德国不同，主要是针对新建建筑和相关设备的。大多数家用电器标准都是联邦政府制定的，“凌驾”于各州的标准之上。

建筑的推广实施起到了巨大的推动作用，它从生态、环境、资源利用等多个方面综合此外绿色建筑标准 (Leadership in Energy & Environmental Design) 的颁布为绿色考虑建筑的绿色性，而绿色建筑学会的成立，更是有利于其大规模推广应用。

此外，一些全国性组织，如国际节能规范 IEBC 和美国暖通空调和制冷工程师协会 ASHRAE，制定了“示范性”建筑标准。但这些标准采用和实施的主动权在各地方政府，在各州范围以内，相关销售的产品必须高于该州的最低能耗标准，新建建筑同样受到最低能耗标准的约束。在经济比较发达的地方，如加利福尼亚、纽约等，其建筑节能标准相对联邦政府标准还要严格。像加利福尼亚州就采用了一些国家尚未执行的标准：要求恒温器必需装有时钟，并且可以进行调节，以便在冬夜和夏季炎热的午后能够节约供热和制冷能耗。

### (3) 建筑能耗认证制度——“能源之星建筑标识”

由美国环保署 (EPA) 和美国能源部 (DOE) 联合推动的项目“能源之星”是能效标识制度应用最典型的一个项目，所谓“能源之星”实际上是对有关产品的一个认证制度，获得该标识的产品通常都能够满足此类产品的强制性最低能耗标准。并且“能源之星”并不是只针对建筑产品的，它覆盖了 31 类耗能产品，包括家用耗能器具、照明器具、办公设备、建筑物及门窗等，共有 13000 多种产品，而“能源之星建筑标识”只是这些当中的一种。

获得“能源之星建筑标识”的标准是该建筑的能源效率需领先太累建筑平均值的 25% 以上，并且要求室内环境的质量同样达到标准的要求。为达到该要求，可以从以

下方面进行改进，如绿色照明，提高暖通及空调系统的效率，加挡围护结构的保温性能等。这些措施预计可以到来 30%以上的节能。在促进标识推广使用的过程中，美国政府也制定了很多的辅助措施，如经济激励、示范推广等。美国采购法以及几个总统令都规定政府必须采购能源之星认证产品，政府办公楼也都在符合建筑节能标准的基础上采用更先进的建筑节能技术等。

## 2.2.3 德国低碳建筑发展现状

### 1、德国建筑业节能减排基本情况

德国的节能理念是控制建筑的整体能耗，由于其缺乏传统能源，石油全靠进口，天然气 80%以上从国外进口，因此倡导节能和环保是德国政府一直以来的做法。

德国 2007 年的二氧化碳排放量为 8.135 亿吨，居世界第六位，人均排放量更是超过了 13 吨，仅次于美国，远远高于世界平均水平。目前德国 CO<sub>2</sub> 气体的排放量大约为 13t/人·年，其主要来源于：①汽车、发电和取暖占 50%；②化学工业占 20%；③农业化肥制造占 15%；④其他占 15%。全球的 CO<sub>2</sub> 排放量到 2010 年要求降低 50%，在工业国家则要求降低 80%。德国更是承诺到 2020 年将温室气体排放量较 1990 年减少 20%以上。同时承诺抬高减排幅度至 30%，前提是各发达经济体同意相当水平的减排力度，同时发展中经济体做出重大贡献，共同促成国际条约的签署。

为了推进减排目标的实现，德国政府从各方面开始节能。首先在房屋和道路设计中要求考虑降低 CO<sub>2</sub> 的排放量，开展房屋节能，提高能源有效利用。1960-1990 年是德国住房面积急剧增加的时期，这三十年间居住面积总量增加了一倍以上，人均能耗也增加了 70%以上。目前家庭能耗占据德国总能耗的三分之一以上，其主要构成取暖占 76%，炊事 3%，热水 13%，照明 2%，其它 6%。

2002 年 2 月生效的德国《能源节约法》(EnEV)，制定了全新的建筑能耗标准，它取代了先前一直使用的《供暖保护法》和《供暖设备法》，对全国范围内的建筑节能相关设备及材料的节能参数进行了统一的规定，并提出了更高的节能要求，按照新法的相关规定计算的建筑的允许能耗在 2002 年的基础上降低了 30%。

新规范的一大特点是改变了以前通过规范局部设计降低建筑物保温隔热参数的



做法，进而通过对整个建筑物的整体设计来降低实际能耗。新法还规定，新建建筑在开工前必须出具建筑所需的采暖量、建筑物总能耗指标一件建筑物的热损失量，尤其是建筑物外围结构的热损失量必须给出完整的计算结果。只有这些指标全部合格以后才被允许开工。

新法规也更重视建筑安装的工作质量，并有相应的指标参数来对其进行考核，此外新法规也将建筑技术（包括建筑密封性）作为建筑节能重要的考核参数。新建的住宅在售卖时必须向购买者出具“能耗证明”，该住宅每年的能耗数据在该证明上被清楚的标明出来，这种方式便于全民监督建筑能耗。实际上早在 1995 年联邦德国就要求明确说明新建建筑的能耗状况。在 2002 年以前能耗证明书只要求说明供热系统的能耗数据，但随着新法 EnEV 的颁布，能耗证明中要求被说明的数据也越来越多。

除此之外发展更低能耗的建筑也正在德国政府的推动下进行，德国政府明确表示其未来建筑的发展方向将是零能耗甚至零排放建筑，目前推广的太阳能被动式房屋就是低能耗建筑的典型，其供热能耗仅为  $15\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

为了促进新法的普及和落实，德国政府还为法定技术规范配套了相应的节能资助项目。

## 2、德国节能减排技术简介

德国对建筑的节能减排要求较高，图 2-4 是对其低能耗建筑的常用节能技术的总结。

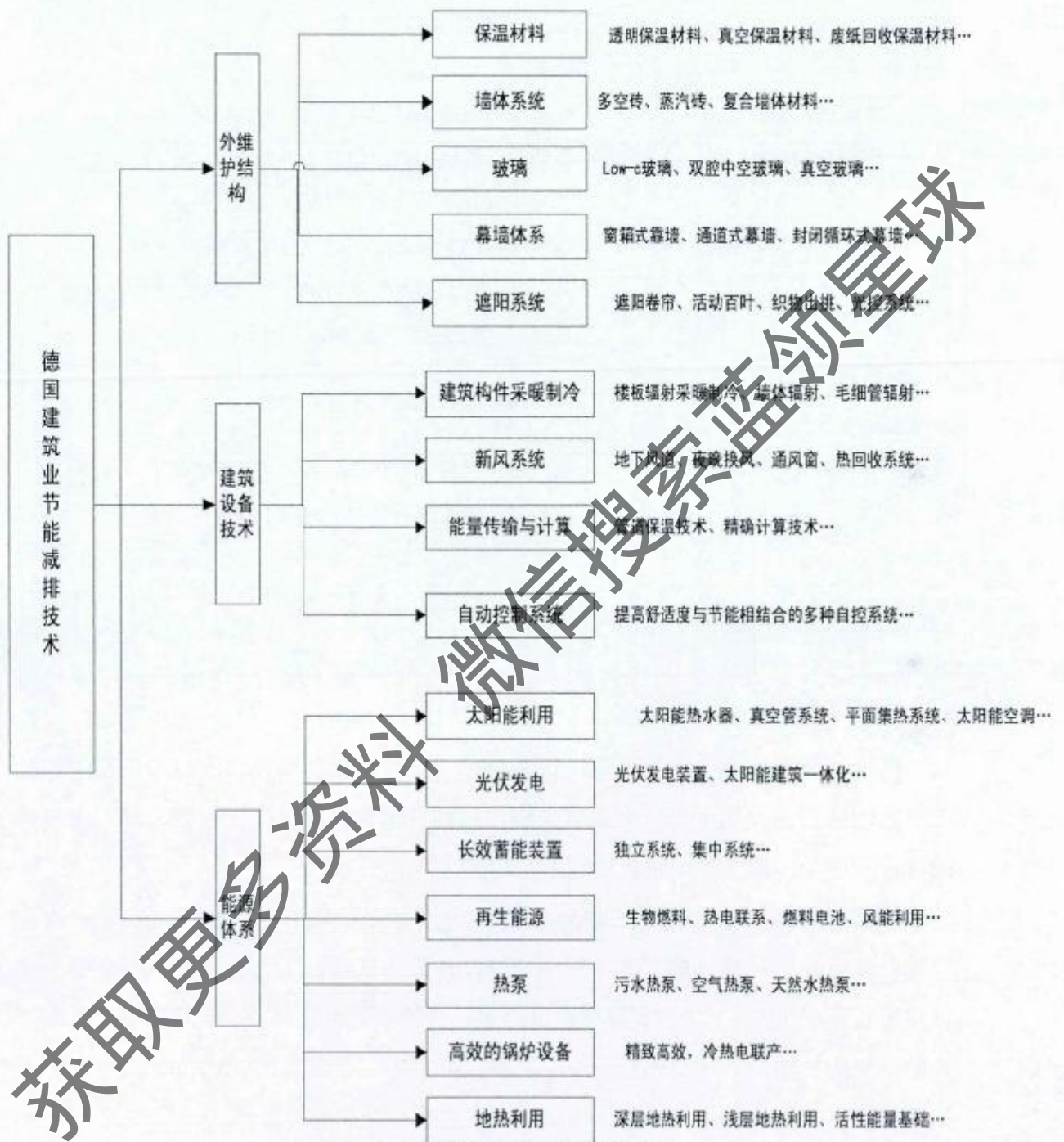


图 2-4 德国低能耗建筑常用节能技术

### 3、德国节能减排制度体系

(1) 德国节能减排法律体系，如表 2-3 所示。

表 2-3 德国节能减排法律

法律名称	颁布时间	特色
《建筑节能法》	1976	授权联邦政府制定建筑物应达到的能耗标准。
《建筑保温规范》	1977	限制建筑的外围护结构的热损失量，规定了建筑物围护结构的导热系数不得超过规定最低值。
第一次修正	1982	建筑节能标准在以前基础上提高了 20%。
第二次修正	1995	开始使用年采暖能耗作为考核参数值，节能标准在 1982 年的基础上再次提高了 30%。
《可再生能源发电并网法》	1991	用于解决电力的并网和补贴问题。
《可再生能源供暖法》 EnEV	2002	统一考量建筑物采暖及热水制备的能量需求，制定了建筑材料的能耗新标准，制定了大量规范和标准。
EnEV2005	2005	为现有建筑、照明和空调设备发放特别能源证书
EnEV2006	2006	规定开发商必须为建筑开一份能耗证明，并详细说明建筑的年能耗值。

## (2) 德国建筑节能标准

纵观德国各部建筑节能法规，在制定建筑节能标准和节能技术时，主要考虑到三个方面的因素：第一是规定建筑外围护结构各部位的热工指标；第二是温室气体的排放量指标；第三是建筑材料的生产耗能。

德国的节能标准制定中还有个很大的特点，就是采取的是实际耗能控制/一次性能源消耗量控制。德国的节能标准中的能耗计算方式历经了几次演变，早期的《建筑保温规范》“WSchVO”主要通过最低温隔热指标来进行能耗控制，其控制对象主要是单项外围护结构，比如建筑外墙、屋顶、窗户等。而后的“EnEV2002”的一大特点把节能重点转为控制建筑物整体的实际能耗和单位面积能耗数量。

“EnEV2002”新法还规定，新建建筑在开工前必须出具建筑所需的采暖量、建筑物总能耗指标一件建筑物的热损失量，尤其是建筑物外围结构的热损失量必须给出完整的计算结果。只有这些指标全部合格以后才被允许开工。

最新修改后颁布实施的“EnEV2007”最大的变化在于其节能的指导思想，开始转

变为直接控制建筑能耗的源头——能源外部输入值，即尽量减少对一次性能源的需求量。这是指通过整体节能设计措施，一系列计算得出建筑所需能耗值，然后根据这些数据和各种不同能源之间的转换系数进行推算，由此得出整个建筑对一次能源的需求量，并以此作为建筑的最高能耗约束量，要求其使用过程中的能耗需求少于此能耗量。

“EnEV2007”中对建筑的最大一次性能源消耗量做出了限制要求，根据住宅建筑和非住宅建筑的不同允许的最大值也不同。同时，这些节能标准大都是强制性的，只有达到相关标准的建筑和设备才能进入市场流通或才能算作改造达标。

### (3) 建筑能耗标识制度——“建筑能耗证书”体系

早在 1976 年德国就有了要求开发商对其开发的建筑出具相关的能耗证明，最早对此进行明文规定的是第一部建筑节能法“EnEV”，但随着节能法的不断修改，其要求说明的数据越来越多，如能耗证明在 2002 年前就只要求说明供热系统的能耗数据，但随着新法 EnEV 的颁布，能耗证明中要求被说明的数据也越来越多。新的能耗证明需要包括建筑在各个方面及整体的详细的能耗数据，建材生产过程中的能耗数据也在其要求说明的范围以内。

2007 年修改颁布的“EnEV”提出了强制性的能耗证明要求：自 2008 年 7 月 1 日开始，凡是在 1965 年以前就存在的既有房屋必须有相关专业机构出具的建筑能耗证明才能进行出租及售卖等经济活动；自 2009 年 1 月 1 日开始，新建的住宅建筑必须具有该证书才能参与出租及售卖活动；对于新建的非住宅建筑此要求放宽到 2009 年 7 月 1 日起开始执行。

建筑能耗证书几乎适用于所有的建筑，可对所有建筑的能耗进行规范，强制性的推进了全社会的建筑节能工作。通过精确的能耗数据可以很好的诊断建筑在节能上的薄弱环节，从而能够进行有效的改变。同时给出了每栋建筑的节能潜力与具体可能的节能量，从而为改善建筑能耗提供了多种可供选择的方式。对控制建筑能耗是一项非常有效的手段。此外，建筑能耗证书由于其相关数据都是间接量化的数据，很容易被理解和接受，为购房者及大众对开发商的监督提供的很大的方便；另外由于建筑能耗证书上清晰的标明了建筑的节能潜力及设备操作方法，有很强的实用

性和可操作性。

德国的绿色建材认证始于 1977 年，是世界上最早开始进行相关认证的国家，第一个认证计划是对发放“蓝天使”标志给低 VOC 散发量的产品，其考虑的主要因素很多，包括有害物质、生产噪声、产生废物、污染物记忆可循环利用等。该标志主要针对环境危害大的产品，通过该认证督促其不断改进，进而达到标准要求，具有良好的环境效益。德国目前已有 3500 多个产品通过了该标识认证，通过认证的产品不仅被广泛接受，而且也为其带来了巨大的经济效益。

## 2.2.4 日本低碳建筑发展现状

### 1、日本建筑业节能减排基本情况

日本是发达资本主义国家，其工业化程度都相当高，二氧化碳排放量也很大，2007 的排放量达到 12.142 亿吨，居世界第四位。在哥本哈根世界能源大会上，迫于国际社会的压力，日本同意把减排目标定为在 1990 年的基础上对温室气体减排 25%。

为了促进节能减排目标的实现，日本提出了“建筑的低碳节能与环境共存设计”的节能理念，其实质是综合考虑建筑的使用寿命、与自然环境的共存性、已经节能、资源节约与再循环等因素进行建筑设计，旨在带动全面参与建筑节能及环境保护；两外在住宅建筑方面也有类似的理念“环境共生住宅”，并在建筑相关法规中对这些要求进行了详细的规定。

日本之所以如此关注建筑领域的节能减排，缘于日本的建筑能耗占本国总能耗的 30%以上，而且建筑领域的节能减排潜力比较大。据日本建筑用能综合管理技术协会的统计数据显示，日本写字楼的年平均能耗为  $1870\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，旅馆酒店为  $2131\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，医院为  $2789\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，百货商店为  $2575\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，学校为  $1185\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

此外日本还将节能管理工作纳入到政府推进节能减排的工作之中，不仅从技术政策上推进节能减排，还在管理上为节能减排工作的顺利进行创造良好的环境，并及时对节能减排效果进行跟踪，形成了全面的节能减排体系。

### 2、日本节能减排技术简介

# 华中科技大学博士学位论文

日本自立循环建筑设计阶段常用的节能技术及在应用时应考虑的基本因素如表 2-4 所示。

表 2-4 日本建筑业常用节能技术

设计阶段	节能技术分类	相关节能技术
基地利用 建筑布置	可再生能源利用技术	自然通风
		天然采光
	建筑围护结构保温隔热技术	太阳热辐射利用
		遮阳设计
	设备节能技术	设备节能
		热水设备节能设计
平面设计	可再生能源利用技术	自然通风
		天然采光
		太阳辐射热利用
		自然通风、天然采光、太阳辐射热利用
	建筑围护结构保温隔热技术	外围护结构隔热设计
		遮阳设计
	设备节能技术	设备节能
热水设备节能设计 水和垃圾的有效利用		
剖面设计 立面设计	可再生能源利用	自然通风、天然采光
		自然通风、太阳热辐射利用
		天然采光
		太阳能热水与发电
	建筑围护结构保温隔热技术	外围护结构隔热设计、遮阳设计
		外围护结构隔热设计
	设备节能技术	遮阳设计
设备节能		
细部设计	可再生能源利用	自然通风
		太阳辐射热利用
	建筑围护结构保温隔热技术	外围护结构隔热设计
		外围护结构隔热设计、遮阳设计
	设备节能技术	设备节能

日本是一个比较注重实效的国家，在节能技术的应用上也是如此。日本制定了一个长远的发展建筑技术的目标，即 2050 技术路线图，主要是促进节能建筑相关技术的创新和推广。此路线图对建筑材料的相关参数进行了更为严格的要求，如要求热损失系数在目前基础上在 2020 年降到  $1.6\text{w/m}^2\text{K}$ ，降幅超过 30%。主要是从高性能的保温材料入手，通过改善热交换系统以及真空隔热等措施来实现。在照明技术上，将目前能耗  $151\text{m/w}$  左右提高到 2030 年的  $2001\text{m/W}$ ，使用寿命提高到 6 万小时以上，在能源管理方面，将加大智能系统在建筑能耗管理中的使用，如 HEMS、BEMS、区域型 EMS 等可以很好的实现对建筑的最优化管理，减少不必要的能量消耗。对于热泵技术从降低成本和提高效率两方面入手，计划在 2008 年的基础上将成本降低一半的同时提高一倍的使用效率，预计这将大大促进热泵技术的推广使用。

### 3、日本节能减排制度体系

(1) 日本节能减排法律体系，如表 2-5 所示。

表 2-5 日本节能减排法律

法律名称	颁布时间	特色
《节约能源法》	1979	对能源消耗的标准做了严格的规定，制定了节能目标，及相应的奖惩制度
《合理用能法》	1984	第一次对民众提出了合理用能的要求
《合理用能及再生资源利用法》	1993	
《合理用能法 98》	1998	规定了更严格的能效标准
《节约能源法 98》	1998	为完成京都会议上承诺减排 6% 的目标，提高了相关节能标准
《节约能源法 02》	2002	提高了相关产品的节能要求
《修正节能法》	2004	对办公楼、住宅等建筑物提出了明确的强制性的节能要求

(2) 日本节能减排标准体系

日本堪称基制定节能标准的典范，早在 1979 年就颁布了《节能法》，该法分别于 1992 年、1999 年进行了两次修订。日本建筑节能法律体系的最大特点就是大法先

行,为了保证大法得到落实,日本政府还为其配套了一系列的监督措施,并制定了相应的强制性标准。节能法中对各类产品及建筑的能耗标准都做了严格的规定,还十分重视标准的更新问题。在日本节能法中有一种“领跑者制度”,即节能标准更新制度,即节能指导性标准按照当下最先进的水平(领跑者)制定,5年后这个标准就变成强制性标准,如果普通产品5年内没有达到这个标准,就不允许再投产。

日本的《建筑物合理用能评价标准》最早于1979年制订,中间经过多次修订,于2003年由日本经济产业省和国土交通省发布实施。该标准适用于2000m<sup>2</sup>以上的建筑,前版标准只对办公、旅馆、学校、医院、商店、餐饮六种建筑的房间规定了用能功率密度值,而在2003年后,标准范围扩大到了其他建筑。新版标准2000m<sup>2</sup>以上建筑面积用能用能系数(CEC/L)来评价,而对于2000m<sup>2</sup>-5000m<sup>2</sup>的建筑还可用计点法(point法)来评价。

日本还制定了一套绿色建筑评估体系CASBEE,它将建筑物环境效率评价的边界清楚的划定出来,并假象以建筑物最高点与建筑地面边界作为封闭空间来进行建筑物环境效率评价。此评估体系的最大创新点是提出了建筑环境效率BEE(Building Environmental Efficiency)概念。该体系包括以下评价标准:《CASBEE-新建·评价工具》,《CASBEE-既有·评价工具》,《CASBEE-临建·评价工具》,《CASBEE-改建·评价工具》,《CASBEE-H·评价工具》,《CASBEE-街区/地域·评价工具》等,几乎涵盖了所有建筑。

### (3) 日本节能减排认证制度

建筑物综合环境认证:该认证体系CASBEE的主要开发者及管理者是日本可持续建筑协会(JSBC),它是一个由产、政、学组成的组织,设立在建筑环境与节能机构内。它是一个由政府机构参与的非盈利性社会组织,负责培养和认定CASBEE评价师,另外还作为独立的第三方来进行建筑物的绿色度评价。CASBEE可以依照建筑初步设计—技术设计—竣工分阶段的对建筑的环境效率进行评价,用户也可以进行自评。CASBEE开发出了基于Excel的评分软件,其中较为典型的CASBEE-NC的评价过程包括输入建筑物基本信息、对Q、L两大方面进行具体评分、加权计算出各个领域综合评分、计算BEE值,给出绿色标签这几个阶段,BEE值是以建筑物的



室内环境、服务性能和地基内的环境为分子，建筑物所耗的能源、资源、材料以及地基外环境为分母，其值越大，建筑物的环境性能越好。用户可以先对建筑进行自我评价，达到一定标准后，可以申请 JSBC 事务局对建筑进行终评，事务局根据 BEE 值对建筑物评定级别并发放证书。

绿色建材认证：日本的绿色建材认证几乎与绿色建筑的认证同步，早在 1998 年就开始了，到目前为止已经有超过 2500 种产品通过了环保认证，这一切还需要归功于 1993 年由日本科技厅组织实施的“环境调和材料研究计划”。

## 2.2.5 我国低碳建筑发展现状

### 1、我国建筑业节能减排基本情况

2005 年我国 CO<sub>2</sub> 排放量 51.008 亿吨，仅次于美国，位居世界第 2 位，更严重的是，它的增长量占了全部增长量的 40%。多年来，中国人均 CO<sub>2</sub> 排放远低于世界平均水平，然而 2006 年中国化石燃料燃烧排放 CO<sub>2</sub> 的人均水平为 4.33t 高于 4.18t 的全球平均水平，使人均 CO<sub>2</sub> 排放低的优势丧失。根据国际能源机构(IEA) 2006 年 11 月份的预计，按照当前的发展态势，中国 CO<sub>2</sub> 排放量将在 2010 年之前超过美国，成为世界上第一大排放大国。

哥本哈根世界气候大会上，温总理向全世界负责任的承诺到 2020 年 GDP 的能源消耗减排量比 2005 年再减少 40%-45%。中国的低碳节能建设任重而道远。为此国务院制定了明确的节能减排目标。

中国建筑业规模占全球 50%左右，消耗建筑钢材、水泥约占全球 50%。万科公司的一份调研报告指出，中国建筑业消耗木材占到全球每年树木砍伐量的 49%；中国建筑业也是能耗最大的行业，超过全社会 40%；同时又是污染大户，在建材生产和建造过程中产生大量污染和碳排放，对环境造成了严重的危害。统计数据显示，中国每建成 1m<sup>2</sup>的房屋，约释放出 0.8t 碳。另外，在房地产的开发过程中建筑采暖、空调、通风、照明等方面的能源都参与其中，碳排放量很大。中国每年的新开工建筑面积虽然是世界的一半，但是 80%-90%都没有达到国际节能标准。中国现在单位建筑面积采暖能耗为发达国家的 3 倍。另外由于建筑外围护结构隔热性能的差异，

使得同纬度发达国家外围护结构的传热系数只有我国的四分之一。

为此我国政府也制定了有步骤的节能目标，从 2010 年开始的 10 年内在将建筑节能标准在 1980 年的基础上提高 65%，2015 年之后，将在部分地区试点 75% 的节能标准，保证 2015 年之前在采暖地区的供热体制改革全面完成，实现建筑集中供热按表收费。并保证集中供热厂、锅炉设备及其系统以及热力站等完成基本的技术改革，使之与适应建筑采暖技术改造。基本完成大中城市的已有高耗能建筑及热环境较差建筑的全方位节能改造，小城市的相应指标放宽到完成已有量的 50%，并大力开展农村建筑的节能改造。在新能源利用方面，将累计建成 1.5 亿平方米的太阳能建筑，累计建成 2000 万平方米的利用其它可再生能源建筑。

到 2020 年末，新建建筑将实现 15.1 亿吨标准煤的节能量，已有建筑节能 5.7 亿吨，合计 20.8 亿吨。其中有 3.2 万亿度电的节约，空调的高峰用电量也下降了 800 万千瓦。在 CO<sub>2</sub> 的减排方面，累计减少 55.4 亿吨的排放量，其中新建建筑减少 40.2 亿吨，已有建筑减少 15.2 亿吨。

## 2、我国节能减排技术简介

随着科学的发展和技术的进步，近年来，与建筑节能设备相关的技术领域在我国也取得了比较大的发展，尤其是制冷供热系统及其控制技术的发展和极大的促进了建筑节能的推广。下面是对我国建筑领域具有高科技含量的节能减排技术的简介。

(1) 计算机仿真技术与智能控制技术的结合。通过仿真与智能控制实现对制冷供热系统的最优控制，来最大限度的减少能耗。

(2) 热泵应用技术。其实质是通过输入少量高品位的电能，实现低温低品位热量能源向高品位能源的转移，充分利用易得低品位能源，来减少对高品位能源的需求。利用的对象主要是水热源和空气源，此外土地源在条件允许的地方也会被用到。通常是利用热泵技术为建筑提供制冷供热所需的能量，能够有效的降低建筑的空调系统对能源的需求量，同时还能保证环境清洁。

(3) 变风量空调技术。其实质是通过对空调系统的智能调节来实现节能。它使得空调系统的送风量可以随时根据负荷的变化进行调节，尤其是在某些负荷运行时风机动力可以被最大限度的减少，从而节约能耗；并且该空调系统还能按需调节，

用户可以根据自已的要求随意的进行设置。在相同使用条件下,该空调系统可以节约用电 30%左右。

(4) 空调的新风处理机余热回收技术。从技术层面上看,建筑物总负荷的 30%-40%为新风负荷,与固定新风量所需消耗的最少供冷量相比,变新风要节约 20%以上。在春秋季节如果将最小新风量变到新变风可以节约 60%左右的能耗。另外利用全热式换热器进行房间的热湿交换可以回收空调系统的余热。

(5) 辐射性供热节能技术。辐射型供热的主要方式有垂直板辐射、地板辐射及天花板辐射,这种技术旨在对调节房间的微热气候,避免风直接吹响人,增加舒适感。在能源供应方面,它还能直接利用低品位冷热源,如地下水、低温废热等,从而省去对冷会能源需求。

(6) 热电联产技术。这种技术的实质是用热电联合生产的方式取代小锅炉的供热方式,将热电的供应集中起来,使得放点过程中产生的余热可以被利用,从而提高能源利用效率,降低 10%-30%的一次能源消耗量。这种方式还能最大限度的保护环境,减少热电供应对环境的影响。

(7) 太阳能热利用技术。利用太阳能为建筑供电从而减少其对能源的需求是未来建筑发展的大势所趋,太阳能在一体化建筑中的使用已经被大大的拓展了,包括利用太阳能来供热制冷,提供生活热水,同时还能够提供热电。

(8) 建筑能耗模拟分析技术。这种技术是将一个建筑项目从策划到建筑作为一个整体来考虑,通过利用软件进行前期的能耗模拟,来辅助进行建筑选址、选型、选材及相关施工技术选择,它能够在最终方案确定前不断的进行模拟,从而实现对方案的优化。该技术比较适宜于在进行节能改造的现有建筑项目中的使用,此外通过建筑能耗模拟来制定空调系统的最优化调节也是其一大用途。

### 3、我国节能减排制度体系

#### (1) 法律法规

目前我国针对节能减排的核心法律有两部:《节约能源法》和《可再生能源法》。相关的法规分为两个层次,国家层面的法规和地方性法规,都是用来适用范围内的建筑作一些强制性的规定,并规定了相应的惩处措施。

①《建设工程质量管理条例》是在《建筑法》的基础上制定出来的行政法规，其对新建工程、扩建建成集改建工程具有普遍约束力，同时有关建设工程的质量监督工作也在其约束范围以内，这其中也包含了建筑节能相关方面的要求。

②《民用建筑节能条例》是我国首部针对建筑节能制定的法规，其约束方位包括所有建筑能耗的各个方面，如新建建筑、改建建筑、既有建筑的节能及用能等，是一部实用性和操作性兼备的法规。该条例的实施使我国的建筑节能标准体系实现了对建筑领域的完全覆盖，是我国建筑节能标准体系形成的标志。

③国务院在 2008 年颁布实施的《公共机构节能条例》，在用能管理及节能规划、管理及监督上对公共机构提出了更高的要求，对促进公共机构主动节能又积极作用，同时可以很好的带动全社会共同参与节能。

④除了中央政府的全国性法规，各地方政府还结合本地的实际制定了一系列的法规来推动建筑节能，从节能制度、责任认定、管理机构等多方面做了规定，为建筑节能法律体系的形成起了重要作用，保证了各地方的节能有法可依。比较有代表性的如下：《陕西省建筑节能条例》（2007 年）是第一步专门为建筑节能制定的地方性法规；《大同市建筑节能条例》（2008 年）是第一部地级市建筑节能法规；另外还有《江苏省节约能源条例》（2004 年修订）、《上海市节约能源条例》（2009 年修订）、《湖北省民用建筑节能条例》（2009 年）等。

另外住房和城乡建设部还制定了民用建筑能效测评标识制度来配合《民用建筑节能条例》的落实，这些标识制度包括《民用建筑能效测评标识技术导则（试行）》、《民用建筑能效测评机构管理暂行办法》、《民用建筑节能信息公示办法》等，进一步促进了建筑节能的制度化。

我国目前出台地方性规章的地区有 20 多个，这些规章制度很好的结合了当地是实际，具有很强的适用性，像《江苏省建筑节能管理办法》（2009 年）、《山东省新型墙体材料发展应用与建筑节能管理规定》（2005 年）、《上海市建筑节能管理办法》（2005 年）、《甘肃省实施〈民用建筑节能管理规定〉办法》（2001 年）、《北京市建筑节能管理规定》（2001 年）、《天津市室内采暖系统设计管理暂行办法》（1999 年）等都已经成为建筑节能法律法规体系中不可缺少的一部分，为整个建筑领域节能的法律化、制度化做成了重大贡献。

---

根据国务院《关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》(国发[2011]26号)和住房城乡建设部《关于落实〈国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知〉的实施方案》(建科[2011]194号)确定的工作目标和任务,结合湖北实际,湖北省住房和城乡建设部也制定了《湖北省住房和城乡建设领域“十二五”节能减排实施方案》。方案提出了切合湖北省实际的节能减排的要求与目标,强调了调整优化建设领域发展方式,并明确了需要实施节能减排的重点工程;建设实施单位需要加强自身节能减排管理、加快节能减排技术的开发和推广,来达到相应的要求与标准;同时,相关行政主管部门也需要通过强化节能减排监督检查,来推进节能减排的市场化,不断完善节能减排配套政策。

方案要求到“十二五”期末,湖北省通过建筑节能实现节约 700 万吨标准煤,并形成每年节约 300 万吨标准煤节能能力。其中,新建节能建筑 2 亿平方米、绿色建筑 1000 万平方米,形成年节约 275 万吨标准煤节能能力;通过加强节能监管体系建设,推动既有建筑实施节能改造 600 万平方米,形成年节约 4 万吨标准煤节能能力;通过新增可再生能源建筑应用 5000 万平方米、太阳能光电建筑应用装机 65 兆瓦,形成常规能源年替代能力 21 万吨标准煤。

具体到 2015 年,全省新型墙体材料产量占墙体材料总产量的比例达 85%以上,县级以上城区新型墙材应用率达到 90%;城镇污水处理率达到 85%,建制镇污水处理率达到 50%,形成化学需氧量削减能力 24 万吨,氨氮削减能力 2 万吨;全省城镇生活垃圾无害化处理率达到 85%,城市生活垃圾资源化利用比例达到 30%;乡镇生活垃圾无害化处理率达到 50%;对于大型公共建筑而言,加强公共建筑用能运行管理,力争单位面积能耗下降 10%以上,大型公共建筑单位面积能耗下降 15%以上。

## (2) 节能减排标准

经过多年的努力,我国的节能减排法律体系相对比较完善。在法律体系的指导下,我国的节能减排标准体系也日趋完整,不仅有《民用建筑节能设计标准》这样全国通用的核心标准,也有针对各地实际情况制定的地方标准,很好的契合了我国幅员辽阔、各地气候相差较大的实际。以下对我国的标准分别做了介绍。

《民用建筑节能设计标准》是我国颁布的有关建筑节能实际的第一步标准,为

我国建筑节能设计开启了新阶段,该标准在 1995 年修订之后,将我国在第二阶段的建筑节能指标由原来的 30%提高到了 50%。

2010 年 10 月 1 日期正式实施的《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》是对我国夏热冬冷地区的节能设计影响最大的一本标准,自该标准颁布实施以后,很多地方都以此为依据制定了各自的地方标准及实施明细。该标准将采暖空调的能耗在基准能耗的基础上降低了 50%,并以此为约束对建筑的整体设计及空调采暖相关部分提出了明确的要求。

《公共建筑节能设计标准》是建设部于 2005 年颁布的,该标准是我国公共建筑节能设计的第一部国家性标准,约束范围包括所有公共建筑,明确提出了对建筑外围护结构的设计要求及用能设备的能耗要求,并第一次提出了具体的判断外围护结构节能设计的方法,操作性很强。

另外还有很多的国家标准及地方性标准都为建筑的节能设计提供参考借鉴,如《采暖居住建筑节能检验标准》、《民用建筑热工设计规范》、《建筑照明设计标准》等,都为建筑节能的推广实施提供了很好的保障作用。

在绿色建筑评价体系的制定方面,主要是在节能及绿色建筑相关法律法规等制度指导下进行的。2001 年 10 月我国第一部生态住宅评估标准《中国生态住宅技术评估手册》出台。2002 年、2003 年又出版了《中国生态住宅技术评估手册》2002 版、2003 版。在国家科技部和北京市科委领导和支持下,清华大学建筑学院等 8 个单位在 2004 年完成了《绿色奥运建筑评估体系》。该《体系》是针对北京 2008 年的奥运建筑评估的评估标准和方法与程序。2005 年 10 月正式颁布实施的《绿色建筑技术导则》是一本由科技部与建设部共同制定的国家标准,而 2006 年 6 月正式实施的则为《绿色建筑技术导则》中的相关细节提供的比较可靠的评价依据。这两本标准是我国专门针对绿色建筑的首部官方文件,其中明确了绿色建筑的定义、内涵及相关的技术规范 and 评价标准,对绿色建筑在我国的推广有很好的指导意义,标志着我国绿色建筑评级体系开始形成。

2007 年 9 月 18 日建设部制定并颁布了旨在规范绿色建筑评价标识工作的《绿色建筑评价标识管理办法(试行)》,用于引导绿色建筑健康发展。在 2007 年 11 月建设部发布了我国唯一经官方认可的《绿色建筑评价标识管理办法》(试行)通知,标

标志着我国终于有了属于自己的绿色建筑评价标准。

### (3) 低碳节能认证制度

低碳节能认证包括对建筑材料、相关设备及建筑本体的能耗、用能效率及相关参数进行评估，并按等级进行标示。目前，我国的相关认证制度还不够完善，但已具雏形。如《节约能源法》和《民用建筑节能条例》对建筑能耗的标识都予以认可，《能效标识管理办法》也将一部分建筑材料纳入到认证的范围，目前只有 200 多家企业的 550 多种产品获得环境标志认证；在绿色建筑认证方面，国家不仅出台了适用于各类建筑的评估标准，还规定了评估单位，制定了评估办法及等级划分制度，相对来说达到了比较完善的地步；在低碳节能建筑方面，目前只有一个行业评价系统—UHE，针对城市住宅的开发设计阶段。

总体来看，我国的认证制度还有待进一步完善，虽然有一些零散的评估标准，但都很不完善。目前存在的问题主要有：缺乏专业的评估机构和人员；认证制度没有形成一个系统，导致的公信力不足；认证的范围有限等。因此，国家在制定更完善的评估标准的同时，也应该将更多的建筑材料、设备和各种类型的建筑都纳入认证范围，并加强培育发展建筑能耗评估机构、培养相应的专业评估技术人员。

## 2.3 国外低碳建筑的建设特点及启示

### 2.3.1 国外低碳建筑的建设特点

在前一章中，详细的介绍了几个国家低碳建筑的建设现状，以及相关政策和节能技术在低碳建筑工程中的应用，它们之间最大的共同点是低碳建设体系相当完备，不仅制定了明确的节能减排目标、而且还配备了完善的法律体系、健全的管理组织和认证制度。对各国的特点进行总结如图 2-6 所示。

表 2-6 各国低碳建设的特点

内 容	英国	美国	德国	日本
国家				
减排目标	1、分阶段量化 2、自主目标	1、分阶段量化	1、分阶段量化 2、自主目标	1、分阶段量化
建筑低碳理念	设计阶段整体控制	舒适性与节能结合	控制整体能耗	低碳节能与环境共存
碳排放现状 (07年)	5.85 亿吨，第八位	58.17 亿吨，第一位	8.135 亿吨，第六位	12.142 亿吨，第四位

续表 2-6

节能减排技术	1、积极开发新技术 2、恰当利用已存在技术	1、注重高新技术开发 2、从建筑热环境模拟的角度考虑节能 3 注重节能材料及设备开发	1、技术体系完备、成熟 2、注重新能源利用	1、注重节能技术的实际效果 2、是能源利用处于世界领先水平
节能减排法律体系	1、一部核心法律，内容包括节能标准等各方面 2、修改频率高 3、要求明确，目标量化	1、法律体系庞大、完善，包括节能的各方面 2、分国家法律、地方法律两个层次	1、一部核心法律，内容包括节能标准等各方面 2、修改频率高，几乎每年一次 3、要求明确，目标量化	1、两部核心法律，包括节能标准等各方面 2、修改频率高 3、奖惩措施明确 4、要求明确，目标量化
认证制度	1、统一、完善、专业 2、包括建筑材料、设备及建筑本体认证 3、强制性认证和自愿性认证结合	1、专门的建筑节能认证和建筑材料、设备认证 2、专业的认证人员 3、自愿性认证	1、旨在明确每一栋建筑的能耗 2、包括建筑材料、设备及建筑本体认证 3、强制性认证和自愿性认证结合	1、包括建筑材料、设备及建筑本体认证 2、认证与奖惩结合 3、强制性认证和自愿性认证结合

### 2.3.2 对我国的启示

我国是在上个世纪九十年代才开始关注节能减排的，经过 20 多年的发展，我国的节能减排工作已经取得了初步进展，比如我国形成了以《节约能源法》和《可再生能源法》为核心的法律制度，制定了庞大的节能减排标准体系，各项认证制度也在建立之中。但是我国目前的经济发展已经走到十字路口，粗放的经济发展模式与节能减排之间形成了不可调和的矛盾，如何选择显得至关重要。上面研究了可是作为重要工业国家和碳排放大国是如何应对经济发展与温室气体带来的挑战，为我国的低碳建设提供了很多可供借鉴和学习的经验。

#### 1、促进建筑节能法律体系的完善

尽管《节约能源法》已经开始实施并起到了一定的作用，但总体来说建筑节能的法律还不够完善，应该根据形势的发展进行完善和提高，在实用性和可操作性方面进行加强。

我国的法律法规虽然多，但相互之间的协调配套处理的不是很好，很多法律法



规之间存在重复部分，在各个不完善的方面又没有形成互补，造成多而乱的局面，有关部门在制定法律法规的过程中应该加强系统性。另外《节约能源法》和《民用建筑节能条例》虽然具有普遍约束性，但其可操作性收到制约，还应该配套一些具体可操作的规章制度。

地方政府也应该积极研究本地方的气候特征及相关实际情况，制定适合本区域的指导下法规和配套措施，为本地区建筑节能的深入推广提供保障。

## 2、根据形势变化，及时调整政策法规

通过对发达国家节能减排政策的研究表明，节能法律法规并不是一成不变的，而是在经常进行修订，如德国多次修订其《可再生能源法》，日本也对其《节约能源法》进行了两次修订等，都是根据不同时期形势的变化，对节能减排提出新的要求。我国的相关法律也应该按照正规的程序适时修订，使之与当前的环境形势、经济形势想协调，如此才能保证法律对节能减排的推进，对低碳经济发展的促进。

## 3、加强对建筑节能关键环节的控制

从欧洲的节能管理经验来看，应该加强对建筑节能关键环节的控制，从源头上减少建筑队能源的消耗，新建建筑的 6 个关键环节分别是：（1）在规划许可阶段，相关主管审查部门应该与同级主管部门共同对设计方案是否符合建筑节能的相关强制性标准作出判断，对不符合要求的设计部给相关项目颁发规划许可证。（2）在设计阶段，同样对建设工程的图纸设计文件进行审查，要求其节能设计必须高于相关强制性标准。（3）在建设阶段，相关参与单位必须严格执行相关强制性标准的规定，建设单位不得私自要求进行违反强制性标准的设计及施工。（4）在竣工验收阶段，相关验收单位应该严格按照相关强制性标准的规定进行相应的验收，对违反相关规定的部分应当视为验收不合格。（5）在销售阶段，应该强制性要求开发商向消费者出具含该方位能耗指标、节能措施、保温保修期等相应信息的能耗证明。（6）在使用保修阶段，必须明确施工质量问题的责任承担着为施工单位，其还应承担相应的损失赔偿。

## 4、建立科学的建筑能耗评估体系

在对国外绿色节能建筑推广的做法进行研究的基础上，学术界一致的结论是必

须建立适合中国实际的绿色建筑节能评估体系。清华大学建筑学院的江亿就明确表示，建筑节能模式的真正运转，需要科学的能耗评估体系通过具体的能耗指标来进行。同时评估体系的建立、评估指标的确定，还需要一套完整的机制来执行，他指出，当前形势下应该要求开发商在售卖房屋时为消费者提供含有该住房能耗和热性能的相关指标的评估证明，让大众一起来监督开发商对建筑节能的执行效果，同时这些指标也会成为开发商竞争的新的方向，这样将会大大促进建筑节能的推广。此外能耗证明并不是一纸空文，在房屋建成后还应该组织相关部门对房屋的实际能耗进行验收，证明其能耗数据的客观性。

目前，已经出台建筑节能标准的只有北京市，其它各地方及中央政府也在加紧相关测评标准的制定，相信很快会有新的标准出台。

## 5、有效的市场激励机制的构建

由于我国目前的能源状况及刚刚起步的建筑节能事业，研究建筑节能的激励政策对我国至关重要，它可以很好的推动建筑节能的前期推广。就中国目前的情况看，重点在理清建筑节能的重要性与应该给予多大的财政支持，建筑节能体系的完善离不开政策的支持，也离不开资金的支持。要逐渐实现由政府强制性执行到由政府引导、由市场推动相结合的转变，所以这期间更少不了必要的税收减免、财政补贴等经济政策的支持。

## 2.4 低碳建筑管理模式的构建

### 2.4.1 低碳建筑管理模式的定义

管理模式，就是企业在管理规章制度和企业文化上最基本的不同特征，是将一种或一套管理理念，管理方法，管理工具反复运用于企业，使企业在运行过程中自觉加以遵守的管理规则或管理体系。

低碳建筑管理模式，则是指以低能耗、低污染、低排放为基础和目标的管理模式。其实质是资源高效利用，追求低碳 GDP(国内生产总值)的问题，核心是资源技术和减排技术创新、组织结构和制度创新以及人类生存发展观念的根本性转变。本

质是节能低碳高效的管理方式。低碳管理与传统的其他管理理念相比，有自己的基本特点：①低碳管理是对项目运行过程中的组织运行方式和低碳技术体系的有机整合。②低碳管理的目标是打造低能耗低排放的可持续建筑。③低碳管理的基础在于管理者的减排意识和员工的低碳文化氛围。

低碳建筑管理模式构建的目的和意义：一是保护项目自身以及周边的生态环境和自然环境，实现项目的可持续发展。二是有助于企业节能，降耗、减污、增效。三是有利于提高企业形象和声誉，增强市场竞争能力。四是有利于企业变被动管理为主动管理。

## 2.4.2 低碳建筑管理模式的构建

虽然低碳节能成为世界各国研究的热点问题，但关于低碳建筑的理论研究还处于起步阶段，低碳建筑的理论依据还比较薄弱，没有形成一个科学完整的体系，低碳建筑的管理更是毫无章法可言，使得低碳建筑在实际工程中的应用具有一定的盲目性，导致施工过程中低碳建设目标不可控等一系列问题。用传统的项目管理模式来进行低碳建筑的建设管理中存在一系列的问题，比如专业性不足，项目管理跨度增大，管理压力增加，风险过大等。

针对低碳建筑在建设管理过程中存在的问题，应该以全生命周期为出发点，建立全生命周期低碳建筑管理模式，如图 2-5 所示，来统筹整个项目各个阶段的低碳建设管理，明确各个阶段的建设任务，保证建设目标的一致性和建设过程的系统性。同时引入专业的第三方来进行协同管理，提供技术和管理上的支持，减少建设方的管理压力，必要的时候，可以对风险较大的低碳专项工程以“交钥匙”的方式进行转让，转嫁低碳建设的风险。

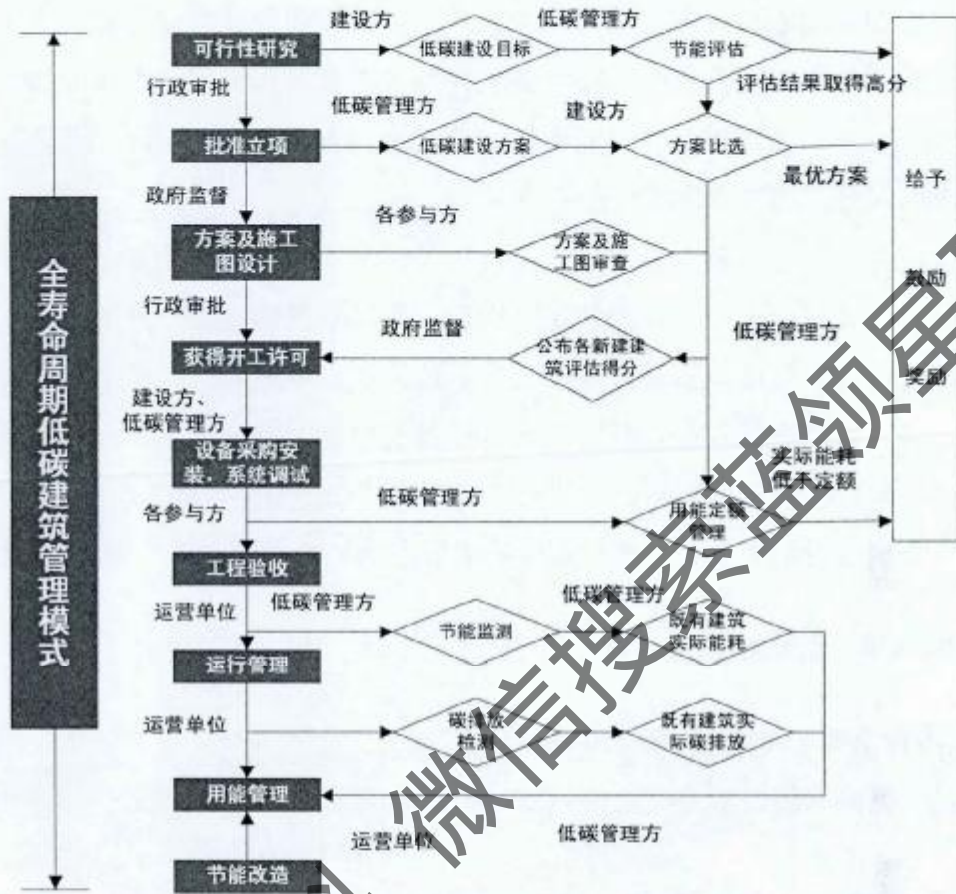


图 2-6 全寿命周期低碳建筑管理模式

这一低碳建筑管理模式的管理主体有三个：政府，建设方和低碳管理方（第三方）。其中政府主要其监督引导作用，建设方负责整合所有资源为低碳建设服务，低碳管理方参与整个寿命周期内的低碳建设管理，并对项目的低碳建设效果负责。

建设方选定投资意向后，委托具有相应资质的咨询机构进行可行性论证，论证的重点应该放在项目的节能潜力上。项目论证可行后，建设方应该根据项目的定位和节能减排的总体要求提出低碳建设总体目标，委托多个咨询单位做详细的低碳规划，对总目标进行分解，并由低碳管理方对多种分解方案做节能评估，选取最优方案，对最优方案的提供者给予奖励。

低碳建设规划通过后，项目即可立项，立项阶段低碳建设管理方应提供多个低碳建设方案给建设方，建设方对这些方案进行比选，选择最适宜于该项目的方案。

方案及施工图设计应在政府的监督下进行，建设方和低碳管理方应经常与设计



方沟通，避免图纸设计与建设意图相差太大。施工图设计完成以后，应组织各参与方进行图纸会审，设计方负责答疑并应详细说明重难点工程。审核通过后低碳管理方应进行节能评估，对各使用低碳技术的建筑的方案及施工图进行打分并公示，达到要求后即可获得开工许可。

建设方应该在安装工程开始前进行相关设备的采购，低碳管理方监督其安装，并进行系统调试，保证系统能够正常运行，并编制用能定额管理手册。在工程验收结束投入运营后，低碳管理方应该进行节能监测，收集建筑的实际能耗数据并进行分析，进一步调整系统的运行工况，将设备的节能减排效果调节到最优，制定长效节能减排运行制度，编制运行调节策略和节能管理制度。收集整个碳排放监测数据，并进行低碳建设效果分析，找出实际效果发生偏差的原因。

### 2.4.3 低碳建筑管理模式的内容分析

从内容上看，可以将低碳建筑管理模式视为一个大系统，主要包括目标管理、技术保障、组织保障、低碳节能效果测评和低碳文化建设五个子系统，如图 2-6 所示。



图 2-6 低碳建筑管理模式内容体系

## 1、低碳建筑目标管理子系统

低碳建设目标管理是低碳建设系统工程的一个组成部分，具体地，由领导根据节能减排要求和项目具体情况，在充分评价比较的基础上，制定出项目的低碳建设总目标，然后将其展开与分解，细化到每个部门甚至每个成员，使其相关责权利明确，并分别制定组织和个人完成目标的保证措施，以此来形成一个科学合理的全过程、多层次的低碳建设目标管理体系。

## 2、制约规范子系统

为了保证低碳建设目标的实现，需要建立完善的组织管理体系，并对该组织成员进行明确分工及权限划分，及相应的规范子系统来保证其高效运转。制约规范子系统应该包括下列内容：

### (1) 建立的健全低碳管理组织机构

一个管理体系的成功实施及高效运转离不开一个责权利分明的组织机构，为了保证低碳建设目标的实现，首先需要一个人人各负其责的低碳管理组织，然后才是充足的资金支持做后盾。如果低碳管理组织不健全，无法保证参与人员职责明确的参与工作，其它各项低碳工作就无从谈起，根本无法落实。

### (2) 建立、健全及落实低碳建设目标责任制

低碳管理组织机构建立之后，明确其参与人员的管理职责及权利界限就显得尤其重要，每个岗位操作人员必须有明确的低碳建设操作规程和相关的责任。低碳建设目标责任制作为企业岗位责任制不可或缺的一个组成部分，目的就是为了保证低碳建设规章制度落实，建立健全以低碳建设目标责任制为中心的各项低碳建设管理制度。

## 3、技术保障子系统

为了保障低碳建设目标的实现，需要建立相应的技术原则及其应用实施程序，即技术保障子系统，主要内容为低碳建设方案制定及其实施管理。一个项目低碳建设目标的实现很大程度上取决于前期的方案制定，一个好的方案将使整个项目低碳建设的依据和指导，当然其实施过程中良好的管理也是低碳建设方案得以落实和低碳建设目标得以实现的保证。因此，技术保障措施是低碳建设过程中最重要的一个部分。

#### 4. 效果测评子系统

低碳建筑效果测评一方面是对已完成部分的低碳建设效果进行评估，保证其与目标低碳保持较小的偏离，并且达到我国相关的低碳节能标准；另一方面通过碳排放监测系统，测算出项目各阶段的实际碳排放，与规划目标进行比较，得出实际的低碳建设效果，此外，通过对运营期节能效果的模拟和评估，优化设备使用和能源利用结构，实现运营成本的最大化和能源损耗及碳排放最小化。

#### 5. 低碳文化子系统

低碳文化子系统是为了在企业内部形成低碳意识及节能减排积极性，保证低碳建设管理的顺利进行。

获取更多资料

微信搜索 蓝领星球

### 3 低碳建筑技术体系的构建

#### 3.1 低碳建筑运行机理

##### 3.1.1 低碳建筑物质流、能量流、信息流

建筑是人类的一项基本活动，其目的是通过对自然的改造为人类自身提供更加适宜的生存环境。建筑本身作为一个系统，在其系统内部以及与外界环境之间会不断进行物质、能量和信息交换，因而是一个开放的人工系统，但建筑并不是独立于整个社会系统之外的系统，因此，建筑还会受到外部各种不同的约束。而建筑是通过物质流、能量流、信息流作为建筑运行的内在机制。

##### 1、物质流

物质流是指取自外部环境中的物质在有限的范围内的反复使用而形成的物质循环。其本质是自然界资源与人类需求间的相互关系，也是如何合理地开发和利用自然资源。

在建筑物的全生命周期的过程中，所使用和涉及到的物质材料和资源有成百上千种。所以在物流系统的设计和控制过程中，不仅要考虑资源的来源于质量，同时也要考虑物质循环系统在建筑全生命周期过程中（原料开采——加工生产——使用——循环）对环境的影响，使用能耗，以及循环使用的经济技术可行性问题。有些材料的循环周期与建筑物寿命周期相同（50 年或者 70 年），有些材料的循环周期可能只有 25 年、10 年或者更少。因此在材料的选择过程中应使材料寿命与使用周期一致，充分发挥材料的作用，做到物尽其用。

物质流子系统要发挥物质材料的性能，实现经济效益与环境效益的最大化，必须遵循以下技术原则：

##### （1）物质材料的最少使用量原则

实现同一项目标，应选择物质材料使用量最少的方案。

##### （2）尽可能利用地方性材料



选择当地丰富的物质资源和地方性材料，做到就地取材，使用后就地回收处理或再利用。减少因材料运输造成的不必要损失和资源浪费。

### (3) 充分发挥材料使用寿命

在建筑物中有永久性的结构和部件，有半永久性的部件，也有临时性的部件。所以在建筑物不同部件的材料选择中应使材料寿命与使用周期寿命相符合。如果材料寿命超出使用寿命是对材料的浪费，如果材料寿命达不到使用周期要求也会造成其他材料的浪费。建筑物为了适应人的需求的变化和气候的季节性变化必须要具有调节能力和可改造的潜力，因此就需要对不同使用寿命的材料进行合理搭配，构造处理方案也要具有灵活性和可更换性，使每种材料的寿命能够得到最大限度的利用。

### (4) 充分利用可再生性物质资源

利用可再生性物质资源是为了减少对环境的影响，但也要与物质材料的可再生能力相协调。

### (5) 充分利用可回收使用的物质材料

建筑物中使用的一些未经二次加工的天然材料如石材、泥土等都是最佳的材料，可以不断地重复利用。在现在建筑材料中，有些材料的初次开采加工的代价和成本较高，但二次回收利用的代价和成本都较低，都可视为较佳的建筑材料。

### (6) 物质材料的选择和使用应与能量流系统的要求相协调

建筑物材料的选择与使用应满足能量流系统对建筑物保温、隔热等方面的要求，所使用材料的热性能也应与当地自然气候条件相适应。

### (7) 物质材料的使用与构造处理方法与信息流系统的要求相协调

在建筑物中使用的材料与构造方法应为信息流系统控制与调节创造有利条件。

## 2. 能量流

能量流系统是指生态系统中能量的流动与转化。能量流研究的是能量在建筑系统中的动态规律，研究它如何从一种形式转变为另一种形式，以及它在流动过程中的数量变化和利用效率。根据热力学第二定律，当能量由一种形式转化为另一种形式时，总有一部分能量转化热能而耗散。所以在建筑系统中能量流研究中，如何在最少借助外界能源特别是化石能源和电能等情况下补偿能量损失，并达到能量的平

衡状态是建筑的能量系统中重要问题。

能源就是向自然界提供能量转化的物质（矿物质能源，核物理能源，大气环流能源，地理性能源）。能源是人类活动的物质基础。按能源的基本形态分类，有一次能源和二次能源。前者即天然能源，指在自然界现成存在的能源，如煤炭、石油、天然气、水能等。后者指由一次能源加工转换而成的能源产品，如电力、煤气、蒸汽及各种石油制品等。一次能源又分为可再生能源（水能、风能及生物质能）和非再生能源（煤炭、石油、天然气、油页岩等）。根据产生的方式可分为一次能源（天然能源）和二次能源（人工能源）。一次能源是指自然界中以天然形式存在并没有经过加工或转换的能量资源，一次能源包括可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气资源，其中包括水、石油和天然气在内的三种能源是一次能源的核心，它们成为全球能源的基础；除此以外，太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能以及核能等可再生能源也被包括在一次能源的范围内；二次能源则是指由一次能源直接或间接转换成其他种类和形式的能量资源，例如：电力、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤、激光和沼气等能源都属于二次能源。

建筑系统中能量流子系统必须满足一下原则：

#### (1) 能量的最少使用原则

通过确定合理的舒适环境标准，与气候条件相适应的建筑设计方案以及提高建筑物保温、隔热性能等手段最大限度的减少能源需求数量。

#### (2) 积极利用可再生能源和绿色能源

#### (3) 采取多种能源利用手段来实现同一个目的。

#### (4) 使用低能耗建筑材料和设备

采用节能型灯具和设备，提高设备运行效率，使用低内涵能量的材料。

(5) 对能量流系统进行优化管理和智能化控制的原则，利用各种信息反馈调节和控制手段减少能源的不必要的浪费。

### 3、信息流

信息流又称为信息调节与反馈系统。建筑信息流系统是通过系统内部的物质流和能量流调节来满足人们的需求并与外部的环境协调。在建筑使用过程中人的要

求会随时发生改变，自然气候调节也会发生季节性变化，建筑是通过对系统内部各个系统的调整来适应变化的要求与条件，从而达到最大限度的利用绿色资源和能源，降低建筑物设备系统的能耗，减少不必要的浪费和损失，实现资源和能源综合利用与效益最大化的目的。

信息流系统是对物质流和能量流系统进行调节、控制与优化，并与之共同形成协调的建筑系统。信息流子系统一方面通过对建筑物物质流、能量流系统的控制与调节为人们提供舒适的温度、湿度、光线、通风条件和生活工作中得其他要求，另一方面是通过对建筑系统和设备的控制和调节来适应外部自然气候条件和内部使用情况的不断变化。信息流系统主要依靠现代信息科技的不断发展和对计算机技术、红外线等传感技术的广泛应用。各种光感器、温度器、红外线感应器等传感元件与计算机和设备控制系统构成系统网络，对建筑物室内舒适条件、建筑物使用情况和设备运行状况进行信息自动收集和自动控制，各种建筑环境控制设备和部件也应具有很高的自动化程度和调节能力以适应自然气候条件的不断变化。

信息流系统应满足以下原则：

(1) 系统应对外部自然气候条件的变化做出及时信息反馈与调整，确保室内环境的舒适和资源、能源优化利用。

(2) 系统应对人的需求变化和建筑使用情况变化作出及时反馈和调整，在满足人的需求的同时，减少资源能源的浪费。

(3) 增强建筑设备和建筑物主要部件的智能化程度和自动化程度，为信息流系统创造必要条件。

(4) 系统应采用系统集成技术和优化控制与管理技术对各信息系统进行系统整合，是建筑系统的整体运行达到最佳状态。

### 3.1.2 低碳技术选取的影响因素

#### 1、人的基本需求

建筑是人们社会生活中的一个产物。通过建筑，人们获取了基本的生存空间和生活条件。也就是说，建筑是为了满足人们的基本要求而存在的。建筑的湿环境、

光环境、声环境、空气品质环境都要达到人们对建筑的基本要求，从而获得更加适合人类居住生活的人工环境。而低碳节能技术是在为人类更加舒适、愉快、健康的建筑环境的前提下，消耗更少的能源，减少二氧化碳的排放。同时人们要获得什么样的生活环境，直接影响到低碳建筑所需要采取的技术措施，而人们的需求能否实现，也会受到环境、技术、经济等因素的限制和制约。

因此，人的需求目标确立，必须要对下述各因素进行综合考虑：

(1) 人的需求多样性与复杂性。作为自然的人，需要满足生理上的基本需求；作为社会的人需要满足心理和社会交往的需求；作为精神的人，需要满足审美与精神生活需求。

(2) 人的需求的差异性。不同自然气候条件下的人的需求具有差异性；不同时间和季节人的需求也会发生变化；不同年龄、性别、民族和文化背景下的人的需求也会有很大的需求。

(3) 人的需求的有限性与合理性。人的需求会受到自然条件、技术条件和经济条件的影响，因此要在这些条件中确定合理的需求目标。

## 2、自然环境

自然环境就是建筑所要面对的外界客观条件。空气温度、湿度、太阳直射、太阳散射、云状、风速风向、海拔等环境因素都对建筑产生重要的影响，这些自然环境有其有利和不利两个方面。节能建筑应充分利用自然环境的有利条件，并通过合理的技术手段克服不利的方面。

自然与气候为生态建筑物流和能流系统提供了必需的物质材料和能源，以及满足人类生存和舒适健康必需的阳光、空气和水等基本条件。同时，自然气候条件的不断变化也是使信息流系统进行系统调节与控制的重要外部刺激因素和依据。

自然环境对建筑的影响主要表现在以下几方面：

(1) 自然资源的有限性。地球中存在的资源和能源是有限的，不可能满足人类无限的需求，因此需要合理利用。

(2) 环境的不稳定性。自然环境随地域和季节的不同会不断发生变化，这就要求低碳节能技术具有可变性和适应性。

(3) 自然环境的规律性。对于一个特定的地区来讲,其自然气候条件的变化具有一定的规律,可以被充分地认识和利用。

### 3、技术水平

技术水平主要体现在技术的先进性、成熟性以及和项目其他设施的配套性。低碳建筑在选择新技术时,首先应遵循项目的低碳节能目标,选择可以实现节能目标并与之相匹配的低碳技术。此外,节能技术的应用,需要有很多的配套技术和设备,因此,技术的选择应尽量考虑和已有技术和环境的相关性,相关性越大技术应用成功的可能性就越大。

一项新技术,可能会存在许多的使用风险,比如:技术效果不稳定,技术不配套、技术依托单位推广能力不强等。而技术的使用者为了避免这些风险,往往会选择一些较为成熟、低风险的技术,所以只有新技术的风险性在可以接受的范围内时,低碳技术的使用者才有可能采用该技术。

低碳节能技术的选取应遵循以下原则:

- (1) 技术高效率的原则;
- (2) 技术的适应性原则;
- (3) 多种技术综合利用的原则;

所谓技术的高效率是指一旦采用了某项技术就应使其效率发挥到最大限度。所谓技术的适宜性是指所采用的技术应该在与人的需求、自然环境、技术本身的性能和经济条件等各方面都是相适应的。所谓多种技术综合利用是指要实现某一特定目标,不是只靠某一种技术手段,而是在充分发挥原有设备或材料性能的基础上,依靠多种技术手段来共同实现,已达到更加经济合理的目的。

在建筑采用低碳节能技术主要有以下几种类型:

- (1) 材料的开采、生产、使用与回收利用的技术;
- (2) 能源开发、生产、使用与循环利用的技术;
- (3) 对自然环境利用的技术;
- (4) 各种计算机技术、传感技术、自动控制技术等智能化技术;
- (5) 系统技术整合

## 4、经济条件

经济效益是指人们从事经济活动所获得的劳动成果与劳动消耗的比较。经济因素对低碳建筑的影响主要体现在低碳节能技术所带来的社会效益和经济效益。采用节能技术势必要增加一定的经济投入，但同时会减少能源浪费，减少环境污染。受利益驱使及减碳节能意识的限制，使用者往往不愿采用低碳技术。只有当技术使用带来的经济效益大于使用成本，或者受政策的制约和严格要求，使用者才有可能采用该技术。

### 3.1.3 低碳技术运行机理

#### 1、建筑系统的构成

建筑是由物质流、能量流、信息流三个子系统构成的，三个子系统均为开放的系统，子系统内部与系统之间均处于一种动态循环与互动过程中。物质流与能量流之间不仅具有互动关系，有时也存在着相互转化的关系。物质流、能量流与信息流之间既有互动关系，又存在着调节与控制关系。

由物质流、能量流、信息流三个子系统构成的建筑系统，其系统目标是：

- (1) 最大限度地减少资源的消耗；
- (2) 最大限度地减少能源的消耗；
- (3) 最大限度地减小对环境的影响；
- (4) 系统内部的最优化控制与最优化管理。

#### 2、低碳节能技术系统运行机理

从前面对建筑的外界影响因素的提出与分析中我们得知，人的基本要求、自然环境、技术条件与经济条件都对低碳节能技术产生直接的作用和影响，人的基本要求是满足低碳节能技术的实现目标，自然环境是其所面对的客观自然条件，而技术条件和经济条件是低碳节能技术得以实现的技术基础和经济基础。这些内在系统与外界影响因素共同构成了完整地低碳节能技术系统，如图 3-1 所示。

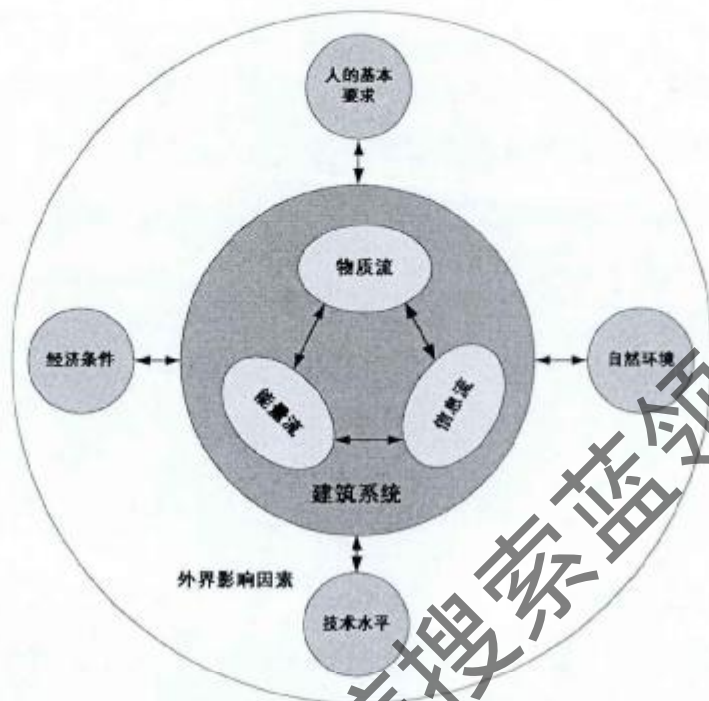


图 3-1 建筑物低碳技术运行机理

该模型所要实现的系统目标为：

- (1) 充分满足人对舒适、健康的基本需求；
- (2) 在减少对自然破坏的前提下，充分利用自然条件的有利因素，实现整个系统的良性循环；
- (3) 在高效与适宜的原则下选择各种技术和材料，通过技术整合实现最优化的目标；
- (4) 实现社会效益与经济效益的最大化的目标。

### 3.2 低碳建筑技术集成模型

自 20 世纪 70 年代出现世界性能源危机以来，建筑业在节能技术的开发应用，以及提高设备的运行效率等方面，取得了很大成绩，各种节能、节水、节电设备，智能化控制设备和技术也是日趋成熟。各种环保设备和措施也大量使用，对太阳能、风能、地热能等绿色能源的利用技术也得到快速发展。但上述节能效果主要得益于技术本身的完善与成熟。随着技术的发展，虽然这些技术都可以进一步发展和完善，但是仅仅靠某一种技术很难达到节能要求。因此，必须将各项技术综合考虑，进行



集成设计来提高技术的综合效率。

基于低碳节能建筑的基本原理进行集成设计，要综合考虑外界环境、绿色能源、规划场地、建筑景观、室内环境、技术措施、具体构造、设备选型等因素。总之，在建筑系统中的节能要素主要包括建筑外部条件、技术设备系统、建筑主体等三方面要素。

### 1、低碳技术运行的外部条件

在低碳节能技术设计中，建筑物外部环境和条件不仅影响到建筑物的舒适度与能耗，但同时也可以为低碳节能技术提供能源支持，为改善室外条件，降低能源消耗发挥重要作用。

可以用的外部条件，如图 3-2 所示



图 3-2 低碳节能技术的外部条件



### 2、低碳技术设备

在建筑热环境中可采用的技术设备系统种类繁多，按照技术设备系统的特点可以分为主动式系统和被动式系统；按照技术设备所使用的能源和功用可分为采暖系统、制冷系统、电力系统、照明系统，供水系统及智能控制系统。

### 3、建筑结构本体

在建筑低碳设计中，一些重要的建筑部位和构件发挥了重要作用。建筑为人提供一个围护结构，直接与外界环境接触，并且其技术性能的好坏也直接影响建筑的能耗以及人们的舒适度。所以在建筑低碳设计中要充分利用好建筑要素。建筑中可利用的一些重要的低碳节能要素如图 3-3 所示：

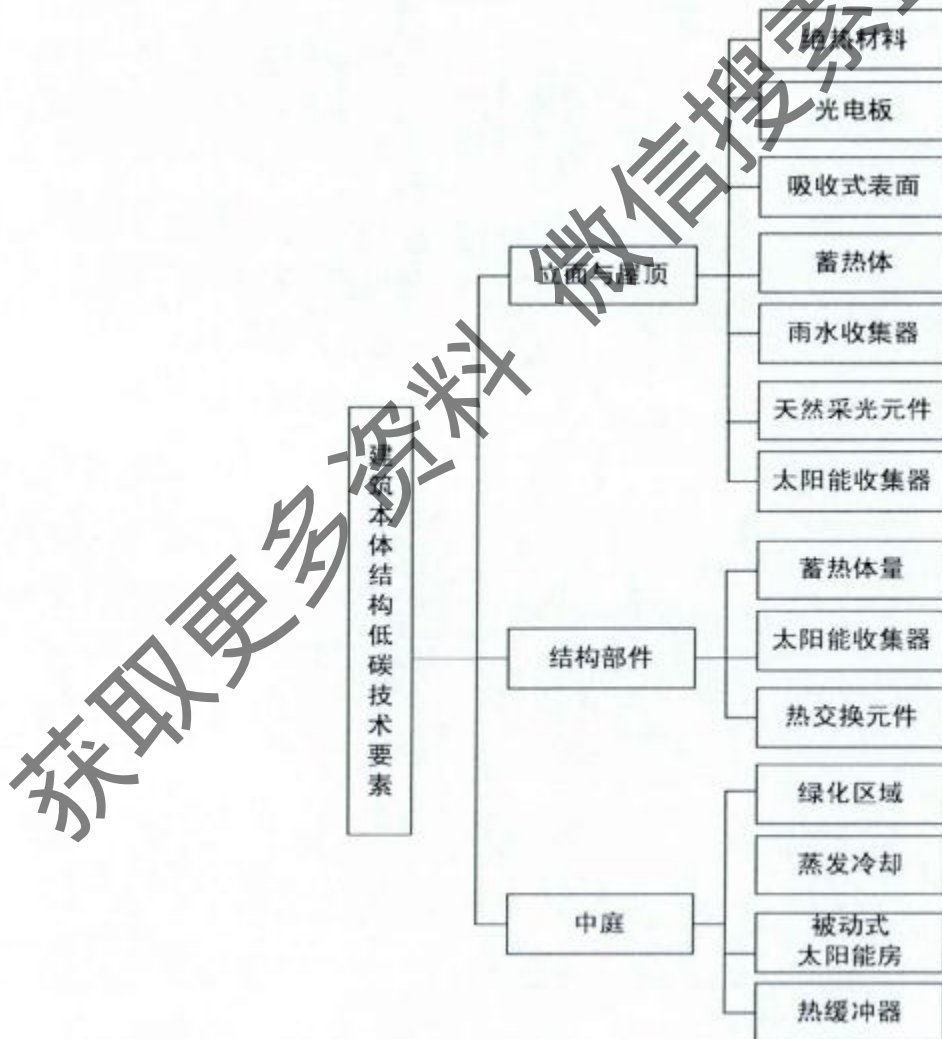


图 3-3 建筑本体结构低碳技术要素

在建筑规划阶段就要对空气、土地、水体、中庭、结构、立面、屋顶以及各种各样的技术装备系统进行充分的考虑。根据建筑利用可再生资源的特点,可以将低碳技术应用方法分为两大类:被动式方法和主动式方法。所谓被动式方法就是通过建筑的合理设计,无需或较少需要设备使用和资金投入即可实现节能目标的技术手段和方法。例如通过合理的建筑规划设计实现建筑物的自然通风;通过建筑形体布置和蓄热材料的合理应用使建筑物热性能达到最佳状态;在建筑立面设计中利用正确的遮阳方案来调节太阳辐射得热,并提供充足的自然光;通过对建筑物中庭空间和玻璃暖房的合理规划设计取得最大环境效益;以及利用绿化植物改善微气候条件和空气质量等。

上述各种被动式技术方法不仅是决定建筑物是否低碳节能的重要标志,而且也是能否获得建筑社会效益、经济效益、环境效益的重要前提和保证。因此被动式技术方法可以作为低碳技术的主体内容。

所谓主动式方法是指通过采用一些技术设备和资金投入,利用太阳能、风能、水能、地热能等可再生能源和其他一些可再生资源与复合资源的技术方法。这些主动式方法虽然需要一定数量的资金投入和设备投入,但从环境保护的角度和长期社会效益的角度看仍是恰当而合理的,可以作为生态建筑技术的后备选择方法。从原则上讲,对主动式生态技术的应用必须以充分利用被动式低碳节能技术为前提,这样就可以最大限度地减少主动式方法的设备与资金投入量,从而获得低碳节能技术应用的利益最大化。

不管是主动式节能减碳方法还是被动式节能减碳方法都涉及到外部条件、建筑主体、技术设备。因此,在建筑低碳技术集成系统中,应充分考虑外部条件、建筑主体、技术设备三方面之间的内在影响。而整个低碳技术运行模型也是这三面的有机组成,如图 3-4 所示。

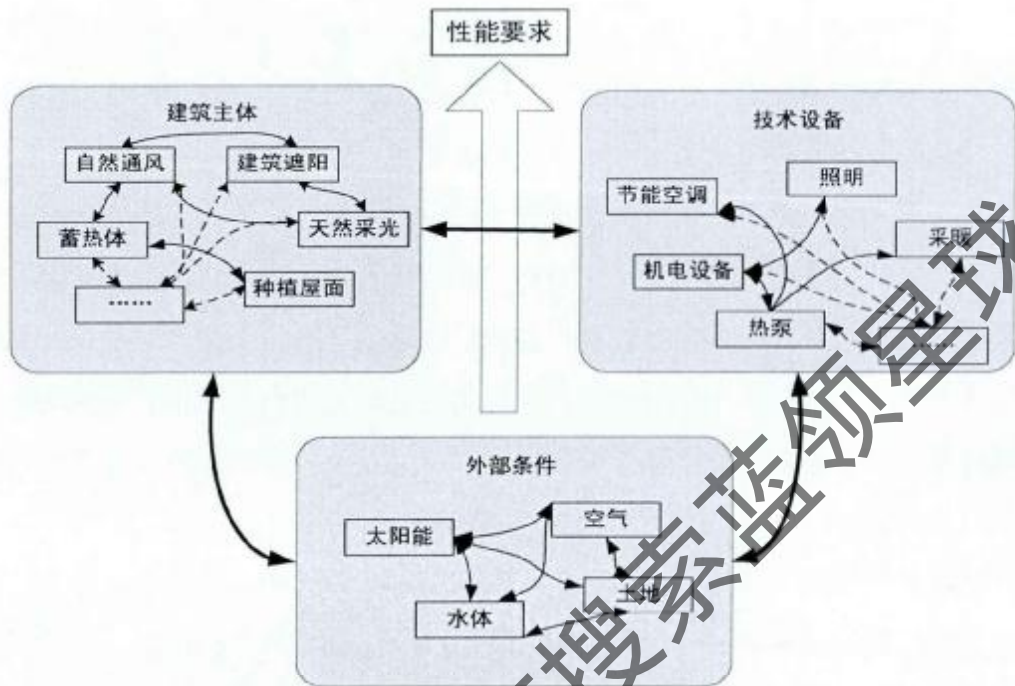


图 3-4 低碳建筑技术运行集成模型

### 3.3 低碳建筑技术集成体系

为实现低碳建筑的节能减碳目标，本文从系统集成的角度，根据建筑主体、低碳技术设备以及建筑物外部条件的相互作用关系，依据我国《绿色建筑评价标准》等标准规范对绿色低碳建筑的技术性要求。对低碳技术进行归纳总结，将建筑中可能采用的低碳节能技术分为了 11 项子系统：室内热环境控制系统、室内光环境控制系统、室外热环境控制系统、绿色环保材料与技术、节水技术、节材技术、节能技术应用、节水技术、可再生能源应用、智能化控制系统、供水系统。各个子系统可分别采用不同技术实现不同的功能，组成系统框架如表 3-1 所示。

表 3-1 低碳建筑技术体系

体系分类	功能分类	低碳技术
室内热环境控制系统	外墙保温、隔热系统	多价式外墙保温、隔热、通风系统
		EPS 板、XPS 板外墙外保温系统
		聚氨酯外墙保温系统
		带空气间层保温隔热系统
		带铝箔保温隔热系统

续表 3-1

室内热环境控制系统		带循环水（或空气）蓄热外墙系统
	高气密性、低传热系数门窗控制系统	断桥铝合金门窗系统
		双层（或三层）夹胶中空玻璃
		幕墙五金配件
		框架式幕墙系统
		呼吸式幕墙系统
	高性能屋顶保温隔热系统	倒置式屋面保温隔热系统
		种植式屋面系统
		蓄水式屋面系统
		通风屋面系统
	室内温度控制系统	分体式空调系统
		户式 VRV 中央空调系统
		小型中央冷热源+FCU+PAU（四管制）
		大型中央冷热源+FCU+PAU（四管制）
	太阳辐射控制系统	外墙、屋顶遮阳系统
		门窗外置遮阳系统
		门窗内置遮阳系统
		双层中空玻璃内置遮阳系统
呼吸式幕墙内置遮阳系统		
外墙、屋顶表面太阳辐射吸收（反射）系数控制		
外墙门窗 Low-E 玻璃（或 Low-E 膜）		
室内光环境控制系统	声控照度控制系统	
	红外线照明控制系统	
	室内情景照明控制系统	
	住宅家庭影院情景照明控制系统	
	室内照度自动补偿照明控制系统	
	侧窗采光百叶板（反光板）系统	
天然采光控制系统	采光井（采光塔）系统	
	光导管、光导纤维天然采光系统	
	室外公共区域地面铺装色彩控制	
室外太阳辐射控制系统	室外公共活动区域遮阳设计	
	室外建筑立面色彩规划	
	室外公共活动场地渗水地面铺装	
室外热环境控制系统	室外沥青渗水路面系统	
	室外夏季、冬季局地风环境控制	
室外风环境控制系统	室外公共活动区域冬季防风设施规划	
	利用乔木进行夏季太阳辐射控制	
	利用垂直绿化进行夏季太阳辐射控制	
	利用高大乔木提供小区公共活动区域遮阳	
室外绿化与水景观环境控制系统	利用植物调节小区夏季、冬季风环境条件	

续表 3-1

		利用水景观进行小区的微气候调节
绿色环保材料与技术	使用地方性建筑材料、设备与技术	使用当地生产的三大建筑材料（钢、水泥、木材）
		使用当地出产的石材等天然装饰材料
		使用当地生产的防火、防水的建筑功能材料
		使用当地生产的建筑设备
	使用绿色环保材料	使用经济林山产的木材
		使用由经济林木加工的制品
		使用无化学添加剂的环保建材
		使用无污染（或二次污染）的绿色建材
节水技术	采用节水型器具和设备	节水型卫生间器具
		节水型家电设备
	采用喷灌、微灌等高效节水灌溉方式	大型公共绿化采用喷灌方式灌溉
		小型绿化采用微灌方式灌溉
		缺水地区采用微灌方式灌溉
	合理规划地表与屋面雨水径流途径	屋面雨水直接就近收集
		雨水管道流经地表化
	采用雨水回收与回灌技术	设置集中雨水回收利用系统
	再生水处理及回用系统	硬质地面采用渗水型材料
		集中设置再生水处理及回用系统
结构体系优化设计	分楼宇设置再生水处理及回用系统	
	选择合理的结构形式	
	建筑平面的结构合理性优化	
节材技术	采用高性能混凝土、高强钢筋	结构体系具有功能改造的可能性
		使用高标号混凝土
		使用高强度钢材
	使用可再循环材料	高结构性能的特殊型材
		使用可再生建筑材料
		使用可循环使用建筑材料
	采用新型墙体材料	使用二次回收、加工方便和能耗低的材料
		使用功能复合型墙体材料
		使用环保、节材型墙体材料
	采用节约材料的新工艺、新技术	使用轻质、高温的建筑材料
采用节材、省时的施工工艺		
采用性能优越的新技术产品、新设备		

续表 3-1

节能技术	采用便于更新的设计	不同使用寿命的材料可更新设计
		方便更新的设备、管道系统设计
	高效节能设备与运行控制系统	高效节能型的供电设备系统
		高效节能型的给水设备系统
		高效节能型的排水设备系统
		高效节能型的中央空调设备系统
		高效节能型的户式空调设备系统
	区域热电、——热、电联供系统	
	节能型灯具与照明控制系统	室内采用节能型灯具
		室外照明采用节能型灯具
照明节能自动控制系统		
带热回收装置的送排风系统	分户式热回收装置	
	楼宇式热回收装置	
带热回收装置的给排水系统	分户式热回收装置	
	楼宇式热回收装置	
节地技术	合理规划	选址合理, 规划得当
		工作区、生活区统筹划分
		适当提高部分建筑容积率
		集成防火措施
		交通流线布置简洁
	原有水体、土壤的保护	建设过程对于水源保护
		保证场地安全
		清理现场污染物, 提出防污染措施方案
		增加植被面积, 提高碳汇量
		周边植被维护
土地的充分利用	提高地下空间、地下停车场	
	减少建筑异型, 规范化, 提高利用率	
	对周围已有旧建筑再改建利用	
可再生能源应用	被动式太阳能系统	被动式太阳能房一体化设计
		太阳能中庭设计
		冬季阳光房设计
		天然采光与日光照明系统
	太阳能光热系统	太阳能热压通风系统
		分户式太阳能热水系统
		楼宇式太阳能热水系统
		太阳能光热一体化系统
太阳能“空调——热水”一体化系统		

续表 3-1

	太阳能光电系统	太阳能庭院灯、草坪灯 楼宇式太阳能光电系统 太阳能光电一体化系统	
	风能利用系统	被动式风能利用系统 小型风力发电系统	
	地源热泵系统	深层地源热泵系统	
		中层地源热泵系统	
		浅层地源热泵系统	
		户式地源热泵系统	
		楼宇式地源热泵系统	
	水源热泵系统	区域地源热泵系统	
		地表水源热泵系统	
		地下水源热泵系统	
		分户式水源热泵系统	
		楼宇式水源热泵系统	
	空气源热泵系统	区域水源热泵系统	
		分户式空气源热泵系统	
		楼宇式空气源热泵系统	
	智能化控制系统	家居智能化控制系统	区域空气源热泵系统
			智能灯光控制
自动窗帘(百叶)控制系统			
室内温度、湿度控制与显示系统			
空调、采暖、通风设备智能控制系统			
建筑设备监控系统		电器设备远程智能控制系统	
		建筑物(家居)智能一体化模块控制系统	
		给排水设备自动监控系统	
物业智能管理系统		供电设备自动监控系统	
		中央空调设备自动监控系统	
供水系统	恒压供水系统	建筑物物业智能管理中心	
		建筑物物业数字化管理控制平台	
		龙头恒压供水系统	
	中央生活热水系统	户式恒压供水系统	
		楼宇恒压供水系统	
		户式锅炉生活热水系统	
		楼宇式中央生活热水系统	
	热电联供生活热水系统		
	24小时热水循环供给系统		



## 4 低碳建筑技术规划方案比选方法研究

### 4.1 低碳建筑技术规划方案比选的基本内容

#### 1、低碳建筑技术规划方案的内容

低碳建筑技术规划方案研究的内容随建筑类型及复杂程度而异，大型公共建筑领域拥有十项节能系统，150余项节能技术，其低碳技术规划方案的比选非常复杂。项目决策分析与评价不同阶段的低碳规划建设方案研究工作深度不同。项目低碳建设规划研究阶段的低碳规划方案较粗略，可行性研究阶段的低碳规划方案要求全面而深入。一般而言，大型建设项目群区域的低碳规划方案应包括以下内容：

##### (1) 总体原则

低碳规划方案应首先列明该区域的能源利用总原则，包括可能采用的节能技术、能源利用总目标、节能目标、可再生能源的利用等内容。

##### (2) 能源供应状况

低碳规划方案应包括区域的整体能源供应状况，包括煤炭、石油、天然气、水电等传统能源，以及可以获得的可再生能源。对这些能源的需求、供应、转换、匹配等内容进行全面分析。

##### (3) 资源条件分析

低碳规划方案应分析项目所处地区的整体资源条件，包括水资源、土地资源、气候资源、矿产资源等。需对各规划方案中可能涉及的资源条件进行全方位分析，如可获得性、可利用性、资源优势等。

##### (4) 负荷需求预测

负荷需求预测内容包括项目空调供暖负荷、热水负荷及用电负荷等。需要在预设的条件下充分计算项目的负荷需求。

##### (5) 关键技术应用分析

关键技术应用分析可借鉴同类技术的成功应用，为该项目能源方案构建提供参考。即考察关键技术的可运用性能。

#### 2、低碳建筑技术规划方案比选的作用



低碳建筑技术规划方案比选是低碳项目进行科学决策的前提，所选择的方案是低碳项目策划工作的重要组成部分。进行低碳建筑技术规划方案的比选，对低碳项目能否成功实现发挥着举足轻重的作用，主要体现在以下方面：

(1) 在研究了当地资源储量、能源供应及市场需求的基础上，确定能源方案与建设规模；

(2) 是对方案进一步进行经济分析、财务分析、社会效益分析、环境评估等工作的依据；

(3) 为低碳项目的初步设计提供依据；

(4) 低碳规划方案比选中反复进行了经济、技术比较，不仅实现了对低碳规划方案的评价与完善，也对方案的经济指标进行了进一步优化；

(5) 为建设资源节约型社会，提供节水、节电、节地等低碳技术运用标准，促进新技术的利用和发展；

(6) 为降低碳排放，实现区域低碳目标提供支持。

一个优秀的低碳规划方案，是实现低碳项目总目标，增加投资收益，规避投资风险，实现经济效益、社会效益、环境效益的基础，因此，低碳规划方案比选工作的好坏，往往对项目的科学性决策起着关键作用。

项目低碳建筑技术规划方案比选研究是指对项目各种低碳规划方案进行分析研究，比选和优化，拟采用最佳方案的全过程。低碳建筑技术规划方案比选研究的任务就是对两个以上可能的低碳规划方案进行优化比选，比选合理的低碳规划方案，先进适用的节能技术，性能可靠的生产设备，合理的能源站建设方案，科学的能源消耗计算；制定明确的资源供应、运输方案；计算合理的碳排放指标，能够有效利用的能源。低碳规划方案研究是进行低碳项目经济评价、环境评价和社会评价的基础。

## 4.2 低碳建筑技术规划方案比选指标体系

### 4.2.1 指标体系确定原则

低碳建筑技术规划方案比选研究，应遵循一般建设方案比选的基本原则，同时也要充分考虑低碳建筑技术规划方案的建设特点，不仅考虑方案的成本、功能、经济效益，更应考察各方案的环境效益、碳排放量、节能效率等因素。为了科学地考察低碳建筑技术规划方案，在研究和确定比选指标体系时，应遵循以下原则：

#### 1、整体性原则

建设方案比选指标体系作为一个动态的有机整体，要从各个方面全面反映方案的真实情况。同时应该有所侧重，分清主要因素和次要因素，使得比选目标和指标能够有机组合在一起，形成层次分明的整体。

#### 2、客观性原则

评价指标将直接影响比选的结果。因此要首先确保比选指标体系的客观公正。要多方求证，征求各方面专家的意见，并不断根据实践结果进行调整。其次，要确保数据来源可靠、准确，并选择科学的方法初步处理获得的基础数据。要根据项目特点选择合适的评价方法和模型，保证方案比选客观公正。

#### 3、科学性原则

在方案比选时，需要首先建立一套科学的指标体系，其工作内容包括指标的选择、各指标间权重系数的确定、基础数据的获得及处理等，这些工作均必须以公认的科学理论（统计理论、系统理论、管理学、决策科学理论等）为依据。同时，指标要能够动态地反映低碳方案的可持续发展内涵和目标，这样才能保证结果的真实性和客观性。

#### 4、可操作性原则

在保证数据精度的基础上，指标体系应难易适中，尽量设定一些易获得可靠数据的指标，利用现有的统计资料和有关规范标准，选择有代表性的综合指标和主要指标，这样也有利于指标体系的推广应用。

#### 5、层次性原则

在设计实际项目指标体系时，应符合层次性原则，即信息量从上至下递增。这样可以避免一些指标无法实施，另一些指标因实施对象不易获得而放弃。层次性原则也更符合逻辑性思维。

#### 4.2.2 方案比选指标体系

按照备选方案的实际情况，可以初步确定以下低碳建筑技术规划方案的比选指标体系。分为低碳指标、经济指标两大项准则，二层准则层包括总能耗、总排放量、可再生能源替代率、资源合理利用、环境保护、环境协调、初投资、全生命周期成本、净现值、动态投资回收期。如图 4-1 所示。

在实际操作中，可根据项目具体情形酌情予以增减。



图 4-1 低碳建筑技术规划方案比选指标体系

总能耗 ( $C_1$ ) 主要是指项目能耗，包括了冷水机组耗电、空调末端耗电、制冷耗气、采暖耗气、生活热水耗气等能耗，折算为标准煤进行衡量。总排放量 ( $C_2$ ) 以总能耗为基准数据，折算为排放的  $CO_2$  量。可再生能源替代率 ( $C_3$ ) 是指可再生能源在能源供应结构中所占的比重。可再生能源是指在自然界中可以不断再生、取之不尽、用之不竭的资源，对环境无害或危害很小，而且资源分布广泛，适宜就地开发利用，主要包括太阳能、浅层地热能等。资源合理利用率 ( $C_4$ ) 是指已利用资源量在可利用自然资源量中所占的比重，包括水资源、土地资源、矿产资源等。环境保护 ( $C_5$ ) 与环境协调 ( $C_6$ ) 强调项目与环境的和谐与可持续发展。

初投资 ( $C_7$ ) 一般包括机房设备费、管网造价、机房上建费、配电费、天然气接口费等。生命周期成本 (Life cycle cost, LCC) ( $C_8$ ) 是指系统设备生产至最后报废期间所需费用的总和, 费用主要构成包括初投资、年运行费、设备的经济寿命及折旧费等。对项目的各能源方案来说, 生命周期成本按式 (4-1) 计算:

$$\begin{aligned} LCC &= P + A(P/A, i_n, n) - R_c(P/F, i_n, n) \\ &= P + A \frac{(1+i_n)^n - 1}{i_n(1+i_n)^n} - R_c(1+i_n)^{-n} \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中 LCC——生命周期成本;

$P$ ——方案初投资 (万元);

$A$ ——年运行费用 (万元/a);

$N$ ——经济寿命 (a);

$i_n$ ——折现率, 取 10%;

$R_c$ ——方案残值 (万元)。

净现值 ( $C_9$ ) 是用技术方案的全寿命周期内每年所发生的资金流入量, 减去其流出量所得的净现金流量, 按照一定的折现率, 折算到投资开始时的现值, 最后把此技术方案每年的折算值加起来的代数和作为评价技术方案的判据。若净现值大于零则方案可行, 且净现值越大, 方案越优, 投资效益越好。

动态投资回收期 ( $C_{10}$ ) 是把投资项目各年的净现金流量按基准收益率折成现值后, 再来推算投资回收期, 这就是它与静态投资回收期的根本区别。动态投资回收期就是净现值累计现值为零时的年份。

动态投资回收期 = (累计净现金流量现值出现正值的年份-1) + 上一年累计净现金流量现值的绝对值 / 出现正值年份净现金流量的现值

## 4.3 项目低碳建筑技术规划方案比选方法

### 4.3.1 常见项目方案评价方法

#### 1、定性分析法

定性分析法是评估人员在对评价对象进行了深入了解、分析的基础上, 结合自

身的经验、认知以及综合判断能力，参照评估标准，对评估指标进行分析判断，最终形成评估结论。在项目方案优选时，要根据项目的特点，分析各备选方案的优劣势，并结合项目的目标，从中选出最优方案。

## 2、价值工程法（功能评价系数法）

价值工程一种技术与经济紧密结合的技术经济分析方法，是以最低的全生命周期成本实现一定的产品或作业的必要功能，而致力于功能分析的有组织的活动。价值工程中的“价值”是指对象所具有的功能与获得该功能的全部费用之比，它不是对象的使用价值，也不是对象的交换价值，而是对象的比较价值，价值的大小取决于功能和成本，产品的价值高低表明产品合理有效利用资源的程度和产品物美价廉的程度。

价值工程有别于一般的投资决策理论。一般的投资决策理论研究项目的可行性，即从经济角度探讨项目是否值得投资，而价值工程着眼于全寿命周期成本，以提高产品价值为目标。

## 3、运筹学优选法

运筹学兼有逻辑的数学和数学的逻辑的性质，是系统工程学和现代管理科学中的一种基础理论和不可缺少的方法、手段和工具，已广泛应用到了服务经济、库存搜索、人口控制、时间表、资源分配、厂址定位、能源设计、生产可靠性等领域，是一种常用的定量评价方法。

运筹学解决实际问题的步骤一般为：确定目标、制定方案、建立模型及制定解法、求得结果。

## 4、专家系统（知识库）优选法

专家系统是一个智能计算机程序系统，其内部内置了大量的某个领域专家水平的知识、经验与技能，能够利用人类专家的知识 and 解决问题的方法来处理该领域的问题。专家系统是一个具有大量的专门知识与经验的程序系统，它应用人工智能技术和计算机技术，根据某领域一个或多个专家提供的知识和经验，进行推理和判断，模拟人类专家的决策过程，以便解决那些需要人类专家处理得复杂问题。

## 5、模糊综合评判法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法。该综合评价法根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价，即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。它具有结果清晰、系统性强的特点，能较好地解决模糊的、难以量化的问题，适合各种非确定性问题的解决。

## 6、定性与定量结合

在方案评价中，有些因素如可靠性、环境影响、环境保护等难以量化，因此，在低碳规划方案比选中，定量分析和定性分析相结合的方法比较适用。这些无法用经济技术指标来测算的，通常选择专家评分法进行评价，专家评分时会将定性和定量分析结合起来，并选择加权法计分。对另一些指标，如产品质量等，可以用技术经济指标表达，但不会直接参与产品经济性能核算，常用于专业设计方案比选。

可以看出，项目方案优选的方法由主观定性分析、简单的定量分析、数学规划发展到目前常用的层次分析法、模糊数学方法以及遗传算法，实现了单一目标局部分析发展到多目标决策分析，由静态分析发展为动态分析的进步。

### 4.3.2 基于层次分析法的灰色关联分析法简介

由于低碳建筑技术规划方案的比选更注重低碳效益及经济性，与一般的建设方案评选有一定差异。所以选择一种合适、科学的方案比选方法是非常重要的。

灰色关联分析（GRA）是一种多因素统计分析方法，它是以各因素的样本数据为依据用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序的。如果样本数据反映出两因素变化的态势（方向、大小、速度等）基本一致，则它们之间的关联度较大，反之关联度较小。与其他传统的多因素分析方法相比，灰色关联分析对数据要求较低且计算量小，得到了广泛应用。层次分析法（AHP）是一种得到了广泛应用的多准则决策方法，在经济发展规划、能源需求预测和供应规划、人才需求预测和教育规划、各种社会经济政策的评价等领域发挥了重要作用。AHP是指将一个复杂的多目标决策问题作为一个系统，将目标分解为多个目标或准则，进而分解为多指标（或准则、约束）的若干层次，通过定性指标模糊量化方法算出层次单排序（权数）和总排序，以作为目标或多方案优化决策的系统方法。

将灰色关联分析方法与层次分析法结合在一起,运用多目标决策思想,对备选方案进行全面完整的深入分析,充分消除主观评判,力求形成一套客观的方案比选方法。其具体步骤如下:

## 1、确定指标特征量矩阵及理想方案

多方案比选的过程实际就是有限个方案的多目标决策过程。设有  $m$  个备选方案,记为  $D_i (i=1,2, \dots, m)$ ; 各方案又有  $n$  个评价指标组成评判方案优劣的指标集,记作  $d_j (j=1,2, \dots, n)$ 。由此,可以得到  $m$  个方案的指标特征量矩阵(也称决策矩阵)。

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

理想方案是客观上可能出现的最好的方案,它不在  $m$  个备选方案中产生,是一个虚拟的方案。其指标值是根据此类项目的目标、资源供应能力、设计能力、方案性质以及各指标可能出现的最优值而定的。

设理想方案为  $D_0 = (d_1^0, d_2^0, \dots, d_n^0)$ , 则由此构成的  $(m+1)$  个方案的指标特征量矩阵为:

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_m \\ D_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \\ d_1^0 & d_2^0 & \dots & d_n^0 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

## 2、特征量矩阵的规范化

在低碳建筑技术规划方案的评价指标体系中,总能耗、总排放量、初投资、全生命周期成本、动态投资回收期等指标是愈小愈好的成本型指标;而可再生资源替代率、资源利用率、环境保护、环境协调以及净现值等则属于愈大愈好的效益型指标。这些指标往往有不同的量纲,且各方案的指标值差别较大。因此,为了消除这些偏差对结果的影响,需要对指标特征量矩阵  $\bar{D}$  做规范化处理,转化为规范化矩阵  $S$ 。为了使两种类型的指标在比选时均有相同的发展趋势,采用下式对  $\bar{D}$  做规范化处理。

$$\text{对于效益型指标, 令: } S_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_j^0} \quad (4-4)$$

$$\text{对于成本型指标, 令: } S_{ij} = \frac{d_j^0}{d_{ij}} \quad (4-5)$$

(4-4)、(4-5)两式中,  $d_{ij}$  为决策矩阵中第  $i$  个待决策方案的第  $j$  项实际值。显然  $0 \leq S_{ij} \leq 1$ , 且  $S_{ij}$  越大方案越优。因此,  $\bar{D}$  的规范化矩阵转化为式 4-6。

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \\ s_1^0 & s_2^0 & \dots & s_n^0 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

### 3、指标权重的确定

采用层次分析法确定指标的权重, 可以更客观科学地评价各方案。其具体步骤如下:

#### (1) 建立层次结构, 将评价体系层次化

根据对项目目标的分析, 将涉及的因素进行分组, 每一组在层次结构中作为单独的一层。对于方案评价问题, 通常划分为目标层、准则层、子准则层、方案层这几个层次。

#### (2) 构造判断矩阵

建立层次结构模型后, 就可据此构造判断矩阵。具体做法为对每一层次中的各元素根据相对重要性进行两两比较, 比较结果可以通过引入合适的标度 (1~9 标度) 用数值表示出来, 写成判断矩阵。一般来说, 构造的判断矩阵形式如表 4-1 所示, 其相应的重要性通过 1~9 标度法赋予一定的数值。具体赋值如表 4-2。

表 4-1 两两比较而得的判断矩阵

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C_1$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
$C_2$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{24}$	$C_{25}$
$C_3$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$	$C_{34}$	$C_{35}$
$C_4$	$C_{41}$	$C_{42}$	$C_{43}$	$C_{44}$	$C_{45}$
$C_5$	$C_{51}$	$C_{52}$	$C_{53}$	$C_{54}$	$C_{55}$



其中, (1)  $C_{ij} > 0$ ; (2)  $C_{ij} = 1/C_{ji}$  ( $i \neq j$ ); (3)  $C_{ii} = 1$  ( $i, j = 1, 2, \dots, 5$ ).

表 4-2 判断矩阵标度及其含义

序号	重要性等级	$C_{ij}$ 赋值
1	i, j 两元素同等重要	1
2	i 元素比 j 元素稍重要	3
3	i 元素比 j 元素明显重要	5
4	i 元素比 j 元素强烈重要	7
5	i 元素比 j 元素极端重要	9
6	i 元素比 j 元素稍不重要	1/3
7	i 元素比 j 元素明显不重要	1/5
8	i 元素比 j 元素强烈不重要	1/7
9	i 元素比 j 元素极端不重要	1/9

$C_{ij} = \{2, 4, 6, 8, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8\}$  表示重要性等级介于  $C_{ij} = \{1, 3, 5, 7, 9, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9\}$  之间。

由于在构造判断矩阵时, 需要对各因素进行两两比较, 可能会出现互相矛盾的结果。为了保证判断矩阵的一致性, 引入判断矩阵的一致性指标  $CI = (A_{max} - n) / (n - 1)$  及同阶平均随机一致性指标  $RI$  来检查决策者判断思维的一致性。判断矩阵的一致性指标  $CI$  与同阶平均随机一致性指标  $RI$  之比 ( $CI/RI$ ) 称为随机一致性比率, 记作  $CR$ 。平均随机一致性指标值如表 4-3 所示。

表 4-3 平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
$RI$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41

### (3) 进行层次单排序

层次单排序即是计算判断矩阵中, 下一层次各元素相对于上一层次与之有关系的元素的重要性次序, 是对底层因素赋以权重的一种方法。可以采用方根法确定各项的排序, 计算步骤为:

#### 1) 计算判断矩阵每一行元素的乘积

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-7)$$

2) 计算  $M_i$  的  $n$  次方根

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (4-8)$$

3) 对向量  $\bar{W} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \bar{w}_3, \bar{w}_4, \bar{w}_5]$  进行正规化处理,  $\bar{w}_i = \bar{w}_i / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j$ , 则

$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  即为所求的各项的权重向量。

4) 计算判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{max}$ 。

4、关联系数的计算

根据灰色关联分析法, 待决策方案  $D_i$  的决策矩阵  $S_i$  中元素的关联系数  $r_{ij}$  可由式 (4-9) 确定:

$$r_{ij} = \frac{\min_j \min_j (s_j^0 - s_{ij}) + p \max_j \max_j (s_j^0 - s_{ij})}{(s_j^0 - s_{ij}) + p \max_j \max_j (s_j^0 - s_{ij})} \quad (4-9)$$

式中  $r_{ij}$  ——与  $S^0$  在第  $j$  个因素处的关联系数;

$p$  ——分辨率系数, 在 0~1 之间取值, 一般取 0.5。

由式 (4-9) 可以计算得关联系数, 以矩阵形式表示为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

5、关联度的计算

关联度可以衡量指标序列相似程度, 是一个在 [0,1] 区间内变化的量。序列与理想方案的相似程度随关联度与 1 的趋近度而变化, 即关联度愈趋近于 1, 序列相似程度越大。关联度  $u_i$  的计算公式如下:

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (4-11)$$

6、结果分析

对关联度  $u_i$  进行从大到小排序, 选择关联度最大的方案作为最优方案, 并对关联度的排序结果和优选方案进行进一步分析说明。

### 4.3.3 灵敏度分析

灵敏度分析是研究与分析一个系统（或模型）的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法。在最优化方法中经常利用灵敏度分析来研究原始数据不准确或发生变化时最优解的稳定性。通过灵敏度分析还可以决定哪些参数对系统或模型有较大的影响。因此，灵敏度分析几乎在所有的运筹学方法中以及在对各种方案进行评价时都是很重要的。

在方案评价与比选中，灵敏度分析可以用来确定评价条件发生变化时备选方案的价值是否会发生变化或变化多少。例如，在利用评价表进行评价时，需要确定每一个分目标的权重系数和各分目标的评分数。这中间或多或少地会存在当事人的主观意识，不同的人可能会有截然不同的价值观念，因此就必须考虑当分配的权重系数或评分数在某一个范围内变化时，评价的结果将会产生怎样的变化。

在低碳建筑技术规划方案中进行灵敏度分析，可以看出在现有的指标体系下，哪些因素对方案比选的结果影响最大。在对个别方案的进一步敏感度分析中，也可以得到该方案优化的目标，从而使其更具竞争性。如对某一方案的初投资值进行灵敏度分析，即可以假设该方案的初投资值降低一定比例，考察其对整个方案比选结果的影响。由此，可以看出初投资这一因素在方案比选中的重要程度，同时也可以看出该方案的初投资值降低到何种程度时才有可能使方案入选。可以对相应的评价指标均进行相似的变化分析，进一步挖掘各个方案的优势所在，为深入优化方案提供依据。若在实际情形下可以实现此优化目标，则最优方案的比选结果也可能会随之改变。

### 4.4 单方案内部能源结构优化

对于大型项目群而言，其能源结构不是单一的，例如不会只使用外部电源，还需要使用内燃机或燃气锅炉，形成复合的能源结构，还可能使用多种技术对能源进行梯级利用。方案内部能源结构的确定，不仅与项目的能耗需求有关，也与项目周围的资源环境、能源供应量、项目建设的目标、投资管理等因素有关，是一个复杂的决策问题，可以将其抽象为运筹学问题。

一个合理科学的能源结构，可以最大化实现方案的目标，可以使各种资源得到充分利用，并使方案的能源消耗最小、成本最小。因此，对能源方案进行能源结构的优化，是十分必要且具有深刻意义的。

现阶段，各种不同的能源方案最终所消耗能源都可以转化为耗电量与耗气量。因此，可以将方案的目标视作耗电量与耗气量的函数，故能源方案的成本与电价、燃气价密切相关。一般而言，燃气价格波动要大于电价波动。因此，在评价方案时，能源的稳定性也要列入考察目标，即考察方案对电价与气价波动的接受能力。假设某方案运用了两种技术，设为 A 技术与 B 技术，分别消耗电和天然气。则该方案的一个目标是使方案对电价与气价的波动性最小。设电价与气价分别为  $p_1$ 、 $p_2$ ，A、B 技术所耗电量（特指从外部获得的电量）与耗气量分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 。则该目标可表述为  $x_1 p_1 + x_2 p_2$  的方差最小，这里  $p_1$  和  $p_2$  看做随机变量。根据概率论知识，得：

$$E(x_1 p_1 + x_2 p_2) = x_1 E(p_1) + x_2 E(p_2) \quad (4-12)$$

$$\begin{aligned} D(x_1 p_1 + x_2 p_2) &= E[x_1 p_1 + x_2 p_2 - E(x_1 p_1 + x_2 p_2)]^2 \\ &= D(p_1) x_1^2 + D(p_2) x_2^2 + 2COV(p_1, p_2) x_1 x_2 \end{aligned} \quad (4-13)$$

这时方案的数学模型表示为

$$\text{Min } f_1(x) = D(p_1) x_1^2 + D(p_2) x_2^2 + 2COV(p_1, p_2) x_1 x_2 \text{ (能源的价格风险)} \quad (4-14)$$

$$\text{min } f_2(x) = 0.095x_1 + 0.28x_2 \text{ (能源费用)} \quad (4-15)$$

$$\text{min } f_3(x) = 0.781x_1 + 1.86x_2 \text{ (碳排放)} \quad (4-16)$$

式中  $x_1$  ——项目从外部获得的电量，单位 MWh；

$x_2$  ——项目消耗的天然气量，单位  $\text{m}^3$ ；

$f_1(x)$  ——方案成本随耗电、耗气量和电价、气价变化的方差，此式表明科学的能源方案应使方案成本随耗电、耗气量及电价、气价的变化最小，即方案最稳定；

$f_2(x)$  ——方案因直接消耗能源产生的费用，单位万元，电价取为 0.95 元/KWh，天然气价格为 2.8 元/ $\text{m}^3$ ；

$f_3(x)$  ——方案由于耗电、耗气而产生的碳排放，此式意为最优方案的碳排放量应达到最小。

则模型的约束条件为:

$$\text{s.t. } x \in X \text{ (方案的可行条件).} \quad (4-17)$$

其中  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $X \subset R^n$ 。

方案的可行条件一般包括了以下方面: 满足项目的供热需求; 满足项目的制冷需求; 满足项目的生活热水需求; 满足项目的照明需求以及方案内部的其他能源消耗需求。运用 Matlab 等软件可以求解得此模型的最优解, 即为该能源方案的最优能源结构。

## 4.5 实证研究——武汉国际博览城项目二期低碳节能方案比选

### 4.5.1 武汉国际博览中心二期工程概况

武汉国际博览中心项目位于武汉市汉阳拦江堤路与滨江大道之间, 东侧紧邻规划建设的滨江大道, 南侧为隔规划居住区(武汉博览中心后期规划用地) 600m 为老关村, 西侧紧邻拦江堤路, 北侧紧邻规划四新北路, 隔四新北路为约 200m 为前进村。项目总用地面积 949932 m<sup>2</sup>, 总项目面积 1416000 m<sup>2</sup>, 不计容积率项目面积 78000 m<sup>2</sup>。其中展馆包含了 12 个展厅, 总项目面积 45.7 万 m<sup>2</sup>, 已获市发改委批准的投资额为 45 亿元, 目前已全面施工建设, 计划于今年年底建成并投入使用。另规划的博览中心配套设施项目包括一座 5 层的会议中心、一座 20 层的洲际酒店(含酒店式办公)、一座海洋乐园(含 4 层假日酒店)和两座 78 层超高写字楼等, 总投资约 69 亿元。

武汉国际博览中心总体上呈不规则“T”形, 项目以圆形广场为中心, 会展主场馆在南北两边以环状围合, 同时强化出东、西向的规划主轴线。会展主场馆西侧为条状的绿化景观带, 会议中心设于中心广场以东的主轴线上, 与展馆共同组成会展立体功能区, 会议中心也将成为此区域内的视觉焦点。会议中心西北两侧为两座超高层写字楼, 东侧为假日酒店, 假日酒店临滨江大道向长江展开, 海洋乐园位于洲际酒店北侧并与其裙楼相连通。

项目分三期建设, 一期建设内容包括 12 座会展展馆, 二期建设内容包括一座 5 层的会议中心、一座 20 层的洲际酒店(含酒店式办公)、一座海洋乐园(含 4 层假日酒店), 三期建设内容包括两座 78 层超高写字楼。具体项目经济技术指标见表 4-4。

表 4-4 项目技术经济指标一览表

项目	单位	技术指标	备注
用地面积	m <sup>2</sup>	949932	
项目面积	m <sup>2</sup>	1416000	
不计容面积	m <sup>2</sup>	78000	
容积率		1.49	
绿化率	%	35	绿化面积 332476m <sup>2</sup>
项目密度	%	54.4	
其中一期会展展馆	m <sup>2</sup>	466558	2层, 高度 27.5m, 由 12 个场馆组成
二期会议中心	m <sup>2</sup>	98118	5层, 高度 66m, 高度 31 个会议厅
洲际酒店	m <sup>2</sup>	200787	裙楼 4层, 裙楼高度 28m; 主楼 20层, 主楼高度 98m, 含酒店式办公, 位于南部
海洋乐园	m <sup>2</sup>	371012	海洋乐园 2层, 高度 93m; 含假日酒店 6层, 高度 38m
三期超高层写字楼	m <sup>2</sup>	279525	78层, 高度 318m, 5A 级写字楼
总停车位	辆	5958	--
其中一期	辆	3358	全部位于地面一层
二期	辆	2600	地下 1863 辆, 地面 737 辆
三期	辆	0	利用前期建设停车位

数据来源: 武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010), 武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

#### 4.5.2 低碳建设理念

推进项目节能减排是改善项目功能、提高能源利用效率、保护环境、加快经济增长方式转变、促进社会可持续发展的一项重要措施, 是建设节约型社会和落实国家能源安全战略的基本要求, 是我国“十一五”期间乃至今后相当长时期的一项重要任务。武汉国际博览中心作为被商务部列为国家重点支持的国际会展项目之一, 对响应国家节能减排政策, 为大型公用项目的节能减排起示范推广作用负有不可推卸的责任。

根据各级政府对国际博览中心区域在节能减排、资源节约型、环境友好型社会

建设的指示要求，建设单位从规划层面出发，对博览中心经营用地区域从布局、能源体系、可再生能源利用、水资源综合利用等方面着眼，融入区域绿色节能理念，结合经营性用地区域地理位置、环境资源条件及博览中心项目特点、资源需求情况，提出实现区域布局合理、能源高效利用、可再生能源合理充分利用等方针。打造低碳生态、绿色节能区域和绿色节能项目。

在“国际一流，国内领先”建设理念的指导下，武汉国际博览中心项目严格执行高标准，在项目节能减排方面，以《绿色项目评价标准》最高等级——三星级的要求来进行设计，以建低碳示范项目为己任。为了体现“建设环境共生项目，创造低碳生态生活”的低碳理念，其低碳目标主要体现一下四个特征：节能高效、环境友好、绿色生态、低排放。

### 1、节能高效

强调采用“整体系统”的设计方法，即从项目选址、项目形态、保温隔热、窗户节能、系统节能与控制等方面去整体考虑项目的设计方案。充分利用自然条件，尽量减少能源的输入，控制项目系统的整体能耗。

如将项目地址选在武汉新区四新组团的滨江地带，东临长江江滩，西至连通港路，北起四新北路，南至二环线，不仅可以充分利用长江的生态系统和水体条件，将江水源纳入项目的能源供应范围，减少对不可再生能源的需求和项目生态系统的再创造；而且将会展中心建成后带来的交通完美融入已有路网，避免重新组织交通及其所带来的环境影响，体现了对整个项目系统的规划。

### 2、环境友好

重视采用本地的文化、本地的原材料，尊重本地的自然、本地的气候条件以及本地经济发展大环境，在风格上尽量本地化。

会展逐渐成为第三产业中最具发展前景的朝阳产业，其对城市经济的拉动效益日益明显，武汉国际博览中心的建设，为武汉打造“中部会展之都”奠定了良好的基础，高档星级酒店的建设也是武汉旺盛需求的结果，这是对经济大环境的适应。同时，选址滨临长江，长江的生态环境将与会展中心的低碳项目交相辉映，长江充足的水源也能够满足会展中心用水需要，这是对本地自然以及气候的利用与适应。在



项目功能空间设计上,考虑到武汉的气候、环境特点,并根据洲际、假日酒店和海洋乐园对项目特色的高要求进行设计。如洲际酒店的四季厅,贯穿四层裙房,要求四季如春,植物茂盛,对空调要求较高。故设计时将此厅采用玻璃进行围合,使特殊的空调空间尽量减少,同时将四季厅的玻璃体设计为圆台形,使顶部采光面也尽量减少,这样既能达到项目的特殊需求,又充分利用气候环境使节能得到保证。

### 3、绿色生态

把项目的低碳节能与环境共存结合起来,项目设计时充分考虑项目的输入与输出,以及周围自然环境的输入与输出,把两者结合起来,使项目与环境一体化,在这个一体化的系统中,尽量做到输入与输出的平衡,构建“环境共生项目”。

如江水源和地源热的利用,将自然环境的能量输出转化为项目能量输入,减少了对不可再生能源的需求,降低了整个项目系统的温室气体排放。另外,冷热电联技术的应用以及能量转换站的建设,通过将系统暂时不用或者浪费的能量收集起来,进行转化,加以利用。增加系统内的碳汇也是平衡系统输入与输出的重要措施之一,博览中心的绿地率要求达到 35%以上,对吸收系统排放的二氧化碳、改善系统环境意义重大。

### 4、低排放

对于博览中心整个系统来说,低排放包含很多方面,如项目本体、交通体系、市政配套等。

降低项目碳排放的方向是减少化石能源的使用,充分利用新能源及清洁能源。如博览中心使用的太阳能光伏发电、地源热泵、江水源热泵等都是利用自然资源来降低系统对化石能源的需求。

在交通组织方面,积极打造绿色交通体系,一方面在园区内大力推广电瓶车以及公交车,另一方面通过科学的规划,合理的布局来减少交通距离,并且充分利用周围城市路网。

在市政配套方面,充分利用周围的垃圾及污水处理系统,减少系统对环境的污染。同时扩大绿化面积,增加碳汇,减少碳排放。据研究,在生态绿地空间中,不同的生物群落内都有碳贮存功能,其中,植被和土壤是碳贮存两的主体。根据 IPCC

(政府间气候变化专门委员会)于2000年提供的数据,植被可以有 $3.1tC/100m^2$ 的碳汇功能,可以粗略计算出,仅武汉国际博览城的 $332476$ 平方米的绿地面积,就能够减少碳排放 $10306.76t$ ,减碳数量十分可观。

总之,武汉国际博览中心旨在使项目与自然完美融合,尽量实现项目用能的自给自足,减少向大自然的索取,真正做到节能减排,成为低碳项目的精品工程。

其中,武汉新城国际博览中心二期项目主要包括国际会议中心、假日酒店、海洋世界和超高层写字楼等项目,总项目面积为 $915747m^2$ 。项目二期能源站主要解决假日酒店、洲际酒店、海洋世界三大项目的采暖、制冷及生活热水负荷,服务项目面积约 $497167m^2$ 。经测算,二期能源站空调设计冷负荷 $43.6MW$ ,设计热负荷 $28.7MW$ ,生活热水设计负荷 $11.12MW$ ,设计电负荷 $42.216MW$ 。二期项目规模庞大,能源需求巨大,对此进行低碳建筑技术规划方案的比选及优化是非常有意义且必要的。

### 4.5.3 备选方案简介

#### 1、方案1-常规方案

常规方案为冷水机组承担夏季空调负荷,洲际酒店、海洋中心及假日酒店的全年热水负荷及冬季采暖负荷由燃气锅炉解决。系统配置为:燃气锅炉总供热容量 $39.8MW(56.8t/h)$ ,其中 $28.7MW$ 供暖, $11.1MW$ 供生活热水;冷水主机总供冷容量 $43.6MW$ 。

#### 2、方案2-常规方案+冰蓄冷

冰蓄冷空调技术是指在用电低谷时用冷机制冰,并暂时蓄存在蓄冰装置中,在用电高峰利用冷量的技术。由此可以实现对电网的“削峰填谷”,有利于降低发电装机容量,维持电网的安全高效运行。但冰蓄冷技术的应用,受项目物使用功能、空调负荷特性、当地能源政策、电力峰谷时段等因素的限制,是否选用需经过经济分析确定。其系统配置为基载主机 $16.01MW$ ,占设计冷负荷的 $37\%$ ;蓄冷主机 $16.41MW$ ,占设计冷负荷的 $38\%$ ;冰槽总蓄冰量 $90.49MW\cdot h$ ,最大小时供冷量 $10.87MW$ ,占设计冷负荷的 $25\%$ 。

### 3、方案 3-热电联供

热电冷联供是能源梯级利用的一种方式。据统计,当全年有稳定热负荷时,BCHP 系统才是高效的能源利用方式。二期项目中,由于酒店生活热水需求及海洋馆大量热水需求,全年具有较稳定热负荷,具备条件下尽量采用热电联供模式。结合该项目特点,采用以热定电原则及电力安全性原则,确定其系统配置为:按以热定电原则确定发电机容量,热负荷取生活热水最低负荷的 55%。内燃机发电容量 4.5MW,发电效率 25%,占基础电负荷的 13%。缸套水和烟气余热供热容量 3.7MW,产热效率 60%,占生活热水总负荷的 33%,不足部分由燃气锅炉调峰补充,生活热水燃气锅炉供热容量 7.4 MW。供暖锅炉供热容量 28.7 MW,冷水机组制冷容量 43.6 MW。

### 4、方案 4-江水源热泵+燃气锅炉

生活热水由于供水温度要求较高,江水源热泵很难达到供水温度要求,故选择江水源热泵提供冬夏季供暖空调,燃气锅炉提供生活热水。系统配置为:江水源热泵总供冷容量为 43.6MW,总供热容量为 28.7 MW,燃气锅炉容量为 11.1 MW。

该方案的关键技术之一是选择地表水源热泵系统取水、退水及水处理的方案,项目所在地处于长江下游、淤泥较多,分析常用的各种取水方式原理及应用特点,初步判断该项目不便采用渗滤取水方式,可以采用直接取水方式。但还是需进行进一步技术论证。

### 5、方案 5-江水源热泵+热电联供

综合方案 3、4 的优势,将常规能源高效利用与可再生能源合理应用相结合,组合构建复合式能源方案。机组配置为:江水源热泵供热容量 28.7MW,供冷容量 43.6MW;内燃机发电容量 3.26MW,发电效率 40%,占基础电负荷的 14%。缸套水和烟气余热供热容量 3.67 MW,产热效率 45%,占生活热水总负荷的 33%,不足部分由燃气锅炉调峰补充,生活热水燃气锅炉供热总量 7.4 MW。

### 6、方案 6-冷热电三联供

采用以热定电原则及电力安全性原则确定系统配置:按以热定电原则确定发电机容量,热负荷取生活热水最低负荷的 55%和采暖负荷的 40%。内燃机发电容量 7MW,发电效率 25%,占基础电负荷的 28.9%。缸套水和烟气余热供热容量 16.8 MW,

产热效率 60%，由烟气热水型冷温水机组提供冬、夏季的稳定热负荷和冷负荷，供热量 15.2 MW，占生活热水和采暖空调的 38%，供冷量 18.5 MW，占夏季总热负荷的 40%，冬季不足部分由燃气锅炉调峰补充，燃气锅炉供热容量 24.6 MW，占总热负荷的 62%；夏季由电制冷机组调峰补充，供冷量 25.1 MW，占总冷负荷的 60%。

#### 4.5.4 各方案评价指标测算

综合低碳建筑技术规划方案比选指标体系、该项目相关数据获取的具体情形，确定以下比较因素：总能耗、总碳排放量、初投资、全生命周期成本、净现值。

##### 1、初投资估算

初投资估算以各拟定方案中的系统配置、项目基本情况及相关设备询价结果为依据进行计算。初投资 ( $Q$ ) 由机房造价 (含设备) ( $Q_1$ )、机房土建费 ( $Q_2$ )、配电费 ( $Q_3$ ) 和天然气接口费 ( $Q_4$ )、管网造价 ( $Q_5$ ) 等部分构成，如式 (4-18) 所示。各方案的初投资价值测算结果如表 4-5 所示。

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (4-18)$$

表 4-5 各方案初投资 (万元)

方案名称	常规	常规+冰蓄冷	热电联供	江水源热泵	热电联供+江水源	冷热电三联供
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
机房造价	5958	7878	7151	8877	9892	13881
机房土建	2983	2983	2983	2983	2983	2983
配电费	500	700	600	480	600	900
天然气接口费	1943	1600	1664	1894	1615	104
管网造价	45	45	47	13	15	57
总计	11429	13207	12445	14257	15105	15118
单位造价 (元/m <sup>2</sup> )	230	266	250	287	304	304
投资增量比	-	16%	9%	25%	32%	32%

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010)，武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

# 华中科技大学博士学位论文

各方案初投资从小到大依次为方案1<方案3<方案2<方案4<方案5<方案6。

## 2、全年运行能耗

依据拟定方案中低碳建设规划，可以得到如下表4-6所示各能源方案全年分项能耗计算结果。

表4-6 各能源方案全年分项能耗计算结果

项目名称	冷水机组耗电	空调末端耗电*	制冷耗电		采暖耗气	热泵耗电	空调末端耗电*	生活热水耗气	产电量
	夏季	夏季	夏季	冬季			冬季		
	kWh	kWh	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>		kWh	kWh	m <sup>3</sup>	kWh
方案1	6657549	4438366	-	1343977			3440159	1128745	
方案2	7798306	5799004	-	1343977			3440159	1128745	
方案3	6657549	4438366	-	1343977			3440159	1554950	5125505
方案4	6657549	4793435	-			2362711	1575141	1128745	
方案5	6657549	4793435	-			2362711	1575141	1554950	5125505
方案6	1464661	4438366	4350252	3440159	1594916		10186	7718	18097433

注：\*是指除冷热源耗电以外的空调耗电，包括冷热水泵、冷却塔、AHU、PAU、FCU、FAU等设备的耗电。

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划（2010），武汉新城国际博览中心有限公司（2010）

## 3、全年运行费用

根据表4-6中测算出的各方案的能源节约形式和数量，计算出各方案的全年运行节省的能源费用，计算结果如表4-7所示。能源价格按照武汉市现行的价格标准执行，电价按0.91元/度，天然气按2.63元/m<sup>3</sup>计算。

表4-7 各方案年运行费用

方案描述		年运行费用				
		气费	电费	水费	维护+人员	合计
		万元	万元	万元	万元	万元
方案1	常规	650	1323	74	238	2284
方案2	常规+冰蓄冷	650	1258	74	263	2246
方案3	热电联供	814	856	74	258	1995
方案4	江水源	297	1400	67	294	2065

续表 4-7

方案 5	热电联供+江水源	460	934	67	311	1773
方案 6	三联供	2063	-601	74	311	1847

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划（2010），武汉新城国际博览中心有限公司（2010）

#### 4、全年累积能耗及碳排放量

全年累积能耗及碳排放量如下表 4-8 所示：

表4-8 主要计算基础数据

折算方式		数值	单位
电折标煤		0.374	kg/kWh
气折标煤		1.2	kg/m <sup>3</sup>
二氧化碳排放系数	电	0.781	kg/kWh
	气	1.86	kg/m <sup>3</sup>

数据来源：《综合能耗计算通则》 GB/T2589-2008（2008）

#### 5、能源方案全寿命周期成本分析

生命周期成本（life cycle cost, LCC）是指系统设备生产至最后报废期间所需费用的总和，费用主要构成包括初投资、年运行费、设备的经济寿命及折旧费等，如下表 4-9 所示。

表 4-9 各能源方案全年累积能耗及碳排放量比较

方案描述		耗气量	耗电量	折标煤	CO <sub>2</sub>	节能率	减排率	可再生能 源替代率
		万 m <sup>3</sup>	MWh	t	t			
方案 1	常规	247	14536	9680	15941	-	-	-
方案 2	常规+冰蓄冷	247	16138	10391	17426	-7.35%	-9.32%	-
方案 3	热电联供	309	14536	8830	13092	8.78%	17.87%	-
方案 4	江水源	113	15389	7692	14113	20.53%	11.47%	24.02%
方案 5	热电联供+江水源	175	15389	6843	11264	29.31%	29.34%	27.01%
方案 6	三联供	784	9543	10186	7718	-5.23%	51.59%	-

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划（2010），武汉新城国际博览中心有限公司（2010）

根据各方案投资结果及公式（4-1），计算出各方案的生命周期成本，如表 4-10 所示。为了对各方案的生命周期成本作横向对比，经济寿命统一取 15 年，设备残值

率取 10%。

表 4-10 各方案的生命周期成本

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
	常规	常规+冰蓄冷	热电联供	江水源	热电联供+江水源	三联供
初投资 (万元)	11429.0	13207.0	12445.0	14257.0	15105.0	15118.0
年运行费用 (万元/a)	2284.0	2246.0	1995.0	2065.0	1773.0	1847.0
经济寿命 (a)	15	15	15	15	15	15
方案残值 (万元)	1142.9	1320.7	1244.5	1425.7	1510.5	1511.8
生命周期成本 (万元)	77126.6	77764.5	69770.8	73561.3	65955	68105

注：\*表示方案 3、5、6 的经济寿命可为 25 年。

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010)，武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

表 4-9 直观反映了各方案生命周期成本的大小。从表中可以看出，在同等折现率和经济寿命的基础上，各方案的生命周期成本从小到大依此为：方案 5<方案 6<方案 3<方案 4<方案 1<方案 2。

## 6、财务分析

### (1) 静态投资回收期

静态投资回收期是反映投资方案清偿能力的重要指标。静态投资回收期是指在不考虑资金时间价值的条件下，以项目方案的净效益回收其总投资（包括建设投资和流动资金）所需要的时间，计算公式如下：

$$\text{静态投资回收期} = \text{原始投资额 (I)} / \text{每年现金净流量 (A)}$$

在该项目中，以方案 1（常规能源方案）为基础，其它方案相对方案 1 的增量投资为原始投资额 (I)，相对节约的年运行费用为年现金净流量 (A)，计算各方案相对方案 1 的静态投资回收期，结果见表 4-11 所示。



表 4-11 各方案的静态投资回收期

系统方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
增量投资 (万元)	-	1778	1016	2828	3676	3689
相对节约量 (万元)	-	38	289	219	511	437
静态投资回收期 (a)	-	46.8	3.5	12.9	7.2	8.4

数据来源: 武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010), 武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

静态回投资回收期越小, 表明资金回收速度越快。从上表中可以看出, 静态回收期从小到大依次为方案 3<方案 5<方案 6<方案 4<方案 2。

### (2) 动态投资回收期

动态投资回收期就是把投资项目各年的净现金流量按基准收益率折成现值后, 再来推算投资回收期, 这就是它与静态投资回收期的根本区别。动态投资回收期就是净现值累计现值为零时的年份。

假设项目的基准收益率为 10%, 则各方案的动态投资回收期可见表 4-12。

表 4-12 各方案的动态投资回收期

系统方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
增量投资 (万元)	-	1778	1016	2828	3676	3689
相对节约量 (万元)	-	38	289	219	511	437
静态投资回收期 (a)	-	>60	4	53.8	11.1	15.3

数据来源: 武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010), 武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

动态回投资回收期越小, 表明资金回收速度越快。从上表中可以看出, 静态回收期从小到大依次为方案 3<方案 5<方案 6<方案 4<方案 2。

### (3) 净现值

该项目中, 以方案 1 (常规能源方案) 为基础, 其它方案相对方案 1 的增量投资为现金流出量 (CO), 相对节约的年运行费用为现金流入量 (CI),  $i_c$  取 6%, 计算结果如表 4-13 所示。

表 4-13 各方案的净现值 (万元)

方案 年份	方案 1 常规	方案 2 常规+冰蓄冷	方案 3 热电厂供	方案 4 江水源	方案 5 热电联供+ 江水源	方案 6 三联供
1	0.0	-1581.8	-660.9	-2371.8	-2877.3	-2956.4
2	0.0	-1550.4	-422.1	-2190.8	-2455.0	-2595.2
3	0.0	-1521.9	-204.9	-2026.3	-2071.0	-2266.9
4	0.0	-1495.9	-7.5	-1876.7	-1722.0	-1968.4
5	0.0	-1472.8	171.9	-1740.7	-1407.7	-1697.1
6	0.0	-1450.9	335.0	-1617.1	-1116.3	-1450.4
7	0.0	-1431.4	483.3	-1504.7	-854.4	-1226.1
8	0.0	-1413.6	618.2	-1402.6	-615.7	-1026.1
9	0.0	-1397.5	740.7	-1309.7	-399.0	-836.9
10	0.0	-1382.9	852.1	-1225.2	-201.9	-668.5
11	0.0	-1369.6	953.4	-1148.5	-22.8	-513.5
12	0.0	-1357.4	1045.5	-1078.7	140.0	-376.1
13	0.0	-1346.4	1129.2	-1015.3	288.0	-249.5
14	0.0	-1336.4	1205.3	-957.6	422.6	-134.4
15	0.0	-1327.3	1274.5	-905.2	544.9	-29.8
16	0.0	-1319.1	1337.4	-857.5	656.1	65.3
17	0.0	-1311.5	1394.6	-814.2	757.2	151.8
18	0.0	-1304.7	1446.4	-774.8	849.1	230.4
19	0.0	-1298.5	1493.8	-739.0	932.7	301.8
20	0.0	-1292.8	1536.8	-706.4	1008.6	366.8
21	0.0	-1287.7	1575.8	-676.8	1077.7	425.8
22	0.0	-1283.1	1611.3	-649.9	1140.4	479.5
23	0.0	-1278.8	1643.6	-625.5	1197.5	528.3
24	0.0	-1274.9	1673.0	-603.3	1249.4	572.7
25	0.0	-1271.4	1699.6	-583.0	1296.5	613.0

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划（2010），武汉新城国际博览中心有限公司（2010）。

由表 4-13 中数据可以得出结论：

①在 25 年内，方案 3、方案 5 和方案 6 分别在第 5 年、第 12 年和第 16 年 NPV 大于 0，即开始产生投资收益。由于考虑机会成本的因素，投资回收年限比静态投资回收期长。

②可以看出，通过比较 NPV，与方案 1 相比，方案 2、方案 4、方案 6 没有投资收益。

(4) 内部收益率

内部收益率是衡量投资方案盈利能力的一个重要指标。内部收益率的实质是使各投资方案在计算期内各年净现金流量的现值累计等于零时的折现率。也就是说，在这个折现率时，项目的现金流入的现值和等于其现金流出的现值和。

采用内插法，不同方案的内部收益率计算结果如表 4-14 所示。

表 4-14 各方案的内部收益率

系统方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
增量投资 (万元)	-	1778	1016	2828	3676	3689
相对节约量 (万元)	-	38	289	219	511	437
静态投资回收期 (a)	-	-	39.7%	6.5%	15.6%	12.6%

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010)，武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

从表 4-14 中可以看出，方案 3、5、6 都具有投资价值，均超过了社会平均收益率 10%。

4.5.5 方案综合评价

1、各低碳建筑技术规划方案综合比较

将各能源方案论证结果进行比较，结果如表 4-15 所示。

表 4-15 各能源方案综合比较一览表

方案描述	总能耗	总排放量	初投资	寿命周期成本	静态投资回收期	动态投资回收期	净现值	内部收益率	
	tcc	tCO <sub>2</sub>	万元	万元	年	年	元	%	
方案 1	常规	9679.8	15941.2	11429.3	77126.6	-	0	10%*	
方案 2	常规+冰蓄冷	10391.0	17426.4	13207.2	77764.5	46	>60	-	
方案 3	热电联供	8830.2	13092.4	12445.2	69770.8	3.5	4	1699.6	39.50%
方案 4	江水源	7692.4	14113.3	14257.2	73461.3	12.9	53.8	-583.0	6.50%
方案 5	热电联供+江水源	6842.8	11264.4	15104.8	65955	7.2	11.1	1296.5	15.60%
方案 6	三联供	10185.7	7717.9	15118.3	68105	8.4	15.3	613	12.60%

\*社会平均收益率取 10%。

2、基于层次分析法的灰色关联分析法方案比选

(1) 建立方案比选结构模型

结合前文的分析与该项目的特点，将该项目中方案比选涉及的因素综合后建立如图 4-2 所示的结构模型。

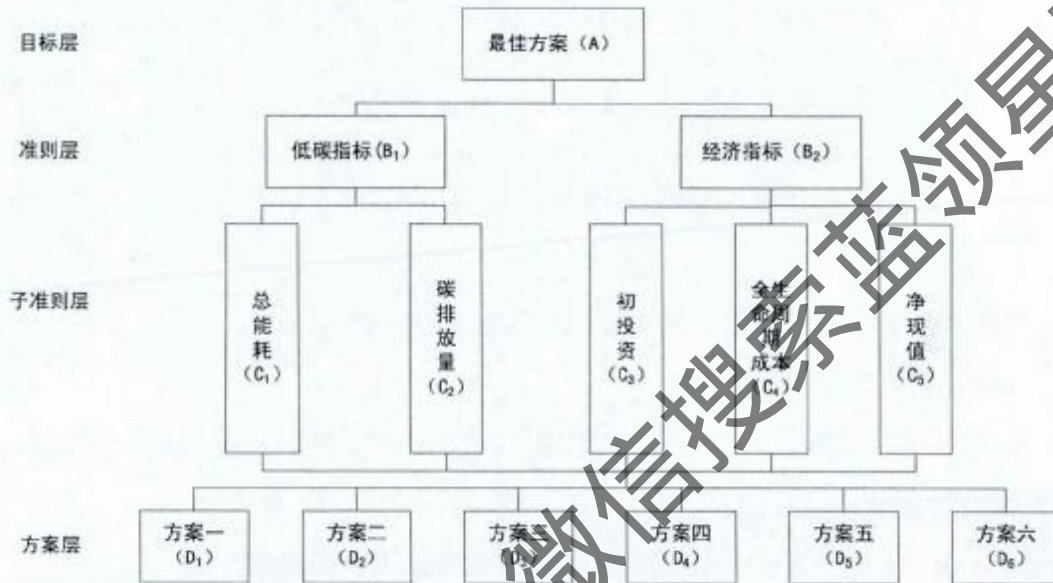


图 4-2 层次结构模型

(2) 确定指标特征量矩阵及理想方案

在该项目中，由于建设规模庞大，各能源方案结构复杂，指标值之间差距也较大，理想方案的确定并不容易。在此采取将各指标中的最优值取整后作为最优方案的该项指标值（由于灰色关联度分析法比选时，只是比选各方案与理想方案的趋近度，因此理想方案的取值如何并不会影响最终结果，故可以采取简单的方法进行确定）。则该项目的特征量矩阵为：

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9679.8 & 15941.2 & 11429.3 & 77126.6 & 0 \\ 10391.0 & 17426.4 & 13207.2 & 77764.5 & -1271.4 \\ 8830.2 & 13092.4 & 12445.2 & 69770.8 & 1699.6 \\ 7692.4 & 14113.3 & 14257.2 & 73561.3 & -583 \\ 6842.8 & 11264.4 & 15104.8 & 65955 & 1296.5 \\ 10185.7 & 7717.9 & 15118.3 & 68105 & 613.0 \\ 6500 & 7500 & 15000 & 65000 & 2000 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

(3) 规范化特征量矩阵

在该项目所取的指标中，仅净现值为效益型指标，即净现值越大方案越优。根据式 (4-4)、(4-5) 可确定该项目的规范化矩阵如下所示：

$$S = \begin{bmatrix} 0.672 & 0.470 & 0.962 & 0.843 & 0 \\ 0.626 & 0.430 & 0.833 & 0.836 & -0.636 \\ 0.736 & 0.573 & 0.884 & 0.932 & 0.850 \\ 0.845 & 0.531 & 0.772 & 0.885 & -0.292 \\ 0.950 & 0.666 & 0.728 & 0.986 & 0.648 \\ 0.638 & 0.972 & 0.728 & 0.954 & 0.307 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

(4) 确定权重

运用层次分析法确定该项目的各个指标项的权重，过程如下：

① 构造判断矩阵

在该项目的准则层中，认为  $B_1$ 、 $B_2$  重要性不同。在该项目的准则层与子准则层，对所列元素进行两两比较，列出判断矩阵如表 4-16 至表 4-18 所示。

表 4-16 目标层-准则层的判断矩阵 A-B 及 W 值

A	$B_1$	$B_2$	W
$B_1$	1	1/5	0.167
$B_2$	5	1	0.833

表 4-17 准则层-子准则层的判断矩阵 B-C 及 W 值

$B_1$	$C_1$	$C_2$	W
$C_1$	1	3	0.75
$C_2$	1/3	1	0.25

表 4-18 准则层-子准则层的判断矩阵 B-C 及 W 值

$B_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	W
$C_3$	1	5/4	5/7	0.297
$C_4$	4/5	1	4/7	0.287
$C_5$	7/5	7/4	1	0.416

② 进行层次单排序

对判断结构进行层次单排序，计算得权重结果如式(4-21)所示。

$$w = \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0.042 \\ 0.247 \\ 0.239 \\ 0.347 \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

(5) 关联系数的计算

可计算得该项目的关联系数矩阵为：

$$R = \begin{bmatrix} 0.669 & 0.555 & 0.739 & 0.813 & 0.397 \\ 0.640 & 0.537 & 0.853 & 0.806 & 0.646 \\ 0.718 & 0.608 & 0.800 & 0.914 & 0.820 \\ 0.815 & 0.586 & 0.939 & 0.858 & 0.337 \\ 0.938 & 0.666 & 1 & 0.989 & 0.654 \\ 0.648 & 0.968 & 0.999 & 0.944 & 0.487 \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

(6) 关联度的计算

由各指标的权重值与关联系数可以计算得各方案的综合关联度，结果如表 4-19 所示。

表 4-19 综合关联度

方案	方案 1: 常规	方案 2: 常规+冰蓄冷	方案 3: 热电联供	方案 4: 江水源	方案 5: 热电联供+江水源	方案 6: 冷热电三联供
综合关联度 $\alpha$	0.720	0.641	0.867	0.680	0.824	0.739

(7) 比选结果

由表 4-19 可以很明显看出，方案 3 优于其他方案，为最佳方案，方案 5 次之。故选其作为该项目的能源方案。

3、灵敏度分析

对该项目中的其他备选方案进行灵敏度分析，主要对在各指标项中较占据优势的方案进行进一步分析，这样可以更清晰明确地看出如何对落选方案进行优化，才可能使其被选中。对项目的后续发展与进一步优化有深刻意义。

假设准则层及子准则层的权重设定不变，对各方案在子准则层的指标值变化进

行灵敏度分析。即讨论各方案的总能耗、总排放量、初投资、全生命周期成本以及净现值发生变化时，对选择方案结果的影响。

(1) 总能耗的变化

考虑到方案的差异性，对个别方案的变化进行分析。因在表 4-19 中可以看出，除基础方案外，方案五的最终结果与方案三最相近。故选取方案 5 进行进一步的研究。由于项目的全年总能耗由用电耗气量折算得来，且二期项目中用气主要为酒店供应热水，其供应量较稳定。而耗电量还有降低空间。则若方案五中耗电量可以降低 6.41%，则项目的全年总能耗可以降低 5%，其分析结果如表 4-20 所示。

表 4-20 方案五总能耗降低 5%时的方案选择

	指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
总能耗	$C_1$	0.125	0.713	0.686	0.756	0.841	0.999	0.693
总排放	$C_2$	0.042	0.607	0.589	0.657	0.636	0.710	0.967
初投资	$C_3$	0.247	0.956	0.830	0.876	0.782	0.751	0.750
生命周期成本	$C_4$	0.239	0.839	0.833	0.922	0.877	0.983	0.947
净现值	$C_5$	0.347	0.450	0.333	0.845	0.388	0.700	0.541
综合关联度 $u$			0.7074	0.6301	0.8502	0.6692	0.8180	0.7265

可以看出，此时最佳方案仍为方案三。由于总能耗对最终结果的影响比重较小，同时此次变化幅度较小，故最终结果并无不同。在后面的分析中，将进一步加大变化的幅度。

(2) 总排放量的变化分析

因在表 4-19 中可以看出，方案五的最终结果与方案三最相近，对其进行进一步分析。若方案五的耗电量降低 12.8%，则其总排放量降低 10%。对此进行分析，结果如表 4-21 所示。

表 4-21 方案五总排放量降低 10%时的方案选择

	指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
总能耗	$C_1$	0.125	0.726	0.698	0.769	0.855	0.958	0.705
总排放	$C_2$	0.042	0.617	0.6	0.668	0.647	0.772	0.983
初投资	$C_3$	0.247	0.972	0.844	0.891	0.795	0.763	0.763
生命周期成本	$C_4$	0.239	0.853	0.847	0.939	0.892	0.999	0.963
净现值	$C_5$	0.347	0.458	0.339	0.859	0.394	0.711	0.55
综合关联度 $u$			0.7195	0.6410	0.8668	0.6803	0.8261	0.7389

可以看出,此时最佳方案仍为方案三。由于总排放量对最终结果的影响比重较小,同时此次变化幅度较小,故最终结果并无不同。在后面的分析中,将进一步加大变化的幅度。

由以上两个因素的分析结果可以看出,由于方案三在净现值这一权重最大的比较因素中占据极大的优势,故各方案整体指标值发生变化时结果并不会发生改变。因此在后面的分析中,只针对个别方案的指标值变化进行分析。

### (3) 初投资的变化分析

方案五的初投资由机房造价、管网造价、机房土建、配电费及天然气接口费组成,经过分析可以看出,各方案的管网费用相同,可降低空间较小,天然气接口费较低,可以忽略。故若机房造价、机房土建及配电费能够降低 25%,方案五的初投资可以降低 20%,生命周期成本降低了 10%,净现值增加了 3%,其结果如表 4-22 所示。

表 4-22 方案五初投资降低 20%时的方案选择

	指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
总能耗	$C_1$	0.125	0.738	0.709	0.782	0.867	0.975	0.717
总排放	$C_2$	0.042	0.628	0.61	0.68	0.658	0.785	0.999
初投资	$C_3$	0.247	0.989	0.859	0.906	0.808	0.932	0.776
生命周期成本	$C_4$	0.239	0.766	0.762	0.822	0.791	0.949	0.837
净现值	$C_5$	0.347	0.465	0.345	0.874	0.401	0.723	0.563
综合关联度 $\alpha$			0.7073	0.6283	0.8498	0.6638	0.8627	0.7187

此时,方案五优于方案三。综合考虑能源供应、节能效益,方案五有如下优势:

- (1) 对电力的需求相对平衡,缓解电、气能源紧张局面;
- (2) 具最佳节能减排效益,作为项目低碳亮点工程,获取相应优惠政策支持;
- (3) 江水源热泵的使用,使项目项目可再生能源利用率至少提高 25%~30%;

故若方案五的初投资能够降低 20%,并考虑其在总能耗、总排放量、生命周期成本方面占据的优势,可以选取为能源方案。

### (4) 生命周期成本的变化分析

由表 4-15 可以看出,方案六的总排放量最低,在低碳指标中占据优势。但其初投资较高、净现值较低,使它在生命周期成本方面的优势没能表现出来,影响了最



终的选择结果。经过分析，可以看出影响方案六结果的主要因素是年运行费用。经过试算，发现若方案六的年运行费用降低 27.78% 时，其生命周期成本降低了 8.5%，净现值增加为原来的 4.7 倍，此时分析结果如表 4-23 所示。

表 4-23 方案六生命周期成本降低 8.5% 时的方案选择

指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
$C_1$	0.125	0.711	0.681	0.758	0.854	0.971	0.689
$C_2$	0.042	0.596	0.577	0.65	0.627	0.707	0.999
$C_3$	0.247	0.987	0.842	0.894	0.787	0.752	0.752
$C_4$	0.239	0.741	0.737	0.801	0.768	0.843	0.892
$C_5$	0.347	0.432	0.346	0.646	0.388	0.578	0.985
综合关联度 $\mu$		0.6847	0.6135	0.7585	0.6456	0.7389	0.8688

可以看出，此时方案六为最佳方案。方案六在各备选方案中排放量最小，对环境保护及协调具有重大意义，也更加符合该项目的定位。故若方案六的年运行费用可以降低 27.78%，可以优先选择方案六。

#### (5) 净现值的变化分析

由净现值的计算公式可知，净现值主要受各方案相对方案 1 的增量投资（作为现金流出量）、相对节约的年运行费用（作为现金流入量）的影响。

方案二中的冰蓄冷技术作为一种新兴的空调系统技术，可以实现对电网的“削峰填谷”，有利于电网的稳定运行，还可以延长设备寿命，具有一定的优势。故净现值分析以方案二为例进行。由表 4-9 可以看出，方案二的使用寿命成本及净现值不具有优势主要是由于年运行费用很高。经过试算，发现当方案二的年运行费用降低 17.23% 时，净现值增加为原来的 3.73 倍，生命周期成本降低 10%，其比选结果如表 4-24。

表 4-24 方案五净现值增加 40% 时的方案选择

指标	权重	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五	方案六
$C_1$	0.125	0.649	0.618	0.699	0.802	0.935	0.627
$C_2$	0.042	0.532	0.514	0.586	0.563	0.645	0.969
$C_3$	0.247	0.954	0.789	0.847	0.73	0.693	0.692
$C_4$	0.239	0.681	0.743	0.745	0.71	0.79	0.763
$C_5$	0.347	0.374	1.001	0.539	0.338	0.488	0.42
综合关联度 $\mu$		0.6316	0.8186	0.6863	0.5912	0.6733	0.6181

可以看出，此时方案二优于方案三。

方案二具有如下优势：

- (1) 在适当的分时电价条件下，降低空调系统的运行费用；
- (2) 制冷机组的容量小于常规空调系统，空调系统相应的冷却塔、水泵、输变电系统容量减少；
- (3) 可以作为稳定的冷源供应，提高空调系统的运行可靠性；
- (4) 制冷设备大多处于满负荷的运行状况，减少开停机次数，延长设备寿命；
- (5) 对电网进行削峰填谷，有利于电网运行的稳定性、经济性，降低发电装机容量。

因此，若方案二中的年运行费用能够降低 17.23%，可以考虑采用。同时也可以推广冰蓄冷空调技术的应用，推进节能技术的发展。

#### 4.5.6 方案比选结论

1、 增加投资，不一定会降低系统的总能耗与总排放量。如表 4-10 中方案二与方案六的数据所示。这与系统的配置及使用条件设置有关。

2、 选用基于层次分析法的灰色关联度分析法进行方案比选，结果为方案三是最优方案。方案三无论在节能技术方面，或者经济效益分析方面，都没有占据特别大的优势，但是其综合性能最强。

3、 敏感度分析表明，在该项目中，净现值对比选结果最敏感。这与实际情况相符合。方案五与方案三最为接近，其总能耗最低，生命周期成本也最低，但净现值相对较低，故选用需谨慎。

4、 方案二具有先进的技术，但经济效益不高。若年运行费用能够降低 17.23%，可以考虑采用。方案六在低碳节能方面具有优势，但其年运行费用过高，只有降低 27.78% 时才可以考虑选取。

#### 4.5.7 方案内部能源结构优化

在该项目中，几个方案的能源除了电外还有天然气。下面引入能源的价格风险

最小这个目标构建数学模型。设能源方案如图 4-3 所示。

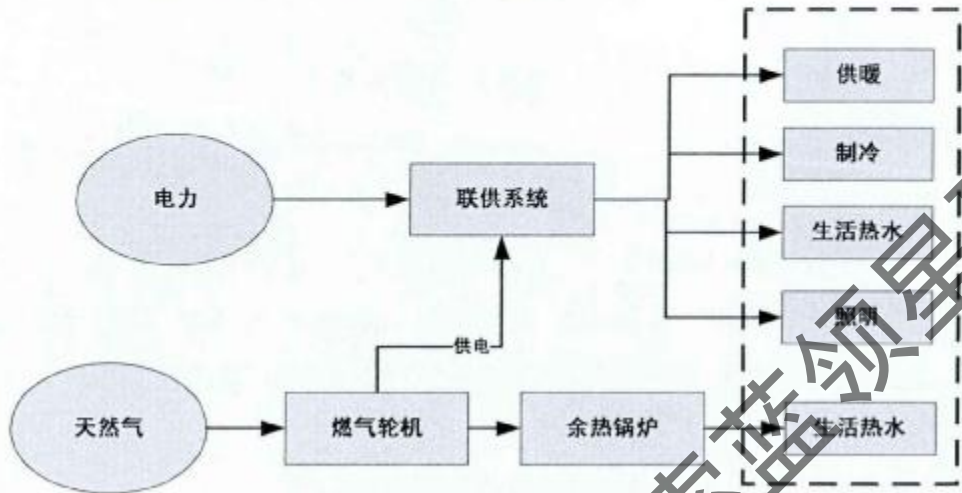


图 4-3 项目的能源方案结构

图中的联供系统除使用外部电源外还使用燃气轮机发的电。燃气轮机以天然气为燃料，每千  $m^3$  的天然气产生 9.56 MWh 电。余热锅炉的热量用来供生活热水，是产生的电能的 1.2 倍。

设全年电和天然气的需求量分别为  $x_1$  (MWh) 和  $x_2$  (千  $m^3$ )。2007 年~2011 年五年间每个季度武汉市电价和天然气价格的数据如表 4-25 所示。

表 4-25 武汉市电价与天然气价格统计表

时间	电价 (元/KWh)	气价 (元/ $m^3$ )	时间	电价 (元/KWh)	气价 (元/ $m^3$ )
2011.5	3	0.91	2009.2	2.49	0.79
2011.2	3	0.91	2008.11	2.49	0.79
2010.11	3	0.91	2008.8	2.2	0.79
2010.8	3	0.91	2008.5	2.2	0.69
2010.5	2.63	0.91	2008.2	2.2	0.69
2010.2	2.63	0.91	2007.11	0.69	2.2
2009.11	2.63	0.91	2007.8	0.69	2.2
2009.8	2.49	0.79	2007.5	0.69	2.2
2009.5	2.49	0.79			

数据来源：武汉市物价局

表 4-25 中电价和气价的单位分别是元/kWh 和元/ $m^3$ 。以万元/MWh 和万元/千  $m^3$

为单位可计算得  $D(p_1) = 0.0006386$ ,  $D(p_2) = 0.0003856$ ,  $COV(p_1, p_2) = -0.0002931$ 。则式 (4-13) 转化为式 4-23。

$$\begin{aligned} \text{Min} f_1(x) &= D(p_1)x_1^2 + D(p_2)x_2^2 + 2COV(p_1, p_2)x_1x_2 \\ &= 0.0006386x_1^2 + 0.0003856x_2^2 - 2 \times 0.0002931x_1x_2 \end{aligned} \quad (4-23)$$

该项目全年累计耗冷耗热量、生活热水需求及照明需求测算结果如表 4-26 所示。

表 4-26 项目全年供电量需求 (MWh)

供暖	制冷	生活热水	照明
11000	42000	9000	18000

数据来源：武汉新城国际博览中心低碳生态建设规划 (2010)，武汉新城国际博览中心有限公司 (2010)

- 令：  
 $x_3$ ——供暖耗电量 (MWh)；  
 $x_4$ ——制冷耗电量 (MWh)；  
 $x_5$ ——联供系统生活热水供应耗电量 (MWh)；  
 $x_6$ ——照明耗电量 (MWh)。

则能源系统的数学模型表述如下：

$$\begin{aligned} \text{Min} f_1(x) &= 0.0006386x_3^2 + 0.0003856x_4^2 - 2 \times 0.0002931x_3x_4 \\ &\quad \text{(能源价格风险最小)} \end{aligned} \quad (4-24)$$

$$\text{min} f_2(x) = 0.095x_5 + 0.28x_6 \quad \text{(能源价格最低)} \quad (4-25)$$

$$\text{min} f_3(x) = 0.781x_5 + 1.86x_6 \quad \text{(碳排放量最小)} \quad (4-26)$$

按照权重法，将  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$  的权重分别定为 0.025、2 和 1，则以上多目标规划可以转化成单目标规划如式 (4-27) 所示。

$$\begin{aligned} \text{Min} f(x) &= 0.025(0.0006386x_3^2 + 0.0003856x_4^2 - 2 \times 0.0002931x_3x_4) \\ &\quad + 2(0.095x_5 + 0.28x_6) + (0.781x_5 + 1.86x_6) \end{aligned} \quad (4-27)$$

模型的约束条件为式 (4-28)。

$$\begin{cases}
 x_1 + 0.8x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 = 0 \text{ (电量平衡)} \\
 1.2x_2 + x_5 \geq 9000 \text{ (满足生活热水需求)} \\
 x_1, x_2, x_5 \geq 0 \text{ (符合实际情况)} \\
 x_3 \geq 11000 \text{ (满足供热需求)} \\
 x_4 \geq 42000 \text{ (满足制冷需求)} \\
 x_6 \geq 18000 \text{ (满足照明需求)}
 \end{cases} \quad (4-28)$$

运用 matlab 软件可以求解得此模型的最优解,即为该能源方案的最优能源结构。结果如下:

总费用:  $\min f_2(x) = 8275$  万元;

总排放量:  $\min f_3(x) = 64715\text{tCO}_2$ ;

消耗的外部电量:  $x_1 = 65000\text{MWh}$ ;

消耗的天然气量:  $x_2 = 7500$  千  $\text{m}^3$ ;

供暖消耗的电量:  $x_3 = 11000$  MWh;

制冷消耗的电量:  $x_4 = 42000$  MWh;

生活热水消耗的能量:  $1.2x_2 + x_5 = 9000$  MWh;

照明消耗的电量:  $x_6 = 18000$  MWh.

以上是就特定的目标权重确定的能源结构方案,即三个目标的权重分别取 0.025, 2 和 1。第一个目标的权重很小是因为第一个目标函数是二次函数,第二、三两个目标函数是线性函数,而变量的数值较大。还可以取不同的目标权重进行计算,并综合考虑其他因素,从中选取一个较好的方案。目标权重的确定与决策者的偏好有关。

对于国际博览城二期项目而言,最优的能源结构方案为消耗外部提供的电量 65000MWh,消耗天然气量 7500000  $\text{m}^3$ 。其中,供暖消耗电量 11000 MWh,制冷消耗电量 42000 MWh,生活热水消耗能量 9000 MWh,照明消耗电量 18000 MWh。对某个已定的低碳建筑技术规划方案而言,可以采用此模型对其进行优化。根据计算结果,可以实现对该低碳建筑技术规划方案设备选型的优化及低碳规划方案中能源使用的优化。这种优化将使方案更具竞争性,更好地发挥其在节能减排方面的优势,更好地实现该项目的低碳目标。

## 5 低碳建筑规划设计方案能耗分析研究

### 5.1 低碳建筑规划设计方案能耗分析的意义

据统计数据显示,目前大型公共建筑面积占总建筑面积的5%~6%,但其总能耗为住宅建筑总能耗的10倍以上。且各地的公共建筑呈建筑规模越来越大、施工速度越来越快、建筑外观越来越个性化等特征,其总建筑能耗量也越来越大,且存在很大的浪费,具有巨大的节能潜力。大型公共建筑的总能耗中,照明、设备、动力等耗能是基本稳定的,空调能耗是大型公共建筑的主要能耗部分。如何在大型公共建筑未建成前对空调系统的选型及管理等进行深入分析,以便降低能耗,实现低碳节能目标,是非常值得研究的课题。

对大型公共建筑规划设计方案进行能耗分析,可以充分实现对空调设备选型的优化。因为对低碳建筑规划设计方案进行能耗分析,可以得到接近于实际运行情况的一系列建筑冷/热负荷数据,据此可以对空调设备的选型进行优化。并根据设定的具体参数,制定相应的空调运行管理机制。这样,可以从源头上控制大型公共建筑能耗的浪费。

同时,对大型公共建筑规划设计方案进行能耗分析,可以改进建筑的管理控制模式。在能耗分析过程中,要事先设定好各种用能设备的运行时间、启用功率、开启条件等参数。这些参数对建筑的总能耗模拟测算起着举足轻重的作用。如果参数改变,那么建筑的能耗分析结果也会相应改变。因此,可以据此对建筑使用过程中的管理控制模式进行改进,有效改善建筑的能耗状况。

大型公共建筑规划设计方案的能耗分析,还可以结合经济分析进行。建筑消耗的各种能源可以在能耗分析结果中直接读出,其价格数据也可轻松获得。因此,可以直接对建筑的经济性进行分析,使设计者及使用者可以在建筑未成形阶段就充分了解到方案的费用情况,从而进行进一步的优化。

在设计阶段,不同的建筑设计形式会造成能耗的巨大差异,可以对不同的设计方案进行详细模拟及能耗分析。根据各方案能耗分析的结果,可以采用一些数学模

型进行分析，最终选择出最优的方案。这也是一种降低建筑能耗的很有效的技术措施。

## 5.2 低碳建筑规划设计方案能耗分析依据

近年来，国家相关部门配合环境气候条件，在建筑的热工性能、暖通空调、照明及整体能耗等方面制订了一系列性能指标和政策条例，用以保障新建建筑符合民用建筑低碳节能设计标准，并且促进既有建筑的节能改造。在进行设计方案低碳能耗分析时，必须依据这些标准规范，对建筑进行全方位的分析。

### 1、《绿色建筑评价标准》(GB50378-2006)

工程建设国家标准《绿色建筑评价标准》(GB/T50378-2006)是总结我国绿色建筑方面的实践经验和研究成果，借鉴国际先进经验制定的第一部多目标、多层次的绿色建筑综合评价标准。该标准明确了绿色建筑的定义、评价指标和评价方法，确立了以“四节一环保”为核心内容的绿色建筑发展理念和评价体系。

《标准》的评价指标体系包括以下六个方面：

- (1) 节地与室外环境；
- (2) 节能与能源利用；
- (3) 节水与水资源利用；
- (4) 节材与材料资源利用；
- (5) 室内环境质量；
- (6) 运营管理（住宅建筑）、全生命周期综合性能（公共建筑）。

各指标体系中的具体指标又分为控制项、一般项和优选项三类。其中，控制项是评为绿色建筑的必备条款；优选项主要指实现难度较大、指标要求较高的项目。对同一对象，可根据需要和可能分别提出对应于控制项、一般项和优选项的指标要求。其体系示意图如图 5-1 所示，其对划分绿色建筑等级的项数要求如表 5-1 所示。





图 5-1 绿色建筑评价标准体系示意图

表 5-1 划分绿色建筑等级的项数要求（公共建筑）

等级	一般项数						优选项数 (共 14 项)
	节地与室外环境 (共 6 项)	节能与能源利用 (共 10 项)	节水与水资源利用 (共 6 项)	节材与材料资源利用 (共 8 项)	室内环境质量 (共 6 项)	运营管理 (共 7 项)	
★	3	4	3	5	3	4	--
★★	4	6	4	6	4	5	6
★★★	5	8	5	7	5	6	10



## 2、《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2005)

《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2005)由建设部组织编制、审查、批准并与国家质量技术监督检验检疫总局联合发布,于2005年7月1日起正式实施。这是我国批准发布的第一部公共建筑节能设计的综合性国家标准。制定并实施公共建筑节能设计标准,有利于改善公共建筑的热环境,提高暖通空调系统的能源利用效率,从根本上扭转公共建筑用能严重浪费的状况,为实现国家节约能源和保护环境的战略,贯彻有关政策和法规作出贡献。

《公共建筑节能设计标准》适用于新建、扩建和改建的公共建筑的节能设计,强调建筑围护结构保温、隔热性能,提供供暖、通风和空调设备、系统的能效比,采取增进照明设备效率等措施,在保证相同的室内热环境舒适参数条件下,与上世纪八十年代初设计建成的公共建筑相比,全年供暖、通风、空调和照明的总能耗可减少50%。其中,围护结构分担的节能率为5%~13%,暖通空调系统分担的节能率为20%~16%,照明系统及设备分担的节能率为7%~18%。

《标准》包括5章和3个附录,共93条条文,具体为总则、术语、室内环境节能设计计算参数、建筑与建筑热工设计、采暖、通风和空气调节节能设计。其中共有10条强制性条文。

## 3、其他相关标准规范

- (1) 《北京市公共建筑节能评审标准》DBJ/T01-100-2005
- (2) 《采暖通风与空气调节术语标准》GB50155-92
- (3) 《民用建筑热工设计规范》GB50176-93
- (4) 《旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准》GB50189-93
- (5) 《采暖通风和空气调节工程设计规范》GB50019
- (6) 《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》JGJ26-95
- (7) 《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ102-96
- (8) 《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ134-2001
- (9) 《建筑给水排水设计规范》GB15-88
- (10) 《节能监测技术通则》GB/T15316-94

- (11) 《建筑采光设计标准》GB/T50033-2001
- (12) 《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》JGJ75-2003
- (13) 《既有采暖居住建筑节能改造技术规程》JGJ129-2000
- (14) 《建筑节能工程施工质量验收规范》GB50411-2007
- (15) 《采暖居住建筑节能检验标准》JGJ132-2001
- (16) 《民用建筑能耗数据采集标准》JGJ/T154-2007

### 5.3 低碳建筑能耗分析内容

建筑物的用能一般包括采暖空调子系统用能、空气处理子系统用能、生活热水子系统用能、照明子系统用能及其他用电系统用能等部分组成。图 5-2 分析了建筑物各部分子系统用能情况及其相互关系。

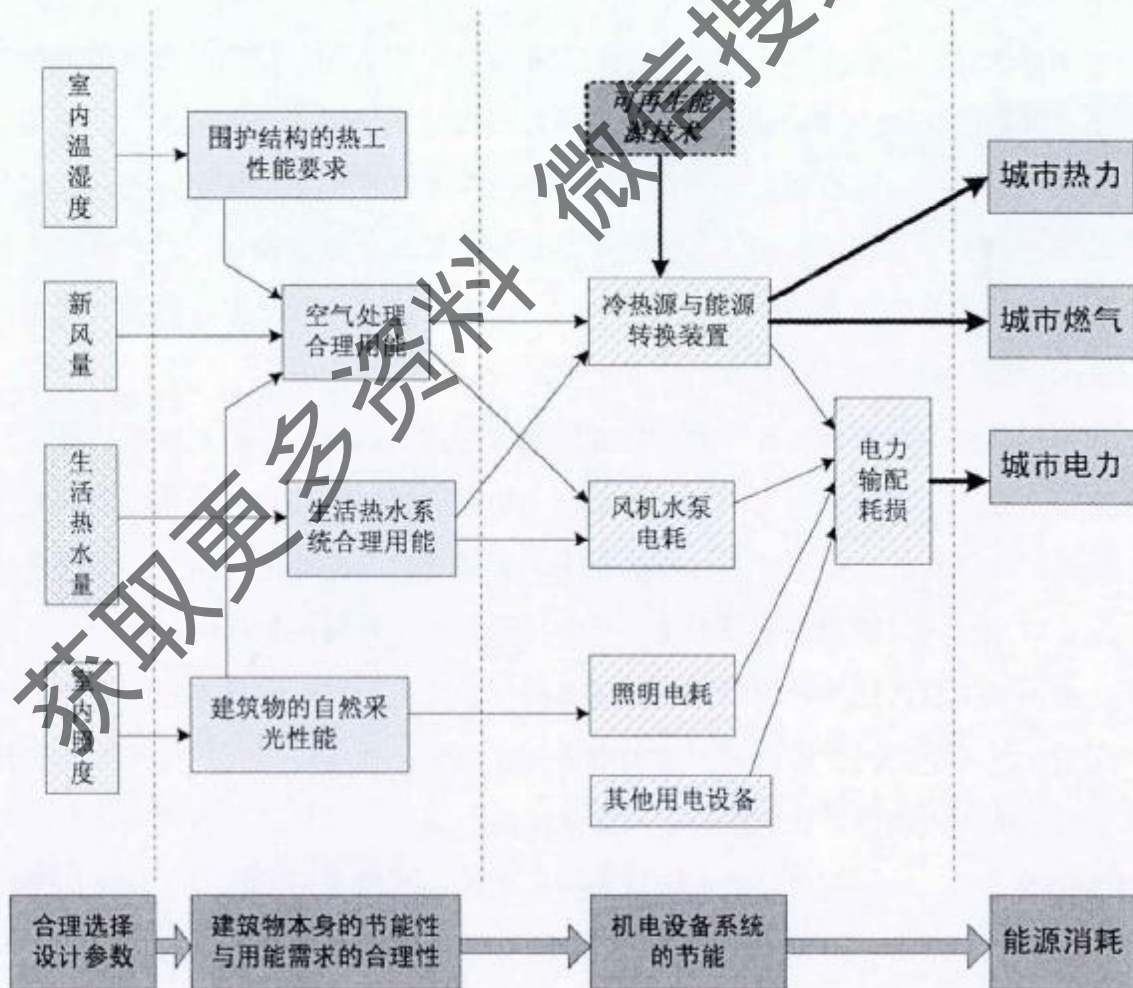


图 5-2 建筑物用能过程

由图 5-2 可以看出,对于低碳建筑物进行能耗分析,必须包括照明系统、空调设备、输配系统节能等。

## 1、照明系统

设计者应选用发光效率高、显色性好、使用寿命长、色温或相关色温适宜并符合环保要求的光源。在满足眩光限制和配光要求条件下,应采用效率高的灯具。此外应尽可能采用分区域分时段控制或光控开关等节能手段。

照明系统的节能评审原则是比较实际照明系统功率与满足节能要求的照明系统功率的相对关系,即在相同的照度要求下,统计按照功能划分的各区域的节能照明系统功率与实际照明系统功率,若实际照明系统总功率超过了节能要求确定的照明系统功率,则参评对象照明系统不满足节能要求。反之亦然。

## 2、空调设备

空调系统作为现代建筑中能耗最大的设备系统,在人们对建筑舒适度的评价中占据了重要地位,其主要功能是满足人们对温度及通风换气的要求。因此,选用合适的空调系统是非常重要的。一方面,可以避免空调选型偏大或偏小,不符合节能标准的要求;另一方面,也实现在过渡季尽量利用新风作免费冷源,并在冬季、夏季利用排风热回收技术实现资源的重复利用。上述内容是空气处理合理用能效果考核部分所主要反映和约束的内容。

评审的具体方法是分别计算并比较被评建筑的建筑物全年累计耗冷耗热量与其空调系统全年累计耗冷耗热量的相对关系。如果被评建筑的空调系统全年累计耗冷耗热量比其建筑物的全年累计耗冷耗热量小,则被评建筑的新风利用与空调系统方式的设计方案是满足节能基本要求的。其中建筑物耗冷耗热量是指满足最小新风量要求,围护结构及内扰导致的负荷与新风负荷相加得到,同时计算各种产湿源造成的除湿负荷及冬季新风加湿所需要的加湿负荷。而空调系统耗冷耗热量是按照设计方案中实际的室内温湿度设定参数、实际采用的空调(分区)运行方式来计算,考虑空气处理过程,同时按照设计者选用的实际新风量并考虑新风利用、排风热回收等措施。

## 3、整体能耗计算

建筑能耗有广义建筑能耗和狭义建筑能耗之分,狭义建筑能耗通常指民用建筑(包括居住建筑和公共建筑)使用过程中的能耗,主要包括采暖、空调、通风、热水供应、照明、炊事、家用电器、电梯等方面的能耗。而广义建筑能耗是指建筑的全寿命周期能耗,即建筑能耗包括建筑物系统在整个生命周期各个阶段的能源消耗,也就是从建材准备、建造施工、居住使用、拆除、废弃建材处置这五个生命阶段以及建筑系统相关的运输活动的能源消耗。

在本研究中,只对建筑运营期产生的能耗进行分析,即针对建筑运营期采暖、通风、热水供应、空调、照明等进行模拟分析,计算其总能耗。

## 5.4 常用的低碳建筑能耗分析软件

### 1、DeST 软件

DeST(Designer's simulation toolkits)是建筑环境及 HVAC 系统模拟的软件平台,该平台以清华大学建筑技术科学系环境与设备研究所十余年的科研成果为理论基础,将现代模拟技术和独特的模拟思想运用到建筑环境的模拟和 HVAC 系统的模拟中去,为建筑环境的相关研究和建筑环境的模拟预测、性能评估提供了方便实用可靠的软件工具,为建筑设计及 HVAC 系统的相关研究和系统的模拟预测、性能优化提供了一流的软件工具。

DeST 是基于 AutoCAD 的平台开发的,其最大的特点是采用“分阶段模拟”的理念。在开发过程中,DeST 融合了实际设计过程的阶段性这个特点,将模拟划分为建筑热特性分析、系统方案分析、空气处理设备方案分析、风网模拟和冷热源模拟共五个阶段,在每一个阶段将信息不断细化,由此实现建筑环境及其控制系统设计的分阶段模拟。DeST 主要有以下特点:

- (1) 以自然室温为桥梁,联系建筑物和环境控制系统;
- (2) 分阶段设计,分阶段模拟;
- (3) “理想化”概念处理后续阶段的部件特性和控制效果;
- (4) 图形化界面。

DeST 目前已得到了广泛应用,在国家游泳中心、国家大剧院等大型公共建筑项目能耗分析工作中有不俗的表现,获得了业内人士的一致认可。

## 2、Autodesk Ecotect Analysis

Autodesk Ecotect Analysis 是一款功能全面，适用于从概念设计到详细设计环节的可持续设计及分析的软件，其中包含应用广泛的仿真和分析功能，能够提高现有建筑和新建筑设计的性能。

Ecotect Analysis 分析的范围很广，从太阳辐射、日照、遮阳、采光、照明到热工、室内声场、室内外风场都可以进行模拟，涵盖了热环境、风环境、光环境、声环境、日照、经济性及环境影响与可视度等建筑物理环境的七个方面。

Ecotect Analysis 具有友好的三维建模设计界面，并提供了用途广泛的性能分析和模拟功能。它的操作界面友好，与建筑师常用的 SketchUP、AutoCAD 等软件有一定的兼容性，与 BIM 软件如 Revit Architecture、ArchiCAD 可以基本做到单项的无缝链接。

Ecotect Analysis 的另一特点是它的模型可以存成多种主要的专业分析软件格式，以便输出进行精确的模拟分析。它开放性的结构也使它成为当前主流的物理环境分析软件，在世界范围内得到了广泛应用。

对上述两种软件进行比较，可以得出如下结果，如表 5-2 所示。

表 5-2 节能分析软件对比分析

软件名称	适用对象	特点	兼容软件	开放性
DeST	建筑环境及 HVAC 系统模拟	1. 以自然室温为桥梁,联系建筑物和环境控制系统; 2. 分阶段设计,分阶段模拟; 3. “理想化”概念处理后续阶段的部件特性和控制效果。	AutoCAD	最封闭
Autodesk Ecotect Analysis	建筑物理环境分析	1.全方位分析; 2.与多种建筑设计软件兼容; 3.开放性的结构。	SketchUP, AutoCAD, Revit Architecture, ArchiCAD	最开放

Ecotect 软件还可用于概念设计，即其可以参与项目的全生命周期的节能评价工作，优于其他两个软件。DeST 软件只能就现有的设计方案进行节能分析。在应用范围方面，Ecotect 应用范围最广，可以实现热环境分析、光环境模拟、资源消耗等方

面的分析,DeST 多应用于与参数有关的分析,故在能耗模拟方面有不可比拟的优势,常被选用进行建筑的能耗分析。

## 5.5 实证研究——武汉国际博览中心展馆设计方案能耗分析

### 5.5.1 武汉国际博览中心一期工程概况

武汉国际博览中心一期工程为主展馆,建成后可以提供 13.5 万平方米的展览净面积和 7400 个国际标准展位。规划方案显示,博览中心的 12 个主展览馆呈圆周形分布,中央合围成一个巨大的中央广场。工程共地上 2 层,建筑面积约 45.7 万  $\text{m}^2$ 。一层架空层为车库,可提供 3250 个车位。二层展馆建筑面积约 18.2 万  $\text{m}^2$ ,室内净高 17.5m。主展览馆一层为现浇钢筋混凝土框架结构,二层为钢网架结构。12 个单体展馆钢屋盖部分钢结构为单层折面空间网格结构,拱形屋架支撑的弧形屋面共同构成波状的展馆形式。

武汉国际博览中心作为低碳示范建设区,除按照国家节能环保要求进行建筑设计外,很多分项工程还针对国家绿色建筑标准作了示范建设。其节能的目标包括以下方面:建筑总能耗为 71868tce,碳排放量为 15.28 万吨,经营性用地总能耗(含市政、交通)为 92046tce,碳排放量为 17.00 万吨;经营性用地进行低碳生态规划前后,按等效折算,节能量为 21094tce,节能率为 19%,减排量为 8.36 万吨,减排率为 33%;经营性用地可再生能源替代量为 8323tce,替代率为 10.90%;经营性用地可再生能源节能量为 3951tce,节能率为 4.81%。

为顺利实现节能目标,项目拟采用光伏发电板、复合能源系统等节能技术,并加强绿色建筑示范工程的建设力度,其中武汉国际博览中心二期会议中心将建设成为武汉市第一个国家三星級绿色公共建筑。光伏电板采用技术先进的晶体硅构件产品,预计建成后将解决展馆近 30%的用电量。复合能源系统是指在采用常规能源方案的基础上,结合地源热泵技术,形成复合的能源系统,实现能源利用效率和节能效果的大幅提高。



## 5.5.2 整体能耗分析

在国博项目中，由于其建筑体量较大，且主要建筑类型为展馆，因此在对其进行整体能耗分析时，主要考察建筑整体的热环境、照明系统、空气处理合理用能效果，同时测算了太阳能光电板的节能量。

### 1、热工性能分析

现代的公共建筑外形奇特，追求艺术和美学价值，对其围护结构的单个部件（如常见的体形系数、窗墙比、外墙传热系数、幕墙遮阳系数、遮阳系数等）进行热工性能评估意义不大。因此，对公共建筑进行热工性能分析，更多地是考察建筑的整体热工性能。评审的具体办法是采用“参考建筑”的节能评论方法。“参考建筑”是指外形设计和几何尺寸与被评建筑完全一致，而围护结构满足建筑节能要求的建筑。这也是《公共建筑节能设计标准》中采用的方法。分别计算被评建筑和参考建筑在参考工况下全年 8760h 逐时需要的热量和冷量，并统计出全年累计值。当被评建筑的全年累计耗冷耗热量比参考建筑的小，则被评建筑的外围护结构设计方案是满足节能基本要求的。

在该项目中，采用了清华大学建筑技术科学系自主研发的建筑热环境模拟计算工具 DeST 软件。图 5-3 为在 DeST 中建立的部分模型图示。表 5-3 为 DeST 中进行计算时输入的参数。

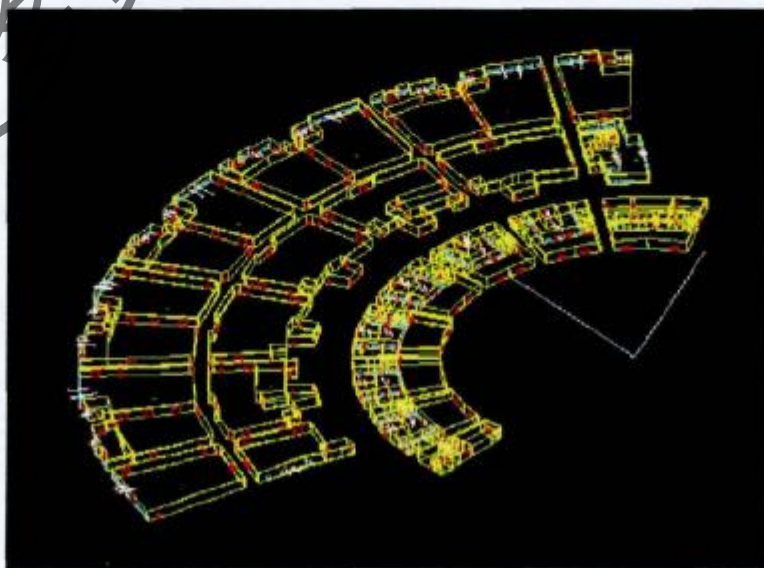


图 5-3 DeST 建模示例

表 5-3 DeSt 中国博主要功能房间边界条件设定

房间类型	基本参数		照明参数			设备参数	空调指标							
	家具系数	人数指标 (人/m <sup>2</sup> )	设定最低照度 (LUX)	最大灯光功率 (W)	灯光电热转换效率		设备最大功率 (W)	人均发热量 (W)	人均产湿量 (kg/Hr)	人均最低新风量 (m <sup>3</sup> /Hr)	空调温度上限 (°C)	空调温度下限 (°C)	空调湿度上限 (%)	空调湿度下限 (%)
办公室	10	0.1	300	10	0.9	20	64	0.084	20	26	20	60	35	7:00-20:00 星期一至星期日
商场	10	0.9	300	20	0.9	0	68	0.1	20	27	20	65	40	7:00-20:00 星期一至星期日
卫生间	7	0.1	150	10	0.9	0	51	0.109	20	28	20	65	55	7:00-21:00 星期一至星期日
餐厅	10	0.6	200	15	0.9	0	180	0.065	20	27	20	60	50	6:00-22:00 星期一至星期日
门厅及中庭	1	0.1	200	20	0.9	0	64	0.084	20	28	18	65	55	6:00-21:00 星期一至星期日
电脑机房	10	0.1	200	10	0.9	30	81	0.15	20	25	18	65	55	0:00-24:00 星期一至星期日
变电所	10	0.05	200	10	0.9	10000	81	0.15	20	28	20	65	55	0:00-24:00 星期一至星期日
楼梯间及走道	1	0.1	150	10	0.9	20	64	0.084	-	-	-	-	-	-
展厅	10	0.2	300	20	0.9	0	68	0.099	25	27	25 (白天), 18 (晚上)	60	35	7:00-17:00 星期一至星期日
车库	1	0.05	45	10	0.9	10	-	-	-	-	-	-	-	-

在 DeST 中可以计算得国博 (只取国博的南半区建筑参与计算, 下同) 与参考建筑全年 8760h 的逐时负荷, 如图 5-4 和 5-5 所示。



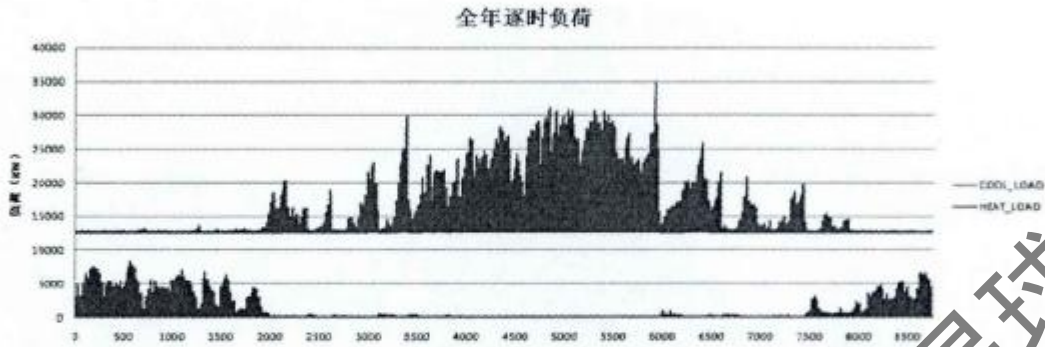


图 5-4 国博项目全年逐时负荷

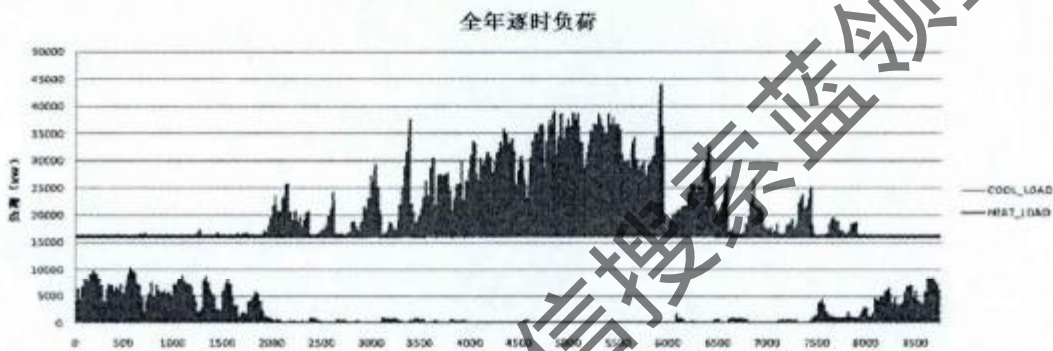


图 5-5 参考建筑全年逐时负荷

据此，可以统计得到全年累计耗冷耗热量如表 5-4 所示。

表 5-4 建筑全年累计耗冷耗热量

	累计耗冷量 (GJ)	累计耗热量 (GJ)	累计冷热量消耗 (GJ)	国博与参考建筑累计冷热量消耗比
国博	456487.7690	9255.5798	456743.2488	0.77
参考建筑	580070.5124	14332.0738	594402.5862	

国博项目和参考建筑全年累计耗热(冷)量的直方图比较结果如图 5-6 所示。



图 5-6 国博与参考建筑全年累计耗冷耗热量

由此，可以清晰地看出国博与参考建筑的累计耗冷量消耗之比为 0.77，即国博项目实际采用的围护结构方案比参考建筑的冷热量消耗小 23%。尤其是累计耗冷量的差异很大，国博与参考建筑的累计耗冷量之比为 0.79。国博采用的建筑材料新颖，设计较合理。其围护结构的整体热工性能高于参考建筑。通过能耗分析的基本要求为被评建筑的建筑物全年累计耗冷耗热量不得高于参考建筑，所以国博的围护热工性能评审满足节能要求。在此基础上，还可以采取其他措施进一步提高围护结构的热工性能。

## 2、照明系统分析

照明系统的节能评审是通过比较在满足同样的照度要求下，各功能区域的照明功率密度均满足节能要求时整幢建筑的照明系统功率，与设计方案实际照明系统功率的相对关系来判定。实际照明系统总功率不得超过根据节能要求确定的照明系统总功率为考核节能的基本要求。

在《建筑照明设计标准》(GB\_50034 2004)中，节能设计部分并没有单独列出展览馆类建筑的设计标准，故展厅设计采用照明设计的设计标准值，办公室等房间场所参照相应节能设计值。具体内容见表 5-5。



表 5-5 建筑照明功率密度

房间或场所	国博实际照明功率密度 (W/m <sup>2</sup> )	《建筑照明设计标准》规定的节能照明功率密度 (W/m <sup>2</sup> )	相应照度值 (lx)
高档展厅	---	---	300
会议室	11.4	9	300
普通办公室	9.9	9	300
档案库房	3.4	7	200
电脑机房	8.5	9	300
门厅	14.3	13	300
走廊	3.1	4	50
卫生间	5.0	6	100

利用分析软件 DeST 计算得到被评建筑实际照明总功率如图 5-7 所示。

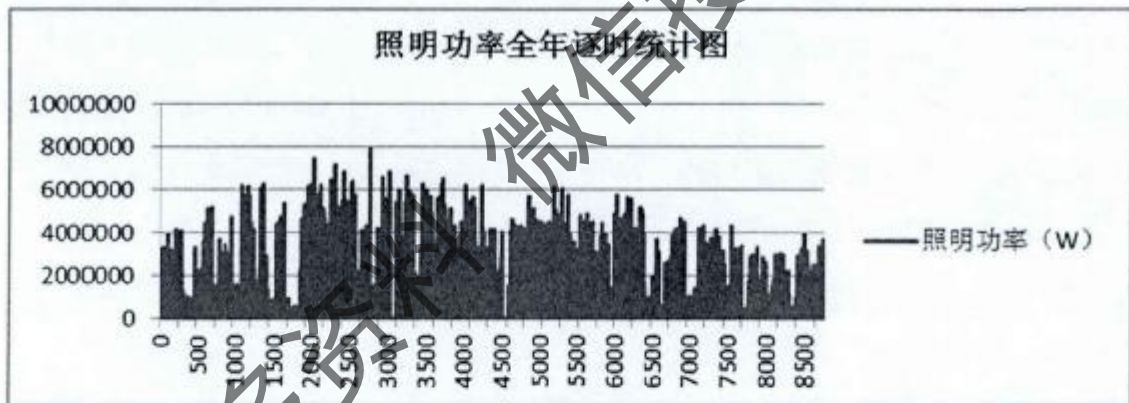


图 5-7 照明功率全年逐时统计图

统计得实际照明总功率与节能照明总功率分别为 6403.43MW、6989.73MW，国博的建筑实际照明总功率比节能照明总功率小，其照明系统满足节能评审要求，但是需要仔细校核配电房、控制室等房间的照度值是否能达到配光要求。

### 3、空气处理合理用能效果分析

在该项目中，评审的具体方法是分别计算并比较国博的建筑物全年累计耗冷耗热量与其空调系统全年累计耗冷耗热量的相对关系。如果国博的空调系统全年累计耗冷耗热量比其建筑物的全年累计耗冷耗热量小，则国博的新风利用与空调系统方式的设计方案是满足节能基本要求的。其中建筑物耗冷耗热量是指满足最小新风量要求，围护结构及内扰导致的负荷与新风负荷相加得到，同时计算各种产湿源造成

的除湿负荷及冬季新风加湿所需要的加湿负荷。而空调系统耗冷耗热量是按照设计方案中实际的室内温湿度设定参数、人员设定、实际采用的空调（分区）运行方式来计算，考虑空气处理过程，同时按照设计者选用的实际新风量并考虑新风利用、排风热回收等其他与之相关的节能措施。

利用模拟分析软件 DeST 逐时计算得到建筑物全年累计耗冷耗热量和空调系统全年累计耗冷耗热量如表 5-6 所示。

表 5-6 建筑物与空调系统全年累计耗冷耗热量

耗冷（热）量(GJ)	建筑物	空调系统
耗冷量(GJ)	456488.78	49703.91
耗热量(GJ)	9255.75	102744.71
累计耗冷热量 (GJ)	465744.53	599778.62

国博的空调系统全年累计耗冷耗热量比其建筑物的全年累计耗冷耗热量大，所以不能满足基本的节能要求。进一步分析可知，造成该空调系统设计方案不节能的原因是部分新风机选型偏大，大大超过房间人员所需的新风量要求，个别房间人均新风量超过了  $60\text{m}^3/\text{h}$ 。这样会造成新风处理能耗过高，和风机能耗过大等问题。因此需要核实一下新风机组设计选型计算中的房间人员密度设定以及有无其他特殊考虑，否则需重新选型。

其中，空调系统的全年逐时显热负荷、加湿负荷以及全部内扰得热和模拟分析结果如图 5-8 至 5-10 所示。

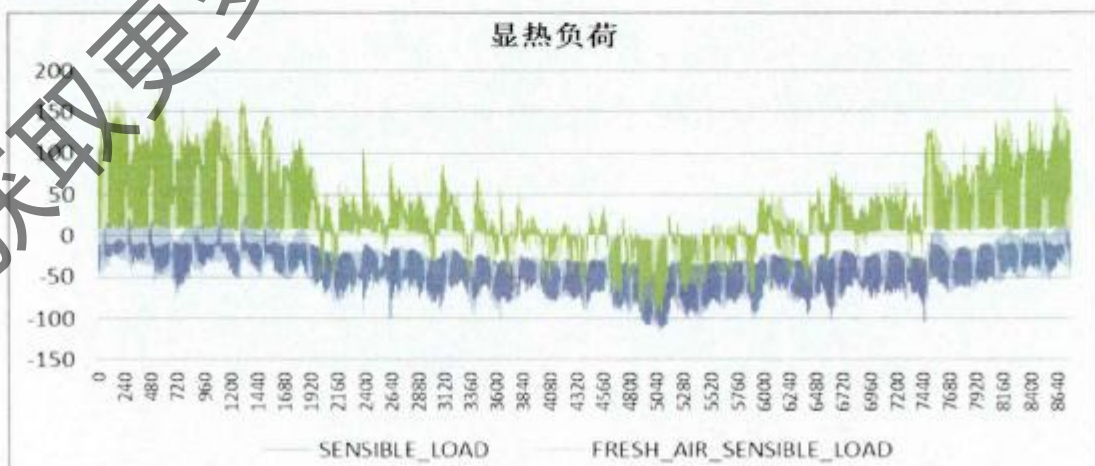


图 5-8 空调系统显热负荷分析图



房间总显热负荷-354676.059KJ，新风总显热负荷 52339.874KJ.

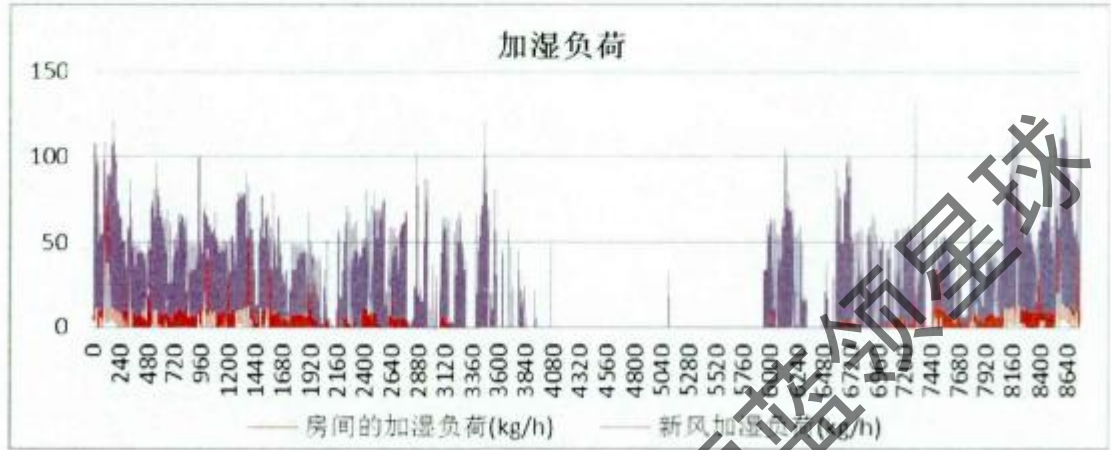


图 5-9 加湿负荷分析图

房间加湿总负荷 218273.044kg/h，新风加湿总负荷 162023.499kg/h.

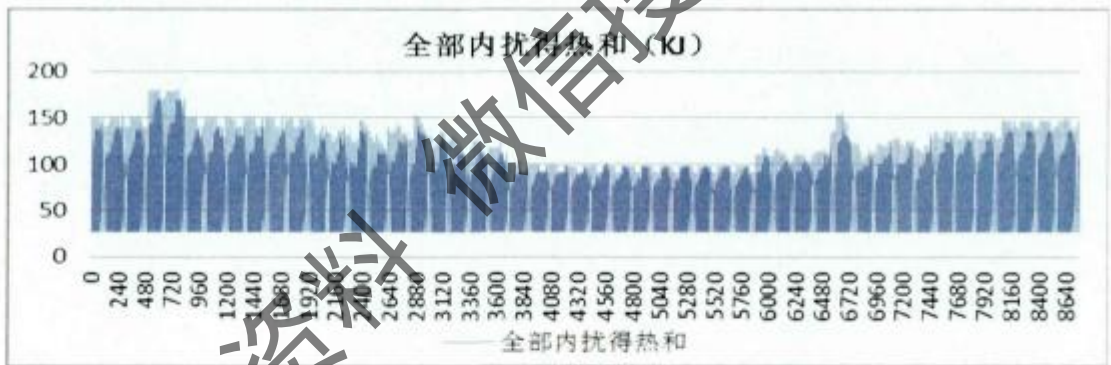


图 5-10 全部内扰得热和分析图

全部内扰得热和为 599751.717KJ.

#### 4、太阳能光电板节能量测算

对武汉市全年逐时太阳辐射进行模拟统计，结果如图 5-11 所示。

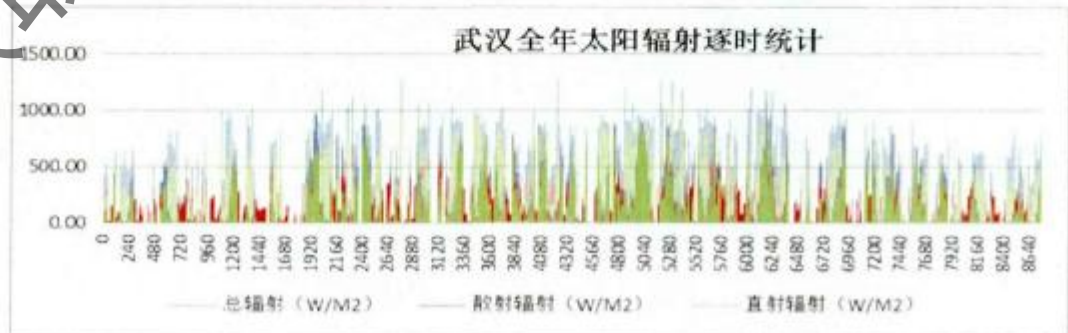


图 5-11 武汉全年太阳辐射逐时统计图

武汉市全年太阳直射辐射强度统计如图 5-12 所示。

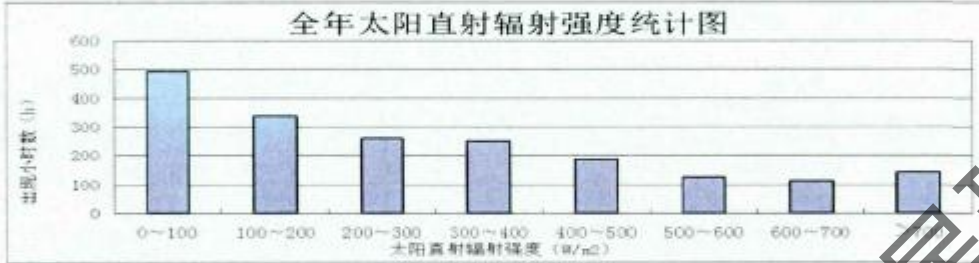
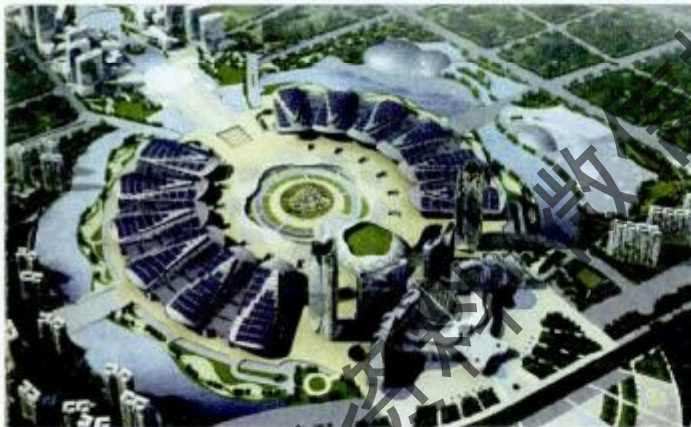


图 5-12 全年太阳直射辐射强度统计图

在国博中，设计采用了太阳能光伏电板发电作为可再生能源利用。在屋顶及采光井幕墙上安装了太阳能光伏电板，约占 9 万平方米，装机容量约为 9.6MW。其初步设计方案及光伏电板的分类、光伏电板的选型如图 5-13 至 5-15 所示。



铺装位置：展馆屋面及 12 层北天井幕墙顶  
 展馆屋面面积约 15 万平米，展开面积大，采光效率高。屋面可铺装太阳能发电电板面积约 9 万平米，装机容量约 9.6MW。  
 采光井玻璃幕墙面积约 1800 平米，可实现装机容量约 280KW。总装机容量约 10MW，总投资约 2.8 亿元。

图 5-13 国博的太阳能光伏电板初步设计

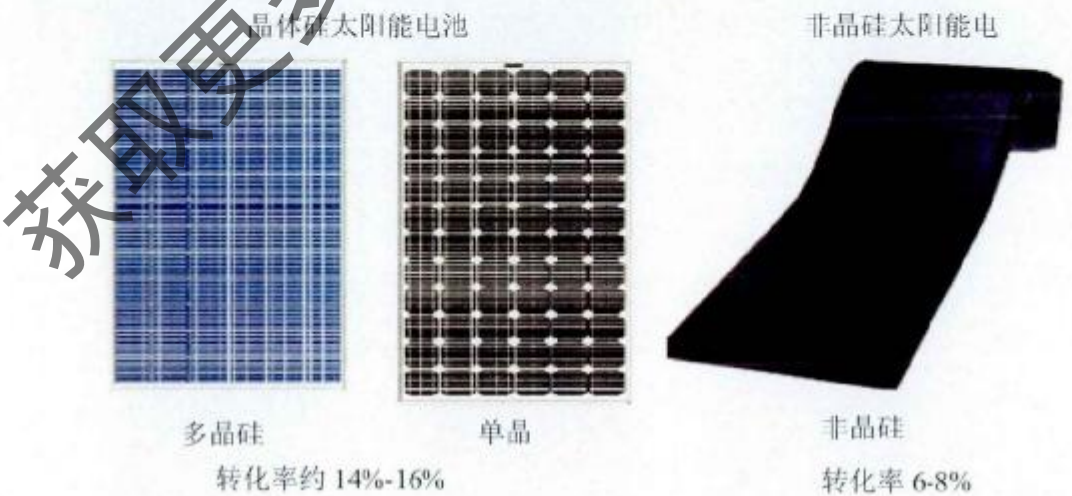


图 5-14 光伏电板的分类



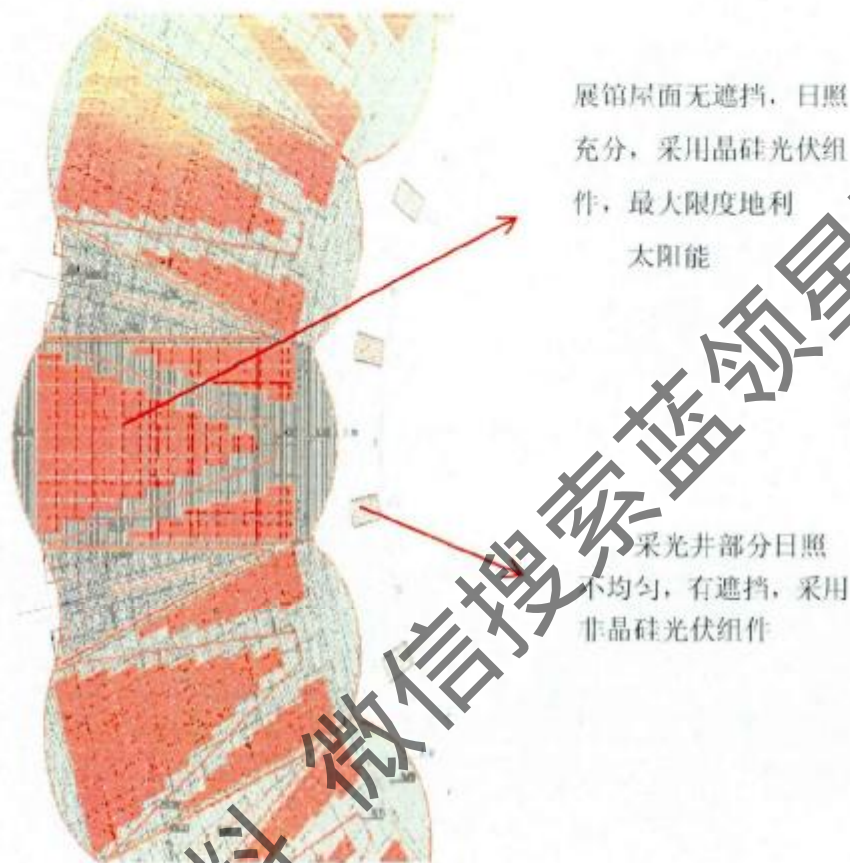


图 5-15 光伏电板的选型

根据以上数据，对太阳能光电板进行节能测算，结果如图 5-16 所示。

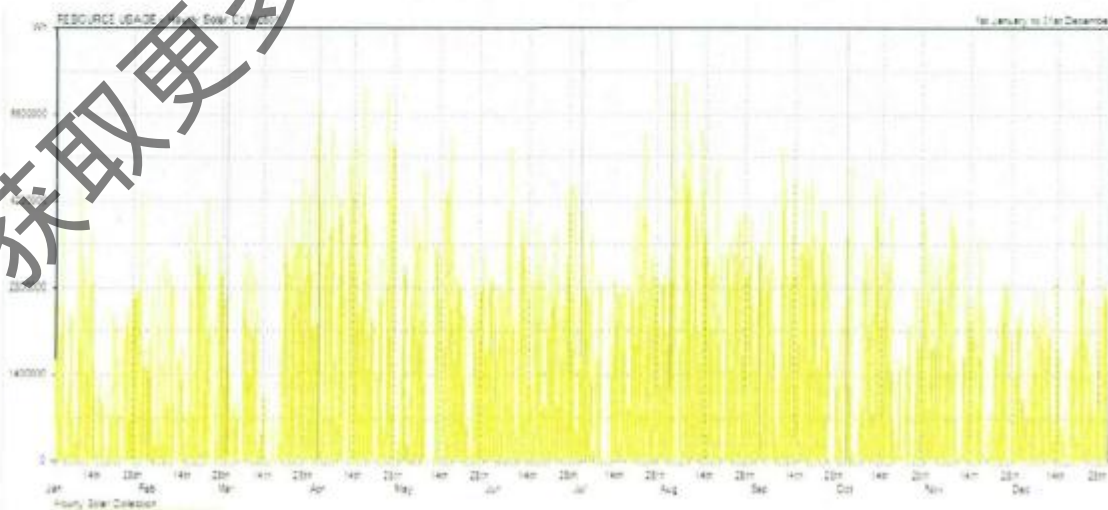


图 5-16 太阳能光电板全年逐时产电量 (太阳能电板面积:76861.750 m<sup>2</sup>)

据此，计算得太阳能光电板年累计发电量及节能量、节能率如表 5-7 所示。

表 5-7 太阳能光电板年节能量

年累计发电量 (Kwh)	节能量 (GJ)	折合标准煤 (tce)	节能率 (%)
5884870.2720	21185.5330	723055.7338	4.55

太阳能作为一种常用的可再生能源，在国博项目中得到了充分利用，可以看出，其节能率相当可观。但太阳能光伏电板造价较高，成本大，其选用还需慎重。

### 5.5.3 结论分析

2007 年，武汉城市圈被批准成为“资源节约型、环境友好型”社会建设综合配套改革试验区；2008 年，住房和城乡建设部与湖北省政府在京签署备忘录，双方商定支持武汉城市圈成为国家绿色建筑试验示范区，推进建筑节能发展；武汉市建委将新区国际博览中心主馆建设工程列为 2009 年重点工程之一。因此，对武汉新城国际博览中心主展馆工程进行能耗分析，是非常有必要的。

在本研究中，采用 DeST 软件对武汉国博进行了整体能耗测算。并根据相应的节能标准对测算结果进行了分析比较，得出结论如表 5-8 所示。

表 5-8 国博中心能耗分析结果一览表

分析内容		分析目的	分析结果
整体能耗测算	热工性能	保证建筑内资源的合理使用，以达到低碳环保的目的	满足节能要求
	照明系统		满足节能要求
	空调系统	选型较大，有浪费，不满足节能要求	
	太阳能光电板	太阳辐射产热量占建筑内生活用电量的比重，以达到绿色环保的要求	充分利用了可再生能源，达到了一定的节能率

由表 5-8 可以看出，建筑的外围护结构热工性能良好，达到了节能要求。若要进一步优化方案，建议从改善外围护结构的材料入手。例如可以选用传热系数更小的



材料与构件，这样可以充分提高外围护结构的热工性能，降低建筑的冷热负荷。这是提高建筑整体节能效果的有效措施。

建筑照明系统也初步达到了节能要求，进一步优化方案可以考虑选用节能型灯具。并制订相应的管理措施，如专人定时巡查熄灯、规定特定时段开启灯具的数量等，可以有效降低照明系统的能耗。

对空调系统进行能耗分析的结果显示，在国博项目的初步设计中，空调系统的选型偏大，造成了一定量的能源浪费，是不可取的。需要进行进一步的论证，核实一下是否计算过程中房间人员密度设定以及人均新风量、房间温度等参数的设定有误，或者使用者有其他方面的特殊考虑，否则需重新选型。重新选型时，可以考虑水冷式集中供冷中央空调，这样可以充分利用长江的水资源。同时，也可以改善空调系统的运行管理制度，避免一些人为因素造成的能源浪费。

在本研究中，还对太阳能光电板的发电量进行了测算。测算结果显示，国博项目中的太阳能光电板发电量巨大，节能率可以达到 4.55%，节能量是非常可观的。需要面临的问题是，太阳能光电板的成本很高，选用的话还需进行经济分析，验证其是否值得采用。

表 5-9 国博中心低碳规划设计方案建议一览表

	分析内容	分析结果	建议
整体 能耗 测算	热工性能	满足节能要求	传热系数更小的 外围护结构
	照明系统	满足节能要求	选用节能型灯具； 制订管理措施
	空调系统	选型较大，有浪费， 不满足节能要求	水冷式集中供冷中央空调系 统； 制订运行管理制度
	太阳能光电板	充分利用了可再生能源，达到了一 定的节能率	进行经济分析

通过对国博项目进行建筑能耗分析，对其低碳规划设计方案提出了一些建议，如表 5-9 所示。能耗分析的结果及提出的建议可以作为进一步优化方案的依据。

## 6 基于 LCA 的建筑物碳排放测算方法研究

### 6.1 建筑物全寿命周期碳排放理论

#### 6.1.1 建筑物全寿命周期

全寿命周期评价 (Life Cycle Assessment, 简称 LCA) 是一种新型的环境影响评价技术和方法体系, 是对建筑物从设计到拆除的全过程所涉及的资源消耗和环境影响问题进行定量评价的方法。具体地说, LCA 是从原料开采和获取、加工制备、运行使用到废弃拆除的各个阶段对环境负荷进行定量分析。

对于建筑物而言, 其全寿命周期的研究, 国内外学者提出了很多定义。

国内的研究主要以清华大学的张智慧教授为代表, 将全寿命周期按照材料的开采使用线, 划分为物化阶段、使用阶段和拆除处置阶段<sup>[86]</sup>; 与此类似的是刘念雄等学者将其分为准备、施工、使用和维护、拆卸四个阶段<sup>[87]</sup>; 其次, 有学者如 Chen 将全寿命周期按照传统的建筑周期理论划分为 9 个阶段, 分别是施工、装修、室外设施建设、运输、运行、废物处理、物业管理、拆卸和废弃物的处置<sup>[88]</sup>。

对于国外的建筑全寿命周期研究理论则更加丰富。有以原材料为主线考虑的 Leif 等, 将全寿命周期分为材料生产、建设、运行、拆除以及处理四个阶段<sup>[54]</sup>; 并且 Cole 在其基础上研究了不同建筑物的碳排放区别, 方便对比分析<sup>[55]</sup>; 也有部分学者没有考虑材料的生产阶段, 认为其应该属于工业碳排放, 如 Gerilia 等<sup>[56]</sup>; 对于传统的建筑全寿命周期, 亦有人研究, 如 Bribian 就将建筑全寿命和走起分为建筑生产、建设、使用和结束四个阶段<sup>[89]</sup>;

综合上述观点, 本文认为建筑物全寿命周期即是建筑物产品的生命周期, 也指建筑物产品全生命周期 (LCA: building life cycle), 指建筑物产品的萌芽到建筑物的拆除处置整个过程, 其过程中的碳排放具体包括原材料开采, 建筑物材料、设备生产和构件加工制造, 建筑物规划设计, 建筑物施工安装, 建筑物使用维护及建筑物拆除与清理六个部分。其中因为原材料开采, 建筑物材料、设备生产和构件加工制造均属于既用建筑物材料本身所带来的碳排放, 如按阶段划分可归入建筑物施工安

装过程，故建筑物全寿命周期碳排放可以分为四个阶段进行计算，分别是：建筑物规划设计阶段碳排放、建筑物施工安装阶段碳排放、建筑物使用维护阶段碳排放和建筑物拆除清理阶段碳排放。

## 6.1.2 建筑物碳排放测算基本方法

由于数据获取困难，无法形成数据统计的规模效应，我国建筑物碳排放的测算还处于比较初级的阶段。目前，对建筑物碳排放的测算主要采用三种方法：实测法、物料衡算法和排放系数法<sup>[90]</sup>。

### 1、实测法

主要通过监测工具或国家认定的计量设施，对目标气体的流量、浓度、流速等进行测量，得到国家环境部门认可的数据来计算目标气体总排放量。实测法要求采集的样品数据具有很强代表性和较高的精确度，当能满足这些要求时，这是一种比较可靠的方法，但如果无法保证样品数据的代表性和精确度，即使测试分析很正确，所得数据也毫无意义。

### 2、物料衡算法

是建设过程中使用的物料进行定量分析，根据质量守恒，投入物质量等于产出物质量，把工业排放源的排放量、生产工艺和管理、资源、原材料的综合利用及环境治理结合起来系统地、全面地研究生产过程中碳排放的一种科学有效的计算方法。这种方法虽然能得到比较精确的碳排放数据，但是需要对建筑物全过程的投入物与产出物进行全面的分析研究，工作量很大，过程也比较复杂。

### 3、排放系数法

是指在正常技术经济和管理条件下，根据生产单位产品所排放的气体数量的统计平均值来计算总排放量的一种方法。目前的排放系数分为有气体回收和无气体回收两种情况下的排放系数，而且在不同的生产状况、工艺流程、技术水平等因素的影响下，排放系数也存在很大差异。因此使用排放系数法的不确定性也较大。

## 6.1.3 建筑物全寿命周期碳排放量化思路

基于上述全寿命周期理论以及各种碳排放测算的基本方法，我们可以总结出建

建筑物全寿命周期的碳排放量化思路。虽然对于不同的建筑物，在设计、施工、运行和维护阶段都有很大的不同，但是所有的建筑物都会经历从建设到运营到拆除的过程，因此，首先可以以时间为节点考虑计算建筑全寿命周期的碳排放。

对于以时间节点为基础的计算，在传统的建筑全寿命周期领域已经有了较多的研究，可以将建筑物全寿命周期分为规划设计阶段、施工安装阶段、使用维护阶段以及拆除清理阶段。每个阶段都有其碳排放的独特性，独特的来源和独有的计算方式，将建筑物按照四个阶段划分，能够更好的与传统全寿命周期理论对接，同时能够明细计算结果，边界更加容易确定。

基于此，我们可以得到如下量化思路：首先确定建筑物碳排放的四个阶段，明确衡量边界；然后根据阶段划分，确定每个阶段产生的碳排放来源，进行分析汇总；最后，根据不同的碳排放来源，进行计算，得到最终的碳排放总量。

#### 6.1.4 建筑物全寿命周期碳排放量化意义

在全球性气候变化的背景下，建筑作为能源消耗和碳排放的主体引起的关注与日俱增。根据 IPCC 统计，在发达国家，建筑消耗了 40% 的能源资源，并导致了 36% 与能源相关的碳排放。据 EIA 估计，建筑占据了全球能源消耗的 30.8%。并且有预计，到 2030 年建筑业产生的温室气体将占全社会排放量的 25%。然而，与它的重要性不相协调的是，作为碳排放的重要来源，在行业内并没有形成统一的计算标准，这也促使了碳排放计算成为近几年企业和研究单位着力研究的重点。

本文着力于建立建筑物全寿命周期的碳排放测算体系，将建筑物从设计阶段到最后拆除清理阶段，全寿命期的碳排放均加以计算分析。基于此思路与方法，不仅能够得到建筑物全寿命期的碳排放的准确数量，还能够分阶段进行分析，确定碳排放量最大的阶段，对此加以控制；并且能够通过数据分析，得出每个阶段不同碳排放来源带来的排放量，对需要减少碳排放量的对象进行更加准确的定位。

对于算出来的结果如何应用，除了上述的进行理论分析，方便准确控制外，碳排放交易也被大家了解并且逐渐开始应用。在未来的交易领域，碳将成为一种货币，可以进入市场流通，进行自由交易，现阶段已经有京都议定书定义的清洁发展机制项目以及美国发展的自愿碳交易机制等广泛交易的机制。由此可见，碳排放交易已

经作为一种交易方式逐渐被大家接受和应用，为了提高减少碳排放量的目的，我们有理由预测中国也将会考虑执行这一交易方式。因此，基于这个前提，如何准确的计算建筑物全寿命期的碳排放，制定碳排放的交易基准线，是最亟待解决的问题。

## 6.2 建筑物全寿命周期碳排放来源

### 6.2.1 建筑物全寿命周期碳排放来源概述

按照建筑物形成的时间顺序，将其看成一个系统，我们可以得到其碳排放来源的四个阶段。

#### 1、规划设计阶段

设计阶段的因能耗产生直接的碳排放是极少的，基本上是可以忽略的。但设计阶段对后续阶段的碳排放影响是巨大的。因为建筑物的选址、结构类型、所用的材料、施工方案、采光、供暖、通风等跟建筑物的碳排放密切相关。

#### 2、施工安装阶段

主要分为建筑物材料碳排放和施工安装过程碳排放

(1) 建筑物材料碳排放：材料生产加工消耗的能量所产生的二氧化碳，主要包括原材料的开采、原材料的加工，以及加工成型前所产生的运输碳排放。

(2) 施工作业碳排放：施工期间所使用的机器、设备消耗的能量及材料从购买地到施工地点运输和场内运输所产生的二氧化碳。

#### 3、使用维护阶段

(1) 使用阶段：建筑物竣工使用后，维持建筑物正常运转，如空调、照明、电梯、供水等消耗的能量所产生的二氧化碳。

(2) 维护阶段：对建筑物进行基本维护，修缮及改造更新等消耗的能量所产生的二氧化碳。

#### 4、拆除清理阶段

(1) 不可再利用废弃物处理碳排放：建筑物拆除，解体消耗的能量所产生的碳排放。

(2) 运输碳排放：废弃物在处理过程中由于运输所产生的碳排放。

(3) 可再生材料回收产生的碳排放：废弃物回收利用形成再生材料消耗的能量

所减少的二氧化碳。

因此，可得建筑物全寿命周期碳排放的构成，见图 6-1：

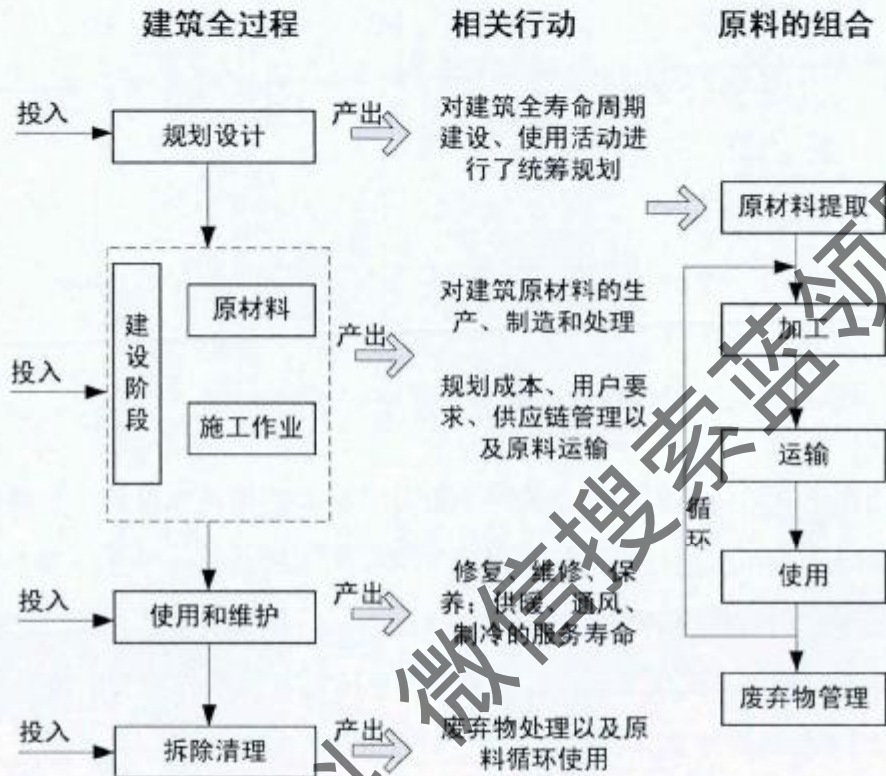


图 6-1 建筑物全寿命周期碳排放的构成

### 6.2.2 建筑物规划设计阶段碳排放来源

建筑物规划设计阶段碳排放是指从设计方接受委托任务书开始，直至最终绘制成为能够表达建筑物立体形态的建筑物图纸的阶段中由于能源消耗和物资消耗所带来的碳排放。设计阶段的因能耗产生直接的碳排放是极少的，基本上是可以忽略的，但设计阶段对后续阶段的碳排放影响是巨大的。因为建筑物的选址、结构类型、所用的材料、施工方案、采光、供暖、通风等跟建筑物的碳排放密切相关。

将设计阶段碳排放进行单独列出，一方面由于这是建筑物全寿命周期中不可或缺的一部分，另一方面可方便后期对各个阶段对碳排放总量的影响进行分析，除此之外，也可与后期建立的碳排放评价指标体系保持阶段划分的一致性。规划设计阶段碳排放见图 6-2：



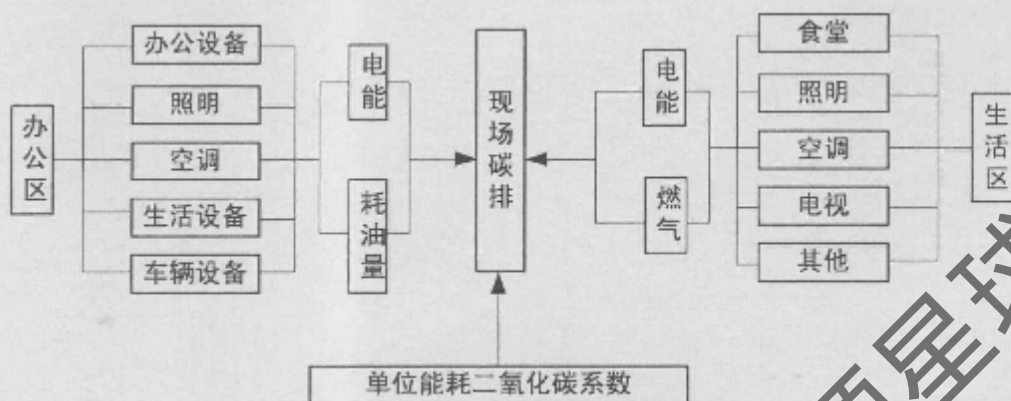


图 6-2 规划设计阶段碳排放

### 6.2.3 建筑物施工安装阶段碳排放来源

建筑物施工安装阶段碳排放分为两个部分：材料碳排放以及施工安装作业碳排放。材料碳排放是指从原材料采集到制成建筑物施工所需的材料成品为这样的一个过程。运输部分是指将建筑物材料运输到施工现场。施工安装作业部分时间从开始建设一直到工程完工，是施工碳排放的最主要来源，并且组成要素也最为复杂。

#### 1、建筑物材料碳排放

建筑物材料的碳排放从其本身而言，应该是涉及到建筑物材料的整个生命周期的，以建筑物材料在原料采取、生产、使用、回收利用等整个生命循环的碳排放为研究对象。以材料使用全生命周期考虑，目前对建筑物材料的环境影响主要考虑以下几方面<sup>[91]</sup>：

- (1) 材料在开采和生产过程中产生的废物；
- (2) 材料在加工生产过程中排放的温室气体；
- (3) 材料生产加工过程中产生的有毒气体；
- (4) 材料在生产加工过程的能源消耗；
- (5) 材料运输的能源消耗；
- (6) 材料使用过程中的能源消耗；
- (7) 材料拆除清理时的能源消耗；
- (8) 材料可再生的处理；

通过上述几个方面可知，建筑物材料的碳排放是伴随着材料从开采到拆毁的全过程。然而如果按照建筑物寿命周期进行划分，在施工安装阶段，材料碳排放则主要发生在建筑物材料的开采、加工生产、运输中，其中，对于运输而言，主要指从开采到形成建筑物材料过程中发生的运输碳排放。

首先对于材料的开产阶段，由于开产阶段需要进行一系列的化学反应，目前没有形成精确的统计数据，因此此处也不予考虑。而在材料生产加工过程中所产生碳排放主要是由于消耗化石燃料碳排放、电力碳排放以及原料之间的化学反应得到的碳排放。对于消耗的化石燃料而言，由于其主要成分是碳氢化合物或其衍生物，燃烧后会产生二氧化碳，因此，由能源的使用量与其含碳量可以推算出二氧化碳排放量；其次，建筑物材料在生产的过程中都要直接或间接地消耗电能，因使用电能而引起的碳排放跟发电的能源结构有关，在具体计算部分有详细说明；对于原料之间化学反应产生的碳排放，因为建筑物材料的种类繁多，各种建筑物材料在生产阶段所发生的化学反应各不相同。最后，对于材料在成型之前，由于运输所产生的碳排放量也需要进行考虑。以上三者综合，就是在建筑物施工安装阶段原材料所带来的碳排放，具体见图 6-3。

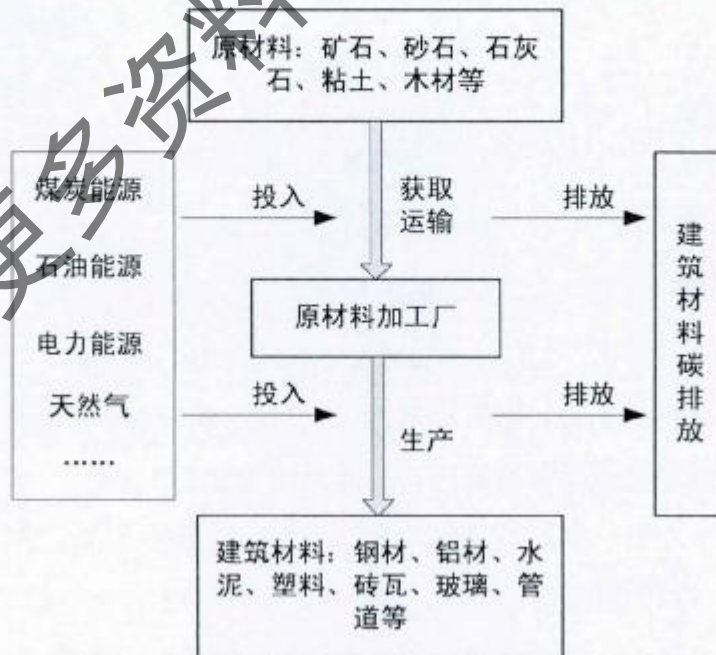


图 6-3 建筑物材料碳排放



2、施工安装作业碳排放

建筑物的施工安装阶段是独立建材，中间构件在整个工程项目过程中加工、制造的延续。这个阶段是能量消耗的重要时期，在能源消耗的构成比例中，一般施工阶段的能耗占 10%~15%，因此也是二氧化碳排放的重要阶段。

通过分析，可以得出建筑在施工安装过程中的碳排放主要来自材料、设备以及生活工作中的能源消耗<sup>[92]</sup>。为了便于统计，可以讲整个施工作业现场范围施工区、生活区和办公区三个部分，分别明细其碳排放的来源。具体如图 6-4 所示：



图 6-4 建筑物施工作业碳排放

由图 6-4 我们可以得出，将施工安装阶段所有的碳排放来源进行汇总，最后得到主要是电能的消耗和化石能源的消耗。因此上述几个方面中凡是消耗了能源都会产生二氧化碳。其中主要包括机械设备的使用、施工现场的二次运输、以及建筑物施工垃圾与建筑物材料的运输所产生的二氧化碳。

其中，对于机械设备的碳排放，因为施工阶段的机械设备的使用跟施工方案与承建商技术水平和管理水平有直接的关系，另外施工阶段使用的机械设备数量众多，

型号千差万别。这些都增加计算建筑物施工阶段碳排放量的难度。本文将提供相应的不同机械台班使用定额，更加方便计算出施工机械设备使用过程中的碳排放。

## 6.2.4 建筑物使用维护阶段碳排放来源

建筑物使用维护阶段是分析建筑物碳排放四个阶段中时间概念上最长久的一个阶段，也是能耗量所占比例最大的阶段，该阶段能耗又可分为建筑物使用能耗和基础维护能耗两部分。

### 1、建筑物使用碳排放

建筑物在使用阶段的碳排放主要来源于空调的使用耗电、照明耗电、电梯的使用以及热水供应、采暖等。其中建筑物由于用途和结构的不同可以分为住宅类建筑和商业类建筑，对于住宅建筑而言，采暖和空调、照明在总的碳排放比例中占据大比重；而对于公共建筑，其使用阶段的碳排放主要来源于空调系统和照明用电，能量消耗巨大，通常能够占建筑物全寿命周期能量消耗的 80%以上<sup>[93]</sup>，即使是对于能源使用效率极高的建筑，在使用阶段的耗能也高达 50%-60%<sup>[94]</sup>。

此处需要注意的是，对于建筑物而言，在使用阶段所产生的碳排放不包括其内部电器、家具等的能源消耗，例如电视机在使用过程中产生的碳排放就不能够包括在内。

### 2、建筑物维护碳排放

建筑物维护能耗是指在建筑物使用阶段的维护和修缮活动涉及能耗。在建筑物运行过程中，因部分材料或构件达到自然寿命需要对其维护或更换。需要更换时，维护阶段的碳排放计算与建筑物材料的生产加工以及运输的碳排放计算相似，可以最终转化成运输能源的碳排放和相应材料的碳排放。并且由于维护构建在设计基准期内一般都能够满足功能需求，故在计算维护碳排放时只需要考虑寿命较短的材料，如面砖、涂料、门窗等等，建筑物使用与维护阶段碳排放来源见图 6-5。

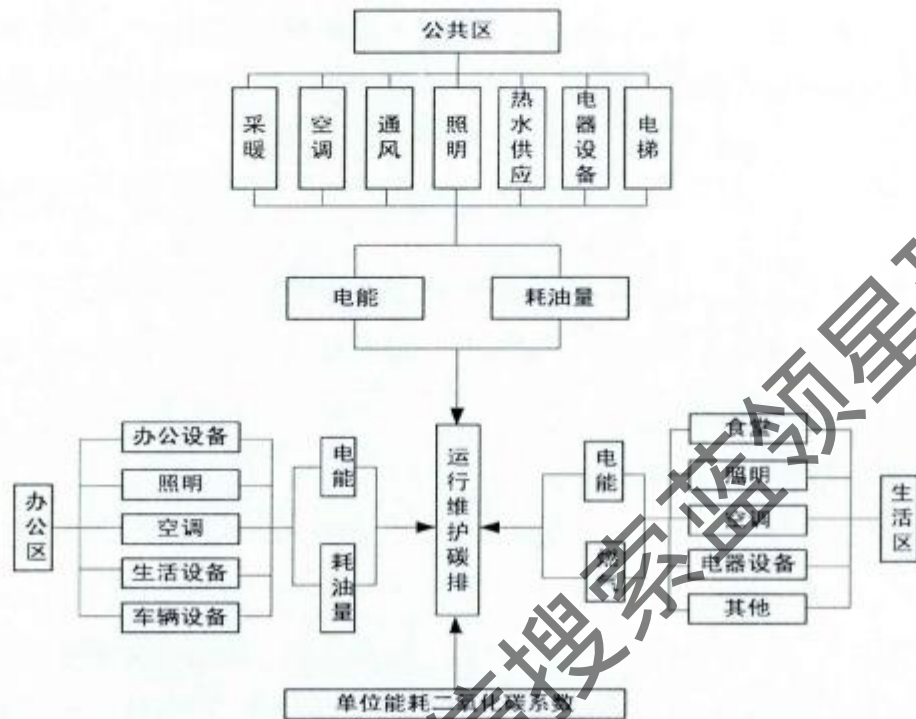


图 6-5 建筑物运行维护碳排放

### 6.2.5 建筑物拆除清理阶段碳排放来源

建筑物在拆除和清理阶段也会产生一定量的碳排放。其主要包括废弃物处理产生的碳排放、废弃物运输所产生的碳排放以及回收材料再利用所带了的碳排放。具体如图 6-6 所示:

#### 1、运输碳排放

由于废弃物在运输的时候会产生相当量的碳排放,因此有必要坚持减少废弃物,增加原来再利用再循环的原则,合理地制定材料的使用计划以及废弃物减量计划。比如模板工程,如果建筑物采用钢制模板,同时能够采取相应的管理措施,减少废弃物的利用,约可减少 30%的废弃物,减少 10%的空气污染<sup>[95]</sup>。并且废弃物运输产生的碳排放与材料运输一致,主要为水平运输工具消耗的能源和燃料。

#### 2、不可再利用废弃物处理碳排放

对于不可再利用的废弃物的处理,我们应该尽量避免和减少建筑物垃圾的焚烧和填埋。在处理不可再利用废弃物时,一般采用焚烧或者填埋的方式,其产生的碳



排放主要包括焚烧时所用的能源和电力，以及焚烧过程中产生的二氧化碳等含碳氧化物。由于化学反应较为复杂，此处只考虑焚烧需要的能源和电力产生的碳排放，其自身因氧化反应产生的碳排放实则可以包含到材料全寿命周期中进行考虑，后文会进行介绍。

### 3、可再利用废弃物处理碳排放减少

现阶段的研究对于建筑工程拆除后的废弃物利用还不是很明确，只有一部分材料在研究中得到了相对准确的再利用数据。如对于废钢铁，每 1 万吨废钢铁，可以炼出 9000 吨优质钢，这能够节约能源达到 60%<sup>[96]</sup>；铝的再生也只需要消耗不到电解铝生产的 5% 的能源<sup>[97]</sup>。除此之外，具备可再生性的材料还有建筑玻璃、木材、铝合金型材等等。本为也主要考虑以上几种材料的可再生利用。

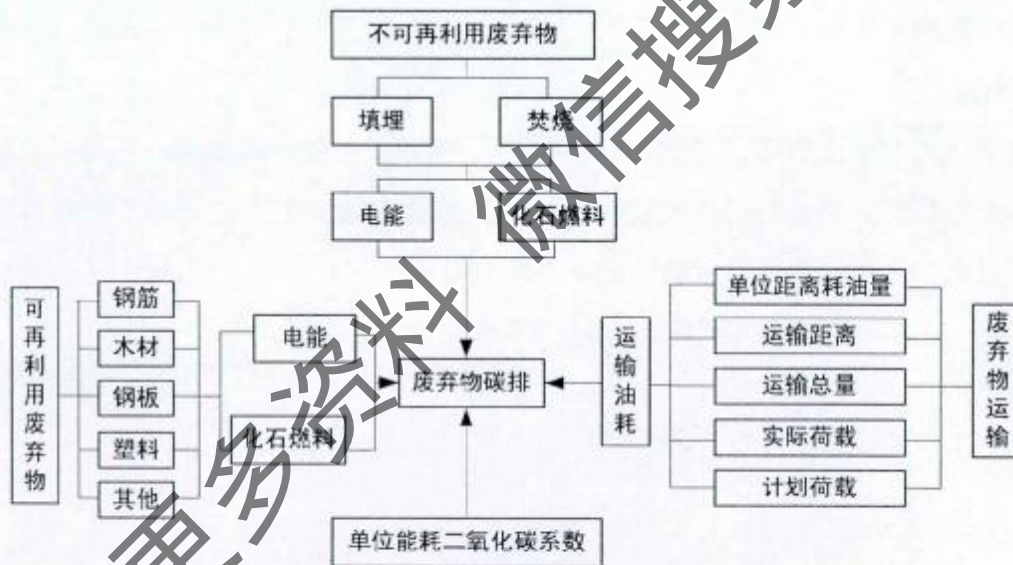


图 6-6 拆除清理阶段废弃物碳排放

## 6.3 建筑物全寿命周期碳排放的计算

### 6.3.1 建筑物全寿命周期碳排放计算概述

#### 1、碳排放因子

##### (1) 化石能源碳排放因子

能源碳排放因子是表征某种能源温室气体排放特征的重要参数<sup>[98]</sup>，同时也是计

算碳排放量的基础数据之一。将所有的能源和碳排放量建立联系，方便计算。其概念是指单位质量的能源产生碳排放的数量，具体可以单位碳的量来表示，也可以用二氧化碳的量表示，从量上来说，包含了能源从开采到使用各个环节碳排放量的总和。

对于化石能源碳排放因子的研究，已经有国内外机构、行业协会等成为了先行者。经过总结可以发现，国外而言，日本能源经济研究所、IPCC、Department of Energy/Energy Information Administration 等机构都对不同能源的碳排放因子进行了测定，并且形成了具有一定影响力的碳排放因子数据库；国内中国工程院、国家环保局、发改委等国家结构也对能源碳排放因子进行了广泛的研究和多次测定，其中，主要就煤、石油、天然气等能源进行了测定。以下也根据能源种类的不同，结合国内外的研究因子差异，进行了整理。

①煤炭

对于煤炭的碳排放而言，首先对煤炭进行了归类，主要包括精洗煤、原煤、焦炭、褐煤、无烟煤等。国内外研究机构也将煤炭作为能源研究重点之一对其碳排放因子进行了研究，各机构整理测定的结果见表 6-1：

表 6-1 煤炭碳排放因子整理 单位 kg(c)/kg

序号	来源	排放因子	均值	
国家机构	1 中国工程院	0.68	0.7254	
	2 国家环境局温室气体控制项目	0.748		
	3 国家科委气候变化项目	0.726		
	4 国家发展和改革委员会能源研究所	0.7476		
城市	5 国家科委北京项目	0.656	0.656	
国际机构	7 IPCC 国家温室气体排放清单指南	原煤	0.7559	0.745
		精洗煤	0.7559	
		焦炭	0.855	
		其他焦化产品	0.6449	
	8 DOE/EIA	0.702		
9 日本能源经济研究所	0.756			

②石油

## 华中科技大学博士学位论文

石油也是使用非常普遍的能源之一，其碳排放主要是在开采和加工过程中产生的。由于开采技术和开采难度有很大的差别，并且各个不同的机构对于其因子的确定也有不同的方法，因此形成了不同的测定结果。对于石油而言，国内外机构对于其碳排放因子研究结果差异较大，具体整理见表 6-2；

表 6-2 石油碳排放因子整理 单位 kg(c)/kg

序号	来源	排放因子	均值
国家机构	1	中国工程院	0.54
	2	国家环保局温室气体控制项目	0.583
	3	国家科委气候变化项目	0.583
	4	国家发展和改革委员会能源研究所	0.591
城市	5	国家科委北京项目	0.5825
国际机构	7	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.5857
	8	DOE/EIA	0.478
	9	日本能源经济研究所	0.586
			0.5743
			0.5825
			0.5499

### ③天然气

天然气本身的碳含量决定了天然气的碳排放系数，不同碳含量的天然气其因子也不尽相同。因此其测量的结果偏差也较大。整理见表 6-3；

表 6-3 天然气碳排放因子整理 单位 kg(c)/kg

序号	来源	排放因子	均值
国家机构	1	中国工程院	0.41
	2	国家环保局温室气体控制项目	0.444
	3	国家科委气候变化项目	0.409
	4	国家发展和改革委员会能源研究所	0.4435
城市	5	国家科委北京项目	0.452
国际机构	7	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.4483
	8	DOE/EIA	0.389
	9	日本能源经济研究所	0.449
			0.4266
			0.452
			0.4287

### ④其他化石能源碳排放因子

IPCC 作为权威的机构对多种化石能源的碳排放因子进行了测定，我国目前使用

的柴油、汽油、煤油灯能源碳排放因子也多采用此结果。整理见表 6-4:

表 6-4 其他能源碳排放因子整理分析表单位: kg(c)/kg

序号	能源	来源	排放因子
1	汽油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.5538
2	煤油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.5714
3	柴油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.5921
4	液化石油气	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.5042
5	燃料油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.6185
6	煤气	IPCC 国家温室气体排放清单指南	0.3548

## (2) 电力

建筑物材料生产过程中都要直接或间接的消耗电能, 因此, 使用电能而引起的碳排放量与电力的消耗也有关系。

对于电力的碳排放系数而言, 更多的取决于发电过程中的能源结构。对发电进行能源结构分析, 电力来源主要划分为以下几种类型:

- ①水力发电: 由于河流的上下游高差, 水将重力势能转化为电能发电;
- ②风力发电: 利用风力吹动高出大型浆叶旋转, 将动能转化为电能发电;
- ③火力发电: 利用化石燃料的燃烧, 将化石燃料的化学能和燃烧后的热能转化为电能;
- ④核能发电: 原子反应堆的核裂变释放的热能转化为电能发电;

以上四种发电方式, 对于水利发电和风力发电, 其电能来自自然界, 属于可再生的清洁能源, 在计算碳排放时可以不予考虑, 主要考虑火力发电方式。可得我国发电所带来的碳排放详见表 6-5:



# 华中科技大学博士学位论文

表 6-5 我国发电方式一览表

年份	总发电量(亿千瓦时)	火力发电量(亿千瓦时)	火力发电量所占比重	水力发电量所占比重	其它发电量所占比重
2003	19106	15804.3	82.72%	14.8%	2.4%
2005	24747	20181.2	81.55%	16.3%	2.15%
2007	32559	27134.7	83.34%	14.4%	2.3%
2009	34334	28706.7	83.61%	14.3%	2.3%

注：数据来源于中国年度统计公报

表 6-6 各种能源热值及其碳排放量

能源类别	单位	热值(kcal/单位)	热值转换单位(TJ)	碳排放系数(T-C/TJ)	碳转化率	CO <sub>2</sub> 排放量(kg-CO <sub>2</sub> /单位)
煤	Kg	7000	0.000029302	29.45	0.99	3.16
煤气	m <sup>3</sup>	5000	0.00002093	13	0.99	0.988
原油	L	9000	0.000037674	20	0.99	2.735
液化石油气	m <sup>3</sup>	6635	2.78E-05	20	0.99	1.734
煤油	L	8500	0.000035581	19.6	0.99	2.532
柴油	L	8800	3.68E-05	20.2	0.99	2.701
燃料油	L	9200	3.85E-05	23.7	0.99	3.31
天然气	m <sup>3</sup>	8900	3.73E-05	15.3	0.995	2.04
汽油	L	7800	3.27E-05	18.9	0.99	2.24
电	kWh					0.95

注：热值转换单位：1cal=4.186J  
表中数据来源于《IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventors》

表 6-7 电力碳排放因子整理分析表

序号	来源	排放因子	均值
国家机构	1 中国工程院	0.26	0.2747
	2 国家环保局温室气体控制项目	0.286	
	3 国家科委气候变化项目	0.278	
城市	4 国家科委北京项目	0.251	0.251
国际机构	5 DOE/EIA	0.269	0.2795
	6 日本能源经济研究所	0.29	

根据中国工程院给的相关数据，我们可以以煤炭然后的火力发电为参考，使用 1 度电能就要排放 0.95kg 二氧化碳<sup>[9]</sup>。因此将单位材料生产所消耗的电能，乘上此数

据即可得到电力消耗转化的碳排放量。

(3) 常用建材单位碳排放

建筑材料在开采和生产过程中，需要经历复杂的化学反应，因此计算具有一定的难度。对于其生产开采过程，由于剥离、开采过程不一，此处不予考虑。

在加工过程中，由于每种材料的化学生成形式相对单一，经过国内外学者的总结和计算，现阶段已经形成了建筑物主要材料生产所需能耗的表格，为材料碳排放提供了简化计算的依据<sup>[100-102]</sup>。

表 6-8 主要建筑物材料生产所需单位能耗（建筑物材料的内含或源生能量）

建材名称	单位建材内含能量 (MJ/Kg)	废弃比率 (%)
砂	0.6	5
碎石	0.9	5
水泥	5.3	5
砖	3.66MJ/块	10
玻璃	17.56	5
钢材（普通）	26.62	10
电炉钢	16.39	10
冷轧钢	32.8	10
塑料	112.2	10
铝	421.65	10
黄铜	239	5
压铸铜	71.6	5
沥青	51	5
沥青屋面板	55.6	5
面砖	4.5	10
陶瓷	29.39	10
卫生陶瓷	43.25	5
木材	1592.3MJ/m <sup>3</sup>	7
胶合板	8.3	5
混凝土	1.6	5
底衬毛毡	41.2	5
玻璃纤维	24.5	5
石膏	3.8	10
橡胶	70.8	5

续表 6-8

灰浆	1.9	5
墙纸	16.2	5
水基涂料	77.6	5
水	0.2	20
牛皮纸	37.7	5
石灰	5.27	5
PVC 管材	22.16	5

注：表格中所提到材料的单位建材能量来自以下文献：

砂、砖、黄铜、压模铜、水、牛皮纸、石灰<sup>[103]</sup>；

碎石、塑料、沥青、沥青屋面板、雨砖、胶合板、混凝土、底衬毛毡、玻璃纤维、石膏、橡胶、灰浆、墙纸、水基涂料；

水泥、玻璃、钢材（普通）、陶瓷<sup>[104]</sup>；

卫生陶瓷<sup>[105]</sup>；

电炉钢、冷轧钢、PVC 管材<sup>[106]</sup>；

铝、木材<sup>[107]</sup>；

从材料的全寿命周期考虑，在计算材料碳排放的过程中，必须将材料的可再生性考虑在内。对于可再生材料，虽然在生产过程中消耗了一定的能源，产生了碳排放，但是由于其具有可再生性，在拆除前清理阶段可以抵消一部分碳排放。由经验和研究总结得出，对于建筑材料而言，有较大可再生性的材料主要包括刚才、混凝土、砖石、非铁金属、玻璃以及木材<sup>[108]</sup>，其具体的回收系数见表 6-9：

表 6-9 主要废旧建筑物材料的回收利用比率

建材种类	钢材	混凝土	砖石	非铁金属	玻璃	木材
回收率%	0.95	0.6	0.6	0.9	0.8	0.1

#### (4) 常用机械设备台班能源消耗因子

对于机械设备的碳排放，因为施工阶段的机械设备的使用与施工方案与承建商技术水平和管理水平有直接的关系，另外施工阶段使用的机械设备数量众多，型号千差万别。这些都增加计算建筑物施工阶段碳排放量的难度。

此处，我们参照《全国统一施工机械台班费用定额》将建筑物按照不同分部分

项工程统计不同分部工程单位工程所使用机械，主要包括土石方及筑路机械、打桩机械、起重机械、水平运输机械、垂直运输机械、混凝土及砂浆机械、加工机械、泵类机械、焊接机械、动力机械、地下工程机械、其他机械，共 12 种。

通过对各个分部工程中使用的机械设备的标准台班能耗进行汇总，然后将现场使用的所有机械、设备、汽车等功率或油耗乘以相应台班后汇总得到机械所有的能源消耗。最后将机械使用的能源的二氧化碳排放系数后汇总通过分别的相乘计算，得到施工过程机械设备所使用的碳排放。

根据全国统一施工机械定额的分类，一共可以分为 12 种分部分项工程中使用的不同机械，以《全国统一施工机械台班费用定额》中第四项、水平运输机械为例，其台班能源消耗见表 6-10：

表 6-10 水平运输机械台班能源消耗表

四、水平运输机械									
编号	机械名称	机型	规格型号		台班能源消耗				
					汽油	柴油	煤	电	木柴
					kg	kg	kg	kwh	kg
4-1	载重汽车	中	载重量 (t)	2.5	20.36				
4-2	载重汽车	中	载重量 (t)	4	25.48				
4-3	载重汽车	中	载重量 (t)	5		32.19			
4-4	载重汽车	中	载重量 (t)	6		32.19			
4-5	载重汽车	大	载重量 (t)	8		35.49			
4-6	载重汽车	大	载重量 (t)	10		40.03			
4-7	载重汽车	大	载重量 (t)	12		46.27			
4-8	载重汽车	大	载重量 (t)	15		56.74			
4-9	自卸汽车	中	载重量 (t)	2	17.27				
4-10	自卸汽车	中	载重量 (t)	4	31.34				
4-11	自卸汽车	中	载重量 (t)	6		36.26			
4-12	自卸汽车	大	载重量 (t)	8		40.93			
4-13	自卸汽车	大	载重量 (t)	10		43.19			
4-14	自卸汽车	大	载重量 (t)	12		46.59			

# 华中科技大学博士学位论文

续表 6-10

4-15	自制汽车	大	载重量 (t)	15	52.93			
4-16	自卸汽车	大	载重量 (t)	20	60.40			
4-17	平板拖车组	大	载重量 (t)	8	30.05			
4-18	平板拖车组	大	载重量 (t)	10	35.50			
4-19	平板拖车组	大	载重量 (t)	15	44.59			
4-20	平板拖车组	大	载重量 (t)	20	45.39			
4-21	平板拖车组	大	载重量 (t)	25	49.13			
4-22	平板拖车组	大	载重量 (t)	30	52.37			
4-23	平板拖车组	大	载重量 (t)	40	57.37			
4-24	平板拖车组	大	载重量 (t)	50	62.38			
4-25	平板拖车组	大	载重量 (t)	60	69.66			
4-26	平板拖车组	大	载重量 (t)	80	84.52			
4-27	平板拖车组	大	载重量 (t)	100	105.90			
4-28	平板拖车组	大	载重量 (t)	150	163.50			
4-29	管子拖车	大	载重量 (t)	24	122.50			
4-30	管子拖车	大	载重量 (t)	27	122.50			
4-31	管子拖车	大	载重量 (t)	35	122.50			
4-32	长材运输车	大	载重量 (t)	8	41.72			
4-33	长材运输车	大	载重量 (t)	12	44.98			
4-34	长材运输车	大	载重量 (t)	15	51.56			
4-35	壁板运输车	大	载重量 (t)	8	36.29			
4-36	壁板运输车	大	载重量 (t)	15	51.08			
4-37	自装自卸运输车	大	载重量 (t)	6	48.30			
4-38	自装自卸运输车	大	载重量 (t)	8	53.53			
4-39	机动翻斗车	小	载重量 (t)	1	6.03			
4-40	机动翻斗车	中	载重量 (t)	1.5	9.77			
4-41	油罐车	中	罐容量 (L)	5000	30.64			

续表 6-10

4-42	油罐车	大	罐容量(L)	8000		33.80		
4-43	洒水车	中	罐容量(L)	4000	29.96			
4-44	洒水车	大	罐容量(L)	8000		33.00		
4-45	轨道拖车头	中	功率(kw)	30		6.80		
4-46	轨道平车	小	载重量(t)	5				
4-47	轨道平车	中	载重量(t)	10				

以下为机械使用的能源的二氧化碳排放系数，见表 6-11

表 6-11 机械使用能源的碳排放系数

能源类别	单位	热值(kcal/单位)	热值转换单位(TJ)	碳排放系数(TCO <sub>2</sub> /TJ)	碳氧化率	CO <sub>2</sub> 排放量(kg-CO <sub>2</sub> /单位)
煤	kg	7000	0.000029302	29.45	0.99	3.16
柴油	kg	8800	3.68E-05	20.2	0.99	2.701
汽油	kg	7800	3.27E-05	18.9	0.99	2.24
电	kWh					0.95

注：热值转化单位：1cal=4.186J  
表中数据来源于《IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventors》

2、计算框架

(1) 划分建筑物全寿命周期四个阶段

由于建筑物生命周期的划分不同，所以生命周期碳排放的计算方法也不尽相同。造成各种方法差别的原因还包括建筑物类型、碳排放源清单的详细程度，以及生命周期考虑的因素等。全寿命周期理论将建筑物碳排放分为四个阶段：规划设计阶段、施工安装阶段、使用维护阶段和拆除清理阶段，见图 6-7：

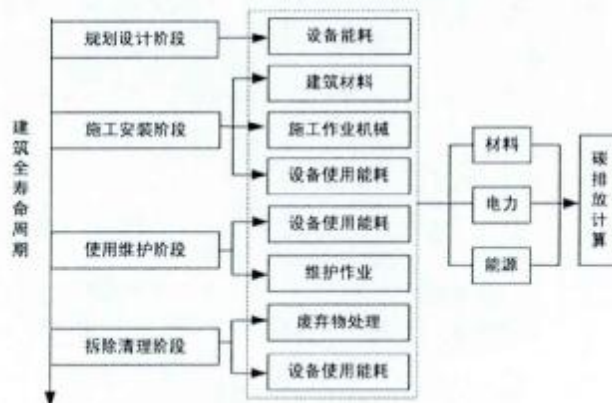


图 6-7 建筑物全寿命周期碳排放阶段划分



(2) 确定各个阶段的碳排放的统计对象

经过前文对建筑物全寿命周期的划分, 结合对各阶段碳排放来源的研究, 可以认为建筑物全寿命周期碳排放总量为生命周期各阶段碳排放量之和。然而, 单体建筑物碳排放的测算是一个相对较为复杂的过程, 测算界限并不明确、碳排放来源也多样, 因此, 有必要建立规范的各阶段测算清单, 方便进行碳排放量的测算。

为了方便建筑物全寿命周期碳排放清单的建立, 首先, 在建筑物全寿命周期内将建筑物按照空间区域进行划分, 所谓空间是指在由建筑物单体建造和使用需求而产生温室气体排放的所有空间场所的总称, 主要指建筑物单体及附属公共空间内产生碳排放的空间, 如办公区、生活区、公共区等, 方便进行固定区域内的统计计算; 其次, 对于各个阶段产生碳排放的机械设备进行汇总划分, 机械设备主要是指在施工安装阶段的现场使用机械以及使用维护阶段还在使用的设备, 有助于统计计算工作的具体实施; 再次, 将上述所有的设备耗油耗电等统计后, 按照碳汇原理选取相应的碳排放因子, 进行最后的计算。

通过上述分析, 可知对于各个阶段碳排放来源可以总结出需要我们统计和计算的对象, 下图以施工安装阶段为例, 表现了施工安装阶段碳排放的计算框架和思路, 图 6-8:

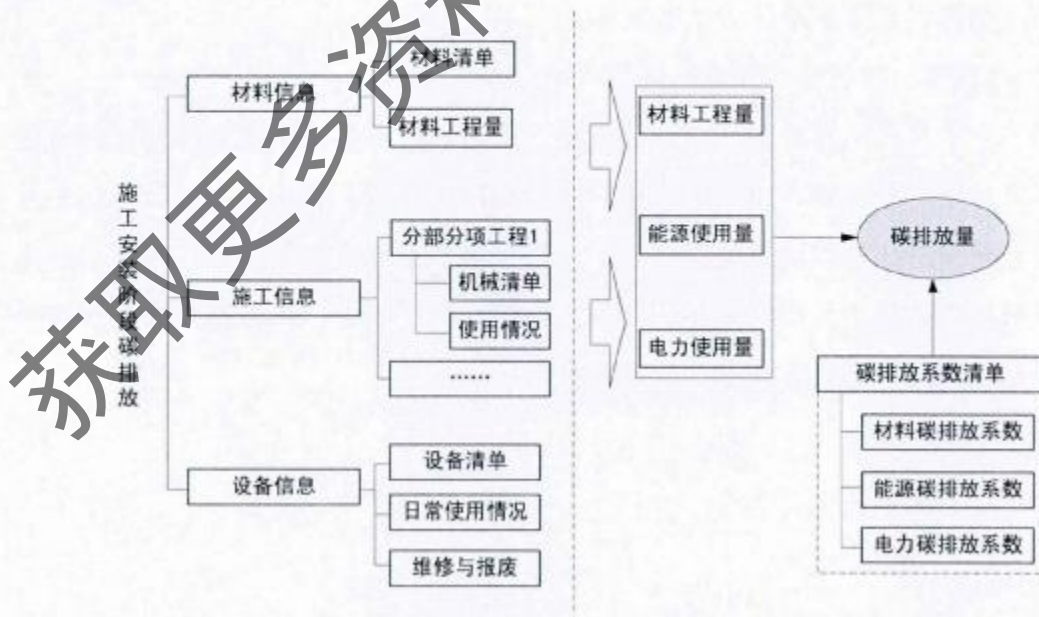


图 6-8 建筑物施工阶段碳排放计算框架

对于建筑物各个阶段的划分，规划设计阶段碳排放可以总结为能源和电力产生的碳排放；施工安装阶段由于材料产生的碳排放比较特殊，可以做为另外一部分进行计算，除此之外也主要是机械设备能源和电力的消耗；同理，建筑物使用维护以及拆除清理阶段的碳排放追根溯源，也是由于能源和电力消耗产生，故可以采用国际广泛的碳汇分类的方法将排放源分为四类，也是我们进行各阶段碳排放对象确立的依据。

**静止燃烧碳排放：**静止设备内部的燃料燃烧，如锅炉、熔炉、涡轮、加热器、燃烧炉、发动机等；消耗的燃料主要为煤炭、石油、天然气，以及部分常见燃料。主要计算阶段为施工安装阶段、使用维护阶段和拆除清理阶段。

**移动燃烧碳排放：**移动燃烧运输工具的燃料燃烧，例如汽车、卡车、火车、飞机、船舶等；消耗的燃料主要考虑其他常见燃料中的汽油、柴油等，可参见下文，主要用于计算施工安装阶段的材料运输、使用维护阶段和拆除清理阶段。

**材料碳排放：**主要计算阶段为施工安装阶段和拆除清理阶段，由于材料的生产加工涉及化学反应和工艺加工生产操作，故单独列出计算。

**电力碳排放：**电能而引起的碳排放量与具体的能源结构有关，通过专家研究，已经将电力与相应的能源消耗、碳排放建立联系，形成电力和能源消耗转化因子，故电力碳排放可以直接参看相应系数表格。

### (3) 建立各个阶段碳排放量的计算清单

清楚各个阶段的碳排放需要统计的对象，就可以建立各个阶段相应的碳排放量的计算清单。用各种能源、电力的耗用量乘以相应的系数，得出碳排放量。这些系数是经过计算得出的排放源温室气体排放量与代表性活动量度直接的比率。《温室气体议定书》的计算工具提供了相应燃料的排放系数。因此，可以得到在建筑物全生命周期，各阶段碳排放清单建立步骤见图 6-9：



图 6-9 各阶段清单建立步骤

基于空间划分和排放来源本质的划分，我们可以建立建筑物各个阶段碳排放来源的清单。基于清单的基础，同时对于不同的排放来源找到其对应的计算因子，两者结合，就能够计算出具体建筑物全寿命碳排放量。

### 3、计算步骤

由建筑物全寿命周期理论，可得建筑物全寿命周期碳排放的计算公式，见式 (6-1)：

$$C_{tot} = C_{de} + C_{erect} + C_{occup} + C_{disp} \quad (6-1)$$

式中各项说明如下：

$C_{tot}$ ：建筑物全寿命周期的碳排放总量，单位 kg；

$C_{de}$ ：建筑物在规划设计阶段的碳排放量，单位 kg；

$C_{erect}$ ：建筑物在施工安装阶段的碳排放量，单位 kg；

$C_{occup}$ ：建筑物在使用维护阶段的碳排放量，单位 kg；

$C_{disp}$ ：建筑物在拆除清理阶段的碳排放量，单位 kg；

#### (1) 建筑物规划设计阶段碳排放 $C_{de}$

由上述所有分析可得，在此阶段中，碳排放主要来源于参与规划设计的办公场所的耗电量以及相应的能源耗用量。故可得其计算式 (6-2)：

$$C_{de} = E_{de} + \sum_{i=1}^n A_i k_i T(de) + \sum_{i=1}^n H(de)_i h_i \quad (6-2)$$

其中  $E_{de}$ ：表示在规划设计阶段办公区和生活区电能的消耗量，单位是度。故实



质上按照区域统计划分，可以得到其计算式（6-3）：

$$E_{de} = E_{de-w} + E_{de-l} \quad (6-3)$$

$E_{de-w}$ ：表示在规划设计阶段办公区耗电量，单位度；

$E_{de-l}$ ：表示在规划设计阶段生活区耗电量，单位度；

$d$ ：表示电能的单位碳排放，单位是 kg/度，计算时可取 0.95；

$A_i$ ：表示第  $i$  种办公车辆对应能源的年耗能值，单位是 KJ/年；

$k_i$ ：表示第  $i$  种办公车辆年耗能值的碳排放转换因子，单位是 kg(c)/KJ；

$T(de)_i$ ：表示第  $i$  种办公车辆在规划设计阶段的使用时间，单位年；

$H(de)_i$ ：表示在建筑物规划设计阶段，第  $i$  种化石燃料的消耗量，单位是

kg；

$h_i$ ：表示第  $i$  种化石燃料的单位二氧化碳碳排放量 kg(c)/kg；

#### (2) 建筑物施工安装阶段碳排放计算 $C_{erect}$

在此阶段中，碳排放主要来源于建筑物材料以及施工作业产生的碳排放，同时还包括生活区电力和燃气的消耗产生的碳排放等。需要注意的是，为了后期方便计算，在此处材料碳排放系数近似处理为全寿命周期内材料的碳排放，也就是考虑了上文中所述包含回收率在内的部分材料的碳排放系数（主要为六种），此目的仅为了简便后期的计算，因此，在拆除清理阶段不考虑材料回收所减少的碳排放。故可得其计算式（6-4）：

$$C_{erect} = E_{erect} d + \sum_{i=1}^n A_i k_i T(erect) + \sum_{i=1}^n M_i Q_i m_i + \sum_{i=1}^n H(erect)_i h_i \quad (6-4)$$

其中， $E_{erect}$ ：表示在施工安装阶段办公区、生活区和施工区电能的消耗量，单位是度。故实质上按照区域统计划分，可得其计算式（6-5）：

$$E_{erect} = E_{erect-w} + E_{erect-l} + E_{erect-s} \quad (6-5)$$

$E_{erect-w}$ ：表示在施工安装阶段办公区耗电量，单位度；

$E_{erect-l}$ ：表示在施工安装阶段生活区耗电量，单位度；

$E_{erect-s}$ ：表示在施工安装阶段施工区耗电量，单位度；

$T(erect)_i$ ：表示第  $i$  种办公车辆在施工安装阶段的使用时间，单位年；

# 华中科技大学博士学位论文

$M_i$ : 表示第  $i$  种材料单位建材内含能量, 单位 MJ/kg, 查表可得;

$Q_i$ : 表示第  $i$  种材料用量, 单位 kg;

$m_i$ : 表示第  $i$  种材料对应能源与碳排放量转换系数, 单位 kg(c)/Mg, 需要注意的是材料在生产过程中消耗的能源不同, 理论上不同能源对应不同的碳转化系数, 为了简化计算, 在材料计算过程中  $m$  取统一值;

$H(erect)_i$ : 表示在施工安装阶段阶段, 第  $i$  种化石燃料的消耗量, 单位是 kg; 其中, 由于施工机械设备台班能源消耗因子已知, 运输设备也包含其中, 故可以得到其计算式 (6-6);

$$H(erect)_i = \sum_{j=1}^n N_{ij} Y(erect)_j \quad (6-6)$$

$N_{ij}$ : 表示  $j$  机械设备所用第  $i$  种化石燃料的台班能源消耗, 单位 kg/台班;

$Y(erect)_j$ : 表示  $j$  机械在施工安装阶段的使用台班量;

### (3) 建筑物使用维护阶段碳排放计算 $C_{occup}$

在此阶段中, 碳排放主要来源于维护的机械设备以及使用阶段的耗能耗电所产生的碳排放, 可得其计算式 (6-7);

$$C_{occup} = E_{occup} d + \sum_{i=1}^n A_i k_i T(occup) + \sum_{i=1}^n H(occup)_i h \quad (6-7)$$

其中  $E_{occup}$ : 表示在使用维护阶段办公区、展馆区和生活区电能的消耗量, 单位是度。故实际上按照区域统计划分, 可得其计算式 (6-8);

$$E_{occup} = E_{occup-O} + E_{occup-G} + E_{occup-S} \quad (6-8)$$

$E_{occup-O}$ : 表示在使用维护阶段办公区耗电量, 单位度;

$E_{occup-G}$ : 表示在使用维护阶段公共区耗电量, 单位度;

$E_{occup-S}$ : 表示在使用维护阶段生活区耗电量, 单位度;

$T(occup)_i$ : 表示第  $i$  种办公车辆在施工安装阶段的使用时间, 单位年;

$H(occup)_i$ : 表示在使用维护阶段, 第  $i$  种化石燃料的消耗量, 单位是 kg;

同理可以得到其计算式 (6-9);

$$H(occup)_j = \sum_{j=1}^n N_j Y(occup)_j \quad (6-9)$$

$Y(occup)_j$ : 表示  $j$  机械在使用维护阶段的使用台班量;

#### (4) 建筑物拆除清理阶段碳排放计算 $C_{disp}$

在此阶段中, 碳排放主要来源于维护的机械设备以及使用阶段的耗能耗电所产生的碳排放, 可得其计算式 (6-10):

$$C_{disp} = E_{disp} d + \sum_{i=1}^n A_i k_i T(dispen) + \sum_{i=1}^n H(dispen)_i h_i \quad (6-10)$$

其中  $E_{disp}$ : 表示在使用维护阶段办公区、公共区和生活区电能的消耗量, 单位是度。故实质上按照区域统计划分, 可得其计算式 (6-11):

$$E_{disp} = E_{disp-O} + E_{disp-G} + E_{disp-S} \quad (6-11)$$

$E_{disp-O}$ : 表示在拆除清理阶段办公区耗电量, 单位度;

$E_{disp-G}$ : 表示在拆除清理阶段公共区耗电量, 单位度;

$E_{disp-S}$ : 表示在拆除清理阶段生活区耗电量, 单位度;

$T(dispen)_i$ : 表示第  $i$  种办公车辆在拆除清理阶段的使用时间, 单位年;

$H(dispen)_i$ : 表示在拆除清理阶段, 第  $i$  种化石燃料的消耗量, 单位是 kg;

同理可以得到其计算式 (6-12):

$$H(dispen)_i = \sum_{j=1}^n N_j Y(dispen)_j \quad (6-12)$$

$Y(dispen)_j$ : 表示  $j$  机械在拆除清理阶段的使用台班量;

### 6.3.2 建筑物规划设计阶段碳排放计算

#### 1、规划设计阶段碳排放计算特点

对于设计规划阶段而言, 其产生的碳排放从空间划分主要为办公区和生活区, 故其来源主要为照明耗电、空调设备耗电以及其他的耗能, 并且需要考虑一定移动设备所消耗的能量。总体而言可以汇总为能源的消耗和电力消耗。

#### 2、规划设计阶段碳排放计算清单



根据规划设计阶段碳排放来源特点和统计的规律, 可得其计算清单详见附表 1。

### 6.3.3 建筑物施工安装阶段基于施工方案的碳排放计算

#### 1、施工安装阶段碳排放计算特点

对于建筑物施工安装阶段, 由于其工作空间多样, 碳排放来源多样, 在测算的时候需要分空间分种类进行统计。主要可以分为生活区的耗能耗电、施工现场的耗能耗电、施工现场的机械使用、施工现场的原材料使用以及办公区的耗能耗电。

由于机械设备使用以及所有区域的耗能耗电均可以转化为能源和电力的消耗, 而对于材料, 由于需要考虑其施工安装阶段的碳排放以及拆除阶段可能涉及到的回收碳排放减少, 则相对而言较为复杂。因此, 在本文中, 在施工安装阶段, 对于原材料我们考虑的是原材料的全寿命周期所带来的碳排放, 列出材料使用清单, 根据对应的 BEES 系数, 计算出其碳排放。

#### 2、施工安装阶段碳排放计算清单

由于施工安装阶段涉及的空间多, 碳排放来源多样, 根据前文中的划分, 可以形成三分清单, 进行汇总, 得到建筑物施工安装阶段的碳排放量。

##### (1) 建筑物材料碳排放清单

从建筑物全寿命周期角度考虑, 涉及到建筑物材料碳排放的阶段主要为施工安装阶段以及拆除清理阶段。施工安装阶段考虑建材从开采、加工一直到成型所带来的碳排放, 然而对于部分材料, 如钢筋、型钢、建筑物玻璃、铝合金型材、木材等, 需要考虑其在拆除清理阶段的回收利用, 回收利用其实是碳排放减少的过程。基于对建筑物建材种类的分析, 列出常见建材, 并且对于其单位碳排放因子, 已经有相关机构给出, 故可以得到材料的碳排放清单见附表 2。

##### (2) 施工安装阶段机械设备碳排放清单

施工安装机械在使用过程中会产生碳排放, 其大量用于建筑物的施工安装阶段, 其中机械设备可以分为施工现场机械以及移动运输机械, 需要注意的是移动运输机械不包含办公用的车辆。

而根据我国 2011 年全国统一施工机械台班费用定额，将施工机械设备主要分为 12 大类，给种机械都有其台班能耗量以及能耗种类，故根据此定额，对施工安装阶段的机械设备进行统计，能够得出施工安装阶段的机械设备使用碳排放。施工安装阶段部分机械设备碳排放清单见附表 3。

### (3) 施工安装阶段办公区、生活区、施工区耗能耗电清单

对于施工安装阶段，与规划设计阶段一样，可以分为生活区的耗能耗电、施工区耗能耗电，办公区的耗能耗电。此处需要注意的是，施工区的耗能耗电已经不包含机械设备使用时的耗能耗电。详见附表 4。

## 3、基于 BIM 的建筑物施工阶段碳排放模型

### (1) BIM 建模

Building information modeling (简称 BIM) 通过数字信息仿真反应建筑物所有真实信息，包括三维几何形状信息和非几何形状信息（如建筑构件的材料、重量、价格、进度和施工等等），即集成了建筑工程项目各种相关信息的工程数据，它为设计师、建筑师、水电暖通工程师、开发商乃至最终用户等各环节人员提供“模拟和分析”的数据。

随着数字化、信息化和智能化技术的发展，BIM 技术为解决建筑行业存在的问题提供了新的解决思路。就碳排放测算而言，BIM 模型涵盖了建筑工程项目相关的所有工程数据，为建筑物碳排放的测算提供了充足的数据基础，其优越性主要体现在施工阶段和运营阶段的碳排放测算。对于施工阶段而言，由于 BIM 不仅仅含有建筑工程本身的材料、机械信息，还能够通过导入进度进化使整个建筑模型与工程进度相连，因此，可以用来计算施工阶段动态的碳排放量。

### (2) 施工阶段动态碳排放计算

BIM 模型拥有建筑全部的与项目有关的各种信息，充分利用模型所拥有的信息进行碳排放计算成为研究的重点工作。

结合碳排放测算对数据的需求，针对施工阶段，我们可以从建筑信息模型中抽取建筑的四方面信息：材料信息、施工信息、设备信息和进度信息；材料信息中包含了材料选择、材料供应、材料的使用情况等；施工信息包含了工程所有的分部

分项工程的机械使用情况信息；设备信息包含了施工阶段设备选择、设备使用等；进度信息则是通过其他文件导入，与 BIM 模型结合，呈现动态效果。这四方面的信息考虑了建筑物施工阶段的碳排放来源，为建筑碳施工阶段碳排放量的动态测算提出有效数据。其计算思路和过程见图 6-10。

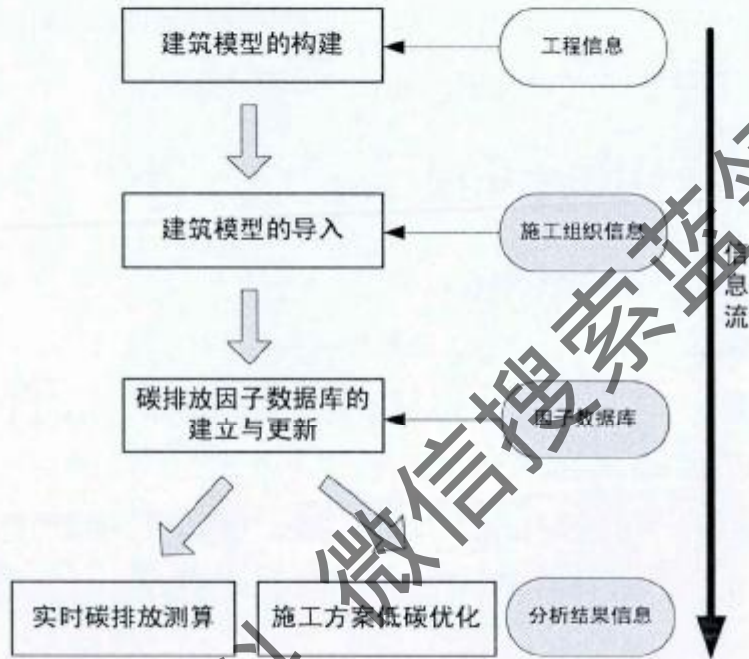


图 6-10 基于 BIM 的建筑物施工阶段碳排放动态测算模型

以上关于 BIM 的介绍以及基于 BIM 的建筑物施工阶段碳排放测算，可以为建筑物全寿命期碳排放测算提供一种动态的思路，除此之外，BIM 建模必将是未来建筑设计的一种发展趋势，基于 BIM 进行全寿命期的碳排放计算，也有利于施工方案以及运营方案的低碳优化，具有非常重要的意义。

#### 6.3.4 建筑物使用维护阶段基于运营方案的碳排放计算

##### 1、使用维护阶段碳排放计算特点

对于建筑物使用维护阶段而言，其碳排放的来源主要来自与办公区、生活区以及公共区的耗能耗电。运营期使用的设备，照明等的耗能耗电所带来的碳排放。除此之外，还需要考虑在特殊情况下维护可能用到的机械设备所造成的碳排放。

由于使用维护在全寿命周期中所占的时间最长，因此在计算的时候更多的是考虑年均一般情况下建筑物各个空间以及所有设备产生的耗能耗电量，转化为碳排放，然后乘以相应的使用年限。

## 2、使用维护阶段碳排放计算清单

根据使用维护阶段碳排放计算特点，可以得出其机械设备使用碳排放清单见附件 5。办公区、生活区、公共区耗能耗电碳排放清单见附件 6。

### 6.3.5 建筑物拆除清理阶段碳排放计算

#### 1、拆除清理阶段碳排放计算特点

建筑物在拆除清理阶段，产生的碳排放空间还是与使用维护阶段相近，来源主要是为拆除清理时使用的机械设备、拆除清理时的耗能耗电，对于建筑物原材料而言，在拆除清理阶段废弃物处理过程中，部分由于焚烧等处理会产生碳排放，由于这个过程涉及到一系列化学反应，故不作考虑。而对于可回收的建筑材料，为了方便计算，在施工安装阶段算材料时已经用的全寿命周期系数，故此处也不予考虑。

#### 2、拆除清理阶段碳排放计算清单

结合拆除清理阶段碳排放计算的特点以及相关的碳排放空间和来源，可以得到建筑物在拆除清理阶段机械设备使用所产生的碳排放量清单见附表 7；办公区、生活区、公共区耗能耗电碳排放清单见附表 8。

## 6.4 实证研究—武汉国际博览城展馆碳排放测算与评价

目前我国低碳建设的发展还处于探索阶段，相关的研究和技术体系还不完善，低碳建设没有形成较为稳固的模式，对建筑物低碳信息的处理和分析也没有必要的技术支持和完善的分析体系，低碳建设的研究和应用都较为盲目和分散，不成体系，与国外相比尚有一定的差距，因此，越来越多的政府和企业也在着力于研究碳排放的测算已经低碳建筑的评价。

武汉国际博览中心被誉为武汉市会展“航母”。建成后的博览中心总建筑物面积 240 万平方米，由展馆、配套商务及居住区、会展产业园共三大板块组成，是华中

地区规模最大、功能最完善的复合型国际博览城。

本实证研究部分针对武汉国际博览城项目七区展馆进行全寿命周期的碳排放测算，通过构建武汉国际博览城项目七区展馆全寿命周期的碳排放测算系统，建立并且完善类似武汉国际博览城的公共建筑物、公共展厅的碳排放测算体系；并且通过案例全寿命周期各阶段自身的碳排放比较以及国际博览城展厅与其它建筑物碳排放的比较，得出具体的结论，为后期建设类似建筑物的决策者展示建筑物的低碳节能信息，为他们提供方案比选的依据，实现低碳建筑物的最终目标。

#### 6.4.1 武汉国际博览城展馆全寿命期碳排放测算

##### 1、排放因子选择

##### (1) 化石能源碳排放因子

关于碳排放因子，前文已经提到各种相关的机构给出的不同能源的碳排放系数，其中，由于 IPCC 排放因子数据库是建立最早也是相对最完善的碳排放数据库，故此处大部分能源选择 IPCC 能源碳排放因子作为标准。

除一般能源如汽油、煤油外，电能的碳排放、煤炭的碳排放因子数据来源结合我国实际情况，参考中国工程院给出的相关系数进行计算，具体见表 6-12。

表 6-12 能源碳排放因子

序号	能源	来源	单位	排放因子 kg(c)/单位	CO <sub>2</sub> 排放因子 kg(CO <sub>2</sub> )/单位
1	汽油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	Kg	0.5538	2.0306
2	煤油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	Kg	0.5714	2.0951
3	柴油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	Kg	0.5921	2.1710

续表 6-12

4	液化石油气	IPCC 国家温室气体排放清单指南	Kg	0.5042	1.8487
5	燃料油	IPCC 国家温室气体排放清单指南	Kg	0.6185	2.2678
6	煤气	IPCC 国家温室气体排放清单指南	m <sup>3</sup>	0.3548	1.3009
7	电力	中国工程院	m <sup>3</sup>	0.26	0.9533
8	天然气	中国工程院	m <sup>3</sup>	0.41	1.5033
9	煤炭	中国工程院	Kg	0.68	2.4933
10	石油	中国工程院	Kg	0.54	1.98

(2) 武汉国际博览城展馆使用建材单位碳排放系数

美国标准和技术研究院开发的 BEES 软件<sup>[101]</sup> (Building for Environmental and Economic Sustainability, BEES), 能够对建筑物材料全寿命周期的环境影响作出综合评价。现在已经有 BEES4.0 版本, 范围涉及几乎建筑物使用的所有的材料, 包括结构材料、装饰装修材料以及景观布置等材料。本文对于材料碳排放的系数选择就是依托此软件和其建立的数据库, 建立全寿命周期材料碳排放系数清单, 见表 6-13。

表 6-13 武汉国际博览城展馆区使用主材全寿命期内的碳排放因子

建材名称	单位	碳排放转化系数 Kg(c)/单位	碳排放量 kg (CO <sub>2</sub> ) /单位
水泥	m <sup>3</sup>	35.17	128.96
混凝土砌块	m <sup>3</sup>	60.00	220.00
混凝土	m <sup>3</sup>	18.04	66.51
钢筋	t	39.93	146.41
铝板	m <sup>2</sup>	16.95	62.15
乳胶漆	m <sup>2</sup>	1.38	5.06
砂浆	m <sup>3</sup>	35.17	132.62
面砖	m <sup>2</sup>	26.74	98.05



续表 6-13

花岗石板材	m <sup>2</sup>	27.70	101.57
喷塑面	m <sup>2</sup>	1.00	3.67
沥青卷材	m <sup>2</sup>	12.95	47.48
装饰金属板	m <sup>2</sup>	6.06	22.22
石膏板	m <sup>2</sup>	21.23	77.84

(3) 武汉国际博览城展馆使用机械设备台班能源消耗因子, 见表 6-14

表 6-14 能源对应碳排放系数

能源对应碳排放系数 kg(c)/单位			
汽油	柴油	煤	电
0.55	0.59	0.68	0.26

根据具体实际使用的机械台班以及相应机械的台班能源消耗情况选择相应的因子进行碳排放的计算。

## 2、碳排放清单确定及计算

### (1) 武汉国际博览城规划设计阶段碳排放计算

由上文研究的成果可知, 武汉国际博览城规划设计阶段碳排放主要有如下几个部分: 一是项目办公区所消耗电能的碳排放, 二是项目办公所使用车辆的能源碳排放, 三是项目生活区的碳排放。武汉国际博览城规划设计阶段历时一年, 由统计数据 and 能源碳排放系数建立了如下的计算表格 (具体计算见下表 6-15), 最终得到了武汉国际博览城规划设计阶段碳排放量为 978379.34kg。

表 6-15 武汉国际博览城规划设计阶段碳排放计算

周期阶段	划分	能耗来源		能源消耗量				能源对应碳排放系数 kg(c)/单位				碳排放总量 (kg)
				汽油	柴油	煤	电	汽油	柴油	煤	电	
				kg	kg	kg	Kwh					
设计规划阶段	办公车辆	类型	数目	7257.60	1209.60			0.55	0.59	0.68	0.26	4705.34
		小轿车	2	3628.80				0.55	0.59	0.68	0.26	0.00
		客车	1		1209.60			0.55	0.59	0.68	0.26	0.00
		其他						0.55	0.59	0.68	0.26	0.00

续表 6-15

设计 规划 阶段	办公 区	照明			709560.00	0.55	0.59	0.68	0.26	184485.60
		空调			1576800.00	0.55	0.59	0.68	0.26	409968.00
		其他			867240.00	0.55	0.59	0.68	0.26	225482.40
	生活 区	照明			153300.00	0.55	0.59	0.68	0.26	39858.00
		空调			350400.00	0.55	0.59	0.68	0.26	91104.00
		其他			87600.00	0.55	0.59	0.68	0.26	22776.00
总量 (kg)		978379.34								

(2) 武汉国际博览城施工安装阶段碳排放计算

施工安装阶段的主要碳排放集中表现为材料碳排放、施工机械碳排放以及项目办公和生活区用电耗能碳排放。

材料碳排放。通常来说，建筑物材料包括 60 多种，各种材料产品上千种，在低碳建筑物研究中不可能包含所有使用的材料，而且建筑物材料的消耗量数据也很齐备，往往只有主要建筑物材料的消耗量数据。本文对武汉国际博览城展馆安全施工阶段碳排放研究，主要考虑如下主要的建筑物材料，计算其碳排放，如表 6-16 所示。其中对于钢材用量，武汉国际博览城主体钢结构用钢 2.7 万吨，混凝土结构用钢 3.0 万吨，屋面用钢 600 吨，幕墙用钢 3000 吨，综合计算，展馆共使用钢材 6.06 万吨。金属板主要来源于金属屋面 24 万方以及金属幕墙 2.8 万方，一共 26.8 万方。

表 6-16 武汉国际博览城展馆使用主材全寿命期内的碳排放

建材名称	单位	用量	碳排放转化系数 Kg(c)/单位	碳排放量 (kg)
混凝土	m <sup>3</sup>	1487752.85	18.04	1487752.85
钢材	t	2419758.00	39.93	33795.15
加气混凝土砌块	m <sup>3</sup>	2053577.40	60.00	2053577.40
砂浆	m <sup>3</sup>	2677789.99	35.17	2677789.99
水泥	m <sup>3</sup>	135884.22	35.17	135884.22
铝板	m <sup>2</sup>	52626.70	16.95	52626.70
金属板	m <sup>2</sup>	1624080.00	6.06	1153802.00
玻璃	m <sup>2</sup>	42000.00	1.40	
花岗岩	m <sup>2</sup>	8285610.15	27.70	8285610.15

续表 6-16

地砖	m <sup>2</sup>	725114.73	26.74	725114.73
石膏板	m <sup>2</sup>	1581883.06	21.28	1581883.06
卷材	m <sup>2</sup>	9747723.09	12.95	9747723.09
乳胶漆	m <sup>2</sup>	15509.13	1.38	15509.13
总量 (kg)		30849309.32		

施工安装阶段机械设备碳排放统计。对于武汉国际博览城展馆全寿命期机械设备使用的碳排放，由于机械设备在施工安装阶段集中使用，运营维护阶段以及拆除清理阶段使用非常少，故主要考虑施工安装阶段的使用，其他两阶段不做计算考虑。此处关于国际博览城展馆区施工机械的数量以及台班均根据展馆区施工方案，施工计划中的内容确定。其碳排放计算见表 6-17。

表 6-17 武汉国际博览城展馆区机械设备全寿命期内的碳排放

机械名称	型号	数量	台班能源消耗				台班数	能源对应碳排放系数 kg(C)/单位				碳排放总量 (kg)
			汽油	柴油	煤	电		汽油	柴油	煤	电	
			kg	kg	kg	度						
塔吊	QTZ7520	6				75	290	0.55	0.59	0.68	0.26	33930
大型龙门吊	20t	2				25	230	0.55	0.59	0.68	0.26	2990
履带吊	150t	2		125.7			300	0.55	0.59	0.68	0.26	44497.8
履带吊	300t	2		176.4			300	0.55	0.59	0.68	0.26	62445.6
汽车吊	25t	2		40.7			350	0.55	0.59	0.68	0.26	16809.1
履带式推土机	中型	16		41			290	0.55	0.59	0.68	0.26	112241.6
混凝土输送泵	HBT60	6				347.8	350	0.55	0.59	0.68	0.26	189898.8
混凝土汽车输送泵	35m	6		43.8			350	0.55	0.59	0.68	0.26	54268.2
反铲挖掘机	0.3m <sup>3</sup>	15		33.7			250	0.55	0.59	0.68	0.26	74561.25
反铲挖掘机	1m <sup>3</sup>	5		63			250	0.55	0.59	0.68	0.26	46462.5

续表 6-17

自卸汽车	5t	35		36.26		350	0.55	0.59	0.68	0.26	262069.15
平板车	20t	3		45.39		350	0.55	0.59	0.68	0.26	28119.105
震动棒	ZX50	20			1.5	300	0.55	0.59	0.68	0.26	2340
震动棒	ZX35	10			1.5	300	0.55	0.59	0.68	0.26	1170
钢筋切断机	GQ40	14			3	200	0.55	0.59	0.68	0.26	2184
弯曲机	GW40	28			3	200	0.55	0.59	0.68	0.26	4368
钢筋对焊机	UN100	7			100	200	0.55	0.59	0.68	0.26	36400
木二压刨	MBS04A	7			3	150	0.55	0.59	0.68	0.26	819
木工电锯	φ 400	14			3	150	0.55	0.59	0.68	0.26	1638
砂浆搅拌机	JDY350	6		43.52		350	0.55	0.59	0.68	0.26	23761.92
CO <sub>2</sub> 焊机	600A	30		24.5		200	0.55	0.59	0.68	0.26	38220
直流电焊机	AX5007	25		90.8		200	0.55	0.59	0.68	0.26	118040
碳弧气刨	TH-10	20		10.56		200	0.55	0.59	0.68	0.26	10982.4
空压机	1 立方米	3		41.8		200	0.55	0.59	0.68	0.26	17388.8
角向砂轮磨 光机	φ100/φ200	20			14	150	0.55	0.59	0.68	0.26	10920
半自动切割 机	CG-30	10			32.1	200	0.55	0.59	0.68	0.26	16692
起重机	15t/10t	2		32.25		200	0.55	0.59	0.68	0.26	7611
手动叉车	BF	4	29.96			200	0.55	0.59	0.68	0.26	13182.4
升降机	液压式	2			4	330	0.55	0.59	0.68	0.26	686.4
剪板机	JA25, CR36	12			3	300	0.55	0.59	0.68	0.26	2808
风管咬口机	LA20, LC15	12			1.5	200	0.55	0.59	0.68	0.26	936
液压铆接机	YW-20	6			1	200	0.55	0.59	0.68	0.26	312

续表 6-17

砂轮切割机	J3G2-400	15			1	200	0.55	0.59	0.68	0.26	780
砂轮机	MD325VC	10			0.5	300	0.55	0.59	0.68	0.26	390
液压冲孔机	S11-10(B)	6			2	200	0.55	0.59	0.68	0.26	624
交流电焊机	BX3-300	30			25	200	0.55	0.59	0.68	0.26	39000
总量 (kg)	1279547.03										

施工安装阶段办公、生活耗能耗电统计。武汉国际博览城施工安装阶段碳排放主要来自于办公车辆、办公设备以及生活设备的耗能耗电，通过工程现场统计数据以及类似工程案例数据，得到下面的计算表格 6-18；汇总三大来源的碳排放量，得到武汉国际博览城施工安装阶段办公、生活的碳排放总量为 4565807.85kg。

表 6-18 施工安装阶段办公、生活碳排放

划分	耗来源		能源消耗量				能源对应碳排放系数 kg(c)/单位				碳排放总量 (kg)
			汽油	柴油	煤	电	汽油	柴油	煤	电	
			kg	kg	kg	kwh					
办公车辆	类型	数量	7372.80	101606.4			0.55	0.59	0.68	0.26	64002.82
	小轿车	2	3686.40				0.55	0.59	0.68	0.26	2027.52
	客车	1		2419.20			0.55	0.59	0.68	0.26	1427.33
	其他	2		48384.00			0.55	0.59	0.68	0.26	28546.56
办公区	照明				657000.00		0.55	0.59	0.68	0.26	286977.60
	空调				1460000.00		0.55	0.59	0.68	0.26	637728.00
	其他				803000.00		0.55	0.59	0.68	0.26	350750.40
施工区	照明				6387500.00		0.55	0.59	0.68	0.26	9899361.73
	空调				14600000.00		0.55	0.59	0.68	0.26	26571970.97
	其他				13687500.00		0.55	0.59	0.68	0.26	7815285.58
总量 (kg)		4565807.85									

通过上述三张表格的计算，汇总得到武汉国际博览城施工安装阶段的碳排放量见式 (6-13)：

$$C_{\text{总}} = 30849309.32 + 1279547.03 + 4565807.85 = 36694664.20\text{kg} \quad (6-13)$$

(3) 武汉国际博览城使用维护阶段碳排放计算

# 华中科技大学博士学位论文

武汉国际博览城使用维护阶段的碳排放，主要是办公区、公共区设备设施耗能和  
生活区耗能所带来的碳排放。通过对主要设施设备的能源消耗情况根据系统性能  
和日常使用情况进行估计，得到年均能源消耗量，然后得出此阶段的总碳排放量，  
计算结果见表 6-19。

表 6-19 武汉国际博览城使用维护阶段碳排放

划分	能耗来源		年均能源消耗量				能源对应碳排放系数 kg(c)/单位				时间 (年)	碳排放总量 (kg)
			汽油 kg	柴油 kg	煤 kg	电 Kwh	汽油	柴油	煤	电		
办公 车辆	类型	数目	4838.40	3870.80			0.55	0.59	0.68	0.26	45	222520.14
	小轿车	2	2419.20				0.55	0.59	0.68	0.26	45	59875.20
	客车	2		1935.40			0.55	0.59	0.68	0.26	45	51384.87
	其他						0.55	0.59	0.68	0.26		0.00
办公 区	照明				388800.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	4738500.00	
	空调				864000.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	10530000.00	
	其他				475200.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	5791500.00	
公共 区	照明				2280000.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	50017500.00	
	空调				6120000.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	134257500.00	
	其他				1800000.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	39487500.00	
生活 区	照明				16800.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	614250.00	
	空调				38400.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	1404000.00	
	其他				9600.00	0.55	0.59	0.68	0.26	45	351000.00	
总计 (kg)							140649540.21					

### (4) 武汉国际博览城拆除清理阶段碳排放计算

在拆除清理阶段，主要考虑拆除清理所使用的工程机械耗电耗能的碳排放和办  
公生活的碳排放。通过参照类似建筑物的拆除清理工程，推算出相关参数，进而得  
到武汉国际博览城在拆除清理阶段的碳排放，具体数据与计算过程参见表 6-20。



表 6-20 武汉国际博览城拆除清理阶段碳排放

划分	能耗来源	年均能源消耗量				能源对应碳排放系数 kg(c)/ 单位				时间 (年)	碳排放总量 (kg)
		汽油	柴油	煤	电	汽油	柴油	煤	电		
		kg	kg	kg	Kwh						
办公 区	类型	3225.60				0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	887.04
	小轿车	1612.80				0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	443.52
	客车					0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	0.00
	其他					0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	0.00
	照明				295650	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	46121.40
	空调				657000	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	102492.00
	其他				361350	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	56370.60
拆除 区	电力机 械				10402500	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	2704650.00
	能源机 械	4106500	13862500			0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	10437450
生活 区	照明				25550	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	7971.60
	空调				58400	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	18220.80
	其他				14600	0.55	0.59	0.68	0.26	0.5	4555.20
总量(kg)		13379162.16									

### 3、武汉国际博览城展总的碳排放量

根据上述对国际博览城展馆碳排放的计算，可以汇总得到其全寿命周期总的碳排放量见式子 (6-14)。

$$C_p = 978379.34 + 36694664.20 + 140649540.2 + 13379162.16 = 191701745.90 \text{kg} \quad (6-14)$$

### 6.4.2 武汉国际博览城七区展馆施工阶段动态碳排放量测算

对于施工安装阶段，由于在上文中提到可以利用 BIM 建模以及与进度对应，建立施工二期动态的碳排放测算系统，因此，此处以武汉国际博览城七区展馆为例进行

建模计算。

## 1、BIM 模型构建

本文以七区展馆的为例，建立该展馆施工的碳排放动态计算模型。

首先根据展馆的施工图纸，借助 BIM 中的建模软件建立工程的 BIM 基本模型，并加入施工方案中建材的参数信息，如构件的组成材料种类、这些原材料到施工场地的运输方式及运距、构件的使用年限、构件材料的报废及回收比率和报废回收的形式等，建立该工程的 BIM 基本模型。见图 6-11。

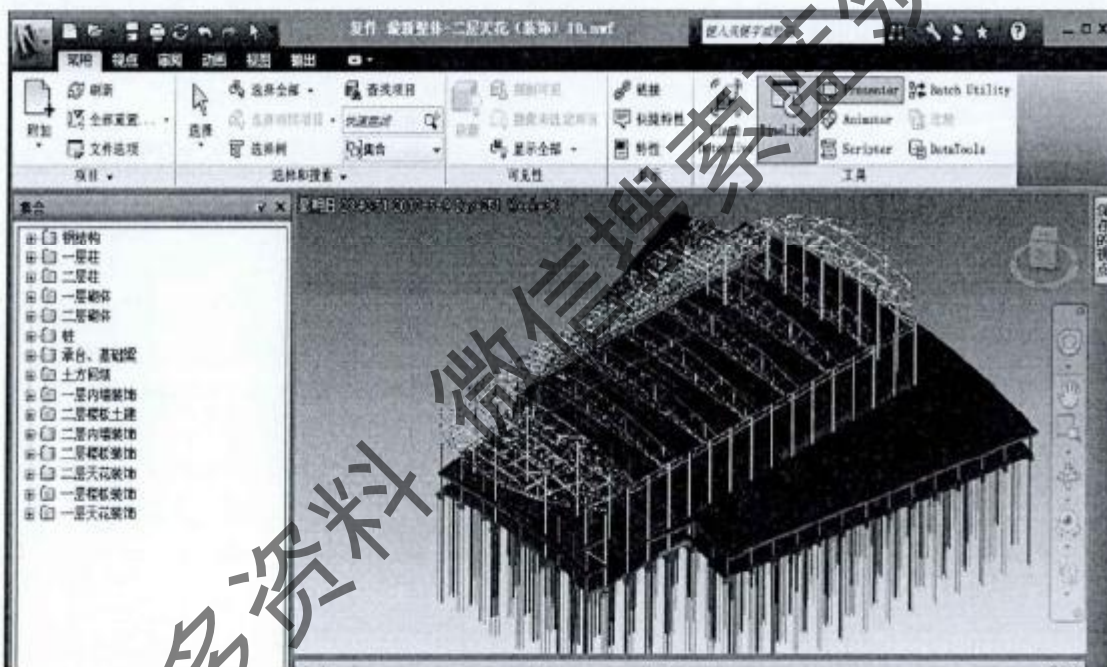


图 6-11 七区展馆的 BIM 基本模型

## 2、BIM 模型中链接实时进度计划

按照该工程的施工方案和现场调研，编制详细的进度计划(如图 6-12 中的所示)，通过指定每个任务操作对象分布的轴号区间来实现与模型中的构件一一对应，并为指定任务类型为构件，将详细的进度计划能与前一步的 BIM 基本模型进行动态链接得到该工程施工的实时动态模型。

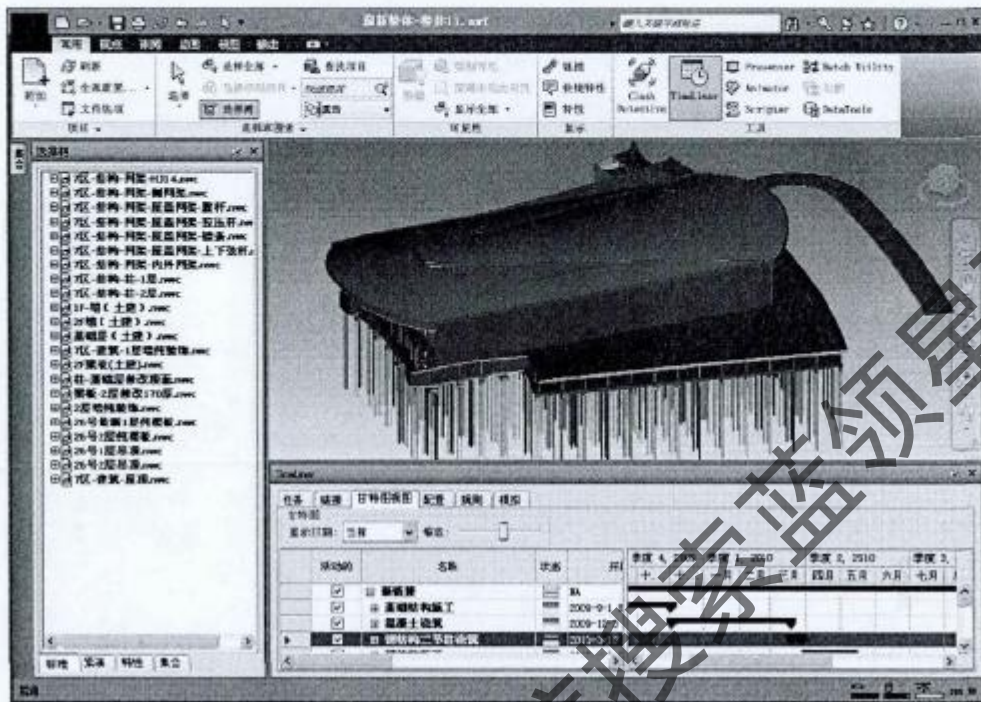


图 6-12 七区展馆的实时动态模型

3、计算该工程实时材料消耗量、机械合理使用情况

为实现最终实现实时碳排放量的目的，需建立施工进度与材料消耗、设备能耗动态对应的规则表，得出每个施工工艺下消耗的各材料消耗的种类和数量，以及该材料施工的具体工期。部分对应表如表 6-21 所示。

表 6-21 部分材料与进度对应表

明细	材料类型	工程量	工期	开始时间	完成时间
			93	2009/9/1	2009/12/2
桩施工		m <sup>3</sup> /t	30	2009/9/1	2009/9/30
7-5;Y-E, Y-N	C35 微膨混凝土	205.44	1	2009/9/1	2009/9/1
	钢筋 HRB235	3.992			
	钢筋 HRB335	12.48			
7-5;Y-C~Y-E, Y-P~Y-S	C35 微膨混凝土	186.18	1	2009/9/2	2009/9/2
	钢筋 HRB235	3.618			
	钢筋 HRB335	11.31			



续表 6-21

7-5;Y-A~Y-B, Y-S/1~Y-T/Y- K;7-3-7-4,7-6 ~7-7	C35 微膨混凝土	199.02	1	2009/9/3	2009/9/3
	钢筋 HRB235	3.867			
	钢筋 HRB335	12.09			
Y-K;7-4/01~7- 2,7-8~7-11	C35 微膨混凝土	205.44	1	2009/9/4	2009/9/4
	钢筋 HRB235	3.993			
	钢筋 HRB335	12.48			
Y-L;7-4/01~7- 4,7-6~7-11	C35 微膨混凝土	288.9	1	2009/9/5	2009/9/5
	钢筋 HRB235	5.614			
	钢筋 HRB335	17.55			
Y-J;7-4/01~7-4 ,7-6~7-11	C35 微膨混凝土	314.58	2	2009/9/6	2009/9/7
	钢筋 HRB235	6.114			
	钢筋 HRB335	15.11			

#### 4、展馆在施工阶段碳排放动态计算

通过设定时段间隔为一个月，系统可以自动累计当月工程摊牌放量，这样就可以得到七区展馆每个月的碳排放情况，见表 6-22。

表 6-22 武汉国际博览城七区展馆施工安装阶段每月碳排放量

碳排放	施工阶段	时间段	碳排放量 (kg)
施工安装阶段	地基与基础	200909	112673.93
		200910	184243.6365
		200911	265048.7455
	主体结构	200912	330033.7269
		201001	381454.955
		201002	461972.4609
		201003	534646.5391
		201004	623909.6285
		201005	669151.1069
		201006	723446.5305
	屋顶工程	201007	695539.3178
		201008	647615.421

续表 6-22

	装饰装修	201009	605791.4155
		201010	491189.1674
		201011	447568.452
		201012	395791.4155
		201101	306760.9913

### 6.4.3 计算结果分析

#### 1、全寿命期分阶段碳排放量比较

为了方便对于各个阶段的碳排放量进行比较，得出对于碳排放总量影响最大的阶段，可以将上述总量分配到各个阶段，可得到在建筑全寿命周期内，武汉国际博览城展馆区各个阶段碳排放量表格，见表 6-23：

表 6-23 武汉国际博览城展馆区分阶段碳排放汇总

阶段	碳排放量 (kg)	所占比例
规划设计阶段	978379.34	0.51%
施工安装阶段	36694664.20	19.14%
使用维护阶段	140649540.21	73.37%
拆除清理阶段	13379162.16	6.98%
碳排放总量	191701745.91	100%

由上述表格可以得到武汉国际博览城展馆区各阶段碳排放比例图，见图 6-13：

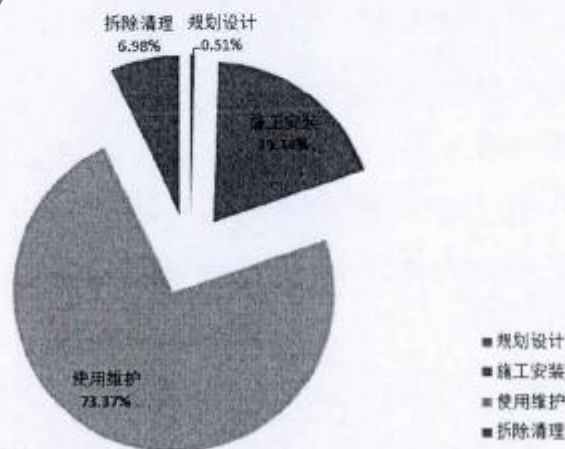


图 6-13 武汉国际博览城展馆区各阶段碳排放占总排放量比例

对全寿命周期内，武汉国际博览城展馆碳排放进行分阶段汇总后，可以得到以下结论：在施工阶段以及运营阶段是对整个建筑物全寿命周期碳排放量影响最大的阶段。其中，对于建筑物而言，尤其是公共建筑，使用维护阶段的碳排放量更是大大超过施工阶段，因此在规划设计阶段，对于运营管理方案的选择应该慎重考虑，充分考虑节能环保因素。各阶段碳排放具体数值见图 6-14，：

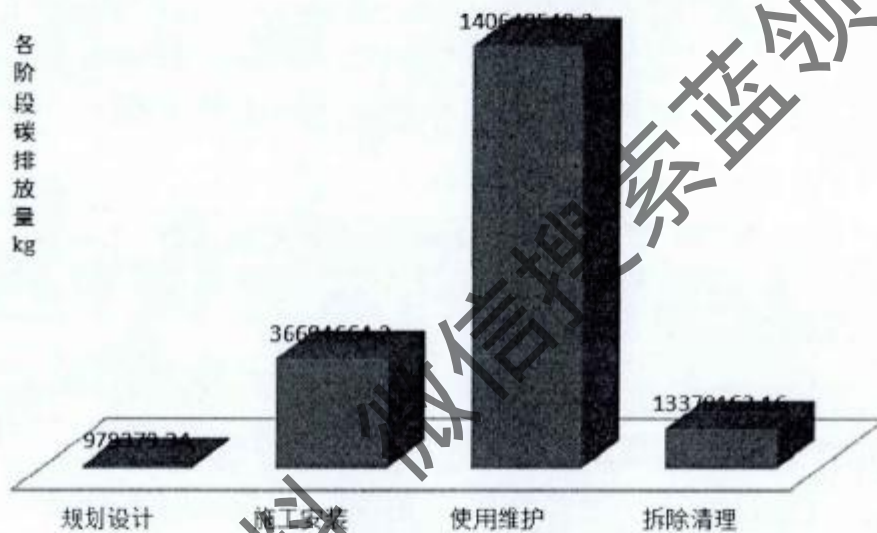


图 6-14 武汉国际博览城展馆区各阶段碳排放量

## 2、设计规划阶段分析

规划设计阶段是碳排放量最少的阶段，但是由于其规划设计方案是项目后期材料机械使用、运营模式选择的依据，因此，规划设计阶段是对整个全寿命周期碳排放量影响最大的阶段。

## 3、施工安装阶段分析

对于施工阶段而言，主要的碳排放来源为原材料使用所带来的碳排放，故在材料使用时考虑使用绿色节能材料对于减少全寿命期内碳排放量有很大的意义，具体分布如图 6-15。

对于建筑物原材料，由于其所占施工安装阶段碳排放总量比重的巨大，故在规划设计阶段就应当充分考虑材料的环保特性。绿色建材也是现在建筑业研究的一个热点和未来建材发展的趋势，应该引起大家充分的重视。



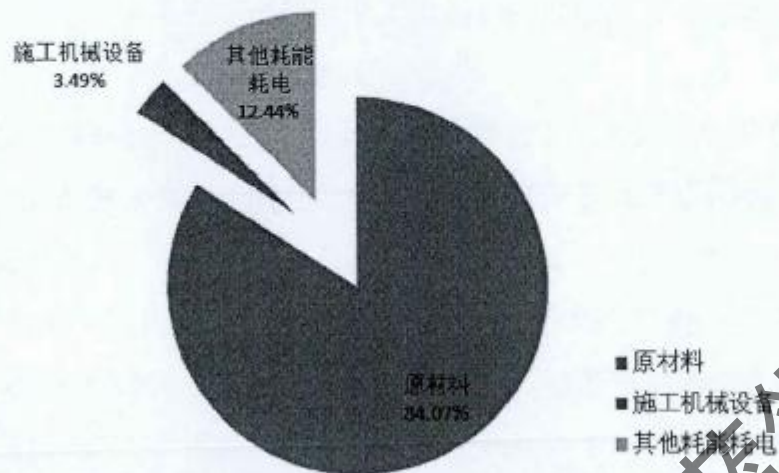


图 6-15 施工安装阶段碳排放构成

#### 4、动态施工碳排放分析

为了体现施工阶段的过程碳排放量，对于武汉国际博览城七区展馆，本文基于 BIM 建模以及其进度情况计算了在施工阶段建筑物每个月的碳排放量，得到如下的时间区段内（以月为单位）的碳排放量图（如图 6-16）。

由图可以看出，对于建筑物施工阶段而言，其碳排放量有以下几个特点：首先，主体工程施工工期长，随着工程的推进，各项工程逐步展开，工程物资投入不断增加，这个阶段的碳排放量也随着逐月增加，且碳排放总量在全寿命周期中也占较大的比重；然后，对于本案例而言，国际博览城展馆屋顶工程属于钢结构网架，吊装工程工期较短，但耗能量大，并且所用的机械设备耗能较多，所以碳排放量相对集中；同时，装饰装修耗材较多，其碳排放量也占有一定的比重。

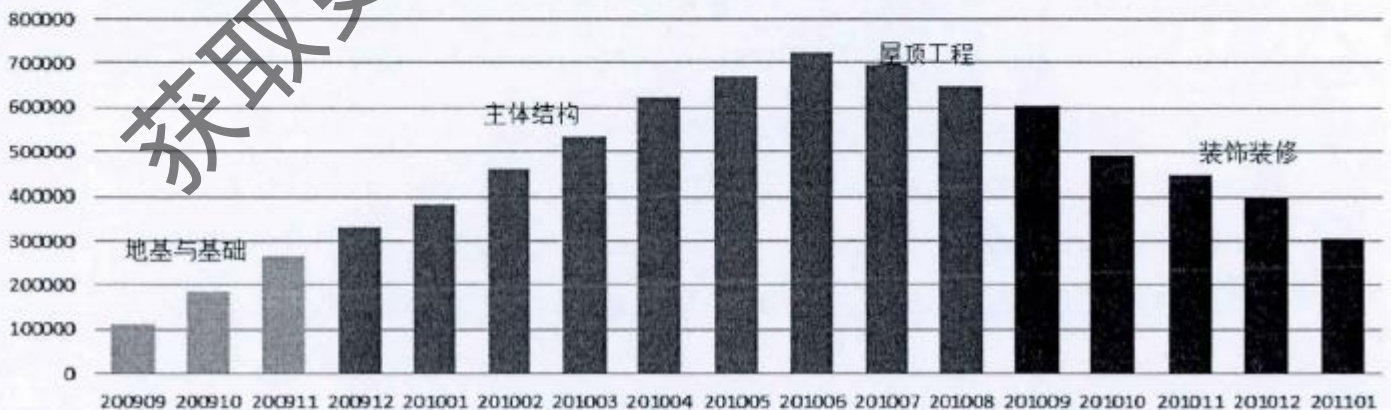


图 6-16 施工安装阶段分时碳排放量统计



通过上述结果分析，将建筑物碳排放划分为四个阶段，每个阶段都有其碳排放的特点：

对于规划设计阶段而言，其重要性和影响力大，在规划设计阶段的决策以及施工、运营方案的选择能够非常人程度上影响建筑物的后面各阶段碳排放量，应该引起参建方的重视。并且对于建筑物的碳排放测算和低碳评价，也必然会在该阶段完成，因此，对于建筑规划设计阶段的研究方向也将主要集中于基于设计方案、施工方案、运营方案的建筑物碳排放测算以及建立完整的低碳建筑评价体系。

对于施工安装阶段，由于其具有工期短、碳排放来源集中，并且主要来源是建筑材料的特点，故从产业链角度考虑，对于施工方和业主方面言，怎么选择绿色建材、选择材料供应商、采用低碳节能的施工方案、设备使用方案是比较关键的考虑要点。同时也预示了低碳施工的具体技术以及低碳建材将越来越受到重视。

对于使用维护阶段，是建筑物碳排放量最大的一个阶段，其碳排放来源依赖于建筑设备的耗能耗电，并且与建筑的使用类型密切相关。对于建筑物的使用维护阶段，目前研究较多的是在使用时更多地利用可再生能源，如太阳能、风能等，另一方面则是提高建筑物本身的节能性，例如采用保温外墙材料、注意日照等因素。因此需要综合考虑多方面的因素，也是实现建筑节能的关键一步。

建筑物拆除清理阶段的碳排放更多的依赖建材的选择，不同的建筑材料有不同的回收利用率，不同的处理方式，所以它的低碳效果与施工方案的低碳效果是密不可分。

除此之外，由于建筑业的不断发展，信息化技术被越来越多的应用。而就现阶段中国建筑业的发展水平而言，离高科技、高性能、精致人文还有很大的差距，因此，建筑业如果需要考虑低碳环保、考虑高品质高科技，必然会用到更多的先进技术。在施工运营过程中，采用更多先进的管理办法。其中，基于传统的建筑工程管理，BIM 建模被越来越广泛地提及。它的普及应用不仅仅是在规划设计阶段有助于模型的可视化和信息化，更多地是 BIM 模型提供了一个信息化的平台，基于此平台，可以满足对于进度管理、成本管理、风险管理以及本文主要讲的低碳管理的需求。其中，以本文为例的基于 BIM 的建筑物碳排放测算，可以为建筑物全寿命期碳

排放测算提供一和动态的思路，为规划设计阶段碳排放的测评提供计算的平台和方  
法，同时为日后碳排放交易的规范化提供依据，具有重要的意义。

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

## 7 总结和展望

### 7.1 结论

在哥本哈根大会上，温总理向全世界承诺，到 2020 年中国 GDP 的能源消耗减排量比在 2005 年的基础上再减少 40%~45%。温总理为此指出了实施纲要即必须深入贯彻落实科学发展观，采取更加强有力的政策措施与行动，加快转变发展方式，努力控制温室气体排放，建设资源节约型和环境友好型社会。为此在低碳经济呼吁之下，各行各业开展了低碳发展路径的研究，作为最具有节能减排潜力之一的建筑业开始了建筑碳排放的定性定量研究，各种新技术、新材料应运而生。

本文通过对低碳建筑技术体系的分析 and 归纳，低碳技术规划方案比选和优化模型的构建，以及全生命周期碳排放测算方法的研究，可以得到如下结论：

1、低碳建筑的发展在国内外正如火如荼的进行，为了赶上发达国家的脚步，我国应尽快构建完善的低碳建筑管理模式，并从低碳目标规划、低碳组织保障、低碳技术保障、低碳节能效果测评等方面开展低碳建设，全方位保障我国建筑业低碳化的顺利进行。

2、低碳建筑必须在建筑物的外部条件、技术设备和建筑主体三者相互作用下共同实现建筑物的节能减碳目标。通过对当前低碳技术的总结，可以看到，目前已有 150 余项低碳技术，随着科技的进步，还会有新的低碳技术不断的涌现，应不断的完善低碳建筑技术体系，建立低碳技术库，从而便于低碳建筑规划时进行低碳技术的选取。

3、在当前众多的低碳技术中如何根据项目的特点选取最低碳经济的低碳技术规划方案进行低碳建筑项目进行规划设计的重点。本文深入探讨了低碳建筑技术规划方案的比选方法和优化模型，不仅可以选择出最符合本项目要求的方案，可以实现对该低碳建筑技术规划方案设备选型的优化及低碳规划方案中能源使用的优化。这种优化将使方案更具竞争性，更好地发挥其在节能减排方面的优势，实现该项目的低碳目标。

此外，在规划设计阶段就应该对已选择的低碳技术方案采用相应的工具进行整体的能耗分析，以进一步确保该方案与当前标准的一致性，以及对低碳建筑全寿命周期中使用维护阶段的碳排放测算提供了数据基础。

4、建筑物碳排放量，是建筑物低碳目标实现与否的首要指标。而碳排放测算的前提是理清建筑物各个阶段的碳排放来源，建立了建筑物全寿命周期碳排放的计算清单和计算步骤，本文对此展开了深入的研究，并且对国内外建筑物碳排放的数据进行了整理和总结，建立了初步的碳排放数据库。将为我国进行建筑物碳排放的盘查和评价提供了有力的依据。

为了验证模型的适用性、有效性和准确性，本文选取了武汉国际博览城的展馆建设进行实证分析，可以得出，建筑物碳排放主要来源来自建筑物的使用维护阶段，约占 73%，依次是安装施工阶段（19%），拆除清理阶段（6%）等。规划设计阶段虽然是碳排放量最少的阶段，但是由于其规划设计方案是项目后期材料机械使用、运营模式选择的依据，因此，规划设计阶段对整个全寿命周期碳排放量的影响是巨大的。

5、施工阶段的碳排放来源主要是由原材料使用所带来的碳排放，约占 71%，故在材料使用时考虑使用绿色节能材料对于减少全寿命期内碳排放量有很大的意义。

此外，随着数字化、信息化和智能化技术的发展，BIM 技术为解决建筑行业存在的问题提供了新的解决思路。针对建筑物施工阶段的碳排放测算，BIM 模型可涵盖建筑工程项目相关的所有工程数据，为建筑物碳排放的测算提供了充足的数据基础，并且可以通过导入进度进化使整个建筑模型与工程进度相连，用来计算施工阶段动态的碳排放量。因此，可以实现施工过程中每个阶段的碳排放监测，对碳排放的进行实时控制，进一步优化施工方案。

## 7.2 创新点

本论文创新之处具体表现在以下几个方面：

1、对建筑物节能技术的运行机理进行了深入的分析，构建了低碳建筑物的节能运行模型和技术体系，从而为低碳建筑规划技术方案的选取提供了理论依据。并且，

为实现建筑物的低碳规划目标，针对不同的低碳技术方案建立了方案比选的方法和优化模型。对武汉国际博览中心项目的低碳节能方案进行了实证分析，为其节能方案的选取提供了理论依据，并对其方案的优化提出了科学的合理化建议。

## 2、构建建筑物全寿命周期碳排放测评方法

(1) 基于建筑物全寿命周期理论，确定了碳排放来源的四个阶段：规划设计阶段碳排放、施工安装阶段碳排放、使用维护阶段碳排放以及拆除清理阶段碳排放。相对于其他一般以原材料形成为基准的全寿命期碳排放的划分，本文以建筑物本身为对象的划分更加符合建筑行业的特点，并且与现有的低碳建筑评价指标划分规则一致，方便后期的碳排放评价系统的建立与统一。

## (2) 建筑物全寿命期各阶段碳排放的清单

国内对于低碳建筑研究已经有一段时间，但是尚未有成型的模型或者表格来规范计算建筑物全寿命期的碳排放。本文将建筑物全寿命期划分为四个阶段，同时通过对碳排放来源空间的划分，考虑碳汇的因素，形成了系统的一系列清单，详细说明了建筑物全寿命期碳排放的来源以及计算规则，并且提供了相应的能源、机械、材料因子，为构建碳排放测算系统提供了思路和依据。

## 3、基于 BIM 模型的动态碳排放测算

BIM 建模是未来建筑的发展趋势，是建筑业信息化的必经之路。

本文提出了基于 BIM 模型的动态碳排放测算，将 BIM 模型从原本的三维，结合进度，扩展为四维模型，同时给模型赋予其碳排放的数据。同时，本文以案例为计算材料，详细说明了模型的构建。基于 BIM 模型的动态碳排放测算不仅仅拘泥于施工阶段，针对建筑物绿色度要求越来越高这一现状，可以充分将其运用于规划设计阶段，并且运用于对施工方案、运行方案的低碳评估，具有十分重要的意义。

## 7.3 展望

关于建设项目碳排放关键技术的研究在我国的发展尚处于起步阶段，与国外较为完善的低碳管理体系和排查标准及工具尚有一定的差距。由于各方面因素的制约，本文只针对建设项目全寿命过程中的低碳节能技术的比选和优化，以及碳排放的测

算方法等关键技术做出了一定的探索和研究,尚有很多需要改进和进一步深入研究的地方,并且需要多学科、跨领域的合作研究才能取得更多的实质性的进展。可从以下几个方面进行加强:

1、建筑物低碳节能技术方案的动态优化,是需要进一步研究的课题。尤其是加强数据的敏感性分析,通过测定各个数据因素的变化对结果的影响程度,找出敏感性因素,便于在实际执行过程中对敏感性因素的基础数据加以控制,本文由于数据来源有限,不能对所有的数据依次展开敏感性分析,只提供了一种思路和方法。

2、应进一步完善低碳节能技术体系,随着建筑材料和技术的发展,以及市场价格不断变动,建立动态的建筑低碳节能技术库,便于节能技术的推广及选取。并且,在节能技术的推广和应用过程中,如何制定切实可行的发展模式、经济政策与激励机制,实现低碳节能与成本的双赢也是有待深入研究的问题。

3、建立我国的建筑物碳排放数据库。进行建筑物全生命周期环境影响评价,是一项复杂的系统工程,所需要的基础清单数据是巨量的,而目前 LCA 中比较成熟的清单分析主要是依据一些发达国家的行业平均水平建立的数据,并不适合我国国情。整个生命周期中涉及到能源使用的环节纷繁复杂,温室气体排放统计也需要长期监控,我国目前现有的统计制度和现有的数据体系还无法较为准确地提供各材料生产能耗或是施工机械尾气排放等基础数据,只能参考国外的相关研究。因此,建议今后应逐步规范相关的能源审计和碳审计工作,逐步建立一套符合我国实际的、较为完善的生命周期数据库,从而更好的支持建筑物环境影响的评估工作。

4、由于建筑物全生命周期产生的碳排放绝大部分来自于运营阶段,因此,应着重加强对运营期能耗的监控和合理的优化。尤其是针对公共建筑和商业建筑,应进一步研究客流量、运行成本、能耗量和碳排放的关系,建立低碳经济的运营模式。

5、有机结合 BIM 相关工具进一步加强建筑物的性能模拟和评估,解决不同能耗模拟工具之间数据格共享的问题,从当前单体建筑物的性能分析扩展到区域性的联动性能分析。并在 BIM 的基础上,结合我国现有标准实现绿色低碳建筑认证评估的信息化和可视化。

6、目前我国正着手进行中国的清洁发展机制(CDM)项目的申请和运作。随着



节能低碳建筑的发展,我国也已经注意到建筑项目节能减排投融资的重要性,住房和城乡建设部已经明确提出引入碳排放权交易是推动建筑节能非常必要的手段。本文通过对建筑业碳排放全寿命周期测算方法的研究,为 CDM 项目在建筑业的推广打下了基础,下一步应继续建筑业碳交易的政策和方法研究,实现建筑项目的低碳性和经济性。

由于本人水平有限,文章中的错误与不当之处在所难免,恳请各位专家批评指正。

获取更多资料 微信搜索 蓝领星球

## 致 谢

本论文是在我华中科技大学学习成果的总结。在论文即将完成之际，回想三年的读书生涯，时间虽不算长却得到了很多人的关心帮助，最应该感谢的是我的导师丁烈云教授，首先感谢他将我纳入门墙，我才有机会在中国一流的大学——华中科技大学完成博士阶段的学习，丁老师深厚的学术造诣，严谨的治学风格，严肃的科学态度，乐观开朗的性格，幽默机智的谈吐，都深深令我折服，尤其是他渊博的学识，精益求精、创新的科研精神和为人师表的高尚品格都是我今后学习和工作的楷模。丁老师的谆谆教诲将使我终身受益。在此，我谨向丁老师致以最衷心的感谢。

感谢骆汉宾老师来对我学习上的关心与帮助。感谢周迎老师、付菲菲博士、金江子、吴媛民、吴蔚等工程管理研究所的老师和学生对我论文撰写和修改的帮助。

感谢我的家人，感谢他们一直以来对我的支持和理解。

感谢所有支持、帮助、批评、鼓励、理解过我的人们。

感谢在百忙之中评审我博士学位论文的各位专家和学者。

李兵

2012年4月于华中科技大学

参考文献

- [1] Petersen S R. Retrofitting Existing Housing for Energy Construction: An economic analysis. National Bureau of Standards, Building Science Series, 1974(10): 71-84
- [2] Petersen S R. Economic optimization in the energy construction design of single-family housing. ASHRAE Transactions, 1976, 82: 446-460
- [3] Buffington D E. Economics of energy construction in cooling/heating residential buildings. American Society of Agricultural Engineers, 1977(8): 48-62
- [4] Ahmed S F. Energy economics of design options – A residential energy and economic optimization microcomputer program. Columbus-USA, 1984(6): 25-30
- [5] Giffin T M. Life-cycle costing application for building energy code compliance. Chicago, IL, USA, 1985(3): 603-608
- [6] Amstalden R W, Kost M, Nathani C, et al. Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. Energy Policy, 2007, 35(3): 1819-1829
- [7] 刘玲. 价值工程(VE)与建筑节能. 工业建筑, 2006(8): 24-26
- [8] 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. 建筑经济, 2009(3): 58-61
- [9] 赵忠超, Simatic Branko, 程林. 既有建筑采用可再生能源节能改造技术分析. 建筑经济, 2009(2): 96-99
- [10] 王志勇, 刘泽华. 基于建筑环境的空调系统节能分析. 节能, 2004(2): 15-18
- [11] 范影, 黄翔, 狄育慧. 利用太阳能的被动蒸发冷却技术. 中国建设动态, 阳光能源, 2004(4): 46-50
- [12] 刘珠雄. 建筑外窗遮阳技术的研究与应用. 福建建设科技, 2006(6): 63-64
- [13] Loxsom F, Vivar Orum N. Window heat transfer in conventional new England residences. SOLAR ENERGY DIVISION, 2006(6): 64-73
- [14] 李金平, 王磊磊, 王立琰等. 传统采暖房内热环境的三维数值模拟. 兰州理工大学学报, 2008(1): 45-49

- [15] 陈飞. 高层建筑风环境研究. 建筑学报, 2008(2): 72-77
- [16] 蔡裕盛. 公共建筑节能设计敏感性因素分析. 福建建设科技, 2008(2): 56-58
- [17] 易雁. 高层建筑供水方式及节能探讨. 山西建筑, 2008(14): 178-179
- [18] 宋崑光. 基于粗糙集的住宅能耗影响因素分析. 中国河南洛阳, 2008
- [19] 李铁庄, 杜国莉. 建筑设备节能技术与措施. 中国勘察设计, 2008(4): 60-62
- [20] 祝百茹, 张宏利. 高层建筑节能采暖系统设计方案研究. 节能, 2009(5): 35-37
- [21] 王剑平. 关于建筑节能检测方法的探讨. 湖南工业大学学报, 2009(2): 14-16
- [22] 李向辉. 建筑外围护墙体的节能研究. 山西建筑, 2009(21): 232-233
- [23] Cai Wei, Gu Wei, Wen Xiaodong. Design strategy and transformation technology in building energy conservation of urban residence. Wuhan, China, 2010: 4510-4513
- [24] 吴金应. 高层建筑给排水节能节水的实现. 价值工程, 2010(23): 77
- [25] 李林, 王亚刚, 闫金银. 基于 ZigBee 技术的楼宇光照节能系统设计. 科技通报, 2010(5): 676-680
- [26] 崔子丰, 王伟. 建筑门窗节能技术综述. 工程质量, 2010(S1): 113-114
- [27] Berry J, Emerson R, Harrison J W, et al. CONSERVATION OF ENERGY IN HOUSING. Building Services Engineer, 1977, 45(2): 288-298
- [28] 周正, 付祥钊. 大同市建筑节能的技术策略. 制冷与空调(四川), 2007(4): 94-97
- [29] 丛娜, 吴成东, 丁君德. 建筑节能综合评价指标体系. 智能建筑, 2007(9): 47-50
- [30] 马明珠, 张旭. 基于 LCA 研究建筑保温的节能减排效益. 环境工程, 2008(1): 88-89
- [31] 肖忠钰. 北方寒冷地区村镇住宅节能技术适宜度评价研究[硕士学位论文]. 天津: 天津城市建设学院, 2008
- [32] 刘磊. 节能技术与建筑集成的经济评价方法研究[硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2008
- [33] 黄茜. 建筑节能技术集成优化与评价研究[硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009
- [34] 王靖, 王增欣. 单体建筑节能优化研究. 河南科学, 2009(9): 1137-1140
- [35] 崔艳琦. 住宅建筑能耗计算与节能分析. 工业建筑, 2009(7): 20-22
-

- [36] Qela B, Mouftah H. Simulation of a house heating system - An energy conservation perspective. Calgary, AB, Canada, 2010
- [37] 吴成东, 从娜, 孙常春. 基于混沌神经网络的建筑节能综合评价. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010(1): 188-191
- [38] 马伟斌. 南方建筑节能技术集成系统示范. 中国科学院广州能源研究所, 2008
- [39] 熊永强, 马继红. 集成一体化节能技术在建筑工程中的应用. 现代涂料与涂装, 2006(8): 26-29
- [40] 卞鹏. 济南廉租房项目节能设计. 建设科技, 2009(5): 42-43
- [41] 徐峰, 张国强, 解明镜. 绿色建筑集成设计软件系统开发的基本流程与框架. 建筑热能通风空调, 2009(2): 54-57
- [42] 张冰, 杨靖. 保障性住房的节能省地技术集成. 住宅科技, 2009(11): 3-6
- [43] 李进. 基于技术集成理论的建筑节能技术路线研究. 中国经贸导刊, 2010(19): 84-85
- [44] 刘念雄, 汗静, 李嵘. 中国城市住宅 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9): 1433-1436
- [45] 汪洪, 林玲. 中国低碳建筑的初期探索与实践. 第六届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集, 2010: 415-421
- [46] 蔡向荣, 王敏权, 傅柏权. 住宅建筑的碳排放量分析与节能减排措施. 防灾减灾工程学报, 2010, 30 (增刊): 428-431
- [47] 李启明, 欧晓星. 低碳建筑概念及其发展启示. 建筑经济, 2010(2): 41-43
- [48] 何福春, 付祥铨. 关于建筑碳排放量化的思考与建议. 资源节约与环保, 2010(6): 20-22
- [49] 龚志起, 张智慧. 生命周期评价和管理与建筑业可持续发展. 青海大学学报: 自然科学版, 2004(2): 26
- [50] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价. 建筑经济, 2010(2): 44-46
- [51] 张春霞, 章蓓蓓, 黄有亮等. 建筑物能源碳排放因子选择方法研究. 建筑经济, 2010(10): 106-109
- [52] 陈飞, 诸人建. 上海发展低碳建筑的现状问题及目标策略研究. 城市观察,

2010(5): 144-155

- [53] 于萍, 陈效逵, 马禄义. 住宅建筑生命周期碳排放研究综述. 建筑科学, 2011, 27(4): 9-12
- [54] Leif Gustavsson, Anna Joelsson, Roger Sathre. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, 2010, 42(2): 230-242
- [55] Cole R.J. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, 1999, 34(3): 335-348
- [56] Gerilla G.P., Teknomo K., Hokao K. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2778-2784
- [57] Bribian, Uson, Scarpellini. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 2009, 44(12): 2510-2520
- [58] Neil May. Low carbon buildings and the problem of human behavior. *Natural Building Technologies*, 2004, (6): 65-78
- [59] P. Paumgarten. The business case for high performance green buildings: sustainability and its financial impacts. *Journal of Facilities Management*, 2003, 2(1): 26-34
- [60] Deepak Sivaraman. An integrated life cycle assessment model: Energy and greenhouse gas performance of residential heritage buildings, and the influence of retrofit strategies in the state of Victoria in Australia. *Energy and Buildings*, In Press, Corrected Proof, Available online, 2011, (5): 29-35
- [61] B. Randolph, D. Holloway, S. Pullen, P. Troy. The Environmental Impacts of Residential Development: Case Studies of 12 Estates in Sydney. Australian Research Council (ARC) Linkage Project: LP 0348770, 2007
- [62] G.Q. Chen, H. Chen, Z.M. Chen, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 2(1): 583-595
- [63] Gian Andrea Blengini, Tiziana Di Carlo. The changing role of life cycle phases,



- subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 2010, 6(2): 869-880
- [64] Tove Malmqvist, Mauritz Glaumann, Sabina Scarpellini, et al. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, 2011, 36(4): 1900-1907
- [65] Aashish Sharma, Abhishek Saxena, Muncesh Sethi, et al. Life cycle assessment of buildings: A review *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 871-875
- [66] ISO, ISO 14040. Environmental management—life cycle assessment principles and framework. International Organisation for Standardization, 1997
- [67] N. Huberman, D. Pearlmutter. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 2008, 40(5): 837-848
- [68] P.C.F. Bekker. A life cycle approach in building. *Building and Environment*, 1982, 17(1): 55-61
- [69] Joshua Kneifel. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy and Buildings*, 2010, 42(3): 333-340
- [70] ISO 14040. 2006 Environmental Management: Life Cycle Assessment Principles and Framework. International Standards Organisation, Paris, 2006
- [71] J. Monahan, J.C. Powell. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 2011, 42(1): 179-188
- [72] I. Sartori, A.G. Hestnes. Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: a review article. *Energy and Buildings*, 2007, 39 (3): 249-257
- [73] 李志强, 刘春梅. 碳足迹及其影响因素分析——基于中部六省的实证. 第六届中国科技政策与管理学术年会论文集, 中国北京, 2010: 147-159
- [74] The Ove Partnership. *Building design for energy economic*. by the Pitman Great Britain, 1980: 101-105
- [75] Oktay Ural. Energy resources and conservation related to build environment. Miami beach, Florida, 1980, (1): 365-369
- [76] CHEN Zhen, LI Heng, WONG C T C. Environmental Management of Urban
-

- Construction Projects in China. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2000, 126 (4): 320-324.
- [77] 左现广, 唐鸣放. 国内外建筑能耗调查与统计研究. *重庆建筑*, 2003: 16-18
- [78] 涂逢祥. 建筑节能经济技术政策研. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [79] 魏积义. 中国建筑能耗现状及节能潜力. *沈阳建筑工程学院学报*, 1994: 184-197
- [80] 郭骏. 嵩山小区的综合节能规划和设计运行. *暖通空调*, 1995, 25
- [81] 龙惟定. 上海公共建筑能耗现状及节能潜力分析. *暖通空调*, 1998, 28: 13-16
- [82] 李世朋. 北京市旅馆类建筑的现状调查与分析(一). *暖通空调新技术*, 2000(2): 105-108
- [83] 武海斌. 北京市城市居民家用空调器耗电量的调查研究. *暖通空调新技术*, 2000(2): 52-56
- [84] 翟超勤. 全国家用电器年耗电量的估算. *暖通空调新技术*, 2002(2): 52-56
- [85] 王婧. 基于 LCA 的建材生产能耗及污染物排放清单分析. *环境科学研究*, 2007(6): 149-153
- [86] 刘念雄, 汪静, 李蝶. 中国城市住区 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(9): 1433-1436
- [87] Chen GQ, Chen H, Chen ZM, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1): 583-595
- [88] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价. *建筑经济*, 2010(2): 44-46
- [89] Brihan, Usen, Scarpellini. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 2009, 44(12): 2510-2520
- [90] 张德英, 张丽霞. 碳源排碳量估算办法研究进展. *内蒙古林业科技*, 2005(1): 20-23
- [91] Tulaesin. A study regarding the environmental impact analysis of the building materials production process (in Turkey). *building and environment*, 2007, 42(11): 3860-3871
- [92] G.Q. Chen, H. Chen, Z.M. Chen, et al. Low-carbon building assessment and

- multi-scale input-output analysis. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2010(6): 58-64
- [93] Adalberth K. Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: A method. *Building and Environment*, 1997(32): 321-329
- [94] Thormark, C. A low energy building the life-cycle its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 2002, 37: 429-435
- [95] 卜一德. 绿色建筑技术指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008
- [96] 鲍丹. 节能减排, 我们在行动: 废钢利用, 还需突破几道坎. 北京: 人民日报, 2010/06/21, <http://finance.people.com.cn/GB/11918780.html>
- [97] 王恭敏. 我国再生铝产业现状. 中国有色金属科技信息网, 2010/6/17, <http://www.cnitdc.com/html/2010617/736.htm>
- [98] 郭运功, 林逢春. 上海市能源利用碳排放的分解研究. *环境污染与防治*, 2009(9): 68-81
- [99] 赵平, 同继锋, 马眷荣. 建筑材料环境负荷影响指标研究. 中华人民共和国建设部科学技术司智能与绿色建筑文集编委会. 智能与绿色建筑文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 933-938
- [100] Lang, Si-Wei. Progress in energy-efficiency standards for residential buildings in China. *Energy and Buildings*, 2004(3): 1191-1196
- [101] 彭文正. 以生命周期评估技术应用于建筑耗能之研究. 台湾: 台湾朝阳科技大学[硕士论文], 2003
- [102] Blanchard S, Reppe P. Life cycle analysis of a residential home in Michigan. <http://www.umich.edu/~css>, 1998
- [103] Adalberth K. Energy use during the lifetime of single-unit dwellings: a method. *Building and Environment*, 1997, 32: 317-320
- [104] Schueer C, Keoleian GR, Pepe P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Building and environment*, 2003, 35: 1049-1064
- [105] 国家发展与改革委员会. 国家节能中长期专项规划. *经济日报*, 2004, 12
- [106] 国家计委宏观经济研究院课题组. 中国中长期能源战略. 北京: 北京中国计划
-

出版社, 1999

- [107] 张智慧, 吴星, 肖厚忠. 北京市住宅建筑的环境影响实证研究. 环境保护, 2004, 9: 39-42
- [108] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[硕士论文]. 北京: 清华大学, 2004
- [109] Barbara Lippiatt. Building for environmental and economic sustainability software. <http://www.bfil.nist.gov/oac/software/bees/bees.html>

获取更多资料 微信搜索蓝领星球

附录 1 攻读博士学位期间发表论文目录

- [1]李兵,李云霞,吴斌,付菲菲. 建筑施工碳排放测算模型研究,土木建筑工程信息技术, 2011, 3(2): 5-10
- [2] 李兵,吴斌,林耀光,谭健锋.武汉国际博览中心屋面太阳能光伏发电应用研究.施工技术.2012(3): 39-42
- [3] B. Li, F.F. Fu, H.Zhong, H.B.Luo. Research on the computational model for carbon emissions in building construction stage based on BIM, Structure Survey.(已录用)
- [4]李兵,黎文涛,付菲菲. 武汉国际博览中心项目低碳建设管理模式研究.土木工程与管理.(已录用)

获取更多资料

微信搜索 建筑星球

附录 2 建筑物全寿命周期碳排放测算清单

附表 1: 建筑物规划设计阶段碳排放清单

来源范围 划分	燃料来源		年均能源消耗量				能源对应碳排放系数				时间 (年)	碳排放 总量(kg)	
	类型	数目	汽油 kg	柴油 kg	煤 kg	电 度	汽油 kg (c)/kg	柴油 kg (c)/kg	煤 kg (c)/kg	电 kg (c)/度			
办公车辆	小轿车												
	客车												
	其他												
办公区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												
生活区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												



附表 2: 建筑物材料碳排放清单

建材名称	单位	用量	单位建材内含能 (MJ/Kg)	废弃比率 (%)	碳排放系数 Kg(C)/Kg	碳排放量 (kg)
混凝土						
钢筋						
加气混凝土砌块						
砂浆						
水泥						
铝版						
金属板						
石膏						
石膏屋面板						
面砖						
陶瓷						
木材						
胶合板						
橡胶						
石灰						

附表 3: 建筑物施工安装阶段机械设备碳排放清单

划分	机械名称	机型	规格型号	台班能源消耗				能源对应碳排放系数				碳排放总量 (kg)
				汽油	柴油	煤	电	汽油	柴油	煤	电	
				kg	kg	kg	度	kg (c)/kg	kg (c)/kg	kg (c)/kg	度	
土石方及筑路机械	松土机	大	松土深度 (m)	0.5	54.34							
	履带式推土机	中	功率 (Kw)	50	30.40							
	自行式铲运机	中	斗容量 (m <sup>3</sup> )	1	34.82							
	推土机	中	斗容量 (m <sup>3</sup> )	3	15.08							
打桩机	轮胎式装载机	中	斗容量 (m <sup>3</sup> )	1	52.73							
	其他见表											
	履带式柴油打桩机	大	重量 (t)	2.5	44.37							
	轨道式柴油打桩机	中	重量 (t)	0.6	9.00		36.40					
机械	导轨式柴油打桩机	中	重量 (t)	1.5	22.30		43.50					
	震动打桩机	大	激振力 (t)	30	17.43		131.29					
	其他见表											

起重机械	脚踏式电动起重机	中	总重量 (t)	3															41.00	
	履带式起重机	大	总重量 (t)	140															25.00	
	轮胎式起重机	大	总重量 (t)	20															41.51	
	其他见表																			
水平运输机械	载重汽车	中	载重量 (t)	2.5															20.36	
	自卸汽车	中	载重量 (t)	2															17.27	
	平板拖车组	大	载重量 (t)	8															30.05	
	长材运输车	大	载重量 (t)	8															41.72	
	其他见表																			
垂直运输机械	电动卷扬机	小	牵引力 (t)	0.5																14.70
	单宽施工电梯	中	提升高度 (m)	75																45.66
	电动葫芦	小	起重量 (t)	2																18.90
	其他见表																			
混凝土及砂浆机械	滚筒式混凝土搅拌机	小	出料容量 (L)	250																20.91
	筒浆式混凝土搅拌机	小	出料容量 (L)	250																34.10
	双链反转出料混凝土搅拌机	中	出料容量 (L)	750																80.64



华中科技大学博士学位论文

动力机械	电渣流焊机	小	容量 (KVA)	15					38.70				
	其他见表												
	柴油发电机	中	功率 (kw)	30		48.30							
	电动空气压缩机	小	排气量 (m <sup>3</sup> /min)	0.3					16.10				
	内燃空气压缩机	中	排气量 (m <sup>3</sup> /min)	6		16.20							
	工业锅炉	中	蒸发量 (t/h)				11.50						
	其他见表												
	盾构同步注浆泵	大		φ2.1m×7m					52.10				
	医疗间设备	中		φ2.1m×7m					38.41				
	其他机械	履带式绳索抓斗成槽机	特		550A-50 MHL-630		110.64						
其他见表													
抽流风机		小	功率 (Kw)	7.5					30.30				
离心通风机		小	能力 (m <sup>3</sup> /min)	335-1300					90.00				
磨砖机		小	功率 (Kw)	4					10.00				
其他见表													

# 华中科技大学博士学位论文

附表4: 建筑物施工安装阶段办公区、生活区、施工区耗能耗电碳排放清单

来源空 间划分	能耗来源		年均能源消耗量				能源对应碳排放系数				时间 (年)	碳排放总 量 (kg)	
	类型	数日	汽油 kg	柴油 kg	煤 kg	电 度	汽油 kg (c)/kg	柴油 kg (c)/kg	煤 kg (c)/kg	电 kg (c)/度			
办公 车辆	小轿车												
	客车												
	其他												
办公区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												
施工区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												
生活区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												

附表 5: 建筑物使用维护阶段机械设备碳排放计算排放清单

划分	机械名称	机型	规格型号		台班能源消耗				能源对应碳排放系数				碳排放总量 (kg)			
			载重量 (t)	规格型号	汽油	柴油	煤	电	台班数	汽油	柴油	煤		电		
															kg	kg
水平运输机械	载重汽车	中	2.5		20.36											
	台卸汽车	中	3		17.27											
	平板拖车组	大	8		30.05											
	长材运输车	大	8		41.72											
垂直运输机械	其他见表															
	电动卷扬机	小	0.5	牵引力 (t)			14.70									
	单笼施工电梯	中	75	提升高度 (m)			45.66									
	电动葫芦	小	2	起重重量 (t)			18.90									
	其他见表															
	滚筒式混凝土搅拌机	小	250	出料容量 (L)			20.91									
混凝土及砂浆机械	滚筒式混凝土搅拌机	小	250	出料容量 (L)			34.10									
	双锥反转出料混凝土搅拌机	中	750	出料容量 (L)			80.64									
	其他见表															
	轴流风机	小	7.5	功率 (Kw)			40.30									
其他机械	离心通风机	小	335-1300	能力 (m <sup>3</sup> /min)			90.00									
	磨砖机	小	4	功率 (Kw)			10.00									
其他种类	其他见表															



附表 6: 建筑物使用维护阶段办公区、生活区、公共区耗能耗电碳排放清单

来源区划分	能源来源		年当能源消耗量				能源对应碳排放系数				时间(年)	碳排放总量(kg)	
	类型	数目	汽油 kg	柴油 kg	电 度	汽油 kg (c)/kg	柴油 kg (c)/kg	煤 kg (c)/kg	电 kg (c)/度				
办公车辆	小轿车												
	客车												
	其他												
办公区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												
公共区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												
	其他												
生活区	照明												
	空调设备												
	电梯												
	取暖												

附表 7: 建筑物拆除清理阶段机械设备碳排放计算排放清单

划分	机械名称	机型	规格型号	台班能源消耗				台班数	能源对应碳排放系数				碳排放总量 (kg)
				汽油	柴油	煤	电		汽油	柴油	煤	电	
				kg	kg	kg	度		kg (c)/kg	kg (c)/kg	kg (c)/kg	kg (c)/度	
水平运输机械	载重汽车	中	载重量 (t)	2.5	20.36								
	白班汽车	中	载重量 (t)	2	17.27								
	平板拖车	大	载重量 (t)	8	30.05								
	材料运输车 其他见表	大	载重量 (t)	8	41.72								
垂直运输机械	电动卷扬机	单筒快速	小	牵引力 (t)	0.5								
	单笼施工电梯		中	提升高度 (m)	75								
	电动葫芦	单速	小	起重量 (t)	2								
其他种类	其他见表												

附表 8 建筑物拆除清理阶段办公区、生活区、公共区能耗耗电碳排放清单

排放空间 划分	能源来源	年均能源消耗量			能源对应碳排放系数			吨位 (tF)	碳排放总量 (kg)
		汽油 kg	柴油 kg	煤 tE	汽油 kg (e)/kg	柴油 kg (e)/kg	煤 kg (e)/kg		
办公车辆	类型								
	小轿车								
	客车 其他								
办公区	照明								
	空调设备								
	电梯								
	取暖								
	其他								
公共区	照明								
	空调设备								
	电梯								
	取暖								
	其他								
生活区	照明								
	空调设备								
	电梯								
	取暖								
	其他								