

学校代号 10532

学 号 S06011149

分 类 号



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

围护结构节能改造与暖通空调系统 生命周期评价方法研究

学位申请人姓名 王 瑞

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 龚光彩教授

学 科 专 业 供热、供燃气、通风及空调工程

研 究 方 向 建筑节能

论文提交日期 2009年4月29日

学校代号: 10532

学 号: S06011149

湖南大学硕士学位论文

围护结构节能改造与暖通空调系统 生命周期评价方法研究

学位申请人姓名: 王 瑞

导师姓名及职称: 龚光彩 教授

培 养 单 位: 土木工程学院

专 业 名 称: 供热、供燃气、通风及空调工程

论文提交日期: 2009 年 4 月 29 日

论文答辩日期: 2009 年 5 月 21 日

答辩委员会主席: 汤广发 教授

Study on Building Envelope Energy-saving Retrofit and HVAC
System with Life Cycle Assessment Method

by

WANG Rui

B.E. (Hunan University) 2005

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor GONG Guangcai

April, 2009

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，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后果由本人承担。

作者签名：王瑞

日期：2009年 5 月 25 日

学位论文授权使用授权书

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，同意学校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。本人授权湖南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。

本学位论文属于

1、保密□，在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：王瑞

日期：2009年 5 月 25 日

导师签名：

日期：2009年 5 月 25 日

摘 要

随着经济的发展和房地产业的繁荣,建筑能耗在能源消耗中的比重越来越大,对于资源和建材的消耗也越来越大,伴随着巨大的能源消耗和资源消耗,引起的环境问题也日益突出,所以建筑节能工作的开展就显得尤为重要。在利用现有的条件下,如果能通过少量的资源和经济投入换来对能源的大量节约,这样在满足室内热舒适性的条件下,不仅节约了能源而且减少了对环境的破坏。有关生命周期评价方法的研究始于上个世纪九十年代,先后在欧洲、北美等发达国家的许多领域得到了应用,比如对工业产品的生命周期分析,对环境管理方面的环境标志评价,对建筑领域的生命周期分析等。

文章通过对生命周期理论的研究,区别于以往针对建筑物整体的生命周期分析,分别从围护结构与暖通空调设备系统两个部分对其进行生命周期评价。建筑围护结构部分的生命周期评价包括构成建筑“外壳”的围护结构从建筑材料的生产阶段、围护结构的施工阶段、围护结构日常使用阶段、围护结构的拆除阶段一直到围护结构废旧建材的回收再利用整个生命周期的分析,包括对其消耗能源的评价和对环境的影响;暖通空调设备系统的生命周期评价包括构成设备的材料的生产加工阶段、设备投入运行阶段,以及设备废旧材料回收利用几个阶段的分析,同样也是包括对其能耗的评价和环境的影响评价。由于我国目前对建筑能耗的评价基本都是针对建筑使用阶段的能耗评价,也就是设备运行阶段的能耗评价,只是针对建筑物生命周期的一个部分的评价,有一定的片面性,所以本文从全生命周期的角度,更加系统、全面的分析建筑物两个主要部分的能耗情况,并且针对目前节能改造的实际情况,提出了用生命周期评价方法判断节能改造方案可行性的标准,即建筑进行节能改造减少的设备运行能耗如果大于或者远远大于因为围护结构或设备改造所投资的材料的生命周期能耗,这样的改造就是有意义的。通过运用生命周期理论对建筑节能改造的评价,让蕴含在建筑材料里的潜在能耗被人们所注意。最后以宁波地区住宅建筑作为典型案例,对本文的研究方法加以分析。本研究提出的全生命周期建筑节能思想对于大力开展建材工业的节能、建筑的节能设计、运输方面的节能、暖通空调设备系统的节能、废旧建材回收利用以及减少环境排放都有着重要的指导作用。

关键词: 生命周期评价; 围护结构; 暖通空调设备系统; 节能改造; CO₂ 排放指标

Abstract

With the development of economic and real-estate industry, the proportion of building energy consumption in total energy consumption is in sustained growth. At the same time, the environmental impact is increasingly prominent caused by great consumption of energy and resources. So it's necessary and important to take actions on energy saving. In this case, more energy efficiency can be achieved by less input of resources and money.

Life Cycle Assessment Method started from the last 90's and then was developed and applied in many fields in most Europe and North America, such as the industry production life cycle assessment, the evaluation to environment management, the life cycle analysis in architecture areas and so Based on the theoretical study of the life cycle, life cycle assessment is carried out from both the building envelope and equipment systems in this article, which is quiet different from the past life-cycle analysis. The building envelope part of the life-cycle assessment includes building materials production stage, the construction phase of the envelope structure, daily use stage, the removal of envelope phase and the recycle stage of the waste building materials. The equipment system life cycle assessment includes the equipment material production stage, the operation stage as well as the waste equipment materials recycling stage. Both parts consist of the evaluation to energy consumption and environmental impact.

Since the present evaluation to building energy consumption is for the building using stage or the device operating stage, the evaluation is of one-sidedness to some extent. Against this background, this article studies the energy consumption from the point view of life cycle assessment method on both the building envelope and the devices in a more systematic and comprehensive way. The standards, which are used to determine the feasibility of the energy-saving program with the method of life cycle analysis, are put forward in this paper. That is to say, if the device consumption reduced by energy-saving transformation is greater or much greater than the life cycle cost of investment to building envelope or equipment, the transformation is meaningful. Through the method of life cycle analysis used to evaluate building energy-saving transformation, the potential energy consumption of building materials are noticed gradually by people. And finally, the residential building in Ningbo is

used as a typical case to illustrate the life cycle analysis. The idea of total life energy saving put forward in this article plays an important role to energy efficiency of building material industry, energy-efficient building design, transport energy saving, recycle of waste materials and reduction of environmental emissions.

Key Words: Life Cycle Assessment (LCA), Envelope structure, HVAC equipment system, Energy-saving retrofit, Carbon dioxide outlet index

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 国外研究现状	4
1.2.2 国内研究现状	6
1.3 存在的问题	7
1.4 本文研究的主要内容与目的	8
1.5 小结	9
第 2 章 生命周期评价方法介绍	10
2.1 生命周期评价的定义	10
2.2 生命周期发展的过程	10
2.3 生命周期评价的理论框架	11
2.3.1 目标定义与范围界定	12
2.3.2 清单分析	13
2.3.3 生命周期影响评价	15
2.3.4 生命周期解释	15
2.4 生命周期评价的应用范围	16
2.4.1 在环境管理方面的应用	16
2.4.2 在工业生产方面的应用	16
2.4.3 在建筑节能方面的应用	16
2.5 生命周期评价在本文中的应用	17
2.6 本章小结	18
第 3 章 建筑围护结构的生命周期评价	19
3.1 研究对象、目标与范围确定	19
3.2 清单分析	20
3.2.1 建材生产阶段	21
3.2.2 建造施工阶段	24
3.2.3 围护结构使用阶段	26

3.2.4 围护结构拆除阶段.....	26
3.2.5 围护结构废旧建材处置阶段.....	27
3.3 环境影响评价.....	28
3.4 本章小结.....	29
第 4 章 暖通空调系统的生命周期评价.....	30
4.1 目标与范围界定.....	30
4.2 清单分析.....	31
4.2.1 暖通空调设备建设阶段.....	32
4.2.2 暖通空调设备使用阶段.....	33
4.2.3 暖通空调设备拆除回收阶段.....	34
4.3 环境影响评价.....	35
4.4 本章小结.....	36
第 5 章 节能改造对围护结构和暖通空调系统的影响分析.....	37
5.1 目前节能改造的主要方式.....	37
5.2 改造前后围护结构与围护结构设备系统的生命周期能耗.....	38
5.2.1 改造前的建筑生命周期能耗.....	38
5.2.2 改造后的建筑生命周期能耗.....	38
5.3 改造部分分析.....	39
5.4 案例分析.....	40
5.4.1 案例介绍.....	40
5.4.2 改造方案介绍.....	41
5.4.3 不同改造方案围护结构生命周期分析.....	42
5.4.4 不同改造方案暖通空调设备系统生命周期分析.....	49
5.4.5 改造合理性分析.....	58
5.4.6 环境影响评价.....	61
5.5 本章小结.....	62
结论与展望.....	63
参 考 文 献.....	65
致 谢.....	69
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录.....	70

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着人类生活水平的提高，对资源的索取也逐渐增大，过度开发的资源导致地球环境恶化，很多资源面临枯竭的危险。在全世界日益增长的能源消耗中，无论是工业发达的国家还是发展中国家，建筑能耗均是国家总能耗中比较重大的一项。据统计，到 2000 年末，我国建筑年消耗商品能源共计 3.76 亿吨标准煤，占全社会终端能耗总量的 27.6%，建筑能耗及所占的比例呈逐年上升趋势，可以预见，如果建筑节能工作仍维持目前状况，2020 年建筑能耗将达到 10.89 亿吨标准煤，为 2001 年的 3 倍以上；如果抓紧建筑节能工作，并达到预期目标，则 2020 年建筑能耗达到 7.54 亿吨标准煤，增长约为 1 倍^[1]。住宅建筑是建筑中最重要的建筑类型，它构成建筑中量大面广的部分，住宅建设在全国范围广泛展开，耗用大量的资金、原材料和能源。目前，我国每年新建建筑 16-19 亿 m²，城市住宅为 5~6 亿 m²，农村住宅为 4~5 亿 m²，公共建筑、工业建筑占 4~5 亿 m²。建筑能耗占总能耗的比例也逐年上升，从 1978 年的 10% 上升到 2001 年的 27.45%。图 1.1 所示为 2001 年建筑能耗的各个组成部分所占比例，其中，采暖、空调能耗所占比例为 55%^[2]。

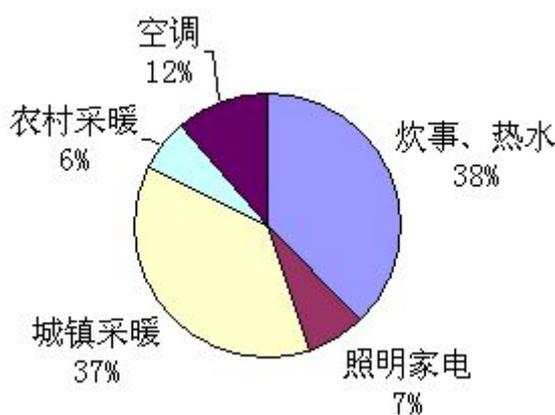


图 1.1 2001 年我国建筑能耗用能比例

随着建筑能耗的消耗越来越到，由于矿石燃料的燃烧所产生的二氧化碳也逐年增多，据统计，建筑能耗引起的二氧化碳的排放量占总排放量的 20% 左右，据推算，暖通空调在全国温室气体排放的贡献率达到 15% 以上，1999 年我国的二氧化碳总排放量已经达到 3007 百万 t 二氧化碳当量^[3]。图 1.2 所示为 1999 年我国各部门二氧化碳排放量占总排放量的比例。

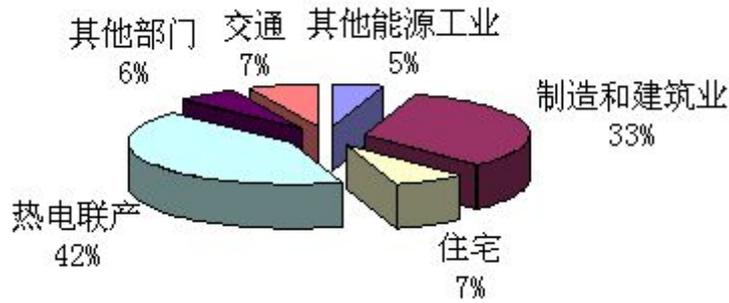


图 1.2 1999 年我国各个部门二氧化碳排放的比例

为提高能源利用效率，降低建筑能耗，我国从住宅建筑入手开展了相当规模的建筑节能工作。制定了建筑节能及其应用技术标准、规范以及相应的鼓励政策和管理规定，以试点示范作引导，建成了一批节能建筑。全国目前建成1.5亿平方米的节能住宅，累计减排二氧化碳约1700万吨，然而总起来我国住宅建筑节能是不容乐观的^[4]。首先节能住宅的数量占住宅总量的比例很小，其次我国住宅建筑采暖空调标准远低于国际水平，是欧洲的三倍，对建筑节能工作的认识不足导致了节能住宅建设进程缓慢，以及其它诸多问题。建设部组织的对我国北方地区和部分过渡地区的建筑节能工作检查结果表明，能够达到采暖建筑节能设计标准的建筑仅占城市既有采暖居住建筑面积的6.5%，除北京、天津等地外，目前建筑节能仍然停留在试点、示范的层面上，尚未从试点扩大到整体推进。

对于建筑能耗的分类，可以分为狭义的能耗和广义的能耗。狭义的建筑能耗一般是指建筑使用过程中的能耗，主要包括建筑采暖、空调、炊事热水、照明、家用电器、电梯、通风等方面的能耗；广义的建筑能耗，还包括用于建筑的建材在生产过程中的能耗、建筑建造过程中的能耗以及建筑拆除等项目的能耗^[4]。不同用途的建筑，能耗的构成及比重是有差异的，建筑节能的意思不仅是节约能源，还包括对经济、环境、社会等方面的广泛影响^[5~7]。能效的提高和能源的节约势必减少节能建筑的运行费用；而且由于热舒适对居住者健康和工作效率的影响，节能建筑舒适的环境也对使用者产生一定的影响；建筑运行能耗的减少将减弱建筑运行产生的废气、固体垃圾对环境的污染；在节能建筑的整个研究周期内，与上述因素相关费用支出会因此而减少。由于能源问题已经成为我国经济发展的瓶颈，建筑是用能大户，不仅大量既有建筑中采暖、空调、照明、家用电器、炊事用具等用能设备消耗着大量的能源，而且在新建建筑的建造过程中消耗了大量的钢铁、有色金属、水泥、玻璃、塑料等建筑材料，在这些建材的生产过程中也消耗着大量的能源，另外在建筑设备和建筑机械的制造、材料运输、能源生产及加工等为建筑服务的相关环节也消耗着大量的能源。但目前对建筑能耗的分析研究主要集中在建筑运行能耗方面，即狭义建筑能耗方面，建筑材料能耗与相关环节

能耗的广义建筑能耗状况研究很少。

我国建筑节能起步较晚，对节能问题的深入研究比较缺乏。随着节能技术进步和制度法规逐步成熟，对建筑节能研究的重心也开始偏向建筑节能环境和经济评估研究。但很多研究是诸如建筑节能收益、初期投资和简单回收期的评价是分项的简单分析，对环境的评价还基本停留在定性分析和简单数据罗列的基础上，计算方法只是静态估算，不能科学反映实际情况。经济利益涉及的对象太多，导致了社会节能积极性和政府法规、节能技术进步相脱节，其根本原因还在于对节能建筑的经济性能认识模糊，对节能建筑的综合经济环境效益缺乏了解。

建筑节能是一项系统的工作，需要各方面、各部门的配合，节能建筑不是各种新技术和新设备的堆砌，一些节能技术和设备运用不当甚至会造成能耗的增加。比如在北方地区增加围护结构的保温，对于减少住宅建筑采暖能耗具有重要意义，但是建筑节能又不是仅仅改善围护结构的保温性能，也不是说围护结构的厚度越厚越好，这中间就有生命周期的思想，因为所谓的能耗增加就是过量采用这些保温材料的能耗增加。最近几年大家都提倡绿色建筑，太阳能等可再生能源的利用越来越受到重视，一些绿色建筑都采用太阳能电池板等节能技术，大量高成本的技术和设备使其造价成倍增加，从全生命周期的角度分析，太阳能发电也不是“免费的午餐”，因为其材料、设备、系统制造过程中也消耗着大量的能耗。减少建筑运行能耗是建筑节能的关键，但是建材能耗在建筑能耗中也占了较大的比例，随着建筑保温措施的加强、节能技术和设备的运用，建筑运行能耗会逐步减少，但是这些措施通常又会造成建筑材料及其生产能耗的增加。因此建筑业要想取得可持续发展，不仅要建筑作为产品来看待，也要全面分析建筑物整个生命周期中影响环境的各种活动、因素，并在此基础上做出相应的变革，才能实现建筑业的可持续发展^[7]。生命周期方法恰好是从产品或服务的整个生命周期出发，是一种分析减少环境污染、资源和能耗的有效方法，现在已经被广泛的应用于各个领域的分析研究。从生命周期评价的观点，建筑能耗不仅包括建筑中各种用能设备的运行能耗，还应包括建筑材料生产过程的能耗、以及建筑施工，建筑设备与建筑机械制造、交通运输、建筑拆除、废弃建材回收处理等建筑相关活动过程的能耗。建筑材料能耗主要包括建筑物建造过程中消耗的钢铁、有色金属、水泥等非金属建材和化工建材等材料生产过程的能耗。建筑施工能耗主要是建筑在施工过程中因为各种施工方式所带来的能耗，建筑运行能耗主要包括建筑中的采暖、空调、照明、家用电器、生活热水供应、炊事用具等建筑用能设备的运行能耗^[8-9]。建筑拆除能耗主要是建筑已经不能满足其使用功能时拆除过程所消耗的能耗，废弃建材回收能耗是由于大量的建筑废弃建材中可回收的建材被送往指定地点重新加工的能耗和不可回收建材被送往垃圾填埋场所的运输能耗。因此本文正是从生命周期的角度出发，将建筑物能耗分为围护结构系统能耗和围护结构设备系统能耗，

分析组成这两大系统的能耗从原材料的生产、运输、施工、建造、维修、回收阶段的整体能耗，分析对围护结构系统改造和围护结构设备系统改造对建筑整体能耗的影响。因此生命周期方法是一种可以对建筑节能从整体上进行评估的方法，能够更好的认识节能潜力、更加全面的分析建筑在各个阶段的能耗。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

对建筑节能的评估，可以分为三类：环境评价、经济评估和综合评估。就全世界范围来说，其范围和重点也是有变化的。这些变化从节能技术研究到节能环境效益研究，进而发展到对经济效益及综合效益的研究，实际上是对节能建筑认识的逐步深化和系统化。在过去 30 年内，节能（或生态）建筑研究领域经历了以下进程：能源供应问题——大气臭氧层问题——全球气候变暖问题——健康和建筑——生命周期评估等五个主要阶段^[10]。对建筑节能相关的理论研究经历了从分散到整合的过程。首先是节能技术和政策研究，这是对能源问题的直接对策，在节能发展的过程中，逐步产生了对节能意义的思考，结合其它领域如环境、经济等的研究，延伸出对节能建筑环境效益的评价研究，如建筑材料生命周期(LCA)环境评价、建筑生命周期总费用评估、环境评估、可持续建筑评估等等。这些评估方法为开展综合经济效益评估和能耗与环境评估奠定了基础。

国外对于建筑材料和建筑物的生命周期评价的研究开展的比较早，而且也取得了一定的研究成果。其主要是对建筑物生命周期的能量消耗和温室气体的排放进行分析^[11-12]。

1.2.1.1 美国 LEED

LEED(Leadership in Energy and Environmental Design)是由非营利团体的美国绿色建筑协会所提出的评估法^[8]。评估对象为办公建筑。提供了一个评价建筑环境性能和满足可持续发展目标的完整框架。LEED 评价系统中设计了 44 个评价指标和 4 个附加指标作为绿色建筑的标准。评估条件第一阶段除需符合必要条件外(如环保法令、废弃物处理、排水等)，第二阶段评估系统基准项目另依室内空气质量、CFCs、能源效率、热舒适性、交通、节水、饮用水含铅量建材、对环境有害的建材、建筑废弃物、再生建材的收集保管、维护、再生能源等进行评估，得分超过 40%以上者可颁发不同等级(一般、铜牌、银牌、金牌、白金牌)绿色建筑证书。

1.2.1.2 英国 BREEAM

BREEAM(Building Research Establishment Environmental Assessment Method)是由英国建筑研究所开发的建筑环境负荷评估法^[9]。主要评估的对象包括新(旧)

办公建筑、新建大百货商场、新建住宅、新工厂建筑等。评估项目主要根据地球环境问题与资源利用、当地环境问题、室内环境问题等三大议题进行 18 项评估，按照总分来评定四等级 (Fair、Good、Very Good、Excellent) 水平。BREEAM 对建筑材料、构件及建筑物的生命周期评价采用环境状况方法论 (Environmental Profiles Methodology)。BREEAM 对建筑产品和工艺过程的环境影响以 Eco-points 表示，考虑的环境因素有：气候变化、化石燃料消耗、臭氧层破坏、货物运输、气体的人体毒性、水的人体毒性、废物处理、水资源开发、酸沉降、生态毒性、富营养化、夏季烟雾以及矿产开采。

1.2.1.3 加拿大 BEPAC

BEPAC (Building Environment Performance Assessment Criteria) 是由加拿大英属哥伦比亚大学所开发的建筑环境性能评估法^[9]。评估对象为新(旧)办公建筑。以臭氧层保护、能源利用环境影响、室内环境质量、省资源、基地交通等五个环境议题进行 34 项评估，并经各评估项目权重来加以量化所得之总分。

加拿大的 ATHENATM 系统采用生命周期评价方法评价新建、改建、重建等建筑的环境影响。该系统考虑的环境影响主要涉及材料制造，包括原材料开采和材料重新使用；运输；现场施工；能源利用、运输以及其他因子的地区差异；建筑形式和寿命；维护、更新和修缮；拆除和处理；运行能耗和排放等领域。

1.2.1.4 法国 TEAM for Building

法国 Ecobilan 集团公司把生命周期评价方法应用于建筑行业，完成了一些工业实例研究^[8]。主要涉及不同结构(木材、钢材、混凝土)的比较研究，并试图确定在给定环境和参数的情况下，什么结构是最佳解决办法；它还进行了一些理论研究，旨在考察生命周期分析方法与材料(窗玻璃、水泥、混凝土、水密性焦油)有关的关键点；最后，一项完整的研究评价了建筑物的环境负荷，涵盖了建设阶段和一定时期内的建筑物使用阶段，Ecobilan 为生命周期评价开发了模拟建筑物的软件 TEAM for Building，并开发了一个生命周期数据库，以描述建筑材料的生产和不同的建筑物建设与使用阶段(混凝土浇筑、管道安装、油漆等)的信息。

1.2.1.5 荷兰 Eco-Quantum

Eco-Quantum 是荷兰阿姆斯特丹大学环境研究所与 W/E 永续建筑顾问公司共同所开发的建筑物生命周期评估软件^[9]。评估对象为所有建筑物，是以建筑物之建造、使用、拆除等阶段为主的生命周期定量评估法。

1.2.1.6 日本 AIJ-LCA

AIJ-LCA 是日本建筑学会所开发的建筑物生命周期评估法^[9]。评估对象为办公厅、百货商场、餐厅、旅馆、学校、医院等建筑物。计算结果以地球暖化、臭氧层破坏、酸雨、健康障碍、资源枯竭等议题项目，转换成图表化及数据化表示之数据来评估。

1.2.1.7 瑞典 CTH

瑞典 Chalmers University of Technology (CTH) 环境技术规划系运用生命周期评价启动了“建筑物和建筑材料的环境评价”项目^[8]。作为研究项目的一部分，A Johnson 等人选择了三种在瑞典用量较大的地板材料作为研究对象，运用生命周期评价方法研究了地板材料生命周期对自然环境的影响。A Johnson 还对比分析了六种建筑产品环境评价的工具和方法，建议在不同的形势下选用不同的方法作为决策依据。

1.2.1.8 澳大利亚

澳大利亚的比尔劳森博士研究了建筑材料的提取、加工，建筑物的设计、使用以及建筑物的拆毁等各个环节对环境的影响以及消耗的能量^[8]。通过几个环境影响评价指标，定性分析了有机建筑材料、陶瓷材料及金属材料制造过程的环境影响。并通过物化能的概念，定量计算了建筑材料、建筑构件及建筑结构体系消耗的能量的大小，并以此作为衡量建筑活动对生态影响的量化指标。他强调建筑生命周期评价的重要性，即在考虑建筑活动的环境影响时，不仅要注重设计、材料提取、加工、建筑结构和建筑物的使用和维护等环节，更要考虑建筑物拆除时的环境影响和有关材料再生和系统能够重复利用的可能性。

1.2.2 国内研究现状

我国的生命周期评价应用在建筑领域还处于起步阶段。主要研究成果有绿色奥运建筑研究课题组编写的《绿色奥运建筑评价体系》和《绿色建筑评价标准》。《绿色奥运建筑评价体系》是根据建设项目在规划、设计、施工、验收与运行管理四个阶段不同的特点和要求，分别从环境、能源、水资源、材料与资源、室内环境质量等方面阐述了如何全面地提高奥运建筑的生态服务质量并有效地减少资源与环境负荷。而《绿色建筑评价标准》体系主要包括六个评价指标：节地与室外环境、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量以及运营管理(住宅建筑)和全生命周期综合性能(公共建筑)。

这些年来，关于建筑物的生命周期能源消耗的环境影响研究也在逐步展开，基本上是由环境领域的研究学者运用生命周期评价(Life-cycle Assessment)的思想，作为建筑物整个生命周期环境影响的一部分对建筑物的能源消耗进行评价。这些研究的主体是建筑在部分或是整个生命周期的综合环境影响，而不是关注所消耗的能源本身，因此关于能源消耗的分析的完整性和精度都非常低，往往不能代表真正意义上的建筑生命周期能耗研究。而且对单个建筑材料的评价研究比较多，对整个建筑项目的生命周期评价研究，大部分的文献只是根据 LCA 的概念提出评价的理论框架。

由于建筑的能源使用在我国能源消耗中占有越来越重要的地位，同时带来的

环境污染问题也越来越突出，建筑的生命周期能耗研究有助于了解我国建筑能耗水平、建筑用能模式、累计建筑能耗基础数据、评价相关环境影响，不少业内人士对住宅建筑或建筑材料进行了全生命周期的评价和研究工作。

李兆坚，江亿^[7]等人对广义建筑能耗的组成进行分析，结果表明，广义建筑能耗占全国建筑能耗的 45.5%。在广义建筑能耗中，运行能耗、建材能耗与间接能耗约占全国总能耗的 20%、15% 和 10.5%，减少建筑运行能耗是建筑节能的关键，但减少建筑材料能耗具有同样重要的意义。

顾道金^[13]等人从生命周期角度进行分析，认为聚苯保温层厚度超过 100mm 后再增加厚度几乎不再有节能效果，超过 120mm 后运行能耗节能不能抵消因产能能耗增多带来的付出。

饶坤普等人^[5]研究发现我国建筑物物化能所占比例过高、能耗过低，指出降低建筑物物化能耗在我国建筑节能中的重要性。

赵平等^[14]用全生命周期评价方法(LCA)进行建筑材料对建筑环境负荷影响的相关基础研究，初步确定了建筑材料对建筑环境负荷影响的评价体系框架。

陈江红^[15]等人以住宅全生命周期的能耗为分析对象，把能耗分为全生命周期的物化能和运行能两部分，从理论上探讨了两者之间的关系，分析了生态住宅合理的使用寿命，提出了我国建立住宅全生命周期能耗统计数据的必要性与数据库的主要类型。

仲平^[16]将生命周期思想运用于建筑系统，并借助生命周期评价工具建立建筑生命周期能源消耗模型，分析国家建筑能源消耗现状及趋势和典型单体建筑能源消耗状况，进而从建筑能源消耗建立与环境污染的联系，提出针对性的环境对策。

乔永锋^[9]用生命周期评价法对传统民居的能耗进行了分析和评价，结果表明靠山窑洞、新式窑居太阳房、新建砖混楼房三种建筑的使用寿命为 30 年时，能有使用最高的阶段都是居住使用阶段，单位建筑面积 CO₂ 的排放量差距最大的阶段分别在建材生产阶段和居住适用阶段，当三种建筑的使用寿命从 10 年到 70 年时，当建筑适用寿命增加时，建筑单位面积年能耗量逐渐减少，但减少程度逐渐减弱。

黄志甲^[17]利用建筑物能量系统生命周期清单分析软件(BESLICI)对上海地区某住宅建筑和办公建筑的能量系统进行了生命周期的清单分析案例研究，还分析了三峡水电全部投产后对建筑物能量系统生命周期环境性能带来的收益以及和美国在这方面的差距。

总之，LCA 在我国已逐渐从方法论和思想的介绍开始发展到系统的理论研究和应用基础研究阶段，相信在不久的将来，LCA 会进入实际应用阶段。

1.3 存在的问题

从上述业内人士的研究成果可以看出，虽然生命周期理论已经被大家所接受，

而且也对很多领域进行了分析，但是由于国内对生命周期理论的研究属于刚起步阶段，尤其是专门的建筑生命周期能耗研究领域，国内还基本处于空白阶段。所以还是有很多问题需要研究：

目前，我国目前的建筑节能主要针对建筑使用阶段的能源消耗，随着节能战略的推广和实施，建筑使用阶段能耗占整个生命周期能耗比例将逐渐减小，从更加系统的层面重新设计原有的建筑节能战略就成了新的课题。在我国目前能源形势紧张、生态环境的脆弱以及温室效应等全球环境问题的日益严峻的背景下，从更加全面、系统的层面重新考虑建筑的能源消耗有助于分析并减少建筑在不同生命周期阶段中因能源使用所带来的环境影响。

根据已有的国内外应用 LCA 方法对建筑节能评价的研究分析现状可以看出，由于建筑节能这种复杂性和特殊性商品，以建筑节能为目的的生命周期评价方法刚刚起步，目前已有的研究大多是概念的介绍和局部环节的分析；缺少针对我国资源、能源分布特点的 LCA 方法框架研究；缺少对典型建筑物作为对象的案例分析；缺乏对建筑节能改造的 LCA 研究；还没有将建筑围护结构和暖通空调设备系统能耗分开的研究。这样在进行节能改造的时候，很多案例都是没有具体分析实际情况就对围护结构进行改造，认为主要增加了围护结构的保温性就能减少设备的运行能耗，但是忽视了围护结构的保温也需要消耗能源，因为围护结构的保温材料在生产、运输、加工过程都有能源的消耗和对环境 CO₂ 的排放。

1.4 本文研究的主要内容与目的

通过查阅国内外对于生命周期评价研究的相关文献资料，了解当前国内外生命周期评价的发展、现状及需要进一步研究的问题，确定研究方法。针对研究目的，本文的研究思路如下：首先根据生命周期评价方法(LCA)作为本研究的理论支撑，通过总结国内外对建筑生命周期评价的方法基础上，针对住宅建筑的改造方案，计算不同的改造方式在生命周期各个阶段的能源消耗和对环境的影响，通过建筑整个生命周期的能源消耗和二氧化碳排放两个指标来衡量建筑物的节能。最后，提出一些可行的节能措施建议。

本文的研究内容及目的是：

(1)在了解我国目前建筑节能改造的普遍做法是对围护结构进行保温，而且对节能改造存在很多误区，有部分观点认为围护结构的保温效果和围护结构设备系统的运行能耗是种“此消彼长”的关系，只要增加了围护结构的保温性就可以减少围护结构设备系统的运行能能耗，这样的建筑改造就是成功的，但是忽视了围护结构的保温也是需要代价的，这部分能耗也是建筑物所要承担的。

(2)运用生命周期评估方法(LCA)对建筑节能改造进行分析，将建筑物的生命周期能耗分为围护结构系统能耗和围护结构设备系统能耗。并分别对这两个部分

进行评价，分析了建筑物的围护结构在原材料生产、施工、居住使用、拆除、回收五个阶段的能耗与 CO₂ 排放量；分析了和围护结构的“晴雨表”——暖通空调设备系统在其生命周期的三个主要阶段即设备生产加工、设备运行、设备拆除回收的能耗与 CO₂ 排放量。

(3) 通过对宁波市住宅建筑的典型案例分析，分析其节能改造前后两大系统的生命周期能耗变化。通过案例分析得出本文的结论，对实际的节能改造起到一定的作用。

本文的结构如下：第 1 章，绪论，主要介绍该课题的研究背景、意义、国内外研究发展状况以及本文的研究主要内容、目的和研究思路；第 2 章，生命周期评价方法介绍，介绍了生命周期相关定义、发展、研究理论和应用领域，并介绍生命周期评价方法在本文中的应用；第 3 章，利用 LCA 对围护结构进行生命周期评价，分析其在各个生命周期阶段的能耗与环境影响因素—CO₂ 排放；第 4 章，分析了暖通空调设备系统在设备系统的生命周期里的各个阶段的能耗与 CO₂ 排放；第 5 章，分析节能改造部分的生命周期能耗，分析节能改造对围护结构和设备系统生命周期能耗的影响，最后得出结论：只要围护结构的改造成本能耗大于设备系统的运行减少能耗，即使设备系统在运行中减少了能耗，建筑整体其实还是在更加多的消耗能耗，这样的节能改造就是“耗能改造”，是不合理的，为评判节能改造提供一种全面分析的指标，通过具体量化计算，分析了宁波地区典型建筑住宅围护结构节能改造的案例，分析不同改造方案的生命周期能耗；最后是结论和展望部分，对整个论文的主要工作进行总结，并指出该课题的不足之处及下一步需要研究的工作。

1.5 小结

本章节主要介绍了本文研究的背景意义，建筑节能评估标准在国内外的应用情况，以及我国对生命周期评估的研究进展和存在的问题，最后介绍了本文的研究内容和目的。

第 2 章 生命周期评价方法介绍

2.1 生命周期评价的定义

生命周期评价(LCA)是将某一产品在其生命周期内对环境的影响进行系统地、定量地评价。关于生命周期有以下两种定义最为通用^[18-24]。

(1)根据 1973 年美国环境毒理学与化学协会的定义:

全生命周期评价是在确定和量化某个产品及其过程或相关活动的材料、能源、排放等环境负荷基础上,评价其对环境的影响,并进而找出和确定改善环境影响的方法和机会。评价的内容应该包括产品、过程或相关活动的整个生命周期,包括原材料的获取、加工制造、运输和排放、使用重用维护、会后及最后的处理等生命周期阶段。

(2)根据 1997 年国际标准化组织(ISO)的定义:

国际标准化组织在总结世界先进环境管理经验的基础上,制定了生命周期评价的原则与框架,将某一产品在其寿命周期内的输入与输出和潜在环境影响做出汇编和评价。即将材料构件生产、规划与设计、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对环境影响的经济效益、社会效益和环境效益综合评价,即 ISO 界定的资源利用、人类健康及生态后果三方面。

2.2 生命周期发展的过程

生命周期理论最早是从西方国家兴起的,为了对生命周期评价有一个全面清晰的了解,应该对其起源和发展的历程有一个大概的了解。

生命周期理论的早期萌芽出现在 20 世纪 60 年代末。1969 年美国中西部研究所(Midwest Research Institute, MRI)对可口可乐外包装的整个原料采集、生产到废弃物的处置过程进行了跟踪调查与定量研究。当时这一研究被称为资源与环境状况分析(resource and environmental profile analysis, REPA)。此后,美国环保局又开展了一系列针对饮料包装的 REPA。同时,欧洲国家一些研究机构和工业企业内部也相继开展了类似的研究。

70 年代中后期,石油危机使公众的目光聚焦到 REPA 的能源分析上,采用的方法更多为能源分析法。此外,还有一些私营企业等认识到 REPA 的价值,但是这一阶段的研究应用仅仅局限于产品开发。

80 年代末,随着全球化问题的日益严重及环境意识的提高,人们再次关注 REPA,在分析通过固体废弃物的综合利用、原材料替代及产品回收等途径来减少

废弃物处置的工作中，REPA 被看作是一种有效的研究方法。大量的研究工作重新开始并逐渐形成理论。

90 年代，国际环境毒理学和化学学会 the Society of Environmental Toxicology and chemistry, SETAC)成员首次提出了生命周期的概念，并已明确 LCA 的目标：①决策产品及生产过程的进展；②决策购买；③构建信息系统；④生态标记；⑤环境的产品阐释；⑥决策规则。经过近 20 年的发展实践，LCA 的国际标准化取得了极大的进展。1997 年国际标准组织推出原则与框架；1998 年，推出目标、范围的界定及清单分析；2000 年，颁布生命周期影响评价和生命周期解释。SETAC 对 LCA 理论的各方面也做出细致严谨的协调^[23]。

2.3 生命周期评价的理论框架

1993 年 SETAC 把 LCA 描述成 4 个相互关联的组分组成的三角形模型^[21,23]。它们分别是目标定义和范围界定、清单分析、影响评价和改进评价，如图 2.1 所示。ISO 于 1997 年 6 月颁布了 ISO14040(环境管理-生命周期评价-原则和框架)标准，对 SETAC 框架的一个重要改进是去掉了改善评价阶段。因为 ISO 认为，改善是开展 LCA 的目的，而不是它本身的一个必须阶段。同时，增加了生命周期解释环节，对前三个互相联系的步骤，更利于指导开展 LCA 的研究与应用。ISO14040 将生命周期评价分为互相联系的、不断重复进行的四个步骤，目的和范围的确定；清单分析；影响评价和结果解释，如图 2.2 所示^[22]。

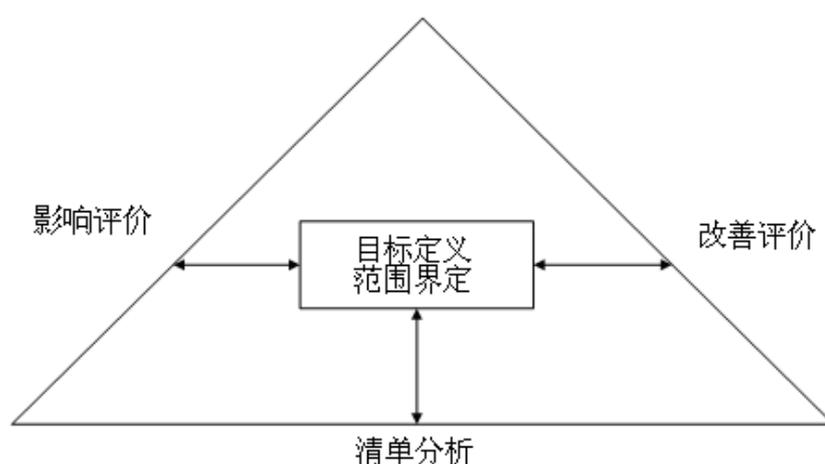


图 2.1 生命周期评价的技术框架 (SETAC)

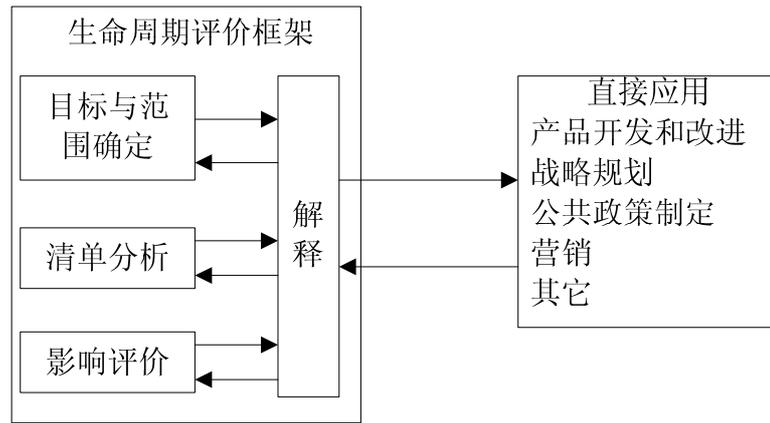


图 2.2 生命周期评价理论框架 (ISO)

2.3.1 目标定义与范围界定

目的与范围的确定是 LCA 研究的起点，LCA 的所有阶段都以目的与范围确认为指导。这一步工作随着任务的不同变化很大，没有标准模式套用，但必须反映资料收集与影响分析的根本方向。

研究目的应包括一个明确的关于 LCA 的原因说明及未来后果的应用。目的应清楚表明，根据研究结果将做出什么决定、需要哪些信息、研究的详细程度即动机。研究目的必须明确陈述应用意图，进行该项研究的理由以及它的使用对象，即研究结果的预期交流对象。LCA 的结果通常是服务于以下三种不同的组织^[23~25]：消费者，这类组织需要的是购买决策信息；生产者，一般是为了产品改进或其他用途(如广告宣传)；公共部门，指政府，是为了制定法规或标准，同时也为了向公众公布信息。

研究范围定义了所研究的产品系统、边界、数据要求、假设及限制条件等。为了保证研究的广度和深度满足预定目标，范围应该被详细定义。由于 LCA 是一个反复的过程，在数据和信息的收集过程中，可能修正预先界定的范围来满足研究的目标。在某些情况下，也可能修正研究目标本身。

研究范围也应妥善规定，要保证研究的广度、深度和详尽程度与研究目标相符。LCA 研究是一个反复的过程，随着对数据和信息的收集，可能须要对研究范围的各个方面加以修改，以满足原定的研究目的。在某些情况下，由于未曾预知的局限、制约或获得了新的信息，可能要对研究目的本身加以修改。LCA 研究范围中必须明确规定所研究系统的功能。功能单位指为某一用户或某一过程所提供的一种服务或使用价值，是产品系统输出功能的量度。功能单位的基本作用是为有关的输入输出提供一个数学意义上的参照基准，以保证 LCA 结果的可比性。在评估不同系统时，LCA 结果的可比性是必不可少的，否则无法在同一个基础上进行比较。一个系统可能同时具备若干种功能，研究中选择哪一种取决于研究的目的和范围。同时，必须对有关功能单位做出定义，并使之可测量。此外，确定

系统边界也是确定研究范围的重要步骤，它决定 LCA 中必须包括的单元过程，产品生命周期所有过程都应落入系统的边界内，边界外就是系统环境。产品一方面与环境系统发生关系，另一方面由于其生产过程中往往需要辅助产品的投入而与其他产品相联系，而 LCA 只包括与产品直接有关的过程。所以必须将产品系统的边界从其他系统中划分出来，这是整个评价中十分重要的一步。一项完善的 LCA 研究应有一个明确的定义系统边界的标准，这个标准对于保证研究结果的可靠性和实现研究目的具有决定性作用。任何忽略生命周期的阶段、过程或输入输出的决定都必须予以明确陈述和论证^[24~26]。

目的和范围的确定具体说来应先确定产品系统和系统边界，包括了解产品的生产工艺，确定所要研究的系统边界。针对生产工艺各个部分收集所要研究的数据，其中收集的数据要有代表性、准确性、完整性。在确定研究范围时，要同时确定产品的功能单位，在清单分析中将收集的所有数据都要换算成功能单位，以便对产品系统的输入和输出进行标准化。

LCA 的研究目的和范围确定之后，就能建立一个 LCI 的数据收集计划。数据的收集是 LCI 的一个重要部分。数据收集的核心应该包括明确数据质量目标，确定数据的来源和种类，建立数据质量的标准，设计数据调查表。其中数据质量决定了最终生命周期评价结果的质量。数据质量主要涉及时间跨度、空间范围(局域、区域和全球)和技术层次等。对实测数据和文献数据的来源应予明确说明。

2.3.2 清单分析

生命周期的清单分析，即对系统范围内的所有过程对资源的消耗及其环境排放物进行以数据为基础的客观量化过程。其核心是建立以单位过程表达的产品系统的输入和输出，即建立用于产品系统评价的数据清单。清单分析贯穿于产品的整个生命周期，即原材料的提取，产品的加工、制造、销售、使用和后处理等，是生命周期影响评价和结果解释的基础。一个完整的使用寿命清单分析应该能为所有与系统相关的投入和产出提供一个总的概括。数据收集的齐全及精确与否是决定分析结果正确与否的关键。进行清单分析是一个反复的过程，当取得了一批数据，并对系统又进一步的认识后，可能会出现新的数据要求，或发现原有的局限性，因而要求对数据收集程序做出修改，以适应研究目的。有时也要求对研究目的或范围加以修改。清单分析是目前 LCA 中发展较为完善的阶段。

清单分析是 LCA 基本数据的一种表达，是进行生命周期影响评价的基础。清单分析是对产品、工艺或活动在其整个生命周期阶段的资源、能源消耗和向环境的排放(包括废气、废水、固体废物及其他环境释放物)进行数据量化分析。清单分析的核心是建立以产品功能单位表达的产品系统的输入和输出(即建立清单)。通常系统输入的是原材料和能源，输出的是产品和向空气、水体以及土壤等排放

的废弃物(如废气、废水、废渣、噪声等)。清单分析的步骤包括数据收集的准备,数据收集,计算程序,清单分析中的分配方法以及清单分析结果等^[25-28]。

清单分析可以对所研究产品系统的每一过程单元的输入和输出进行详细清查,为诊断工艺流程物流、能流和废物流提供了详细的数据支持。同时,清单分析也是影响评价阶段的基础。在获得初始的数据之后就需要进行敏感性分析,从而确定系统边界是否合适。清单分析的方法论已在世界范围内进行了大量的研究和讨论。美国 EPA 制定了详细的有关操作指南,因此相对于其他组成来说,清单分析是目前 LCA 组成部分中发展最完善的一部分。

清单分析主要涉及到清单数据收集、分配和标准化等三个问题^[25,28]。

2.3.2.1 清单数据收集

清单数据是清单分析的基础。由于需要收集产品整个生命周期各个阶段的数据,清单数据的收集是一个相当繁琐的过程。清单数据的完整性和精确性的保证也是一个难点。

对于收集清单数据的通常作法是:对于原材料获取阶段的清单数据,来源于社会生产的平均水平,可以从行业主管部门和环境管理机构获取相应的数据;对于产品制造清单数据,来源于企业生产工艺数据、企业年度统计、企业报表、各个管理部门的检查报告、环境部门的检测报告等;对于产品的运输和销售清单数据,来源于调查、实际测量和相关的文献获取;对于产品使用和处理清单数据,来源于产品的设计资料、国家规定的报废标准以及用户调查和现场测定等方式获取。

2.3.2.2 清单数据分配

清单数据的分配是整个清单分析过程中的核心和难点,它直接影响研究的过程和结论。对产品系统的输入或输出进行分配通常有两种情况:共生产品系统,即两种或两种以上产品同时产出于一个工艺过程或多个相互连接的生产工艺,如在燃煤热电厂这个共生产品系统中,对于两种共生产品输出热和电,需要确定多少煤用来发电和多少煤用来生产热等。生产工艺的再循环利用过程,即边角料、副产品或废旧产品等再被生产工艺重新利用,如塑胶饮料瓶用后经处理后再注塑成其他生活用品(如塑料脸盆等)的再循环工艺等。为了尽量避免分配问题的出现,可以通过两种途径实现,即通过发现工艺之间的因果关系,将可以分解的工艺进行分解以消除虚假的共同工艺;或扩展系统边界,将系统外的输入和输出纳入所研究的系统中。

2.3.2.3 清单数据标准化

清单数据是实施生命周期评价的基础。如果清单数据不符合标准,或者没有统一的标准,则生命周期评价的结果往往无法令人信服。一些研究机构一直在积极地促进清单数据的标准化。如 SPOLD 参考开发了一种数据交换的格式,定义

了清单分析数据的逻辑结果，并可以在网络上运行，为数据的自由流动提供了技术前提。瑞典 SPINE 中心提出了一个标准化地数据模型和关系型数据库结构，可以处理、构造和存储产品生命周期评价数据的所有相关信息^[23]。

2.3.3 生命周期影响评价

ISO 定义的生命周期影响评价框架如下：生命周期影响评价框架及其程序必须透明，并且提供其广泛应用范围的适用性和可操作性；同时，影响评价对所用的成本和资源来说是有效的。影响评价是将 LCA 得到的各种排放物对现实环境影响进行定性定量的评价，它是 LCA 最重要的阶段，也是最困难的阶段。影响评价是对清单阶段所识别的环境影响压力进行定量或定性的表征评价，即确定产品系统的物质、能量交换对其外部环境的影响，这种评价应考虑对生态系统、人体健康及其他方面的影响。

影响评价阶段实质上是对清单分析阶段的数据进行定性或定量排序的一个过程。影响评价目前还处于概念化阶段，还没有一个达成共识的方法。ISO、SETAC 和英国 EPA (Environmental Protection Agency) 都倾向于把影响评价定为一个“三步走”的模型，即影响分类 (Classify)、特征化 (Characterization) 和量化 (Valuation)。分类是将从清单分析中得来的数据归到不同的环境影响类型。影响类型通常包括资源耗竭、生态影响和人类健康三大类。特征化即按照影响类型建立清单数据模型。特征化是分析与定量中的一步。量化即加权，是确定不同环境影响类型的相对贡献大小或权重，以期得到总的环境影响水平的过程。

根据 SETAC 和 ISO 关于 LCA 的影响评价阶段的概念框架，中国科学院生态环境研究中心建立了一个影响评价模型框架。该框架的基本思想是，通过评估每一具体环境交换对已确定的环境影响类型的贡献强度来解释清单数据。模型包括以下步骤：计算环境交换的潜在影响值，数据标准化，环境影响加权，计算环境影响负荷和资源耗竭系数^[27,28]。

2.3.4 生命周期解释

生命周期解释的目的是根据 LCA 前几个阶段的研究或清单分析的发现，以透明的方式来分析结果、形成结论、解释局限性、提出建议并报告生命周期解释的结果，尽可能提供对生命周期评价研究结果的易于理解的、完整的和一致的说明。根据 ISO14043 的要求，生命周期解释主要包括三个要素，即识别、评估和报告。识别主要是基于清单分析和影响评价阶段的结果识别重大问题；评估是对整个生命周期评价过程中的完整性、敏感性和一致性进行检查；报告主要是得出结论，提出建议^[26-29]。目前清单分析的理论和方法相对比较成熟，影响评价的理论和方法正处于研究探索阶段，而改善评价的理论和方法目前研究较少。

2.4 生命周期评价的应用范围

生命周期评价不仅对产品及其“从摇篮到坟墓”的全过程所涉及的资源消耗和环境影响问题进行评价,而且可以对当前产品的环境影响进行量化分析。它既可以用于企业产品的开发与设计,又可以有效地支持政府环境管理部门的环境政策制定,同时可提供明确的产品环境标志从而知道消费者的环境产品消费行为。

2.4.1 在环境管理方面的应用

近年来,一些国家和国际组织相继在环境立法上开始反映产品和产品系统相关联的环境影响。比较有影响的环境管理标准有英国的 BS7750, 欧盟生态管理和审计计划(EMAS), 国际标准化组织(ISO)制定的 ISO14000 环境管理体系。规范了企业和社会团体等所有组织的活动、产品和服务的环境行为。还有很多发达国家和地区已借助于生命周期评价制定了“面向产品的环境政策”。特别是“欧盟产品环境标志计划”, 已对一些产品颁布了环境标志, 如洗碗机, 卫生间用纸巾, 油漆, 洗衣粉以及电灯泡等, 而且正在准备对更多的产品授予环境标志^[26]。

2.4.2 在工业生产方面的应用

生命周期评价在工业中的应用正日益广泛。生命周期评价在工艺选择、设计和最优化过程中的应用更是引起工业领域的极大兴趣。国际上一些著名的跨国企业正积极开展各种产品, 尤其是高新技术产品的生命周期研究。美国的一些企业开展了磁盘驱动器、汽车和电子数字设备部件的生命周期评价研究; 欧盟的一些企业则广泛开展了电器设备和清洗器等产品的生命周期评价研究。

2.4.3 在建筑节能方面的应用

工业部门由于大量的资源消耗和环境排放而遭到人们的抱怨, 但是市场需求是形成工业生产的根本原因。建筑是工业产品需求的大户: 建筑能源消耗占总能源的比例极大, 具体的数字由于不同国家或地区的气候、社会文化和经济水平不同而有所差别, 美国接近三分之一的能源消耗在建筑上, 欧州国家在 28%—45%, 我国为 11%; 温室气体和其它有害气体的排放与能源生产和利用过程密切相关, 这些排放建筑也基本承担和能耗相同的比例; 此外, 建筑还消耗了地球 40% 左右的非金属矿资源; 16% 的淡水; 25% 的原木。所以建筑对工业产品需求所产生的环境影响必须认真研究^[23-25]。

传统的建筑产品或材料的选择是按照其强度、重量、成本、工业性能和美观等方面衡量, 由于人们环境意识的觉醒, 因此在选择时加入了产品性能指标。发达国家已经完成了从对环境被动关心到主动的行動的转变, 这种转变是建筑产品或材料的环境认真和环境标志, 从而使环境性能差的产品或材料不能进入试产。由

于建筑产品的环境影响不仅表现在生产阶段，而且建筑施工、使用、维护到循环利用和最终处置都会对环境产生影响，所以 LCA 在建筑产品的环境影响评价中也得到了广泛的应用。

欧洲和日本在建筑节能领域中的 LCA 案例比较多，主要针对可再生建材和可再生能源在建筑上的应用及不同的建筑物件（如窗户）对能耗和环境影响进行评价，我国建筑行业的所有专家都呼吁应建立能同时反映能源和环境的新评价方法，但由于缺少基础数据和实际案例分析，目前对待大部分案例用的是概念性的 LCA 和简化的 LCA。

建筑物的能耗和环境影响取决于很多方面，如开发商、业主、设计师、物业管理、用户和城市能源供应等，由于他们在建筑物的整个生命周期中所处的位置不同，各自利益不同，使用的能源的种类、成本不同。必须使其所做的决策对建筑的能源与环境造成的影响不同，我国 80 年代曾对建筑物能量系统全年动态负荷进行了成功的研究；90 年代着重进行了建筑节能法规和围护结构热工性能改善以及供热系统分户计费的研究，能耗分析中所采用的方法都是基于热力学第一、二定律基础上的能量的量或质的评价方法^[29-30]。但由于这些研究都是针对建筑物及其能量系统整体环节的某一部分，所以从可持续发展的观点分析都不完善，只有利用生命周期评价方法，可以于是整个建筑物及其能量系统的各个环节的决策对全社会的能耗和环境的影响，以利于建筑的可持续发展。

2.5 生命周期评价在本文中的应用

评价建筑材料与生态环境的属性要涉及整个生命周期，必须对其在生命周期各阶段的环境负荷影响因素进行评估。被称为“从摇篮到坟墓”的生命周期评价方法(LCA)已成为世界通行的材料环境评价方法，作为一种管理工具已经被列入 ISO14000 的第 4 系统标准中。国际标准化组织认为生命周期评价方法是汇总和评估一个产品(或服务)体系在其整个寿命周期的所有投入及产品对环境造成的和潜在的影响方法。具体地说，LCA 是评价某一过程、产品或事件从原料投入、加工制备、使用到废弃的整个生态循环过程中环境负荷的定量方法。

建筑物和建筑材料全生命周期评价在国外建筑和建材领域已是一个非常热门的研究课题。实际上对建筑是否“绿色”的评估就是对建筑物的全生命周期过程进行评价。建筑材料的生命周期评价主要通过确定和量化相关的资源、能源消耗、废弃物排放来评价某种建筑材料的环境负荷，评价过程包括该建筑材料的寿命周期全过程即原料采集、产品生产、运输、使用、循环再生等整个生命循环。

考虑到还没有人用生命周期评价方法分别对围护结构和围护结构设备系统分别进行评价，并分析其各个阶段的能耗和 CO₂ 排放量。因此，本研究针对围护结构和暖通空调设备系统进行生命周期评价，将建筑节能改造分为围护结构设备系

统的改造和围护结构的改造，因此围护结构能耗主要是建筑的物化能，包括建筑材料生产过程、运输过程的能耗、以及建筑施工、对建筑维修的能耗；围护结构设备系统能耗包括各种用能设备的运行能耗和建筑设备的制造能耗、建筑机械的制造能耗，以及建筑消耗能源的生产、加工、运输或输送的能耗。根据有关研究发现^[31]，建筑设备系统的二氧化碳的排放量虽然在建设阶段只占整体建设二氧化碳排放量的 1/5 左右，但在建筑使用阶段其相关的能源消耗、维护管理等运作所造成的二氧化碳排放量，高达建设阶段整体建筑二氧化碳排放量的四倍左右。若以建筑生命周期二氧化碳排放量的观点来看，建筑设备系统二氧化碳排放量约占整体生命周期二氧化碳排放量的 80% 左右，国内对建筑物生命周期二氧化碳排放量相关研究中，关于建筑设备的研究尚属起步阶段，建筑设备中机器与管材等生产及其使用量，与至设备安装、使用、维护修缮、更新阶段之能源消耗等相关基础数据建立，国内也无相关研究。本研究通过分析建筑节能改造过程中建筑物的围护结构和围护结构设备系统的生命周期每个阶段的主要耗能原因，具体量化的分析耗能的大小和所占的比重。通过这样的分析，就可以清楚的看到建筑在那个阶段的耗能最多，那个阶段的节能潜力最大。为了更清楚的表达建筑节能改造对围护结构和围护结构设备系统的影响，本研究将建筑物生命周期的总能耗分为围护结构生命周期能耗和暖通空调设备系统生命周期能耗。在后面的两个章节将分别对其进行研究分析。

2.6 本章小结

本章节主要介绍了生命周期评价的定义、发展、生命周期评价的主要步骤和生命周期评价在各个领域的应用情况。通过生命周期分析的三个主要步骤，即目标范围确定、清单分析、环境影响评价建立本文研究的方法，即利用生命周期的思想，分别对建筑围护结构和围护结构设备系统进行全生命周期的评价，分析其各个阶段的能耗和对环境的影响。

第3章 建筑围护结构的生命周期评价

所谓建筑的生命周期评估,就是从建材生产、制造过程、日常使用、维护修缮、更新到建筑物拆解、废弃物处理等生命周期各阶段进行详细的环境评估,亦即从建筑物的出生到死亡,进行全面性、系统性的环境负荷评估。由于这样的评估观念具有宏观的眼光,完整考察到每一个环节,整合性地评估建筑物的环境影响,提供建筑与环境之间更为完整的信息。事实上,以CO₂排放量作为环境负荷的评估指标并不只有减缓温室效应的功效,它同时也代表节约能源、废弃物减量与保护地球环境的多重意义^[32,33]。因此为了进行建材环境负荷评估,本研究采用生命周期评估法(包括原材料生产、运输、加工、使用、回收再利用或废弃)来考察建材CO₂的排放量。希望通过严格周全的生命周期环境负荷评估的方式,了解我国实际建筑材料环境负荷,通过完善建材环境负荷资料库的量化数据,我们得以在设计建造之初即可计算其环境负荷量,创造出低环境负荷的绿色建筑。

生命周期评估改善以往对产品环境冲击评估的观念,采用系统性的整合评估产品生命周期各阶段的环境冲击影响程度,以提供评估产品与环境之间更完整的互动与评估参考。事实上,建筑物的一砖一瓦都是高耗能的工业产品,使用寿命远比其它工业产品的寿命长,因此相对的环境负荷影响也较其它产业更为深远。而建筑产业相关联的产品可说十分的复杂,建筑物本身也可视为一种市场产品,若能采用生命周期的评估手法,考虑各个环节的耗能结构与环境负荷,无疑的将是兼具绿色建筑概念的评估模式。因此结合生命周期评估观念的绿色建筑评估系统之需求便因应而生。

3.1 研究对象、目标与范围确定

生命周期分析方法第一步就是确定分析对象的目标与范围,本研究的分析对象为建筑物的围护结构的生命周期能耗。评价目标为建筑节能改造前后建筑生命周期能耗和温室气体CO₂排放情况。本研究的目的是对建筑的围护结构生命周期能耗进行评估,得到单位面积典型建筑在其生命周期的能量总消耗量以及各阶段的能耗分布情况,为了便于研究,主要假设如下:

(1)研究范围为建筑围护结构五个生命周期阶段——建材准备、建造施工、使用、拆除以及废旧建材的处置的能源消费量;

(2)根据考察对象和考察标准的不同,也为了有利于研究,输入的能量形式采用整个建筑的生命周期能耗,可以用建筑的总能耗(MJ)、单位建筑面积能耗(MJ/m²)、或者单位建筑面积年能耗(MJ/m²·Y)表示;输出的物质质量形式为建筑生命

周期内单位面积所排放的物质质量 (kg/m^2) 来估算;

(3)典型单体建筑,要求研究中各项参数应取全国平均水平或者尽可能接近平均水平。

(4)环境影响方面主要考虑由于能耗而产生的 CO_2 排放量,对于其它有害气体与排放液体、固体颗粒,本研究暂不做考虑;

(5)研究中只计算建筑物生命周期的能源消耗量,对资源消耗不做详细计算和调查,如土地资源、水资源、矿产等;

(6)建筑物所需要的建筑材料种类繁多,数量不一,很难有详细而精确的计算,研究所限,选取主要建材进行能耗计算。

3.2 清单分析

清单分析的任务是收集数据,并通过计算给出该产品系统各种输入输出,作为影响评价的依据。输入的资源包括物料和能源,输出除了产品外,还有向大气、水体和土壤的排放。在计算能源时要考虑使用的各种形式的燃料和电力、能源的转化和分配效率以及与该能源相关的输入输出。清单分析共有三种类型:基于过程的清单分析、基于经济投入产出的清单分析和复合清单分析,其中基于过程的清单分析因为其直观明了的特点而应用最为广泛。

建筑物由于其本身就是一种特殊的复杂的工业产品,对其的分析也只能是选取合适的假设条件分析最主要的东西,由于建筑物生命周期每个阶段的能耗都是由许多建筑材料和机械设备组成的,因此相关专家学者的研究数据结果,在适当的条件和转换下,都可以被本研究所用。按照国外学者提出生命周期的总能耗包括建材的制造、建材运输、建筑物的施工、建筑的使用与管理、拆除及最终处理几个阶段^[32,34,35]。本研究中将建筑物围护结构的生命周期能耗分为围护结构的建材的制造、运输,建筑主体围护结构的施工,围护结构的使用管理(主要是围护结构用于修缮的能耗)、围护结构的拆除及废弃建材的最终处理五个阶段。

在本论文中,大部分数据通过文献检索获得,少部分数据通过调研获得,数据来源主要包括三方面:企事业单位、生产厂商;正式出版的文献、环境数据手册、国家规定的相关标准或相关研究论文、部分已完成的生命周期评价或公开的数据库;行业协会、网络调查、专家咨询。有些数据由于保密性或其他原因只能通过企事业单位和生产厂商获得;由于许多论文专著和研究报告等文献都是可靠数据的来源,大都使用一些数据和方法来证明自己的观点,这些数据和观点也是生命周期分析的重要数据来源;对于前两种途径都不能获得的数据,可以根据网络调查或者寻找相关专家进行咨询,进行初步的估算。

根据欧洲和台湾的相关文献[10, 11, 34, 36]可知,本研究中围护结构生命周期总能耗为:

$$E_{en} = E_{manu} + E_{cons} + E_{reme} + E_{demo} + E_{disp} \quad (3.1)$$

其中： E_{en} ——围护结构生命周期总能耗，MJ；
 E_{manu} ——围护结构所用建筑材料准备阶段总能耗，MJ；
 E_{cons} ——围护结构施工阶段总能耗，MJ；
 E_{reme} ——围护结构使用阶段用于维护和修缮活动的总能耗，MJ；
 E_{demo} ——围护结构拆除阶段总能耗，MJ；
 E_{disp} ——废弃建材回收阶段总能耗，MJ；

图 3.1 表示出了建筑围护结构的生命周期循环图，从图中可以清楚的看出建筑围护结构的生命周期分为五个主要阶段，其中建材的生产阶段是生命周期循环的起点，废弃建材回收阶段是一个循环的终点，但是一部分可回收的建材仍然可以进入下一个循环过程进行新一轮的循环。图中的能量输入不仅包括建材等资源的输入，也包括提供的必须的能量的输入。能量输出主要是指释放到环境中的能量，还有一些温室气体等。根据这个循环图和每个阶段的生命周期能耗的计算方法，我们就可以对围护结构的生命周期不同的阶段进行详细的清单分析。



图 3.1 围护结构生命周期循环分析图

3.2.1 建材生产阶段

建材生产阶段是建筑施工建造以及建筑在使用过程中的修缮、维护所需建筑材料，包括钢材、木材、砂石、水泥、玻璃、石灰、砖瓦、油漆、塑料、门窗等所有原材料和成品材料的获取、加工和生产的整个过程。这个阶段在建筑物生命周期中的时间不长，往往以高强度的能量输入和物质迁移为主要特征。根据国内

外相关文献[9, 10, 36~40]可知, 建材生产阶段的能耗计算如下面的公式所示:

$$E_{manu} = E_{manu,cons} + E_{manu,renov} \quad (3.2)$$

$$E_{manu,cons} = \sum_{i=1}^n m_i \times (1 + w_i / 100) \times M_i \quad (3.3)$$

式中: $E_{manu,cons}$ ——围护结构建造时所使用建材生产的能源消耗(包括期间的运输能耗), MJ;

n ——围护结构所使用的建筑材料种类数;

m_i ——建材品种 i 的使用量, 通常用重量(t、kg)或体积(m^3)表示;

w_i ——建材在建造过程中因施工工艺损耗或施工管理不善等原因建材 i 被废弃的比例, 以百分比(%)表示;

M_i ——生产单位建材 i 的能源消耗, MJ, 研究所用具体参数见表 3-1;

由于有的建材的寿命周期长短不一, 在建筑生命周期评价中, 它们需要被重复计算, 估算方法如下:

$$E_{manu,renov} = Eq.(3.3) \times \left[\frac{Y_{bui}}{Y_{mat,i}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

式中: $E_{manu,renov}$ ——围护结构在使用过程中因维护和修缮所使用的建材生产的能源消耗, MJ;

$Y_{mat,i}$ ——建材 i 的使用寿命, 年, 部分建材的使用寿命见表 3.2;

Y_{bui} ——建筑物的使用寿命, 年, 一般为建筑物主体结构使用寿命;

Eq.(3.3)——公式 3.3 计算出的建筑能耗, MJ。

注: []内算式结果取整数。

这个阶段的主要工作是确定建材的种类以及用量, 然后就可以根据相应建材的单位生产能耗、使用寿命、废弃比率等条件计算建材生产阶段的能耗。因此对于建材的种类和用量的选取、对单位建材生产能耗的水平判断直接影响着生产阶段的计算结果。但是由于建筑物围护结构的建材设计成百上千种, 只能按照主要用量来选取有代表性的建材的种类, 至于建材的用量, 本研究主要采用咨询概预算相关专业人士对于建筑的概预算结果, 选取典型、主要的建材用量。表 3.1 主要是根据文献[9, 10, 16, 17]得到的建筑材料生产所需的单位能耗, 本研究只是列出了部分主要建材, 供此阶段的计算使用。表 3.2 主要根据文献[9, 12, 14, 41~44]列出了一些主要建材或者构建的使用寿命。

表 3.1 主要建筑材料生产所需单位能耗（建筑材料的内含能）

建材名称	单位建材内含能量（MJ/kg）	废弃比率（%）
PVC 钢管	22.16	5
冷轧钢	32.8	10
牛皮纸	37.7	5
橡胶	70.8	5
玻璃	17.56	5
底衬毛毡	41.2	5
塑料	112.2	10
铝	421.65	10
卫生陶瓷	43.25	10
压模铜	71.6	5
沥青	51	5
玻璃纤维	24.5	5
砖	3.66MJ/块	10
陶瓷	29.39	10
黄铜	239	5
木材	1592.3MJ/m ³	5
胶合板	8.3	7
砂	0.6	5
沥青屋面板	55.6	5
碎石	0.9	5
石膏	3.8	10
面砖	4.5	5
灰浆	1.9	5
墙纸	16.2	5
水基涂料	77.6	5
水	0.2	20
水泥	5.3	5
混凝土	1.6	5
电炉钢	16.39	10

表 3.2 主要建材、构件的使用寿命

建筑物结构和建材名称	使用寿命 Y_{most} , 年
排水管	30
门窗	25
涂料	10
通风管道	50
屋顶（别墅式）	25
电线、电缆	50
屋顶、墙面的瓷砖	30
热水器	16
输水管	50
建筑框架结构（外墙、内墙、地基、联接结构、保温层等）	50
壁纸	10

3.2.2 建造施工阶段

这个生命周期阶段包括建筑物建造的一系列工序，包括工地准备、基础工程、结构工程、安装工程、装修工程直至建筑物交付使用为止。通常来说，此阶段历时也较短，伴随着高强度的物质输入。根据欧洲和台湾相关文献[9~11, 36~40]可知，这个阶段的能耗计算公式如下：

$$E_{\text{cons}} = E_{\text{cons,pro}} + E_{\text{cons,trans}} \quad (3.5)$$

$$E_{\text{cons,pro}} = \sum_{j=1}^n p_j \times P_j \quad (3.6)$$

$$E_{\text{cons,trans}} = \sum_{i=1}^n m_i \times (1 + w_i / 100) \times D_i \times T_c \quad (3.7)$$

式中： $E_{\text{cons,pro}}$ ——围护结构建造施工工艺的能源消耗，MJ；

$E_{\text{cons,trans}}$ ——围护结构建造施工阶段的建筑材料运输所消耗的能源量，MJ；

n ——施工方法的种类；

p_j ——每种施工方法 j 的施工总量，单位可以用面积(m^2)、重量(t)或者体积(m^3)；

P_j ——施工方法 j 的单位能耗，单位 MJ。不同施工方法的单位能耗参数取值见表 3-3。

D_i ——材料 i 从供应商运输至建筑工地的平均距离，km，部分参数见表 3-4；

T_c ——不同运输方式载运单位建材的能源消耗，MJ/t·km，具体参数见表 3-5。

表 3.3 不同施工方法的单位能耗

施工项目	单位能耗 (KJ/m ²)
基础开挖	27260
材料堆放	5200
卫生供暖	4540
场地布置	52240
场地清扫	10000
现场材料运输	198740
场地整平	17030
临时供电	22650
起重机运行	39750
人员运输	459930

根据欧洲和台湾相关文献[10, 11, 36~38, 44~46]可知, 不同施工方法的单位能耗统计如表 3.3 所示, 对于一些常用建筑材料的全国平均运输距离见表 3.4, 由于搜集的数据清单有限, 材料的运输基本都是选取就近原则, 在本研究中认为运输半径是相同, 所以台湾地区的材料运输距离也可以作为本研究使用。不同的运输方式因为其消耗不同的燃料, 所以单位运输能耗也有所不同, 具体运输方式的单位能耗见表 3.5。

表 3.4 主要建材的平均运输距离^[34]

建材种类及名称	平均运输距离 (km)
砂石	28.99
水泥	65.57
预制混凝土	65.38
钢材	122.72
砖及其他墙体材料	57.75
陶瓷建材	106.38
玻璃	98.84
铝制门窗	128.08
木材	59.01
胶合板	86.16
涂料	103.81
其他非金属家具	51.37
其他各种水泥制品	65.38
其他非金属矿物建材	57.75

表 3.5 不同运输方式的单位能耗

运输方式	单位运输能耗 (MJ/10 ² t.km)
铁路运输	304.7
公路运输 (汽油车)	303.8
公路运输 (柴油车)	205.5
内陆水运	46.8
海运	21.6

3.2.3 围护结构使用阶段

传统的生命周期分析都是将建筑物使用阶段所有能耗,包括空调能耗、采暖能耗、热水能耗、照明能耗、电器设备能耗、烹饪能耗、维护修缮能耗等,为了便于揭示围护结构与暖通空调设备系统在建筑物整个生命周期中的能耗比例与变化,本研究中围护结构使用阶段的能耗仅指建筑物本体,即围护结构的维护修缮能耗,至于空调、采暖、热水、照明等能耗属于设备系统的使用能耗,由于本文只考虑设备系统中的暖通空调设备能耗,所以热水、照明系统等能耗暂不在考虑范围之内。

由于围护结构在使用过程中因维护和修缮所使用的建材生产的能源消耗已经在公式(3.4)中体现了,所以使用阶段的能耗就只需计算维护和修缮所涉及的总建材的运输能耗,具体计算方法^[25]可由下式表示:

$$E_{reme,trans} = \sum_{i=1}^n m_i \times (1 + w_i / 100) \times \left[\frac{Y_{bui}}{Y_{mat,i}} - 1 \right] \times (D_i + d_i) \times T_c \quad (3.8)$$

式中: d_i ——围护结构使用阶段的围护和修缮活动中更换下来的老化、废弃建材与最终处置场所之间的距离,单位 km;

i 、 n 、 m_i 、 w_i 所代表意义与公式(3.3)中相同; Y_{bui} 、 $Y_{mat,i}$ 代表意义与公式(3.4)相同; D_i 、 T_c 意义与公式(3.7)中相同。

3.2.4 围护结构拆除阶段

这个生命阶段可以被认为是建筑物建造阶段的逆过程,发生在建筑物无法继续实现其原有用途或是由于出让地皮、拆迁等原因不得被拆除之时。此阶段历时极短,能量输入强度较大。

不同结构的围护结构拆除过程很不同,木工结构的建筑主要是人力或机械拆除,钢筋混凝土的建筑主要是爆破、机械拆除等,钢结构的建筑主要是人工解体等。

$$E_{demo} = \sum_{k=1}^n P_k \times P_k \quad (3.9)$$

式中： m ——表示施工方法的种类；

p_k ——表示使用施工方法 k 的施工总量，单位可以是面积(m^2)、重量 T 或体积(m^3)；

P_k ——表示施工方法 k 的单位能源消耗，MJ/Unit，不同施工方法单位能耗参数见表 3.6。

表 3.6 建筑物拆除不同施工工艺的单位能耗^[34,36]

施工工艺	单位能耗 (P_j , MJ/Unit)
破碎、构件拆除工艺	29.5MJ/m ²
开挖、移除土方	115.2MJ/m ³
平整土方	7.2MJ/m ²
起重机搬运	10.8MJ/t

3.2.5 围护结构废旧建材处置阶段

这个阶段包括建筑物拆除后废弃建筑材料的运输、分拣、处理、再利用和无用废弃建材在最终处置场所处置的过程。其中有利用价值的建筑材料在经过处理之后能够被用作原材料或是建筑材料，重新参与另一建筑生命周期的循环。而其余部分的废弃建材如废弃混凝土、砖瓦等属惰性物质，在自然界的完全降解需要数千年甚至上万年的时间，因此，此阶段在建筑物生命周期中历时最长，但是能量和物质的输入输出强度都很小。

围护结构在退役后产生的大量建筑垃圾数量巨大，随之产生的运输和处置的能源消耗不容忽视，而且废旧建材回收利用的潜力和其中蕴含的能源效益也是相当可观的。欧洲发达国家，如荷兰，由于政策要求和相关市场的利益引导，建筑垃圾的回收利用率高达 90% 以上^[23]，主要利用方式为再利用、再回收、焚烧填埋等。废旧建材一部分用于回收再利用，如玻璃、木材、铝材、钢材等建筑材料，多由建筑公司、爆破公司以及专门废旧物资部门在现场进行回收利用、或是运输至加工场所再次加工处理后再利用；混凝土块、废瓦砾等在有些情况下以路基填料和低洼地回填料等形式得以利用；剩下的大部分属于不可回收部分，如拆除的砖块、石块、建筑垃圾等，这部分则进入专门设立的建筑垃圾渣土消纳场进行填埋处置，有些则被直接运往郊区露天堆放。由于评估废旧建材回收利用能源效益是一项非常复杂的研究，即使在发达国家也只是建立了一些概念性的评估模型。因为每种建材有其自身的化学物理性质和生命周期，与其他原材料一起组成建筑构建后又具有建筑构建自身的使用寿命，但是构成一栋建筑的原材料和产品数量确分别高达几十和上千余种。

为了简化模型，本研究假设：回收利用、废物处理等活动在所有废旧建材被运往建筑垃圾处置场所后展开；我国目前的垃圾处置方式-露天堆放、填埋工艺除

运输外不涉及其他能源的消耗；本研究目前只计算此阶段废弃建筑材料最终处置时候的运输能耗，基于上述假设，废旧建材处置阶段的能源消耗^[34,35]可用下式表示：

$$E_{disp} = E_{trans, reu} + E_{trans, was} \quad (3.10)$$

$$E_{trans, reu} = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i \times D_i \times T_c \quad (3.11)$$

$$E_{trans, was} = \sum_{i=1}^n W_i \times (1 - R_i) \times d_i \times T_c \quad (3.12)$$

式中： $E_{trans, reu}$ ——表示参加回收的废旧建材再循环的运输耗能，MJ；

$E_{trans, was}$ ——表示废旧建材送往最终处置场所的运输耗能，MJ；

W_i ——废旧建材 i 的重量，kg；

R_i ——废旧建材的回收利用率，部分建材回收率见表 3.7；

D_i ——表示废旧建材送往加工场所的平均距离，Km。

表 3.7 主要废旧建筑材料的回收利用率^[13,16]

建材种类	钢材	混凝土	碎石	废铁金属	玻璃	木材	塑料	钢	铝
回收率%	0.95	0.6	0.6	0.9	0.8	0.1	0.25	0.9	0.95

3.3 环境影响评价

在建筑生命周期的各个阶段中，能量消耗中燃料燃烧引起的环境污染是最为严重的，它涉及到温室效应、大气污染、水污染等等，其中导致温室效应的主要气体为 CO_2 。由于消耗的化石燃料的主要成分是碳化合物，燃烧后会产生 CO_2 ，因此，如果知道能源的使用量和其含碳量就可以简单的推算 CO_2 排放量。本文评价构成完整建筑的围护结构和围护结构设备系统的能耗对环境的影响的主要因素是考虑温室效应，即 CO_2 排放量。用 CO_2 作为环境影响评估不仅因为它对温室效应的贡献，而且还可以反映对能源的消耗，对资源的消耗情况，是各种环境影响因子中最具有代表性的指标。我国大部分能量是以燃烧矿物燃料和固体燃料或其他的，建筑物生命周期所消耗的能源基本上以煤、天然气和燃料油、电为主，其平均热值和 CO_2 排放量如表 3.8 所示。

由于每个阶段的 CO_2 排放主要是能量获取的时候，燃烧煤、燃料油、天然气、耗电所产生的，所以本研究将建筑物生命周期总 CO_2 排放量可以用各个阶段的能源消耗量来简单估算^[31,47,48]。

$$P = \sum_{j=1}^m P_j \quad (3.13)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \times L_{CO_2,i} \times 1000}{q_i \times 4.2} / S \quad (3.14)$$

- 式中： P——建筑物单位建筑面积生命周期 CO₂ 总排放量，单位 kg/m²；
 P_j——建筑物在第 j 个生命周期阶段单位建筑面积的 CO₂ 排放量，kg/m²；
 E_i——在 j 阶段，所用的 i 类能源的用量，MJ；
 L_{CO₂,i}——i 类能源的 CO₂ 排放量，kg/Unit，Unit 代表对应能源种类的单位，
 如 Kg、L、m³、度等；
 q_i——单位能源的热值，Kcal/Unit；
 S——总建筑面积，m²；
 i——第 i 种能源，在本文中采用的能源 1 ≤ n ≤ 4；
 j——生命周期第 j 个阶段，在本文中 1 ≤ m ≤ 5。

表 3.8 各能源产生的 CO₂ 排放量^[16,31]

能源类别 i	能源热值 q _i (Kcal/Unit)	CO ₂ 排放量 L _{CO₂,i} (Kg/Unit)
煤	7000 (Kcal/Kg)	3.16
燃料油	9200(Kcal/L)	3.31
天然气	8900(Kcal/m ³)	2.04
电	864 (Kcal/度)	0.658

注：1Kcal=4.2KJ

3.4 本章小结

本章节重点介绍了围护结构部分的生命周期评价模型，分析了围护结构材料的生产阶段、围护结构施工阶段、围护结构使用阶段、围护结构拆除阶段、以及围护结构废弃建材的回收处置五个阶段的能耗方程，最后分析了不同阶段使用不同能源的二氧化碳排放量计算方法。

第4章 暖通空调系统的生命周期评价

同围护结构的生命周期评价一样，暖通空调系统的生命周期评价也包括目标和范围的界定、暖通空调系统清单分析、环境影响评价几个主要步骤。对于暖通空调系统的生命周期分析，也应该将其作为一种特殊产品，分析其原材料获取、生产、加工、使用、拆除回收等过程所消耗的能耗和资源以及对环境的影响。住宅设备系统生命周期的总能耗指建筑物在使用过程中需要的一切设备如采暖、空调、照明、生活热水、烹饪、家电等设备从建造、安装施工、使用、拆除回收几个阶段的生命周期的总能耗。但是对于暖通空调设备系统来说，生命周期的总能耗只考虑空调、采暖等设备从建设到使用，直至最后报废处理几个阶段的能耗。

4.1 目标与范围界定

根据生命周期评价方法对目标和范围的界定，本章节的分析对象为建筑物暖通空调系统的生命周期能耗。评价目标为建筑节能改造前后暖通空调系统的生命周期能耗和温室气体 CO_2 排放情况。本研究的目的是对建筑的暖通空调系统生命周期能耗进行评估，得到单位面积典型建筑因为节能改造而引起的暖通空调系统生命周期的能量总消耗量的变化以及各阶段的能耗分布情况，暖通空调系统的评价对象为空调采暖设备，因为只有空调采暖设备与围护结构保温性能关系最大，围护结构的改造对于其他的家电、管道、烹饪、照明等影响不大。为了便于研究，主要假设如下：

(1)研究范围为暖通空调设备系统三个生命周期阶段——设备生产阶段、使用阶段、拆除及废旧材料的处置阶段；

(2)根据考察对象和考察标准的不同，也为了有利于研究，输入的能量形式采用整个建筑的生命周期能耗可以用建筑的总能耗(MJ)、单位建筑面积能耗(MJ/m^2)、或者单位建筑面积年能耗($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{Y}$)；输出的物质质量形式为建筑生命周期内单位面积所排放的物质质量(Kg/m^2)来估算；

(3)暖通空调系统的部件设备所需要的材料种类繁多，数量不一，很难有详细而精确的计算，研究所限，选取主要材料进行能耗计算；

(4)研究中只计算建筑物生命周期的能源消耗量，对资源消耗不做详细计算和调查，如土地资源、水资源、矿产等；

(5)环境影响方面主要考虑由于能耗而产生的 CO_2 排放量，对于其它有害气体与排放液体、固体颗粒，本研究暂不做考虑。

其他假设与围护结构清单分析假设相同。

4.2 清单分析

传统意义上的建筑能耗指的就是民用建筑(包括居住建筑和公共建筑以及服务业)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。而从建筑的整个生命周期来看,传统意义上的建筑能耗是建筑在使用阶段的能耗,也就是因为使用设备的能耗,在本研究中就是指暖通空调设备系统在使用阶段的能耗,这部分只是建筑生命周期能耗的一部分,但是,由于这个阶段是建筑物这个生命历程中最为漫长的一个阶段,是建筑物作为产品满足其消费者用途的阶段,此阶段往往持续数十年甚至百年,物质和能量的输入输出强度虽然不大,但是由于时间漫长,其能源消耗通常都占建筑整个生命周期能耗的绝大部分,在某些地区甚至高达80~90%以上,因此,这部分的能耗不容忽视。类似对围护结构的生命周期分析,暖通空调设备系统也可以从构成设备的原材料的选取、加工制作、使用、拆除回收四个阶段来描述。住宅设备分为电气设备、空调设备、采暖设备、家用电器设备、给排水设备、厨房设备、电梯设备、消防设备等等,但是由于围护结构的节能改造主要是改善室内热特性,而住宅设备中只有暖通空调系统与室内的热特性有关,所以本研究中只考虑住宅设备中的采暖空调设备,其他设备系统暂不考虑。暖通空调设备生命周期能耗是指设备从建设阶段、使用阶段乃至拆除阶段全部过程中,各阶段耗用能源的总和。关于暖通空调系统边界的流程图,如图4.1所示。从图4.1中可以看出,暖通空调设备系统的生命周期也是从构成暖通空调设备的各个部件的建材的原材料的获取,如塑料生产、制冷剂生产、炼钢等生产阶段到各种金属材料的生产,再到构成暖通空调设备系统各个零部件的生产、组装,直至整个设备的组装、调试、安装,这样就实现了暖通空调设备系统的制造建设阶段;在整个设备系统安装完成后,就可以投入运行,这个时候消耗的能耗主要是设备系统的运行能耗,设备系统的维修能耗相对运行能耗来说非常小,几乎可以忽略,不过如果能考虑到因为及时的维修设备造成的设备使用寿命的延长,这样的考虑就更完善了;当设备运行到一定的年限,由于自然的磨损、老化,设备已经无法靠维修来实现它应具有的功能、或者维修已经不划算的时候,这时候设备系统就算完成它的使命,进入拆除回收阶段,拆除下来的废旧的铜、铁、铝,或则其他可回收的建材还可以接着进入下一个设备生命周期的循环,不可回收的建材就直接送往垃圾处理站处理。

类似围护结构生命周期各个阶段的能耗表达,本研究关于暖通空调设备系统生命周期能耗可由下式表达:

$$E_{equip} = E_{eq,cons} + E_{eq,use} + E_{eq,demo} \quad (4.1)$$

其中: E_{equip} ——暖通空调设备系统生命周期总能耗, MJ;

$E_{eq,cons}$ ——暖通空调设备系统建设阶段能耗, 包括所需材料准备阶段能耗

和零部件生产、加工、组装阶段总能耗，还有运输能耗，MJ；

$E_{eq,use}$ ——暖通空调设备系统运行阶段总能耗，MJ；

$E_{eq,demo}$ ——暖通空调设备系统拆除、废弃建材回收阶段总能耗，MJ。

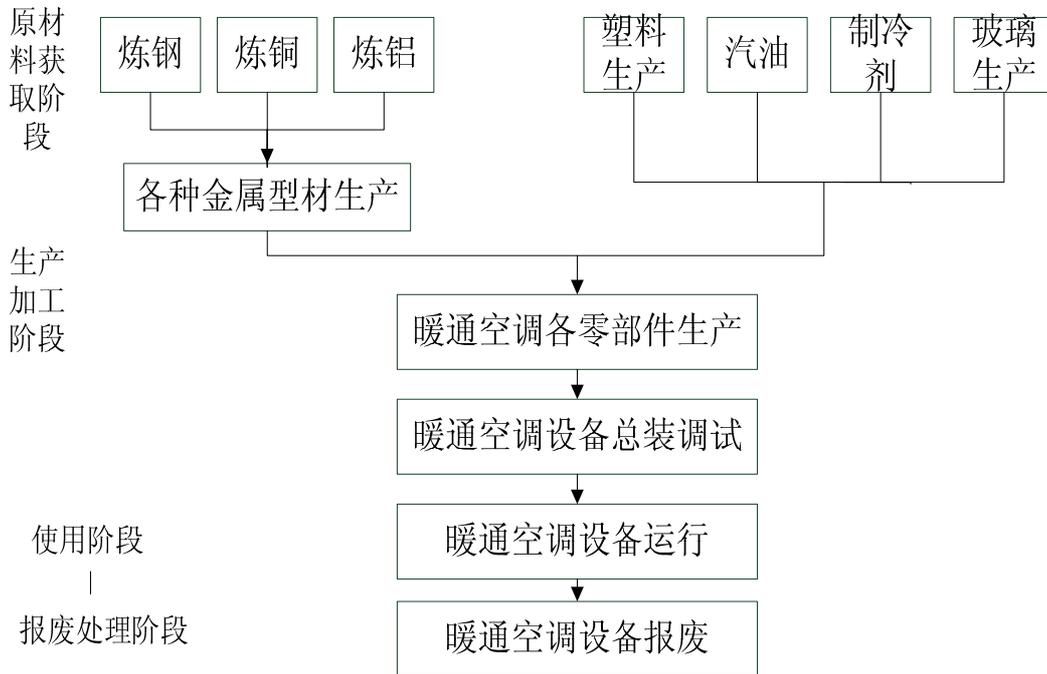


图 4.1 暖通空调设备系统边界流程图

4.2.1 暖通空调设备建设阶段

暖通空调设备系统主要是空调系统、采暖系统，这两个系统又由很多子系统构成，比如燃气热泵系统由燃气发动机、涡旋压缩机、冷凝器、蒸发器、发电机、室内换热器及其他附属设备和原料(如连接管路、包装外壳、制冷剂、润滑油等)。水源中央空调系统由水源系统和主机组成，水源系统包括抽水井、回灌井、水泵及管路系统；主机系统包括各零部件，如压缩机、蒸发器、冷凝器、内部管路、仪表阀件和箱体支架等。这些系统的每个部件又分为2个阶段考察：原材料获得阶段和生产加工阶段，设备建设阶段能耗主要包括：设备原材料生产能耗和建筑设备制造、安装能耗。原材料获取阶段是产品整个生命周期的源头，主要包括生产零部件及燃油、制冷剂和二次能源的原材料，如铁矿石、铜矿石和铝土矿等主要矿产品以及煤炭和石油等能源的开采；生产加工阶段包括与空调系统生产加工相关的所有原材料和零部件的生产加工过程，包括原材料的生产加工过程(钢铁冶炼、铜材冶炼、铝的冶炼)，辅助原料的生产加工过程(煤炭炼焦、火力发电、炼油、制冷剂生产、聚乙烯塑料的合成)，零部件的生产加工过程(原材料加工生产零部件、总装调试、管道敷设、打井安装等)^[49-51]；

所以暖通空调设备系统生产阶段的能耗按照原材料种类进行分解统计(如铁、铜、铝、塑料等)，再根据系统边界所确定的过程，最后以清单的形式收集整理数

据，这些数据的来源包括：行业协会的数据、科技文献的数据、企业的实际生产运行数据、国家统计资料、已有的研究报告等数据。

$$E_{eq,cons} = E_{eq,manu} + E_{eq,erect} \quad (4.2)$$

式中： $E_{eq,manu}$ ——构成暖通空调设备系统的建材建造时所使用建材生产的能源消耗，包括期间的运输能耗，计算方法与公式(3.2)相同，MJ；

$E_{eq,erect}$ ——暖通空调设备系统加工零件的生产能源消耗，MJ。

4.2.2 暖通空调设备使用阶段

暖通空调设备使用阶段能耗主要包括：暖通空调设备日常使用运行能耗、暖通空调设备维护耗材及修缮能耗、更新设备材料生产能耗、更新设备现场施工能耗。其中建筑物日常使用阶段更新设备现场施工能耗，主要由电力及化石燃料所产生，但由于这部分能耗非常少，因此，本研究暂不考虑使用阶段更新设备现场施工所消耗的能量，由于暖通空调设备系统在使用中维护耗材及修缮能耗以及更新设备材料的生产能耗相对暖通空调日常使用中的运行能耗来说，比重很小，因此可以忽略不计，这一阶段只考虑设备日常运行中所消耗的能耗。

$$E_{eq,use} = E_{eq,oper} \times Y + E_{eq,reme} + E_{eq,reeq} \quad (4.3)$$

式中： $E_{eq,oper}$ ——暖通空调设备日常使用中的运行能耗，MJ/a；

$E_{eq,reme}$ ——暖通空调设备使用中维护耗材及修缮能耗，MJ；

$E_{eq,reeq}$ ——暖通空调设备使用中更新设备材料生产能耗，MJ；

Y ——暖通空调设备系统运行寿命，年。

暖通空调设备使用阶段的能耗是暖通空调设备系统也是建筑物能耗最长的一个阶段，其能耗比例也比较大，这个阶段的能耗主要是空调能耗、采暖能耗、热水能耗、烹饪能耗、照明能耗、电器设备能耗等。其中空调和采暖能耗最高，约为60~70%。而且对于设备的使用能耗，不同类型的建筑因为其使用功能的不同也有着很大的差异，对于居住建筑来说，其设备的使用能耗主要是受其他几个方面的影响^[52]：(1)受当地气候条件的影响，(2)受国家经济水平的影响，(3)受家庭收入的影响，(4)受家庭人口结构、居民传统文化的影响等等。这个阶段我们关心的主要问题是良好的室内舒适环境，也就是热舒适性，在达到热舒适性指标这个前提下，计算建筑能耗。在利用性能指标进行节能改造设计的过程中，能耗模拟是非常重要的。用静态设计方法会引起一些比较大的误差。因此为了比较准确的计算采暖、空调负荷、并与现行国标《采暖通风与空气调节设计规范》GBJ19保持一致，对现有住宅的节能改造设计，尤其需要采用动态计算方法分析建筑能耗及影响其大小的因素。即对整栋建筑一系列条件下进行逐时的动态模拟，从模拟结果中提取出每平方米建筑面积每年的采暖和空调的耗电量，由于逐时的动态模拟需要经过复杂的技术，因此需要专门的计算软件来实现。大多数的建筑能耗

模拟软件均是基于动态的计算方法，模拟在变化的室外参数作用下建筑空间的负荷状况。世界各国均根据自己的特点和要求编制了计算机建筑能耗模拟的程序，其中应用较多的是美国的 DOE-2、日本的 HASP、英国的 Energy2、瑞典的 DEROB、法国队 CLIM2000 及我国的 DeST 等^[53]。

本文选用 DeST 是建筑热环境设计模拟工具包(Designer's Simulation Toolkit)的简称。该程序采用状态空间法的建筑物模型计算房间的自然室温和建筑物的冷热负荷。该程序能够在建筑描述、室外气象数据、室内热扰及室内要求温湿度给定情况下，动态模拟出该建筑的全年逐时自然室温和采暖、空调系统负荷的变化情况。同时它也是清华大学建筑技术科学系建筑环境与设备研究所在十余年对建筑和空调系统模拟的基础上，针对建筑采暖空调设计的实际情况出发，开发出的一套面向设计人员的设计用模拟工具，目的是把模拟分析技术有效的引入设计中，为设计人员提供全面有力度帮助。采用 DeST 软件动态模拟，最后得出全年建筑能耗，也就是本文中的设备运行能耗 $E_{eq.oper}$ 。

住宅设备修缮是指因设备中各零部件的生命周期不相同。为了达到该设备整体最合理的使用年限，设备必需要在使用阶段定期的维护、修缮，以了解各零部件的劣化状况。除了防止故障，更进一步希望能在各零部件达到某种劣化程度即予以更换，避免拖垮设备其他部分零件，而缩短整体设备的使用年限。建筑本体的生命周期约50年，而建筑设备的生命周期较短，约10~15 年左右。因此设备在建筑构造的生命周期中需更换2~3次^[38]。若能定期进行设备器具的维护来延长设备使用年数，就可以减少更新所花费的金钱与时间。设备有定期维护与无定期维护的寿命不同，以电气设备为例，有维护的设备都较无维修者耐用年限多1.25~4倍。

由于设备在使用过程中更新设备材料的生产能耗 $E_{eq.reeq}$ 已经在公式 4.1 中体现了，所以维护的能耗就只需计算维护和修缮所涉及的所有建材的运输能耗，具体计算方法可由下式表示：

$$E_{eq.reme,trans} = \sum_{i=1}^n m_i \times (1 + w_i / 100) \times \left[\frac{Y_{equip}}{Y_{mat,i}} - 1 \right] \times (D_i + d_i) \times T_c \quad (4.4)$$

式中： $E_{eq.reme,trans}$ ——设备使用阶段维修中涉及到的所有建筑材料的运输能耗，MJ；

Y_{equip} ——设备的使用寿命，年；

$Y_{mat,i}$ ——设备材料 i 的使用寿命，年。

4.2.3 暖通空调设备拆除回收阶段

对于暖通空调设备系统来说回收阶段主要是回收各种设备、管线的可用材料。废旧设备中含有大量可回收的有色金属、黑色金属、塑料、玻璃、以及一些有使用价值的零部件，数量巨大的废旧部件、设备中蕴含着大量的资源。机械破碎和

分选是实现废旧设备资源化利用的重要手段，这些方法大多借鉴矿物加工工程，有些技术也应用于城市的固体废弃物的处理^[54]。废旧暖通空调设备的拆除回收流程见图4.2。

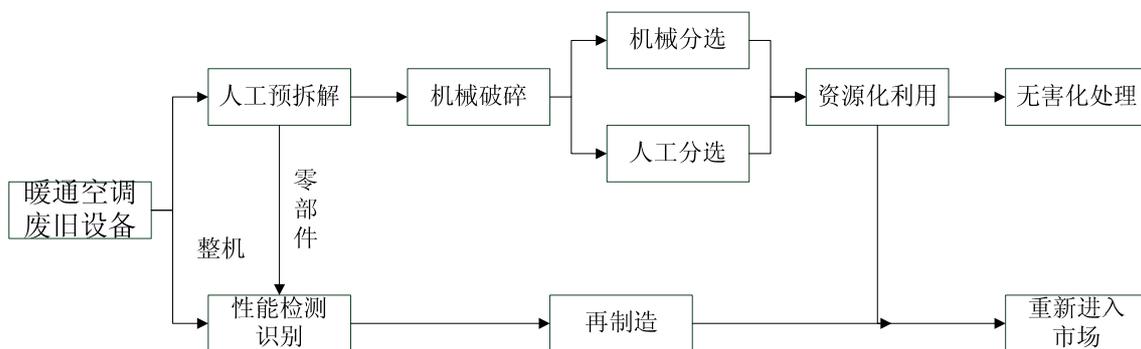


图4.2 废旧设备的拆除回收过程

暖通空调设备拆除阶段所需能耗主要包括：拆除作业机械与搬运车辆产生的能耗和设备资源回收分类作业产生的能耗。其中拆除作业能耗与整体生命周期能耗相比显得相当小，而且缺乏典型的实际案例和相关资料，所以拆除阶段的能耗只考虑搬运车辆产生的能耗与设备资源回收作业能耗。

基于上述假设，暖通空调设备废旧资源处置阶段的能源消耗可用下式表示：

$$E_{eq,disp} = E_{eq,disp,trans} - E_{eq,disp,gain} \quad (4.5)$$

其中：

$$E_{eq,disp,trans} = \sum_{i=1}^n m_i \times d_i \times T_c \quad (4.6)$$

$$E_{eq,disp,gain} = \sum_{i=1}^n m_i \times (1 + w_i / 100) \times \left[\frac{Y_{equip}}{Y_{mat,i}} - 1 \right] \times (R_i + M_i) \times 20\% \quad (4.7)$$

式中： $E_{eq,disp,trans}$ ——暖通空调设备系统废旧建材处置阶段运输所消耗的能量，MJ；

$E_{eq,disp,gain}$ ——扣除掉再利用、再循环、焚烧等过程所设计的运输及加工处理的能耗后，所有回用建筑的能源效益，MJ。

4.3 环境影响评价

暖通空调系统由于在使用过程中消耗了大量的能源，因此对环境的影响是非常巨大的，而且随着暖通空调设备使用的时间越久，对环境和资源的破坏越大，如果在某个阶段，我们无法确切知道到底消耗了多少煤，多少天然气，多少电力资源，那么我们就可以根据公式(3.13)~(3.14)进行表达式的简化：根据建筑物各个阶段的耗能量和煤的燃烧热值得到等效的耗煤量，再按照煤燃烧过程中排放的CO₂计算出整个生命周期的CO₂排放量。公式如下^[7]：

$$P = \sum_{j=1}^m P_j = \sum_{j=1}^m \frac{E_j \times 3.16 \times 1000}{7000 \times 4.2} / S \quad (4.8)$$

式中： E_j ——在生命周期的第 j 阶段，所消耗的能耗，MJ；

其他变量的表达式参考前面不变。

4.4 本章小结

本章节主要对暖通空调系统的生命周期能耗进行分析，类似与对围护结构生命周期的划分，暖通空调设备系统的生命周期分为暖通空调设备的制造阶段、暖通空调设备的使用阶段以及暖通空调设备系统的拆除回收三个阶段，通过每个阶段的公式描述，建立了确定不同阶段能耗的模型公式和二氧化碳排放量公式。

第 5 章 节能改造对围护结构和暖通空调系统的影响分析

5.1 目前节能改造的主要方式

建筑节能改造分为围护结构部分改造和暖通空调设备系统改造。对于围护结构来说，常用的改造方式^[48,49,55]有墙体改造，屋顶改造，窗户改造等。由于外墙是建筑的重要组成部分，对于既有建筑，改造主要是利用反射隔热和吸收隔热的不同原理，来降低外墙的表面温度，从而达到隔热节能的目的。常用的改造方式有在外墙面层处理时采用外观光滑的浅色涂料，如外墙抹灰面上使用的浅色金属漆；或者在外墙上进行外保温或内保温，利用保温材料的蓄热系数与导热系数小，热阻大的原理，减少向围护结构内部的散热；还有一些节能措施比如在外墙上增加绿化遮阳措施，由植被吸收太阳辐射、存储热和蒸发散热，从而减少外围护结构所吸收的热量。既有建筑屋顶的改造常用方式为倒置式屋面、将屋面改为增设保温层的架空通风屋顶、屋顶绿化节能、将平屋顶改造为坡面屋顶。对于窗户的改造主要有将单层窗改为双层窗、更换节能型窗户、窗户的遮阳等。

围护结构设备系统的节能，要根据建筑不同用途和建筑的不同暖通空调设备，进行因地制宜的改造。对于公共建筑的改造主要是对空调采暖系统的改造，包括一些热回收技术的应用、热电联产、变频空调等^[52,53]；对于住宅建筑，在北方的寒冷地区主要是对供暖系统的改造，对于夏热冬冷地区既有住宅的空调、采暖方式多为分户式，居民都是自行购买空调器和采暖器来改善室内热舒适性。夏热冬冷地区是全国最为发达的地区之一，家用空调采暖电器拥有量很大，虽然现有住宅安装的空调器很多都不能满足《标准》的要求，但是全部更换为节能空调的可能性不大，较好的方法是从媒体、政策、价格等方面宣传，鼓励居民在更换空调的时候选用能效比高的节能型冷暖空调^[55]，目前市场上效果较好的空调是采用变频技术的空调产品。

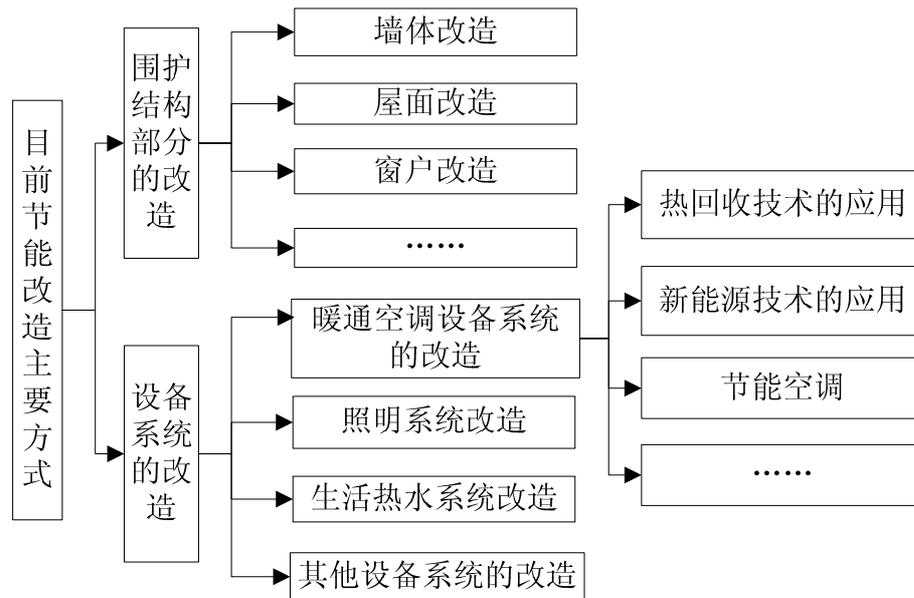


图 5.1 目前节能改造的主要方式

5.2 改造前后围护结构与围护结构设备系统的生命周期能耗

5.2.1 改造前的建筑生命周期能耗

对于改造前的原始建筑，其建筑物生命周期总能耗为围护结构生命周期能耗与暖通空调设备系统生命周期能耗之和，表示如下：

$$E = E_{en} + E_{equip} \quad (5.1)$$

式中： E ——建筑物生命周期总能耗，MJ；

E_{en} ——围护结构生命周期总能耗，MJ；

E_{equip} ——暖通空调设备系统生命周期总能耗，MJ；

关于围护结构生命周期总能耗 E_{en} 和设备系统的生命周期总能耗 E_{equip} 具体计算公式参见公式(3.1)和公式(4.1)。

5.2.2 改造后的建筑生命周期能耗

5.2.2.1 改造后围护结构生命周期分析

围护结构改造后生命周期总能耗等于改造前围护结构生命周期总能耗加上改造部分材料生命周期总能耗，改造部分的生命周期总能耗计算可参见公式(3.2)~(3.12)。本研究中节能改造后，围护结构生命周期总能耗由下式表示：

$$E''_{en} = E_{en} + E'_{en} \quad (5.2)$$

式中： E''_{en} ——围护结构改造后生命周期总能耗，MJ；

E'_{en} ——围护结构改造的部分建材的生命周期能耗，比如增加的保温层部分的生命周期能耗，MJ。

围护结构的节能改造对直接的影响是反映在暖通空调设备系统的能耗上，一般情况下，对围护结构进行节能改造都会使得设备的运行能耗降低，但是由于围护结构节能改造而花费的建材的费用以及花费的建材的生命周期能耗也是不容忽视的。公式(5.2)正是考虑了围护结构节能改造带来的能耗增加。

5.2.2.2 改造后设备系统生命周期分析

设备系统改造后生命周期总能耗等于改造之前设备系统生命周期总能耗加上对设备的结构进行改造的物化能部分的生命周期总能耗，再减去因为设备系统改造引起的设备系统的运行能耗。将改造部分设备材料的生产能耗放到用公式表达就是：

$$E'_{equip} = E'_{eq,cons} + E'_{eq,use} \times Y_{equip} + E'_{eq,demo} \quad (5.3)$$

$$E'_{eq,cons} - E_{eq,cons} = \Delta E_{eq,cons} \quad (5.4)$$

$$E'_{eq,use} - E_{eq,use} = \Delta E_{eq,use} \quad (5.5)$$

$$E'_{eq,demo} - E_{eq,demo} = \Delta E_{eq,demo} \quad (5.6)$$

整理上面几个式子，可将改造后设备系统生命周期总能耗写为

$$E'_{equip} = E_{eq} + (\Delta E_{eq,cons} + \Delta E_{eq,demo} + \Delta E_{eq,use} \times Y_{equip}) \quad (5.7)$$

式中： E'_{equip} ——改造后设备系统生命周期总能耗，MJ；

$E'_{eq,cons}$ ——改造后的设备系统建设阶段能耗，包括改造前系统的设备和因改造而添加的设备的建材阶段能耗，MJ；

$E'_{eq,use}$ ——改造后设备系统运行阶段总能耗，这部分能耗的变化是由设备系统改造而引起的，MJ；

$E'_{eq,demo}$ ——改造后设备系统拆除、废弃建材回收阶段总能耗，MJ；

$\Delta E_{eq,cons}$ ——增加的设备系统建设阶段的能耗，MJ；

$\Delta E_{eq,use}$ ——设备系统增加或减少的运行能耗，当运行能耗增加时其值为正，当运行能耗比改造前减少时其值为负，MJ；

$\Delta E_{eq,demo}$ ——改造后比改造前增加的设备系统拆除阶段能耗，MJ。

这部分计算可参照围护结构生命周期部分能耗公式，设备系统因建筑节能改造而变化的运行能耗，按照动态模拟软件 DeST 模拟。设备系统的合理改造同样会使得设备系统的运行能耗大大降低，由于围护结构的合理节能改造也可以使得设备运行能耗降低，所以，如果是对建筑的围护结构和设备系统同时进行节能改造，减少的运行能耗应该是由设备系统改造减少的运行能耗和围护结构的合理改造减少的运行能耗的总和。

5.3 改造部分分析

通过前面的两个模型，我们分析比较发现，围护结构改造部分的能耗为 E'_{en} ，

设备系统改造部分的能耗为 $(\Delta E_{eq,cons} + \Delta E_{eq,demo} + \Delta E_{eq,use} \times Y_{equip})$ ，其中， $\Delta E_{eq,use} \times Y_{equip}$ 表示设备在 Y 年里因为改造而减少的运行能耗总和，如果下面的不等式成立，则说明对建筑的节能改造是可行的。因为如果节能部分的能耗大过因节能而增加的材料能耗，或者说节能带来的资源和经济效益远远大于为改造而投入的资源和经济成本，这样的节能改造是非常值得的，也是有意义的；否则，改造就是没有意义的。

$$\Delta E_{eq,use} \times Y_{equip} > E'_{en} + (\Delta E_{eq,cons} + \Delta E_{eq,demo}) \quad (5.8)$$

不等式中：左边表示——设备系统生命周期内减少的运行能耗总和，MJ；

右边表示——围护结构和设备系统因为改造而增加的材料生命周期能耗，MJ。

因此，对于改造建筑，我们只要考虑其围护结构和设备系统分别改造所消耗的生命周期能耗，以及对应的设备运行能耗的减少量，就可以知道对围护结构和暖通空调设备系统改造所占的比重，以及按照怎么样的比例进行节能改造是合理的。如果只是进行围护结构的节能改造，那就说明暖通空调设备系统的改造比例为 0，围护结构的改造比例为 1。如果只针对设备系统进行节能改造，那就说明暖通空调设备系统改造的比例为 1，围护结构改造的比例为 0。这样就能清楚的看出更应该对那个部分的改造更合理。

5.4 案例分析

利用生命周期评价方法对建筑物生命周期能耗进行评估，并用于比较节能改造前后建筑物生命周期能耗，这样的类似案例在国内还是比较少见，大多数都是评价不同结构建筑的生命周期能耗^[9,10,16]。本研究利用建筑物生命周期能耗模型，对夏热冬冷地区典型城市—宁波市住宅建筑为例，分析其在特定气候条件下，建筑物节能改造的效果比较。

5.4.1 案例介绍

本研究通过调查统计，综合宁波地区普通多层居住建筑的共性，选取计算模型为 3 单元 6 层加隔楼住宅，层高 2.8m，两室一厅一厨一卫，每户为 90m²，总建筑面积 3420.32m²。南朝向，体形系数为 0.34，东西向无外窗，南向窗墙比为 0.3，北向窗墙比为 0.29。模型建筑单元平面图如图 5.2 所示，模型建筑平面图如图 5.3 所示。



图 5.2 模型建筑平面图

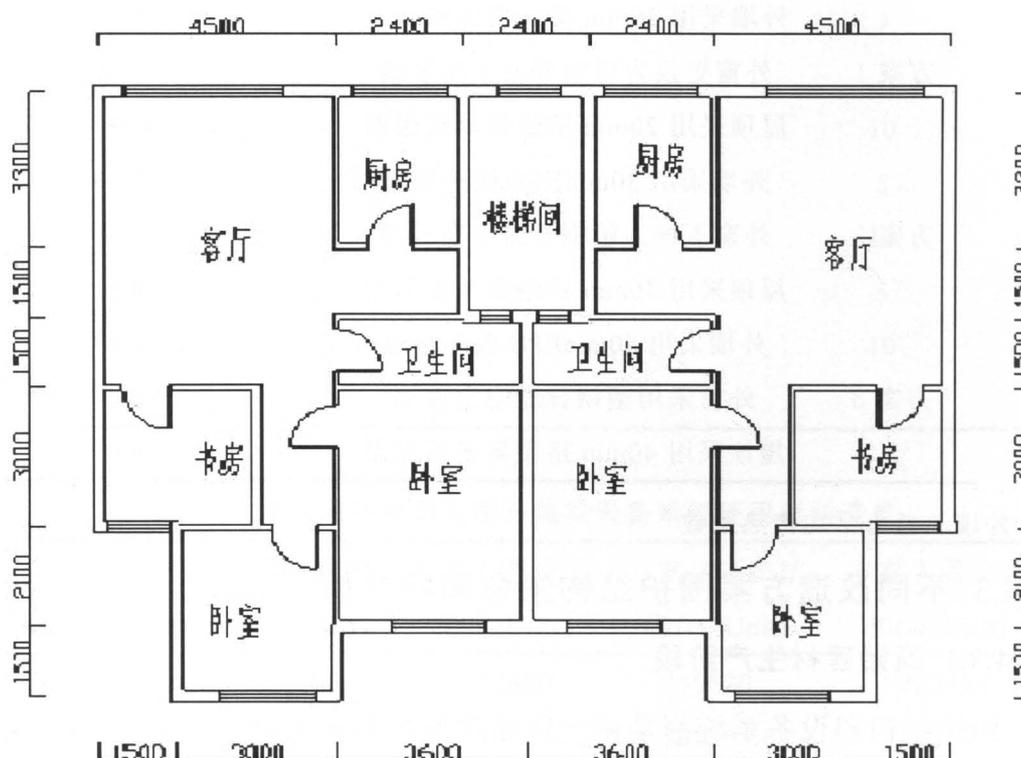


图 5.3 模型建筑单元平面图

5.4.2 改造方案介绍

原始建筑围护结构的外墙主要是 240mmKP1 型烧结多孔砖，窗户为铝合金单层玻璃窗，屋顶基本没有采取保温措施，具体构造及热特性见表 5.1。

表 5.1 原始建筑围护结构构造与热特性

类别	构造	传热系数 $K(W/m^2 \cdot ^\circ C)$
外墙	KP1 型烧结多孔砖	1.91
屋顶	快瓦+挂瓦条+顺水条+防水层+钢筋混凝土板	2.33
窗户	铝合金单层玻璃窗	6.4 ($Sc=0.9$)

注：外墙 K 值为平均传热系数

改造后建筑：对既有建筑上的节能改造由于形体系数，朝向，位置，主体结构材料已经确定，所以节能改造就有很大的局限性，只能从围护结构的外墙，屋顶，窗的类型着手，结合当地的气候条件和具体的建筑特质，进行有选择的节能改造。

表 5.2 不同改造方案的构造结构与热特性

改造方案	改造方案构造结构	传热系数 K ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
方案 1	外墙采用 20mm 聚合物保温砂浆	1.17
	外窗更换为塑钢普通中空玻璃	2.9
	屋顶采用 20mm 挤塑聚苯板保温	0.97
方案 2	外墙采用 30mmXPS 板外保温	0.66
	外窗更换为塑钢普通中空玻璃	2.9
	屋顶采用 40mm 挤塑聚苯板保温	0.61
方案 3	外墙采用 40mmEPS 板外保温	0.67
	外窗采用塑钢普通中空玻璃	2.9
	屋顶采用 40mm 挤塑聚苯板保温	0.61

注：外墙 K 值为平均传热系数

由于研究时间有限，本文对建筑的节能改造的分析只从几种常见的改造方式进行分析，表 5.2 是不同改造方案的构造结构与热特性表。

5.4.3 不同改造方案围护结构生命周期分析

5.4.3.1 原始建材生产阶段

围护结构和设备系统都是由一些建筑原材料如玻璃、铁、铜、水泥、木材、塑料、砖、钢筋等构成的，因此这个阶段的消耗能耗都可以按照公式(3.2)计算，但是由于构成围护结构的材料有好几千种，不可能一一列出计算，所以为了说明问题，本研究只列出几种最常用的，最主要的建材的用量和单位能耗清单。

在计算建筑生产阶段能耗之前，应该先列出案例研究需要的单位建材的生产能耗。建材生产阶段所用材料的单位能耗见表 5.3。

对于改造前的基础建筑和改造方案 1、方案 2、方案 3 的建筑，经过咨询房地产工作相关概预算的专家，在对模型建筑进行简单概预算的基础上，选取对本研究有意义的、主要的、典型的建材的用量进行计算，统计出建筑围护结构主体部分所需要的建材的用量，详细用量清单见表 5.4。

表 5.3 建材生产阶段单位能耗^[8,14,56]

材料名称	单位能耗 MJ/kg	废弃比率 (%)
砂(kg)	0.6	5
水泥(kg)	5.3	5
木材(kg)	2	5
玻璃(kg)	17.56	5
钢材(kg)	38	10
铝(kg)	421.65	10
砼(m ³)	13.07	5
粘土砖(kg)	13.47	5
塑料(kg)	112.2	10
铜(kg)	239	5
铁(kg)	27	10
XPS(kg)	684	5
PVC(kg)	40	10
EPS(kg)	543.6	5

表 5.4 建筑围护结构与围护结构设备系统使用材料清单

材料名称	基础建筑围护	方案 1 围护结	方案 2 围护结	方案 3 围护结
	结构(m _i /Unit)	构(m _i /Unit)	构(m _i /Unit)	构(m _i /Unit)
砂(kg)	223414	2952880	240820	223414
水泥(kg)	98300	114682.5	102395.6	102395.6
木材(kg)	10310	10310	10310	10310
玻璃(kg)	8343	16686	16686	16686
钢材(kg)	154800	154800	154800	154800
铝(kg)	2419.47	1209	1209	1209
砼(m ³)	1076.4	1076.4	1076.4	1076.4
粘土砖(kg)	77260	77260	77260	77260
塑料(kg)	—	—	—	—
铜(kg)	—	—	—	—
铁(kg)	—	—	—	—
XPS(kg)	—	259.524	2194.533	519.049
PVC(kg)	—	6952.5	6952.5	6952.5
EPS(kg)	—	—	—	1985.76

根据公式(3.3), 原始建筑、方案 1 建筑、方案 2 建筑、方案 3 建筑的围护结构在建材生产阶段的生产能耗见表 5.5。根据图 5.4 分析, 由生产阶段的能耗, 可以看出方案 1 在生产阶段的能耗最高, 其次是方案 2 和方案 3, 方案 1 主要是在外墙采用聚合物保温砂浆, 虽然水泥、砂和保温颗粒的材料单位生产能耗小于挤塑聚苯板和膨胀聚苯板, 但是因为其消耗的水泥、砂浆的用量太大, 故其生产能耗总体就比较较大; 方案 2 主要是由于材料挤塑聚苯板(XPS)的本身的生产能耗较 EPS 较高, 而方案 2 在外墙和屋顶都采用了大面积的挤塑基本版(XPS)保温, 导致在建材生产阶段整个改造方案的生产能耗有所上升; 方案 3 由于在外墙采用生产能耗较小的 EPS 板保温, 只在相对外墙面积小很多的屋顶部分采用挤塑聚苯板保温, 所以生产阶段能耗稍小于方案 2 的能耗, 也是这三种方案里生产能耗最少的。

表 5.5 原始建筑与不同改造方案的围护结构建材生产能耗 (MJ)

材料名称	原始建筑	方案 1 建筑	方案 2 建筑	方案 3 建筑
砂	140750.8	1860314	151716.6	142702.4
水泥	547039.5	638208.2	569831.7	569831.7
木材	21651	21651	21651	21651
玻璃	153828.2	307656.5	307656.5	307656.5
钢材	6470640	6470640	6470640	6470640
铝	1122186	560752.3	560752.3	560752.3
砗	14771.98	14771.98	14771.98	14771.98
粘土砖	1092727	1092727	1092727	1092727
塑料	—	—	—	—
铜	—	—	—	—
铁	—	—	—	—
XPS	—	186390.1	1576114	372781
PVC	—	305910	305910	305910
EPS	—	—	—	1133432
建筑总能耗	9563595	11459021	11066205	10992856
单位建筑面积能耗	2763.789	3311.55	3198.03	3176.8332

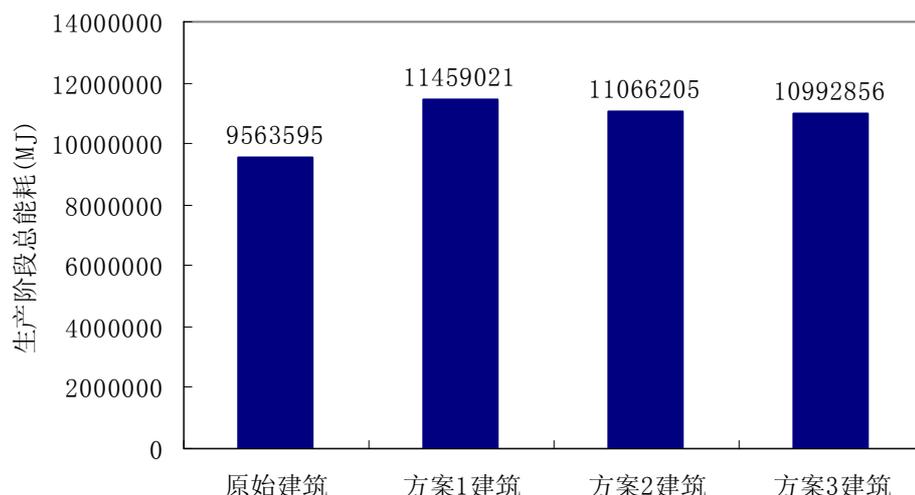


图 5.4 原始建筑与不同改造方案围护结构生产阶段能耗比较

5.4.3.2 施工阶段

关于围护结构的施工能耗，原始建筑按照不同施工方式，按照公式(3.5)和表 3.3 中所列单位面积不同施工方式能耗计算施工阶段总能耗，对于改造建筑，根据文献[57, 58]可知，按照生产能耗的 5%选取改造施工能耗，将结果在表 5.6 中表示出来。由于是对既有建筑的围护结构进行改造，所以建筑主体结构和建筑面积都是一样的，但是由于挤塑聚苯板 XPS 的单位能耗远远高于水泥砂浆的单位能耗，根据文献，改造施工能耗为生产能耗的 5%。由图 5.5 看出，所以在三种改造方案中，方案 2 的施工能耗是最大的，其次是方案 3，施工能耗最少的是水泥砂浆。

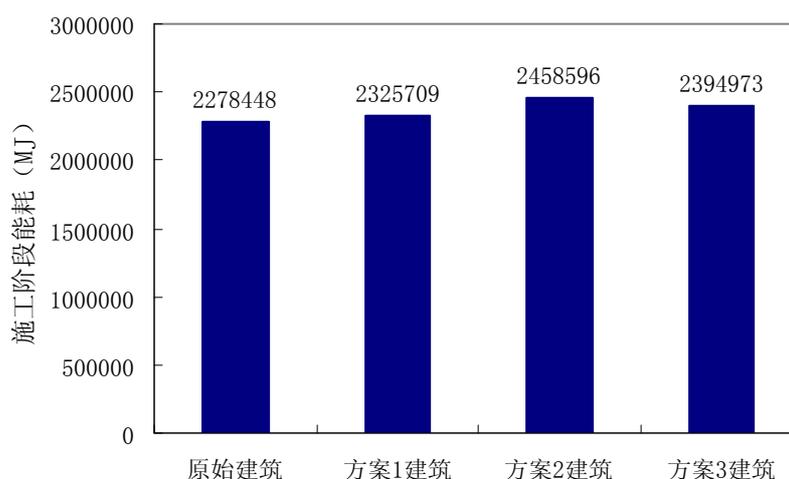


图 5.5 原始建筑与不同改造方案围护结构施工阶段能耗比较

表 5.6 原始建筑与不同改造方案围护结构施工阶段能耗 (MJ)

施工项目	原始建筑	方案 1 建筑	方案 2 建筑	方案 3 建筑
基础开挖	94328.32	94328.32	94328.32	94328.32
材料堆放	17993.66	17993.66	17993.66	17993.66
卫生供暖	—	—	—	—
场地布置	180767.1	180767.1	180767.1	180767.1
场地清扫	34603.2	34603.2	34603.2	34603.2
现场材料运输	84397.44	91990.25	89910.72	89949.38
场地整平	58929.25	58929.25	58929.25	58929.25
临时供电	78376.25	78376.25	78376.25	78376.25
起重机运行	137547.7	137547.7	137547.7	137547.7
人员运输	1591505	1591505	1591505	1591505
节能改造施工能耗	—	39668.08	174635.2	110973.4
设备加工制造能耗	—	—	—	—
施工阶段总能耗	2278448	2325709	2458596	2394973
单位面积施工能耗	658.4501	672.108	710.5113	692.1248

5.4.3.3 居住使用阶段

围护结构在使用阶段只考虑其因为修缮等活动而带来的能耗，由于其修缮过程所需的材料生产能耗已经在建材生产阶段考虑过了，所以只考虑维护和修缮所涉及的总建材的运输能耗，具体计算参见公式(3.9)。根据公式计算出的围护结构的修缮能耗见表 5.7 和图 5.6。

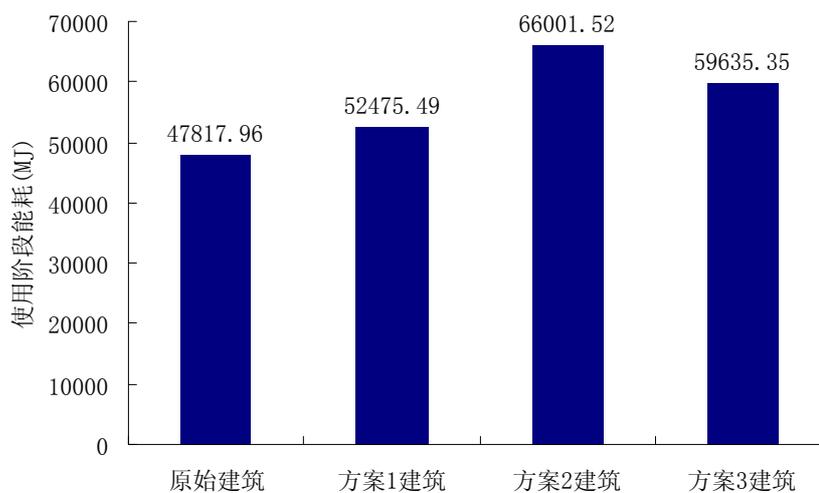


图 5.6 原始建筑与不同改造方案围护结构使用阶段能耗比较

表 5.7 原始建筑与不同改造方案围护结构使用阶段能耗 (MJ/a)

项目	原始建筑	方案 1 建筑	方案 2 建筑	方案 3 建筑
全年总能耗	47817.96	52475.49	66001.52	59635.35
单位建筑面积能耗	13.81894	15.16492	19.07382	17.23406

5.4.3.4 拆除阶段

当建筑物经过几十年的运行后，建材由于结构破坏、破损、老化等原因，通过改造已经无法使建筑物达到建筑使用标准的时候，就应该拆除。由于拆除过程采用各种机械化设备及人力等资源，拆除过程也伴随着能量的消耗和污染环境的气体、灰尘、颗粒污染等。不同施工方法的单位能源消耗是不同的，参照第三章列出的建筑物拆除不同施工工艺的单位能耗表，再根据公式(3.9)就可以估算出不同建筑物的拆除能耗。具体能耗见表 5.8。

表 5.8 原始建筑与不同改造方案围护结构拆除阶段能耗 (MJ)

施工工艺	原始建筑	方案 1 建筑	方案 2 建筑	方案 3 建筑
破碎、构建拆除工艺	102079.4	102079.4	102079.4	102079.4
开挖、移除土方	6228.576	6228.576	6228.576	6228.576
平整土方	24914.3	24914.3	24914.3	24914.3
起重机搬运	20428.83	21061.15	20769.19	20754.45
施工总能耗	150200.2	150695.7	150483.4	150486.7
单位面积施工能耗	43.40646	43.54965	43.48829	43.48926

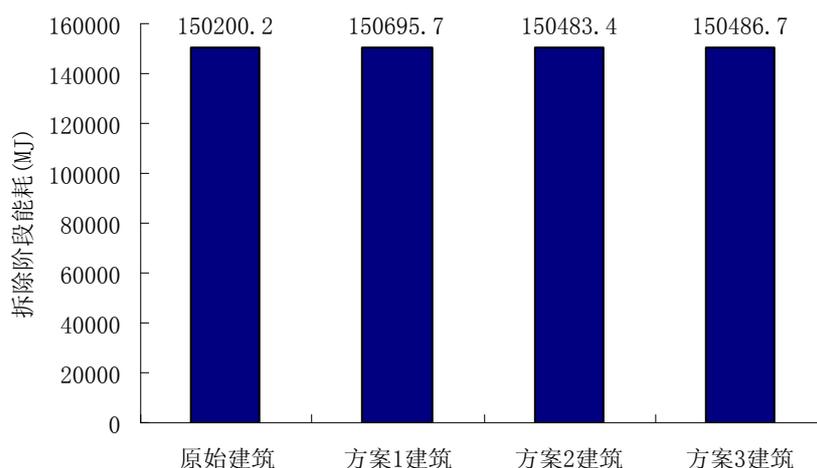


图 5.7 原始建筑与不同改造方案围护结构拆除阶段能耗比较

由图 5.7 所示，基础建筑 and 不同改造方案建筑的拆除能耗都差不多，这是由于本研究是针对同一栋建筑的不同节能改造方案的拆除能耗进行分析，而且改造的重点是对既有建筑的外围护结构系统进行改造，建筑的主体结构和建筑面积几

乎没有发生变化，所以，围护结构的拆除阶段能耗差别不是很大。

5.4.3.5 废弃建材回收阶段

正如在第三章所描述的，当建筑拆除后，废弃的建筑材料，如钢材、木材、铝材、玻璃、甚至保温材料都可以回收再利用，设备中废弃的材料如铜、铁、铝等回收率都是很高的。对于建筑所拆除的大量的砖块、砌块等，也可以回收利用进行铺路、地基铺垫等。对于回收后经过加工后都可以再重新用于建筑物或者设备的建设的材料，我们称之为开环再循环，即可以再次参加产品的生命周期循环，反复利用，对于这一类型的材料，要充分的利用，增加其利用程度，不仅可以节约能源，而且减少了城市垃圾和城市污染。根据美国环保局调查确认^[47]，用于从废家电中回收的废钢代替通过采矿、运输、冶炼得到的新钢材，可减少 97% 的矿废物，减少 86% 的空气污染，76% 的水污染；减少 40% 的用水量，节约 90% 的原材料，74% 的能源，而且废钢材与新钢材的性能基本相同。

对于建筑垃圾这种不可回收的建材，一般都是送往垃圾场等地，在废弃阶段只考虑将其运输至处理地点的能耗；对于可回收的建材和一些设备材料，这一阶段的能耗不仅要考虑将其运输至加工地点的运输能耗，而且要考虑重新加工成成品的能耗。在本研究中，对于围护结构来讲，钢筋、铝合金窗户、玻璃、木材、保温材料都是可回收的建材，但是只有钢筋和铝材是可以直接回收利用的，钢材重新加工的能耗取原始生产能耗的 40%，钢材回收系数为 50%；可循环的铝材的加工能耗取原始生产能耗的 6%，回收系数为 95%^[54]。

本阶段的能耗可以参照第三章的公式(3.10)进行计算，计算后不同围护结构回收阶段能耗如表 5.9 所示：

表 5.9 原始建筑与不同改造方案围护结构废弃建材处理阶段能耗 (MJ)

项目	原始建筑	方案 1 建筑	方案 2 建筑	方案 3 建筑
可回收建材运输能耗	4782.188	5353.773	5496.576	5446.2
不可回收建材运输能耗	22349.84	24039.22	22772.18	22772.18
废弃建材处置阶段总能耗	27132.03	29393	28268.76	28218.38
单位面积废弃建材处置能耗	7.840901	8.4943	8.169407	8.154848

对比不同改造方案在废弃建材处置阶段的能耗，由于方案 1 采用了大量的水泥、砂，所以在回收阶段的运输量将会比其他集中材料要大很多，而且由于方案 2 和方案 3 的保温部分都是比较轻的聚苯板，且回收率很高，所以导致在这一阶段方案 1 的废弃建材处理能耗最大。

5.4.4 不同改造方案暖通空调设备系统生命周期分析

5.4.4.1 暖通空调设备建设阶段

住宅建筑中和暖通空调设备系统有关的就是空调与采暖器。构成其生产阶段的能耗，主要是材料的生产能耗和加工能耗，由于调查资料有限，而且目前关于产品加工能耗的统计数据很少，所以经过本人走访，咨询相关专家意见，根据现有的加工工艺，一般加工能耗为材料生产能耗的 1.5 倍。所以暖通空调的建设阶段总能耗为原材料生产能耗的 2.5 倍。对于空调器，构成其部件的主要材料是塑料、铜、钢、铁。

通过材料的耗材系数推理出来，由于设备的耗材相对于围护结构设备系统在使用阶段的耗能很小，而且对于围护结构改造可行性分析没有太大关系，所以这一部分的耗材量假定其适合本研究。施工阶段，关于围护结构设备系统的加工制造能耗，根据本人走访，按照现在的加工工艺，定为设备生产能耗的 1.5 倍。根据文献[59]可知柜式空调器的材料用量为铜材 10.34kg，铝材 6.6kg，钢材 59.41kg，塑料 8.75kg。

表 5.10 分体立柜式空调材料分解调查表^[48]

项目	铜材	铝材	钢铁	塑料	合计
室内机	2.32	2.72	24.76	7.8	37.6
室外机	6.84	3.89	32.43	0.75	43.71
整机	9.15	6.6	56.99	8.55	81.29
安装材料	1.19	0	2.42	0.2	3.81
材料总用量	10.34	6.6	59.41	8.75	85.1

根据空调器的材料用量和公式(4.2)可以算出暖通空调系统材料(主要是房间空调器)在生产制造阶段的主要能耗，主要材料能耗见表 5.11。

表 5.11 暖通空调设备在材料生产制造阶段材料用量与耗能

主要材料	单位能耗 (MJ/kg)	废弃 比率%	用量(kg)	生产阶段能 耗(MJ)
铝	421.65	10	237.6	110202.4
塑料	112.2	10	315	38877.3
铜	239	5	372.24	93413.63
铁	27	10	2138.76	63521.17

根据前面所做限定，加工能耗为原材料能耗的 1.5 倍，则根据主要材料生产阶段的能耗，则可知暖通空调系统在制造阶段的能耗为 765036.4MJ，单位面积能耗为 221.0883MJ。

5.4.4.2 暖通空调设备使用阶段

建筑的使用阶段最主要的耗能方式是暖通空调设备系统因为运行所消耗的能量，设备系统的运行能耗根据 DeST 软件建模，算出不同改造方案建筑设备的使用能耗。

1. 数据输入阶段：为了使模拟结果更接近既有居住建筑实际能耗情况，模拟参数采用清华大学简毅文博士提出的考虑建筑物的自然通风等因素的参数设定方法。

(1)室内外通风模式：最小换气次数 1 次/小时，最大换气次数 6 次/小时。（如计算耗冷量时，当室外新风温度低于室内控制温度，在房间通风换气能力范围内，加大换气次数，通过新风带走室内热量。当达到最大换气次数仍不能满足室内温度要求，开启空调，房间取最小换气次数）。

(2)空调设备使用方式：空调运行方式采用间歇运行，空调控制温度为 $18^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ ，容忍温度定为 $15^{\circ}\text{C} \sim 29^{\circ}\text{C}$ ，即当房间温度低于 29°C 时，空调不开启，当高于 29°C 时，空调开启，并将房间温度控制在 26°C 以下。空调能效比取 2.3，采暖能效比取 1.9。

(3)内部热扰及人员作息：人均发热量为 53 W，卧室人员作息工作日为 21:00--次日 7:00，12:00—14:00；周末为 23:00--次日 9:00。客厅人员作息为 7:00—8:00；17:00—22:00。灯光热扰为 5 W/m^2 ，灯光作息为 18:00—24:00。

(4)气象数据：采用 DeST-h 气象数据，利用内插法得到宁波地区气象参数。

(5)设定采暖季开始日期为 11 月 15 日到次年的 3 月 15 日，空调季开始日期为 6 月 1 日到 8 月 30 日。空调面积为 2941.056m^2 。

(6)此算例模型房间功能简化处理为卧室和空房间两种，卧室为空调房间；空房间包括卫生间、厨房等，不设空调，不设置内热源。

(7)模拟地点：宁波市某住宅小区；经度：东经 121.3 度；纬度：北纬 29.8 度。

(8)根据建筑热工分区，宁波市属于夏热冬冷地区，采暖度日数： 1517.74 ；空调度日数： 89.6 。

2. 模拟结果：通过 DeST 模拟运算，可以得出不同保温方式建筑的全年冷热负荷及冷热负荷指标，根据原始建筑材料，模型建筑原始能耗（无保温时的能耗），

即全年空调能耗为 $73878 \text{ KW}\cdot\text{h}$ ($25 \text{ KW}\cdot\text{h/a}\cdot\text{m}^2$)，全年采暖能耗为 $64955 \text{ KW}\cdot\text{h}$ ($22 \text{ KW}\cdot\text{h/a}\cdot\text{m}^2$)，全年耗电量为 $66308 \text{ KW}\cdot\text{h}$ ($22.5 \text{ KW}\cdot\text{h/a}\cdot\text{m}^2$)。

由 DeST 计算出房间的热负荷和冷负荷，因为运算数据太多，只列出方案 1，方案 2 和方案 3 的部分房间的热负荷和冷负荷，模拟数据部分结果见表 5.12～表 5.17。

表 5.12 方案 1 建筑的部分房间热负荷统计

房间名称	房间面积 (m ²)	全年最大时刻	全年最大 (W/m ²)	房间全年最大 (kW)	采暖季累计 (kW · h/m ²)	采暖季平均 (W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	1116	131.4694	1.41987	24.94429	8.589633	6
R2-36895	10.8	1116	131.6071	1.421357	24.67319	8.496279	6
R2-36898	9	1212	101.5161	0.913645	1.289056	0.44389	6
R2-36901	9	756	112.0869	1.008783	11.09689	3.821243	6
R2-36904	16.2	1116	92.31891	1.495566	0.183092	0.063048	6
R2-36907	16.2	1116	92.55474	1.499387	0.183064	0.063038	6
R2-36919	36.45	1116	95.63613	3.485937	12.37062	4.259854	6
R2-36925	36.45	1116	94.03926	3.427731	5.175474	1.782188	6
R2-36931	9	1092	103.0752	0.927677	1.2872	0.443251	6
R2-36934	36.45	84	91.74595	3.34414	4.642419	1.598629	6
R2-36937	10.8	1116	131.4396	1.419548	24.39853	8.401698	6
R2-36940	16.2	787	91.75262	1.486392	0.182556	0.062864	6
R2-36949	9	1212	101.3572	0.912215	1.287253	0.443269	6
R2-36952	10.8	1116	131.5086	1.420293	24.66823	8.494568	6
R2-36955	16.2	1116	91.934	1.489331	0.182235	0.062753	6
R2-36964	36.45	780	95.1518	3.468283	5.089363	1.752535	6
R2-36967	9	1092	103.0415	0.927374	1.287793	0.443455	6
R2-36970	36.45	84	91.95315	3.351692	4.821714	1.66037	6
R2-36976	9	108	113.3389	1.02005	8.693998	2.993801	6
R2-36979	10.8	787	118.3675	1.278368	6.286807	2.164878	6
R2-36982	10.8	780	132.3379	1.429249	24.31234	8.372016	6
R2-36985	36.45	108	100.5694	3.665755	10.73501	3.696628	6
R2-36991	16.2	787	91.80716	1.487276	0.182581	0.062872	6
R2-36994	16.2	1116	91.6019	1.483951	0.181722	0.062576	6
R3-39157	55.476	780	113.6561	6.305186	19.03904	6.556142	1
R3-39163	55.476	787	101.4924	5.630394	13.01039	4.480163	1
R3-39166	55.476	787	101.6392	5.638537	12.59536	4.337244	1
R3-39175	55.476	787	101.4606	5.62863	12.99086	4.473435	1
R3-39178	55.476	787	101.7122	5.642587	12.61349	4.343488	1
R3-39181	55.476	780	113.583	6.301129	18.55565	6.389686	1

表 5.13 方案 1 建筑的部分房间冷负荷统计

房间名称	房间面积(m ²)	全年最大时刻	全年最大(W/m ²)	房间全年最大(kW)	空调季累计(kW·h/m ²)	采暖季平均(W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	6156	110.4856	1.193244	19.40596	8.885515	6
R2-36895	10.8	5268	109.4383	1.181934	19.87886	9.102041	6
R2-36898	9	5460	85.66904	0.771021	9.843311	4.50701	6
R2-36901	9	5292	90.04274	0.810385	12.23847	5.603693	6
R2-36904	16.2	6156	120.8342	1.957514	26.32448	12.05333	6
R2-36907	16.2	6156	114.9439	1.862091	26.03073	11.91883	6
R2-36919	36.45	5299	89.97889	3.279731	11.76819	5.388365	6
R2-36925	36.45	5155	85.29106	3.108859	10.38261	4.75394	6
R2-36931	9	5460	83.60205	0.752418	9.716338	4.448873	6
R2-36934	36.45	5155	84.97072	3.097183	10.30352	4.717728	6
R2-36937	10.8	5268	107.3172	1.159026	18.47339	8.458512	6
R2-36940	16.2	6156	119.3746	1.933869	26.00079	11.90512	6
R2-36949	9	5460	85.61956	0.770576	9.763723	4.470569	6
R2-36952	10.8	5268	107.5955	1.162031	18.38076	8.416099	6
R2-36955	16.2	6156	114.7742	1.859341	25.9246	11.87024	6
R2-36964	36.45	5155	85.26939	3.108069	10.36922	4.747809	6
R2-36967	9	5460	83.75841	0.753826	9.749144	4.463894	6
R2-36970	36.45	5155	85.11067	3.102284	10.37091	4.748586	6
R2-36976	9	5292	98.70632	0.888357	15.46889	7.082824	6
R2-36979	10.8	5316	131.506	1.420265	37.539	17.18819	6
R2-36982	10.8	5268	107.5315	1.16134	18.56046	8.498378	6
R2-36985	36.45	5299	94.7709	3.454399	13.44485	6.156066	6
R2-36991	16.2	6156	119.6022	1.937555	26.02958	11.9183	6
R2-36994	16.2	6156	116.5998	1.888917	26.6348	12.19542	6
R3-39157	55.476	5268	99.01012	5.492685	22.32883	10.22383	1
R3-39163	55.476	5131	100.0628	5.551081	21.15513	9.686416	1
R3-39166	55.476	5292	97.07876	5.385541	21.33961	9.770884	1
R3-39175	55.476	5131	100.0405	5.549847	21.22082	9.716494	1
R3-39178	55.476	5292	97.10522	5.387009	21.33887	9.770546	1
R3-39181	55.476	5083	101.352	5.622602	23.70676	10.85474	1

表 5.14 方案 2 部分房间热负荷统计

房间名称	房间面积(m ²)	全年最大时刻	全年最大(W/m ²)	房间全年最大(kW)	采暖季累计(kW·h/m ²)	采暖季平均(W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	1099	116.4319	1.257465	11.397	3.924588	6
R2-36895	10.8	1099	116.1468	1.254386	11.1669	3.845351	6
R2-36898	9	834	98.57051	0.887135	0.489627	0.168604	6
R2-36901	9	1116	102.7871	0.925084	4.136352	1.424364	6
R2-36904	16.2	4868	1.84E-06	2.98E-08	-2.3E-09	-7.9E-10	6
R2-36907	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R2-36919	36.45	780	90.01922	3.2812	4.885669	1.682393	6
R2-36925	36.45	780	90.23857	3.289196	2.040161	0.702535	6
R2-36931	9	136	98.01927	0.882173	0.584819	0.201384	6
R2-36934	36.45	1225	90.09294	3.283888	1.774022	0.610889	6
R2-36937	10.8	1099	116.3288	1.256351	10.72352	3.692673	6
R2-36940	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	-3E-09	-1E-09	6
R2-36949	9	136	98.41384	0.885725	0.488682	0.168279	6
R2-36952	10.8	1099	116.055	1.253394	11.16267	3.843893	6
R2-36955	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R2-36964	36.45	794	90.10641	3.284379	1.864821	0.642156	6
R2-36967	9	136	98.10521	0.882947	0.58568	0.20168	6
R2-36970	36.45	1225	90.04558	3.282161	1.773794	0.610811	6
R2-36976	9	780	103.1385	0.928246	2.701202	0.930166	6
R2-36979	10.8	780	96.61014	1.04339	0.644574	0.221961	6
R2-36982	10.8	1099	116.2998	1.256038	10.7244	3.692976	6
R2-36985	36.45	1116	93.31105	3.401188	4.023267	1.385422	6
R2-36991	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	-3E-09	-1E-09	6
R2-36994	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R3-39157	55.476	1116	94.06352	5.218268	8.056016	2.77411	1
R3-39163	55.476	756	88.77906	4.925107	4.869251	1.676739	1
R3-39166	55.476	108	88.80471	4.92653	4.785781	1.647996	1
R3-39175	55.476	756	88.51863	4.91066	4.86198	1.674236	1
R3-39178	55.476	108	88.87904	4.930654	4.790599	1.649655	1
R3-39181	55.476	780	92.27	5.118771	8.025284	2.763528	1

表 5.15 方案 2 部分房间冷负荷统计

房间名称	房间面积(m ²)	全年最大时刻	全年最大(W/m ²)	房间全年最大(kW)	空调季累计(kW·h/m ²)	采暖季平均(W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	6156	110.2839	1.191066	16.47228	7.542253	6
R2-36895	10.8	6156	105.6758	1.141299	16.55878	7.581861	6
R2-36898	9	5460	84.01963	0.756177	9.083036	4.158899	6
R2-36901	9	4812	89.27959	0.803516	10.83842	4.962645	6
R2-36904	16.2	6156	118.8942	1.926087	24.99051	11.44254	6
R2-36907	16.2	5292	115.7499	1.875149	24.56198	11.24633	6
R2-36919	36.45	5299	85.25813	3.107659	10.63537	4.869676	6
R2-36925	36.45	5467	85.3427	3.110741	9.501275	4.350401	6
R2-36931	9	5220	83.19436	0.748749	9.084721	4.159671	6
R2-36934	36.45	5155	83.02074	3.026106	9.421039	4.313663	6
R2-36937	10.8	6156	105.6049	1.140533	15.725	7.200093	6
R2-36940	16.2	6156	117.3449	1.900988	24.61784	11.2719	6
R2-36949	9	5460	84.06144	0.756553	9.056799	4.146886	6
R2-36952	10.8	6156	105.631	1.140815	15.70146	7.189311	6
R2-36955	16.2	5292	115.7733	1.875527	24.63889	11.28154	6
R2-36964	36.45	5467	85.31888	3.109873	9.498457	4.34911	6
R2-36967	9	5220	83.26518	0.749387	9.094146	4.163986	6
R2-36970	36.45	5155	83.11979	3.029716	9.486675	4.343716	6
R2-36976	9	5292	93.31103	0.839799	12.8033	5.862318	6
R2-36979	10.8	6156	128.9481	1.39264	33.10138	15.15631	6
R2-36982	10.8	6156	105.679	1.141333	15.73374	7.204093	6
R2-36985	36.45	5299	87.53367	3.190602	11.46322	5.248726	6
R2-36991	16.2	6156	117.5782	1.904767	24.67891	11.29987	6
R2-36994	16.2	6156	114.8444	1.860479	25.42092	11.63962	6
R3-39157	55.476	5292	96.27582	5.340997	19.86401	9.095242	1
R3-39163	55.476	5292	95.36302	5.290359	19.19794	8.790264	1
R3-39166	55.476	5292	95.28632	5.286104	19.29017	8.832497	1
R3-39175	55.476	5292	95.42032	5.293538	19.19545	8.789126	1
R3-39178	55.476	5292	95.22519	5.282712	19.2921	8.833379	1
R3-39181	55.476	5292	97.12408	5.388055	20.6051	9.434568	1

表 5.16 方案 3 部分房间热负荷统计

房间名称	房间面积(m ²)	全年最大时刻	全年最大(W/m ²)	房间全年最大(kW)	采暖季累计(kW·h/m ²)	采暖季平均(W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	1099	117.4791	1.268775	11.7746	4.054615	6
R2-36895	10.8	1099	117.5306	1.269331	11.53956	3.973677	6
R2-36898	9	780	99.01211	0.891109	0.490801	0.169008	6
R2-36901	9	1116	104.3347	0.939012	4.421009	1.522386	6
R2-36904	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	-2.3E-09	-7.9E-10	6
R2-36907	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R2-36919	36.45	1104	89.98971	3.280125	4.880879	1.680743	6
R2-36925	36.45	780	90.82209	3.310465	2.119166	0.72974	6
R2-36931	9	1116	98.12207	0.883099	0.487522	0.16788	6
R2-36934	36.45	292	89.7257	3.270502	1.943704	0.669319	6
R2-36937	10.8	1099	116.6381	1.259691	11.24021	3.870595	6
R2-36940	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	-3.4E-09	-1.2E-09	6
R2-36949	9	780	98.59506	0.887356	0.489077	0.168415	6
R2-36952	10.8	1099	117.334	1.267207	11.52547	3.968827	6
R2-36955	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R2-36964	36.45	780	90.31796	3.292089	2.030629	0.699252	6
R2-36967	9	808	98.59368	0.887343	0.587934	0.202457	6
R2-36970	36.45	1249	90.25726	3.289877	1.862269	0.641277	6
R2-36976	9	780	104.4805	0.940324	2.892282	0.995965	6
R2-36979	10.8	780	98.47174	1.063495	0.742736	0.255763	6
R2-36982	10.8	787	114.8634	1.240525	11.10359	3.82355	6
R2-36985	36.45	780	89.84627	3.274897	4.192802	1.443803	6
R2-36991	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	-3.4E-09	-1.2E-09	6
R2-36994	16.2	5749	1.84E-06	2.98E-08	0	0	6
R3-39157	55.476	780	93.30064	5.175946	8.306397	2.860329	1
R3-39163	55.476	756	89.98105	4.991789	5.12689	1.765458	1
R3-39166	55.476	108	89.67907	4.975036	4.899224	1.68706	1
R3-39175	55.476	756	89.46272	4.963034	5.039605	1.735401	1
R3-39178	55.476	1092	88.58693	4.914448	4.874183	1.678438	1
R3-39181	55.476	780	93.30469	5.176171	8.212606	2.828032	1

表 5.17 方案 3 部分房间冷负荷统计

房间名称	房间面积 (m ²)	全年最大时刻	全年最大 (W/m ²)	房间全年最大 (kW)	空调季累计 (kW·h/m ²)	采暖季平均 (W/m ²)	层数
R2-36892	10.8	6156	110.3514	1.191795	16.51657	7.56253	6
R2-36895	10.8	6156	105.7429	1.142024	16.6391	7.618634	6
R2-36898	9	5460	84.08838	0.756795	9.075182	4.155303	6
R2-36901	9	5292	87.5095	0.787585	10.90554	4.993378	6
R2-36904	16.2	6156	118.9264	1.926608	25.03821	11.46438	6
R2-36907	16.2	5292	115.7939	1.875862	24.64074	11.28239	6
R2-36919	36.45	5299	85.397	3.112721	10.64903	4.87593	6
R2-36925	36.45	5467	85.403	3.112939	9.500279	4.349944	6
R2-36931	9	5220	83.28555	0.74957	9.083443	4.159086	6
R2-36934	36.45	5155	83.08671	3.028511	9.480792	4.341022	6
R2-36937	10.8	6156	105.6659	1.141191	15.80792	7.238057	6
R2-36940	16.2	6156	117.3665	1.901337	24.62452	11.27496	6
R2-36949	9	5460	84.12844	0.757156	9.060823	4.148728	6
R2-36952	10.8	6156	105.6978	1.141536	15.84781	7.256325	6
R2-36955	16.2	5292	115.8447	1.876685	24.64724	11.28537	6
R2-36964	36.45	5467	85.37792	3.112025	9.498128	4.34896	6
R2-36967	9	5220	83.33948	0.750055	9.091792	4.162908	6
R2-36970	36.45	5155	83.22566	3.033575	9.481799	4.341483	6
R2-36976	9	5292	93.65082	0.842857	12.94204	5.925841	6
R2-36979	10.8	6156	129.0315	1.39354	33.19699	15.20008	6
R2-36982	10.8	6156	105.7408	1.142	15.81862	7.24296	6
R2-36985	36.45	5299	87.75836	3.198792	11.4784	5.255676	6
R2-36991	16.2	6156	117.602	1.905152	24.68573	11.30299	6
R2-36994	16.2	6156	114.8841	1.861122	25.43649	11.64675	6
R3-39157	55.476	5292	96.41486	5.348711	19.88307	9.103971	1
R3-39163	55.476	5292	95.46625	5.296086	19.1994	8.790934	1
R3-39166	55.476	5292	95.39422	5.29209	19.30694	8.840172	1
R3-39175	55.476	5292	95.52111	5.299129	19.19586	8.789314	1
R3-39178	55.476	5292	95.33433	5.288767	19.38888	8.87769	1
R3-39181	55.476	5292	97.31091	5.39842	20.63961	9.450373	1

根据每种不同围护结构的改造方案模拟出来的最后结果，见表 5.18，由统计

表可以看出方案 2 的全年累计热负荷和冷负荷都是最低的，主要是由于 XPS 板的保温效果较好，加上大面积的在外墙屋顶的使用，所以外墙和屋顶的隔热保温性能都大大提高。

表 5.18 不同方案建筑暖通空调设备系统负荷及指标统计

统计项目	方案 1	方案 2	方案 3
全年最大热负荷 (KW)	242.21	197.4508	198.058
全年最大冷负荷 (KW)	270.2555	268.656	269.0395
全年累计热负荷 (KW · h)	24813.14	9890.018	10268.92
全年累计冷负荷 (KW · h)	55070.08	50299.88	50387.05
全年最大热负荷指标 (W/m ²)	82.35477	67.13603	67.34248
全年最大冷负荷指标 (W/m ²)	91.89062	91.34677	91.47719
全年累计热负荷指标 (KW · h/m ²)	8.436814	3.362744	3.491575
全年累计冷负荷指标 (KW · h/m ²)	18.72459	17.10266	17.1323
采暖季节热负荷指标 (W/m ²)	2.82471	1.129151	1.171603
空调季节冷负荷指标 (W/m ²)	7.671576	6.957811	6.971614

根据空调能效比取 2.3，采暖能效比取 1.9，可以算出不同改造方案运行暖通空调系统运行阶段的全年总能耗和单位空调面积能耗，原始建筑和方案 1、方案 2、方案 3 的全年总能耗分别为 206185.4MJ、108968.2MJ、75326.35 MJ、76142.33 MJ，全年总能耗最高的原始建筑，其次是方案 1、然后是方案 3 和方案 2，全年的总能耗除以建筑总空调面积就是单位空调面积能耗，具体数据见表 5.19。由图 5.8 可知方案 2 的模拟运行效果最好，其次是方案 1 和方案 3。根据 DeST 模拟出的不同改造方案建筑的暖通空调设备运行能耗，方案 2 的运行能耗最少，如果只考虑暖通空调设备系统的运行能耗，这个方案就是最优方案，但是考虑到建筑物生命周期能耗，则不仅仅是比较不同方案与基础建筑的运行能耗差值，而是要考虑到不同方案所增加的材料的生命周期能耗。具体改造分析将在后面详细介绍。

表 5.19 原始建筑与不同改造方案建筑暖通空调设备系统全年运行能耗 (MJ/Y)

项目	原始建筑	方案 1	方案 2	方案 3
全年总能耗	206185.4	108968.2	75326.35	76142.33
空调面积	2941.056	2941.056	2941.056	2941.056
单位空调面积能耗	70.1059	37.05071	25.61201	25.88945

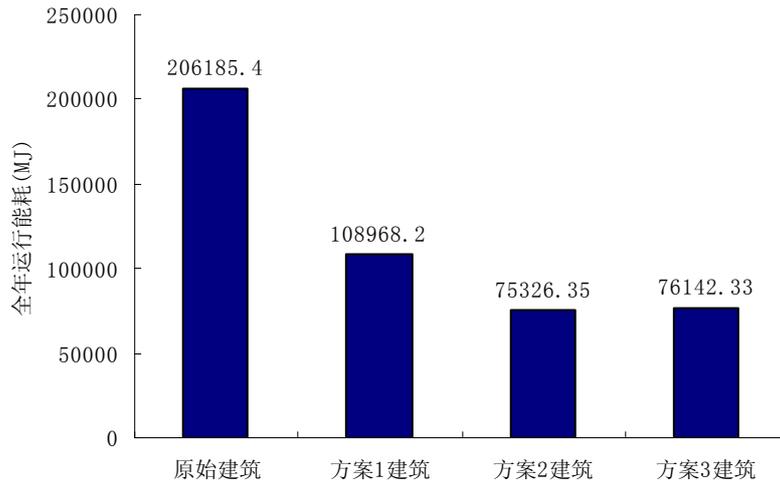


图 5.8 不同改造方案暖通空调系统全年运行能耗

5.4.4.3 暖通空调设备拆除回收阶段

对于暖通空调设备系统的拆除阶段，由于拆除能耗相对建筑围护结构的拆除能耗来说很小，而且相对于暖通空调设备系统在生产阶段产生的能耗也是非常小的，所以我们只考虑其回收阶段的能耗。

暖通空调设备系统中铜、铁、铝是主要的回收材料，拆除回收阶段的能耗可以参照公式(4.5)~(4.7)进行计算，由于三种改造方案影响的都是暖通空调设备系统在使用阶段的能耗，对其拆除回收阶段的能耗都没有影响，所以拆除回收阶段三种方案暖通空调系统的能耗都是相同的，假设暖通空调设备系统拆除回收的材料送往垃圾站的平均运输距离为 20km，根据表 3.7 可查到铝的回收率为 0.95、塑料的回收率为 0.25、铜的回收率为 0.9、废铁的回收率为 0.9 计算暖通空调设备拆除后废弃建材因为回收所消耗的运输能耗。根据公式(4.5)，算出围护结构设备系统拆除阶段的能耗为 166.8972MJ，单位建筑面积的拆除阶段能耗为 0.048232MJ/m²。

5.4.5 改造合理性分析

对于原始建筑和不同改造方案建筑，生命周期的总能耗因为围护结构设备系统的运行寿命不同而有很大的不同，也就是说，如果设备系统的运行时间很短，如 10 年，改造的效果往往是看不出来的，因为这个时候设备系统运行的减少能耗相对来说还是比较少的，但是，如果设备系统的运行时间拉长到 30 年的时候，30 年时间里设备系统运行的减少能耗已经是非常大的数值了，这个时候再比较节能效果会更明显一些，所以为了便于比较，我们假定这四种建筑的生命周期为 30 年，通过分析围护结构设备系统运行 30 年对整体建筑生命周期的影响。

表 5.20 不同改造方案建筑围护结构生命周期各个阶段能耗比较(MJ)

项目	原始建筑	方案 1	方案 2	方案 3
生产阶段	9563595	11459021	11066205	10992856
施工阶段	2278448	2325709	2458596	2394973
运行阶段	47817.96	52475.49	66001.52	59635.35
拆除阶段	150200.2	150695.7	150483.4	150486.7
回收阶段	27132.03	29393	28268.76	28218.38
生命周期总能耗	12067193	14017294	13769555	13626169
单位面积生命周期能耗	3487.306	4050.866	3979.272	3937.835
单位面积年生命周期能耗	116.2435	135.0289	132.6424	131.2612

表 5.21 不同建筑暖通空调设备系统生命周期各阶段能耗比较(MJ)

项目	原始建筑	方案 1	方案 2	方案 3
设备建设阶段	765036.4	765036.4	765036.4	765036.4
设备运行阶段	6185561	3269046	2259790	2284270
拆除回收阶段	166.8972	166.8972	166.8972	166.8972
生命周期总能耗	6950764	4034249	3024993	3049473
单位面积生命周期能耗	2363.357	1371.701	1028.54	1036.863
单位面积年生命周期能耗	78.77856	45.72336	34.28466	34.56211

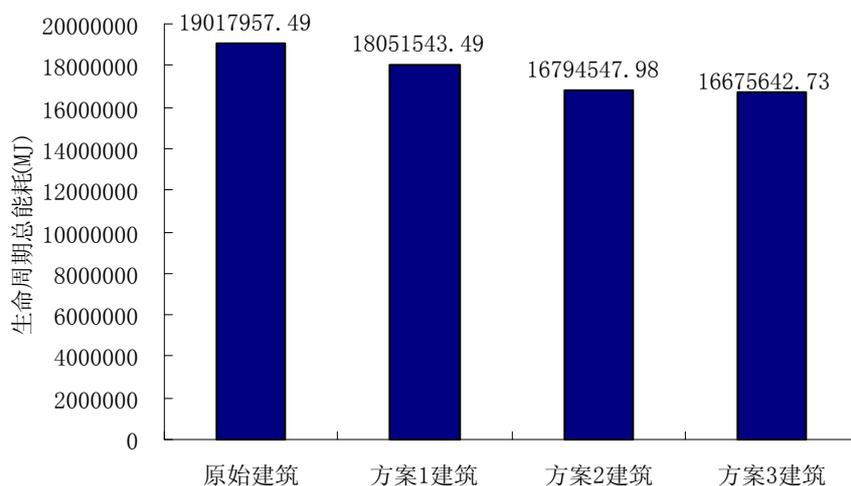


图 5.9 不同改造方案建筑生命周期总能耗 (30 年)

由表 5.20 和表 5.21 可以看出围护结构与围护结构设备系统在不同阶段的生命周期能耗和不同改造方式的生命周期总能耗，将围护结构的生命周期总能耗和对于方案的围护结构设备系统的生命周期总能耗相加，得到建筑物整体的生命周

期总能耗，由图5.9 可以看出原始建筑的生命周期总能耗最大，在30 年的运行过程中，方案3 的建筑整体生命周期总能耗最小，其次是方案2 和方案1 。因此从这个角度来说，考虑建筑物整体生命周期总能耗最小的建筑也是最节能的建筑，所以方案3 是在这几种方案里最节能的选择。

表 5.22 不同使用寿命建筑节能改造方案分析

运行周期(年)	改造方案	围护结构增加能耗(MJ)	空调设备减少的能耗(MJ)	节能量	最优节能方案选择
5	方案 1	1950101	486085.9	-1464015	
	方案 2	1702362	654295.2	-1048067	
	方案 3	1558976	650215.2	-908761	
10	方案 1	1950101	972171.7	-977929	
	方案 2	1702362	1308590	-393772	
	方案 3	1558976	1300430	-258546	
20	方案 1	1950101	1944343	-5757.58	
	方案 2	1702362	2617181	914818.7	
	方案 3	1558976	2600861	1041885	√
30	方案 1	1950101	2916515	966414.1	
	方案 2	1702362	3925771	2223409	
	方案 3	1558976	3901291	2342315	√
40	方案 1	1950101	3888687	1938585.8	
	方案 2	1702362	5234361	3531999.4	
	方案 3	1558976	5201722	3642746	√

根据第四章公式(4.13) 所述，围护结构设备系统生命周期内减少的运行能耗总和如果大于围护结构和设备系统改造而增加的材料生命周期能耗，那么这样的节能改造才是有意义的，假设围护结构设备系统运行时间为 5 年、10 年、20 年、30 年、40 年时，分析改造方案的优劣。不同使用寿命建筑节能改造方案分析见表 5.22 。

当建筑运行周期为 10 年的时候，三种改造方案设备的运行减少能耗都不能抵消因为改造而带来的材料成本的生命周期能耗，因此，如果既有建筑的寿命还不到十年，改造方案都是没有必要的；如果建筑的使用寿命达到20 年左右，方案 1 仍然是设备运行减少能耗不足抵消增加的建材生命周期能耗，方案2 和方案3 都可以满足设备运行减少能耗大于增加的材料生命周期能耗，都属于可以实施的方案，但是方案3 更优于方案2 ，因为方案三节约的生命周期能耗更少。对于建

筑寿命超过 30 年时,每一方案的运行减少能耗都可以抵消因为节能改造而带来的材料生命周期能耗,都是可行的,这个时候可以先根据节能量的大小来选取节能方案,再考虑经济因素等其它因素,综合选取最优节能方案。

从图 5.10 可以看出,当建筑的运行时间为 10 年的时候,任何一种方案都不能满足设备系统减少能耗大于改造消耗的生命周期能耗;当建筑运行时间为 20 年的时候,方案 2 和方案 3 都满足节能改造可行性的条件;而且随着建筑使用时间越长,因为围护结构设备系统的运行能耗越多,这样改造方案都是逐渐会发挥它的作用,对于不同的改造方案,有着不同的改造可行性条件。

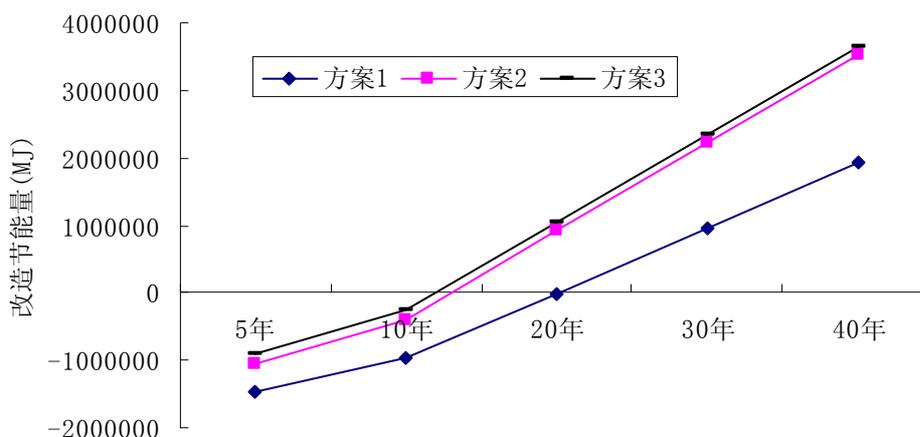


图 5.10 建筑使用年限与改造节约的生命周期能耗比较

5.4.6 环境影响评价

按照建筑运行周期为 30 年,根据第三章的公式(4.14)~(4.15)可以计算出建筑物的围护结构和围护结构设备系统在每个阶段的二氧化碳排放量,由于不清楚每个阶段的能耗构成,所以本研究根据每个阶段的耗能量和煤的燃烧热值得到等效的耗煤量,再按照煤燃烧过程中排放的 CO_2 计算出整个生命周期的 CO_2 排放量,煤的热值为 7000Kcal/Kg ,对应的 CO_2 排放量为 3.16Kg/kgce ,计算结果如表 5.23 所示。

根据表 5.23,建筑物围护结构系统的二氧化碳排放量因为不同阶段的能耗不同而不同,其中又以生产阶段和施工阶段的排放量最大,其次是拆除、运行和回收阶段,由于建筑物的围护结构属于建筑能耗里的固有能耗,自建成开始,每年再消耗的能源就很少,不同于围护结构设备系统每年不断变化的能耗,围护结构随着建筑物使用寿命越长,平均到每年单位建筑面积的二氧化碳排放量越少。表 5.24 是不同改造方案围护结构设备系统运行 30 年的二氧化碳排放量,跟围护结构的规律相反,围护结构设备系统使用的年份越久,排放的二氧化碳越多。

表 5.23 不同改造方案围护结构的二氧化碳排放量 (kg)

项目	原始建筑	方案 1	方案 2	方案 3
生产阶段	1027924	1231650	1189429	1181545
施工阶段	244894.4	249974.2	264257.3	257418.9
运行阶段	5139.617	5640.223	7094.041	6409.786
拆除阶段	16143.97	16197.22	16174.41	16174.76
回收阶段	2916.232	3159.248	3038.411	3032.996
生命周期 CO ₂ 总排放量	1297018	1506621	1479993	1464581
单位面积 CO ₂ 排放量	374.826	435.3993	427.7041	423.2503
单位面积每年 CO ₂ 排放量	12.4942	14.51331	14.2568	14.10834

表 5.24 不同改造方案暖通空调设备系统的二氧化碳排放量 (kg)

项目	原始建筑	方案 1	方案 2	方案 3
设备生产阶段	82228.402	82228.402	82228.402	82228.402
运行阶段	664842.61	351366.85	242888.99	245520.18
拆除回收阶段	17.938611	17.938611	17.938611	17.938611
生命周期 CO ₂ 总排放量	747088.92	433613.16	325135.3	327766.49
单位面积 CO ₂ 总排放	254.02068	147.43453	110.55056	111.44514
单位面积年 CO ₂ 排放量	8.4673554	4.9144836	3.6850179	3.714839

5.5 本章小结

本章节主要分析节能改造对围护结构和暖通空调设备系统生命周期能耗的影响。介绍了目前围护结构和暖通空调系统常见的节能改造方式，用公式表达了改造前的建筑生命周期总能耗和改造后的生命周期总能耗，分析改造部分对建筑节能的影响，提出对节能改造可行性分析的生命周期判断标准：暖通空调设备系统生命周期内减少的运行能耗总和如果大于围护结构和暖通空调系统因为改造而增加的材料生命周期能耗，这样的改造才是有意义的，是值得实施的

最后以宁波地区典型住宅建筑为例，分析了不同节能改造方式对围护结构和暖通空调系统生命周期各个阶段的影响。按照建筑运行周期为 30 年，其节能改造的合理性方案，最后分析了不同改造方案的各个生命周期阶段的二氧化碳排放量。

结论与展望

本研究主要是基于生命周期评价方法，对建筑的生命周期能耗进行评价，特别是对建筑的围护结构和暖通空调设备系统的生命周期评价。通过能概括建筑物整个生命过程的几个阶段的清单描述，分析了构成建筑的主要部分——围护结构与暖通空调设备系统的生命周期清单分析，通过本研究得到以下结论：

(1)不同于目前大多数对建筑生命周期的评价，本文将建筑物的生命周期能耗分成围护结构部分能耗分析和暖通空调设备系统能耗分析。由于围护结构部分是构成建筑物的主体和最主要的部分，消耗着大量的能源和建筑材料；暖通空调系统属于建筑物设备系统的一个部分，但是由于暖通空调设备系统与建筑物的围护结构关系最为密切，也最能直接的反应围护结构的热特性变化。其他的设备系统相对于暖通空调系统来说和建筑本体的能耗关系都不是很大。这样的区分，使得我们在研究的时候更清楚的看到在建筑的每个生命过程阶段中围护结构和暖通空调设备系统所占的能耗比例。对于节能环节的把握更为清楚。

(2)目前对节能建筑的评估有很多方法、标准，但是在我国还很少把生命周期的思想融入节能评估里，本研究通过对建筑两个部分几个阶段详细的清单描述，通过分析节能改造前后对建筑物整体生命周期的影响因素，得出判断节能建筑的一个指标，或者说作为判断建筑是否值得进行节能改造的一个指标：即只有当对围护结构进行改造所消耗的材料、人力、物力等改造部分生命周期的能耗小于这样的改造带来的建筑能耗的减少值时，节能改造才能从基本的能量平衡上值得去做，否则，如果节能改造带来的暖通空调系统的运行能耗减少远远小于改造成本能耗，这样的节能就是“耗能”。

(3)通过对实际中抽象出来的模拟建筑的节能改造分析，发现虽然由 DeST 软件模拟出来的改造方案 2 的节能效果最好，其次是方案 3、方案 1。但是由于方案 2 消耗的材料的生产能耗以及施工能耗过大，在 15 年左右的运行周期里，其生命周期节能效果没有方案 3 的效果好。因为虽然方案 3 在软件中模拟出的运行能耗没有方案 2 理想，但是因为方案 3 在其他几个生命过程阶段中消耗的能耗比方案 2 小得多，所以从整体来看，方案 3 是最优选择；当建筑的使用时间超过 15 年时，方案 2 和方案 3 都可以满足设备运行减少能耗大于增加的材料生命周期能耗，这时可先根据节能量的大小选取节能方案，同时考虑经济因素，综合选取最优节能方案。

由于本人知识的欠缺，加上时间及条件等因素的限制，使得本文对建筑围护结构和暖通空调设备系统研究还不够完善。对于在研究中所遇到的问题，还有不

少未能解决。下面是本文还未能解决的问题以及值得深入研究的问题，在此提出以求供以后研究者参考：

(1)由于建筑生命周期能耗与建筑材料用量和对应的材料耗能紧密关系，但是恰恰这两个部分是最难准确估计的，而且不同的学者对于单位建材内含能的参数有不同的确定，而且由于很多研究数据都是来源于国外和台湾地区，更加造成了研究结果的不确定性。由于建筑物本身的特殊性与复杂性，增加了对其进行评估的难度，而且涉及的范围相当广泛，所以做好合理的假设边界，完善数据库的收集和及时更新就显得非常重要，因此建立柔性边界的生命周期数据库，可以作为下一步研究的内容。

(2) 本文以生命周期评价方法分析节能改造对建筑围护结构和暖通空调设备系统的能耗和环境排放影响，但是没有考虑节能改造的经济效益，没有从生命周期成本角度分析节能改造的影响，因此，如果条件允许，可以对建筑物的围护结构和暖通空调系统在进行生命周期能耗评价的同时，进行生命周期成本的分析，以更全面的了解节能改造的最优方案。

(3) 在进行能耗评价时，由于研究资料有限，未能区分不同品质能源的使用功效与环境影响，如果条件允许，可以将能源从品质区分，更加细化研究结果。

参 考 文 献

- [1] 陈伟珂, 罗方. 浅析我国宏观建筑能耗评价指标体系. 建筑经济, 2008(2): 76-79
- [2] 文远高, 郑重. 地下水资源在住宅空调中应用的方式及注意的问题. 住宅科技, 2004(6): 38-40
- [3] 陈滨, 孟世荣, 陈星等. 中国住宅中能源消耗的CO₂排放量及减排对策[J]. 可再生能源, 2005, (5): 75-79
- [4] 刘涛, 黄志甲. 生命周期清单不确定性分析的主要数据选择. 安徽工业大学学报, 2006, 23 (1): 91-95
- [5] 饶坤普, 钱觉时. 建筑物物化能在我国建筑节能工作中的地位. 新型建筑材料, 2006(11): 38-40
- [6] 王波, 王燕飞, 崔玲. 生命周期评价(LCA)与生态建筑材料. 中外建筑, 2003, (6): 107-109
- [7] 李兆坚, 江亿. 我国广义建筑能耗的分析与思考. 建筑学报, 2006 (7): 30-33
- [8] 顾同曾. 欧洲三国建筑节能近况. 建筑创作, 2002(6): 64-69
- [9] 乔永锋. 基于生命周期评价法(LCA)的传统民居的能耗分析与评价: [西安建筑科技大学硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006, 3-6
- [10] 彭文正. 以生命周期评估技术应用于建筑能耗之研究: [台湾朝阳科技大学硕士论文]. 台湾: 台湾朝阳科技大学环境工程与管理所, 2003, 10-11
- [11] Karin Adalberth. Life cycle assessment of four multi-family building. International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings. 2001, (11): 17-18
- [12] A.P.Arena, C.de Rosa. Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina. Building and Environment, 2003, (38): 359-368
- [13] 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价. 清华大学学报, 2006, 46 (12): 1953-1956
- [14] 赵平, 周继锋, 马眷荣. 建筑材料环境负荷指标及评价体系的研究. 绿色建筑, 2008, (5): 1-5
- [15] 陈江红, 李启明, 邓小鹏. 住宅建筑全生命周期的能耗分析. 建筑经济, 2008, (7): 117-120

- [16] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究: [四川大学硕士论文]. 四川: 四川大学, 2003, 12-20
- [17] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型与案例研究: [同济大学硕士论文]. 中国: 同济大学, 2003, 13-15
- [18] 王婧, 张旭, 黄志甲. 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, 20(6): 149-153
- [19] 王松庆, 王威, 张旭. 基于生命周期理论的严寒地区居住建筑能耗计算和分析. 建筑科学, 2008, 24(4): 58-61
- [20] 熊家晴, 杨飞, 王晓昌. 建筑给水管生命周期能耗分析方法及应用. 建筑科学, 2008, 24(4): 82-85
- [21] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价. 北京: 化学工业出版社, 2003, 23-27
- [22] 吴军. 产品生命周期评价及模型的研究: [华中科技大学硕士论文]. 武汉: 华中科技大学, 2004, 8-15
- [23] 杨建新, 王如松. 生命周期的回顾与展望. 环境科学进展, 1998, 6(2): 21-28
- [24] GB/T 24042-2000, 环境管理生命周期评价目的与范围的确定和清单分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [25] 吴军. 产品生命周期评价及模型的研究: [华中科技大学硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2004, 10-16
- [26] 黄海耀. 对太阳能热水器系统和燃煤锅炉系统的LCA比较: [天津大学硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004, 13-17
- [27] 孟碧霞. 绿色设计产品生命周期评价: [北京机械工业学院硕士论文]. 北京: 北京机械工业学院, 2006, 14-16
- [28] 黄春林, 张建强, 沈淞涛. 生命周期综述. 环境技术, 2004(1): 29-32
- [29] 樊庆铤, 敖红光, 孟超. 生命周期评价. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 177-180
- [30] 林莉琴. 浅析建设全生命周期造价管理的对策. 广州建筑, 2008, 36(4): 42-45
- [31] 张又升. 建筑物生命周期二氧化碳减量评估: [国立成功大学博士论文]. 中国台湾: 国立成功大学, 2002, 45-50
- [32] 周武良. 既有建筑围护结构节能改造技术分析. 建筑节能, 2006, (2): 48-50
- [33] 马明珠, 张旭. 空调冷热源生命周期成本评估. 煤气与热力, 2008, (6): 32-35
- [34] K. ADALBERTH. Energy use during the Life Cycle of buildings: a method. Building and Environment, 1997, (4): 317-320
- [35] 杨居光. 建筑中的固化能耗. 节能技术, 2004, 22(6): 32-34
- [36] K. ADALBERTH. Energy use during the Life Cycle of Single unit dwellings: examples. Building and Environment, 1997, (4): 321-329
- [37] Nalanie Mithraratne, Brenda Vale. Life cycle analysis model for New Zealand

- houses. *Building and Environment*, 2004, (39): 483-492
- [38] M. Asif, T. Muneer, R. Kelly. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 2007, (42): 1391-1394
- [39] D. J. Harris. A quantitative approach to the assessment of the environment impact of building material. *Building and Environment*, 1999, (34): 751-758
- [40] T. Y. Chen, J. Burnett, C. K. Chau. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*, 2001, (26): 323-340
- [41] Maria Jesus Gonzalez, Justo Garcia Navarro. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials, practical case low environmental impact. *Building and Environment*, 2006(41): 902-909
- [42] 林宁德, 张又升, 欧文生等. 台湾生产能耗与CO₂排放之比较. *建筑学报*. 2002, 6(40): 1-15
- [43] RAYMOND J. COLE, PAUL C. KERNAN. Life-Cycle Energy Use in Office Buildings. *Building and Environment*, 1996(4):307-317
- [44] Gian Andrea Blengini. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 2009, (44): 319- 330
- [45] Daniel Kellenberger, Hans-Jorg Althaus. Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 2009, (44): 818-825
- [46] C. Thormark. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*, 2006, (41) : 1019-1026
- [47] 黄国仓. 办公建筑生命周期节能与二氧化碳减量评估之研究: [国立成功大学博士论文]. 中国台湾: 国立成功大学, 2006, 55-60
- [48] 林建隆. 住宅设备生命周期二氧化碳排放量解析: [国立成功大学硕士论文]. 中国台湾: 国立成功大学, 2003, 24-30
- [49] 邓建强, 李文良, 张早校. 燃气热泵系统生命周期评价. *西安交通大学学报*, 2006, 11(11): 1258-1262
- [50] 郑元, 张天柱. 水源中央空调生命周期分析模型研究. *中国环境科学*, 2001, 21(5): 472-475
- [51] 郑元, 张天柱. 水源中央空调环境影响的生命周期评价. *环境工程*, 2002, 12(6): 76-78
- [52] 李峥嵘, 钱必华. 住宅建筑能耗的特点及其评价指标的确定. *节能技术*, 2001, 19(1): 10-12
- [53] 许慧峰. 夏热冬冷地区住宅的节能改造问题研究: [东南大学硕士论文]. 上

- 海：东南大学，2007，40-48
- [54] 阎利，刘应宗，黄文雄．废旧家用电器的机械破碎与分选技术．中国工程科学，2005，7(12)：24-30
- [55] 朱国辉．热回收空调机组系统分析研究．制冷与空调(四川)．2008，6(4)：1671-6612
- [56] 薛祖源．聚苯乙烯生产与发展综述．化工设计，2006，16(6)：6-16
- [57] 杨居光．建筑中的固化能耗．节能技术，2004，11(6)：32-38
- [58] 陈兴华，庄斌舵，刘光远．保温材料节能评判与奖励生产的税率建议．保温材料与建筑节能，2001，(3)：34-35
- [59] 李兆坚，江亿．我国房间空调器材料资源消耗状况分析．暖通空调，2007，(3)：25-31

致 谢

时光如梭，转瞬间，我的研究生生活也即将圆满的画上句号。在我硕士学习期间，非常荣幸能够师从龚光彩教授。在论文完成之际，我谨向龚老师致以崇高的敬意和由衷的感谢！感谢龚老师三年来对我的谆谆教诲和无微不至的关怀。正是在龚老师的悉心指导下，我才得以步入建筑节能方向研究的殿堂，并顺利完成硕士论文工作。

在研究生学习过程中，我还得到了湖南大学土木工程学院建筑环境与设备工程系各位老师的帮助和关心，在此一并向他们表示诚挚的感谢。感谢汤广发教授、李念平教授、杨昌智教授等各位老师在我本科和读研期间对我的关心和指导，从他们身上我学到了许多做人和做学问的道理，这将对我今后在学习和工作中，乃至为人处世方面都将产生深远的影响，令我受益终身！

在课题和论文进行的过程中，衷心感谢周燕博士、陈飞虎博士、白贵平博士给予我的大力支持和帮助，提出了许多具有建设性的意见和建议。特别感谢珠江实业公司的白羽在建筑概预算方法上给我提供的指导与帮助。此外还要感谢在美国的伍星给我的支持和帮助。同时，也要感谢实验室的同学还有师弟师妹们，与他们的交流中，我增长了见识，开阔了视野。

在论文的写作过程中，同学之间的相互鼓励显得尤为重要，在我沮丧的时候，正是他们的鼓励和推动促使我最终能够信心十足地迎接挑战、直面困难。感谢我寝室的好姐妹杨钦文、凌彩珠、薛冰，感谢缘分让我们度过三年愉快的时光。特别感谢国防科技大学的王伟同学，是他的鼓励和支持让我在论文写作低谷的时候鼓起勇气，给我无私的帮助并让我再接再厉。

衷心感谢我的家人！是他们的鼓励和坚定的支持给了我继续深造的动力，并最终完成学业。

最后，感谢评审论文的各位老师！感谢他们抽出宝贵时间来阅读本文，并提出宝贵的意见和建议。

王瑞

2009年05月于湖南大学

附录A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] Rui Wang, Guangcai Gong, Chin Wu. Thermodynamic Analysis about Energy Cycle Pattern in Building. IGEC-III, Sweden, 2007
- [2] 王瑞, 龚光彩, Chin Wu, 陈飞虎等. 建筑能量循环模式的热力学分析. 暖通空调, 2009(5)
- [3] Rui Wang, Guangcai Gong, Progress of Study on Energy Cycle in Building and Environment Control. EERB-BEPH 2009 conference. Acceptance