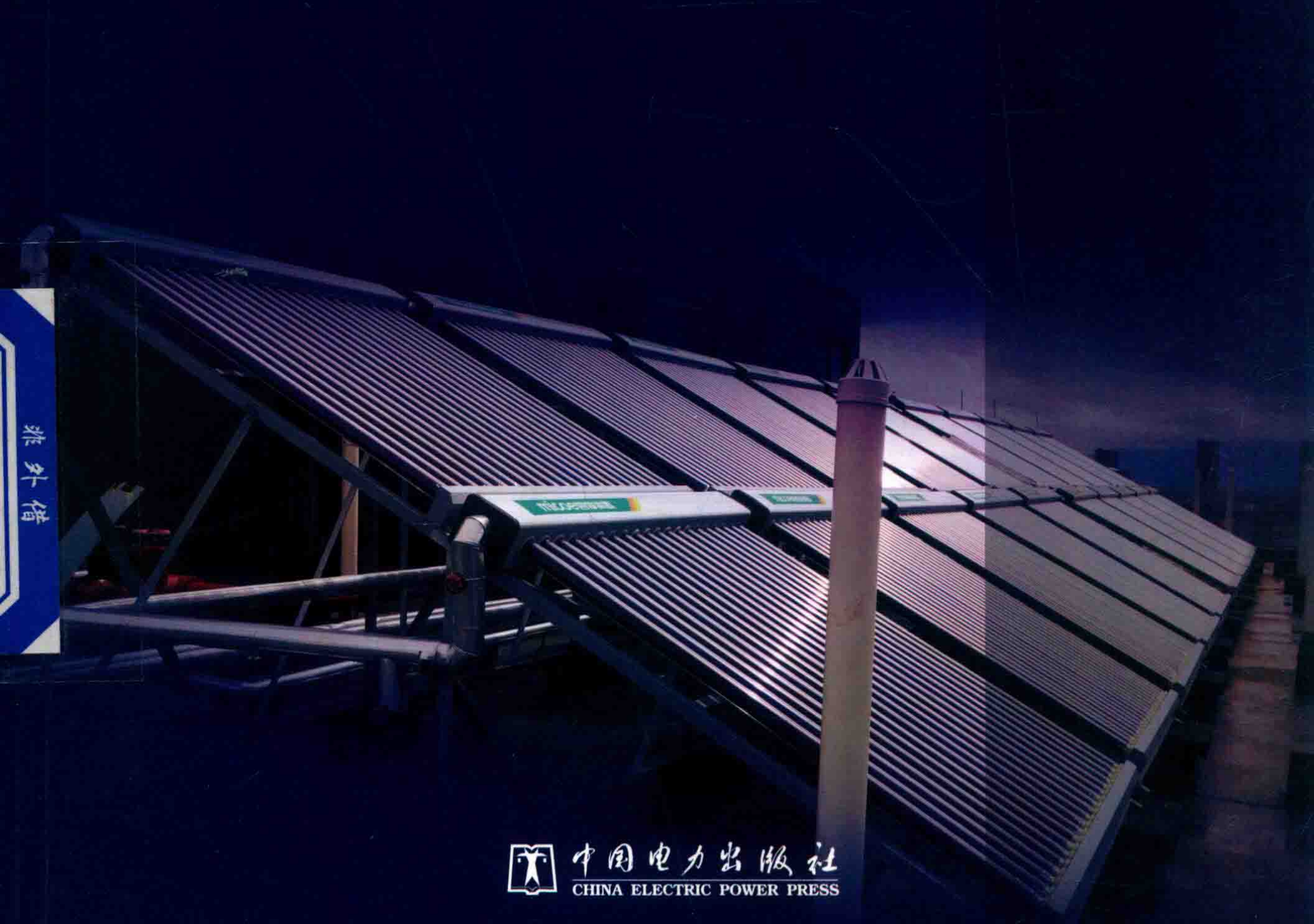
太阳能热水与地源热泵技术在建筑节能中的应用与优化

巩学梅　著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



太阳能热水与地源热泵技术在建筑节能中的应用与优化

中国电力出版社官方微信

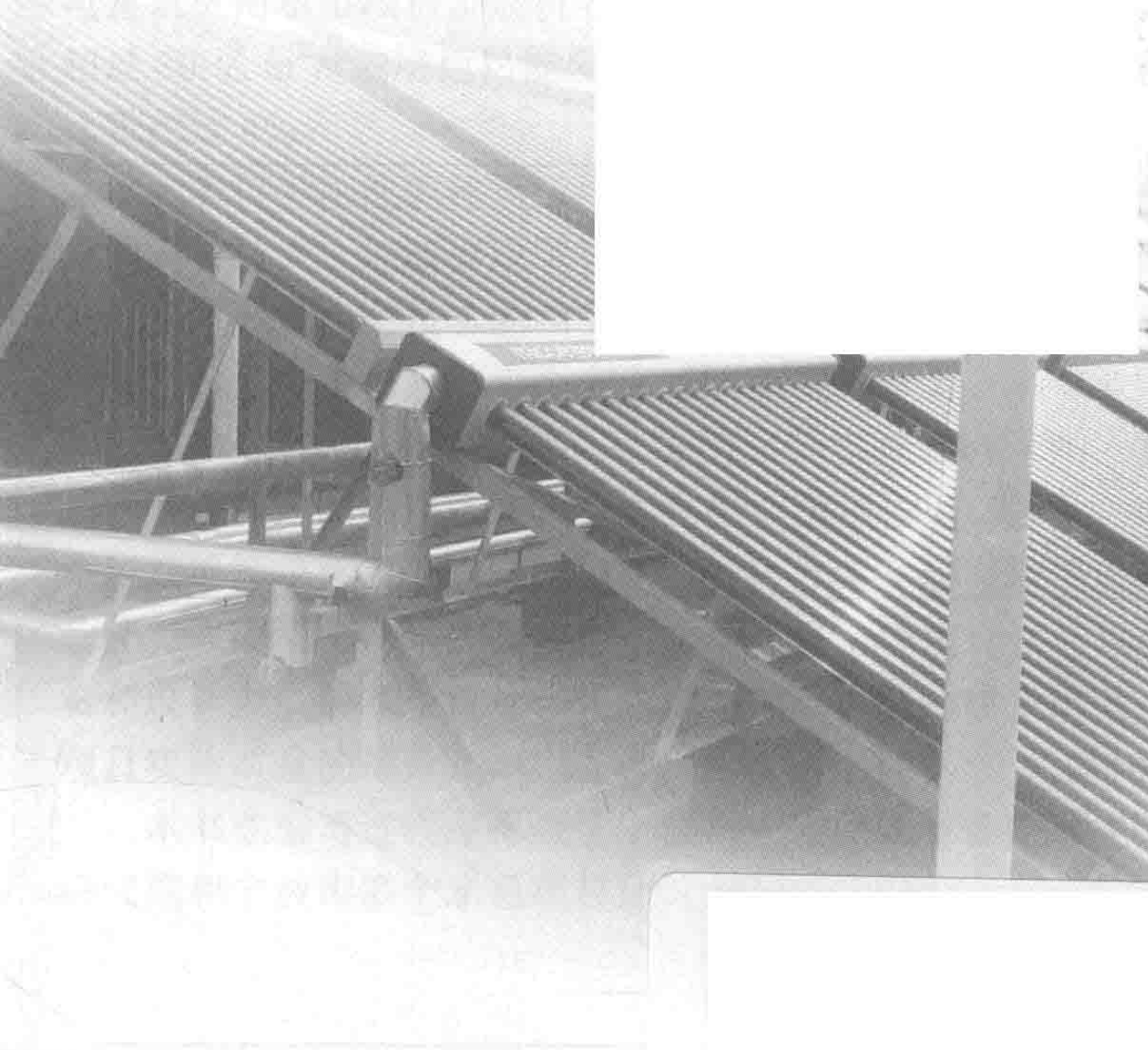
ISBN 978-7-5198-2223-1

9 787519 822231 >

定价：48.00 元

太阳能热水与地源热泵技术在建筑节能中的应用与优化

巩学梅　著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共有 6 章，主要内容包括常用太阳能热水系统与地源热泵系统介绍、基于 TRNSYS 的太阳能热水系统优化基础知识、太阳能热水建筑应用系统优化案例解析、基于 TRNSYS 的地源热泵系统节能优化基础知识、地源热泵建筑应用系统优化案例解析。

本书紧扣太阳能热水和地源热泵技术在示范项目建设中暴露的基本问题，针对现有从业人员的基本现状，从两类节能新技术的工作原理、设计过程、优化思路和模拟计算优化工具四个方面进行系统描述，并结合项目案例说明优化过程及效果。便于读者根据本书的介绍，在后续的两类技术的建筑应用中借鉴使用，提高太阳能热水和地源热泵系统的设计质量和应用效果。

本书可作为“太阳能热水技术及地源热泵技术建筑应用”从业人员的参考书和工具书，还可作为高等院校建筑环境与能源应用工程专业研究生或本科生的节能类课程、学科前沿类课程、模拟软件类课程教材。

图书在版编目（CIP）数据

太阳能热水与地源热泵技术在建筑节能中的应用与优化 / 巩学梅著. —北京：中国电力出版社，2018.6

ISBN 978-7-5198-2223-1

Ⅰ. ①太… Ⅱ. ①巩… Ⅲ. ①太阳能水加热器－热水供应系统－应用－建筑－节能②水源热泵－热水供应系统－应用－建筑－节能 Ⅳ. ①TU111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 142887 号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：孙　静（010-63412542）
责任校对：黄　蓓　常燕昆
装帧设计：郝晓燕
责任印制：钱兴根

印　　刷：三河市百盛印装有限公司
版　　次：2018 年 6 月第一版
印　　次：2018 年 6 月北京第一次印刷
开　　本：787 毫米×1092 毫米　16 开本
印　　张：10.5（含 1 插页）
字　　数：244 千字
定　　价：48.00 元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

前　言

近年来我国能源消费量不断攀升，建筑能耗的快速增长是原因之一。结合统计数据来看，我国建筑能源消耗十年来增长了近 1 倍。从中外建筑能耗对比来看，如果参照发达国家发展水平，未来我国建筑能耗还将成倍增长，这与节能技术在建筑领域的合理应用都息息相关。

面对中国建筑节能的严峻形势，2012 年 5 月，住房和城乡建设部颁布了《“十二五”建筑节能专项规划》（建科〔2012〕72 号），建筑节能工作的推动受到国家层面的重视。2017 年 3 月，住房和城乡建设部颁布了《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》（建科〔2017〕53 号），可再生能源建筑应用贯穿始终，成为建筑节能的重要发展方向。

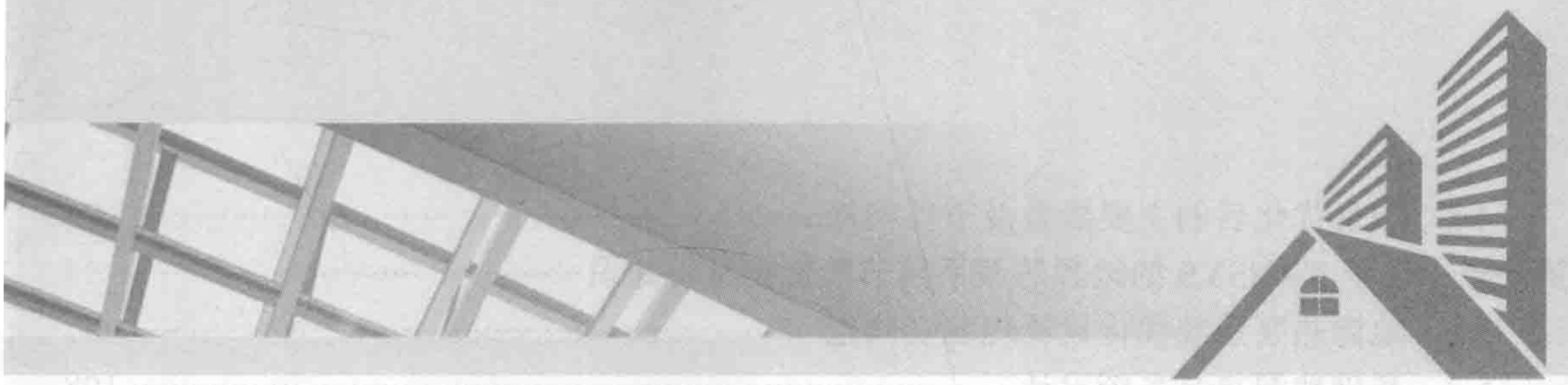
“十二五”期间，我国可再生能源建筑应用规模持续扩大，期间共确定 46 个可再生能源建筑应用示范市、100 个示范县和 8 个太阳能综合利用省级示范，实施 398 个太阳能光电建筑应用示范项目，装机容量 683MW。截至 2015 年底，全国城镇太阳能光热应用面积超过 30 亿 m^2，浅层地热能应用面积超过 5 亿 m^2，可再生能源替代民用建筑常规能源消耗比重超过 4%。

随着可再生能源建筑应用示范项目的建设推广，太阳能热水和地源热泵作为应用最普遍的两种技术，逐渐出现了设备选型、控制策略、运行优化等一系列问题，其原因是太阳能热水与地源热泵技术的相关标准、规范不够完善，设计人员不够专业，相关领域的科学研究与技术应用相脱节等众多因素。而编者作为一名专业从业人员，深知针对太阳能热水和地源热泵技术的研究众多，但是许多研究成果并未纳入相关标准、规范，没有对太阳能热水系统和地源热泵系统设计人员起到指导作用。因此，本书将编者所接触的太阳能热水系统及地源热泵系统存在的问题、解决方案及研究成果进行梳理，重点介绍利用 TRNSYS 软件对太阳能热水系统和复合式地源热泵系统进行设计优化的方法，旨在推进相关研究人员和设计人员的系统设计优化意识，提高系统的建设能效，促进我国可再生能源建筑应用项目实施质量的提升。

本书在编写过程中得到了宁波市土木建筑学会暖通空调学术委员会、宁波市建筑设计研究院和宁波市多个示范项目团队的帮助，编者在此表示衷心感谢！

编　者

2018 年 6 月



目　录

前言

第 1 章　概述 …… 1

1.1　建筑节能的意义 …… 1

1.2　可再生能源建筑应用的主要形式 …… 3

1.3　太阳能热水系统的建筑应用现状及存在的问题 …… 5

1.4　地源热泵系统的建筑应用现状及存在的问题 …… 7

1.5　本书的编写说明 …… 11

第 2 章　常用太阳能热水系统与地源热泵系统介绍 …… 12

2.1　太阳能热水系统 …… 12

2.2　太阳能热水系统分类 …… 19

2.3　规模化太阳能热水系统 …… 24

2.4　地源热泵系统 …… 29

2.5　地埋管地源热泵系统 …… 30

2.6　地表水源热泵系统 …… 31

2.7　地下水源热泵系统 …… 31

2.8　复合式地埋管地源热泵系统 …… 32

第 3 章　基于 TRNSYS 的太阳能热水系统优化基础知识 …… 35

3.1　太阳能热水系统设计问题及优化需求 …… 35

3.2　基础太阳能热水系统组成 …… 36

3.3　太阳能热水系统的评价指标 …… 38

3.4　太阳能热水系统主要部件能耗模型 …… 43

3.5　TRNSYS 软件的太阳能热水系统模拟功能及模块介绍 …… 55

3.6　基础太阳能热水系统 TRNSYS 建模过程 …… 57

3.7　运行 TRNSYS 模型进行优化计算 …… 72

第 4 章　太阳能热水建筑应用系统优化案例解析 …… 73

4.1　太阳能热水系统项目案例概况 …… 73

4.2　项目案例设计及优化说明 …… 73

4.3　基于项目案例的 TRNSYS 建模过程 …… 81

4.4　项目设计参数的优化计算结果及分析 …… 83

4.5 项目优化后的主要参数及节能指标 …… 94
第 5 章 基于 TRNSYS 的地源热泵系统节能优化基础知识 …… 97
5.1 地源热泵系统优化设计现状及问题 …… 97
5.2 基础地源热泵系统设计 …… 108
5.3 地源热泵系统的评价指标 …… 111
5.4 地源热泵系统主要部件能耗模型 …… 115
5.5 TRNSYS 软件的地源热泵系统模拟功能及模块介绍 …… 124
5.6 基础地源热泵系统 TRNSYS 建模过程 …… 126
第 6 章 地源热泵建筑应用系统优化案例解析 …… 134
6.1 地源热泵复合系统项目案例概况 …… 134
6.2 项目案例优化设计过程 …… 134
6.3 基于项目案例的 TRNSYS 建模说明 …… 140
6.4 项目设计参数的优化计算结果及分析 …… 144
6.5 项目优化前后的主要参数及节能指标比较分析 …… 155

参考文献 …… 159

第1章 概　　述

1.1 建筑节能的意义

随着人口的不断增长以及经济的快速发展，全球能源需求不断增加，相应地 CO_2 排放量也逐步攀升。美国能源信息署（EIA）的数据显示（见图 1-1），在 1990—2010 年，全球一次能源消费量从 1990 年的 8719.79Mtce 跃升至 2010 年的 12865.89Mtce，年均增速达到 1.96%；CO_2 排放量从 1990 年的 215.23 亿 t 增至 2010 年的 315.02 亿 t，年均增速为 1.92%。此外，根据国际能源署（IEA）的预测，全球能源需求增长趋势将持续到 2035 年，且在 2011 年的基础上，2035 年的能源需求增速将超过 30%，与能源相关的 CO_2 排放增速将达到 20%。能源紧缺及碳减排压力日益成为制约各国可持续发展的重要因素。

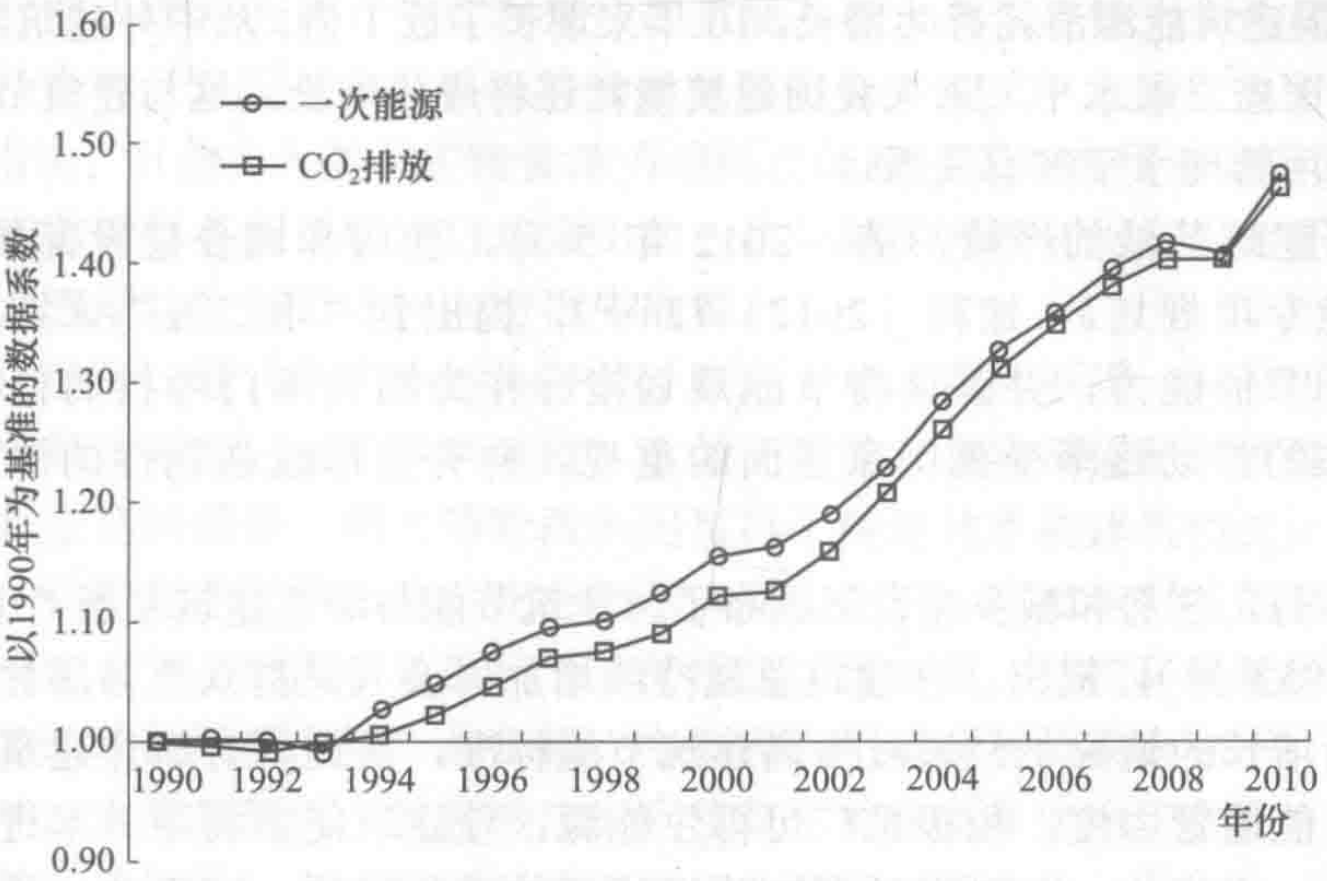


图 1-1　全球一次能源消费及 CO_2 排放

从行业构成来看，建筑用能占一次能源消耗的 20%～40%，在某些发达地区甚至高达 45%。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）在其第四次评估报告（2007）中指出，到 2030 年，全球建筑领域可形成每年 60 亿 t CO_2 当量的减排潜力，在所有部门中减排潜力最高（见图 1-2）。建筑节能研究是未来解决全球能源困境、达到 CO_2 减排目标的重要途径。面对气候变化带来的全球性影响，中国作为一个负责任的大国，坚持“共同但有区别的责任”原则，一直积极承担减少碳排放的责任。在 2009 年的哥本哈根世界气候大会上，

中国政府提出了“4045”节能减排目标，即到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%～45%，并制定相应的国内统计、监测、考核办法加以落实。

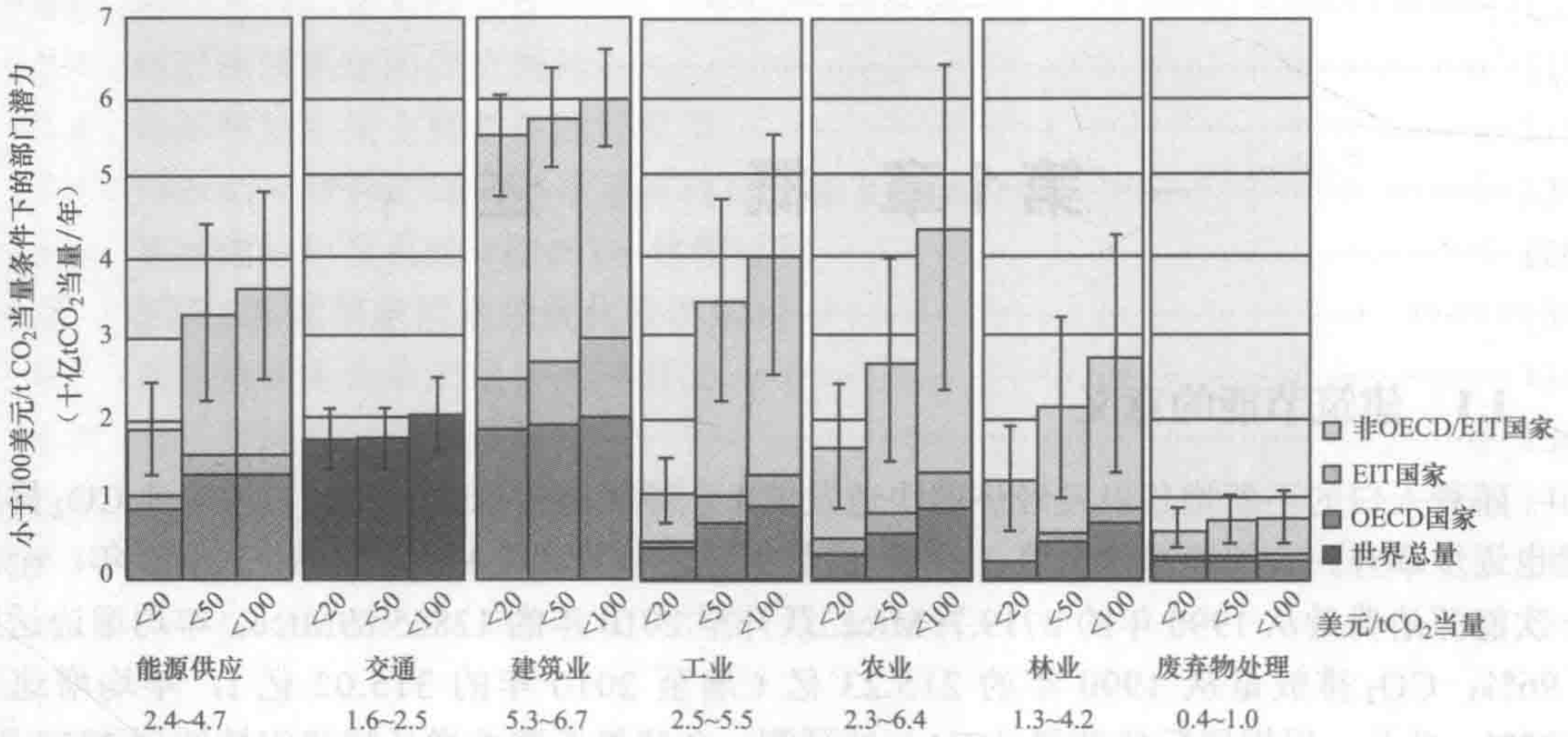


图 1-2　2030 年各行业碳减排成本及潜力预测

近年来我国能源消费量不断攀升，建筑能耗快速的增长是其中重要的原因。结合统计数据来看，我国建筑能源消耗持续增长，10 年来增长了近 1 倍。从中外建筑能耗对比来看，如果参照发达国家发展水平，未来我国建筑能耗还将成倍增长，这与建筑节能技术的应用以及建筑的使用管理水平都有关系。

面对中国建筑节能的严峻形势，2012 年 5 月，住房和城乡建设部颁布了《“十二五”建筑节能专项规划》（建科〔2012〕72 号），提出到“十二五”末期，建筑节能新增 1.16 亿 tce 节能能力，并强调将节能规划指标作为相关部门考核的依据。这意味着建筑节能工作的推动逐渐受到国家层面的重视，并有望形成强制性的法律规定，进一步贯彻落实。

2017 年 3 月，住房和城乡建设部颁布了《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》（建科〔2017〕53 号），提出：在建筑总量持续增加以及人民群众改善居住舒适度需求、用能需求不断增长的情况下，通过提高建筑节能标准，实施既有居住建筑节能改造，加大公共建筑节能监管力度，积极推广可再生能源，使建筑能源利用效率进一步提升，能源消费结构进一步优化，可以有效遏制建筑能耗的增长趋势，实现北方地区城镇民用建筑采暖能耗强度和公共建筑能耗强度稳步下降，预计到“十三五”末期，可实现约 1 亿 t 标准煤的节能，将对完成全社会节能目标做出重要贡献。同时明确了“坚持突出重点”的原则，针对建筑节能与绿色建筑发展薄弱环节和滞后领域，采取有力措施持续推进，务求在建筑整体及门窗等关键部位节能标准提升、高性能绿色建筑发展、既有建筑节能及舒适度改善、可再生能源建筑应用等重点领域实现突破。确立了“十三五”时期建筑节能与绿色建筑发展的总体目标：建筑节能标准加快提升，城镇新建建筑中绿色建筑推广比例大幅提高，既有建筑节能改造有序推进，可再生能源建筑应用规模逐步扩大，农

村建筑节能实现新突破，使我国建筑总体能耗强度持续下降，建筑能源消费结构逐步改善，建筑领域绿色发展水平明显提高。具体目标是：到2020年，城镇新建建筑能效水平比2015年提升20%，部分地区及建筑门窗等关键部位建筑节能标准达到或接近国际现阶段先进水平，城镇新建建筑中绿色建筑面积比重超过50%，绿色建材应用比重超过40%，完成既有居住建筑节能改造面积5亿 m^2 以上，公共建筑节能改造1亿 m^2，全国城镇既有居住建筑中节能建筑所占比例超过60%，城镇可再生能源替代民用建筑常规能源消耗比重超过6%，经济发达地区及重点发展区域农村建筑节能取得突破，采用节能措施比例超过10%。

从我国《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》看，建筑节能的任务仍然很重，而且，可再生能源建筑应用贯串于《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》的全文，成为建筑节能的重要发展方向。

1.2 可再生能源建筑应用的主要形式

1.2.1 可再生能源建筑应用的背景及主要种类

在当前条件下，建设更为健康高效、生态、可持续的建筑已经成为不可阻挡的潮流，可再生能源建筑应用已经受到设计师、建筑专家的肯定，在建设人们所需要的舒适、耐用、健康、经济家园的同时，可以做到使用资源减少，对环境的不利影响降低，发展潜力巨大。也就是说，可再生能源建筑技术的推广应用，是人类持续安居乐业的内在需求。能源是经济发展的血液，是人类社会赖以生存和进步的重要基础，其供应能力和结构协调状况直接影响到经济、社会的长足发展，世界可持续性能源协会（ISEO）主席、执行秘书长 Gustav R·Grob 先生指出：目前，人类对矿物资源的消耗已经超过了现有预测储量的中期点的值。在此背景下，当前世界各国为解决日益突出的一次性能源开发利用与生态环境的矛盾，实现可持续发展，逐渐将发展诉求转向可再生能源。

所谓可再生能源，通常是指不污染环境，取之不尽、用之不竭，并且可以循环再利用的能源，主要包括太阳能、地热能、风能、水能、氢能、生物质能和潮汐能等。可再生能源建筑应用就是在建筑设计、施工等阶段利用可再生能源技术的建筑模式。它以“遵循可持续发展原则，体现绿色平衡理念，充分展示人文与建筑、环境与科技的和谐统一，实现建筑选址规划合理、资源利用高效循环、节能措施综合有效、建筑环境健康舒适、废物排放减量无害、建筑功能灵活多样”为目标。主要可再生能源种类简介如下。

（1）太阳能。太阳能既可以被直接应用到建筑物的加热和照明工作中，还能够用来发电和制冷供暖等，所以被广泛地应用到商业和工业及新行业之中。

（2）风能。风能指的是空气在流动过程中的负载能量，风能的大小受到空气密度及风速的影响。现如今，风能主要被应用于风力发电。

（3）水能。空气的流动和太阳的热量会导致水被蒸发，形成水蒸气，当水蒸气进入到大气中时，就会形成雨和雪；当大气层中的雨雪降落到地面时，就会出现河流和湖泊；而河流湖泊中的水在流动的过程中会产生一定的能量，这些能量就是水能，其主要是以水利发电的形式被人类应用的。

（4）地热能。地热能主要是由地球内部热量所组成的。在使用该能源的过程中，其能

够起到辅助发电或者是在建筑内部制冷供暖等方面的作用。

（5）氢能。氢能是氢在化学变化过程中释放的能量。氢能是氢的化学能，氢在地球上主要以化合态的形式出现，是宇宙中分布最广泛的物质，它构成了宇宙质量的75%，属于二次能源。氢能的主要优点有：燃烧热值高，燃烧同等质量的氢产生的热量，约为汽油的3倍，酒精的3.9倍，焦炭的4.5倍。燃烧的产物是水，是世界上最干净的能源。资源丰富，氢气可以由水制取，而水是地球上最为丰富的资源，演绎了自然物质循环利用、持续发展的经典过程。

（6）生物质能。生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽、用之不竭，是一种可再生能源，同时也是唯一一种可再生的碳源。生物质能的原始能量来源于太阳，所以从广义上讲，生物质能是太阳能的一种表现形式。生物质能蕴藏在植物、动物和微生物等可以生长的有机物中，通常包括木材及森林废弃物、农业废弃物、水生植物、油料植物、城市和工业有机废弃物、动物粪便等。地球上的生物质能资源较为丰富，而且，每年经光合作用产生的物质有1730亿t，其中蕴含的能量相当于全世界能源消耗总量的10～20倍，但利用率不到3%。因此，很多国家都在积极研究和开发利用生物质能。

（7）潮汐能。潮汐能是海水周期性涨落运动中所具有的能量。其水位差表现为势能，其潮流的速度表现为动能。这两种能量都可以利用，是一种可再生能源。由于在海水的各种运动中潮汐最守信，最具规律性，又涨落于岸边，也最早为人们所认识和利用，在各种海洋能的利用中，潮汐能的利用是最成熟的。

1.2.2 国外可再生能源在建筑应用的主要种类及现状

在国际上，发达国家在再生能源建筑应用方面的研究及应用起步很早，以欧盟为例说明国外建筑应用可再生能源的主要种类及现状。

在2010年修订的《欧盟建筑能效指令（EPBD）》的“术语”一章中将“可再生能源”定义为“来自非化石燃料的可再生的能源，包括：风能、太阳能、气热能、地热能、水热和海洋能、水电能、生物质能、填埋气能、污水处理厂气体和沼气能”。

在欧盟各国近几十年的实践中，建筑利用可再生能源主要包括：①供热：生物质能、太阳能、地热能及气热能等；②制冷：地源热泵和空气源热泵（地热能和气热能）等；③供电：光伏（太阳能）、风能、生物质能、水电能；④供热和供电结合：热电联产或微型热电联产；⑤沼气燃料：利用可再生废弃物产生沼气为建筑的取暖、炊事、热水等提供燃料。需要指出的是，热电联产从物理意义上不包含在可再生能源技术的范畴内，但在降低建筑对非可再生一次能源的消耗量方面，其作用与可再生能源技术等同，因此列为可再生能源应用技术。

近年来，以德国为代表的欧盟成员国不断加强对可再生能源的推广应用，并取得显著效果。2010年，德国风能、太阳能等可再生能源占电能消耗的比重已经达到16.9%。最新数据显示，2011年上半年，德国有超过20%的电力来自可再生能源。德国可再生能源发电的目标是：到2020年，电力供应的39%来自可再生能源。

德国建筑领域的可再生能源法律是《可再生能源取暖法》，该法律是2009年1月1日

生效的。该法律要达到的具体目标是 2020 年使德国可再生能源达到终端用于取暖消耗的 14%（包括房间取暖、制冷、工艺加热及热水）。该法规定使用面积为 $50m^2$ 以上的新建房屋的拥有者有使用可再生能源的义务；使用不同新能源占供暖能量需求的最低比例：如选择太阳能，则新房屋供暖能量至少应有 15%来源于太阳能；如选择生物质能，则因其状态不同最低比例为 30%～50%；如选择地热或环境热量（从空气或水中提取的热量），则比例至少为 50%。房屋拥有者不限于选择一种单一的能源方式，可以组合不同的新能源方式来满足法律关于使用义务的要求。

1.2.3 我国可再生能源的建筑应用主要种类及现状

在我国，可再生能源建筑应用的全面推进起步于 2005 年颁布的《中华人民共和国可再生能源法》。《中华人民共和国可再生能源法》指出：适用的可再生能源指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源；水力发电部分适用；对于通过低效率炉灶直接燃烧方式利用秸秆、薪柴、粪便等，不适用。我国“十二五”可再生能源建筑应用推广目标中提及的重点发展建筑用可再生能源种类为：太阳能、浅层地能、生物质能。我国 2013 年颁布实施的工程建设国家标准《可再生能源建筑应用工程评价标准》的《术语》一章中，将“可再生能源建筑应用工程”定义为“在建筑热水、采暖、空调和供电等系统中，采用太阳能、地热能等可再生能源系统提供全部或部分建筑用能的建筑工程”。

可见，我国目前已经实施的可再生能源建筑应用项目以太阳能和地热能的利用为主；太阳能、浅层地热能和生物质能是建筑领域应用可再生能源的重点方向。

“十二五”期间，我国可再生能源建筑应用规模持续扩大。“十二五”时期共确定 46 个可再生能源建筑应用示范市、100 个示范县和 8 个太阳能综合利用省级示范，实施 398 个太阳能光电建筑应用示范项目，装机容量 683MW。截至 2015 年底，全国城镇太阳能光热应用面积超过 30 亿 m^2，浅层地热能应用面积超过 5 亿 m^2，可再生能源替代民用建筑常规能源消耗比重超过 4%。

“十三五”期间，我国可再生能源发展的具体目标是：到 2020 年，城镇可再生能源替代民用建筑常规能源消耗比重超过 6%。

由我国可再生能源的发展现状可以看出，目前在我国太阳能和地热能依然是可再生能源建筑应用的主要形式。太阳能的利用主要是太阳能热水系统的热利用和太阳能光伏发电，其中又以太阳能热水系统为主；地热能的利用主要是地源热泵系统，主要用于空调供冷供热和热水。

1.3 太阳能热水系统的建筑应用现状及存在的问题

1.3.1 国内外太阳能热水系统的应用量

在欧美等发达国家，太阳能热水技术起步早、发展快、用途范围很广。德国现已建成 10 万余套太阳能房屋，这些房屋采用短期储热和季节性储热。房屋下面有钢筋混凝土水池，在太阳辐射量丰富时将收集到的太阳能储存在水池中，在太阳能辐射量不足时将水池中热量取出提供给用户。美国亚特兰大 1996 年奥运会游泳馆的池水加热系统，在屋面铺设了 $10000ft^2$ 的集热器，能保持水温变化在 1℃以内。目前，太阳能热水系统已经成为一种普及

型可再生能源建筑应用技术。

在我国，太阳能热水器行业是我国第一个实现商业化的可再生能源行业，同时，太阳能热水器也是我国太阳能行业最为成熟的产品。自 1998 年始，我国太阳能热水器总产量、保有量呈现逐年升高的态势，其中总产量年均增长率达到 25%以上，保有量年均增长率达到 20%以上，中国已成为世界上太阳能热利用的第一生产大国和应用大国。

2005 年以前，我国太阳能热水器增长率缓慢，2006 年以后，受农村市场刚性需求拉动，整个国内太阳能热水器保持着旺盛的增长势头。2012 年前后，受国际金融危机和国内房地产调控等因素影响，中国太阳能热利用产业发展放缓，但由于太阳能下乡、节能惠民工程政策实施及建筑节能的需要，太阳能热利用产业总体稳步发展。2012 年太阳能热利用年产量达到了 6200 万 m^2，较上年增长 7.6%，销售额突破 1000 亿元大关。太阳能集热系统保有量 2014 年达到 4.14 亿 m^2，比上年增长 10.4%，提前完成“十二五”发展目标（见表 1-1）。

从表 1-1 可以看出，太阳能集热器及系统产量 2011 年同比增长 17.6%，2012 年下降到 7.6%，2013 年继续下降到 2.6%，2014 年出现负增长，且降幅较大，达到–17.6%。出现增速放缓或下降主要原因是经济增速放缓和市场容量增加有限。

表 1-1　　1998—2014 年太阳能集热系统年生产量、保有量和增长率

年份	总产量		比上年增长（%）	保有量		比上年增长（%）
	（万 m^2）	（MW）		（万 m^2）	（MW）	
1998	350	2450	—	1500	10500	—
1999	500	3500	42.86	2000	14000	33.33
2000	640	4480	28	2600	18200	30
2001	820	5740	28.12	3200	22400	23.08
2002	1000	7000	22	4000	28000	25
2003	1200	8400	20	5000	35000	25
2004	1350	9450	12.5	6200	43400	24
2005	1500	10500	11.10	7500	52500	20.97
2006	1800	12600	20	9000	63000	20
2007	2300	16100	27.78	10800	75600	20
2008	3100	21700	34.78	12500	87500	15.74
2009	4200	29400	35.48	15000	105000	20.0
2010	4900	34300	16.7	22170	155190	23.8
2011	5760	40320	17.6	27110	189770	22.3
2012	6200	43400	7.6	32310	226170	19.2
2013	6360	44520	2.6	37470	262290	16.0
2014	5240	36680	–17.6	41360	289520	10.4

随着我国城镇化建设加快，更多农村人口向城市转移，同时由于城镇人口能源消耗一

直占据我国能源消耗相当大比重，在“十一五”和“十二五”期间越来越多的城市和地区都实施太阳能强制安装政策。2009 年，我国开展了全国可再生能源建筑应用示范市建设，太阳能热水作为可再生能源建筑应用的主要技术之一，太阳能热水系统建筑一体化的大规模应用得到推广，并且推广力度越来越大，推广的楼层也越来越高，继 2013 年武汉出台 18 层以上的建筑太阳能热水系统须达到 30%的规定后，2014 年 1 月山东省济南市则要求百米以下新建建筑必须安装太阳能热水系统。太阳能热水器成为唯一被列入政府强制安装的新能源产品，对行业发展起到了积极推动作用。

1.3.2 太阳能热水系统应用存在的问题

但是，随着太阳能热水系统的大规模应用的推进，一些太阳能热水项目在建设完成验收过程中或投入使用后出现了以下问题。

1. 系统形式选择及设计合理性问题

对我国可再生能源示范市第一批竣工验收项目的调查发现，许多大规模应用系统因考虑到后期维护使用及计量的独立性和便利性，采用了集中集热分户储热的间接换热太阳能热水系统，不仅降低了集热效率，而且由于户内水箱设置位置及辅助加热问题，导致出现了许多用户拆除户内水箱，自行更换燃气热水器或单体式太阳能热水系统的现象。比如，编者曾接触一个商业住宅项目，设计人员由于受到建筑结构等因素的影响，以及考虑到户主对于水箱的安装合理美观的要求，在设计计算所需 105L 的水箱情况下，配置 100L 的水箱，导致即便是阳光十分好的时候，100L 水箱也不能满足家庭基本洗浴的日常需要。而这种情况下，电加热不会自动开启，导致洗浴热水不足；临时启动电加热耗时较长，给用户的使用体验带来较大的影响。因此，大批用户就拆掉了分户储热的水箱，自行更换了燃气热水器，导致了集中安装大规模集热器的闲置浪费。

2. 集热器安装方位角和倾角的优化问题

尽管集热器安装方位角和倾角对太阳能热水系统的集热效率影响较大，但是在对我国可再生能源示范市第一批太阳能热水系统竣工验收项目的调查中发现，极少有项目在设计中体现对方位角和倾角的描述。导致项目安装比较随意，太阳能热水系统的集热效果难以达到最理想状态。

1.4 地源热泵系统的建筑应用现状及存在的问题

1.4.1 地源热泵系统的应用量

地热能是一种清洁可再生能源，凭借其节能、环保、可靠等优点，越来越受到人们的关注和青睐。地源热泵系统正是利用地热能的一种新技术，以地表浅层作为低位冷热源，通过输入少量的高位能量，实现低位热能向高位热能的转移。在我国经济持续稳定发展，采暖空调已从“消费品”转变为“必需品”的背景下，研究低能耗可持续发展的暖通空调技术对促进节能减排具有重要的意义。因此，地源热泵自 20 世纪初问世以来，因其节能性及环保性而备受世界各国青睐，呈现出良好的发展势头，近些年来成为了建筑能源研究领域的一个热点。2005 年，我国住建部将采用地热能的地源热泵技术列为建筑业十项新技术之一，有效推动了地源热泵技术在我国的普及和发展。

由于地埋管地源热泵具有高效节能、绿色环保、运行安全稳定、运行费用较低等诸多

优点，因而在全世界范围得到了广泛的应用。据统计，在美国和中国，地源热泵均被广泛应用于各种气候区和各类建筑。在近 10 年里，中国地源热泵的建筑面积应用量增加了 4 亿 m^2，美国现有地源热泵建筑应用面积 1.99 亿 m^2。

根据国际数据，在 1995—2015 的 20 年内，世界地源热泵应用项目均以超过 20%年增长率的速度在发展。表 1-2 是世界地源热泵的发展增长数据，图 1-3 和图 1-4 分别给出了地源热泵装机容量和利用地热能的变化趋势图。其中，在 1997—2007 的 10 年内，大约有 30 个国家的地埋管地源热泵年增长率达到了 10%，到 2007 年底，已有超过 280 家公司和机构从事地埋管地源热泵的制造与建设，地埋管地源热泵工程数量已超过 5000 个，占地面积已有 8000 多万 m^2。在中国，自 1998 年起，开始了大量的地埋管地源热泵实际工程建设，尤其自 2005 年国务院出台了《中华人民共和国可再生能源法》以来，地埋管地源热泵的市场容量每年都能保持 10%以上的增长速度，2007 年地埋管地源热泵的市场容量首次突破 10 亿元，2009 年地埋管地源热泵的市场容量约为 17 亿元人民币，与 2008 年相比，同比增长 13%。表 1-3 给出我国地源热泵装机容量及地热能利用统计表，从装机容量上看，2005—2015 年，我国地源热泵装机容量从 631MWt 增长到 11781MWt，增长了 17.7 倍。

表 1-2　　世界地源热泵的发展增长数据

年份	1995	2000	2005	2010	2015
装机容量（MWt）	1854	5275	15384	33134	49898
年利用地热能（TJ/a）	14617	23750	87530	200149	325028

表 1-3　　我国地源热泵装机容量及地热能利用统计表

年份	1995	2000	2005	2010	2015
装机容量（MWt）	0.8	9.7	631	4250	11781
年利用地热能（TJ/a）	7	83	6569	29035	10031

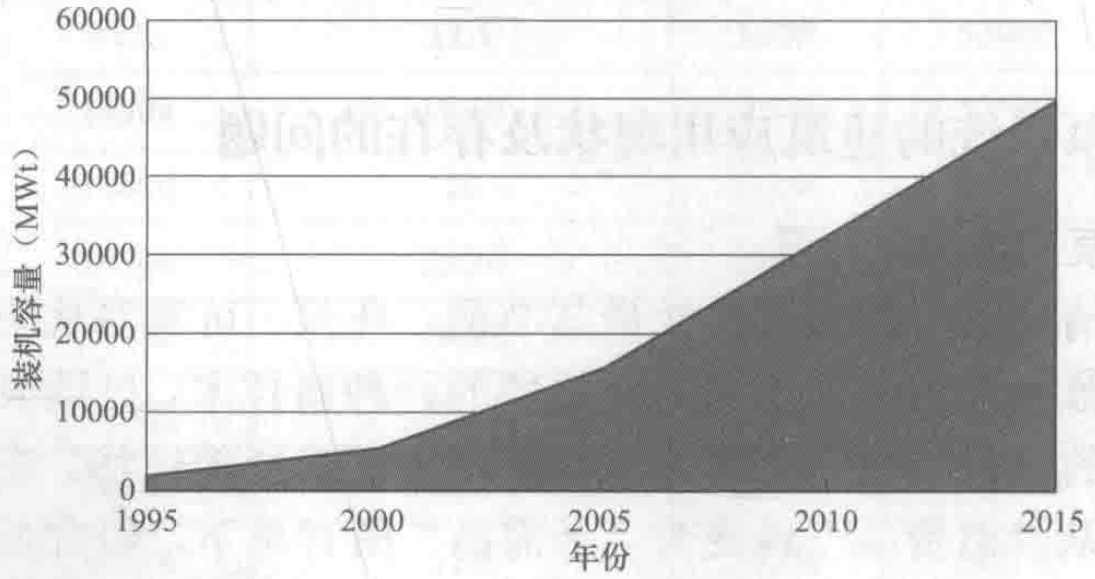


图 1-3　世界地源热泵装机容量变化趋势图

地源热泵系统按照其冷热源的形式不同可分为三类：地表水地源热泵系统、地下水地源热泵系统和地埋管地源热泵系统，其中地埋管地源热泵系统不仅有效利用了可再生能源，并且符合可持续发展的要求，对环境造成损害较少，是目前应用最广泛的一种系统。

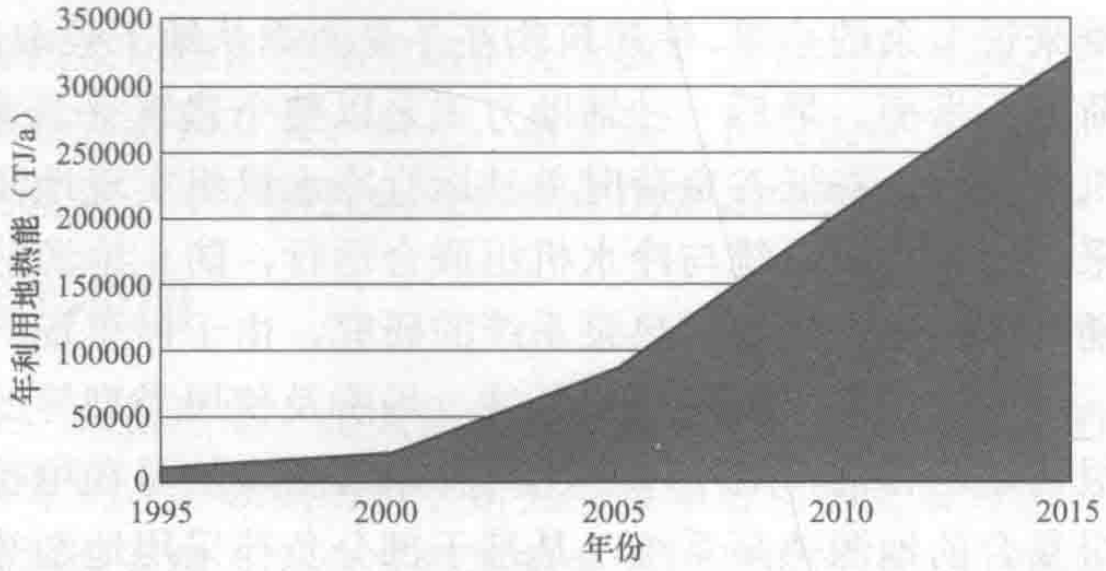


图 1-4 世界地源热泵利用地热能的变化趋势图

1.4.2 地源热泵系统应用存在的问题

在地源热泵技术被大力推广、装机容量迅速发展的背景下，地埋管地源热泵系统的增长速度最快、装机容量最大，但随着系统的建成投用和运行时间的延长，地埋管地源热泵系统开始暴露出一些问题。2010 年，Man 等的研究报告表明，在香港等热带地区，传统地源热泵长期运行，地埋管周围土壤平均温度大约为 23～41℃（温度过高造成制冷效率下降）。另外多篇文献也表明：地源热泵在使用过程中，由于土壤热积聚，造成换热失效，不能满足制冷或制热高峰负荷需求，导致高峰期制热或制冷效果不佳；尤其是几年连续运行后，由于没有解决好长期运行地热平衡问题，导致土壤温度有总体升高或者降低趋势，出现土壤换热量衰减过度，系统制冷或制热效果变差，甚至出现进水温度过高（低）致使热泵机组无法正常稳定运行甚至直接停机等问题。

这种情况在冷热负荷不平衡的地区均会存在，尤其是夏热冬冷地区和严寒地区更加显著，为了解决地源热泵的连续运行效率降低问题，国内外许多学者进行了间歇运行、变容量控制、复合式地源热泵系统等多方面的研究。其中，采用复合式地源热泵系统，是一种较为有效的方法，近年受到国内外高度关注。该方法夏季采用辅助散热措施、冬季采用辅助加热措施辅助地热能，经过在部分地区试用，取得了良好的应用效果。

1.4.3 复合式地源热泵系统的应用形式及存在问题

采用辅助散热或加热装置的地源热泵系统称为复合式地源热泵系统，由地源换热系统、热泵系统和辅助散热或加热系统三个部分组成。根据采用的辅助散热或吸热设备不同，辅助散热和吸热的复合式地源热泵系统类型有如下几种。

1. 辅助散热复合式地源热泵复合系统的类型

对于以夏季冷负荷为主的南方地区，辅助散热复合式地源热泵系统有：①冷却塔辅助散热系统；②水冷器辅助散热系统；③池塘或景观水辅助散热系统；④热水生产系统；⑤其他近地面换热器系统，如停车场、人行道、桥梁的除雪系统等；⑥冷水机组辅助散热。其中，前三种辅助散热系统是在夏季热泵机组运行过程中，当地下换热器不能满足冷却要求时，通过一定的控制策略适时地开启辅助散热系统，以达到设计要求，第二种如果设计为热回收系统，则辅助散热系统的综合能耗较高，但受到热水需求负荷的限制，导致使用受限。④、⑤两种辅助散热系统与前三种的运行原理不同，它们是通过利用生产热水或在冬季消融停车场、人行道、桥梁等的积雪，来增加供热系统热泵机组的运行负荷，从

地下吸取相对于夏季来说多余的热量，使建筑物在冬夏两季从地下吸取和放出的热量相等，以消除土壤冷热负荷的不平衡。最后一种辅助方式是以整个建筑空调系统为对象，采用地源热泵系统与冷水机组复合，在低谷负荷时单独运行冷水机组实现地源热泵系统的间歇运行，在高峰负荷时采用地源热泵系统与冷水机组联合运行，防止地源热泵系统出力不足。

关于以上几种辅助散热复合式地源热泵系统的研究，由于停车场、人行道、桥梁除雪系统的利用能耗大，运行费用高，同时受到区域、场所及使用类型等的限制，因而在世界范围内的使用不是很普遍。目前，对于④、⑤两种系统更多的是在可行性方面的论证。最后一种采用冷水机组复合的地源热泵系统，是基于部分负荷采用地源热泵系统的原理提出的，严格意义上不属于复合式地源热泵系统，同时，相对于冷却塔辅助散热，该系统还需要增加冷水机组，初投资增加较大，只有在地埋管区域受到限制时才采用。

综上所述，大多的工程应用及研究仍集中在前三种辅助散热系统上，尤其是冷却塔辅助散热系统，因其便与实施和调控，受到行业的重视并得以广泛应用。

2. 辅助加热复合式地源热泵系统的类型

对于以冬季热负荷为主的北方地区，辅助加热复合式地源热泵系统有：①城市热网辅助加热系统；②太阳能辅助加热系统；③锅炉辅助加热系统。其中，城市热网一般直接用于北方采暖，而用作辅助热源来提升空调热水的温度，增加了换热次数和热量损失，并不节能。从节能和环保的角度考虑，宜采用太阳能辅助加热系统，其有多种运行方式：即太阳能集热器直接供热；太阳能热泵供热；太阳能蓄热槽直接供热；太阳能蓄热槽作为低位热源热泵供热；太阳能与地埋管地源热泵联合供热；地埋管地源热泵单独供热。对于北方地区来说，以上几种太阳能辅助加热系统的运行方式在一定程度上能够解决长期地热不平衡问题，但是受气候因素的影响较大，在供热时系统往往达不到预期效果，而且运行控制策略也比较复杂。而锅炉辅助加热系统的运行控制策略比较简单，而且运行效果较好，因此在北方地区解决长期地热不平衡问题最好的方法还是锅炉辅助加热复合式地源热泵系统。

3. 地源热泵复合系统应用存在的问题

尽管国内外关于复合式地源热泵系统的研究较多，从复合式地源热泵系统的可行性研究，复合式地源热泵系统地埋管换热器、辅助散热设备的设计方法研究，复合式地源热泵系统的控制策略研究与复合式地源热泵系统的性能与经济性分析等多方面均有研究。但是，与太阳能热水系统的建筑应用相似，研究成果并未纳入相关标准规范，没有对地源热泵系统设计人员起到指导作用，导致研究与应用脱节。编者对现存地源热泵竣工使用项目的调查发现，地埋管地源热泵在应用中存在的问题主要表现在以下几个方面。

（1）由于复合式地源热泵系统相对复杂，设计计算烦琐且缺少参考依据，许多设计人员在存在明显负荷不平衡的情况下未考虑地热平衡，致使使用过程中土壤温度单向波动大，造成系统运行效率降低，乃至不能使用，最后经过改造，夏季由冷却塔代替地埋管，并增加冬季供热设备，复地源热泵系统变为常规制冷空调和供热系统。

（2）复合式地源热泵系统的控制策略未考虑。复合式地源热泵系统的辅助散热或辅助加热设备投入运行的调控策略是复合式地源热泵系统发挥作用的关键。但是，很多设置了辅助加热或散热系统的复合式地源热泵系统，设计中并未体现地埋管与辅助设备的配合调控策略，导致辅助系统不能正常发挥作用，有些废弃闲置，有些与地埋管同时启停，造成能源浪费。