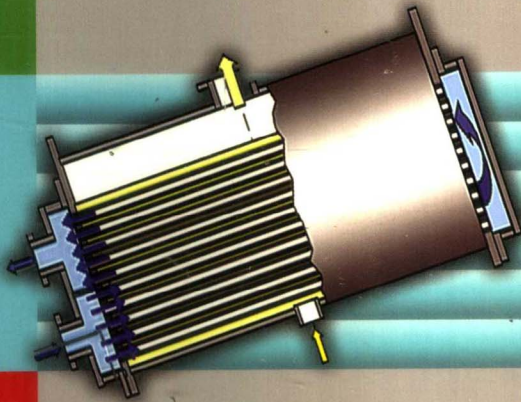


可再生能源建筑应用与建筑节能系列丛书

地源热泵技术与建筑节能应用

Design and Application of Ground Source Heat Pump System

赵 军 戴传山 主编



Design and Application of
Ground Source
Heat Pump System

中国建筑工业出版社

可再生能源建筑应用与建筑节能系列丛书

地源热泵技术与建筑节能应用

Design and Application of Ground Source Heat Pump System

赵 军 戴传山 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地源热泵技术与建筑节能应用/赵军, 戴传山主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007

(可再生能源建筑应用与建筑节能系列丛书)

ISBN 978-7-112-09475-2

I. 地... II. ①赵...②戴... III. 空气调节器-热泵-应用-建筑节能 IV. TU831.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 105400 号

可再生能源建筑应用与建筑节能系列丛书

地源热泵技术与建筑节能应用

赵军 戴传山 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/16 印张: 13 字数: 371 千字

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-09475-2

(16139)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书主要阐述地源热泵的基本原理、设计方法以及在我国建筑节能中的应用,内容包括地源热泵技术的概念、原理、热力学基础、工程设计、工程实例、环境监测等。本书不仅详细介绍了普通形式的地源热泵(埋地管、地下水、地表水系统),还介绍了广义形式的地源热泵,如城市污水源热泵、中高温水源热泵等内容。目的是通过介绍这项可再生清洁能源的热泵技术,使读者结合各地区资源优势,因地制宜地实现规模化应用,切实推动我国建筑节能工作。本书突出系统性与实用性的有机结合,尽量反映该技术的最新进展。

本书可供从事地源热泵技术相关专业工程技术人员进行技术研究和工程设计使用,也可供相关专业院校师生参考与自学之用

* * *

责任编辑:于莉 姚荣华 齐庆梅

责任设计:赵明霞

责任校对:王爽 孟楠

出版说明

为了实现国家“十一五”期间资源能耗要比“十五”末期下降20%的目标，增加能源供应，改善能源结构，保障能源安全，保护环境，实现经济社会的可持续发展，开发利用可再生能源必不可少。然而，目前我国在可再生能源的开发利用方面虽已取得了较大进步，但除水电、沼气和太阳能热水器外，其他可再生能源的发展却比较缓慢，可再生能源在建筑中的应用更是如此。要想真正实现建筑节能，可再生能源的应用势在必行。为此，我社拟陆续出版《可再生能源建筑应用和建筑节能系列丛书》。

本套系列丛书暂定为五分册：《地源热泵技术与建筑节能应用》、《太阳能建筑设计》、《污水再生利用技术》、《屋顶绿化技术与建筑节能应用》、《可再生能源建筑应用示范工程》。

本套系列丛书涵盖的专业面较广，内容比较全面，并有一定深度，组织了国内建筑节能领域的知名专家编写。主要可供建筑设计、房地产开发和施工、建设单位管理人员和工程技术人员，各可再生能源技术、产品与设备研发、生产单位相关人员参考。希望我们这套丛书的问世，能帮助读者解决工作中的疑难问题，掌握专业知识，推进可再生能源在建筑中的应用和建筑节能关键技术的实施。为此，我们热诚欢迎读者对书中不足之处来信批评指正，以便使本套丛书日臻完善。

中国建筑工业出版社

前 言

人们为了追求舒适的生存环境,使得建筑耗能不断增加,进入 21 世纪之后我国的建筑能耗增速在加快,目前已占社会总能耗的近 1/3。因此,如何合理地利用不同形式的能源,尤其是清洁的可再生能源,满足日益增长的建筑耗能需求,成为摆在人类面前亟待解决的关键课题。

尽管世界不同地区所处的气候条件各不相同,但是我们人类对舒适温度的要求却是相近的。值得庆幸的是,在我们人类所居住的地球上,除少数热带地区之外,符合舒适温度要求的地方就在我们脚下,即在浅层地层之内。只不过建造这种地下建筑,在很多地方并不现实,即使保证了温度,可以实现冬暖夏凉,但由于缺少自然阳光,通风困难,同样影响了人类生活的舒适度。虽然不能建造家居于地下,但是我们可以取其热(冬季)或冷(夏季)到地上,这就需要地源热泵节能新技术。

我们的目的已不再是精确地定位人体舒适温度的地层深度,而是如何寻找捷径实现最省能、最经济的地源热泵设计和运行方法。一些地方尽管不具有天然舒适的居住温度,但是采用地源热泵技术可以人为地制造出与周围空气温度相比更舒适的环境。因此,地下水可以用,附近的江、河、湖、海乃至池塘水可以用,城市的排放污水可以用,其他高温用能、耗电设备的排热以及地热尾水都可以用。鉴于此,本书比较详细地介绍了不同形式的地源热泵设计方法和应用实例。从节能观点出发,应优先选择和人体舒适温度接近的资源,但也不应排除利用温度较高的地热资源。因为当热(冷)源的温度偏离环境温度越远,其能量的品位或质量越高,这样的资源完全可以用于其他需要温度更高(低)的应用场合,地热资源的梯级利用就是基于这种思想。另外,地源热泵需要代价,即需要消耗电能或其他高品位能源,才能把热(冷)量传递出来,而消耗的高品位能源可能直接影响到项目的经济性。我们必须考虑地源热泵系统各个能流环节上热(或冷)量的输运特性,实现最优的地源热泵设计以及最低能耗的运行效果。因此,在有多种资源条件的地方,需要作技术、经济的可行性比较。

获得廉价、清洁、可再生、普遍存在的能源不仅是全世界的理想,更是人类共同追求的一个目标。随着 20 世纪后半期,尤其是后 30 年地源热泵技术的开发与完善,使得岩土体、地下水和地表水所包含的热能,成为可以利用的能源。该类能源不同于传统的地热能,但为了方便归类,我们仍称它为一种特殊的地热能——浅层地热能,它不仅包括浅层岩土体、地下水所包含的热能,而且还包括地表水甚至城市污水、工业废水、地热尾水。相对而言,浅层地热能应该属于满足以上四个条件的“新”能源。因此,作为利用该可再生清洁能源的热泵技术,理所当然值得人类给予特别的关注,并且因地制宜地大力推广。

本书内容共分 10 章,不仅详细介绍了普通形式的地源热泵(地理管、地下水、地表水),还介绍了广义形式的地源热泵,如污水源热泵、中高温水源热泵等内容。

本书各章节的编者依次为:

第 1 章 赵 军

第 2 章 马一太

第 3 章 郑秀华 戴传山

第 4 章 赵 军 朱 强

第 5 章 崔俊奎 李明朗

第6章 陈雁 李新国

第7章 戴传山

第8章 赵力

第9章 陈雁 崔俊奎

第10章 戴传山

全书由天津大学赵军教授、戴传山副教授主编，并统稿。中国地质大学郑秀华教授、天津市地质矿产勘察开发局李明朗教授级高级工程师参加了部分章节的编写工作。

在本书的编写过程中，大庆油田建设设计研究院杨伍林教授级高级工程师无私地提供了大量相关资料，天津大学的王洪利博士参与了第2章节内容的文稿编写、整理工作，在此深表感谢。

马一太教授在本书的编写过程中，除了负责编写部分章节外，还承担了全书文稿的审核工作，对其付出的大量心血和劳动，在此表示真诚的感谢！

同时，作者多年来在地源热泵研究方面得到了科技部高新技术司、建设部科技司、天津市科委和天津市建委项目上的支持，得到了天津大学热能工程系老一辈学术带头人、中国最早从事热泵研究的专家学者吕灿仁教授给予的指导和支持；此外，在作者将地源热泵科研成果向工程应用转化的过程中，得到了天津华夏建设股份有限公司王健总工程师、天津房屋鉴定设计院吕强总工程师给予的支持和协作，在此一并表示衷心的感谢！

由于时间所限，很多工程实践尚未总结进来，更受水平所限，书中错误之处在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时修订。

编者
2007年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 地源热泵技术的节能原理	3
1.3 地源热泵系统组成、分类与评述	7
1.4 地源热泵技术的发展历程与未来	11
第 2 章 制冷与热泵装置的理论基础	15
2.1 热力学基础	15
2.2 制冷剂和载冷剂	21
2.3 制冷压缩机运行与调节	29
2.4 水源热泵机组	40
第 3 章 土壤热特性与水文地质	52
3.1 地球结构、地质构造与地热	52
3.2 地球的热平衡与地温分布	53
3.3 土壤温度及其变化	55
3.4 地热资源的水文地质基础	58
3.5 中国地热资源	69
第 4 章 地埋管换热器的设计与施工	73
4.1 地埋管换热器类型	73
4.2 地埋管换热器设计	74
4.3 地埋管换热器施工	80
4.4 地埋管换热系统设计实例	87
第 5 章 水源热泵系统的设计	95
5.1 地下水源热泵系统的设计	95
5.2 地表水源热泵系统设计	106
5.3 污水源热泵系统的设计	109
5.4 海水源热泵系统的设计	114
第 6 章 地源热泵空调系统设计	120
6.1 基础资料	120
6.2 空调冷、热负荷	121
6.3 建筑物空调系统的设计	125
6.4 水环路热泵空调系统	129
6.5 地源热泵冷热源的选择	133
第 7 章 对井系统地源热泵	135
7.1 对井地源热泵系统原理与特点	135
7.2 对井系统的设计方法	136
7.3 对井系统的应用实例	140

实例 1: 法国巴黎北部巴黎盆地岛格 (Dogger) 地热田对井系统	140
实例 2: 天津市对井地源热泵系统	141
实例 3: 天津市对井地热系统	142
第 8 章 中高温热泵	144
8.1 中高温热泵的定义	144
8.2 中高温热泵的应用背景及现状	144
8.3 压缩式中高温热泵系统	146
8.4 压缩式中高温热泵的运行特点	153
8.5 压缩式中高温热泵的研究方向	159
8.6 吸收式中高温热泵	160
第 9 章 地源热泵供热空调技术应用实例	162
9.1 地源热泵系统应用实例	162
实例 1: 天津某生态小区办公楼	162
实例 2: 无锡办公楼	163
实例 3: 郎根市德国飞行保险公司大楼	163
实例 4: 阿恩斯贝克斯市室外游泳池	164
实例 5: 苏黎世 Unique 机场“能量桩”地源热泵系统	164
实例 6: 康涅狄格州商业和办公楼	165
实例 7: LDS 教堂办公楼	166
实例 1: Haverhill 公共图书馆	166
实例 2: The Galt House East Hotel	167
实例 1: 郭庄北里住宅小区	168
实例 2: 空军丰台招待所	168
实例 3: Parkview 公寓	169
实例 4: 维尔纳市的新居民区	170
实例 5: 埃西卡布地区的老式居民区	170
实例 6: Winterthur 的住宅小区	171
9.2 中高温地热热泵应用实例	171
9.3 设计施工标准讨论	178
9.4 运行管理	182
第 10 章 地源热泵系统环境与监测	184
10.1 地源热泵系统环境	184
10.2 地源热泵系统的监测	185
参考文献	192

第 1 章 绪 论

地源热泵技术一般是指利用普遍存在于地下岩土层中可再生的浅层地热能或地表热能（温度范围在 7~21℃），即岩土体、地下水或地表水（包括江河湖海水）中蕴含的低品位热能，实现商业、公用以及住宅建筑冬季采暖、夏季空调以及全年热水供应的节能新技术。而利用深层地热水（温度一般为 30℃ 以上）称为地热热泵的供热技术，以及利用城市污水和工业余热的热泵技术，则作为广义或特殊的地源热泵技术也在本书中一并介绍。

1.1 概 述

1.1.1 建筑节能的概念与发展历程

与建筑相关的能源消耗范围很广，包括建筑材料生产、建筑施工和建筑物使用中的能耗，这使建筑用能跨越了工业生产与民用生活的很多领域。按照国际上通常的提法，建筑能耗是指建筑使用过程中所消耗的能量，主要包括采暖、通风、空调、照明、炊事、家用电器和热水供应等方面的能耗。建筑能耗与工业、农业、交通运输能耗并列，在发达国家一般占全国总能耗的 30%~45% 左右。比如，2000 年全世界一次能源消耗量是 131.32 亿 t 标准煤，美国为 36.55 亿 t 标准煤，其中建筑能耗占 33.7%，工业能耗占 35.9%，交通能耗占 24.8%。法国建筑能耗占社会总能耗 45%。而我国的建筑能耗已从 1978 年的占社会总能耗的 10% 上升到如今的近 30%。建筑节能已经成为世界节能主题的主流之一，作为当今世界建筑技术发展的重点之一，建筑节能技术日益为世人所瞩目。

《中华人民共和国节约能源法》对“节能”的法律规定是指：加强用能管理，采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的措施，减少从能源生产到消费各个环节中的损失和浪费，更加有效、合理地利用能源。因此，节能的核心是提高能源效率。从能源消费的角度来讲，能源效率是指为终端用户提供的能源服务与所消耗的能源数量之比。而建筑节能则是指在建筑中合理使用和有效利用能源，不断提高能源利用率，减少常规能源的消耗。

在发达国家，建筑节能已经历了三个阶段：第一阶段是减少建筑中能源的使用量，抑制建筑能耗的增长（Building Energy Saving）；第二阶段提出在总能耗基本不变的情况下发展经济，即建筑能量守恒（Building Energy Conservation）；第三阶段要求在建筑中提高能源利用率（Building Energy Efficiency）。

我国的建筑节能工作，始于 20 世纪 80 年代初期：

(1) 1980~1986 年，是建筑节能技术的研究与节能标准制定的探索阶段。

1986 年 3 月，建设部颁发了第一部节能设计标准《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）》（JGJ 26—86），于 1986 年 8 月 1 日开始试行，要求在 1980~1981 年住宅通用设计能耗水平的基础上节能 30%。

(2) 1987~1994 年，是第一个建筑节能设计标准的执行阶段，这一阶段的标准也简称为“一步节能标准”。

(3) 1995~2005 年，为节能标准制定的第二阶段，明确提出了在“一步节能标准”的基础

上再节能 30% 的要求，相当于在 1980~1981 年住宅通用设计能耗水平的基础上节能约 50%，也简称为“二步节能标准”。这一阶段相继颁布实施了《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）》(JGJ 26-95)、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 134-2001)、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》(JGJ 75-2003) 和《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2005) 等标准。

(4) 2005 年至今，为第三阶段，以北京、天津等大城市分别于 2004 年 7 月 1 日、2005 年 1 月 1 日率先实施第三步居住建筑节能设计的地方标准为标志，简称“三步节能标准”。节能目标是在“二步节能标准”的基础上再节能 30%，相当于在 1980~1981 年住宅通用设计能耗水平的基础上节能约 65%，而且节能效率的提高全部由建筑物本身来承担。相对于以前的标准，这一新标准在各项指标的要求上更为严格、细致和全面，住宅整体能耗将得到显著下降。住宅建筑的耗热量指标将降低到 14.4W/m² 以下。

我国的能源消费结构以煤炭为主，约占 3/4 以上，其中建筑采暖用煤约占 75% 以上，这与发达国家的情况差别很大。例如，在采暖能源中，法国：电力占 5%，天然气占 50%，煤炭和石油等只占 10%；荷兰：天然气占 46%，石油占 46%，煤炭占 6%，其他占 2%。加上我国既有建筑和每年新建建筑数量巨大，建筑能耗的增长还在加快，这些都将对我国的能源环保工作造成极大的冲击。因此，对于我国，做好建筑节能工作意义尤其重大。

1.1.2 建筑能耗的特点与地源热泵节能技术

在 2000 年美国建筑用能消耗的约 12 亿 t 标准煤中，采暖占 53.3%，热水供应占 12%，制冷占 6.5%，换言之，建筑物中约有 80% 的耗能量（约占总耗能的 26.6%）用于采暖、空调和热水供应。据建设部统计，我国居住建筑用能各部分所占比例如表 1-1 所示，采暖通风空调与热水供应总量也同样达到了建筑总耗能的 80%。

目前我国建筑耗能仍依靠消耗以煤为主的常规能源方式来满足需求，不仅存在着严重的环境问题；而且也造成了极大的不可逆损失，参见表 1-1。对于北方居住建筑能耗，占建筑总能耗 80% 的采暖通风空调与热水供应需求非常接近于环境温度的低品位能，其能级均在 0.1 左右。然而，建筑用能多数为高品位能源，能级高达 1.0，热力学第二定律效率只有 10% 左右。这种“高能低用”模式是造成能源结构不合理与能源浪费的根本原因。

我国北方居住建筑能耗各部分比例

表 1-1

能耗构成	采暖通风空调		热水供应	电气	炊事
比重	65%		15%	14%	6%
	采暖	空调			
对应温度(°C)	18/-12	25/33	40/10	—	—
能级	0.1031	0.0268	0.034~0.117	1.0	—

注：对应温度指室内、环境温度；能级以夏季 33°C/冬季 -12°C 为基准温度计算。

我国建筑耗能不仅数量大，例如，2001 年达 3.76 亿 t 标准煤，占能源消费总量的比例为 27.6%；而且能效水平低，例如，整个供热系统的综合效率仅为 35%~55%，远远低于先进国家 80% 左右的水平。此外，我国的建筑能耗还有如下特点：

(1) 夏季空调用电量。1997 年以来，全国每年发电量按 5%~8% 的速度增长，由于空调耗电大、使用集中，有些城市的空调负荷甚至占到尖峰负荷的 50% 以上。

(2) 冬季采暖能耗高。东北、华北和西北地区，城镇建筑面积约占全国的近 50%，达 40 亿 m²，年采暖用能约 1.3 亿 t 标准煤，占全国能源消费总量的 11%，占采暖地区全社会总能耗的 21.4%。在一些严寒地区，城镇建筑能耗已占到当地总能耗的一半以上。

因此,建筑用能已逐步成为我国能源消费的主体之一,而建筑节能更已成为实现中国可持续发展所必须研究解决的重大问题。要解决建筑节能问题,一方面,要严格执行建筑节能设计标准,从建筑物本身即源头入手,减少建筑负荷;另一方面,积极采用地源热泵等可再生能源利用技术,提高供能系统的能效,最大限度地减少常规能源的消耗。

从对建筑耗能特点的上述分析中可以看出,采暖通风空调与热水供应占据了建筑耗能的主要比例,而且其对应的供能系统大都利用温度为 $7\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的低焓热能,同时这部分建筑用能并不集中。单位管长埋管换热器从土壤中吸收或放出的热量,在数量级上完全可以与单位建筑面积的全年冷热负荷相匹配,因此地源热泵技术自然能够在建筑节能领域发挥重要的作用。

1.2 地源热泵技术的节能原理

从表面上说,地源热泵只是简单地利用了土壤、地下水、地表水或污水等热源,而从更深层次上说,它是非常典型的可再生能源利用技术,为此,明确浅层地热能与地表热能的概念,并在此基础上分析其节能原理是非常必要的。

1.2.1 浅层地热能与地表热能

地源热泵技术在1995年被ASHRAE归纳为地热资源三种利用方式之一,通常指小于 32°C 的地源热泵应用技术。事实上,地源热泵技术应用明显不同于其他两种地热资源利用方式(高于 150°C 的高温地热发电和小于 150°C 的中低温地热直接利用),其运行温度相对较低。笔者认为有必要对这种与地源热泵密切相关的低品位能源进行全面地、科学地定义、评价与认识,以利于推动这种可再生能源在更广泛领域实现更大规模的应用。

地表温度通常在 15°C 左右。这是因为,地球接受到的 $2.6\times 10^{24}\text{J}$ 太阳能中,约有50%被地球吸收。其中一半能量以长波形式辐射出去,余下的成为水循环、空气循环、植物生长的动力。相反的,目前全球人口所消耗的总能量也仅仅为 $2.827\times 10^{20}\text{J}$,由此可见,太阳能以及地表储存能的数量相当可观。

地球主要由地壳、地幔和地核等几大部分组成。按照温度的变化特性,地球表面的地壳层可分为三个带,即:可变温度带、恒温带和增温带。可变温度带,由于受太阳辐射的影响,其温度有着昼夜、年份、世纪甚至更长的周期性变化,其厚度一般为 $15\sim 20\text{m}$;恒温带中温度变化幅度几乎等于零,其深度一般在 $20\sim 30\text{m}$ 。美国的国内统计数据表明,无地热异常地区的浅层地下水温度,约比当地年平均大气温度高 5°C ,即指恒温带温度。在恒温带以下,温度随深度增加而升高,其热量主要来自地球内部释放的热能。增温带温度增加的幅度称为地温梯度,一般地区地温梯度约为 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$;明显高于这一地温梯度的地区,就是地热异常地区。地热异常地区,在地球上的分布并不普遍。因此,传统的深层地热能并不具备普遍存在的特性,而浅层地热能无疑与地表热能是普遍存在且可再生的。如图1-1所示,从地下 $15\sim 20\text{m}$ 到地面,称混合热源,它既受深处地热流的影响,也受当地太阳辐射热的影响。图1-1定性说明了有关概念。

为了利用浅层地热,一些国家和国际机构,根据一些地区地下埋设换热器的测试资

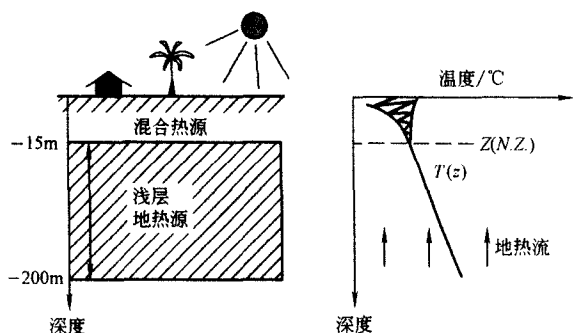


图1-1 浅层地热能(包括浅层地热源和混合热源)与温度分布

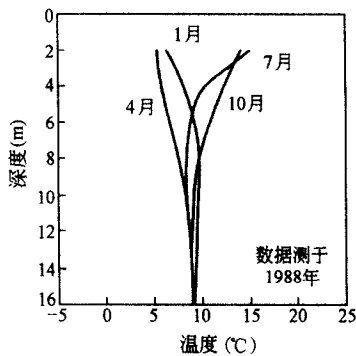


图 1-2 德国 Wetzlar 钻孔实测数据曲线

料，编制了地埋管换热器的设计程序。但必须通过实测获得当地的相关数据，才能保证计算结果的可靠性。

图 1-2 是由德国 Wetzlar 的一个钻井测得的地下温度数据。在地下 16m 处，温度稳定在 9°C；16m 以上的地层温度随季节即随太阳辐射热和大气温度的变化而变化。

根据目前国内外的实际情况，对于非地热异常地区，本书将地下 200m 范围内，温度在 21°C 以下的土壤、岩石、地下水中所包含的热量定义为浅层地热能。根据不同地域情况，深度范围可以扩大，例如，天津市部分地源热泵项目利用的是 400m 深含水层的浅层地热。

对于存在地热异常区的地区，尤其是在有温泉或蒸汽泉的情况下，浅层地热能的定义并不完全适用。

对于地表热能，本书定义为江河湖海、城市污水和工业废水中蕴含的低品位的热能，也可以扩大到包括深层地热尾水的范围。

按照热力学原理，浅层地热能与土壤/岩石的性质、地下水情况关系密切，特别是土壤/岩石的导热系数、含水率、原始温度、水在浅层的运移方向（例如，降雨时，水分往往向下渗透；天晴时，往往向上渗透到地面并吸收热量而蒸发）以及地面覆盖物（植被、冰雪等）。

1.2.2 地源热泵工作原理与节能本质

1. 地源热泵工作原理（能量转换与利用的量的评价）

图 1-3 所示为五种供热方案的能流图，图中都以房屋采暖需要 10kWh 的热量作为比较基础。通过对能量数量转换的对比，可以理解地源热泵的工作原理及其与其他方案比较的优劣。

通常电动压缩式热泵消耗的是电能，得到的是热能。其供热效率用性能系数 COP 表示。

$$COP = \frac{\text{热泵机组提供的热量 (kWh)}}{\text{机组耗电量 (kWh)}}$$

一般地源热泵系统 $COP \geq 3.0$ ，即消耗 1kWh 的电能，可以得到 3kWh 以上的供热用热能。但是，一般燃煤火力发电站效率只有 30%~38%，加上输配电损失，供电效率更低。考查不同供热方案的能量利用效率可以采用一次能源利用率（PER）作为指标，即所得热能与消耗的一次能源之比，对于热泵方案，PER 等于 COP 与供电效率的乘积。

图 1-3 (a) 中的锅炉供热是指效率很高的单户燃油、燃气锅炉供热，没有区域供热管网的热损失和大型循环水泵耗电。如果用燃煤锅炉，效率更低些。图 1-3 (b) 是电热采暖的情况，此时 $COP=1.0$ 。图 1-3 (d) 中，发电是采用天然气的联合循环发电站，这种现代化装置的发电效率能达到 50%~60%，图中采用的供电效率是 45%；所用地源热泵是 $COP=3.7$ 的高效低温地源热泵。表 1-2 更直观地显示了这几种供热方式的对比。

各种供热方式的一次能源利用率

表 1-2

供热或采暖方式	供电效率(%)	COP	PER(%)	备注
电阻式采暖	30	<100%	<30	一般火力发电
电动空气源热泵	30	2.0	~60	大气温度>-10°C
燃油、燃气锅炉	30		<70	燃煤时<65%
地源热泵	30	3.7	110	一般火力发电站
地源热泵	>45	3.7	>160	燃气联合循环发电

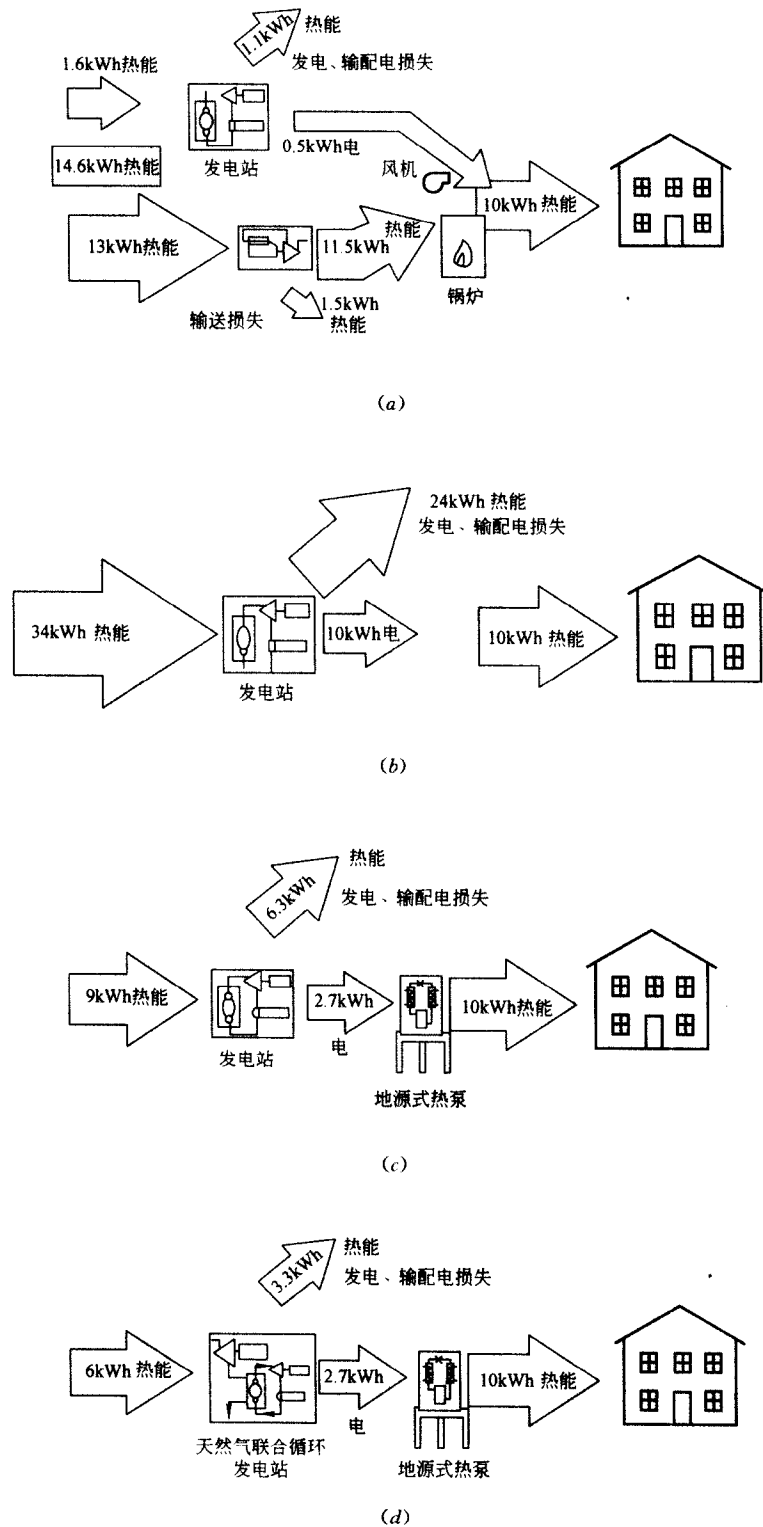


图 1-3 地源热泵与其他各种供热方式的能流图

(a) 锅炉供热；(b) 电阻式采暖；(c) 一般发电站、地源式热泵供热；

(d) 天然气联合循环发电站、地源式热泵供热

实际应用中，供热方案并非仅依据表 1-2 中一次能源利用率的高低来确定，各方案的实际使用效果或经济性还受许多其他因素的制约。

图 1-3 和表 1-2 中的电阻式采暖虽然一次能源利用率最低，但在一些特殊场合（如电价较低），则仍有可能采用这种供热方案。但从热力学角度来讲，不宜大力发展直接电采暖。图 1-3 和表 1-2 中所说的地源热泵，是指使用低温热源的地源热泵，如果采用温度较高的水（工业废水和工业循环水）为热源，其性能系数 COP 可达 4.0~6.0，一次能源利用率将更高。

除了性能系数 COP、一次能源利用率 PER 之外，还可采用季节性能系数 SPF (Seasonal Performance Factor) 来评价地源热泵系统的性能。SPF 是整个供热季节内，性能系数 COP 的平均值。由于在热源和热分配系统中不可避免地存在着热损失和动力消耗，因此在进行计算、比较热泵效率指标时，要注意区分它指的是热泵机组本身，还是对整个系统而言。

热泵的 COP 和 PER 与其温升（热源温度和热泵输出温度的差值）紧密相关。理想状况下热泵的 COP，主要取决于冷凝温度和温升（=冷凝温度-蒸发温度）。国外实践证明，当热源温度高于 0℃ 时，地源热泵的性能系数 COP 一般大于 3.0。热源温度越高，性能系数越大。

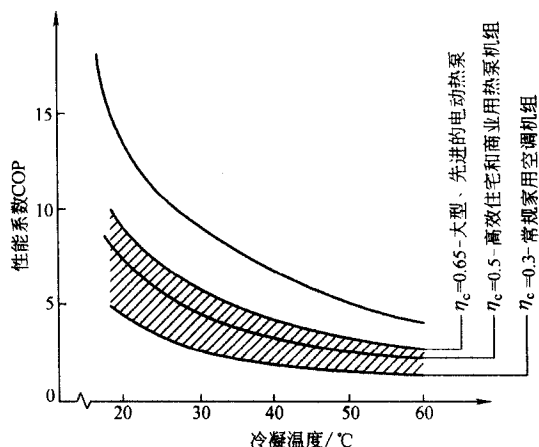


图 1-4 热源温度为 0℃ 时，各种热泵 COP 与冷凝温度的关系

图 1-4 给出了理想热泵的 COP 与温升之间的关系，同时也给出了不同形式、不同容量的热泵在不同温升时，COP 的实际变化范围。热泵的实际 COP 和理论 COP 的比值，定义为卡诺效率。对小型电动热泵，卡诺效率（图 1-4 中的 η_c ）在 0.3~0.5 范围内变化，而大型、高效的电动热泵系统，其范围为 0.5~0.7。图 1-4 来自：国际能源机构热泵中心的资料——热泵性能 (Heat pump performance)。

2. 能量质量的评价——节能的本质

能量质量的评价，将从能量转换的更深层面上去理解地源热泵的工作原理，并进而明确节能的真正意义。

地表热能和大气环境中包含的热能，一般不被视为能源。这就存在一个什么是能源，节能的本质是什么的问题。因此，不得不涉及能量的质量概念。国际能源机构热泵中心的宣传材料中，有一段通俗的关于能量质量的描述：能量不会消失，它总是完整地存在着。这是热力学第一定律的一种说法。但从一般经验看来，这似乎与下列事实矛盾：如果将 1kWh 电力使洗衣机工作，按热力学第一定律，这 1kWh 电力没有“消失”，但是很明显，它再也不能使其工作。然而，事实上这 1kWh 的能量还存在，只是改变了存在的方式，即它转变成热能并使室内环境温度升高，然后散失到室外。虽然，这 1kWh 的能量仍存在于环境，但是失去了做功的能力。

热力学认为，能量可否转换为功，是恒量能量品位的最佳方法。热力学第二定律规定，功可以完全转换为热（或其他形式的能量），但热只能部分地转化为功。能量可转化为功的这一部分数量，称为“焔”或有用能。其余的部分称为“熵”或无用能。第二定律意味着，在任何能量的转换中，焔被认为是能量的最好状态，而且，焔实际上总是在减少。

电能是纯粹的 100% 的焔，因为它能完全转换为功。燃料的热值也可认为是纯粹的焔。但是，按照热力学第二定律，“热能”的热力学价值更有限。热能可以定义为，是一种受温度差驱使的能流。一个理解是，它的价值或质量，将随这种能流温度的升高而提高。热能在一定温度下，真正的焔值含量可用下面公式计算。

$$\text{焓} = (T_r - T_a) / T_r \quad (1-1)$$

式中 T_r ——热能的温度, K;

T_a ——环境温度, K。

上述焓的公式显示, 热能的焓值不仅与其本身的温度有关, 也与周围环境温度有关。只有当热流的温度高于或低于周围环境温度时, 它才能“干某种事情”。释放到屋子内的 1kWh 的能量, 当它散失到室外温度下的环境中时, 就完全丧失了它的价值。热力学第二定律使能源系统的设计有了一个重要的依据, 那就是, 必须承认能量是有“价值”的。人们需要的是能够提供纯粹焓值的燃料, 而且这个焓必须能最大限度地得到应用。所以, 节约能量, 真正的意义是节约有质量的能量。

在这个称为“能量质量概念”的基础上, 出现了能源系统设计的两个重要原则: 能量的梯级利用和能级的提升。

能量的梯级利用, 避免了热能不必要的降级。高质量的热能, 首先用于高质量的目的。能级的提升可以使低质量的能量, 用于需要较高温度热能的地方, 这是用热泵的方法实现的, 不同于常规加热系统。热泵不是自然“降级”成热能, 而是用一部分焓, 把低质量的能量提升到所需要的温度。例如, 10kJ、50°C 的热量中, 只包含 1.5kJ 的焓。理论上, 只需要用一台地源热泵, 从燃料或电能向“无用”热能供应 1.5kJ 的焓, 其余 8.5kJ 的“无用能”, 就可以从低温热源, 如土壤或浅层地下水 (约为 15°C 左右) 中吸取。虽然, 实际上需要更多的焓, 但热泵还是能达到非常高的能源效率。

一个最优化的能量系统无论是单一工艺过程, 还是建筑物, 或者是一个区域, 乃至整个社会始终要使能量降级的梯级最小, 并在必要时, 配套使用能级提升技术。这就是热泵技术在整个能量系统中的地位。而且, 在人类目前掌握的技术中, 热泵技术是唯一一种实用的“能级提升”技术。

和“水泵的扬程越大耗电量越大”的道理一样, 热泵的温度升程 (从热源到供热目的地的温度差) 越大, 耗电量就越大。由于利用的浅层地热能, 在冬季时, 温度总是高于大气温度, 夏季又低于大气温度, 而且地源热泵所服务的对象, 一般属于低温热能供应, 因此, 地源热泵运行的总体温度升程相对较低, 保证其花费少量的高品位能量满足供热制冷的需要, 是非常有效的节约常规能源的技术。

1.3 地源热泵系统组成、分类与评述

1.3.1 地源热泵系统组成

地源热泵系统一般由三个子系统组成: 热 (冷) 源系统、热泵机组、热 (冷) 分配系统 (包括需要的水供应系统)。例如, 对用于建筑采暖空调的地源热泵系统主要包括: 室外地源换热系统、水环管路与水源热泵机组以及室内采暖空调末端系统。

热 (冷) 源系统包括地下水、江河湖海水、岩石和土壤、城市污水、工业污水。美国中部和东部各州政府要求, 地下水温度低至 4°C 时, 仍可作为地源热泵的热源。一般地, 地下水、江河湖海水、岩石和土壤, 夏季温度都低于当地大气温度, 作为冷源, 肯定优于室外大气。城市污水夏季作为冷源也没有问题。工业污水和排放液, 温度变化范围很大, 夏季当其温度接近或高于当地大气温度时 (例如油田污水), 则不宜作为热泵夏季工作的冷源, 应另设冷源。

地源热泵系统中采用的热泵机组都是水源式, 既能制冷, 也能供热, 当然, 也可以做成只制冷或只供热的单一功能。除了机组内水—制冷剂侧换热器与空气源热泵不同外, 其他部件 (压缩

机、输出换热器、节流装置、换向阀等),在很大程度上都是通用的(随工作温度不同,控制装置、压缩机部件略有差异)。如今由于制冷机的广泛使用,这些部件的设计、制造技术,已经取得了很大进步,并且还在不断改进中(如采用先进的压缩机、变速拖动、多段蒸发、内螺纹换热管等)。此外,热泵机组中的制冷剂,也是一个值得讨论的问题。

室内末端输配系统包括加压送风系统或地板盘管、风机盘管等形式。近年来在国内又开始应用顶板辐射和毛细管辐射等末端输配方式。

1.3.2 地源热泵系统的分类

对于热泵装置本身来说,有多种分类方法,如:

按热源分:空气源、土壤—地下水源、太阳能以及工业、生活废热等;

按压缩机种类分:活塞式、螺杆式、涡旋式、离心式;

按热泵的功能分:单纯供热、交替制冷供热、同时制冷供热;

按驱动方式分:电力压缩式、发动机拖动压缩式、热力吸收式(包括吸附式);

按供热温度分:低温 $<70^{\circ}\text{C}$,中高温: $70\sim 100^{\circ}\text{C}$,高温 $>100^{\circ}\text{C}$ 。

此外,按热源和冷热媒介质的组合方式划分,热泵还可以分为:空气—空气式热泵、空气—水式热泵、水—水式热泵、水—空气式热泵等类型。

对于地源热泵系统,实际上是热泵机组、冷热源系统和热分配系统的总和,是一个广义的术语。热泵装置作为该系统的核心部件,上述分类有些也可以应用于地源热泵的分类,如按冷热媒介质不同,可分为水—水式、水—空气式等。实际应用中人们经常将地下水或其他水源的热泵系统称为水源热泵,这与本书的规范说法并不一致。因为地源热泵系统中一般都要包括以水(或以水为主的液体)作为热源介质的热泵装置,可以说采用的都是水源热泵机组。

鉴于室外地下热源系统在地源热泵系统中的关键作用,以下重点根据其形式的不同对地源热泵系统进行分类。根据地下换热系统形式的不同,地源热泵可以分成三种类型:闭环系统、开环系统与直接膨胀系统。对于一定地区,地下换热方式的选择主要取决于水文地质结构、有效的土地面积和系统生命周期费用。

1.3.2.1 闭环系统

闭环系统指的是通过水或防冻液在预埋地下的塑料管中进行循环流动来传递热量的地下换热系统。闭环系统的具体形式有:垂直环路、水平环路、螺旋盘管环路与池塘湖泊环路,还有一种与建筑桩基相结合的桩埋管换热器。

1. 垂直环路

由高密度聚氯乙烯管组成,这些管环放在直径 $100\sim 150\text{mm}$ 的垂直管孔中,井内埋设U形管或者同心套管,具体长度取决于土壤热特性。所有垂直管孔要用膨润土(黏土)灌浆。可采用两种系统类型:并联式系统和串联式系统。并联式系统所用管径较小,管环长度较短,所需水泵扬程较低,可用较小的水泵,运行费用较少。一般地,大多数用户都选择并联式系统。

垂直环路系统更多地用于土地面积有限、水位较深以及地下为岩石层或岩石地层的地区,是商业用途中最常用的系统形式。

2. 水平环路

将横管放在深度约为 $1.2\sim 3.0\text{m}$ 深的水平管沟内,比垂直埋管可节省费用 $25\%\sim 30\%$ 。由于受地表温度年波动的影响,环路长度需增加 $15\%\sim 20\%$ 。管沟长度取决于土壤条件和管沟中的管子数量。该方式常用于住宅,适用于土地丰富,而且具有较高地下水水位的地区。

3. 螺旋管环路

一种形式是多管水平环路的改进,通常称为“slinky”;另一种形式是在窄小的垂直管沟中