

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书

地表水源热泵 理论及应用

DIBIAO SHUIYUAN REBENG
LILUN JI YINGYONG



陈晓○著

中国建筑工业出版社

“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书

地表水源热泵理论及应用

陈 晓 〇 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地表水源热泵理论及应用 / 陈晓著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011.2

“十二五”国家重点图书·新能源与建筑一体化技术丛书

ISBN 978-7-112-12806-8

I. ①地… II. ①陈… III. ①地面水—热泵—空气调节器—研究 IV. ①TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 260016 号

责任编辑: 张文胜 姚荣华

责任设计: 肖 剑

责任校对: 陈晶晶 赵 颖

**“十二五”国家重点图书
新能源与建筑一体化技术丛书
地表水源热泵理论及应用**

陈 晓 著

*

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

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张·12½ 字数: 300 千字

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月第一次印刷

定价·32.00 元

ISBN 978-7-112-12806-8
(20072)

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)

出版说明

能源是我国经济社会发展的基础。“十二五”期间我国经济结构战略性调整将迈出更大步伐，迈向更宽广的领域。作为重要基础的能源产业在其中无疑会扮演举足轻重的角色。而当前能源需求快速增长和节能减排指标的迅速提高不仅是经济社会发展的双重压力，更是新能源发展的巨大动力。建筑能源消耗在全社会能源消耗中占有很大比重，新能源与建筑的结合是建设领域实施节能减排战略的重要手段，是落实科学发展观的具体体现，也是实现建设领域可持续发展的必由之路。

“十二五”期间，国家将加大对新能源领域的支持力度。为贯彻落实国家“十二五”能源发展规划和“新兴能源产业发展规划”，实现建设领域“十二五”节能减排目标，并对今后的建设领域节能减排工作提供技术支持，特组织编写了“新能源与建筑一体化技术丛书”。本丛书已列入“十二五”国家重点图书。本丛书由业内众多知名专家编写，内容既涵盖了低碳城市的区域建筑能源规划等宏观技术，又包括太阳能、风能、地热能、水能等新能源与建筑一体化的单项技术，体现了新能源与建筑一体化的最新研究成果和实践经验。

本丛书注重理论与实践的结合，突出实用性，强调可读性。书中首先介绍新能源技术，以便读者更好地理解、掌握相关理论知识；然后详细论述新能源技术与建筑物的结合，并用典型的工程实例加以说明，以便读者借鉴相关工程经验，快速掌握新能源技术与建筑物相结合的实用技术。

本丛书包括：《低碳城市的区域建筑能源规划》、《地表水源热泵理论及应用》、《光伏建筑一体化设计与施工》、《风-光互补发电与建筑一体化技术》、《蓄冷设备与系统设计》、《太阳能空调技术》、《太阳能热利用与建筑一体化》以及《地源热泵与建筑一体化技术》等。

本丛书可供能源领域、建筑领域的工程技术人员、设计工程师、施工技术人员等参考，也可作为高等学校能源专业、土木建筑专业的教材。

前 言

地源热泵作为一项建筑可再生能源利用技术,以其高效和部分替代常规能源的特点,近年来得到快速发展。地表水源热泵作为地源热泵的一种形式,目前国内已经有一些应用。我国夏热冬冷地区许多地方的地表水资源较丰富,冬夏的地表水温适合于发展地表水源热泵。在住房和城乡建设部公布的前三批可再生能源建筑应用示范项目中,地表水源热泵占有所有地源热泵项目的 15.62%。由于地表水源热泵在我国的应用起步较晚,还缺乏系统和深入的研究,本书作者自 2002 年起致力于这方面的研究与实践。地表水源热泵的研究涉及暖通空调、制冷、环境水力学及水利等多学科的交叉,随着研究的深入,笔者深切地感受到其中的复杂性,无论是在理论研究层面还是在技术应用层面,地表水源热泵都有待进一步的探索和发展。

本书体现了作者近年来在地表水源热泵方面的研究成果。全书共分为 7 章,第 1 章为绪论,论述了地表水源热泵的特点、研究与发展状况及存在的主要问题;第 2 章介绍了几种地表水温预测方法及其应用;第 3 章介绍了开式地表水源热泵系统的原理、各部分的结构与设计、系统优化方法;第 4 章介绍了闭式地表水源热泵系统的构造、换热特性、系统模型及系统设计与安装;第 5 章系统地研究了地埋管-地表水复合式地源热泵系统;第 6 章介绍了地表水源热泵系统设计与运行调节方面一些值得注意的问题;第 7 章为地表水源热泵工程实例介绍。本书可供能源、暖通空调、制冷、建筑节能及地源热泵行业的科研、工程技术人员参考使用,也可供大专院校相关专业的老师、研究生及高年级本科生参考使用。

在本书的撰写过程中,得到了许多前辈、老师和同行们的帮助和鼓励。感谢我的博士生导师湖南大学张国强教授对本书工作的支持和鼓励;湖南凌天科技有限公司为本书的研究工作提供了良好的试验平台和技术应用平台,在此对凌天公司林宣军、林汉柱、李明、胡武文等人的帮助和支持表示衷心的感谢。

本书的工作得到湖南省科技计划项目(2009GK3073)、湖南省建设科技计划项目(200916)及湖南工程学院科研启动基金项目(0841)的资助,同时还得到国家科技支撑计划项目“长江上游地区地表水水源热泵系统高效应用关键技术研究”与示范”(2007BAB21B02)的资助,在此一并致谢。

由于作者的学识水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请前辈与同行批评指正。作者的电子邮箱: xchen126@126.com。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	热泵与节能减排	1
1.2	地源热泵系统的形式与结构	1
1.2.1	地下水源热泵系统	2
1.2.2	地埋管地源热泵系统	2
1.2.3	地表水源热泵系统	3
1.3	我国水资源的现状及开发利用	5
1.3.1	水资源的循环	5
1.3.2	我国水资源的分布	6
1.3.3	我国水资源的开发利用	6
1.4	地表水源热泵发展与研究现状	7
1.4.1	国外地表水源热泵的发展	7
1.4.2	国内地表水源热泵的发展现状	8
1.4.3	地表水源热泵研究现状	9
1.5	地表水源热泵研究与应用中存在的主要问题	9
第 2 章	地表水温预测方法及其应用	13
2.1	湖泊、水库的温度分层现象	13
2.2	经验公式法	15
2.2.1	水库水温垂向分布经验公式	15
2.2.2	河流及浅水湖泊水温经验公式	16
2.3	零维水温模型	17
2.3.1	零维水温模型介绍	17
2.3.2	自然水温模拟	20
2.3.3	排热与取热对水温的影响	22
2.4	垂向一维水温预测	24
2.4.1	垂向一维水温模型介绍	24
2.4.2	垂向一维水温模型的求解	25
2.4.3	垂向一维水温计算实例	27
2.5	平面二维水温预测	30
2.5.1	近区浮射流	31
2.5.2	远区流动与热扩散	33

2.5.3	河流温排水的简化模型	34
2.6	随机水温模型	39
2.6.1	随机模型的建立	39
2.6.2	随机模型参数的确定	40
2.6.3	随机微分方程的解过程的数字特征	42
2.6.4	随机模型的应用	43

第3章 开式地表水源热泵系统	47
-----------------------	-----------

3.1	开式系统运行时水面的散热与得热机理	47
3.1.1	超温水面散热机理	47
3.1.2	弱温水面得热机理	48
3.2	开式系统的中间换热器	49
3.2.1	开式系统的应用形式	49
3.2.2	板式换热器的结构及性能特点	50
3.2.3	板式换热器的选型计算方法	51
3.2.4	开式系统中板式换热器选型计算实例	56
3.3	开式地表水换热器防腐防垢及除垢技术	59
3.3.1	地表水处理措施与方法	59
3.3.2	污垢的类型与形成	62
3.3.3	开式地表水换热器的防腐防垢措施	63
3.3.4	开式地表水换热器的污垢清洗方法	66
3.4	取排水方式与设施	68
3.4.1	取水位置的选择	68
3.4.2	常见的取水方式	68
3.4.3	排水设施	75
3.4.4	取排水系统的施工	75
3.5	地表水利用温差的优化	77
3.5.1	总功率梯度的计算	77
3.5.2	地表水利用温差优化方法及应用	79

第4章 闭式地表水源热泵系统	86
-----------------------	-----------

4.1	闭式地表水换热器的形式与构造	86
4.2	水下盘管的换热性能测试	88
4.2.1	水下盘管传热系数的计算公式	88
4.2.2	测试系统	89
4.2.3	测试结果与分析	91
4.3	水下盘管换热量与长度的关系	93
4.4	闭式地表水换热器系统的设计	96

4.4.1	闭式地表水换热器系统的设计方法	96
4.4.2	闭式地表水换热器系统设计实例	98
4.5	闭式地表水源热泵系统的运行特性	99
4.5.1	闭式系统的动态模型	99
4.5.2	闭式系统运行特性实例分析	100
4.6	闭式地表水换热器系统的施工	104
4.6.1	聚乙烯管道施工	104
4.6.2	系统安装与调试的基本步骤	105

第5章 地埋管-地表水复合式地源热泵系统	109
-----------------------------	------------

5.1	串联式地埋管-地表水复合地源热泵系统	109
5.1.1	研究背景	109
5.1.2	系统的结构	110
5.1.3	系统的模型	111
5.1.4	实例计算与分析	114
5.2	并联式地埋管-地表水复合地源热泵系统	121
5.3	地表水体作为辅助冷却源的复合式系统	122
5.3.1	系统的形式与结构	122
5.3.2	喷淋冷却过程的模拟与分析	123
5.3.3	喷淋冷却对取水温度的影响	130

第6章 地表水源热泵系统的设计与调节	134
---------------------------	------------

6.1	工程勘察	134
6.1.1	工程场地及地表水源勘察	134
6.1.2	地表水设计水温的确定	134
6.2	地表水源热泵的适用性评价	135
6.2.1	经济性评价与性能评价	135
6.2.2	水环境影响评价	136
6.3	地表水源热泵系统的性能化设计	142
6.4	地表水源热泵空调的水系统及能耗分析	143
6.4.1	地表水源热泵空调的水系统形式	143
6.4.2	地源热泵与常规空调热源的能耗比较	145
6.4.3	输送能耗对地源热泵系统节能率的影响	146
6.5	水源热泵机组的选择	149
6.5.1	水源热泵机组选择的注意事项	149
6.5.2	干式蒸发器	151
6.5.3	满液式蒸发器	152
6.5.4	喷淋降膜式蒸发器	153

6.6	水源侧水系统的调节与控制	154
6.6.1	开式系统的调节与控制	154
6.6.2	水环式系统的调节与控制	156

第7章	地表水源热泵工程实例	159
------------	-------------------	------------

7.1	湖南省湘潭市城市中心区湖水热泵系统	159
7.1.1	系统结构	159
7.1.2	取水与排水系统	160
7.1.3	系统运行情况	161
7.2	美国艾奥瓦州 Burlington 市 Great River 医疗中心闭式地表水源热泵系统	163
7.3	瑞典 Lomma 镇复合式河水热泵系统	164
7.4	宁波市鄞州区国税局大楼复合式地源热泵系统	166
7.4.1	工程概况	166
7.4.2	喷泉散热效果模拟分析	166
7.5	挪威 Bodø 空军基地海水热泵系统	167
7.6	东莞塘厦三正半山酒店湖水热泵系统	169

附录		172
-----------	-------	------------

附录 1	2006 年我国各水资源一级区水资源量	172
附录 2	2006 年我国各省级行政区水资源量	172
附录 3	2006 年我国各水资源一级区供用水量	173
附录 4	2006 年我国各省级行政区供用水量	174
附录 5	2007 年我国地表水资源的水质状况	175
附录 6	《地表水环境质量标准》GB 3838 - 2002 选摘	177
附录 7	《循环冷却水用再生水水质标准》HG/T 3923 - 2007 选摘	178
附录 8	《生活杂用水水质标准》CJ/T 48 - 1999 选摘	179
附录 9	2001 年湘江湘潭水文站逐日水温观测值	179
附录 10	《地源热泵系统工程技术规程》GB 50366 - 2009 选摘	180
附录 11	《水源热泵机组》GB/T 19409 - 2003 选摘	182

作者简介		191
-------------	-------	------------

第 1 章 绪论

1.1 热泵与节能减排

能源与环境问题是当今世界所面临的两大问题。产业革命以后,能源成为全球经济与社会发展的基本动力,而矿物能源消费的迅速增长是造成环境恶化的重要因素。截至 2008 年年底,中国的城镇人口已突破 6 亿,城镇化水平达 45.68%,伴随着城镇化而来的是建筑业的快速发展。2007 年我国城乡竣工的房屋建筑面积为 20.4 亿 m^2 ,已有建筑面积达 420 亿 m^2 ,其中城市建筑面积为 186 亿 m^2 ^[1]。如此庞大的建筑规模伴随着巨大的建筑能耗。据统计,建筑能耗在我国能源消费总量中的比例已达 27.6%,且仍将继续增长^[2],大部分建筑能耗用于空调采暖,而且我国建筑能源的使用效率相当低。我国的能源结构以煤炭为主,2008 年火力发电量占全国总发电量的比例是 81.14%,我国火力发电用煤占全国煤炭总产量的 51%^[3]。煤炭燃烧过程中会排放出大量的温室气体、烟尘、 SO_2 、 NO_x 等污染物,建筑用能对环境所带来的污染不容忽视。

发展可再生能源是优化我国能源结构和改善环境质量的要求,已成为我国可持续发展战略中不可缺少的重要组成部分。我国先后颁布了《新能源和可再生能源发展纲要(1996~2010)》和《2000~2015 年新能源和可再生能源产业发展规划要点》等重要文件;财政部与住房和城乡建设部先后启动了可再生能源建筑应用示范项目评审和可再生能源建筑应用城市示范评审,对入选的项目和城市给予专项资金补助。

热泵技术是一种有效利用可再生能源和低品位热能的技术。热泵通过热力循环,把低品位热能从低位热源转移到高位热源,可以节约部分高品位能(如煤、燃气、油、电等),具有高效和部分替代常规能源的特点,是一项很有节能潜力的技术,也是暖通空调系统减少温室气体和大气污染物排放的有效方法。

1.2 地源热泵系统的形式与结构

地源热泵利用了蕴藏在土壤、地下水和地表水中的浅层地能。与空气源热泵相比,地源热泵的效率明显要高,且不存在冬季结霜的问题,因而得到了越来越广泛的应用。我国自 1995 年出现第一个地源热泵应用项目以来,地源热泵的应用面积迅速增加,截至 2009 年年底,全国的地源热泵应用面积达 1.39 亿 m^2 ^[4]。在住房和城乡建设部公布的前三批共 212 个可再生能源建筑应用示范项目中,有 144 个是地源热泵项目^[4]。根据 ASHRAE 规定的标准术语^[5],地源热泵(Ground-Source Heat Pumps, GSHP)包括地下水源热泵(Groundwater Heat Pumps, GWHP)、地埋管地源热泵(Ground-Coupled Heat Pumps, GCHP)及地表水源热泵(Surface Water Heat Pumps, SWHP)。

1.2.1 地下水源热泵系统

地下水的温度比较稳定,一般比当地的年平均气温约高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。地下水源热泵的热源/热汇是从水井抽取的地下水,经过换热后的地下水通常要求通过回灌井把地下水回灌到原来的地下含水层。

地下水源热泵的应用需要有丰富而稳定的地下水源。在决定采用地下水源热泵之前,要做详细的水文地质调查;要打勘测井,以获取地下水温度、地下水深度、水质和出水量等数据。地下水源热泵的经济性与地下含水层的深度有很大的关系。如果地下水的水位较低,不仅成井的费用增加,井水泵的功耗也会增加,系统的效率降低。其次,地下水源热泵的应用还需要有成熟的地下水回灌技术,如果回灌的速度低于抽水的速度,从地下抽出来的水经过换热器后很难再被全部回灌到含水层内,造成地下水资源的流失。如果不加以规范,势必会造成地下水水位下降,诱发地面沉降、海水入侵和突发性岩溶坍塌等一系列环境、地质问题。为了加强对地下水资源的保护,防止地面沉降,我国已有多部法规和多项政策对地下水的利用进行了严格的规定^[6]。此外,即使能够把抽取的地下水全部回灌,怎样保证地下水层不受污染也是一个棘手的问题。

1.2.2 地埋管地源热泵系统

地埋管地源热泵系统利用土壤作为热源/热汇,它由热泵机组与一组埋于地下的埋地换热器构成,埋地换热器通常为高密度聚乙烯管或聚丁烯管。地埋管地源热泵通过循环流体(水或防冻液)在封闭地下埋管中的流动,实现系统与大地之间的换热。在冬季供热过程中,循环介质从地下提取热量,再通过系统把热量释放到室内。夏季制冷时系统逆向运行,即从室内带走热量,再通过系统将热量释放给地下土壤。

土壤的全年温度波动小,在10m深度时的土壤温度与当地全年平均气温基本相当,几乎没有季节性的波动^[7]。由于较深的地层常年可以保持较为稳定的温度,高于冬季室外气温,低于夏季室外气温,地埋管地源热泵可以克服空气源热泵的技术障碍,效率较高;又不受地下水资源的限制,因而在欧洲、北美诸多国家得到了广泛的应用。在地埋管地源热泵系统的运行过程中,建筑负荷动态变化与地下土壤换热是密切相关、互相耦合的。因此,这种热泵又被称为地耦合热泵。

埋地换热器的埋管方式分为水平埋管和竖直埋管两种。水平埋管有单层埋管和多层埋管两种类型,同一个地沟内每层埋管可设1、2或3根塑料管。多层埋管的下层管处于较低的土壤温度场,换热效果比单层埋管好。受造价等因素的限制,水平埋管的地沟不能挖得太深。因此多层埋管一般以双层埋管应用较多,双层埋管的地沟深度通常为 $1.2\sim 1.9\text{m}$,而单层埋管的深度为 $0.8\sim 1.0\text{m}$ ^[8]。近年来还出现了水平排圈式、垂直排圈式及水平螺旋式等水平埋管形式。竖直埋管主要有竖直U形埋管和竖直套管。在竖直钻孔中插入一组或两组U形管,分别形成单U形管或双U形管,U形管的管径通常采用 $20\sim 40\text{mm}$ 。用封井材料把钻孔填实,以尽量减小钻孔中的热阻,钻孔深度一般为 $30\sim 150\text{m}$,钻孔直径为 $100\sim 150\text{mm}$,钻孔之间的间距为 $4\sim 6\text{m}$ 。图1-1为竖直套管式换热器的构造,这种埋管的外管直径最大可达 200mm ,由于增加了换热面积可减少钻孔数和埋深。但套管内管中的流体与外腔中的流体会发生热交换,存在一部分热

损失。

水平埋管为浅层埋设，施工方便，初投资低于竖直埋管，但占用的土地面积较大，浅层土壤的温度受地面气温影响较大，单位管长的换热量较小。竖直埋管的初投资较高，但深层土壤的温度全年比较稳定，热泵系统的运行也更稳定，是常采用的一种形式。对于竖直埋管热泵系统，如果埋地换热器冬季取热量与夏季放热量不平衡，则地下热平衡会被破坏，导致地下土壤温度越来越高或越来越低，埋地换热器的换热效果会受到影响。

1.2.3 地表水源热泵系统

1. 地表水温的变化特点

大气的热量来自于太阳辐射，太阳辐射到达地球表面后，用于空气和表层土壤的加热以及植被、地表水体等水分的蒸发。地球上下垫面的性质和状况有很大的差别，如海洋、湖泊、高山、平原，沙漠等，不同的下垫面对大气温度的影响是不相同的。在同一纬度上，即使到达地面和地表水体的太阳辐射能量相同，地表水温度的变化会比较缓慢，而地面温度的变化比较剧烈，导致地面和水面上方的气温也有较大的差别，其原因在于：

(1) 地面对各种波长的太阳辐射都不透明，吸收的太阳辐射都用在加热很薄的陆地表面上。水面虽然对红外线和红色光不透明，但对可见光其余部分和达到水面的紫外线都是透明的，这一部分辐射能量可以达到水体的深层。

(2) 岩石和土壤的导热系数小，传导到土壤下层的热量很少，大部分热量都集中在地面下 1m 之内的表层土壤。水得到的太阳辐射热量中有相当大的一部分能通过对流扩散等方式传向下层。

(3) 岩石和土壤的比热小于水的比热，岩石的比热约为 $0.837\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，水的比热是 $4.187\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。如果将同样的热量传给相同质量的水和岩石，水的温升约为岩石的 $1/5$ 。

(4) 水面不断地进行蒸发，消耗了很多热量，使水温的升高较为缓慢。

综上所述，地表水源热泵的热源/热汇的温度变化范围较小，有利于提高热泵的性能；空气源热泵的热源/热汇的温度变化范围大、变化剧烈，不利于热泵稳定而高效地运行；在应用埋地管地源热泵时，必须将埋地换热器置于足够深的位置，如果埋地过浅，则受土壤温度变化的影响，热泵的性能不够理想。

2. 地表水体对周围气候的影响

水是生命的源泉，是人类赖以生存的基础。不仅如此，地球表面的水体对周围气候具有调节作用，包括气温、湿度、洁净度的调节。

地表水体的热容量大，与空气的热交换强烈。当太阳辐射强的时候，水体能吸收大部分辐射热，并通过水体内部的热量交换将大量热量储存起来。当太阳辐射减弱的时候，水体又能将储存的热量释放出来，这种吸热和放热对周围的气温起到调节作用。由于水体是一个天然的蒸发面，大量热能消耗于水面蒸发，水体周围的夏季平均气温比陆地要低。地球表面海陆分布很不均匀，北半球陆地面积比南半球约大 1 倍，海洋面积则比南半球小，所以，北半球夏季比南半球热，冬季比南半球冷。北半球夏季平均温度为 22.4°C ，南半球

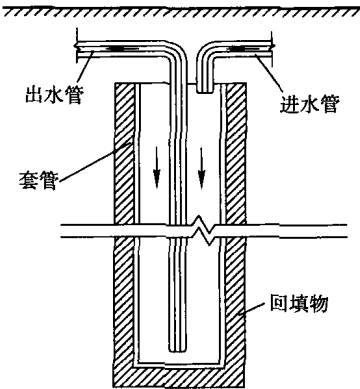


图 1-1 竖直套管式换热器的构造^[8]

只有 17.1℃；北半球冬季平均温度为 8.1℃，南半球却有 9.7℃。林之光研究并指出^[9]，我国长江中下游水域气候具有以下特点：水域对气温年变化的影响主要是提高冬季平均气温和降低夏季平均气温，而且水域的冬季增温影响大于夏季降温；水域对气温日变化的影响主要表现在降低午后最高气温和提高清晨最低气温。

进入现代工业社会以后，身居都市中的人们越来越希望能够贴近自然、回归自然，这也是近年来生态小区越来越受到人们关注和追捧的重要原因，亲水住宅已成为房地产的一大卖点。有了水就有了灵性。在生态小区环境设计中，水景成为设计师或规划师手中的一颗重要棋子，水成为他们进行设计和规划的点睛之笔。除已有的地表水体之外，还可根据需要可以设计成各种样式，例如人工湖、水池、水渠、喷泉、水上游乐场等。

从另外一个角度来看，地表水体在改善小区微气候方面具有明显的效果。首先，水具有相当大的热容量，白天大面积的水面可以吸收太阳短波辐射和建筑物的长波辐射热量，同时通过水的蒸发将显热转化为潜热，减弱小区周围热岛效应的强度。晚上水中的热量缓慢释放出来，可以减小昼夜的温差。

3. 地表水源热泵应用的形式

根据所利用水源的不同，地表水源热泵可分为淡水水源热泵和海水水源热泵。一些文献把污水源热泵也归为地表水源热泵，认为原生污水源热泵的技术方案也可以应用于地表水源热泵^[10~12]。一般来说，地表水与原生污水的水质、水温、流动及换热特性都有着较大的差别。按照国际上通用的术语定义，地表水源热泵是指利用地球表面淡水和海水的地源热泵系统^[5,13]，而污水源热泵（Sewage Source Heat Pumps）没有被归入地表水源热泵的范畴，也不属于地源热泵。笔者认为：在不引起混淆的情况下，可以将污水源热泵视为地源热泵，但不应将其视为地表水源热泵。

在 ASHRAE Handbook 中，根据地表水循环环路的结构形式将地表水源热泵分为开式（Open-loop）和闭式（Closed-loop）两种形式^[5]，图 1-2 为开式和闭式系统的流程示意图。开式地表水源热泵系统就是地表水通过取水口，经处理后进入地面上的热泵机组或中间换热器（水质较差时），经换热后在离取水口一定距离的地点排入地表水体。开式系统对水质有较高的要求，否则换热器容易产生结垢、腐蚀、藻类或微生物滋长等现象。开式系统初投资较低，适合于规模较大的系统，如区域供冷供热系统。

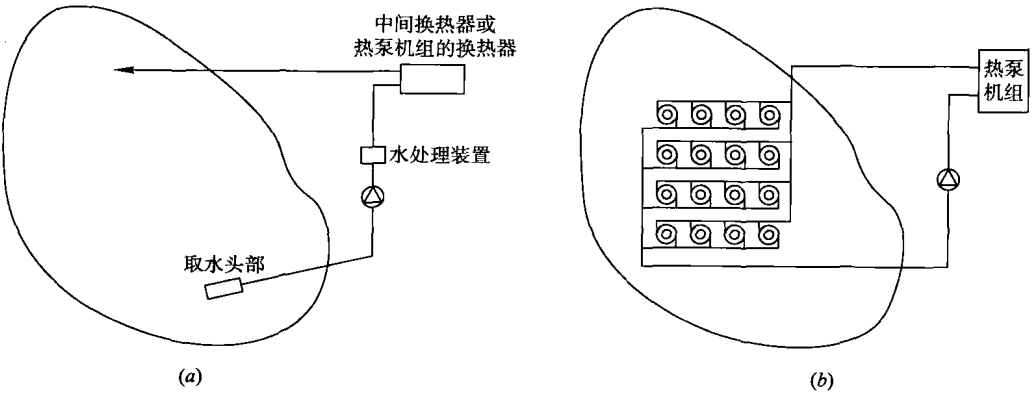


图 1-2 开式与闭式地表水源热泵系统的流程示意图
(a) 开式系统；(b) 闭式系统

闭式系统将换热盘管放置在地表水体中,通过盘管内的循环介质与地表水进行换热。在冬季气候寒冷的地区,为了防止制热时循环介质冻结,需要采用防冻液作为循环介质。与开式系统相比,闭式系统可以避免热泵机组换热器或中间换热器内部腐蚀、结垢等现象,但是盘管的外表面受地表水水质的影响,往往会结垢,使外表面换热系数降低,需要定期维护与清洗。闭式系统换热盘管的材料多采用聚乙烯管,也有的采用导热系数大的铜管或钛合金换热器^[13],所需的换热面积比塑料管要小,但强度不如塑料管,造价比塑料管换热器高。国内有采用镀锌钢管的水下换热器,但运行一段时间后便出现严重的腐蚀现象,不得不将其更换成塑料管换热器。

实际上这种闭式系统与地埋管地源热泵系统类似,也采用了封闭的循环环路,也采用塑料管作为换热器,只不过换热器周围的介质由土壤换成了地表水,因此有的文献也称之为“Lake-coupled geothermal system”^[14]。闭式系统在欧美国家有不少的应用,本书第7章详细介绍了美国艾奥瓦州的一个大型闭式系统。

4. 地表水源热泵的特点

总的来讲,地表水源热泵具有以下特点:

(1) 地表水源热泵利用了每年制热运行前地表水体中蓄存的太阳能资源,这是一种清洁的可再生能源。

(2) 地表水源热泵机组冬季运行水温一般比室外气温高,夏季运行水温一般比室外气温低,能获得较高的制冷及制热 COP 值。

(3) 地表水体温度波动的范围小于空气,水温相对较为稳定,这使得热泵机组运行更稳定、可靠,不存在空气源热泵的冬季除霜等问题。

(4) 地表水源热泵可以对建筑物供热和供冷,在冬季热负荷较小或不需要供热的地方,还可以供应生活热水。一套系统可以代替原来的锅炉和制冷机两套系统,没有锅炉房、冷却塔和空调室外机,节省建筑空间,也有利于建筑的美观。

(5) 如果建筑物附近有足够的地表水源可资利用,地表水源热泵系统的造价相比地埋管地源热泵明显降低。

1.3 我国水资源的现状及开发利用

水是人类赖以生存和发展的不可替代的自然资源。广义而言,水资源包括地球上的一切水体及水的其他存在形式,如海洋、河流、湖泊、地下水、土壤水、冰川、大气水等;狭义而言,水资源指陆地上可以逐年得到恢复、更新的淡水。按照工程上的提法,水资源是指对人类有使用价值,而且能够开发利用的水。

1.3.1 水资源的循环

水循环是指地球上各种形态的水在太阳辐射、地心引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗及径流等环节,不断发生转换的周而复始的运动过程。海洋和陆地之间的循环称为大循环,在大循环过程中交织着一些小循环。由海面蒸发的水汽,以降水的形式落到海面上,或从陆地蒸发的水汽再以降水的形式落到陆地上,这些循环为小循环。

在水循环过程中,海洋向陆地输送水汽,再加上陆地上水面、土面、叶面的蒸发,成

为陆地上降水的来源。陆地上的降水一部分被植物截留；另一部分或沿地面流动形成地表径流，或渗入地下补给土壤水和地下水，形成壤中流和地下径流。地表径流、壤中流和地下径流汇入河流，注入内陆湖泊和海洋，从而完成水资源的循环。可见，大陆上有多余的水注入海洋，大陆上的降水量必然要比蒸发量大，这些多余的水汽来自海洋的蒸发。而海洋上的蒸发量要比降水量大，才能有多余的水汽输送到大陆。

1.3.2 我国水资源的分布^[15,16]

水资源总量是指当地降水形成的地表和地下产水总量，即地表产流量与降水入渗补给地下水量之和，是逐年更新的动态水量。地表水资源等于天然河川径流量。在计算水资源总量时，既可由地表水资源量与地下水资源量相加，扣除两者之间的重复量求得，也可由地表水资源量加上地下与地表水资源不重复量求得。

我国多年平均的年水资源总量约为 28124 亿 m^3 ，居世界第 6 位。由于人口众多，我国人均水资源量仅 2400 m^3 左右，不足世界人均占有量的 1/4，居世界第 110 位，被列入世界上 13 个贫水国家之一。我国水资源的时空分布很不均匀，降雨量和径流量年内、年际变化幅度很大，降低了水资源的可利用程度，而且容易造成旱涝灾害；在地区分布上，受降水量的影响，东南多，西北少。

每年的水资源量是变化的，下面以 2006 年为例来说明我国水资源的分布情况。2006 年，我国的水资源总量为 25330.1 亿 m^3 ，其中地表水资源 24358 亿 m^3 ，地下水资源 7642.9 亿 m^3 ，地下水与地表水资源不重复量 972.1 亿 m^3 。有 6670.8 亿 m^3 的地下水资源由地表水资源转化形成，属于地下水与地表水资源重复计算量。根据各地的水资源状况，我国划分有 10 个水资源一级区，其中松花江、辽河、海河、黄河、淮河、西北诸河 6 个水资源一级区简称为北方六区；长江（含太湖）、东南诸河、珠江、西南诸河 4 个水资源一级区简称为南方四区。附录 1 为 2006 年各水资源一级区的水资源情况，附录 2 为 2006 年各省级行政区的水资源量。南方四区的水资源量占全国的 81.2%，北方六区的水资源量只占全国的 18.8%。具体到各个省份，也呈现出南方多、北方少的特点。

1.3.3 我国水资源的开发利用^[16]

供水量是指各种水源为用水户提供的包括输水损失在内的毛水量。2006 年，全国总供水量 5795.0 亿 m^3 ，占当年水资源总量的 22.9%。其中，地表水源供水量为 4706.8 亿 m^3 ，地下水源供水量为 1065.5 亿 m^3 ，其他水源供水量为 22.7 亿 m^3 ，不包括海水直接利用量。2006 年，全国海水直接利用量为 269.3 亿 m^3 ，主要作为火电厂及核电厂的冷却用水。海水直接利用量较多的为广东、浙江和山东，分别为 136.1 亿 m^3 、42.5 亿 m^3 和 26.3 亿 m^3 ，其余沿海省份大都有数量不等的海水直接利用量。附录 3 为各水资源一级区的供用水量情况，其中的其他水源供水包括污水处理再利用、雨水收集、海水淡化等。2006 年，全国废污水排放总量 731 亿 t，其中工业废水约占 2/3，第三产业和城镇居民生活污水约占 1/3。2006 年，全国污水处理再利用量 12.9 亿 m^3 ，集雨工程水量 9.7 亿 m^3 ，海水淡化水量 0.1 亿 m^3 。

附录 3 中的数据显示，南方四区均以地表水源供水为主，其供水量占总供水量的 95% 左右；北方六区供水组成差异较大，除西北诸河区地下水供水量只占总供水量的 15% 外，

其余五区地下水供水量均占有较大的比例,其中海河区和辽河区的地下水供水量分别占总供水量的 64.5%和 55.6%。附录 4 为 2006 年各省级行政区的供用水量。各省级行政区中,南方省份地表水供水量占其总供水量均在 90%以上,北方省份地下水供水量占有相当大的比例,其中河北、北京、山西、河南等 4 个省(直辖市)地下水供水量占总供水量的二分之一以上,在华北地区 27 个主要城市中,地下水供水量占城市总用水量的 87%。在一些城市,过量开采地下水所造成的地下水位下降、地下水储量减少、地面沉降、海水入侵等现象日益严重,有的城市甚至产生地裂缝和地面塌陷。

1.4 地表水源热泵发展与研究现状

1.4.1 国外地表水源热泵的发展

在国外,早期的热泵中就开始利用江河水、湖水等地表水以及城市生活废水作为低位热源,如 20 世纪 50 年代初建成的伦敦皇家节日音乐厅热泵系统(利用 Thames 河的河水)、苏黎世的瑞士联邦技术学院热泵系统(利用 Limmat 河的河水)等^[17]。随着区域供冷供热技术在欧美、日本等国家的普遍发展,大型热泵装置逐渐在区域供冷供热系统中得到应用。与分散的小型热泵装置相比,大规模采用热泵装置的区域供冷供热系统能充分发挥其规模优势,具有能源利用效率更高、运行管理和控制更加集中可靠、初投资较少等优势。区域供冷供热与大型热泵装置的结合促进了热泵技术的大面积推广。

在日本,20 世纪 80 年代以来建成或在建的利用地表水、各类污水/废水、地下水等的大型热泵区域供冷供热系统共有 33 处,如东京幕张地区利用城市生活废水的水源热泵系统;20 世纪 80 年代初建成的东京箱崎地区区域供冷供热工程采用了隅田川的河水作为热泵热源,第一期工程的供热量为 11000kW,具有 4980m³的蓄热槽;20 世纪 90 年代初建成的采用海水热泵的大阪南港宇宙广场区域供热供冷工程,供热量达到 23300kW^[18]。

在其他国家,相继建成了一些利用海水、河水、湖水、废水的供冷供热系统,尤其以海水源热泵(Seawater Resource Heat Pumps)最为普遍。海水的热容量较大,在较深的地方全年水温变化小,常用来作为大型热泵系统的热源/热汇或冷水机组的冷却水。20 世纪 70 年代初建成的悉尼歌剧院便利用海水作为冷水机组的冷却水。北欧在海水源热泵的应用方面比较领先,瑞典和挪威已经达到规模化应用的程度。现在整个北欧有 180 多台大型热泵在运行,其中瑞典 1985 年至今建成了总容量约 1000MW 的区域供热系统,采用的热源有海水、湖水、污水、工艺废水、地下水和废烟气^[19]。在斯德哥尔摩还建成了世界上最大的海水源热泵供热站——Värtan Ropsten 区域供热站,该热泵站的装机容量达 180MW^[19]。

在一些地区,地表水也被用于直接供冷。瑞典斯德哥尔摩于 1995 年建成了利用海水的区域供冷系统,设计负荷为 60MW,冷源为来自波罗的海的海水^[20]。在北美地区深水湖泊较多,这些深水湖泊会产生温度分层现象,湖水底部可常年保持 4~5℃的水温,是夏季空调很好的冷源,可用于直接供冷。Cornell 大学建成了一个利用湖水供冷的工程,由于利用了天然的冷源,能为 Cornell 大学节约 87%的空调能耗^[21]。加拿大多伦多市兴建了目前世界上最大的利用湖水的区域供冷系统,能提供多伦多市区建筑 40%的空调用冷,能减少 75%的空调能耗^[22]。

1.4.2 国内地表水源热泵的发展现状

我国地表水源热泵的起步晚于地下水源热泵和地埋管地源热泵，从数量上来看，也显得比较少。2007 年中国建筑业协会地源热泵工作委员会（中国热泵委）对其成员单位上报的工程信息进行了统计，各类热泵的使用比例见表 1-1，地表水源热泵只占 14%。对住房和城乡建设部公布的前三批可再生能源建筑应用示范项目中的地源热泵项目进行了统计，其中地表水源热泵占 15.62%^[4]。

我国各类热泵应用面积的比例^[4] 表 1-1

	中国热泵委的统计	住房和城乡建设部示范项目统计
地下水源热泵	42%	39.26%
地埋管地源热泵	32%	21.36%
地表水源热泵	14%	15.62%
污水源热泵	12%	16.18%
混合应用	—	7.58%

我国南方地区有着众多的江河湖泊，地表水资源丰富。南方地区地表水温度变化范围比空气小，是热泵比较理想的热汇及热源。附录 9 为 2001 年湘江湘潭水文站每日上午 8:00 的水温，最高水温为 32.5℃，出现在 7 月 31 日；最低水温为 6.8℃，出现在 1 月 27 日。海水的热容量较大，凝固点较低（一般低于 0℃），适合作为热泵的低位热源。我国的海岸线较长，沿海地区有很多不冻的良港（如渤海湾周围的港口），水温条件比较理想，适合于用来发展海水源热泵。图 1-3 和图 1-4 分别为我国近海 1 月份和 7 月份的表层水温分布情况^[7]。渤海和黄海冬季大部分海域的表层水温都在 2℃ 以上，夏季表层水温在 25℃ 以下。近年来在大连、青岛等沿海城市陆续建成了一些海水源热泵系统，其中的大连星海湾商务区海水源热

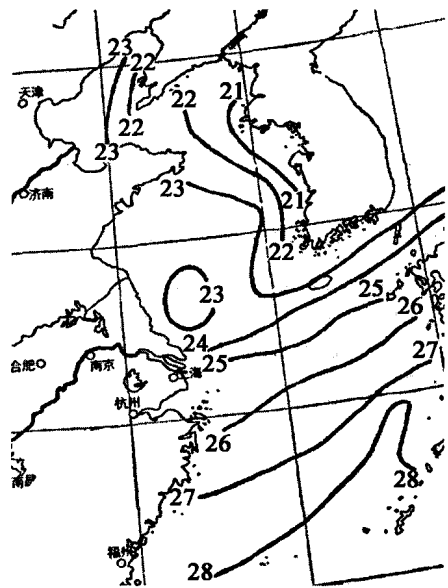


图 1-3 我国近海 7 月份表层水温分布^[7]

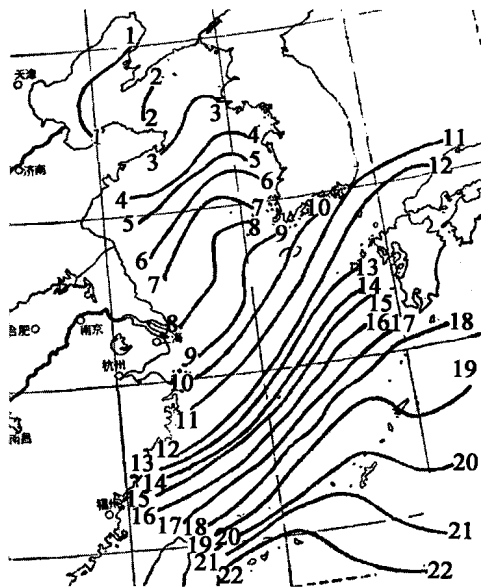


图 1-4 我国近海 1 月份表层水温分布^[7]