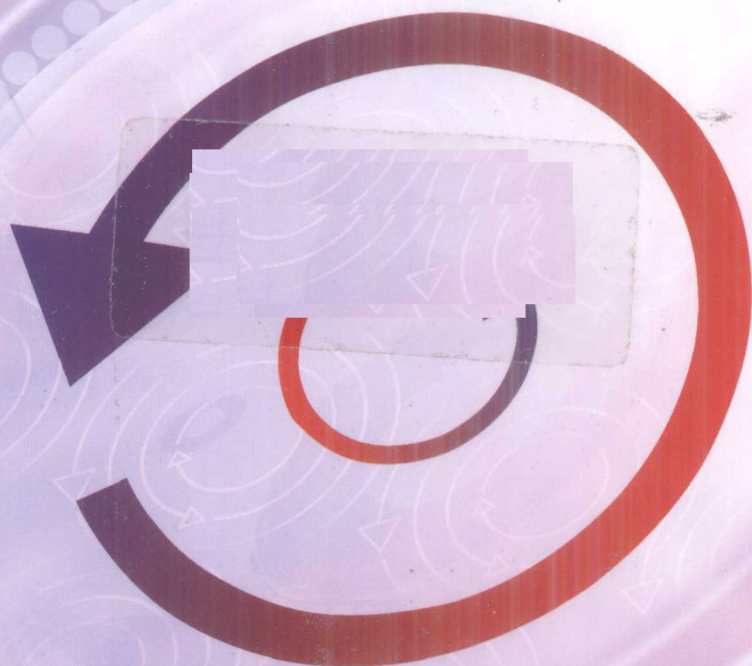


热泵技术 应用理论基础与实践

马最良 姚杨 姜益强 倪龙 等著



中国建筑工业出版社

热泵技术应用理论基础与实践

马最良 姚杨 姜益强 倪龙 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

热泵技术应用理论基础与实践/马最良等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2010

ISBN 978-7-112-11913-4

I. 热… II. 马… III. 热泵-空气调节器 IV. TU831.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 044375 号

本书是一本热泵技术应用基础的著作,系统地介绍了哈尔滨工业大学热泵空调技术研究所近十年中有关热泵理论、系统创新、实验研究、产品开发、工程应用诸方面的创新性研究成果。其主要内容包括:空气源热泵结霜、除霜特性研究以及应用实践,地下水源热泵系统应用理论基础,同井回灌地下水源热泵、土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统、新型处理后污水源热泵的应用基础研究和空调冷凝废热的回收与利用等方面的研究成果。该书可供高校相关专业的教师、学生以及工程技术人员和研究人员等参考。

* * *

责任编辑:石枫华 姚荣华

责任设计:姜小莲

责任校对:赵 颖

热泵技术应用理论基础与实践

马最良 姚杨 姜益强 倪龙 等著

*

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

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:26 字数:649 千字

2010 年 6 月第一版 2010 年 6 月第一次印刷

印数:1—3000 册 定价:68.00 元

ISBN 978-7-112-11913-4

(19167)

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)

《热泵技术应用理论基础与实践》

编 委 会

主 编：马最良

副 主 编：姚 杨 姜益强 倪 龙

编著人员：马最良 姚 杨 姜益强 倪 龙 余延顺

王 伟 范 蕊 江辉民 王 洋 韩志涛

宋 艳 程卫红 沈 朝

前言

在资源紧缺的当今年代,人们愈来愈关注如何通过一定的技术,将贮存在土壤、地下水、地表水或空气中的太阳能之类的自然能源以及生活和生产排出的废热,用于建筑物采暖和热水供应。基于这种理念,随着热泵技术的进步与发展,人们充分认识到热泵技术是应用低位可再生能源的重要技术措施之一。

进入 21 世纪后,热泵的快速发展不仅是为了解决能源问题,而更重要的是为了改善环境问题。如果将热泵从 20 世纪 70 年代末到 90 年代初的发展作为热泵发展的第一次兴旺期,那么,进入 21 世纪后,由于人们要求减少温室效应,使能源效率再次变得更为重要。出于环境原因,热泵技术将经历第二次兴旺的可持续发展,实现暖通空调的生态化和绿色化。

正因为如此,近年来,热泵技术在我国的应用获得了快速的发展。但在快速的发展中表现出一些不同于其他国家与地区的新特点。例如:

(1) 热泵空调系统在我国民用建筑中的使用量急剧上升。据统计,现阶段,我国地源热泵服务面积超过 1 亿 m^2 , 80% 的项目集中在华北和东北地区,其中沈阳 3300 万 m^2 , 北京近 1300 万 m^2 , 而且其项目数量每年以 20%~25% 的速度增长。

(2) 热泵空调系统应用规模由中小单体建筑 (1 万 m^2 以下) 转向大型建筑群住宅小区。几十万 m^2 的埋管地源热泵工程实例时有介绍。

(3) 我国地源热泵的研究是基于实际工程应用的基础上,在应用中摸索规律解决问题,但缺乏基础性的研究,自主创新能力不足。

(4) 有人认为浅层地能是一种资源,地源热泵是以“浅层地温资源”为低温热源,且“浅层地热能资源”在我国应用的区域非常广泛。基于此,在我国过分乐观地发展地源热泵。

如此等等新特点、新问题将会为热泵技术在中国应用带来不确定性与未知性。为此,我国热泵的快速发展亟需热泵技术应用基础理论的支持,亟需在不断实践中勇于创新,更好地走出一条有中国特色的热泵技术新兴发展道路,寻求我国发展热泵技术最优或较优的发展路径。

基于此,我们在国家自然科学基金 (双级耦合式热泵供暖的应用基础研究和系统创新 (50278021)、土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统的应用基础研究 (50378024)、空气源热泵除霜系统创新及其机理研究 (50606007))、“十一五”国家科技支撑计划重大项目课题“水源热泵高效应用关键技术研究及示范” (2006BAJ01A06) 等的资助下,近十年来,开展了热泵技术在我国应用的基础研究工作。其研究成果已在不同学术期刊上和硕士、博士学位论文以学术论文发表。但是,由于论文较多、各有侧重,观点散见在不同刊物和硕士、博士学位论文中,查找很不方便,所以为了消除这个困难,现将研究成果加以总结与汇总,撰写此书以便于同行参阅,更以此作为抛砖引玉之用,以引出国内同行对热

泵技术应用基础的研究与实践的热潮，避免今后我国热泵快速发展中出现类似于世界各国热泵发展过程中曾多次出现热泵发展停滞、热泵市场下跌等问题。

本书成稿的基础是我的博士生研究生（本书编著者）的博士学位论文，在此还要感谢国内著名学者吴元炜、田胜元、**彦启森**、江亿、陈沛霖、龙惟定、张旭、陈再康、张国强、涂光备、朱能、由世俊、李安桂、郎四维、张小松、廉乐明、陆亚俊、何钟怡、高甫生等教授对这些博士学位论文的评审。由于他们的评审使得论文更加完善。

本书由马最良、姚杨、姜益强、余延顺、王伟、江辉民、范蕊、倪龙、王洋、韩志涛、宋艳、程卫红、沈朝编著，马最良担任主编，姚杨、姜益强、倪龙担任副主编。全书由马最良、姚杨统稿。本著作的出版凝聚了姚荣华、石枫华编辑的辛勤工作，在此表示敬意和感谢。

学生们也以此书献给辛勤耕耘了近 50 载、即将步入古稀之年的马最良教授。先生渊博的学识、谦和坦荡的襟怀、一丝不苟的治学态度、孜孜不倦的敬业精神，以及对学科前沿的敏锐洞察力，是学生们学习的楷模。先生通过言传身教教给我们的不仅是知识，更是一种学习、工作和为人处世的方法，这将使我们受益终生。

由于编著者的水平有限，难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

符 号 表

a ——热扩散率, m^2/s ;	l_c ——液膜定性尺度, m ;
A ——面积, m^2 ;	L_p ——埋管间距, m ;
ADF ——日平均释冷率;	$L_{w,p}, L_{w,r}$ ——热源井的抽水流量、回水流量, m^3/s ;
$A_{\min}$ ——空气侧最小流通面积, m^2 ;	m ——管列数;
B ——含水层的厚度, m ; 标煤耗量, kJ/a ;	M ——质量, kg ; 含水层厚度, m ;
b_s ——井过滤器的长度, m ;	$\dot{m}$ ——质量流量, kg/s ;
c, c_p ——比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;	$\dot{m}_{\text{fr}}$ ——霜的积累速率, kg/s ;
C ——逐日冷凝热能力系数;	$\dot{m}_s$ ——用于霜厚度变化的结霜量变化率, kg/s ;
COP ——性能系数;	$\dot{m}_p$ ——用于霜密度变化的结霜量变化率, kg/s ;
D ——直径或水力直径, m ; 井间距, m ;	n ——实验指数; 管排数; 孔隙率, %;
d_a ——空气的含湿量, kg/kg ;	N ——热源井的井数;
d_p ——液滴直径, m ;	p ——压力, Pa ;
d^* ——液柱截面直径, m ;	Δp ——压力降, Pa ;
D_f ——结霜除霜损失系数;	q ——渗流速度, 又称 Darcy 速度, m/s ;
D_{fe} ——结霜量指标;	$\dot{q}$ ——热流量, W/m^2 ;
D_{fm} ——平均结霜除霜损失系数;	q_a ——地下水渗流速度, m/s ;
D_s ——霜表面水蒸气的扩散系数, m^2/s ;	q_l ——单位埋深盘管的换热率, W/m ;
E ——次能源利用系数; 平均误差;	$\dot{Q}$ ——热量, W 或 kW ;
EER ——能效比;	Q ——热量, kJ ;
f ——摩擦因子;	Q_b ——盘管在蓄冷、释冷过程的总冷量传递损失, J ;
F ——摩擦力, N/m^2 ;	Q_c ——冷凝热量或热负荷, W 或 kW ;
F_r ——平均温差修正系数;	Q_e ——制冷量或冷负荷, W 或 kW ;
f_s ——过热区摩擦阻力系数; 固相率;	Q_{H} ——热水供应耗热量, W 或 kW ;
g ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 自由落体加速度, m/s^2 ;	Q_s, Q_r ——盘管的蓄冷与释冷量, J ;
G ——体积力, N ; 喷淋液量, kg/h ;	r ——半径, m ;
h ——拉梅系数;	r_d ——污垢系数, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$;
H ——水头, mH_2O ;	r_{ei} ——当量盘管内半径, m ;
$HSPF$ ——热泵供热季节性能系数;	r_{eo} ——当量盘管外半径, m ;
h ——焓值, J/kg ;	r_K ——渗透系数比 (水平/竖直);
i_{sv} ——水蒸气的升华潜热, J/kg ;	$r_{\text{o,L}}$ ——原水交换负荷比, %;
K ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 渗透系数, 又称水力热导率, m/s ;	$r_{\text{o,w}}$ ——循环单井的原水交换比, %;
K_h ——综合渗透系数, m/s ;	
K_r ——水平渗透系数, m/s ;	
K_z ——竖直渗透系数, m/s ;	

R ——水蒸气气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;
 R_{th} ——水力影响半径, m ;
 s ——水位降深, mH_2O ;
 S_0 ——含水层单位储水系数, m^{-1} ;
 S_1 ——管间距, m ;
 S_2 ——管排距, m ;
 S_f ——翅片间距, mm ;
 t ——温度, $^{\circ}\text{C}$; 时间坐标, s ;
 t_B ——热贯通时间, h ;
 t_g ——供水温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_h ——回水温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T ——温度, K ; 时间, h ;
 T_b ——平衡点温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T_{nl} ——土壤开始解冻温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T_{ms} ——土壤开始冻结温度, $^{\circ}\text{C}$;
 T_s ——霜表面的温度, K ;
 u ——流速, m/s ;
 v ——比容, m^3/kg ; 迎面风速, m/s ;
 W ——功率, W 或 kW ; 土壤的质量含水量, kg/kg ; 泰斯井函数;
 $\dot{w}_a$ ——水蒸气的流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 x ——干度;
 x_d ——蒸干点干度;
 X_{nt} ——Lockhart-Martinelli 参数;
 α ——换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 热弥散度, m ;
 $\bar{\alpha}$ ——孔隙率;
 δ ——厚度, m 或 mm ;
 δ' ——量纲一液膜厚度;
 $\bar{\delta}$ ——平均液膜厚度, m 或 mm ;
 ε ——传热系数修正系数;
 Γ ——淋激密度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;
 Δt ——时间步长; 温差, $^{\circ}\text{C}$;
 Δz ——制冷剂流动方向步长, m ;
 η ——效率;
 θ ——圆周角度, $^{\circ}$ 或 弧度;
 θ_{sc} ——井的完整度, 无因次;
 λ ——热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
 λ_a ——含水层滞止热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

μ ——动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 μ_s ——含水层储水系数, m^{-1} ;
 ν ——运动黏度系数, m^2/s ;
 ρ ——密度, kg/m^3 ;
 σ ——液体表面张力; 热容比;
 τ ——切应力, N/m^2 ; 结霜时间, min ;
 φ ——相对湿度, %;
 ψ ——流函数;
 ψ_1 ——热贯通系数;
 ψ_s ——储能比;

下标符号

a ——空气; 大气;
 c ——冷凝;
 cvt ——对流;
 com ——压缩机;
 e, vap ——蒸发;
 evr ——环境;
 f ——肋片;
 fr ——霜;
 i ——入口, 冰, 内部;
 L ——液相;
 o ——出口, 外部;
 P ——管子;
 pcm ——相变材料;
 PW ——管壁;
 r ——制冷剂;
 S ——蓄能; 过热气体, 显热;
 sc ——过冷;
 sh ——过热;
 sys ——系统;
 t, tot ——总的;
 tp ——两相的;
 V ——气相, 水蒸气;
 w ——水侧; 室外; 地表水;

准则数

Re ——雷诺数;
 Pr ——普朗特数;
 Nu ——努塞尔数;
 Ar ——阿基米得数;

目 录

第 1 章	绪论	1
	1.1 在我国热泵技术发展进步中应关注的几个问题	1
	1.2 改善热泵空调系统性能的途径	5
	1.3 热泵研究工作的回顾	11
第 2 章	空气源热泵结霜特性研究	17
	2.1 概述	17
	2.2 国内外研究进展与分析	18
	2.3 结霜模型	21
	2.4 空气侧换热器传热模型	24
	2.5 空气源热泵结霜稳态模型求解及模拟结果分析	27
	2.6 空气源热泵结霜动态模型求解及模拟结果分析	32
	2.7 空气侧换热器结构参数对结霜特性的影响	36
	2.8 增加蒸发器面积对延缓空气源热泵结霜的实验研究	40
第 3 章	空气源热泵除霜特性研究	45
	3.1 国内外研究进展与分析	45
	3.2 空气源热泵热气除霜的实验研究	51
	3.3 空气源热泵热气除霜能耗特性研究	60
	3.4 空气源热泵蓄能热气除霜的实验研究	62
	3.5 空气源热泵蓄能热气除霜能耗特性研究	72
	3.6 空气源热泵误除霜的实验研究	76
第 4 章	空气源热泵的应用实践	81
	4.1 概述	81
	4.2 空气源热泵在我国应用的研究	81
	4.3 空气源热泵在低温工况下应用存在的问题与对策	89
	4.4 单、双级耦合热泵供暖系统	94
	4.5 双级耦合热泵供暖系统在我国应用前景分析	97
	4.6 单、双级耦合热泵系统中空气源热泵冷热水机组的 实验研究	103
	4.7 单、双级耦合热泵应用实例	107
	4.8 空气源热泵故障分析与诊断	118
第 5 章	地下水源热泵系统应用理论基础	121
	5.1 概述	121

	5.2 地下水源热泵的研究现状与进展	125
	5.3 地下水源热泵热源井数学模型	127
	5.4 热源井引起的地下水渗流理论研究	135
	5.5 地下水源热泵回灌研究与分析	141
	5.6 地下水源热泵适应性分区研究	147
第 6 章	同井回灌地下水源热泵	153
	6.1 填砾抽灌同井的现场实验研究	153
	6.2 热源井数学模型的实验验证	164
	6.3 水力特性分析	177
	6.4 热力特性分析	181
	6.5 热贯通定量研究	185
	6.6 季节性蓄能分析	190
	6.7 水文地质条件的影响	194
	6.8 井参数的影响	198
	6.9 取热负荷的影响	201
	6.10 排放策略的影响	203
第 7 章	水源热泵系统的应用实践	207
	7.1 水源热泵系统的应用	207
	7.2 地下水源热泵热源井设计方法	216
	7.3 地表水源热泵塑料螺旋管换热器设计	222
	7.4 带辅助热源的水源热泵设计负荷比分析	229
第 8 章	新型处理后污水源热泵的应用基础研究	235
	8.1 概述	235
	8.2 处理后污水/原生污水热泵	235
	8.3 淋激式换热器水平管降膜换热模型	237
	8.4 水平管管间流动形态及液膜厚度的研究	244
	8.5 水平管降膜膜状流的流动特性、传热特性及稳定特性	249
	8.6 淋激式换热器管束模型及热泵系统模型	257
	8.7 干式自除污壳管式污水热泵	263
第 9 章	地埋管换热器的热渗耦合理论与实验研究	277
	9.1 地埋管换热器的传热模型研究现状与进展	277
	9.2 热渗耦合作用下地埋管换热器的传热分析	280
	9.3 热渗耦合模型的实验验证	284
	9.4 地埋管在热渗耦合作用下土壤温度场的实验研究	289
	9.5 单井地埋管换热器的模拟与分析 ^[36]	298
第 10 章	土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统	302
	10.1 概述	302
	10.2 集成系统的流程与特点	304

第 11 章

10.3	集成系统地理管换热器传热过程分析	308
10.4	集成系统地理管换热器传热过程的物理模型	309
10.5	土壤蓄冷、释冷过程的数学模型	312
10.6	求解相变问题的固相增量法模型	314
10.7	土壤蓄冷与释冷过程实验研究	315
10.8	集成系统土壤蓄冷与释冷过程的模拟分析 ^[21~23]	324
10.9	集成系统冷量损失的模拟分析	337
10.10	地下水渗流对集成系统运行特性的影响 ^[29]	342
10.11	集成系统全年运行特性模拟分析 ^[32]	349
	空调冷凝废热的回收与利用	356
11.1	概述	356
11.2	应用辅助冷凝器作为恒温恒湿机组的二次加热器 ^[2]	356
11.3	带热水供应的节能型空调器 ^[3~6]	362
11.4	中高档旅馆免费热水供应系统 ^[12]	375
	参考文献	383

第1章 绪 论

众所周知,利用低位再生能的热泵技术在暖通空调领域的应用中充分显示出如下的特点^[1]:

(1) 热泵空调系统用能遵循了能量的循环利用原则,避免了常规空调系统用能的单向性。所谓用能的单向性是指“热源消耗高位能(电、燃气、油与煤等)——向建筑物内提供低温的热量——向环境排放废物(废热、废气、废渣等)”的单向性用能模式。热泵空调系统用能是一种仿效自然生态过程物质循环模式的部分热量循环使用的用能模式,实现热能的级别提升。

(2) 热泵空调系统是合理利用高位能的模范。热泵空调系统利用高位能作为驱动能源,推动动力机(如电机、燃气机、燃油机等),然后再由动力机驱动工作机(如制冷机、喷射器)运行。工作机像泵一样,把低位热能输送至高位以向用户供暖,实现了科学配置能源。

(3) 热泵空调系统用大量的低温再生能源替代常规空调中的高位能。通过热泵技术,将贮存在土壤、地下水、地表水或空气中的自然低品位能源,以及生活和生产排放的废热,用于建筑物的采暖和热水供应。

(4) 暖通空调用热一般来说都是低温热源。如风机盘管只需要 50~60℃ 热水,地板辐射采暖一般要求提供的热水温度低于 50℃。这为使用热泵创造了提高性能系数的条件。也就是说,在暖通空调工程中采用热泵,有利于提高它的制热性能系数。因此,暖通空调是热泵应用的理想用户之一。

基于上述特点,热泵技术注定会在我国暖通空调中兴盛,热泵在我国的应用与发展也充分证明了这一点^[2]。正因为坚信上述理念,我们才能从 20 世纪 60 年代开始研究热泵技术,一直坚持到现在。

1.1 在我国热泵技术发展进步中应关注的几个问题

进入 21 世纪后,热泵空调系统在我国的发展十分迅速,其应用日益广泛,已在热泵理论、系统创新、实验研究、产品开发、工程应用诸方面取得可喜成果,在建筑节能中起到了积极的推动作用,为建筑节能提供了新的思路与技术,为节能减排做出了积极的贡献。近年来,在政府及相关部门的鼓励和支持下,热泵空调系统进入了快速发展时期。在北京、沈阳、天津、山东、河南、湖北、广东、江苏等地从上到下都大力推广与应用热泵空调系统。如 2007 年沈阳应用地源热泵空调系统的工程建筑面积为 $1500 \times 10^4 \text{ m}^2$ ^[3], 2008 年达到 3300 多万 m^2 , 2009 年上半年已达 4000 多万 m^2 ^[4]; 2005 年北京水源/地源热泵机组销售额达 2 亿元, 2006 年销售额上升为 2.5 亿元^[5], 2008 年北京地源热泵服务面积达 1300 万 m^2 左右; 2006 年天津地源热泵工程项目达 130 多项,空调面积达 $200 \times$

10^4 m^2 。这些项目显示出：热泵空调系统比常规空调系统具有更好的节能效果和环保效益。但是，在激烈的市场竞争中也暴露出一些技术、设计、施工和运行中的问题。如：不做工程场区调查与水文地质勘察，就盲目上马地源热泵工程；地下水回灌井堵塞，不能100%回灌地下水；视浅层地温能为分布普遍、埋藏浅、可持续利用，可以作为化石能源的替代资源，基于此发展地源热泵；井水泵、循环泵等功耗过高；对水井的运行缺乏科学的维护管理等。因此，为了热泵技术在我国的健康发展，有必要对各地区正在运行的空调系统的运行现状与效果作全面调查研究，给出正确的评价。在世界各国热泵发展过程中也曾多次出现热泵发展停滞，热泵市场下跌等问题。我们应很好地吸取各国发展热泵的经验与教训，关注在我国热泵技术发展中可能出现的问题，以避免在今后我国热泵快速发展中出现类似的热泵发展停滞现象。

1.1.1 改善和提高空气源热泵的低温适应性问题

近年来，各国学者、生产厂商对改善和提高空气源热泵低温适应性的研究都十分关注，2002年美国能源部将寒冷气候条件下工作的热泵（ 0°C 热泵）列为商业建筑暖通空调系统最具节能潜力的15项技术措施之一^[6]。2008年欧盟指令认可空气源热泵和水源热泵（不只是地源）技术为可再生能源技术，这将会推进空气源热泵在寒冷地区应用的显著增长。我国从20世纪90年代中期开始将空气源热泵冷热水机组的应用范围由长江流域开始扩展到黄河流域和华北等地区，在我国北方一些城市开始应用。如：在京津地区、山东胶东地区、济南、西安等地区都开始选用空气源热泵机组作空调系统的冷热源^[7~9]，试图以此来解决或部分解决这些地区供暖的能源与环境问题。几年的实际应用情况表明，从技术与经济方面看，空气源热泵的应用扩展到我国黄河以南地区是可行的，而在黄河以北的寒冷地区应用空气源热泵却有一些特殊性。在黄河以北以空气源热泵作为过渡季的空调冷热源用，其效果良好。若全年使用，其系统的安全性、可靠性等均存在一些特殊的问题。这主要是因为空气源热泵受室外环境的影响较大，这些地区室外气温过低，引起空气源热泵供热量不足、压缩机的高压缩比、排气温度过高、能效比下降、制冷剂的冷迁移、润滑油的润滑效果变差、机组的热损失加大等问题。

因此，为了解决空气源热泵在寒冷地区应用问题，我们要关注以下几个问题：

- (1) 空气源热泵在寒冷地区应用存在的问题；
- (2) 改善空气源热泵低温运行特性的技术措施；
- (3) 几种适用于寒冷地区气候特点的热泵循环；
- (4) 适用于寒冷地区的空气源热泵机组；
- (5) 双级耦合热泵系统。

1.1.2 我国地下水超采现象严重，已引起一些重大地质灾害问题^[10]

地下水超采包括两部分：一是浅层地下水超采，即地下水多年平均开采量超过相应的总补给量，并造成地下水位持续下降的现象；二是深层承压水超采，由于补给十分困难，其大规模开采即视为超采。

由于地下水开采过于集中，我国一些城市地下水位持续下降，降落漏斗面积不断扩大；地面下降。上海早在20世纪20年代开始，由于大量超采地下水导致地面下沉，从1921年到1967年，最严重的地区下降 2.37 m ^[11]。至今，全国已有50多个大中城市出现了区域性地面沉降，80%分布在沿海地区，较严重的是上海、天津、沧州、苏州、宁波等

地；沿海地区，特别是山东半岛、辽东半岛和渤海湾由于地下水超采造成不同程度的海水入侵；在我国北方、云贵高原和两广等开采岩溶地下水的地区，由于超采，岩溶塌陷现象也比较普遍。

我国由于地下水超采引发的地质灾害问题已越来越严重，因此，在推广和应用地下水源热泵时，首要任务是保护地下水资源。地下水源热泵只能通过地下水采集浅层低温（热）能和季节蓄存的热能，而不得对地下水资源造成浪费和污染，基本实现采补平衡，不能引发地下水超采现象。

1.1.3 地下水源热泵的回灌问题^[12]

评价一个运行的地下水源热泵系统的优劣，应该首先看它能否 100% 的回灌地下水。必须符合《地源热泵系统工程技术规范》（GB 50366—2005）中 5.1.1 的规定。要有完善的回灌系统，在整个运行寿命周期内，保证 100% 回灌地下水。然后才能看它的运行经济性、可靠性和安全性等。

地下水源热泵应用于工程实际已有 60 多年的历史，在这 60 多年中时常暴露出回灌失效问题。回灌井堵塞造成井水量越灌越少，甚至灌而不下。这已是制约地下水源热泵应用的一个瓶颈。引起空调制冷业内人员的关注^[13~15]。为此，建议：

（1）对各地区正在运行的地下水源热泵的回灌措施与回灌效果作全面调查研究，杜绝抽水多、回灌少的现象存在，坚决贯彻《地源热泵系统工程技术规范》（GB 50366—2005）中关于抽取地下水全部回灌到同一含水层的强制性条文规定。对违反者，坚决停止运行，进行技术改造，直到合格为止。

（2）加强对地下水源热泵回灌技术的研究力度。开展地下水源热泵源、汇井运行特性、由于抽水和回灌引起地下水运移特性（水力、热力特性）等方面的理论与实验研究。

（3）积极寻求易于回灌的地下水源热泵形式与回灌技术，学习其他专业的回灌经验与技术。

（4）政府有关部门对地下水源热泵的回灌问题应进行长期有效的管理与监督。

1.1.4 地源热泵的热贯通问题

热贯通（亦称“热突破”）定义为热泵运行期间抽水温度发生改变的现象。对于地源热泵，热贯通现象时有发生。土壤耦合热泵当埋管换热面积不够，回水换热不充分，或者由于抽回水支管之间的换热，抽水温度会发生改变，可以视为产生热贯通现象。当地表水源热泵充当热源或者热汇的水体体积较小时，热泵运行一段时间，水体的温度会发生改变，从而改变抽水温度，发生热贯通现象。对于有回灌的地下水源热泵，热贯通产生的原因是温度不同的回水通过与含水层骨架的对流换热、自身的热对流和含水层骨架之间的导热等将热量（冷量）从回水口传到抽水口，从而引起抽水温度的变化。如加拿大 1990 年建成的一个地下水源热泵系统，冬季运行末期，由于热贯通严重，地下水温度低，机组出现了过冷保护；天津的两个地下水源热泵系统出现了热贯通，一个采暖季，地下水温度降低均值均超过 4℃。

1.1.5 浅层地能的提出与认识

地源热泵技术是随着全球性的能源危机和环境问题的出现而逐渐兴起的一门热泵技术。它是一个广义的术语，包括了使用土壤、地下水和地表水作为低位热源（或热汇）的热泵空调技术。因此为了便于使热源（或热汇）与地源热泵相呼应，国内提出了“浅层地

能”的概念化的术语,它是将土壤、地下水和地表水汇聚在同一术语中,统称为浅层地能。其研究仍沿用以往的从一个个工程视角出发,对小尺度的浅层岩土、地下水和地表水进行研究,一方面,研究浅层地能的特征,其特征对地源热泵产生什么影响,地源热泵又如何适应它的特点;另一方面,研究地源热泵的长期运行对浅层地能会产生什么样变化,如何解决等等。但是,在研究中注意到对“浅层地能”有不同看法^[16]。

近年来地源热泵在我国的应用日益广泛,工程实例的规模越来越大,几十万平方米的地源热泵工程实例时有介绍。因此,打井、埋管所涉及的土地面积也越来越大,甚至可能发展到城市一个区域或几个区,对于大面积土地下的地埋管,再像以往设计地源热泵系统时,将地下岩土的远端温度 t_{∞} 作为未受干扰的情况的岩土温度,其设计结果与实际情况相差较大。另一方面,人们开始从宏观的角度,对大尺度的浅层岩土层进行研究,甚至对整个浅层岩土进行研究,提出“浅层地温能资源”的概念。文献中认为,“浅层地温能是指地表以下一定深度范围内(一般为恒温带至200m埋深),温度低于25℃,在当前技术经济条件下具备开发利用价值的地热能”;“浅层地温能是地热资源的一部分”;“浅层地能是赋存在地球的表面岩土体中的低温地热资源”;“分布普遍、埋藏浅、可持续利用,可以作为化石能源替代资源,减少温室气体的排放”等等。对此,应注意以下几个问题:

(1) 地球是一个大热库,但处于工程场区内的浅层地温能相对要小很多。

(2) 水平埋管和大口井由于位于变温带,其热能的来源为太阳能与地热能;U形管和深井位于恒温带,其热能的来源主要为大地热流(其值平均为几十 mW/m^2)和浅层地温能。而大地热流与建筑物的热负荷($30\sim 40\text{W}/\text{m}^2$)相差甚远,这又如何可以持续利用,正如文献[12]认为把恒温带地层看作“取之不尽,可不断再生的低温地热资源”是犯原则性的错误。此问题值得研究和分析。

(3) 热泵实践过程中也发现热量来源不足的问题。如法国224户住宅利用地源热泵供暖,经10~20年的运行后,地下水温会下降好几摄氏度,水温的利用变得越来越困难^[17],类似的例子很多。为此,作为一种资源,应分析清楚可开采的价值。

(4) 目前我国热泵空调系统在空调中所占比例还很小(2007年占2%)。由于它分布的分散性,系统大多是冬、夏均运行,投入运行的时间还短等原因,目前还没凸显出浅层地温能的枯竭现象。但要注意国内地源热泵规模大的特点,在局部地区会出现什么问题。

通过上述分析,我们认为“浅层岩土储能+浅层地温能”才是地源热泵可持续利用的低温热源^[18]。通过蓄能技术将夏季热能转移到浅层岩土中储存起来,冬季再通过热泵技术将浅层岩土层中的热能取出向用户供暖。在此过程中,浅层地温能作为一种辅助性的调节用能,它是地源热泵安全用能的一种保障。但是多年取热量和储热量的严重不平衡,会使浅层岩土层富积或亏损部分热量,不利于地源热泵的高效而健康的运行,也会对浅层岩土层带来一些新的问题。应杜绝此问题的发生。

地源热泵系统采用浅层岩土层储能技术后,不仅解决了能量的来源问题,而且避免了人们担心的地源热泵长期运行可能引起的区域性热污染和地面沉降的地质灾害问题。

1.1.6 浅层岩土层储能

在含水层储能技术基础上,发展与研究浅层岩土层储能技术,事关地源热泵的快速发展和健康运行。含水层储能是一种利用地下含水层作为介质的储能系统,是一项世界知名的储能技术,现已有几十年的发展史。早在1958年上海开始采用深井回灌技术,以减缓

地面沉降,与此同时,提出“冬灌夏用”含水层储能的思想,并于1965年开始大规模采用“冬灌夏用”、“夏灌冬用”技术,为纺织行业供冷、供暖。随后该技术在北京、杭州、西安、南昌等十几个城市推广使用。20世纪80年代初期,国内已有20多个城市推广含水层储能技术。20世纪80年代末和90年代初该技术凸显出一些问题,已难于继续大力发展。从上海看,地下储能井数目从1984年的近400口减少到现在的100口。而在国外,由于能源危机的出现,于1973年才提出含水层储能的思想,虽然晚于我国,但其发展很快而应用效果显著。如荷兰仅有20年的发展历史,已完成200多个大型地下储能和地下水源热泵项目,成为世界上地下储能和地下水源热泵成功应用的典范,目前,已进入商业化阶段。

为什么国内外发展含水层储能技术有如此的不同和差距。这主要是因为国内外采取的技术路线和研究问题的不同^[19]。国内研究是基于实际工程应用的基础,在应用中摸索规律,解决问题;国外研究侧重于机理,摸索不同条件下含水层储能思想的可行性,可能出现的问题等,在大量实验基础上开展应用。如1976~1977年法国在Bonnaud附近进行10次小型的承压含水层储能实验;1976~1982年美国Auburn大学在美国能源部的资助下深入开展了6次承压含水层储能实验研究^[19]。在实验研究支撑下,再用于工程。

为地源热泵技术的发展,再次提出浅层岩土层储能的思想。浅层岩土层储能的发展需要科技先行。只有通过持续的实验和理论研究,不断的技术创新,才能不断发展此项技术,支撑地源热泵技术的进步。因此,在今后希望:

(1) 在含水层储能技术的基础上,开展浅层岩土层(干土、湿土、饱和土层和有渗流的含水层)储能机理、储能地质条件、应用技术等方面的应用基础研究;

(2) 在土壤蓄冷与土壤耦合热泵集成系统设想基础上,研发适用于寒冷地区的土壤蓄热与地源热泵集成系统;

(3) 结合地源热泵技术,提高低温浅层岩土层储能的利用效率等问题。

未来能源与环境的问题将是人类面临的重大挑战,也是促进科学技术发展的良好机遇。正因为这样,热泵技术将会在能源与环境问题的推动下,获得进步与发展。为此,关注我国热泵技术发展进步中的问题,其目的是更好地走出一条有中国特色的热泵技术新型发展道路,寻求我国发展热泵技术最优或较优的发展路径。在建筑用能的节能减排中做出应有的贡献。

1.2 改善热泵空调系统性能的途径

热泵空调系统是由热泵机组、驱动能输配系统、低位能采集系统和暖通空调用户系统4大部分组成的,也是热泵系统中应用最为广泛的一种系统。电动热泵空调系统的制热性能系数只要大于3,则从能源利用观点看热泵就会比热效率为80%的区域锅炉房用能要节省^[20]。但是要注意其节能效果与效益的大小取决于负荷特性、系统特性、地区气候特性、低温热源特性、燃料与电力价格等因素。因此,同样的热泵空调系统在全国不同地区使用时,其节能效果与效益是不一样的。为了使热泵空调系统比常规空调系统更具有节能效果和环保效益。就应该从热泵空调系统的各组成部分着手研究改善其性能的途径。

1.2.1 低温热源种类的优化选取

目前,热泵空调系统常选用的低温热源有空气、地下水、地表水(江水、河水、湖水、水库水、海水等)、生活污水和工业废水、土壤和太阳能等。选用何种低温热源将会对热泵空调系统的工作特性和其经济性有重大的影响。

众所周知^[21],热泵的工作特性及其经济性很大程度上取决于热汇温度(供热温度)和热源温度。保证热泵经济运行的条件为:

(1) 供热温度与可获取的热源温度间的温差要小。

(2) 热源温度尽可能高。

为此,在选择低温热源时,既要充分考虑上述原则,又要考虑下列各项要求:

(1) 热源任何时候在可能的最高供热温度下,都能满足供热要求。

(2) 用作热源时应该没有任何或者有极少的附加费用,文献[21]中提到热源附加投资不超过供热设备投资的10%~15%。

(3) 输送热量的载热(冷)介质的动力能耗要尽可能的小,以减少输送费用和提高系统的总制热性能系数。

(4) 载热(冷)介质对换热设备与管路无物理和化学作用(腐蚀、污染、冻结等)。

(5) 热源温度的时间特性与供热的时间特性应尽量一致。

(6) 应该便于把低位热源介质与批量生产的系列化热泵产品连接起来。

在热泵系统设计中,还应注意下述问题:

(1) 热源与热汇的蓄热问题。由于热源(如空气、太阳能等)往往具有周期性变化和间歇性,难以稳定地向热泵供给低温热量,故可设置热源的蓄热装置,以解决热源供热的不平衡性问题;热用户用热与热泵供热之间在时间上也可能存在不平衡性,或为解决电力供应的峰谷差较大的问题,常在高温端设置热汇的蓄热装置;采用季节性蓄能技术改善热泵运行特性也是目前正在研究的重要课题。

(2) 低温热源与附加热源的匹配问题。一般来说,对于大型空气源热泵(地表水源热泵),使其在室外空气气温最低时也能满足建筑最大供热量要求的做法往往是不经济的,而应该将热泵设计成保证在特别冷的天气里启动辅助热源,来补充热泵供热量不足部分。

(3) 热源多元化。热源的种类很多,其特性各不相同,如何将其集成,充分发挥各自特点,组成热泵的组合热源,这有利于改善热泵的运行特性和提高其经济性。如室内余热与空气源、室内余热与水源、土壤源和太阳能等作为热泵的组合低位热源,这对提高整个系统的节能效果与环保效益十分有利,应该说,这种组合热源的选择是一种理想的选择。

1.2.2 驱动能源的合理选取

热泵的驱动能源是指热泵驱动装置所使用的高位能源。目前,热泵常使用的驱动能源有一次能源(如天然气、水电等)和二次能源(火电、城市燃气、燃油、柴油等)。其中,电能是主要的驱动能源。因此,单相或三相交流电动机是热泵中用得最普遍的驱动装置,从最小的旋转式压缩机到最大的离心式压缩机都采用电动机驱动。只要电动机选配恰当,它就能平稳地、可靠地和高效率地运转。因此,在可预见的一段时间内,电能将继续是各类热泵的主要动力。对此,我们应该注意到:

(1) 在发电中相当一部分一次能在电站以废热形式损失掉了,因此从能量观点看,使