

Solar energy and air source heat pump
applications in the energy-saving buildings

太阳能与空气源热泵 在建筑节能中的应用

◎李元哲 姜蓬勃 许杰 著 ◎方肇洪 主审



化学工业出版社

Solar energy and air source heat pump
applications in the energy-saving buildings

太阳能与空气源热泵 在建筑节能中的应用

李元哲 姜蓬勃 许杰 著
方肇洪 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分为三章。第一章讲述了建筑围护结构的传热理论及人体在室内与周围物体热湿交换的物理数学描述等相关内容的基础知识,又针对本书的中心内容——空气源热泵供暖、空调讲述了相关的传热与热力学基础理论知识。第二章讲述了蒸汽压缩式热泵的原理、组件、制冷剂和替代物和热力循环在温熵图与压焓图上的表达方法,以及中小型压缩机的种类、特性及适应低温气候的热泵的研究进展,进一步讲述了如何选择、设计空气源热泵机组的主要参数,即蒸发温度(压力)、冷凝温度(压力)、过冷度、过热度、压缩机出口参数及与之相关的压缩机的效率、功率、能效比等确定方法。第三章重点讲述了建筑中的辐射供暖的结构、原理及特性,给出了空气源热泵辐射地板供暖的系统图示、设计参数,特别针对北方寒冷地区气象条件、建筑能耗及常用的水盘管式辐射供暖地板结构给出单位供热量与供、回水温度的相关关系;第三章中还举出多项工程示范实例验证理论的正确性。

本书可供暖通空调、能源利用、环境保护等领域的专业工作者、管理工作者参考,也可供高等学校、设计单位人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能与空气源热泵在建筑节能中的应用/李元哲,
姜蓬勃,许杰著. —北京:化学工业出版社,2015.10
ISBN 978-7-122-24863-3

I. ①太… II. ①李…②姜…③许… III. ①太阳能-
应用-建筑-节能-研究②热泵-应用-建筑-节能-研究
IV. ①TU111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 184220 号

责任编辑:戴燕红

文字编辑:李 玥

责任校对:王素芹

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 11 字数 169 千字 2015 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00 元

版权所有 违者必究



为了顺应节能减排的迫切需要，特别是面对我国北方严重的大气污染问题，北方寒冷地区急需开发新型清洁供热方式。在这种背景下，利用空气源热泵作为热源为寒冷地区供热的技术正在日益得到重视，并开始进入规模化应用的阶段。这种新型供热方式的应用需要从热泵到供热末端的系统性解决方案，也需要有理论基础、设计方法和优化运行控制等一系列的新技术和知识。由李元哲教授撰写的《太阳能与空气源热泵在建筑节能中的应用》结合作者多年在该领域中的教学、研究和工程应用探索，对这一问题的理论基础进行了比较全面的阐述，对该系统的设计方法做了较详细的介绍，对一些比较前沿的领域，如太阳能与空气源热泵结合的供热系统以及温湿度独立控制的空调系统等，也进行了有益的探索。该书的出版将为空气源热泵供热技术领域的工程技术人员提供及时和宝贵的技术支持，为该技术进一步的完善和发展提出方向。希望该书稿早日出版，以飨读者。

山东建筑大学 教授

方肇洪

2015 年 5 月



节能减排是当今人类社会为实现可持续发展而奋斗的两大课题,PM2.5等细颗粒物对人类的困扰,也加快了人们清洁空气的行动。从建筑节能到可再生能源的利用,已列入国家法规,其中太阳能和空气能由于其唾手可得,取之不尽,免费索取,更成为大众首选的清洁能源。

建筑中的采暖空调占据社会能耗的较大份额,节能意义重大,而冬暖夏凉又关系到千家万户奔小康的幸福憧憬。尤其是在寒冷气候区,以空气源热泵为热源取代燃烧化石燃料,更是多年来人们期盼的,也是在探索与争议中被认可的成熟技术。几乎与此同时,建筑中辐射供冷暖的兴起,使人们找到了节能舒适、卫生健康、冷暖合一的末端装置。它更适合与太阳能和空气源热泵这类低品位热源配套使用,所以,本书的中心内容是围绕着空气源热泵和或太阳能低温热水辐射供暖,及供冷除湿的温湿度独立空调技术。

本书分为三章,第一章讲述建筑节能的重要性,建筑围护结构的传热理论及人体在室内与周围物体热湿交换的物理数学描述。又针对本书的中心内容——空气源热泵供暖、空调讲述了相关的传热与热力学的基础理论知识。

第二章讲述蒸汽压缩式热泵的原理、组件、制冷剂及替代物和热力循环在温熵图与压焓图上的表达方法。讲述了中小型压缩机的种类、特性及适应低温气候的热泵的研究进展,进一步讲述了如何选择、设计空气源热泵机组的主要参数,即蒸发温度(压力)、冷凝温度(压力)、过冷度、过热度、压缩机出口参数及与之相关的压缩机的效率、功率、能效比等确定方法,并举例说明。

第三章重点讲述建筑中的辐射供冷暖的结构、原理及特性,

给出了空气源热泵辐射地板供暖的系统图示、设计参数，特别是针对北方寒冷地区气象条件、建筑能耗及常用的水盘管式辐射供暖地板结构给出单位供热量与供、回水温度的相关关系，使低温热水地板辐射供暖的推广有据可循。本部分提出一种冷、暖合一的顶板辐射管帘，对它进行了理论计算并示于图表中，可供参考；同时给出了与辐射供冷配套的“一种内源式固体吸附除湿”设备及实验研究结果。

在第三章中还举出多项工程示范实例验证理论的正确性，其中有主、被动太阳能与空气源热泵三项热源集成的辐射地板供暖工程，节电率高达80%。本部分示范工程的数据证实了在寒冷气候区空气源热泵地板辐射供暖的节能率高，舒适性与室温稳定性好。

本书第一、二章由李元哲执笔，第三章的示范工程实例由姜蓬勃、许杰负责完成了产品制造和工程施工，李元哲做了测试分析，并成文。

本书承方肇洪教授审定，使书的质量得到了保证，在此表示衷心感谢。

书中不妥之处，欢迎读者批评指正。

李元哲

2015年1月于北京清华园



第一章 基础知识

1

第一节 能源形势	1
一、能源形势	1
二、建筑用能	1
三、环境保护对能源利用提出的挑战	2
四、加快推动绿色建筑发展	2
五、能源的品位	2
第二节 人体对室内环境热舒适度的要求	3
一、人体的热平衡	3
二、人体与周围环境的热、湿交换	4
三、作用温度	4
四、作用温度的测量及黑球温度 t_g	4
五、空气相对湿度 φ 和风速 v 的影响	5
六、典型建筑室内热环境的标准	6
第三节 建筑围护结构的传热	6
一、建筑围护结构传热分析	7
二、稳定导热	8
三、稳定传热	13
四、对流换热	18
五、辐射换热	22
第四节 热力学的基本定律	27

第二章 蒸汽压缩式热泵

29

第一节 热泵的发展	29
第二节 蒸汽压缩式热泵	30
一、蒸汽压缩式热泵的原理及组件	30

二、理想循环过程在温熵图上的表示	31
三、理论循环与理想循环的差异	34
四、 $\lg p-i$ 图	36
第三节 制冷剂	38
一、环境保护对制冷剂的要求	38
二、热力循环效率对制冷剂的要求	40
三、对制冷剂的其他物理、化学性质的要求	41
四、常用制冷剂及替代物	41
第四节 压缩机	43
一、全封闭式压缩机	44
二、小型压缩机的功率和效率	45
三、螺杆式压缩机	48
第五节 适应低温气候的空气源热泵	49
一、空气源热泵低温适应性的进展概述	49
二、带经济器的准二级压缩机	50
三、双级压缩的空气源热泵	53
四、双级耦合的热泵	54
五、谷轮低温空气源热泵压缩机	54
第六节 蒸汽压缩式空气源热泵的其他主要部件	56
一、蒸发器	56
二、板式冷凝器与蒸发器	57
三、膨胀阀	58
四、电子膨胀阀	61
五、毛细管	63
六、四通阀	63
第七节 蒸汽压缩式热力循环参数的确定	65
一、冷凝温度的确定	65
二、蒸发温度的确定	67
三、过冷度和过热度	68
四、压缩机出口蒸汽状态的确定	69
第八节 蒸汽压缩式热泵实际循环的热力计算	71

第二节 民用建筑中的主要采暖方式和对热媒的要求	78
一、热风供暖	78
二、散热器供暖	80
三、空气源热泵低温地板辐射供暖	83
第三节 空气源热泵地板供暖在北方寒冷地区应用的节能性与适 用性	88
一、在寒冷地区采用空气源热泵地面采暖的节能性与舒适性	88
二、空气源热泵地板辐射供暖	94
第四节 空气源热泵的冲霜问题	99
一、空气源热泵的室外热交换器	99
二、结霜问题	100
第五节 主、被动太阳能、空气源热泵辐射地板优化集成供暖 系统	103
一、示范建筑概况	103
二、供暖系统——多热源、错时、互补、链接末端集成系统	103
第六节 室外温度波动对空气源热泵供暖的影响	118
一、空气源热泵的热特性	118
二、辐射供暖地板的蓄热性及对热波的衰减	120
三、空气源热泵辐射地板供暖的热过程分析	121
第七节 空气源热泵、太阳能除湿、降温空调	124
一、地板辐射供冷的进展	124
二、空气调节的室内设计工况及露点温度	124
三、典型辐射供冷的地板构造与供冷量的计算	125
四、地板的供冷量	126
五、顶棚(板)辐射供冷、暖	128
第八节 空气源热泵地板辐射供暖实践与示范工程	135
一、早期产品的工程应用	135
二、中期产品的工程案例	136
三、近期的示范工程	136
第九节 太阳能、空气源热泵除湿	139
一、市场上现有除湿机使用情况	139
二、固体吸附除湿——硅胶和水吸附对的优势	140
三、一种内源式固体吸附除湿装置	140
四、内源式固体吸附除湿机性能的实验研究	142

五、关于除湿机的处理空气量与热平衡计算	144
六、太阳能、空气源热泵温、湿度独立除湿降温空调系统	146

附录 153

附录一 饱和氟利昂 22 蒸气表	153
附录二 饱和氟利昂 134a 蒸气表	154
附录三 饱和氟利昂 407c 蒸气表	155
附录四 主要单位换算表	156

基本符号 158

参考文献 161

第一章

基础知识

第一节 能源形势

一、能源形势

人类社会的可持续发展面临着能源的挑战。我国是世界上能耗第二大国，且已有“富煤、贫油、少气”之称，所以，开发可再生能源与新能源、调整工业用能结构、提高能源利用率、节约用能等是我国长期的战略方针。在已制定的《中华人民共和国可再生能源法》及其修订版，以及《节能中长期专项规划》中已确立了上述方针的思想原则和行动目标，将太阳能热利用和热发电技术明确列入发展纲要，并提出到 2020 年实现非化石能源占一次能源消费比重达到 15%。

二、建筑用能

随着我国国民经济的发展，人民生活水平的提高，人群活动空间的扩展，建筑业对能源需求数量越来越多，标准越来越高。例如，2001 年，我国出台了《冬冷夏热地区采暖、空调设计标准》，对原本不采暖的长江流域地区也规定了采暖标准；此外，北方农村采暖、炊事也多由原来自产的生物质简易用能方式改为煤炭、电等，使商品能耗（年）达几亿吨标煤之多。

统计表明，我国的建筑用能已占社会总能耗的 20% 左右，其中，仅北方城镇集中供暖能耗就占去了四分之一以上，可见北方采暖节能的重要性。

为此,我国于1995年至2013年以来,已陆续颁布民用住宅节能设计标准,即在20世纪80年代建筑能耗的基础上逐步节约50%、65%、75%。

三、环境保护对能源利用提出的挑战

全球气候变化对现存能源利用提出了挑战。20世纪前,我国大部分地区采用的燃煤采暖,造成了严重的大气污染,在大城市好于二级以上的天气不足60%,引起我国政府高度重视。为应对气候变化与环境保护问题,在2009年的哥本哈根会议上我国的庄严承诺是,到2020年,单位GDP碳排放要在2005年的基础上减少40%~50%,并且在2010年停止一批破坏大气臭氧层的空调用制冷工质,如R12、R502和R114等。全面建成小康社会要求实现能源翻一番,保证GDP翻两番的目标,以及在治理空气中细颗粒物方面,从工业、运输、建筑三个主要方面入手,加强治理力度,都涉及国民经济结构调整和能源结构调整的战略大局。

四、加快推动绿色建筑发展

2012年,为贯彻国务院关于“十二五”节能减排综合性工作方案,有关部、委下发了加快发展绿色建筑、促进城乡建设模式转型升级的具体部署,目标是到2020年,绿色建筑比重超过30%。

绿色建筑是指在建筑的全寿命期内达到节能、节地、节水、节材、保护环境和减少污染,为人们提供健康、适用和高效的、使人与自然和谐共生的建筑。目标涉及建筑的全过程,即从建造过程到使用过程都要达到能源、资源利用的最大化和环境影响的最低化,不仅包括建造用能、建筑围护结构耗能,而且包括能源系统与设备耗能、生活方式对耗能的影响、行为节能、运行能耗等诸方面。

目标的达到要求全面集成建筑节能、节地、节水、保护环境的多种技术,而实现技术革新推动。

总之,绿色建筑的快速发展,提出了能源合理利用、综合利用的方针。

五、能源的品位

能源的价值不仅有数量的多少之分,更有品位高低的区别。所谓品位

的高低,通俗地说,就是“能”从一种状态或形式可以转化为另一种状态或形式,而后者不能逆转为前者,则前者的品位高于后者。例如,热可以从高温变成低温,但低温不能不付代价地转变为高温,认为温度越高品位越高。但要说明的是,所谓低温,下限不能超出环境温度,低于环境温度的能量品位也是高的,关于这个问题后面有所涉及。

此外,在上述的“能”的形式转化过程中,凡损失少的,或者说“效率”高的就是品位高的,反之,则是品位低的。

例如,天然气发电效率为55%以上,而煤的发电效率在30%左右,则认为天然气的品位高于煤,从这点可以看出,区别能源的品位,按“质”用能对节约能源的重要意义。

在这里,我们要特别提出“可用能”的概念,无论何种能源,只有能转化为人类可利用的“能”,才有评论它的价值和意义。

自然界里存在着大量的与环境状态相同的或区别不大的能源,如空气、地表水、土壤等,它们是清洁的,但不能轻易地转化为人类的“可用能”,但是,如果加以高科技的手段和输入少量高品位的能,则可以转化为“可用能”,因而,是很值得重视的。

建筑技术科学指出,建筑采暖、空调、生活热水一类的用能都属于有别于自然环境,但又是与之差别不大的热能。如采暖是要求比外界环境温度高,空调是要求比外界环境温(湿)度低的状态,因而,尽可能地使用少量高品位的能,来提升自然界中存在的能,使之合乎采暖、空调、生活热水的需求,而不是直接用高品位的电、天然气、石油等可用于工业、交通运输、国防事业的能源,对于节约能源、合理用能,乃至可持续发展是十分重要的。

第二节 人体对室内环境热舒适度的要求

一、人体的热平衡

人体在从食物中获取热量,并在工作时向外界做功的同时,与周围环境进行热、湿交换取得热平衡,则可以找到热舒适温度。当然,人体随时可以更换衣着调节维持体温,一般恒定体温在 36.5°C 左右。

二、人体与周围环境的热、湿交换

在室内，人体与周围环境的热交换指：

① 人体与周围空气的对流换热，它取决于周围空气的干球温度 t_r 和人体与空气的相对运动速度或风速 v 。

② 人体与包围他的所有建筑内表面（包括墙、顶、地、门、窗等）之间的辐射换热，取决于上述诸内表面的温度和这些表面的面积、物性及与人体的相对位置。

③ 人体与周围空气中的湿交换，即出汗与呼吸造成的蒸发散热；取决于空气的相对湿度。

第①、②项是显热交换，第③项则为潜热交换。

三、作用温度

将上述的两项显热交换综合起来以一个温度表示，称为作用温度，它的意义是一个假想的封闭空间具有一个均匀的温度 t_0 ，人体在这个空间里的显热交换如同与实际环境的显热交换——对流与辐射热交换是等同的，由式(1.1)可以表述：

$$(t_y - t_0)(\alpha_f + \alpha_d) = [\alpha_f(t_y - t_b) + \alpha_d(t_y - t_r)] \quad (1.1)$$

式中 t_0 ——作用温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_y ——人体表面温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_b ——包围人体所有表面的平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_r ——房间空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

α_f ——辐射换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ；

α_d ——对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

四、作用温度的测量及黑球温度 t_g

为了用一个指标（温度）给出人体与室内环境之间显热交换达到舒适的程度，可以采用一个可测量出的温度 t_g 替代上述的作用温度 t_0 ，这就是所谓的黑球温度 t_g 。黑球温度仪按下述制作，即制造一个直径 150mm 的黑色铜球模拟人体头部，在其空腔内密封一个温度传感探头，将黑球悬于人体头部的高度，则该黑球与周围环境进行显热交换，达到热平衡时在上述方程中，定量描述：

$$\alpha_f(t_b - t_g) = \alpha_d(t_g - t_r) \quad (1.2)$$

$$t_b - t_g = \frac{\alpha_d}{\alpha_f} (t_g - t_r)$$

$$\left(\frac{\alpha_d}{\alpha_f} + 1 \right) t_g = t_b + \frac{\alpha_d}{\alpha_f} t_r \quad (1.3)$$

$$t_g = \frac{t_b + \frac{\alpha_d}{\alpha_f} t_r}{\frac{\alpha_d}{\alpha_f} + 1} \quad (1.4)$$

在测量出黑球温度 t_g 的同时, 可以测试出人体的舒适感, 并找出不同衣着、不同工作情况下的热舒适温度。需要指出, 黑球温度仅考虑了人体的显热交换, 不包括空气湿度影响人体的潜热交换及风速的影响, 所以, 由它给出的温度指标仅针对一定气候区域、一定的人员习惯, 或仅用于对冬季室内舒适度的评价方法。如, $t_g = 16^\circ\text{C}$ 可以作为北方农村太阳房中的人体舒适度指标。图 1.1 所示为黑球温度测量示意图。

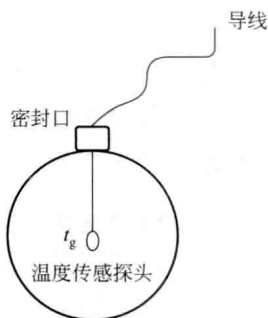


图 1.1 黑球温度测量示意图

五、空气相对湿度 ϕ 和风速 v 的影响

在人体周围空气温度较低或较正常的情况下, 空气的相对湿度对人体的热感觉起重要作用。例如, 刚盖好的房子, 因为潮湿, 生了炉子, 人也感觉很冷。这是因为空气中的水蒸气阻碍了人体与周围物体的辐射交换。相反, 在闷热的夏天, 空气温度已经接近体温, 人体对体外的对流或辐射散热已不可能, 但是, 由于湿度很高, 人靠出汗散热也不行, 这时人会出现“中暑”的现象。可是, 如果仅是周围空气温度高, 而相对湿度不高, 人体还会感到凉爽。在这种情况下, 风速会起到使人更舒适的作用。



所以，使人健康的空气调节，并不是靠低温空气，更不能加上高风速，而应当对空气的相对湿度加以适当调节，使温度、湿度、风速三者起到恰当的综合作用。

六、典型建筑室内热环境的标准

表 1.1 列出了舒适性室内气象参数。

表 1.1 舒适性室内气象参数

参 数	冬季空调	夏季空调	民用采暖
温度/℃	18~24	22~28	16~24 ^①
风速/(m/s)	≤0.2	≤0.3	≤0.3
相对湿度/%	30~60	40~65	

① 辐射地板采暖。

第三节 建筑围护结构的传热

建筑围护结构的传热是因为室内、室外的空气温度不同，太阳照射以及人体在室内的活动和炊事、照明等产生的余热引起的。在民用建筑中，一般后者量少，且多为规律性的。表 1.2 给出了有关常用数值。

表 1.2 人体散热量及散湿量

环境温度/℃		18	20	22	24	26	28	30
静坐状态	显热/W	96	81	73	65	56	43	32
	潜热/W	27	29	32	34	37	45	52
	全热/W	122	110	105	99	93	88	84
	散湿量/(g/h)	42	42	45	58	61	77	87
轻度劳动	显热/W	105	96	86	74	63	51	40
	潜热/W	47	53	61	70	81	93	105
	全热/W	152	149	147	144	144	144	145
	散湿量/(g/h)	68	79	90	105	120	130	150
中度劳动	显热/W	107	96	84	75	66	49	37
	潜热/W	93	102	114	122	131	150	160
	全热/W	200	198	198	197	197	199	197
	散湿量/(g/h)	130	245	180	180	200	220	235

冬季，室内温度高于室外，因而，就产生了由室内向室外的传热过程。大部分通过建筑物的外墙、屋顶、门窗和地面等部分散热，加上有人

体所需新风换气量和（或）进入室内的冷风渗透量，扣除上述室内活动产生的热量，形成所谓采暖热负荷，它需要由供暖设备的热量来补偿。在一般民用建筑中多以供暖加热空气解决空气温度和湿度的问题。

夏季，在室外气温和太阳辐射的综合作用下，使得若要获得室内环境的舒适条件，则必须以空调设备去除这部分余热。

可见，无论是冬季还是夏季，要提供合格的供暖、空调设备，都涉及建筑围护结构的传热过程。

一、建筑围护结构传热分析

围护结构是怎样进行传热的呢？让我们分析一下外墙的传热过程。图 1.2 所示是厚度为 δ 的外墙。当室内、室外空气温度分别为 t_r 和 t_w ，且 $t_r > t_w$ 时，由于温度差存在，产生了室内向室外的传热。它的传热过程必然是室内的热量通过墙的内表面、经过墙体而由墙的外表面向室外空气和物体传递。因此，在 t_r 和 t_w 不变的情况下，在传热的过程中，温度是沿途下降的，若 τ_1 和 τ_2 分别代表墙的内、外表面温度，则 $t_r > \tau_1 > \tau_2 > t_w$ 。

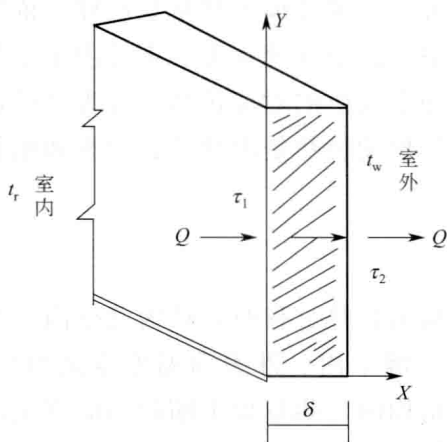


图 1.2 外墙的传热过程

在墙身中的传热是靠 $\tau_1 > \tau_2$ 的温度差而发生的。它是由墙体材料的分子热运动所引起的，这种传热方式称为“导热”。

室内空气和物体与外墙内表面的换热可以分解为两种方式：一是由于室内空气温度 t_r 高于外墙内表面温度 τ_1 ，接触外墙内表面的热空气被冷却后，失去了一部分热量，温度下降，容重增加而下沉，而另一部分离外