



中国太阳能采暖现状与趋势分析报告

主编单位：

国际铜业协会

IMSIA 国际金属太阳能产业联盟

支持单位：

山东力诺瑞特新能源有限公司

北京四季沐歌太阳能技术有限公司

北京天普新能源科技有限公司

江苏迈能高科技有限公司

北京海林太阳能设备有限公司

辽宁三友能源技术有限公司

大连希奥特阳光能源科技有限公司

北京温宁温控设备有限公司



目 录

前 言.....	4
1 我国太阳能采暖发展的背景.....	5
1.1 太阳能资源分析.....	5
1.2 太阳能采暖技术需求与发展.....	6
2 太阳能采暖技术分类.....	7
2.1 被动式太阳房技术.....	7
2.2 主动式太阳能采暖技术.....	8
2.2.1 太阳能空气采暖系统.....	8
2.2.2 太阳能热泵采暖系统.....	8
2.2.3 太阳能采暖与热水系统.....	9
2.2.4 太阳能与地源热泵联合采暖系统.....	10
2.3 主动式太阳能采暖系统的组件.....	11
2.3.1 集热器.....	11
2.3.2 蓄热部分.....	13
2.3.2.1 短期蓄热.....	14
2.3.2.2 季节蓄热.....	14
2.3.3 辅助热源.....	16
2.3.4 供暖末端.....	16
3 国外太阳能采暖发展情况.....	17
3.1 国外太阳能采暖发展历程.....	17
3.2 国外太阳能采暖研究.....	19
3.3 国外太阳能区域供热项目.....	21
4 中国太阳能采暖发展情况.....	22
4.1 我国太阳能发展历程.....	22
4.2 我国太阳能采暖研究.....	23



4.3 中国太阳能采暖项目.....	26
4.3.1 北京市太阳能供暖应用项目.....	27
4.3.2 国内太阳能采暖案例介绍.....	29
4.3.2.1 四季沐歌.....	29
4.3.2.2 山东力诺瑞特新能源有限公司.....	31
4.3.2.3 北京海林太阳能设备有限公司.....	32
4.3.2.4 辽宁三友能源技术有限公司.....	33
4.3.2.5 希奥特太阳能.....	35
5 国内已有太阳能采暖系统运行现状与发展建议.....	36
5.1 已建太阳能供暖系统运行现状.....	36
5.2 故障分许.....	36
5.3 三大环节建议.....	37
6 太阳能采暖系统推广的主要障碍与发展趋势.....	38
6.1 太阳能采暖系统推广的主要障碍及应对措施.....	38
6.1.1 经济性.....	38
6.1.2 集热器安装位置受限，系统技术复杂，缺少成熟的产业支撑.....	38
6.1.3 抗冻、抗风和防冰雹.....	39
6.1.4 防过热、防倒流和承压.....	39
6.1.5 系统技术复杂，缺少成熟的产业支撑.....	40
6.1.6 太阳能采暖地域性差别显著.....	40
6.2 发展趋势.....	41
6.2.1 发展太阳能区域供热.....	41
6.2.2 太阳能热泵采暖.....	41
6.2.3 太阳能村镇市场.....	42
7. 总结.....	42
8 参考文献.....	43



前言

我国幅员辽阔，有着十分丰富的太阳能资源。据估算，我国陆地表面每年接受的太阳辐射能约为 50×10^{15} MJ，全国各地太阳辐射总量为 3 350~8 370 MJ/m²，中值为 5 860 MJ/m²，利用太阳能供暖的潜力非常巨大。

目前，我国北方城镇以燃煤锅炉供暖为主，农村则以燃煤火炉供暖为主。供暖效率低，环境污染严重，对近年越发严重的雾霾贡献很大。太阳能采暖不仅可以替代部分常规化石能源，优化当前严峻的能源结构，从而减少环境污染；而且，太阳能采暖还可运用于缺乏市政热力供暖的地区，提高人们的生活水平。

我国的太阳能采暖技术发展已经初具规模，建立完善的技术支撑体系。2009年8月国家颁布了《太阳能供热工程技术规范》GB 50495—2009，2011年3月中国建筑工业出版社出版发行了与此标准配套的《太阳能供热供暖工程应用技术手册》，中国建筑科学研究院开发的“太阳能供热供暖空调系统优化设计软件”，为相关工程设计人员提供便利、可靠的设计依据和设计工具。国家相关部门启动一系列太阳能供暖发展计划，主要有财政部、住建部支持的“可再生能源建筑应用示范项目”和“可再生能源建筑应用示范县、示范城市”、国家发改委、财政部、农业部支持的“绿色能源县”、国家发改委、能源局支持的“新能源城市”等。西藏、新疆、内蒙、青海、甘肃、宁夏等省、自治区已经建成一大批示范工程。

但我国太阳能采暖技术仍然不够完善，已建太阳能采暖项目也暴露出许多行业发展问题。此外，国内的太阳能采暖工程多为单栋建筑或建筑群，类似于国外大规模太阳能区域供热的案例在国内还很少。因此，我国的太阳能采暖技术还需要进一步提升与改善。



1 我国太阳能采暖发展的背景

1.1 太阳能资源分析

我国的太阳能资源极为丰富，太阳能年辐射总量大于 $4200\text{MJ}/\text{m}^2$ 的地区占国土面积的76%。但是，我国太阳能资源分布并不均匀，依据年总辐射量、年日照时数、年有效日照天数划分为六类。青藏高原西部，年总辐射量大于 $8000\text{MJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数在3300小时左右，年有效日照天数达350天以上，太阳能资源极度丰富，是太阳能开发最高潜力区；西藏中部和北部、青海大部、甘肃北部、新疆东部和内蒙中西部地区，年日照时数为3000~3300小时，年有效日照天数约为330~350天，太阳年总辐射平均 $6500\text{MJ}/\text{m}^2$ 左右，属于太阳能资源丰富区；新疆除天山以北、阿尔泰山以东外，内蒙古中部和东部、东北三省西部、河北北部、宁夏北部、甘肃中部、青海东部和南部、四川西部和西藏局部，太阳能年总辐射量 $5600\sim 5800\text{MJ}/\text{m}^2$ 之间，年日照时数接近3000小时，年有效日照天数为300~330天之间，属于太阳能资源较丰富区；西北东部和北部、华北平原北部、黄土高原大部、青藏高原东南缘、云南大部、雷州半岛和海南岛、以及新疆北部，年辐射总量达到 $4800\text{MJ}/\text{m}^2$ 左右，年日照时数为2400小时左右，年有效日照天数290天，可利用太阳能资源一般。河北、山东、山西、陕西和甘肃南部，河南、安徽全境，江苏、浙江、湖北、江西、福建和广东大部分地区太阳能资源相对较贫乏，四川盆地和重庆可利用太阳能资源为全国最低。

太阳能作为永不枯竭的清洁能源，利用太阳能为建筑物供热可以获得良好的节能和环境效益，长期以来，一直受到世界各国的普遍重视。欧洲、北美对太阳能采暖的应用已有几十年的历史，应用范围和规模都很大。北欧、中欧主要城市的太阳能年辐射总量仅相当于我国可利用太阳能资源最薄弱的四川、重庆，由此可见我国太阳能采暖技术发展的潜力巨大。以历史上的采暖地区——中国北方地区为例，如果太阳能替代10%的常规建筑采暖能源，每年即可减少常规能源消耗3000万吨标准煤，节能潜力显著，因此太阳能采暖将在我国建筑节能领域发挥更大作用。



1.2 太阳能采暖技术需求与发展

随着我国城镇化的进一步发展，以及人民生活水平的逐步提高，至 2020 年，我国建筑采暖能耗可能突破 4.0 亿吨标煤/年。如果完全采用传统能源供应模式，势必进一步加重我国能源供需矛盾，恶化人居环境，阻碍可持续发展。

自 2013 年 1 月开始，我国多地区连续出现严重雾霾天气，给人民的的生活和健康带来了严重影响，环境问题再一次受到了国内外媒体和人民群众的广泛关注。从问题的根源来看，建筑冬季采暖所消耗的大量燃煤造成的污染排放，对大气环境的影响不容小视。部分城市开始推动煤炭的清洁化利用，采用天然气等逐步取代燃煤进行供暖。但在大部分地区，尤其是郊区县和农村地区，中小型燃煤锅炉的使用依然普遍。这类污染虽然单个规模小，但由于数量多、覆盖面广，对当地环境的影响极大。同时，在大气环流的作用下，容易与其他污染源连为一体，影响周边区域，使多年来通过巨大代价在局部地区实现的清洁化采暖成效付之东流。要彻底解决因供暖所造成的大气污染，需要从能源结构入手，大力发展清洁可再生能源供暖，减少建筑供暖污染排放。

太阳能具有清洁、储量巨大、成本低、和能量质量高等优点，成为可再生能源利用的首选能源。近年国内太阳能采暖技术有了快速发展，并建立相关技术支撑体系，包括国家标准、设计手册和计算机模拟设计软件等，同时实施了一批太阳能示范工程，为今后国内太阳能发展打下基础。2007 年，《中华人民共和国可再生能源法》颁布执行，明确提出鼓励发展太阳能光热技术。太阳能光热在建筑中的应用主要包括太阳能热水、太阳能供暖。2009 年 3 月 19 日《太阳能供热供暖工程技术规范》GB 50495—2009 由住房和城乡建设部、国家质量监督检验检疫总局联合发布实施，实施日期为 2009 年 8 月 1 日。以规范和已建工程为依据，国内先后出版了两本用于太阳能采暖设计的工程设计手册，分别为 2009 年出版的《太阳能供热供暖应用技术手册》、2012 年出版的《太阳能供热供暖工程应用技术手册》，为国内太阳能采暖设计提供依据。中国建筑科学研究院还研发了用于太阳能热水设计、太阳能供热供暖设计、太阳能空调系统设计的《太阳能供热供暖空调系统优化设计软件》，极大方便了工程设计。《关于印发加快推进农村地区可再生能源建筑应用的实施方案的通知》(财建[2009]306 号)、《关



于加强可再生能源建筑应用城市示范和农村地区县级示范管理的通知》（财建[2010]455号）、《关于进一步推进可再生能源建筑应用的通知》（财建[2011]61号）等文件的出台，进一步推动了太阳能供热技术在我国的发展与应用。

2 太阳能采暖技术分类

太阳能采暖系统指以太阳能作为采暖系统的热源，利用太阳能集热器将太阳能转换成热能，供给建筑物冬季采暖和全年其它用热的系统。太阳能采暖可分为被动式和主动式两种方式。

2.1 被动式太阳房技术

被动式太阳房技术仅依靠建筑方位的合理布置，通过窗、墙、屋顶等建筑本身构造和材料的热工性能，使建筑物在冬季能吸收和贮存太阳热量，夏季能遮蔽太阳辐射，散逸室内热量，从而达到采暖和降温的建筑。根据当地的条件，不需添加设备，仅仅依靠合理的建筑设计、建筑结构和建筑材料性能就可满足房屋供热降温的效果。被动式太阳房构造简单，造价低廉，维护管理方便。应用的形式主要有直接受益式、集热蓄热墙式、集热墙式、附加阳光间式和屋顶集热蓄热式等。直接受益式是任何一栋被动太阳能采暖建筑必须采用的方式，集热墙比较适宜于白天使用、早上需要尽快提高房间温度的建筑类型，集热蓄热墙和阳光间对住宅类建筑比较适宜。

被动式太阳房的规划设计是通过对建筑布局的规划和建筑设计，充分利用地形、地貌和太阳能等自然因素。设计时要保证冬季尽可能多的阳光热量进入建筑物内，从建筑物流向外部环境的热量尽可能少。所以要求南向立面有大面积玻璃透光集热面积，房屋结构有极好的保温性能，同时还需要考虑投资成本的大小。被动式太阳房设计主要包括以下几个方面：建筑朝向选择；建筑形状与体形设计；建筑立面和平面设计；建筑遮阳与蓄热；通风换气要求。



2.2 主动式太阳能采暖技术

利用太阳能集热器与载热介质经蓄存及设备传向室内供热，该系统由太阳能集热系统、蓄热系统、末端供热采暖设备、控制系统和其它能源辅助加热/换热设备构成。集热器吸收太阳辐射，使集热器内的载热介质如水或空气的温度升高，由水泵或风机传送至蓄热装置内，根据控制温度经过换热器直接送至散热装置向室内供热，其备用系统供阴天及供热不足时使用。目前国内已实施的主动式太阳能采暖系统主要有以下几种形式：

2.2.1 太阳能空气采暖系统

太阳能空气集热器供暖系统是利用太阳能空气集热器加热空气为建筑提供冬季采暖的系统。用太阳能集热器收集太阳辐射能并转换成热能，以空气作为集热器回路中循环的传热介质，以岩石堆积床作为蓄热介质，热空气经由风道送至室内进行供热，末端采暖设备一般采用热风供暖设备。太阳能空气采暖系统一般由太阳能空气集热器、岩石堆积床、辅助加热器、管道、风机等几部分组成。

该系统的优点是：结构简单，安装方便，制作及维修成本低，系统不会出现漏水、冻结、过热隐患，无需防冻措施，无需二次换热，腐蚀问题不严重，系统没有过热汽化的危险，热风供热控制使用方便等。缺点是：空气比热容小于水的比热容，热媒的输送和热量的储存都需要很大空间，蓄热通常为短期蓄热，并且不利于选取辅助热源。所需管道投资大，风机电力消耗大，储热体积大等。

2.2.2 太阳能热泵采暖系统

太阳能热泵供热系统是将太阳能集热器和热泵组合成一个系统，太阳能为热泵提供所需要的低温热源，通过热泵将低品位热能提升到高品位热能，从而为建筑物进行供热。主要运用为太阳能-空气源热泵采暖系统、太阳能水源热泵采暖系统、太阳能-土壤源热泵采暖系统。2006年，陈雁在其硕士论文中做了太阳能辅助空气源热泵采暖实验和模拟研究，搭建试验台对空气源-太阳能组合系统进行模拟研究，在不同采暖面积下，研究集热器面积及出口参数对热泵供热运行性



能的影响，论证了天津地区采用太阳能-空气源热泵供热技术的可行性，同时还发现随热负荷增加时，集热器面积的增长对机组 COP 的影响逐渐减弱。2011 年何端练、李元哲、姜蓬勃分析北京地区清华阳光阳坊办公楼主动式太阳能与空气源/水源热泵双级耦合多能互补的地板采暖系统于 2010~2011 年冬季实际运行情况，空气源/水源热泵双级耦合作为太阳能的辅助热源。该系统能够充分利用太阳能，并解决冬季室外温度低，空气源热泵出力不足的问题，提高寒冷地区热泵能效比，节省运行费用。2011 年博世热力技术（北京）有限公司刘岩对西藏那曲太阳能与水源热泵联合供热的办公建筑进行测试分析，系统采暖末端采用地板辐射供暖，太阳能综合承担 65% 建筑负荷，水地源热泵承担建筑 35% 负荷，燃油锅炉作为备用热源。水源热泵系统与太阳能集热系统联合采暖，经过经济分析，系统静态投资回收期约为 5 年，以实际案例验证太阳能-水源热泵采暖系统在西藏地区的可行性。2014 年重庆大学李婷以红原机场太阳能采暖系统为例，研究太阳能采暖系统在高海拔寒冷地区的运行性能，优化太阳能采暖系统在高海拔寒冷地区的系统配置。建立了太阳能+水源热泵采暖系统主要组件的数学模型及系统 TRNSYS 模型，通过模拟分析太阳能辐射和热负荷、有效得热量、太阳能保证率、太阳能集热器出口温度和集热效率、蓄热装置温度及各模式运行时间等，得到采暖期太阳能直接采暖占总采暖时间的 40.76%， 作者认为太阳能直接采暖在高原太阳辐射较强地区的应用很有前景。

太阳能热泵采暖系统的主要优点是：不仅可以节省电能，即消耗少量电能而得到几倍于电能的热量，而且可以有效地利用低温热源，减少太阳能集热器的面积，缩小贮水箱的容积，延长太阳能供热的使用时间；同时太阳能作为热泵低位热源，廉价清洁，具有很大节能优势。太阳能热泵系统比普通太阳能采暖系统可在较低工质温度下供热，工质温度降低有助于提高集热器效率；采用太阳能作为低位热源，有助于解决传统空气源热泵结霜问题。太阳能热泵采暖系统缺点为初投资较高，太阳能热泵性能可靠性差。

2.2.3 太阳能采暖与热水系统

太阳能采暖与热水系统用太阳能集热器收集太阳辐射能并转换成热能，以液

体（通常是水或一种防冻液）作为传热介质，以水作为储热介质，热量经由散热部件送至室内进行采暖并提供生活热水。太阳能采暖与热水系统一般由太阳能集热器、储热水箱、连接管路、辅助热源、散热部件及控制系统等组成，原理图见图 1。

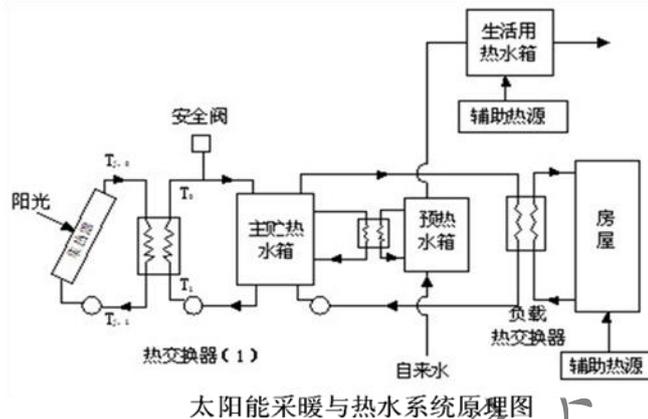


图 1 太阳能供暖与热水系统原理图

太阳能采暖与热水系统储热密度大，温度恒定，储热容器体积小，热效率高；结构安全可靠，功能多样；具有广泛的适应性，可以针对不同的应用场所；能够同时进行供热和提供热水，有利于解决非采暖季的过热问题。

2.2.4 太阳能与地源热泵联合采暖系统

太阳能与地源热泵联合采暖系统实现了太阳能、浅层地热能建筑节能中的结合。该系统运用可再生能源同时满足建筑物采暖、空调和生活热水的需求。促进可再生能源在建筑中的应用，提升太阳能采暖在建筑节能中的作用。太阳能与地源热泵相结合在非采暖季可利用土壤源热泵的埋管系统进行跨季节蓄热；在采暖季太阳能集热系统预热埋管下的水，提高进入热泵机组的温度，从而提高热泵性能。系统比较适用于严寒和寒冷地区。系统的优点在于可以全年利用太阳能，不但在冬季可以通过降低集热系统工作温度提升集热器效率，还可以解决土壤源热泵冷热不平衡问题。但是系统管路复杂，技术要求高，初投资也较高，具体设计时应进行技术经济分析。

2000 年，毕月虹、陈林根就对太阳能-土壤源热泵冬季供热、交替使用方式下性能进行研究，太阳能-土壤源热泵采暖系统平均供热功率和供热系数要比单



独土壤源热泵高，从而从理论上证明了太阳能-土壤源热泵用于北方地区进行采暖的可行性，并且实验验证了不同集热器面积与地埋管的匹配，得出结论该系统可用于全年供热。2012年王琪在其硕士论文寒冷地区太阳能土壤源热泵供热供冷及经济性分析中采用 Trnsys 软件模拟，再次验证太阳能-土壤源热泵采暖系统费用年值低于普通土壤源热泵系统，确立了太阳能-土壤源热泵系统在寒冷地区应用经济方面的可行性，但由于太阳能集热系统昂贵，系统相比普通土壤源热泵系统并没有太大优势。2007年韩宗伟、郑茂余、孔凡红、刘威搭建试验台测试了太阳能-土壤源热泵相变蓄热采暖系统，给出了不同气象条件下对应的系统运行模式，为太阳能-土壤源热泵系统的运用提供参考。2008年田晓改在其硕士论文太阳能/土壤源热泵系统的设计与性能预测给出了在太阳能-土壤源热泵系统设计中动态负荷的分析和对系统长期运行结果预测的方法。但是太阳能-土壤源热泵系统运行状况与当地的地质条件、气候、太阳能资源相关，进行太阳能-土壤源热泵采暖系统设计时，应充分考虑相关影响因素。进行方案分析，论证技术经济可行性。

2.3 主动式太阳能采暖系统的组件

主动式太阳能采暖系统的组成：（1）热量提供部分：集热器和辅助热源；（2）储热蓄热部分：储热和蓄热装置；（3）热量使用部分：采暖末端设备；（4）控制部分。

2.3.1 集热器

太阳能采暖系统中使用的集热器按传热工质类型可分为太阳能空气集热器和液体工质太阳能集热器；按是否有真空空间分可分为平板型集热器和真空管型集热器；按进入采光口的太阳辐射是否改变方向划分可分为聚光型太阳能集热器和非聚光型太阳能集热器；按工作温度分可分为低温、中温、高温型太阳能集热器。

空气集热器不存在冬季冻结问题，小渗透不影响系统工作和性能，承压能力小，制造简单，不需过度考虑材料的防腐问题，采用空气集热器可以直接向房间



供热；但由于空气的导热率低，所以相同条件下空气集热器的效率比液体工质集热器的效率要低，空气密度远小于液体，相同加热量的情况下，需消耗较大的风机输送功率，空气比容小，蓄热需要使用石块或鹅卵石等蓄热材料。

液体工质太阳能集热器导热大，热容大，便于蓄热。平板型太阳集热器结构简单、运行可靠、成本适宜、承压能力强，主要由吸热板、盖板、保温层、外壳四部分组成，是太阳能与建筑结合最佳选择的集热器类型之一。平板型太阳能集热器的工作原理为太阳辐射透过玻璃盖板照射到表面涂有选择性吸收镀层的吸热体上，其中大部分太阳辐射能被吸热体所吸收，转变为热能，并传向流体管道中的工质，使工质温度升高，作为载热体输出有用能量。同时也向四周散热，盖板允许可见光通过，而红外射线不能透过，从而使工质能带走更多的热量而提高太阳能集热器的热效率。

平板集热器在 60°C 以下有较好的效率特性，高于 60°C 时，集热效率明显降低；真空管型在 60°C 以上的工作温度下，仍具有较高的热效率，在寒冷的冬季，热效率也较高。真空管型太阳能集热器是采用透明管（通常是玻璃管），并在管壁与吸热体之间有真空空间的太阳能集热器。常见类型有全玻璃真空管太阳能集热器，金属-玻璃结构真空管型太阳能集热器；金属-玻璃结构真空管型太阳能集热器又可分为U型管式真空管太阳能集热器和热管式真空管太阳能集热器。全玻璃真空管太阳能集热器由数根全玻璃真空集热管按一定的形式组合而成，由内外两个同心玻璃圆管制成，它们一端相互封接，另一端的内玻璃管有金属卡子支撑。内外玻璃管之间抽成真空，内玻璃管外壁镀以选择性吸收涂层，内部充满流体，流体在内玻璃管中被加热，与集联管中的流体进行自然对流换热。U型管式真空管太阳能集热器克服了全玻璃真空太阳能集热器不能承压的缺点，在内玻璃管中插入铝翼导热翅片紧紧包裹着作为流体管道的U型铜管，铜管的两端分别和集联箱中的两根集联管连接。一根输入冷流体，一根输出热流体。热管式真空管太阳能集热器，类似于U型管式真空管太阳能集热器的结构，把U型管换成一根热管，蒸发段位于真空玻璃管内，冷凝端浸入集联管的液体中。太阳光透过玻璃照射到吸热板时，吸热板吸收的热量使热管内的工质气化，被气化的工质升到热管冷凝端，放出气化潜热后冷凝成液体，同时加热水箱和联箱中的水，工质又在重力作用下流回热管的下端，如此重复工作。



聚光型太阳能集热器是利用透镜或平面镜和追踪系统把大面积的太阳光线汇聚到较小面积的吸热器中。通过透镜或平面镜的聚集作用，极大增大太阳光线强度。聚光型太阳能集热器主要包括吸热器和聚光器两个部分。吸热器是一个热交换装置，用于把吸收的太阳能转换为另外一种形式的能量，包括吸热体，相关的盖板和保温，聚光器（光学系统）负责把太阳辐射能聚集到吸热器上。聚光型太阳能集热器可以有多重设计形式。聚光器可以是反光器，也可以是折光器，可以是圆柱形，也可以是连续或分隔的旋转表面。吸热器可以是凹面型，也可以是凸面型或是平板型；可以带盖板，也可以没有盖板。目前常见的聚光型太阳能集热器有槽式，线性菲涅尔式，斯特林碟式和中心塔式。

目前对太阳能供暖系统中集热器的研究主要集中在集热器的面积优化、在不同地区的最佳倾角和最佳安装角度、供暖温度对集热器效率的影响等。

2.3.2 蓄热部分

利用太阳能进行供热，需要克服太阳能周期性和不稳定的缺点，为解决此问题就需要蓄热装置。主动式太阳能采暖蓄热方式主要分为短期蓄热和长期蓄热。短期蓄热以天或周为蓄热周期，其目的是为了维持一天（或一周）的热能供需平衡。短期蓄热主要有蓄热水箱和相变蓄热两种。长期蓄热以季节或年为储存周期，其目的是为了调节季节（或年）的热量供需关系。长期蓄热以季节蓄热为主。跨季节太阳能蓄热系统根据蓄热系统分为：水箱蓄热、埋管蓄热、蓄水层蓄热和砾石-水蓄热。对应同一蓄热系统形式，有两种以上可选择的蓄热方式时，需要根据工程投资规模，当地的气象、水文、土壤条件进行选择。

1987年，彭飞和张国勋建立了太阳能采暖系统中各个部件的计算机分析模型，对蓄热水箱建立温度分层数学模型，给出了水箱内能量平衡方程以及方程中的控制函数，能分析各个设计参数对系统瞬态热性能的影响，有助于确定合理的设计方案。刘艳峰等人根据拉萨、银川、西宁、西安等地的太阳辐射强度及建筑热负荷的日变化规律，模拟得出系统所需蓄热量变化规律，并对各种蓄热温差下对应的蓄热水箱容积进行了模拟分析，结果表明：太阳能采暖系统所需蓄热量随太阳集热器的集热量与建筑热负荷之间的差值增大而增加；蓄热水箱容积随蓄热



温差增大而减小，当蓄热水温达到80℃时，在各种地面采暖系统取水温度下，单位集热器面积所需蓄热水箱容积趋于相等；从经济性方面考虑，蓄热温差最小宜取5℃，此时计算得到的蓄热水箱容积最大。Mehmetesen等人对相变蓄热式太阳能采暖系统进行了研究，蓄热槽采用圆柱状蓄热体，比较了套管内走相变材料，外走换热流体与外装相变材料，内走换热流体两种模型，并研究了各个因素对蓄能时间的影响，通过数值分析认为套管内走相变材料外走换热流体的模型更优，进而对该模型进行了一系列实验与数值分析。Nallusamy等人通过实验方法研究了显热和潜热相结合的蓄热装置，重点研究了定热源与变热源（太阳能）工况下蓄热装置的不同响应，研究了一些因素对蓄放热性能的影响。白剑应用FLUENT软件模拟了蓄热体自身参数和热媒体对蓄热体性能的影响，并用TRANSYS建立了太阳能相变蓄热热泵供暖系统模型研究各组成部件对系统性能的影响，得出相变蓄热比显热蓄热系统COP提升21.6%。

主动式太阳能采暖系统中对蓄热水箱的研究主要集中在温度分层模型与模拟分析、蓄热容积的优化、蓄热温差等问题上。对相变蓄热的研究主要集中在蓄热温度、蓄热材料、蓄放热模式对蓄热性能的影响。

2.3.2.1 短期蓄热

短期蓄热目前常用蓄热方式为储热水箱和卵石蓄热。储热水箱蓄热时储热水箱的材质和构造强度应满足要求，能够满足所贮存水的容积，并且与系统最高工作压力相匹配，确保不渗，不漏；水箱应选择耐腐蚀材料制作，并做内表面防腐处理；还要做好水箱的保温。空气蓄热系统的蓄热装置通常采用卵石蓄热堆，卵石蓄热堆可水平或垂直放在箱内，卵石堆得热分层可提高蓄热性能，宜优先选用垂直方式。

2.3.2.2 季节蓄热

跨季节太阳能蓄热采暖系统可以实现太阳能由夏季向冬季的转移来减少其他不可再生能源的消耗，其蓄热能力可以达到年需求量的40%~60%。

季节蓄热主要以蓄热水池为主，蓄热水池的材料可选用钢、钢筋混凝土、玻



玻璃钢、塑料或砖石等材质制成。同样构造应满足蓄热水容积和系统最高工作压力相匹配，设计应符合国家相关标准规范的要求，蓄热水池需着重做好水池的隔水保温。丹麦在欧盟的帮助下建立许多大型太阳能区域供热供暖系统，其中绝大部分系统都采用季节性蓄热水池作为蓄热装置，针对蓄热水池的隔水问题，丹麦蓄热水池采用的防水层材料为不同的高分子材料（如PP, PE）、弹塑性材料（如EPDM）和不同的金属阻隔材料（如不锈钢、铝）。丹麦蓄热水池保温主要有三种类型分别为基于韧性保温垫；基于刚性保温模块；基于大块保温材料。第一类保温层基于韧性保温垫，保温垫位于不透水的底部漂浮阻隔层和上部的阻隔层之间；第二类保温层基于刚性的保温模块，该模块直接漂浮在水面上方或在不透水的阻隔层之间；第三类的保温层基于大块保温模块，如膨胀黏土或膨胀玻璃球。该保温材料放置于不透水的漂浮着的阻隔层之间。并给出了不同保温类型的设计方法和适用条件。

国外对跨季节太阳能蓄热系统的研究在实验方面目前主要是通过示范工程来实现。近年来，在中北欧主要是瑞典、奥地利、荷兰、丹麦和德国建立了许多大型的跨季节太阳能蓄热系统，其中以德国最具代表性。计算方面，对于跨季节太阳能蓄热系统的研究主要是通过解析解、经验半经验的公式与数值模拟相结合的方法。Schmidt 提出蓄水层蓄热成本最低，其次是埋管蓄热，其他两种蓄热成本较高，在没有合适的蓄水层土壤资源时，一般考虑使用埋管蓄热。但是埋管蓄热对地质结构具有较强的选择性，故其应用受到一定的限制。砾石-水蓄热因其热容小占用体积大没有得到广泛应用。水箱蓄热具有较大的热容以及良好的蓄/放热性能，并且受地质结构的影响较小，应用最为广泛，在欧洲十大太阳能采暖系统示范工程中，有8项采用了水箱蓄热。

从现有的文献来看，国内对该方面的研究最早是在1984年，马文麒等对太阳池的跨季度蓄热问题进行了理论分析和数值计算，并建议太阳池建在无地下水流动的浅层土壤内。近年来哈尔滨工业大学、天津大学、东南大学和上海理工大学等太阳能季节性蓄热做了较多研究。研究方法更多的是建立数学模型和实验平台进行研究。



2.3.3 辅助热源

太阳能是一种不稳定的能源，一个稳定的太阳能采暖系统必须有经济可靠的辅助热源。目前常用的辅助热源有电加热器、燃油锅炉、燃气锅炉、燃煤锅炉、生物质锅炉、热泵等。太阳能与辅助热源结合模式有太阳能与辅助热源串联供热、并联供热和混合供热。如何选择辅助热源及采用哪种模式供热要根据工程实际情况，要从初期造价预算、功能要求、占地面积、提高太阳能的利用率、辅助热源对燃料的需求和后期运行成本几方面考虑。对辅助热源的经济性分析主要用费用年值法。近年来针对热泵作为太阳能供暖辅助热源和复合式能源供热的研究很多，研究集中在系统模式的对比选择以及系统的优化和复合式能源的选等。太阳能与地源热泵的联合系统的研究不仅涉及到常规采暖，还可以用于季节性蓄热采暖，在这方面哈尔滨工业大学等高校的研究比较多。

2.3.4 供暖末端

常见的采暖末端有散热器、风机盘管、辐射地板、毛细管网等。由于太阳能集热器效率随运行温度升高而降低，因此尽可能降低采暖温度有利于太阳能的最大化利用。

低温地板辐射、毛细管网在太阳能采暖系统中的研究已经基本成熟。针对低温散热器、相变蓄热与围护结构的结合在主动式太阳能采暖中的研究主要有：李庆娜研究了低温散热器采暖的可行性以及运行问题，验证了应用于节能建筑的低温散热器采暖系统连续供热可满足热用户的用热需求。崔洁对基于毛细管网末端温控的储热式低温热水采暖地板进行模拟分析和实验研究，得出基于太阳能的相变储能地板采暖系统的优越性。2005年张喜明、于立强、旷玉辉介绍了太阳能热泵地板辐射采暖系统中集热器、蓄热器、地板换热盘管设备设计。2013年李珍、李刚、金汇双做了毛细管网型太阳能采暖系统实验研究，选取沈阳建筑大学生态园的两间大小、朝向和格局相同的平房作为实验基地，铺设毛细管网作为采暖末端，搭建试验台进行测试。毛细管网型太阳能供热系统房间室内温度上升较快，白天太阳能房间的室内温度始终高于普通房间的室内温度，夜间停止运行时



太阳能房间也能维持与普通房间的室内温度基本一致的变化趋势，提高了室内热舒适性。同年徐斌斌、程戈做了毛细管末端太阳能采暖系统可行性分析，文章以四川烟草工业有限责任公司某分厂技改项目动力中心为案例，采暖系统采用真空管太阳能集热系统+蓄热水箱+毛细管末端+独立的全热回收新风系统，同时采用季节蓄热技术。太阳能集热系统与毛细管末端相结合，可将太阳能采暖系统热水温度降到30℃，可大大提高集热系统效率，降低蓄热系统热损失并大幅度降低太阳能集热系统的初投资，与季节蓄热相结合，将有很大推广效应。

3 国外太阳能采暖发展情况

3.1 国外太阳能采暖发展历程

1973年石油危机之后，欧美太阳能采暖系统的发展进入高峰期。到20世纪80年代时，仅美国就已建造了各式太阳房8万多栋，90年代更是增加到了25万栋，初投资虽然增加了10%~15%，却可节约燃料50%~80%，取得了良好的经济效益。西欧发达国家的太阳能利用技术同样迅速发展，各自建立了适合本国应用的太阳房，并应用于零能房屋。欧洲对太阳能供热（热水、采暖）系统的工程应用过去主要用于单体建筑——“太阳能建筑”和“零能耗建筑”内的小型系统；近十余年来，包括区域供热在内的大型太阳能供热采暖综合系统（Solar Combisystems）的工程应用有较快发展。图2是北欧、中欧主要国家综合系统和小型家用系统的安装比例统计，从中可知：即使是比例最低的德国，综合系统的应用比例也约占全部安装量的25%。从2000年开始，德国联邦教育科技部（BMBF）和联邦经济技术部（BMW）实施了“太阳能区域供热”（Solarthermie-2000—Part 3: Solar assisted district heating）项目。

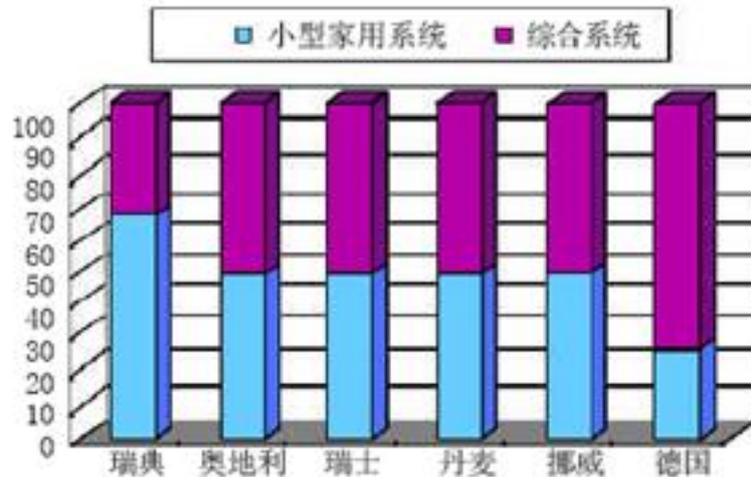


图2 北欧、中欧主要国家综合系统和小型家用系统的安装比例 (%)

丹麦是世界上最早应用发展太阳能区域供热的国家之一，目前是欧洲太阳能区域供热应用工程数量最多、规模最大的国家。自2010年以来，由于对常规能源收取较高能源税，以及推出促进可再生能源发展政策的因素影响，丹麦的太阳能采暖已开始出现市场化发展的趋势。目前，欧洲最大的10个太阳能采暖工程均在丹麦，至2013年6月的统计，已建工程的太阳能集热器总面积已超过310000m²，表2为丹麦3个太阳能区域供热项目的基本参数。

丹麦的常规能源采暖费是40Euro/ (MW·h)，已建成的一些太阳能采暖工程的费效比低于常规能源采暖费，所以，丹麦的太阳能采暖系统有较好的经济效益，而且呈现了商业化发展的前景。

表2 丹麦3个太阳能区域供热项目的基本参数

	Agerspris	Standby	Bradstrup
太阳能集热器面积/m ²	13405	8019	18612
设计年太阳能供热量/ (GW·h)	6	3.76	8.9
初始投资/(Euro/m ²)	220	289	288
太阳能保证率	17	17	20
费效比 (euro/MW·h)	32	42	31

以德国、丹麦和瑞典等为代表的北欧和中欧国家，近年来在太阳能跨季节蓄热技术上发展较快，并取得了良好的使用效果。到2013年10月，丹麦已安装37.5万m²太阳能，高于计划的35万m²，同时丹麦计划到2020年可再生能源占终端消费



能源的35%，到2050年，实现100%使用可再生能源的目标。

至今为止，国外太阳能集热器装机容量约39.3GWth（而中国约为152.2GWth），户式系统主要用于制备生活热水，在中北欧地区太阳能采暖发展迅速，约1%的太阳能集热器与区域供热系统相连接，最大的太阳能区域供热系统在丹麦，太阳能集热器面积高达55,000m²，供暖用户达到15,000户，带季节蓄热的系统太阳能保证率可达50%以上（每平米集热面积对应蓄热容积为1500~3000L），在相关财税政策支持下，与燃气热电联产系统联合运行的太阳能区域供热系统回收期一般为7~10年。

3.2 国外太阳能采暖研究

20世纪30年代，在太阳能采暖系统的研究领域，无论是主动式和被动式，美国都遥遥领先于其他国家，尤其是麻省理工学院先后建成5种太阳能采暖系统。国际能源机构IEA在“太阳能供热制冷”计划中组织完成“任务26——太阳能供热综合系统”，编制出版了《太阳能住宅供热综合系统设计手册》（**Solar Heating Systems for Houses, A Design Handbook For Solar Combisystems**），手册中汇总了19种典型系统和15个工程示例，是太阳能采暖综合利用系统设计的权威工具书。

奥地利Klagenfurt, Sterneckstraße提出太阳能-生物质区域供热采暖系统，1976年时奥地利就安装户式太阳能系统，60%用于太阳能热水，40%用于游泳池。后期采用太阳能进行采暖，就需要进行大规模集热器安装和大容量的储热。但是单纯用太阳能采暖并不能平衡冬季供热与用热需求，由于当时跨季节储热技术不够成熟，并且成本极其昂贵，而当地生物质资源比较丰富，所以提出采用生物质锅炉辅助太阳能进行供暖。德国学者Dario Buoro, Piero Pinamonti, Mauro Reini介绍了一个工业区域采暖方式，普通市政区域热网、跨季节蓄热太阳能区域供热热网、热电联产相结合，并配备锅炉和压缩机。通过建立模型对这样一个多热源采暖形式进行优化，以达到最佳经济性和节能性。Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drucek比较了有热泵驱动的太阳能区域供热系统和单纯的太阳能区域供热系统的能源利用效率和节能性，最终发现，以太阳能区域供热蓄热水池



作为采暖低温热源，采用热泵驱动的系统效率更高，太阳能保证率也相对较大。Mehmet Elcia, Axel Oliva, Sebastian Herkel, Konstantin Klein, Alexander Ripka 比较了传统的热电联产区域供热和加入分散式太阳能供热的热电联产区域供热，对传统热电联产交互性使用和使用性能进行研究，由于风电上网和冬夏供热不平衡对热电联产供热具有很大的干扰，提出太阳能热电联产区域供热，并以负荷匹配系数来对两个系统进行对比，系统运行系数分别为1.03和1.10。表明太阳能热电联产区域供热交互性更强。在夏季可以考虑暂时关闭小区热力站和供热网络，从而避免热量的损失。未来还需要对这两个系统进行经济性对比分析。加拿大学者 Bruce Sibbitt, Doug McClenahan, Reda Djebbar, Jeff Thornton, Bill Wong, Jarrett Carriere, John Kokko 选取 The Drake Landing Solar Community 在加拿大实施了一个太阳能区域供热项目，该项目为52户家庭进行供热和供热水，设计安装集热器面积为2293 m²，采用地埋管蓄热，打井144口，储水量为34000 m³，辅助热源为燃气锅炉。设计用TRNSYS软件进行模拟，2007年投入使用并进行实际测试，连续测试5年。设计时五年内集热器效率由32%降到25%，储热效率由90%降到40%，太阳能占比由68%升到89%。实测数据表明集热器效率稳定在33%，储热效率为55%左右，太阳能占比逐年递增，最终达到97%。可以看出模拟和实测基本吻合，确立了跨季节储热太阳能区域供热在加拿大地区（严寒）的适用性。后续 Humberto Jose Quintana, Michael Kummert 两位学者提出加拿大该项目既有短期蓄热又有长期蓄热的太阳能区域供热系统运行策略 model predictive control (MPC)，这个策略基于模型预测控制，尽量减少辅助能源使用，用TRNSYS对SDH和天气进行预测，从而能减少5%一次能源消耗。2014年立陶宛学者 Vaclovas Kveselis, Aurimas Lisauskas, Eugenija Farida Dzenajavičienė 在第九届国际会议“ENVIRONMENTAL ENGINEERING”上对太阳能区域供热系统做了介绍。SDH系统主要指为超过100户居民住宅提供热量，集热器面积大于1000 m²，为平衡冬夏采暖问题建有长期蓄热装置的太阳能采暖系统。大型太阳能区域供热初投资十分昂贵，初期需要很大资金支持，需要国家补贴，关税优惠，科技支持，开发和示范等，采用太阳能采暖，对温度的控制十分重要，回水温度应尽可能低才能保证太阳能采暖效率。

Simon Furboa, Jianhua Fan, Bengt Perersa, Weiqiang Konga, Daniel



Trier, Niels From介绍了丹麦太阳能区域供热情况，2013太阳能区域供热集热器面积为386000 m²，欧洲前十大太阳能区域供热系统都在丹麦。丹麦发展太阳能区域供热的优势在于：丹麦政府鼓励可再生能源推广和利用；63%的家庭采暖连接到区域热网；低温区域供热系统提高了太阳能的利用率，典型供热温度是80° C左右，回水温度是40° C左右；气候保护计划，2030年全部采用可再生能源进行采暖，2035年化石燃料禁止用于采暖和发电，2050年禁止用化石燃料；风电丰富；高能源税；成熟太阳能区域供热技术；地面安装的集热器阵列造价较低，< 200 欧元/m²；较高的太阳能集热器效率和较长的集热器使用寿命；太阳能区域热厂间良好的合作关系，定期的经验、学术交流活动；低土地成本；跨季节储热技术发展日益成熟。Daniel Trier认为应提高现有太阳能区域供热系统的太阳能保证率，目前丹麦大规模太阳能区域供热系统太阳能占比不超过50%，2012年丹麦能源局下调生物质锅炉税收，进而与太阳能区域供热有了竞争优势，因而必须扩大太阳能区域供热系统规模，太阳能采暖系统中太阳能保证率才能有利于太阳能区域供热产业的发展，基于此作者提出与之相关的商业模式和太阳能采暖系统模型，并通过TRNSYS模拟，最终给出经济平衡点时太阳能占比(82%)。

3.3 国外太阳能区域供热项目

典型案例有Vojens太阳能区域供热项目。德国和丹麦的太阳能跨季节蓄热采暖项目见表3。由表3可见，国外在太阳能采暖方面已形成了区域供热的规模，一些国家在太阳能区域供热政府项目的支持下，太阳能采暖取得了很大的发展。

表3 德国、丹麦的太阳能跨季节蓄热供暖项目

序号	项目名称	集热器面积 (m ²)	蓄热方式	蓄热体容积 (m ³)	设计最高储存 温度 (°C)	开始 运行 时间
1	德国-汉堡布拉姆费尔 德	3000	混凝土水箱	4500	95	1996



国际金属太阳能产业联盟

International Metal Solar Industry Alliance

2	德国-腓特烈港魏根豪森	4050	混凝土水箱	12000	95	1996
3	丹麦-马斯塔尔	33000	蓄水池	75000	95	1996
4	德国-开姆尼茨	540	砾石-水水池	8000	85	1997
5	德国-内卡苏姆的阿莫巴赫	5470	地埋管系统	63300	85	1997
6	德国-施泰因富特	510	砾石-水水池	1500	90	1998
7	德国-汉诺威康斯柏格	1350	混凝土水箱	2750	95	2000
8	德国-罗斯托克	1000	浅层含水层	20000	50	2000
9	德国-阿滕基兴	800	地埋管系统	10000	85	2002
10	加拿大-卡尔加里市	2300	地埋管系统	35580	80	2005
11	德国-慕尼黑	2900	混凝土水箱	5700	95	2007
12	德国-埃根施泰因	1500	蓄水池	3000	90	2007
13	德国-克赖尔斯海姆	5470	地埋管系统	37500	85	2007
14	丹麦-奥尔堡	37000	蓄水池	60000	95	2014

4 中国太阳能采暖发展情况

4.1 我国太阳能发展历程

我国的太阳能采暖技术是从 2000 年之后起步并逐渐开始发展的，2010 年到 2015 年是太阳能采暖技术由示范工程向规模化运用重大转型期。目前已经形成较为完善的太阳能采暖技术体系。2009 年 8 月国家颁布了《太阳能供热工程技术规范》GB50495—2009，2011 年 3 月中国建筑工业出版社出版发行了与此标准



配套的《太阳能供热供暖工程应用技术手册》，中国建筑科学研究院开发的“太阳能供热供暖空调系统优化设计软件”。在国家和地方各级政府的支持下，近年在我国各地相继建成了一批太阳能供热采暖示范工程。截至 2012 年年底，全国城镇太阳能光热应用面积 22.6 亿平方米，浅层地能应用面积 3 亿平方米，光电建筑已建成及正在建设装机容量达到 1079 兆瓦。2012 年，全国有 21 个城市、52 个县、3 个区、10 个镇被确定为可再生能源建筑应用示范市（县、区、镇），山东、江苏启动了两个可再生能源建筑应用集中连片示范区，江苏、青海、新疆等 8 个省（区）被确定为太阳能光热建筑应用综合示范省。

4.2 我国太阳能采暖研究

早在 2005 年杨卫波、施明恒、董华做了太阳能-土壤源热泵系统联合采暖运行模式的探讨。针对三种模式：太阳能集热器与埋管串联运行，载热流体先流经理埋管后集热器；集热器与埋管串联运行，载热流体先流经集热器后流经理埋管；太阳能集热器与埋管串联运行，流经集热器载流体流量与总流量的比值分别为 0.25、0.50、0.75，实验结果模式二的运行效果最佳。后续实验还设计了蓄热水箱，蓄热水箱的对于太阳能-地源热泵采暖系统性能具有很大促进作用。2008 年北京建筑工程学院的高雪飞、李德英、赵秀敏在建筑节能期刊上发表论文对比分析北京地区不同采暖方式经济性对比，具体比较结果见表 4。

表 4 太阳能采暖系统与其他采暖系统对比

不同 供暖方式	运行费		初投资		使 用年 限	标 准收 益率	费用 年值 元 /m ² .a
	运行 能耗 元/ m ² .a	管理 费 元/ m ² .a	公 共部分 元/m ² .a	建筑内部 分 元/m ² .a			
燃煤 锅炉房集 中供热	10.1	2	50	50	1 5	1 0	25.25
天然 气锅炉房	27.3	1	45	50	1 5	1 0	40.79



国际金属太阳能产业联盟

International Metal Solar Industry Alliance

集中供热							
电锅炉房集中供热	63	1	45	50	1	1	76.49
家庭燃气小型锅炉	18.7	0	0	110	1	4	28.59
家庭电热暖或电暖气	43.3	0		40	1	4	46.9
主动式太阳能供热	17.35	0	0	520	1	4	64.12

2015 年赵金秀对北方地区应用太阳能辅助土壤源热泵效能分析，与单独运用土壤源热泵系统，单独运用空调系统采暖对比，太阳能辅助土壤源热泵系统经济效益和一次能源利用率最高。虽然太阳能采暖系统在整个采暖期运行费用比较低，系统的总造价昂贵，但系统以太阳能为热源，既可节省大量的常规化石能源，又可减少温室气体的排放，保护环境。总体考虑利大于弊。加之国家近年又给予太阳能利用大量政策和资金支持，进一步降低太阳能采暖运行费用，为国内太阳能采暖的发展提供有力保障。中国科学院王志峰研究员基于采光面积和传热流体平均温度的瞬时效率测试计算了各类集热器集热效率和传热系数。具体结果见表 5。2009 年中国科学技术大学季杰教授在青海省政府的支持下为当地居民设计并安装测试了太阳能炕采暖系统，太阳能炕与被动采暖复合系统仅对炕体采用主动式热水循环供热，可大大减少集热器的需求，降低投资成本，提升系统经济性；系统可根据用户的需求运行，解决了传统火炕过热和温度不均匀问题；太阳能炕与被动采暖复合系统利用炕的良好蓄热性能，解决单一太阳能被动采暖室内温度波动大的问题。同时，太阳能被动采暖模块不仅可以增加室内得热，还解决单一太阳能炕条件下白天室内空气温度上升缓慢而导致的舒适性差的问题；该复合系



统在非采暖季可以提供热水，解决非采暖季系统闲置问题，提高全年利用率，扩大采暖系统的利用方式。2007 年王磊磊、李金平、王立璞、王林军、金红光等人建立了新型的太阳能和生物质能互补的散热器采暖系统模型。用生物质发酵产生沼气供给燃气锅炉，燃气锅炉作为太阳能采暖系统辅助热源，实际运用系统经济性好，投资回收期小于三年，同时充分利用西北地区秸秆，避免秸秆燃烧对空气的污染。2015 年宋华超介绍了在夏热冬冷地区采用太阳能辅助燃气炉采暖系统进行冬季采暖。并以上海西郊半岛名苑项目为例来说明太阳能辅助燃气炉采暖系统，采用集中集热分户储热的模式，解决了分户计量的问题。系统能有效利用太阳能的并且解决了仅靠太阳能供热的不稳定因素。由此可见太阳能的利用应与当地气候条件、自然资源充分结合，因地制宜，符合当地采暖实际情况。中北欧国家研究了大型太阳能区域供热系统辅助热源的选择，主要有太阳能与垃圾焚烧或工业余热相结合；与地热结合；与燃煤驱动热电联产结合；与生物质能驱动的热电联产结合；与生物质锅炉结合；与天然气驱动的热电联产结合。最终经过技术经济方案的论证对比，认为太阳能与生物质锅炉结合或与天然气驱动的热点联产相结合是比较好的结合采暖方式。国内哈尔滨工业大学的郑茂余教授、韩宗伟博士，青岛建筑工程学院的余立强，上海交通大学的旷玉辉、代彦军等人研究了太阳能辅助地源热泵，太阳能辅助空气源热泵，太阳能-土壤源热泵联合供热等太阳能采暖系统的性能；北京大学张信荣教授研究了太阳能辅助 CO₂ 临界、超临界采暖。基于研究结果，热泵和燃气是比较适宜的辅助热源形式。电和柴油热价高，经济性差。严寒地区、寒冷地区和中部大部分地区适宜采用燃气作为辅助热源。结合建筑形式和需求的太阳能集热产品和系统的新开发应用几年来有长足发展。利用空气源热泵耦合的系统集成研究，在特定条件下的系统集成可获得较高的能源效率，但如何结合用户需求实现市场化并非易事，有待于相关各方的共同推动。2010 年财政部和住建部联合在内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗建立季节蓄热太阳能供热采暖区域供热热力站。作为我国太阳能区域供热一个示范工程。该太阳能供热采暖区域供热热力站为两个小区进行供热，集热器面积 11994m²，采暖用户数 1520 户，蓄热水池容积 13250m³，寿命期内的总节能量为 67,079,339 MJ，总节能费用为 37,890,100 元，投资回收期为 6.4 年。

表 5 不同类型太阳能集热器的对比

集热器类型	集热器效率	传热系数
U型管真空集热器	0.69	2.36
热管真空管集热器	0.754	1.405
单层盖板平板集热器	0.756	4.895
CPC 真空管集热器	0.632	0.317
双层盖板平板集热器	0.721	1.32
全玻璃真空管集热器	0.729	2.793

4.3 中国太阳能采暖项目

中国需要采暖的寒冷和严寒区域基本和太阳能资源丰富和较丰富的 I 区和 II 区重合，只有东北等部分采暖区域太阳能资源属于一般的 III 区，在广大采暖地区利用太阳能作为采暖用能的替代能源具有得天独厚的优越条件。国内目前太阳能采暖项目以单体建筑采暖为主，离区域采暖形式（小区热力站）还有一段距离。目前我国太阳能采暖还处于起步阶段。

我国太阳能应用的发展历程、太阳能与其他采暖系统的比较、不同类型太阳能集热器的比较如图 3、表 4、表 5 所示。

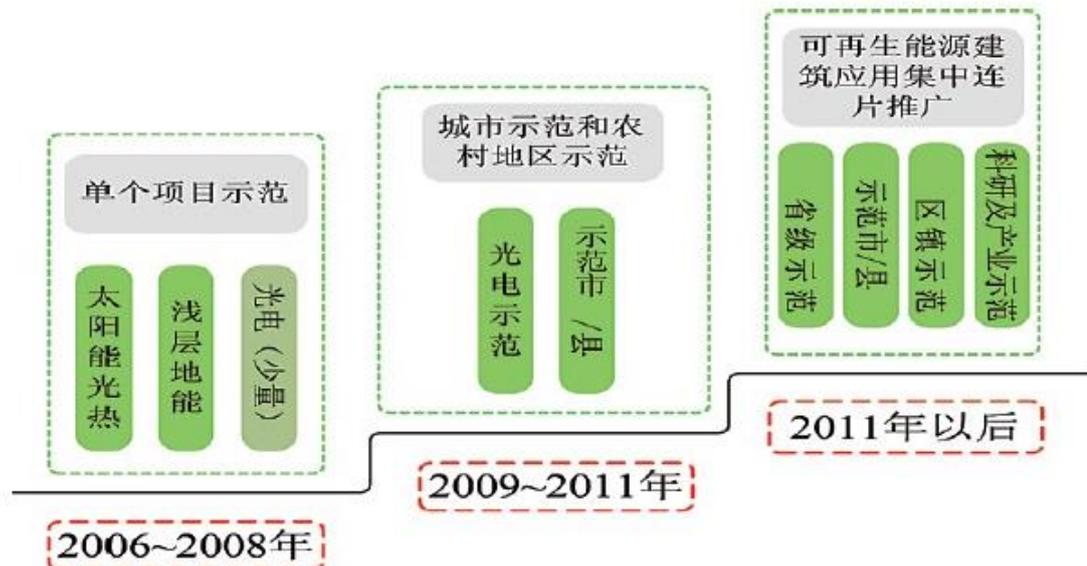




图 3 我国太阳能应用的发展历程

近年来,随着人们节能减排意识的提高以及太阳能热利用产品技术的不断进步,我国相继建成了一系列太阳能采暖项目,有单体个人采暖项目,也有政府太阳能采暖示范项目,其中以新农村建设示范工程项目较多:北京市平谷区新农村建设项目的新农村住宅太阳能采暖项目、北京市顺义区民宅太阳能采暖项目、北京市大兴区榆垓镇无煤村改造项目、河北省唐山迁安市太阳能农村住宅太阳能采暖项目、拉萨火车站太阳能采暖项目、北京清华阳光能源开发有限责任公司办公楼、北京桑普阳光技术有限公司的办公楼、河北经贸大学太阳能季节性蓄热采暖及热水综合示范项目、拉日铁路日喀则车站项目等。国内目前以北京市建设的太阳能采暖项目为最多,而且目前建设的太阳能采暖项目大多为政府补贴示范性项目,非政府示范性项目较少。

4.3.1 北京市太阳能供暖应用项目

北京市太阳能采暖的应用项目汇总如表 6、7 所示。

表 6 北京市太阳能办公采暖应用——办公项目

序号	项目名称	建筑面积/ m^2	集热面积/ m^2	建筑围护结构	太阳能集热器类型	辅助类型	建设地点	建设时间
1	大兴区榆垓镇天普办公楼太阳能采暖项目	356	80	钢架结构 岩棉保温	全玻璃真空管	电热辅助	大兴区	2006年 11月
2	北京大学地球环境与生态系统试验站采暖项目	2000	276	砖混结构 外墙保温	全玻璃真空管	电热辅助	河北省围场	2007年 11月
3	怀柔区能源办公室太阳能采暖项目	384	48	普通砖混	平板集热器	空气源热泵	怀柔区	2001年
4	门头沟区南辛房老年活动中心太阳能采暖项目	1240	210	砖混外墙 保温	平板集热器	电热辅助	门头沟区	2007年
5	门头沟区潭柘寺村民委员会太阳	1000	162	砖混结构 外墙保温	平板集热器	电热辅助	门头沟区	2007年



国际金属太阳能产业联盟

International Metal Solar Industry Alliance

	能采暖项目							
6	大兴区振利公司办公楼太阳能采暖项目	500	95	砖混, 外墙聚氨酯材料保温	平板集热器	无	大兴区	2002年
7	裕鑫昌建筑老年活动站太阳能采暖项目	223	28	砖混结构外墙保温	平板集热器	无	平谷区	2006年
8	北京清华阳光公司办公楼试点工程	640	164	普通砖混	U型管式真空管	电热辅助	昌平区	2003年
9	北京市太阳能研究所有限公司办公楼示范工程	3000	655	普通砖混	热管真空管	无	朝阳区	2000年
10	中国建筑科学研究院科技园蓄热式太阳能采暖示范工程	9573.98	140	建材保温	平板集热器	地源热泵	通州区	2007年
11	北京华光太阳能过滤设备厂	128	20	砖混	平板集热器	电热辅助	昌平区	2002年
12	北京建筑设计研究院试验房	240	100	砖混	U型管式真空管	电热辅助	丰台区	2001年

表 7 北京市太阳能采暖项目——住宅应用

序号	项目名称	建筑面积 /m ²	集热面积 /m ²	建筑围护结构	太阳能集热器类型	辅助类型	建设地点	建设时间
1	We house 别墅太阳能采暖系统项目	500	72	砖混结构外墙保温	热管真空管集热器	燃气锅炉	海淀区	2007年12月
2	门头沟区樱桃沟别墅太阳热水采暖项目(81户)	17172	3888	砖混结构外墙保温	真空管集热器	电加热辅助	门头沟区	2006年12月
3	昌平区南口镇镜之谷别墅区太阳能热水采暖项目	5000	500	砖混结构外墙保温	真空管集热器	电加热辅助	昌平区	2008年
4	平谷区将军关村太阳能采暖项目(86户)	14656.34	1904	砖混结构外墙保温	平板集热器	生物质锅炉	平谷区	2005年
5	平谷区玻璃台村太阳能采暖项目(68户)	10744	1360	砖混结构外墙保温	热管真空管集热器	生物质锅炉	平谷区	2005年
6	平谷区挂甲峪村太阳能采暖项目(71户)	12425	1988	砖混结构外墙保温	平板集热器	生物质锅炉	平谷区	2005年



7	平谷区南宅村太阳能采暖项目（81户）	17658	1554.2	砖混结构外墙保温	平板集热器	生物质锅炉	平谷区	2006年
8	平谷区太平庄村太阳能采暖项目（69户）	7659	993.6	空心砌块保温	平板集热器	生物质锅炉	平谷区	2006年
9	平谷区太平庄村二期太阳能采暖项目（12户）	1764	216	空心砌块保温	平板集热器	生物质锅炉	平谷区	2007年
10	平谷区新农村村委会太阳能采暖项目（10户）	5134	667.6	新型保温建材	平板集热器	生物质锅炉/电	平谷区	2006~2007
11	平谷区新农村示范户太阳能采暖项目（162户）	18893.5	2739.1	空心砌块保温	平板集热器	生物质锅炉/电	平谷区	2007年

由表 6,7 可以看出，北京市太阳能采暖工程主要分布在郊区，并且太阳能采暖技术的应用范围主要集中在新农村新民居的建设项目上，其中，平谷区由于新民居太阳能采暖工程项目实施较早，因此所占比例最大。北京市太阳能采暖建设工程中，公建使用的面积较小，且多为示范性建设工程。

在北京市已建的太阳能采暖工程中，使用的太阳能集热器类型主要为平板型太阳能集热器。鉴于目前太阳能采暖多应用于新农村的建设项目中，即便是公建建筑也多位于郊区县，因此，辅助能源的应用类型多为生物质燃料锅炉或电辅助加热。

4.3.2 国内太阳能采暖案例介绍

4.3.2.1 四季沐歌

四季沐歌工程应用采用 i-XTRA 太阳能跨季节蓄热采暖技术。以下为部分太阳能应用项目：

北京平谷将军关村太阳能采暖及热水系统综合利用项目。采用全玻璃真空管集热器，总计集热面积 7299.6 m²，供暖用户 285 户，末端采用地板辐射采暖。

河北兴隆陡子峪村太阳能采暖及热水系统综合利用项目。采用竖单排全玻璃



真空管集热器，总计集热面积 920.4 m²，采暖用户 21 户，末端采用地板辐射采暖。

北京平谷向阳村太阳能采暖及热水系统综合利用项目。采用竖单排全玻璃真空管集热器，总计集热面积 2239.8 m²，采暖用户 96 户，末端采用地板辐射采暖。

四川烟草泸州分公司烟草育苗大棚太阳能供热采暖项目。采用竖单排全玻璃真空管集热器 90 组，共使用真空管 2700 支，总计集热面积 531 m²，总储热容量 13 吨。

宁夏灵武智能型五连栋节能日光温室太阳能采暖项目。采用横双排全玻璃真空管集热器 76 组，共使用真空管 3800 支，总计集热面积 638.4 m²，总储热容量 20 吨，末端采用大棚埋管采暖。

西藏拉日铁路热管承压式太阳能跨季节储热采暖及热水综合利用项目。采用金属热管集热器 1508 组，共使用金属热管 24128 支，总计集热面积 3770 m²，蓄热总容积 4400 立方，末端采用地板辐射采暖，采暖面积为 20000 m²。

西藏拉日铁路有 5 个火车站安装了太阳能采暖：协荣站、曲水站、尼木站、仁布站、日喀则站。

四季沐歌（洛阳）太阳能有限公司跨季节蓄热采暖及热水综合利用项目。项目位于河南省洛阳市，为四季沐歌洛阳基地展厅跨季节储热采暖项目，采用横双排全玻璃真空管集热器 27 组，共使用真空管 1350 支，总计集热面积 224 m²，总储热容量 320 吨，末端采用地板辐射采暖，采暖面积为 1500 m²。

西藏扎曲河果多水电站业主营地太阳能采暖项目。太阳能系统共安装型号为 Z-RG/0.6-WF-2.6/20-58/1 的热管集热器 326 台，分布在 7 栋楼的屋面上，集热器总面积 1023.64 m²，系统采用二台 40 m³(4m×4m×2.5m)的贮热水箱为太阳能系统保温水箱。太阳能系统为间接系统承压运行，乙二醇水溶液为传热介质。每天可产生 6673MJ 的热量，负担了 40%的采暖热负荷。并安装两台 300KW 快速电锅炉作为辅助加热系统，用以保证太阳能系统不足的热量需求。2013 年 10 月 30 日开始为西藏扎曲河果多水电站业主临时营地供暖，建筑采暖面积 8732.4 m²，室内温度实际达到 17 至 21℃，达到了方案理论设计。

山东省淄博市侯庄中学太阳能采暖项目。采用横双排全玻璃真空管集热器，



总计集热面积 810 m²，总储热容量 12 吨，末端采用风机盘管采暖。

河北经贸大学太阳能季节性蓄热采暖及热水应用综合项目。采用横双排全玻璃真空管集热器 1380 组，铺设在 14 个宿舍楼楼面，共使用真空管 6.9 万支，总计集热面积 1.16 万 m²，总储热容量 2 万余吨，末端采用翅片式散热器采暖，采暖面积为 48 万 m²，是国内最大的商业化跨季节储热采暖及热水综合利用项目，系统见图 4。

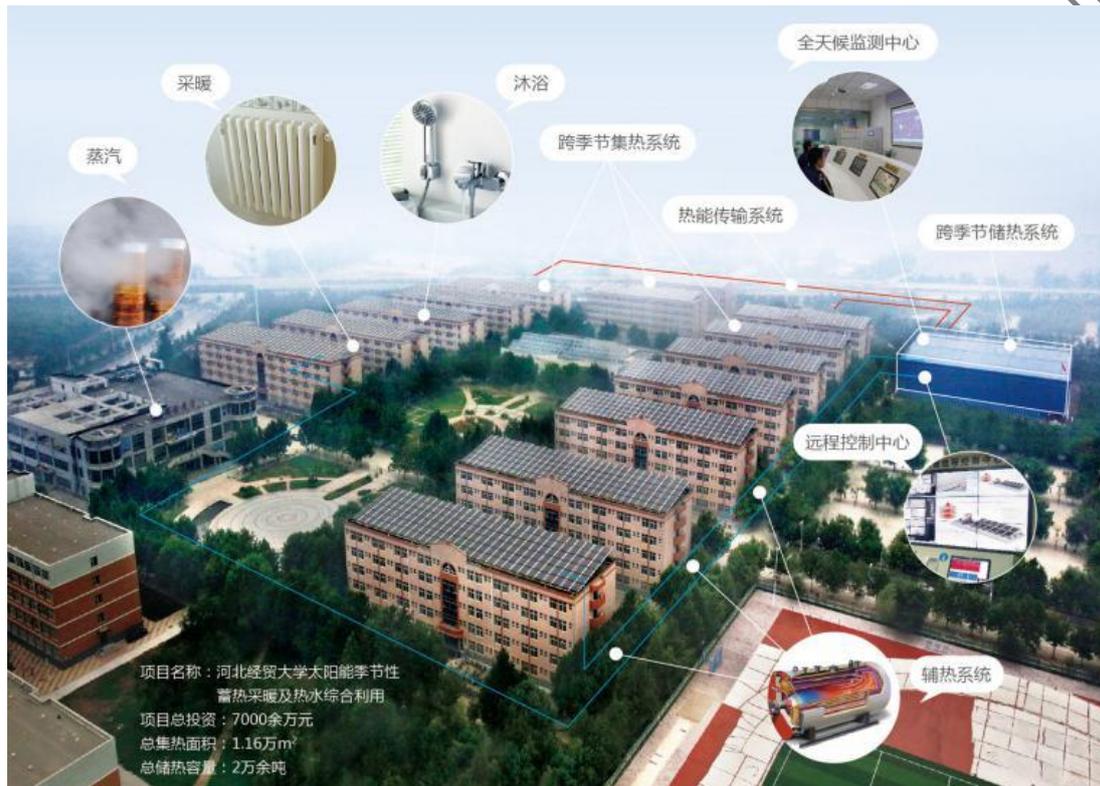


图4 河北经贸大学太阳能季节性蓄热采暖及热水应用综合项目

4.3.2.2 山东力诺瑞特新能源有限公司

中原油田办公楼

项目地处拉萨地区，建筑面积 2200 平方米，为 3 层建筑，采用地板辐射采暖末端与太阳能相匹配，建筑功能为油库值班工作人员办公。采用无机高效热管型集热器，采暖期的系统防过热设计采用设置膨胀罐来容纳系统介质升温膨胀和高温汽化所带来的系统容积和压力的变化；避免过热对系统所带来的危害；非采暖期的防过热设计采用被动遮阳的方式；采用遮阳布将不使用的集热器完全遮



盖。由于没有生活用热水系统等其他用热需求，只能完全覆盖集热器保证设备安全；为发挥蓄热水箱的作用水箱内设置温度分层器，强化水箱内的竖向温度分层。设置水箱的统一高度为 2500mm；水箱取热口设置在水箱上部；回水进口设置在水箱底部。采用温度分层器还可有效降低水箱内的混水现象。

经过计算可得，按照 50%太阳能保证率项目本项目回收期 $n=8.6$ 年。该系统若采暖系统配置的集热面积若仅冬季供暖使用，8.6 年便可收回全部初投资。按 30%太阳能保证率项目本项目回收期 $n=6.8$ 年。该系统若采暖系统配置的集热面积若仅冬季采暖使用；6.8 年便可收回投资。该系统为满足夜间使用需增加较大的储热水箱，设备投资成本增加，需要有高效经济的储能设备；仅用于冬季供暖，而冬季为太阳能资源最差的季节，其余时间为保证系统不过热，还需配置遮阳设备，回收期长，需要增加季节性蓄热或在一定条件下实现夏季制冷方可最大化利用太阳能。

该公司的“无极高效热管技术”是以多种无机元素组合而成的传热介质，加入到管腔或夹壁腔内，经真空处理且密封后形成具有高效传热特性的元件，无机传热元件将热量由元件的一端向另一端快速传热的过程中，元件表面呈现出无热阻快速波状导热的特性。以该技术核心构成的热管应用于太阳能热水器中不仅能够彻底解决普通集热器传热慢、效率低、易结垢、寿命低等诸多缺陷，而且相对同类热管也具有不衰减等独特的优良性能，为太阳能热利用技术带来了突破性进展。

4.3.2.3 北京海林太阳能设备有限公司

北京市延庆旧县旧县镇白河堡村，为新型农村社区太阳能与建筑一体化采暖与生活热水示范项目。总建筑面积 16529 m²，其中地上 12780 m²，地下 4309 m²。结构形式砖混结构，地上 3 层，地下 1 层。在空气源热泵单独采暖，太阳能单独采暖，空气源热泵为水箱加热提供生活热水等功能之间自动切换。太阳能系统为间接分离式系统，空气源热泵为低温型采暖热泵，采用以防冻液为介质的低温地板辐射采暖系统。系统原理图如图 5 所示，实景图如图 6 所示。

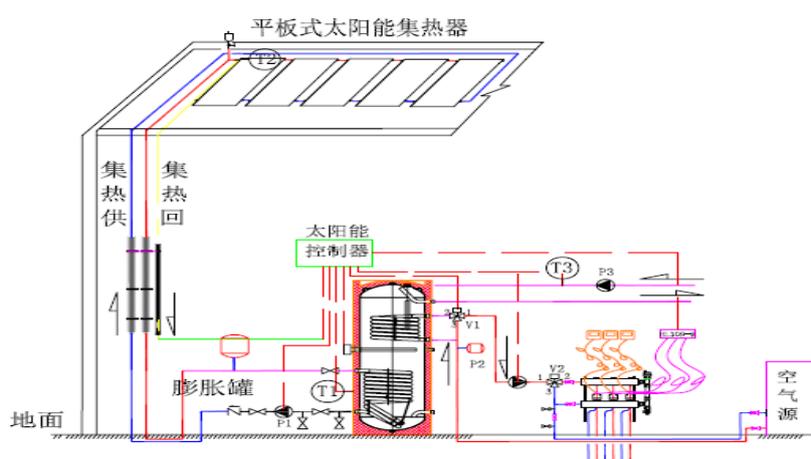


图 5 北京市延庆旧县旧县镇白河堡村太阳能系统原理图



图 6 北京市延庆旧县新型农村社区太阳能与建筑一体化采暖与生活热水示范项目

4.3.2.4 辽宁三友能源技术有限公司

项目实施目的为提供游泳馆 136 个淋浴器每日 60 吨热水洗浴需求，前期泳池加热及日常泳池温度维持的热源；提供除湿机组以及送风机组的热源，设计热水温度 70℃，提供每日 110 吨抵消的热源，供回水温度 70℃/55℃。根据中国医科大学沈北校区体育中心二期游泳馆建筑规划，结合本地的能源价格及实际可提供资金资源状况，综合考虑投资、运行成本，节能减排效应，设计采用“太阳能集热+LNG 瓶组燃气燃烧机组”方式满足游泳馆池用热需求。



太阳能集热场设置于游泳馆东侧的停车场和绿化带上空，集热器采用槽式聚光逐日太阳能集热器，太阳能集热器集热面积 900 m²，采用钢筋混凝土支墩整体抬高 2.75 米，埋地 1 米。辅助加热系统为采用三台常压燃气热水机组，型号分别为两台 70 万大卡，一台 40 万大卡。游泳池容量 2200m³，日补水量 110 m³；热水供应部位：一层淋浴间淋浴器和洗手盆热水；淋浴头数量：男淋浴间 100 个、女淋浴间 37 个；洗浴日开放时间 10h/d。游泳馆机房内设 100m³ 保温水箱 1 台，提供高温热水，额定温度 70℃，洗浴由一台 40 万大卡燃气机组直接提供热水，变频恒温供水。整套系统采用智能化控制，通过逐日聚光储热换热，实现太阳能的最优化利用（实际项目的节能环保目标）。泳池日常维护设计负荷 422kw，淋浴用水设计负荷为 233kw，除湿和通风设计负荷 240kw，一次性冲击负荷 906kw；系统出水温度 70℃，太阳能保证率 50%；

集热器基础为混凝土支墩，钢结构支撑，整个基础支墩高 3.75m，埋地 1m，支墩上表面长*宽为 700mm*500mm，支墩下表面长*宽为 1000mm*800mm，整个基础支墩成现为梯形。（中温太阳能+辅助能源=双源供热系统，见图 7）



图 7 中国医科大学沈北校区游泳馆热水、除湿项目



4.3.2.5 希奥特太阳能

希奥特办公楼太阳能联供系统

希奥特办公楼太阳能联供系统，建筑面积为：5120 m²，用建筑自身的 700 m² 采光面积实现建筑所需的冬季供热、夏季制冷、全年热水等需求，还实现了部分光伏发电（并网），为太阳能联供系统，提供动力电源。该联供系统是大连市委立项的可再生能源利用示范工程，全部采用本公司的专利技术—注水式承压循环全玻璃真空集热管集热模块、电磁感应辅助加热及多腔体分层蓄热系统等，充分发挥其专利技术的优势，实现了冬季采暖及夏季的低品位热源驱动的制冷，已成功运行了 4 年，并于 2013 年 4 月通过了国家科技成果鉴定。（见图 8）

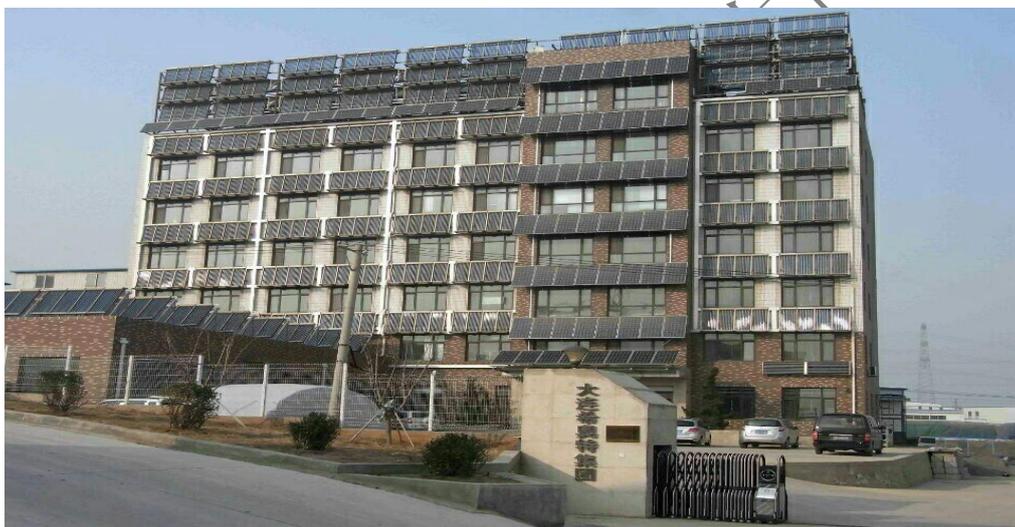


图 8 大连希奥特办公楼

单体户型太阳能采暖给水中心（120 平米）

采暖温度 18~22℃ 任意设置，太阳能保证率 40~78%，日供 45℃ 热水 120 升，远程智能监控确保用户无忧，250L（1.8m 高 X 0.45m 直径）蓄热水箱落地于阳台上。电磁感应辅助加热实现了高达 99% 加热效率，且真正做到了水电分离，确保用水安全。壁挂型注水式承压循环玻璃真空集热模块不仅实现高效、大流量的集热，且其注水式循环确保系统无细菌繁殖，为日常生活提供卫生级热水。

大连希奥特多腔集成太阳能热水器，主要从集热、蓄热、辅助加热及水箱保温这四个部分进行技术创新，于 2014 年 8 月 1 日送达国家太阳能质量监督检验中心（北京）进行检测，2014 年 8 月 8 日性能检测报告及能效检测报告正式完



成。性能检测结果：储热水箱内集热结束时水的温度为 54°C 【国标 $\geq 45^{\circ}\text{C}$ 】；日有用的热量为 $9.5\text{MJ}/\text{m}^2$ 【国标 $\geq 7\text{MJ}/\text{m}^2$ 】，平均热损系数为 $10\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{k})$ 【国标 $\leq 16\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{k})$ 】；能效等级：1 级。

5 国内已有太阳能采暖系统运行现状与发展建议

2009 年冬季西南交通大学联合中国建筑西南设计研究院有限公司对西藏地区 28 个太阳能采暖系统进行了跟踪调查分析，发现太阳能采暖系统诸多后期运行故障并就相关故障提出解决办法以及进行太阳能供暖系统设计时应注意的问题。后期李雨潇、冯炼、张发勇等人 2015 年通过对拉萨市太阳能采暖情况调查研究提出了从系统设计、施工、维护管理三方面太阳能主动式供暖系统应注意的问题。

5.1 已建太阳能供暖系统运行现状

- 1) 太阳能集热板、接头、管道损坏，工质渗漏，系统最终无法运行；
- 2) 太阳能采暖系统蓄热水箱小，白天太阳辐射强时出现沸腾现象；
- 3) 辅助热源与太阳能的匹配不合理，用户不愿意开启辅助热源；
- 4) 停电或电压太低导致系统不能正常运行时，集热板曝晒未遮挡，系统接头热膨胀破损；
- 5) 系统单个组件损坏未修复，造成系统不能正常运行；防冻液泄露或缺少时，运行人员直接加水，系统冻坏；
- 6) 系统排水、排污、排气困难；施工时未清洗管路，管道存在堵塞现象；
- 7) 多数操作人员没有学习过相关知识，不懂操作规程，甚至不敢动控制柜；
- 8) 运行时间长，系统组件损坏、生锈影响供热系统的正常使用。

5.2 故障分许

设计方面：设计人员与甲方沟通不够，不符合甲方的意图，设计阶段并不十分清楚系统的太阳能保证率与系统的运行费用；没有合理优化蓄热水箱和太阳能



集热器，最终设备选型也不符合实际系统的需要；集热器阵列联排布置过长，水流阻力大，集热板容易过热；系统设计说明书不完整，没有安全阀或没有交代安全阀开启压力，防冻排气运行操作不清楚，埋管设计不明确，定压补水不清楚，导致施工不合格，运行管理杂乱。

施工方面： 锅炉没有按照系统设计要求进行选型采购；管路选材压力、防腐级别达不到要求；管件及阀门材料不匹配，因不同材料热胀冷缩系数不同而导致泄漏；室外风负荷估计不足，集热器安装不稳定；系统管道保温未做好；防水、排气坡度未设置；施工质量低，未按设计要求进行。

维护管理方面： 运行管理人员用水充当防冻液，系统防冻能力大大降低；控制系统故障，管理人员缺乏运行维护知识；非供暖季集热器过热；系统平时缺乏保养。

5.3 三大环节建议

系统设计方面： 集热器设计要合理，前后间距，检修预留面积等；设计之初应考虑周围遮挡物对集热器的遮挡；集热器阵列避免过长，串并联使用；集热器防冻保护；集热器与蓄热水箱的匹配优化；系统运行维护操作流程应明确。

施工方面： 集热器应防风、避雷措施应牢固；管路选材应与管内介质种类、温度、压力等相匹配，各管件选材也应与阀门材料相匹配；管道安装坡度、保温等应严格遵照图纸规范要求施工。

系统维护方面： 非供暖季，白天应遮挡集热器，防止过热，夜间集热器应排空进行防冻；防冻液定期检查及时补充；损坏的组件及时维修更换，避免系统停滞或故障；集热器与辅助热源匹配使用，避免长时间采用单一热源。



6 太阳能采暖系统推广的主要障碍与发展趋势

6.1 太阳能采暖系统推广的主要障碍及应对措施

6.1.1 经济性

现状: 主动式太阳能采暖系统的经济性还无法与传统的热电联产集中供热和燃煤锅炉房集中供热相比较的。主要原因为系统的初投资过高, 实现系统功能, 需要安装循环泵、贮热水箱、集热器固定架和相关阀门管件, 还需设有自动控制系统以确保系统安全运行, 组件安装极大地抬高了系统的初投资。每平方米建筑面积太阳能供暖系统造价在 200 元以上。

可采取措施: 建筑节能设计标准必须得到有效实施以便尽量降低建筑供热负荷; 采用主被动结合的方式, 利用被动太阳得热降低主动系统负荷; 通过技术经济比较合理选择蓄热系统和蓄热容量; 选取适当的太阳能保证率, 开发更为高效低价的集热装置和集热方式。

6.1.2 集热器安装位置受限, 系统技术复杂, 缺少成熟的产业支撑

集热器安装位置:

国内外目前集热器的安装位置主要有三种形式。安装在地面, 地面安装太阳能集热器阵列, 集热器一般朝向正南, 并根据地理位置和集热器类型来优化太阳能集热器阵列的间距和倾角; 与建筑相结合, 大面积平屋顶的安装与地面安装相同, 坡屋顶和外墙主要有三种模式屋顶/ 外墙模块, 屋顶/外墙集成的太阳能集热器, 位于屋顶/外墙上的太阳能集热器; 此外太阳能集热器还可以用来作为汽车户外遮阳棚顶等。相比其他土地利用方式, 地面安装太阳能集热器每平方米面积的“能量收获”是最高的。

集热器安装现状:

建筑缺少足够的位置安装集热器, 用户很难依靠自己的力量运行维护系统,



相关工程很难在市场上采购到专门为太阳能供暖设计的设备器材

可采取措施：

在集热器安装位置不足的集合住宅或大型公建另行辟地用于集热器安装，采用太阳能集中供热；系统实现高度的模块化和集成化，减少现场安装维护和维修工作量；与太阳能供热系统相配套的加热器、水箱、热交换器等附件的开发和产业化。

6.1.3 抗冻、抗风和防冰雹

现状：太阳能集热系统长期暴露在室外，且可能连续雨雪天气，必须采取有效的防冻措施；集热器安装于室外，风负荷较大的情况下容易被破坏；雨雪、冰雹天气易对太阳能集热系统造成撞击。

可采取措施：可以采用防冻液作为太阳能集热器工质；管路中充注防冻液防冻；平板集热器采用排空方式防冻；真空管集热器采用管路电伴热方式防冻；水箱热水反冲加热防冻。非供暖期，将系统中的水和系统室外的水排空，应注意用于排水的自动温控系统本身应具有防冻功能；系统采用机械循环时，应能进行定温循环防冻，循环泵停止运转时，太阳能集热器和循环管路中的水应能回流至贮水箱；需要的时候可使循环管路中的水回流。建筑物屋顶相比地面要承受更高的风力载荷，因此需要更坚固的基础，对建筑物与屋顶的结构进行分析，判断是否有必要加固，研究使用混凝土砌块来抵抗风是否可行。集热器与相关设备安装于屋顶需能像在地面安装的集热系统一样，应能经受不低于当地历史最大风力的负载。

6.1.4 防过热、防倒流和承压

现状：太阳能采暖系统正常运转的情况下太阳能集热场以及相连接的管路阀门可能会经历较大温差变化，或者负荷太低，或发生循环停止和停滞，就有可能可能会出现非常高的温度和压力。同时单纯的供暖系统在非供暖季面临热量浪费，集热器过热。

可采取措施：太阳能供热供暖系统应设置过热保护装置，以保证系统在过热



状态下的安全性。封闭式系统应安装安全阀或其他保护措施，集热器与安全阀之间的管路必须不包含任何闭合元件，同时安全阀应能抵御极端温度条件；间接系统使用防冻液时，防冻液的沸点应高于太阳能集热器的最高闷晒温度，防冻液也不因由于过高温而变质。采用季节蓄热将非采暖季热量转移到采暖季使用；采暖系统与空调、热水系统形成综合利用系统，全年向建筑提供相应服务；可在严寒地区与土壤与热泵系统联合运行，非采暖季太阳得热回灌地下，解决热泵系统的热不平衡问题；采用耐高温的集热器和系统，非供暖季采用苫布遮挡，风冷降温等措施防止集热系统过热。太阳能采暖系统还必须能够承受系统停滞发生时的压力水平。由于沸腾不同时发生，大型系统确保压力不超过容许限度是一项挑战。如果蒸汽积聚在集热器中远离安全阀的地方，由于液体挡住汽路造成的延迟，使由蒸发导致的压力升高可能大于由液体溢出导致的压力降。如果蒸汽通往安全阀的通道畅通无阻，压力会迅速下降。对于大型系统的集热器，应设计较高的压力测试水平。集热器之间以及集热器与安全阀之间的所有管道沸腾时的压力不应超过最大允许值，确保人员安全。太阳能采暖系统还要能承受由于外部环境变化而导致系统内部突然地冷热水变化，具有一定的防热冲击能力。

6.1.5 系统技术复杂，缺少成熟的产业支撑

现状：用户很难依靠自己的力量运行维护系统，相关工程很难在市场上采购到专门为太阳能供暖设计的设备器材。

可采取措施：系统实现高度的模块化和集成化，减少现场安装维护和维修工作量；与太阳能供热系统相配套的加热器、水箱、热交换器等附件的开发和产业化。

6.1.6 太阳能采暖地域性差别显著

由于地理位置、气象条件、自然资源和不同使用要求的不同，太阳能供暖的系统形式、辅助能源和控制模式也各不相同，需要就不同地区适宜采用的太阳能供暖技术和设备形式。太阳能供暖对系统集成优化设计要求较高。其主要组成部分（集热系统、储热系统、辅助热源系统、控制系统等）之间的合理匹配是决定系统能



否高效运行的关键。

基于上述分析，我国应该重点攻克相关的技术难关，尤其在低成本太阳能储热和系统合理匹配方面，并进行一定程度的应用示范，及时总结相关问题，制定合理的补贴机制和推广机制，为太阳能采暖技术的推广奠定坚实的基础。

6.2 发展趋势

6.2.1 发展太阳能区域供热

借鉴中欧北欧国家成熟的太阳能区域供热产业，可以在我国西部地区和东部经济发达地区的大城市郊区、乡镇、农村推广大型太阳能区域供热。对大型太阳能区域供热系统经济性的影响因素包括当地冬季的气候和系统的工作寿命等。当地的供暖期天数越长，系统的工作寿命越长，则系统的经济性越好。中国最适宜大型太阳能区域供热供暖应用发展的地区是有丰富太阳能辐射资源、冬季气候寒冷、有大量荒地可用于安装太阳能集热器的西北部地区。过去大多数中国太阳能热利用企业对其集热器产品工作寿命的担保预期是 10 年，少数较好企业产品的预期寿命为 15 年，所以，如果能通过技术提升，对产品性能进行改善，将国产太阳能集热器产品寿命均提高至 15 年以上，中国的大型太阳能供热系统将会有较好的市场化发展前景。

6.2.2 太阳能热泵采暖

太阳能采暖是太阳能热利用系统当前的主要发展趋势，但仍有较多的问题需要解决以支撑该项技术的规模化推广。太阳能与地埋管热泵系统的联合应用有助于提高地源热泵系统在寒冷严寒地区的适用性，提高系统能效，是太阳能与热泵联合供热的主要方式；太阳能空气集热器与空气源热泵的配合应用可以有效提高空气源热泵的制热性能；以空气为介质的太阳能空气采暖系统以其价廉无防冻泄露危险简单可靠的特点成为村镇地区独栋建筑采暖的新兴方向之一；研发更为有效的末端低温供暖设备，降低供回水温度，提高供回水温差，从而提高热源能效。



6.2.3 太阳能村镇市场

目前太阳能采暖系统最大的市场在城镇化背景下的村镇建筑中，以电以煤为主的村镇用能状况。土地资源广阔的村镇将是今后太阳能采暖的主要市场。十三五规划指出到 2020 年太阳能热利用集热面积保有量达到 8 亿平方米，年度总投资额约 1000 亿元。实现全国城镇建筑和广大农村地区民用热水推广项目集热面积保有量 2 亿平方米，工农业供热应用示范项目保有量 1.5 亿平方米。将重点推进太阳能热水系统在中西部运用，在采暖省份的农村乡镇，以 2.5% 的比例开展太阳能采暖示范试点。

7. 总结

能否在一个区域利用太阳能进行供热，首先需要考虑该地区的太阳能资源，所需的关键数据为水平面上的太阳辐照总量，这个数据须为项目现场采集得到或者气候条件相似的附近区域采集得到。其次是太阳能集热蓄热系统安装位置，有多少面积可用于太阳能集热蓄热系统安装，安装的位置位于地面还是屋顶或是停车棚等，同时还需要考虑土地的价格成本等以及供热管网距离集热蓄热系统的距离。由于太阳能的能源密度低（峰值约 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ），需要充足的场地放置集热器，才能达到一定的供热能力，同时还要避免周围环境或建筑物可能造成的遮挡；高于 3 层（不含）以上的建筑，其屋面已不能满足全部太阳能集热器的安装条件，太阳能供暖系统对于高层建筑存在安装建设条件不足的缺陷；这一问题在居住密度较大的城区更加难以解决，这在一定程度上限制了太阳能在此类地区建筑的应用；再次，需要对太阳能供热系统的供热能力进行计算，验证系统能否满足供热需要；还需基于供热量对集热器的倾角和朝向，集热器排与排间的距离，控制策略，换热器，蓄热等进行系统优化，以达到最佳经济性和节能性；最后需要对所设计的太阳能采暖系统进行经济性分析，包括安装区域土地成本、集热器场价格、管路价格、连接管路热损失等。基于上述条件，太阳能采暖工程应用可概括为：针对广大农村地区，研发和推广低成本、易（免）维护的高效太阳能采暖系统，切实符合农村用户的使用特点；针对小城镇地区，研发和推广以太阳能采暖系统



为主要功能的集成优化系统，实现高效太阳能建筑一体化；针对太阳能资源较丰富地区的低密度公共建筑，可以建设集热器与建筑相结合的太阳能采暖项目；针对高密度城区建筑，在有条件的地方设立集中型太阳能辅助供热站，打造区域清洁能源中心。综合比较，现阶段我国太阳能采暖主要集中于独栋建筑或小型建筑群落，采暖模式主要为太阳能热泵系统和太阳能辅助其他热源采暖，太阳能利用有限，且利用效率低，缺乏长期运行管理经验，已建太阳能采暖系统由于设计、施工、运行管理等原因，出现诸多问题，采暖系统寿命远低于设计预期。我国最适宜发展太阳能区域供热采暖系统的地区为太阳能资源丰富，人口密度小的西北地区和中东部经济发达的郊区农村。未来如果能大范围引进运用国外的太阳能区域供热采暖系统，将有助于解决我国西部城镇、农村的采暖问题和东部村镇的采暖问题，缓解气候、能源、环境危机。

8 参考文献

- [1] 李婷, 康侍民, 陈静. 主动式太阳能供暖系统的研究现状综述[J]. 制冷与空调:四川, 2013(6):611-615.
- [2] 郑瑞澄, 聂晶晶. 太阳能供热采暖技术市场化发展前景[J]. 建设科技, 2015(8):43-45.
- [3] 郑瑞澄. 太阳能供热采暖工程应用推广[J]. 太阳能, 2007(2):37-41.
- [4] 杨铭, 王志峰, 王鹏苏, 等. 推进我国北方地区太阳能供暖途径与措施探讨[J]. 建设科技, 2013(10):22-26.
- [5] 2015全国太阳能建筑政策与技术交流会会议资料
- [6] 彭飞, 张国勋. 一个太阳能—热能系统的计算机分析模型[J]. 太阳能学报, 1988(4). 报,
- [7] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能地面采暖系统蓄热水箱容积分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12):1636-1639.
- [8] Esen M, Ayhan T. Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for



- different phase change materials[J]. Energy Conversion & Management, 1996, 37(12):1775-1785.
- [9] Nallusamy N, Sampath S, Velraj R. Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage system integrated with constant/varying (solar) heat sources[J]. Renewable Energy, 2007, 32(7):1206-1227.
- [10] 白剑. 相变蓄热在太阳能热泵供热系统中的应用研究[D]. 太原理工大学, 2012.
- [11] Schmidt T, Mangold D, Müller-Steinhagen H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany[J]. Solar Energy, 2004, 76(s 1-3):165-174.
- [12] 李庆娜. 散热器采暖系统低温运行应用研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [13] 崔洁. 基于太阳能的相变储能地板采暖系统热性能研究[D]. 沈阳建筑大学, 2012.
- [14] 李佳, 刘志强, 王磊磊, 等. 太阳能空气集热器采暖系统的采暖效果分析[J]. 节能, 2013, 32(6):59-61.
- [15] 李恩云. 浅析太阳能采暖与生活热水系统的技术与经济效益[J]. 价值工程, 2014(30):147-148.
- [16] 李雨潇, 冯炼, 张发勇. 拉萨市太阳能供暖情况调查研究[J]. 制冷与空调:四川, 2015(1):106-109.
- [17] 王磊, 袁磊, 朱长鸣, 等. 主动式太阳能供暖系统全过程调试必要性研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(2):53-56.
- [18] 李婷, 康侍民, 陈静. 主动式太阳能供暖系统的研究现状综述[J]. 制冷与空调:四川, 2013(6):611-615.
- [19] 王振辉, 崔海亭, 郭彦书, 等. 太阳能热泵供暖技术综述[J]. 化工进展, 2007, 26(2):185-189.
- [20] www.solar-district-heating.eu
- [21] Solar district heating guidelines Collection of fact sheets WP3 - D3.1 & D3.2
- [23] 韩宗伟, 郑茂余, 刘威, 等. 严寒地区太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统[J]. 太阳能学报, 2006, 27(12):1214-1218.
- [24] 陈雁. 太阳能辅助空气源热泵供暖实验和模拟研究[D]. 天津大学, 2006.
- [25] 王磊, 程建国, 许志浩, 等. 西藏太阳能与水源热泵联合供暖系统优化[J]. 暖通空调, 2007, 37(11):90-94.



- [26] 毕月虹, 陈林根. 太阳能-土壤热源热泵的性能研究[J]. 太阳能学报, 2000, 21(2):214-219.
- [27] 刘岩. 水源热泵与太阳能集热系统联合供暖系统[C]// 中国可再生能源学会2011年学术年会. 2011.
- [28] 何端练, 李元哲, 姜蓬勃, 等. 太阳能-空气源/水源热泵双级耦合地板采暖系统在寒冷地区的应用[J]. 供热制冷, 2011(10):60-63.
- [29] 李婷. 太阳能供暖在红原机场的应用研究[D]. 重庆大学, 2014.
- [30] 王琪. 寒冷地区太阳能土壤源热泵供热供冷及经济性分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [31] 田晓改. 太阳能/土壤源热泵系统的设计与性能预测[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
- [32] 李德英, 高雪飞, 赵秀敏. 太阳能集热供暖系统成套设备设计研究[J]. 建筑科学, 2004, 20(z1).
- [33] 杨卫波, 施明恒, 董华. 太阳能-土壤源热泵系统联合供暖运行模式的探讨[J]. 暖通空调, 2005, 35(8):25-31.
- [34] 宋华超. 太阳能辅助燃气炉供暖系统在非集中供暖地区的应用[J]. 城市建设理论研究:电子版, 2015(15).
- [35] 王磊磊, 李金平, 王立璞, 等. 太阳能和生物质能互补的散热器采暖系统[C]// 2007年工程热力学与能源利用学术会议. 2007.
- [36] Klagenfurt, Sterneckstraße, Austria, COMBINED SOLAR - BIOMASS DISTRICT HEATING IN AUSTRIA, *Solar Energy* Vol. 69, No. 6, pp. 425 - 435, 2000.
- [37] Dario Buoro, Piero Pinamonti, Mauro Reini, Optimization of a Distributed Cogeneration System with solar district heating, *Applied Energy* 124 (2014) 298-308.
- [38] Roman Marx, Dan Bauer, Harald Drueck, Energy Efficient Integration of Heat Pumps into Solar District Heating Systems with Seasonal Thermal Energy Storage, *Energy Procedia* 57 (2014) 2706 - 2715.
- [39] Mehmet Elcia, Axel Oliva, Sebastian Herkel, Konstantin Klein, Alexander Ripka, Grid-interactivity of a solar combined heat and power district heating system, *Energy Procedia* 70 (2015) 560 - 567.



[40] Bruce Sibbitt, Doug McClenahan, Reda Djebbar, Jeff Thornton, Bill Wong, Jarrett Carrierec, John Kokkod, The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system - five years of operation, *Energy Procedia* 30 (2012) 856 - 865.

[41] Humberto Jose Quintana, Michael Kummert, Optimized control strategies for solar district heating systems, *Journal of Building Performance Simulation*, 2015 Vol. 8, No. 2, 79 - 96.

[42] Vaclovas Kveselis, Aurimas Lisauskas, Eugenija Farida Dzenajavičienė, Investigating possibilities to integrate solar heat into district heating systems of Lithuanian towns, The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING” 22 - 23 May 2014, Vilnius, Lithuania.

[43] Simon Furboa, Jianhua Fan, Bengt Perersa, Weiqiang Konga, Daniel Trier, Niels From, Testing, development and demonstration of large-scale solar district heating systems, *Energy Procedia* 70 (2015) 5681 - 573.

转载注明：

来源IMSIA国际金属太阳能产业联盟