

科技综述

太阳能集中供热系统
发展简况北京工业大学 底冰[☆] 马重芳 唐志伟 吴玉庭 魏加项

摘要 介绍了太阳能集中供热系统的概念、分类及在欧洲的发展状况,着重讨论了太阳能季节蓄能供热系统的各种蓄能方式;建议在我国开展太阳能集中供热研究与工程示范工作,以应对城市化进程中建筑用能的增加和《京都议定书》中二氧化碳减排的要求。

关键词 太阳能短期蓄能集中供热系统 太阳能季节蓄能集中供热系统 节能

Development status of central solar heating systems

By Di Bing[★], Ma Chongfang, Tang Zhiwei, Wu Yuting and Wei Jiaxiang

Abstract Presents the concept, classification and development in Europe. Emphatically discusses the energy seasonal storage methods of central solar heating plants. Suggests that research and demonstration project should be carried out in order to satisfy energy consumption of buildings along with urbanization and conform to Kyoto document about reduction of CO₂ emissions.

Keywords central solar heating plant with diurnal storage, central solar heating plant with seasonal storage, energy efficiency

★ Beijing University of Technology, Beijing, China

①

0 概述

太阳能是一种重要的可再生能源,我国的太阳能热利用技术发展很快,家用太阳能热水器得到了广泛的应用。欧洲国家在太阳能利用上做了很多开拓性的工作,了解他们在太阳能利用方面的发展动态对确定我国太阳能事业的发展方向将会很有裨益。当前,欧洲除了继续研发、生产高性能的小型家用太阳能热水器外,更重视太阳能集中供热系统的研究与工程示范工作。太阳能集中供热系统可以为建筑提供生活热水与冬季供暖。由于可资利用的太阳辐射能量是随昼夜、天气状况、季节等因素变化的,大型太阳能系统要正常运行,必然要有蓄能装置,根据蓄存与使用能量的时间跨度可分为太阳能昼夜(或短期)蓄能供热系统 CSHPDS (central solar heating plants with diurnal storage) 和太阳能季节蓄能供热系统 CSHPSS (central solar heating plants with seasonal storage)。前者主要为住宅、旅馆、医院、办公楼等建筑提供生活热

水,通常这种系统按提供 7、8 月份生活热水负荷的 80%~100% 设计,一般可提供全年热水负荷的 40%~50%。后者主要为区域建筑供暖和供应生活热水,通常提供全年这两项热负荷的 40% 以上。截止到 2001 年,在欧洲共建成 55 个太阳能集中供热系统^[1],其中 28 个项目中的太阳能集热器面积在 1 000~2 700 m²,另外 27 个项目中的太阳能集热器面积为 500~1 000 m²,项目主要集中在瑞典、德国、荷兰、奥地利、丹麦等国家。

上世纪 70 年代,由于能源危机,欧洲的科学家开始研究大规模使用太阳能的相关技术,为了便于

①☆ 底冰,女,1973 年 8 月生,博士研究生,讲师

100022 北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程
节能教育部重点实验室暨传热与能源利用北京市重
点实验室

(010) 67391613

E-mail: dibing@bjut.edu.cn

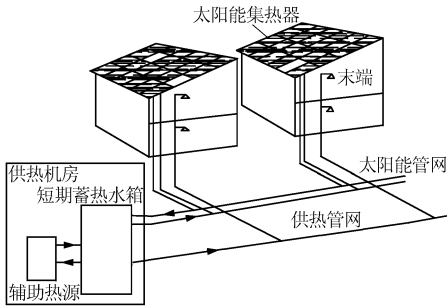
收稿日期:2005-11-11

修回日期:2006-01-23

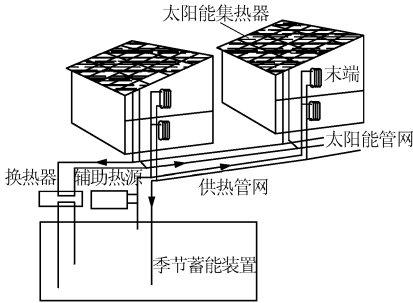
国家间的技术交流与合作,成立了欧洲太阳能集中供热研究组织(European Large-Scale Solar Heating Network);80 年代后,能源危机结束,相关太阳能的研究步伐有所放慢;90 年代以后,人们认识到矿物燃料燃烧产生的温室气体对环境造成的负面影响,许多国家又面临《京都议定书》要求二氧化碳减排的严峻形势,在这一背景下,太阳能集中供热系统又重新得到了重视,如德国在 1993—2003 年由政府资助开展了太阳能集中供热系统的研究与工程示范项目——Solarthermie-2000,目前正在开展它的后续项目 Solarthermie2000plus 的研究工作。

1 太阳能短期蓄能集中供热系统

太阳能短期蓄能集中供热系统由太阳能集热器、蓄热水箱、辅助热源、太阳能管网、供热管网与用户末端等部分组成,如图 1a 所示。它的工作原理是太阳能集热器吸收的太阳能量由太阳能管网输送到蓄热水箱中,再通过供热管网输送到各家各户。多余的热量暂时储存在水箱中,供夜晚和阴天使用。若提供的水温不能满足要求,则使用辅助热源如锅炉等。由于这种系统通常是提供生活热水的,因此供热管网是单向的。这一系统与太阳能家用热水器相似,但它是一个集中供热系统,可为一栋建筑或一个小区提供生活热水。根据欧洲示范工程的经验,它是一种工作稳定、性价比高的供热系统。表1给出了在中欧、北欧地区这种系统



a 太阳能短期蓄能集中供热系统



b 太阳能季节蓄能集中供热系统

图 1 太阳能集中供热系统示意图

的部分设计参数推荐值,从中可以看出采用这种系统的供热费用较家用太阳能热水器低 50%左右。这是由于大型系统中太阳能集热器的单位价格因规模效应而大幅度降低,同时昼夜和短期蓄能系统中太阳能利用率高的原因。在欧洲,这种太阳能的较大规模热利用技术是比较成熟的,已经应用到了实际工程中。

表 1 中欧、北欧部分地区太阳能集中供热系统设计参数推荐值^[1-2]

	家用太阳能热水器	太阳能短期蓄能集中供热系统	太阳能季节蓄能集中供热系统
系统最小容量		至少为 30 套公寓或 60 人提供生活热水	供暖面积不小于 7 000 m ²
太阳能集热器面积	1~1.5 m ² /人	0.8~1.2 m ² /人	1.4~2.4 m ² /(MWh·a)
蓄热容积 ¹⁾ /(m ³ /m ²)	0.05~0.08	0.05~0.1	1.4~2.1
有效吸收太阳能量 ²⁾ /(kWh/(m ² ·a))	350~380	350~500	230~350
太阳能提供全年生活热水负荷的比例/%	50	50	
太阳能提供全年热负荷的比例/%	15	10~20	>40
供热费用(德国)/(欧元/(kWh))	0.15~0.3	0.08~0.15	0.17~0.4

1) 指水容积;2) 指平板集热器吸收的太阳能

2 太阳能季节蓄能集中供热系统

太阳能季节蓄能供热系统由太阳能集热器、季节蓄能装置、辅助热源、换热器、太阳能管网、供热管网与用户末端等部分组成,如图 1b 所示。系统的工作原理是夏天太阳能集热器收集的热量除一部分供用户使用外,相当大的部分通过换热器送入蓄能装置中储存起来;冬季将季节蓄能装置中的热

量提取出来,通过供热管网输送到用户末端。在这种系统中,太阳能通常提供全年热负荷的 40%~70%,其余部分由辅助热源如锅炉、热泵等提供。这种系统实现了太阳能量跨季节的储存与使用,其中蓄热装置的效率和造价在很大程度上影响整个系统运行的经济性,目前蓄能装置有以下几种:热水蓄能(hot-water heat store)、地下埋管蓄能

(duct heat store)、含水层蓄能 (aquifer heat store)、砾石-水蓄能 (gravel-water heat store), 如图 2 所示。

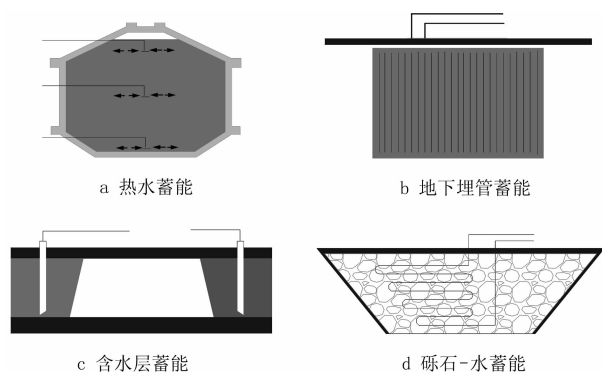


图 2 太阳能季节蓄能的方式

2.1 太阳能季节蓄能集中供热系统的蓄能方式

2.1.1 热水蓄能

这种蓄能方式是在夏季将太阳的热量储存在钢罐或水池的水里, 由于水的密度、比热大, 单位容积的蓄热量大, 同时蓄热和取热的速度也快, 因此这是应用最多的一种季节蓄能方式。在欧洲的气候条件下, 蓄热容积可按每 m^2 集热器 $1.4 \sim 2.1 \text{ m}^3$ 来设计, 水的蓄热和放热温度在 $95 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间。蓄热容积较小时采用钢罐, 钢罐容积一般不超过 $5\,000 \text{ m}^3$, 容积再大则采用水池蓄水的形式, 这主要是从经济性上考虑。通常蓄水池部分或全部埋在地下, 水池上、下及周边是混凝土砌体, 外侧敷设保温材料, 为了防止水和蒸汽渗漏 (透), 通常在墙体内部设置一层不锈钢衬板, 蓄水池顶部可以做成固定或浮动的, 目前已经建成的示范项目中的水池容积为 $3\,000 \sim 80\,000 \text{ m}^3$ 。德国 Hamburg-Bramfeld 太阳能季节供热项目是一个采用水池蓄水的系统, 蓄水设计温度为 60°C , 系统的主要设计参数见表 2。这一系统实际供暖情况较好。当前热水蓄能方面的研究热点是改进、发展现有及新型的蓄水罐 (池), 以降低蓄热量损失和蓄水罐 (池) 的建造费用, 提高整个系统的经济性。德国 Hannover 项目^[2]采用高密度防渗混凝土墙体, 同时承担承重、围护和防渗的功能; 德国 Ilmenau 技术大学项目^[2]采用带有玻璃纤维的强化塑料取代传统的混凝土墙体, 这些降低建筑造价的新型蓄水罐 (池) 是否能解决水和蒸汽的渗漏 (透) 问题还需要经历长时间的系统运行来检验。

表 2 太阳能季节蓄能集中供热项目的部分设计参数^[1-2]

	Hamburg-Bramfeld	Neckarsulm (一期)	Rostock-Brinckmanshöhe	Chemnitz
供暖面积/ m^2	14 800	20 000	7 000	4 680
全年热负荷/ (GJ/a)	5 796	5 987	1 790	2 063
集热器面积/ m^2	3 000	2 700	1 000	540
蓄能装置体积/ m^3	4 500	20 000	20 000	8 000
太阳能供热量/ (GJ/a)	2 840	2 995	1 110	619
太阳能供热占全年负荷的比例/%	49	50	62	30

注: 1) 除 Chemnitz 项目采用真空管集热器外, 其余三个项目均使用平板式集热器; 2) 倒数第 1, 2 行的数值为系统经过一段时间运行达到稳态时的参数。

2.1.2 地下埋管蓄能

目前地源热泵系统在我国发展很快, 而采用地下埋管蓄能与地源热泵系统的地下部分很相似。将地下埋管放置在竖井里, 通过竖井中循环液的流动将太阳能量储存在地下土壤、岩石中, 这与地源热泵夏季向土壤中的散热过程相同; 冬季用地下埋管中的循环液将热量从土壤、岩石中取出供用户使用。竖井中的管子可采用单 U 型管、双 U 型管或套管, 在欧洲常用双 U 型管。竖井的深度在 $30 \sim 100 \text{ m}$ 左右, 在蓄热区的顶部敷设保温层以减少热量损失。由于土壤单位容积蓄热量要比水小很多, 因此蓄热所需的土壤容积较大; 由于蓄热和取热要依靠土壤的导热, 因此蓄热和取热的速度较慢。为了提高地下埋管蓄能系统对热负荷变化的反应速度, 可以在系统中加入一个蓄水箱, 图 3 就是一个具有蓄水箱的地下埋管季节蓄能供热系统的示意图^[3]。通常这种系统的若干个竖井中的埋管先串联成一条管路, 然后若干个这样的管路再并联在集水器和分水器上。蓄热时, 地下循环液从蓄热区中心流进, 边缘流出, 取热时流向正好相反, 这样的设计可以减少蓄热区热量的损失。这种蓄能方式适用于没有地下水流动或地下水流动速度较慢的地区, 这样才能保证地下储热区的蓄热效率较高。这种季节蓄能系统的优点是可以进行模块化设计, 并且蓄能部分的工程造价低, 一般情况下, 它是四种季节蓄能方式中工程造价最低的。以德国 Neckarsulm 项目为例, 在 1998 年兴建的一期工程中, 地下有 168 个竖井, 深 30 m , 竖井间距 2 m , 换热管为聚丁烯双 U 型管, 采用混凝土回填, 总蓄热土壤容积为 $20\,000 \text{ m}^3$, 蓄热区上部有 20 cm 厚的保温材料, 材料边比蓄热区各边长出 4 m , 在蓄热区上方回填了 $2 \sim 3 \text{ m}$ 深的土, 其他设计参数见表 2。2001 年对

项目进行了二期扩建,现在地下土壤的总蓄热容积已达到 $63\,360\text{ m}^3$,集热器面积增至 $5\,263\text{ m}^2$ 。这一项目储热区中心设计温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$,2003 年项目测试报告显示,当年储热区实际最高温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 。这是由于要使具有这么大蓄热体的系统达到稳定运行需要一段时间,研究者估计,在系统运行 5~8 a 后储热区温度可达到设计值。系统自运行后供暖情况良好。

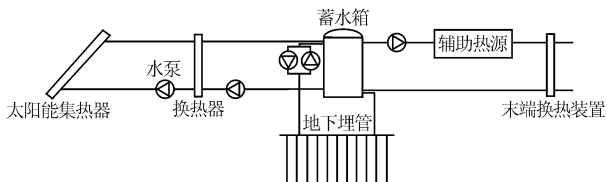


图3 地下埋管太阳能季节蓄能供热系统示意图

2.1.3 含水层蓄能

含水层是由砂子、砾石、砂岩、石灰岩等高透水性物质构成的地下水位线以下的地质构造层。当这一地层的上、下两侧是不透水层并且地下水的流动速度较慢时,含水层可用作太阳能的季节蓄能介质。夏季将抽取上来的地下水经太阳能集热器加热后回灌到热水井中,冬季抽取热井水满足建筑供暖和生活热水的要求,然后将已经提取热量的冷水回灌到冷水井中。采用这种蓄能方式初投资较少,但需要有合适的地质条件;同时由于含水层温度上升会导致其中细菌数量的增加,同时回灌井也可能产生堵塞现象^[4],因此欧洲很多国家对于利用含水层蓄能项目的审批非常慎重。德国 Rostock-Brinckmanshöhe 项目是采用含水层蓄能来进行太阳能集中供暖的^[1],蓄热含水层在地下 15~30 m,最高储水温度 $50\text{ }^\circ\text{C}$,其设计参数见表 2。由于这一项目规模较小,含水层季节蓄热的损失较大,太阳能利用率低,因此系统中加入了水源热泵来提高系统的运行效率。

2.1.4 砾石-水蓄能

砾石-水蓄能也被称为人工含水层蓄能,这是由于蓄能的物质与含水层蓄能中的类似。它是在水池里铺设一层防渗塑料,在里面放入砾石、水等作为储热介质,在防渗塑料外侧铺设保温材料。太阳能可以直接或通过盘管间接存到蓄热槽中。这种蓄能装置造价较热水蓄能罐(池)低,主要是由于不需要建造承重结构,水的重力通过砾石分解到水池周边和底边的土壤上了;同时这种蓄能方式不会

导致地下含水层污染。但由于砾石-水混合物的单位容积蓄热量较小,这种系统的蓄能物质的体积通常大于同等蓄热量热水的 50% 左右。德国 Chemnitz 项目是一个采用砾石-水蓄能的太阳能集中供暖系统,它的相关设计参数见表 2,砾石-水蓄能槽的最高出水温度为 $85\text{ }^\circ\text{C}$ 。该系统自 2000 年建成后运行良好。

2.2 供暖末端的选择

在太阳能季节蓄能集中供热系统中,供暖末端的形式对系统的运行效率影响较大,这一点在已有的示范项目中得到了证实。在一些运行的示范项目中,用户末端的回水温度较设计温度偏高,造成了太阳能集热器集热效率降低,同时蓄存热量也不能完全被利用,造成了浪费。这主要是由于在这些项目中仍采用传统的供暖末端形式^[2]。因此采用太阳能季节蓄能集中供热时,为提高系统的效率和经济性,需要采用低温供暖末端如地板供暖等适用形式。

3 太阳能集热器

与我国有所不同的是欧洲国家通常使用平板式集热器。在瑞典、丹麦等国家的太阳能集中供热系统中,通常是将集热器直接放置在集中供热站附近的地面上;而在其他土地资源紧张的国家,通常是放在建筑物的屋顶上。一种方法是在工厂预制集热器部件,然后安装于建筑物屋面结构之上;另一种方法是采用预制的太阳能屋顶,它包括屋面结构和太阳能集热器两部分,是完整的屋面部件。通常在工厂中制作完成,现场安装比较方便,这种太阳能屋顶是从德国和瑞典发展起来的。目前欧洲有不少太阳能产品生产厂家提供用于大型太阳能供热系统的太阳能集热器和太阳能屋顶。

4 结语

太阳能短期蓄能集中供热系统是一种技术比较成熟并已经应用到实际工程中的系统形式,尽管从经济性方面而言比燃油锅炉等要差,但可以通过增大系统规模来降低成本,同时采用太阳能系统的环境收益也应考虑。

当前,太阳能季节蓄能供热系统在欧洲尚处于科学研究与工程示范阶段,这一技术发展的主要瓶颈在于初投资较大,因此现在建成的示范工程主要是由政府投资建设的。从技术角度来讲,需要改进并提出新的季节蓄能装置以提高储热效率、降低建

造成本,同时提高太阳能集热器效率并采用低温供暖技术等。在设计中,需要对系统参数进行优化,目前欧洲主要采用 TRNSYS 软件来完成系统参数的优化工作。

当前,我国已颁布了《公共建筑节能设计标准》,同时《可再生能源法》也于 2006 年 1 月 1 日正式实施了,这些都为我们采用较低品位的太阳能供热创造了有利条件,同时采用集中供热也符合我国的用热习惯;其次,随着我国城市化进程的推进和人民生活水平的提高,新建建筑逐年增多^[5],而这与我国能源供给形势产生了不小的矛盾,同时,在不远的将来我们还将面对《京都议定书》中的二氧化碳减排任务。本文所述的设计参数等都是基于欧洲的气象条件、地质条件和产品情况而言的,我们不能照搬硬套,需要对太阳能集中供热技术进行系统的研究。

在太阳能季节蓄能供热方面,国内某公司开展了采用热水蓄能的示范项目研究;北京工业大学目前正在开展地下埋管蓄能方面的理论研究工作;天津大学也在进行地下埋管蓄能方面的研究与工程示范工作^[6]。总之,这种系统的研发工作在中国刚刚起步,需要针对不同的蓄热方式分别开展理论分析、系统模拟及工程示范验证等多项工作,制订适合我国气候、地质条件的太阳能集中供热系统的设计规范,并开发相应的设计优化软件^[7-10]。

参考文献

[1] Schmidt T, Angold D M, Müller-steinhausen H.

Central solar heating plants with seasonal storage in Germany[J]. Solar Energy, 2004, 76(1/3): 165-174

[2] Lottner V, Schilz M E, Hahne E. Solar-assisted district heating plants: status of the German programme Solarthermie-2000 [J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 449-459

[3] Pahud D. Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulation [J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 495-509

[4] 袁伟峰,赵军,朱强,等. 季节性含水层蓄能系统研究与发展的综述[J]. 制冷学报, 2000(4): 1-6

[5] 马重芳,底冰,吴玉庭. 可再生能源应用的重要领域[J]. 中国能源, 2005, 27(9): 11-13

[6] 王华军,赵军,宋著坤,等. 跨季节蓄热太阳能集中供热技术[J]. 太阳能, 2005, 108(4): 27-31

[7] Nordell B, Hellstrom G. High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings[J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 511-523

[8] Yumrutas R, Unsal M. Analysis of solar heat pump systems with seasonal thermal energy storage in surface tanks[J]. Energy, 2000, 25(12): 1231-1243

[9] Ozgener O, Hepbasli A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(1): 101-110

[10] Alfred L H. 15 years of R & D in central solar heating in Denmark[J]. Solar Energy, 2000, 69(6): 437-447

(上接第 54 页)

采用用图形用户界面形式编制的 U 形管式换热器管板厚度设计计算模块,可以使用户不必具备很高深的 Matlab 知识或者数学知识,而只要熟悉计算机的基本操作就可以完成管板设计。

2 结论

综上所述,本文以 U 形管式换热器为研究对象,主要探讨了 Matlab 在其优化设计中的具体应用,其中包括编程计算、绘图、曲线拟合和用户图形界面设计等方面。通过采用 Matlab 语言对 U 形管式换热器进行优化设计,不仅可以把设计者从传统的烦琐工程计算中解放出来,从而大大缩短设计周期、提高工作效率,而且 Matlab 精确的数学运算和图形处理功能可以确保设计的可靠

性和合理性,达到了设计节能、高效的新型换热设备的目的。

参考文献

[1] 陈怀琛. MATLAB 及其在理工课程中的应用指南[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004

[2] 罗建军,杨琦. 精讲多练 MATLAB[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002

[3] 潘继红,田茂诚. 管壳式换热器分析与计算[M]. 北京:科学出版社, 1996

[4] 张威. MATLAB 基础与编程入门[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004

[5] 李民波. MATLAB 科学计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2005

[6] 郑宏兴,姚纪欢,张成. MATLAB 5. X 工具箱使用技巧与实例[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2000