

# 太阳能-土壤源热泵联合供能系统的研究进展\*

刘广平<sup>1),2),3),4)</sup> 骆超<sup>1),2),3)</sup> 邱泽晶<sup>5),6)</sup> 郑鑫<sup>5),6)</sup> 龚宇烈<sup>1),2),3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院广州能源研究所) <sup>2)</sup>(中国科学院可再生能源重点实验室)

<sup>3)</sup>(广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室)

<sup>4)</sup>(中国科学院大学) <sup>5)</sup>(南瑞集团公司(国网电力科学研究院))

<sup>6)</sup>(南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心)

**摘要** 随着能源消耗所带来的环境污染越来越严重,可再生能源技术得到日益广泛的应用。其中土壤源热泵和太阳能光热技术得到迅速发展,将太阳能和地热能联合开发利用是新能源发展的方向之一。本文分析太阳能热利用系统、蓄热系统以及太阳能-土壤源热泵联合供能系统的发展现状及性能指标。指出太阳能-土壤源热泵联合供能系统主要有串联、并联和混合连接3种运行方式;影响太阳能-土壤源热泵联合供能系统性能的主要因素有太阳能集热器面积、土壤热物性、联合系统控制策略等。研究表明,联合供能系统是一种比单一热源(如太阳能、地热能)热泵系统更高效、经济的能源利用模式。

**关键词** 太阳能;土壤源热泵;复合系统;优化设计;能效比;运行方式;经济性

## Research progress on solar-ground source heat pump combined power system

Liu Guangping<sup>1),2),3),4)</sup> Luo Chao<sup>1),2),3)</sup> Qiu Zejing<sup>5),6)</sup> Zheng Xin<sup>5),6)</sup> Gong Yulie<sup>1),2),3)</sup>

<sup>1)</sup>(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences)

<sup>2)</sup>(Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences)

<sup>3)</sup>(Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development)

<sup>4)</sup>(University of Chinese Academy of Sciences)

<sup>5)</sup>(Nari Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute))

<sup>6)</sup>(Nari (Wuhan) Electrical Equipment & Engineering Efficiency Evaluation Center)

**ABSTRACT** The renewable energy technologies will be utilized widely with more serious environmental pollution because of the energy consumption. Ground source heat pump and solar thermal technologies are developing rapidly. One of development directions focuses on the utilization of combination of solar energy and geothermal energy. The research progress and performance index of solar thermal utilization, thermal storage and solar-ground source heat pump combined power system are analyzed. There are three operation models for solar-ground source heat pump (SGSHP) combined power system, such as series, parallel and hybrid. The influence of solar collector area, thermal physical properties of soil and combined system control strategy on performance of combined system is conducted. The results show that the combined system is one kind of energy utilization mode with higher efficiency and economy compared with single heat source (such as solar energy and geothermal energy).

**KEY WORDS** solar energy; ground source heat pump; combined system; optimization design; energy efficiency ratio; operation form; economy

\* 国家电网公司科学技术项目“基于光热补偿的热泵及电锅炉供能技术研究及示范应用”。

收稿日期: 2016-12-28

通信作者: 龚宇烈, 博士, 研究员, 主要研究方向为建筑节能、可再生能源利用技术和低品位能源利用技术。

近年来,由于能源的紧缺和城市化的加快,人们对应用于家庭或工业生产的清洁能源和可再生能源(如太阳能、地热能和生物质能等)的关注度逐渐提高。有数据显示,建筑能耗的能量占总能耗的 20%左右<sup>[1]</sup>。因此,提高可再生能源的应用及提高热效率显得尤为重要。

供暖和制冷系统方式的选择受到气候条件、地理位置、经济因素和能源政策的限制,例如:在我国北方,冬季供暖期较长、热负荷大,但是夏季空调期较短、冷负荷较小。如果单独使用土壤源热泵系统对建筑进行供暖和制冷,土壤的蓄热量和释放的热量不平衡,使土壤的温度降低,导致地埋管的供暖能力下降。虽然每年温度的下降幅度并不大,但长期运行后地埋管附近土壤的温度场将出现恶化甚至失去供暖能力,该土壤源热泵系统的 COP 值也会逐渐下降。土壤源热泵系统具有清洁、高效、节能等优点;太阳能具有储量巨大和利用清洁等优点,但是也存在着能量密度低,使用过程具有间歇性等缺点。太阳能-土壤源热泵联合供能系统可以高效运用这 2 种清洁能源。

### 1 太阳能-土壤源热泵联合供能系统的几种联合方式

我国在 20 世纪 50 年代开始对热泵进行研究,但进展缓慢,对土壤源热泵与太阳能联合供能系统的研究也处于初级阶段<sup>[2]</sup>。根据土壤源热泵与太阳能集热器的连接方式,可将联合供能系统分为 3 种方式:串联、并联和混联。

1) 串联模式分 2 种情况:第一种串联模式为循环介质先流经地埋管换热器,再进入太阳能集热器,如图 1 所示。这种情况下,太阳能集热器可以将被地埋管换热器加热过的循环介质再次加热,然后将高温介质输送到风机盘管系统进行供暖。实现热泵不开机、直接供暖的目的。第二种串联模式与第一种相反,循环介质先流经太阳能集热器,再进入地埋管换热器。在日照充足、太阳能集热器供热能力大于建筑热负荷时,选用这种运行模式可以将富余的太阳热能输送到地下土壤中,提高土壤温度的恢复速度。

串联系统主要应用于土壤平均温度不高且冬季太阳能不充足的寒冷地区,如东北地区。夏季,东北地区建筑冷负荷不高,机组满负荷运行时间较短;冬季,热负荷远大于夏季冷负荷,且地下土壤温度较低,为提高冷凝器出口温度,将太阳能热

量用于提高冷凝器的入口水温,既可以解决冷热负荷不平衡所导致的土壤温度失衡的问题,又可以提高系统的综合性能系数。

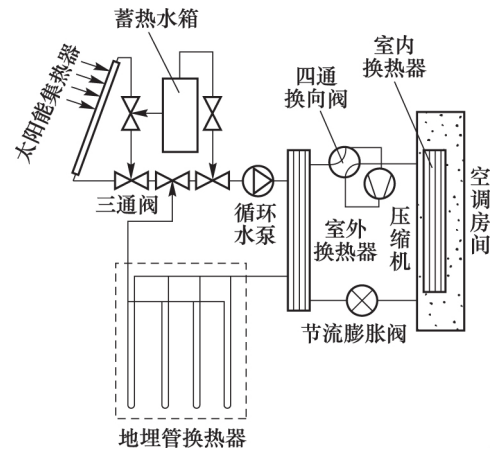


图 1 串联式太阳能-土壤源热泵联合供能系统原理示意图

2) 并联模式。如图 2 所示,热泵机组地源侧循环水通过分水器分流后,同时进入地埋管换热器和太阳能集热器,然后汇合进入热泵机组,介质的分流比例可以通过分流装置智能调节。如果日照条件较好,则增大太阳能集热器管路的流量,从而减轻地下土壤的供热负荷,保证系统在长时间运行工况下具有较好的运行效率;如果光照较弱,则可以减少甚至完全关闭太阳能集热器管路的流量,增大地埋管换热器的取热量,以保证建筑热负荷的需要<sup>[3-4]</sup>。

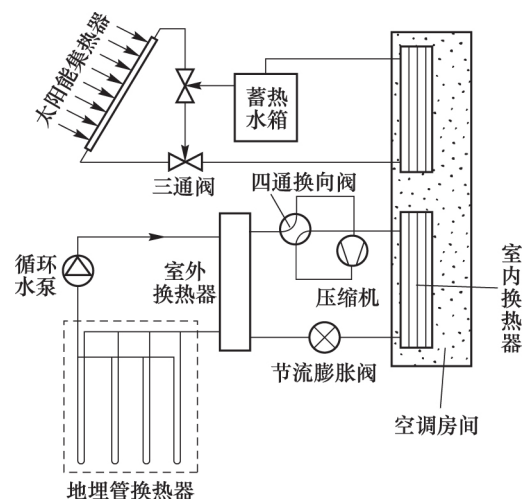


图 2 并联式太阳能-土壤源热泵联合供能系统原理示意图

并联系统主要应用于地下水温度高于 15℃,太阳能较为充足的夏热冬冷地区,太阳能只起辅助作用,太阳能系统所采集的热量直接通入空调

房间供暖,或者部分作为生活热水。并联系统的特点就是不能互补或替换,总能量为太阳能和从土壤中吸收的地热能的总和。

3) 混联模式。太阳能与土壤源热泵的混合连接方式可以有多种。图 3 所示为太阳能与土壤源热泵混联系统中加入了空气换热器。由于土壤源热泵水温比空气温度稳定,在该系统中,土壤源热泵有 2 个蒸发器,一个以太阳能和土壤热能为热源,另一个以空气为热源,目的是提高系统的 COP。当冬季蓄热水箱的水温度高于一定值(30℃)时,就可以直接对房间进行供暖,暂时不启动土壤源热泵;当蓄热水箱的水温度高于大气温度和地下土壤温度时,可以利用它提升土壤源热泵蒸发器的温度;当蓄热水箱的水温度和地下土壤温度均低

于大气温度时,可以切换成为空气源热泵<sup>[5]</sup>。

混联系统的结构决定了该系统的适用场合和地区较为宽泛,既适用于寒冷地区,也适用于夏热冬冷地区。如图 3 所示,寒冷地区冬季热负荷较大且太阳能不充足时,可将地埋管换热器与太阳能集热器并联,空气换热器也开启,三热源同时供热;热负荷不大时,可关闭地埋管换热器侧的水泵,采用空气换热器和太阳能集热器进行供热;夏季太阳能集热器多余的热量蓄存于土壤中,采用空气换热器进行制冷。夏热冬冷地区的冷热负荷相差不大,太阳能集热器与地埋管换热器之间可进行蓄热和释热的调节。混联式系统的特点是适用范围广,控制策略灵活,但是存在操作复杂、故障率较高、初投资较大等问题。

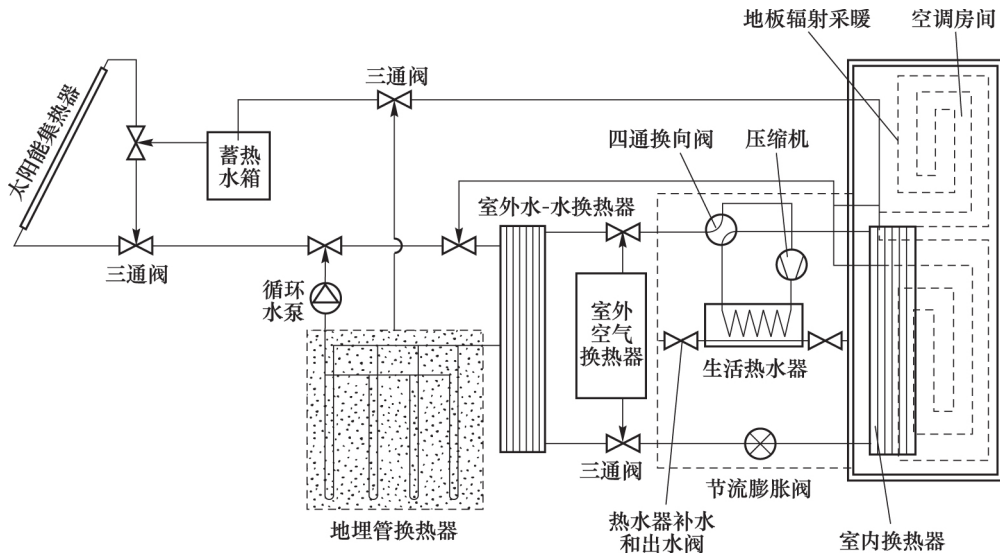


图 3 混联式太阳能-土壤源热泵联合供能系统原理示意图

## 2 研究方法

目前,对联合供能系统主要采用测试和数值模拟的手段进行研究。数值模拟工作主要以 TRNSYS 软件为研究平台。TRNSYS 的最大特色在于其模块化的分析方式,可根据实现的功能调用所需模块,无须单独编制程序。其主要软件包括 simulation studio, TRNBuild, TRNEdit, TRNExe 和 TRNOPT。软件功能强大,不仅可对多方面的系统进行模拟,还能够为系统性能的优化提供可靠帮助。测试利用超声波流量计、温度和压力传感器等设备测试系统的流量、温度和压力等主要参数。

## 3 研究现状

表 1 所示为太阳能-土壤源热泵联合供能系统

的研究进展情况。1956 年, Penrod<sup>[23]</sup> 首先提出将太阳能和土壤源热泵联合供能的概念,他将太阳能集热器与地埋管换热器联合起来,并提出通过将太阳能的能量蓄存于地下土壤中的可能性。随后,随着人们对节能和环境污染的重视,太阳能-土壤源热泵联合供能系统的概念逐渐被接受,研究人员对这一概念的系统进行了大量的理论、模拟研究和试验探索<sup>[23]</sup>。1984—1985 年,瑞典学者广泛地进行了太阳能集热器联合小型土壤源热泵系统的测试。1988 年,瑞士的一个研究项目总结出土壤源热泵和太阳能集热器联合系统优势在于:集热器可以和室内热水系统相连,在夏季采用集热器,不从地下取热,这样便可以最大程度、自然地周围地面补热。1996 年,一个将土壤源热泵和

表 1 太阳能-土壤源热泵联合供能系统的研究进展

年份	既有研究	研究手段	运行模式	集热器	埋管形式	研究结果	COP
2004	Bi Y. H. 等 <sup>[6]</sup>	试验研究	并联	BTR-C1	垂直双螺旋埋管	带双螺旋埋管的地源热泵系统的 COP 最高,且相对于垂直埋管性能提升 21%	2.78
2005	Ozgener O. 等 <sup>[7]</sup>	试验研究	并联	平板集热器	U 形弯管	焓损失最大的部件为风机盘管机组和压缩机	2.38(供暖)
2006	Yang W. B. 等 <sup>[8]</sup>	TRNSYS 数值模拟	串联	平板集热器	单 U 形垂直埋管	载热流体先经过埋管再经过太阳能集热器时系统效率最高	3.41
2006	Trillat-Berdal V. 等 <sup>[9]</sup>	TRNSYS 数值模拟	并联	平板集热器	双 U 形管	在 11 个月的模拟中,抽出和注入的平均热量分别为 40.3 W/m 和 39.5 W/m	3.75(供暖)
2007	Wang H. J. 等 <sup>[10]</sup>	TRNSYS 数值模拟	并联	平板集热器	双 U 形管	蓄热罐和太阳能集热器面积的最佳比率应为 20~40 L/m <sup>2</sup>	—
2008	王侃宏等 <sup>[11]</sup>	TRNSYS 数值模拟	并联	全玻璃真空管集热器	单 U 形垂直埋管	复合系统的 COP 为 3.7,高于地源热泵的 3.5,且运行较为稳定	3.7(供暖)
2008	Han Z. W. 等 <sup>[12]</sup>	数值模拟	混联	双层玻璃平板集热器	双 U 形管	系统有无潜热蓄热罐的 COP 分别为 5.95 和 3.28,因此蓄热罐的存在对 COP 影响很大	3.75(供暖)
2009	马庆瑞等 <sup>[13]</sup>	工程实例	混联	平板型太阳能集热器	单 U 形垂直埋管	无太阳能集热器时系统 COP 为 2.5,太阳能与埋管混联时系统 COP 在 4.5 以上	4.5(供暖)
2009	王雁生等 <sup>[14]</sup>	试验研究	并联	平板集热器	单 U 形垂直埋管	总体效率可达 4.0 以上	4
2010	潘玉亮等 <sup>[15]</sup>	TRNSYS 数值模拟	串联	平板型太阳能集热器	单 U 形垂直埋管	先集热器后埋管顺序的 COP 和年节电量较优	3.4~3.8(供暖)
2010	陈雁等 <sup>[16]</sup>	数值模拟	串联	平板型太阳能集热器	双 U 形 PE 管	扩大集热器面积对系统 COP 的增加效果更为显著	4.2(供暖)
2010	Kjellsson E. <sup>[17]</sup>	TRNSYS 数值模拟	并联	带玻璃盖板平板集热器	单 U 形管	将太阳能热量全部注入埋管的运行方式效率最高	3.70~4.15
2011	Bakirci K. 等 <sup>[18]</sup>	试验研究	并联	改进型平板集热器	单 U 形垂直埋管	系统的 COP 为 3.0~3.4	3.0~3.4(供暖)
2012	Wang E. Y. 等 <sup>[19]</sup>	TRNSYS 数值模拟	混联	平板集热器	单 U 形垂直埋管	太阳能辅助地源热泵系统和将太阳能集热器的热量注入埋管中,系统 COP 提高 20%	3.42
2012	侯静等 <sup>[20]</sup>	试验研究	串联	热管式真空管集热器	单 U 形垂直埋管	地源热泵系统和复合系统的 COP 分别为 3.1 和 4.5	4.5
2013	Rad F. M. 等 <sup>[21]</sup>	TRNSYS 数值模拟	并联	平板集热器	单 U 形垂直埋管	埋管长度减少和太阳能集热器面积增加的比为 7.64 m/m <sup>2</sup> 时,该系统的经济利益最小	2.78(供暖) 7.54(供冷)
2015	李素芬等 <sup>[22]</sup>	Matlab 数值模拟	并联	热管式真空管集热器	单 U 形垂直埋管	间歇负荷模式下系统 COP 最高	3.26(供暖)

太阳能集热器结合的系统,承担近 490 m<sup>2</sup>的住宅热负荷,其中电力需求仅占总热负荷的 9%,剩余的则来源于太阳能集热器和土壤源热泵<sup>[24]</sup>。此外,Trillat-Berdal V. 等针对一面积为 180 m<sup>2</sup>独栋住宅中承担供暖空调及生活热水的太阳能-土壤源热泵系统进行了试验研究,结果表明:供暖期内热泵供热平均 COP 为 3.75<sup>[25]</sup>。2000 年后,主要是针对系统的能量模型进行分析,能量模型主要是研究各部件之间的能量传递关系,然后对整个系统的能量使用效率进行分析。具体研究内容主要集中在以下几个方面:

#### 1) 联合供能系统太阳能集热器的结构

Fudholi A. 等<sup>[26]</sup>利用控制变量法对太阳能光伏热水集热器在不同流量、辐射量和布管形式下的光伏效率和热效率等进行了试验研究,并定义了主要节能效率的公式:

$$\eta_r = \frac{\eta_{pv}}{\eta_p} + \eta_{th} \quad (1)$$

式中: $\eta_p$ 为传统设备产电效率; $\eta_{pv}$ 为集热器光伏效率; $\eta_{th}$ 为集热器热效率。主要节能效率提出了电能和热能的区别,是作为一种能量品位的性能指标参数。结果显示在辐射量为 800 W/m<sup>2</sup>,水流量为 0.041 m<sup>3</sup>/s 时,集热效果最好。在网流管集热器、直流管集热器和螺旋流集热器 3 种布管形式中(如图 4 所示),螺旋流集热器的热效率和光伏效率最高,可达到 54.6%和 13.8%,其主要节能效率可达 91%。当集热器热水质量流量提高时,集热器出口水温下降,集热器热效率提高。

朱冬生等<sup>[27]</sup>对平板型太阳能集热器和真空管太阳能集热器进行了比较,结果表明:虽然真空管太阳能集热器的集热效率较高,但是承压能力较低、易破碎、易结垢,平板型太阳能集热器的承压

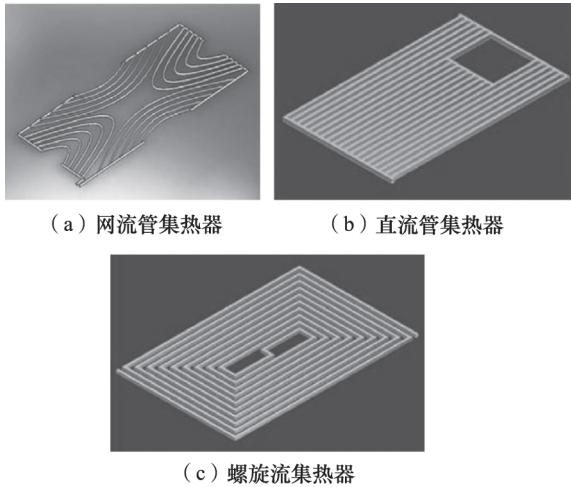


图 4 三种布管形式

能力较好、耐用、维修率低,通过部件的改造可提高集热器的集热效率,如使用真空玻璃作为平板型太阳能集热器的盖板。El-Sawi A. M. 等<sup>[28]</sup>利用连续折叠技术在太阳能收集装置中制造人字形花纹折叠结构,与平板型及 V 形槽式集热器的传热性能相比较,其传热性能提高了 20%,热水出口温度提高了 10 °C。

### 2) 地埋管换热器的结构

地埋管换热器根据地埋管形式的不同可分为水平地埋管和垂直地埋管。水平地埋管施工简单,受外界气候影响较大,适用于单季节使用的情况,占地面积较大,适合场地比较充足的地方。垂直地埋管占地面积较小,受外界影响较小,恒温效果好,后期维护费用低,但是钻孔费用较高,初投资较大,适用于人均占地面积较少的城市等地区。

土壤源热泵的效率受地埋管换热器的传热特性的影响较大,如地埋管换热器的布管形式、土壤类型、湿度、土壤温度、地下水的流动等。Zeng H. Y. 等<sup>[29]</sup>对垂直地埋管换热器(见图 5)的传热性能进行了试验研究,其主要是对地埋管的布管方式和连接方式进行了探讨分析:双 U 形管、单 U 形管和并联连接、串联连接。结果显示:单 U 形管换热器的热阻大于双 U 形管换热器的热阻,串联连接的换热效果优于并联连接方式。Chiasson A. D. 等<sup>[30]</sup>利用 TRNSYS 软件对带有太阳能集热器的土壤源热泵系统进行了模拟研究,对包括芝加哥、盐湖城和丹佛在内的具有不同气候特点的 6 个美国城市的气候参数进行了为期 20 年的模拟,证明联合系统的节能效果。不同的土壤类型对热量

的蓄存能力不同,Yumrutas R. 等<sup>[31]</sup>对 3 种不同成分土壤(碎石、花岗岩、石灰岩)的蓄热能力进行了数值模拟。结果显示碎石成分的土壤蓄热效果最佳。

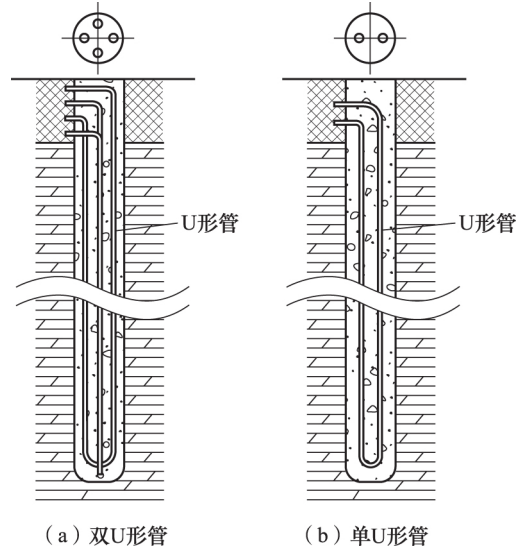


图 5 垂直地埋管示意图

### 3) 联合供能系统的焓损失

为了更加全面地分析土壤源热泵系统性能,并对其进行了优化,研究人员从焓效率的角度对联合供能系统进行了分析。热泵系统的制冷剂经历了压缩、冷凝、节流、蒸发 4 个热力学过程,理论上只有节流阀的节流过程产生焓损失。而经过研究人员的试验、模拟研究,在实际循环过程中,压缩机的不可逆性非等熵压缩、蒸发器和冷凝器的漏热及有限温差传热、制冷剂管路流动过程中摩擦压降等都导致系统焓损失的增加。

Hepbsli A. 等<sup>[32]</sup>对地源热泵系统进行了试验,并对焓效率进行分析,得出系统组件的不可逆性和有待改进的地方等结果。系统中焓损失最大的部件为压缩机,其焓损失达到了实际输入功率的 56%,焓损失主要是取决于压缩机的电机效率、轴效率和等熵效率;第二大不可逆性焓损失部件为冷凝器,这主要是因为压缩后制冷剂过热度过大,冷凝初始阶段大温差传热导致焓损失增大;第三大焓损失部件为使制冷剂压力降低的节流装置;焓损失最小的部件为蒸发器。

### 4) 太阳能与地热能联合供能系统的运行策略

Ozgener O. 等<sup>[7]</sup>以串联的形式将太阳能集热器和地埋管换热器连接,对系统进行试验研究,得到整个系统的焓效率可达到 67.7%。2009 年,王

雁生等<sup>[14]</sup>对太阳能-土壤源热泵并联热水系统的冬季运行特性进行了试验研究,结果表明,其 COP 可保持在 4.0 以上。同年,杨卫波等<sup>[33]</sup>对太阳能-土壤源热泵联合供能系统进行了试验,得出供暖期独立的土壤源热泵系统和太阳能热泵系统的 COP 分别为 2.37 和 2.72,联合运行模式时 COP 为 2.69。2010 年,潘玉亮等<sup>[15]</sup>对太阳能-土壤源热泵联合供能系统串联连接的 2 种不同形式进行了研究比较:载热流体先流经太阳能集热水箱后流经埋管的运行模式效果好些,且太阳能对热泵机组 COP 的提升作用很大,随着埋管深度的增大,COP 也逐渐提高。2012 年,王恩宇等<sup>[34]</sup>建立了太阳能与土壤源热泵多热源热泵系统模型,它由 2 套子系统组成,分别是太阳能辅助土壤源热泵系统和土壤源热泵系统,根据气候的变化调节系统的运行方式。利用 TRNSYS 软件对系统进行模拟研究,得出:该系统的 COP 可达到 4.0 以上,土壤源热泵子系统 COP(不包括风机盘管能耗)可达到 5.4 以上。

太阳能-土壤源热泵联合供能系统的运行策略主要有:①温度控制,当进入或者流出换热器的水温超过设定温度时开启辅助换热装置;②温差控制,当进入热泵的水温与周围空气干球或湿球温度的差值超过设定值时开启辅助换热装置;③开启时间控制,在特定的时间段内(如夜间)开启换热装置。

王恩宇等<sup>[34]</sup>基于 TRNSYS 软件建立联供系统模型,太阳能集热装置的控制策略为集热器出口水温和集热水箱出口水温和差值控制阀门的启闭,系统的运行策略通过设定温度控制,设定供暖控制温度为 20℃,空调控制温度为 26℃。王晓丹等<sup>[35]</sup>对太阳能与空气源热泵联合供热水系统的控制策略进行研究,太阳能集热系统循环水泵的启闭通过温差控制,热泵通过设定温度控制。通过模拟对比了不同控制温度下的能耗情况,得到优化参数,优化后的系统能耗降低了 5%。

#### 5) 联合供能系统的蓄能材料及蓄热装置

严寒地区由于冷热负荷的巨大差距,使得土壤源热泵单独蓄热无法满足夏季制冷量和冬季供热量的平衡。太阳能受天气、季节等因素影响很大,夏季热量过剩,冬季热量不足,具有不稳定性,于是提出了将太阳能蓄存起来以供冬季使用的思想。蓄热形式有 2 种,即跨季节蓄热和昼夜型蓄

热。昼夜型蓄热系统由于太阳能密度低,且存在季节和昼夜交替变化等,存在很大的不稳定性 and 太阳能利用效率低等缺点,一般只用于小型家用热水器。而跨季节蓄热系统通过存储媒介进行太阳能蓄热,以补偿太阳辐射与热量需求的季节性变化,从而达到更高效利用太阳能的目的。

借鉴以上优点,国内外研究人员在热量存储媒介和存储容器 2 个方面开展了一些针对跨季节土壤蓄热相关的研究工作。热量存储方式分为潜热蓄热和显热蓄热。潜热蓄热以相变材料为介质进行储热,显热蓄热介质多为水。现有的埋管换热器设计软件主要基于线热源理论、圆柱热源理论、能量平衡理论等<sup>[36]</sup>建立控制方程,开展埋管的理论研究。Qi Q. 等<sup>[37]</sup>以线热源理论的埋管为基础,以相变材料为储热介质对太阳能热泵跨季节储热系统进行模拟研究。结果表明,在供暖季该系统的 COP 可达 4.2。张志英<sup>[38]</sup>以 TRNSYS 模拟软件为平台对以水为蓄热介质的昼夜型蓄热系统在不同蓄冷率下的节能特性进行比较研究发现,在蓄冷率为 70% 时,经济性最佳。岳韬等<sup>[39]</sup>试验对比了土壤源热泵系统和太阳能-土壤源热泵联合系统的地下蓄热特性,结果表明,后者的平均功率相对于单独土壤源热泵系统提高了 93.5%,联合系统大大增加了夏季的蓄热量。

Yumrutas R. 等<sup>[31]</sup>以水为蓄热介质,以半球形浅层地表蓄热池为研究对象,试验分析了蓄热池位于地表 1 m 以下,不同的蓄热池土壤成分对蓄热能力的影响,结果显示,土壤类型对蓄能区域的瞬态温度场及热泵机组的年平均 COP 的影响很大,土壤导热性小有助于改善系统年平均 COP,碎石质地的土壤蓄热能力最佳。随着集热器面积和蓄热水池半径的增大,系统的 COP 也将增大。蓄热池的深度对 COP 的影响不大。Inalli M.<sup>[40]</sup>应用复数有限傅里叶变换 CFFT (complex finite fourier transform) 和有限差分方法,模拟分析了带地下圆柱形储能罐的太阳能供热系统的地下温度场分布,并就集热器面积、储能容器容积及其埋设深度等因素对地下温度场分布的影响进行了比较分析,结果表明,储热罐可提供重要的部分热水需求,集热器面积为 30 m<sup>2</sup>,储热罐容积为 21 206 m<sup>3</sup> 时,年太阳能使用率最高。

6) 太阳能-土壤源热泵联合系统的经济性评价  
经济性评估主要有动态收益法和静态收益法

2 种,动态收益法考虑了资金的时间价值,静态收益法不考虑资金的时间价值。当系统运行的期限较长时,采用动态收益法分析指标比较合理。在可行性研究中,以动态收益法分析结果为主。经济性评价参数有:初投资、年运行费用、系统维修费用。得到系统的费用  $Z$  计算公式<sup>[39]</sup>为:

$$Z=R+W+C \quad (2)$$

$$R=\frac{Q}{COP} \times h \times E \times f_p \quad (3)$$

式中: $R$  为年运行费用; $W$  为系统维修费用; $C$  为系统初投资; $Q$  为负荷; $COP$  为系统的性能系数; $h$  为运行时间; $E$  为电价; $f_p$  为负荷系数。

动态分析指标采用费用现值和费用年值以及动态追加投资回收期进行分析。费用现值法是将各方案的投资或费用换算成与其等值的现值之和,以费用最小准则决定方案取舍的经济分析方法。费用年值法是将各方案寿命周期内的总费用换算成费用的等额年值,并以费用年值最小方案为最优方案。动态追加投资回收期是指考虑资金的时间因素时,用年经营费节约补偿追加投资所需要的时间。

门小静<sup>[41]</sup>利用经济性评价方法对地源热泵空调系统进行了研究,采用费用现值法和费用年值法以及动态追加投资回收期,比较了土壤源热泵和空气源热泵在寿命期内的经济性,结果表明,土壤源热泵系统经济性更佳,因此选用了地源热泵空调系统。Healy P. F. 等<sup>[42]</sup>对土壤源热泵系统的经济性进行研究,采用初投资、费用年值、费用现值分析对比了使用电锅炉、燃油锅炉、空气源热泵和土壤源热泵的经济性,结果表明,土壤源热泵的初投资最高,但是其费用年值和费用现值最低,按寿命期为 15 年计算,土壤源热泵具有最好的经济性。董玉平等<sup>[43]</sup>利用动态收益法对太阳能-地源热泵联合系统的经济性进行了分析,比较了不同供暖空调系统的经济性,研究结果表明:初投资方面,供暖空调系统太阳能-地源热泵 > 地源热泵 > 燃油锅炉 + 空调 > 燃气锅炉 + 空调 > 空气源热泵;运行费用方面,空气源热泵 > 燃油锅炉 + 空调 > 燃气锅炉 + 空调 > 地源热泵 > 太阳能-地源热泵;动态投资回收期方面,空气源热泵为 13 年,燃油锅炉 + 空调为 12 年,燃气锅炉 + 空调为 9.5 年,地源热泵为 8.5 年,虽然太阳能-地源热泵的初投资较大,但是其运行费用最低,年收益最大,投资回收期最短(5 年)。因此太阳能-地源热泵综合系

统具有更好的经济性。刘逸等<sup>[44]</sup>对严寒地区的太阳能-土壤源热泵联合供能系统进行了经济性分析,比较了太阳能-土壤源热泵联合供能系统、单一土壤源热泵、燃油燃气锅炉、电锅炉的供热方式的经济性,其中太阳能-土壤源热泵联合供能系统的一次能源利用率(供热量/一次能源消耗量)最高,为 1.19。不同运行方式中太阳能-土壤源热泵联合供能系统的年运行费用最低,收益最大。

#### 4 发展前景与展望

笔者总结了太阳能-土壤源热泵联合供能系统的研究方向,阐述了联合供能系统的匹配性特点,通过分析近年来研究人员对该联供系统的模拟、试验研究,得出未来的研究方向主要集中在以下几个方面:

1) 地热储层的温度不同,太阳能的分布受地理位置、环境的影响,太阳能与土壤源热泵的连接方式有多种,何种连接方式能够使能量得到更好地利用是一个重要研究方向。

2) 由于太阳能集热器的集热效果受天气和季节变化的影响,太阳能-土壤源热泵联合供能系统的供能情况随之变化,需要及时、合理、高效地调控 2 种能源的能量分配,智能化自动控制系统是亟待解决的技术问题。

3) 太阳能-土壤源热泵联合供能系统的组成部分焓损失较高,其中压缩机的焓损失最大,为了提高系统的  $COP$  值,对联合系统压缩机和其他能耗损失较大的环节进行优化设计是未来的一个探索方向。

4) 蓄热系统有跨季节型和昼夜型 2 种方式。昼夜型蓄热可以根据阶梯电价进行蓄热,削峰填谷以节约运行费用。季节蓄热系统的容量设计需考虑到蓄热时间、蓄热装置、蓄热介质的选择。如何选择蓄热介质和优化设计蓄热系统是未来的一个重要课题。

5) 太阳能-土壤源热泵联合供能系统作为一种新型能源利用系统,虽然运行费用低,集成性好,优势明显,但其初投资较高,系统维护较复杂,如何合理应用于实际工程,需要与传统设备的经济性作对比以突显出该系统的绝对优势,这将是影响到整个行业发展的关键所在。

#### 参考文献

- [1] 胡平放,向才旺,丁学俊,等. 中国建筑能耗现状特征

- [J]. 武汉城市建设学院学报, 1998, 15(2): 39-43.
- [2] 郭长城, 石惠娴, 朱洪光, 等. 太阳能-地源热泵联合供能系统研究现状[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 356-362.
- [3] 吴晓寒. 地源热泵与太阳能集热器联合供暖系统研究及仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [4] 林辩启, 罗会龙, 王浩, 等. 热泵辅助供热太阳能热水系统运行模式对比分析[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(6): 706-710.
- [5] 孙洲阳, 陈武. 太阳能-地源热泵联合循环技术研究[J]. 流体机械, 2011, 39(10): 67-71.
- [6] BI Y H, GUO T W, ZHANG L, et al. Solar and ground source heat-pump system[J]. Applied Energy, 2004, 78: 231-245.
- [7] OZGENER O, HEPBASLI A. Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system[J]. Energy and Buildings, 2004, 37: 101-110.
- [8] YANG W B, SHI M H, DONG H. Numerical simulation of the performance of a solar-earth source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 2367-2376.
- [9] TRILLAT-Berdal V, SOUYRI B, FRAISSE G. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors[J]. Energy and Buildings, 2006, 38: 1477-1484.
- [10] WANG H J, QI C Y. Performance study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2007, 40: 1278-1286.
- [11] 王侃宏, 李永, 侯立泉, 等. 太阳能-土壤复合式地源热泵供暖的实验研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(2): 13-17.
- [12] HAN Z W, ZHENG M Y, KONG F H, et al. Numerical simulation of solar assisted ground-source heat pump heating system with latent heat energy storage in severely cold area[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28: 1427-1436.
- [13] 马庆瑞, 兰敬平. 太阳能系统与地源热泵系统联合运行方式的探讨[J]. 工程技术, 2009, 70(3): 66.
- [14] 王雁生, 王成勇, 陈文明, 等. 太阳能+地源热泵并联热水系统冬季运行特性研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(9): 70-74.
- [15] 潘玉亮, 徐伟. 北京地区居住建筑太阳能-土壤源热泵系统联合运行的应用分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 237-241.
- [16] 陈雁, 孙德胜. 串联式太阳能辅助地源热泵供暖系统的最优化研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 6-10.
- [17] KJELLSSON E. Solar Collectors combined with ground-source heat pumps In dwellings[D]. Lund University, 2009.
- [18] BAKIRCI K, OZYURT O, COMAKLI K, et al. Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed-loop for heating applications[J]. Energy, 2011, 36: 3224-3232.
- [19] WANG E Y, FUNG A S, QI C Y, et al. Performance prediction of a hybrid solar ground-source heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 600-611.
- [20] 侯静, 荆有印, 王静, 等. 太阳能-地源热泵复合系统的实验研究[J]. 制冷与空调(四川), 2012, 26(3): 295-299.
- [21] RAD F M, FUNG A S, LEONG W H. Feasibility of combined solar thermal and ground source heat pump systems in cold climate, Canada[J]. Energy and Buildings, 2013, 61: 224-232.
- [22] 李素芬, 代兰花, 尚妍, 等. 基于不同动态负荷的太阳能辅助地源热泵系统供暖特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(3): 243-251.
- [23] HANS LUDWIG von CUBA, FRITZ STEIMLE. Heat Pump Technology[M]. London: Butter Worths, 1981.
- [24] FANINGER G. Erdgekoppelte Wärmepumpen-Betriebsdaten von Anlagen in Österreich[C]//Proceedings from OPET-Seminar, Erdgekoppelte Wärmepumpen zum Heizen und Klimatisieren von Gebäuden. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 1999: 18-19.
- [25] TRILLAT-BERDAL V, SOUYRI B, GRAISSE G. Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collector[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(11): 1477-1484.
- [26] FUDHOLI A, SOPIAN K, YAZDI M H, et al. Performance analysis of photovoltaic thermal(PVT) water collectors[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 641-651.
- [27] 朱冬生, 徐婷, 蒋翔, 等. 太阳能集热器研究进展[J]. 电源技术, 2012, 36(10): 1582-1584.
- [28] EL-SAWI A M, WIFI A S, YOUNAN M Y, et al. Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 864-871.
- [29] ZENG H Y, DIAO N R, FANG Z H. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 4467-4481.

(下转第 65 页)



首先计算室内状态点及露点送风状态点的焓值,分别为  $h_i=47 \text{ kJ/kg}$ ,  $h_n=56.226 \text{ kJ/kg}$ , 然后利用全年负荷计算软件计算免税店逐时空调负荷,根据逐时室外气象参数及前述 3 种空调工况计算冷水机组全年制冷量和运行时间,如表 2 所示。

表 2 不同控制方式下冷水机组全年制冷量和运行时间对比

对比项	控制方式	数据
全年制冷量/(kW·h)	采用焓值	235 158
	不采用焓值	254 659
冷水机组运行时间/h	采用焓值	3 943
	不采用焓值	4 678

注:采用焓值控制方式时,冷水机组不运行时间为 1 032 h。

由表 2 可以看出,采用焓值控制方式比不采用焓值控制方式节省 8% 的冷量,同时运行时间减少了 735 h,相当于减少了 16% 的运行费用。因此双风机空调系统采用可变新风比的焓值控制方式具有一定的节能优势。

笔者认为该工程实例节省的能量并不算多,分析其原因是海南地区的新风焓值大部分时间是大于室内回风焓值的。对于新风焓值低于室内回风焓值的地区,采用焓值控制方式更能体现其节

能效果。

### 3 结束语

采用可变新风比的焓值控制方式可以合理调节新风量以适应空调负荷的变化,充分利用新风自然冷却性能,最大限度地减少人工冷源的使用,节能环保效果明显。尤其对于室外空气可利用时间占全年运行时间比例较大的区域,采用焓值控制方式更有利于空调系统的节能。

### 参考文献

- \*\*\* \*\* \*\* \*\* \*\*
- (上接第 15 页)
- [30] CHIASSON A D, YAVUZTURK C. Assessment of the viability of hybrid geothermal heat pump systems with solar thermal collectors[C]//Kansas City, MO, United States: Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., 2003. 487-500.
- [31] YUMRUTAS R, UNSAL M. Analysis of solar aided heat pump systems with seasonal thermal energy storage in surface tanks [J]. Energy, 2000, 25: 1231-1243.
- [32] HEPBASLI A, AKDEMIR O. Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 45: 737-753.
- [33] 杨卫波,倪美琴,施明恒,等. 太阳能-地源热泵系统运行特性的试验研究[J]. 流体机械, 2009, 37(12): 52-57.
- [34] 王恩宇,贺芳,齐承英. 太阳能-地源热泵联合供能系统运行策略研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(12): 83-87.
- [35] 王晓丹,饶政华,孙炜,等. 太阳能与空气源热泵联合供热水系统控制策略的研究[J]. 太阳能, 2016, (4): 54-59.
- [36] 范蕊,马最良. 地埋管换热器传热模型的回顾与改进[J]. 暖通空调, 2016, 36(4): 25-29.
- [37] QI Q, DENG S M, JIANG Y Q. A simulation study on a solar heat pump heating system with seasonal latent heat storage [J]. Solar Energy, 2008, 82: 669-675.
- [38] 张志英. 地源热泵与水蓄能耦合系统的 TRNSYS 模拟与优化研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- [39] 岳韬,陈宝义,王庆华,等. 太阳能-地源热泵联合系统地下蓄热特性研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(1): 47-50.
- [40] INALLI M. Design parameters for a solar heating system with an underground cylindrical tank[J]. Energy (Oxford), 1998, 23(12): 1015-1027.
- [41] 门小静. 地源热泵空调系统的技术经济动态分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
- [42] HEALY P F, UGURSAL V I. Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate[J]. Energy Research, 1997, 21: 857-870.
- [43] 董玉平,由世俊,汪洪军,等. 太阳能-地源热泵综合系统的经济分析[J]. 燃气与热力, 2003, 23(12): 734-740.
- [44] 刘逸,李炳熙,付忠斌,等. 严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析[J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 471-474.