

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-224-06

土壤排取热量不均衡地区地源热泵系统应用研究

刘启明 高朋 魏俊辉 王伟 李向虎
(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

【摘要】 对于土壤排取热量不均衡地区,地源热泵应用过程中常会出现土壤热失衡问题,该问题严重制衡了地源热泵系统在该地区长期高效稳定运行。针对此类地区土壤排取热量严重失衡的特点,同时基于土壤排取热量平衡的理念,提出太阳能对土壤进行全年补热的地源热泵—太阳能耦合系统,并通过一个典型工程案例对地源热泵—太阳能耦合系统的设计思路、技术方案、运行策略、经济性能等方面进行了分析与研究。结果表明,相比于常规能源系统,本项目地源热泵—太阳能耦合系统每年可节能 308 万 kWh,节约运行费用 47.64 万元,节能率达 72.13%,节能减排及环境、社会效益非常显著,以为土壤排取热量不均衡地区地源热泵系统的相关研究及其工程应用提供参考。

【关键词】 排取热量;土壤热失衡;地源热泵
中图分类号 TK529 文献标识码 A

Application Research of Ground Source Heat Pump System in Soil Discharge Unbalanced Area

Liu Qiming Gao Peng Wei Junhui Wang Wei Li Xianghu
(Beijing Geotechnical Institute, Beijing, 100038)

【Abstract】 For areas where heat is not concentrated in the soil, the problem of soil thermal imbalance often occurs in the application of ground source heat pump. This problem seriously checks the long-term efficient and stable operation of the ground source heat pump system in the region. Based on the concept of heat removal in soil and the serious imbalance of soil heat extraction in such areas, this paper proposed a ground source heat pump-solar coupling system that solar energy heats the soil throughout the year. Through a typical engineering case, the system design ideas, technical solutions, operational strategies, economic performance and other aspects were analyzed and studied. The results show that compared with the conventional energy system, the system can save 3.08 million kWh per year, save operating costs of 476,400 yuan, and save energy by 72.13%. The system has significant effects on energy saving, environmental and social benefits. This paper provides a reference for the related research and engineering application of ground source heat pump system in soil heat extraction area.

【Keywords】 heat extraction; soil thermal imbalance; Ground source heat pump

0 引言

地源热泵系统作为一种“绿色空调”,是以大地为冷热源对建筑室内环境进行调节的系统。冬季,通过热泵将大地中的低位热能提高品位对建筑物供暖,同时存储冷量,以备夏用;夏季,则通过热泵将建筑内的热量转移到地下,对建筑物进行供

冷,同时存储热量,以备冬用。由于土壤温度受室外温度影响较小,全年相对保持稳定,这就保证了地源热泵系统的正常运行,有利于提高地源热泵系统的能效比,降低运行费用,达到节能、减排的效果^[1]。在能源与环境问题日益突出的今天,地源热泵系统自身所具备的节能和环保优势,使这项技术

日益受到人们的重视。

目前,对于土壤排取热量不均衡地区应用地源热泵所出现的土壤热失衡问题已逐渐引起国内外相关研究人员的重视,并对土壤热平衡的措施进行了研究与分析。Man^[2]等对以冷却塔作为辅助冷源的混合地源热泵系统进行了模拟,研究结果表明:混合地源热泵系统可有效解决地下土壤的“热堆积”问题。舒海文^[3]等利用 TRNSYS 软件对冷却塔与埋管换热器的不同连接方式进行了模拟计算,得出了可保证地源热泵系统长期高效运行的各种混合地源热泵系统设计方案。余延顺^[4]等对太阳能—土壤源热泵系统的供暖工况进行了模拟研究,得出哈尔滨地区太阳能—土壤源热泵系统中太阳能保证率为 50%~70%左右。Kjellson^[5]等提出带有太阳能集热器的复合地源热泵系统,研究显示通过太阳能集热器向土壤回灌热量可有效减少全年从地下土壤的净取热量。Wang^[6]等对带有太阳能跨季节储能的太阳能—地源热泵系统进行了实验研究,结果表明该系统在哈尔滨地区能满足全年供冷、供热需求,且土壤温度在冬季可用储能维持在一个更高的温度水平。

本文以北京市延庆区某村庄地源热泵工程为研究对象,针对该项目所处严寒地区冬夏两季排取热量严重失衡的特点,同时基于土壤排取热量平衡理念,提出太阳能对土壤进行全年补热的地源热泵—太阳能耦合系统,并对其设计思路、技术方案、运行策略、经济性能等方面进行了分析与研究。

1 工程概况

本项目为北京市延庆区某村庄地源热泵工程,总建筑面积近两万平米,包括村民住房 180 栋以及村委会一栋,绝大多数建筑属于 80 年代翻建,其中含 50 年代建房 31 处,建筑类型绝大部分是 1 层民居,极少部分为 2 层民居,普遍存在安全隐患,水、电、路、气、暖等基础设施也均不同程度存在设施老旧、破损等问题。

根据本区域的地质资料表明,项目场区所处地貌单元为山间盆地地貌,地形平坦开阔,三面环山,地势由东北向西南倾斜,地层主要受妫水河冲洪积作用的影响。工程场区 100m 深度范围内为第四系松散沉积地层,地层岩性为细颗粒物(粘性土)和粗颗粒物(砂、卵石和砾石)交互地层,岩土体导

热性较好。受项目所在地市政、燃气、热力等能源条的制约,因此本项目采用地源热泵系统作为主要冷热源,项目改造后冬季可替代原有燃煤取暖,并解决夏季供冷问题。

2 设计思路

地源热泵—太阳能耦合系统是综合利用低品位的太阳能和地热能的一种新型复合式系统,它综合两种可再生能源的优点,又可相互弥补不足,是很有潜力的可再生能源建筑应用新技术,具有巨大的经济效益、社会效益和良好的环境效益。

根据本项目的建筑特点,结合地热能、太阳能等各种可再生能源利用技术的基本原理、特点、适用范围,针对该项目所处严寒地区冬夏两季排取热量严重失衡的特点,同时基于土壤排取热量平衡理念(见图 1),采用太阳能对土壤进行全年补热的地源热泵—太阳能耦合系统,拟解决项目后期运行过程中可能出现的土壤热失衡问题,且规避了地源热泵系统在该地区长期运行造成“冷堆积”,并最终导致整个系统瘫痪的风险。

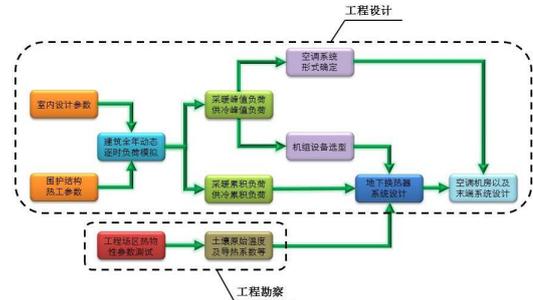


图 1 地源热泵系统设计流程

Fig.1 GHP system design process

3 技术方案

3.1 建筑全年逐时动态负荷计算

本项目采用 DeST 软件对建筑全年逐时动态负荷进行计算,其结果如图 2 所示。建筑峰值热负荷为 1711.61kW,峰值冷负荷为 1304.08kW,采暖季 150 天,热泵系统 24h 运行;供冷季为 30 天,热泵系统每天运行 12h。结合热泵机组的性能参数及系统运行时间,经计算可得土壤年取热量为 1.19×10^{10} kJ,年排热量为 3.84×10^9 kJ,如图 3 所示。地源热泵系统土壤年累积排取热量之差 $\Delta Q_{\text{年}}$ 为

-8.08×10⁹kJ(负数代表土壤累积取热量大于累积排热量),且全年土壤累积排取热量之比为0.32,属于严重土壤热失衡。

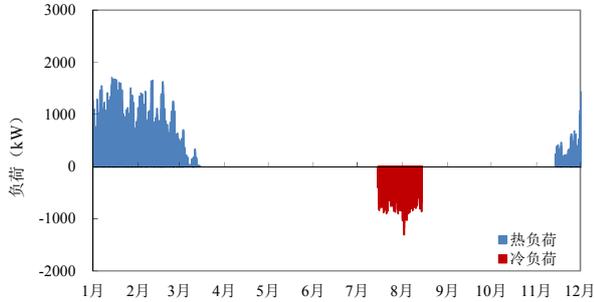


图2 建筑全年逐时动态负荷分布

Fig.2 Building dynamic load distribution throughout the year

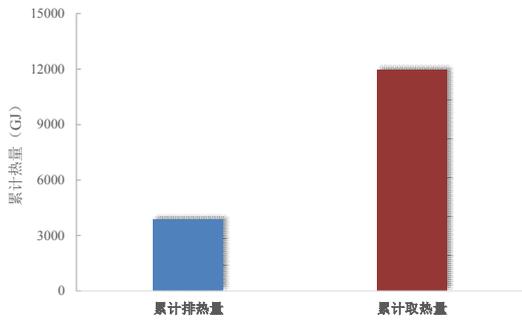


图3 土壤年累计排取热量

Fig.3 Soil-year cumulative heat rejection and take the heat

3.2 埋管系统设计

计算结果

	制冷模式	加热模式
全长(米):	17406.8	50991.4
井孔数:	508	508
井孔长(米):	34.3	100.2
地下温度变化(°C):	-2.4	-0.8
单元进水温度(°C):	32.0	9.4
单元出水温度(°C):	37.2	5.9
峰值负荷(QkW):	1304.1	1711.6
单元总容量(QkW):	1634.0	1724.0
峰值需求(QkW):	218.7	363.4
热泵 COP:	6.0	4.7
系统 COP:	6.0	4.7
系统流量(L/min):	4210.6	5526.4

输入参数

流体		土壤	
流量:	11.4 (L/min)/3.53m ³	土壤温度:	15.6 °C
流体:	100% 水	导热系数:	1.74 W/(m·K)
比热 (Cp):	4.184 kJ/(kg·K)	热扩散率:	0.060 m ² /日
密度 (rho):	999.6 kg/m ³		
管道			
管道类型:	1 in. (25 mm)	径向位置:	平均
流型:	紊流 - SDR11	井孔直径:	150.0 mm
管道阻力:	0.041 m·K/W	填料导热系数:	1.47 W/(m·K)
V型管型式:	双V管	井孔间距:	0.119 m·K/W
型式		模拟时间	额外功率
垂直井孔网格布置:	20 x 25.4	预计时间:	10.0 年数
井孔间距:	4.5 米	长期土壤温度:	制冷: 13.2 °C
并联环路间距:	1		加热: 14.8 °C
			冷却塔水泵: 0.0 kW
			冷却塔风扇: 0.0 kW
			附加功率: 0.0 kW
热泵		备选冷却塔	
制造商:	Addison	负荷平衡:	0 %
系列:	Horizontal 1/2-10 Ton, HGT	冷凝能力(QkW):	0.0
设计热泵负荷侧入水温度:	制冷(DB) 19.4 °C	冷却塔流量(L/min):	0.0
	供暖(DB) 21.1 °C	冷却温度区间(°C):	5.2
水对空气:	19.4 °C	年平均运行小时(hr/yr):	0
水对水:	12.8 °C		

图4 埋管系统设计报告

Fig.4 Ground pipe system design report

结合浅层地热地质条件,工程场区土壤初始温度14.1°C,综合导热系数1.59W/(m·K),综合热扩散率0.058m²/d,采用地下环路设计软件(Ground Loop Design, GLD)进行埋管换热器设计,确定埋管换热器的形式、深度、数量、间距等,经计算本项目埋管换热器设计数量为508个,埋管换热器孔深100m,埋管换热器占地面积为10287m²,设计结果如图4所示。

3.3 年度地层平均温度变化

根据工程场区所在地的浅层地热地质条件,依据热储法可按式(1)计算经年度供冷、采暖季后地层平均温度的变化。

$$\Delta T = \Delta Q_{\text{年}} / Q_{\text{unit}} \quad (1)$$

式中: ΔT 平均温度变化, °C; $\Delta Q_{\text{年}}$ 系统年排取热量之差, kJ; Q_{unit} 为温度变化1°C地层能够释放的热量, kJ/°C。

在布孔区域内,浅层地热静态储量为3.33×10⁹kJ,经过一个制冷、采暖季后,岩土体温度变化 ΔT 为2.42°C,变化较大且地温呈不断递减。为保证系统的长期有效的运行,本项目采用太阳能对埋孔进行全年补热使地源热泵系统年均排取热量保持平衡。

3.4 太阳能补热系统设计

太阳能补热系统所需提供的热量可由式(2)求出。

$$Q_{\text{补}} = \Delta Q_{\text{年}} - Q_R - Q_{\text{地}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{补}}$ 为太阳能补热系统需提供的热量, kJ; $\Delta Q_{\text{年}}$ 为系统年排取热量之差, kJ; Q_R 为大地热流量, kJ; $Q_{\text{地}}$ 为地温变化1°C大地释放(吸收)的热量, kJ。

延庆地区实测大地热流值为53.6mW/m²,埋管孔占地面积为10287m²,计算天数为365天,本项目的大地热流量 Q_R 为1.74×10⁷kJ。则年均地温变化为0°C时(地源热泵系统年均排取热量均衡,即 $Q_{\text{地}}=0$ kJ),太阳能补热系统所需提供的热量 $Q_{\text{补}}$ 为8.07×10⁹kJ。

太阳能补热系统的集热面积可根据式(3)求出。

$$S = \frac{Q_{\text{补}}}{J_T \eta_{cd} n} \quad (3)$$

式中: S 为太阳能补热系统的集热面积, m^2 ;
 J_T 为月平均日太阳能辐照量 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; η_{cd} 为太
 阳能集热器全日集热效率; n 为天数, 365 天。

延庆地区的月平均日太阳能辐照量 J_T 取
 $17.217\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 太阳能集热器全日集热效率 η_{cd}

取 0.538, 则太阳能补热系统集热面积 S 至少为
 2386m^2 。

4 设备选型

项目主要设备表如表 1 所示。

表 1 主要设备表

Table1 Main equipment list

序号	设备名称	技术参数	数量
1	地源热泵机组	制热量 916.9kW, 功率 198.9kW 空调侧进出水温度 40/45℃ 地埋侧进出水温度 10/5℃ 制冷量 929.3kW, 功率 155.6kW 空调侧进出水温度 12/7℃ 地埋侧进出水温度 25/30℃	2
2	空调侧循环水泵	流量 $Q=180\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=46.4\text{m}$, 功率 $N=37\text{kW}$	3
3	地源侧循环水泵	流量 $Q=220\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=48.7\text{m}$, 功率 $N=45\text{kW}$	3
4	全自动软水器	处理水量 $Q=8\text{m}^3/\text{h}$ 功率 $N=100\text{W}$	1
5	软化水箱	水箱体积: $V=8\text{m}^3$ 水箱尺寸: 2000mm×2000mm×2000mm	1
6	空调侧定压补水	流量 $Q=5\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=25\text{m}$, 功率 $N=2.2\text{kW}$	1
7	地源侧定压补水	流量 $Q=8\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=25\text{m}$, 功率 $N=2.2\text{kW}$	1
8	太阳能平板集热器	集热器尺寸: 1032mm×2026mm×67mm 吸收率: $95\pm 0.5\%$, 发射率: $5\pm 2\%$ 瞬时效率 $\geq 78\%$, 热损系数 $\leq 5.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$	1200
9	太阳能集热循环泵	流量 $Q=70\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=39.3\text{m}$, 功率 $N=15\text{kW}$	2
10	集热侧换热循环泵	流量 $Q=100\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=11.8\text{m}$, 功率 $N=5.5\text{kW}$	2
11	补热侧换热循环泵	流量 $Q=100\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=11.8\text{m}$, 功率 $N=5.5\text{kW}$	2
12	太阳能补液循环泵	流量 $Q=1\text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=12\text{m}$, 功率 $N=0.55\text{kW}$	2
13	集热侧板式换热器	换热量: $P=818\text{kW}$ 一次: 65℃/58℃, 二次: 55℃/50℃	1
14	补热侧板式换热器	换热量: $P=818\text{kW}$ 一次: 41℃/34℃, 二次: 28℃/30℃	1
15	储热水箱	水箱体积: $V=42.875\text{m}^3$ 水箱尺寸: 3500mm×3500mm×3500mm	1
16	补液水箱	水箱体积: $V=0.512\text{m}^3$ 水箱尺寸: 800mm×800mm×800mm	1
17	太阳能膨胀罐 (室内)	有效容积: 820L 工作压力: 1.0MPa 罐体直径: 800mm	2
18	太阳能膨胀罐 (室外)	有效容积: 350L 工作压力: 1.0MPa 罐体直径: 600mm	6

5 运行策略

本项目的系统运行原理详见图 5，运行流程为夏季使用地源热泵系统为建筑制冷，冬季使用地源热泵系统为建筑供暖，太阳能补热系统全年向地下土壤补热。其中春、夏、秋季地源热泵机组的地理

侧回水先经过补热侧板式换热器将太阳能的热量排至土壤再返回至地源热泵机组；冬季地理侧回水则先吸取土壤的热量后再经过补热侧板式换热器继续吸收太阳能热量，最后再返回至地源热泵机组以便提高机组的进水温度。

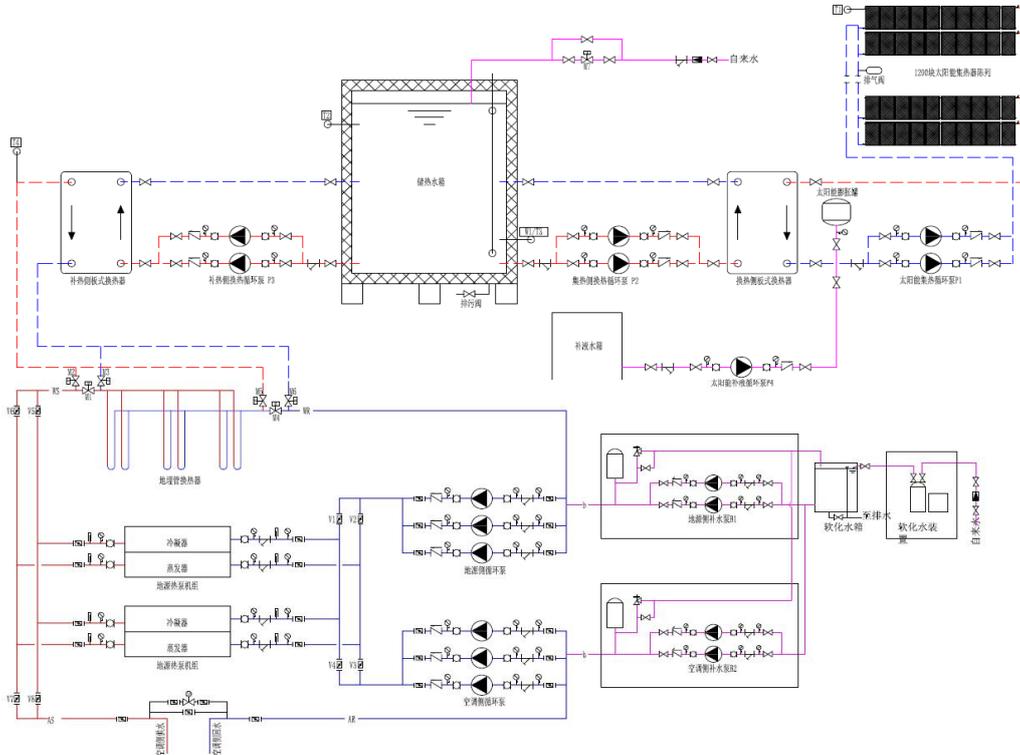


图 5 地源热泵-太阳能耦合系统运行原理图

Fig.5 Ground source heat pump - solar coupling system operation schematic

系统的具体运行策略如下：

(1) 集热温差循环

当有太阳辐照时，由太阳能集热器组成的集热器阵列吸收太阳的能量，逐渐的加热太阳能集热器中的工质，集热器顶部温度 T_1 迅速的升高，当集热器顶部温度 T_1 与储热水箱水温 T_3 的差值大于等于控制程序的设定值（一般设置为 7°C ， $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 可调）时，控制系统自动开启太阳能集热循环泵 P1 和集热侧换热循环泵 P2，通过板式换热器换热，将太阳能集热器阵列所吸收的热量存储到储热水箱中；而当 T_1 与 T_3 的差值小于控制程序的设定值时（一般设置为 3°C ， $2^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 可调），控制系统会自动关闭太阳能集热循环泵 P1 和集热侧换热循环泵 P2，停止集热循环；由于循环水泵均停止工作，太阳能集热器中的工质在太阳的辐照下温度再次很快升高，到满足控制系统工作条件时开始下一轮循环，直到储热水箱内的水温 T_3 达到 55°C （可

自行设定调整）为止。

(2) 补热温差循环

春、夏、秋三季系统运行时，当储热水箱上部水温 T_2 与地源热泵地理侧回水水温 T_4 的差值大于等于控制程序的设定值（一般设置为 5°C ，可自行设定调整）时，控制系统自动开启补热侧换热循环泵 P3，电磁阀 M2、M3、M4 开启，M1、M5、M6 关闭，将储热水箱内的热量逐步转移到地源热泵地理侧回水中；而当 T_2 与 T_4 的差值小于控制程序的设定值时（一般设置为 2°C ，可自行设定调整），控制系统会自动关闭补热侧换热循环泵 P3，电磁阀 M1、M4 开启，M2、M3、M5、M6 关闭，停止换热循环；由于循环水泵均停止工作，储热水箱内的水温会迅速升高，到满足控制系统的工作条件时开始下一轮循环。

冬季系统运行时，当储热水箱上部水温 T_2 与地源热泵地理侧回水水温 T_4 的差值大于等于控制

程序的设定值(一般设置为 5°C , 可自行设定调整)时, 控制系统自动开启补热侧换热循环泵 P3, 电磁阀 M1、M5、M6 开启, M2、M3、M4 关闭, 将储热水箱内的热量逐步转移到地源热泵地理侧回水中; 而当 T_2 与 T_4 的差值小于控制程序的设定值时(一般设置为 2°C , 可自行设定调整), 控制系统会自动关闭补热侧换热循环泵 P3, 电磁阀 M1、M4 开启, M2、M3、M5、M6 关闭, 停止换热循环; 由于循环水泵均停止工作, 储热水箱内的水温会迅速升高, 到满足控制系统的工作条件时开始新一轮循环。

6 经济性能

根据项目具体情况计算系统的运行费用, 并据此做出经济性分析。

经济性分析步骤如下:

(1) 根据系统的运行策略确定在一天的不同时段内设备的启停及运行情况, 计算系统当天运行的总电耗和总电费;

(2) 根据建筑全年逐时动态负荷及供冷、采暖时间, 计算系统的全年总电耗和总电费;

(3) 根据系统的全年总电耗和总运行电费, 评估整个系统的经济性。

地源热泵—太阳能耦合系统与常规能源系统(水冷机组+燃气锅炉)运行费用及能耗对比分析如表 2 所示。

表 2 项目改造前后运行费用及能耗量对比分析表

Table 2 Comparison and analysis of operating costs and energy consumption before and after project renovation

项目	地源热泵—太阳能耦合系统		节能量	节能率
	地源热泵	常规能源系统		
系统运行能耗 (万 kWh)	118.99	426.99	308.00	72.13%
系统运行费用 (万元)	58.30	105.94	47.64	—
平米运行费用 (元/m ²)	30.69	55.76	25.07	—

由表 2 可看出, 本项目采用地源热泵—太阳能耦合系统, 相比于常规能源系统, 每年可节能 308 万 kWh, 节约运行费用 47.64 万元, 每平米运行费

用减少 25.07 元, 节能率达 72.13%; 同时, 本项目每年可节约 1130.36 吨标煤, 减少向大气排放二氧化碳(CO₂) 2791.99 吨(按碳计), 减少向大气排放二氧化硫(SO₂) 22.61 吨, 减少向大气排放粉尘 11.30 吨, 节能减排及环境、社会效益非常显著。

7 结论

土壤热失衡问题对于地源热泵系统长期高效稳定运行至关重要, 没有土壤热平衡方案的地源热泵系统持续运行数年后可能会出现效率下降和持续运行效果变差的巨大风险。本文通过一个典型工程案例, 对土壤排取热量不均衡地区地源热泵—太阳能耦合系统的设计思路、技术方案、运行策略、经济性能等方面进行了详细的阐述。希望本文能对土壤排取热量不均衡地区的地源热泵系统设计有一定参考作用, 以帮助相关工程技术人员真正理解浅层地热资源的设计理念, 从而正确的设计和使用浅层地热资源, 使其真正的实现高效、节能、环保的目标。

参考文献:

- [1] 周复宗, 刘启明, 申雪云, 等. 基于土壤排取热量平衡理念的竖埋管地源热泵系统设计[C]. 2016 年全国工程勘察学术大会论文集(上册), 2016, 2:492-499.
- [2] Man Y, Yang H X, Wang J G. Study on hybrid ground-coupled heat pump systems for air-conditioning in hot-weather areas like Hongkong[J]. Applied Energy, 2010, 87:2826-2833.
- [3] 舒海文, 端木琳, 华蓉, 等. 寒冷地区土壤源热泵冷热源系统设计方案研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(11):1375-1379.
- [4] 余延顺, 廉乐明. 寒冷地区太阳能-土壤源热泵系统运行方式的探讨[J]. 太阳能学报, 2003, 24(1):111-115.
- [5] Kjellsson E, Hellstrom G, Perers B. Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings[J]. Energy, 2010, 35(6):2667-2673.
- [6] Wang X, Zheng M Y, Zhang W Y, et al. Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas[J]. Energy and Buildings, 2010, 42:2104-2110.