

江阴市土壤源热泵系统的性能研究及适宜性评价*

刘广平^{1,2,3,4}, 骆超^{1,2,3}, 龚宇烈^{1,2,3†}, 邱泽晶^{5,6}, 郑鑫^{5,6}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 南京 211000; 6. 南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心, 武汉 430074)

摘要: 针对江苏省江阴市某休闲会所商用建筑的土壤源热泵系统, 采用 TRNSYS 软件模拟并分析了冬夏季供暖空调期土壤源热泵系统 COP 的变化。结果表明, 在埋管深度为 100 m 情况下, 热泵系统的供热季节性能参数为 3.31, 供冷季节性能参数为 3.37。对该地区的土壤源热泵系统采用层次分析法构建了评价体系, 进行适宜性评价指标计算, 并对土壤源热泵系统和常规冷热源系统的经济性和环境性进行了对比分析。与常规冷热源系统相比, 土壤源热泵系统年运行费用是常规冷热源系统的 75.6%, 一次能源利用率高出 13%, 节约标煤量达 1.71 t, 温室气体减排量为 4.47 t, 全年能效比为 2.74。土壤源热泵系统具有明显的节能、经济、环保优势, 适宜性较好。

关键词: 土壤源热泵; 数值模拟; 季节性能系数; 适宜性评价

中图分类号: TK529

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.04.012

Performance Research and Suitability Evaluation of a Ground Coupled Heat Pump of Construction in Jiangyin

LIU Guang-ping^{1,2,3,4}, LUO Chao^{1,2,3}, GONG Yu-lie^{1,2,3}, QIU Ze-jing^{5,6}, ZHENG Xin^{5,6}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
5. Nari Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China;
6. Economic and Technology of State Grid Hubei Electrical Power Company, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to a ground coupled heat pump (GCHP) system for a commercial building in Jiangyin city, Jiangsu province, a model was built based on TRNSYS software to simulate and analysis its coefficient of performance (COP) under different working conditions. The results showed that the heating season performance factor (HSPF) of heat pump system was 3.31 in summer and the seasonal energy-efficiency ratio (SEER) was 3.37 in winter when the pipe buried depth was 100 meters. Analytic hierarchy process (AHP) was used to evaluation the suitability of GCHP system, and compared with the conventional system in terms of economic and environmental performance. It was found that the operating cost of GCHP system was 75.6% of the conventional system, the primary energy ratio was 13% higher, save coal amount was 1.71 tons, greenhouse gas reductions was 4.47 tons, and the all-yearly energy-efficiency ratio was 2.74. The GCHP system presents high suitability regarding its advantages in energy-saving, economic, and environment protection.

Key words: ground coupled heat pump; numerical simulation; seasonal coefficient of performance; suitability evaluation

0 引言

土壤源热泵因具有节能、环保等特点, 受到了国内外学者的广泛关注和研究。学者们对土壤源热泵系统进行了大量理论、实验和数值模拟研究, 并以实验研究为主, 对埋管换热器传热传质^[1-2]、系

统性能特性^[3-5]、系统经济性分析^[6-8]等进行了较深入的研究, 但对土壤源热泵系统埋管深度、性能特性的模拟研究和适宜性分析不够系统全面。本文主要对土壤源热泵系统进行数值模拟研究, 对埋管深度进行优化选择, 并采用层次分析法对系统做出适宜性评价。

* 收稿日期: 2017-05-04 修订日期: 2017-07-14
基金项目: 国家电网公司科学技术项目 (SGTYHT/15-JS-191)

† 通信作者: 龚宇烈, E-mail: gongyl@ms.giec.ac.cn

1 土壤源热泵系统与数学模型

1.1 土壤源热泵系统

土壤源热泵系统的地理管换热器采用单 U 型地理管换热器，埋管深度为 100 m。冬季供暖工况时，地理管换热器与蒸发器相连接，通过制冷剂循环，从土壤中取出热量，为室内供暖；夏季制冷工况时，地理管换热器与机组冷凝器相连接，室内负荷侧的冷冻水管与蒸发器相连接，通过制冷剂循环不断将热量释放到土壤中。通过控制系统的控制启闭制冷/制热模式和每天的运行时间。

1.2 热泵机组数学模型

利用 TRNSYS 进行仿真模拟，发现负荷模块 type682 和水-水热泵模块 type927 在直接连接使用时，实际制热量或制冷量与建筑负荷需求不一致，在仿真模拟过程中会引起负荷侧水系统出现热堆积或者冷堆积现象^[9]，导致冷冻水温度过低或热水温度过高。因此，基于 TRNSYS 仿真模拟平台开发出了适用于负荷需求实时性更强的水-水热泵机组模块。

本论文所采用的热泵机组模型为美国建筑能耗模拟程序 DOE-2 中所使用的冷水机组模型^[10]，建模过程基本一致。

以热泵机组制冷工况为例进行建模。当建筑所需冷负荷小于热泵机组最大制冷量时 ($Q_c \leq CAP_{c,max}$)，此时保持蒸发器侧的出口水温不变；当建筑所需冷

负荷增大到一定程度时 ($Q_c > CAP_{c,max}$)，蒸发器侧回水温度大于额定回水温度，此时建筑所需冷负荷大于热泵机组满负荷运行时的制冷量，解决的办法是提高蒸发器侧的出口水温，使热泵机组制冷量满足负荷需求。

以热泵系统夏季制冷工况下的性能系数 COP_c 计算为例，其计算如式 (1) 所示：

$$COP_c = \frac{Q_c}{W + W_{pump}} \tag{1}$$

式中， W 为热泵机组实际输入功率，根据机组的性能曲线和机组供冷/热量确定，kW； W_{pump} 为水泵的实际功率，kW。

计算热泵系统冬季供暖工况下的性能系数 COP_h 如式 (2) 所示：

$$COP_h = \frac{Q_h}{W + W_{pump}} \tag{2}$$

式中， Q_h 为机组需达到的制热量，kW。

1.3 土壤源热泵系统适宜性评价指标^[11]

分析该地区采用土壤源热泵系统的适宜性，首先要给出适宜性评价指标，建立评价体系。资源性条件从土壤温度进行评价，系统性条件将从节能效益、经济效益、环境效益和平衡性四方面因素进行评价。土壤源热泵的适宜性评价体系见图 1。

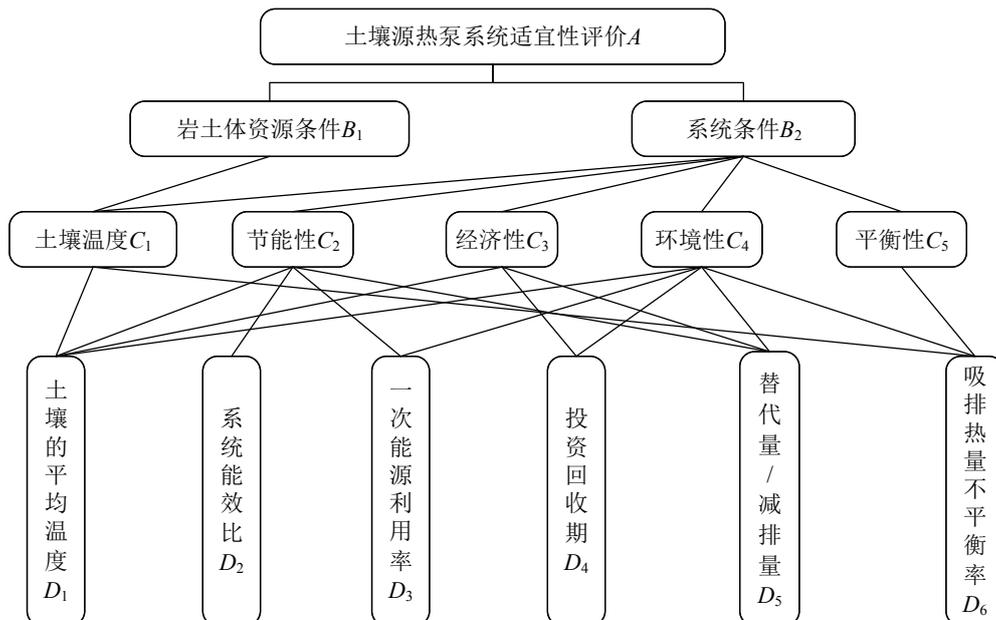


图 1 土壤源热泵系统适宜性评价体系^[17]

Fig. 1 The diagram of suitability evaluation system of the GCHP system

岩土体资源条件主要包括地质条件和岩土体的平均温度,由于同一地区的地质条件有所差异,即使同一城市不同区的地质条件也有所不同,因此本文对于资源条件仅考虑一个指标,即土壤的平均温度。

埋管换热器从地下土壤提取能量,夏季总冷负荷和冬季总热负荷一般不一致,长期运行能量的堆积会造成土壤温度不断偏离初始温度,使埋管出口水温随之变化,并导致系统的运行效率不断下降,这就是土壤源热泵的热不平衡性。

1.3.1 系统能效比

系统能效比是指系统提供的供热(冷)量与系统主机及输送系统的耗功率之和的比值。因此提出了采用季节系统能效比作为土壤源热泵系统的节能指标。供热季节系统能效比(heating season performance factor, HSPF)和供冷季节能效比(seasonal energy-efficiency ratio, SEER)的如式(3)和式(4)所示。

$$HSPF = \frac{\sum Q_h}{\sum (W_h + W_{pump,h})} \quad (3)$$

式中: $\sum Q_h$ 为供热季节总的供热量, kJ; $\sum W_h$ 为供热季节热泵总耗功率, kJ; $\sum W_{pump,h}$ 为供热季节输送系统总耗功, kJ。

$$SEER = \frac{\sum Q_c}{\sum (W_c + W_{pump,c})} \quad (4)$$

式中: $\sum Q_c$ 为供冷季节总的供热量, kJ; $\sum W_c$ 为供冷季节热泵总耗功率, kJ; $\sum W_{pump,c}$ 为供冷季节输送系统总耗功, kJ。

1.3.2 经济性和环境性

对该建筑进行经济性指标、环境性指标和一次能源利用率需要与其它冷热源系统进行比较得出,根据地区气候特点及能源利用状况选用比较方案。供暖空调系统的经济性评价指标主要参数有,初投资、年运行费用、投资回收期。为实现项目预定目标的经济代价,采用费用效果分析法^[12],分析的项目应满足下列条件:(1)备选方案不少于两个,且为互斥方案;(2)备选方案有共同的目标;(3)备选方案的费用应能货币化;(4)备选方案应具有可比寿命周期;(5)效果采用同一非货币计量单位衡量。因为本系统位于夏热冬冷地区,为解决供暖制冷问题,根据上述要求,业主有两种选择方案。

方案一:采用土壤源热泵系统作为冷热源;

方案二:采用常规供暖空调系统,即燃气锅炉作为热源,房间空调器作为冷源。对项目进行经济适宜性分析,本项目备选方案有两个且为互斥方案,有共同目标,即两方案均能实现建筑的供暖制冷要求,且效果难于货币化。两方案的初投资和运行成本可货币化。

初投资:一个完整的供暖空调系统包括冷热源(如热泵、锅炉、空调制冷机),室外管网和室内终端设备三个部分。投资费用还包括土建费、安装费及其他费用,初投资为系统各部分费用之和。

运行能源消耗费用:系统的运行能源消耗费用主要是驱动能源和辅助能源的能耗费用。

投资回收期:土壤源热泵系统的运行能效比一般均较常规冷热源系统高,然而由于受当地常规能源价格以及钻孔安装费用的影响,土壤源热泵系统并不一定省钱。本课题采用投资回收期作为土壤源热泵系统的经济效益指标之一。土壤源热泵系统的投资回收期可以用式(5)计算。

$$\beta = (I_{HP} - I_B) / (C_B - C_{HP}) \quad (5)$$

式中, I_{HP} 为土壤源热泵系统的初投资(元); I_B 为常规冷热源系统的初投资(元); C_{HP} 为土壤源热泵系统的年运营费用(元/年); C_B 为常规冷热源系统的年运营费用(元/年)。

标煤替代量:供热季节,土壤源热泵消耗的是电能,而燃气锅炉消耗的是一次能源,将土壤源热泵系统的耗电量转化为一次能耗进行比较,可以得出可替代标煤量。供热季节标煤替代量为:

$$T_{hce} = (H_1 - H_2) / H_{ce} \quad (6)$$

式中, H_1 为常规系统供热季的一次能耗(kJ); H_2 为土壤源热泵系统供热季的能耗(kJ); H_{ce} 为标准煤的发热量,取为 29307 kJ/kg。

供冷季节,土壤源热泵系统与常规系统消耗的都是电能,可以直接比较耗电量。供冷季节标煤替代量^[11]为:

$$T_{cce} = (C_1 - C_2) \times \phi \quad (7)$$

式中, C_1 为常规系统供冷季耗电量(kW·h); C_2 为土壤源热泵系统供冷季耗电量(kW·h); ϕ 为电能折标准煤的系数,取为 0.345 kgce/kW·h。

温室气体减排量：根据计算的可替代标煤量还可计算出采用土壤源热泵系统所带来的温室气体减排量、烟尘减排量和煤渣减排量。温室气体减排量的计算式为：

$$PEG = (T_{hce} + T_{cce}) \times (\text{COEF}_{\text{CO}_2} + \text{COEF}_{\text{SO}_2} + \text{COEF}_{\text{NO}_x}) \quad (8)$$

式中， $\text{COEF}_{\text{CO}_2}$ 、 $\text{COEF}_{\text{NO}_x}$ 、 $\text{COEF}_{\text{NO}_x}$ 分别为每 kg 标煤 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 的排放系数，这里分别为 2660 g CO_2 、6 g SO_2 、9 g NO_x 。

1.3.3 一次能源利用率

不同冷热源系统的驱动能源不同，土壤源热泵系统的驱动能源是电能，而常规冷热源系统燃气锅炉的驱动能源是天然气，室内空调机的驱动能源是电能，虽然电能和天然气都是能源，但其质量不相同，因此采用一次能源利用率来比较和评价系统的节能性。一次能源利用率 (primary energy ratio, PER) 的计算式为：

$$\text{PER} = \text{供热量} / \text{一次能源消耗量}$$

土壤源热泵的一次能源利用率为：

$$\text{PER} = \eta_{\text{ET}} \times \text{COP} \quad (9)$$

式中， η_{ET} 为电厂供电效率，取 35%；COP 为土壤源热泵系统性能系数。

燃气锅炉的一次能源利用率为：

$$\text{PER}_B = \eta_B \quad (10)$$

式中， η_B 为燃油、燃气锅炉的热效率，取 85%。

1.3.4 层次分析法

基于层次分析法对土壤源热泵系统进行适宜性评价，采用算术平均法（求和法）^[13] 计算各层各子指标的权重向量 W_i 。

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

通过式 (11) 对判断矩阵进行一致性检验，将权重向量 W 右乘权重比矩阵 A ，有：

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (12)$$

一致性指标 (consistency index, CI) 和一致性比率 (consistency ratio, CR) 为：

$$\text{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad \text{CR} = \frac{\text{CI}}{\text{RI}} \quad (13)$$

其中，RI 为随机一致性指标。

2 研究对象

对位于江阴市某商用建筑的土壤源热泵系统的性能进行模拟并对结果进行分析。对土壤源热泵系统进行适宜性评价指标的计算，对土壤源热泵系统和常规冷热源系统的经济性指标、节能性指标和环境性指标进行对比和分析。

2.1 参数设置

(1) 当地室外计算温度来自典型气象年 TMY-2，采暖空调室内计算温度为 18℃，供热季为 12 月 15 日至次年 2 月 29 日。制冷空调室内计算温度为 26℃，供冷季为 6 月 15 日至 9 月 1 日。系统日运行时间为 8:00–23:00。

(2) 相关能源的价格和热值为：电价 0.55 元/kW·h，天然气的热值为 35530 kJ/m³，单价为 2.5 元/m³，标准煤发热值为 29307 kJ/kg。

2.2 建筑负荷模拟

为保证该建筑空调系统的良好设计，本文采用 TRNSYS 瞬时模拟软件对该建筑冬季供暖期和夏季供冷季的热、冷负荷进行逐时计算。室外环境气象参数模块与建筑模块相关联，然后通过控制模块控制建筑灯光的开启/关闭，并利用打印机模块将负荷、温度等参数导入到外部文件中。该建筑的建筑面积为 300 m²，其首层平面图如图 2 所示。建筑相关的墙体等参数参照设计标准^[14-15]，具体参数见表 1。

表 1 模拟建筑围护结构传热系数

Table 1 Heat transfer coefficient of building containment structure

结构	传热系数 / [W/(m ² ·K)]
外墙	0.51
楼板	0.83
屋顶	0.21
外窗	1.40
内隔墙	2.20
一楼地面	0.85

厕所的渗透风量取值为 4 次/h，其他房间的渗透风量为 1 次/h。通风量为 2 次/h。设定冬季室内温度为 18℃，夏季室内温度为 26℃。

室外环境气象参数设置的边界条件从 TRNSYS 软件读出。室外环境温度由典型气象年得出，模拟时间从 4 月 1 日 0 点开始至次年 3 月 31 日结束，全时间段内最高气温出现在 5031 h，即 7 月 28 日，达到 37.4℃；最低气温出现在 288 h，即 1 月 12 日，为 -5.6℃。

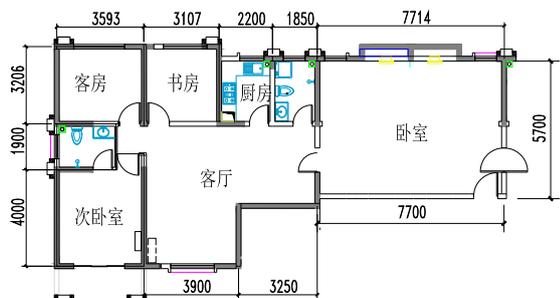


图 2 建筑平面图
Fig. 2 Floor plan of the building

图 3 给出了该建筑供暖制冷期热负荷和冷负荷的模拟结果，可看出，该地区供热季内，最大热负荷为 13.0 kW；供冷季内，夏季最大冷负荷为 14.3 kW。根据负荷模拟的计算结果，确定水-水热泵机组选型为^[16]额定制冷量 17.2 kW，额定制热量 19.4 kW。计算得埋管总长度为 450 m，设置埋管间距为 5 m。

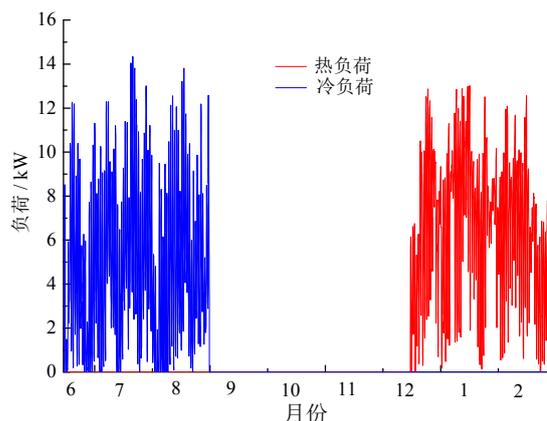


图 3 建筑供暖空调期逐时负荷分布图
Fig. 3 The diagram of building's hourly load distribution

2.3 土壤源热泵系统建模

土壤源热泵系统仿真模拟程序如图 4 所示，模型主要分为四个部分：数据输入、系统控制、土壤源热泵系统及数据输出。将建筑负荷文件导入到负荷模块中，热泵机组通过水泵与负荷模块相连，根据制冷制热的需求，通过自动控制模块控制水泵的启闭和热泵机组的启闭以及制冷模式和制热模式的切换，实现系统自动化控制。

模型的设计参数见表 2。

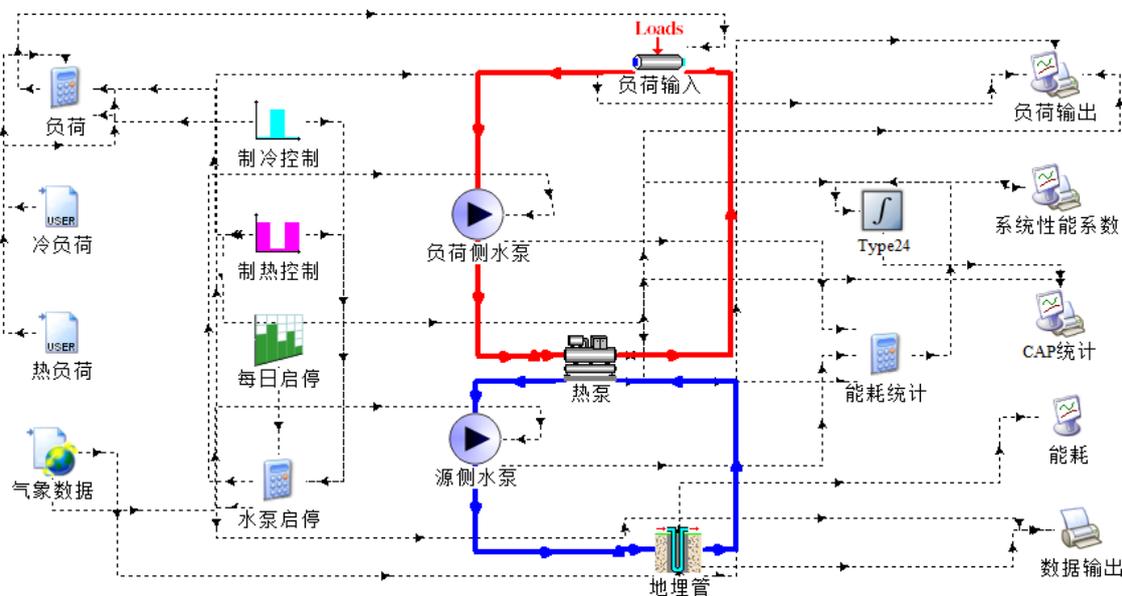


图 4 土壤源热泵系统仿真模拟程序
Fig. 4 The chart of GCHPs's simulation program

表 2 模型主要设计参数

Table 2 Basic parameters of simulation model

项目所在地：江阴市（纬度 N31.91；经度 E120.26）	
建筑设计参数	
冬季室内设计温度	18℃
夏季室内设计温度	26℃
地埋管	
埋管深度	100 m
井数	2
埋管形式	单 U 型垂直地埋管
埋管内/外径	26 mm / 32 mm
水泵	
源侧水泵额定水流量	3 m ³ /h
负荷侧水泵额定水流量	3.6 m ³ /h
源侧水泵额定功率	300 W
负荷侧水泵额定功率	200 W
热泵机组	
类型	水-水热泵
制冷剂	R410A
额定制热量	19.4 kW
额定制冷量	17.2 kW
额定制热功率	5.0 kW
额定制冷功率	3.4 kW
源侧水流量	3.6 m ³ /h
负荷侧水流量	3.0 m ³ /h
制冷额定冷冻水出水温度	7℃
制热额定热水供水温度	45℃

2.4 热泵机组供暖空调期运行性能参数

对该热泵系统进行供冷供热季内运行模拟计算，得到模拟结果。

图 5 ~ 图 6 为该热泵机组典型气象年制冷供暖期内的 COP 变化曲线。根据热泵机组的额定参数，机组的额定制冷 COP 为 5.05，制热 COP 为 3.88。

从图 5 可看出，COP 值剧烈波动，这是因为热泵机组根据每日运行时间启停的较为频繁，在 7 月初和 8 月初附近某段时间机组制冷 COP 在 2.5 左右波动，这是因为该时间段内典型气象年的室外气温（22℃左右）与设计制冷温度（26℃）温差较小，因此建筑的冷负荷（3 kW 左右）较小，机组部分负荷率较低。其他时间段内，夏季机组的实际制冷 COP 基本稳定在 5 ~ 5.8 之间，因为在这些时间段内，建筑冷负荷在 8 kW ~ 14 kW 之间，较接近机组的额定

制冷量（17.2 kW），因此机组的 COP 接近甚至高于额定 COP，此时机组处于高效节能的运行状态。

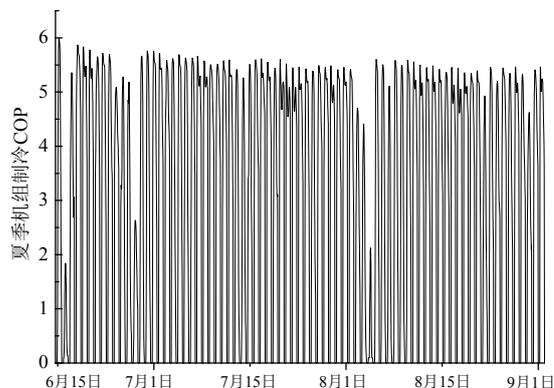


图 5 热泵机组供冷季 COP 变化曲线图

Fig. 5 The graph of COP's changes of heat pump unit in cooling period

图 6 所示为冬季机组制热 COP 变化曲线，从图中可看出，整个冬季热泵机组制热 COP 在 0 ~ 3 之间波动，稳定在 3 左右，未达到额定制热 COP 值（3.88），这是因为热负荷较大，从土壤中吸热量较大，导致土壤温度降低，使热泵机组 COP 较低。

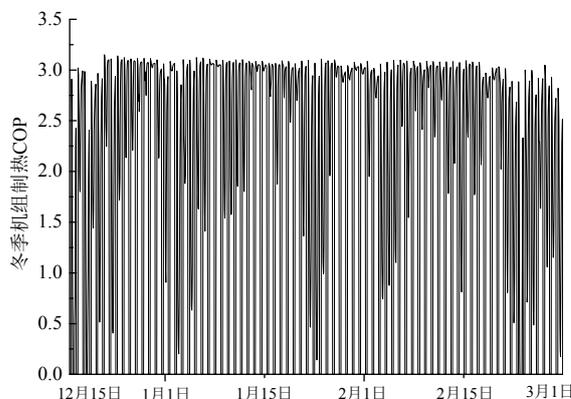


图 6 热泵机组供热季 COP 变化曲线图

Fig. 6 The graph of COP's changes of heat pump unit in heating period

3 系统适宜性评价参数计算结果比较和分析

3.1 节能性参数

热泵系统的供能/耗能量和地埋管附近土壤能量变化的统计结果如图 7 所示，可看出，供冷季地埋管从周围土壤的总吸热量等于系统的供热量，但在供冷季与供热季之间的过渡季时，地埋管附近土壤的热量逐渐减少，这是因为在供冷季时系统释放

到土壤中的热量在过渡季时土壤自身的热扩散效应。到供热季时地理管从周围土壤吸热，使地理管附近土壤的能量变化曲线斜率突然增大。由图 7 可看出，供冷季系统供冷量为 29.1 GJ，耗电量为 8.34 GJ；地理管向周围土壤的释热量为 28.1 GJ；供热季系统的供热量为 25.3 GJ，耗电量为 7.64 GJ，地理管从周围土壤吸收的热量为 17.1 GJ。计算得出，系统供冷季节性能参数（SEER）为 3.37，供热季节性能系数（HSPF）为 3.31，系统全年能效比为 2.74，经过全年的运行，地理管周围土壤热量减少了 2.77 GJ。

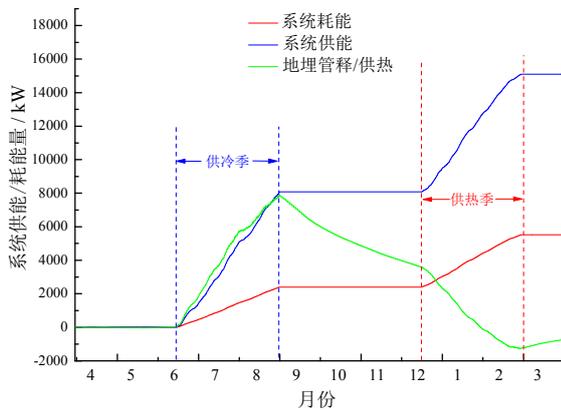


图 7 系统全年供能/耗能量曲线图
Fig. 7 All-yearly energy supply and consumption of the system

表 3 所示为该热泵系统的总体模拟统计结果。可以看出，热泵系统的制热量和制冷量均满足该建筑的热、冷负荷需求，因此，该系统具有良好的供暖空调效果。

表 3 土壤源热泵系统模拟运行结果
Table 3 The simulation result of GCHPs

供暖期参数	数值	供冷季参数	数值
总热负荷/GJ	27.80	总冷负荷/GJ	32.00
总制热量/GJ	25.30	总制冷量/GJ	28.10
土壤释热量/GJ	17.10	土壤吸热量/GJ	7.80
供暖耗电量/GJ	7.64	制冷耗电量/GJ	8.34
HSPF	3.31	SEER	3.37

3.2 经济性及环境性

土壤源热泵系统的初投资由购置热泵机组、埋设地理管及室内末端装置构成，常规冷热源系统的初投资由购置燃气锅炉、室内空调器及安装费用构成。两方案的费用见表 4。

对于土壤源热泵系统，分析该建筑的经济性和环境性。针对该建筑计算出两方案的能耗，计算结果如图 8 所示。

表 4 方案初投资费用比较

Table 4 The comparison of initial investment cost in two project

方案	设备购置费用	建筑安装工程费	打井费用	总计
土壤源热泵系统	热泵机组 1 台；循环水泵 4 台；室外埋管；室内末端系统；小计 3.8 万元	包括人工费、材料费等，小计 0.5 万元	3 孔 100 m 深井，小计 0.8 万元	5.1 万元
常规冷热源系统	冷水机组 2 台；换热器 1 台；循环泵 4 台；冷却水泵 1 台；室内末端系统；小计 3 万元	包括人工费、材料费等，小计 0.3 万元	/	3.3 万元

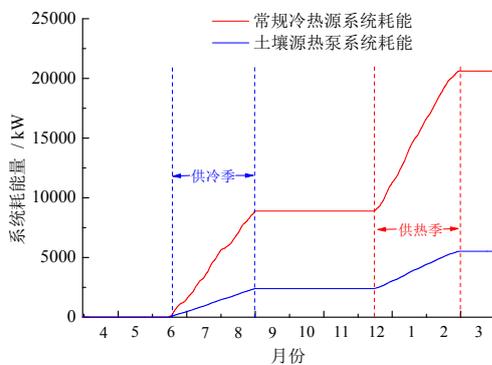


图 8 对比方案能耗曲线图
Fig. 8 The chart of energy consumption of correlation plan

据图 8 可以看出，供冷季土壤源热泵系统的能耗为 2399 kW·h，常规冷源系统的房间空调器能耗达到 3295 kW·h，是土壤源热泵系统的 1.37 倍；供热季土壤源热泵系统的耗电量为 3120 kW·h，常规热源系统燃气锅炉的能耗为 46.89 GJ，是土壤源热泵系统的 4.17 倍。由上述分析可知该土壤源热泵系统的全年能效比为 2.74；燃气锅炉效率设为 85%，供电效率设为 35%，则可得到土壤源热泵系统和常规冷热源系统的一次能源利用。

由式（5）~ 式（10）计算，得到如表 5 所示的经济性和环境性评价参数。

表 5 土壤源系统评价指标计算结果

Table 5 The evaluation index result of GCHPs

方案	初投资/万元	年运行费用/元	一次能源利用率	投资回收期/年	节煤量/t	温室气体减排量/t
方案一	5.1	4621.1	0.96	12	1.7	4.4
方案二	3.3	6111.3	0.85	-	-	-

对两种方案进行比较, 常规冷热源系统的初投资较低, 为土壤源热泵系统的 64.7%, 但年运行费用常规系统远高于土壤源热泵系统, 且一次能源利用率低于土壤源热泵系统。相对于常规系统, 土壤源热泵系统的投资回收期为 12 年, 可节约标煤量为 1.7 t, 减少温室气体排放量为 4.4 t。

3.3 吸排热不平衡率

土壤源热泵系统运行 20 年, 土壤平均温度的模拟变化曲线如图 9 所示。由图 7 可知系统经过全年的运行, 埋管周围土壤热量减少了 2.77 GJ。由图 9 可看出, 土壤初始温度为 15℃, 20 年吸排热不平衡导致土壤平均温度为 14.3℃, 降低了 0.7℃。在土壤源热泵的寿命期内土壤的平均温度的变化不大。

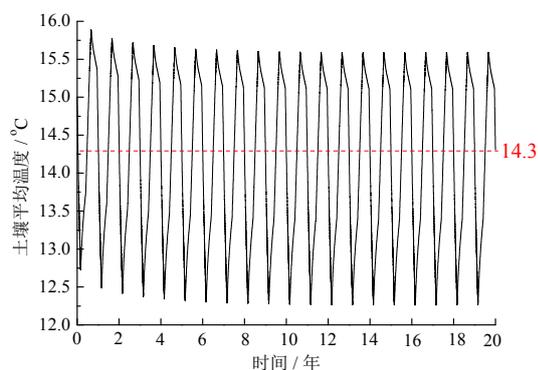


图 9 土壤源热泵运行 20 年土壤平均温度变化曲线图

Fig. 9 The curve of soil average temperature operating 20 years

4 基于层次分析法的土壤源热泵系统适宜性评价

4.1 评价指标权重

各评价取值范围按对土壤源热泵系统适宜性贡献高低取值。根据工程特点, 一般认为系统性条件比资源性条件更重要; 经济性比节能性重要, 节能性比环境性重要; 土壤的平均温度对节能性、经济性、环境性都有影响, 各个指标对系统性条件的影响见图 1。根据模型决策角度结果^[17], 确定判断矩阵。判断矩阵如下:

A 的判断矩阵为

$$A = \begin{matrix} & B_1 & B_2 \\ B_1 & 1 & 1/5 \\ B_2 & 5 & 1 \end{matrix}$$

B₂ 的判断矩阵为

$$B_2 = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 \\ C_1 & 1 & 1/7 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ C_2 & 7 & 1 & 1/3 & 3 & 2 \\ C_3 & 9 & 3 & 1 & 5 & 4 \\ C_4 & 5 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ C_5 & 3 & 1/2 & 1/4 & 2 & 1 \end{matrix}$$

C₄ 的判断矩阵为

$$C_4 = \begin{matrix} & D_1 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ D_1 & 1 & 1/7 & 1/9 & 1/5 & 1/3 \\ D_3 & 7 & 1 & 1/3 & 2 & 2 \\ D_4 & 9 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ D_5 & 5 & 1/2 & 1/3 & 1 & 2 \\ D_6 & 3 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{matrix}$$

根据式 (11) ~ 式 (13) 对各层各判断矩阵进行计算, 计算结果如下:

$$W_A = (0.167, 0.833)^T, \lambda_{\max} = 2, CR = 0 < 0.1;$$

$$W_{B_2} = (0.036, 0.238, 0.495, 0.098, 0.133)^T, \lambda_{\max} = 5.190, CR = 0.042 < 0.1;$$

$$W_{C_1} = (0.250, 0.750)^T, \lambda_{\max} = 2, CR = 0 < 0.1;$$

$$W_{C_2} = (0.044, 0.563, 0.268, 0.125)^T, \lambda_{\max} = 4.268, CR = 0.099 < 0.1;$$

$$W_{C_3} = (0.063, 0.672, 0.265)^T, \lambda_{\max} = 3.022, CR = 0.019 < 0.1;$$

$$W_{C_4} = (0.038, 0.234, 0.449, 0.166, 0.113)^T, \lambda_{\max} = 5.124, CR = 0.028 < 0.1.$$

各个判断矩阵均满足一致性检验, 说明计算出的权重向量 W 有效。计算层次总排序的结果如下所示:

$W_{\text{总}} = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6) = (0.087, 0.112, 0.072, 0.317, 0.148, 0.269)$

因此，土壤源热泵系统适宜性评价指标土壤平均温度、系统能效比、一次能源利用率、投资回收期、标煤替代量（减排量）、吸排热不平衡率的权重值依次为 0.087、0.317、0.269、0.112、0.148 和 0.072。

4.2 评价指标量化及评价结果

与常规冷热源系统相比较，对各评价指标进行赋值处理。评价结果如表 6 所示。

表 6 适宜性评价结果

Table 6 Suitability evaluation of the two systems

参数	常规冷热源系统	土壤源热泵系统
土壤平均温度/℃	15	15
赋值	1	1
系统能效比	1.77	2.74
赋值	0.64	1
一次能源利用率	0.85	0.96
赋值	0.89	1
投资回收期/a	/	12
赋值	1	0
煤替代量（减排量）/t	0	1.71（4.47）
赋值	0	1
吸排热不平衡率/℃	0	-0.7
赋值	1	0
综合评价指数	0.71	0.82

土壤源热泵分区级别和综合指数值的划分标准见表 7^[15]，根据表中各因素的赋值以及各因素的权重，计算得到土壤源热泵系统的综合评价指数为 0.82，而常规冷热源系统的评价指数为 0.71。

表 7 土壤源热泵分区级别和综合指数值的划分标准

Table 7 The synthetically index division standard of GCHP system

分区级别	综合指数
适宜区	0.9 ~ 1
较适宜区	0.7 ~ 0.9
勉强适宜区	0.5 ~ 0.7
不适宜区	0 ~ 0.5

由表 6 的计算结果可以看出，江阴市采用土壤源热泵系统的综合评价指数为 0.82，采用常规冷热

源系统的综合评价指数只有 0.71，都处于较适宜区，但土壤源热泵系统的适宜性明显好于常规系统，因此江阴市采用土壤源热泵系统的节能性、经济性、环境性较好，具有较好的适宜性。

5 结 论

土壤源热泵系统是一种以浅层地热能利用与季节性储能相结合的空调应用技术，代表了未来能源利用的新方向。本文通过对江阴市某建筑的土壤源热泵系统进行数值模拟，计算得出该系统的性能参数，并进行适宜性评价，结论如下：

（1）土壤源热泵系统可以很好的保证该建筑的供暖空调需求，综合运行性能较好，且供暖期和供冷季从土壤中的换热量基本相同，系统在长期运行的情况下土壤平均温度变化不大。系统供热季 HSPF 为 3.31，供冷季 SEER 为 3.37，全年能效比为 2.74。

（2）相对于常规冷热源系统，土壤源热泵系统的初投资高于常规冷热源系统，但是年运行费用是常规冷热源系统的 49.7%。相对于常规冷热源系统，投资回收期约为 12 年，节煤量达 1.71 t/年，温室气体减排量达 4.47 t/年，因此土壤源热泵系统具有很好的经济性和环境效益，适宜于在该地区的应用和推广。

（3）基于层次分析法的评价体系对土壤源热泵系统的适宜性作了综合评价，结果表明江阴市处于较适宜区，该结果可为以后的适宜性评价工作提供理论指导。

参考文献：

- [1] 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(23): 4467-4481. DOI: 10.1016/S0017-9310(03)00270-9.
- [2] 曹馨雅. 地源热泵系统冷热负荷不平衡对土壤温度的影响[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [3] 寇利. 上海某教学楼地源热泵系统性能测试分析[J]. 建筑节能, 2016, 44(8): 6-9, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2016.08.002.
- [4] 汪洪军, 李新国, 赵军, 等. 地下耦合地源热泵机组冬季供热性能分析与实验研究[J]. 流体机械, 2003, 31(12): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2003.12.016.
- [5] 魏唐棣, 胡鸣明, 丁勇, 等. 地源热泵冬季供暖测试及传热模型[J]. 暖通空调, 2000, 30(1): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8501.2000.01.005.
- [6] 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. DOI: 10.7666/d.y1474726.

- [7] 孟杉, 王立发, 江剑. 地理管地源热泵空调系统经济性分析与设计优化[J]. 中国建设信息: 供热制冷, 2009(1): 34-36, 39.
- [8] 李新国, 赵军. 低温地热运用热泵供热的技术经济性[J]. 太阳能学报, 2000, 21(4): 447-450. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2000.04.019.
- [9] 杨少刚. 基于 TRNSYS 地理管地源热泵变流量系统仿真研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [10] HYDEMAM M, GILLESPIE K L. Tools and techniques to calibrate electric chiller component models[J]. ASHRAE transactions, 2002, 108(1): 733-741.
- [11] 徐伟. 地源热泵技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 69-72.
- [12] 马武忠. 浅议电力折标系数及其对节能工作的影响[J]. 能源研究与利用, 2011(1): 32-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5523.2011.01.011.
- [13] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2012.07.012.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [16] TRANE. WPWE 冷热水型模块化水源热泵机组选型手册[Z]. 9.
- [17] 唐凯, 张旭, 张恩泽, 等. 基于层次分析法的铁路客站地理管地源热泵系统适宜性评价[J]. 暖通空调, 2013, 43(10): 110-115, 109.

作者简介:

刘广平 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事地热能和太阳能利用技术研究。

龚宇烈 (1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地热资源规划利用、地热能能量转换技术、新型热泵技术研究。