

# 夏热冬冷地区某高校集中能源站 供暖系统能效实测与分析

重庆大学 尹畅昱<sup>☆</sup> 王 勇<sup>△</sup> 李文欣

重庆京天能源投资股份有限公司 刘 琪 刘 勇

**摘要** 南方地区特别是夏热冬冷地区存在供暖需求。针对夏热冬冷地区某高校建筑的负荷特性,建立了基于埋管地源热泵系统的区域能源站,实现冬季供暖和夏季供冷。结合负荷分析及热响应测试,得到了埋管布置方案。实际运行能效测试表明,系统能效比达到 3.56,比传统供暖系统节能 61%,同时减少了污染物的排放。

**关键词** 夏热冬冷地区 集中能源站 地源热泵系统 负荷特性 能效实测

## Energy efficiency measurement and analysis for heating system of a central energy station at a university in hot summer and cold winter zone

By Yin Changyu<sup>★</sup>, Wang Yong, Li Wenxin, Liu Qi and Liu Yong

**Abstract** In south China, especially in hot summer and cold winter zone, there is the heating demand. According to the load characteristics of buildings at a university in hot summer and cold winter zone, establishes a district energy station based on ground-source heat pump system to cool in summer and to heat in winter. Combined with load analysis and thermal response test, determines the layout of buried pipe. The actual operation test result of energy efficiency shows that the COP of this system is 3.56, decreasing energy consumption by 61% compared to traditional heating system, and decreasing the pollutant emission.

**Keywords** hot summer and cold winter zone, central energy station, ground-source heat pump system, load characteristic, energy efficiency test

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

### 0 引言

近年来,厄尔尼诺等现象导致极端气候频现,冰雪南移使我国很多南方城市冬季日平均气温低于 6℃ 的天数达 90 d 左右,甚至超过 100 d。随着全球气候变化,国内南方地区尤其是夏热冬冷地区集中供暖需求越来越迫切<sup>[1]</sup>。龙惟定指出,夏热冬冷地区没有供暖住宅的卧室实测温度远低于舒适温度,已经达到耐受温度的临界值,对于有关人的健康乃至生命的住宅供暖问题,理所当然的是重大的民生问题<sup>[2]</sup>。李先庭提出在经济、环境和资源条件允许的情况下,南方冬季供暖能提高生活质量<sup>[3]</sup>。

从能量供应方式上看,北方的集中燃煤锅炉房系统燃料运输成本较高、管网热损失大,并不是先

进的供能方式。如果夏热冬冷地区照搬北方的集中燃煤锅炉房系统,则可能造成管网初投资巨大,污染物排放量增加。住房和城乡建设部提出“在南方不提倡建设大规模集中供暖热源和市政热力管网设施为建筑集中供暖”,建议“因地制宜地采用分散、局部的供暖方式”<sup>[3]</sup>。马一太指出热泵技术在理论上是最合理的供热方式,其一次能源利用率接近或超过 100%<sup>[1]</sup>。龙惟定指出夏热冬冷地区要

①<sup>☆</sup> 尹畅昱,男,1990 年 3 月生,在读硕士研究生

<sup>△</sup> 王勇(通信作者)

400045 重庆市沙坪坝区重庆大学 B 区城市建设与环境工程学院

(0) 13008317198

E-mail: cqwangyong@cqu.edu.cn

收稿日期:2014-03-19

修回日期:2014-04-09

全面推广集中供暖既无条件,也不现实。供暖技术应该多元化,各种技术应该扬长避短,兼顾节能性和经济性<sup>[4]</sup>。

近年来,以某小区、高校、医院等为供热区域的集中能源站在夏热冬冷地区日益增多,并取得了较好的运行效果。南京以高新技术园区为供热范围、基于水源热泵的某集中能源站在冬季 COP 可达 4.52<sup>[5]</sup>。武汉以写字楼为供热对象、基于混合式地理管地源热泵的某集中能源站在夏季 EER 可达 3.45<sup>[6]</sup>。重庆以某幢大楼为供热对象、基于江水源热泵的某集中能源站在冬季 COP 可达 4.4<sup>[7]</sup>。

针对夏热冬冷地区某高校的地理环境、负荷特性等参数,建立了基于地理管地源热泵技术的集中能源站供热系统,在工程施工前进行了热响应测试及单孔能效测试,在系统投入运行后进行了实际运行效果的能效评测。本文主要介绍该工程的测试情况。

## 1 工程概况和地层分析

### 1.1 工程概况

该高校位于夏热冬冷地区的贵阳市<sup>[8]</sup>,占地约 100 万 m<sup>2</sup>,分三期建设,由学生宿舍与教学楼组成。其中一、二期已建成并投入使用。一期总面积为 263 845 m<sup>2</sup>,计算空调总冷负荷为 7 151 kW,计算供暖总热负荷为 8 667 kW;二期总面积 295 021 m<sup>2</sup>,计算空调总冷负荷为 7 547 kW,计算供暖总热负荷为 10 080 kW。由于高校各宿舍负荷特性一致,峰值负荷出现在夜间,教学楼负荷相对集中,峰值负荷出现在白天,所以供暖系统可以错峰运行。从高校的集中管理和维护角度看,均适宜采用集中能源站系统。经过可行性研究,确定该校以地理管地源热泵为冷热源,针对建筑分布,建立区域能源站进行集中供暖、空调,地源热泵机组全部选用螺杆机,选型表如表 1 所示。

表 1 一、二期热泵机组选型表

机组型号	台数	制冷量/kW	制热量/kW
一期 RTD3F2F3	3	1 339	1 344
RTD1F1F2	1	1 147.6	1 148.5
RTWD200	1	768.7	650
二期 RTHDD2F2F3	2	1 250.29	1 005.93
RTD3F2F3	3	1 339	1 344
RTWD250	2	886.3	785.7

地源热泵机组负荷侧夏季供回水温度:7℃/12℃,冬季供回水温度:45℃/40℃。地源热泵机组地源侧供回水温度:夏季 28℃/33℃;冬季 10℃/5℃。

### 1.2 地层分析

该高校位于扬子准地台黔北台隆遵义断拱贵阳复杂构造变形区,属喀斯特地貌,岩层产状总体变化不大,主要褶皱为近南北向的贵阳一中曹司船型向斜,断层基本上是以北北东、北东、北东东向为主<sup>[9]</sup>。岩石主要为可溶性碳酸盐岩,区内的岩溶个体形态较发育,主要表现为溶沟、溶槽、岩溶洼地、落水洞等。由于地理管地源热泵系统的应用建筑面积大于 10 000 m<sup>2</sup>,所以热响应试验取 2 个测试孔,最后的测试结果取算术平均值<sup>[10]</sup>。为了能较全面地了解工程地质及土壤换热情况,在该项目场地内选取 2 个测试点钻孔测试,2 个测试孔位于校园的对角线上,相距 2 000 m。经钻探勘察得到的地下岩土构造如图 1,2 所示,地下各层岩土热物性参数见表 2。

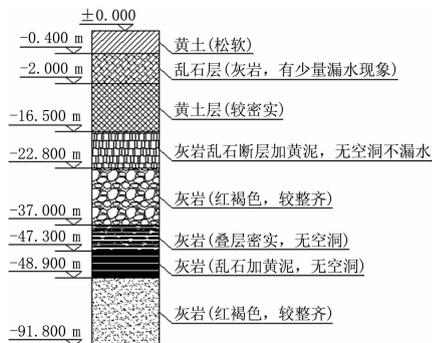


图 1 1号测试孔地下岩土构造

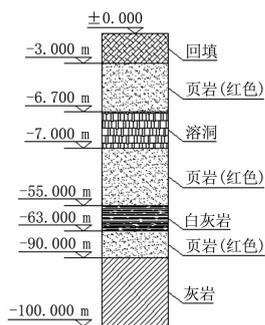


图 2 2号测试孔地下岩土构造

表 2 各岩层导热系数

岩层	导热系数/(W/(m·K))
致密砂土(含水量 5%)	2.1~2.3
碎石	0.39~0.69
砂岩	2.1~3.5
湿页岩	1.4~2.4
干页岩	1.0~2.1
石灰岩	2.4~3.8

注:表中数据参考 GB 50366—2005《地源热泵系统工程技术规范》(2009 年版)。

## 2 热响应测试及单孔换热能力分析

### 2.1 实验测试系统

试验测试系统由 Pt100 数字式热电偶温度传感器、水银温度计(2 支)、智能数据采集箱、电磁流量计、循环水泵(2 台)、分体式热泵机组(2 台,名义制冷量 3 550 W/台,名义制热量 3 940 W/台)等组成。

根据试验测试需要,1 号测试孔布置了 16 只 Pt100 数字式热电偶温度传感器,其在双 U 管上的设定位置如下:双 U 管供、回路 U 形管上,埋管出水管(机组进水端)5,15,25,35,45,55,65,75 m 处,埋管进水管(机组出水端)5,15,25,35,45,55,65,85 m 处;2 号测试孔布置了 20 只 Pt100 数字式热电偶温度传感器,其在双 U 管上的设定位置如下:双 U 管供、回路 U 形管上,埋管出水管(机组进水端)10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 m 处,埋管进水管(机组出水端)10,20,30,40,50,60,70,80,90,100 m 处。

表 4 各测试工况下的换热参数

	供水平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均换热温差/ $^{\circ}\text{C}$	地下平均换热量/ $\text{kW}$	单位孔深换热量/ $(\text{W}/\text{m})$	岩土导热系数测试计算值/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$
工况 1	24.7/27.5	2.8	5.3	57.7	1.83
工况 2	12.0/9.6	2.4	4.3	46.8	1.83
工况 3	26.0/29.1	3.1	6.1	61.0	2.11
工况 4	12.0/9.4	2.6	5.1	51.0	2.11

根据测试得到的岩土物性参数,可以计算得到满足一期空调系统夏季排热量和冬季吸热量的地下换热井数量为 879 口,需要的打孔区域面积约为 15 000  $\text{m}^2$ ;满足二期空调系统夏季排热量和冬季吸热量的地下换热井数量为 1 143 口,需要的打孔区域面积约为 20 000  $\text{m}^2$ 。

### 2.3 能效分析结果

测试过程中,由于当地三相交流电压不稳定,造成了热泵运行不稳定,埋管换热器进出水温度在各工况测试过程中呈现出一定的波动性。

由图 3 可以看出,在夏季制冷工况下,前 7 h 系统能效比振荡较大,随后的时间内逐渐稳定,工况 1 的系统能效比基本稳定在 2.7,工况 3 的系统能效比基本稳定在 3.1,由此可知在热响应试验中夏季工况下系统能效比为 2.9。

由图 4 可以看出,在冬季制热工况下,前 5 h 系统能效比振荡较大,随后的时间内逐渐稳定,工况 2 的系统能效比基本稳定在 2.5,工况 4 的系统能效比基本稳定在 2.7,由此可知在热响应试验中冬季工况下系统能效比为 2.6。

### 2.2 热响应测试

模拟空调工况前,对 2 个测试孔进行了 24 h 的连续测试以取得原始土壤温度数据,结果显示 1 号测试孔土壤温度基本稳定在 17.6  $^{\circ}\text{C}$  左右,2 号测试孔土壤温度基本稳定在 17.0  $^{\circ}\text{C}$  左右,和工程所在地近年来的年平均气温比较接近。

为了模拟不同空调工况下的地下换热情况,测试了 24 h 内双 U 管的制冷和制热情况,系统运行时开启 2 台热泵机组,从而保证埋管换热性能测试的可靠性,具体工况参数见表 3。

表 3 测试工况参数

	水流量/ $(\text{m}^3/\text{h})$	系统功率/ $\text{kW}$	运行时间/ $\text{h}$	测试孔
工况 1(制冷)	1.62	1.98	24	1 号
工况 2(制热)	1.62	1.86	24	1 号
工况 3(制冷)	1.68	1.98	24	2 号
工况 4(制热)	1.67	1.86	24	2 号

注:系统功率包括循环水泵功率和 2 台热泵机组的功率。

各测试工况下的换热参数如表 4 所示。

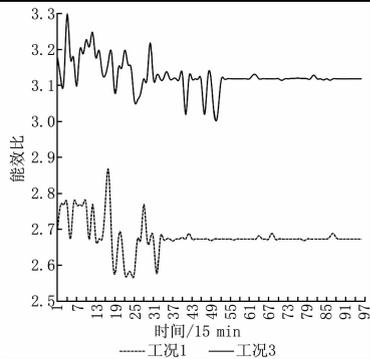


图 3 工况 1,3 系统能效比随测试时间的变化

值得注意的是,热响应测试结果及单孔的运行能效,均可用于预测系统的实际运行能效以及验证系统的可行性。经过供暖系统详细计算及布管设计,可以提升系统的运行能效。该区域建筑由于教学楼和学生宿舍的负荷特点,可以实现错峰运行<sup>[11]</sup>,这对于埋管的分区运行有利,有利于提高系统能效及运行稳定性。

### 3 实际运行效果的能效分析

能效评测的主要参数是地源热泵系统制热性能系数(COP),根据《可再生能源建筑应用工程评

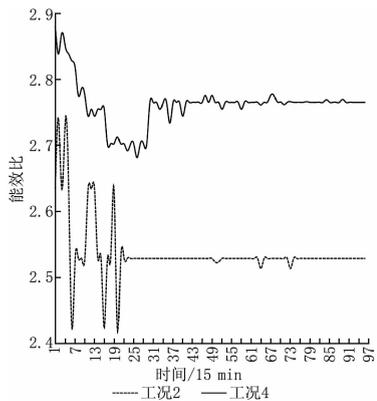


图4 工况2,4系统能效比随测试时间的变化

价标准》<sup>[12]</sup>,地源热泵系统制热性能系数是指地源热泵系统总制热量与热泵系统总耗电量的比值,热泵系统总耗电量包括热泵主机和各级循环水泵的耗电量。本文的系统能效比按下式计算:

$$COP = \frac{Q}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4} \quad (1)$$

式中 COP 为系统能效比;Q 为地源热泵系统总制热量,W;N<sub>1</sub> 为热泵机组总耗电量,W;N<sub>2</sub> 为地源侧循环水泵总耗电量,W;N<sub>3</sub> 为空调侧一级水泵总耗电量,W;N<sub>4</sub> 为水处理仪总耗电量,W。

由图5可以看出,在一周的检测时间内,一期地源热泵系统的冬季能效比在2.4~4.5之间,由表5可知,系统能效比平均值为3.62,系统一直处

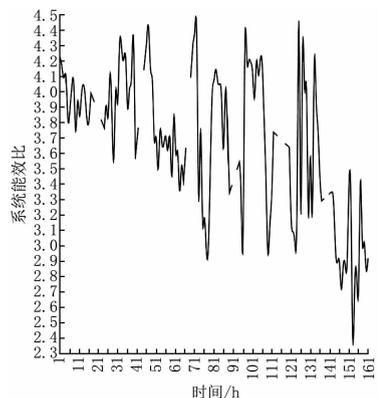


图5 一期地源热泵系统冬季能效比随记录时间的变化

表5 一期地源热泵系统冬季检测数据

冬季检测项目	系统参数
热水供水水平均温差/℃	4.4
地源侧进回水平均温差/℃	3.1
系统平均能效比	3.62

注:有效检测时间为:2012年12月25日08:00—24:00,12月26日07:00—23:00,12月27日05:00—24:00,12月28日05:00—24:00,12月29日05:00—23:00,12月30日07:00—24:00,12月31日05:00—24:00。

于高效率运行状态。因为记录的时间存在凌晨的断档,所以图5中存在不连续值。

在日运行工况中,热泵系统能效比总体呈下降趋势,这是因为地源热泵系统取热导致土壤温度下降,埋管进出水温差减小。由图6可见,在27日23:00之前,系统能效比一直呈下降趋势,降至3.36。按高校的作息时间表,教学楼停止使用后,承担教学楼负荷的埋管群关闭,而夜间学生宿舍负荷减小,负担宿舍负荷的埋管群部分关闭,这非常有利于土壤温度的恢复,到27日24:00,能效比已升至3.42。28日5:00,当教学楼重新使用、宿舍负荷变大、埋管群重新全部开启时,系统能效比已恢复到4.32。

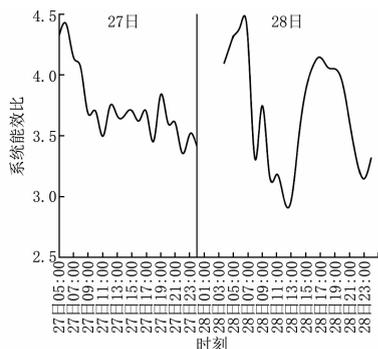


图6 12月27-28日一期地源热泵系统的冬季能效比

由图7可以看出,在一周的检测时间内,二期地源热泵系统的冬季能效比基本在2.7~4.4之间,由表6可知,系统能效比平均值为3.49,系统一直处于高效率运行状态。因为记录的时间存在凌晨的断档,所以图7中存在不连续值。

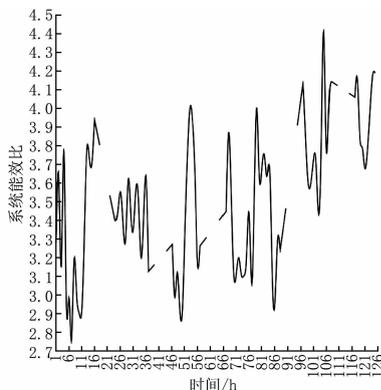


图7 二期地源热泵系统冬季能效比随记录时间的变化

由图8可见,在25日的运行过程中,系统能效比一直呈下降趋势,降至3.06。但是通过机组错峰运行和埋管的分区开闭,经过一个晚上的恢复,到26日早上10:00系统能效比已恢复到4.00。由

表6 二期地源热泵系统冬季检测数据

冬季检测项目	系统参数
热水供回水平均温差/℃	3.7
地源侧进回水平均温差/℃	3.0
系统平均能效比	3.49

注:有效检测时间为:2012年12月22日08:00—23:00,12月23日07:00—23:00,12月24日08:00—22:00,12月25日10:00—22:00,12月26日10:00—23:00,12月27日08:00—23:00,12月28日10:00—16:00。

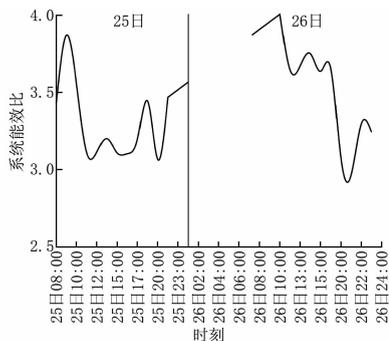


图8 12月25—26日二期地源热泵系统的冬季能效比

图6,8可知,机组错峰运行和埋管分区开闭这种运行策略有利于缓解地下热失衡,延长散热时间,恢复原始土壤温度,提高能效比。

#### 4 集中能源站系统评价

在记录运行数据的9d时间内,该集中能源站每天的供热量总和约为278 228 kW·h,耗电量总和约为77 481 kW·h。对于供暖系统,传统的燃煤锅炉房式的供暖系统产生同等热量的总能耗按《可再生能源建筑应用工程评价标准》<sup>[12]</sup>中的公式计算,不考虑动态负荷,按监测数据进行计算,计

表8 热泵供暖系统与传统燃煤锅炉房式供暖系统等效电耗

能源种类	实际耗能	单位数量能源对应的等效电	等效电耗能/(kW·h)	节能率/%	
热泵供暖系统	电	697 331 kW·h	1.0 kW·h/kW·h	697 331	61
传统供暖系统	标准煤	48 829 kg	4.1 kW·h/kg	1 801 792	

由表8可知,与北方燃煤锅炉房式的传统供暖系统相比,热泵供暖系统可以降低61%的能耗,节能效果相当显著。在适宜建立集中能源站的大型工程中采用埋管地源热泵系统有一定的节能潜力。

#### 5 结语

结合夏热冬冷地区某高校的地理环境和负荷特征,经过可行性研究,确定了以埋管地源热泵系统为基础的集中能源站进行夏季供冷、冬季供热。该项目冬季供暖综合能效测试值高于《可再生能源建筑应用工程评价标准》1级标准,说明在适宜建立集中能源站的大型工程中采用埋管地源热泵系统供暖,要比燃煤锅炉房式的供暖系统更节能。

算时间为年度供暖期:

$$Q_t = \frac{Q_H T}{\eta_t q} \quad (2)$$

式中  $Q_t$  为燃煤锅炉房式的供暖系统总能耗,kg; $Q_H$  为记录的平均每天总制热量,kW·h/d; $\eta_t$  为以传统能源为热源时的运行效率,取0.7; $q$  为标准煤热值,kW·h/kg,取8.14 kW·h/kg; $T$  为每年供暖时间,取70 d。

由式(2)可以求得在不考虑动态负荷的情况下,使用北方传统的燃煤锅炉房式的供暖系统在年度供暖期内要获得同等的热量需要约380 t标准煤,进而可求得CO<sub>2</sub>减排量约937 t,SO<sub>2</sub>减排量约7.6 t,粉尘减排量约3.8 t。

按《可再生能源建筑应用工程评价标准》<sup>[12]</sup>对埋管地源热泵系统的评价,该集中能源站系统能效超过系统制热性能系数限值2.6,据可行性研究报告,室内温湿度符合设计文件的要求,静态投资回收期约为7 a。

由表5,6可知该集中能源站的冬季平均能效比为3.56。对比表7可知,该项目的埋管地源热泵系统冬季能效超过1级,在冬季运行时处于高效率状态。

表7 《可再生能源建筑应用工程评价标准》<sup>[12]</sup>

#### 地源热泵系统性能级别划分

	1级	2级	3级
冬季制热性能系数	COP≥3.5	3.5>COP≥3.0	3.0>COP≥2.6

按江亿等人提出的等效电方法<sup>[13]</sup>换算节能率,结果见表8。

#### 参考文献:

- [1] 马一太. 从南方供热说热泵技术的时代责任和机遇[J]. 制冷与空调,2013,13(2):33-37
- [2] 龙惟定. 同济大学教授龙惟定谈南方供暖[J]. 制冷与空调,2013,13(2):35
- [3] 李先庭. 清华大学教授李先庭谈南方供暖[J]. 制冷与空调,2013,13(2):36-37
- [4] 龙惟定. 夏热冬冷地区住宅供暖问题刍议[J]. 暖通空调,2013,43(6):42-49
- [5] 顾铭,马宏权,王勇. 江水源热泵的技术关键与工程案例[J]. 建筑热能通风空调,2010,29(4):38-42
- [6] 欧阳长文,徐菱虹,许双霜,等. 武汉地区混合式土壤源热泵系统的优化运行[J]. 太阳能学报,2012,33(5):832-837

(上接第 20 页)

- [7] 卢军,黄俊杰,廖兴中,等. 重庆地区地表水地源热泵系统冬季供暖工程应用[J]. 暖通空调,2013,43(6):75-78
- [8] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [9] 袁志英,郝江南. 贵阳地区基本地质环境和主要岩土工程问题综述[J]. 地球与环境,2005,33(zl):251-254
- [10] 中国建筑科学研究院. GB 50366—2005 地源热泵

系统工程技术规范[S]. 2009 年版. 北京:中国建筑工业出版社,2009

- [11] 王勇. 动态负荷下地源热泵性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2006
- [12] 中国建筑科学研究院,住房和城乡建设部科技发展促进中心. GB/T 50801—2013 可再生能源建筑应用工程评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013
- [13] 江亿,杨秀. 在能源分析中采用等效电方法[J]. 中国能源,2010,32(5):5-11