

地源热泵系统运行特性的 实验研究^{*}

浙江水利水电专科学校 冯建江[☆]

浙江大学 徐 坚

摘要 以杭州某地源热泵实际工程为实验平台,结合一套温度测量系统来测定该地区土壤温度年变化规律。测试了冬夏季工况时换热器的进出口水温及地埋管换热器周围的温度分布,分析了地埋管换热器与周围土壤之间的换热状况,确定了该地源热泵系统地埋管换热器的实际换热量。

关键词 地源热泵 热负荷 钻孔壁温度 进出口水温 优化

Experiment of performance of ground-source heat pump systems

By Feng Jianjiang[★] and Xu Jian

Abstract Takes a ground-source heat pump project in Hangzhou as the experimental platform, and measures the annual change pattern of the soil temperature. Tests the inlet and outlet water temperature of the ground heat exchanger and temperature distribution around it in winter and summer. Analyses the heat transfer between the ground heat exchanger and soil, and obtains the actual heat exchange capacity.

Keywords ground-source heat pump, heating load, borehole wall temperature, inlet and outlet water temperature, optimization

★ Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou, China

①

0 引言

地源热泵技术的相关理论已日趋成熟,地源热泵空调在国外也得到了广泛的应用。理论分析主要是通过建立传热模型进行具体计算,理论解可以归纳为基于无限长线热源模型或者基于无限长圆柱模型^[1]。除理论分析计算外,通过现场测试与实验室测定两种方法,可以比较准确地确定地下土壤温度、地埋管换热器进出口温度等相关的变化规律。地源热泵工程实例的总结是国际上研究地源热泵的一个重要方面^[1]。在国内大力推行节能减排的背景下,地源热泵空调逐渐为人们所关注,但由于不同地区的地质、气候等条件存在很大差异,对地源热泵空调的运行效果有极大的影响,故应针对不同地区的实际工程进行广泛的测量评估,为该地区地源热泵的工程设计积累经验。本文以杭州地区的某个典型地源热泵空调系统为研究对象,对

地下温度场进行长时间的跟踪测量,主要分析了地下土壤温度、地埋管换热器进出口温度、空调供水温度及空调供冷量、地埋管换热器排热量、耗电量和 COP,并得出了相关的变化规律,为东南沿海地区地源热泵空调的设计提供参考。

1 工程介绍及实验方案

本项目总占地面积 121 m²,室外绿化面积 88 m²。在参考国内外地源热泵设计施工案例及相关理论研究的基础上^[2-3],结合当地地质条件和用户情况,于 2007 年 3 月建成了 U 形竖直埋管地源热泵空调实验系统。采用 12 个埋深为 40 m 的竖直地埋管换热器呈梅花阵型布置,孔间距为 3.5 m,

①☆ 冯建江,男,1964 年 1 月生,大学,讲师

310018 浙江省杭州市下沙高教园东区学林街 583 号浙江水利水电专科学校

(0) 13858008873

E-mail: fengjj@zjwchc.com

收稿日期:2009-05-18

修回日期:2009-08-17

* 浙江省教育厅科研项目(编号:20070793)

取其中一个埋管进行分析研究。测点布置如图 1 所示。

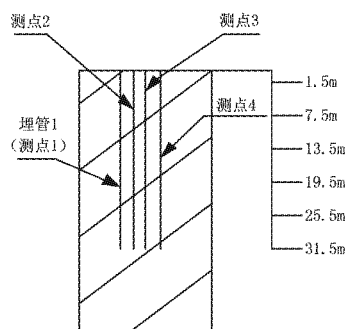


图 1 测点布置示意

以地源热泵实际工程为实验平台,在关键点布置多个温度传感器,地源热泵实验系统主要由 4 部分组成:地埋管换热器系统、单螺杆式水源热泵机组、空调末端和测试装置。通过实验,测定土壤温度年变化规律,测试冬夏季工况时换热器的进出口水温及地埋管换热器周围的温度分布,分析地埋管与土壤之间的换热状况,确定地埋管换热器的实际换热量。

热泵机组的规格参数:额定制冷量 18 kW,额定制热量 25 kW,地源热泵空调系统循环水流量 3.1 t/h,U 形埋管流量 3.75 t/h。

2 土壤温度、钻孔壁温度、冬夏季空调制冷量及功耗和 COP 变化规律

2.1 全年土壤温度变化规律

为了研究该区域土壤温度(沿纵向)的变化规律,尽可能减小地埋管换热器的干扰,将离地埋管 1 最远的 4 号测点的实际温度作为土壤温度。实验记录了从 2007 年 4 月 19 日至 2008 年 11 月 11 日实测的地下温度及其对应的环境温度,绘制成图,见图 2。

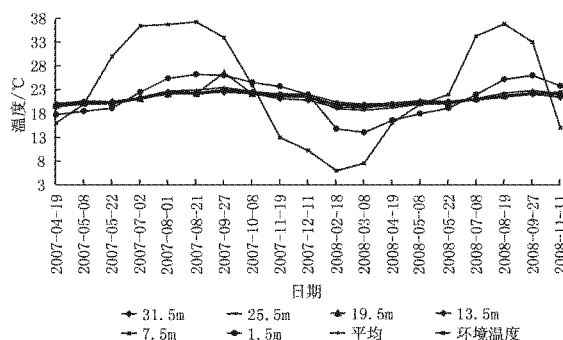


图 2 全年土壤温度的变化规律(沿纵向)

分析数据可以看出:

1) 土壤温度的变化幅度随深度的增加逐渐变小,在 31.5 m 深处全年的温度变化幅度为 3.3 °C,而在 1.5 m 深处波幅为 12.2 °C。随着深度的增加,土壤温度的年变化波幅逐渐减小,最大、最小值出现的时间也渐渐延迟。文献[4]通过对土壤温度的分析计算得到同样的结论,即达到一定深度后,土壤全年温度基本不变,当深度足够大时,温度波幅就衰减到可以忽略的程度。

2) 土壤温度(沿纵向)的变化较环境温度的变化具有一定的滞后性。土壤温度达到最高值的日期往往要比环境温度达到最高值的日期晚 1~2 个月,滞后的时间取决于土层的深度,土层越深则滞后性越显著。

3) 经过第 1 年冬、夏季供暖空调运行,地下土壤温度基本能恢复到初始状态,总体略有升高,平均升高约 0.4 °C。这有利于冬季热泵吸热运行,但不利于夏季空调的排热运行。

为了研究该区域地埋管换热器对地下土壤温度(沿横向)的影响,选取 3 个与埋管距离分别为 1,1.5 和 2 m 的测点,将每个测点测得的土壤温度(忽略纵向影响,沿纵向取平均值)绘制成图 3。从图 3 中可以看出:

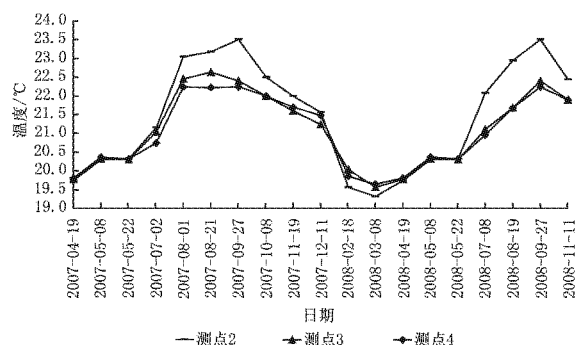


图 3 全年土壤温度的变化规律(沿横向)

1) 由于地埋管换热器的影响,土壤温度全年的变化幅度随横向距离的增加逐渐变小。在距离地埋管换热器 2 m 远处(测点 4)土壤全年的温度变化幅度为 2.6 °C,而在 1 m 远处(测点 2)波幅为 4.1 °C。

2) 经过第 1 年冬、夏季供暖制冷运行,地下土壤温度基本能恢复到初始状态,但由于夏季的负荷大于冬季,土壤温度沿横向有不同程度的升高。观察供暖期开始前的 2007 年 11 月 19 日和 2008 年 11 月 11 日,最远处的测点 4 的温度升高约 0.2

℃,测点 2 处温度升高约 0.4℃。

2.2 地埋管换热器钻孔壁温度的变化规律

为了研究该区域地埋管换热器钻孔壁温度的变化规律,将 6 个温度传感器分别固定在埋管 1 的不同深度,记录从 2007 年 4 月 19 日至 2008 年 11 月 11 日实验测得的钻孔壁温度及其对应的环境温度,绘制成图,见图 4。分析数据可以看出:

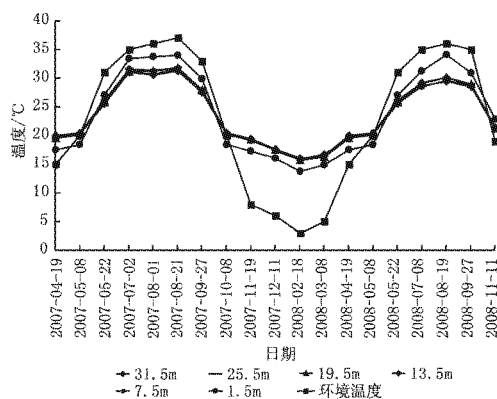


图 4 钻孔壁温度的变化

1) 钻孔壁温度的变化幅度随深度的增加逐渐变小,在 31.5 m 深处全年的温度变化幅度为 15.4℃,而在 1.5 m 深处波幅为 20.3℃。

2) 钻孔壁各点温度基本一致,这与理论分析是相符的^[5],且与环境温度的变化趋于同步。钻孔壁温度达到最高值的日期与环境温度达到最高值的日期一致,且不同深度的钻孔壁温度基本相同。这主要是由于地源热泵系统运行时,钻孔壁某处的温度由该处埋管进出口水温的平均值决定,虽然 U 形管各处温度不同,但不同深度的钻孔壁温度都近似等于进出口温度的平均值。

2.3 夏季空调制冷量、耗电量和 COP

夏季实验分别在 2007,2008 年的 5—9 月进行,主要分析地埋管换热器进出口温度、空调供回水温度,空调供冷量、地埋管换热器排热量、耗电量和 COP,见图 5~7。地源热泵空调系统循环水流量为 3.1 t/h,U 形埋管流量为 3.75 t/h。

图 5 为夏季空调地埋管换热器进出口温度和空调负荷侧进出水温度。由实验数据,地埋管换热器出口温度为 25.1~34.77℃,进口温度为 30.1~39.3℃,说明夏季地埋管换热器的冷却水温度低于风冷空调和冷却塔空调的冷却水温度,显示了地源热泵的优势和特点。空调出水温度 11.9~14.1℃,回水温度 16~19.1℃,符合空调冷水规范值。

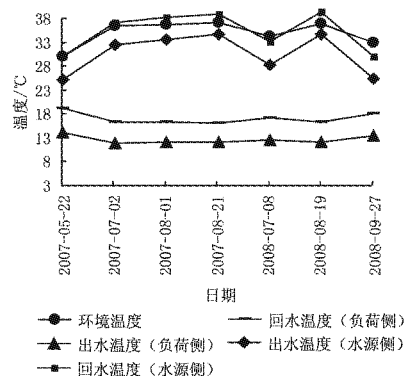


图 5 夏季地埋管换热器进出口温度和空调负荷侧进出水温度

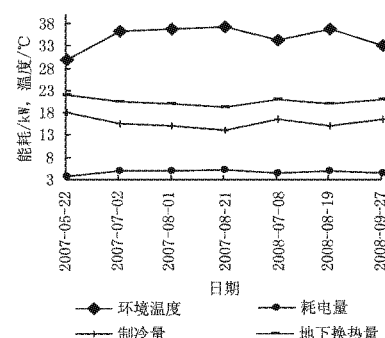


图 6 夏季地源热泵系统的能耗量

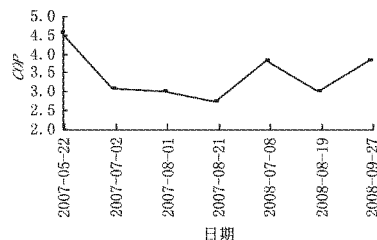


图 7 夏季地源热泵系统的 COP

图 6 为夏季地源热泵系统的制冷量、地埋管换热器换热量和耗电量,由以下关系式计算得出。

$$Q_e = cW_e(t_{e,i} - t_{e,o}) \quad (1)$$

$$Q_c = cW_c(t_{c,i} - t_{c,o}) \quad (2)$$

$$N = (Q_c - Q_e)\eta \quad (3)$$

式(1)~(3)中 Q_e 为制冷量; c 为水的比热容; W_e 为负荷侧流量; $t_{e,i}, t_{e,o}$ 分别为负荷侧进、出口水温; Q_c 为地埋管换热器换热量; W_c 为水源侧流量; $t_{c,i}, t_{c,o}$ 分别为水源侧进、出口水温; N 为地源热泵系统的耗电量; η 为耗电量修正系数,一般为 1.0~1.1^[6],本文取 1.05。

图 7 为地源热泵空调系统 COP 的变化情况, $COP = Q_e/N$,变化范围在 3.0~4.57 之间。

分析夏季实验数据,可以得出以下规律:

1) 地埋管换热器进、出口水温与环境温度同步变化,空调负荷侧进出口水温则与空调设定室温值的变化趋势同步。

2) 同等条件下,随地埋管换热器出口温度的升高,制冷量逐渐降低,耗电量逐渐升高,地埋管换热器换热量基本相同。

3) COP 随地埋管换热器出口温度的升高而降低,如在 2007 年 5 月 22 日 COP 达到最大值 4.57,此时地埋管换热器负荷侧出口温度最低,为 25.1 °C,在 2007 年 8 月 21 日 COP 达到最低值 3.0,此时地埋管换热器出口温度最高,为 34.6 °C。

2.4 冬季空调制热量、耗电量和 COP

冬季实验在 2007 年 11 月至 2008 年 3 月进行,主要分析地埋管换热器进出口温度、空调供回水温度、空调制热量、地埋管换热器取热量、耗电量和 COP,见图 8~10。

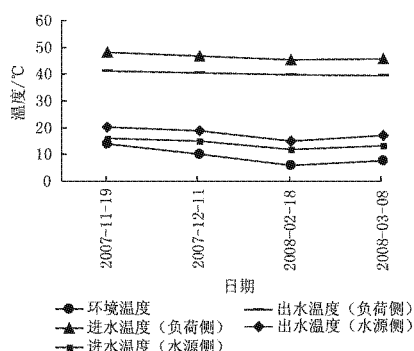


图 8 冬季地埋管换热器水源侧进出口温度和空调负荷侧进出水温度

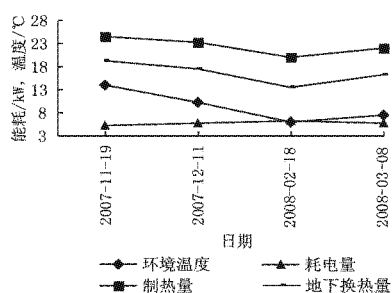


图 9 冬季地源热泵系统的能耗量

图 8 为冬季空调地埋管换热器水源侧进出水温度和空调负荷侧进出水温度。由实验数据,地埋管换热器出口温度为 15.1~20.4 °C,进口温度为 12~16 °C,空调负荷侧出水温度为 45.2~48 °C,进水温度为 39.5~41.2 °C。

图 9 为冬季地源热泵系统的能耗量,由式(4)~(6)计算得出。

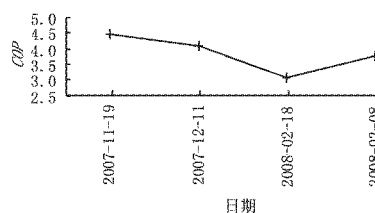


图 10 冬季地源热泵系统的 COP

$$Q'_e = cW_e(t_{e,o} - t_{e,i}) \quad (4)$$

$$Q'_c = cW_c(t_{c,o} - t_{c,i}) \quad (5)$$

$$N' = (Q'_c - Q'_e)\eta \quad (6)$$

式(4)~(6)中 Q'_e 为制热量; Q'_c 为冬季地埋管换热器换热量; N' 为冬季耗电量。

图 10 为冬季地源热泵空调系统 COP 的变化情况,变化范围在 3.04~4.45 之间。

分析冬季实验数据,可以得出以下规律:

1) 地埋管换热器进出口水温与环境温度同步变化,空调负荷侧进出口水温则与空调设定的室温值变化趋势同步。

2) 同等条件下,随地埋管换热器出口温度降低,空调制热量逐渐降低,耗电量逐渐升高,地埋管换热器换热量也降低。

3) COP 随地埋管换热器出口温度的升高而升高,在 2007 年 11 月 19 日 COP 达到最大值 4.45,此时地埋管换热器出口温度最高,为 20.4 °C,在 2008 年 2 月 18 日 COP 达到最低值 3.04,此时地埋管换热器出口温度最低,为 15.1 °C。

3 结论

3.1 土壤温度的变化幅度随深度的增加逐渐变小,土壤温度(沿纵向)的变化较环境温度的变化具有一定的滞后性。土壤温度达到最高值的日期往往要比环境温度达到最高值的日期晚 1~2 个月,滞后的时间取决于土层的深度,土层越深则滞后性越显著。经过第 1 年冬、夏季供暖制冷运行,地下土壤温度基本能恢复到初始状态,总体升高约 0.4 °C。这有利于冬季热泵吸热运行,但不利于夏季空调的排热运行。

3.2 钻孔壁温度的变化幅度随深度的增加逐渐变小,钻孔壁各点温度基本一致,且与环境温度的变化趋于同步。这主要是由于地源热泵系统运行时,钻孔壁某处的温度由该处埋管进出口水温的平均值决定,虽然 U 形管各处温度不同,但不同深度的钻孔壁温度都近似等于进出口温度的平均值。

3.3 夏季,地埋管换热器进出口水温与环境温度同步变化,空调负荷侧进出口水温则与空调设定的室温值变化趋势同步。同等条件下,随地埋管换热器出口温度的升高,空调制冷量逐渐降低,耗电量逐渐升高,地埋管换热器换热量基本相同, COP 随地埋管换热器出口温度的升高而降低;冬季,地埋管换热器进出口水温与环境温度同步变化,空调负荷侧进出口水温则与空调设定的室温值变化趋势同步。同等条件下,随地埋管换热器出口温度降低,空调制热量逐渐降低,耗电量逐渐升高,地埋管换热器换热量也降低, COP 随地埋管换热器出口温度的升高而升高。

参考文献:

- [1] 刁乃仁,方肇洪. 地埋管地源热泵技术[M]. 北京:高等教育出版社,2006:211
- [2] 李元旦,张旭,周亚素,等. 土壤源热泵冬季工况启动特性的实验研究[J]. 暖通空调,2001,31(1):17-20
- [3] 张燕立,张新发,由世俊. 土壤源热泵空调工程的设计与施工[J]. 制冷与空调,2006,6(2):97-101
- [4] 李永. 太阳能-土壤复合式地源热泵运行特性研究[D]. 河北:河北工程大学,2007
- [5] 曾和义,刁乃仁,方肇洪. 地源热泵竖直埋管的有限长线热源模型[J]. 热能动力工程,2003,18(2):166-169
- [6] 雅柯勃松 B G. 小型制冷机[M]. 王世华,译. 北京:机械工业出版社,1982:532

• 简讯 •

《采暖通风与空气调节术语标准》修编组成立暨第一次工作会议

根据住房和城乡建设部建标[2009]88号文《关于印发〈2009年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》,GB 50155—1992《采暖通风与空气调节术语标准》修订项目由亚太建设科技信息研究院、中国建筑设计研究院担任主编单位。

会议于11月18日在北京召开,来自住房和城乡建设部标准定额所的领导、主编单位与参编单位的专家和企业代表参加了会议。

会议首先由标准定额研究所高鹏工程师宣读了修编组成员名单,随后他作了讲话,宣布项目正式启动、修编组正式成立,并提出了标准修订编制的程序和要求。与会代表纷纷发

言表示要积极协作配合,按进度要求完成该标准的修订任务。

会议第二阶段,修编组组长潘云钢总工程师代表主编单位介绍标准立项背景、修编重点等情况,修编组副组长丁力行教授介绍了项目前期的准备工作,原标准编制人代表孙延勋总工程师介绍了原标准编制使用情况并对修编工作提出了建议,获得与会代表的高度评价。此后,与会代表就筹备组拟定的标准编制大纲草案、分工草案和修编工作方式进行了热烈充分的讨论,在讨论基础上确定了具体分工方案,确定了各小组负责人,明确了具体的进度安排。

(本刊)

• 会讯 •

2009年浙江省暨杭州市暖通空调动力学术年会在杭州召开

由杭州市暖通空调学术委员会承办、浙江省土木建筑学会暖通空调动力学术委员会、浙江省制冷学会第五专业委员会、中国勘察设计协会建筑环境与设备分会浙江省委员会联合举办的2009年浙江省暨杭州市暖通空调动力学术年会于2009年11月20日在杭州市钱江新城天元大厦召开,参加会议的学会会员及生产厂商代表共320人,应邀参加会议的暖通空调设备厂商共37家。

浙江省土木建筑学会发来了热情洋溢的贺信,中国勘察设计协会建筑环境与设备分会理事长罗继杰、浙江省制冷学会理事长陈光明、杭州市土木建筑学会副理事长徐志恒到会祝贺并作了指导性发言。

会上,浙江省土木建筑学会暖通空调动力学术委员会主任委员姚国梁、杭州市暖通空调学术委员会主任委员包士方分别代表省、市学会作了学会工作报告,报告回顾了一年来学会所作的工作,总结了成绩与不足,提出了明年工作的设想,号召学会会员为学会多作贡献,争取把下届年会办得更好,希望学会进一步加强与暖通空调动力

生产厂商的沟通与合作,为浙江省的暖通空调事业作出新贡献。姚国梁还汇报了2010年全国空调制冷学术年会的筹备情况,介绍了2009年10月在山东烟台召开的中国勘察设计协会建筑环境与设备分会学术年会的情况,汇报了2009年浙江省首次举办的暖通空调工程优秀设计评选活动,共评出二等奖一项、三等奖二项。会上还颁发了奖状、奖金。

本次会议特邀了浙江大学陈光明教授作了《有关新制冷工质最新进展》的专题报告,浙江省工业设计院赖庆林总工作了《浙江省地方标准〈建筑工程消防验收规范〉防、排烟,通风空调工程章节》的专题介绍,浙江大学建筑设计研究院杨毅高工作了《绿色建筑设计与实践》的专题报告,汉嘉设计集团股份有限公司包士方总工作了《建筑工程设计文件编制深度规定》学习体会的发言。4个报告内容丰富多样,给暖通空调设计思路以新的启迪,极具参考价值,受到与会代表的高度关注与欢迎。

(姚国梁)