

# 土壤源地源热泵系统能效测试分析\*

龚宇烈<sup>1),2),3)</sup> 骆超<sup>1),2),3)</sup> 刘广平<sup>1),2),3),4)</sup>  
邱泽晶<sup>5),6)</sup> 郑鑫<sup>5),6)</sup> 李承凯<sup>7)</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) <sup>7)</sup>(江苏中科能凯夫空调有限公司)

**摘要** 对江阴地区某会所建筑土壤源地源热泵系统制冷期数据监测,获取地源侧和用户侧供、回水温度及耗电量等数据,计算得到建筑冷负荷、机组制冷系数  $COP$  和系统能效比  $EER$ 。结果表明,用户侧冷冻水供、回水平均温度分别为  $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,建筑冷负荷为  $33.4\text{ kW}$ ,机组  $COP$  和系统  $EER$  的平均值分别为  $4.1$  和  $3.1$ ,热泵机组未能达到理想工作状态,有待进一步改进。通过对土壤源地源热泵系统的监测及节能效果分析,可以对系统运行进行指导、节能诊断和系统优化,从而更好地推广土壤源地源热泵系统的应用,为实现国家节能量化的目标奠定基础。

**关键词** 土壤源地源热泵;制冷系数;能效比;系统监测;优化设计

## Analysis on energy efficiency test of ground source heat pump system

Gong Yulie<sup>1),2),3)</sup> Luo Chao<sup>1),2),3)</sup> Liu Guangping<sup>1),2),3),4)</sup> Qiu Zejing<sup>5),6)</sup>  
Zheng Xin<sup>5),6)</sup> Li Chengkai<sup>7)</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)

<sup>7)</sup>(Jiangsu Chinese Science Energy and Cofull Air Conditioning Co., Ltd.)

**ABSTRACT** Through monitoring the refrigeration data of the ground-source heat pump system for one club house in Jiangyin, the inlet & outlet water temperature and the electricity consumption of the ground-source side and the user side are obtained, so as to calculate the cooling load of the building,  $COP$  and  $EER$ . The results show that the average inlet and outlet temperature of chilled water are  $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $12.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. The cooling load of the building is  $33.4\text{ kW}$ . The average  $COP$  and  $EER$  are  $4.1$  and  $3.1$  respectively. The performance of the ground-source heat pump unit can not reach the ideal operation condition, so the optimization of the heat pump has to be done in the future. Based on the the system monitoring and efficiency analysis on the ground-source heat pump system, the operation guide, energy-saving diagnosis and system optimization can

\* 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:2017-07-05

作者简介:骆超,博士,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。

be conducted, which will promote the application of ground-source heat pump system widely and lay foundation for the purpose of energy-saving quantification in China.

**KEY WORDS** ground-source heat pump; coefficient of performance; energy efficiency ratio; system monitoring; optimization design

土壤源地源热泵系统作为一种可再生能源建筑节能应用技术,在建筑节能领域得到了较为广泛的应用。工程示范从单个项目开始发展到城市级和集中连片,建设规模呈明显的增大趋势,应用面积急剧增长;但也暴露一些问题,主要体现在资源勘查、工程设计、施工监管、运营管理等方面的不完善或缺失,导致部分土壤源地源热泵系统工程能效较低,甚至出现系统运行失败的情况<sup>[1]</sup>。郭彬等<sup>[2]</sup>采用对比试验,对不同型号地埋管的散热能力、传热能力的研究发现,如果地下岩土的热导系数测试存在 10% 的误差,则设计的地埋管长度的偏差将达到 4.5%~5.8%,这不仅影响设计系统初始投资,还严重威胁系统的安全、有效运行。张孝鼎等<sup>[3]</sup>对采用土壤源地源热泵技术的某办公楼空调系统进行能效测评,对热泵机组和热泵系统的性能进行现场检测,认为土壤源地源热泵系统没有达到高效运行状态,系统还可以进一步优化,项目的静态投资回收期为 4.1 年,在设备寿命周期内收回增量成本,具有很好的经济效益。扈志勇等<sup>[4]</sup>通过对银川市某土壤源热泵系统制冷期长期连续监测,获取地埋管侧和用户侧供回水温度、流量及耗电量等数据,计算得到建筑日均小时负荷、机组日均能效比和系统日均能效比,结果表明系统日均能效比平均值约为 3.05,热泵机组未能达到理想工作状态,有待进一步改进。刘超等<sup>[5]</sup>利用地源监测运行系统,对绵阳市某土壤源地源热泵系统进行了能效测试,测试结果表明,该土壤源地源热泵系统制热工况下的能效比在 4.1~5.1 之间,制冷工况下的能效比在 5.3~6.1 之间,节能优势明显。李玉云等<sup>[6]</sup>对热回收热泵系统进行了测试,结果表明,有热回收机组的实际性能系数低于无热回收机组的性能系数。胡先

芳等<sup>[7]</sup>通过对某办公楼土壤源地源热泵系统的短期测试与长期监测,分析了影响系统能效的主要因素,建议夏热冬冷地区采用三工况(制冷、制热、热回收)土壤源地源热泵系统,可不设辅助冷却系统。土壤源地源热泵系统在宏观层面可以从设计改善、施工管控和运营落实 3 个方面提高系统的能效,在技术层面可以通过提高机组自控级别、优化水力输配系统、减少热损失环节、因地制宜按质用能的配置辅助系统、选择适宜的“供冷高温化和供热低温化末端系统装置”等手段提高能效<sup>[8-9]</sup>。

对土壤源地源热泵系统运行情况进行监测是了解土壤源地源热泵系统运行与能耗情况的重要手段,笔者以江阴市某工程为例,对该工程土壤源地源热泵系统的运行情况进行监测,给出工程系统的整体能效。

### 1 工程基本概况

土壤源地源热泵工程能效测试地点位于江苏省江阴市,该市年平均气温 16.7℃,极端最高气温 36.5℃,最低气温 -11.1℃。夏季供冷期为 6 月至 8 月,冬季供暖期为 11 月至次年 1 月。建筑用途为休闲会所,地上 3 层,总建筑面积约 300 m<sup>2</sup>,土壤源地源热泵系统提供空调/供暖的建筑面积约为 200 m<sup>2</sup>,建筑末端共 12 个风机盘管机组。土壤源地源热泵系统共打 11 口井,其中布置了 8 口 40 m 和 3 口 80 m 深孔换热器以满足负荷需求,系统采用单 U 形地下换热器设计,孔径为 180~250 mm,承压 1.6 MPa。孔间距控制在 4~5 m 之间,占地面积约 100 m<sup>2</sup>。各管路之间的连接方式为单 U 形管并联。笔者对该系统制冷期的机组制冷系数和系统能效进行测试。土壤源地源热泵系统各设备的具体参数见表 1 和表 2。

表 1 土壤源地源热泵系统设备参数表

参数	型号	参数	型号	参数	型号
热泵机组型号(R22)	WRB30R	冷冻水泵	德国威乐	冷却水泵	德国威乐
制冷量/kW	30.5	冷冻水额定流量/(t/h)	5.2	冷却水额定流量/(t/h)	6.2
制热量(供暖+热水)/kW	33.5	冷冻水泵额定功率/kW	0.74	冷却水泵额定功率/kW	1
压缩机输入功率(制冷/制热)/kW	5.8/8.2	冷冻水额定压力/kPa	18	冷却水额定压力/kPa	21
缓冲水箱容积/L	200	冷冻水泵管径(DN)/mm	32	冷却水泵管径(DN)/mm	32
电源	3N/50 Hz/380 V				

表 2 风机盘管机组参数表

型号	功率/W	风量/(m <sup>3</sup> /h)	冷量/W	热量/W	噪声/dB(A)
FP85	87	640	3 450	5 157	44
FP51	59	385	2 300	3 450	40

## 2 测试方案

基于 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》<sup>[10]</sup>, CJJ 101—2016《埋地塑料给水管道工程技术规程》<sup>[11]</sup>, GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》<sup>[12]</sup>, GB 50366—2009《地源热泵系统工程技术规范》(局部修订)<sup>[13]</sup>,《地源热泵工程技术指南》<sup>[14]</sup>, DL/T 359—2010《电蓄冷(热)和热泵系统现场测试规范》<sup>[15]</sup>等相关标准和规范,通过测试热泵系统冷冻水和冷却水温度、流

量,室内温度,冷冻水泵、冷却水泵、机组压缩机功耗等参数,计算土壤源地热泵机组制冷系数(coefficient of performance, COP)以及供冷系统的能效(energy efficiency ratio, EER)。

### 2.1 测试原理

建筑采用单一土壤源地热泵系统供能,机组夏季制冷,同时回收余热供热水;冬季既供暖又供生活热水;过渡季节采用热泵只提供热水的运行模式。土壤源地热泵系统测试原理如图 1 所示。

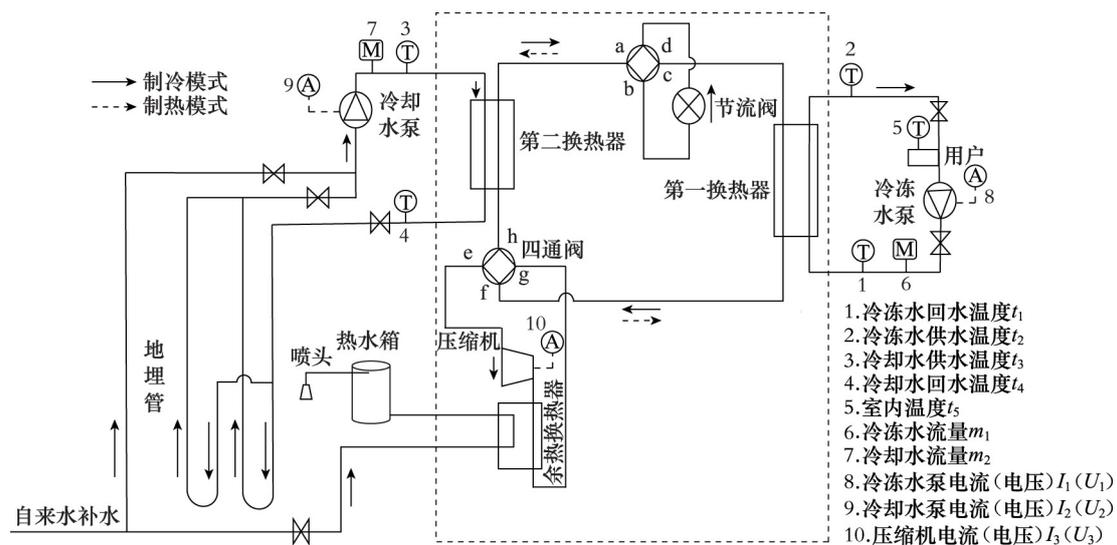


图 1 土壤源地热泵系统测试原理图

系统包括 3 个闭式循环系统:①室外土壤换热系统;②热泵循环系统;③室内换热系统。具体运行模式如下:

夏季制冷与供热水模式:首先,热泵机组的第一换热器(蒸发器)中的制冷剂与冷冻水换热,蒸发器中低温低压的制冷剂吸收冷冻水的热量,使蒸发器冷冻水由回水温度  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  降为供水温度  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,供房间制冷,制冷剂由液态变为气态,气态制冷剂经过四通阀由 f—e 进入压缩机,在压缩机中提升压力后,高温高压的制冷剂蒸气在余热换热器中进行余热回收,高温高压制冷剂蒸气温度降低后由四通阀 g—h,进入第二换热器(冷凝器),在冷凝器中释放热量至冷却水中,使冷却水的温度由  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  升高至  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。制冷剂在冷凝器中温度降低由气态变为液态,由 a—b 经过节流阀减压后的低温低压液体由 d—c 进入第一换热器(蒸发器),

从而制冷剂完成一个闭式循环。其次,蒸发器中的冷冻水与室内环境换热,  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷冻水进入风机盘管机组,与室内环境回风换热,冷冻水吸收回风热量后,温度升高至  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再由冷冻水泵泵入蒸发器,回风释放热量后,温度降低,将冷风送入房间。再次,余热换热器中的生活热水和高温高压的气体换热后,进入生活热水箱。最后,冷凝器中的冷却水和室外土壤换热,  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷却水进入室外地埋管,释放热量至周围土壤中,温度降低至  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,再由冷却水泵泵入冷凝器。

春、秋过渡季节供热水模式:与地埋管相连的第二换热器作为蒸发器,余热回收换热器作为冷凝器,第二换热器中的制冷剂吸收土壤侧热源的热量,由四通阀 h—e 到达压缩机,经过压缩机压缩后,变为高温高压的气体,高温高压制冷剂气体在余热换热器中放热降温,将热量传递给生活热

水,生活热水蓄存于热水箱中,降温后的高压低温制冷剂液体经 g—f 和 c—b 流入节流阀降压,低温低压制冷剂液体由 d—a 流入蒸发器,完成循环。

冬季制热和供热水模式:热泵机组的第二换热器(蒸发器)中的制冷剂和热源侧水进行换热,吸收热量,制冷剂由液态变为气态,通过四通阀的 h—e 进入压缩机,压缩后制冷剂压力升高,变为高温高压的气体,在余热换热器中和生活热水换热,释放一部分热量,由四通阀 g—f 进入第一换热器(冷凝器),释放热量,为房间供暖使用,释放热量后的制冷剂变为低温高压的液体,由 c—b 流入节流阀降压后,再由 d—a 进入蒸发器,吸热蒸发,完成一个循环。

### 2.2 测试仪器

试验直接测量数据包括温度、流量、功率(功耗)等参数,用到的测量仪器有:热电阻、红外温度计、超声波流量计、电能质量表。

温度测量:采用热电阻接无纸记录仪测量,连

续测试 4 h,每 2 min 采集一次数据。或者用红外温度计测试,连续测试 4 h,每 2 min 测试一次数据。

流量测量:采用超声波流量计测量,连续测量 4 h,每 2 min 采集一次数据。

功率(功耗)测量:使用电能质量表测量冷冻水泵、冷却水泵和机组压缩机电流,然后计算功率。

使用仪器仪表如表 3 所示。

### 2.3 测试工况及数据处理

随着室外环境的变化,建筑物房间负荷随之变化,同时引起机组制冷系数和系统能效变化。土壤源地源热泵系统主要通过冷冻水回水温度控制机组的启停,以便适应房间负荷的变化。机组设计回水温度为 12℃,供回水温差为 5℃,笔者测试了冷冻水回水温度为 12℃,11℃和 10℃(分别为第一、二、三种工况)3 种工况下,土壤源地源热泵系统参数和性能的变化。

表 3 测试仪器仪表

仪表设备名称	误差	量程	数量	安装位置
万能表	±0.5%	0~200 A	3	冷冻水泵、冷却水泵、压缩机
红外温度计	±0.3℃	0~100℃	2	冷却水供、回水,室内送风
热电阻	±0.5℃	0~100℃	2	冷冻水供、回水
超声波流量计	±1.5%	0~30 t/h	2	冷冻水、冷却水流量

热泵系统的制冷系数和能效比计算过程如下:

#### 1) 制冷系统制冷量

$$Q = m_1 c_p (t_1 - t_2) / 3.6 \quad (1)$$

式中:Q 为制冷系统制冷量(kW); $m_1$  为冷冻水流量(t/h); $c_p$  为冷冻水定压比热容,取 4.2 kJ/(kg·K); $t_1$  为冷冻水回水温度(℃); $t_2$  为冷冻水供水温度(℃)。

#### 2) 设备功率

$$W = 0.001 \sqrt{3} UI \quad (2)$$

式中:W 为设备功率(kW);U 为三相电压,380 V;I 为实测电流(A)。

#### 3) 机组能效

$$COP = \frac{Q}{W_{com}} \quad (3)$$

式中  $W_{com}$  为压缩机测试功率(kW)。

#### 4) 制冷系统能效

$$EER = \frac{Q}{W_{com} + W_{cooling, pump} + W_{chilled, pump}} \quad (4)$$

式中: $W_{cooling, pump}$  为冷却泵测试功率(kW); $W_{chilled, pump}$  为冷冻泵测试功率(kW)。

### 3 测试结果及分析

#### 3.1 冷却水温度变化

冷却水供、回水温度即为地理管侧供、回水温度,图 2 所示为监测的冷却水的供、回水温度的变化情况,第一、二、三种工况下的冷却水的供水平均温度分别为 16.9℃,18.4℃和 18.9℃,回水平均温度分别为 21.3℃,21.7℃和 22.2℃,供回水平均温差分别为 4.4℃,3.4℃和 3.3℃。在第一种设计工况下,冷却水供回水温差为 5℃,实际测试温差为 4.4℃,误差为 0.6℃。从图中可以看出,供水和回水温度的变化趋势基本一致,3 种工况下,供水温度越来越高,主要是地理管受环境温度的影响,室外环境温度从 12:00 至 17:00 先升高后降低,由于地理管温度变化有一定的延迟,所以监测到的供回水温度逐渐升高。

#### 3.2 冷冻水温度变化

冷冻水供水温度与室内环境的舒适性相关,图 3 所示为监测的冷冻水的供、回水温度的变化情况,第一、二、三种工况下的冷冻水的供水平均温度分别为 9.6℃,9.1℃和 7.5℃,回水平均温度分别为 13.5℃,12.7℃和 11.3℃,供回水平均温

差分别为 3.9 °C, 3.6 °C 和 3.8 °C。在第一种设计工况下,冷冻水供回水温差为 5 °C,实际测试温差为 3.9 °C,误差为 1.1 °C。从图中可以看出,供水

和回水温度的变化趋势基本一致,由于建筑空调面积较小,冷冻水供、回水温度受室内环境舒适性的影响不大,基本趋于稳定。

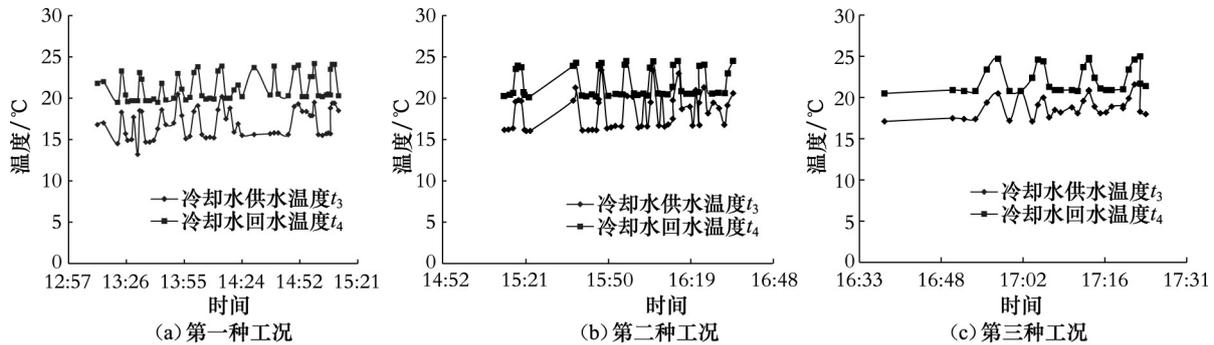


图 2 冷却水供、回水温度的变化

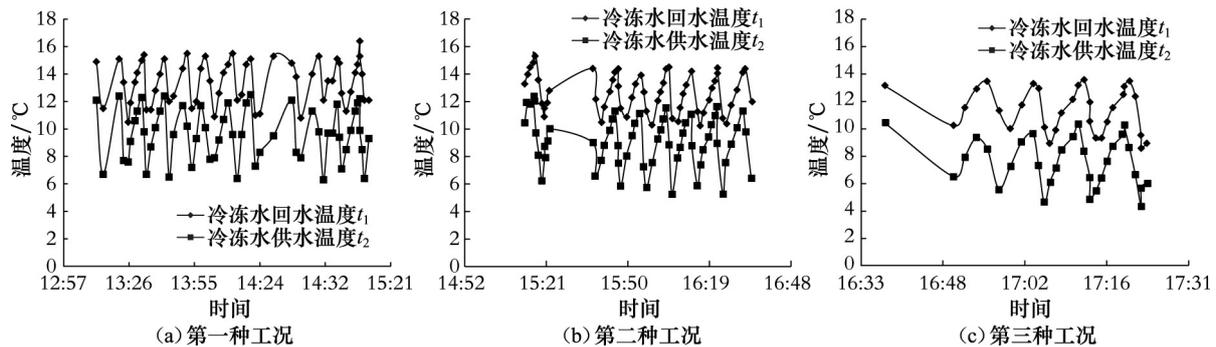


图 3 冷冻水供、回水温度的变化

### 3.3 设备功率监测

土壤源地热泵系统消耗电功率的主要设备有压缩机、冷却水泵和冷冻水泵,3 种工况下压缩机的功率在 8 kW 上下波动,冷冻水泵和冷却水泵的功率在 1 kW 上下波动,与机组和设备的额定功率有一

定的误差,系统和机组须进一步优化。在第一种工况下,14:30 左右,压缩机功率突然降低,然后平稳上升,这主要是由于室内环境温度较低,导致压缩机停机后,快速启动造成的。由于整体建筑面积不大,3 种工况下压缩机功率增幅并不明显(见图 4)。

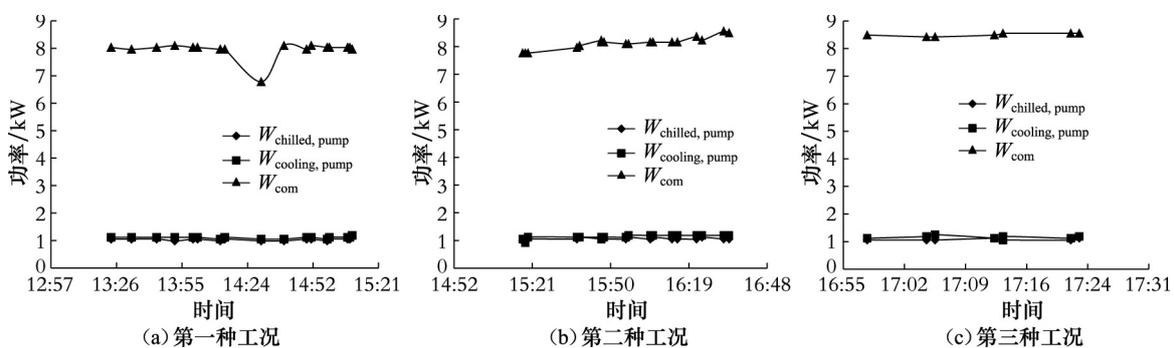


图 4 设备功率变化情况

### 3.4 热泵机组和系统效率

由图 5 可以看出,热泵机组在第一种设计工况下,冷冻水回水温度为 12 °C 时,热泵机组的 COP 和系统的 EER 基本维持在 4.3 和 3.0 左右,在 14:30 左右明显提升,是因为压缩机功率降低。第二种工况的 COP 和 EER 较第一种工况逐渐下

降,第三种工况的 COP 和 EER 较第二种工况逐渐下降,并趋于稳定。3 种工况下的 COP 和 EER 的变化趋势一致。

### 3.5 测试结果分析

根据运行测试数据,整理出土壤源地热泵系统夏季制冷期的平均运行参数,如表 4 所示。

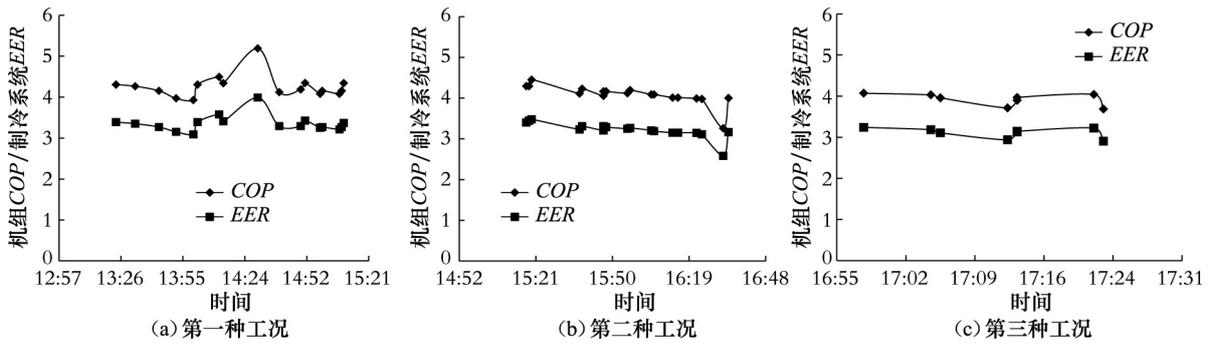


图 5 热泵机组及系统效率变化情况

表 4 三种工况下土壤源地源热泵系统夏季制冷期主要指标平均值对比

工况	冷冻水回水温度/℃	冷冻水供水温度/℃	冷冻水泵功率/kW	冷却水泵功率/kW	压缩机功率/kW	制冷量/kW	机组 COP	系统 EER
第一种	13.5	9.6	1.60	1.70	7.95	33.80	4.3	3.0
第二种	12.7	9.1	1.06	1.13	8.13	33.16	4.1	3.2
第三种	11.3	7.5	1.07	1.15	8.51	33.37	3.9	3.1
平均值	12.5	8.7	1.24	1.33	8.18	33.44	4.1	3.1

由表 4 可知,土壤源地源热泵系统的平均 EER 为 3.1,热泵机组的平均 COP 为 4.1,冷冻水泵、冷却水泵、压缩机和设备总功率实际运行的平均值分别为 1.24 kW,1.33 kW,8.18 kW 和 10.75 kW,建筑总冷负荷为 33.44 kW。热泵机组 COP 测试结果和表 1 中机组的额定值有一定的差距,说明热泵机组供冷系统需要进一步优化。

#### 4 结论

基于对江阴市某会所建筑土壤源地源热泵系统制冷期的数据监测,分析了该热泵系统的制冷特性。该热泵系统能够满足会所建筑夏天温度要求。按照机组设定工况运行时,机组实际测试的冷冻水供、回水平均温度分别为 8.7℃和 12.5℃,建筑冷负荷为 33.44 kW,COP 和 EER 分别维持在 4.1 和 3.1 左右,机组实际运行测试值与机组的额定值有一定的差距,说明热泵机组未能达到理想工作状态,需要进一步优化。

机组实际运行测试值的能耗过高,与土壤源地源热泵系统的设计和选型有关,打井共计 11 口,埋管深度共计 560 m,建筑热泵机组选型的功率过大,造成能耗较高,建议选择功率相匹配的热泵机组。

系统用户侧水泵都是定频泵,建议更换为变频泵和变频压缩机,减少水泵和压缩机运行能耗,从而提高系统性能系数,使项目节能性和经济性进一步提高。

#### 参考文献

[1] 孟杉,江剑,杨帆,等. 地源热泵系统监测与节能减排

效果分析—以北京市顺义区某地源热泵工程为例[J]. 城市地质,2014,9(Z1):55-58.

[2] 郭彬,刘林,王劲松,等. 地源热泵能效比试验与研究[J]. 制冷与空调(四川),2014,28(4):228-232.

[3] 张孝鼎,黄金美,刘以龙,等. 地源热泵系统建筑应用能效测评案例分析[J]. 建筑节能,2016,44(3):84-87.

[4] 扈志勇,杨超,刘君,等. 地源热泵系统制冷期能效测评分析[J]. 洁净与空调技术,2016(4):76-78.

[5] 刘超,高理福,邹国荣. 某地源热泵系统能效的试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2014,40(5):307-309.

[6] 李玉云,马勇,胡先芳,等. 武汉地区地源热泵夏季工况能效测评与效益分析[J]. 可再生能源,2012,30(10):97-101.

[7] 胡先芳,李玉云,马勇,等. 武汉某办公楼地源热泵系统能效测评[J]. 节能技术,2012,30(4):353-356.

[8] 马宏权,张志鹏,罗磊,等. 浅谈地源热泵建筑应用中的能效提升[J]. 建筑科技,2013(8):70-73.

[9] 杨灵艳,钱程,周权,等. 土壤源热泵系统能效提升要素分析[J]. 建筑节能,2016,44(6):1-4.

[10] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S].

[11] 埋地塑料给水管道工程技术规程:CJJ 101—2016[S].

[12] 公共建筑节能设计标准:GB 50189—2015[S].

[13] 地源热泵系统工程技术规范(局部修订):GB 50366—2009[S].

[14] 美国制冷空调工程师协会. 地源热泵工程技术指南[M]. 徐伟,译. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

[15] 电蓄冷(热)和热泵系统现场测试规范:DL/T 359—2010[S].