

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-503-06

## 基于运行数据的地源热泵系统性能分析

刘 雨<sup>1</sup> 谢艳萍<sup>1</sup> 余晓平<sup>1</sup> 郭金成<sup>2</sup>

(1. 重庆科技学院建筑工程学院 重庆 401331;

2. 重庆海润节能技术股份有限公司 重庆 401147)

**【摘 要】** 建筑全年冷热负荷特性对地源热泵空调系统逐年供冷供热能力和地源侧的热平衡有直接影响。以贵阳某综合医院地源热泵空调系统 2015-2019 年连续监测为期 4 年的数据为基础, 通过计算该地源热泵系统制冷季、制热季的平均部分负荷率、热泵主机的 COP 和 EER, 分析了冬、夏季地源侧和用户侧的供回水温度变化, 介绍了该地源热泵系统夏季制冷、冬季制热的运行效果, 总结了该地源热泵系统运行过程中存在的问题, 为该地源热泵系统运行的系统性能提升和运行管理提出了优化的建议, 可最大程度发挥地源热泵系统的节能效益和环境效益。

**【关键词】** 医疗建筑; 地源热泵系统; 运行数据; 性能提升

中图分类号 TB657.5 文献标识码 A

### Performance Analysis of Ground Source Heat Pump System Based on Operation Data

Liu Yu<sup>1</sup> Xie Yanping<sup>1</sup> Yu Xiaoping<sup>1</sup> Guo Jincheng<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401331;

2.Chongqing Hairun Energy Saving Technology Co., Ltd, Chongqing, 401147 )

**【Abstract】** The annual cooling and heating load characteristics of buildings have a direct impact on the annual cooling and heating capacity of ground source heat pump air conditioning system and the heat balance of ground source side. Based on the four-year continuous monitoring data of ground source heat pump air conditioning system in a general hospital of Guiyang from 2015 to 2019, this paper calculates the average partial load rate of the ground source heat pump system in the cooling season and heating season, COP and EER of the heat pump host, analyzes the temperature changes of the water supply and return at the ground source side and the user side in winter and summer, and introduces the cooling, heating and cooling characteristics of the ground source heat pump system in summer. Based on the operation effect of heating in winter, this paper summarizes the problems existing in the operation process of the ground source heat pump system, and puts forward optimization suggestions for the system performance improvement and operation management of the ground source heat pump system, so as to maximize the energy-saving and environmental benefits of the ground source heat pump system.

**【Keywords】** medical building; ground source heat pump system; operation data; performance improvement

作者简介: 刘 雨 (1994-), 男, 在读研究生, E-mail: gewuzhizi@foxmail.com

通讯作者: 余晓平 (1973-), 女, 博士, 教授, E-mail: yuxiaoping2001@126.com

收稿日期: 2021-06-20

### 0 引言

地源热泵系统作为一种清洁可再生的新能源技术, 具有良好的经济效益和环境效益, 在能源的可持续发展战略中起着重要的作用<sup>[1]</sup>。在政策引导

与需求推动之下, 地源热泵系统得以广泛应用于各类建筑中, 并取得了良好的节能效果。地源热泵系统的实际运行效果不仅与设计有关, 也与运行管理有关。对地源热泵系统运行数据进行监测是了解地

源热泵系统运行状态及运行效果的重要手段<sup>[2]</sup>,对监测所得系统的运行数据进行分析,可全面了解系统的运行状况,找出影响其使用效果和节能效果的根源所在,进而实现对系统的优化,使系统充分发挥出舒适、节能、环保的技术优势<sup>[3]</sup>。

现有文献对地源热泵系统的运行分析集中在数值模拟分析和典型工况实测两个方面,缺乏针对长周期的连续运行数据分析<sup>[4-9]</sup>。本文收集整理了贵阳某综合医院地源热泵空调系统 2015-2019 年连续监测为期 4 年的数据,包括主机用户侧和地源侧进出水流量、温度、压力和压缩机电流电压,其中温度、压力及电流电压数据由主机自带对应传感器测量经主机控制面板导出,流量数据则由安装在主管上的超声波流量计测得。通过连续四年全年运行数据分析,对系统运行性能进行诊断,可为项目持续调适提供参考。

### 1 项目介绍

该工程为贵阳某综合医院,是集门诊和住院为一体的综合大楼,总建筑面积 27243m<sup>2</sup>,总楼层为 18 层,总高度为 61.6m,属于一类高层建筑。冷热源采用两台地源热泵主机,提供风机盘管和大楼新风系统的冷热量,主机参数如表 1 所示,夏季供水温度为 7℃/12℃,冬季供水温度为 40℃/45℃;夏季地埋侧设计供回水温度为 25℃/30℃,冬季地埋侧设计供回水温度为 5℃/10℃。项目采用桩基三螺旋埋管形式。

表 1 系统主机参数

Table 1 Technical date of the ground source heat pump unit

主机编号	制冷 (kW)		制热 (kW)	
	制冷量	输入功率	制热量	输入功率
1#、2#	715.4	123.7	739.5	163.4

### 2 地源热泵系统运行分析

#### 2.1 系统供回水温度

系统的供回水温度反映了系统夏季工况和冬季工况运行时地源侧和用户侧的运行状况。自 2015 年下半年制热季开始起至 2019 年制冷季结束为止,分别统计 1#和 2#主机用户侧和地源侧供回水温差,计算温差分布,四年的供回水温度变化

和温差分布计算结果如图 1-图 6 所示。该结果能反映出地源热泵系统主机在用户侧和地源侧的运行状况,同时反映出实际运行状态与设计预期的偏离程度。

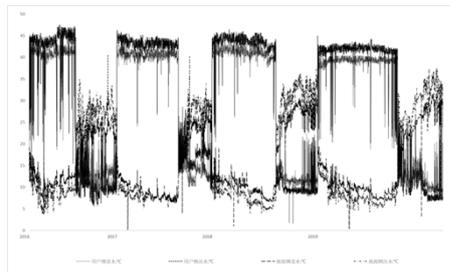


图 1 1#主机两侧供回水温度变化

Fig.1 Temperature variations of supply and return water on both sides of the No.1 heat pump unit

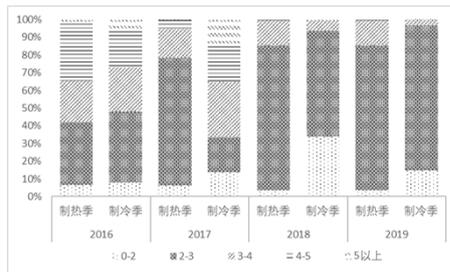


图 2 1#主机用户侧供回水温差分布

Fig.2 Distribution of temperature difference between supply and return water at user side of No.1 heat pump unit

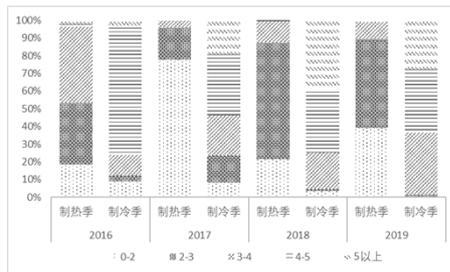


图 3 1#主机地源侧供回水温差分布

Fig.3 Distribution of temperature difference between supply and return water at ground side of No.1 heat pump unit

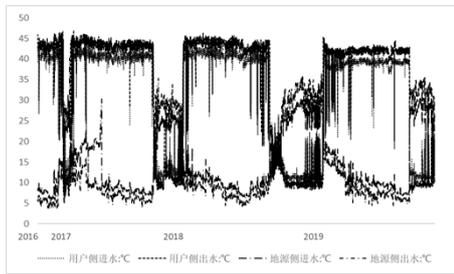


图 4 2#主机两侧供回水温度变化

Fig.4 Temperature variations of supply and return water on both sides of the No.2 heat pump unit

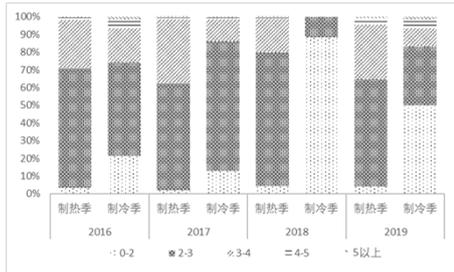


图 5 2#主机用户侧供回水温差分布

Fig.5 Distribution of temperature difference between supply and return water at user side of No.2 heat pump unit

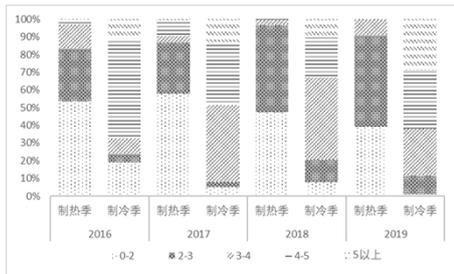


图 6 2#主机地源侧供回水温差分布

Fig.6 Distribution of temperature difference between supply and return water at ground side of No.2 heat pump unit

该项目地源热泵系统主机在制热季和制冷季内均连续运行。由机组两侧供回水温度变化可以看出, 随着机组的持续运行, 制热季地源侧回水温度逐渐降低, 制冷季地源侧回水温度逐渐上升。由温

差分布图可以看出: 用户侧, 两台主机制热季和制冷季供回水温差主要处于 2~3℃ 范围内, 平均占比 67% 和 47%。地源侧, 两台主机的制热季供回水温差主要处于 2℃ 以下, 平均时长占比 50%, 供回水温差有逐年下降趋势。制冷季供回水温差主要分布在 4~5℃ 范围内, 平均时长占比 41%。这表明, 系统在制冷季时的运行表现要优于制热季, 制热季两台机组地源侧供回水温差大部分时间没有达到设计预期, 且偏离较大。

### 2.2 系统的运行能效

系统机组的制热性能系数 COP 和制冷能效比 EER 是反映热泵机组运行状态和性能的重要指标, 其计算公式如下:

$$COP = \frac{Q}{N} \quad (1)$$

$$EER = \frac{Q}{N} \quad (2)$$

$$Q = m_1 \rho C \Delta t / 3600 \quad (3)$$

$$Q_y = \sum_{i=1}^n m_1 \times \rho \times C \times \Delta t_i \times T \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中,  $Q$  为机组用户侧瞬时制热量/制冷量, kW;  $Q_y$  为用户侧累计负荷, GJ;  $N$  为机组制热/制冷工况下瞬时输入功率, kW;  $m_1$  为机组用户侧水泵流量, m<sup>3</sup>/h;  $C$  为冷/热水比热容, kJ/(kg·°C);  $\rho$  为冷/热水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta t_i$  为第  $i$  次记录的机组用户侧供回水温差, °C;  $T$  为记录间隔, h。计算用户侧累计负荷及机组的制冷能效比 EER、制热性能系数 COP, 结果如图 7、图 8 所示。

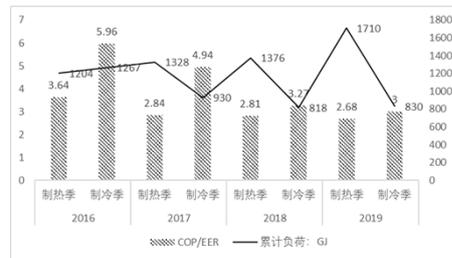


图 7 1#主机 COP/EER 及累计负荷变化

Fig.7 COP/EER and the accumulative load change of No.1 heat pump unit

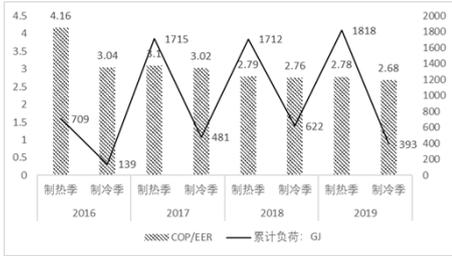


图8 2#主机 COP/EER 及累计负荷变化

Fig.8 COP/EER and The accumulative load change of No.2 heat pump unit

按《可再生能源建筑应用工程评价标准》(GB 50801-2013) [10]所提供的性能级别划分标准对两台主机的性能进行评价如表2所示。

表2 机组性能评价结果

Table 2 The performance evaluation results of the ground source heat pump unit

年度	工况	机组	性能级别
2016	制热性能系数	1#	1级
		2#	1级
	制冷能效比	1#	1级
		2#	3级
2017	制热性能系数	1#	3级
		2#	2级
	制冷能效比	1#	1级
		2#	3级
2018	制热性能系数	1#	3级
		2#	3级
	制冷能效比	1#	3级
		2#	不合格
2019	制热性能系数	1#	3级
		2#	3级
	制冷能效比	1#	3级
		2#	不合格

按时间顺序可以看出,机组的COP和EER水平在4年监测期内是逐年下降的,其中,制热季平均年下降率为11%,制冷季平均年下降率为13%。结合第一节中地源侧供回水低温差占比变化来看,可以推断出该项目地源热泵系统累年运行下,地源侧地下换热环境变差。

### 2.3 机组部分负荷率

机组的部分负荷率是指机组某一时刻所提供的冷量/热量与其最大制冷量/制热量的比值,是反映机组选配与建筑负荷匹配程度重要指标,其计算公式如下:

$$PLR = \frac{Q}{Q_r} \quad (5)$$

式中,  $Q$  为机组瞬时制冷量/制热量, kW;  $Q_r$  为该热泵机组的额定制热量/制冷量, 将为期四年的所有监测时刻点数据逐一计算该时刻 PLR, 并求平均值, 结果如图9、图10所示。

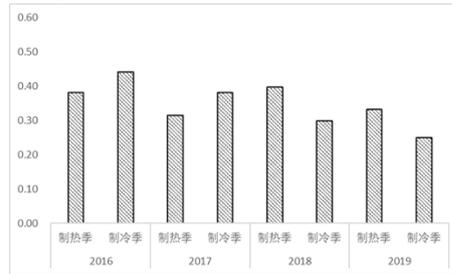


图9 1#主机平均 PLR

Fig.9 Average PLR of No.1 heat pump unit

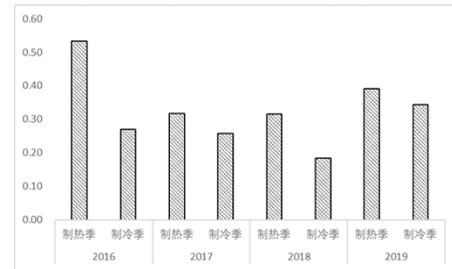


图10 2#主机平均 PLR

Fig.10 Average PLR of No.2 heat pump unit

如图9、10所示,无论制冷季还是制热季,两台主机的部分负荷率都处于较低的水平,在所有统计季节中,1#主机有6个工况季平均部分负荷率低于40%,2#主机有6个季节平均部分负荷率低于35%,热泵主机长时间处于低负荷运行状态,会造成系统的能效偏低。

### 2.4 地源侧全年冷热平衡

地源热泵系统以地下岩石、土壤和水体为热量存储载体,在制冷工况向地下排热,在制热工况从地下取热,我国幅员辽阔,各气候区气候差异明显,

气候差异和工作原理造成了地源热泵技术在实际应用中会产生换热不平衡的情况: 在热负荷主导区域, 冬季向地下取热量大于夏季向地下的排热量; 在冷负荷主导区域, 夏季向地下排热量大于冬季向地下取热量, 即造成冬夏季取排热不平衡, 地源热泵主机长时间在取排热不平衡状态下运行, 将会导致地下储热体温度的升高或降低, 形成冷热堆积, 影响其运行效果。冷热平衡计算公式如下:

$$Q_d = \sum_{i=1}^n m_2 \times \rho \times C \times \Delta t_i \times T \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$Q_d^* = \sum_{i=1}^n m_2 \times \rho \times C \times \Delta t_i \times T \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$R = 1 - Q_d^* / Q_d \quad (8)$$

式中,  $R$  为不平衡率, 其值为正, 说明排热大于取热, 反之, 排热小于取热;  $Q_d$  和  $Q_d^*$  分别为地源侧夏季排热总量和冬季取热总量, GJ;  $m_2$  为制冷季/制热季机组地源侧水泵流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $C$  为冷/热水比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  为冷/热水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\Delta t_i$  为第  $i$  次记录的机组地源侧供水温差,  $^\circ\text{C}$ ;  $T$  为记录间隔,  $\text{h}$ 。计算结果如表 3 所示。

表 3 地源侧全年换热不平衡率

Table 3 Unbalanced rate of annual heat exchange at ground side

年度	不平衡率
2016	38.3%
2017	-72.8%
2018	-2.2%
2019	-63.2%

结合机组工作时间和用户侧累计负荷进行分析, 2016 年两台机组制冷总计运行 143 天, 制热运行 84 天, 造成夏季向地下排热量大于冬季的取热量, 不平衡率为正; 2017 年制热总计运行 118 天, 制冷运行 52 天, 取热量远大于排热量; 2018 年制热累计运行 125 天, 制冷 83 天, 取排热总量接近; 2019 年制热总计运行 137 天, 制冷 78 天, 取热量远大于排热量, 不平衡率较高。总体来讲, 该项目为热负荷主导即冬季取热大于夏季排热, 全年换热是不平衡的, 部分年度不平衡率远高于 20% 的限值<sup>[11]</sup>, 易影响热泵主机的运行效果。

### 3 讨论

(1) 该系统运行存在“大流量小温差”的现象。设计水流量与主机匹配, 按最大负荷设计, 以

保证最不利情况用户需要。在实际运行过程中, 建筑负荷变化很大, 高峰负荷出现时间很短, 当负荷变小而流量不变, 就造成了“大流量小温差”问题。

(2) 地源热泵主机选型配置不合理, 导致主机部分负荷率低, 能效低。具体来说, 主机容量过大, 长期处于低负荷运行状态, 导致机组的 COP/EER 偏低, 与机组名义 COP/EER 相比, COP 平均低 31.4%, EER 平均低 40%; 此外, 两台主机的部分负荷率长时间都低于 35%, 也表明机组的容量选配与建筑的负荷不匹配。

(3) 经统计, 该项目地源热泵主机一年内制热季平均运行 120 天, 制冷季平均运行 68 天, 表明该地区建筑冬季供热需求远高于夏季供冷需求。若冷热源配置不考虑这样的负荷特点, 仅设置地源热泵系统以满足建筑冷热需求, 则容易造成地源侧冬夏季换热不平衡。

### 4 改进建议

(1) 地源热泵系统按设计工况运行时能够发挥其节能绿色的优势。设计阶段, 设计人员需充分了解项目所在地的气候条件和建筑物的负荷特征, 因为会造成到地源热泵系统运行工况与设计工况的偏离, 影响其节能效果。

(2) 通过增加辅助制热系统解决该项目目前存在的取排热不平衡问题, 在制热季部分极端天气或者分时段采用其他制热形式, 一方面减少该系统冬季取热量, 另一方面为地下换热环境提供恢复时间; 或者使辅助系统与地源热泵系统联合制热, 减少地源热泵系统的地源侧取热量; 合理利用过渡季节对地下储热体做一定的热量补充。

(3) 若医院内有新建或改扩建建筑有冷负荷需求, 则可利用该项目现有地源热泵系统为其提供冷量, 最大程度发挥该系统在本项目实际情况下的夏季制冷潜力, 同时对地下储热体补充部分热量。

(4) 改定频水泵为变频水泵, 避免出现“小温差大流量”的低效耗能运行模式。

(5) 规范地源热泵主机使用管理。对于该项目实际情况而言, 在满足热舒适需求的情况下, 冬季不必追求过高的供暖温度, 以减少末端耗能。运行维护人员应提升对本项目地源热泵系统实际运行情况以及现存运行问题的掌握水平, 便于灵活控制机组的运行状态, 达到节能的目的。

Commented [A1]: 请核对公式, 应该有一个是错误的

## 参考文献:

- [1] 何璇,廖翠萍,黄莹. 可再生能源战略研究方法综述[J]. 科学,2015,67(1):48-52.
- [2] 马勇. 地源热泵系统运行能效测评与能效影响因素的研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
- [3] 袁萌萌,楚广明,于涛,等. 某酒店地源热泵系统夏季运行检测与性能分析[J]. 建筑热能通风空调,2013,(3):32-34.
- [4] 王玉莲. 阜阳地区地源热泵冷热平衡分析[J]. 中国新技术新产品,2019,(17).
- [5] 冯国会,赵佳绩,黄凯良. 某超低能耗建筑地源热泵夏季运行的调试与运行问题分析[J]. 建筑科学,2020,36(6):50-55.
- [6] 汪雨清,张文字,王慧丽. 基于实测数据的地源热泵系统应用效果分析[J]. 绿色建筑,2020,12(4):70-72.
- [7] 黄新江,刘成刚. 基于数据挖掘的地源热泵系统性能测试和分析[J]. 热能动力工程,2020,35(3):181-186.
- [8] 李骥,乔鏢,马宁,等. 某医院大型地源热泵系统的设计优化与运行效果验证[J]. 暖通空调,2020,50(8):27-34.
- [9] 陈晨,李晓萍. 绿色公共建筑地源热泵系统运行效果分析[J]. 建筑热能通风空调,2021,40(4):66-69,59.
- [10] 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.
- [11] 曹馨雅,周亚素,方辉旺. 地源热泵系统负荷不平衡率对土壤温度的影响[J]. 建筑热能通风空调,2012,31(5):5-7,36.

## (上接第 502 页)

- [4] 钟茂华,史聪灵,罗艳萍,等. 复杂地铁火灾烟流控制技术研究的若干进展[C]. 第二十届海峡两岸及香港、澳门地区职业安全健康学术研讨会暨中国职业安全健康协会 2012 学术年会,2012.
- [5] 史聪灵,钟茂华,胥旋,等. 地铁站防灾系统全尺寸热烟测试(一)——四节编组地下两层岛式车站[J]. 中国安全生产科学技术,2014,(9):48-54.
- [6] 田向亮,钟茂华,陈俊洋,等. 地铁十字换乘车站全尺寸实验研究.I. 站厅火灾[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(3):11-18.
- [7] 钟茂华,陈俊洋,陈嘉诚,等. 地铁十字换乘车站全尺寸实验研究.II. 站台火灾[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(5):44-50.
- [8] 龙增,刘畅,杨宇轩,等. 含阶梯式站厅地铁岛式车站火灾全尺寸实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,(9):787-794.
- [9] 史聪灵,钟茂华,何理,等. 地铁车站及隧道全尺寸火灾实验研究(1)——实验设计[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(6):22-28.
- [10] 高俊霞,史聪灵,钟茂华. 深埋地铁防排烟设计研究[J]. 中国安全生产科学技术,2006,2(6):39-44.
- [11] <https://www.cqmetro.cn/index.shtml>
- [12] B J McCaffrey, J G Quintiere, M F Harkleroad. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations[J]. Fire Technology, 1982,18(1):122-122.
- [13] AQ 8007-2013, 城市轨道交通运营前安全评价规范[S]. 北京:应急管理出版社,2013.
- [14] Goldstein M. Carbon Monoxide Poisoning[J]. Journal of Emergency Nursing Jen Official Publication of the Emergency Department Nurses Association, 2008,34(6):538-42.
- [15] GB 50157-2013, 地铁设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.