

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-763-05

重庆某医疗建筑复合式地源热泵系统分析

唐茂川 陈金华 田昊洋

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆 400030)

【摘要】 针对重庆市某医疗建筑实际案例, 以保证系统安全性、稳定性、运行能效及土壤热平衡为目的, 对复合式地源热泵系统的设计方案与运行策略进行了分析总结。经过校核, 若应用此设计方案与运行策略, 此工程冬夏季土壤热不平衡率为9.42%, 满足热平衡要求。并对实测数据进行分析, 结果表明系统在冬季的平均能效比为3.64、夏季平均能效比3.94, 保持了较高的运行效率。

【关键词】 医疗建筑; 地源热泵复合系统; 设计方案; 运行效果

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Analysis of Composite Ground Source Heat Pump System for Medical Building in Chongqing

Tang Maochuan Chen Jinhua Tian Haoyang

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030)

【Abstract】 Aiming at the actual case of a medical building in Chongqing, in order to ensure the system safety, stability, operating efficiency and soil heat balance, the design scheme and operation strategy of composite ground source heat pump system are analyzed and summarized. After checking, if this engineering can use the design scheme and operation strategy, the soil thermal imbalance rate in winter and summer of this project is 9.42%, which meets the requirements of thermal balance. The analysis of measured data show that the average energy efficiency ratio of the system is 3.64 in winter and 3.94 in summer, maintaining a high operating efficiency.

【Keywords】 Medical Building; Composite Ground Source Heat Pump System; Design Scheme; Operation Effect

0 引言

近年来由于医院建设的不断发展, 医疗建筑能耗也随之持续增长。由于医疗建筑具有功能房间复杂, 人员活动规律多变, 室内环境要求高, 设备功率大等特点, 导致其建筑能耗往往是一般公共建筑的1.6~2倍^[1], 其中用于供暖、通风、空气调节、热水以及蒸汽供应能耗已达到总能耗的60%左右^[2], 而医疗建筑的建筑能源费用也占到了其运营成本的10%以上^[3]。因此, 医疗建筑的节能是建筑节能领域的重点工作之一。

地源热泵系统是可再生能源应用的代表技术, 在建筑节能领域占据重要地位。然而在实际工程中为保证系统运行的安全稳定性与能效, 往往对设计

方案与控制策略具有更高的要求。此外, 不合理的系统方案往往会导致土壤冬夏季吸放热量不平衡, 从而导致土壤温度夏季过高或冬季过低, 相关研究显示, 夏季土壤温度每升高1℃, 系统效率将降低3~4%^[4]。而对于能耗用量大, 负荷特性复杂的医疗建筑, 地源热泵系统的应用则是一个更大的挑战, 根据相关调研显示, 对于医疗建筑, 空调冷源与热源系统中可再生能源应用比例仅为26%与16%^[5]。因此本文结合重庆市某医疗建筑, 针对地源热泵系统设计与运行进行了分析总结, 并根据实测数据分析其运行效果, 为地源热泵技术在医疗建筑中的推广提供了参考。

作者简介: 唐茂川 (1997.7-), 男, 硕士研究生, E-mail: 1210886861@qq.com

通讯作者: 陈金华 (1973.7-), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: c66578899@126.com

收稿日期: 2022-02-10

1 工程概况及负荷需求

项目位于重庆市潼南区，总建筑面积 50725.72m²，地下 2 层，地上 20 层，建筑高度 74.70m，为一类高层公共建筑。其功能区域大致可分为病房、门诊及办公附属用房三类，面积比例约为 3.5:2:1，根据能耗调研结果显示^[6,7]，此建筑与一般医疗建筑功能分区比例类似，因此可作为典型建筑分析。

采用负荷计算软件计算和 DEST 软件模拟，本建筑空调系统夏季最大冷负荷为 7124.802kW，累计冷负荷为 5110.42MWh，冬季最大热负荷为 2740.487kW，累计热负荷为 1781.56MWh，不同负荷率小时分布统计情况见图 1、2。项目冬季空调热负荷出现的频率较为集中，并有 79.9%的时刻其负荷值出现在 12.5%~62.5%的负荷率区间内，夏季空调冷负荷出现的频率较为分散，但有 78.3%的时刻其负荷值出现在 62.5%以下的负荷率区间内。整个冷热源系统的主要处于 62.5%及以下的低负荷率下运行，且 100%的满负荷运行时间较少。

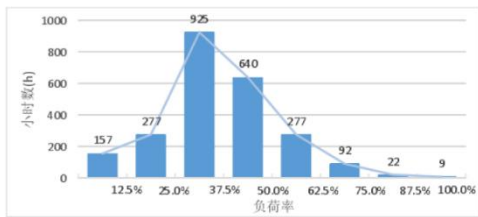


图 1 热负荷小时分布统计

Fig.1 Hourly distribution statistics of heating load

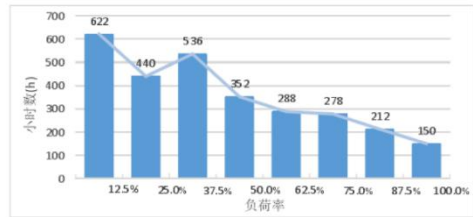


图 2 冷负荷小时分布统计

Fig.2 Hourly distribution statistics of cooling load

2 地源热泵系统

2.1 冷热源系统方案

由于冬季热负荷远小于夏季冷负荷，且累计热负荷也远小于累计冷负荷，为保持土壤冬夏季热平衡和节约投资，本工程采用以冬季负荷需求设计地下换热器，夏季冷却塔辅助供冷的地埋管+冷却塔的复合式热泵系统。选用 2 台地源热泵机组通过地埋管换热器冬季供热、夏季供冷，另选用 3 台水冷冷水机组夏季联合供冷。冬季热泵机组热水进出水温度 40/45℃，地源侧进出水温度 10/5℃；夏季冷冻水进出水温度为 12/7℃，地源侧进出水温度为 30/35℃。水冷冷水机组冷冻水进出水温度为 12/7℃，冷却水进出水温度为 32/37℃。水系统均采用变流量系统，水泵为变频水泵，机组变水流量运行范围为 50%~100%，每分钟最大允许水流量变化为满流量的 20%。系统流程如图 3 所示，机组与冷却塔技术参数如表 1 所示。

表 1 机组选型表

Table 1 Unit selection table

序号	名称	参数	单位	数量
1	离心式冷水机组	制冷量 3250kW，功率 550.5kW，冷冻水供/回水温度 7/12℃，冷冻水流量 559.08m ³ /h，冷却水供/回水温度 32/37℃，冷却水流量 657.72m ³ /h	台	1
2	螺杆式冷水机组	制冷量 1180kW，功率 210kW，冷冻水供/回水温度 7/12℃，冷冻水流量 202.57m ³ /h，冷却水供/回水温度 32/37℃，冷却水流量 240.77m ³ /h	台	2
3	满液螺杆式地源热泵机组	制冷量 1605kW，功率 287.1kW，冷凝器进出水温 30/35℃，流量 326.63m ³ /h；蒸发器进出水温 12/7℃，流量 275.44m ³ /h 制热量 1669kW，功率 369.4kW，冷凝器进出水温 45/50℃，流量 289.94m ³ /h；蒸发器进出水温 10/5℃，流量 224.14m ³ /h	台	2
4	冷却塔	L=1000m ³ /h，N=37kW，塔体扬程 6.8mH ₂ O 设计工况：进水 37℃，出水 32℃，环境湿球温度 28℃	台	1
5	冷却塔	L=400m ³ /h，N=11kW，塔体扬程 4.7mH ₂ O 设计工况：进水 37℃，出水 32℃，环境湿球温度 28℃	台	2

由于地源热泵机组在冬夏季不同工况下需进行蒸发侧与冷凝侧的转换,同时考虑到埋管长期运行时可能会产生水垢,影响管内换热介质流动与换热,因此需要定期对埋管进行反冲洗以保证系统运行的稳定性。因此本工程针对冬季、夏季以及反冲洗三种不同工况设计了转换阀及其对应转换模式,具体如下:

(1) 冬季供暖:开启阀门1'、2'、3'、4'、5'、6'、13、14;关闭阀门1、2、3、4、5、6、11、12。

(2) 夏季制冷:开启阀门1、2、3、4、5、6、13、14;关闭阀门1'、2'、3'、4'、5'、6'、11、12。

(3) 埋管系统反冲洗:开启阀门1、2、3、4、11、12;关闭阀门5、6、13、14。

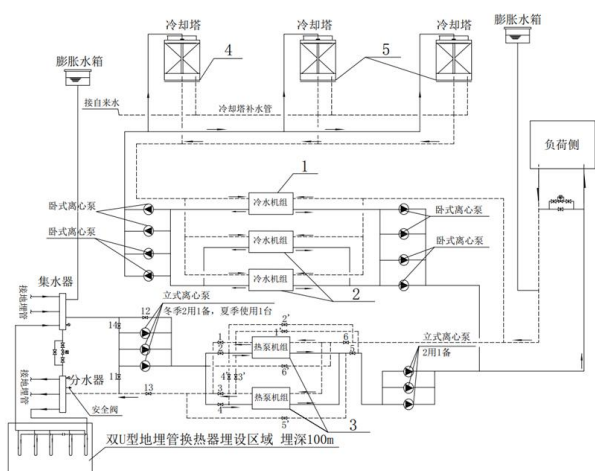


图3 系统流程图

Fig.3 System flow chart

2.2 埋管换热器与辅助冷源设计

(1) 埋管换热器

埋管换热器的换热性能直接关系到系统的运行能效,是地源热泵系统中的重要部分,而工程所在地岩土体的热物性参数是进行埋管换热器设计计算的前提。热响应测试结果表明,该工程所在地岩土原始平均温度为 20.29°C ,综合导热系数为 $2.31\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,综合体积比热容为 $2.36\times 10^6\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 。对DN32双U埋管采用《地源热泵系统工程技术规范(2009版)》GB 50366-2005^[8]中的方法,计算结果显示,冬季工况,设定进水温度 5°C ,管内流速 $0.6\text{m}/\text{s}$ 时,单井延米换热量为 $54.81\text{W}/\text{m}$;夏季工况,设定进水温度 35°C ,管内流速 $0.6\text{m}/\text{s}$ 时,单井延米换热量为

$56.68\text{W}/\text{m}$ 。

由于重庆市属于夏热冬冷地区,本建筑的夏季冷负荷明显大于冬季热负荷,因此考虑到地源热泵系统的冬夏季取放热平衡,埋管换热器总长度根据冬季最大取热量确定。

埋管换热器所能承担的最大取热量与放热量计算公式如下:

$$q_w = \sum [q_h \times (1 - 1/COP)] + S_{q_1} - S_{q_p} \quad (1)$$

$$q_s = \sum [q_c \times (1 + 1/EER)] + S_{q_1} + S_{q_p} \quad (2)$$

式中: q_w 为埋管承担的最大取热量, kW; q_s 为埋管承担的最大放热量, kW; COP 为地源热泵供热工况能效比; EER 为地源热泵供冷工况能效比; q_h 为空调热负荷, kW; q_c 为空调冷负荷, kW; q_1 为输送过程失热量, kW; q_p 为水泵释放热量, kW。

经过机组选型及工况修正,取制热工况时机组COP为4.52,而后两项输送过程失热量与水泵释放热量较小,作为安全量考虑。则埋管换热器可承担最大取热量为 2134.19kW ,根据上述计算结果,冬季工况下单井换热量为 5.481kW ,则需埋管390孔。由于计算所得的冬季最大热负荷属于很少出现的极端负荷,无需考虑过多余量,且从埋管用地与初投资等因素综合考虑,最终确定设计埋管为392孔。

在实际工程中,若钻孔间距较小,埋管群之间往往存在热干扰,造成换热效果的削弱,根据文献[8]中钻孔间距宜为 $3\sim 6\text{m}$ 的规定,同时考虑本项目可供埋管的用地面积有限,埋管换热器采用垂直双U埋管,管径DN32,埋深 100m ,孔径 130mm ,钻孔间距为 4m 。

(2) 辅助冷源

埋管最大放热量 q_s 为埋管数与单井夏季工况换热量之积,其可承担的对应最大冷负荷为 1821.193kW 。其余不足部分均采用冷却塔提供冷源,冷水机组和冷却塔具体选型如表1所示。

2.3 埋管系统设计

(1) 埋管布置

埋管换热器系统布置对运行非常重要。根据前述分析,本项目低负荷率运行时间较多,为利于水力平衡与调节和实现分区节能运行,埋管侧采用同程式布管,并设置两级分集水器。综合负荷率

分布及场地情况,将埋管分为6个分区,除分区4为7组埋管外,其余5个分区均为9组埋管,每组埋管数量为6~8根。

(2) 系统安全

正常情况下,水系统管网形式为闭式,地埋管侧承压主要受地埋管侧开式膨胀水箱标高和循环水泵运行的影响,系统压力可控。但系统中设置有大量的转换阀,若在运行过程中,转换阀启闭不当或发生损坏,埋管侧可能和负荷侧连通,导致埋管底部承压超过1.7MPa,大于其最大承压1.6MPa,因此本工程在地埋管一级分水器处设置安全阀,如图1所示。当压力超过设定值时可自动泄压同时发出警报,从而保障水系统的运行安全。

(3) 系统排气

空调水中一般会有空气存在,因此系统长期使用后,积存的空气就会形成气塞,影响水系统的正常循环。因此系统必须设置排除空气的设备,排气装置应设在系统各环路顶部或者上翻处,常规系统设计时一般不会忽略,但室外地埋管侧的排气装置易被忽略。本工程地埋管系统分为6个分区,且每个分区并联有7~9组地埋管环路,因此在地埋管各分区的每一组末端进水处及每个分区设置自动排气阀,及时排除埋管系统内的空气,保证系统稳定运行,如图4所示。

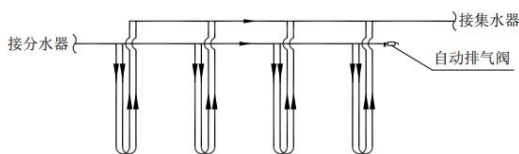


图4 自动排气阀布置示意图

Fig.4 Installation diagram of automatic exhaust valve

2.4 系统运行策略及土壤热平衡校核

制定复合式地源热泵系统的运行策略,总的来说应遵循以下原则:(1)保持系统高效运行;(2)保持地埋管换热器周围岩土的热平衡。系统高效运行主要体现在主机与水泵实现整体高效。其中对于热泵机组与冷水机组,在其他因素不变的情况下,其性能主要与地源侧与冷却塔侧出口水温相关^[9],其主要实现手段为调节系统流量改变地源侧与冷却塔侧的进出水温差,进而改变其出口水温。对于水泵,最常用的运行控制方法则是根据负荷的实时变化对水泵进行变频控制,使其实际运行工况与负

荷相匹配。

此外在冬季,热负荷可以由热泵机组独立承担,而根据相关研究^[10],地埋管分区运行可有效降低系统能耗,因此制定分区运行策略是冬季运行时段的重点。而在夏季,由于需要热泵机组与冷水机组联合供冷,因此需重点考虑以下问题:(1)当前实时负荷是否超出某一冷源容量;(2)如何同时保持热泵机组与冷水机组的高能效;(3)如何控制地埋管的放热量以保持周围岩土的热平衡。其中对于(1),冷却塔容量可由选型得知,而地埋管容量2.2中已明确。而对于(2)(3)则可通过监测机组出水温度与制冷量,以此为依据进行控制。

综上所述,本工程运行控制策略如下:

(1) 监测地埋管与冷却塔的进出水温度,根据温差与出水温度对冷却水泵进行变频调节,此外对于冷却塔还应调节其风机风量,从而达到调节地埋管与冷却塔出水温度的目的;

(2) 在供回水总管间设置压差旁通阀,由供回水总管间的压力差控制用户侧水泵的转速及压差旁通阀的开度;

(3) 监测用户侧进出水温与流量,进而得到实时负荷,并记录各地埋管分区的持续运行时间,结合实时负荷率与持续运行时间,启闭地埋管各分区对应的支管阀门;

(4) 在夏季根据监测得到的实时负荷,判断其是否超出地埋管或冷却塔容量,进而综合考虑当前能否由机组独立承担负荷或进行联合供冷;

(5) 在夏季根据监测得到的地埋管与冷却塔的出水温度,对二者进行比较,在热泵机组与冷水机组均可独立承担实时冷负荷的情况下,优先运行出水温度低的对应系统;

(6) 监测热泵机组流量与进出水温差,换算到供热/制冷量,进而得到地埋管的累计取/放热量,以此为依据判断在夏季是否需要继续运行热泵机组,从而维持岩土体的热平衡。

根据上述运行控制策略,对本工程地源热泵复合系统进行运行模拟分析,计算得到在夏季由冷却塔承担的累计冷负荷为3261.57MWh,地埋管所承担的累计冷负荷为1848.85MWh。土壤全年累计放热量为1518.10MWh,累计吸热量为1387.41MWh,经过校核计算,该复合系统全年冬夏季热不平衡率为9.42%,小于20%,满足冬夏季热平衡要求。

3 系统运行情况

该项目于2021年1月投入运行,在2021年3月和8月分别进行了冬、夏季机组及系统能效测试。主要测试参数包括地源侧进出水温及流量、空调侧进出水温及流量、机组和水泵功率等。

实测发现:地源热泵机组冬季供回水温度为44.2/40.3℃,温差为3.9℃,地源侧水温13.5/8.3℃,温差5.2℃,机组能效比4.30,略低于设计能效比4.52,系统能效比3.64,略低于设计能效比3.7;夏季供回水温度为11.1/7.4℃,温差为3.7℃,地源侧水温34.4/30.2℃,温差4.2℃,机组能效比5.18,略低于设计能效比5.59,系统能效比3.94,略低于设计能效比4.35。

系统应进一步调试,提高相关参数监测与控制的准确程度,改善地埋管与冷却塔出水温度,并优化水泵、风机运行策略,与实时负荷匹配,克服大流量小温差问题,挖掘系统节能潜力。

4 结论

(1) 根据建筑负荷计算结果,对系统设备进行设计选型以满足用户需求,并针对热泵机组的不同运行模式设计了切换方案。同时结合热响应测试结果与工程实际情况,对地埋管换热器进行了设计。

(2) 在地埋管一级分水器处设置安全阀,并在地埋管各分区的每一组末端进水处及每个分区设置自动排气阀,提升了系统运行的安全性与稳定性。

(3) 以保持系统高效运行与土壤热平衡为目的,制定了对应的运行策略。经过校核计算,本工

程系统的热不平衡率为9.42%,满足热平衡要求。

(4) 根据实测数据分析,机组及系统有较高的运行能效,但相比于设计值尚有差距。应对运行策略中各相关参数进行更准确的监测与控制,与实时负荷相匹配,从而优化系统运行,实现节能。

参考文献:

- [1] 朱永松,罗蒙,甘宁,等.大型综合性医院节能管理的分析与对策[J].中国医院,2011,15(2):73-75.
- [2] 李强.医院用能特点与暖通空调系统节能[J].建设科技,2013,(7):64-66.
- [3] 石媛,闫增锋.医院建筑节能研究进展及问题综述[J].华中建筑,2018,36(10):21-25.
- [4] 赵耀.夏热冬冷地区地源热泵长期运行下的土壤热平衡分析[D].长沙:中南大学,2013.
- [5] 狄彦强,张振国,张志杰,等.既有医院建筑空调系统现状[J].暖通空调,2018,48(3):35-39.
- [6] 林爱麟.长沙市医院建筑能耗的实测与分析[D].长沙:湖南大学,2009.
- [7] 宋芳婷,诸群飞,吴如宏,等.中国建筑热环境分析专用气象数据集[C].全国暖通空调制冷2006学术年会资料集,2006:1.
- [8] GB 50366-2005(2009),地源热泵系统工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [9] Yi M, Hongxing Y, Zhaohong F. Study on hybrid ground-coupled heat pump systems[J]. Energy and Buildings, 2008,40(11):2028-2036.
- [10] 韩浩然.重庆某土壤源热泵工程地埋管系统分区运行策略研究[D].重庆:重庆大学,2015.