



复合式地源热泵系统 在既有建筑节能改造中的应用分析

中国城市建设研究院有限公司 ■ 王哲* 白旭光

摘要：为响应国家对于改造项目应用浅层地热清洁能源的号召，该文结合某温泉疗养院既有建筑的实际情况，对项目进行优化设计，通过模拟软件分析岩土的热物性实验数据及地埋管换热器埋管间距与形式的影响程度；通过优化系统形式和系统分区，对系统土壤热平衡进行分析，最终确定了一套合理的节能改造方案。经过调研后发现，该设计实现了良好的经济效益和环境效益，彰显了地源热泵在清洁能源应用领域的发展地位，可加快推动我国扎实实现可持续发展能源战略的方针政策。

关键词：复合式；地源热泵；既有建筑；节能；浅层地热；经济效益；环境效益

0 引言

为进一步优化能源结构，改善空气质量，建设国际一流的和谐宜居之都，扎实推进《北京市“十二五”时期能源发展建设规划》提出的关于加快新能源和可再生能源开发利用的方针政策，以“因地制宜、多能互补、重点突破、政策配套”为原则^[1]，重点开发北京地区的地热能。

众所周知，地源热泵系统在既有建筑中的应用主要面临两大难题：一是建筑场地受限制，厂区内空闲土地面积较少、分散且不规则，存在设计系统不宜划分和地埋管换热器的布置场地不足等问题；二是系统设计不合理，若地埋管换热器的设计选型不合理，会导致系统实际运行效果差，甚至增加工程造价等，这主要是由于各地岩土的热物性存在差异造成的^[2-3]。本项目通过优化能源结构，分析岩土换热特性，

对以往设计中地埋管换热器布置间距不合理、埋管形式选择不当和土壤热堆积等问题进行优化设计；通过对地源热泵系统在既有建筑中的应用进行阐述和分析，旨在为该地区地热能开发利用及合理的系统设计提供参考。

1 项目概况

本项目位于北京市昌平区某温泉疗养院，总建筑面积为 10.47 万 m²，多年来主要采用 2 台容量分别为 4 蒸吨和 10 蒸吨的燃煤蒸汽锅炉和 1 台 7 MW 的燃煤热水锅炉进行冬季供暖。据统计，该疗养院采暖季年均耗煤量达 2619 t；全年耗标准煤量为 2250 t，排放 CO₂ 5557 t、SO₂ 45 t、粉尘等大气污染物 32.5 t。这种采暖方式的能源利用率低，资源浪费严重，因此，对其进行节能改造势在必行。

收稿日期：2018-10-09

通信作者：王哲（1991—），女，硕士、暖通工程师，主要从事地源热泵技术方面的研究。1132782303@qq.com

本项目根据既有建筑的供能需求情况,通过合理优化系统形式,选用复合式地源热泵系统设计,减少了地埋管的初投资费用,在保证系统稳定运行的同时,也取得了良好的环境效益。

2 地埋管换热器的换热性能分析

由于地埋管换热器的换热性能与地质结构直接相关,其传热受地质构造、岩层的产状、地下流体的影响较大,宜通过理论分析与实验来确定本区域地埋管换热器的换热性能。

根据项目既有建筑物的布局特点,结合本次地质勘察区域的水文地质条件,场区地形、地势条件,以及现场施工条件等诸多因素,共设1#和2#2个测试井。单个测试井的孔径为180 mm,井深为130 m,将长130 m的双U形HDPE管插入测试井,测得测试井无加热供水和加热供水2种工况下共计96 h的数据。利用瞬时系统模拟程序(TRNSYS)提供的气象数据,综合地质勘察设计院勘察的地质、地理条件,模拟地埋管换热器在热交换达到稳态情况时测得的数据,实验结果如图1~图3所示。

根据图1~图3中的数据,计算得到该地区地下的原始温度为15.5℃左右。通过软件模拟和理论计算分析得到项目地点的地下综合导热系数为2.1 W/(m·K),容积比热容为920 J/(kg·K);130 m双U形地埋管换热器的综合换热率为30000~34000 kJ/h,平均放热量为

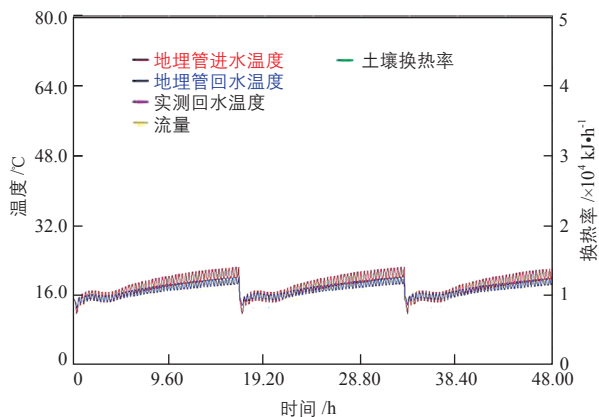


图1 无加热供水时的进、回水温度

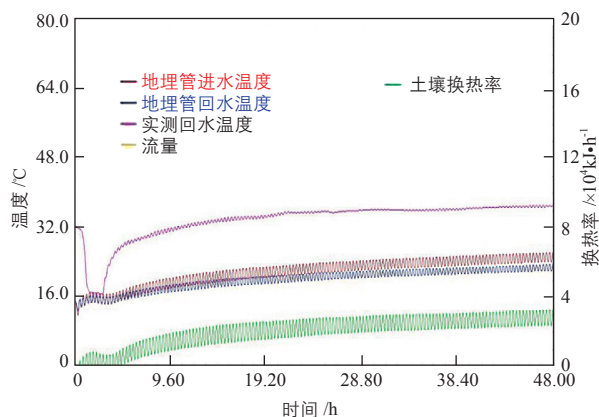


图2 1#测试井中的进、回水温度

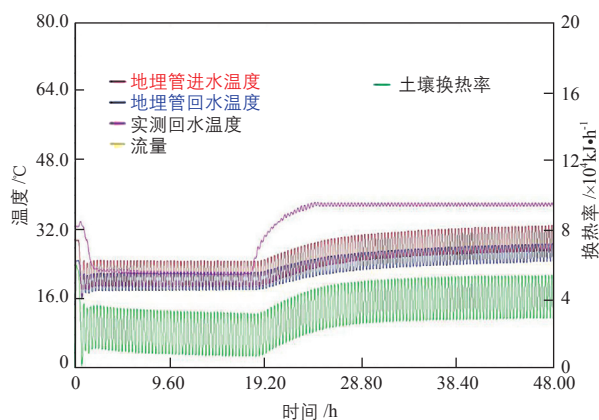


图3 2#测试井中的进、回水温度

68.3 W/延米,平均吸热量为45.6 W/延米。可见,本区域土壤初始温度较高且换热性能好,较适宜开发利用浅层地热能。

3 地埋管换热器的设计

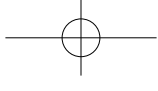
3.1 地埋管换热器的埋管形式

在地源热泵系统中,地埋管换热器的埋管形式有竖直埋管和水平埋管两种^[4]。根据既有建筑厂区内作业面的实际情况、项目所在地的岩土类型及挖掘成本,同时考虑到减小占地面积、减少地埋管受地面温度的影响、提高地埋管换热器的换热性能等因素,本次地埋管换热器采用竖直埋管、同程式方式,以保持各环路之间的水力平衡。

3.2 地埋管井的钻孔间距与地埋管形式的确定

3.2.1 钻孔间距对累计温升的影响

考虑到系统冬、夏季均使用,并要平衡土壤的取、放热量,运用GLD软件对不同钻孔间距



的埋管井群长期运行后土壤的温度变化(与原始土壤温度相比)情况进行了模拟,如图4所示。

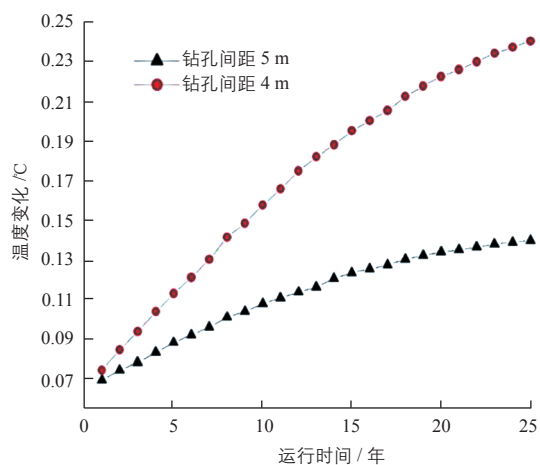


图4 不同间距的温度变化情况

从图4中可以看出,运行15年后,钻孔间距为4 m的地源热泵系统的土壤温度升高0.20℃左右,而采用钻孔间距为5 m的地源热泵系统的土壤温度只升高0.12℃左右;运行25年后,钻孔间距为4 m的地源热泵系统的土壤温度变化比钻孔间距为5 m的高出0.10℃左右。同样,余斌等^[5]建立了6×6和12×12井群模型,研究了钻孔间距对于埋管群换热的影响,并得出钻孔间距越大,埋管换热器的换热效率越大的结论。

若从换热性与安全运行的角度考虑,埋管换热器的布置间距为5 m时可减缓土壤的热堆积效应,系统运行更安全。

3.2.2 单U、双U形式的选择

从换热性能方面分析,在排热工况与取热工况下,双U形埋管的单位井深换热性能均比单U形的高;从投资成本考虑,单U形埋管的经济性较优^[6]。若仅从短期的换热性能或投资成本考虑,二者的选择有较大差别,但从长远来看,选择双U形埋管更优。

3.3 埋管相关设计的确定

通过以上模拟分析,综合考虑施工、安全系数等方面的因素后,本次设计将双U形埋管换热器竖直埋管,埋管间距为5 m,以保证系统的换热性能良好。

3.4 埋管换热器的布置

埋管换热器的布置以“保证利于换热、避免热堆积、降低初投资”为设计原则,利用既有建筑周边绿地、广场、停车场、马场等空地,结合疗养院既有建筑供能需求及负荷需求差异,采用复合式地源热泵系统,并对埋管换热器进行经济合理的分区布置。

根据疗养院总负荷需求及延米换热数据,共需埋管123890延米,按间距5 m、井深130 m计算,需布孔953个。其中,一区布置区主要利用游泳馆周边绿地、广场、停车场,共布孔398个;二区布置区设置在竹林温泉东侧停车场,共布孔58个;三区布置区主要利用北侧马场,共布孔497个。

为保证每个分区的埋管换热器在不同负荷需求下的经济流速及换热能力,将每个分区划分为若干子分区,每个子分区设5~6组分集水器,实现不同负荷需求下的运行调节,同时利于埋管换热器的系统检修。

4 能源站的设计

地源热泵系统中的热泵机组及配套设施统称为能源站,能源站的布置以“靠近负荷较集中的区域”为原则,保证地源热泵系统的能量损失最小;地源热泵机组等设备的配置根据冷热负荷需求及技术经济性确定,最终配置方案如表1所示。

通过表1可以看出,能源站1和能源站3的累计冷负荷远大于累计热负荷,因此,将能源站1和能源站3采用冷却塔辅助的复合式地源热泵系统。此种设计将埋管作为冬季取热、夏季排热的主要冷热源,将冷却塔作为夏季辅助冷源,其可实现以下2个目标:

1) 提高热泵机组的运行效率。通过调节地下换热器的间歇运行,冷却塔辅助排热,以维持地下换热器长期稳定运行,保证热泵机组进水口温度稳定,实现其高效运行。

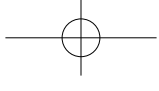


表 1 能源站配置表

	服务面积 /m ²	负荷需求 /kW		配置容量 /kW		配置方案	服务区域
		热负荷	冷负荷	制热能力	制冷能力		
能源站 1	46955	2941	4690	2974.2	4736.2	2 台热泵机组、1 台高效冷水机组、冷却塔	游泳馆、大酒店、康体会展中心
能源站 2	4401	320	396	435.6	434.2	2 台热泵机组	餐厅
能源站 3	53391	3442	5634	3624.8	5750.3	2 台热泵机组、1 台高效冷水机组、冷却塔	花园别墅

2) 降低初投资。采用复合式地源热泵系统一方面可以缩短地埋管换热器的设计长度,减少地埋管换热器的数量;另一方面可以减少占地面积,从而在整个系统的初投资方面节省大量费用。

5 地源热泵系统冷热平衡分析

5.1 浅层岩土体地热能储量

根据建设场地测试孔及地下水动态资料显

示,项目所在地 130 m 深度内,地下水位埋深取 26.0 m。水位以上,粉土层厚度为 3 m(将回填土算入该层),粉质粘土层厚度为 12.5 m,白云岩层厚度为 20.5 m;水位以下,白云岩层厚度为 94 m。不同岩性参数如表 2 所示。

根据建设场地附近区域地层分布情况计算该地区 130 m 深度内地热能储量,采用热储法计算浅层地热能储量,应分别计算包气带和饱水带中的单位温差储热量。

表 2 不同岩性参数表

岩性	比热容 /J·(kg·°C) ⁻¹		孔隙率		密度 /kg·m ⁻³		天然含水率	
	包气带	饱水带	包气带	饱水带	包气带	饱水带	包气带	饱水带
粉土	1.003	—	0.42	—	1750	—	0.08	—
粉质粘土	1.379	—	1.47	—	1780	—	0.15	—
白云岩	0.920	0.92	裂隙率 0.15		2700	2700	0.10	—

5.1.1 包气带热储量的计算

在包气带中,地热能的储存量 Q_{R1} 的计算式为^[7]:

$$Q_{R1}=Q_S+Q_W+Q_A \quad (1)$$

式中, Q_S 为岩土体中的热储存量, kJ; Q_W 为岩土体所含水中的热储存量, kJ; Q_A 为岩土体中所含空气中的热储存量, kJ。

岩土体中的热储存量 Q_S 的计算式为:

$$Q_S=\rho_s C_s(1-\phi)Md\Delta T \quad (2)$$

式中, ρ_s 为岩土体密度, kg/m³; C_s 为岩土体比热容, kJ/kg·°C; ϕ 为岩土体的孔隙率(或裂隙率); M 为计算面积, m², 此处为地下换热器的占地面积; d 为岩土体计算厚度, m; ΔT 为利用温差, °C, 此处取 1 °C。

岩土体所含水中的热储存量 Q_W 的计算式为:

$$Q_W=\rho_w C_w \omega Md\Delta T \quad (3)$$

式中, ρ_w 为水的密度, kg/m³; C_w 为水的比热容, kJ/kg·°C; ω 为岩土体的含水量。

岩土体中所含空气中的热储存量 Q_A 的计算式为:

$$Q_A=\rho_A C_A(\phi-\omega)Md\Delta T \quad (4)$$

式中, ρ_A 为空气的密度, kg/m³; C_A 为空气的比热容, kJ/kg·°C。

通过计算得出,该项目所在地中包气带(0~26 m)每变化 1 °C,需吸收或排放的总热储量 Q_{R1} 为 1.6×10^9 kJ。

5.1.2 饱水带热储量的计算

饱水带主要包括含水层和相对隔水层,在含



水层和相对隔水层中,地热能的储存量 Q_{R2} 的计算式为^[7]:

$$Q_{R2}=Q_s+Q_w \quad (5)$$

岩土体中的热储存量 Q_s 的计算式为:

$$Q_s=\rho_s C_s(1-\phi) M d_1 \Delta T \quad (6)$$

式中, d_1 为地下水面至计算下限的岩土体厚度, m。

岩土体所含水中的热储存量 Q_w 的计算式为:

$$Q_w=\rho_w C_w \omega M d_1 \Delta T \quad (7)$$

通过计算得出,该项目所在地中饱水带

(26 ~ 130 m) 每变化 1 °C, 需吸收或排放的总热量 Q_{R2} 为 4.9×10^9 kJ。

根据包气带和饱水带热储量的计算结果,地源热泵系统影响范围内地质体(0~130 m)每变化 1 °C, 释放或吸收的热量约为 $Q_R=Q_{R1}+Q_{R2}=6.5 \times 10^9$ kJ。

5.2 地源热泵系统与浅层岩土体换热量

根据能源站系统配置,考虑制冷天数为 120 天,供暖天数为 120 天。地源热泵系统使用时的季节系数根据我国行业标准 JB/T 4329-97 和美国 ARI 标准执行。则地源热泵系统与浅层岩土体换热量计算如表 3 所示。

表 3 地源热泵系统与浅层岩土体换热量计算表

		冷(热)负荷 /kW	$\frac{EER}{COP}$	辅助冷源 /kW	运行天数 /天	小时数 /h	负荷 系数	Q_h 或 Q_c / $\times 10^9$ kJ
夏季	能源站 1	4690	5.5	1790	120	12	0.68	12.08
	能源站 2	396	5.5	—	120	8	0.6	0.97
	能源站 3	5634	5.5	2040	120	14	0.68	17.47
	小计	10720	—	—	—	—	—	30.52
冬季	能源站 1	2941	4.5	—	120	24	0.56	13.28
	能源站 2	320	4.5	—	120	24	0.50	1.29
	能源站 3	3442	4.5	—	120	24	0.56	15.54
	小计	6703	—	—	—	—	—	30.11
夏、冬季换热量差值								0.41

注: EER 为地源热泵的能效比; COP 为地源热泵的循环性能系数; Q_h 为夏季最大释热量; Q_c 为冬季最大吸热量

综上所述,经过 1 个制冷季与供暖季后,地源热泵向浅层岩土体所放出的热量与其从浅层岩土体侧吸收的热量差值为 0.41×10^9 kJ。地源热泵系统影响范围内的地质体(0~130 m)每变化 1 °C, 释放或吸收的热量约为 6.5×10^9 kJ, 因此,地源热泵系统运行 1 年导致土壤温度上升 0.06 °C。然而,热泵系统的间歇运行管理、地下水流动对地层散热的影响等均有利于土壤温度的恢复。总体而言,地源热泵系统对地层温度的影响不大。

6 经济效益与环境效益

6.1 经济效益

经回访调研发现,本项目进行节能改造后,

冬季采暖和夏季制冷系统年消耗电力约 826.72 万 kWh,年能耗总量折合成标准煤为 1016.04 t,相当于 9.70 kg 标准煤 / m² 的能耗水平,与现阶段北京市同类高级酒店约 14 ~ 17 kg 标准煤 / m² 的能耗水平相比有较大幅度地降低,节能效果显著。系统能耗指标表如表 4 所示。

表 4 系统能耗指标表

能源消耗 种类	年总消耗量 /万 kWh	折合的标 准煤量 /吨标准煤	单位面积 能耗 /kg 标准煤 · m ⁻²
制冷季电耗	310.56	381.67	3.64
供热季电耗	516.16	634.36	6.06
合计	826.72	1016.04	9.70

注: 年需要折合的标准煤量(吨标准煤) = 年需要实物量 × 参考折标系数; 电力参考折合标准煤系数为 0.1229 kgce/kWh^[8]。
(转第 78 页)



由表 3 可知, 出现峰值电压 (通电) 超过 100 V 的概率为 1%, 当接线盒两端电压峰值超过 100 V 时, 接线盒二极管有击穿失效的风险。

对接线盒两端施加 103 V 电压, 测试 2 次后接线盒二极管均击穿失效, 测试该二极管电性能后发现, 反向漏电 I_R 、反向压降 V_{DR} 均不合格。

3 设备异常排查

使用数字示波器对各测试设备在进行组件测试时的电压情况进行了全程跟踪观察, 并记录分析测试数据, 排查可能存在过大电压的测试设备。表 4 为各测试设备进行测试时的电压情况。

表 4 各测试设备进行测试时的电压情况

测试设备	测试时的电压 / V	峰值电压 / V	二极管是否击穿失效
EL 检测仪 1	48.5	51.2	否
电性能测试仪	50.4	78.4	否
EL 检测仪 2	52.0	119.0	是

由表 4 可知, EL 检测仪 1 的峰值电压为 51.2 V、设备测试时的电压为 48.5 V, 电性能测试仪的峰值电压为 78.4 V、设备测试时的电压为 50.4 V, EL 检测仪 2 的峰值电压为 119.0 V、测

试时的电压为 52.0 V。EL 检测仪 2 在检测组件过程中出现超过 100 V 的峰值电压, 是由其稳态电源空气开关接触不良造成的, 从而导致接线盒二极管击穿失效。对 EL 检测仪 2 更换固态接触开关后再进行测试, 其峰值电压为 54 V, 满足测试要求。

4 结论与建议

本文针对光伏组件生产过程中出现的接线盒二极管击穿失效现象进行了分析, 得出以下结论:

- 1) 35 A 顺向电流会对二极管造成击穿失效, 但该电流出现的概率仅约为 5%。
- 2) 生产中的最高温度 480 °C 未对二极管的电性能产生影响, 但仍建议对焊接温度进行管控, 当长时间高温焊接后, 热量很容易传导到内部芯片, 容易使芯片损伤。
- 3) 组件在 EL 测试过程中受到过大电压冲击会导致接线盒二极管击穿失效。

参考文献

- [1] EN 50548-2011, 光伏组件接线盒 [S].
- [2] 杨松, 诸荣耀, 沈道军, 等. 光伏电站旁路二极管应用失效分析 [J]. 太阳能, 2015, (3): 36 - 46. 太阳能

(接第 75 页)

6.2 环境效益

通过分析改造前后的能源消耗量发现, 改造后每年可减少排放 CO₂ 3050 t、SO₂ 24.7 t、粉尘等大气污染物 26.796 t, 取得了良好的环境效益。

7 结论

浅层地热能属于可再生清洁能源, 其开发利用符合我国能源发展战略。对于地源热泵系统是否适用于既有建筑节能改造, 首先取决于是否有充足的场所, 与此同时需综合考虑工程所在地的土壤温度、建筑物负荷情况、工程地质情况等因素, 利用节能、高效、无污染的热泵技术, 通过优化地埋管换热器设计, 打造专属工程, 以保证

良好的经济效益和环境效益。

参考文献

- [1] 乔渊, 牛寅平, 李欣. 北京市可再生能源建筑应用示范工作 [J]. 建设科技, 2012, (5): 28 - 30.
- [2] 李敏. 地埋管地源热泵系统的区域适应性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [3] Kavansugh S P. Field tests for ground thermal properties methods and impact on ground-source heat pumps [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2): 347 - 355.
- [4] GB 50366-2009, 地源热泵系统工程技术规范 [S].
- [5] 余斌, 王洋浩, 颜亮. 钻孔间距和布置形式对地埋管管群传热影响研究 [J]. 制冷空调, 2010, 10(5): 31 - 34.
- [6] 薛玉伟, 季民, 李新国, 等. 单 U、双 U 型埋管换热器换热性能与经济性研究 [J]. 太阳能学报, 2006, 24(4): 410 - 413.
- [7] 韩再生. 浅层地温能评价方法 [A]. 2007 年地温能与热泵技术应用高层论坛 [C]. 北京, 2013.
- [8] 李曼. 地源热泵空调系统在草莓产业核心区的技术经济分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012. 太阳能