

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-444-05

# 无锡某生态大楼 “以电代气”地源热泵改造工程解析

赵 兰<sup>1</sup> 张雄波<sup>2</sup>

(1. 南京工业大学浦江学院 南京 211222;

2. 特灵空调系统(中国)有限公司 南京 211112)

**【摘要】** 由于原空调系统运行费用较高, 无锡某生态大楼实施了“以电代气”空调系统改造项目。基于原空调系统设计, 对既有建筑进行了地源热泵系统改造。从水系统设备、管路设计、埋管管量、施工技术等方面对工程实施进行了介绍, 为类似地源热泵改造工程提供参考。

**【关键词】** 地源热泵; 以电代气; 节能设计

中图分类号 TU832 文献标识码 A

## Analysis of the ‘Electricity Replacing Gas’ Ground Source Heat Pump Reconstruction Project in an Ecological Building in Wuxi

Zhao Lan<sup>1</sup> Zhang Xiongbo<sup>2</sup>

(1. Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing, 211134;

2. Trane Air Conditioning Systems (China) Co., Ltd, Nanjing, 211112)

**【Abstract】** Due to the high operating cost of the air-conditioning system, a building in Wuxi implemented a renovation project of ‘Electricity Replacing Gas’. Based on the original system, a ground source heat pump system was updated to replace the traditional system. This article introduced the project implementation from the aspects of water system equipment, pipeline design, underground pipe calculation, construction technology, etc., to provide a reference for similar ground source heat pump renovation projects.

**【Keywords】** ground source heat pump; electricity replacing gas; energy saving design

作者简介: 赵 兰 (1982.12-), 女, 硕士, 讲师, E-mail: 94386994@qq.com

通讯作者: 张雄波 (1979.09-), 男, 本科, 工程师, E-mail: 50923871@qq.com

收稿日期: 2021-07-01

## 0 引言

地源热泵与燃煤、燃油、燃气锅炉相比, 最显著的优势是绿色环保、能效高、费用低、占地面积小、使用寿命长、运用范围广<sup>[1]</sup>。“十三五”国家能源规划调整推进电能替代, 旨在通过“以电代煤”、“以电代油”、“以电代气”等策略调整能源消费结构、改善环境质量。近年来, 地源热泵技术的推广已由最初的政策驱动转变为市场理性选择。由于地源热泵技术的经济优势和环保价值, 该技术

不仅在新建建筑中推广迅速, 对既有建筑采暖供热及冷热联供改造的市场也日趋活跃。与传统的锅炉供热系统相比, 锅炉供热只能将 90% 以上的电能或 70~90% 的燃料内能转化为热量, 而地源热泵每输入 1kW 的电能, 可以得到 5kW 以上的热量。因此地源热泵比电锅炉加热节省三分之二以上的电能, 比燃料锅炉节省约三分之一的能耗。

地源热泵作为一种高效的环保节能绿色产品, 在居住建筑和公共建筑中都有着广阔的应用前景。

任永林<sup>[2]</sup>等人在贵州省毕节市针对某医院的地源热泵系统,通过分析系统 COP 与机组 COP 对地源热泵在大型公共场所运行情况进行评价,各数据说明地源热泵系统在公共区域具有可行性并且有较好的应用前景。同时,住宅建筑中引入地源热泵也成为打造绿色建筑、智慧社区的一大亮点。不同城市的国土资源厅也对区域地热能源开发利用的潜力进行勘察,并构建了地源热泵适宜性评价指标体系。为地源热泵的推广和浅层地热能源利用提供了参考<sup>[3]</sup>。针对建筑周边埋管场地面积受限的问题,鲍超等人研发出在建筑底板下方布置换热孔的方式,针对不同规划条件、场地条件及建筑物基础形式,综合考虑埋管系统设计及使用要求,提出了包括地下非集管无接头边坡敷设式、地下非集管无接头下穿板式等多种埋管系统连接工艺<sup>[4]</sup>。更安全的连接及敷设方式为拓宽地源热泵使用范围奠定了技术基础。同时,埋管换热性能的研究,地源热泵与太阳能、空气源、余热利用等多能联合,蓄能型地源热泵技术等都有利于发掘地源热泵系统的节能潜力。

## 1 工程概况

本项目为无锡某光伏板与玻璃幕墙围护结构一体化生态建筑。建筑包括研发中心及活动中心 2 幢楼,总建筑面积 16300m<sup>2</sup>。其中办公楼 11500m<sup>2</sup> (含地下室),活动中心 4800m<sup>2</sup>。建筑夏季总冷负荷为 1800kW,其中研发楼 1000kW,活动中心 800kW。冬季总热负荷为 1150kW,其中研发楼 650kW,活动中心 500kW。

## 2 既有建筑空调系统设计

建筑冷源为一台单制冷用螺杆机组,制冷量 969kW,制热量 1060kW,制冷时机组总输入功率为 200kW。热源由厂区集中设置的燃气锅炉提供采暖热水。夏、冬季分别通过两套水系统输送冷、热水至末端空气处理机组以及吊顶辐射系统。冷热水循环设两套驱动水泵、季节阀门手动转换。

空调系统末端由两部分组成:(1)研发楼为 AHU 全空气低速送风系统,由设于机房的 2 台 30000m<sup>3</sup>/h 风量的新风机组进行空气调节,回风通过回风管道接入地下机房的新风机组,系统设有转轮热回收的节能装置。(2)活动中心末端形式为

AHU 全空气低速送风系统和天花辐射制冷、采暖。一层大厅采用条缝形送风口地板送风,一层餐厅采用球形喷口侧送风,活动中心顶部钢屋架内固定百叶集中回风。末端的节能设计为系统改造提供了基础和开发潜力。

空调系统投入使用后满足设计要求,但由于锅炉供热能效较低,锅炉房距离远,能源价格持续上涨等因素导致建筑全年电能消耗与锅炉燃气消耗总费用较高。

## 3 空调系统改造设计

系统改造设计方案为:取消原有的锅炉、热水循环管路供热系统;取消原有冷却塔及冷却水循环管路;增加地源热泵埋管系统,采用地源热泵进行供冷、供热,以电能代替锅炉耗气;实现季节阀门自动转换。系统设计原理如图 1 所示。

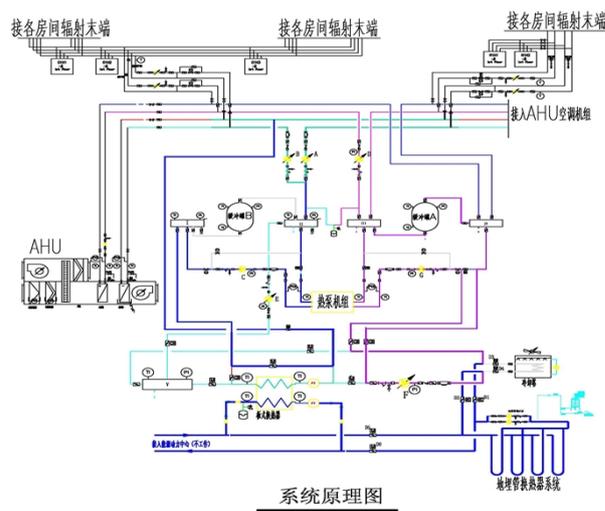


图 1 地源热泵系统改造原理图

Fig.1 Schematic diagram of ground source heat pump system

改造后,空调系统能够保证冷热源温度要求、末端工作模式,也可实现夜间“自然冷却”模式,即在夏季地源热泵主机不开启的情况下,直接由水泵驱动埋管环路与吊顶辐射末端循环进行换热。该模式可以削减建筑峰值负荷、降低建筑日负荷和空调能耗,从而降低主机配置容量、缩减主机工作时间,节省改造投资和运维费用。整套系统低维护,安全,舒适,空气品质高。

### 3.1 水系统设计

(1)分水器和集水器:分水器和集水器是热

泵机组与埋管换热系统各个环路间的供回水“通道”，是输送热泵系统换热介质的“中转站”。分、集水器由直径较大的管段制成，以减少流体的沿程阻力损失。埋管采用垂直埋管<sup>[5]</sup>。分、集水器（井）与各环路连接如图 2 所示。

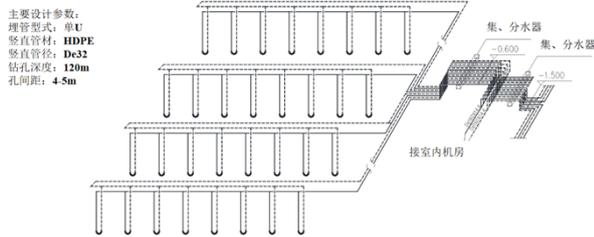


图 2 分、集水器与管路连接图

Fig.2 Connection diagram of water collector and pipeline

(2) 环路：管道自分水器引出，经过水平沟渠及竖埋孔后再返回，各环路均最后连接到集水器，如图 3 所示。

(3) 同程式系统设计：同程式管道布置使并联系统各环路都有相同的进出口压力，用于消除总集水管沿程阻力损失的影响。

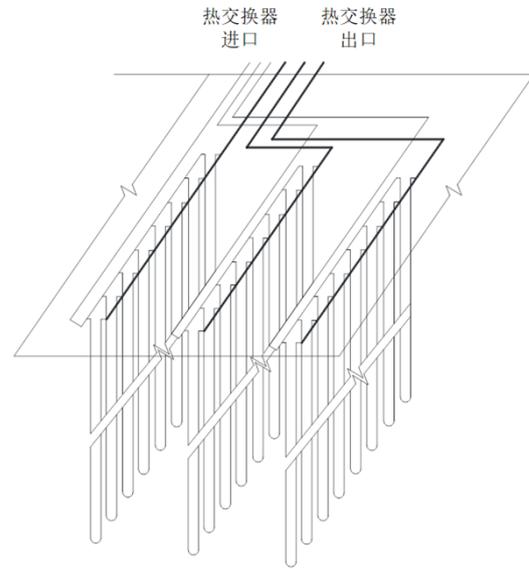


图 3 埋管环路

Fig.3 Buried pipe loop

(4) 单孔换热能力测试：本项目由华中科技大学环境科学与工程学院地源热泵研究所提供地源热泵土壤热物性测试并出具报告，如表 1、表 2 所示。

表 1 测试参数及岩土热物性

Table 1 Test parameters and ground thermo-physical properties

测试井	有效埋管深度 (m)	循环水流量 (m <sup>3</sup> /h)	埋管平均进水温度 (°C)	埋管平均出水温度 (°C)	平均加热功率 (W)	综合导热系数 [W/(m·K)]	岩土容积比热容 [J/(m·K)]	岩土初始平均温度 (°C)
1 号	120	1.411	31.1	28.0	5055.0	2.15	2.49*10 <sup>6</sup>	18.7
2 号	120	1.427	31.5	28.4	5157.9	2.10	2.37*10 <sup>6</sup>	18.7

表 2 钻孔单位延米（孔深）换热量

Table 2 Borehole heat exchange per linear meter

测试井	钻孔单位延米（孔深）换热量 (W/m)	制冷（制热）运行份额			埋管中传热介质设计温度 (°C)		备注
		0.2 (4.8h/d)	0.25 (6h/d)	0.3 (7.2h/d)	制冷工况	制热工况	
		1 号	夏季排热量	62.5	59.0	55.8	
	冬季排热量	45.7	43.2	40.9			
2 号	夏季排热量	61.2	57.8	54.7			
	冬季排热量	44.8	42.3	40.0			

考虑到测试初始阶段埋管换热处于不稳定状态，计算时均舍弃了部分时段，采用稳定时段数据。同时本项目埋管计算以夏季负荷为准，取埋管单孔综合换热量 57.45W/m 作为计算依据。

(5) 确定埋管管道的长度：埋地管道的确定以换热器的构造设计为前提。同时还需结合相应深度

土壤的温度和热传导特性。步骤如下：①确定地下管道的位置；②确定地下土壤的温度；③确定热泵的最大和最小进水温度；④计算土壤和地下换热器之间的温差；⑤计算管道对流体的流阻；⑥计算土壤的热阻；⑦必要的软件辅助，最后得出埋地换热器的总长度。本项目主要设计项目及参数如表 3 所示。

表 3 地源热泵水系统设计内容

Table 3 Ground source heat pump water system

项目	设计内容	备注说明
埋管材料	竖直、水平管、环路集管: HDPE 管; 分集水器总管: 塑套钢直埋保温管, De200	高密度聚乙烯管材, De32×2.9mm (外径 32mm, 壁厚约 2.9mm), 额定承压能力为 1.6MPa
埋管形式/换热孔间距	竖直单 U, 东西方向 4m 孔间距, 南 北方向 5m 间距	从该地区岩土结构、富含水性以及成本和换热能力综合 考虑, 确保经济、合理、可操作性
钻孔深度及孔径	120m, Φ130mm	根据项目地勘资料, 且尽可能减少园区地质的扰动 依据岩土层结构, 膨润土的比例约占 8% 左右, 选适当 比例取出的泥沙浆用作灌浆料; 灌浆管和 U 型管同时插 入孔底, 泥浆泵通过灌浆管将回填混合浆料灌入孔中, 由下至上回填
回填材料/回填方式	采用膨润土和细沙与原浆的混合浆 材料, 由下至上回填	
埋管侧水系统	合理孔数连接成环路, 环路集管再 通过水平沟汇集, 各环路中均安装 平衡调节阀; 采用同程式布置; 设 一级, 二级集分水器	水系统设计尽可能减少埋管侧的阻力损失, 且各 U 型孔 水量均匀, 以发挥最大换热能力

3.2 埋管量计算

埋管循环水作为主机系统运行的冷、热源,  
管道长度按埋管承担的峰值排热量 1260kW 设

计计算。参考第三方测试单位提供的测试报告结论,  
计算结果如表 4 所示。

表 4 埋管长度计算

Table 4 Buried pipe length calculation

下管深度 (m)	夏季总排热量 (kW)	竖埋管总长度 (m)	埋管单孔换热能力 (kW)	孔数	竖井总长度 (m)	占用埋管面积 (m <sup>2</sup> )
121.5	1260	4.32 万	6.98	180	2.16 万	4000

在建筑物周围布置垂直单 U 埋管, 管孔共  
计 180 个。外管路设置 4 个区域检查井, 1 个区域  
总井。每个区域 6 个环路, 36/42/48/54 个竖直孔,  
区域总管管径 De110; 各环路分别由 6/7/8/9 个竖  
直孔组成, 环路总管管径 De63。系统集分水器总管  
管径 De200。各区域以及区域所辖的各环路之间,  
水流量分配均通过 TA 平衡阀来调节。

时, 应使用泥浆泵通过灌浆管将混合浆灌入孔中。

(2) 管道连接

HDPE 埋地管道采用热熔或电熔的方法连 接  
[3]。≤De110 的管道, 采用电熔或热熔承插连接 >  
De110 的管道, 宜采用热熔对接连接。PE 管热熔  
承插深度如表 5 所示。

表 5 PE 管热熔承插深度

Table 5 PE pipe hot melt socket depth

管子外径/mm	熔入深度要求/mm
32	20
40	22
50	25
63	28
75	31
90	35
110	39

4 埋管主要施工技术

(1) 钻孔、下管、回填

针对建筑所在地地质情况, 采用国内先进的  
GXY-2 (300 型) 工程钻机。钻孔深度 120m, 由  
于孔内地下水 (或泥浆) 水位较浅, 主要采用机械  
钻杆辅助下管。

垂直土壤热交换器下管完成后, 应在 12 小时  
内用灌浆材料回灌封孔。灌浆应密实, 无空腔。浆  
管和 U 型管同时插入孔中, 直至孔底, 孔内灌浆

### (3) 水平横管敷设

水平埋管地沟结构综合考虑地上、地下障碍物、地表坡度、沟转向半径限制、回填和复原要求等因素。施工中进行横沟开挖,沟底清理,找平,管道敷设,环路连接,回填和水压试验。

### (4) 管道试压与检漏

管材到达现场下管前、竖直埋管换热器入孔回填前、单个竖直埋管换热器接入环路后、环路集管与机房集水器连接完成后、埋管换热系统安装完毕,共进行五次试压、检漏。

### (5) 系统冲洗,注水排气

注水排气可维持竖直孔稳定排热、取热,是整个埋管系统运行良好的保障。在系统运行前,用水冲净管内泥土,管屑等杂质。冲洗时采用过滤装置,用以除去水中或系统外来的微粒或杂质。

## 5 空调主机系统对接改造

原有单制冷用螺杆机组,通过管道、阀门改造,实现管路切换实现制冷、制热转换,从而升级为“热泵机组”。

改造后新系统为土壤源热泵与辐射系统相结合的系统形式。最大的系统亮点是,在有供冷需求时,可以不开启热泵,直接将源水通过换热器把冷量传给负荷侧冷水,通过毛细管进行顶棚辐射制冷。使用这种模式可以在夜间对房间进行自然冷却,降低一部分负荷,热泵在白天运行负荷可以大大降低。自然冷却状况下,只需要地源侧和负载侧的水泵工作,而热泵处于关闭状态,这样热泵机组容量配置就可以比常规空调系统减少近 50%。再加上运行时间的缩减,可以大大降低系统能耗。

## 6 总结与展望

本项目通过改造前三年多的运行数据统计,夏季常规制冷系统平均耗电量约 316571kWh/年,夏季运行产生费用约为 221600 元(折算下来与当地平均使用电价 0.7 元/kWh 符合一致);冬季系统通过使用蒸汽和热水板换机组供热,其制热运行费用约 180000 元。通过电能替代改造,采用地源热泵作为冷热源作系统重新改造后,大楼全年总能耗预计降低 40%左右。由于夏季可以使用“自然冷却”

模式降低一部分冷负荷,可以降低热泵机组容量的配置,因此,本系统冷热源机房仅配置了 1 台螺杆热泵机组即能满足这个建筑的负荷需要。

该节能改造项目利用增设的地源热泵系统取代原空调中的锅炉供热系统,通过合理的管路设计、热平衡设计、节能运行和控制不仅降低了系统能耗,而且实现了“以电代气”,减少了一次能源的消耗和碳排放。在既有建筑中因地制宜的推广地源热泵系统,为优化建筑能源消耗,解决能源和环境问题提供了新的思路。地源热泵系统的应用在节能改造方面具有很大的空间与潜力。

### 参考文献:

- [1] 李纯.暖通工程地源热泵技术应用浅述[J].绿色环保建材,2021,(5):141-142.
- [2] 任永林,林华颖,邹行,等.毕节某人民医院地源热泵应用分析[J].建筑节能(中英文),2021,49(10):82-85.
- [3] 赵新村,李晓波.泰安市城区埋管地源热泵适宜性评价研究[C].中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集,2021:644-648.
- [4] 鲍超.布置于建筑下的地源热泵埋管系统连接工艺研究[J].暖通空调,2021,51(S2):376-382.
- [5] 范惠文.地源热泵垂直埋管换热器换热效率下降因素分析[J].节能与环保,2021,(1):73-75.
- [6] 刁乃仁,方肇洪.埋管地源热泵技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [7] CJJ/T98-2014,建筑给水塑料管道工程技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [8] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [9] 张成方.暖通空调设计标准中地源热泵的应用分析[J].中国标准化,2017,(22):140-141.
- [10] GB 50366-2016,地源热泵系统工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [11] JGJ 176-2009,公共建筑节能改造技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [12] 秦祥熙,李少华,万龙,等.不同型式埋管换热器换热性能的试验研究[J].科学技术与工程,2015,(12):215-218.
- [13] Qiao Zhenyong, Long Tianhe, Li Wuyan, et al. Performance assessment of ground-source heat pumps (GSHPs) in the Southwestern and Northwestern China: In situ measurement[J]. Renewable Energy, 2020,153.