

风冷热泵与地源热泵系统耦合技术应用与分析

赵凯辉

中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013

[摘要]随着能源危机的日益加剧和环保要求的不断提高,暖通空调系统的节能成为建筑节能领域的重要课题。冷热源作为暖通空调系统的核心组成部分,其能耗在整个系统中占据较大比例。本论文结合实际工程案例,探讨了风冷热泵与地源热泵的耦合应用场景的节能性、经济型的分析,为暖通空调系统的节能设计和运行提供参考。

[关键词]风冷热泵;地源热泵;耦合;节能;低碳

DOI: 10.33142/aem.v6i9.13850

中图分类号: TU831

文献标识码: A

Application and Analysis of Coupling Technology between Air-cooled Heat Pump and Ground Source Heat Pump System

ZHAO Kaihui

China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing, 100013, China

Abstract: With the increasingly severe energy crisis and the continuous improvement of environmental protection requirements, energy conservation of HVAC systems has become an important issue in the field of building energy conservation. As the core component of HVAC systems, the energy consumption of cold and heat sources accounts for a large proportion of the entire system. This paper combines practical engineering cases to explore the energy-saving and economic analysis of the coupled application scenarios of air-cooled heat pumps and ground source heat pumps, providing reference for energy-saving design and operation of HVAC systems.

Keywords: air-cooled heat pump; ground source heat pump; coupling; energy-saving; low carbon

引言

随着世界经济的发展,能源危机、全球变暖等问题越来越突出,经济的可持续发展研究越来越重要,我国提出力争在2030年前实现碳达峰、努力争取2060年前实现碳中和。而暖通在建筑能耗中占比很大(一般占比30%~50%),所以建筑的节能设计和运行在很大程度上需要优化空调系统。但是暖通空调系统在为人们提供舒适的室内环境方面发挥着关键作用,因此,怎样在保证建筑内人员舒适的情况下实现建筑低碳、节能和可持续发展已成当务之急。

1 风冷热泵、地源热泵的技术原理及优缺点

1.1 风冷热泵技术原理

风冷热泵的技术原理基于压缩式制冷循环,利用冷媒作为载体,通过风机的强制换热,从大气中吸取热量或者排放热量,以达到制冷或者制热的需求。

1.2 风冷热泵的优点

风冷热泵具有较好的环保和节能效果,无需燃气、燃油等化石燃料,可以有效降低碳排放,对环境影响较小,机房占地面积小,系统管路比较简单,初投资较小,制冷效果好。

1.3 风冷热泵缺点

风冷热泵冬季制热效果受室外环境温度影响很大,在严寒地区、寒冷地区极端天气情况下制热效果不理想;风冷热泵制冷效率相比较低,因此风冷热泵的运行费用较高,

且主机的使用年限为10~15年。

1.4 地源热泵的技术原理

地源热泵的技术原理也是基于压缩式制冷循环,用土壤或者水源(地下水、地表水等)作为低温热源,强制从土壤或者水源(地下水、地表水等)中吸收(排放)热量,以达到给建筑物供热或供冷的目的。

1.5 地源热泵的优点

地源热泵具有很好的环保和节能效果,无需燃气、燃油等化石燃料,可以有效降低碳排放,对环境影响小;地源热泵利用地下土壤的恒定温度进行换热,通过埋在地下的地热管吸收或者释放热量,因此地源热泵系统供热时不受室外环境的影响,可以常年稳定地供冷或者供热;由于地下温度相对稳定,地源热泵的热效率较高,后期运行费用较少,主机使用年限可达20年。

1.6 地源热泵的缺点

地源热泵的安装需要较大的土地面积,施工工艺较为复杂,因此初投资成本比较高;同时地源热泵的主机大,因此需要更大的机房面积。

2 项目背景

为贯彻党中央、国务院关于碳达峰、碳中和重大战略部署,2023年10月北京市下发了《关于印发全面推进新能源供热高质量发展实施意见的通知》京发改[2023]1309号文件,文件明确中指出坚持新能源优先供热要求,提升

新能源在供热中的比例,新建供热项目中新能源供热比例不小于 60%;文件中还指出到 2025 年,新能源供热领域制度不断完善、管理更加规范、规模稳步提升,力争全市新能源供热面积累计达到 1.45 亿 m^2 , 新能源供热面积占全市供热面积比重达到 10%以上。到 2030 年,新能源供热市场趋于成熟,新能源供热产业发展稳定、供热规模持续扩大,力争新能源供热面积占全市供热面积比重达到 15%以上的宏伟目标;本文件还规定在不具备地源热泵或再生水(或者污水)源热泵等新能源供热系统建设条件的城镇建筑,通过论证后,可在供热需求相对集中的区域,建设单机装机容量大(不低于 300kW)、设备能效高(COP 不低于 2.5)噪音低、可变频的集中式空气源热泵供热系统。在此基础上北京新建供热项目应优先选用地源热泵系统供热,如不具备使用地源热泵条件的经过专家论证后可使用风冷热泵作为新能源供热。本项目为北京城市副中心建设项目,严格执行上述文件,冷热源采用地源热泵和风冷热泵耦合形式供热,且风冷热泵的单台装机容量大于 300kW。

3 项目简介

3.1 项目概况

(1)工程名称:北京市某办公、商业配套项目。(2)建筑规模:总建筑面积:25710.64 m^2 ,其中地上建筑面积:15401.81 m^2 ,地下建筑面积:10308.83 m^2 。(3)建筑层数及高度:地上 7 层,地下 3 层。建筑高度 31.35m。(4)建筑防火分类:二类高层民用建筑。

3.2 室内外设计参数

室外气象参数如表 1:

室内设计参数如表 2:

3.3 主要设计指标

(1)本项目玻璃采用 70 系列内平开隔热铝合金窗(5+12Ar+5Low-E+12Ar+5Low-E),幕墙整体传热系数为 1.60W/ $m^2 \cdot K$,太阳得热系数 0.24,可见光透射比 0.4;幕墙龙骨采用断桥隔热铝合金型材,幕墙型材内置隔热条,形成幕墙与主结构连接部位的断热措施;屋面保温采用

90mm 厚 B1 级别挤塑聚苯板,传热系数 0.39W/ $m^2 \cdot K$,满足 K 值 ≤ 0.40 的限值要求;幕墙梁构造采用 100mm 厚岩棉板,传热系数为 0.44W/ $m^2 \cdot K$;加气块外墙传热系数为 0.34W/ $m^2 \cdot K$,整体合计 0.4W/ $m^2 \cdot K$,考虑线性热桥后传热系数为 0.48W/ $m^2 \cdot K$,满足 K 值 0.50 的限值要求;周边地面保温措施为建筑外墙内表面 2M 范围内铺设 30mm 挤塑聚苯板,热阻为 0.91($m^2 \cdot K$)/W,满足规范不小于 0.6($m^2 \cdot K$)/W 的要求。

(2)采暖空调建筑面积约为 16000 m^2 ,项目设计冷负荷约 1920kW,单位面积冷负荷指标:120W/ m^2 ;项目设计热负荷约 1280kW,单位面积热负荷指标 80W/ m^2 ;

4 冷热源设置情况

按北京市《关于印发全面推进新能源供热高质量发展实施意见的通知》京发改[2023]1309 号文件要求,本工程冷热源采用地源热泵与空气源热泵耦合的能源系统形式供应夏季 7/12 $^{\circ}C$ 冷水,冬季供应 45/40 $^{\circ}C$ 热水;风冷热泵空调室外机组放置于七层室外屋面;制冷机房设置在地下二层;空调系统优先采用地源热泵系统供冷供热,不足部分由空气源热泵系统满足。

由于本项目用地紧张,建筑外墙体已贴近用地红线,建筑轮廓以外已无地源热泵打井位置,结合实际情况本项目地源热泵采用结构底板下打井的方式。

4.1 冷热源配比计算

(1)地源热泵和空气源热泵相比,同属于清洁能源,前者具有初投资高、运行费用低的特点,后者具有初投资低、运行费用高的特点,采用两者结合的复合式系统,找到两者配比经济性最佳的点,有利于项目投资收益的最大化。

(2) 计算依据及过程

①直接能源费测算执行北京市郊区一般工商业夏季尖峰平谷电价:1.27352/1.19189/0.87144/0.58050 元/kWh、冬季峰平谷电价:1.15505/0.84145/0.55675 元/kWh。②贷款利率按现市场水平 3.5%进行测算。③系统初投资计算:如表 3。

表 1 室外气象参数表

| 站名 | 室外计算干球温度($^{\circ}C$) | | | | | 夏季空调计算湿球温度($^{\circ}C$) | 室外计算相对湿度(%) | | 最多风向及频率(%) | | | | 夏季空调室外计算日均温度($^{\circ}C$) |
|----|-------------------------|------|------|------|------|---------------------------|-------------|------|------------|-------|------|-------|-----------------------------|
| | 冬季 | | | 夏季 | | | 冬季空调 | 夏季空调 | 冬季 | | 夏季 | | |
| | 供暖 | 通风 | 空调 | 空调 | 通风 | | | | 风向 | 频率 | 风向 | 频率 | |
| 北京 | -7.6 | -3.6 | -9.9 | 33.5 | 29.7 | 26.4 | 44 | 61 | C N | 19/12 | C SW | 18/10 | 29.6 |

表 2 室内设计参数表

| 房间名称 | 夏季 | | 冬季 | | 风速 m/s | 新风量标准 $m^3/h \cdot 人$ | 噪声标准 dB(A) |
|------|----------------|-------|----------------|-------|-------------|--------------------------|---------------|
| | 温度 $^{\circ}C$ | 相对湿度% | 温度 $^{\circ}C$ | 相对湿度% | | | |
| 办公室 | 26 | 60 | 20 | — | ≤ 0.20 | 30 | ≤ 40 |
| 会议室 | 26 | 60 | 20 | — | ≤ 0.20 | 30 | ≤ 40 |
| 前厅 | 28 | 60 | 16 | — | ≤ 0.20 | 20 | ≤ 45 |
| 餐厅 | 26 | 60 | 18 | — | ≤ 0.20 | 25 | ≤ 45 |
| 休息室 | 26 | 60 | 20 | — | ≤ 0.20 | 15 | ≤ 40 |
| 商业 | 26 | 60 | 18 | — | ≤ 0.20 | 15 | ≤ 45 |

表3 系统初投资计算表

| 序号 | 名称 | 价格(万元) | 备注 |
|----|-----------|--------|----------------------------------|
| 1 | 热泵机组 | 77.1 | 2台螺杆地源热泵 |
| 2 | 循环泵组 | 23.6 | 9台,立式离心泵 |
| 3 | 热泵机房安装 | 80.9 | 含定压补水、管线、阀门等购置及安装 |
| 4 | 热泵机房电气 | 46.1 | 含低压配电控制系统购置及安装 |
| 5 | 室外地理换热系统 | 241.5 | 含竖直孔、水平管、检查井及至机房间管线敷设施工 |
| 6 | 地源热泵系统小计 | 469.1 | / |
| 7 | 空气源热泵机组 | 84.0 | 4台超低温空气源热泵机组 |
| 8 | 空气源热泵安装 | 28.6 | 含管线、阀门及至热泵机房间管线购置及安装 |
| 9 | 空气源热泵配电 | 20.6 | 配电、控制系统配电柜、电缆(含至热泵机房间)、控制线等购置及安装 |
| 10 | 空气源热泵系统小计 | 133.1 | / |
| 11 | 其他费 | 45.0 | 热物性测试、地理系统在线监测等 |
| 12 | 总投资合计 | 647.3 | / |

注:以上初投资不含地源热泵机房土建、消防、通风、给排水、照明、装饰、机房维护结构隔音降噪、设备基础等费用。

④直接能源费包含机组和水泵的全年电费。

⑤全寿命周期成本=全寿命周期投资成本+全寿命周期运行成本,即为各组合下所比较的数值对象。由图1可知,在地源热泵热装机占比60%,空气源40%的组合情况下,全寿命周期成本最低。因此本方案参考该比例结合布孔条件和设备型号最终确定系统配置。

经济性分析计算以满足冬季热负荷1138kW来测算,计算系统寿命周期20年内,地源热泵和空气源装机配比分别在0%~100%、100%~0%的21种组合下的全寿命周期成本,详见图1。

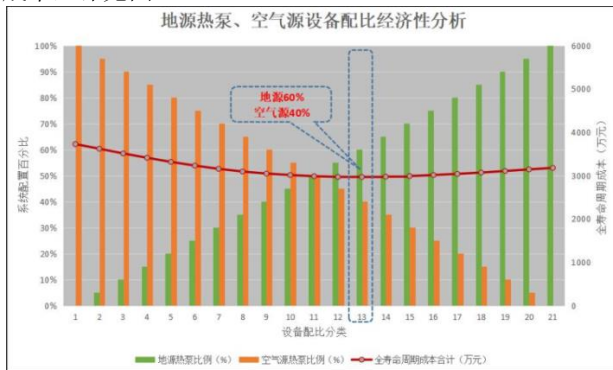


图1 地源热泵、空气源设备配比经济性分析图

4.2 综上所述本项目地源热泵及空气源热泵配置

(1) 地源热泵机组

结合以上换热孔的设计参数,本方案配置2台地源热

泵机组,单台制热量480kW,制冷量473kW,2台热泵机组总制热量960kW,总制冷量946kW。

(2) 空气源热泵机组

结合北京市发改的补贴政策(对300kW以上的空气源热泵有补贴),配置4台空气源热泵机组,单台名义制热量为315kW(-15℃时的制热量为201kW),名义制冷量为300kW。冬季运行3台,夏季运行4台可以满足负荷需求。

(3) 地源热泵和空气源热泵装机配比

冬季最大负荷时,地源热泵运行2台,空气源热泵运行2台,总制热装机容量为1590kW,地源热泵占比为60.4%,空气源热泵占比39.6%。夏季制冷时,地源热泵运行2台,空气源热泵运行4台,总制冷装机容量为2146kW,地源热泵占比为44.1%,空气源热泵占比55.9%。

(4) 其他设备

①循环水泵

主要包括地源热泵地源侧循环水泵3台(2用1备)、地源热泵空调侧循环水泵3台(2用1备)、空气源热泵循环水泵3台(2用1备)。

表4 循环水泵使用情况表

| 序号 | 名称 | 流量 | 105 | m ³ /h | 扬程 | 3 | 台 | 2用1备 |
|----|-------------|----|-----|-------------------|----|---|------|------|
| | | 扬程 | 32 | mH ₂ O | | | | |
| 1 | 地源侧循环泵 | 功率 | 15 | kW | | | | |
| | | 流量 | 90 | m ³ /h | 3 | 台 | 2用1备 | |
| | | 扬程 | 30 | mH ₂ O | | | | |
| 功率 | 13 | kW | | | | | | |
| 2 | 空调侧循环泵 | 流量 | 115 | m ³ /h | 3 | 台 | 2用1备 | |
| | | 扬程 | 30 | mH ₂ O | | | | |
| | | 功率 | 17 | kW | | | | |
| 3 | 空气源热泵空调侧循环泵 | 流量 | 115 | m ³ /h | 3 | 台 | 2用1备 | |
| | | 扬程 | 30 | mH ₂ O | | | | |
| | | 功率 | 17 | kW | | | | |

②一套软化水系统,一套地源侧补水定压系统,一套用户侧补水定压系统。

③空气源热泵机组布设:现设计4台空气热泵机组,需布设面积约120m²。空气源热泵机组布设在原空气源热泵系统机组的布置位置即七层屋面,经核算现有屋面空间满足使用需求。

④系统最大用电量:本项目夏季最大配电容量约为641KW。

5 项目总结

地源热泵系统是最节能的空调系统之一,从实现经济的可持续发展来看,地源热泵有很好的节能前景,符合国家的可持续发展战略,是国家实现碳中和、碳达峰的重要手段;从建筑的全生命周期来看,虽然初投资大一些,但是后期运行中成本更少,而且能长期稳定供冷和供热,尤其适合在我国北方地区采用。

地源热泵和空气源热泵耦合的优点在于能够提高系统的整体效率和性能,尤其是在环境温度较低的情况下,地源热泵的制热贡献率更高,而空气源热泵则在环境温度

表 5 地源热泵+空气源热泵系统最大电量需求测算表

| 序号 | 设备名称 | 单台电量 (kW) | 数量 | 单位 | 合计 | 备注 |
|----|-----------------|-----------|----|----|-----|-------------|
| 1 | 地源热泵机组 | 74 | 2 | 台 | 148 | 夏季配电 |
| | | 112 | | | 225 | 冬季配电 |
| 2 | 空气源热泵机组 | 88 | 4 | 台 | 353 | 夏季配电, 4 台运行 |
| | | 90 | | | 270 | 冬季配电, 3 台运行 |
| 3 | 地源热泵 地源侧循环泵 | 15 | 3 | 台 | 30 | 2 用 1 备 |
| 4 | 地源热泵 空调侧循环泵 | 13 | 3 | 台 | 26 | 2 用 1 备 |
| 5 | 空气源热泵 空调侧循环泵 | 17 | 3 | 台 | 34 | 2 用 1 备 |
| 6 | 其他设备用电 | | | | 50 | 暂估 |
| 7 | 夏季合计 (kW) | | | | 641 | |
| 8 | 冬季合计 (kW) | | | | 635 | |

较高时表现更佳。地源热泵和空气源热泵的结合使用,可以在不同环境下充分发挥各自的优势,提高整个系统的能效和稳定性。地源热泵利用地下温度相对稳定的特性,具有较高的 COP 值,能够显著节省运行费用。相比之下,空气源热泵虽然受环境温度影响较大,但在环境温度较高时,其能效比也相对较高。因此,通过耦合这两种热泵系统,可以根据环境温度的变化自动调整运行模式,以达到最佳的能效比。另外,地源热泵和空气源热泵的耦合使用还可以提高系统的适应性和可靠性。在冬季低温环境下,地源热泵的制热贡献率更高,能够提供稳定的热量供应;而在夏季高温环境下,空气源热泵则能够发挥其高效制冷的特点,保证系统的制冷效果。这种耦合系统能够在不同季节和环境下保持较高的能效和性能,为用户提供更加舒适和节能的居住或工作环境。

地源热泵弥补了空气源热泵冬季制冷效果差的劣势,具有更广泛的地理和气候使用条件;相比于单独采用地源热泵,则需要大规模的地下埋管系统增加了埋管系统的占地面积,同时需要更大的投资成本,耦合系统可以在一

定程度上减少埋管的数量和规模,从而降低初投资,减少土地面积的使用;

地源热泵和空气源热泵耦合使用的技术已在不同场所得到了应用,比如在一些别墅、办公楼等高档建筑均有使用,其技术也已经成熟,发展相对完善,要实现经济的可持续发展,未来的空调冷热源系统必定是多元化的,单一的冷热源已不能适用多元的需求,地源热泵和风冷热泵耦合系统作为其中重要的组成部分,未来必将得到充分的发展,为我国的低碳发展之路添砖加瓦。

[参考文献]

[1] 罗国立. 建筑暖通空调设计技能措施分析[J]. 低碳世界, 2015(15): 173-174.
 [2] 汤梓涵, 王帅杰, 鞠振河, 等. 光伏/光热耦合空气源热泵系统性能优化[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(4): 34-41.
 [3] 高昊天, 苑翔, 季轩昂. 低温空气源热泵补热技术研究进展[J]. 节能, 2023, 42(12): 114-116.
 作者简介: 赵凯辉 (1989—), 男, 汉, 籍贯: 河北石家庄, 学历: 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 暖通空调。