

# 关于空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统技术经济对比研究

王德锁 刘晋鸿 徐雨宁 芮惠雯

(浙江星光电科智能家居科技有限公司, 浙江 湖州 313000)

**摘要** 本次研究从空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的原理出发, 应用 DHWcalc 软件建模以评价空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的热负荷与系统能效。同时, 研究还使用动态投资计算, 分别就初投资、运行费用、费用现值和费用年值, 对包括空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统在内的城市集中供热、天然气壁挂炉单户供热、分体式空调供暖、电膜式电暖炉供热等五种常见供暖系统的技术经济进行对比。研究显示, 空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统初投资 30.14 万元, 运行费用 1.19 万元、费用现值 40.90 万元、费用年值 4.51 万元。总体来看, 空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统, 污染低、能效高、综合技术经济性较好, 值得推广和普及。

**关键词** 空气源热泵 直接冷凝 供暖系统 技术经济对比

中图分类号: TU832.17

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)11-0118-03

长期以来, 我国秦岭淮河以北地区的冬季, 需要大量能源用于供暖。然而, 由此带来的能源消耗、环境污染、费用提升等问题不断, 严重制约了这些地区的可持续发展<sup>[1]</sup>。为了保护当地环境、增加能源获取、提高资源效率和改善长期经济性的目标, 众多学者和从业人员研究并开发了许多的新型供暖系统, 以替代传统化石燃料供暖系统方式, 实现减少温室气体排放, 提高供暖系统工作效率和经济性的目标。在此背景下, “空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统”是最近几年新提出的供暖方式, 将在未来发挥巨大的作用<sup>[2]</sup>。然而, 现阶段的研究中, 对于空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的技术经济性存疑。鉴于此, 本文通过案例分析和动态投资计算, 对市面上的多种供暖系统进行对比, 以期凸显空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的技术经济优势。

## 1 系统原理和能效分析

### 1.1 案例简述

本次研究是在一个公寓楼中进行。该建筑每间公寓都有 91m<sup>2</sup> 的有用建筑面积, 建筑总计 24 间公寓, 累计 2184m<sup>2</sup> 的采暖面积。其中, 楼梯位于绝缘外壳内, 不直接加热。阳台 / 露台位于隔热建筑围护结构之外, 没有热桥。建筑物内的通风换气率, 公寓为 0.4h<sup>-1</sup>, 地下室和楼梯为 0.1h<sup>-1</sup>。建筑物的供暖需求为 36kWh/(m<sup>2</sup>a)<sup>1</sup>, 室温设定为 21℃。同一地点的制冷需求为 5.5kWh/(m<sup>2</sup>a)<sup>1</sup>, 室温设定为 25℃。

### 1.2 热负荷与系统能效分析

通常, 衡量系统热负荷与能效的指标采用的是性能系数 (COP)<sup>[3]</sup>。COP 是产生的瞬时热能 (Q) 与为热泵运行提供动力所消耗的电能 (W) 的比率, 即:

$$COP=Q/W \quad (1)$$

在制造商数据表中, COP 表示在一组固定的实验室条件下稳定流动条件下的性能, 是评定热泵性能的实验室测试条件。即热泵被加载, 直到达到制造商的最大输出, 并在特定的源和汇温度和流速下评估其性能。但是, 热泵在某个时间点的实际性能随环境温度、出口和入口水温等因素而变化, 需要更细致入微的方法来更全面、更实际地评估已安装的供暖系统的整体性能。鉴于此, 本次研究使用 DHWcalc 软件模拟了为建筑提供供暖的集中供暖系统所产生的建筑能耗, 以分析热负荷与系统能效。

供暖系统在 TRNSYS 中建模, 主要使用标准 TRNSYS 模型, 所有模拟均使用 1 分钟的恒定时间步长进行。该模型基于使用制冷剂的热力学特性对制冷剂循环进行迭代计算; 考虑启动 / 停止损失和除霜损失。该模型使用来自合作伙伴运营的商用可逆 HP 的数据进行参数化; 使用了压缩机的详细性能数据 (整体等熵效率和容积效率), 具体取决于蒸发和冷凝温度以及压缩机速度。参考制造商的规格, 仔细考虑了压缩机的运行限制 (最高冷凝温度和最低蒸发温度取决于压缩机速度)。软件使用不同类型的流速和持续时间的统计概率,

表1 不同供暖系统的初投资对比表

供暖方式	城市基础设施配套费用(元/m <sup>2</sup> )	室内采暖管网费用(元/m <sup>2</sup> )	室内采暖末端费用(元/m <sup>2</sup> )	室外机费用(元/m <sup>2</sup> )	初投资(万元)
城市集中供热	91	50			31.02
天然气壁挂炉 单户供暖	73	50	36		43.98
分体空调供暖			38	67	23.1
电取暖器供暖			20		4.4
空气源热泵直凝 供热系统		70		67	30.14

不考虑节假日,使用软件的计算功能,得出每间公寓的最大流量为1000kg/h。

研究中的实验方面包括使用两个相同的原型,其中原型A包含可变参数,原型B充当控制设施。每个原型的供暖系统都配备了一个控制系统,可以根据室内热环境管理供暖过程。当室内温度下降到指定的设定点(可接受的最低室内温度)时,泵启动,将热水输送到地板螺旋管中。然后,当温度达到指定的上限设定点(最高可接受的室内温度)时,泵将关闭。地板层内的热传递,即占据热源的系统。对流热传递从管道中流动的热水到管道边界发生。然后,传导和自然对流热传递穿过不同层到达模式变为的内表面和外表面:自然对流和辐射。在TRNSYS中使用77型计算,得出建筑物每年DHW总热量需求为14MWh/a, COP为3.36,平均耗热量为12.35W/m<sup>2</sup>。

## 2 与其他供暖系统的技术经济对比

### 2.1 对比方法

由于供暖系统产生的能量和消耗的能量之间的滞后,当供暖启动时,在给定的一分钟内,与产生的热能相比,会消耗大量电力,导致COP非常低。在接下来的连续运行几分钟内,产生的热能增加超过消耗的电力,导致COP值更符合预期,这导致在斜坡下降期间每分钟的COP值非常大<sup>[4]</sup>。因此,每分钟的原始数据被转换为小时级别,以平滑启动和减速效应的噪声。其中,温度、流量、室温区域平均到每小时值,将能源消耗、产生的能源和稳态等能源特征相加以计算每小时的总量。然后使用方程式计算每小时COP值以进行对比。为进一步说明空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的技术经济性,对案例另选四种供暖方式——城市集中供热、天然气壁挂炉单户供热、分体式空调供暖、电膜式电暖炉供热——从初投资、运行费用、费用现值和费用年值几个方面进行对比分析。

由于本研究中建模系统是公寓楼,由单户住宅组成,因此,敏感性分析会关注不同分布概念的性能差异。因为这样的敏感性分析可以为所研究的技术经济对比提供有用信息。其中,敏感性分析是通过动态投资计算来进行的,可以在不同的供暖系统边界进行计算,具体取决于供暖系统运行的实际情况,突出了评估性能的方法的多样性,并提倡采用统一的方法来定义系统边界和效率,以便可以对五种供暖系统进行比较。

### 2.2 对比结果

#### 2.2.1 初投资对比

作为供暖系统,在初次投资时,除了需要能源系统外,还需要其他配套设施、终端管网等。以空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统为例,在本次案例中,各种供暖方式的初次投资费用分别是:空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统30.14万元;城市集中供热系统31.02万元;天然气壁挂炉单户供热系统34.98万元;分体式空调供暖23.1万元;电膜式电暖炉供热系统4.4万元。其中,电膜式电暖炉供热系统的初次投资最少;天然气壁挂炉单户供热系统的初次投资最多;空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的初次投资居中。具体如表1所示。

#### 2.2.2 运行费用对比

单纯的初次投资费用的对比并不能有效地体现不同的供暖系统的优缺点和取舍,为此,还需要从运行方面进行进一步的技术经济对比。由于不同的供暖系统所使用的能源、能耗、效率都有所不同,为了更加全面的体现供暖系统的技术经济对比,研究将从燃料单价、燃料热值、供热效率、单位能源耗资和单供暖季运行费用来进行对比。具体结果如表2所示。

#### 2.2.3 费用现值和费用年值对比

由于供暖系统运行期长且没有明确收益,因此,研究采用费用现值和费用年值来对供暖系统的方案费

表2 不同供暖系统的费用现值和费用年值对比表

供暖系统	燃料单价 (元/t)	燃料热值 (kJ/kg)	供热效率	单位能源耗资 (元/GJ)	单供暖季运行费用 (万元)
空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖	0.505	3600	3.36	41.75	1.19
城市集中供热	350	20910	0.6	27.9	0.79
天然气壁挂炉单户供热	2.5	35.88	0.88	79.18	2.61
分体式空调供暖	0.505	3600	3.29	42.64	1.21
电膜式电暖炉供热	0.505	3600	0.98	143.14	4.07

表3 不同供暖系统的费用现值和费用年值对比表 (单位: 万元)

供暖系统	费用现值	费用年值
空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖	40.90	4.51
城市集中供热	38.21	4.21
天然气壁挂炉单户供热	58.71	6.47
分体式空调供暖	34.09	3.76
电膜式电暖炉供热	41.32	4.55

用进行对比和取舍。其中,费用现值和费用年值是衡量项目仅在其生命周期结束时即可承受的最大利率。其他类似的方法或名称有盈利指数、收益率、真实收益率和投资者收益率等。在经济分析中,费用现值和费用年值可以确定为项目生命周期结束时,各方案的投资及运行费用换算成与其等值的现值之和:

$$PC=C+D \times (P/A, i_0, n) \quad (2)$$

在等式(2)中:

PC——费用现值(元)。

$i_0$ ——基准收益率,本文取10%。

$n$ ——方案寿命年限,本文取25年。

$(P/A, i_0, n)$ ——复利系数,本文取9.077。

直观地说,在项目生命周期内的净累积刚好足以支付所有本金和累积利息的条件下,可能被视为等于为项目融资而借入资金的最高利率。为了获得一致的比较,研究使用经过通货膨胀校正的税后值。因此,PC是对过程盈利能力的综合衡量,这可以通过反复试验找到,更低的PC意味着更有利可图的项目。在此基础上,费用年值为:

$$AC=PC \times (A/P, i_0, n) \quad (3)$$

在等式(3)中:

AC——费用年值(元)。

$(A/P, i_0, n)$ ——复利系数,本文取0.1102。

通过计算,结果如表3所示。

如表2所示,天然气壁挂炉单户供暖的费用现值

和费用年值最高;分体式空调供暖的费用现值和费用年值最低;空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖的费用现值和费用年值居中。

### 3 结论

综上所述,在节能减排背景下,空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统是未来北方寒冷地区供暖系统的发展方向之一,有助于碳中和目标的实现。通过本次研究,从热负荷与系统能效以及与其他常见供暖性的技术经济对比,说明了空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统的技术和经济优越性,对于推广和普及空气源热泵直接冷凝式地板辐射供暖系统有着重要的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 荣雨诗,胡恩硕,石岩,等,王染霖.空气源热泵在东北地区实测与优化方案研究[J].能源与节能,2022(08):20-25.
- [2] 高明星,周亚东,陈浩宇,等.基于动态费用年值法的空气源热泵加热系统能耗评价研究[J].石油工业技术监督,2022,38(08):1-5.
- [3] 吴云鹤,王刚,高寒,等.农村空气源热泵系统蓄热模式对电网负荷的影响分析[J].青岛理工大学学报,2022,43(04):111-117.
- [4] 彭亚君,林樱,江龙,等.相变蓄热型空气源热泵系统的模拟[J].制冷学报,2022,43(04):158-166.