

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-624-08

多能源耦合系统在严寒地区的应用研究

魏俊辉 褚 赛 刘启明 鲍 超 童 雷

(北京市勘察设计院有限公司 北京 100038)

【摘要】 我国严寒地区冬季漫长而寒冷,对采暖要求相对较高。目前,冬季采暖主要还是使用煤等不可再生能源,其对环境污染影响严重。因此,研究适宜于严寒地区的可再生能源解决方案就显得十分必要和迫在眉睫。然而,受严寒地区的冷热负荷特点的限制,单一的可再生能源形式往往无法满足要求,需对多种能源进行耦合来提高系统的安全性和高效性。以长春市某建筑为例,利用 DeST 软件模拟了全年逐时动态负荷,通过对多种能源耦合方式的研究,得到了既能安全稳定运行又能满足经济性要求的工程应用的指导方案。

【关键词】 全年逐时动态负荷;控制策略;分时段-温度控制

中图分类号 TK529 文献标识码 A

Application Research of Multi-energy Coupling System in Severe Cold Area

Wei Junhui Chu Sai Liu Qiming Bao Chao Tong Lei

(Beijing Geotechnical Institute, Beijing, 100038)

【Abstract】 The winter in severe cold areas of our country is long and cold, and the requirements for heating are relatively high. At present, heating in winter mainly uses non-renewable energy such as coal, which has a serious impact on environmental pollution. Therefore, it is very necessary and urgent to study renewable energy solutions suitable for severe cold regions. However, limited by the characteristics of cold and heat loads in severe cold areas, a single form of renewable energy is often unable to meet the requirements. It is necessary to couple multiple energy sources to improve the safety and efficiency of the system. Taking a building in Changchun City as an example, this paper uses DeST software to simulate the hourly dynamic load throughout the year. Through the study of multiple energy coupling methods, a guiding plan for engineering applications that can operate safely and stably and meet economic requirements is obtained.

【Keywords】 the hourly dynamic load throughout the year; Control Strategy; Time division-Temperature Control

作者(通讯作者)简介:魏俊辉(1977.07-),女,学士,高级工程师, E-mail: wei_jun_hui@126.com

收稿日期:2021-09-28

0 引言

我国严寒地区冬季漫长而寒冷,对采暖要求相对较高,目前主要使用煤等不可再生能源,其对环境污染影响严重。为减少建筑对环境及能源消耗的不良影响,国家政策鼓励开发使用可再生能源用于建筑制冷、采暖,严寒地区能源解决方案的研究目前已十分必要且迫在眉睫^[1]。

众所周知,埋管地源热泵系统由于其高效节能、安全稳定、运行费用低等优点得到广泛应用。

但在严寒地区,由于建筑冷、热负荷的不平衡,从而导致埋管周围土壤温度出现逐年下降的趋势。土壤温度的逐年下降直接导致地源热泵系统性能系数下降,甚至无法正常运行。

基于地源热泵的多能源耦合系统可以通过能源之间的互补,弥补不同能源的劣势,发挥不同能源的优势,有效提高系统运行性能和效率,减少系统能耗,近年来国内外学者也对此进行了深入研究。白晨光等^[2]提出了一种将空气能、土壤能、太阳能

互补利用的多热源耦合热泵系统,并以哈尔滨地区为例对该系统进行了数值模拟,结果表明系统全年综合 COP 值为 3.19,土壤热不平衡率为 0.71%,证实是一种适用于严寒地区的高效热泵系统。宋晓蓓^[3]提出了多热源耦合热泵供暖空调系统,建立了系统蒸发器、冷凝器、压缩机等主要组成部分的数学模型,以哈尔滨地区某典型住宅为例,模拟分析耦合系统动态特性,模拟研究表明,多热源耦合热泵供暖空调系统在我国严寒地区应用具有良好的节能效果和可行性。张妹等^[4]设计了用于研究严寒地区土壤热补偿策略的太阳能/空气能/地热能/热泵综合实验台,该实验台既可手动实现多种运行模式的转换,又可实现一定温度条件下的连续运行,通过实验台的搭建以期为严寒地区土壤源热泵容易出现的土壤热失衡问题提供研究平台。韩宗伟等^[5]在研究分析严寒地区建筑负荷特性及自然能源能量输出特性基础上,探讨了严寒地区热泵供暖空调系统的构建基本思想,并据此思想构建了一种能实现多种自然能源互补利用的多源耦合热泵系统,为严寒地区热泵供暖空调系统用于提出参考。

上述研究未能从工程实际方案设计及运行角度对比多能源耦合系统应用效果,本文以长春市某建筑为例,利用 Dest 软件模拟了全年逐时动态负荷,通过对多种能源形式不同的耦合方式的研究,得到满足经济性要求的工程应用的指导方案。

1 负荷分析

本项目为长春市某产业园内办公区,包含综合服务中心、销售展示中心及检测研发中心,建筑地上 8 层,地下 1 层,总供能面积 55894.98m²。建筑外墙为黏土实心砖及聚苯板复合保温墙,外窗为断桥铝合金中空 low-e 玻璃,屋顶为 SBS 改性沥青防水卷材屋面并有挤塑板保温。将建筑地理位置、围护结构类型以及热工参数、房间功能、室内设计参数、室内热扰参数、全年热扰及空调系统作息模式等输入模型,在 DeST 软件中进行全年 8760 小时的逐时动态负荷模拟,计算出建筑全年逐时动态冷热负荷分布。本项目供冷季时间为 6 月 15 日至 9 月 15 日共计 93 天,供暖季时间为 10 月 20 日至来年 4 月 6 日共计 169 天。本项目制冷、供暖季动态负荷分布如图 1 所示。由图 1 可得,该楼制冷季峰值冷负荷为 4728.86kW,峰值热负荷为 3882.39kW;

累计冷负荷为 1610.41MWh,累计热负荷为 6523.19MWh。

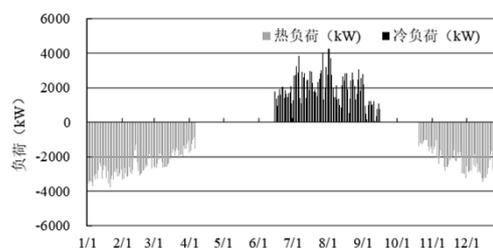


图 1 建筑制冷季、供暖季动态负荷

Fig.1 Dynamic load in building cooling season and heating season

2 方案对比

本项目为新建建筑,地处偏远,无法接入市政供暖系统,燃气也未接入,综合考虑油、煤运输困难费用高以及节能环保等因素,不宜采用燃煤锅炉、燃气锅炉、燃油锅炉、电锅炉等传统方式。

项目场地范围内地貌类型属于河流阶地地貌,地形平坦开阔,地势西北略高,东南略低,依据现场量测及岩土热响应试验,150m 深度范围内岩土体初始温度为 9.90 °C,地层综合导热系数为 1.47W/(m·K),综合热扩散率为 0.075m²/d,场区内地埋换热适宜性分区属较适宜区。

若单独采用地源热泵系统为建筑冬季供暖,夏季制冷,经计算,全年向土壤排热量为 1903.22MWh,全年向土壤取热量为 5073.59MWh,全年取排热热量差值为 3170.37MWh,不平衡率为 62.49%。故拟采用多能源耦合系统为建筑冬季供暖、夏季制冷,通过能源间的互补,有效提升系统运行性能和效率,减少系统能耗,用于补热或辅热的热源装置一般有太阳能系统及空气源热泵。

太阳能光热技术与地源热泵相结合为地埋管补热,既可以利用土壤蓄热特性实现太阳能跨季节蓄热,又可保证地埋管地源热泵系统正常运行,且运行费用低,其系统原理如图 2 所示,但太阳能集热板占地面积大、系统初投资造价高是该系统不容忽视的缺点之一。空气源热泵既能制冷又能供暖,还可在过渡季进行补热^[6],以维持土壤的吸放热平衡,其系统原理如图 3 所示,但空气源热泵机组制热性能随室外环境变化剧烈。

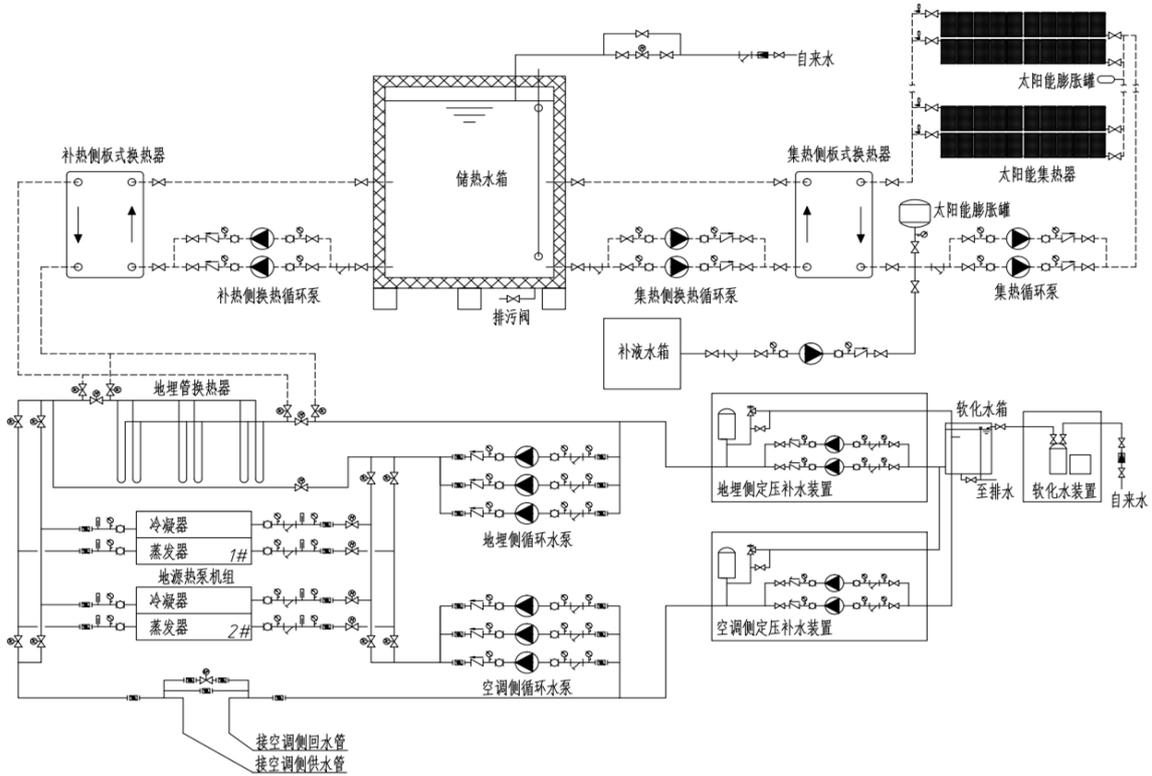


图 2 地源热泵+太阳能补热系统原理

Fig.2 Principle of GSHP and solar supplementary heating system

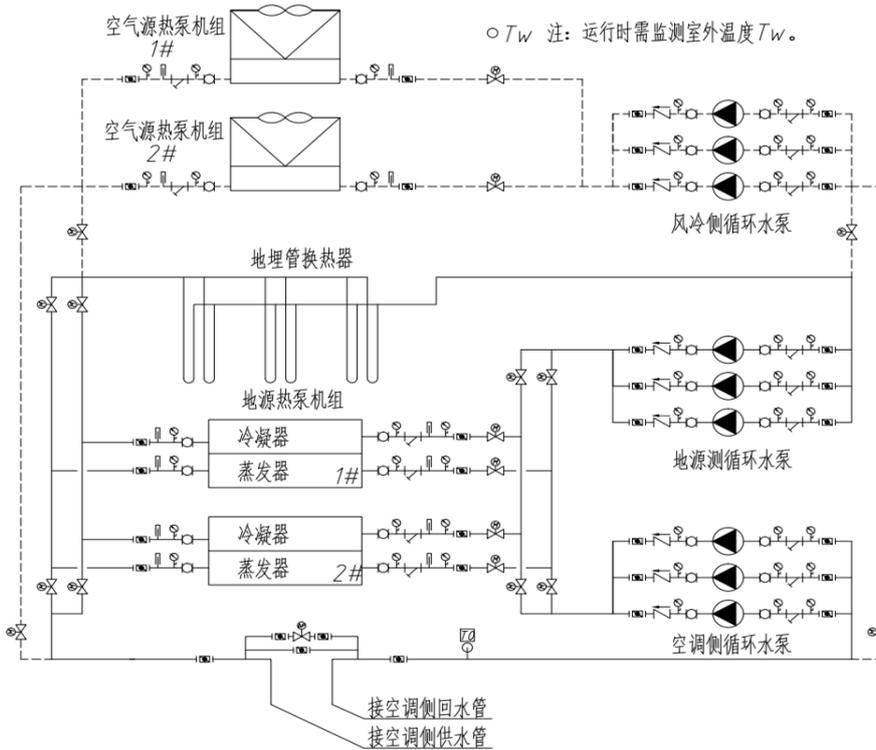


图 3 空气源热泵与地源热泵耦合系统原理

Fig.3 Principle of coupling system of air source heat pump and GSHP

3 地源热泵+太阳能系统

3.1 设计思路

本方案选择两台地源热泵机组为建筑冬季供暖夏季制冷, 单台制冷量 2430kW, 总制冷量 4860kW, 单台制热量为 2122kW, 总制热量 4244kW, 共设计 150m 地埋孔 1056 个, 满足建筑冷热负荷需求。

参照国家建筑标准设计图集《太阳能集热系统设计及安装》(06K503) [7] 中所列长春市太阳能辐照量数据, 经计算可得, 单平米倾斜表面全年太阳辐照量为 5918.36MJ。参照《建筑给水排水设计标准》(GB50015-2019), 太阳能集热板集热效率暂按 53.8% 计算, 管路损失暂按 15% 计算, 则单平米集热板全年太阳集热量为 2706.47MJ。为提高太阳能集热器使用率, 本系统设计全年对土壤进行补热, 经过计算, 补热所需太阳能集热器面积为 4200m², 满足系统补热量 3170.37MWh 的需求, 系统能够长期稳定高效运行。全年太阳能补热量如图 4 所示。

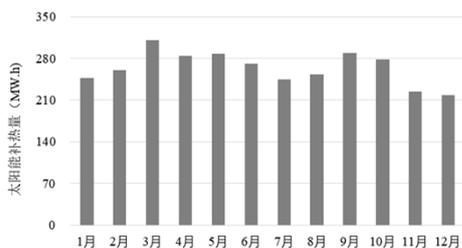


图 4 太阳能补热量

Fig.4 Solar heat supplement

3.2 运行策略

为保证太阳能补热系统的有效补热, 实时监测储热水箱温度与地埋管出水温度, 当储热水箱温度大于地埋管出水温度并且维持一定时间后, 通过阀门切换开启太阳能补热, 反之关闭太阳能补热系统。

3.2.1 夏季运行工况

夏季运行工况下, 既要保证地源热泵制冷系统正常运行, 又要保证太阳能补热系统有效的将太阳能集热量回灌到地埋管中。具体的措施有:

(1) 通过阀门切换, 机组冷凝器出水先经过板式换热器, 吸收太阳能热量, 再经过地埋管进行热交换后流回机组。

(2) 对冷却水温度进行实时监测, 防止冷却水进入冷凝器的温度过高而造成地源热泵机组停机。当系统监测到冷却水温度高于机组要求最高限

值时, 系统暂时关闭太阳能补热系统, 反之正常启动太阳能补热系统。

(3) 合理设计储热水箱的有效容积, 保证太阳能集热量全部回灌到地埋管中。同时校核夏季运行工况下集热量引起的机组出水温升:

① 太阳能集热器集热量计算

$$Q_{\text{集}} = S J_T \eta_{cd} / t \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{集}}$ 为太阳能集热器集热量, kW; S 为太阳能补热系统集热面积, m²; J_T 为月平均日太阳能辐照量, MJ/m²·d; η_{cd} 为太阳能集热器集热效率, 取 0.538; t 为日照小时数, h。

② 集热量 (补热换热量) 能够引起的机组出水温升 ΔT_1

$$\Delta T_1 = \frac{Q_{\text{补}}}{1.163 * V_1} \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{补}}$ 为太阳能补热量/集热量, kW; V_1 为机组冷凝器侧水流量, m³/h。

经计算, 本项目集热量引起的机组最大温升为 1.73℃, 能够保证机组在高效运行范围内。

3.2.2 冬季运行工况

冬季运行工况下, 通过阀门切换, 机组冷凝器出水先经过地埋管进行热交换, 再经过板式换热器, 吸收太阳能热量后流回机组。既保证了太阳能补热系统有效的将太阳能集热量回灌到地埋管中, 又提高了机组蒸发器的温度, 保证了供暖系统的高效运行。

3.2.3 过渡季运行工况

过渡季运行工况下, 关闭地源热泵系统, 太阳能补热系统对土壤进行补热。

3.3 运行费用

经计算, 本系统夏季制冷运行费用 19.58 万元, 冬季供暖运行费用 108.32 万元, 太阳能补热运行费用 6.1 万元, 总运行费用 134 万元。

4 地源热泵+空气源热泵系统

4.1 设计思路

考虑地源热泵系统与空气源热泵系统能够稳定联合运行, 同时降低末端循环水泵并联的流量折减。经合理计算匹配, 地源热泵与空气源热泵装机容量各承担负荷的 50%。由于空气源热泵制热量会随室外温度的下降而衰减, 而制冷量衰减不像冬季

工况剧烈，故夏季选择空气源热泵机组部分轮换开启。图 5 为空气源热泵制热性能随室外环境温度的变化曲线，该曲线可直观描述室外温度对空气源热泵制热性能的影响。

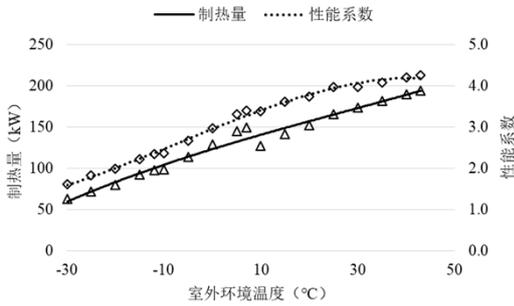


图 5 空气源热泵性能变化曲线

Fig.5 Air source heat pump performance change curve

4.2 运行策略

该系统的运行策略以温度为监控点，以某一种能源形式为基载，承担基础负荷，另一种能源形式作为调峰使用，通过监测温度确定辅助能源的起停。即有三种方案，第一：以地源热泵系统为基载，承担基础负荷，空气源热泵系统作为调峰使用；第二：以空气源热泵系统为基载，承担基础负荷，地源热泵系统作为调峰使用；第三：采用分时段-温度控制的策略，即采用一年中不同季节来控制机组的启停，对于本系统，在初冬或冬末室外湿球温度较高时，空气源热泵系统优先运行，在其他时间段，地源热泵机组承担基础负荷，空气源热泵系统作为调峰使用。

4.2.1 地源热泵承担基础负荷

在部分负荷时优先运行地源热泵系统，通过监测机组回水温度以及机组负载率，判定单独运行地源热泵系统是否能够满足建筑负荷需求。当负荷增大、无法满足设计工况时开启空气源热泵系统进行调峰。该方案的优点是发挥了设置地源热泵系统的作用，充分应用了地源热泵系统环保、高效、节能的优点，降低系统的运行费用。

根据长春市的气温曲线以及该项目的热负荷分布曲线，在峰值热负荷时，对应的室外气温为-28℃，按照空气源热泵的制热曲线，在-28℃工况下，单台空气源热泵的制热量为 66.88kW。该方案共设计 150m 深地埋孔 528 个，主机设备选型参数如表 1 所示，系统承担负荷分布如图 6 所示。

表 1 主机设备选型参数表

Table 1 Equipment selection parameter table

设备名称	地源热泵	空气源热泵	合计
设备数量	2	27/17	—
单台制冷量 (kW)	1215	138	—
总制冷量 (kW)	1215	2346	4776
制冷能源占比 (%)	51.39	49.61	101.00
单台制热量 (kW)	1061	66.88	—
总制热量 (kW)	1061	1806	3928
制热能源占比 (%)	54.66	46.51	101.17

注：空气源热泵机组冬季峰值负荷时开启 27 台，夏季峰值负荷时开启 17 台。

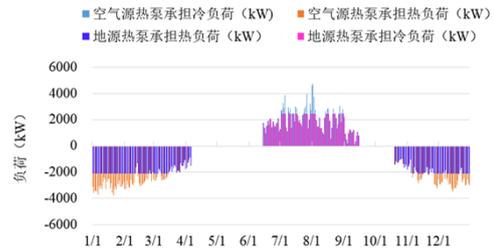


图 6 复合能源系统各种能源承担负荷分布

Fig.6 Energy distribution of composite energy system

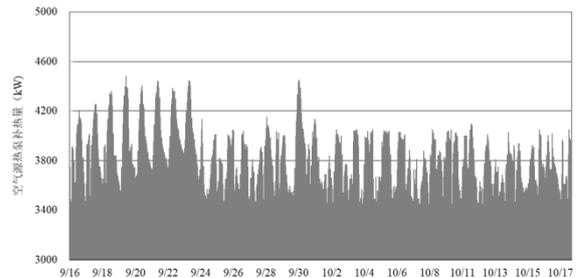


图 7 空气源热泵系统补热量

Fig.7 Air source heat pump supplement heat

经计算，在种运行策略下地源热泵系统承担峰值冷负荷为 2430kW，累计承担的冷负荷为 1529.51MWh，承担峰值热负荷为 2122kW，累计承担的热负荷为 6017.54MWh。地源热泵系统全年向土壤排热量为 1807.60MWh，向土壤取热量为 4680.31MWh，全年取排热热量差值为 2872.71MWh，不平衡率为 61.38%。

经过迭代计算，空气源热泵在 9 月 16 日到 10 月 17 日补热运行，该时间段室外平均干球温度 12.29℃，在该工况下空气源热泵 COP 为 3.53，补热效率相对较高，且将补热时间选择在制冷季末至供暖季前这段时间，能够有效减少热量流失。图 7

为空气源热泵补热量分布图, 经计算, 空气源热泵总补热量为 2941.90MWh, 满足所需补热量 2872.71MWh 的需求。

4.2.2 空气源热泵承担基础负荷

在部分负荷时优先运行空气源热泵系统, 通过监测机组回水温度以及机组负载率, 判定单独运行空气源热泵系统是否能够满足建筑负荷需求。当负荷增大、无法满足设计工况时开启地埋管地源热泵系统进行调峰。

该方案的优点是充分利用了空气源热泵系统在夏季室外干、湿球温度相对较低时段以及冬季室外干、湿球温度相对较高时段运行效率较高的特点, 提高了空气源热泵系统的运行效率。

根据该项目的热负荷分布曲线, 在 50%左右热负荷时, 对应的室外气温均 $\geq -5^{\circ}\text{C}$, 因此可以按照 -5°C 工况选择空气源热泵机组, 承担同样比例负荷下, 降低了空气源热泵的装机容量。按照空气源热泵的制热曲线, 在 -5°C 工况下, 单台空气源热泵的制热量为 114.5kW。该方案共设计 150m 深地埋孔 528 个, 主机设备选型参数如表 2 所示, 各系统承担负荷分析如图 8 所示。

表 2 主机设备选型参数表

Table 2 Equipment selection parameter table

设备名称	地源热泵	空气源热泵	合计
设备数量	2	17	—
单台制冷量 (kW)	1215	138	—
总制冷量 (kW)	2430	2346	4776
制冷能源占比 (%)	51.39	49.61	101.00
单台制热量 (kW)	1061	114.5	—
总制热量 (kW)	2122	1947	4069
制热能源占比 (%)	54.66	50.14	104.79

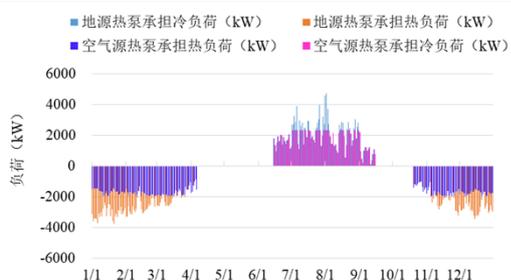


图 8 复合能源系统各种能源承担负荷分布

Fig.8 Energy distribution of composite energy system

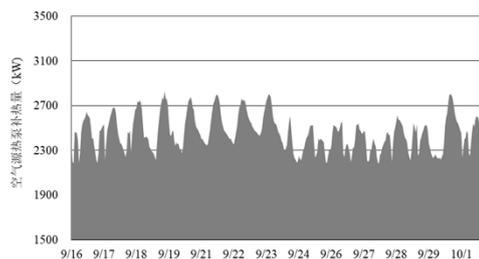


图 9 空气源热泵系统补热量

Fig.9 Air source heat pump supplement heat

经过计算, 在该种运行策略下, 地源热泵系统承担峰值冷负荷为 2430kW, 累计承担的冷负荷为 98.85MWh。地源热泵系统承担峰值热负荷为 2122kW, 累计承担的热负荷为 1310.57MWh。地源热泵系统全年向土壤排热量为 116.82MWh, 向土壤取热量为 1019.33MWh, 全年取排热不平衡率为 88.54%, 该系统全年取排热热量差值为 902.51MWh。

经过迭代计算, 空气源热泵在 9 月 16 日到 10 月 1 日补热运行, 该时间段室外平均干球温度 14.79°C , 在该工况下空气源热泵 COP 为 3.63, 补热效率相对较高, 且将补热时间选择在制冷季末至供暖季前这段时间, 能够有效减少热量的流失。图 9 为空气源热泵补热量分布图, 经计算, 空气源热泵总补热量为 942.53MWh, 能够满足所需补热量 902.51MWh 的需求。

4.2.3 分时段-温度控制

地源热泵+空气源热泵耦合系统运行策略采用分时段-温度控制的方法。即采用一年中不同季节来控制机组的启停, 为了避免发生水环路温度过高的情况, 用设定机组最高回水温度的温度控制的方法作为补充。

分时段-温度控制需要结合建筑所在区域的气候条件和全年日负荷等数据来制定系统的运行策略, 以提高系统的运行效率。对于本系统, 在初冬室外湿球温度较高时, 空气源热泵系统可以优先运行, 在冬末, 刚度过热负荷的高峰阶段, 地埋管周围土壤温度已经降低, 热负荷已经处于较低的水准。继续让地埋管持续工作会导致热泵系统的运行效率降低, 此时让空气源热泵系统优先运行, 让其承担这部分较低的热负荷, 使得系统整体运行达到最优。在其他时间段, 地源热泵机组承担基础负荷, 空气源热泵系统作为调峰使用。

该方案的优点在于既充分利用了室外干、湿球温度相对较高时的阶段，提高了空气源热泵机组的运行效率。又充分应用了地源热泵系统环保、高效、节能的优点，降低系统的运行费用。

经过迭代试算，在 10 月 20 日~11 月 10 日的初冬以及 3 月 13 日~4 月 6 日的冬末单独开启空气源热泵系统，其他时间段，地源热泵机组承担基础负荷，空气源热泵系统作为调峰使用。查长春市供暖季气温分布曲线，在该时间段，最低气温为 -13.2℃。查该项目冬季热负荷分布曲线图，在该时间段最大热负荷为 2450.7kW。查空气源热泵机组制热量随室外气温分布曲线，在 -13.2℃时，空气源热泵机组总制热量为 2581.2kW，单独运行空气源热泵机组能够满足该时间段热负荷的需求。各系统的承担负荷分析如图 10 所示。

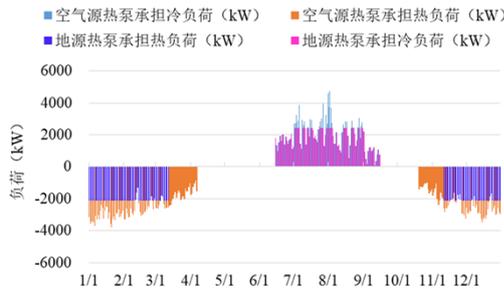


图 10 复合能源系统各种能源承担负荷分布

Fig.10 Energy distribution of composite energy system

经过计算，在该种运行策略下，地源热泵系统承担峰值冷负荷为 2430kW，累计承担的冷负荷为 1529.51MWh。地源热泵系统承担峰值热负荷为 2212kW，累计承担的热负荷为 5043.65MWh。地源热泵系统全年向土壤散热量为 1807.60MWh，全年向土壤取热量为 3922.84MWh，全年取排热热量差值为 2115.24MWh，全年取排热不平衡率为 53.92%。

经过迭代计算，空气源热泵在 9 月 16 日到 10 月 8 日补热运行，该时间段室外平均干球温度 13.17℃，在该工况下空气源热泵 COP 为 3.53，补热效率相对较高，且将补热时间选择在制冷季末至供暖季前这段时间，能够有效减少热量流失。图 11 为空气源热泵补热量分布图，经计算，空气源热泵总补热量为 2127.51MWh，能够满足所需补热量 2115.24MWh 的需求。

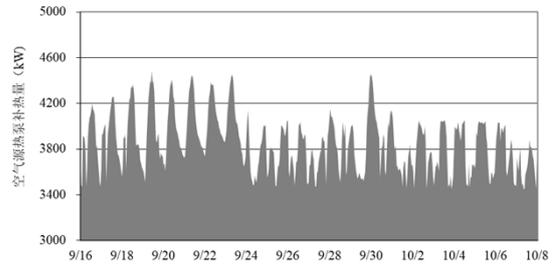


图 11 空气源热泵系统补热量

Fig.11 Air source heat pump supplement heat

4.3 运行费用

综合考虑项目所在地能源分时价格及各系统不同工况的运行参数，计算该系统运行费用。

4.3.1 地源热泵承担基础负荷

经计算，地源热泵承担基础负荷-空气源热泵调峰的运行策略下，地源热泵系统夏季制冷运行费用 18.60 万元，冬季供暖运行费用 99.92 万元；空气源热泵夏季制冷运行费用为 1.95 万元，冬季供暖运行费用为 17.05 万元；空气源热泵补热运行费用为 62.58 万元；全年运行费用 200.09 万元。

4.3.2 空气源热泵承担基础负荷

经计算，空气源热泵承担基础负荷-地源热泵调峰的运行策略下，地源热泵夏季制冷运行费用 1.20 万元，冬季供暖运行费用 9.78 万元；空气源热泵夏季制冷运行费用 36.34 万，冬季供暖运行费用 177.84 万元；空气源热泵补热运行费用为 19.60 万元；全年运行费用为 244.76 万元。

4.3.3 分时段-温度控制

经计算，地源热泵承担基础负荷-空气源热泵调峰并辅以分时段-温度控制策略下，地源热泵夏季制冷运行费用 18.6 万元，冬季供暖运行费用 83.75 万元；空气源热泵夏季制冷运行费用 1.95 万元，冬季供暖运行费用 41.71 万元；空气源热泵补热运行费用 44.88 万元；全年运行费用 190.88 万元。

5 经济性分析

该项目初投资估算如表 3 所示，建筑性质为自持出租，假定运营收费标准为 62 元/m²，则从业主方考虑，各系统收益-支出增长如图 12 所示。由图可知，运营收费收益与初投资+运行费用等支出相持平的时间依次为：地源热泵+空气源热泵系统且采用分时段+温度控制系统为 9.31 年，地源热泵+

空气源热泵系统且地源热泵承担基础负荷为 9.90 年, 地源热泵+太阳能系统为 10.96 年, 地源热泵+空气源热泵系统且空气源热泵承担基础负荷为 12.08 年。故本项目采用地源热泵承担基础负荷-空气源热泵调峰并辅以分时段-温度控制策略经济性最优。

表 3 初投资估算

Table 3 Initial investment estimate

	地源热泵+空气源热泵系统			地源热泵+太阳能系统
	地源热泵承担基础负荷	空气源热泵承担基础负荷	分时段-温度控制	
	(万元)	(万元)	(万元)	(万元)
地源热泵	850	850	850	1700
空气源热泵	600	380	600	0
太阳能	0	0	0	630
合计	1450	1230	1450	2330

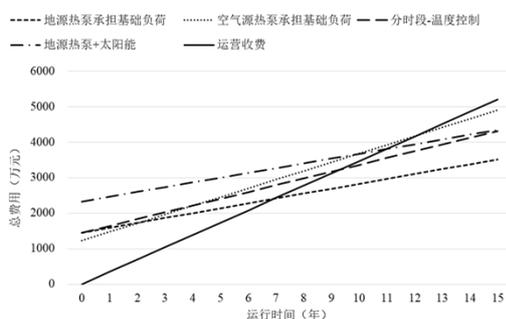


图 12 收入支出增长图

Fig.12 Income and expenditure growth

6 结论

本文以长春市某产业园项目为例, 利用 DeST 软件计算了全年逐时动态负荷, 对不同能源耦合方

式以及不同运行策略下的各个系统经济性进行了分析, 得出如下结论:

(1) 地源热泵+太阳能耦合系统, 初投资最高、运行费用最低;

(2) 地源热泵+空气源热泵的耦合系统, 采用以空气源热泵承担基础负荷时, 初投资最低, 运行费用最高;

(3) 地源热泵+空气源热泵的耦合系统, 采用分时段-温度控制的策略时, 在系统的全寿命周期内经济性最好;

(4) 不同的能源耦合方式的经济性与建筑所在区域的气候条件、全年日负荷数据以及工程场地的地层资料、太阳能辐照量、能源价格能有关。

参考文献:

- [1] 崔正旭. 北方严寒地区超低能耗建筑应用技术策略研究[J]. 低碳世界, 2017, (19): 191.
- [2] 白晨光, 韩宗伟, 李彪, 等. 多热源耦合热泵系统在严寒地区的运行性能研究[J]. 建筑环境与能源, 2017, (2): 152-157.
- [3] 宋晓蓓. 严寒地区多热源耦合热泵系统特性与参数优化研究[M]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [4] 张姝, 张希浩, 张聪慧, 等. 严寒地区土壤源热泵热补偿策略综合试验台研制[J]. 节能技术, 2017, (8): 48-50.
- [5] 韩宗伟, 王一茹, 杨军, 等. 严寒地区热泵供暖空调系统的研究现状及展望[J]. 建筑科学, 2013, 29(12): 124-133.
- [6] 金洪文, 孙妍, 马喆, 等. 超低温空气源热泵在严寒地区供暖应用研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2017, 33(6): 728-731, 743.
- [7] 06K503, 太阳能集热系统设计与安装[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.