

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-043-13

# 基于 C#的地源热泵 多能耦合系统方案设计软件开发

孙寅 魏俊辉 孙林娜 刘启明 甄璐莹

(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

**【摘要】** 地热能是可再生能源之一, 而地源热泵系统是应用地热能的一种重要方式。为提升工作效率, 基于 Visual Studio 2022 开发平台, 以 C#编程语言下的 WPF 框架开发了一款地源热泵多能耦合系统方案设计软件, 并依托于某项目对该软件在实际工程中的可用性、准确性进行了验证。该软件运行结果表明选用 2 台某地源热泵机组及 5 台某空气源热泵机组可承担该项目冷热负荷, 每年耗能为 4347.36MWh, 总能耗费用 449.53 万元, 单平米能耗费用 33.30 元/m<sup>2</sup>, 在得到特定比例补贴的情况下投资成本总计 3545.92 万元, 单平米造价 262.66 元/m<sup>2</sup>, 与原设计方案一致。

**【关键词】** 地源热泵; 方案设计; C#程序设计; WPF

中图分类号 TP311/TU83 文献标志码 A

## Software Development for the Design of Multi-Energy Coupling System of Ground Source Heat Pump Based on C#

Sun Yin Wei Junhui Sun Linna Liu Qiming Zhen Luying

(BGI Engineering Consultants, Beijing, 100038)

**【Abstract】** Geothermal energy is one of the renewable energy sources, and the ground source heat pump system is an important way to apply geothermal energy. To improve work efficiency, a software for designing the multi-energy coupling system of ground source heat pumps has been developed using the WPF framework under C# programming language based on the Visual Studio 2022 development platform. The usability and accuracy of the software in practical engineering have been verified through a certain project. The operation results of the software show that two certain ground source heat pump units and five certain air source heat pump units can bear the cold and heat loads of the project. The annual energy consumption is 4347.36MWh, and the total energy cost is 4.49 million yuan. The energy cost per square meter is 33.30yuan/m<sup>2</sup>. With a specific subsidy, the total investment cost is 35.46 million yuan, and the cost per square meter is 262.66yuan/m<sup>2</sup>, which is consistent with the original design plan.

**【Keywords】** Ground source heat pump; Design proposal; C# programming; WPF

## 0 引言

随着人口的增长以及传统能源的日渐枯竭, 我国对可再生能源的开发和利用也日渐重视, 寻找新能源、提高能源利用效率已成为如今的重要课题。《“十四五”现代能源体系规划》确立了 2020—

2025 年间碳排放量下降 18%、非化石能源消费比重达到 20%、非化石能源发电比重达到 30% 的目标<sup>[1]</sup>。

地热能作为一种可再生能源, 具有储量大、稳定性高、不易受环境影响等优点。地源热泵系统可

通过消耗少量的电能,将蕴藏在土壤里、地下水内的地热能转移至建筑内进行利用,是利用地热能的一种重要形式。我国对地源热泵系统的应用愈加重视,《北京市新增产业的禁止和限制目录(2022年版)热力生产和供应业管理措施实施意见》中建议新建建筑的地源热泵供热装机占比不低于60%<sup>[2]</sup>。

近年来,随着国家政策的鼓励及地源热泵系统应用的深入,有关于地源热泵的理论研究与实际应用研究也日趋丰富。王宏伟<sup>[3]</sup>等人利用 TRNSYS 搭建了地源系统模型并模拟其运行十年,得到了地温与热泵机组 COP 的关系。胡志高<sup>[4]</sup>等人对武汉地区 10 个公共建筑项目的地源热泵系统运行参数进行了测试及分析,并与常规能源进行了节能对比。吴子龙<sup>[5]</sup>利用风机盘管将冬季空气冷量储存于土壤中以解决地源热泵取排热不平衡问题,并搭建试验台验证此方法实际效果。唐茂川<sup>[6]</sup>等人对重庆市某医疗建筑的地源热泵系统进行了运行数据监测,分析了能效比与土壤热不平衡率。李永<sup>[7]</sup>等人地源热泵系统上增加一蓄热系统用以改善土壤热不平衡问题,基于 TRNSYS 建立了该系统模型并与实际数据进行了对比。

单独利用地源热泵系统需要考虑到土壤热平衡等问题。在实际工程中,地源热泵系统与其他能源系统耦合使用是一种平衡地源热泵取排热量的方式。地源热泵多能耦合系统方案设计计算过程繁杂,且消耗时间较长,为提高工作效率,基于 Visual Studio 2022 开发平台,以 C# 编程语言下的 WPF 框架开发了一款地源热泵多能耦合系统方案设计软件。该软件目前耦合了地源热泵系统与空气源热泵系统,并通过某项目验证了该软件的可行性。

## 1 理论模型

在实际的方案设计过程中,通常可得到的前期资料为工程项目的建筑面积、供能面积、冷负荷指标、热负荷指标等,根据这些资料需要计算出项目的冷热负荷、耗热量、空调耗电量等,并根据具体情况得到地源热泵系统的装机负荷,并结合初投资、运行费用得出一个经济、节能的选型方案。

工程项目的冷负荷与热负荷通过式(1)、式(2)计算:

$$Q_{cool,n} = q_{cool,n} \times S_{cool,n} \quad (1)$$

$$Q_{heat,n} = q_{heat,n} \times S_{heat,n} \quad (2)$$

式中:  $Q_{cool,n}$  为工程项目第  $n$  地块的冷负荷, kW;  $Q_{heat,n}$  为工程项目第  $n$  地块的热负荷, kW;  $q_{cool,n}$  为工程项目第  $n$  地块的冷负荷指标, kW/m<sup>2</sup>;  $q_{heat,n}$  为工程项目第  $n$  地块的热负荷指标, kW/m<sup>2</sup>;  $S_{cool,n}$  为工程项目第  $n$  地块的供冷面积, m<sup>2</sup>;  $S_{heat,n}$  为工程项目第  $n$  地块的供热面积, m<sup>2</sup>。

工程项目各地块的全年能耗量(即耗热量与空调电力)可通过单位建筑面积能耗指标<sup>[1]</sup>与供能面积计算得到,通过式(3)、式(4)计算:

$$P_{air,n} = p_{air,n} \times S_{cool,n} \quad (3)$$

$$Q_{heat,cons,n} = q_{heat,cons,n} \times S_{heat,n} \quad (4)$$

式中:  $P_{air,n}$  为工程项目第  $n$  地块的空调电力, kWh;  $Q_{heat,cons,n}$  为工程项目第  $n$  地块的全年耗热量, GJ;  $p_{air,n}$  为工程项目第  $n$  地块的空调电力指标, kWh/m<sup>2</sup>;  $q_{heat,cons,n}$  为工程项目第  $n$  地块的采暖耗热量指标, GJ/m<sup>2</sup>。

整个工程项目的供冷面积、供热面积、冷负荷、热负荷、耗热量与空调电力计算方法见式(5)~式(10)。

$$S_{cool,total} = \sum_{n=1}^N S_{cool,n} \quad (5)$$

$$S_{heat,total} = \sum_{n=1}^N S_{heat,n} \quad (6)$$

$$Q_{cool,total} = \sum_{n=1}^N Q_{cool,n} \quad (7)$$

$$Q_{heat,total} = \sum_{n=1}^N Q_{heat,n} \quad (8)$$

$$P_{air,total} = \sum_{n=1}^N P_{air,n} \quad (9)$$

$$Q_{heat,cons,total} = \sum_{n=1}^N Q_{heat,cons,n} \quad (10)$$

式中:  $N$  为该工程项目地块总数;  $S_{cool,total}$  为工程项目总供冷面积, m<sup>2</sup>;  $S_{heat,total}$  为工程项目总供热面积, m<sup>2</sup>;  $Q_{cool,total}$  为工程项目总冷负荷, kW;  $Q_{heat,total}$  为工程项目总热负荷, kW;  $P_{air,total}$  为工程项目总空调电力, kWh;  $Q_{heat,cons,total}$  为工程项目总耗热量, GJ。

工程项目的单平米耗热量与单平米空调电力计算方法见式(11)、式(12)。

$$P_{air,ave} = \frac{P_{air,total}}{S_{cool,total}} \quad (11)$$

$$Q_{heat,cons,ave} = \frac{Q_{heat,cons,total}}{S_{heat,total}} \quad (12)$$

式中:  $P_{air,ave}$  为该工程项目的单平米空调电力,  $\text{kWh/m}^2$ ;  $Q_{heat,cons,ave}$  为该工程项目的单平米耗热量,  $\text{GJ/m}^2$ 。

在按热计算地源热泵的装机负荷时, 其计算方法见式 (13) 一式 (16)。

$$Q_{GSHP,ins,heat} = Q_{heat,total} \times k_{GSHP,heat} \quad (13)$$

$$Q_{ASHP,ins,heat} = Q_{heat,total} - Q_{GSHP,ins,heat} \quad (14)$$

$$Q_{GSHP,ins,cool} = Q_{GSHP,ins,heat} \quad (15)$$

$$Q_{ASHP,ins,cool} = Q_{cool,total} - Q_{GSHP,ins,cool} \quad (16)$$

式中:  $Q_{GSHP,ins,heat}$  为地源热泵系统制热工况下的装机负荷,  $\text{kW}$ ;  $k_{GSHP,heat}$  为规定的地源热泵系统制热工况下的装机占比;  $Q_{ASHP,ins,heat}$  为空气源热泵系统制热工况下的装机负荷,  $\text{kW}$ ;  $Q_{GSHP,ins,cool}$  为地源热泵系统制冷工况下的装机负荷,  $\text{kW}$ ;  $Q_{ASHP,ins,cool}$  为空气源热泵系统制冷工况下的装机负荷,  $\text{kW}$ 。

地源热泵系统的  $COP$  及  $EER$  通过式 (17)、式 (18) 计算:

$$COP_{GSHP} = \frac{Q_{GSHP,heat}}{P_{GSHP,heat}} \quad (17)$$

$$EER_{GSHP} = \frac{Q_{GSHP,cool}}{P_{GSHP,cool}} \quad (18)$$

式中:  $COP_{GSHP}$  为地源热泵系统制热工况下的能效;  $Q_{GSHP,heat}$  为所选地源热泵机组的制热量,  $\text{kW}$ ;  $P_{GSHP,heat}$  为所选地源热泵机组的制热功率,  $\text{kW}$ ;  $EER_{GSHP}$  为地源热泵系统制冷工况下的能效;  $Q_{GSHP,cool}$  为所选地源热泵机组的制冷量,  $\text{kW}$ ;  $P_{GSHP,cool}$  为所选地源热泵机组的制冷功率,  $\text{kW}$ 。

地源热泵系统的系统  $COP$  及系统  $EER$  通过式 (19)、式 (20) 计算:

$$COP_{GSHP,sys} = \frac{Q_{GSHP,heat}}{P_{GSHP,heat} + P_{GSHP,pump,holes} + P_{GSHP,pump,air}} \quad (19)$$

$$EER_{GSHP,sys} = \frac{Q_{GSHP,cool}}{P_{GSHP,cool} + P_{GSHP,pump,holes} + P_{GSHP,pump,air}} \quad (20)$$

式中:  $COP_{GSHP,sys}$  为地源热泵系统的系统  $COP$ ;  $EER_{GSHP,sys}$  为地源热泵系统的系统  $EER$ ;  $P_{GSHP,pump,holes}$  为所选地源热泵机组地埋侧循环泵的功率,  $\text{kW}$ ;  $P_{GSHP,pump,air}$  为所选地源热泵机组空调侧循环泵的功率,  $\text{kW}$ 。

在选定地源热泵机组后, 工程项目可承受的最

大冷热负荷计算方法见式 (21)、式 (22)。

$$Q_{cool,max} = \frac{N_{holes} \times L_{holes} \times q_{rej}}{1000 \times \left(1 + \frac{1}{EER_{GSHP}}\right) \times (1 + \alpha)} \quad (21)$$

$$Q_{heat,max} = \frac{N_{holes} \times L_{holes} \times q_{abs}}{1000 \times \left(1 - \frac{1}{COP_{GSHP}}\right) \times (1 + \alpha)} \quad (22)$$

式中:  $N_{holes}$  为该项目所在地块的地埋孔的可布孔数, 个;  $Q_{cool,max}$  为该项目在布孔数为  $N_{holes}$  时可承受的最大冷负荷,  $\text{kW}$ ;  $Q_{heat,max}$  为该项目在布孔数为  $N_{holes}$  时可承受的最大热负荷,  $\text{kW}$ ;  $L_{holes}$  为地埋孔长度,  $\text{m}$ ;  $q_{rej}$  为该项目所在地块的单米排热量,  $\text{W/m}$ ;  $q_{abs}$  为该项目所在地块的单米取热量,  $\text{W/m}$ ;  $\alpha$  为该项目所在地块的可布孔数的富余系数, %。

地埋孔占地面积通过式 (23) 计算:

$$A_{holes} = N_{holes} \times S_{holes}^2 \quad (23)$$

式中:  $A_{holes}$  为该项目所布地埋孔的占地面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_{holes}$  为该项目所布地埋孔的孔间距,  $\text{m}$ 。

地源热泵地埋侧循环泵及空调侧循环泵的流量计算方法见式 (24)、式 (25)。

$$F_{GSHP,holes} = \frac{(Q_{GSHP,cool} + P_{GSHP,cool}) \times k_{pump}}{c \times \Delta T_{GSHP}} \quad (24)$$

$$F_{GSHP,air} = \frac{Q_{GSHP,cool} \times k_{pump}}{c \times \Delta T_{GSHP}} \quad (25)$$

式中:  $F_{GSHP,holes}$  为该项目所选地源热泵机组地埋侧循环泵的流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $F_{GSHP,air}$  为该项目所选地源热泵机组空调侧循环泵的流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $k_{pump}$  为水泵的富余系数, 与水泵个数有关;  $c$  为水的比热容, 常温常压下取  $1.163 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta T_{GSHP}$  为地源热泵水的进出口温差,  $^\circ\text{C}$ 。

空气源热泵系统常规工况下的  $COP$  及  $EER$  通过式 (26)、式 (27) 计算:

$$COP_{ASHP,nor} = \frac{Q_{ASHP,heat,nor}}{P_{ASHP,heat,nor}} \quad (26)$$

$$EER_{ASHP,nor} = \frac{Q_{ASHP,cool,nor}}{P_{ASHP,cool,nor}} \quad (27)$$

式中： $COP_{ASHP,nor}$  为空气源热泵系统常规制热工况下的能效； $Q_{ASHP,heat,nor}$  为所选空气源热泵机组常规工况下的制热量，kW； $P_{ASHP,heat,nor}$  为所选空气源热泵机组常规工况下的制热功率，kW； $EER_{ASHP,nor}$  为空气源热泵系统常规制冷工况下的能效； $Q_{ASHP,cool,nor}$  为所选空气源热泵机组常规工况下的制冷量，kW； $P_{ASHP,cool,nor}$  为所选空气源热泵机组常规工况下的制冷功率，kW。

空气源热泵系统低温工况下的制热量、制热功率及  $COP$  通过式 (28)、式 (29) 及式 (30) 计算：

$$Q_{ASHP,heat,low} = Q_{ASHP,heat,nor} \times j_{ASHP,heat,low} \quad (28)$$

$$P_{ASHP,heat,low} = P_{ASHP,heat,nor} \times j_{ASHP,heat,low} \quad (29)$$

$$COP_{ASHP,hourly,time} = T_{Dry,time}^3 \times k_{COP,cubic} + T_{Dry,time}^2 \times k_{COP,quadratic} + T_{Dry,time} \times k_{COP,primary} + k_{COP,constant} \quad (31)$$

$$EER_{ASHP,hourly,time} = T_{Dry,time}^3 \times k_{EER,cubic} + T_{Dry,time}^2 \times k_{EER,quadratic} + T_{Dry,time} \times k_{EER,primary} + k_{EER,constant} \quad (32)$$

式中： $T_{Dry,time}$  为项目所在地各个时段的室外干球温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $COP_{ASHP,hourly,time}$  为空气源热泵全年各个时段的  $COP$ ； $k_{COP,cubic}$  为空气源热泵环境温度与  $COP$  曲线的三次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{COP,quadratic}$  为空气源热泵环境温度与  $COP$  曲线的二次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{COP,primary}$  为空气源热泵环境温度与  $COP$  曲线的一次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{COP,constant}$  为空气源热泵环境温度与  $COP$  曲线的常数项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $EER_{ASHP,hourly,time}$  为空气源热泵全年各个时段的  $EER$ ； $k_{EER,cubic}$  为空气源热泵环境温度与  $EER$  曲线的三次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{EER,quadratic}$  为空气源热泵环境温度与  $EER$  曲线的二次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{EER,primary}$  为空气源热泵环境温度与  $EER$  曲线的一次项，由空气源热泵厂家样本查询得到； $k_{EER,constant}$  为空气源热泵环境温度与  $EER$  曲线的常数项，由空气源热泵厂家样本查询得到。

空气源热泵系统的系统  $COP$  及系统  $EER$  通过式 (33)、式 (34) 计算：

$$COP_{ASHP,sys} = \frac{Q_{ASHP,heat,low}}{\frac{Q_{ASHP,heat,low}}{COP_{ASHP,hourly,ave}} + P_{ASHP,pump,air}} \quad (33)$$

$$EER_{ASHP,sys} = \frac{Q_{ASHP,cool}}{\frac{Q_{ASHP,cool}}{EER_{ASHP,hourly,ave}} + P_{ASHP,pump,air}} \quad (34)$$

$$COP_{ASHP,low} = \frac{Q_{ASHP,heat,low}}{P_{ASHP,heat,low}} \quad (30)$$

式中： $Q_{ASHP,heat,low}$  为所选空气源热泵机组低温工况下的制热量，kW； $j_{ASHP,heat,low}$  为工程项目所在地区的冬季室外计算温度下所选空气源热泵机组的制热量修正系数； $P_{ASHP,heat,low}$  为所选空气源热泵机组低温工况下的制热功率，kW； $j_{ASHP,heat,low}$  为工程项目所在地区的冬季室外计算温度下所选空气源热泵机组的制热功率修正系数； $COP_{ASHP,low}$  为空气源热泵系统低温制热工况下的能效。

空气源热泵系统  $COP$  通过全年逐时  $COP$  的平均值计算，全年逐时  $COP$  及  $EER$  通过式 (31)、式 (32) 计算：

式中： $COP_{ASHP,sys}$  为空气源热泵系统的系统  $COP$ ； $EER_{ASHP,sys}$  为空气源热泵系统的系统  $EER$ ； $COP_{ASHP,hourly,ave}$  为空气源热泵系统的冬季逐时平均  $COP$ ； $EER_{ASHP,hourly,ave}$  为空气源热泵系统的夏季逐时平均  $EER$ ； $P_{ASHP,pump,air}$  为所选空气源热泵机组空调侧循环泵的功率，kW。

空气源热泵空调侧循环泵的流量计算方法见式 (35)：

$$F_{ASHP,air} = \frac{Q_{ASHP,cool} \times k_{pump}}{c \times \Delta T_{ASHP}} \quad (35)$$

式中： $F_{ASHP,air}$  为该工程项目所选空气源热泵机组空调侧循环泵的流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $\Delta T_{ASHP}$  为空气源热泵的进出口温差， $^{\circ}\text{C}$ 。

该工程项目的供冷指标和供热指标通过式 (36) 及式 (37) 计算：

$$I_{cool} = \frac{P_{air,ave} \times 3}{278} \quad (36)$$

$$I_{heat} = Q_{heat,cons,ave} \quad (37)$$

式中： $I_{cool}$  为该工程项目的供冷指标，GJ； $I_{heat}$  为该工程项目的供热指标，GJ； $EER_{rec}$  为空调能效的估算值；278 为 kWh 转换为 GJ 的转换系数。

地源热泵及空气源热泵的年总耗能量计算方法见式 (38) — (41) 所示：

$$E_{GSHP,cool} = \frac{S_{cool,total} \times I_{cool} \times R_{GSHP,cool} \times 0.278}{EER_{GSHP,sys}} \quad (38)$$

$$E_{GSHP,heat} = \frac{S_{heat,total} \times I_{heat} \times R_{GSHP,heat} \times 0.278}{COP_{GSHP,sys}} \quad (39)$$

$$E_{ASHP,cool} = \frac{S_{cool,total} \times I_{cool} \times R_{ASHP,cool} \times 0.278}{EER_{ASHP,sys}} \quad (40)$$

$$E_{ASHP,heat} = \frac{S_{heat,total} \times I_{heat} \times R_{ASHP,heat} \times 0.278}{COP_{ASHP,sys}} \quad (41)$$

式中:  $E_{GSHP,cool}$  为地源热泵在制冷工况下的年总耗能量, MWh;  $E_{GSHP,heat}$  为地源热泵在制热工况下的年总耗能量, MWh;  $E_{ASHP,cool}$  为空气源热泵在制冷工况下的年总耗能量, MWh;  $E_{ASHP,heat}$  为空气源热泵在制热工况下的年总耗能量, MWh;  $R_{GSHP,cool}$  为地源热泵在制冷工况下的供能占比, %, 经逐时负荷计算得出;  $R_{GSHP,heat}$  为地源热泵在制热工况下的供能占比, %, 经逐时负荷计算得出;  $R_{ASHP,cool}$  为空气源热泵在制冷工况下的供能占比, %, 通过逐时负荷计算得出;  $R_{ASHP,heat}$  为空气源热泵在制热工况下的供能占比, %, 通过逐时负荷计算得出; 0.278 为单位转换系数。

以地源热泵制冷工况为例, 年总耗能费用及年单平米耗能费用通过式 (42) 及式 (43) 计算:

$$J_{GSHP,cool,total} = E_{GSHP,cool} \times J_{electric} \times 0.1 \quad (42)$$

$$J_{GSHP,cool,ave} = \frac{J_{GSHP,cool,total}}{S_{cool,total}} \quad (43)$$

式中:  $J_{GSHP,cool,total}$  为地源热泵在制冷工况下的年总耗能费用, 万元;  $J_{electric}$  为项目所在地区的平均电价, 元/kWh;  $J_{GSHP,cool,ave}$  为地源热泵在制冷工况下的年单平米耗能费用, 万元/m<sup>2</sup>; 0.1 为单位转换系数。

地源热泵室外工程初投资计算方法见式 (44):

$$C_{GSHP,outdoor,total} = \frac{N_{holes} \times L_{holes} \times J_{holes,permeter}}{10^4} \quad (44)$$

式中:  $C_{GSHP,outdoor,total}$  为地源热泵室外工程初投资, 万元;  $J_{holes,permeter}$  为地源热泵地埋孔单米打孔价格, 元; 10<sup>4</sup> 为单位转换系数。

地源热泵及空气源热泵机房工程初投资通过式 (45) 及式 (46) 计算:

$$C_{GSHP,room,total} = N_{GSHP} \times Q_{GSHP,cool} \times J_{GSHP,perWatt} \times 0.1 \quad (45)$$

$$C_{ASHP,room,total} = N_{ASHP} \times Q_{ASHP,cool} \times J_{ASHP,perWatt} \times 0.1 \quad (46)$$

式中:  $C_{GSHP,room,total}$  为地源热泵机房工程初投资, 万元;  $N_{GSHP}$  为地源热泵机组台数, 个;  $J_{GSHP,perWatt}$  为地源热泵能源价格, 元/W;  $C_{ASHP,room,total}$  为空气源热泵机房工程初投资, 万元;  $N_{ASHP}$  为空气源热

泵机组台数, 个;  $J_{ASHP,perWatt}$  为空气源热泵能源价格, 元/W; 0.1 为单位转换系数。

该工程项目能源系统总初投资计算方法如式 (47) 所示:

$$C_{total} = C_{GSHP,outdoor,total} + C_{GSHP,room,total} + C_{ASHP,room,total} \quad (47)$$

式中:  $C_{total}$  为该工程项目能源系统总初投资, 万元。

## 2 软件开发

### 2.1 开发环境

本软件采用 Visual Studio 2022 开发平台, 基于 C# 编程语言的 WPF 框架开发。Visual Studio 2022 是微软推出的一款强大的集成开发环境 (IDE), C# 是微软公司推出的一种面向对象的编程语言<sup>[8]</sup>, 其具有稳定可靠、框架丰富等优点。WPF (Windows Presentation Foundation) 则是 C# 的一种用于构建应用程序的框架, 其引入了 XAML 语言, 使得其前端和后端开发实现了分离, 具有易于设计、开发效率高等优点<sup>[9]</sup>。

### 2.2 基本构造

类是 C# 的核心构造之一, 其通过构造类对对象进行抽象的描述。类包含成员和方法, 成员用于存储信息, 而方法则用于执行特定的任务或计算。本软件除了用于执行程序的主窗口类外, 还额外构造了建筑信息类、地源热泵类、地埋孔类、空气源热泵类等 6 个类。以地源热泵类为例, 其包含了机组个数、机组制冷量、机组制冷功率、地埋侧循环泵个数等多个成员, 涵盖了方案设计中需要地源热泵方方面面的数据。本软件构造的类详细信息如图 1 所示。

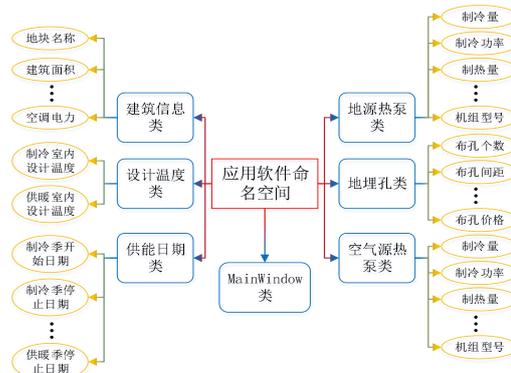


图 1 地源热泵多能耦合系统方案设计软件包含的类与成员

Fig.1 The classes and members included in the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

在 WPF 框架中，各个控件的本质也是类，各个控件的功能均通过其包含的方法实现。本软件中用于执行任务的主要是按钮控件，各个按钮控件包含的方法的功能如图 2 所示。

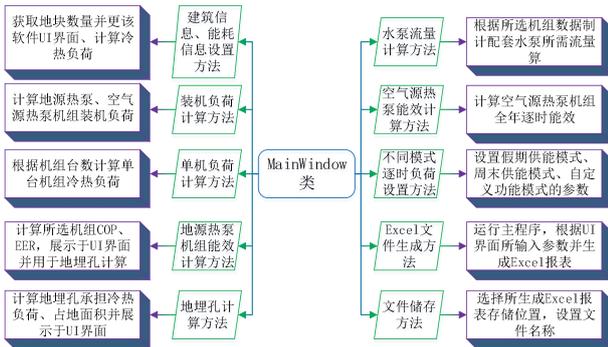


图 2 地源热泵多能耦合系统方案设计软件 MainWindow 类中的包含的方法与其功能

Fig.2 The methods and functions included in the MainWindow class of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat

本软件主要功能为在 UI 界面中输入各个地源热泵方案设计过程中所需的参数，进而一键生成计算表格，达到提高工作效率的目的，流程图如图 3 所示。

由于本软件所涉及编辑框及其他类型的控件总数较多，因此采用 WPF 中的 TabControl 控件(即选项卡控件)对各个控件加以进行分类，并在各个子选项卡中分别显示。如图 4 所示，当前软件界面分为项目信息、能耗指标、地源热泵设备选型、地埋孔设计、空气源热泵设备选型、能源价格、逐时负荷及投资成本 8 个选项卡。而在选项卡之外，具有生成方案设计表格和逐时负荷计算表格的“生成 Excel 表格”按钮控件、显示当前软件运行阶段的编辑框控件以及设置生成的 Excel 表格存储位置的“保存方案”“保存负荷”按钮控件。



图 4 地源热泵多能耦合系统方案设计软件 TabControl 控件

Fig.4 The TabControl control in the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

### 2.3 UI 界面介绍

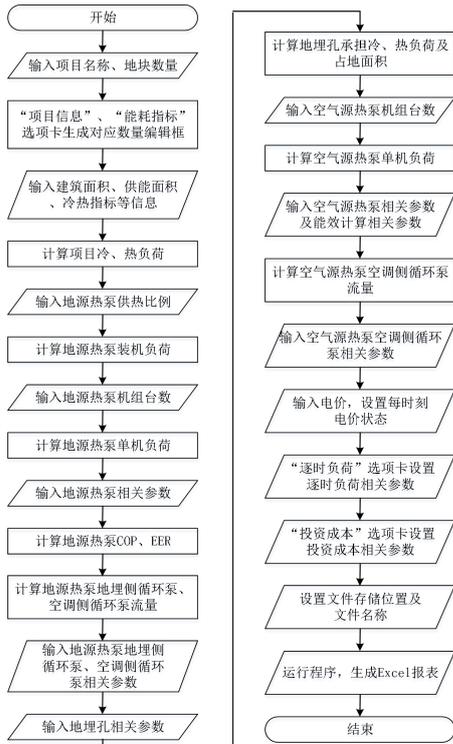


图 3 地源热泵多能耦合系统方案设计软件使用流程图  
Fig.3 The flow chart of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump



图 5 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“项目信息”选项卡

Fig.5 The "Project Information" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

在“项目信息”选项卡的初始界面中，具有“项目名称”编辑框，用以输入工程名称；具有“地块数量”编辑框以及“建筑面积≠供能面积”“供冷面积≠供热面积”多选框以及“确认”按钮，再点击“确认”按钮后 UI 界面会基于操作者进行的根

据地块数量以及业主所提供的项目信息进行的设置产生变化, 例如图 5 为地块数量为 5 且建筑面积与供能面积不相等的情况的 UI 界面。此外, 该选项卡中还有“项目位置”组合框, 用以选择项目位置, 在后续计算中会根据项目位置使用不同的气象参数。

在“能耗指标”选项卡中, 具有四类编辑框, 如图 6 (a) 所示, 分别用于设置该项目各个地块的冷负荷指标、热负荷指标、采暖耗热量指标及空调电力指标, 所显示的个数与“项目信息”选项卡中所设置的地块数量相关联。此外该界面中具有四类多选框, 在选中上述多选框后, 对应的编辑框会变为 1 个, 用于设置各个地块的能耗指标相同时的数据, 如图 6 (b) 所示。此外, 此界面中还有“负荷计算”按钮, 在填写了各地块冷热负荷指标后, 通过此按钮可计算此项目的整体冷热负荷, 并显示于“地源热泵设备选型”选项卡和“空气源热泵设备选型”选项卡中, 用以选型。



(a) 各地块能耗指标不同



(b) 各地块能耗指标相同

图 6 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“能耗指标”选项卡

Fig.6 The "Energy Consumption Indicators" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

本软件当前仅可按热负荷设计地源热泵系统, 在“地源热泵设备选型”选项卡中的“地源热泵供热占比”编辑框内可以设置地源热泵的供热占比, 点击右侧的“装机负荷计算”按钮后, 地源热泵的总冷热装机负荷会在对应的编辑框中显示, 操作者此时可以根

据所显示的数据对地源热泵进行选型。随后考虑台数, 在对应的编辑框输入台数后点击右侧的“单机负荷计算”按钮可以显示出单台地源热泵所需的最低制冷量、制热量, 根据此数据可以查找样本对单台地源热泵进行选型。在填写了制冷量、制冷功率及制热量、制热功率后, 应点击“COP 计算”“EER 计算”按钮计算能效, 随后填写其他信息。

此外, 地源热泵地理侧循环泵以及空调侧循环泵的相关信息也在此选项卡中进行填写。在单击水泵信息填写区域右侧的“流量计算”按钮后, 对应的编辑框会显示水泵所需的最低流量, 操作者可根据此数据查找样本对水泵进行选型。



图 7 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“地源热泵设备选型”选项卡

Fig.7 The " Selection of Ground Source Heat Pump Equipments" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump



图 8 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“地理孔设计”选项卡

Fig.8 The "Design of Buried Hole " tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

“地理孔设计”选项卡的作用是在项目布孔完成的情况下, 根据最大可布孔数、单米取、排热量

等数据计算该项目所布地埋孔所能承受的最大冷负荷及最大热负荷，以判断该项目是否适合地源热泵系统。此处的 COP、EER 编辑框与“地源热泵设备选型”选项卡中的“COP 计算”“EER 计算”按钮相关联，在点击此按钮后会再次会此处显示数据，无需手动输入。

“空气源热泵设备选型”选项卡的布局与功能与“地源热泵设备选型”选项卡类似。装机负荷区域的编辑框与“地源热泵设备选型”选项卡的“装机负荷计算”按钮相关联，在计算地源热泵装机负荷的同时，此区域编辑框也计算出了空气源热泵的装机负荷。若地源热泵制热占比为 100%，此编辑框将自动被隐藏。根据所计算的空气源热泵装机负荷确定空气源热泵台数，点击“单机负荷计算”按钮，在下一行编辑框中会显示单台空气源热泵的最低冷负荷及热负荷。值得一提的是，在空气源热泵的实际使用过程中，其能效受室外环境影响较大，因此在选型过程中有必要考虑到此因素，尤其是在低温工况下制热。一般一系列室外计算温度下的制热系数、制热功率系数会在机组样本中提供，操作者可在对应编辑框中输入项目所在地区冬季室外计算温度所对应的制热系数、制热功率系数，单击“空气源热泵低温工况计算”按钮，根据计算出的低温工况制热量、制热功率对空气源热泵进行选型。

在本选项卡中也对空气源热泵空调侧循环泵的选型进行了设置，空气源热泵空调侧循环泵的选型方法与地源热泵空调侧循环泵类似。



图 9 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“空气源热泵设备选型”选项卡

Fig.9 The "Selection of Air Source Heat Pump Equipment" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

由于空气源热泵的能效受环境影响较大，因此其能效的计算一般对厂家样本中所提供的环境温度和该温度下的能效进行拟合，进而根据拟合的系数通过全年的逐时干球温度计算全年逐时能效，而最终空气源热泵的能效取全年逐时能效的平均值。这一过程体现在“空气源热泵能效计算”对话框，该对话框通过单击“空气源热泵设备选型”中的“空气源热泵能效计算”按钮调出。鉴于一些厂家会提供产品在特定环境温度下的制热系数、制热功率系数以及相关的制冷系数，而一些厂家则会直接提供制热量、制热功率等，因此该对话框上方的两个单选框用于根据厂家提供的数据设定不同的计算模式。在此对话框中，还需在对应的编辑框中输入项目所在地的冬季室外计算温度以及厂家样本所提供的参数个数，随后界面中会根据所输入参数个数显现不同个数的编辑框，用于输入厂家所提供的参数。在该对话框关闭后，在该对话框中输入的参数都会得到保存。



图 10 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“空气源热泵能效计算”对话框

Fig.10 The "Energy Efficiency Calculate of Air Source Heat Pump" dialog box of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

“能源价格”选项卡主要用于输入电费，在后续计算能源系统运行费用。一般来说，各地区的工商业电价在一天内的不同时段具有不同的价格，可分为平时电价、低谷电价、高峰电价、尖峰电价，

此 UI 界面根据此特点设计。由于各个城市政策不同, 有可能不存在尖峰电价, 此界面最上方单选框提供了有无尖峰电价两种选择。在确定有无尖峰电价后, 操作者需要在平时电价、低谷电价、高峰电价、尖峰电价(如有)编辑框中输入电价, 随后只需要在下方对应时段的组合框选择电价状态, 在后方编辑框会自动显示对应的价格。



图 11 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“能源价格”选项卡

Fig.11 The "Energy Prices" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

在“逐时负荷”选项卡界面内最占据面积最大的是 4 个日历控件, 分别用于设置制冷季、供暖季的起止时间。且在下方编辑框用于输入供能设备的起停时间, 右侧组合框用于设置在设备停止时间的供能状态(例如不制冷、限温供暖等等), 后续对逐时负荷的计算会因为这些选项的不同而采用不同的算法。在界面右上方, 有一组合框及四个编辑框, 用于设置建筑类型以及制冷、供暖设计温度和限温制冷、限温供暖设计温度。在此控件下方可见到三个多选框, 分别用于控制设置寒暑假供能模式、周末供能模式及自定义供能模式的对话框是否可见。如有需要此三种供能模式进行设置, 只需对对应的多选框进行勾选, 随后点击对应按钮调出对话框即可, 对话框如图 13—图 15 所示。在多选框下方为两组单选框及两个编辑框, 用于设置计算逐时冷负荷时的计算模式(幂函数修正、多段线性修正)、夜间负荷启停及对冷负荷系数使用单变量求解方法的初始值、目标值。由于逐时负荷计算量较

大, 因此此选项卡会单独生成一个 Excel 文件, 并且单独设定存储位置。



图 12 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“逐时负荷”选项卡

Fig.12 The "Hourly Load" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump



图 13 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“寒暑假供能设置”对话框

Fig.13 The "Energy Supply Settings for Winter and Summer Vacations" dialog box of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump



图 14 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“周末供能设置”对话框

Fig.14 The "Energy Supply Settings for Weekends" dialog box of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump



图 15 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“自定义供能设置”对话框

Fig.15 The "Custom Energy Supply Settings" dialog box of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

地源热泵+空气源热泵能源系统的初投资构成主要包括地源热泵室外投资、地源热泵机房投资及空气源热泵机房投资。在“投资成本”选项卡中，可以设置地理孔单米打孔价格、地源热泵以及空气源热泵机房投资价格（元/W）、投资倍率以及补贴倍率，通过这些设置可以计算出该能源系统的初投资。



图 16 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“投资成本”选项卡

Fig.16 The "Investment Cost" tab of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

在上述数据设置完毕后，点击“保存方案”按钮和“保存负荷”按钮，会分别弹出一个对话框，用于设置所生成的方案设计 Excel 文件和逐时负荷 Excel 文件的存储位置以及文件名字，如图 17 所示。在上述设置完毕后，单击“生成 Excel 文件”按钮，即可运行程序，最终生成两份 Excel 报表。

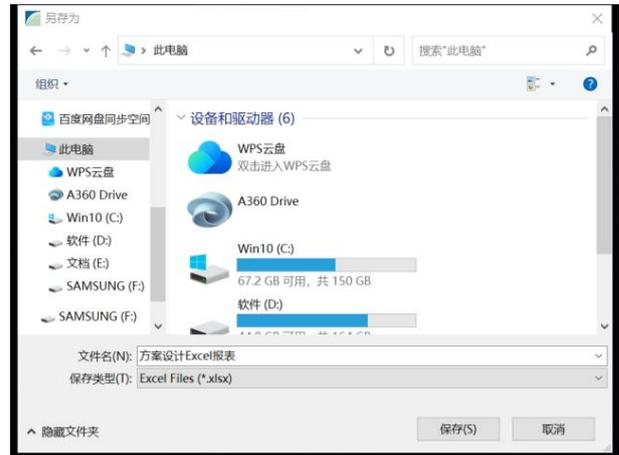


图 17 地源热泵多能耦合系统方案设计软件“另存为”对话框

Fig.17 The "Save as" dialog box of the Design Software for Multi Energy Coupling System based on Ground Source Heat Pump

## 2.4 运行结果

方案设计表格中包含 4 个工作簿，分别名为“面积及负荷统计”“空气源热泵能效计算”“逐时负荷”及“能源基价”。其中“面积及负荷统计”工作簿包含着大部分方案设计所需的数据。其中包含“设计条件”表格、“建筑能耗”表格、“系统装机”表格、“根据设备选型装机”表格、“最大承担冷热负荷”表格、“设备选型”表格、“能耗测算”表格、“布孔方案”表格以及“投资成本”表格。另外，空气源热泵能效过程、逐时负荷以及能源基价相关信息都反映在对应工作簿中。

逐时负荷计算表格中有 6 个工作簿，分别为“气象参数”“参数设置”“供能模式”“负荷计算”“图表数据”及“负荷图表”。“气象参数”工作簿中包含了该地块所在地区的全年逐时干球温度；“参数设置”工作簿显示了该方案的一些基础信息，比如制冷季、供暖季起止日期、项目供能面积、冷负荷、热负荷等等；“供能模式”工作簿则显示了对于周末供能模式、寒暑假供能模式以及自定义供能模式进行的设置；“负荷计算”工作簿

则显示了从原始冷热负荷到最终冷热负荷的计算过程;“图表数据”工作簿整合了全年每日的峰值负荷以及典型负荷日的逐时负荷;“负荷图表”工作簿则对上述各个典型数据进行了可视化。

### 3 项目应用

依托于北京市某能源系统项目,对此软件进行

功能验证。

#### 3.1 项目概况

项目位于北京市丰台区,项目总建筑面积约 13.5 万 m<sup>2</sup>, 业主所提供各个建筑冷热负荷指标如表 1 所示。根据《民用建筑能耗指标》<sup>[10]</sup>, 该项目采暖耗热量、空调电力采用表 2 所示数据。

表 1 该项目冷热负荷统计表

Table 1 The statistical table of cooling and heating loads for this project

分项	供能面积/m <sup>2</sup>	冷指标/(W/m <sup>2</sup> )	热指标/(W/m <sup>2</sup> )	冷负荷/kW	热负荷/kW
合计	135000	100	80	13500	10800

表 2 该项目供能指标统计表

Table 2 The statistical table of energy supply indicators for this project

分项	供能面积/m <sup>2</sup>	单位建筑采暖耗热量/(GJ/m <sup>2</sup> )	单位建筑空调电力/(kWh/m <sup>2</sup> )	采暖耗热量/GJ	空调电力/kWh
合计	135000	0.25	20	33750	2700000

#### 3.2 软件设置

将上述信息输入该软件的“项目信息”及“能耗指标”选项卡内,计算可得出该项目的冷负荷为 13500kW,热负荷为 10800kW。在“地源热泵设备选型”选项卡将地源热泵供热比例定为 60%,可得到地源热泵所需装机热负荷及冷负荷均为 6480kW。

设定地源热泵选用 2 台,软件计算结果显示单台制冷量、制热量均应大于 3240kW。根据上述信息,对地源热泵机组进行选型。查找样本,地源热泵选用 2 台某地源热泵机组,其详细信息如表 3 所示。

对场地进行布孔,孔深定为 130m,孔间距定为 4.5m,可布孔 2840 个,布孔图如图 18 所示。本项目布孔位置是在建筑筏板下,因此考虑 50%的场地利用率,实际布孔数为 1420 个。表 3 所示地源热泵机组 COP 为 4.71, EER 为 5.95。根据周边

浅层地热能勘查结果,单米排热量为 55W/m,单米取热量为 31W/m。考虑 5%富余系数,计算可得地埋孔可承担 8278kW 冷负荷、6919kW 热负荷,可满足地源热泵负荷需求。

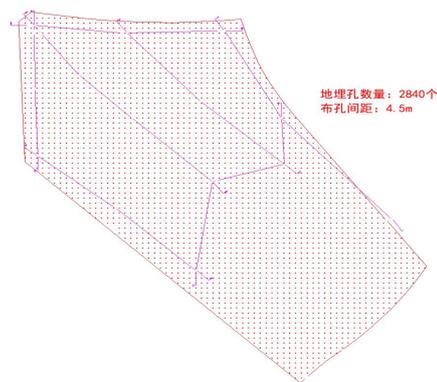


图 18 本项目地埋孔布置示意图

Fig.18 The schematic diagram of buried holes layout for this project

表 3 地源热泵机组配置

Table 3 The configuration of ground source heat pump units

项目	数量/台	制冷量/kW	制冷功率/kW	EER	制热量/kW	制热功率/kW	COP
合计	2	3267	549	5.95	3448	732	4.71

剩余的冷负荷及热负荷由空气源热泵承担,其装机负荷分别为 7020kW 和 4320kW。空气源热泵选用 5 台,经软件计算单台制冷量应大于 1404kW,

单台低温制热量应大于 864kW。所选空气源热泵机组详细信息如表 4 所示。

表 4 空气源热泵机组配置

Table 4 The configuration of air source heat pump units

项目	数量 /台	制冷量 /kW	制冷功率 /kW	EER	常规工况	常规工况	常规	低温工况制热量	低温工况	低温
					制热量 /kW	制热功率 /kW	工况 COP	(室外气温-9.9℃) /kW	制热功率 /kW	工况 COP
合计	5	1473	453.7	3.25	1463	405.3	3.61	943.6	357.1	2.64

根据所选机组的信息，经过软件计算可得出地源热泵机组地理侧循环泵流量应大于 754.67m³/h，空调侧循环泵流量应大于 646.10m³/h；空气源热泵

空调侧循环泵流量应大于 329.30m³/h。查找样本对三种水泵进行选型，详细信息如表 5 所示。

表 5 水泵选型参数

Table 5 The parameters of pump

名称	流量/(m³/h)	扬程/m	功率/kW	数量/台	备注
地源热泵地理侧循环泵	760	30	90	3	两用一备
地源热泵负荷侧循环泵	650	30	75	3	两用一备
空气源热泵空调侧循环泵	330	30	45	5	互为备用

随后在“能源价格”选项卡设定电力价格，根据《国网北京市电力公司代理购电工商业用户电价表》<sup>[1]</sup>设定该能源系统各时段能源基价，北京市无尖峰电价，平时电价为 0.873858 元/kWh，低谷电价为 0.593550 元/kWh，高峰电价为 1.194210 元/kWh。

根据本项目附近场地勘察报告，本项目所处地层第四系厚度为 70m，岩性主要为卵石，其次为粘土，钻孔难度及成本较高，因此地源热泵地理孔钻孔成本设定为 100 元/m。随后对地源热泵机房投资成本、空气源热泵机房投资成本、报价倍率及补贴倍率进行设定。

本项目的制冷季及供暖季起止日期、每日设备时间、设计温度、负荷修正方式等数据在“逐时负荷”选项卡进行设置。制冷季及供暖季起止日期均设置为北京市规定时间，分别为 6 月 15 日—9 月 15 日、11 月 15 日—来年 3 月 15 日；每日设备启停时间设定为每日 8:00—20:00，其余时间在制冷季设置为不制冷，供暖季设置为限温供暖（限温供暖设计温度在下文说明）；建筑类型设置为办公建筑；制冷室内设计温度及供暖室内设计温度均设置为北京市室温标准，即 26℃ 及 18℃，供暖限温设计温度设置为 5℃，因为在制冷季的设备关闭制冷状态设置为“不制冷”，因此无需设置制冷限温设计温度。

### 3.3 测试结果

根据软件运行结果显示，在设定地源热泵供热比例为 60%的情况下，该项目选用 2 台某地源热泵机组承担基础冷热负荷需求，5 台某空气源热泵机组作为调峰冷热源可满足项目冷热负荷要求。地源热泵单台制冷量 3267kW，制热量 3448kW。考虑 5%富余系数情况下，地理孔布孔数 1415 个、孔间距 4.5m、孔深 130m 可承担机组负荷，如图 19 所示；空气源热泵单台制冷量 1473kW，常规工况制热量 1463kW，低温工况制热量 944kW。该工程的全年逐时冷热负荷如图 20 所示，峰值冷负荷为 13500kW，峰值热负荷为 10531.68kW，上述机组配置可承担此负荷。

布孔方案	承担冷负荷 kW	承担热负荷 kW	单米排热量 W/m	单米取热量 W/m	孔深 m	EER	COP	富余系数	设计所需孔数		孔间距 m	占地面积 m²
									按冷计算	按热计算		
自然博物馆	6534	6896	55.0	31.0	130	5.95	4.71	5%	1121	1415	4.5	28660
合计			-	-	-	-	-	-	1415		-	

图 19 该项目地理孔设计方案表格（取自软件生成 Excel 报表）

Fig.19 The design plan table for the buried hole of this project (taken from Excel report generated by the software)

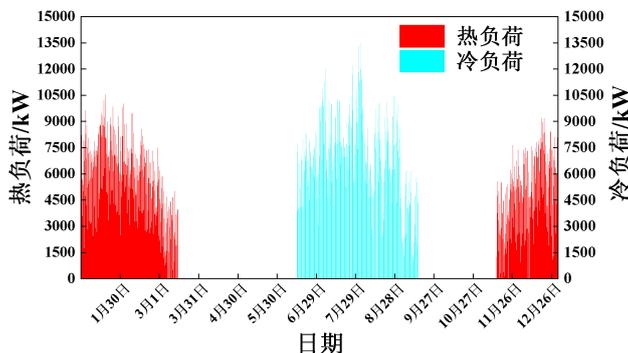


图 20 该项目全年逐时冷热负荷

Fig.20 The hourly cooling and heating load throughout the year of this project

经计算,若采用上述机组供能,每年耗能为 4347.36MWh,总能耗费用 449.53 万元,单平米能耗费用 33.30 元/m<sup>2</sup>,经对比与原设计方案一致,如

图 21 所示。本项目在得到特定比例补贴的情况下投资成本总计 3545.92 万元,单平米造价 262.66 元/m<sup>2</sup>。

能耗测算										
地块	工况	供能指标	系统形式	装机占比	供能占比	系统COP	总耗能量	能源基价	总能耗费用	单平米费用
		GJ/m <sup>2</sup>					MWh	元/kWh	万元	元/m <sup>2</sup>
自然博物馆	制冷	0.22	地源热泵	47.01%	81.38%	4.58	1439.55	1.034034	148.85	11.03
			空气源热泵	52.99%	18.62%	3.53	426.41	1.034034	44.09	3.27
	制热	0.25	地源热泵	59.38%	95.09%	3.84	2319.17	1.034034	239.81	17.76
			空气源热泵	40.62%	4.91%	2.84	162.23	1.034034	16.78	1.24
合计	0.47	-	-	-	-	4347.36	-	449.53	33.30	

(a) 软件生成能耗测算表格

能耗测算										
地块	工况	供能指标	系统形式	装机占比	供能占比	系统COP	总耗能量	能源基价	总能耗费用	单平米费用
		GJ/m <sup>2</sup>					MWh	元/kWh	万元	元/m <sup>2</sup>
自然博物馆	制冷	0.22	地源热泵	48.92%	81.38%	4.58	1439.55	1.0340	148.85	11.03
			空气源热泵	51.08%	18.62%	3.53	426.41	1.0340	44.09	3.27
	制热	0.25	地源热泵	61.15%	95.09%	3.84	2319.17	1.0340	239.81	17.76
			空气源热泵	38.85%	4.91%	2.84	162.23	1.0340	16.78	1.24
合计	0.47	-	-	-	-	4347.36	-	449.53	33.30	

(b) 原设计方案能耗测算表格

图 21 该项目原设计方案能耗测算表格与软件生成能耗测算表格对比

Fig.21 The comparison between the original design Energy Consumption Calculation table and the software generated Energy Consumption Calculation table for this project

### 4 结论

针对地源热泵多能耦合系统方案设计过程计算繁琐的问题,基于 C#语言的 WPF 框架开发了地源热泵多能耦合系统方案设计软件,并依托于北京市某项目验证了该软件的实用性,主要结论如下:

(1) 基于 Visual Studio 2022 开发平台的 C# 语言的 WPF 框架,采用多线程的结构开发了地源热泵多能耦合系统方案设计软件。

(2) 本软件通过将原基于 Excel 表的计算过程集成于软件 UI 界面内,简化了工作流程,达到提升工作效率的目的,降低了方案设计所需时间。

(3) 依托于北京市某项目对该软件的功能进行了验证,在地理孔布孔数为 1415 个、孔间距 4.5m、孔深 130m、选用 2 台某地源热泵机组和 5 台某空气源热泵机组的情况下,每年耗能为

4347.36MWh,总能耗费用 449.53 万元,单平米能耗费用 33.30 元/m<sup>2</sup>,在得到特定比例补贴的情况下投资成本总计 3545.92 万元,单平米造价 262.66 元/m<sup>2</sup>,与原设计方案一致,该结果表明本软件的实用性得到了验证。

### 参考文献:

[1] “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/5680759/files/ccc7dffca8f24880a80af12755558f4a.pdf>.

[2] 北京市人民政府.北京市新增产业的禁止和限制目录(2022 年版)热力生产和供应业管理措施实施意见[EB/OL].2022.[https://fgw.beijing.gov.cn/fgwzwwgk/zcgk/sjbmfgfwj/bjszfwj/202203/t20220317\\_2632583.htm](https://fgw.beijing.gov.cn/fgwzwwgk/zcgk/sjbmfgfwj/bjszfwj/202203/t20220317_2632583.htm).

(下转第 107 页)

为例进行优化控制功能的验证, 该工况的冷水流量  $290\text{m}^3/\text{h}$ , 冷水供水  $7.4^\circ\text{C}$ , 回水  $10.5^\circ\text{C}$ , 负荷为  $1045\text{kW}$ , 根据实时温度和湿度计算出湿球温度。系统调用 MATLAB 程序的 COM 组件, 得出优化变量设定值, 根据冷却水泵流量与电源频率的关系式向 PLC 控制柜发出频率控制指令, 将水泵电源频率调节至频率设定值, 图 4 为系统界面上的水泵频率反馈值与设定值, 均为  $38.38\text{Hz}$ , 说明该系统的上位机能够根据实时的运行工况调用优化模型计算出优化变量设定值, 并且将优化变量设定值传递给 PLC 控制柜, 由 PLC 控制柜将优化变量调节至设定值。

#### 4 结论

建立了基于历史运行数据驱动的空调制冷机房的全局优化控制模型, 编写了全局优化控制模型求解的 MATLAB 程序, 基于 LabVIEW 开发了空调制冷机房在线优化控制系统, 采用 COM 组件技术进行 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程。搭建实验系统对系统功能进行验证, 实验结果表明: 所开发的在线优化控制系统能够根据实时的运行工况将优化变量调节至优化设定值, 实现空调制冷机房的在线优化控制。后续将进一步完善系统功能, 在实际工程中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 徐伟. 中国高效空调制冷机房发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
  - [2] 李元阳, 邱艺德, 方兴, 等. 高效制冷机房标准化设计及其应用[J]. 制冷与空调, 2023, 23(6): 92-100.
  - [3] 刘守超, 吴疆, 张瑞, 等. 基于主动寻优控制系统的制冷机房性能分析[J]. 制冷与空调, 2023, 23(3): 56-61.
  - [4] 黄健. 制冷机房多台冷水机组运行优化节能控制研究[J]. 安装, 2019, (2): 34-37.
  - [5] 张炜杰, 裘舒年, 李铮伟. 冷水机组运行策略对比评价[J]. 建筑节能, 2019, 47(9): 44-47.
  - [6] 魏峥, 王碧玲. 基于机器学习的冷水机组能耗模型辨识方法研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(6): 115-122.
  - [7] Jiang W, Reddy T A. Reevaluation of the Gordon-Ng performance models for water-cooled chillers[J]. ASHRAE transactions, 2003, 109: 272.
  - [8] Jin G Y, Cai W J, Lu L, et al. A simplified modeling of mechanical cooling tower for control and optimization of HVAC systems[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(2): 355-365.
  - [9] 韩伟国, 陆亚俊. 风机盘管加新风空调系统  $e$  值比较设计方法[J]. 暖通空调, 2002, 32(5): 80-83.
  - [10] 徐何, 李滔, 李勇. Matlab 与 LabVIEW 混合编程方法应用研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(33): 8267-8271.
- 
- (上接第 55 页)
- [3] 王宏伟, 李斯南, 张芸栗, 等. 基于 TRNSYS 模拟土壤源热泵长期运行效果研究[J]. 建筑技术, 2024, 55(9): 1064-1068.
  - [4] 胡志高, 胡平放, 王彦芳, 等. 武汉埋管地源热泵系统能效测试分析[J]. 煤气与热力, 2024, 44(3): 1-5.
  - [5] 吴子龙. 跨季节土壤蓄冷—土壤源热泵系统运行特性及优化研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
  - [6] 唐茂川, 陈金华, 田昊洋. 重庆某医疗建筑复合式地源热泵系统分析[J]. 制冷与空调, 2022, 36(5): 763-767.
  - [7] 李永, 崔军艳, 鲍玲玲. 跨季节空气—土壤蓄热式热泵系统运行特性分析[J]. 制冷与空调, 2022, 22(10): 61-69.
  - [8] MichaelisMark. C#本质论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
  - [9] 刘铁猛. 深入浅出 WPF[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
  - [10] DB11/T 1413-2017, 民用建筑能耗指标[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2017.
  - [11] 国网北京市电力公司代理购电工商业用户电价表[EB/OL]. <https://www.95598.cn/omg-static//omg-static/99309271846191757911301501758590.pdf>.