

中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件的开发与应用

崔瑞英, 张星汉, 左未东, 杨志豪, 陶丹玉

中石化中原石油工程设计有限公司, 河南 郑州 450000

摘 要： 本文针对中深层地热供热站工艺系统设计复杂、依赖人工计算效率低的问题，开发了一款集成化设计计算模拟软件。该软件通过分析典型工艺系统模型（如直供、梯级利用、热泵组合等），建立模块化计算逻辑和18个功能模块，整合设备选型数据库（涵盖热泵、换热器、管道等），实现全流程自动化计算与模拟。软件具备参数输入、负荷分配、设备选型、投资估算等功能，支持多工况模拟与方案优化。实际案例验证表明，软件可将传统设计周期从1天缩短至几分钟，计算结果与实测数据偏差 $\leq 3\%$ ，显著提升设计效率和精度，为地热供热工程的高效设计与优化运行提供了可靠工具。

关 键 词： 中深层地热供热；工艺系统设计；模拟软件；模块化计算；设备选型；多工况优化

Development and Application of Simulation Software For Process System Design of Medium-Deep Geothermal Heating Station

Cui Ruiying, Zhang Xinghan, Zuo Weidong, Yang Zhihao, Tao Danyu

Sinopec Petroleum Engineering Zhongyuan Co., Ltd. Zhengzhou, Henan 450000

Abstract： In this paper, an integrated design calculation simulation software is developed to solve the problems of complex design and low efficiency of manual calculation for the process system of medium-deep geothermal heating station. By analyzing typical process system models (such as direct supply, step utilization, heat pump combination, etc.), the software establishes modular calculation logic and 18 functional modules, integrates equipment selection database (covering heat pumps, heat exchangers, pipelines, etc.), and realizes the automatic calculation and simulation of the whole process. The software has the functions of parameter input, load distribution, equipment selection, investment estimation, etc., and supports multi-condition simulation and scheme optimization. The actual case verification shows that the software can shorten the traditional design cycle from 1 day to a few minutes, and the deviation between the calculated results and the measured data is less than 3%, which significantly improves the design efficiency and accuracy, and provides a reliable tool for the efficient design and optimal operation of geothermal heating projects.

Keywords： medium-deep geothermal heating; process system design; simulation software; modular calculation; equipment selection; multi-condition optimization

引言

随着全球对清洁能源的需求日益增长以及环境保护意识的不断提高，地热能作为一种可再生、清洁的能源，其开发利用受到广泛关注。中深层地热供暖作为一种高效利用地热能的方式，在我国得到了快速发展。

中深层地热供暖系统的设计需要综合考虑多种因素，如地热水的温度、流量、水质，供暖区域的面积、建筑类型、热负荷需求，以及回灌地质条件等。这些因素相互关联且变化多样，导致系统组合配置复杂、设备选型多样、参数变量繁多，且计算逻辑方法不同，能够衍生出几百种系统方案。传统的设计方法主要依赖设计人员的经验和手工计算，不仅效率低下，而且容易出错，且输入参数与输出结果呈强耦合性，任一参数调整均需重新验证全系统，耗时耗力。目前尚无适用于这类项目的小巧实用的系统模拟计算软件支持全系统建模与多工况模拟，设计过程中需反复试错，这在很大程度上限制了地热供暖项目的高效设计和优化运行，难以满足快速发展的市场需求。^[1]

本研究旨在开发一款中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件，通过整合典型工艺流程、设备选型特点和全面的选型数据库，实现从基础计算到设备选型、投资估算和占地面积估算的全过程模拟。该软件的开发将大大提高地热供热站设计的效率和准确性，为工程决策提供可靠依据。

一、典型工艺系统计算模型的研究

为便于设计人员能够应用软件完成各种中深层地热供暖工艺系统的全流程计算，就要将各类工艺系统的计算方法统一到一套

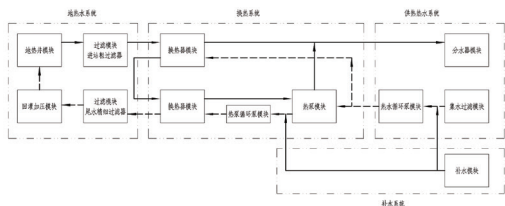
计算逻辑和计算程序中。为实现上述目的，经过以下分析研究：

（一）建立典型工艺系统模型并优化整合

研究人员收集整理了河南、河北、山西、山东、陕西等地区的近百个中深层地热项目案例，深入研究各项目工艺系统特征，

分析其主要影响因素和运行工况。^[2]如地热量、水质、水温、供热用户采暖形式、温度、供热负荷、建筑分区情况、运行模式、设备选型等技术因素等对工艺系统的影响特性。

通过分析研究,发现大部分工艺系统框架的设计思路是基本一致的,主要分为地热井、过滤回灌、直供换热、热泵供热、供暖循环、分区供应、补水系统等几大功能区块。但是工艺系统中设计变量多,对系统计算方法影响较大;不同设备配置又形成了多种运行工况和系统设计。



> 图1 通用模块化工艺系统示意图

研究人员总结设计影响关键因素和工艺系统特点, 整合提炼4种可涵盖大部分工艺系统方案的典型工艺系统模型, 包括“直供+热泵不分区换热系统”“梯级直供+热泵不分区换热系统”“直供不分区换热系统”“梯级直供分区换热系统”。这些典型模型涵盖了直供、梯级利用、热泵、分区供暖等多种常见工艺形式, 能够满足不同项目的需求。

同时结合实际项目的设计和运行经验,对典型工艺系统模型进行优化,使其更加合理、高效。优化后的模型能够更好地适应不同输入参数的变化,提高系统的灵活性和适应性。^[3]

(二) 建立典型工艺系统的全流程计算模型, 确定关键参数特性

对4类典型工艺系统模型,模拟工程设计计算过程,进行全系统计算数据模型的创建。通过四套计算过程试验,总结出1.所有类型计算都需要的基础输入参数列入设计输入模块;2.所有系统计算的数据基础是各个环节负荷和流量的分配,此为关键参数;3.直供和热泵负荷分区分配是关键,一般直供首先满足负荷较小区;4.设备台数和连接方式对系统类型和计算取值有很大影响,是关键参数;直供一般1~2台,有串并联形式,热泵前置板换一般不超过2台,并联为主,热泵跟随分区每区一般1~2台;5.建筑分区一般最多分高、中、低三区;6.各类泵的流量、扬程是关键参数。

通过计算过程分析,采用模块化建模方案,形成18个计算模块,包含:设计参数输入模块、负荷计算和分配模块、高区直供板换模块、高区热泵前置板换模块、高区中间循环泵模块、高区

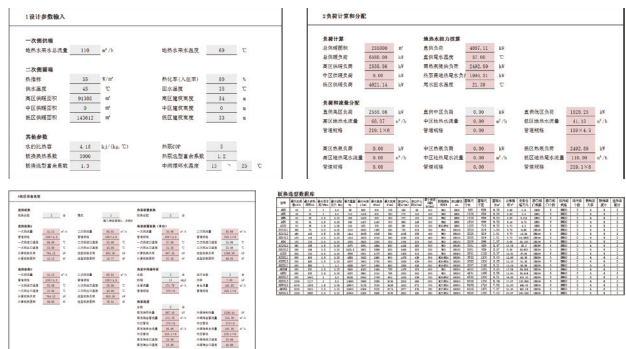


图2 计算模块示例

热泵模块、中区直供板换模块、中区热泵前置板换模块、中区中间循环泵模块、中区热泵模块、低区直供板换模块、低区热泵前置板换模块、低区中间循环泵模块、低区热泵模块、供暖循环泵模块、补水泵模块、潜水泵模块和回灌加压泵模块。涵盖工艺系统所有设备选型和管路设计计算。

（三）整合算法和计算逻辑，创建通用型计算方法

研究人员对不同类型工艺系统计算逻辑归一化分析,研究多种计算模块组合条件下的通用判断条件、计算方法、系统参数关联逻辑,基于以上研究中确定的关键参数,整合算法,通过关键变量参数形成判断条件,进行计算公式的选取和数据的调用。最终设计和创建一套适用性强、覆盖面广的计算逻辑和关联判断条件,将所有系统计算整合成一套计算模型。

研究效果:该方法适用直供、梯级利用、热泵、高中低分区、板换串并联等所有组合形式的计算。可完成整个项目全套系统设备管道的计算。给定条件,自动判断流量划分、自动计算设备选型参数、管道规格、泵功率。^[4]

二、计算数据库的创建研究

为了计算过程中可以调取相应数据,同时实现直接进行设备和管道选型,减少设计人员额外工作,研究人员创建计算数据库:包含热泵选型数据库、板式换热器选型数据库、循环泵、补水泵选型数据库、管道水力计算数据表、管径匹配选型表、泵功率匹配数据表等。

通过分析地热项目参数条件, 筛选建立设备选型数据库, 为了实现计算结果与工程设计紧密结合, 详细记录了设备的性能参数、基础尺寸、配管尺寸、阀门和仪表配套数量、安装操作空间尺寸、投资估算价格、安装估价等信息, 为设备选型提供数据支持。通过分析一般选型方法, 确定关键选型参数, 由面积、负荷、功率等设备参数的计算结果关联数据库进行自动选型。

管道选型数据库中包含有不同流量、压力等级下的对应的管道规格、材质、比摩阻、流速等参数,为管道选型提供依据,由管道流量计算结果数据关联数据库自动选型。^[5]

计算取值数据库包含泵功率计算表、管道水力计算表、管径匹配取值表等,关联系统计算结果,通过结果判定取值,以便用于下一步计算。

[illegible]

> 图3 数据库示例

研究效果：通过数据库的建立和完善，全流程计算数据模型就可以实现输入基础参数和关键参数，一键完成全部工艺计算、

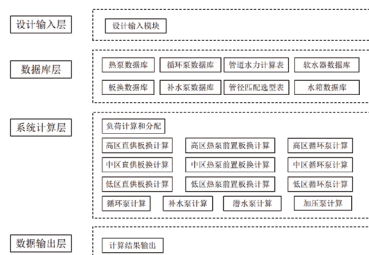
设备选型、管道选型，并可拓展仪表阀门统计、投资估算和面积估算等功能。

三、计算软件开发与应用

基于以上研究积累的计算模型和数据库,采用编程语言开发地热供热系统工艺计算模拟软件,内嵌工艺系统和所有设备选型计算方法、计算公式和逻辑判断条件。^[6-7]

（一）软件架构设计

软件主要由数据输入层、数据库层、系统计算层、数据输出层组成。包含六大功能组件: 设计输入、负荷计算和分配、高区设备计算选型、中区设备计算选型、低区设备计算选型、辅助设备计算选型、计算结果输出。将18个系统计算模块嵌入。



> 图3 软件架构

（二）软件工作流程

软件工作主要流程：软件主界面为设计输入界面，输入项目基本条件参数，点击“负荷计算和分配”功能，可自动计算得出结果，依次点击“高区设备计算选型”“中区设备计算选型”“低区设备计算选型”功能，输入关键变量参数：设备台数、运行模式，后台根据判断逻辑，选取前序计算结果中相对应数据，选用对应公式计算，并调用数据库，形成设备选型参数结果；点击其他功能，输入变量参数，通过系统后台判断，调用前序计算结果和数据库，进行计算。

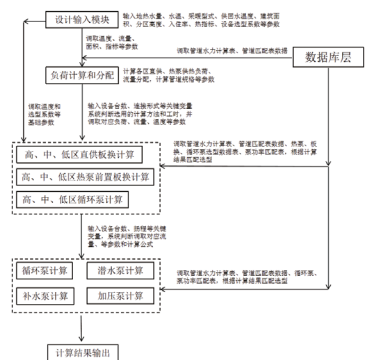


图4 软件工作流程

（三）软件界面设计

软件采用友好的轻便易用的用户界面,以设计输入为主界面,集成各个计算功能模块,计算过程可视化和结果输出,大大提高了使用便捷性。

(四) 软件应用试验

软件能够实现全工艺系统计算过程的集成模拟。研究人员以一个23万平方米小区地热供热站的设计为实验案例,按照平时工作流程和计算过程,进行流程草图绘制、EXCEL 计算表格创建、查找数据、计算调整、翻找样本选型,需要最少1天时间完成;在



多工况变化、方案系统修改、设备选择修改时,需要重新创建计算过程,调整修改,一套至少需要1~2小时完成。通过集成计算软件的应用,只需几分钟即可完成。效率极大提高,且模拟结果与实测数据偏差 $\leq 3\%$ 。

通过实际案例应用,验证了软件在地热供热站设计中的准确性和实用性。用户只需输入基本参数,软件即可自动完成复杂计算和选型过程,大大提高了设计效率。同时,软件支持多种方案的比较分析,有助于优化系统设计和降低工程成本。^[8-9]

四、结论

本研究成功开发了一款中深层地热供热站工艺系统设计计算模拟软件,可对中深层地热供暖的多种工艺系统进行一键快速计算和多种工况模拟,为设计过程中设备和管道选型、工艺方案对比,运行期工况模拟提供高效直观的计算工具。达到减少人力时间投入、缩短设计周期、提高计算精度和质量、指导运行操作等功能。^[10] 软件基于对典型工艺流程的深入研究,建立了全面的选型数据库,具有计算准确、功能全面、使用便捷等特点。实际应用表明,该软件可显著提高地热供热站设计效率,为工程决策提供可靠依据,对推动地热能利用技术的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 王伟, 张强, 李华. 中深层地热供热系统换热性能模拟与优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 45-52.
- [2] 刘志鹏, 等. 基于 TRNSYS 的地热供热站动态仿真及参数优化[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 88-94.
- [3] 陈璐, 等. 中深层地埋管地热系统热力计算模型研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(12): 1801-1808.
- [4] 黄志刚, 等. 中深层地热井群供热系统热力耦合模型与优化分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1205-1212.
- [5] 孙晓峰, 等. 中深层地热供热站工艺参数敏感性分析与优化[J]. 暖通空调, 2023, 53(2): 55-61.
- [6] 吴磊, 等. 中深层地热与热泵联合供热系统的能效分析与设计[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 152-159.
- [7] 高翔, 等. 中深层地热供热系统经济性评价模型构建与应用[J]. 煤气与热力, 2021, 41(12): 23-28.
- [8] Lund J W, et al. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. Geothermics, 2020, 90: 101915.
- [9] Li X, et al. Optimization of medium-deep geothermal heating systems using hybrid simulation methods[J]. Applied Energy, 2021, 281: 116035.
- [10] Bayer P, et al. Computational modeling of shallow and deep geothermal systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 160: 112287.