

小型模块化低温堆城镇集中供热系统运行参数调控研究

丁乾坤

中国核动力研究设计院

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8936

[摘要] 小型模块化低温堆具有自然循环、本质安全、低碳高效等优点，是适合城市采暖的一种新的核电装置，可以高效地取代传统的石化能源供暖方式。文章分析低温堆供热系统三层热交换结构及关键参数耦合作用下的系统性能特征，确定其在不同工作状态下的安全性极限。根据城市热力系统的空间和时间变化特征，研究城市热力系统单个参量的精确控制和多元参量的协调联动调节方法，并采用基于模糊 PID 的方法对其进行自适应调节。以期在城市集中供暖系统的安全、有效运行及工艺优化设计奠定基础。

[关键词] 模块化；低温堆城镇；集中供热系统；运行参数

Research on Operation Parameter Control of Small Modular Low-Temperature Reactor Urban Central Heating Systems

Ding Qiankun

China Nuclear Power Research and Design Institute

[Abstract] Small modular low-temperature reactors offer advantages such as natural circulation, inherent safety, and low carbon efficiency, making them a novel nuclear power device suitable for urban heating that can efficiently replace traditional fossil fuel-based heating methods. This paper analyzes the system performance characteristics under the three-layer heat exchange structure and the coupling effects of key parameters in low-temperature reactor heating systems, determining their safety limits under different operating conditions. Based on the spatial and temporal variation characteristics of urban thermal systems, the study investigates precise control of individual parameters and coordinated regulation methods for multiple parameters, employing a fuzzy PID-based approach for adaptive adjustment. These efforts aim to establish a foundation for the safe, efficient operation and process optimization design of urban central heating systems.

[Key words] Modular design; Low-temperature reactor city; Central heating system; Operating parameters

随着我国“双碳”目标的不断深入和城市清洁供暖需求的不断增加，传统燃煤和燃气供暖模式面临着碳排放高、环境污染严重、能耗利用率低等问题。因此，城市供热系统的节能减排是当前发展的重要趋势。基于非主动自然循环原理，小型模块化低温反应堆具有安全性高、运行维护简单、传输损耗低等优点，逐渐成为城市供暖提供了一种全新的洁净能源来源。目前我国低温热电站大多为定参数运行方式，未能与城市热负载的变化特性相匹配，且在运行过程中面临着参数匹配度低、工况适应性差、运行经济性差等问题。由于多因素的耦合作用，使得现有的控制方法很难兼顾供热的稳定性、安全性和节能

性。为此，对小型模块化低温堆供热系统的操作参数进行研究，通过机理分析、策略优化，建立适用于该装置的精确控制方法，促进核电供暖的规模工程化应用。

一、小型模块化低温堆城镇集中供热系统架构与运行特性

（一）供热系统组成和工作原理

与常规石化能源供暖方式不同，小型模块化低温堆供热系统具有本质安全、能耗低、无碳排放等优点，适合城市小规模化供暖场合。以清华大学自主研发的 NHR200- II 集成式低温核

反应堆为主要能源，将整个系统划分为三个层次，即：堆芯—环芯热交换系统、中间热二回路交换系统、城镇末端热力管网，实现从核到热的转换和传输的完整流程^[1]。第一级回路采用完全密闭的、不需要启动的、利用冷热流体密度差来自动完成冷却剂循环的系统，大大减少了装置的故障和能源消耗。一回路冷却剂由核内裂变放出的能量加热冷却剂，再由蒸气发生装置

进行自然循环，实现换热；二回路蓄能蓄热后生成的高温水经城市集中供暖网络送到乡镇的各个换热站点；利用终端换热器将管道内的热量向居民供暖，从而达到城市整体的供暖目的，流程见图 1。一体化紧凑布局和非主动安全的方式，将其布置在城郊地区，可以有效地减少供暖网络的间距，减少热量的传输损失，与常规的燃煤供暖方式相比，整体供暖的能效提高。

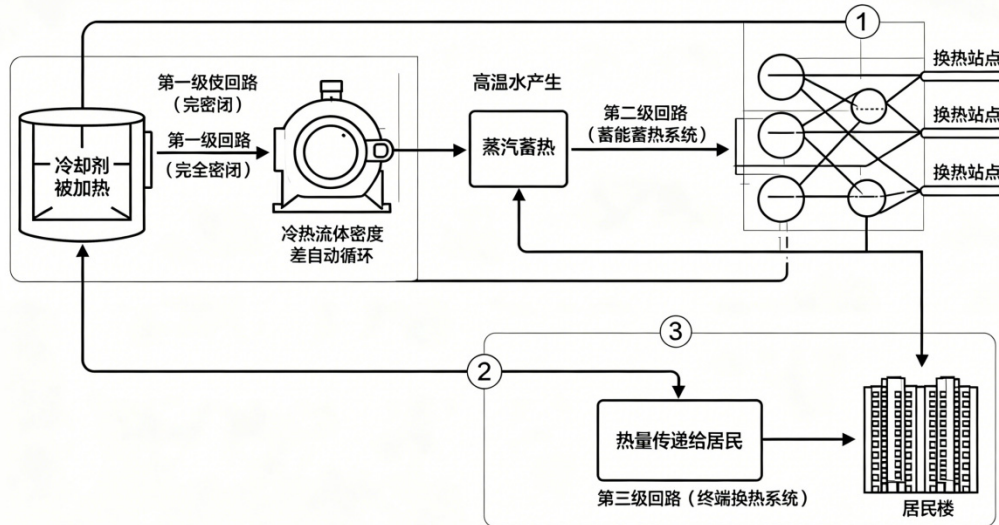


图 1 低温堆城镇集中供热系统供热流程图

（二）系统核心运行参数与阈值

结合 NHR200-II 低温堆工程运行标准及城镇供热规范，通过对运行过程的作用机制和运行工况的选择，识别出对整个系

统安全和供暖品质有重要作用的关键运行指标，并提出相应的控制措施。具体见表 1。

表 1 系统核心运行参数

运行参数	额定工况数值	安全运行阈值	合理调控区间
堆芯入口温度	232℃	≤245℃	220~240℃
堆芯出口温度	280℃	≤295℃	270~290℃
二回路工作压力	8.8MPa	≤9.5MPa	8.2~9.2MPa
供热管网供水温度	105℃	≤110℃	85~108℃
供热管网供回水温差	25℃	30℃	18~28℃
管网循环流量	320m ³ /h	350m ³ /h	260~330m ³ /h

这些参数之间存在着一定的联系和制约关系，而堆芯入口和出口的温度则是影响整个系统发电能力的重要因素。二回路的压力与管网的流量和温度一起决定着供暖的容量，从而对城市末端供暖的品质产生重要的作用。各项参数调整要严格控制在一个安全限值之内，避免因超参操作而引起的装置失效和事故。

（三）系统的动力学特征和负载变化规律

小模块的低温热机组具有大惯性、纯滞后和非线性的特点，与传统的热动力系统有很大的不同。由于堆芯具有大的热惯量，其动力调控的延迟时间一般在 30~60 秒左右，且在进行参数调节后不能立即进入稳定状态；此外，多个操作参数之间具有很强的耦合作用，单个流量和温度参数的变动将导致压力和供热功率的联动，使得精确控制的难度大大增加。根据城市供暖系统的特点，在采暖期，系统的负载表现出明显的时间和空间变化特点。住宅白天有较多的生产、生活和工作活动，建筑物的热量释放速度很大，其热载荷处在较高的水平；随着夜

晚气温的下降，采暖需求的降低，采暖需求逐渐降低；该装置在极端温度条件下，其最高可达额定负载 110%—120%，且具有显著的调峰压力^[2]。常规的定参量操作方式难以适应动态负载的变化，容易导致供热过剩、高能耗或缺电，迫切需要建立精细的参量调控系统。

二、系统运行参数调控策略设计与优化

（一）调节的基本原理和指标系统

以保证反应器的安全性为第一条件，避免超临界操作；根据城市用能负荷的动态演变规律，准确地进行参量和负载的匹配，以减少传输能耗和提高热能利用率为优化目的，综合考虑末端供暖的平稳性和舒适度，构建多维度多层次的调节目标。其中，控制的主要指标包括：保证堆芯温度和二回路的压力处于一个安全范围内，避免超温或超压的风险；供暖指标：保证城市终端居民室内温度在 18~24 度之间保持恒定，供暖温度分

布均衡。

(二) 单一参数的调节机制研究

在充分考虑各关键操作参数各自独立工作特点的基础上, 根据工作环境要求, 提出有针对性的单个参数调节策略, 以满足小负载变化条件下的单参数精确、稳定控制需求。针对堆芯的温控, 以堆芯的输出温度作为关键的调节目标, 通过堆芯的能量回馈来完成闭环的调节。在负荷较小而管网供水温度较高的情况下, 使堆芯的温度保持在 $275\sim 285^{\circ}\text{C}$ 之间; 在负荷减少、热量过剩时, 依次降低堆芯的能量, 从而有效地降低堆芯的温升, 避免因温度急剧变化而引起的系统振荡, 从而保证堆芯的稳定工作^[3]。在对管道的流量和压力进行控制时, 根据管道的压差反馈来调整水泵的工作频率。在供暖高峰期, 如果管网压力低, 流量不足, 则适当提高流量, 使供水、回水压力差值保持在 $0.4\sim 0.6\text{ MPa}$; 在低负载条件下, 通过减小输送流量, 以此减小输送损失, 防止因高电压操作引起的管路损耗和能量损失。在供、回水的调节上, 采用 25°C 的设计值作为参考, 并依据周围的气温进行调整。当外界气温下降 5°C 时, 供、回水的温差提高 $2\sim 3$ 度, 从而保证了最终的供暖容量; 当气温上升时, 供、回水温差会随之下降, 从而达到微小的动态适应。

(三) 多参数协调控制系统的构建

单一参量的单独调节难以有效地克服由于各参量之间的相互影响而引起的波动, 难以满足负荷大幅波动和极端天气等多种复杂条件下的调节准确性。因此, 需要建立适用于多工况条件下的“温-流-压-功”的多参量协调控制系统, 并通过多个参量的耦合作用, 达到与其相匹配的多变量联动调节。协同控制核心思想是: 以城市实际用电负载作为调节参考, 对堆芯功率、一回路温度、二回路压力、管网流量等关键指标进行联动, 从而实现闭环联动调节。在大负载情况下, 首先将核心出力抬升, 并与提升系统的循环量进行配合, 适当升高水温以确保供暖与负载相适应, 并将次级回路的压力控制在 9.2 MPa 以内, 避免安全隐患。在低负载情况下, 通过减小核心功率和管网的流速, 使给水水温稍微下降, 保持供回水温差的平稳, 从而降低了系统的无效能量消耗。此外, 为克服系统大惯性和滞后等问题, 采用超前调控机制, 根据外界温度的变化规律, 预测系统的热负荷, 实现对系统的预调整。与单一参量调节相比, 多参量协同调节能够显著减小参量的变化范围, 提高对运行条件的适应性。

(四) 用模糊 PID 方法进行调节最优控制

常规的 PID 控制方法不能适应系统的非线性和强耦合特性, 在调节中容易出现超调和稳态误差。基于模糊 PID 的调整方法, 利用模糊逻辑对 PID 的比例参数、积分参数和微分参数进行在线调整, 从而实现系统的自适应调整^[4]。该方法在执行期间, 对系统的温度、压力、流量、负荷偏差和偏差的速率进行了实时采集, 并利用模糊逻辑进行优化, 实现了对调节输出的动态调整。当工况发生突变或参数变化较大时, 增大比例系数, 提高响应速度; 当系统的各参量趋于稳定状态时, 减小积分系数, 抑制过冲; 当系统的参数发生剧烈变化时, 对系统的

微分系数进行优化, 提高了系统的稳定性。通过对其进行优化, 可以克服现有调控方法存在的滞后、波动大和精度不足等缺陷, 显著提高其动力学调控效果。

三、供热系统参数调控效果仿真验证与性能分析

(一) 系统安全性和稳定性的确认方式

为了充分检验单一和多参数的协调调控作用, 通过 24 小时连续模拟实验, 获取系统温度波动幅度、压力稳态误差、供热达标率、系统能耗、响应时间等关键性能参数。此外需要通过管网压力波动、环境温度骤降、负荷突变等多种非正常情景的干扰情况进行模拟试验, 对所提出的控制方案进行安全性和可靠性检验。实验证明, 该系统在多个参量的协调调节下, 各机组的主要工作指标都被严密地监控在一个安全限值之内, 没有出现过热、超压和异常流量等问题。该方法能够在 30 秒之内实现对外部干扰的自动调整, 并迅速回到稳定状态, 具有良好的容错和抗干扰性, 能够充分满足城市供暖系统对安全性和可靠性的要求。

(二) 系统应用建议

针对城市低温水冷堆供暖系统, 建立多参量协调调节模型, 突破常规的定参量操作方式, 提高其精细操作能力。根据当地冬天温度和负载的变化情况, 对调节算法的参数进行调整, 使其适应区域供暖特性。建立电力市场的电力负荷实时监控和预测平台, 实现电力市场的互联调节, 提高电力市场的动态适应性。通过本项目的研究, 可以将多能源协同供暖系统与清洁能源调峰装置相融合, 实现多能源协同供暖的协同控制, 并充分发挥其应用的灵活性和节约能源的潜能。

四、结束语

通过小型模块化低温堆城镇集中供热系统的运行特性分析、调控策略优化及性能测试研究, 可较好地解决常规定置调控方式适应性差、动态稳定性不足等问题。小型模块化核电供暖是解决城市供暖低碳转型难题和优化区域能源布局的重要途径, 对于促进我国核能的民用和规模化应用, 构建清洁低碳、安全高效的城镇供暖系统, 促进我国实现“双碳”的战略目标, 具有重大的理论和现实意义。

[参考文献]

- [1]李连飞, 刘宁川, 张帅. 推动小型模块化反应堆与化工园区耦合发展的政策建议[J]. 中国化工园区, 2026, (3): 26-30.
- [2]游战洪, 刘年凯. 清华大学核研院研制 5 MW 低温核供热试验堆与 10 MW 高温气冷实验堆的工程技术创新[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16 (3): 354-363.
- [3]Solomykov Aleksandr, 赵金玲, 顾青青, 等. 基于核能低温供热堆调节特性的基本热负荷确定方法研究[J]. 暖通空调, 2023, 53 (2): 108-114+126.
- [4]朱珈辰, 张亚东, 杨笑, 等. 池式低温供热堆快速供热启动方式仿真研究[J]. 节能技术, 2021, 39 (5): 448-451.