

双碳目标下新能源多能互补供热系统的优化配置 与能效评估

温凯

国能宁夏供热有限公司, 宁夏 银川 750001

DOI:10.61369/ERA.2026020024

摘 要 : 在“碳达峰、碳中和”双碳目标背景下, 构建安全、低碳、高效的新能源多能互补供热系统已成为能源转型的重要方向。本文构建了涵盖能源采集、转换、储能、辅助能源、管网、负荷与监控调度七大单元的系统总体架构, 并建立了太阳能集热器、地源热泵、蓄热水箱及燃气锅炉等关键设备的数学模型, 同时结合负荷预测与新能源资源特性模型, 形成了系统运行策略模型。以全生命周期经济成本最低、碳排放量最小和系统能效最高为目标, 构建了多目标优化配置模型, 并采用 NSGA-III 算法进行求解, 以获得兼顾多目标的帕累托最优配置方案。基于科学性、系统性等原则, 构建了包含能效、经济、环境三个一级维度及十余项二级指标的综合评估体系, 并结合层次分析法与模糊综合评价法进行系统性能的量化评估。研究成果可为双碳目标下新能源多能互补供热系统的规划设计、优化运行和性能评价提供理论依据与技术支撑。

关 键 词 : 双碳目标; 多能互补; 供热系统; 优化配置

Optimal Allocation and Energy Efficiency Evaluation of New Energy and Multi-Energy Complementary Heating System Under Double Carbon Target

Wen Kai

CHN ENERGY Ningxia Heating Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750001

Abstract : Under the background of "peak carbon dioxide emissions, Carbon Neutralization", it has become an important direction of energy transformation to build a safe, low-carbon and efficient new energy multi-energy complementary heating system. In this paper, the overall framework of the system covering seven units, namely energy collection, conversion, energy storage, auxiliary energy, pipe network, load and monitoring and dispatching, and the mathematical models of key equipment such as solar collectors, ground source heat pumps, heat storage water tanks and gas boilers are established. At the same time, the system operation strategy model is formed by combining load forecasting and new energy resource characteristic model. Aiming at the lowest economic cost, the lowest carbon emission and the highest system energy efficiency in the whole life cycle, a multi-objective optimal allocation model is constructed and solved by NSGA-III algorithm, so as to obtain a Pareto optimal allocation scheme with multi-objectives. Based on the principles of scientificity and systematicness, a comprehensive evaluation system including three first-level dimensions of energy efficiency, economy and environment and more than ten second-level indicators is constructed, and the system performance is quantitatively evaluated by combining analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method. The research results can provide theoretical basis and technical support for the planning, design, optimal operation and performance evaluation of new energy and multi-energy complementary heating system with double carbon targets.

Keywords : double carbon target; multi-energy complementarity; heating system; optimal allocation

引言

供热系统作为能源消耗与碳排放的主要领域之一, 其传统的以化石能源为主的模式已难以适应新时代的发展要求。因此, 开发利用太阳能、地热能等可再生能源, 构建安全、环保、低碳的新型供热系统, 是实现建筑领域节能减排、助力双碳目标落地的关键路径。然而太阳能、风能等新能源具有天然的间歇性与波动性, 单一能源系统难以满足供热负荷连续稳定的需求。在此背景下, 新能源多能互补

供热系统应运而生。该系统通过整合多种可再生能源与辅助能源，并辅以储能技术，实现能源的梯级利用与优势互补，能够有效平抑单一能源的波动，提升系统整体的供能可靠性与能源利用效率。尽管多能互补供热系统展现出巨大潜力，但在实际推广应用仍面临诸多挑战。为此，本文聚焦于双碳目标下的新能源多能互补供热系统，旨在通过系统化的研究，解决其优化配置与能效评估两大核心问题。研究期望为新能源多能互补供热系统的规划、设计、运行与评价提供一套完整的理论方法与技术支撑，从而推动其在“双碳”战略中的规模化应用。

一、新能源多能互补供热系统建模

（一）系统总体架构设计

随着可持续发展战略的开展以及国家“碳达峰，碳中和”双碳目标的提出，安全、环保、低碳成为我国能源技术的主要要求，分布式冷热电联供系统因其可以充分发展分散资源的潜力，成为了新型能源系统发展的重要方向之一^[1]。新能源多能互补供热系统以“因地制宜、资源适配、梯级利用、稳定可靠”为核心原则，构建一个涵盖能源采集、转换、储能、辅助能源、供热管网、用户负荷和监控调度七大单元的完整体系^[2]。系统根据区域资源禀赋，通过太阳能、地热、空气能等多种采集方式获取能源，经由热泵、锅炉等设备高效转换为可直接利用的热能。储能单元通过储热和储电设施平抑新能源的间歇性，而辅助能源则在关键时刻提供备用保障，确保供热连续稳定。转换后的热能通过优化的管网输送至各类用户，整个系统由一个集成了物联网与智能算法的监控调度单元统一协调，实现实时监测与优化运行^[3]。根据应用场景不同，系统可采用适用于城市大规模供热的集中式架构，或适用于农村、社区等分散场景的分布式架构，以实现资源的高效、可靠利用。

（二）关键设备数学模型

关键设备数学模型是系统建模的核心，需准确描述各设备的输入输出特性、能量转换效率及运行约束条件，为系统的优化配置和运行模拟提供基础^[4]。本文针对系统中的核心设备建立了相应数学模型，太阳能集热器的集热效率受辐照度、环境温度及进水温度影响，其产热量为 $Q_{th} = A \cdot G \cdot \eta$ ；地源热泵的性能系数由蒸发温度和冷凝温度线性拟合确定，其制热量为 $Q_{hp} = W \cdot COP$ ；蓄热水箱的能量平衡遵循 $C \cdot m \cdot dT/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{loss}$ ，其中热损失与温差成正比；燃气锅炉的热效率是负荷率的二次函数，其产热量为 $Q_{gb} = V \cdot q \cdot \eta$ 。这些模型共同构成了系统优化配置与运行模拟的基础。

（三）负荷与资源特性模型

负荷与资源特性模型是系统设计运行的重要基础，需刻画供热负荷时序规律与新能源供应特性^[5]。供热负荷为系统设计运行依据，需逐时预测，含建筑散热、人员/设备散热、太阳得热等，采用逐时负荷算法（ $Q = Q \cdot f$ ， f 为逐时负荷系数，受室外温度等影响，可通过回归或BP/LSTM等拟合，需考虑极端天气峰值以配置备用容量）^[6]。新能源需建准确模型：太阳能用逐时辐照强度 G 描述，基于历史数据结合天气类型拟合（如Hargreaves、Angstrom模型）；地热能刻画土壤温度分布与地埋管换热特性，土壤温度场用热传导方程描述；风能用逐时风速 v 描述，基于评估数据采用Weibull分布拟合。

（四）系统运行策略模型

双碳目标下，系统运行策略核心是优化能源分配，兼顾供热稳定、新能源利用率最大化及碳排放与运行成本最小化^[7]。核心包含三方面协同设计，优先用太阳能、地热能等可再生能源，其次调用储能单元，最后启动燃气锅炉等辅助能源，新能源充足时储能、不足时先释能再启辅助能源；结合新能源供应与供热负荷时序变化，高峰时储能、低谷或负荷高峰时释能，同时设定储能容量、充放电/充放热功率约束；优化设备运行参数（如调节太阳能集热器水泵流量、地源热泵地埋管循环水量），通过监控调度单元实时采集数据动态调整策略。

二、系统多目标优化配置模型

（一）优化目标函数

双碳目标下，系统多目标优化配置模型以经济成本最低、碳排放量最小、系统能效最高为核心目标。经济成本最低聚焦全生命周期成本（LCC），涵盖初始投资（各类设备购置、安装及管网建设）、运行维护（设备与管网维护、人工）及辅助能源消耗成本，目标为最小化全生命周期总经济成本；碳排放量最小聚焦系统运行中燃气、电能等辅助能源消耗产生的碳足迹，目标为最小化总碳排放量（与辅助能源消耗量及单位碳排放系数相关）；系统能效最高以综合能源利用效率（总供热量与总能源输入量的比值，含新能源与辅助能源）为衡量标准，目标为最大化该效率^[8]。因三者量纲不同，需先对其归一化处理，再通过线性加权法转化为单目标优化问题，总目标函数为 $\min F = \omega_1 f_1' + \omega_2 f_2' - \omega_3 f_3'$ （其中 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 为归一化后的各目标值， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为各目标权重系数且和为1，由层次分析法（AHP）结合专家打分确定）。

（二）约束条件

为保障系统的可行性、稳定性和安全性，优化配置模型需满足相应约束条件。各类设备容量需在自身最小/最大允许容量范围内，且满足供热负荷需求；任意时刻系统总供能（新能源供热量+储能放热量+辅助能源供热量-热能损耗） \geq 供热负荷；含容量（ $0 \leq E \leq E_{max}$ ）、充放热功率（ $P_{charge}/P_{discharge}$ 上下限）及能量平衡（ $E_t = E_{t-1} + P_{charge} \cdot \Delta t - P_{discharge} \cdot \Delta t - E_{loss}$ ）约束；设备需符合运行参数规范（如太阳能集热器温度0-100℃、地源热泵蒸发/冷凝温度限制、燃气锅炉负荷率30%-100%）；系统碳排放量 \leq 区域允许最大限值（ $f \leq E_{max_carbon}$ ）。

（三）优化求解算法选择与实现

针对新能源多能互补供热系统这一多目标、非线性、有约束的复杂优化问题，选用NSGA-III算法求解，因其凭借参考点机制能

有效获得分布均匀的帕累托最优解，在处理高维目标和收敛速度上均优于 MOPSO 和 MOSA 算法^[9]。该算法进行种群初始化，设定太阳能集热器面积、地源热泵容量等优化变量及种群规模、迭代次数等参数，并随机生成初始种群；通过计算归一化后的总目标函数作为适应度值，对种群进行非支配排序和拥挤度计算以筛选优质解并维持多样性；基于参考点匹配机制选择个体进入下一代，并对其执行交叉和变异操作生成新种群；此过程循环迭代，直至达到最大迭代次数或种群收敛，输出帕累托最优解集。为确保求解精度与效率，采用正交试验法优化算法参数（如种群100-200，迭代200-300次），并通过标准测试函数验证其性能，同时结合惩罚函数等约束处理机制，提升算法处理实际工程约束的能力。

三、系统能效综合评估体系构建

（一）评估指标体系构建原则

为确保能效评估体系的科学性、合理性和可操作性，构建时需遵循科学性、系统性、可操作性、动态性与针对性五大原则^[10]。指标选取与计算须基于能量平衡等科学原理和国家标准，确保客观准确；体系应全面覆盖能源、经济、环境与运行等维度，理清指标关联以避免重复遗漏；所有指标必须易于测量和获取，如通过运行数据或经济核算直接得出；同时体系需保持动态，能适应“双碳”目标与技术发展，灵活调整权重或增补新指标；必须突出新能源多能互补的特色，增设太阳能利用率、多能互补协调系数等核心指标，以区别于传统供热系统。

（二）一级评估维度

基于双碳目标与系统核心性能，系统能效综合评估体系包含能效、经济、环境三大协同关联的一级维度。能效维度聚焦能源利用效率与运行性能，反映新能源及辅助能源向供热能量的转换能力与节能潜力，核心二级指标有系统综合能效、关键设备运行效率、新能源利用率、多能互补协调系数；经济维度关注经济可行性与经济性，体现系统生命周期内的成本收益情况，是推广应用的重要保障与市场竞争力关键，涵盖投资回收期、单位供热成本、生命周期成本、成本收益率等二级指标；环境维度侧重碳减排效果与环境友好性，彰显对双碳目标的贡献及绿色低碳特性，核心二级指标包括单位供热碳排放量、新能源替代率、污染物排放量。

（三）二级具体评估指标

基于三个一级评估维度，结合系统特点与评估原则，选取二

级评估指标。能效维度包含系统综合能效、太阳能利用率、地热能利用效率、地源热泵 COP、储能设备效率、多能互补协调系数；经济维度涵盖投资回收期（初始投资与年净收益比值，反映投资回收速度）、单位供热成本（生命周期总经济成本与总供热量比值，体现供热经济性）、生命周期成本（含初始投资、运行维护及能源消耗的全周期总费用）、成本收益率（年净收益与初始投资比值，表征投资收益水平）、设备寿命匹配度（关键设备与系统生命周期契合程度，匹配度越高更换成本越低）；环境维度包括单位供热碳排放量（生命周期总碳排放量与总供热量比值，反映碳减排效果）、新能源替代率（新能源供热量与总供热量比值，体现化石能源替代程度）、污染物排放量（运行中 SO₂、NO_x 等总排放量，表征环境友好性）、碳减排效益（较传统化石能源供热系统减碳量与碳交易价格的乘积，反映碳减排经济价值）。

（四）综合评价方法

本文采用层次分析法（AHP）与模糊综合评价法相结合，构建系统能效综合评价方法，以有效处理评估中的模糊性和主观性。通过 AHP 法构建包含目标层、准则层和指标层的层次结构模型，并利用专家两两比较构建判断矩阵，经计算与一致性检验后确定各指标权重。随后开展模糊综合评价，先设定评价等级与分值，再由专家确定各指标的模糊隶属度以构建模糊评价矩阵，然后将权重与矩阵逐层进行模糊合成运算，根据最大隶属度原则得出系统能效的综合等级。评价完成后，根据结果分析系统在能效、经济、环境等方面的不足，提出针对性优化建议，并通过定期更新数据与重新评估，动态调整系统配置与运行策略，实现持续改进。

四、结束语

在“碳达峰、碳中和”战略目标引领下，构建以新能源为主体的多能互补供热系统是推动能源绿色低碳转型、实现建筑领域节能减排的关键路径。本文围绕该系统的优化配置与能效评估两大核心问题展开了系统性研究。研究成果为新能源多能互补供热系统的规划设计与运行管理提供了理论方法和技术支撑，有助于提升系统的经济性、可靠性与环保性，从而更好地服务于国家双碳战略。

参考文献

- [1] 杨丽波. 太阳能--天然气多能互补分布式能源系统动态特性分析[D]. 华北电力大学, 华北电力大学(北京), 2022.
- [2] 林朵童, 白文明, 黄帅, 等. 中深层地源热泵多能互补供热系统运行特性的理论研究[J]. 制冷与空调, 2024, 24(8): 104-112. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2024.08.019.
- [3] 胡俊羽. 基于多能互补的区域综合能源系统优化调度研究与应用[D]. 华北电力大学, 华北电力大学(保定), 2022.
- [4] 曹春旺, 刘凌, 权朝艳, 等. 严寒地区民用建筑多能互补供暖系统应用研究[J]. 青海科技, 2022, 29(3): 187-192.
- [5] 韦新东, 张天阳, 秦焱欣. 多能互补清洁能源供热技术研究进展[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 61-66. DOI: 10.16862/j.cnki.issn1674-3873.2021.01.012.
- [6] 方八零. 混合可再生能源系统的多能互补及集成优化[D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [7] 张淮. 多能互补的综合能源供热系统工程设计及优化[J]. 数字化用户, 2024(26): 23-24.
- [8] 薛会文, 边志敏. 北方小城镇及农村太阳能为主多能互补供热采暖工程技术应用探讨[C]//2015年中国太阳能热利用行业年会暨“十三五”太阳能热利用发展论坛论文集. 2015: 207-211.
- [9] 张凯. 多能互补清洁能源供热技术研究进展[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(17): 2565. DOI: 10.12159/j.issn.2095-6630.2021.17.2456.
- [10] 一飞. 《多能互补分户供暖节能运行应用技术导则》编制组成立暨第一次会议在京召开[J]. 中国建筑金属结构, 2017(12): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1671-3362.2017.12.006.