

地热+多能互补：浅析构建可持续能源系统的关键路径

伊浩然 程英好 张浩 张冀 梁峰伟

中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘查院 河北邯郸 056000

摘要：地热能作为一种稳定可靠、低碳清洁的可再生能源，在能源转型进程中扮演着日益重要的角色。然而，地热能单一开发模式存在效率有限、地域限制等挑战，“地热+多能互补”系统应运而生。本文系统综述了地热多能互补系统的技术原理、应用实践与未来发展趋势，分析了地热与太阳能、风能等能源的互补特性与集成模式。研究表明，多能互补系统能够显著提升能源综合利用效率（提升15-30%），增强系统稳定性与可靠性，并提高项目经济性。同时，本文总结了多能互补系统在发电、供暖、工农业等领域的成功案例，探讨了系统面临的技术、经济挑战，并提出了针对性发展建议。为“双碳”目标下地热能的规模化高效利用提供参考。

关键词：地热+；多能互补；可持续能源系统；关键路径

引言

在全球能源转型与“双碳”目标背景下，地热能因其分布广泛、供应稳定、利用效率高等特点受到广泛关注。据国际可再生能源机构统计，全球地热资源理论储量相当于全球年能源需求的140倍以上，开发利用潜力巨大。然而，传统地热单一开发模式存在效率波动、地域限制、初期投资高等挑战，制约了其大规模应用。

地热多能互补系统通过将地热与太阳能、风能等可再生能源有机结合，实现了能源梯级利用、波动平抑与效率提升，形成了更加稳定、高效、经济的综合能源供应方案。这种模式不仅能克服单一能源开发的局限性，还能充分发挥不同能源的协同效应，提升整个系统的技术经济性和环境友好性。

近年来，国内外在地热多能互补领域已开展了大量理论研究与工程实践。从西安热电厂的“地热+”清洁供热项目到沙特麦地那的地热-太阳能混合系统，一系列成功案例证明了多能互补系统的可行性与优势。本文将系统梳理地热多能互补系统的技术原理、应用实践与未来趋势，为相关研究与工程应用提供参考，助力地热能可在能源结构调整中发挥更大作用。

基金项目：人才强冀工程2025年度项目——碳中和目标下全国地热资源智慧平台研发人才支撑项目。

作者简介：伊浩然（1992—），男，汉族，河北邯郸人，工程师，硕士研究生。

一、地热多能互补系统核心架构与技术原理

地热多能互补系统通过对不同品位地热资源进行梯级利用，并与其他可再生能源协同优化，实现能源综合利用效率的最大化。根据系统整合的能源类型和应用目标，地热多能互补系统可分为以下几种典型技术路线：

（一）系统层级划分

地热多能互补系统在架构上可分为源、网、荷、储四个层级：源侧包括地热及其互补能源；网侧负责能量传输与分配；荷侧涵盖多样化的用能需求；储侧则通过储热、储电等技术实现能量时空调配。这种层级划分确保了系统设计的模块化与运行灵活性，为不同场景下的技术组合提供了基础框架。

（二）地热-太阳能互补技术

地热与太阳能的组合是最常见且最具潜力的多能互补形式，能够有效克服太阳能间歇性和波动性的弱点，利用地热的稳定性提供持续能源供应。在技术实现路径上，主要分为两类：

中低温地热与太阳能热力互补：此类系统通常将中低温地热资源与聚光太阳能结合，通过熔盐储热实现全天候供电。研究表明，在沙特阿拉伯实施的案例中，CSP提供的400-600℃高温热与地热协同，可将系统容量因子提升至90%以上。这一系统特别适合既有良好地热资源又有丰富太阳能资源的地区。

（三）地热与其他能源互补技术

除了上述主要形式，地热还可以与风能、空气能等能源形成互补：

地热-风能互补：风能具有显著的间歇性和波动性，与稳定可靠的地热能形成良好互补。这种组合系统通常通过智能调度算法，在风力充足时优先使用风能，在地热基础上调节保障，实现稳定电力输出。

地热-空气能互补：如济南能投集团的“华山多能互补热泵供热制冷示范项目”创新研发了地热钢套管桩与空气能源塔耦合热泵高效供热供冷技术，成功将地热能和空气能耦合创新利用，构成“靠得住、品位好”的低温热源，实现“天上地下热量互补”，破解了“冬夏冷热不平衡”问题。

表 1-1 地热多能互补系统主要技术组合对比

互补类型	核心技术	优势特征	适用场景
地热-太阳能	CSP+EGS+TES、PV+地热热泵	提升系统温度、改善稳定性、实现全天候供电	太阳能资源丰富地区、干旱半干旱区域
地热-风能	地热基荷+风电调节	平滑输出、提升供电可靠性	风资源丰富区、高寒地区
地热-空气能	地热桩+空气源热泵	解决冬夏热平衡问题、提升取热效率	城市建筑、冷暖双供需求地区

二、地热多能互补系统应用实践与效益分析

地热多能互补系统在全球范围内已有多项成功实践，涵盖了区域供暖、发电综合利用等多种应用类型。这些案例不仅验证了技术可行性，更为后续推广提供了宝贵经验。

(一) 发电领域的创新应用

在发电领域，地热多能互补系统展现出巨大潜力，通过多种技术路线提升发电效率与经济性：

增强型地热系统混合方案：EGS与聚光太阳能、储热系统及天然气/氢能的混合方案，为能源转型提供了多技术协同路径。具体而言，EGS+CSP+TES组合中，聚光太阳能提供400-600℃高温热与EGS协同，通过熔盐储热实现全天候供电；而天然气过渡方案则利用EGS预热联合循环燃气轮机工质，减少30%天然气消耗，CO₂排放降低45%，长期可转向氢能，利用EGS电解水制氢实现零碳循环。

(二) 供暖与区域能源应用

在区域供暖领域，地热多能互补系统已展现出显著的经济和环境效益：

西安热电“地热+”减碳互补清洁供热项目：这一国内首个采用地热能集中替代传统供热的示范项目，也是国内单站换热规模最大的地热能热源项目。该项目采

用“地热井工厂”模式，在厂区内群式布设20口中深层地热井，运用“地热间接换热+热泵梯级利用+燃气锅炉提温互补技术”设计思路，采用“采灌结合、等量回灌”先进技术，开创了国内群采群灌开发利用地热资源的先河。项目建成后，可实现最大供热量75.75兆瓦、年供热量78.54万吉焦、供热面积232万平方米，年可节约燃气约2600万立方米，相当于年节约标煤8万吨、减排二氧化碳约19万吨。

煤炭设计院集团多能互补清洁能源供应技术：该技术创新性整合浅层地热冷热同供、地源热泵快速启动、太阳能-地热融合及余热回收耦合四大核心技术体系，其中浅层地热冷热同供技术使热泵制热能效提升28%，快速启动技术将机组响应时间缩短至5分钟，太阳能-地热融合技术实现98%超高换热效率。

(三) 工农业综合利用实践

地热多能互补系统在工农业领域也展现出广泛适用性：

农业温室种植：利用中低温地热资源结合太阳能，为温室提供稳定热源，同时通过地热发电余热为温室补光系统供电，形成全天候农业生产能源系统。研究表明，此类系统可降低农业温室能耗成本40%以上。

工业流程供热：在食品加工、木材干燥等工业领域，地热多能互补系统可提供稳定流程热源，结合生物质能或太阳能进行温度调峰，确保工业生产的连续性与经济性。

三、地热多能互补系统发展的关键挑战

尽管地热多能互补系统展现出广阔前景，但在大规模推广过程中仍面临技术、经济、政策和环境等多重挑战。

(一) 技术层面挑战

在地热多能互补系统的技术与工程层面，主要存在以下难点：

系统集成复杂度：地热多能互补系统涉及多种能源技术的协同，系统设计和运行控制远比单一能源系统复杂。例如，在混合地热-太阳能系统中，如何优化子系统间的耦合，降低集成系统焓损，是提升整体效率的关键。多能流耦合、参数匹配与动态调控等技术难题尚未完全解决，制约了系统性能的进一步提升。

钻井成本与技术壁垒：钻井成本占地热项目总投资的60%，且随着深度增加急剧上升。虽然犹他FORGE项目通过技术创新使钻井成本降低40%，但对于3-7 km的

深部EGS，装机成本仍高达9, 228\$/kW，构成项目经济性的主要障碍。钻井技术的可靠性、适应性和经济性仍是制约地热多能互补系统规模化发展的关键因素。

储能技术匹配性：多能互补系统需要高效的储能技术实现能量时空调配，但现有储热、储电技术在能量密度、循环效率、成本等方面仍难以完全满足系统需求。特别是在跨季节储能领域，技术经济性尚未得到充分验证，限制了系统对间歇性可再生能源的消纳能力。

（二）经济与成本挑战

地热多能互补系统的经济发展同样面临诸多制约：

初期投资门槛高：地热项目，特别是EGS项目，需要大量前期资本投入，包括资源勘探、钻井工程和设备投资等。尽管地热能的平准化度电成本已显著下降，但高昂的初期投资仍成为阻碍企业进入的主要壁垒。多能互补系统由于涉及多种能源技术与集成方案，进一步增加了前期投资的不确定性与风险。

投资回收周期长：地热多能互补项目通常需要3-5年的建设期和5-8年的投资回收期，较长的回报周期降低了社会资本的投资意愿。特别是对于增强型地热系统与多能互补结合的前沿项目，投资风险与收益匹配机制尚未完善，制约了商业化进程。

结语

地热多能互补系统作为能源转型的重要路径，整合了地热能的稳定优势与其他可再生能源的灵活性，形成

了更加可靠、高效、清洁的综合能源解决方案。

地热多能互补系统具有显著的技术经济与环境优势。通过地热与太阳能、风能等能源的协同，系统能够实现能源梯级利用和波动平抑，提升整体能源效率。

未来地热多能互补系统将向智能化、多元化、规模化方向发展。人工智能优化、超临界CO₂工质、EGS技术创新将驱动系统效率提升和成本下降；政策目标引导、生态补偿机制和多能联动产业体系将营造有利发展环境；混合系统多样化、标准化模块化设计和全生命周期优化将加速系统普及应用。

综上所述，地热多能互补系统是构建可持续能源体系的关键路径之一，其规模化发展对调整能源结构、实现“双碳”目标具有重要意义。地热多能互补系统的成功既依赖技术创新，也需要政策、市场与社会的多方协同，从而在保障能源安全、促进经济发展的同时，实现环境保护与气候变化应对的多重目标。

参考文献

- [1]程学坤, 张亚乔.绿色投资: 构建“地热能+多能互补”发展格局[J].山东国资, 2024, (10): 30-31.
- [2]孙冠宇, 王永真, 颜艺灿, 等.油田区域地热+多能互补能源系统技术应用分析[J].综合智慧能源, 2023, 45(12): 63-70.
- [3]杨金鹏.“地热+”多能互补系统采热规律数值模拟研究[D].石家庄铁道大学, 2024.