

新能源背景下热能动力工程发展趋势分析

梁泽超

邢台纳科诺尔精扎科技股份有限公司, 河北 邢台 054001

[摘要]在双碳目标以及新能源装机快速增加的双重影响之下,热能动力工程正在发生由基荷电源技术体系向灵活调节和多能协同技术体系的结构变化。根据 2025 年中国电力统计资料,分析了能源结构调整给热力系统一次能源供应约束和终端用能电气化冲击带来的影响,对热能动力系统在调峰灵活性、中低温余热利用、电热耦合、数字孪生智能控制等方面的技术变革进行了梳理,探究了热-电-碳多目标集成、基础设施低碳改造、前沿技术工程转化、学科知识体系重塑等协同演进路径。

[关键词]热能动力工程; 新能源; 灵活性改造; 余热利用; 电热协同

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20071

中图分类号: TK01

文献标识码: A

Analysis of the Development Trend of Thermal Power Engineering under the Background of New Energy

LIANG Zechao

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054001, China

Abstract: Under the dual impact of the dual carbon target and the rapid increase in new energy installed capacity, thermal power engineering is undergoing a structural change from a base load power technology system to a flexible regulation and multi energy collaborative technology system. Based on the statistical data of China's power industry in 2025, this paper analyzes the impact of energy structure adjustment on the constraints of primary energy supply in thermal power systems and the impact of electrification of terminal energy consumption. The technological changes in thermal power systems in various aspects such as peak shaving flexibility, utilization of medium and low temperature waste heat, electric thermal coupling, and digital twin intelligent control are sorted out, and the collaborative evolution path of multi-objective integration of heat electricity carbon, low-carbon transformation of infrastructure, transformation of cutting-edge technology engineering, and reshaping of disciplinary knowledge system is explored.

Keywords: thermal power engineering; new energy; flexibility transformation; waste heat utilization; electric thermal synergy

引言

到 2025 年底,中国并网风电、太阳能发电的装机总容量占总装机容量的比重达到 47.3%,煤电的占比降低到 32.4%。全国可再生能源发电量达到 3.99 万亿 kW h, 占各类电源总发电量的 38.3%,风光总发电量首次超过万亿千瓦时。能源结构发生巨大改变之后,对热能动力工程技术逻辑、未来发展路径都产生根本性的影响。传统的热能动力工程是以化石燃料的燃烧热功转换为主,追求高参数、大容量、高效率。但是当新能源发电成为电力增量的主要来源时,热力系统运行的边界条件也发生了根本的变化。波动性电源大规模接入之后,火电机组就要由原来的“设计工况运行”变成“全工况灵活调节”,终端用能电气化的发展又导致热力负荷的时空分布发生变化,碳约束加强以后,热力系统评价维度也由原来的热效率单指标拓展成

了热、电、碳三者的多目标评价。

1 热能动力工程的技术范畴与学科定位

热能动力工程是以热力学、传热学、流体力学为基础,研究热能和其他形式的能量之间转换、传递和利用的工程学科。其技术范围包含化石燃料燃烧、蒸汽动力循环、燃气-蒸汽联合循环、核电热工、工业余热回收、热泵供热、制冷空调等热力系统的设计、运行和控制。

热能动力工程在传统的电力系统中,主要的任务就是保证火电机组在额定工况附近高效、稳定地运行,追求供电煤耗、热效率等单个指标的最优^[1]。但是,在新能源占比不断提升的新型电力系统中,热能动力工程的学科定位也在发生改变,它不再只是“把燃料烧好、把蒸汽参数做高的单一技术领域”,而成了“连接波动性电源和刚性热力需求的缓冲器”“调节器”,是保证电力系统安全稳定运

行、热能供需平衡的重要技术支撑。学科定位的改变成了文章分析的主要出发点。

2 能源结构转型对热能动力工程的核心冲击

2.1 一次能源供给格局变化对热力系统的约束

2025 年我国电力装机结构由原来的以火电为主转变为新能源为主。全国发电装机容量达 38.9 亿 kW，其中火电 15.4 亿 kW(占 39.6%)，并网风电 6.4 亿 kW(占 16.4%)，并网太阳能发电 12.0 亿 kW(占 30.9%)。非化石能源发电装机比例已经超过六成。这一格局变化对热力系统构成三重约束。第一，运行方式约束。由于新能源出力具有很大的波动性、不确定性，所以火电机组要经常做深度调峰、快速启停。2025 年启动的新型煤电升级专项行动中，对现役、新建、新一代示范机组分别提出深度调峰最小技术出力为额定负荷的 25%~40%、25%以内、20%以内。这就意味着热力系统的运行点已经由额定工况向宽负荷运行区间的范围转变。第二，经济性限制。火电机组的利用小时数不断减少，频繁调峰造成煤耗增大、设备损耗增大。在电力现货市场环境，热力系统要在变负荷工况下取得经济性动态最优，而不能只在设计工况下追求最低煤耗。第三，碳排放约束。煤电发电量占总发电量的比例由“十三五”末的 60.7%下降到 2025 年的 51.1%。新一代示范机组要达到比 2024 年同类型机组每度电减排 10%~20% 的目标。碳成本内部化之后，热力系统优化的目标就由原来的“最小化煤耗”变成了“最小化综合成本”。

2.2 终端用能电气化趋势下热力负荷的重构

终端用能电气化是能源转型的又一条线。随着电动汽车、热泵供暖、电锅炉等电气化设备的普及，电力负荷峰谷差变大，热力负荷时空分布也发生变化。供暖领域里热泵技术的推广改变了传统集中供热的热源结构。2025 年中国热泵内销量达到 310 万台，空气源热泵占比较大，大于 85%。热泵从电网取电制热，使热力负荷部分变成电力负荷，热力系统和电力系统之间的耦合程度大大加深了。在工业上，电加热代替化石燃料直燃的趋势也正在改变工业热力负荷的时空特征。由此产生的主要问题就是，当热力负荷不再仅仅取决于热源侧的状况，而与电力系统运行

情况密切相关的时候，传统的“以热定电”或者“以电定热”的单向耦合方式已经不再适用了。热力系统要发展双向、动态的电热协同运行方式。

3 热能动力系统技术范式的结构性变革

3.1 面向波动性电源的调峰与灵活运行能力提升

提高火电机组的调峰、灵活运行能力，这是热能动力工程解决新能源冲击的主要技术途径。循环流化床锅炉的压火启动调峰技术得到广泛的关注。经过对床料蓄热以及启动过程进行改进，可以在不投油的情况下使机组快速热态启动，大大缩短了调峰响应时间^[2]。汽机侧采用汽轮机切换技术来达到热电解耦的目的，在发电和供热之间可以自由切换。系统侧火电机组和储能系统的联合调峰成了重要的趋势。表 1 给出了不同灵活性改造技术路线调峰深度、改造成本和技术成熟度的对比。

以熔盐储热为例，330MW 亚临界机组电加热耦合抽汽储热发电系统可以达到最大 30% 的调峰深度，远大于抽汽储热的 9.3%，并且可以实现机组零出力。系统中熔盐温度可以达到 350℃，储存的单位热量成本比电加热器的储热、抽汽储热方案要低 21%、73%。目前全国煤电灵活性改造市场空间每年可达 100 亿至 200 亿元，到 2027 年可以释放出 56GW 的调节能力。

3.2 中低温余热利用与低品位热能提质技术

新能源大规模接入并没有降低余热资源的可利用价值，反而由于热力系统运行方式的改变，使余热的时空分布更加复杂，对余热利用技术提出了更高的要求。电厂余热回收中，吸收式热泵、压缩式热泵被用在循环水余热、烟气余热的深度回收上。2×200MW 水冷供热机组利用吸收式热泵回收循环水余热，供热能力得到很大提高。在矿井方面，矿井排风、矿井涌水余热常年稳定，高温热泵系统可以将它提高到高温来满足工业多场景用能需求。低品位热能提质技术的主要难题是，在变温热源的环境下怎样维持热泵系统的高效运转，怎样缩减高温热泵的投入和运行费用。目前对 R245fa 工质高温热泵蒸汽系统的研究表明，在低温热源温度为 45~65℃、蒸汽温度为 118~122℃ 的情况下，可以得到较高的能效比。

表 1 典型火电灵活性改造技术路线对比

技术路线	调峰深度(%额定负荷)	改造成本(元/千瓦)	技术成熟度	主要适用场景
锅炉侧低负荷稳燃改造	30~40	50~150	成熟	现役纯凝机组
热电联产热电解耦改造	25~35	200~500	较成熟	供热机组
熔盐储热耦合调峰	20~30(可至零出力)	800~1500	示范推广	深度调峰需求高场景
火储联合调峰	20~35	视储能配置而定	示范阶段	新能源高渗透率地区

3.3 热泵、储热与电热协同的跨能耦合机制

热泵、储热和电热三者之间相互耦合的技术称为热能动力工程由“单向供能”向“双向互动”转变的关键技术。热泵是高效电热转换设备,其能效比(COP)为3~5,即消耗1kW·h电能可产生3~5kW·h的热量。在新能源发电过剩的时候,热泵可以把多余的电力转变成热能储存或者直接供热,从而达成电力的时移利用。储热系统在此基础上又增加了热量的时空调节能力。在电价低谷或者新能源大发时段储热,在热负荷高峰或者电价高峰时段放热。综合能源系统中电热混合储能已经引起人们的注意。研究表明,含有电热混合储能的综合能源系统采取分时序灵活运行策略,可以很好地解决供热侧和用户侧不匹配、弃热多等问题。热网本身具有热惯性,可以作为天然的储热资源,在电-热耦合约束下进行系统综合成本最优。电加热耦合抽汽储热方案在购电电价为0.2元/kW·h时,售电价只需要0.632元/kW·h就可以满足资本金内部收益率为7%。

3.4 数字孪生与智能控制驱动的热力系统全工况优化

数字孪生技术给热力系统由“经验调控”向“精准优化”转变赋予了新的技术途径。供热系统中用数字孪生的信息物理系统架构可以实现供热管网全过程的管理。利用一次、二次管网热源创建孪生运行模型,可以达到按需精准控制的目的。人工智能、大数据、云计算技术被用在火电机组上进行实时分析处理机组运行数据,从而达到对机组的精准控制和优化运行的目的。数字孪生使热力系统具有了预测性的调控能力,而不是反应性的调控能力。利用实时镜像来反映物理系统的状态,用机器学习算法来预测负荷的变化以及新能源的出力,可以在变工况的情况下实现热力系统的最佳运行策略在线生成和动态更新。

4 学科方向与工程实践的协同演进

4.1 热-电-碳多目标约束下的系统集成方法论

传统的热力系统设计只用热效率或者供电煤耗作为单一的优化目标。但是,在新能源高比例接入、碳交易市场逐渐成熟的情况下,热力系统优化的目标也从原来的单一的热效率、调节灵活性、碳排放强度的单目标最优变成了现在的多目标综合最优,即热效率、调节灵活性、碳排放强度等多个目标的最优。这就需要发展新的系统集成方法论。在建模上要创建一个可以考虑热力循环、电力系统调度以及碳排放限制的多物理场耦合模型。从优化角度来讲,要创建可以处理热、电、碳三者之间权衡关系的优化

算法。从评价角度来讲,要创建可以体现调峰、调频、备用等辅助服务价值的综合评价体系。

4.2 既有热力基础设施的低碳化改造路径

中国火电装机规模最大,到2025年底火电装机容量为15.4亿kW。这些已有的基础设施的低碳化改造,是热能动力工程所要面对的最大工程难题,同时也是最现实的减排机会。目前主流的低碳化改造途径有三条。一是生物质掺烧,用生物质燃料部分代替燃煤,降低度电碳排放。二是绿氨掺烧,用绿氨作为无碳燃料和燃煤混合燃烧。三是燃烧后碳捕集、利用与封存(CCUS),从烟气中分离出二氧化碳。另外供电煤耗不断降低也成了重要的碳减排途径,新一代示范机组的设计工况煤耗要达到270g/kW·h^[3]。三种技术路线在技术成熟度、改造成本、减排潜力等各方面存在着较大差别,应根据机组种类、区位条件、政策环境等不同情况来作出差别选择。

4.3 前沿热工转换技术从实验室到工业应用的衔接瓶颈

超临界二氧化碳循环、高温热泵、先进斯特林发动机等前沿热工转换技术在实验室层面已经显示出很好的性能潜力。但是从实验室到工业应用还存在着较大的衔接瓶颈。首先就是材料瓶颈。高温、高压、腐蚀性工质环境里,关键部件耐久性、可靠性不能在短时间内得到检验。其次就是系统集成瓶颈。前沿热工转换技术一般要同现有的热力系统达成接口匹配以及协同优化,这样的过程包含诸多系统集成难题。其次是经济性瓶颈。在现有的技术条件下,前沿技术的单位投资成本一般要远远大于成熟技术,缺少足够的市场动力。破解这些难题要依靠“政府引导、企业主导、产学研协同”多方发力,还要创建起由示范工程向商业化推广的渐进式路径。

4.4 交叉学科知识体系对人才培养与知识结构的重塑

能源转型正在从根本上改变热能动力工程的知识结构。传统的以热力学、传热学、流体力学为主的课程体系,正在受到电气工程、控制科学、数据科学、环境工程等方面的知识相互渗透的要求。热动专业学生要掌握电力系统运行基本知识,理解新能源出力统计特性及预测方法,有碳核算、碳交易基本素养,熟悉数字孪生、人工智能等新技术在热力系统中应用的方法^[4]。研究生教育中实验教学、创新能力培养要由原来的单个热工测试发展为多能互补系统综合实验。如表2所示,热能动力工程的知识结构由原来的纵向深化转变为现在的横向拓展。

表 2 热能动力工程学科知识结构的演变趋势

知识维度	传统侧重	新兴需求	融合方向
基础理论	热力学、传热学、流体力学	电化学、控制理论、信息科学	多物理场耦合分析
核心技能	热力计算、设备设计、运行调控	系统建模、优化算法、数据分析	数字孪生与智能控制
工程视野	单一热力系统	电-热-碳多系统协同	综合能源系统集成
评价标准	热效率、煤耗	碳排放、调节性、经济性	多目标综合评价

5 结束语

在新能源背景之下，热能动力工程正在发生由“基荷电源技术”向“灵活调节技术”、由“单一热效率最优”向“热-电-碳多目标最优”、由“经验驱动”向“数据驱动”的深刻转变。这一转变不但是技术上的升级，也是学科内涵和工程范式的一种结构性的重新塑造。热能动力工程未来发展会朝着以下方向发展：火电机组的深度调峰和快速启停能力不断改善，熔盐储热等新的调峰技术会加快商业化步伐，中低温余热利用同热泵技术深度融合，创建起分布式和集中式相融合的低品位热能提质利用体系，数字孪生和人工智能技术会深入热力系统全生命周期管理当中，促使热力系统规划和运行发生智能化改变，热-电-碳多目标集成方法论慢慢趋于成熟，变成热力系统规划和运行的主要手段。

[参考文献]

- [1]刘虹.新型电力系统构建中煤电“刚柔并济”发展新态势[J].煤炭经济研究,2025,45(9):1.
 - [2]石亮,乌悦伦,毛华西,等.330 MW 火电机组耦合熔盐储能系统设计与经济性分析[J].电力科技与环保,2025,41(6):950-958.
 - [3]崔世兵,杨洋,黄朔,等.热泵技术在某电厂余热回收中的应用[J].节能,2025,44(3):86-88.
 - [4]丁艳,金蕊.“双碳”背景下高校多维实践教学模式研究——以中国矿业大学徐海学院热能与动力工程专业为例[J].江苏科技信息,2024,41(11):32-35.
- 作者简介：梁泽超（1989—），男，汉族，河北省邢台市襄都区人。