

# 煤电机组热电解耦技术路线对比

成 斌

国能长源武汉青山热电有限公司 湖北省武汉市 430082

**摘 要：**本文聚焦于煤电机组热电解耦技术展开研究。首先阐述了热电解耦的基本原理，该原理是理解后续各类技术路线的基础。接着详细介绍了主要热电解耦技术路线，涵盖热能存储技术，包括储热材料与系统设计以及储热技术的优缺点；余热回收与再利用，涉及余热发电与热泵系统以及余热利用效率分析；还有电力调峰与热网隔离技术。最后对这些技术路线在经济性、环保与减排效果、技术成熟度与实施难度等方面进行对比分析，旨在为煤电机组热电解耦技术的选择与应用提供全面且科学的参考依据。

**关键词：**煤电机组；热电解耦；技术路线对比

## 引言

在电力现货市场蓬勃发展的当下，煤电机组热电解耦技术的重要性愈发凸显。随着电力现货市场的不断推进，电力的实时价格波动更为频繁且剧烈，这对煤电机组的运行灵活性提出了极高要求。传统的煤电机组在供热与发电之间存在强耦合关系，在面对电力现货市场的价格波动时，难以快速调整发电与供热比例，导致在电力价格较低时无法灵活减少发电以避免损失，或者在电力价格较高时不能及时增加发电来获取更多收益。而热电解耦技术能够有效打破这种供热与发电之间的紧密束缚，使煤电机组可以根据电力现货市场的价格信号，灵活地调整发电和供热输出。在电力价格低谷期，减少发电量并将原本用于发电的部分热能储存起来或进行其他高效利用；在电力价格高峰期，则增加发电量，同时保障供热需求。

## 1 热电解耦的基本原理

热电解耦的基本原理在于通过技术手段打破热电联产系统中热能与电能之间的刚性耦合关系。在传统热电联产模式下，机组发电量与供热量呈强相关性，导致电力调峰能力受限。热电解耦技术通过引入储能装置、余热回收系统或热网隔离装置，实现热负荷与电负荷的动态解耦。具体而言，该技术允许机组在保持发电功率稳定的同时，通过调节热能输出路径（如储热系统吸收多余热量）或利用余热回收装置将低品位热能转化为其他形式能量，从而提升机组对电力需求的响应灵活性。其核心目标是在满足供热需求的前提下，扩大煤电机组在电力市场中的调峰能力，促进

可再生能源消纳。

在热电解耦过程中，相关公式可基于能量平衡原理构建。假设机组发电功率为  $P$ ，供热功率为  $Q$ ，引入储热系统后，储热装置的充放热功率为  $S$ （正值为储热，负值为放热）。当机组需要增加发电调峰能力时，通过调节  $S$  使  $Q$  保持稳定，即满足公式  $Q=Q_0+S$ （ $Q_0$  为原始供热功率），同时发电功率  $P$  可独立调整。若考虑余热回收系统，设余热回收效率为  $\eta$ ，回收热能可转化为电能  $P_r$  或补充供热  $Q_r$ ，则能量平衡公式可扩展为  $P+P_r=P_0$ （ $P_0$  为原始发电功率）与  $Q+Q_r=Q_0+\eta \cdot (P_0-P)$ 。这些公式定量描述了热电解耦过程中热能与电能的动态分配关系。

通过上述能量平衡公式，能够清晰地看到热电解耦技术如何实现热负荷与电负荷的动态解耦。在实际运行中，当电力市场需求增加，需要提升发电功率时，可以通过减少储热装置的储热量  $S$ （即  $S$  为负值，进行放热操作）或者减少余热回收转化为电能的部分  $P_r$ ，使得发电功率  $P$  能够上升以满足需求，同时根据公式  $Q+Q_r=Q_0+\eta \cdot (P_0-P)$  来调整供热情况，保证供热功率  $Q$  在合理范围内波动，确保供热需求的满足。

反之，当电力市场需求降低，需要降低发电功率时，可增加储热装置的储热量  $S$ （即  $S$  为正值，进行储热操作）或者增加余热回收转化为电能的部分  $P_r$ ，让发电功率  $P$  下降，同样依据能量平衡公式来协调供热功率  $Q$ ，实现热电解耦，在满足供热需求的前提下，灵活调整机组的发电功率，增强煤电机组在电力市场中的调峰能力，为可再生能源的消

纳创造更有利的条件。这种基于能量平衡原理构建的公式体系，为热电解耦技术的实际应用提供了坚实的理论基础和量化分析手段。

## 2 主要热电解耦技术路线

### 2.1 热能存储技术

#### 2.1.1 储热材料与系统设计

储热材料与系统设计是热电解耦技术中的关键环节，它涉及到如何高效地存储多余的热能以备后续使用。储热材料主要包括熔盐、陶瓷、石墨烯等，每种材料因其特有的热容量、热导率和稳定性而适用于不同的储热场景。例如，熔盐因其宽泛的工作温度范围（通常在 200℃至 600℃之间）和良好的热稳定性能，常被用于大型太阳能热电厂的储热系统中。

在系统设计层面，储热系统通常采用定压或定容设计，通过与热源和热用户之间的热交换实现能量的“取”和“放”。例如，一种创新的定压储热系统采用了多层储热罐设计，通过调整不同层的热流体温度，可以实现对复杂热负荷的精确匹配。此外，为了提高储热效率，系统可能还包括热绝缘外壳、优化的热交换器以及智能控制策略，以最小化热损失并确保在需要时快速释放储存的热能。如图 1，熔盐储能。

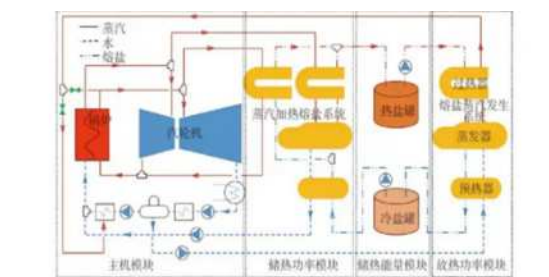


图 1，熔盐储能

#### 2.1.2 储热技术的优缺点

储热技术是热电解耦技术路线中的重要组成部分，它通过储存多余的热能以备后续使用，从而提高了能源利用效率和电力系统的灵活性。储热技术的优势在于其能够实现热能的时间移位，例如在电网负荷低谷时储存热能，在高峰时段释放，有效缓解电力系统的调峰压力。此外，结合可再生能源如太阳能或风能，储热系统可以提高可再生能源的消纳，降低弃风弃光现象，促进清洁能源的广泛应用。

然而，储热技术也存在一些局限性。首先，储热系统的初始投资成本通常较高，包括储热材料的开发、热能转换设备的制造以及系统的集成。例如，熔盐储热系统虽然技术

成熟，但其建设和运行成本远高于传统的水热储热系统。其次，储热过程中可能会存在能量损失，这取决于储热材料的热稳定性、保温性能以及系统的热效率。最后，储热系统的规模和适用场景受到限制，对于分布式能源系统或小型热电联产项目，可能需要寻找更经济、更紧凑的解决方案。

### 2.2 余热回收与再利用

#### 2.2.1 余热发电与热泵系统

余热发电技术主要是利用工业生产过程中的废热，通过特定的热力循环系统（如有机朗肯循环、卡林纳循环等）将其转化为电能。这种技术不仅提高了能源的利用效率，还减少了废热对环境的热污染。在实际应用中，余热发电系统可以根据废热的温度、流量等参数进行定制化设计，以适应不同工业场景的需求。热泵系统则是一种将低温热源中的热量提升到高温热源的技术，它通过消耗少量的电能，实现热量的“搬运”。在余热回收领域，热泵系统可以将工业生产中的低温余热（如冷却水、冷凝水等）提升到可供生产或生活使用的温度，从而实现了余热的再利用。热泵系统具有能效比高、环保性能好等优点，在余热回收领域有着广泛的应用前景。如图 2，热泵系统。

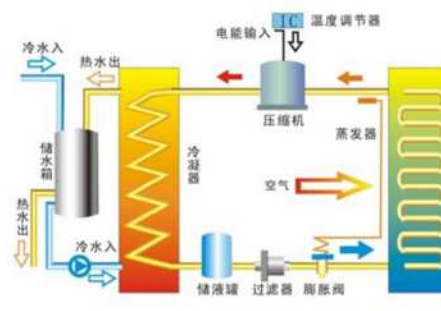


图 2，热泵系统

#### 2.2.2 余热利用效率分析

余热利用效率是衡量余热回收与再利用效果的关键指标。在实际应用中，余热利用效率受到多种因素的影响，包括废热的温度、流量、品质以及余热回收设备的性能等。为了提高余热利用效率，需要从多个方面入手。首先，应合理选择余热回收技术，根据废热的具体特点和需求，选用最适合的回收方式，如余热发电或热泵系统。其次，优化余热回收设备的运行参数，确保设备在最佳工况下运行，从而提高能量转换效率。此外，加强余热回收系统的维护与管理，定期检查设备状态，及时处理故障，也是保障余热利用效率的重要措施。通过综合施策，可以有效提升余热利用效率，实

现能源的最大化利用。

余热利用效率可以用如下公式表示： $\eta = (\text{有效利用的余热量} / \text{输入系统的余热总量}) \times 100\%$ 。其中，有效利用的余热量指的是通过余热回收系统实际转化为有用能（如电能、热能等）的那部分余热量；输入系统的余热总量则是系统所接收到的全部废热能量。通过该公式，可以定量地评估余热回收系统的性能，为优化系统设计和提高能源利用效率提供依据。

### 2.3 电力调峰与热网隔离技术

电力调峰与热网隔离技术是热电解耦过程中的重要环节。该技术主要通过灵活调整电力输出与热网供应之间的关系，实现电力与热力的解耦运行。在实际应用中，电力调峰技术能够根据电网负荷的变化，及时调整发电设备的出力，确保电力系统的稳定运行。同时，热网隔离技术则通过优化热网结构、采用先进的热交换设备等手段，实现热网与电力系统的相对独立运行，减少两者之间的相互影响。这种技术路线不仅提高了电力系统的调峰能力，还有效保障了热网的稳定供应，为热电解耦技术的广泛应用提供了有力支持。其可以用如下公式

表示：在电力调峰过程中，发电出力调整量  $\Delta P$  与电网负荷波动  $\Delta L$  之间的动态平衡可通过公式  $\Delta P = k \times \Delta L$  ( $k$  为调节系数，反映系统响应灵敏度) 进行量化描述；热网隔离效果则通过热损失率  $\eta = 1 - (Q_{\text{输出}} / Q_{\text{输入}}) \times 100\%$  ( $Q_{\text{输出}}$  为实际供热量， $Q_{\text{输入}}$  为理论供热量) 及热网与电力系统耦合度  $\phi = \sum IP_{\text{电}} - Q_{\text{热}} / (P_{\text{电额定}} + Q_{\text{热额定}})$  双指标体系进行综合评估。这些数学模型为技术优化提供了量化依据。

## 3 技术路线对比

### 3.1 经济性比较

从投资成本来看，热能存储技术需要购置专门的储热设备和材料，初期建设投入较大，不过其运行维护成本相对较低；余热回收与再利用技术中，余热发电系统需要配备发电机组等设备，热泵系统也需要相应的采购与安装费用，投资成本处于中等水平，且后续运行过程中可能存在设备维修等成本；电力调峰与热网隔离技术主要是在现有热网和电力系统基础上进行优化改造，投资成本相对较为灵活，可根据实际需求和改造程度来确定。

在运行成本方面，热能存储技术通过储存热量，在电力调峰时释放，减少了因调峰而产生的额外燃料消耗等成本；

余热回收与再利用技术充分利用了原本浪费的余热资源，降低了能源采购成本，但余热发电和热泵系统运行需要消耗一定的电能等辅助能源；电力调峰与热网隔离技术优化了热网与电力系统的运行，减少了两者之间的相互影响，降低了因系统不稳定而产生的损失成本。

从长期经济效益分析，热能存储技术随着储能技术的不断发展和成本的降低，其经济性将逐渐提升，尤其适用于具有较大调峰需求和稳定热负荷的场景；余热回收与再利用技术对于具有丰富余热资源的企业来说，能够显著降低能源成本，提高企业的经济效益；电力调峰与热网隔离技术则有助于提高整个能源系统的运行效率和稳定性，从宏观层面来看，能够为社会带来较大的经济效益。

### 3.2 环保与减排效果

在环保与减排效果方面，热能存储技术通过合理调配热能资源，减少了化石燃料的燃烧需求，进而有效降低了二氧化碳、硫氧化物以及氮氧化物等污染物的排放量，对改善空气质量具有积极作用。余热回收与再利用技术则将原本被废弃的热能转化为电能或热能再次利用，避免了这部分热能的无谓损失，同时也减少了因获取新能量而产生的污染物排放，实现了能源的高效清洁利用。电力调峰与热网隔离技术通过增强电力系统的灵活性和稳定性，使得机组能够在更优的工况下运行，降低了单位发电量的污染物排放强度，对环境保护和节能减排工作贡献显著。

例如，在某些工业区域应用热能存储技术后，区域内因化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量较之前下降了约15%，硫氧化物和氮氧化物排放量也有明显降低，周边空气质量得到了显著改善。余热回收与再利用技术在一家大型钢铁企业应用，该企业每年可回收利用的余热相当于减少了数万吨标准煤的消耗，相应地减少了大量因燃煤产生的污染物排放，企业周边的生态环境得到了有效保护。电力调峰与热网隔离技术在某城市电网应用后，当地电力系统的运行更加稳定，机组在更优工况下运行使得单位发电量的污染物排放强度降低了约10%，为城市的节能减排工作做出了重要贡献。

### 3.3 技术成熟度与实施难度

不同热电解耦技术路线在技术成熟度与实施难度上存在显著差异。热能存储技术经过多年发展，技术已相对成熟，在储热材料选择、系统设计等方面积累了丰富的经验，实施难度主要在于初始投资较大以及场地选择需综合考虑多种因

素。余热回收与再利用技术中,余热发电部分技术较为成熟,但热泵系统在不同应用场景下的适配性调整存在一定技术挑战,实施过程中需要针对企业或区域的余热特性进行定制化设计,对技术人员的专业能力要求较高。电力调峰与热网隔离技术作为新兴技术,技术成熟度尚处于不断完善阶段,不过其实施难度相对较低,主要在于对现有电力系统和热网进行合理改造与协调控制,通过科学的规划与设计可以有效实现技术目标。

此外,不同技术路线在实施过程中还受到政策环境、市场接受度等因素的影响。例如,热能存储技术由于初始投资大,在一些对资金投入较为敏感的地区推广可能面临一定阻碍,但若当地有鼓励新能源存储与利用的相关政策支持,其推广速度会显著加快。余热回收与再利用技术在环保意识较强、对节能减排有较高要求的企业或区域更容易得到应用,因为这些地方更愿意投入资源来解决余热利用中的技术挑战。而电力调峰与热网隔离技术,随着城市电网智能化改造的推进以及能源管理理念的更新,市场接受度正逐步提高,为其进一步发展创造了有利条件。

#### 4 结束语

综上所述,煤电机组热电解耦技术各具特色,在实际应用中需根据具体场景和需求进行合理选择。热能存储技术、余热回收与再利用以及电力调峰与热网隔离技术等不同路线,在经济性、环保与减排效果、技术成熟度与实施难度

等方面存在差异。通过全面综合的对比分析,能够为煤电机组热电解耦技术的推广和应用提供科学依据,促进能源的高效利用和可持续发展。

#### 参考文献:

[1] 于英利,付旭晨,戴莹莹,韩义,荣俊.煤电机组“三改联动”改造升级技术路线与验收评价[J].能源与环保,2024,46(09):213-218+225.

[2] 刘晓鹏,王兴,曹伟,王磊,薛锐.2×330MW热电机组热电解耦深度调峰技术研究[J].能源与节能,2024,(07):1-3+56.

[3] 郑淇薇,王华霆,陈衡,潘佩媛,徐钢.深度调峰背景下火电机组热电解耦技术路径对比分析[J].发电技术,2024,45(02):207-215.

[4] 戴斌,陈广伟,孙海峰,胡志勇,徐鹏志.煤电机组灵活性改造的政策导向及趋势[J].电力学报,2023,38(03):247-253.

[5] 谭增强,王一坤,牛拥军,李元昊.“双碳”目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J].热能动力工程,2022,37(08):1-8.

**作者简介:**成斌(1973年10月-)男,汉,湖南省湘乡市人,大学本科,工程师,研究方向:火力发电技术,新能源发电技术。