

## 行业研究

## 火电灵活性改造：电力系统灵活性的重要增量

## ——新型电力系统系列报告（四）

## 要点

**灵活发电是电力系统灵活运行的重要一环。**长时间来看，新能源发电可以满足电量平衡需要，但由于出力波动，在短时无无法满足电力平衡需要。随着我国新能源渗透率的不断提高，对于系统灵活性的要求也不断提高。系统能否在高比例波动可再生能源的情况下灵活运行，是电力系统转型的核心。在短期、中期及更长时间尺度上，灵活发电能力对于电力平衡都至关重要，而提升灵活火电能力的重要手段就是进行火电灵活性改造。

**火电灵活性改造：多路径，效果优。**为保证成本效益和可靠性，传统发电厂必须具有灵活运行能力，并且可以在波动性可再生能源发电量较低时满足提供电力。提高火电灵活性主要是指增加火电机组的出力变化范围，响应负荷变化或调度指令的能力，多数情况下是指增加火电机组在低负荷时的稳定、清洁、高效运行能力。火电灵活性改造包括运行灵活性改造和燃料灵活性改造。其中，运行灵活性又要分纯凝机组和供热机组。纯凝工况灵活性提升技术路线主要包括深度调峰和快速响应；改变供热地区电力发展现状的关键在于对机组进行热电解耦改造。宽负荷脱硝技术、低负荷稳燃技术等均是火电灵活性改造中的重要技术。**灵活性改造后的机组，在运行范围、爬坡速率、启停时间上均会有明显的提升，可以更好的参与系统的灵活性调节。**

**火电灵活性改造：成本较低，空间广阔。**根据我们测算，“十四五”期间火电灵活性改造的市场空间在90~280亿元。从政策制定者视角看，电源侧灵活性资源中煤电灵活性改造和抽水蓄能电站分别为成本和提升效果的第一梯队，**灵活性改造成本最低，抽蓄调节效果最佳。**从发电运营商视角看，改造后增加的调峰收入，与减小的售电收益相比，得不偿失。这也解释了为什么之前运营商进行火电灵活性改造的动力不足。

**容量电价和现货市场都将提升火电灵活性改造的经济性。**容量成本回收机制是保证电力可靠性的重要支撑。容量电价机制的持续完善，可以较好的弥补火电灵活性改造之后，利用小时数下行带来的经济上的负面影响，提升运营商进行改造的动力。此外，未来电力现货市场将会是火电灵活性改造的重要收益。以山东省为例，在电力现货市场中，在个别日期已经出现过较长时段出现负电价，此时，进行过火电灵活性改造的机组可以将出力压到更低，以减少损失。

**投资建议：**在目前的消纳压力下，灵活发电的价值日益凸显，而提升灵活火电能力的重要手段就是进行火电灵活性改造，对应的市场空间广阔。未来随着容量电价机制的完善以及电力市场化的推进，运营商进行火电灵活性改造的积极性有望持续提升。建议关注：青达环保、龙源技术、华光环能、盛德鑫泰。

**风险分析：**电改政策力度低于预期风险、火电灵活性改造进度低于预期风险、市场竞争加剧风险。

## 电力设备新能源 买入（维持）

行业与沪深300指数对比图



# 目 录

<b>1、灵活发电是电力系统灵活运行的重要一环</b> .....	<b>5</b>
1.1、高比例可再生能源加大电网可靠性压力 .....	5
1.2、灵活发电是系统灵活性资源中的重要一环 .....	6
<b>2、火电灵活性改造：多路径、效果优</b> .....	<b>9</b>
2.1、纯凝机组的灵活性改造技术路线 .....	10
2.1.1、宽负荷脱硝技术 .....	11
2.1.2、低负荷稳燃技术 .....	13
2.2、热电联产机组的灵活性改造技术路线.....	13
2.3、过往火电灵活性改造项目复盘.....	15
2.4、火电灵活性改造的效果对比 .....	16
<b>3、火电灵活性改造：成本较低，空间广阔</b> .....	<b>18</b>
3.1、初始投资成本低，市场空间广阔 .....	18
3.2、火电灵活性改造的经济性讨论.....	18
3.3、容量电价：提升火电运营商改造动力.....	20
3.4、电力现货市场的逐步完善将持续提升火电灵活性改造的经济性.....	20
<b>4、投资建议</b> .....	<b>21</b>
4.1、青达环保：全负荷脱硝业务有望快速增长 .....	22
4.2、龙源技术：等离子稳燃业务有望快速增长 .....	22
4.3、华光环能：煤粉预热燃烧技术有望贡献新增量 .....	23
4.4、盛德鑫泰：专注于小口径无缝钢管领域.....	23
<b>5、风险分析</b> .....	<b>25</b>

## 图目录

图 1: 2020 年五省区风电对南网的容量可信度.....	5
图 2: 系统可靠容量供给图.....	5
图 3: 波动性可再生能源并网阶段划分 (2017 年) .....	6
图 4: 系统灵活性运行资源.....	7
图 5: 电力系统灵活性维持供需平衡示意 .....	8
图 6: 德国燃气电厂和燃煤电厂现货市场价格交易示意 .....	8
图 7: 火电灵活性改造的分类 .....	10
图 8: 纯凝机组的灵活性改造技术路线.....	11
图 9: 快速爬坡改造路径 .....	11
图 10: 省煤器给水旁路示意图 .....	11
图 11: 省煤器烟气旁路示意图 .....	11
图 12: 省煤器分级改造示意图 .....	12
图 13: 省煤器热水再循环系统示意图 .....	12
图 14: 抽汽加热给水示意图.....	12
图 15: 切除低压缸进气示意图 .....	14
图 16: 汽轮机旁路供热示意图 .....	14
图 17: 热水/熔盐储热示意图 .....	14
图 18: 电锅炉供热示意图 .....	14
图 19: 火电灵活性改造试点项目技术路线情况.....	15
图 20: 灵活性改造涉及子系统 .....	15
图 21: 低渗透率场景下各情景负荷及电源装机边界条件 .....	19
图 22: 灵活性提升成本与效益 (以同样提供 1000 万千瓦调节能力测算) .....	19
图 23: 改造前后发电成本变化 .....	20
图 24: 改造前后盈利水平变化 .....	20
图 25: 山东省 2023 年 9 月 28 日实时用电侧价格.....	21
图 26: 灵活性改造涉及子系统 .....	22

## 表目录

表 1: 并网第 1 至第 4 阶段的相关影响概述.....	6
表 2: 灵活性提升手段比较.....	7
表 3: 电力系统灵活性的不同时间尺度 .....	7
表 4: 火电厂灵活性改造参数比较.....	9
表 5: 纯凝机组、热电联产机组灵活性改造技术特点.....	10
表 6: 宽负荷脱硝技术分析比较.....	12
表 7: 低负荷稳燃技术分析比较.....	13
表 8: 热电解耦改造路径对比 .....	15
表 9: 我国 22 个火电机组灵活性改造试点项目情况 .....	15

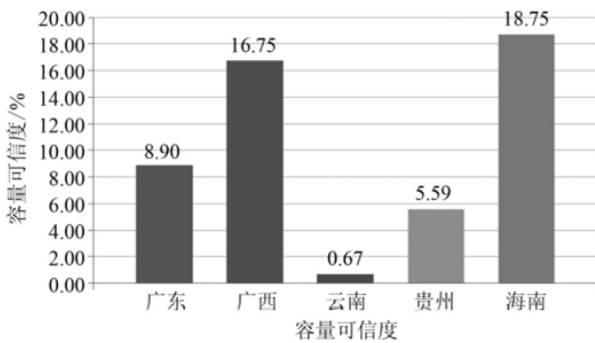
表 10: 电力系统部分资源灵活性特性 .....	17
表 11: 电力系统部分资源灵活性成本组成 .....	18
表 12: 核心假设 .....	19
表 13: 改造前后营收及成本变化 .....	20
表 14: 相关公司估值情况 .....	21

# 1、灵活发电是电力系统灵活运行的重要一环

## 1.1、高比例可再生能源加大电网可靠性压力

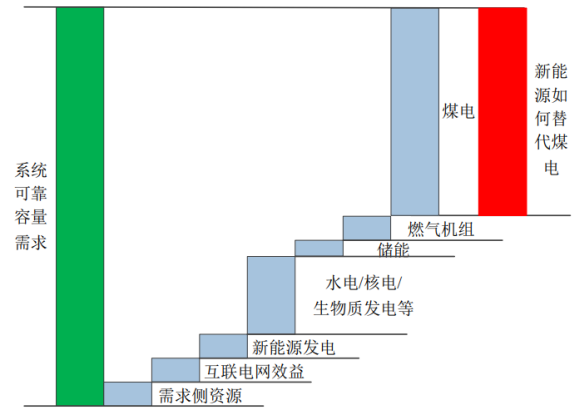
长时间来看，新能源发电可以满足电量平衡需要，但由于出力波动，在短时段内无法满足电力平衡需要。新能源出力具有不确定性、间歇性以及不可控性的特点，为电力系统维持发电及负荷的实时平衡带来挑战。由于新能源机组出力具有间歇性，同样容量的新能源机组与常规火电或水电机组带负荷的能力并不相同，因此电力系统充裕度分析中新能源容量无法与常规机组同等对待。以风电为例，风电可信容量指等可靠性前提下风电机组可以视为的常规机组容量大小，风电容量可信度为其可信容量占其装机容量的比例，根据王彤等对南网的可靠性评估结果，南网 2020 年风电的容量可信度在 0.67%~18.75%之间。而方鑫等人《在《并网光伏电站置信容量评估》一文中测算，光伏的容量可信度在 54%~56%之间。

图 1：2020 年五省区风电对南网的容量可信度



资料：《风电并网对南方电网可靠性的影响评估》（王彤等）

图 2：系统可靠容量供给图



资料：《能源转型下我国新能源替代的关键问题分析》（刘永奇等）

**波动性可再生能源并网会对电力系统产生多种影响。**这些影响并非突然出现，而是随着波动性可再生能源渗透率的提高而逐步增多。IEA 对系统接入划分了不同阶段，可用于定义随着波动性可再生能源渗透率不断增加时电力系统受到的影响，以及由此导致的并网问题。**目前我国整体已进入第 3 阶段，对系统灵活性的要求不断提高。**

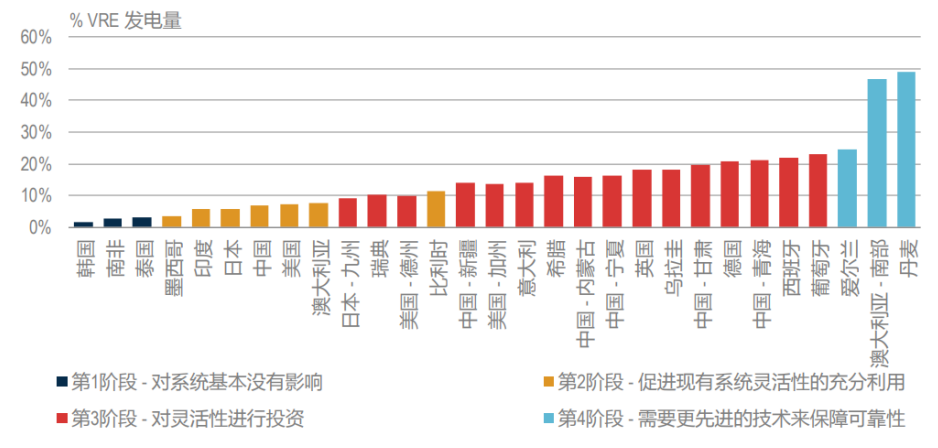
第 1 阶段：已部署第一批波动性可再生能源发电厂，但对系统基本没有影响；只会造成极少的局部影响，例如在发电厂的并网节点。

第 2 阶段：随着波动性可再生能源发电厂数量的增加，负荷与净负荷之间的变化日益明显。改进系统运行方式以更充分地利用现有系统资源，通常足以满足系统并网要求。

第 3 阶段：供需平衡难度更大，需要系统性地提高电力系统灵活性，现有设施和改进运行方式难以满足这一要求。

第 4 阶段：在某些特定时段，波动性可再生能源发电量足以提供系统大部分电力需求，电力系统在系统受到扰动后迅速响应的方式发生变化。可能涉及到规则调整，使波动性可再生能源发电也要提供频率响应服务，如一次调频和二次调频。

图 3：波动性可再生能源并网阶段划分（2017 年）



资料：《中国电力系统转型》（IEA）

表 1：并网第 1 至第 4 阶段的相关影响概述

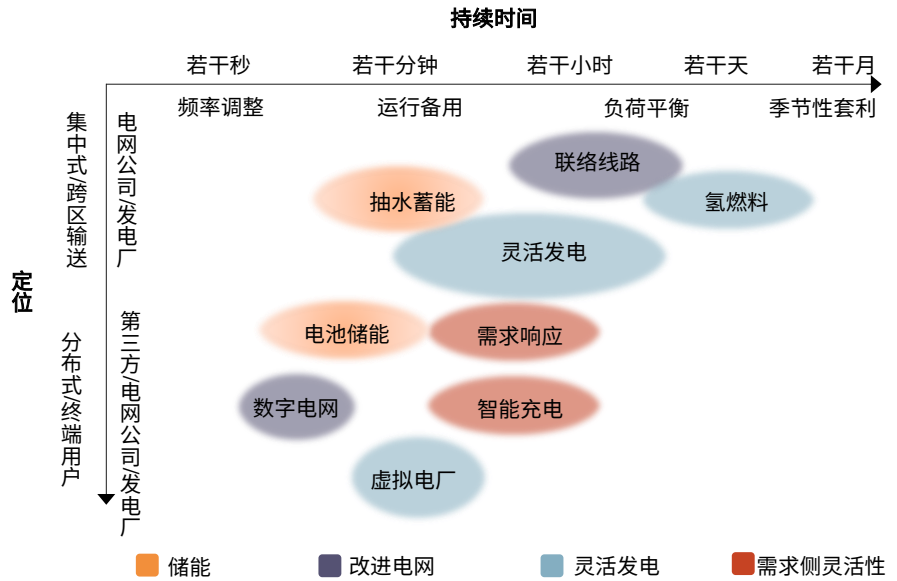
		属性(随着各阶段的推进累加)			
		第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
从系统角度的特点总结		在整个系统层面，波动性可再生能源发电容量并不重要	系统运营商关注到波动性可再生能源发电容量	随着供需平衡的起伏加大，灵活性变得重要	稳定性变得重要。在个别时间，波动性可再生能源发电容量满足近 100% 的需求
对现有发电企业的影响	对现有发电企业的负荷与净负荷之间没有显著差异		净负荷的不确定性和波动性没有显著提高，但为了消纳波动性可再生能源，现有发电企业需要对运行模式做出小幅调整	运行模式有较大差异；所有发电厂调整发电量减少	没有发电厂全时运行；以消纳波动性可再生能源
对电网的影响	靠近并网点的地方电网状况(若有)		极有可能影响地方电网状况；电网内电力潮流转移可能导致输电阻塞	受到不同地点气候状况的影响，电网内电力潮流模式出现显著变化；电网高压和低压部分之间双向电力潮流增加	要求电网强化，改善电网在扰动后恢复的能力
挑战主要取决于	电网中的本地状况		需求和 VRE 发电量的匹配情况	灵活资源的可及性	系统承受扰动的强度

资料：《中国电力系统转型》（IEA）

## 1.2、 灵活发电是系统灵活性资源中的重要一环

**系统能否在高比例波动可再生能源的情况下灵活运行，是电力系统转型的核心，且对于确保现代电力系统的安全性至关重要。**电力系统灵活运行能力主要是指电力系统能够可靠且经济有效地应对全时间尺度的供需平衡变化和不确定性，从而确保电力系统瞬时稳定性、并支持长期供电安全。系统调节能力不足会降低电力系统的稳定性，或产生大量的弃电。电力系统灵活运行能力既来自电力供给侧，还可以通过电网基础设施，需求侧响应和电力存储来提供系统运行调节能力。在这其中，灵活发电的地位非常重要，提升灵活火电能力的重要手段就是进行火电灵活性改造。

图 4：系统灵活性运行资源



资料：《中国电力系统转型》（IEA）

表 2：灵活性提升手段比较

提升手段	优势	不足
火电灵活性改造	<ul style="list-style-type: none"> <li>单位调节容量投资小，调峰能力提升显著</li> <li>配合检修同步进行，周期短见效快</li> <li>改造的技术方案成熟，提升空间大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>配套政策与机制依赖性较高</li> <li>响应调节速度慢，冷启动需 5 小时</li> </ul>
抽水蓄能电站	<ul style="list-style-type: none"> <li>启动速度快</li> <li>不仅提升灵活性，还能作为事故备用和黑启动电源</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>抽发损失 25%，使用成本高</li> <li>地理条件受限</li> </ul>
电化学储能站	<ul style="list-style-type: none"> <li>全自动化控制，响应快速</li> <li>控制精度高，可全容量调节</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>缺乏转动惯量，不利于控制电网频率</li> <li>前期投资高，性价比较低</li> <li>目前尚不具备大规模建设条件</li> </ul>
需求侧响应	<ul style="list-style-type: none"> <li>潜力大</li> <li>前景好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>价格信号传导机制形成需要较长时间</li> <li>提升效果存在不确定性</li> <li>需求侧资源可控性相对较差</li> <li>响应效果难以精确计量，有争议</li> </ul>

资料：《火电机组灵活性改造的激励机制研究》（张晶等），《中国电力系统灵活性的多元提升路径研究》（袁家海教授课题组），光大证券研究所

**系统灵活性在不同时间尺度下需求各异，长时间以满足电量平衡、短时间以满足电力平衡为主要特点。**维持电力稳定供应需要在所有时间尺度内（从瞬时到数年）平衡供应和需求，因此需要考虑不同时间尺度内的系统灵活性。短期灵活性与系统的稳定性有关，包括电压和频率管理等，主要考虑供需不平衡导致的频率偏差；长期灵活性与容量和资源的可用性有关，主要考虑非波动性可再生能源组合，以满足波动性可再生能源偏离预期发电比例时的系统电量平衡需求。**在短期、中期及更长时间尺度上，灵活发电能力对于电力平衡都至关重要。**

表 3：电力系统灵活性的不同时间尺度

灵活性类型	超短期灵活性/稳定性	极短期灵活性	短期灵活性	中期灵活性	长期灵活性	极长期灵活性
时间尺度	亚秒到数秒	数秒到分钟	数分钟到数小时	数小时到数天	数天到数月	数月到数年
问题	在非同步发电	在波动性发电	应对更频繁、更	提前一小时	解决因特定天	平衡波动性发



## 2、火电灵活性改造：多路径、效果优

**为保证成本效益和可靠性，传统发电厂必须具有灵活运行能力，并且可以在波动性可再生能源发电量较低时满足提供电力。**由于波动性可再生能源发电的运行成本极低，因此对电力系统而言，最经济的方式是接受所有可用的波动性可再生能源发电，关闭运行成本更高的传统发电厂，同时利用电网基础设施、需求响应和储能资源等更为经济的系统灵活性资源。但为了维持系统稳定性，继续运营的其他传统发电厂必须有能力消纳风电和太阳能光伏发电。在这种全新的运行条件下，传统发电厂的运行时间和发电量可能减少，传统火电厂的灵活性改造显得尤为重要。**提高火电灵活性主要是指增加火电机组的出力变化范围，响应负荷变化或调度指令的能力，多数情况下是指增加火电机组在低负荷时的稳定、清洁、高效运行能力。**提升指标包括：

(1) 稳定运行负荷范围：是指在有足够时间进行负荷调整时，发电机组可以稳定运行的工况范围，包括稳定运行发电量下限、稳定运行发电量上限。稳定运行范围越大，发电厂运行的灵活性越高。

(2) 爬坡率：是指在稳定运行范围以内升/降负荷的速度。向上和向下爬坡率取决于发电厂的技术特性和控制系统的技术属性。

(3) 最低运行时间和最低停机时间：是指发电机组必须在与系统同步后保持开机（最低运行时间），或在被停用时保持停机（最低停机时间）的时间限制。

(4) 启动时间：指达到最低稳定发电量水平所需要的时间。根据发电厂的运行状况，启动时间可进一步分为冷启动、暖启动和热启动。

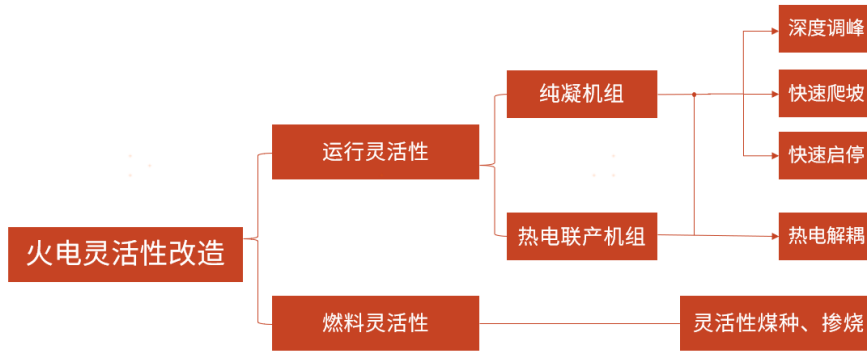
表 4：火电厂灵活性改造参数比较

参数	改造前性能	改造后性能
最低稳定负荷（万千瓦）	44	27
最大向上爬坡率（万千瓦/分钟）	0.5	1.5
最大向下爬坡率（万千瓦/分钟）	0.5	1.5
主要频率控制（30 秒以内，万千瓦）	1.8	4.5
次要频率控制（5 分钟以内，万千瓦）	0	10

资料：《中国电力系统转型》（IEA）

**具体来看，火电灵活性改造包括运行灵活性改造和燃料灵活性改造。**运行灵活性主要是指深度调峰能力、快速爬坡能力和快速启停能力，其中深度调峰能力是指火电机组具有较大的变负荷范围，对于热电机组是指通过热电解耦减少高峰热负荷时机组出力的能力。燃料灵活性是指使用适应力强的煤种，掺烧生物质例如秸秆、木屑等。

图 7：火电灵活性改造的分类



资料：《中国电力系统灵活性的多元提升路径研究》（袁家海教授课题组），光大证券研究所

**火电运行灵活性改造又可以分为纯凝机组灵活性改造和热电联产机组灵活性改造。**纯凝机组，指的是蒸汽进入汽轮发电，通过其中各级叶片做功后，乏汽全部进入凝汽器凝结为水的机组；热电联产机组，指的是在叶片中间抽出一部分蒸汽供给热网的机组。两种机组的运行方式不同，灵活性改造路线也有所差异。

表 5：纯凝机组、热电联产机组灵活性改造技术特点

机组类型	技术特点	改造需求	技术方案
纯凝机组	<ul style="list-style-type: none"> <li>低负荷运行能力强，负荷调节灵活</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解决制煤、锅炉、汽机、辅机、排放系统的低负荷运行适应性问题</li> <li>重点关注低负荷排放和设备磨损及寿命问题</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>磨煤机改造</li> <li>低负荷稳燃、脱硝技术</li> <li>汽机系统适应性改造</li> </ul>
热电联产机组	<ul style="list-style-type: none"> <li>热电耦合</li> <li>供热时调节能力差</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>增加供热能力，降低供热时的强迫出力</li> <li>利用热储能实现热电解耦</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>汽轮机旁路抽汽供热技术</li> <li>低压缸零出力供热技术</li> <li>高背压改造</li> <li>电极锅炉供热技术</li> <li>电锅炉固体储热技术</li> </ul>

资料：北极星电力网，光大证券研究所

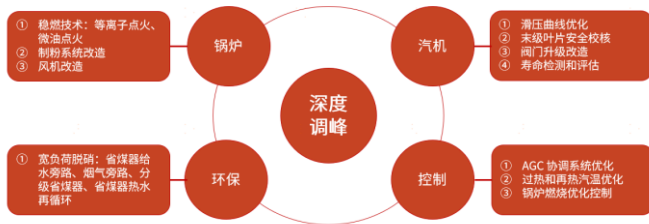
## 2.1、纯凝机组的灵活性改造技术路线

**纯凝机组具有低负荷运行能力强，负荷调节灵活的优势。纯凝工况灵活性提升技术路线主要包括深度调峰和快速响应。**

其中深度调峰包括四方面的改造路径：锅炉侧、汽机侧、环保侧和控制侧。在锅炉侧，主要有稳燃技术机改造、制粉系统改造和风机改造；在汽机侧，主要的改造方式包括滑压曲线优化、末级叶片安全校核、阀门升级改造、寿命检测和评估；在控制侧，主要的改造方式有 AGC 协调系统优化、过热和再热汽温优化、锅炉燃烧优化控制；在环保侧，主要涉及宽负荷脱硝。

快速爬坡改造包括四方面的改造路径：优化制供粉系统、优化运行操作过程、燃烧煤种预处理、新型材料减薄壁厚。

图 8：纯凝机组的灵活性改造技术路线



资料：《中国电力系统灵活性的多元提升路径研究》（袁家海教授课题组），光大证券研究所

图 9：快速爬坡改造路径



资料：《中国电力系统灵活性的多元提升路径研究》（袁家海教授课题组），光大证券研究所

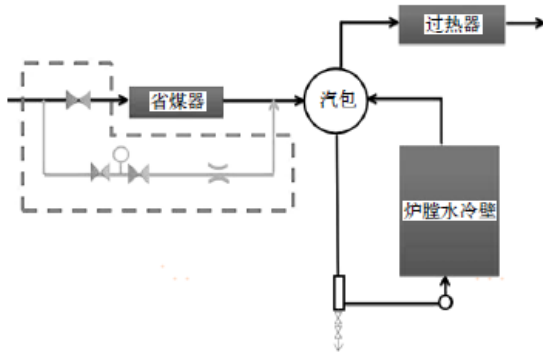
### 2.1.1、宽负荷脱硝技术

**宽负荷脱硝技术主要用于解决火电降低出力负荷时的环保问题。**为实现燃煤电厂超低排放的环保要求,大部分燃煤发电机组都使用 SCR (选择性催化还原法) 烟气脱硝技术。SCR 系统的高效催化剂最佳运行烟温一般要求在 300°C~420°C 之间,但在火电深度调峰时,脱硝入口烟温达不到催化剂投运最低温度要求。烟温低于催化剂最佳运行温度时,会导致氨分子逃逸率增大,减少了与 NO<sub>x</sub> 的反应机率,脱硝效率下降,最终导致排放不达标。**常见的宽负荷脱硝技术包括省煤器给水旁路、省煤器烟气旁路、省煤器分级改造、热水再循环、抽汽加热给水。**

**省煤器给水旁路：**通过减少给水在省煤器受热面中的吸热量,以达到提高 SCR 烟气脱硝系统入口烟气温度目的,实现宽负荷脱硝投运。

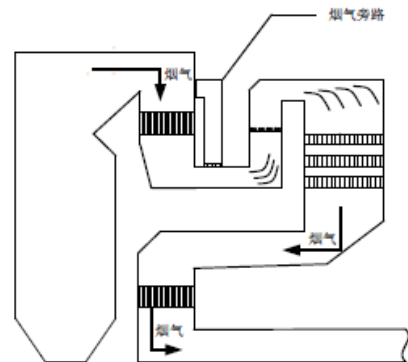
**省煤器烟气旁路：**通过抽取烟气加热省煤器出口过来的烟气,使低负荷时 SCR 入口处烟气温度达到脱硝最低连续运行烟温以上。

图 10：省煤器给水旁路示意图



资料：《燃煤机组宽负荷脱硝技术分析》（张杨等），光大证券研究所

图 11：省煤器烟气旁路示意图

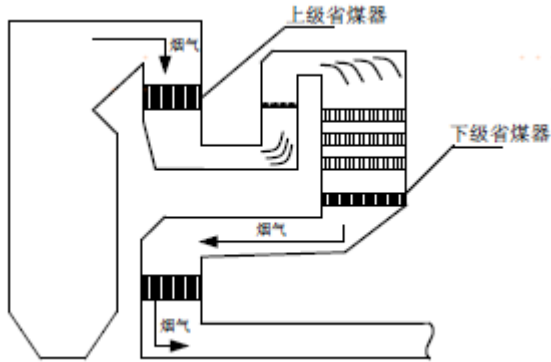


资料：《燃煤机组宽负荷脱硝技术分析》（张杨等），光大证券研究所

**省煤器分级设置：**通过减少 SCR 反应器前省煤器的吸热量,达到提高 SCR 反应器入口温度的目的。

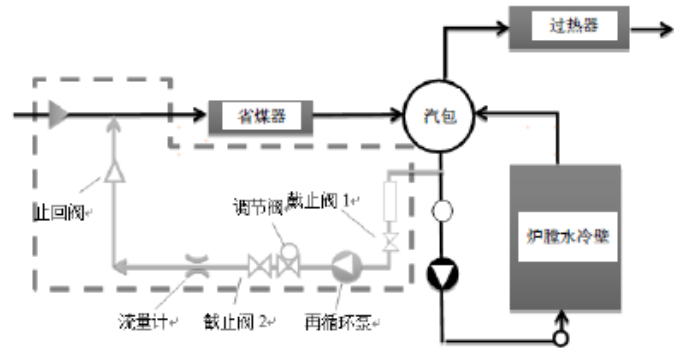
**热水再循环：**通过热水再循环提高给水温度,减少省煤器的冷端换热温差,以减少省煤器对流换热热量,使省煤器出口烟气温度提高。

图 12：省煤器分级改造示意图



资料：《燃煤机组宽负荷脱硝技术分析》（张杨等），光大证券研究所

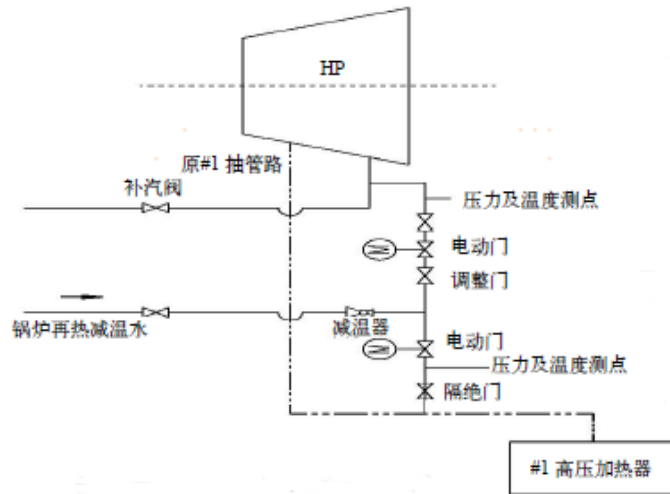
图 13：省煤器热水再循环系统示意图



资料：《燃煤机组宽负荷脱硝技术分析》（张杨等），光大证券研究所

**抽汽加热给水：**通过投运新一路抽汽，关闭原第一级抽汽口，通过调节门控制加热器入口压力，保证低负荷工况下给水温度，减少省煤器在低负荷工况下的吸热量，提高省煤器出口烟气温度，实现宽负荷脱硝功能。

图 14：抽汽加热给水示意图



资料：《燃煤机组宽负荷脱硝技术分析》（张杨等），光大证券研究所

**各种宽负荷脱硝技术各有优劣。**省煤器给水旁路、烟气旁路投资较小，但是会影响锅炉效率；热水再循环方案可以大幅提升烟气温度，但投资费用高；省煤器分级改造不会影响到锅炉经济性，但是成本同样较高。

表 6：宽负荷脱硝技术分析比较

	优点	缺点	工期 (天)	投资 (元/kW)
省煤器给水旁路	投资少，工程量小	调温幅度有限(10°C以内)；影响锅炉效率。	30	7~10

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/846104104135010113>