

# 燃煤电厂灵活性改造工具箱

中德能源与能效合作伙伴



# 版本说明

---

## 中文版发行方

中德能源与能效合作伙伴

受德国联邦经济和能源部（BMWi）委托

北京市朝阳区亮马河南路 14 号

塔园外交办公楼 2-5

邮编：100600

c/o

德国国际合作机构（GIZ）

Torsten Fritsche

Köthener Str. 2

柏林 10963

邮箱：[Sino-German-Energy-Partnership@giz.de](mailto:Sino-German-Energy-Partnership@giz.de)

网站：[www.energypartnership.cn](http://www.energypartnership.cn)

## 项目负责人

尹玉霞、Maximilian Ryssel

德国国际合作机构（GIZ）

## 中文版发布日期

2021 年 4 月

## 图片来源

德国联邦经济和能源部/封面

报告由中德能源与能效合作伙伴根据英语源报告“FLEXIBILITY TOOLBOX – MEASURES FOR FLEXIBLE OPERATION OF COAL-FIRED POWER PLANTS”翻译和汇编。

### 报告英语原版发行方：

德国——印度能源论坛 Indo-German Energy Forum Support Office (IGEF-SO)

地址：1st Floor, B-5/2, Safdarjung Enclave, New Delhi 110 029, India

邮箱：info@energyforum.in

网站：www.energyforum.in

电话：+91 11 4949 5353

### 项目负责人

O.P. Maken, EEC

Tobias Winter, IGEF-SO

受灵活性工作小组(Task Force Flexibility)委托

### 研究机构

VGB Power Tech e.V.

Deilbachtal 173

D-45257 Essen, Germany

Website: www.vgb.org

### 英文版发布日期

2018 年 4 月

本报告全文受版权保护，未经德国——印度能源论坛（Indo-German Energy Forum Support Office (IGEF-SO)）允许，不得随意转载使用。德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。未经德国——印度能源论坛不对因使用本报告信息而直接或间接造成的有形或无形损失负责，除非能证明其存在蓄意性或重大疏忽。

# 目录

执行摘要	3
<b>1.工具箱简介</b>	<b>5</b>
<b>2.发电厂灵活运行介绍</b>	<b>6</b>
2.1 德国情况概览	6
2.2 技术灵活性参数	7
2.3 技术灵活性措施的实施	8
<b>3.提高灵活性的改造措施</b>	<b>10</b>
3.1 燃烧	12
3.2 水蒸汽循环	20
3.3 汽轮机	23
3.4 仪表与控制系统	25
3.5 辅助设备	32
3.6 储能技术	33
<b>4.运维的灵活性</b>	<b>39</b>
4.1 仪表与控制的作用	39
4.2 关键组件	40
4.3 实用提示	43
4.4 对供电热耗率、寿命消耗和成本的影响	46
<b>5.培训概念和技能方案</b>	<b>49</b>
5.1 不同发电厂人员群体的培训需求	50
5.2 对培训师的培训	53
<b>6.灵活性与管理</b>	<b>54</b>
6.1 整体机组分析路径法	54
<b>附录 A: VGB “发电厂/工业工厂的给水、锅炉水和蒸汽质量”标准</b>	<b>57</b>
<b>附录 B: VGB“蒸汽锅炉工厂组件、压力容器安装和高压给水和蒸汽管道状态监测和检验”标准</b>	<b>60</b>
<b>附录 C: VGB“发电厂的保全”标准</b>	<b>63</b>
<b>附录 D: VGB “蒸汽涡轮发电机组的保全”标准</b>	<b>68</b>
<b>附录 E: 更多参考文献</b>	<b>69</b>

# 示意图

---

图 1:	工具箱结构	05
图 2:	发电厂灵活运行的维度	08
图 3:	灵活性措施的实施周期	09
图 4:	燃煤电厂改造主要部分	10
图 5:	储能技术概览	34
图 6:	截至 2016 年 11 月德国电化学储能园区概览, 资料来源: Büro F	35
图 7:	德国曼海姆 GKM 发电厂的储热系统	38
图 8:	仪表与控制系统的不同级别	40
图 9:	整体机组分析路径	54
图 10:	基于风险的维护措施选择; 资料来源: VGB 和 EnBW	56

# 表格

---

表 1:	德国电力装机容量概览; 单位: 百万千瓦, 截至 2020 年 12 月 31 日	06
表 2:	发电厂灵活运行概览	07
表 3:	火电厂灵活性参数, 资料来源: VDE 和 VGB	08
表 4:	关键组件清单	41
表 5:	状态监测的现行法规和 VGB 标准	42
表 6:	实用运维技巧	45
表 7:	管理人员灵活性培训计划	50
表 8:	操作人员灵活性培训计划	51
表 9:	技术人员灵活性培训计划	52
表 10:	针对维护的整机分析法; 资料来源: VGB 和 Uniper	55

# 执行摘要

波动的可再生能源（主要是风能和太阳能）发电上网份额不断增加，给能源系统带来了复杂的挑战。除了电网和需求侧管理等选择外，灵活的常规发电在确保足够的系统稳定性方面发挥着关键作用。因此，现有燃煤电厂需要适应全新的运行模式。

## 最小稳定出力是最重要的灵活性维度：

发电厂的灵活运行包括三个方面：较低最小稳定出力，短时而高效的启动和停机，以及较高爬坡速率。大多数提高灵活性的措施旨在降低最小稳定出力，这对提供剩余负荷、提升调节空间非常重要；在需求低的时候，这样的安排比关停整个电厂更经济。

从基础负荷向灵活运行的转型是一个改变的过程，需要强有力的管理和领导、熟练的员工和适当的技术。每个发电厂都有自己的具体情况、技术要求和现实条件，因此没有适用于所有电厂的通用概念或单一实施计划。不过，电厂可以采取一些行动和步骤来挖掘自身的灵活性潜力。

## 实现灵活性的十个步骤

- 1. 提高灵活性意识：**提供关于灵活性需求的背景信息，解释必要性和对电厂运维的影响，并启动培训计划。
- 2. 检查电厂状态，识别与灵活运行相关的瓶颈和限制因素：**
  - 咨询原始设备制造商，评估低负荷运行以及温度和压力梯度对主要组件和设备的影响。
  - 确保所有控制回路在基荷下平稳运行。
- 3. 计划并进行试运行，评估电厂灵活性潜力。**
  - 就当前的最小稳定出力、启动和循环特性实现电厂性能的透明化。
  - 识别制约因素和流程限制因素以及改进潜力。
- 4. 优化仪表与控制系统：**

这是提高电厂灵活性的最具成本效益的方法。一定程度的自动化是挖掘这一潜力的先决条件。

- 对主要发电过程的平稳控制是灵活性的促进因素；例如精确控制蒸汽温度。
- 优化基本控制回路（即煤炭供应、汽包水位和空气控制）是一项基本要求，工厂操作人员需要考虑逻辑电路联锁。

## 5. 实施缓解措施

需要运用缓解措施以管理灵活 / 循环运行之后的结果。其中包括重新评估所有运维程序，重点关注水和蒸汽质量、保全和防锈程序以及维护策略。必须使用适当的状态监测系统。

## 6. 优化燃烧：

稳定燃烧是确保最小稳定出力的关键。以下方面至关重要：

- 对每个燃烧炉进行可靠的火焰检测
- 确保煤质和成分信息透明
- 优化气流管理
- 运行期间使用更少的磨煤机
- 锅炉保护系统适应低负荷运行。

## 7. 优化启动程序：

为了确保快速高效启动，电厂操作员应检查与启动相关的温度测量并考虑更换。

除了自动启动程序外，这也是评估可接受的温度限制并使用较不保守的设定值运行的先决条件。

**8. 提高部分负荷下的电厂效率、改善电厂动态特性：** 这是指利用水-蒸汽循环潜力的措施，例如通过停止冷凝和优化高压加热器实现频率保持，以及提高重要设备和组件（如 ID、FD 和 PA 风扇或给水泵）性能的措施。

**9. 提高煤质：** 煤质越好，燃烧越充分。因此，应考虑改进和监测煤质的措施，如配煤和洗煤，以及在线煤质分析。

## 10. 考虑储能以提高电厂整体灵活性表现：

这里是指电化学储能或储热系统。

电厂纳入考虑储能技术的益处很大程度上取决于市场设计如何。

# 1.工具箱简介

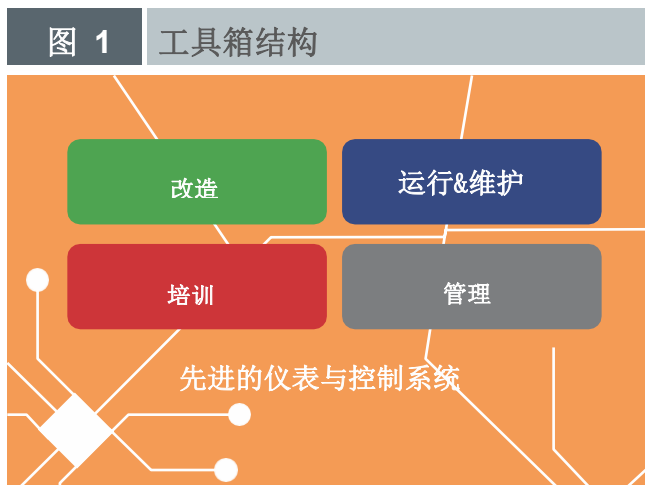
燃煤电厂的灵活运行需要合适的技术、熟练的人员和富有远见的领导层。此外，必须认识到，这种全新的运行模式意味着只有全盘兼顾、采取整体方法才能成功管理改变的进程。

## 灵活运行需要整体方法

灵活性工具箱旨在引导分析以下问题，以支持在现有发电厂部署这一变化进程：

- 哪些程序已被证明有助成功识别并实施灵活性措施？
- 哪些技术措施已被证明有助现有电厂适应灵活运行？
- 对电厂运维（O&M）会产生什么影响？
- 对人员有何要求？哪些培训有用？
- 电厂管理层需要面临哪些任务？

工具箱概述了众多行之有效的措施、实用技巧和培训建议以及管理问题的参考文献。因此将其划分为四个部分——改造、运行&维护、培训和管理。



仪表与控制（I&C）系统对于灵活运行起着至关重要的作用。工厂状态透明化、运行数据的可用性、复杂的数据评估和先仪表与控制系统在灵活运行中扮演重要角色。电厂状态信息透明度、运行数据可获得性、精细的数据评估以及先进的控制是运行具有更高灵活性的发电厂的前提条件。此外，仪表与控制系统是连接电厂高效运行各个重要方面的纽带。其收益和成本效率无与伦比，因此应是任何灵活性项目的重点。在进一步提升数字化水平方面，通过同时促进效率和灵活性，仪表与控制系统优化提供了更大潜力。



## 2. 发电厂灵活运行介绍

### 2.1 德国情况概览

2020 年，德国可再生能源发电占比高达 46%，早已成为德国最大能源品类。德国政府更是制定了宏伟发展目标：到 2050 年，一次能源消费量中可再生能源占比 80%。此外，德国将在 2022 年全面淘汰核电站，并承诺最迟于 2038 年淘汰煤炭。电力装机容量概览详见表 1。

表 1：德国电力装机容量概览；单位：百万千瓦，截至 2020 年 12 月 31 日

总计	可再生能源发电				火电				核能
	太阳能	风能	水电*	生物质能	燃气	燃油	煤炭	褐煤	
227	54.1	62.6	14.7	8.3	30.5	4.4	23.7	20.2	8.1
	139.7				78.8				

\*包括 980 万千瓦抽水蓄能装机容量

在德国，波动性可再生能源（尤其是太阳能和风能发电）上网消纳已是常态。阳光充沛、风力充足时可再生能源发电能够满足绝大部分电力需求。

然而某些情况下，特别是冬季日照不足时，传统发电厂需要供应几乎所有用电需求。

因此，电力系统的剩余负荷必须保持高度灵活，以满足所有情景的潜在需求。在全新运行模式下，发电厂年运行小时数减少，启动次数增加，负荷率降低。下图展示德国硬煤电厂计划外不可用率、启动次数和等效满负荷运行小时数在十年期间的变化情况。数据表明，启动次数、满负荷小时数和计划外不可用率之间高度相关，十年期间，计划外不可用率急剧增加。这种趋势基于 VGB 数据库发电厂信息系统 KISSY 分析得出。

#### 分析得出如下结论：

- 经验表明，发电厂老化导致不可用率相应升高，计划维护频率减少时更是如此。
- 灵活性运行偏离了发电厂初始设计考量，导致不可用率上升。

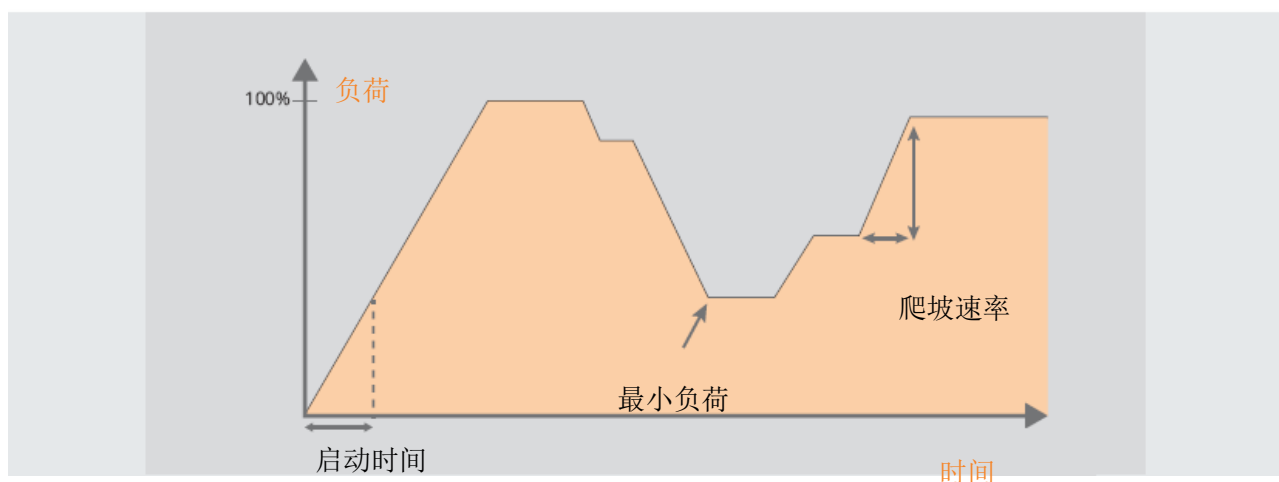
## 2.2 技术灵活性参数

从技术角度看，灵活运行发电厂需要考虑三个层面（见图 2）：

表 2：发电厂灵活运行概览

最小稳定出力	<p>最小稳定出力是指发电厂在稳定条件下未使用辅助燃料（如燃油）运行的最低负荷水平。最小稳定出力运行可减少低价时段的损失，避免发生关停与启动操作，从而降低启动成本，减少热应力造成的寿命消耗。此外，在发电厂保持同步的情况下，最小稳定出力运行可提供旋转惯性，为电网运营商提供支持。最小稳定出力状态运行会显著降低效率。</p>
短时、经济的启动	<p>启动时间是指发电厂从开始运行到达到最小稳定出力负荷所需的时间。有必要缩短启停时间，快速响应市场需求变动，例如实行两班制作业。启动和停机过程中产生的热应力极大地影响元件设备的寿命消耗。启动时间分为以下几类：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 热态启动：&lt; 8 小时</li> <li>● 温态启动：&gt; 8 小时并&lt;48 小时</li> <li>● 冷态启动：&gt; 48 小时</li> </ul> <p>由于启动次数增加（详见 ），也需更加重视成本节约。</p>
高爬坡速率	<p>爬坡速率是指发电厂在一定时间内改变电力输出的速度。</p> <p>爬坡速率高的发电厂可对市场变化快速作出响应。具有动态循环能力的发电厂可灵活参与不同市场（如辅助服务）。</p>

图 2：发电厂灵活运行维度



下表提供不同类型火力发电厂的灵活性参数概览。

数字依次代表普通水平、先进水平和潜能水平。

表 3：火电厂灵活性参数；资料来源：VDE 和 VGB。

发电厂类型	硬煤机组	褐煤机组	CCGT	燃气轮机
负荷梯度（%/分钟）	2 / 4 / 6	2 / 4 / 6	4 / 8 / 12	8 / 12 / 15
负荷范围（%）	40 至 90	50 至 90	40*至 90	40*至 90
最小负荷（%）	40 / 25 / 15	60 / 40 / 20	50 / 40 / 30*	50 / 40 / 20*
热启动爬坡时间（h）	3 / 2 / 1	6 / 4 / 2	1.5 / 1 / 0.5	< 0.1
冷启动爬坡时间（h）	7 / 4 / 2	8 / 6 / 3	3 / 2 / 1	< 0.1

普通水平/先进水平/潜能水平；\*根据氮氧化物和二氧化碳排放限制；CCGT =燃气轮机联合循环发电机组

燃气轮机联合循环发电厂比燃煤电厂更快更灵活。燃煤电厂的启动程序更为复杂。因此，本灵活性工具箱特为燃煤电厂提供多项灵活性措施。

### 2.3 技术灵活性措施的实施

为提高电厂运行灵活性，前期准备工作必不可少。

这主要包括分析电厂历史数据以及试运行，以深入了解电厂在最小稳定出力、启动时间和爬坡速率方面的实际表现。要准确掌握电厂现状，必须进行试运行。

具体流程如下图所示。灵活性措施实施周期包括以下步骤。

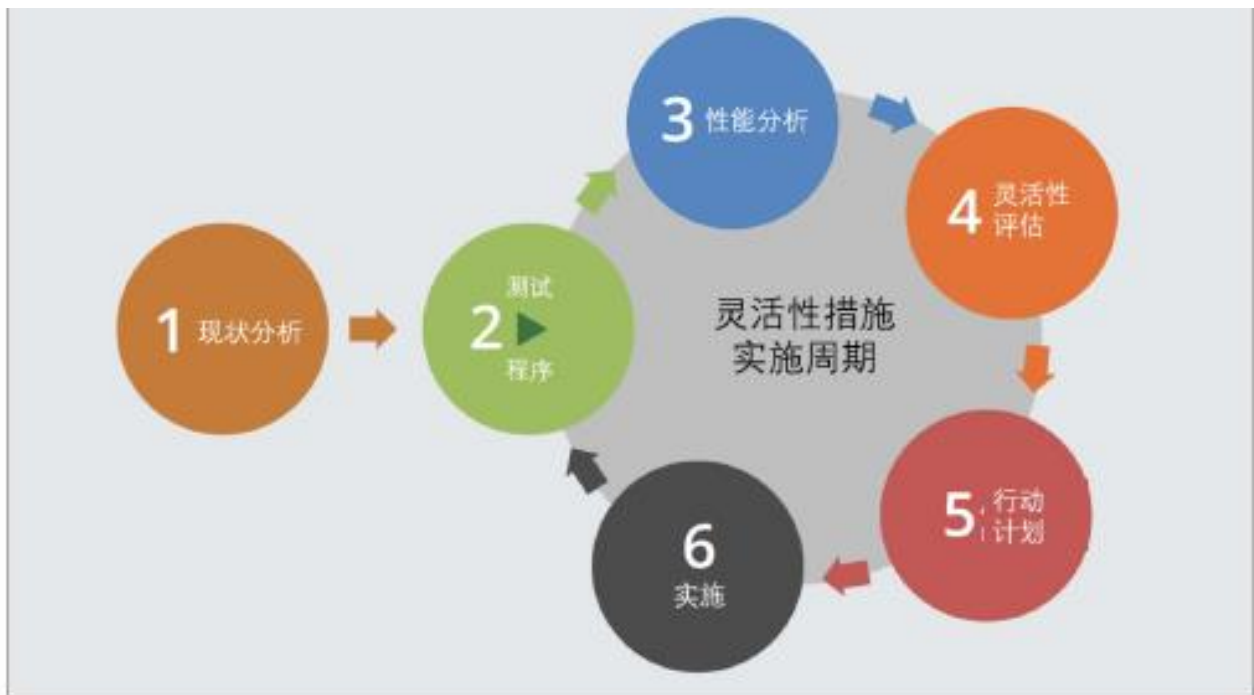
- (1) 利用历史数据分析发电厂现状，制定试运行方案。
- (2) 发电厂试运行。试运行方案应包括部分负荷和最小稳定出力运行、启动试运行及指定时期

循环运行。

- (3) 试运行期间收集的资料和数据构成**分析发电厂性能**的基础资料。
- (4) 通过试运行与历史数据分析电厂性能，**根据成本效益原则制定并评估改良措施，提升电厂灵活性。**
- (5) 评估系统灵活性提升措施，制定**行动计划**。
- (6) 最后，在发电厂实施**选定的具体措施**。

下一步则是重新评估发电厂性能与灵活性。试运行期间，应特别注意适时调整相关措施，可酌情跳过步骤 1、4 和 5。通过重复评估与调整，有助于顺利实施技术改造措施与相应的运维流程。

图 3：灵活性措施的实施周期

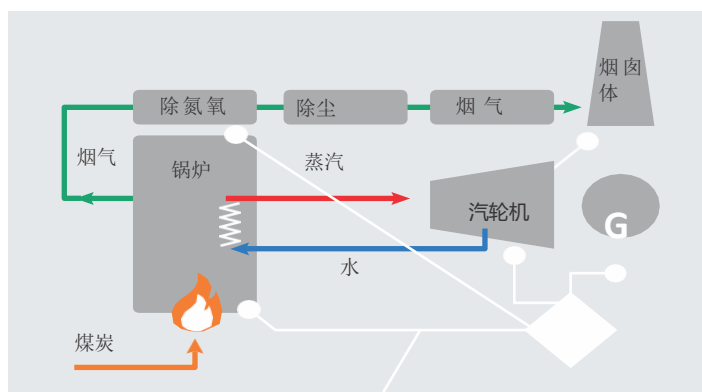


## 3.提高灵活性的改造措施

本章介绍需要进行电厂灵活性改造的不同措施。这些措施应用于电厂的不同部分（参见图 7），并侧重于以下步骤：

- 燃烧
- 水蒸汽循环
- 汽轮机
- 仪表与控制系统
- 辅助系统

图 4 燃煤电厂改造主要部分



除了以上电厂部分外，本文还涵盖一篇常用储能技术的章节。各项措施的描述包括以下方面信息：

- 灵活性影响
- 该措施针对的限制因素和关键问题
- 与该措施有关的关键特点的说明
- 所需投资估算：

A < 100,000 美元

100,000 美元 < B < 300,000 美元，

300,000 美元 < C < 600,000 美元，

D > 600,000 美元

- 落地时间
- 最佳实践示例 / 参考资料（如有）
- 提供对该措施益处的评估的说明

改造所需的总投资具体取决于方方面面，例如：

- 工厂实际状态及其自动化水平
- 市场框架——灵活性激励机制和商业模式
- 其他合约义务，例如供电/供热相关

然而经验表明，提高运行灵活性——最小稳定出力降至 20%到 40%所需平均投资约为每千瓦 5 至 15 美元。这些数字不包括储能投资成本。

更多有关火力发电厂灵活运行的参考资料，可参阅以下研究和报告：

- 《火力发电厂的灵活性》(Flexibility in thermal power plants), [Agora 能源转型智库研究](#), 2017 年 6 月
- 合作项目“联合蒸汽发电厂”(Partner Steam Power Plant)的[最终报告](#), 2016 年 12 月
- 《提高燃煤电厂的灵活性》(Increasing the flexibility of coal-fired power plants), 国际能源署报告 242, Colin Henderson, 2014 年 9 月

后文将按上述电厂部分建议行之有效的措施。考虑到工具箱的性质将以通用方式描述措施。本章的目的是概述基于经验来看具有较大发展潜力的措施。如果表格中未作说明，这些措施可以作为所有类型和规模的发电厂的一种选择。然而，每个发电厂的改进潜力以及成本和时间需要单独调查才能得出。只有经过更深入的分析，才可能对具体发电厂的改造措施进行排序。

除了根据不同电厂情况选择措施之外，我们强烈建议所有电厂下采取以下措施：

#### 总体措施——与原始设备制造商合作评估流程限制因素

灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化、爬坡速率
限制因素	一般（特别是锅炉和汽轮机）
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 评估应包括锅炉计算，以评估低负荷运行以及温度和压力梯度对锅炉组件和设备的影响</li> <li>▪ 需要进行库存检查，以详细评估电厂状态并制定测试计划时间表</li> <li>▪ 实现电厂灵活运行所需技术边界条件的透明化</li> </ul>
投资	A – B：可能不需要投资，具体取决于原始设备制造商
时间	1 – 3 个月
最佳实践或参考资料	不适用
备注	采取进一步措施的前提条件

### 3.1 燃烧

#### 储煤场——热谱检测系统和煤炭处理

灵活性影响	最小稳定出力降低
限制因素	储煤场煤炭自燃
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 最小稳定出力负荷的降低以及更频繁在最小出力下运行带来煤炭储存期延长，更容易导致自然事故发生</li> <li>▪ 除了安装检测系统外，建议在储煤场内适当处理煤炭（压实），以避免自燃</li> </ul>
投资	A – B 和额外运维成本
时间	1 – 3 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nolte M.; Brüggendick, H. and Brosch, K.: 《燃煤电厂中的能源与可再生能源混合 – 低负荷运行及其对燃煤电厂的影响》(Kohlekraftwerke im Energiemix mit den erneuerbaren Energien – Der Schwachlastbetrieb und seine Auswirkungen auf das Kohlekraftwerk) . 《电厂技术 – 安全可持续的能源供应》(Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung) – 第 3 卷, TK-Verlag, 2011, 第 699 页-707 页</li> <li>▪ Carpenter, A.M.: 《煤堆管理》(Management of coal stockpiles), 国际能源署煤炭研究 1999, ISBN 92- 9029-333-0</li> </ul>
备注	这项措施并不提高发电厂的灵活性，但涵盖更灵活运行发电厂需要考虑的次要影响。

#### 燃料供应——在线煤炭分析

灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化、爬坡速率
限制因素	火焰稳定性、热量输出可重复性
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 灵活运行的一般要求是使用质量良好的煤炭</li> <li>▪ 例如，通过利用在线煤炭分析，能够持续保持火焰稳定性和可靠运行，从而减少跳闸次数并加快响应，例如</li> </ul>
投资	C
时间轴	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sloss, LL.:《通过配煤满足发电厂要求》(Blending of coals to meet power</li> </ul>

	<p>station requirements), 国际能源署清洁煤炭中心, 2014 年 7 月, ISBN 978-92-9029-559-4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lockwood, T.: 《燃煤电厂的先进传感器和智能控制系统》(Advanced sensors and smart controls for coal-fired power plant), 国际能源署清洁煤炭中心, 2015 年 6 月, ISBN 978-92-9029-573-0</li> <li>▪ Reid, I.: 《煤炭选矿》(Coal Beneficiation), 国际能源署清洁煤炭中心, 2017 年 6 月, ISBN 978-92-9029-600-3</li> </ul>
备注	如果不能保障优质煤炭的持续供应, 这项措施应成为后续措施的前提条件, 例如磨煤机单机运行, 以确保运行更可靠且可重复。

### 燃料供应 – 高温燃气发生器

灵活性影响	启动优化、最小稳定出力降低。
限制因素	煤炭干燥, 磨煤机启动工况
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 需要热风来保证煤炭充分干燥。如果热风来自空气预热器, 则必须使用启动燃料预热整个系统(锅炉和烟道)</li> <li>▪ 高温燃气发生器能够几乎瞬间提供足够的一次风温度。因此, 提早替代昂贵的启动燃料, 可使磨煤机更早启动, 从而节省成本</li> <li>▪ 对煤炭干燥需要再循环烟气的褐煤电厂特别有效</li> <li>▪ 烘干由大雨天气引起的极度潮湿的煤炭, 以及不在研磨过程规定的劣质煤范围之列的煤炭</li> <li>▪ 高温燃气发生器可用于保持所需的烟气温度, 以免对烟气清洁设备造成不利影响, 并避免烟气温度下降到三氧化硫的露点温度以下, 特别是在空气预热器的冷端</li> </ul>
投资	D
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 欧洲专利 12 162 930</li> <li>▪ 德国发电厂 Bexbach / Weiher 和 Herne 4 号机组</li> </ul>
备注	这项措施能够考虑使用与设计相比水分更高的煤, 提高了燃料灵活性。此外, 这项措施在降低启动成本和最小稳定出力方面具有适中的改进潜力。



## 燃料供应和烟道 – 蒸汽盘管空气预热器

灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化
限制因素	煤炭干燥、烟气温度、露点
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 为保证煤炭充分干燥，需要热风。如果热风来自空气预热器，则必须首先使用启动燃料预热整个系统（锅炉和烟道）（另见热气发生器）</li> <li>■ 启动蒸汽盘管预热器需要足够高的蒸汽参数，因此蒸汽盘管空气预热器能够持续提供启动期间所需的一次风温度，特别是在配备辅助锅炉的情况下。因此，提早替代昂贵的启动燃料，可使磨煤机更早启动，从而节省成本</li> <li>■ 蒸汽盘管空气预热器可用于保持所需的烟气温度，以免对烟气清洁设备造成不利影响，并避免烟气温度下降到三氧化硫的露点温度以下，特别是在空气预热器的冷端</li> <li>■ 对煤炭干燥需要再循环烟气的褐煤电厂特别有效</li> </ul>
投资	D; A–B，如果仅需要重新调试现有硬件
时间	6–12个月
最佳实践或参考资料	德国发电厂的标准设计
备注	这项措施在降低启动成本和最小稳定出力的灵活性方面具有适中的改进潜力。这项措施须与其他燃料供应措施同步。

## 燃料供应 – 在线管理系统

灵活性影响	最小稳定负荷降低、启动优化
限制因素	煤炭干燥、烟气温度、露点
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 灵活运行的一般要求是优质煤炭供应</li> <li>■ 在线煤粉配风管理系统能够实时测量各个煤粉管道中煤炭燃烧器与煤炭燃烧器的空燃比，并可根据获取的煤质进行自动优化</li> <li>■ 减少碳粉在燃烧器上的不均匀分布</li> </ul>
投资	B
时间	6–12个月
最佳实践或参考资料	德国发电厂 Walsum 10 号机组
备注	如果不能保障优质煤炭的持续供应，这项措施应成为后续措施的前提条件。因此，这项措施在灵活性方面可能具有显著改进潜力。

### 燃料供应 – 更多数量的磨煤机

灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化
限制因素	每台磨煤机的最小负荷
说明	<p>磨煤机的最小负荷受诸多因素限制，例如</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 最少一次风流量</li> <li>▪ 给煤机最小速度</li> <li>▪ 通过降低负荷，空燃比恶化，潜在导致火焰不稳定。通过安装更多但更小的磨煤机，可以在启动相同数量磨煤机的情况下显著降低最小负荷。</li> <li>▪ 由于磨煤机的热量输出减少，运行提前从启动烟道过渡到煤炭，从而具有启动方面的优化潜力。</li> </ul>
投资	D
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	由德国联邦经济与能源部资助的可再生能源发电联合研究项目“联合制蒸汽发电厂”。
备注	这项措施在灵活性方面可能具有显著改进潜力，但还需对现有发电厂投入大量资金。因此，对于新建发电厂，应当考虑采取这项措施。此外，这项措施还须与煤质及相应措施同步。

### 燃料供应 – 利用磨煤机的储存能力

灵活性影响	爬坡速率
限制因素	磨煤机/锅炉出力的响应时长
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 为了加快热量输出，可通过调整研磨压力、有意释放或储存来自磨煤机/磨煤机中的煤炭来利用磨煤机的储存能力</li> <li>▪ 响应时间的缩短和储存容量在很大程度上取决于磨煤机类型</li> </ul>
投资	B
时间	3 – 6 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurth, M.; Greiner F.: 《对过程工程动态需求的不断增加导致电厂控制技术面临的挑战》(Herausforderungen an die Kraftwerksleittechnik durch steigende dynamische Anforderungen an die Verfahrenstechnik). VGB</li> </ul>

	<p>PowerTech Journal 8/2008</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kallina, G.; Kochenburger, A.; Lausterer, G.: 《通过分层储存使用对电厂进行经济的电网频率支持升级》(Wirtschaftliche Ertüchtigung von Kraftwerken zur Netzfrequenzstützung durch gestufte Speichernutzung). VGB Kraftwerkstechnik 2/2000</li> <li>▪ 德国发电厂 Voerde 和 Bexbach</li> </ul>
备注	<p>在以很低投资提高爬坡速率方面，这项措施可能具有中等至显著改进潜力。然而，实际潜力在很大程度上取决于已安装的磨煤机。此外，通过将这项措施与在线燃料供应管理系统结合使用，可以提高潜力。</p>

### 燃料供应 – 动态分离器

灵活性影响	爬坡速率
限制因素	磨煤机/锅炉出力的响应时间长
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 为了加快热量输出，可通过有意调整分离器的转速来利用磨煤机的储存能力</li> <li>▪ 较低的分选器转速向燃烧器释放更多煤粉，而较高的速度分离更多煤</li> </ul>
投资	D
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	德国发电厂 Walsum 10 号机组
备注	这项措施在灵活性方面可能具有适中的改进潜力。

### 燃料供应 – 间接点火

灵活性影响	启动优化、爬坡速率
限制因素	煤炭干燥和研磨、热量输出
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 间接点火系统通过储存煤粉使磨煤机和燃烧器分离</li> <li>▪ 热量输出响应速度明显高于直接点火</li> <li>▪ 进一步的益处是，磨煤机可以始终在额定负荷下运行，并且可以在炉内保持更均匀的热分布</li> <li>▪ 可以安装包含直接点火和间接点火的混合点火系统</li> </ul>
投资	D

时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 由德国联邦经济与能源部资助的可再生能源发电联合研究项目“联合制蒸汽发电厂”</li> <li>▪ Ehmann, M.: 《用于燃烧在密相输送中供应的燃料的煤粉燃烧器》（Kohlenstaubbrenner zur Verfeuerung von in Dichtstromförderung zugeführtem Brennstoff）.欧洲专利, EP2009351</li> <li>▪ 《发电厂混合点火》（Hybrid firing in power plants）Niederaußem 和 Jänschwalde</li> </ul>
备注	这项措施在提高爬坡速率方面具有显著改进潜力。然而，必须为粉煤增加额外和充足的储存容量，这会扩大投资范围和规模。这项措施必须与其他燃料供应措施同步。

#### 燃料供应 – 单磨煤机作业

灵活性影响	最小负荷降低
限制因素	火焰稳定性
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 单磨煤机作业是一个技术选项，与优化的燃烧过程相结合，通过提高空燃比实现最高 15% 的最小负荷</li> <li>▪ 保持可用性要求所需的可靠设备</li> <li>▪ 通常需要对锅炉保护系统进行改造</li> </ul>
投资	B – D，取决于对（额外）硬件的要求
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lens, H.和 M. Nolte, M.: 《通过控制和过程工程措施降低硬煤发电厂的最低发电机负荷》（Absenkung der Generatormindestlast von Steinkohlekraftwerken durch regelungstechnische und verfahrenstechnische Maßnahmen）.VGB PowerTech Journal 4/2015</li> <li>▪ Heinzl, T.; Meiser, A.; Stamatelopoulos, G.-N.和 Buck, P.: 《在 Bexbach 和 Heilbronn 发电厂 7 号机组实施单磨煤机作业》（Implementation of Single Coal Mill Operation in the Power Plant Bexbach and Heilbronn Unit 7）,VGB PowerTech Journal 11/2012</li> <li>▪ Stamatelopoulos, G.-N.和 Heinzl, T.: 《Heilbronn 燃煤电厂 7 号机组 – 750 兆瓦 – 单磨煤机作业》（Coal fired power plant Heilbronn Unit 7 –</li> </ul>

	<p>750 MW – one-mill operation) .PowerGen (2014)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>德国若干发电厂，如 Altbach、Bexbach、Heilbronn 7 号机组、Weiher、Lünen</li> </ul>
备注	<p>这项措施在降低最小稳定出力方面具有较高改进潜力。然而，这项措施在很大程度上依赖于煤质，并且可能需要采取相应措施，如改造锅炉安全系统。这项措施更适合硬煤电厂。</p>

### 燃烧 – 可靠的火焰检测

灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化
限制因素	降低火焰强度
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>通常，分区火焰检测在降低最小稳定出力的条件下不再合适。所以建议直接火焰检测；因此，至少要在燃烧器降低最小负荷的层面安装新传感器</li> <li>此外，更可靠的火焰检测能够实现更稳定、可重现的启动</li> </ul>
投资	B – D，取决于硬件的必要更换或改造
时间	6 – 12 个月，取决于所需改造
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heinzel, T.; Meiser, A.; Stamatelopoulos, G.-N.和 Buck, P.: 《在 Bexbach 和 Heilbronn 发电厂 7 号机组实施单磨煤机作业》(Implementation of Single Coal Mill Operation in the Power Plant Bexbach and Heilbronn Unit 7) ,VGB PowerTech Journal 11/2012</li> <li>Stamatelopoulos, G.-N.和 Heinzel, T.: 《Heilbronn 燃煤电厂 7 号机组 – 750 兆瓦 – 单磨煤机作业》(Coal fired power plant Heilbronn Unit 7 – 750 MW – one-mill operation) .PowerGen (2014)</li> <li>德国若干发电厂，如 Bexbach 和 Heilbronn 7 号机组</li> </ul>
备注	<p>这项措施对进一步措施有所要求，特别是单磨粉机作业的前提条件。因此，这项措施在灵活性方面可能具有中等至显著改进潜力。</p>

### 燃烧 – 可靠点火

灵活性影响	启动优化
限制因素	燃烧器故障
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>对启动优化的基本要求</li> <li>可以避免不必要的跳闸和等待时间</li> </ul>

投资	A – D, 取决于硬件的必要更换或改造、运维 (燃烧器的循环启动)
时间	1 – 12 个月, 取决于所需改造
最佳实践或参考资料	无
备注	这项措施相当于采取进一步措施的前提条件, 尤其是启动优化。因此, 这项措施在灵活性方面具有中等至显著改进潜力。

### 燃烧 – 等离子体点火

灵活性影响	启动优化
限制因素	点火所需启动 / 辅助燃料
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 用热等离子体流点燃煤</li> <li>▪ 通过减少 / 替代启动 / 辅助燃料 (取决于是所有燃烧器还是仅特定燃烧器层面将配备电点火) 的使用, 具有显著的成本节约潜力</li> </ul>
投资	B – D, 取决于现有燃烧器是否可以改造或需要更换
时间	3 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heimann, G.: 《提高褐煤电厂灵活性》(Flexibilitätssteigerungen von Braunkohlekraftwerken), VGB PowerTech 4/2015</li> <li>▪ Heimann, G.: 《使用带等离子体点火的干褐煤燃烧器成功安装和调试点火及支撑炉》(Erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme einer Zünd- und Stützfeuerung mittels Trockenbraunkohlebrenner mit Plasmazündung), VGB PowerTech 7/2016</li> <li>▪ 《干褐煤提高灵活性》(Dry lignite increases flexibility), BINE info</li> </ul>
备注	这项措施在节省辅助燃料方面可能具有适中的改进潜力。

### 燃烧 – 电点火

灵活性影响	启动优化
限制因素	点火所需启动 / 辅助燃料
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 使用仅由电能加热的热燃烧器喷嘴点燃煤</li> <li>▪ 通过减少 / 替代启动 / 辅助燃料 (取决于是所有燃烧器还是仅特定燃烧器层面将配备电点火) 的使用, 具有显著的成本节约潜力</li> </ul>
投资	B – D, 取决于现有燃烧器是否可以改造或需要更换。一般来说, 与等离

	子体点火相比，改造所需的工作量 / 投资更少
时间	3 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>由德国联邦经济与能源部资助的可再生能源发电联合研究项目“联合制蒸汽发电厂”</li> <li>Leisse, A.; Rehfeldt, S.和 Meyer, D.: 《固体多尘燃料颗粒在热表面上的点火特性》(Das Zündverhalten fester, staubförmiger Brennstoffpartikel an heißen Oberflächen) .VGB PowerTech (2014)</li> </ul>
备注	这项措施在节省辅助燃料方面可能具有适中的改进潜力。

### 3.2 水蒸汽循环

锅炉 – 可疏水受热面	
灵活性影响	启动优化
限制因素	热应力
说明	由于下部冷凝水的缘故，不可疏水弯管（例如屏式过热器）在冷启动方面尤其受限。如果管内冷凝液无法排出，则必须缓慢升高启动过程中的温度，以避免管内温度冲击
投资	不适用于发电厂改造。因此，仅应考虑新建发电厂
时间	不适用
最佳实践或参考资料	所有德国发电厂
备注	这项措施仅适用于新建发电厂。

锅炉 – 摆动式燃烧器	
灵活性影响	最小稳定出力
限制因素	蒸汽温度
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小出力时，新蒸汽温度以及再热蒸汽的温度通常会降低</li> <li>使用摆动式燃烧器，可以利用火焰的位置将热传递从辐射受热面转移到对流受热面，该设计有利于将温度保持在可接受范围内</li> <li>此外，可以克服由于裂纹而传递到对流受热面的不均匀热传递（也可通过适当调整燃烧器级别实现）</li> </ul>
投资	D

时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>由德国联邦经济与能源部资助的可再生能源发电联合研究项目“联合制蒸汽发电厂”</li> </ul>
备注	这项措施在灵活性方面可能具有显著改进潜力

### 锅炉 – 厚壁组件的更薄设计

灵活性影响	启动优化、爬坡速率
限制因素	热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁厚以及各个组件的材料影响可接受的热应力</li> <li>更薄的设计能使温度瞬变更快</li> <li>作为备选，替代材料能够增加热应力</li> </ul>
投资	现有发电厂通常不适用于这项改造。因此，仅应主要考虑新建发电厂
时间	不适用
最佳实践或参考资料	由德国联邦经济与能源部资助的可再生能源发电联合研究项目“联合制蒸汽发电厂”
备注	这项措施仅适用于新建发电厂。

### 锅炉 – 厚壁组件的外部加热

灵活性影响	启动优化
限制因素	热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>在启动过程中，厚壁组件（如汽包、启动器、集箱）是提高点火速率的限制因素</li> <li>利用外部加热可以减少热应力，从而缩短启动时间</li> </ul>
投资	不适用
时间	不适用
最佳实践或参考资料	Hentschel, J.; Zindler, H.; Prabucki, M.-H.; Spliethoff, H.和 Amm, D.: 《通过加热厚壁组件优化常规发电厂的启动过程》(Optimierung eines konventionellen Kraftwerksanfahrprozesses durch Beheizung dickwandiger Bauteile). Kraftwerkstechnik 2014, 弗莱堡, Saxonia, 2014



备注	这项措施在灵活性方面可能具有较小至中等改进潜力。
<b>锅炉 – 循环泵</b>	
灵活性影响	最小稳定出力降低、启动优化
限制因素	能源浪费 – 低效运行
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 不适合汽包锅炉</li> <li>▪ 直流锅炉的最小流量约为标称流量的 40%。为避免通过蒸汽向大气中不必要的能量和软化水损失，必须提供足够的启动和低负荷装置，例如从启动器到省煤器或蒸发器的循环泵。如果设想在湿态下连续驱动机组的最小出力，则这项措施不可避免</li> <li>▪ 应避免在低负荷下转换为循环模式而造成省煤器内不允许的汽化（水再循环导致省煤器入口水温升高）</li> <li>▪ 从直流运行切换到循环运行导致温度变化，从而增加厚壁组件的热应力</li> <li>▪ 另一种启动和低负荷装置是启动闪蒸器，该装置将蒸汽侧连接至低温再热入口，并将水连接至给水箱。这项措施效率较低，但投资成本大幅减少</li> </ul>
投资	D
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	大多数德国发电厂的标准设计
备注	这项措施不适用于配备汽包锅炉的发电厂。这项措施能够在减少最小负荷的条件下维持经济运行，可能具有中等至显著改进潜力。

<b>蒸汽 – 高压旁路</b>	
灵活性影响	启动优化
限制因素	热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 如果未安装高压旁路，使用现有排水管和通风口启动。高压旁路的益处是只要汽轮机未运行，就能保证再热器充分冷却</li> <li>▪ 为避免不必要的蒸汽损失，需要正确控制高压旁路（参见仪表与控制系统章节）</li> </ul>
投资	现有发电厂通常需要进行全方位改造。因此，仅应主要考虑新建发电厂
时间	不适用
最佳实践或参考资料	大多数德国发电厂的标准设计

备注	这项措施非常适用于新建发电厂。
<b>省煤器旁路</b>	
灵活性影响	最小稳定出力降低
限制因素	烟气温度
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 为了维持所需的烟气温度，可使用省煤器旁路将给水输送至蒸发器，从而提高省煤器出口处的烟气温度。因此，可以避免烟气清洁设备受到不利影响，并避免烟气温度下降到三氧化硫的露点温度以下，特别是在空气预热器的冷端</li> <li>▪ 需要避免省煤器内发生汽化</li> <li>▪ 仅适用于采用除氮氧化物技术的发电厂</li> </ul>
投资	C – D
时间	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Michels, B.和 Kotzan, H.:《通过改造省煤器旁路降低 750 兆瓦硬煤电厂的最小负荷》(Retrofit of an ECO bypass to reduce minimum load of a 750 MW hard coal-fired power plant), VGB PowerTech (2015)</li> <li>▪ 德国发电厂 Mehrum 3 号机组</li> </ul>
备注	这项措施对采用除氮氧化物技术的发电厂尤其具有吸引力。

### 3.3 汽轮机

<b>低压汽轮机叶片更换</b>	
灵活性影响	提高低负荷运行条件下对通风和水滴侵蚀的抵抗力
限制因素	最低蒸汽流量
说明	更换最后一个低压段的叶片以及安装护罩元件
投资	C-D
时间轴	6 个月
最佳实践或参考资料	Heddoun, H.; Richard, J.-M., VGB PowerTech Journal, 3/2017
备注	这项措施在灵活性方面可能具有小至中等改进潜力

## 转子的材料替换和设计改造

灵活性影响	改进汽轮机的动态行为，缩短启动时间
限制因素	电厂效能和设计标准
说明	用由两个较小转子锻件（含有一个模腔）组成的焊接转子替换单体 考虑到应采用符合锅炉规范/标准或获得锅炉规范/标准认可的材料，应使用 10% 铬钢
投资	D
时间轴	至少 6 个月
最佳实践或参考资料	Rediess, M. et.al, VGB PowerTech Journal, 3/2017
备注	这项措施在灵活性方面可能具有中等改进潜力

## 替代厚壁组件

灵活性影响	改进汽轮机的动态行为，缩短启动时间
限制因素	电厂效能和设计标准
说明	考虑到应采用符合锅炉规范/标准或获得锅炉规范/标准认可的材料，使用收缩环或环形壳体法兰，用螺栓固定高压内壁，以替代厚壁组件
投资	C – D
时间轴	至少 6 个月
最佳实践或参考资料	Rediess, M. et.al, VGB PowerTech Journal, 3/2017
备注	这项措施非常适合新建的发电厂。

## 高压段旁路

灵活性影响	改进动态行为和提供频率保持的能力
限制因素	设计和性能
说明	旁路阀门打开时，在第一排叶片之后的一些阶段，额外的高压蒸汽可以进入高压汽轮机，并可在此阶段实现全周进汽。该系统的设计通常是为在短期内提升 5% 的功率。不过，如果需要，可通过设计使此类系统额外提升 10% 甚至 15% 的功率。
投资	D
时间轴	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	Colin Henderson: 《提高燃煤电厂的灵活性》(Increasing the flexibility of

	coal fired power plants), 国际能源署清洁煤炭中心 242 (2014), ISBN 978-92-9029-564-8
备注	提供频率控制保持的措施
<b>加热毯</b>	
灵活性影响	启动优化
限制因素	停机后造成热损失
说明	平衡上下机壳, 避免壳体弯曲, 从而使在静止期间保持汽轮机温度
投资	B
时间轴	1 个月
最佳实践或参考资料	Biesinger, F. et.al, VGB PowerTech Journal, 11/2016
备注	在灵活性方面可能具有较小改进潜力。

### 3.4 仪表与控制系统

<b>可靠的温度测量</b>	
灵活性影响	启动优化、爬坡速率
限制因素	热应力
说明	为评估发电厂启动和停机过程中的热应力（温差）以及相应的寿命消耗，必须精确测量厚壁组件（内壁和中壁）的温度 测得的温度直接影响点火速率
投资	取决于发电厂情况
时间轴	取决于发电厂情况
最佳实践或参考资料	Lens, H.: 《硬煤电厂启动过程优化》(Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks), 摘自 Kraftwerkstechnik, 弗莱堡, Saxonia, 2014, 第 231 页-241 页 Lens, H.: 《大型燃煤电厂中负荷运行》(Mid-Load Operation of Large Coal-Fired Power Plants), PowerGen Europe, 2014 德国莱茵 TÜV 集团和运营商莱茵西伐利亚电力公司 (RWE Power) 推出用于发电厂高负荷厚壁组件永久监测的新型传感器系统
备注	这项措施应作为其他措施的前提条件。

## 对启动燃料的精确可靠控制

灵活性影响	启动优化
限制因素	厚壁组件的热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>需要精确控制启动燃料的质量流量，以实现温和、重复启动</li> <li>需要正确的驱动（流量控制阀）和测量（流量测量）</li> </ul>
投资	取决于硬件安装情况
时间轴	取决于硬件安装情况
最佳实践或参考资料	德国发电厂的标准设计
备注	这项措施应作为其他措施的前提条件。

## 基于模型的热应力计算器

灵活性影响	启动优化、爬坡速率
限制因素	热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用具有物理参数的动态壁面模型（例如用于热传递和热分布），可以计算与蒸汽温度的温差，通常都会测量蒸汽温度</li> <li>热应力相关的可用余量可用作启动控制器的反馈信号，以将温差保持在其可接受范围内</li> <li>不如传统测量方法测量温差保守</li> </ul>
投资	B
时间轴	12 个月，取决于可用的启动数量
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lens, H.: 《硬煤电厂启动过程优化》（Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks）. 摘自 Kraftwerkstechnik, 德国弗莱堡, 2014, 第 231 页-241 页.</li> <li>Lens, H.: 《大型燃煤电厂中负荷运行》（Mid-Load Operation of Large Coal-Fired Power Plants）, PowerGen Europe, 2014</li> <li>Wagner, J. 和 Deeskow, P.: 《用于灵活运行模式的厚壁锅炉组件的趋势预测和在线诊断》（Trend prognosis and online diagnostics of thick walled boiler components for a flexible mode of operation）. 收录于美国机械工程师协会 2014 年压力容器与管道会议（2014 Pressure Vessels &amp; Piping Conference）的会议记录, 美国加利福尼亚州阿纳海姆, 2014 年 7 月 20 日-24 日.</li> </ul>

	<p>Kallina, G.: 《用于实现蒸汽发生器最佳启动的预测性空载计算器》（Vorausschauender Freilastrechner für das optimale Anfahren von Dampferzeugern）.摘自 VGB Kraftwerkstechnik 75 (1995).</p> <p>《VDE 中的能源技术公司（ETG）：可再生能源需要灵活发电厂——到 2020 年的情景》（Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG): Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien bis 2020），全文.VDE (2012)</p> <p>DIN EN 12952-3:《水管锅炉和辅助装置 – 第 3 部分：锅炉压力部件的设计和计算》（Water-tube boilers and auxiliary installations – Part 3: Design and calculation for pressure parts of the boiler）（2012）</p> <p>德国若干发电厂，如 Voerde A/B、West 1/2、GKM 9 号机组</p>
备注	这项措施在灵活性方面可能具有中等改进潜力。

### 量程调整

灵活性影响	最小负荷降低
限制因素	量程
说明	<p>量程可能无法满足降低最小负荷的需求，特别是在压力、温度和流量方面</p> <p>在达到量程下限时，流量测量的质量通常会变差，可能会对相应的控制产生不利影响</p>
投资	取决于硬件的安装情况
时间轴	取决于硬件的安装情况
最佳实践或参考资料	无
备注	这项措施应作为其他措施的前提条件。

### 自动启动程序（一键启动）

灵活性影响	启动优化
限制因素	无
说明	<p>自动启动程序自动熄灭燃烧器，在达到必要条件时立即转动汽轮机，并在特定启动阶段之间实现平稳过渡，以避免不必要的等待时间</p> <p>只有当所有相关排水管和通风口都实现自动化后才可能自动启动</p>
投资	A – C，取决于当前控制实施情况

时间轴	3 – 6 个月
最佳实践或参考资料	德国若干发电厂，如 Voerde 发电厂 A/B 机组、Herne 发电厂 4 号机组
备注	考虑到措施可复制性，这项措施在灵活性方面可能具有中等至较高改进潜力。

### 启动优化（点火速率、高压旁路）

灵活性影响	启动优化
限制因素	厚壁组件的热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>需要精确控制启动燃料的质量流量，以实现温和、可复制启动</li> <li>需要适当驱动（流量控制阀）和测量（流量测量）</li> <li>需要适当程度的自动化（顺序控制）</li> </ul>
投资	取决于自动化程度和硬件的安装情况
时间轴	取决于自动化程度和硬件的安装情况
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lens, H.: 《硬煤电厂启动过程优化》（Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks）.摘自 Kraftwerkstechnik, 弗莱堡, Saxonia, 2014, 第 231 页-241 页.</li> <li>Kallina, G.: 《用于实现蒸汽发生器最佳启动的预测性空载计算器》（Vorausschauender Freilastrechner für das optimale Anfahren von Dampferzeugern）.摘自 Kraftwerkstechnik 75 (1995).</li> <li>德国发电厂 West 1/2、GKM 9 号机组</li> </ul>
备注	这项措施在降低启动成本方面可能具有中等至较高改进潜力，特别是通过大幅降低启动过程中高压旁路的位置。因此，这项措施主要适用于配备高压旁路的发电厂。

### 优化基础控制回路

灵活性影响	启动优化、最小稳定出力降低、爬坡速率
限制因素	平稳的过程行为、热应力
说明	为了利用先进的过程控制解决方案实现电厂灵活性，必须正确设置基础控制回路。一般来说，这些控制回路仅在额定负荷下密集地调试，因此这些控制回路在新工作条件（例如降低的最小稳定出力）上的性能有所降低。

	<p>此外，灵活的电厂运行应注重过程的动态行为，而非静态行为，这对现有控制回路提出了新要求。需要考虑的控制回路有：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 喷水控制</li> <li>▪ 给水控制</li> <li>▪ 焓控制</li> <li>▪ 汽包水位控制</li> <li>▪ 氧气/空气控制</li> <li>▪ 循环控制</li> </ul>
投资	C
时间轴	6 – 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurth, M.; Greiner F.: 《对过程工程动态需求的不断增加导致电厂控制技术面临的挑战》(Herausforderungen an die Kraftwerksleittechnik durch steigende dynamische Anforderungen an die Verfahrenstechnik), VGB PowerTech Journal 8/2008</li> <li>▪ Lens, H.: 《硬煤电厂启动过程优化》(Optimierung des Anfahrvorgangs eines Steinkohlekraftwerks). 摘自 Kraftwerkstechnik, 弗莱堡, Saxonia, 2014, 第 231 页-241 页</li> <li>▪ 德国若干发电厂: Herne 4 号机组、Walsum 9 号 / 10 号机组、GKM</li> </ul>
备注	<p>这项措施应纳入考虑，是所有三项灵活性改进的基本前提，特别是对于启动优化和先进机组控制而言。这项措施本身可能具有较小至中等改进潜力。</p>

先进机组控制	
灵活性影响	最小稳定出力降低、爬坡速率
限制因素	平稳的过程行为
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 先进机组控制特别包括基于前馈模型的方法，这些方法是改进发电厂动态行为的适当措施</li> <li>▪ 仿真环境可用于通过减少在线优化相关参数所需的时间来支持调试</li> </ul>
投资	B – C
时间	6 – 12 个月



## 最佳实践或参考资料

- W. Zehner, W.和 Schöner, P.: 《通过过程仿真提高现代燃煤电厂的灵活性》(Erhöhung der Flexibilität von modernen Kohlekraftwerken durch Prozesssimulation) .VGB-发电厂灵活性研讨会(2014)
- Meinke S.: 《在风能和光伏馈电增加导致动态需求不断增加的背景下对火力发电厂进行建模》(Modellierung thermischer Kraftwerke vor dem Hintergrund steigender Dynamikanforderungen aufgrund der zunehmenden Windenergie- und Photovoltaikeinspeisung) .罗斯托克大学论文, 2012
- Richter, M.; Möllenbruck, F.; Obermüller, F.; Knaut, A.; Weiser, F.; Lens, H.和 Lehmann, D.: 《蒸汽发电厂作为可再生能源系统合作伙伴的灵活性》(Flexibilization of steam power plants as partners for renewable energy systems) .第 19 届电力系计算会议 (2016)
- 德国若干发电厂

## 抽汽的间接和直接节流 – 先进频率控制

## 灵活性影响

爬坡速率 (及辅助服务)

## 限制因素

负荷输出的阶跃响应

## 说明

- 为了获得更快的负荷变化, 可对抽汽实施间接和直接节流:
- 冷凝液节流 (间接)
- 通往低压预热器和给水箱的抽汽节流 (直接)
- 通往高压预热器的抽汽节流 (直接)
- 对所产生的固有储存容量进行的协调可用于先进频率控制。

## 投资

C

## 时间

6 – 12 个月

## 最佳实践或参考资料

- Kurth, M.; Greiner F.: 《对过程工程动态需求的不断增加导致电厂控制技术面临的挑战》(Herausforderungen an die Kraftwerksleittechnik durch steigende dynamische Anforderungen an die Verfahrenstechnik) ,VGB PowerTech Journal 8/2008
- Kallina, G.; Kochenburger, A.; Lausterer, G.: 《通过分层储存使用对电厂进行经济的电网频率支持升级》(Wirtschaftliche Ertüchtigung von Kraftwerken zur Netzfrequenzstützung durch gestufte

	Speichernutzung) .VGB Kraftwerkstechnik 2/2000 <ul style="list-style-type: none"> <li>德国专利 DE 10 2005 034 847, Prinz, S.和 Schreiber, W.:《快关式旋转控制翻板的安装》(Einbau einer schnell schließenden Drehregelklappe)</li> <li>用于德国若干发电厂提供频率控制</li> </ul>
备注	这项措施在提高爬坡速率方面有中等至显著改进潜力，并可通过替换涡轮阀门的节流以进行频率控制来提高发电厂效率。

### 一般 - 状态监测系统

灵活性影响	一般
限制因素	设备故障
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>状态监测系统应监测高负荷锅炉和管道组件，防止蠕变和疲劳</li> <li>系统应监测温差和压力，并在负荷变化过程中超过允许限值时发出信号。如果监测系统具有预判能力以计算不同的启动和关闭情景对疲劳损耗的影响，则将更有利</li> </ul>
投资	B - C
时间	3 - 4 个月
最佳实践或参考资料	德国许多发电厂使用先进的状态监测系统
备注	这项措施在灵活性方面可能具有较小至中等改进潜力。这项措施的目的是降低长期运维成本。

### 有限元法分析：

灵活性影响	启动优化
限制因素	热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>通过有限元法分析和适当评估，可以扩大可接受的温差范围，从而进一步挖掘加快启动过程的潜力（例如 Ansys Workbench 17.0）</li> <li>执行有限元法计算需要以下工厂数据： <ul style="list-style-type: none"> <li>互连件的尺寸/几何形状</li> <li>材料数据</li> <li>工况（压力和温度）</li> </ul> </li> <li>用于计算的模型瞬态定义（例如 7 K/min、14 K/min 和 55 K/min）</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>传热系数定义（通常为 1,000 和 3,000 W/(m<sup>2</sup>K)，作为 DIN EN 规范中的模型值）</li> </ul>
投资	A
时间	1 – 3 个月
最佳实践或参考资料	无
备注	这项措施在启动方面可能具有中等改进潜力。

### 3.5 辅助设备

更换执行器和风机	
灵活性影响	启动优化、爬坡速率、最小稳定出力
限制因素	设备故障
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>可靠的执行器（风机、泵、阀门）是优化启动的基本要求</li> <li>可以避免不必要的跳闸和等待时间</li> <li>执行器如无法快速响应，则无法满足灵活运行的更多要求</li> <li>使用变流器驱动的风机和执行器能够实现速度控制，从而在宽泛的作业范围内实现快速反应时间和增强动态</li> </ul>
投资	C – D；取决于要更换的硬件
时间	取决于要更换的硬件
最佳实践或参考资料	由许多制造商提供，标准技术
备注	这项措施应作为其他灵活性措施的前提条件。

在风道和烟气道中安装阻尼器	
灵活性影响	启动优化
限制因素	停机后热损失
说明	<p>通过在以下组件中安装阻尼器使锅炉保暖：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>一次风道和二次风道</li> <li>烟气道</li> <li>一次风冷却器（PAC）</li> <li>将热启动能力期限延长至约 60 小时</li> </ul>
投资	D
时间	3 至 6 个月

最佳实践或参考资料	Boewe, J.和 Gade, U.:《发电厂 Moorburg》(Power Plant Moorburg), VGB 2016 年大会专题报告
备注	这项措施在灵活性方面可能具有较小至中等改进潜力。

发电机冷却技术	
灵活性影响	启动优化、爬坡速率
限制因素	发电机绕组的热应力
说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 冷却技术的调整</li> <li>▪ 水冷定子绕组对热应力的抵抗力更强</li> </ul>
投资	不适用
时间轴	不适用
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Weidner, J. R., VGB PowerTech Journal, 12/2016</li> <li>▪ Baca, M., Joswig, A., VGB PowerTech Journal, 6/2016</li> <li>▪ Wittner, S. et al., VGB PowerTech Journal, 8/2015</li> </ul>
备注	这项措施旨在减小发电厂循环运行的影响。

### 3.6 储能技术

使用储能技术为提高发电厂灵活性提供了更多机会。下图显示如今业界应用的不同储能储存方案。储能方案根据储能的规模和持续时间进行如下划分区分：

图 5 储能技术概览



资料来源：VGB，基于亚琛工业大学 Sauer 教授的研究成果

热量及固定蓄电池储能（上图中圈出的部分）是可直接应用于热电厂的储能技术。

### 固定电化学储能

固定电化学储能的主要技术是基于电化学充电/放电反应的锂离子 (Li-Ion) 电池系统，电化学充电/放电反应发生在含有锂化金属氧化物的正极（阴极）与由碳材料或插层化合物制成的负极（阳极）之间。电极由多孔聚合物材料隔开，该材料允许电子和离子在彼此之间流动；电极将浸入由溶解在有机液体中的锂组成的电解质中。

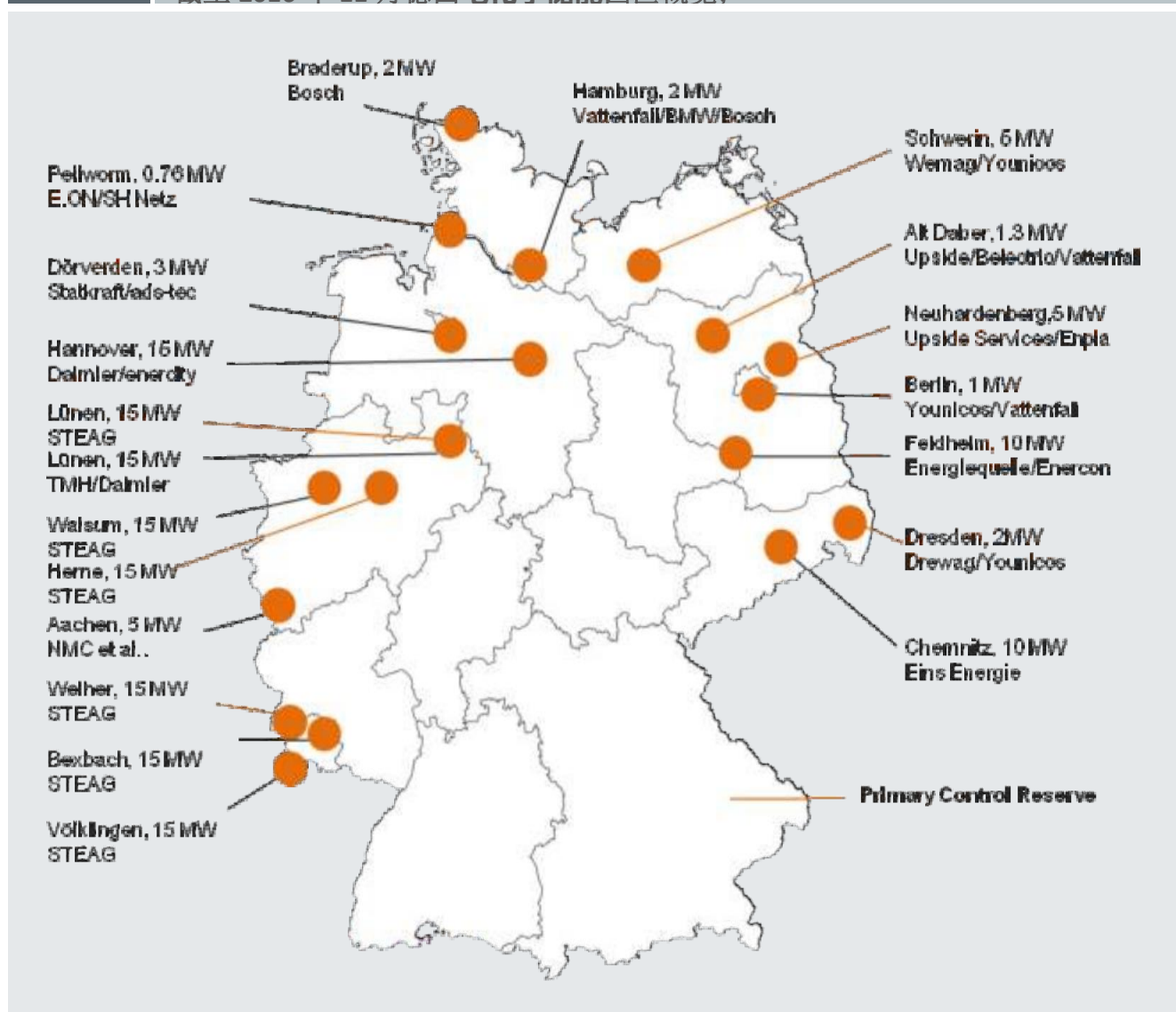
当蓄电池充电时，阴极中的锂原子变成离子并通过电解液迁移到碳阳极，并与外部电子结合，以锂原子的形式沉积在碳层之间。放电期间反之。

2015 年，全球有超过 500 兆瓦的固定型锂离子电池并网运行。现已设计并成功测试了与几千瓦到几兆瓦不等的分布式可再生能源发电机相关的系统，以及最高电压 1 千伏的电网支持系统。早期系统是作为示范项目而实施的，现在这方面的应用正在世界不同地区进行商业开发。

图 9 是德国安装的所有固定型电化学储能系统。

图 6

截至 2016 年 11 月德国电化储能园区概览；



资料来源：Büro F

## 固定型锂电池

灵活性影响

增强动态行为

限制因素

主控及其他辅助服务的市场选择

说明

蓄电池系统能够在几秒钟至至少 30 分钟时间内吸收来自电网的能量，或将能量馈送到电网。因此，该系统特别适合提供主控电源。此外，该系统还能够：

- 提供备用电源

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 削峰填谷</li> <li>▪ 发电厂黑启动</li> <li>▪ 使波动发电过程趋于平稳</li> <li>▪ 控制电网电压</li> <li>▪ 蓄电池系统可直接集成至发电厂过程中，以提供主控和辅控能量。</li> </ul>
投资	最高 1,500 欧元/千瓦
时间	取决于尺寸 – 6 至 12 个月
最佳实践（大型）	<p>集成（至发电厂）式蓄电池储存系统：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heilbronn 发电厂蓄电池 – 博世与 EnBW 的合资公司；燃用硬煤的 7 号机组的储能装置包括 2 个 2.8 兆瓦时锂离子电池容器、6 个 900 千瓦逆变器、6 个 1000 千伏安变压器及辅助系统；2017 年 11 月开始安装，计划于 2018 年春季试车</li> <li>▪ 独立蓄电池储存系统：</li> <li>▪ STEAG Large Scale Battery System（互联网），PowerTech Journal 1,2/2017 和 PowerTech Journal 4/2017 德国 6 个地点，总计 90 兆瓦（6 x 15 兆瓦），2016 年 12 月投入运行 – 投资 1 亿欧元</li> <li>▪ Enercon; Feldheim（10 兆瓦）</li> <li>▪ 3,360 个锂离子储存模块，安装在 17 x 30 米储存建筑内，2015 年 9 月投入运行 – 投资 1,280 万欧元</li> </ul>

## 储热

最常见的储热系统是基于水的显热的水箱。加热装置在保温水箱外部或内部产生热水，热水在水箱中储存一段较短时间（最多几天）。储存的能量取决于热水温度和水箱容积。水箱的保温性能决定热损失并限制储存期。

在发电厂应用中，在低需求情况下将储存多余热量。多余热量使热能与电力生产脱钩，从而提高发电厂灵活性。提高产热能力，减少强制电力生产。

此外，储热系统有助履行供热义务。因此，该技术特别适合“热电联产（CHP）”工厂。应用领域和最佳案例如下：

### 蒸汽 – 储热

灵活性影响	最小稳定出力降低、动态行为
限制因素	低需求 / 供热义务

说明	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 安装外部储热箱 – 主要是热水箱</li> <li>▪ 适用的各种储存技术（加压和非加压）</li> <li>▪ 适用的各种操作概念（削峰填谷、提供抽汽）</li> </ul>
投资	<p>300 – 500 欧元/立方米（非加压储存）</p> <p>800 – 1,200 欧元/立方米（加压储存）</p>
时间	取决于尺寸 – 6 至 12 个月
最佳实践或参考资料	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ FLEXI-TES 联合研究项目，2017 – 2020</li> <li>▪ I-TESS 研究，Solar Institut Jülich</li> <li>▪ 曼海姆 GKM 项目</li> </ul>

曼海姆 GKM 项目采用非加压平底箱设计，特点如下：

- 简约设计
- 箱体直径：                  40 米
- 圆柱箱体高度：              36 米
- 介质：                      水 / 蒸汽
- 最高温度：                  98°C
- 容积：                      43,000 立方米
- 储热容量：                  1,500 兆瓦时
- 进/出箱最大流量：          6,200 吨/小时



GKM 示例如下图所示。

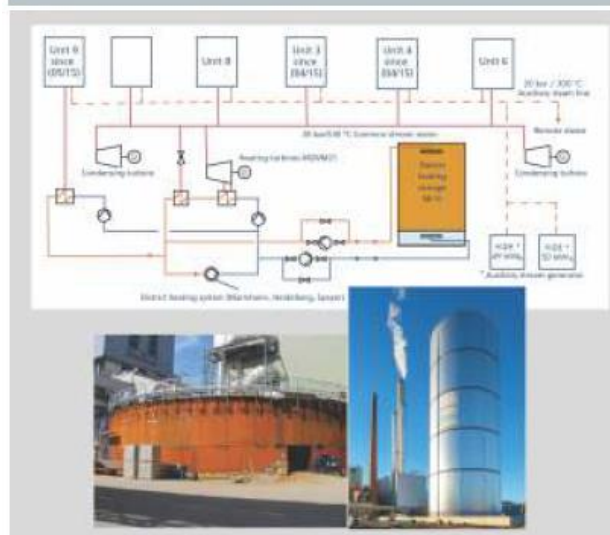
### 电锅炉

另一种使热能与电力生产脱钩并提高运行灵活性的技术解决方案是在工厂内安装电锅炉。此应用专用于热电联产工厂。该解决方案的投资成本在 60 至 80 美元/千瓦之间。

资料来源：中国电力规划设计总院（EPPEI）

图 7

德国曼海姆 GKM 发电厂的储热系统



资料来源：GKM

# 4. 运维的灵活性

灵活运行会影响工厂的运维。为应对灵活运行，密切监控重要组件和设备的运行数据非常重要，这对于妥善处理灵活和循环运行至关重要。在此背景下，仪表与控制系统起着至关重要的作用，本章将对此进行讨论。

此外，本章的内容还包括工厂运行的实用技巧（覆盖工厂的不同区域），以及灵活运行对寿命、效率和成本影响的相关参考资料。

## 4.1 仪表与控制的作用

仪表与控制系统仪表与控制系统是灵活运行的关键赋能器。现有发电厂存在不同级别的自动化（另见图 11）。

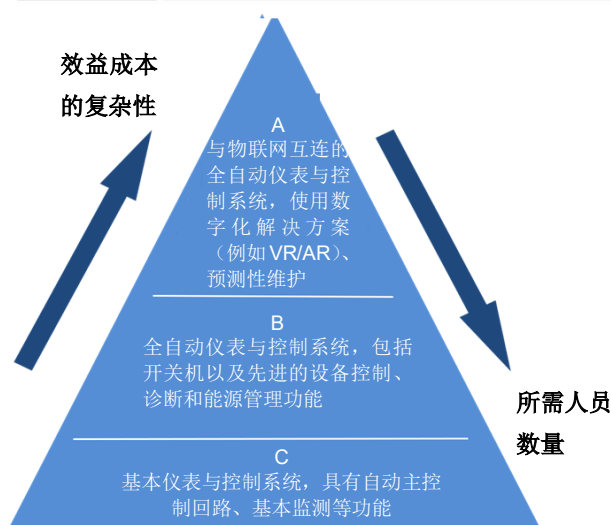
- **(C) 基本仪表与控制系统：**这是工厂运行所需的基本级别。它包括所有测量和保护功能，以及对所有过程的基本检测和控制。
- **(B) 全自动控制仪表与控制：**这包括自动开关机以及先进的机组控制概念以及诊断和能源管理功能。它包括状态监测系统和寿命消耗监测系统。
- **(A) 与物联网（IoT）互连的全自动化仪表与控制：**发电厂（包括所有过程和程序）均集成在数字化环境中。这意味着要通过虚拟现实（用于计划停机、虚拟电厂行为）或增强现实（用于支持维护工作）以及大数据解决方案等创新技术，来进一步挖掘预测性维护的潜力。此外，工厂应与全公司的网络相连。

**(B)** 级和 **(A)** 级最有利于灵活运行。除自动化运行外，它们还提供了评估工厂状态的必要工具，来评估工厂的状态。

### 仪表与控制优化能够以最低成本提高发电厂的灵活性

在考虑采取任何提高灵活性的优化措施之前，所有现有的控制回路必须稳定运行。下一步应确定可优化的地方，并实施相应的解决方案。仪表与控制系统的优化能够以最低成本来提高发电厂的灵活性。相关措施请参见第 3.4 章。

图 8 仪表与控制系统的不同级别



## 4.2 关键组件

对于以基本负荷为主要运行模式的燃煤电厂而言，采用循环运行会对工厂设备造成不利影响。受影响设备的预期寿命会在减少，并且工厂计划外不可用的情况也会增加（另见附件A）。

循环运行带来的主要问题包括：与压力和温度有关的组件应力（累积蠕变-疲劳损伤）、使用率较高导致的磨损以及使用和腐蚀率较高（由工厂化学变化和冷凝增加而造成水分过多导致）。

下表列出了受循环运行影响最大的典型工厂设备。

表 4 关键组件清单

影响最大的工厂设备	主要损坏机理
锅炉水冷壁	疲劳腐蚀、氧气和化学沉积引起的腐蚀（取决于水质）。
锅炉过热器	启动过程中蒸汽流量低引起的高温差和热点、长期的过热故障
锅炉回热器	启动过程中蒸汽流量低引起的高温差和热点、长期的过热故障、管道脱落损坏中压汽轮机
锅炉省煤器	启动过程中的温度瞬变
锅炉集箱	由于温度范围和速率、管道到集箱之间的温差引起的疲劳；异种金属焊缝、集箱和阀门开裂
汽包壁	汽包壁处的热机械应力
低压汽轮机	叶片冲蚀
汽轮机壳和转子间隙	温度不均匀导致转子弯曲并失去所需间隙，还可能引起转子摩擦，从而导致汽封损坏
给水加热器	启动过程中爬坡速率高；不适用于快速热变化
空气加热器	低负载和启动时冷端篮腐蚀，酸和水结露点 在 SCR 安装时，冷端需要搪瓷护膜，以避免硫酸铵腐蚀
燃料系统/粉碎机	煤流量从降低到达到最小这段时间，低煤流量导致铁磨损率增加，因此磨煤机从运行后的均匀负荷开始循环
发电机	发电机组件（特别是绕组和绝缘）的热机械应力
水化学/水处理	循环导致冷凝液供应和氧气控制的需求达到峰值

这些组件需要仔细监控和频繁检查。强烈推荐 VGB 标准 S-506-R-00；2012-03.EN 《蒸汽锅炉工厂组件、压力容器安装和高压给水和蒸汽管道状态监测和检验》等行业指南。

下表概述了关于状况监测的现行法规和 VGB 标准。

表 5 状况监测的现行法规和 VGB 标准

	管道	集箱/汽包壁	注塑冷却器
计算/设计	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R109</li> <li>▪ VGB-R507 第 4.3.2 节, 参考: 压力容器及管道安装专业技术协会准则“电力管道设计”和德国工程师协会手册《能源技术》</li> <li>▪ VGB-R501 (锅炉内部)</li> <li>▪ VGB-R503</li> <li>▪ VGB-R510</li> <li>▪ EN 13480-3</li> <li>▪ TRD 系列 300*、508*</li> <li>▪ AD 2000 系列 B/S</li> <li>▪ AD 2000 系列 HP 100R(替换 TRR 100)</li> <li>▪ (TRR 100*)</li> <li>▪ 有限元法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R109</li> <li>▪ VGB-R501</li> <li>▪ EN 12952-3</li> <li>▪ EN13445-3 (A1 项目 19)</li> <li>▪ TRD 系列 300*、508*</li> <li>▪ AD 2000 系列 B/S</li> <li>▪ 有限元法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R109</li> <li>▪ VGB-R501</li> <li>▪ VGB-R540</li> <li>▪ EN 13480-3</li> <li>▪ EN 13445-3</li> <li>▪ TRD 系列 300*、508*</li> <li>▪ AD 2000 系列 B/S</li> <li>▪ 有限元法</li> </ul>
扩展检测	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R508</li> <li>▪ VGB-R510</li> <li>▪ EN 13480-5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R501</li> <li>▪ DIN EN 13445-5</li> <li>▪ DIN EN 12952-6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R540</li> <li>▪ DIN EN 12952-6</li> </ul>
诊断测试	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VGB-R509 (定期检查)与 VGB-R510 配合使用</li> <li>▪ VGB-TW507</li> <li>▪ (微结构评级图)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TRD 系列 500*</li> <li>▪ VGB-R509 (定期检查)与 VGB-R510 配合使用</li> <li>▪ VGB-TW507</li> <li>▪ (微结构评级图)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TRD 系列 500*</li> <li>▪ VGB-R540 与 VGB-R509 结合使用</li> <li>▪ VGB-TW507</li> <li>▪ (微结构评级图)</li> </ul>
诊断寿命计算	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TRD 508* /EN 12952-4</li> <li>▪ TRD 系列 300*/EN 12952-3</li> <li>▪ 制造带诊断系统的力/位移传感器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TRD 508* / EN 12952-4</li> <li>▪ TRD 系列 300*/EN 12952-3</li> <li>▪ DIN EN 13445-3 A1</li> <li>▪ (附录 M)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TRD 508* /EN 12952-4</li> <li>▪ TRD 系列 300*</li> <li>▪ EN 12952-3</li> <li>▪ 有限元法</li> </ul>

- 有限元法
- 有限元法

\* ) 法规将不再更新

### 4.3 实用提示

下表列出灵活工厂运行的最佳实践和建议。它涉及不同的厂区，并解决循环运行模式中的重要问题。

厂区	问题/特别重点	缓解措施
<b>燃烧</b>		
磨煤机	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 确保充分点火和分别燃烧的最低数量的磨煤机/燃烧器/燃烧器级别。</li> <li>▪ 最小煤流量</li> <li>▪ 配风控制</li> <li>▪ 惯性和平滑切换</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 根据部分负荷运行的经验优化燃烧控制；特别关注反应时间和磨煤机切换；注：在较低负荷下运行的磨煤机数量较多，而在较高负荷下运行的磨煤机燃烧稳定性更高，数量较少。</li> <li>▪ 优化研磨：更好地利用燃料，以改善燃烧过程，前提是使用洗煤，这些煤不含石头、岩石及其他硬质杂质。</li> <li>▪ 第一台磨煤机投入运行的控制标准应为各个磨煤机(分级机)内部的温度。该温度应高于 70°C，以防止磨煤机内出现水露点，从而避免湿煤粉造成磨煤机内部腐蚀和堵塞</li> </ul>

厂区	问题/特别重点	缓解措施
燃烧器	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 火焰稳定性（火焰脉动和熄灭）</li> <li>▪ 配风</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 可靠的火焰检测</li> <li>▪ 提高空燃比</li> <li>▪ 增加混合气和涡流</li> <li>▪ 确保煤粉均匀分配给燃烧器</li> <li>▪ 减少冷却空气流量</li> <li>▪ 提高了空气调节风门的定位精度</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>为将所需的蒸汽温度保持在低负荷，请使用较高的燃烧器级别，以便将热量从蒸发器传递到过热器/再热器部分。</li> </ul>
锅炉总成		<ul style="list-style-type: none"> <li>确保妥善清除</li> </ul>

### 水-蒸汽循环

水化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>在所有负荷条件下保持适当的水和蒸汽质量，以避免腐蚀</li> <li>循环导致对冷凝液供应和氧气控制的需求达到峰值</li> </ul>	<p>严格遵守经过验证的质量标准，例如 VGB-S-010-T-00；2011-12.EN“发电厂/工业工厂的给水、锅炉水和蒸汽质量”-见附件 B</p>
蒸发器	<ul style="list-style-type: none"> <li>和材料应力的差异</li> <li>避免过热</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>确保足够的水/蒸汽流量</li> <li>优化操作规程或方法，以将爬坡速率降低到所需或必要的最小值</li> <li>检查最小给水流量下的设计缓冲，特别是直流锅炉中的设计缓冲</li> <li>使用循环模式</li> <li>监测条件</li> </ul>

厂区	问题/特别重点	缓解措施
过热器	<ul style="list-style-type: none"> <li>壁温和材料应力的差异</li> <li>长寿命蒸汽排放时的温度差距</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>确保充足的蒸汽流量</li> <li>监测条件</li> </ul>
汽包壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>最低级别</li> <li>壁温和材料应力的差异</li> <li>启动过程中的惯性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遵循允许的温差范围</li> </ul>
直流电路	<ul style="list-style-type: none"> <li>切换点-从直流到循环模式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>优化直通与循环运行之间的模式转换程序</li> </ul>
给水泵	<ul style="list-style-type: none"> <li>最小流量控制</li> <li>切换（如果有多个泵）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>优化部分负荷运行机制</li> </ul>

汽轮机		
概况	<ul style="list-style-type: none"> <li>引入加热毯</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>直立时保持汽轮机温暖</li> </ul>
高压和低压汽轮机	<ul style="list-style-type: none"> <li>通风（排气区内反向蒸汽流）</li> <li>末级叶片的振动激励</li> <li>水滴侵蚀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在高压和低压汽轮机中实现保护功能</li> <li>扩展振动监测</li> <li>冷却叶片和壳体（低压、控制流量并通过直接连接冷凝器快速排空）</li> <li>提高冷凝器真空度</li> <li>优化排水</li> </ul>
机壳、轴承和轴	<ul style="list-style-type: none"> <li>热应力引起的振动和膨胀</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>优化启动程序</li> <li>EOH（等效运行小时）计数器，用于量化热应力导致的寿命消耗</li> <li>改进状态和温度监测</li> </ul>

**表 6** 实用运维技巧

厂区	问题/关注重点	缓解措施
<b>其他</b>		
发电机	发电机组件（特别是定子绕组）的热机械应力	集成在线监测和诊断：控制冷却温度、局部流量测定和定子端绕组振动测量
除氮氧化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>氨泄漏</li> <li>结垢和腐蚀</li> <li>形成硫酸铵</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>确保在所有负荷条件下的最低烟气温度（使用更高的燃烧器级别和更高的空气比）</li> <li>改进给药控制</li> <li>冷端需要搪瓷护膜</li> </ul>
烟气脱硫	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低效率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>确保适当的质质量传递—适当的吸附剂流量（增加液气比）</li> <li>改进后的泵运行方案</li> </ul>

### 保全或铺设程序的必要性

另一个重要方面是实施保全或铺设程序。可以通过制定铺设程序来减少锅炉管的故障及其他腐蚀疲劳的影响，具体取决于工厂的投产时间长短。为实施适当的保全程序来保护设备，



可以将 VGB 标准“发电厂的保全”和“蒸汽涡轮发电机组的保全”作为准则（参见附件 C 和 D）。

#### 4.4 对供电热耗率、寿命消耗和成本的影响

##### 供电热耗率

原则上，在分析循环运行对发电厂热耗率的影响时，必须考虑两个方面。一方面，循环运行可能会加速设备老化，从而使热耗率永久性增加，可通过适当的维护和改造措施可以削弱其影响。另一方面，在部分负荷下运行时热耗率较高。这一点仅发生在部分负荷运行时，不会导致基本负荷运行的热耗率发生变化。

##### ● 循环运行时的热耗率变化

第一个影响是循环运行引起的热耗率总体变化，这很难量化。

除了循环对发电厂造成的蠕变效应外，研究还分析了对热耗率的负面影响（例如国家可再生能源实验室 – NREL – REF\_1, REF\_2）。发电机组的热耗率通常可能在 30 年内下降 10%，即使采取例行维护和改造措施亦是如此。循环引起的降幅可能达到 1%-5%（REF\_1）。这些研究得出的热耗率总体下降与德国的经验相同。

##### ● 部分负荷运行时的热耗率变化

第二个影响是热耗对部分负荷运行的依赖性，它的估算稍微容易一些。

第一个指标可以通过热平衡示意图获得。由于锅炉效率在适度部分负荷下通常变化不大或略有提高，因此热耗率的提高主要是由于水-蒸汽循环效率的降低和辅助动力不成比例的降低所致。如果负荷进一步降低，例如降至单磨煤机运行模式，则效率不能视为主导参数。

该运行模式的更高级别目标是使机组保持运行状态，并避免因再次启动而产生的成本。热耗率会显著增加，这种情况无法避免。

降低最小稳定出力会分别影响工厂效率以及特定的二氧化碳排放量。但是，由于可再生能源占比增加而节省的二氧化碳排放量，要高于热电厂较低的部分负荷效率所增加的二氧化碳排放量。尽管如此，必须针对每个发电厂单独制定提高部分负荷运行热耗的措施。

##### 参考文献：

REF\_4.1 – 发电厂循环成本，N. Kumar 等人，NREL，2012 年

REF\_4.2 – 灵活性煤炭，Jaquelin Cochran 等人，NREL，2013 年

寿命消耗

灵活运行（特别是冷启动和超过额定负荷 50%的负荷变化）会产生非常高的热应力，厚

壁组件尤为如此。特定组件的寿命消耗受到许多因素的影响，并且这种消耗非常明显。因此，通过寿命监测系统对这些部件进行状态监测和寿命消耗评估，这点尤为重要。

这些系统基于 TRD 代码和 DIN EN 12952 等官方标准规定的程序，用于持续监测发电厂锅炉和汽轮机厚壁组件的应力。它们提供各个受监测组件关于总疲劳（蠕变和疲劳）的信息，并根据适当的模型测量或计算厚壁组件的温差。应使用 X 射线检查、裂纹测试和微结构检查等物理检查方法进行频繁监测，以验证寿命监测系统的结果寿命消耗不能直接与某种成本影响挂钩。因设备故障导致的潜在收入损失取决于商业模式、未来的运行制度以及维护和维修策略。

### 参考文献：

REF\_3 – 火力发电厂的灵活性，Agora 能源转型智库，2017 年

### 成本

由于运维成本很大程度上取决于未来的负荷状况，因此无法对运维成本进行总体陈述。应该开发一种市场设计，激励人们投资于灵活的增强措施。即使工厂负荷率较低，工厂运行在商业上也可行。除供电外，适当的辅助服务（如提供频率和电压控制以及黑启动能力）也应作为的可交付成果。

在循环模式下估算单个发电厂的成本影响并非易事。多年来，每家工厂都经过多次物理改造，并且在许多方面独具特色。为准确评估循环运行对成本的影响，需要对每家工厂进行深入分析。因此，尽管成本指标是基于对相似工厂的研究而得出的，但本章及后续章节仅将其作为指导原则。

循环运行带来的相关成本影响可分为以下几类：

#### 1.热、暖和冷启动成本：

除燃料和其他辅助成本外，循环还会产生额外的运行、维护和资本（检修支出）成本。这些成本不包括常规的固定运维成本

#### 2.作为启动类型函数的强迫停运率（EFOR）：

强迫停运率成本与市场 and 工厂运行所依据的合同协议直接相关。

它可能包括收入损失以及在现货市场上采购替换容量的义务。

#### 3.负荷跟踪成本（主要负荷跟踪）：

这些成本产生的原因是主要负荷跟踪（最大连续装机容量的 15%至 20%）导致设备更容易损坏。

#### 4.启动成本：燃料和辅助动力+化学品+水：

启动燃料、辅助动力等成本在循环总成本中的占比非常高。

#### 5.发电厂循环产生的热耗率影响：

研究表明，循环运行可能导致在一段时间内效率下降。此外，部分负荷运行效率的降低也会导致燃油消耗增加。

为增加循环运行而准备和改造工厂的决定在很大程度上取决于商业案例的合理性，而这些案例与特定市场和环境密切相关。

## 5. 培训概念和技能方案

为实施灵活运行机制，工厂工作人员必须做好准备。过去的最终目标是在基本负荷下以最高效率运行工厂，但是在能源转型时期，目标已经发生了变化。因此，强烈建议为发电厂工作人员制定合适的培训计划，以实现以下目标：

- 对灵活运行及其对运维的影响有深入的技术理解
- 了解灵活性和改变运营模式的要求和需求
- 改变思维方式和动力以应对新挑战。

设计的培训针对足以下几类发电厂工作人员的培训需求：

- 管理
  - 高级工程师
  - 培训师
- 操作人员
  - 主管
  - 操作员
- 维护人员
  - 机械
  - 电气
- 协调人员
  - 运行
  - 电网

推荐的培训计划包括准备模块、灵活性模块、模拟器模块和能力模块，并针对两种燃煤电厂的设计类型提供种类丰富的技术主题。在培训阶段，应全面评估和验证每位学员的表现和进度。通过有针对性的培训，学员能够积极而有目的地将他们在理论和实践中获得的知识 and 技能应用到新的领域。通过毕业考试会颁发参与证书与记录培训成功的毕业证书，并协助电力行业的企业进行人力资源开发。

发电厂和电网模拟器是一种可供选择的补充性学习工具。培训模拟器应基于真实发电厂和电网的技术数据。模块化的模拟器培训可惠及各类目标群体，例如操作人员（发电厂操作

员、主管、电网操作员)、运行管理人员(值班主管、团队负责人、单位负责人、成熟技术工人)和技术人员(技术员、化学工程师)。

## 5.1 不同发电厂人员群体的培训需求

### 管理人员

建议高级管理人员接受商务管理方面的专门培训,以及应对因参加灵活性计划(辅助电网服务)而导致灵活生产技术和操作受限方面的培训。此外,还建议针对停电情况、黑启动和电网恢复程序进行应急管理演练。

下表概述了管理人员培训计划。

类型	教学研讨会	模拟设备工作坊
特点	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 提供应对技术和运营限制的商业方法,使“家庭工厂”能够参与灵活性计划</li> <li>▪ 对与灵活市场的需求密切相关的经济环境有深入和广泛的理解</li> <li>▪ 定制化工厂结构的运营和组织策略:值班时间表、值班制度(4、5、6 值班制度)、控制室人员数量最小化、用于生产和维护的工厂运行管理、备件管理、组织研讨会等。</li> <li>▪ 广泛了解电网要求和负荷调度员工作</li> <li>▪ 工厂和电网中断的危险、黑启动程序、黑启动功能辅助系统、中断后电网重建程序</li> </ul>	<p><b>发电厂模拟</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 用于快速启动、停机、负荷爬坡、最低负荷限制的操作规程</li> <li>▪ 电力市场价格高昂时期的燃料消耗和技术资源管理</li> <li>▪ 减轻故障影响的方法</li> <li>▪ 最低负荷条件和负荷爬坡期间的工厂效率</li> <li>▪ 工厂运行期间的风险管理</li> </ul> <p><b>电网模拟</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在不同负荷条件下的电网行为(电压、频率、感应和无功行为)</li> <li>▪ 密集城市电网或长跨度运输线的特性</li> <li>▪ 与当地公用事业公司、负荷调度员或其他工厂进行沟通</li> <li>▪ 电网重建和设置程序</li> <li>▪ 电网和/或工厂停运时的应急管理</li> </ul>
成就	培训证书	培训证书

潜在职能	升级至公司层级的职能（高级经理、高级顾问）	升级至公司层级的职能（辅助服务高级经理、整体机组分析路径灵活运行高级顾问）
------	-----------------------	---------------------------------------

## 操作人员

灵活性培训计划的主要目标群体为控制室人员。如本章所述，仪表与控制系统是灵活性的核心。因此，需要对操作人员进行培训，确保他们熟练使用这些技术，并在分析监测和评估系统时得出正确的结论。

下表概述了操作人员培训计划。

类型	准备运行培训	灵活运行培训	模拟培训
特点	<ul style="list-style-type: none"> <li>更新培训</li> <li>参加灵活性培训的准备</li> <li>通用但具体的工厂技术内容</li> <li>“家庭工厂”设计和运行</li> <li>基本了解与工厂要求密切相关的经济环境</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>参加模拟培训的准备</li> <li>对各种工厂技术等广泛的广泛的技术理解</li> <li>进一步了解技术限制以及灵活运行期间应对这些限制的备选方案</li> <li>理解与工厂要求密切相关的经济环境</li> <li>基本了解操作和维护程序</li> <li>可选：灵活性项目课堂培训师（需要值班主管或工程师证书）培训师（培训师培训）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>深入了解操作和维护程序</li> <li>制定新的操作规程</li> <li>对整个工厂运行规模等有广泛的理解</li> <li>专业处理故障</li> <li>专业处理高速启动和关闭程序以及负载爬坡</li> <li>优化冷、热和热启动程序</li> <li>处理停机情况</li> <li>黑启动程序</li> <li>决策和控制室人员管理</li> <li>领导力培训</li> <li>运行能力的文化变革，实现卓越运行</li> <li>学习采取积极主动的方法运行工厂</li> <li>定期进行虚拟工厂检查</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>可选：模拟培训师（针对模拟培训的培训师培训）</li> </ul>
培训对象	操作人员（本地和控制室）	控制室人员、值班主管和值班工程师	控制室值班组
成就	运行准备合格证书（灵活性培训模块必修） （可选：推荐参加进一步培训）	灵活运行合格证书（模拟培训模块必修） （可选：推荐参加进一步培训）	模拟灵活性证书 （可选：推荐参加进一步培训）
证书	口试和笔试	口试和笔试	使用模拟设备进行工厂运行的实践测试作为值班主管进行灵活运行期间班组管理的实践测试
潜在职能	本地和控制室操作员	控制室操作员、领班或值班主管	值班主管、值班主管的灵活性顾问、运行和电网协调员或模拟培训培训师

## 技术人员

该组人员需要了解加大工厂负荷和运行范围所需的技术解决方案。该组人员还应该能够开发出更先进的解决方案，以解决不符合要求的负荷梯度、最小负荷条件、磨损或污垢等问题。技术人员组应分为两个小组

- 机械维修人员
- 电气和自动化人员

根据培训模块的内容，联合培训课程不仅可取，而且有用。下表概述了技术人员培训计划。

类型	准备技术培训	灵活性技术培训
特点	<ul style="list-style-type: none"> <li>新技术培训</li> <li>参加灵活性培训的准备</li> <li>通用但具体的工厂技术内容</li> <li>有关服务和维护程序的“家庭工厂”设</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>对各种工厂技术等广泛的技术理解</li> <li>加强对维护方法和策略的了解，能够在灵活运行期间满足维护要求</li> <li>进一步了解与工厂和维护要求密切相关</li> </ul>



	计和运行 <ul style="list-style-type: none"> <li>基本了解与维护要求密切相关的经济环境</li> </ul>	关的经济环境 <ul style="list-style-type: none"> <li>基本了解操作规程</li> <li>广泛了解与维护要求密切相关的经济环境</li> <li>可选：灵活性项目课堂培训师（需要维护主管身份或工程师证书）</li> </ul>
培训对象	机械、电气和自动化维护或服务人员（本地和车间）	机械、电气和自动化维护或服务人员（本地、车间和管理）
成就	准备技术合格证书（灵活性培训模块必修） （可选：推荐参加进一步培训）	灵活性技术合格证书（可选：推荐参加进一步升级培训）
证书	口试和笔试	口试和笔试
潜在职能	本地和车间服务人员	服务负责人、维护主管、维护协调员

## 5.2 对培训师的培训

为保持培训效果，应该将针对培训师的培训课程作为重点。这里开发了一个专门的培训模块，目的是系统地培养员工成为讲师和培训师。首先，让学员熟悉讲师角色的要求，如何处理学习的基础知识，学习如何规划和实施课程，以及如何选择和准备适合其目标和目标群体的内容。

在此基础上，我们为选择和使用合适的媒体制定了合适的技术和标准，以便有效地传授学习内容。

另一个重点是对学习小组动态的控制。学员学习与小组合作，指导并激励他们解决教学中的冲突，以及恰当地解决干扰因素。

此外，参加培训师培训的学员还需要具有并分析组织中个人和团队培训需求的策略。最后，学员还将学习质量保证技术和方法，并了解教育控制的机会。

该模块包含两项深化实践练习，在专业培训师的指导下与其他学员进行交流，以深化和扩大学习。学员还将通过这些实践练习构思和展示实际项目工作。该课程内容适用于那些已经在公司接受进一步教育和培训并希望获得更高资格的人员。



## 6. 灵活性与管理

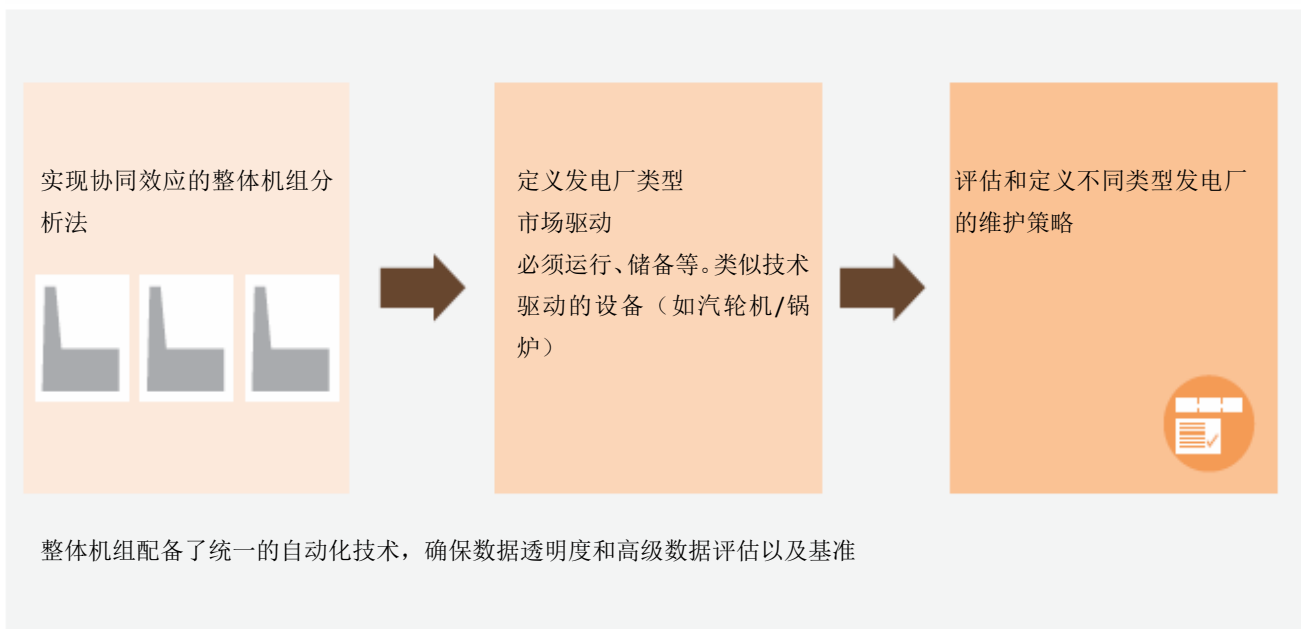
本章包括发电厂管理人员在向灵活运行的过渡过程中应解决的领域和任务。活动领域各不相同，例如：

- 实施新的商业模式：使工厂运行与商业策略保持一致，例如提供辅助服务
- 改革管理：提高对灵活性需求的认识并实施变革过程
- 技能和人才管理：确保达到要求
- 获得技术专业知识和动力，并且获得上级的理解（请参阅培训章节）
- 质量意识：提高人们对质量重要性和遵守运维程序的认识
- 组织：实行新的工作流程、规程和过程（特别是维护），以适应新的运行要求（例如两班制、周末停机）

### 6.1 整体机组分析路径

图 9

整体机组分析路径



整体机组分析路径管理方法的好处是标准化、统一工作和报告程序以及能够交流和分享成功经验。这种方法并不是一种新发明的。但是，考虑到灵活运行的影响，应该对该方法进行重新评估。

制定正确维护策略的第一步是根据市场需求对发电厂进行分类。德国制定了以下办法。

基本思路是将发电厂分为三类：

- 须运行的工厂：需要履行专门的购电协议和/或供热合同
- 市场追随型工厂：调整运行制度，以适应循环运行份额较大的（择优顺序）市场。
- 储备型工厂：需要时可满足电力需求

下表对三类工厂进行了概述。

	必须运行（合同）的工厂	市场追随型工厂	储备型工厂
特点	根据客户的电力和/或热量需求运行	市场价格决定工厂运行	根据输电系统运营商的要求运行
可用率	> 90%	< 80%	根据需求
利用率	70 - 80%	35 - 50%	1 - 5%
维护方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 在磨损密集区（磨煤机、锅炉、FG 清洁）的预防性维护</li> <li>▪ 基于状态的维护</li> <li>▪ 检修周期和持续时间取决于时长</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 基于风险的维护</li> <li>▪ 高级状态监测</li> <li>▪ 检修周期经过成本优化，并且基于等效运行时间</li> <li>▪ 长时间停顿</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 基于条件的维护</li> <li>▪ 如有要求，经常进行工厂测试和启动，以确保可靠运行</li> <li>▪ 长时间停顿</li> <li>▪ 需要维护专有技术的概念</li> </ul>

在合同期内，必须运行型和储备型发电厂的运行制度保持稳定。市场追随型发电厂则受到寿命消耗增加的影响。显然，德国的工厂类型必须适应其他市场（包括印度市场）。但是，像德国那样对印度的发电厂进行系统性合理分类很有好处。

市场追随型发电厂应根据风险评估选择工厂维护措施。随着检查力度的加大，风险也随之增加。需要对可靠性与（维护）成本进行评估，以找到最佳方案。

下图展示了维护方法与风险之间的关系。

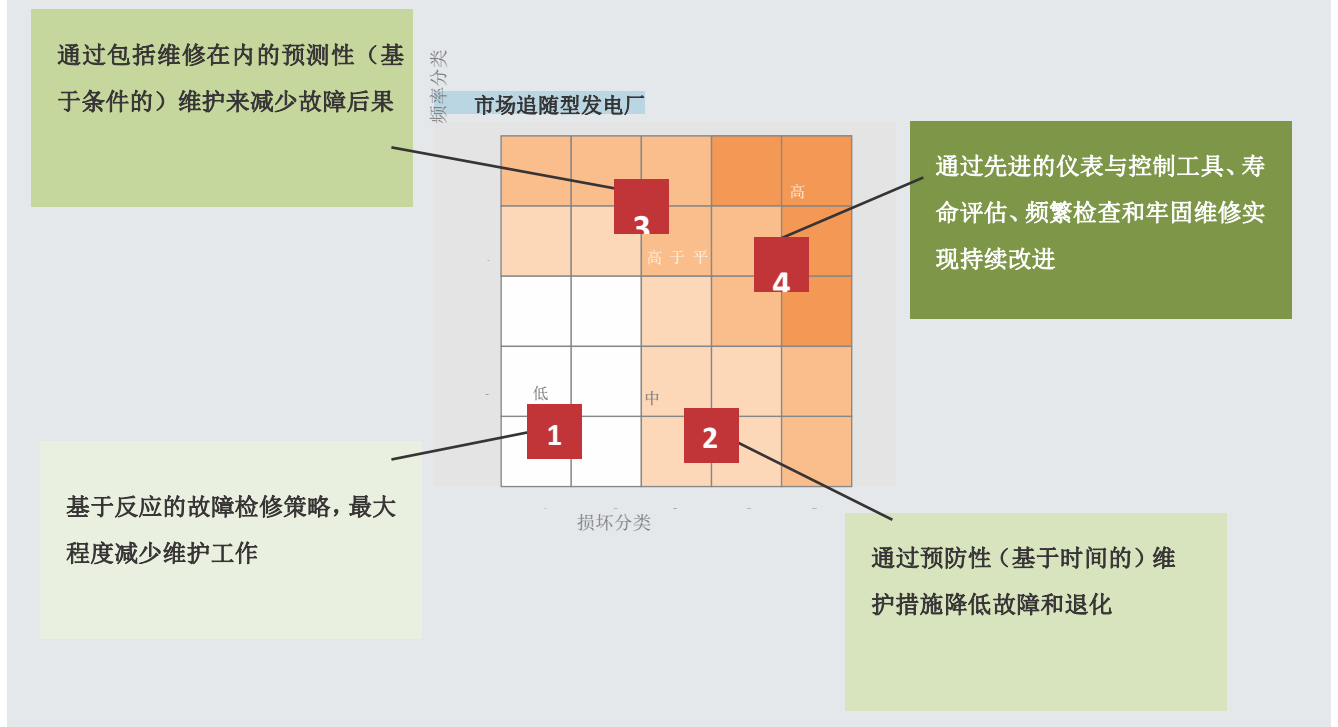
这意味着，那些对循环运行非常敏感的发电厂组件或部件，需要非常严格地维护和控制，例如：

- 壁组件：集管、阀门、T型和Y型件、壳体、汽轮机转子
- 高温组件：过热器、再热器

- 管吊架
- 汽轮机：ND 部件
- 省煤器和空气预热器
- 发电机：绕组和绝缘

图 10

基于风险的维护措施选择；资料来源：VGB 和 EnBW



## 附录 A: VGB “发电厂/工业工厂的给水、锅炉水和蒸汽质量”标准

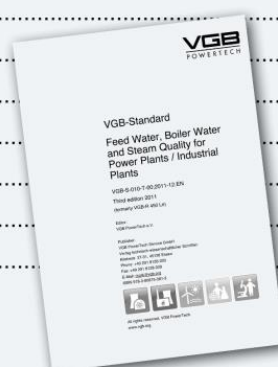
VGB-S-010-T-00; 2011-12.EN, 目录

VGB-S-010-T-00;2011-12.EN

VGB

### Content

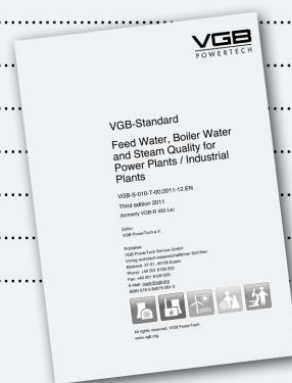
<b>1</b>	<b>Scope</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Definitions</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Water-steam cycle system</b> .....	<b>15</b>
3.1	Feed water/feed water system.....	16
3.2	Steam generator/boiler water system .....	17
3.3	Turbine/steam system .....	18
3.3.1	Backpressure Turbines.....	19
3.4	Condensate/Condensing system .....	20
3.4.1	Secondary condensates .....	20
3.4.2	Process condensate return.....	20
<b>4</b>	<b>Boiler types, materials and water chemistry</b> .....	<b>21</b>
4.1	Boiler types.....	21
4.1.1	Water-tube boiler .....	21
4.1.1.1	Once-through boilers .....	21
4.1.1.2	Drum boiler .....	22
4.1.1.3	Heat recovery steam generator .....	22
4.1.2	Fire tube boiler (auxiliary steam boiler).....	22
4.1.3	Waste Heat Boiler, Process Gas Cooler, and steam generators from solar thermal plants .....	22
4.2	Materials .....	23
4.2.1	Steel materials.....	23
4.2.2	Non-ferrous metals .....	23
4.2.2.1	Copper alloys.....	24
4.2.2.2	Aluminium alloys.....	24
4.2.2.3	Titanium .....	24
4.2.2.4	Special alloys.....	24
4.3	Physicochemical processes.....	25
4.3.1	Basics of material protection.....	25
4.3.2	Deposition.....	26
4.3.2.1	Deposition from water.....	26



VGB

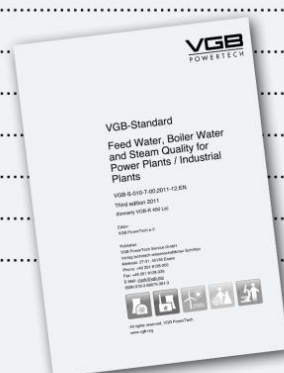
VGB-S-010-T-00;2011-12.EN

4.3.2.2	Deposition from steam.....	27
4.3.3	Corrosion in the water-steam cycle.....	30
4.4	Physicochemical processes at the components .....	31
4.4.1	Steam generator .....	31
4.4.1.1	Erosion corrosion/stress corrosion cracking in exit ends of boiler tubes.....	31
4.4.1.2	Hide-out/negative hide-out.....	31
4.4.1.3	Volatile alkalising agents/distribution equilibrium.....	32
4.4.1.4	Water separation for drum boilers.....	32
4.4.1.5	Spray-water for temperature control .....	33
4.4.1.6	Superheaters .....	34
4.4.2	Steam turbine .....	34
4.4.2.1	Turbine inlet valves.....	35
4.4.2.2	Control stage .....	35
4.4.2.3	Turbine rotor blades in the first condensate zone.....	35
4.4.2.4	Basis of rotor blades in low pressure turbines .....	36
4.4.2.5	Basis of stator blades in low pressure turbines.....	36
4.4.2.6	Steam lines for exhaust steam.....	36
4.4.3	Turbine condensers .....	36
4.4.3.1	Surface condensers (steam side tubing) .....	36
4.4.3.2	Air condensers.....	37
4.4.4	Condensate polishing plant.....	37
4.4.5	Steam side of low and high pressure pre-heaters.....	38
4.4.6	Feedwater tank.....	38
<b>5</b>	<b>Treatment of water-steam cycles .....</b>	<b>40</b>
5.1	Purification.....	40
5.1.1	Make-up water treatment.....	40
5.1.2	Condensate treatment .....	40
5.1.3	Removal of salts .....	41
5.1.3.1	Blowdown from drum and shell boilers .....	41
5.1.3.2	Blowdown from once-through boilers.....	41
5.1.3.3	Heaters .....	41
5.2	Deaeration and oxygen scavenging.....	42





5.2.1	Deaeration .....	42
5.2.2	Oxygen scavenging .....	42
5.3	Conditioning.....	43
5.3.1	Feed water conditioning.....	43
5.3.1.1	Feed water conditioning with alkalizing agents (AVT).....	43
5.3.1.2	Feed water conditioning only with oxidizing agents .....	44
5.3.1.3	Feed water conditioning with alkalising and oxidising agents (OT).....	45
5.3.2	Boiler water conditioning.....	46
5.3.2.1	Caustic or phosphate treatment (solid alkalising) .....	48
5.3.2.2	All volatile treatment .....	48
5.3.3	Organic conditioning agents .....	50
<b>6</b>	<b>Chemical specification .....</b>	<b>52</b>
6.1	Action level control system .....	52
6.2	Operation with demineralised feed water.....	55
6.2.1	Requirements on feed water for once-through boilers .....	55
6.2.2	Requirements on feed water for drum boilers .....	57
6.2.3	Requirements on boiler water for drum boilers .....	59
6.2.4	Requirements on steam for condensing turbines.....	65
6.3	Operation with non-demineralised feed water.....	66
6.3.1	General.....	66
6.3.2	Raw water/treated water parameters.....	66
6.3.3	Condensate percentage return .....	66
<b>7</b>	<b>Explanation of chemical specifications .....</b>	<b>73</b>
7.1	pH value, alkalinity.....	73
7.1.1	pH value.....	73
7.1.2	Alkalinity.....	74
7.2	Conductivity .....	75
7.3	Oxygen .....	76
7.4	Hardness .....	77
7.5	Phosphate.....	77
7.6	Silica .....	77
7.7	Iron and copper.....	78



VGB

VGB-S-010-T-00;2011-12.EN

7.8	Sodium.....	78
7.9	Carbon dioxide.....	78
7.10	Organic substances .....	79
<b>8</b>	<b>Analytical control of operation .....</b>	<b>80</b>
8.1	Sampling of water and steam .....	80
8.2	Sampling points and parameters .....	81
8.3	Quality control of measurements .....	88
8.4	Specification of the optimal operation – definition of the N-range .....	88
8.5	Monitoring and reporting .....	93
<b>9</b>	<b>Annex.....</b>	<b>95</b>
9.1	Internal cleaning and preservation.....	95
9.1.1	Internal cleaning .....	95
9.1.2	Preservation.....	95
9.2	Operation above Action level 3 .....	96
9.3	Warning examples .....	97
9.4	Statistical procedures .....	101
9.4.1	Determining the N-limit .....	101
9.4.2	The “Box-and-Whiskers” plot .....	104
9.4.3	Modelling of observed data.....	104
9.4.4	Test of two estimated distributions.....	106
<b>10</b>	<b>Bibliography.....</b>	<b>110</b>
10.1	VGB-Standards and guidelines in force.....	110
10.2	Standards in force.....	111
10.3	Literature.....	111



## 附录 B: VGB“蒸汽锅炉工厂组件、压力容器安装和高压给水和蒸汽管道状态监测和检验”标准

S-506-R-00; 2012-03.EN; 目录

**VGB**

VGB-S-506-R-00;2012-03.EN

<b>2</b>	<b>Table of contents</b>	
<b>1</b>	<b>Preamble</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Table of contents</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>9</b>
3.1	Scope and objectives of the guideline .....	9
3.2	Definition and objective of condition monitoring.....	9
<b>4</b>	<b>Condition monitoring modules</b> .....	<b>10</b>
4.1	Design .....	10
4.2	Documented quality.....	10
4.2.1	Manufacturing.....	11
4.2.2	Periodic inspections and operation.....	12
4.2.3	Overhaul.....	12
4.2.4	The exceptional case "Reduction of strength parameters of materials".....	12
4.3	Diagnostics during operation .....	13
4.3.1	Creep and fatigue .....	13
4.3.2	Additional loads .....	13
4.3.2.1	Process-related causes .....	14
4.3.2.2	Component-related causes.....	14
4.4	Diagnostics during shutdown.....	15
4.4.1	Visual inspections.....	15
4.4.2	Materials testing .....	15
4.4.3	Functional tests .....	15
4.5	Condition assessment .....	15
4.5.1	Statistical methods .....	15
4.5.2	Probabilistic methods .....	16
4.5.2.1	RBI/RCM (qualitative, semi-quantitative or quantitative method).....	16
4.5.2.2	Expert methods (qualitative method).....	18
4.5.3	Detailed inelastic analysis .....	19
<b>5</b>	<b>Inspection periods and extent of inspection</b> .....	<b>20</b>
5.1	Specific requirements for the hazard assessment/technical safety .....	
	assessment of components subject to creep and cyclic loading.....	21
5.2	Inspections prior to first putting into service of or upon essential.....	
	changes in pressure equipment installations subject to supervision.....	
	as per § 14, para. 1 of the Ordinance on Industrial Safety and Health .....	
	(BetrSichV).....	22
5.2.1	Additional requirements for steam boiler plants.....	25
5.2.2	Additional requirements for pressure vessel installations .....	29
5.2.3	Additional requirements for piping .....	29
5.3	Periodic inspections.....	30
5.3.1	Inspection of good order of pressure equipment .....	30
5.3.2	External inspection on steam boiler plants .....	31



5.3.2.1	Inspection of items of equipment having safety functions and the corresponding instrumentation and control systems .....	31
5.3.2.2	Additional inspections of components exposed to creep or cyclic loadings..	33
5.3.3	Internal inspection on steam boiler plants .....	34
5.3.3.1	Further measures in the case of expected cumulative damage in the..... creep range .....	36
5.3.4	External inspection on pressure vessel installations and related pipework ..	38
5.3.5	Internal inspection on pressure vessel installations and related pipework....	40
5.3.6	External inspections on pipes .....	42
5.3.6.1	Preparation of external inspections .....	42
5.3.6.2	Performance of external inspections .....	42
5.3.6.3	Certificates .....	44
5.3.7	Strength test (pressure test) on pressure equipment systems .....	44
5.3.7.1	Test gauge pressure during the strength test (pressure test).....	44
5.3.7.2	Application and holding time of test gauge pressure .....	46
5.3.7.3	Requirements for water .....	46
5.3.7.4	Visual inspections of walls.....	47
5.3.7.5	Replacement measures for liquid pressure testing.....	47
5.4	Specific inspections upon change of the pressure equipment system .....	48
5.5	Other equivalent methods suited for condition monitoring or an..... extension of inspection periods .....	49
5.5.1	Optimisation of modelling .....	49
5.5.2	Requirements for the documented quality .....	51
5.5.3	Evidence of the operation as intended .....	51
<b>6</b>	<b>Additional references .....</b>	<b>52</b>
<b>Appendix 1</b>	<b>Documented quality .....</b>	<b>55</b>
<b>Appendix 2</b>	<b>Additional tests on components - Method for the calculation .....</b> <b>of components having time-dependent design strength values –.....</b> <b>(on the basis of TRD 508, Appendix 1) .....</b>	<b>58</b>
<b>Appendix 3</b>	<b>Explanations of section 4.3.1 "Creep and fatigue".....</b>	<b>69</b>
<b>Appendix 4</b>	<b>The RIMAP Method.....</b>	<b>71</b>
<b>Appendix 5</b>	<b>Explanations of the expert-based evaluation procedures .....</b>	<b>81</b>
<b>Appendix 6</b>	<b>Example for expert-based evaluation procedures .....</b>	<b>85</b>
<b>Appendix 7</b>	<b>Summary of existing VGB Guidelines/Regulations with respect.....</b> <b>to condition monitoring .....</b>	<b>93</b>

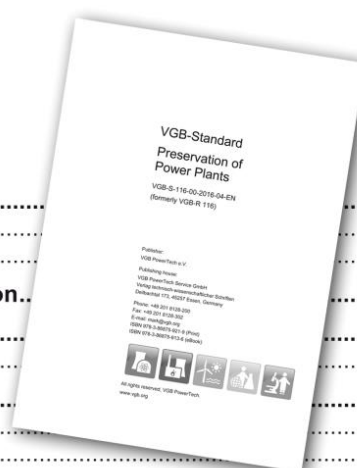
## 附录 C：VGB“发电厂的保全”标准

VGB-S-116-T-00-2016-04-EN

VGB-S-116-00-2016-04-EN

### Table of contents

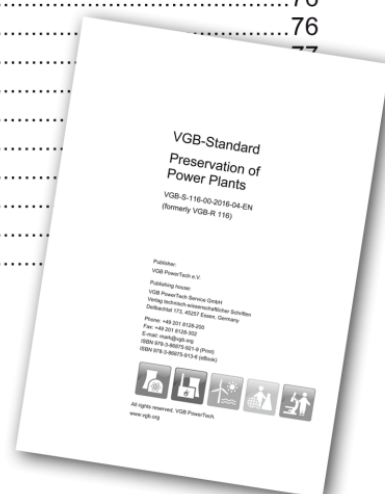
<b>1</b>	<b>Scope and introduction</b> .....	<b>13</b>
1.1	Scope .....	13
1.2	Introduction .....	13
<b>2</b>	<b>Fundamentals of off-line corrosion</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>Fundamentals of preservation</b> .....	<b>24</b>
3.1	General .....	24
<b>4</b>	<b>Materials</b> .....	<b>25</b>
4.1	Material surfaces .....	25
4.2	Material surfaces .....	26
<b>5</b>	<b>Preservation methods for the water/steam side</b> .....	<b>29</b>
5.1	Wet preservation.....	31
5.2	Dry preservation .....	32
5.3	Inert gas blanketing (inerting) .....	34
5.4	Preservation with volatile corrosion inhibitors (VCI).....	35
5.5	Preservation with filming amines .....	36
5.6	Oils, waxes and fat .....	37
5.7	Temporary coating.....	39
<b>6</b>	<b>Plant value conservation and test plans for preservation</b> .....	<b>40</b>
6.1	Wet preservation.....	41
6.2	Dry preservation .....	42
6.3	Inert gas blanketing (inerting) .....	43
6.4	Volatile corrosion inhibition .....	43
6.5	Filming amines.....	43
<b>7</b>	<b>Preservation of power plant components upon fabrication, during .....</b>	<b>45</b>
7.1	Specific requirements .....	45
7.2	Preservation requirements.....	46
7.3	Acceptance of preservation .....	46
7.4	Removal of preservatives .....	47
<b>8</b>	<b>Storage classes and conditions</b> .....	<b>50</b>
8.1	General.....	50
8.2	Storage classes .....	50
8.2.1	Class A .....	51
8.2.2	Class B .....	51
8.2.3	Class C .....	51
8.2.4	Class D .....	52
8.2.5	Class E .....	52
8.3	Storage categories.....	52
8.3.1	Storage category 1: Fully air-conditioned storage room .....	52
8.3.2	Storage category 2: Closed (air-conditioned) storage room .....	53
8.3.3	Storage category 3: Covered storage area .....	53
8.3.4	Storage category 4: Open storage area, material covered .....	53
8.3.5	Storage category 5: Open storage area.....	53



VGB

VGB-S-116-00-2016-04-EN

8.4	Other storage requirements .....	53
8.4.1	Accessibility and stackability .....	53
8.4.2	Fire protection and leanliness .....	54
8.4.3	Protection from insects and animals .....	54
8.4.4	Products with specific storage requirements .....	54
<b>9</b>	<b>Preservation of power plants during outages .....</b>	<b>55</b>
9.1	Start-up readiness/repairs/revision .....	57
9.2	Water/steam side wet preservation .....	60
9.2.1	Wet preservation by maintenance of over-pressure .....	60
9.2.2	Wet preservation by means of oxygen scavengers .....	60
9.2.3	Wet preservation when conditioning with oxidising agents .....	61
9.2.4	Wet preservation by raising the pH value to support corrosion .....	61
9.3	Preservation by shutdown heating in steam generating plants .....	62
9.3.1	Preservation by shutdown heating through <b>direct steam injection</b> .....	62
9.3.2	Preservation by shutdown heating through feedwater recirculation .....	64
9.4	Preservation through inerting steam generating plants .....	64
9.4.1	Preservation with nitrogen of plant to be drained .....	64
9.4.2	Preservation with nitrogen of already drained plant .....	64
9.5	Preservation by volatile corrosion inhibitors or filming amines .....	65
9.5.1	Volatile corrosion inhibitor – VCI .....	65
9.5.2	Preservation by filming amines .....	66
9.6	Dry preservation of steam generators .....	67
9.6.1	Drying of plants .....	67
9.6.2	Dry air preservation (adsorption dryers) .....	68
9.6.3	Dry preservation by means of solid adsorbents .....	69
9.6.4	Preservation with hot air .....	70
9.7	Long-term preservation and/or measures to be taken during outages .....	70
<b>10</b>	<b>Preservation of steam turbine-generator set .....</b>	<b>72</b>
<b>11</b>	<b>Preservation of cooling systems and their components .....</b>	<b>73</b>
11.1	Main and service cooling water systems .....	73
11.1.1	Condensers and intermediate heat exchangers .....	75
11.1.2	Other heat exchangers .....	76
11.1.3	Materials .....	76
11.1.3.1	Copper alloys .....	76
11.1.3.2	Stainless steels .....	77
11.1.3.3	Titanium .....	77
11.2	Preservation of intermediate cooling systems .....	77
11.3	Preservation of air-cooled condensers (ACC) .....	77
11.3.1	Air-cooled condensers of high-grade steels .....	77
11.3.2	Air-cooled condensers of carbon steel .....	77
11.3.3	Preservation with dry air .....	77
11.3.4	Other preservation methods .....	77





## VGB-S-116-00-2016-04-EN

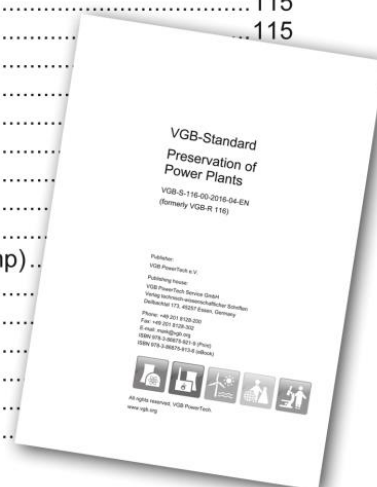
11.4	Flocculation plants and cooling tower make-up water plants.....	81
11.4.1	Preservation methods in case of outage with permanent start-up ..... readiness .....	81
11.4.2	Preservation methods in case of extended outage without start-up..... readiness .....	82
11.4.3	Filter units .....	82
11.4.3.1	Filter chamber press .....	82
11.5	Cooling towers .....	83
11.5.1	Natural-draught cooling tower.....	83
11.5.2	Natural-draught cooling tower used in combination as flue-gas stack .....	84
11.5.3	Mechanical-draught cooling tower/hybrid cooling tower .....	84
11.5.4	Dry cooling towers .....	84
<b>12</b>	<b>Preservation of components in water treatment systems .....</b>	<b>85</b>
12.1	Gravel filters/multi-media filters.....	85
12.2	Ion exchanger units .....	85
12.2.1	Cation exchanger resins (H and Na exchange resins).....	86
12.2.2	Anion exchangers .....	86
12.2.3	Mixed-bed unit .....	87
12.3	Membrane systems .....	88
12.3.1	Reverse osmosis (RO) systems shutdown and lay-up consideration .....	88
12.3.2	Ultra- and micro-filtration .....	90
12.3.3	Membrane degasification.....	90
12.4	Electro-deionisation .....	90
<b>13</b>	<b>Fuel supply system .....</b>	<b>91</b>
13.1	Coal firing system .....	91
13.1.1	Coal handling system .....	91
13.1.2	Coal bins and bunkers .....	91
13.1.3	Feeders .....	92
13.1.4	Pulverising mills .....	92
13.2	Fuel supply lines .....	93
13.2.1	Pulverised-fuel supply line .....	93
13.2.2	Oil supply lines.....	93
13.2.3	Booster pumps.....	93
13.2.4	Gas supply lines .....	94
13.3	Burners, firing systems .....	94
13.3.1	Pulverised-fuel burners.....	94
13.3.2	Oil burners .....	94
13.3.3	Gas burners.....	94
<b>14</b>	<b>Air supply system.....</b>	<b>95</b>
14.1	External/internal combustion air intake .....	95
14.2	Steam air heater .....	95
14.3	Regenerative air heaters .....	95
14.4	Forced-draught fans/primary air fans .....	97
14.5	Forced-draught intake ducts .....	97



VGB

VGB-S-116-00-2016-04-EN

<b>15</b>	<b>Flue-gas system.....</b>	<b>98</b>
15.1	Combustion chamber, convective heating surfaces and 2nd pass ..... or blank pass .....	98
15.2	Furnace bottom ash removal .....	98
15.3	Flue-gas recirculation .....	99
15.4	Flue-gas ducts including dampers upstream of electrostatic precipitator .....	99
<b>16</b>	<b>Flue-gas side preservation of steam generators .....</b>	<b>100</b>
16.1	Preservation methods .....	102
16.1.1	Thermal methods .....	102
16.1.2	Dry air method .....	103
16.1.3	Blast cleaning and preservation with alkalisied pressurized water .....	105
16.1.4	Chemical methods .....	105
16.2	Flue-gas side preservation of coal-fired steam generators .....	106
16.3	Flue-gas side preservation of oil-fired steam generators .....	106
16.4	Flue-gas side preservation of steam generators fired with substitute fuels .....	108
16.5	Flue-gas side preservation of waste-heat recovery boilers .....	108
<b>17</b>	<b>Flue-gas cleaning systems .....</b>	<b>111</b>
17.1	NOx reduction systems .....	111
17.1.1	High-dust catalyst .....	111
17.1.2	Tail-end catalyst .....	112
17.1.3	Ancillary DeNOx systems .....	112
17.1.3.1	Storage of ammonium hydroxide .....	112
17.1.3.2	Storage of pressure-liquified ammonia .....	113
17.2	Electrostatic precipitator (ESP) .....	114
17.2.1	Electrostatic precipitator casing with electrodes and rapping system, insulators .....	114
17.3	ESP ancillary systems .....	114
17.3.1	High-voltage units .....	114
17.3.2	Ash disposal .....	114
17.4	Fabric filter .....	115
17.5	Fabric filter ancillary systems .....	115
17.5.1	Cleaning system/compressed-air supply .....	
17.5.2	Ash disposal .....	
17.6	Flue-gas desulphurisation system (FGD) .....	
17.6.1	Absorber inlet .....	
17.6.2	Absorber with spray bank and mist eliminator .....	
17.7	FGD ancillary systems .....	
17.7.1	Absorber circulation pumps (large pumps) .....	
17.7.2	Suspension pumps (e.g. gypsum discharge pump) .....	
17.7.3	Pumps, general requirements .....	
17.7.4	Pipework and valves .....	
17.7.5	Compressors .....	
17.7.6	Agitators .....	
17.7.7	Measuring equipment .....	
17.7.8	Gypsum drainage systems .....	



## VGB-S-116-00-2016-04-EN

17.7.8.1	Hydrocyclones .....	120
17.7.8.2	Vacuum band filter .....	120
17.7.8.3	Vacuum pumps .....	121
17.7.8.3.1	Stainless steel pumps .....	121
17.7.8.3.2	Stainless steel pumps .....	121
17.7.8.4	Gypsum silo .....	121
17.7.8.5	Absorbent supply .....	121
17.8	Other flue-gas wetted plant components .....	122
17.8.1	Heat transfer systems .....	122
17.8.1.1	Steam gas heater .....	122
17.8.1.2	Regenerative gas heater .....	122
17.8.1.3	Preservation concept for hose-type heat exchanger systems .....	122
	with water as heat transfer fluid .....	122
17.8.2	Heat displacement system .....	126
17.8.3	Flue gas ducts with dampers and expansion joints .....	127
17.8.4	Air heater .....	127
17.8.5	Induced-draught fan with hydraulic station .....	127
17.8.6	Seal air and cooling air fans .....	128
17.8.7	Silencers .....	128
17.8.8	Stack .....	128
17.8.9	Operational measuring devices .....	128
17.8.10	Emission measuring devices .....	128
<b>18</b>	<b>Waste-water cleaning plant .....</b>	<b>129</b>
<b>19</b>	<b>Literature .....</b>	<b>130</b>
<b>20</b>	<b>Standards and Guidelines from Associations .....</b>	<b>133</b>
<b>21</b>	<b>Abbreviations .....</b>	<b>134</b>
<b>22</b>	<b>Examples for inspection plans .....</b>	<b>135</b>
	Part B 1: Actual condition after delivery .....	137
	Part B 2: Actual condition during storage period .....	139
	Part B 3: Measures after storage period/before erection .....	141



## 附录 D: VGB “蒸汽涡轮发电机组的保全”标准

VGB-S-036-T-00-2014-08-EN

VGB-S-036-00-2014-08-EN

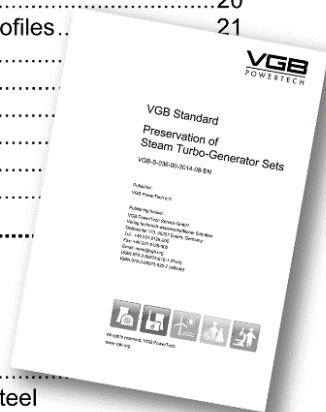
VGB

## Contents

<b>1</b>	<b>General description .....</b>	<b>7</b>
1.1	Purpose .....	7
1.2	Scope of application .....	7
1.3	Start of preservation .....	7
<b>2</b>	<b>Causes and effects of corrosion .....</b>	<b>8</b>
2.1	Causes .....	8
2.2	Effects .....	10
<b>3</b>	<b>Preservation measures .....</b>	<b>11</b>
3.1	Preservation with dry/dehumidified air based on the adsorption method ..	11
3.2	Preservation with instrument air .....	12
3.3	Preservation with inert gases .....	13
<b>4</b>	<b>Applications instructions and measures .....</b>	<b>13</b>
4.1	During erection and initial start-up .....	13
4.2	Preservation during outages and inspections .....	14
<b>5</b>	<b>Design dry-air volume .....</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Monitoring during preservation .....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Things to do before resuming operation .....</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Preservation of generators .....</b>	<b>17</b>
8.1	Causes and effects of moisture and corrosion .....	17
8.2	Preservation measures .....	18
8.2.1	Preservation during transport, temporary storage and long-term storage ..	18
8.2.2	Preservation during inspection periods .....	20
8.2.3	Preservation on account of changed requirement profiles ..	21
8.3	Maintenance in the preserved state .....	
8.3.1	Transport .....	
8.3.2	Storage .....	
8.3.3	Inspection .....	
8.3.4	Special requirement profiles .....	
8.4	Establishing of operational readiness .....	
<b>9</b>	<b>Literature .....</b>	

<b>Figures</b>	
Figure 1:	Corrosion rate as a function of relative humidity .....
Figure 2:	Time dependence of the atmospheric corrosion of steel at setting “steady” corrosion rate .....
Figure 3:	Diagram showing principle of regenerative adsorption drying .....





## 附录 E：更多参考文献

- 《火力发电厂的灵活性-着眼于现有燃煤电厂》

本研究以燃煤电厂为重点，对可能的火力发电灵活性措施进行了广泛分析。研究包括以下几个部分：

研究的第一部分分析与整合了大量可再生能源相关的主要挑战。

第二部分详细描述了与火力发电厂灵活性相关的当前技术特征。

第三部分分析了提高燃煤电厂灵活性的一些改造措施，包括技术和经济参数。

第四，通过聚焦南非和波兰这两个燃煤发电份额较高的国家情况讨论了在挑战和机遇方面的调查结果，并进行了展望。

下载地址：<https://www.agora-energiewende.de/en/publications/flexibility-in-thermal-power-plants-1/>

- 合作项目“联合蒸汽发电厂”的最终报告

VGB 报告，2015 年

研究项目“联合蒸汽发电厂”将明显提高波动能源发电的适度融合性。

因此，现有发电厂应更好地应对风力或光伏发电的波动，以确保能源供应。

下载地址：[https://www.vgb.org/en/research\\_project375.html](https://www.vgb.org/en/research_project375.html)

- 《提高燃煤电厂的灵活性》

国际能源署报告 242，Colin Henderson，2014 年 9 月

越来越多的人要求燃煤发电厂通过补偿来自可再生能源的可变电力供应来平衡电网。

为此，燃煤电厂需要在应对频繁启动的适应力、满足重大和快速的符合变化以及提供频率控制职责等方面具备出色的灵活性。

本报告回顾了实现灵活性的现有方法及正在开发的方法。各种可能的损坏机理是众所周知的，可通过组件寿命、效率和排放产生的可接受影响来实现必要的灵活性。

目前正在开发各种设计，以使将来的工厂具备灵活性。

下载地址：

[https://www.usea.org/sites/default/files/092014\\_Increasing%20the%20flexibility%20of%20coalfired%20power%20plants\\_ccc242.pdf](https://www.usea.org/sites/default/files/092014_Increasing%20the%20flexibility%20of%20coalfired%20power%20plants_ccc242.pdf)



- 《印度燃煤电厂灵活运行所需的培训》

随着印度可再生能源发电能力的迅速扩大以及发电厂技术的日益复杂，整个行业对标准化和定制化的高素质人才培训的需求显而易见。

本报告对是否有必要进行培训给出了明确建议。

可立即点击此处下载：<https://www.energyforum.in>

微信



网站

