# 火电机组
# 汽轮机深度调峰和灵活性改造
# 技术导则

（第一版）

联合发布单位 ： 哈尔滨电气集团有限公司

上海电气集团股份有限公司

中国东方电气集团有限公司

2018 年 10 月

# 目　录

1 汽轮机灵活性改造的背景及目标 ..... 1
1.1 灵活性改造的背景 ..... 1
1.2 灵活性改造的目标 ..... 1
2 灵活性运行对汽轮机的影响 ..... 2
3 灵活性运行的应对措施 ..... 2
3.1 静子部件结构优化 ..... 2
3.2 转子结构优化 ..... 3
3.3 汽轮机滑销系统优化 ..... 3
3.4 通流间隙优化 ..... 4
3.5 阀门结构优化 ..... 4
3.6 低负荷经济性优化 ..... 5
3.7 辅助系统优化 ..... 5
3.8 供热机组叶片优化 ..... 6
3.9 低压长叶片健康检测系统开发 ..... 6
3.10 供热机组深度调峰和灵活性改造方案 ..... 7
4 针对切缸供热的具体分析 ..... 8
4.1 切除低压缸供热的目的及优势 ..... 8
4.2 切缸引发的问题 ..... 8
4.3 针对切缸问题的应对措施 ..... 11
4.4 喷水系统优化 ..... 12
5 灵活性改造汽轮机改造范围 ..... 12
6 结论 ..... 13

# 1 汽轮机灵活性改造的背景及目标

## 1.1 灵活性改造的背景

2016 年 11 月 7 日，国家发改委、国家能源局正式发布《电力发展“十三五”规划（2016-2020 年）》，以下简称“《规划》”。为满足可再生能源的快速发展需要，提高可再生能源消纳能力，《规划》中“重点任务”明确加强调峰能力建设，提升火电运行灵活性是工作重点之一。“十三五”期间，热电联产机组和常规煤电灵活性改造规模分别达到 1.33 亿千瓦和 8600 万千瓦左右。当务之急是火电机组灵活性改造及深度调峰技术、深度调峰和快速变负荷改造技术的研究，为全面推动煤电机组灵活性改造，全面实施煤电机组调峰能力提升工程奠定基础。

哈尔滨电气、上海电气和东方电气对火电汽轮机组灵活性改造及深度调峰技术、深度调峰和快速变负荷改造技术开展了细致的研究。相关各项研究技术可一定程度上满足汽轮机组灵活性运行和深度调峰的需求，并依据专业独立性强和专业技术交叉等特点将各项研究技术分为几个部分予以阐述。

## 1.2 灵活性改造的目标

火电机组灵活性运行对机组提出了更高的要求，对纯凝机而言其中标志性的三个指标为快速启停、快速变负荷及深度调峰能力；对供热机组热电解耦是其运行灵活性的目标。

根据国内外机组灵活性运行的调研，初步确定了灵活性改造的目标。对于纯凝机组，机组的温态启动时间由目前的 4 小时降低到 2 小时，机组的变负荷速度由目前的 1%～1.5%/min 提高到 5%/min，机组的调峰深度降低至 20～25%额定负荷。对于供热机组，目标为热电解耦，目前没有真正实现，仅部分电厂实施了低压缸在线切缸运行，大幅提高了供热能力，同时机组电负荷大幅降低。

## 2 灵活性运行对汽轮机的影响

机组在上述目标状态运行时会带来各种问题，详见下图。这些问题必须通过实施通流及系统上的改造方能解决，才能保证机组安全稳定运行。

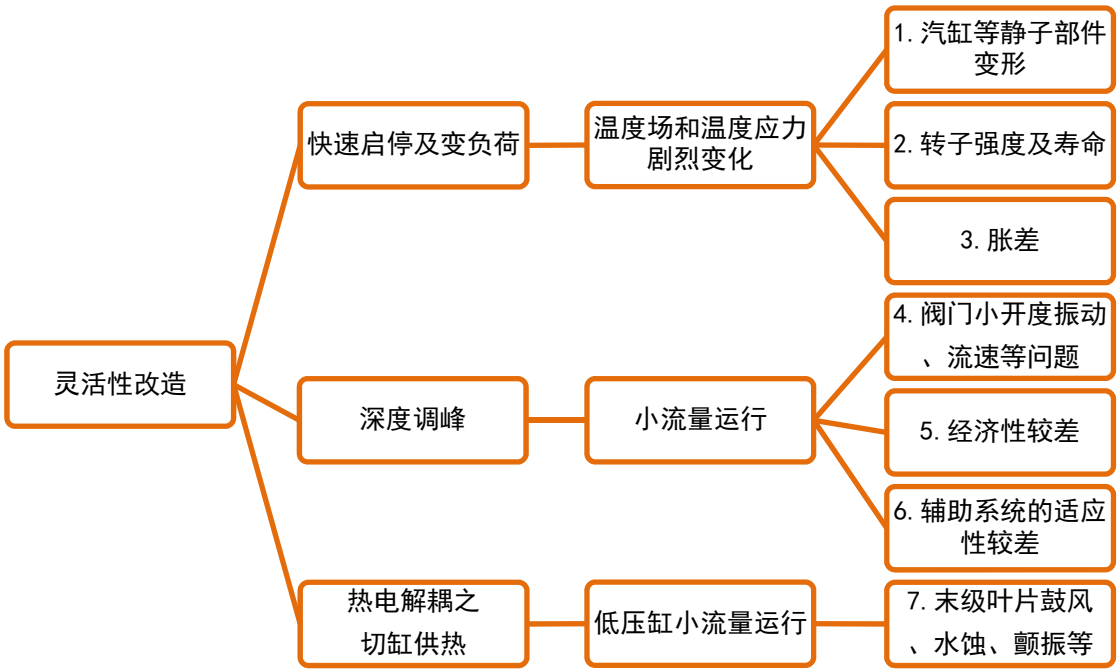


图 1. 灵活性对机组的影响

## 3 灵活性运行的应对措施

### 3.1 静子部件结构优化

汽轮机在快速启停及变负荷时，蒸汽参数变化幅度大，各静子部件处于非稳态运行，将会承受很大的热应力，容易导致变形漏汽。

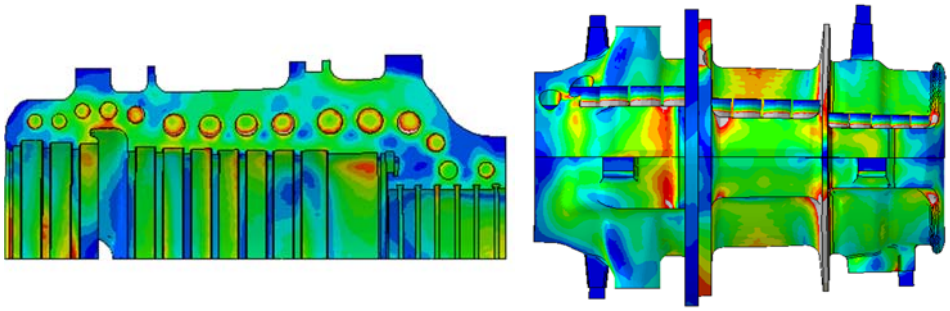

图 2. 高压内缸应力分析示意图

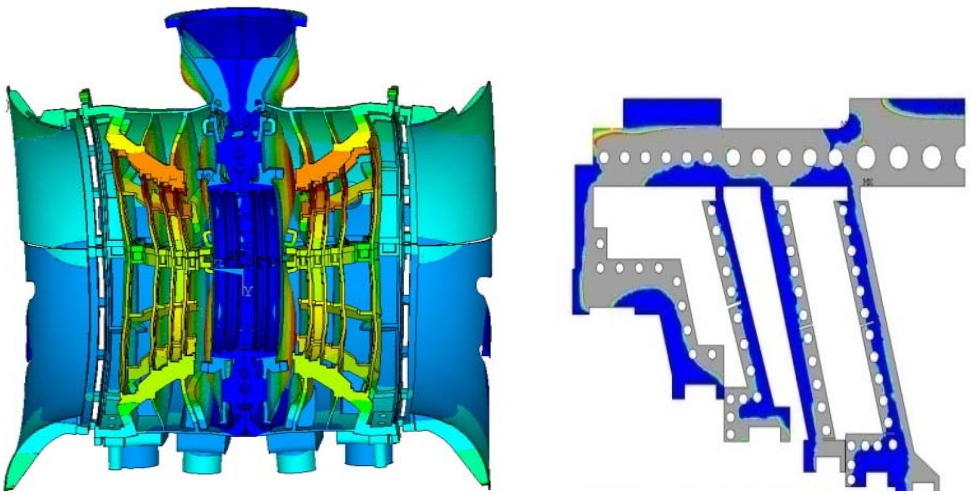

图 3. 低压内缸应力分析示意图

采用有限元软件对高中压内外缸及低压内缸等静子部件进行稳态和瞬态温度场及应力场分析，根据计算结果对部件的可用性进行评估，并提出运行建议及静子部件结构优化措施，尽量降低各部件在瞬态及稳态过程中的综合应力，能够实现适应快速升降负荷等复杂工况的要求。

### 3.2 转子结构优化

汽轮机转子在工作过程中，承受着蒸汽的高温、高压且高速运转，受到多种作用力，热应力和离心力起主要作用。汽轮机转子在快速启动、停机及变负荷等工况下，转子表面各参数的变化，使转子处于非稳态温度场，产生了更大的热应力和热变形，缩短了转子寿命。

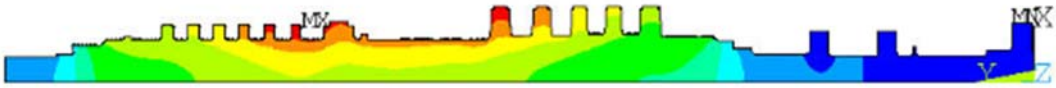

图 4. 转子温度场分析示意图

针对灵活性改造机组，转子处于更加复杂、恶劣的工作环境，需进行多项理论计算和分析研究。采用有限元法计算各种不同工况的蒸汽初参数、启动及变负荷温升率组合下的转子应力，对转子结构进行优化，通过采用轮盘根部大直径、双圆角过渡等措施从而有效降低转子热应力，减少转子快速启停时的寿命消耗。

### 3.3 汽轮机滑销系统优化

针对机组快速启停要求，为防止机组因频繁启停而引起滑销系统卡涩，导致

膨胀不畅而引发动、静碰磨，应根据实际情况，对滑销系统优化，非自润滑形式（如注油脂结构）改为自润滑型式。

### 3.4 通流间隙优化

#### 3.4.1 轴向间隙

机组在快速启动时，由于升温率较快，机组胀差较之前会有所增大，增加轴向碰磨的风险。

为满足机组灵活性改造需求，需对轴向间隙进行优化处理，保证在尽量不牺牲机组经济性的情况下满足安全运行要求。

#### 3.4.2 径向间隙

机组在快速启动及变负荷时，由于动静部件材质和受热速率差异，会造成径向间隙发生变化。

需采用特殊汽封，保证良好的退让性和耐磨性，防止汽封间隙因磨损迅速增大而影响经济性。

### 3.5 阀门结构优化

#### 3.5.1 高压调节阀

在低负荷下，由于机组进汽量较小，阀门调节性能、流速、阀杆振动等因素会受影响。需进一步研究阀门结构及配汽方式，必要时需更换阀碟阀座。

#### 3.5.2 中联阀

在低负荷下或考虑汽机侧供热等可能出现的情况，中联阀很有可能需要参与调节，目前部分机组的中联阀并不具备此功能。需考虑更换新的具有一定调节能力的中联阀。

## 3.6 低负荷经济性优化

### 3.6.1 配汽运行优化

分析优化在役机组喷嘴结构，降低压损及出口流场均匀度，有效提高调节级级段效率。

但在低负荷工况下仍不可避免地需要节流，为最大化提高低负荷工况下的经济性需对配汽方式进一步优化。

### 3.6.2 热力系统优化——增加零号高加

增加零号高加是指在 1 号高加之前增设一个高加，在低负荷下从汽轮机抽取高压蒸汽加热给水，以提高低负荷下机组的给水温度，即可以提高机组在该工况下的循环效率，亦可以提高脱硝装置中催化剂的活性，从而实现机组回热系统在低负荷下保持高效。

### 3.6.3 高效宽负荷叶型开发

需采用先进的、工况适应能力强的新叶型，改善攻角适应性，提高变工况性能。

## 3.7 辅助系统优化

### 3.7.1 疏水系统

机组灵活性改造后可能长期处于低负荷工况下运行，根据原设计逻辑，高、中、低压疏水阀分别将于机组 30%、20%、10%负荷工况打开，在此工况下长期处于疏水阀打开状态，将影响机组的经济性。需对疏水阀的开启逻辑进行优化。

### 3.7.2 汽封系统

机组灵活性改造后汽封系统将长期处于非自密封状态运行，需保证参数合适且稳定的辅助蒸汽长期供汽以满足机组轴封要求。

另外，在低负荷下，汽封加热器冷却水量可能不满足设计最低水量要求，此

时需开启凝结水再循环，以保证轴封系统正常投入，建立真空，或者重新设计一套汽封加热器以满足小流量工况运行。

### 3.7.3 凝汽器

灵活性改造后机组可能长期处于低负荷状态，凝汽器可以采用以下两种运行方式：

1、半侧运行

2、小水量运行：需对低流速下管侧结垢的解决方案进行研究。

采用何种运行方式需联合水工专业共同进行评估选择最优的方案。

## 3.8 供热机组叶片优化

针对供热机组，在汽机方面目前较为流行的方案是切除低压缸供热，在供热量一定时相比之前能减少发电量。由于低压缸进汽量很少，小于末两级叶片的最小冷却流量，故末两级叶片运行时处于鼓风状态，其工作温度上升剧烈，造成叶片、转子许用强度降低，同时，低压喷水一直开启,由于蒸汽卷吸作用会造成末级叶片出汽边水蚀。另外，在小流量下叶片还可能出现颤振等问题。

针对上述影响，需采用优化的末级、次末级叶片，使其在高温下也能满足强度要求，同时具备良好的抗水蚀性能。另外还需精确分析小流量下叶片可能出现的颤振点，运行时注意避开。

由于中排抽汽供热量增加，需对中压末几级叶片加强，保证抽汽工况中压末几级叶片强度。

## 3.9 低压长叶片健康检测系统开发

汽轮机末级长叶片是影响汽轮机组安全运行的关键部件。在火电机组灵活性及深度调峰的要求下，面临诸如叶片材料性能、叶片气动设计和安全可靠性等诸多挑战。影响叶片安全运行的主要因素有：频率、蒸汽参数、真空、变化速率、轴系扭振等。这些因素如果叠加，对末级叶片安全运行构成的影响将是致命的。

因此，开发低压长叶片监测系统对火电机组深度调峰及灵活性改造后的安全运行有着至关重要的意义。

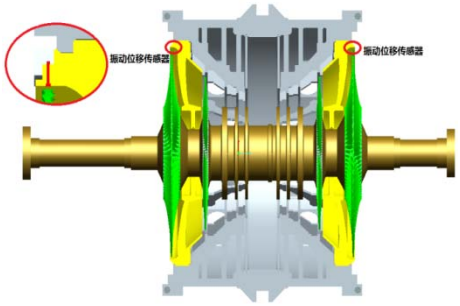


图 5. 叶片周向振动位移传感器安装位置

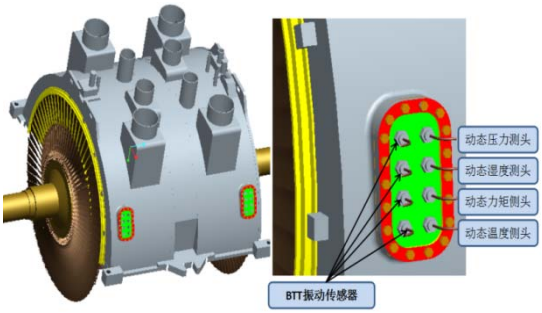


图 6. 叶片监测系统传感器布置示意图

### 3.10 供热机组深度调峰和灵活性改造方案

针对供热机组，大部分机组采用“以热定电”的方式运行，在热负荷需求一定时，机组变负荷能力较差。对于汽轮机来说，提高供热机组供热期灵活性的主要方式就是实现低负荷供热，即在保证供热量不变的情况下，降低机组电负荷。

低负荷供热的主要方案：

1、低压光轴方案

**优势：**方案成熟，具有较多实际工程经验；在供热期量相同时，采用该方案改造后较改造前出力减小，增加调峰深度；改造后机组最大供热量较改造前增加显著，供热经济性好。

**不足：**每年需进行两次检修，更换低压转子，增加电厂检修工作量；供热期最大发电能力降低。

2、低压缸切缸方案

**优势：**操作简单；在供热期量相同时，采用该方案改造后较改造前可减少电负荷，增加调峰深度；改造后机组最大供热量较改造前增加显著，供热经济性好。

**不足：**此技术仅对个别机组进行了一部分低压切缸试验的研究工作，未经过长期运行试验验证，尚存在一定安全风险。

3、再热热段抽汽供热方案

**优势：**改造相对简单，投资较小。

**不足：**由于该方案将高品质的蒸汽直接去供热，供热经济性差。

# 4 针对切缸供热的具体分析

## 4.1 切除低压缸供热的目的及优势

目的：最大程度增加中排供热量。

优势：

1、较常规中排供热方式供热量增大，约 90t/h 左右（300MW 机组）。

2、改造方案简单，工期较短。若不改造低压缸，施工工期约 1 个月，可平行施工。

3、改造成本低。

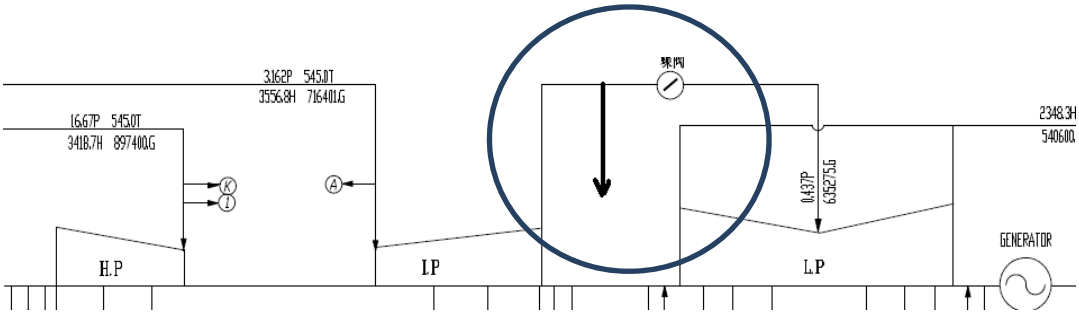


图 7. 切缸供热系统示意图

## 4.2 切缸引发的问题

切缸供热运行相对于别的供热改造来说优势是明显的，但是切缸运行自身引发的问题也是不可忽视的。

**切缸引发的主要问题是：**

a) 叶片水蚀

b) 叶片颤振

c) 叶片强度（动应力）

d) 转子轮缘强度

### 4.2.1 动叶出汽边水蚀

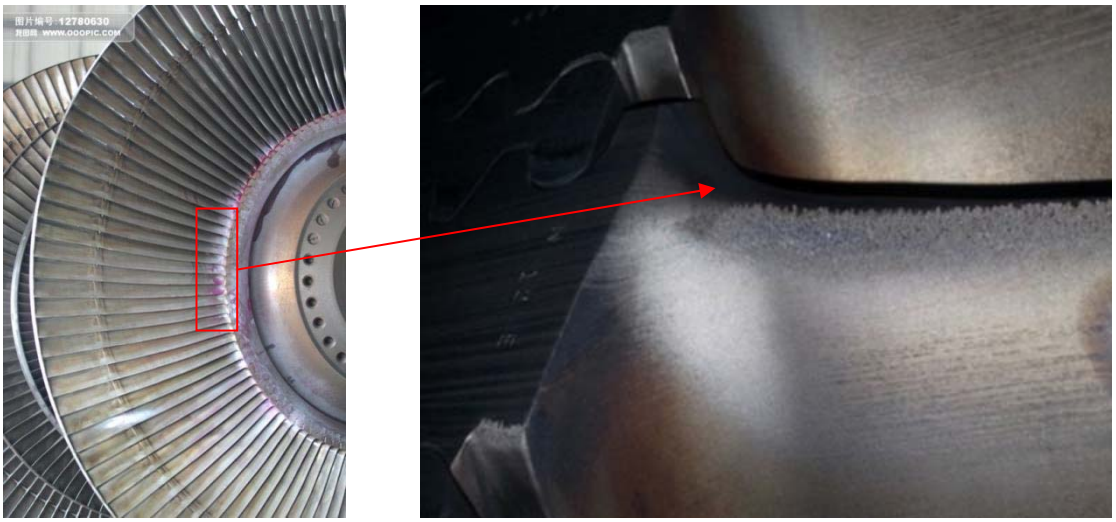

图 8. 末级动叶出汽边水蚀示意图

切缸运行时，由于喷水长期投入，在小流量情况下流道中下部会形成回流漩涡，易导致叶片动应力增加，湿气侵蚀叶片中下部出汽边，不利于叶片安全运行。

### 4.2.2 长叶片颤振风险

低负荷、高背压运行工况的运行安全性是末级叶片设计的一个关键点。小容

积流量工况下，末级动叶进口大负攻角引起大尺度分离诱导产生自激振动，导致动应力水平突增，发生颤振。

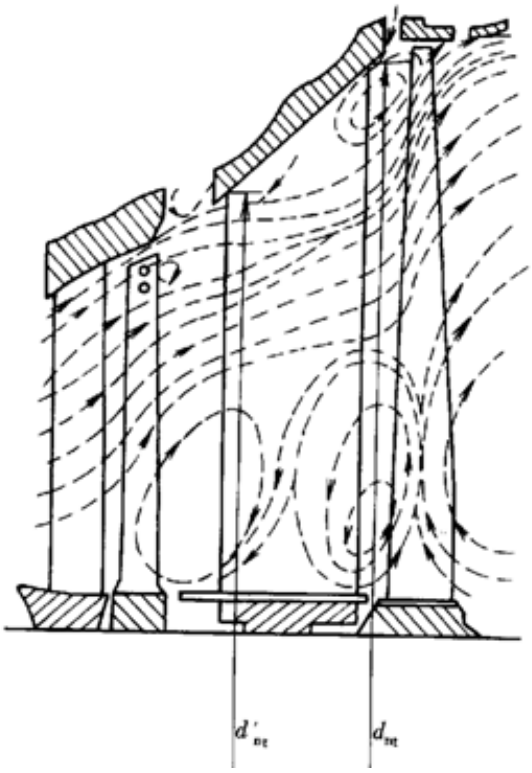

图 9. 小容积流量下流场示意图

### 4.2.3 转子强度风险

当低压末级根部级间温度达到 160℃左右时（切缸时），会降低低压末级转子轮缘处最大拉应力安全系数，且由于低负荷工况喷水回流造成的转子轮缘水蚀进一步降低末叶根部轮缘强度，为此，需进行全面评估。

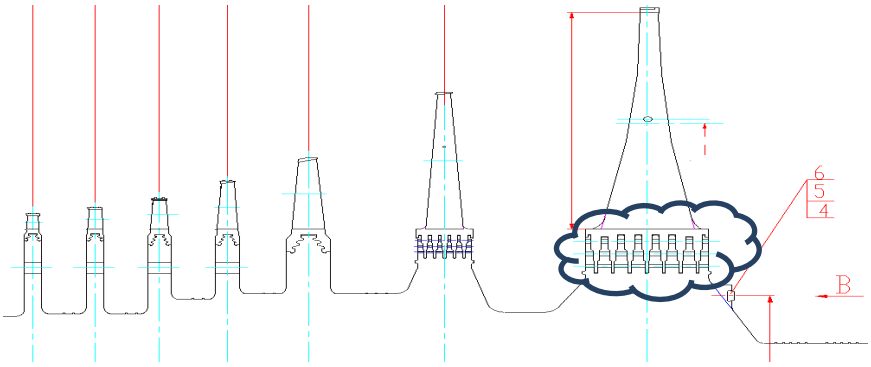


图 10. 转子强度风险点示意图

### 4.3 针对切缸问题的应对措施

#### 4.3.1 防水蚀涂层

图 11. 汽轮机末级叶片回流区防水蚀涂层建议喷涂区域

由于末级叶片叶根回流区的出汽边沿很薄，且受力较大，需做防水蚀处理。

#### 4.3.2 末级叶片健康在线监测系统

末级叶片健康在线监测系统的总体设计目标是通过对末级叶片周向振动位移、机组运行背压、转速、轴系不平衡力矩、末级次末级叶片工作湿度及工作温度和发电机三相电压、电流等相关数据进行连续、在线监测，对叶片的健康寿命状态进行实时评估。

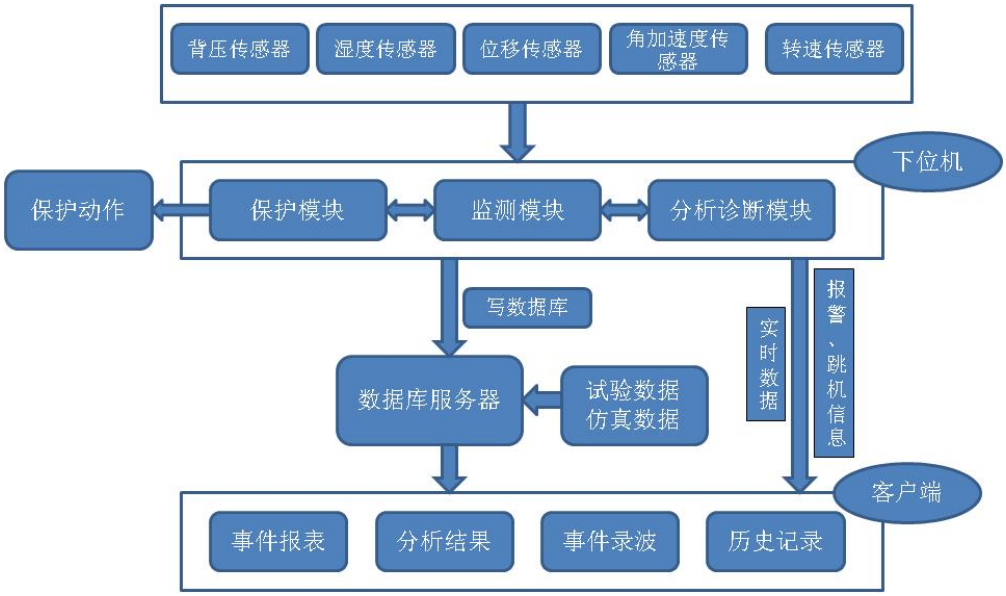


图 12. 末级叶片健康在线监测系统

#### 4.3.3 采用新型的末级叶片

为进一步满足切缸供热运行工况的需求，还需在现有基础上进行末叶优化，主要目的是降低其运行时的动应力水平，减小其离心力以及评估颤振情况等。

### 4.4 喷水系统优化

根据机组实际运行情况，为防止低压缸鼓风发热导致的轴系标高变化，应考虑增加喷水量以控制运行时超温。

## 5 灵活性改造汽轮机改造范围

为提高火电机组的灵活性，需对汽轮机进行改造，改造范围如下表。

表 1. 汽轮机改造范围

| 改造部件 \ 改造目标 | | 深度调峰 | 快速启停/升降负荷 | 低负荷经济性 | 切缸供热 |
|---|---|---|---|---|---|
| 阀门部分 | 高压主汽调节阀（整体或阀芯） | ◐ | ◐ | ◐ | ○ |
| | 中压联合汽阀（整体或阀芯） | ◐ | ◐ | ◐ | ○ |
| 高压部分 | 高压外缸 | ◐ | ◐ | ● | ○ |
| | 高压内缸 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 高压转子 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 高压动叶片 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 高压隔板 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 高压汽封体 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 高压汽封圈 | ◐ | ● | ● | ○ |
| 中压部分 | 中压外缸 | ◐ | ◐ | ◐ | ○ |
| | 中压内缸 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 中压转子 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 中压动叶片 | ◐ | ● | ● | ● |
| | 中压隔板 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 中压汽封体 | ◐ | ● | ● | ○ |
| | 中压汽封圈 | ◐ | ● | ● | ○ |
| 轴承箱 | 轴承箱基架 | ◐ | ● | ◐ | ○ |

| 改造部件 \ 改造目标 | | 深度调峰 | 快速启停/升降负荷 | 低负荷经济性 | 切缸供热 |
|---|---|---|---|---|---|
| 低压部分 | 低压外缸 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 低压内缸 | ◐ | ◐ | ● | ◐ |
| | 低压转子 | ◐ | ◐ | ● | ◐ |
| | 低压动叶片 | ◐ | ◐ | ● | ● |
| | 低压隔板 | ◐ | ◐ | ● | ◐ |
| | 低压汽封体 | ○ | ○ | ● | ○ |
| | 低压汽封圈 | ○ | ○ | ● | ● |
| | 连通管 | ○ | ○ | ○ | ● |
| | 低压缸喷水系统 | ◐ | ○ | ○ | ● |
| 辅机部分 | 疏水系统 | ◐ | ○ | ○ | ○ |
| | 轴封系统 | ◐ | ○ | ○ | ○ |
| | 凝汽器 | ◐ | ○ | ○ | ○ |
| 系统部分 | 零号高加 | ○ | ○ | ● | ○ |
| | 供热系统 | ○ | ○ | ○ | ● |

注：　●表示改造必须更换的部件；

◐表示根据实际情况评估后或根据具体实施方案确定是否更换；

○表示无特殊要求可不更换的部件。

## 6 结论

**火电机组灵活性运行是国家能源行业发展的大趋势，不可逆转，根据地区和电厂自身需求的差异，不同的电厂有不同灵活性改造需求。根据电厂的不同需求，针对性作出应对方案，实现一厂一策，从而满足灵活性改造市场的要求。**

（全文完）