

# 火电机组旋转设备 智能预警诊断系统

诚信 / 务实 / 创新 / 共赢

火电厂三大主机和各类辅机中旋转机械设备种类和数量繁多，各类设备故障时有发生，基于行业普遍认识 and 实际工程经验等的不完全统计，在各类旋转机械设备发生过的故障中，由于**振动异常**导致的故障占比达到了70%左右，一旦发生故障引起设备停机，极易造成电厂非计划停运。如何针对设备振动异常进行早期预警和诊断，也是行业内设备故障诊断的研究重点方向。

### 火电机组旋转机械分类及常见故障

汽轮机

发电机

汽动泵机

磨煤机

一次风机

送风机

引风机

给水泵

循环水泵

凝结水泵



学术研究和报告

行业共识和普遍认识

实际工程经验

转子不平衡

故障占比33%

振动故障

故障占比70%

旋转机械故障

准确性

实时性

远程监控

非破坏性

智能化诊断

广泛应用性

振动诊断优势

6

1

5

2

4

3

# 1

## 背景分析

## 传统预警诊断方式

传统旋转设备运行维护过程中发现设备故障的方式主要有三种，第一是靠日常巡点检的听、摸、看等手段来判断旋转设备运行的状态好坏；后经国内外的机械专家和设备管理人员经过多年研究，业内目前采用了振动分析系统(TDM)通过监测信号对主机设备进行故障检测，通过监测信号的变化情况可在故障早期进行判断；第三是通过日常DCS运行监盘，通过监测参数变化情况判断设备运行状态。

### 日常巡点检

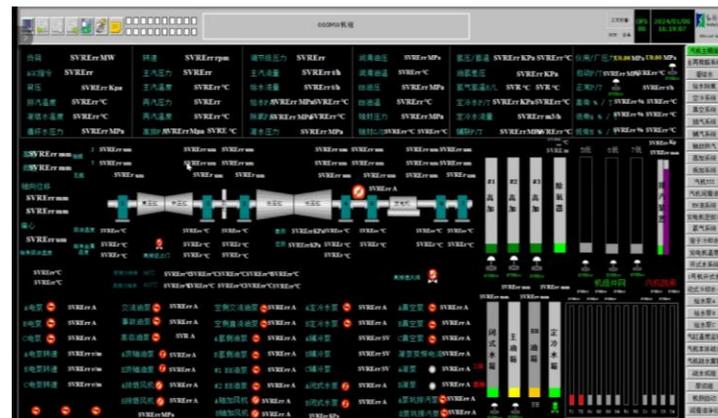
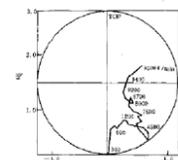
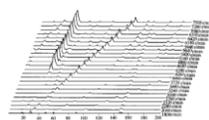
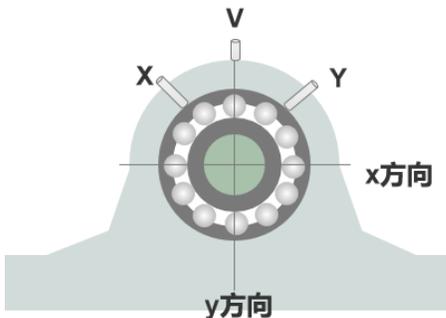
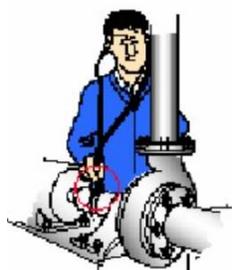
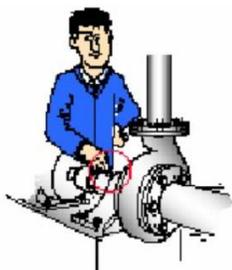
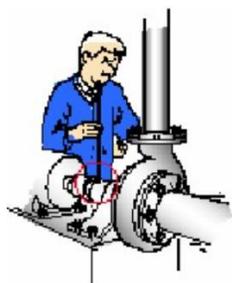
### 旋转机械故障诊断系统(TDM)

### 集散型控制系统(DCS)

看

摸

听



电流

温度

振动

感性判断

监测信号判断

经济性

时效性

专业性

准确性

# 1

## 背景分析

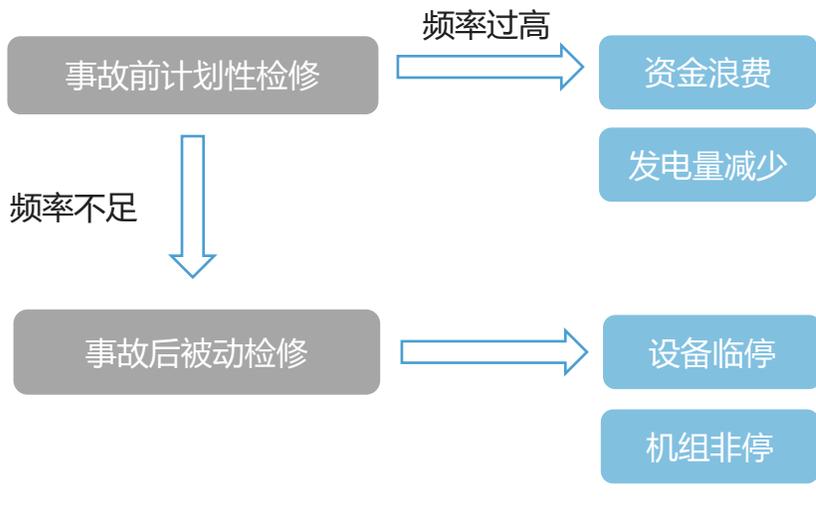
## 传统方式存在问题

故障表象较为明显时才能通过**人工巡检**发现故障，滞后性较强，易导致被动停机检修；当前厂里常见专业的**旋转机械故障诊断系统(TDM)**存在专业性要求高、覆盖面不全、无法给出具体指导建议等问题；而**DCS运行监盘**对人员专业性要求高、数据查询对比不方便，且DCS诊断故障迟滞性高，对于设备异常早期的指标微小变化无法敏感识别。

### 日常巡点检

#### 滞后性较强

往往都是在故障表象较为明显时才能通过人工巡检发现故障；滞后性较强，易导致被动停机检修



经济性

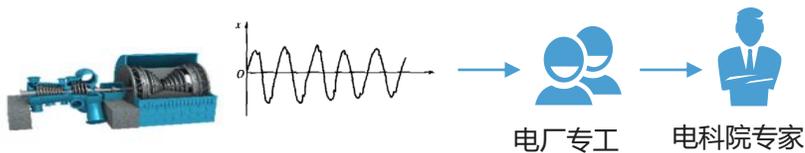
### 旋转机械故障诊断系统(TDM)

#### 数据分析专业性要求高

当前电厂TSI或者是TDM系统，多数能基于振动信号状态生成一系列专业图形，需要电科院专家分析判断故障原因

#### 数据分析准确性不高

基于人工经验诊断的方式准确性不够，往往需要长时间监控判断或停机检修时进行拆卸诊断



#### 监测系统覆盖面不全

目前多数电厂的旋转设备故障诊断系统均只覆盖汽轮机、发电机组，对于辅机设备最多会加装传感器接入DCS系统

#### 监测系统无运行指导

市面同类产品多数没有运行指导建议，无法给运行人员提供专业的故障问题解决指导

时效性

### 集散型控制系统(DCS)

#### 专业性要求高

需要长时间观测根据参数变化情况判断，终的故障诊断和处理仍然需要依赖于操作人员的经验，对人员专业性要求高，

#### 诊断迟滞性高

DCS运行监盘时往往关注指标超限告警情况，对于设备异常早期的指标微小变化无法敏感识别



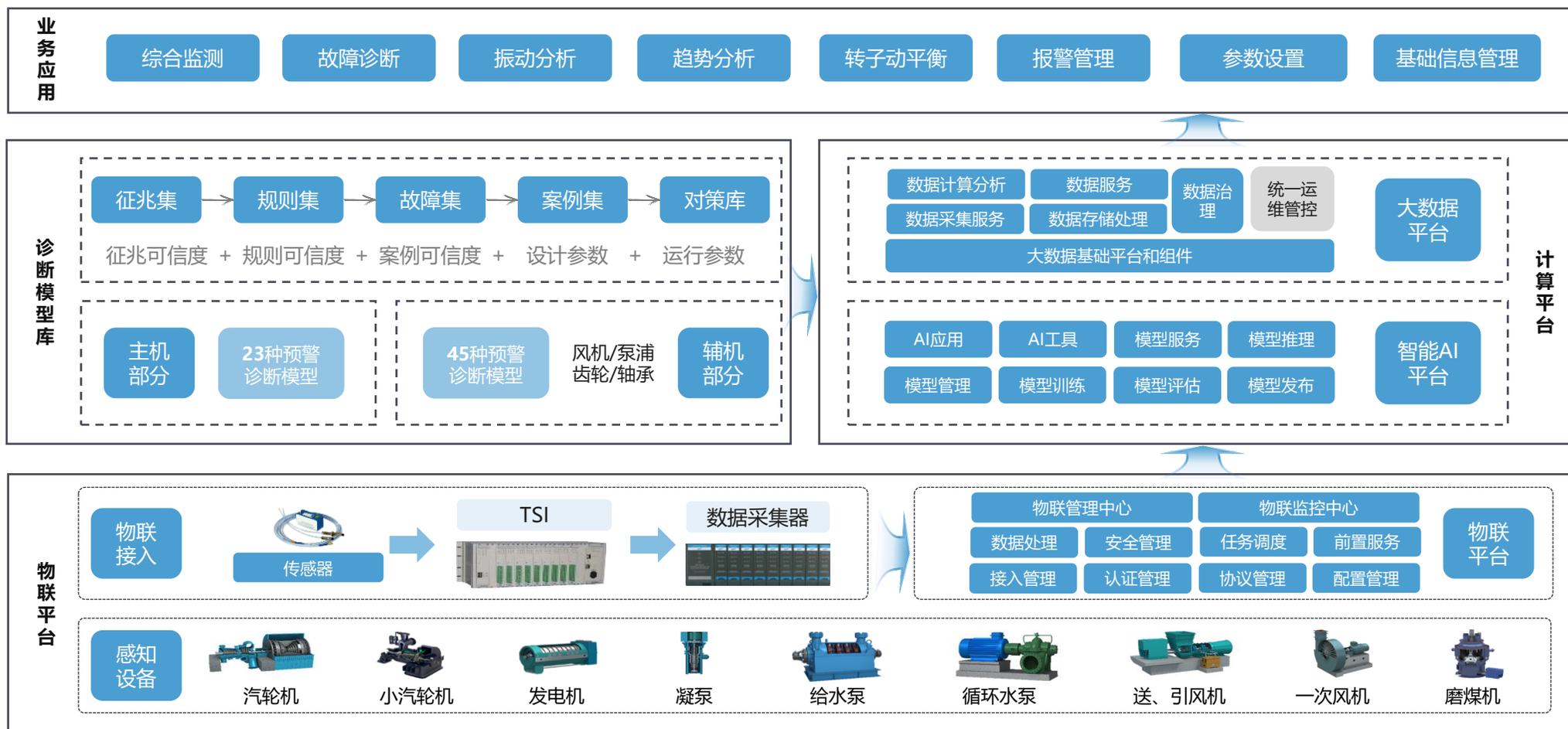
准确性

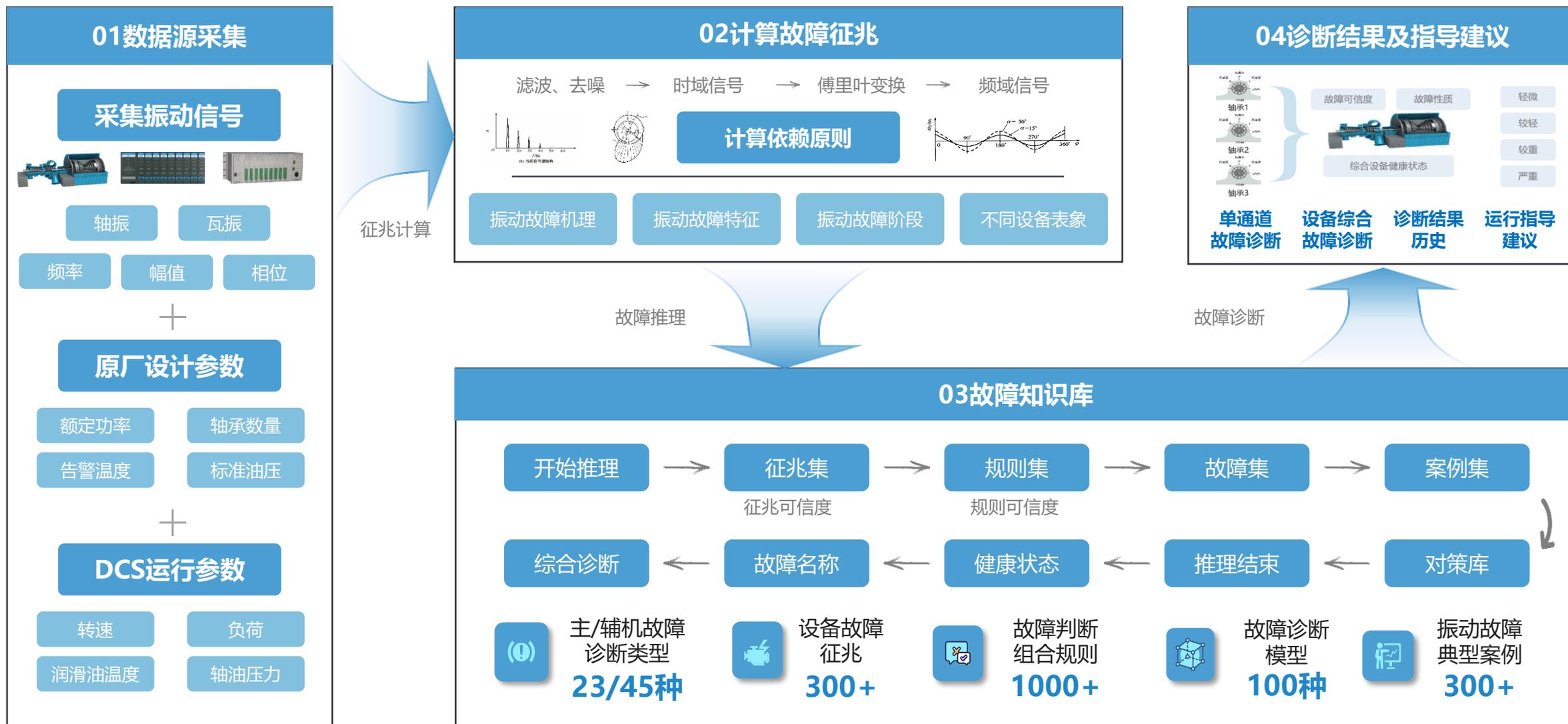
专业性

本系统基于**物联网技术**，实时监测火电厂旋转设备振动信号，包括汽轮机、发电机等主机设备及风机、泵浦等主要辅机设备；汇集主辅机设备振动信号，利用**机器学习**和**人工智能技术**，实时计算各通道故障征兆；结合专家多年研究成果构建的**智能故障诊断知识库**，实现**精准诊断主辅机旋转设备的振动故障**；最终达到超前预警、实时诊断、提升电厂设备故障预警诊断分析能力的目标。

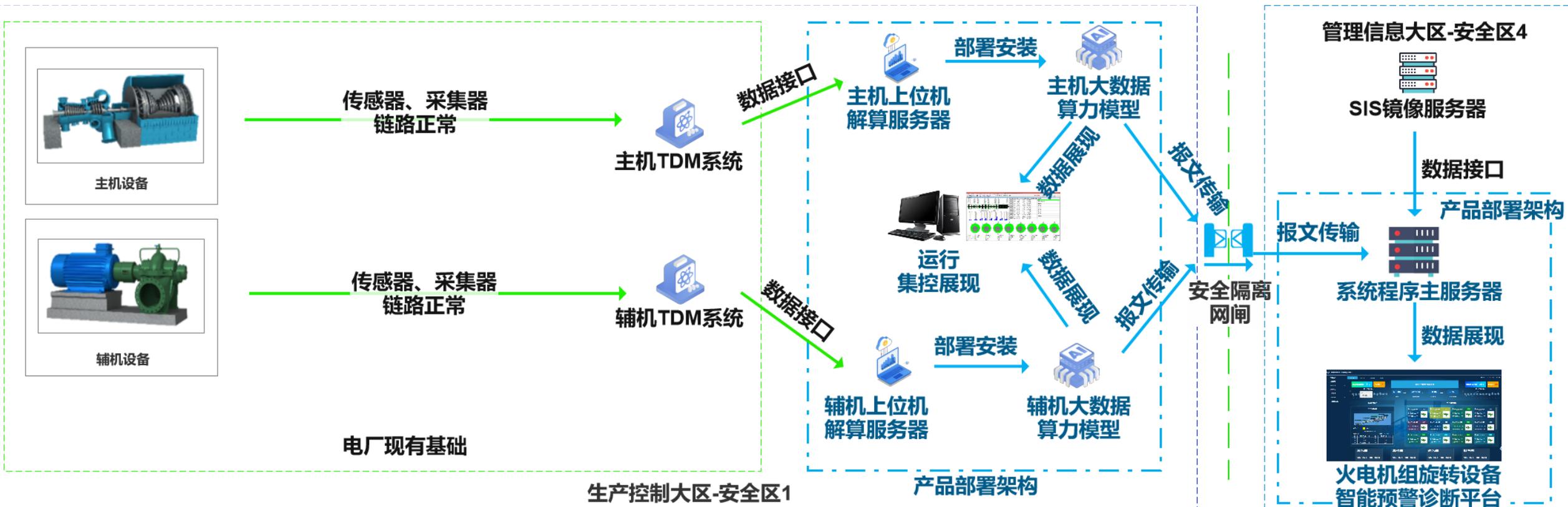


系统体系架构自下而上分为**物联平台层**、**计算平台层**、**诊断模型库**以及**业务应用层**，利用**物联接入技术**对主辅机设备进行振动信号采集，结合**大数据平台计算**和**智能AI平台计算**技术，通过对**诊断模型库**进行推理匹配，实现对设备数据的采集、处理、存储和业务建模，利用**信息化技术平台**搭建智能预警诊断系统及其业务应用，提升电厂智能预警、诊断、分析、评价能力。



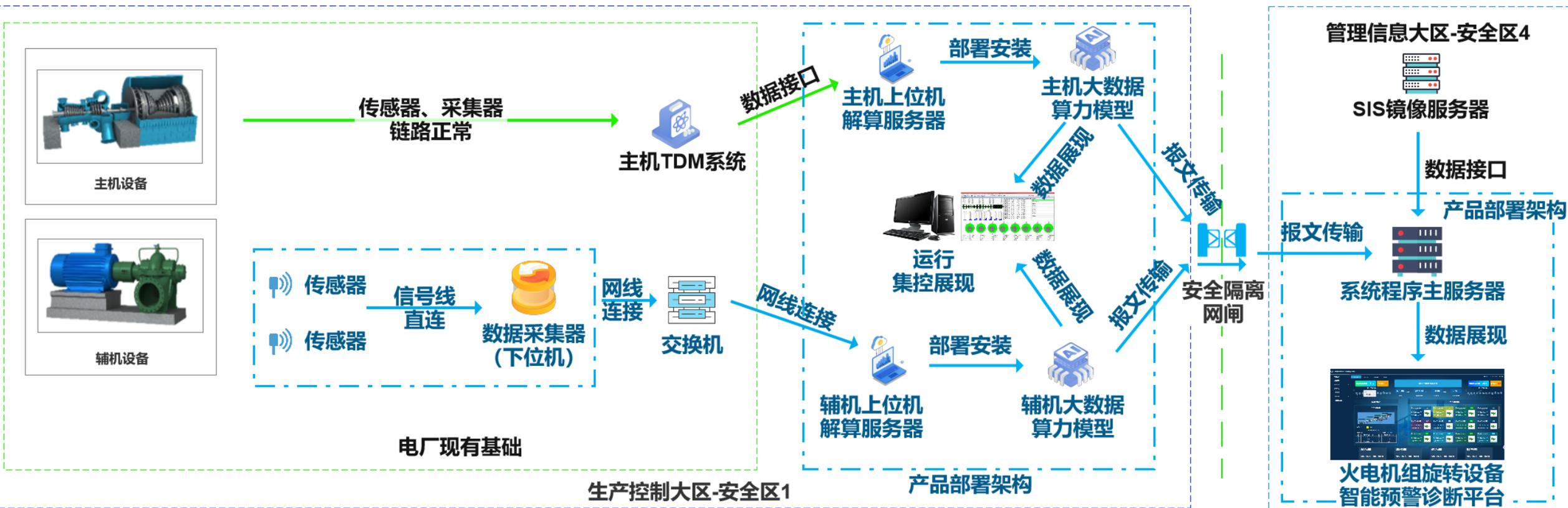


本系统支持灵活的部署架构，根据电厂现有基础不同，采用不同的数据采集方案；方案1：如电厂现有TDM条件可满足主机和辅机的数据采集监控，则可以简单的**通过现有TDM系统接口获取振动信号数据**，将采集到的数据通过上位机结算服务器进行大数据算力模型计算，计算结果可分区综合展现。



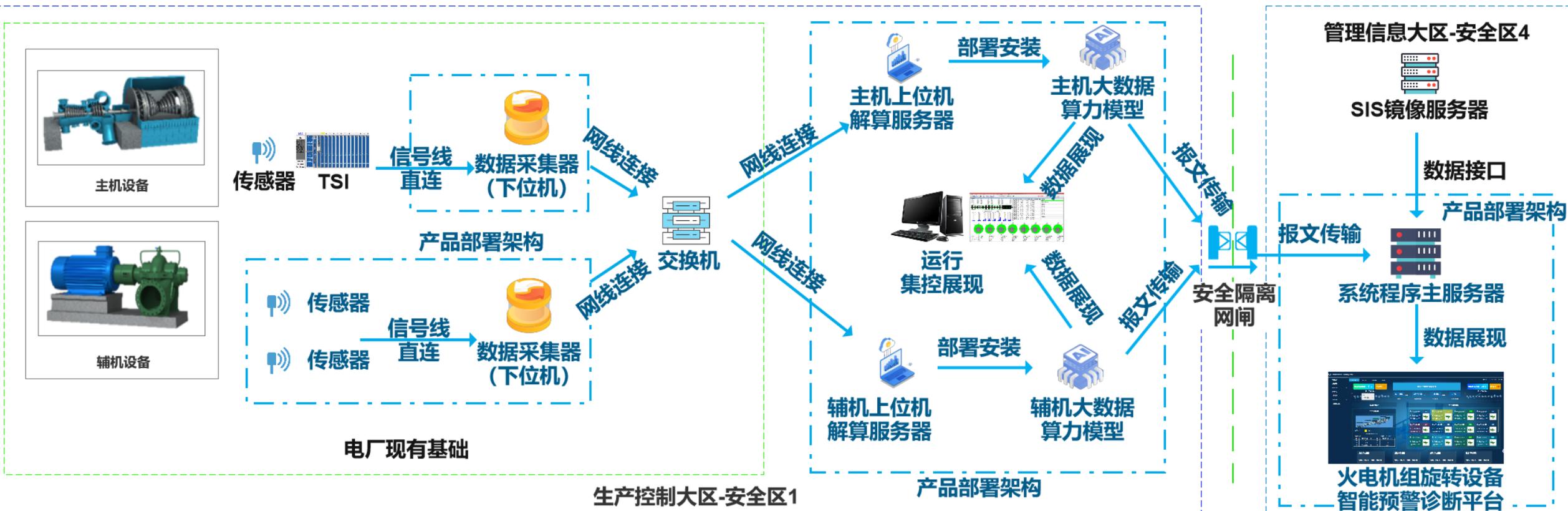
蓝色点划线框选区域为本平台部署架构

本系统支持灵活的部署架构，根据电厂现有基础不同，采用不同的数据采集方案；方案2：如电厂现有TDM条件仅覆盖主机设备，则除数据接口获取TDM数据外，可在辅机设备安装传感器自行搭建一条数据采集链路，将采集到的数据通过上位机结算服务器进行大数据算力模型计算，计算结果可分区综合展现。



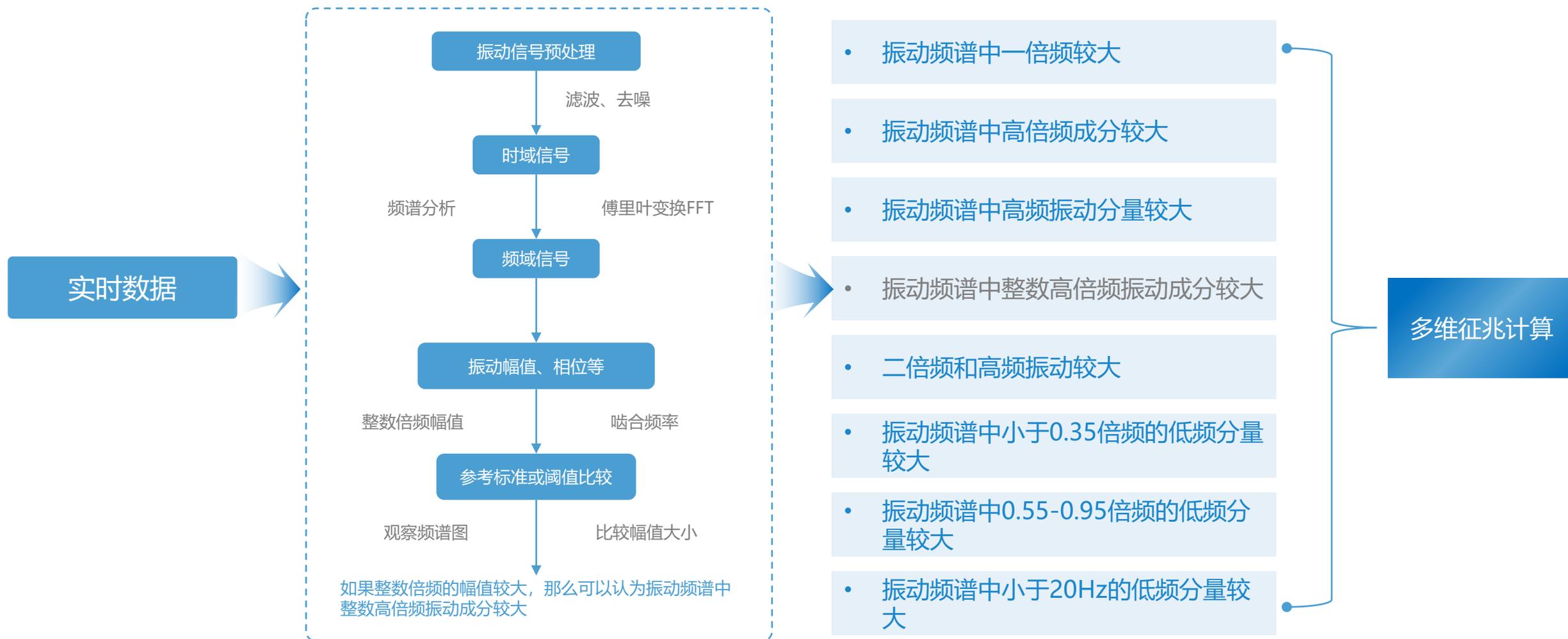
蓝色点划线框选区域为本平台部署架构

本系统支持灵活的部署架构，根据电厂现有基础不同，采用不同的数据采集方案；方案3：如电厂建设年限较久，原有TDM系统已无法满足取数需求，则可以在**主机设备替换原有TDM系统**、**辅机设备加装传感器自行搭建数据采集链路**；将采集到的数据通过上位机结算服务器进行大数据算力模型计算，计算结果可分区综合展现。



蓝色点划线框选区域为本平台部署架构

**征兆**是指机组出现异常时的现象，从故障诊断的角度来说，分辨征兆是有助于判断设备存在何种故障。以振动频谱中整数高倍频振动成分较大为例，将获取到的实时数据进行滤波去噪处理，并将时域信号转换为频域信号，通过频谱分析基频和整数倍频（如2倍频、3倍频）的振动幅值相位等数据，结合标准阈值计算，平台判断当前监测通道是否出现故障征兆。



根据专家多年诊断经验，对各类设备出现不同故障时的不同现象进行总结积累，形成一系列征兆；由于不同类型的旋转机械，故障的机理和特征有较大区别，且不同的故障可能具有相同的征兆，因此平台充分考虑到**故障诊断的需要、诊断部位的差别、故障的类型、故障的不同阶段、复合故障的相互影响**，对不同设备不同监测位置计算征兆可信度，最终形成设备全系列的**征兆库**。

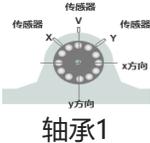
## 征兆集

- 振动频谱中一倍频较大
- 振动频谱中高倍频成分较大
- 振动频谱中高频振动分量较大
- 振动频谱中整数高倍频振动成分较大
- 二倍频和高频振动较大
- 振动频谱中小于0.35倍频的低频分量较大
- 振动频谱中0.55-0.95倍频的低频分量较大
- 振动频谱中小于20Hz的低频分量较大

## 多设备多通道



汽轮机

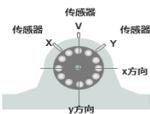


轴承1

#1轴振X

#1轴振Y

#1瓦振V

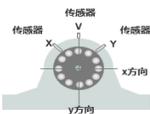


轴承2

#2轴振X

#2轴振Y

#2瓦振V



轴承3

#3轴振X

#3轴振Y

#3瓦振V

## 计算征兆可信度

名称	可信度
振幅较大	$1.5 * 157 * 157 / (157 * 157 + 1 * 125 * 125 + 0.1) = 0.92$
振动频谱中二倍频较大	0
振动频谱中(0.35-0.48)倍频的低频分量较大	0
振动频谱中1/2倍频的低频分量较大	0
振动频谱中高频成分较大	0
振动频谱中非整数倍高频分量较大	$0.5 * 0.2 / 152.6 = 0$
振动频谱中分数谐波较大	0
振动以一倍频为主	$1.1 * 152.6 / (157.3 + 0.1) = 1.07$

诊断结果列表 (实时数据)	正常
15 4#V1	正常
16 4#V2	正常
17 5#X	质量不平衡: CF=0.72, R16
18 5#Y	质量不平衡: CF=0.58, R21
19 5#V1	质量不平衡: CF=0.59, R17
20 5#V2	质量不平衡: CF=0.59, R17
21 6#X	正常

不同部位

不同类型

不同阶段

相互影响

系统模拟人工诊断设备故障的流程，基于不同故障出现时会产生多种不同征兆现象的原理，根据当前征兆来推理可能发生何种故障，称为**基于故障因果关系的规则诊断**。一个设备类型会对应多个故障名称，每个故障可能对应多条诊断规则，最终形成一个**规则库**；此种诊断方式能准确地反映专家处理实际问题的整个思维过程，确切地表达事物的因果关系。

## 诊断规则

故障1

故障...

发生时会出现

发生时会出现

征兆1

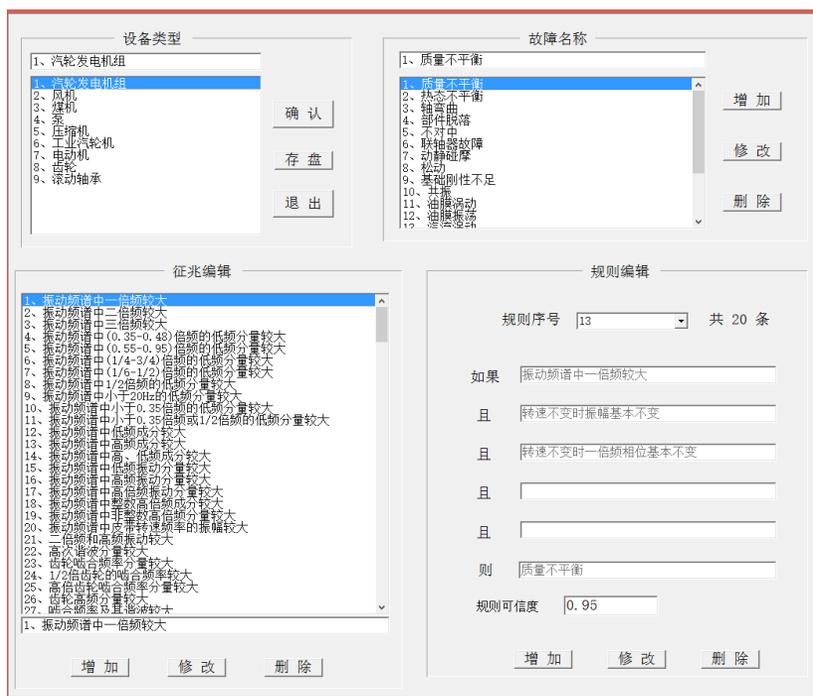
征兆1

+  
征兆2+  
征兆2+  
征兆3+  
征兆3

可能性是XX

可能性是XX

## 多规则组合



## 故障诊断规则示例

如果 振动频谱中一倍频较大  
且 转速不变时振幅基本不变  
且 转速不变时相位基本不变  
则 质量不平衡

如果 转速接近机组额定转速  
且 顶隙率较大的转子振动较大  
则 轴系对中不良

如果 盘车过程中晃度逐渐下降  
则 转子存在热弯曲

如果 振动频谱中一倍频较大  
且 转速不变时振幅逐渐变化  
且 转速不变时一倍频相位逐渐变化  
则 动静碰摩

如果 振动频谱中(0.6-0.9)倍频的低频分量较大  
且 诊断部位是高(中)压转子  
且 负荷变化，振动改变  
则 汽流激振

如果 振动频谱中非整数高频分量较大  
则 非真实转子振动

通过多年**旋转机械振动故障机理研究**发现，对于大量同类设备，**出现相似故障**的可能性达到80%以上；本系统利用基于故障诊断规则和故障案例相结合的方法，可以更准确的诊断设备故障。如果基于规则和基于案例推理的诊断结果的准确率分别达到80%以上，则混合推理的诊断结果的**准确率可以达到96%以上**。

### 案例相似度计算示例

- 1、案例库中某个案例的征兆： $CS_1, CS_2, \dots, CS_m$ ，表示该案例有  $m$  个征兆；
- 2、该案例每个征兆的权值： $CS_{w1}, CS_{w2}, \dots, CS_{wm}$ ，并且  $\sum_{j=1}^m CS_{wj} = 1$
- 3、目标案例的征兆： $DS_1, DS_2, \dots, DS_n$ ，表示目标案例有  $n$  个征兆，一般情况下， $n \neq m$ ；
- 4、该案例每个征兆的权值： $DS_{w1}, DS_{w2}, \dots, DS_{wn}$ ，并且  $\sum_{j=1}^n DS_{wj} = 1$
- 5、设目标案例与案例库中某个案例有  $k$  个相同的征兆，则相同征兆的相似度计算：

$$S_{wi} = 1 - |CS_{wi} - DS_{wi}|, i = 1, 2, \dots, k$$

- 6、案例相似度的计算：

$$S_c = \sum_{i=1}^k S_{wi} \times |CS_{wi} + DS_{wi}| / 2$$

权值的归一化处理

设有  $n$  个征兆，每个征兆的权值是  $w_i$ ，所有征兆的权值之和是  $w$ ，则归一化处理后每个征兆的权值为  $w_i/w$ 。

例如：某目标案例出现 4 个征兆，得到如下表格：

序号	征兆名称	征兆值	征兆可信度	固定权值	归一化权值
1	振动频谱特征	一倍频较大	0.75	0.30	0.578
2	转速不变时振幅趋势特征	稳定	0.87	0.15	0.288
3	轴心轨迹形状	椭圆形	0.93	0.02	0.038
4	振动发生时转速	2 倍一阶临界转速以上	1.0	0.05	0.096
合计				0.52	1.0

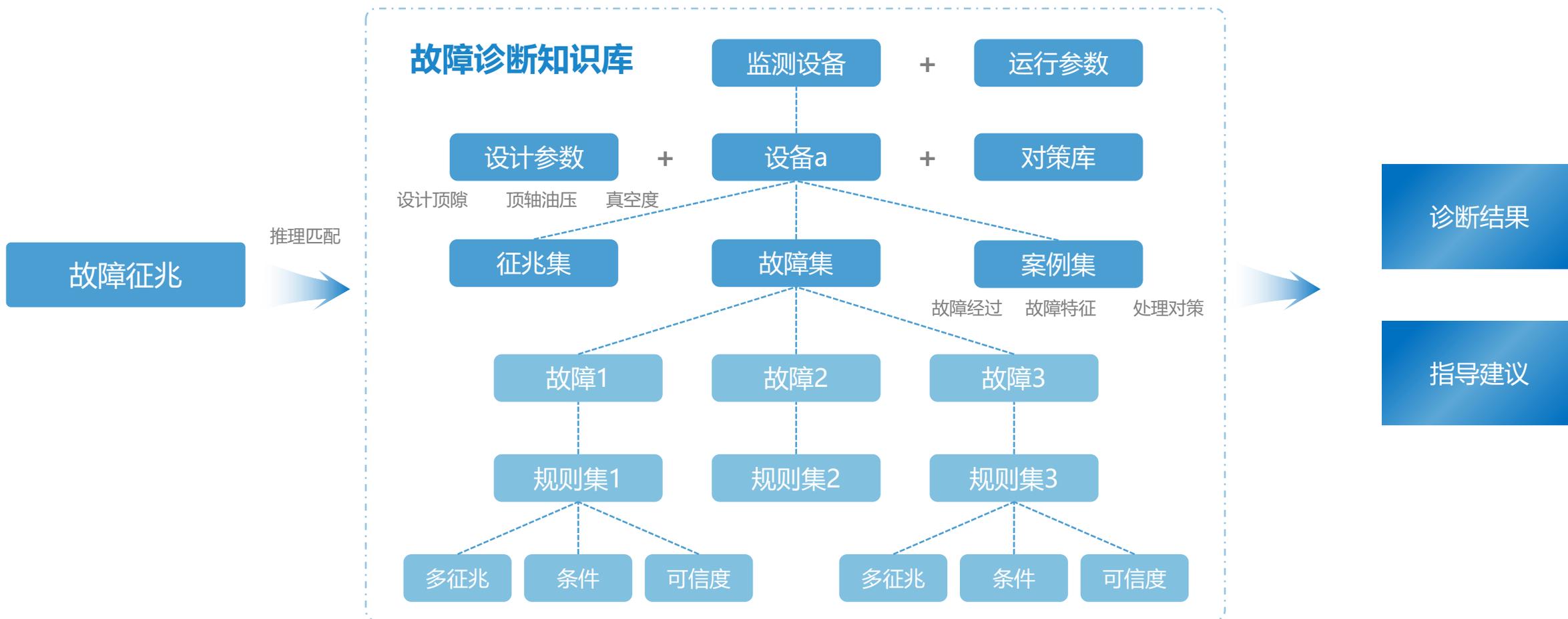
如目标案例与案例库中某个案例有两个相同的征兆，第 1 个相同的征兆的权值分别是 0.75，0.60，第 2 个相同的征兆的权值分别是 0.15，0.20，则

$$S_{w1} = 1 - |0.75 - 0.6| = 0.85$$

$$S_{w2} = 1 - |0.15 - 0.2| = 0.95$$

$$S_c = 0.85 \times (0.75 + 0.6) / 2 + 0.95 \times (0.15 + 0.2) / 2 = 0.74$$

将计算得到的征兆与故障诊断知识库进行推理匹配，诊断当前设备发生何种异常故障。本系统将多征兆的条件判断、可信度计算以及转速和负荷等运行参数形成规则集；再结合设备基础设计参数和历史案例的故障经过和故障特征等内容形成故障诊断知识库，形成**基于规则**和**基于案例推理**的诊断；也可以结合自己厂内管理经验和设备情况，对知识库进行编辑和修改操作，**形成贴合电厂管理特色的专家系统**。



## 基于人工智能构建预警诊断模型

### 预警诊断故障体系

#### 主机部分

- 质量不平衡
- 热态不平衡
- 转子中心孔进油
- 汽轮机进水/冷汽
- 轴弯曲
- 部件脱落
- 不对中
- 联轴器故障
- 动静碰摩
- 松动
- 转子支撑系统刚度不足
- 共振
- 油膜涡动
- 油膜振荡
- 汽流激振
- 轴承故障
- 电磁激振
- 发电机转子刚度不对称
- 转子裂纹
- 转子存在活动部件
- 转轴测量面有缺陷
- 传感器测量系统共振
- 非真实转子振动

#### 辅机部分

##### 风机

- 质量不平衡
- 热态不平衡
- 轴弯曲
- 叶片断裂
- 结垢
- 不对中
- 联轴器故障
- 动静碰摩
- 松动
- 基础刚性不足
- 共振
- 旋转失速
- 喘振
- 拍振
- 气流激振

##### 泵

- 质量不平衡
- 轴弯曲
- 不对中
- 松动
- 基础刚性不足
- 泵内有异物
- 气蚀引起振动
- 泵抽空
- 压力脉动
- 碰摩
- 叶轮设计不合理或损坏
- 流体激振
- 结垢
- 共振

##### 压缩机

- 质量不平衡
- 热态不平衡
- 轴弯曲
- 结垢
- 转子吸入异物
- 不对中
- 联轴器故障
- 动静碰摩
- 松动
- 基础刚性不足
- 共振
- 旋转失速
- 喘振
- 油膜涡动
- 油膜振荡
- 汽流涡动
- 汽流激振
- 部件脱落
- 管道振动
- 冲击振动

##### 工业汽轮机

- 质量不平衡
- 热态不平衡
- 轴弯曲
- 部件脱落
- 不对中
- 联轴器故障
- 动静碰摩
- 松动
- 基础刚性不足
- 共振
- 油膜涡动
- 油膜振荡
- 汽流激振
- 轴承故障
- 转轴测量面有缺陷
- 传感器测量系统共振
- 非真实转子振动

##### 电动机

- 质量不平衡
- 热态不平衡
- 轴弯曲
- 结垢
- 转子吸入异物
- 不对中
- 联轴器故障
- 动静碰摩
- 松动
- 基础刚性不足
- 共振
- 旋转失速
- 喘振
- 油膜涡动
- 油膜振荡
- 汽流涡动
- 汽流激振
- 部件脱落
- 管道振动
- 冲击振动

##### 齿轮

- 齿轮磨损
- 齿轮点蚀
- 齿轮断齿
- 齿轮胶合
- 齿轮偏心
- 齿轮损坏
- 齿轮设计缺陷
- 齿轮轴中心线不平行
- 不对中和齿轮损坏

##### 滚动轴承

- 轴承内圈故障
- 轴承外圈故障
- 滚动体故障
- 保持架故障
- 轴承故障



主/辅机故障诊断类型

**23/45种**



设备故障征兆

**300+**



故障判断组合规则

**1000+**



振动故障典型案例

**300+**

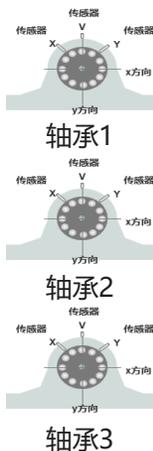


故障诊断模型

**100种**

系统根据设备各部位故障的性质和可信度，结合轴系振动水平和轴承状态，综合判断设备的健康状态。除了设备处于优良状态外，可以将故障严重程度分为**轻微**、**较轻**、**较重**和**严重**四个等级，同时平台根据故障的类型和轻重程度不同，对不同故障提出相对应的处理意见，形成指导建议。

### 故障诊断及指导建议



故障可信度

故障性质

轻微

较轻

较重

严重

综合设备健康状态

故障1

处理意见1

故障2

处理意见2

故障3

处理意见3

故障... ..

处理意见4

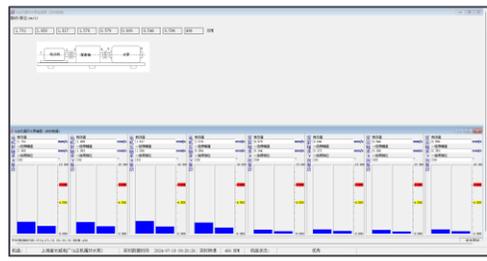
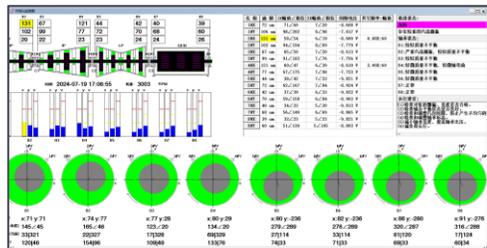
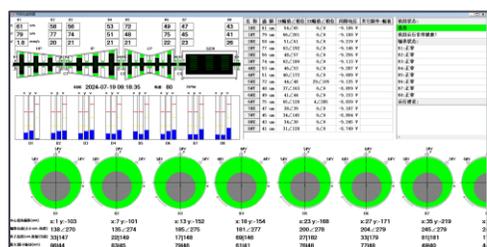
#### 如较重动静碰摩故障：

- (1)检查轴系平衡、对中状况是否良好。
- (2)检查轴系的稳定性是否良好。
- (3)检查和调整动静间隙。
- (4)启停机过程中应检查大轴晃动度、汽缸上下温差、蒸汽参数等是否合格。
- (5)根据不同碰摩原因采取低速盘车、反复启机磨出间隙以及提高升速率等措施。

序号	故障严重程度	故障可信度 CF	设备状态描述
1	轻微	CF=0.35~0.50	设备可以长期运行
2	较轻	CF=0.50~0.65	设备运行存在潜在的风险，需要加强监测
3	较重	CF=0.65~0.80	设备运行存在现实风险，必要时停机处理
4	严重	CF>0.80	设备运行存在严重危险，尽快停机处理

系统将上述诊断流程形成系统内置算法库，在**生产控制大区**可单独展示每台设备运行状态，根据设备运行状态划分不同风险等级，风险较高的情况下会提供**运行建议**，推荐运行人员做进一步检查；通过网闸可将生产控制大区数据传送至**信息管理大区**，全景展现所有监控设备状态，便于管理人员全局把控。

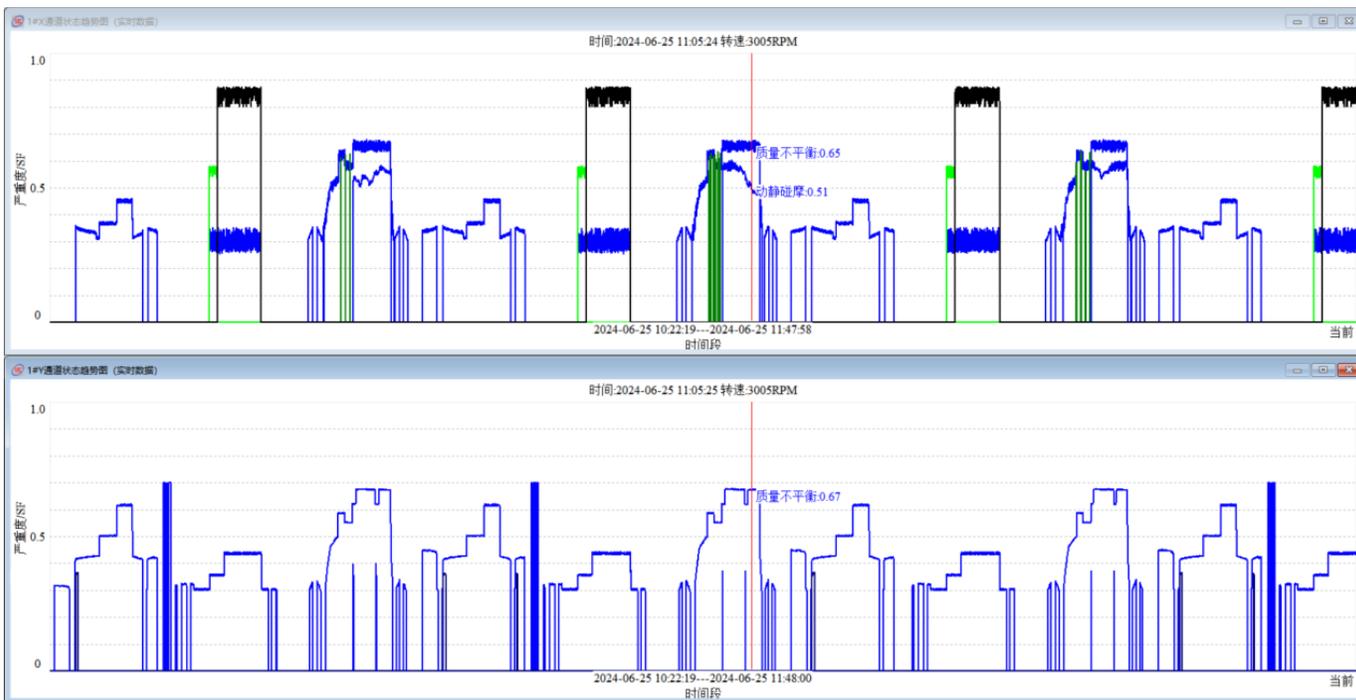
## 生产控制区单设备监控



## 信息管理区全局把控



本模块是对传感器数据实时计算和分析后的故障问题诊断，**利用故障存在的必要条件和充分条件，从征兆出发去诊断故障**。本模块可选择设备各轴承上的**每个传感器信号通道**，根据后台计算和诊断结果，查看该通道近一段时间的**诊断状态**，除诊断曲线展示外，也可对机组设备各轴承每个通道数据的诊断结果进行实时展示，同时可将历史诊断结果自动生成**故障诊断报告**提供下载。

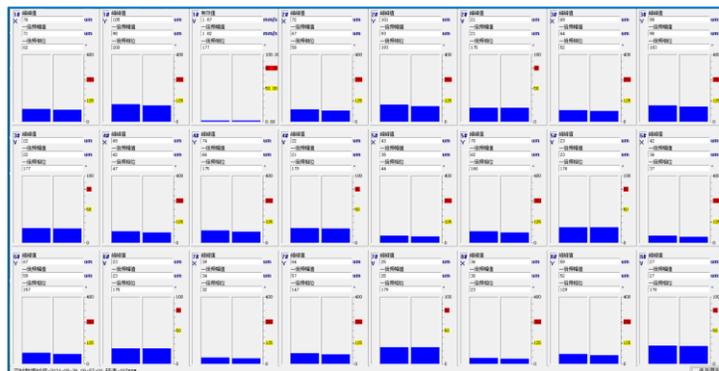


序号	通道名称	诊断结果
1	1#X	质量不平衡: CF=0.64 动静碰摩: CF=0.53
2	1#Y	质量不平衡: CF=0.68
3	1#V	正常
4	2#X	质量不平衡: CF=0.53 动静碰摩: CF=0.50
5	2#Y	正常
6	2#V	正常
7	3#X	质量不平衡: CF=0.56 动静碰摩: CF=0.50
8	3#Y	正常
9	3#V	正常
10	4#X	正常
11	4#Y	正常
12	4#V	正常
13	5#X	正常
14	5#Y	正常
15	5#V	正常
16	6#X	正常
17	6#Y	质量不平衡: CF=0.72
18	6#V	正常
19	7#X	正常
20	7#Y	正常
21	7#V	质量不平衡: CF=0.65
22	8#X	质量不平衡: CF=0.41
23	8#Y	质量不平衡: CF=0.38
24	8#V	质量不平衡: CF=0.54 共振: CF=0.41

数据时间: 2024-06-25 11:55:40 转速: 3003 RPM

根据故障监测和专家分析的需要，振动分析模块可利用振动信号生成各类专业图形，便于专业人员根据图形变化判断设备运行状态或故障分析。包括**振动棒图**、**时域分析（波形、轴心轨迹、轴心位置、轴系位置、轴系轨迹、趋势分析）**、**频域分析（频谱、全频谱、矢量图、瀑布图、全息谱）**、**变速分析（波特图、极坐标图、级联图）**等。

振动棒状图形直观地显示各通道的振动峰峰值



振动棒图

轴系位置图展示轴系中心相对位置和油膜在轴承圆周方向的分布



轴系位置图

多类可视化图形便于专家精准分析设备健康状况

波形图

轴心位置图

频谱图

波特图

矢量图

极坐标图

轴心轨迹图

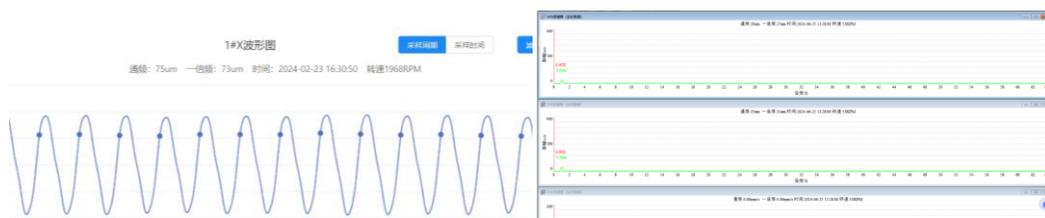
级联图

轴承振动圆图

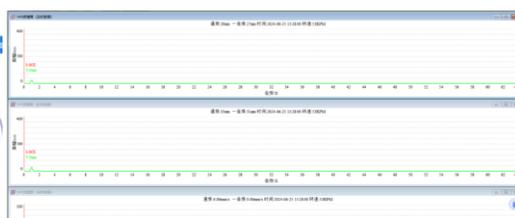
瀑布图

振动图形分析

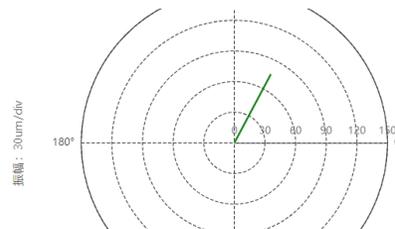
**波形图**可显示各通道振动的时域特征、**频谱图**能以频率Hz或转频倍数为横坐标，显示信号中所含各谐波分量的频率和幅值、通过**矢量图**可以判断机组从定速到带负荷过程中热矢量变化、**轴心轨迹图**可显示某轴承处水平和垂直方向振动合成后轴的运动情况，包括轴承圆周方向振幅的极值等信息、**轴心位置图**可显示轴的中心位置随转速或时间的变化趋势、**瀑布图**基于历史数据可显示机组在某一段时间内各种频率或成分的大小随时间变化趋势等。



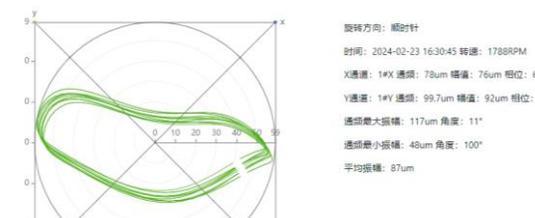
波形图



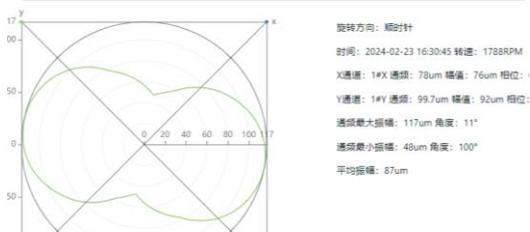
频谱图



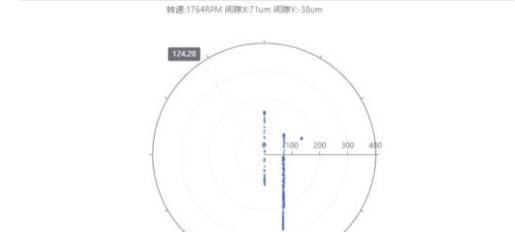
矢量图



轴心轨迹图



轴承振动圆图



轴心位置图



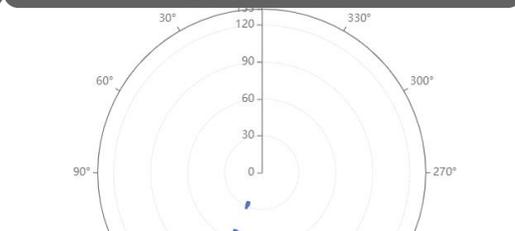
机组状态趋势图



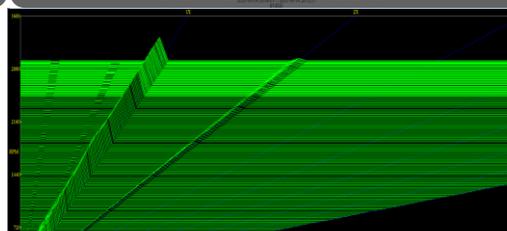
轴系位置图



波特图



极坐标图

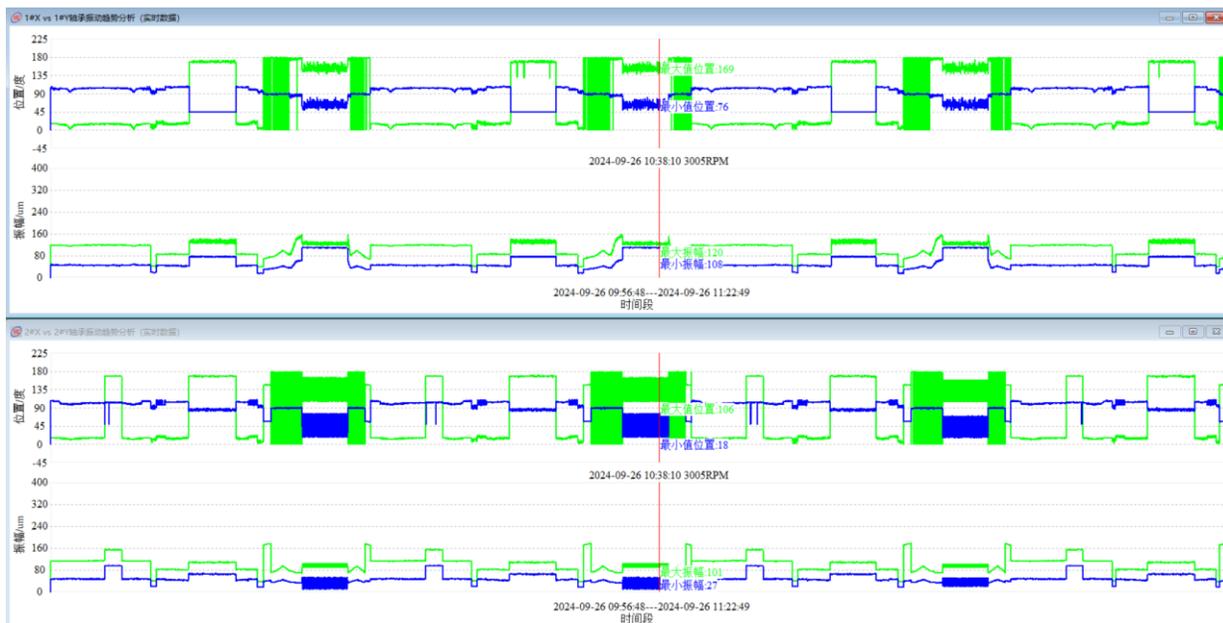


级联图

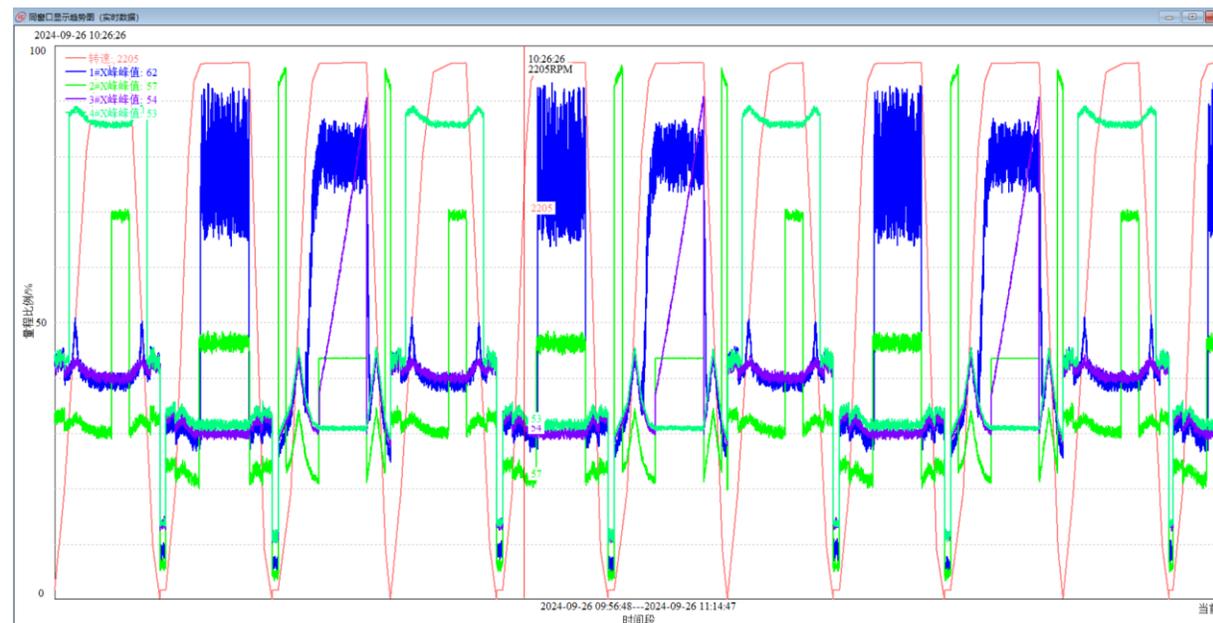


瀑布图

传统TDM系统之所以应用效果不佳，主要原因是数据过于专业且操作不便，本系统布局简单方便，可便捷查看振动数据及波形频谱图等分析图形，有助于专家快速诊断分析，同时可快速调取多项历史数据，查看运行趋势，数据对比分析等；数据操作灵活性极强，便于发生故障时快速分析故障原因和处理对策，节省大量时间。

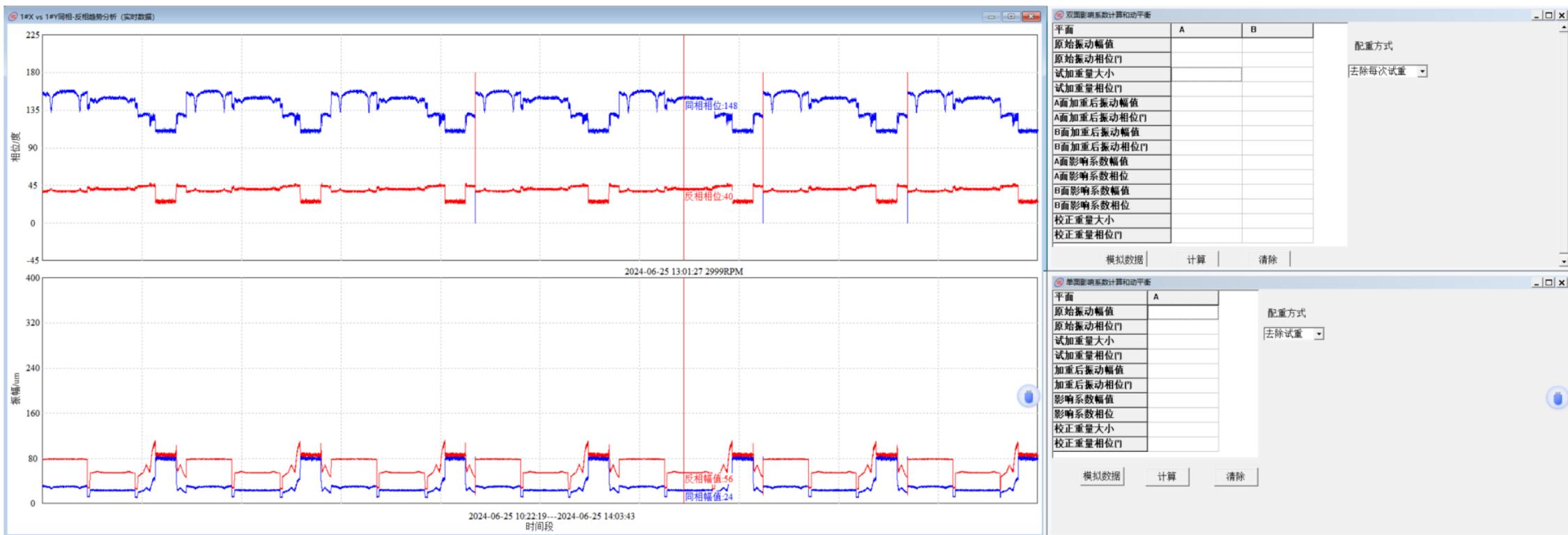


多通道展示振动幅值相位历史变化趋势



同窗口展示多指标数据历史变化趋势

转子动平衡计算模块为一通用的平衡软件，系统提供了**最小二乘法影响系数计算、最小二乘法影响系数动平衡、谐波分量法影响系数计算、谐波分量法影响系数动平衡、重量合成与分解、矢量加减运算和估算剩余振动**等多种功能，可以迅速方便地找出最佳的合理配重。仅需要输入必要参数，即可输出应加装的重量和角度；便于专业人员现场计算动平衡，节省时间精力。



火电机组旋转设备智能预警诊断系统（智能TDM系统）做为**智慧诊断工具**，可实时监测火电机组旋转设备振动信号，用机器学习和人工智能技术，实时计算各通道故障征兆；结合专家多年研究成果构建的智能故障诊断知识库，实现**精准诊断主辅机的振动故障**，最终做到**实时分析、智能诊断、超前预警**，成为现场提供**辅助决策**和**辅助分析**的支撑工具，提升电厂设备故障预警诊断分析能力，提高现场设备运行效率和检修效率，减少设备非计划停机。



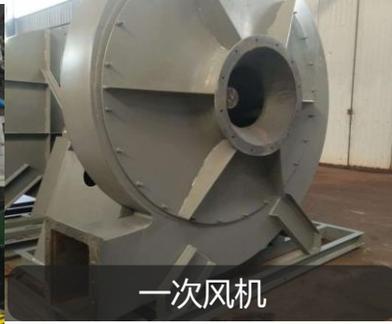
汽轮机组



引送风机



磨煤机



一次风机

基于振动监测与故障诊断的火电机组  
旋转设备智能预警诊断系统

谢谢观看！

---

诚信 / 务实 / 创新 / 共赢