



# 基于SBM技术的发电设备故障预警系统研究

滕卫明<sup>1</sup>, 刘林<sup>2</sup>, 卢伟明<sup>3</sup>, 张震伟<sup>2</sup>, 胡伯勇<sup>2</sup>

(1. 浙江省能源集团有限公司 浙江 杭州 310006; 2. 浙江浙能技术研究院, 浙江 杭州 310008;  
3. 浙江浙能镇海发电有限责任公司 浙江 宁波 315200)

**摘 要:** 发电设备常规的监测手段均采用绝对值报警, 当运行参数超过设定值时产生报警提示。这种单一的监测手段难以及时发现设备的早期征兆并对其发展趋势进行跟踪, 最终导致被迫停机。为此提出基于相似性原理(SBM)的建模技术, 将实际设备运行数据通过数学分析的方法, 建立与实际设备相似的模型矩阵。将实际运行值与模型计算出的估计值进行比较, 超过预设的偏差值即出现报警。在线展示系统参数的动态变化过程, 反映系统运行的健康状态, 并及时提醒维护人员进行设备维护; 此外通过实例介绍了该系统的实际运用效果。

**关键词:** 发电设备; 状态监测; 相似性原理(SBM); 数据挖掘; 故障预警

中图分类号: TK39

文献标志码: B

文章编号: 1004-9649(2015)01-0040-07

## 0 引言

国内大部分发电企业都考虑在提高机组可靠性和发电小时数的同时, 降低检修成本减少检修时间, 尽量避免过修或者失修。先后尝试 RCM(以可靠性为中心的维修), RBM(以风险分析为基础的维修), 点检定修和建立责任制等方式。但是上述方式往往多是事后分析查找原因, 很难做到实时、预知、自动化和信息化<sup>[1]</sup>。其困境和问题就在于缺少实时捕捉设备异常的引擎, 因此各种系统的运作和流程的启动无法和机组设备的异常状态实时关联。本文介绍的发电设备故障预警系统, 是一种以电厂实时数据为基础, 通过相似性原理(SBM)建模技术产生估计值, 对生产设备的运行参数进行实时检测, 将实际值与估计值进行分析比较, 对设备状态变化趋势进行判断, 对潜在故障隐患做出提前警示的在线检测诊断系统。本系统自 2008 年开始项目研究, 2009 年投入运行以来, 通过不断完善, 取得了较好的实用效果。

## 1 发电设备故障预警系统

### 1.1 系统功能

发电设备故障预警系统是浙能集团发电设备

远程在线集中诊断系统的重点部分, 依托先进的专业平台型开发软件, 开发出具有自主知识产权的设备故障预警和诊断软件。该系统具有实现对发电设备进行远程监控及故障诊断的功能, 通过不间断地监测设备相关测点信息和基本数据信息, 自动分析所有过程数据、状态监测数据和历史数据, 就能较为准确地诊断出发电机组中那些有可能影响安全经济运行的不良趋势及可能发生的不同类型、不同程度的故障和异常情况, 并提前发出告警信息。发电设备故障预警系统发现的问题涵盖了发电机组设备运行工况的指标偏差、设备性能劣化、设备质量隐患和设备故障等方面。例如管道及容器的泄露、轴承过热、机械磨损及卡涩、电机振动及线圈过热、管路结垢与堵塞、燃烧偏差、油气品质问题、电气设备过载过热、测量设备超差及损坏等故障<sup>[2]</sup>。借助该系统平台, 可以及时掌控各发电厂机组设备的健康状况, 及时识别潜在的系统风险, 为指导日常生产活动和设备故障处理提供辅助决策支持。对出现故障的机组, 集团公司可以迅速组织专家力量, 远程分析设备故障信息。在远程诊断专家的技术支持下, 集团公司和所属各电厂可以得到更专业的机组状态评价报告, 有助于增强机组可用性、改善机组可靠性, 减少设备损坏和故障风险, 优化设备维

收稿日期: 2014-11-01

基金项目: 浙江省能源集团科技项目资助(发电设备远程在线集中诊断系统(071119))

作者简介: 滕卫明(1972—), 男, 浙江金华人, 高级工程师, 从事发电自动化技术应用研究、设备故障分析处理与生产技术支持管理工作。E-mail: 151679703@qq.com



护，增强发电厂的环境适应能力，有效降低整个集团公司的生产成本。

## 1.2 发电设备故障预警系统的架构形式

整个故障预警系统的主要硬件包括各发电厂实时数据库(PI)服务器、集团 PI 服务器、系统维护服务器、应用服务器及各种网络交换设备。在软件使用方面，应用 SQL2005 及 PI 数据库作为数据平台，使用了建模工具 Workbench、设备监测界面 Sentinel、权限管理软件 Gatekeeper、计算服务器端软件及网页发布相关软件等。整个系统架构如图 1 所示。

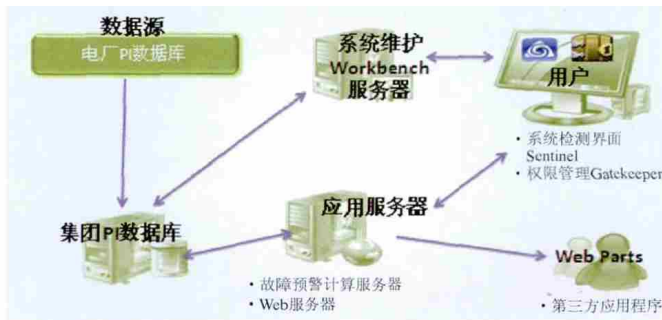


图 1 发电设备故障预警系统架构

Fig.1 The architecture of fault early warning system for power generating equipment

发电企业通过各自的 PI 数据库采集发电设备参数信息，上传至集团 PI 服务器，故障预警应用服务器从集团的 PI 数据库读取需要的实时数据送到计算服务器进行分析，分析结果通过预警信息服务器发送到各浏览器。在系统运行过程中，可以通过系统维护服务器远程对系统中的模型进行维护。

## 2 SBM 建模原理及工作过程

### 2.1 SBM 建模原理及工作过程

基于相似理论的建模技术(SBM)，是为状态监视专门设计的多变量无参数模式重构技术，目前在化工及发电设备故障预测等方面有成功的应用。它的核心理念在于把训练数据当作没有错误的数。估计模型(或重构后的模式)是训练数据样本多维插值后产生的<sup>[3-4]</sup>。

#### 2.1.1 模型的建立

模型建立的第一步，是从参考数据( $X$ )中选定样本，并组成状态矩阵( $D$ )，即某一过程或设备有  $n$  个相关联的测点，设在某一时刻  $i$  对其取样，将采集到的  $n$  个测点选做一个模式<sup>[5-6]</sup>。

$$X(i)=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

结合一年中工况的变化，选择  $m$  个模式，并组成状态矩阵( $D$ )

$$D=[X(1) X(2) \dots X(m)]=$$

$$\begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (2)$$

状态矩阵中的每一列向量都代表了设备的一个正常运行工况，经过合理选择状态矩阵中的  $m$  个历史模式所组成的子空间( $D$ )，能够代表设备正常运行的整个动态过程。整个状态矩阵的构成就是对设备运行特性的学习，使用这些模式的组合就可以产生估计模型。

#### 2.1.2 估计值的产生

在某个时间点上，一个输入模式  $x_{in}$  由模型中每个传感器的一个单独读数构成<sup>[7]</sup>

$$x_{in}=[x_{1in} \ x_{2in} \ \dots \ x_{nin}]^T \quad (3)$$

将输入模式  $x_{in}$  与在状态矩阵( $D$ )中的每一个模式的相似程度进行比较，会产生相似向量( $a$ )，它含有的元素个数，与存储在状态矩阵中的训练矩阵(模式)元素个数相同。

$$a=D^T \otimes x_{in} \quad (4)$$

把代表相似程度的相似向量转化为权重向量( $w$ )

$$w_0=G^{-1} \cdot a \quad (5)$$

$$G^{-1}=(D^T \otimes D)^{-1} \quad (6)$$

$$w=\frac{w_0}{\sum w_0} \quad (7)$$

式中： $\otimes$  为非线性运算符，选取为两向量间的(欧氏距离)EUCLIDEAN<sup>[8]</sup>，即

$$\otimes(X, Y)=\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

通过样本和权重的线性组合产生估计值

$$x_{out}=D \cdot w \quad (9)$$

$$\text{即: } x_{out}=\frac{D \cdot (D^T \otimes D)^{-1} \cdot (D^T \otimes x_{in})}{\sum (D^T \otimes D)^{-1} (D^T \otimes x_{in})} \quad (10)$$

#### 2.1.3 偏差值的生成及预警的触发

通过把输入模式减去估计模式从而产生一个剩余值，把剩余值较低的变量作为正常变量，直接在系统中予以显示，不触发预警信号。

$$RES=x_{in}-x_{out} \quad (11)$$

为了减少系统运行中所产生的无效预警，系统设置中采取了 2 种手段：一是每个模型都加入了机组负荷或电机电流值，对该数值设定了模型启动运行下限，低于该下限值时，模型不会启动，减少机组在启停阶段非稳定工况下数据对预警正确判断的干扰；二是对偏差向量中的所有值都针对性地做了特有阈值，只有偏差值超过相应的特有阈值，并持续发生一段时间，才会使相应的预





警触发，剔除机组快速变负荷或偶发的测量问题所带来的无效预警。通过上述技术手段，基本可以保证该系统所产生的预警能真实反应发电设备的异常信息。

## 2.2 SBM 建模过程

任何一个设备进行 SBM 建模，都要经历以下几个过程：确定模型测点、导入历史数据、历史数据过滤及过滤后数据的选取和状态矩阵的建立。

以引风机机械模型为例简要介绍 SBM 建模过程。搭建引风机机械模型的目的是监测引风机机械运转状态，通过建立此模型，在设备运转中自动发现机械运转中的异常情况，例如轴承温度升高、轴承振动变大等。

### 2.2.1 确定模型测点

为了建立引风机机械模型，首先要确定该模型采用引风机的哪些测点作为模型依据。这里我

们根据统计学中的相关性分析及设备专业知识来确定，采用了对应机组的负荷、环境温度、引风机进出口压力、引风机静叶位置、引风机电流、引风机轴承温度、引风机轴承振动及引风机电机线圈温度作为相关测点集引入模型。

### 2.2.2 导入历史数据

根据确定的测点集，从实时数据库读取该设备一整年的运行数据，时间间隔为 1 h，每个测点共有 8 762 个左右的数据。部分测点趋势如图 2 所示。

### 2.2.3 历史数据过滤及过滤后数据的选取

建立模型是为了监视设备正常运行中的异常，而整年的历史数据中包括了设备停运及设备异常运行的数据。为保证模型的健康，必须在模型建立之初，就对其中的历史数据进行过滤，保证模型本身的准确性。对过滤后的数据还要进一步选择，选取的目的是通过选择代表性的设备运转数

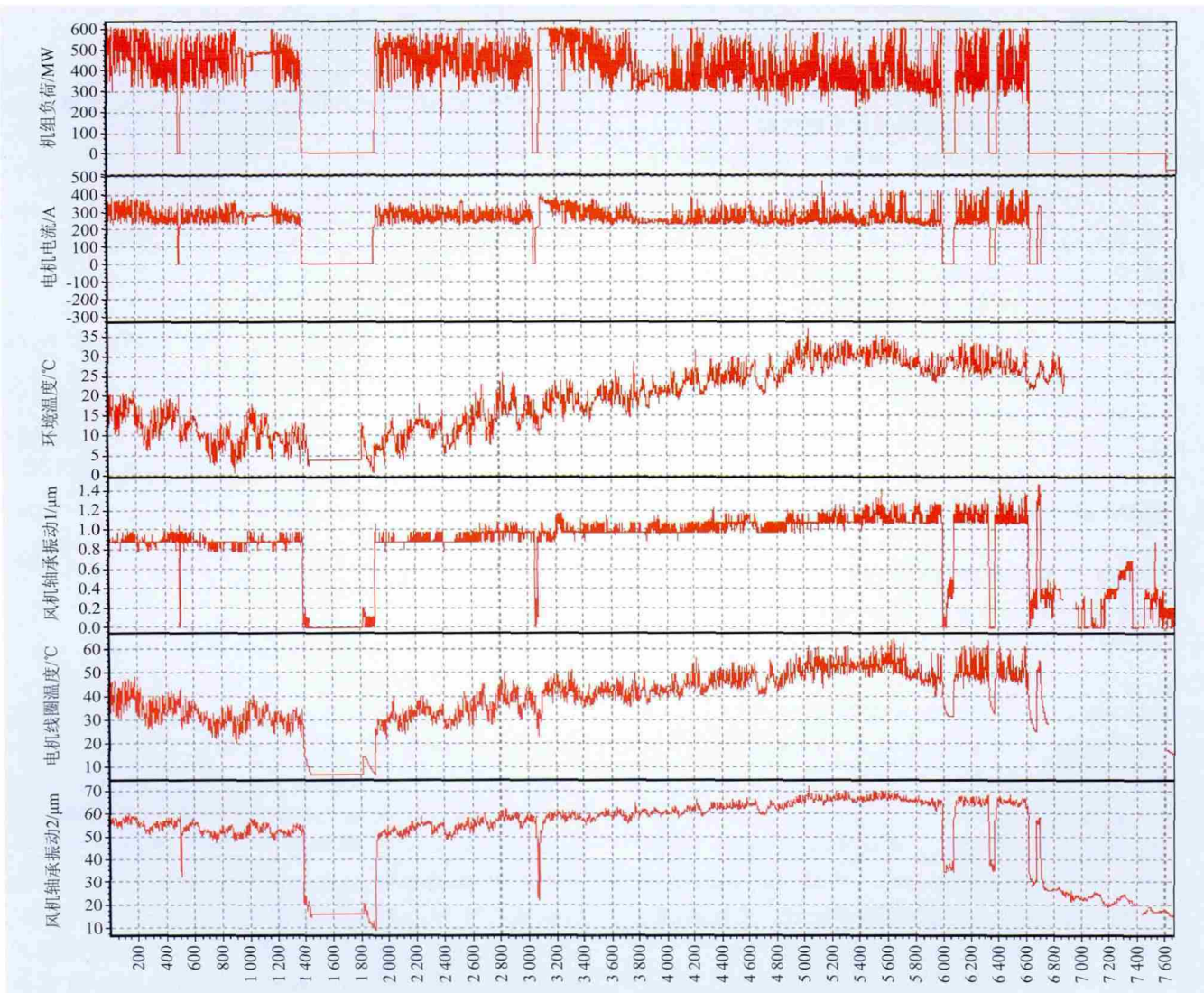


图 2 部分测点趋势

Fig.2 The trend of part measuring points





据，进一步精炼历史数据，避免出现向量的共线性。过滤后选取的历史数据，部分测点趋势如图 3 所示。

#### 2.2.4 状态矩阵的建立

为了保证模型的健壮性与准确性，故模型最后采用的样本必须满足一定的规则。本系统采用最大最小值方法进行自动选取，即将每个测点的最大最小值所在模式的数据均选入状态矩阵。根据此方法确定的模型中部分测点趋势如图 4 所示。

经过上述选取过程，最终该引风机机械模型由 90 个数据样本组成，构成最终的状态矩阵。

### 3 发电设备故障预警系统处理的流程及实际应用

#### 3.1 发电设备故障预警诊断系统处理的流程

发电设备故障预警系统首先对电厂各部分按

设备进行分类。分别对各关键设备建立个性化的经验模型，通过现场设备采集的真实值与模型给出的估计值进行比较，将符合诊断规则的标签点予以报警呈现，分析人员结合现场设备实际运行工艺特点、性质、运行参数设置及要求等，经科学的分析判断，准确地找出设备存在的问题并提出可行性处理建议。发电设备故障预警诊断系统流程如图 5 所示。

#### 3.2 发电设备故障预警系统的实际应用

发电设备故障预警系统自 2009 年投入实际应用以来，经过不断研究、修正和完善，逐步趋于成熟。在对集团所属电厂的设备实施该系统的应用过程中，专业人员对该系统所预警的问题进行综合分析判断，不断摸索规律，指导项目的进一步完善；几年来预警了相当数量的设备隐患，提前发现设备运行中的问题，下面选择 2 起案例加

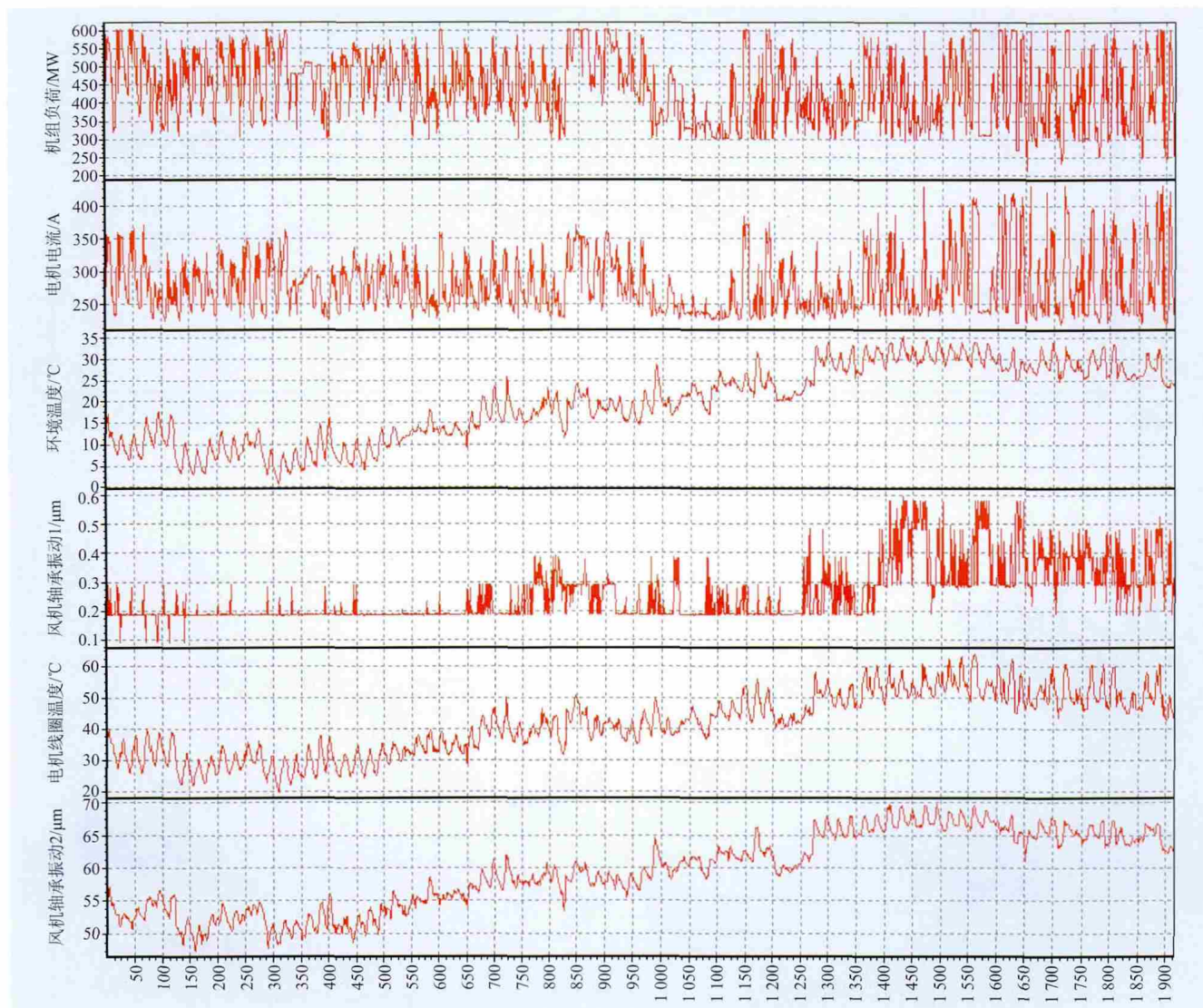


图 3 过滤后部分测点趋势

Fig.3 The trend of part measuring points after filtering



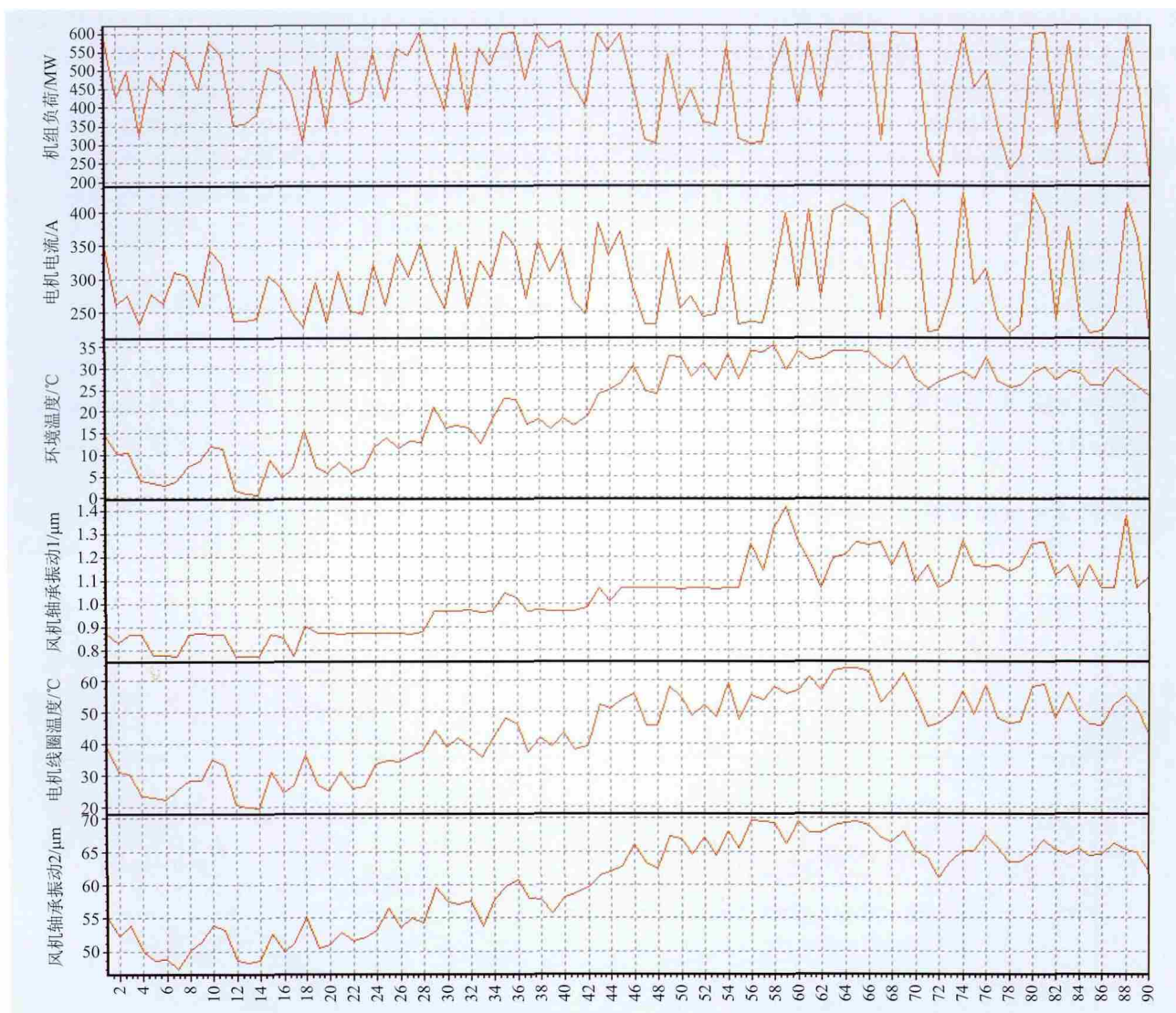


图 4 状态矩阵中部分测点趋势

Fig.4 The trend of part measuring points in state matrix

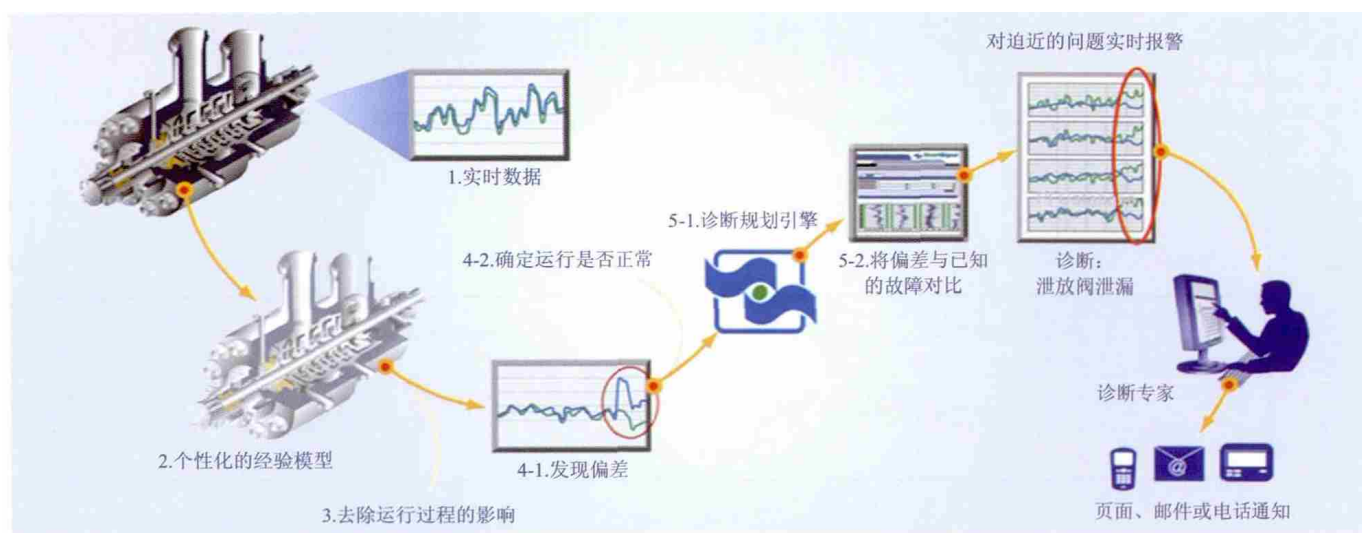


图 5 发电设备故障预警系统工作流程示意

Fig.5 Flow chart of fault early warning system

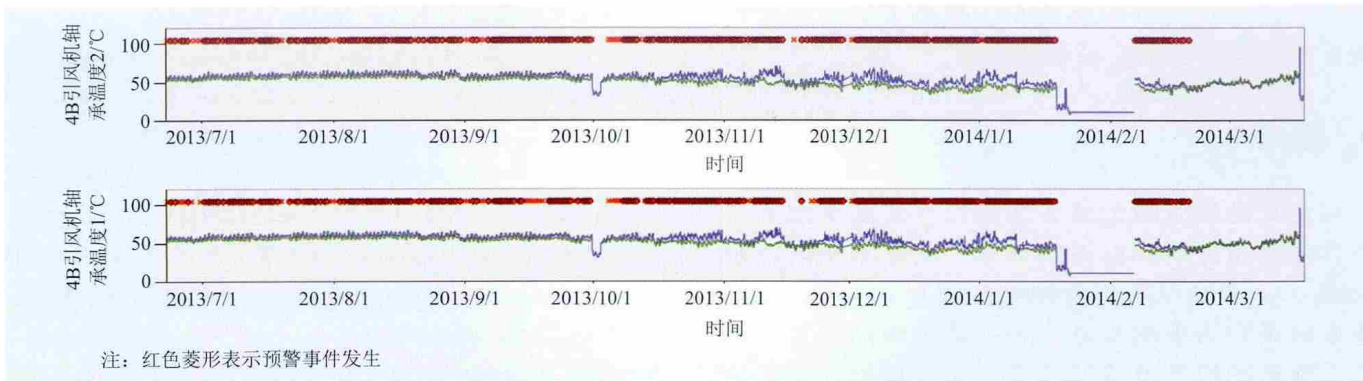


图 6 引风机轴承温度故障预警

Fig.6 Induced draft fan bearing temperature fault warning

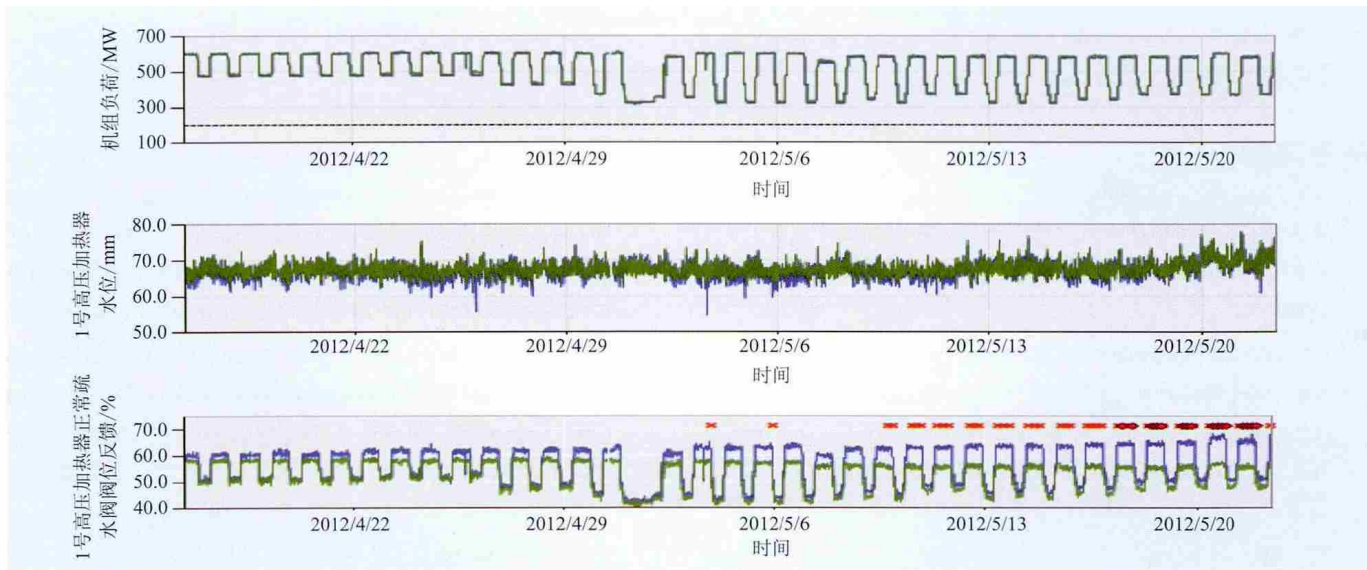


图 7 1 号高压加热器性能相关曲线

Fig.7 The performance curves of High-Pressure Heater 1

以验证。

### 3.2.1 发电设备故障预警系统诊断某厂引风机前轴承温度异常

电厂三大风机之一的引风机运行工况最为恶劣，该设备的可靠性直接关系到机组的正常运行。本案例中，通过引风机机械设备模型预警发展过程，验证该系统可以发现电厂设备的早期异常。

从趋势图(图 6)上可以看到，从 2013 年 7 月 4B 引风机轴承温度已连续发出偏差预警，在 2013 年 11 月，4B 引风机轴承温度经常上升至 65℃，并且环境温度下降至 2~3℃时，前轴承温度并没有下降(4A 引风机前轴承温度在环境温度低时，明显下降)。此外 3 个轴承温度变化是一致的，所以基本可以排除传感器的问题。而在冬季工况时，引风机轴承温度不时上升可能是引风机轴承处于比较差的运行状态，甚至已经发生一些轻微磨损。

2014 年 3 月 17 日 14:30 左右，4B 引风机前轴承温度突然上蹿，升至 90℃，导致引风机跳闸。

拆开引风机检查，发现引风机前轴承已经磨损。

### 3.2.2 发电设备故障预警系统诊断高加疏水阀内部结垢

高压加热器疏水阀内部结垢，影响疏水效果。为此预警系统针对电厂中高压加热器疏水阀阀位的变化情况进行跟踪，发现高压加热器疏水阀内部结垢，及时通知电厂进行检查处理。高压加热器性能相关曲线如图 7 所示。

根据上述曲线数据及趋势分析，某厂 2 号机组 1 号高压加热器运行参数均未发现明显异常，加热器水位基本保持平稳，但高压加热器正常疏水调节阀的阀位反馈以一定的斜率持续上升，导致阀位偏差报警，专业人员分析，认为可能的原因是阀门结垢导致正常疏水回路通流面积变小引起。电厂接到通知后及时安排了检修计划，验证了 1 号高压加热器正常疏水阀内部有结垢物质存在，通过对垢样进行分析，确认发生了流动加速腐蚀(FAC)。最后结合集团其他机组的高压加热





器正常疏水阀阀位变化情况,提出了给水加氧处理技术,确保了电厂设备的安全。

#### 4 结语

发电设备故障预警系统通过在浙能集团 6 年的实际运用证明,该系统对电厂的安全生产有现实意义,不但可用于发现电厂设备的早期异常,变事后维修为事前检查,还可将发现的异常设备列入最近的检查或检修项目,实现设备的状态检修。在设备检修后,还可通过该平台实现对设备检修质量的在线评价,保证检修质量。通过该平台,可使电厂各个部门及专业实现有机结合,消除设备监控的盲点,最大化地保证电厂设备的安全稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] 李玉珍. 故障预警系统在发电设备状态评估与故障诊断工作中的应用[C]//2010 年全国发电企业设备检修技术大会论文集. 2010.
- LI Yuzheng. Application of fault warning system in the power generation equipment evaluation and fault diagnosis in the work [C]//2010 the national power generation enterprise equipment maintenance technology conference proceedings. 2010.
- [2] 蔡宁宁. 发电设备故障远程诊断系统的应用探索 [J]. 浙江电力, 2012(5): 20-23.
- CAI Ningning. Discussion on application of fault remote diagnosis system for power generation equipments [J]. Zhejiang Electric Power, 2012(5): 20-23.
- [3] 王建波, 吴耀昊, 刘文颖. 基于 OpenGL 的电力系统预警可视化技术实现[J]. 中国电力, 2014, 47(8): 123-128.

- WANG Jianbo, WU Yaohao, LIU Wenying. Implementation of OpenGL-based visualization techniques for safety warning of power system [J]. Electric Power, 2014, 47(8): 123-128.
- [4] 徐天乐, 马宏忠, 陈楷, 等. 基于振动信号 HHT 方法的 GIS 设备故障诊断[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 39-42.
- XU Tianle, MA Hongzhong, CHEN Kai, *et al.* Diagnosis of GIS failures based on HHT method for vibration signals [J]. Electric Power, 2013, 46(3): 39-42.
- [5] 郭鹏, David Infield, 杨锡运. 风电机组齿轮箱温度趋势状态监测及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(11): 29-36.
- GUO Peng, David Infield, YANG Xiyun. Wind turbine gearbox condition monitoring using temperature trend analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(11): 29-36.
- [6] 常剑, 高明. 基于相似性建模的发电机组设备故障预警系统[J]. 机电工程, 2012(5): 46-49.
- CHANG Jian, GAO Ming. Failure prognostic system of power generating equipment based on similarity modeling [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2012(5): 46-49.
- [7] 凌六一, 黄友锐, 魏圆圆. 基于多传感器信息融合和神经网络的汽轮机故障诊断研究[J]. 中国电力, 2010, 43(3): 46-50.
- LING Liuyi, HUANG Yourui, WEI Yuanyuan. Research on fault diagnosis of turbine based on multi-sensor information fusion and neural network [J]. Electric Power, 2010, 43(3): 46-50.
- [8] 常澎平, 郭江龙, 吕玉坤, 等. 非线性状态估计 (NEST) 建模方法在故障预警系统中的应用[J]. 软件, 2011(7): 35-40.
- CHANG Pengping, GUO Jianglong, LU Yukung, *et al.* The application of NEST modeling method in failure prognostic system [J]. Software, 2011(7): 35-40.

(责任编辑 李秀平)

### Study on SBM-Based Failure Prognostic System for Power Generation Equipments

TENG Weiming<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>, LU Weiming<sup>3</sup>, ZHANG Zhenwei<sup>2</sup>, HU Boyong<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Energy Group Co. Ltd., Hangzhou 310006, China; 2. Zhejiang Energy Group R&D Co. Ltd., Hangzhou 310008, China;

3. Zhejiang Zheneng Zhenhai Electric Power Generation Co. Ltd., Ningbo 315200, China)

**Abstract:** Generally, the monitoring system for power generation equipments adopts absolute value to issue alarms when the operating parameters exceed the set values. This single monitoring method makes it difficult to notice the early signs of the equipment abnormalities and then keep the track of their further development, which may eventually cause the forced outage of equipments. In this paper, a modeling technique based on similarity mechanism (SBM) is proposed in which a model matrix is established to simulate the real equipments by analyzing the actual operation data with mathematical method. Then, the deviation is obtained by comparison between the actual operation value and the calculated value on the model. If it is more than the preset deviation, the alarm will be triggered. This system can display the online dynamic process of the system parameter changes, reflect how well the system is operated, and timely remind the maintenance personnel of equipment maintenance. At last, the practical applications of the system are demonstrated with case studies. This work is supported by Science and Technology Project of Zhejiang Energy Group Co. Ltd.: Remote Online Concentrated Diagnosis System for Power Generation Equipment (071119).

**Keywords:** power generating equipment; state monitoring; similarity-based modeling (SBM); data mining; failure prognostic