

# 设备预诊断及其关键问题研究

## Prognostics and Its Important Problems

(1.中国科学院沈阳自动化研究所;2.中国科学院研究生院)吴薇<sup>1,2</sup> 胡静涛<sup>1</sup>

WU WEI HU JINGTAO

**摘要:**预诊断是实现基于状态的设备维护系统的关键。在分析了预诊断的需求、技术背景、内涵以及实现理念的基础上,从流程统一、连贯的角度设计了其应用系统的参考模式与运行机制。并对预诊断系统的数据来源、数据预处理、预诊断方法的实现机制,以及预诊断结论的应用层次等关键问题进行了深入阐述。

**关键词:**预诊断;趋势预测;评价因子;参考模式;状态维护

中图分类号:TP391; TH165+3

文献标识码:A

**Abstract:**Prognostics is the key technology for the implement of Condition-based Maintenance systems. After the analysis of the requirement, technology background, meaning and implement philosophy of the prognostics, a standard and coherent reference prognostic system mode and its mechanism is proposed. Finally some key problems such as data resource and pretreatment, processing and important points of prognostic analysis methods and the application hierarchy of the information are discussed.

**Key words:**prognostics, trend prediction, FOM, reference mode, condition-based maintenance

### 引言

设备是企业生产经营活动的基础,是企业核心竞争力的重要组成部分。科学的设备维护方式能够提高设备的可靠性和安全性,使设备处于良好的工作状态,避免发生重大故障,减少停机时间,从而确保安全生产、提高产品的产量和质量,为企业带来更大的经济效益。

设备维护方式已从传统的故障发生后的修复性维护和按计划定期进行的预防性维护,发展为基于状态的预知性维护(CBM, Condition-based Maintenance)。CBM方式的主旨是根据设备健康状况、可用资源及使用需求来安排维护计划,在设备需要维护的时候再对其进行维护。该方式能够将更多的设备维护成本从不可控制成本变为可控制成本,从而达到降低总维护成本的目的。CBM方式的维护作业一般没有固定的时间间隔,需要根据监测数据的变化趋势做出判断,制定维护计划。

可见,选取合理的维修时机是实现CBM方式的关键,而这—关键取决于对设备健康状况的准确评估和预测,即预诊断的能力。目前,国内外对CBM相关技术的研究多集中于状态监测与故障诊断,而对于预诊断的研究才刚刚起步。预诊断是一种事前诊断,它针对设备在故障发生前通常都会经历一段性能衰退过程的特点,根据对设备状态历史变化轨迹的分析,预测设备状态的未来发展趋势和剩余有效使用寿命(RUL, Remaining Useful Life),为设备维护计划的制定和实施提供更多的响应时间,进一步降低故障发生率,提高维护效率和系统可靠性。所以,开展设备预诊断相关理论及其应用的研究,对CBM方式的发展将起到极大的推动作用,具有很重要的理论意义和应用价值。

吴薇:博士研究生

基金项目:国家863/CIMS主题资助项目(2003AA414210);沈阳市科技计划资助项目(1053084-2-02)

### 1 预诊断的概念和基本功能

#### 1.1 预诊断的概念

所谓预诊断(Prognostics),是一种利用设备状态监测数据、设备本身构造特性、以及运行环境和负载状况等相关信息,对设备健康状态进行评估,预测设备可能发生的故障及其潜在影响,并根据性能变化趋势推断设备剩余有效使用寿命的技术。

基于CBM方式在准确时间(Right Time)、对准确部位(Right Components)、采取准确维修活动(Right Maintenance Actions)的3R理念,预诊断既要给出可能发生故障的预测,更要跟踪设备性能衰退情况,为维修计划的实时安排和调整提供可靠的时间依据,确保对设备进行经济、高效的维护。

预诊断系统的实现,会提高生产过程的有效性,降低设备的不确定性,从而实现备品备件的主动订购、采办,和维护作业的迅速响应,使停机时间和维护费用大大减少,进而极大地促进CBM方式将设备维护的重点从状态监控提升为状态管理的实现进程。

#### 1.2 预诊断的基本功能

预诊断一般应具有以下基本功能:

1)健康状况评估,主要是对被监测设备的性能衰退情况进行评估。通过综合分析设备的系统组成、运行状态、维护操作以及负载状况等信息,选取能够表征设备健康状况的特征参量,对其变化情况进行跟踪和预测,得出当前设备性能处于正常、衰退或者不可用的健康状况评估结论。如图1,  $T_i$  为当前时刻,  $T_{i+1}$  为给定时间段端点或设备执行下一项任务的起始时刻,  $E_n$  为设备正常状态的性能阈值,  $E_i$  为设备可用状态的性能阈值。通过对  $T_i$  之前(包括  $T_i$ )的性能特征参量观测值进行分析,得出  $T_{i+1}$  的预测值。若  $E(T_{i+1}) \leq E_n$ , 则设备当前处于正常状态;若  $E(T_i) > E_n$ ,  $E(T_{i+1}) < E_n$ , 则设备性能处于衰退状态;  $E(T_i) \leq E_n$ , 则设备已经发生故障或者设备性能已达到下限,处于不可用状态。

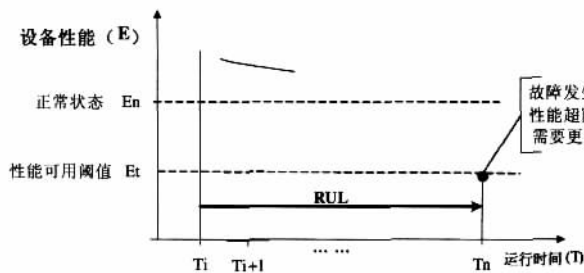


图1 设备状态趋势图

2)故障预测。当设备处于性能衰退状态时,需预测其未来可能发生的故障类型、部位和时间。传统的故障诊断是对已发生故障的特征进行识别,而故障预测主要是对将要发生的故障的征兆进行识别,即对某故障发生时刻 $T_n$ 之前(不包括 $T_n$ )的特征变化情况进行分析和判断。

3)RUL预测,是指对设备发生故障停机或设备性能达到可用下限的时间预测,也就是对 $T_n$ 的预测,即 $RUL=T_n-T_i$ 。相对于故障类型和设备性能特性等专业术语,RUL这个时间的概念更通俗易懂,更容易对设备性能建立一致的理解,能够为整个设备维护管理体系提供统一和直观的衡量指标。

## 2 预诊断系统参考模式设计

基于对预诊断系统内涵、目标、运行机理及应用特点的研究,本文设计一个预诊断系统参考模式,如图2。预诊断系统建立在数据采集、信号处理及状态监测系统之上,并为备件备件、维护计划及数据采集配置等决策提供相关依据。基于“全局建模、局部使用”的思想,预诊断系统由一个预诊断中心和若干个实时预诊断工作站构成。其中,预诊断中心主要负责建立预诊断模型,工作站主要利用专属模型和观测数据对所监测设备进行具体预诊断分析。这里每个工作站是一个逻辑节点,多个工作站可运行在同一个物理节点上。

预诊断工作站通过网络与预诊断中心相连,预诊断系统的工作机制如下:

\* 状态监测数据及维护记录存储于预诊断工作站的本地数据库;

\* 预诊断工作站定期将设备性能变化、发生的故障及指定时间段内设备状态相关数据,作为数据样本上传到预诊断中心的典型样本库中;

\* 预诊断中心根据典型样本库,为每类设备构建其性能变化的通用模型,然后根据设备的特征将通用模型具体化为每台设备的专属模型,与通用模型共同存储于全局模型库中;

\* 预诊断工作站从中心全局模型库下载相关专属模型,对所监测设备进行预诊断分析。

其中,预诊断中心不需实时工作,只需定期接收工作站提供的状态数据样本,在某类设备预诊断模型发生改变时通知相关实时工作站下载模型,在建模需要调整特征参数时通知数据采集配置系统进行更改。

预诊断模型和算法应该随生产过程、环境和设备运行模式不断调整和修正。个别设备情况的变化,只需修改专属模型,并下载更新;某类设备实质性变化,则需对全局模型生成途径和算法流程进行修改。通常前者经常发生,后者在整个设备寿命周期内发生次数很少。

本参考模式具有以下特点:

1) 全局集中建模。将同类设备的预诊断建模过程集中在—

起,同时集中多台设备的样本数据,避免了一台设备提供样本单一且周期长的缺点,增加了样本库的完备程度和有效性,减少了数据存储冗余,使得预诊断更加准确和完善。

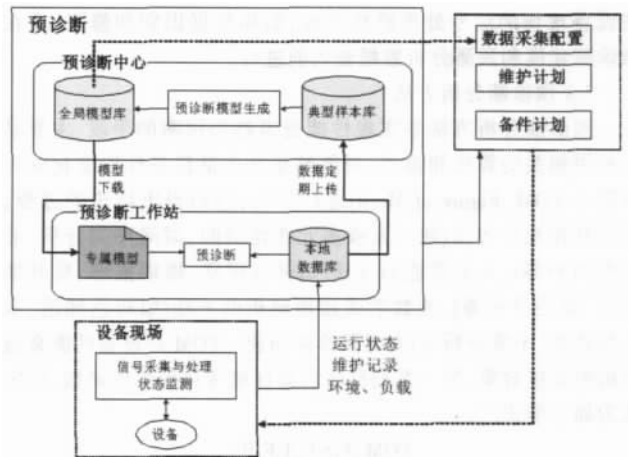


图2 预诊断系统参考模式

2) 局部使用专属模型。预诊断工作站只关注相关的专属模型对观测数据的分析,预诊断中心典型样本的提取与存储、预测模型的生成工作,提高了预诊断的高效性和灵活性。

3) 与相关系统交互性强。预诊断系统可以根据不同的建模方法、设备运行任务计划,对状态监测系统合理配置,提高维护的针对性和实效性。

## 3 实现预诊断系统的关键问题

### 3.1 数据源

预诊断强调对设备整体性能的评价,所以一定要保证原始数据的全面性和综合性。原始数据的基本来源主要有:1)通过安装在设备上的各种传感器采集的监测数据(如振动信号、温度、压力等);2)信号处理和状态监测分析结论;3)预诊断历史记录;4)设备维护历史记录,包括故障发生和维修记录及零件更换记录等;5)设备负载及完成任务历史记录。1)和2)主要由设备现场采集分析得到,3)、4)和5)主要是预诊断工作站日志信息。

另外,预诊断分析不仅需要设备本身的相关历史数据进行纵向比较,还应进一步考虑到以下三类作为横向比较的相关数据:1)设备生产技术参数。如设备额定寿命,振动、压力、温度等状态参数的限定范围等。2)设备预诊断工程经验(专家知识)以及国内外相关的工业标准(如ISO 2372、ISO 13381-1)。3)同类设备整个寿命周期的运行轨迹相关信息。

这三类数据源虽不能直接表征设备的运行状态,但它们能够为预诊断的模型建立和算法分析提供有力的先验知识,提高分析效率和结果正确性,在预诊断过程中也不能够忽视。

### 3.2 数据预处理

1. 噪声。维护系统测量和接收的状态监测数据不会受到不同程度随机噪声的污染。噪声干扰会存在于不同频率的信号中,并可能与设备运行模式(如开机、暖机、普通运行及停机等)有关。为了提高预诊断精度,需要先对数据进行降噪处理。降噪方法有传统的低通或带通滤波、傅立叶变换、及新兴的小波变换。降噪过程中需要注意,有时噪声本身可能恰恰是揭示问题的信息,所以要对数据平滑降噪的程度与噪声的作用进行权衡。

2. 坏数据。传感器、网络布线以及存储介质的损坏,监测设备校准错误等,会使原始数据受到破坏。这些坏数据若直接参与预测,必然会误导评估和预测,降低分析结论的准确率。为此,

预诊断系统必须具备坏数据辨识和修正机制。扩大数据集容量,是弱化坏数据影响的有效办法,但是同时也会削弱系统对征兆变化监测的灵敏度,所以应对二者进行权衡。降噪处理通常是在设备现场的信号处理模块完成,而坏数据识别和修复,应在预诊断建模和预测分析数据输入前进行。

### 3.3 预诊断分析方法

预诊断分析方法是实现性能衰退趋势预测的手段,主要是指利用相关的算法和模型,对能够量化表征设备性能变化的评价因子(FOM, Figure of Merit)进行分析,进而得出结论的过程。可以利用统计方法(如一元或多元线性回归、时间序列分析、非线性回归等),人工智能的方法(如神经网络、模糊推理、贝叶斯网络、聚类分析等),或数学或物理解析的方法(如灰色理论,卡尔曼滤波、小波分析等)实现预诊断功能。FOM是设备性能衰退分析的直接对象,是一系列反映设备性能变化因素的函数,可定义为如下形式:

$$FOM=F(S,C,T,E,R)$$

其中,S为设备监测数据;C为状态监测及故障诊断等结论;T为设备相关技术参数;E为专家工程经验;R为设备运行负载和环境信息。

预诊断方法功能的实现应该能够输出以下结论: 设备给定时间内寿命消耗情况; RUL值; 评估和预测结论的可信度; 结论修正率; 设备性能变化的原因以及对其他系统的影响; 设备以当前性能状况能够完成下一阶段任务的可靠度;



图3 预诊断输入输出数据流图

为提高预诊断方法的精度和效率,还应注意权衡灵敏度和误警率;兼顾分析平缓和突发的性能变化趋势;根据预测精度不同需要,调整采样数据信噪比阈值,合理利用资源;需解决设备性能平缓变化阶段,性能衰退趋势性信息少的瓶颈,降低RUL的预测误差;预诊断响应时间要足够快,以保证为维护决策提供有效信息。

另外,设备管理的各个层次人员应充分按需利用预诊断信息,在设备出现薄弱环节前预先做好各自的准备,缩短了供应链、维修进度安排及其它过程的时间间隔,减少后勤保障延误,提高了维护效率。

## 4 结束语

CBM是保证设备经济安全运行的最佳维护方式,对于企业重要设备的管理维护、提高企业生产能力和安全及产品质量,具有十分重要的意义。预诊断系统能够提供选取最佳维护时机的信息,是CBM系统实现的关键。本文从过程统一、连贯实现的角度,阐述了预诊断的内涵,根据预诊断的功能需求和应用特点设计了一个预诊断系统参考模式,并对系统实现涉及的数据源,数据预处理、分析方法以及信息应用层次等关键问题进行了讨论。对进一步深入的预诊断理论研究以及高效的预诊断应用系统构建开发工作起到了指导作用。

本文作者创新点:基于“全局建模、局部使用”的思想,设计了一个预诊断系统实现的参考模式;界定了系统实现过程中涉及的数据源;给出了能够量化表征设备性能变化的评价因子(FOM, Figure of Merit)的定义;对预诊断的输入输出数据流包括

处理逻辑进行深入分析和规划。

### 参考文献

- [1]Open O & MTM For Manufacturing Joint Working Group. Condition based operations for manufacturing [EB/OL]. <http://www.mimosa.org/papers>,2004 - 10 - 05
  - [2]Byington C S, Watson M, Roemer M J et al. Prognostic enhancements to gas turbine diagnostic systems[A]. Aerospace Conference Proceedings [C]. Big Sky, MT, USA: IEEE Press, 2003: 3247-3255.
  - [3]YAN Jihong, MUAMMER Ko?, LEE Jay. A prognostic algorithm for machine performance assessment and its application [J]. International Journal on Production Planning & Control, 2004, 15(8): 796-801
  - [4]余刃,张永刚,叶鲁卿等.智能控制-维护-技术管理集成系统中维护子系统分析与设计方法的研究及应用[J].中国电机工程学报,2001,21(4): 60-65.
  - [5]毕静,胡静涛. Web Services技术在CBM系统开发中的应用研究[J].微计算机信息,2006,3-1:204-206。
- 作者简介:吴薇,女,1981年生,汉族,博士研究生,主要研究方向为设备远程监控与智能预诊断;胡静涛,男,1963年生,汉族,研究员、教授、博士生导师。主要研究方向为嵌入式系统、远程监控与故障诊断。
- Biography:Wu Wei, Female, 1981, Han Nationality, Ph.D Student, Research Field: Remote Monitoring and Prognostics; HU Jing-tao, Male, 1963, Han Nationality, Professor, Research Field: Embedded System, Remote Monitoring and Failure Diagnosis.
- (100080 北京 中国科学院沈阳自动化研究所)吴薇 胡静涛  
(100080 北京 中国科学院研究生院)吴薇  
通讯地址:(110016 沈阳市 东陵区南塔街114号 中科院沈阳自动化研究所三室)吴薇

(收稿日期:2007.6.13)(修稿日期:2007.7.15)

(上接第164页)

### 参考文献

- [1]张正伟.传感器原理及应用[M].中央广播电视大学出版社,1998.2
  - [2]李继容,何湘初.电子虚拟实验室中X-Y坐标仪的建立[J].微计算机信息,2006,3-2
  - [3]丛华.电涡流传感器温度稳定性研究.清华大学学报(自然科学版),1999.10
- 作者简介:杜保强(1973-),男(汉族),河南郑州人,河南职业技术学院,讲师,硕士,主要从事电子技术和信号处理技术的理论教学与研究。
- Biography:Du baoqiang(One nine seven three- -),male(the Han nationality),Henan zhengzhou, Henan vocation and technical college, lecturer, M.A., mainly engaged in teaching and study about electron technology and signal processing technology.
- (450046 河南郑州 河南职业技术学院)杜保强  
(Henan Vocation and Technical college zhengzhou 450046 China)Du Baoqiang  
通讯地址:(450046 河南 郑州市金水区锦苑路36号河南职业技术学院)杜保强

(收稿日期:2007.10.13)(修稿日期:2007.11.15)