

## 摘 要

基于现场的故障诊断系统的体系结构相对封闭，故障诊断与维修都会受到人力、技术以及地域的限制，故障诊断的时效性也受到一定的影响。现代工业设备正朝着超高速、超载荷、超精密、机电一体化、自动化、数字化、智能化、网络化、集群化方向快速发展。传统故障诊断技术越来越难以满足现代工业设备的需求，所以，应用现代信息技术和人工智能实施设备诊断工程，逐步实现状态维修和预知维修，是大型流程工业企业降低生产成本的重要途径，故障的远程诊断理论方法也变得更加重要和迫切。本文围绕关键机组远程实时监测诊断系统开发建设，对系统的建设思想和原则、信息处理与分析方法进行了分析研究。其主要内容包括：

一、论述了建立关键机组远程实时监测诊断系统的意义，探讨和研究了关键机组远程实时监测诊断系统的基本原理和结构，以及研究背景、研究现状、研究的基本思路和主要内容、论文的结构安排以及研究价值与创新之处等。

二、给出了总体方案与构架，设计出完整、统一的关键机组远程实时监测诊断系统监测平台；提供基于多种专业化分析图谱和监测诊断报警手段，并实现广域网监测、远程专家诊断服务、远程维护和远程升级服务等。

三、探讨和研究了建立关键机组远程实时监测诊断系统的理论与方法，结合现有的技术资料，提出了系统的软硬件结构设计方案，并对各组成部分进行选取和论证；分析故障诊断的处理规则，以系统软硬件为基础，加之故障专家诊断系统知识库和正向模糊推理，为知识规则提供了科学的依据。

四、总结了辽化多年现场诊断工作经验，分析了各种旋转机械振动的故障机理和识别特征，并对其进行科学分类，研究其对应关系，提出了黑灰白集合筛选法。根据旋转机械各种典型故障特点，从故障诊断角度出发，有针对性的提取并分类组合故障特征参数，并在此基础上设计智能专家诊断系统。

关键词：关键机组；状态监测；远程实时监测诊断；数据库

## Development and Application of Remote Realtime Monitoring and Diagnosis System for Critical Machine Set

### Abstract

Local based equipment fault diagnosis system is so close relatively that troubles diagnosed and maintained are limited by manpower, technology and region. The equipments of modern industry are developed fast towards the hypervelocity, ultra load, ultra precision manufacture, the electron mechanics integrates, automation, digitization, intelligent, networking. The traditional equipment fault diagnosis system is more difficult to meet apparatus of modern industry's demands, so, using the modern information science and artificial intelligence to achieve the predictive maintenance is one of the important way to reduce the production cost in the process industries. The theory and methods of remote real time monitoring and diagnosis on critical machine set have become more important and exigent. The principles to build a remote realtime monitoring and diagnosis system, processing methods of information, diagnosis analysis methods, the management and reuse of knowledge, data transfers and transaction, the methods of comprehensive diagnosis are systematically studied in this thesis. The main contents are given as below:

Firstly, the signification to develop remote realtime monitoring and diagnosis system on critical machine set, the background of this research, the achievements at home and abroad, the methodology is discussed. Then the main contents and the structure are introduced

Secondly, the basic principles and general structures of remote realtime monitoring and diagnosis system on critical machine set which provided various specialization analysis, atlas alarming system and Implementation wide area network monitoring remote expert service remote maintenance and upgrade service are described.

Thirdly, the method of network based remote realtime monitoring and diagnosis system on critical machine set is researched. Combining with existing technical information experience, the project of software/ hardware is developed. Then give the selection and demonstration of each part. By analyzing processing rules of fault diagnose, on the basis of system software/hardware and the knowledgebase of fault diagnose expert system and the fuzzy property and uncertainty of some knowledge ,it is provided that the scientific basis for the popularization application of this method.

Finally, the dissertation summarized the engineering experience in machinery fault diagnosis in Liaoyang Petrochemical Company in recent years. The author analyzed kinds of

rotating machinery mechanism of faults and recognition clues in vibration. On the basis of scientific classification the author studied its corresponding relation and put forward a new diagnosis method that black-gray-white gathering distinguishing sieve method. Referencing to the characteristics of typical faults found in the rotational machinery and from the aspect of fault diagnosis, the monitoring and diagnosis parameter set is extracted purposely and classified, that provided scientific basis for the knowledge rules.

**Key Words:** Critical Machine Set; Condition Monitoring; Remote Realtime Monitoring and Diagnosis; Database

## 大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：关键机组过程实时监测诊断系统的开发与应用

作者签名：兴成宏 日期：2008年12月6日

## 大连理工大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目： 关键机组过程实时监测诊断系统的开发与应用  
作者签名： 兴成岩 日期： 2008 年 12 月 6 日  
导师签名： 李刚 日期： 2008 年 12 月 6 日

# 1 绪论

## 1.1 选题的背景及意义

设备故障诊断技术从诞生以来,由面向单台或单一类型的设备,逐渐发展到以计算机网络为基础,把分布在各处的传感器与各种服务和管理站点联系起来的分布式监测与诊断系统,并随着 Internet 在全球范围的迅速发展,为实现远程设备故障诊断提供了条件和基础。

2005年5~7月,中国石油天然气股份有限公司设备故障诊断技术中心受化工与销售分公司技术装备处的委托,对化工与销售分公司9家地区分公司的关键机组运行管理及状态监测工作开展情况进行了调研。调研的9家地区公司共有关键机组183台,其中已经安装在线监测系统的有97台,占总数的53%;但所安装的系统来源较多,而且有些在线监测系统在稳定性、数据准确性和数据完整性等方面尚存在欠缺。

因此,建立网络化监测管理平台势在必行,依托现有的在线监测系统,对股份分公司内所有关键机组全面获取设备运行状态信息,并充分利用网络优势,实现设备状态信息的多角度利用,数据多层次共享,使各级设备管理人员可及时了解设备运行状况;同时充分发挥股份公司的专家资源优势,实现机组故障的网上专家会诊。对关键机组全面实现远程监控、远程诊断,以提高整个股份公司的设备监测、管理水平,为生产的顺利进行切实起到保驾护航的作用。

## 1.2 国内外现状及发展趋势

### 1.2.1 故障诊断技术与设备诊断工程

随着科学技术的不断进步与发展,尤其是计算机技术的迅猛发展和普及,故障诊断技术已经发展成为一门较为完善的新兴综合性工程学科。故障诊断是在一定工作环境下,根据系统运行过程中产生的各种信息判断系统是正常运行还是发生了异常现象,并判定产生故障的原因和部位,以及预测、预报系统运行状态的技术<sup>[1]</sup>。应用现代信息技术和人工智能实施设备诊断工程,逐步实现状态维修和预知维修,是大型流程工业企业降低生产成本的重要途径之一<sup>[2]</sup>。

设备诊断工程(PDE Plant Diagnosis Engineering)包括机电装备运行状态和工况监测、故障诊断和预测、维修决策、优化操作、指导改进机器及其设计等在工业企业实施的全过程,近年来在我国得到广泛的发展和应用。应用现代信息技术和人工智能,充分挖掘信息和知识资源,逐步改进机电装备的维修方式,从事后维修(BM)和定时维修(TBM)过渡到

集状态维修(CBM) 和可靠性维修( RCM)的基于风险的动态智能维修是石化、冶金、电力等流程工业杜绝事故、减少故障、降低生产成本的重要途径之一<sup>[3]</sup>。近年来,在我国一些企业实施设备诊断工程已取得显著成效。

设备诊断工程不仅采用传统的对损坏的设备进行失效分析的方法,而且要将运行中的工业装备看作“活机器”,它时时刻刻在“说话”——发出信息,对其中的故障征兆信息进行采集、处理、分析,并对故障进行诊断、预测,从而查清故障原因并采取修复、预防、改进的对策。设备诊断技术正在成为信息、监控、通信、计算机和人工智能集成技术,并逐步发展成为一个多学科交叉的新学科。近年来,已由单纯的设备故障诊断(PFD)发展为设备诊断工程,而且今后可能发展成为设备医学工程(PMD)<sup>[4]</sup>。显然,设备诊断工程比传统的失效分析更有利于对故障的超前预防,二者兼用之,更便于对设备消患治本。

### 1.2.2 故障诊断技术的研究现状

随着人工智能技术的发展,使诊断技术进入了崭新的发展阶段。以人工智能技术为支持的基于知识的处理、知识推理为核心的智能诊断和以信息处理工具为基础的新型诊断代替了以数值计算和信号处理为核心的诊断过程。在智能诊断中,诊断过程从信息检测到维修计划都实现了知识化,达到了信号检测、数据处理与知识处理的统一<sup>[5]</sup>。在此阶段,以快速傅立叶变换为核心的经典信号处理方法在工况监测与故障诊断中发挥了巨大的作用,包括:频谱分析、相关分析、传递函数分析、时间序列分析、包络分析等。对具有时变特性的信号广泛采用时频分析法,如短时傅立叶变换、Wigner-Vill 分布、小波分析等方法<sup>[6]</sup>。模糊理论和人工神经网络等最新工具在诊断领域中得到广泛应用。

如今,对复杂系统进行在线监测和智能诊断已成为诊断技术研究的前沿和焦点。在专家系统比较成熟的国家,故障专家诊断系统已基本完成了研究和试验阶段,开始进入了广泛应用阶段<sup>[7]</sup>。

现有的故障诊断技术主要分为三大类:基于定量模型的故障诊断技术、基于定性模型的故障诊断技术和基于历史信号处理的故障诊断技术<sup>[8]</sup>。

#### (1) 基于定量模型的故障诊断技术

其核心思想是用解析冗余取代硬件冗余,以系统的数学模型为基础,利用观测器(组)、等价空间方程、Kalman 滤波器、参数模型估计和辨识等方法产生残差,然后基于某种准则或阈值对该残差进行评价和决策<sup>[9]</sup>。这类方法中常用的技术有三类:

##### ① 状态估计方法;

② 参数估计方法；

③ 等价空间法。

这些方法的缺点是过分依赖于系统的数学模型，对于建模误差、参数摄动、噪声和干扰非常敏感，一般仅适用于线性对象的单个故障分析<sup>[10]</sup>。

(2) 无模型的故障诊断技术

其包括基于定性模型的方法和基于历史数据的方法，近年来日益受到国内外学者的关注，尤其在非线性系统领域，获得了广泛应用<sup>[11]</sup>。这种方法引入了诊断对象的许多信息，特别是可以充分利用专家诊断知识等，通过过程的深层浅层知识获得故障监测产生式规则，实现故障监测与诊断功能；或者根据直接可测的输入输出及其变化趋势或者利用系统直接可测信号与故障源存在的关系，提取幅值、相位、频谱等特征值，用这些特征值分析、判断、处理故障<sup>[12]</sup>。这些方法主要有：

① 故障树分析方法；

② 统计特征提取方法；

③ 基于小波分析技术的故障监测与诊断；

④ 基于专家系统的诊断方法；

⑤ 基于神经网络的故障监测与诊断。

### 1.2.3 大型透平离心压缩机组故障诊断技术研究中存在的问题

通过对上述诊断技术的分析研究，目前大型旋转机械故障诊断系统主要存在以下问题：

(1) 大型旋转机械特别是透平离心压缩机组系统运行状况复杂，干扰因素多，使得早期故障信号在形式上、程度上征兆表现微弱<sup>[13]</sup>。同时传统旋转机械故障专家诊断系统一般是基于以振动信号为主要信号源的状态监测系统集成搭建的，由于其自我封闭性与其他生产执行系统集成困难，振动特征成为故障诊断单一信息源，获得的仅是局部、片面的信息，它的信息量是十分有限的；而且每个信息源还受到自身品质，性能噪声的影响，采集到的信息往往是不完整的，带有较大的不确定性，甚至是错误的<sup>[14]</sup>。

(2) 诊断系统与当前诊断对象的故障空间与机组结构参数、机组工艺参数有着一定的关联关系，传统的故障专家诊断系统并未引入或难以在线获取全部诊断所需机组结构参数、机组工艺参数，致使故障空间及识别框架冗余或不准确，增加了故障诊断分析中的不确定性因素，影响故障诊断精度<sup>[15]</sup>。

(3) 将故障诊断决策分析技术放在大型炼化企业设备风险管理流程中考虑，故障诊断决策分析系统一方面实现由数据到信息的转变，当机组出现故障或早期故障征兆的时



候及时发现、精确诊断,另一方面根据诊断结论提出维修、维护、检测指导策略,形成状态维修或预知维修建议,传统诊断分析系统由于其并未综合考虑故障损失、生产损失、环境、维修成本等多方面因素,无法科学、有针对性的提出维修维护策略<sup>[16]</sup>。

#### 1.2.4 设备远程诊断技术概述

基于因特网的设备故障远程协作诊断是将设备诊断技术与计算机网络技术相结合,用若干台中心计算机作为服务器,在企业的重要关键设备上建立状态监测点,采集设备状态数据;而在技术力量较强的企业或科研院所建立分析诊断中心,为企业提供远程技术支持和保障。生产企业设备运行出现异常,其状态监测服务器立即以工作传票方式向诊断分析服务器申请在线技术援助,同时以电子邮件方式向有关专家发出离线会诊请求;在短时间内调动入网的所有诊断资源,实现对设备故障的早期诊断和及时维修。

基于网络的远程诊断研究工作首先是从医学领域开始的。50年代末,美国学者 Wittson 首先将双向电视系统用于医疗,这被认为是最初的远程诊断。60年代初,为调查失重状态下宇航员的健康及生理状况以及为亚利桑那州 Papago 印第安人居住区提供远程医疗服务,人们通过卫星和微波技术,传递包括心电图和 X 光片在内的医学信息<sup>[17]</sup>。自 80 年代后期,美国和西欧国家的远程医学系统发展速度最快,联系方式多是通过卫星和综合业务数据网(ISDN)<sup>[18]</sup>。1988 年美国提出远程医学系统应作为一个开放的分布式系统的概念,同时美国学者还对远程医学系统的内容作了如下定义:它包括远程诊断、信息服务、远程教育等多种功能,它是以计算机和网络通信为基础,针对医学资料(包括数据、文本、图片和声像资料)的多媒体技术,进行远距离视频、音频信息传输、存储、查询及显示。1991 年,美军在海湾战争中成功运用了远程医学技术<sup>[19]</sup>。

以信息为基础的设备故障监测与诊断也面临着新的机遇和挑战,传统的、封闭的单一体系已经无法满足用户对设备管理日益增长的要求,而远程医疗诊断所采用的系统结构、信息传输方法和异地专家会诊组织以及实现形式等都可为远程设备诊断所采用和借鉴。信息化是未来之路,依托 Internet 来构筑新型的网络化开发平台,可使设备状态监测在信息采集、交换、处理、分析诊断、管理等方面获得前所未有的技术支持<sup>[20]</sup>。随着 Internet 迅速发展,利用 Internet 技术选择适当的网络系统作为开发平台实现远程设备故障监测与诊断,使分布各地的诊断系统和专家分析系统延伸互联,发展异地诊断和网上服务是势在必行的<sup>[21]</sup>。

与医学远程诊断相比,工业领域的远程诊断工作起步较晚,进展相对较慢。1997 年,首届基于 Internet 的工业远程监测诊断研讨会由斯坦福大学和麻省理工大学联合主

办。会议讨论了远程监测诊断系统的连接开放体系、诊断信息规程、传输协议、以及对用户的合法限制，并对未来技术发展作了展望<sup>[22]</sup>。许多国际组织，如 MIMOSA、MFTP、COMADEM、Vibration Institute 等纷纷通过网络进行设备故障诊断咨询和技术推广工作，并制定了信息交换格式和标准<sup>[23]</sup>。

90 年代以来，由于受到远程医疗诊断系统与分布式控制系统发展的影响，也是由于封闭式状态监测诊断系统自身的局限性越来越严重的阻碍了其广泛推广与技术发展，基于 Internet 的远程设备监测与诊断系统的研究受到高度重视，机械设备的远程监测与诊断可以实现“移动的是数据而不是人”，从而改变了一旦设备发生故障，诊断人员就疲于奔命的被动局面<sup>[24]</sup>。这种基于 Internet 的远程监测诊断网络系统可以认为是第三代设备状态监测诊断系统。

国内方面，北京化工大学、西安交通大学、上海交通大学、华中理工大学、北京工业大学和哈尔滨工业大学都在向国外先进水平看齐，已开始或准备开始从事工业领域的远程诊断研究工作，有的院校在因特网上设立了一个远程诊断宣传站点，向国内外介绍远程诊断技术，并以技术示范的方式向用户提供十分有限的远程诊断服务<sup>[25]</sup>。同时 BENTLY、ENTEK、SOLTRAN 等大公司也纷纷将他们最新的网络化设备状态监测产品推向中国市场<sup>[26]</sup>。

### 1.2.5 辽阳石化公司应用故障诊断技术综述

辽阳石化公司是大型石油、化工、化纤联合企业，设备自动化程度高，结构复杂，技术先进，连续生产，介质具有易燃、易爆、高温、高压、易腐蚀的特点，许多关键设备、大机组无备台，设备一旦发生故障给生产和质量造成的影响往往大的难以估计。

汽轮机、发电机、压缩机、鼓风机等旋转设备是辽阳石化公司的核心设备，为了确保关键机组长周期稳定运行，我们开展了大型机组安全运行关键技术的研究，把常年的实践经验和理论知识相结合，深入研究各种故障的机理，一方面在设计阶段，利用先进的理论计算方法分析新设备的振动特性，杜绝产生“先天不足”，从设计的源头把关；另一方面在运行阶段，我们采用现代化的监测手段，及时掌握设备的运行状态，预防和杜绝事故的发生。关键机组故障停机率大幅度下降（如图 1.1），设备的运行周期明显延长，大大提高了经济效益和社会效益。本文是作者亲身从事这方面技术和管理工作的总结。

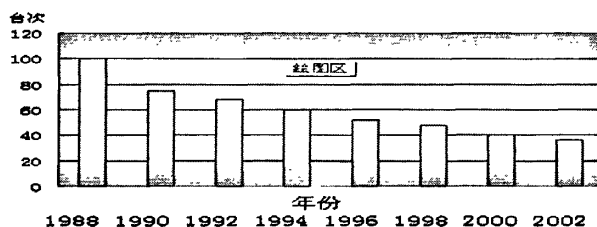


图 1.1 辽阳石化分公司 27 台关键机组故障停机台次图

Fig.1.1 The figure of number changing of fault machine each year in Liaoyang Petrochemical company

设备故障诊断技术是国内外发展较快的一门新兴学科。为了充分发挥该技术的作用，1990 年辽阳石化公司研究建立了“石化设备监测诊断及维修决策信息系统 Monitoring diagnosis—Maintenance decision information system”简称“2MDIS”的模式，对公司设备进行了 A、B、C 科学分类，对机电装备状态监测实行三级（即公司、厂、车间）、八定（即定人员、定设备、定测点、定仪器、定周期、定标准、定表格、定参数）管理，使其规范化、程序化、数字化。明确一、二、三级监测设备的范围，建立健全了设备监测档案，建立数据库、结构库、信息库，根据公司多年监测诊断经验研制了实用的专家系统。

该模式根据设备 A、B、C 分类建立了设备的监测网，A 类由公司机械技术研究所负责，B 类由厂负责，C 类由车间负责，各级监测网配备相应仪器，根据设备情况定周期、定仪器、定标准、定点进行监测，采集数据，画出趋势图，分析设备劣化程度，诊断故障原因，做到预知维修，避免设备故障和事故的发生。

多年来，我们应用 2MDIS 系统坚持对大型关键机组开展“特护”管理与“八定”巡检，有效地保障了现有 27 台关键机组平稳可靠运行。每台机组在现场设立了“关键机组特级监护站”，明确了特护责任人、职责、机组监护参数、巡检路线及安全、平稳运行状况等。同时设有各类人员巡检、检查记录本，管理人员（即特护小组长）每天要履行签字认可。使得关键机组完全在受控状态下安全、可靠运行，为装置经济、平稳运行起到了应有作用。

对关键机组按 A 类网进行管理，公司设备处机械技术研究所每月对 27 台关键机组 296 个测点进行一次巡检，采集机组运行状态数据（每年监测 3552 点）。并利用分析软件作出趋势分析，发现问题及时查询结构库、信息库的有关内容，进行故障诊断并与现场沟通，下发“检修通知单”。同时适时安排检修，即做到了关键机组的预知检修，又

消除了设备隐患，杜绝了机组故障及事故的发生。公司关键机组的故障停机台时逐年大幅度下降，有力地保障了关键机组的平稳运行。

应用设备状态监测故障诊断技术开展关键机组特护活动，推行 CBM 维修，使设备管理工作由被动变主动，取得了显著的经济效益。故障诊断技术对于大型设备正常运行的重要性已逐渐被人们所认识。从设备故障诊断技术诞生以来，诊断系统由面向单台或单一类型的设备，发展到以计算机网络为基础，把分布在各处的传感器与各种服务和管理站点联系起来的分布式监测与诊断系统。Internet 在全球范围的迅速发展，为实现远程机械设备故障诊断提供了条件和基础。

远程故障诊断技术是通过设备故障诊断技术与计算机网络技术相结合，在大企业的重要关键设备上建立状态监测点，采集设备状态数据。而在技术力量较强的核心单位建立诊断中心，对设备运行进行分析诊断的一项新技术。远程诊断的实现既能使机械设备的故障诊断更加灵活方便，应用更加广泛，又能实现资源共享，避免重复开发，加强企业间以及企业与外部科研院所的交流。基于网络的设备远程实时监测诊断系统充分利用各企业现有监测诊断系统，将其联成网络。由于采用了网络结构，监测系统的价格降低，使得监测范围的扩大成为可能，由原来只监测关键机组扩大到对大电机、风机、往复式压缩机、泵等的监测，这对企业提高管理及维修决策水平意义重大，经济效益可观。以辽阳石化公司为例，十几年在振动诊断工程方面的投入产出比为 1:12。石化系统每年都发生十几台次大机组事故，有的造成机毁停产；还有的因原因不明，不得不延长检修时间，生产损失严重；有时请专家会诊，在路途上人力、物力消耗大，并且不及时。辽阳石化作为原中国石化及现中国石油设备故障诊断技术中心，十多年来曾为许多企业诊断排除大机组故障 110 多台次，如果建立远程诊断系统，可以节省大量人力物力。基于网络的设备远程实时监测诊断系统可以充分挖掘信息、知识资源，充分发挥诊断专家的作用，利用该系统在中国石油乃至全国对设备诊断的疑难问题进行会诊，益处如下：

- (1) 杜绝事故，减少故障，减少非计划停机；
- (2) 减少大检修中等待时间；
- (3) 减少过剩维修；
- (4) 使检修有的放矢，对症下药；
- (5) 延长运转周期。

### 1.3 本文的主要内容及安排

建立关键机组远程实时监测诊断系统，将服务器放置于辽阳石化公司，通过股份公司内部网将炼化企业的所有关键机组运行状况按照一定的网络拓扑结构、采用多种网络

连接方式连接，形成一个完整的系统，对关键机组进行实时监控和管理，使各级负责人能及时准确地掌握设备状态，同时实现远程诊断，确保关键机组的安全、稳定、经济合理长周期运行，延长设备使用寿命和检修周期，节约维修费用，最终实现预知维修的目标。

本项目旨在提高设备故障诊断技术中心的诊断水平和提供更加完善、统一的股份公司关键机组远程实时监测诊断管理系统平台。能给炼化企业设备管理带来全新的机组管理模式，提供优越的基于多种专业化分析图谱和监测诊断报警手段，并实现广域网监测、强大的多层次的远程专家诊断服务以及快速、方便的远程维护和远程升级服务等。

本项目主要建设内容包括：

(1) 针对旋转机械振动信号的特点，提供诊断中心使用的大型振动分析及故障诊断实时数据库；

(2) 建立故障专家诊断系统平台，提供包括自动专家诊断系统开放式平台和人机交互式专家诊断系统开放式平台；

(3) 针对振动信号数据的特性，提供高无损压缩比的通讯系统软件包；

(4) 针对故障诊断专家的经验 and 特点，开发便于行业专家使用的诊断分析软件包；

(5) 为便于远程诊断专家之间以及专家与现场相关人员的沟通与交流，提供集成于监测诊断系统内的交流互动平台。

围绕上述任务及特点，本文探索论述了关键机组远程实时监测诊断系统基本概念、一般模型、结构特点、系统的总体框架与拓扑结构。就远程实时监测诊断中心的知识管理与运用、数据库系统、智能综合诊断理论与方法、信号分析和信息交流等方面进行了研究，并针对关键机组进行了综合诊断实验研究，初步建立了一个较为完整的关键机组远程实时监测诊断系统，并以成功的诊断实例验证了系统的性能。全文共分 5 章，主要内容如下：

第一章 绪论，阐述了建立关键机组远程实时监测诊断系统的背景及意义以及远程诊断技术的概念。综述了目前国内外状态监测与诊断技术的现状与发展动态；给出了本文的主要工作内容。还论述了流程工业中装备的智能维修技术研究的背景及意义以及智能维修技术组成。进而分析了大型旋转机械实时状态监测早期预警技术、大型离心透平压缩机组故障诊断技术以及流程工业智能维修技术与工程资产安全风险管理的现状及面临的主要问题。

第二章 关键机组远程实时监测诊断系统总体方案与构架，探讨和研究了关键机组远程实时监测诊断系统的基本原理和结构，给出了总体方案与构架，设计出完整、统一

的关键机组远程实时监测诊断系统监测平台；提供基于多种专业化分析图谱和监测诊断报警手段，并实现广域网监测、远程专家诊断服务、远程维护和远程升级服务。

第三章 叙述了旋转机械常见故障机理及识别特征，分析故障诊断的处理规则，以远程实时监测诊断系统软硬件为基础，加之故障专家诊断系统知识库和正向模糊推理，设计出故障专家诊断系统；在总结辽化现场诊断经验及现有研究成果的基础上，针对炼化企业大型旋转机械智能诊断需要综合运用各种诊断知识、诊断方法和诊断专家等特点，对智能诊断知识系统的获取、运用和管理等问题进行了研究，为建立关键机组远程实时监测诊断系统知识库奠定基础。

第四章 关键机组远程实时监测诊断的考核及实际应用案例分析，对远程实时监测诊断系统进行运行考核，通过考核来检验系统的实际效果并进行分析和评价。利用关键机组远程实时监测诊断系统对透平压缩机组进行故障诊断的案例，论文分析了透平压缩机组的故障特点，分别提出了诊断意见，指导现场提前预防或正确诊断机组故障。

第五章 总结与展望，对全文的主要研究成果进行了总结。

## 2 关键机组远程实时监测诊断系统总体方案与构架

### 2.1 引言

中国石油天然气股份有限公司广泛从事与石油、天然气有关的各项业务，企业资产超过 500 亿美元，下属数十家大型油田、炼化、石油分公司的生产设备中大型旋转机械（压缩机、烟机、风机等）超过 2000 台套。如何提高中石油股份公司对下属生产厂的设备管理和维护指导，提高对大型机组等核心设备的监测和管理维护能力，已经成为股份公司为了实现“改进本公司的技术平台及通过持续性重组和经营合理化降低成本”的业务战略，提高企业综合竞争力而必须面对的重大课题。

目前，股份公司在提高机组管理水平的过程中与下属各个企业之间存在着严重的“信息不对称”。股份公司的管理者缺乏对大型机组等关键设备实施科学、严格、统一管理所必需的基础运行数据，不能及时、准确掌握分散在全国各地机组的第一手运行状态信息，这归根结底在于机组运行状态的透明化和信息共享上，我们称之为机组设备管理中的“信息化瓶颈”。设备管理中“信息化瓶颈”的存在严重影响了股份公司设备现代化管理的推广实施。因此，要摆脱“信息化瓶颈”的困境，仅仅依赖现有的监测技术和管理模式是远远不够的，必须依托最新的远程监测诊断技术，拓展设备信息化管理的新思路，建立一种科学、合理、实用的设备管理模式。

本课题旨在提高设备故障诊断技术中心的诊断水平和提供更加完善、统一的股份公司关键机组远程实时监测诊断系统平台。该平台能给股份公司设备管理带来全新的机组管理模式，提供优越的基于多种专业化分析图谱和监测诊断报警手段，并实现广域网监测、强大的多层次的远程专家诊断服务以及快速、方便的远程维护和远程升级服务等。

随着现代计算机技术、网络技术、电子技术以及信号处理技术的不断发展，新技术不断涌现，这些技术的出现，使早年一些无法实施的想法和研究成为可能。在设备监测与诊断行业也有着同样的发展趋势。

就技术方面而言，随着计算机网络技术的发展以及使用成本的急剧下降，特别是广域网技术和 Internet 技术的发展，在城市间、企业间传输大批量数据在速度上成为可能，同时其稳定性、可靠性以及安全性也可以得到有效保障，这为旋转机械运行信息的网络化技术提供了契机，也为诊断中心开展远程诊断服务和远程培训提供了十分良好的网络基础。

## 2.2 项目技术综述

本远程实时监测诊断系统的主要功能是首先通过分布在各分公司的数据采集系统对分公司内部现场运行的机组的运行状态进行实时在线的状态监测与故障诊断，全面、深入分析机组的状态信息，包括机组振动位移、速度、加速度信息、转速信息、轴位移等，以及功率、温度、压力、流量等工艺量信息（根据各机组的实际情况采集不同类型数据）。然后，通过通讯技术和数据压缩技术，各分公司机组数据通过北京中转服务器将机组运行状态数据远程传输到远程监测诊断中心服务器上，实现对下属各生产厂机组的运行信息的统一管理、数据汇总、远程专家会诊等。

### 2.2.1 系统架构

远程实时监测诊断系统采用网络拓扑结构，以中国石油股份公司设备故障诊断技术中心为主站，以化工与销售分公司各分公司为分站，如图 2.1 所示。

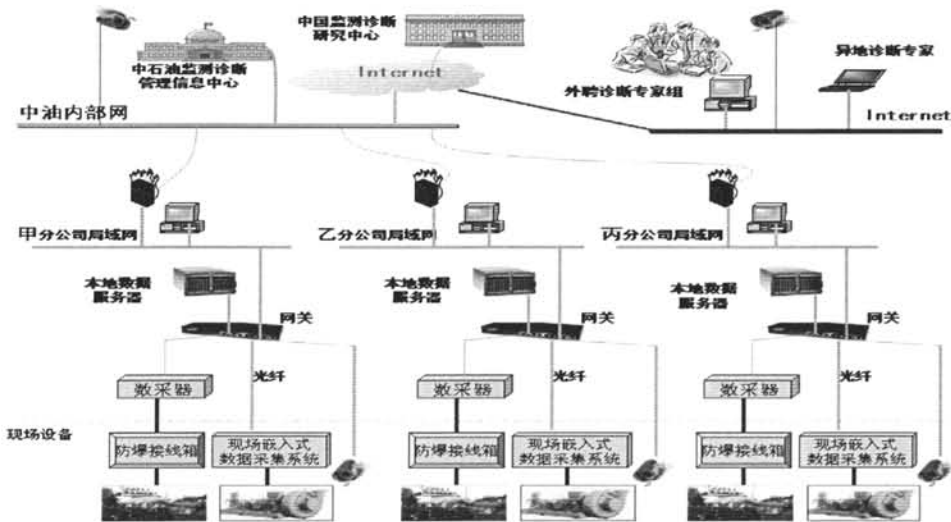


图 2.1 实时监测诊断管理系统网络拓扑图

Fig. 2.1 The figure of real-time monitoring diagnosis management system

上图为远程实时监测诊断系统的网络拓扑图，本远程实时监测诊断系统由远程监测诊断中心（以下简称远程中心）、分厂数据服务器以及现场数据采集器组成；其中远程监测诊断中心服务器安置在中国石油股份公司设备故障诊断技术中心（辽阳石化公司机械技术研究中心），分厂数据服务器以及现场数据采集器安装在化工与销售分公司各个分公司。



### 2.2.2 远程中心内部架构

关键机组远程实时监测诊断系统由大型数据服务器阵列、数据存储器和专用软件等组成。远程中心可以完成对各分厂数据服务器及数据采集器进行管理与设置，对各分厂机组运行数据的长期存贮和管理，为总公司管理人员提供机组自动运行统计和各种报表自动生成功能，为公司各级诊断专家和工程师提供专业的诊断功能，为行业专家提供网上共享的工作平台。远程中心内部网络架构图如图 2.2 所示。

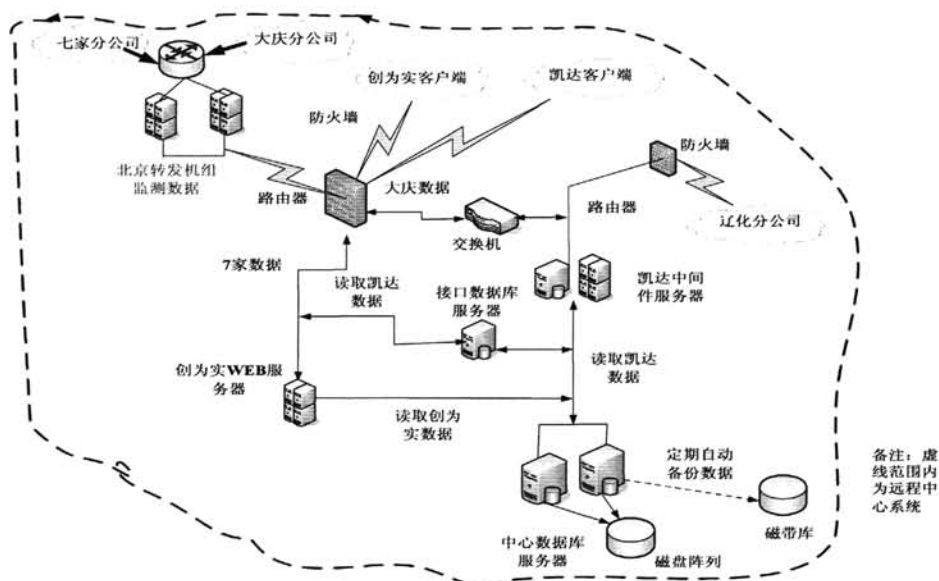


图 2.2 远程中心内部的网络框架结构图

Fig. 2.2 The network frame of Remote diagnosis center

### 2.2.3 远程实时监测诊断中心的整体运行结构

远程实时监测诊断系统主要由数据采集及在线状态监测预报系统和故障专家诊断系统构成。

数据采集及在线监测预报系统主要包括传感器系统、智能数据采集系统、在线监测预报系统。

故障诊断系统包括信号分析处理系统和故障专家诊断系统两大部分。

项目的整体运行结构如图 2.3 所示

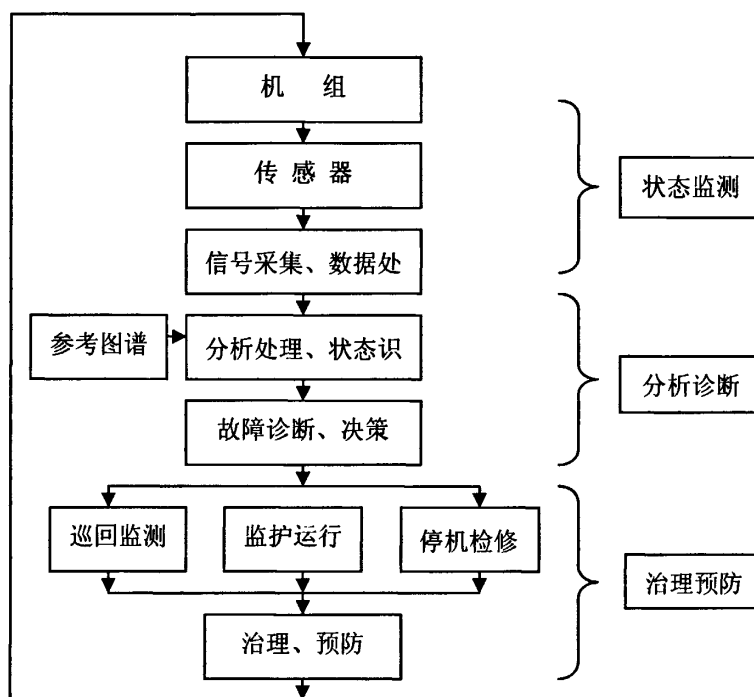


图 2.3 项目的整体运行结构图

Fig. 2.3 The sketch map of the item

#### 2.2.4 远程实时监测诊断系统硬件构成

中国石油远程实时监测诊断系统的硬件配置方案充分考虑了系统数据的安全性、数据冗余性、数据的实时性、数据的完整性、系统的抗压性等。

(1) 机柜：采用 IBM42U 专用机柜，保证了服务器就位的安全性和美观性。

(2) 不间断电源 UPS：采用了 Smart 8000 Ups ,Smart 10000ups,apc 台式机 ups ，保证了系统的安全性和稳定性。

(3) Cisco PIX 515E 防火墙。

(4) Cisco PIX 515E 硬件防火墙：该防火墙大量应用于金融、证券、政府、教育和大中型企业等领域，Cisco 防火墙支持 130000 并发连接数，最大吞吐量达 188Mpps。并集成入侵监测系统 (IDS)。Cisco 防火墙系列提供了先进、高性能的保护，可防御网络和应用层攻击、拒绝服务 (DoS) 攻击。满足 UL 1950, CSA C22.2 No. 950, EN 60950, IEC 60950, AS/NZS3260, TS001, IEC60825, EN 60825, 21CFR1040 等安全标准，能为远程中心提供足够的安全保护。

(5) Cisco Catalyst 系列 24 口 1000M 交换机：业界最有权威的 Cisco 产品，架设以稳定、安全为原则，提供光纤扩展，为了给中心提供可靠稳定安全的网络基础平台，在型号和性能上充分考量可扩展性以及长期投入方面能得以保证，能满足未来一段时间 IT 需求的产品。

(6) IBM 3573-L2U(TS3100)磁带机+IBM X346 备份服务器：实现对数据海量存储的定期自动备份，实现数据存储转移和冗余。

(7) IBM X3850 数据库服务器+IBM DS400 磁盘阵列柜：为了使服务器性能得到充分发挥，我们将服务器的计算应用与数据存储分离，在存储方面我们选择 IBM SAN 磁盘阵列柜，纯光纤数据传输，数据传输达到 800M/S ,配备 4T 的海量存储可保存 5-10 年的数据，同时 SAN 磁盘阵列柜支持容量扩展，最多可支持上百 T 的海量存储。支持热插拔，双电源备份，外部连接为 2G 光纤线路。如果未来有需要可以为机房其它服务提供存储空间，只需增加相应的插件即可。

(8) 在数据库服务器的运算方面我们选择了 IBM 小型服务器双 CPU 4G 内存容量。单独为数据库提供快速的运算处理能力。

(9) IBM X3650 WEB 服务器：WEB 服务器是提供所有数据再现的一个窗口，也是为远程诊断提供的可视化界面，所以在数据处理能力及负载均衡上进行了评估。我们选择了双 CPU 2G 内存的 IBM 服务器配置，并可根据需要进行再扩展，为以后的升级预留空间。

(10) 转发服务器 dell poweredge sc440 & dell poweredge 1600sc。

(11) 接口服务器 dell poweredge sc440 x 2。

### 2.2.5 远程实时监测诊断系统软件组成

客户端软件：可在 windows 2000,windowsNT,windows xp,windows sever 2000 等操作系统下运行；

服务器软件：可在各种 WINDOWS 和 LINUX 等系统上运行；

防火墙：选用 LINUX、WINDOWS 系统构建；

数据库：Microsoft SQL SERVER 2005；

数据备份：Symantec vertias 10D ；

数据转发：wingate；

杀毒软件：Symantec antivirus；

系统软件：S8000。

## 2.2.6 关键技术

为了确保关键机组远程实时监测诊断系统的管理功能、诊断功能以及交流平台的顺利实现，确实为总公司及各分公司的设备管理水平提高、生产效益提升发挥重要作用，在实施该系统方案时，实现了以下关键技术：

### (1) 诊断服务技术

组成了以机组状态监测和故障诊断领域权威——工程院院士为首的，结合大专院校深厚理论基础和现场诊断专家丰富的实践经验的专业化设备故障诊断和设备管理专家组，为总公司和各分公司的运行机组提供故障预警、远程诊断和维修指导以及现场诊断服务。

### (2) 数据采集技术

以嵌入式 LINUX 操作系统为核心的数据采集平台，满足大型旋转机械高速、并行、同步整周期采集，以及自动采集高速起停机数据的要求。并采用最新的信号处理和故障识别技术，满足高达 1600 线频谱分析和故障特征量的提取功能，具有分频报警功能，以捕捉机组的早期故障征兆，将故障控制在萌芽状态。

### (3) 数据库技术

采用大型关系型数据库——MS SQL server，该数据库具有数据容量大、查询方便快捷、备份管理方便、易于维护等特点。以长期稳定地保存机组历史数据、故障数据以及起停机数据。

### (4) 智能报警监测存储技术

系统根据智能判断快变、缓变、趋势等报警特性对数据进行分析、存储，实现有用数据不丢，无用数据少存的科学存储。

### (5) 网络 IP 自动寻优技术

根据用户查询的数据及要求的调用速度，系统自动搜索各层服务器的连接速度，找到最能满足使用者需求的数据源。

### (6) 远程浏览技术

总公司专家、外聘诊断专家以及现场专家和工程师可以通过分公司内部网、中石油内部网以及 INTERNET 远程浏览机组运行数据并实施对机组故障的远程诊断。可以通过基于 WEB 浏览方式为各级管理者提供机组日常运行信息。

### (7) 远程数据传输技术

机组数据（包括波形、频谱、故障特征以及工艺量参数）可以通过 INTERNET 或中石油内部网进行远程数据传输，并有效保障数据的保密性、网络的安全性以及传输速度。

### (8) 系统开放性和可扩展性

该系统的设计具有充分的开放性和可扩展性，系统的数据库、数据结构是公开的并可以开发灵活的数据接口。能够满足该方案的二次开发和扩展，与中石油信息平台充分融合，与 RBI、RCM 等专业软件充分对接。

## 2.2.7 常规图谱分析功能

### (1) 总貌图

总貌图（如图 2.4 所示）显示系统所监测的机组结构、测点分布以及这些测点值的实时变化情况。同时在总貌图上可以方便的切换所选通道相应的图谱。

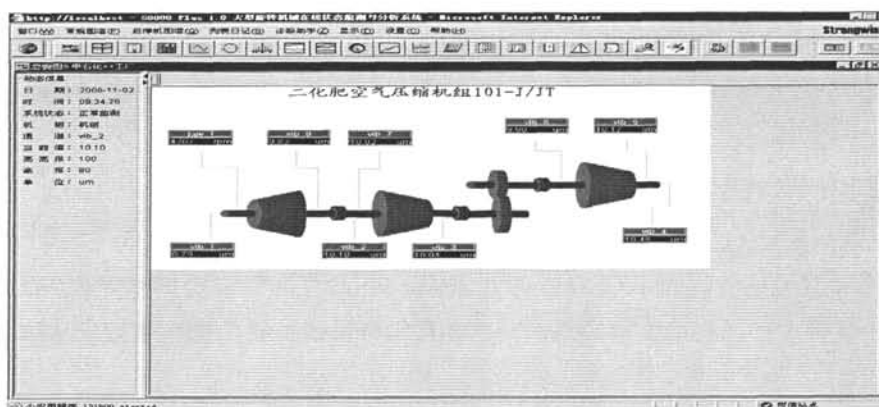


图 2.4 总貌图

Fig. 2.4 The sketch of the unit

### (2) 综合分析图谱

综合分析图谱（如图 2.5 所示）显示一个综合的图谱，它将一个轴承上的两个测点的频谱图、轴心轨迹图、轴心位置图、趋势图等自定义的 4 个分析图谱显示在一起，可以让用户从多个角度了解测点当前的情况。

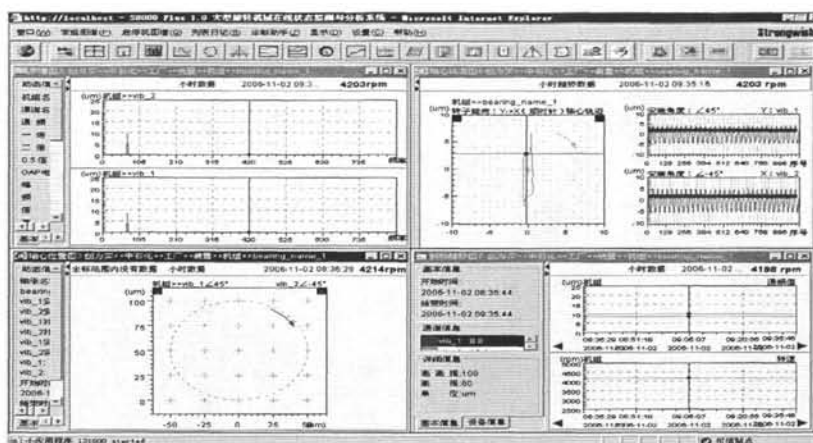


图 2.5 综合分析图谱

Fig. 2.5 The spectra of general analysis

### (3) 单值棒图

单值棒图（如图 2.6 所示）是以三维单棒的形式实时显示多个振动通道，通过切换可获得通频值、一、二倍频、0.5 倍频、二个可选频段和残余量、GAP 电压、有效值等的单值棒图。

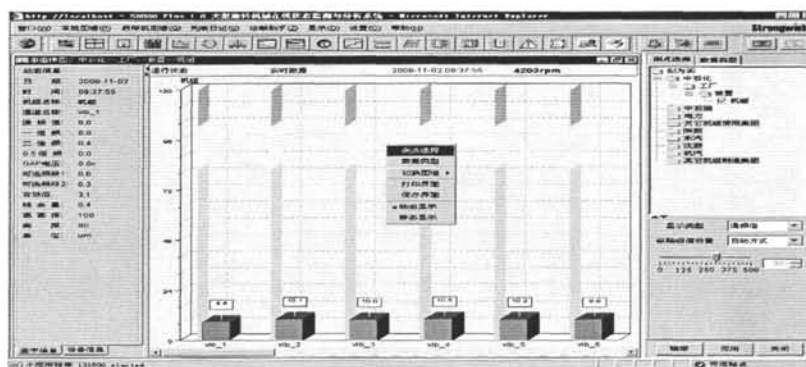


图 2.6 单值棒图

Fig. 2.6 The diagram of single claviform spectra

### (4) 多值棒图

多值棒图（如图 2.7 所示）是以三维多棒的形式实时显示多个振动通道的下列特征值：通频值、一倍频幅值、二倍频幅值、0.5 倍频幅值、两个可选倍频幅值、残余量、有效值，每个特征值分别以不同的颜色显示；还可显示所选通道的动态信息。

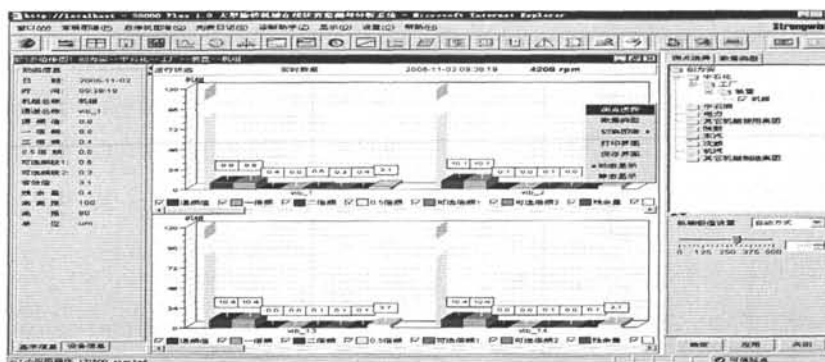


图 2.7 多值棒图

Fig. 2.7 The diagram of multitask claviform spectra

#### (5) 波形频谱图

波形频谱图（如图 2.8 所示）显示的是所选通道的时域波形图，还可显示所选通道的频域波形图，同时显示所选通道的动态信息。

可以随意实现：波形周期数及频谱倍频数可调、显示频率谱/阶比谱、图形放大、数据类型可选实时动态/实时静态/历史数据、界面的打印/保存、不同窗函数的选择等。

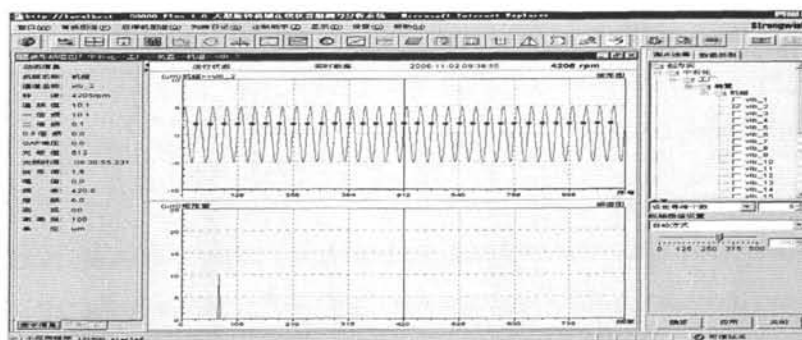


图 2.8 波形频谱图

Fig. 2.8 The diagram of undee amplitude spectrum

### (6) 振动趋势图

振动趋势图(如图 2.9 所示)显示了一个机组下最多 8 个振动通道的特征值在一段时间内的变化趋势。振动趋势图由两个子图所组成,它们分别配对成:总振值/转速、一倍频幅值/一倍频相位、二倍频幅值/二倍频相位、0.5 倍频幅值/转速、GAP 电压/转速、可选倍频 1/转速、可选倍频 2/转速、有效值/转速。

数据类型可选实时动态、实时静态、短时趋势数据、自定义历史数据、启停机数据等。



图 2.9 振动趋势图

Fig. 2.9 The diagram of vibration trend

### (7) 轴心轨迹

轴心轨迹(如图 2.10 所示)显示了一个轴承的两个振动通道的特征值波形和合成轨迹。轴心轨迹图由三个子图所组成,分别用来显示两个振动通道的特征值波形和合成轨迹图,在图谱中显示了轴承的两个振动通道的安装角度、转子的旋转方向、轴承以及两个振动通道的名称。

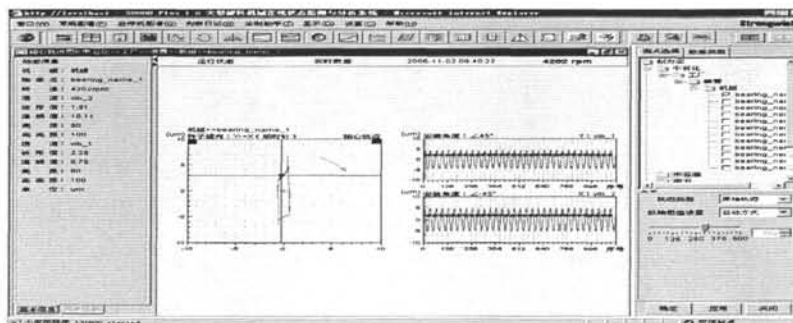


图 2.10 轴心轨迹图

Fig. 2.10 The diagram of Journal center trajectory



### (8) 全息谱图

该图谱显示了选定机组下选定轴承的两个振动通道的多个可选倍频的轴心轨迹全息谱信息。同时在图的下方用文字显示各选定倍频轴心轨迹的椭圆长轴、椭圆短轴、初始相角、倾斜相角、进动方向等信息。结合全息谱理论，可以方便地分析机组各种疑难故障。

### (9) 三维全息谱图

三维全息谱图(如图 2.11 所示)将全息谱图以三维的方式显示出来。显示机组转子的数个支承截面上同一阶分量的振动轨迹，它们之间的相位关系，以及在轴心线上出现的节点，利用三维全息谱可以方便地确定转子失衡等的情况。

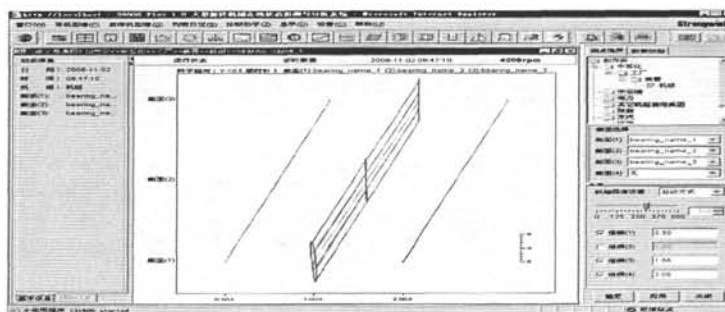


图 2.11 三维全息谱图

Fig. 2.11 The diagram of three-dimensional holograph

### (10) 工艺量频谱瀑布图

工艺量频谱瀑布图(如图 2.12 所示)显示出选定机组的选定振动通道在一定时间范围内随着选定过程量的值的变化，其频谱图发生相应变化的情况。

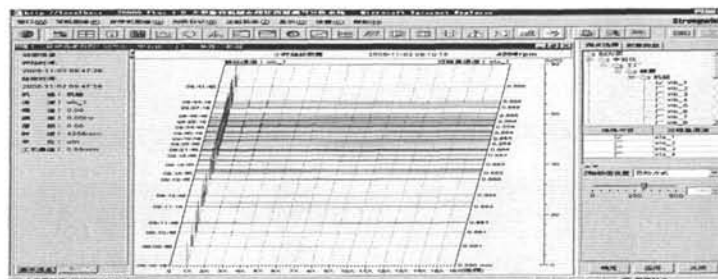


图 2.12 工艺量频谱瀑布图

Fig. 2.12 The frequency waterfall spectra of process quantity

## 2.2.8 启停机图谱分析功能

启停机自动识别，自动切换启停机时间 $<0.1$ 秒。特征值采样转速变化间隔可调。全部记录停机图谱同时可以浏览已经启停机结束的数据（称之为启停机事后分析），也可以浏览正在启停机的数据（称之为启停机实时分析）。

### (1) 转速时间图

转速时间图（如图 2.13 所示）显示机组在启停机过程转速随时间的变化图。

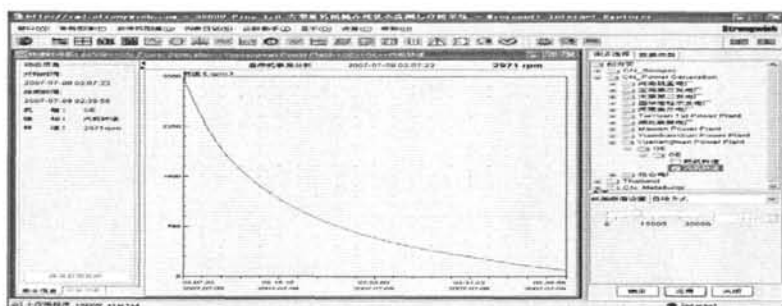


图 2.13 转速时间图

Fig. 2.13 The diagram of rotate speed/time

### (2) Nyquist 图

Nyquist 图（如图 2.14 所示）显示选定机组的选定振动通道的一倍频或二倍频矢量值（包括幅值和相位）在启停机过程中的变化情况。

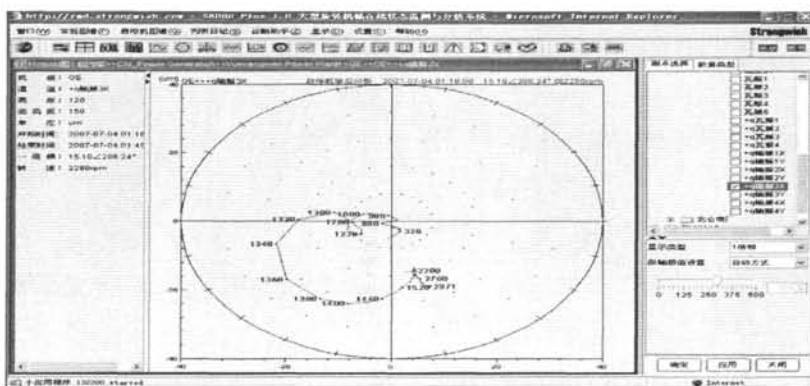


图 2.14 Nyquist 图

Fig. 2.14 The diagram of Nyquist

### (3) Bode 图

Bode 图（如图 2.15 所示）显示了机组在启停机过程中振动通道的特征值随转速的变化趋势，通过该图可以方便的判断机组的临界转速等。

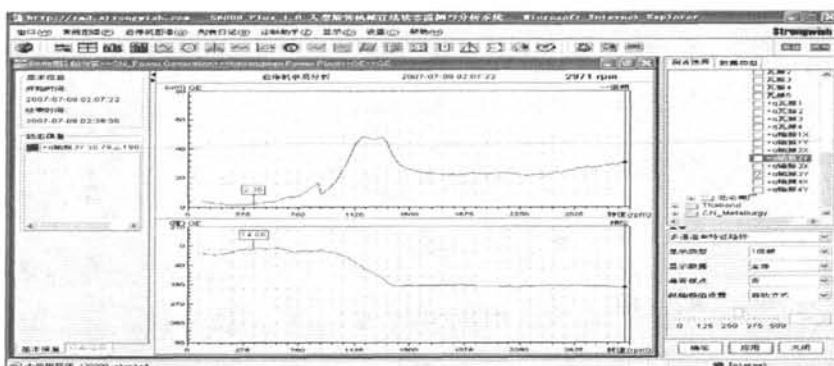


图 2.15 Bode 图

Fig. 2.15 Bode plots

### (4) 频谱瀑布图

频谱瀑布图（如图 2.16 所示）显示了机组在某一段时间内振动通道的各频率成分的大小随时间的变化趋势，是一段时间内连续测得的一组频谱图顺序组成的三维谱图。

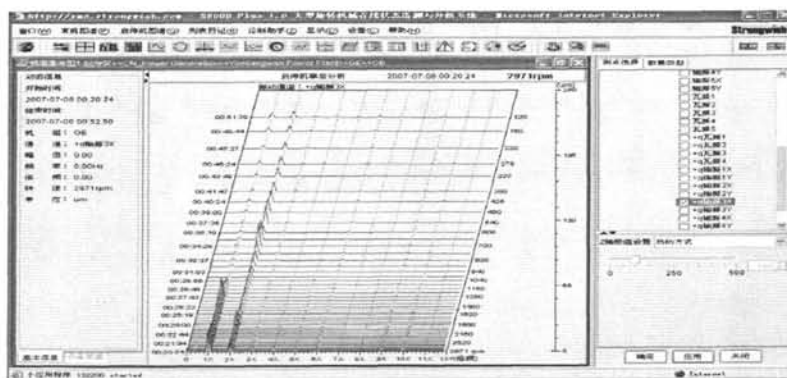


图 2.16 频谱瀑布图

Fig. 2.16 Waterfall spectra of the frequency

### (5) 级联图

级联图(如图 2.17 所示)显示了机组在启停机过程中振动通道的各频率成分的大小随转速的变化趋势,是启停机过程中不同转速下测得的一组频谱图按转速顺序组成的三维谱图。

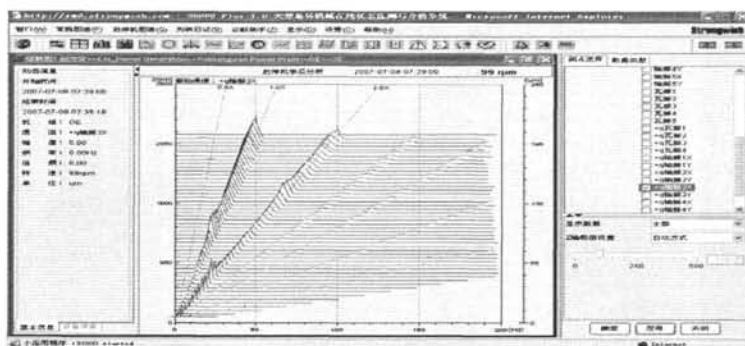


图 2.17 级联图

Fig. 2.17 The diagram of rank

## 2.2.9 列表日记功能

### (1) 振动参数列表

振动参数列表(如图 2.18 所示)显示所监测机组在实时、短时趋势、历史、启停机条件下各个振动通道不同频段的振动数值。

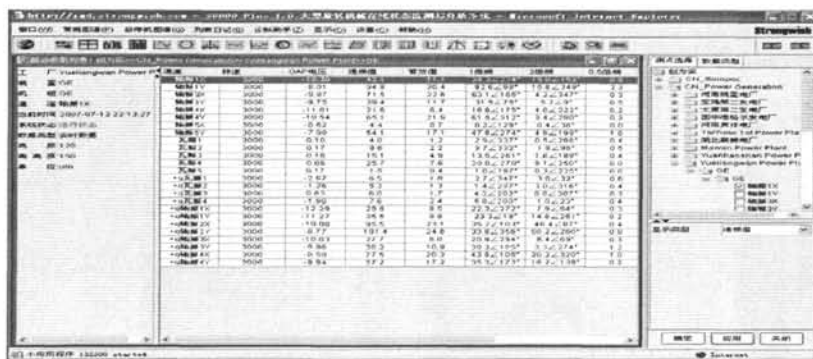


图 2.18 振动参数列表

Fig. 2.18 The list of vibration parameter

### (2) 振动报警日记

振动报警日记（如图 2.19 所示）显示所监测机组在实时、趋势、历史等所选时间段下全部振动的自学习超限报警情况。当没有报警时显示绿色，当报警时显示红色；每个振动量可通过灵敏监测自学习得到：高高报、高报、通频偏差、1X 偏差、2X 偏差、0.5X 偏差、可选 X 频段、残余偏差等门限。

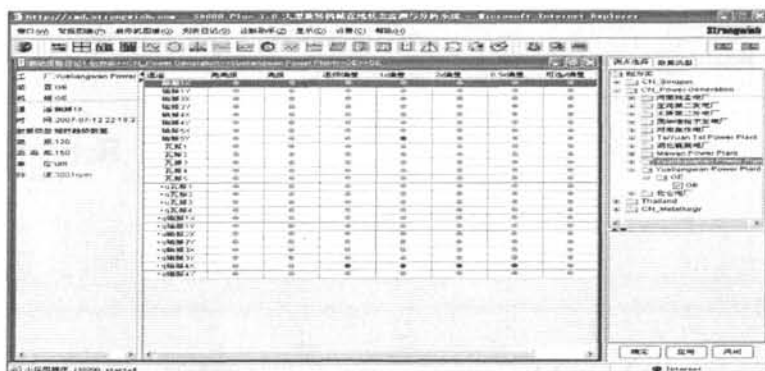


图 2.19 振动报警日记

Fig. 2.19 Vibration alarm diary

### (3) 灵敏监测事件

灵敏监测事件（如图 2.20 所示）显示所选定的机组在一段时间内测点的灵敏监测事件情况。事件分为开始时间、结束时间、时间测点群。

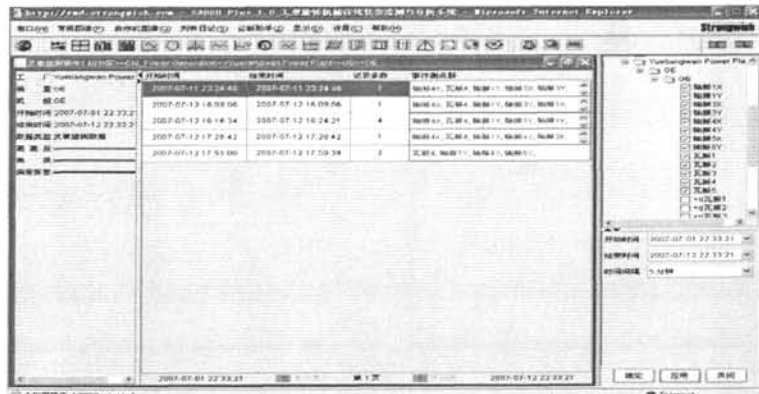


图 2.20 灵敏监测事件

Fig. 2.20 Sensitive monitoring happening

#### (4) 机组状态列表

机组状态列表（如图 2.21 所示）显示机组在某段时间内的工况如：开机时间、结束时间、机组状态描述等。

图 2.21 机组状态列表

Fig. 2.21 The list of unit condition

#### (5) 厂级报表

厂级报表（如图 2.22 所示）以列表的形式显示出一个集团下面的选定（所有）工厂在报表统计期间的统计信息，统计信息按月进行统计。统计信息包括：有无振动通道报警、有无过流量通道报警、起停机次数、累积停机时间、累积运行时间、详细信息等。

图 2.22 厂级报表

Fig. 2.22 The plant grade report forms

#### (6) 机组报表

机组报表（如图 2.23 所示）显示一个机组所有通道在报表统计期间的最大值、最小值和平均值等统计信息；其中振动通道还按：GAP 电压、总振值、有效值、1 倍频幅



## (2) 单、双面动平衡

单、双面动平衡模块(如图 2.25 所示)是辅助现场进行刚性转子单面动平衡、双面动平衡的软件模块。该模块共提供了单、双面动平衡计算、动平衡基本信息输入、实验备注、实验结果保存、历史实验记录浏览等功能。

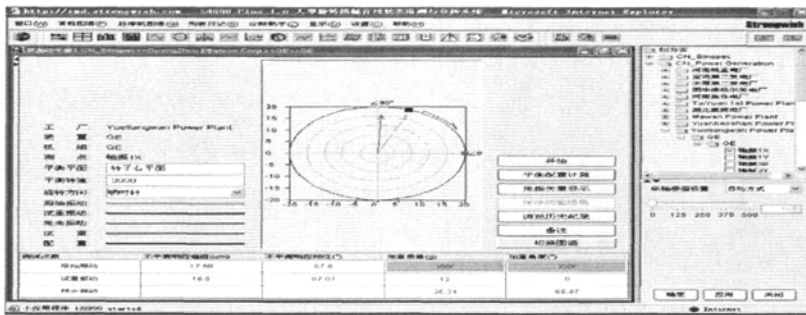


图 2.25 单、双面动平衡

Fig. 2.25 Static or dynamic balancing

## 2.3 远程实时监测诊断系统的应用前景

随着中国石油股份公司越来越多的关键机组数据接入远程诊断系统,以及远程监测通用数据接口的规范化,同样将有越来越多的大机组通过 UDE 数据接口接入远程中心。

### 2.3.1 机组远程管理平台方面的应用

通过远程实时监测诊断系统,股份公司的各级管理人员一方面可以“实时、随时、随地”地掌握机组运行的第一手信息,避免以往信息传递过程的严重滞后和信息缺失;另一方面,可以通过远程中心数据仓库,对全国各大生产厂的机组运行数据进行统一集中的远程管理。机组运行数据长期统一的保存和管理,有利于股份公司积累历史经验,利用信息的价值提高企业竞争优势。

### 2.3.2 机组远程诊断和维护平台方面的应用

关键机组远程实时监测诊断系统作为机组远程诊断和维护的平台,使得为各生产厂提供诊断服务的专家远在千里之外就可以及时、准确、全面地掌握机组的运行状态,通过股份公司对远程诊断专家小组的实施与发展,针对某类型机组,可以在全国范围内调集对该类机组有深入了解的诊断专家,进行有针对性的远程专家会诊,从而集专家所长,尽快地解决现场问题。



### 2.3.3 机组信息沟通和交流平台方面的应用

远程中心网站还可以发挥其信息沟通和交流的作用，促进股份公司和各个生产厂间的沟通以及各个下属生产厂之间的交流。一方面加强股份公司对各个生产厂设备的统一管理和维护指导，推广实施预知维修技术；另一方面也有助于所属各家生产厂之间的信息共享和经验交流，促进股份公司整体设备管理和诊断维护水平的共同提高。

### 2.3.4 机组故障诊断技术发展平台方面的应用

通过远程中心的信息汇总功能，可将分散于各地的、针对各类型机组的、各诊断人员手中的故障诊断案例，集中于远程中心的大型案例库中统一管理；通过股份公司组织的诊断小组，对上述案例库进行归纳、整理，从而形成针对不同类型机组的丰富的诊断规则库；进而，结合最新的故障诊断理论基础知识的发展，发展自动专家诊断系统以及新机组故障诊断技术。

另一方面，通过实施在线系统及远程诊断，设备管理人员可以方便地通过系统中的诊断帮助知识、诊断案例库、故障诊断论坛及远程专家人员等方式，参与到机组故障诊断的学习中，从而可以大量地培养企业所需要的专业设备诊断人员。

## 2.4 本章小结

本章提出了系统的构成方案，并对整个系统的工作原理进行了论述。主要介绍了远程实时监测诊断系统的结构与功能，硬件配置方案充分考虑了系统数据的安全性、数据的冗余性、数据的实时性、数据的完整性、系统的抗压性等；在实施该系统方案时，所使用的关键技术能够确保远程实时监测诊断系统的管理功能、诊断功能以及交流平台的顺利实现，为总公司及各分厂的设备管理水平提高、生产效益提升发挥重要作用。通过上述分析研究，得出以下结论：

首先，利用统一管理各地区分公司机组的运行数据，对各机组进行实时监测和数据统计，能加强集团公司对现场关键机组的统一管理和维护指导，有助于推广实施状态维修，避免重大事故的发生，逐步延长关键机组的运行周期，减少维修费用；有利于各分公司之间的经验交流和信息共享；同时能够发挥网络优势，充分利用集团公司内部有效的专家资源，使得故障诊断专家在局域网（中石油内部网）或互联网上通过视频和语音实现会诊，及时对出现的问题进行精确诊断，从而大大提高诊断效率，节约服务成本。

其次，在实施该系统方案时，实现了以下关键技术：大型数据管理技术、高压缩比的无损压缩技术、智能报警监测存储技术、网络 IP 自动寻优技术、开放的通用数据交

换接口技术、多种设备运行数据的处理和采集技术、故障诊断案例库及专家会诊功能等的  
数据深加工功能、系统稳定性和可靠性的实施技术、系统的远程维护和远程升级技术。

最后，通过机组远程管理平台方面的应用、机组远程诊断和维护平台方面的应用、  
机组信息沟通和交流平台方面的应用、机组故障诊断技术发展平台方面的应用等方面对  
远程实时监测诊断系统的应用前景进行了预测。

### 3 基于矩阵判别筛选法的专家诊断系统的研究

#### 3.1 引言

作为一个先进的远程智能诊断系统，知识的运用和管理是不可或缺的。为了更加积极有效地支持复杂设备故障诊断与处理，远程实时监测诊断系统需要丰富的知识储备和管理机制，以存放各种诊断规则、因果关系、专家经验、典型案例，方便诊断人员利用知识库、数据库进行诊断推理和问题求解。

目前知识系统的发展已经历了两代。第一代知识系统主要侧重于知识的表达、储存和推理，适合解决小型的智能问题，发展已相当成熟。第二代知识系统更侧重于知识本身，注重知识的分级、建模、集成和管理，因而适合解决较大规模的智能问题<sup>[27]</sup>。

设备的智能诊断就是这样一个复杂的智能问题。长期以来，人们已经提出许多智能诊断模型和诊断方法，但在知识获取方面，智能诊断的知识获取“瓶颈”问题仍然没有突破，知识获取主要依赖于知识工程师手工组织<sup>[28]</sup>。关键机组远程实时监测诊断系统由于涉及内容广博，因而获取问题显得更加突出。解决办法之一就是使知识获取过程更加逻辑化和理性化<sup>[29]</sup>。

本章在总结辽化现场诊断经验及现有研究成果的基础上，针对炼化企业大型转动机械智能诊断需要综合运用各种诊断知识、诊断方法和诊断专家等特点，对智能诊断知识系统的获取、运用和管理等问题进行了研究，提出了黑·灰·白集合诊断方法，在故障机理和识别特征研究基础上，应用此方法开发基于矩阵判别筛选法的专家诊断系统。

#### 3.2 振动故障的机理与诊断方法的知识规则

振动是表征机器运行状态最敏感的征兆参数，故障诊断是根据征兆参数来探求故障原因的逆过程。征兆参数与故障原因并非一一对应，是多果（征兆参数）和多因（故障原因）的复杂关系，因此，多年来人们寻求许多方法用以诊断机械振动故障，如概率统计法、时间序列诊断法、应用灰色理论、模糊理论诊断法、故障树诊断法、神经网络诊断法以及基于上述方法的故障专家诊断系统<sup>[30]</sup>。上述方法大部分是建立在统计和专家经验基础上的，也有部分是理论分析和实验研究结果，在诊断常见和多发故障场合取得一定效果。模糊诊断采用隶属度（百分数），而灰色诊断采用关联度（百分数）。国际上一些商品化的机械故障专家诊断系统，如美国 CSI 公司的 NCPECTR II 诊断结果常常是多个相近的百分数。这些方法提供的诊断结果，在工程实践中是很难采取对策的，因为

对于多个百分数的可能，即使仅有 5%的可能原因，也无法排除，常常使工程技术人员束手无策。况且这些百分数大多来自统计和专家经验，在此基础上即使计算方法再科学，得出的结论精确到小数点后几位，也和实际不符，因为最终验证的结果要么为“是”（100%），要么为“不是”（0）。

在医学界人们普遍认为，临床医学在医学科学发展中占有极其重要的地位，大多疾病及其症状是在大量临床实践中首先发现的。对机械故障诊断技术的研究，现场工程实践也同样重要<sup>[31]</sup>。

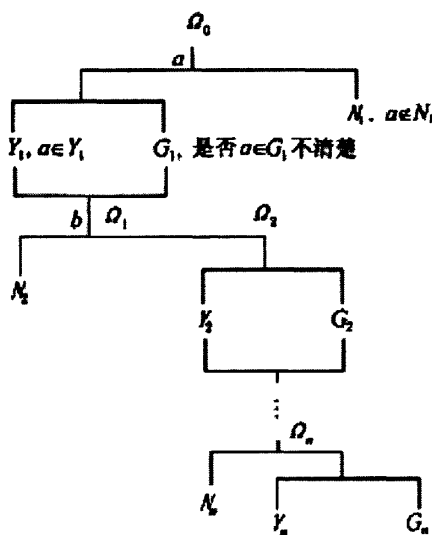


图 3.1 黑·灰·白集合筛选法示意图

Fig. 3.1 diagram of the black-gray-white gathering diagnosis method

辽阳石化公司在多年机械故障诊断工程实践基础上，认真研究振动故障机理和识别特征并对其进行科学分类，研究其对应关系，发现大部分故障征兆参数与故障原因有比较明确对应关系，并可以用振动理论和转子动力学理论去解释。由此可见，故障与原因之间的关系大部分是白色的、明了的，仅少部分是灰色的、模糊的。因此，我们结合辽化公司故障样本丰富的特点，提出一种新的诊断方法——黑·灰·白集合筛选法，如图 3.1 所示。即在研究故障机理基础上，找出识别特征作为判据（a,b,...），对全部故障可能原因集（ $\Omega_0$ ）逐一进行判别，凡不具备此特征的为黑集（N），具备的为白集（Y），而不清楚具备与否的称为灰集（YN）。这样可以应用判据去掉黑集（N），余下白集（Y）

和灰集 (YN) 作为新的全集 ( $\Omega 1$ )，用上述方法多次筛选直至得到满意结果。随着对机械振动故障机理的深入研究和工程实践反复验证，灰集会越来越少，白化程度越来越高，诊断的结果会更科学、更实用。

应用好黑·灰·白集合筛选方法，关键在于找出能将故障原因分类的识别特征即判据，并应用这些判据，逐步排除黑集，尽可能减少灰集，使故障原因大白于天下。

### 3.3 振动故障机理及识别特征研究

机械振动故障往往是多因多果，一种征兆可能反映多种故障，一种故障可能产生多种征兆。工厂机械故障诊断实践一般是根据果——故障的征兆信息（如频率、转子轨迹、相位变化等）去探因——故障的原因即可能是机器零件缺陷、机器部件或系统（例如轴系）的问题、机器零部件间或与流体（汽、气、润滑油、工艺介质等）、电磁间相互关系的不协调以及外界干扰等等<sup>[32]</sup>。

众所周知，旋转机械响应、激励和系统动力特性三者关系如式 3.1 所示：

$$\{\bar{X}\} = [Z(\omega)]^{-1} \{\bar{F}\} \quad (3.1)$$

其中  $[Z(\omega)] = [k] - \omega^2[m] + j\omega[c]$  称为系统的特征矩阵，或阻抗矩阵。

从上式可见，响应（振幅、频率、相位）产生于激励（力、位移）和系统动力特性（刚度、阻尼、质量）的变化。振动故障诊断就是由响应探求故障原因——激励或刚度、阻尼、质量变化的逆过程<sup>[33]</sup>。在工程上，通常是对响应即振动进行测量和信号处理提取征兆参数，以此作为故障诊断的识别特征。为了找出识别特征即故障原因，从而得到黑·灰·白集合筛选的判据，本文提出如下方法，有可能使灰色白化。

#### 3.3.1 振动故障一次原因分析法及其分类

振动故障一次原因是指产生振动响应的直接原因，其本身是产生激励或是直接使旋转机械系统的刚度、质量、阻尼等系统动力特性发生变化的原因，不包括可能引起直接原因的其它原因，称为二次、三次原因。如机壳扭曲、基础不均匀沉降、配管应力等不列入一次原因，因它们可能是可能引起对中不良、轴承偏心、摩擦等诸多一次原因的二次、三次原因。

在研究故障机理基础上，将转子自身、轴系与定子（支承）分开；将转子与定子之间不同相互作用分开（电磁力、摩擦、流体动力激励），将零部件与机器整体分开<sup>[34]</sup>。

这是由于每类故障的一次原因具有共性，易于判别和区分。另外如能确定为某类一次原因，工程上也好处理，如肯定为定子支承问题，则不必打开机盖，仅检查轴承即可。

机械振动故障的一次原因归纳为 10 类 56 种，如表 3.1 所示。

表 3.1 旋转机械故障一次原因分类表

Table. 3.1 Classification of the first reasons of faults in rotating machinery

类别	故障一次原因
1. 转子自身	1. 转子质量偏心 2. 轴永久性弯曲 3. 轴暂时性弯曲 4. 轴裂纹 5. 轴弯曲刚度不对称 6. 转子上部件松动 7. 浮环失浮 8. 转子轴内摩擦 9. 液体陷入转子内部激振
2. 轴系	10. 轴系不平衡 11. 角不对中 12. 联轴节误差 13. 弹性联轴节偏差 14. 轴对中不良 15. 联轴节精度过低或损伤
3. 支承系统	16. 轴承偏心 17. 径向轴承损伤 18. 支撑松动 19. 轴承支撑刚度垂直水平不等 20. 油膜涡动 21. 油膜振荡 22. 轴瓦与轴承预紧力不足 23. 可倾瓦错位 24. 轴承箱未充分预紧 25. 径向轴承间隙过大
4. 电磁力	26. 电机转子断条 27. 静气隙偏心 28. 动气隙偏心 29. 轴磁化 30. 感应电机转子偏心 31. 感应电机转子短路 32. 电气问题
5. 摩擦	33. 转子与定子干摩擦（反进动） 34. 转子与定子轴向局部干摩擦 35. 转子与定子摩擦 36. 干涡动
6. 流体动力	37. 轴流机叶轮偏心 38. 隔板倾斜 39. 叶片激振 40. 油封受激振动 41. 偏隙 42. 透平不均匀进气 43. 喘振 44. 旋转失速
7. 临界	45. 转子轴承系统临界 46. 联轴节临界 47. 悬臂临界
8. 共振	48. 结构共振 49. 倍频谐波共振 50. 次谐波共振 51. 共振涡动
9. 部件	52. 皮带偏拉力 53. 齿轮偏心 54. 滚动轴承缺陷 55. 齿轮缺陷
10. 其他	56. 临近振源影响

### 3.3.2 振动的主导频率判别法及其分类

振动的频率特征是故障诊断的最有效识别特征。振动的主导频率一般是指在频谱分析中最大或变化率最大的频率成分，振动主导频率作为响应的特征之一与激励和系统动力特性二者均有果因关系。因此，找出振动响应的主导频率在有些场合可以确定故障一次原因的大致类别。在旋转机械场合，由于激励和系统动力特性一般与机器转速有关或随其变化而改变，因此振动主导频率往往与机器转速有关。

为了便于故障识别特征与其一次故障原因相对应，对旋转机械振动主导频率分类如下：

- (1) 精确分频振动；
- (2) 精确同频振动；

- (3) 精确倍频振动;
- (4) 分频滞后;
- (5) 同频滞后;
- (6) 倍频滞后;
- (7) 一般亚异步。

以上共分为 3 大类 7 种主导频率, 与众不同的是将精确分频、同频和倍频与非精确分频、同频和倍频严格区分开来, 因为二者在振动故障机理和一次原因上差异很大。后者即分频滞后、同频和倍频滞后, 其振动频率总是小于精确分频、同频和倍频, 并且与转速相关联, 随转速变化而改变<sup>[35]</sup>。归纳起来此类振动的明显特点如下:

(1) 与流体激振有关, 如气体旋转失速产生同频滞后, 油膜涡动产生分频滞后等。

(2) 与转子上零部件松动或轴承产生的滑差有关, 转子上轮盘与轴过盈不足产生松动会引起同频滞后振动, 振动频率随转速变化<sup>[36]</sup>。

为了确定故障一次原因到底是哪一类, 进而查明是该类中的哪一种或几种原因, 还需要研究出更多的识别特征或称判据, 例如可采用如下多种途径寻求更多判据:

- (1) 振动方向;
- (2) 振动稳定性;
- (3) 振动相位特性;
- (4) 转子轨迹;
- (5) 振动随转速的变化;
- (6) 振动随油温的变化;
- (7) 振动随负荷的变化。

举例如下:

(1) 转子轴向振动过大的一次故障原因可能有轴弯曲、轴裂纹、角不对中、喘振、旋转失速、转子——定子摩擦。

(2) 从机体上测振动有明显的方向性, 可能是支撑刚度或支撑松动问题。

(3) 转子振动随机波动无明显规律, 可能是轴裂纹、轴承损伤、气体动力问题等。

(4) 从轴两端同方向上测转子相位差 180 度, 在刚性转子情况下可能是轴弯曲。

(5) 振动矢量端图变化范围大且无规律、不稳定, 可能是轴裂纹。

(6) 振动相位变化大, 不稳定其可能一次原因为: 轴暂时弯曲、轴裂纹、轴承损伤、摩擦、临界转速、喘振及旋转失速等。

(7) 转子轴心轨迹成香蕉或 8 字形有可能的一次原因为：对中不良、轴裂纹以及支撑系统问题。

(8) 转子轴心位置轨迹可以看出轴承的偏位角、偏心距、最小油膜的厚度，从而判断转子运行是否平稳。

(9) 转子 $<1N$ 的滤波轴心轨迹的形状，可以区分流体激励、气封磨损、轴承座松动等引起的低频噪声。

(10) 故障随机器转速变化振动突升或突降，表明振动原因可能与共振或临界转速有关。

(11) 振动主导频率与转速无关，振动故障原因可能是外界干扰，特低频时可能是喘振或旋转失速。

(12) 振动随油温变化明显的一次故障原因可能是油膜涡动、油膜振荡、轴承问题及转子—定子摩擦等。

(13) 振动随负荷变化明显，可能的一次故障原因为：对中不良、气动问题、联轴节问题、轴承问题、轴弯曲、轴裂纹、齿轮问题及电磁问题等。

本远程诊断系统，首先研究各种典型故障机理，从故障特征出发，针对原有监测报警系统仅对各分、倍频幅值及相位这些基本特征参数的监控，在报警监测的特征参数集的选取上，并未建立故障原因与故障特征间多对多的关系等问题。本课题根据各种典型故障特点，从故障诊断角度出发，有针对性的提取并分类组合特征参数集，进而防止海量报警数据的产生，并为上层分析诊断系统提供有效数据分析源。

所选取的特征参数集包括振动幅值（包括全频、工频、分频、倍频、及工频滞后、分频滞后、倍频滞后、残振等幅值）、相位（包括工频、分频、倍频等相位）、相位波动状况、各种缓变信号、轴位移、轴心位置等。其中残振是指振动信号的能量减去已经提取的各个倍频上的能量后残余的部分，用来反应除去各个特征频率外，其他频率上振动能量的大小。当设备出现非所选频率或频段下的故障征兆时，将会在残振的数值中反映出来。

### 3.3.3 振动故障一次原因与主导频率的关系

在研究振动故障一次原因和主导频率分类的基础上，对二者之间的对应关系进行了归纳总结，如表 3.2 所示。



表 3.2 旋转机械振动故障主导频率及故障原因对应表

Table. 3.2 Relationship between main frequency and direct reasons of vibration faults in rotating machinery

故障类别	精确分频振动	精确同倍频振动		非精确分、同和倍频振动			
故障频率特征	(1/2~1/N)分频	(精确1倍)同频	(2~N)倍频	一般亚异步	分频滞后	同频滞后	倍频滞后
故障特征	转子自转(2~N)周发生一次涡动	转子自转一周发生一次振动	转子自转一周振动(2~N)次	振动频率小于转子转动频率但无规律,有的为第一临界	振动频率总是略低于分频	振动频率总是略低于同频	振动频率总是略低于某倍频
故障机理	在非线性系统中激励出的切向力使转子产生涡动	离心力引起的旋转矢量激振力过大,或是每转一周产生一次交变力	转子自转一周受(2~N)次交变力	转子、定子偏心引起	转子内摩擦或转子内部积液	流体激振,油膜涡动,油膜振荡	转子的部件松动,旋转失速
故障直接原因类别	支承系统,摩擦,流体动力,共振	转子自身,轴系, (预负荷), 支承系统, 电磁力, 摩擦, 流体动力, 临界转速, (仅同频), 共振, 部件, 其他		转子自身, 流体动力	支承系统, 流体动力	转子自身, 流体动力	部件

根据这一表格, 当我们测出机器主导频率时, 就可以确定故障一次原因的类别, 排除其余的类别。如主导频率为精确分频时, 据表 3.2 可以判定, 仅有 4 类一次故障原因, 即支承系统、摩擦、流体动力激振、共振, 可以排除其余 6 种故障类别, 可以方便地使用黑·灰·白集筛选法(在此种情况无灰集, 仅为黑·白集筛选)。

过去某些故障诊断方法往往是从经验总结和概率统计列出了特征参数与故障原因之间的关系, 例如 John Sohre 所著 Turbomachinery analysis and protection 一文中归纳的表格 Symptoms and distress manifestations, 是国际上公认的比较权威的机械故障诊断用表; 近 30 年为国内外许多企业广泛应用, 也被国内外许多专家、学者用作编制专家系统知识规则的依据<sup>[37]</sup>。但是, 由于该表中没有分清故障一次原因和二次、三次原因, 没有将精确分、同和倍频与分、同和倍频滞后主导频率相区别, 因此所列表格无明确对应

关系，只好用概率百分数表示诸多可能，这就使得故障诊断的原因和征兆之关系变得模糊，变成灰色了<sup>[38]</sup>。

### 3.3.4 基于黑·灰·白集合矩阵判别筛选法的专家诊断系统架构

在上述黑·灰·白集合筛选法和判据研究的基础上，通过建立多征兆和多故障一次原因故障树，采用黑·灰·白集合矩阵判别筛选法开发出机械故障专家诊断系统。应用黑·灰·白集合理论，采用判据对故障一次原因进行黑·灰·白集合判别筛选过程如表 3.3 所示。

表 3.3 黑·灰·白集合筛选法程序表

Table. 3.3 The flow chart of black and white concourse filter method

原因		R1	R2	...	Rn
判据 1	Y	1	0		1
	N	0	0		0
	YN	0	1		0
判据 2	Y	0	1		0
	N	0	0		1
	YN	1	0		0
判据 3	Y	1	0		
	N	0	1		
	YN	0	0		
结论		1	0		0

旋转机械故障专家诊断系统总体框架，实际上是一种故障树结构，如图 3.2 所示，其诊断过程就是以人机对话形式采用人工智能矩阵判别筛选来完成。该专家系统由 6 个层次构成，现概要说明如下：

#### 第一层：机器类型及测试方式

采用选择方式输入主机名称、驱动机、联接方式、密封形式、测试传感器配置等。程序可据此采用矩阵判别法来决定一次故障原因和程序中判据的取舍。

#### 第二层：初步诊断和精确诊断

在简单测试没有频谱分析的场所只能采用初步诊断，如有振动分析可以单独选用精确诊断或者是初步诊断和精确诊断二者同时进行。初步诊断是按振动趋势及其随转速、负荷等变化规律来初步判别，一般难以得出一、二种可能的故障原因<sup>[39]</sup>。

第三层：由主导征兆频率确定故障原因类别

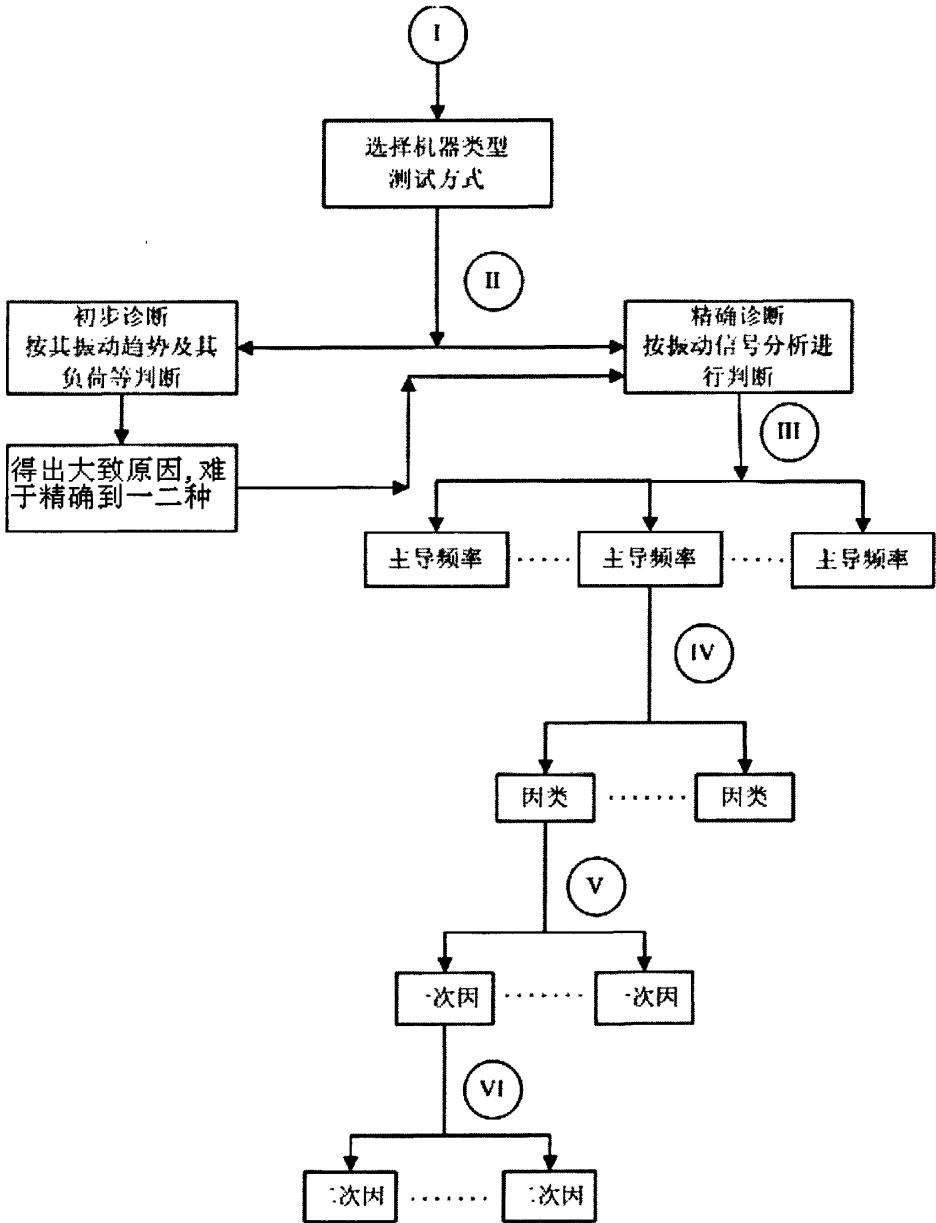


图 3.2 基于黑·灰·白集合筛选法的机械故障专家诊断系统总体框架

Fig. 3.2 The flow of rotating machinery expert system based on black and white concurrence filter method

用判据筛选出一类或几类故障类别，排除其余类。

第四层：由诸故障原因类中确定一类

同一主导频率可能有几种至十几种故障原因类，如同频振动就有可能有十类故障原因。要由规则来判别取舍哪一类为可能故障类。

第五层：由故障原因类确定故障一次原因

第六层：由故障一次原因查找故障二次原因

由于采用了科学的判据和黑·灰·白集合筛选法，逐步、尽可能多地排除了不可能原因，得出真正的原因和个别暂时难以排除的原因。由得出的故障一次原因可以查得引起这些一次原因的故障二次原因，诸如设计制造、安装维修、运行操作、机器劣化等问题及防治对策，可以较好地指导工程实践。

### 3.4 专家诊断系统的建立

#### 3.4.1 基于诊断知识的规则库的建立

规则库(或知识库)是一组产生式规则的集合，包含某一问题领域的一般性知识，一个产生式规则就是一条知识。

本节主要研究的是故障诊断系统的规则库(Set of Rules)，即通过手动输入机组的故障特征频率，系统就会显示出与此故障频率接近的故障。

结合辽化近十年的大机组的运行状况，总结出了以下 11 类常出现故障类型如表 3.4 所示：

表 3.4 常见故障分类

Tab. 3.4 Classification of faults in rotating machinery

序号	类型	序号	类型
T-01	不平衡故障征兆	T-06	碰摩故障征兆
T-02	弯曲故障征兆	T-07	部件松动故障征兆
T-03	不对中故障征兆	T-08	轴裂纹故障征兆
T-04	油膜故障征兆	T-09	滑动轴承损坏故障征兆
T-05	转子部件脱落	T-10	推力轴承损坏故障征兆
		T-11	转子部件结垢故障征兆

故障特征：

每种故障征兆，在发生的时候，对应的频率或者谱图都会有一定的变化<sup>[40]</sup>，表 3.5~3.15 详细列出了故障发生的时候，伴随出现的一些特征：

表 3.5 不平衡故障征兆及特征表现

Tab. 3.5 The fault symptoms and characteristics of unbalance

故障征兆	特征表现
不平衡	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 轴(或轴承)振动频谱呈枫树形</li> <li>2. 轴(或轴承)振动时域波形为单一谐波</li> <li>3. 轴心轨迹为椭圆形</li> <li>4. 轴(或轴承)水平方向(垂直方向)振动较大</li> <li>5. 轴(或轴承)水平方向(垂直方向)1×振动较大</li> <li>6. 相位稳定</li> <li>7. 在定速下轴(或轴承)振水平方向(垂直方向)幅值稳定</li> <li>8. 在定速下轴(或轴承)振水平方向(垂直方向)1×幅值稳定</li> </ol>

表 3.6 初始弯曲故障征兆及特征表现

Tab. 3.6 The fault symptoms and characteristics in winding of shaft

故障征兆	特征表现
初始弯曲	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 1X 幅频特性呈丘陵状</li> <li>2. 低速盘车后晃动度超限</li> <li>3. 振动与负荷无关</li> <li>4. 在定速下轴(或轴承)水平方向 1X 振动幅值稳定</li> </ol>

表 3.7 转子部件结垢故障故障征兆及特征表现

Tab. 3.7 The fault symptoms and characteristics of dirty rotor components

故障征兆	特征表现
转子部件结垢故障	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 轴相对振动一个月增加超过 25μm</li> <li>2. 轴相对振动一年增加超过 25μm</li> <li>3. 机组效率逐渐下降</li> <li>4. 机组级间压力逐渐增大</li> </ol>

表 3.8 转子部件脱落故障征兆及特征表现

Tab. 3.8 The fault symptoms and characteristics of rotor components break off

故障征兆	特征表现
转子部件脱落	1 日常运行时振动突然增大
	2 日常运行时 IX 相位有突变
	3 现场能听到金属撞击声
	4 与断叶片最有关的高频分量明显

表 3.9 不对中故障征兆及特征表现

Tab. 3.9 The fault symptoms and characteristics in misalignment

故障征兆	特征表现
不对中	1. 轴承振动二倍频较大
	2. 轴振动二倍频较大
	3. 负荷升高, 振动逐渐增大(轴或轴承)
	4. 负荷升高, 振动逐渐减小(轴或轴承)
	5. 两轴承油压反方向变化
	6. 轴心轨迹香蕉形, 且轴心轨迹正进动

表 3.10 部件松动故障征兆及特征表现

Tab. 3.10 The fault symptoms and characteristics of loose parts on shaft

故障征兆	特征表现
部件松动	1. 三维谱图上 1X、2X、3X 谐振分量明显
	2. 轴承振动 (0.10~0.49)X 低频分量较大
	3. 轴承振动波形有跳跃现象
	4. 轴心轨迹形状不规则变化
	5. 轴承振动频谱中三倍频较大
	6. 转子一阶临界转速下降 10rpm
	7. 转子一阶临界转速下降 20rpm
	8. 转子二阶临界转速下降 20rpm
	9. 转子二阶临界转速下降 60rpm
	10. 轴承座垂直方向振动相差较大
	11. 轴承座同一结合面四周振动相差较大
	12. 轴承座与台板振动较大
	13. 轴承振动频谱中存在大于 10 倍频成分
	14. 轴承振动频谱中以奇次谐波为主
	15. 轴承振动频谱中大于一倍频成分丰富
	16. 转速升至某一值时, 振动突然增大
	17. 转速降至某一值时, 振动突然减小

表 3.11 轴裂纹故障征兆及特征表现

Tab. 3.11 The fault symptoms and characteristics of cracked shaft

故障征兆	特征表现
轴裂纹	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 轴承振动频谱中, 三倍频较大</li> <li>2. 轴承振动频谱中, 二倍频较大</li> <li>3. 转子一阶临界转速减小 10rpm</li> <li>4. 轴振动频谱中三倍频较大</li> <li>5. 轴振动频谱中二倍频较大</li> <li>6. 轴相对振动频谱中三倍频较大</li> <li>7. 轴相对振动频谱中二倍频较大</li> <li>8. 转子二阶临界转速减小 20rpm</li> <li>9. 一倍频相位超前 15 度以上</li> </ol>

表 3.12 摩擦故障征兆及特征表现

Tab. 3.12 The fault symptoms and characteristics of rub

故障征兆	特征表现
摩擦	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 含多种振动分量</li> <li>2. 振动波形有明显畸变</li> <li>3. 轴或轴承振动波形有削波现象</li> <li>4. 轴心轨迹时而扁长时而细高</li> <li>5. 轴心轨迹为反进动</li> <li>6. 现场能听到金属摩擦声</li> <li>7. 低转时现场能听到金属摩擦声</li> <li>8. 轴封处有火花或火花环</li> <li>9. 惰走时间明显减少</li> <li>10. 盘车时在某个转速下突然静止</li> <li>11. 盘车电流增大</li> <li>12. 盘车电流振动大</li> <li>13. 盘车不动</li> <li>14. 存在不对中故障</li> <li>15. 振动幅值周期性变化</li> <li>16. 振动相位周期性缓慢变化</li> <li>17. 轴(或轴承)垂直方向与轴向振动幅值比增大</li> <li>18. 轴(或轴承)水平方向与轴向振动幅值比增大</li> <li>19. 轴(或轴承)振动轴向与垂直方向幅值比增大</li> <li>20. 轴(或轴承)振动轴向与水平方向幅值比增大</li> </ol>

表 3.13 滑动轴承损坏故障征兆及特征表现

Tab. 3.13 The fault symptoms and characteristics of sliding bearing damage

故障征兆	特征表现
滑动轴承损坏	1. 轴承回油温度上升
	2. 润滑油中含有轴瓦合金粉末
	3. 机组径向振动过大
	4. 轴承振动频谱丰富
	5. 油膜压力增大
	6. 轴承振动频谱丰富
	7. 0.5X 频振幅较大

表 3.14 推力轴承损坏故障征兆及特征表现

Tab. 3.14 The fault symptoms and characteristics of thrust bearing damage

故障征兆	特征表现
推力轴承损坏	1. 推力轴承回油温度上升
	2. 润滑油中含有轴瓦合金粉末
	3. 机组轴向振动过大
	4. 轴承振动频谱丰富
	5. 油膜压力增大

表 3.15 油膜故障征兆及特征表现

Tab. 3.15 The fault symptoms and characteristics of oil whip

故障征兆	特征表现
油膜故障	1 振动 (0.42-0.49)X 低频分量出现
	2 以 (0.42-0.49)X 低频分量和 IX 分量为主
	3 轴心轨迹形状呈花瓣形
	4 轴心轨迹正进动
	5 进油温度升高, 振动减小, 进油温度降低, 振动增大
	6 转速升至某一值, 振动突然增大, 或转速降至某一值, 振动突然消失
	7 振动 (0.42-0.49) X 低频分量时大时小

### 3.4.2 故障的逻辑判断关系

各种故障的逻辑判断关系如表 3.16~3.26 所示



表 3.16 不平衡故障的逻辑判断关系

Tab. 3.16 The logical relationship of estimation on unbalance

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)		
不平衡	1. 如果	轴承处轴相对振动水平方向振动较大	W=0.4
	且	相位稳定	W=0.3
	且	振幅稳定	W=0.3
	则	不平衡	CFr=0.95
	2. 如果	轴承处轴相对振动水平方向 1X 较大	W=0.4
	且	振幅稳定	W=0.3
	且	相位稳定	W=0.3
	则	不平衡	CFr=0.98
	3. 如果	轴承处轴相对振动垂直方向较大	W=0.4
	且	振幅稳定	W=0.3
	且	相位稳定	W=0.3
	则	不平衡	CFr=0.90
	4. 如果	轴承处轴相对振动垂直方向 1X 较大	W=0.4
	且	振幅稳定	W=0.3
	且	相位稳定	W=0.3
则	不平衡	CFr=0.95	
5. 如果	1X 幅频特性呈山脉状	W=0.4	
且	相频单调变化	W=0.40	
且	振动与负荷无关	W=0.15	
则	质量不平衡	CFr=0.95	

表 3.17 初始弯曲的逻辑判断关系

Tab. 3.17 The logical relationship of estimation on original winding of shaft

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)		
初始弯曲	1. 如果	相邻两个轴承 1X 幅频特性呈丘陵状	W=0.3
	且	相频非单调变化	W=0.20
	且	低速盘车后晃动度超限	W=0.3
	且	振动与负荷无关	W=0.20
	则	转子初始弯曲	CFr=0.95

表 3.18 转子结垢的逻辑判断关系

Tab. 3.18 The logical relationship of estimation on dirty rotor components

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)		
转子结垢	1. 如果	轴振动一年增加超过 15 $\mu$ m	W=0.2
		且 机组级间压力逐渐增大	W=0.3
	则	转子部件结垢	CFr=0.98
	2. 如果	轴承振动一年增加超过 15 $\mu$ m	W=0.2
且 机组效率逐渐下降		W=0.2	
则	转子部件结垢	CFr=0.98	

表 3.19 转子部件脱落的逻辑判断关系

Tab. 3.19 The logical relationship of estimation on rotor components break off

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)		
转子部件脱落	1. 如果	日常运行时振动突然增大	W=0.4
		且 现场能听到金属撞击声	W=0.3
	且	与断叶片最有关的频分量明显	W=0.3
	则	转子部件脱落	CFr=0.98

表 3.20 不对中故障的逻辑判断关系

Tab. 3.20 The logical relationship of estimation on misalignment

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)		
不对中	1. 如果	轴承处轴心轨迹香蕉形	W=0.2
		且 轴心轨迹正进动	W=0.4
		且 垂直方向振动与轴向振动的比值增大	W=0.2
		且 轴心位置稳定	W=0.2
	则	轴承不对中	CFr=0.98
	2. 如果	轴承处轴心轨迹香蕉形	W=0.2
		且 轴心轨迹正进动	W=0.4
		且 水平方向振动与轴向振动的比值增大	W=0.2
		且 两轴承油膜压力反方向变化	W=0.3
	则	轴承不对中	CFr=0.98
	3. 如果	轴承处轴心轨迹香蕉形	W=0.2
		且 轴心轨迹正进动	W=0.2
		且 负荷升高, 振动逐渐减小	W=0.2
		且 两轴承油膜压力反方向变化	W=0.3
	则	轴承不对中	CFr=0.98
	4. 如果	轴承处轴心轨迹香蕉形	W=0.2
且 轴心轨迹正进动		W=0.4	
且 负荷升高, 振动逐渐增大		W=0.2	
且 轴心位置稳定		W=0.2	
则	轴承不对中	CFr=1.0	

表 3.21 部件松动故障的逻辑判断关系

Tab. 3.21 The logical relationship of estimation on loose parts

故障征兆	逻辑判断 (W—权重, CFr—置信度)
部件松动	1. 如果 轴承振动波形有跳跃现象 W=0.30
	且 轴心轨迹形状不规则变化 W=0.30
	且 轴承振动频谱中三倍频较大 W=0.40
	则 轴承松动 CFr=0.95
	2. 如果 转子一阶临界转速下降 20rpm W=0.60
	且 轴承振动频谱以奇次谐波为主 W=0.60
	则 基础松动 CFr=0.98
	3. 如果 轴承座同一结合面四周振动相差较大 W=0.55
	且 轴承振动频谱中以奇次谐波为主 W=0.45
	则 基础松动 CFr=0.95
	4. 如果 轴承座与台板振动相差较大 W=0.55
	且 轴承振动频谱中以奇次谐波为主 W=0.45
	则 基础松动 CFr=0.95
	5. 如果 轴承振动频谱中大于一倍频成份丰富 W=0.40
	且 转速降至某一值时, 振动突然减小 W=0.60
	则 叶轮松动 CFr=0.80
	6. 如果 轴承振动频谱中大于一倍频成份丰富 W=0.40
	且 转速升至某一值时, 振动突然增大 W=0.60
则 叶轮松动 CFr=0.85	

表 3.22 轴裂纹故障的逻辑判断关系

Tab. 3.22 The logical relationship of estimation on cracked shaft

故障征兆	逻辑判断 (W—权重, CFr—置信度)
轴裂纹	1. 如果 轴相对振动频谱中三倍频较大 W=0.4
	且 轴相对振动频谱中二倍频较大 W=0.4
	且 转子一阶临界转速减小 10rpm W=0.2
	且 一倍频相位超前 15 度以上
	则 轴裂纹 CFr=0.90
	2. 如果 轴相对振动频谱中三倍频较大 W=0.3
	且 轴相对振动频谱中二倍频较大 W=0.3
	且 转子二阶临界转速减小 20rpm W=0.2
	且 一倍频相位超前 15 度以上
	则 轴裂纹 CFr=0.90

表 3.23 摩碰故障的逻辑判断关系

Tab. 3.23 The logical relationship of estimation on rub

故障征兆	逻辑判断 (W—权重, CFr—置信度)		
摩碰	1. 如果	含多种振动分量	W=0.5
	且	存在不对中故障	W=0.5
	则	转子碰摩	CFr=0.95
	2. 如果	振动波形有明显畸变	W=0.6
	且	存在不对中故障	W=0.4
	则	转子碰摩	CFr=0.90
	3. 如果	轴或轴承振动波形有削波现象	W=0.5
	且	存在不对中故障	W=0.5
	则	转子碰摩	CFr=0.90
	4. 如果	含多种振动分量	W=0.3
	且	振动幅值周期性变化	W=0.3
	且	振动相位周期性缓慢变化	W=0.3
	则	转子碰摩	CFr=0.90

表 3.24 滑动轴承损坏的逻辑判断关系

Tab. 3.24 The logical relationship of estimation on sliding bearing damage

故障征兆	逻辑判断 (W—权重, CFr—置信度)		
滑动轴承 损坏	1. 如果	轴承回油温度上升	W=0.4
	且	机组径向振动过大	W=0.3
	且	油膜压力增大	W=0.3
	则	轴承损坏	CFr=0.95
	2. 如果	润滑油中含有轴瓦合金粉末	W=0.4
	且	机组径向振动过大	W=0.3
	且	油膜压力增大	W=0.3
	则	轴承损坏	CFr=0.95
	3. 如果	轴承回油温度上升	W=0.4
	且	轴向振动正常	W=0.20
	且	油膜压力增大	W=0.4
	则	轴承损坏	CFr=0.95
	4. 如果	润滑油中含有轴瓦合金粉末	W=0.4
	且	轴向振动正常	W=0.20
	且	油膜压力增大	W=0.4
	则	轴承损坏	CFr=0.95
	5. 如果	轴承回油温度上升	W=0.4
	且	轴向振动频谱丰富	W=0.3
	且	油膜压力增大	W=0.3
	则	轴承损坏	CFr=0.95

表 3.25 推力轴承损坏的逻辑判断关系

Tab. 3.25 The logical relationship of estimation on thrust bearing damage

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)			
推力轴承损坏	1.	如果	推力轴承回油温度上升	W=0.6
		且	机组轴向振动过大	W=0.2
		且	油膜压力增大	W=0.2
		则	推力轴承损坏	CFr=0.95
	2.	如果	润滑油中含有轴瓦合金粉末	W=0.6
		且	机组轴向振动过大	W=0.2
		则	推力轴承损坏	CFr=0.95
	3.	如果	推力轴承回油温度上升	W=0.6
		且	轴向位移增大	W=0.2
		且	油膜压力增大	W=0.2
		则	推力轴承损坏	CFr=0.95
	4.	如果	润滑油中含有轴瓦合金粉末	W=0.5
		且	轴向位移增大	W=0.2
		且	油膜压力增大	W=0.2
		则	推力轴承损坏	CFr=0.95
	5.	如果	推力轴承回油温度上升	W=0.5
		且	轴向振动频谱丰富	W=0.5
		且	油膜压力增大	W=0.25
		则	推力轴承损坏	CFr=0.95

表 3.26 油膜涡动故障的逻辑判断关系

Tab. 3.26 The logical relationship of estimation on oil whip

故障征兆	逻辑判断(W—权重, CFr—置信度)			
油膜涡动	1.	如果	转速小于 2000rpm	W=0.3
		且	振动(0.42-0.49)X 低频分量出现	W=0.3
		且	轴心轨迹花形	W=0.2
		且	轴心轨迹正进动	W=0.2
		则	油膜涡动	CFr=0.90
	2.	如果	转速小于 2000rpm	W=0.3
		且	振动(0.42-0.49)X 低频分量出现	W=0.3
		且	进油温度升高, 振动减小, 进油温度降低, 振动增大	W=0.2
		且	转速升至某一值, 振动突然出现, 或转速降至某一值, 振动突然消失	W=0.2
		则	油膜涡动	CFr=0.95

### 3.5 本章小结

本章主要研究的是振动故障的机理与诊断方法以及故障专家诊断系统的建立。其创新处主要体现在结合辽化十几年机械故障诊断临床经验，吸收国内外同行诊断知识精华，研究了振动故障机理和识别特征并对其进行科学分类，研究其对应关系，提出了黑·灰·白集合筛选法，并应用此方法开发了基于矩阵判别筛选法的专家诊断系统。

## 4 远程实时监测诊断系统的考核与应用

### 4.1 引言

关键机组远程实时监测诊断系统研制工作完成以后我们即开展系统的试运行和性能考核，每天对远程实时监测诊断系统监测范围内运行的机组进行监测分析，并通过实际应用来检验系统的实际效果并进行分析和评价，对所得到的结果进行分析。实践证明，该系统可以准确监测和诊断机组状态，能够满足工程实际的需要。

本章以两个机组故障诊断实际案例分析验证了远程诊断中心利用网络优势以及系统强大的诊断分析功能，通过远程实时监测诊断系统对机组实现远程监测、诊断，发现问题及时与现场沟通，并成功诊断了多起故障，将机组故障消灭在萌芽状态，达到了缩短检修时间，节约维修费用的目的。

### 4.2 系统的安装测试与现场试验

远程监测中心的主要功能是首先通过分布在各分公司的数据采集系统对分公司内部现场运行的机组的运行状态进行实时在线的状态监测与故障诊断，全面、深入分析机组的状态信息，包括机组振动位移、速度、加速度信息、转速信息、轴位移等，以及功率、温度、压力、流量等工艺量信息（根据各机组的实际情况采集不同类型数据）。

然后，通过通讯技术和数据压缩技术将各分公司机组数据通过北京中转服务器将机组运行状态数据远程传输到远程监测诊断中心服务器上，实现对下属各生产厂机组的运行信息的统一管理、数据汇总、远程专家会诊等。

#### 4.2.1 安装系统的机组简介

系统安装的样机有一台数据采集器、一台数据服务器和若干浏览站组成（浏览站可选择局域网中的PC机），机组为辽化的裂解气压缩机组。裂解气压缩机组属技术密集型、高速旋转的大型石化机械设备，其开发、研制涉及气体动力学、热力学、转子动力学、传热学、材料力学、自动控制等多种学科和领域，是乙烯装置的心脏设备。机组运行的正常与否，直接影响到生产的安全性、稳定性，因为对裂解气压缩机组的监测也具有十分重大的意义。

## 4.2.2 系统安装

### (1) 系统构成

现场裂解气压缩机组通过探头传感器、Bently3500 监测系统将机组的键相、振动、位移等现场数据传送到现场数据采集站上。该数据采集站有 RJ-45 网络接口，通过厂内的局域网将现场机组实时数据发送到数据服务器上。浏览站的数量不受任何限制，只要联网的任何一台计算机中安装有 IE 5.0 以上版本，利用授权密码均可通过 IE 浏览器登录网页，实现对现场机组的远程监测、分析和诊断。系统构成如图 4.1 所示

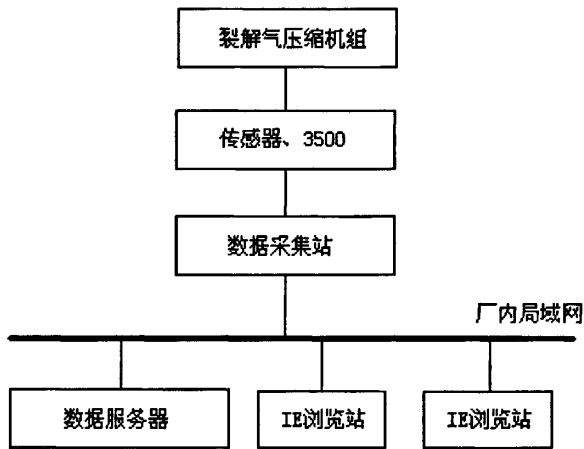


图 4.1 系统构成

Fig. 4.1 System structure

### (2) 接入信号

数据采集站采用盘装的方式安装在乙烯区控制室机柜间一个独立的机柜内，机组测点的统计如表 4.1 所示：

表 4.1 机组测点统计表

Tab. 4.1 The statistics of unit monitoring point

机组名称	机组编号	轴振动	轴位移	键相位
裂解气压缩机组	201	16	12	1

#### ① 径向振动和轴向位移信号



裂解气压缩机组的径向振动和轴向位移信号，直接来自 Bently3500 的输出缓冲端口，通过专用 25 芯电缆接线端子模块和 25 芯电缆与数据采集站连接。采用这种方式，可以将现场众多机组信号通过电缆插拔的方式连接到数采站。

现场传感器采用美国 Bently Nevada 公司的在线监测保护装置，即 Bently3500 传感器系统。它可连续测量和监视不同的机械参数，如径向振动和轴向位移信号等，并能提供机组的运行工况，同时对早期确认机械故障可提供重要的信息。

Bently3500 传感器系统如图 4.2 所示，该系统由 8mm 趋近式探头传感器、延伸电缆、前置放大器和指示仪等组成。这种探头表面有一个封闭的传感器线圈，通过线圈的高频工作电流在探头前端产生一个交流磁场，当探头靠近转动轴时，轴表面将感应出电涡流，同时，闭合的电涡流也在轴表面感应出一个对应的磁场，与探头线圈的交变磁场作用相反，由于反作用磁场的抵消作用，使探头产生的交变磁场受到损耗，这种损耗被前置放大器检测出来，这样，探头与轴面的间隙就可以通过磁场耦合反映到前置放大器的输出电压上，并且构成一定的特性曲线关系<sup>[41]</sup>。

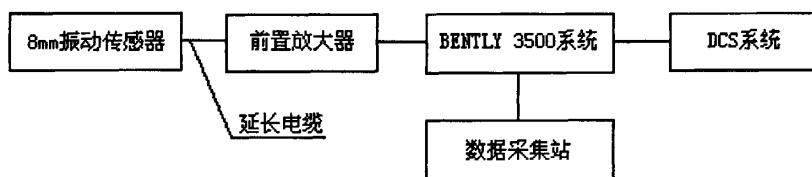


图 4.2 Bently3500 传感器系统

Fig. 4.2 Bently3500 transducer system

### ② 键相位信号

数据采集站 NET8000 可以处理无键、键槽、测速齿轮、多轴单键等多种信号。让键相探头传感器在轴转动时，每转感测产生一个脉冲信号，该信号即为键相信号。在该系统中，裂解气压缩机组有一个键相信号，由 Bently3500 输出并与数据采集站相连。

### ③ 过程量信号

为了获得更多与机组运行相关的过程量，NET 8000 监测分站突破传统的仅采用硬接线的方式，其自身具有 2 个串行口，根据 MODBUS 通讯协议，可从 DCS 系统将必要

的过程变量信号采入 NET 8000 监测分站，最多可接入 256 个过程变量信号，大大丰富了机组监测与故障诊断的信息。

④ 系统供电及接地

系统电源要求：220VAC±10%，50Hz±1Hz；

系统负荷：数据采集站功率小于 80W，数据服务器的功率小于 100W，系统最大负荷小于为 200W。

系统接地：系统分别提供保护接地和信号接地；电源输入端子均有保护接地；机柜均有接地铜排和 M10 安全接地螺栓。

4.2.3 系统测试考核

拿裂解气压缩机做测试，通过 S8000 图谱（如图 4.3 所示），调出 VE2116B 通道下的从 2007-2-27 00:00:00 到 2007-3-04 00:00:00 平稳运行的高密度包括灵敏监测一段历史数据，把对应的一些特征输入后，系统自动得出以下结论：

存在两个可能的故障：动平衡不良和转子叶轮结垢。

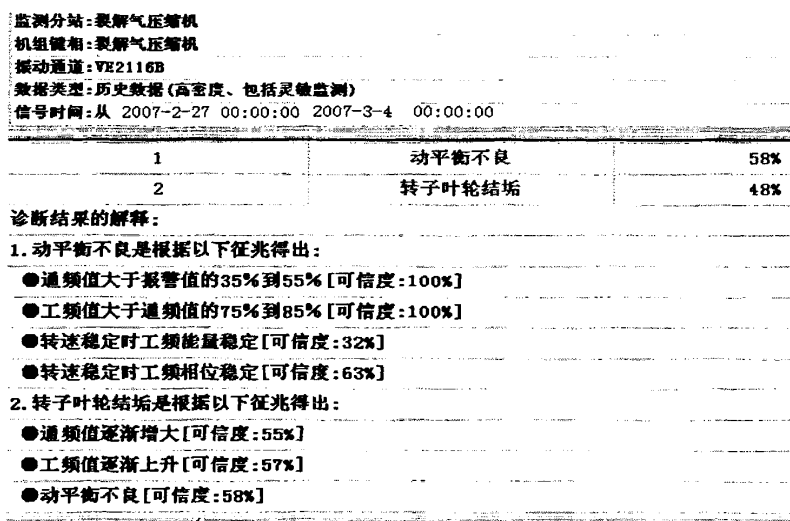


图 4.3 诊断界面

Fig. 4.3 The diagram of diagnosis interface

从专家系统诊断获得的自动征兆来看，动平衡不良故障特征主要表现在以下几方面：振动的时域波形为正弦波；频谱图中，谐波能量集中于基频；当工作转速一定时，相位稳定；转子的轴心轨迹为椭圆<sup>[42]</sup>。转子的进动特征为同步正进动；振动的强烈程度

对工作转速的变化很敏感等<sup>[43]</sup>。而专家系统得出的以上四个征兆，从下面通频值趋势图和工频值趋势图中可以得到验证，的确满足了动平衡不良故障的一些特征。结果从现场诊断人员判断该机组的确存在动平衡不良故障，需要进行现场动平衡试验以消除故障。

同理，对于转子叶轮结垢的判断，专家系统主要是基于以下三个征兆：通频值逐渐增大；工频值逐渐上升；动平衡不良<sup>[44]</sup>。从转子叶轮结垢的故障机理来看，转子叶轮结垢故障特征主要表现在以下几方面：通频值逐渐增大；工频值逐渐上升；工频值>通频值的60%到80%。同时转子叶轮结垢故障破坏了转子的动平衡状态，所以当发生转子叶轮结垢故障时存在一定的动平衡不良。从专家系统得出的以上三个征兆，从图 4.4 通频值趋势图和图 4.5 工频值趋势图中可以得到验证，的确满足了转子叶轮结垢故障的一些特征。

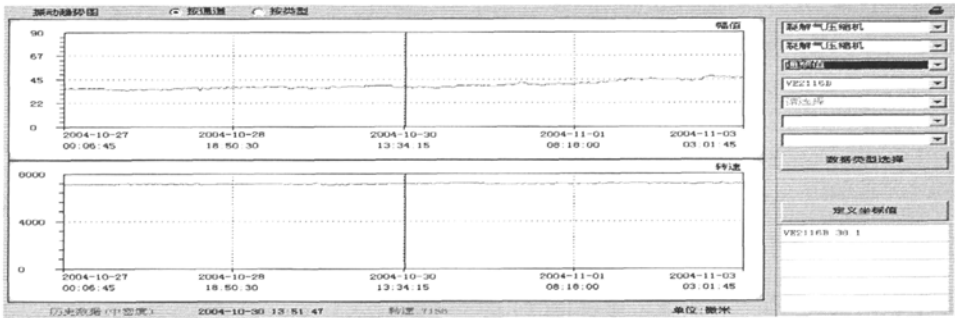


图 4.4 通频值趋势图

Fig. 4.4 The trend of pass-band

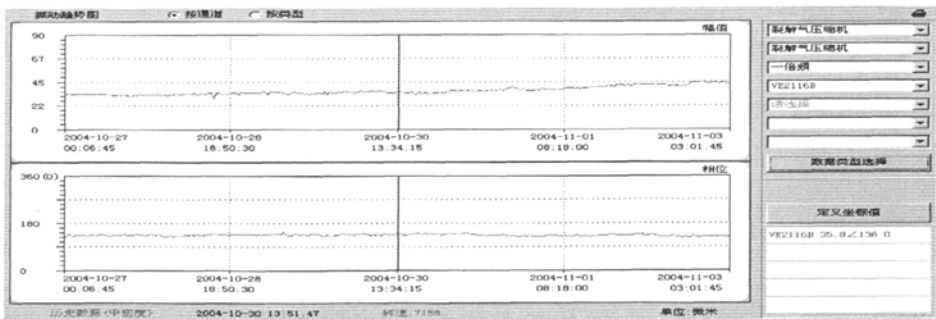


图 4.5 工频值趋势图

Fig. 4.5 The trend of power frequency

从现场诊断人员诊断结果判断该机组的确存在一定程度的转子叶轮结垢故障，需要彻底清理转子与壳体内件，复查各部分间隙，检查是否存在由于碰磨而造成的损伤，若振动偏大则请检查轴承的瓦面以及间隙等状况。

故障诊断系统对该机组的诊断结果与现场诊断人员的诊断结果是一致的。

#### 4.2.4 系统实现的功能

##### (1) 早期故障诊断

由于在线网络的连续运行，监测系统可以全自动地连续记录各机组的运行状态。根据记录的状态数据，通过各种分析手段，能够将早期出现的故障征兆及时发现，同时机组运行的任何异常现象都可记录下来并可保存 10 年以上。

##### (2) 自动报警

可对表征机组运行状态的各种监测量（振动，轴位移，键相，温度，压力等）进行在线报警检查。实现对各种监测量快变、缓变、趋势、波动情况等统计信息以事件触发的形式自动触发声光报警。并实时根据机组运行情况通过自适应学习调整各种报警及事件触发的门限值，真正实现对机组运行状态有效数据的无遗漏、无冗余、快速准确记录，从而为早期故障预报及故障诊断提供依据。

##### (3) 高效的故障专家诊断系统

利用人工智能及数据挖掘技术开发的“旋转机械故障专家诊断系统（分自动和人工两种）”可对设备各类故障进行初步及精确诊断，对企业及时发现故障隐患和培养高素质的设备故障诊断人才提供重要手段及工具。

##### (4) 远程诊断、服务功能

在设备诊断工程研究中心的有力支持下，可随时通过互联网对机组的运行状态进行分析，并对出现的故障作精密诊断，及时通知现场有关人员进行适当处理，避免事故发生。

##### (5) 节省人工

系统全自动化，不需要状态监测方面专职人员维护和诊断，系统可以按照要求定期自动生成机组运行状态报表供生产、设备人员参考，并可指导设备检修。

#### 4.2.5 系统特点

##### (1) 实时性

###### ① 实时数据更新速度

早期的远程监测与诊断系统都是采用关系型数据库或内存来保存实时数据，但对数据库读写的 IO 操作十分消耗资源，对内存的频繁开辟和释放又会影响系统平台的稳定

性。而本系统通过一套实时数据库将实时数据保存在一段高速缓存中，对内存进行统一管理，提高了系统的实时性、稳定性。

### ② 数据传输速度

本系统为减少网络流量，在数据传输时，利用各种压缩算法及数据挖掘对原始数据进行了高压缩比的无损压缩，大大提高了数据的传输速度。

本系统为了降低数据库连接和网络通讯连接的负载，设计并使用了数据库连接池和网络通讯连接池，利用并行计算原理考虑各种并发和峰值情况，利用连接池对连接对象进行集中管理，提高了通讯速度及稳定性。

### ③ 数据处理速度

本系统数据处理模块采用 C++ 语言编写，C++ 语言是一种高效地编程语言，从数据处理角度讲速度远远高于其它编程语言。早期远程监测系统使用 J2EE 框架开发，通过 JSP+Applet 模式显示实时监测数据图谱。

## (2) 应用性

在进行机组运行状态实时监测及诊断时需要对时域信号、频域信号以及振动、温度、压力、流量等各种信号综合分析才能得到有效分析诊断，基于以上目的本系统通过多年现场及故障诊断经验的积累设计提供了各种图谱组合、图谱比较及图谱切换功能，方便用户使用，对各种监测通道及特征类型可以方便的进行纵横比较。

## (3) 安全性

早期远程监测系统采用二层网络体系结构，实时性、扩展性、安全性的提高成为优化的瓶颈之一。本系统采用了基于中间件技术的多层网络体系结构，使系统安全性得到提高。在多层体系结构中，各种业务逻辑及功能模块放在应用服务层中间件平台。应用服务层接受客户端的业务请求，根据请求访问数据库，通过相关数字信号处理和逻辑运算，将处理结果返回客户端。

中间件应用服务层从物理上和逻辑上将数据层、逻辑层、显示层分离出来，客户端不直接访问数据库服务器（数据层），转而访问应用服务层，从而使客户端和数据库相隔离，有利于安全管理，可有效防止恶意攻击。在体系结构中将业务逻辑划分权限，一种业务对应一个中间件模块（应用服务），利用中间件的安全管理对其进行访问控制，使权限控制与管理更加灵活、方便和实效。

## (4) 可扩展性

### ① 设备组台的可扩展性

本系统作为网络化监测平台，充分考虑了设备组台的扩展性，通过添加相应的硬件设备和网络化软件可以实现系统平台网络节点的快速扩充。

## ② 业务逻辑的可扩展性

业务逻辑的可扩展是中间件技术的优势之一，各种业务逻辑、数据处理、诊断方法模块的增加、删除和优化可以通过网络根据相应的权限自动更新到各个监测分站网络节点，各个节点的监测平台无需关闭，可在保持运行的情况下实现更新。

### 4.3 远程实时监测诊断系统的实际应用

远程实时监测诊断系统采用网络技术对 9 家地区公司的关键机组的运行状态和故障信息实施远程联网在线监测，实现了关键机组远程实时监测诊断管理，实现了信息交流共享和异地专家远程会诊。

关键机组远程实时监测诊断系统的建立，为发挥全员管理提供了强有力的支持，它可对所有大型机组进行全天候的不间断监测，并不断地向生产调度、机动管理、诊断、维修部门及各级领导发送实时数据。保证设备安全可靠运行，发挥其最大的设计能力和使用效率。及时准确地对关键机组转子运行中出现的异常或故障进行诊断，以便制定正确的维修策略，发现问题时可及时采取措施。随时掌握设备性能的发展变化情况，为逐步实现定期强迫维修制度向预知维修制度的过渡提供条件。并可为关键机组的优化设计和制造提供相关参考数据。最终使各部门之间成为一个密切相联的有机整体，从而极大地提高设备的全员优化管理水平，为企业节省大量人力物力。

关键机组远程实时监测诊断系统作为机组远程诊断和维护的平台，使得为各生产厂提供诊断服务的专家远在千里之外就可以及时、准确、全面地掌握机组的运行状态，通过股份公司对远程诊断专家小组的实施与发展，针对某类型机组，可以在全国范围内调集对该类机组有深入了解的诊断专家，进行有针对性的远程专家会诊，从而集专家所长，及时地解决现场问题。系统对在远程监测系统内运行机组进行监测分析，发现问题及时与现场沟通，解决了多起关键机组的故障问题，逐渐显现出其应有的价值。

#### 4.3.1 远程诊断宁夏石化公司二化肥合成气压缩机组掉叶片故障

##### (1) 故障情况概述

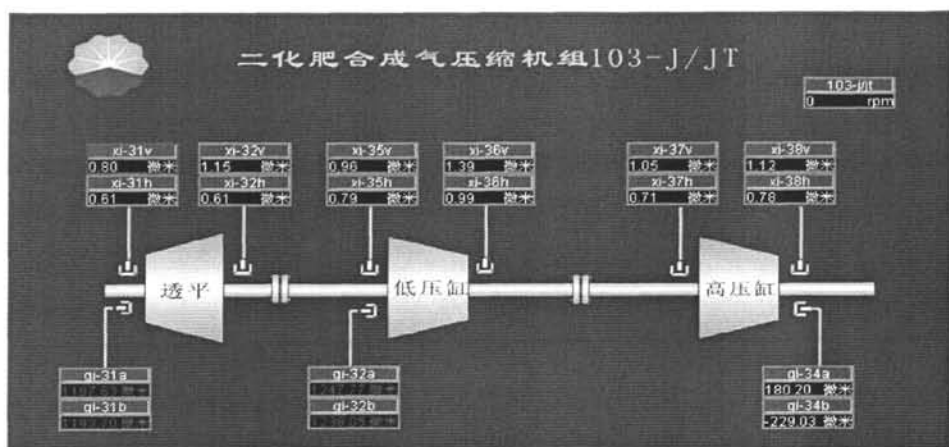


图 4.6 103-J/JT 机组结构简图

Fig. 4.6 The diagram of compressor unit 103-J/JT

宁夏石化分公司二化肥合成气压缩机组 103-J/JT 于 2007 年 7 月首次开车, 机组运行状况良好, 2007 年 9 月 9 日 10: 33: 34 时透平两端轴瓦振动同时骤增, 10 秒钟后连锁停车。远程中心通过关键机组远程实时监测诊断系统发现此情况后及时向股份公司领导进行了汇报, 同时立即通过远程诊断系统的振动趋势图、波形频谱图、轴心轨迹图等谱图分析功能对其进行远程诊断分析。机组结构简图如图 4.6 所示

### (2) 测试分析图

测试分析图如图 4.7~4.11 所示, 由图 4.8 可见, 9 月 9 日 10: 33: 44 时, 透平两端各测点振动值 XI-31V207.3 $\mu$ m; XI-31H179.4 $\mu$ m; XI-32V160.4 $\mu$ m; XI-32H132.5 $\mu$ m。

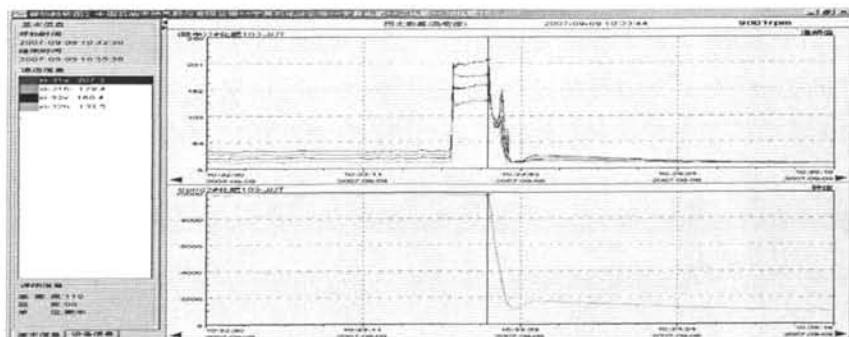


图 4.7 9 月 9 日透平两端各测点的振动趋势图

Fig. 4.7 The vibration trend on both sides of turbine testing point

从图 4.7 中可以看出, 该机组振值在某个时刻瞬间迅速增长。

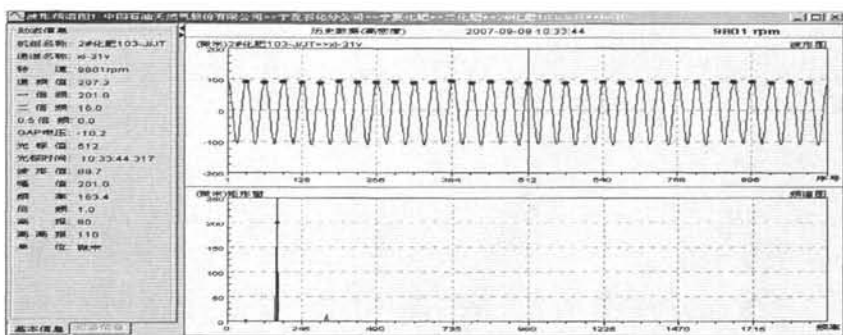


图 4.8 9月9日 10: 33: 44 时 XI-31V 测点振动波形频谱图

Fig. 4.8 The vibration wave and amplitude spectrum in monitoring point XI-31V

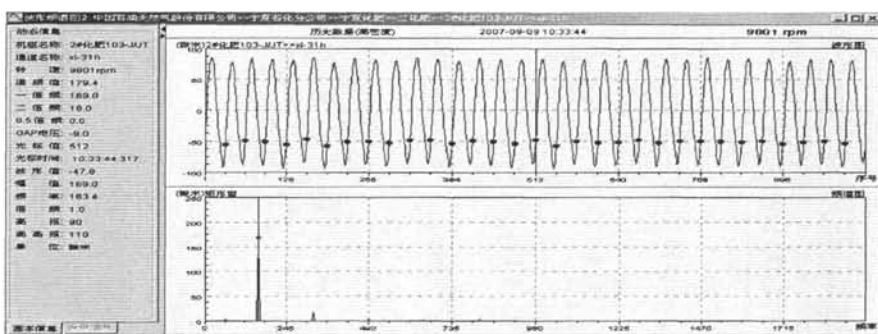


图 4.9 9月9日 10: 33: 44 时 XI-31H 测点振动波形频谱图

Fig. 4.9 The vibration wave and amplitude spectrum in monitoring point XI-31H

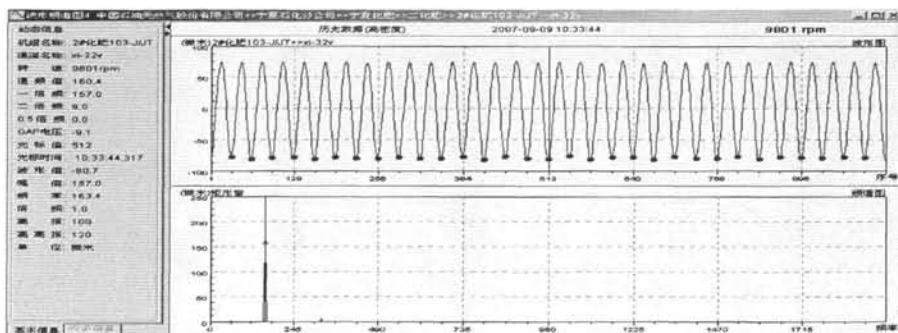


图 4.10 9月9日 10: 33: 44 时 XI-32V 测点振动波形频谱图

Fig. 4.10 The vibration wave and amplitude spectrum in test point XI-32V





图 4.11 9月9日 10: 33: 44 时 XI-32H 测点振动波形频谱图

Fig. 4.11 The vibration wave and amplitude spectrum in test point XI-32H

从图 4.8、图 4.9、图 4.10 和图 4.11 中可以看出，该机组振动都以工频占主导。

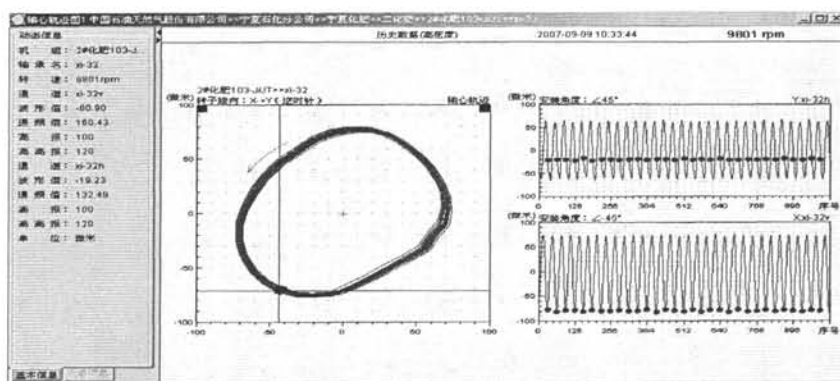


图 4.12 9月9日 10: 33: 44 时 XI-32 轴承振动轴心轨迹图

Fig. 4.12 Journal center trajectory of bearing vibration in XI-32

从图 4.12 中可以看出，轴心轨迹为椭圆形。

### (3) 远程诊断意见

远程诊断系统对其振动趋势图、波形频谱图、轴心轨迹图进行分析，机组在工艺未做任何调整，操作正常的情况下，9月9日 10: 33: 34 时透平两端轴瓦四个测点的振动同时骤增，10 秒钟后连锁停车，透平两端轴瓦四个测点的振动以工频占主导，从振动趋势图、波形频谱图、轴心轨迹图中可以看出，该机组振值在某个时刻瞬间迅速增长、机组振动都以工频占主导，轴心轨迹为椭圆形。通过对故障征兆的选取、并结合发生故障

时的前后运行状态，我们通过远程诊断系统机械故障专家诊断系统的黑·灰·白集合矩阵判别筛选法的功能，将所测得的这些故障特征参数，以人机对话形式采用人工智能矩阵判别筛选得出的故障原因加以分析，认为引起透平高振动的主导原因是：透平转子掉叶片。

#### (4) 结论验证

根据远程诊断中心的诊断意见，宁夏石化公司对机组进行解体检查。解体后发现：透平转子第一级叶片有一片断裂，未对其他叶片造成损伤。转子送杭州汽轮机厂分析叶片断裂原因并进行检修。至此，这次机组故障原因查明。此次远程诊断从发现故障到做出精确诊断前后仅用了不到二个小时的时间，真正体现了远程诊断系统充分利用网络优势，实现了远程诊断及时、准确，异地指导机组检维修，达到缩短检修时间，节约维修费用的目的。

### 4.3.2 远程诊断乌鲁木齐石化公司二氧化碳压缩机组振动故障

#### (1) 故障情况概述

乌鲁木齐石化公司一化肥二氧化碳压缩机组 102-J/JT 于 2008 年 7 月份停车检修，更换了高压缸转子，7 月 28 日开车后高压缸测点 Xi109 的水平方向和垂直方向振动值就超过报警值，并且测点 Xi109H 和 Xi109V 振值都达到了  $130\mu\text{m}$ ，测点 Xi108V 振值为  $77\mu\text{m}$ ，Xi108H 振值为  $34\mu\text{m}$ 。几天后 Xi109V 和 Xi108H 振动有增长的趋势，Xi109h 振值已达到了  $165\mu\text{m}$ ，Xi108H 振值增大到  $49\mu\text{m}$ 。机组结构简图如图 4.13 所示

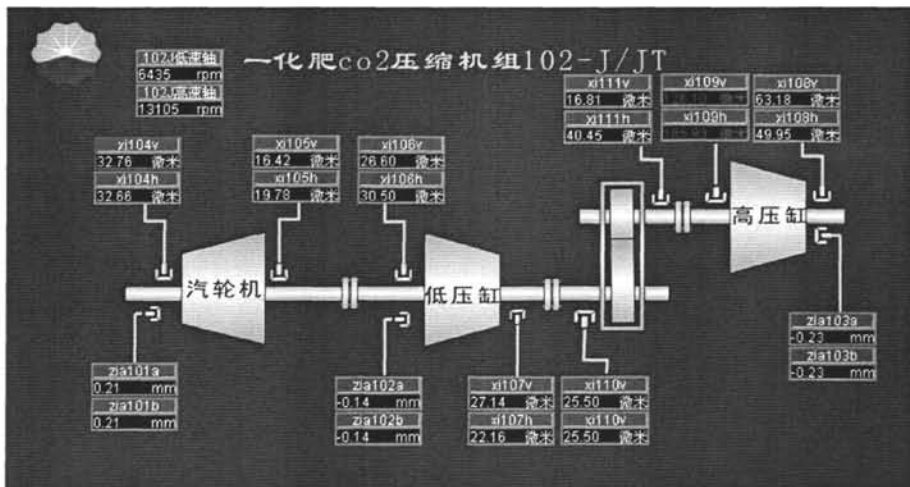


图 4.13 机组结构简图

Fig. 4.13 The diagram of compressor unit 102-J/JT

(2) 测试分析图

测试分析图如图 4.14~4.19 所示

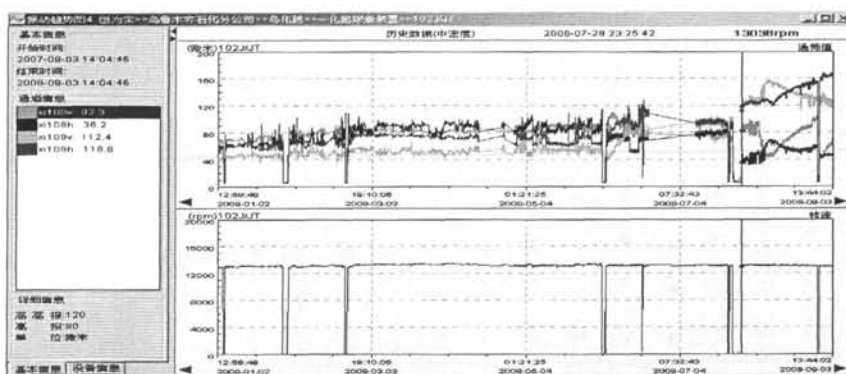


图 4.14 高压缸两端各测点的振动趋势图

Fig. 4.14 The vibration trend on both sides of the turbine high pressure cylinder test point

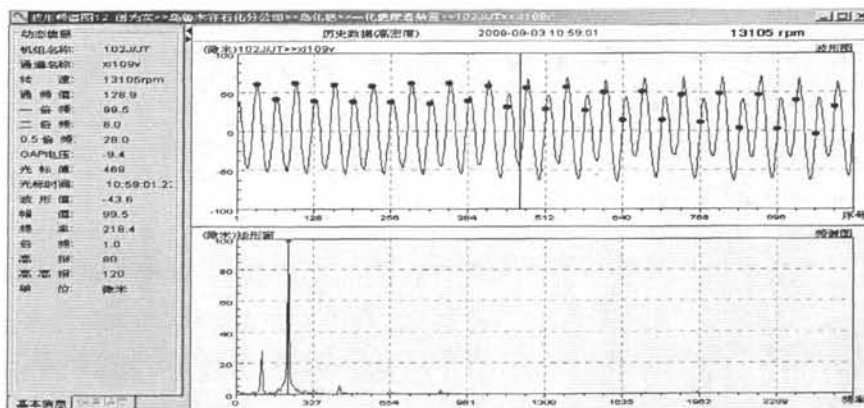


图 4.15 2008 年 9 月 3 日 10: 59: 01 时 xi109v 测点振动波形频谱图

Fig. 4.15 The vibration wave and amplitude spectrum in test point xi109v

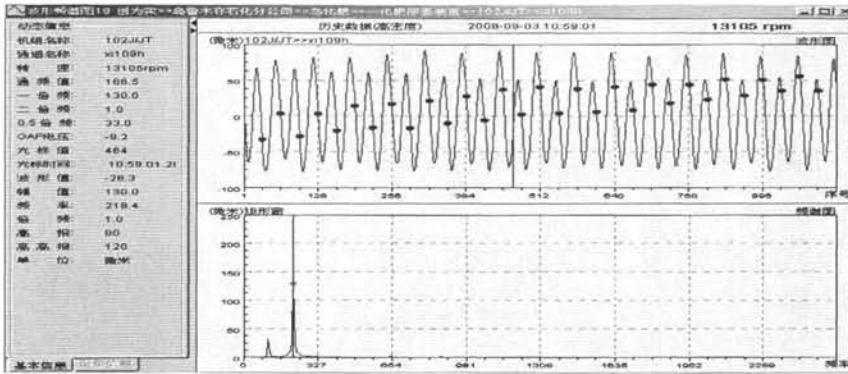


图 4.16 2008 年 9 月 3 日 10: 59: 01 时 xi109h 测点振动波形频谱图

Fig. 4.16 The vibration wave and amplitude spectrum in test point xi109h

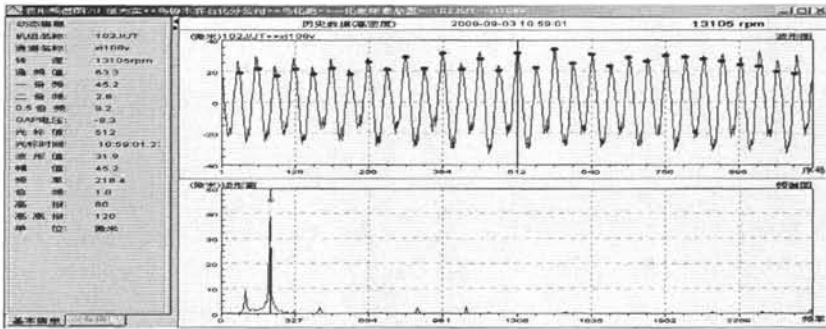


图 4.17 2008 年 9 月 3 日 10: 59: 01 时 xi108v 测点振动波形频谱图

Fig. 4.17 The vibration wave and amplitude spectrum in monitoring point xi108v

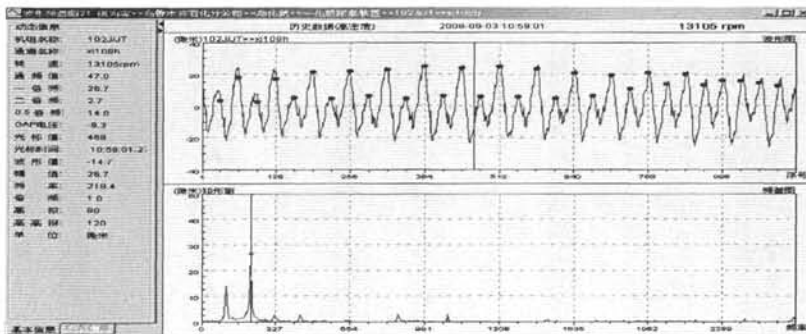


图 4.18 2008 年 9 月 3 日 10: 59: 01 时 xi108h 测点振动波形频谱图

Fig. 4.18 The vibration wave and amplitude spectrum in monitoring point xi108h

从图 4.15、图 4.16、图 4.17 和图 4.18 中可以看出，该机组振动以工频占主导，兼有 0.5 倍频成分。

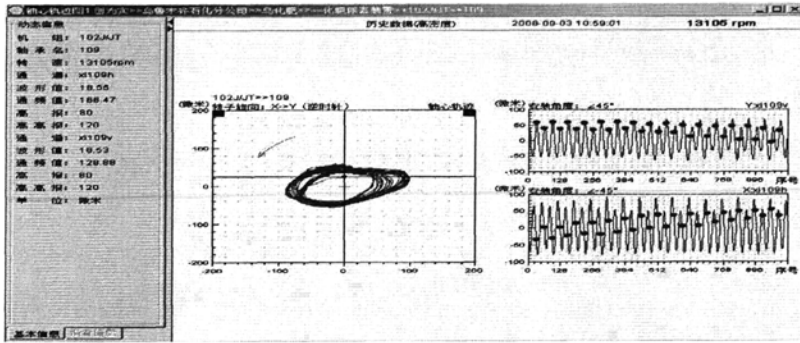


图 4.19 2008 年 9 月 3 日 10: 59: 01 时 xi109 轴承振动轴心轨迹图

Fig. 4.19 Journal center trajectory of bearing vibration in xi109

从图 4.19 从可以看出，轴心轨迹为双环椭圆。

### (3) 远程诊断意见

通过远程实时监测诊断系统对其振动趋势图、波形频谱图、轴心轨迹图进行分析，机组在 7 月 28 日开车以后，高压缸测点 Xi109 的水平方向和垂直方向振动值就超过报警值，并且随着时间的推移，振动有增高的趋势。从波形频谱图上看，所有测点的振动以工频占主导，伴有明显的 0.5X 频率成分。我们通过远程诊断系统机械故障专家诊断系统的黑·灰·白集合矩阵判别筛选法的功能，将所测得的这些故障特征参数，以人机对话形式采用人工智能矩阵判别筛选得出分析结论，确定引起该机组高振动是由于高压缸转子轴系不平衡且轴瓦间隙不良，导致油膜失稳造成的。我们建议乌鲁木齐石化公司调整该机组的润滑油温而消除油膜失稳，如有检修机会立即停车对该机组高压缸转子进行动平衡处理，回装时注意调整轴瓦间隙。后经停车且按照上述方法进行了检修，该机组的故障得以彻底消除。

## 4.4 本章小结

本章通过对系统的考核及应用实例验证系统的可靠性和实用价值。经过系统测试与现场实验，远程实时监测诊断系统技术先进、成熟，其系统可靠性、可维护性在现场实际运行过程中得到验证。利用关键机组远程实时监测诊断系统对透平压缩机组进行故障

诊断的案例，分析了透平压缩机组的故障特点，验证了黑·灰·白集合筛选法的科学性与实用性。

## 结 论

中国石油关键机组远程实时监测诊断系统的实施与推广，对于提高工业现场设备管理的信息化程度，加强设备维护能力具有重要作用，为实现转动设备预知维修、有效遏制恶性设备事故发生提供了必要的技术手段和保障，其实施具有重要的现实意义。

本远程实时监测诊断系统涉及的技术面非常广，融合了设备故障诊断技术、现代计算机技术、网络技术、大型数据库技术、数据压缩技术、海量数据挖掘技术、电子技术以及信号处理技术的最新发展成果，主要包括以下关键技术：

- (1) 大型数据管理技术；
- (2) 诊断服务技术；
- (3) 远程浏览技术；
- (4) 高压缩比的无损压缩技术；
- (5) 智能报警监测存储技术；
- (6) 网络 IP 自动寻优技术；
- (7) 开放的通用数据交换接口技术；
- (8) 多种设备运行数据的处理和采集技术；
- (9) 故障诊断案例库及专家会诊功能等的数据库深加工技术；
- (10) 系统稳定性和可靠性的实施技术；
- (11) 系统的远程维护和远程升级技术。

本远程实时监测诊断系统还在以下几方面有广泛的应用前景：

- (1) 机组远程管理平台方面的应用；
- (2) 机组远程诊断和维护平台方面的应用；
- (3) 机组信息沟通和交流平台方面的应用；
- (4) 机组故障诊断技术发展平台方面的应用等。

至目前为止，在远程设备监测诊断领域里，本次建立的关键机组远程实时监测诊断系统集成了这些最新的技术成果及网络信息技术，同时在可靠性、稳定性、可维护性等方面已积累了相当的经验，并且真正搭建了一个低成本的、基于网络的、设备远程实时监测诊断的设备综合管理信息平台。

## 参 考 文 献

- [1] 高金吉. 未来装备医工程思维[J]. 中国工程科学, 2003, 5(12): 30-35.
- [2] 钟一谔, 何衍宗, 王正. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987:8-10.
- [3] Markert, R. Response in Passing through Critical Speed of Arbitrary Distributed Flexible Rotor System [M]. Bull JSME, 1983:1198-1212
- [4] 安红艳, 蔡正国. 提高设备诊断水平的途径和方法研究[J]. 石油化工设备技术, 1996, 17(4):60-62.
- [5] Lund J W. Review of the concept of dynamic coefficients for fluid film journal bearings[J]. Tribology, 1987, 109(8):37-41.
- [6] Knospe, C R, Hope. Experiments in the Control of Imbalance Response using Magnetic Bearings [M]. Mechanics, 1995:385-400.
- [7] 熊万里, 闻邦椿, 段志善. 转子系统瞬态过程的减幅特性及共振区迟滞特性[J]. 振动与冲击, 1999, 18(4):12-15.
- [8] C A Papadopoulos, A D Dimarogonas. Stability of cracked rotors in the coupled vibration mode[J]. Transactions of the ASME, 1988, 110(15):356-359.
- [9] Foppl A. Das Problem der Lavalschen Turbinenwelle[M]. Der Civilingenieur, 1985:335-342.
- [10] 沈庆根. 化工机械故障诊断技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994:52-58.
- [11] 梁启荣等. 单轴等温离心压缩机的转子动力学[J]. 风机技术, 1994, 9(6):2-6.
- [12] 刘士学等. 转子不平衡响应计算结果判断标准的探讨[J]. 风机技术, 1996, 10(4):19-22.
- [13] 徐宾刚, 屈梁生, 温广瑞. 柔性弯曲转子的特性识别与诊断[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(3):288-291.
- [14] 林富生, 孟光. 具有初始弯曲转子振动峰值得控制方法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3):46-48.
- [15] 虞烈, 刘恒. 轴承-转子系统动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:2-9.
- [16] 冀江, 于克敏, 李洪平, 乔宪一. 15000~20000kW 大型烟气轮机的开发及烟机应用上的几个问题[J]. 石油化工设备技术, 1999, 20(5): 18-23.
- [17] 高洪英, 陈兆虎, 李强等. 催化烟机故障的综合诊断[J]. 中国设备工程, 2003, (4):42-44.
- [18] Nelson, H D, Meachan. Transient Analysis of Rotor Bearing System Using Component Mode Synthesis [M]. Transactions of the ASME, 1989:81-110.
- [19] Yanabe, S. Non-Stationary Vibration During Acceleration through Two Critical Speeds [M]. Bull JSME, 1981:405-412.
- [20] Kotera, T. Vibration of Flexible Rotor Driven by Limited Torque through its Critical Speed [M]. Bull JSME, 1974:686-692.
- [21] Gasch, R. Vibration of Large Turbo-Rotors in Fluid-film Bearings on an Elastic Foundation [M]. Journal of Sound and Vibration, 1995:53-73.



- [22] Nelson, H D. A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory [M]. ASME Transactions, 1980:793-803.
- [23] 易拥军, 何敬成, 王路军. 前置高温金属热管蒸汽发生器在烟机保护中的应用[J]. 石油化工设备技术, 2002, 23(4): 46-49.
- [24] Shiau, Hwang. A New Approach to the Dynamic Characteristic of Undamped Rotor-Bearing System [M]. ASME Transactions, 1989:379-385.
- [25] Nelson, H D, Chen W J. Undamped Critical Speeds of Rotor System Using Assumed Modes [M]. ASME Transactions, 1993:367-369.
- [26] 李大仰. 轮机械实际应用中的动力学问题[J]. 化工机械, 2002, 29(5): 266-270.
- [27] Chen, C T. Linear System Theory and Design [M]. Rinehart and Winston, 1998:50-66
- [28] Hassenpflug, H L et al. Influence of Acceleration on Critical Speed of a Jeffcott Rotor [J]. Engr Power, 1981, 103(1):108-113.
- [29] 方之楚. 不平衡旋转轴系通过临界点时的瞬态响应[D]. 上海: 上海交通大学振动、冲击、噪声研究所, 1985.
- [30] 熊万里, 闻邦椿. 振动机械启动过程中的迟滞共振原因分析[J]. 力学与实践, 1999, 38(9):38-39.
- [31] Gosiewski, Z. "Automatic Balancing of Flexible Rotors, Part 2: Synthesis of System" Journal of Sound and Vibration [J]. Engr Power, 1987, 114(1):103-119.
- [32] Nelson, McVaugh, J M. The Dynamics of Rotor-Bearing System Using Finite Elements [M]. ASME Transactions, 1976:465-475.
- [33] Zorzi, Nelson, H D. Finite Element Simulation of Rotor-Bearing System with Internal Damping [M]. ASME Transactions, 1992:71-76.
- [34] 陈进. 机械设备振动检测与故障诊断[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999:3-5.
- [35] 杨叔子. 基于知识的诊断推理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993:2-6.
- [36] Childs, Graviss. A note on Critical-Speed Solution for Finite-Element-Based Rotor Models[M]. ASME Transactions, 1982:412-416.
- [37] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 韩清凯等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京: 科学出版社, 2004:4-6.
- [38] 徐龙祥. 高速旋转机械轴系动力学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994:5-7.
- [39] 余光伟. 多平行轴齿轮-轴承-转子系统耦合振动的有限元分析[J]. 上海大学博士学位论文, 1994: 3-9.
- [40] 黄钟岳. 化工轮式压缩机[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 10-15.
- [41] Yanabe, S. Vibration of A Shaft Passing through A Critical Speed[M]. Bull JSME, 1980:945-952.
- [42] Nonami, K, Miyashita. Problem of Rotor Passing through Critical Speed with Gyroscopic Effect[M]. Bull JSME, 1980:2104-2110.

- [43] 闻邦椿等. 高等转子动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000:7-9.
- [44] Norner, G C, Pilkey. The Riccati Transfer Matrix Method [J]. Mech Design, 1978, 100(25):297-302.

## 致 谢

本论文是在大连理工大学硕士生导师邹久朋老师悉心指导下完成的。导师渊博的学识、严谨的治学作风、锲而不舍的专研精神一直在启发我、鼓舞我、激励我、教育我，在导师的教诲和帮助下我不仅完成了学业和论文，也使我拓宽了学术视野、丰富了人生经历，在此学生对邹久朋老师表示崇高的敬意和深深的谢意！

论文完成之际，我还深深感谢辽阳石化公司副总工程师翁刚博士，从论文的理论研究、系统研发到论文撰写的整个过程，处处浸透翁刚博士心血。自 1994 年起我就在翁刚博士的直接领导和指导下从事科研、攻关工作，并取得了一系列成果；翁刚博士求实、严谨、创新的治学态度和博学进取的学识作风，使我受益匪浅，终生难忘；翁博士言传身教、忘我专研、兼收并蓄、不断进取的精神永远鼓舞我奋发向上。

在论文期间还得到了机研所全体同仁大力支持和帮助，在此深表感谢。

衷心感谢攻读硕士研究生期间的同窗学友们，在与他们的相处中受益匪浅。

同时，深深感谢多年来关怀和支持我的家人和其他亲人们，是他们给了我克服困难的信心和勇气。

最后，对阅读评审此论文的各位老师表示衷心的感谢。