

压缩机组高效可靠及智能化研究丛书

往复式压缩机 故障监测与诊断技术

Condition Monitory and Fault Diagnosis for
Reciprocating Compressor

江志农 张进杰 马波 等 著

非
外
借



科学出版社

压缩机组高效可靠及智能化研究丛书

往复式压缩机故障监测 与诊断技术

Condition Monitory and Fault Diagnosis for
Reciprocating Compressor

江志农 张进杰 马波等 著



科

内 容 简 介

本书采用理论方法和实际应用案例结合的方式,系统介绍了往复式压缩机故障监测诊断领域中的新方法、新技术及其应用成果,包括小波包算法、能量算子方法、活塞杆轴心轨迹与轴心振动能量方法、仿真动态压力方法等,为往复式压缩机典型故障监测诊断提供了新思路和新途径。

本书内容新颖,实用性强,尤其选用并介绍了大量往复式压缩机实际故障监测案例,紧密贴合工程实际应用,适合国内高等院校、研究单位以及工业企业从事往复式压缩机故障监测诊断技术研究应用的工程技术人员阅读与参考;也可作为相关高校机械故障诊断学科专业的研究生、本科生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

往复式压缩机故障监测与诊断技术=Condition Monitory and Fault Diagnosis for Reciprocating Compressor /江志农等著—北京:科学出版社,2018

压缩机组高效可靠及智能化研究丛书

ISBN 978-7-03-055252-5

I. ①往… II. ①江… III. ①往复式压缩机-故障诊断 IV. ①TH457

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第274221号

责任编辑:范运年/责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟/封面设计:正典设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第二次印刷 印张:13 3/4

字数:280 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书编委会

主 编 高金吉 院士

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈学东 (合肥通用机械研究院 院士)

范志超 (合肥通用机械研究院 研究员)

何立东 (北京化工大学 教授)

江志农 (北京化工大学 教授)

刘向峰 (清华大学 教授)

秦国良 (西安交通大学 教授)

王维民 (北京化工大学 教授)

王玉明 (清华大学 教授)

张家忠 (西安交通大学 教授)

赵远扬 (合肥通用机械研究院 研究员)

序

压缩机组是国之重器，是日益大型化、复杂化、自动化、连续化生产的石化、冶金等流程工业的心脏装备，压缩机组故障停机会造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故；压缩机组是流程工业的耗能大户，仅炼化、冶金行业的压缩机组能耗就占我国工业能耗的15%左右。目前我国石化、冶金等流程工业压缩机组安全和经济运行问题十分突出。中国工程院重点咨询研究项目“中国高耗能装备运行现状及节能对策研究”指出，压缩机组运行存在的主要问题，一是故障时有发生，不能确保安全长周期运行，二是长期偏离设计工况低效运行，这是迫切需要解决的重大工程实际问题。

工欲善其事，必先利其器。针对国家能源动力等领域对压缩机装置大型化、高参数和稳定、高效、长周期运行的重大战略需求，面临压缩机组实际运行效率低、运行周期短的重大挑战，由北京化工大学为负责单位，与合肥通用机械研究院、西安交通大学、清华大学、东北大学、沈阳鼓风机集团股份有限公司、西安陕鼓动力股份有限公司共同合作承担了科技部国家重点基础研究发展计划项目“高端压缩机组高效可靠及智能化基础研究”（973项目）。

该项目从能源、动力、制造等领域多学科交叉层面，围绕三个关键科学问题开展研究：①多干扰复杂工况下压缩机组系统非稳定边界条件及扩稳机制；②极端工况下关键部件劣化及主辅设备系统关联耦合作用规律；③压缩机组复杂系统振动噪声起因、诊治与自愈化原理。通过研究，揭示了多干扰和多变工况下压缩机组和过程复杂系统在与物质、能量、信息流相互作用下，气动特性、结构动力特性的变化规律。通过对复杂系统监测分析，揭示了低效运行、失稳、失效及故障发生发展的原因及关联性；通过参数/结构的匹配适应和智能调控，建立了机组与过程始终和谐以实现高效稳定可靠运行的原理和方法，发展压缩机组高效、可靠与智能化基础理论，其主要创新成果如下。

1. 压缩机组仿生自愈化原理和振动故障靶向抑制方法

借鉴医学的自愈调控机制及靶向医疗方法，建立一种具有确保装备在运行中预防和自动消除故障的能力的机制，在压缩机组运行中测试分析可能产生故障的条件及早期故障征兆，采用诊断预测、智能决策和主动控制方法，使装备系统不具备产生故障的条件或靶向精准抑制故障，使其消除在萌芽中，实现压缩机的自愈化。

2. 叶片局部柔性智能结构的流动扩稳减阻原理

发展了非定常流动的 Lagrangian 拟序结构动力学分析方法, 揭示了抑制失速和喘振的机制。叶片局部柔性结构可有效地将主流的能量和动量迁移到流体边界层中, 从而抑制流动分离等奇异现象, 提高叶轮的气动性能, 为叶轮扩稳减阻技术提供了新途径及理论基础。

3. 压缩机主辅耦合作用规律和失速及喘振的扩稳规律

研究了推迟失速和喘振的扩稳机理, 揭示了气体抽吸/喷射对叶轮端壁区分离涡消散过程的影响规律, 提出了主动喷射扩稳方法, 拓宽了小流量下离心压缩机组高效稳定运行的工况范围。提出了离心压缩机叶片扩压器周向开槽新结构, 能够在保证压缩机效率基本不变的情况下明显提高压缩机稳定工作范围, 并且给出了扩压器周向槽参数选取的指导性原则。

4. 力场、温度和化学等多场综合作用下压缩机关键部件失效规律

首次考虑应力场、温度场、化学场的共同作用, 建立了压缩机曲轴、叶轮等关键部件的多轴断裂、动态断裂失效评定和腐蚀疲劳寿命预测方法, 提出基于寿命的设计制造技术方法。综合考虑极端工况对压缩机曲轴、叶轮瞬态响应的影响, 建立了体现高阶谐波和气流激励影响的附加载荷谱计算方法。建立了干气密封动力学新分析方法体系, 提出了基于声发射的干气密封端面碰摩损伤状态监测方法和磨损表面分析评价方法。

5. 首次提出压缩机早期故障信号快准捕捉及智能联锁保护新方法

项目攻克了压缩机组高速运转快准判别的难题, 突破了国际和 API 标准以通频振动幅值为基础的压缩机报警及紧急联锁停车保护技术, 提出了故障的劣化度和风险度无量纲参数, 建立了一种基于专家思维方式的多维度智能诊断方法, 研发出基于状态和风险的智能联锁保护系统。

6. 整体齿轮压缩机临界负荷概念及抑制耦合振动优化设计方法

鉴于国内外压缩机设计厂家没有充分考虑临界负荷振动设计问题, 导致平行齿轮轴系高端压缩机组故障频发, 国际先进的专业动力学分析软件均不具备临界负荷设计计算能力。研究证明了临界负荷的存在, 揭示了临界负荷对整体齿轮压缩机振动的影响规律, 提出了规避多平行齿轮轴系压缩机临界负荷的优化设计方法。

通过项目系统的研究揭示, 压缩机组一过程系统和谐是高效可靠的基础, 智能化使压缩机组更聪明, 自愈化让压缩机组更健康。研究成果可为提高压缩机组高效可靠和智能化自愈化水平, 为研制新型高端压缩机组和在役再制造工程, 提供基础理论和关键技术, 有些是国际上压缩机领域理论和技术发展的前沿。

“压缩机组高效可靠及智能化研究丛书”是将 973 项目主要研究成果编著成七册出版。这都是在科技部和项目专家组关怀和指导下, 有关高校、科研院和企

业产学研合作，973 项目组成员现场调研、理论探讨、试验研究的丰硕成果，是集体汗水和智慧的结晶。我们的研究成果，不仅要在国际知名期刊上发表供他引，更要编著成书深入解读，让研究成果在祖国大地落地生根，开花结果。我在石化企业和压缩机组打交道近 30 年，深知这套丛书对压缩机组研发、设计和技术提升及智能化非常实用、非常有价值。我对丛书的出版表示由衷欣喜和热烈祝贺！向为大国重器基础理论和关键技术发展付出辛勤劳动的同仁们表示崇高的敬意！

这套丛书的出版发行，必将为我国高端压缩机组高效可靠和智能化自愈化技术的普及，为压缩机等动力机械领域科研和专业技术人员的成长发挥重要作用。

中国工程院院士 高金吉

2017.10

前 言

往复式压缩机是石油、石化、煤化工、输气管道等领域的关键动力机械。由于压力适应范围宽、压缩效率高等突出优势，目前在聚乙烯、加氢裂化、化肥等装置以及天然气地下储气库中，往复式压缩机具有不可替代的作用；但同时，往复式压缩机也存在振动大、易损件多、故障率高、检维修周期短等问题，目前，国内绝大多数往复式压缩机仍采用定期维修与故障事后维修的方式进行设备管理与维护，故障监测诊断水平的发展与应用较为缓慢。

作者所在北京化工大学高金吉院士团队，在国内从事往复式压缩机故障监测诊断技术研究已超过 20 年，团队通过开展“高端压缩机组高效可靠及智能化基础研究”“基于信息融合的炼化企业往复压缩机智能诊断”“基于物联网的石化工业风险识别与安全应急系统研发及示范应用”等课题的研究工作，在往复式压缩机故障监测诊断领域取得了大量研究与应用成果。近 10 年以来，团队相关技术成果在国内应用超过 400 台套，积累了数百起往复式压缩机典型故障案例。本书是上述研究与应用成果的总结。

本书共 9 章。第 1 章为绪论，简要介绍往复式压缩机故障监测诊断的基础知识、监测诊断背景与方法。第 2 章为往复式压缩机结构及工作原理，系统介绍往复式压缩机的组成、结构与工作原理，作为机械故障监测诊断的基础，机械结构与工作原理是故障诊断人员必须掌握的知识点。第 3 章是往复式压缩机关键运动部件受力分析，介绍往复压缩机关键运动部件气阀、活塞、连杆、曲轴等的受力特点，推导并建立相关动力学与运动学模型。第 4 章是基于角域分析的故障诊断技术，该章对往复式压缩机监测系统的键相传感器、角域信号分析图谱、信号角域相位补偿与校准技术进行介绍，区别于离心式压缩机、机泵等旋转设备，往复压缩机由于曲柄—连杆—活塞往复运动特性，其振动冲击与曲轴转角存在实际对应关系，将常规时域信号转化为角域信号进行故障分析诊断具有较好效果。第 5 章是往复式压缩机典型故障监测诊断技术，该章从不同监测信号出发，以振动、位移、温度、压力以及声发射信号为监测分析对象，分别对气阀、连杆、活塞杆等关键运动部件故障监测诊断方法进行介绍。第 6 章是往复式压缩机管道振动分析及减振技术，该章对往复式压缩机管道振动原因、振动机理与判定方法、管道减振技术等介绍。第 7 章是往复式压缩机在线监测诊断系统组成与应用，本章以目前在国内应用最广泛的 BH5000R 往复式压缩机故障在线监测诊断系统为例对系统的构成、设计开发、应用情况进行介绍。第 8 章是往复式压缩机典型故

障案例分析,通过大量实际故障案例数据对往复式压缩机气阀组件、活塞组件、活塞杆组件、连杆组件以及管道故障进行分析说明,本章是往复式压缩机故障监测诊断技术在工程实际应用方面的集中体现,选取的故障案例具有很强的代表性,故障数据特征具有一定的通用性,对实际往复式压缩机故障监测诊断工作具有指导作用。第9章是往复式压缩机监测诊断技术展望,对未来往复式压缩机故障监测诊断技术的发展和趋势进行分析介绍。

以往复式压缩机为代表的工业装备的安全、可靠、高效、稳定运行必将成为今后工程领域关注的重点。本书所涉及的相关方法和技术大都在企业取得成功应用,可供石油、石化、煤化工等过程工业企业设备工程技术人员和运行、维修管理人员阅读,也可供相关往复式压缩机制造厂和其他行业同类技术人员参考,还可供高等院校、研究院等从事机械故障监测诊断的教学、科研人员参考阅读。

本书由江志农、张进杰、马波等负责撰写。在撰写过程中,茆志伟博士、王庆锋副教授、冯坤博士、魏中青博士、马晋博士参与了部分章节的撰写工作,刘江、于小龙、徐丰甜、朱丽娜、范正天、贾杨、张晓帆等研究生参与了软件调试、资料收集与整理、图形处理等工作,在此一并表示感谢。

由于时间仓促,加上水平有限,书中难免有不当之处,恳请广大读者批评指正,以便今后修改完善。

作者

2017年7月

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 故障监测诊断基础知识	1
1.1.1 故障诊断的定义	1
1.1.2 故障诊断的名词术语	1
1.1.3 设备故障诊断技术的发展	2
1.2 往复式压缩机故障监测诊断背景	4
1.3 往复式压缩机监测与诊断的方法	7
参考文献	9
第 2 章 往复式压缩机结构及工作原理	10
2.1 往复式压缩机的定义	10
2.2 往复式压缩机结构组成	10
2.2.1 基本结构组成	10
2.2.2 典型结构形式	11
2.3 往复式压缩机工作原理	13
2.3.1 基本原理	13
2.3.2 气缸循环机理	13
2.3.3 气阀工作原理	15
2.3.4 传动部件工作原理	17
参考文献	18
第 3 章 往复式压缩机关键运动部件受力分析	19
3.1 气阀受力分析	19
3.2 活塞—活塞杆—十字头受力分析	25
3.3 连杆受力分析	27
3.4 曲轴受力分析	29
参考文献	30
第 4 章 基于角域分析的故障诊断技术	31
4.1 键相标记方法与意义	31
4.2 角域图包含的信息	34

4.2.1	压力信号角域图	34
4.2.2	振动信号角域图	35
4.2.3	位移信号角域图	37
4.3	角域图的相位补偿	38
4.4	角域图的相位校准	39
	参考文献	45
第 5 章	往复式压缩机典型故障监测诊断技术	46
5.1	往复式压缩机常见故障	46
5.2	往复式压缩机在线监测测点布局	50
5.3	基于振动信号的监测诊断技术	52
5.3.1	基于振动信号的气阀故障诊断方法	52
5.3.2	基于振动信号的连杆小头瓦故障诊断方法	60
5.4	基于活塞杆位移信号的监测诊断技术	67
5.4.1	活塞杆自激振动特征提取方法	67
5.4.2	基于活塞杆轴心轨迹的故障诊断方法	75
5.4.3	基于活塞杆位移信号的松动故障诊断方法	84
5.4.4	基于活塞杆轴心振动能量的故障诊断方法	90
5.5	基于阀盖温度信号的监测诊断技术	101
5.5.1	PCA 及气阀故障自动诊断模型	102
5.5.2	气阀故障异常检测模型	104
5.5.3	气阀故障异常检测实例	105
5.6	基于气缸动态压力信号的监测诊断技术	107
5.6.1	基于仿真动态压力的连杆大头瓦故障诊断方法	107
5.6.2	基于实测动态压力的故障诊断方法	118
5.7	基于声发射技术的活塞杆断裂的预警技术	132
5.7.1	声发射技术	132
5.7.2	声发射信号与裂纹疲劳扩展的关系	133
5.7.3	活塞杆裂纹的声发射检测分析	134
5.7.4	活塞杆有、无裂纹的声发射参数比较	137
5.7.5	小结	139
	参考文献	140
第 6 章	往复式压缩机管道振动分析及减振技术	142
6.1	往复式压缩机管道振动的原因	142
6.2	往复式压缩机管道振动的机理及判定方法	143
6.2.1	机组本体振动导致管线振动的机理	143
6.2.2	机组本体振动导致管线振动的判定方法	143

6.2.3	气柱压力脉动导致管线振动的机理	143
6.2.4	气柱压力脉动导致管线振动的判定方法	145
6.2.5	由共振引起的管线振动机理与判断方法	146
6.3	往复式压缩机管道减振技术	148
6.3.1	针对机组振动引起管线振动的减振方法	148
6.3.2	针对压力脉动引起管线振动的减振方法	148
6.3.3	针对共振原因的管线减振方法	150
	参考文献	151
第 7 章	往复式压缩机在线监测诊断系统组成与应用	152
7.1	在线监测诊断系统的整体介绍	152
7.2	在线监测诊断系统硬件	153
7.2.1	传感器	153
7.2.2	安全栅	156
7.2.3	数据采集器	157
7.2.4	数据服务器	158
7.3	在线监测系统软件	158
7.4	基于插件化技术的故障分析诊断软件	162
7.4.1	插件化系统的设计思想及作用、意义	163
7.4.2	插件化系统的设计结构及实现	164
7.5	分布式网络架构与中间件软件开发	167
7.6	故障诊断专家系统	169
7.6.1	知识库设计	171
7.6.2	故障诊断逻辑设计	173
7.6.3	专家系统的实现	175
7.6.4	专家系统的应用测试	180
7.7	在线监测诊断系统实际应用	185
	参考文献	186
第 8 章	往复式压缩机典型故障案例分析	187
8.1	气阀组件故障案例分析	187
8.1.1	泄漏故障案例	187
8.1.2	阀片断裂故障案例	188
8.1.3	弹簧失效故障案例	190
8.2	活塞组件故障案例分析	192
8.2.1	支撑环磨损故障案例	192
8.2.2	支撑环断裂故障案例	192
8.3	活塞杆组件故障案例分析	195

8.4	连杆组件故障案例分析	196
8.4.1	连杆螺栓断裂故障案例	196
8.4.2	连杆小头瓦磨损故障案例	198
8.5	管道故障案例分析	200
第9章	往复式压缩机监测诊断技术展望	203
9.1	故障智能诊断是发展必然趋势	203
9.2	往复式压缩机故障“诊断-预警-保护”	204
9.3	结束语	206

第1章 绪 论

1.1 故障监测诊断基础知识

1.1.1 故障诊断的定义

故障诊断是指运用现代测试与分析技术，查找设备或系统的故障，分析故障的机理、原因、部位以及故障程度的过程。根据故障诊断结论，可进一步确定故障设备或故障系统的检维修方案。

1.1.2 故障诊断的名词术语

1) 机械状态监测(condition monitoring)

基于传感器监测技术对机械设备运行状态进行在线或离线监测，采集设备振动、温度、压力等信号，以判断设备运转是否正常。针对机械部件存在的磨损、松动、断裂等异常工况，可利用采集的数据进行异常跟踪，对当前及未来的运行情况进行综合判断，力求实现故障的有效捕捉与提示。机械设备状态监测的目的在于掌握设备发生故障前后的异常征兆，实现预知性维修，减少故障停机时间与因停机而造成的损失，降低维修费用和提高设备的有效利用率。当前，对旋转机械设备，包括轴承、齿轮等设备的在线状态监测技术已趋于成熟，大量实际应用的状态监测系统实现了设备关键参数的连续监测与报警，提升了设备综合管理水平。

2) 信号处理(signal processing)

信号处理是对各种监测信号按照预期的目的进行不同的加工处理的过程，从原始信号中完成有用信息的提取，它是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称，常用方式包括放大、滤波、调制、解调等。根据信号类别的不同，信号处理可分为模拟信号处理与数字信号处理。

3) 特征提取(feature extraction)

特征提取是指通过不同的处理方法，提取信号中有价值的特征参数，是模式识别、故障诊断等诸多领域的基础和关键。信号特征参数可分为时域特征、频域特征、角域特征等，采用不同的变换方法可对原始信号进行必要的变换，获得新的特征。典型的时域特征包括均值、方差、峰值，典型的频域特征包括转频、倍频或其他特征频率，典型的角域特征包括单位角度特征峰值、单位角域特征有效值。

4) 时域分析 (time domain analysis)

时域分析是指对时域信号的特征参数与变化规律进行分析的过程。常见的时域分析诊断方法有振幅值诊断法、波形因数诊断法、波峰因数诊断法、概率密度诊断法、峭度系数诊断法等。机械设备监测信号随时间变化所体现的特征可有效反映设备运行状态的改变,如设备壳体振动有效值随时间的变化反映了设备振动能量的改变,运动杆件的位移信号随时间的变化反映了杆件位置的改变。从监测信号的时域变化规律中可对磨损、断裂、泄漏等机械故障进行有效的诊断。

5) 频谱分析 (spectrum analysis)

通过傅里叶变换可将时域信号转换到频域进行分析,频谱分析是对频域信号进行分析的简称。常见的频域分析方法有细化谱分析、解调谱分析、倒频谱分析等。旋转机械振动信号中包含了大量的不同频率成分,包括转频、倍频,通过信号的频谱分析,可提取这些频率成分并加以分析。

6) 智能诊断 (intelligent diagnosis)

智能诊断技术是在计算机和人工智能的基础上发展起来的,是一门集数学、计算机技术、信息处理、模式识别和人工智能等多学科于一体的综合性技术。常见的智能诊断方法包括专家系统诊断方法、人工神经网络方法、遗传算法、模糊推理算法等。机械故障智能诊断技术近年来发展较快,各种智能诊断方法被陆续应用,形成了一大批研究成果。

7) 大数据分析 (big data analysis)

大数据分析主要依靠机器学习和大规模计算,完成对规模巨大的数据的处理。伴随着计算机技术、通信技术的快速发展,人类制造的数据量同步飞速积累,据预测,到2020年,人类产生的数据总量将达到40ZB,大数据分析的价值将无处不在。机械故障诊断进入在线监测阶段后,不同传感器监测的数据量快速发展,传统的数据处理分析方法越来越无法满足使用要求。大数据分析方法的发展与应用,将推动故障数据的深入挖掘,进而促进自动诊断、智能诊断技术的发展。

8) 深度学习 (deep learning)

深度学习的概念源于神经网络的研究,是机器学习研究中的一个新的领域,其动机在于建立、模拟人脑进行分析学习的神经网络,它模仿人脑的机制来解释数据,如图像、声音和文本等。和机器学习方法一样,深度机器学习方法也有监督学习与无监督学习之分,不同的学习框架下建立的学习模型不同。深度学习可应用于机械故障监测数据的特征挖掘,构建分类模型,实现不同故障的自动分类与诊断。

1.1.3 设备故障诊断技术的发展

设备故障诊断技术的发展,大致可分为四个阶段。

(1) 第一个阶段是在 19 世纪, 当时机器设备本身的技术水平和复杂程度都很低, 诊断技术还没有出现, 因此采用事后维修方式。

(2) 第二个阶段是进入 20 世纪后, 随着大生产的发展, 机器设备本身的技术复杂程度也有了提高, 设备故障或事故对生产的影响显著增加, 在这种情况下, 出现了定期预防维修方式, 在这段时期, 设备故障诊断技术处于孕育时期。

(3) 第三个阶段是从 20 世纪 60 年代开始, 特别是 70 年代以来, 设备诊断技术随着现代计算机技术、数据处理技术等的发展, 出现了更科学的按设备状态维修的方式。

(4) 第四个阶段是进入 20 世纪 80 年代以后, 计算机网络技术发展迅速, 人工智能技术和专家系统、神经网络等开始发展, 并在实际工程中应用, 使设备诊断技术朝着网络化、智能化的方向迈进。

在第二次世界大战期间, 能用振动分析仪表进行设备状态参数的测定, 相继又开发了快速、多功能机械故障检测仪器。欧洲各国在欧洲维修团体联盟 (European Federation of National Maintenance Societies, FENMS) 的推动下, 主要以英国倡导的设备综合工程学为指导; 美国以后勤学 (logistics) 为指导; 日本提出了全员生产维修 (total productive maintenance, TPM) 的观点。

美国自 1961 年开始执行阿波罗计划后, 出现一系列因设备故障造成的事故, 导致 1967 年在美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的倡导下, 由美国海军研究室 (Office of Naval Research, ONR) 主持成立了美国机械故障预防小组 (machine fault prediction group, MFPG), 并积极从事技术诊断的开发。英国在 20 世纪 60~70 年代, 以 Collacott 为首的英国机器保健和状态监测协会 (machine health and condition monitoring association, MHMG&CMA) 最先开始研究故障诊断技术。英国在摩擦磨损、汽车和飞机发电机监测及诊断方面具有领先地位。日本的新日铁自 1971 年开发诊断技术, 1976 年达到实用化。日本诊断技术在钢铁、化工和铁路等部门处于领先地位。法国电力部门 (Electricite De France, EDF) 从 1978 年起就在透平发电机上安装离线振动监测系统, 到 20 世纪 90 年代初又提出了监测和诊断支援工作站 (monitoring and diagnosis aid station) 的设想。90 年代中期, 其专家系统 PSAD 及其 DIVA 子系统在透平发电机组和反应堆冷却泵的自动诊断上得到了应用。丹麦的 B&K 公司在 20 世纪 90 年代推出了新一代状态监测与故障诊断系统——B&K3450 型 COMPASS 系统。日本三菱重工首先研制出机械状态监测系统 (machinery health monitoring system, MHMS), 并在多台核电站和商业热电站使用, 后来又发展成带诊断规则描述以及采用模糊逻辑分析确定置信因素功能的振动诊断专家系统。目前, 美国诊断技术在航空、航天、军事、核能等尖端部门仍处于世界领先地位。

我国在故障诊断技术方面起步较晚, 发展始于 20 世纪 70 年代末, 而真正的起步应该从 1983 年南京首届设备诊断技术专题座谈会开始。我国设备故障诊断的

发展大致经历了三个阶段：第一阶段从 20 世纪 70 年代到 80 年代初期，主要是引进和吸收国外的先进技术，在此基础上开始研究机械设备的故障激励、诊断方法等；第二阶段从 20 世纪 80 年代初到 80 年代末，主要是研究各种新的诊断技术，研究和创建新的诊断理论及诊断方法，将设备诊断技术推广应用到生产中；第三阶段从 20 世纪 80 年代末至今，主要是从理论上和生产实践上建立较系统性的诊断理论，研究设备状态检测和故障诊断系统，将我国的机械故障诊断技术推向理论研究和应用的新高潮。虽起步较晚，但经过多年的努力，加上政府有关部门多次组织外国诊断技术专家来华讲学，已基本跟上了国外在此方面的步伐，在某些理论研究方面已和国外不相上下。目前我国在一些特定设备的诊断研究方面很有特色，形成了一批自己的监测诊断产品。全国各行业都很重视在关键设备上装备故障诊断系统，特别是智能化的故障诊断专家系统，在电力系统、石化系统、冶金系统，以及高科技产业中的核动力电站、航空部门和载人航天工程等领域都有广泛的应用。代表性的企业包括：普迪美科技(北京)有限公司、郑州恩普特设备诊断工程有限公司、北京京航公司、西马力检测仪器公司、大连圣力来监测技术有限公司、江苏东华测试技术股份有限公司、北京博华信智科技股份有限公司等。

1.2 往复式压缩机故障监测诊断背景

往复式压缩机是一种在石油、化工、天然气储运、冶金、制冷等国民经济领域广泛应用的通用动力机械。依靠曲柄—连杆—活塞结构，往复式压缩机将驱动机的机械能转化为气体的压力能，具有流量范围宽、压力范围广、压缩效率高等突出优势，在炼油加氢装置、高压聚乙烯装置、化肥装置、天然气地下储气库等工业生产领域中，往复式压缩机属于核心设备，无法取代，如图 1-1、图 1-2 所示。在一系列优势的基础上，一个多世纪以来，往复式压缩机得到了广泛应用，根据

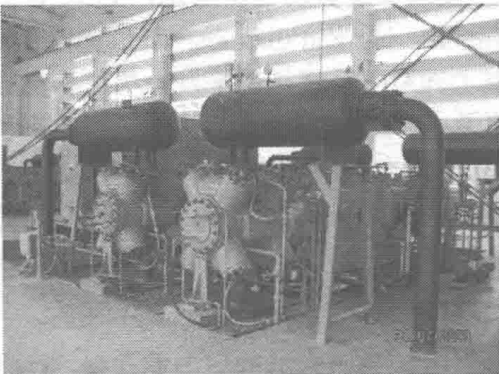


图 1-1 炼油装置大型往复式压缩机组

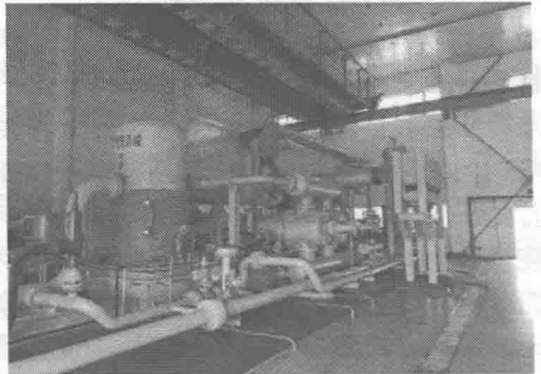


图 1-2 天然气气田大型往复式压缩机组