

机械系统

工况监测与故障诊断

CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS FOR MECHANICAL SYSTEM

主 编 · 严新平
副主编 · 周 强
主 审 · 萧汉梁

Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Mechanical System
机械系统工况监测与故障诊断

主 编 严新平
副主编 周 强
主 审 萧汉梁

武汉理工大学出版社
· 武 汉 ·

内 容 提 要

工况监测与故障诊断是工业界十分关注的技术,旨在提高机械系统安全、可靠、高效、低耗和环境友好地运行。这一技术内容丰富,涉及多个学科的知识,是近年来发展迅速的研究领域。本书系统地介绍了机械系统的工况监测与故障诊断的方法、理论、仪器及其应用。全书共分12章,主要包括:故障及其基本概念;工况监测与故障诊断技术的基本知识及其常用的性能参数;振动、油液、无损检测等方法;工况监测与故障诊断技术在液压系统、船舶动力机械、卷扬系统和机车柴油机等重点机械系统中的应用。

本书内容取材新颖,系统深入,注重理论联系实际。本书可作为机械工程及自动化、机械设计制造及其自动化、热能与动力工程、能源动力工程及自动化、物流工程、油气储运工程、轮机工程等专业的低年级本科生教材和相关专业研究生课程的参考书,也可以作为从事设备维修、机务管理和生产质量控制等研究人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统工况监测与故障诊断/严新平著. —武汉:武汉理工大学出版社,2009.10
ISBN 978-7-5629-3060-0

I. 机… II. 严… III. ①机械系统-监测 ②机械系统-故障诊断 IV. TH17

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第182266号

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn>

E-mail:wutpbook@126.com

huangchun@whut.edu.cn

wutpbailh@163.com

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉理工大印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:16

字 数:406千字

版 次:2009年10月第1版

印 次:2009年10月第1次印刷

印 数:1—3000册

定 价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

前 言

机械系统的安全、可靠、高效、低耗和环境友好地运行,是企业提高生产效率,实现生产安全的重要保证。实时采集机械系统运行状态的信息,从而分析和判断机械系统运行状态的优劣,为机械系统的维修决策提供技术支持,可达到最佳的运行经济性之目的。工况监测与故障诊断技术是实现这一目的的重要技术手段。

近年来,工况监测与故障诊断技术得到了前所未有的发展。在诊断方法和理论方面,人们不断吸收人工智能、信息工程、系统控制等方面的成果,用于改善和提升工况监测与故障诊断的精度和可靠性;在诊断仪器和手段方面,监测手段的在线式、智能型、数字化等特征日趋发展;在工况监测与故障诊断技术的应用方面,监测系统的集成化、分布式、网络型等特点尤为明显……。随着工况监测与故障诊断技术的发展,使之已成为未来机械工程师不可或缺的知识 and 能力。因此,在高等院校的相关专业开设机械系统工况监测与故障诊断这一课程,对于培养高级专门人才具有重要的战略意义。

全书共 12 章,由三部分组成。第一部分包括第 1 章绪论,第 2 章故障及其基本概念和第 3 章工况监测与故障诊断的基本知识三章。主要介绍了工况监测与故障诊断技术的基本概念、定义、作用与发展趋势;同时,讨论了故障及其基本概念等内容。第二部分包括第 4 章性能参数监测,第 5 章振动监测技术,第 6 章油液监测技术,第 7 章无损检测技术和第 8 章状态监测数据的自动获取与管理五章。主要介绍了当前应用于工业界的常用监测与诊断仪器的原理、种类、特点等内容。第三部分包括第 9 章液压系统的故障分析与诊断,第 10 章船舶动力机械的远程监测与诊断,第 11 章卷扬系统的监测与诊断和第 12 章机车柴油机状态监测与故障诊断四章。这些内容是编者在工况监测与故障诊断的科研实践中,总结与提炼的工况监测与故障诊断的案例。

本书由严新平教授担任主编,周强教授担任副主编。具体编写分工为:严新平(第 1 章、第 3 章和第 10 章);白秀琴(第 2 章和第 7 章);姚玉南(第 4 章);余永华(第 5 章);周新聪(第 6 章);刘杰(第 8 章);吴洪民(第 9 章);周强(第 11 章)和金华标(第 12 章)。全书由严新平和周强负责统稿。

本书由武汉理工大学萧汉梁教授担任主审,他对全书进行了全面、认真、细致的审读工作,提出了许多宝贵建议,编者在此表示深切谢意。

本书在编写过程中,参阅了大量的文献,这些文献启发了编写者思路,提供了丰富的素材,在此,对列在本书参考文献中的作者,表示真诚的感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免有错误和不妥之处,恳请各位专家、读者批评指正。

编 者

2009 年 9 月 30 日

目 录

1 概论	(1)
1.1 设备管理及其作用	(1)
1.2 工况监测与故障诊断技术的基本概念	(2)
1.3 工况监测与故障诊断技术的现状	(4)
1.4 开展工况监测与故障诊断技术研究的意义	(4)
1.5 工况监测与故障诊断技术的发展趋势	(5)
2 故障及其基本概念	(7)
2.1 故障的概念与分类	(7)
2.1.1 故障的概念	(7)
2.1.2 机械系统故障的外因	(7)
2.1.3 故障的分类	(10)
2.2 故障规律——典型故障率曲线	(11)
2.2.1 早期故障期	(12)
2.2.2 偶发故障期	(12)
2.2.3 严重故障期	(12)
2.3 故障模式	(12)
2.4 故障机理	(13)
2.5 机械系统故障状态标准	(13)
2.5.1 损伤程度的极限值	(14)
2.5.2 输出系数的极限值	(14)
2.5.3 整机的极限状态	(14)
2.5.4 经济损失的极限值	(15)
3 工况监测与故障诊断技术的技术知识	(17)
3.1 机械系统工况监测与故障诊断技术的定义	(17)
3.2 工况监测与故障诊断技术的基本内容与结构体系	(17)
3.3 工况监测与故障诊断技术的区别和联系	(18)
3.4 工况监测与故障诊断技术的分类	(19)
3.4.1 按诊断对象的类别分类	(19)
3.4.2 按诊断方法(或称技术)分类	(19)
3.4.3 按诊断的目的、要求和条件的不同分类	(20)
3.5 工况监测与故障诊断技术的特征	(21)
3.6 工况监测与故障诊断技术的性能评价	(23)
3.6.1 机械系统工况监测与故障诊断技术的效能	(23)
3.6.2 机械系统工况监测与故障诊断手段的一般特性	(24)

3.7	工况监测与故障诊断系统的设计	(25)
3.7.1	系统分析	(25)
3.7.2	监测与诊断系统的基本结构	(26)
4	性能参数监测	(28)
4.1	概述	(28)
4.2	监测参数的选择	(28)
4.2.1	监测参数的分类	(28)
4.2.2	选择监测参数的要求	(28)
4.2.3	监测参数的确定方法	(29)
4.3	温度监测	(29)
4.3.1	温度监测基础	(29)
4.3.2	接触式温度测量	(31)
4.3.3	非接触式温度测量	(39)
4.4	压力监测	(46)
4.4.1	压力监测基础	(46)
4.4.2	测压仪表	(47)
4.5	流量测量	(50)
4.5.1	流量监测基础	(50)
4.5.2	差压式流量计	(51)
4.5.3	容积式流量计	(52)
4.5.4	其他流量计	(52)
5	振动监测技术	(54)
5.1	机械振动基础	(54)
5.1.1	振动的分类及其特点	(54)
5.1.2	振动参量	(56)
5.2	振动测试系统	(58)
5.2.1	常用振动传感器原理	(58)
5.2.2	压电式加速度传感器测量系统	(64)
5.2.3	电涡流式传感器测量系统	(68)
5.3	振动信号的分析与处理基础	(69)
5.3.1	信号的时域统计分析	(69)
5.3.2	信号的幅值分析	(70)
5.3.3	信号的频谱分析	(71)
5.4	振动监测技术的应用	(73)
5.4.1	不对中故障机理与诊断	(73)
5.4.2	转子弯曲的故障机理与诊断	(77)
5.4.3	转子不平衡的故障机理与诊断	(78)
5.4.4	齿轮故障机理与特征	(80)
5.4.5	滚动轴承故障机理及其特征	(82)

6 油液监测技术	(87)
6.1 概述	(87)
6.2 取样	(88)
6.2.1 取样时刻	(88)
6.2.2 取样点	(89)
6.2.3 取样周期	(89)
6.2.4 取样方法	(90)
6.2.5 取样记录	(90)
6.2.6 油样采集时必须注意的几个问题	(90)
6.3 油样物理化学指标检测	(90)
6.3.1 目的	(90)
6.3.2 方法	(91)
6.4 油料分析光谱技术	(93)
6.4.1 原理	(93)
6.4.2 方法与仪器	(93)
6.5 红外光谱分析	(96)
6.5.1 红外光谱仪及其工作原理	(97)
6.5.2 红外光谱油液分析的特点	(97)
6.5.3 润滑油红外光谱分析的常用指标	(98)
6.5.4 油液红外光谱分析方法	(100)
6.6 铁谱技术	(100)
6.6.1 铁谱技术及其特点	(100)
6.6.2 常用铁谱仪的结构与工作原理	(102)
6.6.3 铁谱分析工作程序	(106)
6.7 油液颗粒计数技术	(113)
6.7.1 自动颗粒计数器的结构与原理	(113)
6.7.2 仪器的使用方法	(114)
7 无损检测技术	(115)
7.1 概述	(115)
7.2 射线检测	(115)
7.2.1 射线检测原理	(115)
7.2.2 X射线照相法检测工艺	(116)
7.3 超声检测	(120)
7.3.1 超声波检测方法	(121)
7.3.2 超声波检测设备	(124)
7.3.3 超声检测的应用	(125)
7.4 磁粉检测	(125)
7.4.1 磁粉检测原理	(126)
7.4.2 磁粉检测方法	(126)

7.4.3	磁粉检测工艺	(127)
7.4.4	铸件的磁粉检测	(128)
7.5	渗透检测	(128)
7.5.1	渗透检测原理	(128)
7.5.2	渗透检测方法	(129)
7.5.3	渗透检测工艺	(129)
7.5.4	渗透检测装置	(130)
7.5.5	锻造不锈钢大阀门体着色渗透检测	(130)
7.6	涡流检测	(131)
7.6.1	涡流检测的原理及特点	(131)
7.6.2	涡流检测仪的组成	(131)
7.6.3	涡流检测方法	(132)
7.6.4	轧辊裂纹的涡流检测	(133)
8	状态监测数据的自动获取与管理	(134)
8.1	分析仪器设备的特征分类	(134)
8.2	网络体系结构设计	(135)
8.2.1	传统解决方案	(135)
8.2.2	基于协议转换的解决方案	(135)
8.2.3	两种方案的比较	(135)
8.3	串口型仪器的数据采集方法	(136)
8.3.1	仪器通讯协议	(136)
8.3.2	软件流程	(138)
8.3.3	关键程序	(139)
8.4	自带计算机型仪器的数据采集方法	(142)
8.4.1	基于文件夹监控的数据自动获取	(142)
8.4.2	基于消息的仪器数据自动获取	(143)
8.5	仪器数据文件格式的解析方法	(147)
8.5.1	已有的算法	(147)
8.5.2	基于聚类分析的算法	(149)
8.6	监测数据管理系统	(149)
9	液压系统的故障分析与诊断	(152)
9.1	液压系统故障分析与诊断的概念及其分类	(152)
9.1.1	液压传动和液压系统的类型和特点	(152)
9.1.2	液压系统故障的概念及其分类	(154)
9.1.3	液压系统故障诊断的方法	(156)
9.2	液压系统共性故障分析与诊断	(163)
9.2.1	系统噪声、振动大的故障分析与诊断	(164)
9.2.2	系统压力不正常的故障分析与诊断	(164)
9.2.3	系统动作不正常的故障分析与诊断	(165)

9.2.4	系统液压冲击大的故障分析与诊断	(166)
9.2.5	系统油温过高的故障分析与诊断	(166)
9.2.6	系统污染及泄漏控制	(167)
9.3	典型液压元件的故障分析与诊断	(170)
9.3.1	液压泵和液压马达的故障分析与诊断	(170)
9.3.2	液压缸的故障分析与诊断	(176)
9.3.3	液压控制阀的故障分析与诊断	(180)
9.4	液压控制系统的故障分析与诊断	(188)
9.4.1	液压控制系统的安装与调试	(188)
9.4.2	液压控制系统的故障分析与诊断	(189)
10	船舶动力机械的远程监测与诊断	(190)
10.1	概述	(190)
10.2	远程监测与诊断系统的设计原则与基本构成	(190)
10.2.1	船舶动力机械的远程监测与诊断系统的设计原则	(190)
10.2.2	船舶动力机械的远程监测与诊断系统的基本构成	(190)
10.3	远程监测与诊断系统的监测方法与测点布置	(192)
10.4	船载监测子系统的组成及功能	(194)
10.4.1	系统的硬件构成	(194)
10.4.2	数据库设计	(194)
10.4.3	软件结构	(195)
10.4.4	程序设计	(196)
10.4.5	界面设计	(199)
10.4.6	远程通信程序设计	(199)
11	卷扬系统的监测与诊断	(202)
11.1	卷扬系统的组成及布置形式	(202)
11.2	卷扬系统的振动诊断技术	(203)
11.3	钢丝绳损伤的磁检测技术	(207)
11.3.1	钢丝绳损伤及检测方法	(207)
11.3.2	钢丝绳磁检测技术	(209)
11.3.3	钢丝绳缺陷的漏磁检测	(210)
11.3.4	钢丝绳金属截面积损失检测	(214)
12	机车柴油机状态监测与故障诊断	(217)
12.1	概述	(217)
12.1.1	机车柴油机性能要求	(217)
12.1.2	机车柴油机主要特征	(217)
12.1.3	常用机车柴油机介绍	(217)
12.2	基于瞬时转速的机车柴油机故障诊断技术	(218)
12.2.1	原理	(218)
12.2.2	系统描述	(219)

12.2.3	模型建立	(220)
12.2.4	系统仿真	(221)
12.2.5	仿真分析	(226)
12.3	应用实例	(226)
12.3.1	检测仪简介	(226)
12.3.2	硬件结构	(227)
12.3.3	软件结构	(230)
附录	机械系统工况监测与故障诊断名词术语	(238)
参考文献		(243)

1 概 论

1.1 设备管理及其作用

机械系统是一个复杂的技术综合体。为保证机械系统能有效地应用,在研制过程中,必须在可靠性、维修性、安全性、经济性、可生产性和质量控制等诸方面加以控制。工业界为解决机械系统的可靠性问题,应用系统工程观点和优化观点,运用各种手段和技术,对机械系统从开发、设计、制造、安装调试到维修使用,实施全过程管理。现代工业生产具有明显的特点:机械系统大型化,生产连续化,高度自动化。这些特点在提高生产率、降低成本、节约能源和人力、减少废品率、保证产品质量等方面,具有巨大的作用。但是,一旦机械系统在生产过程中发生故障,哪怕是一个零件或组件的故障,也会迫使生产中断,甚至导致整个生产线停止运行,停机停工。这不仅会带来巨大的生产损失,而且往往也会造成重大的灾难。历史上先后发生过多次引起全球很大震动的严重事故,例如:

(1) 1979年3月美国三里岛核电站由于系统误判断和误操作,导致堆芯严重漏损、放射性物质释放,不仅造成几十亿美元的经济损失,而且因公害引起居民示威抗议游行,迫使国会出面干预调停。

(2) 1986年4月,前苏联乌克兰切尔诺贝利核电站发生爆炸,造成2000多人死亡,几万名居民撤离原居民区,溢出的放射性物质,污染了西欧上空,带来近30亿美元的巨大损失,并且还国际政治关系产生了影响。

(3) 1986年10月与1988年2月,我国山西和陕西先后发生两起20万千瓦电站机组由于运行失稳导致的机组烈振、轴系断裂、零件飞出毁坏厂房的恶性电站事故。

(4) 1998年9月2日,瑞士航空公司SR111航班(MD-11/HB-IWF)从纽约飞往日内瓦,起飞后机组发现驾驶舱有烟雾且情况不断恶化,机组向航空管制中心请求紧急迫降,约10分钟后,飞机失控以接近垂直角度坠入大西洋。机上乘客及机组人员共229人全部遇难。空难发生后,加拿大运输安全委员会历时4年,花费超过3000万美元经费展开了一场艰苦而又细致事故调查。事故最终调查显示由于电线短路引起的火花点燃了聚乙烯隔热层,再由聚乙烯隔热层点燃了其他设备,导致飞机上的仪表设备相继失效,飞机最终失去控制坠毁。

(5) 2005年8月27日,发生在我国山东沂州市沂台线路段的“八·二七”特大交通事故原因现已查明,肇事车辆机械故障是引发这场意外灾难的直接原因。此客车是由于转向器左侧横拉杆内球头与球头座严重磨损而分离脱落,造成方向失控。

(6) 2008年2月23日,美国空军一架机身编号为89-0127(绰号为堪萨斯幽灵号)的B-2隐形战略轰炸机在关岛安德森空军基地起飞时坠毁,正是因为24个传感器之中的3个传感器被水汽损伤,导致机上飞行控制系统数据紊乱,使得飞机猛然抬头急升,造成空中燃火而坠毁。

(7) 2008年9月13日,我国四川省巴中市一辆开往浙江宁波的客车,由于机械故障,侧翻入100米左右深的悬崖下沟溪中,致使全车51人无一生还。

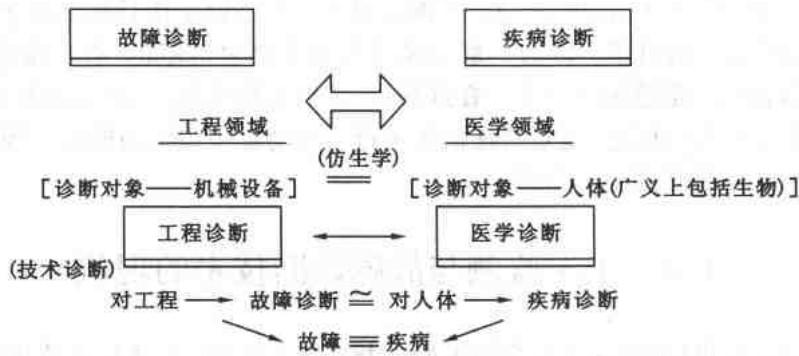


图 1.1 工程领域的故障诊断与医学领域的疾病诊断的相互对应关系

“断”分开。诊在于客观状态检测,包括采用各种测量、分析和诊断方法(物理的或者化学的);断则需要确定故障的性质、故障的程度、故障的类别、故障的部位,乃至说明故障产生的原因等,是诊断技术的关键。医学领域中的“病理学”与工程领域中的“故障学”,是完全相互对应的,所不同的是后者是针对机械系统而已。对于突发性、破坏性、随机性的故障,应该是研究的重点,因为它影响生产的安全,所造成的经济损失也大。

“工况监测”是指设备状态诊断,突出设备的状态。其状态可以是正常状态,也可以是不正常状态,也包括各种故障状态,含义比较广泛。而“故障诊断”是突出诊断的目的性,针对寻找和发现故障状态而进行诊断,也包括无故障状态在内,但强调故障状态的重要性。

从仿生学角度对照医学领域的“疾病诊断”,采用模拟方法,可以建立工程领域中有关设备故障诊断方面的一系列名词术语,其中包括在故障范畴内的一些术语,诊断范畴的一些术语,以及有关故障治理(排除)方面的一些术语。这样容易理解,容易普及,也容易为人们所接受。

综上所述,工况监测与故障诊断是指在一定工作环境下,查明导致系统某种功能失调的原因或性质,判断劣化状态发生的部位或部件,预测状态劣化的发展趋势。犹如医生借助各种手段对人体进行检查、化验,然后根据医学理论确定诊断对象是否患病和患有何种疾病的过程,诊断就是由现象判断本质,由当前预测未来,由局部推测整体的过程。在工程技术领域,也需要根据设备的各种可测量的物理现象和技术参数的检测值来推断设备是否正常运转,判断发生故障的原因和部件,预测潜在故障的发生。

工况监测与故障诊断的基本思想一般可以表述为:设被检测对象全部可能发生的状态(包括正常和故障状态)组成状态空间 S ,它的可测量特征的取值范围全体构成特征空间 Y ,当系统处于某一状态 s 时,系统具有确定的特征 y ,即存在映射 g

$$g: S \rightarrow Y$$

反之,一定的特征也对应确定的状态,即存在映射 f

$$f: Y \rightarrow S$$

状态空间与特征空间的关系可用图 1.2 表示。

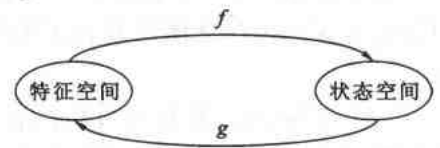


图 1.2 工况监测与故障诊断的表述

如果 f 和 g 是双射函数,即特征空间和状态空间存在一对一的单映射,则由特征向量可唯一确定系统的状态,反之亦然。故障诊断的目的在于根据可测量的特征向量来判断系统处于何种状态,也就是找出映射 f 。

若系统可能发生的状态是有限的,例如可能发生 n 种故障,这时把正常系统所处的状态称为 s_0 ,把存在不同故障的系统所处的不同状态称为 s_1, s_2, \dots, s_n 。当系统处于状态 s_i 时,对应

的可测量特征向量为 $Y_i = (y_{i1}, \dots, y_{im})$ 。工况监测与故障诊断是由特征向量 $y = (y_1, \dots, y_m)$ ，求出它所对应的状态 s 的过程。因为一般故障状态并非绝对清晰的，有一定模糊性，因此，它所对应的特征值也在一定范围内变动。在这种情况下，工况监测与故障诊断就成为按特征向量对被测系统进行分类的问题，或对特征向量进行状态的模式识别的问题。因此，工况监测与故障诊断实质上是一类模式分类问题。

1.3 工况监测与故障诊断技术的现状

自 20 世纪 60 年代以来，随着科学技术的不断进步和发展，尤其是计算机技术、网络技术和信息技术的迅速发展和普及，工况监测与故障诊断技术已在工业界得到推广与应用，并逐步形成一门较为完整的新兴的边缘性综合工程学科。该学科以设备的管理、状态监测和故障诊断为内容，以建立新的维修体制为目标，在世界范围内以不同形式获得了推广，成为国际上一大热门学科。

最早发展工况监测与故障诊断技术的国家是美国，在航空航天、军事、核能等尖端部门得到广泛的应用，处于领先地位。

英国于 20 世纪 70 年代初成立了机械健康监测组织与状态监测协会 (MHMG&CMA)，该协会对故障诊断技术的发展起了很大作用。

欧洲一些国家的诊断技术发展各有特色，如瑞典 SPM 公司的轴承监测技术，AGEMA 公司的红外热像技术；丹麦 B&K 公司的振动、噪声监测技术；挪威的船舶诊断技术等都有深入的研究和特色。

日本的诊断技术研究始于 20 世纪 70 年代，1971 年新日铁以丰田利夫教授为首率先研究诊断技术，到 1976 年已达到实用阶段。

我国工况监测与故障诊断工作的开展始于 1983 年，这一技术首先在我国的化工、冶金、电力、铁路等行业得到应用，取得了较好的效果。随着诊断技术研究的不断发展，我国厂家生产的部分传感器、数采器已接近国际水平，同时研制开发了一些诊断仪器和设备，其中检测仪器有一些已发展成为成熟的产品。

1.4 开展工况监测与故障诊断技术研究的意义

当前，我国的工矿企业中大型设备的数目越来越多，其在生产中的重要性不言而喻，关键设备的工况监测与故障诊断技术所带来的社会效益和经济效益，也不断为人们所认识，具体包括：

(1) 预防事故，保证人身和设备的安全。在航天、航空、航海、核工业等部门中，许多设备的故障不仅会造成巨大的经济损失，而且会带来严重的社会危害。为避免恶性事故的发生，仅靠提高其设计的可靠性是不够的，还必须辅以有效的故障诊断，才能够防患于未然。

(2) 推动设备维修制度的改革。预知维修是一种动态维修制度，而预防维修的明显缺陷在于过剩维修和失修。1980 年，美国全年税收为 7500 亿美元，而全年工业维修费达 2460 亿美元，其中因为过剩维修和失修而浪费的资金约为 750 亿美元，占总维修费用的 30%。除以上经济原因外，维修人员的不足和素质提高慢等因素，也促进了维修制度从定时维修向预知维

修的转化。预知维修明显优于预防维修,它不仅可避免类似失修造成的故障,也可以防止过剩维修带来的浪费,是一种理想的维修制度。

维修制度由预防维修向预知维修的转化是必然的,而真正实现预知维修的基础即是工况监测与故障诊断技术的发展和成熟。这一技术一般是暂不分解、破坏设备,对作用于设备的应力、故障趋势、强度和性能进行定量的描述,预测寿命及可靠性,同时决定其恢复方法的技术。因此,工况监测与故障诊断技术的发展决定着预知维修制度的实现,它的推广和应用,改变了原有的设备维修制度,成为企业提高设备的综合管理水平的标志之一。

(3) 提高经济效益。工况监测与故障诊断技术的最终目的是避免故障(尤其是重大事故)的发生,使零部件的寿命得到充分发挥,延长检修周期,提高维修的精度和速度,降低维修费用,获得最佳经济效益。因此,工况监测与故障诊断技术的应用“隐含”着巨大的经济效益。20世纪80年代一项针对英国2000家工厂的调查表明,采用工况监测与故障诊断技术后维修费用每年节约3亿英镑,除去这一技术的费用约0.5亿英镑,净获利2.5亿英镑。

1.5 工况监测与故障诊断技术的发展趋势

工况监测与故障诊断技术发展到今天,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术。它是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器、计算机和网络为技术手段,结合各种诊断对象(系统、设备、机器、装置、工程结构、工艺过程等)的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科。它大体上由三部分组成:第一部分为故障诊断物理、化学过程的研究,如对电气、机械部件失效的腐蚀、蠕变、疲劳、氧化、断裂、磨损等机理的研究。第二部分为故障诊断信息学的研究,它主要研究故障信号的采集、选择、处理与分析过程。例如,通过传感器采集设备运行中的信号(如振动、转速),再经过时域与频域上的分析处理来识别和评价所处的状态或故障。第三部分为诊断逻辑与数学原理方面的研究,主要是通过逻辑方法、模型方法、推论方法及人工智能方法,根据可观测的设备故障表征来确定进一步的检测分析,最终判断故障发生的部位和产生故障的原因。

工况监测与故障诊断技术可划分为传统诊断方法、数学诊断方法以及智能诊断方法。传统诊断方法包括振动监测技术、油液监测技术、噪声监测技术、红外测温技术、声发射技术以及无损检测技术等;数学诊断方法包括基于贝叶斯决策判据以及基于线性和非线性判别函数的模式识别方法、基于概率统计的时序模型诊断方法、基于距离判据的故障诊断方法、模糊诊断原理、灰色系统诊断方法、故障树分析法、小波分析法以及混沌分析法与分形几何法等;智能诊断方法包括模糊逻辑、专家系统、神经网络、进化计算方法(如遗传算法)等。

工况监测与故障诊断技术与当代前沿科学的融合是这一技术的发展方向。当今故障诊断技术的发展趋势是传感器的精密化、多维化,诊断理论、诊断模型的多元化,诊断技术的智能化,具体表现在如下方面:

(1) 与当代最新传感器技术尤其是激光测试技术的融合。近年来,激光技术已从军事、医疗、机械加工等领域深入发展到振动测量和设备故障诊断中,并且已经成功应用于测振和旋转机械对中等方面。

(2) 与最新信号处理方法相融合。随着新的信号处理方法在工况监测与故障诊断领域中的应用,传统的基于快速傅里叶变换的机械设备信号分析技术有了新的突破性进展。

(3) 与非线性原理和方法的融合。机械系统在发生故障时,其行为往往表现为非线性。如旋转机械的转子在不平衡外力的作用下表现出的非线性特征。随着混沌与分形几何方法的日趋完善,这一类诊断问题必将得到进一步发展。

(4) 与多元传感器信息的融合。现代化的大生产要求对机械系统进行全方位、多角度的监测与维护,以便对机械系统的运行状态有整体的、全面的了解。因此,在进行机械系统故障诊断时,可采用多个传感器同时对机械系统的各个位置进行监测,然后按照一定的方法(如人工神经网络方法)对这些信息进行处理。

(5) 与现代智能方法的融合。现代智能方法包括专家系统、模糊逻辑、神经网络、进化计算等。现代智能方法在工况监测与故障诊断技术中已得到广泛的应用。随着智能技术的不断发展,机械系统状态的智能监测和工况监测与故障的智能诊断,将是这一技术的最终目标。

2 故障及其基本概念

2.1 故障的概念与分类

2.1.1 故障的概念

机械系统故障是指“机械系统功能失常”，也就是机械系统不能达到预期的工作状态，无法满足应有的性能、功能。有时也用特定词汇“失效”(Failure)来描述，如机械系统因腐蚀而失效，也属故障范畴。在一般情况下两者是同义词，但严格地说失效与故障是有区别的，一般的，所有失效都属故障，但不是所有的故障都是失效。

失效是指不可修复产品“丧失了其规定功能”，不可修复产品往往是指一次使用性产品，如销子、垫片、电灯泡或电气元件等。对失效的零件一般做报废处理，不能再使用。从可靠性分析的角度多用“失效”。

故障是指可修复产品“丧失了其规定功能”，可修复产品是指零、部件经故障再经修理后能继续使用。就一般机械系统的整体而言，均属于可修复产品，而其中部分零件则没有修复可能和修复价值。从故障分析的角度均用“故障”。

产生故障的原因通常是机械系统的构造处于不正常状态(劣化状态)。

判断故障的准则是：在给定的工作状态下，机械系统的功能与约束条件不能满足正常运行或原设计期望的要求。

常见的故障有以下几种：

- (1) 使机械系统立即丧失其功能的破坏性故障；
- (2) 由于设计、制造、安装、维护、检修等与机械系统性能有关的参数不适当造成机械系统性能降低的故障；
- (3) 机械系统在给定条件下工作时，由于操作不当引起的故障。

2.1.2 机械系统故障的外因

机械系统种类繁多、工作条件复杂、故障形式多种多样，但引起机械系统故障的外因可归纳为以下三个方面。

2.1.2.1 环境因素

凡外界施加于机械系统的各种条件、客观环境等均称为环境因素。因而环境因素包括功能、温度、湿度、振动、污染物等外界因素，这些环境因素将以各种能量的形式对机械系统产生作用，并使零件发生磨损、变形、裂纹以及腐蚀等各种形式的损伤，最终导致故障的发生。

(1) 机械能

机械能不但能沿着各个零件传递，而且还和外部介质发生相互作用，以静载荷和动载荷的形式对机械系统产生作用。零件中力的大小取决于工作过程的特征、运动件的惯性和运动副

的摩擦状况。零件在加工中需要消耗机械能,而同时机械能又会以内应力的形式保存在零件内部。因此,由于内应力再分布而发生零件变形和热处理后零件体积自动发生变化等也属机械能的作用。通常,机械应力能使机械强度降低、磨损加剧、裂纹扩展、变形加大,容易导致机械系统的破坏。

(2) 热能

由于周围介质温度发生变化以及机械在运转过程中的发热作用,会产生一定的热能。热能是材料产生物理变化和化学变化的重要外界因素,几乎所有的材料其物理性质都随热能的变化而发生巨大变化。同时几乎所有的化学变化的反应速度都受到热能的显著影响。可想而知,热能对机械系统的破坏作用也是很大的。如热胀冷缩将引起零件间配合关系的改变、密封失效以及内应力等问题,温度不均将导致局部应力集中,加速裂纹扩展,高、低温还将改变金属的性能,产生热脆或冷脆。此外,在交变热应力作用下零件还会产生热疲劳。

(3) 化学能

化学能也会对零件产生影响,如含有水分和侵蚀成分的空气会使零件产生腐蚀破坏。如果机械系统是在有侵蚀介质的条件下工作,如化工机械、船舶、纺织机械等,还会直接受到化学能的破坏作用。

(4) 其他能量

除了上述几种主要的能量外,还有核能、电磁能以及生物因素等同样会对零件产生破坏作用,影响机械系统的工作能力。

表 2.1 列举了几种主要环境因素对机械系统的影响及由此产生的典型故障。

表 2.1 环境影响

环境因素	主要影响	典型故障
机械能	产生振动、冲击、压力、加速度、机械应力等	机械强度降低、功能受影响、磨损加剧、过量变形、疲劳破坏、零件断裂
热能	产生热老化、氧化、软化、熔化、粘性变化、固化、脆化、热胀冷缩及热应力等	电气性能变化、润滑性能降低、机械应力增加、磨损加剧、机械强度降低、腐蚀加速、热疲劳破坏、密封性能破坏
化学能	产生受潮、干燥、脆化、腐蚀、电蚀、化学反应及污染等	功能受影响、电气性能下降、机械性能降低、保护层损坏、表面变质、化学反应加剧、零件断裂
其他能量	产生脆化、加热、蜕化、电离及磁化等	表面变质,材料褪色,热老化,氧化,材料的物理性能、化学性能、电气性能发生变化

2.1.2.2 人为因素

机械系统在设计、制造、使用和维修过程中,始终都与人为因素的作用有关,特别是早期故障的发生大部分都可以归因于人为因素。

(1) 设计不良

即使设计者认为是完美的机械系统,实际上总是存在着薄弱环节。这些薄弱环节一般是由于设计中考虑不周、条件限制或设计差错造成的。

在新产品设计时,常常会遇到许多未知的因素,包括未被广泛研究过的新环境或实际情况不甚熟悉的老环境,如辐射、绝对真空、超高压、超低温等。这些环境发生的概率及其对零件失