

163

71-117  
Z99(2)

# 机械故障诊断学

第2版

主编 钟秉林 黄 仁  
参编 贾民平 朱向阳 许飞云  
主审 杨叔子



A0964743



机械工业出版社

本书共分五部分：第一部分是第1章绪论，主要说明工况监视与故障诊断的意义，发展概况，研究、设计系统的指导思想；第二部分是第2、3章，主要说明传感器、信号采集及数据处理；第三部分是第4、5、6章，主要说明一般诊断方法原理及其应用场合；第四部分是第7、8章，介绍旋转机械状态监视与故障诊断和机械制造过程的状态识别与控制；最后第五部分是第9章，以大型旋转机械为例，说明工况监视与故障诊断系统的结构、主要模块内容，使读者有一完整的概念。

本教材于2000年被教育部研究生工作办公室推荐作为“研究生教学用书”，也可作为大学本科及机器设备运行管理工程师参考书。

### 图书在版编目（CIP）数据

机械故障诊断学/钟秉林，黄仁主编.—2版.—北京：机械工业出版社，2002.2

ISBN 7-111-05866-6

I. 机... II. ①钟... ②黄... III. 机械设备-故障诊断  
IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 16960 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：高文龙 版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣

封面设计：鞠 杨 责任印制：路 琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 2 月第 2 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·7.625 印张·2 插页·280 千字

7 001—9 000 册

定价：23.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

## 序

故障诊断技术进入 20 世纪 90 年代以来，以前所未有的势头在国内得到了十分迅速的发展，并在机械、石化、冶金、电力等行业得到了十分广泛的应用，在国内形成了一个十分庞大的研究与应用队伍，为这一技术的进一步普及提供了一个良好的契机。这就要求我们能提供一批适合于不同层次科技工作者的参考用书，也同时需要一些适合于本科和研究生使用的教学用书。钟秉林教授、黄仁教授等所编著的《机械故障诊断学》一书就是这方面的一个很好尝试。

我是很赞成出版这本书的。一方面本书较为系统地阐述了机械故障诊断的基本原理，由浅入深，非常适合于作为教学用书。另一方面，本书中的许多研究内容是作者多年来的研究成果，集中反映了这一领域的一些最新进展。书中内容具有很强的实践性，内容直观，易于理解，因而也可作为从事故障诊断工作的一种范例。

作者所在的研究集体，在旋转机械的故障诊断、制造过程的状态监测与故障诊断等领域进行了许多卓有成效的研究工作，取得了许多重要的理论研究成果，并积累了许多宝贵的实践经验，这些都全面地融入了本书的内容之中，使本书具有很好的可读性和示范性，因此，是一本很好的教学及参考用书。

希望本书的出版能够在推广和普及故障诊断技术，培养更多的从事故障诊断技术的后备力量方面起到积极的作用。值本书出版之际，谨为作序，祝本书的出版在促进学科建设、普及故障诊断技术方面发挥重要作用。祝本书出版成功。

中国科学院院士  
华中理工大学校长

杨志

97年3月

## 第 1 版前言

在现代化生产中，机械设备的故障诊断技术越来越受到重视，如果某台设备出现故障而又未能及时发现和排除，其结果不仅会导致设备本身损坏，甚至可能造成机毁人亡的严重后果。在连续生产系统中，如果某台关键设备因故障而不能继续运行，往往会殃及全厂生产系统设备的运行，而造成巨大的经济损失。

本书编写的指导思想是从以下两点考虑的：

首先，故障诊断是一门新发展的技术，还没有形成较为完整的科学体系。因此除对其研究目的、研究内容范畴的理解之外，往往与工程应用背景，乃至工程技术人员的专长不同而有很大差异。因此，很有必要说明机械设备故障的含义、性质、诊断方法原理等，但现有出版著作偏重应用者较多。任何一种科学方法，必须理解它，才能得到更好的应用与发展。

其次，考虑到一个重要的实际问题是目前国内已开发了不少的诊断系统，但在生产中能正常应用，发挥应有的效益的还不多。其原因很多，一是使用者对基本原理不够理解之外，一些小问题不能排除，或者操作不当，使系统不能正常运行；二是不理解机械设备运行是动态过程，故障现象是随机的。试验室数据与实际机组运行数据不属于同一母体，只能用于研究故障现象的一般原理和发展规律，而监视诊断系统需要的是针对某台机器设备的具体数据。即使同一型号的机器设备，由于装配、安装及运行条件不同，其工况状态边界是有差别的，应从实际机组运行状态出发，研究故障工况状态的实际边界作为监视诊断的门限值。为此必须理解方法原理，灵活运用，才能达到应有目的。

因此，编写的指导思想是以方法原理为主，通过旋转机械和机械制造的典型实例说明所述诊断方法的应用，举一反三，最后以大型旋转机械为例，给出一个完整的诊断系统，说明系统的结构、主要模块内容及尚待解决的问题。

本书所提供的数据、图表，大部分都是作者在试验室及工程实践中的研究结果，也有些采用其它单位的研究成果，但也经过实验验证。如前所述，主要用于说明试验方法原理，所提供的数据图表，也主要是说明基本规律，在实际生产中，需根据具体对象决定相应的数据。

鉴于工况监视与故障诊断是一门综合性学科，在诊断方法方面涉及人工

智能、数学、信号处理、自动控制、计算机等许多学科，这些学科都有各自的领域，有许多参考文献，限于篇幅，本书只能从故障诊断的角度出发，简述其原理及应用。

本书适用于高校学生、研究生及工厂有关设备运行管理工程师使用。

本书是我校工况监视与故障诊断研究室全体教师及历届研究生集体研究的成果。第4章由钟秉林教授编写，第1及第8章由黄仁教授编写并负责全书统稿，第6、7、9章由贾民平教授编写，第2、3章由朱向阳副教授编写。第5章由许飞云副教授编写。参加本书编写工作的还有颜庭虎副教授、何永勇博士、张雪江博士和孙蓓蓓博士等。

本书在编写过程中一直得到华中理工大学杨叔子教授的指导与支持。杨叔子教授对本书认真进行了审查并为本书作序；在本书内容上，中国科技大学李川奇教授提出了许多宝贵意见，在此特致以诚恳的感谢。

由于故障诊断是一门新发展的科学技术，还没有形成自身的科学体系，本书所提出的思路、体系、观点是几年来在教学、科研、工程技术讲座中逐步形成的，只是抛砖引玉，旨在促进故障诊断学科的发展和故障诊断技术的应用。但是由于作者水平有限，恳切希望读者对书中的错误和不妥之处提出批评指正，我们将不胜感激。

东南大学

钟秉林、黄仁 1997年4月

## 第2版前言

本书第1版1997年问世以来，得到各方面的关心、指正与鼓励，在此致以深切的谢意。

故障诊断是一门新发展的科学领域，还没有形成较为完整的科学体系，第1版编写的指导思想是以本校经过实践的科研新成果为主，增加可实践性。根据2000年6月教育部研究生工作办公室的推荐，本书已列为研究生教学用书，从全国各高等学校的需要来看，有些章节的覆盖面偏窄。为此，本书第2版修改的指导思想是“面要宽些，保持必要的先进性与可实践性”的原则，在原有基础作了以下修改：

1. 第8章进行了改写：由于工况监视与故障诊断技术在机械制造领域中的系统研究与应用，还只是处于起步阶段，而它的内容与生产模式有关，考虑到未来发展与当前的实际生产状况相结合，改写的思路是突出质量控制，具体来说分三个方面：（1）以敏捷制造系统为例介绍质量监视与控制系统的构成，使初学者能从发展的观点了解一个监视与控制系统所必须具备的主要功能；明确要解决的基本问题，即过程控制与质量控制的原理和方法；（2）从广义理解“控制”的含义，不仅是“自动控制”，而且包括在科学方法论的指导下有人参加对过程的组织安排，因此着重介绍统计过程控制（SPC）的理论基础，说明它在机械制造过程控制与质量控制中的适用范围；（3）由于生产过程是动态的，而传统的统计过程控制是静态的，因此提出基于动态过程分析对加工过程及质量状态的研究方法。

2. 第7章对齿轮箱故障诊断进行修改，补充了齿轮箱振动信号分析的特征及几种现代常用的主要分析方法，如倒谱、希尔伯特（Hilbert）包络分析法、时频分析法及时域模型法等。

3. 全书进行了文字的修改，改正了某些错误或不妥之处。

虽然作者们经过很大努力，但由于水平有限，仍然恳切地希望广大读者能对修改后的第2版提出批评指正，不胜感谢。

钟秉林、黄仁 2001年8月

# 目 录

序

第 1 版前言

第 2 版前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1 故障诊断学的意义 .....	1
2 故障诊断技术的发展 .....	6
3 计算机辅助监视诊断系统的主要环节及诊断策略 .....	8
4 故障诊断与机械系统可靠性及维修性的关系 .....	11
<b>第 2 章 传感器原理与信号检测</b> .....	15
1 概述 .....	15
2 特征信号的选择 .....	15
3 振动信号的检测 .....	16
4 计算机辅助信号采集系统的主要功能 .....	29
5 信号预处理 .....	33
<b>第 3 章 特征分析与特征量选择</b> .....	35
1 概述 .....	35
2 随机过程和时间序列 .....	35
3 时间序列的统计分析 .....	40
4 时域模型分析及其在故障诊断中的应用 .....	44
5 随机时间序列的频域分析 .....	54
6 小波分析 .....	60
<b>第 4 章 状态识别方法原理</b> .....	65
1 概述 .....	65
2 对比分析法 .....	65
3 模型分析法 .....	66
4 贝叶斯分类法 .....	66
5 距离函数分类法 .....	72
6 信息距离判别法 .....	74
7 势能函数分类法 .....	76
8 模糊诊断法 .....	78

9 故障树分析法 .....	87
10 灰色理论诊断法 .....	91
<b>第5章 神经网络诊断原理 .....</b>	<b>94</b>
1 概述 .....	94
2 人工神经网络的拓扑结构及学习规则 .....	94
3 多层前向神经网络模型及 BP 算法 .....	99
4 径向基函数 (RBF) 网络及其学习算法 .....	104
5 模糊神经网络模型 .....	108
<b>第6章 专家系统诊断原理 .....</b>	<b>114</b>
1 概述 .....	114
2 专家系统的基本结构及功能 .....	115
3 推理机制 .....	117
4 知识表示与知识获取 .....	119
5 人工神经网络与专家系统 .....	127
6 基于行为的故障诊断系统 .....	130
<b>第7章 旋转机械的状态监视与故障诊断 .....</b>	<b>135</b>
1 概述 .....	135
2 预备知识 .....	135
3 转子系统振动故障诊断 .....	138
4 齿轮箱故障诊断 .....	150
5 滚动轴承的振动信号分析及研究 .....	155
<b>第8章 机械制造过程质量状态识别与控制 .....</b>	<b>167</b>
1 概述 .....	167
2 敏捷制造环境下质量状态识别与控制系统 .....	167
3 基于数理统计对质量控制的理论基础及其适用性 .....	173
4 基于动态过程分析对加工过程及质量状态的研究 .....	204
<b>第9章 计算机辅助工况监测与故障诊断系统 .....</b>	<b>218</b>
1 概述 .....	218
2 汽轮机压缩机组工况监视与故障诊断系统实例 .....	218
3 大型机械设备工况监视与诊断系统尚待解决的问题 .....	231
<b>参考文献 .....</b>	<b>235</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1 故障诊断学的意义

在现代化生产中，机械设备的故障诊断技术越来越受到重视，如果某台设备出现故障而又未能及时发现和排除，其结果不仅会导致设备本身损坏，甚至可能造成机毁人亡的严重后果。在连续生产系统中，如果某台关键设备因故障而不能继续运行，往往会涉及全厂生产系统设备的运行，而造成巨大的经济损失。因此，对于连续生产系统，故障诊断具有极为重要的意义。例如电力系统的汽轮发电机组、冶金过程及化工过程的关键设备等等。在机械制造领域中，如柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等，故障诊断技术也具有相同的重要性。然而在机械制造业中，大量的单件、小批量生产，在传统的生产环境中，一般机床设备操作与质量控制主要靠人进行，这时故障诊断技术的地位就没有前述连续生产系统显得那么重要。但对于某些关键机床设备，因故障存在而导致加工质量降低，使整个机器产品质量不能保证，这时故障诊断技术也不容忽视。

但是故障诊断是一门新发展的科学领域，还没有形成较为完整的科学体系。因此对其研究目的、研究内容范畴的理解，往往与工程应用背景，乃至工程技术人员的专业专长不同而有很大差异。正确理解故障诊断的研究目的、研究内容的范畴是涉及本门学科指导思想和发展策略的问题。为此，有必要说明以下四个问题。

### 1.1 故障的含义

从系统的观点来看，故障包括两层含义：一是机械系统偏离正常功能，它的形成原因主要是因为机械系统的工作条件（含零部件）不正常而产生的，通过参数调节，或零部件修复又可恢复到正常功能；二是功能失效，是指系统连续偏离正常功能，且其程度不断加剧，使机械设备基本功能不能保证，则称之为失效（*Failure*）。一般零件失效可以更换，关键零件失效，往往导致整机功能丧失。

### 1.2 故障的类型

故障可按其故障性质、状态的不同而分为以下几种类型。

### 1.2.1 按工作状态分有间歇性故障和永久性故障

间歇性故障是有时发生，有时又消失。永久性故障是故障出现后，除经人工修理不然就一直存在。

### 1.2.2 按故障程度分有局部功能失效的故障和整体功能失效的故障

局部功能失效的故障是该机器设备某一部分存在故障，使这一部分功能不能实现，而其它部分功能仍可实现。整体功能失效的故障，虽然也可能是机器设备某一部分出现故障，但使整机功能不能实现。

### 1.2.3 按故障形成速度分有急剧性故障和渐进性故障

急剧性故障是故障一经发生之后就使工况状态急剧恶化，不停机修理，机器就不能继续运行。渐进性故障是发展缓慢，可以继续运行一定时间后再修理。

### 1.2.4 按故障程度及形成速度分有突发性故障和缓变性故障

突发性故障发生在瞬间，它和急剧性故障不同之处是没有明显的征兆，往往导致整机功能失效，甚至人身、设备安全都难于预测。缓变性故障具有渐进性和局部功能失效的特点，可以预测。

### 1.2.5 按故障形成的原因分有操作或管理失误形成的故障和机器内在原因形成的故障

操作或管理失误形成的故障是人为的外在因素造成的，主要是要求操作思想集中，提高工作责任心。机器内在原因形成的故障一般是由于机器设计、制造遗留的缺陷（如残余应力）或材料内部潜在的缺陷造成的，无法检测，是突发性故障的重要原因。

### 1.2.6 按故障形成的后果分有危险的故障和非危险的故障

突发性故障和急剧性故障属于危险性故障，常导致整机损坏、车间破坏，乃至人身事故和灾难性后果，是机械故障诊断重点预防的问题。非危险的故障一般是指可修复的故障。

### 1.2.7 按故障形成的时间分有早期故障、随时间变化的故障和随机性故障

早期故障是有征兆的，可早期发现，一般不影响机器的继续运行，但应注意其发展趋势，防止故障扩大。随时间变化的故障是渐进性故障，如轴承磨损等。随机性故障没有明显的规律，大部分故障的特征值都具有随机性，不可重复。

上述故障类型是相互交叉的，随着故障的发展，可从一种类型转移到另一种类型。

机械设备种类很多，但具有共同的基本特点，即机械系统故障现象大部分具有随机特性。此处‘随机’一词包括两层含义：一是在不同时刻的观测数据是不可重复的。我们说现时刻机器的工况状态和过去某时刻没有变化

(或者相同), 只能理解为其观测值在统计意义上没有显著差别; 二是表征机器工况状态的特征值不是不变的, 而是在一定范围中变化。机器的运行过程是一个动态过程, 都可以用数学方法(微分方程或差分方程)描述, 不同的机器描述它的动态特性的模型参数和特征方程不同, 因而描述工况状态的特征域就有差异。即使是同型号机械设备, 由于装配、安装及工作条件上的差异, 也往往导致机器的工况状态及故障模式改变。因此, 研究机械系统工况状态的基本出发点是必须遵循随机过程的基本原理。文献资料上所提供的数据、图表只能作为参考, 如用这些数据图表进行工况状态判断, 往往得不到满意的效果。我们的指导思想是立足于对本机组的实际运行状态分析, 结合本机组的历史资料, 参考其它有关资料、专家知识, 进行综合判别。

### 1.3 故障诊断方法

由于目前人们对故障诊断的理解不同, 各工程领域都有其各自的方法, 概括起来有以下四方面:

#### 1.3.1 按诊断环境分

有离线人工分析、诊断和在线计算机辅助监视诊断, 二者要求有很大差别。本书立足于在线计算机辅助诊断。

#### 1.3.2 按检测手段分

1.3.2.1 振动检测诊断法 以机器振动作为信息源, 在机器运行过程中, 通过振动参数的变化特征判别机器的运行状态。

1.3.2.2 噪声检测诊断法 以机器运行中的噪声作为信息源, 在机器运行过程中, 通过噪声参数的变化特征判别机器的运行状态。此法的本质与振动检测诊断法是一致的, 因为噪声主要是由振动产生的。此法虽简便, 但易受环境噪声影响, 不如振动检测诊断法准确。

1.3.2.3 温度检测诊断法 以可观测的机械零件的温度作为信息源, 在机器运行过程中, 通过温度参数的变化特征判别机器的运行状态。

1.3.2.4 压力检测诊断法 以机械系统中的气体、液体的压力作为信息源, 在机器运行过程中, 通过压力参数的变化特征判别机器的运行状态。

1.3.2.5 声发射检测诊断法 金属零件在磨损、变形、破裂过程中产生弹性波, 以此弹性波为信息源, 在机器运行过程中, 分析弹性波的频率变化特征判别机器的运行状态。

1.3.2.6 润滑油或冷却液中金属含量分析诊断法 在机器运行过程中, 以润滑油或冷却液中金属含量的变化, 判别机器的运行状态。

1.3.2.7 金相分析诊断法 某些运动的零件, 通过对其表面层金属显微组织、残余应力、裂纹及物理性质进行检查, 研究变化特征, 判别机器设备存在的

故障及形成原因。

### 1.3.3 按诊断方法原理分

1.3.3.1 频域诊断法 应用频谱分析技术,根据频谱特征变化,判别机器的运行状态及故障形成原因。

1.3.3.2 时域分析法 应用时间序列模型及其有关的特性函数,判别机器的工况状态的变化。

1.3.3.3 统计分析法 应用概率统计模型及其有关的特性函数,实现工况状态监视与故障诊断。

1.3.3.4 信息理论分析法 应用信息理论建立的某些特性函数,如库尔伯克(Kullback)信息数, J 散度等在机器运行过程中的变化,进行工况状态分析与故障诊断。

1.3.3.5 模式识别法 利用检测信号,提取对工况状态反应敏感的特征量构成模式矢量,设计合适的分类器,判别工况状态,它是人工智能的技术之一。

1.3.3.6 其他人工智能方法 如人工神经网络、专家系统等,这些都是新发展的新领域。

上述方法是从应用方面考虑,就学科角度而言,它们是交叉的,例如许多统计方法都包括在统计模式识别范畴之内。

### 1.3.4 按诊断对象分

有汽轮机故障诊断、压缩机故障诊断、化工机械故障诊断等等,各种产品都可冠上故障诊断的名字。但从故障诊断原理来看,不同对象的动态性能都有其特点,但方法原理的共性是基本的。

## 1.4 机械系统故障的特点、研究目的和范围

### 1.4.1 机械系统故障的特点

归纳起来可从以下几点来说明:

1) 机械运行过程是动态过程,就其本质而言是随机过程。前述已知,在不同时刻的观测数据是不可重复的,用检测数据直接判断运行过程故障是不可靠的,不同时刻观测值是否一致,只能从统计意义上看它们是一致,还是有显著差别。

2) 从系统特性来看,除了前述诸如连续性、离散性、间歇性、缓变性、突发性、随机性、趋势性和模糊性等一般特性外,机械设备都是由成百成千个零件装配而成,零部件间相互耦合,这就决定了机械设备故障的多层次性,一种故障由多层次故障原因所构成。故障与现象之间没有一一对应的因果关系,上述所列举的方法,由于只从某一个侧面去分析而作出判断,因而很难作出正确的决策。我们的出发点是从随机过程出发,运用各种现代化科学分

析工具,综合判断机械的故障现象属性、形成与发展。

### 1.4.2 故障诊断学的研究目的、研究范围

1.4.2.1 故障诊断学的定义 从系统分析观点出发,工况监视与故障诊断可以理解为识别机械设备运行状态的科学,也就是说利用上述检测方法和监视诊断手段(包括不断发展的信息科学与系统辨识的新方法),从所检测的信息特征判别系统的工况状态。它的最终目的是提高设备效率、运行可靠性、分析故障形成原因,以防患于未然。它是大型机械设备运行的关键技术之一,也是各种自动化系统及一般机械系统提高效率和可靠性,进行预知维修及预知管理的基础。

上述定义、研究目的和研究范围是针对在线诊断提出的,这是由于在线监视诊断对当前生产具有极其重要意义,而离线诊断方法已有许多成熟的科学方法可供借鉴。例如材料成分分析、无损检测、应力分析、金相分析等,将不在本书研究范围;有关信号分析及数据处理方法则是在线诊断中的重要手段。至于实验室研究,它的主要任务是研究故障形成机理及其一般规律,它与在线诊断的关系是相辅相成,但应注意两个问题:

1) 即使同一型号的机组,在实验室与在生产线上的工况条件是不相同的。研究证明:在实验室用模拟故障所得到的特征信息在模式空间中的模式样本的类聚性,与生产线上实际的模式样本的类聚性有着很大的差别,因为它们不属于同一个母体,因此,不能用实验室所得到的判别函数直接用于生产线上。在生产线上要根据在现场实际检测结果,确定判别函数,且需经过学习,不断修正判别函数的参数。

2) 在实验室条件下进行研究时,虽然旨在研究动态过程故障现象的一般规律,但所用的测试方法要考虑到生产条件下是否可以应用,例如传统的温度测量法是用热电偶。在线条件下,将它用于测量轴承温度、熔炼炉温度,都可得到良好的测量效果,而对切削、磨削温度,在生产条件下就不可能用热电偶,因为在许多零件上,一般都不允许钻孔、开槽来埋置热电偶。

1.4.2.2 工况监视与故障诊断的关系 工况监视与故障诊断不是等同的概念,而又统一于动态系统之中,工况监视的任务是判别动态系统是否偏离正常功能,监视其发展趋势、预防突发性故障产生。一旦偏离正常功能,如系统有可调参数,应迅速作出调整,使工况恢复到正常,如果系统某个环节存在故障,就要进一步查明故障原因及其部位,这就是诊断。因此,工况监视是故障诊断的基础。以上概念是从计算机辅助监视与诊断的要求提出的。现有其它提法,也基本上包括在上述概念之内。

综上所述,工况监视与故障诊断是综合性很强的技术,它涉及计算机软硬件、传感器与检测技术、信号分析与数据处理、预测预报、自动控制、系

统辨识、人工智能、力学、数学及振动工程和机械工程等领域。本书以原理方法为主，重在机械，但不限于机械。各种机械设备，因其应用背景不同，有其本身的个性，但毕竟属于第二位。故障诊断的理论与方法是从共性出发，研究其发展规律。就原理与方法而言，可用于解决机械设备的故障诊断问题，也可用于解决非机械的动态系统识别问题。

## 2 故障诊断技术的发展

故障诊断技术是现代化生产发展的产物。早在20世纪60年代末，美国国家宇航局（NASA）就创立美国机械故障预防小组 MFPG（Machinery Fault Prevention Group），英国成立了机械保健中心（UK, Mechanical Health Monitoring Center）。由于诊断技术所产生的巨大的经济效益，从而得到迅速发展。但各个工程领域对故障诊断的敏感程度和需求迫切性并不相同。例如一台机械设备因故障停机检修，并不导致全厂生产过程停顿，或对产品质量产生严重的影响，它对故障诊断的需求性就不那么迫切。反之，就非要有故障诊断技术不可。目前监视诊断技术主要用于连续生产系统或与产品质量有直接关系的关键设备，如汽轮机、高速离心压缩机等。在这一领域监视诊断技术的发展情况，大致可从两方面来说明：

### 2.1 监视诊断技术的发展

目前所采用的监视诊断技术可以概括为三类。

#### 2.1.1 以检测仪表为主体的监视装置

我国目前许多引进的大型设备都配备了这种装置，如本特利（Bently）公司的 Bently 序列和飞利浦（Philips）公司的 Philips 序列，其中以 Bently 序列较多，如 Bently 7200、9000、3300 型等。它的主要构成部件是传感器和指示仪表箱，有用于测温度的，但大多数是用于测振动的。其主要缺点是：

- 1) 检测信号是随机的，幅值并不能全面地表达动态过程的特性；
- 2) 机组在强烈振动之前，故障征兆并不很明显，有时振幅变化并不大，但机组确有故障，如半倍频是故障的重要信息之一，但检测仪表并未显示出来。而一旦振幅突然增大，则为时已晚，即不能防止突发性故障；
- 3) 读数式检测仪表本身并无分析功能，依赖于人的经验判断。

#### 2.1.2 检测仪表配备软硬件分析装置

这种系统是第一种装置的改进与补充，所用的装置主要是频谱分析仪，有些名为故障诊断仪，而实际主要功能还是频谱分析，也有的分析功能是用计算机软件去实现。如早几年本特利公司的 ADRE3 及恩特克（Entek）公司的

PM 等系统就具有频谱分析、谱阵图、波特图 (Bode Plot)、轴心轨迹图等功能, 故有帮助人们提高诊断的准确性的优点, 但也仍存在以下缺点:

- 1) 分析装置只是一种工具, 不能自动判断, 诊断决策仍需依赖于领域专家;
- 2) 不能连续地自动分析, 容易丢失故障信息, 不能预防突发性故障;
- 3) 大型机械设备的结构复杂, 故障与征兆之间并无一一对应的因果关系, 难免有误诊。

### 2.1.3 计算机辅助监视与诊断系统

这种系统主要结构是由传感器、接口装置及计算机组成。其中接口装置具有电平转换、采样、存储等功能。它可以实时监视和自动诊断, 对防止突发性故障有利, 是工况监视与故障诊断技术的主要发展领域。但目前的水平主要是计算机辅助监视与诊断系统, 还不能真正达到自动诊断的水平。国内外都有这种系统的开发与应用, 但仍无商品, 除了技术成熟性不足之外, 主要原因还是由于大型机械设备故障诊断的针对性很强, 且领域专家知识仍然是故障诊断不可缺少的一部分, 而商品型诊断系统必须充分考虑通用性, 例如商品型专家系统只能提供一个框架结构, 因为知识库的内容总离不开机组的实际运行状态和该领域的专家知识。

因此, 计算机辅助监视与诊断系统今后发展方向主要是减少人工干预, 提高自动化及自适应能力的多层次的人工智能诊断系统。

## 2.2 人工智能在故障诊断应用中的发展

人工智能的研究起源于 50 年代, 开始是以游戏、博弈为对象, 其间也有人以电子线路模拟神经元及人的大脑, 但没有成功。60 代前后应用了启发式技术和一般问题求解方法, 1963 至 1972 年间, 艾伦·纽厄尔 (Allen Newell) 发表了问题求解程序, 开始了用计算机程序来模拟人类思维的道路, 1960 年慕卡塞 (McCarthy) 建立了人工智能表处理 (List Processor) LISP 语言; 接着开发了一系列带有实用型的专家系统 (Expert System), 美国斯坦福大学 (Stanford University) 对此作出了许多重要贡献, 例如勒德贝尔 (Lederberg) 等开发的, 旨在解决分子结构解释问题的 DENDRAL 系统 (1964); 密斯基 (Minsky) 和慕卡塞 (McCarthy) 旨在解决医生对感染性疾病诊断的 MYCIN 系统 (1972); 杜达 (R.O.Duda) 和赫特 (P.E.Hart) 所研制的地质探矿 PROSPECTOR 系统 (1976); 傅立兰 (P.E.Friedland) 和斯特费克 (M.Stefik) 所研究的分子遗传的 MOLGEN 系统 (1976) 等; 这些系统在知识表达、逻辑推理等基本问题上作出了贡献, 为专家诊断系统的发展奠定了基础。在此期间, 马赛大学 (University of Marseille) 科尔迈伦 (Alain Colmeraure) 所提出基于逻辑演算的 PROLOG

(*Programing in Logic*) 语言出现了, 随着它的发展和应用, 促进了诊断技术的发展。70 年代末, 专家系统开始用于工程领域, 故障诊断专家系统也是这时开始。80 年代起, 推理技术、知识获取、自然语言理解和机器视觉都成为研究的主流, 并开始了不确定性推理、非单调推理、定性推理的研究, 知识获取及自学习问题, 特别引人注目。这时的研究思路是以基于知识 (*Knowledge-based*) 为核心, 从总体出发, 自上而下。反映在诊断策略上, 是建立某种故障模型进行求解, 其缺点是知识对环境的适应能力差, 知识空间庞大, 对问题求解带来了困难。1985 年之后, 在积极发展基于知识的同时, 又出现了一种基于行为的研究思路, 即自下而上以对象的实际行为为基础的人工智能法, 也有人称这种方法为 ‘人工生命’, 现在越来越引人注目, 因为它是从实际对象出发, 结合实际, 但我们并不排斥普遍性知识 (如书本上所提供的), 但它是处于第二位。神经网络是实现这一策略的有效手段之一。任何科学的理论与方法总有它的适用范围。关于诊断方法, 我们的指导思想是积极解决基于知识方法中所存在的技术问题, 努力开展基于行为的研究工作, 根据实际情况选择合适的方法, 不论是采用哪一种方法, 最终目的是要建立适合于具体对象的故障诊断系统。

人工智能现在面临的关键问题是要使计算机能模拟人的学习行为并具有决策功能, 也就是自学习问题。它是知识工程 (知识获取、知识表示、知识使用) 的重要问题。自学习的方法有记忆学习、示教学习、演绎学习、类比学习和归纳学习等。这些方法都能使计算机达到一定程度的自学习, 但出发点和采用的方法不同, 其中归纳式学习是具有代表性的一个领域。它是从一系列的概念、样例和已知的反样例中获得概念, 并归纳推导出一般概念的描述方法。这里所指的概念范围很广, 可以是一个定义, 一种行为, 一种决策, 还可以是对状态的识别过程。人工神经网络就是一种数字式的归纳式学习方法。

### 3 计算机辅助监视诊断系统的主要环节及诊断策略

#### 3.1 工况监视与故障诊断系统的主要环节

由于诊断方法和诊断对象工作特性的要求不同, 监视诊断系统的结构亦有差异, 现将以模式识别为基础的计算机辅助监视诊断系统的主要环节说明如下 (图 1.1)。

##### 3.1.1 信号的在线检测

它必须满足两方面的要求。一是在线 (*On-line*), 它是针对系统而言, 对



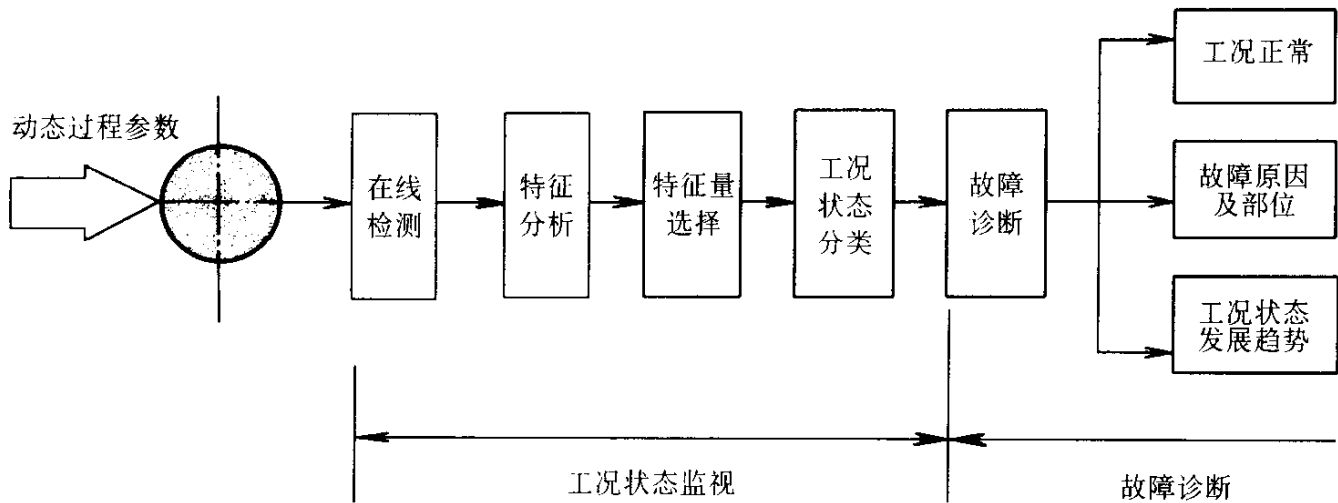


图 1.1 工况状态监视与故障诊断系统主要环节

于连续运行的机械设备是指机器运行（生产）过程（系统）中的检测，是在生产线上进行，故属于在线检测。有些机械设备的运动，既有连续，又有中断，例如机床加工一个零件可看成是一个系统，则切削、换刀、上下料和测量都是系统的组成环节。但除了切削之外，在进行换刀、上下料等其它环节时，机床并不运动，刀具也不加工，但都属于系统的组成部分，故仍属在线；二是动态过程具有多方面的信息，没有必要都检测，所选择的信号及其在机器上的部位都要能敏感地反映工况特征信息的变化。

### 3.1.2 信号的特征分析

鉴于直接检测信号大都是随机信号，它包括了大量的与故障无关的信息，一般不宜用作判别量。需要用现代信号分析和数据处理方法把直接检测信号转换为能表达工况状态的特征量。对于某些具有规律的信号，也可从波形的形式提取特征量。特征分析的目的是用各种信号处理方法作为工具，找到工况状态与特征量的关系，把反映故障的特征信息和与故障无关的特征信息分离开来，达到“去伪存真”的目的。因此，信号处理是特征分析的一种工具，但不是唯一的工具。用作特征分析的方法有频域分析、时域分析、统计分析、小波分析及波形分析等等。

### 3.1.3 特征量的选择

用上述方法可以得到很多可表达系统动态行为的特征量，但没有必要都用来判别工况状态。因为实际生产中，各个特征量对工况状态变化的敏感程度不同，应当选择敏感性强、规律性好的特征量，达到“去粗取精”的目的。对此，只有在系统建成之后，结合机组运行做实验，进行特征分析，才能知道哪一个特征量敏感或不敏感。实验室试验所得到的某种规律可作参考。选择对具体机器最敏感的特征量，才能加强监视诊断的针对性，提高诊断的准确性。特征量的选择还要考虑判别的实时性，要求计算简单，如能在一定程度上表达工况状态的物理含义，就更有利于对工况状态变化原因的分析。用