

机械故障诊断学的理论及其应用

Machinery Fault Diagnosis Theory with its Applications

第一讲 故障诊断的意义及研究发展概况

Topic 1 Fault Diagnosis and its Evolution

(东南大学 设备与系统故障诊断研究所, 210096)

摘要 现代化生产日益向着规模化、自动化方向发展, 机械故障诊断越来越受到重视。本文在介绍故障诊断学的意义及其研究发展情况后, 进一步阐述了故障以及故障诊断的分类和特点, 最后介绍了故障诊断的主要环节。

关键词: 故障诊断, 工况监视, 信号, 人工智能

Abstract: More attention is paid to machinery fault diagnosis because of modern industry's large scale and automation. The importance and evolution of fault diagnosis is introduced first in the paper, and the characteristics of fault and fault diagnosis are expatiated also. Main procedures for condition monitoring and fault diagnosis are introduced last.

Keywords: fault diagnosis, condition monitoring, signal, artificial intelligent

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, 如果某一零部件或设备出现故障而又未能及时发现和排除, 其结果不仅可能导致设备本身损坏, 甚至可能造成机毁人亡的严重后果。在流程生产系统中, 如果某一关键设备因故障而不能继续运行, 往往会涉及整个流程生产系统的运行, 造成巨大的经济损失。因此, 对于流程生产系统故障诊断具有极为重要的意义, 例如电力工业的汽轮发电机组, 冶金、化工工业的压缩机组等。在机械制造领域中, 如柔性制造系统、计算机集成制造系统等, 故障诊断技术也具有相同的重要性。因故障存在而可能导致加工质量降低, 使整个机器产品质量不能保证。

1 故障诊断学的特点

从系统观点来看, 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不正常而产生的, 通过参数调节, 或零部件修复又可恢复正常; 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。

1) 故障的分类

故障的类型因故障性质、状态不同可以分类如下: 按工作状态分有间歇性故障和永久性故障; 按故障程度分有局部功能失效和整体功能失效的故障; 按故障形成速度分有急剧性故障和渐进性故障; 按故障程度及形成速度分有突发性故障和缓变性故障; 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; 按故障形成的后果分有危险的故障和非危险的故障; 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。这些故障类型是相互交叉, 随着故障的发展, 可从一种类型转为另一种类型。

2) 故障诊断方法的分类

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

下三方面：

(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。

(2) 按检测手段分 a) 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；b) 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，但易受环境噪声影响；c) 温度检测诊断法。以可观测的温度作为信息源，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；d) 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；e) 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；f) 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；g) 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。

(3) 按诊断方法原理分 a) 频域诊断法。应用频谱分析技术，根据频谱特征的变化判别机器的运行状态及故障；b) 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；c) 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；d) 信息理论分析法。应用信息理论建立的特性函数，进行工况状态分析与故障诊断；e) 模式识别法。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；f) 其它人工智能方法。如人工神经网络，专家系统等新发展的研究领域。

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。

3) 机械系统故障的特点

由于机械系统是一个动态随机过程，其故障有下述两个特点：

(1) 机械运行过程是动态过程，其本质是随机过程。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。说现时刻机器的工作状态和过去某时刻没有变化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，而是在一定范围内变化。即使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，研究工况状态必须遵循随机过程的基本原理；

(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上千个零部件装备而成，零部件间相互耦合，这就决定了机械设备故障的多层次性，一种故障可能由多层次故障原因所构成。故障与现象之间没有简单的对应关系，上述所列举的故障诊断方法，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的。因此，故障诊断应该从随机过程出发，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、形成及其发展。

4) 故障诊断学的研究目的和研究范围

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，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。它是大型机械设备安全可靠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 and 可靠性，进行预知维修及预知管理的基础。

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的是否偏离正常功能，监视其发展趋势，预防突发性故障产生。一旦偏离正常功能，应迅速作出调正，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。

综上所述，工况监视与故障诊断是一门综合性很强的技术领域，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。

2 故障诊断技术的发展概况

故障诊断技术是现代化生产发展的产物，早在 60 年代末。美国国家宇航局创立美国机械故障预防小组，英国成立了机械保健中心。由于诊断技术所产生的巨大的经济效益，从而得到迅速的发展。这一领域监视诊断技术的发展情况可从两方面来说明：

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：

(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，如本特利公司 7200、9000、3300 系列等。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和位移，只能显示振动峰峰值。其主要缺点在于：a) 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；b) 往往只能显示振动通频幅值，而有时变频或倍频幅值更重要；c) 没有记录振动信号趋势功能，这在判别故障原因时是十分重要的；d) 读数式检测仪表本身并无分析功能，需依赖于人的经验判断。

(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，也有的分析功能是用计算机软件去实现，但也仍存在以下缺点：a) 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；b) 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；c) 大型机械设备的结构复杂，故障与征兆之间并无简单的一一对应的因果关系，难免有误诊。

(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，存贮等功能。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，但仍无成熟商品，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。

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发展。

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。60 代前后应用了启发式技术和一般问题求解方法，1964 年 Lederberg 等开发了解决分子结构解释问题的 DENDRAL 系统、1972 年 Minsky 和 McCarthy 解决医生对感染性疾病诊断的 MYCIN 系统、1976 年 Duda 和 Hart 研制了地质探矿 PROSPECTOR 系统等。这些系统在知识表达、逻辑推理等基本问题作出了贡献，为专家诊断系统的发展奠定了基础。70 年代末起，专家系统开始用于工程领域。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。85 年之后，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^[1]。

3 计算机辅助监视诊断系统的主要环节

计算机辅助监视诊断系统的主要环节如图所示。

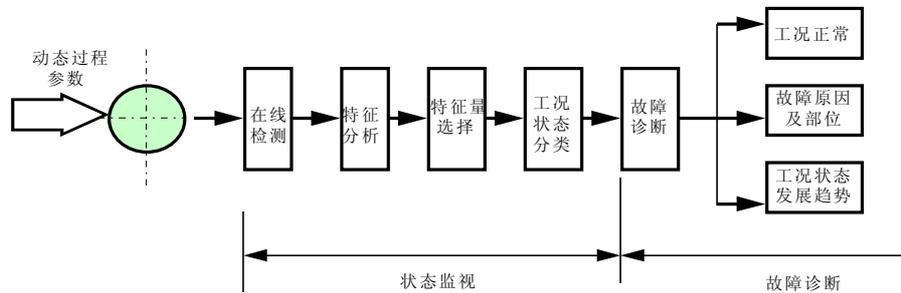


图 工况监视与故障诊断系统主要环节

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，对于连续运行的机械设备是指机器运行过程中的检测，是在生产线上的进行，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。

2) 信号的特征的分析

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，一般不宜于用作判别量。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。对于某些具有规律性的信号，也可从波形结构上提取特征量。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，小波分析及波形结构分析等等。

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。只有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。用模式识别方法进行状态分类时，特征量的数量以 2~3 个为宜。特征量太少，误判率大，而特征量太多，又使得判别函数复杂，计算量大，实时性差，且误判率并不因特征量的数量增多而单调地减少。

4) 工况状态识别

工况状态识别就是状态分类问题，分类与诊断往往是一个概念，此处从生产过程不同的目的考虑，把‘分类’分成监视与诊断两个问题，工况监视的目的是区分工况状态是正常还是异常，或者那一部分不正常，便于进行运行管理，强调在线和实时性。

5) 故障诊断

故障诊断首先需根据监视系统提供的信息,对当前工况状态及其发展趋势作出确切的判断。故障诊断主要任务是针对异常工况,查明故障部位、性质、程度以及发展趋势,这就不仅需要根据当前机组的实际运行工况,而且还需要考虑机组的历史资料及领域专家的知识作出精确诊断。诊断和监视不同之处是诊断精度放在第一位,而实时性是第二位。

在以后的讲座中,将主要就上述五方面进行阐述,并介绍旋转机械和机械制造过程这两种典型机械的故障诊断原理和方法。

参考文献

- 1 钟秉林,黄仁、贾民平等,机械故障诊断学,北京:机械工业出版社,1997年12月
- 2 陈克兴,李川奇,设备状态监测与故障诊断技术,北京:科学技术文献出版社,1991年8月
- 3 沈庆根,化工机械故障诊断技术,杭州:浙江大学出版社,1994年12月
- 4 Harris, C. M. (ed.), *Shock and Vibration Handbook, Fourth Edition*, McGraw-Hill, New York, 1996
- 5 Dalpiaz, G. and Rivola, A. Condition monitoring and diagnostics in automatic machines: comparison of vibration analysis techniques, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(1):53 ~ 73