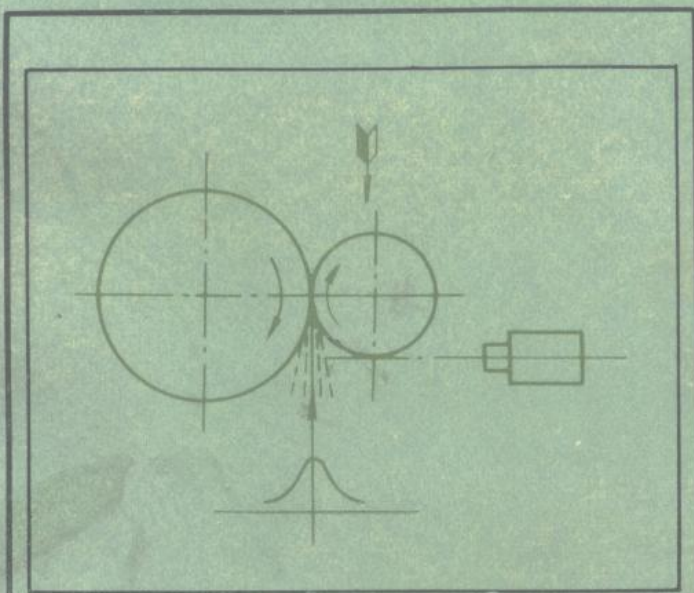




机械故障诊断丛书

机械制造过程的工况监视 与故障诊断

黄 仁 钟秉林 编著



西安交通大学出版社

9

353323

机械故障诊断丛书之九

机械制造过程的工况监视 与故障诊断

黄仁 钟秉林 编著



西安交通大学出版社

2005/04

内 容 简 介

本书简述了机械制造过程的工况监视与故障诊断的基本概念、研究内容和研究方法；机械制造过程的辨识与优化；机械制造过程的状态分类、状态监控与质量监控。在论述状态监控与质量监控时，列举了典型的应用实例予以说明。

本书为机械类工程技术人员用书，亦可供高等工科院校机械类专业师生参考。

机械制造过程的工况监视 与故障诊断

黄仁 编著

责任编辑 高民军

西安交通大学出版社出版

邮政编码：710049

西安交通大学出版社电脑排版

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

开本 787×1092 1/32 印张 5.375 字数 110 千字

1991 年 7 月第 1 版 1991 年 7 月第 1 次印刷

印数：1 — 5000

ISBN7-5605-0413-2/TH·19 定价：3.00 元

“机械故障诊断丛书”总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广应用不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备运行状态的监测，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射、红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学等新兴学科在机械故障诊断技术中也找到了用武之地。

近年来，在国家计委、中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在各行各业中推广应用。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本丛书是为满足广大工程技术人员的迫切需要而编写的；同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

在组织编写这套丛书时要求既注意科学性，又注意实用性。内容有一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，努力避免过多的数学推导，既能为广大实际工作者所接受，对研究人员和高等学校的师生也有参考价值。为了尽量节省读者的精力和时间，每本就一个专题编写，简洁明了，以便于读者阅读和使用。

由于各类产业机械既有各自的特点，又有某些共同点，机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，本丛书在

编写时着重讨论多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，同时尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向，以开阔视野。丛书也注意总结作者的理论研究成果和实际经验，以促进这些成果和经验在生产中发挥应有的作用。

本丛书和广大读者见面之后，编者和作者衷心希望能得到广大读者的反馈信息，以便改进我们的工作，提高丛书的质量。

“机械故障诊断丛书”编辑委员会

1988年2月

前 言

机械制造过程的工况监视与故障诊断是机械设备故障诊断学的一个分支，它是新发展的一门学科领域，也是一个正引起人们关注的问题；它比机器设备运行状态监视与诊断技术的发展要晚一步，有待解决的问题更多，原因是：(1) 机械制造过程具有断续性、离散性及突变性等特点，现有相邻学科如系统辨识、状态识别、优化控制等理论与方法不能照搬；(2) 传统的研究工作是基于静态分析出发，实验公式多半属于确定性模型，它只能说明某些现象的因果关系，并不适用于动态过程的监视与控制。鉴于以上背景，本书编写的指导思想是以原理与方法为主，首先阐明机械制造过程的工况监视与故障诊断的研究内容和研究方法，再从过程监视与质量监视出发，用典型实例说明它的应用。

机械制造过程的工况监视与故障诊断是以动态过程辨识与状态分类为基础的，不同的工厂、不同的产品和制造条件，都会导致工况状态的差异。企图把现成的技术引进，成熟的资料照搬都是不符合实际的。只有懂得了原理，掌握了方法，结合工程实际不断开发，才能解决实际问题。

本书是编者在为本校研究生开设的机器故障诊断原理课程讲义的基础上，结合生产实际需要编写的。书中一些应用实例，取材于国内各高校研究成果报告和编者的教学科研工作。这些实例在实验室条件下都是成功的。如前所述，要用

之于生产，还有许多工作要做。

由于编者水平有限，书中必有谬误之处，深切期望读者批评指正。

黄仁 钟秉林

1989 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 机械制造过程工况监视与故障诊断的基本概念

- 1.1 概述 1
- 1.2 机器故障诊断学的研究内容与方法 2
- 1.3 机械制造过程工况监视与故障诊断的特点 5
- 1.4 机械制造过程监视与诊断的内容 8
- 1.5 机械制造过程监视与诊断待研究的问题 11

第 2 章 机械制造过程的辨识与优化

- 2.1 机械制造过程系统辨识的概念 14
- 2.2 线性离散时间系统随机型数学模型 16
- 2.3 随机型线性动态系统的时间序列模型 19
- 2.4 机械制造过程优化目标函数 36

第 3 章 机械制造过程的状态分类

- 3.1 状态分类的概念 48
- 3.2 特征分析与特征量选择 53
- 3.3 几何距离分类方法 61
- 3.4 信息距离分类方法 66
- 3.5 Bayes 分类方法 68

第 4 章 机械制造过程的状态监控

- 4.1 切削过程刀具磨损与破损的状态识别 77
- 4.2 金属切削颤振的在线监控 94

4.3 切屑状态的识别	103
第5章 机械制造过程的质量监控	
5.1 工序质量控制的统计方法	114
5.2 工序质量控制的模型方法	118
5.3 加工过程中工件尺寸偏差的预报补偿控制 ...	120
5.4 机械加工点位精度的预报补偿控制	124
5.5 工件形状偏差的预报补偿控制	134
5.6 磨削过程表面烧伤的在线辨识	137

参考文献

第 1 章 机械制造过程工况监视与故障诊断的基本概念

1.1 概述

在动力、化工、冶金等工业部门中，机械设备和生产过程都是连续运行的。过程状态监测并不是什么新问题，围绕着过程状态监测已经开发出许多专门仪表，这些仪表迄今仍然起着重要的作用。但是把机器设备和生产过程状态监视和故障诊断作为一个专门技术提出，是在 60 年代初开始的。由于航空、航天及核工业的发展，各工业部门自动化程度的提高，对系统稳定性与可靠性的要求十分突出，如果只有仪表监测，靠人工控制，往往不能满足生产要求，需要监测与控制相结合，保证运行的稳定性。为了确定系统运行可靠性，还要求系统具有分析功能，这就提出了故障诊断问题。到了 70 年代中期，故障诊断技术便作为一门学科提出来了，并且在理论与方法方面进行了系统的研究。工况监视与故障诊断的发展和计算机软硬件的发展是分不开的，只有当微处理机及微型计算机得到充分发展，并可以在车间作为在线控制和实时分析的手段时，生产过程和设备运行状态的在线监视与诊断才有可能。

机械制造过程的工况监视与故障诊断比机械设备运行状态的监视与诊断还要滞后一个时期。直至 80 年代初，随着

柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing System) 和集成制造系统 CIMS (Computer-Integrated Manufacturing System) 的发展提出来的。在 FMS、CIMS 生产环境下, 靠计算机对过程控制, 离开了人对过程的直接干预, 若对过程状态不能识别, 对故障不能自动排除, 则系统就无稳定性可言, 也就不能使 FMS、CIMS 形成生产力, 因此工况监视与故障诊断是实现机械制造过程自动化、无人化的重要技术保证。

机械制造过程的工况监视与故障诊断是机器故障诊断学的一个分支。以下就从机器设备故障诊断的概念出发, 说明它的研究内容、方法和机械制造过程监视、诊断技术的特点。

1.2 机器故障诊断学的研究内容与方法

从系统分析的观点出发, 机器故障诊断学可以理解为识别机器运行状态的科学, 也就是说从系统外部信息特征判别系统的状态属性, 它的最终目的是提高设备效率, 运行可靠性及判断故障形成部位和原因, 防患于未然, 并尽可能提高设备的利用率。故障的内容包括两层含义: 一是机器系统偏离正常功能, 通过参数调节又可恢复正常功能, 它包括使系统处于最佳运行状态; 二是系统的功能失效, 除了修复或更换产生故障原因的零部件外, 便无法使系统的功能恢复正常。工况监视的任务是使机器系统不偏离正常功能, 故必须具备状态识别及预报功能, 它是优化控制及实时诊断的基础。

工况监视与故障诊断的研究内容和方法因所采用的策略和研究目的而不同，主要有两大类：

(1) 以分析故障原因为主要目的时，诊断准确性是第一位的，实时性是第二位的，可依据系统辨识理论，根据特定输入信号的响应，研究机器动态性能的变化，查明原因、故障（或薄弱环节）部位，采取适当对策。所采用的输入信号有时域及频域两类：如阶跃函数、脉冲函数、正弦或余弦函数等，属时域分析；频谱分析则是频域信号分析的一种方法。对于某些复杂的机器系统，还可以用专家系统，将人类经验与机器实际运行特征结合起来，这是当代人工智能在故障诊断中的应用之一。

(2) 以监视和控制为主要目的时，实时性是第一位的，准确性是第二位的，可以模式识别的理论为基础，通过聚类分析、图象识别、信息理论等技术，在线检测机器系统运行信息，实时地进行状态识别，预报机器系统的动态行为发展趋势，通过调节系统参数，实时控制。

对于某些复杂的机器系统或生产过程，既要求监视实时性，又要求诊断的准确性，则可将上述两种方法结合起来，综合数值推理与符号推理的优点，构成多层次的监视与诊断系统。图 1·1 是一个由三层次子系统构成的监视诊断系统。第一级为数字信号处理系统，由 MCS-96 完成，它的任务是多种运行特征量监视，并向第二、第三级子系统提供特征量，包括频谱分析的幅值、频率和时序模型参数、特性函数及统计特征量或 Kullback 信息量等等。通过特征分析，选择对工况状态反映最敏感的特征量显示和存盘。不论是机器设备运行过程还是机械制造过程，存贮长时期运行的

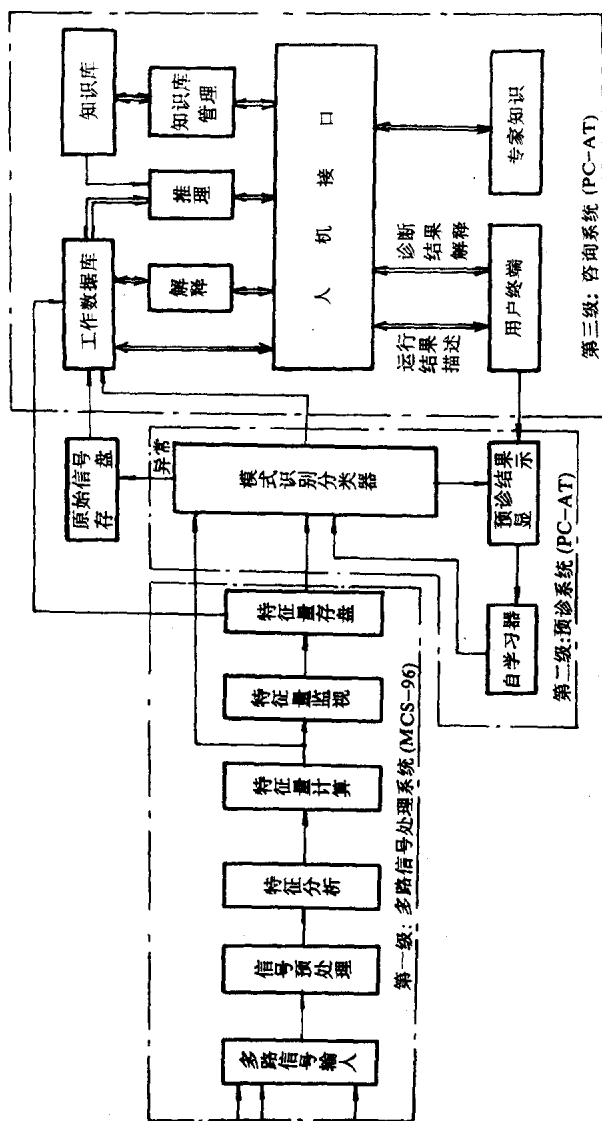


图 1·1 多层次监视诊断系统示例

原始信号是不现实的，而上述特征量是从不同方面凝集了动态过程的主要信息。存贮特征量可以节省存贮空间，并可随时调出，用以分析故障原因和预报工况发展趋势。若工况异常便自动存贮原始信号。第二级为状态辨识系统，在全系统中起着预诊作用，可由 PC-AT 完成，它的任务是实时显示工况状态，实质是由第一级子系统提供特征量，构成多维模式空间，用模式识别方法进行状态分类，它具有自学习功能，能自动修正分类器参数。第三级为专家系统，将第二级预诊结果和专家经验相结合，综合数值推理和符号推理，进一步诊断故障性质，能起诊断与咨询作用。机械制造过程的机床设备加工状态识别主要是利用第一、第二级子系统，第三级可用于车间及生产单元系统的监视与诊断。

由上例可知，工况监视与故障诊断是一个以计算机、信号处理、人工智能等学科为基础的交叉性学科领域。一个完善的监视诊断系统必定是以状态辨识为中心的信号智能处理系统。它与机器系统的动态特性有关，不深入研究机器系统、生产过程的动态特性，状态辨识就失去依据。

1.3 机械制造过程工况监视与 故障诊断的特点

由于机械制造系统的动态特性不同于机器设备运行系统，而有以下特点：

1.3.1 机械制造系统动态过程的特点

(1) 离散性与断续性：就制造系统而言，信息的主要形式是离散的，如零件尺寸、加工精度以及各种经济与技术数

据等等。就加工过程而言，在一次走刀中的切削加工可以是连续的（车、钻、磨等），也可以是断续的（如铣）；从一个零件的制造过程而言，工序与工序是两个相互独立的过程，而对加工质量来说，工序与工序又是相关的。

(2) 缓变性与突变性：在固定的加工条件下，一台机床的动态特性是缓变的，如机床的温升、零件磨损、应力的分布等都是缓变过程；而如刀具损坏、折断等在瞬间出现的则是突变性故障。

(3) 随机性与趋向性：由于机械加工过程中的随机因素干扰大，因此机械加工过程中各种物理量的变化，如切削力、切削温度、刀具磨损、加工系统振动都是随机过程；与环境因素有关的物理量，如刀具磨损与刀具寿命和切削条件的关系往往是含有趋向性的随机过程。

(4) 模糊性：在现象与因素关系上，大部分呈模糊性，即一部分因果关系是透明的，而另一部分是黑色的，属于灰色系统。在系统辨识中需要用到各种建模方法，没有适用于各种情况的通用数学模型。在状态分类中，可分性是基本的，但类别间往往无确定的边界，客观上也存在模糊区，使得状态分类困难。在传统的生产环境中，由于人参与决策，上述矛盾并不突出，而在自动化生产环境中，靠计算机控制，因此人工智能的应用就显得更加重要。

1.3.2 研究目的不同时内容及方法上的区别

任何一种制造系统，它的最终目的是在保证产品质量前提下，降低制造成本，提高生产率。因此，机械制造过程的监视与诊断的目的，就是为了保证达到上述目标，实时识别过程状态，通过参数调节，提供稳定的生产条件，分析过程

中的问题。从监视诊断内容上看，有质量监控和过程监控，前者是以产品质量为中心来考虑的，后者是以保证加工过程稳定性为目标。为了进一步说明监视与诊断的研究内容，需区别以下两个概念。

(1) 监视与诊断和优化与自适应控制的关系：从加工成本与生产效率出发，按照目标函数研究如何控制加工条件，这便是机床加工优化的问题；如果按照给定的目标函数，并连续地测量系统的品质，靠闭环控制自动地调节参数，以满足目标函数所给定的准则，便是自适应控制问题。而制造过程的监视与诊断不只是围绕单一目标，而是从制造系统（一台机床，一个生产单元，一个车间乃至一个工厂）出发，通过状态识别，调节过程参数，分析过程中问题。它比优化、自适应控制范围更广，控制的边界条件要宽，并有分析及预报能力。机床自适应控制比制造过程监视与诊断早提出将近 10 年，迄今没有在生产中得到成功的应用，主要原因是根据单目标、确定性函数模型，或门限值(如切削力、功率)控制，它不能确切地反映加工过程的动态变化。

(2) 监视与诊断和在线检测补偿控制的关系：在线检测补偿是根据检测信号的幅值作为门限值进行补偿的，前述已知，机械加工过程是随机过程，原始信号的幅值并不能完整地描述动态过程的变化，如图 1·1 所示，监视诊断系统是将原始信号，经过特征分析，去伪存真，找出能反映工况状态的特征量，从许多特征量中，去粗取精，选择对工况状态反映敏感的特征量，构成模式空间进行状态分类。它是以过程的动态特性变化规律为基础，而不是以瞬间信号的幅值为依据，因此可以适应机械加工过程随机变化，并且可以考虑

全制造系统对单台机床设备的要求，达到总体优化的目的。

1.4 机械制造过程监视与诊断的内容

首先从自动化生产环境全面说明机械制造过程的监视与诊断的内容。

在 CIMS 生产系统中，车间、各类零件的制造系统、制造单元、机床设备、运输设备等都有其自身的计算机控制，它是一个多级计算机控制网络，监视与诊断系统是网络的组成部分。在网络各层次中，各子系统的职能不同，监视诊断的内容就有差别。例如一个自动化车间有 m 个制造系统(或单元)，每一个制造系统又有 n 台机床设备(图 1·2)。第一层 (T) 是基础设备监视诊断级，原则上每台设备都

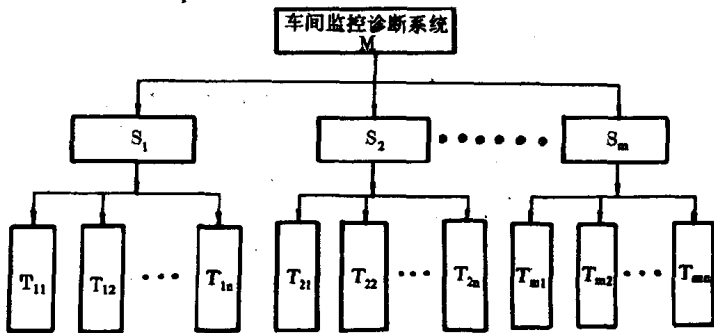


图 1·2 自动化生产车间监视诊断系统

备都应有各自的监视诊断系统，对于某些动作简单的设备也可采用集中监控。基础设备级是质量监控与过程监控的具体执行者，也是高层次监视诊断系统所需信息的提供者。它必