

序 一

先进制造技术是当前国内外的一个重点研究方向,是推动国防、汽车等基础工业发展的高新技术之一。加工过程自动化依然是先进制造技术的重要研究内容,由于加工过程的复杂性,依然存在许多有待解决的问题,如加工过程监控中的刀具状态检测。书中撰写的智能监控技术对提高加工质量、保证加工设备和工件具有重要的意义,是先进制造技术研究的一重要分支。

作者在前人的研究基础上,对加工过程监控技术作了系统的研究,尤其是对监控技术中的信号处理和模式识别作了深入的阐述。首先,系统地综述了加工过程中的监控技术研究现状,论述计算智能与监控技术的关系,指出智能监控的研究内容和关键。其二,对当前应用于监控技术的几种先进信号处理方法——时间序列方法和小波分析方法作了论述,前者为处理监控中平稳信号极为有效的方法之一;后者为处理监控中平稳和非平稳信号的有效方法,尤其对于非平稳信号。小波分析技术是当今信号处理的研究前沿,作者从应用背景深入浅出地论述了此技术。其三,模糊技术和神经技术是计算智能的核心内容,作者针对监控技术的相关计算智能方法作了阐述,对模糊神经技术提出了相应的模型。最后,作者结合自己的研究——自动化加工过程中的刀具状态智能监控,深入详细地介绍了自己如何应用上述理论方法解决智能监控中的关键性问题,同时也展现了所取得的成果,提供了有实用价值的程序。

该书的主要特点是理论方法和工程应用结合为一体,有理论深度,也有应用价值。读者能通过该书对智能监控技术中所用到的理论方法有更进一步的了解,同时也能借鉴作者的观点,运用上述理论方法解决一些实际的研究问题。我相信,此书对从事先进制造

技术研究,尤其从事其中的信号处理和模式识别的读者有所裨益;
同时,期待作者能更进一步地为我国的先进制造技术作出更大的
努力和贡献!

中国科学院院士 熊有伦 教授
1998年10月于华中理工大学

序 二

先进制造技术是一个国家民族振兴的最基础的技术之一,涉及到国防、汽车、航空航天等国家支柱工业。先进制造技术的最终目标是低成本、高速度、高质量地完成生产任务,其核心就是自动化加工技术。要保证自动化加工顺利地进行,关键的技术之一就是加工过程的监控。因此,加工过程的监控技术成为先进制造技术中的关键技术。

制造中的监控技术研究起源于 50 年代,随着计算机技术的发展,该研究领域极为活跃,尤其是智能技术的盛行,更为该研究提供了许多理论方法;同时,该方向的研究也推动了传感器技术、模式识别技术、信号处理技术和智能技术的发展。由于制造过程的复杂性,工作环境恶劣,传感器要求安装方便易行,抗干扰能力强;同时由当前单一传感器向多传感器集成方向发展,要求传感器有自校准、信号处理、决策、融合学习能力;制造过程中的信号信息量极为丰富,提取信号特征是一个极为关注的问题,当前正向时频分析(小波分析)、智能分析(神经网络,模糊,遗传算法)等方向发展;用模糊神经网络方法来识别制造过程中的信息是当前采用的主要方法。总之,先进制造中监控技术涉及多方面基础理论,是一交叉学科。

对制造过程进行监控,可以降低产品制造成本,减少制造环境的危害,保证产品质量,尤其是先进制造技术正在迅速发展,制造工艺更为复杂,自动化程度要求更高,因此对制造过程的监控显得更为重要。可见,对先进制造过程的监控具有重要的应用价值。国内在先进制造技术中广泛地开展智能技术的应用;同时在高校科研、知识普及方面也把智能技术应用作为一个主流方向。

本书汇集了国内外智能技术的主要内容,尤其与监控系统相

关的新理论、新方法,同时也融合作者近年来在该方面所取得的新成果。作者对监控系统中当前采用的信号处理方法和智能技术作了系统的介绍,同时考虑读者能看以致用,通过实例介绍如何运用这些方法,为读者解决实际问题提供参考。另外,提供了部分典型的程序,便于读者迅速地解决实际问题。

本书的主要内容:第一章引论中论述了先进制造技术的概念,监控技术与先进制造的关系,同时详细地介绍了智能监控技术的核心内容以及今后的发展。第二章论述了时间序列 AR 模型的基本理论和方法,同时对小波分析方法也作了较为详细的介绍。第三章介绍了模糊数学的基本知识,对模糊技术中常用的模糊模式识别和模糊聚类分析方法作了阐述。第四章主要介绍神经网络的基本特征以及 BP 算法,同时介绍了模糊系统与神经网络的关系以及模糊神经网络模型。第五章主要通过介绍作者如何运用上述方法解决刀具状态监控中的实际问题。

由于本书介绍的是一门新学科领域,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

CIRP 正式会员、中国高校金属切削研究会理事长、哈尔滨工业大学袁哲俊教授对本书的编写给予许多指导。中国科学院院士熊有伦教授在百忙之中为此书作序以至支持鼓励。在此,我们以崇敬的心情,衷心感谢这两位教授。同时,对科学出版社柴雨亭同志在出版中所给予的帮助表示感谢。本书又蒙国家自然科学基金资助,书中引用了著者课题组的部分成果,在此一并致谢!

李小隼 董 申

1998 年 4 月于哈尔滨工业大学

目 录

序一

序二

第一章 引论	(1)
§ 1.1 先进制造中的监控技术	(1)
1.1.1 先进制造技术	(1)
1.1.2 先进制造中的监控技术	(4)
§ 1.2 智能监控技术	(6)
1.2.1 计算智能与制造智能	(6)
1.2.2 监控系统的一般概述	(8)
1.2.3 智能监控技术	(10)
§ 1.3 加工过程智能监控关键性技术	(11)
1.3.1 智能传感器技术	(11)
1.3.2 信号处理技术	(13)
1.3.3 智能学习决策技术	(15)
§ 1.4 加工过程状态智能监控的主要内容及发展	(17)
1.4.1 智能监控技术的主要内容	(17)
1.4.2 智能监控技术的发展	(18)
第二章 信号处理技术	(20)
§ 2.1 时间序列分析方法	(20)
2.1.1 时间序列分析概述	(20)
2.1.2 时间序列分析的数学基础	(21)
2.1.3 AR 模型	(21)
2.1.4 AR 模型参数估计	(24)
2.1.5 AR 模型频谱分析	(31)
§ 2.2 小波分析技术	(34)
2.2.1 信号时频分析方法	(34)

2.2.2	短时傅里叶变换(STFT).....	(34)
2.2.3	小波分析	(37)
2.2.4	正交小波分析	(40)
2.2.5	小波包原理	(42)
2.2.6	基于小波包的信号特征提取	(45)
第三章	模糊技术	(47)
§ 3.1	模糊数学基本理论	(47)
3.1.1	模糊集合论的哲学基础	(47)
3.1.2	模糊集合的基本概念	(48)
§ 3.2	模糊模式识别.....	(52)
3.2.1	模式识别综述	(52)
3.2.2	何谓模糊模式识别	(54)
3.2.3	几个重要概念	(55)
3.2.4	模糊模式识别方法	(56)
§ 3.3	模糊聚类分析.....	(57)
3.3.1	模糊等价矩阵动态聚类分析法	(57)
3.3.2	模糊 ISODATA 聚类分析法	(59)
第四章	神经网络技术	(63)
§ 4.1	神经网络	(63)
4.1.1	神经网络的基本特征	(63)
4.1.2	BP 算法.....	(66)
§ 4.2	模糊神经网络.....	(69)
4.2.1	模糊系统与神经网络关系	(70)
4.2.2	模糊系统与神经网络融合方式	(70)
4.2.3	模糊神经网络模型	(71)
第五章	加工过程中刀具状态监控	(75)
§ 5.1	刀具状态监控主要方法	(75)
§ 5.2	基于时序分析刀具破损检测.....	(78)
§ 5.3	基于小波分析刀具破损检测.....	(82)
5.3.1	电流信号小波分析	(82)
5.3.2	刀具破损检测系统的研制	(91)

§ 5.4	基于电流信号刀具磨损状态识别	(92)
5.4.1	钻头磨损状态识别	(93)
5.4.2	镗刀磨损状态识别	(100)
§ 5.5	基于模糊神经网络刀具磨损状态识别	(108)
5.5.1	声发射信号分析	(108)
5.5.2	基于模糊神经网络的刀具磨损状态识别	(116)
§ 5.6	刀具磨损状态智能综合识别	(121)
5.6.1	扩展泰勒公式及刀具磨损状态估计	(122)
5.6.2	刀具磨损状态智能识别	(125)
附录 I	镗削实验数据	(132)
附录 II	常用智能软件程序	(134)
1.	AR 模型	(134)
2.	离散小波变换	(139)
3.	连续小波变换	(146)
4.	小波包变换	(152)
5.	模糊 ISODATA 聚类分析	(162)
6.	模糊神经网络	(167)
参考文献	(173)

第一章 引 论

§ 1.1 先进制造中的监控技术

1.1.1 先进制造技术

先进制造技术(AMT——Adanced Manufacturing Technology)是在制造系统和制造过程中有机融合并有效应用微电子、信息、管理等现代科学技术,优质、高效、低成本、及时地制造出市场需求的产品的先进工程技术的总称^[1]。当前,世界先进国家都在大力开展先进制造技术基础研究,尤其美国、日本、韩国、德国都在强化制造业的重要位置。制造业是国家经济发展的重要支柱之一,直接反映一个国家的综合实力、科技水平、生活水准及国防力量。自从二战以后,信息科学得到迅速发展,同时给全球制造业带来了新的变革,在技术方面主要的特点体现在:多学科交叉、系统化、自动化、智能化、精密、微细、高速化等方面。下面列出美、日、韩三国在先进制造技术的研究计划及其资金投入情况,如表 1-1 所示。

表 1-1 美国、日本、韩国的研究计划及资金投入

国别	实施时间	投资
美国 AMT 计划	1992 年 6 月	13.85 亿美元
日本的 IMS 计划	1990 年	10 亿美元
	1995 年	40 亿美元
韩国 G7 计划	1991 年 8 月	5.95 亿美元

先进制造技术主要包括如下方面的内容:

1.1.1.1 先进制造技术的基础理论

先进制造技术是在传统制造技术的基础上,利用计算机技术、控制技术、传感器技术与机、电、光一体化技术,形成一门新型充满活力的学科;加之系统科学融入制造过程,并贯穿整个制造系统,推出一系列新的设计、加工和管理新哲理,对制造过程中物质流、能量流和信息流三方面更为完整和全面地认识,形成信息制造观。人工智能的蓬勃发展,以人工智能为基础的计算智能正在制造领域中广泛应用,形成制造智能,使制造技术由劳动密集型向信息、知识密集型转化;另外,先进制造技术更强调多学科渗透,数学、物理、化学、材料科学、电子技术以及计算机科学和技术的新成果、新理论越来越多地运用于制造过程。总之,一门新的学科——制造科学正在崛起形成,其今后发展的基本内容主要包括:

(1)制造经验、技能的知识提取、表示、贮存、推理成为制造科学的关键之一;

(2)计算机科学和方法将更深入应用于CAD/CAM/CAPP、机器人学、智能检测和智能诊断等制造过程各环节;

(3)制造过程系统建模、仿真和优化,将会提出新型的制造哲理、制造模式和制造体系结构;

(4)产品设计、规划和制造过程中统一的几何表示与几何推理(包括设计、规划、加工、测量、装配等)应用,形成一门新的学科——计算机几何。

1.1.1.2 现代设计理论和方法

产品设计是制造业的“灵魂”。产品设计在先进制造技术的背景下具有新的特点:

- 1)面向市场、用户设计;
- 2)全寿命周期设计;
- 3)面对时变对象,适用于复杂系统;
- 4)设计对象步入新的领域;
- 5)设计支持和投入需求较高。

现代设计理论和方法主要研究领域包括:知识获取,信息融

合,产品建模,工程综合优化理论,面向并行设计和虚拟制造的设计支持系统。

1.1.1.3 成形制造

成形制造技术是铸造、焊接、塑性加工、热处理、粉末冶金等单元技术的总称,是先进制造技术的重要组成部分。成形制造技术正向精确成型制造和工艺方向发展,计算机模拟仿真技术正进入应用化阶段。

1.1.1.4 加工制造

加工制造是先进制造技术的基层作业,是先进制造系统中最基本最活跃的环节。进入90年代后,加工制造技术的热点和发展大致如下:

- (1)CAD/CAM 集成的柔性,无图纸制造技术;
- (2)柔性快速制造技术等制造信息分布集成技术;
- (3)精密、超精密加工技术、特种加工技术与超高速切削、磨削技术;
- (4)微米/纳米加工技术;
- (5)智能化多功能加工中心,加工单元与新一代制造装备;
- (6)制造系统建模仿真与虚拟制造;
- (7)敏捷制造模式与并行工程、质量工程与产品数据管理系统建造;
- (8)成形工业技术;
- (9)少无污染制造技术与用弃产品的可拆卸重组技术。

1.1.1.5 制造自动化

制造自动化是先进制造技术的主要标志之一。制造自动化将向柔性化、智能化、集成化、全球化方向发展,其总体目标是要达到快速设计、快速制造、快速检测和快速重组。制造自动化关键性技术基础如下:

- (1)并行工程环境下CAD/CAM 一体化技术;
- (2)面向自动化的虚拟制造技术;
- (3)制造过程监测与诊断技术;

(4) 机器人化制造技术。

1.1.1.6 先进制造生产模式与管理

先进制造生产模式主要包括三类：柔性生产或智能制造、精益生产和敏捷制造。柔性生产主要依靠有高度柔性的以计算机数控机床为主的制造设备来实现多品种小批量的生产。智能制造是指应用智能制造技术和智能制造系统的制造生产模式。上述两者都是为实现制造生产的自动化，前者为操作自动化，后者为决策自动化。精益生产是日本丰田生产方式，其目标是要以具有最优质量和最低成本的产品，对市场需求作出最迅速的响应。其基本原则是：无浪费和不断改善。敏捷制造是以柔性生产技术和动态组织结构为特点，以高素质协同良好的工作人员为核心，实行企业间网络集成，形成快速响应市场的社会化制造体系^[2]。

1.1.2 先进制造中的监控技术

制造过程的工况监测与故障诊断的目标是对生产过程中产生的各种信息进行获取、传输、处理、分析和应用，确保制造自动化生产和精密生产高效、合格地进行，实现无废品生产。先进制造过程中主要靠生产设备自身所具有的完善的自监视、自诊断及自动控制、补偿功能、故障自动排除功能来保证不出废品，而不是事后检验剔除废品。先进制造过程中监控系统一定得与制造自动化、智能化、柔性化及集成化相适应，是一通用型模块化、集成化、智能化的具备自主学习训练与自适应调整功能的多传感器、多参数、多模型综合决策系统。先进制造中的监控技术是集传感技术、计算机视觉、图像处理、信号处理、自动控制等为一体的综合性技术。

对先进制造技术中制造自动化加工过程监控的主要目的在于^[3]：

- (1) 保证加工系统的安全运行；
- (2) 保证加工工件质量；
- (3) 保证加工设备避免受到损坏；
- (4) 减少加工辅助工作时间，提高生产率；

(5)对资源进行优化使用。

综合当前加工过程监控所开展的研究工作,主要包括如下方面:

- (1)机床状态监控;
- (2)刀具状态监控;
- (3)加工过程监控;
- (4)加工工件质量监控。

详细概要如下:

①机床状态监控 { 机床主轴部件监控
机床导轨部件监控
机床伺服驱动系统监控
机床动态特性监控
机床磨损状态监控

②刀具状态监控 { 刀具破损状态监控
刀具磨损状态监控
刀具型号识别
刀具自动调整
刀具补偿
刀具寿命管理

③加工过程监控 { 加工状态监控
加工过程振动监控
加工中力监控
加工中温度监控
加工中自适应监控
加工工序识别
冷却润滑系统监控

- ④加工工件质量监控
- 工件尺寸精度监控
 - 工件形状精度监控
 - 工件表面粗糙度监控
 - 工件安装定位监控
 - 工件识别

先进制造技术的发展,对制造过程和产品质量监控技术提出新的要求,面临的主要问题包括:

- (1)先进制造中多品种小批量生产,导致加工过程中工况频繁变化;
- (2)先进制造中信息量较大且繁杂,难以提取出特征信息;
- (3)先进制造其柔性要求较高,决策复杂,决策更要求准确迅速;
- (4)先进制造要求监控系统能与制造系统有效集成,提高制造系统的可靠性。

随着先进制造技术的发展,加工过程监控系统与之适应应具备一些新的功能和特点,主要特点如下:

- (1)多传感器获取更多的信息;
- (2)高鲁棒性监控系统适应频繁工况;
- (3)具有自组织、自学习和自适应能力,适应加工过程的变化;
- (4)多功能多目标监控,并行监控加工过程中的不同状态;
- (5)具有高柔性化且可扩展;
- (6)集成化制造过程监控。

§ 1.2 智能监控技术

1.2.1 计算智能与制造智能

计算机辅助制造系统(CAM),随着人工智能技术的发展,正向智能制造系统发展。智能制造系统将具备在不完全和不精确信息下解决前所未有或不可预见问题的能力。1990年日本通产省首

先提出了智能制造系统(IMS),其结构示意图如图 1.1 所示。总地来讲,IMS 的研究包括如下三方面内容:

- (1)将当前制造技术系统化,包括产品设计技术和产品加工、装配技术等;
- (2)对现有技术标准化,包括制造数据的压缩、传递和储存的标准化,以及物流管理技术的标准化;
- (3)先进制造系统的研究开发,包括系统管理技术,设计、加工和装配技术,以及制造系统体系结构。

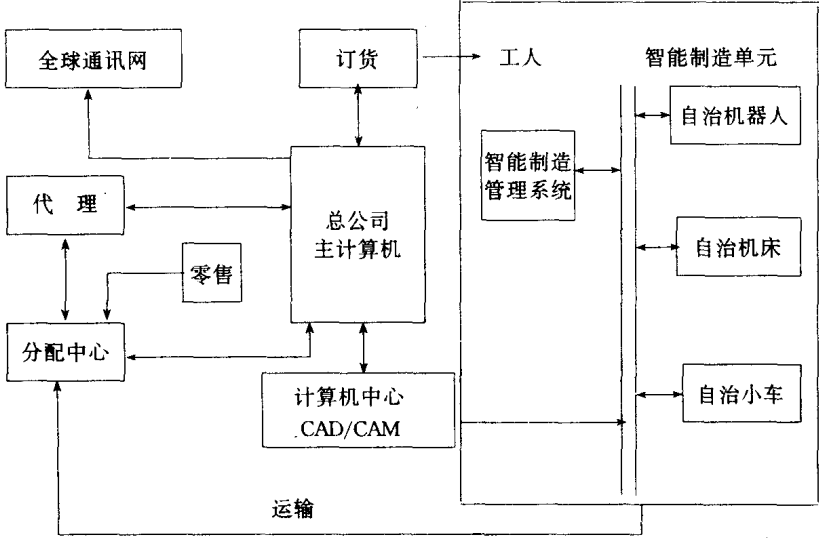


图 1.1 智能制造系统

人工智能自 50 年代以来,其许多技术广泛地应用于制造,例如基于专家系统的机床自适应控制。最先的智能行为体现在计算机的符号推理,即专家系统。专家系统对人类思维的一般规律研究转为知识的研究,主要研究知识的表示、知识的获取和基于知识推理技术,形成知识工程学科。大量的应用专家系统开发实践证实了专家系统是人工智能应用的重要部分,但其是建立在符号推理的基础之上的,有其内在的不足之处,主要表现在:专家系统的建立需要相关的专家存在;专家必须明确回答专家系统提出的问题,导

致一些模糊或不一致的描述无法明确。要求所建规则必须正确、一致；针对一些复杂的问题，专家系统的开发时间需要较长时间，适应性差，当问题稍有不明确，就会出现大偏差；另外大专家系统运行起来时间过长而满足不了实时性。总之，专家系统存在对领域专家的依赖性、知识获取的困难以及解决问题的灵活性等无法克服的困难，还有开发成的专家系统通用性也较差。

为了克服基于知识的人工智能缺点，人工智能的最新研究已向计算智能(Computational Intelligence)方向发展。计算智能研究较为成功的有模糊逻辑(FL)、人工神经网络(ANN)、基因算法(GA)以及模拟退火算法(SA)。这些人工智能的处理方式是基于数值计算，其灵活性、通用性及严密性明显优于基于知识的人工智能。

人工智能在产品制造过程各个环节的应用产生了制造智能。制造智能具体表现为：智能设计、智能装配、机器人操作、智能加工、智能控制、智能工艺规划、智能调度、智能测量和诊断等。

计算智能在制造领域有其较专家系统优越的方面，计算智能主要包括以下方面的研究：模糊技术、人工神经网络、遗传算法和模拟退火等。在下一章将对模糊技术和人工神经网络技术作详细介绍。

1.2.2 监控系统的一般概述

机械加工过程是一个复杂的物理、化学过程，对加工过程的在线监控涉及很多相关技术，如：传感器技术、信号处理技术、计算机技术、自动控制技术、人工智能技术以及切削机理。一般的加工过程监控系统主要由信号检测、特征提取、状态识别、决策和控制四个部分组成，如图 1.2 所示。

1.2.2.1 信号检测

信号检测是监控系统的首要一步，加工过程的许多状态信号从不同角度反映加工状态的变化。可见，信号检测直接决定监控系统成败。加工过程中常见的被检测信号包括：切削力、切削功率/电

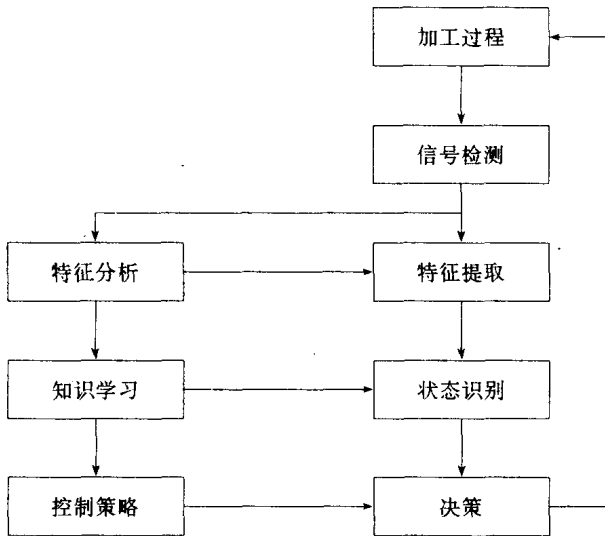


图 1.2 加工过程监控系统一般结构

流、声发射信号(AE)、振动信号、切削温度、切削参数、切削扭矩等。一般要求监控信号应具备能迅速准确地反映加工状态的变化,便于在线测量,不改变加工系统结构,被检测信号影响因素少,抗干扰能力强等特点。

1.2.2.2 特征提取

特征提取是对检测信号的进一步加工处理,从大量信号中提取出与加工状态变化相关的参数,目的在于提高信号的信噪比,提高系统的抗干扰能力。目前采用的方法主要有时域方法(均值、滤波、差值、相关系数、导数值等)、频域方法(FFT、功率谱、谱能量、倒频谱)和时频分析方法(短时FFT、维格分布、小波分析)。提取特征参数的品质对监控系统的性能和可靠性具有很重要的影响作用。

1.2.2.3 状态识别

状态识别实质上是通过建立合理的模型,根据所获取的特征参数对加工过程的状态进行分类判断。从数学角度来理解就是特征参数与加工过程状态的映射,其核心是模型。当前采用建模的主要方法有统计方法、模式识别、专家系统、模糊推理判断、神经网络