

INTELLIGENT MACHINING TECHNOLOGY



智能加工技术

邓力凡 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能加工技术

邓力凡 编著

站在现代制造技术的前沿，把握未来最新发展趋势



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

智能加工技术/邓力凡编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2015. 2
ISBN 978 - 7 - 5682 - 0159 - 9

I. ①智… II. ①邓… III. ①智能控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 005485 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
82562903 (教材售后服务热线)
68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 7.25

字 数 / 116 千字

版 次 / 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 29.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

前 言

2008 年全球金融危机对各国的制造业造成了不同程度的冲击,为了应对危机,世界上主要的制造业国家密集出台了一系列制造业振兴战略,瞄准产业新的制高点。与此同时,新一轮的科技革命和产业变革正在兴起,高度发展的信息技术、互联网技术与制造业的深度融合,促使制造技术呈现出数字化、智能化和网络化的特点。这些新情况、新形势要求我们务必以新的视角来观察和研究制造技术。相关的基础共性技术逐渐成为新的技术高地,发达国家正在加快布局,如美国政府部署制造业创新网络,德国政府提出工业 4.0 战略,千方百计加快这些技术的商业化。对于我国制造业而言,一方面要加快解决传统领域中的基础共性技术发展不足所带来的瓶颈制约;另一方面要重点突破数字化制造领域的基础共性技术,构建新的竞争优势。

金融危机之后,再工业化成为美国的战略选择,美国重振制造业成为全球热议的话题;而美国制造业衰落的本质原因是制造业的外包及本地投资不足导致产业耕地的“贫瘠”,进而导致产业生态系统的衰落。自 2013 年以来,国内制造业也出现了不同程度的下滑,一方面与宏观经济有关,但更重要的原因是自身内功不足。特别是在基础共性技术上与发达国家的差距较大(如数控系统、高速丝杠、电主轴、精密轴承等),发达国家以数字化、智能化和网络化为主要特征的第三次工业革命早已开始。我们应面对现实,奋起直追,首先我们要了解这次工业革命的技术特点、发展态势、研究开发的层次等。

为此,作者通过多渠道、多方面的收集和自己的体会及实践总结,编写了这本介绍当今已发生的、正在研究开发的、将出现的当代最新加工技术——智能加工技术。本书首先简明介绍了智能加工的原理。其次介绍了智能加工采用的相关技术。最后提出了智能加工有待攻克的难题(即理论基础与现实)及展望。

本书既可作为大学本科制造加工类专业的参考教材,也可作为专科(高职)相关专业的选修教材,还可作为企业产品工程师、制造工程师以及相关科研人员的参考用书。

由于时间仓促及作者水平有限，书中难免有不正确之处，敬请相关专家、学者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 智能加工概述	4
一、智能加工问题的提出	4
二、智能加工的概念	4
第 2 章 智能加工技术的基础	6
一、智能加工的自动化、复合化	6
二、数控系统的智能化	14
三、智能加工的 CAD/CAM	18
四、智能加工的主动感知与判断	27
五、智能加工的自适应控制	31
六、智能加工的 FMC/FMS	36
七、智能加工的高速加工	39
八、智能加工的工艺规划	42
九、3D 打印技术	46
十、智能加工的刀具	49
十一、智能加工的新方法	54
第 3 章 数控机床与机器人及自动化工厂	56
一、人机工程	56
二、机器人	57
三、工厂自动化	58
四、国外工业机器人的前沿技术	66
五、国内外数控机床用机器人的研究现状	70
六、小结	75
第 4 章 智能加工的理论基础	76
一、加工过程中的随机变量	76

二、机床的稳定性	79
三、机床主轴的新校核算法	83
四、数控系统的控制器	86
五、电主轴的关键技术	89
六、切削机器人的设计方法	93
七、最新的精加工工艺——基于 CD 磨削方法的高效磨削技术	96
八、小结	100
第 5 章 智能加工的发展趋势	101
一、技术层面	101
二、政策层面	102
附录 智能加工的出路	105
参考文献	107

绪 论

人类成为“现代人”的标志就是制造工具，石器时代的各种石斧、石锤和木质、皮质的简单粗糙的工具是后来出现的机械的先驱。从制造简单工具演进到制造由多个零件、部件组成的现代机械，经历了漫长的过程。15—16世纪，机械工程发展缓慢，但在以千年计的实践中，在机械发展方面还是积累了相当多的经验和知识，成为后来机械工程发展的重要潜力。18世纪后期，蒸汽机的应用从采矿业推广到纺织、面粉、冶金等行业，制造机械的主要材料逐渐从木材改用更为坚韧，但难以用手工加工的金属，机械制造业开始形成，并经几十年的发展而成为一个重要产业。机械工程通过不断扩大实践，从分散性的、主要依赖匠师们个人才智和手艺的一种技艺，逐渐发展成为一门有理论指导的、系统的和独立的工程技术。机械工程是促成18—19世纪的工业革命，以及资本主义机械大生产的主要技术因素。20世纪初，电动机已在工业生产中取代了蒸汽机，成为驱动各种工作机械的基本动力。生产的机械化已离不开电气化，而电气化通过机械化才能对生产发挥作用。

机械加工虽然从产生到现在已有几百年的历史，但它仍是获得精密零件的主要方法，到目前为止，机械加工仍然是机械制造中的一种重要手段。机械加工经历了：木制零件加工→金属零件加工的不同形式，皮带机床加工→金属零件传动的机床加工→普通的机电液气机床加工→数控加工→智能加工的不同发展阶段。机械加工是在机械技术、材料技术、刀具技术、电子技术、控制论、计算机技术、机器人技术的基础上发展起来的。

现代机械加工制造业是一个应用现代化智能技术较为广泛的行业，其生产过程是一个利用高科技信息技术手段不断改进和提高自动化生产水平的过程。当前的机械加工制造业广泛采用智能化设备进行加工生产，正是因为智能化的融入才提升了机械加工自动化生产的质量和水平。智能化是现代机械加工行业最明显的技术标志之一，它将引领未来新兴产品的研发、制造并普遍应用于人们的生产、生活中，这是社会科学的发展趋势。随着社会的不断发展，我国的机械制造加工行业普遍进行了企业内部的产品结构调整，这是因为市场经济发展发生变化后影响着消费需求也发生了相应的变化，但是所有企业都有一个共同点，那就是它们所选择加工生产的产品都是带有智能信息技术的机电一体化智能产品。

智能制造技术已成为世界制造业发展的必然趋势，世界上主要工业发达国家正在大力推广和应用智能制造技术。发展智能制造既符合我国制造业发展的内在要求，也是重塑我国制造业新优势、实现转型升级的必然选择，应该提升到国家战略的高度。实现制造业升级的内在要求：一是实现我国制造业高端化的重要路径，二是加速智能制造技术进步的内在要求。

重塑制造业新优势的现实需要：一是应对“双重挤压”挑战的必然选择；二是加快我国智能制造技术产业化的客观需要；三是破解能源、资源和环境约束，实现节能减排目标的有力手段，也是拓宽产业施政空间的重要抓手。分析我国已出台的促进智能制造发展的规划和政策可以发现，目前将重点放在智能制造技术及智能制造装备产业发展方面，而智能制造是将智能制造技术贯穿于产品的设计、生产、管理和服务的制造活动全过程，不仅包括智能制造装备，还包括智能制造服务。因此，要促进智能制造的发展，应从智能制造技术、智能制造装备、智能制造服务等诸多领域加以规划和加大政策扶持。

自 20 世纪 80 年代末智能制造提出以来，世界各国对智能制造系统进行了各种研究，首先是对智能制造技术的研究，然后为了满足经济全球化和社会产品需求的变化，智能制造技术集成应用的环境——智能制造系统被提出来。日本于 1989 年提出智能制造系统，并于 1994 年启动了先进制造国际合作研究项目。美国于 1992 年执行新技术政策，大力支持包括信息技术、新制造工艺和智能制造技术在内的关键重大技术。欧盟于 1994 年启动新的研发项目，选择了 39 项核心技术，其中的信息技术、分子生物学和先进制造技术均突出了智能制造技术的地位。近年来，各国除了对智能制造基础技术进行研究外，更多的是进行国际的合作研究。

我国智能制造发展战略与对策：

1. 战略思路

按照“市场主导、创新突破、引领产业”的发展思路，前瞻布局核心智能制造技术、着力提升智能部件产业化、重点突破智能制造装备集成及工业软件创新，全面普及制造过程数控化、智能化与管理信息化。

2. 发展目标

基于我国现有的产业基础及技术水平，智能制造的发展可分两步走：到 2020 年，制造业基本普及数控化，实现重点领域智能制造装备尤其是高端数控机床及工业机器人的产业化与应用；到 2030 年，制造业全面实现数字化，在制造业重点领域推进智能制造模式的转变，形成与世界工业发达国家在高端制造领域全面抗衡的能力。

3. 发展重点

① 关键智能基础共性技术。围绕感知、决策和执行等智能功能的实现，

针对测控装置、部件和重大智能制造成套装备的开发和应用,突破新型传感原理和工艺、高精度运动控制、高可靠智能控制、工业通信网络安全、健康维护诊断等一批共性、基础关键智能技术,为实现制造装备和制造过程的智能化提供技术支撑。

② 核心智能测控装置与部件。围绕重大智能制造成套装备研发以及智能制造技术的推广应用,开发机器人、感知系统、智能仪表等典型的智能测控装置和部件并实现产业化。在充分利用现有技术和产品的基础上,进一步实现智能化、网络化,形成对智能制造装备产业发展的有力支撑。

③ 重大智能制造成套装备。突出制造业所需装备,针对石油化工、冶金、建材、机械加工、食品加工、纺织、造纸印刷等制造业生产过程数字化、柔性化、智能化的需要,发挥产学研用相结合的创新机制,依托有明确需求的用户,组织“产、学、研、用”共同参与的创新团队,推动软硬件在数控/工业控制装备中的应用与推广,通过集成创新,开发一批标志性的重大智能制造成套装备,保障产业转型升级,并结合国家重大工程建设,推进示范应用,加快产业化。

④ 重点应用示范领域。根据我国智能制造技术和智能测控装置的发展水平,立足制造业,在“十二五”期间重点选择在电力、节能环保、农业、资源开采、国防军工等国民经济重点领域推广应用,分步骤、分层次开展应用示范,形成通用性、标准化、知识产权的应用平台,加快推进产业、技术与应用协同发展。

第1章 智能加工概述

一、智能加工问题的提出

在数控加工的过程中，并非一直处于理想状态，而是伴随着材料的切除出现多种复杂的物理现象（如爬行、振动、变形）。加工过程中出现的问题是：利用零件模型生成正确的加工程序，并不一定就能加工出合格的优质零件。正是由于上述各种复杂的物理现象及加工过程中出现的问题，导致加工精度不能满足要求。在产品的生产制造过程中，一旦工艺设计不合理，就会导致零件的加工质量差，机床的加工能力得不到发挥，特别是制造系统的很多物理及力学特性（如惯性、间隙等）没有受到重视和考虑，出现一些难以控制的结果，如加工出的零件误差大，其原因是把工艺系统简化为线性系统，忽略了工艺系统的实际工况。机床零部件间的间隙、摩擦、阻尼迟滞等非线性因素将使工艺系统处于混沌现象，从而影响了工艺系统的灵敏性和稳定性，最终出现无法控制的加工误差。为了解决这些问题，我们要从系统和控制这两个角度来分析，对加工过程的状况及时感知和预测，从而对加工过程进行随时评估和调整。

二、智能加工的概念

智能加工是将制造技术与数字技术、智能技术、网络技术集成应用于设计、生产、管理和服务的全生命周期，在制造过程中进行感知、分析、推理、决策与控制，实现产品需求的动态响应、新产品的迅速开发以及对生产和供应链网络实时优化的制造活动的总称，可分为智能设计、智能生产加工、智能管理、智能制造服务4个关键环节。

从表面上看，智能加工是一种自动化、复合化的加工，实际上是借助先进的机床、刀具、夹具及检测、控制手段，实现对加工过程的主动感知和实时判断，用最优的工艺方法和手段获得最优的加工性能和加工质量。简单地说，智能加工是以数字信息为传递介质，以主动在线感知为手段，以先进的自适应控制为大脑神经的加工方法。

智能加工具有以下特点：

① 自动化、复合化。

② 主动检测感知。

③ 主动调整参数（几何参数、切削参数、物理参数）和主动调整机床、刀具、夹具，以得到最优的输出，即自适应控制。

④ 高灵敏性、高响应速度、强抗扰性、高柔性。

以往及现有（数控加工、先进加工等）加工都是基于确定性的理论，即如果对一个确定性动力系统施加确定性的输入，该系统的输出必然具有确定性，这就是 Laplace 提出的确定论思想。但是，现实生产制造过程中，即使输入最优的参数，利用最好的机床、刀具、夹具，有时还是会得到超出设定的结果，这就是机械专家不断地研究加工与制造的原因。智能加工就是为了解决加工精度和成本问题而发展起来的新兴加工技术。正是由于机床工具、机器人、电子信息、控制论的不断发展，为智能加工的发展奠定了基础。

第2章 智能加工技术的基础

智能加工技术的创新及应用贯穿制造业的全过程，先进制造技术的加速融合使得制造业的设计、生产、管理、服务各个环节日趋智能化。智能加工正引领新一轮的制造业革命，主要体现在以下4个方面：一是建模与仿真使产品设计日趋智能化；二是以工业机器人为代表的智能制造装备在生产过程中的应用日趋广泛；三是全球供应链管理创新加速；四是智能服务业模式加速形成。

智能加工的关键技术体现在以下几个方面：

- ① 智能加工的自动化、复合化；
- ② 数控系统的智能化；
- ③ 智能加工的 CAD/CAM；
- ④ 智能加工的主动感知与判断；
- ⑤ 智能加工的自适应控制；
- ⑥ 智能加工的 FMC/FMS；
- ⑦ 智能加工的高速加工；
- ⑧ 智能加工的工艺规划；
- ⑨ 3D 打印技术；
- ⑩ 智能加工的刀具；
- ⑪ 智能加工的新方法。

一、智能加工的自动化、复合化

1. 自动化生产

自动化生产是人类生产活动中的一种先进、完善的高级生产形式，是科学技术不断进步和生产高度发展的产物，也是人类向往和期待的一种理想生产形式。自动化生产时，各种高生产效率的机械设备代替了人类繁重的体力劳动，各种自动控制装置、仪器、计算机代替了人的操纵管理和部分脑力劳动，整个生产过程可以在无人参与下，自动按最佳状态连续进行生产，简要表示为：机械化、自动化机械设备→人的部分脑力劳动。

自动化生产经历了：

- ① 机床的变革：机械传动（皮带、齿轮、蜗轮蜗杆、离合器等传动）→

液压和气体传动→伺服传动→直接驱动的演变。

② 刀具的变革：整体式→焊接式→机夹可转位式；特别是刀具材料的变革：高速钢→硬质合金→陶瓷→CBN。

③ 电气控制和传感技术的变革。

每次进步都使加工精度提高、加工成本降低，所以，自动化加工是依赖工艺系统的进步作为支撑的。

2. 复合加工

复合加工是指在柔性自动化的数控加工条件下，当工件在机床上一次装夹后，能自动进行同一类工艺方法的多工序加工（如同属切削工艺的车、铣、钻、镗等加工）或者不同类工艺方法的多工序加工（如切削加工和激光加工），从而能在一台机床上顺序地完成工件的全部或大部分加工工序。复合加工机床一般具有以下4个特征：

- ① 设置较少，有时甚至是一次性的；
- ② 复杂工件能在同一台机床上加工，无须多台机床；
- ③ 减少工件的装夹次数；
- ④ 加工现场机床设备数量减少，不需要在设备上投入很多。

复合加工机床的功能是从以下两个方面实现的：

① 设计的机床能进行一道以上的加工工序，现在，有些机床能提供铣削、钻削、攻丝、车削、磨削、焊接和调平等多种功能；

② 通过加速工件装夹速度来使机床提高产出，这主要是通过单台机床或单元内增加机器人或工件夹持机构来实现的。

3. 数控加工

相对于普通加工，数控加工的加工过程是自动化的，数控加工将零件的几何信息、工艺信息用规定的代码编成程序，用程序来控制加工过程，但很多数控机床辅助过程（装料、夹紧、卸料、换刀、测量）还是手动。数控加工的工序比较单一（如数控车、数控铣、数控磨等）；而智能加工是在数控加工的基础上发展起来的，运用机械手或机器人使所有过程都是自动化的，并在一台数控机床或几台数控机床连续完成几道工序的全自动化的加工。

4. 实际应用举例

（1）活塞环全自动成型磨床

3MK8116 全自动活塞环外圆成型磨床是新近设计投产的数控磨床，主要用于精加工磨削 $\phi 60 \sim \phi 160$ 活塞环外圆锥面或沟槽等外圆成型面。目前，活塞环生产厂家使用的全自动数控活塞环外圆成型磨床主要有两轴数控和五轴数控两种机床。两轴数控机床（如 R-5）的数控坐标运动为砂轮架进给及修整器纵向进给；五轴数控机床（如 R-7）的数控坐标运动为砂轮架横向移

动, 砂轮架纵向进给及修整器纵、横向进给, 头架伺服驱动。

3MK8116 全自动活塞环外圆成型磨床采用 FANUC 或 SIEMENS 系统, 是五轴四坐标数控机床 (见图 2-1), 即砂轮架横向移动坐标、砂轮架纵向进给坐标、修整器横向进给坐标及修整器纵向进给坐标头架伺服驱动。修整器可以两轴联动仿形修整, 通过程序设定即可联动插补走出所需型线, 无须靠模成型。装料采用力矩电动机通过 V 形导轨送料, 而卸料采用机械手 (见图 2-2) 实现全自动。

可见, 自动化是通过数控伺服、数控系统、检测及传感装置、机械本体、机械手、液压及气动等装置, 以及数控的轴数来实现的。

(2) 活塞环的珩磨与清洗加工

如图 2-3 所示为四轴数控活塞环的珩磨与清洗复合加工机床, 单台珩磨加工的生产节拍 (即生产效率) 可随时调节。它采用伺服驱动控制和液压控制以及两个机械手 (见图 2-4), 能一次在料仓中装满 270 ~ 540 mm 堆高的活塞环; 能自动准确地下、送料, 装、卸压板和螺母, 以及出料, 从而实现加工和辅助运动的全自动。单台珩磨机装满一次料, 自动加工的时间为: 1 桶料珩 2 ~ 3 min, 完成所有环的珩磨 6 ~ 9 min。这期间不需要人操作, 所以, 料仓装料 0.5 min, 清洗出料 0.5 min; 1 个操作工在单台珩磨机上仅需操作 1.0 ~ 1.5 min, 故 1 个操作工操作 4 台这种新珩磨机是很轻松的——效率高、自动化程度高, 实现了珩磨和清洗两工序的集成。

显然, 把许多加工工序集中到一台机床上完成, 不仅消除了分散加工时间、工件在各工序流通过程中的运输和等待时间, 相应缩短了工件的加工周期和减少车间的在制品数量, 而且由于工件不需要在不同 (或同一) 机床上重新定位装夹, 从而既减少了加工辅助时间, 又提高了工件的加工精度, 特别是形位精度。自数控机床发明以来, 复合加工便是其重要的技术发展方向之一。

(3) 双主轴车削中心

如图 2-5 所示五轴数控双主轴车削中心, 配置了六轴数控的上下料机器人, 这种双主轴车削中心特别适合活塞、齿轮等零件的复合加工, 它能完成活塞、齿轮的多道车、钻工序。活塞是汽车发动机里的一个重要零件, 属于薄壁回转类零件, 刚性差而要求尺寸精度高及表面粗糙度小, 各表面相互位置有较高要求。加工活塞有利于基于复合加工的双主轴车削中心的加工性能的发挥。

其加工循环和夹持方式是:

- ① 夹活塞顶部外圆, 车止口;
- ② 夹止口, 车顶部、活塞顶部外圆, 切环槽, 数控仿形车裙部椭圆;
- ③ 钻油孔, 铣直通槽 (在 1 台双主轴车削中心上完成)。

