

数控铣削 加工过程仿真与优化

——建模、算法与工程应用

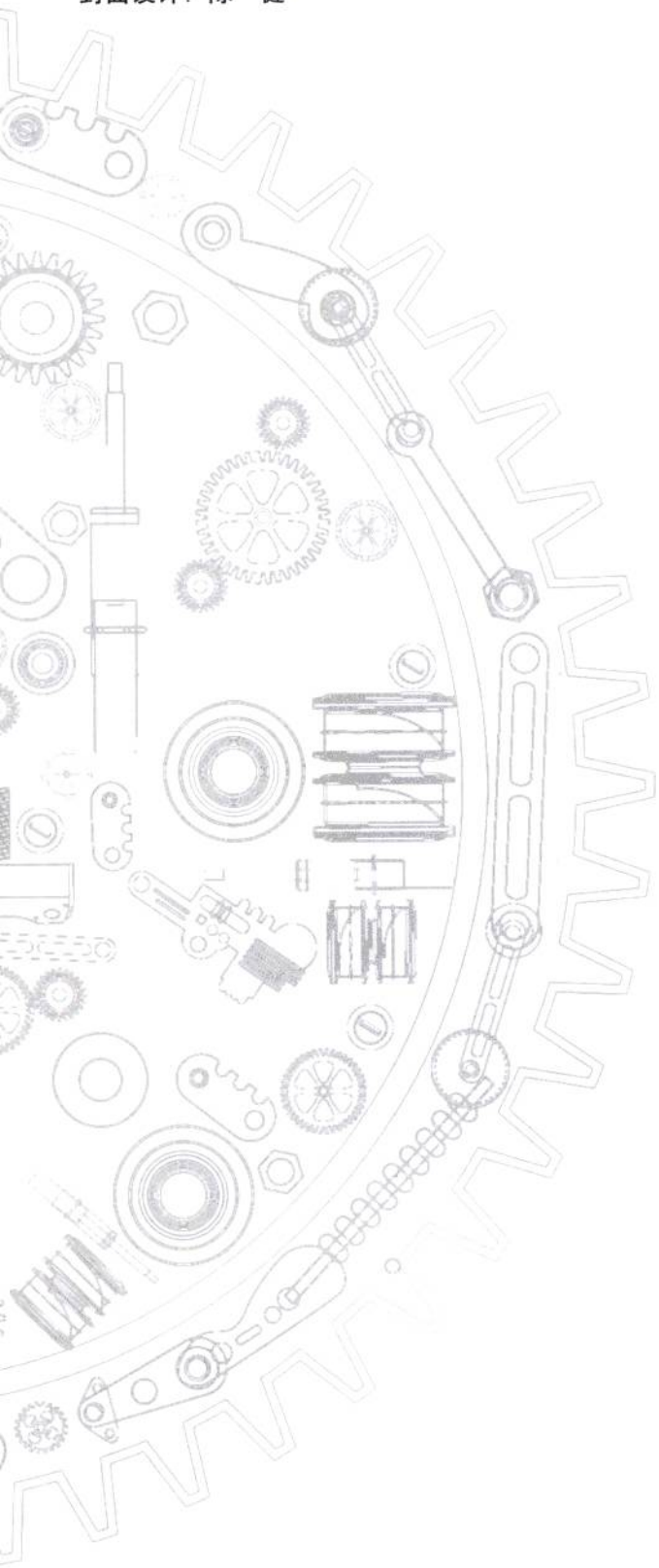
SIMULATION AND OPTIMIZATION
OF CNC MILLING PROCESS
—Modeling, Algorithms and Applications

© 刘 强 李忠群 编著

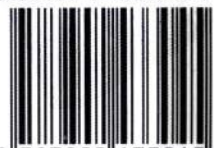
航空工业出版社

责任编辑：郭倩旋

封面设计：陈 健



ISBN 978-7-80243-304-5



9 787802 433045 >

定价：50.00元

数控铣削加工过程仿真与优化

——建模、算法与工程应用

刘 强 李忠群 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书围绕高性能数控切削加工过程及仿真、切削参数优化技术这条主线,重点介绍了铣削加工过程的切削力学/动力学建模理论与仿真算法、数控机床动力学特性参数辨识方法与测试技术、切削参数优化原理与应用、切削参数数据库构建方法等内容,并结合“X-Cut”和“e-Cutting”系列数控铣削加工动力学仿真优化系统,给出了多个工程应用实例。书中内容既包括切削理论及动力学基本原理,又涉及国内外高性能数控加工技术的最新研究进展和成果,还有具体实际应用指导作用。

本书可供机械制造专业尤其是数控加工技术方向的本科生、研究生做教科书或参考书使用,也可供相关专业的工程技术人员、数控工艺及编程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控铣削加工过程仿真与优化:建模、算法与工程应用/刘强,李忠群编著. --北京:航空工业出版社, 2011.7

ISBN 978-7-80243-304-5

I. 数… II. ①刘…②李… III. 数控机床:铣床—金属切削—加工 IV. ①TG547

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第135216号

数控铣削加工过程仿真与优化——建模、算法与工程应用
Shukong Xixiao Jiagong Guocheng Fangzhen yu Youhua
——Jianmo、Suanfa yu Gongcheng Yingyong

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011年7月第1版

2011年7月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:16 字数:386千字

印数:1—9000

定价:50.00元

序

人类进入 21 世纪, 制造技术从先进制造已开始发展到高端制造。数控机床是代表一个国家制造技术能力和水平重要的高端制造装备, 已在航空、航天、汽车、能源、模具和电子等制造行业得到广泛应用, 并呈现出“高速化、复合化、高效化、智能化”等发展趋势。随着复杂产品零件对切削加工的精度、效率和成本以及环境友好性等方面要求越来越高, 采用数控机床实现高性能切削加工 (High Performance Cutting) 已成为现代制造业必不可少的手段, 而数控切削过程仿真、加工工艺与参数优化则是支持实现高性能数控切削加工应用的关键技术。

在切削加工技术发展过程中, 人们对切削加工过程中的力学、动力学建模和切削参数优化问题的深入研究可以追溯到 20 世纪早期和中期, 从美国的 F. W. 泰勒 (F. W. Taylor) 提出沿用至今的刀具寿命公式, 到 M. E. 麦钱特 (M. E. Merchant) 首次采用解析方法研究切削模型问题, 再到 J. 特卢斯托夫斯基 (J. Tlustý) 和 S. A. 托拜厄斯 (S. A. Tobias) 研究机床颤振的机理, 开创机床动力学研究的先河, 以及后来 P. 奥克斯利 (P. Oxley) 在切削力学的解析研究方面开展深入全面的研究, 师汉民教授在金属切削基础理论及应用进行新的探索等, 国内外的一批学者积极开展和推动了切削理论研究和工程应用实践, 取得了令人瞩目的成果。近 20 年来随着高速数控机床的出现和高速切削进入实际应用, 进一步激发起人们研究高速加工中许多不同于常规切削的现象和规律的兴趣, 使得切削力学和动力学研究再次成为数控加工领域的热点, 此外, 借助于计算机建模仿真技术, 数控切削过程的物理仿真、虚拟加工等也已不再是纸上谈兵, 而是可以将理论、仿真研究与工程应用紧密结合, 从而使得数控加工过程切削力学、动力学的研究应用进入一个新阶段。

近 10 年来, 刘强教授带领他的研究团队一直致力于数控切削过程建模与仿真、切削参数优化技术的研究与应用工作, 尤其值得一提的是, 他们紧密结合国内制造企业数控加工技术的新发展和新需求, 将理论研究与工程实践相结合, 自主研究开发了“X - Cut”、“e - Cutting”系列数控切削过程力学、动力学仿真优化系统, 为实施“千台数控机床增效工程”提供了数控加工过程仿真优化的技术方法和应用工具, 已在 100 多家企业应用, 取得了显著的成效, 这是高校与企业“产、学、研”合作进行先进技术推广应用的一个成功范例。

在基础理论研究和工程开发应用取得成功的基础上, 刘强教授与李忠群教授又将在数控切削过程建模、仿真和优化领域的研究应用成果编著成《数控铣削加工过程仿真与优化——建模、算法与工程应用》一书, 这是作者及其团队多年来在该领域研究应用工作的汇集与总结, 我期望该书将对数控切削加工仿真优化基础理论的深化研究、工程应用的广泛拓展产生积极的推动作用。

中国工程院院士



2011 年 7 月

目 录

第1章 概 述	(1)
1.1 高性能切削的内涵	(1)
1.2 高性能数控机床与刀具	(3)
1.2.1 高性能数控机床	(3)
1.2.2 先进切削刀具	(5)
1.3 支持高性能切削的仿真与优化技术	(9)
1.3.1 切削过程仿真	(9)
1.3.2 数控切削参数优化技术	(11)
1.3.3 虚拟加工技术	(13)
1.4 本书内容概览	(14)
参考文献	(15)
第2章 切削过程力学建模原理	(20)
2.1 切削过程概述	(20)
2.1.1 切削运动与切削用量	(20)
2.1.2 切削层参数与切削方式	(21)
2.1.3 金属的切削层变形	(23)
2.2 切削力模型	(24)
2.2.1 切削力及切削功率	(24)
2.2.2 切削力的经验公式	(25)
2.2.3 切削力的力学模型	(26)
2.2.4 切削力影响因素及修正	(28)
2.3 铣削加工过程动态切削力建模	(31)
2.3.1 铣刀种类及铣削方式	(31)
2.3.2 圆柱螺旋铣刀动态切削力建模	(35)
2.3.3 通用螺旋铣刀动态切削力建模	(38)
2.3.4 镶齿铣刀动态切削力建模	(43)
2.4 切削力系数辨识	(49)
2.4.1 切削力系数辨识算法	(49)
2.4.2 切削力系数辨识试验	(51)
2.4.3 典型材料的铣削力系数	(52)

参考文献	(55)
第3章 数控铣削过程动力学建模	(57)
3.1 金属切削过程中的颤振	(57)
3.1.1 切削加工过程振动分类	(57)
3.1.2 切削颤振现象及其类型	(58)
3.1.3 车削加工颤振模型	(59)
3.2 铣削过程的动力学建模	(63)
3.2.1 动态切削厚度与动态铣削力模型	(63)
3.2.2 颤振稳定性叶瓣图 (解析法)	(66)
3.2.3 颤振稳定性仿真实现	(68)
3.2.4 三维稳定性叶瓣图	(74)
3.3 颤振稳定性影响因素分析	(74)
3.3.1 切削力系数对颤振稳定性的影响	(75)
3.3.2 铣刀几何参数对颤振稳定性的影响	(75)
3.3.3 模态参数对颤振稳定性的影响	(78)
3.4 颤振稳定性时域数值方法求解	(79)
3.4.1 铣削过程时域数值仿真	(79)
3.4.2 时域颤振稳定性仿真判据	(81)
3.4.3 时域颤振稳定性仿真试验验证与分析	(81)
3.5 颤振稳定性其他求解方法简介	(84)
3.5.1 多频率求解方法	(84)
3.5.2 半离散时域求解方法	(87)
3.5.3 全离散时域求解方法	(89)
3.5.4 几种颤振稳定性求解方法对比	(92)
参考文献	(93)
第4章 数控机床动态特性参数测试与分析	(96)
4.1 模态分析基本理论简介	(96)
4.1.1 单自由度系统振动	(96)
4.1.2 多自由度系统实模态分析	(105)
4.2 试验模态分析基础	(106)
4.2.1 引言	(106)
4.2.2 试验结构的支撑	(106)
4.2.3 激励方式	(107)
4.2.4 激振装置	(107)
4.2.5 激励信号	(108)
4.2.6 测量系统	(109)
4.2.7 冲击试验	(114)

4.3 振动信号的处理与分析	(114)
4.3.1 采样定理和混频现象	(114)
4.3.2 泄漏和窗函数	(115)
4.3.3 平均技术	(116)
4.3.4 噪声对频响函数估计的影响	(117)
4.3.5 试验模态分析频响函数处理	(117)
4.4 模态参数辨识	(118)
4.4.1 模态参数识别方法的确定	(119)
4.4.2 单模态参数识别	(119)
4.4.3 多模态参数识别	(121)
4.5 数控机床加工动力学特性测试分析系统 DynaCut	(126)
4.5.1 测试系统结构设计	(126)
4.5.2 DynaCut 系统应用	(128)
参考文献	(132)
第5章 数控铣削加工切削参数优化	(134)
5.1 切削参数优化技术概述	(134)
5.1.1 数控切削加工过程优化	(134)
5.1.2 数控加工切削参数优化技术	(135)
5.2 切削参数优化模型	(136)
5.2.1 目标函数及优化问题分类	(136)
5.2.2 设计变量	(139)
5.2.3 约束条件	(140)
5.3 切削参数优化实现	(144)
5.3.1 高速铣削切削参数优化实现	(145)
5.3.2 中低速铣削切削参数实现	(147)
参考文献	(154)
第6章 基于动力学仿真技术的铣削加工切削参数数据库	(157)
6.1 切削数据库国内外研究现状	(157)
6.1.1 切削数据库国外研究现状	(157)
6.1.2 切削数据库国内研究现状	(158)
6.2 基于动力学仿真技术的切削数据库总体设计	(159)
6.2.1 需求分析	(159)
6.2.2 系统总体设计	(160)
6.2.3 数据库建模方法	(163)
6.2.4 数据库概念设计	(164)
6.2.5 系统逻辑模型设计	(165)
6.3 切削数据库管理功能的实现	(168)

6.3.1	系统开发工具	(168)
6.3.2	主要功能模块开发	(169)
6.4	切削数据的采集及处理	(174)
6.4.1	切削数据的采集	(174)
6.4.2	切削数据的筛选与录入	(176)
6.5	切削数据库管理系统的应用	(178)
6.5.1	切削数据库管理系统的安装部署	(178)
6.5.2	数据库管理系统	(179)
	参考文献	(185)
第7章	工程应用实例	(187)
7.1	基于切削过程仿真的数控加工切削参数优化过程	(187)
7.1.1	基于切削力学/动力学仿真的数控加工参数优化软件	(187)
7.1.2	基于切削力学/动力学的数控加工参数仿真优化的实施	(188)
7.2	实例1: 典型高速加工整体构件切削参数优化	(192)
7.2.1	相关基本信息	(193)
7.2.2	切削参数优化实现	(193)
7.3	实例2: 通道体零件切削参数优化	(195)
7.3.1	相关基本信息	(195)
7.3.2	总体优化思路	(196)
7.3.3	粗加工切削参数优化	(196)
7.3.4	精加工切削参数优化	(200)
7.4	实例3: 合金钢40Cr切削参数优化	(202)
7.4.1	相关基本信息	(202)
7.4.2	约束条件确定	(203)
7.4.3	切削参数优化	(205)
7.4	实例4: 整体叶轮切削参数优化	(208)
7.4.1	相关基本信息	(208)
7.4.2	优化前准备工作	(209)
7.4.3	切削参数优化	(211)
附录	数控切削动力学仿真与优化系统(e-Cutting)使用说明	(214)
附1	频域仿真	(214)
附1.1	功能简介	(214)
附1.2	操作说明	(214)
附2	时域仿真: 整体刀铣削力仿真	(220)
附2.1	功能简介	(220)
附2.2	操作说明	(220)
附3	时域仿真: 镶齿刀铣削力仿真	(224)

附 3.1 功能简介	(224)
附 3.2 操作说明	(224)
附 4 时域仿真：切削力仿真批处理	(227)
附 4.1 功能简介	(227)
附 4.2 操作说明	(228)
附 5 时域仿真：切削参数优化	(231)
附 5.1 功能简介	(231)
附 5.2 操作说明	(231)
附 6 工具	(238)
附 6.1 功能介绍	(238)
附 6.2 操作说明	(238)
后 记	(240)

第1章 概述

高效数控加工 (High Efficiency CNC Machining) 是实现优质、高效、低成本和环境友好的制造过程的重要技术途径, 它是指综合应用高效数控加工装备、优化的数控加工工艺及参数以及数控车间制造执行系统 (MES) 等技术, 减少零件在整个数控加工过程的占用时间, 从而提升数控加工过程的综合效率。高效数控加工不过分强调最快的切削速度或最高的加工质量, 而是通过提高单位时间的材料去除速率 (Material Removal Rate, MRR)、降低加工时间来实现降低加工成本的目的。

数控加工过程占用时间可以分为三个部分: 切削时间、辅助时间和生产准备时间。高效数控加工就是通过采用高性能数控装备、先进工艺技术和现代管理手段, 减少这三部分时间, 达到提高加工效率的目的。其中, 采用高性能切削技术 (High Performance Cutting, HPC) 来减少切削时间, 是提高数控加工效率最直接、有效的途径。高性能切削技术包括: 高速切削、大进给切削和强力切削等, 采用 HPC 的同时, 还需要以高性能切削刀具、新型冷却润滑方式、数控程序优化及切削过程参数优化等作为支持技术, 才能实现提高切削过程的材料去除速率, 缩短直接切除工件上多余材料的切削时间, 从而提高加工效率。

为了满足数控加工过程中工件材料、零件几何形状、精度和表面质量等方面的新要求, 提高数控机床产品本身的竞争力, 从 20 世纪 90 年代中期开始, 综合了高精度和高速度两个方面特点的高性能数控机床受到高度重视, 进入 21 世纪以来, 高性能切削及其主要支撑技术——虚拟数控加工 (Virtual CNC Machining) 技术已经成为数控切削加工领域的研究新热点。国际生产工程学会 (The International Academy for Production Engineering, CIRP) 分别于 2004 年、2006 年召开了第一、二届高性能切削国际会议, 就高性能切削加工技术及装备所涉及的机床动力学建模、控制、CAM、切削理论、铣削/钻削/磨削、微切削等方向进行了研讨, 国内举办的先进制造技术方面的重要会议也已将高性能数控机床及加工工艺技术列为主题之一, 可以说, 高性能切削加工及其支撑技术研究应用已成为数控加工技术发展的一个新趋势。

1.1 高性能切削的内涵

现代装备及产品中高性能零件呈现如下特性。

(1) 材料特点

金属材料零件是数控加工的主要对象, 各种钢、铝合金等占有很大比例, 钛合金、高温合金也有占一定比例, 金属材料毛坯可以由铸造、锻造、预拉伸、轧制等多种工艺制

成,此外,非金属材料零件(主要是复合材料和光学硬脆性材料)的数控加工量也呈现上升的趋势。

(2) 结构特点

零件结构种类多样,如汽车发动机的箱体、缸体/缸盖、盘、轴等零件,飞机的壁板、梁、框、肋、缘条、长桁和接头及骨架等结构零件,航空发动机的叶片/叶轮/叶盘、机匣、盘环件等。此外,由于高性能、轻量化和高可靠性的设计要求,采用整体结构和复杂型面结构的零件比例大大增加,因此零件几何尺寸大、型面复杂、工艺特征多、壁厚小。

(3) 工艺特点

由于材料选用和结构设计上的特点,高性能零件数控切削加工具有加工精度要求高、材料去除量大、加工变形控制难度大等诸多特点,对加工质量、变形控制和加工效率提出了很高的要求。另外,现代制造业的发展还要保证零件加工过程满足日益严格的环境友好方面的要求。

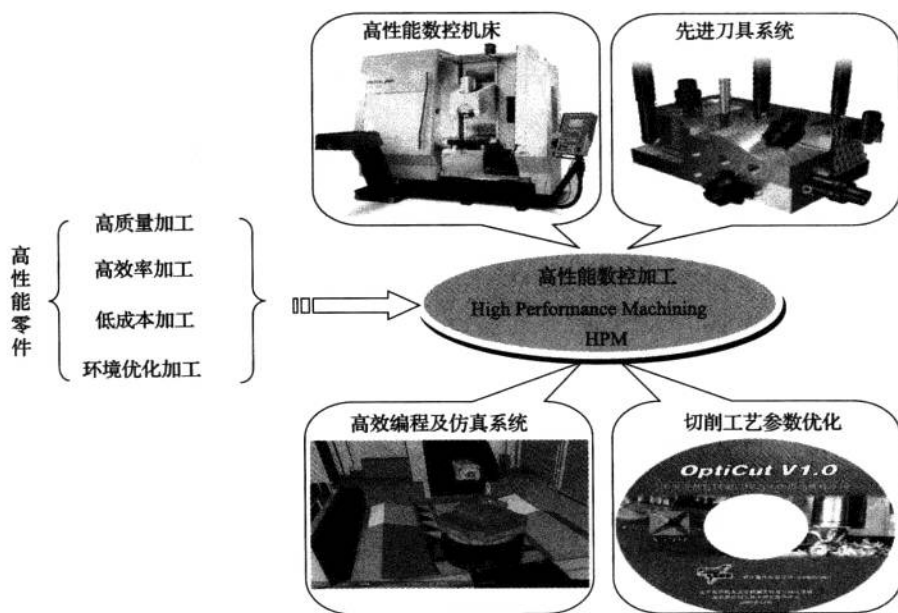


图 1-1 高性能切削加工

高性能产品零件的材料、结构和工艺特点,对加工质量、效率、成本以及环保等方面提出了更高的要求,高性能切削就是满足上述要求而提出的一个新的理念。所谓高性能切削加工是指在数控切削加工过程中,全面考虑机床、刀具、工件、编程、加工工艺和参数等因素及其相互作用,采用刀具轨迹仿真、几何仿真、物理仿真等方法,通过对“机床-零件-刀具-夹具”工艺系统特性、数控编程、走刀路径、切削参数等的分析,对切削加工过程进行综合优化,实现优质、高效、低成本及绿色的数控加工。

在高性能数控切削加工中,高性能数控机床、高性能切削刀具、高效数控编程与仿真系统(虚拟数控加工技术)、加工工艺与切削参数优化技术等是其关键的支撑技术。

1.2 高性能数控机床与刀具

1.2.1 高性能数控机床

(1) 高性能数控机床的主要特点

高性能加工中心不仅满足高精度和可靠性、工序集约、复合加工、信息化和智能化等性能要求,还满足生产效率高、运行成本低、环境污染少、人机界面友好的要求。高性能数控机床应具备如下主要特点。

①多轴联动:

一般为4轴或5轴联动,或在5轴联动控制基础上实现更多轴的控制以及实现复合加工联动控制。引入A/B、A/C坐标的多轴联动可方便地解决诸如叶片、复杂型腔、泵体、多面体等复杂结构和型面的加工问题;在多轴联动基础上实现复合数控加工可以大大缩短工件定位装夹等辅助工作时间,提高机床加工效率。

②高速主轴:

现代高性能零件的数控加工对高性能数控机床的主轴提出了多样性需求,如要求主轴转速超过几万转每分钟甚至更高,或要求主轴功率达到几十甚至几百千瓦,高速主轴配合使用高性能刀具系统,可以实现高速切削加工,如飞机大型铝合金结构件的高速数控加工中,切削线速度一般达1000~4000m/min,最高切削线速度可达5000m/min以上。

电主轴由于具有结构紧凑、重量^①轻、惯性小、动态响应性能好、振动和噪声小等特点,是高速主轴单元的理想结构。在高速主轴单元设计中高速主轴支撑是核心,设计和选择主轴支撑时,不但要求在主轴旋转时有较高的刚度和承载能力,而且要求有较高的使用寿命。国内外用于高性能机床主轴支撑的轴承主要有:陶瓷球轴承、静压轴承、动静压轴承、气浮轴承和磁悬浮轴承。其中又因动静压轴承综合了动压与静压轴承的优点,所以在高速加工设备中有很好的应用前景与发展潜力。

③高动态响应的进给系统:

在高速加工条件下,除要求高主轴转速外,还对进给轴的速度及加、减速度提出了很高的要求,直线进给轴速度最高可达120m/min,新型数控机床的进给加速度可达到3~5g。高性能数控机床采用直线电机驱动的直线轴运动和力矩电机驱动的摆动轴运动,可大大简化机械传动结构,实现所谓“零传动”。同时要采用先进的轮廓(Profile)控制技术等,如回冲加速、新型NURBS插补等平滑插补、钟形加减速、前馈控制、精确矢量补偿、最佳拐角减速控制及大数目超前程序段预处理等,保证具有快速反应能力而且功能丰富、高效和高精度。

④高精度:

直线轴定位精度在微米数量级,并可实现更高的位置精度。由于进给伺服中采用直线电机驱动、高精度高刚度运动部件构成的运动控制系统,并考虑进给系统中的机电耦合作

^① 本书重量系为质量(mass)概念,单位为千克。

用,采用全闭环反馈控制、PID 加前馈控制甚至更复杂先进控制算法的数字伺服控制以及补偿控制,数控机床的坐标轴运动平稳性和运动精度进一步提高。此外,卧式加工中心都装有机床精度及温度补偿系统,使加工精度更加稳定。

⑤高刚度:

主轴系统、进给系统和机床结构应具有良好的静态刚度和动态刚度以及热稳定性。足够高的静态刚度可以抵抗由于机床零部件重力和零件加工时的切削力引起的机床变形,保证刀具与工件在切削过程中的静态位移;优良的动态特性可防止和减小切削过程中由于动态切削过程产生的强迫振动和自激振动,以满足刀具与工件在切削过程中的动态位移要求;良好的热稳定性使得机床在加工过程中受到切削热、环境温度变化等作用时,热变形尽可能小。最终,机床高静态刚度和热稳定性将使零件切削加工获得好的表面质量和高的切削效率。

⑥智能化:

智能化是新一代数控机床的重要特征。智能化主要表现在两个方面:一方面是机床控制的智能化,例如,在机床轴运动控制上引入前馈控制、预测控制、鲁棒控制等先进控制策略,在加工过程控制上引入自适应控制、学习控制等。另一方面是将专家系统、自动检测及自动补偿功能等嵌入数控系统,例如,在数控系统中配备自动编程与仿真、机床状态监测、故障诊断、刀具自动管理及补偿、机床热变形/振动监测与补偿等功能,使数控机床具有更多的“智能”,提高数控系统的控制性能,从而实现机床和加工过程的智能化、最优化控制。

(2) 高性能数控机床的研究开发

不断追求数控机床的更高性能一直是机床研究与开发者的目标。1995 年美国 Cincinnati 公司在美国制造科学中心(National Center for Manufacturing Science, NCMS)基金的资助下,正式提出了“高性能数控加工”和“高性能数控机床”的概念,并持续开展了大型高速机床关键技术研究 and “HYPER - MACH (源自 High Performance Machining)” 高性能加工机床的研制工作。他们首先分析了使能技术的设计极限以及当前技术与未来需求之间的差距,建立了数控系统、伺服电机、直线电机的试验平台,初步设计了原型测试平台,进行了建模和动态分析,开展了对比测试,并于 1998 年研制并试验了全尺寸的 5 轴 ZAC - Module 机床,该机床在 2000 年的 IMTS 上展出引起轰动。2002 年 Cincinnati 又得到资助进行高速加工工艺研究开发。现在,Hyper Mach 系列高性能机床已有多种型号,可以有单主轴、双主轴、4 主轴等配置,各主轴均可实现 5 轴联动加工并分区同时工作。单主轴切削大型铝合金零件时的材料去除速率能达到 $7538\text{cm}^3/\text{min}$,此外,Hyper Mach 已从铝合金材料零件铣削加工拓展到包括复合材料、蜂窝材料在内的多种金属、非金属材料零件的钻削、铣削等加工,已批量应用于军机、民机的各种结构零件的数控加工中。一款配有双主轴的 Hyper Mach 工作行程为: $X = 16150\text{mm}$, $Y = 2134\text{mm}$, $Z = 750\text{mm}$, A 、 B 轴的摆角范围 $\pm 40^\circ$, X 、 Y 轴以直线电机驱动、高精度激光反馈,快进、工进速度为: 10000 和 6000mm/min,配备 SuperV5 主轴,主轴功率为 130hp (96.9kW),转速 18000r/min。

近年来,国外各知名数控机床制造厂商都不遗余力研究开发高性能数控机床。进一步针对高动态响应、高精度和重切削等,德马吉公司的 DMC H duoBLOCK 采用滚珠丝杠驱

动, DMC H linear 则采用直线电机直接驱动以获得高达 $1.6g$ 的加速度及高精度, 另外 DMC 80/100/125 H duoBLOCK (见图 1-2) 则采用高刚度的机械主轴, 以便承受重切削。GF 阿奇夏米尔全新推出了 MIKRON HEM 系列高效立式加工中心 (见图 1-3)。采用 SCHNEEBERGER 高精密线性导轨, 高刚性以及高承载性能的线性导轨确保了全行程内光滑连续地移动。在获得工件的高几何精度和表面质量的同时保证了高加工效率。高的刚性减小了加工振动从而也延长了刀具寿命。



图 1-2 DMC 55 H duoBLOCK 卧式加工中心

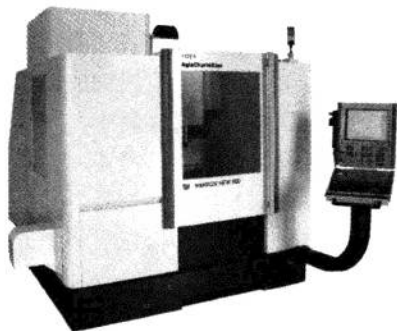


图 1-3 MIKRON HEM 800 高效立式加工中心

国内多家数控机床制造企业投入力量, 研究开发高性能数控机床, 并取得了可喜的突破性进展, 已经研制并生产了一批可满足国内需求的高性能数控机床, 如沈阳机床的 GMC1230u 龙门 5 轴联动铣削加工中心 (见图 1-4) 及 GTM320140 龙门移动式车铣加工中心 (见图 1-5)。另外, 北京市机电研究院也研制了以直线电机驱动的大型龙门式铣削加工中心和 5 轴联动铣削加工中心, 可以用于高速、高效数控加工。

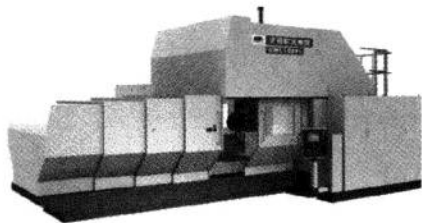


图 1-4 GMC1230u 龙门 5 轴联动铣削加工中心

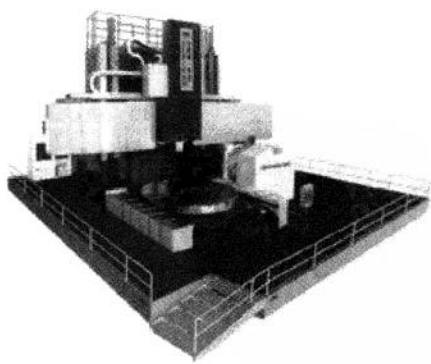


图 1-5 GTM320140 龙门移动式车铣加工中心

1.2.2 先进切削刀具

高性能刀具的应用是实现高性能切削加工这一目标的最关键环节之一。高性能刀具不仅仅是高速刀具, 脱离加工精度、稳定性和成本而去片面追求高加工速度不能算是高性能

加工；离开了合适的零件材料、合理的工艺参数，高性能刀具也不能实现高性能加工。高性能刀具涉及刀具材料、刀具涂层技术、刀具结构设计及优化、刀具配套技术及刀具的应用等诸多方面。

(1) 刀具材料

刀具材料是刀具研发与应用的基础，对刀具切削性能的提高起着决定性影响。高性能切削加工除了要求刀具材料具备普通刀具材料的基本性能外，还要求具备高的硬度、强度，良好的热稳定性和热硬性以及优异的高温力学性能。广泛应用的刀具材料包括高速钢、硬质合金、超硬刀具材料（含陶瓷、立方氮化硼、聚晶金刚石等）。随着制造业的不断发展硬质合金正在取代高速钢成为最主要的刀具材料，超硬刀具材料的使用比重也在大幅增加。在知名的刀具供应商中，山高 Jabro 推出的全新整体硬质合金通用加工铣刀 Solid2 系列，可适用的加工温度已由普通刀具的 800°C 提高到了现有的 1100°C ，从而提高了加工效率和刀具寿命，刀具的性价比得到了较大的提升。另一方面，随着干切削、硬切削的发展，国外各公司都推出了陶瓷及超硬刀具材料的新牌号。

(2) 刀具涂层技术

涂层刀具材料是指通过化学气相沉积（CVD）、物理气相沉积（PVD）或其他技术方法，在硬质合金或高速钢基体上涂覆一层耐磨性极高的化合物，最早出现在 20 世纪 70 年代。传统的涂层主要有 TiC 、 TiN 和 Al_2O_3 等，最新的涂层材料有 TiAlN 、 AlCrN 、聚晶金刚石等。目前，纳米结构涂层刀具的涂层数达到 1000 层以上，每层厚度仅为几纳米。涂层刀具有效地解决了刀具材料硬度、耐磨性和强度、韧性之间的矛盾，并具有如下优越性：

①由于表面涂层材料具有很高硬度、耐磨性和耐高温性，故与未涂层的刀具相比，涂层刀具允许采用较高的切削速度，从而提高了切削加工效率；或能在相同的切削速度下，提高刀具寿命。

②由于涂层材料与被加工材料之间的摩擦因数较小，故涂层刀具的切削力小于未涂层刀具。

③用涂层刀具加工，零件的已加工表面质量较好。

④由于涂层刀具的综合性能良好，故涂层硬质合金刀片有较好的通用性。

目前，欧洲国家的涂层技术水平最高，领先于其他国家和地区。知名的厂商有欧瑞康巴尔查斯（OerlikonBalzers）公司、德国 PVT 等离子真空技术公司和丹麦尤尼莫克（Unimanco）公司等。其涂层设备和工艺先进，涂层材料品种多，涂层刀具和其他产品使用性能好。国外一些知名的高速钢和硬质合金工具厂，都有涂层刀具（刀片）产品，但涂层设备和工艺多购自涂层技术的专业公司，或与之合作，而不是自行研制。与工艺发达国家相比，中国的刀具涂层技术尚有很大差距，涂层刀具的数量差得更远，大致只占全部刀具的 20%，主要用在数控机床和加工中心上，在普通非数控机床则少得可怜，原因是认识问题和价格因素。

(3) 先进的刀具结构设计及优化

刀具结构创新体现在刀具结构的优化、切削负荷的合理分布、三维断屑槽形开发以及带前角的螺旋形刀刃铣削刀片的问世和小规格浅孔钻开发等诸多方面，出现了各种新型可转位刀片结构，如用于车削的高效刮光刀片、形状复杂的带前角铣刀刀片、球头立铣刀刀

片等。刀具结构优化、几何参数更趋合理才能使刀具性能得到改善和提高,各种新型可转位刀具不仅在车削、铣削、钻削领域的应用有新的突破,而且已扩大到拉削和齿轮加工等复杂型面的加工领域。山特维克可乐满的 CoroMill 316 是第一种可互换头铣削产品系列,能够覆盖 10~25mm 的直径范围,因其全新的倒角和圆角半径硬质合金切削头范围的扩展,可适用于更多的应用场合,刀柄与可互换式立铣刀通过独特的螺纹接口连接,实现了高强度与高精度的完美结合。

(4) 先进高性能刀具配套技术

高性能的切削刀具离不开先进的刀具配套技术,刀具配套技术主要包括刀柄与机床主轴之间的连接方式、刀具在刀柄里的夹紧方式、刀具系统平衡及刀具管理等。

HSK 锥柄由于具有连接刚性好、定位精度高及装卸时间短等优点,被越来越广泛地应用。目前,各机床工具厂商纷纷推出带 HSK 主轴接口的高速加工中心和带 HSK 刀柄的工具系统或整体刀具,充分显示了其强大的生命力和良好的应用前景。与此同时,一些类似于 HSK 的刀柄结构被相继开发出来,如 Sandvik 公司的 Capto 刀柄,Kennametal 公司的 KM 刀柄等。

高性能切削对刀具装夹提出了新要求,它要求装夹精度高、径向跳动小、夹持刚性好、结构紧凑且操作简单。目前主要有液压夹头、热装夹头和力缩夹头等 3 种常用新型夹头,它们各有其特点。液压夹头依靠液压压的薄壁内套变形夹紧刀柄,套的变形量较大允许刀柄的直径可略有变动,且油腔有消振作用,使用方便,但薄壁套的夹持刚性较低且结构不对称。热装夹头利用热胀冷缩原理夹紧刀柄,夹紧可靠、结构紧凑、悬伸长,应用最为广泛。力缩夹头靠机械弹性变形产生夹紧力,省掉了热缩夹头加热冷却时间和能源,使用方便并且轴向定位精度可控,操作简单,但外形尺寸较大。

刀具或工具系统由于结构不对称或制造、装配误差带来偏心,在高速旋转时会产生周期性径向力,从而影响加工质量、刀具寿命和机床的性能,因此高速/高效加工时需对刀具的许用不平衡量及最高转速提出要求。为此,刀具制造商还开发了各种可调平衡的刀具,或通过事先进行动平衡试验把不平衡量控制在一定的范围内。新推出的在线自动平衡技术,可在工作转速下对主轴、刀柄和刀具作为一个转子系统整体地进行平衡。另一方面,在高速切削时,刀具的转速通常在 10000~20000r/min 以上甚至更高,此时,刀体、刀片及刀片的夹紧零件会受到很大离心力作用,当转速达到某一临界值时,足以使刀片甩出,或者夹紧螺钉断裂甚至整个刀体破裂。为此,德国制定了高速旋转刀具的安全规范,对刀具的设计、检测、使用、平衡质量都做了严格的规定,这项规范已先后成为欧洲标准和国际标准。

资料显示,刀具的直接成本只占制造成本的 2%~4%,而刀具使用、管理的间接费用要占 12% 以上,科学的刀具管理能为用户节省可观的刀具费用,降低制造成本,因此开发刀具管理技术和相关的软件、硬件已成为刀具制造商的业务范围,可为用户提供多种形式的刀具管理服务,从简单的刀具物流管理到全部刀具业务的一揽子承包,后者包括刀具采购、鉴定、保管、现场服务、刀具重磨、工艺改进和项目开发等。

(5) 高性能刀具在航空领域的应用

随着材料科学和加工技术的发展,许多诸如钛合金、镍基合金、新型高强度钢等高强