

Gaosu qiexiao yu wuzhou liandong jiagong jishu

高速切削与 五轴联动加工技术

▶ 陆启建 褚辉生 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高速切削与五轴联动 加工技术

主 编 陆启建 褚辉生
副主编 刘 岩 祁 欣 关小梅
参 编 卢文澈 何晓凤 任新梅 张 敏
马雪峰 周云曦 易 军 张 涛
欧阳陵江 王乐文 石 磊
主 审 杨庆东

机 械 工 业 出 版 社

本书从高速与五轴联动加工技术应用的角度全面系统地介绍了与先进的高速与五轴联动加工技术相关的理论基础、关键技术、数控系统、数控机床、CAM 编程技术, 主要内容包括高速加工技术及应用、五轴联动加工技术与应用、高速切削与五轴联动加工编程软件及编程基础、多轴数控编程软件的后置处理、高速切削加工实例、四轴联动加工实例、五轴联动加工实例以及综合加工实例。本书内容安排上先理论, 后实例, 先简单、后复杂, 尤其是从第七章开始的实例讲解, 循序渐进, 过程完整, 读者按照书中的步骤就能轻松完成实例的编程和操作, 轻松掌握高速加工与五轴联动加工技术。

本书可作为各类大学和高职高专院校机械类专业学生的教材和教师的参考书, 也可以作为企业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高速切削与五轴联动加工技术/陆启建, 褚辉生主编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 11

ISBN 978-7-111-32324-2

I. ①高… II. ①陆…②褚… III. ①高速切削②数控机床 IV. ①TG506. 1②TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 208054 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王英杰 责任编辑: 王英杰 武晋

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21 印张 · 518 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-32324-2

ISBN 978-7-89451-739-5 (光盘)

定价: 40.00 元 (含 1CD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

高速切削与五轴联动加工技术在发达国家已经广泛应用，而该技术在我国的研究与应用还处在起步阶段，与发达国家还存在很大的差距，但该技术的引进和应用正在迅速发展。首先，我国航空航天等领域大量采用了这种技术；其次，随着高速加工机床及五轴联动加工机床的大量引进以及国内机床厂家相继推出自己的高速切削与五轴联动加工机床，高速切削与五轴联动加工技术的应用正在向其他领域迅速扩展。由于高速切削与五轴联动加工技术的复杂性，高速切削与五轴联动机床的操作及加工程序的自动编程、后处理等工作要具备一定的条件才能顺利完成；同时，由于目前国内还没有比较系统的高速切削与五轴联动加工编程的书籍和资料，所有这些因素严重地影响了高速切削与五轴联动加工技术的应用，因此急需一本从应用的角度系统介绍高速切削与五轴联动加工技术的实用教程，使我们的工程技术人员和学生能完整地掌握该技术，让高速切削与五轴联动技术发挥更大的作用。本书正是在这样的背景下由机械职业教育实验实训建设指导委员会策划组织，多个学校和单位参与讨论和编写的实用教材。

本书从应用的角度系统介绍了高速切削和五轴联动加工用到的理论基础和操作实例。全书共十章，第一到第六章为理论基础，包括概论、高速加工技术及应用、五轴联动加工技术与应用、高速切削与五轴联动加工编程基础、高速及多轴数控编程软件、多轴数控编程软件的后置处理，全面而简练地阐述了高速切削与五轴联动加工技术的理论和自动编程基础，内容的编排和取舍是以能系统掌握高速切削和五轴加工操作及编程需要为要求的，着眼点不是从研究的角度而是从应用的角度来介绍这些内容的；第七到第十章为实例篇，由四部分组成，分别是高速切削加工实例、四轴联动加工实例、五轴联动加工实例和综合加工实例，由浅入深、循序渐进地介绍了高速切削与多轴加工零件的工艺分析、数控自动编程和实际的加工操作过程。

本书由陆启建、褚辉生任主编，刘岩、祁欣、关小梅任副主编，参编人员有卢文澈、何晓凤、任新梅、张敏、马雪峰、周云曦、易军、张涛、欧阳陵江、王乐文、石磊等，杨庆东任主审。在本书的编写过程中，南京四开电子企业有限公司提供了大力支持，书中的案例全部来源于生产一线，有很好的应用价值。

限于编者水平，书中难免有不足之处，望读者批评指正，提出宝贵意见和建议，以利再版时修改完善。

本书的配套光盘里有本书用到的全部实例的素材和实例完成后的结果文件。

编 者

目 录

前言

第一章 概述 1

第一节 数控技术的现状及发展趋势 1

一、数控技术的基本概念和特点 1

二、数控技术的发展 2

三、数控设备的发展 2

四、数控技术的现状 4

五、数控技术的发展趋势 7

第二节 高速加工技术的现状及发展趋势 ... 8

一、高速加工的基本概念 8

二、高速加工技术的发展过程 10

三、高速加工技术的研究现状 13

四、高速加工技术的发展趋势 14

第三节 五轴数控加工技术的现状及发展趋势 15

一、多轴加工的基本概念和过程 15

二、四轴联动加工的特点 17

三、五轴联动加工的特点 17

四、五轴加工技术的应用现状 20

五、五轴加工技术的发展与未来 21

第二章 高速加工技术及应用 22

第一节 高速加工数控系统 22

一、高速加工数控系统的组成 22

二、高速加工对数控系统的要求 23

三、高速数控系统介绍 24

第二节 高速加工数控机床 29

一、高速加工数控机床的特点 29

二、高速车铣床 30

三、高速加工中心 31

四、典型高速机床厂家介绍 34

第三节 高速加工数控机床的关键技术 36

一、概述 36

二、电主轴技术 37

三、高速加工系统的控制技术 40

四、高速进给控制技术 42

第四节 高速加工工艺 43

一、高速加工的工艺特点 43

二、各种材料的高速切削工艺 43

三、高速加工数控编程的工艺特点 51

第五节 高速加工刀具 54

一、高速加工对刀具的要求 54

二、高速加工刀具的分类及选择 55

三、高速刀具的装夹 59

四、著名高速刀具厂家介绍 64

第六节 高速加工技术的应用 65

一、高速加工技术的应用特点 65

二、高速加工技术在汽车制造中的应用 66

三、高速加工技术在航空航天工业中的应用 68

四、高速加工技术在模具制造业的应用 69

第三章 五轴联动加工技术与应用 72

第一节 五轴联动数控机床在装备制造业中的重要地位 72

第二节 五轴联动数控机床的结构特点 72

一、概述 72

二、五轴机床旋转轴结构 73

第三节 五轴联动数控系统的特点 77

第四节 五轴联动加工技术的应用 78

一、五轴联动机床与 CAM 软件的结合 ... 78

二、五轴联动加工技术在航空航天领域的应用 79

三、五轴联动加工技术在模具制造业的应用 79

第四章 高速切削与五轴联动加工编程基础 82

第一节 高速切削编程方法 82

一、高速加工编程与普通加工编程的区别 82

二、高速加工切削参数的合理设置 88

第二节 多轴数控加工的工艺 91

一、多轴数控加工工艺特点 91

二、常用刀具选择及工艺安排 93

第三节 五轴机床工件坐标系的建立	95	分析	196
一、四轴机床的工件坐标系的建立	95	二、利用 PowerMILL 软件生成加工程序	197
二、五轴机床的工件坐标系的建立	98	第三节 兔子凸模加工实例	212
第四节 五轴数控加工刀具的补偿	108	一、兔子凸模的加工工艺分析	212
一、二维刀具半径补偿与三维刀具半径补偿	109	二、利用 PowerMILL 软件生成加工程序	213
二、二维刀具长度补偿与三维刀具长度补偿	112	第八章 四轴联动加工实例	223
三、在 CAM 软件中的刀具补偿	113	第一节 空间凸轮加工实例	223
四、在四轴、五轴数控系统中的刀具补偿	116	一、空间凸轮加工工艺分析	223
第五章 高速及多轴数控编程软件	118	二、利用 UG 软件生成加工程序	224
第一节 高速及多轴编程软件简介	118	三、空间凸轮实际加工过程	233
第二节 UG 在五轴联动加工中的应用	120	第二节 柱面图案加工实例	234
一、UG 界面简介	120	一、柱面图案加工工艺分析	234
二、UG 多轴刀具轴线的控制方法	122	二、利用 UG 软件生成加工程序	235
第三节 PowerMILL 在高速及五轴联动加工中的应用	141	三、柱面图案实际加工过程	253
一、PowerMILL 软件使用简介	141	第九章 五轴联动加工实例	255
二、PowerMILL 高速加工选项	142	第一节 多面体加工实例	255
三、PowerMILL 多轴刀具轴线控制	147	一、多面体零件加工工艺分析	255
第六章 多轴数控编程软件的后置处理	156	二、利用 UG 软件生成加工程序	256
第一节 刀具路径与 NC 程序	156	三、多面体零件实际加工过程	276
一、刀具路径和刀轨文件	156	第二节 球面刻字加工实例	277
二、NC 程序	156	一、球面刻字加工工艺分析	277
三、后置处理	157	二、利用 UG 软件生成加工程序	279
第二节 后置处理器的设置	158	三、球面刻字实际加工过程	289
一、UG 后置处理器的设置	159	第三节 叶轮加工实例	290
二、PowerMILL 后置处理器的设置	178	一、叶轮各部分曲面分层放置	290
第三节 后置处理过程	186	二、叶轮粗加工	292
一、UG 后处理过程	186	三、叶轮精加工	297
二、PowerMILL 后处理过程	186	四、叶轮的 actual 加工过程	299
第七章 高速切削加工实例	189	第十章 综合加工实例	302
第一节 螺旋薄壁零件加工实例	189	第一节 维纳斯雕像加工实例	302
一、螺旋薄壁零件加工工艺分析	189	一、维纳斯雕像加工工艺分析	302
二、利用 PowerMILL 软件生成加工程序	189	二、利用 CAM 软件生成加工程序	303
第二节 深槽大去除余量零件的加工实例	196	三、实际加工过程	309
一、深槽大去除余量零件的加工工艺		第二节 老爷车模型加工实例	313
		一、老爷车模型加工工艺分析	313
		二、利用 CAM 软件生成加工程序	318
		三、实际加工过程	328
		参考文献	329

第一章 概 述

数控技术随着计算机技术、CAD/CAM 技术的不断发展而得到了迅猛的发展，高速加工、五轴联动加工、车铣复合加工、精密加工技术等都得到了快速发展和应用，本章简要介绍数控技术的发展和應用。

第一节 数控技术的现状及发展趋势

一、数控技术的基本概念和特点

数控技术是指用数字或数字代码的形式来实现控制的一门技术，简称 NC (Numerical Control)。它所控制的大多是位移、角度、速度等与机械有关的量，也控制温度、压力、流量、颜色等物理量。如果一种设备的控制过程是以数字形式来描述的，其工作过程在数控程序的控制下自动地进行，那么这种设备就称为数控设备。随着数控技术的发展，其在各行业的应用越来越广，如宇航、造船、军工、汽车等；数控设备的种类和自动化程度也越来越高，如数控机床、数控激光切割机、数控火焰切割机、数控弯管机、数控压力机、数控冲剪机、数控测量机、数控绘图机、数控雕刻机、电脑绣花机、衣料开片机、工业机器人等，其中数控机床是数控设备的典型代表。

相对于传统的加工技术，数控加工技术有以下特点：

1. 加工精度高

由于数控设备是按照预定程序自动加工，不受人工影响，消除了人为误差，使同一批工件的一致性提高，质量稳定。此外，由于数控设备采用了许多提高精度的措施，如高刚度的结构、高的热稳定性、滚珠丝杠、消除间隙机构、误差自动补偿等，因此数控设备能达到较高的精度。

2. 生产效率高

数控设备能有效地减少加工所需要的机动时间和辅助时间。由于数控设备的刚性好，精度高，可采用较大的切削用量，再加上自动换刀、自动变速以及无需工序间的检验与测量等，因此使生产效率大大提高。

3. 适应范围广

由于数控设备是通过程序来完成各种动作的，因此当工件改变时，只需改变程序就可以实现新的加工，而无需改变硬件，生产准备周期短，有利于产品的更新换代。因此，数控设备特别适合单件、小批量生产以及新产品的试制。

4. 劳动强度低

由于数控设备是按预先编制好的程序自动加工的，无需操作者进行繁重的重复作业，所以大大减轻了劳动者的工作强度，改善了操作者劳动条件。

5. 有利于生产管理

采用数控设备能准确地计算产品生产的工时，并有效地简化了产品检验及工具、夹具、

量具的管理和半成品的管理。通过数控设备之间的通信,为实现生产自动化和生产管理自动化创造了条件。

二、数控技术的发展

从1952年美国麻省理工学院研制出第一台试验性数控系统开始,数控技术已走过了五十多年历程。数控系统由当初的电子管起步,经历了晶体管、小规模集成电路、大规模集成电路、小型计算机、超大规模集成电路、微机式的数控系统。从体系结构的发展,数控系统可分为由硬件及连线组成的硬数控系统、计算机硬件及软件组成的CNC数控系统,后者也称为软数控系统;从伺服及控制的方式可分为步进电动机驱动的开环系统和伺服电动机驱动的闭环系统。数控系统装备的机床大大提高了加工精度、速度和效率。到1990年,全世界数控系统专业生产厂家年产数控系统约为13万台(套)。

20世纪90年代以来,世界上许多数控系统生产厂家利用PC机丰富的软硬件资源,开发开放式体系结构的新一代数控系统。开放式体系结构使数控系统有更好的通用性、柔性、适应性、扩展性,并向智能化、网络化方向发展。近几年许多国家纷纷研究开发这种系统,如原欧洲共同体的“自动化系统中开放式体系结构”OSACA,日本的OSEC计划等,并且开发研究成果已得到应用。开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术,如多媒体技术,实现声控自动编程,图形扫描自动编程等;利用多CPU的优势,实现故障自动排除;增强通信功能,提高联网能力。这种数控系统可随CPU升级而升级,结构上则不必变动。

数控系统在控制性能上向智能化发展。随着人工智能在计算机领域的渗透和发展,数控系统引入了自适应控制、模糊系统和神经网络的控制机理,不但具有自动编程、模糊控制、学习控制、自适应控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿等功能,而且人机界面极为友好,并具有故障诊断专家系统,使自诊断和故障监控功能更趋完善。伺服系统智能化的主轴交流驱动和智能化进给伺服装置,能自动识别负载并自动优化调整参数。此外,直线电动机驱动系统已实用化。新一代数控系统技术水平大大提高,促进了数控机床性能向高精度、高速度、高柔性化方向发展,使柔性自动化加工技术水平不断提高。

三、数控设备的发展

1. 数控机床的产生

随着科学技术和生产力的发展,机械产品日趋精密、复杂,而且改型频繁。长期以来,这类产品都在通用机床上加工,基本上是由人工操作,工人劳动强度大,而且难以提高生产效率和保证产品质量。对一些复杂的曲线、曲面所构成的零件,手工操作甚至根本无法加工。数控机床就是为了解决单件、小批量、高精度、复杂型面零件加工的自动化要求而产生的。

1948年,美国Parsons公司承担了设计、研究和加工直升机螺旋桨叶片轮廓用检验样板的任务,该公司经理John T Parsons根据自己的设想,提出了革新这种样板加工机床的新方案,由此产生了研制数控机床的最初萌芽。1949年,作为这一方案主要承包者的Parsons公司正式接受委托,在麻省理工学院伺服机构实验室的协助下开始从事数控机床的研制工作。1952年试制成功世界第一台数控机床试验样机。它是一台采用脉冲乘法器原理的直线插补三坐标连续控制数控铣床,其数控装置体积比机床本体还要大,电路采用的是电子管元件。该铣床的研制成功是机械制造行业中的一次技术革命,使机械制造业的发展进入了一个新的阶段。

2. 数控设备的发展

在数控系统不断更新换代的同时,数控设备中的典型代表——数控机床的品种得以不断发展,几乎所有品种的机床都实现了数控化。1956年日本富士通公司研制成功数控转塔式冲床,美国帕克工具公司研制成功数控转塔钻床,1959年美国 Keaney&Trecker 公司研制出带自动刀具交换装置的加工中心 MC (Machining Center)。CNC 技术、信息技术、网络技术以及系统工程学的发展,为单机数控向计算机控制的多机制造系统自动化发展创造了必要的条件,在 20 世纪 60 年代出现了由一台计算机直接管理和控制一群数控机床的计算机群控系统,即直接数控系统 DNC (Direct NC)。1967 年出现了由多台数控机床联接成的可调加工系统,这就是最初的柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing System)。1978 年以后加工中心迅速发展,各种加工中心相继问世。20 世纪 80 年代初又出现以 1~3 台加工中心或车削中心为主体,再配上工件自动装卸的可交换工作台及检验装置的柔性制造单元 FMC (Flexible Manufacturing Cell)。后来,MC、FMC、FMS 发展迅速,在 1989 年第 8 届欧洲国际机床展览会上,展出的 FMS 超过 200 台。目前,已经出现了包括生产决策、产品设计及制造和管理等全过程均由计算机集成管理和控制的计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System),以谋求实现整个企业生产管理的现代化,实现工厂自动化。近年来,从世界上数控技术及其装备发展来看,数控设备在以下几个方面又有了长足的发展:

1) 高速化。由于高速加工技术普及,数控机床普遍提高各方面速度,数控车床主轴转速由 3000~4000r/min 提高到 8000~10000r/min,数控铣床和加工中心主轴转速由 4000~8000r/min 提高到 12000~50000r/min,快速移动速度由过去的 10~20m/min 提高到 48m/min、60m/min、80m/min、120m/min;在提高速度的同时要求提高运动部件起动的加速度,其已由过去一般机床的 $0.5g$ ($g=9.8\text{m/s}^2$,为重力加速度)提高到 $1.5g\sim 2g$,最高可达 $15g$;直线电动机在机床上广泛使用,主轴上大量采用内装式主轴电动机。

2) 高精度化。数控机床的定位精度已由一般的 $0.01\sim 0.02\text{mm}$ 提高到 0.008mm 左右,亚微米级机床达到 0.0005mm 左右,纳米级机床达到 $0.005\sim 0.01\mu\text{m}$,最小分辨力为 1nm (0.000001mm) 的数控系统和机床已有产品。数控系统中两轴以上插补技术大大提高,纳米级插补使两轴联动出的圆弧都可以达到 $1\mu\text{m}$ 的圆度,而且插补前多程序段预读,大大提高插补质量,并可进行自动拐角处理等。

3) 复合加工、新结构机床大量出现,如五轴五面体复合加工机床,五轴五联动加工各类异形零件。此外,也派生出各种新颖的机床结构,包括六轴虚拟轴机床、串并联铰链机床等,采用特殊机械结构、数控的特殊运算方式、特殊编程要求。

4) 使用各种高效特殊功能的刀具使数控机床“如虎添翼”。如内冷钻头由于使用高压切削液直接冷却钻头切削刃和排除切屑,在钻深孔时效率大大提高,加工钢件时切削速度能达 1000m/min ,加工铝件时能达 5000m/min 。

5) 数控机床的开放性和联网管理已是使用数控机床的基本要求,它不仅是提高数控机床开动率、生产率的必要手段,而且是企业合理化、最佳化利用这些制造手段的方法。因此,计算机集成制造、网络制造、异地诊断、虚拟制造、异行工程等各种新技术都在数控机床基础上发展起来,这必然成为 21 世纪制造业发展的一个主要潮流。

采用五轴联动对三维曲面零件的加工,可用刀具最佳几何形状进行切削,不仅表面粗糙度低,而且效率也大幅度提高。特别是使用立方氮化硼等超硬材料铣刀进行高速铣削淬硬钢

零件时，五轴联动加工可比三轴联动加工发挥更高的效益。但五轴联动数控系统过去因主机结构复杂等原因，其价格要比三轴联动数控机床高出数倍，加之编程技术难度较大，制约了五轴联动机床的发展。

当前，电主轴的出现使得实现五轴联动加工的复合主轴头结构大为简化，其制造难度和成本大大降低，数控系统的价格差距缩小，因此促进了复合主轴头类型五轴联动机床和复合加工机床（含五面加工机床）的发展。

我国数控机床的研制始于 1958 年，到 1985 年，我国的数控机床的品种累计达八十多种，包括加工中心、数控车床、数控铣床、数控磨床等，数控机床进入了实用阶段。

目前我国已有二百多个厂家在从事不同层次的数控机床的生产和开发，形成了具有小批量生产能力的生产基地。数控机床的品种已超过 500 种，品种的满足率达 80%，并在一些企业实施了 FMS 和 CIMS 工程。

在数控机床全面发展的同时，数控技术在其他机械行业中得以迅速发展，数控激光切割机、数控火焰切割机、数控弯管机、数控压力机、数控冲剪机、数控测量机、数控绘图机、数控雕刻机等数控设备得到广泛的应用。

四、数控技术的现状

1. 开放式系统结构

人类发明了机器，延长和扩展人的手脚功能；当出现数控系统以后，制造厂家逐渐希望数控系统能部分代替机床设计师和操作者的大脑，具有一定的智能，能把特殊的加工工艺、管理经验和操作技能放进数控系统，同时也希望系统具有图形交互、诊断功能等。这首先就要求数控系统具有友好的人机界面和开发平台，通过这个界面和平台开放而自由地执行和表达自己的思路，于是产生了开放结构的数控系统。机床制造商可以在该开放系统的平台上增加一定的硬件和软件构成自己的系统。

目前，开放系统有两种基本结构：

(1) CNC + PC 主板 把一块 PC 主板插入传统的 CNC 机器中，PC 主板主要运行程序实时控制，CNC 主要运行以坐标轴运动为主的实时控制。

(2) PC + 运动控制板 把运动控制板插入 PC 机的标准插槽中作实时控制用，而 PC 机主要作非实时控制。

开放结构在 20 世纪 90 年代初形成，当时对于许多熟悉计算机应用的系统厂家，往往采用 (2) 方案。但目前主流数控系统生产厂家认为数控系统最主要的性能是可靠性，像 PC 机存在的死机现象是不允许的；而且系统功能首先追求的仍然是高精高速的加工；加上这些厂家长期已经生产大量的数控系统，产品体系结构的变化会对他们原系统的维修服务和可靠性产生不良的影响，因此不把开放结构作为主要的产品，仍然大量生产原结构的数控系统。为了增加开放性，主流数控系统生产厂家往往采用 (1) 方案，即在不变化原系统基本结构的基础上增加一块 PC 板，提供键盘，使用户能把 PC 和 CNC 联系在一起，大大提高了人机界面的功能，比较典型的如 FANUC 的 150/160/180/210 系统。有些厂家也把这种装置称为融合系统 (Fusion System)。由于它工作可靠，界面开放，越来越受到机床制造商的欢迎。

2. 软件伺服驱动技术

伺服技术是数控系统的重要组成部分。广义上说，采用计算机控制，控制算法采用软件的伺服装置称为“软件伺服”。它有以下优点：

- 1) 无温漂, 稳定性好。
- 2) 基于数值计算, 精度高。
- 3) 通过参数设定, 调整减少。
- 4) 容易做成 ASIC 电路。

20 世纪 70 年代, 美国 GATTYS 公司发明了直流力矩伺服电动机, 从此开始大量采用直流电动机驱动, 开环的系统逐渐由闭环的系统取代。但是, 直流电动机存在以下缺点:

- 1) 电动机容量、最高转速、环境条件受到限制。
- 2) 换向器、电刷维护不方便。

交流异步电动机虽然价格便宜、结构简单, 但早期由于控制性能差, 所以很长时间没有在数控系统上得到应用。随着电力电子技术的发展, 1971 年, 德国西门子的 Blaschke 发明了交流异步电动机的矢量控制法; 1980 年, 以德国人 Leonhard 为首的研究小组在应用微处理器的矢量控制研究中取得进展, 使矢量控制实用化。从 20 世纪 70 年代末, 数控机床逐渐采用以异步电动机为主轴的驱动电动机。如果把直流电动机进行“里翻外”的处理, 即把电枢线圈装在定子上, 转子为永磁部分, 由转子轴上的编码器测出磁极位置, 这就构成了永磁无刷电动机。这种电动机具有良好的伺服性能, 从 20 世纪 80 年代开始逐渐应用在数控系统的进给驱动装置上。为了实现更高的加工精度和速度, 20 世纪 90 年代, 许多公司又研制了直线电动机。它由两个非接触元件组成, 即磁板和线卷滑座, 电磁力直接作用于移动的元件而无需机械联接, 没有机械滞后或螺距周期误差, 精度完全依赖于直线反馈系统和分级的支承, 由全数字伺服驱动, 刚性高, 频响好, 因而可获得高速度; 但由于它的推力还不够大, 发热、漏磁及造价也影响了它的广泛应用。对现代数控系统, 伺服技术取得的最大突破可以归结为: 交流驱动取代直流驱动、数字控制取代模拟控制或软件控制取代硬件控制。这两种突破性技术的结果是产生了交流数字驱动系统, 应用在数控机床的伺服进给和主轴装置。由于电力电子技术及控制理论、微处理器等微电子技术的快速发展, 软件运算及处理能力的提高, 特别是 DSP 的应用, 系统的计算速度大大提高, 采样时间大大减少。这些技术的突破, 使伺服系统性能改善、可靠性提高、调试方便、柔性增强, 大大推动了高精高速加工技术的发展。

3. CNC 系统的联网

数控系统从控制单台机床到控制多台机床的分级式控制需要网络进行通信; 网络的主要任务是进行通信, 共享信息。这种通信通常分三级:

- (1) 工厂管理级 一般由 Internet 网组成。
- (2) 车间单元控制级 一般由 DNC 功能进行控制。通过 DNC 功能形成网络可以实现对零件程序的上传、读、写 CNC 的数据, PLC 数据的传送, 存储器操作控制, 系统状态采集和远程控制等。更高档次的 DNC 还可以对 CAD/CAM/CAPP 以及 CNC 的程序进行传送和分级管理。CNC 与通信网络联系在一起还可以传递维修数据, 使用户与 NC 生产厂直接通信, 进而把制造厂家联系在一起, 构成虚拟制造网络。
- (3) 现场设备级 现场设备级与车间单元控制级及信息集成系统主要完成底层设备的运行控制、I/O 控制、连线控制、通信联网、在线设备状态监测及现场设备生产、运行数据的采集、存储、统计等功能, 保证现场设备高质量完成生产任务, 并将现场设备生产运行数据信息传送到工厂管理层, 向工厂管理层提供数据; 同时, 也可接受工厂管理层下达的生产

管理及调度命令并执行之。因此,现场设备级与车间单元控制级是实现工厂自动化及 CIMS 系统的基础。

传统的现场设备级大多是基于 PLC 的分布式系统,其主要特点是现场层设备与控制器之间的连接是一对一,即一个 I/O 点对设备的一个测控点。这种系统的缺点是:信息集成能力不强、系统不开放、可集成性差、专业性不强、可靠性不易保证、可维护性不高。

现场总线系统是以单个分散的、数字化、智能化的测量和控制设备作为网络节点,用总线相连接,实现相互交换信息,共同完成自动控制功能的网络系统与控制系统。因此,现场总线技术是面向工厂底层自动化及信息集成的数字网络技术。

现场总线控制系统(FCS)用数字信号取代模拟信号,以提高系统的可靠性、精确度和抗干扰能力,并延长信息传输的距离。它既是一个开放的通信网络,又是一种全分布的控制系统,是一种新型的网络集成自动化系统。它以现场总线为纽带,把挂接在总线上相关的网络节点组成自动化系统,实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、综合自动化等多项功能。由于现场总线系统具有开放性、互操作性、互换性、可集成性,因此是实现数控系统设备层信息集成的关键技术,它对提高生产效率、降低生产成本非常重要。目前在工业上采用的现场总线有 Profibus-DP, SERCOS, JPCN-1, Deviconet, CAN, hterbus-S, Marco 等。有的公司还有自己的总线,如 FANUC 的 FSSB, I/O LINK(相当于 JPCN-1), YASKA 的 MOTION LINK 等。目前比较活跃的是 Profibus-DP,为了允许更快的数据传送速度,它由 OSI 的 7 层结构省去第 3~7 层构成。西门子最新推出 802D 的伺服控制就是由 Profibus-DP 控制的。

4. 功能不断发展和扩大

数控技术经过 50 年的发展,已经成为制造技术发展的基础。如 FANUC 最先进的 CNC 控制系统 15i/150i,这是一个具有开放性、4 通道、最多控制轴数为 24 轴、最多联动轴数为 24 轴、最多可控制 4 个主轴的 CNC 系统。

数控技术功能发展和扩大体现在以下几个方面。

(1) 开放性 系统可通过光纤与 PC 机连接,采用 Window 兼容软件和开发环境。功能以高速、超精为核心,并可实现智能控制,特别适合于加工航空机械零件,汽车及家电的高精零件,各种模具和复杂的需五轴加工的零件。15i/150i 系统具有高精纳米插补功能,即使系统的设定编程单位为 $1\mu\text{m}$,通过纳米插补也可提供给数字伺服机构以 1nm 为单位的指令,平滑了机床的移动量,降低了加工表面粗糙度值,大大减小了加工表面的误差。

(2) 高速高精加工的智能控制功能 系统可预算出多程序段刀具轨迹,并进行预处理。通过智能控制,计算机床的机械性能,可按最佳的允许进给率和最大的允许加速度工作,使机床的功能得到最大的发挥,以便减少加工时间,提高效率,同时提高加工精度。系统可在分辨力为 1nm 时工作,适用于控制超精机械。

(3) 高级复杂的功能 15i/150i 系统既可进行各种数学的插补,如直线、圆弧、螺旋线、渐开线、螺旋渐开线、样条等插补,也可以进行 NURBS 插补。采用 NURBS 插补可以大大减少 NC 程序的数据输入量,减少加工时间,特别适于模具加工,而且 NURBS 插补不需任何硬件。

(4) 强大的联网通信功能 适应工厂自动化需要,系统支持标准 FA 网络及 DNC 的连接,体现在以下几方面:

1) 工厂干线或控制层通信网络。由 PC 机通过以太网控制多台 15i/150i 组成的加工单元, 可以传送数据、参数等。

2) 设备层通信网络。15i/150i 采用 I/O LINK。

3) 通过 RS-485 接口传送 I/O 信号。也可采用 Profibus-DP, 以 12Mbit/s 进行高速通信。

(5) 高速的内装 PMC (有的厂商称为 PLC) 可以减少加工的循环的时间, 其特点如下:

1) 梯形图和顺序程序由专用的 PMC 处理器控制, 这种结构可进行快速大规模顺序控制。

2) 基本 PMC 指令执行时间为 0.085 μ s, 最大步数为 32000 步。

3) 可以用 C 语言编程。32 位的 C 语言处理器可实现实时多任务运行, 它与梯形图计算的 PMC 处理器并行工作。

4) 可在 PC 机上进行程序开发。

(6) 先进的操作性和维修性

1) 具有触摸面板, 容易操作。

2) 可采用存储卡改变输入输出。

五、数控技术的发展趋势

1. 高精度

经过几十年的发展, 数控机床的加工精度已显著提高, 特别是滚珠丝杠工艺的成熟和“零传动”机床的出现, 减少了中间环节的误差。目前, 普通级数控机床的加工精度已由 10 μ m 提高到 5 μ m; 精密级加工中心的加工精度则从 (3~5) μ m 提高到 (1~1.5) μ m, 甚至更高; 超精密加工精度进入纳米级 (0.001 μ m), 主轴回转精度要求达到 0.01~0.05 μ m, 加工圆度误差小于 0.1 μ m, 加工表面粗糙度值为 Ra0.003 μ m 等。这些机床一般都采用矢量控制的变频驱动电主轴 (电动机与主轴一体化), 主轴径向圆跳动误差小于 2 μ m, 轴向窜动小于 1 μ m, 轴系不平衡度达到 G0.4 级

2. 高速度

提高机床的切削速度, 不但可以提高加工效率, 降低加工成本, 而且还可提高工件的表面质量和加工精度。在超高速加工中, 车削和铣削的切削速度已达到 5000~8000m/min 甚至以上; 主轴转速达到 50000r/min; 工作台的移动速度达到 240m/min; 自动换刀时间普遍已在 1s 以内, 快的已达 0.5s。

3. 柔性化

柔性是指机床适应加工对象变化的能力。数控技术的柔性化和自动化, 使数控机床对加工对象的变化有很强的适应能力, 并且在提高单机柔性化的同时, 正努力向单元柔性化和系统柔性化发展。如在数控机床的软、硬件的基础上, 增加不同容量的刀库和自动换刀机械手, 增加第二主轴, 增加交换工作台装置, 或配以工业机器人和自动运输小车, 以组成新的加工中心、柔性加工单元 FMC 或柔性制造系统 FMS。

数控机床向柔性自动化系统发展的趋势是: 从点 (数控单机、加工中心和数控复合加工机床)、线 (柔性加工单元 FMC、柔性制造系统 FMS、FTL、FML) 向面 (工段车间独立制造岛、自动化工厂 FA)、体 (计算机集成制造系统 CIMS、分布式网络集成制造系统) 的方向发展, 并且越来越注重应用性和经济性, 逐步实现“无人工厂”。

4. 智能化

为适应制造自动化的发展,向 FMC、FMS 和 CIMS 提供基础设备,要求数字控制制造系统不仅能完成通常的加工功能,而且还要具备自动测量、自动上下料、自动换刀、自动更换主轴头(有时带坐标变换)、自动误差补偿、自动诊断、进线和联网等功能,广泛地应用机器人、物流系统;FMC, FMS Web-based 制造及无图样制造技术;围绕数控技术、制造过程技术在快速成形、并联机构机床、机器人化机床、多功能机床等整机方面和高速电主轴、直线电动机、软件补偿精度等单元技术方面都有较大发展。

5. 网络化

多机床联网要求数控系统有更高的网络通信能力。计算机直接数控系统(Direct Numerical Control, DNC)是基于数控机床通信技术而发展的自动控制系统。目前正在研究的网络制造、远程制造等先进制造方法就是自动控制系统最新的发展动态。

在数控系统中,由于计算机的应用使数据处理的速度比机械加工的速度快很多,因而有可能用一台计算机来控制多台数控设备,构成群控系统,简称为 DNC 系统,也称为计算机直接数控系统。在 DNC 系统中,各台数控机床的零件加工程序由计算机统一储存与管理,根据加工的要求,适时地把加工程序分配给各机床,并对机床群中的加工情况进行管理与统计(如打印报表等),同时还适时地处理操作者的指令以及对零件加工程序进行编辑、修改。目前,计算机群控的发展趋势是由多台 CNC 或 NC 机床各守其职,与 DNC 计算机组成网络,实现分级控制,而不再考虑让一台计算机去分时完成各台数控机床的常规工作。总之,DNC 系统实现了机床群加工过程中信息传递的自动化。DNC 系统是对 CNC 系统的改进,它突破了单机自动化的概念,为以后的 FMC、FMS 乃至 CIMS 的发展奠定了基础。

第二节 高速加工技术的现状及发展趋势

一、高速加工的基本概念

根据 1992 年国际生产工程研究会(CIRP)年会主题报告的定义,高速切削通常指切削速度超过传统切削速度 5~10 倍的切削加工。因此,根据加工材料的不同和加工方式的不同,高速切削的切削速度范围也不同。高速切削包括高速铣削、高速车削、高速钻孔与高速车铣等,但绝大部分应用的是高速铣削。目前,加工铝合金的切削速度已达到 2000~7500m/min;加工铸铁的切削速度为 900~5000m/min;加工钢的切削速度为 600~3000m/min;加工耐热镍基合金的切削速度达 500m/min;加工钛合金的达 150~1000m/min;加工纤维增强塑料的为 2000~9000m/min。

高速切削技术是以比常规高 10 倍左右的切削速度对零件进行切削加工的一项先进制造技术,又称超高速切削。实践证明,当切削速度提高 10 倍,进给速度提高 20 倍,远远超越传统的切削“禁区”后,切削机理发生了根本的变化。其结果是:单位功率的金属切除率提高了 30%~40%,切削力降低了 30%,刀具寿命提高了 70%,传入工件的切削热大幅度降低,切削振动几乎消失,切削加工发生了本质性的飞跃。在常规切削加工中备受困惑的一系列问题亦得到了解决,高速切削技术可谓是集高效、优质、低耗于一身的先进制造技术,是切削加工新的里程碑。

高速切削是一项系统技术,如图 1-1 所示为高速机床 CNC 控制技术,显示了影响高速

切削技术的各方面因素。企业必须根据产品的材料和结构特点,购置合适的高速切削机床,选择合适的切削刀具,采用最佳的切削工艺,以达到理想的高速加工效果。

高速加工对系统的要求有如下几点:

- 1) 速度快、稳定性高的控制系统。
- 2) 精确的刀具路径编程。
- 3) 高速、高刚性、同轴度高的刀具系统。

- 4) 快速、精准的装夹系统。

高速切削技术的特点有如下几点:

(1) 加工效率高 采用高速切削技术能使整体加工效率提高几倍乃至几十倍,这将使加工成本相应降低。在现代制造过程中,随着自动化程度的提高,辅助时间、空行程时间已大大减少,有效切削时间成为工件制造时间的主要部分。而切削时间的多少取决于进给速度或进给量的大小。很显然,若保持进给速度与切削速度的比值不变,则随着切削速度的提高切削时间将迅速减少。虽然高速加工时切削深度小,但由于主轴转速高,进给速度快,因此单位时间内金属的切除量反而增加了,效率也提高了。

(2) 加工精度高 高速切削具有较高的材料去除率并能相应减小切削力。对同样的切削层参数,高速切削的单位切削力明显减小。若在保持高效率的同时适当降低进给量,则切削力的减幅还将进一步加大。在加工过程中,切削力的降低对减小振动和误差非常重要。切削力减小,工件在加工过程中受力变形显著减小,有利于提高加工精度。另外,高速切削加工时将粗加工、半精加工和精加工合为一体,全部在一台机床上完成,避免了由于多次装夹带来的定位误差。特别对于大型框架件、薄板件、薄壁槽型件的高精度高效加工,高速铣削是非常有效的加工手段。

(3) 表面质量好 高速切削时的切削力变化幅度小,与主轴转速有关的激振频率也远远高于切削工艺系统的高阶固有频率,因此切削振动对加工质量的影响很小。同时,高速切削使传入工件的切削热的比例大幅度减小,加工表面受热时间短,切削温度低,因此热影响区和热影响程度都较小,有利于获得低损伤的表面结构和保持良好的表面物理性能及力学性能。例如在加工模具型腔时,电火花加工后型腔内表面处于拉应力状态,而应用高速铣加工后相应表面是处于压应力状态。

(4) 加工能耗低且节省制造资源 高速切削时,单位功率所切削的材料体积显著增加。国外有资料表明,高速铣削时,当主轴转速从4000r/min提高到20000r/min时,切削力降低了30%,而材料切除率却增加了3倍。切除率高、能耗低、工件在制的时间短,提高了能源和设备的利用率,降低了切削加工在制造系统资源总量中的比例。高速切削时采用较小的背吃刀量,刀具每刃的切削量很小,机床主轴、导轨的受力小,机床的精度保持时间长,同

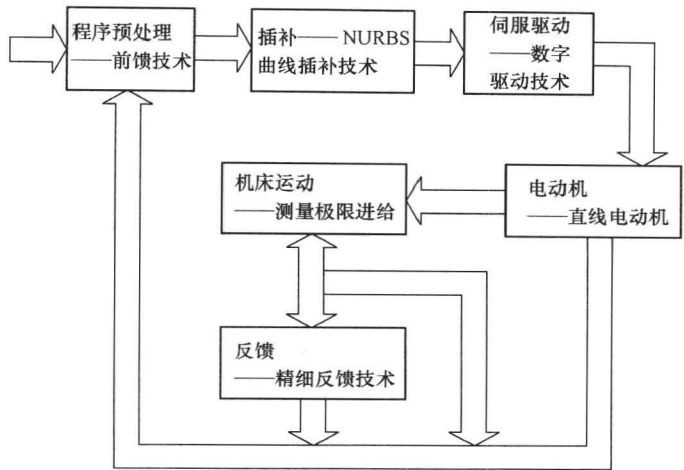


图 1-1 高速机床 CNC 控制技术

时刀具的寿命也延长了。此外，高速加工时机床振动小，噪声低，可以少用或不用切削液，符合环保的要求。

(5) 可以加工各种难加工材料 例如，航空和动力部门大量采用的镍基合金和钛合金，这类材料强度大、硬度高、耐冲击，加工中容易硬化，切削温度高，刀具磨损严重，因此在普通加工中一般采用很低的切削速度。如果采用高速切削，切削速度可提高到 100 ~ 1000m/min，为常规切削速度的 10 倍左右，不但可以大幅度提高生产效率，而且可以有效地减少刀具磨损，提高零件加工的表面质量。

总之，高速切削具有切削力低，工件热变形小，有利于保证零件的尺寸、形位精度，已加工表面质量高，工艺系统振动减小，材料切除率显著提高，加工成本降低等加工特点。这些特点，反映了高速切削在其适用领域内，能够满足效率、质量和成本方面越来越高的要求，同时解决了三维曲面形状的零件高效精密的加工问题，并为硬材料和薄壁件加工提供了新的解决方案。

高速切削在航空航天业、模具工业、电子行业、汽车工业等领域得到越来越广泛的应用。其中，在航空航天业主要是解决零件大余量材料去除、薄壁件加工、高精度、难加工材料和加工效率等问题，特别是整体结构件高速切削，既保证了零件质量，又省去了许多装配工作；模具业中大部分模具均适用高速铣削技术，高速硬切削可加工硬度达 50 ~ 60HRC 的淬硬材料，因而取代了部分电火花加工，并减少了钳工修磨工序，缩短了模具加工周期；高速铣削石墨可获得高质量的电火花加工电极。此外，高速切削的高效率使其在印刷电路板打孔和汽车大规模生产中得到广泛应用。目前，适合高速切削的工件材料有铝合金、钛合金、铜合金、不锈钢、淬硬钢、石墨和石英玻璃等。

二、高速加工技术的发展过程

1931 年德国工程师卡尔·萨洛蒙 (Carl Salomon) 博士首次提出了有关高速切削的概念。高速切削 (High Speed Cutting, HSC 或 High Speed Machining, HSM)，是指在比常规切削速度高出很多倍的速度下进行的切削加工，因此，也称为超高速切削 (Ultra - High Speed Machining)。

萨洛蒙博士的研究突破了传统切削理论中对切削热的认识，认为切削热只是在传统切削速度范围内与切削速度成单调增函数关系。而当切削速度增加到某一数值后，切削温度不再随切削速度的增加而增加，反而会随切削速度的增加而降低，即与切削速度在较高速度的范围内成单调减函数，

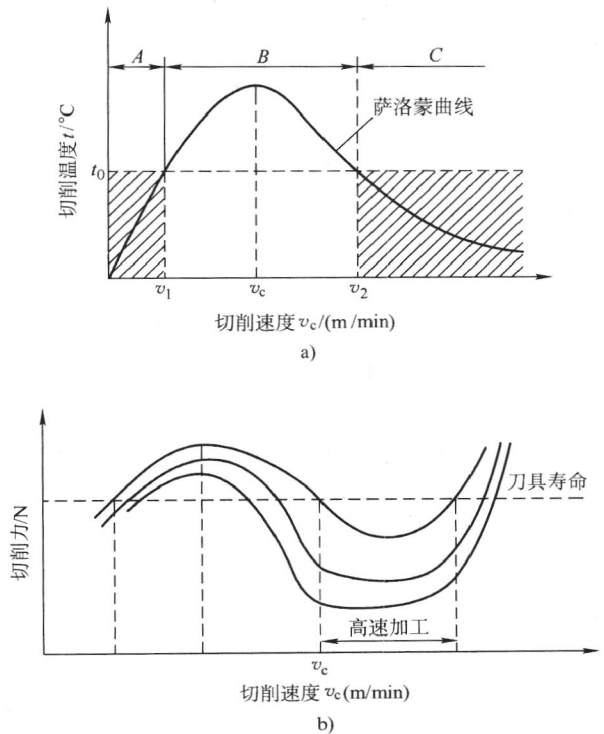


图 1-2 萨洛蒙 (Salomon) 曲线

a) 切削温度与切削速度的关系 b) 切削力与切削速度的关系

如图 1-2a 所示；切削力也会在某一范围内随着切削速度的提高而减小，如图 1-2b 所示。现代研究证明这个理论并不完全正确，对于不同的材料，从某一切削速度开始切削刃上的温度有相对降低现象。对钢和铸铁来说，这种温度降低相对不大，但对铝合金和某些非金属材料则是明显的。

萨洛蒙博士对不同的材料做了很多的高速切削实验。但遗憾的是，在二战中这些资料和数据都遗失了，参加这项研究的人也没有一个能活到战后，所以无法证实他的研究成果。现在使用的萨洛蒙假设曲线大多是根据推论做出的，如图 1-3 所示。萨洛蒙对铝和铸铜等非铁金属进行了高速和超高速实验，而其他几种材料切削温度与切削速度的关系曲线，是萨洛蒙根据前面的实验推算出来的，并没有经过实验验证。

萨洛蒙博士的研究因第二次世界大战而中断。从 20 世纪 50 年代后期开始，又进入高速切削的各种试验研究，高速切削的机理开始被科学家们所认识。1979 年由德国政府研究技术部资助，Darmstadt 工业大学生产工程与机床研究所 (PTW) 牵头，由大学研究机构、机床制造商、刀具制造商、用户等多方面共同组成的研究团队，对各种金属和非金属材料进行高速切削试验。除了高速切削机理外，研究团队同步研究高速铣削中机床、刀具、工艺参数等多方面的应用解决方案，

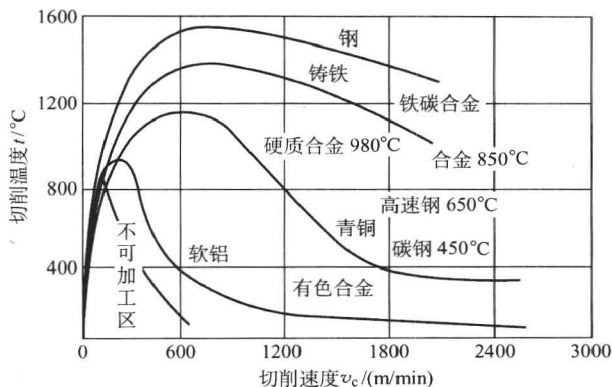


图 1-3 萨洛蒙对各种金属“切削速度与切削温度关系”的实验曲线和推论曲线

使高速铣削在加工机理尚未得到完全共识的情况下首先在铝合金加工和硬材料加工等领域得到应用，解决了模具、汽车、航空等领域的加工需求，从而取得了巨大的经济效益。自 20 世纪 80 年代中后期以来，商品化的超高速切削机床不断出现，超高速机床从单一的超高速铣床发展成为超高速车铣床、钻铣床乃至各种高速加工中心等。

美国于 1960 年前后开始进行超高速切削试验。美国工程师沃汉 (R. L. Vaughan) 和他的研究小组在其所进行的高速切削理论研究中，一方面得到了美国空军支持的研究计划的一些成果；另一方面，他得到了萨洛蒙的一些研究结果和数据。

试验时，将刀具装在加农炮里从滑台上射向工件；或将工件当做子弹射向固定的刀具。试验指出，在超高速切削的条件下，切屑的形成过程和和普通切削条件下不同：随着切削速度的提高，塑性材料的切屑形态将从带状、片状到碎屑不断演变；单位切削力初期呈上升趋势，尔后急剧下降。这些现象说明，在超高速切削条件下，材料的切削机理将发生变化，切削过程变得比常规切速下容易和轻松。

虽然他们的实验设备是枪和大炮，实验方法完全不能应用于实际工业生产，但是他们的研究却取得了很多非常有价值的高速切削的理论成果。

沃汉在对各种切削方式，包括传统的和高速的切削进行了一系列实验研究后指出，影响金属切除率的因素有：

1) 机床的大小和类型。