

西北工业大学出版基金资助项目

航空复杂零件数控加工工艺设计与优化

任军学 姚倡锋 田卫军 刘维伟 梁永收 著

ZHUANZHU

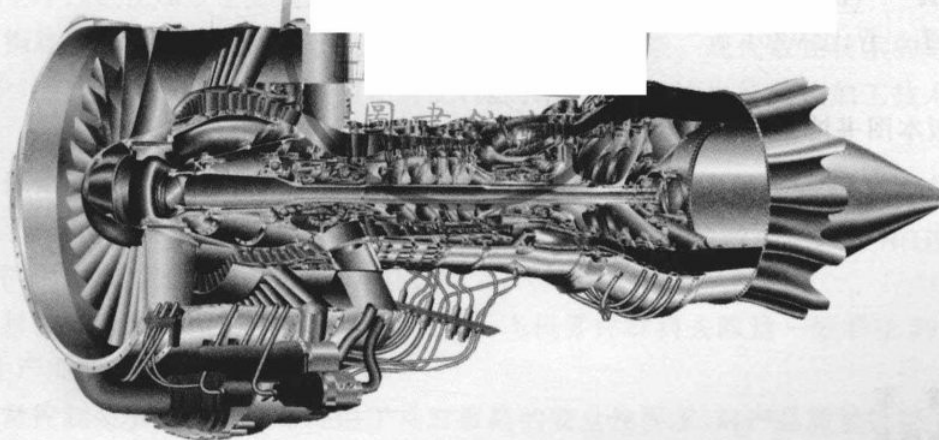
西北工业大学出版社

西北工业大学出版基金资助项目

HANGKONG FUZA LINGJIAN SHUKONG JIAGONG GONGYI SHEJI YU YOUHUA

航空复杂零件数控加工工艺 设计与优化

任军学 姚倡锋 田卫军 刘维伟 梁永收 著



西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本著作主要讲述航空典型零部件的数控加工工艺及关键编程技术方法。内容共分为7章,主要包括数控加工技术基础、数控加工夹具与工艺设计基础、复杂薄壁件数控加工工艺、整体构件高效数控加工、薄壁件加工变形控制技术、薄壁件加工颤振抑制技术、高速铣削表面完整性控制等。

本著作力求与工程实际紧密联系,最大程度地反映了目前航空制造业的发展现状,论述深入浅出,图文并茂,既给出了相关技术的基本原理,又提供了较多的工程应用,力求让读者能够在实践的基础上深刻理解和掌握航空复杂零件的先进制造手段和方法。

本著作可作为航空宇航制造工程专业本科生和研究生的专业技术课教材,为他们尽快进入科研课题奠定基础;也可作为装备制造企业科学与工程技术人员解决实际问题的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

航空复杂零件数控加工工艺设计与优化/任军学等著. —西安:西北工业大学出版社,2018.11

ISBN 978-7-5612-5858-3

I.①航… II.①任… III.①航空器-机械元件-数控机床-加工 IV.①V261

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261576 号

策划编辑:雷 军

责任编辑:何格夫

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号

邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm

1/16

印 张:20.25

字 数:531 千字

版 次:2018 年 11 月第 1 版

2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价:62.00 元

前 言

随着现代航空制造业的高速发展,数控加工技术已经成为飞机制造的关键技术之一。数控加工技术的进步使飞机设计理念发生了转变,零件设计向整体化、复杂化方向发展。同时,设计理念的转变也给数控加工技术提出了新的挑战,如何高质量、高效率、低成本地完成大型零件的数控加工成为了必须克服的难关。

国外发达国家航空制造史很长,特别是飞机大型复杂结构件的设计、制造技术都已非常成熟。随着近年来国内各类军民机的研制,国内主要航空企业在航空数控加工技术方面积累了大量的技术经验,解决了一系列关键技术难题,初步形成了以飞机大型复杂结构件制造为代表的核心技术优势。但是,随着我国大飞机项目的启动,航空零件数控加工技术将面临更大的挑战,因此,我们在数控加工技术领域还需要不断进行深层次的研究,以缩小和西方国家的差距。

与其他行业产品相比,航空类产品零件具有一些显著的特征,从而决定了航空零件数控加工技术的特点以及发展的方向。这些特征主要体现在以下方面:

(1)产品类型复杂,具有小批量、多样化特点。由于现代飞机结构复杂,零件品种繁多,同时,飞机研制通常为小批量生产,因此无法采用大规模流水线生产方式来提高效率和降低成本,因此航空零件数控加工也必须适应这种特点。

(2)结构趋于复杂化和整体化,工艺难度大,加工过程复杂。现代数控技术的进步促使航空零件的设计趋于复杂化和整体化,简化装配,提高结构性能,这也给数控加工技术提出了更高的要求。

(3)薄壁化、大型化特点突出,变形控制极为关键。为了控制飞机质量,飞机零件的一个显著特点就是进行了薄壁化设计,另外,飞机的大型化也使得零件结构趋于大型化,出现了许多超大型零件,因此加工变形成为了突出的问题。

(4)材料去除量大,切削加工效率问题突出。飞机零件材料去除量一般都在50%以上,切削效率对生产周期和成本影响较大。

(5)质量控制要求高。航空零件由于具有极高的安全性要求,对产品质量控制十分严格。

(6)产品材料多样。随着材料、冶金技术的发展,高强度钛合金、复合材料等的应用范围和用量正在逐步地得到扩展,对航空数控加工技术的适应性提出了广泛的要求。

(7)大型结构件毛料价值高,质量风险大。

以上问题,虽然经过多年的技术应用研究和探索,我国在航空零件数控加工技术研究与应用上取得了较大的进步,但是目前我国数控加工整体技术水平和国外先进水平差距仍较大,尤其在大型结构件研制方面,存在诸多下述亟待解决的问题:

(1)混线生产,专业化、集成化程度低。在目前的生产资源配置中,普遍存在专业化程度低、布局不合理、各种类型产品交叉生产现象严重等问题,这极大地制约了产品效率的提高。

(2)数控加工准备时间、辅助时间占用过多,装夹效率低下。在数控加工中程序调整、工装夹具准备、刀具准备及零件检测等占用的时间较多,加工效率偏低。据统计,机床有效切削时

间比例仅为 30%，这极大地影响了产品加工效率的提高。

(3) 切削加工效率低，高速切削应用比例较低。在数控加工仿真、程序优化、工艺参数库、制造资源管理等方面与高效加工需求存在一定的差距，切削参数不合理、机床利用率低等现状极大地制约了高效数控加工技术的发展。特别是飞机大型零件，材料去除量大、加工周期长、加工效率低等现状成为制约生产研制的突出问题。

(4) 信息化程度低，制约了生产研制的高效运作。数控机床是一个孤岛，各环节数据信息传递和交换存在瓶颈，总体上制约了企业的高效运作，影响生产效率。

(5) 大型结构件变形控制仍然是亟待突破的难题。不同类型的航空零件结构、尺寸、材料各不相同，难以掌握准确的变形规律，这是数控加工中最大的变数之一。

(6) 研制成本高，研制风险大。大型航空结构件、新型材料构件等毛料价值较高，任何质量问题都会给企业带来巨大的经济损失。

本著作是西北工业大学航空宇航制造工程专业教学科研团队在多年教学、科研工作中的知识积累和经验总结。本课题组自从 20 世纪 90 年代以来一直致力于航空发动机关键零部件的科研、生产制造、技术攻关工作。著作中主要介绍航空复杂零件数控加工方法、机床、刀具、夹具；制造质量分析与控制；工艺规程设计以及航空典型零件精密加工等先进制造技术。全书以系统的观点构建航空典型零件数控加工知识体系，让读者对航空零部件制造关键技术有一个全面系统的了解。

本著作在内容的编排上力求精练，符合读者的认知规律。首先介绍从加工方法的认识到完成加工成形的装备，其次介绍从加工工艺过程的设计到质量的控制，最后介绍具有代表性航空典型零件的先进制造技术。全书内容系统全面，知识体系科学完整。

本著作具体内容包括：

第 1 章数控加工技术基础。本章系统介绍数控技术的发展历程与发展方向，数控机床的基本结构与控制原理。同时对数控加工编程技术进行简要的介绍。通过本章学习，读者可以对数控加工技术有一个全面的了解。

第 2 章数控加工夹具与工艺设计基础。本章主要针对航空零部件的数控加工夹具与工艺设计进行详细的介绍。最后，针对航空复杂零件的夹具的设计特点及设计方法进行介绍。

第 3 章复杂薄壁件数控加工工艺。本章主要针对典型航空零部件叶片、叶盘、机匣、叶轮等构件的加工特点、数控加工工艺规划、数控加工关键技术及编程方法进行详细介绍。通过本章学习，读者可以对复杂薄壁件的数控工艺规划、刀轴矢量控制、刀位轨迹计算方法有进一步深入的掌握。

第 4 章整体构件高效数控加工。本章主要针对典型航空零部件的高效数控加工技术进行全面阐述，包括高效插铣技术、快速铣削技术、高速加工技术等工艺方法。通过本章学习，读者可以对典型航空零部件高效加工技术有系统的了解。

第 5 章薄壁件加工变形控制技术。本章主要针对典型航空薄壁零部件的变形控制技术进行阐述，其中反变形补偿技术、对称铣削技术、同步半精铣-精铣工艺技术都是团队多年来实践经验与科研成果的高度总结。通过本章学习，读者可以对典型航空薄壁零件的变形规律及变形控制方法有全面的了解。

第 6 章薄壁件加工颤振抑制技术。本章主要针对典型航空薄壁件数控加工颤振的产生机

理与颤振抑制技术进行阐述,其中非均匀刚度优化理论、刀轴矢量优化控制等包含了团队多年来科研成果的结晶。

第7章高速铣削表面完整性控制。本章主要针对典型航空零部件高速数控加工表面质量完整性进行详细的介绍,涉及表面完整性的内涵、测试方法、高速加工切削参数、刀具参数等对表面完整性的影响规律。通过本章学习,读者可以对表面完整性评价体系与测试方法以及工艺参数的优化方法有全面深入的了解。

本著作力求反映目前航空制造业的发展现状,论述深入浅出,图文并茂,既给出了相关技术的基本原理,又提供了较多的工程应用,力求通过本书的出版,让读者能够在实践的基础上深刻理解和掌握航空复杂零件先进制造手段和方法。

本著作由西北工业大学机电学院任军学教授牵头执笔,姚倡锋教授、刘维伟副教授、田卫军副教授等人共同参与完成。博士研究生梁永收、史恺宁、周金华、黄新春、冯亚洲、李祥宇、冯谦、吴导侠等人和许多硕士研究生在章节校对与书写方面提供了大量的帮助,同时西北工业大学教务处、西北工业大学出版社和“高档数控机床与基础制造装备科技重大专项资助”(2014ZX04012013)在出版方面提供了大量的帮助,在此一并致谢。

虽然笔者在本著作的编写过程中力求叙述准确、完善,但由于水平有限,书中欠妥之处难免,希望读者和同仁能够及时指出,共同促进本专著质量的提高,为我国航空事业发展贡献一份力量。

任军学

2018年8月30日于西安

目 录

第 1 章 数控加工技术基础	1
1.1 数控机床概述	1
1.2 数控机床控制原理	11
1.3 数控编程基础	31
1.4 数控加工编程方法	38
参考文献	49
第 2 章 数控加工夹具与工艺设计基础	50
2.1 数控机床夹具概述	50
2.2 工件的定位与夹紧	53
2.3 夹具设计与优化	69
2.4 数控加工工艺基础	74
参考文献	91
第 3 章 复杂薄壁件数控加工工艺	92
3.1 叶片类零件数控加工工艺	92
3.2 机匣类零件数控加工工艺	103
3.3 叶盘类零件数控加工工艺	116
3.4 叶轮类零件数控加工工艺	128
参考文献	141
第 4 章 整体构件高效数控加工	143
4.1 整体构件插铣工艺及应用	143
4.2 整体构件快速铣工艺及应用	165
4.3 整体构件高速铣削工艺及应用	173
参考文献	185
第 5 章 薄壁件加工变形控制技术	186
5.1 薄壁结构加工变形概述	186
5.2 弹性变形误差补偿技术	189
5.3 加工残余应力变形控制技术	205
参考文献	222

第 6 章 薄壁件加工颤振抑制技术	223
6.1 颤振抑制技术现状	223
6.2 切削颤振机理及抑制策略	226
6.3 基于转速-切深参数的颤振抑制方法	230
6.4 基于工艺刚度增强的颤振抑制方法	245
6.5 基于刀轨优化的颤振抑制方法	256
6.6 薄壁叶片颤振抑制实验验证	261
参考文献.....	263
第 7 章 高速铣削表面完整性控制	264
7.1 高速铣削工艺及其特点	264
7.2 表面完整性概念、表征及检测方法	266
7.3 高速铣削表面粗糙度与形貌	274
7.4 高速铣削速度对钛合金表面完整性的影响	288
7.5 立铣刀高速端铣加工工艺对表面完整性的影响	295
7.6 球头刀高速铣削加工工艺对表面完整性的影响	300
参考文献.....	315

第 1 章

数控加工技术基础

数控技术是现代先进制造技术的核心。随着科学技术的发展,机械产品的结构越来越复杂,对产品的性能、精度和生产效率的要求越来越高,并且更新换代频繁。为了缩短生产周期,满足市场上不断变化的需求,机械制造业正经历着从大批量到小批量及单件生产的转变过程,而传统的制造手段已满足不了当前技术的发展和市场竞争的要求。数控技术的应用和发展,有效地解决了上述问题,它使传统的制造方式发生了根本的转变。现在数控技术已成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术,现代的 CAD/CAM、FMS、CIMS、敏捷制造和智能制造等都是建立在数控技术之上的。

1.1 数控机床概述

1.1.1 数控机床的发展史

20 世纪中期,随着电子技术的发展,自动信息处理、数据处理以及电子计算机的出现,给自动化技术带来了新的概念,用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制,推动了机床自动化的发展。

采用数字技术进行机械加工,最早是在 20 世纪 40 年代初,由美国北密支安的一个小型飞机工业承包商派尔逊斯公司(Parsons Corporation)实现的。他们在制造飞机的框架及直升机的旋翼时,利用全数字电子计算机对机翼加工路径进行数据处理,并考虑到刀具直径对加工路径的影响,使得加工精度达到 $\pm 0.0381 \text{ mm}(\pm 0.0015 \text{ in})$,达到了当时的最高水平。

1952 年,麻省理工学院在一台立式铣床上,装上了一套实验性的数控系统,成功地实现了同时控制三轴的运动。这台机床是一台实验性机床,被大家称为世界上第一台数控机床。到 1954 年 11 月,在派尔逊斯专利的基础上,第一台工业用的数控机床由美国本迪克斯公司(Bendix - Cooperation)正式生产出来。

此后,从 1960 年开始,其他一些工业国家,如德国、日本都陆续开发、生产及使用了数控机床。由于当时数控系统处于电子管、晶体管和集成电路初期,设备体积大、线路复杂、价格昂贵、可靠性差,数控机床大多是控制简单的数控钻床,数控技术没有普及推广,数控机床技术发展整体进展缓慢。

70 年代,出现了大规模集成电路和小型计算机,特别是微处理器的研制成功,实现了数控系统体积小、运算速度快、可靠性提高、价格下降,使数控系统总体性能、质量有了很大提高,同时,数控机床的基础理论和关键技术有了新的突破,从而给数控机床发展注入了新的活力,世界发达国家的数控机床产业开始进入到发展阶段。

80 年代以来,数控系统微处理器运算速度快速提高,功能不断完善、可靠性进一步提高,

监控、检测、换刀、外围设备得到了应用,使数控机床得到了全面发展,数控机床品种迅速扩展,发达国家数控机床产业进入到发展应用阶段。

90年代,数控机床得到了普遍应用,数控机床技术有了进一步发展,柔性单元、柔性系统、自动化工厂开始应用,标志着数控机床产业化进入成熟阶段。中国于1958年研制出第一台数控机床,发展过程大致可分为两大阶段。1958—1979年间为第一阶段,从1979年至今为第二阶段。第一阶段对数控机床特点、发展条件缺乏认识,在人员素质不高、基础薄弱、配套件不过关的情况下,一哄而上又一哄而下,曾三起三落,终因表现欠佳、无法应用于生产而停顿。主要存在的问题是盲目性大,缺乏实事求是的科学精神。第二阶段从日本、德国、美国、西班牙先后引进数控系统技术,从日本、美国、德国、意国、英国、法国、瑞士、匈牙利、奥地利、韩国和中国台湾引进数控机床先进技术和合作、合资生产,解决了可靠性、稳定性问题,数控机床开始正式生产和使用,并逐步向前发展。

1.1.2 数控机床的发展趋势

进入21世纪,我国经济与国际全面接轨,进入了一个蓬勃发展的新时期。目前,数控机床的发展日新月异,高速化、高精度化、复合化、智能化、开放化、并联驱动化、网络化、极端化、绿色化已成为数控机床发展的趋势和方向。

1. 高速化

随着汽车、国防、航空、航天等工业的高速发展以及铝合金等新材料的应用,对数控机床加工的高速化要求越来越高。

(1) 主轴转速:机床采用电主轴(内装式主轴电机),主轴最高转速达200 000 r/min。

(2) 进给率:在分辨率为 $0.01\ \mu\text{m}$ 时,最大进给率达到240 m/min且可获得复杂型面的精确加工。

(3) 运算速度:微处理器的迅速发展为数控系统向高速、高精度方向发展提供了保障,开发出CPU已发展到32位以及64位的数控系统,频率提高到数百兆赫甚至上千兆赫。由于运算速度的极大提高,使得当分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$, $0.01\ \mu\text{m}$ 时仍能获得高达24~240 m/min的进给速度。

(4) 换刀速度:目前国外先进加工中心的刀具交换时间普遍已在1 s左右,高的已达0.5 s。德国Chiron公司将刀库设计成篮子样式,以主轴为轴心,刀具在圆周布置,其刀到刀的换刀时间仅0.9 s。

2. 高精度化

数控机床精度的要求现在已经不局限于静态的几何精度,机床的运动精度、热变形以及对振动的监测和补偿越来越获得重视。

(1) 提高CNC系统控制精度:采用高速插补技术,以微小程序段实现连续进给,使CNC控制单位精细化,并采用高分辨率位置检测装置,提高位置检测精度(日本已开发装有106脉冲/转的内藏位置检测器的交流伺服电机,其位置检测精度可达到 $0.01\ \mu\text{m}/\text{脉冲}$),位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法。

(2) 采用误差补偿技术:采用反向间隙补偿、丝杆螺距误差补偿和刀具误差补偿等技术,对设备的热变形误差和空间误差进行综合补偿。研究表明,综合误差补偿技术的应用可将加工误差减少60%~80%。

(3)采用网格解码器检查和提高加工中心的运动轨迹精度,并通过仿真预测机床的加工精度,以保证机床的定位精度和重复定位精度,使其性能长期稳定,能够在不同运行条件下完成多种加工任务,并保证零件的加工质量。

3. 功能复合化

复合机床的含义是指在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的多种要素加工。根据其结构特点可分为工艺复合型和工序复合型两类。工艺复合型机床如镗铣钻复合,加工中心、车铣复合,车削中心、铣镗钻车复合,复合加工中心等;工序复合型机床如多面多轴联动加工的复合机床和双主轴车削中心等。采用复合机床进行加工,减少了工件装卸、更换和调整刀具的辅助时间以及中间过程中产生的误差,提高了零件加工精度,缩短了产品制造周期,提高了生产效率和制造商的市场反应能力,相对于传统的工序分散的生产方法具有明显的优势。

加工过程的复合化也导致了机床向模块化、多轴化发展。德国 Index 公司最新推出的车削加工中心是模块化结构,该加工中心能够完成车削、铣削、钻削、滚齿、磨削、激光热处理等多种工序,可完成复杂零件的全部加工。随着现代机械加工要求的不断提高,国内外制造商展出了形式多样的多轴加工机床(包括双主轴、双刀架、9轴控制等)以及可实现4~5轴联动的五轴高速门式加工中心、五轴联动高速铣削中心等。

4. 控制智能化

随着人工智能技术的发展,为了满足制造业生产柔性化、制造自动化的发展需求,数控机床的智能化程度在不断提高。具体体现在以下几个方面:

(1)加工过程自适应控制技术:通过监测加工过程中的切削力、主轴和进给电机的功率、电流、电压等信息,利用传统的或现代算法进行识别,以辨识出刀具的受力、磨损、破损状态及机床加工的稳定性状态,并根据这些状态实时调整加工参数(主轴转速、进给速度)和加工指令,使设备处于最佳运行状态,以提高加工精度、降低加工表面粗糙度并提高设备运行的安全性。

(2)加工参数的智能优化与选择:将工艺专家或技师的经验、零件加工的一般与特殊规律,用现代智能方法,构造基于专家系统或基于模型的“加工参数的智能优化与选择器”,利用它获得优化的加工参数,从而达到提高编程效率和加工工艺水平、缩短生产准备时间的目的。

(3)智能故障自诊断与自修复技术:根据已有的故障信息,应用现代智能方法实现故障的快速准确定位。

(4)智能故障回放和故障仿真技术:能够完整记录系统的各种信息,对数控机床发生的各种错误和事故进行回放和仿真,用以确定错误引起的原因,找出解决问题的办法,积累生产经验。

(5)智能化交流伺服驱动装置:能自动识别负载,并自动调整参数的智能化伺服系统,包括智能主轴交流驱动装置和智能化进给伺服装置。这种驱动装置能自动识别电机及负载的转动惯量,并自动对控制系统参数进行优化和调整,使驱动系统获得最佳运行。

(6)智能4M数控系统:在制造过程中,加工、检测一体化是实现快速制造、快速检测和快速响应的有效途径,将测量(Measurement)、建模(Modelling)、加工(Manufacturing)、机器操作(Manipulator)四者(即4M)融合在一个系统中,实现信息共享,促进测量、建模、加工、装夹、操作的一体化。

5. 体系开放化

(1)向未来技术开放:由于软硬件接口都遵循公认的标准协议,只需少量的重新设计和调整,新一代的通用软硬件资源就可能被现有系统所采纳、吸收和兼容,这就意味着系统的开发费用将大大降低而系统性能与可靠性将不断改善并处于长生命周期。

(2)向用户特殊要求开放:更新产品、扩充功能、提供硬软件产品的各种组合以满足特殊应用要求。

(3)数控标准的建立:国际上正在研究和制定一种新的 CNC 系统标准 ISO 14649(STEP-NC),以提供一种不依赖于具体系统的中性机制,能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型,从而实现整个制造过程乃至各个工业领域产品信息的标准化。标准化的编程语言,既方便用户使用,又降低了和操作效率直接有关的劳动消耗。

6. 驱动并联化

并联运动机床克服了传统机床串联机构移动部件质量大、系统刚度低、刀具只能沿固定导轨进给、作业自由度偏低、设备加工灵活性和机动性不够等固有缺陷,在机床主轴(一般为动平台)与机座(一般为静平台)之间采用多杆并联联接机构驱动,通过控制杆系中杆的长度使杆系支撑的平台获得相应自由度的运动,可实现多坐标联动数控加工、装配和测量多种功能,更能满足复杂特种零件的加工,具有现代机器人的模块化程度高、质量轻和速度快等优点。

并联机床作为一种新型的加工设备,已成为当前机床技术的一个重要研究方向,受到了国际机床行业的高度重视,被认为是“自发明数控技术以来在机床行业中最有意义的进步”和“21世纪新一代数控加工设备”。

7. 多媒体技术的应用

多媒体技术集计算机、声像和通信技术于一体,使计算机具有综合处理声音、文字、图像和视频信息的能力,因此也对用户界面提出了图形化的要求。合理的人性化的用户界面极大地方便了非专业用户的使用,人们可以通过窗口和菜单进行操作,便于蓝图编程和快速编程、三维彩色立体动态图形显示、图形模拟、图形动态跟踪和仿真、不同方向的视图和局部显示比例缩放功能的实现。除此以外,在数控技术领域应用多媒体技术可以做到信息处理综合化、智能化,应用于实时监控系统和生产现场设备的故障诊断、生产过程参数监测等,因此有着重大的应用价值。

8. 信息交互网络化

对于面临激烈竞争的企业来说,使数控机床具有双向、高速的联网通信功能,以保证信息流在车间各个部门间畅通无阻是非常重要的。既可以实现网络资源共享,又能实现数控机床的远程监视、控制、培训、教学、管理,还可实现数控装备的数字化服务(数控机床故障的远程诊断、维护等)。例如,日本 Mazak 公司推出新一代的加工中心配备了一个称为信息塔(e-Tower)的外部设备,包括计算机、手机、机外和机内摄像头等,能够实现语音、图形、视像和文本的通信故障报警显示、在线帮助排除故障等功能,是独立的、自主管理的制造单元。

9. 极端化(大型化和微型化)

国防、航空、航天事业的发展和能源等基础产业装备的大型化需要大型且性能良好的数控机床的支撑。而超精密加工技术和微纳米技术是 21 世纪的战略技术,需发展能适应微小型尺寸和微纳米加工精度的新型制造工艺和装备,所以微型机床包括微切削加工(车、铣、磨)机床、微电加工机床、微激光加工机床和微型压力机等的需求量正在逐渐增大。

10. 高可靠性

数控机床与传统机床相比,增加了数控系统和相应的监控装置等,应用了大量的电气、液压和机电装置,易于导致出现失效的概率增大;工业电网电压的波动和干扰对数控机床的可靠性极为不利,而数控机床加工的零件型面较为复杂,加工周期长,要求平均无故障时间在20 000 h以上。为了保证数控机床有高的可靠性,就要精心设计系统、严格制造和明确可靠性目标以及通过维修分析故障模式并找出薄弱环节。国外数控系统平均无故障时间在70 000 h以上,国产数控系统平均无故障时间仅为10 000 h左右,国外整机平均无故障工作时间达800 h以上,而国内最高只有300 h。

11. 加工过程绿色化

随着日趋严格的环境与资源约束,制造加工的绿色化越来越重要,而中国的资源、环境问题尤为突出。因此,近年来不用或少用冷却液、实现干切削、半干切削节能环保的机床不断出现,并在不断发展当中。在21世纪,绿色制造的大趋势将使各种节能环保机床加速发展,占领更多的世界市场。

1.1.3 数控加工的基本概念

数控即为数字控制(Numerical Control, NC),是用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的一种方法。

数控系统:数控机床中的程序控制系统,它能够自动阅读输入载体上事先给定的程序,并将其译码,从而使机床运动和加工工件。

数控机床:就是采用了数控技术的机床,或者说是装备了数控系统的机床。它是一种将数字计算技术应用于机床的控制技术。它把机械加工过程中的各种控制信息用代码化的数字表示,通过信息载体输入数控装置。经运算处理由数控装置发出各种控制信号,控制机床的动作,按图纸要求的形状和尺寸,自动地将零件加工出来。

数控机床较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题,是一种柔性的、高效的自动化机床,代表了现代机床控制技术的发展方向,是一种典型的机电一体化产品。其特点如下所述。

1. 柔性好

由硬件逻辑电路构成的专用硬件数控装置,若想改变系统的功能,必须重新布线;具有灵活性计算机数控系统只要改变相应控制软件,就可改变和扩展其功能,满足用户的不同需要。

2. 功能强

可利用计算机技术及其外围设备,增强数控系统及数控机床的功能。例如,利用计算机图形显示功能,检查编程的刀具轨迹,纠正编程错误,还可校验刀具与机床、夹具碰撞的可能性等;利用计算机网络通信的功能,便于数控机床组成生产线。

3. 可靠性高

计算机数控系统可使用磁带、软盘以及U盘等多种输入装置,避免了以往数控机床由于频繁地开启光电阅读机而造成的信息出错的缺点。与硬件数控相比,计算机数控尽量减少硬件电路,显著地减少了焊点、接插件和外部连线,提高了可靠性。此外,计算机数控系统一般都具备自诊断功能,当数控系统出现故障时,能显示出故障信息,便于维修或预防操作失误,减少维修停机时间。这一切使得现代数控系统的无故障运行时间大为增加。

4. 易于实现机电一体化

由于计算机电路板上采用大规模集成电路和先进的印制电路排版技术,只要采用数块印制电路板即可构成整个控制系统,而将数控装置连同操作面板装入一个不大的数控箱内,有力地促进了机电一体化。

5. 经济性好

采用微机数控系统后,系统的性能价格比大为提高,现在不仅大型企业,就是中小型企业也逐渐采用微机数控系统了。

1.1.4 数控机床的基本组成

现代计算机数控机床由控制介质、输入输出设备、计算机数控装置、伺服系统及机床本体组成,如图 1-1 所示。

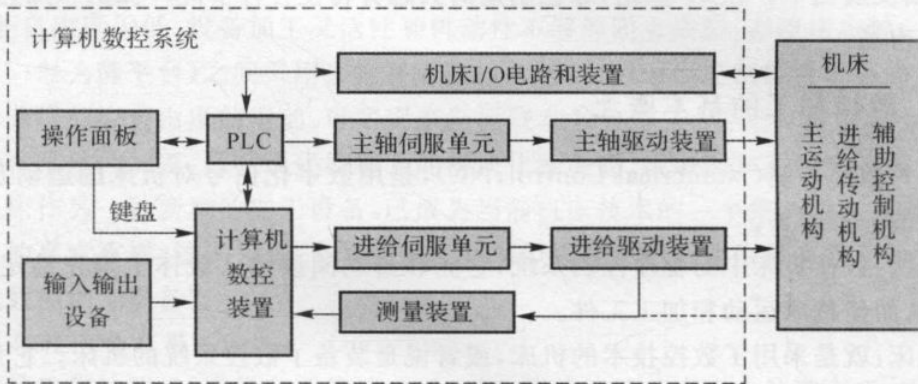


图 1-1 数控机床基本组成

1. 控制介质

控制介质又称信息载体,是人与数控机床之间联系的中间媒介物质,反映了数控加工中的全部信息。早期常用的有穿孔带、磁带、磁盘等,目前常用移动硬盘、Flash(U 盘)、CF 卡等。

2. 输入/输出装置

输入/输出装置是机床数控(CNC)系统与外部设备进行交互的装置。交互的信息通常是零件加工程序。即将编制好的记录在控制介质上的零件加工程序输入 CNC 系统或将调试好了的零件加工程序通过输出设备存放或记录在相应的控制介质上。

3. 数控装置

CNC 装置是数控机床实现自动加工的核心,主要由计算机系统、位置控制板、PLC 接口板、通信接口板、特殊功能模块以及相应的控制软件等组成。其作用就是根据输入的零件加工程序进行相应的处理(如运动轨迹处理、机床输入输出处理等),然后输出控制命令到相应的执行部件(伺服单元、驱动装置和 PLC 等),所有这些工作是由 CNC 装置内硬件和软件协调配合,合理组织,使整个系统有条不紊地进行工作的。

4. 伺服系统

伺服系统是数控系统与机床本体之间的传动联系环节,主要由伺服电动机、驱动控制系统以及位置检测反馈装置组成。伺服电机是系统的执行元件,驱动控制系统则是伺服电机的动力源。数控系统发出的指令信号与位置反馈信号比较后作为位移指令,再经过驱动系统的功

率放大后,带动机床移动部件作精确定位或按照规定的轨迹和进给速度运动,使机床加工出符合图纸要求的零件。

5. 检测反馈系统

测量反馈系统由检测元件和相应的电路组成,其作用是检测机床的实际位置、速度等信息,并将其反馈给数控装置与指令信息进行比较和校正,构成系统的闭环控制。

6. 机床本体

机床本体指的是数控机床机械机构实体,包括床身、主轴、进给机构等机械部件。由于数控机床是高精度和高生产率的自动化机床,它与传统的普通机床相比,具有更好的刚性和抗振性,相对运动摩擦因数要小,传动部件之间的间隙要小,而且传动和变速系统要便于实现自动化控制。

1.1.5 数控机床的分类

数控机床的种类很多,可以按不同的方法对数控机床进行分类。

1. 按工艺用途分类

按工艺用途可分为数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控镗铣床、数控电火花加工机床、数控线切割机床、数控齿轮加工机床、数控冲床、数控液压机床等各种用途的数控机床,如图1-2所示。

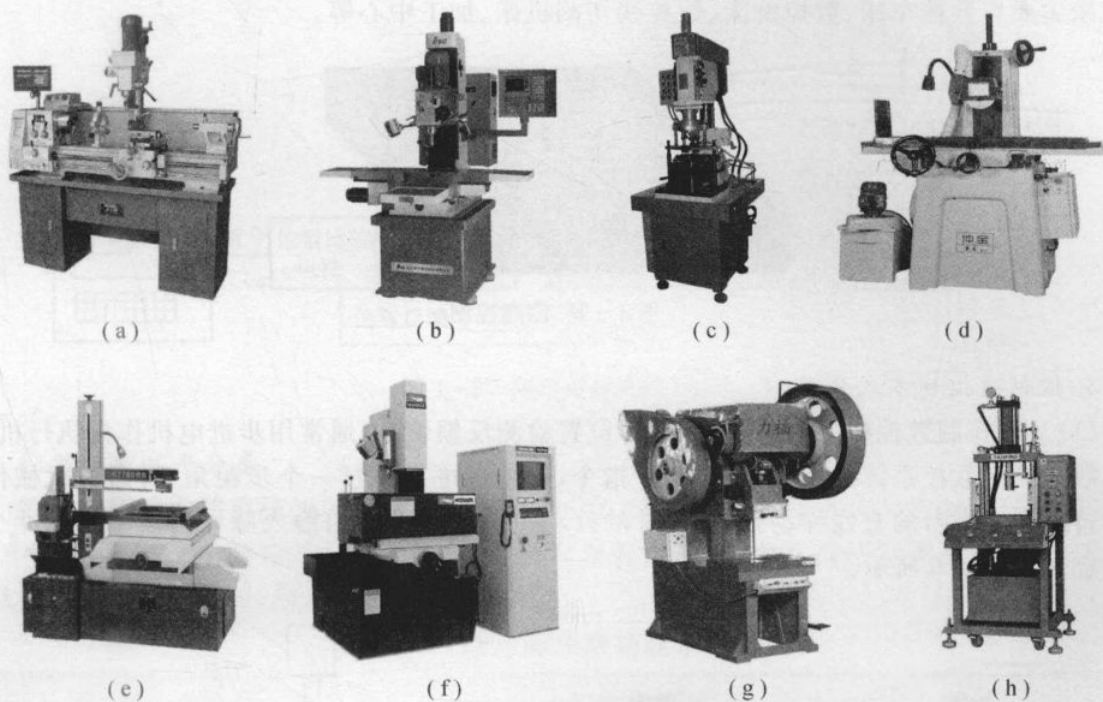


图1-2 各类数控机床

(a)数控车床;(b)数控铣床;(c)数控钻床;(d)数控磨床;
(e)数控线切割机床;(f)数控电火花加工机床;(g)数控冲床;(h)数控液压机床

2. 按运动方式分类

(1)点位控制数控机床:数控系统只控制刀具从一点到另一点的准确位置,而不控制运动

轨迹,各坐标轴之间的运动是不相关的,在移动过程中不对工件进行加工,如图 1-3 所示。这类数控机床主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床等。

(2)直线控制数控机床:数控系统除了控制点与点之间的准确位置外,还要保证两点间的移动轨迹为一直线,并且对移动速度也要进行控制,也称点位直线控制,如图 1-4 所示。这类数控机床主要有比较简单的数控车床、数控铣床、数控磨床等,而单纯用于直线控制的数控机床已不多见。

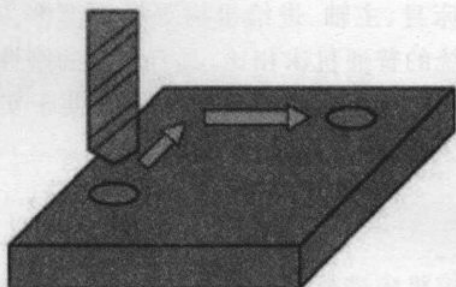


图 1-3 点位控制

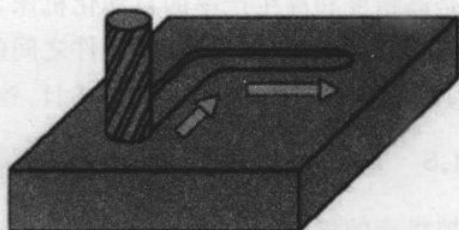


图 1-4 直线控制

(3)轮廓控制数控机床:轮廓控制的特点是对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度同时进行连续相关的控制,它不仅控制机床移动部件的起点与终点坐标,而且要控制整个加工过程的每一点的速度、方向和位移量,也称为连续控制数控机床,如图 1-5 所示。这类数控机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机床、加工中心等。

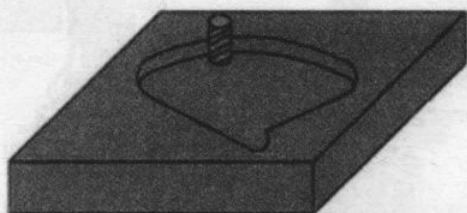


图 1-5 轮廓控制

3. 按伺服控制方式分类

(1)开环控制数控机床:这类机床不带位置检测反馈装置,通常用步进电机作为执行机构。输入数据经过数控系统的运算,发出脉冲指令,使步进电机转过一个步距角,再通过机械传动机构转换为工作台的直线移动,移动部件的移动速度和位移量由输入脉冲的频率和脉冲个数所决定,如图 1-6 所示。

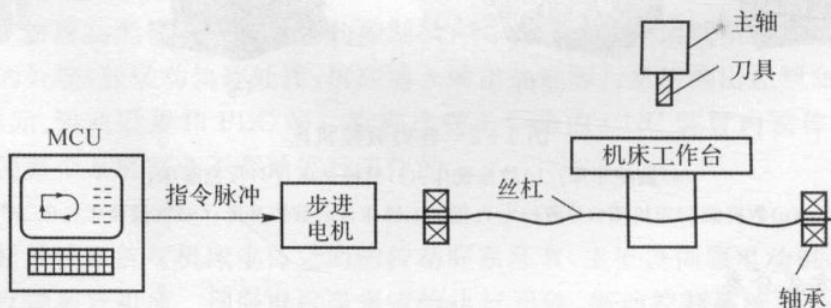


图 1-6 开环控制系统框图

(2)半闭环控制数控机床:在电机的端头或丝杠的端头安装检测元件(如感应同步器或光电编码器等),通过检测其转角来间接检测移动部件的位移,然后反馈到数控系统中。由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内,因此可获得较稳定的控制特性。其控制精度虽不如闭环控制数控机床,但调试比较方便,因而被广泛采用,如图1-7所示。

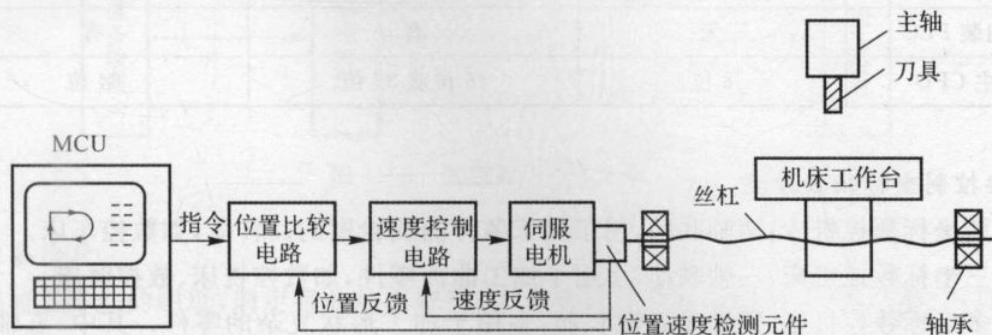


图 1-7 半闭环控制系统框图

(3)闭环控制数控机床:这类数控机床带有位置检测反馈装置,其位置检测反馈装置采用直线位移检测元件,直接安装在机床的移动部件上,将测量结果直接反馈到数控装置中,通过反馈可消除从电动机到机床移动部件整个机械传动链中的传动误差,最终实现精确定位,如图1-8所示。

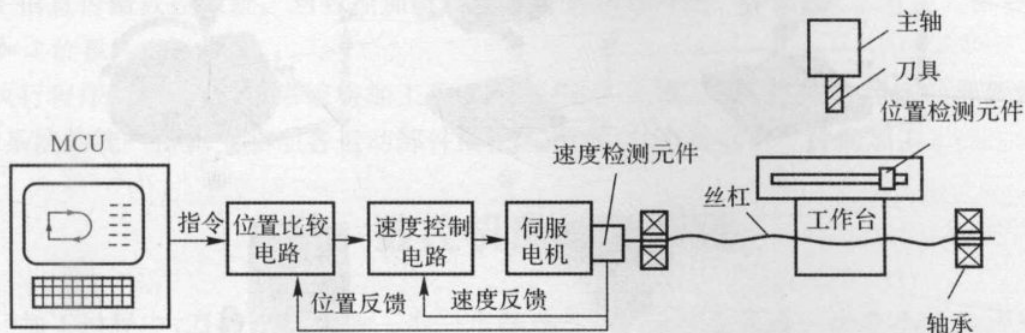


图 1-8 闭环控制系统框图

4. 按功能水平分类

数控机床按数控系统的功能水平可分为低、中、高三档。这种分类方式在我国用得很多。低、中、高档的界限是相对的,不同时期的划分标准有所不同,就目前的发展水平来看,大体可以从以下几个方面区分,见表1-1。

表 1-1 数控机床按功能水平分类

项 目	低档	中档	高档
分辨率,进给速度	10 μm,8~15 m/min	1 μm,15~24 m/min	0.1 μm,15~100 m/min
伺服进给类型	开环、步进电动机系统	半闭环直流或交流伺服系统	闭环直流或交流伺服系统
联动轴数	2 轴	3~5 轴	3~5 轴
主轴功能	不能自动变速	自动无级变速	自动无级变速、C 轴功能