



国防特色教材·职业教育

数控加工与编程

SHUKONG JIAGONG YU BIANCHENG

● 刘 坚 主编 ●

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·职业教育

数控加工与编程

刘 坚 主编

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

高等教育出版社



内容简介

本书是“十一五”国防特色规划教材“数控技术”专业规划教材之一。全书共7章,主要介绍数控加工工艺基本知识、数控程序编制基本知识、数控车床加工工艺与编程、数控铣削加工工艺与编程、加工中心加工工艺与编程、数控电火花线切割机床加工工艺与编程及自动编程等内容,各章后均附有思考题与习题。书中采用新国标规定的名词术语,将数控加工工艺规程的制定与数控加工程序编制有机地结合在一起。

本书可供高等职业技术学院、职工大学等相关专业选用,也可供大专院校和从事数控加工与编程工作的工程技术人员参考,或作为工厂数控加工设备操作工人的自学教材。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工与编程/刘坚主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.8

ISBN 978-7-81124-822-7

I. 数… II. 刘… III. 数控机床—程序设计 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 113611 号

数控加工与编程

刘 坚 主编

责任编辑 史海文 杨 波 李保国

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19.25 字数:431 千字

2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-822-7 定价:34.00 元

数控加工与编程

主 编 刘 坚

副主编 刘让贤

王秀伟

章正伟

参 编 龚环球

金初云

黄国辉

主 审 赵学清

前 言

本书是高等职业技术教育“数控技术”专业的适用教材,是“十一五”国防特色规划教材。

本书内容是根据数控技术的迅速发展对人才素质的要求而确立的,体现了以创新意识和实践能力为重点的教育教学指导思想。在书中渗透了当代课程的教学内容科学思维,反映了数控技术发展对数控技术应用型人才素质的要求。

本书在调查研究的基础上,总结近几年来高等职业技术教育课程改革的经验,适应经济发展、科技进步和生产实际对教学内容提出的新要求,注意反映生产实际中的新知识、新技术、新工艺和新方法,突出高等职业教育特色,紧密联系生产实际,注意基本理论、基本知识和基本技能的论述。书中编写了形式多样的例题、习题和思考题,方便教学,具有广泛的实用性。

全书共7章,分别介绍数控加工工艺基本知识、数控程序编制基本知识、数控车床加工工艺与编程、数控铣削加工工艺与编程、加工中心加工工艺与编程、数控电火花线切割机床加工工艺与编程及自动编程等内容。除供高等职业技术学院、职工大学等相关专业选用外,也可供大专院校和从事数控加工与编程工作的工程技术人员参考,或作为工厂数控加工设备操作工人的自学教材。

本书绪论和第1章由张家界航空工业职业技术学院刘坚老师编写,第2章由大庆职业技术学院黄国辉老师编写,第3章由张家界航空工业职业技术学院刘让贤老师编写,第4章由大庆职业技术学院王秀伟老师编写,第5章由浙江交通职业技术学院金初云老师编写,第6章由浙江交通职业技术学院章正伟老师编写,第7章由张家界航空工业职业技术学院刘让贤老师和中国航空工业集团公司株洲南方航空工业公司龚环球高级工程师编写。刘坚老师为主编,刘让贤、王秀伟、章正伟老师为副主编。

本书由张家界航空工业职业技术学院赵学清副教授主审。参加审稿者除编审人员外,还有湖南工业大学熊显文教授、张家界航空工业职业技术学院胡细东副教授、湖南工业职业技术学院王雪红副教授等。他们对书稿提出了许多宝贵的意见,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,经验不足,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

编 者

2009年6月于张家界

目 录

绪 论	1
0.1 数控加工在机械制造业中的地位和作用	1
0.2 数控加工技术的发展	2
0.3 现代数控技术发展趋势	5
0.4 本课程的性质、任务和内容	7
第 1 章 数控加工工艺基本知识	8
1.1 数控加工工艺系统	8
1.1.1 数控加工工艺系统的基本组成	8
1.1.2 数控机床的主要类型	10
1.1.3 数控刀具的主要种类和特点	13
1.1.4 数控机床夹具的类型和特点	17
1.2 数控刀具	20
1.2.1 数控刀具材料	20
1.2.2 数控刀具的失效形式及可靠性	25
1.2.3 数控可转位刀片	27
1.2.4 数控刀具的选择	31
1.2.5 工具系统	42
1.3 数控加工工艺设计	47
1.3.1 数控加工工艺过程概述	47
1.3.2 数控加工工艺设计的主要内容	49
1.3.3 数控加工工序设计方法	55
1.3.4 编制数控加工工艺文件	66
思考题与习题	70
第 2 章 数控程序编制基本知识	72
2.1 数控编程的基本概念	72
2.1.1 数控编程的定义	72
2.1.2 数控编程的内容与步骤	72

2.1.3	数控编程的方法	74
2.2	数控机床的坐标系	75
2.2.1	机床坐标系	75
2.2.2	工件坐标系	78
2.2.3	加工坐标系	79
2.3	数控加工程序与常用编程指令	79
2.3.1	程序结构与程序段格式	79
2.3.2	常用编程指令	81
2.4	数控编程中的数学处理	88
2.4.1	选择编程原点	88
2.4.2	基点计算	89
2.4.3	非圆曲线数学处理的基本过程	90
2.4.4	列表曲线的数学处理	91
2.4.5	数控加工误差分析	91
	思考题与习题	92
第3章	数控车床加工工艺与编程	93
3.1	数控车削的主要加工对象	93
3.1.1	加工精度要求高的零件	93
3.1.2	表面质量要求高的零件	93
3.1.3	表面轮廓形状复杂的零件	94
3.1.4	导程有特殊要求的螺纹零件	94
3.2	数控车削加工工艺基础	94
3.2.1	零件图工艺分析	94
3.2.2	工序的划分	95
3.2.3	加工顺序的确定	96
3.2.4	进给路线的确定	97
3.2.5	夹具的选择和装夹方式的确定	100
3.2.6	刀具的选择	102
3.2.7	对刀	103
3.2.8	车削用量的选择	105
3.3	数控车床的编程基础	107
3.3.1	数控车床编程特点	107
3.3.2	数控车床的坐标系	107

3.3.3 数控车床编程基本功能指令	108
3.4 数控车床编程的基本方法	110
3.4.1 坐标值编程方式	110
3.4.2 机床原点与参考点	112
3.4.3 机床坐标系与工件坐标系	113
3.4.4 暂停指令 G04	115
3.4.5 刀具补偿功能	116
3.4.6 循环加工编程	120
3.4.7 复合循环指令 G71,G72,G73,G70	124
3.4.8 螺纹车削加工编程	129
3.4.9 子程序	134
3.4.10 自动倒角、倒圆角功能	135
3.5 数控车削加工编程综合实例	137
思考题与习题	141
第 4 章 数控铣削加工工艺与编程	144
4.1 数控铣削加工的主要对象	144
4.2 数控铣削加工工艺的制定	145
4.2.1 数控铣削加工内容的选择	145
4.2.2 数控铣削加工零件的工艺性分析	146
4.2.3 数控铣削加工工艺路线的确定	147
4.2.4 夹具的选择和装夹方式的确定	150
4.2.5 刀具的选择和对刀	150
4.2.6 铣削用量的选择	151
4.3 数控铣床编程基本方法	153
4.3.1 数控铣床的编程特点	153
4.3.2 数控铣床的坐标系	154
4.3.3 常用辅助功能	154
4.3.4 进给功能 F、主轴转速功能 S 和刀具功能 T	156
4.3.5 常用 G 指令功能	156
4.3.6 固定循环指令	166
4.3.7 子程序	171
4.3.8 宏程序	173
4.4 数控铣削加工编程综合实例	179

思考题与习题	185
第5章 加工中心加工工艺与编程	187
5.1 加工中心的主要加工对象和工艺特点	187
5.1.1 加工中心的主要加工对象	187
5.1.2 加工中心的工艺特点	188
5.2 加工中心加工工艺的制定	189
5.2.1 零件的工艺分析	190
5.2.2 加工中心的分类	192
5.2.3 加工中心加工工艺路线的确定	194
5.2.4 夹具的选择和装夹方式的确定	195
5.2.5 刀具的选择	197
5.3 加工中心编程基础	198
5.3.1 加工中心的编程特点	198
5.3.2 加工中心指令系统简介	199
5.4 SINUMERIK 系统固定循环功能	204
5.4.1 主要参数	204
5.4.2 钻削循环	205
5.4.3 钻孔样式循环	211
5.4.4 铣削循环	214
5.5 加工中心加工编程综合实例	217
5.5.1 FANUC 系统加工编程综合实例	217
5.5.2 SIEMENS 系统加工编程综合实例	220
思考题与习题	224
第6章 数控电火花线切割机床加工工艺与编程	226
6.1 数控电火花线切割机床的加工原理、特点及应用	226
6.1.1 数控电火花线切割机床的加工原理	226
6.1.2 数控电火花线切割机床加工的特点	227
6.1.3 数控电火花线切割的应用	227
6.1.4 数控线切割加工的主要工艺指标	228
6.2 数控电火花线切割加工工艺的制定	228
6.2.1 零件图工艺分析	229
6.2.2 工艺准备	230

6.2.3 工件的装夹和位置校正	233
6.2.4 加工参数的选择	238
6.3 数控电火花线切割机床的基本编程方法	241
6.3.1 ISO 格式程序编制	242
6.3.2 3B 格式程序编制	244
6.3.3 4B 格式程序编制	249
6.3.4 编程实例	250
思考题与习题	253
第 7 章 自动编程	254
7.1 自动编程概述	254
7.1.1 自动编程的概念	254
7.1.2 图形交互式自动编程系统简介	255
7.1.3 自动编程的工作过程	258
7.2 UGNX5.0 概述	259
7.2.1 主要功能	259
7.2.2 主要应用模块	260
7.2.3 基础工作环境	264
7.3 UGNX5.0 自动编程实例	266
7.3.1 UGNX5.0 车削加工实例	266
7.3.2 UGNX5.0 实体轮廓铣削加工实例	275
7.3.3 UGNX5.0 线切割加工编程实例	285
思考题与习题	292
参考文献	293

绪 论

0.1 数控加工在机械制造业中的地位和作用

随着科学技术的发展,机械产品的结构越来越合理,其性能、精度和效率日趋提高,更新换代频繁,生产类型由大批、大量生产向多品种小批量生产转化。因此,对机械产品的加工相应地提出了高精度、高柔性和高度自动化的要求。

对于大批、大量生产的产品,如汽车、拖拉机和家用电器的零件,为了提高质量和生产率,多采用专用工艺装备、专用自动化机床、专用自动生产线或自动车间进行生产。这类设备初次投资很大,生产准备周期长,产品改型不易,因而使产品的开发周期加长。但是由于分摊在每个零件上的费用很少,所以经济效益仍很显著。

然而,在机械制造工业中,单件及中、小批生产的零件约占机械加工总量的 80% 以上,尤其是在造船、航天、航空、机床、重型机械以及国防部门,其生产特点是加工批量小,改型频繁,零件形状复杂和精度要求高,加工这类产品需要经常改装或调整设备,对于专用化程度很高的自动化机床来说,这种改装或调整甚至是不可能实现的。

在飞机制造业中,已经采用的仿形机床部分地解决了小批量复杂零件的加工。但这种机床有两个主要缺点:一是在更换零件时,必须制造相应的靠模或样件并调整机床,这样不但要耗费大量的手工劳动,而且生产准备时间长;二是靠模或样件在制造中由于条件的限制而产生的误差和在使用中由于磨损而产生的误差不能在机床上直接进行调整,因而使加工零件的精度很难达到较高的要求。

由于数控机床综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等方面的技术成果,具有高柔性、高精度与高度自动化的特点,因此数控加工手段解决了机械制造业中采用常规加工技术难以解决甚至无法解决的单件、小批量,特别是复杂型面零件的加工。应用数控加工技术是机械制造业的一次技术革命,使机械制造业的发展进入一个新的阶段,提高了机械制造业的制造水平,为社会提供了高质量、多品种及高可靠性的机械产品。目前,应用数控加工技术的领域已从当初的航空工业部门逐步扩大到汽车、造船、机床和建筑等民用机械制造业,并已取得了巨大的经济效益。

0.2 数控加工技术的发展

1. 数控机床的发展

采用数字控制技术进行机械加工的设想,最早是在 20 世纪 40 年代初提出的。当时,美国北密执安的一个小型飞机承包商派尔逊斯公司(Parsons Corporation)在制造飞机框架和直升飞机的机翼叶片时,利用全数字电子计算机对叶片轮廓的加工路径进行了数据处理,并考虑了刀具半径对加工路径的影响,使得加工精度达到 $\pm 0.0015\text{ in}$ 。在当时来说,是相当高的。

1952 年美国派尔逊斯公司(Parsons Co)和麻省理工学院伺服机构实验室(Serve Mechanisms Laboratory of the Massachusetts's Institute of Technology)合作研制成功世界上第一台三坐标数控立式铣床,用它来加工直升机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床,专用计算机采用电子管元件,逻辑运算与控制采用硬件连接的电路。1955 年,这类机床进入实用化阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用,这就是第一代数控机床。从那时起的 50 多年来,随着自动控制技术、微电子技术、计算机技术、精密测量技术及机械制造技术的发展,数控机床得到了迅速发展,不断地更新换代。

1959 年,晶体管元件问世,数控系统中广泛采用晶体管和印制板电路,从此数控机床跨入第二代。

1965 年,出现了小规模集成电路,由于其体积小,功耗低,使数控系统的可靠性得到了进一步提高,数控机床从而发展到第三代。

随着计算机技术的发展,出现了以小型计算机代替专用硬接线装置,以控制软件实现数控功能的计算机数控系统,即 CNC 系统,使数控机床进入第四代。

1970 年前后,美国英特尔(Intel)公司首先开发和使用四位微处理器,1974 年美、日等国首先研制出以微处理器为核心的数控系统。由于中、大规模集成电路的集成度和可靠性高、价格低廉,所以微处理器数控系统得到了广泛的应用。这就是微机数控(Micro-computer Numerical Control)系统,即 MNC 系统,从而使数控机床进入第五代。

20 世纪 90 年代后,基于 PC-NC 的智能数控系统的发展和应用,充分利用现有 PC 机的软硬件资源,规范设计了新一代数控系统,因而使数控机床的发展进入到第六代。

我国是从 1958 年开始研制数控机床的,到 20 世纪 60 年代末 70 年代初,已经研制出一些晶体管式的数控系统,并用于生产。但由于历史的原因,一直没有取得实质性的成果。数控机床的品种和数量都很少,稳定性和可靠性也比较差,只在一些复杂的、特殊的零件加工中使用。

直到 20 世纪 80 年代初,我国先后从日本、德国、美国等国家引进一些先进的 CNC 装置及主轴、伺服系统的生产技术,并陆续投入了生产。这些数控系统性能比较完善,稳定性和可靠

性都比较好,在数控机床上采用后得到了用户的认可,结束了我国数控机床发展徘徊不前的局面,使我国的数控机床在质量、性能及水平上有了一个飞跃。到1985年,我国数控机床的品种累计达80多种,数控机床进入了实用阶段。

1986年至1990年间,是我国数控机床大发展的时期。在此期间,通过实施国家重点科技攻关项目“柔性制造系统技术及设备开发研究”,以及重点科技开发项目“数控机床引进技术消化吸收”等,推动了我国数控机床的发展。

1991年以来,一方面从日本、德国、美国等国家购进数控系统,另一方面积极开发、设计、制造具有自主版权的中、高档数控系统,并且取得了可喜的成果。我国的数控产品已覆盖了车、铣、镗铣、钻、磨、加工中心及齿轮机床、折弯机、火焰切割机、柔性制造单元等,品种达500多种。中、低档数控系统已达到小批量生产能力。

我国的数控技术经过“六五”“七五”“八五”到现在“九五(1996~2000年)”的近20年的发展,基本上掌握了关键技术,建立了数控开发和生产基地,培养了一批数控人才,初步形成了自己的数控产业。“八五”攻关开发的成果:华中Ⅰ号、中华Ⅰ号、航天Ⅰ号和蓝天Ⅰ号,这4种基本系统建立了具有中国自主版权的数控技术平台。具有中国特色的经济型数控系统经过这些年的发展,有了较大的改观。产品的性能和可靠性有了较大的提高,它们逐渐被用户认可,在市场上站住了脚。如上海开通数控有限公司的KT系列数控系统和步进驱动系统、北京凯恩帝数控技术有限公司的KND系列数控系统、广州数控设备厂的GSK系列数控系统等。这些产品的共同特点是数控功能较齐全,价格低,可靠性较好。

纵观这些年来我国数控技术的发展历程,尽管取得了不少成绩,但与国外发展的速度和水平相比,差距仍然很大,主要表现在产品水平低、品种少、质量不稳定。由于国产数控系统的竞争力较差,因而,目前我国中高档数控系统基本上被国外产品所垄断。随着国外经济型数控系统的进入,国产经济型数控系统一统天下的局面被打破,国产系统的市场占有率正在逐渐减小。而FANUC 0T/0M-D+ β 系列伺服驱动系统、Siemens推出的802D数控系统和配套伺服驱动和三菱电机即将推出的低价位数控系统加配套伺服驱动,将进一步冲击国产数控系统市场。

应该看到,尽管我国数控事业取得长足进步,但在中高档数控系统领域,在高速、高精、多轴加工等方面,不论是产品系列化程度,还是功能部件,国内企业还略逊一筹。德国、美国、日本、意大利等国家,仍是世界机床业的第一梯队。

普及型数控系统市场是国内企业最难开拓的领域。统计显示,2006年普及型数控系统83%的市场份额被国外企业抢占。在工艺管理、检测手段、质量控制、品牌认同度等方面,国内企业与国外都存在不小差距。

在高档数控系统,虽然国产五轴联动数控系统技术取得一定突破,但功能还不完善,实际应用验证还不充分。2006年,国外公司在中国销售高档数控系统2000台左右,约占市场份额99.5%,而国产高档数控系统只销售了10多台,仅占市场份额0.5%。

目前,我国数控行业遇到的严峻挑战是:对于我国技术尚不完善的五轴联动以上的高性能数控系统产品,发达国家至今仍封锁限制;由于我国数控技术进步,国外中高档数控系统开始大幅降价,市场竞争异常激烈;一些国外机床巨头采用高附加值产品销售、落后技术转让等方式占领国内市场,抢占产业发展先机。

国内经济发展为我国数控系统提供了广阔市场空间,预计到 2010 年,国内市场仅金属加工机床总需求就将达到 100 亿至 120 亿美元,其中数控机床需求将超过 10 万台。此外,航空航天、船舶工业、重大装备制造业、汽车及零部件制造业、微电子装备制造业对高档数控机床及数控系统的需求也将急剧增加。

2. 自动编程系统的发展

在 20 世纪 50 年代后期,美国首先研制成功了 APT(Automatically Programmed Tools)系统。由于它具有语言直观易懂、制备控制介质快捷、加工精度高等优点,很快就成为广泛使用的自动编程系统。到了 20 世纪 60 年代和 70 年代,又先后发展了 APT III 和 APT IV 系统,主要用于轮廓零件的程序编制,也可以用于点位加工和多坐标数控机床的程序编制。APT 语言系统很庞大,需要大型通用计算机,不适用于中、小用户。为此,还发展了一些比较灵活、针对性强的可用小型计算机的自动编程系统,如用于两坐标轮廓零件程序编制的 A-DAPT 系统等。

在西欧和日本,也在引进美国技术的基础上发展了各自的自动编程系统,如德国的 EX-APT 系统、法国的 IFAPT 系统、英国的 2CL 系统以及日本的 FAPT 和 HAPT 系统等。

1972 年,美国洛克希德飞机公司开发出具有计算机辅助设计、绘图和数控编程一体化功能的自动编程系统 CAD/CAM,由此标志着一种新型的计算机自动编程方法的诞生。1978 年,法国达索飞机公司开发研制出具有三维设计、分析和数控编程一体化功能的 CATIA 自动编程系统;1983 年,美国 Unigraphics Solutions 公司开发研制出 UG II CAD/CAM 系统,这也是目前应用最广泛的 CAD/CAM 软件之一。从 20 世纪 80 年代以后,各种不同的 CAD/CAM 自动编程系统如雨后春笋般发展起来,如 Master CAM, Surf CAM, Pro/Engineer 等。

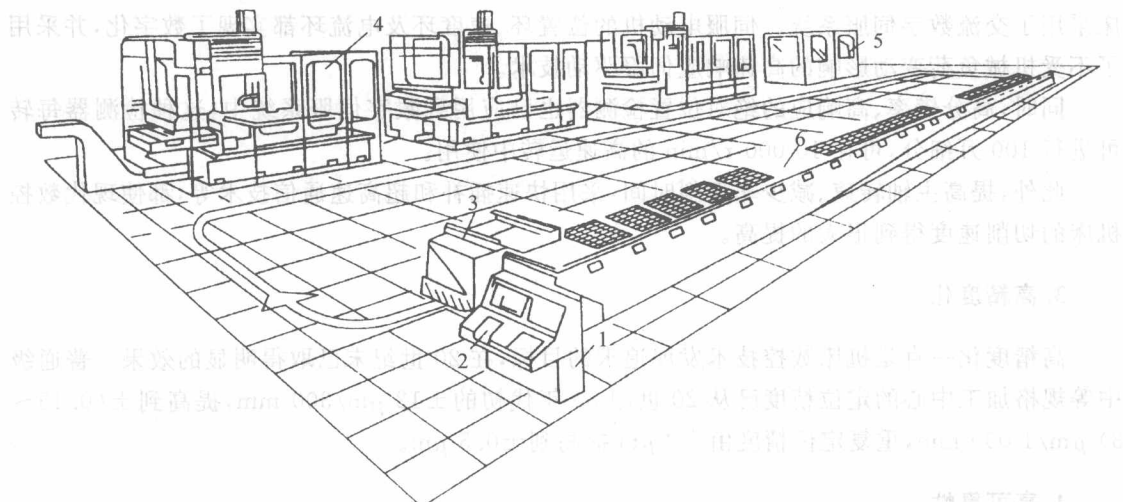
自 20 世纪 90 年代中期以后,数控自动编程系统更是向着集成化、智能化、网络化、并行化和虚拟化方向迅速发展,标志着更新的自动编程系统的发展潮流和方向。

我国的自动编程系统发展较晚,但进步很快,目前主要有用于航空零件加工的 SKC 系统、ZCK 系统和 ZBC 系统,以及用于线切割加工的 SKG 系统等。

3. 自动化生产系统的发展

随着 CNC 技术、信息技术、网络技术以及系统工程学的发展,为从单机数控化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 年代末期,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可调加工系统,这就是最初的柔性制造系统 FMS(Flexible Manufacturing System)。20 世纪 80 年代初又出现以 1~3 台加工中心为主体,再配上工件自动装卸的可交换工作台及监控检验装置的柔性制造单元 FMC(Flexible Manufacturing Cell)。20 世纪 80 年代末 FMC 和 FMS 发展迅速,在 1989 年第八届欧洲国际机床展览会上展出的 FMS 超过 200 条。如图 0-1 所示,是加工箱体零件的柔性制造系统。



1—带有记录生产数据的主计算机控制与主计算机接口;2—生产数据记录打印;3—感应式无轨小车;

4—卧式镗铣加工中心;5—零件清洗站;6—托盘与上、下料工作站

图 0-1 加工箱体零件的柔性制造系统实例

0.3 现代数控技术发展趋势

现代数控机床正向着更高的速度、更高的精度、更高的可靠性及更完善的功能发展。

1. 智能化

在数控机床工作过程中,有许多变量直接或间接影响加工质量,如工件毛坯余量不均匀、材料硬度不一致、刀具磨损或破损、工件变形、机床热变形、化学亲和力、润滑和冷却液等因素。这些变量是事先难以预测的,编制加工程序时往往凭经验数据,而实际加工时,难以用最佳参数进行切削。现代数控机床由于采用了自适应控制技术,它能根据切削条件变化而自动调整并保持最优工作状态,从而使得其经济效果好,达到加工精度和表面质量均高的效果。

另外,在现代数控机床上装有各种类型的监控、检测装置,如红外线、声发射等检测装置,对工件及刀具进行监测,并监视加工全过程。一旦发现工件尺寸超差、刀具磨损破损,便立即

报警,并给予补偿或调换刀具。

2. 高速化

现代机床数控系统多采用 32 位 CPU(目前已经开发出了 64 位 CPU 的新型数控系统)和多个 CPU 并行技术,使运算速度得到了很大的提高。与高性能数控系统相配合,现代数控机床采用了交流数字伺服系统。伺服电动机的位置环、速度环及电流环都实现了数字化,并采用了不受机械负荷变动影响的高速响应伺服驱动技术。

同时,高分辨率、高响应的绝对位置检测器也已应用到数字伺服系统中,这种检测器每转可进行 100 万细分,可在 10 000 r/min 的高速运转中使用。

此外,提高主轴转速、减少非切削时间,采用快速插补和超高速通信技术等,都使现代数控机床的切削速度得到很大的提高。

3. 高精度化

高精度化一直是机床数控技术发展追求的目标,在 20 世纪末已取得明显的效果。普通级中等规格加工中心的定位精度已从 20 世纪 80 年代初的 $\pm 12 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$,提高到 $\pm (0.15 \sim 3) \mu\text{m}/1\,000 \text{ mm}$,重复定位精度由 $\pm 2 \mu\text{m}$ 提高到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。

4. 高可靠性

现代数控机床的可靠性是在设计阶段就开始进行,即预先确定可靠性指标,在生产过程中模拟实际工作条件进行检测,并采取各种提高可靠性的措施予以保证。通常采用的可靠性技术有:冗余技术,故障诊断技术,自动检错、纠错技术,系统恢复技术,软件可靠性技术等。

5. 多功能复合化

现代数控机床的多功能复合化发展,主要体现在以下几个方面:

① 大多数数控机床都具有 CRT 图形显示功能,可以进行二维图形的轨迹显示,有的还可以显示三维彩色动态图形。

② 大多数数控机床都具有人机对话功能,都有很“友好”的人机界面。借助 CRT 与键盘的配合,可以实现程序的输入、编辑、修改和删除等功能。此外还具有前台操作、后台编辑的功能,并大量采用菜单选择操作方式,操作更加简便。

③ 现代数控系统具有更高更强的通信功能,除了能与编程机、绘图机等外部设备通信外,还能与其他 CNC 系统通信,或与上级计算机通信,以实现 FMS 的进线要求。因此,除了具有 RS-232C 串行通信接口外,还有 RS-422 和 DNC 等多种通信接口。MAP 工业控制网络也在数控机床联网上得到了应用,为数控机床进入 CIMS 创造了条件。