

高等学校教材



数控编程技术

田锡天 耿俊浩◎主编



西北工业大学出版社

数控编程技术

主编 田锡天 耿俊浩

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍了数控加工编程技术的理论及其应用,涉及数控机床、数控工艺、数控编程以及计算机辅助数控编程等内容。针对目前我国数控机床以 FANUC、SIEMENS 数控系统为主体的特点,重点介绍了相应的数控编程技术。全书分 7 章,分别是数控加工技术概述、数控加工程序编制基础、数控加工工艺过程设计、数控铣床的程序编制、加工中心的程序编制、数控车床的程序编制以及 CAD/CAM 软件及其应用。

本书内容丰富,深入浅出,图文并茂,理论与实际紧密结合,每章均给出了知识要点,并附有思考与练习题,便于自学。

本书适合作为高等学校机电类专业本科、高职高专相关课程教材,也可供中专、技校数控和机械类专业学生以及有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控编程技术/田锡天、耿俊浩主编. —西安:西北工业大学出版社, 2015.3
ISBN 978-7-5612-4366-4

I. ①数… II. ①田… ②耿… III. ①数控机床—程序设计 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 064199 号

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:727 mm×960 mm 1/16

印 张:20

字 数:299 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

前 言

数控技术是通过计算机用数字化信息控制生产过程的自动化技术，它是由计算机、自动控制、自动检测、精密测量和精密机械等高新技术相互交叉、渗透、有机结合而成的一门综合科学。它既是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造的关键技术，也是柔性制造系统、计算机集成制造系统、CAD/CAM等先进制造技术的基础。

数控技术的广泛应用，使整个制造业发生了根本性的变化。因此，数控技术的水平、数控设备的拥有量以及数控技术的普及程度，已经成为衡量一个国家综合国力和工业现代化水平的重要标志。当今世界各国制造业广泛采用数控技术，以提高制造能力和水平，提高对动态多变市场的适应能力和竞争能力。

数控加工技术是应用数控机床高效、优质地实现零件特别是复杂形状零件加工的有关理论、方法和实现技术，能够有效解决复杂、精密、多品种小批量零件的自动化加工问题。数控编程技术是数控加工技术应用中的关键环节，通过数控编程能够生成数控机床进行零件加工所需要的数控程序。因而，数控编程技术在实现加工自动化、提高加工精度和加工质量、缩短产品研制周期等方面发挥了重要作用。

随着先进制造技术的进步和发展，数控加工技术的应用也越来越普及。目前，数控技术在我国航空、航天、船舶、汽车、模具等对零件加工要求较高的行业均得到了普遍应用。但是调查资料显示，我国的数控设备利用率不高，其中数控编程能力对其影响率达到了17.5%。因此，我国迫切需要大量具有创新意识和能力的高素质数控加工编程技术研发与应用人才。

我们针对上述需求，结合本科学生的特点，编写了本书。本书既注重应用性，又兼顾一定的理论性，同时还考虑到最新的数控应用技术，以期为我国复

合型数控编程人才的培养尽绵薄之力。

本书系统地介绍了数控加工编程技术的理论及其应用。首先对数控加工技术进行了概要介绍,在此基础上详细讲述了数控加工程序的编制基础,并结合数控技术的特点,对数控工艺的设计过程进行了讲解。然后针对数控铣床、加工中心、数控车床的不同特点,分别介绍了它们的基本编程方式,并针对目前我国数控机床以FANUC, SIEMENS数控系统为主体的特点,重点介绍了它们在数控铣床、加工中心和数控车床上的应用。最后简要介绍了CAD/CAM软件及其应用,并给出了NX CAM软件的数控车和数控铣应用实例。

本书由西北工业大学田锡天、耿俊浩编写,其中,第1章、第3章、第4章、第6章由田锡天编写,第2章、第5章、第7章由耿俊浩编写,全书由田锡天统稿。

在编写本书过程中参阅了一些同行专家学者的著作、相关的标准和数控系统使用手册,在此谨致谢意。

由于水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年12月

目 录

第 1 章 数控加工技术概述	1
1.1 数控加工的基本概念	1
1.2 数控机床	4
1.3 数控系统	16
1.4 思考与练习题	25
第 2 章 数控加工程序编制基础	26
2.1 数控加工程序及其编制过程	26
2.2 机床坐标系与运动方向	28
2.3 工件坐标系与局部坐标系	31
2.4 数控机床的坐标轴数与联动数	33
2.5 数控加工程序的结构	34
2.6 数控加工程序的指令	38
2.7 数控加工程序编制举例	57
2.8 数控加工程序编制方法	62
2.9 思考与练习题	66
第 3 章 数控加工工艺过程设计	67
3.1 数控工艺的特点和内容	67
3.2 数控加工零件的选择	69
3.3 数控加工内容的确定	70
3.4 零件的数控工艺性分析	71
3.5 数控工艺过程制定	75
3.6 数控加工工艺文件	102
3.7 编程误差及其控制	104
3.8 思考与练习题	107

第4章 数控铣床的程序编制	108
4.1 数控铣床概述	108
4.2 数控铣削工艺过程制定	111
4.3 数控铣床程序编制基础	121
4.4 SINUMERIK 802C 数控系统的程序指令简介及应用	125
4.5 数控铣床程序编制举例	152
4.6 思考与练习题	155
第5章 加工中心的程序编制	156
5.1 加工中心概述	156
5.2 加工中心的程序编制基础	159
5.3 FANUC 0i-MB 数控系统的程序指令简介及应用	169
5.4 加工中心程序编制举例	205
5.5 思考与练习题	213
第6章 数控车床的程序编制	214
6.1 数控车床概述	214
6.2 数控车削加工工艺	215
6.3 数控车床程序编制基础	224
6.4 FANUC 0i-TD 数控系统程序指令及应用	226
6.5 数控车床的程序编制举例	258
6.6 思考与练习题	262
第7章 CAD/CAM 软件及其应用	263
7.1 概述	263
7.2 CAD/CAM 软件系统的组成及功能	264
7.3 应用 CAD/CAM 软件编程的过程	267
7.4 常见 CAD/CAM 软件	272
7.5 NX CAM 车削编程实例	275
7.6 NX CAM 铣削编程实例	294
7.7 思考与练习题	312
参考文献	313

第 1 章 数控加工技术概述

本章知识要点：

1. 数字控制、数控机床、数控加工的基本概念
2. 数控机床的特点、组成和工作过程
3. 数控机床的控制方式
4. 数控系统的基本组成

1.1 数控加工的基本概念

本节考试知识点：

1. 数字控制及其特点
2. 数控机床的定义
3. 数控加工的定义

1.1.1 数字控制与数控机床

数字控制（Numerical Control, NC），简称为数控，是用数字化信息（数字量及字符）对控制对象进行自动控制的一种技术。数字控制与模拟控制相比有许多优点，如可用不同的字长表示不同精度的信息，可对数字化信息进行逻辑运算、数学运算等复杂的信息处理工作，特别是可用计算机程序来改变信息处理的方式或过程，而不用改变电路或机械机构，从而使机械设备具有很大的柔性。因此，数字控制技术已被广泛应用于机械运动的轨迹控制和机械系统的开关量控制，如机床的控制、机器人的控制等。

数字控制的对象是多种多样的，但数控机床是最早应用数控技术的控制对

象，也是应用最广泛和最典型的数控设备。正因为如此，在国家标准《机床数字控制 术语》(GB 8129—87)中将数字控制定义为：“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”。数控机床是指装备了数控系统并应用数控技术对机床加工过程进行控制的机床。数控系统是数控机床的控制装置，其作用是处理输入到系统中具有特定指令代码的程序，控制机床的运动和动作，实现零件的加工。

数控机床的出现和发展，对于单件和小批量生产自动化，尤其对复杂零件的自动化加工起着重要作用。在整个机械加工生产中，中小批量和单件生产的零件品种占 80% 以上。一般的自动化机床或专用机床由于准备工作、调整工作量很大（凸轮、靠模、挡块、电器、液压等），在大批量生产中使用才是经济合理的，而对中小批量、单件生产是不经济合理的。

精密、复杂形状零件在航空、航天、汽车、船舶、兵器等工业中具有大量应用，而且改型频繁，普通机床的加工能力已完全不能满足加工要求，尤其对于一些复杂曲线、曲面零件，用普通机床加工不仅劳动强度大、加工周期长，精度不易保证，有时甚至无法完成加工。因此，数控机床在上述行业的产品制造中具有十分重要的地位和作用。

1.1.2 数控机床的发展过程

数控机床是为满足复杂形状零件的自动化加工而发展起来的一种自动化加工机床。1948 年，美国帕森斯（Parsons）公司受美国空军委托，研制直升机螺旋桨叶片的精密加工设备。由于直升机零件及其检验用样板形状复杂、精度要求高，传统加工设备难以完成加工，因此帕森斯公司提出了用数字信息来控制机床自动加工外形复杂零件的设想。

1949 年美国空军为了能在短时间内制造出经常变更设计的火箭零件，与帕森斯公司和麻省理工学院（MIT）伺服机构研究所合作，于 1952 年研制成功世界上第一台数控机床——三坐标立式铣床，可控制铣刀进行连续空间曲面的加工，揭开了数控加工技术的序幕。

自 1952 年美国研制出世界上第一台数控铣床后，德国、日本、苏联等国于

1956年前后分别研制出本国第一台数控机床。1958年,北京第一机床厂与清华大学合作研制出我国第一台电子管电路的X53K型数控立式升降台铣床。

20世纪50年代末,美国K&T公司开发了世界上第一台加工中心,从而揭开了加工中心的序幕。1967年,英国首先把几台数控机床连接成具有柔性的加工系统,这就是最初的柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)。70年代末,计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)系统研制成功,使数控机床进入了一个较快的发展时期。

20世纪70年代以后,随着CNC系统及其他相关技术的发展,数控机床的效率、精度、柔性和可靠性进一步提高,品种规格系列化,门类齐全,FMS也进入了实用化。80年代初出现了投资较少、见效快的柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell, FMC)。

目前,除金属切削机床外,数控设备的范围不但扩展到铸造机械、锻压设备等各种机械设备,而且延伸到非金属加工行业中的玻璃、陶瓷制造等各类设备。数控机床已成为国家工业现代化和国民经济建设的基础与关键设备。

1.1.3 数控加工

数控加工是指使用数控机床进行零件加工的方法或技术,它采用数字化信息对零件加工过程进行定义(即编程),并控制机床自动运行完成零件的加工。

数控加工过程:

(1) 数控加工程序编制。首先根据零件设计要求(零件图)制定数控加工工艺过程,选择刀具及切削参数,然后按数控机床规定的编程格式编写零件的数控加工程序。

(2) 数控加工程序输入。根据数控机床的程序输入要求,通过输入装置将数控加工程序输入到数控机床的数控系统中。

(3) 零件加工。数控系统对输入的数控加工程序进行必要的处理,生成和发出相应的控制指令,控制机床的各种运动和动作,使刀具与工件严格地按照程序规定的顺序、刀具路径和参数运动,从而加工出符合要求的零件。

数控加工程序，简称数控程序或零件程序（Part Program），是用特定格式的一套指令代码编写的控制数控机床执行一个确定的加工任务的一系列指令。

数控加工程序编制（NC Programming of Part Program）是指为零件的数控加工编写加工程序的过程。

一般来说，数控加工技术包括数控加工工艺和数控加工程序编制技术两大方面。数控机床为数控加工提供了物质基础，但数控机床是按照事先规定的指令信息——数控加工程序——来执行各种运动的。因此，数控加工程序的编制是实现数控加工的重要环节。对于复杂零件的加工，其编程工作显得尤其重要。

此外，在数控加工中，通常采用坐标测量机或直接在数控机床上测量零件的加工精度，因此需要编写数控测量程序控制测量过程。一般认为，数控测量程序是数控加工程序的一种。

数控加工是一种具有高效率、高精度和高柔性特点的自动化加工技术，它可以有效解决复杂、精密、单件小批量零件的加工问题，不仅能够充分适应现代化生产的需要，而且是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造的基础与关键技术。

1.2 数控机床

本节考试知识点：

1. 数控机床组成部分及其作用
2. 数控机床的工作过程
3. 数控机床的分类
4. 数控机床的运动控制方式
5. 数控机床的伺服系统控制方式

1.2.1 数控机床的组成

数控机床主要由控制介质、数控系统、伺服系统和机械系统等组成，如图 1-1 所示。



图 1-1 数控机床的组成

1. 控制介质

控制介质又称信息载体，用于记录零件的数控程序。常用的信息载体有磁盘、U 盘等，它们可通过相应的输入装置将信息输入到数控系统中。数控机床也可采用操作面板上的按钮和键盘直接输入数控程序和其他加工信息，或者通过配置的通信接口（串口或网卡）将外部计算机上的数控程序输入到数控系统中。

2. 数控系统

数控系统是数控机床的控制系统，是数控机床的核心组成部分。它的功能是输入数控加工程序，进行计算和处理后，发出相应的指令，传送给伺服系统，通过伺服系统控制机床的运动和动作。数控系统控制的机床运动和动作主要包括：

- （1）机床主轴运动，如主轴的启动、停止、转向和速度；
- （2）机床进给运动，如点位、直线、圆弧进给运动，运动方向和进给速度选择等；
- （3）刀具选择、换刀和刀具补偿；
- （4）其他辅助运动，如工作台锁紧和松开、工作台的旋转与分度、冷却液的开和关等各种辅助操作。

3. 伺服系统

伺服系统（又称随动系统）是用来精确地跟随或复现某个过程的反馈控制系统。它是数控系统与机床执行机构的连接环节，是数控机床执行机构的驱动部件。伺服系统的作用是把来自数控系统的位移或位移速度、加速度等信号，经功率放大和处理后，转换成机床执行部件的运动，如工作台的直线运动、主轴的旋转运动等。

根据驱动主轴或进给运动，可以将伺服系统划分为主轴伺服系统和进给伺服系统。

伺服系统一般由比较环节、驱动单元、伺服电动机和测量反馈单元等四部分组成，如图 1-2 所示。

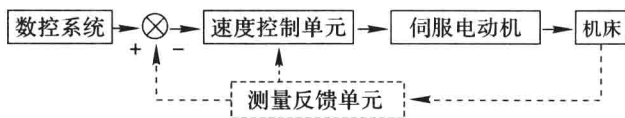


图 1-2 伺服系统的组成

比较环节的功能是将输入的指令信号与反馈信号进行比较，以获得输出与输入间的偏差信号。

驱动单元包括位置控制单元和速度控制单元，其主要任务是对比较环节输出的偏差信号进行变换处理，以控制伺服电动机按要求动作。一般情况下，多将位置控制单元与数控系统做在一起，所以通常所说的驱动单元是指速度控制单元。速度控制单元是一个调速系统，由速度调节器、电流调节器、功率驱动放大环节等组成。

伺服电动机的功能是将电信号转换成转轴的角位移或角速度以驱动控制对象。“伺服”即电动机转子服从控制信号的要求而即时运转或停止，因此伺服电动机的控制精度非常准确。常用的伺服电动机有直流伺服电动机、交流伺服电动机和数字伺服电动机。一些低端数控机床常采用步进电动机作为驱动部件。

测量反馈单元是指能够对输出进行测量并转换成比较环节所需要的量纲的装置，一般包括传感器和转换电路。

伺服系统的性能将直接影响数控机床部件的运动精度和速度，因此是影响数控机床加工精度和加工效率的主要因素之一。

4. 机械系统

数控机床的机械系统由下述几部分组成。

(1) 机床基础件：包括床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台等，它是

整台机床的基础和框架。机床的其他零部件，或者固定在基础件上，或者工作时在它的导轨上运动。

(2) 主轴部件：包括主轴伺服电动机和主轴传动系统。

(3) 进给系统：包括进给伺服电动机和进给传动系统。

(4) 实现工件回转、定位的装置和附件。

(5) 实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置，如液压、气动、润滑、防护等装置。

(6) 刀库和自动换刀装置。

(7) 自动托盘交换装置。

数控机床的机械系统主要有以下特点：

(1) 大多数数控机床采用高性能的主轴及伺服传动系统，因此，数控机床的机械传动机构得到了简化，传动链较短。

(2) 为了适应数控机床的连续自动化加工，数控机床具有较高的动态刚度、阻尼及耐磨性，热变形较小。

(3) 采用高效、高精度、无间隙传动部件，如滚珠丝杠螺母副、直线滚动导轨、静压导轨等。

(4) 一些数控机床还采用了刀库和自动换刀装置以提高机床工作效率。

1.2.2 数控机床的工作过程

在数控机床上加工零件时，首先要制定零件的数控工艺过程，按照数控机床规定的格式和指令代码编写零件的数控加工程序；然后通过输入装置将数控加工程序输入到数控系统中；数控系统对数控加工程序进行处理，向伺服系统等发出相应的指令，控制机床主轴的启停、变速，工作台（或刀架）的进给方向、速度和位移，以及其他如刀具更换、冷却液开关等，使刀具与工件及其他辅助装置严格按照数控加工程序规定的顺序、轨迹和参数进行工作，从而加工出符合要求的零件。数控机床的工作过程如图 1-3 所示。

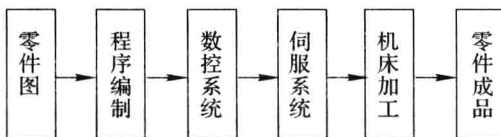


图 1-3 数控机床的工作过程

1.2.3 数控机床的分类

与控机床种类较多，按其加工工艺方式一般可分为金属切削数控机床、金属成型数控机床和特种加工数控机床等。金属切削数控机床中根据其自动化程度的高低，又可分为数控机床、加工中心(Machining Center, MC)和柔性制造单元。

与传统的通用机床一样，数控机床可分为数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控齿轮加工机床、数控冲床、数控剪床等，这类数控机床的工艺特点和相应的通用机床相似，但它们具有复杂形状零件的加工能力。

加工中心可分为镗铣类加工中心和车削加工中心，它们是在相应的数控机床的基础上加装刀库和自动换刀装置而构成的。其工艺特点是：工件经一次装夹后，数控系统能控制机床自动地更换刀具，连续自动地对工件多个表面进行铣（车）、镗、钻等多种加工操作。

柔性制造单元是具有更高自动化程度的数控机床。它可以由加工中心、搬运机器人和（或）自动化小车等自动物料储运系统组成，有的还具有加工精度、切削状态和加工过程的自动监控功能。

特种加工数控机床可分为数控电火花加工机床、数控线切割机床等多种类型。

1.2.4 数控机床的控制方式

1.2.4.1 按运动方式划分

数控机床的种类虽然很多，但按照刀具与工件的相对运动方式，可将其控制方式划分为点位控制、直线运动控制和轮廓控制。

（1）点位控制。只控制机床移动部件的终点位置，而不管移动轨迹如何，并且在移动过程中不进行切削，如图 1-4(a) 所示。数控钻床、数控冲床等是典

型的点位控制机床。

(2) 直线运动控制。除了控制运动的起点与终点的准确位置外,还要求刀具运动轨迹为一条直线,并能控制刀具按照给定的进给速度进行切削加工,如图 1-4(b) 所示。数控车床、数控铣床、加工中心等一般都具有直线运动控制功能。

(3) 轮廓控制。又称连续轨迹控制,能够对刀具与工件的相对移动轨迹和速度进行连续控制,并在移动时进行切削加工,可以加工任意斜率的直线、圆弧和曲线,如图 1-4(c) 所示。大多数数控铣床、数控车床、数控磨床、加工中心等都具有轮廓控制功能。

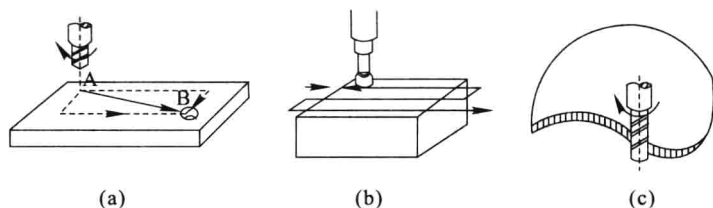


图 1-4 数控机床的控制方式

1.2.4.2 按伺服系统控制方式划分

按伺服系统控制方式的不同,可将数控机床的控制方式划分为开环控制、闭环控制和半闭环控制。

1. 开环控制方式

开环控制是一种不带位置测量反馈装置的控制方式。在这种控制方式中,数控系统处理数控加工程序,并向伺服系统发出位移指令信号,驱动机床运动,进行加工。最典型的开环伺服系统就是采用步进电动机的伺服系统,如图 1-5 所示。它一般由步进电动机驱动器、步进电动机、齿轮箱和丝杠螺母传动副等组成。数控系统每发出一个位移指令脉冲,经驱动器功率放大后,驱动步进电动机旋转一个步距角,再经传动机构带动工作台或刀具移动。步进电动机的实际转角和转速分别由输入的脉冲数和脉冲频率决定。这类系统的信息传送是单向的,即位移脉冲指令发出去以后,实际进给位移不再反馈回来,所以称为开环控制方式。经济型数控机床一般采用开环伺服系统,机床调试简单,其精度

取决于步进电动机和机床机械系统的精度，一般来说，其加工速度和加工精度较低。

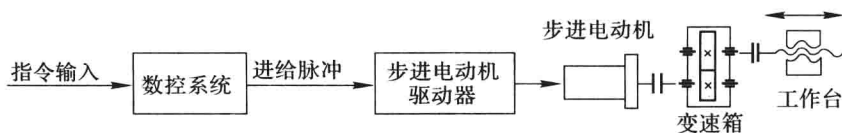


图 1-5 开环控制示意图

2. 闭环控制方式

闭环控制是一种在机床移动部件上直接安装有位置测量反馈装置的控制方式，如图 1-6 所示。位置测量装置（光栅、感应同步器等）的作用是检测工作台的实际位置并反馈给数控系统。数控系统将实际位置与数控加工程序中规定的位置相比较，以其差值来控制伺服电动机（直流或交流伺服电动机）驱动工作台向减少误差的方向移动，直到差值等于零为止。这类伺服系统因为把机床工作台纳入位置控制环，故称为闭环控制。闭环伺服系统可以消除因传动环节的制造精度而引起的运动误差，因而定位精度高。但由于闭环伺服系统受丝杠的拉压刚度、扭转刚度、摩擦阻尼特性和间隙等非线性因素的影响，机床调试复杂困难。如果各种参数匹配不当，将会引起系统振荡，造成不稳定，影响定位精度。由于闭环伺服系统复杂和成本高，故主要用于精度要求高的数控机床。

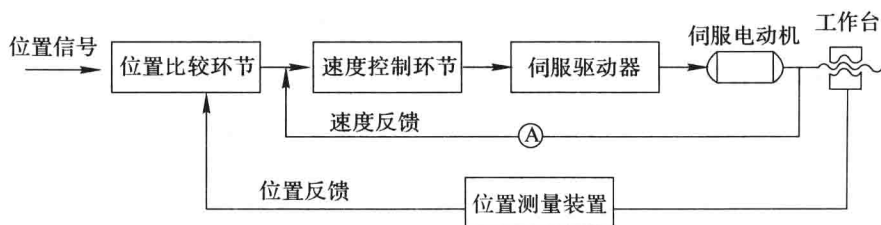


图 1-6 闭环控制示意图

3. 半闭环控制方式

与闭环控制方式不同，半闭环控制用安装在伺服电动机或丝杠上的角位移测量元件（如旋转变压器、脉冲编码器、光栅等）来代替安装在机床工作台上