

国家数控
职业教育
“示范性”
教材

实用数控技术丛书

数控编程技术

——手工编程

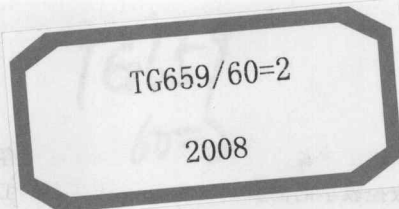
SHUJONG BIANCHENG JISHU SHOUJONG BIANCHENG

第二版

张超英 主编



化学工业出版社



实用数控技术丛书

数控编程技术 ——手工编程

SHUJING BIANCHENG JISHU SHOUJONG BIANCHENG

第二版

张超英 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

元 00.00 份 宝

本书在第一版的基础上并结合近几年的教学实践对内容进行了较大的改进,主要是为了更加适合学生学习和数控教学的需要。内容包括编程中的工艺分析、数学处理,基本编程指令、常用 G 代码、刀具补偿功能的编程方法,车削、铣削的程序编制,宏程序的编制等。

在内容选择上,注重编程各个细节的讲解,突出要点,体现普遍性、实用性、综合性和先进性的特点,前后各章节联系紧密。特别讲解了不同数控系统(FUNUC、西门子、华中数控系统等)之间的差别与联系,并配有大量的典型实例,内容丰富。每章都有一定数量的习题,供读者复习和巩固所学知识。

本书可作为高等职业教育机电类专业中从事数控技术应用、CAD/CAM 技术应用和模具设计与制造人员的教材或培训用书,也还可供从事数控加工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程技术——手工编程/张超英主编. —2 版.
北京:化学工业出版社,2008.3
(实用数控技术丛书)
ISBN 978-7-122-02192-2

I. 数… II. 张… III. 数控机床-程序设计 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 021580 号

责任编辑:张兴辉

装帧设计:尹琳琳

责任校对:洪雅姝

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 14½ 字数 272 千字 2008 年 4 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

实用数控技术丛书

编写委员会

主 任：罗学科

副主任：张超英 徐宏海

委 员：（按姓氏笔画排序）

马天颖 王风霞 王孝忠 牛小铁 朱运利

刘 瑛 李 凯 李跃中 余圣梅 张超英

陈晓光 罗学科 周国烛 郑 青 郑张龙

赵玉侠 徐宏海 高德文 阎红娟 谢富春

魏晓东

序

随着我国由制造大国向制造强国迈进，机械制造行业技术人员对掌握数控技术的要求越来越迫切。国家提出振兴我国装备制造业的战略方针，也对培养新世纪的数控人才提出了更高的要求。

20 世纪 50 年代初第一台数控机床的出现，使制造技术的发展出现了日新月异的局面。特别是近 20 年来，随着计算机技术、信息技术和微电子技术等高新技术的发展，制造业也发生了革命性的变化。数控技术在现代企业的大量应用，使制造技术正朝着数字化的方向迈进，出现了以信息技术驱动的现代制造技术，其核心就是数控加工设备替代了传统的加工设备。与此同时，数控技术正在朝着高精度、高速度、高柔性、高可靠性以及复合化（工序复合化，功能复合化）的方向发展。这一领域的研究是在当前高新技术不断发展的背景下进行的，涉及许多相关领域、交叉学科。当前，在人才需求方面，除需要具有数控技术基本知识和能力的高素质人才，以促进研究与开发工作的新突破外，还急需大批数控技术应用型人才，即数控编程、数控设备操作及其维修人员。而大部分制造企业在这方面的人才严重不足，特别是北京、上海和南方较发达地区，对数控应用型人才更是求贤若渴。为了培养国内急需的数控应用人才，各高等院校、职业技术学院纷纷设置高职层次的数控类专业，急需数控技术的教材和参考书，《实用数控技术丛书》就是为此目的编写的。

这套书在 2003 年底出版后，受到广大读者的厚爱，先后多次印刷累计发行量 3 万多套，为普及数控知识和培养数控技能人才做出了一定的贡献，也荣获中国石油化工协会优秀科技图书奖一等奖，这给我们全体编写人员极大的鼓励和鞭策。在近四年的时间里，我们也收到了一些读者的来信和电子邮件，就书中的问题和我们交换意见，指出了书中的一些问题。近年来数控技术在国内的普及日趋深入，《丛书》中的部分内容已经比较陈旧，不太适合国家职业教育的要求，为此我们决定修订再版，全体编写人员根据《丛书》第二版的修订要求认真讨论编写大纲，经过近一年时间的努力，这套丛书的第二版就要与读者见面了，我们期望它不辜负读者的厚爱。

《实用数控技术丛书》（第二版）共 6 册，约 200 万字，部分书名和内容进行了较大调整，框架体系更加合理，更加适合职业院校数控技术教育和培训的需要，内容涉及数控技术从理论到实际加工操作的各个环节。其中，《数控原理与数控机床》讲述数控技术的基本原理和数控机床的结构；《数控加工工艺》重点

讲述在数控机床的应用中涉及的工艺问题,包括数控设备用刀具、夹具等工艺装备的选择和使用;《数控编程技术——手工编程》详细地讲述各类数控机床和加工中心的编程原理和手工编程方法;《数控编程技术——自动编程》以 Master-CAM 为主介绍数控自动编程的方法、参数设置和编程技巧,给出了大量的典型实例;《数控加工综合实训》是配合实践教学使用的教材,重点突出系统性、实用性和实践性的特点;《数控技术英语》是本专业的专业英语教材,在编写上考虑了数控专业的特点,并注意使用者的英语水平。

《实用数控技术丛书》既参考了国内外相关领域的书籍和资料,也融会了作者们长期以来的教学实践和研究心得。《丛书》立足于应用,面向职业院校学生和工程技术人员。在内容组织和编排上理论结合实践、由浅入深、图文并茂、通俗易懂。《丛书》特别强调实践,书中的大量实例来自生产实际和教学实践。丛书不但为职业院校数控类专业提供了完备的系列教材,也为企业培训数控技术应用人才提供了参考书籍,对相关工程技术人员也是一套很有益的参考书。

《实用数控技术丛书》编写委员会

前 言

《实用数控技术丛书》之一《数控编程技术》自 2004 年出版以来,深受广大读者的好评,许多院校选择该书作为教材。为了适应我国高等职业技术教育发展及应用型高级人才培养的需要,本书的第 2 版与第 1 版相比,作了较大的变动,主要体现在以下几个方面:

1. 进行结构整合,将原来的 8 章增加到现在的 10 章,去掉了“第 7 章电火花线切割的加工编程”和“第 8 章自动编程简介”两章的内容。其中电火花线切割的加工编程安排在《数控加工综合实训》教材中介绍。

2. 进行内容的重新整合,将车削和铣削编程的共性基础知识按功能模块划分组成章节,形成“第 4 章基本功能指令的编程方法”、“第 5 章常用准备功能指令的编程方法”、“第 6 章刀具补偿指令及其编程方法”、“第 7 章简化编程指令及其编程方法”。这样有利于组织教学,避免重复讲解。

3. 为了使读者能够适应因数控系统多样性造成的编程指令和编程方法上的差异,教材以 FANUC 系统为主线,同时以西门子(SIEMENS)、三菱(MITSUBISHI)、发格(FAGOR)和华中等公司的典型数控系统为核心对象,通过指令对比的方法,介绍它们之间的共性和差异,以进一步提高读者的应变能力。

4. 注重在编程过程中综合应用工艺知识,使 NC 程序成为数控加工中的纽带作用,从而不断提高读者的综合能力和素质。

5. 各章节后面增加了“本章小结”内容,对本章的重点内容进行总结,并提出本章学习的基本目标和要求。

6. 每章都有一定数量的习题,供读者复习和巩固所学知识。

本书由张超英主编,参加修订的还有首钢工学院王犇、杨霁云,北京市应用职业技术学院牛桂林。北方工业大学的谢富春、高德文、郑青、赵长友、张利等同志对本书修订提供了很大的帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,数控技术发展迅速,所以本书难免有不足之处,望读者和各位同仁不吝赐教。

编者

目 录

第 1 章 数控加工的编程基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 数控加工的过程	1
1.1.2 数控编程的内容与方法	2
1.1.3 数控编程的种类	3
1.2 数控机床的坐标系与运动方向	3
1.2.1 刀具沿工件的运动	3
1.2.2 坐标系和运动方向	6
1.3 数控系统及其功能	7
1.3.1 典型的数控系统介绍	7
1.3.2 数控系统的主要指令功能	10
1.4 数控加工程序的结构与格式	12
1.4.1 程序的结构	12
1.4.2 程序段格式	13
1.5 编程手册中的 G 代码表	15
本章小结	18
习题	19
第 2 章 数控编程中的工艺分析	21
2.1 数控编程中工艺分析的主要内容	21
2.2 编程中的工艺处理要点	23
本章小结	35
习题	36
第 3 章 数控编程中的数学处理	40
3.1 编程中数学处理的主要内容	40
3.2 基点坐标的计算方法	42
3.3 刀位点轨迹的坐标计算	44
3.4 非圆曲线节点坐标的概念与数学方法	50
本章小结	53
习题	54
第 4 章 基本功能指令的编程方法	57
4.1 刀具功能的编程方法	57

4.1.1 数控车床刀具功能的编程	57
4.1.2 加工中心刀具功能的编程	59
4.2 主轴功能的编程方法	61
4.2.1 主轴恒转速控制的编程	61
4.2.2 主轴恒表面速度控制的编程	62
4.3 进给功能的编程方法	63
4.4 常用辅助功能的编程	64
本章小结	66
习题	66
第5章 常用准备功能指令的编程方法	68
5.1 与坐标系相关的 G 指令编程方法	68
5.1.1 工件坐标系设定	68
5.1.2 功能选择指令	71
5.2 基本运动控制指令的编程	74
5.2.1 快速移动指令 G00	74
5.2.2 直线插补指令 G01	75
5.2.3 圆弧插补指令 G02/G03	77
5.2.4 暂停指令 G04	84
本章小结	84
习题	85
第6章 刀具补偿指令及其编程方法	90
6.1 刀具半径补偿	90
6.2 刀具长度补偿	95
本章小结	97
习题	97
第7章 简化编程指令及其编程方法	100
7.1 FANUC 车削固定循环的编程方法	100
7.1.1 简单粗车固定循环	100
7.1.2 粗车复合固定循环	104
7.1.3 典型数控系统的车削固定循环指令对比	110
7.2 铣削固定循环的编程方法	113
7.2.1 FANUC 铣削固定循环的特征	113
7.2.2 常用的铣削固定循环编程方法	114
7.2.3 编程实例	119
7.3 SIEMENS 典型固定循环的编程方法	120
7.4 子程序及其调用	128

7.5 其他简化编程指令	129
本章小结	131
习题	131
第8章 数控车削加工编程	134
8.1 数控车削的特点	134
8.2 数控车床编程时的工艺处理	138
8.3 轮廓加工的编程	140
8.4 螺纹车削加工编程	145
8.5 典型零件综合加工编程	151
本章小结	157
习题	157
第9章 数控铣削加工编程	161
9.1 数控铣削编程的特点	161
9.2 数控铣床与加工中心编程的区别	164
9.3 平面加工程序的编制	167
9.4 轮廓加工的程序编制	171
9.5 沟槽与型腔加工的程序编制	179
9.6 孔及孔系加工的程序编制	183
9.7 铣削编程综合实例	187
本章小结	191
习题	191
第10章 宏程序的编制	195
10.1 变量及其类型	195
10.2 宏程序的调用方法	198
10.3 程序的控制指令	200
10.4 加工宏程序的编制方法	202
本章小结	211
习题	211
数控编程技术模拟试卷	213
参考文献	220

第1章

数控加工的编程基础

1.1 概述

1.1.1 数控加工的过程

利用数控机床完成零件数控加工的过程如图 1-1 所示,包括下列主要步骤。

① 根据零件加工图样进行工艺分析,确定加工方案、选择刀具、设计加工路线和工艺参数。

② 用规定的程序代码和格式编写零件加工程序单;或用自动编程软件进行 CAD/CAM 工作,直接生成零件的加工程序文件。

③ 程序的输入或传输。由手工编写的程序,可以通过数控机床的操作面板输入程序;由编程软件生成的程序,通过计算机的串行通信接口直接传输到数控机床的数控单元(MCU)。

④ 将输入/传输到数控单元的加工程序,进行试运行、刀具路径模拟等。

⑤ 通过对机床的正确操作,运行程序,完成零件的加工。

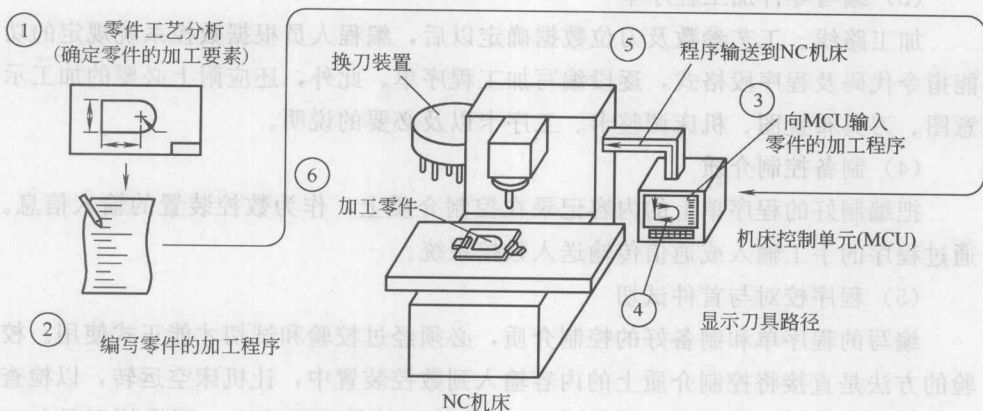


图 1-1 数控加工的过程

由此可见,数控编程是数控加工的重要步骤。用数控机床对零件进行加工时,首先对零件进行加工工艺分析,以确定加工方法、加工工艺路线;正确地选

择数控机床刀具和装卡方法；然后，按照加工工艺要求，根据所用数控机床规定的指令代码及程序格式，将刀具的运动轨迹、位移量、切削参数（主轴转速、进给量、吃刀深度等）以及辅助功能（换刀、主轴正转/反转、切削液开/关等）编写成加工程序单，传送或输入到数控装置中，从而指挥机床加工零件。

1.1.2 数控编程的内容与方法

程序编制通常包括以下几个方面的工作。

(1) 加工工艺分析

编程人员首先要根据零件图纸，对零件的材料、形状、尺寸、精度和热处理要求等，进行加工工艺分析。合理地选择加工方案，确定加工顺序、加工路线、装卡方式、刀具及切削参数等；同时还要考虑所用数控机床的指令功能，充分发挥机床的效能；加工路线要短，正确地选择对刀点、换刀点，减少换刀次数。

(2) 数值计算

根据零件图的几何尺寸确定工艺路线及设定坐标系，计算零件粗、精加工运动的轨迹，得到刀位数据。对于形状比较简单的零件（如直线和圆弧组成的零件）的轮廓加工，要计算出几何元素的起点、终点、圆弧的圆心、两几何元素的交点或切点的坐标值，有的还要计算刀具中心的运动轨迹坐标值。对于形状比较复杂的零件（如非圆曲线、曲面组成的零件），需要用直线段或圆弧段逼近，根据加工精度的要求计算出节点坐标值，这种数值计算一般要用计算机来完成。

(3) 编写零件加工程序单

加工路线、工艺参数及刀位数据确定以后，编程人员根据数控系统规定的功能指令代码及程序段格式，逐段编写加工程序单。此外，还应附上必要的加工示意图、刀具布置图、机床调整卡、工序卡以及必要的说明。

(4) 制备控制介质

把编制好的程序单上的内容记录在控制介质上，作为数控装置的输入信息。通过程序的手工输入或通信传输送入数控系统。

(5) 程序校对与首件试切

编写的程序单和制备好的控制介质，必须经过校验和试切才能正式使用。校验的方法是直接将控制介质上的内容输入到数控装置中，让机床空运转，以检查机床的运动轨迹是否正确。在有 CRT 图形显示的数控机床上，用模拟刀具与工件切削过程的方法进行检验更为方便，但这些方法只能检验运动是否正确，不能检验被加工零件的加工精度。因此，要进行零件的首件试切。当发现有加工误差时，分析误差产生的原因，找出问题所在，加以修正。

整个数控编程的内容及步骤,可用图 1-2 的框图表示。

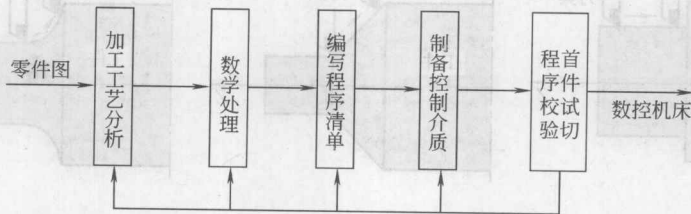


图 1-2 数控编程的步骤

1.1.3 数控编程的种类

数控编程一般分为手工编程和自动编程两种。

(1) 手工编程

手工编程就是从分析零件图样、确定加工工艺过程、数值计算、编写零件加工程序单、制备控制介质到程序校验都是由人工完成。对于加工形状简单、计算量小、程序不多的零件,采用手工编程较容易,而且经济、及时。因此,在点位加工或由直线与圆弧组成的轮廓加工中,手工编程仍广泛应用。对于形状复杂的零件,特别是具有非圆曲线、列表曲线及曲面组成的零件,用手工编程就有一定困难,出错的概率增大,有时甚至无法编出程序,必须用自动编程的方法编制程序。

(2) 自动编程

自动编程是利用计算机专用软件编制数控加工程序的过程。编程人员只需根据零件图样的要求,使用数控语言,由计算机自动地进行数值计算及后置处理,编写出零件加工程序单,加工程序通过直接通信的方式送入数控机床,指挥机床工作。自动编程使得一些计算繁琐、手工编程困难或无法编出的程序能够顺利地完。有关自动编程的内容,请参阅本《丛书》之一《数控编程技术——自动编程》。

1.2 数控机床的坐标系与运动方向

1.2.1 刀具沿工件的运动

(1) 刀具的基本运动

数控加工的过程利用刀具对金属进行切削的过程,是刀具沿工件所要加工的要素移动(注:某些机床实际上是工作台移动而不是刀具运动,但为了编程上的方便,假定刀具相对于工件移动)——插补过程,如图 1-3、图 1-4 所示。

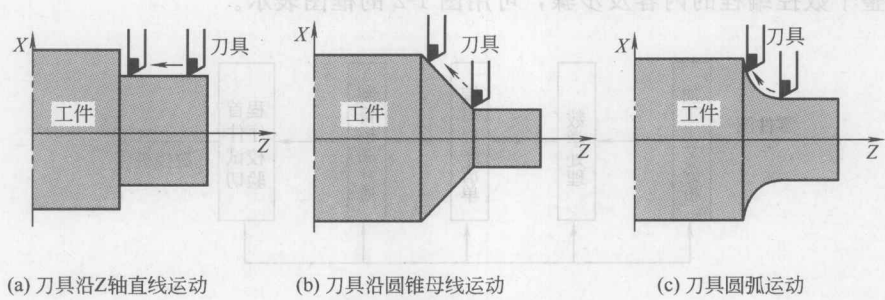


图 1-3 车削加工刀具运动轨迹

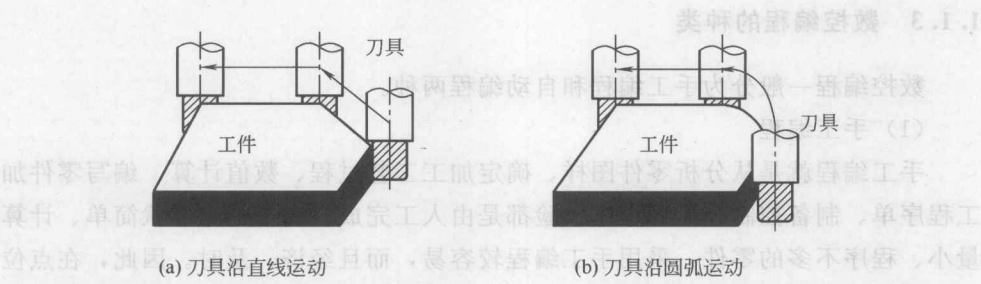


图 1-4 铣削加工刀具运动轨迹

(2) 刀具运动的类型

按机床运动的控制轨迹，有以下几种类型。

① 点位控制的运动 典型的点位控制是孔加工，如图 1-5 所示。

② 平面轨迹控制 平面轮廓控制特点是能够对两个运动坐标的位移和速度同时进行控制，可以进行各种直线、圆弧、曲线的加工。轮廓控制的加工轨迹如图 1-6 所示。

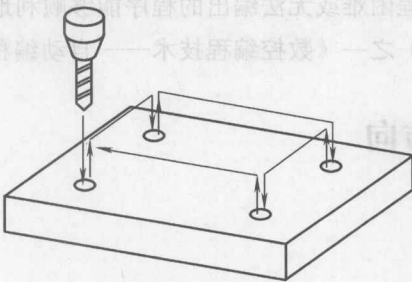


图 1-5 数控机床的点位加工轨迹

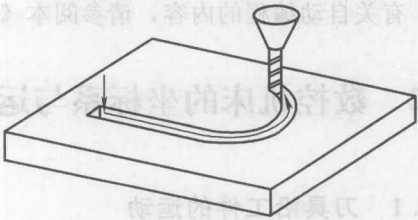


图 1-6 数控铣床的轮廓加工轨迹

③ 多轴运动控制 根据数控机床控制的联动坐标轴数不同，又可以分为下面几种形式。

- a. 二轴联动。主要用于数控车床加工旋转曲面或数控铣床加工曲线柱面。

b. 二轴半联动。主要用于三轴以上机床的控制，其中二轴可以联动，而另外一根可以作周期性进给。如图 1-7 所示就是采用这种方式用行切法加工三维空间曲面。

c. 三轴联动。一般分为两类，一类就是 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动，比较多的用于数控铣床、加工中心等，如图 1-8 所示用球头铣刀铣切三维空间曲面。另一类是除了同时控制 X、Y、Z 其中两个直线坐标外，还同时控制围绕其中某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴。如车削加工中心，除了纵向（Z 轴）、横向（X 轴）两个直线坐标轴联动外，还需同时控制围绕 Z 轴旋转的主轴（C 轴）联动。

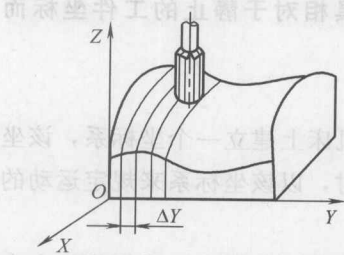


图 1-7 二轴半联动的曲面加工

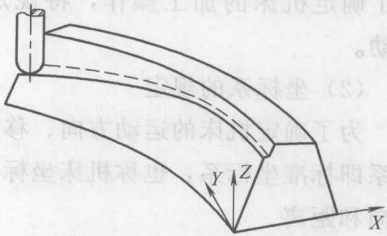


图 1-8 三轴联动的加工曲面

d. 四轴联动。同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴与某一旋转坐标轴联动，图 1-9 所示为同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴与一个工作台回转轴联动的数控机床。

e. 五轴联动。除同时控制 X、Y、Z 三个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的 A、B、C 坐标轴中的两个坐标轴，形成同时控制五个轴联动。这时刀具可以定位在空间的任意方向，如图 1-10 所示。如要控制刀具同时绕 X 轴和 Y 轴两个方向摆动，刀具在其切削点上应始终保持与被加工的轮廓曲面成法线方向，以保证被加工曲面的光滑性，提高其加工精度和加工效率，减小被加工表面的粗糙度。

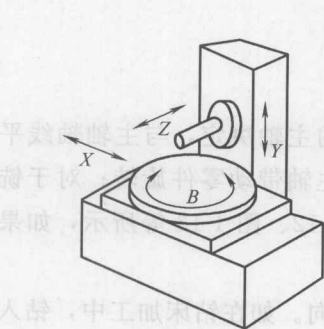


图 1-9 四轴联动的数控机床

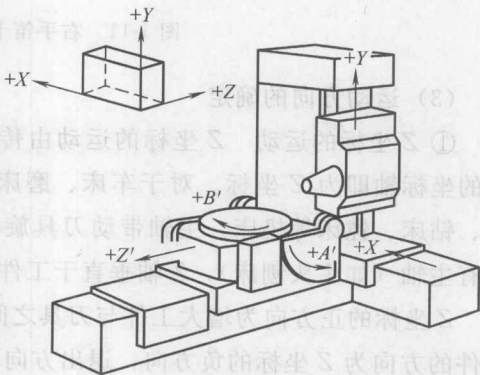


图 1-10 五轴联动的加工中心

1.2.2 坐标系和运动方向

规定数控机床坐标轴及运动方向,是为了准确地描述机床运动,简化程序的编制,并使所编程序具有互换性。目前国际标准化组织已经统一了标准坐标系,我国原机械工业局也颁布了 JB 3051—1999 标准,对数控机床的坐标和运动方向作了明文规定。

(1) 坐标和运动方向命名的原则

为了使编程人员在不知道零件加工时是刀具移向工件,还是工件移向刀具,为了确定机床的加工操作,特规定:永远假定刀具相对于静止的工件坐标而运动。

(2) 坐标系的规定

为了确定机床的运动方向、移动的距离,要在机床上建立一个坐标系,该坐标系即标准坐标系,也称机床坐标系。在编制程序时,以该坐标系来规定运动的方向和距离。

数控机床上的坐标系是采用右手直角笛卡儿坐标系。在图中,大拇指的方向为 X 轴的正方向,食指为 Y 轴的正方向,中指为 Z 轴正方向,如图 1-11 所示。图 1-12、图 1-13 分别给出了卧式车床和立式铣床的标准坐标系。

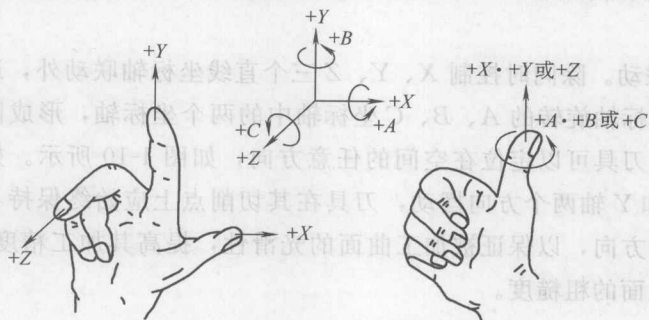


图 1-11 右手笛卡儿坐标系

(3) 运动方向的确定

① Z 坐标的运动 Z 坐标的运动由传递切削力的主轴决定,与主轴轴线平行的坐标轴即为 Z 坐标。对于车床、磨床等机床,主轴带动零件旋转;对于铣床、钻床、镗床等机床,主轴带动刀具旋转,如图 1-12、图 1-13 等所示,如果没有主轴(如牛头刨床),Z 轴垂直于工件装卡面。

Z 坐标的正方向为增大工件与刀具之间距离的方向。如在钻床加工中,钻入工件的方向为 Z 坐标的负方向,退出方向为正方向。

② X 坐标的运动 X 坐标为水平的且平行于工件的装卡面,这是在刀具或

工件定位平面内运动的主要坐标。对于工件旋转的机床（如车床、磨床等）， X 坐标的方向是在工件的径向上，且平行于横滑座。刀具离开工件旋转中心的方向为 X 轴正方向，如图1-12所示。对于刀具旋转的机床（如铣床、镗床、钻床等）， X 运动的正方向指向右，如图1-13所示。

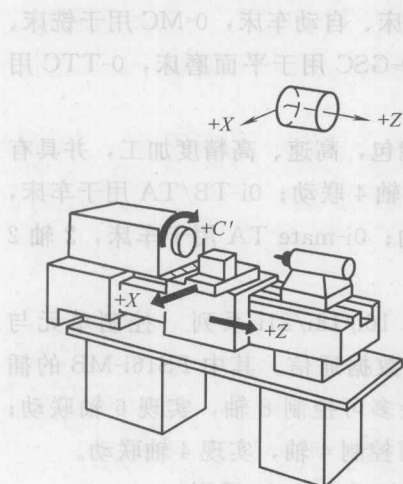


图 1-12 卧式车床坐标系

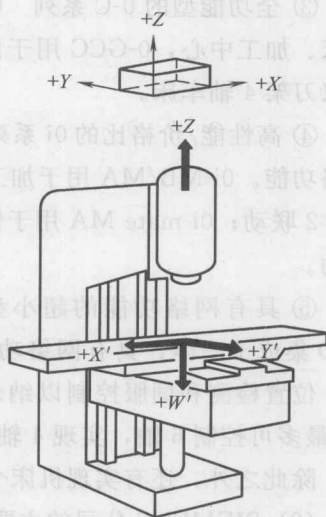


图 1-13 立式升降台铣床坐标系

③ Y 坐标的运动 Y 坐标轴垂直于 X 、 Z 坐标轴， Y 运动的正方向根据 X 和 Z 坐标的正方向，按右手直角坐标系来判断。

④ 旋转运动 A 、 B 和 C A 、 B 和 C 相应地表示其轴线平行于 X 、 Y 和 Z 坐标的旋转运动。 A 、 B 和 C 的正方向，相应地表示在 X 、 Y 和 Z 坐标正方向上按照右旋螺旋前进的方向。

1.3 数控系统及其功能

数控系统是数控机床的核心。数控机床根据功能和性能要求，配置不同的数控系统。下面介绍几种数控系统生产厂家的典型数控系统。

1.3.1 典型的数控系统介绍

大量 FANUC（日本）、SIEMENS（德国）、MITSUBISHI（日本）、FAGOR（西班牙）、HEIDENHAIN（德国）等公司的数控系统及相关产品，在数控机床行业占据主导地位；我国数控产品以华中数控、广州数控、航天数控等为代表，也已将高性能数控系统产业化。

(1) FANUC 公司的主要数控系统