

XIANDAI SHUKONG JICHUANG  
BIANCHENG YU CAOZUO

# 现代数控机床

## 编程与操作

王睿鹏◎编著



# 现代数控机床编程与操作

王睿鹏 编著

机械工业出版社

本书将数控系统 FANUC、SIEMENS 和 MAZAK 与数控车床、数控铣床和加工中心相结合,将数控机床的编程与操作同具体实训相结合,主要内容包括绪论、数控机床编程基础、数控车床的编程与操作、数控铣床的编程与操作、加工中心的编程与操作、FANUC 宏程序与 SIEMENS 参数化编程等。

本书可作为从事数控加工的技术人员和操作人员的培训用书,还可作为高校数控专业和机电专业数控机床编程与操作的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代数控机床编程与操作/王睿鹏编著. —北京:机械工业出版社, 2014.7

ISBN 978-7-111-47408-1

I. ①现… II. ①王… III. ①数控机床—程序设计②数控机床—操作  
IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 161652 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:徐明煜 责任编辑:徐明煜 阎洪庆

责任校对:薛娜 封面设计:陈沛 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·592 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-47408-1

定价:49.90 元



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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

我国是制造业大国，目前已经成为全球装备制造基地。如今，企业为了能够在日趋激烈的竞争中赢得一席之地，无不想方设法提高企业生产制造的自动化、柔性化和信息集成化。而数控技术则是制造业实现自动化、柔性化和信息集成化生产的基础。针对目前企业对数控技术人才的广泛迫切需求，培养适合制造业发展需求的大量的数控专业人才已成为高等教育的紧迫任务。高等院校相关专业学生和从事数控技术、机械制造技术的技术人员迫切需掌握目前应用广泛的 FANUC、SIEMENS、MAZAK 数控系统的操作与编程、利用数控机床加工零件时的相关工艺知识以及如何利用计算机辅助制造软件高效地编制数控程序。

本书通过介绍配置 FANUC 数控系统的数控车床、配置 SIEMENS 数控系统的数控铣床、配置 MAZAK 数控系统的立式加工中心的编程与操作，从而构建一个立体层面的学习框架，一个层面是从目前流行的数控系统角度学习流行的 FANUC、SIEMENS、MAZAK 的数控系统编程与操作方法，另一个层面是从数控机床的功能结构来学习数控车床、数控铣床和加工中心的操作方法以及各自的加工工艺方法。

本书还介绍了数控程序的高级编制方法，即第六章中关于 FANUC 宏程序与 SIEMENS 参数化编程的介绍。本书并没有将 FANUC 宏程序与 SIEMENS 参数化编程的内容加以简单的堆砌，而是寻找其共性与差异，并用算法描述的模式介绍程序结构的控制方法，使读者能够触类旁通，掌握程序设计的思想而不是语言描述方法。

本书以“实操为目的，理论为基石”的宗旨来合理分配理论知识与实操技能在本书中所占的比例。书中精选了大量的典型案例，取材适当、内容丰富，理论联系实际。所有实训项目都经过实践检验，所给程序的程序段都进行了详细、清晰的注释说明。

全书共 6 章，主要内容包括绪论、数控机床编程基础、数控车床的编程与操作、数控铣床的编程与操作、加工中心的编程与操作、FANUC 宏程序与 SIEMENS 参数化编程。

本书由北方民族大学材料科学与工程学院王睿鹏编写。在编写过程中，参考了大量的文献，作者尽可能一一注明，但由于文献较多，疏漏在所难免，在此向被遗漏的作者表示歉意，并向所有的参考文献作者表示衷心的感谢！

数控技术所包含的内容极其丰富，涉及领域甚广，数控系统的发展日新月异，限于作者的学识和水平，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

作者地址：

邮编：750021

地址：宁夏银川市北方民族大学材料科学与工程学院

电子邮箱：dimplewarp@sohu.com

作者

# 目 录

|                  |    |
|------------------|----|
| 前言               |    |
| 第一章 绪论           | 1  |
| 第一节 数控机床概述       | 1  |
| 一、数控及数控机床        | 1  |
| 二、数控机床的特点        | 1  |
| 第二节 数控机床的组成及工作原理 | 2  |
| 一、数控机床的组成        | 2  |
| 二、数控机床的基本工作过程    | 3  |
| 第三节 数控机床的分类      | 4  |
| 一、按工艺用途分类        | 4  |
| 二、按控制方式分类        | 4  |
| 三、按控制的运动轨迹分类     | 6  |
| 四、按数控系统的功能水平分类   | 7  |
| 第二章 数控机床编程基础     | 8  |
| 第一节 数控程序编制的相关标准  | 8  |
| 一、数控加工程序编制的内容与方法 | 8  |
| 二、数控机床的坐标系       | 10 |
| 三、程序结构与程序段格式     | 13 |
| 第二节 数控加工程序的指令代码  | 15 |
| 一、准备功能 G 指令      | 15 |
| 二、辅助功能 M 指令      | 25 |
| 三、其他功能指令         | 28 |
| 第三节 子程序          | 28 |
| 一、子程序的概念与格式      | 28 |
| 二、子程序的执行过程       | 29 |
| 第三章 数控车床的编程与操作   | 32 |
| 第一节 数控车床概述       | 32 |
| 一、数控车床的工艺范围      | 32 |
| 二、数控车床的基本构成与分类   | 32 |
| 三、数控车床的坐标系及其正方向  | 33 |
| 四、数控车床的编程特点      | 34 |
| 五、数控车床基本功能指令     | 34 |
| 第二节 数控车床常用各种指令   | 37 |
| 一、坐标系设定指令        | 37 |
| 二、基本编程指令         | 38 |
| 第三节 数控车床的循环加工指令  | 42 |
| 一、单一形状固定循环指令     | 42 |
| 二、复合形状固定循环指令     | 44 |
| 第四节 数控车床的螺纹加工指令  | 50 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 一、螺纹切削参数              | 50  |
| 二、螺纹加工指令              | 50  |
| 第五节 数控车床的子程序          | 53  |
| 第六节 数控车床的刀具半径补偿功能     | 55  |
| 一、刀尖圆弧半径的概念           | 55  |
| 二、刀具半径补偿指令与补偿值的设定     | 56  |
| 三、刀具半径补偿注意事项          | 58  |
| 四、刀具半径补偿实例            | 58  |
| 第七节 数控车床的操作与加工        | 60  |
| 一、机床操作面板介绍            | 60  |
| 二、基本操作步骤              | 65  |
| 第八节 典型零件编程与加工实例       | 73  |
| 第四章 数控铣床的编程与操作        | 84  |
| 第一节 数控铣床概述            | 84  |
| 一、数控铣床的分类             | 84  |
| 二、数控铣床功能特点            | 85  |
| 三、数控铣床的加工工艺范围         | 86  |
| 第二节 数控铣削编程基础          | 87  |
| 一、数控铣削编程工艺基础          | 87  |
| 二、数控铣床的坐标系和参考点        | 90  |
| 三、刀具运动原则              | 91  |
| 四、对刀点与换刀点的选择          | 91  |
| 五、数控铣床程序编制基础          | 91  |
| 第三节 数控铣床常用各种指令        | 95  |
| 一、坐标系设定指令             | 95  |
| 二、绝对和增量尺寸编程           | 97  |
| 三、基本编程指令              | 97  |
| 四、刀具补偿指令              | 107 |
| 五、子程序调用               | 113 |
| 第四节 数控铣床的固定循环         | 114 |
| 一、固定循环的调用             | 114 |
| 二、常用固定循环指令            | 114 |
| 第五节 数控铣床的操作与加工        | 131 |
| 一、机床操作面板介绍            | 131 |
| 二、SINUMERIK 802D 软件功能 | 134 |
| 三、手动操作与自动操作           | 135 |
| 四、程序的输入与编辑            | 136 |
| 五、工件坐标系的建立            | 140 |
| 六、刀具补偿                | 143 |
| 七、自动加工                | 145 |
| 第六节 典型零件编程与加工实例       | 147 |
| 第五章 加工中心的编程与操作        | 154 |
| 第一节 加工中心概述            | 154 |
| 一、加工中心的工艺特点           | 154 |
| 二、加工中心的主要加工对象         | 155 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 三、加工中心的基本构成与分类 .....                  | 156 |
| 四、加工中心的编程特点 .....                     | 159 |
| 第二节 加工中心程序编制 .....                    | 159 |
| 一、加工中心的功能指令 .....                     | 159 |
| 二、编程指令详解 .....                        | 161 |
| 第三节 钻、镗固定循环及程序调用 .....                | 169 |
| 一、孔加工综述 .....                         | 169 |
| 二、常用固定循环方式 .....                      | 171 |
| 三、固定循环应用举例 .....                      | 176 |
| 四、孔加工固定循环中重复次数的使用方法 .....             | 178 |
| 第四节 MAZATROL 会话式编程 .....              | 180 |
| 一、MAZATROL FUSION 640 数控系统简介 .....    | 180 |
| 二、MAZATROL 会话式程序编制基础 .....            | 182 |
| 第五节 加工中心操作基础 .....                    | 197 |
| 一、加工中心的刀柄及工具系统 .....                  | 197 |
| 二、工件的找正安装 .....                       | 199 |
| 三、工件在加工中心上装夹的要求 .....                 | 201 |
| 四、加工中心的对刀方法 .....                     | 203 |
| 第六节 加工中心的操作与加工 .....                  | 206 |
| 一、VTC—16A 立式加工中心概述 .....              | 206 |
| 二、机床操作面板介绍 .....                      | 207 |
| 三、MAZATROL FUSION 640 数控系统的操作画面 ..... | 212 |
| 四、手动操作与自动操作 .....                     | 214 |
| 五、程序的输入与编辑 .....                      | 215 |
| 六、工件坐标系的建立 .....                      | 216 |
| 七、刀具数据设定 .....                        | 219 |
| 八、存储器运行（自动加工）方式操作 .....               | 221 |
| 九、硬盘操作功能 .....                        | 222 |
| 第七节 典型零件编程与加工实例 .....                 | 222 |
| 第六章 FANUC 宏程序与 SIEMENS 参数化编程 .....    | 245 |
| 第一节 宏程序与参数化编程概述 .....                 | 245 |
| 第二节 FANUC 系统宏程序 .....                 | 248 |
| 一、宏程序理论基础（FANUC Oi 系统） .....          | 248 |
| 二、用户宏程序功能 A .....                     | 255 |
| 三、用户宏程序功能 B .....                     | 260 |
| 四、FANUC Oi 系统 B 类宏程序应用 .....          | 270 |
| 第三节 SIEMENS 系统参数化编程与应用 .....          | 278 |
| 一、R 参数编程的基本概念 .....                   | 278 |
| 二、计算参数（R 参数） .....                    | 278 |
| 三、程序跳转 .....                          | 279 |
| 四、SIEMENS 参数化编程应用实例 .....             | 281 |
| 参考文献 .....                            | 289 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 数控机床概述

### 一、数控及数控机床

数字控制 (Numerical Control) 简称 NC, 它是采用数字化信息实现加工自动化的控制技术, 用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的机床, 称为数控机床。

数控机床是数字控制技术与机床相结合的产物, 狭义地讲, 数控一词就是“数控机床”的代名词; 广义地讲, 数控技术本身在其他行业中也有着广泛的应用, 称为广义数字控制。数控机床就是将加工过程中所需要的各种机床动作, 用数字化的加工代码来描述, 并通过手动输入装置、程序介质或计算机网络将信息输入数控系统; 数控系统对输入的信息进行译码、编译等信息处理, 并通过插补功能模块和位置控制模块控制机床的伺服系统或其他执行元件, 使机床加工出所需要的工件, 其过程见图 1-1。

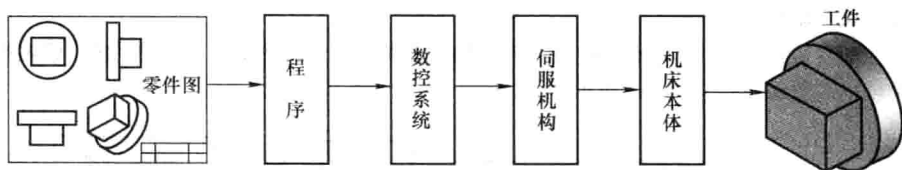


图 1-1 数控机床的工作过程

### 二、数控机床的特点

数控机床在机械制造业中的应用日趋广泛, 它有效地解决了目前零件加工中存在的结构复杂、加工精度高、加工批量小和改型频繁的问题。数控机床集中了专用机床、精密机床和万能机床三者的优点, 具有专用机床的高效率、精密机床的高精度、万能机床的高柔性。具体来说, 数控机床具有以下特点:

#### 1. 具有较强的柔性, 能够适应不同类型零件的自动化加工

数控机床由于采用数字程序控制, 当生产品种改变时, 仅仅改变所要加工零件的加工程序, 就可以实现新零件的自动化加工。故数控机床能够缩短新产品的试制和生产周期, 使企业快速适应市场需要, 为解决多品种、中小批量的生产组织方式提供强有力的支持。

#### 2. 产品加工精度高, 质量稳定

数控机床在加工时按照预先编制的加工程序自动完成加工过程, 一般情况下加工过程不需要人为干预, 这就消除了由于操作者人为因素而产生的加工误差。一般的数控机床都采用半闭环或全闭环控制方式, 可以通过实时检测反馈, 来修正实际的机床运动轨迹误差, 从而获得很高的加工精度。同时, 数控机床可以在一次装夹过程中完成多个工序的加工, 实现了工序集中, 避免重复定位产生误差。

数控机床所加工产品质量的稳定性 (即零件加工精度指标的一致性) 是普通机床无法比拟的。它的加工运行过程与操作者的思想情绪、生理状态以及熟练程度几乎无关。由于零件加工的一致性, 它给下道工序的加工或产品装配时的互换都带来了许多方便。

#### 3. 能够实现具有特殊外形轮廓零件的加工

对于螺旋桨、汽轮机叶片等具有复杂空间曲面结构的零件, 用普通机床是难以加工的, 而数控机床由于

采用了计算机插补技术和多坐标轴联动控制,从理论上讲几乎可以实现任意轨迹的运动和加工任何形状的空间曲面,适用于各种复杂形面的零件加工。

#### 4. 生产效率高

数控机床可以大大减少零件加工时间与辅助时间。由于数控机床具有良好的机械结构刚性和电气调速性能,允许数控机床采用大切削量的强力切削,从而有效地节省了机械加工时间。数控机床的移动部件在加工定位时采用了合理优化的加速和减速措施,同时机床在空行程移动时具有很高的运动速度,从而缩短了定位和非切削时间。加工中心类数控机床由于具有 ATC (刀具自动交换) 装置、APC (工件自动交换) 装置等辅助装置,使其可以在一次装夹过程中,完成车、铣、镗、钻等各种粗、精加工,即在一台机床上实现多道工序的连续加工,这不仅减少了辅助加工时间,而且减少了半成品工序间的周转时间,提高了生产效率。

#### 5. 减轻劳动强度

操作者只要在数控机床上完成第一个零件的加工试切时,调整好零件的加工尺寸精度后,在以后加工过程中,一般只需装卸工件,按下“自动循环”启动按钮后,机床就可以按照所编制的程序自动完成零件的加工,因而大大减轻了操作者的劳动强度,改善了生产条件,减少了对技术熟练工人的需求,可一人管理多台数控机床的加工运行。

## 第二节 数控机床的组成及工作原理

### 一、数控机床的组成

数控机床一般由数控系统、包含伺服电动机和检测反馈装置的伺服系统、主传动系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成,如图 1-2 所示。

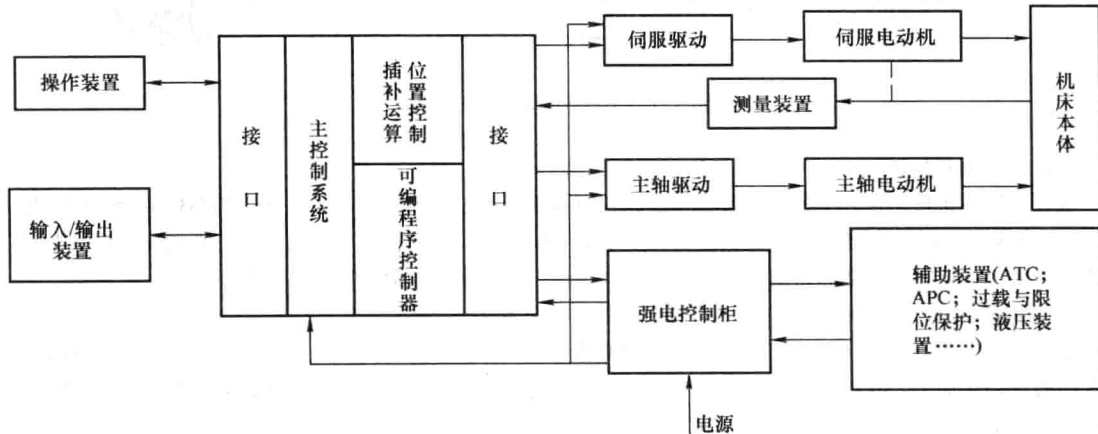


图 1-2 数控机床的组成

#### 1. 输入/输出装置

数控机床在进行加工前,需要将存储介质上记载的零件加工程序,通过输入装置输入到数控系统中,然后才能根据输入的加工程序控制机床运行,从而加工出所需的零件。同时数控系统也需要通过输出装置将暂时不用的零件加工程序存储或备份到外部存储介质上。

早期的数控机床常用穿孔纸带、磁带等存储介质,现代数控机床常用磁盘或半导体存储器等存储介质,或不用存储介质,而直接由操作人员通过手动数据输入 (Manual Date Input, MDI) 键盘输入零件程序,或采用计算机通信技术进行零件程序的输入/输出,后者是实现 CAD/CAM (计算机辅助设计/计算机辅助制造) 集成、FMS (柔性制造系统) 和 CIMS (计算机集成制造系统) 的基本技术。

输入/输出装置是机床与外部设备的接口,目前常用的主要有纸带阅读机、磁盘驱动器、RS232C 串行通信接口、MDI 装置、网卡和读卡器等。

## 2. 操作装置

操作装置是数控系统提供给机床操作者控制机床运转的平台,也是机床操作者与数控系统进行信息交互的平台。一方面,机床操作者可以通过它对数控机床进行操作、编程、程序调试,以及对机床参数进行设定和修改;另一方面,还可以通过它了解或查询数控机床的运行状态。操作装置主要由显示装置、NC 键盘、机床控制面板 (Machine Control Panel, MCP)、状态灯和手持单元等部分组成。MCP 集中了数控系统中的所有控制按钮,用于控制机床的动作或加工过程,如程序启动、主轴旋转、坐标轴手动进给、切削液开关等。手持单元一般由手摇脉冲发生器 (MPG) 和坐标轴选择旋钮组成,主要用于方便用户调整机床坐标轴位置或采用手摇脉冲进给方式进行手动切削加工。

## 3. 数控系统

数控系统是机床实现自动加工的核心,数控机床中的所有控制命令都是由数控系统发出的。它主要由主控制系统、可编程控制器、各类输入/输出接口等组成。主控制系统的硬件结构与计算机的主板有些类似,主要由 CPU (中央处理器)、存储器、控制器等部分组成。数控系统接受从输入装置输入的数字信息,这些数字信息经由数控系统中的控制软件和逻辑电路进行译码、编译、运算和逻辑处理后,生成相应的控制指令或电位信号,这些控制指令和电位信号再经过输出接口输出给伺服系统、主轴驱动和强电控制柜,从而控制机床各个部件有条不紊地按序工作。

## 4. 伺服系统

伺服系统是数控系统与机床本体之间的电传动联系环节,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。伺服电动机是系统的电气执行元件,驱动控制系统作为伺服电动机的动力源。数控系统发出的位置指令信号与位置检测反馈信号进行比较后,将其差值作为驱动控制系统的输入位移指令信号,并经驱动控制系统功率放大后,驱动伺服电动机运转,伺服电动机通过联轴器带动机械传动装置拖动工作台或刀架运动。

## 5. 测量装置

测量装置 (也称检测装置、反馈装置) 主要用于对机床坐标轴的位置和移动速度的测量,将机床坐标轴的实际运动速度、方向、位移量以及加工负荷加以检测,把检测结果转化为电信号反馈给数控装置,通过比较,计算出实际位置与指令位置之间的偏差,并发出纠正误差指令。测量装置通常安装在机床的工作台、丝杠或伺服电动机的端部,并根据测量装置在机床中的安装位置将数控机床的控制方式分为闭环控制系统和半闭环控制系统。

## 6. 机床本体

机床本体指的是数控机床机械结构实体,是数控系统的控制对象,是实现制造加工的执行部件。与普通机床相比,具有如下特点:

- 1) 进给传动采用高效传动部件。具有机械传动链短、结构简单、传动精度高等特点,一般采用滚珠丝杠副、直线滚动导轨副等部件。
- 2) 使用高性能主动及主轴部件。具有传递功率大、刚度高、抗振性好及热变形小等优点。
- 3) 具有完善的刀具自动交换和管理系统。工件在加工中心类机床上一次装夹后,一般需要完成多个工序的加工,这就要根据不同的加工工序,选择不同的加工刀具,故机床应具有自动换刀机构。
- 4) 床身结构具有很高的动、静刚度。
- 5) 采用全封闭罩壳。由于数控机床是高度自动化的加工设备,为了操作者的人身安全,一般采用移动门结构的全封闭罩壳,对机床的加工部位进行全封闭。

## 二、数控机床的基本工作过程

机床操作者首先根据零件图样及加工工艺文件进行程序编制,然后通过手动输入装置或程序介质将程序输入数控系统,再经过调试、修改,最后把它存储起来。在加工时就依照所编制的程序进行相应的数字信息

处理,一方面通过插补运算器进行加工轨迹的运算处理,输出位移指令信号,从而控制伺服系统驱动机床各坐标轴,使刀具与工件的相对位置按照被加工零件的形状轨迹进行运动,并通过位置检测反馈以确保其位移精度。另一方面按照加工要求等,通过 PLC 控制主轴及其他辅助装置协同工作,如主轴变速、主轴高低速齿轮换挡、ATC、APC、工件夹紧与放松、切削液的开关、润滑系统的定时启动、过载与限位保护功能等。

数控机床通过程序调试、试切削后,进入正常批量加工时,操作者一般只要进行工件上、下料装卸,再按一下自动循环按钮,数控机床就可以根据加工程序自动地完成整个加工过程。

### 第三节 数控机床的分类

数控机床的种类繁多,其分类方法也很多。根据数控机床的功能和结构,一般可按下面四种原则来进行分类。

#### 一、按工艺用途分类

##### 1. 切削加工类

切削加工类数控机床是指通过工件的材料剥离过程而得到所需零件的数控机床。它又可以被分为两类:

##### (1) 普通型数控机床

最常见的有数控车床、数控钻床、数控铣床、数控镗床、数控磨床、数控齿轮加工机床等。

##### (2) 加工中心

加工中心与普通数控机床的本质区别在于,它配备了具有自动换刀机构的刀具库。

##### 2. 成形加工类

成形加工类数控机床是指通过挤、冲、拉、压等物理方法来改变工件形状才能得到所需零件的数控机床。如数控压力机、数控折弯机、数控弯管机、数控旋压机等。

##### 3. 特种加工类

特种加工类数控机床是指利用特种加工技术加工出所需零件的数控机床。如数控电火花切割机、数控电火花成形机、数控火焰切割机、数控激光加工机等。

##### 4. 其他类型

一些广义上的数控装备。如三坐标测量仪、数控对刀仪、数控绘图仪、数控装配机、机器人等。

#### 二、按控制方式分类

数控机床按照对被控量有无检测反馈装置可分为开环控制和闭环控制两种。在闭环系统中,根据测量反馈装置的安装位置不同,又可分为全闭环控制和半闭环控制两种。

##### 1. 开环控制数控机床

图 1-3 所示的是典型的开环数控系统。数控系统输出的进给指令信号通过环形分配器来控制驱动电路,输出一定频率和数量的脉冲,这些脉冲信号不断改变步进电动机各相绕组的供电状态,使相应坐标轴的步进电动机转过相应的角位移,再经过机械传动链带动滚珠丝杠转动,从而使运动部件产生直线位移运动。运动部件的速度和位移量由输入脉冲的频率和脉冲数决定,而改变步进电动机各相绕组的脉冲分配顺序则可以改变运动部件的运动方向。

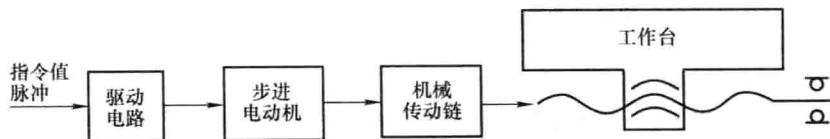


图 1-3 开环控制系统框图

开环控制系统发出的位移指令信号流是单向的,所以不存在稳定性问题。但是这种控制系统由于没有检测装置,也就没有纠正偏差的能力,因而它的控制精度较低;同时步进电动机的输出转矩有限,难以实现大

功率切削；当输入较高的脉冲频率时，容易产生失步，难以实现运动部件的高速运动控制。尽管开环控制系统有很多弊端，但由于其结构简单、调试方便、维修容易、造价低廉等优点，现仍被广泛应用于经济型数控机床及旧机床的数控化改造上。尤其是近年来由于发展了步进电动机的细分技术，出现了专用的细分功率驱动模块，步进电动机在低转矩、高精度、速度中等的小型设备的驱动控制中得到了广泛应用，特别是在微电子生产设备中充分发挥了它的独特优势。

## 2. 闭环控制数控机床

根据测量反馈装置的安装部位不同，可分为半闭环和全闭环两种控制方式。

### (1) 半闭环控制

半闭环控制系统框图如图 1-4 所示。半闭环控制系统是在伺服电动机轴上装有角位移检测装置（如光电编码器），通过检测伺服电动机或丝杠的转角来间接地检测出运动部件的位移量，并将位移量反馈给数控系统中的比较器，与输入指令进行比较，用比较的差值控制运动部件。随着脉冲编码器的迅速发展和性能的不断完善，作为角位移检测装置能方便地直接与直流或交流伺服电动机同轴安装。而高分辨率的脉冲编码器的诞生，为半闭环控制系统提供了一种高性能价格比的配置方案。由于惯性较大的机床运动部件不包括在闭环之内，控制系统的调试非常方便，并具有良好的系统稳定性，甚至可以将脉冲编码器与伺服电动机设计成一个整体，使系统变得更加紧凑。由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内，丝杠等机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但是可采用软件定值补偿的方法来适当提高其精度。而且目前广泛使用的滚珠丝杠螺母机构具有很好的精度和精度保持性，还具有可靠的消除反向运动间隙的结构，完全可以满足绝大多数数控机床用户的需要。

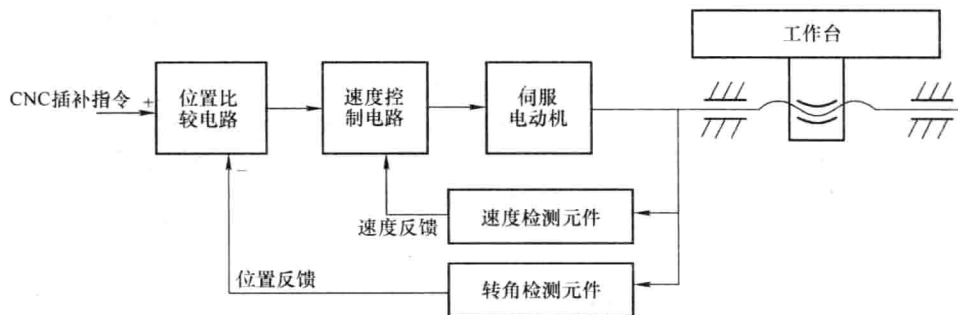


图 1-4 半闭环控制系统框图

半闭环控制数控机床的精度虽然比闭环数控机床差，但较开环数控机床好得多。其稳定性虽然不如开环数控机床，但好于闭环数控机床。

半闭环控制由于具有结构简单、调试方便、稳定性好、精度较高等优点，因而在现代数控机床的控制方式中被广泛采用。

### (2) 全闭环控制

全闭环控制系统框图如图 1-5 所示，其位置反馈采用直线位移检测元件，安装在机床床鞍部位上，将直接检测到的机床坐标轴的直线位移量，反馈到数控装置的比较器中，与输入指令位移量进行比较，用差值控制运动部件，使运动部件严格按实际需要的位移量运动，直到差值消除。全闭环控制的主要优点是将机械传动链的全部环节都包括在闭环内，因而从理论上说，全闭环控制系统的运动精度主要取决于检测装置的精度，而与机械传动链的误差无关，其控制精度超过半闭环系统，为高精度数控机床提供了技术保障。然而从另一个角度来看，由于在整个控制环内，许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙都是非线性的，故很容易造成系统的不稳定，使闭环系统的设计、安装和调试都相当困难。因而，这类数控机床对其组成环节的精度、刚性和动态特性等都有较高的要求，价格昂贵，主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨

床、超精车床和较大型的数控机床等。

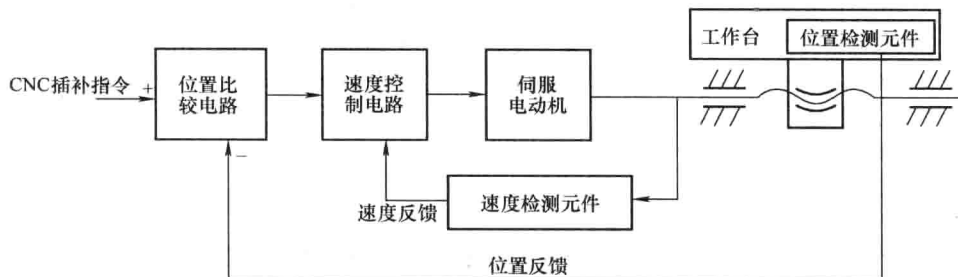


图 1-5 全闭环控制系统框图

### 三、按控制的运动轨迹分类

#### 1. 点位控制数控机床

点位控制数控机床的特点是刀具或工件在到达指定位置后才开始切削加工，加工完后刀具相对工件从一个位置移动到另一个位置再进行加工，依此循环往复。由于在运动和定位过程中并不进行切削加工，数控系统只需要控制行程的起点和终点的坐标值，而运动部件的运动轨迹则不需要严格控制，因为运动轨迹并不影响最终的定位精度。因而，点位控制的几个坐标轴之间的运动是不相关的。为了尽可能减少运动部件的运动和定位时间，并保证定位精度，刀具相对工件先是快速移动到接近终点的位置，然后降低移动速度，使之慢速趋近定位点，以确保其定位精度。最典型的点位控制数控机床有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机等。图 1-6 所示是点位控制钻孔加工示意图。从图中可以看出从孔 A 到孔 B，刀具的三种不同的运动轨迹，都能满足钻孔的要求。

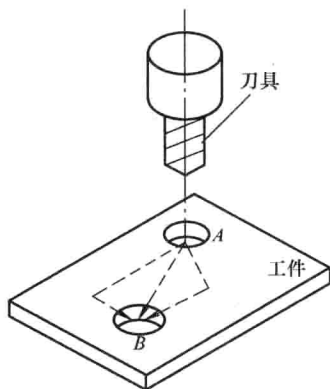


图 1-6 点位控制钻孔加工示意图

#### 2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床也称为平行控制数控机床，其特点是不仅要控制从一坐标点到另一坐标点的精确定位，还要控制两相关点之间的移动速度和轨迹。其运动轨迹是平行机床各坐标轴的直线，也就是说同时控制的坐标轴只有一个（即数控系统可以不具有插补运算功能），在移动的过程中刀具以指定的进给速度进行切削，一般只能加工矩形、台阶轴等零件。这类数控机床主要有经济型数控车床、简易数控铣床、数控磨床等，其相应的数控装置被称为直线控制数控系统。图 1-7 所示是直线控制切削示意图。

#### 3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称为连续控制数控机床，其特点是能够对两个或两个以上坐标轴在运动时的位移和速度同时进行连续相关的控制。它不仅要求控制机床运动部件的起点与终点坐标位置，而且要求控制整个加工过程中每一点的速度和位移量，即要求控制刀具的运动轨迹，从而将零件加工成在平面内的直线、曲线或在空间的曲面。图 1-8 所示是轮廓控制铣削示意图。

轮廓控制数控机床为了满足刀具沿工件轮廓的相对运动轨迹符合最终零件加工轮廓的要求，必须将各坐标运动的位移控制和速度控制按照规定的比例关系精确地协调起来。故在这类控制方式中，要求数控系统必须具有插补运算的功能，即根据程序输入的基本数据（如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心相对于圆弧起点的矢量的坐标），通过数控系统内插补运算器的数学运算，用离散化的方式把直线或圆弧的形状描述出来。在加工时，一边运算，一边根据计算结果向各坐标轴控制器分配脉冲，从而控制由各坐标轴所形成的复合运动能够满足零件加工轮廓的要求。在运动过程中刀具对工件表面连续进行切削，可以进行各种斜

线、圆弧、曲线的加工。

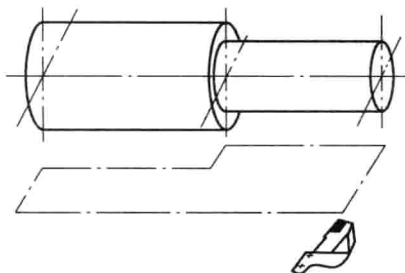


图 1-7 直线控制切削示意图

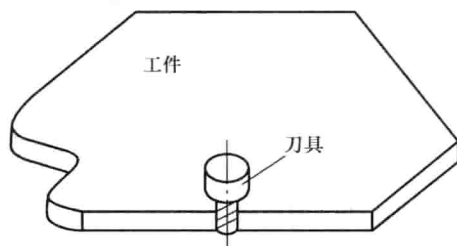


图 1-8 轮廓控制铣削示意图

轮廓控制数控机床的结构比较复杂。这类数控机床主要有数控铣床、数控车床、数控缓进给成形磨床、加工中心、数控线切割机等，其相应的数控装置称为轮廓控制数控系统。它按所控制的联动坐标轴数不同，又可分为下面几种主要形式。

- 1) 2 轴联动数控机床，主要用于数控车床加工曲线旋转面或数控铣床等加工曲线柱面。
- 2) 3 轴联动数控机床，常用的数控铣床、加工中心等。
- 3) 4 轴联动数控机床，用于加工空间曲面的数控铣床、加工中心等。
- 4) 5 轴联动数控机床，用于高效、高精度加工空间曲面的数控铣床、加工中心等，是功能最全、控制最复杂的一类数控机床。例如用端铣刀替代球头铣刀加工空间曲面轮廓时，要求刀具轴线与工件轮廓的法线平行或成某一夹角；在加工某些特殊空间曲面（如船用螺旋桨）时，为了避免刀具与工件发生干涉，要求刀具在加工时能够绕开与工件发生干涉的位置，这时就需要控制 5 个坐标轴（3 个直线轴、2 个旋转轴）联动，才能实现如此复杂的空间运动。

#### 四、按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平来分，主要有两种方法。一种是把数控机床分为高、中、低档（经济型）数控机床。这种分类方式，在我国应用较为普遍。目前高、中、低档数控机床的划分界限比较模糊，而且在不同时期它的划分标准也不尽相同，故按照功能水平分类的指标界限是相对的而非绝对的。表 1-1 列出在目前发展水平下，高、中、低档数控系统功能水平的界定指标，仅供读者参考。

另一种是将数控机床分为经济型（简易）、全功能型（普及型）和精密型（高档）数控机床。全功能型并不追求过多功能，以实用为准，也称为标准型。精密型采用闭环控制，它不仅具有全功能型数控机床的全部功能，而且机械系统的动态响应较快，适用于精密和超精密加工。经济型数控机床是指装备了功能简单、价格低、使用操作方便的低档数控系统的机床，主要用于车床、线切割机床及原有设备的数控化改造等。

表 1-1 低、中、高档数控系统功能水平的界定指标

| 功 能                            | 低 档          | 中 档           | 高 档               |
|--------------------------------|--------------|---------------|-------------------|
| 分辨率/ $\mu\text{m}$             | 10           | 1             | 0.1               |
| 进给速度/( $\text{m}/\text{min}$ ) | 8 ~ 15       | 15 ~ 24       | 15 ~ 100          |
| 伺服类型                           | 开环及步进电动机     | 半闭环及直流、交流伺服系统 | 闭环及直流、交流、数字伺服系统   |
| 驱动轴数                           | 2 ~ 3 轴      | 2 ~ 4 轴       | 5 轴以上             |
| 通信功能                           | 无            | RS232 或 DNC   | RS232、DNC、MAP、以太网 |
| 显示功能                           | 数码管或简单的 CRT  | CRT（图形、人机对话）  | CRT、液晶屏（三维图形、自诊断） |
| 主 CPU                          | 8 位、16 位 CPU | 16 位、32 位 CPU | 32 位、64 位 CPU     |
| 内装 PLC                         | 无            | 有             | 功能强劲的内装 PLC       |

## 第二章 数控机床编程基础

### 第一节 数控程序编制的相关标准

#### 一、数控加工程序编制的内容与方法

数控机床与普通机床在加工零件时的根本区别在于零件加工过程不需要人为干预，能够按照事先编制好的加工程序自动地完成对零件的加工。普通机床的加工过程是由操作者根据图样、工艺卡片等相关技术文件以及操作者自己的经验，通过手动操纵机床而完成的，机床操作者的技术娴熟程度对于普通机床的加工工效与零件的加工质量影响很大；而影响数控机床加工零件的质量与效率的因素，很大程度上取决于所编制程序的合理与否。理想的加工程序不仅能够加工出符合图样要求的合格零件，还要能够最大限度地发挥数控机床的各种优良性能，从而使数控机床能够安全、可靠、高效地工作。

不同规格的数控机床其性能、编程指令格式以及 CNC（计算机数控）系统所具备的功能都有很大的差别，程序员在编制程序前，应该对所要使用的数控机床的上述特性有深入的了解。程序编制时，需要先对图样进行分析，确定加工零件的几何特征、需要保证的尺寸公差及位置精度、相关工艺要求、加工方法和加工路线，再进行相应的数值运算，获得刀位数据。最后，按照数控机床所规定采用的代码和程序格式，将工件的坐标系、加工尺寸、刀具补偿、刀具运动轨迹、切削参数以及辅助功能（换刀、主轴正反转、切削液的开关等）等信息编制成加工程序。其实，零件加工程序就是用数控系统所能够识别的代码来描述整个零件的加工工艺以及机床运转的每一个动作、步骤。

#### （一）程序编制过程

在程序编制时，主要根据具体的零件加工图样、相关技术文件和具体机床的特性等信息编制加工代码。通常程序编制工作的主要过程如图 2-1 所示。

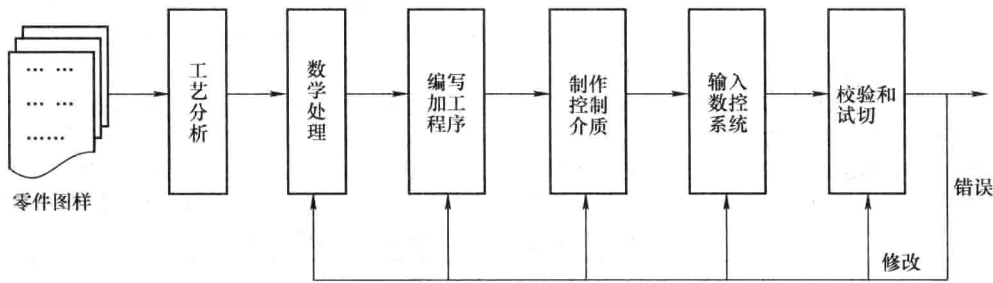


图 2-1 数控编程过程

#### 1. 零件的图样工艺分析

根据加工零件的图样和工艺卡片等技术文件，对零件的材料、加工余量、加工形状、尺寸精度、表面粗糙度以及热处理情况等进行分析，从而制定出合理、高效的加工工艺方案，根据相应的加工工艺方案，再决定具体的加工方法、零件的定位夹紧措施、加工表面的加工顺序、满足具体加工要求的机床、刀具以及合适的切削参数等。

#### 2. 数学处理

在编制程序前，首先应该根据图样与零件的定位夹紧方式，确定合适的工件坐标系，并以此工件坐标系为零件加工基准坐标系，其次还需要对加工轨迹中的一些坐标值进行计算，包括基点计算、节点计算等。对

于复杂的曲线和曲面的数值计算,必须借助于 CAD/CAM 软件。

### 3. 编写加工程序

根据指定的加工路线、具体刀具、刀具补偿、切削参数、辅助动作和计算的坐标值,依照具体数控机床所规定的指令代码和程序段格式,编写零件加工程序,并进行初步的校验(通过仔细地阅读和分析程序段,对程序段的语法错误、坐标计算错误等进行初步的校验)。同时,还应该附上相应的加工示意图、刀具布置图、机床调整卡、加工工序卡和必要的说明等。

### 4. 制作控制介质与输入数控系统

加工程序编制完成后,可以采用手动数据输入方式,将编制好的加工程序按机床规定的格式输入数控系统。也可以将加工程序的内容记录在控制介质上,通过相应的硬件设备将控制介质上的内容输入到数控系统。

### 5. 校验和试切

#### (1) 程序的校验

利用数控系统相关功能,在数控机床上运行程序,通过刀具运动轨迹检查程序的正确与否。程序的校验用于检查程序的正确性与合理性,但不能检查加工精度。

1) 静态校验。大部分的数控系统都提供“加工模拟”功能,利用数控系统所提供的加工模拟功能能够在机床不动作的情况下,通过数控系统的图形模拟显示刀具加工轨迹,以便检查程序的正确性。

2) 动态校验。利用数控系统的“空运行”功能运行程序,在不安装零件的情况下,数控机床按编程轨迹快速运行,同时在显示屏上显示刀具加工轨迹。

此外,对于平面的轮廓加工可以用笔代替刀具,用纸代替零件,通过运行程序描绘出刀具的实际加工轨迹。对于空间曲面轮廓零件,可以使用蜡块、塑料、木材等价格低廉的材料代替加工零件进行试切。这种方法不仅可以验证程序的正确合理性,还可以发现在加工过程中是否存在刀具干涉现象。

#### (2) 程序的试切

程序的试切通过在数控机床上加工实际零件来检查程序的正确性与合理性,以及实际零件的加工精度。如果有较大的加工误差,应分析加工误差产生的原因,并有针对性地予以修正。

### (二) 程序编制的方法

数控机床的程序编制方法有两种:手工编程和自动编程。

#### 1. 手工编程

手工编程是指从零件图样工艺分析、数值计算、编写零件程序单、键盘输入程序直至程序校验等各步骤均由人工来完成。

#### 2. 自动编程

##### (1) 数控语言自动编程

它是由程序员根据零件图样、工艺卡片等相关技术文件的要求,用一种专用的编程语言来描述零件的加工过程,即零件加工源程序。将源程序输入计算机,由编译程序对源程序进行编译(前置处理),计算刀具轨迹,最后由与所使用的数控系统相对应的后置处理程序处理后(后置处理),生成与使用的数控系统相对应的数控加工程序。最典型的数控语言是 APT (Automatically Programmed Tools, 自动编程工具)。借鉴 APT 语言的设计理念,各厂家及研究机构先后开发出许多具有不同特点的数控语言自动编程系统,如日本的 FAPT,德国的 EXAPT,美国的 ADAPT、AVTOSPOT、UNIAPT,英国的 2CL,日本与德国合作开发的 MIN-IAPT,我国的 SKC、2CX 等数控语言自动编程系统。这种编程方法复杂不易掌握,已被图形交互式自动编程所取代。

##### (2) 图形交互式自动编程

图形交互式自动编程是利用 CAD 或 CAM 软件的图形编辑功能,将零件的几何图形信息利用图形交互的方式输入到计算机中,形成零件的图形文件,也可以直接调用由 CAD 软件生成的零件设计图形文件,然后再利用相应的 CAM 模块,进行刀具轨迹处理,使计算机自动对零件加工轨迹中的所有节点或基点坐标进行计算,生成相应的刀位文件,再经过后置处理(Postprocessing),自动生成数控加工程序,而且可以在计算

机上加工仿真，动态地显示刀具的加工轨迹。图形交互式自动编程极大地提高了编程的效率，为解决复杂零件的编程提供了简易、可行的有效途径。它使从设计到编程的信息流连续，实现了 CAD/CAM 的集成。为了满足现代集成制造系统（Contemporary Integrated Manufacturing Systems, CIMS）对现代制造工程所提出的要求，随着计算机辅助工艺过程设计（Computer Aided Process Planning, CAPP）技术的发展，在先进制造技术领域，对数控编程又提出了 CAD/CAPP/CAM 集成的全自动编程。图 2-2 所示为全自动编程系统的组成框图。CAPP 数据库中存储着最先进、最合理、最高效的加工工艺方案，而且利用现代的数据仓库与数据挖掘技术使得数据库具有自我更新与自我学习的能力（如大隈公司的“IT 广场”信息工程中的“KCMAC”数据库）。系统从 CAD 数据库获得零件的几何特征信息，从 CAPP 数据库获得零件加工过程的工艺信息，然后调用 NC 源程序生成器生成不依赖于具体数控系统的数控源程序。经过后置处理后生成与具体数控系统相对应的数控加工程序，最后经过计算机加工仿真，验证程序的正确与否。如果没有错误，可以通过通信模块将加工程序传送到 NC 机床进行加工。

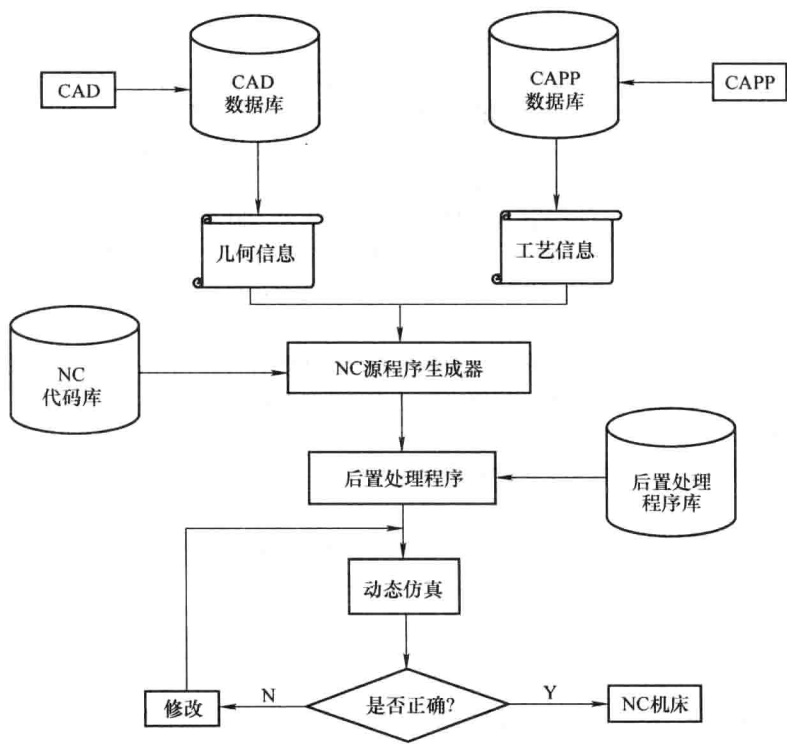


图 2-2 CAD/CAM/CAPP 集成的全自动编程系统框图

(3) 语音数控自动编程

它是采用语音识别器，将操作者发出的加工指令声音信号转变为数控加工程序的过程。

二、数控机床的坐标系

对数控机床坐标轴名称及其运动的正、负方向进行统一规定，可以使程序员在编制程序的时候，不必考虑具体设备的特殊性，并可以使编制的程序对相同类型的机床具有互换性。ISO（国际标准化组织）和我国都拟定了命名的标准。

1. 机床坐标轴的命名标准与方向

数控机床中的坐标轴，是指在机械设备中，具有位移（线位移或角位移）控制和速度控制功能的运动轴。它有直线坐标轴和回转坐标轴之分。一个直线进给运动或一个圆周进给运动定义一个坐标轴。在 ISO 和 EIA（美国电子工业协会）标准中都规定直线进给运动的直角坐标系用 X、Y、Z 表示，常称为基本坐标系。X、Y、