

# 数控技术



类目：机械类

书名：数控技术

主编：关汗青 李四明 关跃奇

出版社：电子科技大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5770-2245-1

使用层次：通用

出版时间：2026 年 2 月

定价：59.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

机械类创新教材  
教育改革新理念教材



机械类创新教材  
教育改革新理念教材

# 数控技术

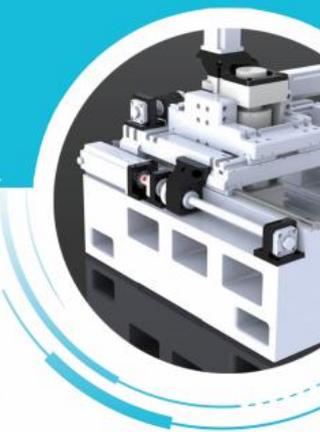


## 数控技术

# 数控技术

主 编 © 关汗青 李四明 关跃奇

主 编 © 关汗青 李四明 关跃奇



策划编辑：万晓俐  
责任编辑：万晓俐  
封面设计：旗语书装



ISBN 978-7-312-02245-1  
定价：59.80元

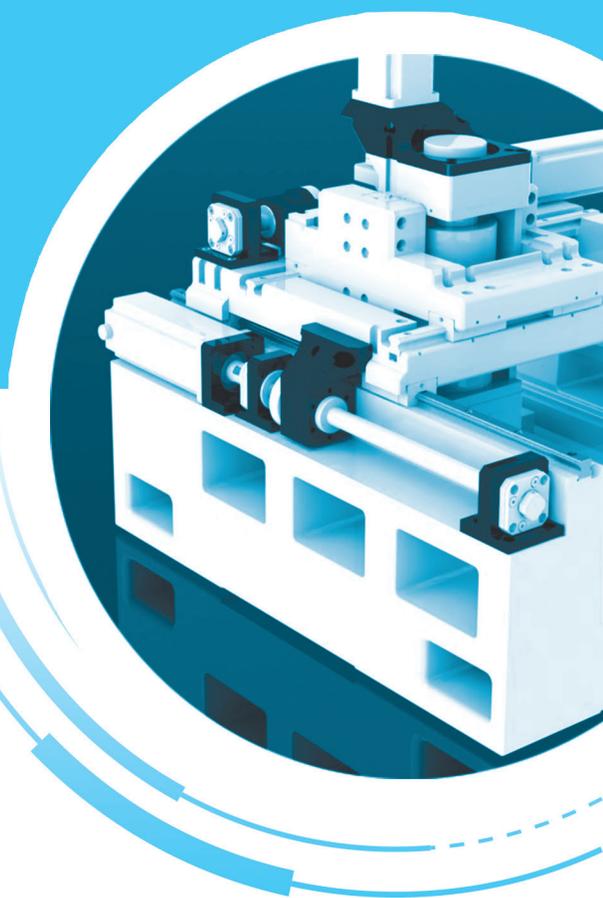
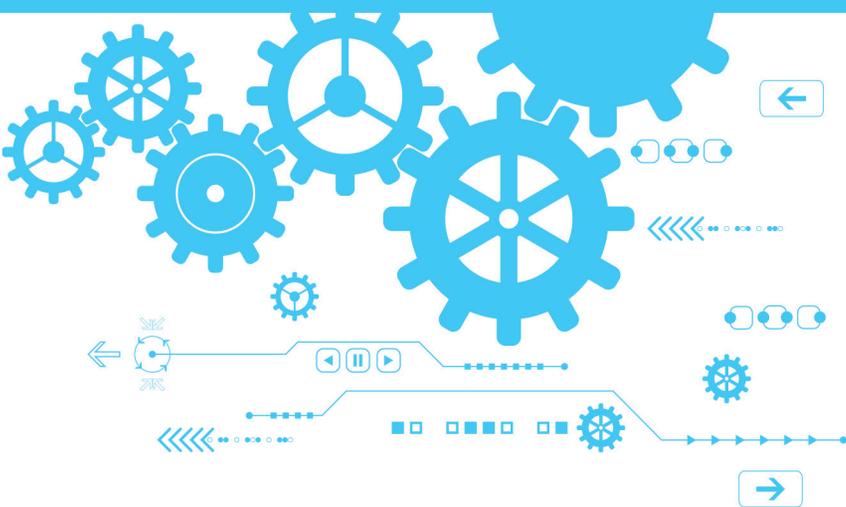
电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press



机械类创新教材  
教育改革创新理念教材

# 数控技术

主 编 ◎ 关汗青    李四明    关跃奇  
副主编 ◎ 王高升    康家鑫    王相如  
          张  誉    路丹丹    陈  凯  
          李珊珊    彭泽兵



电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

数控技术 / 关汗青, 李四明, 关跃奇主编. -- 成都 :  
成都电子科大出版社, 2026. 2. -- ISBN 978-7-5770  
-2245-1

I. TP273

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025J0M712 号

**数控技术**

SHUKONG JISHU

**关汗青 李四明 关跃奇 主编**

策划编辑 万晓桐

责任编辑 万晓桐

责任校对 罗 雅

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市祥达印刷包装有限公司

成品尺寸 210 mm×285 mm

印 张 17.25

字 数 456 千字

版 次 2026 年 2 月第 1 版

印 次 2026 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-2245-1

定 价 59.80 元

版权所有 侵权必究

# PREFACE

# 前言

自 1952 年第一台数控机床问世以来，数控机床技术得到了迅猛发展和广泛应用，不仅给传统制造业的生产方式、产品结构、产业结构带来了深刻的变化，也给传统的机电类专业人才的培养带来了新的挑战。21 世纪机械制造业竞争日益激烈，数控技术已成为核心竞争的重要体现。目前，随着国内产业升级及数控机床应用范围日益扩大，急需培养一大批熟悉数控机床技术、数控加工工艺，熟练掌握数控加工技术的应用型高级技术人才。为了适应当前我国高等教育发展及智能制造人才培养的需要，我们总结了大量的工程实践经验，编写了本书。

编者依据工程类高等教育的特点，按照机电类专业现代加工制造教学的需求进行编写。全书共 7 章，系统介绍了数控机床的基本知识，数控机床的结构，数控机床的伺服系统，数控加工工艺设计，数控车床的手工编程、数控铣床和加工中心的手工编程、数控加工自动编程技术等。针对目前最流行的 CAD/CAM 软件的编程技术，按照数控编程的一般步骤和数控编程人员必备的知识结构，重点介绍了 Mastercam 2024 的铣削加工应用，主要包括 Mastercam 特点、系统相关性、2 轴半加工、曲面 3 轴加工、曲面多轴加工及编程实例。本书精选的编程实例对学生全面认知和掌握数控机床技术及其切削加工编程技能有较大的帮助，同时每章附有思考与练习题，便于学生自学及复习掌握各章知识点。

本书内容全面，通俗易懂，实用性强；坚持“宽广而不散”的原则，做到内容够用，重点突出；理论问题论述条理清晰，便于掌握；实例分析典型全面，完全接近生产实际，具有示范性，有利于学生应用能力的培养。本书可作为学生的学习用书，也可作为数控机床技术及加工编程人员学习用书及为从事数控机床技术的工程技术人员和操作人员的培训用书。

由于编者水平有限，书中难免出现错误与不妥之处，敬请读者批评指正。

编者

2025 年 9 月



# CONTENTS

# 目 录

## 1

### 第 1 章 数控机床的基本知识 /1

- 1.1 数控机床技术基础 /1
- 1.2 数控机床的分类与应用 /10
- 1.3 数控编程的基础知识 /14
- 1.4 数控机床技术的历史与现状 /20

## 2

### 第 2 章 数控机床的结构 /29

- 2.1 数控机床的结构特点 /29
- 2.2 数控机床主传动系统 /33
- 2.3 数控机床进给传动系统 /37
- 2.4 进给系统传动间隙的消除 /43
- 2.5 回转工作台与导轨 /46
- 2.6 数控机床的自动换刀装置 /50
- 2.7 数控加工用辅具 /53

## 3

### 第 3 章 数控机床的伺服系统 /57

- 3.1 概述 /57
- 3.2 开环步进式伺服系统 /59

- 3.3 数控机床的检测装置 /74
- 3.4 闭环进给伺服系统 /86
- 3.5 伺服系统的性能分析 /107
- 3.6 进给运动控制参数的设置 /111
- 3.7 主轴驱动简介 /115

## 4

### 第4章 数控加工工艺设计 /118

- 4.1 数控加工工艺特点 /119
- 4.2 数控车削加工工艺设计 /120
- 4.3 数控铣削加工工艺设计 /129
- 4.4 数控加工工艺文件的编写 /146

## 5

### 第5章 数控车床的手工编程 /149

- 5.1 数控车床编程的特点和方法 /149
- 5.2 数控车床的对刀 /169
- 5.3 数控车床编程实例 /172

## 6

### 第6章 数控铣床和加工中心的手工编程 /177

- 6.1 数控铣床编程基本指令 /177
- 6.2 数控铣床和加工中心编程实例 /198

## 7

### 第7章 数控加工自动编程技术 /205

- 7.1 数控自动编程概述 /205
- 7.2 常用自动编程软件介绍 /207
- 7.3 CAM 系统实践——Mastercam 2024 概述 /209

- 7.4 CAM 系统实践——Mastercam 2024 二维加工 /213
- 7.5 CAM 系统实践——Mastercam 2024 三轴加工 /225
- 7.6 CAM 系统实践——Mastercam 2024 的多轴加工 /246
- 7.7 典型零件自动编程加工实例 /250

**参考文献 /268**



# 第 1 章

## 数控机床的基本知识

### 1.1 数控机床技术基础



#### 1.1.1 基本概念

##### 1. 数控与数控技术

数字控制 (numerical control, NC), 简称“数控”, 是一种借助数字、字符或其他符号对某一工作过程 (如加工、测量、装配等) 进行可编程控制的自动化方法。

数字控制技术, 简称“数控技术”, 是用数字指令控制对象的一种自动控制技术。其包括早期使用的普通数控系统和目前广泛使用的计算机数控系统 (computer numerical control, CNC)。由采用数控技术的自动控制系统形成数控系统。

##### 2. 数控机床

装备了计算机数控系统, 能实现运动和加工过程自动控制的机床称为数控机床。随着生产的发展, 数控技术已广泛应用于金属切削机床、三坐标测量机、工业机器人、数控雕刻机等机械设备上。

数控机床由程序、数控系统、伺服系统、检测反馈装置和机床主体组成, 综合了计算机、自动控制、精密测量、机床制造及其配套技术的最新成果, 成功地解决了现代产品多样化、零件形状复杂化、产品研制生产周期短、精度要求高的难题, 既是现代制造业的主流设备, 也是关系国计民生、国防尖端建设的战略物资。

##### 3. 数控加工

数控加工是指在数控机床上进行切削加工的一种工艺方法, 即采用数字信息对零件加工过程进行定义, 并控制机床进行自动运行的一种自动化加工方法。

数控加工技术集传统的机械制造、计算机、现代控制、传感控制、信息处理、光机电等

技术于一体，已成为现代机械制造技术的基础。它的广泛应用，给机械制造业的生产方式、产品结构带来了深刻的变化。数控技术的水平和普及程度，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。

## 1.1.2 数控机床的工作原理

### 1. 数控机床的加工作过程

利用数控机床完成零件的数控加工过程如图 1-1 所示，其主要包括以下内容：

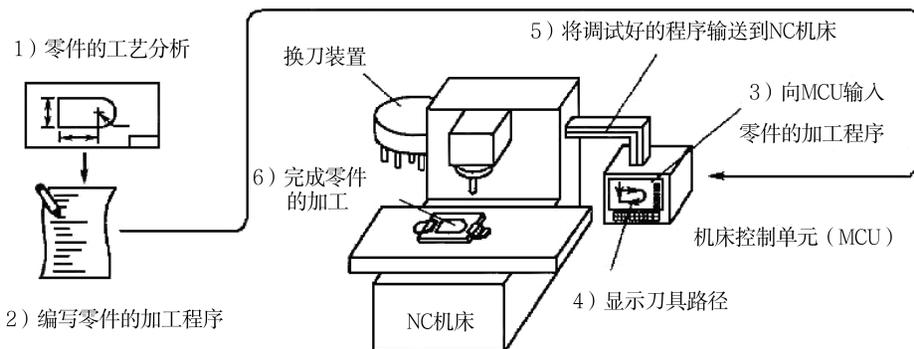


图 1-1 数控加工过程示意图

- 1) 根据零件图样进行工艺分析，确定加工方案、工艺参数和位置数据；
- 2) 编写零件数控加工程序，可以是手工编程或自动编程；
- 3) 将数控程序输入或传输到机床控制单元（MCU）；
- 4) 将输入或传输到控制单元的加工程序，进行试运行、刀具路径模拟等；
- 5) 将调试好的程序输送到 NC 机床（数控系统）；
- 6) 通过对机床的正确操作，进行程序运行，完成零件的加工。

### 2. 数控系统的工作过程

数控系统是数控机床的控制核心。它通常由一台带有专门系统软件的计算机构成，即数控系统由软件和硬件两部分组成。其硬件是软件的物理基础，软件是整个系统的灵魂，数控系统的活动均依靠系统程序来指挥。数控系统的工作过程如图 1-2 所示。

#### (1) 数据输入

输入数控系统的有零件和程序、控制参数、补偿参数，输入过程中还需要完成校验和代码的转换工作。输入的全部信息存储在数控装置的内部存储器中。

#### (2) 译码处理

将零件程序以一个程序段为单位进行处理，每个程序段含有零件轮廓信息（如起点、终点、直线、圆弧等）、加工速度信息（F 代码）以及其他（如换刀、换挡、冷却液等）辅助信息（M、S、T 代码等）。计算机依靠译码程序来识别这些代码符号，按照一定的语言规则解释成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存区间中。

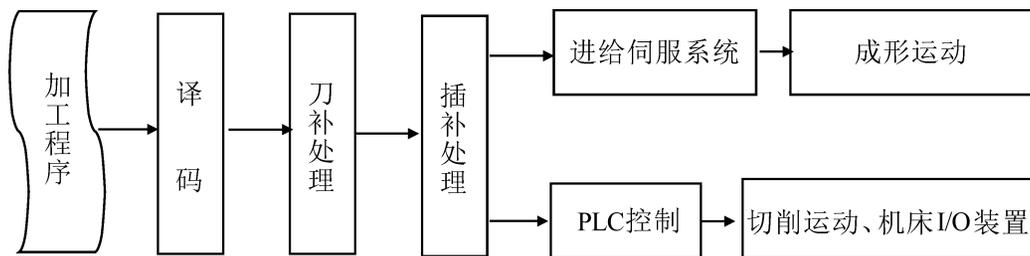


图 1-2 数控系统的工作过程

### (3) 数据处理

数据处理一般包括刀具半径补偿、速度计算及辅助功能处理。刀具半径补偿是将零件轮廓轨迹转化为刀具中心轨迹，从而大大减轻了编程人员的工作量。速度计算是解决该加工程序段以什么样的速度运动的问题。编程所给的刀具移动速度，是在各坐标的合成方向上的速度，速度处理首先是根据合成速度来计算各坐标方向的分速度，然后对机床容许的最低速度和最高速度的限制进行判别并处理。辅助功能（如换刀、主轴起停、冷却液开停等）大部分都是些开关量，因此辅助功能处理的主要工作是标志识别，即在程序执行时发出信号，让机床相应部件执行这些动作。

### (4) 插补运动

数控机床在加工复杂几何形状的零件时，机床的多个坐标轴必须同时联动控制。这就要求数控系统能够产生一系列控制坐标轴的运动指令，因此机床数字控制的核心问题是：计算机数控装置如何把输入的数控程序，通过运算处理来控制刀具的运动轨迹。该过程由数控系统的插补功能来实现。插补是在已知曲线的起点、终点之间，确定一些中间点坐标值的计算方法。插补的任务是根据加工程序中进给速度的要求，完成从曲线轮廓起点到终点的中间点坐标值的计算。插补程序在每个插补周期运行一次，在每个插补周期中，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段，通常经过若干个插补周期后，插补加工完一个程序段，即从数据段的起点走到终点。计算机数控系统是一边插补，一边加工；而在本次处理周期内插补程序的作用是计算下一个处理周期的位置增量。

当一个程序段开始插补加工时，管理程序便着手准备下一个程序段的读入、译码、数据处理，即由它调动各个功能子程序，并保证在一个程序段加工过程中完成下一个程序段的数据准备，一旦本程序段加工完毕，则立即开始下一个程序段的插补计算。整个零件加工就在这种周而复始的过程中完成。

### (5) 位置控制

位置控制既可以由软件来实现，也可以由硬件来实现。它的主要任务是在每个采样周期内，将插补计算的理论与实际反馈位置相比较，用其差值去控制进给电动机，进而控制机床工作台（或刀具）的位移，这样数控机床就自动地按照零件加工程序的要求进行切削加工。

## 3. 伺服系统的工作原理

在数控机床中，伺服系统是数控系统的执行部分。它用来控制被控对象的转角（或位移），使其能自动地、连续地、精确地复现输入指令的变化规律。在数控机床上，伺服驱动系统接收来自插补装置或插补软件产生的进给脉冲指令，经过一定的信号变换及电压、功率放

大，将其转化为机床工作台相对于切削刀具的运动，主要通过对步进电机、交/直流伺服电机等进给驱动元件的控制来实现。

数控机床的伺服驱动系统作为一种实现切削刀具与工件间运动的进给驱动和执行机构，是数控机床的一个重要部分，在很大程度上决定了数控机床的性能。也就是说，数控机床的最高转动速度、跟踪精度、定位精度等一系列重要指标主要取决于伺服驱动系统性能的优劣。

### 1.1.3 数控机床运动轨迹的插补原理

在实际加工中，零件的轮廓形状是由各种线形（如直线、圆弧、螺旋线、抛物线、自由曲线等）构成的。其中，最主要的是直线和圆弧。数控在编程时，一般仅提供描述该线形所必须的相关参数，如对直线，提供其起点和终点；对圆弧，提供起点、终点、顺圆或逆圆，以及圆心相对于起点的位置。为满足零件几何尺寸精度要求，必须在刀具（或工件）运动过程中实时计算出满足线形和进给速度要求的在起点和终点之间的若干中间点，通常把这个过程称为“插补”（interpolation）。插补的结果是输出运动轨迹的中间点坐标值，机床伺服系统根据此坐标值控制各坐标轴协调运动，走出预定轨迹。

在数控系统中，完成插补运算的装置被称为插补器。插补运算可由硬件或软件来完成，早期的 NC 系统，完全由硬件（即逻辑电路）实现插补运算。在计算机数控（CNC）系统中，通过软件（即程序）完成插补，具有结果简单、灵活多变、可靠性好等优点。现代计算机数控系统为了满足插补速度和插补精度越来越高的要求，采用软件与硬件相结合的方法，由软件完成粗插补，硬件完成精插补。

目前，CNC 系统中常用的插补算法可归纳为下面两类。

#### （1）基准脉冲插补法

基准脉冲插补，又称“脉冲增量插补”。其特点是每次插补结束仅向各运动坐标轴输出一个控制脉冲，各坐标仅产生一个脉冲当量或行程的增量。脉冲序列的频率代表坐标运动的速度，而脉冲的数量代表运动位移的大小。常用的基准脉冲插补的方法有逐点比较法、数字积分法、脉冲乘法器等。

#### （2）数据采样插补法

数据采样插补，又称“数字增量插补”。其特点是先采用时间分割思想，根据编程的进给速度，将轮廓曲线分割为每个插补周期的进给直线段（又称“轮廓步长”）进行数据密化，以此来逼近轮廓曲线；然后将轮廓步长分解为各个坐标轴的进给量（一个插补周期的进给量），作为指令发给伺服驱动装置。该装置按伺服检测采样周期采集实际位移，并反馈给插补器与指令比较，有误差则运动，误差为零则停止，从而完成闭环控制。常用的数据采样插补法有时间分割法和扩展数字积分法等。

本节仅介绍一下逐点比较插补法的计算方法。

#### 1. 逐点比较插补法

逐点比较法就是刀具（或工件）每走一步控制系统都要将加工点与给定的图形轨迹相比较，以决定下一步进给的方向，使之逼近加工轨迹。逐点比较法是以折线来逼近直线或圆弧

的方法，其最大误差不超过一个设定单位（脉冲当量）。它运算直观，输出脉冲均匀，而且输出脉冲的速度变化小，调节方便，在两坐标数控机床中应用得较为普遍。

## 2. 逐点比较法直线插补

### (1) 偏差计算公式

假设加工如图 1-3 所示的第一象限的直线  $OA$ 。直线的起点为坐标原点  $O$ ，终点  $A$  的坐标为  $(x_e, y_e)$ 。设  $M(x_m, y_m)$  为任一加工点。若  $M$  在  $OA$  直线上，则根据相似三角形的关系可得

$$\frac{y_m}{x_m} = \frac{y_e}{x_e}$$

取 
$$F_m = y_m x_e - x_m y_e$$

作为直线插补的偏差判别式。

若  $M$  点在  $OA$  直线上， $\frac{y_m}{x_m} = \frac{y_e}{x_e}$ ，则  $F_m = 0$ ；

若  $M$  点在  $OA$  直线上方的  $M'$  处， $\frac{y_m}{x_m} > \frac{y_e}{x_e}$ ，则  $F_m > 0$ ；

若  $M$  点在  $OA$  直线下方的  $M''$  处， $\frac{y_m}{x_m} < \frac{y_e}{x_e}$ ，则  $F_m < 0$ 。

设在某加工动点处，有  $F_m \geq 0$  时，为了逼近给定轨迹，应沿  $+X$  方向进给一步，走一步后新的坐标值为

$$x_{m+1} = x_m + 1, y_{m+1} = y_m$$

新的偏差为 
$$F_{m+1} = y_{m+1} x_e - x_{m+1} y_e = F_m - y_e$$

若  $F_m < 0$  时，为了逼近给定轨迹，应向  $+Y$  方向进给一步，走一步后新的坐标值为

$$x_{m+1} = x_m, y_{m+1} = y_m + 1$$

新的偏差为 
$$F_{m+1} = F_m + x_e$$

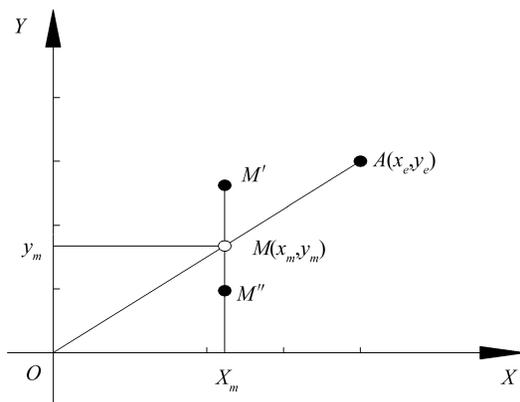


图 1-3 逐点比较法直线插补

### (2) 插补计算过程

在插补计算时，每走一步，都要进行以下四个步骤（又称“四个节拍”）的逻辑运算和算术运算，即偏差判别、坐标计算和进给、偏差计算、终点判别。

(3) 终点判别

逐点比较法的终点判断方法通常有两种：

① 设置 X、Y 两个减法计数器，加工开始前，在 X、Y 计数器中分别存入终点坐标  $x_e$ 、 $y_e$ ，当在 X 坐标（或 Y 坐标）中进给一步时，就在 X 计数器（或 Y 计数器）中减去 1，直到这两个计数器中的数都减到零时，便到达终点。

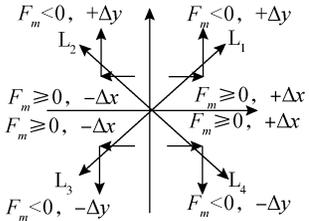
② 用一个终点计数器，寄存从起点到达终点的总步数  $\Sigma$  ( $\Sigma = x_e + y_e$ )，X、Y 坐标每进一步， $\Sigma$  减去 1，直到  $\Sigma$  为零时，就到了终点。

(4) 不同象限的直线插补计算

上面讨论的为第一象限的直线插补计算方法，其他三个象限的直线插补算法可以用相同的原理获得。表 1-1 列出了四个象限的直线插补时的偏差计算公式和进给脉冲方向，注意在计算偏差时，无论是哪个象限的直线，均用坐标的绝对值来计算。

表 1-1 四个象限的直线插补计算

线型	$F_m > 0$ 时，进给方向	$F_m < 0$ 时，进给方向	偏差计算公式
$L_1$	$+\Delta x$	$+\Delta y$	$F_m \geq 0$ 时： $F_{m+1} = F_m - y_e$ $F_m < 0$ 时： $F_{m+1} = F_m + x_e$
$L_2$	$-\Delta x$	$+\Delta y$	
$L_3$	$-\Delta x$	$-\Delta y$	
$L_4$	$+\Delta x$	$-\Delta y$	



(5) 直线插补计算流程

如图 1-4 所示为逐点比较法直线插补的流程图。

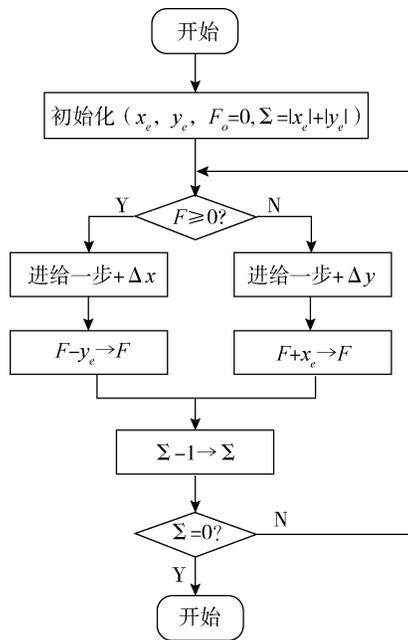


图 1-4 第一象限逐点比较法直线插补的运算流程图

例 1-1, 图 1-5 中的  $OE$  为欲加工的第一象限直线, 直线的起点为  $O(0, 0)$ , 终点为  $E(4, 3)$ , 试用逐点比较法对该直线进行插补, 并画出插补轨迹。

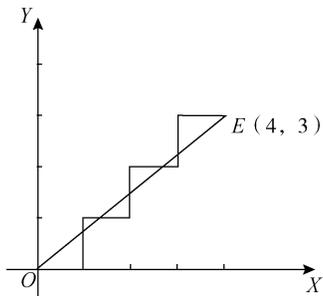


图 1-5 直线插补轨迹

解: 插补完这段直线, 刀具沿  $X$ 、 $Y$  轴应走的总步数为

$$\Sigma = x_e + y_e = 4 + 3 = 7$$

开始时刀具在直线起点, 故  $F_0 = 0$ , 插补运算过程见表 1-2 所列, 插补轨迹如图 1-5 所示。

表 1-2 直线插补的运算过程

序号	偏差进给	进给	偏差计算	终点判别
1	$F_0 = 0$	$+\Delta x$	$F_1 = F_0 - y_e = 0 - 3 = -3$	$\Sigma_1 = \Sigma_0 - 1 = 7 - 1 = 6$
2	$F_1 = -3 < 0$	$+\Delta y$	$F_2 = F_1 + x_e = -3 + 4 = 1$	$\Sigma_2 = \Sigma_1 - 1 = 6 - 1 = 5$
3	$F_2 = 1 > 0$	$+\Delta x$	$F_3 = F_2 - y_e = 1 - 3 = -2$	$\Sigma_3 = \Sigma_2 - 1 = 5 - 1 = 4$
4	$F_3 = -2 < 0$	$+\Delta y$	$F_4 = F_3 + x_e = -2 + 4 = 2$	$\Sigma_4 = \Sigma_3 - 1 = 4 - 1 = 3$
5	$F_4 = 2 > 0$	$+\Delta x$	$F_5 = F_4 - y_e = 2 - 3 = -1$	$\Sigma_5 = \Sigma_4 - 1 = 3 - 1 = 2$
6	$F_5 = -1 < 0$	$+\Delta y$	$F_6 = F_5 + x_e = -1 + 4 = 3$	$\Sigma_6 = \Sigma_5 - 1 = 2 - 1 = 1$
7	$F_6 = 3 > 0$	$+\Delta x$	$F_7 = F_6 - y_e = 3 - 3 = 0$	$\Sigma_7 = \Sigma_6 - 1 = 1 - 1 = 0$ , 到终点

### 3. 逐点比较法圆弧插补

#### (1) 偏差计算方式

圆弧轨迹的形式既有顺时针方向和逆时针方向的不同, 也有坐标象限的区别。现以第一象限逆圆为例讨论偏差计算公式。如图 1-6 所示, 设需要加工圆弧  $AB$ , 圆弧的圆心在坐标系原点, 已知圆弧的起点为  $A(x_0, y_0)$ , 终点为  $B(x_e, y_e)$ , 圆弧半径为  $R$ 。令加工动点为  $M(x_m, y_m)$ , 它与圆心的距离为  $R_m$ 。比较  $R_m$  和  $R$  反映的加工偏差。

$$R_m^2 = x_m^2 + y_m^2, R^2 = x_0^2 + y_0^2$$

因此, 可得圆弧偏差判别式:

$$F_m = R_m^2 - R^2 = x_m^2 + y_m^2 - R^2$$

若  $F_m = 0$ , 则表明加工点  $M$  在圆弧上;

若  $F_m > 0$ , 则表明加工点  $M$  在圆弧外;

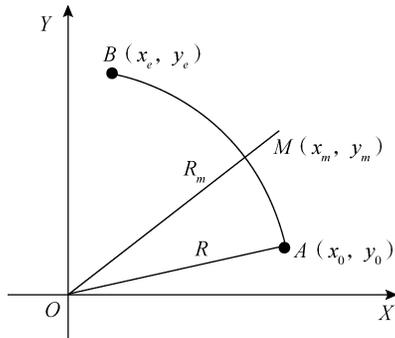


图 1-6 逐点比较法圆弧插补

若  $F_m < 0$ ，则表明加工点  $M$  在圆弧内。

设加工动点正处于  $M(x_m, y_m)$  点，若  $F_m \geq 0$ ，对于第一象限的逆圆，为了逼近圆弧，应沿  $-X$  方向进给一步，到  $m+1$  点，其坐标值为  $x_{m+1} = x_m - 1, y_{m+1} = y_m$ 。新加工点的偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = F_m - 2x_m + 1$$

若  $F_m < 0$ ，为了逼近圆弧，应沿  $+Y$  方向进给一步，到  $m+1$  点，其坐标值为  $x_{m+1} = x_m, y_{m+1} = y_m + 1$ ，新加工点的偏差为

$$F_{m+1} = x_{m+1}^2 + y_{m+1}^2 - R^2 = F_m + 2y_m + 1$$

因为加工从圆弧的起点开始，起点的偏差  $F_0 = 0$ ，所以新加工点的偏差总可以根据前一点的数据计算出来。

(2) 终点判别法

圆弧插补的终点判断方法和直线插补基本相同。可将起点到达终点  $X、Y$  轴所走步数的总和  $\Sigma$  存入一个计数器，即

$$\Sigma = |X_e - X_0| + |Y_e - Y_0|$$

无论  $X$  轴还是  $Y$  轴每进给一步，从  $\Sigma$  中减去 1，当  $\Sigma = 0$  时便发出终点到达信号。

(3) 圆弧插补计算流程

与直线插补计算流程一样，逐点比较法圆弧插补每进给一步也需要经过四个工作节拍，但是偏差计算公式不同，如图 1-7 所示。

(4) 四个象限圆弧插补计算公式

圆弧所在象限不同，顺、逆不同，则插补计算公式和进给方向也不同。归纳起来共有 8 种情况，这 8 种情况的进给脉冲方向和偏差计算公式，见表 1-3 所列。

表 1-3 四个象限的圆弧插补计算

线型	$F_m \geq 0$ 时，进给方向	$F_m < 0$ 时，进给方向	偏差计算公式
SR1	$-\Delta y$	$+\Delta x$	$F_m \geq 0$ 时： $F_{m+1} = F_m - 2y_m + 1$
SR3	$+\Delta y$	$-\Delta x$	$Y_{m+1} = y_m - 1$
NR2	$-\Delta y$	$-\Delta x$	$F_m < 0$ 时： $F_{m+1} = F_m + 2x_m + 1$
NR4	$+\Delta y$	$+\Delta x$	$x_{m+1} = x_m + 1$

(续表)

	SR2	$+\Delta x$	$+\Delta y$	$F_m \geq 0$ 时: $F_{m+1} = F_m - 2x_m + 1$ $x_{m+1} = x_m - 1$
	SR4	$-\Delta x$	$-\Delta y$	
	NR1	$-\Delta x$	$+\Delta y$	$F_m < 0$ 时: $F_{m+1} = F_m + 2y_m + 1$ $y_{m+1} = y_m + 1$
	NR2	$+\Delta x$	$-\Delta y$	

注: 表中  $x_m$ 、 $y_m$ 、 $x_{m+1}$ 、 $y_{m+1}$  都是动点坐标的绝对值。

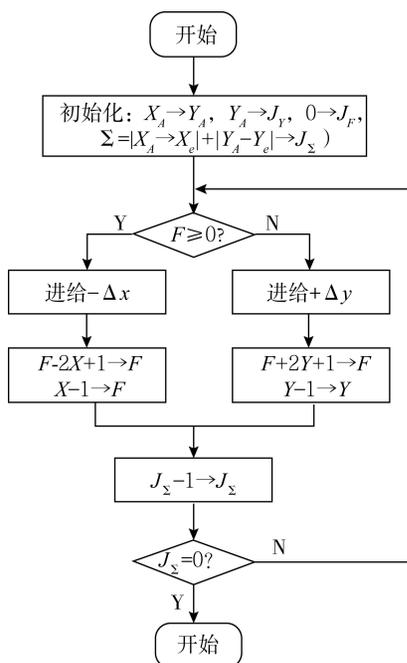


图 1-7 逐点比较法圆弧插补流程

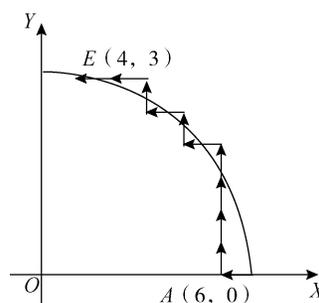


图 1-8 圆弧插补轨迹

例 1-2, 设欲加工第一象限圆弧 AE, 圆弧起点为 A (6, 0), 终点为 E (0, 6), 用逐点比较法对该段圆弧进行插补, 并画出插补轨迹。

解: 加工完这段圆弧, 刀具沿 X、Y 轴应走的总步数为

$$\Sigma = |6 - 0| + |0 - 6| = 12$$

开始时刀具在起点 A, 即在圆弧上,  $F_0 = 0$ 。插补轨迹如图 1-8 所示, 插补运算过程见表 1-4 所列。

表 1-4 圆弧插补运算过程

序号	偏差判别	进给	偏差计算	坐标计算	终点判别
1	$F_0 = 0$	$-\Delta x$	$F_1 = F_0 - 2X_0 + 1 = 0 - 2 \times 6 + 1 = -11$	$X_1 = 6 - 1 = 5,$ $Y_1 = 0$	$\Sigma_1 = \Sigma_0 - 1 = 12 - 1 = 11$
2	$F_1 = -11 < 0$	$+\Delta y$	$F_2 = F_1 + 2Y_1 + 1 = -11 + 2 \times 0 + 1 = -10$	$X_2 = 5,$ $Y_2 = 0 + 1 = 1$	$\Sigma_2 = \Sigma_1 - 1 = 11 - 1 = 10$

(续表)

序号	偏差判别	进给	偏差计算	坐标计算	终点判别
3	$F_2 = -10 < 0$	$+\Delta y$	$F_3 = F_2 + 2Y_2 + 1 = -10 + 2 \times 1 + 1 = -7$	$X_3 = 5,$ $Y_3 = 1 + 1 = 2$	$\Sigma_3 = \Sigma_2 - 1 = 10 - 1 = 9$
4	$F_3 = -7 < 0$	$+\Delta y$	$F_4 = F_3 + 2Y_3 + 1 = -7 + 2 \times 2 + 1 = -2$	$X_4 = 5,$ $Y_4 = 2 + 1 = 3$	$\Sigma_4 = \Sigma_3 - 1 = 9 - 1 = 8$
5	$F_4 = -2 < 0$	$+\Delta y$	$F_5 = F_4 + 2Y_4 + 1 = -2 + 2 \times 3 + 1 = 5$	$X_5 = 5,$ $Y_5 = 3 + 1 = 4$	$\Sigma_5 = \Sigma_4 - 1 = 8 - 1 = 7$
6	$F_5 = 5 > 0$	$-\Delta x$	$F_6 = F_5 - 2X_5 + 1 = 5 - 2 \times 5 + 1 = -4$	$X_6 = 5 - 1 = 4,$ $Y_6 = 4$	$\Sigma_6 = \Sigma_5 - 1 = 7 - 1 = 6$
7	$F_6 = -4 < 0$	$+\Delta y$	$F_7 = F_6 + 2Y_6 + 1 = -4 + 2 \times 4 + 1 = 5$	$X_7 = 4,$ $Y_7 = 4 + 1 = 5$	$\Sigma_7 = \Sigma_6 - 1 = 6 - 1 = 5$
8	$F_7 = 5 > 0$	$-\Delta x$	$F_8 = F_7 - 2X_7 + 1 = 5 - 2 \times 4 + 1 = -2$	$X_8 = 4 - 1 = 3,$ $Y_8 = 5$	$\Sigma_8 = \Sigma_7 - 1 = 5 - 1 = 4$
9	$F_8 = -2 < 0$	$+\Delta y$	$F_9 = F_8 + 2Y_8 + 1 = -2 + 2 \times 5 + 1 = 9$	$X_9 = 3,$ $Y_9 = 5 + 1 = 6$	$\Sigma_9 = \Sigma_8 - 1 = 4 - 1 = 3$
10	$F_9 = 9 > 0$	$-\Delta x$	$F_{10} = F_9 - 2X_9 + 1 = 9 - 2 \times 3 + 1 = 4$	$X_{10} = 3 - 1 = 2,$ $Y_{10} = 6$	$\Sigma_{10} = \Sigma_9 - 1 = 3 - 1 = 2$
11	$F_{10} = 4 > 0$	$-\Delta x$	$F_{11} = F_{10} - 2X_{10} + 1 = 4 - 2 \times 2 + 1 = 1$	$X_{11} = 2 - 1 = 1,$ $Y_{11} = 6$	$\Sigma_{11} = \Sigma_{10} - 1 = 2 - 1 = 1$
12	$F_{11} = 1 > 0$	$-\Delta x$	$F_{12} = F_{11} - 2X_{11} + 1 = 1 - 2 \times 1 + 1 = 0$	$X_{12} = 1 - 1 = 0,$ $Y_{12} = 6$	$\Sigma_{12} = \Sigma_{11} - 1 = 0,$ 到终点

## 1.2 数控机床的分类与应用



数控机床的品种规格较多,从不同角度对其进行考查,就有不同的分类方法,一般可根据其功能和结构,按以下原则进行分类。

### 1.2.1 按机床运动的控制功能分类

#### 1. 点位控制数控机床。

点位控制数控机床仅能实现刀具相对于工件从一点到另一点的精确定位运动,对点与点之间的运动轨迹不作控制要求,在移动过程中不进行任何加工,各坐标轴之间的运动是不相

关的，可以同时移动，也可以依次运动。为了实现快速精确的定位，两点间位移的移动方式通常是先快速移动，然后慢速趋近定位点，以确保定位精度。如图 1-9 所示为点位控制的运动轨迹。具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。随着数控技术的发展和数控系统价格的降低，单纯采用点位控制的数控系统已不多见。

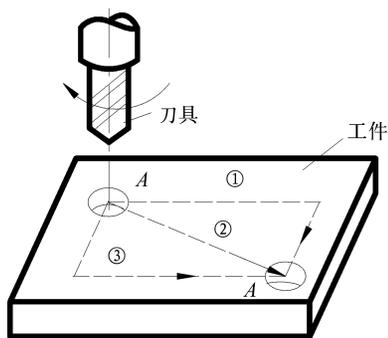


图 1-9 点位控制加工示意

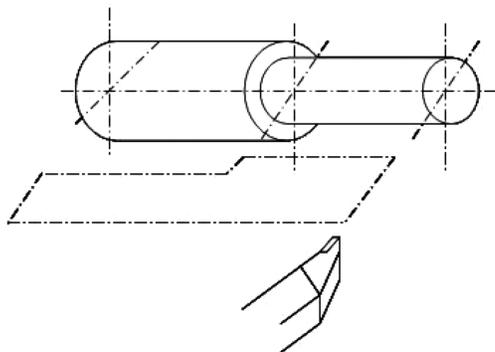


图 1-10 直线控制加工示意

## 2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床除了要求控制点与点之间的准确位置外，还需控制两相关点之间的移动速度和移动轨迹，一般是沿与坐标轴平行的方向作切削运动，如图 1-10 所示。具有直线控制功能的机床主要有某些简易数控车床、数控镗铣床等。一般来说，单纯采用直线控制的数控机床也不多见。

## 3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床，也称“连续控制数控机床”，能同时控制 2 个或 2 个以上坐标轴联动，使工件相对于刀具按程序规定的轨迹和速度运动，这类机床在加工过程中，每时每刻都对各坐标轴的位移和速度进行严格的不间断控制。

具有连续控制功能的机床根据所控制的联动轴数不同，可分为两轴联动、两轴半联动、三轴联动、四轴联动和五轴联动。两轴联动同时控制两个坐标轴实现两维直线、圆弧、曲线的轨迹控制，如图 1-11 所示。两轴半联动主要用于三轴以上机床的控制，其中任意两根轴联动，第三根轴作周期性进给，以实现简单曲面的轨迹控制，如图 1-12 所示。三轴联动一般分两类：一类是  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴联动，多用于数控铣床和加工中心，如图 1-13 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  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  中两个直线轴外，还同时控制绕某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴，如车削加工中心，除了实现纵向（ $Z$  轴）、横向（ $X$  轴）两个直线坐标轴的联动外，还需同时控制绕  $Z$  轴旋转的主轴（ $C$  轴）联动。四轴或五轴联动是除控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴联动外，还能同时控制一个或两个回转坐标轴，如工件的旋转、刀具的摆动等，从而实现复杂曲面的轨迹控制。如图 1-14 和图 1-15 所示。

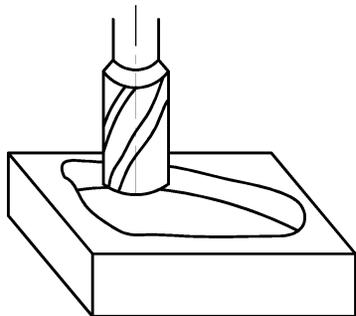


图 1-11 二轴联动加工示意

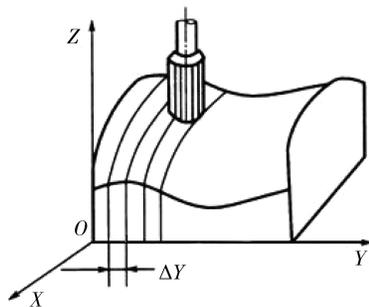


图 1-12 二轴半联动加工示意

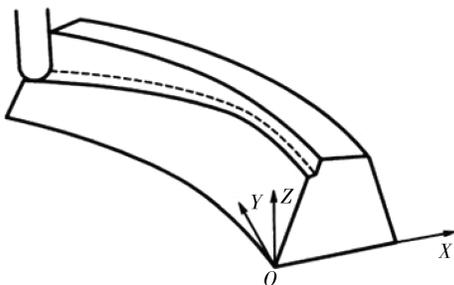


图 1-13 三轴联动加工示意图

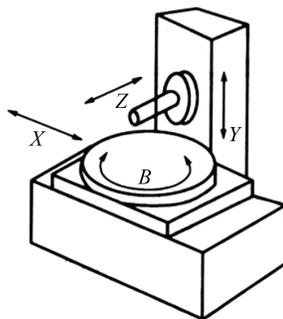


图 1-14 四轴联动数控机床

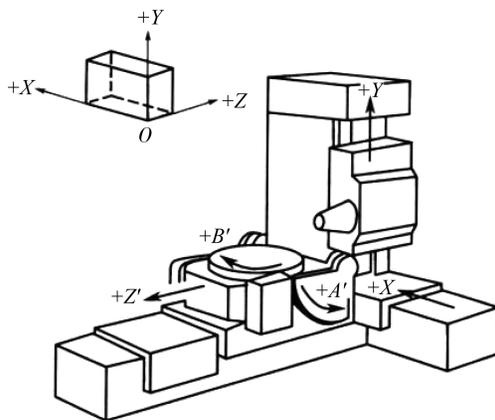


图 1-15 五轴联动数控机床

## 1.2.2 按伺服系统的类型分类

按数控系统的伺服系统控制方式的不同,可分为开环控制、半闭环控制和闭环控制三种类型。

### 1. 开环控制数控机床

开环控制数控机床是没有位置测量装置的数控机床,一般以功率步进电机作为伺服驱动元件,其数控装置发出信号的流程是单向的,其精度主要取决于伺服驱动系统和机械传动机构的性能和精度,如图 1-16 所示。开环控制数控机床具有结构简单、工作稳定、调试方便、维修简单、价格低廉等优点,在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用,

一般用于经济型数控机床。

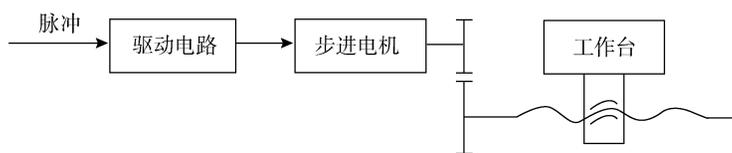


图 1-16 开环控制系统框图

## 2. 全闭环控制数控机床

全闭环控制数控机床是带有位置检测装置，而且检测装置安装在机床刀架或工作台等执行部件上，用以随时检测这些执行部件的实际位置，并将检测到的实际位置反馈到数控装置的比较器中，与程序指令值进行比较，用差值进行控制，直到差值为零，如图 1-17 所示。这种闭环控制方式，可以消除由于机械传动部件误差给加工精度带来的影响，所以具有很高的位置控制精度。但由于将丝杠螺母副及工作台导轨副等大惯量环节放在闭环之内，很容易造成系统的不稳定，安装和调试都较困难，且结构复杂，价格昂贵，所以其主要用于对精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精磨床以及较大型的数控机床。

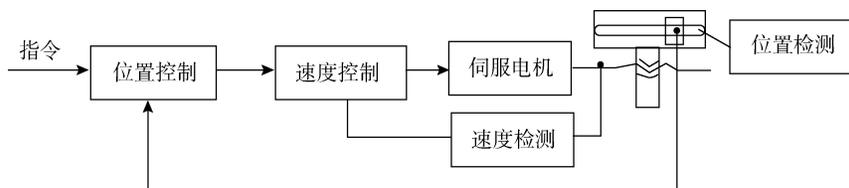


图 1-17 全闭环控制系统框图

## 3. 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床也带有位置检测装置，只是它的位置检测装置安装在伺服电机上或丝杠的端部，先通过检测伺服电机或传动丝杠的转角间接计算出机床工作台等执行部件的实际位置值，然后与程序指令值进行比较，用差值进行控制，如图 1-18 所示。由于半闭环控制环内不包括丝杠螺母副及工作台导轨副等大惯量环节，所以可获得稳定的控制性能。但丝杠的螺距误差和齿轮间隙引起的运动误差难以消除，其精度较全闭环控制系统差。半闭环控制系统结构简单、调试方便、精度也较高，因而在现代数控机床中得到了广泛应用。

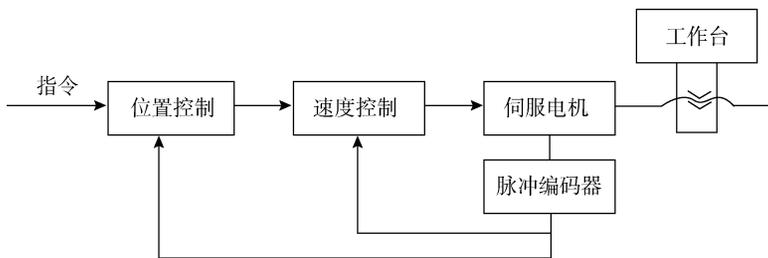


图 1-18 半闭环控制系统框图

### 1.2.3 按工艺用途分类

按工艺用途的不同,可将数控机床分为以下四大类。

#### 1. 金属切削类数控机床

金属切削类数控机床指采用车、铣、镗、磨、齿轮加工等各种切削工艺的数控机床。它又分为以下两类。

1) 普通数控机床。这类数控机床与传统的通用机床一样,有数控车、铣、镗、磨、刨、齿轮加工等,而且每一类数控机床又有多个品种。例如,镗铣类数控机床有立式、卧式、龙门式之分。这类数控机床的工艺性能与通用机床相似,所不同的是它能自动加工出复杂的零件。

2) 加工中心。其是带有刀库和自动换刀装置的数控机床。它与普通数控机床的区别是:工件经一次装夹后,通过自动更换各种刀具,可对工件各加工表面连续进行铣(车)镗、铰、钻、攻螺纹等多种工序的加工,这不仅减少了数控机床的台数,而且减少了由于工件多次安装所造成的定位误差,从而显著提高工件各加工面间的位置精度。所以,近年来加工中心发展迅速。

#### 2. 金属成形类数控机床

金属成形类数控机床是采用挤、冲、压、拉等成形工艺的数控机床。常用的有数控压力机、数控折弯机、数控弯管机、数控旋压机等。

#### 3. 特种加工类数控机床

特种加工类数控机床主要包括数控切割机、数控电火花加工机、数控火焰切割机、数控激光切割机等。

#### 4. 其他类型数控机床

近年来,其他机械设备中也大量采用数控技术,如数控多坐标测量机、数控装配机、自动绘图机及工业机器人等。

## 1.3 数控编程的基础知识



### 1.3.1 数控程序的编制方法及步骤

数控编程是从分析零件图纸开始到获得合格的数控加工程序的全过程。根据零件的复杂程度,数控编程有手工编程和自动编程两种方法。对于一些几何形状或加工内容较简单的零件,如二维运动的孔系加工或轮廓加工,由于轨迹坐标计算简单,程序也不长,采用手工编

程经济、方便。对于零件复杂、计算量大的零件，用手工编程困难，出错率增大，效率低，有时甚至无法编程，因此通常采用自动编程。

手工编程是指由人工完成数控编程的全部工作，包括分析零件图样，确定加工工艺过程、数学处理、编写加工程序、程序的输入等，其工作流程如图 1-19 所示。

自动编程是指由计算机完成数控编程的大部分或全部工作，如刀具路径的生成、加工仿真、数控加工程序的生成等，有效地提高了编程效率和编程质量，同时解决了手工编程无法解决的复杂零件的编程难题。工件表面形状越复杂，工艺过程越烦琐，自动编程的优势越明显。

自动编程目前多采用图形交互式自动编程，它是基于某一 CAD/CAM 软件或 CAM 软件，以人机交互方式完成零件的 2D 或 3D 造型、加工工艺参数的设定、自动生成刀具加工轨迹和数控加工程序，其工作流程如图 1-20 所示，其中，后置处理是将生成的刀具切削路径转换成符合特定数控系统要求的数控程序的过程。

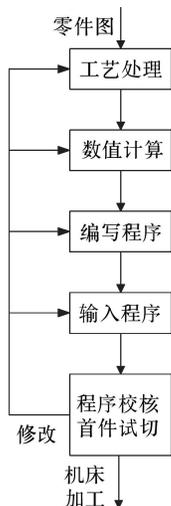


图 1-19 程序编制的一般过程

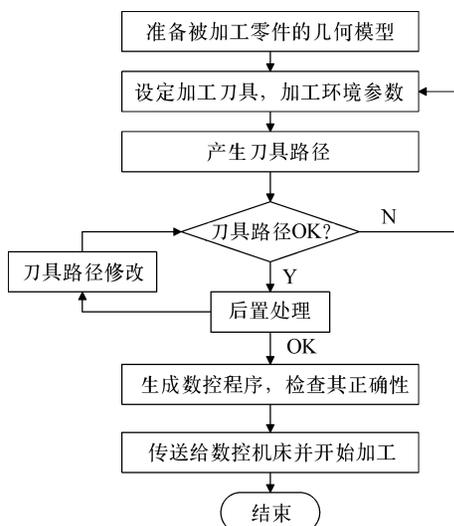


图 1-20 CAM 系统工作流程

## 1.3.2 程序的结构与格式

### 1. 加工程序的结构

零件加工程序由主程序和可被主程序调用的子程序组成，子程序有多级嵌套。无论主程序还是子程序，都是由若干个按规定格式书写的“程序段”组成的。每个程序段由按一定顺序和规定排列的“功能字”（简称“字”）组成。字是表示某种功能的代码（或指令），由表示地址的英文字母、符号和数字组成（如 X-120.5）。

一个完整的程序由程序号、程序内容和程序结束指令构成。

程序号，又称“程序名”，置于程序的开头，用作一个具体程序存储、调用的标记。程序号一般由字母 O、P 或符号“%”后加 2~4 位数字组成，如 O0001。程序内容是整个程序的核心，它由许多程序段组成，每个程序段由一个或多个指令构成，它表示零件在加工过程中数控机床要完成的全部动作。程序以结束指令 M02 或 M30 表示一个加工程序的结束。

## 2. 程序段格式

程序段格式是指程序段中的字、字符、数据的书写规则。格式不符合规定，数控系统不予接受并会报警。数控机床发展的初期采用固定顺序程序段格式和分隔符程序段格式，但现在已基本不用。现在广泛采用的是字地址可变程序段格式（简称“字地址程序格式”）。字地址程序格式的特点是：由于字首为地址，可以区分字的功能类型与存储单元，从而一个程序段中字的数目与字的位数可按需给定，与上一程序段相同的模态（续效）字可以省略，使程序简化、缩短。字地址格式中常用的地址字符及其意义见表 1-5 所列。

表 1-5 地址字符及其意义

功能	地址	意义
程序号	O、P	程序编号，子程序号的指定
顺序号	N	程序编号（程序段号）
准备功能	G	指令动作方式（直线圆弧等）
坐标字	X、Y、Z	基本直线坐标轴的移动指令
	U、V、W	第一组附加直线坐标轴的移动指令
	P、Q、R	第二组附加直线坐标轴的移动指令
	A、B、C	基本旋转坐标轴的旋转指令
	I、J、K	圆弧中心坐标或螺距指定
进给速度	F	进给速度的指令
主轴功能	S	主轴旋转速度的指令
刀具功能	T	刀具编号的指令
辅助功能	M	机床开/关指令，指定工作台分度等
补偿号	H、D	补偿号指定
暂停	P、X	暂停时间指定
重复次数	L	子程序及固定循环的重复次数
圆弧半径	R	实际上是坐标字的一种

由于字首为地址，一个程序段除程序段号与程序段结束符外，其余各字的顺序并不严格，可先可后，但为编写、检查程序的方便，习惯上按 N、G、X、Y、Z、F、S、T、M 的顺序编程，如 N0050 G03 X25.0 Y0 I-25.0 J0 F50。

每个数控系统都规定了各自的地址程序格式和一个程序段的字符总数。

### 1.3.3 数控机床的坐标系

在数控机床上加工零件时，刀具与零件的相对运动，必须在确定的坐标系中才能按规定的程序进行加工。为了便于编程时描述机床的运动，简化程序的编制方法，保证记录数据的互换性，数控机床的坐标和运动方向均已标准化。数控机床的坐标系及运动部件的运动方向的命名应符合 GB/T 18437.1—2019 的规定。

### 1. 标准坐标系的规定

标准规定，数控机床上的标准坐标系采用右手直角笛卡尔坐标系。如图 1-21 所示， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为移动坐标轴， $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的回转坐标轴。

### 2. 坐标轴的命名和方向

如图 1-21 所示，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  $Z$  轴的正方向，三个坐标轴相互垂直。当数控机床直线运动多于三个坐标轴时，则用  $U$ 、 $V$ 、 $W$  轴分别表示平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的第二组直线运动坐标轴，用  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  轴分别表示平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的第三组直线运动坐标轴。转动轴按右手螺旋定则确定，用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别表示绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴转动的转动轴，转动的正方向为四指方向， $A$ 、 $B$ 、 $C$  以外的转动轴用  $D$ 、 $E$  表示。机床某一坐标轴的正方向，是增大工件和刀具之间距离的方向。

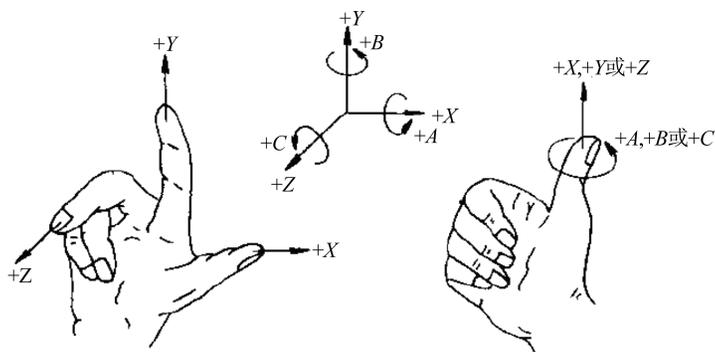


图 1-21 标准坐标系的规定

### 3. 数控机床坐标轴的规定

在确定机床坐标轴时，一般先确定  $Z$  轴，然后确定  $X$  轴和  $Y$  轴，最后确定其他轴。 $Z$  轴的方向是由传递切削力的主轴确定的，与主轴轴线平行的坐标轴即为  $Z$  轴。如果机床没有主轴，则  $Z$  轴垂直于工件装夹面，同时规定刀具远离工件的方向作为  $Z$  轴的正方向。

在一般情况下， $X$  轴应为水平方向，平行于工件的装夹面，且垂直于  $Z$  轴。对于刀具旋转的机床（如车床和磨床），若  $Z$  轴是水平的，朝  $Z$  轴负方向看， $X$  轴正向指向右方；若  $Z$  轴是垂直的单立柱机床，从机床的前面向立柱看时， $X$  轴正向指向右方；若  $Z$  轴为垂直的龙门式机床，从主轴向左手立柱看时， $X$  轴正向指向右方； $Y$  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，按照右手直角笛卡儿坐标系来判断。

### 4. 机床坐标系与工件坐标系

1) 机床坐标系与机床坐标系的原点。机床坐标系是机床上固有的坐标系，用于确定被加工零件在机床中的坐标、机床运动部件的位置（如换刀点、参考点）以及运动范围等。机床坐标系原点称为机床原点或机床零点。它是机床上的一个固定点，亦是工件坐标系、机床参考点的基准点，由机床制造单位确定，常用  $M$  表示。

2) 工件坐标系与工件坐标原点。工件坐标系是编程人员在编制零件加工程序时使用的坐标系，可根据零件图纸自行确定，用于确定工件几何图形上点、直线、圆弧等几何要素的位置。工件坐标系的原点称为工件原点或工件零点，可用程序指令来设置和改变。根据编程需

要，在一个零件的加工程序中可一次或多次设定或改变工件原点。工件零点常用 W 表示。

工件坐标系，也称“编程坐标系”，一般把工件看作是静止的，刀具看作是运动的。在这一原则下，当编程人员能够在不知道是刀具移近工件，还是工件移近刀具的情况时，就可以根据图样确定机床的加工过程。

3) 机床参考点。机床参考点是为了建立机床坐标系而在数控机床上专门设置的固定点，与机床零点的位置关系是固定的，常用 R 表示。

4) 对刀点。对刀点就是在数控加工时，刀具相对工件运动的起点，程序就是从这一点开始的。对刀点也可以叫作“程序起点”或“起刀点”。对刀点可以设在被加工零件上，也可以设在夹具上，但是必须与零件的定位基准有一定的坐标尺寸联系，这样才能确定机床坐标系与零件坐标系的相互关系。对刀点通常也是程序的终点。

### 1.3.4 辅助功能指令

辅助功能 M 代码，也称“M 指令”，由字母 M 和其后的两位数字（M00～M99）组成。它是控制机床某一辅助动作通/断（开/关）的指令，如主轴的正反转、冷却液的开关等。表 1-6 为 GB/T 18438—2019 标准规定的 M 代码及其功能。

表 1-6 辅助功能（M 功能）代码

代码 (1)	功能与 程序段 运动同 时开始 (2)	功能在 程序段 运动完 后开始 (3)	功能 (4)	代码 (1)	功能与 程序段 运动同 时开始 (2)	功能在 程序段 运动完 后开始 (3)	功能 (4)
M00	—	#	程序停止	M36	#	—	进给范围 1
M01	—	#	计划停止	M37	#	—	进给范围 2
M02	—	#	程序结束	M38	#	—	主轴速度范围 1
M03	#	—	主轴顺时针方向	M39	#	—	主轴速度范围 2
M04	#	—	主轴逆时针方向	M40~M45	#	#	不指定或齿轮换挡
M05	—	#	主轴停止	M46~M47	#	#	不指定
M06	#	#	换刀	M48	—	#	注销 M49
M07	#	—	2 号切削液开	M49	#	—	进给率修正旁路
M08	#	—	1 号切削液开	M50	#	—	3 号切削液开
M09	—	#	切削液关	M51	#	—	4 号切削液开
M10	#	#	夹紧	M52~M54	#	#	不指定
M11	#	#	松开	M55	#	—	刀具直线位移，位置 1
M12	#	#	不指定	M56	#	—	刀具直线位移，位置 2
M13	#	—	主轴顺时针方向 切削液开	M57~M59	#	#	不指定

(续表)

代码 (1)	功能与 程序段 运动同 时开始 (2)	功能在 程序段 运动完 后开始 (3)	功能 (4)	代码 (1)	功能与 程序段 运动同 时开始 (2)	功能在 程序段 运动完 后开始 (3)	功能 (4)
M14	#	—	主轴逆时针方向 切削液开	M60	—	#	更换工件
M15	#	—	正运动	M61	#	—	工件直线位移, 位置 1
M16	#	—	负运动	M62	#	—	工件直线位移, 位置 1
M17~M18	#	#	不指定	M63~M70	#	#	不指定
M19	—	#	主轴定向停止	M71	#	—	工件角度位移位置 1
M20~M29	#	#	永不指定	M72	#	—	工件角度位移位置 1
M30	—	#	纸带结束	M73~M89	#	#	不指定
M31	#	#	互锁旁路	M90~M99	#	#	永不指定
M32~M35	#	#	不指定				

常用的辅助功能 (M 功能) 代码及其应用如下:

M00——程序暂停。用以停止主轴旋转、进给和冷却液, 以便执行其他动作, 如手动变速、换刀、测量工件。当按下循环启动键后, 继续执行后面的程序。

M01——计划停止。如果操作者在执行某个程序段之后准备临时停机或关键尺寸的抽样检查, 便可预先接通“任选停止”开关。当机床执行程序到 M01 时, 就进入程序停止状态。此后, 须按下循环启动键, 才能执行以下程序。如果不接通“任选停止”开关, 则 M01 指令无法发挥作用。

M02——程序结束。该指令编在最后一条程序句中, 用以表示程序结束, 数控系统处于复位状态。

M03、M04、M05——分别命令主轴正转、反转和停止。主轴正转方向是从主轴轴线向正 Z 方向看的顺时针旋转方向, 逆时针方向则为反转方向。

主轴转速用字母 S 及 S 后面的数字表示, 单位 mm/min。如 S1000 M03 表示主轴正转, 转速 1 000 r/min, S2000 M04 表示主轴反转, 转速为 2 000 r/min。对于有恒线速控制功能的机床, 在恒线速状态下, S 表示切削点的线速度, 单位为 m/min。如 G96 S50 表示切削点的线速度为 50 m/min。

M06——换刀指令。适用于具有自动换刀装置的机床, 如加工中心和有回转刀架的数控车床。所换刀具用字母 T 及 T 后面的数字表示, T 后面跟随的数字有两位或四位, 表示选择的刀具和刀补号。

M07、M08、M09——分别表示 2 号冷却液开、1 号冷却液开、冷却液关。

M30——程序结束并返回到程序开始的字符位置, 准备下一个零件的加工。

M98——调用子程序。

M99——子程序结束并返回主程序。

## 1.4 数控机床技术的历史与现状



### 1.4.1 数控机床的历史

#### 1. 数控机床的产生

在机械产品中，单件和小批量产品占70%~80%。由于这类产品的生产批量小、品种多，一般都采用通用机床加工。而通用机床的自动化程度不高，生产效率低，加工质量难以保证。随着科学技术和社会生产力的迅速发展，人们对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化成为实现上述要求的重要措施之一，因而，出现了各种专用自动化机床和专用自动生产线，将“单件生产”方式转为“大批量生产”方式，从而大大提高了生产率，降低了生产成本。但这种生产方式需要巨大的初期投资和很长的生产准备周期，产品改型不易，因而损失了产品的多样性和创造性。但社会在不断进步，市场对机械产品的多样化要求日益强烈，产品更新越来越快，多品种、小批量生产比重明显增加，同时随着汽车工业和轻工业消费品的高速增长，机械产品的结构日趋复杂，其精度日趋提高，性能不断改善，激烈的市场竞争要求产品研制生产周期越来越短，传统的加工设备和制造方式已难以适应这种多样化、柔性化、高效和高质量复杂零件的加工要求。特别是一些由曲线、曲面组成的复杂零件，若采用通用机床加工，只能借助画线和样板用手工操作的方法来加工，或利用靠模和仿型机床来加工，其加工精度和生产效率都受到了很大的限制。

数控机床就是为了解决单件、小批量，特别是高精度、复杂型面零件加工的自动化并保证质量要求而产生的。1948年，美国帕森斯（Parsons）公司为了精确地制作直升机机翼、桨叶和飞机框架，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，他们利用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±0.001 5英寸（0.038 1 mm）。1952年，帕森斯公司和麻省理工学院（MIT）伺服机构研究所合作，成功研制出世界上第一台数控机床——三坐标立式铣床，它可控制铣刀进行连续空间曲面的加工，三坐标方式铣床的诞生拉开了数控加工技术的序幕。

#### 2. 数控机床及数控技术的发展史

自1952年第一台数控机床问世以来，数控技术得到了迅速发展、加工精度和生产效率不断提高。按照数控系统的发展，数控机床已先后经历了两个阶段、六个时代的发展：电子管、晶体管、集成电路、小型计算机、微处理器及基于PC的通用CNC系统。其中，前三代为第

一阶段称为普通数控系统（NC系统），主要由电路的硬件和连线组成，其特点是具有很多硬件电路和连接节点，电路复杂，可靠性不好。后三代为第二阶段称作计算机数控系统（CNC系统），主要由计算机硬件和软件组成，其最突出的特点是利用存储器里的软件控制系统工作，这种系统容易扩展功能、柔性好、可靠性高。现在，开放式数控系统（open numerical control system）正得到快速发展和应用。

在计算机数控系统（CNC系统）时代，随着微电子技术和计算机技术的不断发展，数控技术也随之不断更新，发展非常迅速，几乎每5年更新换代一次，其在制造领域的加工优势逐渐体现出来。

在数控系统不断更新的同时，数控机床的品种也得以不断发展。自世界上第一台三坐标数控铣床于1952年问世，先后研制成功了数控转塔冲床、数控转塔钻床，1958年美国K&T公司研制出带自动换刀装置的数控机床，称为加工中心（MC）。特别是直接数字控制系统（DNC）、柔性制造系统（FMC）、计算机集成制造系统（CIMS）等相继出现，使数控机床成为现代制造技术的基础，同时使人们对传统的机床传动及结构的概念发生了根本的转变。同时，数控技术在其他机械行业中也得到了迅速发展，如数控激光加工机床、数控等离子弧切割机床、数控火焰切割机床、数控压力机、数控剪板机、数控折弯机、数控弯管机、自动绘图机、数控测量机、数控编织机、数控剪裁机、数控雕刻机等数控设备已得到了广泛应用。

20世纪60年代，我国开始数控机床的研制工作。到1975年已试制生产了40多个品种300多台数控机床。1979年之前，由于国外的技术封锁和我国基础条件的限制，我国数控机床的品种和数量都很少，而且绝大部分为数控线切割机床，其数控机床的稳定性和可靠性也比较差。20世纪80年代，我国先后从日本、美国等国家引进部分数控装置和伺服驱动系统，通过引进和消化吸收，开始批量生产数控系统，逐步建立国产化体系，出现了华中I型和蓝天I型等数控系统。数控机床的品种也有了新的发展，除了线切割机床外，其他金属切削机床也都有了极大的发展。“九五”期间是我国数控机床发展重要的发展时期，到“九五”末期，国产数控机床的国内市场占有率达50%，配国产数控系统（普及型）也达10%。20世纪90年代，一些较高档次的五轴联动数控机床相继开发出来，并向高档数控机床发展。“十四五”期间，我国数控机床实现规模扩张、高端突破、国产替代、智能升级，从“能用”迈向“好用”，成为智能制造核心支撑。2024年数控机床产量28.7万台；总产值2150亿元；金属切削机床中数控机床占比72%；中高端数控机床市占率达38.5%。2025年高档数控系统市占率 $\geq 50\%$ ；智能制造装备国内满足率 $\geq 70\%$ ；关键工序数控化率 $\geq 68\%$ ；突破精密轴承、伺服、光栅、数控系统等12项“卡脖子”技术；机床装备产业达1.05万亿元；核心部件自主配套率达65%。

此外，我国在柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统（CIMS）等方面也取得了重要突破。1984年，北京机床研究所研制成功了FMC-1和FMC-2柔性加工单元，之后又开始了柔性制造系统的开发工作，并与日本FANUC公司合作，在北京机床研究所内建立了第一套柔性制造系统（JCS-FMC-1型），用于加工直流伺服电机的轴类、法兰盘类、刷架体类和壳体类的14种零件。清华大学等单位用了五年半的时间，建成了我国第一条计算机集成

制造系统（CIMS—ERC），于1993年3月正式通过国家鉴定和验收。它不仅填补了国内在CIMS方面的空白，而且进入了世界先进行列，达到了美国和欧共体CIMS研究的水平。“十四五”期间，我国柔性制造系统与计算集成制造系统深度融合、协同升级，成为智能制造核心支柱，实现从单点应用到系统集成、从局部柔性到全局智能的跨越。柔性制造系统从传统FMS到可重构智能柔性，5G+工业互联网+数字孪生+AI+机器人+AGV深度融合，实现不停机重配、秒级换产、混线生产；设备互联互通协议覆盖率68%；上汽通用五菱“智能岛”，单产线混产8—10车型，效率+80%、调度响应+90%。家电头部企业柔性产线实现多品类混线、AI质检（15分钟→30秒）、秒级换产；高端装备行业多品种小批量柔性单元普及，适配定制化与快速迭代。新一代计算机集成制造系统打通设计—工艺—生产—物流—质量—管理—供应链全链路，实现数据互通、业务协同、全局优化。工业软件2024年市场规模2850亿元，国产占比32%；系统集成方面，软硬一体化（硬件+软件+服务）成为主流；华为、阿里云等构建国产化生态；智能工厂建成3.5万+基础级、1260+先进级、230+卓越级智能工厂，覆盖80%以上的制造业大类。

21世纪，我国数控机床技术从跟跑→并跑→局部领跑，经历了规模扩张、技术突破与智能升级三阶段，在数控系统、五轴联动、伺服驱动、智能制造等方向实现关键跨越。2000—2010年为规模扩张与技术追赶期。数控机床产量与产值快速增长，成为世界第一大机床生产国；中低端产品实现国产化替代，占有率约85%；华中数控、广州数控等企业突破基础数控系统，打破国外垄断。2011—2020年为中高端突破与标准构建期。五轴联动技术从“卡脖子”走向工程化应用；2019年机床工具行业首获贸易顺差；2020年发布NC-Link工业互联网标准，支撑数字化转型。2021—2025年为智能升级与换道超车期。AI深度融入数控系统，如华中数控“华中10型”集成AI芯片与大模型，实现自主学习与决策；格力、科德数控等在高速双五轴、铣车复合等高端机型取得突破；国产高端五轴机床国产化率提升至约10%，航空航天、新能源等领域应用加速。这期间数控系统、伺服驱动、智能制造等关键技术获得突破。机床数控系统从依赖发那科、西门子，到华中9型/10型、广州数控GSK25i等实现自主可控，部分性能达国际先进。伺服驱动模块，如汇川技术、华中数控等推出高性能伺服电机与驱动器，定位精度达微米级，满足高精加工需求。智能制造方面，融合数字孪生、物联网、预测性维护，构建无人化智能工厂，如格力双五轴龙门加工中心效率提升80%。21世纪我国数控机床技术完成从规模到质量、从跟跑到并跑领跑的跃迁，中低端已稳固，高端加速突破，智能升级正重塑产业格局，为“工业母机”自主可控与“中国智造”奠定坚实基础。

目前，高端数控系统、精密传感器、关键功能部件仍有差距；高端市场国产化率约10%，稳定性与寿命待提升；基础工艺与算法积累不足。应该抓住机会不断发展，努力发展自己的先进技术，加大技术创新与人才培养力度，提高企业综合服务能力，努力缩小与发达国家之间的差距。力争早日实现数控机床产品从低端到高端、从初级产品加工到高精尖产品制造转变。实行AI+数字孪生深度融合，实现加工过程实时优化；开放式架构成为主流，支持用户二次开发；绿色低碳与高效加工结合，提升能效与精度。实现从中国制造到中国创造、从制造大国到制造强国的转变。

## 1.4.2 机床数控技术现状及发展

### 1. 直接数字控制系统

直接数字控制，又称“分布式数字控制（DNC）”，其研究始于20世纪60年代。它指的是用一台计算机直接控制若干台数控机床进行零件加工或装配的系统，所以又称为“计算机群控”。当时的研究目的主要是解决早期数控设备使用纸带输入数控加工程序而引起的一系列问题和早期数控设备成本高等问题。70年代以后，DNC已由简单的直接数字控制发展为分布式数字控制。分布式数控系统不但具有直接数字控制的所有功能，而且具有系统信息收集、系统状态监视及系统控制等功能。相对群控而言，其最大优点在于DNC中的各数控机床具有自治能力。此时，主控计算机一旦出现故障，系统中的各数控机床仍可继续工作。80年代以后，随着计算机技术、通信技术和CIMS技术的发展，DNC的内涵和功能不断扩大，并开始着眼于车间的信息集成，即针对车间的生产计划、技术准备和加工操作等基本作业进行集中监控与分散控制，把生产任务通过局域网分配给各个加工单元，并进行信息的相互交换，最终可以与整个工厂的计算机联结成网络，形成一个较大的、较完整的制造系统。

DNC的基本功能是传送NC程序。随着DNC技术的发展，现代DNC还具有制造数据传送（CNC程序上传、NC程序校正文件下传、刀具指令下传、托盘零点值下传、机器人程序下传、工作站操作指令下传等）、状态数据采集（机床状态、刀具信息和托盘信息等）、刀具管理、生产调度、生产监控、单元控制和CAD/CAPP/CAM接口功能。

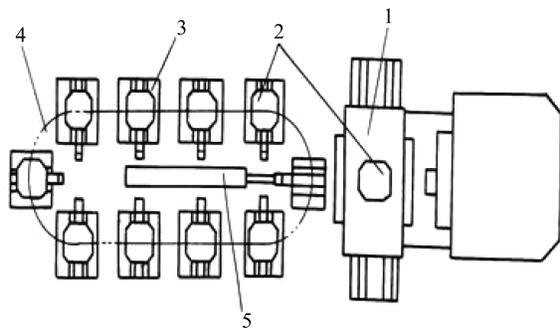
目前，DNC技术的发展方向主要表现在DNC与CIMS的集成、DNC系统的模块化与商品化、基于现场总线与计算机局域网的DNC产品开发，以及DNC产品与数控系统的配套开发和生产等方面。

### 2. 柔性制造系统

#### (1) 柔性制造单元

柔性制造单元（FMC）是以中心控制计算机和加工中心为主体，配上托盘自动交换装置或工业机器人、刀具和工件的自动检测装置、加工过程监控装置等组成的自动检测加工系统。由于工件一次装夹后可在柔性制造单元中的加工中心上加工，所以比加工中心具有更高的制造柔性、加工精度和生产效率。

如图1-22所示为柔性制造单元。它由卧式加工中心机床、环形交换工作台、托盘及托盘交换等装置组成。托盘上装有工件，在加工过程中，它与工件一起流动，类似通常的随行夹具。环形变换工作台用于工件的输送与中间存储，托盘座在环形导轨上由内侧的环链拖动而回转，每个托盘座上有地址识别码。当一个工件加工完毕，数控机床发出信号，先由托盘交换装置将加工完的工件（包括托盘）拖至回转台的空位处，然后转至装卸工位，同时将待加工工件推至机床工作台并定位加工。



1—卧式加工中心机床；2—托盘；3—托盘站；4—环形交换工作台；5—工件交换台。

图 1-22 柔性制造单元

在车削 FMC 中一般不使用托盘交换工件，而是直接由机械手将工件安装在卡盘中，装卸料由机械手或机器人来完成。

FMC 是在加工中心 (MC)、车削中心 (TC) 的基础上发展起来的。它可以作为独立运行的生产设备进行自动加工，也可以作为 FMS 的加工模块。FMC 具有规模小、成本低、占地面积小、便于扩展等优点。它可在单元计算机的控制下，配以简单的物料传送装置，扩展成小型的柔性制造系统，特别适用于中、小型企业。

### (2) 柔性制造系统

柔性制造系统 (FMS) 由一组数控机床组成。它能随机地加工一组具有不同加工顺序及加工循环的零件，实行自动运送材料及计算机控制，以便动态平衡资源的供应，从而使系统自动适应零件生产混合的变化及生产量的变化。一般认为，柔性制造系统由加工系统、物料储运系统、刀具运输系统和信息控制系统组成。如图 1-23 所示为柔性制造系统的基本组成。

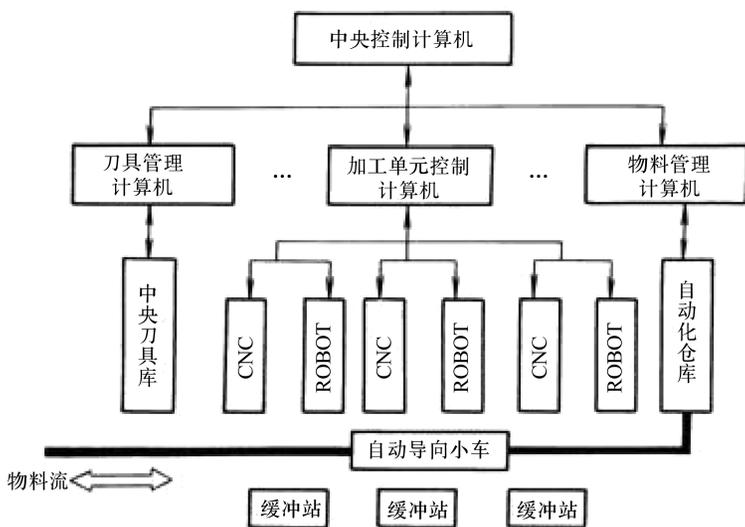


图 1-23 柔性制造系统的基本组成

①加工系统。其包括由两台以上的 CNC 机床、加工中心或柔性制造单元 (FMC) 以及其他的加工设备所组成。例如，测量机、清洗机、动平衡机和各种特种加工设备等。

②物料储运系统。其由工件装卸站、自动化仓库、自动化运输小车、机器人、托盘缓冲

站、托盘交换装置等组成，能对工件和原料进行自动装卸、运输和存储。在 FMS 中，工件通常通过专用夹具安装在托盘上，工件输送连同整个托盘一起由自动小车进行输送。

③刀具存储系统。其包括中央刀库、机床刀库、刀具预调站、刀具装卸站、刀具输送小车或机器人、换刀机械手等。刀具输送是利用机器人实现刀具进出系统，以及系统中央刀库和各个加工设备刀库之间的刀具输送。

④信息控制系统。信息控制系统由主计算机、分级计算机及其接口、外围设备和各种控制装置的硬件和软件组成。它接收来自主计算机的指令并对整个 FMS 实行监控，实现单元层对上级及下层的内部通信传递，对每一个标准的数控机床或制造单元的加工实行控制，对夹具及刀具等实行集中管理和控制，协调各控制装置之间的动作，从而实现各系统之间的信息联系，确保系统的正常工作。对一个复杂系统，只有通过计算机分级管理才能对系统进行卓有成效的管理，保证在工作时，各部分协调一致。

柔性制造系统不仅节省了上料、下料与调整时间，而且系统只需要最低限度的操作人员，并能实现夜班无人作业，操作人员只负责启停系统和装卸工件。特别是柔性制造系统中的各工作单元以及整个系统均由计算机控制，具有很高柔性，非常适合于多品种、中小批量的零件生产。

### 3. 计算机集成制造系统

计算机集成制造（CIM）的概念是由美国的约瑟夫·哈林顿（J. Harrington）博士于 1973 年提出来的，基于 CIM 理论和技术构成的具体实现便是计算机集成制造系统（CIMS）。CIMS 是在计算机技术、信息技术、自动化技术、制造技术和现代管理科学的基础上，将制造工厂的全部生产和经营活动——设计、制造及经营管理（包括市场调研、生产决策、生产计划、生产管理、产品开发、产品设计、加工制造以及销售经营）等整个生产过程有关的各种分布的自动化子系统，通过新的生产管理模式、工艺理论和计算机网络有机地集成起来，构建一个完整的、优化的全面自动化生产系统，我们可以获得更高的整体效益，并缩短产品开发周期，提高产品质量和生产效率。它是工厂自动化的发展方向，也是未来制造工厂的模式。

CIMS 包括制造工厂的生产和经营的全部活动，应具有经营管理、工程设计和加工制造等主要功能，一般 CIMS 由经营管理信息分系统、工程设计自动化分系统、制造自动化分系统、质量保证分系统、计算机网络分系统和数据库分系统六个部分组成，即 CIMS 由四个功能分系统和两个支撑分系统组成，如图 1-24 所示为 CIMS 的基本组成结构。

1) 经营管理信息分系统。其主要包括市场预测、经营决策、各级生产计划、生产技术准备、销售及售后跟踪服务、成本核算、人力资源管理，通过信息的集成，达到缩短产品生产周期、减少占用的流动资金、提高企业的应变能力。

2) 工程设计自动化分系统。其采用计算机辅助进行产品设计、工艺设计、制造准备及产品性能测试等阶段的工作，即 CAD/CAPP/CAM 系统，目的是使产品开发活动更高效、更优质、自动地进行。

3) 制造自动化分系统。其主要包括零件的数控加工、生产调度、刀具管理、装配、物料

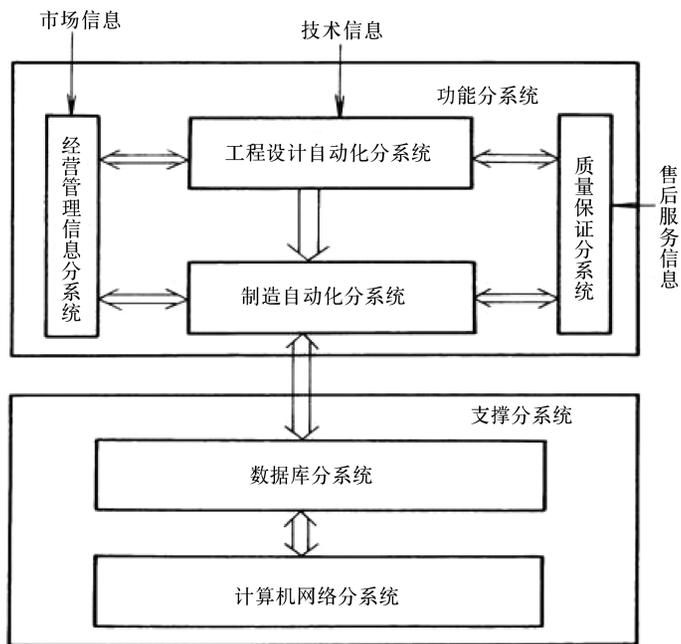


图 1-24 CIMS 的基本组成结构

储运等，涉及加工制造的各个环节，以及系统与设备间的信息管理和物流管理。其是 CIMS 中信息和物流的结合点，是 CIMS 最终产生经济效益的关键所在。

4) 质量保证分系统。其包括质量决策、质量检测与数据采集、质量评价、控制与跟踪等功能。该系统保证从产品设计、制造、检测到售后服务的整个过程的质量，以实现产品的高质量、低成本，达到提高企业竞争力的目的。

5) 计算机网络分系统。其是连接 CIMS 各个分系统的计算机通信网络系统，采用国际标准和工业标准规定的网络协议，实现各分系统间信息与数据的通信与交换。

6) 数据库分系统。其是支持 CIMS 各个分系统，覆盖企业全部信息的数据库系统。各类数据库可在分布式数据库管理系统的控制和管理下进行调用和存取，通过该系统可以实现企业数据共享和信息集成。

#### 4. 机床数控技术的发展趋势

数控机床的出现不仅给传统制造业带来了革命性的变化，使制造业成为工业化的象征，而且随着先进制造技术的兴起和不断成熟，对机床数控技术提出了更高的要求，当前，机床数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

##### (1) 运行高速化、高效化及加工高精化

高速、高效和精度是数控设备的重要指标，也是数控技术永恒追求的目标。因为它直接关系到加工效率和产品质量。

近年来，高精度数控机床以电主轴和直线电动机的应用为特征，使主轴转速、工作台移动速度大大提高。新一代数控设备在运行高速、高效化及加工高精化等方面都有了更高的要求。由于计算机技术的不断进步，促进了数控技术水平的提高，数控装置、进给伺服驱动装置和主轴伺服驱动装置的性能也随之提高，使得现代的数控设备在新的技术水平下，可同时

具备运行高速化、加工高精化的性能。

**高速化：**提高切削和进给速度，缩短加工时间，充分发挥现代刀具材料的性能，大幅度提高加工效率、降低加工成本，提高零件的表面加工质量和精度。超高速加工技术对制造业实现高效、优质、低成本生产有广泛的适用性。

**高效化：**通过快速、准确的数字量传递技术对高性能的机床执行部件进行高精密度、高响应速度的实时处理。新型刀具的应用使得车削和铣削的切削速度达到 5 000~8 000 m/min 以上；主轴转数在 30 000 r/min（有的高达  $10 \times 10^4$  r/min）以上；工作台的移动速度在 100 m/min 以上（有的到 200 m/min），在分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$  时，在 24 m/min 以上；进给加速度和减速度达到 2~4 g；自动换刀速度在 1 s 以内；小线段插补进给速度达到 12 m/min。

**加工高精化：**从精密加工发展到超精密加工（特高精度加工），精度从微米级到亚微米级，乃至纳米级（小于 1  $\mu\text{m}$ ）。高精度加工是世界各工业强国致力发展的方向。

#### （2）高可靠性

可靠性是实现高速、高效、高精度加工的基本保证。高性能的数控装置和伺服系统，以及先进的控制系统和监控系统，提高了数控机床的可靠性和稳定性。数控机床的可靠性一直是用户最关心的主要指标，它主要取决于数控系统各伺服驱动单元的可靠性。提高可靠性，目前主要采取以下措施：

1) 采用更高集成度的电路芯片，采用大规模或超大规模的集成电路、专用芯片及混合集成电路，以减少元器件的数量，精简外部连线，提高可靠性。

2) 通过硬件功能软件化，以适应各种控制功能的要求，同时通过硬件结构的模块化、标准化、通用化和系列化，提高硬件的生产批量和质量。

3) 增强故障自诊断、自恢复和保护功能，对系统内硬件、软件和各种外部设备进行故障诊断、报警，自动进行相应保护，以避免损坏机床和报废工件。由于采取了各种有效的可靠性措施，现代数控机床的平均无故障时间（MTBF）可达到 10 000~36 000 h。

#### （3）控制智能化

新一代数控系统在控制性能上向智能化发展，引入了自适应控制、模糊系统和神经网络的控制机理，具有自动编程、前馈控制、模糊控制、学习控制、自适应控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿等功能。伺服系统采用智能化的主轴交流驱动和智能化进给伺服装置，能自动识别负载并自动优化调整参数。直线电机驱动系统已实用化。为满足制造业生产柔性化、制造自动化发展需求，数控技术智能化程度将不断提高。

#### （4）网络化和智能化

支持网络通信协议，既满足单机需要，又能满足 FMC、FMS、CIMS 对基层设备集成要求的数控系统，该系统是形成“全球制造”的基础单元。目前，先进的数控系统为用户提供了强大的联网能力，可实现多台数控机床间的数据通信和直接对多台数控机床进行控制。有的已配备与工业局域网通信的功能以及网络接口，使远程在线编程、远程仿真、远程操作、远程监控及远程故障诊断成为可能。在智能化控制方面，通过采样加工过程中影响产品加工质量的外部变量，实现了加工参数的自动修正、调节与补偿，有效地提高了 CNC 的工作效率。

### (5) 体系开放及模块化

具有在不同的工作平台上均能实现系统功能，且可以与其他的系统应用进行互操作的系统。系统构件（软件和硬件）具有标准化（standardization）与多样化（diversification）和互换性（interchangeability）的特征；允许通过对构件的增减来构造系统及重构机床结构，实现系统“积木式”的集成。系统构造应该是可移植的和透明的。数控系统体系结构正向基于 PC 的全数字化开放体系结构方向发展。基于 PC 的开放式数控系统具有强大的生命力，它允许机床制造商根据自己的特殊操作方式和理念，利用 Windows 技术改变人机界面（HMI）。其开放式系统理念的重要特点是，可以在数控核心部分，使用标准的开发工具对用户指定的系统循环和功能宏进行调整。

综上所述，机床数控技术的发展趋势主要集中在提高速度、效率、精度和可靠性等方面，采用开放式体系结构，实现网络化和智能化控制，以及开发高性能的数控系统和伺服系统。这些发展趋势将推动制造业向更高水平迈进，满足日益复杂的制造过程 and 市场需求。

## 拓展阅读

### 精密数控机床技术专家——王亮

王亮，从一名普通的车间工人成长为精密数控机床技术专家，成为国内高端数控机床行业的佼佼者。他在高端数控机床领域取得了多项技术突破，研发的直线电机系列、FMS 柔性生产线系列、五轴加工中心系列产品在国内同类产品中处于领先地位。王亮还提出了提高数控机床定位精度的技术方案，并成功应用于实际生产中，推动了国产数控机床达到国际领先水平。他获得了“全国五一劳动奖章”“全国劳动模范”“齐鲁大工匠”等称号。



## 思考与练习题 ▶▶▶

- 1-1 数控机床主要由哪几部分组成？
- 1-2 与普通机床相比，数控机床的特点是什么？
- 1-3 数控机床按控制方式可分为哪几大类？
- 1-4 简述点位控制、直线控制和轮廓控制。
- 1-5 解释下面名词术语：  
加工中心；联动控制；CNC；FMS；CIMS；闭环进给伺服系统。
- 1-6 试述手工编程的内容与方法。
- 1-7 数控程序和程序段的格式是什么？其包括哪几类指令代码？
- 1-8 辅助功能 M 的作用是什么？常用 M 指令有哪些？
- 1-9 数控加工的工件坐标系和机床坐标系的关系是如何建立的？
- 1-10 简述刀位点、起刀点和换刀点的区别。
- 1-11 简述数控机床技术的发展趋势。

## 第 2 章

# 数控机床的结构

数控机床是典型的机电一体化产品，尽管它的机械结构同传统普通机床有许多相似之处，然而，现代数控机床并不是简单地在传统机床上配备数控系统，也不是在传统机床的基础上，仅对局部加以改进而成。传统机床存在着一些如刚性不足、抗振性差、热变形大、滑动面的摩擦阻力大及传动元件之间存在间隙等弱点，难以胜任数控机床对加工精度、表面质量、生产率以及使用寿命等要求。现代数控机床，特别是加工中心，无论是其基础大件、主传动系统、进给系统、刀具系统、辅助功能等部件结构，还是整体布局、外部造型等都已发生了很大的变化，已形成数控机床的独特机械结构。

## 2.1 数控机床的结构特点

### 1. 模块化的设计

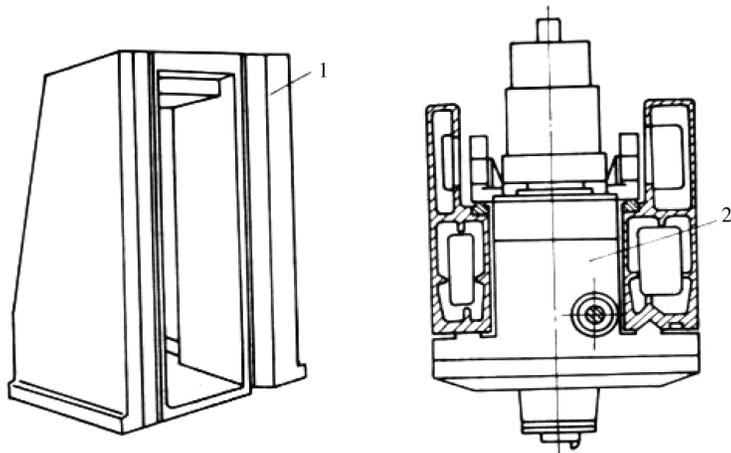
所谓模块化的设计是把数控机床各个部件的基本单元，按不同功能、规格、价格设计成多种模块，用户可以按需要选择最合理的功能模块配置成整机。这样不仅能降低数控机床的设计和制造成本，而且能缩短设计和制造周期，数控机床也能以足够多的功能和相对低廉的价格推向市场，从而赢得市场。

### 2. 静、动刚度高

数控机床常在高速和重负荷条件下工作，以最大限度地提高切削效率。这就要求数控机床结构须具有良好的刚度、抗振能力和承载能力，以便把移动部件的重量和切削力所引起的弹性变形控制在最小限度之内，保证所要求的加工精度和表面质量。为此，数控机床在结构设计上采取了以下几个措施。

1) 合理设计基础件的截面形状和尺寸，采用合理的筋板结构。基础件的整体刚度（包括抗弯刚度和抗扭刚度）是通过合理地设计基础件的截面形状和尺寸，采用合理的筋板形状及布置等来保证的。

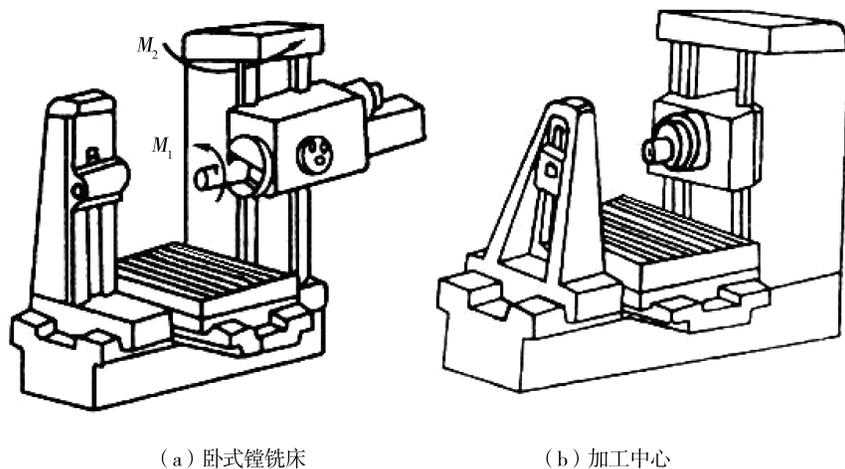
如图 2-1 所示为框式加工中心普遍采用的框式立柱结构。从正面看，立柱截面呈封面框形，轮廓尺寸大，从而保证以高扭转刚度承受切削扭矩产生的扭转载荷；从俯视截面看，两个立柱截面形状为矩形，矩形尺寸大的方向正是因切削力作用大的弯曲载荷的方向。因而这种结构具有很高的刚度。



1—立柱；2—主轴箱。

图 2-1 框式立柱主轴箱的嵌入式结构

2) 采用合理的结构布局，改善机床的受力状态。在切削力、自重等外力相同的情况下，如果能改善机床的受力状态，减少变形，则能达到提高刚度的目的。如图 2-2 (a) 所示，传统的卧式镗铣床由于主轴箱单面悬挂在立柱侧面，主轴箱自重和切削力将使立柱产生弯曲和扭转变形；加工中心采用如图 2-2 (b) 所示的布局，主轴箱置于立柱对称平面内，改善了立柱的受力状况，减少了立柱的弯曲、扭转变形，提高了刚度。



(a) 卧式镗铣床

(b) 加工中心

图 2-2 卧式镗铣床与卧式加工中心的结构布局比较

3) 采用补偿变形措施。在外力的作用下，机床的变形是不可避免的，采取相应措施，补偿有关零、部件的静力变形，相当于提高了机床的刚度。如图 2-3 所示的大型龙门铣床，主轴部件移到横梁中部时，自重使横梁向下的弯曲变形最大，为此可以横梁导轨做成“拱形”，使变形得到补偿；或者可以通过在横梁内部安装辅助横梁，利用预校正螺钉对横梁主导轨进

行校正；还可以用加平衡重块的方法，减少横梁因主轴和自重而产生的变形。

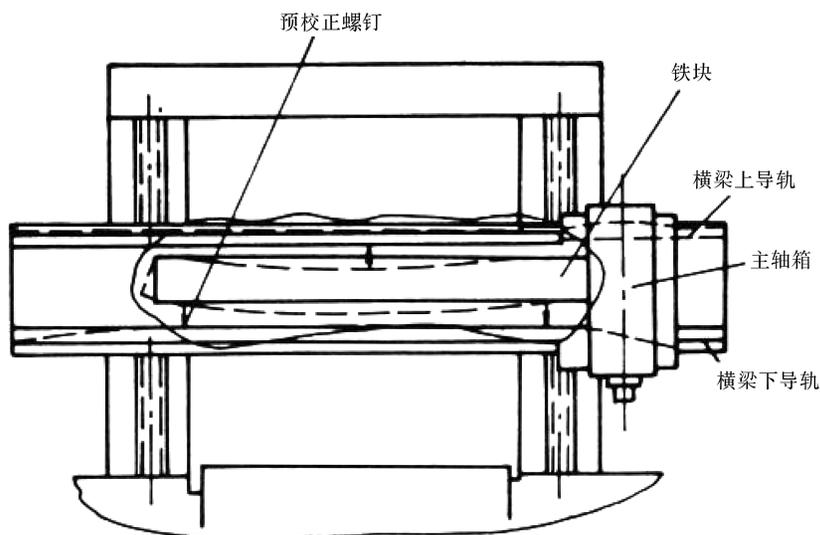


图 2-3 大型龙门铣床横梁弯曲变形补偿图

4) 提高机床各部件的接触刚度。影响接触刚度的根本因素是接触面积的大小，任何增大实际接触面积的方法都能有效地提高接触刚度。如机床导轨通过刮研，能增加导轨副接合面的实际接触面积，并使接触点分布均匀，提高接触刚度。在接合面之间施加足够大的预加载荷也能达到提高接触刚度的目的。

5) 选用合理材料。长期以来，机床基础件主要采用铸铁件。近年来，机床床身、立柱等支承件采用钢板或型钢焊接而成，具有减轻重量、提高刚度的显著特点。将型砂或混凝土等阻尼材料填充在支承件的夹壁中，可以有效地提高阻尼特性，增加支承件的动刚度。人造大理石由于具有很高的热稳定性，良好的吸振性，并能根据需要制作最合理的机床结构，近年来应用广泛。

### 3. 抗振性高

机床工作时可能强迫振动和自激振动，机床的抗振性是指抵抗这两种振动的能力。机床的振动不仅直接影响工件的加工精度和表面质量，还会降低刀具寿命，严重时甚至使加工无法继续进行。数控机床常在高速重载情况下切削，容易产生强迫振动和自激振动，切削过程的自动化使得振动难以由人工进行控制和消除，因此对数控机床的抗振性提出更高的要求。

数控机床上提高抗振性的主要方法有：提高系统的静刚度可以提高自激振动的稳定性极限；增加阻尼既可以提高自激振动的稳定性，也有利于振动的衰减；通过调整机床质量改变系统的自振频率，使它远离工作范围内所存在的强迫振动源的频率；数控机床中的旋转零部件尽可能进行良好的动平衡，以减少强迫振动源；用弹性材料将振源隔离，以减少振源对数控机床的影响。

### 4. 热稳定性好

数控机床在内外热源的影响下，各部件都会发生不同程度的热变形，使工件与刀具之间的相对运动关系遭到破坏，机床加工精度下降，因此机床热变形是影响加工精度的重要因素。

引起机床热变形的原因主要是热源及机床各部分的温差。热源主要是机床的内部热源，如电动机发热、摩擦热以及切削热等。数控机床的热稳定性好，主要是在设计时采取了以下措施。

1) 减少机床内部热源和发热量。如采用低摩擦系数的导轨和轴承，液压系统中采用变量泵，数控车床采用斜床身、平床身和斜滑板结构，配置倾斜的防护罩和自动排屑装置等。

2) 控制温升。数控机床普遍对各发热部位采取散热、风冷、液冷等控制温升的办法改善散热条件，控制温升。如主轴箱采用强制外循环润滑冷却；采用恒温冷却装置，减少主轴轴承在运转中产生的热量；在电动机上安装散热装置和热管消热装置等。

3) 机床结构和布局设计合理。设计热传导对称的结构，使温升一致，以减少热变形；采用热变形对称结构，以减少热变形对加工精度的影响。例如，数控机床立柱一般采取双壁框式结构，在提高刚度的同时使结构对称，防止因热变形而产生倾斜偏移。

#### 5. 运动件间的摩擦特性好、传动件间的传动间隙小

数控机床的运动精度和定位精度不仅受到机床零部件的加工精度和装配精度、刚度及热变形的影响，而且与运动件的摩擦特性有关。同时，其进给系统要求运动件既能以高速运动又能以极低的速度运动，使工作台能对数控装置的指令做出准确的响应。为此必须设法提高进给低速运动的平稳性。采取的主要措施有降低运动件的质量，减少运动件的静、动摩擦力之差，减少传动间隙，缩短传动链。

运动件的摩擦阻力主要来自滑动导轨副，普通机床的滑动导轨副不仅静、动摩擦系数大，而且其差值也大。因此，数控机床普遍采用滚动导轨、静压导轨和塑料导轨，以改善运动件间的耐磨性和摩擦特性。数控机床的进给系统中采用滚珠丝杠传动替代滑动丝杠，也可收到同样的效果。

数控机床尤其是开环系统的数控机床的加工精度很大程度取决于进给传动链的精度。除了减少传动齿轮和滚珠丝杠的加工误差外，还广泛采用无间隙传动副，目前用同步齿形带替代齿轮、用无键连接替代键连接已成为一种趋势。

近年来，在高速机床中建立的“零传动”理论，即取消从电动机到工作部件之间的一切传动环节，使电动机和机床的工作部件合二为一，从而使传动链的长度等于零。电主轴是实现高速机床主运动系统“零传动”的典型结构，而直线电动机高速进给单元则是高速机床进给运动系统实现“零传动”的典型代表。“零传动”是现代高速机床的基本特征，它不但大大简化了机床的传动与结构，而且提高了机床的动态灵敏度、加工精度和工作可靠性。

#### 6. 自动化程度高、操作方便

数控机床是一种自动化程度很高的加工设备，许多数控机床采用了多主轴、多刀架，以及带刀库的自动换刀装置等，以减少换刀时间。有的具有工作台交换装置，可以进一步缩短辅助时间。在机床的操作性方面充分注意了机床各部分运动的互锁能力，以防止事故的发生。同时，其最大限度地改善了操作者的观察、操作和维护条件，设有紧急停车装置，避免发生意外事故。此外，数控机床上还留有最便于装卸的工件装夹位置。对于切屑量较大的数控机床，其床身结构一般设计成有利于排屑的结构，或者设有自动工件分离和排屑装置。