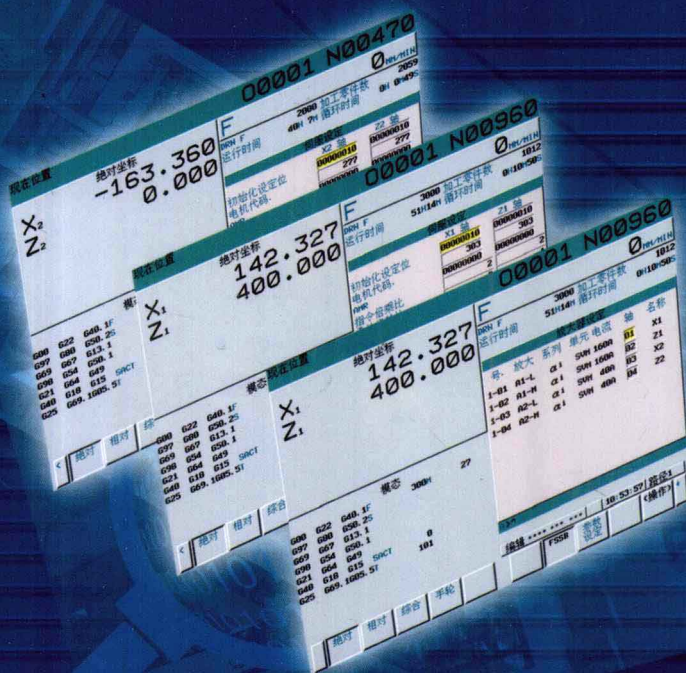


# 数控原理 与编程

罗 敏 等编著



# 数 控 原 理 与 编 程

罗 敏 等编著



机 械 工 业 出 版 社

# 前 言

数控技术是机械加工技术、自动控制技术、检测技术、计算技术和微电子技术而形成的一门综合性高端技术，也是当今世界上机械制造业的先进技术。

本书以数控编程应用技术为出发点，既注重知识结构的系统性，又注重内容的实践性。书中大量实例来自生产实际，融合了作者长期以来对 CNC 系统工程应用的研究成果。

全书共 6 章。第 1 章介绍了数控技术基础，涉及数控机床的基本组成、工作原理和运行方式；第 2 章介绍了数控系统的硬件结构、典型的计算机数控装置和伺服驱动系统；第 3 章介绍了典型数控机床的机械机构及装置；第 4 章以 FANUC 数控系统为主线介绍了基本的数控编程应用技术；第 5 章介绍了 FANUC 宏程序编程应用技术；第 6 章介绍了 FANUC 数控系统在曲轴龙门机械手、曲轴双刀架车削、曲轴主轴颈车拉、曲轴连杆颈内铣、曲轴主轴颈磨削、曲轴连杆颈磨削等加工工艺编程中的应用实例。书中提供了很多例题和应用实例，并有详细的程序清单及注释，使读者能更好地理解数控编程方法。

本书既可作为大中专院校相关专业的教材或技术参考书，也可作为从事数控编程技术应用的从业人员的培训指导用书。

本书第 1、2、4、5 章由湖北汽车工业学院罗敏编写；第 3 章由湖北汽车工业学院刘凌云编写；第 6 章由湖北汽车工业学院罗敏，东风轻型发动机有限公司徐春友、周亚萍，东风（十堰）精密设备有限公司吴清生共同编写。全书由罗敏统稿。东风汽车有限公司何晓波研究员级高工、湖北汽车工业学院钱新恩教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。编写过程中还得到了湖北汽车工业学院龚青山等老师的大力支持，在此表示衷心的感谢。此外，还要感谢在数控系统工程应用项目中一起工作的诸多同事，本书的面世与他们的工作密不可分。

由于作者水平有限，书中难免有不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

作 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 数控技术基础 ..... 1

### 1.1 数控技术概述 ..... 1

#### 1.1.1 数控技术的基本概念 ..... 1

#### 1.1.2 数控系统及其组成 ..... 3

### 1.2 数控机床的组成及工作过程 ..... 4

#### 1.2.1 数控机床的基本组成 ..... 4

#### 1.2.2 数控机床的工作过程 ..... 5

#### 1.2.3 数控机床的分类 ..... 7

#### 1.2.4 数控机床的特点 ..... 9

#### 1.2.5 数控机床的基本运行方式 ..... 11

### 1.3 数控插补原理 ..... 13

#### 1.3.1 数控插补的分类 ..... 13

#### 1.3.2 逐点比较法 ..... 14

#### 1.3.3 数字积分法 ..... 21

#### 1.3.4 数据采样插补法 ..... 24

### 习题 ..... 30

## 第 2 章 数控系统硬软件结构 ..... 33

### 2.1 CNC 装置的硬件结构 ..... 33

#### 2.1.1 单微处理器结构和多微处理器结构 ..... 33

#### 2.1.2 大板式结构和功能模块式结构 ..... 36

#### 2.1.3 专用型结构和个人计算机结构 ..... 38

#### 2.1.4 封闭式结构和开放式结构 ..... 39

### 2.2 CNC 装置的软件结构 ..... 40

#### 2.2.1 数控系统的软件构成 ..... 40

#### 2.2.2 CNC 装置系统软件的设计思想 ..... 42

#### 2.2.3 CNC 系统控制软件结构模式 ..... 44

### 2.3 典型 CNC 装置 ..... 46

#### 2.3.1 FANUC 数控系统 ..... 47

#### 2.3.2 西门子数控系统 ..... 55

#### 2.3.3 三菱数控系统 ..... 58

#### 2.3.4 NUM 数控系统 ..... 61

#### 2.3.5 FAGOR 数控系统 ..... 63

### 2.4 典型伺服驱动系统 ..... 63

#### 2.4.1 伺服驱动的分类 ..... 63

#### 2.4.2 交流伺服驱动系统 ..... 65

#### 2.4.3 直线伺服电动机 ..... 73

#### 2.4.4 交流电主轴 ..... 76

### 习题 ..... 79

## 第 3 章 数控机床的机械结构及装置 ..... 81

### 3.1 数控机床的主传动系统 ..... 81

#### 3.1.1 数控机床对主传动系统的要求 ..... 81

#### 3.1.2 数控机床主传动系统的变速方式 ..... 82

#### 3.1.3 主轴箱与主轴组件 ..... 85

### 3.2 数控机床的进给传动系统 ..... 91

#### 3.2.1 数控机床对进给传动系统的要求 ..... 91

#### 3.2.2 进给传动机构 ..... 92

#### 3.2.3 齿轮传动间隙的消除措施 ..... 102

### 3.3 数控车床的自动换刀装置 ..... 104

#### 3.3.1 回转刀架的类型 ..... 104

#### 3.3.2 电动回转刀架 ..... 105

#### 3.3.3 伺服刀架 ..... 108

### 3.4 加工中心自动换刀装置 ..... 109

#### 3.4.1 刀库的类型 ..... 109

#### 3.4.2 机械手的类型 ..... 111

#### 3.4.3 无机手自动换刀 ..... 113

#### 3.4.4 机械手自动换刀 ..... 113

#### 3.4.5 凸轮机械手换刀装置 ..... 115

### 3.5 数控机床分度装置 ..... 117

#### 3.5.1 数控转台 ..... 117

#### 3.5.2 分度工作台 ..... 118

### 习题 ..... 121

## 第 4 章 FANUC 数控基础编程技术 ... 122

### 4.1 零件加工程序编写的方法 ..... 122

#### 4.1.1 手工编程 ..... 122

#### 4.1.2 自动编程 ..... 122

### 4.2 程序编写的工艺处理 ..... 123

#### 4.2.1 数控机床的选择 ..... 123

#### 4.2.2 数控刀具的选择 ..... 125

#### 4.2.3 工件的定位与夹紧 ..... 130

#### 4.2.4 进给路线的确定 ..... 131

|                                |            |                          |     |
|--------------------------------|------------|--------------------------|-----|
| 4.2.5 切削用量的确定 .....            | 134        | 5.3.4 用 G 代码调用宏程序 .....  | 256 |
| 4.3 CNC 编程技术基础 .....           | 136        | 5.3.5 用 M 代码调用宏程序 .....  | 257 |
| 4.3.1 基本编程术语 .....             | 136        | 5.3.6 用 M 代码调用子程序 .....  | 258 |
| 4.3.2 程序结构 .....               | 137        | 5.3.7 用 T 代码调用子程序 .....  | 258 |
| 4.3.3 数控机床编程坐标及运动方向 ..         | 144        | 5.3.8 中断型用户宏程序 .....     | 258 |
| 4.3.4 坐标尺寸指令 .....             | 145        | 5.4 宏程序函数 .....          | 260 |
| 4.3.5 参考点 .....                | 148        | 5.4.1 算术函数 .....         | 261 |
| 4.3.6 平面选择 .....               | 151        | 5.4.2 三角函数 .....         | 263 |
| 4.3.7 坐标系 .....                | 152        | 5.4.3 取整函数 .....         | 263 |
| 4.3.8 镜像 .....                 | 156        | 5.4.4 辅助函数 .....         | 264 |
| 4.3.9 坐标旋转 .....               | 157        | 5.4.5 逻辑函数 .....         | 265 |
| 4.3.10 比例缩放 .....              | 157        | 5.4.6 变换函数 .....         | 266 |
| 4.3.11 极坐标 .....               | 158        | 5.4.7 实际应用 .....         | 266 |
| 4.4 基本编程指令 .....               | 159        | 5.5 宏程序控制指令 .....        | 267 |
| 4.4.1 插补指令 .....               | 159        | 5.5.1 无条件转移指令 .....      | 267 |
| 4.4.2 进给指令 .....               | 164        | 5.5.2 有条件转移指令 .....      | 268 |
| 4.4.3 主轴功能指令 .....             | 166        | 5.5.3 循环指令 .....         | 268 |
| 4.4.4 刀具功能指令 .....             | 168        | 5.5.4 实际应用 .....         | 268 |
| 4.4.5 刀具补偿指令 .....             | 177        | 5.6 系统变量 .....           | 270 |
| 4.4.6 辅助功能指令 .....             | 179        | 5.6.1 接口信号 .....         | 270 |
| 4.4.7 工作台功能指令 .....            | 180        | 5.6.2 刀具偏置变量 .....       | 272 |
| 4.5 固定循环 .....                 | 183        | 5.6.3 工件坐标系零点偏移变量 .....  | 272 |
| 4.5.1 车削固定循环 .....             | 183        | 5.6.4 报警变量 .....         | 273 |
| 4.5.2 孔加工固定循环 .....            | 190        | 5.6.5 定时器变量 .....        | 273 |
| 4.6 编程实例 .....                 | 200        | 5.6.6 自动运行控制变量 .....     | 274 |
| 4.6.1 CNC 编程中的数学知识 .....       | 200        | 5.6.7 轴位置变量 .....        | 275 |
| 4.6.2 车削编程实例 .....             | 202        | 5.6.8 模态数据变量 .....       | 276 |
| 4.6.3 铣削编程实例 .....             | 208        | 5.6.9 其他系统变量 .....       | 277 |
| 4.7 CNC 程序的创建与编辑 .....         | 216        | 5.7 外部输出指令 .....         | 278 |
| 4.7.1 CNC 系统的 MDI 键盘 .....     | 216        | 5.7.1 打开指令 .....         | 278 |
| 4.7.2 CNC 程序的创建与编辑 .....       | 218        | 5.7.2 输出数据指令 .....       | 279 |
| 4.7.3 常见 CNC 编程与操作错误 .....     | 223        | 5.7.3 关闭指令 .....         | 280 |
| 习题 .....                       | 237        | 5.7.4 编程举例 .....         | 280 |
| <b>第 5 章 FANUC 数控高级编程技术</b> .. | <b>244</b> | 5.8 用户宏程序 A .....        | 280 |
| 5.1 概述 .....                   | 244        | 5.8.1 用户宏程序 A 运算和转移      |     |
| 5.2 变量 .....                   | 247        | 指令 .....                 | 281 |
| 5.2.1 变量的类型 .....              | 247        | 5.8.2 用户宏程序 A 调用指令 ..... | 282 |
| 5.2.2 变量的声明 .....              | 248        | 5.9 宏程序举例 .....          | 282 |
| 5.2.3 变量的引用 .....              | 249        | 5.9.1 相似定位销的加工 .....     | 282 |
| 5.3 宏程序结构 .....                | 250        | 5.9.2 圆周孔的加工 .....       | 285 |
| 5.3.1 宏程序的定义 .....             | 250        | 5.9.3 矩形型腔加工宏程序 .....    | 286 |
| 5.3.2 宏程序的非模态调用 (G65) ..       | 253        | 5.9.4 圆柱型腔铣削循环 .....     | 288 |
| 5.3.3 模态调用 (G66) .....         | 255        | 习题 .....                 | 289 |

## 第 6 章 ZD30 发动机曲轴 CNC 加工

|                               |     |                            |     |
|-------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 程序设计 .....                    | 295 | 6.4.3 曲轴车拉刀具配置 .....       | 347 |
| 6.1 ZD30 发动机曲轴加工工艺 .....      | 295 | 6.4.4 曲轴车拉加工程序 .....       | 349 |
| 6.1.1 ZD30 曲轴主要技术要求 .....     | 295 | 6.5 曲轴内铣 CNC 程序设计 .....    | 350 |
| 6.1.2 ZD30 曲轴主要工艺流程 .....     | 295 | 6.5.1 曲轴内铣工艺 .....         | 350 |
| 6.2 曲轴生产线龙门机械手 CNC 程序         |     | 6.5.2 CKM200 曲轴内铣机床 .....  | 352 |
| 设计 .....                      | 298 | 6.5.3 连杆颈内铣宏程序 .....       | 355 |
| 6.2.1 龙门机械手 .....             | 298 | 6.5.4 连杆颈内铣加工程序 .....      | 360 |
| 6.2.2 接口信号与宏变量 .....          | 298 | 6.5.5 刀盘紧急返回中心 .....       | 362 |
| 6.2.3 机械手 CNC 程序 .....        | 302 | 6.6 曲轴主轴颈磨床 CNC 程序设计 ..... | 363 |
| 6.3 曲轴车床 CNC 程序设计 .....       | 308 | 6.6.1 4SPL 曲轴主轴颈磨床 .....   | 363 |
| 6.3.1 NST30/100SS 双刀架曲轴车床 ... | 308 | 6.6.2 主轴颈磨床测量用接口信号 .....   | 364 |
| 6.3.2 刀具配置 .....              | 311 | 6.6.3 主轴颈磨床磨削 CNC 程序 ..... | 365 |
| 6.3.3 刀具寿命管理程序 .....          | 311 | 6.6.4 主轴颈磨床修整 CNC 程序 ..... | 380 |
| 6.3.4 宏变量定义与设定 .....          | 313 | 6.7 曲轴连杆颈磨床 CNC 程序设计 ..... | 389 |
| 6.3.5 曲轴车床加工程序 .....          | 315 | 6.7.1 5RN 曲轴连杆颈磨床 .....    | 389 |
| 6.4 曲轴车拉 CNC 程序设计 .....       | 344 | 6.7.2 连杆颈磨床测量用接口信号 .....   | 390 |
| 6.4.1 曲轴车拉工艺 .....            | 344 | 6.7.3 连杆颈磨床磨削 CNC 程序 ..... | 391 |
| 6.4.2 TBN200 曲轴车拉机床 .....     | 346 | 6.7.4 连杆颈磨床修整 CNC 程序 ..... | 406 |
|                               |     | 参考文献 .....                 | 411 |

# 第 1 章 数控技术基础

## 1.1 数控技术概述

### 1.1.1 数控技术的基本概念

#### 1. 数控技术

数控技术，简称“数控”（Numerical Control, NC），是指用数字、文字和符号组成的数值指令来实现一台或多台机械设备动作控制的技术。通常，它所控制的是位置、角度、速度等机械量和与机械能量流向有关的开关量。1952 年，第一台数控机床问世，只需改变数控加工程序，这台机床便可自动生产出不同形状和尺寸要求的零件。这是世界机械工业史上划时代的事件，由此拉开了数控技术发展的序幕。

目前，数控技术也叫计算机数控技术，它是采用计算机实现数字程序控制的技术。这种技术用计算机按事先存储的控制程序来执行对设备的控制功能。由于采用计算机替代原先用硬件逻辑电路组成的数控装置，使输入数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种控制机能的实现，均可通过计算机软件来完成。

#### 2. 数控系统

数控系统是数字控制系统的简称，早期是由硬件电路构成的，称为硬件数控（Hard NC），1970 年以后，硬件电路元件逐步由专用的计算机代替，称为计算机数控系统。

计算机数控（Computer numerical control, CNC）系统是用计算机控制加工的功能，实现数值控制的系统。CNC 系统是一种配有接口电路和伺服驱动装置的专用计算机系统，它根据计算机存储器中存储的控制程序，执行部分或全部数值控制功能。

CNC 系统由数控程序、输入装置、输出装置、计算机数控装置（CNC 装置）、可编程序控制器（PLC）、主轴驱动装置和进给（伺服）驱动装置（包括检测装置）等组成。

CNC 系统的核心是 CNC 装置。由于使用了计算机，并用 PLC 代替了传统的机床电器逻辑控制装置，使系统更小巧，其灵活性、通用性、可靠性更好，易于实现复杂的数控功能，使用、维护也方便，并具有与上位机连接及进行远程通信的功能。

NC（CNC）、SV 与 PLC（PMC）是数控设备中最为常用的英文缩写词。它们在实际应用中的不同场合具有不同的含义如下。

① NC（CNC）。NC（Numerical Control）是数控的英文缩写词。由于现代数控都采用了计算机控制，因此，可以认为 NC 和 CNC 的含义完全等同。NC（CNC）在广义上代表一种控制技术即数控技术；在狭义上代表一种控制系统的实体即数控系统；此外，还可以代表一种具体的控制装置即数控装置。

② SV（Servo Drive）是伺服驱动的常用英文缩写。按日本 JIS 标准规定的术语，它是“以物体的位置、方向、状态等作为控制量，追踪目标值的任意变化的控制机构”。也就是说，它是一种能够自动跟随目标位置等物理量的控制装置。

在数控机床上，伺服驱动的控制对象通常是机床坐标轴的位移（包括速度、方向和位置），其执行机构是伺服电动机，对输入指令信号进行控制和功率放大的是伺服放大器（也称：驱动器、放大器、伺服单元等），实际位移量的检测通过检测装置进行。伺服驱动不仅可以和数控装置配套使用，而且可以单独作为一个位置（速度）随动系统使用，因而常称为伺服系统。通常情况下，伺服、伺服驱动、伺服系统具有相同的含义，它们都可以用 SV 表示。此外，和数控系统一样，伺服驱动的核心是伺服放大器，在有些场合，SV 也被用来表示伺服放大器。

在数控机床上，伺服驱动的作用主要有两个方面：一是按照数控装置给定的速度运行；二是按照数控装置给定的位置定位。因此，伺服驱动的精度和动态响应性能是影响数控机床的加工精度、表面质量和生产率的重要因素之一。

③ PLC（Programmable Logic Controller）即可编程序控制器，PMC 即可编程序机床控制器（Programmable Machine Controller）。在数控机床上，PLC 与 PMC 具有完全相同的含义。由于 PLC 具有响应快、性能可靠、使用方便、编程和调试容易等特点，并可直接驱动部分机床电器，因此，被广泛用来作为数控设备的辅助控制装置。目前，大多数数控系统都带有内置 PLC，用于处理数控机床的辅助指令，从而大大简化了机床的辅助控制装置。

### 3. 数控机床

数控机床是数字控制机床的简称，是一种装有数控系统的自动化机床。该控制系统能够逻辑地处理具有控制编码或其他符号指令规定的程序，并将其译码，从而使机床动作并加工零件。

数控机床种类繁多，有钻铣镗类、车削类、磨削类、电加工类、锻压类、激光加工类和其他特殊用途的专用数控机床，凡是采用了数控技术进行控制的机床统称为数控机床。

带有自动刀具交换装置（Automatic Tool Changer, ATC）的数控机床称为加工中心（Machining Center, MC）。它通过刀具的自动交换，可以一次装夹完成多工序的加工，实现了工序的集中和工艺的复合，从而缩短了辅助加工时间，提高了机床的效率，减少了零件安装和定位次数，提高了加工精度。加工中心是目前数控机床中产量最大、应用最广的数控机床。

在加工中心的基础上，通过增加自动托盘交换装置（Auto Pallet Changer, APC）以及其他相关装置，组成的加工单元称为柔性加工单元（Flexible Manufacturing Cell, FMC）。FMC 不仅实现了工序的集中和工艺的复合，而且通过工作台（托盘）的自动交换和较完善的自动检测、监控功能，可以进行一定时间的无人化加工，从而进一步提高了设备的加工效率。FMC 既是柔性制造系统的基础，又可以作为独立的自动化加工设备使用，因此，其发展速度较快。

在 FMC 和加工中心的基础上，通过增加物流系统、工业机器人以及相关设备，并由中央控制系统进行集中、统一控制和管理，这样的制造系统称为柔性制造系统 FMS（Flexible Manufacturing System）。FMS 不仅可以进行长时间的无人化控制，而且可以实现多品种零件的全部加工或部件装配，实现了车间制造过程的自动化，它是一种高度自动化的先进制造系统。

随着科学技术的发展，为了适应市场需求多变的形势，对现代制造业来说，不仅需要发展车间制造过程的自动化，而且要实现从市场预测、生产决策、产品设计、产品制造直到产



品销售的全面自动化。将这些要求综合所构成的完整的生产制造系统，称为计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System, CIMS）。CIMS 将一个工厂的生产、经营活动进行了有机的集成，实现了更高效益、更高柔性的智能化生产，是当今自动化制造技术发展的最高阶段。

数控机床与程控机床是两种不同含义的机床，它们的控制要求和控制对象有本质的不同。一般来说，机床自动控制主要包括以下 3 个方面内容。

① 机床动作顺序的程序控制。典型的有组合机床、自动生产线等的流程与工步的控制。其主要控制要求是根据机床的动作顺序表（如：电磁阀等执行元件的动作表），按规定的顺序通过执行元件的依次动作，完成机床的动作流程。

② 辅助机能的控制。典型的有主电动机与辅助电动机的起动、停止、变速、冷却、润滑、排屑、自动换刀等。这些控制有的是为了实现机械加工所必需的控制，有的是机床特殊动作和功能方面的需要。它可以通过继电器、接触器、变频器、调速器等进行控制。

对于只需要上述①、②两方面控制的加工设备，称为程序控制机床，简称程控机床。如：组合机床、自动生产线等，PLC 是实现以上控制的最佳选择。

③ 刀具（或坐标轴）移动轨迹控制。对刀具运动轨迹进行控制，是加工轮廓的必要条件，它包括移动速度控制、移动位置控制、移动轨迹控制等几方面的基本要求，必须采用数控技术才能实现。

在程控机床上，对于运动部件的位移量控制，一般需要通过挡铁、行程开关等检测元件的发信和对执行元件的通断控制实现。即便是采用了伺服驱动装置的程控机床，一般也只能对各运动部件的移动速度、移动位置进行单独的控制和调整，因此，程控机床能实现点位控制，但不能实现各运动部件间的“联动”，不能任意改变坐标轴（或刀具）在平面或空间的移动轨迹，故不能称为数控机床。

在数控机床上，通过数控系统的“插补”运算，可以实现坐标轴的“联动”。它不仅可以控制移动部件的起点与终点坐标，还能同时控制各运动部件每一时刻的速度和位移及各运动部件间的相互关系，从而可以将工件加工成要求的轮廓形状。这是数控机床与其他机床的本质区别，也是机床采用数控技术的根本原因。

### 1.1.2 数控系统及其组成

数控系统是所有数控设备的核心。数控系统的主要控制对象是坐标轴的位移（包括移动速度、方向、位置等），其控制信息主要来源于数控加工或运动控制程序。因此，作为数控系统的最基本组成应包括：程序的输入/输出装置、数控装置、伺服驱动 3 个部分。

① 输入/输出装置。输入/输出装置的作用是进行数控加工或运动的控制程序、加工与控制数据、机床参数以及坐标轴位置、检测开关的状态等数据的输入、输出。键盘和显示器是任何数控设备都必备的最基本输入/输出装置。作为外围设备，计算机是目前常用的输入/输出装置之一。

② 数控装置。数控装置是数控系统的核心。它由输入/输出接口线路、控制器、运算器和存储器等部分组成。数控装置的作用是将输入装置输入的数据，通过内部的逻辑电路或控制软件进行编译、运算和处理，并输出各种信息和指令，以控制机床的各个部分进行规定的动作。

在这些控制信息和指令中，最基本的是坐标轴的进给速度、进给方向和进给位移量指令，它经插补运算后生成，提供给伺服驱动，经驱动器放大，最终控制坐标轴的位移。它直接决定了刀具或坐标轴的移动轨迹。

此外，根据系统和设备的不同，如：在数控机床上，还可能有主轴的转速、转向和起、停指令；刀具的选择和交换指令；冷却、润滑装置的起、停指令；工件的松开、夹紧指令；工作台的分度等辅助指令。在基本的数控系统中，它们是通过接口，以信号的形式提供外部辅助控制装置，由辅助控制装置对以上信号进行必要的编译和逻辑运算，经放大后驱动相应的执行元件，带动机床机械部件、液压、气动等辅助装置完成指令规定的动作。

③ 伺服驱动。伺服驱动通常由伺服放大器（亦称驱动器、伺服单元）和执行机构等部分组成。在数控机床上，目前，一般都采用交流伺服电动机作为执行机构；在先进的高速加工机床上，已经开始使用直线电动机。另外，在 20 世纪 80 年代以前生产的数控机床上，也有采用直流伺服电动机的情况。对于简易数控机床，步进电动机也可以作为执行元件。伺服放大器的形式决定于执行元件，它必须与驱动电动机配套使用。

以上是数控系统最基本的组成部分。随着数控技术的发展和机床性能水平的提高，对系统的功能要求也日益增强。为了满足不同机床的控制要求，保证数控系统的完整性和统一性，并方便用户使用，常用的数控系统，一般都带有内部可编程序控制器作为机床的辅助控制装置。此外，在金属切削机床上，主轴驱动装置也可以成为数控系统的一个部分；在闭环数控机床上，测量检测装置也是数控系统必不可少的。对于先进的数控系统，有时甚至采用计算机作为系统的人机界面和数据的管理、输入/输出设备，从而使数控系统的功能更强、性能更完善。

总之，数控系统的组成决定于控制系统的性能和设备的具体控制要求，其配置和组成具有很大的区别，除加工程序的输入/输出装置、数控装置、伺服驱动这 3 个最基本的组成部分外，还可能有更多的控制装置。

## 1.2 数控机床的组成及工作过程

### 1.2.1 数控机床的基本组成

数控机床是最典型的数控设备。为了了解数控机床的基本组成，首先需要分析数控机床加工零件的工作过程。在数控机床上，为了进行零件的加工，可以通过如下步骤进行。

① 编写加工程序。根据被加工零件的图样与工艺方案，用规定的代码和程序格式，将刀具的移动轨迹、加工工艺过程、工艺参数、切削用量等编写成数控系统能够识别的指令形式。

② 将所编写的加工程序输入数控装置。

③ 数控装置对输入的程序（代码）进行译码、运算处理，并向各坐标轴的伺服驱动装置和辅助机能控制装置发出相应的控制信号，以控制机床各部件的运动。

④ 在运动过程中，数控系统需要随时检测机床的坐标轴位置、行程开关的状态等，并与程序的要求相比较，以决定下一步动作，直到加工出合格的零件。

⑤ 操作者可以随时对机床的加工情况、工作状态进行观察、检查，必要时还需要对机

床动作和加工程序进行调整，以保证机床安全、可靠地运行。

由此可知，作为数控机床的基本组成，它应包括：输入/输出装置、数控装置、伺服驱动和反馈装置、辅助控制装置以及机床本体等部分，如图 1-1 所示。

图 1-1 中的输入/输出装置、数控装置、伺服驱动和反馈装置构成了机床数控系统。反馈装置的作用是检测数控机床坐标轴的实际位置和移动速度，并将检测信号反馈到机床的数控装置或伺服驱动中，数控装置或伺服驱动对反馈的实际位置和速度与给定值进行比较，并向机床输出新的位移、

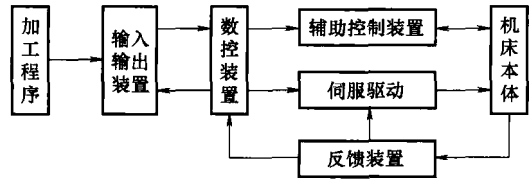


图 1-1 数控机床的基本组成

速度指令。检测装置的安装位置，决定于数控系统的结构形式。由于先进的伺服都采用了数字化伺服驱动技术（称为数字伺服），伺服驱动和数控装置间一般都采用总线进行连接，反馈信号在大多数场合都是与伺服驱动进行连接，并通过总线传送到数控装置。只有在少数场合或采用模拟量控制的伺服驱动（称为模拟伺服）时，反馈装置才需要直接和数控装置进行连接。

数控装置发出的一个进给脉冲所对应的机床坐标轴的位移量，称为数控机床的最小移动单位，亦称脉冲当量。根据机床精度的不同，常用的脉冲当量有 0.01mm、0.005mm、0.001mm 等，在高精度数控机床上，可以达到 0.0005mm、0.0001mm，甚至更小。反馈装置的位置检测精度也必须与之相适应。

辅助控制装置的主要作用是根据数控装置输出的主轴转速、转向和起停指令；刀具的选择和交换指令；冷却、润滑装置的起停指令；工件和机床部件的松开、夹紧与工作台转位等辅助指令所提供的信号，以及机床上检测开关的状态等信号，经过必要的编译和逻辑运算，经放大后驱动相应的执行元件，带动机床机械部件、液压、气动等辅助装置完成指令规定的动作。辅助控制装置通常由 PLC 和强电控制回路构成。

机床本体与传统的机床基本相同，它也是由主传动系统、进给传动系统、床身、工作台以及辅助运动装置、液压气动系统、润滑系统、冷却装置等部分组成。但为了满足数控的要求，充分发挥机床的性能，它在总体布局、外观造型、传动系统结构、刀具系统以及操作性方面都已发生了很大的变化。

### 1.2.2 数控机床的工作过程

通过各种输入方式，接收机床加工零件的各种数据信息，经过 CNC 装置译码，再进行计算机的处理、运算，然后将各个坐标轴的分量送到各控制轴的驱动电路，经过转换、放大去驱动伺服电动机，实现各坐标轴的运动，并进行实时位置反馈控制，使各个坐标轴能精确地运动到所要求的位置，这就是数控机床的工作过程。

#### 1. 插补运算

CNC 对机床进给轴的控制，是执行事先编写好的加工程序指令。程序指令是按零件的轮廓编写的加工刀具运动轨迹。

程序是根据零件轮廓分段编写的。一个程序段加工一段形状的轮廓。轮廓形状不同，使用不同的程序指令（零件轮廓形状元素）。例如，G01 代表直线运动指令；G02 代表顺时针

圆弧运动指令；G03 代表逆时针运动圆弧指令；G32 代表螺纹加工等。

在一段加工指令中，一般只是编写此段的进给终点。如：下面一个程序段要加工 XY 平面上一段圆弧，程序中只指定了终点的坐标值（100、-200）。

```
G90 G17 G02 X100 Y -200 R50 F500;
```

此段的起点已在前一段编写，就是前段的终点。因此，加工此段时，CNC 控制器只知道该段的起点和终点坐标值。段中的刀具运行轨迹上其他各个点的坐标值必须由处理器计算出来。

处理器依据该段轮廓指令（G02）和起点、终点的坐标值计算出希望加工的工件轮廓，算出在执行该段指令过程中刀具沿 X 轴和 Y 轴移动的各点位置。X 轴和 Y 轴的合成运动即形成了刀具加工的工件轮廓轨迹。

除此之外，在程序中必须指定运动速度（加工速度），如：F500（mm/min）。在位置计算时，要根据轮廓位置算出对应点的刀具运动方向和速度。此例中是分别算出沿 X 轴各点的速度和沿 Y 轴各点的速度。

实现上述运算的机构称为插补器。插补器每运算一次称为一个插补周期，一般为 8ms；计算复杂型面的插补器使用高速 CPU，插补周期可缩短，目前可达 2ms。一个程序段可分多个插补周期，取决于轮廓形状和轮廓尺寸。

执行上例程序段的指令是进行顺时针圆弧插补，是执行以圆弧计算公式为基础的插补子程序。计算时的判断条件是：不断地执行刀具沿 X 轴向和 Y 轴向的进给，每进给一个脉冲当量即判断是否到达终点，是否超差，计算方向是顺时针，进给当量是 1μm/脉冲，速度是 500mm/min。

2. 插补脉冲的分配输出

经过插补运算，算出了加工所要求的工件形状在同一时间周期（插补周期）内各个坐标轴移动的距离（移动量），它是以脉冲数表示的，如：在本插补周期内 X 轴进给 25 个脉冲；Y 轴进给 50 个脉冲，分别送给对应的坐标轴，作为相应轴的位置移动指令。

脉冲序列有正负号，指定对应轴的运动方向；脉冲序列按一定的频率输出，指定该轴的运动速度。这种装置称为脉冲分配器，如图 1-2 所示。

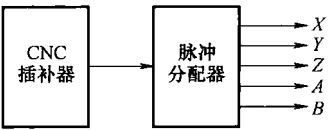


图 1-2 脉冲分配器

为了防止产生加工运动的冲击、提高加工精度和降低粗糙度，在脉冲分配给各进给轴之前，对进给速度都进行加/减速处理。如图 1-3 所示，CNC 可实现两种加/减速控制：插补前加/减速和插补后加/减速。

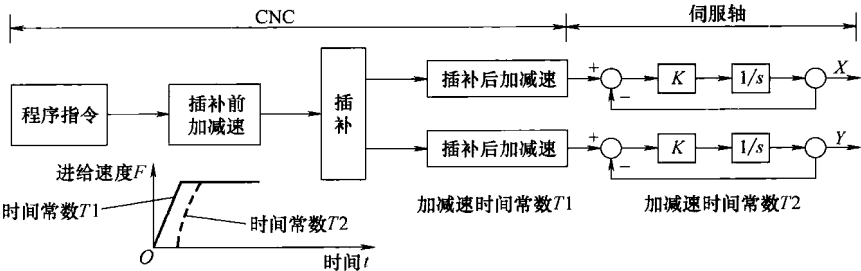


图 1-3 加减速控制

插补后通常用直线型或指数型加减速方法：指数型加/减速的速度变化比较平滑，因而冲击小，但是速度指令的滞后较大。相反，直线型加减速的速度变化迅速，时间常数设得较小时会造成冲击，引起机床的振动。但是，加工出的零件轮廓可能与程编的轮廓更接近。

插补前用直线型加减速方法，这样可以减小加工的形状误差。

### 3. 加工刀具的偏置及补偿

上述插补的位置脉冲，是按工件轮廓编写的程序计算出来的，即刀具中心点的运行轨迹是工件的轮廓。考虑到刀具有不同的半径和长度，实际加工时刀具中心不能按此轨迹行进，必须根据实际使用的刀具，计入其实际半径和长度，由 CNC 计算出实际刀具的中心轨迹，按此轨迹控制刀具的移动。此功能称为“刀具的偏置及补偿”。

#### (1) 刀具半径补偿

如图 1-4 所示，实际的刀具中心轨迹与按照零件轮廓尺寸编写的 CNC 加工程序轨迹偏移了一个刀具半径的尺寸。

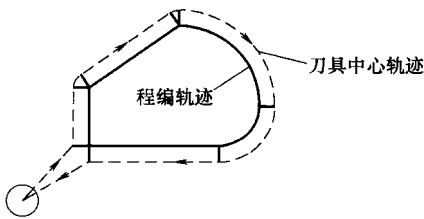


图 1-4 刀具半径补偿

在编程时，用 G 指令（G41，G42）告知 CNC 的插补器执行刀具半径的偏置计算，插补器即按照实际的刀具半径计算出刀具的中心轨迹，以此控制刀具的行进。就是说，上述脉冲分配器输出的给各个进给轴的脉冲数，是插补的零件轮廓偏移了一个刀具半径后的刀具中心轨迹的进给脉冲数。每个轴的补偿脉冲分别送给相应的进给轴。

实际刀具的半径值在加工前必须输入至刀具补偿存储器。刀具补偿存储器可同时存储多把刀具的几何尺寸（半径值）。加工中用哪一把刀具，由程序用刀具号指定，如：T12。根据程序中指令的刀号，CNC 插补器找到实际的刀具半径值执行计算。

G41 为左刀补：沿着刀具行进的方向看，在工件的左侧加补偿；G42 为右刀补：沿着刀具行进的方向，在工件的右侧加补偿。

#### (2) 刀具长度补偿

加工前，用一把刀具的长度作为基准，先测量好实际加工中使用的各把刀具与基准刀具的长度差值，与上述的刀具半径值一样，将这一差值按刀具号输入刀具补偿存储器。编写加工程序时，编入刀具号。加工开始时，用基准刀具的刀尖对刀。CNC 执行加工程序时，根据程序中指令的刀具号找出刀具长度的差值，按刀具长度差值的符号伸长或缩短进行补偿。图 1-5 是铣床刀具长度的补偿，只有 Z 向补偿。

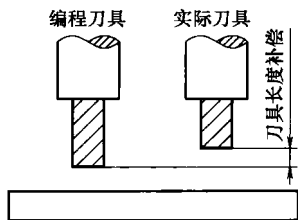


图 1-5 刀具长度补偿

在铣床类的 CNC 系统中，用 G43 和 G44 指令刀具的长度补偿。G43 为正刀补，即将刀具补偿值加到程序指令的终点坐标值上。G44 为负刀补，即由程序指令的终点坐标值减去刀具的补偿值。

## 1.2.3 数控机床的分类

### 1. 按加工工艺方法分类

#### (1) 金属切削类数控机床

与传统的车、铣、钻、磨、齿轮加工相对应的数控机床有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控齿轮加工机床等。尽管这些数控机床在加工工艺方法上存在着很大差别，具体的控制方式也各不相同，但机床的动作和运动都是数字化控制的，具有较高的生产率和自动化程度。

在普通数控机床上加装一个刀库和换刀装置就成为加工中心。加工中心进一步提高了普通数控机床的自动化程度和生产效率。例如，铣、镗、钻加工中心，它是在数控铣床基础上增加了一个容量较大的刀库和自动换刀装置形成的，工件一次装夹后，可以对箱体零件的4面甚至5面进行铣、镗、钻、扩、铰以及攻螺纹等多工序加工，特别适合箱体类零件的加工。加工中心机床可以有效地避免由于工件多次安装造成的定位误差，减少了机床的台数和占地面积，缩短了辅助时间，大大提高了生产效率和加工质量。

(2) 成型加工类数控机床

常见的成型加工主要应用于金属板材加工，这一类数控机床有数控压力机、数控剪板机和数控折弯机等。

(3) 特种加工类数控机床

除了切削加工数控机床以外，数控技术也大量用于数控电火花线切割机床、数控电火花成型机床、数控等离子弧切割机床、数控火焰切割机床以及数控激光加工机床等。

(4) 其他机械设备

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

2. 按驱动装置的特点分类

(1) 开环控制数控机床

无位置反馈装置的数控机床称为开环控制数控机床。使用步进电动机（包括电液脉冲电动机）作为伺服执行元件，是其最明显的特点。在开环控制数控机床中，数控装置输出的脉冲，经过步进驱动器的环形分配器或脉冲分配软件的处理，并通过驱动电路进行功率放大后，控制步进电动机的角位移。步进电动机再经过减速装置（或直接连接）带动丝杠旋转，通过丝杠将角位移转换为移动部件的直线位移。因此，控制步进电动机的转角与转速，就可以间接控制移动部件的移动速度与位移量。图 1-6 为开环数控机床伺服驱动部分的结构原理图。

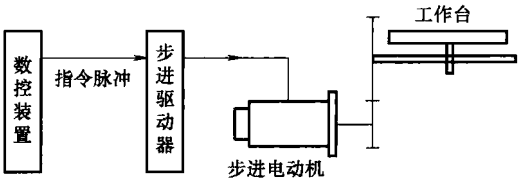


图 1-6 开环控制

开环控制系统的数控机床结构简单、成本较低。但是，系统对移动部件的实际位移量不进行监测，也不能进行误差校正。因此，步进电动机的失步、步距角误差、齿轮与丝杠等传动误差都将影响被加工零件的精度。开环控制系统仅适用于加工精度要求不很高的中小型数控机床，特别是简易经济型数控机床。

(2) 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床的特点是：机床的传动丝杠或伺服电动机上装有角位移检测装置（如：光电编码器等），通过它检测丝杠的转角，从而间接地检测了移动部件的位移，如图 1-7 所示。角位移信号被反馈到数控装置或伺服驱动中，实现了从数控装置到电动机输出转

角间的闭环自动调节。同样，由于伺服电动机和丝杠相连，通过丝杠将旋转运动转换为移动部件的直线位移，因此，间接控制了移动部件的移动速度与位移量。这种结构，只对电动机或丝杠的角位移进行了闭环控制，没有实现对最终输出的直线位移的闭环控制，故称为“半闭环控制”。

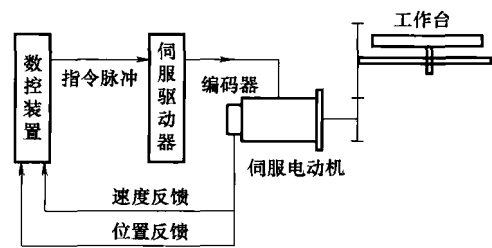


图 1-7 半闭环控制数控机床

半闭环控制的数控机床，电气控制与机械传动间有明显的分界，因此，调试比较方便；且机械部分的间隙、摩擦死区、刚度等非线性环节都在闭环以外，因此，系统的稳定性较好。

伺服电动机和光电编码器通常做成一体，电动机和丝杠间可以直接连接或通过减速装置连接。位置检测单位和实际最小移动单位间的匹配，可以通过数控系统参数（电子齿轮比）进行设定。它具有设计方便、传动系统简单、结构紧凑、制造成本低、性能价格比高等特点，从而在数控机床上得到了广泛的应用。

### (3) 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床的特点是：机床移动部件上直接安装有直线位移检测装置，检测装置检测最终位移输出量。实际位移值被反馈到数控装置或伺服驱动中，它可以直接与输入的指令位移值进行比较，用误差进行控制，最终实现移动部件的精确运动和定位。从理论上说，对于这样的闭环系统，其运动精度仅取决于检测装置的检测精度，它与机械传动的误差无关，显然，其精度将高于半闭环系统。而且，它可以对传动系统的间隙、磨损自动补偿，其精度保持性要比半闭环系统好得多。图 1-8 为闭环控制数控机床伺服驱动部分的结构原理图。

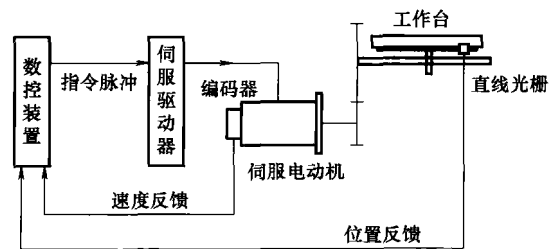


图 1-8 闭环控制数控机床

由于闭环控制系统的工作特点，所以它对机械结构以及传动系统的要求比半闭环更高，传动系统的刚度、间隙、导轨的爬行等各种非线性因素将直接影响系统的稳定性，严重时甚至产生振荡。

解决以上问题的最佳途径是采用直线电动机作为驱动系统的执行元件。采用直线电动机驱动，可以完全取消传动系统中将旋转运动变为直线运动的环节，大大简化了机械传动系统的结构，实现所谓的“零传动”，从根本上消除传动环节对精度、刚度、快速性、稳定性的影响。因此，可以获得比传统进给驱动系统更高的定位精度、快进速度和加速度。

除以上两种分类方法以外，数控机床还可以按照功能水平、功能特点等不同的分类方法分类，但这些分类方法的定义均不够明确，概念比较模糊，不同种类机床之间很难规定出明确的界限，在此从略。

## 1.2.4 数控机床的特点

除少数使用步进电动机驱动的简易数控机床以及作为特殊用途的数控机床外，一般来

说，数控机床都具有以下几方面特点。

#### (1) 加工精度高

数控机床加工精度之所以比普通机床高的原因主要有以下几个方面。

1) 数控机床的脉冲当量小，位置分辨率高。机床的脉冲当量决定了机床理论上可以达到的定位精度，在数控机床上，脉冲当量一般都达到了 0.001mm，高精度数控机床则更小，因此，它能实现比普通机床更精确的定位。

2) 数控系统具备误差自动补偿功能。在数控机床上，进给传动系统的反向间隙与丝杠的螺距误差等均可由数控系统进行自动补偿，因此，数控机床能在同等条件下，提高零件的加工精度。

3) 数控机床的传动系统与机床结构设计，都具有比普通机床更高的刚度和稳定性。如：部件的制造、装配精度均比较高，提高了机床本身的精度与稳定性。

4) 数控机床采用了自动加工方式，避免了加工过程中的人为干扰。特别是在加工中心上，通过一次装夹，可以完成多工序的加工，减少了零件的装夹误差。因此，零件的尺寸一致性好，产品合格率高，加工质量稳定。

目前，普通中、小型数控机床，其定位精度一般都可以达到 0.02mm，重复定位精度达到 0.01mm；在高精度数控机床上，精度更高。

#### (2) 机床的柔性强

在数控机床上，改变加工零件只需重新编写（更换）程序，就能实现对不同零件的加工，它为多品种、小批量生产加工以及新产品试制提供了极大的便利。同时，由于数控机床通过多轴联动，具备曲线、曲面的加工能力，扩大了机床的适用范围。特别对于普通机床难以加工或无法加工的复杂零件，利用数控机床可以充分发挥机床的功能，提高加工精度和效率。因此，对加工对象变化的适应性好，“柔性”比普通机床强。

#### (3) 自动化程度高，劳动强度低

数控机床对零件的加工是根据事先编写的程序自动完成的。在正常加工过程中，操作者只要进行极为简单的操作，即可完成零件的自动加工，不需要进行繁杂的重复性手工操作，操作者的劳动强度可大为减轻。此外，数控机床一般都具有较好的安全防护、自动排屑、自动冷却和自动润滑装置，使操作者的劳动条件也得到了很大改善。

#### (4) 生产率高

零件加工效率主要决定于零件的实际加工时间和辅助加工时间。数控机床的效率主要通过以下几个方面体现。

1) 在数控机床上，由于主轴的转速和进给量都可以任意选择，因此，对于每一道工序的加工，都可选择最合适的切削用量，以提高加工效率。此外，由于数控机床的结构刚性好，一般都允许进行较大切削用量的强力切削，提高了数控机床的切削效率，节省了实际加工时间。

2) 数控机床的移动部件的空行程运动速度大大高于普通机床，它一般都在 15m/min 以上，在高速加工数控机床上，目前已经达到 100m/min 左右，刀具定位时间非常短，空程运动辅助时间比普通机床要小得多。

3) 数控机床更换被加工零件时，一般都不需要重新调整，在加工中心上，更是一次装夹，完成多工序加工，节省了零件安装、调整时间。



4) 数控机床加工零件的尺寸一致性好, 质量稳定, 一般只需要做首件检验, 即可以代表批量加工精度, 节省了停机检验时间。

5) 数控机床可以实现精确、快速定位, 它不必像普通机床那样, 在加工前对工件进行“画线”, 节省了“画线”工时。

#### (5) 良好的经济效益

数控机床虽然设备价格较高, 分摊到每个零件的加工费用较普通机床高, 但使用数控机床加工, 可以通过上述优点体现出整体效益。特别是数控机床的加工精度稳定, 减少了废品, 降低了生产成本; 此外, 数控机床还可一机多用, 节省厂房面积和投资。因此, 使用数控机床, 通常都可获得良好的经济效益。

#### (6) 有利于现代化管理

采用数控机床加工, 能准确地计算零件加工工时和费用, 简化了检验、工装, 减少了半成品的管理环节, 有利于生产管理的现代化。数控机床使用了数字信息控制, 适合采用计算机管理, 使它成为计算机辅助设计、制造及管理一体化的基础。

### 1.2.5 数控机床的基本运行方式

#### 1. 手动方式

##### (1) 手动返回参考点

CNC 机床上有一个确定机床位置的基准点。这个点称为参考点, 并且在这一点上进行换刀和设定坐标值。通常在通电后, 机床要回到参考点。手动回参考点就是用操作面板上的开关或者按钮将坐标轴移动到参考点。

机床操作面板上的返回参考点开关接通时, 各坐标轴按照各轴参数中指定的方向移动。先是以快速移动到减速点, 然后减速, 以返回参考点的速度 (常称为 FL 速度) 速度移动到参考点。快速移动的速度和 FL 速度在参数中指定。参考点返回时, 快速移动的倍率有效。当刀具回到参考点后, 参考点返回完成, 指示灯亮。数控机床回参考点通常只沿一个轴方向移动, 但也可以沿多轴同时移动。

##### (2) 手动连续进给 (JOG)

在 JOG 方式中, 持续按下操作面板上的进给轴及其方向选择开关, 会使坐标轴沿着所选轴的所选方向连续移动。JOG 进给速度在参数中设定。JOG 进给速度可以通过倍率旋钮进行调整。

按下快速移动开关会使坐标轴以快速移动速度移动, 而不用管 JOG 倍率旋钮的位置。该功能称为手动快速移动。

手动操作一次, 一般只能移动一个轴, 可以通过参数设置同时移动多个轴。

##### (3) 增量进给

在增量进给 (INC) 方式中, 按下机床操作面板上的进给轴及其方向选择开关会使坐标轴沿着所选方向移动一步。坐标轴移动的最小距离是最小的输入增量。每一步可以是最小输入增量的 1、10、100 或者 1000 倍。增量进给这种方式一般在没有连接手摇脉冲发生器时使用。

##### (3) 手轮进给

在手轮进给方式中, 可以通过旋转机床操作面板上的手摇脉冲发生器, 微量移动坐标