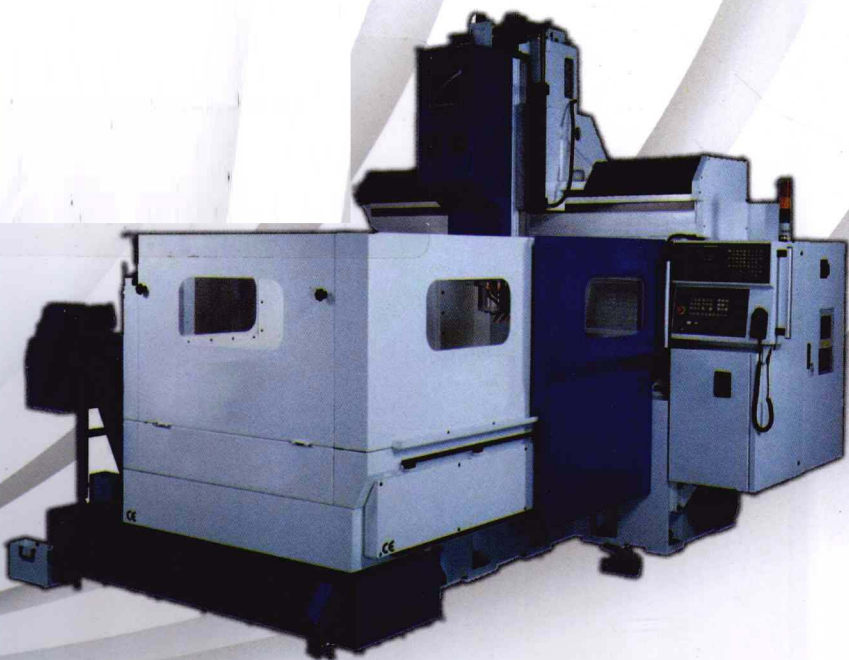


数控机床

调试诊断与维修

刘利剑 杜增辉 苏卫东 李扬 编著

SHUKONG JICHUANG TIAOSHI
ZHENDUAN YU WEIXIU



数控机床调试诊断与维修

刘利剑 杜增辉 苏卫东 李扬 编著



机械工业出版社

本书从机床电器入手,首先着重介绍了伺服系统、主轴系统和可编程序控制器的原理和应用,接着着重通过维修和调试的具体实例深入浅出地阐明了数控机床调试和维修的理论依据和实践方法,力图做到理论密切联系实际,先进性与系统性相结合,实用性与技术性相结合。全书内容包括数控机床概述,机床电气控制电路,进给伺服驱动系统,数控机床的主轴系统,可编程序控制器的控制技术,数控机床故障维修实例,数控机床机械、气路、油路调试维修与诊断,系统参数调整与修改,数控机床安装调试,数控机床故障维修与诊断。本书选材源于当代最新技术,全面而且实用。

本书可供从事数控机床设计、维修、调试、使用的研究单位或企业单位相关工程技术人员使用,还可以作为各类高等学校相关专业学生的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控机床调试诊断与维修/刘利剑等编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-111-35223-5

I. ①数… II. ①刘… III. ①数控机床-调试②数控机床-维修
IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第129957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:张沪光

责任编辑:张沪光

版式设计:张世琴

责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛

责任印制:李妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2011年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·463千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35223-5

定价:49.80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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

数控机床是现代机械制造工业的重要技术装备，也是先进制造技术的基础装备，几乎所有传统机床都有相应的数控机床。数控机床的广泛使用给机械制造业的生产方式、产业结构、管理方式带来深刻的变化，其关联效益和辐射能力更是难以估计。数控技术及数控装备是关系到国家战略地位和体现国家综合实力的重要基础性产业，其水平高低是衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志，实现加工机床和生产过程的数控化、柔性化，已经成为当今制造业的发展方向。尽管数控系统的性能和品质已有了极大的提高，从而保证了数控机床的稳定性和可靠性，但是数控机床是机电液气高度一体化的复杂机电设备，在使用中难免出现故障，通过科学的方法、行之有效的措施，迅速判别故障发生的原因，随时解决出现的问题，既是保证数控机床安全、可靠运行，提高设备使用率的关键所在，也是当前数控机床使用过程中亟待解决的问题之一。随着数控机床使用规模的不断扩大，对数控系统调试与维修人员的需求量和技能要求都有了显著提升，本书正是为满足用户这些迫切需要而编写的。

本书从机床电器、伺服系统、主轴系统和可编程序控制器的原理及应用分析入手，通过机、电、液、气维修和调试的具体实例深入浅出地阐明了数控机床调试和维修的理论依据和实践方法，力图做到理论密切联系实际，实用性与技术性相结合。

本书既可以供研究单位、企业从事数控机床设计、维修、调试、培训、使用的各类工程技术人员参考，又可以作为各类高等学校相关专业的参考教材。本书由刘利剑、杜增辉、苏卫东、李扬编著，第1、2章由哈尔滨理工大学的李扬编写，第3~5章由河北科技大学的刘利剑编写，第6~10章由石家庄链轮总厂的杜增辉和苏卫东编写，全书由刘利剑和杜增辉统稿和定稿。

在编写过程中，编者参考了诸多著作、教材和厂家手册，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不少缺点与错误，殷切期望广大读者批评指正。

编 者

2011年4月

目 录

前言

| | | | |
|-----------------------------------|----|---------------------------------------|-----|
| 第1章 数控机床概述 | 1 | 2.2.4 电气原理图和接线图的绘制 | 33 |
| 1.1 数控机床的基本原理 | 1 | 2.2.5 电气原理图的阅读 | 35 |
| 1.1.1 数字控制与数控机床的概念 | 1 | 第3章 进给伺服驱动系统 | 36 |
| 1.1.2 数控机床的组成 | 2 | 3.1 伺服系统的组成 | 36 |
| 1.1.3 数控机床的加工过程 | 3 | 3.2 数控机床对伺服系统的要求 | 36 |
| 1.1.4 计算机数控系统的工作过程 | 4 | 3.3 伺服系统的分类和发展 | 37 |
| 1.1.5 计算机数控系统的工作过程实例 | 5 | 3.3.1 伺服系统的分类 | 37 |
| 1.2 数控机床的主要性能指标及要求 | 7 | 3.3.2 伺服系统的发展 | 41 |
| 1.2.1 数控机床的特点及适用范围 | 7 | 3.4 交流伺服电动机的变频调速 | 43 |
| 1.2.2 数控机床的主要性能指标 | 8 | 3.4.1 交流电动机的调速原理 | 43 |
| 1.2.3 数控机床总体设计要求 | 10 | 3.4.2 交流伺服电动机 | 44 |
| 1.3 数控机床的分类 | 10 | 3.4.3 变频调速技术 | 48 |
| 1.3.1 按刀具与工件相对运动轨迹分类 | 10 | 3.5 交流伺服系统的发展趋势 | 63 |
| 1.3.2 按伺服系统控制方式分类 | 11 | 3.6 进给运动系统参数的设定 | 64 |
| 1.3.3 按加工工艺用途分类 | 12 | 3.6.1 FANUC 系统参数的设置和调整 | 64 |
| 1.3.4 按可控制联动的坐标轴数分类 | 13 | 3.6.2 西门子 802CBL 系统参数的设置和 调整 | 70 |
| 1.3.5 按控制系统功能水平分类 | 14 | 第4章 数控机床的主轴系统 | 76 |
| 1.4 数控机床电气控制系统的发展 状况 | 14 | 4.1 数控机床对主轴的基本要求 | 76 |
| 1.4.1 数控机床的产生和发展历程 | 14 | 4.2 主轴常见的变速方式 | 76 |
| 1.4.2 数控机床的发展趋势 | 15 | 4.3 典型数控机床主轴部件 | 85 |
| 第2章 机床电气控制电路 | 17 | 4.3.1 数控车床的主轴部件 | 85 |
| 2.1 常用低压电器的图形和文字 符号 | 17 | 4.3.2 车削中心的主轴传动系统 | 86 |
| 2.1.1 低压刀开关、断路器 | 17 | 4.3.3 加工中心主轴的准停和刀具装夹 | 87 |
| 2.1.2 熔断器 | 19 | 4.4 数控机床主轴驱动控制 | 91 |
| 2.1.3 接触器 | 20 | 4.4.1 直流主轴驱动 | 91 |
| 2.1.4 继电器 | 21 | 4.4.2 交流主轴驱动 | 93 |
| 2.1.5 控制按钮 | 27 | 第5章 可编程序控制器的控制技术 | 99 |
| 2.1.6 行程开关 | 27 | 5.1 通用 PLC 的工作原理、组成和 分类 | 99 |
| 2.2 电气控制电路 | 29 | 5.1.1 PLC 的工作原理 | 99 |
| 2.2.1 电气控制电路的类型和特点 | 29 | 5.1.2 PLC 的应用范围 | 99 |
| 2.2.2 电气原理图、接线图和电气设备 安装图 | 29 | 5.1.3 PLC 的分类 | 100 |
| 2.2.3 绘制电气控制电路的一般原则 | 31 | 5.1.4 PLC 的主要特点 | 100 |
| | | 5.1.5 通用型 PLC 主要性能指标 | 101 |
| | | 5.1.6 通用型 PLC 系统软硬件组成 | 101 |

| | | | |
|---|-----|-----------------------------------|-----|
| 5.1.7 PLC 的编程语言 | 102 | 7.1 机械部位调试维修与诊断 | 171 |
| 5.1.8 PLC 的工作原理 | 103 | 7.1.1 主传动系统 | 171 |
| 5.2 数控机床用 PLC | 105 | 7.1.2 主轴部件 | 172 |
| 5.3 FANUC PLC 简介 | 107 | 7.1.3 进给系统的结构原理和维修 | 178 |
| 5.4 PMC 与数控系统和数控机床的 接口信号 | 109 | 7.2 气路调试维修与诊断 | 200 |
| 5.4.1 NC 侧与 MT 侧的概念 | 109 | 7.3 油路调试维修与诊断 | 201 |
| 5.4.2 数控机床接口 | 110 | 7.3.1 液压系统常见故障的特征 | 202 |
| 5.4.3 输入、输出信号规范 | 111 | 7.3.2 液压元件常见故障及排除 | 202 |
| 5.5 FANUC-PMC 内部软件、基本 逻辑指令及编程方法 | 114 | 第 8 章 系统参数调整与修改 | 207 |
| 5.5.1 FANUC-PMC 的特点 | 114 | 8.1 开环系统参数调整 | 207 |
| 5.5.2 FANUC-PMC 信号、继电器地址 | 114 | 8.2 半闭环系统调整 | 211 |
| 5.5.3 FANUC-PMC 梯形图的表示符号 | 115 | 8.3 闭环系统调整 | 216 |
| 5.6 FANUC 数控系统 PMC 的基本 指令和编程方法 | 116 | 第 9 章 数控机床安装调试 | 218 |
| 5.6.1 PMC 的基本指令和功能指令 | 116 | 9.1 急停与回零安装调试 | 218 |
| 5.6.2 FANUC 数控系统 PMC 编程方法 举例 | 122 | 9.2 硬体极限过行程解除安装调试 | 218 |
| 5.7 梯形图 | 124 | 9.3 伺服轴控制调试 | 218 |
| 5.7.1 梯形图的概念 | 124 | 9.4 主轴控制调试 | 220 |
| 5.7.2 梯形图的符号和地址 | 124 | 9.5 记忆体保护及门锁开关调试 | 223 |
| 5.7.3 梯形图的结构 | 127 | 9.6 切削液及排屑机功能调试 | 223 |
| 5.7.4 梯形图与继电器逻辑电路在运行时的 差别 | 127 | 9.7 刀库及刀具交换调试 | 224 |
| 5.7.5 第一级顺序程序和第二、三级顺序 程序 | 128 | 9.8 托板交换及第四轴 (B 轴) 功能 调试 | 228 |
| 5.8 FANUC-PMC 诊断功能的利用 | 130 | 9.9 主轴油冷系统 (空调机) 调试 | 230 |
| 第 6 章 数控机床故障维修实例 | 134 | 9.10 位置检测系统调试 | 230 |
| 6.1 数控机床返回参考点控制及常见 故障分析 | 134 | 第 10 章 数控机床故障维修与诊断 | 233 |
| 6.2 数控车床刀架控制及故障分析 | 142 | 10.1 系统故障维修与诊断 | 233 |
| 6.3 加工中心自动换刀装置及常见 故障分析 | 157 | 10.2 主轴故障维修与诊断 | 243 |
| 6.4 数控机床操作中常见故障及解决 方法 | 164 | 10.3 进给伺服故障维修与诊断 | 253 |
| 6.5 数控机床超程故障及处理方法 | 166 | 10.4 刀库故障维修与诊断 | 280 |
| 6.6 系统电源的工作原理及常见故障 分析 | 167 | 10.5 工作台故障维修与诊断 | 283 |
| 第 7 章 数控机床机械、气路、油路 调试维修与诊断 | 171 | 10.6 机械故障与诊断 | 284 |
| | | 10.7 其他故障与诊断 | 288 |
| | | 附录 | 292 |
| | | 附录 A 主要数控机床型号与生产 企业 | 292 |
| | | 附录 B 主要数控机床的数控系统与 生产企业 | 293 |
| | | 参考文献 | 294 |

第 1 章 数控机床概述

1.1 数控机床的基本原理

1.1.1 数字控制与数控机床的概念

1. 数字控制

数字控制 (Numerical Control, NC), 简称为数控, 是一种自动控制技术, 是用数字化信号对控制对象加以控制的一种方法。数控系统 (Numerical Control System, NCS) 是指利用数控技术实现自动控制的系统。

数字控制是相对于模拟控制而言的, 数字控制系统中的控制信息是数字量, 而模拟控制系统中的控制信息是模拟量。数字控制与模拟控制相比有许多优点, 如可用不同的字长表示不同的精度信息, 可对数字化信息进行逻辑运算、数学运算等复杂的信息处理工作, 特别是可用软件来改变信息处理的方式或过程, 而不用改动电路或机械结构, 从而使机械设备具有很大的“柔性”。因此数字控制已被广泛用于机械运动的轨迹控制和机械系统的开关量控制, 如机床、机器人的控制等。

计算机数控 (Computerized Numerical Control, CNC; 又称 Microcomputerized Numerical Control, MNC) 是用专用计算机通过控制程序来实现部分或全部基本控制功能, 并能通过接口与各种输入/输出设备连接的一种自动化技术。更换不同的控制程序, 可以实现不同的控制功能。

数控技术综合运用机械制造技术、信息处理技术、加工技术、传输技术、自动控制技术、伺服驱动技术、传感器技术和软件技术等方面的最新成果, 具有动作顺序自动控制、位移和相对位置坐标自动控制, 速度、转速及各种辅助功能自动控制等功能。

2. 数控机床

数字控制的对象是多种多样的, 但数控机床是最早应用数控技术的控制对象, 也是最典型的数控化设备。数控机床即数字控制的机床, 它是采用了数控技术的机床, 或者说是装备了数控系统的机床。

数控机床的工作过程为, 将加工过程所需的各种操作 (如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择刀具、供给冷却液等) 和步骤以及刀具与工件之间的相对位移都用数字化的代码来表示, 通过各种输入方式将数字化信息送入专用或通用的计算机 (数控装置), 计算机对输入的信息进行处理与运算, 发出各种指令来控制机床的伺服系统或其他执行元件, 使机床按图样要求的形状和尺寸自动加工出所需要的工件。简单地说, 数控机床就是由通用计算机或专用计算机装置控制的一种柔性的、高效能的自动化机床。数控机床是一种典型的机电一体化产品, 较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题。

数控机床是数控设备的典型代表, 其他数控设备包括数控雕刻机、数控火焰切割机、数控测量机、数控绘图机、数控插件机、电脑绣花机、工业机器人等。它们都是采用数控系统进行控制的机械设备, 其操作命令也是用数字化信息的形式来描述, 其工作过程按照规定格

式的指令自动地进行。

1.1.2 数控机床的组成

数控机床是一种灵活、通用、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床，它一般由程序载体、输入装置、数控装置、伺服系统、位置反馈系统和机床本体组成，如图 1-1 所示。

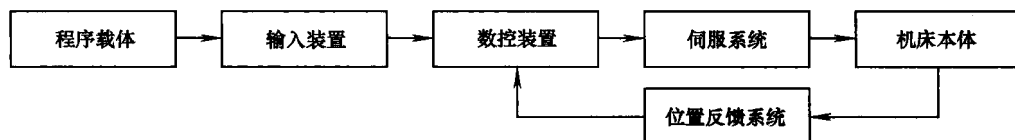


图 1-1 数控机床组成框图

1. 程序载体（信息载体）

程序载体又称信息载体或控制介质，用于记录数控机床上加工一个零件所必需的各种信息，如零件加工的位置数据、工艺参数等，以控制机床的运动，实现零件的加工。常用的信息载体有穿孔纸带、磁带、磁盘、U 盘等。

2. 输入装置

输入装置的作用是将程序载体内有关加工程序读入数控装置。根据程序载体的不同，输入装置可以是光电阅读机、软盘驱动器等。数控机床程序输入的方法也可采用操作面板上的按钮和键盘。

数控加工程序编制好后，一般存放在便于输入到数控装置的一种介质上。多年以来，主要采用光电阅读机、阅读穿孔纸带或使用键盘手动输入程序和数据。随着计算机技术的发展，一些计算机中的通用技术融入数控系统，则用磁盘、U 盘、光盘等输入。现在主要用串行通信的方式输入，把零件程序保存在上级计算机中，由上级计算机的输出进行直接数控输入。直接数控简称为 DNC（Direct Numerical Control）。

3. 数控装置（数控系统）

数控装置（又称数控系统）是数控机床的控制核心。它的作用是接收输入装置的信息，进行运算和产生一系列的控制信号与数据，再送到伺服驱动机构，用以操纵机床的运动。

计算机数控装置由硬件和软件两部分组成。硬件一般由控制器、输出装置和接口电路等组成。软件有管理软件和控制软件。管理软件包括输入/输出、显示和诊断程序等；控制软件包括译码、刀具补偿、速度控制、插补运算和位置控制等。

控制器是由一台或多台专用计算机组成，其功能是对输入的信息进行数据处理。首先是编译输入的程序和识别输入的数据及符号；进行刀具半径的补偿；计算切削速度；处理各种辅助功能，如换刀、变速、主轴起停、冷却液开关等；再进行插补运算。插补运算的任务是使数据点密集化。现代数控系统中，绝大多数机床控制器都采用可编程序控制器（PLC）实现开关控制。

输出装置与伺服机构相连，控制伺服驱动系统使机床按照规定的要求运动。

机床接口是计算机与机床之间联系的桥梁，机床接口包括伺服驱动接口及机床输入/输出接口。伺服驱动接口主要是进行数-模转换，以及对反馈元件的输出进行数字化处理并记录，以供计算机采样。

数控装置控制机床的动作可概括如下：

- a) 机床主运动, 包括主轴的起动、停止、转向和速度选择;
- b) 机床的进给运动, 如点位、直线、圆弧、循环进给的选择, 坐标方向和进给速度的选择等;
- c) 刀具的选择和刀具的补偿(长度、半径);
- d) 其他辅助运动, 如各种辅助操作、工作台的锁紧和松开、工作台的旋转与分度、工件的夹紧与松开以及冷却泵的开、停等。

4. 伺服系统

伺服系统是数控机床的执行部分, 包括驱动机构和机床移动部件, 伺服系统的作用是接收数控装置发来的各种动作命令, 把来自控制装置的脉冲信号转换为机床移动部件的运动, 以加工出符合图样要求的零件。

伺服驱动装置包括主轴伺服装置和进给伺服驱动装置两部分, 用于实现数控机床的主轴伺服控制和进给伺服控制。伺服驱动装置由驱动电路和伺服电动机组成, 并与机床的机械传动部件组成数控机床的主传动系统和进给传动系统。主轴伺服驱动装置接收来自 PLC 的转向和转速指令, 经过功率放大后驱动主轴电动机转动。进给伺服驱动装置在每个插补周期内接收数控装置的位移指令, 经过功率放大后驱动进给电动机转动, 同时完成速度控制和反馈控制功能。根据所选电动机的不同, 伺服驱动装置的控制对象可以是步进电动机、直流伺服电动机或交流伺服电动机等。伺服驱动装置有开环、半闭环和闭环之分。

对伺服系统的要求是运行可靠、动作灵敏、惯性小、有足够的驱动力矩等。这样才能使数控机床的加工精度、表面质量和生产率得到保证。

5. 位置反馈系统

位置反馈系统的作用是通过传感器将伺服电动机的角位移或数控机床执行机构的直线位移转换成电信号, 输送给数控装置, 与指令位移量进行比较, 并由数控装置发出指令, 纠正所产的误差, 以提高机床加工精度。

位置检测装置与伺服驱动装置配套组成半闭环或闭环伺服驱动系统。

6. 机床本体

机床本体是数控机床加工运动的机械部分, 用于完成各种切削加工。

数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动部件(如机床工作台、滑板及其传动部件)和床身立柱等支承部件; 此外, 还有转位、夹紧、润滑、冷却、排屑等辅助装置。对于加工中心类的数控机床, 还有存放刀具的刀库、交换工作台、机械手或机器人等部件。

数控机床与一般机床在结构上是有本质区别的。通过多年的实践证明, 用普通机床改造的数控机床, 存在着一系列严重的弱点。例如机床刚度不足, 传动中相对运动面间摩擦过大、传动间隙过大, 不适应自动化加工的特殊要求等。采用数控技术后, 对机床结构的技术性能的要求将更高, 这是因为数控机床操作过程的自动化, 对加工精度的要求, 皆需机床本身予以保证。所以, 数控机床各方面, 都要比普通机床设计得更完美, 制造得更精密, 传动结构要求更为简单, 在精度、刚度、摩擦、抗振性等方面要求更高, 而且传动和变速系统要便于实现自动化。

1.1.3 数控机床的加工过程

数控机床加工工件的过程如图 1-2 所示, 具体分为以下几个方面。

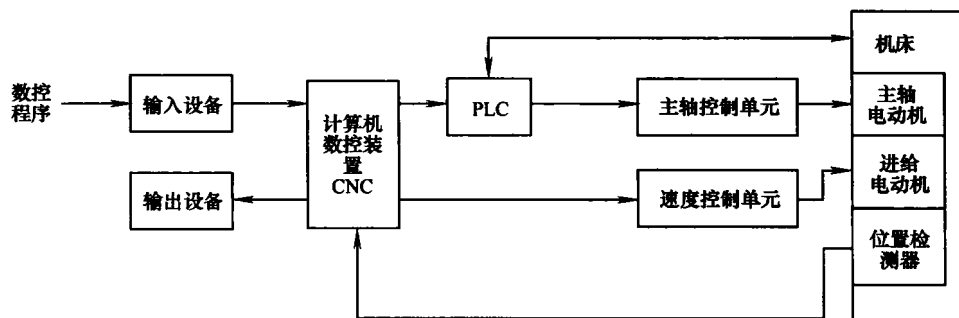


图 1-2 数控机床加工工件的过程

1. 数控程序的编制

在数控机床上加工工件前，首先要根据加工零件图样的工艺要求设计数控加工工艺过程（如工步、加工路线、切削量等），再按编程手册规定的格式编制数控加工程序单。

2. 控制介质的制作和程序的输入

由加工程序清单制作控制介质，如穿孔带、磁带、磁盘等，再将控制介质记录的加工信息通过输入装置输入到数控装置中。

3. 加工信息的处理与计算和控制指令的发出

当加工程序输入到数控装置后，在控制系统内部的系统程序的支持下，数控装置将输入的程序经过必要的处理与计算后，向机床各个坐标的伺服系统发出相应的控制指令。

4. 控制指令的执行

伺服系统根据数控装置发出的信号，通过伺服执行机构（如步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机），经传动装置（如滚珠丝杠螺母副等），驱动机床各运动部件，使机床按规定的动作顺序、速度和位移量进行工作，实现零件的数控加工，从而加工出符合图样要求的零件。

1.1.4 计算机数控系统的工作过程

计算机数控系统的主要功能是将输入装置传送的数控加工程序，经数控装置系统软件进行译码、插补运算和速度预处理，产生位置和速度指令以及辅助控制功能信息等。

计算机数控系统的工作过程如下：

a) 将零件加工程序、控制参数和补偿数据等输入给数控系统。

b) 译码：译码输入的程序段含有零件的轮廓信息（起点、终点、直线还是圆弧等）、要求的加工速度以及其他辅助加工信息（如换刀、换档、冷却液开关等）。计算机依靠译码程序来识别这些符号，将加工程序翻译成计算机内部能识别的语言。

系统进行数控加工程序译码时，将其区分成几何数据、工艺数据和开关功能。几何数据是刀具相对于工件运动路径的数据，利用这些数据可加工出要求的工件几何形状；工艺数据是主轴转速和进给速度等功能的数据；开关功能是对机床电器的开关命令，如主轴起/停、刀具选择和交换、切削液的开/关等。

c) 数据处理：数据处理的目的是完成插补运算前的准备工作。数据处理程序一般包括刀具半径补偿、速度计算及辅助功能的处理等。刀具半径补偿是把零件轮廓轨迹转化为刀具

中心轨迹；速度计算是解决该加工数据段以什么样的速度运动的问题。加工速度的确定是一个工艺问题。数控系统仅仅是保证这个编程速度的可靠实现。另外，辅助功能（如换刀、换档等）也在这个程序中实现。

d) 插补：即根据给定的曲线类型（如直线、圆弧或高次曲线）、起点、终点以及速度，在起点和终点之间进行数据点的密化。即根据曲线段已知的几何数据以及相应工艺数据中的速度信息，计算出曲线段起点、终点之间的一系列中间点，分别向机床各个坐标轴发出速度和位移信号，通过各个轴运动的合成，形成符合数控加工程序要求的工件轮廓的刀具运动轨迹。

计算机数控系统的插补功能主要由软件来实现，目前主要有两类插补法：一是脉冲增量插补，它的特点是每次插补运算结束产生一个进给脉冲；二是数字增量插补，它的特点是插补运算在每个插补周期进行一次，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。

e) 伺服系统将计算机送出的位置进给脉冲或进给速度指令经变换和放大后，转化为伺服电动机（步进电动机、交、直流伺服电动机）的转动，从而带动机床工作台移动。

f) 当一个数据段开始插补时，管理程序即着手准备下一个数据段的读入、译码、数据处理，即由它调用各个功能子程序，且保证一个数据段加工过程中，将下一个程序段准备就绪。一旦本数据段加工完成，即开始下一个数据段的插补加工。整个零件加工就是在这种周而复始的过程中完成。

数控系统控制机床的动作可概括如下：

- 机床主运动，包括主轴的起/停、转向和速度选择；
- 机床的进给运动，如点位、直线、圆弧、循环进给的选择，坐标方向和进给速度的选择等；
- 刀具的选择和刀具的长度、半径补偿；
- 其他辅助运动，如各种辅助操作、工作台的锁紧和松开、工作台的旋转与分度、工件的夹紧与松开以及切削液的开/关等。

1.1.5 计算机数控系统的工作过程实例

图 1-3 所示为数控系统的原理框图，图中的点画线框内是数控装置的核心——计算机。

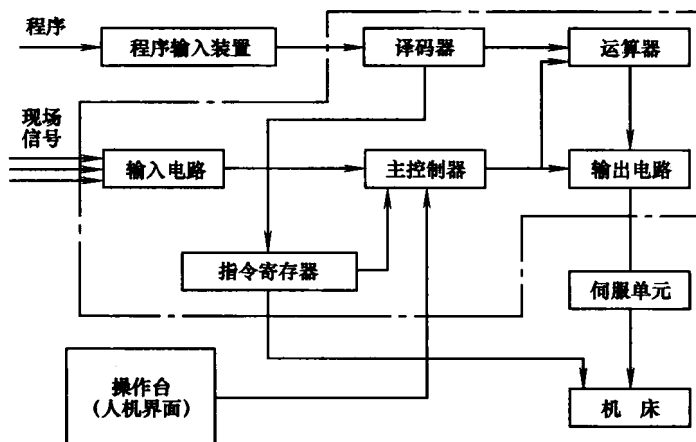


图 1-3 数控系统原理框图

6 数控机床调试诊断与维修

在操作台上按下起动按钮后，输入控制器发出的命令，首先使程序输入装置工作，将程序载体内有关加工程序读入数控装置。然后通过译码器进行译码，如果译出的码是代表数字——称为数字码，就被送到运算器；如果译出的代码是表示文字符号即某种指令——称为指令码，就被送到指令寄存器和主控制器。

主控制器就是数控装置的大脑，它指挥着有节奏的运算进行数据的处理，根据运算结果和指令寄存器中存放的加工指令，随时对输出进行控制，从而达到控制进给坐标、进给方向和进给速度的目的。主控制器还通过输入控制电路控制程序输入装置的起/停。

下面通过数控车床加工一段圆弧的例子，了解数控装置是如何对加工过程进行控制的。所要加工的圆弧如图 1-4 中的 AB 所示。

现规定走刀方向为 X 方向，进刀方向为 Y 方向，试用一台步进电动机驱动纵向丝杠以带动刀架沿 X 方向走刀；再用一台步进电动机驱动横向丝杠以带动刀架沿 Y 方向进刀。

在加工过程中，数控装置每发一个脉冲，步进电动机就旋转一定的角度，使刀架移动一步。与此同时，数控装置对刀尖位置进行一次计算。若刀尖位置落在圆弧里面，下一个脉冲就发给 X 方向的步进电动机，令其往 X 正方向走一步；若刀尖位置落在圆弧外面，下一个脉冲就发给 Y 方向的步进电动机，令其往 Y 负方向退一步，按照这个规则，刀尖将走出如图 1-5 中所示的阶梯形折线，在图 1-5 中是为了分析的方便把图 1-4 中的圆弧 AB 放大后画出来的。

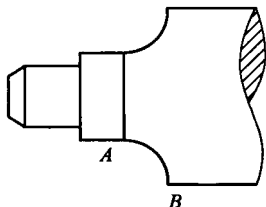


图 1-4 工件圆弧

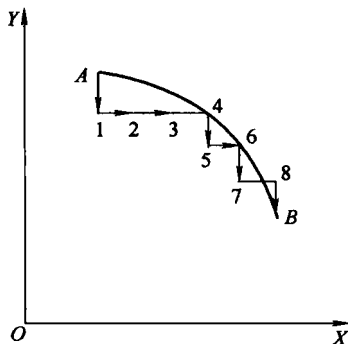


图 1-5 圆弧加工放大图

例如在起始点 A ，刀尖在圆弧上，数控装置发一个脉冲给 Y 方向步进电动机，令其后退一步，于是刀尖走到点 1，数控装置内部通过计算得知此刻刀尖位置在圆弧内，于是发出一个脉冲给 X 方向步进电动机，令其前进一步，刀尖到达 2 点。数控装置内部又通过计算得知刀尖仍在圆弧内，就又发一个脉冲给 X 方向步进电动机，令其再前进一步……连续走了 3、4 步，此时刀尖到达 4。通过数控装置的计算，发现此刻刀尖已落到圆弧的外面，此时数控装置发出一个脉冲给 Y 方向步进电动机，令其退一步使刀尖到达点 5……如此继续在数控装置的控制下使刀尖一直位移至 B 点为止，不难看出，刀尖位移的实际轨迹是阶梯折线，但是由于脉冲当量足够（在最简单的数控机床中脉冲当量也不过 $0.01\text{mm}/\text{脉冲}$ ）所以加工出来的这段折线很近似 AB ，其误差不会超过数控系统的一个脉冲当量。

在加工中，数控装置对刀尖位置的跟踪计算是很方便的。只要把要加工的圆弧的起点和终点的坐标、圆弧所在象限及走向等数据和指令等输入到数控装置内部，数控装置的主控制

器就会对其内部部件进行控制,按预先输入的要求完成加工。

在加工过程中,操作人员要向机床数控装置输入操作命令,数控装置则为操作人员显示必要的信息,如坐标值、报警信号等。此外,输入的程序并非全部正确,有时需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员进行信息交流的过程。要进行信息交流、数控机床中必须具备必要的交互设备,即输入输出装置。

1.2 数控机床的主要性能指标及要求

1.2.1 数控机床的特点及适用范围

1. 数控机床的特点

数控机床是一种高效、新型的自动化机床,它是实现柔性自动化的重要设备,具有广阔的应用前景。与普通车床相比,数控机床具有以下主要特点。

1) 加工零件的适应性强、灵活性好 数控机床能完成很多普通机床难以胜任,或者根本不可能加工出来的复杂型面的加工。当加工对象改变时,只需重新编写程序,即能迅速地从一种零件的加工过渡到另一种零件的加工,特别适应于目前多品种、小批量、变化快的生产特征,具有较大的柔性。因此,数控机床首先在航空航天等领域获得应用,在复杂曲面的模具加工、螺旋桨及蜗轮叶片的加工中,也得到了广泛的应用。

2) 加工精度高、产品质量稳定 数控机床是按指令进行加工的。由于数控机床的脉冲当量普遍达到了 0.001mm ,对于中、小型数控机床,定位精度普遍可达 0.03mm ,重复定位精度为 0.01mm ,其运动分辨率远高于普通机床。数控机床的一切动作都是按照规定的程序自动工作,不受零件结构复杂程度和操作者的技术水平及情绪变化对加工质量的影响。数控加工将责任从操作者转移给控制指令,消除了操作者人为产生的误差,从而不仅使零件加工质量稳定可靠,提高了同一批工件的尺寸一致性,同时废品率大为降低。

3) 自动化程度高、劳动强度低 利用数控机床进行加工,只要按图样要求编制零件的加工程序,然后输入并调试程序,除工件毛坯装夹外,全部加工过程都由数控机床自动完成。工序、刀具可自动更换、检测,工件加工过程中不需要人的干预,加工完毕后自动停车,使操作者的劳动强度大为减轻。加上数控机床一般都具有较好的自动排屑、自动冷却和自动润滑装置,操作者的劳动条件也大为改善。由于操作失误减少,也降低了废品、次品率。

4) 生产效率高 数控机床的进给运动和多数主运动都采用无级调速,且调速范围大,可选择合理的切削速度和进给速度,良好的结构刚性允许数控机床采用大的切削用量,提高切削效率,有效地减少加工中的切削工时;数控机床还具有自动换刀、自动交换工作台和自动检测等功能,可实现在一次装夹后几乎完成零件的全部加工,这样不仅可减少装夹误差,还可减少半成品的周转时间,并且无需工序间的检验与测量,使辅助时间大为缩短。因此,与普通机床相比,数控机床的生产效率高出 $3\sim 4$ 倍。对于复杂型面的加工,生产效率可提高十倍,甚至几十倍。

5) 具有良好的经济效益 数控机床虽然设备昂贵,分摊到每个工件上的费用较高,但用数控机床加工工件可以节省许多其他费用。数控机床加工精度稳定、废品率低,使生产成

本下降，另外数控机床可以一机多用，节省厂房面积，减少建厂投资。因此，使用数控机床加工可以获得良好的经济效益。

6) 有利于生产管理的现代化 在数控机床上加工作，能预先精确估算零件加工时间，便于实现生产计划调度、简化和减少了检验、工具夹准备、半成品调度等管理工作。数控机床是以数字信息（程序）作为控制信息，用数控机床加工能准确计算零件的加工时间，这样有利于与计算机连接，构成由计算机控制和管理的生产系统，实现生产过程的科学管理和信息化管理。

7) 具有监控和自动故障诊断功能 CNC 系统不仅控制机床的运动，而且可对机床进行全面监控。可对一些引起故障的因素提前报警、进行故障诊断等，极大地提高了检修的效率。

8) 由于综合应用机、电、液和计算技术，维护的技术要求高 数控机床是综合多学科、新技术的产物，价格昂贵，一定要由具有较高水平的技术工人进行操作和维护。

2. 数控机床的适用范围

在机械加工业中的大批量零件的生产宜采用专用机床或自动线。对于小批量产品的生产过程中产品品种的变换频繁、批量小、加工方法的区别大，宜采用数控机床。数控机床的适用范围如图 1-6 所示。

图 1-6 所示为随零件复杂程度和零件批量的变化，通用机床、普通机床和数控机床的运用情况。当零件不太复杂、生产批量较小时，宜采用通用机床；当生产批量较大时，宜采用专用机床；而当零件复杂程度较高时，宜采用数控机床。

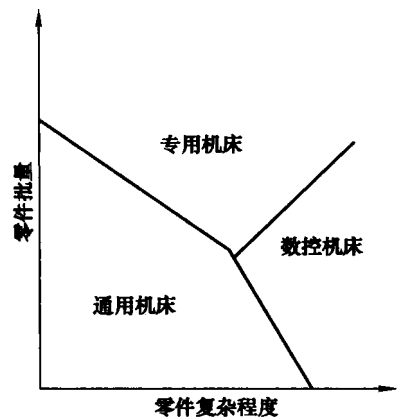


图 1-6 数控机床的适用范围

1.2.2 数控机床的主要性能指标

1. 规格指标

规格指标是指数控机床的基本能力指标，主要有以下几方面：

1) 承载能力 它反映该机床能加工零件的最大重量。

2) 主轴功率和进给轴扭矩 它反映该机床的加工能力，同时也可间接反映机床的刚度和强度。

3) 控制轴数和联动轴数 数控机床的控制轴数通常是指机床数控装置能够控制的进给轴数，现在有的数控机床生产厂家也认为控制轴数包括所有的运动轴，即进给轴、主轴、刀库轴等。数控机床的控制轴数与数控装置的运算处理能力、运算速度及内存容量等有关。联动轴数是指数控机床同时控制多个进给轴，使它们按零件轮廓规定的规律运动的进给轴数目。它反映数控机床的曲面加工能力。

2. 精度指标

数控机床的精度主要是指加工精度、定位精度和重复定位精度。精度是数控机床的重要技术指标之一。

1) 几何精度 它是综合反映机床的关键零部件及其在总装后形位误差的指标，该指标

可分两类：第一类是对机床的基础件和运动大件（如机身、立柱、工作台、主轴箱等）的直线度、平面度、垂直度的要求；第二类是对机床执行切削运动的主要部件——主轴的要求。

2) 位置精度 它是综合反映机床各运动部件在数控系统的控制下空载所能达到的精度。根据各轴能达到的位置精度，就能判断出加工时零件所能达到的精度。这类指标主要有如下几种：

a) 定位精度：定位精度是指实际位置与数控指令位置的一致程度。不一致量表现为误差。

定位误差包括伺服系统、进给系统和检测系统的误差，还包括移动部件导轨的几何误差等。

b) 重复定位精度：重复定位精度是指在同一台数控机床上，应用相同程序、相同代码加工一批零件，所得到的连续结果的一致程度。重复定位精度受伺服系统特性、进给系统的间隙、刚度以及摩擦特性等因素的影响。一般情况下，重复定位误差是成正态分布的偶然性误差，它影响一批零件加工的一致性，是一项非常重要的性能指标。

c) 分度精度：分度精度是指分度工作台在分度时，指令要求回转的角度值和实际回转的角度值的差值。分度精度既影响零件加工部位在空间的角度位置，也影响孔系加工时的同轴度等。

d) 回零精度：回零精度是指数控机床各坐标轴达到规定零点的精度，其误差称为回零误差。同定位误差一样，回零误差包括整个伺服系统的误差。它直接影响机床坐标系的建立精度。

e) 分辨率与脉冲当量：分辨率是指两个相邻的分散细节之间可以分辨的最小间隔。对测量系统而言，分辨率是可以测量的最小增量；对控制系统而言，分辨率是可以控制的最小位移增量或角位移量，一般又称为脉冲当量。脉冲当量是设计数控机床的原始数据之一，其数值的大小决定数控机床的加工精度和表面质量。目前经济型数控机床的脉冲当量一般采用0.01mm；普通数控机床的脉冲当量一般采用0.001mm；精密型数控机床的脉冲当量一般小于0.0001mm；最精密的数控系统的分辨率已达到0.001 μm 。一般情况下，脉冲当量越小，数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

3. 运动性能指标

1) 最高主轴转速和最大加工速度 最高主轴转速是指主轴所能达到的最高转速，它是影响零件表面加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素之一。最大加速度是反映主轴速度提速能力的性能指标，也是加工效率的重要指标。

2) 最高快移速度和最高进给速度 最高快移速度是指进给轴在非加工状态下的最高移动速度。最高进给速度是指进给轴在加工状态下的最高移动速度，它们也是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。这两个性能指标受数控装置的运算速度、机床动态特性及工艺系统刚度等因素的限制。

3) 行程范围 坐标轴可控的运动区间，它反映该机床允许的加工空间。一般情况下工件轮廓尺寸应在加工空间的范围之内，个别情况下工件轮廓可大于机床的加工范围，但工件的加工区域必须小于加工空间。

4) 回转轴的转角范围 转角范围是指回转坐标轴可控制的摆角区间。对于具有回转坐

标轴的数控机床，其转角的大小将直接影响加工零件空间部位的能力。

5) 刀库容量和换刀时间 刀库容量和换刀时间会影响数控机床的加工效率。刀库容量是指刀库内所能存放刀具的数量。大容量的刀库相对于小容量的刀库，在选刀时占用的时间长。一般中小型加工中心的刀库容量在 16 ~ 60 把之间，大型加工中心的刀库容量达到 100 把以上。

换刀时间是指具备自动换刀系统的数控机床，刀具交换机构将主轴上的刀具与刀库中下一个工步需用的刀具进行交换所用的时间。目前国内加工中心的换刀时间由原来的 10 ~ 20s，缩短为 1 ~ 5s。

1.2.3 数控机床总体设计要求

数控机床总体设计包括系统设计（含数控装置的功能设计、元件和部件设计、程序设计及系统的总体结构设计）、逻辑设计（含运算器的设计、控制器设计及电路设计）、机床主机的结构设计。数控机床的结构设计要求可归纳为以下几个方面：

- a) 具有最大的切削功率，高的机床动、静态刚度和良好的抗振性能；
- b) 具有较高的几何精度、传动精度、定位精度和热稳定性；
- c) 具有实现操作自动化的结构部件。

对于机床加工性能的要求包括机床工作范围要更广泛、机床加工精度要高和工作速度要快；对于机床的刚度要求，应合理选择结构件的结构形式、采取补偿构件变形的结构措施和进行合理的结构布局以提高刚度；对于抗振性的要求，应采取的措施是减少机床的内部热源、提高机床的静态刚度和增加结构件的阻尼；对于机床低速运动的平稳性和运动精度的要求，应考虑降低执行部件的质量、减少动、静摩擦系数和选取高传动刚度；对于数控机床热稳定性的要求，应采取的措施是减小内部热源的发热量、改善散热和隔热条件、合理设计机床的结构和布局；对于人-机关系的要求是噪声、漏油等都必须符合环境要求，尽可能给操作者提供一个干净、舒适的工作环境；对数控机床的经济效益的要求是机床成本要低，生产效率要高；而且数控机床的可靠性要高，否则一台数控机床的故障，有可能造成一条自动生产线全线停产。

1.3 数控机床的分类

数控机床的种类繁多，根据数控机床的功能和组成的不同，可以从多种角度对数控机床进行分类。

1.3.1 按刀具与工件相对运动轨迹分类

1. 点位控制系统

它的特点是刀具相对工件的移动过程中，只能够实现从一个位置（坐标点）到另一个位置（坐标点）的精确运动，在运动和定位过程中不进行任何加工工序，即不进行切削加工，数控系统只需要控制行程的起点和终点的坐标值，而不控制运动部件的运动轨迹，因为运动轨迹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不需要保持任何的联系。最典型的点位控制数控机床如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机、

数控弯管机和数控测量机等都采用此类系统，如图1-7a所示。

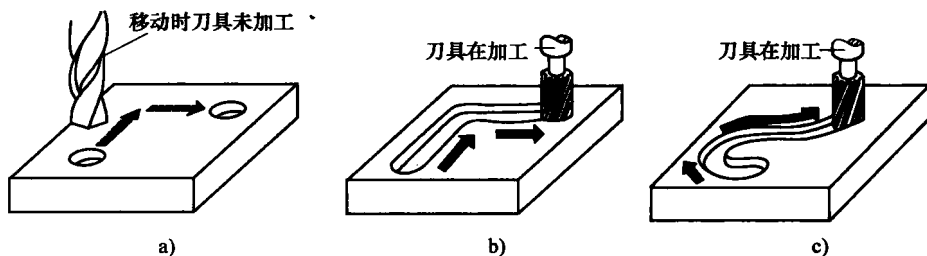


图1-7 按运动轨迹分类

a) 点位控制 b) 直线控制 c) 轮廓控制

2. 直线控制系统

这类控制系统的特点是机床的运动部件不仅可以实现由一个坐标位置到另一个坐标位置的精确移动和定位，而且能实现平行于坐标轴的直线进给运动并可对工件进行切削，或控制两个坐标轴实现斜线的进给运动。即除了控制起点与终点之间的准确位置外，而且要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线，并能控制位移速度，因为这类数控机床的刀具在移动过程中要进行切削加工，如图1-7b所示。也可将点位控制系统和直线控制系统结合在一起成为点位/直线控制系统。采用这类控制系统的机床有数控铣床、数控镗床等。

3. 轮廓控制系统

轮廓控制系统也称连续控制系统。其特点是机床的运动部件能够实现两个或两个以上的坐标轴同时进行联动控制。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，即要求控制运动轨迹，将零件加工成在平面内的直线、曲线表面或在空间的曲面，如图1-7c所示。轮廓控制比点位控制和直线控制更为复杂，需要在加工过程中不断进行多坐标轴之间的插补运算，实现相应的速度和位移控制。很显然轮廓控制包含了点位控制和直线控制的功能。

轮廓控制系统能加工曲面、凸轮、锥度等复杂形状的零件。数控铣床、数控车床、数控磨床、数控加工中心和各类数控切割机床是典型的轮廓控制数控机床，这类数控机床具有两个坐标或两个坐标以上的联动功能，不仅有刀具半径补偿、刀具长度补偿功能，而且还具有机床轴向运动误差补偿，丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能。

1.3.2 按伺服系统控制方式分类

1. 开环伺服系统

这种控制方式不带位置反馈装置。数控装置程序的指令信号，经控制运算发出指令脉冲，使伺服驱动元件转过一定的角度，并通过传动齿轮、滚珠丝杠螺母副，使执行机构（如工作台）移动或转动。这种控制方式没有来自位置测量元件的反馈信号，对执行机构的动作情况不进行检查，指令流向为单向，因此称为开环控制系统。

这种控制系统的特点是系统简单、调试维修方便、工作稳定、成本较低。

由于开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性，因此控制精度较低。目前国内多用于经济型数控机床，以及对旧机床的改造。