

加工中心 结构、调试与维护

沙杰 等编著



加工中心结构、调试与维护

沙杰 刘战术 李焕锋 常晓玲 编著
薛东彬 朱登杰 陈兴洲
李华 主审



机械工业出版社

本书对加工中心的结构、调试与维护技术进行了详细的介绍。全书分为四个部分：加工中心的机、电、液及检测装置的结构及特点，加工中心PMC的软件结构及开发方法，加工中心的安装、调试方法，加工中心的故障诊断及维护方法。

本书简明扼要，深入浅出，采用的实例翔实可靠，是一本针对性和实用性较强的教材。本书可作为数控技术专业、机电一体化专业和机械制造专业的大中专教材，可作为初、中级数控技术人员的培训用书，也可作为从事数控机床设计和数控加工的工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

加工中心结构、调试与维护/沙杰等编著. —北京：机械工业出版社，2003.1

ISBN 7-111-11386-1

I. 加... II. 沙... III. ①加工中心—结构②加工中心—调试③加工中心—维护 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 103124 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：邓海平 冯春生 版式设计：张世琴 责任校对：申春香

封面设计：鞠 杨

责任印制：付方敏

北京市密云县印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

2003 年 2 月第 1 版 · 第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ · 11.75 印张 · 285 千字

0 001—4 000 册

定价：17.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面防伪标均为盗版

前 言

随着技术的进步与发展,加工中心的应用已日趋普及,现代的数控加工技术使得机械制造过程发生了显著变化,对技术人员的要求也越来越高。为适应数控技术教学和人才培养的需求,我们编写了《加工中心结构、调试与维护》一书。本书力求紧跟现代加工技术的步伐,以介绍实用技术为主,系统阐述加工中心的基本结构、调试与维护方法。

本书主要供高等院校机电类专业开展数控技术教学使用,也可供从事数控加工的工程技术人员使用。

本书作为教材,以理论联系实际为指导、以技术应用为目标,把熟悉结构原理和掌握应用作为学习的基本要求。在内容上力求体系完整、通俗易懂、具有实际指导意义。全书共分八章,主要内容有:数控机床及相关学科的发展概况,加工中心的机械结构,加工中心的控制系统,加工中心 PMC 的软件结构及开发方法,加工中心的调试、维护与保养。

本书由沙杰等人编著。参加编写的有:沙杰(第一章、第七章),李焕锋(第二章),刘战术(第三章),薛东彬(第四章),陈兴洲(第五章),常晓玲(第六章),朱登杰(第八章)。

本书由李华教授审定,特此致谢。

本书在编写过程中参阅了国内外同行有关的资料、文献和教材,得到了许多专家和同行的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平和时间所限,书中定有不少错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2002 年 9 月

目 录

前言		第五节 编码器	74
第一章 概述	1	第五章 加工中心的气、液压系统	77
第一节 数控机床发展现状与发展趋势	1	第一节 概述	77
第二节 加工中心型态演化过程	3	第二节 典型加工中心的气、液压系统	79
第三节 加工中心控制系统发展	5	第三节 加工中心的冷却、润滑系统	85
第二章 加工中心典型部件	12	第六章 加工中心可编程控制器的 软件结构及开发方法	90
第一节 概述	12	第一节 加工中心 PMC 及其动作要求	90
第二节 加工中心主轴系统	13	第二节 NC-PMC 之间的实时数据联系	93
第三节 加工中心进给传动系统	19	第三节 PMC 软件总体结构及基本功能 程序段	104
第四节 加工中心支承系统	22	第四节 加工中心的典型子模块举例	112
第五节 加工中心刀库及自动换刀装置	25	第五节 PMC 软件的开发与调试步骤	128
第六节 回转工作台及工件交换系统	29	第七章 加工中心的安装和调试	131
第三章 加工中心电气控制系统	34	第一节 加工中心的安装	131
第一节 CNC 加工中心电气控制系统的 总体结构	34	第二节 加工中心调试与性能检验	136
第二节 INCON-M40F 数控系统	36	第三节 加工中心的精度检验	143
第三节 加工中心的主轴驱动系统	40	第八章 数控机床的维护	158
第四节 加工中心的伺服驱动系统	49	第一节 概述	158
第五节 可编程控制器的逻辑电路	57	第二节 故障诊断的方法	164
第四章 常用位置检测装置	64	第三节 数控机床机械故障诊断	170
第一节 概述	64	第四节 控制系统故障诊断	175
第二节 光栅	65	第五节 伺服系统故障诊断	176
第三节 感应同步器	68	参考文献	180
第四节 磁栅	71		

第一章 概 述

第一节 数控机床发展现状与发展趋势

从 1952 年世界上第一台数控机床出现到新世纪开局之年,数控机床随着电子、计算机、材料、信息等技术的发展而得到了质的飞跃。从臃肿、笨拙、功能简单的数控铣床已发展到精致、灵巧、功能齐全的各种数控机床。从开始的纯军事用途发展到如今,已应用到各个制造领域。数控机床已从稀有到普及。发达国家数控机床年产值的比重迅速超过传统机床,成为这些国家机床工业的主导产品。如 1997 年日本的数控机床产量为 59568 台,产值 73.57 亿美元,产值数控化率 73.69%;德国则分别为 22960 台、53.10 亿美元和 78.23%;美国为 19414 台、26.81 亿美元和 53.51%。以我国为例:根据国家机械工业局的统计资料,1998 年底我国拥有各类数控机床 13 万台。2000 年,我国数控机床的年产量达到 1.4 万多台,可供品种超过了 1300 种,而且以每年 200 种左右的速度在增加。

如今,随着市场竞争的日趋激烈,对数控机床的要求也越来越高,数控机床的变化和发展越来越快,其主要表现在以下几个方面:

一、推进以“三高”为特征的全面高速化

“三高”是指高的主轴转速、高的快速移动速度和高的换刀速度(即短的换刀时间或刀架转位时间)。高的主轴转速将能提高切削效率和改善加工表面的质量,高的换刀速度能有效地缩短辅助时间,而高的快速移动速度不仅能减少非切削工时,且能相应地提高切削进给速度,从而有利于提高切削效能,所以全面高速化能大大强化机床的工作效能。随着近年市场竞争加剧,促使发展全面高速化的趋势更为明显。图 1-1 所示为有关数据。

二、机床结构创新日趋活跃

数控机床随着技术的进步和市场需求,其结构有了较大的变化。归纳起来,机床结构的变化主要体现在新颖的布局及运动方式、复合加工的新型式和新材料的应用等三个方面。

1. 新颖的机床布局及运动方式

1) 并联杆系机床又称六条腿机床或虚拟轴机床,是 1994 年才出现的新概念机床。由于其构件只承受拉、压力,不承受引起变形较大的弯矩和扭矩而具有较高的刚度;运动构件的质量小,因而易实现高速和高加速度,加上结构简单、制造容易而引起广泛的重视。

2) 多轴高生产率数控铣床,是一种对小型复杂零件进行中、大批量高效加工的新构思铣床。它是加工中心与组合机床自动线的折中方案,既有加工中心的柔性,又有接近自动线的高产量的特性。如瑞士 WILLEMIN—MACODEL SA 公司生产的 W—138 多轴数控铣床,它有 8 根垂直主轴(其中 2 根可倾转 $0\sim 90^\circ$)和 8 根水平主轴,换刀时间小于 1s(25 号刀具锥柄)。工件装夹在 $\phi 180\text{mm}$ 转台上,有三个直线移动轴和一个 C 轴。这种结构可进行五面加工而不需重新装夹工件,减少了工件装夹和调整次数,提高了加工精度。

2. 复合加工发展势头方兴未艾

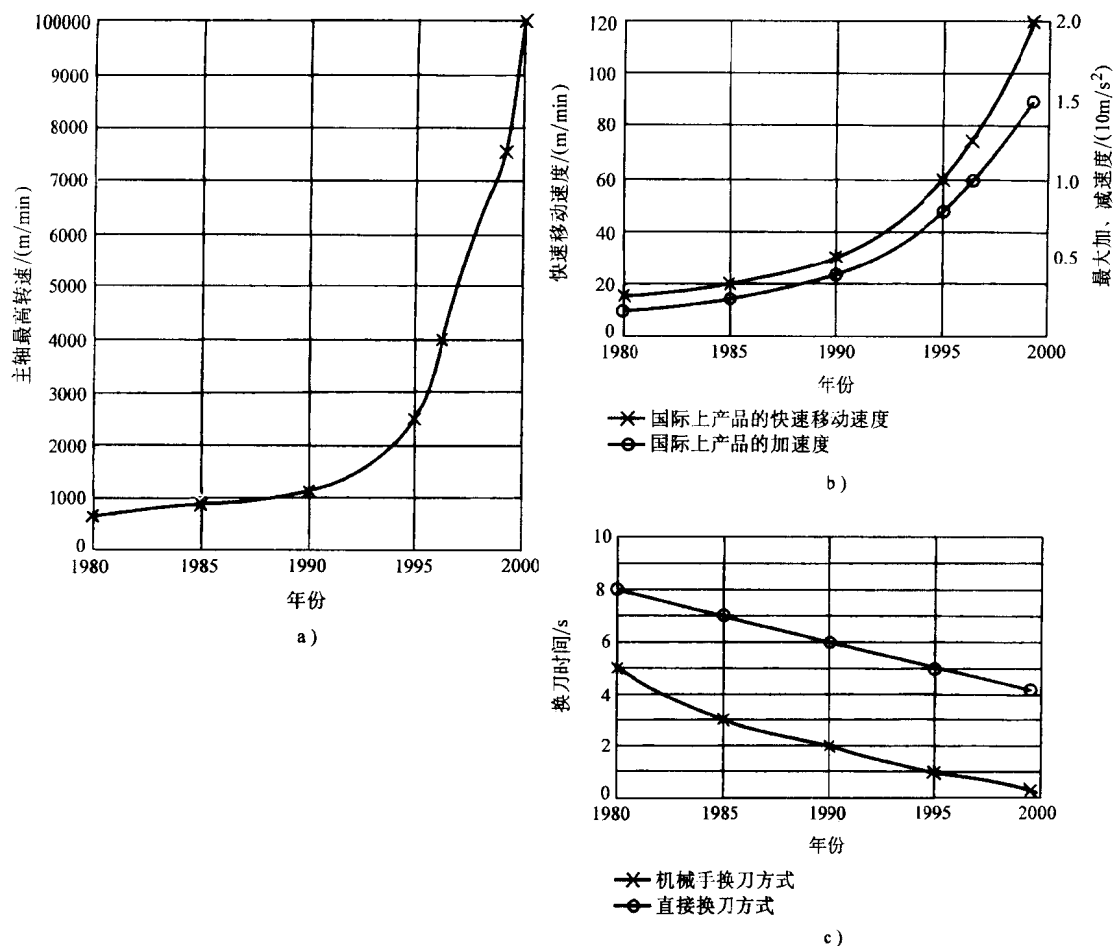


图 1-1 中、小型加工中心高速化发展历程

a) 主轴最高转速 b) 快速移动速度及加速度 c) 换刀时间 (刀-刀), 40 号刀柄刀具

复合加工，即在一台机床上工件一次装夹便可完成多工种、多工序的加工。它具有工件一次安装后进行车削、钻削、攻螺纹和铣削的功能，从一个工序到下一个工序工件的传送是自动的，在加工操作过程中工件的装卸也都是自动的。其主要优点是：

- 1) 提高了零件加工精度；
- 2) 降低了制造每个零件所需要的成本；
- 3) 减少了不创造价值的辅助时间；
- 4) 减少了整个车间的占地面积；
- 5) 降低了功率消耗；
- 6) 提高了中小批量生产的产量；
- 7) 提高了生产的柔性。

复合加工技术发展很快，而且现已相当普遍。机床复合加工的范围正由常用的车、铣加工复合，扩大到铣削和激光精细雕刻的复合加工（如德国 DMG 公司生产的 DMU 60L），以及车、铣、磨等复杂加工的复合加工。

3. 人造花岗岩在精密机床上应用广泛

高精度的车床和磨床,为了提高其刚性、抗振性和热稳定性,其床身趋向于应用人造花岗岩(树脂混凝土)。例如有试验资料表明,用混凝土床身和立柱构成的立式加工中心与全部用铸铁材料制成的立式加工中心相比,阻尼比平均提高 40%~90%,噪声约降低 10dB,延长刀具寿命一倍以上。温升和热变形的试验条件为在 2h 内由 1000r/min 逐步增速至 5000r/min,并以运行 9min、停车 1min 的规范连续运行 6h,测出立柱前侧中部温升:前者为 2.5℃,后者为 6℃,立柱顶端向后倾移前者为 10 μ m,后者达 31 μ m。正因为树脂混凝土具有如此的优点,故尽管它的工艺较铸铁件复杂,但仍然受到了精密机床制造厂的欢迎。

三、适应环保要求的干切削技术广泛应用

切削过程中应用切削液可提高刀具寿命,改善加工表面质量和利于排出切削热而不致于引起机床的热变形,但是在高速切削过程中切削液的飞溅和形成的雾状液滴将污染操作现场,影响操作者健康,而变质切削液的更换排放,又会环境影响,因而发展满足环保要求的干切削技术是绿色制造的一项重要内容。干式切削是用专用空压机供给 -30℃ 冷风直接冷却加工部位的一种切削方法,它采用高压空气冷却和排除切屑,免去了使用大量润滑液的诸多麻烦。

四、充分运用 IT 技术,大力发展开放式机床

随着手机电话、网络通信技术的日益普及,为了做好售后服务,一些数控机床制造商将这些先进的通信工具用于机床行业。如 FAUNC、三菱电机等许多公司生产的机床都装有远程维护系统。可以通过网络对用户的机床运行进行监控、故障诊断,并实时向用户提出解决方法。用户在生产中的技术疑难,也可通过网络随时向公司咨询,技术人员当即作答,必要时去现场解决。另一方面,制造机床的生产现场都连通成 LAN(局域网),从市场调查、产品设计、加工装配到检验包装、售后服务等每一运行状况都通过网络进行交流,真正实施并行工程。

第二节 加工中心型态演化过程

加工中心的型态会因环境条件的发展而改变,就如同生物适应环境变迁而演化一样。本节以卧式加工中心为例,说明加工中心型态的演化过程。

一、卧式加工中心的基本型态

卧式加工中心的 Z 轴和 X 轴配置可以有六种配置型态,其基本结构如图 1-2 所示。其中图 1-2d 这一型流行了近 20 年,甚至有许多人以为它是标准型,以为卧式加工中心一开始出世时就是这样,其实在卧式加工中心开始应用时,其结构型态大多是定柱式,如图 1-2a 所示,以便操作与观察。直到自动化程度提高,完全不需要人手介入以后,Z 轴与 X 轴的移动才分开配置,以取得全行程支撑与排屑的便利性。

在这段期间,最合适的导轨是滑动式,需有小间隙才能顺畅滑动,为避免轴向推力与切削阻力产生偏转力矩,立柱纵向移动的倒 T 型加工中心结构拥有最大的优势,如图 1-3 所示,直到滚动导轨实用化以后,情形才开始转变。

二、加工中心型态转变的关键

滚动导轨的发展促成了加工中心切削高速化的进展。但在初期,切削速度的有限提升并不会衍生什么问题。直到大量的切屑与热量严重地干扰到加工精度稳定性时,加工中心结构

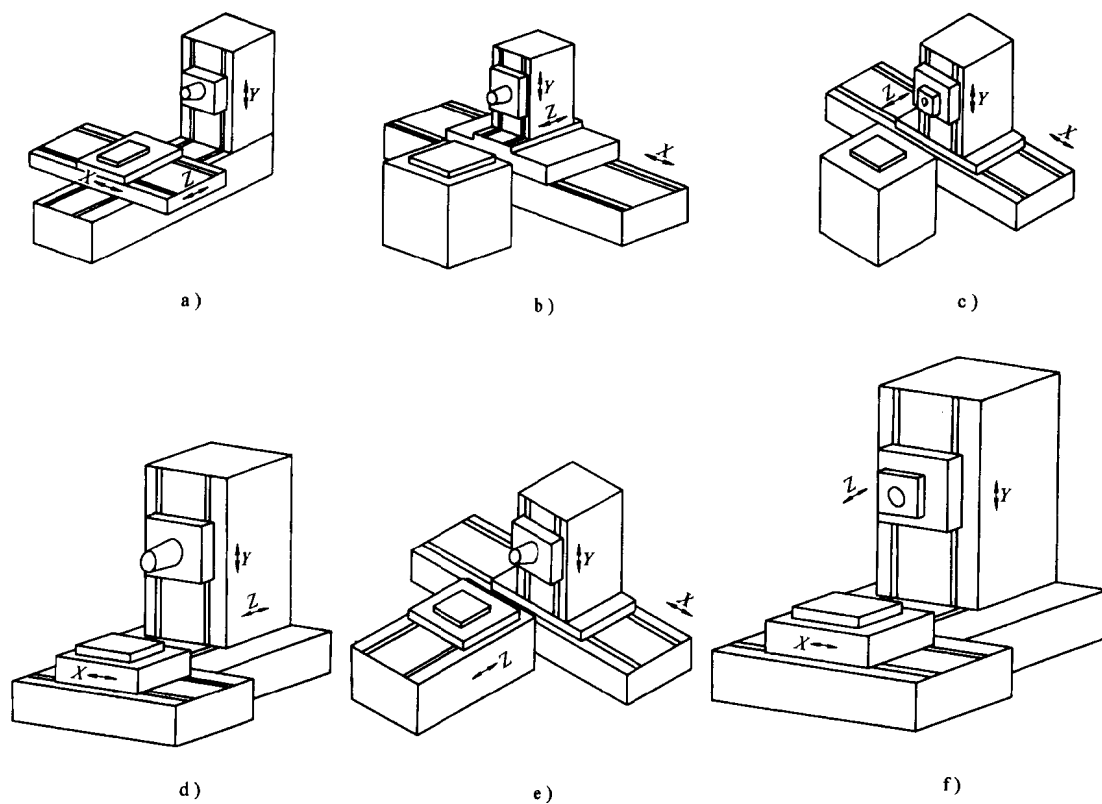


图 1-2 卧式加工中心的型态配置

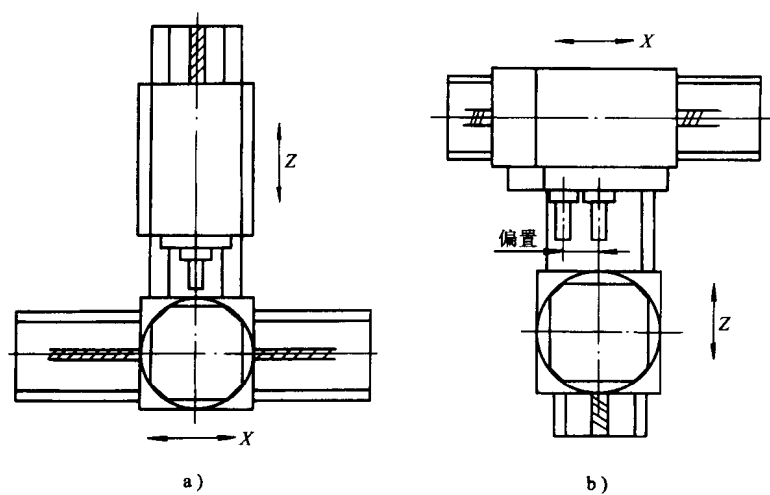


图 1-3 立柱纵向移动与横向移动的比较

a) 倒 T 型 b) T 型

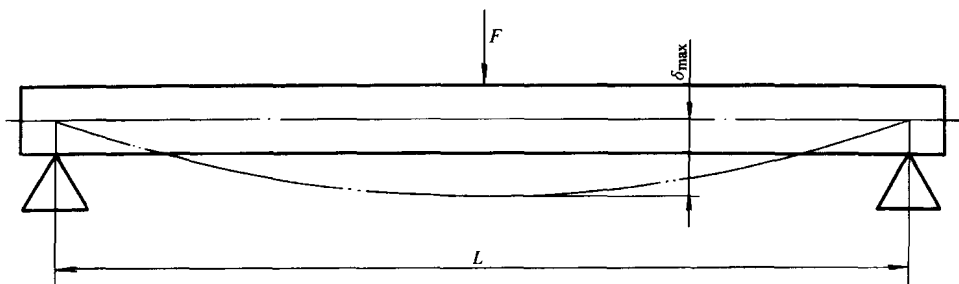
型态才开始面临考验。

定柱式结构弱点：一是有两坐标轴采用了重迭布局，造成两坐标方向精度相互影响；二是不能实现全行程支撑，总体结果造成加工精度保持性不好。倒 T 型的结构弱点，就在工

作台与立柱底座间的排屑槽。排屑槽将底座切开成前后两块，因此单侧聚集的切屑热量与变形也因加工中心的高速化而日趋严重。在这种情况下，任何可以减轻机床热变形量的结构，都值得考虑。此时，机床热对称结构或可以迅速移除热源的配置都得以应用，加工中心的结构型态自此开始转变，T型结构得以推广应用。

三、T型结构特点

T型结构的加工中心显著特点是底座的加厚与立柱的横向移动。立柱的横向移动可实现加工过程的全行程支撑，而加工中心底座的加厚对加工精度有极大的影响。加厚底座的初始本意，是要带走热量、带走切屑。但因刚性的提高与热变形量的减少，加上三点支撑的作用，综合以后达到了精度的全面提升。所有这一切都源于底座的加厚。但厚底座的优点在支撑跨距拉大以后会逐渐减弱，如图 1-4 所示。所以 T 型结构只适用于小型机型。



图中， $\delta_{\max} = \frac{FL^3}{48EI}$

L/mm	400	500	630
$\delta_{\max}/\text{mm}$	1	1.95	3.91

图 1-4 支点跨距大小的变形量比较

T型结构虽具有许多优点，但 T 型结构成本高很多，所获得的效益并不足以弥补提高的成本，所以在初期应用厂家很少。直到 1994 年 CPU 升级以后，控制器运算处理速度的提高，对机床加减速的控制能够收放自如，足以达到高精度，高表面质量轮廓的高速铣削，大幅度降低模具等行业的人工抛光工作以后，效能的提升大过成本的增加，T 型结构的优势才算齐备成熟，厂家应用得以普及。

T 型结构不会是卧式加工中心的最终结局。虽然目前在小工件的轮廓铣削上，它的表现比其他结构型态都好，但仍有需要改善的地方。立柱的惯性和其他两进给轴相比太过于悬殊便是一例。要充分发挥加工中心高速化的效能，首要任务是提高机床的加减速能力，其次是降低惯性。环境条件还会再改变，因此卧式加工中心的结构型态也会继续演化下去。

第三节 加工中心控制系统发展

一、数控系统的现状与发展趋势

数控系统是数控机床的控制指挥中心，机床的各个执行部件在数控系统的统一指挥下，有条不紊地工作，自动地按给定程序进行机械零件加工。数控系统随着电子技术的发展而发展，先后经历了电子管、晶体管、集成电路、小型计算机、微处理器及基于工控 PC 机的通用型系统六代。其中前三代称为硬线联接数控，简称 NC 数控，目前已被淘汰；后三代称为

软件数控,也称 CNC 系统。CNC 系统的核心是计算机,即由计算机通过执行其存储器内的程序,来实现部分或全部数控功能。也就是说 CNC 系统由硬件和软件两大部分组成,硬件是软件活动的舞台,软件是整个系统的灵魂,整个 CNC 系统的活动均依靠系统软件来指挥。软件和硬件各有不同的特点:软件设计灵活,适应性强,但处理速度慢;硬件处理速度快,但成本高。

20 世纪 80 年代以来,国际上数控技术发展很快,形成了一批著名的专业生产厂。国际上数控装置的 80%~90% 由这些专业生产厂生产,如日本的 FAUNC、三菱电机、美国的 AB 公司、德国的西门子、Bosch、意大利的 FIDIA、西班牙的 FAGOR 和法国的 NUM 等。数控技术的进步突出地表现在数控装置性能大为提高,总结起来可概括为以下三点:

1. 数控系统智能化

数控系统的智能化包括在数控系统中各个方面:为追求加工效率和加工质量方面的智能化,如加工过程的自适应控制,工艺参数自动生成;为提高驱动性能及使用连接方便的智能化,如前馈控制、电机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型、自整定等;简化编程、简化操作方面的智能化,如智能化的自动编程、智能化的人机界面等;还有智能诊断、智能监控等。

2. 数控系统结构开放式设计

20 世纪 90 年代,数控系统完成了 16 位机向 32 位机的转变,以及伺服驱动从直流式向交流全数字式的转变,系统体系结构从封闭转向开放,从而使数控系统可充分利用计算机技术的丰富资源,能根据控制对象的要求迅速、灵活地更换软硬件,并能及时吸收新技术,使得数控技术发展步伐加快,开发周期缩短。著名的数控系统生产厂家,平均每三年就有一种新型号数控系统产品诞生。数控机床的应用也从解决疑难零件加工、批量零件自动化生产,到进入家庭作坊,越来越广泛地应用到各种场合,同时也不断对数控系统的软硬件提出新的要求。集中地表现在要求有开放式结构的数控系统、适应技术发展的用户自己开发的功能。

开放式数控系统的基本结构有硬件平台、软件平台、一个用户可扩展的软硬件空间和应用程序开发环境。硬件平台:由数控系统生产厂提供,或是选择通用的标准模块,但其配置可由用户在较大范围内选择,如控制轴数、控制方式、各种外部设备等;软件平台:由数控系统生产厂提供,或 CNC 软件开发商提供,它是系统的核心软件,即 CNC、PLC 的基本软件,同时提供良好的用户开发应用软件的环境;应用软件:用户在数控系统生产厂家提供的软硬件平台的基础上,开发专用软件、硬件,实现用户要求的控制功能。

以 PC 为基础的 CNC 系统结构方式有以下三种:

1) 把数控系统生产厂开发的数控专用硬件和软件装到 PC 的母板上,用 ISA 或 PCI 总线,保留原 PC 的整体形象,如图 1-5 所示。

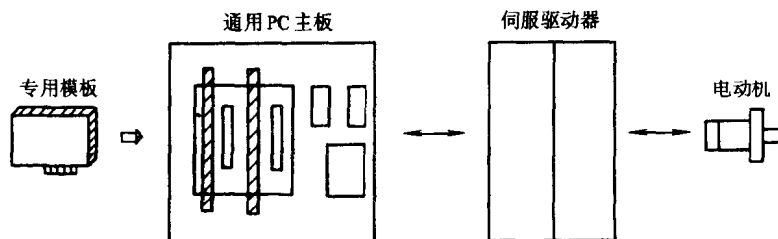


图 1-5 数控专用模板装入 PC 母板的结构

2) 数控系统生产厂，在自己生产的数控系统中嵌入 PC 机的主板，这种嵌入式结构，展现的是生产厂的整体结构特点，使用生产厂的专用总线或混合总线结构，如图 1-6 所示。

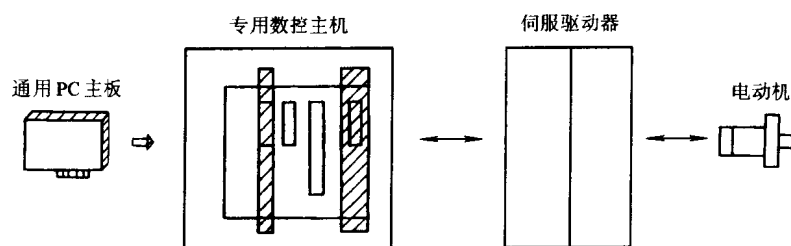


图 1-6 PC 主板嵌入数控系统的结构

3) 使 PC 经光缆，用高速串行口总线（或 ARCNET 等）和数控系统生产厂开发的专用硬软件进行通信，如图 1-7 所示。

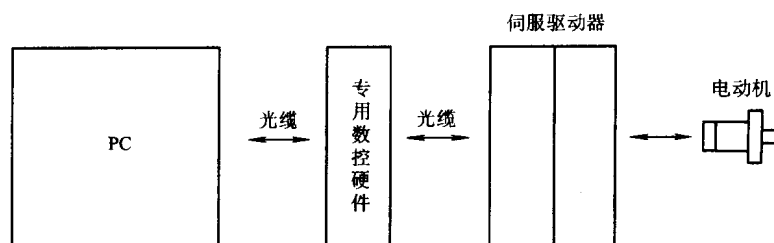


图 1-7 PC 与数控专用硬软件经光缆网络通信的结构

3. 数控系统网络功能增强

从 20 世纪 90 年代初，数控机床的数控系统开始采用基于 PC 机开放式结构以来，通过因特网可以实现远程通信，使用户与生产厂商的联系更加快捷，更能满足用户的需要。目前，数控机床已发展成采用 PC 和 NC 融合的数控系统，外界的信息可很快地反映到机床上，建立起与用户快速的反映系统。

二、伺服系统的现状与发展趋势

数控机床技术水平的提高，在很大程度上依赖于进给伺服系统和主轴伺服系统特性的改善及功能的扩充。当前这些系统都是由电动机作驱动部件的电气传动系统。下面分别介绍数控机床对进给伺服系统和主轴系统的要求，它们的现状以及发展动向。

1. 机床用进给伺服系统

为了提高数控机床的性能，对机床用进给伺服系统提出了很高的要求。由于各种数控机床所完成的加工任务不同，所以对进给伺服系统的要求也不尽相同，但大致可概括为以下四个方面：

(1) 高精度 为了保证零件加工质量和提高效率，就要保证数控机床的定位精度和加工精度。因此，在位置控制中，要求有高的定位精度；而在速度控制中，要求有高的调速精度、强的抗负载扰动的能力，即要求静态和动态速降尽可能小。

(2) 快响应 为了保证轮廓切削形状精度和加工表面质量，除了要求有较高的定位精度外，还要求系统有良好的快速响应特性，即要求跟踪指令信号的响应要快，位置跟踪误差

(位置跟踪精度)要小。

(3) 宽调速范围 它是指在额定负载时电动机能提供的最高转速与最低转速之比。对于一般的数控机床而言,要求进给伺服系统能在 $0\sim 24\text{m/min}$ 下都能正常工作。

(4) 低速大转矩 根据机床的加工特点,大都是在低速时进行重切削,即要求在低速时进给伺服系统有大的转矩输出。

为了满足上述四点要求,对进给伺服系统的执行元件——伺服电动机也相应地提出了如下要求:

1) 电动机在整个转速范围内都能平滑地运转,转矩波动要小,特别在低速时应仍有平稳的速度而无爬行现象。

2) 电动机应有一定的过载能力,以满足低速、大转矩的要求。

3) 为了满足快速响应的要求,电动机必须具有较小的转动惯量和大的堵转转矩、尽可能小的机电时间常数和起动电压。

4) 电动机应能承受频繁的起动、制动和反转。

机床进给伺服系统,一般是由位置控制、速度控制、伺服电动机、检测部件以及机械传动机构五大部分组成。但在习惯上,通常是将位置控制部分与数控装置做在一起,而且也不包括机械传动机构。因此,习惯上所说的进给伺服系统,只是指速度控制、伺服电动机和检测部件三部分。而且,将速度控制部分称之为伺服单元或驱动器。按照伺服系统的结构特点,进给伺服系统通常有四种基本结构类型:开环、闭环、半闭环及混合闭环。在机床中应用最广泛的是半闭环结构。

机床进给伺服系统在经历了开环的步进电动机系统、直流伺服系统两个阶段之后,已进入了交流伺服系统阶段。目前,在中小功率范围内,高性能的交流伺服系统的交流电动机主要采用异步电动机和永磁同步电动机两种。一般来说,异步电动机多用在功率较大、精度要求较低、投资少的场合;而永磁同步电动机则在精度要求高、容量较小的场合得到了广泛的应用。所以,在机床进给伺服系统中,多用永磁同步电动机。

交流伺服单元又有模拟式和数字式之分。早期的伺服单元全是模拟式,目前,国外大都采用数字—模拟混合或全数字式,而国内尚处于实验阶段,还没有做到商品化。模拟式和数字式的伺服单元各有其优缺点。模拟式伺服单元一般工作速度快,系统的频率范围可以做得很宽,这使系统具有快速的动态响应性能和很宽的调速范围。其缺点是难于实现复杂的控制方法,并且器件多,体积大,不易调试,还存在着零点漂移等问题。数字式伺服单元的优点是用软件编程,易于实现复杂的算法,而且柔性好,有时几种控制方法之间的改变只需改变软件即可实现,而不需要做硬件上的改动,硬件电路一般比较简单,可以设计得相当紧凑。由于参数的设定和调节不必通过调节电位器来进行,所以实现的重复性好,更易批量生产。但由于高性能的电动机控制算法计算量大,单片微处理机的执行速度还不够快,以及低成本的模/数(A/D)转换时间长,因此,实用的全数字化伺服单元的电流环响应频带一般很难做到足够宽,即使用高速数字信号处理器(DSP),或采用双CPU结构以提高计算速度,使系统的电流环采样周期达到 $100\mu\text{s}$ 左右,也无法与模拟式系统相比。当然随着微电子技术的发展以及控制算法的改进,这些缺点是可以克服的。而介于两者之间的数模混合系统,其电流环(内环)用硬件电路实现,而速度环、位置环(外环)用软件实现,同时微处理器还可用来实现系统的运行监控、接收数字/模拟给定信号以及与外部设备进行通信联络等功能。

机床进给伺服系统所用的检测部件主要有旋转变压器和脉冲编码器两种，在全闭环时用作位置检测的还有光栅等。它们的性能直接影响到伺服系统的性能。目前在机床上应用最多的是脉冲编码器。

用于机床的位置测量并已得到广泛应用的有光栅、感应同步器、容栅、磁栅、球栅和激光。它们的检测精度及其代表厂商如表 1-1 所示。

表 1-1 数控机床常用检测系统精度

测量系统名称	信号周期（节距）/ μm	分辨率/ μm	精度/ μm	代表厂商
光栅	20	0.1	± 2	德国 HEIDENHAIN
感应同步器	2000	0.1	± 20	美国 FARRAND
磁栅	200	0.1	± 10	日本 SONY
容栅	50	0.1	± 10	瑞士 TRIMOS
球栅	12.7	0.1	± 30	英国 NEWALL
激光 He-Ne	$\lambda = 0.6328$	$\lambda/16$		美国 HP

从表 1-1 可见，除激光外，光栅尺的分辨率和精度均高于其他四种测量系统，而在系统的稳定性、可靠性、使用方便及价格方面均比激光系统有着明显的优势。因此，在 20 世纪 90 年代，国际市场上的数控机床（指闭环控制结构），包括三坐标测量机所采用的测量系统 80% 以上都使用光栅。高精度的光栅测量系统，其分辨率可做到纳米级，精度可达 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 。

2. 机床用主轴伺服系统

机床的主轴系统和进给系统有很大差别。根据机床主传动的工作特点，早期的机床主轴传动全部采用三相异步电动机加上多级变速箱的结构。随着技术的不断发展，机床结构有了很大的改进，从而对主轴系统提出了新的要求，而且因用途而异。在数控机床中，数控车床占 42%，数控钻镗铣床占 33%，数控磨床、冲床占 23%，其他只占 2%。为了满足量大面广的前两类数控机床的需要，对主轴传动提出了下述要求：①主传动电动机应有 2.2~250kW 的功率范围；②要有大的无级调速范围，如能在 1:100~1000 范围内进行恒转矩调速和 1:10 的恒功率调速；③要求主传动有四象限的驱动能力；④为了满足螺纹车削，要求主轴能与进给实行同步控制；⑤在加工中心上为了自动换刀，要求主轴能进行高精度定向停位控制，甚至要求主轴具有角度分度控制功能等。

主轴传动和进给传动一样，经历了从普通三相异步电动机传动到直流主轴传动，而随着微处理技术和大功率晶体管技术的发展，现在又进入了交流主轴伺服系统的时代。交流主轴电动机均采用异步电动机的结构形式，这是因为：一方面受永磁体的限制，当电动机容量做得很大时，电动机的成本会很高，对数控机床来讲无法接受采用；另一方面，数控机床的主轴传动系统不必像进给伺服系统那样要求如此高的性能，采用成本低的异步电动机进行矢量闭环控制，完全可以满足数控机床主轴的要求。但对交流主轴电动机性能要求又与普通异步电动机不同，要求交流主轴电动机的输出特性曲线（输出功率与转速关系）是在基本速度以下时为恒转矩区域，而在基本速度以上时为恒功率区域。

交流主轴控制单元与进给系统一样，也有模拟式和数字式两种。现在所见到的国外交流主轴控制单元大多都是数字式的。

3. 机床进给系统和主轴系统的发展趋势

(1) 控制智能化 随着微电子技术、大规模集成电路制造工艺和计算机技术的发展,高性能的微处理器(MPU)、大规模集成电路(LSIC)芯片、表面安装器件(SMD)等为实现数字化控制提供了硬件基础,不仅使控制电路体积大大缩小,而且通过控制软件可以实现更加灵活、复杂的控制方法,在不增加或很少增加硬件设备的前提下,可满足不同场合的需要,充分体现数字控制高度智能化和柔性化的优点。

(2) 控制方法集成化 在许多国外厂商生产的伺服系统中,将串行通信以及多种控制方法集中应用在一个产品中。如日本 FAUNC 公司在伺服控制中采用高速 DSP (Digital Signal Processor) 进行数值计算来实现“直线性”、“稳定性”和“重复性”。利用前馈控制(Feed Forward)(框图见图 1-8)、插补前钟形加减速以及自动拐角减速方案之后,克服了模拟伺服和一般数字伺服控制的响应滞后现象,响应和精度都得到明显的改善,轮廓误差减到 1/100,而且定位时间也大为缩短,在典型钻削循环中循环时间可减少 30%。因机床工作台具有摩擦、电动机旋转反向造成响应延迟以及圆弧切削在过象限时的凸起,都会造成加工误差,使精度降低。而在最新的数字伺服软件中,考虑到这些因素,利用预补偿来减少这个圆度误差,并实现高速度环增益而无振动。

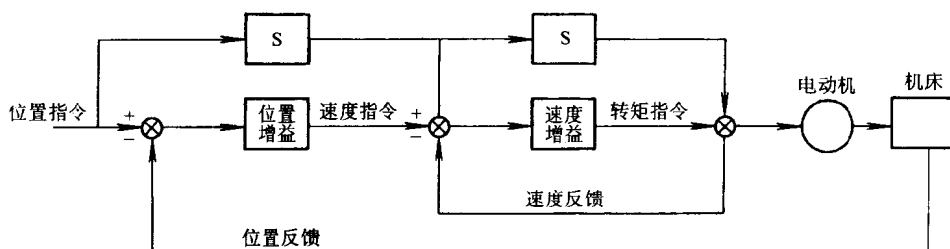


图 1-8 前馈控制框图

(3) 传感器检测技术的发展大幅度提高了伺服系统的性能 传感器检测技术的发展,也极大地提高了交流电动机调速系统的动态响应性能和定位精度。普遍采用的电压型和电流型霍尔传感器具有小于 $1\mu\text{s}$ 的响应时间。交流电动机调速系统一般选用无刷旋转变压器、混合型的光电编码器和绝对值编码器作为位置、速度传感器。随着它们的转速、分辨率的不断提高,系统的动态响应、调整范围以及低速性能也相应提高。传统的具有 A、B 信号的编码器,由于它不能兼顾分辨率和高速度,且信号线太多,从而影响了高精度、高速度的伺服系统的实现。而新型的编码器则克服了上述缺点,如日本 FAUNC 公司生产的脉冲编码器(绝对型),由于它来自 SIN 和 COS 信号的角度转化成数字量,使它具有 4000r/min 的高速以及高达 1000000 脉冲/r 或 65536 脉冲/r 的分辨率。另外,伺服电动机本身也在向高速方向发展,与上述高速编码器配合实现了 60m/min 甚至 100m/min 的快速进给和 1g 的加速度。而在电动机磁路设计上又做了改进,使电动机旋转更加平滑,再配合高速数字伺服软件,可使电动机即使在进给量小于 $1\mu\text{m}$ 微位移的转动时也显得平滑而无爬行。

交流主轴电动机为满足机床加工工艺以及主轴需要,现在都在向高速化方向发展,12000r/min 的转速已是正常的指标。主轴系统所用的位置编码器分辨率也已达 360000 脉冲/r。

(4) 直线电动机的出现打破了传统的结构 直线电动机驱动机构,无论是在国外还是国

内都在积极的研究、探索之中，将会是下一代数控机床的一个显著特色。这是因为至今为止的驱动系统都是由旋转电动机、齿轮箱或联轴器、丝杠和驱动螺母、丝杠支座轴承等构成，而它们都影响甚至限制了机床的性能。例如：电动机本身有最大转速的限制，随着速度的增加，电动机输出转矩下降；在高的加速度下电动机轴会产生扭曲甚至变形和位置误差。齿轮箱则会增加系统惯性、产生间隙；如电动机与丝杠直接连接，则会产生扭曲变形、间隙及滞后；丝杠本身受临界转速、间隙、扭曲、螺距误差、摩擦等影响，且其振动衰减时间很长。而直线电动机驱动机构则没有上述缺点，能达到快速移动（可以达到 $120\text{m}/\text{min}$ 甚至 $200\text{m}/\text{min}$ 的速度）和较短的位置稳定时间，且能进一步减少机床不进行实际切削加工的非生产时间。

第二章 加工中心典型部件

第一节 概 述

一、加工中心的分类

加工中心又称多工序自动换刀数控机床。它把铣削、镗削、钻削等功能集中在一台设备上，一次装夹可以完成多个加工要素的加工。根据加工中心的结构和功能，有以下几种分类形式：

1. 按工艺用途分类

(1) 镗铣加工中心 镗铣加工中心是机械加工行业应用最多的一类加工设备。其加工范围主要是铣削、钻削和镗削，适用于箱体、壳体以及各类复杂零件特殊曲线和曲面轮廓的多工序加工，适用于多品种小批量加工。

(2) 钻削加工中心 钻削加工中心的加工以钻削为主，刀库形式以转塔头为多。适用于中小零件的钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹等多工序加工。

(3) 车削加工中心 车削加工中心以车削为主，主体是数控车床，机床上配备有转塔式刀库或由换刀机械手和链式刀库组成的刀库。机床数控系统多为二、三轴伺轴配制，即 X、Z、C 轴，部分高性能车削中心配备有铣削动力头。

(4) 复合加工中心 在一台设备上可以完成车、铣、镗、钻等多工序加工的加工中心称之为复合加工中心，可代替多台机床实现多工序加工。这种方式既能减少装卸时间提高生产效率，又能保证和提高形位精度。复合加工中心多指五面复合加工中心，它的主轴头可自动回转，进行立卧加工。

2. 按主轴特征分类

(1) 立式镗铣加工中心 立式加工中心的主轴垂直放置，它能完成铣削、镗削、钻削、攻螺纹等多工序加工。立式加工中心多为三轴联动，可实现三维曲面的铣削加工。高档加工中心可以实现五轴、六轴控制。立式加工中心适宜加工高度尺寸较小的零件。

(2) 卧式镗铣加工中心 卧式加工中心的主轴水平放置，一般卧式加工中心由 3~5 个坐标轴控制，通常配备一个旋转坐标轴（回转工作台）。卧式加工中心适宜加工箱体类零件，一次装夹可对工件的多个面加工，特别适合孔与定位基面或孔与孔之间有相对位置要求的箱体零件加工。

二、加工中心机械结构构成

典型加工中心的机械结构主要有基础支承件、加工中心主轴系统、进给传动系统、工作台交换系统、回转工作台、刀库及自动换刀装置以及其他机械功能部件组成。图 2-1 所示为 H400 加工中心结构图。

加工中心基础支承件是指床身、立柱、横梁、工作台、底座等结构件，它构成了机床的基本框架。基础支承件对加工中心各部件起支承和导向作用，因而要求基础支承件具有较高