



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

数控技术

主 编	华中科技大学	廖 效 果
副 编	天 津 大 学	刘 又 午
主 审	南京航空航天大学	朱 剑 英



湖北科学技术出版社

面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

数控技术

主 编	华中科技大学	廖效果
副主编	天津大学	刘又午
主 审	南京航空航天大学	朱剑英

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/廖效果主编. —武汉:湖北科学技术出版社,2000.5
ISBN 7-5352-2469-5

I. 数… II. 廖… III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 20051 号

数控技术

© 廖效果 主 编 刘又午 副主编 朱剑英 主 审

策划组稿:王汉熙 王连弟
责任编辑:王连弟

封面设计:王 梅
督 印:李 平

出版发行:湖北科学技术出版社
地 址:武汉市武昌黄鹤路 75 号

电话:86782508
邮编:430077

印 刷:石首市印刷一厂

邮编:434400

787mm×1092mm 16 开 21 印张
2000 年 7 月 1 日第 1 版

370 千字
2003 年 6 月第 4 次印刷

印数:10 200 - 13 200
ISBN 7 - 5352 - 2469 - 5/TP·54

定价:28.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换



面向21世纪课程教材

高等教育机电类规划教材
“九五”部级重点教材

内 容 提 要

本书是根据全国高等学校机械制造业类专业教学指导委员会“九五”教材建设规划会议(1996年11月)确定的重点教材编写计划和审定的“数控技术”课程的编写大纲,结合教学和科研经验编写而成的。

全书共分六章,介绍了数控机床的基本概念、原理、计算和设计方法,结合机械工程及自动化专业的需要,着重阐述了计算机数控系统的硬件和软件结构、进给伺服系统、位置检测装置、数控加工程序的编制等内容,对于数控机床特有的机械部件和其结构设计也作了扼要的介绍。

本书主要用作高等工科院校机械工程及自动化专业“数控技术”课程的教材,也可用作夜大、函授和职工大学的同类专业的教材,还可供从事数控技术、数控机床设计和研究的工程技术人员参考。

前 言

微电子、自动控制、电子计算机技术和机械制造中的机床设备相结合,形成了一种全新的机械加工装备——数控机床,它根据机械加工工艺的要求,由数控机床的计算机对整个加工过程进行信息处理和控制在实现加工过程的全部自动化。随着微电子、微型计算机、传感器、信息处理和自动控制等技术的发展,数控技术和数控机床也得到了迅速的发展,应用数控技术的数控机床和其他数控装备在生产过程中的使用也越来越普遍。数控技术和数控机床的发展极大地推动了计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)、柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)与自动化工厂(FA)的发展,它已经成为这些机电一体化高新制造技术的技术基础和重要组成部分。

为了适应数控技术和国民经济发展的需要,以及高等工科大学的教学要求,根据全国高等学校机械工程类专业教学指导委员会“九五”教材建设规划会议(1996年11月)确定的重点教材编写计划,我们编写了《数控技术》一书。在编写中,力求反映数控技术和数控机床的系统的基本知识、核心技术与最新技术成就,并兼顾到理论与实际的联系;取材和叙述上要求层次分明和合理,叙述简练,便于教学。

本书共分为六章,第一章介绍数控机床的组成、工作原理、分类和发展及其技术水平。第二章介绍了数控编程方法、实例和编程中的数学处理方法。第三章讲述计算机数控装置的硬件和软件结构,插补和刀补原理,故障自诊断功能以及数控系统中的可编程控制器。第四章是进给伺服系统,对它的类型,伺服电机及调速,现代典型进给伺服系统及位置检测装置作了较为详细的介绍。还对进给伺服系统的结构和特性作了扼要的介绍。第五、六两章讲述了数控机床特有的机械传动结构和数控加工中心的刀具交换装置。本书对数控技术的几个重要内容、核心技术和最新技术成果作了较为系统、深入的叙述。

本书是作为高等工科大学机械工程及自动化专业主干技术基础课程“数控技术”的教科书而编写的,也可供从事数字控制机床设计和研究的工程技术人员参考。

本书由华中科技大学廖效果担任主编,天津大学刘又午、杜君文与华中科技大学李斌担任副主编。杜君文、李佳编写第二、五两章,李斌编写第三章,朱启速编写第六章,廖效果编写第一章,廖效果和李斌合写了第四章。全书由南京航空航天大学朱剑英教授主审。

本书编写时参阅了有关院校、工厂、科研院所的一些教材、资料和文献,并得到许多同行专家教授的支持和帮助,在此衷心致谢。

限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2000年6月

目 录

第一章 数控机床概述	1
第一节 数控机床简介.....	1
第二节 数控机床的控制原理和组成.....	3
第三节 数控机床的分类.....	5
第四节 数控技术及数控机床的发展及其技术水平	11
第二章 数控加工程序编制	27
第一节 概述	27
第二节 数控机床的坐标系	38
第三节 G 指令编程应用与举例	41
第四节 数控加工程序编制举例	47
第五节 程序编制中的数学处理	56
第六节 自动编程	73
第三章 计算机数控装置	80
第一节 概述	80
第二节 CNC 装置的硬件结构	87
第三节 CNC 装置的软件结构.....	101
第四节 CNC 装置的插补原理.....	117
第五节 刀具半径补偿原理.....	139
第六节 CNC 系统故障自诊断功能.....	148
第七节 数控系统中的可编程控制器.....	154
第四章 进给伺服系统	171
第一节 概述.....	171
第二节 伺服电机及其调速	175
第三节 位置检测装置.....	194
第四节 典型进给伺服系统	215

第五节 进给伺服系统的分析	236
第六节 进给伺服系统的特性对加工精度的影响	250
第五章 数控机床的机械传动结构	256
第一节 数控机床的主传动系统	256
第二节 进给伺服系统的机械传动结构	266
第三节 回转工作台与导轨	284
第四节 数控机床的布局	294
第六章 数控机床的刀具交换装置	298
第一节 自动换刀装置的形式	298
第二节 刀库	307
第三节 刀具系统和刀具的选择	312
第四节 刀具交换装置	318
第五节 自动换刀装置实例	321
参考文献	325

第一章 数控机床概述

第一节 数控机床简介

一、数控机床的产生

在机械制造行业中,机床是一种主要的生产设备。机械制造行业的产品,其结构日趋复杂,精度和性能要求日趋提高,因此对生产设备——机床也相应地提出了高效率、高精度和高自动化的要求。

大批大量生产的产品,如汽车、拖拉机与家用电器的零件,为了提高产量和质量,广泛采用组合机床、凸轮控制的多刀多工位机床以及专用的自动生产线和自动化车间进行加工。但是应用这类专用机床和生产设备,生产准备周期长,使更新产品及修改加工工艺的时间较长,费用较高,制约了产品的更新换代。

在制造行业中,单件与小批量产品占到 70% ~ 80%,这类产品的零件一般都采用通用机床来加工,通用机床的自动化程度不高,基本上由人工操作,难于提高生产效率和保证产品质量。特别是一些由曲线、曲面组成的复杂零件,只能借助划线和样板用手工操作的方法来加工,或者利用靠模和仿形机床来加工,其加工精度和生产效率仍会受到很大的限制。

数控机床,就是为了解决单件、小批量,特别是复杂型面零件加工的自动化并保证质量要求而产生的。1952 年美国 PARSONS 公司与麻省理工学院 (MIT) 合作研制了第一台三坐标数控铣床,它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等多方面的技术成果,是一种新型的机床,可用于加工复杂曲面零件。该铣床的研制成功是机械制造行业中的一次技术革命,使机械制造业的发展进入了一个新的阶段。从第一台数控机床问世到现在的半个世纪中,数控技术的发展非常迅速,几乎所有品种的机床都

实现了数控化。数控机床的应用领域也从航空工业部门逐步扩大到汽车、造船、机床、建筑等民用机械制造行业。此外,还出现了金属成型类数控机床:如数控折弯机、数控弯管机、数控步冲机等;特种加工数控机床:如数控线(电极)切割机、数控火焰切割机、数控激光切割机床等;其他还有:数控绘图机、数控三坐标测量机等。特别是相继出现的自动换刀数控机床(即加工中心 Machining Center)、直接数字控制系统(即计算机群控系统, DNC, Direct Numerical Control)、自适应控制系统(AC, Adaptive Control)、柔性制造系统(FMS, Flexible Manufacturing System)、计算机集成(综合)制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)等,进一步说明,数控机床已经成为组成现代机械制造生产系统,实现计算机辅助设计(CAD)、制造(CAM)、检验(CAT)与生产管理等全部生产过程自动化的基本设备。

二、数控机床的特点

数控机床在机械制造业中得到日益广泛的应用,是因为它具有如下特点。

(1)能适应不同零件的自动加工。数控机床是按照被加工零件的数控程序来进行自动加工的,当改变加工零件时,只要改变数控程序,不必更换凸轮、靠模、样板或钻镗模等专用工艺装备。因此,生产准备周期短,有利于机械产品的更新换代。

(2)生产效率和加工精度高、加工质量稳定。数控机床上可以采用较大的切削用量,有效地节省了机动工时。还有自动换速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,使辅助时间大为缩短,而且无需工序间的检验与测量,所以,比普通机床的生产率高3~4倍甚至更高。同时由于数控机床本身的精度较高,还可以利用软件进行精度校正和补偿,又因为它是根据数控程序自动进行加工,可以避免人为的误差,因此,不但加工精度高,而且质量稳定。

(3)能高效优质完成复杂型面零件的加工,其生产效率比之通用机床加工可提高十几倍甚至几十倍。

(4)工序集中,一机多用。数控机床,特别是自动换刀的数控机床,在一次装夹的情况下,几乎可以完成零件的全部加工,一台数控机床可以代替数台普通机床。这样可以减少装夹误差,节约工序之间的运输、测量和装夹等辅助时间,还可以节省机床的占地面积,带来较高的经济效益。

(5)数控机床是一种高技术的设备。因此,机床价格较高,而且要求具有较高技术水平的人员来操作和维修。尽管如此,使用数控机床的经济效益还是很高的。

第二节 数控机床的控制原理和组成

一、数控机床的控制原理

数控机床是一种高度自动化的机床,在加工工艺与加工表面形成方法上,与普通机床是基本相同的,最根本的不同在于实现自动化控制的原理与方法上。数控机床是用数字化的信息来实现自动控制的,将与加工零件有关的信息——工件与刀具相对运动轨迹的尺寸参数(进给执行部件的进给尺寸),切削加工的工艺参数(主运动和进给运动的速度、切削深度等),以及各种辅助操作(主运动变速、刀具更换、冷却润滑油启停、工件夹紧松开等)等加工信息——用规定的文字、数字和符号组成的代码,按一定的格式编写成加工程序单,将加工程序通过控制介质输入到数控装置中,由数控装置经过分析处理后,发出各种与加工程序相对应的信号和指令控制机床进行自动加工。这一数字控制的原理与过程通过下述数控机床的组成将得到更明确的说明。

二、数控机床的组成

如图 1-1 所示,数控机床由以下几个部分组成。

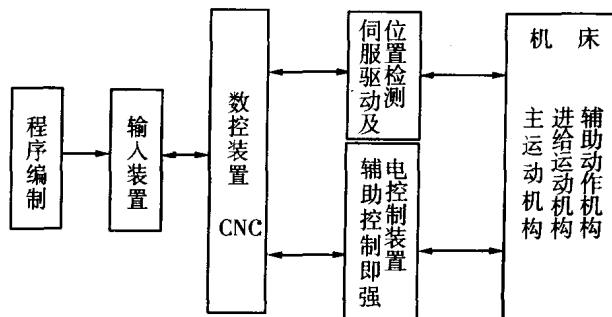


图 1-1 数控机床的组成

(一) 程序编制及程序载体

数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令。在对加工零件进行工艺分析的基础上,确定:零件坐标系在机床坐标系上的相对位置,即零件在机床上的安装位置;刀具与零件相对运动的尺寸参数;零件加工的工艺路线或加工顺序、切削加工的工艺参数以及辅助装置的动作等。这样得到零件的所有运动、尺寸、工艺参数等加工信息,然后用标准的由文字、数字和符号组成的数控

代码,按规定的方法和格式,编制零件加工的数控程序单。编制程序的工作可由人工进行,或者在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成,比较先进的数控机床,可以在它的数控装置上直接编程。

编好的数控程序,存放在便于输入到数控装置的一种存储载体上,它可以是穿孔纸带、磁卡、磁盘等,采用哪一种存储载体,取决于数控装置的设计类型。

(二)输入装置

它的作用是将程序载体上的数控代码变成相应的电脉冲信号,传送并存入数控装置内。根据程序存储介质的不同,输入装置可以是光电阅读机、录放机或软盘驱动器。有些数控机床,不用任何程序存储载体,而是将数控程序单的内容通过数控装置上的键盘,用手工方式(MDI方式)输入,或者将数控程序由编程计算机用通信方式传送到数控装置。

(三)数控装置及强电控制装置

数控装置是数控机床的核心,它接受输入装置送来的脉冲信号,经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种信号和指令控制机床的各个部分,进行规定的、有序的动作。这些控制信号中最基本的信号是:由插补运算决定的各坐标轴(即作进给运动的各执行部件)的进给位移量、进给方向和速度的指令,经伺服驱动系统驱动执行部件作进给运动。其他还有主运动部件的变速、换向和启停信号;选择和交换刀具的刀具指令信号,控制冷却、润滑的启停、工件和机床部件松开、夹紧、分度工作台转位等辅助指令信号等。

强电控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制系统。其主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号,经必要的编译、逻辑判断、功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件,以完成指令所规定的动作,此外还有行程开关和监控检测等开关信号也要经过强电控制装置送到数控装置进行处理。

(四)伺服驱动系统及位置检测装置

伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置(电机)组成,并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个作进给运动的执行部件,都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服驱动系统中,还得使用位置检测装置,间接或直接

测量执行部件的实际进给位移,与指令位移进行比较,按闭环原理,将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动。

(五)机床的机械部件

数控机床的机械部件包括:主运动部件,进给运动执行部件如工作台、拖板及其传动部件和床身立柱等支承部件,此外,还有冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似,但传动结构要求更为简单,在精度、刚度、抗震性等方面要求更高,而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

第三节 数控机床的分类

数控机床的品种很多,根据其控制原理、功能和组成,可以从几个不同的角度进行分类。

一、按数控机床的加工功能分类

(一)点位控制数控机床

这类机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机等,此外印刷电路板钻孔机应算是最简单的点位控制数控机床。点位控制的数控机床用于加工平面内的孔系,它控制在加工平面内的两个坐标轴(一个坐标轴就是一个方向的进给运动)带动刀具与工件相对运动,从一个坐标位置(坐标点)快速移动到下一个坐标位置,然后控制第三个坐标轴进行钻镗切削加工。要求坐标位置有较高的定位精度,为了提高生产效率,采用机床设定的最高进给速度进行定位运动,在接近定位点前要进行分级或连续降速,以便低速趋近终点,从而减少运动部件的惯性过冲和因此引起的定位误差。在定位移动过程中不进行切削加工,因此对运动轨迹没有任何要求。

(二)直线控制数控机床

直线控制数控机床可控制刀具或工作台以适当的进给速度,沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工,进给速度根据切削条件可在一定范围内调变。

直线控制的简易数控车床,只有两个坐标轴,可用于加工台阶轴。直线控制的数控铣床,有三个坐标轴,可用于平面的铣削加工。现代组合机床采用数

控进给伺服系统,驱动动力头带着多轴箱轴向进给进行钻镗加工,它也可以算作一种直线控制的数控机床。

数控镗铣床、加工中心等机床,它的各个坐标方向的进给运动的速度可在一定范围内进行调整,兼有点位和直线控制加工的功能,这类机床应该属于点位/直线控制的数控机床。

(三) 轮廓控制数控机床

1. 平面轮廓加工的数控机床

这类机床有加工曲面零件的数控车床和铣削曲面轮廓的数控铣床,其加工零件的轮廓形状如图 1-2 所示。零件的轮廓可以由直线、圆弧或任意平面曲线(如抛物线、阿基米德螺旋线等)组成。不管零件轮廓由何种线段组成,加工时通常用小段直线来逼近曲线轮廓。

如图 1-2(c)所示,在数控铣床上用圆柱铣刀铣削轮廓侧面时,数控系统控制刀具中心相对工件在单位时间内,同时在两个坐标轴方向上移动 $\Delta x_i, \Delta y_i$, 刀具中心对工件的合成位移 ΔL_i 则由轮廓曲线的等距线上的 I' 点移到点 J' 。从而在工件上加工出一小段直线 IJ , 来逼近轮廓曲线上的 \widehat{IJ} 弧段。

连续控制两个相对位移分量 $\Delta x_i, \Delta y_i$, 便可加工出多段小直线组成的折线来逼近曲线轮廓。进给分量 $\Delta x_i, \Delta y_i$, 要根据: ①合成进给速度, ②单位时间的长短, ③轮廓曲线的数学公式 $y = f(x)$, ④由刀具半径 R 和加工裕量 δ 所决定的刀具中心对工件轮廓的偏移量 $D = R + \delta$ 等诸条件, 由数控系统实时计算。这样的运算称为插补运算和刀具半径补偿运算。用计算所得的两个位移分量分别指令两个坐标轴同时运动, 这种控制方式

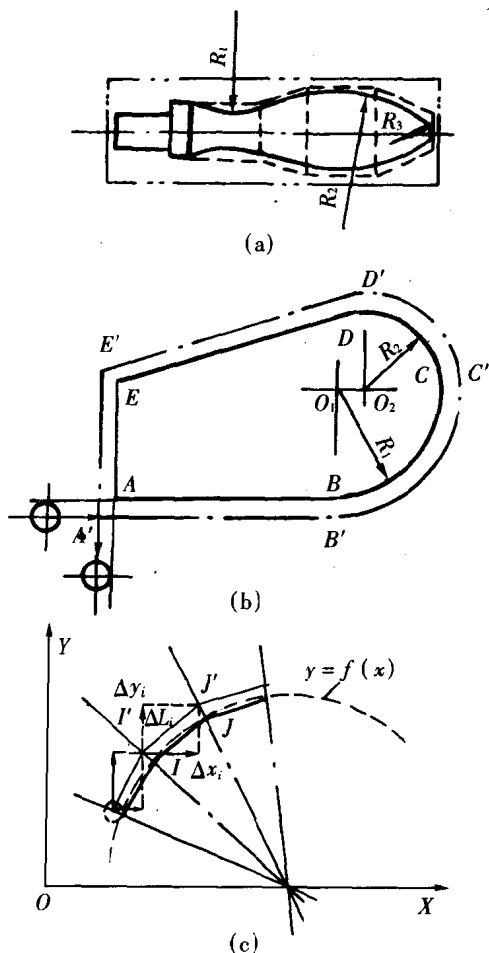


图 1-2 数控加工平面轮廓的成形

称为两坐标联动控制。当用半径为 R 的圆弧刀车削曲面零件时,同样也要进行插补运算与刀具半径补偿运算。如果用半径 $R=0$ 的尖刀车削进行加工时,可根据工件的轮廓直接运算不需考虑刀具中心偏移的问题,因此无需进行刀具半径补偿的运算,只作插补运算。

这类机床又称为连续控制或多坐标联动数控机床,它具有两轴联动的插补运算功能和刀具半径补偿功能。这类机床的数控装置的功能是最齐全的。能够进行两坐标联动控制的数控机床,一般也能够进行点位和直线控制。

随着计算机数控装置向小型和廉价方向发展,它的功能也不断增加和完善。如增加轮廓控制功能,则只需增加插补运算软件,几乎不带来硬件成本的提高。因此,除了少数专用的数控机床,如数控钻床、冲床等以外,现代的数控机床都具有轮廓控制的功能。

2. 空间轮廓加工的数控机床

空间轮廓加工,根据轮廓形状和所用刀具形状的不同有以下几种方法。

(1)在三坐标控制两坐标联动的机床上,用“行切法”进行加工。也有将这种方法称为 $2\frac{1}{2}$ 轴控制的,即以 X 、 Y 、 Z 三轴中任意两轴作插补运动,第三轴作周期性进给,刀具采用球头铣刀。如图 1-3 所示,在 Y 向分为若干段,球头铣刀沿 XZ 平面的曲线进行插补加工,当一段加工完后进给 Δy ,再加工另一相邻曲线,如此依次用平面曲线来逼近整个曲面。其中 Δy 根据表面光洁度的要求及刀头的半径选取,球头铣刀的球半径应尽可能选得大一些,以利于提高光洁度,增加刀具刚度和散热性能。但在加工凹面时球头半径必须小于被加工曲面的最小曲率半径,以免产生刀刃干涉。

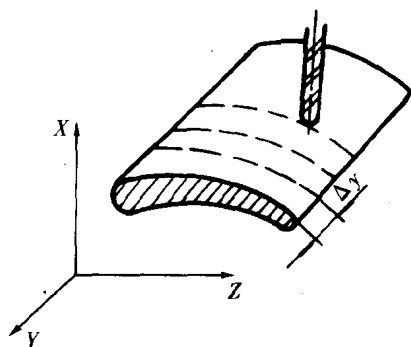


图 1-3 行切法加工空间轮廓

(2)三坐标联动加工 图 1-4 为内循环滚珠螺母的回珠器示意图,其滚道母线 SS' 为一空间曲线,它可用空间直线去逼近,因此,可在有空间直线插补功能的三坐标联动机床上加工。但是编程计算较复杂,其加工程序可采用自动编程系统来编制。

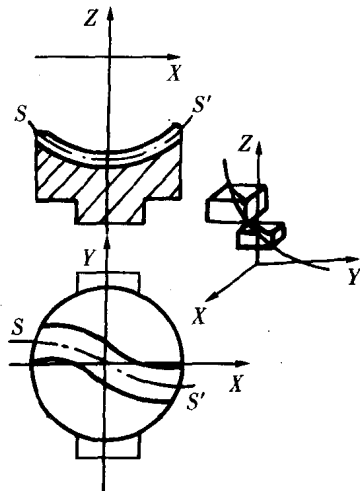


图 1-4 三坐标联动加工

(3)四坐标联动加工 图 1-5 所示的飞机大梁,它的加工表面是直纹扭曲面,若用三坐标联动机床和球头铣刀加工,不但生产率低,而且零件的表面光洁度也很差。为此,可采用圆柱铣刀周边切削方式,在四坐标机床上加工,除了三个移动坐标的联动外,为保证刀具与工件型面在全长上始终贴合,刀具还应绕 O_1 (或 O_2)作摆动联动,由于摆动运动,导致直线移动坐标要有附加的补偿移动,其附加运动量与摆心的位置有关,也需在编程时进行计算,加工程序要给定四个坐标轴的位移指令,以控制四轴联动加工。因此编程是相当复杂的。

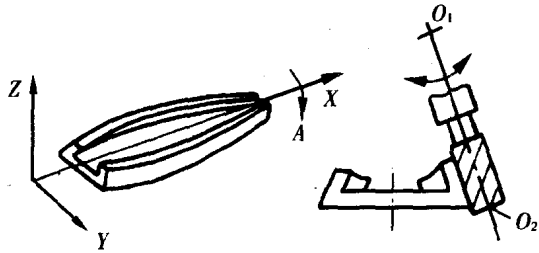


图 1-5 四坐标联动加工

(4)五坐标联动加工 所有的空间轮廓几乎都可以用球头刀按“行切法”进行加工。对于一些大型的曲面轮廓,零件尺寸和曲面的曲率半径都比较大,改用端铣刀进行加工,可以提高生产率和减少加工的残留量(减小表面粗糙度)。

所有的空间轮廓几乎都可以用球头刀按“行切法”进行加工。对于一些大型的曲面轮廓,零件尺寸和曲面的曲率半径都比较大,改用端铣刀进行加工,可以提高生产率和减少加工的残留量(减小表面粗糙度)。

如图 1-6 所示,用端铣刀加工时,刀具的端面与工件轮廓在切削点处的切平面相重合(加工凸面),或者与切平面成某一夹角(加工凹面),也就是刀具轴线与工件轮廓的法线平行或成某一夹角(成一夹角可以避免产生刀刃干涉)。加工时切削点 $P(x, y, z)$ 处的坐标与法线 n 的方向角 θ 是不断变化的

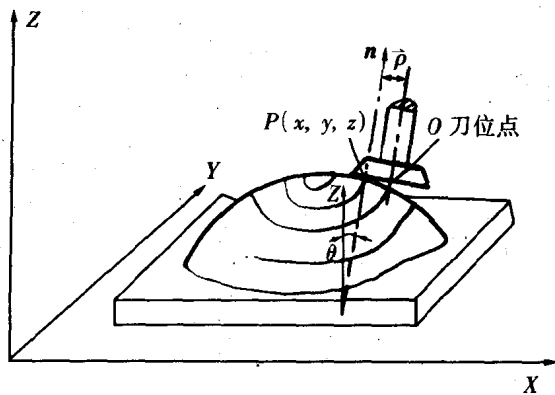


图 1-6 五坐标联动加工

的,因此刀具刀位点 O 的坐标与刀具轴线的方向角也要作相应的变化。目前的数控机床,都是在编制加工程序时根据零件曲面轮廓的数学模型,计算出每一个切削点对应的刀位点 O 的坐标与方向角(即刀位数据),通过程序输送至数控系统控制刀具与工件相对运动至所要求的切削位置。刀位点的坐标位置可以由三个直线进给坐标轴来实现,刀具轴线的方向角则可以由任意两个绕坐标轴旋转的圆周进给坐标的两个转角合成来实现。因此用端铣刀加工空间曲面轮廓时,需控制五个坐标轴,即三个直线坐标轴,两个圆周进给坐标轴进行联动。五轴联动的数控机床是功能最全、控制最复杂的一种数控机床,五

坐标联动加工的程序编制也是最复杂的,只有使用自动编程系统来编制了。

上面所述是从加工功能来分类的,如果从控制轴数和联动轴数的角度来考虑,上述的各类机床可分为:两轴联动数控机床,三轴控制两轴联动数控机床,三轴联动数控机床,五轴联动数控机床等。

二、按所用进给伺服系统的类型分类

(一)开环数控机床

开环数控机床采用开环进给伺服系统,图 1-7 所示为典型的开环进给系统。其中图 1-7(a)是由功率步进电机驱动的开环进给系统。数控装置根据所要求的进给速度和进给位移,输出一定频率和数量的进给指令脉冲,经驱动电路放大后,每一个进给脉冲驱动功率步进电机旋转一个步距角,再经减速齿轮、丝杠螺母副,转换成工作台的一个当量直线位移。对于圆周进给,一般都是通过减速齿轮、蜗杆蜗轮副带动转台进给一个当量角位移。由于功率步进电机的输出转矩有限,不足以驱动较大的工作台等部件,可采用由小的信号步进电机与由液压扭矩放大器组成的电液脉冲马达作为驱动装置,它可以输出较大的转矩,能驱动较大的工作台执行进给运动,如图 1-7(b)所示。这类机床速度及精度都较低。图 1-7(a)的方案多用于经济型数控机床或对旧机床进行改造。图 1-7(b)的方案已不再采用了。

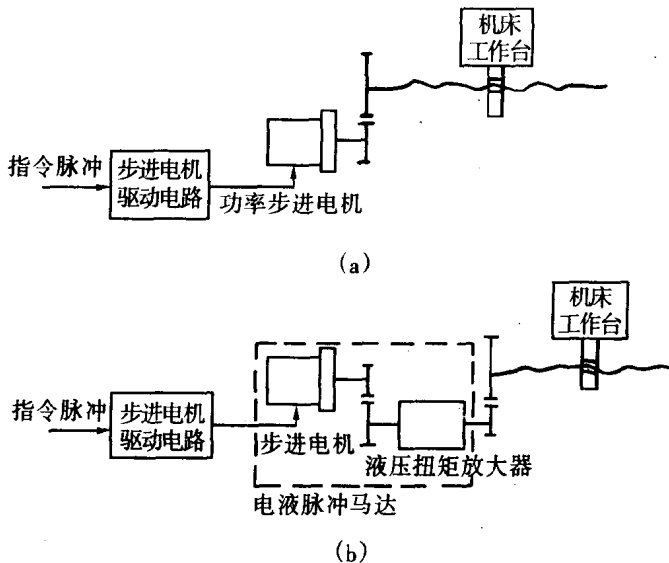


图 1-7 开环进给伺服系统