

第 1 章 数控加工技术概述

随着科学技术的飞速发展,机械产品结构越来越合理,其性能、精度和效率日趋提高,更新换代频繁,生产类型由大批量生产向多品种小批量生产转化。因此,对机械产品的加工相应地提出了高精度、高柔性 with 高度自动化的要求。

大批大量的产品,如汽车、拖拉机与家用电器的零件,为了解决高产、优质的问题,多采用专用的工艺装备、专用自动化机床或专用的自动生产线和自动车间进行生产。但是应用这些专用生产设备进行生产,生产准备周期长,产品改型不易,因而使产品的开发周期延长。在机械产品中,单件与小批量产品占 70%~80%,这类产品一般都采用通用机床加工,当产品改变时,机床与工艺装备均需作相应的变换和调整,而且通用机床的自动化程度不高,基本上由人工操作,难以提高生产效率和保证产品质量。特别是一些由曲线、曲面轮廓组成的复杂零件,只能借助靠模和仿形机床,或者借助划线和样板用手工操作的方法来加工,加工精度和生产效率受到很大的限制。

由于数控机床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方面的技术成果,具有高柔性、高精度与高度自动化的特点。采用数控加工方式,解决了机械制造中常规加工技术难以解决甚至无法解决的单件、小批量,特别是复杂型面零件的加工。应用数控加工技术是机械制造业的一次技术革命,使机械制造业的发展进入了一个新的阶段,提高了机械制造业的制造水平,为社会提供了高质量、多品种及高可靠性的机械产品。目前,应用数控加工技术的领域已从当初的航空工业逐步扩大到汽车、造船、机床、建筑等民用机械制造业,并已取得了巨大的经济效益。

随着航空工业、汽车工业和轻工消费品生产的高速增长,复杂形状的零件越来越多,精度要求也越来越高;此外,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法已难以适应这种多样化、柔性化与复杂形状的高效高质量加工要求。因此,近几十年来,能有效解决复杂、精密、小批多变零件加工问题的数控加工技术得到了迅速发展和广泛应用,使制造技术发生了根本性的变化。努力发展数控加工技术,并向更高层次的自动化、柔性化、敏捷化、网络化和数字化制造技术推进,是当前机械制造业发展的方向。

数控技术是机械加工现代化的重要基础和关键技术。应用数控加工可大大提高生产率、稳定加工质量、缩短加工周期、增加生产柔性、实现对各种复杂精密零件的自动化加工,易于在工厂或车间实行计算机管理;还使车间设备总数减少,节省人力,改善劳动条件;有利于加快产品的开发和更新换代,提高企业对市场的适应能力和综合经济效益。数控加工技术的应用,使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程连为一体,使零件的计算机辅助设计(computer aided design, CAD)、计算机辅助工艺规划(computer aided process planning, CAPP)和计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)的一体化成为现实,使机械加工的柔性自动化水平不断提高。

数控加工技术也是发展军事工业的重要战略技术,许多先进武器装备的制造,如飞机、导弹、坦克等的关键零件,都离不开高性能的数控机床加工。我国的航空、能源、交通等行业

引进了一些 5 坐标机床等高档数控设备,但其使用受到国外的监控和限制,不准用于军事用途的零件加工。

1.1 数控机床概述

1. 数控机床的起源与发展

用数字化信号构成的控制程序对某一具体对象(如速度、位移、温度、流量等)进行控制的技术,称为数控技术。广义上说,凡是使用数控技术的机械设备统称为数控设备,包括数控机床、数控折弯机、电脑绣花机、自动绘图机等。狭义上的数控设备是指应用了数控技术的切削机床,即数控机床。

数控机床的研制最早是从美国开始的。1948 年,美国帕森斯公司(Parsons Co.)为了精确地制作直升机机翼、桨叶和飞机框架,提出用数字信息技术控制机床自动加工外形复杂的零件的设想,这就是研制数控机床的最初设想。1949 年,在美国空军的支持下,帕森斯公司正式接受委托,与麻省理工学院伺服机构实验室合作,开始从事数控机床的研制工作。1952 年世界上第一台数控机床试验性样机试制成功,揭开了数控加工技术的序幕。自此以后,随着电子技术、计算机技术、自动控制和精密测量等相关技术的发展,数控机床也迅速地发展和不断更新换代。总的来说,数控机床的发展经历了 5 个阶段。

第一代数控:1952—1959 年采用电子管元件构成的专用数控系统(numerical control, NC)。

第二代数控:从 1959 年开始采用晶体管电路的 NC 系统。

第三代数控:从 1965 年开始采用小、中规模集成电路的 NC 系统。

第四代数控:从 1970 年开始采用大规模集成电路的小型通用电子计算机控制的系统(computer numerical control,CNC)。

第五代数控:从 1974 年开始采用微型电子计算机控制的系统(microcomputer numerical control,MNC)。

近年来,微电子技术和计算机技术日益成熟,数控机床系统的体系结构随之朝着开放和智能化方向发展,相继出现了计算机直接控制系统(direct numerical control,DNC)、柔性制造系统(flexible manufacturing system,FMS)和计算机集成制造系统(computer-integrated manufacturing system,CIMS)。这些高级自动化生产系统都是以数控机床为基础,它们代表着数控机床今后的发展趋势。

随着市场和科技发展的需要,为了满足现代制造技术更高的要求,世界数控技术发展趋势主要体现在以下几方面。

(1) 运行高速化、加工高精度。速度和精度是数控设备的两个重要指标,它们是数控技术永恒追求的目标。

(2) 功能复合化。在一台设备上能实现多种工艺手段加工。

(3) 控制智能化。随着人工智能技术的不断发展,为了满足制造业生产柔性化、制造自动化发展的需求,数控技术智能化程度不断提高。

(4) 体系开放化。在不同的工作平台上均能实现系统功能,且可以与其他系统应用进行互换操作。

(5) 驱动并联化。并联加工中心是数控机床在结构上取得的重大突破。

(6) 交互网络化。支持网络协议,既满足单机需要,又能满足对集成要求高的数控系统,该系统是形成“全球制造”的基础单元。

中国的数控机床研究始于1958年,通过“六五”期间引进数控技术,“七五”期间组织消化吸收“科技攻关”,我国数控技术和数控产业取得了相当大的成绩。随着我国经济高速发展,我国的制造业迅猛发展,全球制造业向我国转移的趋势十分明显。代表先进制造技术的数控加工在我国制造业中的应用也日益普及。早在2003年开始,中国就成为全球最大的机床消费国,也是世界上最大的数控机床进口国。

2. 数控机床的优点

相对于普通机床,数控机床有以下优点。

1) 自动化程度高

数控机床完全按照事先编好的加工程序加工零件,操作者除了操作面板、装卸零件、更换刀具、监察关键工序和机床的运行之外,不需要进行繁重的重复性手工操作,因此工人的劳动强度与劳动条件都得到极大改善。

2) 适应性、灵活性强

当加工零件改变时,只要对数控机床重新编制加工程序就能实现零件的自动化加工。不像传统的机床那样还要制造和更换许多工具、夹具和检具,更不需要重新调整机床。因此,它能够适应市场竞争中对产品不断更新换代的要求,解决了多品种、单件小批量生产的自动化问题,给试制新产品提供了极大的便利。它不仅缩短了生产准备周期,而且节省了大量工艺装备费用。此外,数控加工运动的任意可控性使其能充分满足飞机、汽车、造船、动力设备、国防军工等制造部门复杂形状零件和型面零件的加工需求。

3) 加工精度高、质量稳定

数控机床机械部分的制造精度高于普通机床,且它的控制精度高达0.001mm,有位置检测装置的闭环或半闭环数控机床,还可以加工出精度高于数控机床本身的产品。零件加工过程中,数控机床自动按照程序运行,避免了人为操作误差,同一批零件质量稳定。此外,数控机床采用在线自动补偿(实时补偿)技术来消除或减少热变形、力变形和刀具磨损的影响,使加工精度的一致性得到保证。这些都是传统机床无法做到的。

4) 加工生产率高

零件加工所需要时间由机动时间和辅助时间组成。数控机床能够有效地减少这两部分时间。数控机床的进给速度、多数主运动及进给量的范围比普通机床的范围大,允许选择最有利的切削速度、进给速度、空行程速度和切削量;可采用自动换刀、自动换工作台,减少换刀时间和半成品周转时间;可以对零件进行在线检测,减少停机检验时间。因而,数控机床生产率比一般机床高很多。

5) 经济效益高

使用数控机床批量加工零件时,分摊在每个零件上的设备费用相对来说是很便宜的;数控机床自动化程度高,节省了工艺装备费用、辅助生产工时;数控机床加工精度高、质量稳定,有效减少了废品率。因而,数控机床可以提高经济效益。

6) 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件时,可以准确地计算零件的加工工时,有效地简化检验和工夹具、

半成品的管理工作,有利于生产过程的科学管理与信息管理。此外,由于数控机床使用的是数字信息,易于与计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)系统连接,形成计算机辅助设计和制造与数控机床紧密结合的一体化系统。而且,现在数控机床通过互联网(Internet)、内联网(Intranet)、外联网(Extranet),可实现远程故障诊断及维修,已初步具备远程控制和调度,进行异地分散网络化生产的可能,从而为今后进一步实现制造过程网络化、智能化提供了必备的基础条件。这些特点都有利于生产管理现代化。

3. 数控机床的合理选用

虽然数控机床具有上述优点,但是数控机床初期投资大,维护费用高,对管理和操作人员素质的要求高。因此,企业要合理选择和使用数控机床才能获得最好的经济效益。

从技术经济的角度出发,企业在对普通机床、数控机床、专用机床的选用上,要分析以下三方面因素,以求合理选用:第一,能否保证零件的技术要求;第二,能否有利于提高生产率;第三,能否降低生产成本。

总的来说,适合在数控机床上加工的零件种类如下:

- (1) 结构较复杂、加工精度要求高的零件;
- (2) 多品种、小批量生产的零件;
- (3) 新产品的试制零件;
- (4) 价格昂贵,不允许报废的关键零件;
- (5) 生产周期短的急需件;
- (6) 集铣、钻、镗、扩、铰、攻螺纹等多种工序于一体的箱体零件;
- (7) 要求精密复制的零件;
- (8) 要求 100% 检验的零件。

1.2 数控机床的工作原理及组成

数控机床通过数字化信息控制机床运动及零件加工过程。数控加工原理如图 1-1 所示。在数控机床上加工零件的时候,首先要根据被加工零件的图纸要求确定零件加工路线、工艺参数和刀具数据等一系列工艺过程;然后按照数控机床编程手册的规定编写数控加工程序,并输入到数控系统中;最后,由数控系统自动完成译码、数据处理、插补及伺服控制,

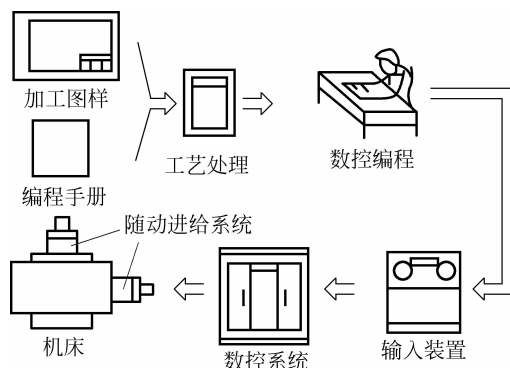


图 1-1 数控加工原理

加工出合格的零件。

数控机床主要由机床本体、数控(CNC)系统、伺服系统等装置构成。

(1) 机床本体是数控机床的硬件基础,它承担加工执行功能。机床本体主要包括主运动部件、进给运动部件(如工作台、刀架)、辅助部件(如液压、气动、冷却和润滑部分等)、支承部件(如床身、立柱)和一些辅助装置(如刀库、自动换刀装置、自动托盘转换装置等)。

(2) 数控系统是数控机床的核心。它是满足用户操作和机床控制要求的方法和手段。数控系统由信息输入装置、信息处理装置、信息输出装置3部分组成。数控程序通过信息输入装置输入到信息处理装置中,经一系列自动处理后,最后由信息输出装置输出指令给伺服系统。

(3) 伺服系统是数控机床的驱动系统,用来实现数控机床的进给与主轴的伺服控制。伺服系统由伺服驱动电机和伺服驱动装置组成。它接收来自数控系统输出装置的指令,按照指令的要求驱动机床本体动作,以加工出合格的零件。

1.3 数控机床的分类

1. 按运动控制方式分类

按运动控制方式分,数控机床分为点位控制数控机床、直线控制数控机床、轮廓控制数控机床3种。

1) 点位控制数控机床

点位控制数控机床只控制刀具从一点到另一点的精确定位,而对定位过程中的移动轨迹及移动速度没有严格要求,并且移动过程中不进行切削,如图1-2(a)所示。其数控装置称为点位控制装置。

点位控制的数控机床一般用于加工平面内的孔系,主要有数控钻床、数控坐标镗床、数控弯管机和数控冲剪床、数控点焊机等。

2) 直线控制数控机床

直线控制数控机床不仅要控制刀具从一点到另一点的精确定位,而且要求机床在给定的进给速度下沿平行坐标轴方向进行直线切削加工或者移动,如图1-2(b)所示。其数控装置称为直线控制装置。

直线控制数控机床主要有比较简单的数控镗铣床、数控车床、数控磨床等。

3) 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床能同时控制两个以上的轴联动,具有插补功能。它不仅要求精确控

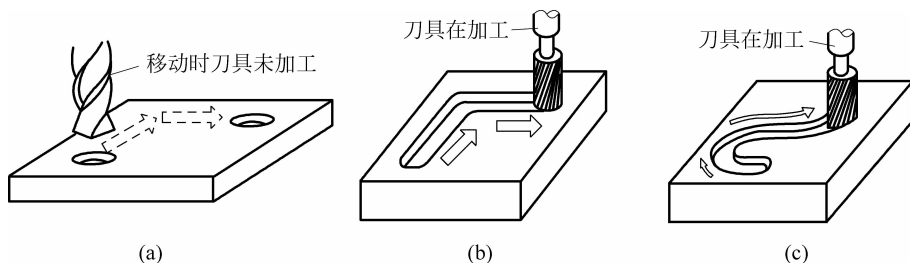


图1-2 数控机床分类

制机床移动部件的起点与终点坐标,而且要控制加工过程中每一个点的速度与坐标,也就是控制移动轨迹,从而加工出任意轮廓形状的零件,如图 1-2(c)所示。其数控装置称为轮廓控制装置。

轮廓控制数控机床主要有两坐标及两坐标以上的数控铣床、可加工曲面的数控车床、加工中心、数控线切割机床等。

2. 按伺服系统类型分类

按伺服系统类型的不同,数控机床可以分为开环伺服系统数控机床、闭环伺服系统数控机床和半闭环伺服系统数控机床。

1) 开环伺服系统数控机床

开环伺服系统是不带测量反馈装置的伺服系统,其原理如图 1-3 所示。

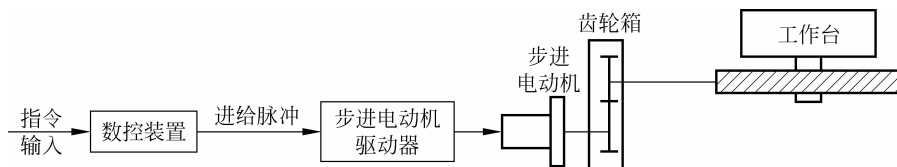


图 1-3 开环伺服系统

开环控制的伺服系统主要使用步进电动机。数控系统输出指令信号给伺服系统,通过步进电动机驱动机床运动。系统中没有位置反馈装置,因此开环系统的速度和精度都较低。但是,由于开环控制结构简单,调试方便,容易维修,成本较低,所以它仍被广泛应用于经济型数控机床和对旧机床的改造上。

2) 闭环伺服系统数控机床

闭环伺服系统是反馈元件装在工作台上的伺服系统,反馈元件直接检测工作台的位移,其原理如图 1-4 所示。

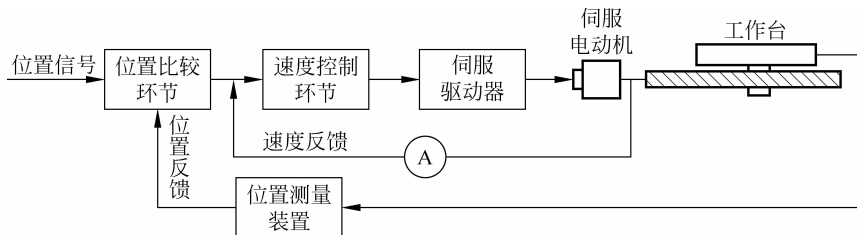


图 1-4 闭环伺服系统

数控装置输出指令给伺服系统,进而驱动机床工作台移动,与此同时反馈装置将工作台的位移、速度转换成电信号,反馈到输入端与输入信号进行比较,得到差值后再去控制伺服电动机,驱动机床向减少差值的方向运动。理论上该系统可以完全消除传动误差,因而定位精度高、调节速度快。由于闭环伺服系统设计和调整难度较大,成本较高,所以它主要用于精度要求很高的数控机床,如精密数控镗铣床、超精密数控车床和加工中心等。

3) 半闭环伺服系统数控机床

半闭环伺服系统指反馈元件安装在进给电动机或丝杠上的伺服系统,反馈元件通过测

量旋转角来间接测量工作台的位移,其原理如图 1-5 所示。

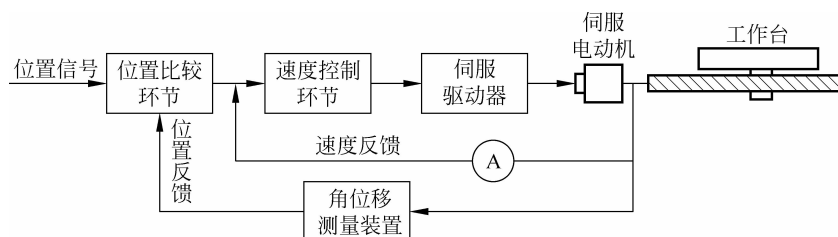


图 1-5 半闭环伺服系统

数控装置输出指令给伺服系统,进而驱动机床工作台移动,与此同时反馈装置将电动机或丝杠的角位移、角速度转换成电信号,反馈到输入端与输入信号进行比较,得到差值后再去控制伺服电动机,驱动机床向减少差值的方向运动。

由于这种系统未将丝杠螺母副、齿轮传动副等传动装置包含在反馈系统中,它不能补偿传动装置的传动误差,但是可以获得稳定的控制特性。半闭环伺服系统的性能介于开环与闭环之间,其精度没有闭环伺服系统高,但它比闭环伺服系统调试方便、稳定性好、成本低,同时半闭环伺服系统的加工精度也能被大多数用户接受。因此,半闭环控制系统得到了广泛应用。

3. 按加工工艺类型分类

数控技术发展到现在,几乎所有的机床种类都向着实现数控化的方向发展。数控机床按加工工艺类型分类,有以下几种:

1) 金属切削类数控机床

这类数控机床包括数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、数控镗床和加工中心。

2) 金属成形类数控机床

这类机床包括数控弯折机、数控冲床、数控弯管机、数控回转头压力机等。

3) 数控特种加工机床

这类机床包括数控线(电极)切割机、数控电火花加工机床、火焰切割机、数控激光切割机等。

4) 其他类型的数控机床

这类机床包括三坐标测量仪、数控绘图仪、机器人等。

第2章 数控编程基础

2.1 数控编程概述

在数控机床上加工零件时,首先要进行程序编制,简称编程。

数控机床之所以能加工出不同形状、不同尺寸和精度的零件,是因为编程人员为它编制不同的加工程序。数控编程是数控机床使用中最重要的一环。合理的数控编程不仅能保证产品的质量,还能充分发挥数控机床的性能,并保证数控机床高效、安全可靠的工作。

在第1章对数控机床工作原理的介绍中,从分析零件图纸到获得数控机床所需的数控加工程序的全过程统称为数控编程。

编程就是将加工零件的加工顺序、刀具运动轨迹的尺寸数据、工艺参数(主运动和进给运动速度、切削深度等)以及辅助操纵(换刀、主轴正反转、冷却液开关、刀具夹紧/松开等)等加工信息用规定的文字、数字、符号等组成的代码,按一定的格式编写成加工程序。

2.2 数控编程的步骤

理想的加工程序应保证加工出符合图纸要求的合格工件,同时应能使数控机床的功能得到合理的应用与充分的发挥,以使数控机床能安全可靠及高效地工作。在数控编程前,编程员应了解所用数控机床的规格、性能、CNC系统所具备的功能及编程指令格式等。编制程序时,应对图纸规定的技术特性和零件的几何形状、尺寸及工艺要求进行分析,确定使用的刀具、切削用量及加工顺序和走刀路线;再进行数值计算,获得刀位数据;然后按数控机床规定的代码和程序格式,将工件的尺寸、刀具运动轨迹、位移量、切削参数(主轴转速、刀具进给量、切削深度等)以及辅助功能(换刀、主轴正转/反转、冷却液开/关等)编制成加工程序,并输入数控系统,由数控系统控制数控机床自动进行加工。

一般来说,数控编程的步骤为:分析零件图纸、制订数控加工工艺、数学处理、编写零件加工程序、输入加工程序、程序检验。

2.2.1 分析零件图纸

首先应熟悉零件在产品中的作用、位置、装配关系和工作条件,搞清楚各项技术要求对零件装配质量和性能的影响,找出主要的和关键的技术要求,然后对零件图样进行分析。

1. 检查零件图样的完整性和正确性

在了解零件外形和结构之后,应检查零件视图是否正确、足够,表达是否直观、清楚,绘图是否符合国家标准,尺寸、公差以及技术要求是否齐全、合理等。

2. 零件的技术要求分析

零件的技术要求包括下列几个方面:加工表面的尺寸精度;主要加工表面的外形精

度；主要加工表面之间的相互位置精度；加工表面的粗糙度以及表面质量方面的其他要求；热处理要求；其他要求（如动平衡、未标注圆角或倒角、去毛刺、毛坯要求等）。要注意分析这些要求在保证使用性能的前提下是否经济合理，在现有条件下能否实现。特别要分析主要表面的技术要求，因为主要表面的加工决定了零件工艺过程的大致轮廓。

3. 零件的材料分析

分析所提供的毛坯材质本身的机械性能和热处理状态，毛坯的铸造品质和被加工部件的材料硬度，是否有白口、夹砂、疏松等。判断其加工的难易程度，为选择刀具材料和切削用量提供依据。所选的零件材料应经济合理，切削性能好，满足使用性能的要求。

4. 零件的标注尺寸分析

零件尺寸标注应符合国家标准，一张完整的零件图纸的尺寸标注应注意以下几个方面：

(1) 零件图上的重要尺寸应直接标注，而且在加工时应尽量使工艺基准与设计基准重合，并符合尺寸链最短的原则。如图 2-1 所示，活塞环槽的尺寸为重要尺寸，其宽度应直接标注。

(2) 零件图上的标注尺寸应便于测量，不要从轴线、中心线、假想平面等难以测量的基准标注尺寸。如图 2-2 所示，轮毂的键槽深度，只有尺寸 c 的标注才便于用卡尺或样板测量。

(3) 零件图上的尺寸不应该标注成封闭式，以免产生矛盾。如图 2-3 所示，已经标注了孔间距尺寸 $a \pm \delta_a$ 和 $\alpha \pm \delta_\alpha$ ，则 x 、 y 轴的坐标尺寸就不能随便标注。有时为了方便加工，可按尺寸链计算出来，并标注在圆括号内，作为加工时的参考尺寸。

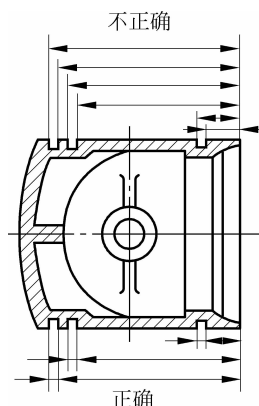


图 2-1 直接标注重要尺寸

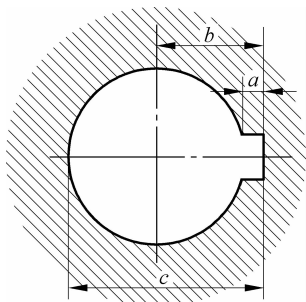


图 2-2 键槽深度的标注

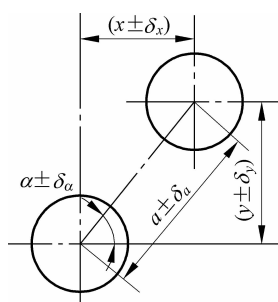


图 2-3 孔中心距的标注

(4) 零件上非配合的自由尺寸应按加工顺序尽量从工艺基准标出。如图 2-4 所示，齿轮轴图(a)的表示方法大部分尺寸要精算，且不能直接测量；而图(b)的标注方式与加工顺序一致，且便于加工测量。

(5) 零件上各非加工表面的位置尺寸应直接标注，而非加工面与加工面之间只能有一个联系尺寸。如图 2-5 所示，图(a)的标注不合理，只能保证一个尺寸符合图样要求，其余尺寸可能会超出误差；图(b)中标注尺寸 A 在加工面Ⅳ时予以保证，其他非加工面的位置直接标注，能在铸造时保证。

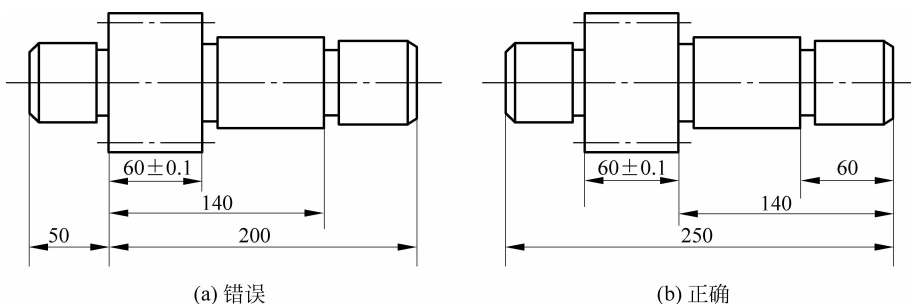


图 2-4 按照加工顺序标注自由尺寸

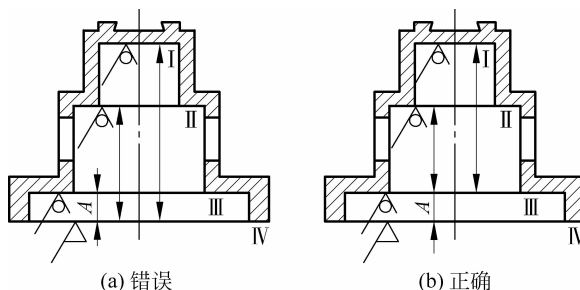


图 2-5 非加工面与加工面之间的尺寸标注

综上所述,分析零件图纸是为了对零件进行工艺分析,明确加工内容及材料、毛坯种类、形状、尺寸、精度、表面质量和热处理等方面的技术要求,为下一步的加工工艺制订做好准备。

2.2.2 制订数控加工工艺

制订数控加工工艺包括选择合适的数控机床、刀具、夹具,确定合理的加工工序、工艺路线、切削用量等工艺参数,制订合理的加工工艺。

1. 数控机床的选择

根据零件的加工工艺类型,结合加工成本、生产率等因素选择最合适的数控机床。基本原则是:在保证所加工零件精度和要求的前提下,追求高的生产效率和良好的经济效益。对于不同的加工工艺,在选择数控机床时一般应考虑以下几个方面的问题:

(1) 数控机床主要规格的尺寸应与工件的轮廓尺寸相适应。即小的工件应当选择小规格的机床加工,而大的工件则选择大规格的机床加工,做到设备的合理使用。

(2) 机床结构取决于机床规格尺寸、加工工件的质量等因素的影响。表 2-1 列出了数控设备最常见的重要规格和性能指标。

(3) 机床的工作精度与工序要求的加工精度相适应。根据零件的加工精度要求选择机床,如精度要求低的粗加工工序,应选择精度低的机床,精度要求高的精加工工序,应选用精度高的机床。

(4) 机床的功率与刚度以及机动范围应与工序的性质和最合适的切削用量相适应。如粗加工工序去除的毛坯余量大,切削余量选得大,就要求机床有大的功率和较好的刚度。