

## 单元一

# 数控加工工艺概述



### 知识目标

- 了解机械加工工艺的基本概念；
- 了解生产类型；
- 了解数控加工设备的分类。



### 技能目标

- 掌握数控加工设备的结构；
- 掌握数控加工设备的工作原理。



### 单元导读

制造业是永远的朝阳产业,是现代文明的支柱。它在科技研究中既占有基础地位,又处于前沿关键。它是工业的主体,是国民经济持续发展的基础,是生产工具、生活资料、科技手段、国防装备等进步的依托,是现代化的动力源之一。随着各项科学技术的发展,社会对机械产品的质量和生产率等提出了越来越高的要求,因此,能实现加工工艺过程自动化、柔性化与智能化的数控机床也就应运而生。

数字控制(numerical control,简称为 NC)技术是指用数字、文字和符号组成的数字指令来实现控制一台或多台机械设备动作的技术。GB/T 8129—1997《工业自动化系统 机床数值控制 词汇》中对 NC 的定义为“用数值数据的控制装置,在运行过程中不断地引入数值数据,从而对某一生产过程实现自动控制”。

数控机床是用数字化信号对机床的运动进行控制的机床。也可以说,数控机床是装备了数控系统的机床。它是一种自动化程度很高的机电一体化加工设备,是数控技术与传统加工技术相结合的产物。早期的数控机床控制系统采用逻辑元件、记忆元件构成逻辑电路,属于固定接线的硬件结构。

1952年,美国 MIT 研制出世界上第一台数控机床,如图 1-1 所示。数控机床的问世成为机械工业史上一件划时代的事件,推动了机械自动化的发展。1955年,用于制造航空零件的数控铣床在美国正式问世。此后其他一些工业国家,如德国、日本、英国、前苏联等相继开始开发、研制和应用数控机床。

1958年,中国数控机床的研制开始起步,北京第一机床厂与清华大学合作试制了中国第一台三坐标数控机床 X53K1,如图 1-2 所示。它利用数控系统来控制机床的工作台、横向滑鞍以及立铣头的进给运动,实现了三坐标联动。这台数控机床的研制成功为中国机械工业开始高度自动化奠定了基础。现在我国很多机床厂家都能生产各类数控机床,数控机床

在制造业中的应用也越来越广泛。

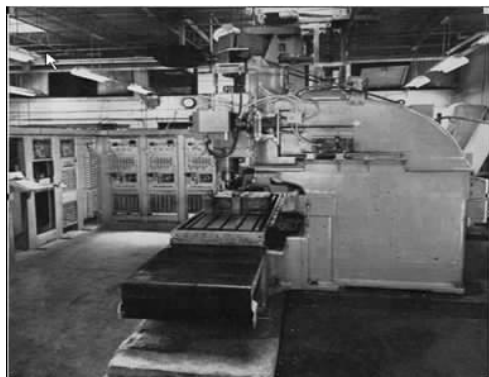


图 1-1 世界上第一台数控机床

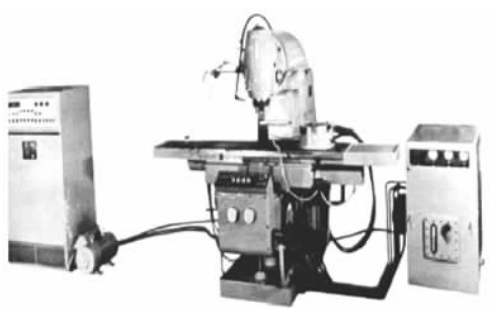


图 1-2 中国第一台数控机床

计算机数字控制(computer numerical control, 简称为 CNC)系统采用微处理器中的系统程序(软件)来实现逻辑控制,通过接口与外围设备连接。通过 CNC 系统实现控制目的的机床称为 CNC 机床,如今人们提及的数控机床一般是指 CNC 机床。有些数控机床配备有刀库、自动换刀装置、自动交换工作台或回转工作台,能在一次装夹中对工件的多个表面进行多工序加工,如进行钻孔、铰孔、扩孔、攻螺纹、平面铣削、轮廓铣削等加工,这种数控机床称为加工中心(mechanical center, 简称为 MC),它是当今数控机床中的主流产品。如图 1-3 所示为带有链式刀库的卧式加工中心。



图 1-3 卧式加工中心

数控加工技术是伴随着数控机床的产生、发展而逐步完善的一种应用技术。随着我国数控机床用户的不断增加,数控机床的应用领域不断扩大,因此,提高数控加工技术水平已成为推动我国制造业发展的重要环节。数控加工技术水平的提高,除与数控机床的性能和功能紧密相关外,数控加工工艺与数控程序也起着相当重要的作用。在数控加工过程中,如果数控机床是硬件的话,数控加工工艺和数控程序则相当于软件,两者缺一不可。



## 学习情境一 机械加工工艺与生产类型

### 一、机械加工工艺的基本概念

#### 1. 生产过程

生产过程是指把原材料转变为成品的全过程。生产过程一般包括原材料的运输、仓库保管、生产技术准备、毛坯制造、机械加工(含热处理)、装配、检验、喷涂和包装等。

#### 2. 工艺过程

工艺过程是指改变生产对象的形状、尺寸、相对位置和性质等,使其成为成品或半成品的过程。工艺过程是生产过程中的主体。机械加工的过程称为机械加工工艺过程。在机械加工工艺过程中,针对零件的结构特点和技术要求,采用不同的装备和加工方法,按照一定的顺序依次进行,才能完成由毛坯到零件的转变过程。因此,机械加工工艺过程是由一个或若干个顺序排列的工序组成的,而工序又由安装、工位、工步和走刀组成。

##### 1) 工序

工序是指一个或一组工人,在一个工作地点对同一个或同时对几个工件连续加工完成的那一部分工艺过程。划分工序的依据是工作地点是否变化或工作是否连续。如图 1-4 所示为阶梯轴简图,该零件加工数量较少时,共有 4 个工序,其工艺过程和工序的划分见表 1-1;当加工数量较多时,可分为 6 个工序,其工艺过程和工序的划分见表 1-2。

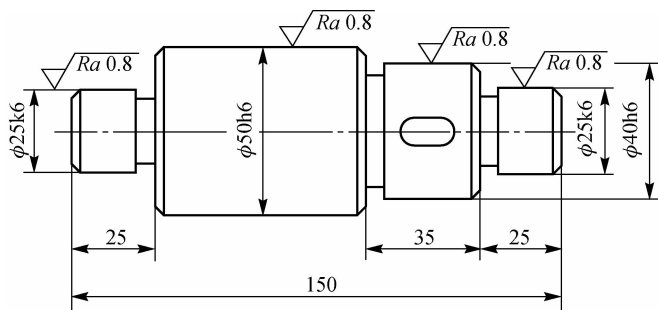


图 1-4 阶梯轴简图

表 1-1 阶梯轴单件小批生产的工艺过程和工序划分

| 工序号 | 工序内容        | 设 备     |
|-----|-------------|---------|
| 1   | 车两端面、钻两端中心孔 | 车床      |
| 2   | 车外圆、车槽和倒角   | 车床      |
| 3   | 铣键槽、去毛刺     | 铣床、钳工工具 |
| 4   | 磨外圆         | 磨床      |

表 1-2 阶梯轴大批量生产的工艺过程和工序划分

| 工序号 | 工序内容         | 设 备  |
|-----|--------------|------|
| 1   | 两端同时车端面、钻中心孔 | 专用机床 |
| 2   | 车一端外圆、车槽和倒角  | 车床   |
| 3   | 车另一端外圆、车槽和倒角 | 车床   |
| 4   | 铣键槽          | 铣床   |
| 5   | 去毛刺          | 钳工工具 |
| 6   | 磨外圆          | 磨床   |

在表 1-1 的工序 2 中,先车一个工件的一端,然后调头装夹,再车另一端,是在同一地点,其工艺内容是连续的,因此算作一道工序。在表 1-2 的工序 2 和工序 3 中,虽然工作地点相同,但工艺内容不连续(工序 3 是在该批工序 2 的内容都完成后才进行的),因此算作两道工序。

上述工序的划分方法是常规加工工艺中采用的方法。在数控加工中,根据数控加工的特点,工序的划分会比较灵活。

2)工步

工步是指在加工表面(或装配连接面)和加工(或装配)工具不变的情况下,所连续完成的那一部分工序内容。划分工步的依据是加工表面和加工工具是否变化。表 1-1 中的工序 1 有 4 个工步,工序 4 只有一个工步。但是,为了简化工艺文件,对在一次安装中连续进行的若干个相同工步,通常都看作一个工步。如图 1-5 所示,零件上 6 个  $\phi 20$  mm 的孔,可写成一个工步,即钻  $6 \times \phi 20$  mm 孔。

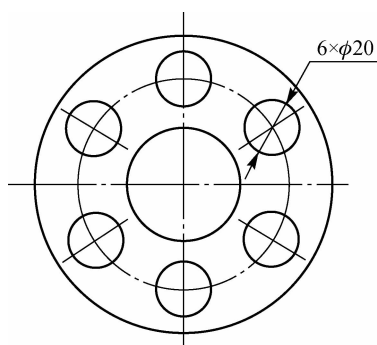


图 1-5 加工 6 个相同表面的工步

为了提高生产率,有时用几把不同的刀具或复合刀具同时加工一个零件上的几个表面,通常将此工步称为复合工步。如图 1-6 所示,钻削和车削同时进行,就是一个复合工步。在数控加工中,有时把在一次安装下用一把刀具连续切削零件上的多个表面划分为一个工步。

3)走刀

在一个工步内,若被加工表面需切除的余量较大,可分几次切削,每次切削称为一次走刀。如图 1-7 所示为阶梯轴的车削走刀,第一工步只需一次走刀,第二工步需分两次走刀。

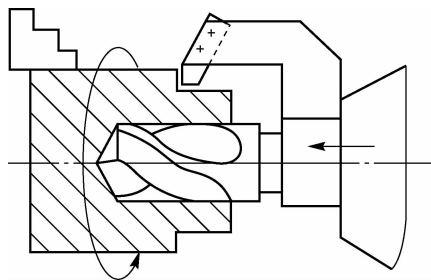


图 1-6 钻、车的复合工步

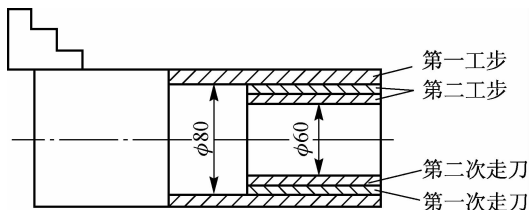


图 1-7 阶梯轴的车削走刀

#### 4) 安装

安装是指工件经一次装夹后所完成的那一部分工序。在一道工序中,工件可能只需要安装一次,也可能需要安装几次。在表 1-2 的工序 4 中,只需一次安装即可铣出键槽,而在表 1-1 的工序 2 中,至少要两次安装,才能完成全部工艺内容。

#### 5) 工位

工位是指为了完成一定的工序内容,一次装夹工件后,工件(或装配单元)与夹具或设备的可动部分一起相对刀具或设备的固定部分所占据的每一个位置。常用各种回转工作台、移动工作台、回转夹具或移动夹具,使工件在一次安装中先后处于几个不同的位置进行加工。如图 1-8 所示为利用移动工作台或移动夹具在一次安装中依次完成铣端面、钻中心孔两个工位加工的实例。采用这种多工位加工方法,减少了安装工件的次数,从而提高加工精度和生产率。

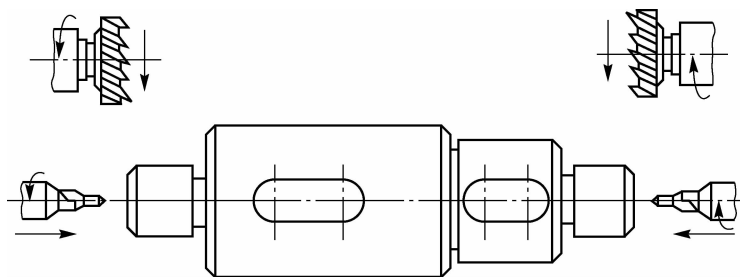


图 1-8 阶梯轴的多工位加工

## 二、生产类型

生产类型的划分主要由生产纲领确定,同时还与产品大小和结构复杂程度有关。不同类型的产品生产类型与生产纲领的关系见表 1-3。生产纲领指企业单位时间内生产产品的

件数,有周生产纲领、月生产纲领、季生产纲领、年生产纲领几种类型,通常也把年生产纲领称为年产量,零件的年生产纲领是指包括备品和废品在内的该产品的年产量。

根据生产纲领的大小和产品品种的多少,机械制造的生产类型可分为单件生产、大量生产和成批生产 3 种类型。

表 1-3 生产类型和生产纲领的关系

| 生产类型 |      | 生产纲领               |                   |                   |
|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|
|      |      | 重型零件<br>(30 kg 以上) | 中型零件<br>(4~30 kg) | 轻型零件<br>(4 kg 以下) |
| 单件生产 |      | ≤5                 | ≤10               | ≤100              |
| 成批生产 | 小批生产 | >5~100             | >10~150           | >100~500          |
|      | 中批生产 | >100~300           | >150~500          | >500~5 000        |
|      | 大批生产 | >300~1 000         | >500~5 000        | >5 000~50 000     |
| 大量生产 |      | >1 000             | >5 000            | >50 000           |

### 1. 单件生产

单件生产是指产品品种多,而每一种产品的结构、尺寸不同,产量很少,各个工作地点的加工对象经常改变,且很少重复的生产类型。例如,新产品试制、重型机械、航天仪器以及专用设备的制造等均属于单件生产。

### 2. 大量生产

大量生产是指产品数量很大,大多数工作地点长期地按固定节拍进行某一个零件的某一道工序的加工。例如,汽车、摩托车、柴油机等的生产均属于大量生产。

### 3. 成批生产

成批生产是指一年中分批轮流地制造几种不同的产品,每种产品均有一定的数量,工作地点的加工对象周期性地重复。例如,机床、电动机等均属于成批生产。

按照成批生产中每批投入生产的数量(即批量)大小和产品的特征,成批生产又可分为小批生产、中批生产和大批生产 3 种。小批生产与单件生产相似,大批生产与大量生产相似,常合称为单件小批生产、大批大量生产,而通常所说的成批生产仅指中批生产。

生产类型不同,产品的制造工艺、工装设备、技术措施、经济效益等也不相同。大批大量生产采用高效的工艺及设备,经济效益好;单件小批生产通常采用通用设备及工装,生产效率低,经济效益较差。各种生产类型的工艺特征见表 1-4。

表 1-4 各种生产类型的工艺特征

| 工艺特征         | 单件小批生产                       | 中批生产                           | 大批大量生产                                    |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|---|
| 毛坯的制造方法及加工余量 | 铸件用木模手工造型,锻件用自由锻。毛坯精度低,加工余量大 | 部分铸件用金属模造型,部分锻件用模锻。毛坯精度及加工余量中等 | 铸件广泛采用金属模造型,锻件广泛采用模锻,以及其他高效方法,毛坯精度高,加工余量小 |

续表

| 工艺特征     | 单件小批生产                               | 中批生产                                 | 大批大量生产                        |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 机床设备及其布置 | 采用通用机床、数控机床。按机床类别采用机群式布置             | 部分采用通用机床及高效机床。按工件类别分工段排列             | 广泛采用高效专用机床及自动机床。按流水线或自动线排列    |
| 工艺装备     | 多采用通用夹具、刀具和量具。靠划线和试切法达到精度要求          | 广泛采用通用夹具,较多采用专用刀具和量具。部分靠找正装夹达到精度要求   | 广泛采用高效率的专用夹具、刀具和量具。用调整法达到精度要求 |
| 工人技术水平   | 技术熟练                                 | 比较熟练                                 | 对操作工人的技术要求较低,对调整工人的技术要求较高     |
| 工艺文件     | 有工艺过程卡,关键工序要工序卡,数控加工工序要详细的工序卡和程序单等文件 | 有工艺过程卡,关键工序要工序卡,数控加工工序要详细的工序卡和程序单等文件 | 有工艺过程卡和工序卡,关键工序需要调整卡和检验卡      |
| 生产率      | 低                                    | 中                                    | 高                             |
| 成本       | 高                                    | 中                                    | 低                             |

## 学习情境二 数控加工设备

数控加工设备是加工制造业的主要设备,本节主要讲述数控加工设备的分类情况,数控生产设备的结构、工作原理以及发展趋势。

### 一、数控加工设备的分类

数控加工设备的种类很多,分类方法也是多种多样。

#### 1. 按加工工艺方法分

##### 1) 金属切削类数控机床

金属切削类数控机床即具有切削加工功能的数控机床,包括数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控齿轮加工机床和加工中心等。在金属切削加工中,常用的有车床、铣床、刨床、磨床、钻床、镗床、插床、拉床、切断机床、齿轮加工机床等设备。目前,国内外都开发了数控产品,品种也分得越来越细。如在数控磨床中不仅有数控外圆磨床、数控内圆磨床、集外圆磨床与内圆磨床功能于一体的数控万能磨床、数控平面磨床、数控坐标磨床、数控工具磨床、数控无心磨床、数控齿轮磨床,还有专用的数控轴承磨床、数控外螺纹磨床、数控内螺纹磨床、数控双端面磨床、数控凸轮轴磨床、数控曲轴磨床、能自动换砂轮的数控导轨磨床(导轨磨削中心)等。

(1)数控车床。如图 1-9 所示为一台数控车床的外观图。数控车床是一种高精度、高效率的自动化机床,可加工直线圆柱、斜线圆柱、圆弧和各种螺纹,具有直线插补、圆弧插补等各种补偿功能,并在复杂零件的批量生产中获得良好的经济效益。



图 1-9 数控车床的外观图

(2)数控铣床。世界上第一台数控机床就是数控铣床,见图 1-1。由于有价格低、操作方便灵活、准备工作时间短等优点,数控铣床广泛应用于航空航天、汽车、机床等行业。数控铣床按主轴的位置可分为立式数控铣床、卧式数控铣床、立卧两用数控铣床等,按结构可分为工作台升降式数控铣床、主轴头升降式数控铣床、龙门式数控铣床等。如图 1-10 所示为一台数控铣床的外观图。



图 1-10 数控铣床的外观图

(3)加工中心。加工中心是数控机床发展到一定阶段的产物。一般将带有自动换刀装置的数控机床称为加工中心。实际上数控加工中心是具有自动刀具交换装置,并能进行多种工序加工的数控机床。它可在工件一次装夹中进行铣、车、钻、扩、铰、攻螺纹等多道工序的加工,适于加工三维复杂曲面。加工中心常分为立式加工中心和卧式加工中心,立式加工中心的主轴是垂直安装的,如图 1-11 所示;卧式加工中心的主轴是水平安装的。在加工中心上,一个工件可以通过夹具安装在回转工作台或交换托盘上,回转工作台可以加工多面体,通过托盘交换可更换被加工工件,提高了加工效率。





图 1-11 立式加工中心的外观图

(4)数控磨床。数控磨床主要用于加工高硬度、高强度表面,可分为数控平面磨床、数控内圆磨床、数控轮廓磨床等。随着砂轮磨损自动补偿技术、自动砂轮修整技术和磨削固定循环技术的发展,数控磨床的功能越来越强。如图 1-12 所示为数控平面磨床的外观图。

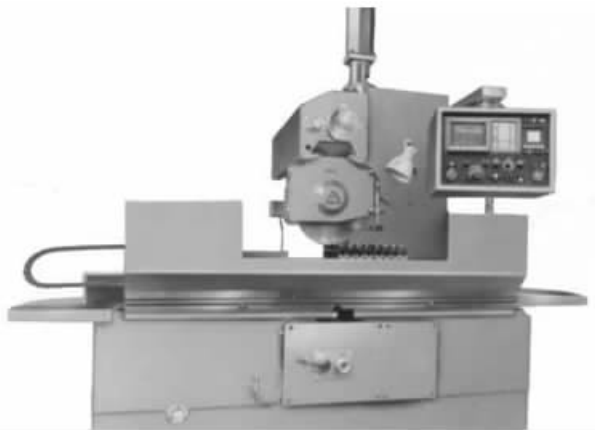


图 1-12 数控平面磨床的外观图

## 2) 板材及成形加工类数控机床

板材及成形加工类数控机床是指只通过物理方法改变工件形状的数控机床,如数控旋压机、数控压力机、数控剪板机和数控折弯机等。如图 1-13 所示为数控折弯机的外观图。



图 1-13 数控折弯机的外观图

### 3) 特种加工类数控机床

特种加工类数控机床是指有特种加工功能的数控机床,如数控电火花线切割机床、数控电火花成形机床、带自动交换电极功能的电加工机床、数控激光切割机床、数控激光热处理机床、数控激光板料成形机床、数控等离子切割机床等。数控电火花线切割机床和数控电火花成形机床分别如图 1-14 和图 1-15 所示。



图 1-14 数控电火花线切割机床



图 1-15 数控电火花成形机床

### 4) 非加工类数控设备

非加工类数控设备是指一些广义上的数控设备,如数控装配机、数控测量机、多坐标测量机、自动绘图机及工业机器人等。如图 1-16 所示为三坐标测量仪。



图 1-16 三坐标测量仪



## 2. 按控制运动的方式分

### 1) 点位控制数控机床

点位控制数控机床仅能控制两个坐标轴带动刀具或工作台,从一个点(坐标位置)快速准确地移动到下一个点(坐标位置),在移动和定位过程中不进行任何加工,然后控制第三个坐标轴进行钻、镗等切削加工,如图 1-17 所示。它具有较高的定位精度,由于在移动过程中不进行切削加工,因此对运动轨迹没有要求。点位控制数控机床主要用于加工平面内的孔系,主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床、数控点焊机、三坐标测量仪等。

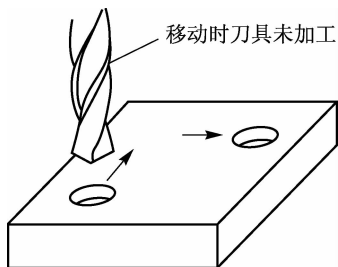


图 1-17 点位控制数控机床加工示意图

### 2) 点位直线控制数控机床

点位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,以一条直线准确地从一个点移动到下一个点,移动过程中能进行切削加工,进给速度可根据切削条件在一定范围内调节,如图 1-18 所示。点位直线控制数控机床主要有简易数控车床、数控镗铣床等。

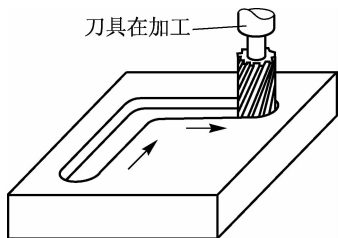


图 1-18 点位直线控制数控机床加工示意图

### 3) 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床具有控制几个坐标轴同时协调运动即多坐标轴联动的能力,使刀具相对于工件按程序规定的轨迹和速度运动,能在运动过程中进行连续切削加工,如图 1-19 所示。轮廓控制数控机床不仅可完成点位控制及点位直线控制数控机床的加工功能,而且能够对两个或两个以上坐标轴进行插补,因而能切削加工各种轮廓的工件。

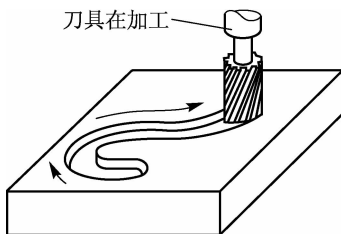


图 1-19 轮廓控制数控机床加工示意图

轮廓控制数控机床的结构要比点位直线控制数控机床的结构更复杂,在加工过程中需要不断进行插补运算,然后进行相应的速度与位移控制。这类数控机床有用于加工曲线和曲面形状零件的数控车床、数控铣床、加工中心等。

### 3. 按控制系统的特点分

#### 1) 开环控制数控机床

开环控制数控机床不带反馈装置,通常用步进电动机作为伺服执行机构,如图 1-20 所示。开环控制数控机床结构简单,成本较低,不能进行误差校正,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。开环控制数控机床仅适用于加工精度要求不高的中小型数控机床,特别是简易经济型数控机床。

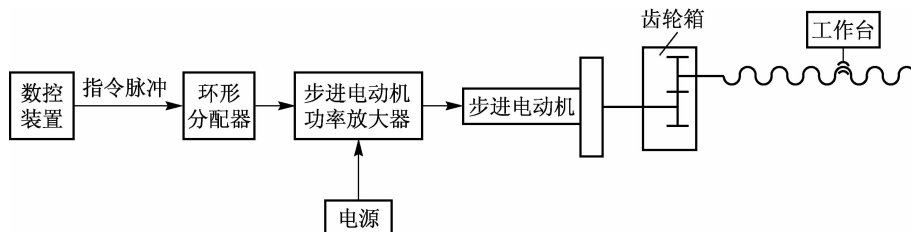


图 1-20 开环控制数控机床

#### 2) 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床的特点是在伺服电动机的轴或数控机床的传动丝杠上装有角位移检测装置(如光电编码器等),通过检测丝杠的回转角间接地检测工作台的实际位移,然后反馈到控制器中进行比较,并对误差进行修正,如图 1-21 所示。半闭环数控系统的调试比较方便,并且具有很好的稳定性。目前,多将角位移检测装置和伺服电动机设计成一体,使结构更加紧凑。

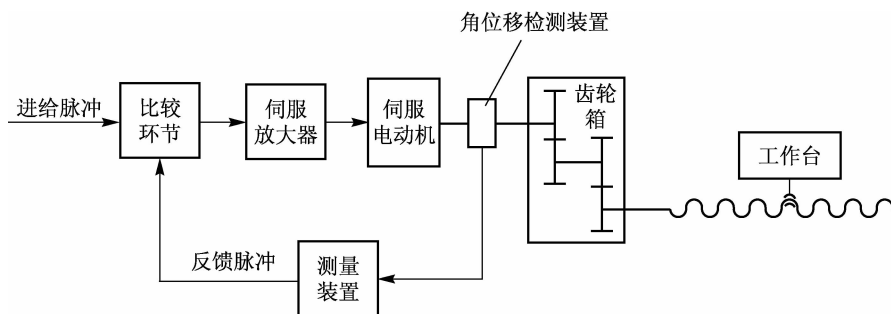


图 1-21 半闭环控制数控机床

#### 3) 全闭环控制数控机床

全闭环控制数控机床的特点是在机床工作台上直接安装直线位移检测装置,将测量的实际位移值反馈到数控装置中,与输入位移值进行比较,用差值对机床进行控制,如图 1-22 所示。

#### 4) 混合控制数控机床

将前 3 类数控机床的特点结合起来,就形成了混合控制数控机床。混合控制系统特别适用于大型或重型数控机床。混合控制系统又分为开环补偿型和半闭环补偿型。开环补偿



型控制系统的特点是用开环伺服机构加一个校正电路,通过装在工作台上的测量元件反馈的信号校正机械系统的误差。半闭环补偿型的特点是用半闭环控制方式取得高速度控制,再通过测量元件实现全闭环修正,以获得高速度和高精度。

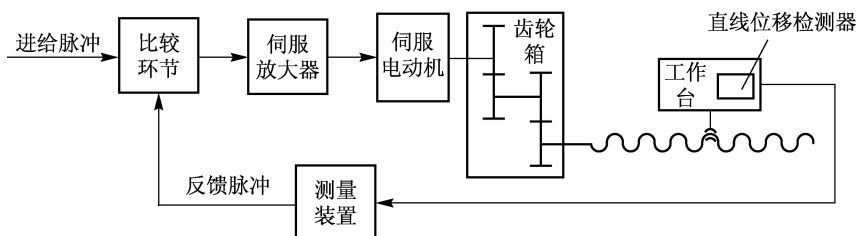


图 1-22 全闭环控制数控机床

## 二、数控加工设备的结构

数控加工设备一般由计算机数控装置、伺服单元、驱动装置、检测装置、输入输出(I/O)设备、辅助控制装置和机床本体组成。如图 1-23 所示为数控机床的组成图。

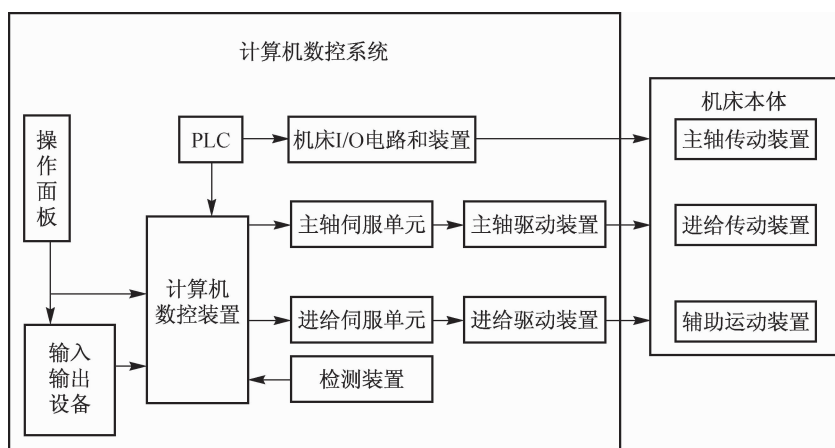


图 1-23 数控机床的组成

### 1. 计算机数控装置

计算机数控装置是数控机床的中枢。数控装置从内部存储器中取出或接受输入装置送来的一段或几段数控加工程序,通过数控装置的逻辑电路或系统软件进行编译、运算和逻辑处理后,输出各种控制信息和指令,控制机床各部分的工作,使其进行规定的有序运动和动作。

零件的轮廓图往往由直线、圆弧或其他非圆弧曲线组成,刀具在加工过程中必须按零件形状和尺寸的要求运动,即按图形轨迹移动。而编辑零件加工程序只能是各线段轨迹的起点与上一线段轨迹的终点坐标值数据相等,如不能满足其要求,则要进行轨迹插补,也就是在线段的起点和终点坐标值之间进行数据点的密化,求出一系列中间点的坐标值,并向相应坐标输出脉冲信号,控制各坐标轴(即进给运动各执行部件)的进给速度、进给方向和进给位移量等。

## 2. 伺服单元、驱动装置和检测装置

伺服单元和驱动装置包括主轴伺服单元、主轴驱动装置、主轴电动机、进给伺服单元、进给驱动装置及进给电动机。驱动装置接收来自数控装置的指令信息,经功率放大后,严格按照指令信息的要求驱动机床的移动部件,以加工出符合图样要求的零件。驱动装置包括控制器(含功率放大器)和执行机构两大部分。目前大都采用直流或交流伺服电动机作为执行机构。

检测装置将数控机床各坐标轴的实际位移量检测出来,经反馈系统输入到机床的数控装置中。数控装置将反馈回来的实际位移量值与设定值进行比较,控制驱动装置按指令设定值运动。

## 3. 输入输出设备

输入输出 I/O 设备是操作人员与数控机床(系统)进行信息交换的工具。可以通过它对数控机床(系统)进行操作、编程、调试或对机床参数进行设定和修改,也可以通过它了解或查询数控机床(系统)的运行状态。它主要由状态灯、操作面板和显示器等部分组成。

## 4. 辅助控制装置

现广泛采用可编程控制器 PLC 作为数控机床的辅助控制装置。机床 I/O 电路和装置是由继电器、电磁阀、行程开关、接触器等组成的逻辑电路,用于实现 I/O 控制,这部分属于辅助控制装置。其主要作用是接收数控装置输出的开关量指令信号,经过编译、逻辑判别和运算,再经功率放大后驱动相应的电器,带动机床的机械、液压、气动等辅助装置完成指令规定的开关量动作。如主轴运动部件的变速、换向和启停指令,刀具的选择和交换指令,冷却、润滑装置的启停,工件和机床部件的松开、夹紧,分度工作台转位分度等开关辅助动作。

## 5. 机床本体

数控机床的机床本体与传统机床相似,由主轴传动装置、进给传动装置、辅助运动装置、床身、工作台等组成。

# 三、数控加工设备的工作原理

数控加工是根据零件图样及工艺要求等原始条件编制零件数控加工程序,并将程序输入数控系统,控制数控机床中刀具与工件的相对运动,从而完成零件的加工。

数控加工技术是一门综合普通金属切削加工、计算机数控、计算机辅助制造等技术的先进加工技术。在以上各个领域技术进步的推动下,尤其是计算机技术的飞速发展下,数控加工技术正从深度、广度上对机械加工技术进行变革。数控从业人员要制订出合理的数控加工工艺并编写出零件加工程序,首先必须掌握数控加工的基本原理。

## 1. 数控加工原理

在 CNC 机床上,传统加工过程中的人工操作均被数控系统的自动控制所取代。利用 CNC 机床加工零件的工作过程如下:首先,将被加工零件图上的几何信息和工艺信息数字化,即将刀具和工件的相对运动轨迹、加工过程中主轴速度和进给速度的变换、冷却液的开关、工件和刀具的交换等控制和操作按规定的代码和格式编制零件加工程序;然后,将零件加工程序输入数控系统,数控系统则按照程序的要求,进行相应的运算、处理;最后,由数控系统发出控制命令,使各坐标轴运动与辅助动作相互协调,实现刀具与工件的相对运动,自动完成零件的加工。



## 2. 数控加工中的数据转换过程

CNC 系统的数据转换过程如图 1-24 所示。

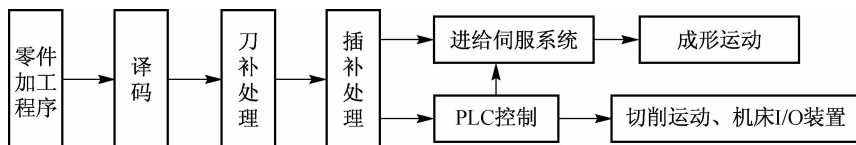


图 1-24 CNC 系统的数据转换过程

### 1) 译码

译码程序的主要功能是将用文本格式(通常用 ASCII 码)表达的零件加工程序以程序段为单位转换成刀补处理程序所要求的数据结构(格式)。该数据结构用来描述一个程序段的数据信息。这些数据信息主要包括坐标值、进给速度、主轴转速、G 指令、M 指令、刀具号、子程序处理和循环调用处理等数据或标志的存放顺序和格式。

### 2) 刀补处理

为方便编程,零件加工程序通常按零件轮廓尺寸和工艺要求编制,而数控机床在加工过程中控制的是刀具中心(刀位点)轨迹。因此,加工前必须将编程轨迹变换成刀具中心的轨迹,刀补处理就是完成这种转换的处理。

### 3) 插补处理

数控编程提供了刀具运动的起点、终点和运动轨迹,而刀具如何从起点沿运动轨迹走向终点,则由数控系统的插补装置或插补软件来控制。该程序以系统规定的插补周期定时运行,它将各种线形(直线、圆弧等)组成的零件轮廓,按程序给定的进给速度,实时计算各个进给轴在插补周期内的位移,并传送给进给伺服系统,实现成形运动。

### 4) PLC 控制

CNC 系统对机床的控制分为对各坐标轴速度和位置的轨迹控制和对机床动作的顺序控制(或称为逻辑控制)。后者是指在数控机床运行过程中,以机床各行程开关、传感器、按钮、继电器等开关信号状态为条件,并按预先规定的逻辑关系对主轴的启停、换向,刀具的更换,工件的夹紧、松开,液压系统、冷却系统、润滑系统的运行等进行控制。PLC 就是实现上述功能的功能模块。

通过以上介绍可知,数控加工的原理就是将预先编制的零件加工程序,以数据的形式输入数控系统,数控系统通过译码、刀补处理、插补处理等数据处理和 PLC 协调控制,最终实现零件的自动化加工。

## 学习情境三 数控加工技术发展趋势

制造对象、制造材料、制造手段和制造环境的不断变化为制造科学带来了新的挑战和课题,数控技术与此息息相关,并将朝着高速化、高精化、极端化、智能化、高柔性集成化及网络化等方向发展。这些方面彼此渗透,使整体数控加工技术向计算机集成制造系统 CIMS 的方向发展。

### 1. 高速化

受高生产率的驱使,高速化已是现代机床技术发展的重要方向之一,机床高速化既表现在主轴转速上,也表现在工作台快速移动和进给速度的提高,以及刀具交换时间、托盘交换时间的缩短上。

在高速切削机床上,主轴的高转速减小了切削力,也减小了切削深度,有利于克服机床振动,排屑率大大提高,热量被切屑带走,传入零件中的热量降低,热变形大大减小,提升了加工精度,也改善了加工面的表面质量。因此,经过高速加工的工件一般不需要精加工。

### 2. 高精化

以前的汽车零件的加工精度要求一般在 0.01 mm 数量级以上,但随着高速计算机、高精度液压轴承等精密零件的增多,精整加工所需精度已提高到 0.1  $\mu\text{m}$ ,加工精度进入了亚微米级。

提高数控设备的加工精度,除通过提高机械设备的制造精度和装配精度外,还可通过减小数控系统的控制误差或采用补偿技术来达到。在减小数控系统控制误差方面,通常采用提高数控系统的分辨率,以微小程序段实现连续进给使数控控制单位精细化;提高位置检测精度;以及位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制等方法。在采用补偿技术方面,除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿和刀具误差补偿等技术外,近年来的研究热点设备的热变形误差补偿和空间误差综合补偿技术也能大大提高加工精度。研究表明,应用综合误差补偿技术可将加工误差减少 60%~80%。

### 3. 极端化

极端化是指生产特殊产品的制造技术必须达到“极”的要求。例如,能在高温、高压、高湿、强冲击、强磁场、强腐蚀等条件下工作,或具有高硬度、大弹性等特点,或超大、超微、超厚、超薄。极端化加工技术将沟通微观世界与宏观世界,其深远意义难以估量。

### 4. 智能化

未来的数控装备将是具有一定智能的系统,智能化的内容包括在数控系统中的各个方面:加工效率和加工质量方面的智能化包括加工过程的自适应控制、工艺参数自动生成,驱动性能及使用连接方面的智能化包括前馈控制、电动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,简化编程和简化操作方面的智能化包括自动编程、人机界面等,除此之外,还有智能诊断、智能监控等方面的内容,以方便系统的诊断及维修。

### 5. 网络化

在网络化和数字化的时代,网络化、数字化以及新的制造理论深刻地影响着新世纪的制造模式和制造观念。作为制造装备的数控机床也必须适应新的制造模式和观念,必须满足网络环境下制造系统集成要求。具有联网功能正逐渐成为现代数控设备的特征之一,如数控机床的远程故障诊断、远程状态监控、远程加工信息共享、远程操作、远程培训等都是以前网络功能为基础的。

### 6. 集成化

集成化一方面表现为数控机床向柔性自动化发展,即其控制从点(数控单机、加工中心和数控复合加工机床)、线(柔性制造单元 FMC、柔性制造系统 FMS、柔性生产线 FTL、柔性制造生产线 FML)向面(工段车间独立制造、工厂自动化 FA)、体(计算机集成制造系统





CIMS、分布式网络集成制造系统)的方向发展,另一方面表现为向注重应用性和经济性方向发展。柔性自动化技术是制造业适应动态市场需求及产品迅速更新的主要手段,是制造业发展的主流趋势,是先进制造领域的基础技术。其重点是以提高系统的可靠性、实用化为前提,以易于联网和集成为目标,注重加强单元技术的开拓和完善。数控机床单机生产向高精度、高速度和高柔性方向发展,其柔性制造系统能方便地与 CAD、CAM、CAPP 及 MTS 等联系,向信息集成方向发展。近年来,微电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与技术、信息科学与技术以及系统科学与技术等获得了迅速的发展,它们与数控制造相结合,为机械制造自动化提供重要的理论基础和技术支持。经通信网络连接的各个子系统,构成一个有机联系的整体,即自动化工厂。在激烈的竞争市场中,计算机集成制造系统能为现代制造企业快速、灵活地响应市场变化提供所要求的战略性系统技术。



### 思考与练习

1. 简述生产过程、工艺过程、工序、工步、走刀、安装、工位的概念。
2. 生产类型是如何分类的? 不同生产类型各有何特点?
3. 什么是数字控制? 数控机床的加工原理是什么?
4. 数控加工设备是怎样分类的? 数控加工设备由哪几部分组成? 各有什么作用?
5. 什么是开环、全闭环、半闭环数控机床? 它们之间有什么区别?
6. 简述数控加工中的数据转换过程。
7. 简述数控机床进行零件加工的一般过程。
8. 简述数控加工技术的发展方向。

## 单元二

# 零件加工误差分析



### 知识目标

了解机械加工质量；  
掌握影响加工精度的因素；  
掌握影响机械加工表面质量的因素及其控制。



### 技能目标

掌握保证加工精度的工艺措施；  
掌握控制表面质量的工艺途径。



### 单元导读

对任何一台机器或仪器而言,为保证它们的使用性能,必然对其组成零件提出许多方面的质量要求。机械加工精度、机械加工表面质量是质量要求的两个主要方面。加工误差的大小反映了加工精度的高低,研究加工误差的目的就是要分析影响加工精度的各种因素及其存在的规律,从而找出减小加工误差、提高加工精度的合理途径。零件的机械加工是在由机床、刀具、夹具和工件组成的工艺系统内完成的。零件加工表面的几何尺寸、几何形状和加工表面之间的相互位置关系取决于工艺系统间的相对运动关系。因此,工艺系统中的各种误差就会以不同的程度和方式反映为零件的加工误差。



### 相关知识

## 学习情境一 机械加工质量概述

零件的加工质量是保证机械产品质量的基础,包括机械加工精度和表面质量等方面的要求。零件的加工精度并不是越高越好,一般情况下,零件的加工精度越高,则加工成本相对地增加,生产率相对地降低。设计人员应根据零件的使用要求,合理地规定零件的加工精度。工艺人员则应根据设计要求、生产条件等采取适当的工艺方法,以保证加工误差不超过允许范围,并在此前提下尽量提高生产率和降低加工成本。

### 1. 加工精度

加工精度是指零件加工后实际的几何参数(几何尺寸、几何形状和表面间的相对位置)

与理想零件的几何参数的符合程度。符合程度愈高,加工精度愈高。理想的几何参数对几何尺寸而言,就是平均尺寸;对表面几何形状而言,就是绝对的圆、圆柱、平面、锥面和直线等;对表面之间的相对位置而言,就是绝对的平行、垂直、同轴、对称等。

加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度。

#### 1) 尺寸精度

尺寸精度是指加工后零件的实际尺寸与零件尺寸公差带中心的符合程度。

#### 2) 形状精度

形状精度是指加工后零件表面的实际几何形状与理想几何形状的符合程度。

#### 3) 位置精度

位置精度是指加工后零件有关表面之间的实际相对位置与理想相对位置的符合程度。

### 2. 加工误差

加工误差是指零件加工后实际的几何参数与理想零件的几何参数的不符合程度。

加工精度与加工误差都是评价加工表面几何参数的术语。加工精度用公差等级衡量,等级值越小,精度越高;加工误差用数值表示,数值越大,误差越大。加工精度高,则加工误差小,反之亦然。

### 3. 加工经济精度

由于在加工过程中有很多因素影响加工精度,所以同一种加工方法在不同的工作条件下所能达到的精度是不同的。不论何种加工方法,只要认真操作、调整,选择合适的切削参数进行加工,都能得到较高的加工精度,但这样往往会降低生产率,增加加工成本。加工误差 $\delta$ 与加工成本 $C$ 成反比。某种加工方法的加工经济精度不应理解为某一个确定值,而应理解为一个范围,在这个范围内都可以说是经济的。

## 学习情境二 影响加工精度的因素

在机械加工过程中,往往有很多因素影响工件的最终加工质量。如何使工件的加工精度达到质量要求,如何减少各种因素对加工精度的影响,就成为加工前必须考虑的问题,也就是要对影响加工精度的因素进行分析。由机床、夹具、刀具和工件组成的工艺系统存在各种误差,这些误差会在不同的具体条件下,以不同的程度反映到加工零件上去,造成加工误差。这种造成加工误差的工艺系统原有误差,称为原始误差。原始误差主要有工艺系统的几何误差、定位误差、工艺系统受力变形引起的加工误差、工艺系统受热变形引起的加工误差、工件内应力重新分布引起的形变误差以及原理误差、调整误差、测量误差等。

### 一、原理误差

原理误差是指加工工艺中采用了近似的成形运动或刀刃形状而产生的误差。例如,滚齿时,由于滚刀的刀刃数有限,加工出来的齿轮齿形是有限个刀刃切成的折线;或由于滚刀制造困难,采用阿基米德基本蜗杆代替渐开线基本蜗杆,由此产生的加工误差都属于原理误差。如图 2-1 所示为采用阿基米德基本蜗杆加工齿轮的示意图。

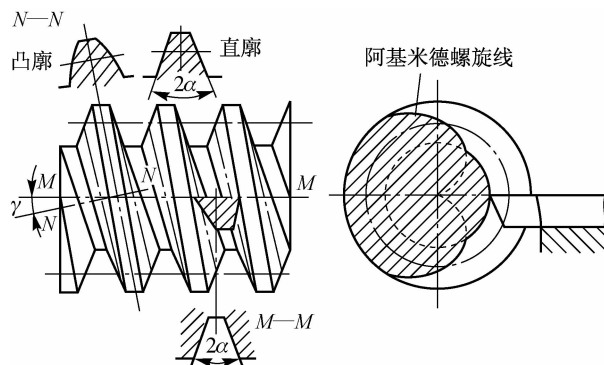


图 2-1 采用阿基米德基本蜗杆加工齿轮

采用成形法铣齿时,由于铣刀分 8 个刀号,每一个刀号在该组内加工齿轮,齿数最少的齿轮,其齿形最精确,其他齿轮只能获得近似的齿形。因此,铣齿产生的加工误差也属于原理误差,如图 2-2 所示。

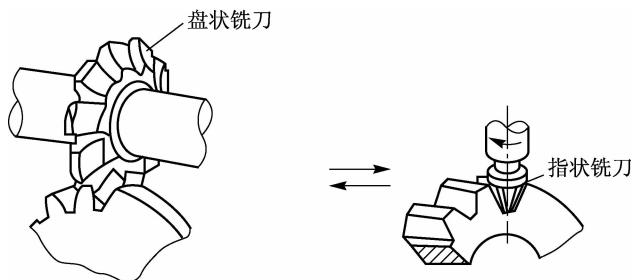


图 2-2 采用成形法铣齿

## 二、工艺系统的几何误差

### 1. 机床的几何误差

加工过程中刀具相对于工件的成形运动一般都是通过机床完成的。因此,工件的加工精度在很大程度上取决于机床的精度。机床的几何误差中对工件加工精度影响较大的有主轴回转误差、导轨误差和传动链误差。另外,机床的磨损会使机床工作精度下降。

#### 1) 主轴回转误差

机床工作时,由于主轴部件在制造、装配过程中存在各种误差,使得主轴回转轴线的空间位置在每一瞬间都处于变动状态,而产生回转误差。机床主轴是装夹工件或刀具的基准,并将运动和动力传给工件或刀具,主轴回转误差将直接影响工件的精度。

主轴回转误差是指主轴的实际回转轴线相对其平均回转轴线的变动范围。变动范围愈小,其回转误差越小。

(1) 主轴回转误差的基本形式。主轴回转误差包括轴向窜动、角度摆动和径向跳动 3 种基本形式,如图 2-3 所示。

① 轴向窜动是指瞬时回转轴线沿平均回转轴线的轴向运动。

② 角度摆动是指瞬时回转轴线与平均回转轴线成一倾斜角,但其交点位置固定不变的运动。

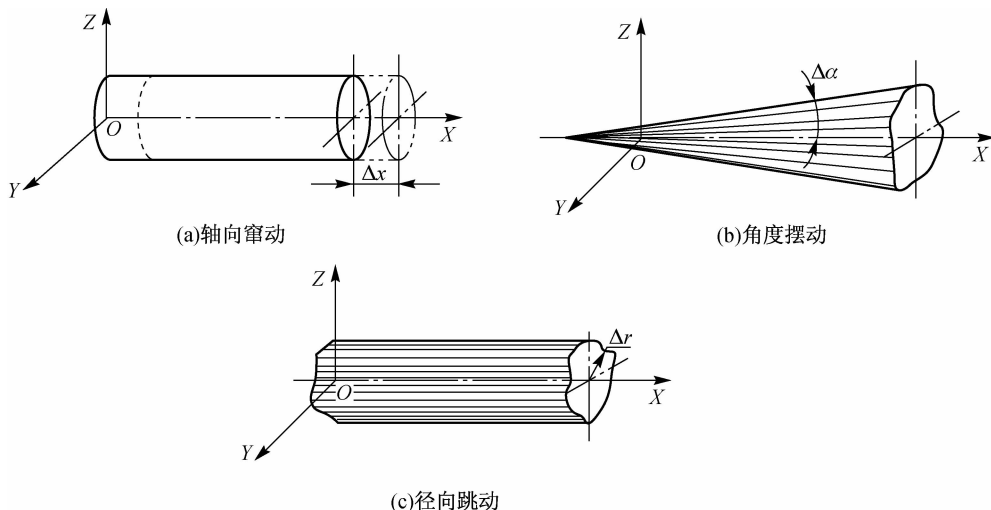


图 2-3 主轴回转误差的 3 种基本形式

③径向跳动是指瞬时回转轴线沿平均回转轴线的径向运动。

(2)影响主轴回转误差的因素及分析。主轴回转误差和主轴部件各组成零件的制造误差、装配误差与零件加工方法有关。

车磨类机床主轴所受的切削力方向基本是不变的。切削时,主轴颈被压向轴承孔内表面的某一固定部位。主轴颈在转动时,将其轴颈上的圆度误差传递给工件,导致在加工的工件上产生相同的圆度误差。而这种圆度误差对加工精度的影响极小。镗床类机床主轴轴承孔内表面所受切削力的方向是随镗刀的旋转而变化的,因此,使主轴轴颈上某一固定部位与轴承孔的不同部位相接触,这样,轴承孔的圆度误差将传递给工件,而主轴轴颈的误差对工件的影响不大。对于滚动轴承支承的主轴部件,其回转精度不仅与滚动轴承本身的精度有关,还在很大程度上与轴承配合件的精度有关。

(3)主轴回转误差对加工精度的影响。

①主轴的角度摆动对工件加工精度的影响。车削加工时,主轴的角度摆动会对工件加工精度造成一定的影响,工件径向截面仍然是一圆形,而轴向截面则是一个梯形,见图 2-3(b)。

镗削加工时,由于主轴的角摆动形成的回转轴线与工作台导轨不平行,镗出的孔将为椭圆形。

②主轴的轴向窜动对工件加工精度的影响。主轴的轴向窜动对外圆与内孔的形状精度没有影响,而对端面与内、外圆垂直度有一定的影响。主轴每转一周,就要沿轴向窜动一次,在向前窜动的半周中形成右螺旋面,在向后窜动的半周中形成左螺旋面,最终切出的端面呈类似凸轮端面的形状。当加工螺纹时,则将产生螺距的周期误差。

③主轴的径向跳动对工件加工精度的影响。车削加工时,支承轴颈的圆度误差会引起主轴的径向跳动,主轴的径向跳动对工件的圆度影响较小,而对工件的径向尺寸则有较大的影响,如图 2-4 所示。

假定主轴轴心沿 Y 轴作简谐直线运动,在工件的 1 处(主轴中心偏移最大处)切出的半径比 2、4 处切出的半径小一个幅值 A,而在 3 处切出的半径比 2、4 处切出的半径大一个幅值 A,则 1、2、3、4 各点的半径均相等,所以车出的工件表面近似一个圆。

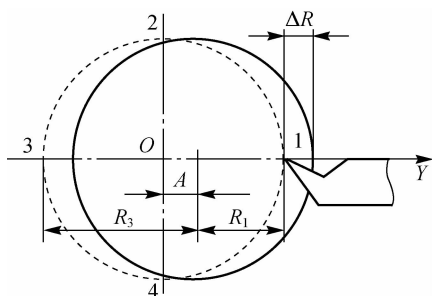


图 2-4 径向跳动对加工精度的影响

如图 2-5 所示, 主轴回转轴心线的任一方向的径向跳动, 可以分解为沿刀尖处加工表面法向分量  $\Delta y$  和切向分量  $\Delta z$ 。

由图 2-5 可知, 切向分量  $\Delta z$  产生的半径误差  $\Delta R$  的推导公式为

$$(R + \Delta R)^2 = \Delta z^2 + R^2 \tag{2-1}$$

整理、略去  $\Delta R^2$ , 得

$$\Delta R = \frac{\Delta z^2}{2R} \tag{2-2}$$

设  $\Delta z = 0.01 \text{ mm}$ ,  $R = 50 \text{ mm}$ , 则

$$\Delta R = \frac{0.01^2}{2 \times 50} \text{ mm} = 0.000\ 001 \text{ mm}$$

此值可忽略不计。

而法线方向上的误差将 1 : 1 反映到工件的半径上去。如误差仍为  $\Delta y = 0.01 \text{ mm}$ , 则在工件法线方向上造成的半径误差就是  $0.01 \text{ mm}$ , 它是切线方向上误差的  $10^4$  倍。因此, 法线方向称为误差的敏感方向。

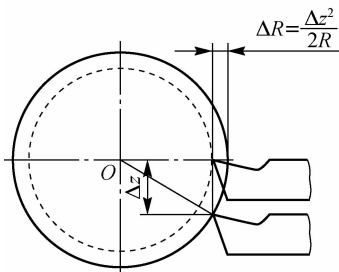


图 2-5 主轴的径向跳动

(4) 提高主轴回转精度的措施, 具体如下。

① 采用高精度的主轴部件。获得高精度主轴部件的关键是提高轴承精度, 所以主轴轴承, 特别是前轴承, 多选用 D、C 级轴承, 当采用滑动轴承时, 应采用静压滑动轴承, 以提高轴系刚度, 减少径向跳动; 其次是提高主轴箱体支承孔、主轴轴颈和与轴承相配合零件的有关表面的加工精度, 对滚动轴承进行预紧。

② 使主轴回转误差不反映到工件上。采用双死顶尖装夹工件, 可减小机床主轴回转误差对工件加工精度的影响。如采用死顶尖磨削外圆, 只要保证定位中心孔的形状、位置精度, 即可加工出高精度的外圆柱面。主轴仅提供旋转运动和转矩, 而主轴的回转精度与工



件无关。

③提高主轴支承轴承的精度并进行精细的调整安装。如使用精密滚动轴承,或液体、气体静压轴承。主轴部件装配时,应合理地确定各相关零件的精度,采用轴颈与轴承圈误差抵消法或角度选配法精细调整安装并尽量消除轴承间隙。

## 2) 导轨误差

导轨是机床上确定各机床部件相对位置关系的基准,也是机床运动的基准。除了导轨本身的制造误差外,导轨的不均匀磨损和安装质量也是造成导轨误差的重要因素。导轨不均匀磨损是机床精度下降的主要原因之一。

(1)机床导轨的制造误差。机床导轨的制造误差包括导轨在水平面的直线度误差,如图 2-6(a)所示;导轨在垂直面的直线度误差,如图 2-6(b)所示;前后导轨在垂直面的平行度误差,如图 2-6(c)所示。

(2)导轨误差对加工精度的影响。以车床车削为例,在车削外圆表面时,车床导轨在水平面内直线度误差中的径向误差 1:1 反映到工件加工表面上,轴向误差为圆锥度误差。车床导轨在垂直平面内直线度误差对径向尺寸的影响可以忽略,轴向截面则为一双曲面。

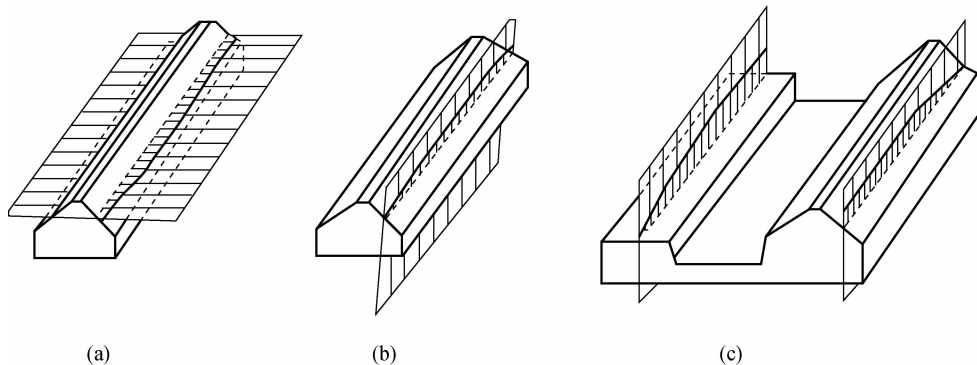


图 2-6 机床导轨的制造误差

(3)提高导轨精度的措施,具体如下。

①设计制造导轨时,应从结构、材料、润滑方式、防护装置等方面进行优化,提高其制造精度及耐磨性。

②使用过程中应精心维护,注意润滑,避免导轨非正常磨损。

## 3) 传动链误差

传动链误差是指传动链始末两端传动元件间相对运动的误差。一般用传动链末端元件的转角误差来衡量。

(1)引起机床传动链误差的原因。机床的运动是通过某些传动机构实现的。如滚齿机的分齿机构、车床车削螺纹时工件与丝杠间的挂轮机构,它们都是通过齿轮副、蜗轮蜗杆副、丝杠螺母副等传动副多级传动来实现的。这些元件本身存在的制造、安装误差,以及工作过程中的磨损所造成的误差,将引起传递与运动的不准确,从而影响工件的加工精度。例如,滚齿机分齿机构中各传动件制造、安装误差,会引起齿轮转角不均匀而产生分齿误差;车床车削螺纹时,工件至传动丝杠间各传动元件的制造、安装误差,都会引起加工螺纹的螺距误差。

(2)提高机床传动精度的措施,具体如下。

- ①缩短传动链,减少传动元件数目,从而减少误差来源。
- ②提高传动元件精度,特别是末端传动元件的制造和安装精度。
- ③消除间隙,传动元件间的间隙会造成瞬时速度不均。
- ④采用误差校正机构。

## 2. 刀具的几何误差

刀具的几何误差对加工精度的影响如下。

- (1)一般刀具(车刀、镗刀和刨刀等)的几何误差对工件加工精度没有直接影响。
- (2)定尺寸刀具(钻头、铰刀和拉刀等)的几何误差将直接影响工件加工精度。
- (3)成形刀具(成形车刀或成形铣刀)的几何误差将直接影响工件的形状精度。
- (4)刀具磨损将影响工件加工精度。如加工一根长轴时,车刀磨损将使轴产生锥度。采用调整法加工时,刀具磨损将使一批工件产生尺寸分散。
- (5)成形刀具的磨损将引起被加工表面的形状误差。

## 3. 夹具的几何误差

组成夹具的各元件的制造误差及夹具中定位元件间的位置误差将会产生定位误差,使被加工零件产生加工误差。夹具的作用是使工件相对于刀具和机床具有正确的位置,因此,夹具的几何误差对工件的加工精度(特别是位置精度)有很大影响。夹具的几何误差主要由以下几个方面引起。

- (1)定位元件、刀具导向元件、分度机构和夹具体的制造误差。
- (2)夹具元件装配误差。
- (3)夹具在长期使用过程中工作表面的磨损。

## 4. 工件安装误差

工件的定位、夹紧不当,会使工件偏离正确位置而产生加工误差,包括基准不重合误差和定位不准确误差。

### 1) 基准不重合误差

基准不重合误差只有在采用调整法加工时才会出现,在试切法加工中不会出现。

### 2) 定位不准确误差

工件在夹具中的正确位置是由夹具上的定位元件来确定的。基准不重合误差的方向和定位不准确误差的方向可能不相同,定位误差为基准不重合误差和定位不准确误差的矢量和。

## 5. 调整误差

在零件加工过程中,为了获得良好的形状、尺寸和位置精度,必须对机床、夹具、刀具和工件进行调整。调整方法有试切法和调整法。

### 1) 试切法

对工件进行试切→测量→调整→再试切,直到达到要求的精度为止,应用于单件小批生产中。这时引起调整误差的因素如下。

(1)测量误差。测量误差由量具本身精度、测量方法及使用条件引起。

(2)进给机构的位移误差。在微量调整刀具的位置时或低速微量走刀中,常常出现走刀机构的“爬行”现象,其结果使刀具的实际位移与刻度盘上的数值不一致,造成加工误差。

(3)试切时与正式切削时切削层厚度不同的影响。精加工试切时,切削刃只起挤压作用而不起切削作用切削深度较浅,但正式切削时的切削深度较大。





## 2) 调整法

由于调整机床、夹具、刀具、工件而产生的误差就是调整误差。影响调整精度的因素如下：

(1) 影响试切法调整精度的各种因素。因为采用调整法对工艺系统进行调整时，也要以试切为依据。

(2) 行程挡块、靠模及凸轮等机构的刚度和制造精度。用定程机构调整时，调整精度取决于行程挡块、靠模及凸轮等机构的刚度和制造精度。

(3) 样件或样板的制造、安装精度和对刀精度。用样件或样板调整时，调整精度取决于样件或样板的制造、安装精度和对刀精度。

工艺系统初调准以后，一般要试切几个工件，并以其平均尺寸作为判断调整是否准确的依据。由于试切加工的工件数（称为抽样件数）不可能太多，不能完全反映整批工件切削过程中的各种随机误差，因此，试切加工几个工件的平均尺寸与总体平均尺寸不能完全符合，这也会造成加工误差。

## 6. 测量误差

工件在加工过程中要用各种量具、量仪等进行检验测量，再根据测量结果对工件进行试切或对机床进行调整。量具本身的制造误差、测量时的接触力、温度、目测准确程度等，都直接影响加工误差。因此，要正确地选择和使用量具，以保证测量精度。

## 三、工艺系统受力变形对加工精度的影响

机械加工时，在切削力、传动力、惯性力、夹紧力以及重力的作用下，工艺系统将产生相应的变形和振动。这种变形和振动破坏了工件和刀具之间的准确位置与速度关系，也破坏了切削过程的稳定性，从而造成了被加工零件的各种误差及表面粗糙度。例如，加工细长轴时，在切削力作用下，工件因弹性变形产生“让刀”现象，中部变形最大，切深最小，而两端变形最小，切深减小量不大，使加工出的轴的外圆柱面呈腰鼓形，如图 2-7 所示。此图也能反映出工艺系统受力变形对加工精度的影响。由材料力学知识可知，任一物体在外力的作用下，总要产生变形，其变形量的大小与外力和物体本身的刚度有关。

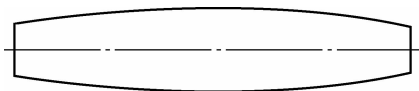


图 2-7 工艺系统受力变形对加工精度的影响

### 1. 各种受力变形引起的误差

在工艺系统中，只有工件和刀具一般是简单构件，其刚度及变形问题是一般的材料力学问题；但对于机床及刀架等部件则是由许多零件组成的复杂构件，其刚度及变形问题主要牵涉到接触面间存在接触变形（接触变形与受力不是线性关系）、薄零件本身的变形、间隙等方面的影响。构件由于装配间隙的影响将产生较大的变形。

#### 1) 切削力引起的加工误差

切削力着力点位置变化以及切削力大小变化都会对加工精度产生影响。在加工过程中，由于工件的加工余量不均或工件材料的硬度不均，将引起切削力大小的变化，导致工艺系统受力变形随切削力大小的变化而变化，造成加工误差。如图 2-8 所示，由于工件加工前存在圆度误差，在切削时，切深不一致（ $a_{p1} > a_{p2}$ ），因此，工艺系统的受力变形量也不一致

( $y_1 > y_2$ ), 这样, 在加工后, 工件上仍留有较小的圆度误差。把工件加工前的误差以相似的形状反映到加工后的工件上去的这一规律, 称为误差复映。

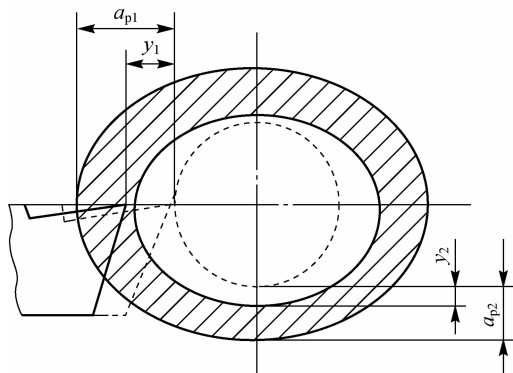


图 2-8 误差复映现象

### 2) 夹紧力引起的加工误差

当工件的刚度较差时, 因夹紧时的变形所引起的加工误差是影响加工精度的主要问题。如图 2-9 所示依次为用三爪卡盘夹紧工件、加工内孔、加工后松开工件时工件内孔产生的误差。

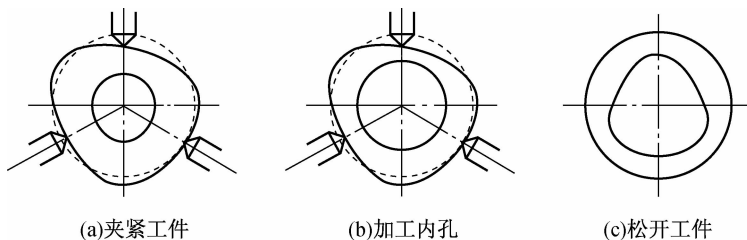


图 2-9 夹紧力引起的误差

### 3) 离心力(或惯性力)对加工精度的影响

在加工过程中, 高速回转的零部件(夹具、工件、刀具)的不平衡将产生离心力, 离心力不断改变方向, 它在法向方向分力大小的变化, 将会使工艺系统的受力变形也随之变化, 从而产生加工误差。

### 4) 传动力(或拨动力)引起的加工误差

采用双顶尖拨盘卡箍装夹工件在车床或磨床上加工时, 单爪拨盘传动力不断改变方向, 使切削力随之变化, 从而产生加工误差。

### 5) 机床部件自重引起的加工误差

如图 2-10 所示为摇臂钻床自重导致主轴倾斜。由于摇臂和其上主轴部件的重量, 将引起机床有关部件变形, 使主轴回转轴线与工作台不垂直, 造成钻孔轴线的倾斜。

## 2. 减小工艺系统受力变形的途径

减小工艺系统受力变形的途径有以下几种措施。

(1) 提高接触刚度。提高接触刚度常用的方法, 一个是改善工艺系统主要零部件接触表面的配合质量, 另一个是预加载荷。预加载荷既可以消除配合面间的间隙, 又能使零部件之间有较大的实际接触面, 减少受力后的变形量。预加载荷法常在轴承的调整中使用。

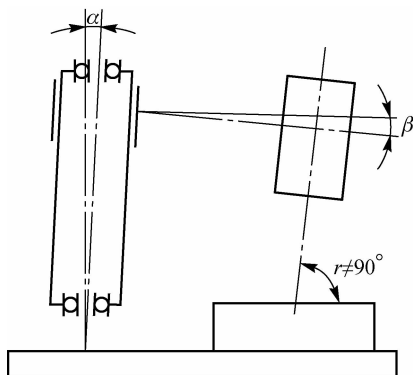


图 2-10 摇臂钻床自重导致主轴倾斜

(2)提高工件刚度,减小受力变形。工件本身刚度不足或工件各个部位结构不均匀而产生变形将引起加工误差,解决办法是缩小切削力作用点到工件支承面之间的距离,以增大工件加工时的刚度。

(3)提高机床零部件刚度,减小受力变形。可以采用一些辅助装置提高机床刚度。

(4)合理装夹工件,减小夹紧变形。

#### 四、工艺系统热变形对加工精度的影响

工艺系统在各种热源的影响下,将产生变形,从而改变各部件间的相对位置,造成加工误差。热变形不仅降低了系统的加工精度,而且还影响了加工效率。

##### 1. 工艺系统热源

引起工艺系统热变形的热源可分为内部热源和外部热源。内部热源包括切削热和摩擦热,外部热源指环境温度及辐射热。

(1)切削热。在加工过程中,切削层金属的变形、刀具与工件、刀具与切屑之间的摩擦,将会产生大量的热。这些热量传入工件和刀具,并由切屑和冷却液带到机床的其他部位,形成次生热源。

(2)摩擦热。机床在工作状态下,各运动副(如齿轮副、丝杠螺母副、导轨副)运动时,均存在摩擦力,因此会产生摩擦热。

(3)环境温度及辐射热。冬天与夏天、白天与夜晚以及室内不同位置会有温差变化即环境温度,而日光、灯光、取暖设备、人体均会产生辐射热。

##### 2. 各种热变形引起的加工误差

###### 1) 工件热变形引起的加工误差

工件均匀受热将引起工件体积的均匀膨胀。轴类零件在车削或磨削时,一般是均匀受热,温度逐渐升高,其直径也逐渐胀大,胀大部分将被刀具切去,待工件冷却后形成圆柱度和直径尺寸的误差。轴类零件均匀受热时,其径向变形  $\Delta d$  为

$$\Delta d = \alpha d \Delta t \quad (2-3)$$

其轴向变形  $\Delta L$  为

$$\Delta L = \alpha L \Delta t \quad (2-4)$$

式中, $\alpha$  为工件材料的线膨胀系数; $\Delta t$  为工件的温升( $^{\circ}\text{C}$ ); $d$  为工件原直径(mm); $L$  为工件

原长度(mm)。

工件受热不均,如磨削板类零件的上平面,由于工件单面受热,就会在磨削过程中产生向上的翘曲变形,磨削后冷却则造成中凹的形状误差。

### 2) 机床热变形引起的加工误差

机床受热源的影响,各部分温度将发生变化,由于热源分布的不均匀和机床结构的复杂性,机床各部件将发生不同程度的热变形,破坏了机床原有的几何精度,从而引起加工误差。对于车床,由于主轴箱各轴系部件轴承、传动副的摩擦热及油池发热,将造成主轴的抬高及倾斜;对于大型机床(如导轨磨床、龙门铣床),若床身上面温度升高,将使床身产生弯曲变形,呈中凸形,被加工零件将产生形状误差。

### 3) 刀具热变形引起的加工误差

在切削加工过程中,传入刀具的热量虽然很少,但刀具的体积小,热容量小,故有相当程度的温升,引起刀具的热伸长并造成加工误差。以车刀为例,开始工作时,刀具的热伸长量增长较快,随后趋缓,最后达到热平衡。由于刀具在切削过程中的磨损与热伸长量基本抵消,总体上对加工精度影响不大。

此外,环境温度变化也会引起加工误差。因此,坐标镗床、精密磨床均安装在恒温车间,以减少环境温度变化对机床精度的影响而产生的加工误差。

## 3. 减少工艺系统热变形的措施

### 1) 从结构上

从结构上减少工艺系统热变形的措施如下。

(1)注意结构的对称性。在变速箱的结构中,注意传动元件安装的对称性,这样可以均衡箱壁的温升而减小变形。机床上大部件的结构和布局应尽量采用热对称结构,如图2-11所示,采用双立柱式结构的机床主轴相对于工作台的热变形就比单立柱式结构的小得多。

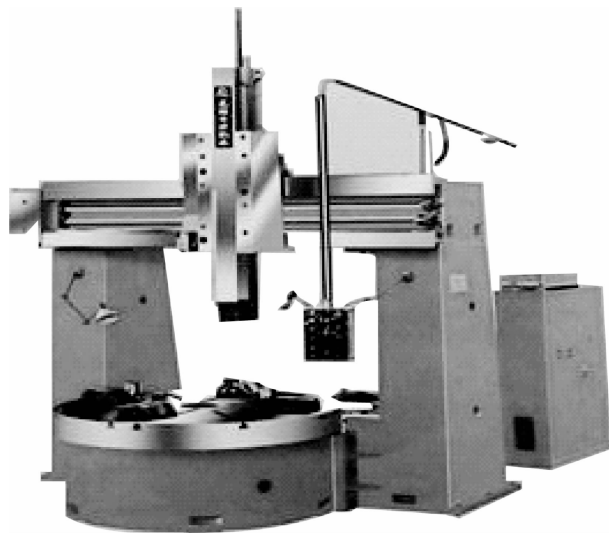


图 2-11 双立柱式车床

(2)合理安排支承的位置。使产生热变形对加工精度有直接影响的零件的有效部分缩



短,以减小热变形对加工精度的影响。

(3)均衡机床零部件的温度。当机床零部件的温升均匀时,机床处于一种热稳定状态,其热变形较小。应注意改进机床零部件的结构,使其温升均匀。

(4)隔热和减小发热。为了减少机床的发热,在设计机床时,凡是能够从主体中分离出去的热源最好与主体分离。如电动机、液压装置、油箱等部件均应分离出去。对于不能分离出去的热源,如主轴承、丝杠螺母副、摩擦离合器等部件,应改善其摩擦状态以减少发热。当电动机、液压装置、油箱等部件不能从主体中分离出去时,可以采用隔热材料将其与主体部分隔开。如图 2-12 所示为 T4163B 型单柱坐标镗床,就是采用加隔热罩的方法解决立柱的热变形问题的。

(5)强制冷却以控制温升。为了消除机床内部热源的影响,还可以采用强制冷却的方法控制温升,以减小变形。如空气冷却、水冷、循环润滑油冷却等。



图 2-12 T4163B 型单柱坐标镗床

## 2)从工艺上

从工艺上减少工艺系统热变形的措施如下。

- (1)精加工前,应当让机床空转一段时间,达到热平衡后再加工。
- (2)在安排机床的区域内应尽量保持稳定的环境温度,精密机床不允许阳光直接照射。
- (3)在加工大型精密零件时,不允许中途停车,应连续加工完毕。
- (4)对于精密机床,如坐标镗床、螺纹磨床等,应采取恒温措施。

## 五、残余应力对加工精度的影响

残余应力是引起工件自身误差的因素。工件冷热加工后会产生一定的内应力,通常情况下内应力处于平衡状态,但对具有内应力的工件进行加工时,工件原有的内应力平衡状态被破坏,从而使工件产生变形。

### 1. 残余应力的概念及特点

#### 1)残余应力的概念

内应力是无外力作用时物体内部存在的应力。引起工件内部应力的因素去除以后,工

件内部仍存在应力,这种内部应力称为残余应力。

## 2)残余应力的特点

残余应力的特点是在物体内形成一个平衡的力系,具体表现在以下几个方面。

(1)始终处于平衡状态,外部因素发生变化时,内应力就会重新分布。

(2)随着时间的推移会逐渐减小,直到自行消失。

(3)残余应力的重新分布或自行消失都会引起工件的变形。

## 3)残余应力产生的原因

残余应力产生的原因包括冷态塑性变形、热态塑性变形和金相组织变化。

(1)冷态塑性变形。机械加工时,工件表面金属层发生塑性变形,使表面金属的比容加大,体积膨胀,但因受基体材料制约所以在表层产生残余压应力,而在里层产生残余拉应力。

(2)热态塑性变形。机械加工时,切削区会有大量的切削热产生,表面层与里层金属间产生很大的温度梯度。冷却时表面层收缩,从而形成较大的残余拉应力,而在里层金属中产生残余压应力。

(3)金相组织变化。切削时的高温会引起表面层金相组织变化。不同金相组织具有不同的密度和比容。如果表层金属体积膨胀,因受基体材料制约在表层产生残余压应力;反之,则在表层产生残余拉应力。残余拉应力超过材料屈服极限时,工件表面产生裂纹。

## 2. 残余应力对加工精度的影响

加工过程中残余应力对加工精度的影响有如下几种。

### 1)毛坯制造过程中产生的残余应力

在毛坯的铸造、锻造、焊接等过程中,由于其结构复杂或各部分的壁厚不均,在浇铸后的冷却过程中,会造成坯件各部分的冷缩速度不相同及金相组织在不同温度下的变化,产生内部的相互牵制,从而使得工件内部产生相当大的内应力。加工时切掉工件的一部分残余应力层,并不能消除残余应力,反而会使残余应力重新分布,造成工件变形。

### 2)切削过程中产生的残余应力

在切削过程中,由于力与热的作用,使工件表层产生塑性变形并相应产生残余应力,造成加工后工件的变形。在大多数情况下,热的作用引起的残余应力大于力的作用。特别是高速切削、强力切削、磨削等,热的作用引起的残余应力占主要地位。磨削加工中,表层残余拉应力严重时会产生裂纹。

### 3)冷校直产生的残余应力

细长轴如光杠、丝杠、曲轴、凸轮轴等加工后,会因在毛坯轧制时产生的残余应力重新分布而产生弯曲变形。为纠正这种弯曲变形,常采用冷校直的方法。但校直后内部仍存在残余应力,再次加工或残余应力重新分布后,仍会产生新的变形。因此,高精度的丝杠不允许采用冷校直,而是采用人工时效的方法来消除残余应力。

## 3. 减小或消除残余应力的措施

减小或消除残余应力的措施如下。

(1)合理设计零件结构,尽量减少尺寸差异,以减少在毛坯制造阶段的残余应力。

(2)采取时效处理。自然时效、人工时效是消除残余应力的有效措施。自然时效是指在毛坯成形之后或粗、精加工之间,将工件静置一段时间,利用温度的自然变化,使工件的内应

力逐渐消除,这种方法会使加工时间延长。人工时效包括热时效和人工振动时效。热时效是指将工件放在炉内加热到一定温度,再随炉冷却,以达到消除应力的目的,用这种方法处理大型零件时需要一套很大的设备,其投资和能源消耗较大。人工振动时效是通过振动时效装置的激振器对工件进行共振,从而达到消除应力的目的,这种方法简单,节约能源,没有氧化皮,残余应力消除彻底,是近年来普遍采用的方法。

## 六、保证加工精度的工艺措施

保证和提高加工精度的方法包括直接消除或减小加工误差、误差补偿法、转移误差法、就地加工法、误差抵消法、误差均化法、控制误差法等几种。

### 1. 直接消除或减小加工误差

查明产生加工误差的主要原因以后,设法直接消除或减小。例如,车削细长轴时,进给抗力  $F_x$  和切深抗力  $F_y$  都会使轴在加工过程中弯曲, $F_y$  引起的弯曲可以通过增加刀架予以消除,而  $F_x$  引起的弯曲则可以采用反向走刀切削法或车床尾架装浮动顶尖等方法予以消除,另外,这两种方法可以有效减小加工过程中工件的热伸长。

### 2. 误差补偿法

人为制造一种新的误差去抵消原始误差。当原始误差是负值时,人为误差就取正值,反之取负值,并尽量使两者大小相等。或者利用一种原始误差去抵消另一种原始误差,但也要尽量使两者大小相等,方向相反,从而达到减小加工误差,提高加工精度的目的。如摇臂钻床预先制造出使摇臂上抬的误差,以抵消因主轴箱、摇臂自重下垂而产生的误差。

### 3. 转移误差法

把误差转移到不影响加工精度的部件或方向上的方法称为转移误差法。例如,用镗模法镗孔时,把主轴的回转误差转移到不影响加工精度的浮动联轴器上;在六角车床刀具调整中,将刀具垂直安装,使六角转塔的转位误差转移到不影响加工精度的方向上。

具有分度或转位的多工位加工工序或采用转位刀架加工的工序,其分度误差、转位误差将直接影响零件有关表面的加工精度。若将刀具垂直安装,可将转位刀架转位时产生的重复定位误差转移到零件内孔加工表面的误差非敏感方向上来,这样可减小加工误差,提高加工精度。

再如,磨削主轴锥孔时要保证其和轴颈的同轴度,不是靠机床主轴的回转精度来保证,而是靠夹具保证。当机床主轴与工件之间浮动连接以后,机床主轴的原始误差就被转移了。

### 4. 就地加工法

就地加工法也称为自身加工修配法。如车床主轴孔与尾架顶尖孔有较高的同轴度,采用分别加工不易保证同轴度要求,这时在主轴孔安装刀杆镗削尾架顶尖孔,则易于保证加工精度。就地加工法在机械零件加工中常用作保证零件加工精度的有效措施。

### 5. 误差抵消法

利用误差本身的规律性,部分或全部抵消所造成的加工误差。如由于铣床主轴轴线与工作台面的垂直度误差会造成加工表面下凹的形状误差  $\Delta$ ,可采用铣刀轴线横向多次走刀加工,多次走刀可使下凹的形状误差得到部分抵消。

## 6. 误差均化法

利用有密切联系的表面进行互检互研,使加工误差得到均化。实际上就是利用有密切联系的表面相互比较,相互检查,从对比中找出差异,然后进行相互修正或互为基准加工,使工件被加工表面的误差不断缩小和均化。如研磨检验平台就是利用误差均化法得到高质量的平面。在生产中,许多精密基准件(如平板、直尺、角度规、端齿分度盘等)都是利用误差均化法加工出来的。

## 7. 控制误差法

在现代机械加工中采用自动跟踪测量、自动补偿,直至达到规定的尺寸公差值。如闭环控制的数控机床加工就是采用控制误差法获得较高的加工精度的。

# 学习情境三 影响机械加工表面质量的因素及其控制

机械加工表面质量是指零件经过机械加工后的表面层状态。探讨和研究机械加工表面质量,掌握机械加工过程中各种工艺因素对表面质量的影响规律,对保证和提高产品的质量具有十分重要的意义。

## 一、表面质量的基本概念

机械加工表面质量又称为表面完整性,通常应包括表面几何形状特征和表面物理机械性能两个方面的内容。

### 1. 表面几何形状特征

表面几何形状特征主要由表面粗糙度、表面波度、表面加工纹理和伤痕组成。

#### 1) 表面粗糙度

表面粗糙度指经机械加工的零件表面产生微小峰谷的高低程度和间距所组成的微观几何形状特性,是指波距  $L$  小于 1 mm 的表面微小波纹。它主要是由刀具的形状以及切削过程中的塑性变形和振动等因素引起的,其评定参数主要有轮廓算术平均偏差  $R_a$  和轮廓最大高度  $R_z$ ,一般优先使用轮廓算术平均偏差  $R_a$ 。

#### 2) 表面波度

表面波度是介于宏观形状误差与微观表面粗糙度之间的周期性形状误差,是指波距  $L$  介于 1~20 mm 之间的表面波纹。它主要是由机械加工过程中的低频振动引起的,应作为工艺缺陷设法消除。

#### 3) 表面加工纹理

表面加工纹理是指表面切削加工刀纹的形状和方向。它取决于表面形成过程中所采用的机械加工方法、切削运动的规律以及工件材料的性质。

#### 4) 伤痕

伤痕是指在加工表面个别位置上出现的缺陷,如裂痕、划痕等。它们大多随机分布,加工人员应该及时发现,并尽量修复。

### 2. 表面物理机械性能

在切削加工中,工件由于受到切削力和切削热的作用,使表面层金属的物理机械性能产





生变化,最主要的变化是表面层冷作硬化、金相组织的变化和残余应力的产生。

#### 1) 表面层冷作硬化

由于加工中受到挤压使表面的显微硬度增加,这种现象称为冷作硬化或冷硬现象。冷硬厚度一般为 0.05~0.20 mm。

#### 2) 表面层的金相组织变化

切削区温度升高到金相组织变化的临界点时,工件表面层就会产生金相组织变化。特别是磨削时,切削区温度高达 800~1 000 ℃,极易产生金相组织变化或烧伤现象。同时还伴随产生残余应力。

#### 3) 零件表面层残余应力

加工过程中,切削层金属由于塑性变形、金相组织的变化和温升造成的体积变化的影响,产生残余应力。目前对残余应力的判断大多是定性的,它对零件使用性能的影响大小取决于它的方向、大小和分布状况。

## 二、表面质量对零件使用性能的影响

### 1. 对零件耐磨性的影响

表面粗糙度大的表面在相互接触时只是少数微观凸峰相接触,实际接触面要比理论接触面小得多,接触应力大。当两个接触面有相互运动时,接触处的凸峰就产生了弹性变形、塑性变形和剪切,造成严重的磨损。因此,一般情况下,表面粗糙度小的表面,耐磨性好。但如果表面粗糙度过小,则表面不能储存润滑油,使接触面产生黏合现象,反而使磨损加剧。表面层的冷作硬化可使表面层的硬度提高,增强表面层的接触刚度,从而降低接触处的弹性变形和塑性变形,使耐磨性有所提高。但如果冷作硬化程度过大,表面层金属组织会变脆,出现微观裂纹,甚至会使金属表面组织剥落而加剧零件的磨损。而加工时高温产生的回火组织将会降低零件表面的耐磨性。

### 2. 对零件疲劳强度的影响

粗糙的表面在交变载荷作用下,表面粗糙度波谷处容易引起应力集中,产生疲劳裂纹,并且表面粗糙度越大,表面划痕越深,其抗疲劳破坏能力越差。由于残余压应力与外载荷产生的拉应力方向相反,抵消部分拉应力,因此,残余压应力可提高零件表面的疲劳强度。当表层存在残余拉应力时,则容易引起晶间破坏,产生表面裂纹而降低零件的疲劳强度。适度的冷作硬化能阻止已有裂纹的扩展和新裂纹的产生,提高零件的疲劳强度,但冷作硬化过于严重会使零件表面组织变脆,容易出现裂纹,从而使疲劳强度降低。

### 3. 对零件配合性质的影响

无论哪一类配合,粗糙的表面都会影响配合性质的可靠性和稳定性。如间隙配合的两接触面表面很粗糙,接触时只有少数微观凸峰相接触,接触应力大,微观凸峰在配合早期会被磨除,使配合间隙过大。因此,对有配合要求的表面应规定较小的表面粗糙度值。在过盈配合中,如果表面硬化严重,将可能造成表面层金属脱落的现象,从而破坏配合性质和配合精度。

### 4. 对零件表面耐腐蚀的影响

粗糙表面的凹谷易储存腐蚀介质,特别是在表面裂纹中。腐蚀往往是通过凹谷处的微小裂纹向金属内部进行,直至侵蚀的裂纹扩展相交时,表面的凸峰脱落,又形成新的凹谷、新

的裂纹。因此,表面越粗糙,凹谷越狭窄,就越容易被腐蚀。一般表面粗糙度越小,表面越光洁,其耐腐蚀性越好。残余压应力使表面组织致密,腐蚀性介质不易侵入,有助于提高表面的耐腐蚀能力;残余拉应力则降低零件的耐腐蚀能力。

### 5. 对零件其他性能的影响

除以上所述影响外,表面质量对零件的使用性能还有一些其他影响。如降低液压缸配件的表面粗糙度可以减少泄漏,提高密封性能;机器上许多静止连接的接触表面往往要求较小的表面粗糙度值,而相对运动的表面却不能对表面粗糙度值要求过小;表面层的残余应力会使零件在使用过程中继续变形,失去原有的精度,机器工作性能恶化等。

## 三、影响表面质量的因素

### 1. 影响表面粗糙度的因素

#### 1) 刀具切削加工的影响

切削加工后的表面粗糙度是由刀具切削刃相对工件运动时,在已加工表面上遗留下来的残留切削层形成的。残留切削层的高度值越大,表面越粗糙。影响切削加工后表面粗糙度的因素包括刀具几何参数、切削用量、工件材料性质、工艺系统刚度及冷却液性能等。

(1) 刀具几何参数。对于车削加工,表面粗糙度主要是由刀刃直线部分形成的,若切削深度和进给量都较小,则加工后表面粗糙度主要是由刀尖圆弧部分形成的。进给量不变时,减小刀具的主偏角、副偏角,都可以减小表面残留面积的高度值。增大刀具前角可以减小刀具前刀面挤压切削层形成的塑性变形。增大刃倾角可以使刀具实际的前角加大,因此,可以降低表面粗糙度。

(2) 切削用量。进给量  $f$  的影响,切削速度越高,进给量  $f$  越小,表面粗糙度值越小。切削速度  $v_c$  对表面粗糙度的影响如图 2-13 所示。切削塑性材料时,切削速度很低或很高均不易产生积屑瘤。切削速度愈高,切削中的切屑、加工表面的塑性变形程度也就愈小,表面粗糙度值就减小。当切削速度  $v_c = 0.16 \sim 1.3 \text{ m/s}$  时,容易产生积屑瘤,表面较为粗糙。切削脆性材料时不产生积屑瘤,故切削速度对表面粗糙度值影响很小,但增大切削速度  $v_c$ ,切屑与已加工表面分离处的崩碎范围会减小,因而表面粗糙度值也会相应减小。

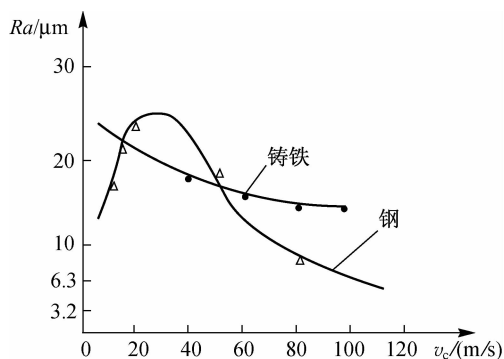


图 2-13 切削速度  $v_c$  对表面粗糙度的影响

(3) 其他方面。当切削脆性材料时,切屑呈碎粒状,加工表面往往会出现微粒崩碎痕迹,留下许多麻点,增大了表面粗糙度。冷却润滑液具有降温减摩作用,有利于降低表面粗糙度



值。工艺系统振动对表面粗糙度也有一定的影响。减弱或消除工艺系统振动可有效降低表面粗糙度。

## 2) 磨削加工的影响

磨削机理与切削机理不同,因而对表面粗糙度的影响也不相同。

(1) 砂轮工作表面的几何形态。由磨削机理可知,砂轮磨料的粒度越细,在单位时间内通过工件单位面积上的磨粒数越多,在工件表面上的磨痕就越细密,表面粗糙度值也就越小。但砂轮磨料粒度过细,磨削时易堵塞砂轮表面,反而降低了砂轮的切削性能,磨削热增加,使工件表面层出现烧伤及裂纹。所以磨削时要选择合适的砂轮磨料粒度。

(2) 磨削用量。磨削用量包括砂轮线速度、工件进给线速度、切削深度、纵向进给量等要素。提高砂轮线速度时,通过工件单位面积上的磨粒数增多,可使表面粗糙度值减小,同时可提高生产率。提高工件速度、增加切削深度和进给量时,将使磨削表面塑性变形程度加剧,增大表面粗糙度值。

## 2. 影响表面层物理机械性能的因素

### 1) 影响表面层冷硬程度和冷硬深度的因素

(1) 刀具。刀具刃口圆角的增大及后刀面的磨损增加,都会增加切削层金属的塑性变形,因而会增大表面冷硬程度和冷硬深度。

(2) 切削用量。切削用量中以切削速度和进给量的影响最大。切削速度增大时,刀具与工件的接触时间缩短,加工表面层金属来不及充分地塑性变形,所以变形程度减小。同时,增大切削速度,会使工件温度升高,有助于冷硬的恢复,冷硬程度和冷硬深度都有所减小,如图 2-14 中  $v_c$  线所示。进给量增加时,切削力增大,塑性变形也增大,冷硬现象加重。当进给量小到一定数值(如车削  $f=0.03\sim 0.06$  mm/r)时,进给量愈小,冷硬现象反而愈严重,见图 2-14 中的  $f$  线。这是因为进给量过小时,刀具刃口没有切削作用,而只有挤压作用,使加工表面层金属塑性变形增加,从而加重了冷硬现象。

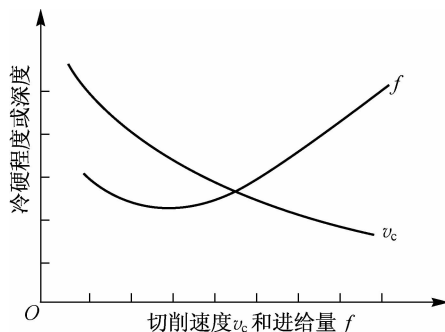


图 2-14 切削速度和进给量对冷硬程度或深度的影响

(3) 工件材料。被加工材料的塑性愈好,硬度愈低,则加工后的冷硬现象越严重。

### 2) 影响表面层金相组织变化的因素

磨削比切削产生的热量大得多。因此,磨削是影响表面层金相组织变化的主要因素。

(1) 磨削用量。由实验可知,磨削深度增加时,无论是工件表面的温度还是表面层不同深度的温度都会随之升高,使烧伤加剧。在纵向磨削时,纵向进给量增加,工件表面层和表面层下不同深度的温度将降低,使烧伤减轻。为弥补因纵向进给量增加使工件表面粗糙度增加的缺陷,可采用较宽的砂轮磨削。当工件速度增加时,磨削区的温度会上升,但随工件

速度的提高,相当于磨削热源在工件表面上移动速度加快,从而减少了热源的作用时间,使磨削表面的温度下降。因此,工件速度的影响比磨削深度的影响要小得多。提高工件速度又会导致工件表面粗糙度增加。为弥补这一缺陷,一般可提高砂轮线速度。

(2)冷却方法。有效的冷却方法是降低磨削区温度,减少磨削烧伤面积的最佳措施。以前采用的冷却方法,冷却液不易进入磨削区,而是大量进入已加工表面,避免磨削区烧伤的效果不明显。目前已从砂轮结构上采取措施,使冷却液直接进入磨削区,充分发挥冷却液的作用。

### 3. 影响表面残余应力的因素

#### 1) 冷塑性变形的影响

在切削力的作用下,表面层金属产生塑性变形,比容增大,体积膨胀,受到四周金属基体的阻碍,因而在表层产生压应力,而里层则产生拉应力。

#### 2) 热塑性变形的影响

加工中,切削区的温度很高,使工件表面层受热膨胀,由于受到温度较低的金属基体的阻碍,因而产生热压缩应力。当表面层的温度超过相变温度时,就会产生热塑性压缩变形。切削结束后,温度逐渐下降到与金属基体一致时,因为表面层已产生的热塑性变形受到基体的限制,从而在表层产生拉应力。

#### 3) 金相组织的影响

机械加工时,工件在受热和受冷的过程中,表层金相组织发生变化。由于各种不同的金相组织的比重和比容不同(马氏体组织比重最小为 7.55,比容最大;奥氏体组织比重最大为 7.86,比容最小),所以表层金相组织的变化会引起体积的变化。当表层体积膨胀时,受到基体的限制,将产生压应力。当表层体积收缩时,受到基体的牵制作用,将产生拉应力。如磨削淬火钢时,高温作用使表层金属由原来的马氏体组织转变为回火索氏体或屈氏体,此时体积缩小产生残余拉应力。如磨削温度超过 750~800 °C,并快速冷却,还会出现二次淬火,表层金属产生二次淬火马氏体,体积膨胀,表层产生压应力,里层产生拉应力。

## 四、控制表面质量的工艺途径

提高表面质量的工艺途径大致可以分为两类:一类是寻求各工艺参数的优化组合,以减小表面粗糙度,该途径的效率低、成本高;另一类是着重改善工件表面的物理力学性能,以提高其表面质量。

### 1. 精加工提高表面质量

机械加工时,采用超精密加工、珩磨、研磨等方法作为最终工序加工可以提高其表面质量。超精密切削是指表面粗糙度  $Ra$  为  $0.04 \mu\text{m}$  以下的切削加工方法。超精密加工、珩磨等都是利用磨条以一定压力压在加工表面上,并作相对运动以降低表面粗糙度和提高精度的方法,一般用于表面粗糙度  $Ra$  为  $0.4 \mu\text{m}$  以下的表面加工。各种精密加工方法及应用见表 2-1。

表 2-1 各种精密加工方法及应用

| 分 类  | 加工方法     | 可加工材料      | 应 用                |
|------|----------|------------|--------------------|
| 切削加工 | 等离子弧切削   | 各种材料       | 熔断钼、钨等高熔点材料、硬质合金材料 |
|      | 微细切削     | 有色金属及其合金   | 磁盘、反射镜、多面棱镜        |
|      | 微细钻削     | 低碳钢、铜、铝    | 油泵油嘴、化学喷丝头、印刷电路板   |
| 磨料加工 | 微细磨削     | 黑色金属、硬脆材料  | 集成电路基片的外圆、平面磨削     |
|      | 研磨       | 金属、半导体、玻璃  | 平面、孔、外圆加工, 硅片基片    |
|      | 抛光       | 金属、半导体、玻璃  | 平面、孔、外圆加工, 硅片基片    |
|      | 弹性发射加工   | 金属、非金属     | 硅片基片               |
|      | 喷射加工     | 金属、玻璃、水晶   | 刻槽、切断、图案成形、破碎      |
| 特种加工 | 电火花成形加工  | 导电金属、非金属   | 孔、沟槽、狭缝、方孔、型腔      |
|      | 电火花线切割加工 | 导电金属       | 切断、切槽              |
|      | 电解加工     | 金属、非金属     | 打孔、切槽、成形、加工模具型腔    |
|      | 超声波加工    | 硬脆金属、非金属   | 刻模、落料、切片、打孔、刻槽     |
|      | 微波加工     | 绝缘金属、半导体   | 在玻璃、红宝石、陶瓷等上打孔     |
|      | 电子束加工    | 各种材料       | 打孔、切割、光刻           |
|      | 粒子束去除加工  | 各种材料       | 刃磨、割蚀成形表面          |
|      | 激光去除加工   | 各种材料       | 打孔、切断、划线           |
| 复合加工 | 光刻加工     | 金属、非金属、半导体 | 划线、图形成形            |
|      | 电解磨削     | 各种材料       | 刃磨成形平面、内圆          |
|      | 电解抛光     | 金属、半导体     | 平面、外圆、型面、细金属丝、槽    |
|      | 化学抛光     | 金属、半导体     | 平面                 |

## 2. 表面强化提高表面质量

在工艺过程中增设表面强化工序以改善工件表面的物理力学性能来保证零件的表面质量。采用表面强化工艺不仅可以提高工件的表面强度,而且还可以降低零件的表面粗糙度值。

表面机械强化工艺简单、成本低,在生产中应用十分广泛,用得最多的是喷丸强化和滚压加工。

(1)喷丸强化。喷丸强化过程就是利用压缩空气或离心力使大量直径为 0.4~4 mm 的珠丸高速打击零件表面的过程,犹如无数小锤对表面锤击,因此,金属零件表面产生极为强烈的塑性形变,使零件表面产生一定厚度的冷作硬化层,称为表面强化层。此强化层会显著地提高零件的疲劳强度。喷丸强化工艺可用来加工各种形状的零件,加工后零件表面的硬化层深度可达 0.7 mm,表面粗糙度值  $Ra$  可由  $3.2 \mu\text{m}$  降低到  $0.4 \mu\text{m}$ ,使用寿命可提高几倍甚至几十倍。喷丸强化分为一般喷丸和应力喷丸。

(2)滚压加工。滚压加工是在常温下通过淬硬的滚压工具(滚轮或滚珠)对工件表面施加压力,使其产生塑性变形,从而减小了表面粗糙度值,并在其表面产生了冷硬层和残余压应力,使零件的承载能力和疲劳强度得以提高。滚压加工是一种无切屑加工,被滚压加工的

工件不仅可使表面粗糙度  $Ra$  值从  $1.25\sim 5\ \mu\text{m}$  降低到  $0.8\sim 0.63\ \mu\text{m}$ , 而且加工面硬化后, 其耐磨性得到提高, 同时疲劳强度也增加了  $30\%$ 。因此, 这种方法可同时达到光整加工及强化两种目的。



### 思考与练习

1. 影响加工精度的因素有哪些?
2. 如何提高零件表面加工精度?
3. 残余应力对加工精度的影响有哪些?
4. 热变形对加工精度的影响有哪些?
5. 影响零件表面质量的因素有哪些?
6. 如何提高机械加工表面质量?

## 单元三

# 尺 寸 链



### 知识目标

了解尺寸链的概念和分类；  
掌握尺寸链的计算；  
掌握装配尺寸链的分析。



### 技能目标

会尺寸链的计算和工序尺寸的标注；  
能进行工序尺寸的换算；  
掌握装配尺寸链的建立方法。



### 单元导读

在机械设计和工艺工作中,为保证加工、装配和使用的质量,经常要对一些相互关联的尺寸、公差和技术要求进行分析和计算。为了使计算工作简化,可采用尺寸链原理。



### 相关知识

## 学习情境一 尺寸链概述

在实际生产中,经常遇到定位基准与设计基准不重合,测量基准与设计基准不重合的情况,这时采用数学计算难以解决问题。尺寸链就是解决这类问题的最佳方法。本单元主要介绍尺寸链的基本概念以及用尺寸链计算工艺尺寸的基本问题。

### 一、尺寸链的基本概念

#### 1. 尺寸链的定义

在零件的加工或产品的装配过程中,经常遇到一些相互联系且按一定顺序排列着的封闭的尺寸组合,就形象地称其为尺寸链。如图 3-1 所示为尺寸链,其中, $A_2$  为封闭环, $A_i$  为各组成环。

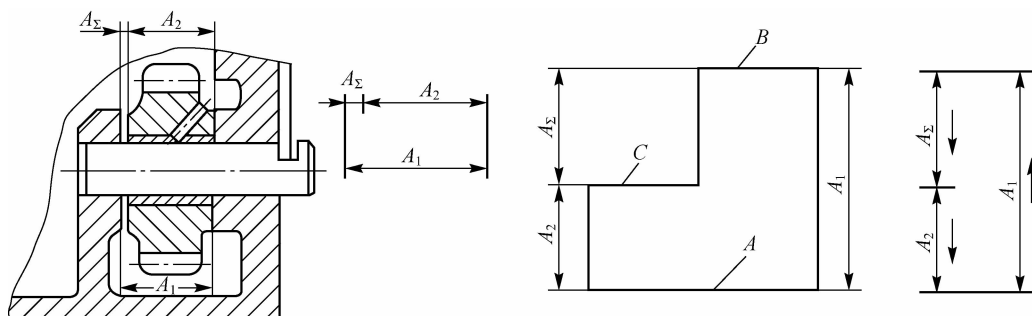


图 3-1 尺寸链

## 2. 尺寸链的组成

为简便起见,把尺寸链中的每一个尺寸称为尺寸链中的一个环。环又分为封闭环和组成环。

### 1) 封闭环

封闭环是指在零件的加工或产品的装配过程中间接形成的环,其精度由其他环间接保证。

### 2) 组成环

组成环是指直接影响封闭环精度的各环。根据影响方向不同,组成环又可分为增环和减环。

(1) 增环。组成环中该环的变动会引起封闭环同向变动的环称为增环。

(2) 减环。组成环中该环的变动会引起封闭环异向变动的环称为减环。

在组成环中预先选定的某一环,通过改变其大小和位置,使封闭环达到规定的要求,这样的环称为协调环。

尺寸链一般都用尺寸链图表示。建立尺寸链时,应首先对工艺过程和工艺尺寸进行分析,确定间接保证精度的尺寸,并将其定为封闭环。然后再从封闭环出发,按照零件尺寸间的联系,用首尾相接的双向箭头顺序表示各组成环,这种尺寸图就是尺寸链图。根据上述定义,利用尺寸链图即可迅速判断组成环的性质。对每个尺寸环都沿同一个方向标上箭头,凡与封闭环箭头方向相同的环即为减环,而凡与封闭环箭头方向相反的环即为增环。

## 3. 尺寸链的特性

通过上述分析可知,尺寸链的主要特性是封闭性和关联性。

封闭性是指尺寸链中各尺寸的排列呈封闭形式。没有封闭的尺寸组合不能成为尺寸链。

关联性是指尺寸链中任何一个直接获得的尺寸及其精度的变化,都将影响间接获得或间接保证的那个尺寸及其精度的变化。

## 二、尺寸链的分类

### 1. 按尺寸链的应用范围分

按尺寸链的应用范围可分为工艺尺寸链和装配尺寸链。

#### 1) 工艺尺寸链

在零件的加工过程中,由单个零件的有关工序尺寸组成的尺寸链,称为工艺尺寸链。

#### 2) 装配尺寸链

在产品的装配过程中,由相关零(部)件的相关尺寸组成的尺寸链,称为装配尺寸链。





### 2. 按尺寸链的几何特征及空间分布分

按尺寸链的几何特征及空间分布情况可分为直线尺寸链、角度尺寸链、平面尺寸链和空间尺寸链。

#### 1) 直线尺寸链

由彼此平行的直线尺寸所组成的尺寸链,称为直线尺寸链。如图 3-2 所示,可按画箭头的方法判断增、减环。判断时遵循增反减同原则,也就是说和封闭环箭头方向相反的为增环,反之则为减环。

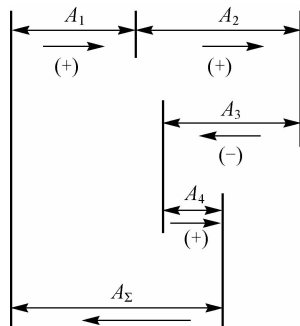


图 3-2 直线尺寸链

#### 2) 角度尺寸链

由处在同一平面内或平行平面内的角度尺寸所组成的尺寸链,称为角度尺寸链,如图 3-3 所示。

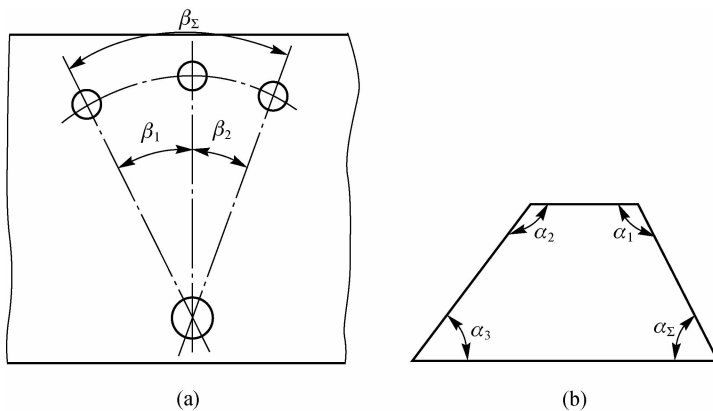


图 3-3 角度尺寸链

#### 3) 平面尺寸链

由处在同一平面内或平行平面内的直线尺寸和角度尺寸所组成的尺寸链,称为平面尺寸链,如图 3-4 所示。

#### 4) 空间尺寸链

由直线尺寸和角度尺寸所组成,并形成空间位置关系的尺寸链,称为空间尺寸链。

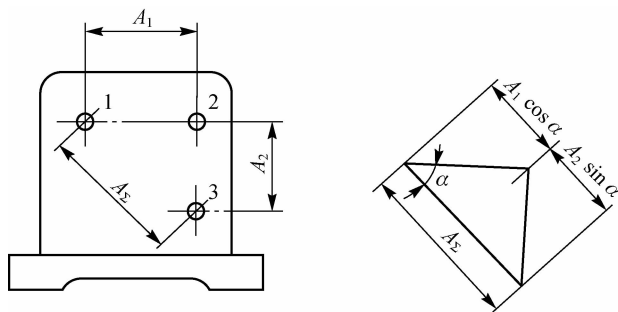


图 3-4 平面尺寸链

### 3. 按尺寸链间相互联系的形式分

按尺寸链间相互联系的形式可分为独立尺寸链、并联尺寸链、串联尺寸链和混联尺寸链。

#### 1) 独立尺寸链

独立尺寸链是指尺寸链中的每一个环均只属于一个尺寸链,不参与其他任一尺寸链的组成,如图 3-5 所示。

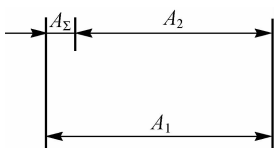


图 3-5 独立尺寸链

#### 2) 并联尺寸链

通过公共环相互联系,且形成并联关系的尺寸链,称为并联尺寸链,如图 3-6 所示。

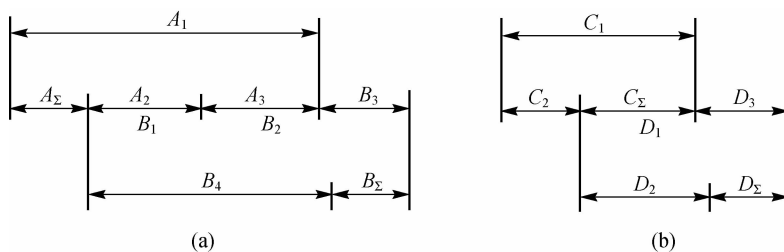


图 3-6 并联尺寸链

#### 3) 串联尺寸链

由公共环相互联系且形成串联关系的尺寸链,称为串联尺寸链,如图 3-7 所示。

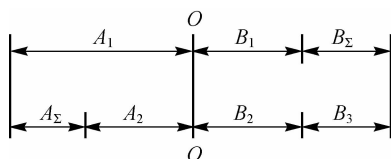


图 3-7 串联尺寸链



#### 4)混联尺寸链

既有串联关系又有并联关系的尺寸链,称为混联尺寸链,如图 3-8 所示。

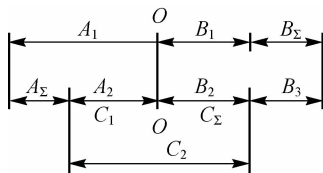


图 3-8 混联尺寸链

## 学习情境二 尺寸链的计算

### 一、尺寸链的基本计算方法

#### 1. 极值法

用极值法解尺寸链是假设尺寸链各环均处于极值条件下,来求解封闭环尺寸与组成环尺寸之间关系的。

##### 1)基本尺寸

基本尺寸间的关系为

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_i \quad (3-1)$$

式中,  $\vec{A}_i$  为增环;  $\overleftarrow{A}_i$  为减环;  $A_{\Sigma}$  为封闭环;  $m$  为增环的数目;  $n$  为尺寸链的总环数。

##### 2)极限尺寸

(1)最大极限尺寸的计算公式为

$$A_{\Sigma\max} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\max} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{i\min} \quad (3-2)$$

式中,  $\vec{A}_{i\max}$  为增环最大值;  $\overleftarrow{A}_{i\min}$  为减环最小值;  $A_{\Sigma\max}$  为封闭环最大极限值。

(2)最小极限尺寸的计算公式为

$$A_{\Sigma\min} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\min} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{i\max} \quad (3-3)$$

式中,  $\vec{A}_{i\min}$  为增环最小值;  $\overleftarrow{A}_{i\max}$  为减环最大值;  $A_{\Sigma\min}$  为封闭环最小极限值。

##### 3)上、下偏差

(1)上偏差的计算公式为

$$\begin{aligned} ES_{A_{\Sigma}} &= A_{i\max} - A_i \\ &= \left( \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\max} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_i \right) - \left( \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{i\min} - \sum_{i=1}^m \vec{A}_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^m \overrightarrow{ES}_{A_i} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{EI}_{A_i} \end{aligned} \quad (3-4)$$

式中,  $A_{i\max}$  为最大值;  $A_i$  为基本尺寸;  $ES_{A_{\Sigma}}$  为封闭环上偏差;  $\sum_{i=1}^m \overrightarrow{ES}_{A_i}$  为所有增环的上偏差

之和;  $\sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{EI}_{A_i}$  为所有减环的下偏差之和。

(2) 下偏差的计算公式为

$$EI_{A_\Sigma} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{EI}_{A_i} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{EI}_{A_i} \quad (3-5)$$

4) 公差

公差的计算公式为

$$\begin{aligned} T_\Sigma &= A_{\Sigma_{\max}} - A_{\Sigma_{\min}} \\ &= \left( \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{i_{\max}} - \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{i_{\min}} \right) + \left( \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{i_{\max}} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{i_{\min}} \right) \\ &= \sum_{i=1}^m \overrightarrow{T}_i + \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{T}_i \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} T_i \end{aligned} \quad (3-6)$$

式中,  $T_\Sigma$  为公差;  $\sum_{i=1}^m \overrightarrow{T}_i$  为所有增环公差带之和;  $\sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{T}_i$  为所有减环公差带之和。

5) 平均尺寸

平均尺寸的计算公式为

$$A_{\Sigma M} = \sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{iM} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{iM} \quad (3-7)$$

式中,  $A_{\Sigma M}$  为封闭环平均尺寸;  $\sum_{i=1}^m \overrightarrow{A}_{iM}$  为所有增环平均尺寸之和;  $\sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{iM}$  为所有减环平均尺寸之和。

## 2. 概率法

1) 各环平均公差

由概率论可知,各独立随机变量(尺寸链的组成环)的均方根偏差  $\sigma_i$  与这些随机变量之和(尺寸链的封闭环)的均方根偏差  $\sigma_\Sigma$  之间的关系为

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_i^2} \quad (3-8)$$

当零件尺寸为正态分布时,其随机误差  $\omega$  与均方根偏差  $\sigma$  之间的关系为

$$\omega = 6\sigma$$

如组成环为正态分布,封闭环也为正态分布,在各环随机误差等于公差条件下,  $\omega_i = T_i$ ,  $\omega_\Sigma = T_\Sigma$ , 则式(3-8)可转化为

$$T_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} T_i^2} \quad (3-9)$$

当组成环为非正态分布时,封闭环也为非正态分布,式(3-8)可转化为

$$T_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} K_i^2 T_i^2} \quad (3-10)$$

式中,  $K_i$  为相对分布系数。

如各组成环尺寸相等,则各环平均公差为

$$T_M = \frac{T_\Sigma}{\sqrt{n-1}} = \frac{\sqrt{n-1}}{n-1} T_\Sigma \quad (3-11)$$



## 2) 各环偏差的算式

尺寸链各环无系统误差,即加工尺寸偏差为正态分布中的对称分布,如图 3-9 所示。

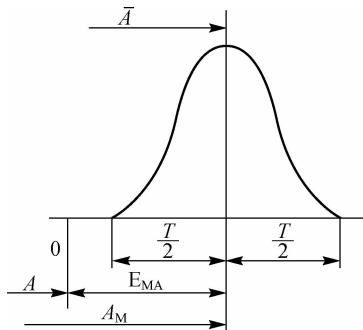


图 3-9 正态分布偏差

平均尺寸  $A_M$  为

$$A_M = A + E_{MA}$$

又因为

$$A_{\Sigma M} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{iM} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{iM}$$

代入整理得

$$\begin{aligned} A_{\Sigma M} &= A_{\Sigma} + E_{MA\Sigma} \\ &= \sum_{i=1}^m (\vec{A}_i + \vec{E}_{MAi}) - \sum_{i=m+1}^{n-1} (\overleftarrow{A}_i + \overleftarrow{E}_{MAi}) \\ &= \left( \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_i \right) + \left( \sum_{i=1}^m \vec{E}_{MAi} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{E}_{MAi} \right) \end{aligned}$$

则

$$E_{MA\Sigma} = \sum_{i=1}^m \vec{E}_{MAi} - \sum_{i=m+1}^{n-1} \overleftarrow{E}_{MAi} \quad (3-12)$$

式中,  $E_{MA}$  为尺寸  $A$  的平均偏差;  $\vec{E}_{MAi}$  为增环平均偏差;  $\overleftarrow{E}_{MAi}$  为减环平均偏差。

由图 3-9 可知

$$ES_{A\Sigma} = E_{MA\Sigma} - \frac{T_{\Sigma}}{2} \quad (3-13)$$

$$EI_{A\Sigma} = - \left( E_{MA\Sigma} - \frac{T_{\Sigma}}{2} \right) \quad (3-14)$$

## 二、尺寸链计算的类型

### 1. 正计算

已知各组成环求封闭环为正计算。其计算结果是唯一确定的,主要用于审核图纸,验证设计的正确性。

### 2. 反计算

已知封闭环求组成环为反计算。由于求算的组成环数目较多,因此,不是一个简单的计算问题,实际上是把封闭环公差分配到各组成环上去。这就存在一个最佳分配方案的问题。

常用的分配方法有等公差值法和等公差系数法。后文中所需的标准公差值可查《机械设计手册》中的标准公差数值表。

#### 1) 等公差值法

##### 极值法

$$T_M = T_i = \frac{T_\Sigma}{n-1} \quad (3-15)$$

##### 概率法

$$T_M = T_i = \frac{\sqrt{n-1}}{n-1} T_\Sigma \quad (3-16)$$

#### 2) 等公差系数法

设各组成环公差等级系数相等,即

$$a_1 = a_2 = a_3 = \cdots = a_m$$

对于 1~500 mm 尺寸段,  $a_m$  的计算公式为

$$a_m = \frac{T_\Sigma \times 1\,000}{\sum_{i=1}^{n-1} (0.45 \times \sqrt[3]{D_i} + 0.001D_i)} \quad (3-17)$$

式中,  $D$  为公称尺寸的计算值,该值为尺寸分段中首、尾两尺寸的几何平均值。

再由各组成环基本尺寸和平均公差等级系数,查出各组成环对应的公差等级,确定出各组成环的公差等级数值。

### 3. 中间计算

已知封闭环和部分组成环,求另一组成环,其计算结果也是唯一确定的。中间计算主要用于工艺设计、基准不重合工序尺寸的换算。

## 三、工序尺寸的标注

### 1. 按向体原则标注

公差带的分布按向体原则标注时,对于被包容面的尺寸可标注成上偏差为零、下偏差为负的形式,即  $-T$ ;对于包容面的尺寸可标注成下偏差为零、上偏差为正的形式,即  $+T$ 。

### 2. 按双向对称分布标注

对于孔系中心距、相对中心的两平面之间的距离等尺寸,一般按对称分布标注,即可标注成上、下偏差绝对值相等、符号相反形式即  $T/2$ 。

当组成环是标准件时,其公差大小和分布位置按相应标准确定。当组成环是公共环时,其公差大小和分布位置应由对其有严格要求的那个尺寸链来确定。

## 学习情境三 工艺尺寸链的应用

### 一、基准不重合有关工序尺寸的换算

工艺基准(工序、定位、测量等)与设计基准不重合,工序基准就无法直接取用零件图上的设计尺寸,因此,必须进行尺寸换算来确定其工序尺寸。



### 1. 定位基准与工序基准不重合有关工序尺寸的换算

采用调整法加工零件时,若所选的定位基准与设计基准不重合,那么该加工表面的设计尺寸就不能由加工直接得到,这时就需要进行工艺尺寸的换算,以保证设计尺寸的精度要求,并将计算的工序尺寸标注在工序图上。

**例 3-1** 如图 3-10 所示,零件的设计尺寸为  $120_{-0.10}^0$  mm 和  $30 \pm 0.12$  mm,上、下平面均已加工,现以底平面定位镗水平孔,求工序尺寸  $A$ 。

**解** (1)画尺寸链图,如图 3-11 所示。

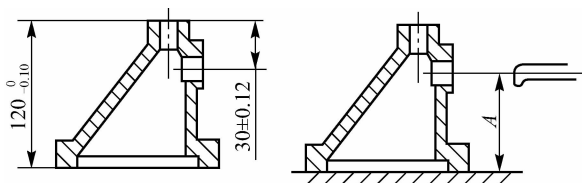


图 3-10 零件图

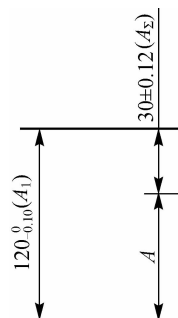


图 3-11 例 3-1 尺寸链图

(2)判断各环的性质。

$30 \pm 0.12$  mm 为间接保证的设计尺寸,应为封闭环, $A$  为减环, $120_{-0.10}^0$  mm 为增环。这种情况为基准不重合,存在三环直线尺寸链的中间计算问题。

(3)计算尺寸链。

由式(3-1)可得, $A$  的基本尺寸为

$$A = A_1 - A_2 = (120 - 30) \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

由式(3-4)和式(3-5)可得, $A$  的上、下偏差为

$$ES_A = EI_{A_1} - EI_{A_2} = [-0.10 - (-0.12)] \text{ mm} = +0.02 \text{ mm}$$

$$EI_A = ES_{A_1} - ES_{A_2} = (0 - 0.12) \text{ mm} = -0.12 \text{ mm}$$

故  $A = 90 \pm_{-0.12}^{+0.02}$  mm。

(4)验算。

由式(3-6)可得

$$T_{A_1} + T_A = (0.1 + 0.02 + 0.12) \text{ mm} = 0.24 \text{ mm} \leq T_2 = 0.24 \text{ mm}$$

故该尺寸符合题意。工序尺寸  $A = 90 \pm_{-0.12}^{+0.02}$  mm。

**例 3-2** 如图 3-12 所示为某零件的镗孔工序图,定位基准是底面  $N$ , $M$ , $N$  都是已加工表面, $L_0 = 100 \pm_{-0.15}^{+0.15}$  mm, $L_2 = 200 \pm_{-0.10}^{+0.10}$  mm,试求镗孔调整时的工序尺寸  $L_1$ 。

**解** (1)画出尺寸链并确定封闭环,如图 3-13 所示。

镗孔时要调整的工序尺寸  $L_1$  为轴线到定位基准间的距离,由加工保证。图 3-12 中孔的轴线的基准是  $M$  面,其位置尺寸  $L_0$  通过工序尺寸  $L_1$  和已加工尺寸  $L_2$  间接获得,因此, $L_0$  为封闭环。

(2)判断增、减环。

按增、减环的定义确定  $L_1$  为增环, $L_2$  为减环。

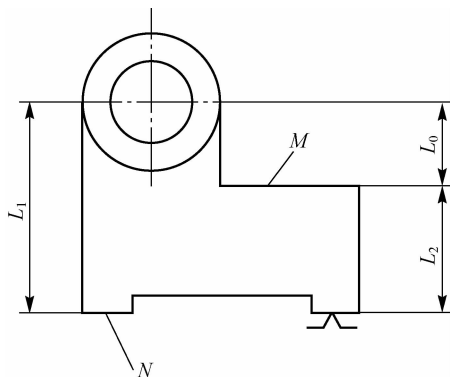


图 3-12 零件图

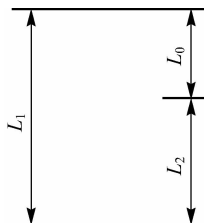


图 3-13 例 3-2 尺寸链图

(3) 计算  $L_1$  的基本尺寸和上、下偏差。

由式(3-1)可得,  $L_1$  的基本尺寸为

$$L_0 = L_1 - L_2$$

$$L_1 = L_0 + L_2 = (100 + 200) \text{ mm} = 300 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得,  $L_1$  的上偏差为

$$ES_{L_0} = ES_{L_1} - EI_{L_2}$$

$$ES_{L_1} = ES_{L_0} + EI_{L_2} = (+0.15 + 0) \text{ mm} = +0.15 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $L_1$  的下偏差为

$$EI_{L_0} = EI_{L_1} - ES_{L_2}$$

$$EI_{L_1} = EI_{L_0} + ES_{L_2} = (-0.15 + 0.10) \text{ mm} = -0.05 \text{ mm}$$

故  $L_1 = 300^{+0.15}_{-0.05} \text{ mm}$ 。

(4) 验算。

由封闭环的公差值是其他组成环的公差之和可得

$$T_{L_0} = T_{L_1} + T_{L_2} = (0.2 + 0.1) \text{ mm} = 0.3 \text{ mm} \leq T_{\Sigma}$$

该尺寸符合题意。故工序尺寸  $L_1 = 300^{+0.15}_{-0.05} \text{ mm}$ 。

计算上面的尺寸链, 由于环数少, 利用尺寸链计算公式比较简便。如果尺寸链环数很多, 尺寸链计算公式计算起来会比较麻烦, 并且容易出错。

## 2. 测量基准与设计基准不重合有关工序尺寸的换算

### 1) 不便直接测量的尺寸换算

在工件加工过程中, 有时会遇到一些表面加工之后按设计尺寸不便直接测量的情况。因此, 需要在零件上另选一容易测量的表面作为测量基准进行测量, 以间接保证设计尺寸的要求。这时就需要进行工艺尺寸的换算。

**例 3-3** 轴承套零件图如图 3-14 所示, 轴向设计尺寸为  $68^{0}_{-0.20} \text{ mm}$ ,  $10^{0}_{-0.15} \text{ mm}$ ,  $50^{0}_{-0.10} \text{ mm}$ , 但在加工过程中, 设计尺寸  $50^{0}_{-0.10} \text{ mm}$  不便于直接测量, 为此设计一个专用的心轴和卡板来间接测量检验尺寸  $50^{0}_{-0.10} \text{ mm}$  是否合格。若已知心轴的轴向尺寸为  $80^{0}_{-0.02} \text{ mm}$ , 求卡板测量尺寸  $X$ 。

**解** (1) 画尺寸链图, 如图 3-15 所示。



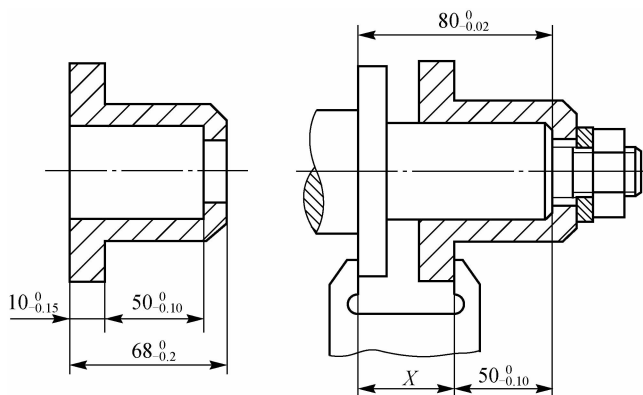


图 3-14 轴承套零件

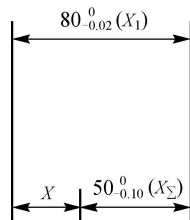


图 3-15 例 3-3 尺寸链图

(2)判断环的性质。

$50_{-0.10}^0$  mm 是间接测量保证的设计尺寸,应为封闭环, $X$  为减环, $X_1 = 80_{-0.02}^0$  mm 为增环。

(3)计算尺寸链。

由式(3-1)可得, $X$  的基本尺寸为

$$X_{\Sigma} = X_1 - X$$

$$X = X_1 - X_{\Sigma} = (80 - 50) \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得, $X$  的上偏差为

$$EI_{X\Sigma} = EI_{X_1} - ES_X$$

$$ES_X = EI_{X_1} - EI_{X\Sigma} = [-0.02 - (-0.10)] \text{ mm} = +0.08 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得, $X$  的下偏差为

$$ES_{X\Sigma} = ES_{X_1} - EI_X$$

$$EI_X = ES_{X_1} - ES_{X\Sigma} = (0 - 0) \text{ mm} = 0 \text{ mm}$$

故  $X = 30_{0}^{+0.08}$  mm。

(4)验算。

由式(3-6)可得

$$T_{X_1} + T_X = (0.02 + 0.08) \text{ mm} = 0.1 \text{ mm} \leq T_{\Sigma} = 0.1 \text{ mm}$$

故该尺寸符合题意。卡板测量尺寸  $X = 30_{0}^{+0.08}$  mm。

**例 3-4** 如图 3-16 所示,小套零件加工时,要求保证尺寸  $(6 \pm 0.10)$  mm,由于这一尺寸不便于直接测量,只好通过测量尺寸  $L$  来间接检验其是否合格,求工序尺寸  $L$ 。

**解** (1)画尺寸链图,如图 3-17 所示。

(2)判断环的性质。

尺寸  $(6 \pm 0.10)$  mm 是间接保证的设计尺寸,应为封闭环,尺寸  $L_1 = (26 \pm 0.05)$  mm 和  $L$  为增环, $L_2 = 36_{-0.05}^0$  mm 为减环。(3)计算尺寸链。

由式(3-1)可得, $L$  的基本尺寸为

$$L = L_{\Sigma} + L_2 - L_1 = (6 + 36 - 26) \text{ mm} = 16 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得, $L$  的上偏差为

$$ES_{L\Sigma} = ES_{L_1} + ES_L - EI_{L_2}$$

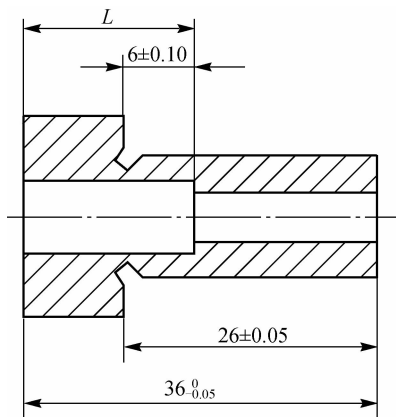


图 3-16 小套零件

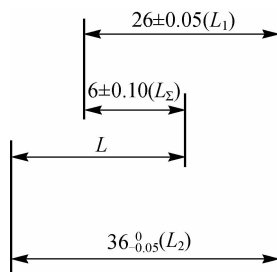


图 3-17 例 3-4 尺寸链图

$$ES_L = ES_{L\Sigma} - ES_{L1} + EI_{L2} = [+0.10 - 0.05 + (-0.05)] \text{ mm} = 0 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $L$  的下偏差为

$$EI_{L\Sigma} = EI_{L1} + EI_L - ES_{L2}$$

$$EI_L = EI_{L\Sigma} - EI_{L1} + ES_{L2} = [-0.10 - (-0.05) + 0] \text{ mm} = -0.05 \text{ mm}$$

故工序尺寸  $L = 16_{-0.05}^0 \text{ mm}$ 。

(4) 验算。

由式(3-6)可得

$$T_{L1} + T_{L2} + T_L = (0.10 + 0.05 + 0.05) \text{ mm} = 0.2 \text{ mm} \leq T_\Sigma$$

故该尺寸符合题意。

**例 3-5** 如图 3-18 所示为轴套零件加工  $\phi 40 \text{ mm}$  沉孔的工序图,其余表面已加工。因孔深的设计基准为横孔轴线,尺寸  $A_4$  无法测量,问能否通过测量孔深  $A_0$  来检验  $A_4$ 。其中,  $A_1 = 70_{-0.20}^0 \text{ mm}$ ,  $A_2 = 25_{-0.20}^0 \text{ mm}$ ,  $A_3 = 20_{-0.10}^{+0.10} \text{ mm}$ ,  $A_4 = 30_{-0.15}^{+0.15} \text{ mm}$ ,  $A_5 = \phi 40 \text{ mm}$ 。

**解** 按题意,以测量孔深  $A_0$  来检验  $30_{-0.15}^{+0.15} \text{ mm}$  尺寸,测量基准为左端面,与设计基准不重合,需要进行尺寸链换算。

(1) 画出尺寸链图,如图 3-19 所示。

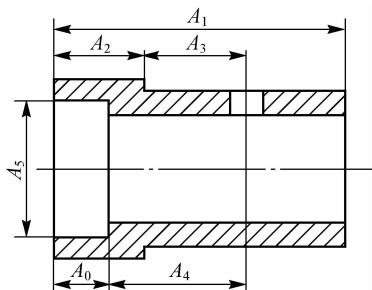


图 3-18 轴套

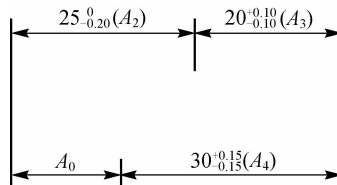


图 3-19 例 3-5 尺寸链图

(2) 判断环的性质。确定  $A_4$  为封闭环,  $A_0$  为减环,其余两个组成环  $A_2$ 、 $A_3$  为增环。

(3) 计算  $A_0$  的基本尺寸和上、下偏差。

由式(3-1)可得,  $A_0$  的基本尺寸为

$$A_0 = A_2 + A_3 - A_4$$



$$A_0 = A_2 + A_3 - A_4 = (25 + 20 - 30) \text{ mm} = 15 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $A_0$  的上偏差为

$$EI_{A_0} = EI_{A_2} + EI_{A_3} - ES_{A_4}$$

$$ES_{A_0} = EI_{A_2} + EI_{A_3} - EI_{A_4} = [(-0.20) + (-0.10) - (-0.15)] \text{ mm} = -0.15 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得,  $A_0$  的下偏差为

$$ES_{A_0} = ES_{A_2} + ES_{A_3} - EI_{A_4}$$

$$EI_{A_0} = ES_{A_2} + ES_{A_3} - ES_{A_4} = (0 + 0.10 - 0.15) \text{ mm} = -0.05 \text{ mm}$$

故  $A_0 = 15_{-0.05}^{-0.15} \text{ mm}$ 。

计算结果不合理,因此不能以测量孔深  $A_0$  来检验  $A_4$ 。

## 2) 工艺尺寸及基准变更引起的换算

加工过程中,由毛坯尺寸到工序尺寸,最后达到满足零件性能要求的设计尺寸,工件的尺寸是不断变化的。一方面,由于加工的需要,在工序图以及工艺卡上要标注一些专供加工用的工序尺寸,工序尺寸往往不是直接采用零件图上的尺寸,而是需要另行计算;另一方面,当零件加工时,有时需要多次转换基准,因而引起工序基准、定位基准或测量基准与设计基准不重合。这时,需要利用工艺尺寸链原理来进行工序尺寸及其公差计算。

**例 3-6** 如图 3-20(a)所示零件,尺寸  $A_0$  不方便测量,改测尺寸  $A_2$ ,试确定  $A_2$  的大小和公差。

**解** (1)画出尺寸链图,如图 3-20(b)所示。

(2) $A_2$  是直接测量得到的尺寸,是组成环; $A_0$  是间接保证的尺寸,是封闭环。

(3)计算  $A_2$  的基本尺寸和上、下偏差。

由式(3-1)可得,  $A_2$  的基本尺寸为

$$A_0 = A_1 - A_2$$

$$A_2 = A_1 - A_0 = (50 - 10) \text{ mm} = 40 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得,  $A_2$  的下偏差为

$$ES_{A_0} = ES_{A_1} - EI_{A_2}$$

$$EI_{A_2} = ES_{A_1} - ES_{A_0} = (0 - 0) \text{ mm} = 0 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $A_2$  的上偏差为

$$EI_{A_0} = EI_{A_1} - ES_{A_2}$$

$$ES_{A_2} = EI_{A_1} - EI_{A_0} = [-0.17 - (-0.36)] \text{ mm} = +0.19 \text{ mm}$$

故  $A_2 = 40_{0}^{+0.19} \text{ mm}$ 。

由此例可以看出假废品问题。若实测  $A_2 = 40.30 \text{ mm}$ ,按上述要求判为废品,但此时如果  $A_1 = 50 \text{ mm}$ ,则实际上  $A_0 = 9.7 \text{ mm}$ ,零件仍合格,即假废品。当实测尺寸与计算尺寸的差值小于尺寸链其他组成环公差之和时,可能为假废品。采用专用检具可减小假废品出现的可能性。

新建立的尺寸链如图 3-20(c)所示,由它可解得(计算过程略) $A_2 = 40.3_{-0.47}^{+0.06} \text{ mm}$ 。

只要测量尺寸的超差量小于或等于其余组成环尺寸公差之和,就有可能出现假废品。为此,应对该零件各有关尺寸进行复检和验算,以免将实际合格的零件报废而导致浪费。假废品的出现给生产质量管理带来诸多麻烦,因此,一般要求工艺基准与设计基准重合。

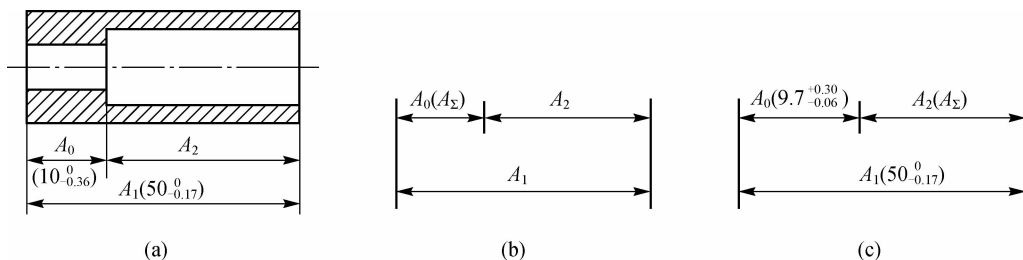


图 3-20 例 3-6 图

## 二、中间工序尺寸的换算

在加工过程中常常会出现先加工出某一个尺寸,然后以这个尺寸为基准进行其他方面的加工,来保证最终的尺寸精度要求的情况,这种情况就是中间工序尺寸换算。如工序基准是尚待加工的设计基准时,有关工序尺寸需换算。

**例 3-7** 如图 3-21 所示为齿轮内孔及键槽的加工过程。最终尺寸为  $46^{+0.300}_0$  mm,不计两次加工孔的同轴度影响。要求:

- (1) 镗孔至尺寸  $\phi 39.6^{+0.100}_0$  mm。
- (2) 插键槽,工序尺寸为  $A$ 。
- (3) 热处理。
- (4) 磨孔至设计尺寸  $\phi 40^{+0.050}_0$  mm,同时保证键槽深度。

试确定工序尺寸  $A$  的大小和公差。

**解** (1) 画出尺寸链图,如图 3-22 所示。

由于该零件尺寸为直径值,应算出其半径值。 $\phi 39.6^{+0.100}_0$  mm 的半径值为  $19.8^{+0.050}_0$  mm,  $\phi 40^{+0.050}_0$  mm 的半径值为  $20^{+0.025}_0$  mm。

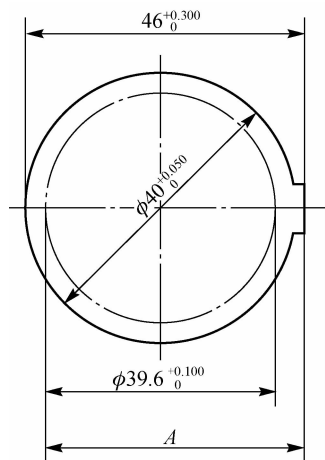


图 3-21 齿轮加工图

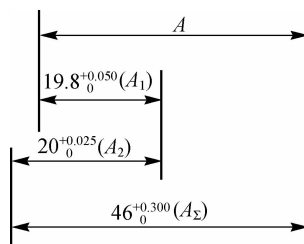


图 3-22 例 3-7 尺寸链图

(2) 判断环的性质。

键槽深度  $\phi 46^{+0.300}_0$  mm 为间接保证的,故为封闭环,  $A_2 = 20^{+0.025}_0$  mm 为增环,  $A$  为增环,  $A_1 = 19.8^{+0.050}_0$  mm 为减环。

(3) 计算尺寸链。



由式(3-1)可得,  $A$  的基本尺寸为

$$A_{\Sigma} = A + A_2 - A_1$$

$$A = A_{\Sigma} + A_1 - A_2 = (46 + 19.8 - 20) \text{ mm} = 45.8 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得,  $A$  的上偏差为

$$ES_{A_{\Sigma}} = ES_A + ES_{A_2} - EI_{A_1}$$

$$ES_A = ES_{A_{\Sigma}} + EI_{A_1} - ES_{A_2} = (+0.300 + 0 - 0.025) \text{ mm} = +0.275 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $A$  的下偏差为

$$EI_{A_{\Sigma}} = EI_A + EI_{A_2} - ES_{A_1}$$

$$EI_A = EI_{A_{\Sigma}} + ES_{A_1} - EI_{A_2} = (0 + 0.050 - 0) \text{ mm} = +0.050 \text{ mm}$$

故  $A = 45.8^{+0.275}_{+0.050} \text{ mm}$ 。

(4) 验算。

$$T_A + T_{A_1} + T_{A_2} = (0.225 + 0.050 + 0.025) \text{ mm} = 0.300 \text{ mm} \leq T_{\Sigma}$$

故该尺寸符合题意。

### 三、电镀零件有关工序尺寸的换算

为提高零件表面硬度、耐磨性、耐腐蚀性及保证零件的表面精度,一般都安排表面电镀,并在图纸上标出要求的电镀层厚度。为保证达到图纸要求,需对有关的工序尺寸进行换算或验算。生产中,电镀零件表面有两种情况,一种是镀后尚需加工,另一种是镀后不加工,两者的工序尺寸换算或封闭环的判断是不相同的。

**例 3-8** 如图 3-23 所示为轴套零件外圆电镀示意图。其中  $\phi 28_{-0.045}^0 \text{ mm}$  外圆表面要求镀铬,镀层厚度为  $0.025 \sim 0.040 \text{ mm}$  (即双边为  $0.05 \sim 0.08 \text{ mm}$  或  $0.08_{-0.030}^0 \text{ mm}$ ),该表面的加工顺序为车→磨→电镀,求磨外圆的工序尺寸  $A$ 。

**解** (1) 画出尺寸链图,如图 3-24 所示。

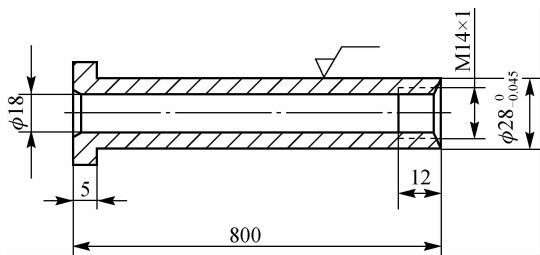


图 3-23 轴套零件外圆电镀示意图

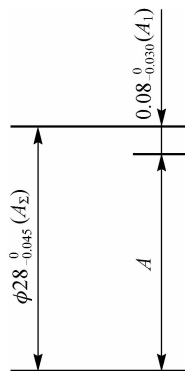


图 3-24 例 3-8 尺寸链图

(2) 判断环的性质。

镀后保证的设计尺寸  $\phi 28_{-0.045}^0 \text{ mm}$  为封闭环,工序尺寸  $A$  及镀层厚度  $0.08_{-0.030}^0 \text{ mm}$  为增环。

(3) 计算尺寸链。

由式(3-1)可得,  $A$  的基本尺寸为

$$A_{\Sigma} = A + A_1$$

$$A = A_{\Sigma} - A_1 = (28 - 0.08) \text{ mm} = 27.92 \text{ mm}$$

由式(3-4)可得,  $A$  的上偏差为

$$ES_{A_{\Sigma}} = ES_A + ES_{A_1}$$

$$ES_A = ES_{A_{\Sigma}} - ES_{A_1} = (0 - 0) \text{ mm} = 0 \text{ mm}$$

由式(3-5)可得,  $A$  的下偏差为

$$EI_{A_{\Sigma}} = EI_A + EI_{A_1}$$

$$EI_A = EI_{A_{\Sigma}} - EI_{A_1} = [-0.045 - (-0.030)] \text{ mm} = -0.015 \text{ mm}$$

故磨外圆的工序尺寸  $A = 27.92_{-0.015}^0 \text{ mm}$ 。

## 学习情境四 装配尺寸链分析

在产品装配或机床维修过程中也会牵涉到尺寸链的问题,下面介绍装配尺寸链的问题。

### 一、装配尺寸链的概念及组成

#### 1. 装配尺寸链的概念

在产品的装配过程中,由相关零件的相关尺寸所组成的尺寸链称为装配尺寸链。

#### 2. 装配尺寸链的组成

装配尺寸链也是由封闭环和组成环组成的。

##### 1) 封闭环

有装配精度或装配技术要求的尺寸环为装配尺寸链的封闭环,它是由相关零件的相关尺寸间接保证的。

##### 2) 组成环

直接影响装配精度的各环为组成环。组成环中预先选定的某一组成环,通过改变其大小和位置,使封闭环达到规定的精度要求,称为协调环。

### 二、装配尺寸链的建立方法

#### 1. 建立装配尺寸链的步骤

建立装配尺寸链包括确定封闭环、查找组成环、画出装配尺寸链图。

##### 1) 确定封闭环

确定封闭环,并准确判断封闭环及封闭环允许范围。

##### 2) 查找组成环

首先要正确理解相关零件和相关尺寸。如果零件上某尺寸变动会引起封闭环尺寸变动,则该零件为相关零件,相应的尺寸为相关尺寸。相关尺寸是装配尺寸链的组成环。

其次是查找相关零件。由于前一步已确定封闭环,这里沿封闭环两端零件逐个查找,找到同一个零件或同一基准面,直到使尺寸链封闭为止。

##### 3) 画出装配尺寸链图

根据装配图画出相应的尺寸链图,并判断组成环的性质。判断形位公差组成环和配合环性质是解决装配尺寸链的关键。形位公差组成环和配合环都是基本尺寸为零的组成环,



判别形位公差组成环的性质可根据具体情况确定。如配合间隙组成环是先判断在力的作用下配合间隙所引起的零部件位移方向,再依据位移方向判别其变动对封闭环的影响性质,如图 3-25 所示。

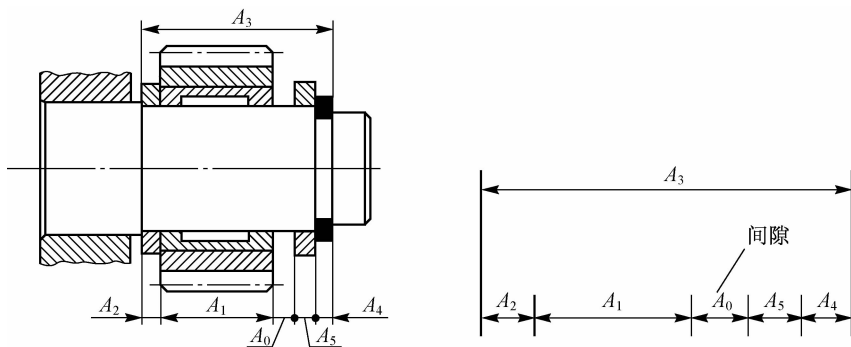


图 3-25 配合尺寸链举例

## 2. 装配尺寸链最少环原则

建立装配尺寸链要遵循最少环原则,即每一个相关零件只有一个相关尺寸加入装配尺寸链的组成环,尺寸链的组成环数目恰好等于相关零件个数。这就是装配尺寸链最少环原则。装配尺寸链最少环原则是十分重要的知识。实际上,在一个装配尺寸链中,应当尽量减少相关零件数量,并做到每个相关零件只有一个尺寸列入尺寸链,这样的装配经济性最好。由于产品的精度常常是由多个方向不同或位置不同的精度要求来保证的,所以可能会出现多个封闭环。但是,在每个装配尺寸链中都要求仅有一个封闭环。角度尺寸链通常被转化为直线尺寸链后,按直线尺寸链的方法建立尺寸链。

## 三、装配尺寸链的应用

通常,在实际生产中可以按经济加工精度加工零件,以降低零件的加工成本,而在装配时需要采取一定的工艺措施。例如,采取选配、调节、修配等方法以保证装配精度。虽然装配的劳动量和成本提高了,但就整个产品而言,比增加机械加工的劳动量和成本更经济。常用的保证装配精度的方法有完全互换法、分组选择装配法和修配法等。

### 1. 完全互换法

从尺寸链各环的最大与最小极限尺寸出发进行尺寸链计算,不考虑各环实际尺寸的分布情况。按此法计算出来的尺寸加工各组成环,装配时各组成环无须挑选或辅助加工,装配后能满足封闭环的公差要求,即可实现完全互换。完全互换法是装配尺寸链计算中最基本的方法,也称为极值法。

**例 3-9** 双联转子泵装配示意图如图 3-26 所示,轴向装配精度要求的轴向装配间隙为  $0.05 \sim 0.15 \text{ mm}$  (冷态下),即  $A_2 = 0_{-0.05}^{+0.15} \text{ mm}$ 。已知相关零件的相关尺寸为  $A_1 = 41 \text{ mm}$ ,  $A_2 = A_4 = 17 \text{ mm}$ ,  $A_3 = 7 \text{ mm}$ 。试按极值法计算各组成环的上、下偏差。

**解** (1) 尺寸链图在图 3-26 中得以体现。

(2) 判断环的性质。

装配精度  $A_2 = 0_{-0.05}^{+0.15} \text{ mm}$  为封闭环,  $A_1$  为增环,  $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$  为减环。

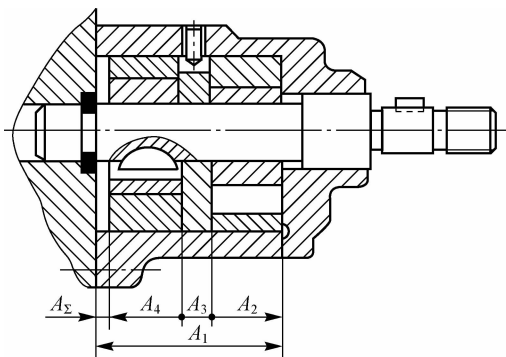


图 3-26 双联转子泵装配示意图

(3) 计算尺寸链。

①按等公差值法分配封闭环公差。

i) 计算平均公差。

$$T_M = \frac{T_\Sigma}{n-1} = \frac{0.15-0.05}{5-1} \text{ mm} = 0.025 \text{ mm}$$

零件制造的平均精度很高,但尚可加工,因此,采用完全互换极值解法是可行的。按照各组成零件的尺寸大小,加工的难易程度和设计要求等方面,调整各组成环公差。尺寸  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  可用平面磨床加工,经济精度定为 IT7。由于各尺寸都便于用卡板测量,其尺寸偏差的分布位置应按被包容尺寸(轴)标注成单向负偏差。查标准公差数值表,得公差等级为 IT7 时,  $T_2 = T_4 = 0.018 \text{ mm}$ ,  $T_3 = 0.015 \text{ mm}$ 。

则

$$A_2 = A_4 = 17_{-0.018}^0 \text{ mm}, \quad A_3 = 7_{-0.015}^0 \text{ mm}$$

尺寸  $A_1$  采用镗削加工,因镗削加工不易保证高的加工精度,  $A_1$  应采用较大的公差值,其深度尺寸在成批生产中采用专用极限量规进行测量,为保证装配精度,选  $A_1$  为协调环,其公差为

$$\begin{aligned} T_1 &= T_\Sigma - (T_2 + T_3 + T_4) \\ &= [0.1 - (0.018 + 0.015 + 0.018)] \text{ mm} \\ &= 0.049 \text{ mm} \end{aligned}$$

相当于公差等级 IT9~IT8。

ii) 计算  $A_1$  的上、下偏差。

由式(3-4)可得,  $A_1$  的上偏差为

$$\begin{aligned} ES_{A_\Sigma} &= ES_{A_1} - (EI_{A_2} + EI_{A_3} + EI_{A_4}) \\ ES_{A_1} &= ES_{A_\Sigma} + EI_{A_2} + EI_{A_3} + EI_{A_4} \\ &= [0.15 + (-0.018) + (-0.015) + (-0.018)] \text{ mm} \\ &= 0.099 \text{ mm} \end{aligned}$$

由式(3-5)可得,  $A_1$  的下偏差为

$$EI_{A_1} = ES_{A_1} - T_1 = (0.099 - 0.049) \text{ mm} = +0.050 \text{ mm}$$

故  $A_1 = 41_{+0.050}^{+0.099} \text{ mm}$ 。

②按等公差系数法分配封闭环公差。

i) 计算平均公差等级系数。



&gt;&gt;&gt;&gt;&gt;&gt;

$A_1 = 41$  mm 属于 30~50 mm 尺寸段,几何平均值为

$$D_1 = \sqrt{30 \times 50} \text{ mm} \approx 38.73 \text{ mm}$$

$A_2 = A_4 = 17$  mm 属于 10~18 尺寸段,几何平均值为

$$D_2 = D_4 = \sqrt{10 \times 18} \text{ mm} \approx 13.42 \text{ mm}$$

$A_3 = 7$  mm 属于 6~10 尺寸段,几何平均值为

$$D_3 = \sqrt{6 \times 10} \text{ mm} \approx 7.75 \text{ mm}$$

对于尺寸  $\leq 500$  mm 尺寸段,由式(3-17)可得

$$\begin{aligned} \alpha_m &= \frac{T_\Sigma \times 1\,000}{\sum_{i=1}^{n-1} (0.45 \times \sqrt[3]{D_i} + 0.001D_i)} \\ &= \frac{0.1 \times 1\,000}{(0.45 \times \sqrt[3]{38.73} + 0.001 \times 38.73) + (0.45 \times \sqrt[3]{13.42} + 0.001 \times 13.42) \times 2 \\ &\quad + (0.45 \times \sqrt[3]{7.75} + 0.001 \times 7.75)} \\ &= \frac{100}{1.56 + 1.084 \times 2 + 0.889} \text{ mm} = 21.65 \text{ mm} \end{aligned}$$

由  $\alpha_m = 21.65$  mm,查尺寸  $\leq 500$  mm 的 IT5~IT18 标准公差表,得相对应的公差等级为 IT8。由  $A_1 = 41$  mm,  $A_2 = A_4 = 17$  mm,  $A_3 = 7$  mm,按 IT8 查标准公差表得

$$T_1 = 0.039 \text{ mm}, \quad T_2 = T_4 = 0.027 \text{ mm}, \quad T_3 = 0.022 \text{ mm}$$

取  $A_1$  为协调环,其余尺寸按向体原则标注为  $A_2 = A_4 = 17_{-0.027}^0$  mm,  $A_3 = 7_{-0.022}^0$  mm。

ii) 计算  $A_1$  的上、下偏差。

$$\begin{aligned} ES_{A_1} &= ES_{A_\Sigma} + (EI_{A_2} + EI_{A_3} + EI_{A_4}) \\ &= [0.15 + (-0.027) + (-0.022) + (-0.027)] \text{ mm} \\ &= +0.074 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$EI_{A_1} = ES_{A_1} - T_1 = (+0.074 - 0.039) \text{ mm} = +0.035 \text{ mm}$$

故  $A_1 = 41_{\pm 0.035}^{+0.074}$  mm。

## 2. 分组选择装配法

为了提高零件的装配精度,工人首先根据整批零件的尺寸进行分组,然后进行装配,这种方法可以获得较高的装配精度。

如图 3-27 所示为发动机活塞销孔与活塞销的配合,按照装配技术要求,销子直径  $d$  与销孔  $D$  在冷态下装配时,应有过盈量 0.002 5~0.007 5 mm,其公差值为  $T_N = (0.007 5 - 0.002 5) \text{ mm} = 0.005 0 \text{ mm}$ 。

如果采用完全互换法装配,按等公差值法分配封闭环公差,活塞销与活塞销孔均能分配到 0.002 5 mm。销尺寸标注为  $d = 28_{-0.007 5}^{0.005 0}$  mm,取消孔尺寸为协调环则  $D = 28_{-0.007 5}^{0.005 0}$  mm。显然,这样高的加工精度制造较困难,也不经济,应采用分组选择法装配。

将销的公差放大 4 倍,则  $d = 28_{-0.01}^0$  mm,取消孔尺寸为协调环,公差放大方向相同,则  $D = 28_{-0.015}^{0.005}$  mm,上偏差都没有变动,放大了下偏差,以扩大制造公差。这样一来,就可以用无心磨床磨削活塞销外圆,在金刚镗床上镗活塞销孔。然后再逐个测量,按照尺寸大小分成 4 组,用不同颜色区别,分装在不同容器里,以便分组装配。

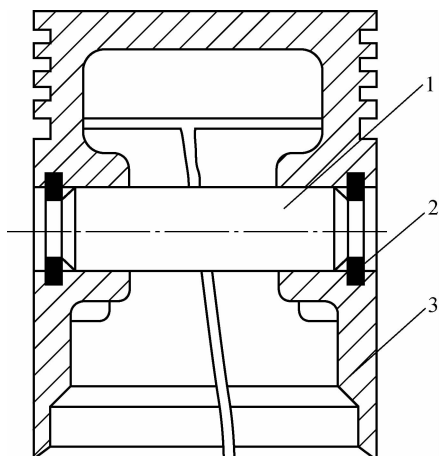


图 3-27 发动机活塞销孔与活塞销的配合  
1—轴；2—垫圈；3—箱体

活塞销与活塞销孔的分组尺寸见表 3-1。

表 3-1 活塞销与活塞销孔的分组尺寸表

| 组 别 | 标志色 | 活塞销直径 $d/\text{mm}$        | 活塞销孔直径 $D/\text{mm}$       | 最大过盈    | 最小过盈    |
|-----|-----|----------------------------|----------------------------|---------|---------|
| 1   | 红   | $d=28_{-0.0025}^0$         | $D=28_{-0.0075}^{-0.0050}$ | 0.007 5 | 0.002 5 |
| 2   | 白   | $d=28_{-0.0050}^{-0.0025}$ | $D=28_{-0.0100}^{-0.0075}$ | 0.007 5 | 0.002 5 |
| 3   | 黄   | $d=28_{-0.0075}^{-0.0050}$ | $D=28_{-0.0125}^{-0.0100}$ | 0.007 5 | 0.002 5 |
| 4   | 绿   | $d=28_{-0.0100}^{-0.0075}$ | $D=28_{-0.0150}^{-0.0125}$ | 0.007 5 | 0.002 5 |

### 3. 修配法

修配法装配是使组成装配尺寸链的各组成环都按照经济加工精度制造,然后在组成环中挑选一环为修配环,修配前留有一定的余量,装配时通过修刮修配环的余量来达到装配精度要求。

**例 3-10** 如图 3-28 所示为 C6140 车床装配时前后顶尖对床身导轨等高度的修配图。为简化计算,略去同轴度误差,可以得到只有  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  这 3 个组成环的简化线性尺寸链。已知: $A_{\Sigma}=0^{+0.06}_0$  mm、 $A_1=202$  mm、 $A_2=46$  mm、 $A_3=156$  mm。为保证装配精度,试计算修配环尺寸。

**解** (1)计算平均公差。

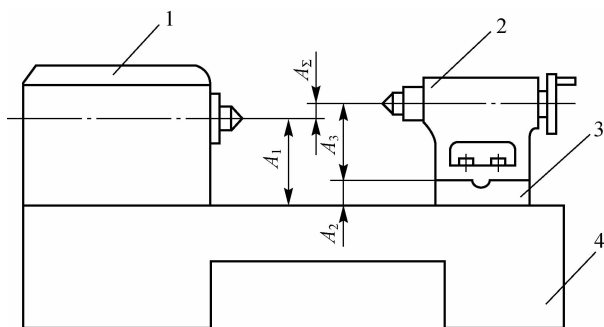
$$T_M = \frac{T_{\Sigma}}{n-1} = \frac{0.06}{4-1} \text{ mm} = 0.02 \text{ mm}$$

各组成环平均制造精度很高,加工困难,应采用修配法装配。为减少修配刮研量,先将尾架和底板的接合面修刮后,将两者配为一体,再精镗尾架孔,以直接控制尾架孔至导轨面之间的尺寸及公差,并令其间尺寸为  $A_{23}$ ,则构成的新尺寸链如图 3-28(c) 所示。

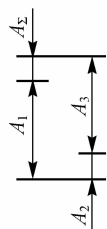
(2)确定修配环尺寸。

①修配环被修配后,封闭环变小的情况。选  $A_{23}$  为修配环,修配前,前后顶尖套筒孔采用镗模法加工,经济精度为 IT9,则

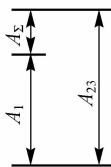
$$T_1 = T_{23} = 0.1 \text{ mm}$$



(a)机床基本结构



(b)原尺寸链



(c)合并后的尺寸链

图 3-28 C6140 车床基本结构及尺寸链图

1—主轴箱；2—尾架；3—底板；4—床身导轨

$$A_1 = (202 \pm 0.05) \text{ mm}$$

$$A_{23} = A_2 + A_3 = (46 + 156) \text{ mm} = 202 \text{ mm}$$

由式(3-3)可得

$$A_{23\min} = A_{1\max} + 0 = (202.05 + 0) \text{ mm} = 202.05 \text{ mm}$$

当  $A_{23\min} = A_{1\max}$  时,装配时没有必要设修配刮研量,故取最小刮研量为 0.15 mm,则修配后  $A_{23\min} = 202.2 \text{ mm}$ ,由于  $T_{23} = 0.1$ ,故修配后的最后尺寸为

$$A_{23} = (202.2 \sim 202.3) \text{ mm} = 202.25_{-0.05}^{+0.05} \text{ mm}$$

②修配环被修配后,封闭环变大的情况。选  $A_1$  为修配环,可得

$$A_{1\min} = A_{23\max} - A_{\Sigma\max} = (202.05 - 0.06) \text{ mm} = 201.99 \text{ mm}$$

为满足装配精度要求,取最小刮研量为 0.15 mm,则

$$A_{1\min} = (201.99 + 0.15) \text{ mm} = 202.14 \text{ mm}$$

又有  $T_1 = 0.1 \text{ mm}$ ,故  $A_1$  的尺寸可定为  $202.14 \sim 202.24 \text{ mm}$ ,即  $A_1 = (202.19_{-0.05}^{+0.05}) \text{ mm}$ 。



### 思考与练习

1. 工艺尺寸链的种类有哪些?
2. 尺寸链的计算类型有哪些?
3. 什么是装配尺寸链?
4. 什么是工艺尺寸链?
5. 工艺尺寸链有哪些特征?