

第 1 章

机械加工工艺规程设计

在实际生产中,由于对零件的结构形状、几何精度、技术条件和生产数量等的要求不同,一个零件往往要经过一定的加工过程才能将其由图样变成成品零件。机械加工人员必须从工厂现有的生产条件、运营情况及零件的生产数量出发,根据零件加工的具体要求,在保证加工质量、提高生产效率和降低生产成本的前提下,对零件上的各加工表面选择适宜的加工方法,合理地安排加工顺序,科学拟定加工工艺过程,执行完整的机械加工工艺规程,才能获得合格的机械零件。

1.1 机械加工工艺过程基本概念

机器的生产过程是将原材料转变为成品(机器)的全过程,包括原材料的运输、保管以及生产与技术准备、毛坯制造、机械加工、装配、检验、试车、油漆、包装等。为了降低生产成本和有利于生产技术的发展,目前很多机器的生产过程已不是由一个工厂单独全部完成,而是由许多国内甚至国外的专业工厂共同完成。当前家用小轿车的生产就是一个例子。

在生产过程中,凡是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统称为工艺过程,它包括毛坯制造(如铸造、锻造、焊接、冲压、注塑成型等)、零件加工、热处理和机器装配等。其他过程则称为辅助过程,如运输、保管、动力供应、质量检验、工装(刀具、量具和夹具)制造、设备维修保养等。

1.1.1 机械加工工艺过程的含义

工艺是指制造产品过程中所采取的技巧、方法和步骤。通常,机械加工是获得合格机器零件的最主要手段和方法。在工艺过程中,以机械加工方法按一定顺序逐步地改变毛坯形状、尺寸、相对位置和表面性质,直至使之成为合格零件的过程称为机械加工工艺过程。

由于制造技术的不断出现和发展,现在所说的机械加工方法除切削和磨削等方法外,还包括其他加工方法,如特种加工中的电火花加工、超声加工、电子束加工、离子束加工、激光束加工、水力切割、(电)化学加工等几乎所有单独或复合的加工方法。

同样,将加工好的零件装配成机器,使之达到所要求的装配精度并获得预定技术性能的工艺过程,称为装配工艺过程。

生产过程、工艺过程、辅助过程与机械加工工艺过程及装配工艺过程的关系如图 1-1 所示。

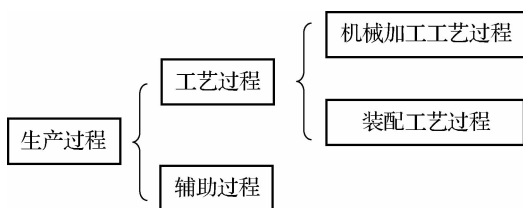


图 1-1 生产过程、工艺过程、辅助过程与机械加工工艺过程及装配工艺过程的关系

1.1.2 机械加工工艺过程的组成

机械加工工艺过程是机械产品生产过程的一部分,零件的机械加工工艺过程(通常称为工艺)是由若干个按一定顺序排列的工序组成的。工序是组成机械加工工艺过程的基本单元。在一个工序中可能包含一个或几个安装,每个安装又可能包含一个或几个工步(或工位),每个工步包含一个或几个走刀(工作行程)。

1. 工序

一个(或一组)工人在一个工作地点(同一机床),对一个(或同时对几个)工件所连续完成的那一部分机械加工工艺过程称为工序。因此,某一过程只要工人、工作地点、工作对象(工件)之一发生变化或不是连续完成,就称为另一个工序。例如,在车床上加工一批轴,可以先对整批毛坯轴进行粗车,经调质处理后再依次对它们进行精车。这时,由于加工过程被调质处理打断,虽然加工是在同一车床上进行的,却是两个工序。

在零件加工工艺过程中通常还包括检验、探伤、打标记、涂漆等一些虽然不改变零件形状、尺寸和表面性质,但却对工艺过程的完成有直接影响的工序,这些工序一般称为辅助工序。

2. 安装

工件在机床上可能需要经过多次装夹才能完成一个工序的加工内容。工件在一次装夹后所完成的那一部分工序内容称为安装。例如,在车床上加工轴,先从一端加工出部分表面,然后掉头加工另一端,这时的工序内容就包括两个安装。

3. 工位

在工件的一次安装中,通过分度(或移位)装置,工件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个位置称为工位。在一个安装中可能只有一个工位,也可能有多个工位。

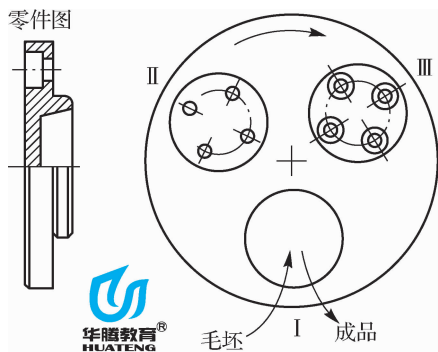


图 1-2 轴承盖螺钉孔的三工位加工

图 1-2 所示为轴承盖螺钉孔的三工位加工,是通过立轴回转式工作台使工件变换加工位置的例子。在该加工中共有 3 个工位,依次为装卸工位 I、钻孔工位 II 和扩孔工位 III,机床上钻、扩主轴箱同时完成轴向进给,实现在一个安装中同时进行钻孔和扩孔,从而减少因多次装夹而带来的装夹误差和时间损失。在生产批量比较大的情况下多采用多工位加工。

4. 工步

在加工表面、加工刀具、切削速度(转速)和进给量都保持不变的情况下所完成的那一部分工位内容称为工步。在一个安装中可以完成一个或多个工步。

为提高生产效率而使用一组同时工作的刀具对零件的几个表面同时进行加工时,可以把它看成一个工步,称为复合工步。例如,带回转刀架的机床(转塔车床、加工中心),其回转刀架的一次转位所完成的工位内容应属一个工步,此时若有几把刀具同时参与切削,该工步就是一个复合工步。图 1-3 为立轴转塔车床回转刀架示意图,图 1-4 所示为用该刀架加工齿轮内孔及外圆的一个复合工步。

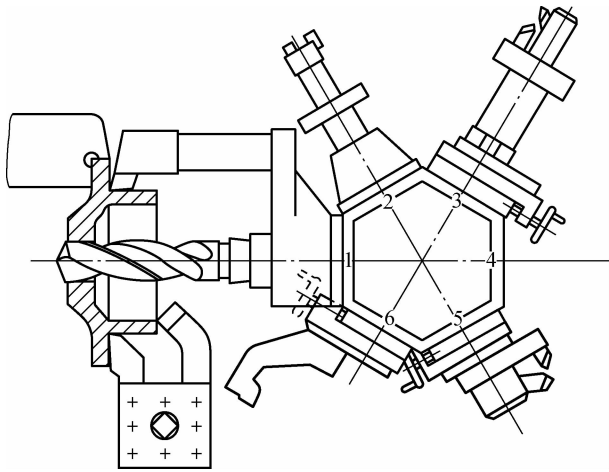


图 1-3 立轴转塔车床回转刀架示意图

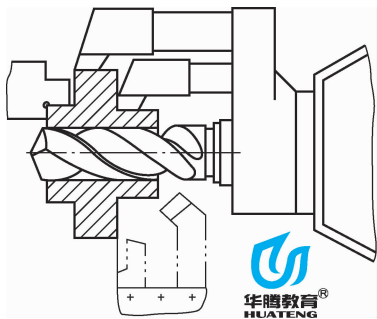


图 1-4 立轴转塔车床回转刀架加工齿轮内孔及外圆的一个复合工步

5. 走刀(工作行程)

切削刀具在加工表面上切削一次所完成的工步内容称为一次走刀。当工件上有较厚的切削层需要切除而不能在一次走刀下切完时,需要多次走刀来完成一个工步。走刀次数又称行程次数。

图 1-5 左半边是单件生产带键槽阶梯轴的机械加工工艺过程,右半边则是成批生产该零件的机械加工工艺过程。从图中可以看出,单件生产的工艺过程由车、铣两道工序构成,其中车削工序又有若干个安装、工位、工步和走刀。成批生产的工艺过程由四道工序构成,其中各工序有若干个工位、工步和走刀。

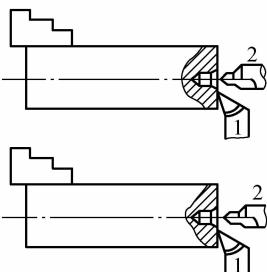
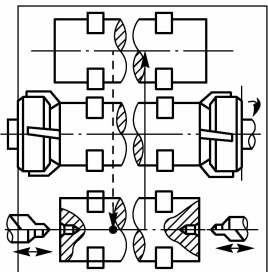
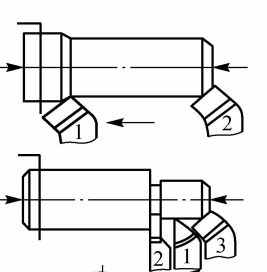
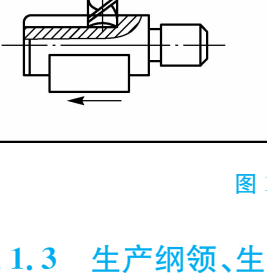
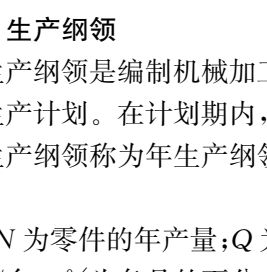
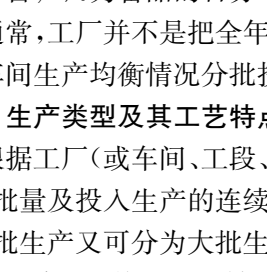
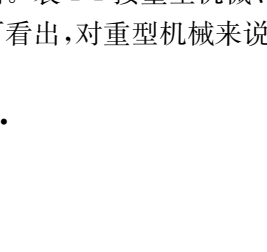
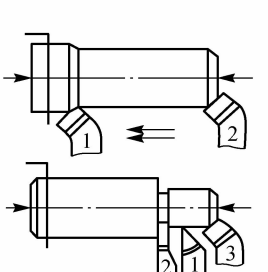
单件生产工艺过程	工序	安装	工位	工步	走刀	成批生产工艺过程	三工位铣端面、钻中心孔专用机床	工序	安装	工位	工步	走刀
	1车 (各部成型)	1	1	1	1		三工位铣端面、钻中心孔专用机床	1 铣端面、打中心孔	1	1 装卸	1	1
				2	1					2 铣端面	1	1
				1	1					3 钻中心孔	1	1
		2	2	1	1			2车	1	1	1	2
				2	1						2	1
		3	1	1	2			3车	1	1	1	2
				2	1						2	1
				3	1						3	1
	2 铣槽	1	1	1	1			4 铣槽	1	1	1	1

图 1-5 带键槽阶梯轴加工工序划分方案比较

1.1.3 生产纲领、生产类型与工艺特点

1. 生产纲领

生产纲领是编制机械加工工艺规程的重要依据。企业根据市场需求和自身的生产能力制订生产计划。在计划期内,应当生产的产品数量和进度计划称为生产纲领。计划期为一年的生产纲领称为年生产纲领(或称年产量)。零件的年产量可按式(1-1)计算。

$$N=Qn(1+a\%)(1+b\%)$$
 (1-1)

式中, N 为零件的年产量; Q 为机器产品的年产量,台/年; n 为每台机器产品中该零件的数量,件/台; $a\%$ 为备品的百分率; $b\%$ 为废品的百分率。

通常,工厂并不是把全年产量一次投入车间进行生产,而是根据产品周期、销售和库存量及车间生产均衡情况分批投入车间生产。每批投入生产产品或零件的数量称为批量。

2. 生产类型及其工艺特点

根据工厂(或车间、工段、班组、工作地)生产专业化程度及产品尺寸大小和特征、年生产纲领、批量及投入生产的连续性,可将其生产类型分为单件生产、成批生产和大量生产。其中,成批生产又可分为大批生产、中批生产和小批生产。显然,产量越大,生产专业化程度应该越高。表 1-1 按重型机械、中型机械和轻型机械的年产量列出了不同生产类型的规范,从表中可看出,对重型机械来说,其大量生产的数量远小于轻型机械。

表 1-1 各种生产类型的规范

生产类型	零件的年生产纲领		
	重型机械	中型机械	轻型机械
单件生产	≤5	≤20	≤100
小批生产	>5~100	>20~200	>100~500
中批生产	>100~300	>200~500	>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

从工艺特点上看,小批生产和单件生产的工艺特点相似,大批生产和大量生产的工艺特点相似,因此生产上常按单件小批生产、中批生产和大批大量生产来划分生产类型,并且按这三种生产类型归纳它们的工艺特点。不同的生产类型具有不同的工艺特点,在毛坯种类、机床及工艺装备选用、机床布置、人员素质及生产组织各方面均有明显区别。不同生产类型的工艺特点见表 1-2。

表 1-2 不同生产类型的工艺特点

项 目	生产类型		
	大批大量生产	中批生产	单件小批生产
生产对象	品种少,量很多,固定不变	品种较多,量较多,周期性变换	品种很多,量少,经常变换
零件互换性	具有广泛的互换性,某些高精度配合件用分组选配法装配,不允许用钳工修配	大部分零件具有互换性,同时还保留某些钳工修配工作	广泛采用钳工修配
毛坯制造	广泛采用金属模机器造型、模锻等。毛坯精度高,加工余量小	部分采用金属模机器造型、模锻等,部分采用木模手工造型、自由锻造。毛坯精度中等	广泛采用木模手工造型、自由锻造。毛坯精度低,加工余量大
机床设备及其布置	采用高效专用机床、组合机床、可换主轴箱(刀架)机床、可重组机床。采用流水线或自动线进行生产	部分采用通用机床,部分采用数控机床、加工中心、柔性制造单元、柔性制造系统。机床按零件类别分工段排列	广泛采用通用机床,重要零件采用数控机床或加工中心。机床按机群布置
获得规定加工精度的方法	在调整好的机床上加工	一般是在调整好的机床上加工,有时也用试切法	试切法
装夹方法	高效专用夹具装夹	夹具装夹	通用夹具装夹,找正装夹
工艺装备	广泛采用高效率夹具、量具或自动检测装置、高效复合刀具	广泛采用夹具、通用刀具、万能量具,部分采用专用刀具、专用量具	广泛采用通用夹具、量具和刀具

续表

项 目	生产类型		
	大批大量生产	中批生产	单件小批生产
对工人要求	对调整工技术水平要求高,对操作工技术水平要求不高	对工人技术水平要求较高	对工人技术水平要求高
生产率	高	一般	低
成本	低	一般	高
工艺文件	工艺过程卡片、工序卡片、检验卡片	一般有工艺过程卡片,重要工序有工序卡片	只有工艺过程卡片

随着社会发展、技术进步和市场需求变换,生产类型的划分正在发生变化,传统的大批大量生产不能适应产品及时更新换代的需要,而单件小批生产又不能有效满足市场需求,因此各种生产类型都朝着生产过程柔性化的方向发展。

1.2 机械加工工艺规程设计及其原则

机械加工工艺规程是规定产品或零部件机械加工工艺过程和操作方法等的工艺文件,是一切有关生产人员都应严格执行、认真贯彻的纪律性文件。生产规模的大小、工艺水平的高低,以及解决各种工艺问题的方法和手段都是通过机械加工工艺规程来体现的。因此,机械加工工艺规程设计是一项重要而严肃的工作。它要求设计者必须具备丰富的生产实践经验和广博的机械制造工艺基础理论知识。

设计机械加工工艺规程应遵循以下原则:

(1)能够可靠地保证产品的加工质量。经过审核确定下来的机械加工工艺规程不得随意变更。随着科学技术的进步和发展,新的制造方法和加工设备层出不穷,这就要求加工工艺与时俱进。另外,对于生产过程中工艺的纰漏,需要对已有的工艺进行修改、补充和更新,这时必须经过有关人员认真讨论和重新审核,不得擅自修改图纸或不按工艺要求去做。

(2)必须满足生产纲领的要求。

(3)力求工艺成本最低。

(4)减轻工人的劳动强度,保障生产安全。

1.2.1 机械加工工艺规程的作用

一个工件从毛坯加工成成品的机械加工工艺过程,可以因产量及生产条件的不同而不同。用一定的文件形式规定下来的工艺过程称为工艺规程。

机械加工工艺规程在生产中有以下作用:

(1)工艺规程是指导工人生产的技术文件。

(2)工艺规程是生产管理和组织的主要依据。

(3)工艺规程是新建或扩建机械制造工厂或车间的基本文件。

(4)工艺规程是现有生产方法和技术的总结,是进行生产技术交流和推广的重要文件。

因此,机械加工工艺规程必须保证产品能可靠地达到所有规定的技术要求,并能在充分

发挥生产设备能力的条件下,以尽可能低的成本和尽可能少的时间制造出来。

机械加工工艺规程的编制必须以下列原始资料为依据:

- (1)产品装配图及零件图。
- (2)有关产品质量验收标准。
- (3)产品的生产纲领。
- (4)产品零件毛坯制造情况。
- (5)本厂现有生产设备能力和精度。
- (6)工艺设计及工装设计手册及技术资料。
- (7)国内外同类产品的参考工艺资料等。

另外,工艺的编制人员要经常深入生产现场,及时了解生产情况及工艺实时流程,发现问题并解决问题。

1.2.2 机械加工工艺规程的编制阶段

机械加工工艺规程的编制分为以下四个阶段:

(1)工作准备阶段。该阶段包括收集原始资料和基本数据,对零件进行工艺性分析、生产纲领计算、生产类型与毛坯种类的确定。

(2)工艺路线拟定阶段。这一阶段要确定整个工艺路线,是工艺规程编制的主要工作阶段。这一阶段需要考虑多方面因素的影响,并要求有相当丰富的工艺设计经验。通常,该阶段的工作可大致分为以下三个步骤进行:

①根据规定的技术要求和对定位基准的选择,确定零件上每个加工表面的加工方法和获得步骤。

②将所有需要的加工步骤按一定原则确定其进行的先后顺序,形成一个有序的工步排列。

③对工步序列中的若干工步进行组合,形成以工序为单位的加工流程。这一加工流程初步设计即形成了零件机械加工工艺路线。

(3)工序设计阶段。进一步设计、确定每个工序的具体工艺内容,如工序尺寸及其公差,使用的机床、夹具、刀具和量具,切削用量和时间定额等。

(4)最终确定阶段。对设计的工艺路线进行分析、评价和比较,经反复比较修改完善,最终确定一个最佳的机械加工工艺规程并将其投放到生产过程中去。

1.2.3 工艺文件

零件机械加工工艺规程确定后,应将有关内容填入各种不同的卡片,以便指导生产。这些卡片总称为工艺文件。工艺文件的详细程度与生产类型、零件的设计精度和工艺过程的自动化程度有关。

(1)工艺过程综合卡片。工艺过程综合卡片是简要说明零件整个工艺过程的一种卡片,又称过程卡。其中包括工序号、工艺过程的工序名称和简明加工内容、加工车间和工段,以及各工序的时间定额等内容。它概述了加工的全过程,是制定其他工艺文件的基础,可以作为生产管理及调度文件来使用。在单件小批生产中,通常不再编制更详细的工艺文件,而直接以过程卡指导生产。机械加工工艺过程综合卡片见表 1-3。

表 1-3 机械加工工艺过程综合卡片

(工厂名)	机械加工工艺过程综合卡片	产品名称及型号			零件名称			零件图号			
		材料	名称		毛坯	种类		零件重	毛重		第 页
			牌号			尺寸		量/kg	净重		共 页
			性能		每料件数			每台件数			每批件数
工序号	工序内容			加工车间	设备名称及编号	工艺装备名称及编号			技术等级	时间定额/min	
						夹具	刀具	量具		单件	准备-终结
更改内容											
编制		抄写		校对		审核		批准			

(2)机械加工工艺卡片。机械加工工艺卡片又称工艺卡,以工序为单位说明工艺过程,详细规定了每个工序及其工位和工步的工作内容。复杂工序绘有工序简图,注明工序尺寸及其公差等。工艺卡用来指导生产和管理加工过程,广泛用于成批生产或重要零件的小批生产。机械加工工艺卡片见表 1-4。

表 1-4 机械加工工艺卡片

工厂名			机械加工工艺卡片	产品名称及型号			零件名称			零件图号					
				材料	名称		毛 坯	种类		零件重量/kg	毛重		第 页		
					牌号			尺寸					共 页		
					性能		每料件数			每台件数		每批件数			
工序	安 装	工 步	工序内容	同时加工零件数	切削用量				设备名称及编号	工艺装备名称及编号			时间定额/min		
					背吃刀量/mm	切削速度/(m·min ⁻¹)	主轴转速/(r·min ⁻¹)或双行程数/每分钟	进给量/(mm·r ⁻¹)或/(mm·min ⁻¹)		夹具	刀具	量具	技术等级	单件	准备-终结
更改内容															
编制				抄写				校对				审核		批准	

(3)机械加工工序卡片。机械加工工序卡片又称工序卡,用来具体指导工人的操作。它为零件工艺过程中的每个工序而制定,详细说明各工序的具体内容并附有工序简图。工序卡多用于大批大量生产和重要零件的成批生产。机械加工工序卡片见表 1-5。

表 1-5 机械加工工序卡片

(工厂名)	机械加工 工序卡片	产品名称及 型号		零件名称	零件图号	工序名称	工序号	第 页												
								共 页												
(画工序简图处)				车间	工段	材料名称	材料牌号	力学性能												
				同时加 工件数	每料件数	技术等级	单件时间 /min	准备-终结 /min												
				设备名称	设备编号	夹具名称	夹具编号	工作液												
				更改内容																
工步号	工步内容	计算数据			工作行程数	切削用量				时间定额			刀具、量具及辅助工具							
		直径或长度	进给长度	单边余量		背吃刀量/mm	进给量/(mm·r ⁻¹) 或/(mm·min ⁻¹)	主轴转速/(r·min ⁻¹) 或双行程数/每分钟	切削速度/(m·min ⁻¹)	基本时间	辅助时间	工作地点服务时间	工步号	名称	规格	编号	数量			
编制					抄写				校对				审核				批准			

对于加工精度高的关键零件的关键工序,即便采用普通加工方法的单件小批生产,也应制定较为详细的机械加工工艺规程,以保证加工质量。若机械加工工艺规程中有数控工序或全部由数控工序组成,则不管生产类型如何,都必须对数控加工工序做出详细规定,填写数控加工工序卡、刀具卡等必要的与编程有关的工艺文件,以利于编程。

需要说明的是,我国对工艺文件的格式没有做统一的规定,但各机械制造企业所用表格的基本内容是相同的。有关内容可以参照中华人民共和国电子行业标准《工艺文件格式的填写》(SJ/T 10375—1993)来填写。

1.2.4 机械加工工艺规程的制定步骤

机械加工工艺规程的制定步骤如下：

(1) 阅读装配图和零件图。通过阅读装配图和零件图，了解产品的用途、性能和工作条件，熟悉零件在产品中的地位和作用。

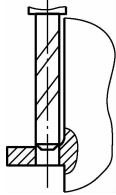
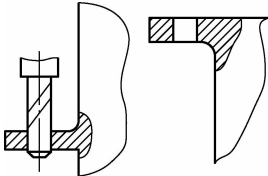
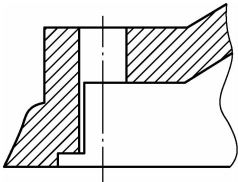
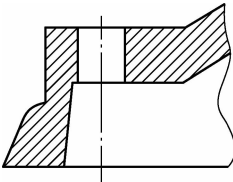
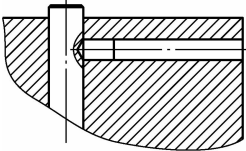
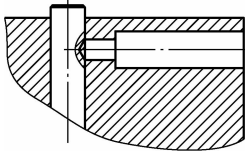
(2) 工艺审查。审查图样上的尺寸、视图和技术要求是否完整、正确、统一，找出主要技术要求和分析关键的技术问题，重点审查零件的结构工艺性。

所谓零件的结构工艺性，是指在满足使用要求的前提下制造该零件的可行性和经济性。在分析结构工艺性过程中，首先要确定零件是否具有可加工性，在可加工的基础上判断其经济性如何。设计功能相同的零件，其结构工艺性可以有很大的差异。所谓结构工艺性好，是指在一定的工艺条件下，既能方便制造，又有较低的制造成本。

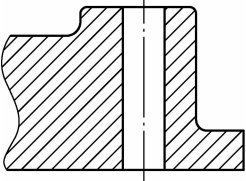
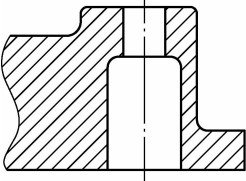
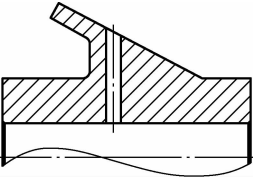
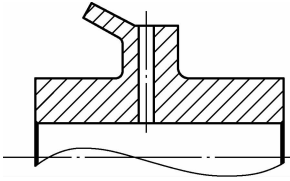
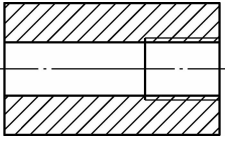
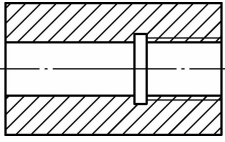
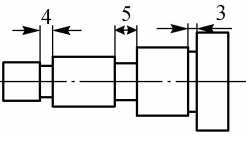
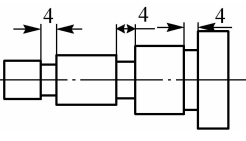
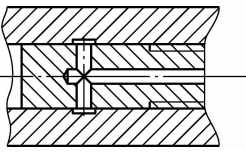
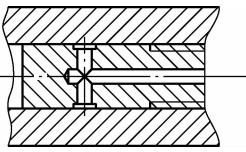
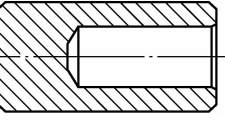
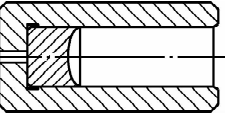
如果在工艺审查中发现了结构工艺性问题，那么应同产品设计部门联系，共同研究解决办法，切不可自行修改。

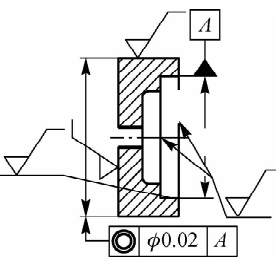
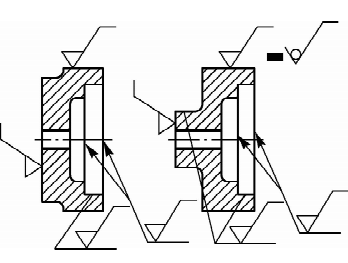
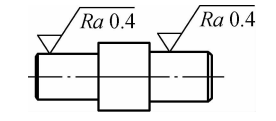
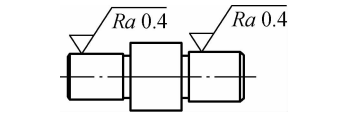
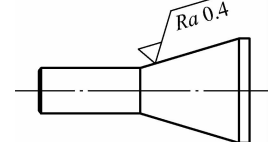
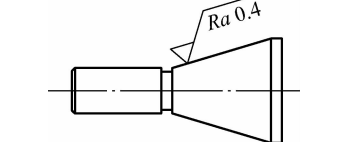
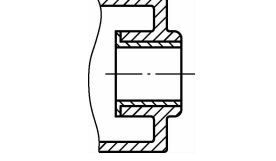
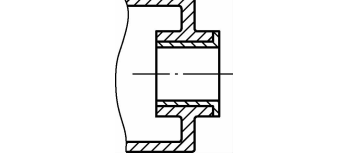
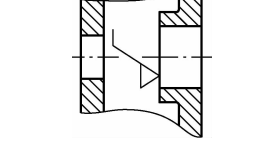
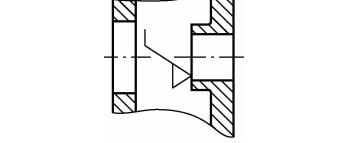
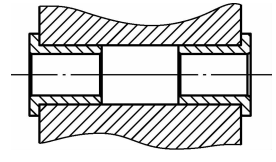
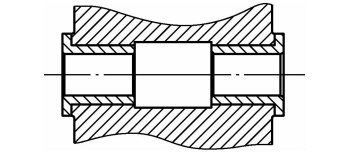
在通常的工艺条件下，常见的零件结构工艺性问题分析见表 1-6。

表 1-6 常见的零件结构工艺性问题分析

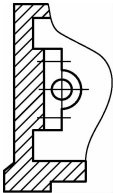
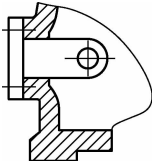
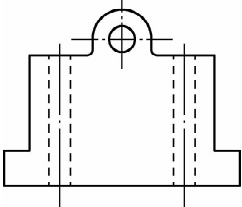
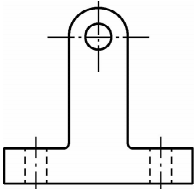
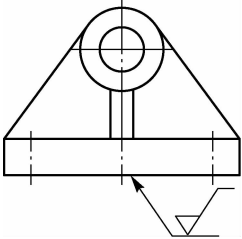
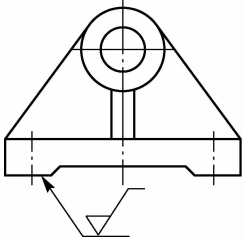
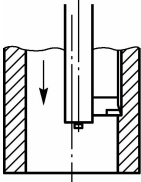
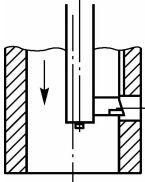
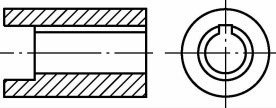
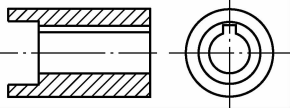
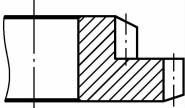
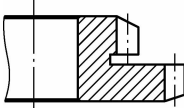
序号	零件结构			
	结构工艺性不好		结构工艺性好	
1	孔距离箱壁太近，一是钻头在圆角处易引偏；二是箱壁高度尺寸大，需要加长钻头才能钻孔			(1) 加长箱耳，无须加长钻头钻孔； (2) 将箱耳设计在结合面上，无须加长箱耳，可方便钻孔
2	孔在内壁出口遇到阶梯面，孔易钻偏或折断钻头			孔的内壁出口为平面，容易保证孔轴线位置度
3	螺孔长度过长，增加攻丝的难度，且螺钉的工作行程较长			减少了深孔的螺纹加工长度，减少了螺钉顶紧的时间

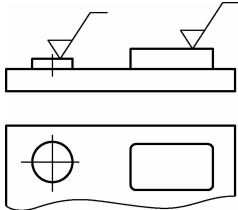
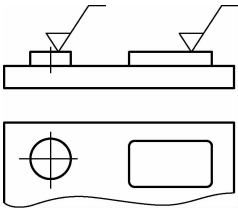
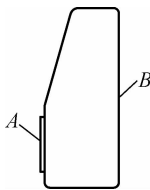
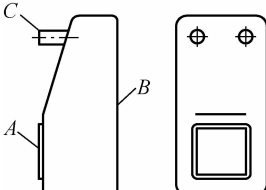
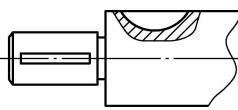
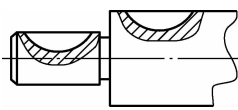
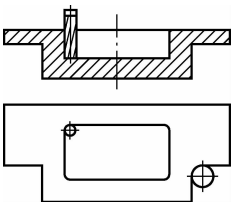
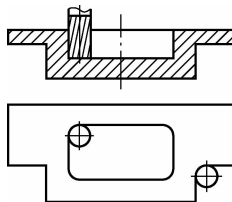
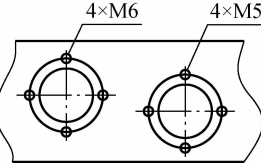
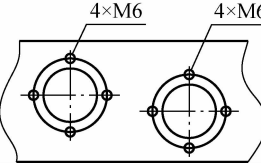
续表

序号	零件结构			
	结构工艺性不好		结构工艺性好	
4	钻孔过深,加工时间长,钻头损耗大,且钻头易偏斜			钻孔的一端留有空刀,钻孔时间短,钻头寿命长,钻头不易偏斜
5	斜面上钻孔,钻头易引偏			若结构允许,钻头进刀处设计成平面,方便直接钻孔
6	车螺纹时,螺纹根部易打刀,工人操作紧张,且不能清根			留有退刀槽,可使螺纹清根,操作相对容易,可避免打刀
7	三处空刀槽宽度各不相同,需要用三种不同尺寸的切刀加工,增加了设计成本			若设计允许,使空刀槽宽度尺寸相同,使用同一刀具即可加工
8	在阀体孔内壁上车环形槽,由于车刀刚性所限,加工比较困难			在阀芯的外圆上车环形槽比较容易
9	内孔底部的圆弧较难车出,且测量困难			改成镶装结构后,通过加工镶块上的圆弧和配合外圆,能很方便地完成加工

序号	零件结构			
	结构工艺性不好	结构工艺性好	结构工艺性好	
10	内外圆有同轴度要求的外圆需在两次装夹下加工,同轴度不易保证			可在一次装夹下加工内外圆,同轴度要求容易得到保证
11	两端轴颈需要磨削加工,存在砂轮圆角而无法清根			根部设计有砂轮越程槽,磨削时可以清根
12	圆锥面磨削时会伤及圆柱面,并且不能清根			车出退刀槽后,可以方便地对圆锥面进行磨削加工
13	加工面设计在箱体内,加工时调整刀具不方便,观察也较为困难			加工面在箱体外,既便于加工,又易观察
14	箱体内壁凸台直径大于进刀孔,不方便加工			进刀孔较大时可以方便地进行加工
15	配合表面过长,加工较为困难,且端面加工面积也较大			孔的长度按实际配合需要加工,并在两端改用凸台定位,从而降低了对孔及端面的加工成本

续表

序号	零件结构			
	结构工艺性不好		结构工艺性好	
16	箱体内表面加工较为困难,观察也不方便,装配时螺钉安装较容易			配合面在箱体外,既便于加工,又方便装配
17	浪费材料,且要进行涤孔加工			既可节约材料,减轻重量,又避免了涤孔加工
18	加工面大,加工时间长,零件尺寸越大,平面度误差越大			加工面减少,节省工时,减少刀具损耗,且容易保证平面度要求
19	插键槽时,底部无退刀槽或空间,容易折断刀具			留出退刀空间(孔),避免打刀
20	键槽底部与左面孔母线平齐,插键槽时容易插到左面孔			若左面孔设计允许,尺寸加大后可避免插键槽时划伤左面孔表面
21	小齿轮插齿时无退刀槽而无法加工			大齿轮可滚齿,可插齿;小齿轮因有退刀槽,可以完成插齿加工

序号	零件结构			
	结构工艺性不好	结构工艺性好		
22	加工高度不同的两个面需要两次调整刀具加工,影响生产率			若加工面在同一高度,一次调整刀具即可同时加工两个平面
23	加工B面以A面为基准的,A面面积小,定位不可靠			增加附加定位基准C,同A面一起加工后能保证以后加工B面的平行度。加工后可将附加定位基准去掉
24	两个键槽分别设计在阶梯轴相差90°方向上,需两次调整后加工			将两个键槽设计在同一方向上,一次装夹即可对两个键槽进行加工
25	内、外形圆角半径不同,需换刀加工;内形圆角半径太小,铣刀刚度差			内、外形圆角半径相同,减少了换刀次数,提高生产率;增大了内形圆角半径,可用大直径铣刀加工
26	同一端面上的螺纹孔尺寸相近,需换刀加工,装配也不方便			尺寸相近的螺纹孔改为同一尺寸螺纹孔,方便加工和装配

(3)熟悉或确定毛坯。确定毛坯的主要依据是零件在产品中的作用和生产纲领,以及零件本身的结构。常用的机械零件毛坯种类有铸件、锻件、型材、焊接件、冲压件等。毛坯的选择通常是由产品设计者完成的,工艺人员在设计机械加工工艺规程之前要熟悉毛坯的特点。

①铸件毛坯。铸件适宜做形状复杂的毛坯,如箱体、床身、底座、机架等。其常用材料有铸铁、铸钢、铸铜、铸铝等。其中,铸铁因其成本低廉、吸振性好和容易加工而获得广泛应用。铸造方法有砂型铸造、金属型铸造、精密铸造、压力铸造等。

②锻件毛坯。锻件适于做强度和机械性能要求高而形状较为简单的零件毛坯。目前应

用最广泛的锻造方法有自由锻造和锤模锻。

③型材毛坯。型材包括热轧型材和冷拔型材(包括各种圆、方棒料,板材,管材,型钢等)。

④焊接件毛坯。焊接件毛坯可由型材-型材、型材-锻件、型材-铸钢件等焊接组合而成。它的制造过程简单,制造周期短,但一般焊后易变形,需经去应力时效处理。

⑤冲压件毛坯。冲压件毛坯可以非常接近成品要求,但因冲压模具昂贵而仅用于大量生产或成批生产。

⑥其他。其他如粉末冶金制品、工程塑料制品、新型陶瓷等毛坯也有一定应用。

毛坯种类的选择主要依据下列各方面的因素:

①设计图纸规定的材料及机械性能。铸铁零件要用铸造毛坯,钢质零件在形状不复杂及机械性能要求不太高时用型材毛坯,否则可用锻造毛坯。

②零件的结构形状及外形尺寸。阶梯轴各台阶直径相差不大时可用型材,相差较大时则可采用锻造或焊接毛坯。

③零件制造经济性。增大毛坯尺寸公差能降低毛坯制造成本,但机械加工成本增加,选择毛坯时应使材料、毛坯制造和零件加工各项费用之和为最小。

④生产纲领。使用模具和设备生产高精度毛坯,在生产纲领很大时会由于机械加工费用降低而使零件总成本降低,这时采用高精度毛坯是合理的。

毛坯形状一般力求接近成品形状,以减少机械加工劳动量。但也有以下几种特殊情况:

①尺寸小或薄的零件,为便于加工时的装夹并减少夹头金属损失,可将多个工件连在一起,由一个毛坯制出。例如,钻套加工时,毛坯就是一根长棒料,在外圆和内孔粗车后,用切断刀切为一个一个的钻套。

②装配后需要形成同一工作表面的两个相关零件,为保证加工质量并使加工方便,经常把两件合为一个毛坯,加工至一定阶段后再切开,如车床开合螺母外壳、发动机连杆(图 1-6)和曲轴轴瓦盖等的毛坯都是两件合制的。

③为了加工时安装工件方便,有的铸件毛坯需要铸出工艺搭子(图 1-7)。该工艺搭子在零件加工后一般应切去,在对使用没有影响或不影响外观的情况下也可保留在零件上。



图 1-6 发动机连杆毛坯(大头孔合铸)

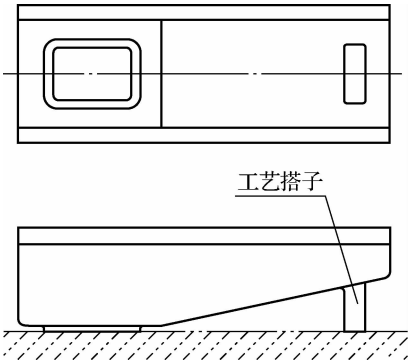


图 1-7 机床立柱加工时的工艺搭子

在选择毛坯时,除了要考虑零件的作用、生产纲领和零件的结构以外,还必须综合考虑产品的制造成本 and 市场需求。

(4)拟定机械加工工艺路线。这是制定机械加工工艺规程的核心。其主要内容包括定

位基准的选择、加工方法的确定、加工阶段的划分、加工顺序的安排,以及热处理、检验和其他工序的安排等。

机械加工工艺路线的最终确定一般要通过一定范围的论证,即通过对几条工艺路线的分析与比较,从中选出一条适合本厂条件的和确保加工质量、高效率、低成本的最佳工艺路线。

(5)确定满足各工序要求的工艺装备(包括机床、夹具、刀具和量具等),对需要改装或重新设计的专用工艺装备应提出具体设计任务书。

(6)确定各主要工序的技术要求和检验方法。

(7)确定各工序的加工余量、计算工序尺寸和公差。

(8)确定切削用量。

(9)确定时间定额。

(10)进行工艺方案的技术经济分析。

(11)填写工艺文件。

1.3 制定机械加工工艺路线的主要工艺问题

制定机械加工工艺路线时需要考虑的主要工艺问题有选择定位基准、确定加工方法、划分加工阶段、安排加工顺序,以及热处理、检验、探伤、去刺等其他工序。

1.3.1 定位基准的选择

用来确定生产对象上几何要素的几何关系所依据的那些点、线、面称为基准。根据其作用的不同,基准分为设计基准和工艺基准两大类。而工艺基准又可进一步分为工序基准、定位基准、测量基准和装配基准,如图 1-8 所示。

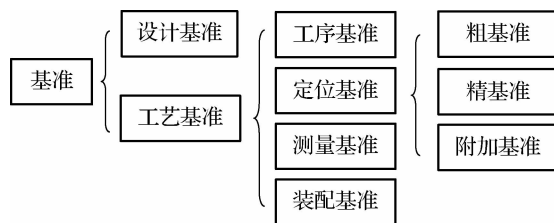


图 1-8 基准的分类

设计基准是设计图样上所采用的基准,也就是设计图样中作为确定某一几何要素位置的设计尺寸起点的那些点、线、面。简而言之,设计图样上所用的基准就是设计基准。

工艺基准是零件在加工工艺规程中所用的基准,即零件在加工、检验和装配过程中所使用的基准。

工序基准是在工序图中用来确定本工序所加工表面加工后的尺寸、形状、位置的基准。

定位基准是加工时使工件在机床或夹具中占据一个正确位置所使用的基准。定位基准又分为粗基准、精基准和附加基准。作为定位基准的表面,若是未经加工过的毛坯表面则称为粗基准,若是经过加工的表面则称为精基准。在零件上没有合适的表面可作为定位基准时,为便于定位装夹,可在工件上特意加工出专供定位用的表面做基准,这种定位基准称为

附加基准。例如,箱体加工中的工艺定位销孔和轴类零件的中心(顶尖)孔就是一种附加基准。机床立柱零件由于背部是斜面,不便定位,在毛坯铸造时专门做出两个凸台(图 1-9),这就是附加基准。图 1-7 中的工艺搭子也是附加基准。附加基准可以在加工后根据需要去除或保留。

测量基准是零件检验时用以测量已加工表面尺寸和位置所用的基准。

装配基准是装配时用以确定零件或部件在机器中位置的基准。

基准是加工表面的依据,因此必然客观存在,但不一定具体存在:有的是轮廓要素,可直接接触;有的是中心要素,不可触摸,常由某些具体存在的基面来体现。例如,在磨削长轴时,可以通过两端打中心孔,将顶尖顶在中心孔锥面这一具体表面上,来反映中心线这个看不见的中心要素。

加工过程中定位基准的选择对工艺过程有重要的影响,拟定加工路线的第一步是选择定位基准。定位基准的选择合理与否,将直接影响所制定的零件加工工艺规程的质量。定位基准选择不当,往往会增加工序,或使工艺路线不合理,或使夹具设计困难,甚至达不到零件的加工精度(特别是位置精度)要求,所以必须遵循一定的原则来正确选择每道工序使用的定位基准。

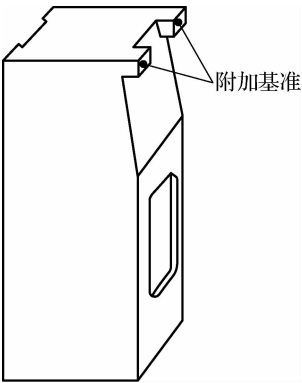


图 1-9 附加基准

1. 粗基准的选择原则

粗基准的选择对零件加工有着重要的影响。粗基准选择时要考虑的是保证加工表面有足够的加工余量,不加工表面符合图样要求。在第一道工序,只能使用毛坯表面来定位。在选择某一表面作为粗基准时,应遵循以下原则:

(1)保证相互位置要求的原则。如果必须保证工件上加工面与不加工面的相互位置要求,那么应以不加工面作为粗基准。如图 1-10 所示的零件毛坯,在铸造时孔和外圆难免有偏心,加工时如果采用不加工的外圆面 1 作为粗基准来装夹工件(夹具装夹,用三爪自定心卡盘夹住外圆 1)进行加工,那么加工面 2 与不加工面 1 同轴,可以有效保证壁厚均匀,但是加工面 2 的加工余量则是不均匀的。

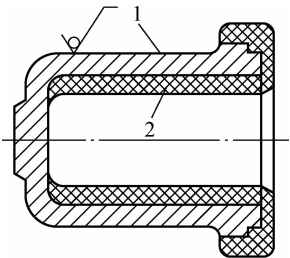


图 1-10 保证相互位置要求的原则

1—不加工面; 2—加工面

(2)保证加工表面加工余量合理分配的原则。如果必须首先保证工件某重要表面的余量均匀,那么应选择该毛坯表面作为粗基准。例如,在车床床身加工中,导轨面是重要的表面,它不仅精度要求高,而且要求导轨面有致密均匀的金相组织和较高的耐磨性,因此希望加工时导轨面去除余量小而且均匀。此时应以导轨面为粗基准,先加工床身底面,再以底面为精基准加工导轨面(图 1-11),这就可以保证导轨面的加工余量均匀。

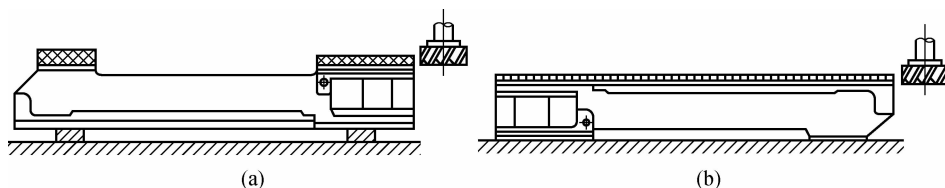


图 1-11 机床床身加工的粗基准选择

对于具有较多加工表面的工件,选择粗基准时应考虑合理分配各加工表面的加工余量。如图 1-12 所示阶梯轴,在毛坯制造时两外圆偏心 3 mm,为使两个外圆加工后同轴,应选择其中加工余量最小的表面作为粗基准,以避免该表面在加工时因余量不足而留下部分毛坯面,造成废品。

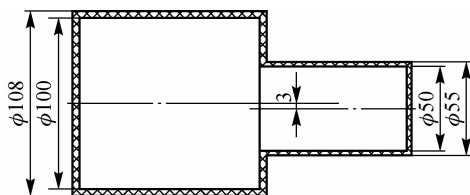


图 1-12 选加工余量最小表面做粗基准

(3)便于工件装夹的原则。选择粗基准时,必须考虑定位可靠、夹具简单、操作方便等问题。为此,要求选用的粗基准尽可能平整、光洁和有足够大的尺寸,一般不允许选择有锻造飞边、铸造浇口、铸造冒口或其他缺陷的表面。

(4)粗基准一般不得重复使用的原则。若在后序加工中能使用精基准定位,则粗基准一般不应被重复使用。这是因为毛坯面较粗糙,在两次装夹中重复使用同一粗基准会造成相当大的定位误差。

上述选择粗基准的四条原则,每一原则都只说明一个方面的问题。在实际生产中,划线装夹有时可以兼顾这四条原则,而夹具装夹则不能同时兼顾,这就要根据具体情况进行分析,权衡利弊,保证主要技术要求。

2. 精基准的选择原则

选择精基准时要考虑的主要问题是如何实现零件的设计技术要求,以及装夹准确、可靠、方便。为此,一般应遵循下列五条原则:

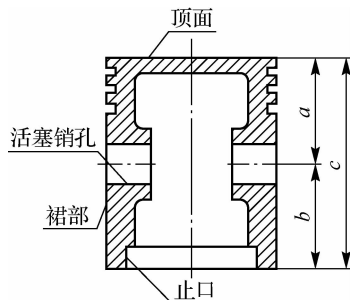


图 1-13 活塞加工时精基准的选择

(1)基准重合原则。应尽可能选择被加工表面的设计基准作为精基准。在对加工面位置尺寸有决定作用的工序中,特别是当位置公差要求很小时,一般不应违反这一原则。因为违反了这一原则就必然会产生基准不重合误差,增大加工难度。

例如,图 1-13 所示活塞零件的设计要求是:活塞销孔与顶面的距离为 a ,公差一般为 $0.1 \sim 0.2$ mm。当加工销孔时以止口面(一大平面加一短圆柱面)定位,直接保证的尺寸是 b (图 1-14 中的 H)。此时,为了使尺寸 a 达到规定的精度,必须同时严格控制尺寸 b 和 c (尺寸 a 、 b 和 c 构成

一个尺寸链,其中 a 是封闭环,尺寸 b 和 c 的公差之和应小于或等于尺寸 a 的公差,详见 1.5 节)。而这两个尺寸从功能要求出发,均无须严格控制,且在加工顶面时(通常采用车削方法),尺寸 c 也确实较难控制。因此,在大批量生产中常以顶面作为定位基准来加工销孔,以使尺寸 a 容易保证,避免产生基准不重合误差。

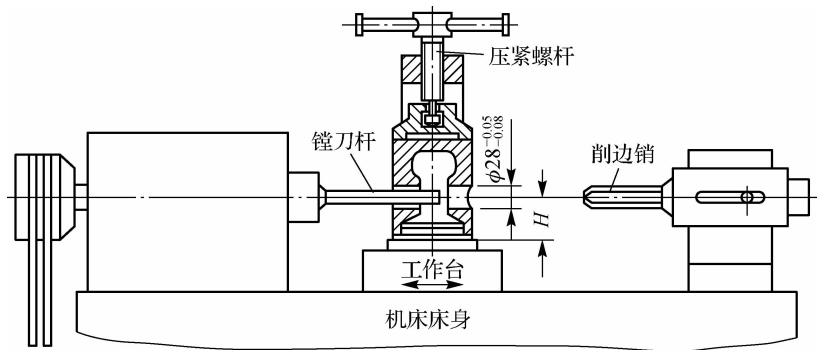


图 1-14 镗削活塞销孔加工示意图

(2)基准统一原则。当工件以某一表面定位时,可以比较方便地加工大多数(甚至所有)其他表面,则应尽早地把这个基准面加工出来,并达到一定精度,以后工序均以该表面为精基准加工其他表面。

采用基准统一原则可以简化夹具设计,可以减少工件搬动和翻转次数,在自动化生产中有广泛应用。

通常,轴类零件使用两顶尖孔作为统一的精基准,箱体类零件用“一面两孔”(一个较大的平面和两个距离较远的销孔)作为统一精基准,齿轮加工中以其内孔及一端面作为统一精基准,盘套类零件常使用止口面作为统一精基准,这些都符合基准统一原则。如图 1-13 所示的活塞零件,采用裙部止口面定位可以方便地加工活塞的其他表面(如活塞外圆、活塞环槽、活塞顶面、活塞销孔等),故选其为统一精基准。实际上,活塞止口面并无功能要求,之所以对其进行加工,完全是为了做定位基准(附加基准)使用。

必须指出,基准统一原则常常会带来基准不重合的问题。在这种情况下,要针对具体问题进行认真分析,在满足设计要求的前提下,决定最终选择的精基准。如图 1-13 所示的活塞零件,采用止口面作为统一的精基准,而在活塞销孔加工工序中,为直接保证尺寸 a ,则可采用顶面作为精基准。

(3)互为基准原则。某些位置要求很高的表面常采用互为基准反复加工的办法来达到位置精度要求。

例如,加工淬硬精密齿轮时,因其齿面淬硬层较浅,故磨削余量应小而均匀。这就要求先以齿面为基准磨内孔(图 1-15),再以孔为基准(内孔穿定位心轴)磨齿面。

在加工普通车床 CA6140 的主轴(图 1-16)时,由于主轴支承轴颈 2、3 和主轴锥孔 4 之间有很高的同轴度要求及加工精度要求,因而在编制与主轴支承轴颈和主轴锥孔有关的工序时都应用了互为基准原则。例如,车小端 1:20 锥孔和大端莫氏 6 号主轴锥孔时,是以与前支承轴

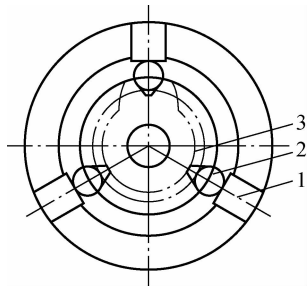


图 1-15 以齿形表面定位磨内孔

1—三爪卡盘; 2—圆棒; 3—齿轮

颈 3 相邻而又是用同一基准加工出来的外圆柱表面 2 为定位基准(直接用前支承轴颈作为定位基准当然更好,但由于轴颈有锥度,在制造托架时会增加困难);在精车各外圆(包括支承轴颈 3 的 $1:12$ 锥度)时,是以上述前后锥孔 1、4 内所配锥堵(图 1-16)的顶尖孔作为定位基准面;在粗磨莫氏 6 号内锥孔时,又是以两轴颈表面为定位基准面,这符合互为基准原则。在粗、精磨两个支承轴颈时,再次以粗磨后的锥孔所配锥堵的顶尖孔为定位基准。在最后精磨莫氏 6 号主轴锥孔时,以精磨后的前支承锥度轴颈和另一圆柱面为基准面,基准再一次转换。随着基准的不断转换,定位精度不断提高。基准的每次转换都使加工精度进一步提高。基准转换次数的多少要根据加工精度要求而定。

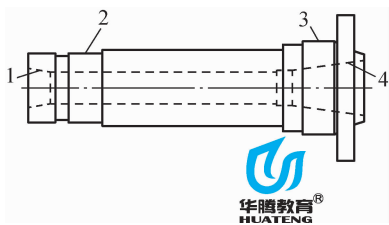


图 1-16 CA6140 车床主轴示意图

1—后锥孔；2—后支承轴颈；

3—前支承轴颈；4—前锥孔

例如,磨削加工主轴工序需要以轴颈为基准磨削锥孔,再以锥孔为基准磨削轴颈,经多次反复加工,逐步提高基准精度和表面加工精度,最终达到高的技术要求。

在精磨莫氏 6 号主轴锥孔的定位中,以前、后支承轴颈为基准磨削莫氏 6 号锥孔。成批生产时大多采用专用夹具定位加工,图 1-17 所示为磨主轴锥孔的专用夹具,其是由底座、支承架及浮动卡头三大部分组成的。前后两个支承架 5 与底座 6

连成一体。作为工件定位基准面的两段轴颈放在支架的两个 V 形块上,V 形块镶有硬质合金,以提高耐磨性,并减少对工件轴颈的划擦。工件的中心高应调整到正好等于磨头砂轮轴的中心高。后端的浮动卡头装在磨床主轴锥孔内,工件尾部插入弹性套 3 内,并用锁紧螺钉 7 锁紧。用弹簧 1 把浮动卡头外壳连同工件向后拉,通过钢球 2 压向镶有硬质合金 8 的锥柄端面,依靠压簧 1 的张力限制工件的轴向窜动。采用这种连接方式,机床只通过拨盘 9 传递扭矩,排除了磨床主轴圆跳动或同轴度误差对工件的影响,也可减小机床本身的振动对加工精度的影响。

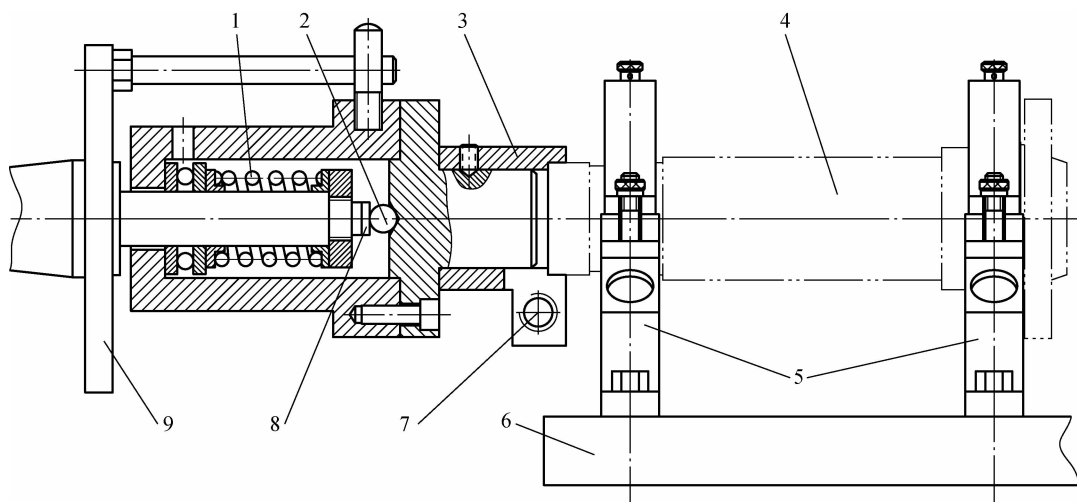


图 1-17 磨主轴锥孔的专用夹具

1—弹簧；2—钢球；3—弹性套；4—主轴；5—支承架；

6—底座；7—锁紧螺钉；8—硬质合金；9—拨盘

小端 1:20 锥孔和大端莫氏 6 号内锥孔磨削完成后,以磨削后的锥孔所配锥堵的顶尖孔为定位基准磨削支承轴颈,如图 1-18 所示。

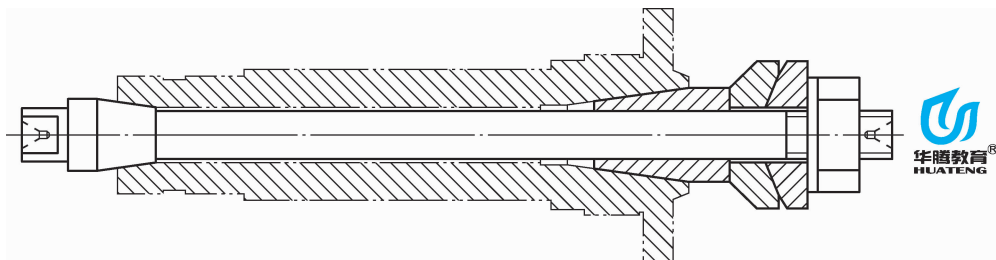


图 1-18 磨削主轴支承轴颈

(4) 自为基准原则。对一些加工精度要求很高的表面,在精密加工时,除要保证加工精度外,还要求加工的余量小而均匀,此时可以已经精加工过的表面作为定位基准进行加工。至于该表面与其他表面之间的相互位置精度,则要求由先行工序加以保证。

车床床身在最后磨削导轨面时,为使加工余量小而均匀,以待加工的导轨面本身为精基准,找正定位后进行磨削。其具体做法如图 1-19 所示,用固定在磨头上的千分表 3 找正床身上的导轨面,当磨床工作台纵向移动时,调整工件(床身)1 下部的四个楔铁 2,使千分表的指针基本不动为止,夹紧工件,加工导轨面。此即以导轨面自身为基准进行加工。工件下部的四个楔铁只起支承作用。

其他如浮动镗刀镗孔、圆拉刀拉孔、珩磨头珩孔、无心磨床磨削外圆等,都是以加工表面本身作为精基准的例子。

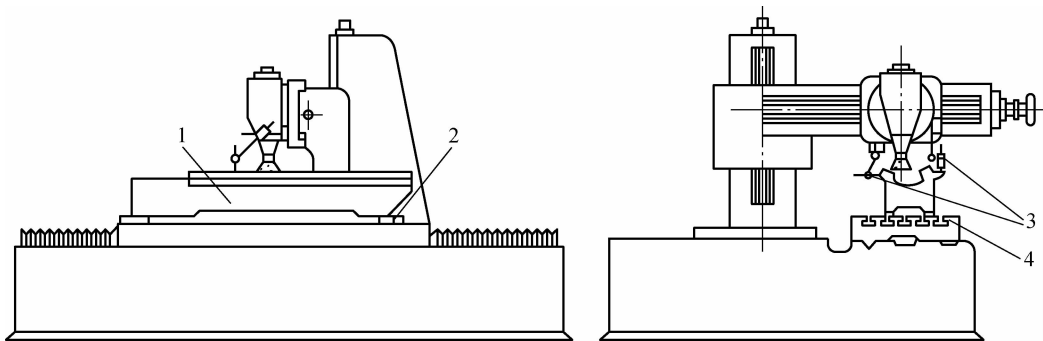


图 1-19 在导轨磨床上磨床身导轨面

1—床身; 2—楔铁; 3—千分表; 4—磨床工作台

(5) 便于装夹原则。所选择的精基准,应能保证定位准确、可靠,夹紧机构简单,操作方便。

在上述五条原则中,前四条都有它们各自的应用条件,唯有最后一条即便于装夹原则是始终不能违反的。在考虑工件如何定位的同时必须认真分析工件夹紧情况,遵守夹紧机构的设计原则。

1.3.2 零件表面加工方法的选择

零件表面加工方法的选择是拟定工艺路线的首要步骤,主要考虑以下几个方面:

(1)被加工表面的几何特点。不同加工表面由不同的机床运动关系和加工方法获得。外圆表面主要由车削和磨削方法获得,内孔表面主要由钻削、铰削、镗削和磨削方法获得,平面主要由刨削、铣削和磨削方法获得。因此,被加工表面的几何特点决定了加工方法的选取。

(2)被加工表面的技术要求。不同加工方法可得到不同的加工精度和表面粗糙度范围,在该范围内有一个可以最经济地获得的加工精度。任何一种加工方法,只要操作时细心调整、选择合适的切削用量,其加工精度都可以得到提高,加工表面粗糙度也可以减小。但加工精度提高得越高,表面粗糙度减少越小,耗费的时间与成本就会越大。

生产上加工精度的高低是用其可以控制的加工误差的大小来衡量的。统计资料表明,加工误差和加工成本之间成反比例关系,如图 1-20 所示,图中 δ 表示加工误差, S 表示加工成本。由图中曲线可以看出,两者关系的总趋势是加工成本随着加工误差的减小而上升,但在不同的误差范围内成本上升的比率不同,对于某一种加工方法来说,加工误差小到一定程度(如图中 A 点的左侧),加工成本会提高很多,加工误差则降低很少;加工误差大到一定程度后(如曲线上 B 点的右侧),即使加工误差可以很大,但加工成本却降低很少。这说明一种加工方法在 A 点的左侧或 B 点的右侧应用都是不经济的,只有在曲线的 AB 段,加工成本随着加工误差的减少而上升的比率相对稳定,所采用的相应的加工方法才是经济的。实际上,每种加工方法都有一个加工经济精度问题。加工经济精度是指在正常加工条件下(采用符合质量标准的设备、工艺装备和标准技术等级的工人,不延长加工时间),某种加工方法所能保证的加工精度。所对应的表面粗糙度为经济粗糙度。加工经济精度和经济粗糙度是指一个范围而不是一个确定值。

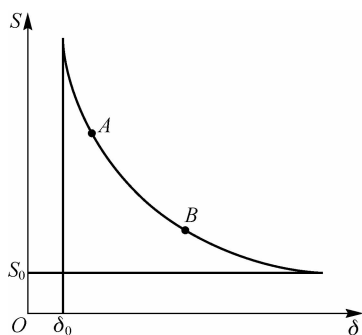


图 1-20 加工误差与加工成本的关系

应该指出,随着机械工业的不断发展,提高机械加工精度的研究工作一直在进行,加工精度在不断地提高。例如,20 世纪 40 年代的精密加工精度大约只相当于 20 世纪 80 年代的一般加工精度。因此,各种加工方法的加工经济精度的概念也在发展,其指标在不断提高。

在选择表面加工方法时,应选择经济加工精度与零件表面要求精度相一致的加工方法。一般加工精度越高的加工方法,材料切除率(单位时间内切除的材料)越小。全部加工余量都用精加工方法去除是极不经济的。所以,在精加工之前要安排半精加工,在半精加工之前要安排粗加工。这样,对不同加工精度及粗糙度要求的加工表面就形成了若干典型的加工方法组合,即表面加工路线。表 1-7~表 1-9 是外圆、内孔和平面加工的典型加工路线及所能达到的经济加工精度和表面粗糙度。

表 1-7 外圆表面典型加工路线及所能达到的经济加工精度和表面粗糙度

序号	加工方案	经济精度	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	适用范围
1	粗车	IT11 以下	50~12.5	适用于除淬火钢以外的各种金属
2	粗车—半精车	IT8~IT10	6.3~3.2	
3	粗车—半精车—精车	IT7、IT8	1.6~0.8	
4	粗车—半精车—精车—滚压(或抛光)	IT7、IT8	0.2~0.025	

续表

序号	加工方案	经济精度	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	适用范围
5	粗车—半精车—磨削	IT7、IT8	0.8~0.4	主要用于淬火钢,也可用于未淬火钢,但不宜加工有色金属
6	粗车—半精车—粗磨—精磨	IT6、IT7	0.8~0.1	
7	粗车—半精车—粗磨—精磨—超精加工(或轮式超精磨)	IT5	0.1~0.05	
8	粗车—半精车—精车—金刚车	IT6、IT7	0.4~0.025	主要用于精度要求较高的有色金属加工
9	粗车—半精车—粗磨—精磨—超精磨或镜面磨	IT5 以上	0.025~0.01	用于极高精度的外圆加工
10	粗车—半精车—粗磨—精磨—研磨	IT5 以上	0.1~0.01	

表 1-8 内孔表面典型加工路线及所能达到的经济加工精度和表面粗糙度

序号	加工方案	经济精度	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	适用范围
1	钻	IT11、IT12	12.5	加工淬火钢及铸铁的实心毛坯,也可用于加工有色金属,孔径小于15 mm
2	钻—铰	IT9	3.2~1.6	
3	钻—铰—精铰	IT7、IT8	1.6~0.8	
4	钻—扩	IT10、IT11	12.5~6.3	同上,孔径为 15~20 mm
5	钻—扩—铰	IT8、IT9	3.2~1.6	
6	钻—扩—粗铰—精铰	IT7	1.6~0.8	
7	钻—扩—机铰—手铰	IT6、IT7	0.4~0.1	
8	钻—粗拉—精拉	IT7~IT9	1.6~0.1	大批大量生产
9	粗镗(或扩孔)	IT11、IT12	12.5~6.3	淬火钢以外的各种金属,毛坯有铸出孔或锻出孔
10	粗镗(粗扩)—半精镗(精扩)	IT8、IT9	3.2~1.6	
11	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—精镗(铰)	IT7、IT8	1.6~0.8	
12	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—精镗—浮动镗	IT6、IT7	0.8~0.4	
13	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—磨孔	IT7、IT8	0.8~0.2	主要用于淬火钢或未淬火钢,不宜用于有色金属加工
14	粗镗(扩)—半精镗(精扩)—粗磨—精磨	IT6、IT7	0.2~0.1	
15	粗镗—半精镗—精镗—金刚镗	IT6、IT7	0.4~0.05	精度要求高的有色金属加工
16	钻—(扩)粗铰—精铰—珩磨 粗镗—半精镗—精镗—珩磨	IT6、IT7	0.2~0.025	精度要求很高的孔
17	钻—(扩)粗铰—精铰—珩磨 粗镗—半精镗—精镗—珩磨	IT6 以上		

表 1-9 平面典型加工路线及所能达到的经济加工精度和表面粗糙度

序号	加工方案	经济精度	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	适用范围
1	粗车—半精车	IT9	6.3~3.2	回转体端面
2	粗车—半精车—精车	IT7、IT8	1.6~0.8	
3	粗车—半精车—磨削	IT8、IT9	0.8~0.2	
4	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)	IT8、IT9	6.3~1.6	未淬硬平面
5	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—刮研	IT6、IT7	0.8~0.1	精度要求较高的未淬硬平面,批量大时宜用宽刃刨削
6	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—宽刃刨削	IT7	0.8~0.2	
7	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—磨削	IT7	0.8~0.2	精度要求高的(不)淬硬平面
8	粗刨(或粗铣)—精刨(或精铣)—粗磨—精磨	IT7~IT9	0.4~0.02	
9	粗铣—拉削	IT7~IT9	0.8~0.2	较小平面的大批大量生产
10	粗铣—精铣—磨削—研磨	IT6 以上	0.8~0.1	高精度平面

(3)零件结构形状和尺寸大小。例如,中、小尺寸零件上的精度较高的孔可采用铰削或拉削方法加工(一般为通孔),而大尺寸零件上的精度较高的孔则宜采用镗削或磨削方法进行精加工。

(4)生产纲领和生产率。大批大量生产中应采用高生产率的加工方法,如拉削平面、拉削型孔、滚铣花键等,而在单件小批生产中则应采用通用设备、通用工艺装备及一般的加工方法。

(5)零件材料的性质。淬火钢用磨削的方法加工;有色金属材料宜选择一般切削加工方法,不宜选择磨削加工方法,因为有色金属在磨削加工时易堵塞砂轮表面。

(6)工厂或车间的设备情况和技术条件。选择加工方法应充分利用现有设备,挖掘企业潜力,发挥工人的积极性和创造性。但也应考虑不断改进现有的加工方法和设备,采用新技术和提高工艺水平。

(7)加工机床。根据产品变换周期的长短和生产批量的大小,以及零件表面的复杂程度等因素,决定选择数控机床或选择普通机床。一般来说,产品变换周期短,生产批量大,宜选数控机床;普通机床加工有困难或无法加工的复杂曲线、曲面宜选数控机床;产品基本不变的大批大量生产宜选专用组合机床。由于数控机床特别是加工中心价格昂贵,因而在新购置设备时还必须考虑企业的经济实力和投资的回收期限。无论是普通机床还是数控机床,其精度都有高低之分,高精度机床的价格与普通精度机床相差很大,因此应根据零件的精度要求选择精度适中的机床。选择时,可查阅产品目录或有关手册来了解各种机床的精度。

综上所述,选择零件表面加工方法时,要首先根据表面种类、零件材料、生产纲领和技术要求,确定与加工要求相一致的经济加工精度和表面粗糙度,选择可供选用的最后精加工方法及加工路线。对于选出的几种加工路线,经综合考虑各方面因素,最终确定一种最优的加工方法和加工路线。

1.3.3 加工阶段的划分

零件加工时,往往不是一次加工完各个表面,而是各表面分步进行加工,逐渐逼近成品形状,即所谓的粗、精加工分开进行。特别是当零件的精度要求较高时,若将加工面从毛坯面开始到最终的精加工或精密加工都集中在一个工序中连续完成,则难以保证零件的精度要求,或者浪费人力、物力。原因如下:

(1)粗加工时,切削层厚,切削力大,切削温度高,难以消除因受力、受热而变形带来的加工误差,也无法消除因粗加工而留在工件表层的残余应力产生的加工误差。

(2)后续加工容易把已加工好的表面划伤。

(3)不利于及时发现毛坯的缺陷。若在加工最后一个表面时才发现毛坯有缺陷,则前面的加工就前功尽弃了。

(4)不利于合理地使用加工设备。把精密机床用于粗加工,精密机床会过早地丧失精度。

(5)不利于合理地使用技术工人。让技术等级高的工人完成粗加工任务是人力资源的一种浪费。

因此,通常可将高精度零件的加工过程按照精度要求的不同划分为以下几个加工阶段:

(1)粗加工阶段。在此阶段,应以高的生产率去除加工面上大部分金属,为半精加工提供定位基准,使工件基本成型。这个阶段主要考虑的是提高生产效率的问题。

(2)半精加工阶段。在半精加工阶段主要是减小粗加工中留下的误差,使加工面达到一定的精度,并留下一定的精加工余量,为精加工做好准备。同时完成一些次要表面的加工,如钻孔、攻丝、铣键槽、倒(圆)角等,一般在热处理(如淬火)之前进行。

(3)精加工阶段。在精加工阶段,应确保加工表面的尺寸、形状和位置精度达到或基本达到图样规定的精度要求及表面粗糙度要求。这个阶段的主要任务是提高加工表面的各项精度和降低表面粗糙度。一般精度的零件至此加工完毕。极少数精度很高的零件还需要在此阶段为进行精密加工或光整加工做好准备。

(4)精密、光整加工阶段。对那些加工精度要求很高(精度 $\leq IT6$, $Ra \leq 0.2 \mu m$)的零件,在工艺过程的最后应安排如珩磨或研磨、抛光、精密磨削、超精加工、金刚石车、金刚镗或其他特种加工方法加工,以达到零件最终的精度要求。但精密、光整加工仅以提高加工的尺寸精度和减小表面粗糙度为主,一般不能用来纠正前面工序留下的表面形状及位置误差。

有时,由于毛坯余量特别大,表面特别粗糙,在粗加工前还要有去黑皮加工阶段,称为荒加工阶段。为了及时发现毛坯废品及减少运输工作量,常把荒加工放在毛坯准备车间进行。

高精度零件的中间热处理工序自然地工艺过程划分为几个加工阶段。例如,在精密机床主轴的加工中,在粗加工后进行消除残余应力的时效处理,半精加工后进行淬火,精加工后进行冰冷处理和低温回火,最后进行光整加工。

对于精度要求不高、工件刚度足够、毛坯质量好、加工余量小的零件加工,则可以不划分加工阶段,如在自动机上加工的零件。另外,有些重型零件,由于安装、运输费时费力,常不划分加工阶段,在一次装夹下完成全部粗加工和精加工;或在粗加工后松开夹具,消除夹紧

变形,然后用较小的夹紧力重新夹紧,进行精加工,这样有利于保证重型零件的加工质量。但是对于精度要求高的重型零件,仍要划分加工阶段,并插入时效等消除内应力处理。这就需要根据具体情况来决定。

零件经过上述各加工阶段的加工,可以保证有充分的时间消除热变形和消除粗加工产生的残余应力,使后续加工精度提高。另外,在粗加工阶段发现毛坯有缺陷时,就不必进行下一加工阶段的加工,避免浪费。此外,还可以合理地使用设备,低精度机床用于粗加工,精密机床专门用于精加工,以保持精密机床的精度水平;合理地安排人力资源,由高技术工人专门从事精密、超精密加工;精加工工序安排在最后,保护精加工后的表面少受损伤或不受损伤。这些对保证产品质量,提高工艺水平来说都是十分重要的。

应当指出,工艺过程划分加工阶段是就零件加工的整个过程而言的,不能以某一表面的加工和某一工序的加工来判断。例如,有些定位基准面在半精加工阶段甚至在粗加工阶段就需加工得很精确,而某些钻小孔的粗加工工序也常常安排在精加工阶段。

1.3.4 加工顺序的安排

一个零件上往往有多个表面需要加工,这些表面不仅本身有一定的精度要求,而且各表面之间还有一定的位置要求。为了达到这些精度要求,各表面的加工顺序就不能随意安排,零件上的全部加工表面应安排在一个合理的加工顺序中进行,为此加工顺序安排必须遵循一定的原则。

1. 加工顺序的安排原则

(1)先基准后其他。此原则有两个含义:一是工艺路线开始安排的被加工表面应该是选作定位基准的精基准面,然后以精基准定位,加工其他表面;二是为保证一定的定位精度,当加工面的精度要求很高时,精加工前一般应精修一下精基准。例如,精度要求较高的淬硬轴类零件,其第一道工序就是打中心孔确定精基准,然后以中心孔定位加工其他表面,在淬火后中心孔会产生一定的变形,在磨削外圆前需精(研)修中心孔,使精基准保持应有的精度。再如,箱体类零件也都是先安排定位基准面的加工(多为一个大平面和两个销孔),再以此“一面两孔”加工其他表面和孔系。

(2)先面后孔。此原则有两个含义:一是当零件上有较大的平面可作为定位基准时,应先加工出来做定位面,以该表面定位来加工孔,这样可以保证定位可靠、准确,装夹工件往往也比较方便;二是在毛坯面上钻孔容易使钻头引偏,若该平面本身就需要加工,则应在钻孔之前加工平面。

(3)先主后次。先安排主要表面的加工,后安排次要表面的加工。主要表面是指设计基准面、主要工作面。而次要表面是指非工作表面,如键槽、光孔、台阶孔、螺纹孔等表面。次要表面的加工工作量比较小,且次要表面的位置要求往往取决于主要表面。因此,一般要在主要表面达到一定的精度之后,再以主要表面定位加工次要表面。要注意的是“后加工”的含义并不一定是整个工艺过程的最后。

(4)先粗后精。先安排粗加工,中间安排半精加工,最后安排精加工和光整加工。

在安排工艺顺序时,要注意退刀槽、倒角等表面的加工安排。对这一类结构表面,在审查图纸的结构工艺性时就应予以注意。

为保证加工质量的要求,有些零件的最后精加工需放在部件装配之后或在总装过程中

进行。例如,拖拉机连杆(图 1-21)的大头孔就要在连杆盖 2 和连杆体 1 通过连接螺钉 3 装配为一体后再进行精镗和珩磨。

拟定零件机械加工工艺路线后,再在切削加工工艺过程中合理地安排热处理、表面处理、检验等工序,就得到完整的零件加工工艺过程。

2. 热处理工序及表面处理工序的安排

60%~80%的机械零件要通过热处理提高材料的物理机械性能。热处理工序在工艺过程中的安排是否恰当,是影响零件加工质量和材料使用性能的重要因素。热处理的方法、次数和在工艺过程中的位置,应根据零件材料和热处理的目的而定。机械零件常采用的热处理方法有退火、正火、调质、时效、淬火、渗碳和氮化等。它们大致可分为预备热处理和最终热处理两大类,具体作用如下:

(1)预备热处理。预备热处理包括退火、正火、调质和时效处理等,其目的是改善毛坯切削性能、消除残余应力和为最终热处理做准备。

①退火或正火。毛坯进行退火和正火,能改善材料切削性能和消除残余应力,还能细化晶粒,均匀内部组织。对于含碳量超过 0.5%的碳钢,一般采用退火,以降低材料的硬度;对于含碳量不大于 0.5%的碳钢,一般采用正火,以提高材料的硬度,使切削时切屑不粘刀,加工表面较光滑。退火和正火常安排在毛坯制造之后、粗加工之前进行。但也有将正火安排在粗加工之后进行的。

②调质。调质即淬火后高温回火,能获得均匀细致的索氏体组织,为以后的表面淬火和氮化做好组织准备,因此它也可作为预备热处理工序。由于调质后零件综合机械性能较好,对于某些要求不高的零件也可作为最终热处理工序。

调质处理一般安排在粗加工之后、半精加工之前进行。这时因为受钢的淬透性影响,对大截面零件而言,调质只是在表层下一定深度内获得理想的细致索氏体组织,而心部组织变化很少。如果先调质再粗加工,加工中会把调质组织切除,那么加工余量大的部位只剩下很少的调质组织,起不到应有的效果。对淬透性好、截面积小或加工余量小的毛坯,也可把调质安排在粗加工之前进行。

③时效处理。时效处理用于消除毛坯制造和机械加工过程中产生的残余应力。对铸件、锻件和焊接件,一般在粗加工之后安排时效处理,将毛坯残余应力和加工残余应力一并消除。但对高精度的复杂铸件则应安排两次时效处理:铸造—粗加工—第一次时效—半精加工—第二次时效—精加工。简单低精度铸(焊)件则不必进行时效处理。有的工厂则将时效处理安排在毛坯制造之后、粗加工之前进行。时效处理又有人工时效和自然时效两种方法。

(2)最终热处理。最终热处理包括淬火、渗碳淬火和氮化处理等,其目的是提高零件材料的硬度和耐磨性。

①淬火。淬火零件常需预先进行调质或正火处理。淬火后因材料硬度提高、切削困难,通常只能用磨削方法获得最终加工精度和表面粗糙度,因此淬火经常安排在半精加工之后、精加工之前进行。其一般的工艺路线为:毛坯制造—正火(退火)—粗加工—调质—半精加



图 1-21 拖拉机连杆

1—连杆体; 2—连杆盖; 3—连接螺钉

工—(表面)淬火—精加工。

②渗碳淬火。渗碳淬火能使低碳钢和低合金钢零件表层获得高的硬度与耐磨性,而心部仍保持一定的强度和较高韧性,因此也需预先进行调质或正火处理。局部渗碳时不需渗碳的部位应采取防渗措施。由于渗碳淬火导致零件变形较大,渗碳深度一般仅为 $0.5\sim 2\text{ mm}$,其后加工去除的加工余量必须很小,因而渗碳淬火经常安排在半精加工和精加工之间进行。零件渗碳淬火一般的工艺路线为:下料—锻造—正火—粗加工—半精加工—渗碳淬火—精加工。

③氮化处理。氮化处理能提高零件表层硬度、耐磨性、疲劳强度和耐腐蚀性。由于氮化温度低,零件变形小,且氮化层较薄,因而氮化处理应尽量靠后安排。为减少氮化后变形,氮化前应安排时效处理去除应力。因氮化层较薄且脆,零件心部应具有较高的综合机械性能,故粗加工后应安排调质处理。零件氮化处理的工艺路线一般为:下料—锻造—退火—粗加工—调质—半精加工—去除应力—精磨—氮化—超精磨或研磨(精度要求很高时安排)。对于热处理变形更小的真空离子氮化,则可以安排在精磨之后作为最后一道工序进行。

各种热处理一般都是安排在各加工阶段之间进行,所以热处理工序往往成为工艺路线中加工阶段的划分界线。调质和时效处理一般是粗加工阶段与半精加工阶段的分界,淬火一般是半精加工阶段与精加工阶段的分界,氮化一般是精加工阶段与光整加工阶段的分界。

另外,对于高精度精密零件(如量块、量规、精密丝杠、精密轴承、精密齿轮、油泵油嘴偶件等),在淬火后安排冰冷处理(使零件在低温介质中继续冷却到 $-80\sim -90\text{ }^{\circ}\text{C}$)以消除残余奥氏体,稳定零件的尺寸。

为了提高零件表面耐磨性或耐腐蚀性而安排的热处理工序,以及以装饰为目的而安排的热处理工序和表面处理工序(如镀铬、阳极氧化、镀锌、发蓝处理等)一般都放在工艺过程的最后。

(3)其他工序的安排。检查、检验工序,去毛刺、平衡、清洗等工序也是工艺规程的重要组成部分。

检查、检验工序是保证产品质量合格的关键工序之一。每个操作工人在操作过程中和操作结束后都必须自检。在工艺规程中,在下列情况下应安排检查工序:零件加工完毕之后,从一个车间转到另一个车间的前后,工时较长或重要的关键工序前后。

除了一般性的尺寸检查(包括形位误差的检查)以外,X射线检查、超声波探伤检查等多用于工件(毛坯)内部的质量检查,一般安排在工艺过程的开始。磁力探伤、荧光检验主要用于工件表面质量的检验,通常安排在精加工的前后进行。密封性检验、零件的平衡、零件的重量检验一般安排在工艺过程的最后阶段进行。

切削加工之后,应安排去毛刺处理。零件表层或内部的毛刺会影响装配操作、装配质量,以致影响整机性能,因此应给予充分重视。

工件在进入装配之前,一般都应安排清洗。工件的内孔、箱体内腔易存留切屑,清洗时应予以特别注意。研磨、珩磨等光整加工工序之后,砂粒易附着在工件表面上,要认真清洗,否则会加剧零件在使用中的磨损。采用磁力夹紧工件的工序(如在平面磨床上用电磁吸盘夹紧工件),工件会存有剩磁,应安排去磁处理,并在去磁后进行清洗。

1.3.5 工序的集中与分散

在确定加工顺序后,应考虑把许多工步内容进行恰当的组织,以形成以工序为单位的工

艺过程。在组织工序时,要考虑以下两个方面:

(1)几个工步能否在同一机床上完成,以及是否需要在一次安装中完成,以保证高的位置精度。能在同一机床上完成的几个工步,才可能被组合成一个工序。例如,零件的一组表面在一次安装中加工,可有效地保证表面间的相互位置精度。

(2)是采用工序集中原则,还是采用工序分散原则来组织工序。所谓工序集中,是指将加工零件的所有工步尽可能集中在少数几个工序内完成。最大限度的工序集中是指在一个工序中完成零件的全部加工内容,这样工序少而工艺路线短。工序分散则相反,使每个工序的加工内容尽可能单一,因而整个零件的加工工艺过程工序较多,工艺路线长。

工序集中有利于采用高效专用机床和工艺装备;工件安装次数少,便于保证高的表面间相互位置精度;机床及操作工人少,生产面积小,有利于提高劳动生产率,保证产品质量及降低制造成本。但使用的机床及工艺装备复杂,要求工人技术水平高。随着目前数控机床、加工中心机床及柔性制造系统等的发展,多采用工序集中,这样生产适应性强,转产容易。

工序分散时使用的机床及工艺装备简单,生产、技术准备工作量小,投产期短,可以使用通用或专用机床组织大批量生产,有较高的劳动生产率,工人技术水平要求较低。但设备、工人数量多,生产面积大,车间在制品数量多,资金占用量大。

工序集中与工序分散各有特点,在生产上均有应用:传统的流水线、自动线生产多采用工序分散的组织形式(个别工序亦有相对集中的形式,如箱体类零件采用专用组合机床加工孔系),可以实现高生产率生产,但是适应性较差,特别是那些工序相对集中、专用组合机床较多的生产线,转产比较困难;通常,单件小批生产为减少加工设备和操作工人,倾向于工序集中;当零件的加工精度要求比较高时,常需要把工艺过程划分为不同的加工阶段,在这种情况下,工序必然相对比较分散。

1.4 工序设计

零件机械加工工艺路线拟定后就要对每个工序进行具体设计,包括确定每个工步的加工余量、计算工序尺寸及公差、选择机床及工艺装备、确定切削用量,以及计算时间定额等工作内容。

1.4.1 加工余量的确定

加工余量是指为使加工表面达到所需要的精度和表面质量而应切除的金属层厚度。加工余量可分为工序余量和加工总余量。工序余量是指某表面在一道工序中所切除的金属层厚度。其数值为上道工序尺寸与本道工序尺寸之差。

根据工件表面形状的不同,加工余量又可分为单边余量和双边余量两种。

零件非对称结构的非对称表面,其加工余量为单边余量[图 1-22(a)],可按式(1-2)计算。

$$Z_i = l_{i-1} - l_i \quad (1-2)$$

零件对称结构的对称表面,其加工余量为双边余量[图 1-22(b)],可按式(1-3)计算。

$$2Z_i = l_{i-1} - l_i \quad (1-3)$$

式中, Z_i 为单边的加工余量; l_{i-1} 为上道工序尺寸; l_i 为本道工序尺寸。

若外圆和内孔的加工余量为对称的双边加工余量[图 1-22(c)、(d)],可按下式计算:

轴(外表面) $2Z_i = d_{i-1} - d_i$

孔(内表面) $2Z_i = D_i - D_{i-1}$

式中, $2Z_i$ 为直径方向上的加工余量; D_{i-1} 、 d_{i-1} 为上道工序的加工表面直径; D_i 、 d_i 为本道工序的加工表面直径。

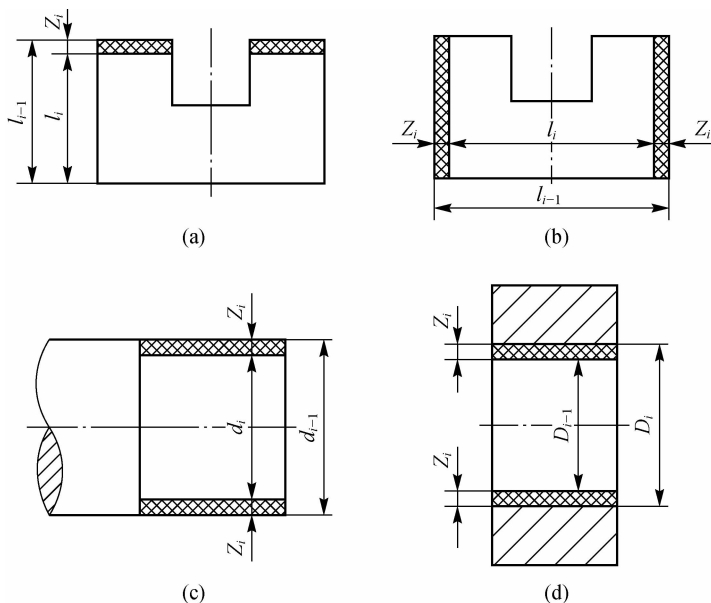


图 1-22 单边余量与双边余量

加工总余量是指在零件从毛坯变为成品的整个加工过程中,某一表面所切除金属层的总厚度,即零件上同一表面处的毛坯尺寸与零件设计尺寸之差。很显然,加工总余量 Z_Σ 等于各工序余量之和,即

$$Z_\Sigma = Z_1 + Z_2 + \cdots + Z_n = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (1-4)$$

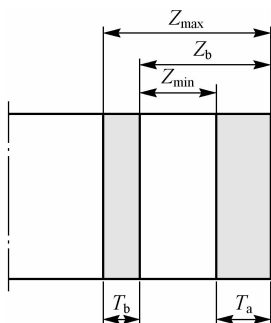


图 1-23 被包容件的加工余量及公差

工序尺寸应有公差,所以加工余量也必然在某一公差范围内变化。其公差大小等于本道工序工序尺寸公差与上道工序工序尺寸公差之和。因此,如图 1-23 所示,工序余量有标称余量(简称余量)、最大余量和最小余量的分别。从图中可以看出,被包容件的余量 Z_b 包含上道工序工序尺寸公差,工序余量公差可表示如下:

$$T_z = Z_{\max} - Z_{\min} = T_b + T_a \quad (1-5)$$

式中, T_z 为工序余量公差; $Z_{\max}$ 为工序最大余量; $Z_{\min}$ 为工序最小余量; T_b 为加工面在本道工序的工序尺寸公差; T_a 为加工面在上道工序的工序尺寸公差。

包容件(孔)的情况与此相类似。

第一道工序的 T_a (毛坯尺寸公差)一般采用双向标注,即 $\square \pm \square$ 。最后工序的 T_b 即为零件图上标注的该表面设计尺寸公差。而中间工序的工序尺寸公差规定按“入体”(指向工

件材料内部方向)原则标注,即对包容表面(如孔、键槽宽等),其基本尺寸是最小工序尺寸,标注为 $\square^{+\square}$;对被包容表面(如轴、键宽等),其基本尺寸是最大工序尺寸,标注为 $\square-\square$ 。

加工余量大小对零件加工质量和生产率有较大影响。加工余量不足,不能切除和修正上道工序残留的表面层缺陷和位置误差。加工余量过大,会使工时、材料和电力消耗增大,造成不必要的浪费。因此,工序设计中应选取合理的加工余量值。

加工总余量的确定一般与毛坯的制造精度有关。同样的毛坯制造方法,总余量的大小又与生产类型有关。批量大,总余量就可小些。因为粗加工的工序余量的变化范围很大,半精加工和精加工的加工余量依次递减,所以在一般情况下,加工总余量总是足够分配的。但是在个别余量极不均匀的情况下,也可能发生毛坯上有缺陷的表面层切削不掉,甚至留下毛坯表面的情况。

最小工序余量的选取,应保证在本工序加工中切去足够的金属层以获得一个完整的新加工表面,这取决于上道工序加工后获得的表面粗糙度高度和表面缺陷层深度、上道工序的工序尺寸公差(第一道加工工序则是毛坯尺寸公差)、上道工序加工的表面位置误差和本工序加工时工件的装夹误差,包括定位误差、夹紧误差和夹具误差。从理论上说,最小余量可以根据上述具体数据经过分析计算确定,但要做到对余量影响因素分析清楚,必须具备一定的测量手段和掌握必要的统计分析资料,这种分析计算方法目前尚很少应用。

除了以上的计算分析法以外,常用的加工余量确定方法有以下两种:

(1)查表修正法。查表修正法是指以生产实践和试验研究积累的有关加工余量的资料数据为基础,并按具体生产条件加以修正来确定加工余量的方法。该方法方便、迅速、可靠,应用比较广泛。具体数值可在《金属机械加工工艺人员手册》等相应工艺资料中查找,考虑到表中所列数据未计入零件热处理变形、机床及夹具在使用中的磨损等,使用时应适当加大余量数值。

(2)经验估计法。经验估计法是指由一些有经验的工程技术人员或工人根据积累的生产经验确定加工余量的方法。为避免产生废品,估计的加工余量值往往偏大,常用于单件小批生产。

1.4.2 工序尺寸及公差计算

每个工序都应确定本工序加工后各表面应达到的尺寸及公差,以指导工人操作及方便工序间检验。一个工序加工结束后应达到的尺寸称为工序尺寸。工序尺寸的大小与工序间加工余量的选取有关,而工序尺寸公差的确定与表面加工方法的经济加工精度有关。

某表面最后一道工序的工序尺寸及公差应是零件设计尺寸及公差。除此之外,其余各中间工序的工序尺寸及公差均需要通过计算确定。生产上绝大部分表面的加工都是在基准重合(工艺基准和设计基准重合)的情况下进行的,其工序尺寸及公差的确定只需考虑各工序的加工余量和能达到的加工精度。计算步骤如下:

(1)使用查表修正法或经验估计法确定该表面的加工工序余量数值。

(2)从终了加工工序开始,即从设计尺寸开始一直向前推到第一道加工工序,向前逐次加上每道加工工序余量,可分别得到各工序基本尺寸(包括毛坯尺寸)。

(3)除终了加工工序以外,其他各加工工序按各自所采用加工方法的加工经济精度确定工序尺寸公差(终了加工工序的公差是设计图纸确定的)。

(4)填写工序尺寸并按“入体”原则标注中间工序尺寸公差。毛坯尺寸的偏差需按对称形式标注。

例如,某一主轴箱体上孔的设计尺寸为 $\phi 100\text{Js6}$,表面粗糙度 Ra 为 $0.63\sim 1.25\ \mu\text{m}$,加工路线为:毛坯铸孔—粗镗—半精镗—精镗—浮动镗。由工艺手册查得加工工序余量数值后通过计算得到各工序尺寸及公差(表 1-10)。

表 1-10 工序尺寸及公差

单位: mm

工序名称	工序余量	工序基本尺寸	工序公差	工序尺寸公差	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
浮动镗	0.1	100	$\text{Js}\left(\begin{smallmatrix} +0.011 \\ -0.011 \end{smallmatrix}\right)$	$\phi 100\pm 0.011$	$0.63\sim 1.25$
精镗	0.5	$100-0.1=99.9$	$\text{H7}\left(\begin{smallmatrix} +0.035 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$\phi 99.9^{+0.035}_0$	$1.25\sim 2.5$
半精镗	2.4	$99.9-0.5=99.4$	$\text{H10}\left(\begin{smallmatrix} +0.14 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$\phi 99.4^{+0.14}_0$	$2.5\sim 5.0$
粗镗	5.0	$99.4-2.4=97$	$\text{H12}\left(\begin{smallmatrix} +0.44 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$	$\phi 97^{+0.44}_0$	$5.0\sim 10$
毛坯		$97-5=92$	$\left(\begin{smallmatrix} +1.5 \\ -1.5 \end{smallmatrix}\right)$	$\phi 92^{+1.5}_{-1.5}$	

在工艺基准无法同设计基准重合的情况下,确定了工序余量之后,需通过工艺尺寸链进行工序尺寸和公差的换算。具体换算方法将在工艺尺寸链中加以介绍。

1.4.3 机床及工艺装备的选择

在工艺文件中需要规定每个工序使用的机床及工艺装备。

机床的选择要遵循如下原则:机床的加工范围应与零件外廓尺寸相适应,机床精度应与工序要求的加工精度相适应,机床功率应与工序加工需要的功率相适应。

对那些有特殊要求的加工表面,如相对于本厂工艺条件来说尺寸特别大或特别小、技术要求高、加工有困难的表面,应考虑是否需要外协加工,或者增加投资,增添设备,开展必要的工艺攻关,以扩大工艺能力,满足加工要求。

机床夹具的选择要和生产类型相适应,单件小批生产应尽量选用通用夹具,为提高生产率可应用组合夹具;大批大量生产应根据工序要求采用高效率的专用夹具。

刀具的选择主要取决于所采用的加工方法、工件材料、加工尺寸、精度要求和表面粗糙度、生产率要求及加工经济性等。在选择时应尽可能采用标准刀具。必要时,如大批大量生产可采用高生产率的复合刀具和专用刀具。

量具主要根据零件生产类型和要求检验的尺寸大小及精度来选择。单件小批生产应尽量采用通用量具,大批大量生产则宜选用各种量规和生产率高的专用量具。

当需要设计、制造专用机床、专用夹具和专用的刀具、量具时,应由工艺人员根据工序的具体要求提出设计任务书。

1.4.4 切削用量的确定

除在单件小批生产中,工艺文件不需要具体规定切削用量,而由工人在加工时根据加工情况自行确定外,在工艺文件中要规定每个工步的切削用量(切削速度、进给量和背吃刀量)。可以通过查表法或计算法选择切削用量,其步骤如下:

- (1)由工序余量确定背吃刀量。全部工序(或工步)余量最好在一次走刀中去除。
- (2)由工件表面粗糙度确定进给量。对粗加工工序,进给量在根据粗糙度要求选定后,还要校验刀片强度及机床进给机构强度。
- (3)确定刀具磨钝标准及刀具耐用度。
- (4)通过相应公式计算确定切削速度,并按机床实有的主轴转速表选取接近的主轴转速。
- (5)校验机床功率。正确地选择切削用量,对保证加工精度、提高生产率、降低刀具的损耗,以及降低工艺成本都有很大的意义。

1.4.5 时间定额的确定

时间定额是指在一定的生产规模下,当生产条件正常时,为完成某一产品或工序所需要的时间。它是安排生产计划、进行成本核算、确定生产规模、考核工人任务完成情况的主要依据。时间定额的确定是工序设计的又一内容。

时间定额定得过紧,将影响产品质量或者影响工人的劳动积极性和创造性。时间定额定得过松,就起不到指导生产和提高生产率的作用。因此,合理地制定时间定额对保证产品质量、提高劳动生产率、降低生产成本都是十分重要的。

完成一个零件的一道工序所需要的时间称为单件时间 $T_{\text{单件}}$,它包括以下组成部分:

(1)基本时间 $T_{\text{基}}$ 。基本时间是指直接改变生产对象的尺寸、形状、相对位置、表面状态或材料性质等工艺过程所消耗的时间。对于机械加工来说,基本时间是指从工件上切除金属层所耗费的机动时间。当切削参数确定后,机动时间可通过计算公式来确定,需要注意该时间包括刀具的切入和切出时间。

各种不同加工情况下机动时间的计算公式可参考有关手册,针对具体情况予以确定。

(2)辅助时间 $T_{\text{辅}}$ 。辅助时间是指为实现工艺过程所必须进行的各种辅助动作所消耗的时间。这些辅助动作包括装卸工件、开停机床、改变切削用量、进退刀具、测量工件尺寸等。

基本时间和辅助时间的总和称为操作(作业)时间,即直接用于制造产品零部件所消耗的时间。

(3)布置工作地时间 $T_{\text{布}}$ 。布置工作地时间是指为使加工正常进行,工人照管工作地所消耗的时间。它包括加工过程中的调整更换刀具和夹具、修正砂轮、润滑和擦拭机床、清理切屑、收拾工具等工作所耗费的时间,一般可按操作时间的 2%~7%来估算。

(4)休息和生理需要时间 $T_{\text{休}}$ 。休息和生理需要时间是指工人在工作时间内为恢复体力和满足生理需要(休息、喝水、上厕所等)所消耗的时间,一般可按操作时间的 2%来估算。

因此,单件时间为

$$T_{\text{单件}} = T_{\text{基}} + T_{\text{辅}} + T_{\text{布}} + T_{\text{休}}$$

对于成批生产还要考虑准备与终结时间。

(5)准备与终结时间 $T_{\text{准终}}$ 。准备与终结时间是指工人为了生产一批产品和零部件,进行准备和结束工作所消耗的时间。这些准备和结束工作包括熟悉工艺文件,安装工艺装备,调整机床,借用、归还工艺装备和送交成品等。准备与终结时间对一批零件只消耗一次,零件批量 n 越大,则分摊到每个零件上的这部分时间越少。将这一时间加到单件时间中即得到成批生产的单件时间定额

$$T_{\text{定额}} = T_{\text{单件}} + T_{\text{准终}}/n$$

在大批大量生产中,单件时间定额中可忽略 $T_{\text{准终}}/n$,即

$$T_{\text{定额}} = T_{\text{单件}}$$

计算得到的单件时间定额通常以“分钟”为单位填入工艺文件相应的栏目中。

1.5 工艺尺寸链

对于复杂零件的工艺过程,或零件在加工过程中需要多次转换工艺基准,或工序尺寸在尚需继续加工的表面标注时,工序尺寸及其公差计算就比较复杂,这时需利用工艺尺寸链进行分析与计算。

1.5.1 工艺尺寸链相关知识及解题步骤

1. 尺寸链和工艺尺寸链的概念

在工序设计中确定工序尺寸及公差时,如果工序基准或测量基准与设计基准不相重合,就不能如前面所述进行简单计算,而需要借助尺寸链求解。

尺寸链是在机器装配过程或零件加工过程中,由相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组。

在工艺过程中,由同一零件上与工艺相关尺寸所形成的尺寸链称为工艺尺寸链。在工艺尺寸链中,直线尺寸链和平面尺寸链用得最多。

2. 尺寸链的组成

尺寸链由以下几部分组成:

(1)环。环是指列入尺寸链中的每个尺寸。

(2)封闭环。封闭环是指在装配过程中最后形成的或在加工过程中间接获得(间接保证)的一环。

(3)组成环。组成环是指除封闭环以外的其他环。

(4)增环。增环是指当其他组成环不变时,某一环增大时封闭环随之增大,该环减小时封闭环随之减小的组成环。通常在增环符号上标以向右的箭头,如 $\vec{A}_1$ 、 $\vec{A}_3$ 。

(5)减环。减环是指当其他组成环不变时,某一环增大时封闭环随之减小,该环减小时封闭环随之增大的组成环。通常在减环符号上标以向左的箭头,如 $\overleftarrow{A}_2$ 、 $\overleftarrow{A}_4$ 。

3. 尺寸链的计算方法

尺寸链的计算方法有极值法和概率法两种。极值法适用于组成环较少的尺寸链计算,而概率法适用于组成环较多的尺寸链计算。目前生产中常用极值法,本节仅介绍尺寸链的极值法公式。对直线工艺尺寸链(全部环平行的尺寸链)来说,其极值法计算基本公式如下:

(1) 封闭环的基本尺寸。封闭环的基本尺寸等于所有增环基本尺寸之和减去所有减环基本尺寸之和,即

$$A_0 = \sum_{i=1}^m \vec{A}_i - \sum_{j=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_j \quad (1-6)$$

式中, A_0 为封闭环的基本尺寸; $\vec{A}_i$ 为组成环中增环的基本尺寸; $\overleftarrow{A}_j$ 为组成环中减环的基本尺寸; m 为增环数; n 为包括封闭环在内的总环数。

(2) 封闭环的极限尺寸。封闭环的最大极限尺寸等于所有增环的最大极限尺寸之和减去所有减环的最小极限尺寸之和,最小极限尺寸等于所有增环的最小极限尺寸之和减去所有减环的最大极限尺寸之和,即

$$A_{0\max} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\max} - \sum_{j=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{j\min} \quad (1-7)$$

$$A_{0\min} = \sum_{i=1}^m \vec{A}_{i\min} - \sum_{j=m+1}^{n-1} \overleftarrow{A}_{j\max} \quad (1-8)$$

式中, $A_{0\max}$ 、 $A_{0\min}$ 为封闭环的最大及最小极限尺寸; $\vec{A}_{i\max}$ 、 $\vec{A}_{i\min}$ 为增环的最大及最小极限尺寸; $\overleftarrow{A}_{j\max}$ 、 $\overleftarrow{A}_{j\min}$ 为减环的最大及最小极限尺寸。

(3) 封闭环的极限偏差。封闭环的上偏差等于所有增环上偏差之和减去所有减环下偏差之和,封闭环的下偏差等于所有增环下偏差之和减去所有减环上偏差之和,即

$$ESA_0 = \sum_{i=1}^m ES\vec{A}_i - \sum_{j=m+1}^{n-1} EI\overleftarrow{A}_j \quad (1-9)$$

$$EIA_0 = \sum_{i=1}^m EI\vec{A}_i - \sum_{j=m+1}^{n-1} ES\overleftarrow{A}_j \quad (1-10)$$

式中, ESA_0 、 EIA_0 为封闭环的上、下偏差; $ES\vec{A}_i$ 、 $EI\vec{A}_i$ 为增环的上、下偏差; $ES\overleftarrow{A}_j$ 、 $EI\overleftarrow{A}_j$ 为减环的上、下偏差。

(4) 封闭环的公差。封闭环的公差等于各组成环公差之和,即

$$T_0 = \sum_{i=1}^{n-1} T_i \quad (1-11)$$

式中, T_0 为封闭环极值公差; T_i 为组成环公差。

4. 工艺尺寸链的解题步骤

(1) 确定封闭环。求解工艺尺寸链问题时能正确找出封闭环是求解关键。工艺尺寸链的封闭环必须是在加工过程中最后间接形成的尺寸,即是在获得若干直接得到的尺寸后而自然形成的尺寸。

(2) 查明全部组成环,画出尺寸链图。确定封闭环后,由该封闭环围绕一个方向按照尺寸的相互联系依次找出全部组成环,并把它们与封闭环一起,按尺寸联系的相互顺序首尾相接画出尺寸链图。

(3) 判断组成环中的增、减环,并在字母上方用箭头标出。

(4) 利用基本计算公式求解。计算中可用不同公式求解,而不会影响解的正确性。可按式(1-6)、式(1-9)和式(1-10)进行计算,也可用“竖式”计算。“竖式”的计算方法将在后面的例题中进行介绍。解工艺尺寸链得到的中间工序尺寸公差一般按“人体”原则标出。

需要指出的是,当出现已知的若干组成环公差之和等于或大于封闭环公差的情况时,则欲求的组成环必须是零公差或负公差才能有解,而负公差是不存在的。这时需要适当缩小

某些组成环的公差。一般工艺人员无权放大封闭环公差,因为这样会降低产品技术要求。

此处还要注意以下几点:

(1) 工艺尺寸链的构成取决于工艺方案和具体的加工方法。

(2) 确定哪一个尺寸是封闭环,是解尺寸链的决定性一步,封闭环确定错了,必然全盘计算错误。

(3) 一个尺寸链只能解一个封闭环。

1.5.2 工艺尺寸链的分析与计算

1. 定位基准与设计基准不重合时工序尺寸及其公差计算

在零件加工过程中,有时为方便定位或加工,会选用不是设计基准的几何要素做定位基准。在这种定位基准与设计基准不重合的情况下,需要通过尺寸换算求出有关工序尺寸及公差,并按换算后的工序尺寸及公差进行加工,以保证零件的设计要求。

【例 1-1】 在图 1-24 所示的零件上,以底面 N 为定位基准镗 O 孔,确定 O 孔位置的设计基准是 M 面(设计尺寸为 100 ± 0.15)。用镗夹具镗孔时,镗孔相对于定位基准 N 的位置(L_1 尺寸)预先由夹具确定。这时设计尺寸 L_0 是在 L_1 、 L_2 尺寸确定后间接得到的。问如何确定 L_1 尺寸及公差,才能使间接得到的 L_0 尺寸在规定的公差范围内?

解 ①判断封闭环并画出尺寸链图。根据加工情况,设计尺寸 L_0 是加工过程中间接获得的尺寸,因此 L_0 (100 ± 0.15) 是封闭环。从封闭环任一端出发,按顺序将 L_0 与 L_1 、 L_2 连接为一封闭尺寸组,即为求解的工艺尺寸链,画出尺寸链图[图 1-24(b)]。

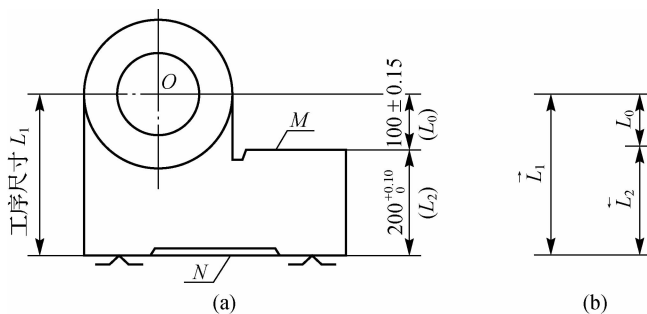


图 1-24 轴承座镗孔工序尺寸的换算

②判定增、减环。由定义或用画箭头的方法可判定 L_1 为增环, L_2 为减环,并将其用箭头标于尺寸链图上。

③按公式计算工序尺寸 L_1 的基本尺寸,由式(1-6)有

$$100 = L_1 - 200$$

故

$$L_1 = 100 + 200 = 300$$

④按公式计算工序尺寸 L_1 的极限偏差,由式(1-9)有

$$+0.15 = ESL_1 - 0$$

故 L_1 的上偏差

$$ESL_1 = +0.15$$

由式(1-10)有

$$-0.15 = EI\vec{L}_1 - 0.1$$

故 L_1 的下偏差

$$EI\vec{L}_1 = 0.1 - 0.15 = -0.05$$

因此,工序尺寸 L_1 及其上、下偏差为(L_1 作为中心高按双向对称标注)

$$L_1 = 300.05 \pm 0.10$$

也可将式(1-6)、式(1-9)和式(1-10)改写成表 1-11 所示的竖式。在本例中,在“增环”这一行中抄入待算的尺寸 L_1 及其上、下偏差,在“减环”这一行中把尺寸 L_2 的上、下偏差的位置对调,并改变其正负号(原来的正号改负号,原来的负号改正号),同时给减环的基本尺寸冠以负号,再将封闭环的尺寸和上、下偏差在对应行中一一写入,然后把三列的数值分别求代数,即得到增环的基本尺寸、上偏差及下偏差(在表中,计算结果用波浪线标出)。

表 1-11 计算尺寸链的竖式

组成环	基本尺寸	ES	EI
增环	<u>300</u>	<u>0.15</u>	<u>-0.05</u>
减环	-200	0	-0.10
封闭环	100	0.15	-0.15

在竖式中对增、减环的处理可归纳成一句口诀:封闭环/增环上、下偏差照抄,减环上、下偏差对调、变号。

2. 测量基准与设计基准不重合时测量尺寸及其公差的换算

加工中有时会遇到某些加工表面的设计尺寸不便测量,甚至无法测量的情况。为此需要在工件上另选一个容易测量的测量基准,要求通过对该测量尺寸的控制,能够间接保证原设计尺寸的精度。这就是测量基准与设计基准不重合时测量尺寸及其公差的计算问题。

【例 1-2】 图 1-25 所示零件外圆及两端面已车好,现欲加工台阶状内孔。因设计尺寸 $10_{-0.4}^0$ 难以测量,现欲通过控制 L_1 尺寸间接保证 $10_{-0.4}^0$ 尺寸。求 L_1 的基本尺寸及上、下偏差。

解 据题意,确定 $10_{-0.4}^0$ 尺寸为封闭环 L_0 ,画出尺寸链图[图 1-25(b)],并确定增、减环,即 L_2 为增环、 L_1 为减环。

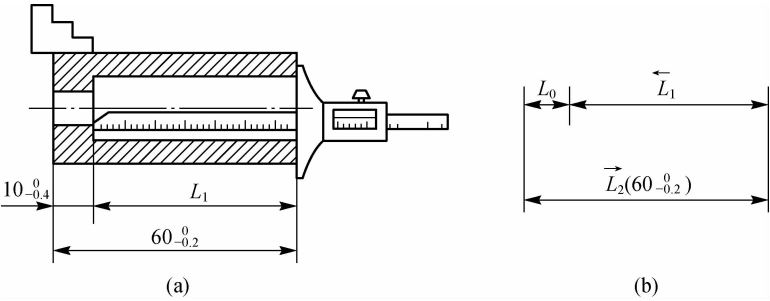


图 1-25 测量基准与设计基准不重合时测量尺寸的计算

由式(1-6)有

$$10 = 60 - L_1$$

故 $L_1 = 50$ 。

由式(1-9)有

$$0 = 0 - EI\bar{L}_1$$

故 L_1 的下偏差 $EI\bar{L}_1 = 0$ 。

由式(1-10)有

$$-0.4 = -0.2 - ES\bar{L}_1$$

故 L_1 的上偏差 $ES\bar{L}_1 = +0.2$ 。

因此,测量尺寸为 $L_1 = 50^{+0.2}_0$ 。

需要指出的是,利用这种换算方法来控制设计或加工尺寸会出现“假废品”的情况,即从测量尺寸看已经超差,似乎是废品,但其被控制的设计尺寸却未超差,并不是真正的废品。例如,上例中当 $L_2 = 60$,测量尺寸 $L_1 = 50.3$ 时,可认为是废品,但实际上 $L_0 = 9.7$,并未超差,是合格品。由此可见,当测量尺寸超差数值不超过其他组成环公差之和时,就有可能出现“假废品”。但按换算结果控制尺寸,得到的一定是合格品。

3. 中间工序的工序尺寸及其公差计算

在工件加工过程中,有时一个表面的加工会同时影响两个设计尺寸的数值。这时,需要直接保证其中公差要求较严的一个设计尺寸,而另一个设计尺寸需由该工序前面的某一中间工序的合理工序尺寸间接保证。为此,需要对中间工序尺寸进行计算。

【例 1-3】 图 1-26 所示齿轮内孔孔径设计尺寸为 $\phi 40^{+0.05}_0$ mm,键槽设计深度为 $43.6^{+0.34}_0$ mm,内孔需淬硬。内孔及键槽加工顺序为:①镗内孔至 $\phi 39.6^{+0.1}_0$;②插键槽至尺寸 L_1 ;③淬火热处理;④磨内孔至设计尺寸 $\phi 40^{+0.05}_0$,同时要求保证键槽深度为 $43.6^{+0.34}_0$ 。试问如何规定镗后的插键槽深度 L_1 ,才能最终保证得到合格产品?

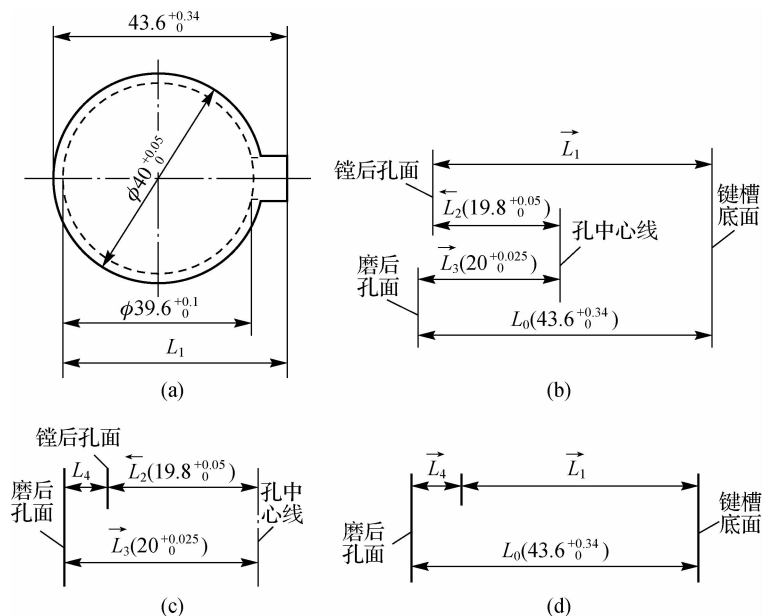


图 1-26 内孔和键槽加工中的尺寸换算

解 由加工过程知,尺寸 $43.6^{+0.34}_0$ 的一个尺寸界线——键槽底面是在插键槽工序时按尺寸 L_1 确定的,另一个尺寸界线——孔表面是在磨孔工序时由尺寸 $\phi 40^{+0.05}_0$ 确定的,故尺寸

43.6^{+0.34}₀是一间接获得的尺寸,为封闭环。在不将磨孔余量作为一环列入尺寸链时,可得到图 1-26(b)所示的尺寸链,并确定增、减环。由式(1-6)有

$$43.6 = (L_1 + 20) - 19.8$$

故 L_1 的基本尺寸为

$$L_1 = 43.6 + 19.8 - 20 = 43.4 \text{ mm}$$

由式(1-9)有

$$0.34 = (ES\vec{L}_1 + 0.025) - 0$$

故 L_1 的上偏差为

$$ES\vec{L}_1 = 0.34 - 0.025 = 0.315 \text{ mm}$$

同样,由式(1-10)可得到 L_1 的下偏差为

$$EI\vec{L}_1 = 0.05 \text{ mm}$$

因此

$$L_1 = 43.4 \pm_{0.050}^{0.315}$$

按“入体”原则标注为

$$L_1 = 43.45 \pm_{0.050}^{0.265}$$

4. 保证应有渗碳或渗氮层深度时工序尺寸及其公差计算

零件渗碳或渗氮后,表面一般要经过磨削来保证尺寸精度,同时要求磨后保留有规定的渗层深度。这就要求进行渗碳或渗氮热处理时按一定渗层深度及公差进行(用控制热处理时间保证),并对这一合理渗层深度及公差进行计算。

【例 1-4】 图 1-27 所示 38CrMoAl 衬套内孔要求渗氮,加工工艺过程为:①先磨内孔至 $\phi 144.76 \pm_{0.04}^{+0.04}$, 渗氮处理深度为 L_1 ; ②再终磨内孔至 $\phi 145 \pm_{0.04}^{+0.04}$, 并保证留有渗层深度为 $0.4 \pm 0.1 \text{ mm}$ 。求氮化处理深度 L_1 及公差应为多大?

解 由题意知,磨后保留的渗层深度 $0.4 \pm 0.1 \text{ mm}$ 是间接获得的尺寸,为封闭环。由此可画出图 1-27(b)所示的尺寸链,并确定增、减环(其中 L_2 、 L_3 为半径尺寸), L_1 、 L_2 为增环, L_3 为减环。

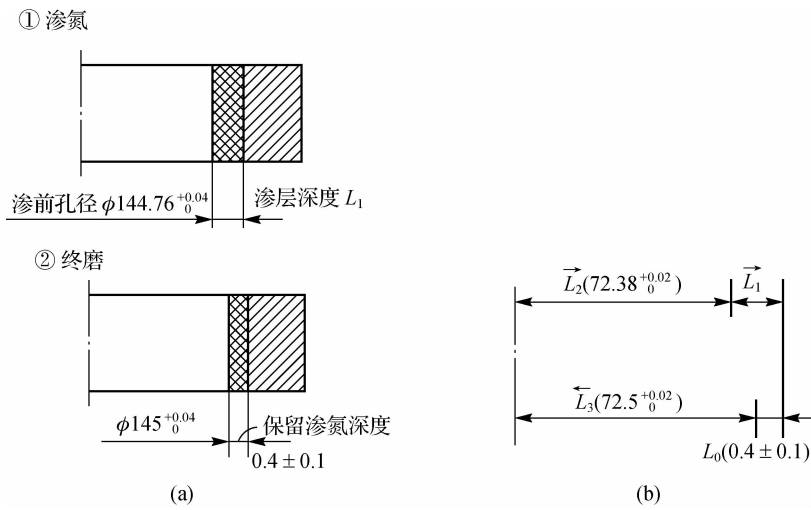


图 1-27 保证渗氮层厚度的工序尺寸换算

由式(1-6)有

$$0.4 = (72.38 + L_1) - 72.5$$

L_1 的基本尺寸为

$$L_1 = 0.52 \text{ mm}$$

由式(1-9)有

$$0.1 = (0.02 + ES\vec{L}_1) - 0$$

故 L_1 的上偏差为

$$ES\vec{L}_1 = 0.08 \text{ mm}$$

由式(1-10)有

$$-0.1 = (0 + EI\vec{L}_1) - 0.02$$

故 L_1 的下偏差为

$$EI\vec{L}_1 = -0.08 \text{ mm}$$

因此,工序尺寸 L_1 为

$$L_1 = 0.52 \pm 0.08 \text{ mm}$$

即渗氮处理时,渗氮深度控制到 0.44~0.60 mm。

1.6 提高劳动生产率的工艺途径

劳动生产率是指一个工人在单位时间内生产出的合格产品的数量,也可以用完成单件产品或单个工序所耗费的劳动时间来衡量。如何提高生产率,归根到底是研究怎样才能减少时间定额。因此,可以从时间定额的组成中寻求提高劳动生产率的工艺途径。采取合理工艺措施以缩短各工序的单件时间定额,是提高劳动生产率的有效途径。通过单件时间组成不难看出,提高劳动生产率的工艺途径可有以下四个方面。

1. 缩短基本时间

(1)提高切削用量。主要是提高切削速度。近年来随着新型刀具材料和磨料的出现,切削速度越来越高,高速切削和磨削技术正在迅速推广应用,使得机械制造业发生了突破性的变化,不仅生产率大大提高,而且原来不能加工或不可加工的材料也可以加工了。

缩短基本时间还可以从刀具材料、刀具结构和刀具几何参数等方面进行深入研究。例如,涂层刀具和群钻在提高生产率方面起了相当显著的作用。

(2)减少工件加工长度。可采用多刀加工,使每把刀具的加工长度缩短;采用宽砂轮磨削,变纵磨为横磨等,均是减少工件加工长度而提高生产率的例子。

(3)合并工步。用几把刀具或用一把复合刀具对一个零件的几个表面同时加工,可将原来需要的几个工步集中合并为一个工步(图 1-4),从而使需要的基本时间全部或部分地重合,缩短了工序基本时间。

(4)多件加工。将多个工件置于一个夹具上同时进行加工,可以有效减少刀具的切入切出时间。将多个工件置于机床上,使用多把刀具或多个主轴头同时进行加工,可以使各零件加工的基本时间重合而大大减少分摊到每个零件上的基本时间。

(5)采用精密铸造、压力铸造、精密锻造等先进工艺提高毛坯制造精度,减少机械加工余量,以缩短基本时间,有时甚至无须再进行机械加工,可以大幅度地提高生产效率。

2. 缩短辅助时间

(1)直接缩减辅助时间。采用先进的高效夹具,如气动、液压及电动夹具或成组夹具等,

不但可减轻工人劳动强度,而且能缩短许多装卸时间。采用主动测量法或在机床上配备数显装置等,可以减少加工中需要的停机测量时间和读数时间。采用具有转位刀架(如六角车床)、多位多刀架(如多刀半自动车床)的机床进行加工,可以缩短刀具更换和调整时间。采用快换刀夹(图 1-28)及快换夹头是缩短更换刀具时间的重要方法。

(2)间接缩短辅助时间。使辅助时间和基本时间全部或部分重合,可间接缩短辅助时间。采用多工位回转工作台机床或转位夹具加工,在大量生产中采用自动线等均可使装卸工件时间与基本时间重合,使生产率得到提高。

3. 缩短布置工作地时间

缩短布置工作地时间的方法主要有以下几种:

(1)缩短每批零件加工前或刀具磨损后的刀具调整或更换时间,提高刀具或砂轮的耐用度,以便在一次刃磨或修整后加工更多的零件。

(2)采用刀具微调装置(图 1-29)、专用对刀样板或对刀块等,以减少刀具的调整、装卸、连接和夹紧等工作所需的时间。



图 1-28 数控机床用快换刀夹



图 1-29 数显镗刀的快速微调装置

(3)采用专职人员在刀具预调仪上事先精确调整好刀具和刀杆。这也是一种先进的减少刀具调整和试切时间的方法。

(4)使用不重磨刀片,也可使换刀时间大大缩短。

4. 缩短准备与终结时间

缩短准备与终结时间的途径有以下两个:

(1)通过零件标准化、通用化或采用成组技术扩大产品生产批量,以相对减少分摊到每个零件上的准备与终结时间,来直接减少准备与终结时间。

(2)单件小批生产复杂零件时,其准备与终结时间及样板、夹具等的制造周期都很长;而数控机床、加工中心机床或柔性制造系统则很适合这种单件小批复杂零件的生产,这时程序编制可以在机外由专职人员进行,在加工中自动控制刀具与工件间的相对位置和加工尺寸,自动实现换刀,使工序可高度集中,从而获得高的生产效率和稳定的加工质量。

1.7 工艺过程的技术经济分析

制定零件机械加工工艺规程时,在保证质量的前提下往往有几种工艺方案可供选取。为从中选出技术上比较先进且经济上又比较合理的方案,需要进行技术经济分析,即从技术和经济两方面对各方案进行评价,进而选出技术经济效果较好的方案。工艺方案的经济性

分析是在计算与工艺直接有关的费用(工艺成本)后进行分析比较。

零件加工工艺成本中的各项费用可分为两大类,即可变费用(V)和不变费用(C)。

可变费用是与年产量有关并与之成比例的费用,包括材料费、机床工人工资、机床电费、通用机床的折旧费和修理费,以及通用工夹具的折旧费和修理费等。产品产量越大,分摊到每件产品的可变费用越少。

不变费用是指与年产量无直接关系,且不随年产量的增减而变化的费用,包括专用设备的折旧费和修理费、专用工夹具的折旧费和修理费、管理人员、车间辅助工人及机床调整工人的工资等。这些费用在工艺方案一定的情况下,分摊到每件产品上的部分一般是不变的。

单个零件(或单个工序)的工艺成本 $S_{\text{单}}$ 为

$$S_{\text{单}} = V + \frac{C}{N} \text{ (元/件)} \quad (1-12)$$

零件(或工序)的全年工艺成本 $S_{\text{年}}$ 为

$$S_{\text{年}} = VN + C \text{ (元/年)} \quad (1-13)$$

式中, C 为不变费用(元/年); V 为可变费用(元/件); N 为年产量(件/年)。

由式(1-12)及图 1-30(a)可见,单件工艺成本随年产量 N 的增加而降低。单件小批生产条件下的单件工艺成本很高,而大批大量生产时单件工艺成本大幅度下降。这就是机械制造行业推广通用化、标准化和专业化生产,以及推广成组技术扩大生产批量的主要原因。而全年工艺成本[式(1-13),图 1-30(b)] 则随年产量的增加而成比例地上升。

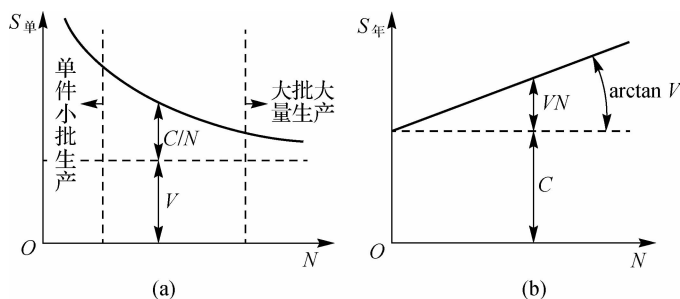


图 1-30 随年产量而变化的工艺成本曲线

在比较不同工艺方案的经济性时,一般分两种情况。

(1)要比较的两种工艺方案的基本投资相近,或在采用现有设备的条件下,工艺成本可作为衡量两种工艺方案经济性的依据。

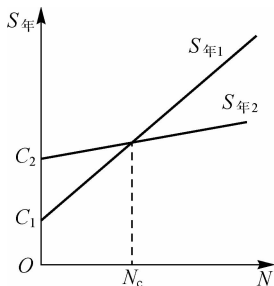


图 1-31 两种工艺方案的比较

假设有两种工艺方案,其全年的工艺成本分别如图 1-31 所示,即

$$S_{\text{年}1} = V_1 N + C_1$$

$$S_{\text{年}2} = V_2 N + C_2$$

由上面两式可求两种工艺方案年工艺成本相等($S_{\text{年}1} = S_{\text{年}2}$)时的年产量 N_c 。

$$N_c = \frac{C_1 + C_2}{V_2 - V_1}$$

显然,当年产量为 N_c 时,两种工艺方案的经济性相当;

当年产量小于 N_c 且 $C_2 > C_1$ 时,采用第一工艺方案比较经济,宜采用通用机床;当年产量大于 N_c 且 $C_2 > C_1$ 时,采用第二工艺方案比较经济,宜采用专用机床;而数控机床介于两者之间。

(2)当要比较的两种工艺方案的基本投资额相差较大时,假设第一工艺方案采用了生产效率高但价格较贵的机床装备,其基本投资 K_1 大,而工艺成本 $S_{\text{年}1}$ 较低;第二工艺方案采用了生产效率较低但价格便宜的机床装备,虽然工艺成本 $S_{\text{年}2}$ 较高,但基本投资 K_2 小。这时单纯比较工艺成本难以全面评价其经济性。为此需再考虑两种工艺方案的基本投资差额的回收期限,即要考虑第一工艺方案比第二工艺方案多花费的投资需要多长时间才能因工艺成本降低而收回来,即所谓的回收期限。回收期限 τ 可用下式计算

$$\tau = \frac{K_1 - K_2}{S_{\text{年}2} - S_{\text{年}1}}$$

回收期限越短则经济性越好。回收期限必须满足以下要求:回收期限应小于所采用的机床设备或工艺装备的使用年限,回收期限应小于产品生产年限,以及回收期限应小于国家规定的标准回收期限。例如,采用新夹具的标准回收期限规定为 2~3 年,采用新机床的标准回收期限规定为 4~6 年。

1.8 计算机辅助工艺过程设计(CAPP)

随着制造科学和计算机技术的发展,计算机辅助技术大量应用于制造技术的各个方面,并且达到了非常成熟的水平,如 CAE、CAD、CAM 等技术。现代制造系统向集成化、智能化和网络化方向发展,作为 CAD 系统和 CAM 系统桥梁的 CAPP(computer aided process planning)系统也在现代制造技术中引起了人们的特别关注。

用 CAPP 系统代替传统的手工工艺设计,可以将工艺技术人员从繁重的工艺设计中解放出来,进行新工艺、新技术的研究和开发;应用 CAPP 技术可以大大缩短工艺设计周期,提高产品对市场的快速反应能力;使用 CAPP 技术,有利于实现和促进现代集成制造系统的应用与发展。

从 20 世纪 60 年代开始进行工艺设计自动化技术的理论与应用的研究,经过 50 多年的发展,已经取得了一定的成果。但由于工艺设计本身的复杂性,很多工艺知识和工艺规则还不能用数学的语言进行描述与运算,因此和其他计算机辅助技术比较,CAPP 技术还不成熟,还没有通用化、工具化、商业化的 CAPP 系统软件。

根据实现 CAPP 技术的方法,可把 CAPP 系统分为交互式 CAPP 系统、派生式 CAPP 系统、生成式 CAPP 系统和基于知识的 CAPP 专家系统。

1. 交互式 CAPP 系统

交互式 CAPP 系统是最简单的 CAPP 技术,是把工艺设计时使用的工艺数据、工艺知识等工艺资料用数据库的原理建立工艺资源库,并设计一个人机交互软件系统。在工艺设计过程中,工艺设计人员根据人机交互系统设计的工艺设计流程对工艺过程进行决策,回答工艺设计中的问题,并输入相应的内容,形成所需要的工艺规程。交互式 CAPP 系统对工艺设计人员的依赖性大,但可把工艺设计人员从烦琐的查阅工艺设计手册和重复计算中解放出来了,原理简单,易于实现。它是以前人的经验为基础的,而且所编制的工艺规程通常只局限于特定的工厂和产品。

2. 派生式 CAPP 系统

派生式 CAPP 系统利用了零件在结构和工艺方面的相似性,相似的零件应该有相似的工艺过程,一个新零件的工艺规程可通过检索相似零件的工艺规程并加以筛选或编辑而成。

派生式 CAPP 系统的设计过程如图 1-32 所示。

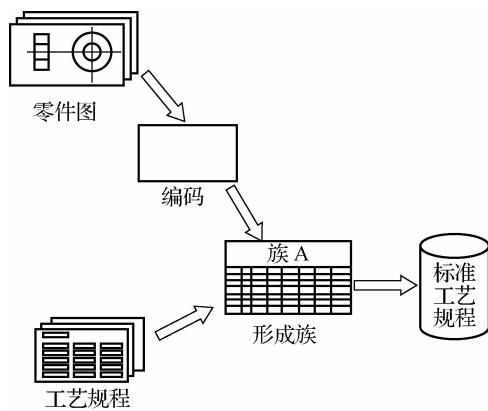


图 1-32 派生式 CAPP 系统的设计过程

(1)选择零件的分类编码系统。根据本系统中适用的零件,选择或设计相应的零件分类编码系统。

(2)将现有适用于 CAPP 系统的零件进行分类。每类零件对应一个零件族,同一零件族的零件可以是结构相似,也可以是工艺相似。

(3)编制标准工艺规程。为每个零件族编制一份标准工艺规程,标准工艺规程代表该族零件的工艺过程。标准工艺规程可以是本族内最具代表性零件的工艺规程,也可以是本族现有零件的复合零件工艺规程,还可以是本族现有零件工艺规程的复合工艺规程。

(4)把各族的标准工艺规程存入数据库或数据文件中,并确定检索及筛选的方法。

派生式 CAPP 系统的使用过程如图 1-33 所示。

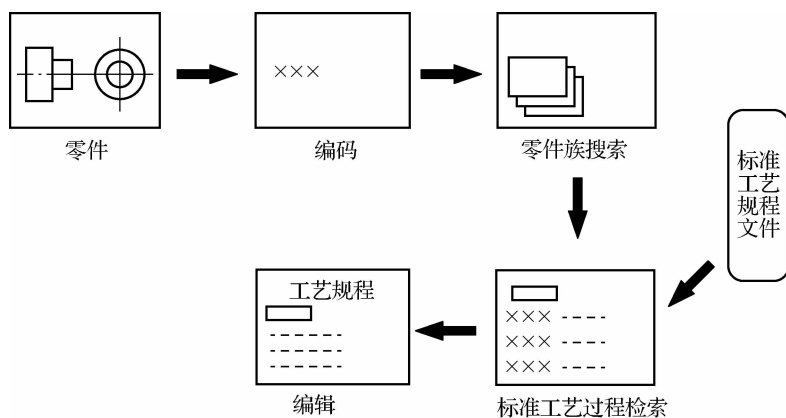


图 1-33 派生式 CAPP 系统的使用过程

(1)对新零件编码。用所采用的零件分类编码系统(如 JLBM-1)对所加工的零件进行编码。为了使零件按其编码输入计算机后能够找到相应的零件组(族),必须先将零件的编码

转换为矩阵。

(2)把新零件的编码输入计算机,判断新零件是否包括在本 CAPP 系统所考虑的零件族内。如果通过编码搜索不到相应的零件族,则通知用户用别的办法设计工艺规程;如果能够搜索到相应的零件族,则检索出该族零件的标准工艺规程。

(3)根据输入的零件代码和零件的其他信息及已经设计的筛选逻辑,对标准工艺过程进行提取。

(4)用户对选出的工艺过程进行编辑。根据零件的全部信息,对工艺过程进行增加、删除和修改。

(5)将编辑好的工艺规程存储起来,或按规定的工艺文件格式打印出来。

1976 年,意大利 Mc Donnell Douglas 自动化公司按照与设在美国的计算机辅助制造国际组织(CAM-I)签订的合同开发出了第一个实用的派生式 CAPP 系统。经过 40 多年的发展,国内外许多研究机构、高校和企业开发出了很多派生式 CAPP 系统,使 CAPP 系统达到了比较成熟的程度,使 CAPP 系统在现代集成制造系统中获得应用。

3. 生成式 CAPP 系统

生成式 CAPP 系统的基本原理和派生式 CAPP 系统不同,它不是利用相似零件的工艺规程编辑出来的,而是依靠 CAPP 系统中的决策逻辑和制造工艺数据自动生成的。在生成式 CAPP 系统中没有零件族和标准工艺规程的概念,系统设计工艺规程所依据的主要信息是零件的设计信息、制造资源数据库和制造工艺规则库。在设计工艺规则的过程中,输入零件的设计信息,系统的决策模型调用工艺资源库和工艺规则库,独立对工艺设计做出决策,从而设计出零件的工艺规程。理想的生成式 CAPP 系统应该是和工艺设计人员设计工艺规程一致的。

由于工艺过程设计的复杂性和多样性,功能完全、自动化程度很高的生成式 CAPP 系统的研究和开发都不成熟,现在还没有完全自动化的生成式 CAPP 系统。当前,只要在 CAPP 系统的某一部分决策应用到生成式的原理,这个系统就可以称为生成式 CAPP 系统。

4. 基于知识的 CAPP 专家系统

基于知识的 CAPP 专家系统主要由知识库、数据库、推理机、解释模块、知识获取模块等组成。其主要特点是接近人类思维,比较容易从人类专家那里获取专业领域的知识;模块是独立的,容易被用户检查、修改和扩充;容易使系统从一种环境到另一种环境;容易添加一些解释功能;具有描述不确定知识的能力。

当前生成式 CAPP 系统和专家系统、人工智能相结合,可以开发出自动化程度相对较高的 CAPP 系统。同时,CAPP 技术和 CAD 系统、CAM 系统集成,成为 CIMS 系统的重要组成部分。CAPP 系统也是并行工程中进行可制造性分析的具体实施方式。

目前国内外已有许多上述各类系统的实例,一般是针对某一类零件的专用 CAPP 系统,但迄今为止已得到生产实践考验和令人满意的通用系统还不多。现在用派生式原理生成工艺规程的方法已经比较成熟,应用十分广泛,现有的大部分 CAPP 系统都属于此类型。生成式原理目前还不完善,还没有一个纯粹的、商业化的生成式 CAPP 系统出现。

1.9 数控加工工艺

数控技术是综合应用计算机、自动控制、自动检测及精密机械等高新技术的产物。它的出现及所带来的巨大效益,已引起世界各国科技与工业界的普遍重视。专家们预言,21 世纪机械制造业的竞争实质上是数控技术的竞争。

数控加工的主要特点有以下几个:

(1)数控机床传动链短、刚度高,可通过软件对加工误差进行校正和补偿,因此加工精度高。

(2)数控机床是按设计好的程序进行加工的,加工尺寸的一致性较好。

(3)在程序控制下,几个坐标可以联动并能实现多种函数的插补运算,所以能完成普通机床难以加工或不能加工的复杂曲线、曲面及型腔等。

(4)有的数控机床(加工中心)带自动换刀系统和装置转位工作台,带可自动交换的动力头等,在这样的数控机床上可实现工序的高度集中,生产率比较高,并且工夹具数量少,夹具的结构也可以相对简单。

因数控机床有上述特点,故在安排机械加工工艺过程时,有时需要考虑安排数控加工。

1.9.1 数控加工简介

1. 数控加工相关术语

数控加工泛指在数控机床上进行零件加工的工艺过程。

数控机床是一种用计算机程序来控制的机床。

用来控制机床的计算机,不管是专用计算机还是通用计算机,都统称为数控系统。数控机床的运动和辅助动作均受控于数控系统发出的指令。而数控系统的指令是由程序员根据工件的材质、加工要求、机床的特性和系统所规定的指令格式(数控语言或符号)编制的。

所谓编程,是指把被加工零件的工艺过程、工艺参数、运动要求用数字指令形式(数控语言)记录在介质上,并输入数控系统。数控系统根据程序指令向伺服装置和其他功能部件发出运行或中断信息来控制机床的各种运动。当零件的加工程序结束时,机床便会自动停止。任何一种数控机床若没有在其数控系统中输入程序指令,就不能工作。

2. 数控机床加工过程

机床的受控动作大致包括机床的启动、停止;主轴的启停、旋转方向和转速的变换;进给运动的方向、速度、方式;刀具的选择,长度和半径的补偿,刀具的更换;冷却液的开启、关闭等。图 1-34 所示为数控机床加工过程框图。从框图中可以看出,在数控机床上加工零件所涉及的范围比较广,与相关的配套技术有密切的关系。合格的编程员首先应该是一个很好的工艺员,应熟练地掌握工艺分析、工艺设计和切削用量的选择,能正确地选择刀辅具并提出零件的装夹方案,了解数控机床的性能和特点,熟悉程序的编制方法和程序的输入方式。

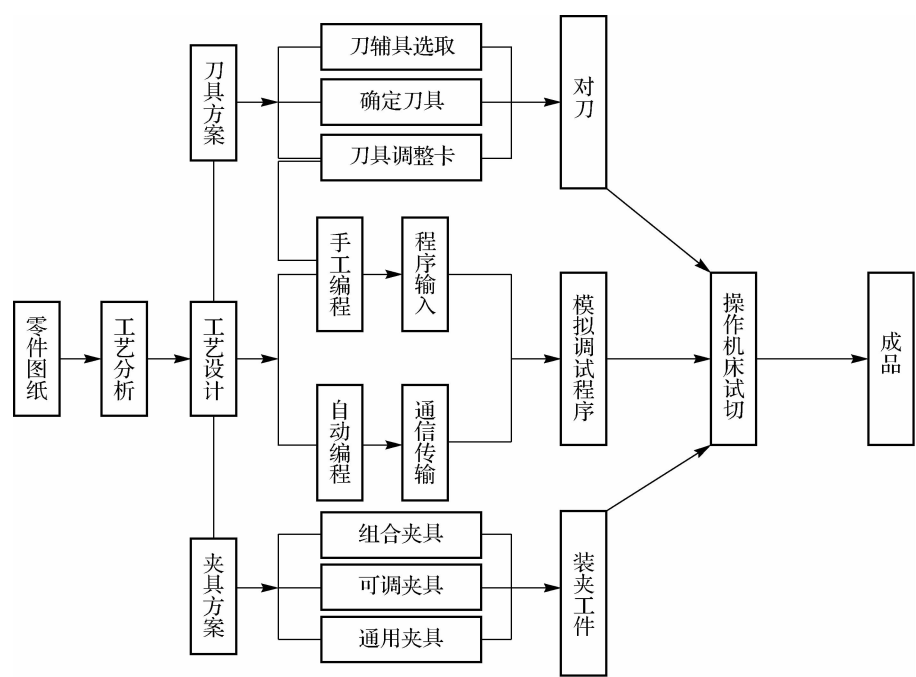


图 1-34 数控机床加工过程框图

3. 数控加工编程方法

数控加工编程方法有手工(人工)编程和自动编程之分。手工编程时,程序的全部内容是由人工按数控系统所规定的指令格式编写的。自动编程即计算机编程,可分为以语言输入、语音输入和图形输入为基础的自动编程方法。但是,无论采用何种自动编程方法,都需要有相应配套的硬件和软件,相应的成本较高。

4. 数控加工工艺主要内容

编程是实现数控加工的关键,但仅有编程是不够的,数控加工还包括编程前必须做的一系列准备工作,以及编程后的善后处理工作。数控加工工艺是数控编程与操作的基础,合理的数控加工工艺是保证数控加工质量、发挥数控机床效能的前提条件。一般来说,数控加工工艺的主要内容如下:

- (1)选择并确定进行数控加工的零件及内容。
- (2)对零件图纸进行数控加工的工艺分析。
- (3)数控加工的工艺设计。
- (4)对零件图纸进行数学处理。
- (5)编写加工程序单。
- (6)按程序单制作控制介质。
- (7)程序的校验与修改。
- (8)首件试加工与现场问题处理。
- (9)数控加工工艺文件的定型与归档。

1.9.2 数控加工工艺设计

在数控加工前对工件进行工艺设计是必不可少的准备工作。无论是手工编程还是自动编程,在编程前都要对所加工的工件进行工艺分析,拟定工艺路线,设计加工工序。因此,合理的工艺设计方案是编制加工程序的依据,工艺设计做不好是数控加工出差错的主要原因之一,往往会造成工作反复,使工作量成倍增加。编程人员必须首先搞好工艺设计,再考虑编程。

1. 数控加工工艺内容的选择

当选择并决定对某个零件进行数控加工后,并非其全部加工内容都要采用数控加工,数控加工可能只是零件加工工序中的一部分。因此,有必要对零件图样进行仔细分析,立足于解决难题、提高生产效率,注意充分发挥数控机床的优势,选择那些最适合、最需要的加工内容和工序进行数控加工。一般可按下列原则选择数控加工内容:

- (1)普通机床无法加工的内容应作为优先选择内容。
- (2)普通机床难加工、质量也难以保证的内容应作为重点选择内容。
- (3)普通机床加工效率低、工人手工操作劳动强度大的内容,可在数控机床尚有加工能力的基础上进行选择。

相比之下,下列一些加工内容则不宜选择数控加工:

- (1)需要用较长时间占机调整的加工内容。
- (2)加工余量极不稳定,且数控机床上又无法自动调整零件坐标位置的加工内容。
- (3)不能在一次安装中加工完成的零星分散部位,采用数控加工很不方便,效果不明显,应安排普通机床补充加工。

此外,在选择数控加工内容时,还要考虑生产批量、生产周期、工序间周转情况等因素,要尽量合理使用数控机床,达到产品质量、生产率及综合经济效益等指标都明显提高的目的,要防止将数控机床降格为普通机床使用。

2. 数控加工零件的工艺性分析

数控加工零件的工艺性分析主要包括产品的零件图样分析和结构工艺性分析两部分。本章第 1.2.4 节中工艺规程的制定步骤“工艺审查”内容同样适用于数控加工。

(1) 零件图样分析。

①零件图上的尺寸标注方法应适应数控加工的特点。如图 1-35(a)所示,在数控加工零件图上,应以同一基准标注尺寸或直接给出坐标尺寸。这种标注方法既便于编程,又便于尺寸之间的相互协调,还有利于设计基准、工艺基准、测量基准和编程原点的统一。零件设计人员在标注尺寸时,一般总是较多地考虑装配等使用特性,因而常采用图 1-35(b)所示的局部分散的标注方法,这样就给工序安排和数控加工带来诸多不便。由于数控加工精度和重复定位精度都很高,不会因产生较大的累积误差而破坏零件的使用特性,因而可将局部的分散标注法改为同一基准标注或直接标注坐标尺寸。

②分析被加工零件的设计图纸,根据标注的尺寸公差和形位公差等相关信息,将加工表面区分为重要表面和次要表面,并找出其设计基准,进而遵循基准选择的原则确定加工零件的定位基准,分析零件的毛坯是否便于定位和装夹,夹紧方式和夹紧点的选取是否会有碍刀具的运动,夹紧变形是否对加工质量有影响等,为工件定位、安装和夹具设计提供依据。

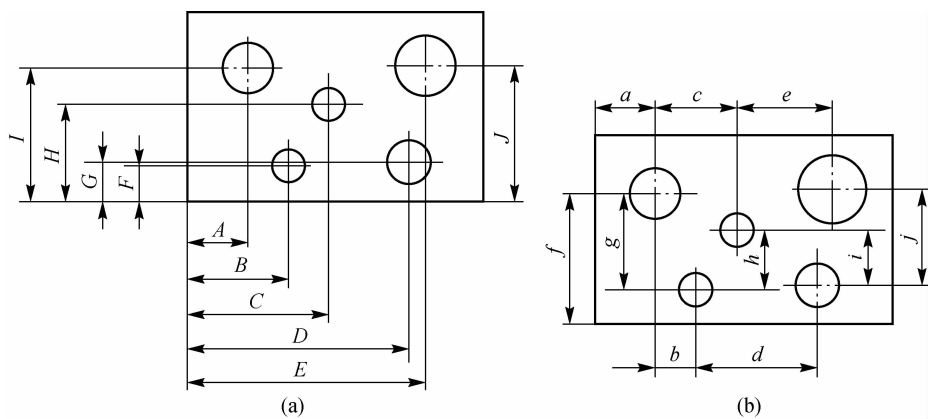


图 1-35 零件尺寸标注分析

③构成零件轮廓几何元素(点、线、面)的条件(如相切、相交、垂直和平行等)是数控编程的重要依据。手工编程时,要依据这些条件计算每个节点的坐标;自动编程时,则要根据这些条件对构成零件的所有几何元素进行定义。无论哪一个条件不明确,都会导致编程无法进行。因此,在分析零件图样时,务必要分析几何元素的给定条件是否充分,发现问题要及时与设计人员协商解决。

(2)零件的结构工艺性分析。

①零件的内腔与外形应尽量采用统一的几何类型和尺寸,这样可以减少刀具规格和换刀次数,方便编程,提高生产效益。

②内槽圆角的大小决定着刀具直径的大小,所以内槽圆角半径不应太小。对于图 1-36 所示的零件,其结构工艺性的好坏与被加工轮廓的高低、转角圆弧半径的大小等因素有关。图 1-36(b)与图 1-36(a)相比,转角圆弧半径 R 大,可以采用直径较大的立铣刀来加工;加工平面时,进给次数也相应减少,表面加工质量也会好一些,因而工艺性较好,反之工艺性较差。通常,当 $R < 0.2H$ (H 为被加工工件轮廓面的最大高度)时,可以判定零件该部位的工艺性不好。

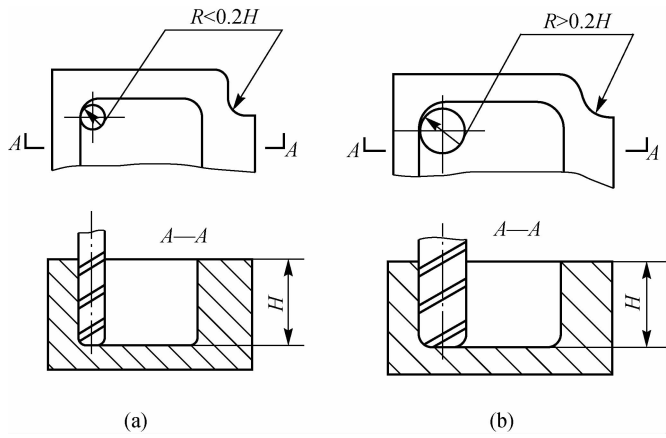


图 1-36 内槽结构工艺性

③零件铣槽底平面时,槽底圆角半径 r 不要过大。如图 1-37 所示,铣刀端面刃与铣削平面的最大接触直径 $d = D - 2r$ (D 为铣刀直径),当 D 一定时, r 越大,铣刀端面刃铣削平面

的面积越小,加工平面的能力就越差,效率越低,工艺性也越差。当 r 大到一定程度时,甚至必须用球头铣刀加工,这是应该尽量避免的。

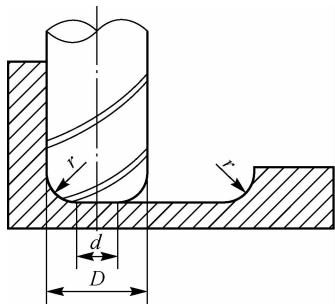


图 1-37 零件底面圆弧半径对工艺性的影响

④应尽可能在一次装夹中完成所有能加工表面的加工,为此要选择便于各个表面都能加工的定位方式;若需要二次装夹,应采用统一的定位基准。在数控加工中若没有统一的定位基准,会因工件重新安装而产生定位误差,从而使加工后的两个面上的轮廓位置及尺寸不协调。因此,为保证二次装夹加工后其相对位置的准确性,应采用统一的定位基准。

3. 数控加工的工艺路线设计

与常规工艺路线拟定步骤相似,数控加工工艺路线的设计,最初也需要找出零件所有的加工表面并逐一确定各表面的加工方法,其每步相当于一个工步,然后将所有工步内容按一定原则排列成先后顺序,再确定哪些相邻工步可以划为一个工序,即进行工序的划分,最后将所需的其他工序如常规工序、辅助工序、热处理工序等插入,衔接于数控加工工序序列之中,就得到了要求的工艺路线。

数控加工的工艺路线设计与普通机床加工的常规工艺路线拟定的区别主要在于:它仅是几道数控加工工艺过程的概括,而不是指从毛坯到成品的整个工艺过程,由于数控加工工序一般均穿插于零件加工的整个工艺过程之中,因此在工艺路线设计中一定要兼顾常规工序的安排,使之与整个工艺过程协调吻合。

(1)工序的划分。在数控机床上加工的零件一般按工序集中原则划分工序。其划分方法如下:

①按安装次数划分工序。以一次安装下完成的那一部分工艺过程为一道工序。该方法一般适用于加工内容不多的工件,加工完毕就能达到待检状态。如图 1-38 所示的凸轮零件,其两端面、 $R38$ 外圆及 $\phi 22H7$ 和 $\phi 4H7$ 两孔均在普通机床上加工,然后在数控铣床上以加工过的两个孔和一个端面定位安装,在一道工序内数控铣削凸轮剩余的外表面轮廓。

②按所用刀具划分工序。以同一把刀具所完成的那一部分工艺过程为一道工序。这种方法适用于工件的待加工表面较多,机床连续工作时间过长,加工程序的编制和检查难度较大等情况。在专用型数控机床和加工中心上常用这种方法。

③按粗、精加工划分工序。考虑工件的加工精度要求、刚度和变形等因素来划分工序时,可按粗、精加工分开的原则划分工序,即以粗加工中完成的那部分工艺过程为一道工序,精加工中完成的那部分工艺过程为另一道工序。一般来说,在一次安装中不允许将工件的某一表面粗、精不分地加工至精度要求后再加工工件的其他表面。

④按加工部位划分工序。以完成相同型面

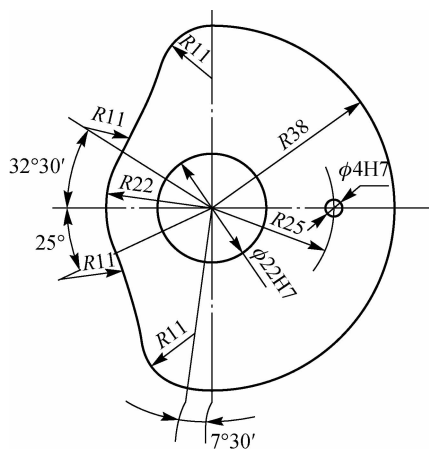


图 1-38 凸轮零件

的那一部分工艺过程为一道工序。有些零件加工表面多而复杂,构成零件轮廓的表面结构差异较大,可按其结构特点(如内型、外形、曲面或平面等)划分成多道工序。

综上所述,在划分工序时,一定要视零件的结构与工艺性、机床的功能、零件数控加工内容的多少、安装次数、生产组织等实际情况灵活掌握。

(2)加工顺序的安排。加工顺序安排得合理与否,将直接影响零件的加工质量、生产率和加工成本。应根据零件的结构和毛坯状况,结合定位及夹紧的需要综合考虑,重点应保证工件的刚度不被破坏,尽量减少变形。加工顺序的安排除遵循“1.3.4 加工顺序的安排”中所讲述的原则外,还应遵循下列原则:

①尽量使工件的装夹次数、工作台转动次数、刀具更换次数及所有空行程时间减至最少,提高加工精度和生产率。

②先内后外原则,即先进行内型、内腔加工,后进行外形加工。

③为了及时发现毛坯的内在缺陷,精度要求较高的主要表面的粗加工一般应安排在次要表面粗加工之前;大表面加工时,因内应力和热变形对工件影响较大,故一般也需先加工。

④在同一次安装中进行的多个工步,应先安排对工件刚性破坏较小的工步。

⑤为了提高机床的使用效率,在保证加工质量的前提下,可将粗加工和半精加工合为一道工序。

⑥加工中容易损伤的表面(如螺纹等)应放在加工路线的后面。

下面通过一个实例来说明这些原则的应用。如图 1-39 所示零件,可以先在普通机床上把底面和四个轮廓面加工好,即遵循基准先行原则;其余的顶面、孔及沟槽安排在立式加工中心上完成,即遵循工序集中原则;加工中心加工工序按“先粗后精”“先主后次”“先面后孔”等原则可以划分为如下 15 个工步:

- 5 粗铣顶面,留加工余量。
- 10 $\phi 32$ 、 $\phi 12$ 等孔的中心孔(预钻凹坑)。
- 15 $\phi 32$ 、 $\phi 12$ 孔至 $\phi 11.5$ 。
- 20 $\phi 32$ 孔至 $\phi 30$ 。
- 25 钻 $3 \times \phi 6$ 的孔至尺寸。
- 30 粗铣 $\phi 60$ 沉孔及沟槽,留加工余量。
- 35 钻 $4 \times M8$ 底孔至 $\phi 6.8$ 。
- 40 镗 $\phi 32$ 孔至 $\phi 31.7$ 。
- 45 精铣顶面至尺寸。
- 50 铰 $\phi 12$ 孔至尺寸。
- 55 精镗 $\phi 32$ 孔至尺寸。
- 60 精铣 $\phi 60$ 沉孔及沟槽至尺寸。
- 65 $\phi 12$ 孔口倒角。
- 70 $3 \times \phi 6$ 、 $4 \times M8$ 孔口倒角。
- 75 攻 $4 \times M8$ 螺纹完成。

完成以上工步后进行终检。

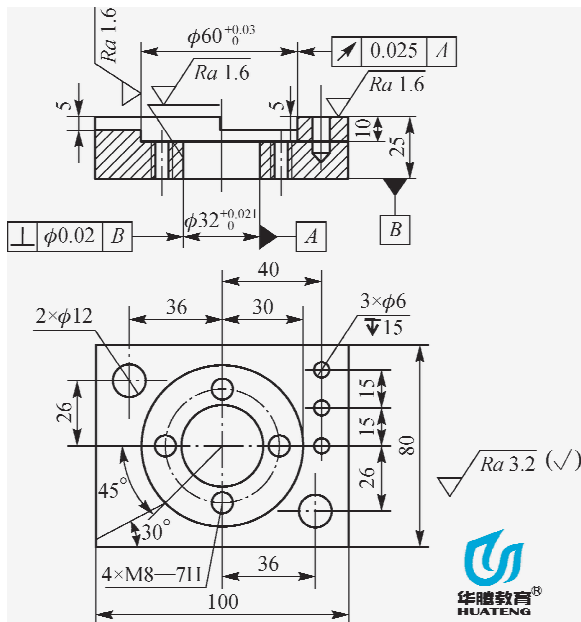


图 1-39 零件简图

(3)数控加工工序与普通工序的衔接。这里所说的普通工序是指常规的加工工序、热处理工序和检验等辅助工序。在数控工序前、后一般都穿插其他普通工序,衔接不好就容易产生矛盾。较好的解决办法是建立工序间的相互状态联系,在工艺文件中做到互审会签。如是否预留加工余量及留多少、定位基准的要求、零件的热处理等,这些问题都需要前后衔接,统筹兼顾。

4. 数控加工工序的设计

数控加工工序设计的主要任务是为每道工序选择机床、夹具、刀具及量具,确定定位夹紧方案、走刀路线、工步顺序、加工余量、工序尺寸及其公差、切削用量和时间定额等,为编制加工程序做好充分准备。

(1)走刀路线和工步顺序的确定。走刀路线是刀具在整个加工工序中相对于工件的运动轨迹,不但包括工步的内容,而且反映出工步的顺序。走刀路线是编写程序的依据之一。在确定走刀路线时,主要遵循以下几个原则:

①保证零件的加工精度和表面粗糙度。例如,在铣床上进行加工时,因刀具的运动轨迹和方向不同,可能会形成顺铣或逆铣,其不同的加工路线所得到的零件表面的质量就不同。究竟采用哪种铣削方式,应视零件的加工要求、工件材料的特点及机床刀具等具体条件综合考虑,确定原则与普通机械加工相同。数控机床一般采用滚珠丝杠传动,其运动间隙很小,并且顺铣优点多于逆铣,所以应尽可能采用顺铣。在精铣内、外轮廓时,为了改善表面粗糙度,应采用顺铣的走刀路线加工方案。

对于铝镁合金、钛合金和耐热合金等材料,建议也采用顺铣加工,这对于降低表面粗糙度值和提高刀具耐用度都有利。但如果零件毛坯为黑色金属锻件或铸件,表皮有硬皮而且余量较大,这时采用逆铣较为有利。

当加工位置精度要求较高的孔系时,应特别注意安排孔的加工顺序。如果安排不当,就可能将坐标轴的反向间隙带入,直接影响位置精度。镗削如图 1-40(a)所示零件上六个尺寸相同的孔,有两种走刀路线。按图 1-40(b)所示路线加工时,由于 5、6 孔定位方向与 1、2、3、4 孔定位方向相反,X 向反向滚珠丝杠间隙会使定位误差增加,从而影响 5、6 孔与其他孔的位置精度。按图 1-40(c)所示路线加工时,加工完 4 孔往上多移动一段距离至 P 点,然后折回来在 5、6 孔处进行定位加工,从而使各孔的加工进给方向一致,避免反向间隙的引入,提高了 5、6 孔与其他孔的位置精度。

刀具的进退刀路线要尽量避免在轮廓处停刀或垂直切入、切出工件,以免留下刀痕。

②使走刀路线最短,减少刀具空行程时间,提高加工效率。图 1-41 所示为正确选择钻孔加工路线的例子。按照一般习惯,总是先加工均布于同一圆周上的一圈孔后,再加工另一圈孔,如图 1-41(a)所示,但这不是最好的走刀路线。对点位控制的数控机床而言,要求定位精度高,定位过程尽可能快。若按图 1-41(b)所示的进给路线加工,可使各孔间距的总和最小,空程最短,从而节省定位时间。

③最终轮廓一次走刀完成。图 1-42(a)所示为采用行切法加工内轮廓。加工时不留死角,在减少每次进给重叠量的情况下,走刀路线较短,但两次走刀的起点和终点间留有残余高度,影响表面粗糙度。图 1-42(b)是采用环切法加工,表面粗糙度较小,但刀位计算略为复杂,走刀路线也较行切法长。采用图 1-42(c)所示的走刀路线,先用行切法加工,最后沿轮廓切削一周,使轮廓表面光整。在三种方案中,图 1-42(a)方案最差,图 1-42(c)方案最佳。

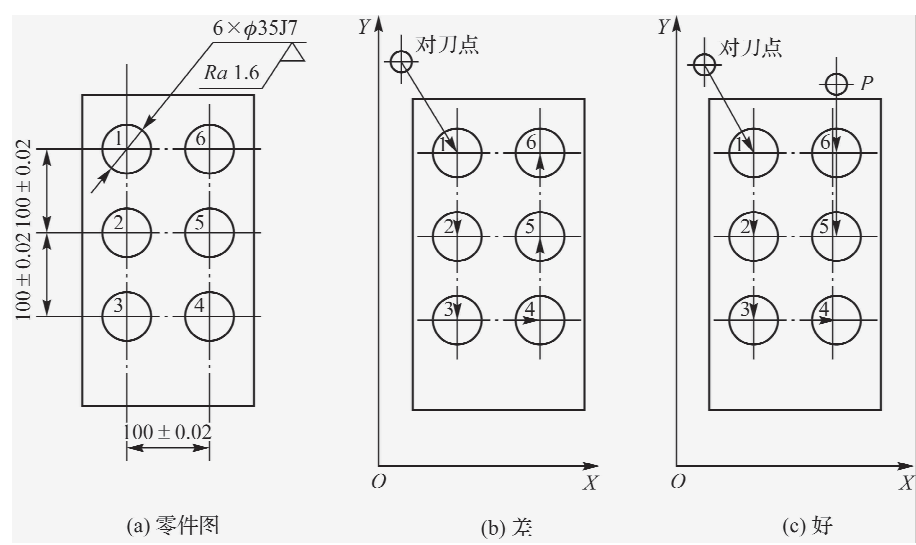


图 1-40 镗削孔系走刀路线比较

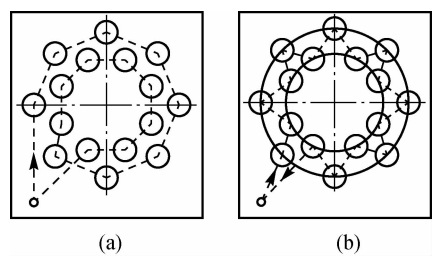


图 1-41 最短加工路线选择

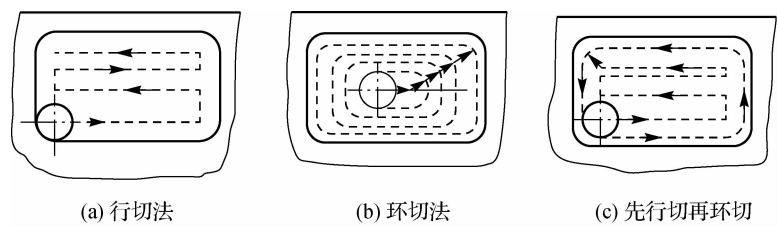


图 1-42 封闭内轮廓加工走刀路线

(2) 工件的定位与夹紧方案的确定。工件的定位基准与夹紧方案的确定,应遵循前面所述有关定位基准的选择原则与后面章节中工件夹紧的基本要求。此外,还应该注意下列三点:

①力求设计基准、工艺基准与编程原点统一,以减少基准不重合误差和数控编程中的计算工作量。

②设法减少装夹次数,尽可能做到在一次定位装夹中能加工出工件上全部或大部分待加工表面,以减少装夹误差,提高加工表面之间的相互位置精度,充分发挥数控机床的效率。

③避免采用占机人工调整方案,以免占机时间太多,影响加工效率。

(3) 夹具的选择。数控加工的特点对夹具提出了两个基本要求:一是保证夹具的坐标方向与机床的坐标方向相对固定,二是要能协调零件与机床坐标系的尺寸。除此之外,重点考

考虑以下几点:

①单件小批量生产时,优先选用组合夹具、可调夹具和其他通用夹具,以缩短生产准备时间和节省生产费用。

②在成批生产时,才考虑采用专用夹具,并力求结构简单。

③零件的装卸要快速、方便、可靠,以缩短机床的停顿时间,减少辅助时间。

④为满足数控加工精度,要求夹具定位、夹紧精度高。

⑤夹具上各零部件应不妨碍机床对零件各表面的加工,即夹具要敞开,其定位、夹紧元件不能影响加工中的走刀(如产生碰撞等)。

⑥为提高数控加工的效率,批量较大的零件加工可采用气动或液压夹具、多工位夹具。

(4)刀具的选择。刀具的选择是数控加工工艺中重要的内容之一,不仅影响机床的加工效率,而且直接影响加工质量。与传统加工方法相比,数控加工对刀具的要求,尤其在刚性和耐用度方面更为严格。应根据机床的加工能力、工件材料的性能、加工工序、切削用量,以及其他相关因素正确选用刀具及刀柄。刀具选择总的原则是:既要求精度高、强度大、刚性好、耐用度高,又要求尺寸稳定,安装调整方便。在满足加工要求的前提下,尽量选择较短的刀柄,以提高刀具的刚性。

当前数控机床所使用的金属切削用刀具材料主要有五类:高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼(CBN)、聚晶金刚石。

①根据数控加工对刀具的要求,选择刀具材料的一般原则是尽可能选用硬质合金刀具。只要加工情况允许选用硬质合金刀具,就不用高速钢刀具。

②陶瓷刀具不仅可用于加工各种铸铁和不同钢料,还适用于加工有色金属和非金属材料。陶瓷刀片质地硬而脆,无论何种工况都要用负前角。为减少崩刃现象的发生,必要时可将刃口倒钝。陶瓷刀具在下列情况下使用效果欠佳:短零件的加工,冲击大的断续切削和重切削,铍、镁、铝和钛等的单质材料及其合金的加工(易产生亲和力,导致切削刃剥落或崩刃)。

③金刚石和立方氮化硼都属于超硬刀具材料,它们可用于加工任何硬度工件材料的精加工,具有很高的切削性能,加工精度高,表面粗糙度值小。一般可用切削液。

聚晶金刚石刀片一般仅用于加工有色金属和非金属材料。

立方氮化硼刀片一般适用于加工硬度大于 450HBS 的冷硬铸铁、合金结构钢、工具钢、高速钢、轴承钢,以及硬度大于或等于 350HBS 的镍基合金、钴基合金和高钴粉末冶金零件。

④从刀具的结构应用方面,数控加工应尽可能采用镶块式机夹可转位刀片,以减少刀具磨损后的更换和预调时间。

⑤选用涂层刀具以提高耐磨性和刀具耐用度。

(5)切削用量的确定。切削用量包括主轴转速(切削速度)、背吃刀量和进给量(进给速度)。主轴转速要根据机床和刀具允许的切削速度来确定;背吃刀量主要受机床刚度的制约,在机床刚度允许的情况下尽可能加大背吃刀量;进给量要根据零件的加工精度、表面粗糙度、刀具和工件材料来选择。切削用量的合理选择将直接影响加工精度、表面质量、生产率和经济性,其确定原则与普通加工相似。具体数据应根据机床使用说明书、切削用量手册,并结合实际经验加以修正确定。

切削用量的确定除了遵循“1.4.4 切削用量的确定”的有关规定外,还应考虑如下因素:

①刀具差异。国内外不同厂家生产的刀具质量差异较大,因此切削用量须根据实际所用刀具和现场经验加以修正。

②机床特性。切削用量受机床电机功率和机床刚性的限制,必须在机床说明书规定的范围内选取。避免因功率不够而发生闷车、刚性不足,从而产生大的机床变形或振动,影响加工精度和表面粗糙度。

③数控机床的生产率。数控机床的工时费用较高,刀具损耗费用所占比重较低,应尽量用高的切削用量,通过适当降低刀具耐用度来提高数控机床的生产率。

5. 数控加工工艺守则

数控加工除遵守普通加工通用工艺守则的有关规定外,还应遵守数控加工工艺守则(见表 1-12)。

表 1-12 数控加工工艺守则

项 目	要求内容
加工前的准备	(1)操作者必须根据机床使用说明书,熟悉机床的性能、加工范围和加工精度,并要熟练地掌握数控机床及其数控装置或计算机各部分的作用及操作方法。 (2)检查各开关、旋钮和手柄是否在正确位置。 (3)启动控制电气部分,按规定进行预热。 (4)开动机床,使其空运转,并检查各开关、按钮、旋钮和手柄的灵敏性及润滑系统是否正常等。 (5)熟悉被加工件的加工程序和编程原点
刀具与工件的装夹	(1)安放刀具时应注意刀具的使用顺序,刀具的安放位置必须与程序要求的顺序和位置一致。 (2)工件的装夹除应牢固可靠外,还应注意避免在工作中刀具与工件或刀具与夹具发生干涉
加工	(1)首件进行加工前,必须经过程序检查(试走程序)、轨迹检查、单程序段试切及工件尺寸检查等步骤。 (2)在加工时,必须正确输入程序,不得擅自更改程序。 (3)在加工过程中操作者应随时监视显示装置,发现报警信号时应及时停车并排除故障。 (4)零件加工后,应将程序纸带、磁带、磁盘或机内程序收藏后妥善保管或保存,以备再用

思考与练习

- 1-1 什么是机械加工工艺过程? 什么是机械加工工艺规程? 工艺规程在生产中起何作用?
- 1-2 什么是工序、安装、工位、工步和走刀?
- 1-3 简述机械加工工艺过程的设计原则、步骤和内容。
- 1-4 试分析图 1-43 所示阶梯轴零件,其上有成 90°分布的键槽和轴端螺纹。问这些结构有无工艺性问题;如有,请提出正确的改进意见。

1-5 图 1-44 所示为车床主轴箱的一个视图,图中 I 孔为主轴孔,是重要孔,加工时希望余量均匀。试选择加工主轴孔的粗、精基准。

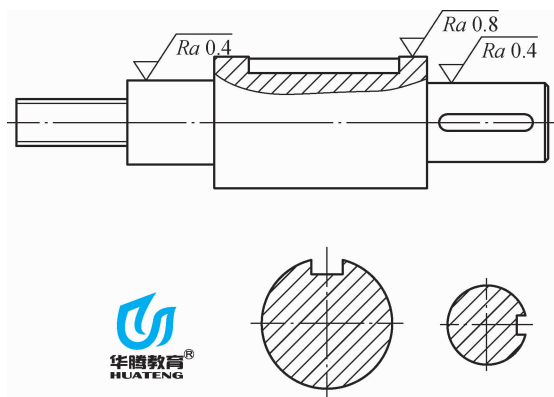


图 1-43 题 1-4 图

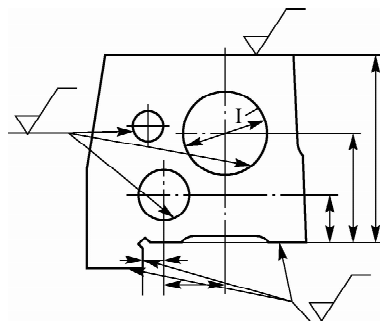


图 1-44 题 1-5 图

1-6 试分析、选择图 1-45 所示各零件的粗、精基准[其中,图 1-45(a)为齿轮零件简图,毛坯为模锻件;图 1-45(b)为液压缸体零件简图,毛坯为铸件;图 1-45(c)为飞轮简图,毛坯为铸件]。

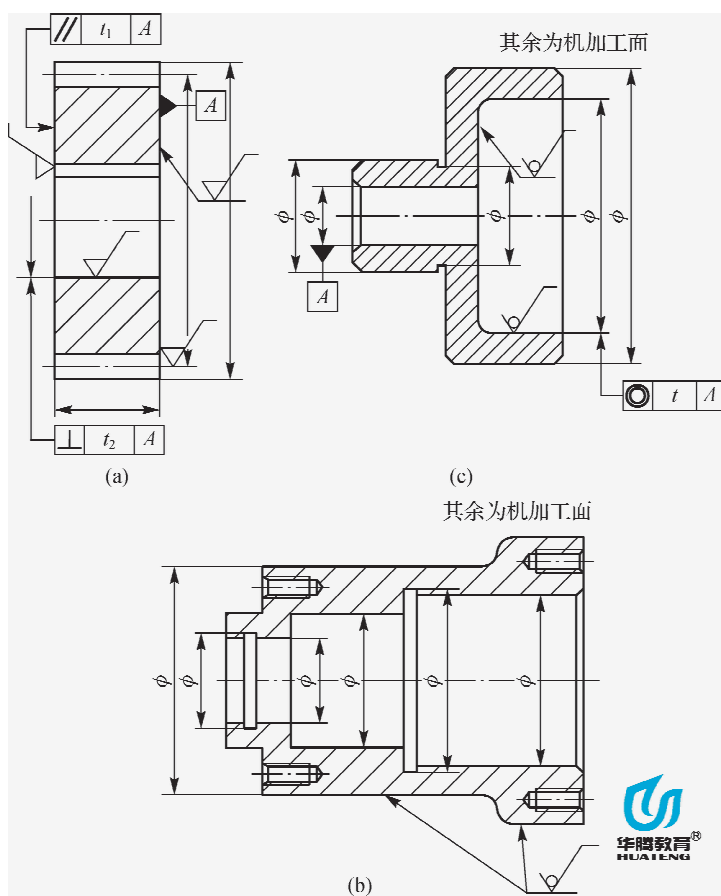


图 1-45 题 1-6 图

1-7 什么是经济加工精度？选择加工方法时应考虑的主要问题有哪些？

1-8 什么是毛坯余量？什么是工序余量？影响工序余量的因素有哪些？确定工序余量的方法有哪些？

1-9 图 1-46 所示箱体零件的两种工艺安排如下：

(1)在加工中心上加工：粗、精铣底面，粗、精铣顶面，粗镗、半精镗、精镗 $\phi 80H7$ 孔和 $\phi 60H7$ 孔，粗、精铣两端面。

(2)在流水线上加工：粗刨、半精刨底面，留精刨余量；粗、精铣两端面；粗镗、半精镗 $\phi 80H7$ 孔和 $\phi 60H7$ 孔，留精镗余量；粗刨、半精刨、精刨顶面；精镗 $\phi 80H7$ 孔和 $\phi 60H7$ 孔；精刨底面。

试分别分析上述两种工艺有无问题；若有问题，则提出改进意见。

1-10 图 1-47 所示小轴系大量生产，毛坯为热轧棒料，经过粗车、精车、淬火、粗磨、精磨后达到图样要求。现给出各工序的加工余量及工序尺寸公差（见表 1-13）。毛坯的尺寸公差为 $\pm 1.5\text{ mm}$ 。试计算工序尺寸，标注工序尺寸公差，计算精磨工序的最大余量和最小余量。

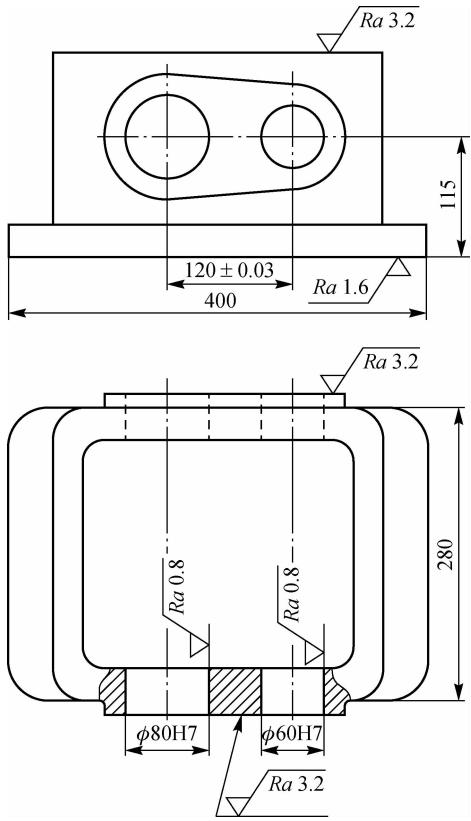


图 1-46 题 1-9 图

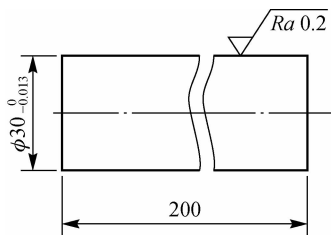


图 1-47 题 1-10 图

表 1-13 加工余量及工序尺寸公差

工序名称	工序余量/mm	工序尺寸公差/mm
粗车	3	0.21
精车	1.1	0.052
粗磨	0.4	0.033
精磨	0.1	0.013

1-11 在图 1-48 所示的工件中, $L_1 = 70_{-0.050}^{-0.025}$ mm, $L_2 = 60_{-0.025}^0$ mm, $L_3 = 20_{+0}^{+0.15}$ mm, L_3 不便直接测量, 试重新给出测量尺寸, 并标注该测量尺寸的公差。

1-12 图 1-49 所示为某零件的一个视图, 图中槽深为 $5_{+0}^{+0.3}$ mm, 该尺寸不便直接测量, 为检验槽深是否合格, 可直接测量哪些尺寸? 试标出它们的尺寸及公差。

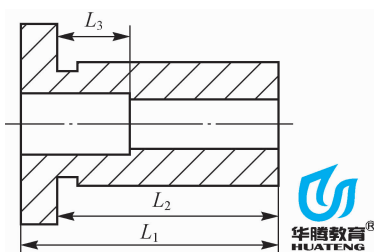


图 1-48 题 1-11 图

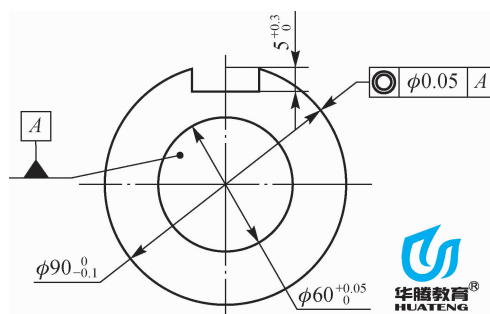


图 1-49 题 1-12 图

1-13 图 1-50 所示小轴的部分工艺过程为: 车外圆至 $\phi 30.5_{-0.1}^{-0.0}$ mm, 铣键槽深度为 H_{-TH}^0 , 热处理, 磨外圆至 $\phi 30_{+0.015}^{+0.036}$ mm。设磨后外圆与车后外圆的同轴度公差为 $\phi 0.05$ mm, 求保证键槽深度为 $26_{-0.2}^0$ 的铣槽深度 H_{-TH}^0 。

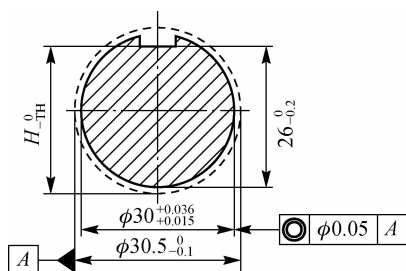


图 1-50 题 1-13 图

1-14 一批小轴的部分工艺过程为: 车外圆至 $\phi 20.6_{-0.04}^0$ mm, 渗碳淬火, 磨外圆至 $\phi 20_{-0.02}^0$ mm。试计算保证淬火层深度为 0.7~1.0 mm 的渗碳工序渗入深度 t 。

1-15 什么是劳动生产率? 提高机械加工劳动生产率的工艺措施有哪些?

1-16 什么是时间定额? 什么是单件时间? 如何计算单件时间?

1-17 什么是生产成本与工艺成本? 两者有何

区别?

1-18 简述数控加工的主要特点。

1-19 简述在数控工序设计中有哪些必须考虑的主要问题。

1-20 目前 CAPP 技术分为哪四大系统技术?

第 2 章

机械加工质量控制

2.1 机械加工质量控制基本概念

机械产品是由许多互相关联零件经加工后按一定顺序装配而成的,机械产品的质量因此取决于零件的加工和装配质量。零件的加工质量是保证产品使用性能的基础。为了满足和保证这些机械产品的性能要求与使用寿命,就必须对零件的加工质量提出合适的要求,并给予控制。零件的加工质量包括零件的加工精度和表面质量两大部分。

2.1.1 机械加工质量

机器零件在加工过程中,受到机械加工各方面的影响,加工后实际表面几何形状与理想几何形状总是存在一定的误差。这种误差分为宏观几何误差和微观几何误差。宏观几何误差通称为机械加工误差,它包括尺寸误差、几何形状误差和相互位置误差,表达的是机械加工精度的高低。微观几何误差又称表面粗糙度。介于宏观几何误差与微观几何误差之间的周期性几何形状误差,常用波度表示。波度主要是由加工系统振动所引起的。

同时,受到刀具切削部分的挤压和摩擦,在距零件表面一定深度处产生与基体物理力学性能相比具有某些变化的加工表面变质层,这些变化包括表面层加工硬化、表面层金相组织变化和表面层残余应力。

尺寸精度、形状精度和位置精度称为加工精度。

加工硬化、金相组织变化和残余应力及表面粗糙度称为表面质量。

2.1.2 机械加工精度

1. 机械加工精度与加工误差

机械加工精度是指零件经机械加工后的实际几何参数(尺寸、形状、表面相互位置)与零件的理想几何参数相符合的程度。符合的程度越高,加工精度也越高。加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度。

实际加工的零件不可能做得与理想零件完全一致,经加工后零件的实际几何参数与理想零件的几何参数的偏离程度称为加工误差。加工精度和加工误差是从两个不同方面来评定零件几何参数的,在实际生产中,加工精度的高低是用加工误差的大小来评价和表达的。

2. 机械加工精度间的关系

在一般情况下,尺寸精度、几何形状精度和位置精度间存在着一定的关系。通常确定轴的直径尺寸时,就必须考虑到圆柱表面的圆度和圆柱度;确定两平面间距离时,就必须考虑

到平面的平面度和两平面间的平行度。只有在个别情况下,零件的尺寸精度与几何形状精度之间没有联系。一般来说,几何形状精度、相互位置精度与尺寸精度应该相互适应。尺寸精度要求高,其几何形状精度和相互位置精度要求也高,其次形状精度应高于尺寸精度,而位置精度在多数情况下也应高于尺寸精度。

保证和提高加工精度,实际上也就是限制和降低加工误差。从保证产品的使用性能要求和降低生产成本考虑,没有必要将每个零件都加工得绝对精确,而只要满足规定的公差要求即可。

研究加工精度的目的,就是研究如何把各种误差控制在允许范围内,即在规定的公差范围之内,掌握各种因素对加工精度的影响规律,从而寻找降低加工误差、提高加工精度的工艺措施。

2.1.3 机械加工精度的获得方法

1. 尺寸精度的获得方法

尺寸精度是对零件加工精度的基本要求,设计人员根据零件在机器中的作用与要求提出了零件应达到的尺寸精度要求,包括直径公差、长度公差和角度公差等。为了使零件达到规定的尺寸精度,工艺人员必须采取各种工艺手段予以实现。

获得零件尺寸精度的方法有以下几种:

(1)试切法。试切法是将刀具与工件的相对位置做初步调整并试切一次,测量试切所得尺寸,然后根据测得的试切尺寸与所要求达到尺寸之间的差值调整刀具与工件的相对位置,再试切,重复上述过程,直到试切尺寸符合设计要求。试切法车削轴如图 2-1 所示。

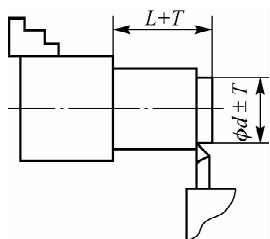


图 2-1 试切法车削轴

试切法确定刀具与工件的相对位置需经多次调整、试切、测量和计算,因此生产效率低。试切法可以达到很高的精度,这与操作工人的技术水平有关。试切法适用于单件、小批生产或高精度零件的加工。

(2)定尺寸刀具法。这种方法以相应尺寸的刀具或组合刀具来保证加工表面的尺寸。如图 2-2(a)所示用镗刀块加工孔径 D , 图 2-2(b)所示用拉刀加工方孔 $b \times b$ 。

用定尺寸刀具法加工,生产率高,加工尺寸的精度也较稳定,几乎与操作者技术水平无关,只与刀具相关尺寸有关。定尺寸刀具法常用来加工孔、槽、成型表面,适用于成批生产或大批大量生产,但刀具设计、制造较复杂。

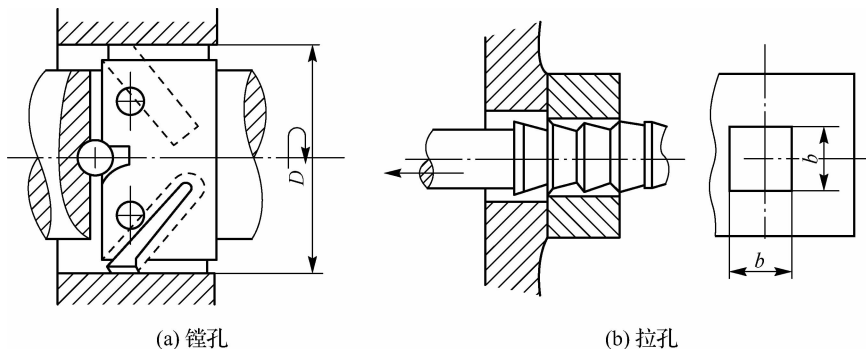


图 2-2 定尺寸刀具加工

(3)调整法。调整法是按零件规定的尺寸预先调整好刀具与工件相对机床的位置,然后进行加工,并在一批零件加工过程中始终保持这个位置不变。工件的加工精度取决于刀具、工件和机床间的调整精度,而刀具和工件调整位置是由正式加工前通过试切法来确定的。这种加工方法效率高,工件加工精度一致性较好,广泛使用于成批生产和大量生产。

(4)自动控制法。自动控制法是用尺寸测量装置、进给装置和控制系统组成一个自动加工控制系统,使加工过程中的测量、补偿调整和切削加工自动完成,以保证加工尺寸精度的方法,如具有主动测量功能的自动机床、数控机床和加工中心等。从本质上说,自动控制法是自动化了的试切法。

2. 形状精度的获得方法

机械零件在加工过程中会产生大小不同的形状误差,它们会影响机器的工作精度、连接强度、运动平稳性、密封性、耐磨性和使用寿命等,甚至对机器产生的噪声大小也有影响。因此,为了保证零件的质量和互换性,设计时应按形状公差提出要求,以限定形状误差,加工时需采取必要的工艺方法给予保证。几何形状精度包括圆度、圆柱度、平面度、直线度等。获得零件几何形状精度的方法有成型运动法和非成型运动法两种。

(1)成型运动法。这种方法使刀具相对于工件做有规律的切削成型运动,从而获得所要求的零件表面形状,常用于加工圆柱面、圆锥面、平面、球面、曲面、回转曲面、螺旋面、齿形面等。成型运动法主要包括轨迹法、仿形法、成型刀具法和展成法。

①轨迹法。轨迹法是依靠刀尖与工件的相对运动轨迹来获得所要求的加工表面几何形状。图 2-3 所示为利用工件做回转运动和刀具做斜直线运动获得内圆锥面。

②仿形法。仿形法是刀具按照仿形装置的形状进行进给,完成对工件加工的一种方法。如图 2-4 所示,在仿形车床上利用靠模和仿形刀架加工阶梯轴,其形状精度主要取决于靠模精度。

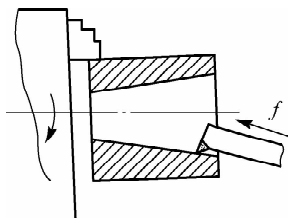


图 2-3 车锥孔

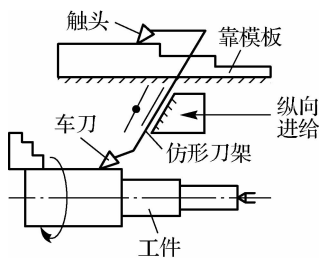


图 2-4 仿形车削

③成型刀具法。成型刀具法是用成型刀具来替代通用刀具对工件进行加工的一种方法。刀具切削刃的形状和加工表面所需获得的几何形状相一致,加工时刀具只需完成单一进给运动即可达到工件的形状要求,很显然,其加工精度取决于成型刀具刀刃轮廓的形状精度,如图 2-5 所示。

④展成法。展成法是利用工件和刀具做展成切削运动进行加工的一种方法。螺纹加工、滚、插齿加工多采用此法。如图 2-6 所示,其加工精度主要取决于展成切削运动的传动链精度和刀具的制造精度。

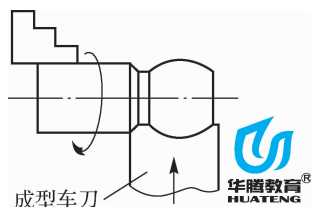


图 2-5 成型车削

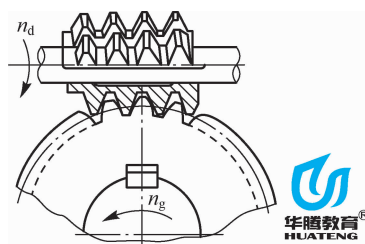


图 2-6 展成法滚齿

(2)非成型运动法。通过对加工表面形状的检测,由工人对其进行相应的修整加工,以获得所要求的形状精度。尽管非成型运动法是获得零件表面形状精度的最原始方法,效率相对比较低,但当零件形状精度要求很高(超过现有机床设备所能提供的成型运动精度)时,常采用此方法。例如,0 级平板的加工就是通过三块平板配刮、配研方法来保证其平面度要求的。

3. 位置精度的获得方法

零件的相互位置精度主要由机床精度、夹具精度和工件安装精度及机床运动与工件装夹后的位置精度予以保证。位置精度获得方法有以下几种:

(1)一次装夹法。零件表面的位置精度在一次安装中由刀具相对于工件的成型运动位置关系保证。例如,车削阶梯轴的外圆与端面,则阶梯轴同轴度是由车床主轴回转精度来保证的,而端面相对于外圆表面的垂直度要靠车床横向溜板(刀尖)运动轨迹与车床主轴回转中心线垂直度来保证。

(2)多次装夹法。通过刀具相对于工件的成型运动与工件定位基准面之间的位置关系来保证零件表面的位置精度。例如,在车床上使用双顶尖两次装夹轴类零件,以完成不同表面的加工。不同安装下加工外圆表面之间的同轴度,是通过相同顶尖孔轴心线,即使用同一定位基准来实现的。

(3)非成型运动法。利用工人,而不是依靠机床精度,对工件的相关表面进行反复的检测和加工,使之达到零件的位置精度要求,如研磨加工直角面。

2.2 加工误差产生的原因

2.2.1 机械加工工艺系统原始误差

机械加工时,机床、夹具、刀具和工件构成了一个完整的加工系统,称为工艺系统。零件的尺寸、几何形状和表面间相对位置的形成,取决于工件和刀具在切削运动过程中相互位置的关系,而工件和刀具又安装在夹具与机床上,并受到夹具和机床的约束。工艺系统中的种种误差,在不同的具体条件下,以不同的程度和方式反映为加工误差。加工精度问题也就牵涉到整个工艺系统的精度问题。工艺系统的误差是“因”,是根源;加工误差是“果”,是表现。因此,把工艺系统的误差称为原始误差。

1. 原始误差分类

工艺系统的原始误差可分为两大类:一类是在零件未加工前工艺系统本身所具有的某些误差因素,称为工艺系统原始误差,也称为工艺系统静误差;另一类是在加工过程中受力、

热、磨损等原因的影响,工艺系统原有精度受到破坏而产生的附加误差因素,称为工艺过程原始误差,也称为工艺系统动误差。原始误差的分类如图 2-7 所示。

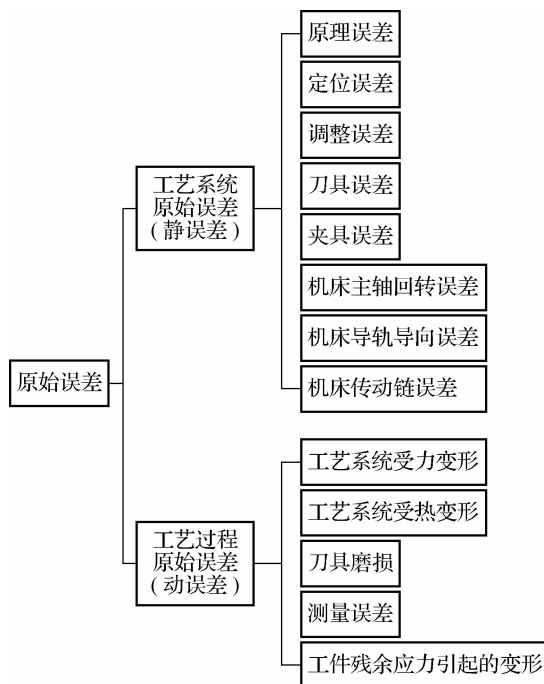


图 2-7 原始误差的分类

2. 误差敏感方向

在切削加工过程中,各类原始误差的影响会使刀具和工件间正确的几何关系遭到破坏,引起加工误差。不同方向的原始误差对加工误差的影响程度有所不同,差别很大。当原始误差方向与工序尺寸方向一致时,原始误差对加工精度的影响最大。

下面以外圆车削为例进行说明。如图 2-8 所示,车削时工件的回转轴心是 O ,刀尖正确位置在 A ,设某一瞬时刀尖相对于工件回转轴心 O 的位置发生变化,移到 A' 。 AA' 即为原始误差 ΔY ,由此引起工件加工后的半径由 R_0 变为 $R=OA'$ 。在三角形 OAA' 中,有如下关系式:

$$\Delta Y^2 = R^2 - R_0^2 = (R_0 + \Delta R)^2 - R_0^2 = 2R_0 \Delta R + \Delta R^2 \quad (2-1)$$

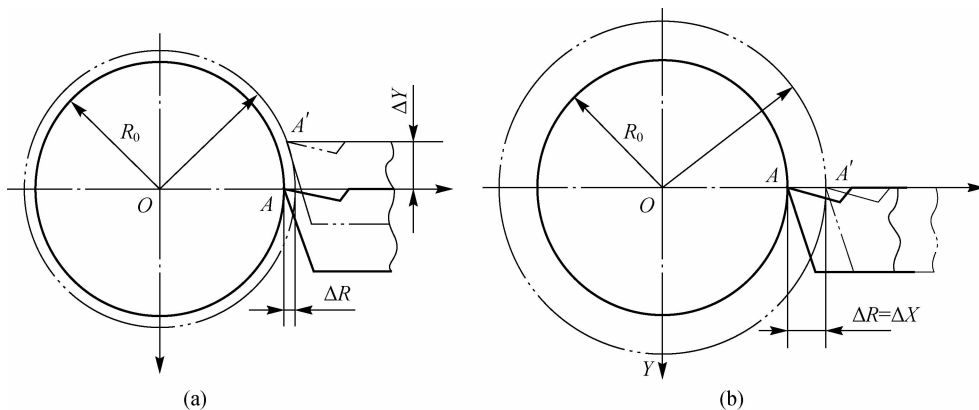


图 2-8 误差敏感方向

由于 ΔR 很小, ΔR^2 可以忽略不计。因此,刀尖在 Y 方向上的位移引起的半径上(工序尺寸方向上)的加工误差 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{\Delta Y^2}{2R_0} \quad (2-2)$$

设 $2R_0 = 40 \text{ mm}$, $\Delta Y = 0.1 \text{ mm}$, 得到 $\Delta R = 0.00025 \text{ mm}$ 。

可见, ΔY 对 ΔR 的影响很小。

如果刀具在 X 方向上存在对刀误差 ΔX , 这时引起的半径上(工序尺寸方向上)的加工误差为

$$\Delta R = \Delta X \quad (2-3)$$

同样可设 $2R_0 = 40 \text{ mm}$, $\Delta X = 0.1 \text{ mm}$, 得到 $\Delta R = 0.1 \text{ mm}$ 。

可见, ΔX 对 ΔR 的影响很大。

由上看出,在不同方向产生的原始误差值 ΔX 和 ΔY 大小假设相同,但直径上误差值 $2\Delta R$ 相差非常大。由此可知,当工艺系统原始误差引起刀尖和工件在加工表面的法线方向产生相对位移时,该误差对加工精度有直接的影响,并引起的加工误差为最大;而在加工表面切线方向产生的相对位移的影响最小,可以忽略不计。为了便于分析原始误差对加工精度的影响,把影响加工精度最大的方向(通过刀刃切削点的加工表面法向方向)称为误差敏感方向。

2.2.2 原始误差对加工精度的影响

零件在加工过程中可能出现各种原始误差,它们会引起工艺系统各环节相互位置关系的变化而造成加工误差。

1. 原理误差

原理误差是由于在加工中采用了近似加工运动或近似的刀具轮廓而产生的误差。在实际加工生产中,如用阿基米德蜗杆滚刀或法向直廓蜗杆滚刀代替渐开线基本蜗杆滚刀切削渐开线齿轮,在数控机床上用直线插补或圆弧插补方法加工复杂曲面(图 2-9),都会有加工原理误差造成零件的加工表面形状误差。

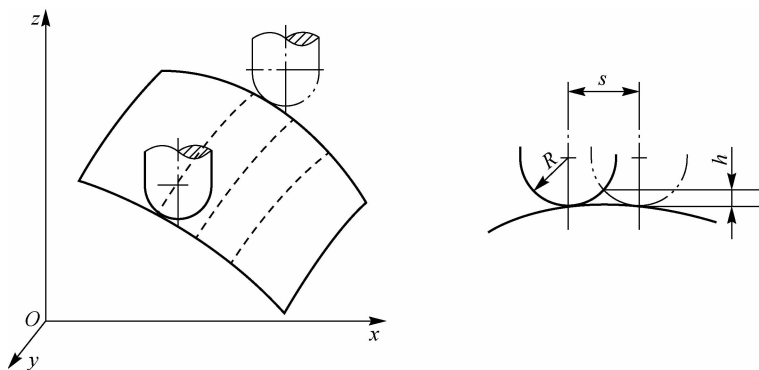


图 2-9 空间复杂曲面的数控加工

如图 2-10 所示,当用齿轮模数盘铣刀以成型法加工齿轮时,理论上要求刀具轮廓与工件的齿槽形状完全相同,即一种模数下的每种齿数的齿轮都应有相应的铣刀,但这样就必须备用大量不同规格的铣刀,这是很不经济的,同时管理也很不方便。实际生产中是将每种模

数的齿轮按齿数分组,在组内使用同一把铣刀加工所有齿数的齿轮,这样对组内其他齿数的齿轮来说加工后便会出现其齿形误差。

原理误差不能通过提高机床和刀具的制造精度来消除。

在实际生产中,采用理论上完全准确的方法进行加工往往会使机床的结构复杂,刀具的制造困难,加工的效率降低。而采用近似加工方法或近似刀具轮廓,则常常可使工艺装备简单化,生产成本降低,故在满足产品精度要求的前提下,原理误差的存在是允许的,是一种合理、行之有效的加工方法。

2. 机床误差

机床误差对加工精度有着较为显著的影响,它是决定工艺系统误差的主要因素。机床误差主要来自机床本身的制造、安装和磨损这三个方面,其中尤以机床本身制造误差影响最大。衡量一台机床的制造精度高低的主要项目是主轴回转误差、导轨导向误差及传动链误差。为此,着重对这三项误差进行分析讨论。

(1) 主轴回转误差。机床主轴是决定工件或刀具的位置和运动的基准,它的误差直接影响着工件的加工精度和表面粗糙度。对于主轴的精度要求,最主要的就是在回转时能保持轴心线的位置稳定不变,即主轴回转精度。

但实际加工中,主轴制造误差、受力、受热及磨损等问题的存在,使主轴回转轴心线的空间位置在每个瞬间都是变动着的,即存在回转误差。主轴回转误差是指主轴实际回转轴线对其理想回转轴线的漂移。

为便于研究,可以将主轴回转误差分解为径向跳动、轴向窜动和角度摆动三种基本形式,如图 2-11 所示。图 2-11(a)所示为径向跳动误差,又称径向漂移,是主轴实际回转中心线相对于理想中心线位置在横切面上的平移变动范围。图 2-11(b)所示为轴向窜动误差,又称轴向漂移,是主轴实际回转中心线沿理想中心线位置的轴向变动量。图 2-11(c)所示为角度摆动误差,又称角度漂移,是主轴实际回转中心线与理想中心线位置的角度偏移量。

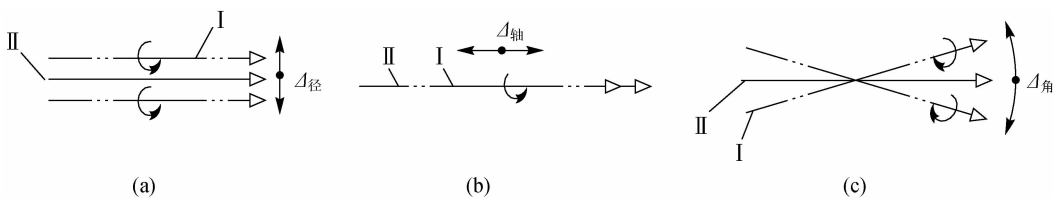


图 2-11 主轴回转误差的基本形式

I—主轴回转轴线; II—主轴平均回转轴线

不同形式的主轴回转误差对加工精度影响不同,同一形式的主轴回转误差在不同的加工方式中对加工精度的影响程度也不一样。

① 主轴径向跳动误差对加工精度的影响。不同的加工方法,主轴径向跳动误差对加工精度的影响也不同。在镗床上加工内孔时,主轴径向跳动误差可以引起工件的圆度误差和圆柱度误差;在车床上加工内孔时,主轴径向跳动误差对工件的圆度和圆柱度影响较小;但在镗床上镗端面和在车床上车端面时,主轴径向跳动误差对端面的形状精度无直接影响。

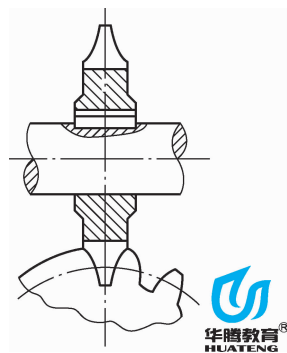


图 2-10 齿轮铣刀铣齿

②主轴轴向窜动误差对加工精度的影响。当主轴存在轴心线轴向窜动时,在车床上对孔和外圆加工并无大影响,但在加工端面和螺纹时有明显影响,所车出的端面对轴心线的垂直度误差随着切削直径的减小而增大,出现加工端面凹凸不平;主轴的轴向窜动误差使车削螺纹螺距产生周期性误差。

③主轴纯角度摆动误差对加工精度的影响。如图 2-12 所示,在车外圆时,由于纯角度摆动误差,得到的是一个锥体而不是一个圆柱体,在镗床上镗孔时镗出的孔将是椭圆形锥孔。

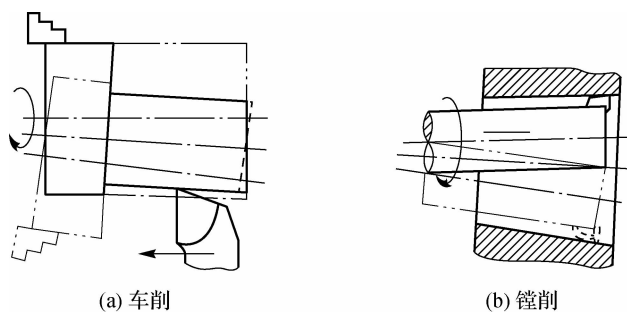


图 2-12 纯角度摆动误差对车削和镗削加工的影响

实际上,主轴工作时其回转轴线的误差是上述三种误差的综合,在轴线某一横截面上表现出径向跳动、轴向窜动和角度摆动,既影响所加工工件圆柱面的形状精度,又影响其端面的形状精度。

④主轴回转误差产生的原因。主轴回转误差主要与主轴部件的制造精度有关,它是保证主轴回转精度的基础,包含轴承误差、轴承间隙、与轴承相配合零件的误差等(如轴承孔或主轴轴颈的圆柱度、两端轴承孔或主轴轴颈的同轴度等)。同时,主轴回转误差还和切削过程中主轴受力、受热后的变形及使用一段时间后的磨损有关。

当机床主轴采用滑动轴承支承结构时,如图 2-13(a)所示,对于工件回转类机床(如车床),主轴的受力方向基本上是稳定的,这时主轴轴颈被压向轴承表面的某一位置,因此主轴轴颈的圆度误差将直接传递给工件,从而造成工件的圆度误差;而轴承孔本身的误差,则对加工精度影响较小;如图 2-13(b)所示,对于刀具回转类机床(如镗床),主轴所受切削力的方向是随着镗刀的旋转而变化的。因此,箱体上轴承孔的圆度误差将传递给工件,而主轴轴颈的圆度误差对加工精度影响较小。

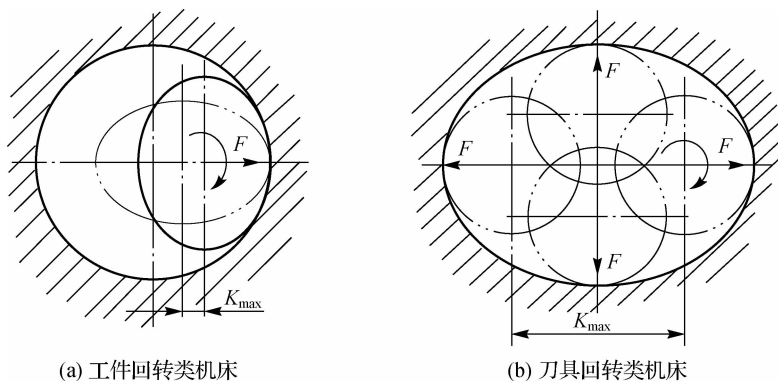


图 2-13 主轴采用滑动轴承的径向跳动

当主轴用滚动轴承支承时,其影响因素就更加复杂。主轴的回转精度不仅取决于滚动轴承的精度,在很大程度上还和轴承的配合件有关。

主轴轴承间隙对回转精度也有影响,如轴承间隙过大,会使主轴工作时油膜厚度增大、刚度降低。

由于轴承的内外座圈或轴套很薄,因此与之相配合的主轴轴颈或箱体轴承孔的圆度误差,会使轴承的内圈或外圈发生变形而引起主轴回转误差。

为了提高主轴的回转精度,在滑动轴承结构中可以采用静压轴承和动压轴承,也可以选用高精度的滚动轴承并对其进行预紧,以及提高主轴轴颈和与主轴相配合零件的有关表面加工精度,或者采取措施使主轴的回转精度不反映到工件上去。例如,在卧式镗床上镗孔时(图 2-14),工件安装在镗模夹具中,镗杆支承在镗模夹具的支承孔上,镗杆的回转精度完全取决于镗模支承孔的形状精度及同轴度。因镗杆与机床主轴之间是浮动连接,故机床主轴回转误差对加工无影响。

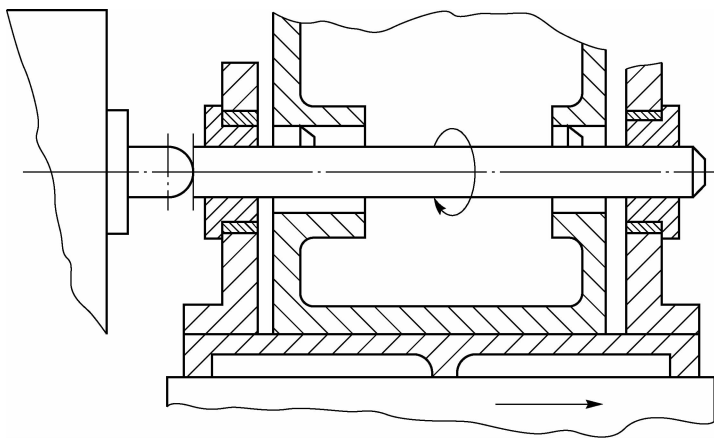


图 2-14 镗模镗孔

(2) 导轨导向误差。导轨导向精度是指机床导轨副的运动件实际运动方向与理想运动方向的符合程度。这两者之间的偏差值则称为导向误差。

机床导轨是确定机床主要部件相对位置和运动的基准,所以机床成型运动中的直线运动精度主要取决于导轨精度,它的各项误差将直接影响被加工工件的精度。机床导轨导向误差对刀具或工件的直线运动精度有着直接的影响,它将导致刀尖相对于工件加工表面的位置发生变化,主要是对工件的形状精度产生影响。

导轨导向误差主要包括导轨在水平

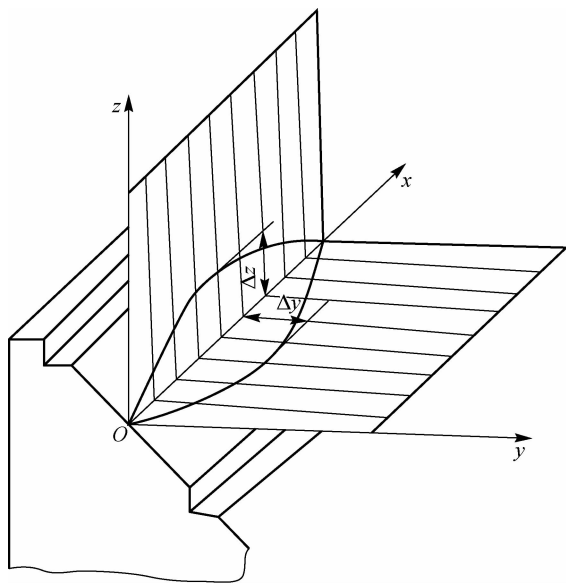


图 2-15 导轨的直线度

面内直线度误差 Δy 、导轨在垂直平面内直线度误差 Δz (图 2-15)、两导轨间的平行度误差。

①导轨在水平面内直线度误差 Δy 。以车削为例,如图 2-16(a)所示,使刀尖在水平面内产生位移 Δy ,造成工件在半径方向上的误差 ΔR 。因为 $\Delta R = \Delta y$,所以工件在直径上的加工误差 $\Delta D = 2\Delta y$ 。

②导轨在垂直平面内直线度误差 Δz 。如图 2-16(b)所示,刀尖产生 Δz 的位移,造成工件在半径方向上产生误差为 $\Delta R = \frac{\Delta z^2}{2R}$,即工件直径误差为 $\Delta D = \frac{\Delta z^2}{R}$ 。

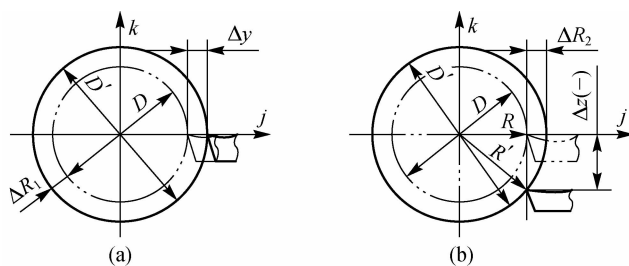


图 2-16 导轨导向误差对车削圆柱面精度的影响

③两导轨间有平行度误差。机床导轨发生了扭曲,产生两导轨间的平行度误差。这一误差使刀尖相对于工件在水平和垂直两方向上发生偏移。如图 2-17 所示,车床中心高为 H ,导轨宽度为 B ,则导轨扭曲量引起的刀尖在工件径向变化量为 $\Delta D = 2\delta = 2 \frac{\Delta H}{B}$,该误差使工件产生圆柱度误差。

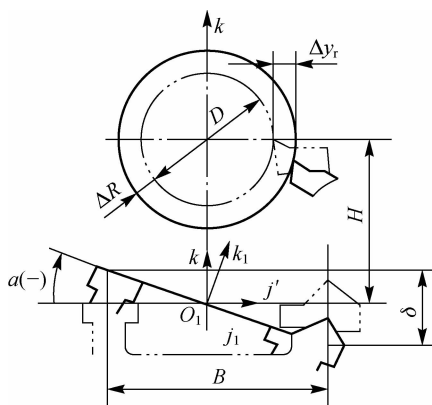


图 2-17 导轨扭曲引起的加工误差

机床导轨的几何误差除取决于机床的制造精度以外,还与机床的安装、调整和使用过程中的磨损有很大关系。尤其是对大、重型机床,因导轨较长,刚性较差,床身在自重作用下容易变形。因此,为减少导轨导向误差对加工精度的影响,除提高导轨制造精度外,还应注意减少机床安装和调整的误差,并应提高导轨的耐磨性,同时保证良好的润滑和维护。另外,影响导轨导向精度的因素还有加工过程中各种力、热等方面的原因。

(3)传动链误差。传动链误差是指内联系传动链始末两端传动元件间相对运动的误差,即采用展成法加工时才考虑该误差。一般用传动链末端元件的转角误差来衡量。

对车削螺纹、滚齿、插齿、磨齿等加工来说,工件表面的成型运动必须要求各成型运动之间具有准确的速度或传动比关系,是通过传动元件的合成运动来完成的。为保证获得要求的成型表面,除要求机床各成型运动间有正确的几何位置关系外,还必须要求刀具与工件间有严格精确的速度或传动比关系。例如,车螺纹时,要求刀具的直线进给速度和工件螺纹中径处的圆周速度间保持一个所需的速比关系,同时要求工件转一转,刀具正好移动一个导程;又如,用单头滚刀滚切齿轮时,要求滚刀转一转,工件必须转过一个齿,这种正确的成型

运动关系是由传动副组成的传动链保证的。刀具和工件间传动链传递运动正确,就能保证工件的加工精度。如果传动链中的传动副由于加工、装配和使用过程中磨损而产生误差,则这些误差将通过传动链逐级传递给工件,造成加工误差。

各转动元件在传动链中的位置不同,对其整个传动链误差的影响也不同,如图 2-18 所示的精密滚齿机的传动系统图,设滚刀轴匀速旋转,若齿轮 Z_1 具有转角误差 $\Delta\varphi_1$,则它使工作台或工件(传动链末端元件)的转角误差为

$$\Delta\varphi_{g1} = \Delta\varphi_1 \times \frac{80}{20} \times \frac{23}{28} \times \frac{28}{28} \times \frac{28}{56} \times \frac{42}{56} \times i_c \times \frac{e}{f} \times i_x \times \frac{1}{84} = K_1 \Delta\varphi_1 \quad (2-4)$$

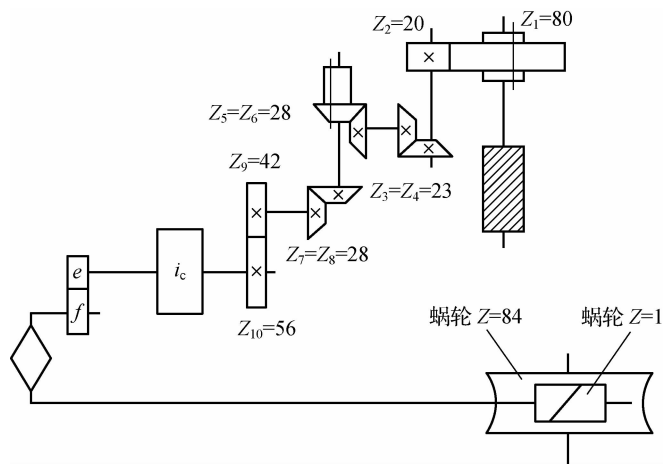


图 2-18 Y3180E 滚齿机的滚切传动链

从式(2-4)中可以看出, K_1 反映齿轮 Z_1 转角误差对末端工作台传动精度的影响程度, 被称为误差传递系数。同理, 若第 j 个传动元件有转角误差 $\Delta\varphi_j$, 则转角误差通过相应的传动链传递到末端工作台上的转角误差为

$$\Delta\varphi_{gj} = K_j \Delta\varphi_j \quad (2-5)$$

式中, K_j 为第 j 个传动件的误差传递系数。

因此, 各传动件传动误差对工件精度影响的误差总和为

$$\Delta\varphi_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n \Delta\varphi_{gj} = \sum_{j=1}^n K_j \Delta\varphi_j \quad (2-6)$$

在某一确定的传动链中, 不同成型运动的速度对其传动副产生误差的影响不同。式(2-6)说明, 当传动副为升速时, 即 $K_j > 1$, 转角误差被扩大, 当传动副为降速时, $K_j < 1$, 转角误差被缩小。也就是说, 当有几对传动元件降速传动时, 这一转角误差对工件精度的影响将被缩小。末端传动副的降速比越大, 其他传动元件的误差对被加工工件的影响越小。

因此, 在实际加工中, 使用的机床在满足成型运动的速度要求的条件下, 可从以下几个方面采取措施, 减少机床传动链误差对加工精度的影响:

- ①采用降速传动链传动, 特别是尽可能使末端传动副采用大的降速比。
- ②减少传动链中的元件数目, 缩短传动链。
- ③提高传动元件, 特别是末端传动元件的制造精度和装配精度。
- ④采用误差校正机构或自动补偿系统。如图 2-19 所示, 在传动链中增加一个机构, 使

其产生一个与原传动链产生的传动误差大小相等、方向相反的误差,以此来抵消传动链本身的误差。准确地测量传动链误差,是应用这种补偿措施的关键。

3. 夹具误差

夹具的作用是使工件相对于机床和刀具占据正确的位置,由此看出夹具的制造误差对工件的加工精度有很大影响。在图 2-20 所示的钻床夹具中,钻套轴心线 F 至夹具定位平面 C 间的距离误差,影响工件孔 A 至底面 B 尺寸 L 的精度;钻套轴心线 F 至夹具定位平面 C 间的平行度误差,影响工件孔轴心线 A 与底面 B 的平行度;夹具定位平面 C 与夹具体底面 D 的垂直度误差,影响工件孔轴心线 A 与底面 B 间的尺寸精度和平行度;钻套孔的直径误差亦影响工件孔 A 至底面 B 的尺寸精度和平行度。

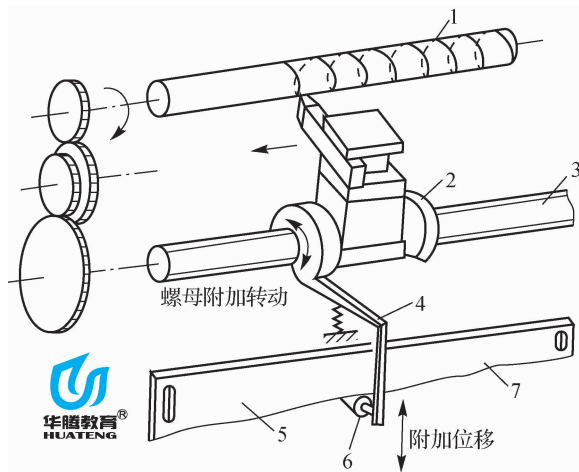


图 2-19 丝杠加工误差校正装置

1—工件; 2—螺母; 3—母丝杠; 4—杠杆;
5—校正尺; 6—触头; 7—校正曲线

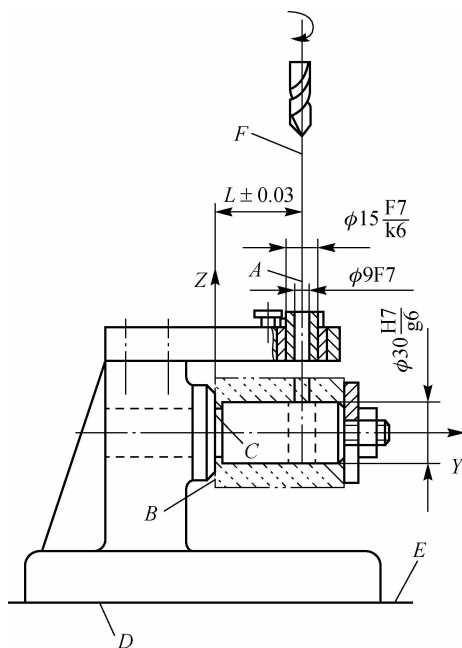


图 2-20 钻孔夹具误差对加工精度的影响

夹具磨损将使夹具的原始误差增大,从而使工件的加工误差也相应地增大。为了保证工件的加工精度,除了严格保证夹具的制造精度外,必须注意提高夹具易磨损件(如钻套、定位销等)的耐磨性。当其磨损到一定限度后须及时予以更换。

利用夹具装夹工件进行加工时,造成工件加工表面之间尺寸位置误差的因素主要有以下两个:

①工件装夹误差 Δ_{ZJ} 。它包括定位误差 Δ_{DW} 和夹紧误差 Δ_{JJ} 。定位误差是工件在夹具中定位不准确而引起的加工误差,包括基准位置误差和基准不重合误差。夹紧误差是夹紧工件时引起工件和夹具变形所造成的加工误差。

②夹具对定误差 Δ_{DD} 。它包括对刀误差 Δ_{DA} 和夹具位置误差 Δ_{JW} 。对刀误差是刀具相对于夹具位置不正确所引起的加工误差,而夹具位置误差是夹具相对于刀具成型运动位置不正确所引起的加工误差。这些加工误差的大小与夹具的制造、安装和使用密切相关。

4. 测量误差

精确的测量是保证工艺系统各部分间保持正确位置的基础,也是判定工件合格与否的依据。测量的精度取决于量具、量仪、测量方法和测量时的环境条件,以及操作者的技术经验。而测量条件中以测量温度和测量力的影响最显著。测量误差一般应控制在工件公差的 $1/10\sim 1/5$ 。计量器具误差主要是由示值误差、示值稳定性、回程误差和灵敏度四个方面综合起来的极限误差。计量器具误差会对被测零件测量精度产生直接影响。

除量具本身误差之外,测量者的视力、判断能力、测量经验、相对测量或间接测量中所用的对比标准、数学运算精确度、单次测量判断的不准确等因素都会引起测量误差。

5. 刀具误差

刀具的尺寸、几何形状和相互位置误差会使零件产生加工误差。刀具误差对加工精度的影响随刀具种类的不同而不同。

当采用定尺寸刀具(如钻头、铰刀、键槽铣刀、拉刀等)加工时,刀具的制造误差和刀具磨损会带来加工误差,刀具的尺寸精度将直接影响工件的加工精度。

采用成型刀具(如成型铣刀、车刀、成型砂轮等)加工,刀刃的几何形状和有关尺寸存在制造误差及刀具安装位置不正确,都会造成加工表面的几何形状误差或尺寸误差。

在应用展成法加工时,刀刃的几何形状和有关尺寸因制造或重新刃磨而存在误差,同样会使零件产生加工误差。

而对一般刀具(如车刀、刨刀等),其制造误差对工件加工精度无直接影响。

另外,刀具安装调整不正确,也会产生加工表面的几何形状误差。采用调整法进行加工时,刀具的刀尖或刀刃与工件间的相互位置调整不准确,则将产生刀具调整误差,并会直接造成加工的尺寸误差。

6. 调整误差

在零件加工的每道工序中,为了获得被加工表面的形状、尺寸和位置精度,必须对机床、夹具和刀具进行必要的调整。而采用任何调整方法及使用任何调整工具都难免带来一些原始误差,这就是调整误差,而调整误差必然带来工件的加工误差。

如用试切法调整时的测量误差、进给机构的位移误差及最小极限切削厚度的影响;如用调整法调整时的定程机构的误差、样板或样件调整时的样板或样件的误差等。

2.2.3 工艺系统受力变形

1. 工艺系统刚度的概念

在加工过程中,由于受到切削力、夹紧力、传动力、重力、惯性力等外力作用,工艺系统会产生变形而破坏已调整好的刀具和工件间的相对位置,造成它们相互之间发生位移。同时,工艺系统各环节相互连接处由于存在间隙等而产生相对位移。这两部分位移总称为工艺系统变形位移。很显然,工艺系统产生变形位移必然会破坏刀具切削刃与工件表面间业已调整好的位置,使工件产生加工误差。如图 2-21(a)所示,在车床上采用前、后顶尖为支承来车削一个细长轴,最终工件会出现中间直径大、两头直径小呈鼓形的形状误差,因此有必要采取有效的工艺措施加以减小或消除。

图 2-21(b)所示为内圆磨床上横磨内孔时,砂轮轴受到径向磨削力而弯曲变形,磨出的孔出现锥度误差。

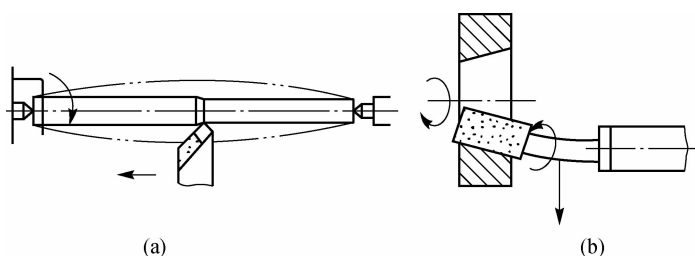


图 2-21 工艺系统受力变形引起的加工误差

另外,在外圆精磨的最后几个行程中,尽管砂轮没有径向进给,即无进给磨削,但依然能见到磨削火花,先多后少,直到无火花,说明逐渐消除了工艺系统受力变形的影响。

工艺系统中各组成环节在切削加工过程中,受到各种外力作用会产生不同程度的变形,使刀具和工件的相对位置发生变化,从而产生相应的加工误差。为了衡量工艺系统抵抗受力变形的能力和分析计算工艺系统受力变形对加工精度的影响,就需要建立工艺系统刚度的概念。

弹性系统在外力作用下所产生的变形位移大小取决于外力大小和系统抵抗外力的能力。弹性系统抵抗外力使其变形的能力称为刚度。工艺系统的刚度 k 是以切削力和在该外力方向上(误差敏感方向)所引起的刀具和工件间相对变形位移的比值表示的,即

$$k = \frac{F_y}{y} \text{ (N/mm)} \quad (2-7)$$

由式(2-7)可知,刚度越大,说明工艺系统抵抗外力使其变形的能力越强,加工精度就越高。

因为切削力 F 有三个分力 F_x 、 F_y 、 F_z ,所以刚度也有相应三个方向的刚度,但是在切削加工中对加工精度影响最大的是误差敏感方向(y 方向上),因此计算工艺系统刚度就仅考虑此方向上的切削分力 F_y 和变形位移量 y ,即

$$k_{st} = \frac{F_y}{y} \text{ (N/mm)} \quad (2-8)$$

式中的 y 不只是由径向切削分力 F_y 所引起,垂直切削分力 F_z 与纵向切削分力 F_x 也会不同程度地使工艺系统在 y 方向产生位移,因此 y 方向上的位移是三个方向上的分力共同作用的结果。

一般把夹具作为机床的附加装置,其变形被认为是机床变形的组成部分,因此工艺系统受力变形的总变形 y_{st} 是机床、刀具和工件各组成部分变形位移的叠加,即

$$y_{st} = y_j + y_d + y_g$$

根据工艺系统刚度定义

$$y_j = \frac{F_y}{k_j}, y_d = \frac{F_y}{k_d}, y_g = \frac{F_y}{k_g}$$

所以

$$k_{st} = \frac{1}{\frac{1}{k_j} + \frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_g}} \quad (2-9)$$

上述式中的 y_{st} 、 k_{st} 分别为工艺系统的变形位移、刚度; y_j 、 k_j 分别为机床的变形位移、刚

度; y_d 、 k_d 分别为刀具的变形位移、刚度; y_g 、 k_g 分别为工件的变形位移、刚度。

2. 工艺系统刚度对加工精度的影响

(1) 切削力作用点位置变化引起的工件形状误差。在切削过程中, 工艺系统的刚度会随切削力作用点位置的变化而变化, 因此使工艺系统受力变形亦随之变化, 引起工件形状误差。下面以在车床两顶尖间加工光轴为例进行分析。

① 机床的变形。假定工件短而粗, 同时车刀悬伸长度很短, 即工件和刀具的刚度很大, 其受力变形比机床的变形小到可以忽略不计, 也就是说, 假定工艺系统的变形只考虑机床的变形。又假定工件的加工余量很均匀, 并且由于机床变形而造成的背吃刀量变化对切削力的影响很小, 即假定车刀进给过程中切削力保持不变, 故机床总变形位移量将是机床的床头箱、床尾及刀架等部件变形位移量的综合。当刀尖切至工件图 2-22 所示的位置时, 在切削力作用下, 床头变形由 A 移至 A' , 尾座变形由 B 移至 B' , 刀架变形由 C 移至 C' , 它们的位移分别为 y_{ij} 、 y_{uz} 、 y_{dj} 。此时, 工件的轴线由原来 AB 位置移至 $A'B'$, 则在切削点处的位移 y_x 为

$$y_x = y_{ij} + \Delta x = y_{ij} + (y_{uz} - y_{ij}) \frac{x}{L}$$

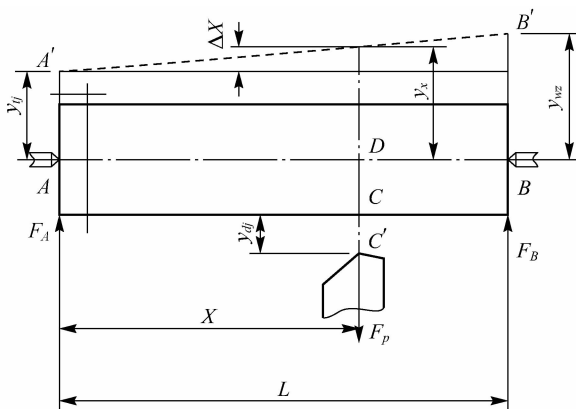


图 2-22 工艺系统变形随切削力位置变化而变化

考虑到刀架的变形 y_{dj} 与 y_x 的方向相反, 所以机床总的变形为

$$y_{jc} = y_x + y_{dj} \quad (2-10)$$

由刚度定义有

$$y_{ij} = \frac{F_A}{k_{ij}} = \frac{F_p}{k_{ij}} \left(\frac{L-x}{L} \right)$$

$$y_{uz} = \frac{F_B}{k_{uz}} = \frac{F_p}{k_{uz}} \left(\frac{x}{L} \right), \quad y_{dj} = \frac{F_p}{k_{dj}}$$

式中, k_{ij} 、 k_{uz} 、 k_{dj} 分别为主轴箱、尾座、刀架的刚度。

代入式(2-10), 最后可得机床的总变形为

$$y_{jc} = F_p \left[\frac{1}{k_{ij}} \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{uz}} \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{dj}} \right] = y_{jc}(x) \quad (2-11)$$

式(2-11)说明, 随着切削力作用点位置的变化, 工艺系统变形是变化的。显然, 这是工艺系统的刚度随切削力作用点变化而变化所致。

由于变形大的地方,从工件上切去的金属层薄;变形小的地方,切去的金属层厚,因此因机床受力变形而使加工出来的工件呈两端粗、中间细的马鞍形,如图 2-23 所示。

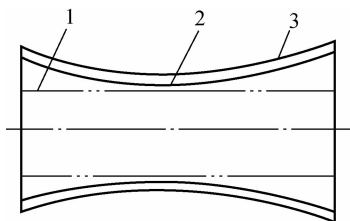


图 2-23 工件装夹在两顶尖车削后的形状

- 1—机床不变形的理想形状;
2—考虑主轴箱、尾座变形的形状;
3—包括考虑刀架变形在内的形状

②工件的变形。若在两顶尖间车削刚性很差的细长轴,则工艺系统中的工件变形必须考虑。假设此时不考虑机床和刀具的变形,即可由材料力学公式计算工件在切削点的变形量

$$y_g = \frac{F_p}{3EI} \frac{(L-x)^2 x^2}{L}$$

显然,加工后的工件呈腰鼓(中间粗两头细)形,如图 2-21(a)中点画线所示。

③工艺系统的总变形。当同时考虑机床和工件的变形时,工艺系统的总变形为两者的叠加(忽略车刀的变形),即

$$y = y_{jc} + y_g = F_p \left[\frac{1}{k_{ij}} \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{uz}} \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{dj}} + \frac{(L-x)^2 x^2}{3EIL} \right]$$

工艺系统的刚度为

$$k = \frac{F_p}{y_{jc} + y_g} = \frac{1}{k_{ij}} \left(\frac{L-x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{uz}} \left(\frac{x}{L} \right)^2 + \frac{1}{k_{dj}} + \frac{(L-x)^2 x^2}{3EIL}$$

由此可知,在测得车床主轴箱、尾座、刀架三个部件的刚度,确定工件的材料和尺寸后,就可按 x 值估算车削圆轴时工艺系统的刚度。当已知刀具的切削角度、切削条件和切削用量时,即在知道切削力 F_p 的情况下,利用上面的公式就可估算出不同 x 处工件半径的变化。

工艺系统刚度随受力点位置变化的例子很多,如立式车床、龙门刨床、龙门铣床等的横梁及刀架,大型镗铣床滑枕内的主轴等,其刚度均随刀架位置或滑枕伸出长度不同而不同。例如,镗床在镗孔时,随着镗杆长度的伸长,镗杆可看成长度变长的悬臂梁,其刚度急剧下降,它的变形对加工精度有较大影响,如图 2-24 所示加工后的孔为喇叭形。

(2)切削力变化引起的加工误差。在切削过程中,毛坯加工余量和材料硬度的变化引起切削力的变化,工艺系统受力变形也相应地发生变化,因而造成工件的尺寸误差和形状误差。如图 2-25 所示,工件毛坯有椭圆形的圆度误差,车削前将车刀调整至图中双点画线位置。车削时刀尖受切削力影响移至实线位置,工件每一转过程中,背吃刀量不断发生变化。背吃刀量大的部位切削力大,由此产生受力变形也大,背吃刀量小的部位切削力小,受力变形也就小,所以加工后工件仍有椭圆形误差,这种经加工后零件存在的加工误差 Δ_g 和加工前的毛坯误差 Δ_m 相对应,其几何形状误差与加工前形状相似,这种现象称为误差复映规律。

令

$$\frac{\Delta_g}{\Delta_m} = \epsilon < 1$$

ϵ 定量地反映了毛坯误差经加工后减小的程度,称为误差复映系数。误差复映系数与工艺系统刚度成反比,即工艺系统刚度越大,复映在工件上的误差越小。

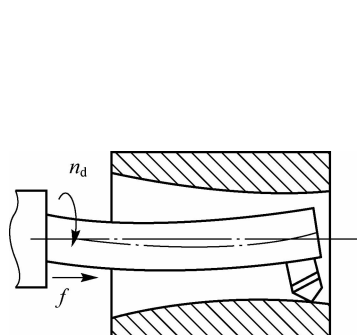


图 2-24 刀杆刚度对加工精度的影响

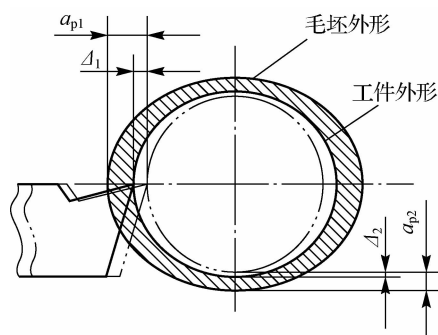


图 2-25 误差复映现象

若某一工件需要分成几次走刀加工,每次走刀的复映系数为 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 $\dots$ 、 ϵ_n ,则总的复映系数 $\epsilon = \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \dots \epsilon_n$ 远远小于 1。因此,经过几次加工后,加工误差也就降到允许范围以内了。在成批或大量生产中,用调整法加工一批工件,误差复映规律表明了毛坯尺寸不一致造成加工后该批工件尺寸的分散程度。

毛坯硬度不均匀,同样会使切削力发生变化,造成加工误差。在采用调整法成批生产情况下,控制毛坯材料硬度的均匀性是很重要的。调整法加工的走刀次数通常已定,如果一批毛坯材料的硬度差别很大,就会使工件的尺寸分散范围扩大,甚至超差。

(3) 夹紧力和重力引起的加工误差。工件在装夹时,由于工件刚度较低或夹紧力着力点不当,工件产生相应的变形,造成加工误差。例如,薄壁套筒装在车床三爪卡盘上镗孔,夹紧后套筒孔产生弹性变形,虽然镗出的孔为正圆形,但在松开三爪卡盘后,薄壁套筒弹性变形恢复使孔呈三角棱圆形 [图 2-26(a)]。夹紧变形引起的工件形状误差不仅取决于夹紧力的大小,而且与夹紧力的作用点及分布有关。为了减少套筒因夹紧变形而产生的加工误差,可采用开口过渡环 [图 2-26(b)] 或采用圆弧面卡爪 [图 2-26(c)] 均匀夹紧等方法,使夹紧力均匀分布。

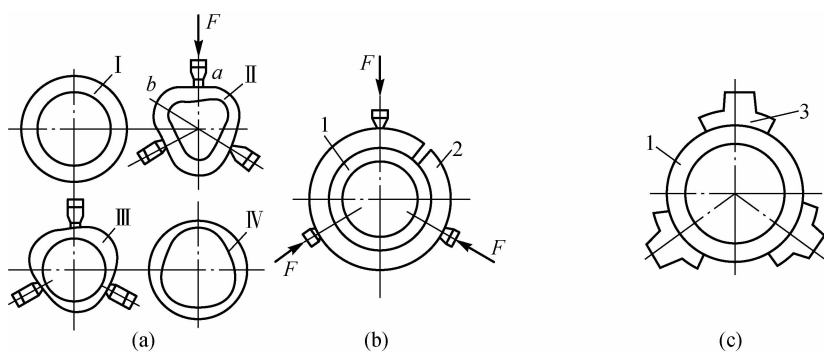


图 2-26 夹紧变形引起的加工误差

I—毛坯; II—夹紧后; III—镗孔后; IV—松开后

1—工件; 2—开口过渡环; 3—专用卡爪

又如磨削薄板类零件,假定毛坯件存在翘曲,当被平面磨床电磁工作台吸紧时,产生弹性变形,磨削后取下工件,由于弹性恢复,已磨平的表面仍然会产生翘曲,如图 2-27(a)、(b)、

(c)所示。改进的办法是在工件和磁力吸盘之间垫入一层薄橡胶垫(0.5 mm 以下)或纸片,如图 2-27(d)、(e)所示,当工作台吸紧工件时,橡胶垫或纸片(用于干磨的场合)受到不均匀的压缩,使工件变形减小,翘曲的部分就将被磨去。如此进行,正、反面轮番多次磨削后,就可得到较平的平面。

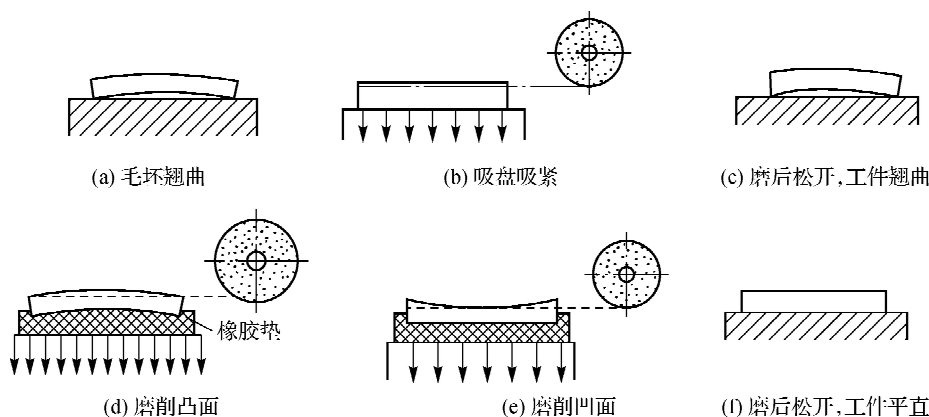


图 2-27 薄片工件的装夹与磨削

图 2-28 为加工发动机连杆大头孔的装夹示意图,由于夹紧力着力点不当,造成加工后两孔中心线不平行及其与定位端面不垂直。

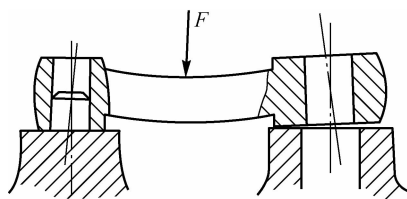


图 2-28 着力点不当引起的加工误差

工艺系统有关零部件自身的重力所引起的相应变形,也会造成加工误差。如图 2-29 所示,大型立车在刀架的自重下引起了横梁变形,造成工件端面的平面度误差和外圆上的锥度。工件的直径越大,加工误差也越大。

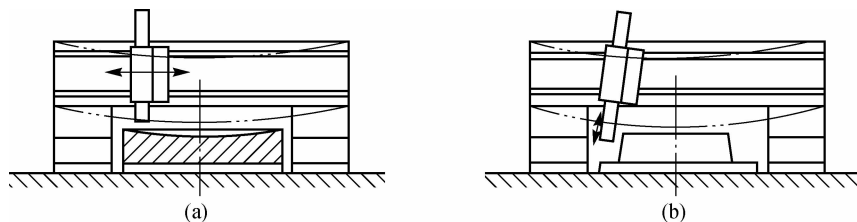


图 2-29 机床部件自重所引起的加工误差

3. 减小工艺系统受力变形对加工精度影响的措施

在实际生产中,应有效地减小工艺系统的变形。从刚度公式看出,可以从两个主要方面采取措施来予以解决:一是提高系统刚度,二是减小载荷及其变化。从加工质量、生产效率、经济性等问题全面考虑,提高工艺系统中薄弱环节的刚度是最重要的措施。

(1)提高工艺系统的刚度。具体措施有以下几个:

①合理的结构设计。在设计机床和工装时,要合理设计各零件结构和断面形状,避免由于个别零件刚度不足使整体刚度下降而影响加工;同时,还要注意刚度平衡,防止有局部低刚度环节出现。对于一些支承零件,如机床床身、立柱、横梁和夹具体等构件,它们的静刚度对整个工艺系统刚度影响较大,为提高其刚度,除适当增加其截面积外,必须改进构件结构和断面形状,尽可能减轻质量,采用空心截面,加大空心截面轮廓尺寸,减小壁厚。如图 2-30 所示,在设计大型零件时,应尽量使截面封闭,这样可得到较大刚度。此外,在部件的适当部位处增添加强筋和隔板,也能取得良好的效果。

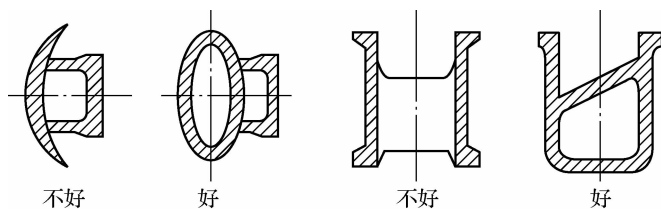


图 2-30 零件结构刚度的比较

②提高连接表面的接触刚度。在机床设计中应尽量减少连接面的数目,并尽可能提高有关组成零件配合面的形状精度,降低表面粗糙度,增大接触面积,减少接触变形。因为部件的接触刚度远低于同样外形尺寸实体的刚度,所以提高零件间的接触刚度是提高工艺系统刚度的关键,特别是对使用中的机床设备。为此,提高机床导轨的刮研质量,提高顶尖锥体和主轴及尾座套筒锥孔的接触质量,多次修研中心孔等都是生产中提高接触刚度的常用措施。

此外,还可采用预加载荷,使机床或夹具上的有关零件在装配时产生预紧力,以此消除配合面间的间隙,增加实际接触面积,提高接触刚度。通常在机床主轴组件中的滚动轴承都有预紧装置。

③采用合理的装夹和加工方式。例如,在卧式铣床上铣削角铁形零件,如按图 2-31(a)所示装夹、加工方式,工件的刚度较低;如改用图 2-31(b)所示装夹、加工方式,则工件的刚度可大大提高。再如,车削加工细长轴时,若改为反向进给(从主轴箱向尾座方向进给),则工件从原来的轴向受压变为轴向拉伸,也可提高工件刚度。

此外,增加辅助支承也是提高刀架刚度的常用方法,如图 2-32 所示。另外,如车削加工细长轴时采用中心架或跟刀架就是一个很典型的实例。

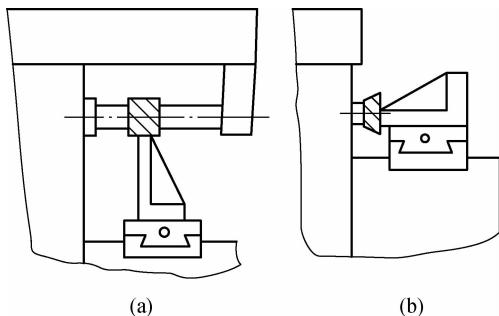


图 2-31 铣削角铁形零件的两种装夹和加工方式

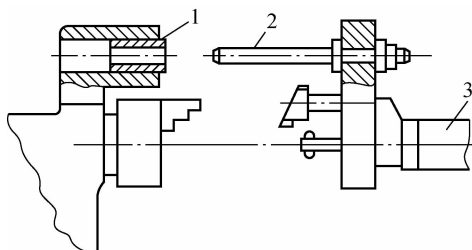


图 2-32 六角车床增加辅助支撑提高刚度

1—支承座; 2—加强杆; 3—刀架

(2)减小载荷及其变化。采取适当的工艺措施,如合理选择刀具几何参数(如增大前角、让主偏角接近 90° 等)和切削用量(如适当减少进给量和背吃刀量)以减小切削力(特别是 F_p),就可以减少受力变形。

对制造误差较大毛坯进行分组,使一次调整中加工的一组毛坯余量比较均匀,从而减少切削力的变化,减小复映误差。

2.2.4 工艺系统受热变形

1. 工艺系统的热源

在机械加工过程中,常有大量的热传入工艺系统中。工艺系统在热的作用下常产生复杂的变形,从而破坏工件与刀具正确的位置关系,引起加工误差。工艺系统的热变形对加工精度的影响是较大的。据统计,在精密加工中,热变形引起的加工误差占总加工误差的 $40\% \sim 70\%$ 。热变形不但严重降低了加工精度,而且影响生产效率。因此,控制工艺系统热变形已成为机械加工特别是精密机械加工的重要研究课题。

工艺系统的热源分为内部热源和外部热源两大类。

(1)内部热源。在机床完成切削运动和切削功能的过程中,驱动机床的能量中有相当一部分转变为热能。机床所消耗的功率中有 $30\% \sim 70\%$ 转变为热。机床消耗功率主要是在切削过程中变为切削热和在传动过程中变为摩擦热。

在切削过程中,切削热是引起工艺系统热变形最主要的热源,对工件加工精度的影响最直接。

传动过程中热源来自轴承副、齿轮副、离合器、导轨副等的摩擦热及动力源能量(如电动机、液压系统)损耗的发热等。尽管摩擦热比切削热少,但摩擦热在工艺系统中是局部发热,会引起局部温升和变形,破坏工艺系统原有的几何精度,对加工精度也会造成影响。

(2)外部热源。外部热源主要是以热辐射和热传导方式由外界环境传入工艺系统的热量。这种热源来自周围的环境(通过空气对流传热),以及阳光、灯光、加热器等产生的辐射热,它们对机床热变形也不容忽视。例如,某厂加工精密大齿轮,需几昼夜连续加工才能完成,由于昼夜温差大,结果齿面产生波纹度;当机床导轨顶面或侧面受到阳光照射时,也会使导轨顶部或侧面凸起或扭曲。

2. 工艺系统热变形对加工精度的影响

(1)机床热变形对加工精度的影响。在切削过程中,机床在热源影响下各部分温度将发生变化,由于热源分布不均匀及机床结构和加工环境的复杂性,因此产生机床热变形的形式是多种多样的。

机床热变形对加工精度的影响,主要是主轴部件、床身、导轨,以及两者相对位置等的热变形。例如,车床热变形的热源主要是主轴箱轴承的摩擦热和主轴箱中油池的发热,它们使

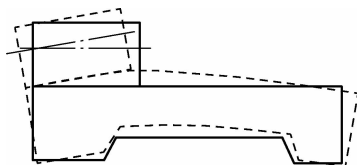


图 2-33 车床受热变形

主轴箱及与之相连接的床身局部温度升高,温升使主轴抬高和倾斜;油池的温升通过箱底传到床身上,使床身上、下表面产生温差,造成床身弯曲而中凸,并进一步使主轴抬高和倾斜。车床受热变形如图 2-33 所示。

铣、镗床热变形的热源也是主轴箱发热,它除了使主轴箱变形外,还将使立柱倾斜,从而使主轴对机床工作台

产生位移和倾斜。立式铣床受热变形如图 2-34 所示。磨床热变形的热源亦是主轴箱发热和砂轮磨削工件产生的磨削热,外圆磨床受热变形如图 2-35 所示。

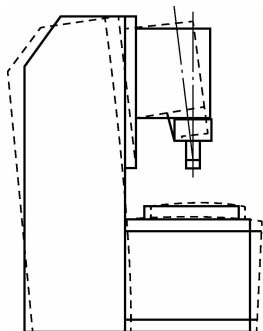


图 2-34 立式铣床受热变形

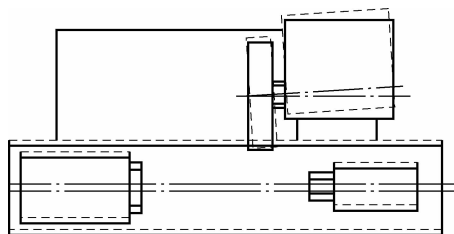


图 2-35 外圆磨床受热变形

在分析机床热变形对加工精度影响时,同样应注意分析热位移方向与误差敏感方向的相对位置关系。对处在误差敏感方向的热变形,需要特别注意并加以控制。

龙门刨床、导轨磨床等大型机床床身较长,如果导轨面与底面间稍有温差,就会产生较大的弯曲变形,故床身热变形是影响加工精度的主要因素。例如,一台长 12 m、高 0.8 m 的导轨磨床床身,导轨面与床身底面温差 1 °C 时,其弯曲变形量可达 0.22 mm。床身上、下表面产生温差的原因,不仅是工作台运动时导轨面摩擦发热所致,环境温度的影响也是重要原因。如在夏天,地面温度一般低于车间室温,因此床身中凸(图 2-36);冬天则地面温度高于车间室温,使床身中凹。

此外,若机床局部受到阳光照射,而且照射部位随时间变化,也会引起床身各部分不同的热变形。

(2)工件热变形对加工精度的影响。在切削过程中,工件的热变形主要来自切削热。精密零件及某些大型工件还会因周围环境温度的变化和局部受到日光等热源的热辐射而产生热变形。

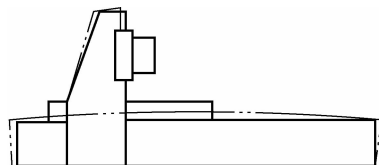


图 2-36 大型导轨磨床热变形

工件的热变形因采用加工方法不同而异。例如,车削时传给工件的热量小(约 10%),因此变形小;钻孔时因传给工件的热量多(约 50%),故变形大。此外,工件热变形还会因受热体积(尺寸)不同而不同,如薄壁件和实心件,即使是同样的热量,其温升和热变形也是不同的。

从工件的受热情况看,均匀受热与不均匀受热两者引起的变形情况也是不相同的。现对这两种情况进行分析。

①工件均匀受热引起变形。一些形状较简单的轴类、套类、盘类零件的内、外圆加工时,切削热比较均匀地传入工件,若不考虑工件温升后的散热,其温度沿工件全长和圆周的分布都是比较均匀的,可近似地看成均匀受热,因此其热变形可按物理学计算热膨胀的公式求出。在车削外圆时,设测得的工件温升为 Δt ,则热伸长量(直径上和长度上)可按式(2-12)计算。

$$\Delta L = \alpha L \Delta t \quad (2-12)$$

式中, α 为工件材料的热膨胀系数, 钢材为 12×10^{-6} , 铸铁为 11×10^{-6} , 铜为 17×10^{-6} ; L 为工件在热变形方向上的尺寸。

一般情况下, 工件热变形在精加工中较为突出, 尤其是长度长而精度要求较高的零件。如磨削(不加冷却液)丝杆, 若丝杆长为 3 m, 每磨一次温度就升高约 3°C , 则丝杆的伸长量为 $\Delta L = 3\,000 \times 12 \times 10^{-6} \times 3 = 0.108\text{ mm}$, 而 6 级精度丝杆的螺距累积误差在全长上不允许超过 0.02 mm, 由此可见热变形对精密零件的尺寸精度影响还是比较严重的。

②工件不均匀受热引起的变形。铣削、刨削或磨削平面时, 工件因单面受到切(磨)削热, 上、下表面间温差使工件产生向上拱起变形(假设不受夹紧力的约束), 加工时中间凸起部分被切去, 冷却后工件变成下凹, 造成平面度误差。如图 2-37 所示, 当工件长度为 L , 厚度为 S , 工件受热上、下表面温差为 $\Delta t = t_1 - t_2$ 时, 工件变形呈向上凸起。若以 f 表示工件中点变形量, 因中心角 φ 很小, 故可认为中性层弦长近似为原长 L , 于是

$$f \approx \frac{L}{2} \tan \frac{\varphi}{4}$$

因为 φ 很小, $\tan \frac{\varphi}{4} = \frac{\varphi}{4}$, 所以

$$f = \frac{L\varphi}{8} \quad (2-13)$$

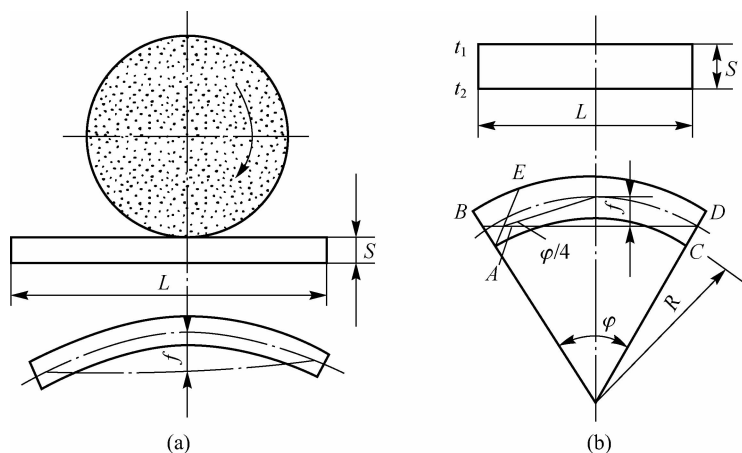


图 2-37 工件单面受热时的弯曲变形计算图

由图 2-37 中关系得

$$(R+S)\varphi - R\varphi = \alpha\Delta tL$$

式中, R 为圆弧半径。所以

$$f = \alpha\Delta t \frac{L^2}{8S} \quad (2-14)$$

由此可见, 热变形量 f 随 L 增大而急剧增大。因 L 、 S 、 α 均为不变量, 故欲减小 f , 必须减小 Δt , 即减小切削热的传入。

对于大型精密板类零件(如长为 2 000 mm、高为 500 mm 的机床床身)的磨削加工, 当工件(床身)的温差为 2.5°C 时, 热变形可达 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。说明工件单面受热引起的误差对尺寸精度和形状精度的影响是很严重的。为了减少这一误差, 通常采取的措施是在切削时使用充

分的切削液以减少切削表面的温升；也可采用误差补偿的方法（在装夹工件时使工件上表面产生微凹的夹紧变形，以此来补偿切削时工件单面受热而拱起的误差）。

（3）刀具的热变形对加工精度的影响。刀具热变形主要是由切削热引起的。尽管传给刀具的热量占总热量的百分比很小（3%~5%），但刀具体积小，热容量小，所以刀具仍有较高的温升。

连续切削时，刀具的热变形在切削初始阶段增加很快，随后变得较为缓慢，经过不长时间后（10~20 min）便趋于热平衡状态。此后，热变形变化量就非常小（图 2-38 中 A），刀具总的热变形量可达 0.03~0.05 mm。当切削停止时，刀具温度开始下降较快，以后逐渐减缓，如图 2-38 中曲线 B 所示。

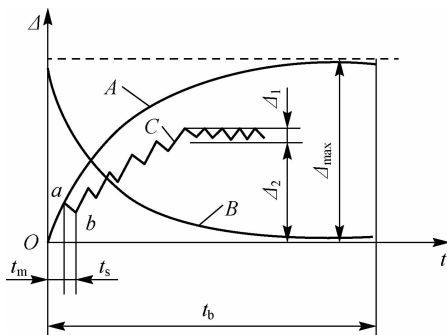


图 2-38 车刀热变形

间断切削时，因刀具有了短暂的冷却时间，故其热变形曲线（图 2-37 中曲线 C）具有热胀冷缩双重特性，且总的变形量比连续切削时要小一些，最后稳定在 Δ_1 范围内变动。

加工大型零件时，刀具热变形往往造成几何形状误差和尺寸误差，如车削长轴时刀具热伸长可能产生锥度（尾座处的工件直径比主轴箱附近的工件直径大）。

3. 工艺系统受热变形控制措施

（1）减少机床热变形的措施。具体措施有以下几个：

①减少机床的热源影响、用低黏度的润滑油改善轴承的润滑条件，提高齿轮副的传动精度并配以油雾润滑，从而减少传动副的发热，用强制式的风冷加强机床内部的电机和变速系统的散热。

此外，设法将热源分离到机床外部或移到通风散热较好的位置，如将立式机床的主电机安装在主轴箱顶部，将液压系统置于床身外部，等等。

②均匀机床零部件的温升。利用机床发出的热量均衡机床重要部分温升较低的部位，使机床处于热平衡稳定状态，其热变形就会减小，如图 2-39 所示。再如，M7150A 型磨床机床床身较长，加工时工作台纵向运动速度较高，所以床身上部温升高于下部。为均衡床身上

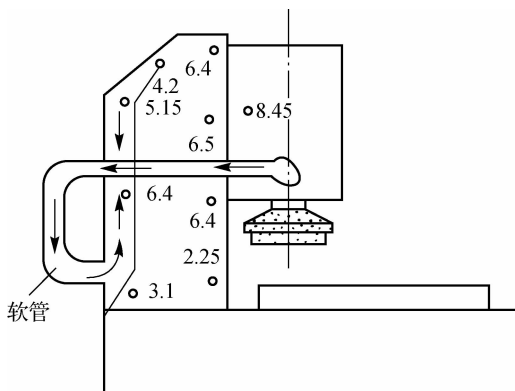


图 2-39 均衡机床温度场

下部温升，将油池搬出主机并做成一单独油箱；在床身下部配置热补偿油沟，使一部分带有余热的回油经热补偿油沟送回油池，如图 2-40 所示。采用这些措施后，床身上、下部温差降至 1~2℃，导轨的中凸量由原来的 0.026 5 mm 降为 0.005 2 mm。

另外，注意结构对称性设计：一是在主轴箱或变速箱的内部结构中，对称安放传动元件（轴、轴承及传动齿轮），可有效均衡箱壁的温升而减少其变形；二是对称性安排对机床热态特性有很大影响的机床大件结构和布局。以加工中心为例，在热源影响下，

单立柱结构会产生相当大的扭曲变形,而双立柱结构由于左右对称,仅产生垂直方向的热位移,很容易通过调整的方法予以补偿。

③采取隔热措施。在发热部件和机床重要大件之间加装隔热材料,以阻隔热辐射和热对流对大件的加热,也可以较好地减少机床热变形,如图 2-41 所示。

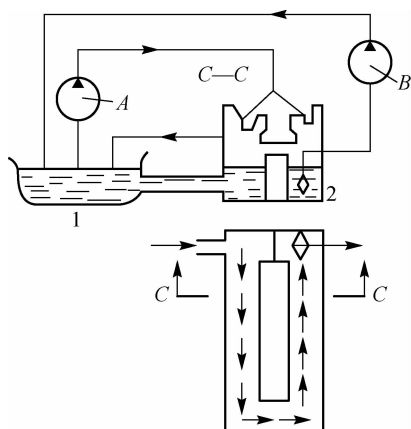


图 2-40 M7150A 磨床的热补偿油沟
A、B—油泵；1—油箱；2—热补偿油沟

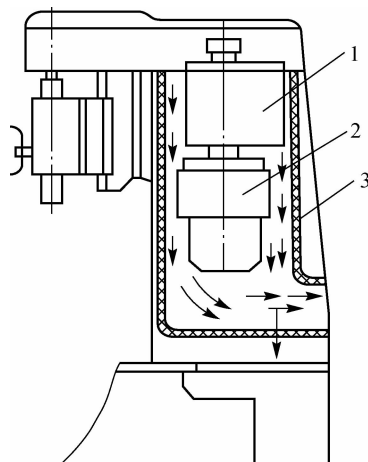


图 2-41 采用隔热罩减少热变形
1—变速箱；2—主电机；3—隔热罩

④改进工艺措施。加工时采取工艺措施以减少热变形对加工的影响。例如,在开始精加工前,可让机床空转一段时间,待机床达到热平衡状态后变形趋于稳定再进行加工。

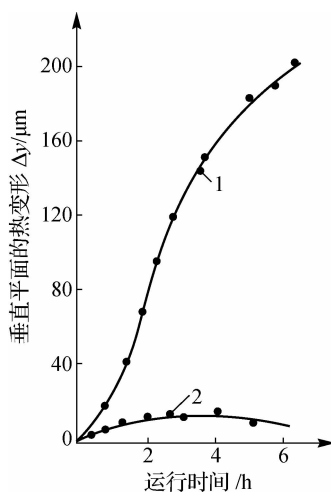


图 2-42 坐标镗床主轴箱
强制冷却试验结果
1—未强制冷却；2—强制冷却

在顺序加工一批零件的间断时间内不要停车或尽量减少停车时间,以免破坏热平衡,这样可保持已调整好的位置。在加工中还应严格控制切削用量,以减少工件的发热。此外,尽可能将精密机床安置在恒温室内,以减少环境温度变化对加工精度的影响。

对发热量大的热源,如果既不能从机床内部移出,又不便隔热,则可采用强制式的风冷、水冷等散热措施。图 2-42 所示为一台坐标镗床主轴箱强制冷却的试验结果。当不采用强制冷却时,机床冷却 6 h 后,主轴与工作台之间在垂直方向发生了 190 μm 的热变形,而且机床尚未达到热平衡;当采用强制冷却后,上述热变形减少到 15 μm ,而且机床运转不到 2 h 时就达到热平衡。

目前,大型数控机床加工中心机床普遍采用冷冻机对润滑油、切削液进行强制冷却,以提高冷却效果。精密丝杠磨床的母丝杠中通以恒温冷却液,可减少热变形。

⑤采用恒温措施。控制环境温度变化,从而使机床热变形稳定,主要是采用恒温的方法来解决。例如,超精密加工机床、精密磨床、坐标镗床、螺纹磨床、齿轮磨床等精密机床都要安装在恒温车间内使用。恒温的精度根据加工精度的要求而定。

⑥使用热变形自动补偿系统。该方法是在加工过程中测量出热变形量的数值,然后采取各种加工中修正或程序数字控制的方式来补偿这一变形量,以保持加工精度不变。精密加工中心机床已采用这种热变形补偿系统。

(2)减少工件热变形的措施。为减少工件热变形对加工精度影响,可以采取以下措施:

- ①在切削区域内充分施加冷却液。
- ②提高切削速度或进给量,使传入工件的热量减少。
- ③工件在精加工前给予充分冷却时间。
- ④及时刃磨刀具和修整砂轮,以免刀具和砂轮变钝,引起切(磨)削热的增大。
- ⑤采用弹簧或液压后顶尖,使工件在夹紧状态下受热后能自由伸缩。

(3)减小刀具热变形的措施。减小刀具热变形对加工精度的影响的措施有:减小刀具伸出长度,改善散热条件,改进刀具角度以减少切削热,合理选用切削用量及加工时加冷却液使刀具得到充分冷却等。

2.3 加工误差的统计分析

前面对影响加工精度的各种主要因素进行了分析和讨论,并提出一些保证加工精度的措施。从分析方法上来讲,前面所述内容属于单因素分析法。而实际生产中影响加工精度往往是多因素、错综复杂的,有时很难用单因素分析法去分析计算某一工序的加工误差。为此,生产中常采用数理统计方法,通过对一批工件进行检查测量,将所测得的数据进行处理与分析,从中找出产生误差的原因和规律,并采取工艺措施提高加工精度,这就是所要讨论的加工误差统计分析法。

2.3.1 加工误差的性质

在零件加工过程中,各种原始误差会造成性质不同的加工误差,按照在加工一批工件时误差出现的规律,加工误差可分为系统误差和随机误差两大类。

1. 系统误差

顺序加工一批工件,其加工误差的大小和方向保持不变或按一定的规律变化,称为系统误差。前者称为常值系统误差,后者称为变值系统误差。

原理误差,机床、刀具、夹具的制造误差,调整误差,量具误差及工艺系统的受力变形等引起的加工误差均与加工时间无关,其大小和方向在一次调整中基本不变,因此都是常值系统误差。例如,钻头直径尺寸大于规定的直径尺寸 0.01 mm ,则所有钻出的孔的直径都比规定的尺寸大 0.01 mm 。机床、夹具、量具等磨损引起的加工误差,在一次调整的加工中也均没有明显的差别,也可认为是常值系统误差。

机床、刀具和夹具在未达到热平衡时的热变形及刀具的磨损等所引起的加工误差都是随加工时间有规律地变化的,故属于变值系统性误差。

2. 随机误差

顺序加工一批工件,其加工误差的大小或方向都是随机的,称为随机误差,如毛坯误差(余量大小不一、硬度不均匀)的复映、定位误差(基准面精度不一、间隙影响)、夹紧误差、工件残余应力引起的变形误差、多次调整的误差等。随机误差服从一定的统计规律。

必须指出,对于某一具体误差来说,应根据其实际情况来决定是属于系统误差还是随机

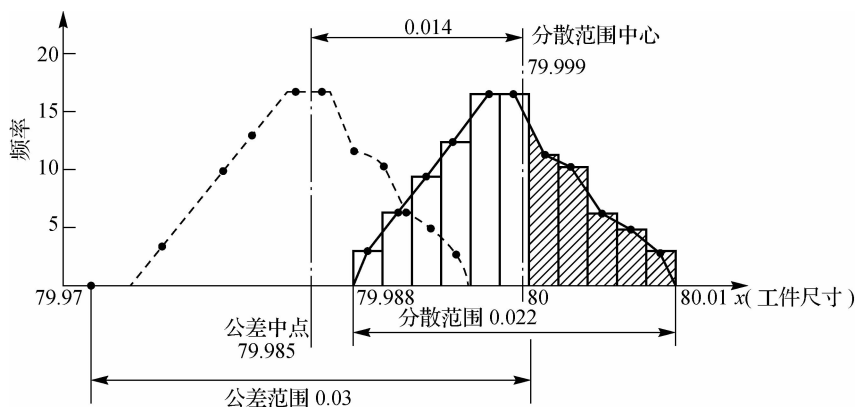
误差。例如,冷却液温度对精磨工件尺寸精度的影响,当冷却液的温度不稳定时,磨削的尺寸也随着发生变化,此时的加工误差属于随机误差;如果采取相应措施,使冷却液温度处于某一恒定值,则温差所造成的尺寸误差也就表现为系统误差了。又如,机床在一次调整中加工一批工件时,机床的调整误差是常值系统误差。但是,当多次调整机床时,每次调整时发生的调整误差就不可能是常值,变化也无一定规律,因此对于经多次调整所加工出来的大批工件,调整误差所引起的加工误差又成为随机误差。

2.3.2 加工误差的分布规律

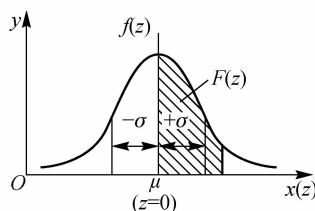
采用调整法加工一批零件时,由于在加工过程中存在随机误差,因而这一批零件的尺寸在数值上是不相同的,其加工误差按照不同规律分布。研究加工误差时,常常应用数理统计学中一些理论分布曲线来近似代替实验分布曲线,这样可使误差分析问题得到简化。

1. 正态分布

采用调整法加工一批零件后,测量出每个零件的尺寸,并按照尺寸大小把整批零件分成若干组。每组中,零件的尺寸处于一定的范围内。同尺寸间隔的零件数量称为频数,频数与该批零件总数之比称为频率。以尺寸间隔为横坐标,以频率为纵坐标,则可求得若干点,用直线把这些点连接起来,就可得到一根折线。例如,磨削 100 根曲轴的轴颈,图纸规定的轴颈尺寸为 $\phi 80_{-0.03}^0$ mm,磨好后逐个进行测量,并按尺寸大小进行分组,现规定每组的尺寸间隔为 0.002 mm,则可做出图 2-43(a)所示的折线。从图中可以看出,一部分工件已超出公差范围(阴影部分),成为废品,但这批工件的尺寸分散范围为 0.022,比公差带 0.03 小,如果将分散范围中心向左移动 0.014 mm 到公差中点,工件就合格了。



(a) 实际分布曲线



(b) 正态分布曲线

图 2-43 零件尺寸分布图

当所取工件的数量增多,尺寸间隔较小时,则所作出的连线就非常接近曲线。不同的加工条件,统计作图为不同形状的曲线,但都呈现出正态分布。生产实践的经验表明,在正常条件下加工一批工件,其尺寸分布情况常和上述曲线相似,符合数理统计学中的正态分布。概率论已经证明,相互独立的大量微小随机变量,其总和的分布符合正态分布。大量实验表明,在机械加工中,用调整法加工一批零件,当不存在明显的变值系统误差因素时,则加工后零件的尺寸近似于正态分布。正态分布曲线如图 2-43(b)所示。

2. 非正态分布

工件的实际分布有时并不近似于正态分布。例如,将两次调整加工的零件混在一起,由于每次调整时常值系统误差是不同的,就有可能得到双峰曲线[图 2-44(a)];假使把两台机床加工的工件混在一起,不仅调整时常值系统误差不等,机床精度也不同(随机误差的影响也不同),那么曲线的两个高峰也不一样。

如果加工中刀具或砂轮的尺寸磨损比较显著,所得一批工件的尺寸分布如图 2-44(b)所示。尽管在加工的每一瞬时,工件的尺寸呈正态分布,但是随着刀具或砂轮的磨损,不同瞬间尺寸分布的算术平均值是逐渐移动的(当均匀磨损时,瞬时平均值可看成匀速移动),因此分布曲线为平顶。

当工艺系统存在显著的热变形时,分布曲线往往不对称。例如,刀具热变形严重,加工轴时曲线凸峰偏向左,加工孔时曲线凸峰偏向右,如图 2-44(c)所示。

试切法加工时,操作者主观上存在宁可返修也不报废的倾向性,所以分布图也会出现不对称情况:加工外圆时宁大勿小,故凸峰偏向右;加工孔时宁小勿大,故凸峰偏向左。

对于端面圆跳动和径向圆跳动一类的误差,一般不考虑正负号,所以接近零的误差值较多,远离零的误差值较少,其分布(称为瑞利分布)也是不对称的,如图 2-44(d)所示。

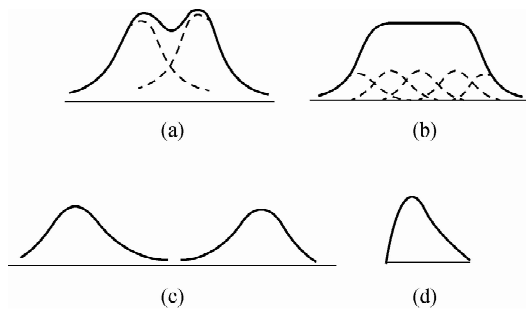


图 2-44 非正态分布曲线

2.3.3 分布曲线统计分析方法

常用的统计分析法有分布曲线法和点图法两种。

在研究加工误差时,人们常用数理统计学中一些“理论分布曲线”来近似地代替实际分布曲线,从而较方便地研究零件的加工精度问题。正态分布曲线是应用最广泛的理论正态分布曲线。

1. 理论正态分布曲线

理论正态分布曲线如图 2-45 所示,其方程式为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (2-15)$$

当采用正态分布曲线代替加工尺寸的实际分布曲线时,上述方程式中 x 为工件尺寸, $\bar{x}$ 为工件平均尺寸(算术平均尺寸),即

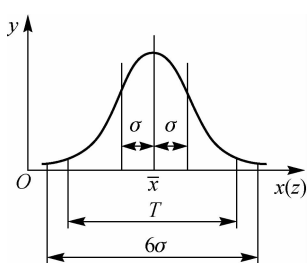


图 2-45 理论正态分布曲线

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-16)$$

式中, x_i 为第 i 个零件的尺寸; σ 为均方根误差(标准差), 是表示零件尺寸分散状况的指标, 其值为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n} \quad (2-17)$$

式中, n 为样本的工件总件数。

理论正态分布曲线具有以下一些特点:

(1) 算术平均尺寸 $\bar{x}$ 决定了正态分布曲线的中心位置, 即 $\bar{x}$ 表示样本的尺寸分散中心, 它主要决定于调整尺寸的大小和常值系统误差。正态分布曲线在 $\bar{x}$ 左右是对称的, 有时为研究方便起见, 把纵坐标移至 $\bar{x}$ 的位置, 即 $\bar{x}=0$, 此时正态分布曲线方程式为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2-18)$$

式中, e 为自然对数底($e=2.7183$)。

(2) 均方根误差 σ 是决定曲线形状的参数, 反映了工件的尺寸分散程度, 它是由变值系统误差和随机误差决定的, 误差大 σ 也大, 反之亦然。由图 2-46 所示的曲线可看出: 当 $x = \bar{x}=0$ 时, 零件出现的概率最大, 这时 $y_{\max} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$ 。该式说明, σ 越大, $y_{\max}$ 越小, 即曲线越矮

胖, 因为曲线与横坐标所包围的面积, 即全部零件出现的概率是个常数; 相反, σ 越小, $y_{\max}$ 越大, 曲线越瘦高, 如图 2-47 所示。 σ 的物理意义就在于它表明了一批零件加工精度的高低。

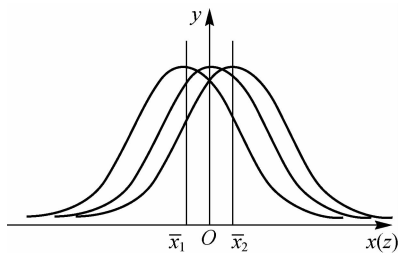


图 2-46 不同 x 的正态分布曲线

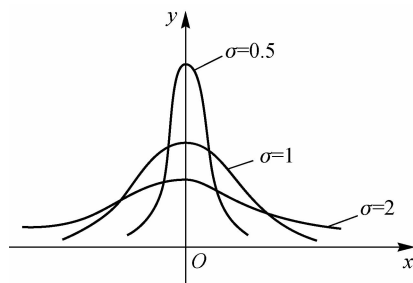


图 2-47 不同 σ 的正态分布曲线

(3) 正态分布曲线与横坐标轴没有交点, 由曲线方程式可知, 只有当 $x = \pm\infty$ 时, 才使 $y=0$, 实际上零件尺寸分散有一定的范围, 故 y 不可能为零。

(4) 在任一尺寸范围内, 零件出现的概率计算: 由横坐标上任意两点作垂线, 与分布曲线相交后, 则分布曲线与横坐标轴间包含的面积即该区间零件出现的概率。图 2-48 所示的小条面积: $\Delta F = y\Delta x$, 包围在分布曲线与横坐标之间全部面积等于各个小条面积之和, 也就代

表一批被加工零件的百分之百,所以这一部分的面积等于 1。

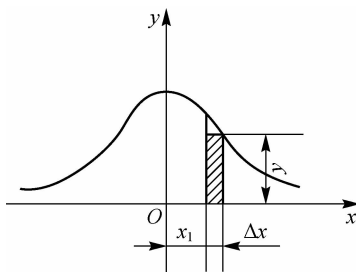


图 2-48 零件在 x 尺寸范围出现的概率

2. 分布曲线的相关计算

如果只计算分布曲线与横坐标之间某一部分面积,如图 2-49 所示的带阴影部分的面积,则可用式(2-19)表示。

$$F_1 = \int_0^{x_1} y dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{x_1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2-19)$$

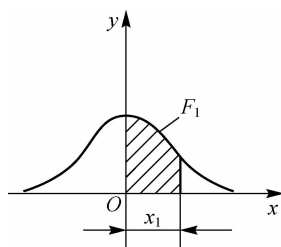


图 2-49 零件在 $\bar{x}$ 尺寸范围出现的概率

对于同一曲线, x 不同,面积也就不同。 x 越大,包围在这一范围内的面积也就越大,即所包含的零件数越多,对于不同的曲线(σ 不同),虽 x 相同,但在同一尺寸范围内的面积大小都不同,因此面积 F 可看成 x/σ 的函数。

设 $\frac{x}{\sigma} = z$, 则

$$F(z) = \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2-20)$$

各不同 z 的函数 $\varphi(z)$ 见表 2-1。

查表 2-1 可知:

当 $z=0.3$, 即 $x=\pm 0.3\sigma$ 时, $2\varphi(z)=0.2358$ 。

当 $z=1.1$, 即 $x=\pm 1.1\sigma$ 时, $2\varphi(z)=0.7286$ 。

当 $z=3$, 即 $x=\pm 3\sigma$ 时, $2\varphi(z)=0.9973$ 。

这说明,在 $x=\pm 3\sigma$ 范围内,实际上已差不多包括了该批零件的全部,因此一般可取 6σ 为尺寸分散范围,即可达到加工零件的合格率为 99.73%,而废品率只有 0.27%。