

齐国光 陈良浩 编

高等学校教学用书

机械制造工艺学

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是为从事石油矿场机械和石油化工机械的设计人员加强机械制造的基本理论, 进一步掌握机械加工的基本知识和提高设计的机械加工工艺水平而编写的技术基础课教材。

此书还可供矿山机械、冶金机械、建筑机械等机械设计类专业参考。

机 械 制 造 工 艺 学

齐国光 陈良浩 编

石油工业部教材编译室编辑 (北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 17¹/₄印张 411千字 印1—5,500

1988年6月北京第1版 1988年6月北京第1次印刷

书号: 15037·2942 定价: 2.75元

ISBN 7-5021-0093-8/TE·93

前 言

《机械制造工艺学》是为石油矿场机械和石油化工设备与机械等机械设计类专业编写的一门技术基础课教材。也可用作同专业的成人高等教学参考书，并可供从事机械设计的工程技术人员参考。

为了便于掌握本书的基本内容和教学重点，编写中力求各章的篇幅与所分配的教学时数相适应。

本书第一、四、五、七、十章由齐国光编写，第二、三、六、九章由陈良浩编写，第八章由齐国光、陈良浩合写。全书由齐国光主编，由陈如恒教授主审。

本书是在石油高校“机制工艺编写组”所编同名教材经过试用于1984年征求意见后重新编写的，本书初稿曾在石油高校金工学科组“抚顺会议”上进行了认真的讨论，并提出了不少修改意见，石油高校和职工大学的同行教师在本书编写过程中也提出过不少宝贵意见。在此，谨向他们表示衷心地感谢。

由于我们的水平有限，加上编写时间仓促，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

一九八六年四月

目 录

第一章	机械制造工艺过程的基本概念	(1)
第一节	生产过程和工艺过程	(1)
第二节	生产类型及其工艺特点	(3)
第二章	机械加工质量	(6)
第一节	机械加工质量的基本概念	(6)
第二节	影响加工精度的主要因素	(7)
第三节	加工误差的综合分析	(30)
第四节	表面质量对零件使用性能的影响	(37)
第五节	影响表面质量的工艺因素	(41)
第六节	机械加工的经济精度和表面粗糙度	(49)
第三章	尺寸链	(51)
第一节	尺寸链的基本概念	(51)
第二节	用极值法解尺寸链	(55)
第三节	用概率法解尺寸链	(64)
第四章	提高劳动生产率的主要途径	(69)
第一节	提高劳动生产率的基本途径	(69)
第二节	提高机械加工劳动生产率的工艺措施	(70)
第三节	高生产率机床和工艺简介	(73)
第四节	机械加工装备的发展	(92)
第五章	机械加工工艺规程的编制	(94)
第一节	工艺工作和工艺规程	(94)
第二节	基准的选择	(101)
第三节	拟定工艺路线	(106)
第四节	加工余量和工序尺寸的确定	(113)
第五节	编制机械加工工艺规程实例——汽车变速器传动轴工艺规程的编制	(115)
第六章	工件的安装	(122)
第一节	工件的安装方式	(122)
第二节	工件定位原理	(124)
第三节	机床夹具简介	(128)
第四节	定位方法、定位元件和定位误差	(140)
第五节	工件的夹紧	(149)
第七章	典型表面的加工	(152)
第一节	外圆表面的加工	(152)

第二节	内圆表面的加工	(164)
第三节	平面的加工	(177)
第四节	成形表面加工	(181)
第五节	螺纹加工	(186)
第六节	齿面加工	(191)
第八章	典型零件加工	(202)
第一节	圆柱齿轮加工	(202)
第二节	箱体加工	(210)
第三节	连杆加工	(219)
第四节	三牙轮钻头加工	(228)
第九章	装配与调整	(237)
第一节	装配精度	(237)
第二节	建立装配尺寸链	(238)
第三节	装配体结构和装配尺寸链的计算方法	(241)
第四节	装配工艺与装配体设计	(250)
第十章	机械加工结构工艺性	(253)
第一节	概述	(253)
第二节	改进零件切削加工结构工艺性的途径和实例	(255)
第三节	典型零件的结构工艺性	(263)
第四节	改进零部件结构装配工艺性的途径和实例	(267)

第一章 机械制造工艺过程的基本概念

机械制造工艺学是以机械制造中的工艺问题为研究对象的一门技术学科。本章从介绍生产过程开始，重点讲述机械加工工艺过程的组成，同时阐述机械制造行业中生产类型的划分及其工艺特点。

第一节 生产过程和工艺过程

一、生产过程和工艺过程

机械制造业为国民经济中各部门提供机械装备。机械产品的生产过程包括从原材料到成品的全部过程（如图1-1）。

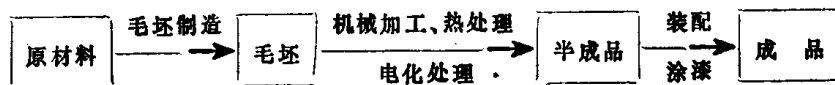


图 1-1 生产过程流程图

生产过程是一个复杂、综合的劳动过程，其中包括直接改变毛坯形状、尺寸和材料性能，以及将零、部件装配成机器的生产过程；同时也包括各种辅助生产过程。前者称为工艺过程，后者称为辅助生产过程。生产过程的组成如图1-2所示。

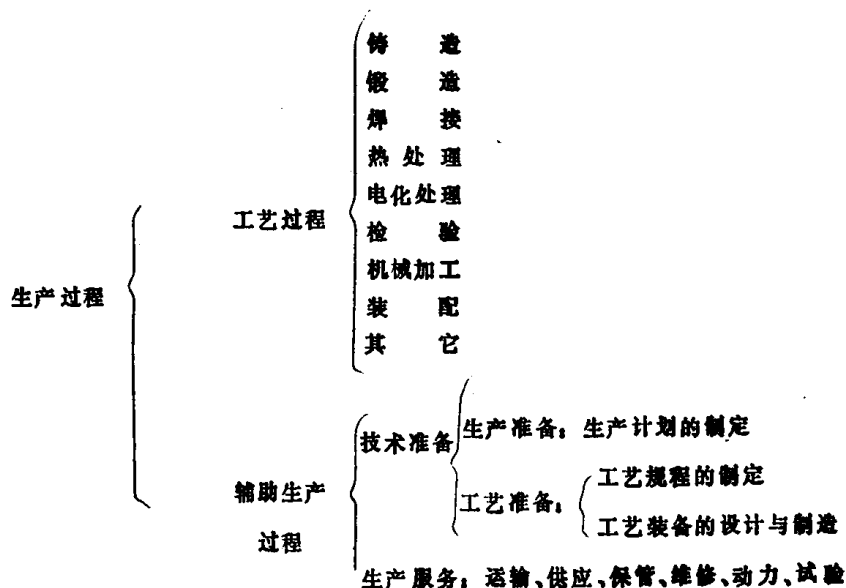


图 1-2 生产过程的组成

在整个生产过程中，占主导地位的是工艺过程。对大多数产品，机械加工工艺过程对保证产品质量、提高劳动生产率、降低成本具有最直接的影响，占的比重也较大。

机械加工工艺过程是指用机械加工方法改变毛坯的几何形状、尺寸、加工精度和表面粗糙度，使之成为合格零件的过程。

二、机械加工工艺过程的组成

零件的机械加工工艺过程，大多要在多台设备上顺序地经过多次加工才能完成。工艺过程可细分为工序、安装、工位和工步。

1. 工序

一个（或一组）工人在一个工作地点上对一个或同时几个工件进行加工，所连续完成的那部分工艺过程称为工序。它是工艺过程的基本单元。

2. 安装

在一个工序中，零件可能只装夹一次，也可能需要装夹多次（如调头、翻转），每一次装夹所完成的那部分工艺过程称为安装。

3. 工位

在一个工序中，多次安装会增加工时消耗和安装误差。为此，采用转位（或移位）工作台、刀台或夹具，这时在一次安装中，工件在机床占有的每个位置上完成的那部分工艺过程称为工位。

4. 工步

在一个工序（一次安装或一个工位）中，常采用多种刀具对一个（或几个）表面进行不同的加工（粗、半精、精加工）。在加工表面、切削刀具和切削用量中的转速和送进量不变的情况下，所完成的那部分工艺过程称为工步。

工步是构成工序的基本单元。

以联轴器的加工工艺过程（图1-3）来进一步说明加工工艺组成中的各个部分。

在单件小批生产条件下，联轴器加工工艺过程为：

工序1——车外圆、车端面、钻孔、镗孔和内孔倒角（普通车床）。

工序2——划线（划线平台）。

工序3——钻 $\phi 20$ 六个孔（摇臂钻床）。

在大批大量生产条件下，联轴器加工工艺过程为：

工序1——车外圆 $\phi 223$ 、车端面C和镗孔 $\phi 60$ 。（多刀半自动车床）。

工序2——车端面A和B，内孔倒角（多刀半自动车床）。

工序3——钻 $\phi 20$ 六孔（六轴专用钻床）。

以车削加工工序为例，单件生产时，只一个工序，但要两次安装：

安装1——用三爪卡盘夹紧 $\phi 102$ 外圆，车端面C，车外圆，钻、镗孔和内孔倒角。

安装2——工件调头，用三爪卡盘夹紧 $\phi 223$ 外圆，车端面A和B，内孔倒角。

大批生产时需要两个工序，每工序只要一次安装。

再以安装1中，加工 $\phi 60$ 孔为例，由于先用钻头钻孔，再用镗孔刀镗孔，是两个工步，即：

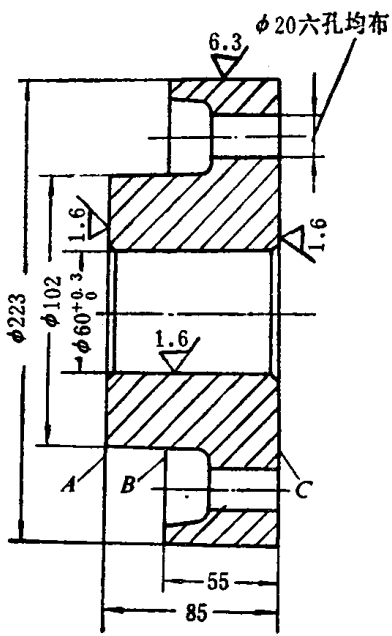


图 1-3 联轴器

工步 1 —— 钻孔至 $\phi 30$

工步 2 —— 镗孔至 $\phi 60^{+0.3}_{-0}$

若镗孔时先粗镗后精镗，虽然刀具不变，由于转速和进给量要变，则为三个工步，

工步 1 —— 钻孔

工步 2 —— 粗镗孔

工步 3 —— 精镗孔

对于钻孔工序，当单件生产时，用摇臂钻在一次安装中以线找正，分 6 个工步完成。当大批生产时，工件安装在转位夹具中，在立式钻床上钻孔，一次安装要经过 6 个工位依次加工出 6 个孔（图 1-4）。当大批生产时，工件在如图 1-5 所示的六轴专用钻床上钻孔。一次装夹后，6 个孔同时钻出，称为复合工步。

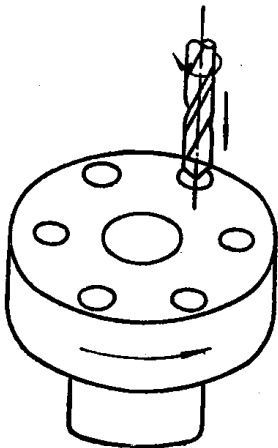


图 1-4 多工位加工

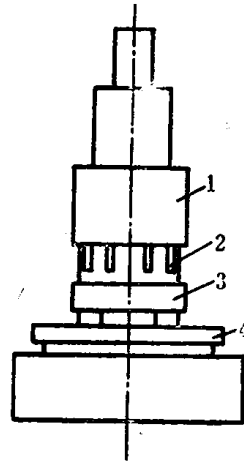


图 1-5 复合工步
1—主轴箱；2—钻头；3—工件；4—工作台

第二节 生产类型及其工艺特点

一、生产纲领

产品的生产纲领，是指包括备品和废品在内的年生产量，通常按下式计算：

$$N = Q \cdot n (1 + a\% + b\%)$$

式中 N —— 零件的生产纲领，件/年；

Q —— 产品的年产量，台/年；

n —— 每台产品中该零件的数量，件/台；

$a\%$ —— 备品率；

$b\%$ —— 废品率。

二、生产类型

生产纲领决定了生产规模，生产规模的不同对零件的工艺过程影响很大。零件的生产纲领确定后，还要根据车间具体情况将零件在一年中分批或连续投入生产。每批投入生产的数量称为批量。

生产管理部门按照投入生产的批量或生产的连续性，把生产规模分为三种类型，即单件生产，成批生产和大量生产。

(1) 单件生产。单个地生产不同结构和不同尺寸的产品，甚至完全不重复的生产。例

如生产某些重型机械、专用设备、专用工装和新产品样机等。

(2) 成批生产。一年中分批地制造相同的产品, 制造过程有一定的重复性。例如机床制造是典型的成批生产。根据批量的大小, 批量生产又分为: 小批生产、中批生产、大批生产。小批生产的工艺的特点和单件生产相似, 中批生产工艺过程的特点介于单件小批和大批生产之间, 大批生产工艺特点和大量生产相似。

(3) 大量生产。产品的数量很大, 大多数工作地点经常重复地进行某一个零件的某一道工序的加工。例如制造汽车、拖拉机、轴承, 通常都是以大量生产的方式进行。

表1-1是企业的生产类型和生产纲领的关系。

生产类型的不同之所以能影响工艺过程, 是因为同一零件当生产类型不同时, 其生产方式、生产管理方法、毛坯状况、工艺装备和加工方法等都会有很大差别。表1-2列出了各种生产类型工艺过程的主要特点。

表 1-1 企业的生产类型和生产纲领的关系

生 产 类 型		产品类型及同种零件的年产量		
		重 型	中 型	轻 型
单 件 生 产		5 以下	10 以下	100 以下
成 批 生 产	小 批	5~100	10~200	100~500
	中 批	100~300	200~500	500~5000
	大 批	300~1000	500~5000	5000~50000
大 量 生 产		1000 以上	5000 以上	50000 以上

表 1-2 各种生产类型工艺过程的主要特点

序 号	项 目	单 件 生 产	成 批 生 产	大 量 生 产
1	加工对象	经 常 变 换	周期性变换	固 定 不 变
2	零件互换性	没有互换性, 广泛采用钳工修配	大部分有互换性, 少数用钳工修配	全部有互换性, 某些精度较高的配合件用分组选择装配法
3	毛坯的制造方法	铸件用木模手工造型, 锻件用自由锻	部分铸件用金属模, 部分锻件用锻模	铸件广泛采用金属模机器造型, 锻件广泛采用模锻, 以及其它高生产率的毛坯制造方法
4	加工余量	毛坯精度低, 加工余量大	毛坯精度中等, 加工余量中等	毛坯精度高, 加工余量小
5	机床设备	采用万能设备按机群布置	部分通用机床和部分高生产率机床, 按加工零件类型分工段排列或采用成组技术或柔性自动加工系统	广泛采用高生产率的专用机床及自动机床, 按流水线形式排列

续表

序 号	项 目	单 件 生 产	成 批 生 产	大 量 生 产
6	夹 具	多采用标准件和组合夹具	采用组合夹具, 通用可调夹具、成组夹具、专用夹具	广泛采用高效夹具和特种工具, 工件靠夹具及调整法达到精度要求
7	安装方法	靠划线找正及试切法达到精度要求	部分靠划线法找正	不需划线找正
8	刀具与量具	采用通用刀具和万能量具	较多采用专用刀具及专用量具	广泛采用高生产率刀具和量具
9	对工人的技术要求	需要技术熟练的工人	需要一定熟练的人工	对操作工人的技术要求较低, 对调整工人的技术要求较高
10	工艺规程	只编制简单的工艺过程卡片	有较详细的工艺过程卡片, 对主要件的关键工序编制工序卡片	编制详细的工序卡片
11	生 产 率	低	中	高
12	成 本	高	中	低

第二章 机械加工质量

任何一种机械产品都是由许多零件装配起来的,零件的加工质量和装配质量直接关系到产品的质量。

机械产品的设计人员通过图纸对零件的加工质量提出具体的要求。制造者的任务则在于在满足这些要求的前提下,多、快、好、省地把零件加工出来。质量高、价格合理的机械产品是设计师和工艺师共同努力的结果。设计人员不但应当考虑零件的工作性能,从而对零件提出加工质量方面的要求,还应当具备机械加工知识,了解影响加工质量的工艺因素以及各种机械加工方法能够达到的加工精度、表面质量和生产成本,使设计的零件结构合理,便于加工,满足使用要求而又价格合理。制造者则关心各种因素对加工质量的影响规律,力图从中找出提高加工质量和降低生产成本的途径。

第一节 机械加工质量的基本概念

机器零件的加工质量包括两个方面的指标:加工精度和表面质量。

加工精度指加工以后的零件在形状、尺寸、表面相互位置等方面和理想零件的符合程度。符合的程度愈高,加工精度也愈高。理想零件的尺寸不应当被理解为基本尺寸,而应理解为零件图纸上对应于公差带中点的尺寸。任何一种加工方法,都不可能把零件做成和理想的完全相同,总会产生一些偏离。这种偏离就是加工误差。

表面质量指零件表面的几何形状(表面粗糙度、波度等)和表面层的机械物理性能。

一、获得规定的加工精度的方法

1. 表面形状精度

机械加工中获得一定形状表面的方法可以归纳为如下三种。

(1) 轨迹法。此法利用刀尖的运动轨迹形成要求的表面几何形状。刀尖的运动轨迹取决于刀具与工件的相对运动(成形运动)。例如刨刀的直线运动和工件的垂直于刀具运动方向的间断的直线运动形成平面;工件的回转运动和车刀的直线运动可以形成圆柱面或圆锥面;工件的回转运动和车刀沿靠模所作的曲线运动可以形成特殊形状的回转表面等。

用这种方法得到的形状精度取决于机床成形运动的精度。

(2) 成形法。此法利用成形刀具代替普通刀具来获得要求的几何形状的表面。机床的某些成形运动被成形刀具的刀刃所取代,从而简化了机床的结构,提高了劳动生产率。例如用成形车刀加工曲面,用成形铣刀铣成形表面等。

用这种方法获得的表面形状精度,既取决于刀刃的形状精度,又有赖于机床成形运动的精度。

(3) 展成法。刀具和工件作啮合运动,刀具刀刃的形状必须是被加工面的共轭曲线,它在啮合运动中的包络面就是被加工面。加工齿轮的齿面时常常采用这种方法。

展成法的加工精度取决于刀刃的几何形状精度和啮合运动的准确程度。

2. 尺寸精度

机械加工中获得规定尺寸的方法有试切法、定尺寸刀具法、调整法和自动控制法。

(1) 试切法。这是一种通过调整—试切—测量，再调整、试切、测量的反复进行的过程来获得要求的尺寸的方法。这种方法获得的尺寸精度取决于测量精度，机床进给机构的工作精度，刀具的切削性能，工艺系统的刚性，以及操作工人的技术水平。它的生产率比较低，一般只适用于单件和小批生产。

(2) 定尺寸刀具法。它利用刀具的相应尺寸来保证被加工表面的尺寸。例如用一定尺寸的钻头和铰刀来加工孔，用铣刀铣键槽，用丝锥加工螺纹等。用这种方法获得的尺寸精度取决于刀具本身的尺寸精度和一系列其它的因素。例如刀具和工件的安装，机床运动的准确性和稳定性，工件材料的性质，冷却润滑条件等。

(3) 调整法。根据要求的工件尺寸预先调整好机床、刀具和工件的相对位置，再进行加工。采用这种加工方法得到的加工精度除了受调整精度的影响之外，还受诸如工艺系统弹性变形之类的一些因素的影响。和试切法相比，这里省去了重复多次的试切和测量工作，因而生产率比较高，适用于成批和大量生产。

(4) 自动控制法。采用自动控制系统对加工过程中的刀具进给、工件测量、补偿调整和切削运动等进行自动控制，从而获得要求的工件尺寸。这种加工方法生产率高，能够加工形状复杂的表面，而且适应性好，所以获得了日益广泛的应用。采用这种加工方法得到的工件的尺寸精度取决于控制系统中元件的灵敏度，系统的稳定性以及机械装置的工作精度。

3. 表面相互位置精度

当零件上有相互位置精度要求的各表面是在一个工序的一次安装中加工出来的时候，表面相互位置精度是由机床有关部分的相互位置精度来保证的。当零件上有相互位置精度要求的各表面被安排在不同的安装中加工时，零件表面的相互位置精度主要取决于安装精度。有关安装精度的问题将在第六章中讨论。

二、零件的表面质量

零件的表面质量包括表面的几何特征和表面层的物理、机械性能。表面几何特征指的是表面粗糙度和波度；物理机械性能是塑性变形引起的表层金属的冷作硬化，切削热引起的金相组织变化，以及表层金属中的残余内应力。

第二节 影响加工精度的主要因素

在研究影响加工精度的因素时，应当对机械加工的全过程进行分析，也就是应当对采用的加工方法，机床，夹具，刀具，工件，工艺系统（机床——夹具——刀具——工件系统）的调整，切削过程中可能产生的问题，工作环境，工件的检验等进行分析。分析表明，影响加工精度的主要因素可以归纳为八个方面：

- | | |
|---------------|-----------------|
| (1) 原理误差； | (2) 机床、夹具、刀具误差； |
| (3) 工艺系统受力变形； | (4) 工艺系统受热变形； |
| (5) 内应力； | (6) 度量误差； |

(7)调整误差;

(8)工件安装误差。

影响加工精度的这些因素并非总是同时出现在每一个机械加工过程中,各个因素对加工精度的影响程度也不尽相同。因此,在对一个具体的机械加工过程中引起加工误差的因素进行分析时,必须善于找出主要的影响因素,从而设法提高加工精度。实践表明,泛泛地了解引起加工误差的原因是比较容易的,而针对具体情况采取具体的措施则要困难得多。下面对工件安装误差以外的各影响因素进行逐个的分析。

一、原理误差

原理误差是由于采用了近似的加工运动或者近似的刀具轮廓而产生的。

例如在公制车床上加工模数蜗杆。蜗杆的螺距为 πm ,而 π 是一个无理数,在机床的传动链中只能根据蜗杆的精度要求选用适当的挂轮。这时,由于采用了近似的传动比,就引起了蜗杆螺距的原理误差。

用齿轮模数铣刀加工齿轮时,从理论上讲,同一模数不同齿数的齿轮具有不同的齿形,需要用不同形状的铣刀来铣制。实际上,这样做将是不经济的。所以通常是用有限把数(8~26把)的一套铣刀来加工同一模数的各种齿数的齿轮,每一把铣刀加工一定齿数范围的齿轮,而且铣刀的形状是根据这个齿数范围中齿数最少的那一个齿轮的齿形设计的。用这把铣刀来加工该齿数范围内其余齿数的齿轮时就有加工原理误差。用成形砂轮磨削齿面时,修整砂轮的机构结构很复杂。因此,出现了一种根据新的理论设计的砂轮修整器,用以取代渐开线砂轮修整器,使砂轮修整机构的结构简化。采用这种磨齿法也有原理误差。

滚切齿轮也是一种近似的加工方法,它有两种原理误差:一是由于刀具制造上的困难,生产上采用阿基米德蜗杆或法向直廓蜗杆来代替渐开线蜗杆而引起的误差,二是由于为了形成刃口,在滚刀上开了几条槽,破坏了蜗杆齿的连续性。由于开的槽数有限,实际切成的工件齿形就是一条折线,而不是光滑的渐开线。同理,插齿、刨齿等加工方法也得不到光滑的渐开线而只能得到由折线组成的齿形。

从理论上讲,似乎应当采用完全符合理想的加工运动或刀刃轮廓形状,以期得到形状准确的工件表面,避免加工原理误差。实际上,这样做会使机床或刀具的结构变得很复杂,难于制造;或者由于机床传动链中环节过多,增加了机构运动中的误差;反而得不到高的工件加工精度。生产实践中,在权衡了各方面因素的利弊以后,往往采用近似的加工运动或刀刃形状,以获得高产、优质、低消耗的技术经济效益。

二、机床、夹具、刀具误差对加工精度的影响

机床误差包括机床的制造误差、安装误差和机床的磨损。机床夹具类似于机床部件,可以用分析机床误差对工件加工精度的影响的方法来分析夹具误差对加工精度的影响。机床误差中对工件加工精度影响较大的有主轴回转误差、导轨误差和传动链误差。导轨误差包括导轨本身的几何形状误差、导轨与导轨之间的相互位置误差、以及导轨和机床主轴旋转轴心线之间的相互位置误差。

1. 主轴回转误差

主轴的回转精度对工件的加工精度影响甚大。在理想的情况下,主轴在转动时它的旋转轴心线的空间位置不发生变化。实际上,由于存在着主轴轴颈的圆度,轴颈之间的同轴度,轴承内孔和外表面之间的同轴度,主轴支承端面对轴颈轴心线的垂直度,以及主轴的

挠度等误差, 主轴的瞬时回转轴心线的空间位置会发生变化。图2-1表示主轴回转误差的基本形式。

常用的测量主轴回转精度的方法如图2-2所示。这种方法使用方便, 但它不能反映主轴在工作状态下的回转误差及其对工件加工精度的影响。

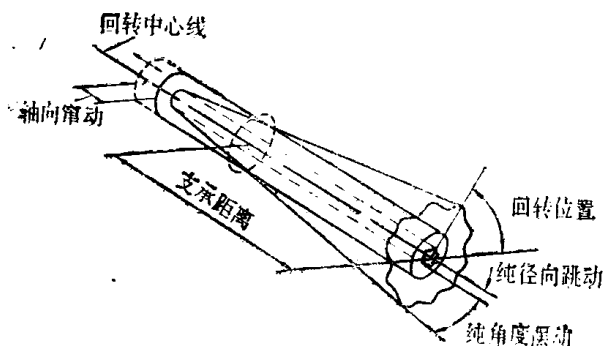


图 2-1 主轴回转误差的基本形式

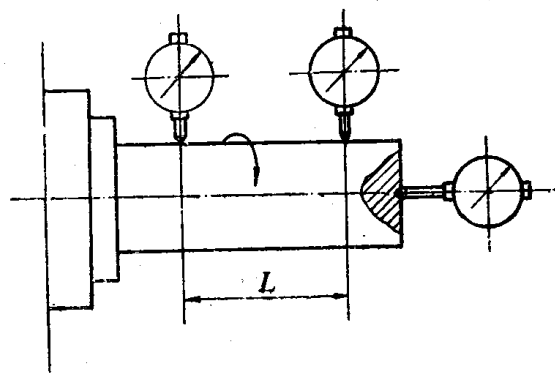


图 2-2 主轴回转精度的常用测量方法

近年来, 主轴轴心漂移以及对于由此产生的加工误差进行在线 (on line) 补偿, 一直是机械制造工艺的研究课题之一。

(1) 主轴的径向跳动。在主轴使用滑动轴承的结构中, 主轴轴颈在轴套孔内旋转, 轴颈和轴套孔之间存在着间隙。轴颈和轴套孔的圆度误差都可能对主轴回转轴心线的空间位置产生影响。加工方法不同, 主轴回转轴心线位置变化引起的加工误差也不同。在车床类机床中, 在切削力的作用下, 主轴轴颈和轴套孔壁的固定部位接触, 如图 2-3a 所示。这

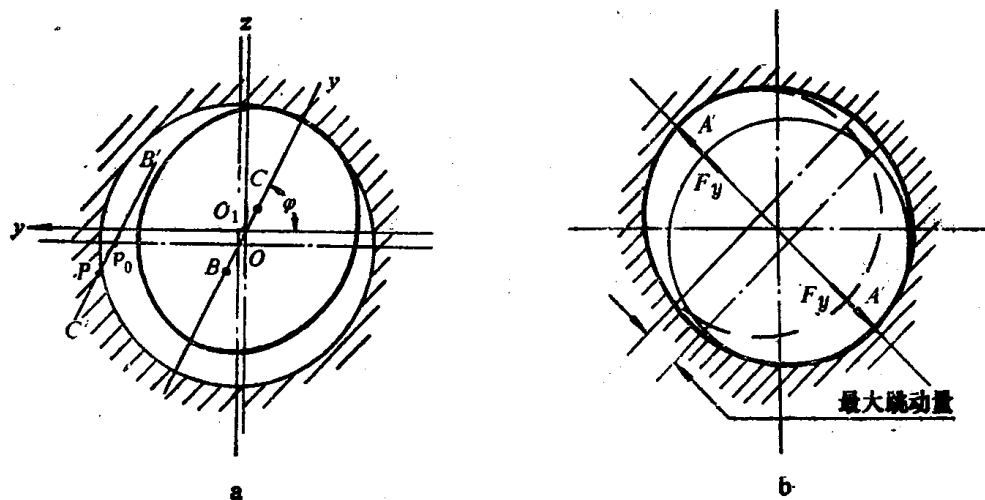


图 2-3 轴颈和轴套孔圆度误差引起的加工误差

a—车床类机床; b—镗床类机床

时, 轴套孔的圆度误差对加工精度没有影响, 主轴轴颈的圆度误差则使主轴回转轴心线的位置发生变化, 它和刀尖之间的距离时远时近, 从而引起工件的圆度误差。设车刀刀尖的位置为 P_0 , 主轴回转轴心沿 BC 作往复运动, 偏离其中心位置 O 的距离为

$$OO_1 = A \cdot \sin \omega t \quad (2-1)$$

$$A = \frac{1}{2} BC$$

根据运动的相对性，可以设想主轴回转中心的位置固定不变，而刀尖相对于它的固定位置 P_0 沿着平行于 BC 的直线作往复运动，偏离 P_0 点的距离等于

$$PP_0 = A \sin(\omega t + \pi) \quad (2-2)$$

π 表示 OO_1 和 PP_0 的相位刚好相反。可以把 PP_0 看作是由 y 和 z 两个方向的分量组成。 z 方向的分量对工件半径大小的影响甚微，可以忽略不计， y 方向的分量等于

$$\begin{aligned} (PP_0)_y &= A \sin(\omega t + \pi) \cdot \cos \varphi \\ &= A_1 \sin(\omega t + \pi) \\ A_1 &= A \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (2-3)$$

由于 P_0 距 y 轴很近，可以把 $(PP_0)_y$ 近似地看作工件半径上的加工误差。工件的瞬时半径 PO 等于

$$\begin{aligned} PO &\approx P_0O + (PP_0)_y \\ &= R_0 + A_1 \sin(\omega t + \pi) \end{aligned} \quad (2-4)$$

工件截面的轮廓形状不是一个圆。由式(2-4)可知，虽然在 y 轴和 z 轴上工件的直径都正好等于 $2R_0$ ，但 O 点却不在工件横截面的中心位置。

由于主轴跳动的方向不和 y 轴平行，主轴轴颈的圆度误差将以缩小的比例反映到工件上。

在镗床类机床中，情况正好相反。在切削力的作用下，主轴轴颈的固定部位沿轴套孔壁滑动，如图2-3b所示。轴套孔的圆度误差将引起工件的圆度误差。

在主轴采用滚动轴承的结构中，主轴的径向跳动既和轴承本身的制造精度有关，又和与轴承环相配合的轴颈的形状精度有关。外环滚道的圆度误差，内环滚道的圆度误差和滚道与内孔之间的同轴度误差，滚动体的尺寸误差和形状误差等综合作用的结果造成主轴的径向跳动，从而引起工件的圆度误差。由于滚动轴承环是薄壁零件，刚性较小，所以即使它本身的几何形状是正确的，当它装到有圆度误差的主轴轴颈上的时候，也会由于有装配过盈而产生变形，影响主轴的回转精度。图2-4表示滚动轴承内环在装到有圆度误差的轴颈上之后在圆度仪上测得的圆度误差。和采用滑动轴承的主轴结构类似，在车床类机床中，主要是轴承内环滚道的圆度误差影响主轴的回转精度；在镗床类机床中，则主要是轴承外环滚道的圆度误差影响主轴的回转精度。

(2) 主轴的轴向窜动。止推轴承滚道端面跳动会造成主轴的轴向窜动。主轴上安装止推轴承的台肩和主轴轴心线不垂直，调节螺母、过渡套、垫圈等的端面和主轴轴心线不垂

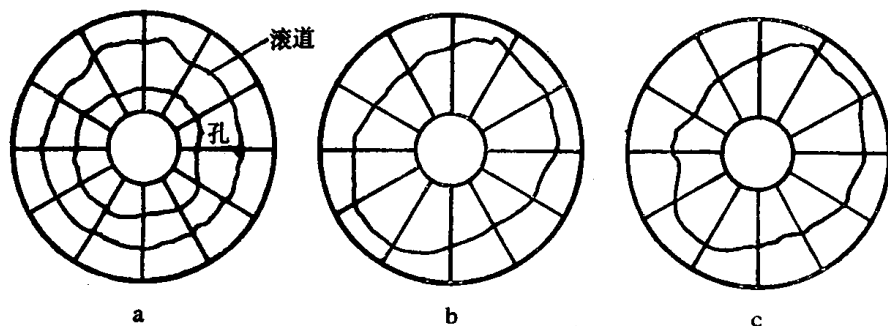


图 2-4 轴承内环在安装前后的误差

a—安装前内环的孔和滚道的形状误差；b—主轴轴颈形状误差；c—装上轴颈后内环滚道的形状误差

直, 都可能使止推轴承安装不正确, 造成类似于滚道端面跳动的后果, 引起主轴轴向窜动。

在车床类机床中, 加工螺纹时, 主轴的轴向窜动将使单个螺距产生周期误差; 在端面车削中则会造成端面不平。

近年来, 机床制造业致力于提高机床的制造精度。国外的某些车床, 主轴轴颈的圆度为 0.005mm , 同轴度 0.005mm , 内外圆锥面对轴颈的跳动量不大于 0.005mm , 轴颈的表面粗糙度的算术平均偏差不大于 $0.08\mu\text{m}$, 因而使精车外圆时可以达到圆度 0.006mm , 圆柱度 $0.01\text{mm}/300\text{mm}$; 车端面时在直径 250mm 上的垂直度为 0.003mm 。在超精密加工中, 国外某些厂家能够在 $\phi 150\text{mm}$ 上达到的加工精度为: 平面 0.1微米 , 成形面 $0.1\mu\text{m}$ 。在美国的POMA (Point One Micrometer Accuracy) 计划中, 对机床主轴的径向和轴向跳动甚至提出了 $\leq 0.02\mu\text{m}$ 的高精度要求。

2. 导轨误差

床身导轨是机床中一些主要部件相对位置的基准, 也是运动的基准, 它的误差直接影响工件的加工精度。导轨的不同形式的误差对工件加工精度的影响程度是不相等的。以车床床身导轨为例。床身导轨在水平面内的不直度使刀具产生水平方向的位移 Δy , 它使工件的半径产生误差 ΔR , 其值等于 Δy 。工件直径的误差等于 $2 \cdot \Delta y$ 。可见这个影响是很大的。车床床身导轨在磨损以后会形成内凹的形状, 为了补偿这个误差, 允许新车床床身导轨在水平面内微向外凸。车床床身导轨在垂直面内的不直度使纵走刀过程中车刀的高度发生变化, 引起加工误差。设刀尖的高度变化等于 Δz , 由图2-6可知, 工件半径的变化量

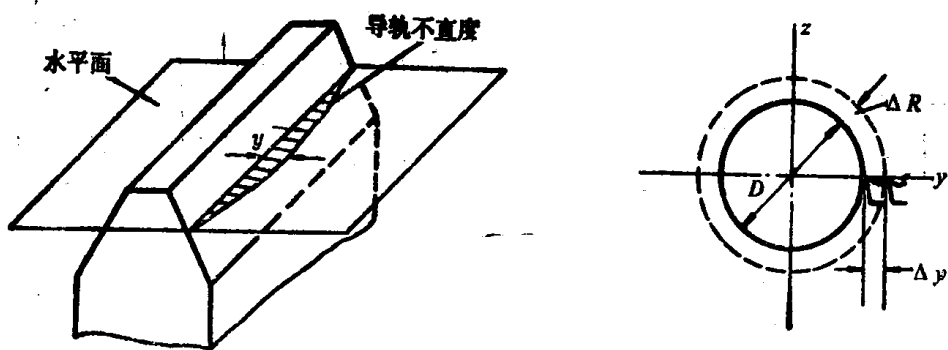


图 2-5 车床导轨在水平面内的不直度引起的加工误差

$$\Delta R = R' - R$$

$$(R + \Delta R)^2 = R^2 + \Delta z^2$$

$$2 \cdot \Delta R \cdot R + (\Delta R)^2 = \Delta z^2$$

$$\text{所以 } \Delta R \approx \frac{\Delta z^2}{2R}$$

(2-5)

当 $\Delta z = 0.5\text{mm}$; $R = 20\text{mm}$ 时

$$\Delta R = 0.00625\text{mm}。$$

这个影响是很小的, 可以忽略不计。在分析主轴跳动对加工精度的影响时, 实际上已经承认了这个事实。

从上面的例子可以看出, 床身导轨误差对工件加工精度的影响程度取决于误差是否处

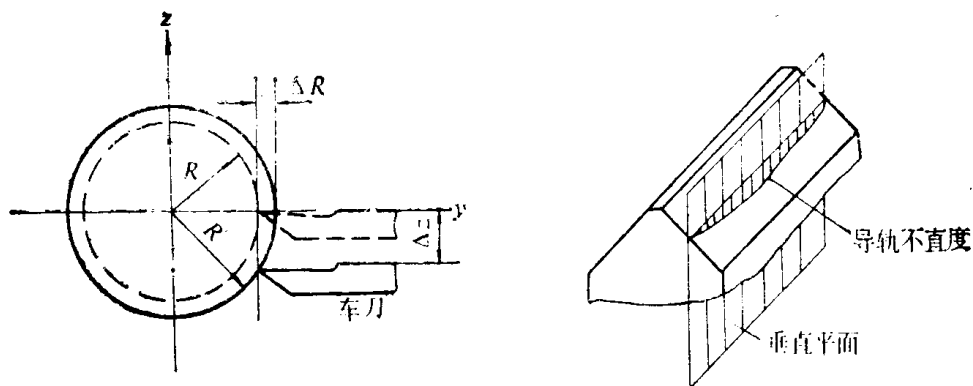


图 2-6 车床导轨在垂直面内的不直度引起的加工误差

于所谓的敏感方向。当导轨误差处在敏感方向时，对加工精度的影响大；反之，则往往可以忽略不计。在六角车床上，刀具往往垂直安装，如图2-7所示。在这种情况下，导轨在垂直面内的直度误差所引起的刀刃与工件之间的相对位移发生在被加工表面的法线方向，即导轨误差处于敏感方向，故对加工精度有较大的影响。总而言之，当机床导轨误差引起的刀具和工件被加工表面之间的相对位移发生在被加工表面的法线方向时，导轨误差处于敏感方向；而当相对位移发生在被加工表面的切线方向时，导轨误差对加工精度的影响小得多，往往可以忽略不计。

在车床上，当主轴回转轴心线和床身导轨在垂直平面内不平行时，被加工的圆柱面就会变成双曲面（图2-8）。

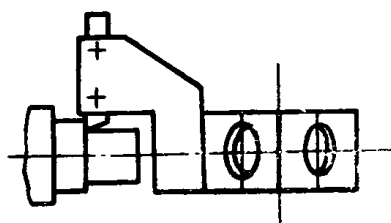


图 2-7 六角车床上刀具的安装

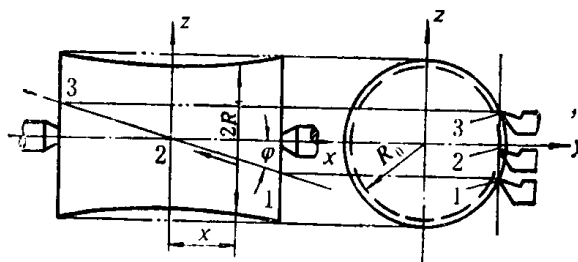


图 2-8 主轴回转轴心线和床身导轨在垂直平面内不平行

建立如图2-8所示的坐标系。车刀刀尖的 z 坐标和车刀在床身上的位置 x 之间的关系是

$$z = x \operatorname{tg} \varphi$$

工件半径

$$\begin{aligned} R &= (R_0^2 + z^2)^{1/2} \\ &= (R_0^2 + x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{1/2} \end{aligned}$$

在通过主轴回转轴心线的平面内，工件轮廓线上任意一点的 y 坐标值等于工件的半径 R 。

$$y^2 = R_0^2 + x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi$$

或

$$y^2 - x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi = R_0^2 \quad (2-6)$$

它是双曲线的方程式。

有趣的是，试验表明，具有双曲面形状的内燃机滑动轴承轴瓦会使摩擦条件改善，从