

QICHE ZHIZHAO GONGYI

汽车 制造工艺

唐远志 ● 编著



化学工业出版社

汽车 制造工艺

唐远志 ● 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

前言

目前,我国已成为世界汽车制造大国,汽车制造业又是我国的支柱性产业之一。为适应我国快速发展的汽车制造业,需要培养一大批掌握汽车制造技术的新人,从事汽车技术的工程人员也需要较为实用的和反映汽车最新工艺方面的书籍。同时,各大专院校开设车辆工程专业或汽车制造工艺课程,有逐渐增多的趋势。但是,与实践结合紧密、反映现场最新工艺、介绍汽车典型零件工艺的书籍较少,本书力求能够弥补这方面的不足。

全书由两部分内容组成:汽车零件机加工工艺理论基础、汽车典型零件机加工工艺。第一部分包括:汽车零件机加工工艺基本知识,机床夹具结构及设计,汽车零件质量分析及控制,汽车零件机加工工艺规程制定,汽车装配工艺。第二部分包括:发动机缸体、曲轴、连杆和汽车齿轮机加工工艺。这部分内容是本书最大的特点。在内容的选取上选用实际工作中使用的技术及知识,淘汰了落后的、已不使用的工艺。同时介绍了最新的已投入使用的工艺。

本书是在多年教学实践基础上,结合作者的技术工作经验、研究成果,考虑实际工作中的实用性,吸收了最新汽车制造工艺内容,同时部分参照其他版本同类教材编写而成。

教材内容选取,考虑了学生的接受情况,力求实用、精炼。在内容编排体系构成上,遵循了学生学习汽车制造工艺的认知规律,首先讲汽车零件制造技术基础,再讲典型零件机加工工艺。在叙述上除文字外大量采用插图表示工程含义,插图绘制细致精良,使学生容易找到直觉、迅速掌握要点,同时也培养学生养成“用图说话”的工程习惯。

作者长期从事汽车制造工艺、装备技术的研究工作;多次主持或参加“富康、蓝鸟”等轿车生产的工艺、装备攻关;经济效益显著,具有丰富的实践经验。本书纳入作者多年的现场考察研究成果,增加了教材的实用性、新颖性,使读者能从贴近实际的角度了解、掌握汽车制造工艺方面的基本知识、基本理念。

本书读者对象为高等学校及专科学校的车辆工程专业及相关专业学生,也适于从事汽车设计、汽车制造工艺及相关专业的工程技术人员参考使用。本书既可作为教科书,也可作为车辆工程专业及相关专业学生下厂实习的参考书。

本书由湖北汽车工业学院唐远志教授、高级工程师编著。由于编著者水平所限,疏漏之处在所难免,恳请使用本书的广大师生、读者及同仁提出宝贵意见。

编著者

目 录

第 1 篇 汽车零件机加工工艺基础 /1

第 1 章 汽车零件机加工工艺基本知识	2
1.1 生产过程与工艺过程	2
1.2 生产类型与工艺特征	3
1.3 工件定位原理	5
1.4 工件定位分析	8
1.5 加工精度的获得方法	11
1.6 汽车零件对加工精度的要求	13
1.7 汽车装配工艺简介	15
第 2 章 机床夹具结构及设计	17
2.1 机床夹具概述	17
2.2 工件定位方式及定位元件	19
2.3 定位误差计算	24
2.4 工件在夹具上的夹紧	25
2.5 车床夹具	30
2.6 铣床夹具	32
2.7 钻床夹具	35
2.8 镗床夹具	39
第 3 章 汽车零件质量分析及控制	43
3.1 概述	43
3.2 工艺系统几何误差与措施	44
3.3 工艺系统受力变形误差与措施	50
3.4 工艺系统热变形误差与措施	53
3.5 加工误差的统计分析	57
3.6 影响表面质量的因素及其控制	62
3.7 机加工振动基本知识及控制	66
3.8 表面强化方法及光整加工	69
3.9 高速切削简介	72
第 4 章 汽车零件机加工工艺规程制定	73
4.1 概述	73
4.2 工艺路线分析与设计	78
4.3 加工余量与工序尺寸	90

4.4	工艺尺寸链	93
4.5	工艺生产率和经济性	97
第5章	汽车装配工艺	100
5.1	概述	100
5.2	装配尺寸链	104
5.3	装配方法	105
5.4	装配工艺规程的编制	109
5.5	发动机装配工艺	112
5.6	车身装焊工艺	114
5.7	汽车整车装配工艺	116
5.8	某轿车装调规范	120

第2篇 汽车典型零件机加工工艺 /125

第6章	发动机缸体机加工工艺	126
6.1	发动机缸体概述	126
6.2	缸体定位基准的选择	128
6.3	缸体加工阶段和顺序	129
6.4	缸体加工工序的分析	132
第7章	发动机曲轴机加工工艺	137
7.1	发动机曲轴概述	137
7.2	曲轴的工艺特点	138
7.3	曲轴工艺分析	140
7.4	曲轴主要表面的加工	143
7.5	曲轴其他工序	149
第8章	发动机连杆机加工工艺	152
8.1	发动机连杆概述	152
8.2	连杆机加工工艺分析	154
8.3	连杆辅助工序	159
第9章	汽车齿轮机加工工艺	161
9.1	汽车齿轮概述	161
9.2	圆柱齿轮加工	165
9.3	锥齿轮加工	170
9.4	典型齿轮工艺案例	172
参考文献	178

第 1 篇

汽车零部件

机加工工艺基础

第 1 章

汽车零部件机加工工艺基本知识

本章介绍汽车零部件机械制造工艺的基本知识，内容包括生产过程与工艺过程、生产纲领与生产类型、工件的定位与基准、加工质量、汽车装配概念等。这些内容是汽车零部件机械制造工艺过程中最基本的概念、理论及相关知识，是本课程的基础和支柱。

1.1 生产过程与工艺过程

1.1.1 生产过程

汽车零部件生产过程是将原材料加工为成品的全过程。生产过程包括主要生产过程和辅助生产过程。

主要生产过程包括如下内容。

- ① 生产准备工作，工艺设计、装备安装。
- ② 毛坯制造和处理。
- ③ 零件的机械加工、热处理。
- ④ 产品的装配、检验、调试、油漆、包装和发交等。

辅助生产过程包括：物流、仓储、动力供应、设备维修等。

1.1.2 机加工工艺过程

在生产过程中凡属直接改变生产对象的形状、尺寸、性能和相对位置关系的过程，称为工艺过程。工艺过程是生产过程中的主体。工艺过程又可具体分为机械加工、铸造、锻造、冲压、焊接、特种加工、热处理、表面处理和装配等工艺过程。

主要生产过程中的零件机械加工、产品装配为机械加工工艺过程，是生产过程中的一个局部过程。其特点是直接改变原材料或毛坯形状、尺寸和性能。本书主要介绍汽车零部件机加工工艺。

在具体的机加工生产条件下，对于某个零件或产品，用文字按规定的表格形式书写成的工艺文件，称为机械加工工艺规程，简称工艺规程。工艺规程是在总结实践经验的基础上，根据科学理论和必要的工艺试验制定的，用于规定产品或零部件制造工艺过程和操作方法，是组织生产和进行技术准备的根本依据。当然，工艺规程也不是一成不变的，随着科学技术的进步，一定会有新的更为合理的工艺规程代替旧的相对不合理的工艺规程。但工艺规程的修订必须经过充分的试验论证，并必须严格履行一定的审批手续。

机械加工工艺过程分为若干工序，即毛坯到零件的转变过程是由一个或若干个顺序排列的工序所组成的，并按照一定的顺序依次完成所有加工内容。

1.1.3 机加工工艺过程的组成

机械加工工艺过程由按一定的顺序排列的若干个工序组成，而每一个工序又可细分为装夹、工位、工步及走刀等。

(1) 工序

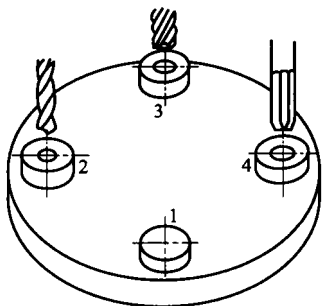
工序是指由一个（组）工人在同一个地点，对一（几）个工件所连续完成的加工作业过程。一个工艺过程需要包括哪些工序，是由被加工零件的结构复杂程度、加工精度要求及生产类型所决定的。

(2) 装夹

装夹是指工件在夹具中占有正确的位置，然后固定。目的是使工件在加工过程中保持定位位置不变。

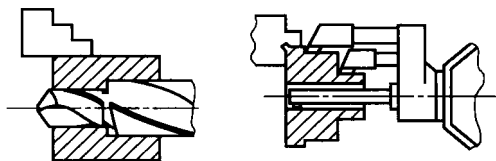
(3) 工位

工位就是完成工序任务的位置。一道工序有一个工位，也可有多个工位。多工位加工方法，既可以减少装夹次数，提高加工精度，并减轻工人的劳动强度；又可以使各工位的加工与工件的装卸同时进行，提高劳动生产率。多工位加工，机床采用回转工作台、回转夹具、移动夹具。图 1-1 所示为一利用回转工作台，在一次安装中依次完成装卸工件、钻孔、扩孔、铰孔三个工位加工的例子。



工作工位1: 装卸工件; 工位2: 钻孔;
工作工位3: 扩孔; 工位4: 铰孔

图 1-1 回转工作台



(a) 钻孔、扩孔

(b) 转塔车床复合工步

图 1-2 复合工步

(4) 工步

工步是指在一个加工表面、一把切削刀具所连续完成的工序内容。带回转刀架的机床如转塔车床或带自动换刀装置的机床如加工中心，当更换不同刀具时，即使加工表面不变，也属不同工步。在一个工步内，若有几把刀具同时加工几个不同表面，称此工步为复合工步，如图 1-2 (a)、(b) 所示。采用复合工步可以提高生产效率。

(5) 走刀

每次工作进给所完成的工步称为一次走刀。

1.2 生产类型与工艺特征

生产纲领是指企业在计划期内应生产的产品产量和进度计划。企业根据市场要求和自身

能力决定生产计划。在计划期内应当生产的产品数量称为生产纲领。计划期通常为一年，零件的年生产纲领 N 按下式计算：

$$N = Q_n(1 + \alpha + \beta) \quad (1-1)$$

式中 Q ——产品年产量，台/年；
 n ——每台产品中该零件数量，件/台；
 α ——备品率，%；
 β ——废品率，%。

生产类型是指企业生产专业化程度的分类。人们按照产品的生产纲领、投入生产的批量，可将生产分为单件生产、大量生产和成批生产三种类型。

(1) 单件生产

单个生产不同结构和尺寸的产品，很少重复甚至不重复，这种生产称为单件生产。如新产品试制、维修车间的配件制造属此种生产类型。其特点是：生产的产品种类较多，而同一产品的产量很小，工作地点的加工对象经常改变。

(2) 大量生产

同一产品的生产数量很大，大多数工作地点经常按一定节奏重复进行某一零件的某一工序的加工，这种生产称为大量生产。汽车生产属此种生产类型。其特点是：同一产品的产量大，工作地点较少改变，加工过程重复。

(3) 成批生产

一年中分批轮流制造几种不同的产品，每种产品均有一定的数量，工作地点的加工对象周期性地重复，这种生产称为成批生产。如汽车零部件的生产即属这种生产类型。其特点是：产品的种类较少，有一定的生产数量，加工对象周期性地改变，加工过程周期性地重复。

同一产品或零件每批投入生产的数量称为批量。根据批量的大小又可分为大批量生产、中批量生产和小批量生产。小批量生产的工艺特征接近单件生产，大批量生产的工艺特征接近大量生产。

根据前面公式计算的零件生产纲领，参考表 1-1 即可确定生产类型。不同生产类型的制造工艺有不同特征，各种生产类型的工艺特点见表 1-2。

表 1-1 生产类型和生产纲领的关系

生产类型	生产纲领/(件/年)		
	重型零件	中型零件	轻型零件
单件生产	≤5	≤10	≤100
小批生产	5~100	10~200	100~500
中批生产	100~400	200~500	500~5000
大批生产	400~1000	500~5000	5000~50000
大量生产	>1000	>5000	>50000

表 1-2 各种生产类型的工艺特点

工艺特点	单件生产	成批生产	大量生产
毛坯制造方法	铸件用木模造型，锻件用自由锻	铸件用金属模造型，部分锻件用模锻	铸件用金属模机器造型，锻件用模锻
零件互换性	无互换、互配零件成对制造，用修配法装配	多数零件有互换性，少数用修配法	全部零件有互换性，某些精度高的配合采用分组装配

续表

工艺特点	单件生产	成批生产	大量生产
机床设备及其布置	通用机床;按类别和规格排列	部分通用机床,部分专用机床;按零件分“工段”排列	专用机床和自动机床,按流水线形式排列
夹具	少数专用夹具,用划线和试切法	多数用专用夹具,部分用划线法	专用夹具
刀具和量具	通用刀具、万能量具	较多采用专用刀具、量具	高生产率刀具、量具
技术工人	技术熟练	一定熟练程度	维修工要求高,操作工要求低
工艺文件	简单工艺过程卡	详细工艺过程卡,关键工序有工序卡	工艺过程卡、工艺卡和工序卡

1.3 工件定位原理

工件在机床上的定位包括工件在夹具上的定位和夹具在机床上的定位两个方面,本节只讨论工件在夹具上的定位问题。

1.3.1 基准及基面的概念

定位就是在加工过程中,工件相对刀具始终具有正确位置并保持不动。否则会影响加工精度以及出现“打刀”等故障等。

工件的定位是在夹具上,由工件和夹具定位元件共同完成的。夹具定位元件上有定位基准面。

基准是指在零件图或零件上,确定几何要素点、线、面的位置所参照的点、线、面。

基准分为两种:可见基准和不可见基准。可见基准是指轮廓要素,如平面、棱线、素线、顶点等。不可见基准是指中心要素,如轴线、球心、对称中心线或面等。不可见基准不具备外在性和可接触性,不能参与定位,因此要由可见轮廓要素来替代。基面:不可见基准的体现或替代定位表面。如图 1-3 所示,C 尺寸的设计基准是轴线,为不可见基准,无法定位,只能用 ϕd 外圆来作为加工或测量基准,也就是基面。

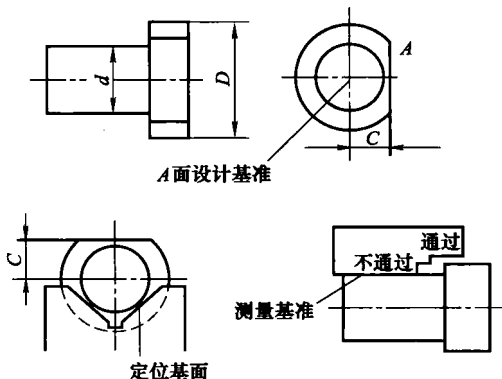


图 1-3 基准、基面实例

(1) 设计基准

设计基准是零件图纸上采用的尺寸基准,如图 1-4 所示。

(2) 工艺基准

工艺基准是指切削过程中采用的基准。包括定位基准、工序基准、测量基准和装配基准。

定位基准:确定工件加工位置的基准。

工序基准:工序图上确定本工序所加工尺寸、位置所采用的定位基准(见图 1-5)。

测量基准:测量工件已加工表面的尺寸和位置的基准。

装配基准:装配时,确定零件或部件在产品中的位置的基准。

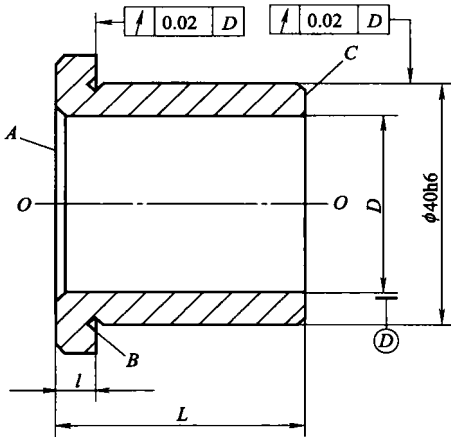


图 1-4 设计基准实例

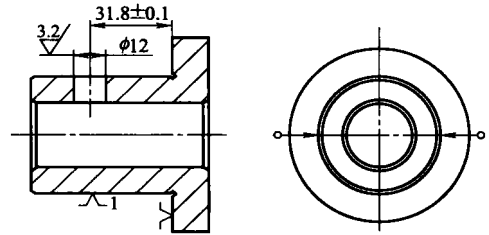


图 1-5 工序基准实例

1.3.2 六点定位原理

(1) 六点定位原理

工件在空间有六个自由度（见图 1-6），在三个坐标轴线所处位置和绕这三个坐标轴线角度方位所处位置：

$$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}, \hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}$$

要使工件有确定的位置，在空间直角坐标系中，由定位元件限制其六个自由度，如图 1-7 所示。一个定位元件限制一个自由度，同一面上间隔的两个定位元件除限制一个移动自由度外还限制一个旋转自由度。

(2) 工件定位应注意的问题

① 一个自由度有两个方向，要限制自由度必须限制两个方向的移动。定位元件只能限制靠近定位元件方向的移动，而不能限制背离定位元件方向的移动。因此实际工程中完整的定位应该是由定位元件及指向定位元件的力共同完成的（见图 1-8），为简化起见，通常这个力省略不画。

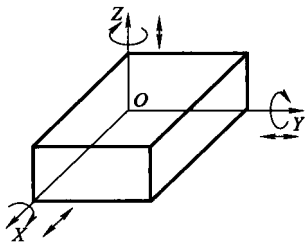


图 1-6 工件六个自由度

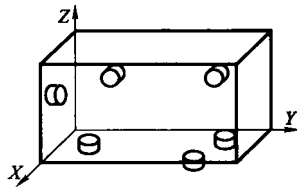


图 1-7 工件的定位

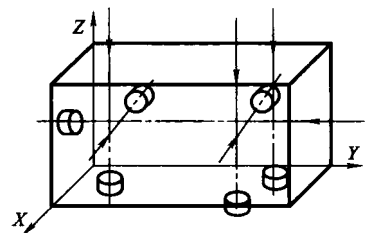


图 1-8 完整的定位

② 一个完整的定位方案，定位支撑点的数目不得多于六个。

③ 不同面上两个定位元件不能限制一个旋转自由度。

④ 应分清定位与支撑的区别。如铣轴端槽夹具，在水平铣槽方向不需定位，但是工件在该方向也是不能动的，此方向要有支撑力作用，用于克服切削力，起支撑作用的面称为支撑面。

1.3.3 典型表面定位方式

表 1-3 列出了工程上常用表面定位方式及其定位元件。包括平面定位、心轴定位、V 形

块定位、锥面定位和部分组合定位。注意的是：短心轴和短V形块、长心轴和长V形块所限制的自由度是分别一样的。

表 1-3 工程上常用表面定位方式及其定位元件

定位基准面	定位元件	简图	限制自由数
平面	一块条形板		\vec{Y}, \vec{Z}
	两块条形板		$\vec{Z}, \vec{X}, \vec{Y}$
	一块矩形板		$\vec{Z}, \vec{X}, \vec{Y}$
心轴	短心轴		\vec{X}, \vec{Z}
	长心轴		$\vec{X}, \vec{Z}, \vec{X}, \vec{Z}$
圆锥销	固定锥销		$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$
	浮动锥销		\vec{Y}, \vec{Z}
V形块	短V形块		\vec{X}, \vec{Z}
	长V形块		$\vec{X}, \vec{Z}, \vec{X}, \vec{Z}$

续表

定位基准面	定位元件	简图	限制自由数
部分组合定位	窄轴肩与长轴		$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}, \hat{Y}, \hat{Z}$
	环平面与短销		$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}, \hat{Y}, \hat{Z}$
	固定锥销与浮动锥销		$\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}, \hat{Y}, \hat{Z}$

1.4 工件定位分析

1.4.1 完全定位和不完全定位

六个自由度全部被限制的定位方式称为完全定位。只限制其部分自由度，六个自由度没有全部被限制的定位称为不完全定位。工件定位时应采用完全定位还是不完全定位，主要由该工序的加工要求和定位稳定性来决定。

工程实践中发现，为保证加工精度不一定要限制六个自由度，有时可以小于六个自由度。如一般来说走刀方向的自由度可以不用限制，对钻孔来说孔轴线方向和绕轴线旋转的自由度可以不用限制。

但注意的是不限制自由度不等于该自由度方向可以活动，因为工件活动会造成打刀和无法克服切削力，因此某方向不限制自由度仍要求固定不动。

为保证加工精度必须限制的自由度称为第一类自由度。显然第一类自由度不一定等于六个，有可能少于六个，应根据实际情况而定，这就为简化夹具结构提供了理论根据，因为限制的自由度越少，夹具结构越简单、成本越低，操作也方便。

如图 1-9 所示，在球形零件上打孔，只需限制 \vec{X}, \vec{Y} 两个自由度，就能保证加工精度，因此可用虎钳定位夹具，结构简单、实用。

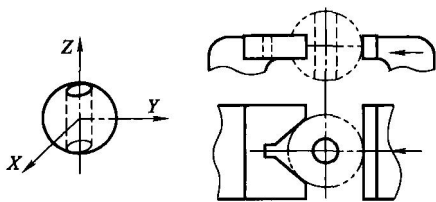


图 1-9 零件钻孔

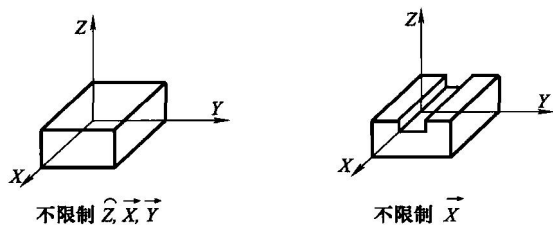


图 1-10 加工平面和铣槽

如图 1-10 所示, 在矩形零件上面加工平面不用限制 \vec{Z} , \vec{X} , \vec{Y} 三个自由度; 在矩形零件上面加工槽不用限制 \vec{X} 自由度。

1.4.2 过定位

(1) 概念

过定位是指在组合定位情况下, 两个或两个以上的定位点限制工件同一个自由度的现象。对刚性工件而言, 过定位会造成夹具上的定位零件与工件发生干涉, 造成工件定位不稳定, 降低加工精度。但有时为减少工件变形或提高柔性零件加工刚性而采用过定位方式, 如车身焊接夹具均采用过定位。

过定位问题的出现主要原因是设计失误和工作表面之间位置精度低。过定位问题应极力避免, 但过定位问题时有发生, 许多质量问题究其原因就是过定位问题, 读者应给予高度关注, 引以为戒, 本部分内容为本章重点。

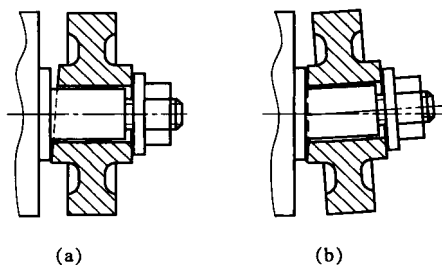


图 1-11 长轴过定位

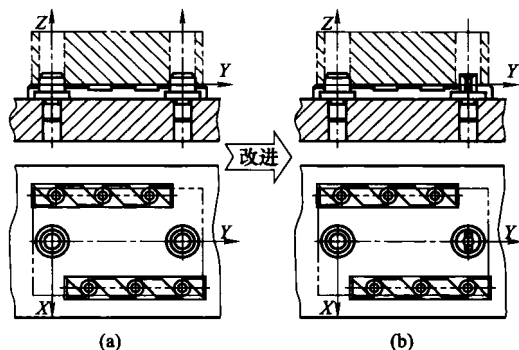


图 1-12 一面两销中一销改成菱形销

如图 1-11 (a) 所示的悬臂长轴定位, 由于长轴轴肩较宽为面定位, 因而过定位, 如果强扭紧螺母势必造成长轴弯曲变形 [见图 1-11 (b)]。如图 1-12 (a) 所示的一面两销定位, 由于两个销均为圆销, 在 \vec{Y} 方向过定位, 发生干涉, 圆销不能同时进入工件孔中。

(2) 消除过定位的途径

消除过定位的途径有两种: 其一改进定位件结构; 其二是提高定位件工作表面之间位置精度。改进定位件结构是消除过定位的常用方法。另外, 过定位是指在组合定位情况下发生的, 因此提高定位件工作表面之间位置精度可以消除或缓解过定位。

一面两圆销定位为过定位, 将其中一销改成菱形销即可, 如图 1-12 (b) 所示。菱形销的关键尺寸 b (菱形销留下的宽度), 参见图 1-13 和图 1-14。

当孔距最大、销距最小时, 销与孔会发生干涉 (见图 1-13)。图 1-14 是销与孔干涉的分析, 可知阴影区域为销与孔干涉面积。为了消除干涉则需将销加工成菱形销, 将干涉处削去, E 点为销外圆与轴套孔内圆的焦点, 只要求出 \overline{EH} 的长度即可得出不干涉的菱形销的尺寸。由图 1-14 可知: 在 $\triangle AOH$ 中的直角边 \overline{OH} 和 $\triangle EOH$ 的直角边 \overline{OH} 共边, 根据直角三角形勾股定理可得

$$\overline{OA}^2 - \overline{AH}^2 = \overline{OH}^2 \quad (1-2)$$

$$\overline{OE}^2 - \overline{EH}^2 = \overline{OH}^2 \quad (1-3)$$

式 (1-2) 与式 (1-3) 合并, 得

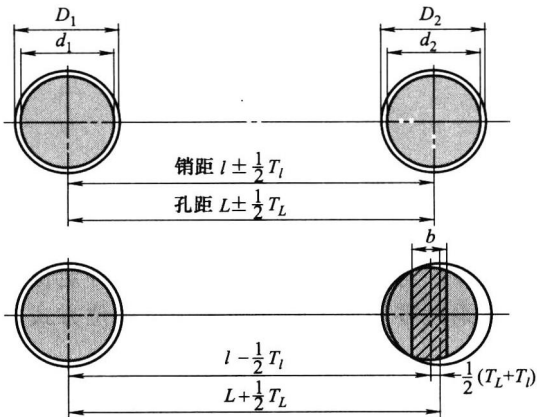


图 1-13 一面两销分析

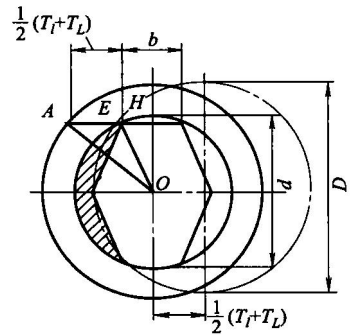


图 1-14 销与孔干涉分析

$$\overline{OA}^2 - \overline{AH}^2 = \overline{OE}^2 - \overline{EH}^2 \quad (1-4)$$

因

$$\overline{OA} = \frac{D}{2}, \overline{AH} = \frac{T_i + T_L}{2} + \frac{b}{2}, \overline{OE} = \frac{d}{2}, \overline{EH} = \frac{b}{2}$$

令

$$D - d = X$$

将以上各式代入式 (1-4), 得

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{b + T_i + T_L}{2}\right)^2 = \left(\frac{D - X}{2}\right)^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

展开化简得

$$b = \frac{2XD - X^2 - \left(\frac{T_i + T_L}{2}\right)^2}{2(T_i + T_L)}$$

略去二阶微量得出削边宽度的常用公式为

$$b = \frac{XD}{T_i + T_L} \quad (1-5)$$

根据 b 尺寸为厚度改制成的削边销即可避免过定位现象发生。

图 1-15 (a) 所示宽轴肩与长轴过定位情况, 在 \hat{X} 、 \hat{Z} 自由度上重复定位。可改成窄轴肩, 因为窄轴肩只能限制一个自由度; 采用球面垫片的道理与窄轴肩一样, 此法在实际中采用较多; 或将长轴改成短轴, 因为短轴只能限制两个自由度。

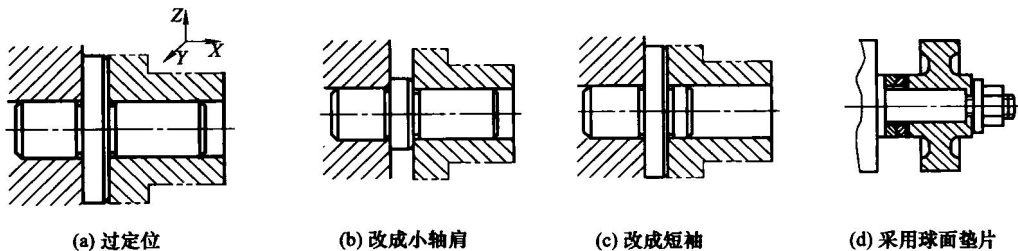


图 1-15 轴肩过定位处理

1.4.3 欠定位

欠定位是指限制的自由度数小于应限制的自由度数。结果：无法保证加工要求。欠定位的出现属低档错误，一般较少发生，因此此处不进行展开讨论。

1.5 加工精度的获得方法

1.5.1 尺寸精度的获得方法

机械加工中获得规定尺寸的方法有试切法、调整法、定尺寸刀具法和自动控制法。

(1) 试切法

试切法是先试切出很小一部分加工表面，测量试切所得尺寸，根据测量结果重新调整刀具位置，参见图 1-16；再试切，再测量，如此反复，直至测得的尺寸合格为止的方法。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。此法的生产率比较低，一般只适用于单件小批生产。

(2) 调整法

调整法是根据要求的工件尺寸，利用机床上的定程装置或对刀装置预先调整好机床、刀具和工件的相对位置，再进行加工，参见图 1-17。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，由于省去了重复多次的试切和测量工作，因而生产率比较高，适用于成批大量生产。

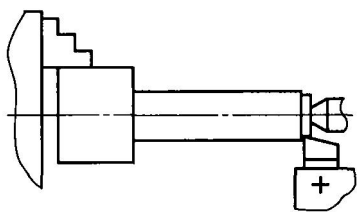


图 1-16 试切法

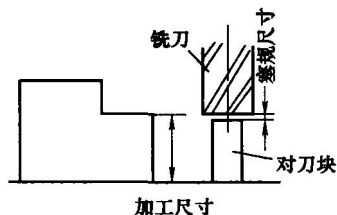


图 1-17 对刀块调整

(3) 定尺寸刀具法

定尺寸刀具法是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拉刀（见图 1-18）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主要取决于刀具本身的尺寸精度，其次是其他的因素，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

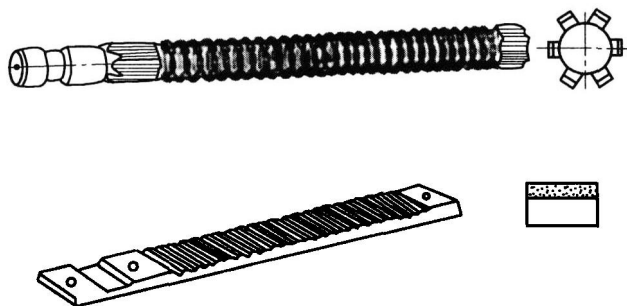


图 1-18 拉刀

性质、冷却润滑条件等。

(4) 自动控制法

自动控制法是采用自动控制系统对加工过程中的刀具进给、工件测量和切削运动等进行自动控制，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，且适应性好，已获得了日益广泛的应用。采用这种加工方法得到的工件尺寸精度取决于控制系统中各元件的灵敏度、系统的稳定性以及机械装置的工作精度。

1.5.2 形状精度的获得方法

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

利用刀具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垂直于刀具运动方向的间断直线运动形成平面；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刀具与工件成形运动的精度。

(2) 成形法

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，提高了劳动生产效率。例如，用成形车刀加工曲面、用成形铣刀铣削成形表面等。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，又依赖于机床成形运动的精度。

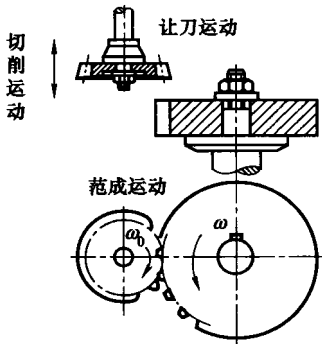


图 1-19 展成法

(3) 展成法

利用刀具和工件作展成切削运动来获得加工表面。展成法中刀刃的形状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，如在插齿机上加工齿轮的齿面（见图 1-19）。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度。

1.5.3 位置精度的获得方法

机械加工中获得一定表面相互位置精度的方法主要有下面两种。

(1) 一次装夹获得法

当零件上有相互位置精度要求的各表面是在同一次装夹中加工出来的时候，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。

(2) 多次装夹获得法

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。