

现代制造技术系列教材

冯之敬 主编

机械制造工程原理

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

《现代制造技术》系列教材

机械制造工程原理

冯之敬 主编



964565

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是为适应机械制造专业教学体系改革的需要,将机械制造原几门专业课程中的核心教学内容,以机械制造工程基础原理为主线进行综合编写而成的一门系统的机械制造专业基础课教材。主要内容有:金属切削的基本要素,金属切削的基本规律,机床与刀具,夹具原理,机械加工表面质量,机械加工精度,机械加工工艺规程,装配工艺规程,精密特种加工技术等。本书可作为高等工科院校机械制造专业的专业基础课教材,也可作为机械类通用的专业基础课教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工程原理/冯之敬主编;潘尚峰等编著. —北京:清华大学出版社,1998
ISBN 7-302-03113-4

I. 机… II. ①冯… ②潘… III. 机械制造工艺-高等学校-教材 IV. TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 31551 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京丰华印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:25 字数:592 千字

版 次:1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03113-4/TH·78

印 数:0001~5000

定 价:25.00 元

《现代制造技术》系列教材

出版说明

近半个世纪以来,制造技术的发展日新月异。特别是近 20 年来,随着科学技术的迅猛发展,尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展,使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化,传统制造技术不断吸收信息、材料、能源及管理等领域现代成果,综合应用于产品的设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面,许多新的思想和概念不断涌现,而且,不同学科之间相互渗透、交叉融合,衍生新的研究领域,迅速改变着传统制造业的面貌。

在实际工作中,我们迫切感觉到需要一套系列教材,既能反映现代制造技术的发展,又能反映制造技术的基本原理。因此,围绕着教学改革,清华大学制造工程研究所将陆续编写和出版一套制造技术教材,以满足机械制造及其自动化专业的教学需要。

由于教育改革的步伐很快,组编和出版这套教材是一次尝试,我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评和建议。

《现代制造技术》系列教材

编辑委员会

1998.9.18

现代制造技术系列教材编辑委员会

主 任：金国藩

副主任：汪劲松 王先逵

委 员：(按姓氏笔画)

叶蓓华 冯之敬 冯平法 成 晔 陈 愚

郑 力 郁鼎文 张 昆 赵广木 徐家球

潘尚峰

前 言

当前,机械制造专业课程如何进行改革是许多高等工科院校共同面临和普遍关注的重要问题。

制造业是在国民经济中起着重要作用的基础工业。近十多年来,随着现代科学技术的进步,特别是微电子技术、计算机技术、信息技术等与机械制造技术的深度结合,机械制造业的面貌发生了很大的变化。数控机床、加工中心、柔性制造系统、集成制造系统、虚拟制造、敏捷制造等不断出现的新的先进制造技术和新的先进生产模式增强了企业的生产能力和市场适应性,产品结构走向多样化,产品性能大幅度提高,机械制造业呈现出激烈的国际性竞争的高速发展势态。

机械制造业的高速发展,基于强大的机械制造工程技术基础和科学基础。为培养能适应现代制造业发展的高层次的工程技术人员和科学研究人才,高等工科院校必须根据现代高新技术的发展调整机械制造业专业课程设置的结构和教学内容,使学生建立与现代制造业发展相适应的系统的知识体系。学生不仅应具有坚实的机械制造业专业基础,而且要学习大量涌现的新知识,拓宽知识面,注重专业能力和综合能力的培养,提高毕业后对工作环境的专业适应性。高等工科院校机械制造业原来的专业课程设置,分为金属切削原理、金属切削刀具、机床、机械制造工艺学等几门大课,虽然在教学中注重了不断充实新的专业基础方面的研究成果,但由于分类细化,专门化程度深,专业教学内容增多,学时延长,总体上与培养适应现代制造业发展的综合性人才的培养目标难以协调,特别是新的知识、新的教学内容、新的课程大量增加引起的课程学时分配的矛盾问题尤为突出。一方面必须加强机械制造业专业基础的教学,一方面又需要缩短学时,机械制造业专业课程的结构和教学内容的改革已是势在必行,将相关的多门专业课开设成一门综合专业基础课在许多高校被认为是一个可采取的方案。

为适应教学改革的需要,本书对机械制造业原专业课程中的核心教学内容进行了综合提炼以及新的专业基础知识的扩展,以机械制造业工程基础原理为主线,形成一门系统的机械制造业专业基础课程,力图达到强化工程基础原理、扩大专业讲授知识面、反映专业新技术和发展趋势、加强教材系统性、精化教学、注重学生专业基础能力和专业适应能力培养的目的。

本书可作为高等工科院校机械制造业专业的专业基础课教材,也可作为机械类通用的专业基础课教材。

本书的编写人员及负责的编写工作如下:潘尚峰、冯平法第1章,潘尚峰第2章,冯平法、冯之敬第3章,刘成颖第4、7、8章,郁鼎文第5、6章,冯之敬第9章。

在本教材的规划和编写过程中,王先逵、金之垣、姚健、池去病、傅水根、汪劲松、段广洪、

张玉峰、叶蓓华、陈田养、成晔等许多有经验的教师对教材编写大纲和编写方法提出了宝贵的意见和建议,在此致以衷心的感谢。

诚恳希望对教材中的错误和不足之处提出批评指正。

主 编

1998 年 6 月

目 录

第 1 章 金属切削的基本要素	1
1.1 工件表面的形成方法和成形运动	1
1.2 加工表面和切削用量三要素	7
1.3 刀具角度	10
1.4 切削层参数与切削方式	21
1.5 刀具材料	23
第 2 章 金属切削过程及切削参数优化选择	33
2.1 金属切削的变形过程	33
2.2 切屑的种类及卷屑断屑机理	41
2.3 前刀面上的摩擦与积屑瘤	44
2.4 影响切削变形的因素	48
2.5 切削力	50
2.6 切削热和切削温度	63
2.7 刀具磨损、破损和使用寿命	68
2.8 切削用量的优化选择	79
2.9 刀具几何参数的选择	83
2.10 工件材料的切削加工性	90
2.11 切削液	95
第 3 章 金属切削机床与刀具	101
3.1 机床的分类与型号编制、机床的运动分析	101
3.2 车床和车刀	107
3.3 镗床	131
3.4 刨床和插床	133
3.5 钻床和麻花钻	135
3.6 铣床和铣刀	145
3.7 拉床和拉刀	156
3.8 齿轮加工机床和齿轮加工刀具	162
3.9 磨床和砂轮	188
3.10 组合机床	199
3.11 数控机床和加工中心	200
第 4 章 工件的定位夹紧与夹具设计	204
4.1 夹具的基本概念	204

4.2	工件在夹具上的定位	207
4.3	工件在夹具中的夹紧	228
4.4	各类机床夹具举例	231
第5章	机械加工表面质量	244
5.1	机械加工表面质量的概念	244
5.2	表面粗糙度及其影响因素	246
5.3	机械加工后表面物理机械性能的变化	250
5.4	控制加工表面质量的途径	256
5.5	振动对表面质量的影响及其控制	258
第6章	机械加工精度	263
6.1	机械加工精度的概念	263
6.2	获得加工精度的方法	264
6.3	影响加工精度的因素	265
6.4	加工误差的分析与控制	291
第7章	机械加工工艺规程的制订	305
7.1	基本概念	305
7.2	定位基准及选择	314
7.3	工艺路线的制订	317
7.4	加工余量、工序间尺寸及公差确定	326
7.5	工艺尺寸链	331
7.6	时间定额和提高生产率的工艺途径	336
7.7	工艺方案的比较与技术经济分析	341
7.8	自动生产线和柔性制造系统	343
第8章	装配工艺规程的制定	351
8.1	装配工艺规程的制定	351
8.2	装配尺寸链	359
8.3	利用装配尺寸链达到装配精度的方法	364
第9章	精密超精密加工和特种加工	377
9.1	金刚石超精密切削	377
9.2	精密磨料加工	378
9.3	超声波加工	380
9.4	电解加工	382
9.5	电铸加工	382
9.6	电火花与线切割	383
9.7	电子束加工和离子束加工	385
9.8	激光加工	387
9.9	快速成形制造技术	388
9.10	微机械的制造技术	389
参考文献		391

第 1 章 金属切削的基本要素

金属切削刀具和工件按一定规律作相对运动,通过刀具上的切削刃切除工件上多余的(或预留的)金属,从而使工件的形状、尺寸精度及表面质量都合乎预定要求,这样的加工称为金属切削加工。在金属切削加工过程中有两个基本要素:一个是成形运动,另一个是刀具。

1.1 工件表面的形成方法和成形运动

零件的形状是由各种表面组成的,所以零件的切削加工归根到底是表面成形问题。

1.1.1 工件的加工表面及其形成方法

1. 被加工工件的表面形状

图 1-1 是机器零件上常用的各种表面。可以看出,零件表面是由若干个表面元素组成的,如图 1-2 所示。这些表面元素是:(a) 平面、(b) 直线成形表面、(c) 圆柱面、(d) 圆锥面、(e) 球面、(f) 圆环面、(g) 螺旋面等。

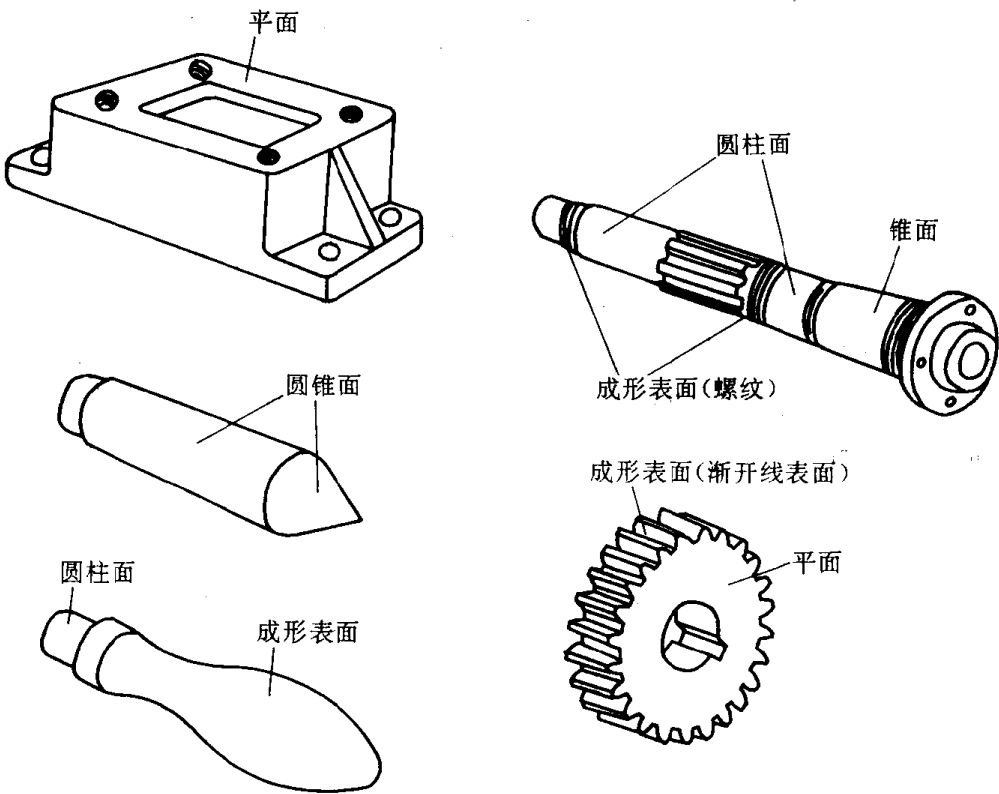


图 1-1 机器零件上常用的各种典型表面

2. 工件表面的形成方法

各种典型表面都可以看作是一条线(称为母线)沿着另一条线(称为导线)运动的轨迹。母线和导线统称为形成表面的发生线。

为得到平面(图 1-2(a)),可以使直线 1(母线)沿着直线 2(导线)移动。直线 1 和 2 就是形成平面的两条发生线。为得到直线成形表面(图 1-2(b)),须使直线 1(母线)沿着曲线 2(导线)移动。直线 1 和曲线 2 就是形成直线成形表面的两条发生线。同样,为形成圆柱面(图 1-2(c)),须使直线 1(母线)沿圆 2(导线)运动,直线 1 和圆 2 就是它的两条发生线,等等。

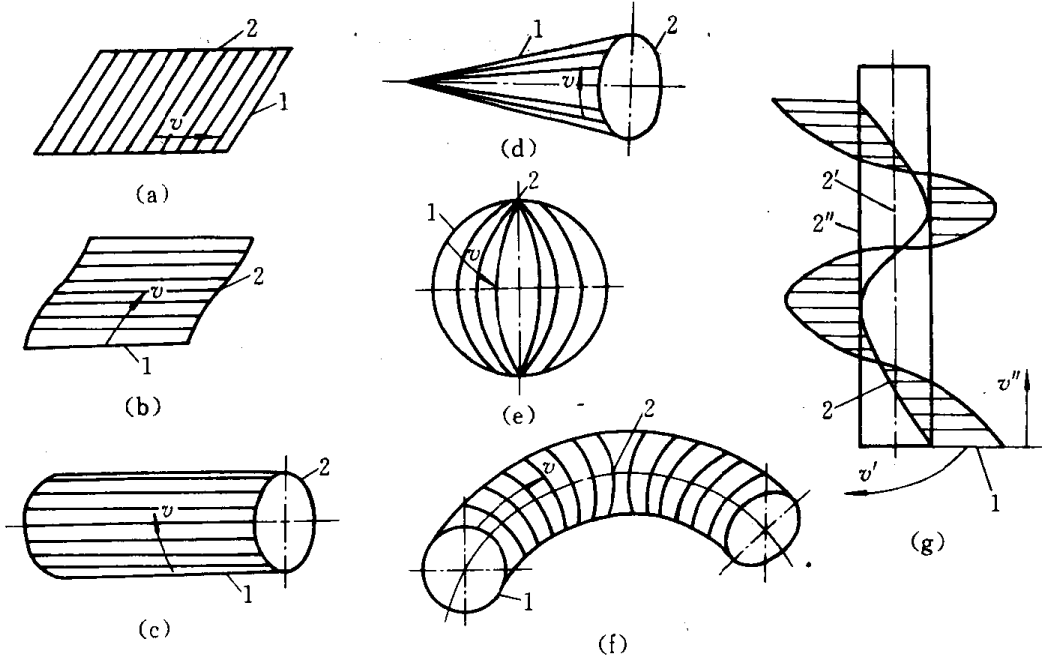


图 1-2 组成工件轮廓的几种几何表面

但是还需要注意,有些表面的两条发生线完全相同,只因母线的原始位置不同,也可形成不同的表面。如图 1-3 中,母线皆为直线 1,导线皆为圆 2,轴心线皆为 OO ,所需要的运动也相同。但由于母线相对于旋转轴线 OO 的原始位置不同,所产生的表面也就不同,如圆柱面、圆锥面或双曲面等。

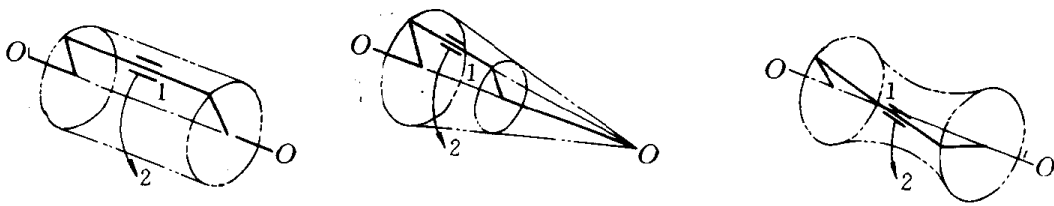


图 1-3 母线原始位置变化时形成的表面

3. 发生线的形成方法及所需的运动

发生线是由刀具的切削刃与工件间的相对运动得到的。由于使用的刀具切削刃形状和采取的加工方法不同,形成发生线的方法可归纳为四种。以形成图 1-4 所示的发生线 2(图中为一段圆弧)为例,说明如下。

(1) 成形法

成形法(图 1-4(a))是利用成形刀具对工件进行加工的方法。刀刃为切削线 1,它的形状和长短与需要形成的发生线 2 完全重合,因此形成发生线 2 不需运动。

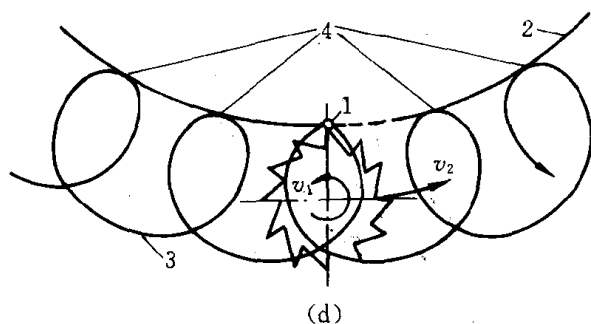
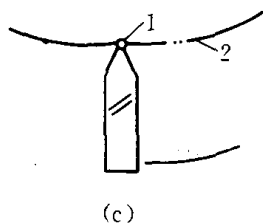
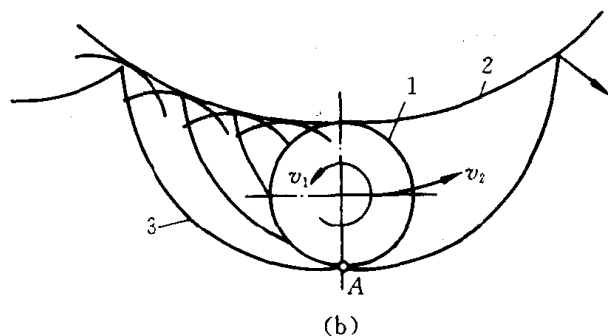
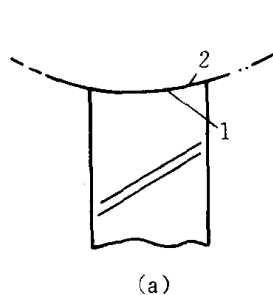


图 1-4 形成发生线的方法

(2) 展成法

展成法(图 1-4(b))是利用工件和刀具作展成切削运动的加工方法。刀具切削刃为切削线 1,图示形状为圆,也可是直线(如齿条刀)或曲线(如插齿刀),它与需要形成的发生线 2 的形状不吻合。切削线 1 与发生线 2 彼此作无滑动的纯滚动。发生线 2,就是切削线 1 在切削过程中连续位置的包络线。曲线 3 是切削刃上某点 A 的运动轨迹。在形成发生线 2 的过程中,或者仅由切削刃 1 沿着由它生成的发生线 2 滚动;或者切削刃 1(刀具)和发生线 2(工件)共同完成复合的纯滚动,这种运动称为展成运动。因此,用展成法形成发生线需要一个成形运动(展成运动)。用展成法形成发生线的典型例子是渐开线,如图 1-5 所示。

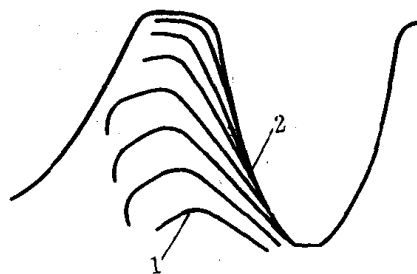


图 1-5 由刀刃包络形成渐开线齿形

(3) 轨迹法

轨迹法(图 1-4(c))是利用刀具作一定规律的轨迹运动来对工件进行加工的方法。刀刃

为切削点 1, 它按一定规律作直线或曲线(图为圆弧)运动, 从而形成所需的发生线 2。因此采用轨迹法形成发生线需要一个成形运动。

(4) 相切法

相切法(图 1-4(d))是利用刀具边旋转边作轨迹运动来对工件进行加工的方法。刀刃为旋转刀具(铣刀或砂轮)上的切削点 1。刀具作旋转运动, 刀具中心按一定规律作直线或曲线(图为圆弧)运动, 切削点 1 的运动轨迹如图中的曲线 3。切削点的运动轨迹与工件相切, 形成了发生线 2。图中点 4 就是刀具的切削点 1 的运动轨迹与工件的各个相切点。由于刀具上有多个切削点, 发生线 2 是刀具上所有的切削点在切削过程中共同形成的。用相切法得到发生线, 需要两个成形运动, 即刀具的旋转运动和刀具中心按一定规律的运动。

1.1.2 表面成形运动

为了获得所需的工件表面形状, 必须使刀具和工件按上述四种方法之一完成一定的运动, 这种运动称为表面成形运动。

1. 表面成形运动分析

表面成形运动(简称成形运动)是保证得到工件要求的表面形状的运动。例如, 图 1-6

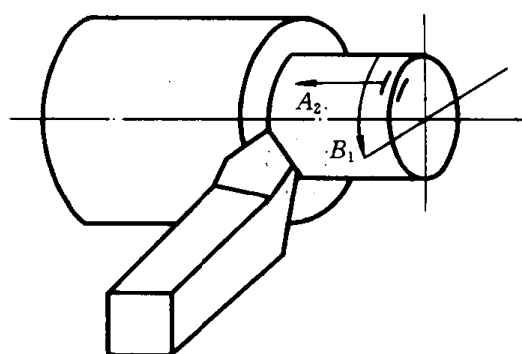


图 1-6 车削外圆柱表面时的成形运动

是用车刀车削外圆柱面, 形成母线和导线的方法, 都属于轨迹法。工件的旋转运动 B_1 产生母线(圆); 刀具的纵向直线运动 A_2 产生导线(直线)。运动 B_1 和 A_2 就是两个表面成形运动。又如刨削, 滑枕带着刨刀(牛头刨床和插床)或工作台带着工件(龙门刨床)作往复直线运动, 产生母线; 工作台带着工件(牛头刨床和插床)或刀架带着刀具(龙门刨床)作间歇直线运动, 产生导线。

(1) 成形运动的种类

以上所说的成形运动都是旋转运动或直线运动。这两种运动最简单, 也最容易得到, 因而都称为简单成形运动。在机床上, 它以主轴的旋转, 刀架或工作台的直线运动的形式出现。一般用符号 A 表示直线运动, 用符号 B 表示旋转运动。

成形运动也有不是简单运动的。图 1-7(a)所示为用螺纹车刀车削螺纹。螺纹车刀是成形刀具, 其形状相当于螺纹沟槽的轴剖面形状。因此, 形成螺旋面只需一个运动: 车刀相对于工件作螺旋运动。在机床上, 最容易得到并最容易保证精度的是旋转运动(如主轴的旋转)和直线运动(如刀架的移动)。因此, 把这个螺旋运动分解成等速旋转运动和等速直线运动, 在图 1-7(b)中, 以 B_{11} 和 A_{12} 代表, 这样的运动称为复合的表面成形运动或简称复合成形运动。为了得到一定导程的螺旋线, 运动的两个部分 B_{11} 和 A_{12} 必须严格保持相对关系, 即工件每转 1 转, 刀具的移动量应为一个导程。图 1-8 为用齿条刀加工齿轮, 产生渐开线靠展成法, 需要一个复合的展成运动。这个复合运动也可分解为工件的旋转 B_{11} 和刀具的直线运动 A_{12} , B_{11} 和 A_{12} 是一个运动(展成运动)的两个部分, 必须保持严格的运动关系。即工件每转过一个齿, 齿条刀应移动一个周节 πm (m 为模数)。

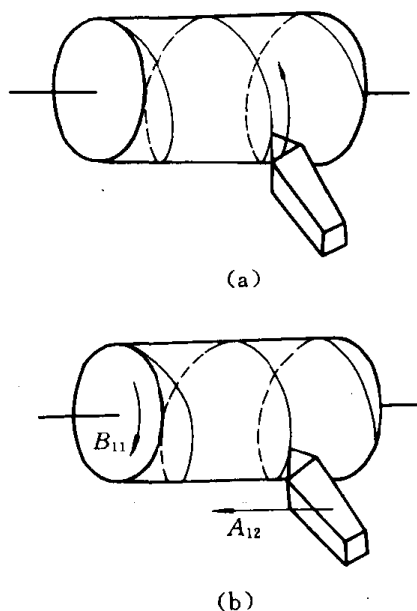


图 1-7 加工螺纹时的运动

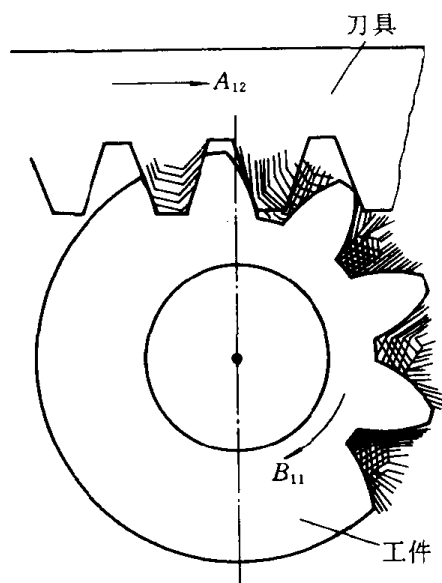


图 1-8 齿条刀加工齿轮时的运动

有些零件的表面形状很复杂,例如螺旋桨的表面,为了加工它需要十分复杂的表面成形运动。这种成形运动要分解为更多个部分,这只能在多轴联动的数控机床上实现。运动的每个部分,就是数控机床上的一个坐标轴。

由复合成形运动分解成的各个部分,虽然都是直线或旋转运动,与简单运动相像,但本质是不同的。前者是复合运动的一部分,各个部分必须保持严格的相对运动关系,是互相依存,而不是独立的。简单运动之间是互相独立的,没有严格的相对运动关系。

(2) 零件表面成形所需的成形运动

母线和导线是形成零件表面的两条发生线。因此,形成表面所需要的成形运动,就是形成其母线及导线所需要的成形运动的总和。为了加工出所需的零件表面,机床就必须具备这些成形运动。

例 1-1 用普通车刀车削外圆(见图 1-6)。

母线——圆,由轨迹法形成,需要一个成形运动 B_1 。

导线——直线,由轨迹法形成,需要一个成形运动 A_2 。

表面成形运动的总数为两个,即 B_1 和 A_2 ,都是简单的成形运动。

例 1-2 用成形车刀车削成形回转表面(图 1-9(a))。

母线——曲线,由成形法形成,不需要成形运动。

导线——圆,由轨迹法形成,需要一个成形运动 B_1 。

表面成形运动的总数为一个—— B_1 ,是简单的成形运动。

例 1-3 用螺纹车刀车削螺纹(图 1-9(b))。

母线——车刀的刀刃形状与螺纹轴向剖面轮廓的形状一致,故母线由成形法形成,不需要成形运动。

导线——螺旋线,由轨迹法形成,需要一个成形运动。这是一个复合运动,把它分解为工件旋转 B_{11} 和刀具直线移动 A_{12} 。 B_{11} 和 A_{12} 之间必须保持严格的相对运动关系。表面成

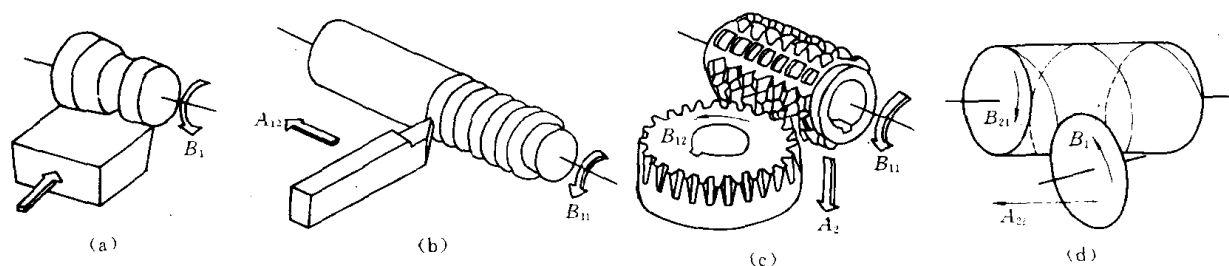


图 1-9 形成所需表面的成形运动

形运动的总数为一个—— $B_{11}A_{12}$ ，是复合的成形运动。

例 1-4 用齿轮滚刀加工直齿圆柱齿轮齿面(图 1-9(c))。

母线——渐开线，由展成法形成，需要一个成形运动，是复合运动，可分解为滚刀旋转 B_{11} 和工件旋转 B_{12} 两个部分， B_{11} 和 B_{12} 之间必须保持严格的相对运动关系。

导线——直线，由相切法形成，需要两个独立的成形运动，即滚刀的旋转运动和滚刀沿工件的轴向移动 A_2 。其中滚刀的旋转运动与复合展成运动的一部分 B_{11} 重合。因此，形成表面所需的成形运动的总数只有两个：一个是复合的成形运动 $B_{11}B_{12}$ ，另一个是简单的成形运动 A_2 。

2. 主运动、进给运动和合成切削运动

各种切削加工中的成形运动，按照它们在切削过程中所起的作用，可以分为主运动和进给运动两种，而这两个运动的向量和称为合成切削运动。所有切削运动的速度及方向都是相对于工件定义的。

(1) 主运动

由机床或手动提供的刀具与工件之间主要的相对运动，它使刀具的切削部分切入工件材料，使被切金属层转变为切屑，从而形成工件新表面。

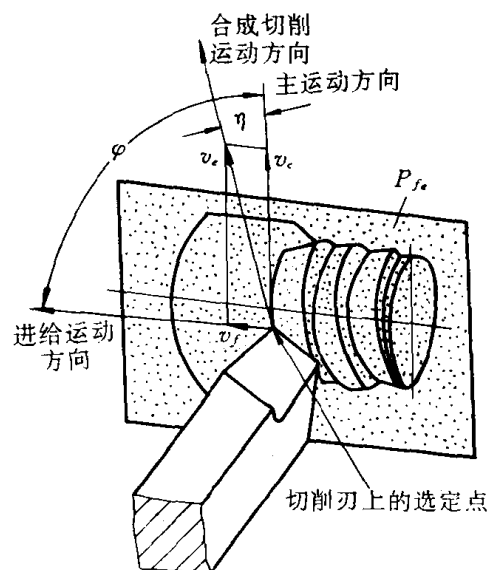


图 1-10 车刀相对于工件的运动

如图 1-10 所示，在车削时，工件的回转运动是主运动；在钻削、铣削和磨削时，刀具或砂轮的回转运动是主运动；在刨削时，刀具或工作台的往复直线运动是主运动。主运动可能是简单的成形运动，也可能是复合的成形运动。上面所述各种切削中的主运动都是简单运动。图 1-7(b)所示的车削螺纹，主运动就是复合运动 $B_{11}A_{12}$ 。

在表面成形运动中，必须有而且只能有一个主运动。一般地，主运动消耗的功率比较大，速度也比较高。

由于切削刃上各点的运动情况不一定相同，所以在研究问题时，应选取切削刃上某一个合适的点作为研究对象，该点称为切削刃上选定点。

主运动方向(图 1-10、图 1-11):切削刃上选定点相对工件的瞬时主运动方向。
 切削速度(图 1-10、图 1-11) v_c :切削刃上选定点相对工件的主运动的瞬时速度。

(2) 进给运动

由机床或手动传给刀具或工件的运动,它配合主运动连续不断地切削工件,同时形成具有所需几何形状的已加工表面。进给运动可能是连续的(例如在车床上车削圆柱表面时,刀架带车刀的连续纵向运动),也可能是间歇的(例如在牛头刨床上加工平面时,刨刀每往复一次,工作台带工件横向间歇移动一次)。进给运动可以是简单运动,也可以是复合运动。上述两个例子的进给运动都是简单运动。用成形铣刀铣削螺纹(见图 1-9(d))时,铣刀相对于工件的螺旋复合运动 $B_{21}A_{22}$ 是进给运动,这时的主运动是铣刀的旋转 B_1 ,是一个简单运动。

进给运动方向(图 1-10、图 1-11):切削刃上选定点相对于工件的瞬时进给运动的方向。
 进给速度 v_f (图 1-10、图 1-11):切削刃上选定点相对于工件的进给运动的瞬时速度。

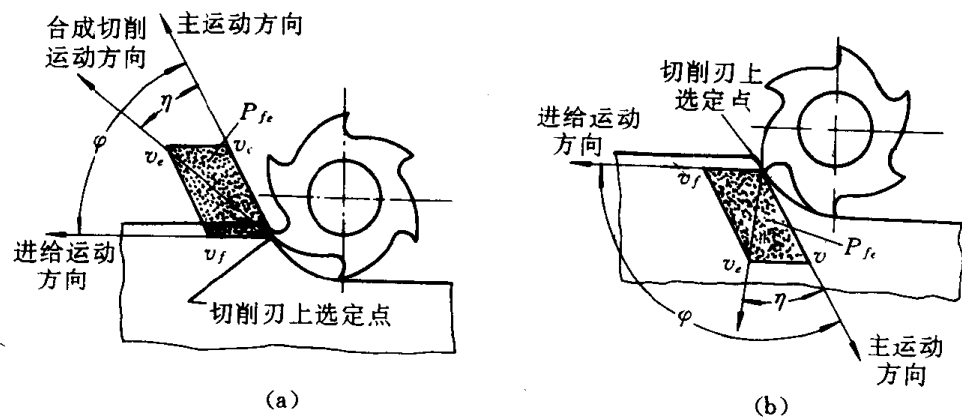


图 1-11 平面铣刀相对于工件的运动

(3) 合成切削运动

由同时进行的主运动和进给运动合成的运动。

合成切削运动方向(图 1-10、图 1-11):切削刃上选定点相对于工件的瞬时合成切削运动的方向。

合成切削速度 v_e (图 1-10、图 1-11):切削刃上选定点相对于工件的合成切削运动的瞬时速度。

合成切削速度角 η (图 1-10、图 1-11):主运动方向和合成切削运动方向之间的夹角。它在工作进给剖面 P_{fe} 内度量。

显然,在车削中(图 1-10), $v_e = v_c / \cos \eta$ 。在大多数实际加工中 η 值很小,所以可认为 $v_e = v_c$ 。

1.2 加工表面和切削用量三要素

1.2.1 切削过程中工件上的加工表面

车削加工是一种最典型的切削加工方法。如图 1-12 所示,普通外圆车削加工在主运动和进给运动的共同作用下,工件表面的一层金属连续地被车刀切下来并转变为切屑,从而加

工出所需要的工件新表面。在新表面的形成过程中,工件上有三个不断变化着的表面:待加工表面、过渡表面和已加工表面,它们的涵义是:

(1) 待加工表面:加工时即将被切除的表面。

(2) 已加工表面:已被切去多余金属而形成符合要求的工件新表面。

(3) 过渡表面:加工时由主切削刃正在切削的那个表面,它是待加工表面和已加工表面之间的表面。

在切削过程中,切削刃相对于工件运动轨迹面,就是工件上的过渡表面和已加工表面。显然,这里有两个要素,一是切削刃,二是切削运动。不同形状的切削刃与不同的切削运动组合,即可形成各种工件表面,如图 1-13 所示。

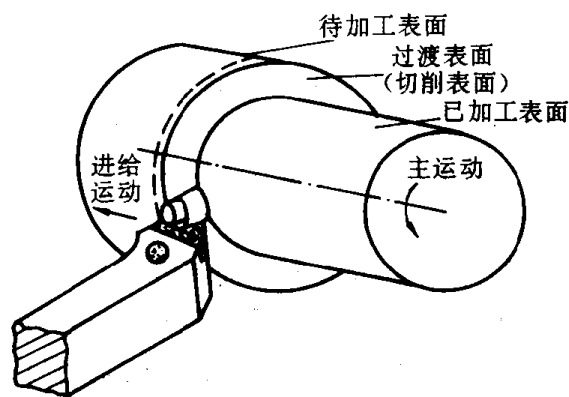


图 1-12 外圆车削运动和加工表面

1.2.2 切削用量三要素

切削速度 v_c 、进给量 f 和切削深度 a_p 称之为切削用量三要素。

1. 切削速度 v_c

主运动为回转运动时,切削速度的计算公式如下:

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (\text{m/s 或 m/min}) \quad (1-1)$$

式中 d ——工件或刀具上某一点的回转直径, mm;

n ——工件或刀具的转速, r/s 或 r/min。

在生产中,磨削速度的单位习惯上用 m/s(米/秒),其它加工的切削速度单位用 m/min(米/分)。

由于切削刃上各点的回转半径不同(刀具的回转运动为主运动),或切削刃上各点对应的工件直径不同(工件的回转运动为主运动),因而切削速度也就不同。考虑到切削速度对刀具磨损和已加工表面质量有影响,在计算切削速度时,应取最大值。如外圆车削时用 d_w 代入公式计算待加工表面上的切削速度,内孔车削时用 d_m 代入公式计算已加工表面上的切削速度,钻削时计算钻头外径处的速度。其中 d_w 和 d_m 见图 1-13。

2. 进给速度 v_f , 进给量 f 和每齿进给量 f_z

进给速度 v_f 是单位时间内的进给位移量,单位是 mm/s(或 mm/min),进给量是工件或刀具每回转一周时二者沿进给方向的相对位移,单位是 mm/r(毫米/转)。

对于刨削、插削等主运动为往复直线运动的加工,虽然可以不定期间进给速度,但要规定间进给的进给量,单位为 mm/双行程。对于铣刀、铰刀、拉刀、齿轮滚刀等多刃刀具(齿数用 z 表示),还应规定每齿进给量 f_z ,单位是 mm/齿。

显然进给速度 v_f 、进给量 f 和每齿进给量 f_z 有如下关系: