

《机械制造工艺学》第四分册

圆 柱 齿 轮 加 工

《圆柱齿轮加工》编写组

哈尔滨工业大学 上海工业大学 主编

上海科学技术出版社

内 容 简 介

本书为《机械制造工艺学》的第四分册。全册内容分为圆柱齿轮加工概述、齿形加工方法、误差分析、齿轮噪声、加工工艺和蜗轮加工共六节。

本书特点是对圆柱齿轮的加工方法作了较全面的叙述,对加工误差作了较深入的理论分析、对齿轮的整体误差和齿轮噪声等新的科研成果作了较简明的介绍。

读者对象:主要为高等工科院校机械制造工艺及设备专业的师生,以及有关技术人员。

《机械制造工艺学》第四分册

圆柱齿轮加工

《圆柱齿轮加工》编写组

哈尔滨工业大学、上海工业大学主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 7.75 字数 183,000

1979 年 11 月第 1 版 1980 年 12 月第 2 次印刷

印数: 15,001—25,000

书号: 15119·2046 定价: 0.77 元

编写说明

根据大专院校机械制造工艺及设备专业教学上的需要和有关工程技术人员的要求,东北工学院、哈尔滨工业大学、吉林工业大学、上海工业大学、华南工学院等发起并联合有关院校,共同组织编写了本专业的教材与教学参考书。其中《金属切削原理与刀具》、《金属切削机床设计》、《机床设计图册》、《机床夹具设计手册》、《机械制造工艺学》、《机床夹具设计》、《数控机床》等由上海科学技术出版社出版。

《机械制造工艺学》一书由哈尔滨工业大学、吉林工学院、大连工学院、沈阳机电学院、长春第一汽车厂工人大学、清华大学、北京工业大学、天津大学、合肥工业大学、南京工学院、浙江大学、上海工业大学、江西工学院、湖南大学、武汉工学院、西安交通大学、昆明工学院等参加编写。

本书主编单位为哈尔滨工业大学和上海工业大学。主编及审稿人员为:哈尔滨工业大学侯镇冰、葛洪瀚、陶崇德;上海工业大学杨质苍、张景勘。此外,还邀请了山东工学院程韦德、大连工学院王小华、清华大学朱耀祥、华南工学院苏树珊、沈阳机电学院经以广参加审稿。

本书在编写与审定过程中,上海工业大学、华南工学院、昆明工学院、云南工学院、哈尔滨工业大学、广西大学等曾做了大量的组织工作。

本书共分四册出版。第一册为《机械制造工艺的理论基础》;第二册为《机械加工工艺规程的制订及装配尺寸链》;第三册为《轴、箱体、丝杠加工》;第四册为《圆柱齿轮加工》。

《圆柱齿轮加工》分册由湖南大学傅杰才(概述、圆柱齿轮的齿形加工方法)、江西工学院熊瑞文(齿轮加工误差分析)、长春第一汽车厂工人大学黄道葵(整体误差分析、齿轮噪声)、吉林工学院吕思义(圆柱齿轮加工工艺与蜗轮加工)等编写。主要审稿人员为山东工学院程韦德、沈阳机电学院经以广。

本册对圆柱齿轮的加工方法与加工误差作了全面的论述及分析,同时对齿轮整体误差、齿轮噪声等新的科研成果作了简明的介绍。不足之处,恳请读者批评指正。

一九七九年六月

目 录

第十二章 圆柱齿轮加工

§ 12-1 概述	1
一、圆柱齿轮的结构特点	1
二、圆柱齿轮传动的精度要求	2
三、齿形的加工方法简述	2
§ 12-2 圆柱齿轮的齿形加工方法	3
一、滚齿	3
二、插齿	9
三、剃齿	12
四、冷挤齿轮	18
五、珩齿	20
六、磨齿	22
七、其它加工方法	29
§ 12-3 齿轮加工误差分析	31
一、齿轮加工误差的形成	31
二、齿轮加工误差的理论分析	34
三、运用整体误差曲线对齿轮加工误差的分析	60
四、保证齿轮加工精度的方法	69
§ 12-4 齿轮噪声	76
一、齿轮噪声的产生原因	77
二、齿轮噪声的试验	78
三、齿轮制造误差对噪声的影响	78
四、加工方法与齿轮噪声的关系	82
§ 12-5 圆柱齿轮加工工艺	83
一、工艺过程	83
二、工艺过程分析	87
§ 12-6 蜗轮加工工艺	91
一、蜗轮加工概述	91
二、蜗轮的齿形加工	92
三、提高蜗轮加工精度的方法	102
附录	
一、Y38 滚齿加工机床的调整	108
二、滚齿加工调整中的几个问题	114

第十二章 圆柱齿轮加工

§ 12-1 概 述

渐开线圆柱齿轮是机械传动中应用极为广泛的零件之一, 齿轮生产在机械制造中, 占有重要地位。随着近代工业的飞速发展, 对齿轮的加工精度提出了越来越高的要求, 因此, 如何合理地制订齿轮的加工工艺规程, 不断发现和解决加工过程中出现的问题, 从而有效地提高齿轮加工的精度和生产率, 就成了一项重要的研究课题。

一、圆柱齿轮的结构特点

齿轮尽管由于它们在机器中的功用不同而设计成不同的形状和尺寸, 但总可以把它们看成是由齿圈和轮体两个部分所构成; 在齿圈上切出直齿、斜齿等齿形。轮体的结构形状直接影响着齿轮加工工艺过程中各工艺因素的确定。因此, 齿轮的工艺分类, 可以以齿轮轮体的结构形状为依据。

在机器中, 常见的圆柱齿轮有以下几类(见图 12-1):

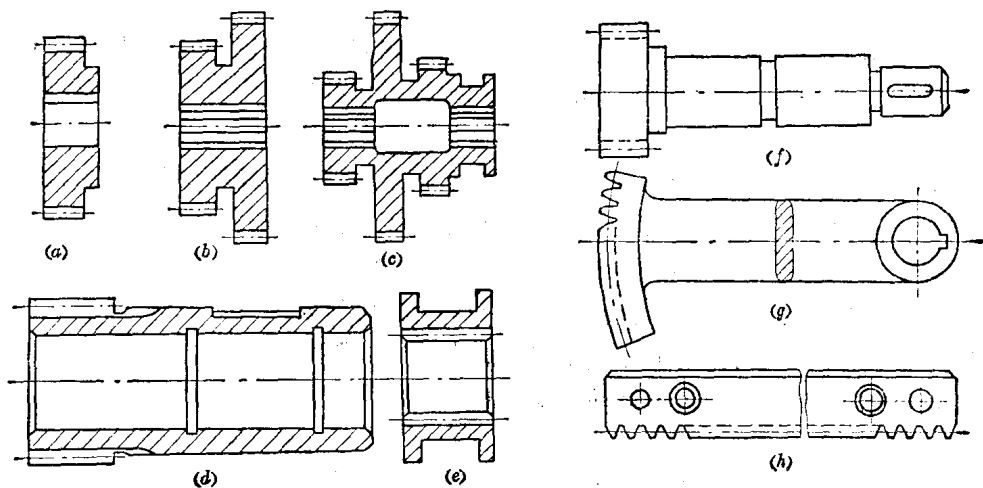


图 12-1 圆柱齿轮的结构形式

- ① 盘类齿轮(图 12-1a、b、c);
- ② 套类齿轮(图 12-1d);
- ③ 内齿轮(图 12-1e);
- ④ 轴类齿轮(图 12-1f);
- ⑤ 扇形齿轮(图 12-1g), 为齿圈不完整的圆柱齿轮;
- ⑥ 齿条(图 12-1h), 为齿圈半径无限大的圆柱齿轮。

其中以 ①、②、④ 类齿轮应用最广。

齿圈的结构形状和位置是评定齿轮结构工艺性的一项重要指标。从图 12-1 中可以看

出,一个圆柱齿轮可以有一个或几个齿圈。图 12-1a 为普通的单齿圈齿轮,工艺性最好。图 12-1b、c 为双联或三联的多齿圈齿轮,由于在台肩面附近的小齿圈不便于刀具或砂轮切削,因此,加工方法便受到限制,一般只能用插齿。当齿轮精度要求高,需要剃齿或磨齿时,通常将多齿圈齿轮做成单齿圈齿轮的组合结构。

二、圆柱齿轮传动的精度要求

齿轮本身的制造精度对整个机器的工作性能、承载能力及使用寿命都有很大关系,根据齿轮的使用条件,对齿轮传动提出以下几方面的要求:

(1) 运动传递准确

作为传动元件的齿轮,要求它能准确地传递运动,即保证主动轮转过一定角度,从动轮按速比关系准确地转过一个相应的角度。这就要求齿轮在每转一转的过程中,转角误差的最大值不能超过一定的限度。

(2) 工作平稳

在传递运动过程中,特别是高速转动的齿轮,不希望出现冲击、振动和噪声,这就要求齿轮工作平稳。因此,必须限制齿轮转动时瞬时速比的变化,也就是要限制较小范围内的转角误差。

(3) 接触良好

齿轮在传递动力时,为了不致因接触不均匀使接触应力过大,引起齿面过早磨损,就要求齿轮工作时齿面接触均匀,并保证有一定的接触面积和要求的接触位置。

(4) 齿侧间隙适当

在齿轮传动中,互相啮合的一对牙齿的非工作面之间应留有一定的间隙,以便贮存润滑油并使工作齿面形成油膜,减少磨损;同时齿侧间隙还可以补偿由于温度、弹性变形以及齿轮制造和装配所引起的间隙减小,防止卡死。但是齿侧间隙也不能过大,对于要求正反转的传动齿轮,侧隙过大会引起换向冲击,产生噪声;对于正反转的分度齿轮,侧隙过大就会产生过大的“空程”,使分度精度降低。可见齿轮的工作条件不同,要求的齿侧间隙也不同。

根据齿轮传动的工作条件对精度的不同要求,我国第一机械工业部颁发的机械工业通用标准 JB179-60 对渐开线圆柱齿轮传动规定了 12 个精度等级。1 级最高,12 级最低。其中 1、2 级是远景级,12 级则留给不经机械加工的齿轮用,都没有规定公差;其余从 3 级至 11 级,标准中分别规定了影响齿轮运动精度、工作平稳性精度和接触精度等三个方面的各项公差。

齿轮精度等级的选择,应根据齿轮传动的用途和工作条件(如圆周速度、传递功率、噪声及振动等方面的要求),参照生产实践中积累的资料和经验加以确定。同时尚需通过实践反复修订后,才能做到比较合理。

另外,机标 JB179-60 中还规定了齿侧间隙不按齿轮传动的精度等级选用,而按要求保证侧隙的大小,依次分为 D 、 D_b 、 D_c 和 D_d 四种结合形式,分别应用于不同的工作条件。

三、齿形的加工方法简述

齿圈上的齿形加工是整个齿轮加工的核心与关键。齿轮加工尽管有若干道工序,但主要是围绕切齿工序服务的,目的在于最终获得符合精度要求的齿轮。因此,我们必须对各种齿形加工方法加工原理进行深入的研究,对它们的加工精度及应用范围等有必要的认识,做到心中有数。从而才能够根据具体情况,合理地选择齿形加工方法,解决加工中出现的有关

问题,保证达到所要求的精度,并不断提高生产率。

齿形加工可按其在加工中有无切屑而区分为两大类:即无切屑加工和有切屑加工。同时按其加工原理又可分为仿形法(或称成形法)和展成法(或称滚切法)。

常见的齿形加工方法见表 12-1。

表 12-1 常见的齿形加工方法

齿形加工方法		刀 具	机 床	加工精度及适用范围
仿形法	成形铣齿	模数铣刀	铣 床	加工精度及生产率均较低,一般精度为 9 级以下
	拉 齿	齿轮拉刀	拉 床	精度和生产率均较高,但拉刀多为专用,制造困难,价格高,故只在大量生产时用之,宜于拉内齿轮
展成法	滚 齿	齿轮滚刀	滚 齿 机	通常加工 6~10 级精度齿轮,最高能达 4 级,生产率较高,通用性大,常用以加工直齿、斜齿的外啮合圆柱齿轮和蜗轮
	插 齿	插 齿 刀	插 齿 机	通常能加工 7~9 级精度齿轮,最高达 6 级,生产率较高,通用性大,适于加工内外啮合齿轮(包括阶梯齿轮)、扇形齿轮、齿条等
	剃 齿	剃 齿 刀	剃 齿 机	能加工 5~7 级精度齿轮,生产率高,主要用于齿轮滚插预加工后、淬火前的精加工
	冷挤齿轮	挤 轮	挤 齿 机	能加工 6~8 级精度齿轮,生产率比剃齿高,成本低,多用于齿形淬硬前的精加工,以代替剃齿,属于无切屑加工
	珩 齿	珩 磨 轮	珩齿机或剃齿机	能加工 6~7 级精度齿轮,多用于经过剃齿和高频淬火后,齿形的精加工
	磨 齿	砂 轮	磨 齿 机	能加工 3~7 级精度齿轮,生产率较低,加工成本较高,多用于齿形淬硬后的精密加工

除上表所列的常见齿形加工方法以外,还有正在不断推广使用的热轧齿轮、冷轧齿轮、粉末冶金齿轮、电解齿轮及双刀盘切向切齿等工艺方法。

§ 12-2 圆柱齿轮的齿形加工方法

一、滚齿

1. 滚齿原理及所需运动

在滚齿机上用齿轮滚刀加工齿轮的原理,相当于一对螺旋齿轮的啮合原理。滚刀实质上可以看成是一个齿数很少(单头滚刀齿数等于 1)的螺旋齿轮。因为它的齿数少,螺旋角又很大,而且轮齿很长,可以绕轴线很多圈,所以成蜗杆状。为了形成切削刃和前、后角,又在这个蜗杆上开槽和铲齿,就形成了滚刀。我们知道,一对螺旋齿轮的正确啮合,它们的轮齿必须能与同一假想齿条正确啮合,如图 12-2 所示。为此必须要求这两个齿轮在同一假想齿条的法向剖面中,具有相等的齿距和齿形角。滚齿过程中,滚刀和被加工齿轮之间的要求也是如此,由于齿距和齿形角可用模数、齿形角、螺旋角等来确定,因此这个要求可写成:

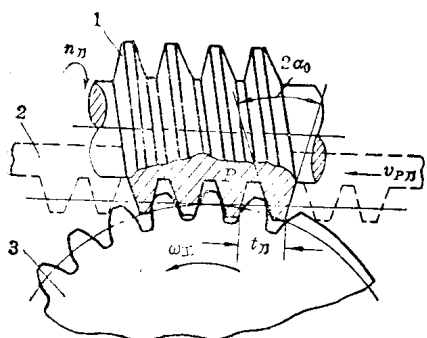


图 12-2 滚齿原理

1—滚刀； 2—假想齿条； 3—被切齿轮

① 滚刀的法向模数 m_n 和法向齿形角 α_{on} 应与被切齿轮的相应参数相等, 且为标准值。

② 为了使滚刀的螺旋方向和被切齿轮切于同一假想齿条, 滚刀轴线应该与齿轮端面倾斜一个 γ_{Σ} 角 (安装角), 如图 12-3 所示。在滚直齿圆柱齿轮时 (图 12-3a): $\gamma_{\Sigma} = \lambda_f$, 式中 λ_f 为滚刀的螺旋升角。

在滚斜齿轮时 (图 12-3b、c): $\gamma_{\Sigma} = \beta_f \pm \lambda_f$, 式中 β_f 为齿轮的螺旋角。并且当滚刀与工件的螺旋方向相反时取“+”号 (图 12-3b), 相同时取“-”号 (图 12-3c)。

可见当滚刀螺旋线方向与被加工齿轮的螺旋线方向相同时, 滚刀轴线倾斜角度较小, 所用滚刀边缘刀齿不会因过载而影响其耐用度, 尤其在螺旋角 β_f 较大时更是如此。且滚刀螺旋线方向和齿坯螺旋线方向相同时, 可以消除工作台分度蜗轮副间的啮合间隙, 减少滚齿时的振动, 从而提高滚齿的精度和光洁度。

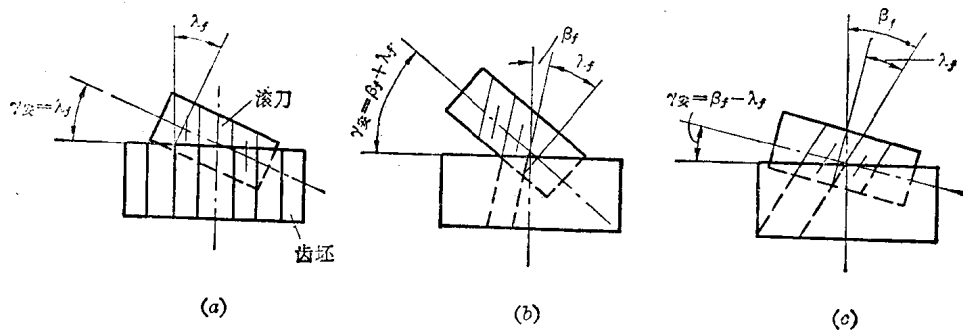


图 12-3 滚齿时滚刀的安装角

通常加工直齿和 $\beta_f < 10^\circ$ 的斜齿轮时, 一般选用右旋滚刀; 加工 $\beta_f > 10^\circ$ 的斜齿轮时, 则应取滚刀螺旋线方向与被加工齿轮螺旋线方向相同。

③ 滚刀和被加工齿轮必须强制性地保持一对螺旋齿轮相啮合的运动关系, 即

$$\frac{n_n}{n_x} = \frac{Z_x}{K}$$

式中: n_n ——滚刀每分钟转数;

n_x ——工件每分钟转数;

Z_x ——工件的齿数;

K ——滚刀的头数。

因此, 滚齿的过程可以视为: 当滚刀绕自己轴线转动时, 形成刀齿的轴向移动, 这个移动就相当于假想齿条与被加工齿轮的啮合移动, 其移动速度 v_{Pn} , 与被加工齿轮的角速度 ω_x 应符合于 (图 12-4):

$$v_{Pn} = r_f \cdot \omega_x$$

式中 r_f ——被加工齿轮的分度圆半径。

这个滚切过程也相当于被加工齿轮的分度圆沿齿条节线作无滑动的纯滚动。渐开线齿形是由滚刀参与切削的一定数量刀齿连续位置的包络折线所构成, 如图 12-5 所示。图中 1~12 表示有 12 个刀齿参与切削。由于在形成一个齿槽的过程中, 参与切削的刀齿是有限

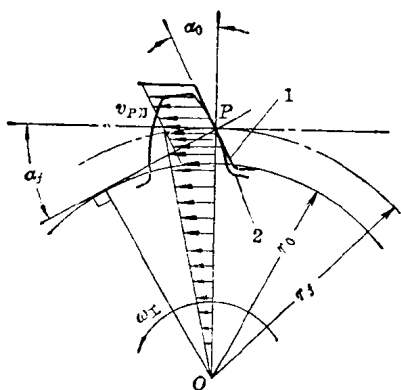


图 12-4 滚齿的切削运动图解
1—滚刀； 2—被加工齿轮

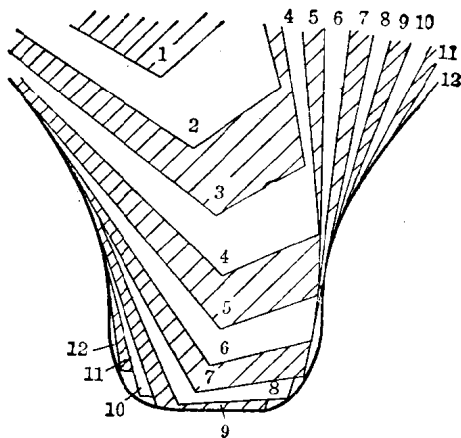


图 12-5 滚齿切削图形

的，因而构成的渐开线齿形不是一条光滑的曲线。并且参与切削的各刀齿切下的切屑大小形状均不相同，各刀齿上顶刃与侧刃的切削面积与载荷也各不相同，因此滚齿过程中刀齿的磨损也不均匀，影响滚刀的耐用度和加工质量。

滚齿加工过程如图 12-6 所示，它应具备如下三个基本运动：

滚刀的转动 n_n (切削运动)；

齿坯的转动 n_x (分齿运动) $n_x = \frac{K}{Z_x} \cdot n_n$ ；

滚刀沿工件的轴向走刀运动 $s_{\text{轴}}$ 。

滚切直齿必须有以上三种运动。

滚切斜齿也必须有这三种运动，但是由于斜齿轮轮齿沿齿宽上是螺旋形状，所以滚切斜齿轮时，要求滚刀在轴向走刀 $s_{\text{轴}}$ 的同时，齿坯还要附加转动，如图 12-7 所示。当滚刀由 A 点走至 A₁ 点时，齿坯还要多转一段距离 BA₁，否则只能切出直齿来。所以按照斜齿轮螺旋角 β_f 与导程 T 的关系，只要满足滚刀轴向走刀一个导程 T 时，齿坯正好附加多转或少转一圈，就能够加工出斜齿轮。

可见在滚切斜齿轮时，既要求机床工作台（即齿坯）具有能严格保持滚刀转一转，工作台转 K/Z_x 转的分齿运动，又同时要求具有滚刀轴向进给到齿坯的一个导程 T 时，工作台（即

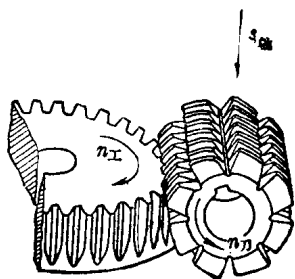


图 12-6 滚齿运动

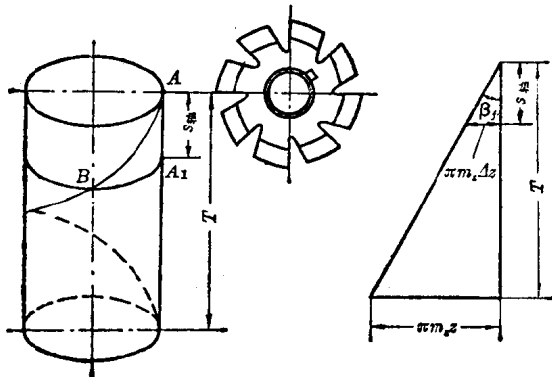


图 12-7 滚斜齿原理图

齿坯)多转或少转一圈的附加运动。

在 Y38 滚齿机上, 这个附加运动是通过调整附加运动链来获得, 而附加运动与分齿运动的合成是靠滚齿机的差动机构。

2. 提高滚齿生产率的途径

提高滚齿的生产率, 首先要减少滚齿时的机动时间。

滚齿时的机动时间按下式计算:

$$T = \frac{(A+B)Z_x}{n_n s_{\text{轴}} K} (\text{分})$$

式中: A ——滚刀轴向切入长度(毫米);

B ——工件齿圈宽度(毫米);

Z_x ——工件齿数;

n_n ——滚刀转速(转/分);

$s_{\text{轴}}$ ——滚刀轴向进给量(毫米/工件每转);

K ——滚刀螺旋线头数。

式中 B 和 Z_x 在加工一定的工件时, 是一个常数, 因此, 要减少机动时间, 提高滚齿生产率, 就必须设法增加 n_n 、 $s_{\text{轴}}$ 、 K 或者设法减小 A 。

(1) 高速滚齿

目前, 我国齿轮生产中, 滚齿速度一般还较低。这主要是由于现有的滚齿机刚性差和刀具耐用度低的原因造成的。

近年来, 我国已开始设计和制造刚性较好和具有自动轴向窜刀机构的高速滚齿机, 同时生产了铝高速钢(Mo5Al)滚刀, 滚齿速度可提高到 $v=100$ 米/分以上, 进给量 $s_{\text{轴}}=1.38\sim 2.06$ 毫米/转, 此时滚刀的磨损反而比 $v=60$ 米/分时下降 15% 左右, 而生产率则提高了 25%。

已有的试验还证明, 只要滚齿机刚度足够并具有自动轴向窜刀机构, 普通高速钢(W18Cr4V)滚刀也完全可以在 $v=80$ 米/分左右的速率下正常工作, 从而大大提高生产率。

国外在高速滚齿方面, 高速钢滚刀的切削速度已由 70~80 米/分提高到 100~150 米/分; 硬质合金滚刀已经试验到 400 米/分以上。为了适应高速滚齿, 新型滚齿机都大大提高了刚性, 重量和功率也都为此增大了。

总之随着滚齿机和刀具材料的不断改进, 高速滚齿的潜力很大, 而且加工后的齿轮精度和光洁度都有很大的提高, 可以减少剃齿余量, 提高剃齿刀寿命, 甚至有可能取消剃齿工序。因此, 高速滚齿具有一定的发展前途。

(2) 加大滚齿的轴向进给量

提高滚齿生产率的另一方法是低速大走刀, 即在较低的切削速率下采用较大的轴向进给量, 也能有效地提高滚齿生产率。

目前一般采用的轴向进给量为 $s_{\text{轴}}=1\sim 2$ 毫米/转, 有关工厂试验结果, 当 $v=40\sim 50$ 米/分时, 把轴向进给量加大至 $s_{\text{轴}}=3\sim 4$ 毫米/转, 只要机床刚度足够, 滚齿仍能正常进行。

但必须指出, 这种低速大走刀的滚齿方法, 和高速滚齿相比, 加工后的齿轮质量较差, 机床精度也难长期保持, 因此, 只能用于大模数齿轮的粗切工序中。

(3) 改进刀具结构

采用大直径滚刀,可以使滚刀的圆周齿数增加,同时还可以加大滚刀的孔径,使滚刀刀杆的刚度得到有效的增加。因此,采用大直径滚刀后就能选取较大的滚齿切削用量,从而能提高滚齿生产率。但是当滚刀直径加大后,切入长度 A 将随之增加(图12-8a),因此,采用大直径滚刀必须配合采用径向切入法,以大大缩短切入长度(径向切入长度 s 与轴向切入长度 C 之和,见图12-8b),从而能更加有效地缩短滚齿机动时间,最大限度地提高滚齿生产率。而且由于大直径滚刀的圆周齿数增加了,加工时包络齿面的刀刃数将增加,切削工作平稳,有利于提高齿面光洁度和刀具耐用度。

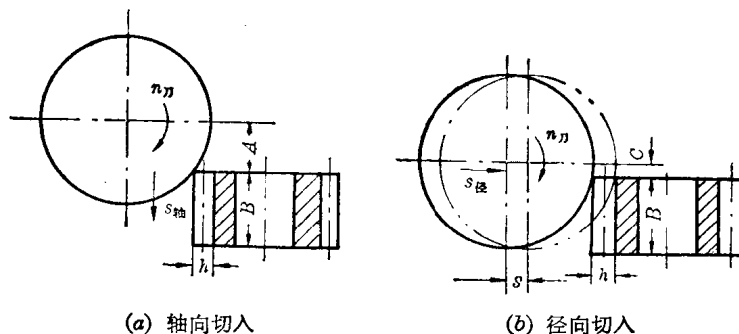


图 12-8 滚刀的切入情况

采用多头滚刀将明显地提高滚齿生产率。根据某厂的统计,采用双头滚刀比单头滚刀可提高切齿效率40~60%,三头滚刀能提高70~80%。国外有的工厂为此已采用5~6头滚刀。但是由于多头滚刀各头之间不可避免地存在分度误差,使被加工齿轮的齿距误差和齿厚误差加大。同时多头滚刀因导程大,螺旋升角大,使被加工的齿形误差增加;其次多头滚刀包络齿面的刀刃数少,加工后齿面棱面高度增加,降低了齿面光洁度。因此,必须注意使多头滚刀的头数与被加工齿轮齿数之间互为质数,并且使滚刀头数与滚刀圆周齿数之间也互为质数,这样齿轮的每个齿槽将被滚刀螺旋线的各个头轮流切削,刀刃包络齿面的位置也互相错开,在这种情况下将基本消除多头滚刀各头分度不准所造成的齿距误差和齿厚误差,被切齿面的棱面高度也将大大降低。

采用带有正前角的滚刀能明显地改善刀具的切削性能,增加刀具的耐用度,并且消耗功率较小。所以带正前角的滚刀一般能提高滚齿生产率25%左右。但是必须注意,由于滚刀具有正前角,使齿形发生变化,因而只适宜于粗加工,否则刀具齿形必须加以修正。

(4) 改进加工方法

① 应用对角滚齿

滚刀在滚齿过程中,不是全部刀齿都参与切削,而且参与切削的刀齿磨损也不均匀,因此影响着滚刀的耐用度和滚齿生产率的提高。对角滚齿法就是让滚刀在切削过程中,除沿工件轴向进给外,还增加一个沿滚刀本身中心线方向的切向进给。这样滚刀就具有轴向进给 $s_{\text{轴}}$ 和切向进给 $s_{\text{切}}$ 的综合运动(当然工件也应有分齿运动和相应的附加运动),见图12-9。结果滚刀的进给轨迹就成了对角线形。

对角滚齿法的优点,在于滚刀增加了沿其本身轴心线方向移动的切向进给后,使得滚刀在全长内所有刀齿都能参加切削,使各刀齿的负荷均匀,因而磨损均匀,刀具耐用度高,便于提高切削用量,达到提高生产率的目的。

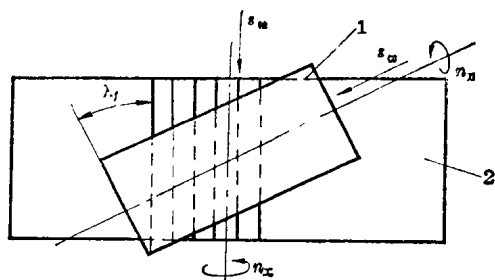


图 12-9 对角滚齿
1—滚刀；2—工件

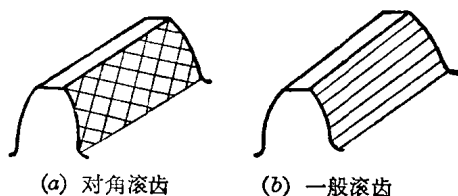


图 12-10 对角滚齿和一般滚齿切削后齿面的比较

同时，对角滚齿法滚出的齿面痕迹不象一般的滚齿（图 12-10b）而为交叉的网形（图 12-10a），故齿面光洁度高，对进一步剃齿或滚齿有利。但采用对角滚齿法的滚刀要长一些。较经济的对角滚齿法的滚刀长度为标准滚刀的 1.3~1.8 倍。另外对角滚齿法要求滚齿机具有切向进给刀架。

② 滚齿时以顺铣代替逆铣

图 12-11a 为滚刀从上向下进给——逆铣情况；图 12-11b 为滚刀从下向上进给——顺铣情况。根据铣削原理，逆铣时切屑厚度从零到大，由于刀具刃口不是绝对尖锐，刀具切入金属前要滑过一段距离，才能切入。而且刀具开始接触工件的地方，正是前一刀齿形成的冷硬层，这时挤压和摩擦都很严重，因此刀具后面的磨损较大，刀具耐用度和工件表面质量降低。而且刀具水平分力 P_H ，随刀具位置不同而改变其大小与方向，使刀架和立柱之间的配合时松时紧，影响被切齿轮的齿面光洁度。而顺铣时则切屑的厚度从大到零，刀具水平分力始终将刀架压向立柱，没有逆铣时的缺点，故可以获得较好的刀具耐用度和工件表面质量。但是顺铣也有缺点：当齿坯外圆表面很硬时，顺铣切削不够平稳；且刀具垂直方向的分力 P_V 的大小与方向随刀具位置的不同而改变，各齿 P_V 的合力往往将刀架上抬。如果刀架的丝杠和螺母间配合间隙较大，则进给过程中刀架有晃动，容易崩刃，故滚齿机上多装有消除丝杠和螺母间隙的装置：如 Y38 滚齿机刀架上方就有油压装置，当机床开动后，油缸就通入压力油，使传动丝杠和螺母贴紧，以消除间隙，保证工作平稳。有了这种装置，可使顺铣提高切削速度和进给量，从而提高生产率。

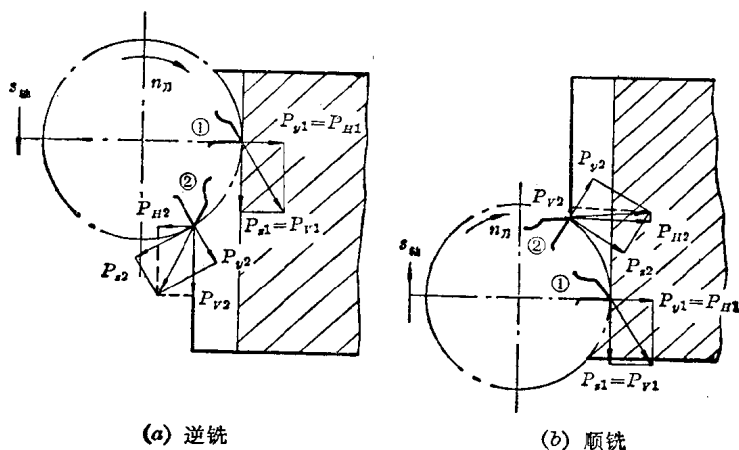


图 12-11 滚齿时的切削情况

除了上述的许多方法外,也还可采用多件串联安装加工来减少切入长度 A , 达到减少机动时间,提高生产率的目的。

近年来,滚齿的自动化程度大大提高了。有各种装置能自动装卸各种形状的工件;装有程序控制系统,使在一次安装中,能对多联齿轮的不同齿圈以不同的切削规范进行切齿;实现机床操作和工件测量的高度自动化,以便于单机自动化和建立自动化生产线,大大提高生产率。

二、插齿

1. 插齿原理及所需运动

插齿和滚齿一样,也是利用展成法来加工的。插齿刀和工件相当于一对轴线相互平行的圆柱齿轮相啮合,而插齿刀就象是一个磨有前后角而产生切削刃的齿轮(图 12-12)。现以 Y54 型插齿机为例,将插齿时刀具与工件之间所需的运动分述如下(图 12-13):

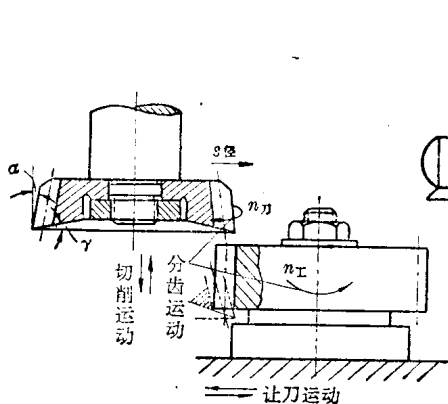


图 12-12 插齿过程

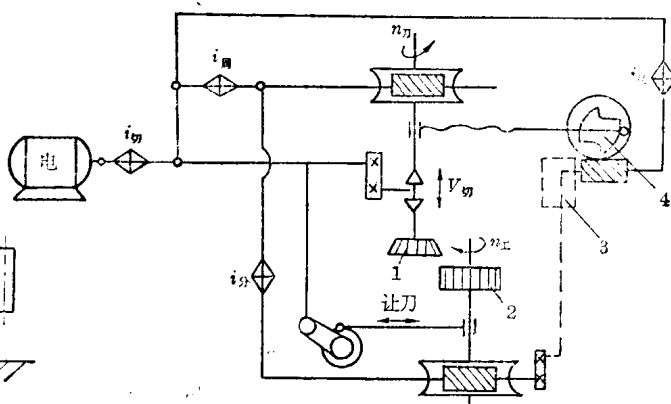


图 12-13 插齿的传动链

1—插齿刀; 2—工件; 3—计数机构; 4—径向进给凸轮

(1) 切削运动

插齿时要求插齿刀作上下往复的切削运动,它是通过插齿机的变速箱(或挂轮)来实现变速的。切削速度以每分钟的双行程次数来表示。

(2) 分齿运动

插齿时插齿刀和工件的相对旋转运动相当于一对啮合的齿轮,故插齿刀与工件之间须保持一对圆柱齿轮的啮合关系。插齿刀与工件由插齿机的传动链提供强制性的啮合运动,并保持 $i = n_n/n_z = Z_z/Z_n$ 的关系。

式中: n_n 、 n_z ——插齿刀与工件的转速;

Z_n 、 Z_z ——插齿刀与工件的齿数。

(3) 径向进给运动

开始插齿时,为了逐步切至全齿深,插齿刀必须有径向进给运动。径向进给量 s_g 是用插齿刀每次双行程径向移动的毫米数来表示。当切至调整好的深度时,径向进给运动自行停止。在 Y54 等型号的插齿机上,插齿刀的径向进给量是用凸轮来实现的,其工作原理如下:

Y54 型插齿机,有三个径向进给凸轮,可根据加工工件的模数大小及精度要求来选用一次、二次或三次进给。

图 12-14a 为一次进给凸轮, 凸轮工作从 a 点开始, 当按逆时针方向转动 90° 时即至 b 点, 使插齿刀完成径向进给; 凸轮再转 90° , 由于 $\widehat{bc}$ 段为圆弧, 故没有径向进给, 这时工件转一整转, 在整个齿圈上切出完整的齿形来。当凸轮达到 c 点时, 滚子落入凹槽, 插齿刀快速退出, 这时机床停止, 插齿完毕。故凸轮转一转机床可作插齿工作循环二次。

图 12-14b 为二次进给凸轮, 凸轮曲线 $\widehat{da}$ 段不起作用, $\widehat{ab}$ 段为有升程的曲线, 用作第一次径向进给。 $\widehat{bc}$ 为工件在没有径向进给的情况下转一整转, 但此时所切出的齿深还没有达到要求的数值, 应使工件在将要转至 c 点时, 凸轮再使插齿刀进给 0.5 毫米, 至需要的切削深度, 即作第二次径向进给。以后再转 90° , 即 $\widehat{cd}$ 弧, 工件再相应转一转, 最后加工出所需要的齿深。此时凸轮需转 360° , 机床方完成插齿工作循环一次。其中 90° 为空转。

图 12-14c 为三次进给凸轮, 凸轮的整个圆周都用上了, 工作原理和二次进给相似。

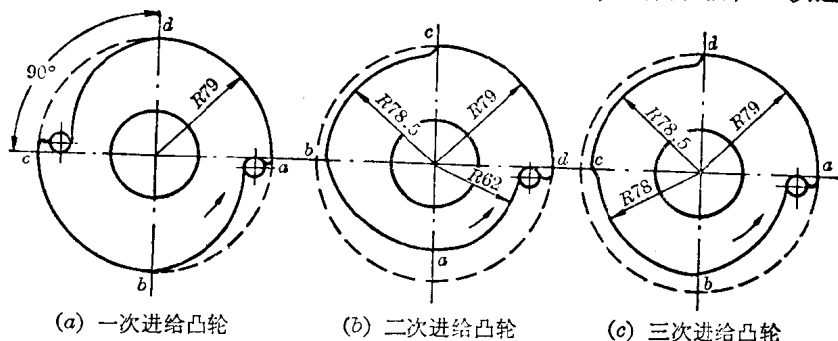


图 12-14 径向进给凸轮

由此可知, 不管用那个凸轮, 当其转过第一个 90° 后(此时工件根据径向进给量和圆周进给量的大小转相应的角度), 必须保证凸轮每再转 90° 时, 工件应转过一整周。为此径向进给凸轮不能再由径向进给传动链来驱动, 而是通过“计数机构”的传动链来驱动, 以保证此运动关系。故操纵径向进给凸轮的转动需要要有两条传动链, 一条是由径向进给系统传入的, 另一条是由“计数机构”传入的。前者用于作径向切入时; 后者则为无径向切入时切出整圈齿所必需。

(4) 圆周进给运动

插齿刀每一往复行程在分度圆上所转过的弧长(毫米), 称为圆周进给量。因此, 啮合过程也是圆周进给过程。

(5) 让刀运动

插齿刀在作上下往复运动中, 向下是切削运动, 向上是空行程。为了避免擦伤已加工的齿面和减少插齿刀的刀齿磨损, 故在插齿刀空行程时, 工作台需让开插齿刀(沿工件径向); 而当插齿刀作工作行程时, 工作台恢复原位, 这种运动称为让刀运动。

在插制斜齿轮时, 其原理是两轴线相互平行的斜齿圆柱齿轮啮合。故这时插齿刀的运动不能是单纯的上下往复运动, 同时还应有一附加转动(图 12-15), 以使切削刃运动时产生的表面相当于斜齿轮的齿侧面。这个附加转动由机床的螺旋形导轨得到。螺旋形导轨的导程等于插齿刀的螺旋导程。由于插齿刀要随工件而变换, 且螺旋形导轨也应相应变换, 故用得不多。

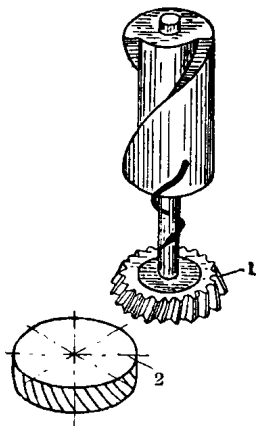


图 12-15 插制斜齿轮
1—插齿刀; 2—斜齿轮

2. 滚、插齿工艺特点的比较

齿轮由于工艺、结构等因素的影响,生产时有的只能滚切(如蜗轮);也有的只能插制,如加工多齿圈圆柱齿轮中的小齿轮时,若两齿圈之间的轴向距离很小(图 12-1b、c),因插齿刀“切出”时只需要很小的距离,而用滚齿则滚刀与大齿轮将发生干涉,故不能用滚齿而只能用插齿。

机器中绝大部分的圆柱齿轮是既可以滚,也可以插的。除了加工斜齿轮时,滚齿比插齿方便;而在加工内齿、齿条和扇形齿轮时,用插齿比滚齿有利外,在其它情况下,究竟选用那种加工方法最适宜呢?那就需要从加工齿轮时的精度和生产率两方面进行考虑。

(1) 加工精度

滚齿的运动精度较高;但插齿的齿形和齿面光洁度较好。这是因为:

① 插齿机的传动链较复杂,较突出的一点是比滚齿机多了一个刀具蜗轮副,即多了一部分传动误差。刀具主轴的往复运动和工作台的让刀运动部分也易于磨损。由于被加工齿轮的齿形是在与插齿刀作无间隙啮合时得到的,因此插齿刀的周节累积误差也必然反映到齿轮上。使插齿的运动精度一般较滚齿为低。

② 插齿时形成齿形包络线的切线数量由圆周进给量的大小决定,可以选择;而滚齿时形成渐开线包络线的切线数量只与滚刀开槽数和螺旋线的头数有关,包络线的切线数量不能通过改变加工条件而增减。故插齿所得表面光洁度比滚齿所得的高得多,齿形误差也较小。

③ 插齿刀的安装误差对齿形误差的影响较小,而滚刀的安装误差则会引起工件产生较大的齿形误差。

④ 插齿刀的几何形状是一个正齿轮,与滚刀相比,制造工艺较简单,容易制造得较精确,因此齿轮的加工精度较高。

故从加工精度方面看,对运动精度要求不高的齿轮,可直接用插齿对齿轮进行精加工,不再进行剃齿或磨齿。而对运动精度要求较高的齿轮和剃前齿轮(剃齿不能提高运动精度),则以用滚齿较为有利。

(2) 生产率

一般滚齿的生产率较插齿为高,只有在加工模数较小、齿数多和齿宽小的齿轮时,插齿才有与滚齿竞争的能力。这是因为:

① 滚刀是利用转动来进行切削,切削速度较高,空行程损失较少。而插齿刀是作往复运动,使切削速度的提高受到了限制,且实际进行切削的行程长度只占总行程长度的 $1/3$ 左右,空行程损失太大。

② 滚齿可以采用多头滚刀来提高粗滚效率。

③ 滚齿时的机动时间与工件的齿数有关,而插齿的机动时间只要考虑工件的直径。这就是说大直径小模数的齿轮,采用插齿比较适宜。

3. 提高插齿生产率的途径

为了提高插齿的生产率,可以采用下列的方法。

(1) 提高圆周进给量。这样能减少插齿的机动时间。但必须注意,圆周进给量愈大,插齿刀每次回程时机床工作台让刀量也需愈大。当改进机床使让刀值加大时,则由于工作台部分的重量大,容易引起振动和加速磨损。因此有的插齿机采用刀头来完成让刀运动。

(2) 增加插齿刀每分钟往复行程次数(高速插齿)。现在有的插齿机在实际生产中插齿刀每分钟往复行程次数可达 1200~1500 次/分, 有的甚至可达 2500 次/分左右, 比常用的提高了 3~4 倍, 使切速大大增加, 因此能减少插齿所需的机动时间。

(3) 充分发挥现有插齿刀的切削性能和改进刀具参数, 提高插齿刀的耐用度。

经试验表明 W18Cr4V 高速钢插齿刀在 20 米/分左右的切削速度下加工, 并未充分发挥刀具的切削性能, 在精插时完全可以提高到 $v=60$ 米/分左右。

若加大插齿刀的前角 γ_n 至 15° 、后角 α_n 至 9° (标准插齿刀 $\gamma_n=5^\circ$ 、 $\alpha_n=6^\circ$), 刀具耐用度可提高三倍左右。以前所以不采用较大前角和后角的插齿刀的原因是以为加大前、后角后, 切出的齿形精度会过分降低。而现在经研究证明, 应用上述插齿刀加工时, 齿形精度降低很少。另外在插齿刀前刀面磨出 1~1.5 毫米宽的平台, 也可以提高插齿刀的耐用度 30% 左右。因此可以相应提高插齿的切削速度以提高生产率。

(4) 串联安装。对于齿宽很小的齿轮实行多件加工, 可减少插齿刀空行程损失, 提高生产率。

此外, 国外已采用多把插齿刀插齿的新工艺, 取得提高生产率的效果。

三、剃齿

1. 剃齿的原理与特点

用圆盘剃齿刀剃齿的过程, 是剃齿刀与被剃齿轮以螺旋齿轮双面紧密啮合的自由对滚切削过程。剃齿刀实质上就是一个高精度的螺旋齿轮, 只是为了形成切削刃, 在齿面上沿渐开线方向开有许多小槽而已(图 12-16a)。

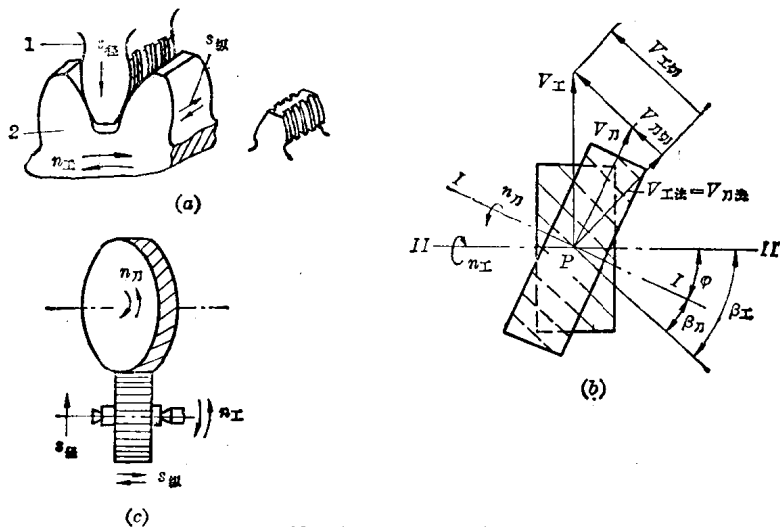


图 12-16 剃齿的基本原理

1—剃齿刀; 2—工件

图 12-16b 表示一把左旋剃齿刀和右旋齿轮相啮合的情况。在啮合点 P , 剃齿刀旋转的圆周速度是 V_n , 工件绕自己的轴线转动, 圆周速度为 V_x 。 V_n 和 V_x 都可以分解成为齿的法向分量($V_{n法}$ 和 $V_{x法}$)和切向分量($V_{n切}$ 和 $V_{x切}$)。由于啮合点的两个法向分量必须相等, 即 $V_{x法}=V_{n法}$, 亦即 $V_x \cos \beta_x = V_n \cos \beta_n$ 。这时两个切向分量将不会相等, 因而产生了相对滑动。因为剃齿刀的齿面上有许多小槽, 这些小槽与齿侧面的交线就是切削刃, 所以当齿轮齿面沿它相对滑动时, 就产生切削作用, 切下很细的切屑。这个相对滑动速度就是切削速度,

由图 12-16b 可知:

$$\begin{aligned} V_{\text{切削}} &= V_{\text{工切}} \pm V_{\text{刀切}} = V_{\text{工}} \cdot \sin \beta_{\text{工}} \pm V_{\text{刀}} \cdot \sin \beta_{\text{刀}} = V_{\text{刀}} \left(\frac{\cos \beta_{\text{刀}}}{\cos \beta_{\text{工}}} \sin \beta_{\text{工}} \pm \sin \beta_{\text{刀}} \right) \\ &= V_{\text{刀}} \left(\frac{\cos \beta_{\text{刀}} \sin \beta_{\text{工}}}{\cos \beta_{\text{工}}} \pm \frac{\sin \beta_{\text{刀}} \cos \beta_{\text{工}}}{\cos \beta_{\text{工}}} \right) = V_{\text{刀}} \cdot \frac{\sin(\beta_{\text{工}} \pm \beta_{\text{刀}})}{\cos \beta_{\text{工}}} = \frac{V_{\text{刀}}}{\cos \beta_{\text{工}}} \cdot \sin \varphi \end{aligned}$$

式中: φ ——剃齿刀和工件轴线的夹角, $\varphi = \beta_{\text{工}} \pm \beta_{\text{刀}}$; $\beta_{\text{工}}$ 、 $\beta_{\text{刀}}$ 分别为工件与刀具的螺旋角。

既然剃齿是螺旋齿轮传动, 所以剃齿刀与被剃齿轮也是点接触, 转过一个齿后, 齿面上只留下一条接触点的痕迹, 如图 12-17 所示。因此为了要加工出轮齿的整个齿面, 工作台必须往复运动, 工作台往复一次后, 剃齿刀向工件径向进给一次, 使剃齿刀切入金属层, 逐步切除全部余量, 得到被切齿轮所需要的齿厚。

因此实际在普通剃齿时, 应具有以下几种运动(图 12-16c)。

- (1) 剃齿刀的高速旋转;
- (2) 工件沿轴向的往复运动(用以剃出全齿宽);
- (3) 工件每往复一次后的径向进给运动。

为了保证齿轮工作时接触区位于齿宽中部, 以减少由于齿轮装配时轴心线偏斜所引起的不良啮合及由此而产生的噪声而需要剃鼓形齿时, 可以利用工作台能够摆动的剃齿机加工。如图 12-18 所示, 当工作台绕中心 1 摆动时, 在齿轮两端可以剃去较多的金属。如原有剃齿机的工作台不能摆动, 则可在机床上装摆动夹具以剃鼓形齿。

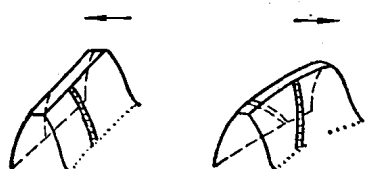


图 12-17 剃齿侧面上的接触线

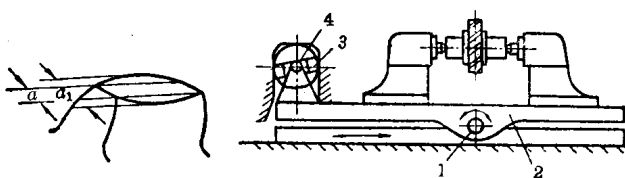


图 12-18 鼓形齿及剃齿机工作台

从上面的分析可知, 由于剃齿加工的齿坯是已经过滚(或插)齿的齿轮, 剃齿时就靠剃齿刀和它直接啮合, 所以剃齿是一对齿轮自由啮合的展成加工, 这是区别于其它展成加工(强制啮合)的特殊点, 正是由于这个特殊本质, 所以剃齿法有一系列优点。

- (1) 剃齿机的结构简单, 调整方便。
- (2) 剃齿加工精度主要取决于刀具。只要剃齿刀本身的精度高, 刃磨好, 就能够剃出光洁度 $\nabla 7 \sim \nabla 8$, 精度 6~7 级的齿轮来。
- (3) 生产率高。一般只要 2~4 分钟便可加工一个齿轮。

当然, 剃齿也存在一定的缺点。主要是因为加工齿轮没有强制性的啮合运动, 所以分齿均匀的要求便无法控制, 不能修正齿轮的公法线长度变动量; 并部分地会将径向跳动量转化到公法线长度变动量上来(详见本章齿轮加工误差分析一节), 这是个比较大的问题。再者, 剃齿刀的制造比较困难; 剃齿也不便于加工多齿圈齿轮的小齿轮等, 使剃齿的应用受到一定限制。

2. 剃齿方法

(1) 轴向剃齿法(普通剃齿法)

即工作台走刀方向和被加工齿轮的轴线一致(图 12-19), 用这种方法时被加工齿轮齿宽的各个截面都要从啮合节点 P 通过(由 $P_1 \rightarrow P_2$), 因此工作台最小走刀长度 L_s 应等于齿