



第2版

下册

齿轮手册

齿轮手册编委会 编



机械工业出版社
China Machine Press

第 20 篇 锥齿轮加工



	主 编	曾 韬	董学朱
	编写人	曾 韬	董学朱
第 1~4、7 章		董学朱	
第 5、6 章		曾 韬	

第 1 章 锥齿轮加工方法

由第 5 篇可知, 锥齿轮的当量圆柱齿轮齿数 $z_m = \frac{z}{\cos^3 \beta \cos \delta}$, $\delta \rightarrow 90^\circ$ 时 $z_m \rightarrow \infty$ 。即平面锥齿轮相当于圆柱齿轮中的齿条, 可作为锥齿轮加工中的产形轮, 称为环形齿条。当产形轮和工件作为一对锥齿轮或准双曲面齿轮啮合时, 即可加工出锥齿轮的齿形。实践中通常用摇台来构造产形轮, 用刀具切削刃的运动轨迹构造一个或多个轮齿。现讨论各种锥齿轮的切齿方法。

1 直齿锥齿轮切齿方法

1.1 刨齿法

如图 20.1-1 所示, 两把作往返切削运动的刨刀所形成的切削面是产形轮轮齿, 携带它转动的摇台是产形轮, 工件与它作展成运动时即可加工出直齿锥齿轮的轮齿。加工好一个轮齿后分度再加工第二个轮齿, 直至加工好整个齿轮。这是加工直齿锥齿轮最广泛、最常见的一种方法, 生产率低, 适用于小批及单件生产。

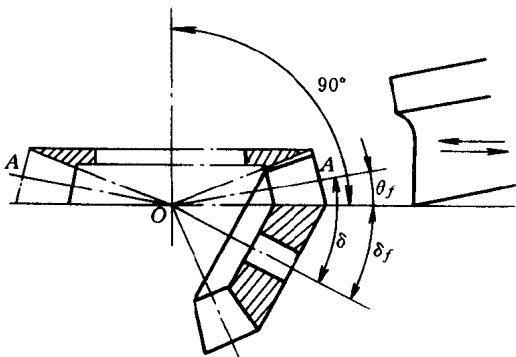


图 20.1-1 刨齿法

1.2 双刀盘铣削法

如图 20.1-2 所示, 两把铣刀盘的旋转运动所形成的切削面是产形轮轮齿, 携带它转动的摇台是产形轮, 工件与它作展成运动时即可加工出直齿锥齿轮的轮齿。加工好一个轮齿后分度再加工第二个轮齿, 直至加工好整个齿轮。这种加工方法效率较高, 但刀具费用贵, 一般用于批量生产中。

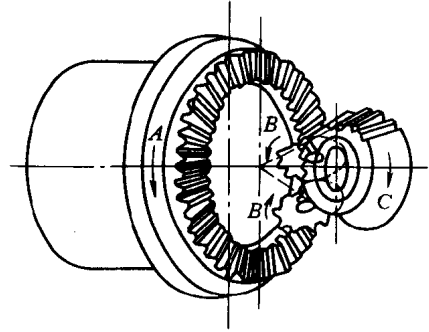


图 20.1-2 双刀盘铣削法

1.3 圆拉法

如图 20.1-3 所示, 工件不动, 拉刀盘作旋转运动的同时, 沿 B 及 C 方向作往复运动以拉削出齿槽。其具体的工作循环是:

- 1) I 组刀头进行粗切, 刀具中心按 B 方向运动。

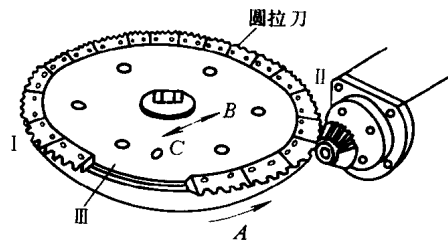


图 20.1-3 圆拉法

- 2) 刀具中心沿 B 方向快速移动一小段距离。
- 3) II 组刀头进行精切, 刀具中心按 C 方向运动。
- 4) 在空隙 III 通过时, 进行分度, 同时刀具退回。

这是一种成形法, 只能在专用机床上加工, 效率很高, 用于大批量生产中, 如汽车差速器齿轮的生产。

2 曲线齿锥齿轮切齿方法

2.1 端面铣齿法

格利森制弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮用端面铣齿法加工, 其加工原理见图 20.1-4。机床上的摇台机构构成其产形轮, 安装在摇台上的端面铣刀盘切削刃的轨迹代表产形轮上的一个轮齿。当工件即被加工齿轮

与产形轮以一定的传动比绕各自的轴线旋转时,刀盘就会在工件轮坯上切出一个齿槽。齿轮的切削过程就是产形轮和工件这对准双曲面齿轮的啮合过程,弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的这种加工方法称为展成法。

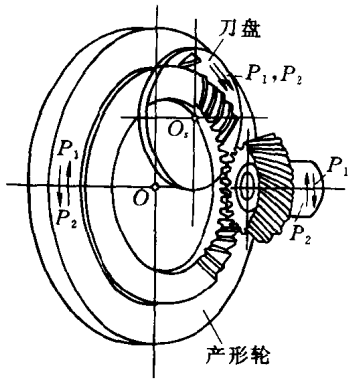


图 20.1-4 端面铣齿法

当大轮的分锥角大于 70° 时,大轮齿面与刀盘刀锥面形状相近而且大轮根锥面与根锥中点切平面很靠近,这时可以不用展成法而用拉齿的方法精切大轮,这样可以极大地提高生产效率,特别适合大批量齿轮的生产。大轮的这种加工方法称为成形法。

不管大轮用什么方法加工,小轮都必须用展成法加工。根据各种机床上所具有的机构不同,又可以分为三种加工方法:

(1) 刀倾法 在有刀倾机构的铣齿机上加工小轮,可以用刀倾机构使刀盘轴线倾斜来修正小轮齿面,汽车齿轮多采用这种方法。

(2) 变性法 在有变性机构的铣齿机上加工小轮,可以用变性机构改变产形轮和小轮的瞬时传动比来修正小轮齿面,需磨齿的齿轮只能用变性法加工。

(3) 双重螺旋运动法 用刀倾法和变性法加工小轮时,小轮的两侧齿面是分开的,为了提高小轮的加工效率,在有刀倾机构和螺旋运动机构的机床上加工小轮时可以同时加工两侧齿面,用这两种机构联合

起来修正小轮齿面。这种方法主要用于小模数齿轮的加工。

2.2 端面滚齿法

2.2.1 奥利康切齿法

加工奥利康制摆线齿锥齿轮和准双曲面齿轮时,其产形轮的形成见图 20.1-5。与刀盘固联并同心的动圆在定圆上作纯滚动时,刀盘上每个刀片的运动轨迹都是外摆线,每组刀片的切削刃形成了产形轮上的一个轮齿,动圆在定圆上连续运转时,各组刀片就形成了产形轮上连续的轮齿。当这个产形轮与工件绕各自的轴线按齿数比旋转时,就可连续地加工出各个轮齿。要注意的是这时刀盘的转速不能任意,必须把刀盘也看作一个齿轮,其刀片组数就是它的齿数,在加工过程中也必须严格按齿数比转动。

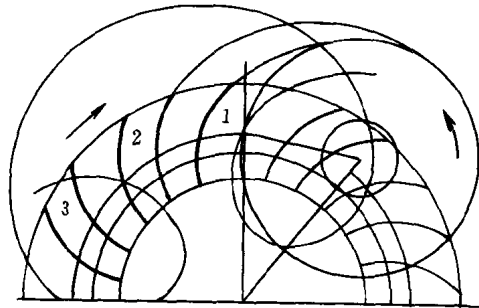


图 20.1-5 奥利康切齿法产形轮的形成

端面铣齿法是单分度的,即每加工好一个齿槽后工件与刀盘脱离接触,分度后再加工第二个齿槽。而端面滚齿法是连续分度的。

2.2.2 克林根贝尔格切齿法

按克林根贝尔格制设计的摆线齿锥齿轮和准双曲面齿轮的切齿原理与奥利康切齿法是一样的,不同的是它所采用的刀盘是双体的。一个刀体上安装内切刀片,另一个刀体上安装外切刀片,加工时它们的轴线是分离的,各自有不同的动圆和定圆。这样可以更方便地修正两侧齿面的齿形。

第2章 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮切齿计算方法

1 切齿计算原理

弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮切齿计算时,都采用

格利森计算卡进行计算,本章简要介绍这些计算卡的编制原理和基本公式。其详细的推导请参见参考文献 [4~8] 等。

1.1 齿面修正的原因和方法

弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮加工时，为了在展成齿面的同时也加工出齿根曲面，刀盘的刀尖平面应该与工件的根锥相切，即刀盘轴线应该垂直于根锥。将加工的大轮和小轮装配在一起并画出加工它们的刀盘（见图 20.2-1）就可以看到，两刀盘轴线根本不能平行。由齿轮啮合原理知道，这样加工出的齿轮副是无法正确啮合的。因此，必须对齿面进行修正。考虑到小轮齿数较少，所以都对小轮进行修正。

齿面修正原理见图 20.2-2。根据展成法或成形法加工的大轮齿面，可以用齿轮啮合原理求出与小轮完全啮合的小轮齿面。这种小轮齿面虽然理论上存在，但在现有的铣齿机上是无法加工的。这时可以在小轮齿面上选择一个基准点 M ，然后将 M 点四周的齿面轻轻地铲出一层，离 M 点越远的地方铲得越多一些，把理论齿面修正成一个与理论齿面在 M 点相切而又能为铣齿机所能加工出的实际齿面。很显然，将这种实际齿面再与大轮啮合，其接触区不再布满整个齿面而是形成一个以 M 点为中心的近似于椭圆的局部接触区。

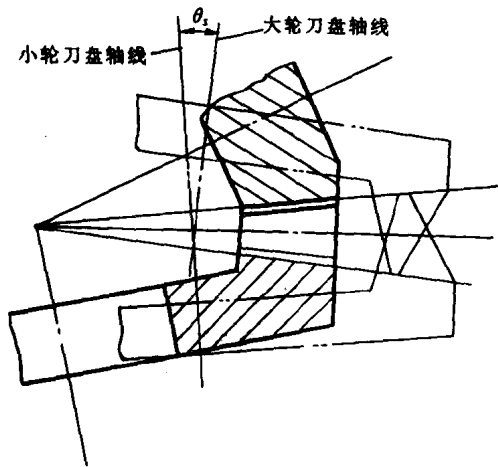


图 20.2-1 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的加工

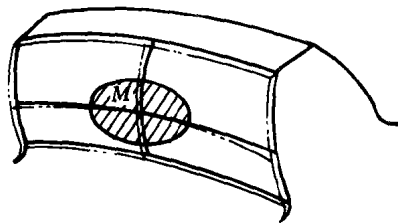


图 20.2-2 齿面修正原理

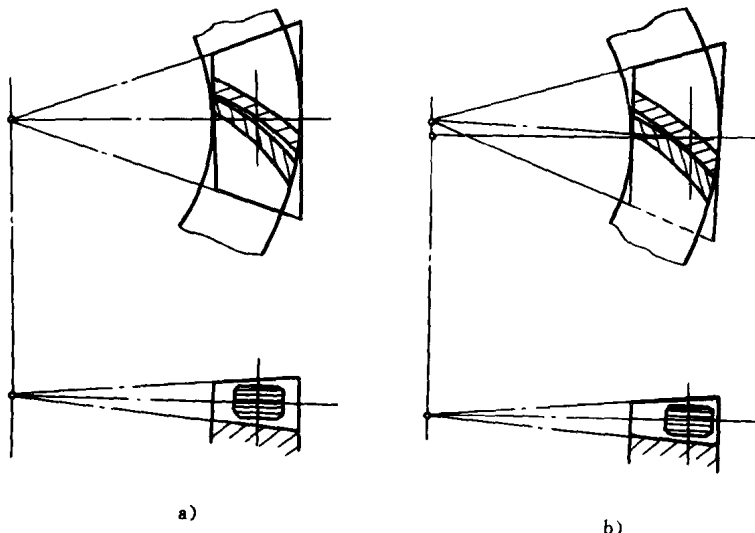


图 20.2-3 齿轮安装位置对载荷集中的影响

a) 正确安装位置 b) 安装有误差的情况

完全共轭的齿轮副理论上有很多优点，例如它具有最大的承载能力，运转平稳而无噪声。但是完全共轭的齿轮副有一个很大的缺点，就是可调性差。它要求齿轮的制造和安装都没有误差，否则容易造成载荷集中于齿轮边缘而使齿轮破坏。局部接触的齿轮副在正确安装位置时，其接触区位于轮齿中部，如果安装位置有误差，接触区也只会在中点附近移动而不会使载荷集中到轮齿边缘上去（见图 20.2-3）。实践证明，这种齿轮副的使用效果要比完全共轭的齿轮副好得多。

1.2 齿面修正的数学模型

从数学的角度来看，修正后的实际齿面与理论齿面在 M 点有相同的法矢，但曲率略有不同。实际齿面的曲率是对理论齿面的曲率进行修正后得到的。

相切曲面之间的距离 $\Delta\delta$ 和曲率差 $\Delta\kappa$ 之间的关系是

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} \Delta\kappa \Delta s^2$$

式中 Δs ——相切曲面之间的距离为 $\Delta\delta$ 处到切点的距离。

试验证明：当两齿面之间的距离 $\Delta\delta \leq 0.00635\text{mm}$ 时，用红丹粉可以检查出齿面的接触印痕。两齿面运转时的接触区大小就是根据这个原则来确定的。设 $\Delta\kappa$ 是两曲面切点处沿某一方向的法曲率之差， $l=2\Delta s$ 是两齿面沿该方向的接触区长度，将 $\Delta\delta=0.00635\text{mm}$ 代入上式可知

$$\Delta\kappa = \frac{0.0508}{l^2} \quad (20.2-1)$$

以上讨论的是单方向的修正，对于整个齿面来说，可以考虑对齿长、齿高两垂直方向的法曲率和短程挠率进行修正。设齿宽为 b ，螺旋角为 β ，则齿面的长度约为 $\frac{b}{\cos\beta}$ ，若齿长方向的接触区长度与齿面长度之比为 f ，则接触区长度 $l = \frac{fb}{\cos\beta}$ ，将它们代入式 (20.2-1) 可以求得齿长方向法曲率的修正值

$$\Delta \frac{1}{r} = 0.0508 \left(\frac{\cos\beta}{fb} \right)^2 \quad (20.2-2)$$

调整计算时， $\Delta \frac{1}{r}$ 分为两部分，在大轮刀盘半径和小轮刀盘半径上分别修正。 f 称为接触区长度系数，一般取为 0.3~0.4。

齿高方向法曲率的修正值可按接触区宽度是中点齿高的一半来确定，即令 $l = \frac{h}{2} = \frac{2r_1 \cos\beta_1}{z_1}$ ，代入式 (20.2-1) 可以求得齿高方向法曲率修正值 $\Delta \frac{1}{\rho} = 0.0127 \left(\frac{z_1}{r_1 \cos\beta_1} \right)^2$ ，在调整计算中引入齿高修正系数 K_p 而将该式改写为

$$\Delta \frac{1}{\rho} = 0.00254 K_p \left(\frac{z_1}{r_1 \cos\beta_1} \right)^2 \quad (20.2-3)$$

通常 $K_p = 0.63m$ ，然后再根据需要适当增减。

为了保证实际齿面在各个方向都确实低于理论齿面而且不发生对角接触，调整计算卡取齿长方向短程挠率的修正值 $\Delta r = 0$ 。

综上所述，弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮切齿计算的步骤应该是这样的：

- 1) 确定大小轮齿面上的切齿计算点，根据大轮加工情况确定小轮齿面计算点的法矢和法曲率。
- 2) 根据设计对接触区大小的要求，对小轮齿面计算点齿长和齿高方向的法曲率进行修正。
- 3) 确定机床调整参数，使加工出的小轮齿面在计算点处的法矢和法曲率满足上述要求。

1.3 切齿节锥和计算点的选择

从理论上讲，切齿计算点应该选择在设计所要求

的接触区中心，但为了计算方便，计算点都选择在产形轮和工件的节点上。因为切齿时产形轮和工件构成了一对准双曲面齿轮传动，将计算点选在它们的节点上，就可以利用第 5 篇第 6 章准双曲面齿轮几何计算来确定产形轮参数，进而利用这些参数来确定工件齿面的曲率。切齿计算时产形轮与工件的节锥称为切齿节锥，为计算方便，取工件的切齿节锥与根锥平行，产形轮的切齿节锥与面锥平行，见图 20.2-4。因此，大小轮切齿节锥的压力角、螺旋角等参数都是根锥参数。

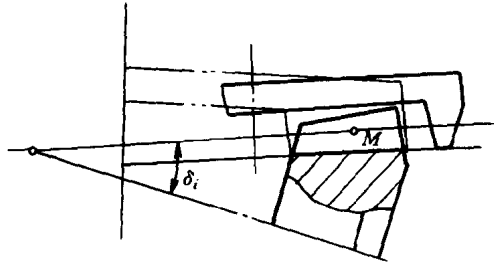


图 20.2-4 切齿节锥的确定

加工弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮时，大轮一般采用双面法加工。即在一次装夹中用双面刀盘切出大轮齿槽的两个侧面，这样可以提高大轮加工的生产率，保证产品的一致性。与大轮相配的小轮一般是用单面法加工，即轮齿两侧是用不同的刀盘、在不同的机床调整下分别加工的，这样可以保证对两侧齿面的接触区分别进行有效的控制。从理论上说，两侧齿面应该有不同计算点，必须分开来进行切齿计算。但这样处理比较麻烦，因此格利森计算卡都利用等距共轭曲面原理，将两侧齿面的计算点合二而一，选择在图 20.2-5 所示的大轮齿槽中点上。这时大轮两侧计算点具有相同的成形半径 r_0 ，计算可以简化。计算点 M 既位于大轮刀盘内刀和大轮凸面的一对等距共轭曲面上，又位于大

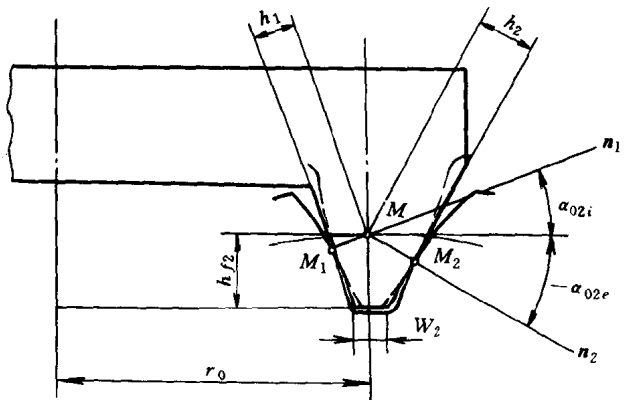


图 20.2-5 大轮切齿计算点

轮刀盘外刀和大轮凹面的一对等距共轭曲面上，其等距参数分别为

$$h = \frac{1}{2} W_2 \cos \alpha_{02} \pm h_{f2} \sin \alpha_{02} \quad (20.2-4)$$

式中 W_2 ——大轮刀盘的刀顶距；
 α_{02} ——大轮刀盘的齿形角。

格利森计算卡规定：加工大轮凸面的内刀齿形角为正，加工大轮凹面的外刀齿形角为负，上式中的复号即由此而产生。本章凡出现复号的地方，如不特别说明，上面的符号都适用于大轮凸面和小轮凹面，大轮刀盘内刀和小轮刀盘外刀；下面的符号都适用于大轮凹面和小轮凸面，大轮刀盘外刀和小轮刀盘内刀。

2 用展成法加工大轮

2.1 产形轮的节锥参数

用展成法加工准双曲面齿轮右旋大轮的情况见图

20.2-6，产形轮为左旋，大轮为右旋。产形轮的节锥角 $\delta_{02} = 90^\circ$ ，其节圆半径和节锥距为 R_{02} ，螺旋角为 β_{02} ，刀盘半径为 r_0 。加工大轮的双面刀盘见图 20.2-7，刀盘体上交替地安装着加工大轮凸面的内切刀片和加工大轮凹面的外切刀片，每种刀片中有一个基准刀片不能微调，其余刀片都能通过斜垫片微调以保证其径向位置与基准刀片的径向位置一致。刀盘的主要参数是刀盘的名义直径 D_0 、刀顶距 W_2 和齿形角 α_{02} 。双面刀盘的名义直径 D_0 已经标准化，常用的名义直径 (in) 有 3.5、6、7.5、9、12 和 18 等等。大轮切齿节锥与根锥平行，即节锥角为 δ_{f2} ，节圆半径为 r_2 。产形轮和大轮构成了一对轴交角为 $\Sigma = 90^\circ + \delta_{f2}$ 的准双曲面齿轮传动。它们的压力角 α_f 和螺旋角 β_{f2} 是第 5 篇第 6 章确定小轮面锥角时所用工艺节锥的压力角和螺旋角，把工艺节锥参数代入准双曲面齿轮几何计算公式，可以得到以下的结果：

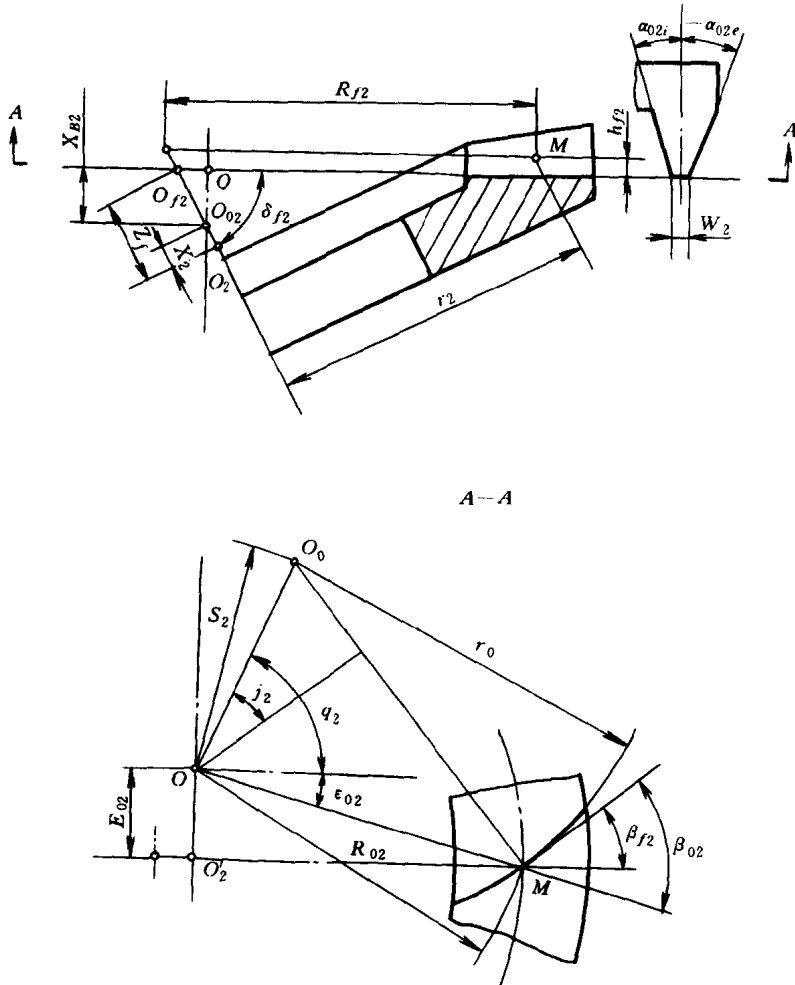


图 20.2-6 用展成法加工右旋大轮

$$r_{a1} = \frac{Z_1 - E \cot \epsilon_f \cot \Sigma}{\sin \delta_{f2}} \cos \delta_{a1} \quad (20.2-5)$$

$$R_{a1} = \frac{r_{a1}}{\sin \delta_{a1}} \quad (20.2-6)$$

$$\sin \epsilon_f = \frac{\sin \epsilon_j \sin \Sigma}{\cos \delta_{a1}} \quad (20.2-7)$$

$$\tan \beta_{f2} = \frac{\cos \epsilon_f - \frac{z_1 r_2}{z_2 r_{a1}}}{\sin \epsilon_j} \quad (20.2-8)$$

$$\beta_{a1} = \beta_{f2} + \epsilon_f \quad (20.2-9)$$

$$-\tan \alpha_j^* = \frac{R_{a1} \sin \beta_{a1} - R_{f2} \sin \beta_{f2}}{R_{a1} \tan \delta_{a1} + R_{f2} \tan \delta_{f2}} \frac{\tan \delta_{a1} \tan \delta_{f2}}{\cos \epsilon_j} \quad (20.2-10)$$

$$\frac{1}{r_j^*} = \frac{1}{\tan \beta_{a1} - \tan \beta_{f2}} \left[-\tan \alpha_j^* \left(\frac{\tan \beta_{a1}}{R_{a1} \tan \delta_{a1}} + \frac{\tan \beta_{f2}}{R_{f2} \tan \delta_{f2}} \right) + \frac{1}{R_{a1} \cos \beta_{a1}} - \frac{1}{R_{f2} \cos \beta_{f2}} \right] \quad (20.2-11)$$

工艺锥大轮凸面和小轮凹面的压力角 α_{f1} 、大轮凹面和小轮凸面的压力角 α_{f0} 在格利森计算卡上是求解方程组

$$\begin{cases} \alpha_{f1} - \alpha_{f0} = 2\bar{\alpha} \\ \tan \alpha_{j1} + \tan \alpha_{j0} = 2 \tan \alpha_j^* \end{cases}$$

而得到的：

$$\tan \alpha_j = \pm \left(\frac{\sqrt{1 + (\tan \alpha_j^* \sin 2\bar{\alpha})^2} - 1}{\sin 2\bar{\alpha}} + \tan \bar{\alpha} \right) + \tan \alpha_j^* \quad (20.2-12)$$

轮是根据大轮来配制的，应该说大轮产形轮的节锥参数 R_{02} 和 β_{02} 可以比较随便地确定。但格利森计算卡为了简化曲率计算，是按产形轮与大轮这对准双曲面齿轮的极限压力角和极限曲率半径等于工艺节锥的极限压力角和极限曲率半径这个条件来确定 R_{02} 和 β_{02} 的^[1]，其计算结果为

$$\tan \epsilon_{02} = - \frac{\tan \alpha_j^* \cos^3 \beta_{f2}}{\left(1 - \frac{R_{f2} \sin \beta_{f2}}{r_j^*} \right) \tan \delta_{f2} + \tan \alpha_j^* \sin^3 \beta_{f2}} \quad (20.2-13)$$

$$\beta_{02} = \beta_{f2} + \epsilon_{02} \quad (20.2-14)$$

$$\frac{1}{R_{02}} = \left(\frac{1}{R_{f2}} + \frac{\sin \beta_{f2} \tan \alpha_j^*}{R_{f2} \tan \delta_{f2}} \right) \cos \epsilon_{02} + \left[\frac{1}{r_j^* \cos \beta_{f2}} - \left(\frac{1}{R_{f2}} + \frac{\sin \beta_{f2} \tan \alpha_j^*}{R_{f2} \tan \delta_{f2}} \right) \tan \beta_{f2} \right] \sin \epsilon_{02} \quad (20.2-15)$$

2.2 机床调整参数

机床调整参数包括刀盘相对于产形轮的位置（简称刀位）、大轮相对于产形轮的位置（简称轮位）和产形轮与大轮之间的传动比（简称滚比）。在图 20.2-6 中， O 是产形轮轴线和刀尖平面的交点，称为机床中心。 O_0 是刀盘轴线和刀尖平面的交点，称为刀盘中心。过 O 并与摇台轴线垂直的平面称为机床平面，这里机床平面刚好与刀尖平面重合，它是平面产形轮的面锥。刀位可由 OO_0 之间的距离 S_2 和 OO_0 与水平轴线之间的夹角 q_2 确定。 S_2 称为径向刀位， q_2 称为角向刀位。如令

$$\tan j_2 = \frac{r_0 - R_{02} \sin \beta_{02}}{R_{02} \cos \beta_{02}} \quad (20.2-16)$$

则

$$S_2 = \frac{R_{02} \cos \beta_{02}}{\cos j_2} \quad (20.2-17)$$

$$q_2 = \beta_{f2} + j_2 \quad (20.2-18)$$

记产形轮和大轮这对准双曲面齿轮副的交叉点为 O_{02} 和 O_2 ，轮位由大轮轴线与机床平面的夹角 δ_{M2} 、大轮轴线与产形轮轴线的偏置距离 E_{02} 、大轮设计交叉点 O_2 与切齿交叉点 O_2 的距离 X_2 和 O_{02} 到机床平面的距离 X_{B2} 等四个参数所确定。它们的计算公式分别为

$$\delta_{M2} = \delta_{f2} \quad (20.2-19)$$

$$E_{02} = -R_{02} \sin \epsilon_{02} \quad (20.2-20)$$

$$X_{B2} = (R_{f2} - R_{02} \cos \epsilon_{02}) \tan \delta_{f2} - h_{f2} \quad (20.2-21)$$

$$X_2 = Z_f - \frac{X_{B2}}{\sin \delta_{f2}} \quad (20.2-22)$$

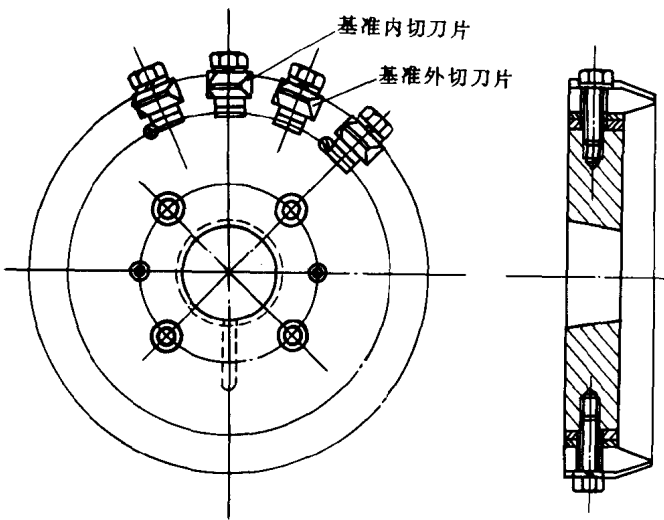


图 20.2-7 加工大轮的双面刀盘

这是大轮工艺节锥的理论压力角，大轮刀盘的齿形角 α_{02} 即根据这一计算结果来选择，两者可相差 2° 左右。 α_{02} 是切齿节锥的实际压力角。

前面已经说明，弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮的小

它们分别称为轮坯安装角、垂直轮位、床位和水平轮位。设 z_{02} 为产形轮齿数, $i_{02} = \frac{z_{02}}{z_2}$ 称为机床滚比, 其计算公式可由式 (5.6-12) 导出:

$$i_{02} = \frac{R_{02} \cos \beta_{02}}{r_2 \cos \beta_{f2}} \quad (20.2-23)$$

2.3 小轮齿面计算点的法矢和曲率

在上述的机床调整下, 可以求出大轮齿面沿根锥方向的法矢和曲率, 然后再研究准双曲面齿轮副的工艺节锥, 则可以求出小轮齿面沿面锥方向的法矢和曲率, 这个过程比较复杂, 下面仅叙述其研究结果。

按图 5.6-4 建立一个类似的坐标系, 仅将坐标矢量 i, j, k 改为 i_1, j_1, k_1 , 锥角 δ_1 改为 δ_{a1} , 则矢量齿面计算点的法矢 $n = n_{a1}i_1 + n_{a2}j_1 + n_{a3}k_1$ 中的各分量的表达式也可类似于式 (5.6-13) ~ 式 (5.6-15) 得到

$$n_{a1} = \sin \alpha_{02} \sin \delta_{a1} + \cos \alpha_{02} \cos \delta_{a1} \sin \beta_{a1} \quad (20.2-24)$$

$$n_{a2} = \cos \alpha_{02} \cos \beta_{a1} \quad (20.2-25)$$

$$n_{a3} = \sin \alpha_{02} \cos \delta_{a1} - \cos \alpha_{02} \sin \delta_{a1} \sin \beta_{a1} \quad (20.2-26)$$

当大轮产形轮参数 β_{02} 和 R_{02} 按式 (20.2-14) 和式 (20.2-15) 确定时, 小轮齿面可认为是一个节锥距为 R_X 、节锥角为 90° 、螺旋角为 $\beta_X = \beta_{02}$ 、刀盘半径为 r_{02} 的产形轮展成出来的, R_X 和 r_{02} 的表达式分别为

$$R_X = (1 - \tan \beta_{02} \tan \epsilon_f) \times \left\{ \frac{1}{R_{02}} - \frac{\sin \beta_{02}}{\sin \beta_{f2}} \frac{\sin \epsilon_f \tan \epsilon_f}{E} \right. \\ \left. \left(1 - \frac{\sin \epsilon_f \tan \alpha_{02}}{\cos \beta_{a1} \tan \delta_{f2}} + \frac{\tan \delta_{a1} \cos \beta_{f2}}{\tan \delta_{f2} \cos \beta_{a1}} \right) \right\}^{-1} \quad (20.2-27)$$

$$\frac{1}{r_{02}} = \frac{1}{r_0} - \frac{1}{\sin \beta_{02}} \left(\frac{1}{R_{02}} - \frac{1}{R_X} \right) \mp 0.0254 \left(\frac{\cos \beta_{f2}}{f b_2} \right)^2 \quad (20.2-28)$$

由此, 即可求出小轮齿面计算点沿面锥方向的曲率

$$\tan \omega_a = \sin \alpha_{02} \tan \beta_{a1} - R_{a1} \tan \delta_{a1} \left(\frac{1}{R_{a1} \cos \beta_{a1}} - \frac{1}{R_X \cos \beta_X} - \frac{\tan \beta_{a1} - \tan \beta_X}{r_{02}} \right) \cos \alpha_{02} \quad (20.2-29)$$

$$\frac{1}{\rho_a} = \frac{1}{\cos \alpha_{02} (\tan \alpha_{02} - \tan \alpha_f^*) + \tan (\beta_{a1} - \beta_X) \tan \omega_a} \\ \frac{\cos \beta_{a1} \cos \beta_X}{\cos (\beta_{a1} - \beta_X) R_{a1} \tan \delta_{a1}} \quad (20.2-30)$$

2.4 用展成法加工弧齿锥齿轮

上面对准双曲面齿轮的讨论对弧齿锥齿轮也是正确的, 只不过更简单。在前面的各公式中令 $\beta_{a1} = \beta_{f2} =$

$$\beta, r_{a1} = \frac{R \sin \delta_1}{\cos \beta_{f2}} \text{ 和 } r_2 = \frac{R \sin \delta_2}{\cos \theta_{f2}}, \text{ 首先可以求得 } \alpha_f^* \approx$$

$\theta_{f2} \sin \beta$, 即大轮切齿节锥的压力角

$$\alpha_f = \pm \alpha + \theta_{f2} \sin \beta$$

加工弧齿锥齿轮大轮的刀盘齿形角 α_{02} 就是根据上式选择的。工程上采用刀号制, 当 θ_{f2} 单位为 $(^\circ)$ 时, 理论刀号 $C^{\#}$ 按公式

$$C^{\#} = 6 \theta_{f2} \sin \beta \quad (20.2-31)$$

计算, 然后圆整到 0.5 或 1。设实际使用的刀号为 $C_2^{\#}$, 则实际采用的刀盘齿形角为

$$\alpha_{02} = \pm \alpha + \frac{1}{6} C_2^{\#} \quad (20.2-32)$$

例如对压力角 $\alpha = 20^\circ$ 、刀号 $C_2^{\#} = 12$ 的刀盘, 其内刀齿形角为 22° , 外刀齿形角为 -18° 。弧齿锥齿轮的极限压力角总是正值, 内刀齿形角总是比外刀齿形角大 (绝对值), 这与准双曲面齿轮是不相同的。

在机床调整公式中令 $R_{02} = R, \beta_{02} = \beta$ 可以得到下面更简单的计算公式:

$$H_2 = R - r_0 \sin \beta \quad (20.2-33)$$

$$\tan q_2 = \frac{H_2}{r_0 \cos \beta} \quad (20.2-34)$$

$$S_2 = \frac{r_0 \cos \beta}{\sin q_2} \quad (20.2-35)$$

$$E_{02} = X_2 = 0 \quad (20.2-36)$$

$$X_{H2} = R \tan \theta_{f2} - h_{f2} \quad (20.2-37)$$

$$i_{02} = \frac{\cos \theta_{f2}}{\sin \delta_2} \quad (20.2-38)$$

小轮齿面计算点的法矢和曲率公式也可以简化为

$$n_{a1} = \sin \alpha_{02} \sin \delta_{a1} + \cos \alpha_{02} \cos \delta_{a1} \sin \beta \quad (20.2-39)$$

$$n_{a2} = \cos \alpha_{02} \cos \beta \quad (20.2-40)$$

$$n_{a3} = \sin \alpha_{02} \cos \delta_{a1} - \cos \alpha_{02} \sin \delta_{a1} \sin \beta \quad (20.2-41)$$

$$\tan \omega_a = \sin \alpha_{02} \tan \beta - \tan \theta_{f2} \frac{\cos \alpha_{02}}{\cos \beta} \quad (20.2-42)$$

$$\frac{1}{\rho_a} = \frac{1}{\sin \alpha_{02} + \tan \omega_a \tan \beta} \frac{1}{R_{a1} \tan \delta_{a1}} \quad (20.2-43)$$

3 用成形法加工大轮

当大轮的节锥角大于 70° 时, 用展成法加工的大轮齿面与刀盘刃锥面形状相近而且大轮根锥与根锥中点切平面很靠近, 这时可以不用展成法加工大轮而采用拉齿的方法。拉齿采用专用的拉齿刀盘和专门设计的拉齿机。拉齿刀盘见图 20.2-8, 刀盘分半精拉、精拉和分度三部分。半精拉部分的刀片排列得比较多也比较密, 精拉部分只有两个刀片而且排列得比较稀, 以保证精拉时只有一个刀片参加工作。分度部分没有刀片, 以便拉齿分度时工件不要后退。拉齿刀盘上的内外刀片交错排列, 从第一个半精拉刀到最后一个精拉刀

刃，其径向尺寸都不相同。外刀片的刀尖半径逐渐加大，内刀片的半径逐渐减少，相邻同名刀片之间的切削余量约为 0.02~0.04mm。半精拉刀片的高度也是逐渐递升的，但精拉刀片的高度应比半精拉刀片的高度低些，这样可以提高拉齿精度。拉齿开始时，大轮从分度空间处进入切削的全齿深位置，轮齿两侧的拉削余量要分配均匀，刀盘慢速旋转进行拉齿，当刀盘旋转一圈，最后一个精拉刀片离开齿槽时拉齿完毕。齿轮在分度空间处分度后再重复上述拉齿过程，所有轮齿精拉完之后机床自动停止。这种加工弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮大轮的方法称为成形法。成形法的生产率要比展成法高 4~5 倍。

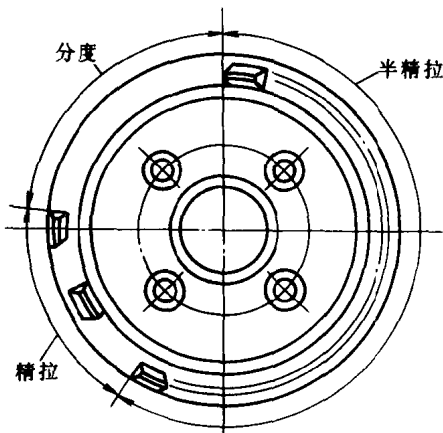


图 20.2-8 拉齿刀盘

用成形法加工大轮时，产形轮和大轮之间没有相对运动，大轮的齿面形状只决定于刀盘和轮坯的相对位置。当刀盘的齿形角 α_{02} 不等于大轮切齿中锥的压力

角 α_f 时，可以将刀盘绕齿线的切线方向旋转一个角度来进行补偿。为了方便和使内刀、外刀有相同的寿命，一般取 $\alpha_{02} = \bar{\alpha}$ 并像图 20.2-9 那样将刀盘绕齿线的切线方向旋转

$$\Delta\alpha_2 = \bar{\alpha} - \alpha_{f1} \quad (20.2-44)$$

这时产形轮的螺旋角 β_M 和轮坯安装角 δ_{M2} 应修正为

$$\tan\beta_M = \tan\beta_{f2} \cos\Delta\alpha_2 + \frac{\tan\delta_{f2} \sin\Delta\alpha_2}{\cos\beta_{f2}} \quad (20.2-45)$$

$$\cos\delta_{M2} = \frac{\cos\delta_{f2} \cos\beta_{f2}}{\cos\beta_M} \quad (20.2-46)$$

刀位应修正为

$$H_2 = S_2 \cos q_2 = R_{02} \cos\beta_{f2} \cos\beta_M - \Delta r \sin\beta_M - \frac{\Delta h}{\tan\delta_{M2}} \quad (20.2-47)$$

$$V_2 = S_2 \sin q_2 = R_{02} \cos\beta_{f2} \sin\beta_M + \Delta r \cos\beta_M \quad (20.2-48)$$

$$R_{02} = R_2 \cos\theta_{f2} + \frac{R_2 \sin\theta_{f2} - h_{f2}}{\tan\delta_{f2}} \quad (20.2-49)$$

$$\Delta h = h_{f2} (1 - \cos\Delta\alpha_2) - R_{02} \sin\beta_{f2} \sin\Delta\alpha_2 \quad (20.2-50)$$

$$\Delta r = r_0 - R_{02} \sin\beta_{f2} \cos\Delta\alpha_2 + h_{f2} \sin\Delta\alpha_2 \quad (20.2-51)$$

轮位的计算公式为

$$E_{02} = 0 \quad (20.2-52)$$

$$X_2 = Z_f - \frac{\Delta h}{\sin\delta_{M2}} \quad (20.2-53)$$

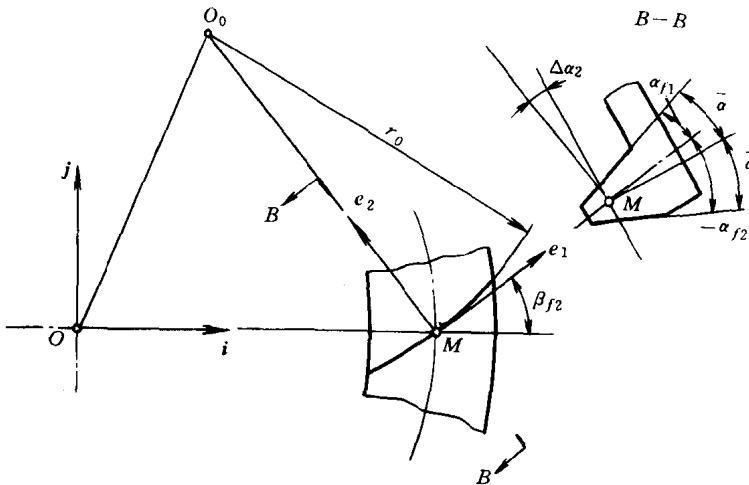


图 20.2-9 分盘绕齿线的切线方向旋转

$$X_{B2}=0 \quad (20.2-54)$$

用成形法加工大轮时法矢的计算公式为

$$n_{a1} = \sin\alpha_f \sin\delta_{a1} + \cos\alpha_f \cos\delta_{a1} \sin\beta_{a1} \quad (20.2-55)$$

$$n_{a2} = \cos\alpha_f \cos\beta_{a1} \quad (20.2-56)$$

$$n_{a3} = \sin\alpha_f \cos\delta_{a1} - \cos\alpha_f \sin\delta_{a1} \sin\beta_{a1} \quad (20.2-57)$$

曲率的计算公式可以简化, 准双曲面齿轮的计算公式为

$$\frac{1}{r_{o2}} = \frac{\cos\bar{\alpha}}{r_o \cos\alpha_f} \mp 0.0254 \left(\frac{\cos\beta_{f2}}{fb} \right)^2 \quad (20.2-58)$$

$$\tan\omega_u = \frac{\sin(\alpha_f - \alpha_f^*)}{\cos\alpha_f^*} \left[\tan(\beta_{a1} - \lambda_f) - \frac{R_{a1} \tan\delta_{a1} R_{f2} \tan\delta_{f2}}{R_{a1} \tan\delta_{a1} + R_{f2}} \frac{\tan\beta_{a1} - \tan\beta_{f2}}{\tan\alpha_f - \tan\alpha_f^*} \times \left(\frac{1}{r_f^*} - \frac{1}{r_{o2}} \right) \right] \quad (20.2-59)$$

$$\frac{1}{\rho_u} = \frac{1}{\cos\alpha_{o2} (\tan\alpha_f - \tan\alpha_f^*) + \tan\epsilon_f \tan\omega_u} \times \frac{\cos\beta_{a1} \cos\beta_{f1}}{\cos\epsilon_f} \left(\frac{1}{R_{a1} \tan\delta_{a1}} + \frac{1}{R_{f2} \tan\delta_{f2}} \right) \quad (20.2-60)$$

弧齿锥齿轮的计算公式则变为

$$\tan\omega_u = \sin\alpha_f \tan\beta - \tan\theta_{f2} \frac{\cos\alpha_f}{\cos\beta} \quad (20.2-61)$$

$$\frac{1}{\rho_u} = \frac{1}{\sin\alpha_f + \tan\omega_u \tan\beta} \left(\frac{1}{R_{a1} \tan\delta_{a1}} + \frac{1}{R_{f2} \tan\delta_{f2}} \right) \quad (20.2-62)$$

4 用刀倾法加工小轮

4.1 小轮切齿节锥

小轮切齿主要有两种方法, 一种是在有刀倾机构的机床上加工, 这时的产形轮节锥角 $\delta_{o1} \neq 90^\circ$, 这种加工小轮的方法称为刀倾法; 另一种加工方法是在有变性机构的机床上加工, 这时产形轮的节锥角 $\delta_{o1} = 90^\circ$, 但其滚比可在加工过程中变化, 这种加工小轮的方法称为变性法。

小轮切齿时, 右旋的产形轮和左旋小轮构成了一对准双曲面齿轮副的传动, 它们的节点就是小轮工艺节锥的节点。为了在加工小轮轮齿曲面的同时还加工出齿根曲面, 产形轮的节平面(与刀尖平面平行)不能与小轮面锥平行而应与小轮根锥平行。即小轮切齿节锥的节锥角不是 δ_{a1} 而是 δ_{f1} 。但用刀倾法加工小轮时, 实际切出的齿根曲面和理论齿根曲面有些差异。为了使实际切出的齿根曲面尽可能地接近理论齿根曲面, 必须对 δ_{f1} 修正 $\Delta\delta$ 而变为

$$\delta_{f1}' = \delta_{f1} - \Delta\delta \quad (20.2-63)$$

小轮切齿节锥的节锥距为

$$R_{f1} = \frac{r_{a1}}{\sin\delta_{f1}'} \quad (20.2-64)$$

小轮工艺节锥和切齿节锥的齿线方向是不一致的, 两者相差一个角度 Δ , 压力角 α_{f1} 和螺旋角 β_{f1} 也会变化, 它们的计算公式为

$$\sin\Delta = \frac{\cos\beta_{a1}}{\cos\alpha_{f1}} \sin(\delta_{a1} - \delta_{f1}') \quad (20.2-65)$$

$$\sin\alpha_{f1} = \sin\alpha_{o2} \cos(\delta_{a1} - \delta_{f1}') - \cos\alpha_{o2} \sin(\delta_{a1} - \delta_{f1}') \sin\beta_{a1} \quad (20.2-66)$$

$$\cos\beta_{f1} = \frac{\cos\alpha_{o2} \cos\beta_{a1}}{\cos\alpha_{f1}} \quad (20.2-67)$$

小轮切齿节锥的 $\tan\omega_f$ 、曲率 $\frac{1}{\rho_f}$ 和工艺节锥的曲率也不一样, 应改变为

$$\tan\theta = \frac{\rho_u \cos\alpha_{o2}}{r_{o2}} \frac{\tan\Delta}{1 - \tan\omega_u \tan\Delta} + \tan\omega_u \quad (20.2-68)$$

$$\tan\omega_f = \tan(\theta + \Delta) \quad (20.2-69)$$

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{1 - (\tan\omega_u + \tan\omega_f)(1 - \tan\theta \tan\Delta) \sin\Delta \cos\Delta}{\rho_u} \quad (20.2-70)$$

$$r_M = \frac{\rho_u}{\rho_f} \frac{\cos\alpha_{f1}}{\cos\alpha_{o2}} r_{o2} \pm 0.0254 \left(\frac{r_o \cos\beta_{f2}}{fb} \right)^2 \quad (20.2-71)$$

4.2 产形轮节锥参数

设小轮切齿节锥的节锥距为 R_{o1} , 节锥角为 δ_{o1} , 螺旋角为 β_{o1} , 使它加工出的小轮齿面在计算点处的法矢和曲率满足上述要求。按这个要求列出的方程组称为切齿方程组, 求解时可先求出 $\beta_{o1} = \beta_{f1}$ 时的特解 R_{o1}' 和 δ_{o1}' :

$$\tan\eta = \tan\omega_f \frac{\cos\beta_{f1}}{\cos\alpha_{f1}} - \sin\beta_{f1} \tan\alpha_{f1} \quad (20.2-72)$$

$$\frac{1}{R_{o1}' \tan\delta_{o1}'} = \frac{\sin\alpha_{f1} + \tan\omega_f \tan\beta_{f1}}{\rho_f} - \frac{1}{R_{f1} \tan\delta_{f1}'} \quad (20.2-73)$$

$$\frac{1}{R_{o1}'} = \frac{\tan\eta}{R_{o1}' \tan\delta_{o1}'} + \frac{\tan\delta_{f1}' + \tan\eta}{R_{f1} \tan\delta_{f1}'} \quad (20.2-74)$$

在这基础上令

$$\frac{1}{R_{o1}' \tan\delta_{o1}'} = \frac{1}{R_{o1}' \tan\delta_{o1}'} + \Delta K \quad (20.2-75)$$

$$Q_T = \tan \omega_r \Delta K + \frac{\cos \alpha_{f1}}{R_{o1} \cos \beta_{f1}} + \left(\frac{\sin \alpha_{f1}}{R_{o1} \tan \delta'_{o1}} - \frac{\cos \alpha_{f1}}{r_M} \right) \tan \beta_{f1} \quad (20.2-76)$$

可求得产形轮的节锥参数为

$$\tan \beta_{o1} = \tan \beta_{f1} - \frac{\Delta K \rho_r}{Q_T} \left(\frac{1}{R_{o1} \tan \delta'_{o1}} + \frac{1}{R_{f1} \tan \delta'_{f1}} \right) \quad (20.2-77)$$

$$\frac{1}{R_{o1}} = \left(\frac{1}{r_M} - \frac{\tan \alpha_{f1}}{R_{o1} \tan \delta'_{o1}} \right) \sin \beta_{o1} + \frac{Q_T}{\cos \alpha_{f1}} \cos \beta_{o1} \quad (20.2-78)$$

$$\tan \delta'_{o1} = (R_{o1} \tan \delta'_{o1}) \frac{1}{R_{o1}} \quad (20.2-79)$$

4.3 机床调整参数

把准双曲面齿轮几何计算用到小轮产形轮和小轮切齿节锥这对准双曲面齿轮副的传动上来，可以求得小轮加工时的机床调整参数

$$\epsilon_{o1} = \beta_{f1} - \beta_{o1} \quad (20.2-80)$$

$$\sin \delta'_{M1} = \sin \delta'_{f1} \sin \delta'_{o1} - \cos \delta'_{f1} \cos \delta'_{o1} \cos \epsilon_{o1} \quad (20.2-81)$$

$$\sin \epsilon_{o1} = \frac{\sin \epsilon'_{o1} \cos \delta'_{f1}}{\cos \delta'_{M1}} \quad (20.2-82)$$

$$E_{o1} = (R_{o1} \sin \delta'_{o1} + R_{f1} \tan \delta'_{f1} \cos \delta'_{o1}) \sin \epsilon_{o1} \quad (20.2-83)$$

$$X_1 = \frac{E_{o1}}{\tan \epsilon_{o1} \cos \delta'_{M1}} - R_{f1} \tan \delta'_{f1} \sin \delta'_{f1} - Z_G \quad (20.2-84)$$

$$i_{o1} = \frac{R_{o1} \sin \delta'_{o1} \cos \beta_{o1}}{R_{f1} \sin \delta'_{f1} \cos \beta_{f1}} \quad (20.2-85)$$

用刀倾法加工小轮时，小轮刀盘的齿形角 α_{o1} 可以不等于是 α_{f1} ，其差

$$\Delta \alpha_1 = \alpha_{f1} - \alpha_{o1} \quad (20.2-86)$$

可以用刀倾机构来补偿。用刀倾法加工小轮时，为了刀盘和工件不发生干涉，通常选用外刀齿形角 14° 、内刀齿形角 31° 的刀片加工弧齿锥齿轮小轮，选用外刀齿形角 14° 、内刀齿形角 35° 的刀片加工准双曲面齿轮小轮。由图 20.2-10 可知小轮的刀尖半径 r_{o1} 和刀盘轴心的坐标位置 r_R 、 h_R 为

$$r_{o1} = \frac{r_M \cos \alpha_{o1} \mp h \cos \Delta \alpha_1 - h_{f1} \sin \alpha_{o1}}{\cos \alpha_{f1}} \quad (20.2-87)$$

$$r_R = r_{o1} \cos \Delta \alpha_1 + h_{f1} \tan \alpha_{f1} \pm \frac{h}{\cos \alpha_{f1}} \quad (20.2-88)$$

$$h_R = h_{f1} - r_{o1} \sin \Delta \alpha_1 \quad (20.2-89)$$

$$X_{B1} = (R_{f1} \tan \delta'_{f1} - h_R) \sin \delta'_{o1} - \frac{E_{o1}}{\tan \epsilon_{o1}} \tan \delta'_{M1} - r_R \sin \beta_{o1} \cos \delta'_{o1} \quad (20.2-90)$$

刀位是由以下公式确定的：

$$H_1 = (R_{o1} - r_R \sin \beta_{o1}) \sin \delta'_{o1} + h_R \cos \delta'_{o1} \quad (20.2-91)$$

$$V_1 = r_R \cos \beta_{o1} \quad (20.2-92)$$

$$S_1 = \sqrt{H_1^2 + V_1^2} = \frac{H_1}{\cos q_1} \quad (20.2-93)$$

$$\tan q_1 = \frac{V_1}{H_1} \quad (20.2-94)$$

$$q_1 = q'_1 + \epsilon_{o1} \quad (20.2-95)$$

刀盘主轴的位置由刀盘主轴与机床主轴的夹角 q_1 和刀盘主轴在机床平面上的投影方向角 j_1 来确定（图 20.2-11），其计算公式为

$$\tan \theta = \frac{\cos \delta'_{o1} \cos \Delta \alpha_1 - \sin \delta'_{o1} \sin \Delta \alpha_1 \sin \beta_{o1}}{\cos \beta_{o1} \sin \Delta \alpha_1} \quad (20.2-96)$$

$$\sin q_1 = \frac{\cos \delta'_{o1} \cos \Delta \alpha_1 - \sin \delta'_{o1} \sin \Delta \alpha_1 \sin \beta_{o1}}{\sin \theta} \quad (20.2-97)$$

$$j_1 = \theta + q_1 + 180^\circ \quad (20.2-98)$$

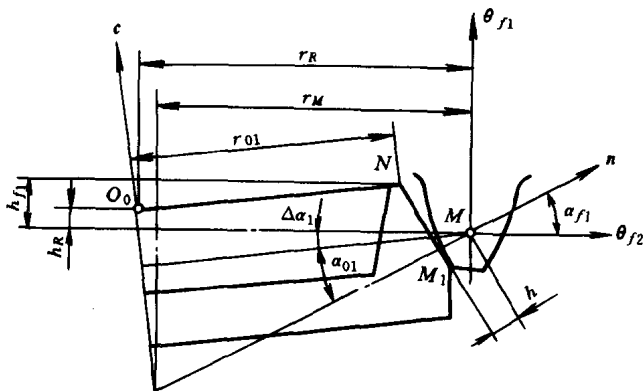


图 20.2-10 小轮刀尖半径和刀盘轴心的坐标

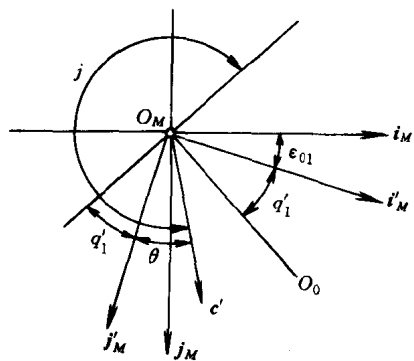


图 20.2-11 刀盘主轴的位置

5 用变性法加工小轮

5.1 计算点的转换

在具有变性机构的铣齿机上加工弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮小轮的方法称为变性法。用变性法加工小轮时，刀盘主轴不能倾斜，产形轮的节锥角 $\delta_{o1} = 90^\circ$ ，这时刀尖平面与小轮根锥相切就可以保证加工后的实际根锥等于理论根锥。因此，小轮切齿节锥的节锥角等于根锥角，不需要修正。当我们把小轮计算点 M 作为小轮产形轮和小轮切齿节锥的节点时，切齿节锥的压力角 α_f 由式 (20.2-66) 求得

$$\begin{aligned} \sin \alpha_f &= n_{a1} \sin \delta_{f1} + n_{a3} \cos \delta_{f1} \\ &= \sin \alpha_{o2} \cos (\delta_{a1} - \delta_{f1}) - \\ &\quad \cos \alpha_{o2} \sin (\delta_{a1} - \delta_{f1}) \sin \beta_{a1} \end{aligned} \quad (20.2-99)$$

当实际使用的小轮刀盘齿形角 $\alpha_{o1} \neq \alpha_f$ 时，变性法

虽然不能像刀倾法那样用刀倾机构方便地进行补偿，但可以用改变节点的位置来予以修正。图 20.2-12 画出了将计算点绕小轮轴线旋转 λ 角的情形，为使齿形角和压力角的误差得以补偿， λ 可按下式确定：

$$\sin \lambda = \frac{n_{f2} n_{a3} - n_{f3} n_{a2}}{(n_{a2})^2 + (n_{a3})^2} \quad (20.2-100)$$

式中

$$n_{f2} = \cos \alpha_{o1} \cos \beta_{f1} \quad (20.2-101)$$

$$n_{f3} = \sin \alpha_{o1} \cos \delta_{f1} - \cos \alpha_{o1} \sin \delta_{f1} \sin \beta_{f1} \quad (20.2-102)$$

这时切齿节锥螺旋角 β_{f1} 和夹角 Δ 的计算公式为

$$\sin \beta_{f1} = \frac{n_{a1} - \sin \alpha_{o1} \sin \delta_{f1}}{\cos \alpha_{o1} \cos \delta_{f1}} \quad (20.2-103)$$

$$\begin{aligned} \sin \Delta &= \frac{\cos \beta_{a1}}{\cos \alpha_{o1}} \{ \sin (\delta_{a1} - \delta_{f1}) - [\sin \lambda \tan \beta_{a1} + \\ &\quad (1 - \cos \lambda) \sin \delta_{a1}] \cos \delta_{f1} \} \end{aligned} \quad (20.2-104)$$

当计算点 M 不在 M_0 的位置展成时，它不位于过

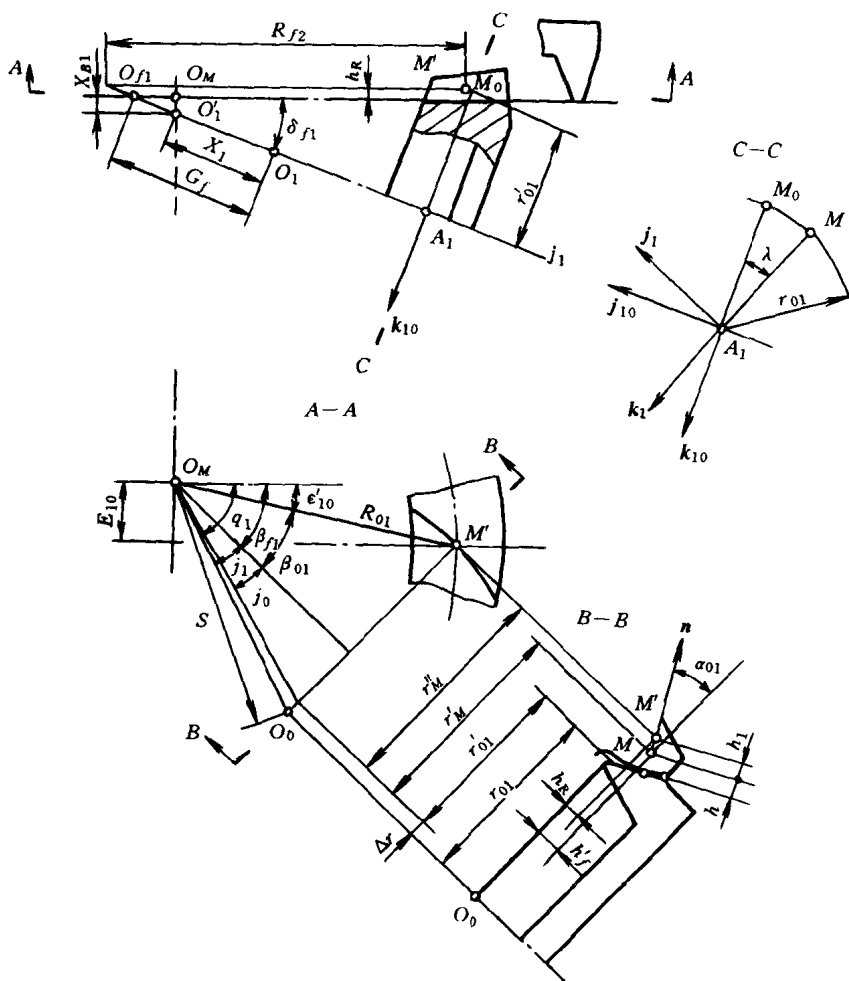


图 20.2-12 齿形角和压力角的误差补偿

小轮轴线并与节平面垂直的轴截面内，因而不是这对准双曲面齿轮副的节点。为了使问题简化，可以再一次利用等距共轭曲面原理，求出这对准双曲面齿轮副的节点 M' 。设 MM' 之间的距离为 h_1 ， M' 点的节圆半径为 r_{a1} ，它到刀尖平面的距离为 h_R ，那么

$$h_1 = \frac{r_{a1} \sin \lambda}{n_{f2}} \quad (20.2-105)$$

$$r_{a1} = r_{a1} \cos \lambda - h_1 n_{f3} \quad (20.2-106)$$

$$h_R = h_{r1} - r_{a1} (1 - \cos \lambda) \cos \delta_{f1} - h_1 \sin \alpha_{01} \quad (20.2-107)$$

设这对准双曲面齿轮副在节点 M' 处的成形半径为 r_M ，接触线方向角和小轮齿高方向法曲率为 $\tan \omega_f$ 、 ρ_f ，则

$$r_M = r_M + h_1 \cos \alpha_{01} \quad (20.2-108)$$

$$\tan \omega_f = \frac{r_M}{r_M} \tan \omega_f \quad (20.2-109)$$

$$\rho_f = \rho_f - h_1 (1 + \tan \omega_f \tan \omega_f) \quad (20.2-110)$$

将小轮齿高方向的法曲率修正 $\Delta \frac{1}{\rho}$ 而保证齿长方向的短程绕率不变，上述三值应变为

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{1}{\rho_f} + \Delta \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_f} \pm 0.00254 K_p \left(\frac{z_1}{r_{a1} \cos \beta_{a1}} \right)^2 \quad (20.2-111)$$

$$\tan \omega_f = \frac{\rho_f}{\rho_f} \tan \omega_f \quad (20.2-112)$$

$$r_M = \frac{r_M \cos \alpha_{01}}{\cos \alpha_{01} - r_M \tan \omega_f \tan \omega_f \Delta \frac{1}{\rho}} \quad (20.2-113)$$

5.2 产形轮节锥参数

用变学法加工小轮时，也可以得到一个切齿方程组，求解时可先求 $E_{01} = 0$ 时的特解，其结果为

$$\tan \eta = \tan \omega_f \frac{\cos \beta_{f1}}{\cos \alpha_{01}} - \sin \beta_{f1} \tan \alpha_{01} \quad (20.2-114)$$

$$R'_{01} = \frac{R_{f1} \tan \delta_{f1}}{\tan \eta + \tan \delta_{f1}} \quad (20.2-115)$$

$$\sigma = \frac{\sin \alpha_{01} + \tan \omega_f \tan \beta_{f1}}{\rho_f} - \frac{1}{R_{f1} \tan \delta_{f1}} + \Delta \frac{1}{\rho} \sin \alpha_{01} \quad (20.2-116)$$

$$(2c)_0 = \frac{R'_{01} (\tan \alpha_{01} + \tan \eta \sin \beta_{f1})}{\left(R_{f1} \tan \delta_{f1} + \frac{1}{\sigma} \right) \cos \beta_{f1}} \quad (20.2-117)$$

其中 $\tan \eta$ 、 σ 是辅助量， R'_{01} 和 $(2c)_0$ 是 $E_{01} = 0$ 时产形轮节锥距和变性系数。在此基础上可进一步求出

$R_{01} \cos \beta_{01}$ 、 E_{01} 和 $2c$ 之间的关系式，即

$$R_{01} \cos \beta_{01} = \left(1 + \frac{E_{01}}{r_M \cos \beta_{f1}} \right) R'_{01} \cos \beta_{f1} \quad (20.2-118)$$

$$2c = (2c)_0 + \left[(2c)_0 + \tan j_0 \right] \frac{E_{01}}{r_M \cos \beta_{f1}} \quad (20.2-119)$$

式中

$$\tan j_0 = \frac{r_M}{R_{01} \cos \beta_{f1}} - \tan \beta_{f1} \quad (20.2-120)$$

在 E_{01} 和 $2c$ 中只要给定其中的一个，就可以由式 (20.2-119) 确定另外一个。它们通常是这样确定的：在式 (20.2-119) 中令 $2c = 0$ 可以求得不用变性机构的垂直轮位，即

$$E_{01} = \frac{-(2c)_0}{(2c)_0 + \tan j_0} r_M \cos \beta_{f1} \quad (20.2-121)$$

将计算值与 $E + E_{02}$ (对于弧齿锥齿轮该值为 0) 进行比较，若两者相差不大，可以考虑不用变性机构，垂直轮位由式 (20.2-121) 确定。若两者相差太大，可令

$$E_{01} = E + E_{02} \quad (20.2-122)$$

作为垂直轮位的值，然后再按式 (20.2-119) 确定 $2c$ 的值。

5.3 机床调整参数

垂直轮位 E_{01} 和 $R_{01} \cos \beta_{01}$ 确定之后，其余参数可以直接由图 20.2-12 求得：

$$r_{01} = r_M - \frac{h + h_1}{\cos \alpha_{01}} - h_R \tan \alpha_{01} + \Delta r \quad (20.2-123)$$

$$\tan j_1 = \frac{\Delta r}{R_{01} \cos \beta_{01}} + \tan j_0 \quad (20.2-124)$$

$$S_1 = \frac{R_{01} \cos \beta_{01}}{\cos j_1} \quad (20.2-125)$$

$$q_1 = \beta_{f1} + j_1 \quad (20.2-126)$$

$$X_{B1} = \left(R_{f1} + E_{01} \tan \beta_{f1} - \frac{R_{01} \cos \beta_{01}}{\cos \beta_{f1}} \right) \tan \delta_{f1} - h_R \quad (20.2-127)$$

$$X_1 = \frac{R \tan \theta_{f1} - h_{f1} - X_{B1}}{\sin \delta_{f1}} \quad (20.2-128)$$

$$i_{01} = \frac{R_{01} \cos \beta_{01}}{r_{a1} \cos \beta_{f1}} \quad (20.2-129)$$

其中

$$\Delta r = \pm 0.0254 \left(\frac{r_0 \cos \beta_{f2}}{f b_2} \right)^2 \quad (20.2-130)$$

6 机床的具体调整参数

前面公式求得的各机床参数对所有的铣齿机都成立，但对各铣齿机的具体调整还要根据铣齿机的结构来具体分析。铣齿机是按齿轮啮合原理设计的，按这个原理设计的铣齿机如图 20.2-13 所示：能够上下摆动的摇台代表假想产形轮，刀盘固定在摇台上随摇台摆动，其刃锥面是这个假想齿轮上一个轮齿的齿面。被加工齿轮即工件安装在工件主轴上，工件主轴能沿着工件箱侧面的垂直导轨上下移动以调整垂直轮位。当工件主轴轴线与摇台轴线相交时，产形轮与工件构成一对弧齿锥齿轮副。当工件主轴轴线与摇台轴线不相交时，产形轮与工件构成一对准双曲面齿轮副。当加工左旋齿轮时，产形轮右旋，它们构成的准双曲面齿轮副属下偏置，这时若垂直轮位为正，工件主轴必须向下调整；若垂直轮位为负，工件主轴则必须向上调整。当加工右旋齿轮时，产形轮左旋，它们构成的准双曲面齿轮副属上偏置，这时若垂直轮位为正，工件主轴必须向上调整；若垂直轮位为负，工件主轴则必须向下调整。情况刚好与左旋齿轮加工时的调整相反。

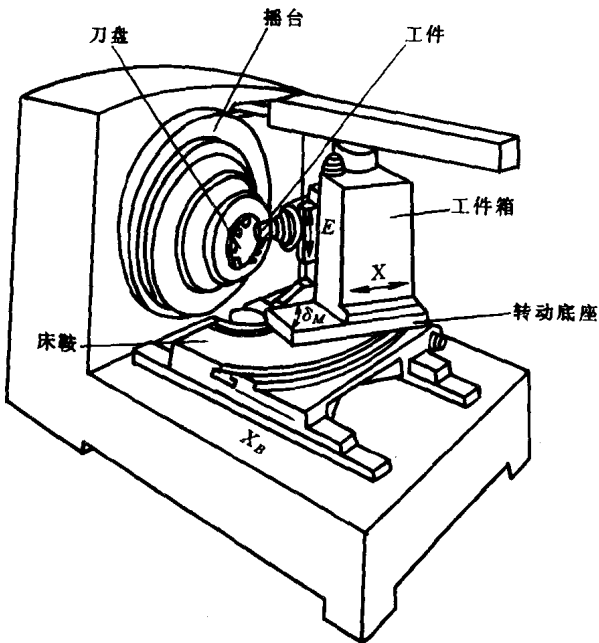


图 20.2-13 铣齿机

工件箱能在旋转底座的水平轨道上前后移动以调整齿轮在机床上的轴向位置。当轴向轮位修正值为正时，应增加齿轮的轴向轮位，这时工件箱必须向后移动，否则工件箱必须向前移动。工件箱可以在床鞍的圆

形轨道上移动，以调整被加工齿轮的轮坯安装角。整个床鞍还可以相对于摇台作向前或向后的移动以调整齿轮的切削深度，这个移动量就是床位。当计算的床位为正时，床鞍必须向后移动以减少被切齿轮的齿深；否则床鞍应向前移动以增加被切齿轮的齿深。

铣齿机摇台和工件主轴之间用传动链相联接，这条传动链称为展成链。展成链中安装有滚比交换齿轮、分齿交换齿轮和换向机构。机床起动后，进刀鼓轮控制床鞍快速移动把工件送到与产形轮正确啮合的位置，同时摇台和工件绕各自的轴线旋转，刀盘就会在轮坯上加工出齿面。滚比交换齿轮保证了产形轮和工件啮合时正确的传动比。当第一个齿槽加工完毕后，进刀鼓轮又会控制床鞍快速后退，在反相机构和分齿交换齿轮的作用下，工件自动旋转到第二个齿槽的切削位置，摇台则返回到开始切削的位置。之后，机床又重复上述动作加工第二个齿槽。如此循环往复，直到加工完所有齿槽，铣齿机自动停止。

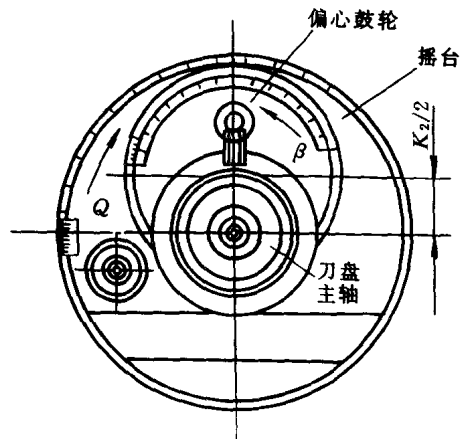


图 20.2-14 Y2280 铣齿机摇台机构

图 20.2-14 画出了国产 Y2280 铣齿机的摇台机构，刀盘主轴与摇台主轴平行但被偏心地安装在一个偏心鼓轮上，偏心鼓轮又被偏心地安装在摇台上，它们之间的偏心距都是 $K_2/2$ 。摇台和偏心鼓轮的角向位置都是可以调整的，其调整角分别用 Q 和 β 表示。刀位和极角则由它们联合调整得到，Y2280 铣齿机上的各铣齿机的 β 和 Q 的计算公式为

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{S}{K_2} \quad (20.2-131)$$

$$Q = \frac{\beta}{2} \pm q \quad \begin{matrix} \text{LH} \\ \text{RH} \end{matrix} \quad (20.2-132)$$

其中 K_2 是偏心距的两倍。LH 表示左旋齿轮，RH 表示右旋齿轮。Y2280 铣齿机的 $K_2 = 340\text{mm}$ 。Y2250 铣齿机的结构与 Y2280 铣齿机是完全相同的，只是偏心

距为135mm,因而 $K_2=270\text{mm}$ 。其他铣齿机的结构也都与图20.2-14大同小异,只是偏心距、偏心鼓轮中心所在的初始位置、偏心角和摇台角的计量方向不同而导致摇台角的计算公式有所区别,例如格利森№106、№116和№26铣齿机的计算公式为

$$Q_{106,116} = 90^\circ - \frac{\beta}{2} \pm q \quad \begin{matrix} \text{LH} \\ \text{RH} \end{matrix} \quad (20.2-133)$$

$$Q_{26} = 270^\circ + \frac{\beta}{2} \mp q \quad \begin{matrix} \text{LH} \\ \text{RH} \end{matrix} \quad (20.2-134)$$

其他铣齿机的机床常数 K_2 见表20.2-1。

表 20.2-1 机床常数

机 床	№106	№116	№26	Y2250	Y2280
常数 K_2	152.4	222.25	342.9	270	340

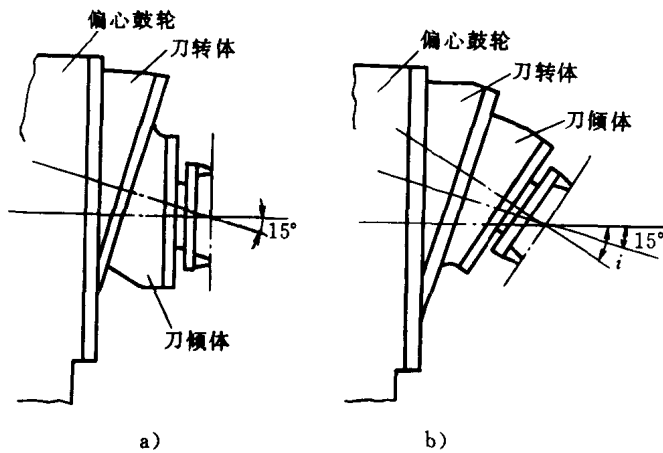


图 20.2-15 刀倾体和刀转体

a) 刀倾体调整前 b) 刀倾体调整后

在有刀倾机构的机床上,刀盘主轴不是直接安装在摇台的偏心鼓轮上,中间还附加有一个刀倾体和一个刀转体,如图20.2-15a所示。刀转体、偏心鼓轮和摇台三者的轴线是平行的,但是刀倾体的轴线与摇台轴线之间有一个夹角,这个夹角一般为 15° 。当刀倾体调整角为 0° 时,刀盘轴线与摇台轴线也是平行的,刀倾机构不起作用。当刀倾体调整角不为 0° 时,刀盘轴线不再与摇台轴线平行而产生了刀盘轴线对机床平面的倾斜角,其情况见图20.2-15b。这时再调整刀转体可以将刀盘轴线倾斜到切齿所需要的任何方向。格利森№106、

№116铣齿机的刀倾机构调整角 I_X 和刀转体调整角 J 的计算公式为

$$\sin \frac{I_X}{2} = \frac{\sin \frac{i}{2}}{\sin 15^\circ} \quad (20.2-135)$$

$$\cot \alpha = \tan \frac{I_X}{2} \cos 15^\circ \quad (20.2-136)$$

$$J = \alpha - \frac{\beta}{2} \mp j \quad \begin{matrix} +180^\circ & \text{LH} \\ +0^\circ & \text{RH} \end{matrix} \quad (20.2-137)$$

产形轮和工件的滚比是由滚比交换齿轮来实现的,格利森机床的滚比交换齿轮的计算公式为

$$m_{106,116} = \frac{z_0}{50} \quad (20.2-138)$$

$$m_{26} = \frac{z_0}{75} \quad (20.2-139)$$

这里 $z_0 = zi_0$ 是产形轮齿数,它等于工件齿数与滚比的乘积。格利森机床都采用单分度,分度交换齿轮可在机床说明书中查得。国产YT2250和Y2280铣齿机采用跨越分度,设跨齿数为 z_i ,其分度交换齿轮和滚比交换齿轮的计算公式为

$$m_i = \frac{2z_i}{z} \quad (20.2-140)$$

$$m_{2250,2280} = \frac{3 \cdot 5z_i}{z_0} \quad (20.2-141)$$

变性机构的作用原理见图20.2-16,液压作用使摇台蜗杆紧紧地压着变性结构的滚子。在蜗杆转动摇台的同时还通过滚子交换齿轮和一对蜗轮副使滚子随蜗轮旋转,从而迫使蜗杆轴向移动,给摇台增加一

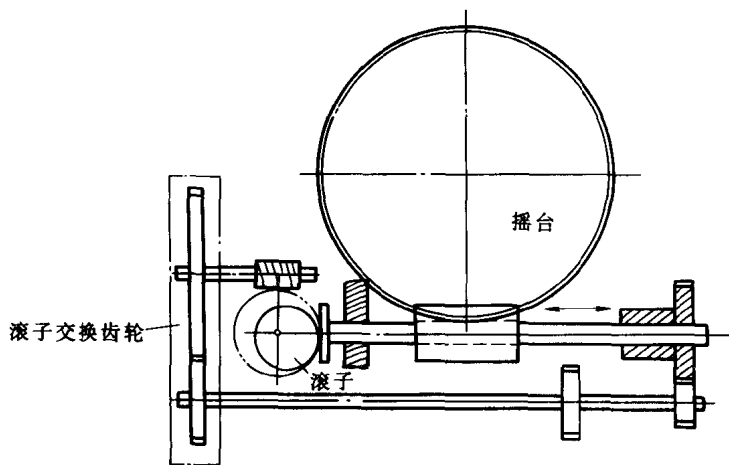


图 20.2-16 变性机构的作用原理