

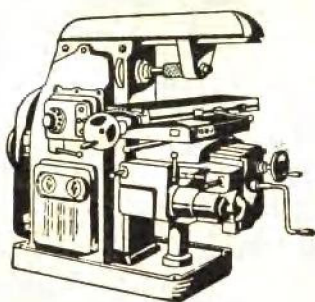
机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

飞刀滚切蜗轮

陈东元 编著

铣工



机械工业出版社

目 次

一 工作原理	2
1 蜗轮齿斜角的形成和滚切比 (2) —— 2 分齿挂轮计算 (5)	
—— 3 升角和齿斜角的对应关系 (7) —— 4 多线蜗轮的加工特点	
(9) —— 5 切向进给原理 (14) —— 6 蜗轮齿形的间接包络原理 (18)	
二 切向进给方法和典型操作路线	21
1 概说 (21) —— 2 切向进给的开路法 (21) —— 3 切向进给的闭路	
法 (26) —— 4 切向进给的方框图 (32) —— 5 切向进给的切削过程 (35)	
—— 6 切向进给的典型操作路线 (38) —— 7 简易切向刀架 (39)	
三 刀 具	50
1 一般要求 (50) —— 2 蜗杆的形成 (51) —— 3 蜗杆的类型 (52)	
—— 4 刀体的种类和形状 (56) —— 5 切削参数的选择 (59) —— 6	
实现齿面“贴切”接触的途径 (61)	
四 操作要点	65
1 机床的调整 (65) —— 2 刀具的安装 (70) —— 3 成品的技术检	
查 (79)	
五 应用实例	84
实例 1 “K4Z ₂ 30 (左)”蜗轮的更新 (84) —— 实例 2 “K3Z ₂ 31	
(右)”蜗轮的更新 (86) —— 实例 3 “K4Z ₂ 27 (左)”蜗轮的修复	
(88)	

用飞刀滚切蜗轮，在单件生产中，特别是加工同非标准蜗杆相啮合的蜗轮时，方便易行；在设备维修时，用它解决急迫的加工蜗轮的任务是个很实用和有效的方法。

飞刀加工蜗轮，即在滚齿机的刀杆上装上一个单一的刀头，用它的一个刃齿去代替蜗轮滚刀。由于滚切蜗轮不像滚切齿轮那样，只要求刀具的模数、齿形角和齿高系数等工作参数同被切的齿轮相符合，同时还要求滚刀的直径和滚刀的螺纹线数（头数）和相配工作的蜗杆（以下简称工作蜗杆）一致。这样就给刀具的储备工作带来很大的困难。对于非标准蜗轮（工作蜗杆的特性系数为非标准值），要找到一只合乎要求的滚刀就更加困难了。

面对工厂中经常遇到的上述实际情况，用飞刀去加工蜗轮，就能解决临时性的加工蜗轮的急需。在加工精度方面，只要精心操作，是可以满足机修工作的需要的。如果采用机动切向进给，工件的加工质量并不低于用蜗轮滚刀加工的质量。用飞刀代替蜗轮滚刀全部齿去完成切削蜗轮的问题，包括：用飞刀加工蜗轮的理论根据是什么；轮齿的齿形是怎样形成的（切向进给的方式和计算方法）；同多线蜗杆相配合工作的蜗轮（以下简称多线蜗轮）的加工特点和方法；对刀具的要求以及机床调整的特点等等。在用飞刀加工蜗轮的过程中，尽管要解决的问题有这么多，但其中主要问题只有两个：刀具齿形的设计和蜗轮齿形的展成切削。

飞刀自身的技术特点决定了其加工对象的单件性质和应急性质。也就是说，只有单个零件和急需等待加工的零件用飞刀完成才有价值。这在实际中的应用领域主要是机修工作。

在适应机修工作需要的基础上，我们逐步明确了用“间接包络”的方式加工蜗轮的好处。这种方式加工蜗轮，有助于提高飞

刀的加工质量，使我们避开了刀具计算的繁复，从工作一开始就把力量放在如何使刀具的实形尽量和工作蜗杆螺线体的截形相近这个问题上来。而且在一定意义上讲，相近到什么程度决定了所加工蜗轮的质量提高到什么程度。

注意到这个问题以后，我们还找到了常见的成品工件的中心距离总是偏大的原因。发觉应当把正常设计中的蜗杆齿厚的最小减薄量 ($\Delta_m S$) 和螺线齿厚公差 ($\Delta \delta$) 变成正公差加到刀具上面去。这样才适应了由原来的成批生产的蜗轮副的互换性加工转变为用飞刀的单件配修的偶件加工的特点。

解决蜗轮齿形的展成切削问题，说得具体点，就是对切向进给要不断改进其方式，明确其操作程序。改进方式使之繁而从简，明确操作方法（程序）使之复而不杂。

一 工 作 原 理

1 蜗轮齿斜角的形成和滚切比 不难理解，用蜗轮滚刀切削蜗轮时，蜗轮滚刀和蜗轮如同工作蜗杆和蜗轮一样，两者按照各自的螺纹线数和齿数形成的速比关系进行转动。所不同的是蜗轮和滚刀一边转动，一边完成切削运动，蜗轮自然形成了同相配工作的蜗杆（滚刀）相同的齿斜角。用飞刀滚切蜗轮时，刀具只有这一个刃齿，它的本身并不存在什么齿斜角。那么这时被切削的蜗轮的齿斜角是怎样形成的呢？了解清楚这一点，有助于全面理解用飞刀滚切蜗轮的整个工作过程。在这一节里，我们还对滚切比的意义进行说明，因为它是进行分齿挂轮计算首先要解决的一个问题。

下面就来谈一谈这两个问题。

用飞刀滚切蜗轮时，按照一般蜗轮副的工作要求，刀杆安装

于水平位置。为了保持蜗轮齿间的底面（齿根面）在齿宽方向呈圆弧形，在滚切过程中，刀具不需要垂直进给，进给挂轮挂空档（进给手柄处于脱开位置）。当不进行机动切向进给时，也不需要差速进给（差速装置脱开），只用分齿挂轮。机床开动后，刀架主轴带动刀杆转动，工作台随之转动。

现在，让我们来研究一下刀头和被加工蜗轮之间的相对运动关系。

图 1 是用飞刀滚切右旋蜗轮的工作原理图。被加工的蜗轮 2 按箭头方向逆时针转动。刀头在刀杆 1 的带动下，沿箭头方向自上而下地滚切。刀头中线（相当蜗杆的分圆）上的一点 e 对蜗轮

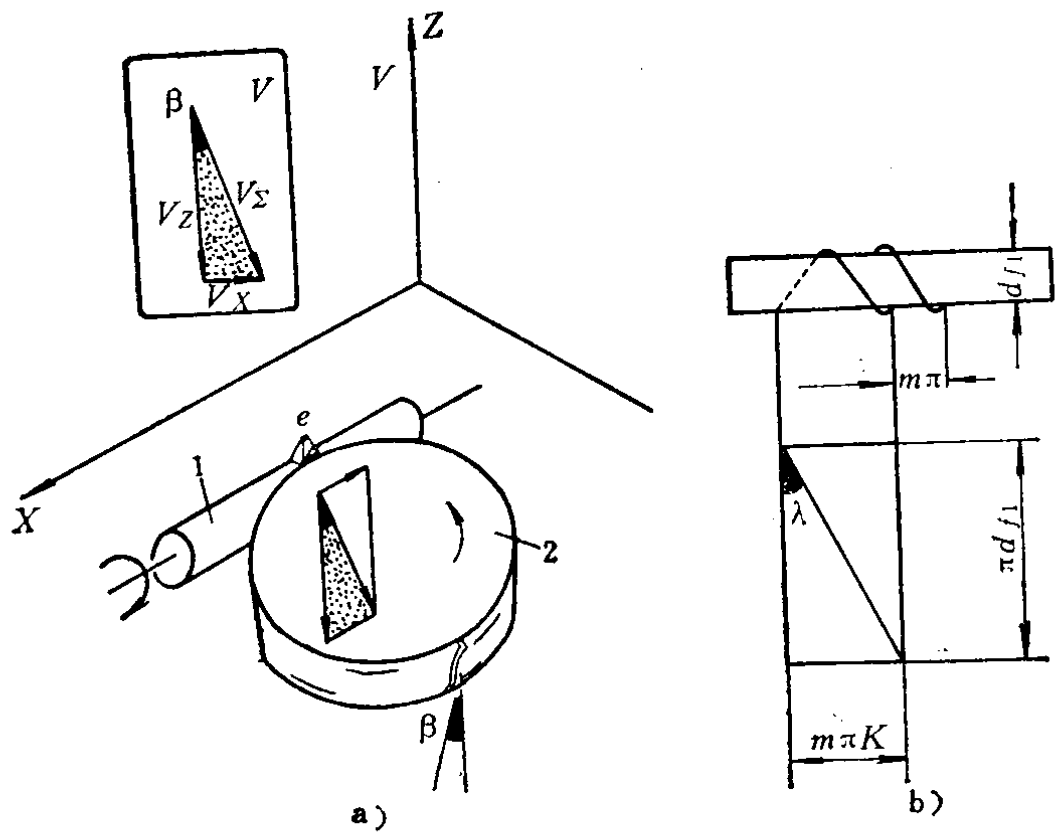


图 1 用飞刀滚切右旋蜗轮的工作原理图

1—刀杆 2—工件蜗轮 V_x —刀头对工件的水平相对速度 V_z —刀头对工件的垂直相对速度 V_Σ —刀头对工件的合成相对速度

的水平相对速度为 V_x 。当刀头上同一点 e 的切向速度 V_z 的方向同垂直坐标平面 V 重合时, 速度 V_x 和 V_z 的合成速度用 V_s 表示。不难看出, 当工件和刀头各自按照箭头方向转动时, 刀头在工件蜗轮上切出的刀痕轨迹的方向就是上述合成速度 V_s 的方向。因此, 速度 V_s 和 V_z 之间的夹角, 就是被加工蜗轮的齿斜角 β 。用飞刀滚切蜗轮的一项主要要求, 就是要保证这个齿斜角 β 同工作蜗杆的螺线升角 λ 相等。

怎样使被滚切的蜗轮的齿斜角和工作蜗杆的螺线升角相等 ($\beta = \lambda$) 呢?

由图 1 可以看出, 齿斜角 β 的大小取决于 V_z 和 V_x 的比例关系。当刀头的回转半径和工件蜗轮的直径确定以后, 上述两个速度的比例关系就只决定于刀杆和工件的转数关系。我们把这个转数关系叫做《滚切比》。它表示在用飞刀滚切蜗轮时, 刀杆和工件必须遵循的相对运动的关系。它不同于传动比, 因为这时刀杆和工件没有主动和被动之分, 两者都是主动件, 在各自主动转动的情况下完成《滚切》的加工过程。

我们可通过下面的计算获得需要的滚切比, 来保证工件蜗轮的齿斜角和工作蜗杆的螺线升角相等。

由图 1 中左上角的速度图可以直接写出工件蜗轮的齿斜角 β 和速度 V_x 与 V_z 之间的关系:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_x}{V_z} \quad (1)$$

把刀头和工件蜗轮的各运动参数和尺寸参数代入公式 1, 可得:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{mZ_2}{d_{f1}} \times \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

式中 n_2 和 n_1 ——工件和刀杆的每分钟的转数;

Z_2 ——工件蜗轮的齿数；

d_{f1} ——工作蜗杆的分圆直径(毫米)；

m ——模数 (毫米)。

根据螺纹的形成原理，可知蜗杆螺旋升角的正切值应为（参阅图 1 b）：

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{mK}{d_{f1}} \quad (3)$$

按蜗轮副的啮合要求，在蜗轮同其工作蜗杆的各自的轴线相垂直的情况下，要使蜗轮的齿斜角 β 等于工作蜗杆的升角 λ ，则公式 2 和 3 应相等，所以得：

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{K}{Z_2} \quad (4)$$

式中 K ——工作蜗杆的螺纹线数。

公式 4 为用飞刀滚切蜗轮时的滚切比公式。可以看出，这个滚切比同被加工蜗轮副的传动比是相等的。这说明在计算刀杆和工件之间的转数关系时，在数值上应等于蜗轮副的传动比。这一点在应用蜗轮滚刀时，是避免“乱扣”的必要条件。因此，在用飞刀加工蜗轮时，必须保持上述的关系。

2 分齿挂轮计算 由上述可知，被加工蜗轮的齿斜角决定于滚切比（参看公式 4），而不是像加工斜齿轮那样，齿斜角是依靠差速挂轮来实现的。这两种方法在传动原理方面有着本质的差异。因此在用飞刀滚切蜗轮时，由于不再需要差速进给（当用机械传动进行切向进给时，仍需差速挂轮，在下面章节中将述及，这里就从略了），也不需要垂直进给，只要进行分齿挂轮计算就可以了。

按照公式 4 求出滚切比以后，在整个分齿传动系统中，只剩下分齿挂轮为未知数。现在以 Y38-1 型滚齿机为例，来求这个分

齿挂轮的计算公式。

图 2 是 Y 38-1 型滚齿机分齿传动系统图。在一个封闭的传动链中，组成它的各个运动副的速比之积等于 1。根据这个道理，可列出下列传动方程式：

$$\frac{A}{B} \times \frac{C}{D} \times \frac{e}{f} \times \frac{1}{84} \times \frac{n_1}{n_2} \times \frac{60}{20} \times \frac{17}{17} \times \frac{23}{23} \times \frac{28}{24} \times 1 \times \frac{42}{42} = 1 \quad (5)$$

当工件的齿数小于 160 时，通常取 $e = f = 36$ ，则得：

$$\frac{AB}{CD} = 24 \frac{K}{Z_2} \quad (6)$$

式中 $ABCD$ 同时表示挂轮的代号齿数。

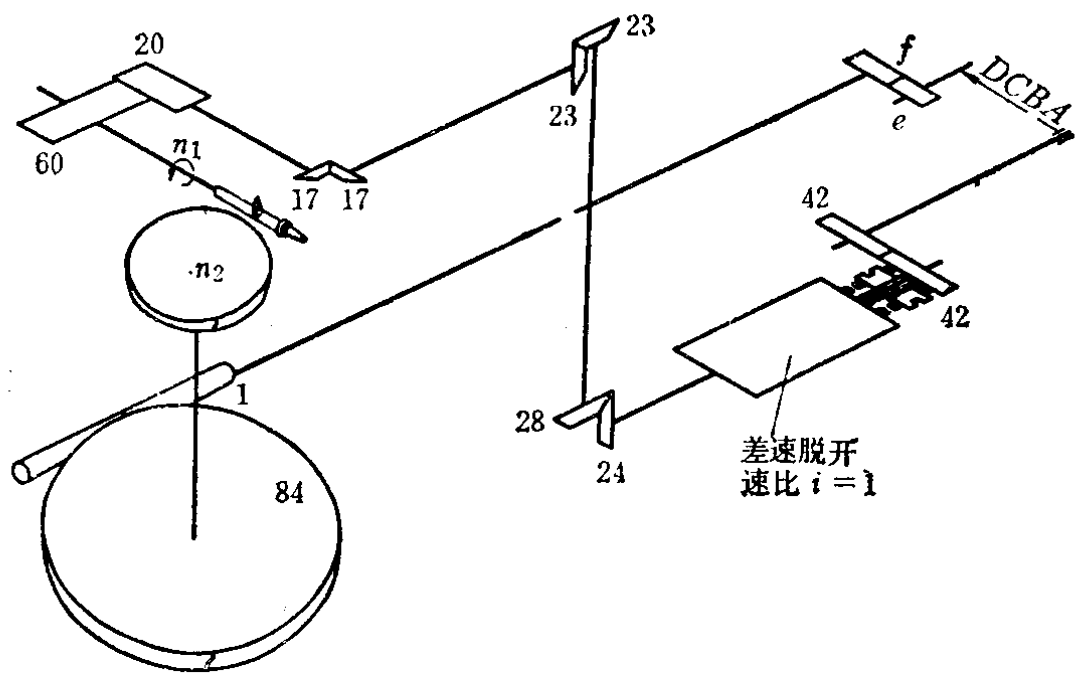


图 2 Y 38-1 滚齿机分齿系统传动原理图

上面的计算结果和 Y 38-1 型滚齿机的分齿挂轮公式，虽然在形式上相同，但是两者推导的依据是不同的。现说明如下：

(1) 用飞刀去加工蜗轮，可以直接应用机床说明书中提供的分齿挂轮公式；

(2) 要把这飞刀的刀头也看成是一个滚刀(假想滚刀), 因此它也有“螺纹线数”, 其数值和工作蜗杆的相同;

(3) 用飞刀滚切蜗轮时, 刀杆必须置于水平位置。不能用搬转刀架的转角的方法调节工件蜗轮的齿斜角, 因为这种错误的操作方法会破坏蜗轮和工作蜗杆相对位置的几何关系。

3 升角和齿斜角的对应关系 这里说的蜗杆的升角和蜗轮的齿斜角的位置关系是指: 当蜗杆和蜗轮的相对位置(中心距离)发生变化时, 上述两个角度在轮齿和螺线的不同的啮合的地方也将发生变化。这便是在后面将要提到的径向进给会引起“干涉切削”的原因。在这里简要地叙述一下产生这种现象的原因。

常说的蜗杆的螺线, 实际上并非一条直线, 而是一个具有一定几何截形的螺线体。这个螺线体的顶部和根部的工作直径是不同的。然而它们都有相同的螺距。这就说明了, 具有不同工作直径的同一条螺线体, 不同位置的升角是不同的。同理, 蜗轮轮齿的不同位置的齿斜角也是不同的。

图3是一对蜗轮副的齿形和螺线相配合的示意图。粗线条的方框 F 表示蜗杆 A 的在一个螺距上的展开图。螺线体的齿形用两条螺线表示。内螺线 i (白圈, 表示齿形的根部)和外螺线 e (黑圈, 表示齿形的顶部)按照同一螺线的形成规律, 分别缠在蜗杆的根圆柱(直径 d)和顶圆柱(直径 D)上面。当把它们展开在同一平面上时, 由于它们的螺距是相同的, 而在蜗杆上形成螺线的母圆柱的直径不同, 则由公式3可知它们具有不同的升角, 而且直径大的升角小(因为 mK 是不变的)。如设内螺线 i 的升角为 λ_i , 外螺线 e 的升角为 λ_e , 则两者的角差为:

$$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_e \quad (\text{永为正值}) \quad (7)$$

公式7说明一个蜗杆顶圆的螺线的升角比根圆的螺线升角小。对于蜗轮来说, 情况刚好相反, 即其顶圆处的齿斜角比齿根

处的大，它们的角差为：

$$\Delta\beta = \beta_e - \beta_i \text{ (永为正值)} \tag{8}$$

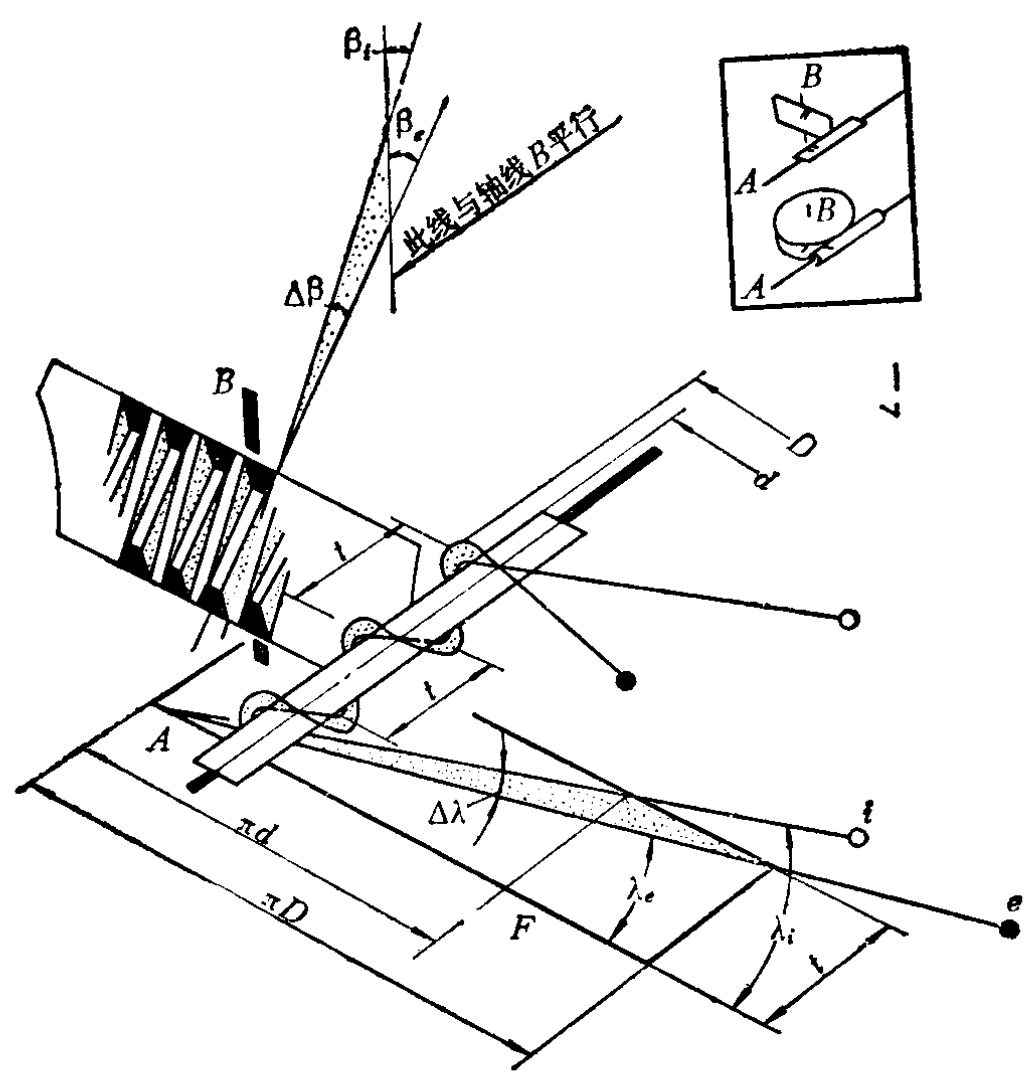


图3 蜗轮副的升角和齿斜角的位置关系示意图

A—蜗杆的轴线 B—蜗轮的轴线 e—蜗杆顶圆柱上的螺旋线
 i—蜗杆根圆柱上的螺旋线 λ_e 和 λ_i —蜗杆的齿顶部和齿根部的螺旋升角
 β_e 和 β_i —蜗轮的齿顶部和齿根部的齿斜角 t—螺距（或周节） d和D—蜗杆的根圆和顶圆直径

我们把蜗轮付的升角和齿斜角的上述性质叫做“同名角度的相异性”。也就是说：同为齿顶部的斜角（或升角），蜗轮的大，而蜗杆的小；同为齿根部的斜角（或升角），蜗杆的大而蜗轮的

小。可见，当径向进给时，蜗轮滚刀（蜗杆）沿径向接近并切入蜗轮，由于这种“同名角度的相异性”的原因，蜗轮滚刀齿顶部的较小的升角同蜗轮齿顶部的较大的齿斜角必然会产生干涉，结果使蜗轮齿顶部被多切去一小部分，从而降低了蜗轮副的接触精度。这是径向进给方法的一个缺点。由此可见，利用飞刀采用机动切向进给方式（下面将介绍）加工蜗轮的精度，就这一点而言比用蜗轮滚刀的要高。

4 多线蜗轮的加工特点 蜗杆可以分为单线蜗杆和多线蜗杆。同这些蜗杆相配合工作的蜗轮叫多线蜗轮。加工多线蜗轮时，要考虑到工作蜗杆的螺纹线数。前面导出来的滚切比和分齿挂轮公式已经说明了这个问题。不考虑这个螺纹线数（ K ），滚切比不同，分齿挂轮也不同，加工出来的工件的齿斜角也不同，有时分齿动作还会错乱，加工后的工件蜗轮就无法工作。所以，加工蜗轮之前，先要知道工作蜗杆的螺纹线数是多少。

滚切单线蜗轮时，加工过程比较简单。由公式4知道，当 $n_1 = 1$ ， $K = 1$ 时，得：

$$n_2 = \frac{1}{Z_2} \tag{9}$$

公式9说明：在滚切单线蜗轮时，当刀杆转过一转时，工件的转数为 $1/Z_2$ 。即刀杆每转一转，工件便转过一个齿。依此类推，刀杆转二转时，工件便转过二个齿，等等。在工件转动一周的过程中，可以依次地把工件蜗轮全部齿滚切一遍。这是单线蜗轮的加工特点。

滚切多线蜗轮的情况要复杂一些。这时工件转过一周被切过的不是全部齿，而是每隔 $K - 1$ 个齿间切一个齿。在工件每转一周内切过的齿数要视蜗轮的齿数（ Z_2 ）和工作蜗杆的线数（ K ）的具体情况而定。在机械工厂中，遇到的蜗杆，螺纹线数一般不超

过 4。下面就对 4 线及 4 线以下的蜗轮的滚齿程序做进一步的讨论。

我们按照切齿的特点，分三种情况叙述。

第一种情况 被加工的蜗轮齿数能被工作蜗杆的螺纹线数整除。

设同 2 线蜗杆相配合工作的蜗轮的齿数为 A ；3 线蜗轮的齿数为 B ；4 线蜗轮的齿数为 C 时，则有：

$$\left. \begin{aligned} \frac{A}{2} &= \square (\text{无余数}) \\ \frac{B}{3} &= \square (\text{无余数}) \\ \frac{C}{4} &= \square (\text{无余数}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 $\square$ ——表示整数（即公式可以整除，下同）。

可以看出，加工上述三种蜗轮时，自切齿的第二周及以后的所有各周内，被滚切的齿间，必为第一周所滚切的齿间的重复。要滚切余下未加工的齿间，需要进行“脱扣分齿”。脱扣分齿的次数（ n' ）为工作蜗杆螺纹线数（ K ）减 1。因为任意两个齿间所夹的齿数总比齿间数少 1，所以有：

$$n' = K - 1 \quad (11)$$

图 4 是多线蜗轮的切齿过程的图解。图中按照多线蜗轮的三种加工特点，划分为三个区域。区域“一”表示上述的第一种情况。图中的大写阿拉伯数字表示各种类型蜗轮的编号。小写的阿拉伯数字 1 和 2 表示工件在第一周内被滚切的第一个和第二个齿间， M 表示第末（ ME ）个齿间。在这区域中的滚切特点是第 2 个齿间和第末（ M ）个齿间距第 1 个齿间（始点）的距离相等。由此理解进行“脱扣分齿”的道理就很容易了。图中的箭头方向

表示切齿的方向，它同工件的转动方向相反。

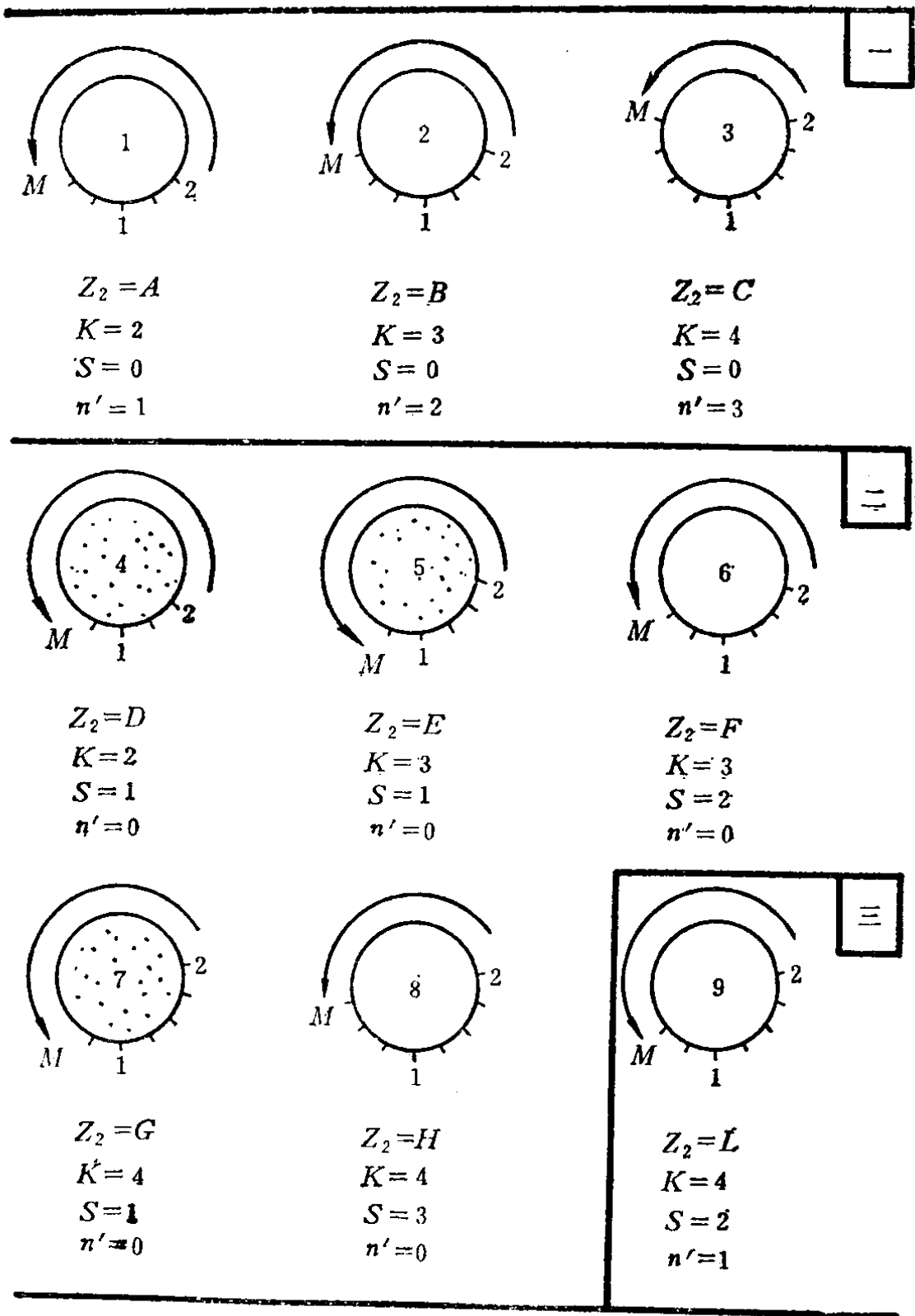


图 4 多线蜗轮切齿过程图解
 S —剩余齿数 n' —脱扣分齿次数

脱扣分齿增加了操作的复杂性。因此，在设计蜗轮副时，照顾到加工的方便，在速比允许的情况下，尽可能避免上述情况。使蜗轮的齿数和蜗杆的线数不能整除，也不要公因数。这就是属于下面第二种情况的蜗轮。

第二种情况 被加工的蜗轮齿数不能被工作蜗杆的螺纹线数整除，并且两者没有公因数。

图 4 中的区域“二”为这种情况的切齿过程图解。设 D 、 E 、 F 、 G 、 H 为相应蜗轮的齿数，则有：

$$\left. \begin{aligned} \frac{D}{2} \nmid \square; \text{并没有公因数} \\ \frac{E}{3} \nmid \square; \text{并没有公因数} \\ \frac{F}{3} \nmid \square; \text{并没有公因数} \\ \frac{G}{4} \nmid \square; \text{并没有公因数} \\ \frac{H}{4} \nmid \square; \text{并没有公因数} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

按照上述条件进行切齿，在工件被切完最末 (M) 个齿以后，必存在一个或几个所谓剩余齿数。用 S 表示这个剩余齿数，则 S 同工作蜗杆螺纹线数 K 的关系应如表 1 中所列的数值。

表 1 剩余齿数和工作蜗杆螺纹线数的关系

蜗杆线数 K	剩余齿数 S		
1	—	—	—
2	1	—	—
3	1	2	—
4	1	2	3

由表 1 和图 4 (区域“二”) 可以看出，当 $S = 1$ 或 $K - S =$

1 时，工件转过一周刀头错过一个齿。

$S = 1$ 时——表示在每滚切一周时剩余一个齿间没有被切出，因此是滞后错过一个齿。图 4 中的 4，5 和 7 号三个工件属于这一种；

$K - S = 1$ 时——表示未滚切到的齿数（剩余齿数）比蜗杆线数少于 1，所以必然是越前错过一个齿。图 4 中的 6 和 8 号两个工件属于这一种。

滞后也好，越前也好，其结果总会逐次地自行把全部齿间切削完毕，而不需脱扣分齿。由此可以得出结论：对于 2、3 和 4 线蜗轮而言，只要它们的齿数和工作蜗杆的螺纹线数不能整除又无公因数时，就不需脱扣分齿。

上述五种蜗轮之间的滚切的不同点在于，全部齿间滚切一遍时，工件本身转过的周数不同，这个周数等于工作蜗杆的线数：同 2 线蜗杆相配合工作的蜗轮，需要转过二周才能把全部齿滚切一遍，3 线蜗轮，需要转三周才能把全部齿滚切一遍，等等。

第三种情况 被加工的蜗轮齿数不能被工作蜗杆的螺纹线数整除，但是两者有公因数。

图 4 中的区域“三”是这种情况的图解。设这时蜗轮的齿数为 L ，则有：

设

$$\frac{L}{4} \neq \square, \text{ 但是有公因数} \quad (13)$$

因为 2 和 3 都是素数，所以这种情况只对 4 线蜗轮有意义。这时的公因数无疑是 2。因此，当 $K = 4$ ， $S = 2$ 时，由于 $S \neq 1$ ， $K - S \neq 1$ ，说明欲切除全部齿间需要进行脱扣分齿。但这时 K 刚好被 $K - S$ 整除，这种情况相当切制两次不需脱扣分齿的双线蜗轮，中间进行一次脱扣分齿。为了详细说明这种情况的切

齿过程，在实际用例中选入了“ $Z_2 = 30$, $K = 4$ ”的蜗轮的加工过程，读者可以参考该例题去理解。

上面说的“脱扣分齿”的目的是使刀头相对工件蜗轮轮齿在滚切过程中跳移一个齿。这样便可以满足上述切除全部齿间的要求。因为这一动作是在分齿挂轮脱开的情况下进行的，所以把它叫做“脱扣分齿”。

实现“脱扣分齿”的方法有三种：

- 1) 刀具不动，使工件转动 $1/Z_2$ 周；
- 2) 工件不动，使刀具转动 $1/K$ 周；
- 3) 工件不动，使刀杆移动一个工作蜗杆的螺距。

以上三种方法，前两种比较精确。习惯上多用第一种方法。第三种方法操作简单（不需脱开挂轮）。对于小模数的工件很适用。但这种方法有时受到对中丝杠移动行程的限制。当用第二种方法时，如果在搬转挂轮时困难，可以在脱开挂轮以后做好记号，再去搬转机床立柱上部的飞轮，操作甚为方便，缺点是需要二人配合操作。

5 切向进给原理 滚切蜗轮和滚切齿轮一样，刀具和工件之间有一个展成切削的过程。在这个过程中，工件的齿边形被滚切为工作曲线。用“多刃齿”滚刀滚切工件时，这种展成运动是靠着位于滚刀上同一条螺线（单线滚刀）上或几条螺线（多线滚刀）上的许多个刃齿，在刀具旋转过程中形成的一种“刃齿平移效应”而进行的。也就是说，在不改变刀具的轴向位置的情况下，产生了如同一个齿条刀具由左端移到右端（左旋蜗轮副）或由右端移到左端（右旋蜗轮副）那样的效果。

图 5 是用“多刃齿”滚刀加工蜗轮的过程的图解。当滚刀 A 沿箭头方向转动时，排列在同一条螺线上的许多个刃齿，就相当于一个刃齿，自右而左地依次进入切削状态。这就是上面所说的

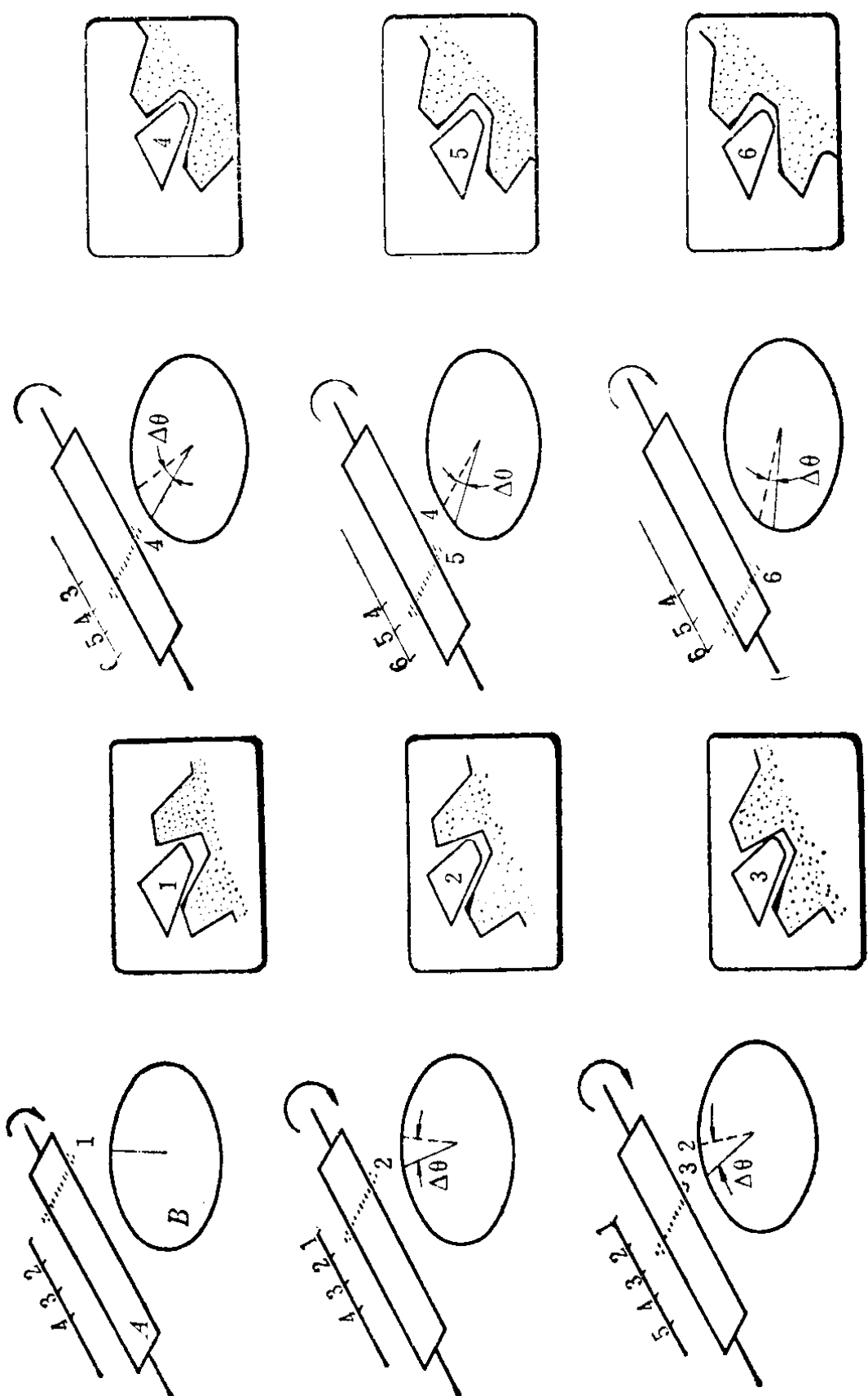


图5 “刃齿平移效应”图解
 A—多刃齿右旋滚刀 B—被加工的蜗轮