

# 第 21 篇 蜗杆、蜗轮加工

主 编 张光辉(重庆大学)

编写人

- 第 1 章 刘延林(华中理工大学)
- 第 2 章 谢佩娟(太原工业大学)
- 第 3 章 葛树义(第一重型机器厂)
- 第 4 章 张光辉、谢辅汉(重庆大学)
- 第 5 章 查济瑞(郑州机械研究所)
- 第 6 章 刘宗辅(重庆机床厂)

审稿人

- 徐仲康(天津第一机床厂)
- 雷 光
- 许洪基
- 许洪基
- 杨汉松(郑州机械研究所)
- 徐仲康



# 第1章 普通圆柱蜗杆、蜗轮加工

## 1 普通圆柱蜗杆、蜗轮的加工工艺规程

1) 蜗杆加工的工艺规程,见表 21.1-1。

表 21.1-1 蜗杆加工工艺规程<sup>①</sup>  
(适用于 5~7 级精度蜗杆)

序号	工序名称	说 明
1	粗 车	全长至图样要求,作两端中心孔,其余留余量 2mm
2	调 质	
3	精 车	蜗杆轴颈及齿顶圆柱面留磨量 0.3mm,其余至图样要求
4	齿面粗加工	
5	钳 作	去除两端不完全螺旋齿面直至 1/3 齿厚处
6	铣花键	留磨量
7	淬 火	
8	研中心孔	
9	精 磨	精磨轴颈及齿顶圆柱面至图样要求
10	磨花键	磨花键至图样要求
11	钳 作	去花键棱角毛刺
12	精磨齿面	
13	检 验	

① 取自重庆机床厂工艺资料。

2) 蜗轮加工的工艺规程,见表 21.1-2。

表 21.1-2 蜗轮加工工艺规程  
(适用于 5~7 级精度蜗轮)

序号	工序名称	说 明
1	粗车、钻孔	留余量 2.5mm
2	精车	至图样要求
3	加工键槽	至图样要求
4	钳作	修去键槽棱角毛刺
5	滚齿	至图样要求
6	钳作	修去齿部棱角毛刺
7	检 验	

## 2 蜗杆螺旋面的加工

### 2.1 蜗杆螺旋面的常用加工方法及其比较

1) 普通圆柱蜗杆螺旋面的粗加工常采用车削。批

量生产时可采用螺纹铣或旋风铣。精加工采用车削或磨削。

2) 切削用量可参考有关螺纹资料。

3) 三种普通圆柱蜗杆、蜗轮加工工艺性的比较<sup>[2,3]</sup>,见表 21.1-3。

### 2.2 普通圆柱蜗杆的近似磨削加工

#### 2.2.1 用盘状锥面砂轮

模数不大的单头蜗杆,若其齿形精度要求不太高,可用盘状锥面砂轮近似磨削作为终加工工序。

#### 2.2.2 用环面砂轮<sup>[4]</sup>

对于齿形精度要求较高的蜗杆,可用环面砂轮磨削作为终加工工序,其调整计算见表 21.1-4。

### 2.3 蜗杆的精加工余量<sup>[4]</sup>

余量的分布见图 21.1-1,总的余量  $a$  见表 21.1-5。

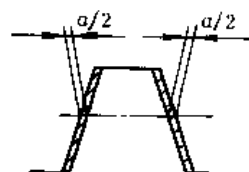


图 21.1-1 蜗杆精加工余量分布

## 3 蜗轮轮齿的加工

### 3.1 蜗轮轮齿加工要点

蜗轮轮齿加工所用刀具的基本参数应与相应蜗杆一致,并且,最终精切成形时,刀具与蜗轮的相对位置也应与相应蜗杆副啮合时的相对位置一致。

### 3.2 飞刀加工<sup>[5]</sup>

单件小批生产蜗轮时,若缺少蜗轮滚刀,可用飞刀加工蜗轮轮齿。

#### 3.2.1 加工原理

飞刀相当于蜗轮滚刀的一个刀齿。加工时,飞刀旋转并同时沿刀杆轴线作切向进给运动,蜗轮作相应的分度旋转和附加旋转运动。由于飞刀刀齿的相对运动轨迹与滚刀刀齿所在的螺旋面等效,因此,能切出正确的蜗轮轮齿。

表 21.1-3 三种普通圆柱蜗杆及蜗轮的加工工艺性比较

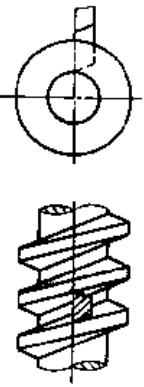
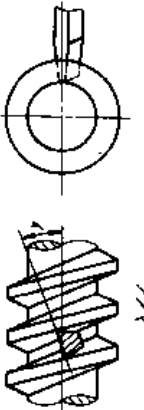
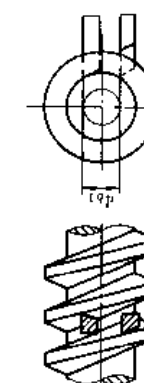



加工工艺	阿基米德蜗杆(ZA)	齿槽法向直廓蜗杆(ZN <sub>1</sub> )	渐开线蜗杆(ZI)
车削	 <p><math>\alpha_0 = \alpha_{x1}</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 车刀直线刀刃位于蜗杆轴平面内,因此对刀容易</li> <li>2) 蜗杆两侧齿面可同时进行加工,因此生产率高</li> <li>3) 车刀两切削刃切削条件不一样,其中有一面对车削不利</li> </ol>	 <p><math>\alpha_0 = \alpha_{x1}</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 车刀直线刀刃位于蜗杆齿槽中点法截面中,因此对刀较困难</li> <li>2) 蜗杆两侧齿面可同时进行加工,因此生产率高</li> <li>3) 车刀两切削刃都有合理的前角和后角,改善了切削条件</li> </ol>	 <p><math>\alpha_0 = \gamma_{k1}</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 车刀直线刀刃位于基圆柱切平面内,对刀困难</li> <li>2) 蜗杆两侧面要分别用两把车刀加工,生产率低</li> </ol>
磨削	 <p>砂轮安装简单,可同时进行磨削蜗杆两侧面,故生产率较高,用普通砂轮修整器将砂轮修成沿工件轴截面直线形,可加工出近似齿形,操作简单;若用反靠法修整器修整砂轮,可加工出准确齿形,但调整复杂</p>	 <p>同(ZA)蜗杆</p>	 <p>用平面砂轮磨削,砂轮修整容易,但安装调整较复杂,而且两侧面要分别加工,因此生产率低</p>
蜗轮加工	<p>用阿基米德蜗轮滚刀加工蜗轮,这种滚刀重磨后齿形变化小,故加工的蜗轮齿形误差小</p> <p>蜗轮剃刀和珩磨蜗杆的加工及检验较方便</p>	<p>用法向直廓蜗轮滚刀加工蜗轮,这种滚刀重磨后齿形变化大,故加工的蜗轮齿形误差大</p> <p>蜗轮剃刀和珩磨蜗杆的加工及检验工艺性与ZA刀具相同</p>	<p>渐开线蜗轮滚刀制造复杂</p> <p>蜗轮剃刀和珩磨蜗杆的加工和检验也复杂</p>

表 21.1-4 近似磨削蜗杆的砂轮修整计算

蜗杆类型	渐开线蜗杆	法向直廓蜗杆
图例		
砂轮修整计算	$R = OC - PC$ $OC = \frac{\sin \alpha_n}{\cos^2 \beta} (r_1 + r \sin^2 \beta)$ $PC = \pi m_n / 4 \cos \alpha_n$ 式中 $r_1$ —— 蜗杆分度圆半径(mm); $r$ —— 砂轮半径(mm); $\beta$ —— 蜗杆螺旋角	$R = OC + PC$ $OC = \frac{r_1 \sin \alpha_n}{\cos^2 \beta} \left( 1 + \frac{r_1}{r \sin^2 \beta} \right)$ $PC = \pi m_n / 4 \cos \alpha_n$ 式中 $r_1$ —— 蜗杆分度圆半径(mm); $r$ —— 砂轮半径(mm); $\beta$ —— 蜗杆螺旋角

 表 21.1-5 蜗杆精加工余量  $a$  (mm)

模数	$\leq 2$	$>2 \sim 3$	$>3 \sim 5$	$>5 \sim 7$	$>7 \sim 10$	$>10 \sim 12$
粗铣后精车	0.7~0.8	1.0~1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	1.8~2.0
淬火后磨削	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8

### 3.2.2 工艺特点

加工时刀杆位于蜗杆与蜗轮啮合时蜗杆的位置上。飞刀的前刀面可安装在刀杆的轴截面内,此时刀刃形状应与蜗杆轴截面齿形一致。为了改善飞刀的切削条件,可把飞刀转过一个角度安装,使前刀面相对于刀杆轴线倾斜一个蜗轮螺旋角,此时刀刃的形状应与蜗杆齿体法截面齿形一致。

### 3.2.3 优缺点

刀具易于制造,成本低,但加工蜗轮的生产率低,并要求滚齿机备有切向刀架。

### 3.2.4 无切向刀架时的加工法

在没有切向刀架的滚齿机上用飞刀加工蜗轮时,

可以用以下方法实现手动的展成滚切过程:

1) 可按表 21.1-6 的替代步骤:

上述步骤的优点是不需要增添新的工具,只要操作细心无误,加工结果令人满意。但由于调整变动次数频繁,容易产生失误。而且多次调整造成的误差积累也会导致加工质量的降低。

2) 采用图 21.1-2 所示的专用切向刀杆,可以简化手动切向进给的操作过程,从而避免上述操作失误所能造成的后果并消除操作过程引起的误差积累。

专用刀杆的特点在于:它与滚刀架主轴之间采用模数螺纹连接,它的模数值与被加工蜗轮的模数值相等。因此,当调节刀杆相对于滚刀架主轴旋转时,它同

表 21.1-6 在无切向刀架的滚齿机上用飞刀加工蜗轮的工作步骤

序号	工步	说明
1	粗切开槽 	机床调整操作与用蜗轮滚刀径向进给法加工蜗轮时相同,飞刀要对中,切削深度比要求的全齿高约小 0.7~1.5mm

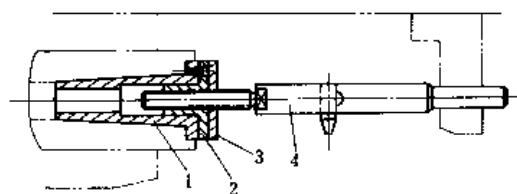


图 21.1-2 专用切向刀杆

- 1—莫氏锥度套 2—模数螺纹套  
3—锁紧螺母 4—飞刀杆

时按模数螺纹的规律产生相应的轴向移动。这一运动使飞刀刀刃可以达到任意细分的假想工具蜗杆的齿面位置上,从而实现准确的展成加工。这种运动规律不会受外界操作影响而破坏,操作过程不再产生误差积累,使操作难度降低,不需要计算和测量,而可靠性增加。并且同一个刀杆对于同模数同旋向而直径不同的蜗杆副可以有通用性,对于单件小批和修配生产有一定的实用价值。

### 3.3 滚齿加工

按滚刀进给方式不同,分为径向滚齿与切向滚齿见图 21.1-3。

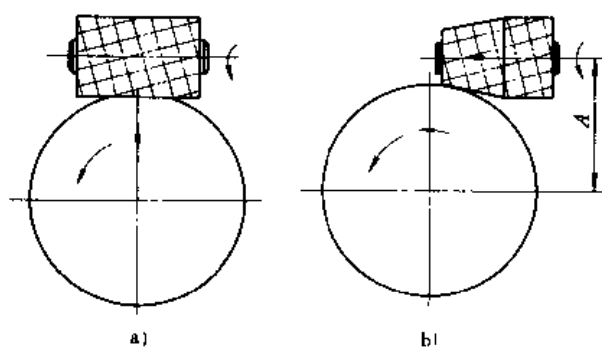


图 21.1-3 蜗轮滚齿

- a) 径向滚齿 b) 切向滚齿

表 21.1-7 径向滚齿与切向滚齿的比较

滚齿方式	径 向 滚 齿	切 向 滚 齿
工艺特点	蜗轮滚刀向被加工蜗轮作径向进给,由齿顶逐渐切至全齿深	1) 蜗轮滚刀前端是锥形的,滚刀沿其轴线方向进给,滚刀与蜗轮的中心距预先调整好,在加工中保持不变 2) 对应于滚刀的轴向进给,蜗轮必须有一附加补偿运动
优缺点	1) 进给行程仅等于齿高,故加工机动时间短,生产率高 2) 不用差动链,传动链短,传动误差较小,机床调整简单 3) 蜗轮的轮齿可能被过切,影响传动质量	1) 不会产生轮齿的过切现象 2) 滚刀主要由切削锥部参加切削,圆柱部分仅作修光和校正,因此滚刀精度保持时间长 3) 由于滚刀切向进给量可调节,展成蜗轮轮齿的切削刀数可比径向进给法多,故加工出的轮齿齿面粗糙度细 4) 进给行程长,生产率低 5) 要用切向刀架,滚齿传动链较长,附加传动环节的误差将影响蜗轮的精度
使用场合	蜗轮的螺旋角为 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 时,过切现象不明显,为提高生产率,常用径向滚齿,滚切分度蜗轮时,为提高运动精度,一般也采用径向滚齿	大螺旋角、大模数蜗轮的加工,宜用切向滚齿(并宜用切向装配)

#### 3.3.1 径向滚齿与切向滚齿的比较(见表 21.1-7)。

#### 3.3.2 滚蜗轮的切削用量<sup>[4]</sup>

蜗轮材料为灰铸铁 180~200HBS 及青铜 120HBS 时切削用量见表 21.1-8。

使用条件变换时的切削速度修正系数见表 21.1-9。

#### 3.3.3 精滚齿余量<sup>[6]</sup>

精滚齿余量  $a$  的分布见图 21.1-4,数值  $a$  列于表 21.1-10。

表 21.1-8 滚蜗轮的切削用量

模 数 /mm	刀 具 直 径 /mm	径 向 滚 齿			切 向 滚 齿			切 削 速 度 /(m/min)	
		机 床 动 力 /kW							
		1.5~2.8	3~4	5~9	1.5~2.8	3~4	5~9		
		工件每转进给量/mm			工件每转进给量/mm				
3	70	0.60	0.90		1.4	1.6		26.4	
4	80	0.55	0.85	0.95	1.3	1.5	1.55	24.5	
5	90	0.55	0.80	0.90	1.2	1.4	1.45	23	
6	125	0.50	0.75	0.85	1.2	1.3	1.40	23	
8	145	0.45	0.68	0.78	1.1	1.2	1.30	22.5	
10	164	0.40	0.64	0.74	1.0	1.1	1.25	20.5	
12	171		0.60	0.70		1.05	1.20	20.5	
14	171		0.50	0.65		1.0	1.10	19.6	
16	199		0.48	0.55		0.85	0.95	19.4	
18	207			0.50			0.85	18.4	
22	252			0.40			0.80	18	
24	272			0.35			0.75	17.5	
26	292			0.30			0.70	17	

表 21.1-9 切削速度修正系数  $K_v$  及  $K_{T_v}$

与工件材料有关	材 料		灰 铸 铁				青 铜			
	硬 度 HB		140~160	>160~180	>180~200	>200~220	80	100	120	140
	修正系数 $K_v$		1.25	1.12	1.0	0.9	1.2	1.1	1.0	0.9
与刀具耐磨时间有关	刀具耐磨时间 $T/\text{min}$		120	240	360	480	600	900	1200	
	修正系数 $K_{T_v}$	模数 $m$ /mm	1.38	1.18	1.11	1.05	1.0	0.93	0.87	
		$\leq 18$ 20~26								
			1.49	1.27	1.19	1.12	1.08	1.0	0.95	

表 21.1-10 蜗轮精滚齿余量 (mm)

模 数 $m$	2~2.75	3~5	5.5~6	6.5~8	9~12
余 量 $a$	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80

3.4 剃齿<sup>[3]</sup>

按有无外加传动链,剃齿可分为强迫剃齿和自由剃齿。

3.4.1 强迫剃齿与自由剃齿的比较(见表 21.1-11)。

表 21.1-11 强迫剃齿与自由剃齿的比较

	强 迫 剃 齿	自 由 剃 齿
特 点	蜗轮由机床分度链强迫驱动,剃后的相邻齿距误差及齿距累积误差直接受机床分度链精度的影响,要求机床精度高	蜗轮由剃齿刀在切削中带齿,因剃后的相邻齿距误差决定于刀具齿距精度,此项精度可以获得改善,但对齿距累积误差修正不大
夹具	与滚齿用的夹具相同	用心轴或转盘式夹具
进给方式	径向或切向	径向

3.4.2 剃齿切削用量(见表 21.1-12)

3.4.3 剃齿余量<sup>[6]</sup>(见表 21.1-13 及图 21.1-4)

表 21.1-12 剃齿切削用量

切削速度/(m/min)	2~4
进给量/(mm/r)	0.01~0.04

表 21.1-13 剃齿余量 (mm)

模数 $m$	2~2.75	3~5	5.5~6	6.5~8	9~12
余量 $a$	0.10	0.12	0.15	0.20	0.25

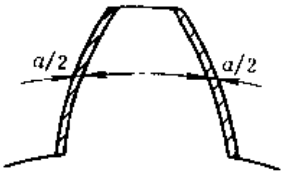
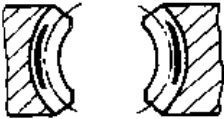









图 21.1-4 蜗轮精加工余量分布

(续)

序号	示意图	接触区特点	产生原因
2		带状条纹左右齿面上都集中在齿根中部	1) 蜗杆齿形角小于刀具齿形角或刀具具有负前角 2) 蜗杆导程大于刀具导程
3		带状条纹、左右齿面上都集中在齿顶中部	1) 蜗杆齿形角大于刀具齿形角或刀具具有正前角 2) 蜗杆导程小于刀具导程
4		一面齿根, 一面齿顶	由序号 2 和 3 的原因不同搭配的结果
5		对角接触	1) 加工时刀具或装配(配接触面)时蜗杆的轴线歪斜 2) 装配(检验)中心距大于加工中心距 3) 刀架安装有误差 4) 多头蜗杆径向滚齿时有干涉 5) 蜗杆导程大于刀具导程或蜗杆齿厚大于刀具齿厚
6		四点接触 左右齿面均为两端一小部分接触, 中间部分无接触	1) 可调节蜗杆副的蜗杆齿厚大于刀具齿厚, 或蜗杆导程小于刀具导程 2) 不可调节蜗杆副的加工中心距小于装配中心距, 或蜗杆导程小于刀具导程
7		左右齿面同一端出现对称接触	加工时蜗轮中间平面偏移
8		一侧接触良好, 另一侧齿上端或下端接触	1) 刀具与蜗杆导程不一致(单面) 2) 切向进给双面切削时, 丝杠间隙或刀杆轴承间隙过大, 对一面切削条件有不利影响产生让刀现象, 滚刀不利于切削的一侧刀刃用钝
9		中空	刀具齿形中凸或蜗杆齿形中凹



确定 ZC<sub>1</sub> 蜗杆作为我国国标“圆弧圆柱蜗杆减速器”的蜗杆, 砂轮轴截面齿廓为圆弧形, 其包络形成的蜗杆轴截面齿廓为凹形, 蜗杆螺旋面是曲纹螺旋面, 蜗轮为凸形齿廓。

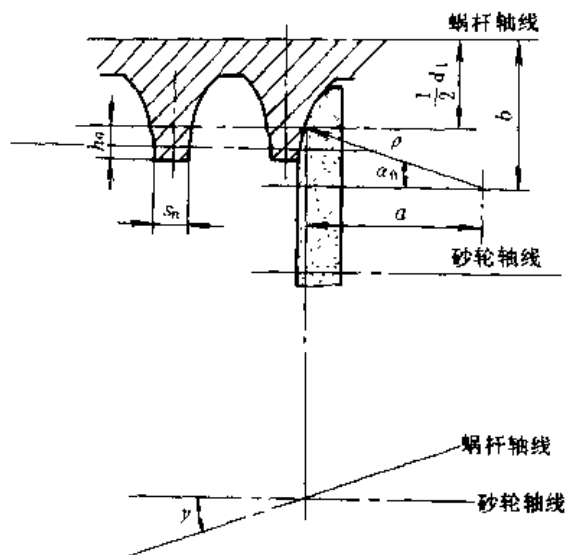
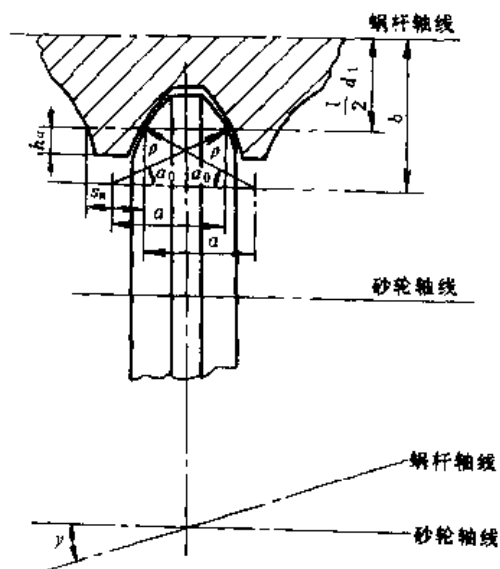


图 21.2-3 单面砂轮单面磨削



**图 21.2-4 双面砂轮双面依次磨削**

## 2.2 ZC<sub>2</sub> 蜗杆传动

ZC<sub>2</sub> 蜗杆传动也是一种圆弧圆柱蜗杆传动,它与 ZC<sub>1</sub> 蜗杆都是磨削蜗杆,只是形成原理有区别,砂轮安装时,要使圆弧齿廓的圆心位于蜗杆轴与砂轮轴的最短距离线上且距蜗杆轴有一定距离,这就意味着蜗杆一个截面的齿廓与砂轮的轴向齿廓重合,并且是一段圆弧,这样蜗杆齿面与刀具表面的瞬时接触线不是空间曲线而是平面曲线。

采用此种磨削方法,最大的优点是砂轮经过修整后,其直径的减小并不引起蜗杆螺旋齿面的变化,可以克服  $ZC_1$  蜗杆的缺点,当然,  $ZC_2$  蜗杆加工时,要求刀具安装位置十分精确,有时难于达到。

### 2.3 ZC<sub>3</sub> 蜗杆传动

$ZC_3$  蜗杆传动也是圆弧圆柱蜗杆传动的一种型式, 又称圆弧齿圆柱蜗杆传动, 蜗杆轴截面齿形为圆弧齿形见图 21.2.1, 被定为部标准 JB2318-79“圆弧齿圆柱蜗杆减速器”蜗杆的基准齿形。 $ZC_3$  蜗杆为车削成形, 即使采用磨削加工也要保证蜗杆轴截面齿形为圆弧齿形, 显然磨削这种蜗杆修整砂轮不易掌握, 需要设计专用砂轮修整器。

2C。蜗杆传动自 60 年代初开始,在国内进行理论、设计、加工、试验等方面的研究,近十年来,推广应用非常迅速,效果良好。蜗杆减速器有通用型——WHT、蜗杆在蜗轮之下型——WHX、蜗杆在蜗轮之上型——WHS 及蜗杆在蜗轮之侧型——WHC 四种安装形式,供各种设备选用。

以上三种类型的圆弧圆柱蜗杆传动是主要的传动形式,它们形成的原理不同,形成了各自的特点,理论分析、参数选择等也有所不同,但它们的传动性能比较接近。

### 3 蜗杆加工

圆弧圆柱蜗杆与普通圆柱蜗杆最大的区别是蜗杆齿形不同,因此,刀具的设计、砂轮的修形是不同的,而加工蜗杆的工艺路线、技术要求、加工方法、机床调整等均与普通圆柱蜗杆加工基本相同。现就圆弧(齿)圆柱蜗杆采用车削方法和磨削方法的加工特点,叙述如下。

### 3.1 车削蜗杆<sup>[8,10]</sup>

圆弧圆柱蜗杆采用车削加工是比较方便的,在普通车床上就可以实现,车削加工的成形原理与普通圆柱蜗杆相类似,根据车刀加工时,安装的位置不同,也可形成阿基米德型圆弧圆柱蜗杆(ZAY型)、渐开线型圆弧圆柱蜗杆(ZJY型)、延伸渐开线型圆弧圆柱蜗杆(ZKY型)以及采用圆盘刀具加工的圆弧齿圆柱蜗杆等,ZC<sub>3</sub>蜗杆是车削蜗杆最典型的例子,见图21-2-5。不管是采用车削成形,还是采用先车削后磨削的加工工艺方法,最终都要保证蜗杆轴截面齿形为圆弧齿形——半径为 $\rho$ 的凹圆弧齿形(基准齿形可参考有关文献)。加工完后,齿形的检测,在蜗杆轴截面内进行,也就是用标准轴向样板进行检测,这种方法比较简便。

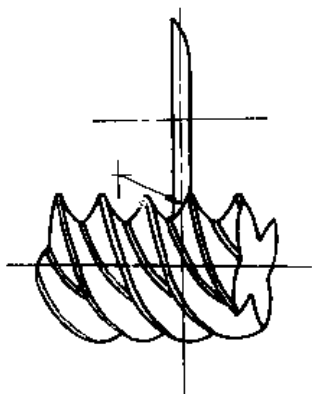


图 21.2-5 车削圆弧圆柱蜗杆

圆弧圆柱蜗杆加工时采用的车刀,可以设计成圆弧偏刀,见图 21.2-6a 示意图,采用圆弧偏刀加工蜗杆,车完一侧螺旋面,可将蜗杆调头,车另一侧螺旋面,这样加工时,可以减少切削力,避免过大的振动,能提高蜗杆加工精度和减小表面粗糙度参数值,延长刀具寿命。车刀也可设计成圆弧成形车刀,见图 21.2-6b 示意图。这种车刀,可以同时加工两侧螺旋面,加工时无需将蜗杆调头,但切削时,振动较大,刀具寿命短,齿形误差大,尤其是导程角较大时,两螺旋侧面的齿形误差更大,因此,应综合考虑选用。

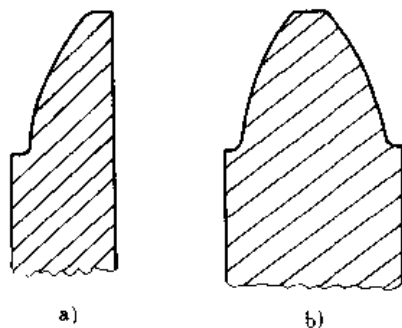


图 21.2-6 车刀示意图

a) 圆弧偏刀 b) 圆弧成形车刀

当然,为了提高生产率,加工蜗杆时,可采用先铣槽,后车削、精加工等方法。为了减小表面粗糙度参数值,也可采用车削后再进行磨削加工等方法。

圆弧圆柱蜗杆的齿形为凹圆弧,当设计车刀或蜗轮滚刀时,必须考虑两者有齿廓半径差  $\Delta\rho$ ,或考虑齿形角修正值  $\Delta\alpha_1$ ,这样才能达到理想的啮合部位和要求的接触区。

根据理论分析和生产实践,为了保证良好的啮合状态,所用滚刀(或飞刀)齿廓的圆弧半径比蜗杆车刀刃边圆弧半径(或铣刀、或砂轮)减小半径差  $\Delta\rho$  的方法是有效的,在生产中经常采用。因此,蜗轮刀具的齿

形,确切地讲不是理想的基准齿形,而是修正后的圆弧凸齿形,见图 21.2-7。半径差  $\Delta\rho$  的推荐值见表 21.2-1。

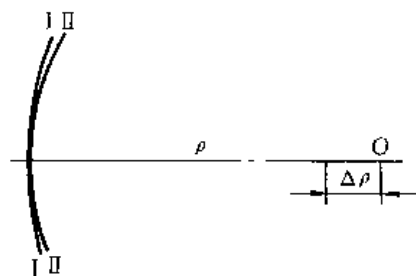


图 21.2-7 车刀、滚刀齿廓示意图

I—车刀 II—滚刀

表 21.2-1  $\Delta\rho$  推荐值 (mm)

$x_2 = 0.5 \sim 0.75$	$x_2 = 0.75 < 1$	$x_2 \geq 1$
$0.04\pi m_t$	$0.05\pi m_t$	$0.06\pi m_t$

注:  $x_2$ ——蜗轮变位系数,  $m_t$ ——蜗轮端面模数(mm)。

采用齿形角修正的方法也可达到蜗轮副理想的啮合状态,即可以实现蜗轮齿顶和蜗杆齿根的接触。设计时,减小滚刀(或飞刀)的齿形角,或者增大车刀(或铣刀、砂轮)刃边的齿形角,可以达到同样的目的。经过理论分析和实践经验累积,车刀、滚刀的齿形角差异示意图,见图 21.2-8,齿形角修正值见表 21.2-2。

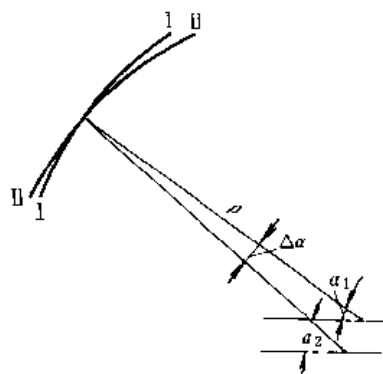


图 21.2-8 车刀、滚刀齿形角差异示意图

I—滚刀 II—车刀

表 21.2-2 齿形角修正值  $\Delta\alpha_1$ 

$m_t = 3 \sim 6$	$m_t = 7 \sim 12$	$m_t = 13 \sim 20$
$20'$	$30'$	$35'$

注:  $m_t$ ——蜗轮端面模数(mm)。

在设计车刀和滚刀时,上述两种方法还可以综合考虑应用,或者采用其他有效方法。

### 3.2 磨削蜗杆<sup>[7,9,8]</sup>

为了保证圆弧圆柱蜗杆传动的啮合质量和传动性

能,提高螺旋齿面的几何精度和降低表面粗糙度参数值,提高蜗杆齿面硬度等,蜗杆需要采用磨削加工工艺。

$ZC_1$  和  $ZC_2$  圆弧圆柱蜗杆都是磨削成型的,砂轮轴截面都是圆弧齿形,只是磨削时,砂轮安装的位置不同而已,见图 21.2-3 和图 21.2-4。

圆弧圆柱蜗杆磨削加工,一般在螺纹磨床上进行,如果条件不具备时,也可以在自制专用设备上磨削,或者在铲床上进行磨削加工。

磨削加工过程中,粗磨齿操作时,对机床的调整,蜗杆的安装和校正,磨头的安装和调整等与普通圆柱蜗杆磨削加工基本相同,为了防止螺旋面出现严重干涉和磨削不足的现象,要选择直径合适的砂轮,根据有关资料推荐,可按式(21.2-1)进行计算,圆整后选用标准砂轮。

$$d_0 \geq (80 - 1.5m_t) + d_{a1}$$

式中  $d_0$ ——选用标准砂轮时的参考砂轮直径(mm);

$m_t$ ——蜗轮端面模数(mm);

$d_{a1}$ ——蜗杆齿顶圆直径(mm)。

砂轮在磨削加工过程中,不断磨损,使砂轮直径逐渐变小,并引起砂轮截形的相应变化,为了保证获得正确的齿形,制造高质量蜗杆副,磨削工艺要引起足够的重视。砂轮的修正是否正确也是技术关键,最好采用专用的圆弧(齿)圆柱蜗杆砂轮修整器进行修整,砂轮的廓线要按啮合原理进行精确求解。

### 3.3 德国“CAVEX”蜗杆齿形修正

德国 CAVEX 蜗杆齿形修正,可用下述方法

1) 修正蜗杆 磨削蜗杆时,从工艺上对蜗杆或砂轮的参数进行修正,在满足线接触的共轭条件下,进行磨削加工蜗杆,用同样的方法去磨削滚刀,再去加工蜗轮。

2) 修正滚刀 蜗杆的齿形不变,通过修整滚刀参数或调整滚刀安装参数来加工蜗轮,这样加工出来的蜗轮与蜗杆不是共轭齿面,而是局部共轭齿面,齿面不再呈线接触。这种修形方法也是常采用的。

### 3.4 蜗杆材料选用

圆弧圆柱蜗杆传动,承载能力可比普通圆柱蜗杆高得多,因此,对于蜗杆的材质要求较高,除了重视加工工艺外,还要注意选用优质材料和先进的热处理方案。表面粗糙度要求能达到  $R_{a1.6} \sim 0.8 \mu m$ ,甚至  $R_{a0.4} \sim 0.1 \mu m$

蜗杆材料常用的有:

1) 渗碳钢: 20Cr、20CrV、20CrMnTi、18CrMnTi、

12CrNi3A、20MnVB 及 20SiMnVB 等。渗碳后,表面淬硬可达 58~63HRC。

2) 表面淬火钢: 40Cr、40CrNi、42SiMn、37SiMn、2MoV 及 38SiMnMo 等。表面淬火后,硬度可达 50~55HRC。

3) 调质钢: 40Cr、40CrNi、38CrMnNi、35CrMoA 等,表面硬度可达 30~38HRC。

根据圆弧圆柱蜗杆传动的工况条件及蜗轮的材质、热处理和机械加工条件,以及成本合算等因素,综合考虑后,合理选用。

## 4 蜗轮加工

圆弧圆柱蜗杆传动中蜗轮的加工,在滚齿机上,用常规的方法进行安装、调整和滚切加工,一般都采用圆弧齿形的蜗轮滚刀,在单件和小批量生产时,可用飞刀加工蜗轮,加工工艺与普通蜗轮的加工工艺基本相同,只是滚刀本身的设计要考虑圆弧圆柱蜗杆传动的特点与普通蜗杆传动有明显的区别。例如:圆弧圆柱蜗轮滚刀的几何形状应当与共轭的蜗杆几何形状相同,滚刀的齿形为凹形曲线, $ZC_1$  型、 $ZC_2$  型及  $ZC_3$  型三种类型的圆弧圆柱蜗轮滚刀,齿形曲线虽然不同,但在设计滚刀时,必须都要考虑齿廓圆弧半径差和齿形角修正,见图 21.2-7、图 21.2-8 及表 21.2-1、表 21.2-2。另外,由于圆弧圆柱蜗杆副是凸凹啮合形式,在滚切蜗轮时,中心距应是负偏差。设计圆弧圆柱蜗杆副时,一般选择较大的变位系数,加工蜗轮时要考虑变位。为防止不良接触情况,应控制中心距精度公差。圆弧圆柱蜗杆传动,对中心距误差十分敏感,无论在加工还是装配时,应给予足够重视。

蜗轮材料主要有:

锡青铜: ZCuSn10Pb1、ZCuSn3Zn8Pb6Ni1 等。

铝青铜: ZCuAl9Fe4Ni4Mn2、ZCuAl10Fe3Mn2 等;

还有灰铸铁及新型材料。

蜗轮材料的选择,应考虑与蜗杆材料的合理搭配,以保证具有良好的传动性能和最佳经济效益。

蜗杆副加工完毕,需要进行单项和综合检测,可参考有关章节。

## 5 加工圆弧圆柱蜗杆副需注意的几个问题

1) 半径差 圆弧圆柱蜗轮为凸齿,蜗杆为凹齿,形成凸凹啮合的形式,根据工艺条件,刀具必须考虑半径差,才能达到理想的啮合部位和接触区。

2) 安装参数  $ZC_1$ 、 $ZC_2$  及  $ZC_3$  三种类型的圆弧

圆柱蜗杆传动,加工时、刀具安装和调整,必须根据安装参数来控制,才能保证具有正确的齿形。

3) 蜗轮修正 圆弧圆柱蜗杆传动设计参数的选择,往往选择较大的蜗轮变位系数,因此,在滚切蜗轮时要注意蜗轮的变位问题。

4) 边切和根切 圆弧圆柱蜗杆传动的几何参数搭配是考虑了轮齿强度、润滑特性、刀具寿命等诸因素后确定的,加工后蜗轮轮齿上可能会出现少量的边切和根切现象是允许的。

5) 接触区 圆弧圆柱蜗杆传动由于它的齿形参数和几何参数搭配所决定,接触区的面积一般要比普通圆柱蜗杆传动小,这是正常的。在安装、调整时,接触部位调到蜗轮啮出端为宜。

6) 中心距误差 圆弧圆柱蜗杆传动是凸凹啮合,中心距误差比普通圆柱蜗杆传动要求高,即中心距误差敏感性大,为保证在蜗轮轮齿顶部啮合,见图 21.2-9,加工蜗轮和装配时,应控制中心距为负偏差。

7) 偏刀与成形刀 车削圆弧圆柱蜗杆时,最好采用偏刀加工,尤其是螺旋升角较大时,更要采用偏刀,两侧螺旋面分别车削,磨削时也希望两侧螺旋面分别磨削,以保证蜗杆齿形的正确性,同时可减少由切削力引起的振动,提高表面精度和降低表面粗糙度参数值。

如果螺旋升角比较小时(一般小于  $5^{\circ}$ )采用成形刀加工,对齿形和精度的影响比较小。

8) 磨削 磨削加工时,注意留的磨削余量要均匀化,加工过程中要注意砂轮的直径变化,及时进行修整。要保证对滚刀和蜗杆磨削的一致性。

9) 检测 蜗杆副加工后,要采用仪器进行单项和综合检测,以保证一定的精度和传动质量。用样板检验蜗杆齿形时,导程角小于  $5^{\circ}$  时,可在蜗杆轴截面内进行检验,导程角大于  $5^{\circ}$  时,需要在蜗杆法截面内进行检测更好些。

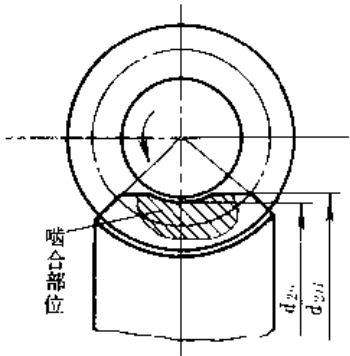


图 21.2-9 理想啮合部位示意图

第 3 章 直廓环面蜗杆、蜗轮加工

1 直廓环面蜗杆、蜗轮的加工工艺流程

1.1 直廓环面蜗杆加工的工艺流程

典型的加工工艺过程见表 21.3-1。

表 21.3-1 直廓环面蜗杆加工工艺过程

工序号	工序名称	工序内容	选用设备
1	锻造	按锻件粗加工图锻造毛坯	
2	热处理	正回火	
3	划	检查毛坯各部余量,划十字中心线引至轴端面上,划中心孔加工线	
4	定中心	打中心孔并平端面	台面镗床
5	车	按锻件粗加工图半精车	卧式车床
6	探伤	超声波探伤检查	
7	热处理	调质处理	

(续)

工序号	工序名称	工序内容	选用设备
8	镗	按锻件取样图取试样,并进行机械性能检验	镗床
9	划	检查蜗杆变形情况,划十字中心线并引至轴端面上,重划中心孔加工线	
10	定中心	重打中心孔	镗床
11	车	按蜗杆半精加工图半精床,装夹找正等基准留磨量	卧式车床
12	磨	按蜗杆半精加工图磨装夹找正等基准	外圆磨
13	划	划装夹用扁	
14	铣	按蜗杆半精加工图铣装夹用扁,并对称于蜗杆中心	铣床

直廓环面蜗杆的螺旋齿面通常是采用直线刀车刀在专用机床上加工的。按照切制蜗杆的工艺参数不同可分为“原始型”和“修正型”两类,而修正型的蜗杆又可分为倒坡修形、全修形和综合对称修形等几种。倒坡修形的蜗杆是将“原始型”环面蜗杆的螺旋齿面的两端逐渐减薄而成,主要用于大尺寸的蜗杆加工,其目的在于预防装配时发生干涉,并适当改善其润滑条件。目前较广泛采用的是全修形和综合对称修形。

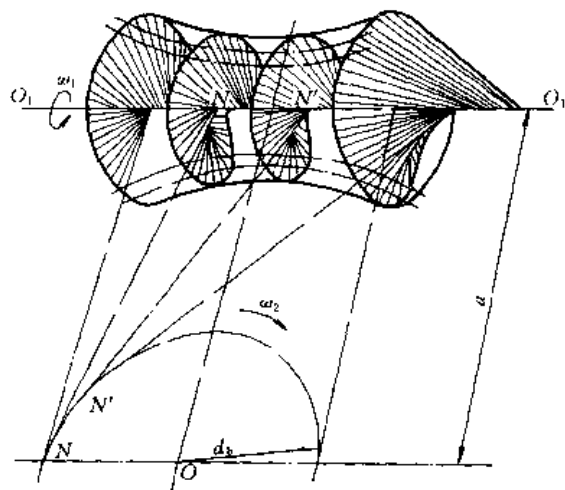


图 21.3-1 直廓环面蜗杆螺旋齿面的形成原理

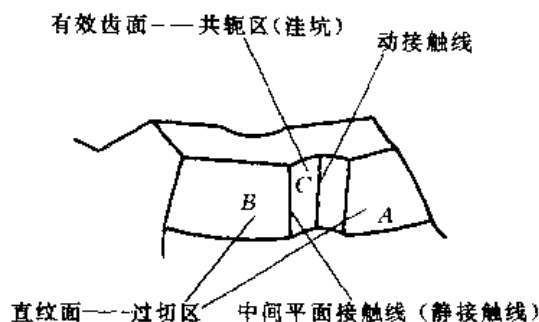


图 21.3-2 直廓环面蜗轮的齿面

按照直廓环面蜗杆螺旋齿面的形成原理,要实现磨削是很难的。目前已尝试采用指状砂轮近似磨削蜗杆螺旋齿面的工艺方法,可提高齿面硬度和精度。但对小模数直廓环面蜗杆来说,还存在许多工艺难点,同这种蜗杆相啮合的蜗轮齿面,必须用原理上与配对蜗杆几何参数相一致的刀具,并在完全相同的啮合参数下进行对偶的展成加工。

## 2.2 对加工直廓环面蜗杆副用机床的要求

根据直廓环面蜗杆副的形成原理和工艺要求,专用加工机床应满足以下几点要求:

1) 蜗杆和旋转刀台两个主运动的回转轴线应保

持垂直交叉,由精确而可调的传动链连接。不仅要能调节不同的进给量,而且应具有快慢速传动转换的功能。为此,机床的蜗杆轴转速应能在  $0.006 \sim 100 \text{ r/min}$  范围内调节。快速传动时,蜗杆转速可控制在  $100 \sim 500 \text{ r/min}$  左右。

2) 具有径向进给和切向进给运动。径向进给量随被加工件的模数和材料等因素而定,一般要求在  $0.2 \sim 0.6 \text{ mm/r}$  范围内;切向进给量一般在  $0.04 \sim 0.08 \text{ mm/r}$  范围内。

3) 蜗杆应能作精确的轴向位置调整。

4) 两回转轴线的中心距应能方便地进行调整和精确定位。

5) 应具备安装蜗杆毛坯的专用刀架。

6) 机床的传动机构应具有分度差动机构及足够的刚性。

7) 为了能对直廓环面蜗杆进行“全修形”加工,应能接入一个特殊的机构,以实现旋转刀台的转速按一定的规律变化。

## 2.3 几种实用的机床设计与改造

### 2.3.1 利用立式滚齿机改造的实例

#### 2.3.1.1 几种主轴转速的改造

##### 1. 前苏联 5330 滚齿机的改造

通过增加一套减速装置(见图 21.3-3 所示),降低精切蜗杆的主轴和工作台转速,在空程时通过快速电动机和超越离合器直接带动机床。

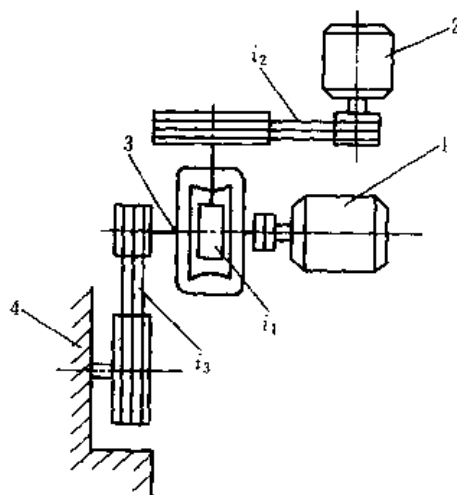


图 21.3-3 前苏联 5330 滚齿机主轴转速的改造

1—主电动机 2—精车用电动机

3—超越离合器 4—机床

5330 滚齿机通过加装减速装置后的转速:

(1) 主刀架(或切向刀架)的主轴转速:

1) 精切齿面时  $n = 0.1973 \sim 1.578 \text{ r/min}$ 。

位于同一水平面上即可。用指形铣刀粗铣蜗杆螺旋齿面的效率要比用车刀粗切蜗杆螺旋齿面提高10倍以上,并且工人的劳动强度低。

### 2.3.2 普通车床的利用与改造

改装车床用于加工环面蜗杆的一种方案见图21.3-7。机床上原有的横向进给小滑板用带有横向工作台2的较大的滑板1代替。在机床的纵向滑板上装有差动机构3。工件蜗杆装夹在机床主轴与尾座顶尖之间。

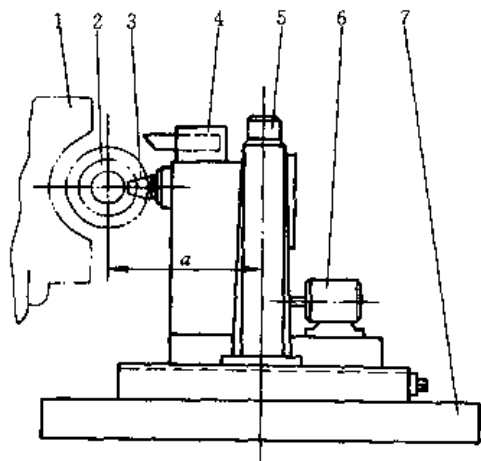


图 21.3-6 切蜗杆螺旋齿面的两用刀台

1—机床刀架 2—直廓环面蜗杆 3—指形铣刀  
4—刀盒 5—找正心轴 6—电动机 7—工作台

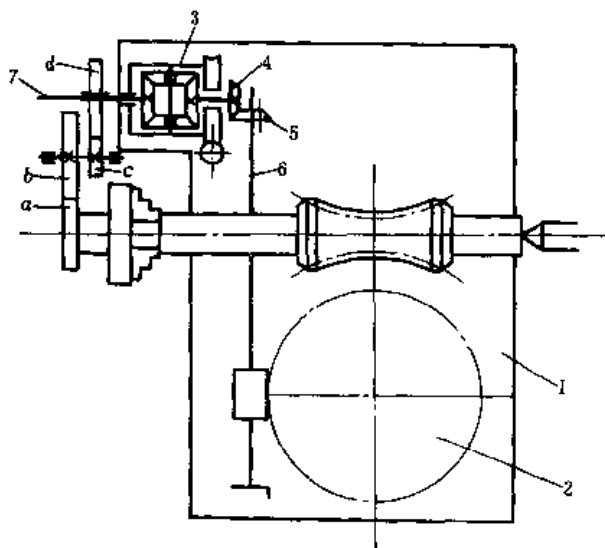


图 21.3-7 一种用于加工环面蜗杆的车床改造方案

主轴的旋转运动通过装在主轴上的齿轮a和装在交换齿轮板上的交换齿轮b和c,传至差动机构一端的

交换齿轮d,再经过差动机构另一端的锥齿轮副4与5传至工作台分度蜗杆副2。锥齿轮5和交换齿轮d分别套装在花键轴6和7上,保证回转工作台和机床的纵滑板可自由地横向和纵向移动。差动机构的蜗杆副由回转工作台上的凸轮块推动(图中未表示出),由此可实现修形加工。

机床径向进给运动可由原车床的横向进给机构获得。但要满足回转工作台 $0.20\sim0.60\text{mm/r}$ 的进给量要求,必须使它的进给速度降低。这可更换从主轴箱传至进给齿轮箱的交换齿轮,使它的传动比 $i_{\text{进给}}$ 满足下式:

$$i_{\text{进给}} \geq \frac{f_{\text{min}}}{0.20}$$

式中  $i$ ——被加工蜗杆副传动比;

$f_{\text{min}}$ ——原车床的最小横向进给量 $\text{mm/r}$ 。

另外,也可以采用改造滚齿机的同样方法,使主轴获得合适的快慢不同的转速。

当加工大中心距蜗杆副时,为了增大滑板的支承刚性,可在原车床床身旁拼接一辅助床身,见图21.3-8。

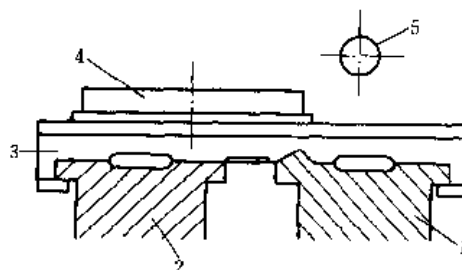


图 21.3-8 增大车床滑板支承刚性的一种改进方案

1—原机床床身 2—辅助床身 3—改装的纵向滑板 4—回转工作台 5—主轴

改造车床的方案较容易实现,并且装夹工件和操作都很方便,但是它受原车床中心高的限制,新工作台和滑板不能设计得太厚,致使刚性有所不足。另外,为了保证工件的齿距精度和螺旋线精度,回转工作台应具有足够的传动精度。借用普通铣床的通用转台常嫌精度不够,因此,应精化或更换其中的蜗杆副。

### 2.3.3 环面蜗杆副专用加工机床

卧轴式环面蜗杆专用机床的传动系统图见图21.3-9。该机床的加工中心距为 $150\sim160\text{mm}$ ,有适合于各种加工条件的广泛转速和进给量范围,并设有为多头蜗杆单齿分度和进行螺旋线修形的差动机构,配上数控系统后可实现包括抛物线在内的任意曲线的修形加工。

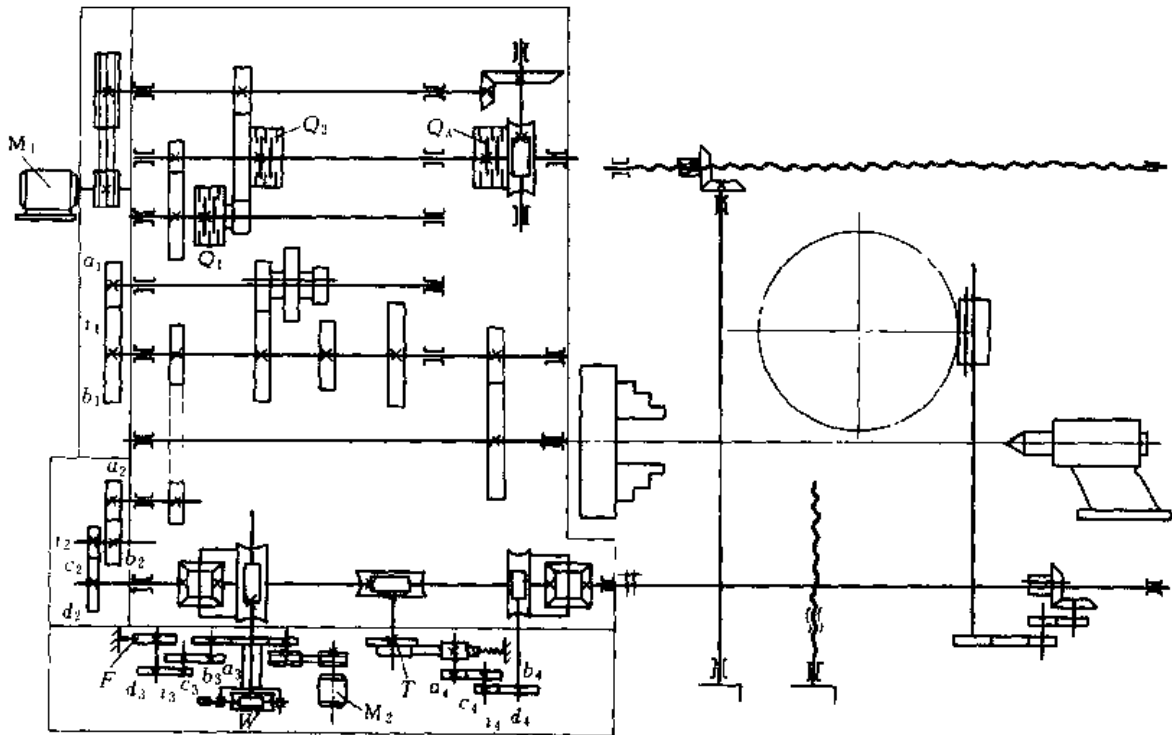


图 21.3-9 外啮合蜗杆专用机床传动系统图

$i_1$ —速度交换齿轮  $i_2$ —分度交换齿轮  $i_3$ —单齿分度交换齿轮  $i_4$ —修形交换齿轮  $M_1$ —主电动机  
 $M_2$ —单齿分度电动机  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ —换速电磁离合器  $F$ —分头用分度板  $W$ —圆周进给蜗杆副  $T$ —修形凸轮

### 3 直廓环面蜗杆、蜗轮加工工艺

#### 3.1 直廓环面蜗杆加工中的几个问题

##### 3.1.1 蜗杆半精加工图的设计

蜗杆半精加工工艺图，应根据所选用的加工蜗杆螺旋齿的机床刀架所允许的装夹尺寸并适当留出装夹用的工艺夹头及蜗杆各部位的加工余量。加工工艺图要选用的传动套（或弹簧套）和支承的尺寸，如图 21.3-5 和表 21.3-3 所示。

在一般情况下，设计工艺锥度和工艺支承面时，传动套端的弹簧套处的配合应选用 f7 配合，后支承套处的配合应选用 g6 配合，如图 21.3-10 所示。在两端支承的内侧，位于蜗杆齿部两侧的轴颈，要在留余量的基础上保持相同尺寸的轴颈，以备蜗杆在刀架中调整水平时做测量表面之用。齿顶圆弧在蜗杆直径上留适当的精加工余量。

##### 3.1.2 蜗杆坯的装夹和调整

将蜗杆坯像安装滚刀刀轴一样安装在滚齿机的专用刀架上，其径向圆跳动不大于 0.03mm。用水平仪依靠蜗杆同尺寸轴颈母线调整找正或用高度尺测量找正，以达到与工作台面相平行，允差为 0.02mm，并使蜗杆轴线与工作台面相垂直。

蜗杆坯的轴向位置应调整到使其喉颈截面通过工作台轴线。可按基准端面至喉部的尺寸  $B$  制作专用样板进行测量和调整，如图 21.3-10 所示，即  $L = B - d/2$ 。也可通过划针或百分表找正蜗杆坯圆弧两顶点  $a$  进行调整。

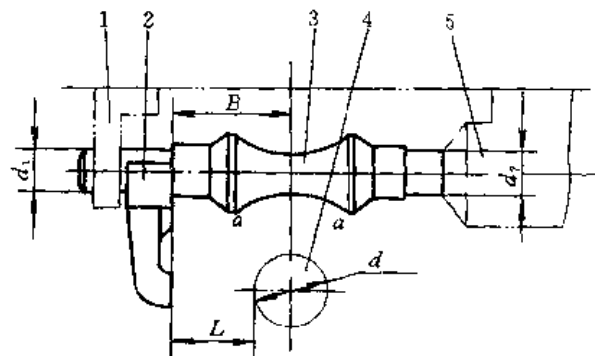


图 21.3-10 调整蜗杆的轴向位置

1—刀架后支座 2—专用叉形样板 3—蜗杆  
 4—工作台面轴 5—刀架主轴

##### 3.1.3 加工中心距的调整

蜗杆、蜗轮的加工，必须首先保证设计确定的传动中心距  $a$ ，并使切刀或飞刀的切削刀刃的延长线始终与成形圆相切。

为了控制切齿时的中心距，首先切齿前应测出常数  $K$ ，如图 21.3-11 所示， $K = L_2 + L_3$ ，式中， $L_2 = L_1 +$

$d_1/2 + d_2/2$ 。

加工蜗杆、蜗轮时,以  $L_m = K - a$  来控制中心距。

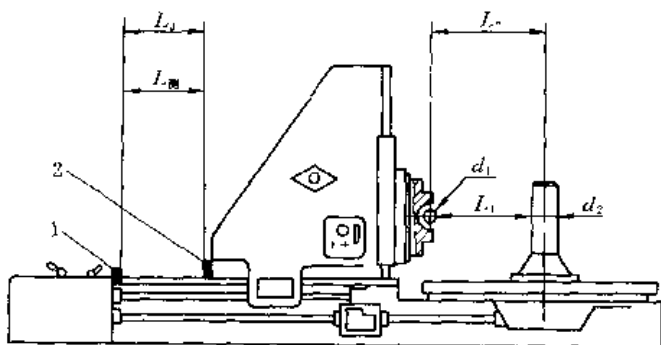


图 21.3-11 加工中心距的调整

1—固定测量基准块 2—随立柱移动基准块

### 3.1.4 车削蜗杆齿顶圆环面

将车刀安装在刀台上的刀盒中,利用高度尺测量控制蜗杆的轴线与车刀切削刃位于同一水平面内,使刀尖所在的圆周半径等于蜗杆的齿顶圆弧半径。车削时以单分度法加工斜齿内轮的方式,但将垂直进给运动链脱开,便可获得自动的不同方向的圆周进给。进给量约为  $0.2\text{mm/r}$  左右。大小可由差动交换齿轮进行调整。直至达到预先确定的加工中心距为止。

### 3.1.5 粗切蜗杆的螺旋齿面

粗切蜗杆螺旋齿面时,为了提高加工的生产效率和减少空程的时间损失,可用多刀刀盘(图 21.3-12)或利用指状铣刀铣削开齿。当采用指状铣刀粗切开槽时,指状铣刀的旋转中心线要与蜗杆轴线等高,并与工作台旋转轴线相交。所用指状铣刀如图 21.3-13 所示。有关工艺参数按下式计算:

$$\bar{s} = d_2 \sin 0.275r \cos \gamma_m - \Delta$$

$$\bar{h} = 0.5(d_2 - d_{f1}) + 0.5d_2(1 - \cos 0.275r) - c$$

$$\Phi_k = \arctan[\tan(\alpha - 0.275r) \cos \gamma_m]$$

式中  $d_2$ ——蜗轮分度圆直径(mm);

$r$ ——蜗轮齿距角( $^\circ$ );

$\gamma_m$ ——蜗杆喉部分度圆导程角( $^\circ$ );

$\Delta$ ——粗铣后齿厚留量(mm);

$d_1$ ——蜗杆喉部分度圆直径(mm);

$d_{f1}$ ——蜗杆喉部分度圆直径(mm);

$c$ ——顶隙(mm);

$\alpha$ ——齿形角,  $\alpha = \arcsin \frac{d_b}{d_2}$  ( $^\circ$ );

$d_b$ ——成形圆直径(mm)。

为了减小精车时的振动,车刀顶刃不应参加切削,为此粗铣时的切深应按蜗杆齿全高增加  $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ ,在齿厚上留  $2 \sim 3\text{mm}$  的精加工余量。对蜗杆

螺旋齿的不完整部分,齿厚应铣薄  $4 \sim 5\text{mm}$ ,但其厚度不小于齿厚的二分之一。对于车削切齿的蜗杆,在蜗杆螺旋齿面精车后,用普通铣床将不完整螺旋内面铣薄。齿厚不完整部分的棱角由钳工倒钝。

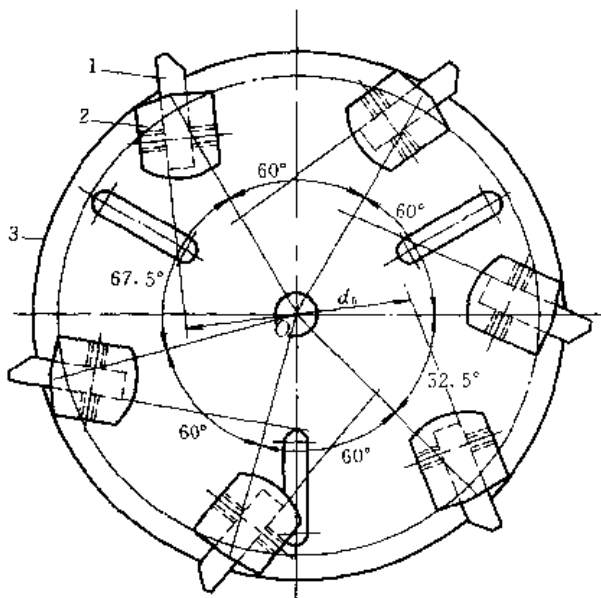


图 21.3-12 多刀刀盘(六切刀刀盘)

1—车刀 2—刀盒 3—刀盘

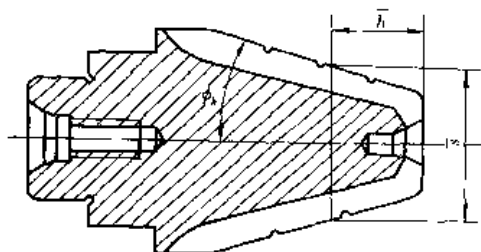


图 21.3-13 粗铣蜗杆螺旋齿面用指状铣刀

### 3.1.6 精车蜗杆螺旋齿面

蜗杆螺旋齿面的粗切和精切在同一工序中进行,蜗杆齿面用指状铣刀粗铣后,将刀架上移使蜗杆轴线与车刀切削刃位于同一平面上,其中心平面偏移误差不大于  $\pm 0.05\text{mm}$ 。

蜗杆螺旋齿面的精车是蜗杆加工的关键工序,必须按设计确定的中心距进行,精车前需要重新检查工作装夹精度及校核切刀位置是否正确,通常左右齿面各用一把车刀进行加工。直刃车刀分别按对刀盘(设计对刀盘时,其直径  $d_0$  应小于图样的成形圆直径  $d_s$ ,即:  $d_0 = d_s - 2b$ ,  $b$  为对刀尺厚度)对刀,使车刀切削刃的延长线与成形圆相切。在蜗杆螺旋齿面半精车时,其圆周进给不大于  $0.1\text{mm/r}$ 。

圆周进给也可以采用微处理机控制步进电机经差



动机构输入一个附加运动,使工作台(即切刀)在正常传动比的基础上增加一个附加转角,即产生一个附加进给量。

在蜗杆齿面精车的最后几刀,为了保证有较高的质量,除选用较低的切削速度( $v=0.3\sim 0.8\text{mm/min}$ ),使精切圆周进给量不大于 $0.03\text{mm/r}$ 外,在精车过程中,切削刃不得有切屑瘤存在,为保持切削刃锋利,要用细油石进行研磨。精车后要将齿顶倒角。

精切刀具的材料最好用钴高速钢或铝高速钢,要保持车刀切削刃锋利,车刀各刃面的表面粗糙度应达 $R_a 0.4\mu\text{m}$ ,车刀几何参数要适宜,刃带后角在 $2^\circ$ 左右为最佳。

精车蜗杆螺旋齿面时,当机床分度传动链中的间隙过大或蜗杆分度圆导程角 $\gamma>30^\circ$ 时,在切削过程中易产生“扎刀”而导致过量切削,使齿面精度和表面粗糙度遭到破坏,为了避免这一点,应采用反切法进行加工(车刀反装,使整个运动链反转)。为了获得良好的齿面的表面粗糙度,最好用植物油(如豆油)进行冷却和润滑,其次是煤油加白铅油(比例为1:5)。或用75%的纯四氯化碳和25%的锭子油混合而成的特殊的冷却润滑液。在切削过程中均匀地涂刷到齿面上,冷却润滑液的浓度不能太稀;另一方面太浓了也不好,因散发性差也会影响齿面的表面粗糙度。

蜗杆副的传动效率与该蜗杆副啮合面的表面粗糙度关系很大,齿面越光洁,传动效率就越高,运行时的润滑油温升越低。蜗杆螺旋齿面的表面粗糙度数值一般不应大于 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ,这对精车是很难达到的。所以对精车蜗杆的齿面的表面粗糙度数值要求不大于 $R_a 1.6\mu\text{m}$ 即可,必要时应采用齿面抛光加工。

### 3.1.7 切制多头蜗杆的分头方法

对于直廓环面蜗杆副,当蜗杆头数与蜗轮齿数不成整数倍时,蜗杆分头的精度是影响蜗杆副制造质量的关键因素之一。它直接影响直廓环面蜗杆副的啮合质量,因此必须予以特别的重视。

蜗杆的分头方法:可采取手动使工作台转过一个齿距角的方法,也可通过切向刀架分头机构使蜗杆转过 $1/z$ 转的方法。这两种方法均需脱开传动链,否则传动链的误差将影响分头精度。最理想的方法是采用数控分头。该方法通过数控系统,在滚齿机的差动轴上输入一个附加运动,令工作台相对蜗杆正或反转过一个齿距角,即可实现分头。机床传动链不需脱开,因此分头精度高。

### 3.1.8 蜗杆螺旋齿面的修形加工

#### 1. 全修形加工

(1) 原理和修形计算 全修形加工是几种修形加

工中最理想的一种。全修形目前有抛物线修形和高次方修形等,高次方修形目前还处于研制阶段。

抛物线全修形曲线,其特点是没有拐点,极值点对应的角度值等于 $1.428\varphi_w$ (图21.3-14)修形曲线的方程为

$$\Delta_y = \Delta_f \left( 0.3 \pm 0.7 \frac{\varphi_x}{\varphi_w} \right)^2$$

式中  $\Delta_f$ ——啮入口修形量,其值与中心距 $a$ 及传动比 $i$ 有关,由下式确定;

$$\Delta_f = (0.0003 - 0.000034i)a;$$

$\varphi_w$ ——蜗杆工作包容半角( $^\circ$ );

$\varphi_x$ ——用来确定修形量 $\Delta_y$ 的角度值;

$$-\varphi_w \leq \varphi_x \leq \varphi_w$$

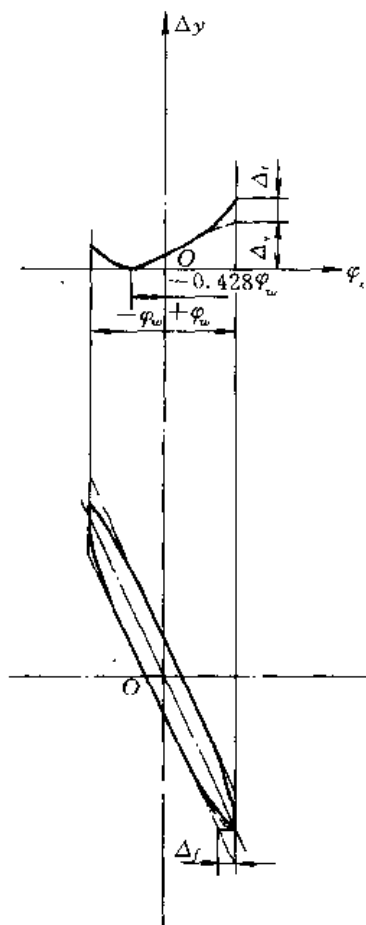


图 21.3-14 抛物线修形示意图

用数控系统实现全修形加工,其传动原理见图21.3-15。该法通用性强不需要改动机床,对不同参数的蜗杆,只要按其参数改变控制程序即可

全修形直廓环面蜗杆加工工艺的主要特点是在加工过程中,分度链的传动比是按照修形曲线的要求随转角位置不断变化的。采用微机进行数控修形具有使用方便、变动灵活的特点。

(2) 全修形加工六头直廓环面蜗杆实例:

1) 蜗杆零件图和啮合特性见图 21.3-16 和表 21.3-4。

2) 技术要求

- a. 锻件硬度 330~360HBS;
- b. 蜗杆粗加工后进行调质;
- c. 超声波探伤检查, 不许有裂纹和白点, 允许有小于当量直径  $\phi 2\text{mm}$  的非金属夹杂物的存在。

3) 微处理机控制修形加工 微处理机的工作原理如图 21.3-17 所示。

对于 TP801 型单板机的控制系统, Z80 是控制系统的核心, 它按设计的程序发出指令, 控制机床实现修形加工。

BK25-1 型驱动电源为步进电动机供电。供电方式为 5 相 10 拍按 3-2 制, 得到步进电动机的步距角为  $0.75^\circ$ , 即当向驱动电源输入一个电脉冲, 步进电动机转动  $0.75^\circ$ 。驱动指令包括脉冲数目和移动方向均由微处理机输出。

BFG2820 型步进电动机 (5) 是控制系统的执行机构, 它与滚齿机差动轴联接, 实现输入变速比的附加运动。

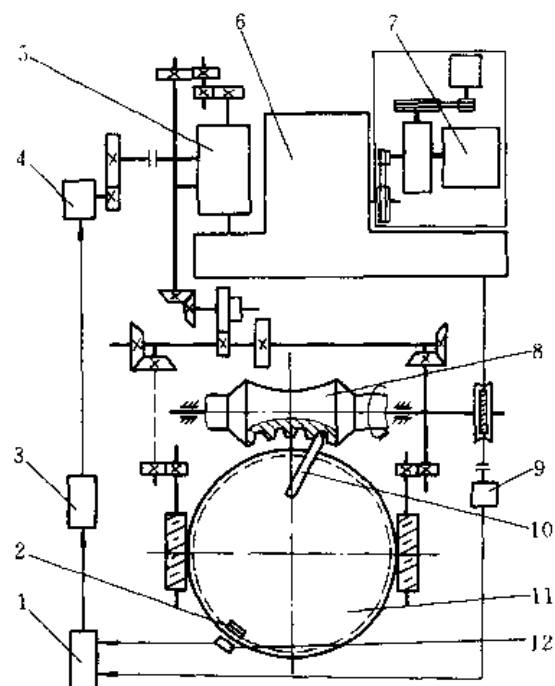


图 21.3-15 微处理机控制机床修形传动系统原理图  
1—微处理机 2—磁铁 3—驱动电源 4—步进电机  
5—机床差动机构 6—机床主传动系统 7—减速装置  
8—直廓环面蜗杆 9—光电脉冲发生器 10—蜗杆车刀 11—机床工作台 12—起动开关

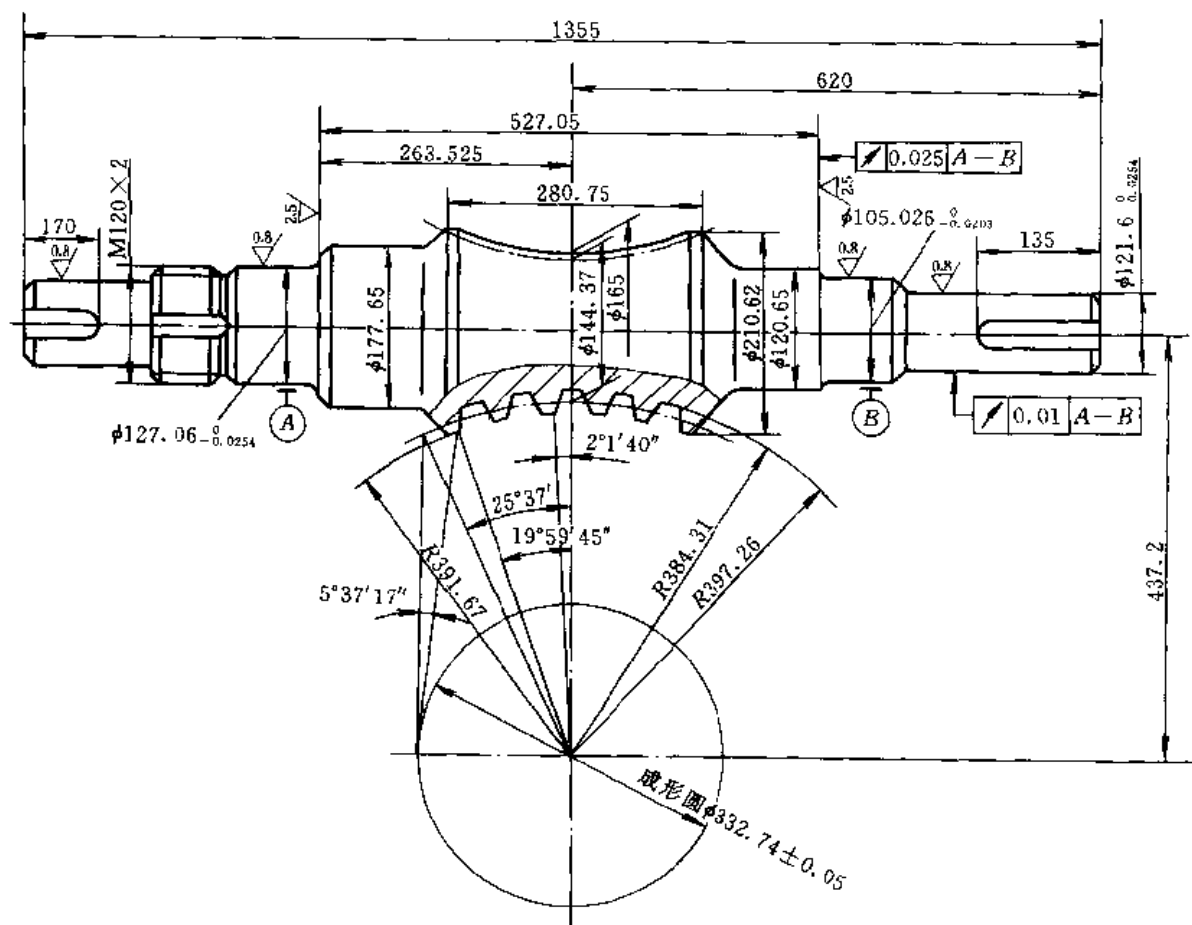


图 21.3-16 蜗杆零件图

表 21.3-4 啮合特性

1	蜗杆头数	$z_1$	6
2	蜗轮齿数	$z_2$	48
3	螺旋方向	—	右
4	螺旋升角	$\gamma$	$33^\circ 36' 11''$
5	蜗杆包围蜗轮齿数	$z'$	5
6	齿全高	$h$	22.61mm
7	齿距角	$\tau$	$7^\circ 30'$
8	精度等级	—	8
9	齿距极限偏差	$\pm f_{pt}$	$\pm 0.03\text{mm}$
10	齿距极限累积偏差	$\pm f_{p\Delta L}$	$\pm 0.06\text{mm}$

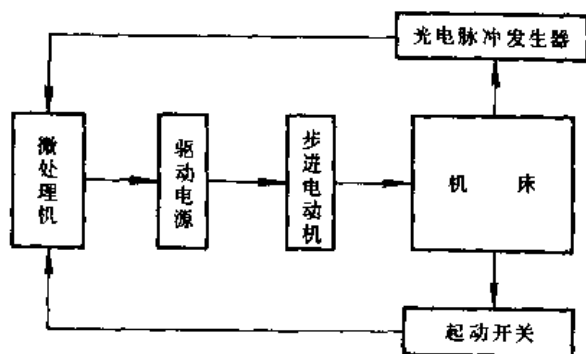


图 21.3-17 微处理机控制系统装置框图

GD-2 型光电脉冲发生器,是一个数模转换器。可安装在机床某一合适的传动轴上,将工件转动行程通过光电作用转换为电脉冲送入微处理机。此电脉冲的发生与蜗杆旋转运动是同步协调的,称为同步脉冲,起着控制系统运行与机床运动协调作用。

起动采用的是一只干簧管开关,用磁铁控制。开关装在靠近工作台床身上,而磁铁固定在工作台上并随之转动。当刀具随工作台运行到开始进入控制程序时,开关起动,发出程序起动信号,命令微处理机按程序执行工作。保证修形曲线的正确位置。

六头直展环面蜗杆全修形加工在 ND-5 立式滚齿机上进行。下面对其主要参数进行计算:

a. 蜗杆的分头 蜗杆的分头是通过微处理机控制系统,在滚齿机差动轴上的步进电动机输入一组与附加运动对应的脉冲,令工作台相对蜗杆快转或慢转一个齿距角而实现的。其步进电动机的脉冲数  $D_{\text{mm}}$  计算如下:

蜗杆分一个头需要旋转  $60^\circ$ ,工作台相应旋转  $60^\circ$

$\times \frac{1}{8} = 7.5^\circ$ ,工作台和步进电动机轴的速比  $i_s = 3840$ ,步进电动机的步距角  $\alpha_B = 0.75^\circ$ ,工作台旋转  $7.5^\circ$  时,步进电动机的脉冲为  $D_{\text{mm}} = \frac{75^\circ}{0.75^\circ} \times 3840 = 38400$  (脉冲)。由于计算脉冲为整数,在分头时不会有脉冲累积误差,控制系统对精度也没有影响。

b. 脉冲当量  $D$  的计算 步进电动机每走一步,步距角  $\alpha_B = 0.75^\circ$ ,工作台(刀刃)在分度圆  $d_2$  处相应走的弧齿就是脉冲当量  $D$ ,其计算公式为

$$D = \frac{\pi m z_2 \alpha_B}{360 i_s}$$

式中  $\alpha_B$ ——步进电动机齿距角( $^\circ$ );

$m$ ——蜗轮模数(mm);

$z_2$ ——蜗轮齿数;

$i_s$ ——步进电动机至工作台的速比,  $i_s = 1 \times \frac{180}{1}$

$$\times \frac{37}{37} \times \frac{29}{29} \times \frac{d \cdot b}{c \cdot a} \times \frac{38}{30} \times \frac{30}{38} \times \frac{1}{2} \times \frac{32}{1} \times \frac{80}{20} = 11520 \times \frac{d \cdot b}{c \cdot a}, \text{分齿交换齿轮 } \frac{a \cdot c}{b \cdot d}$$

$$= 3, \text{则 } i_s = 11520 \times \frac{1}{3} = 3840;$$

即

$$D = \frac{\pi \times 769.62 \times 0.75^\circ}{360^\circ \times 3840} \text{mm} = 0.013117581 \text{mm}$$

c. 程序角  $\alpha_f$  的计算

$$\alpha_f = \frac{360^\circ N_f z}{P N_q z_2 i_q}$$

式中  $N_f$ ——二进制计数器一个循环脉冲数,  $N_f = 512$ ;

$N_q$ ——光栅盘每一转发出的脉冲数,  $N_q = 500$ ;

$P$ ——变频倍数,有  $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$ ;取  $P = \frac{1}{2}$ ;

$z_1$ ——被加工蜗杆头数,  $z_1 = 6$ ;

$z_2$ ——与被加工蜗杆相啮合的蜗轮齿数,  $z_2 = 48$ ;

$i_q$ ——光栅盘至工件轴的传动速比,由 ND-5

$$\text{机床传动系统可知 } i_s = 1 \times \frac{72}{24} \times \frac{46}{23} \times \frac{35}{28} \times \frac{30}{27} \times \frac{70}{23} \times \frac{56}{28} = 50.72463764;$$

即

$$\alpha_f = \frac{512 \times 6 \times 360^\circ}{0.5 \times 500 \times 48 \times 50.72463764} = 1.816868572^\circ$$

d. 计算修形加工程序段数  $n$

$$n = \frac{2\alpha_f}{\alpha_f}$$

式中  $\alpha_p$  —— 蜗杆实际加工包容半角, 由工作图计算得:  $\alpha_p = 23.227825^\circ$ 。

即  $n = \frac{2 \times 23.227825^\circ}{1.816868572^\circ} = 25.569907567 \approx 26$

为了切削安全, 在入口进刀和出口退刀时, 各增加一段, 共为 28 段。

e. 程序进刀与退刀 蜗杆修形加工不是只切一次, 而是需要多次反复切削才能达到要求。为了使多次切削时修形曲线位置不变, 则采用切入进刀和切出退刀来保证。切入进刀是指当进入程序后, 还没有切削时, 按最大修形量将刀具进到相应位置。切出退刀是指在修形切削时, 每切完一次, 刀具退至原始位置 (如图 21.3-18 所示)。

计算切刀进入程序的位置:

$$L = R_f \sin \alpha_{\text{始}}$$

式中  $L$  —— 刀尖进入开始位置至蜗杆喉颈中心线的距离 (mm);

$R_f$  —— 蜗杆齿根圆半径 (mm);

$\alpha_{\text{始}}$  —— 切刀进入程序起始位置的切削刃与蜗杆喉颈中心线夹角 ( $^\circ$ )。

依据蜗杆修形曲线方程计算修形量和相应的脉冲数, 编制控制程序, 经调试后可存储在 FPR0M 可擦除

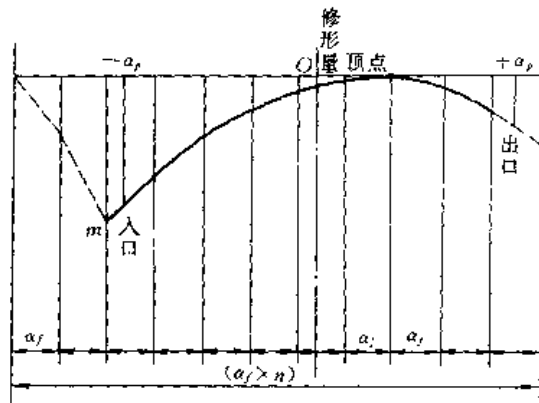


图 21.3-18 切入进刀与切出退刀示意图

编程只读存储器里, 对不同参数的蜗杆只需改变控制程序即可实现任意曲线的修形加工。

## 2. 综合对称修形加工

综合对称修形加工是利用加工时将原设计参数中心距  $a$ 、传动比  $i$ 、成形圆直径  $d_f$  改变为中心距  $a_p$ 、传动比  $i_p$  和成形圆直径  $d_{fp}$  的情况下加工出近似抛物线修形蜗杆的一种加工方法。该法与其他两种方法相比, 具有加工简单不需添置专用机构或数控装置的优点。

直廓环面蜗杆的对称修形调整计算见图 21.3-19 和表 21.3-5 所示。

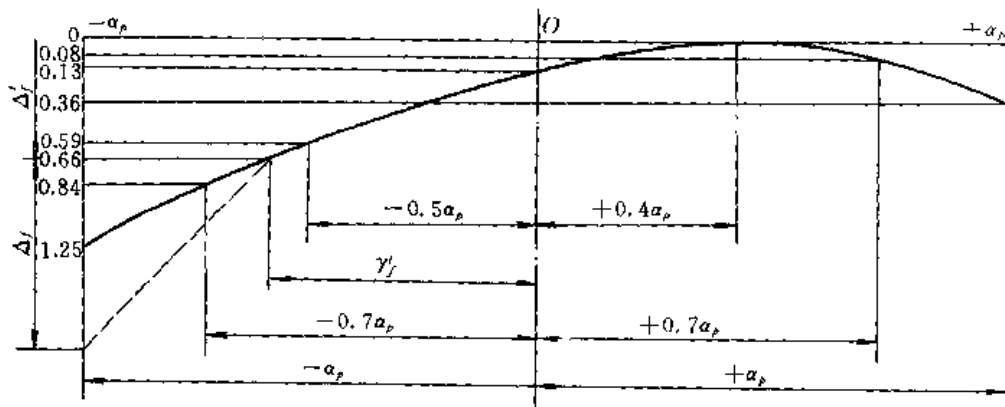


图 21.3-19 综合对称修形曲线

表 21.3-5 直廓环面蜗杆综合对称修形计算

序号	名称	公式和说明	例
1	中心距 (mm)	$a$	900mm
2	传动比	$i$	51/4
3	蜗杆头数	$z_1$	4
4	蜗轮齿数	$z_2$	51
5	蜗轮分度圆直径 (mm)	$d_2$	1424mm
6	蜗杆喉部计算齿厚 (mm)	$s_{n1}$	11.14mm
7	成形圆直径 (mm)	$d_b$	525mm
8	蜗杆包围蜗轮齿数	$z'$	6

按图样上的给定数值

(续)

序号	名 称		公式和说明	例 题	
9	蜗轮分度圆压力角(°)		$\alpha_c = \arcsin \frac{d_L}{d_2}$	21°38'3"	
10	齿距角(°)		$r = \frac{360^\circ}{z_2}$	7°3'32"	
11	蜗杆包围蜗轮的工作半角(°)		$\alpha_p = 0.5(z' - 0.45)r$	19°24'43"	
12	蜗杆齿入口修形量(mm)		$\Delta_f' = (0.0003 + 0.000034i)\alpha$	0.66mm	
13	计算传动比增量系数		$K = \frac{\Delta_f' \cos(0.4\alpha_p) + \frac{\alpha_0}{1.4\alpha_p \pi \cos(0.4\alpha_p + \alpha_0)/180^\circ} + \Delta_f' \cos \alpha_0}{0.5d_2 [\sin(0.4\alpha_p + \alpha_0) - \sin(\alpha_0 - \alpha_p)] - \alpha_0}$	0.0203244	
14	分度交换齿轮齿数比, (加工蜗杆用)		$i_\phi = \frac{i}{1-K}$ 尾数圆整到 $\pm \frac{1}{z_1}$ , 选取 $i_\phi$ , 单头蜗杆最好取较大整数	$\frac{53}{4}$	
15	精确传动比增量系数		$K_\phi = \frac{i_\phi - i}{i_\phi}$	0.0377358	
16	加工蜗杆用	中心距增量(mm)	$\Delta a = \frac{K_\phi d_2 \cos \alpha_0}{2[\cos(0.4\alpha_p + \alpha_0) - K_\phi \cos \alpha_0]}$	29.87mm	
17		蜗轮假想齿数	$z_{2\phi} = i_\phi z_1$	53	
18	蜗杆齿对称修形方程 (近似抛物线方程)		$\Delta_{f\phi} = \left\{ \frac{\Delta a}{\cos \alpha_0} [\sin \alpha_0 - \sin(\alpha_0 + \phi)] + K_\phi \phi \times \left( \Delta a + \frac{d_2}{2} \right) \right\} -$ $\left\{ \frac{\Delta a}{\cos \alpha_0} [\sin \alpha_0 - \sin(\alpha_0 + 0.4\alpha_p)] + 0.4\alpha_p K_\phi \left( \Delta a + \frac{d_2}{2} \right) \right\}$ 式中 1. $-\alpha_p \leq \phi \leq \alpha_p$ 代入方程 2. $K_\phi \phi$ 和 $0.4\alpha_p K_\phi$ 用弧度计 3. 绘出对称修形曲线	$-\alpha_p$	1.25
				$-0.7\alpha_p$	0.84
				$-0.5\alpha_p$	0.59
				0	0.13
				$0.4\alpha_p$	0
				$0.7\alpha_p$	0.08
				$\alpha_p$	0.36
19	蜗杆喉部测量齿厚(mm)		$s_\phi = s_{n1} - 2a\phi (\phi_0 = 0 \text{ 时})$	(39.88—0.1)mm	
20	修正成形圆直径(mm) (加工蜗杆用)		$d_{b\phi} = d_b + 2\Delta a \sin \alpha_0$	547.02mm	

如要求在上述修形曲线的基础上还要进行二次倒坡修形,其二次倒坡修形计算参数见倒坡修形加工。

### 3. 倒坡修形加工

倒坡修形加工是将“原始型”直廓环面蜗杆通过用改变中心距和蜗杆轴向位置的方法,分别在蜗杆螺旋齿面的进出口端切出倒坡而成。这种修形方法计算简单,但机床调整麻烦,两端出入口要调整四次机床,而且加工出的折线与理想的全修形曲线相差较大,见图 21.3-20。

由于目前已广泛采用综合对称修形,因此倒坡修形主要用于对称修形后进行的二次倒坡修形,其目的是预防装配时发生干涉和适当改善其润滑条件。倒坡修形调整计算如下:

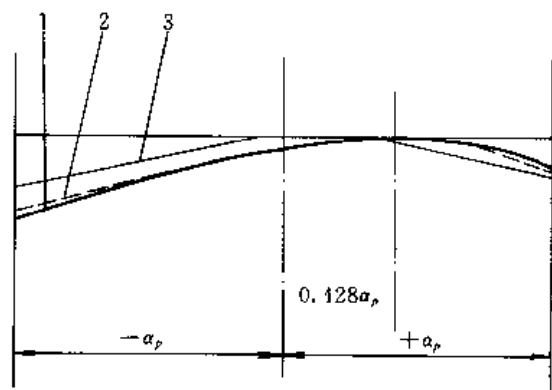


图 21.3-20 修形曲线的比较

1—全修形曲线 2—综合对称修形曲线

3—倒坡修形折线

1) 当图样以角度值表示倒坡尺寸时的倒坡修形调整计算, 见图 21.3-21 和表 21.3-6 所示。

2) 当图样以长度值表示倒坡尺寸时的倒坡修形调整计算, 见图 21.3-22 和表 21.3-7 所示。

### 3.1.9 蜗杆齿面的光整加工

蜗杆齿面进行光整加工是为了降低表面粗糙度数值。这对于提高蜗杆副的传动效率与支承能力, 以及对于延长使用寿命都有明显的效果。

抛光是一种实用有效的齿面光整加工方法。抛光过程采用柔性工具, 并且不需要精确的传动链。抛光可以在普通卧式车床上用小型磨头带动布轮加氧化铬抛光膏进行, 也可用毛毡条加抛光膏手工进行。

其他如研磨、研磨和磨齿等工艺方法, 由于从原理上提供不出形状完全正确的工具, 而只能用近似的圆锥形或平面形工具替代, 或多或少地引入了原理性误差, 所以目前这些方法应用较少。

### 3.2 直廓环面蜗杆副的蜗轮加工中的几个问题

直廓环面蜗杆副的蜗轮一般在滚齿机上加工, 其安装、调整和切齿等很多方面与切制普通蜗轮基本相

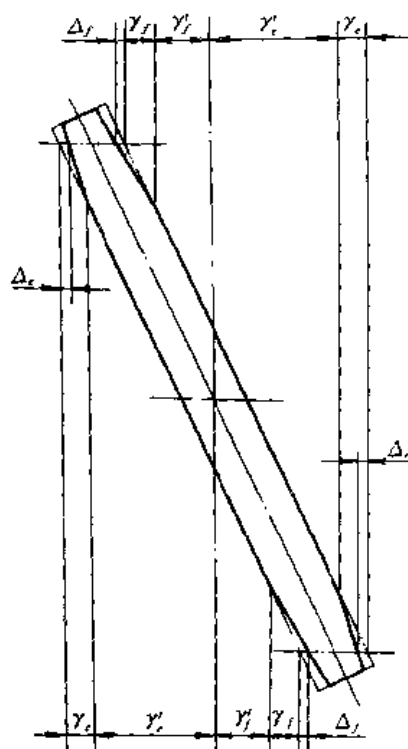


图 21.3-21 蜗杆螺旋齿展开图(以角度表示)

表 21.3-6 倒坡修形(以角度值表示的)调整计算

序号	名称	代号	公式和说明	实例
1	入口端倒坡值	$\Delta_f$	(按图样上的给定数值)	0.64mm
2	入口端倒坡角	$\gamma_f$		$14^{\circ}38'40''$
3	蜗杆工作部分入角	$\gamma'_f$		$4^{\circ}2'50''$
4	出口倒坡角	$\gamma_e$		$13^{\circ}51'1''$
5	蜗杆工作部分出角	$\gamma'_e$		$8^{\circ}11'30''$
6	出口端倒坡值	$\Delta_e$		0.32mm
7	成形圆直径	$d_b$		280mm
8	蜗轮分度圆直径	$d_2$		818mm
9	倒入口端 蜗杆轴向移动量	$\Delta M_1$	$\Delta M_1 = e_1 \sin \mu_1$ 式中 $e_1 = \frac{\Delta_f}{\sin \gamma_f}$ $\mu_1 = \alpha_0 - \gamma'_f$ 而 $\alpha_0 = \arcsin \frac{d_b}{d_2}$	0.69mm
	中心距增加值	$\Delta a_1$	$\Delta a_1 = e_1 \cos \mu_1$ 对于对称修形的二次倒坡, 中心距增加值 $\Delta a_1$ 是在中心距 $a + \Delta a$ 的基础上的增加值	2.43mm
10	倒出口端 蜗杆轴向移动量	$\Delta M_2$	$\Delta M_2 = e_2 \sin \mu_2$ 式中 $e_2 = \frac{\Delta_e}{\sin \gamma'_e}$ $\mu_2 = \alpha_0 + \gamma'_e$ 而 $\alpha_0 = \arcsin \frac{d_b}{d_2}$	0.63mm
	中心距减小值	$\Delta a_2$	$\Delta a_2 = e_2 \cos \mu_2$	1.18mm

(续)

序号	名称	代号	公式和说明	实例
8	中间计算值	$\theta_1$	$\theta_1 = \theta_0 - \delta_1$	$19^{\circ}58'35''$
		$\theta_2$	$\theta_2 = \theta_0 - \delta_2$	$6^{\circ}34'10''$
		$\theta_3$	$\theta_3 = \theta_0 + \delta_3$	$37^{\circ}18'31''$
		$\theta_4$	$\theta_4 = \theta_0 + \delta_4$	$39^{\circ}14'04''$
9	倒入口端 中心距增大值	$\Delta a_1$	$\Delta a_1 = \frac{\Delta_f}{\sin \theta_1' - \sin \theta_2'}$	1.45mm
	轴向移动距离	$\Delta M_1$	$\Delta M_1 = \Delta a_1 \tan \theta_1'$	0.53mm
10	倒出口端 中心距减小值	$\Delta a_2$	$\Delta a_2 = \frac{\Delta_r}{\sin \theta_4' - \sin \theta_3'}$	6.82mm
	轴向移动距离	$\Delta M_2$	$\Delta M_2 = \Delta a_2 \tan \theta_3'$	5.2mm

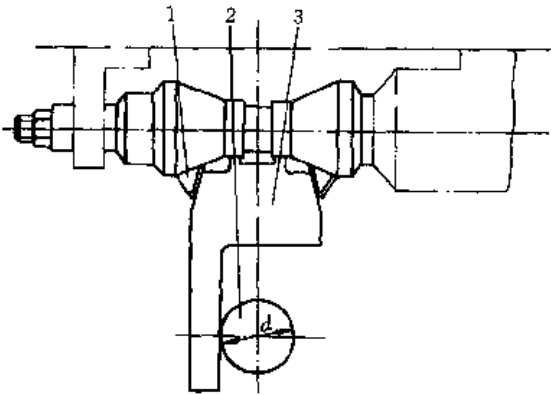


图 21.3-23 样板对刀法  
1—蜗轮飞刀 2—心轴 3—对刀样板

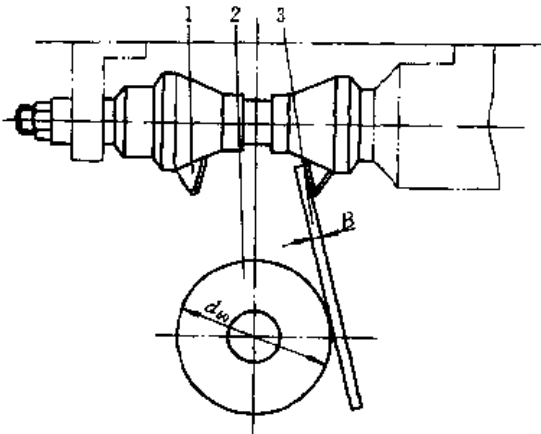


图 21.3-24 对刀尺法  
1—蜗轮飞刀 2—对刀圆盘 3—对刀尺

蜗轮剃齿刀一般制造过程同工作蜗杆一样,只是在螺旋齿面上开出很多的切削槽。它是理想的精加工刀具,但这种剃齿刀制造困难,成本高,现只用于高精度直廓环面蜗杆副蜗轮的加工。

2. 蜗轮刀具的安装调整

蜗轮刀具的安装调整(如径向跳动、水平、刀轴与蜗轮中间平面重合等)与直廓环面蜗杆加工的调整要求相同。因蜗轮加工通常采用飞刀加工,所以这里主要介绍蜗轮用飞刀加工时如何保证切削刃延长线始终与成形圆相切的几种找正方法:

(1) 样板对刀法 样板对刀法是用对刀样板和心轴进行对刀(如图 21.3-23),这种方法通常用于中心距较小的直廓环面蜗轮的加工。

(2) 对刀尺法 对刀尺法是用对刀圆盘和对刀尺进行对刀(如图 21.3-24),这种方法主要用于模数较大、切削刃伸出长度较长的环面蜗轮的加工。

(3) 刮刀花法 刮刀花法是在轮坯找正夹紧后,以飞刀刀尖对刀(参见图 21.3-25)。这种对刀法要求刀尖伸出的长度相等。在小批量生产时,当工序中间需要换刀而蜗轮夹具又没有定心心轴时,该法更显出其独特优点。

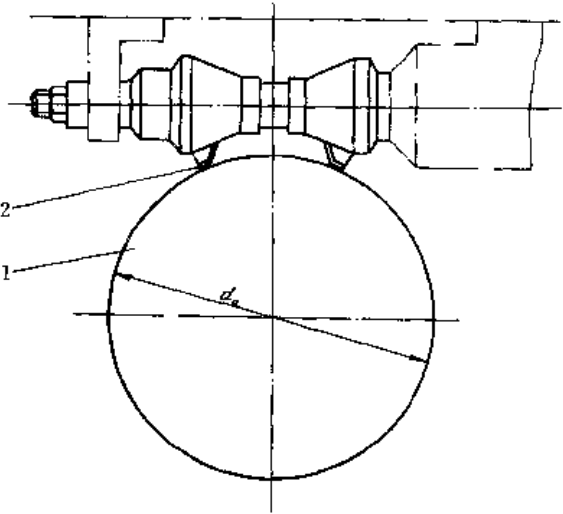


图 21.3-25 刮刀花法  
1—蜗轮坯外圆 2—蜗轮飞刀刀尖

蜗杆的轴向调整是在蜗轮轴向位置调整的同时进行的,也是由直廓环面蜗杆副的接触印痕分布情况来判断,确定蜗杆应向哪个方向移动,直至接触情况达到要求为止。此时再考虑间隙要求,确定调整垫或端盖的最后尺寸。

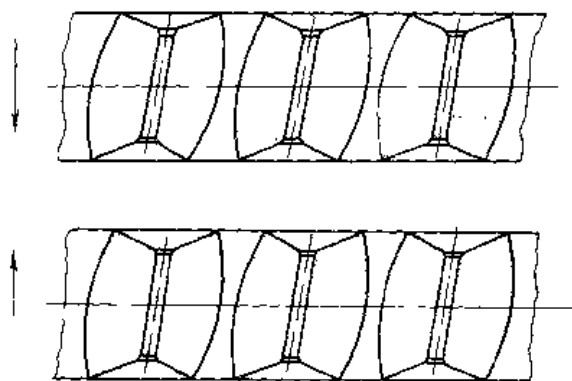


图 21.3-27 接触印痕及调整方向

## 2. 根据接触区位置确定蜗杆的轴向调整方向

(1) 蜗杆上的接触区偏在一端 蜗杆上的接触印痕偏在一端(可能是入口处,也可能是出口处),而且沿蜗杆的齿高上接触不是均匀分布的,此时蜗杆应按图 21.3-28 所示的箭头方向移动,直至啮合齿两面接触部位距中间喉颈距离相等为止。这里应该注意的是,在蜗杆副装配时(未加正常载荷),初期的接触印痕应稍偏向入口端。

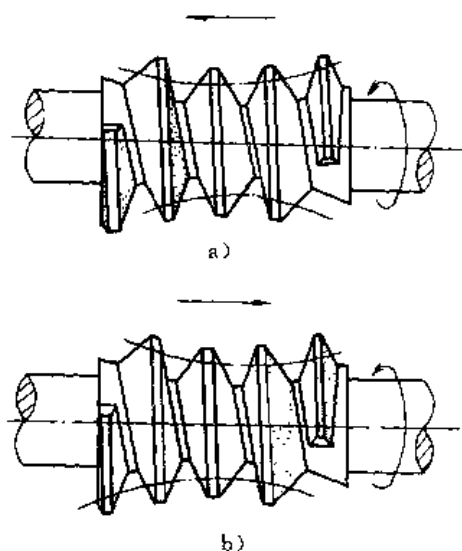


图 21.3-28 蜗杆上的接触印痕及其调整方向

a) 偏向入口 b) 偏向出口

(2) 蜗杆上的接触印痕呈吊角分布 如蜗杆采用倒坡修形加工,装配时蜗杆的一侧齿面齿顶与蜗轮的齿根接触,而另一侧齿面的齿根与蜗轮的齿顶接触,此

时蜗杆应按图 21.3-29 的箭头方向作轴向移动,直至两侧内面齿高都接触为止。

如蜗杆采用综合对称修形,装配时,其接触印痕应以蜗杆成形圆中心线为基准对称分布,否则蜗杆应向接触面积小的一边移动。

(3) 蜗杆齿呈齿顶接触 当蜗杆采用倒坡修形加工时,如果直廓环面蜗杆副中心距稍小,仅在蜗杆齿顶和蜗轮齿根有接触痕迹,这种情况是可用的,如果直廓环面蜗杆副中心距过小,仅在蜗杆的出口处有接触痕迹,而在入口处及标准齿部分没有接触痕迹,见图 21.3-30,这种情况一般是无法挽救的。

当蜗杆采用对称修形加工时,由于制造时中心距变化量的误差比齿形误差要小得多,同时齿形误差使齿在出口处偏肥,所以蜗杆表现在齿顶接触。

(4) 蜗杆齿呈齿根接触 当蜗杆采用倒坡修形加工时,如果直廓环面蜗杆副中心距稍大,仅在蜗杆齿根和蜗轮齿顶有接触痕迹,这种情况可用。如果直廓环面蜗杆副中心距过大,仅在蜗杆的入口处有接触痕迹,而在出口处及标准齿部分都没有接触痕迹,这种情况一般也是无法挽救的(图 21.3-31 所示)。

## 4.1.3 直廓环面蜗杆副的正确接触位置

如蜗杆是采用倒坡修形的,蜗杆、蜗轮位置调整后,其正确接触痕迹在蜗轮齿上的分布如图 21.3-32 所示,为在齿全高偏入口处线接触。

如蜗杆是采用综合对称修形的,蜗杆、蜗轮位置调整后,其正确接触痕迹在蜗轮齿上的分布如图 21.3-33 所示,为在齿根偏入口处小三角接触。

## 4.2 直廓环面蜗杆副的研齿

### 4.2.1 研磨膏的选择及研齿方法

目前较常使用的是 M10、M14、M20 氧化铬( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )研磨膏,适当加温与煤油混合使之呈粥状,涂刷到工件上时基本不向下流即可。

研齿过程中蜗轮轴应加一定的负载,约为  $100 \sim 500 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。加载的方法,可用螺栓和木方夹住蜗轮轴端部,再用箱体上的螺孔穿入大螺栓压住木方。研磨剂涂到蜗轮齿上后先转动一周,用肉眼能看到明显的接触痕迹时,便可开始加载。一般情况下,粗研应重载低速,精研应轻载高速。

开始研齿时,研磨剂应稀而薄,加载可较大;待研到一定程度时,加载要适当减小,研磨剂也要稠些,这样做可以较快地达到接触痕迹要求。要注意的是研齿时不能漏涂一齿,以免齿面研伤。另外,要始终保持研磨剂稀而薄,若发现齿面上的研磨剂已发黑,就要用煤油刷掉,再涂刷上新的研磨剂。



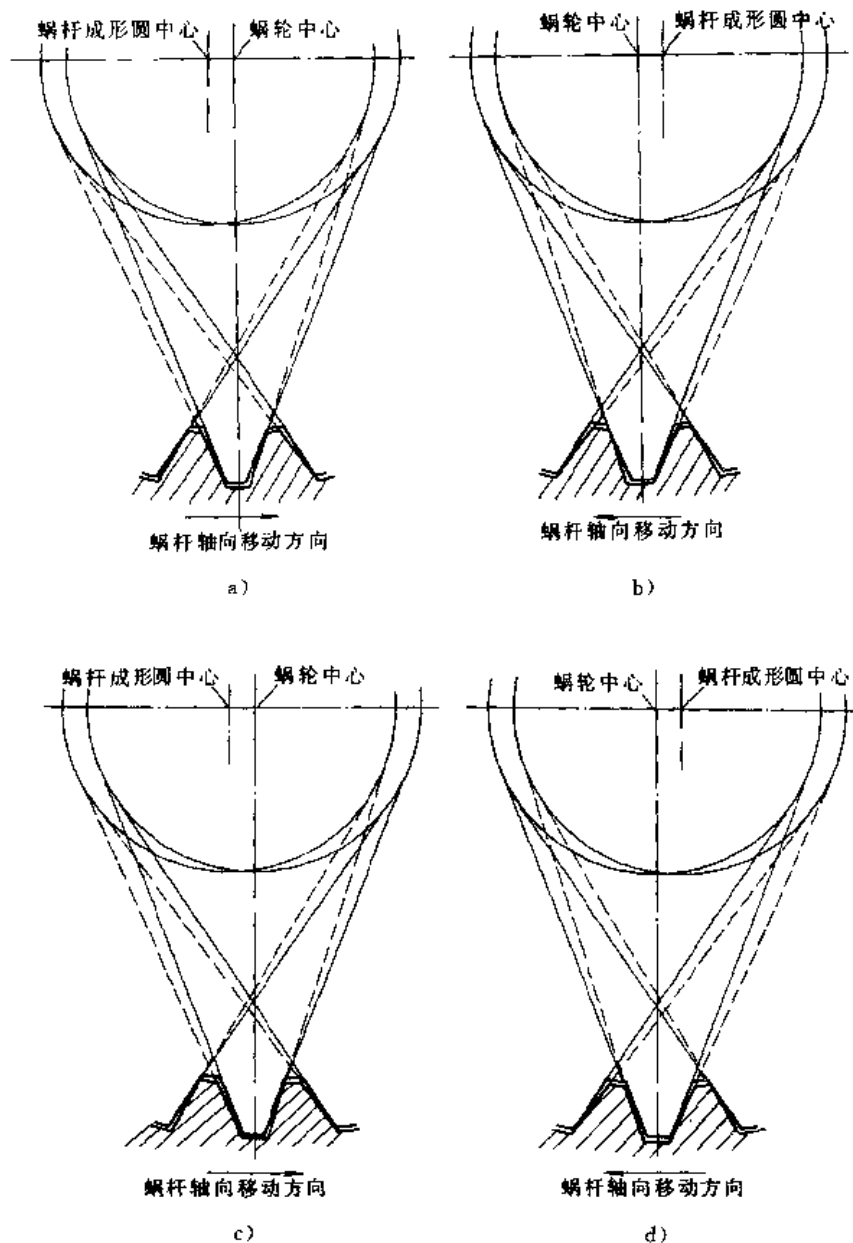


图 21.3-29 蜗杆齿接触印痕呈吊角分布时的调整方法

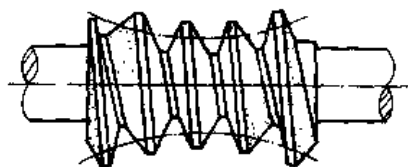


图 21.3-30 在蜗杆的齿顶接触



图 21.3-31 在蜗杆的齿根接触

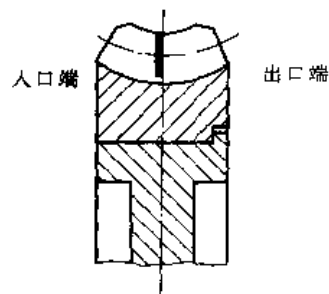


图 21.3-32 蜗杆采用倒坡修形时蜗轮齿的正确接触位置

#### 4.2.2 研伤的原因及处理方法

(1) 研伤的原因 在研齿过程中如果研磨剂涂得

干而厚,则润滑作用差便易研伤。如果有的齿没有涂上研磨剂,就等于没有润滑作用,而成为一对轮齿之间的干摩擦,则更易研伤。如研磨剂中有硬杂质或齿面存有毛刺、划伤也能导致齿面研伤。

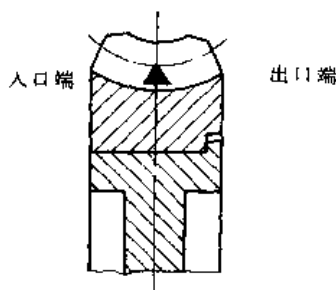


图 21.3-33 蜗杆采用综合对称修形时  
蜗轮齿的正确接触位置

生产实践证明,研齿前蜗杆齿面的表面粗糙度值越小,越不易研伤,而且研齿效果也好。研齿前蜗杆齿面抛光到  $R_a 0.8 \mu\text{m}$  为佳。

(2) 处理方法 当研齿过程中出现研伤情况时,应用油石将蜗杆上的伤痕处磨光,再重新研齿。

#### 4.2.3 研齿后的正确接触痕迹

##### 1. 倒坡修形直廓环面蜗杆副的正确接触痕迹

(1) 蜗杆齿双面经研齿后,仅在喉颈标准齿全高上有接触痕迹,应经过修正倒油涵的部分齿直至没有接触痕迹,如图 21.3-34 所示。

(2) 蜗轮经双面研齿后,接触痕迹应分布在齿的全高并偏入口处,为齿长的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ , 如图 21.3-35 所示。

##### 2. 综合对称修形直廓环面蜗杆副的正确接触痕迹

(1) 蜗杆经双面研齿后,仅在  $0.4a_p$  处齿全高并偏出口处有痕迹,喉颈及其余部分齿没有接触痕迹,如图 21.3-36 所示。

(2) 蜗轮经双面研齿后,接触痕迹应分布在齿全高并偏入口处。

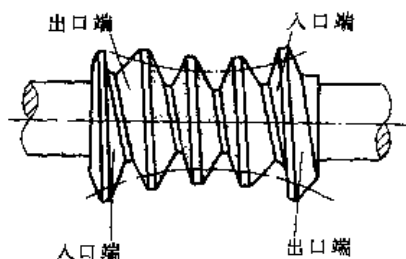


图 21.3-34 倒坡修形直廓环面蜗杆  
研齿后的接触痕迹

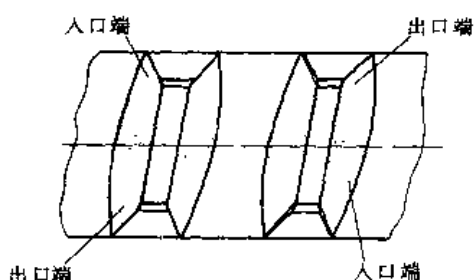


图 21.3-35 蜗杆倒坡修形时研齿后  
蜗轮齿的接触痕迹

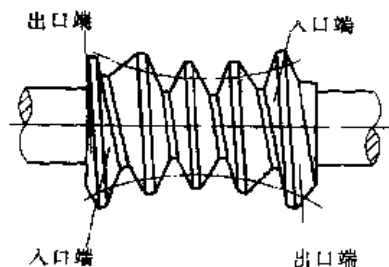


图 21.3-36 综合对称修形直廓环  
面蜗杆研齿后的接触痕迹

## 第4章 平面包络环面蜗杆、蜗轮加工

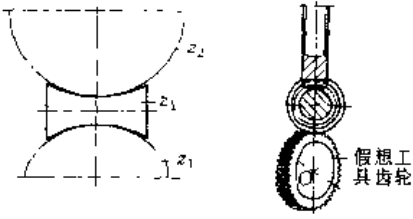
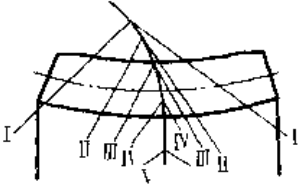
### 1 传动的种类及形成原理

若有一蜗杆蜗轮传动,其蜗轮齿面为平面(一般为斜平面,其端面及法向齿廓为直线),相应的蜗杆齿面原理上由该蜗轮齿平面在与蜗杆所作的共轭啮合运动中包络形成,则称这种蜗杆为平面包络环面蜗杆,

称这种传动为平面一次包络环面蜗杆传动或平面齿蜗轮包络蜗杆传动。

若有一环面蜗杆传动,其蜗杆为平面包络环面蜗杆,相应的蜗轮工作齿面由该蜗杆齿面作共轭啮合运动包络形成,则称这种蜗杆传动为平面二次包络环面蜗杆传动。

(续)

传动名称	形成方法	形成原理	条件	接触线
平面二次包络间接展成原始型传动	二次包络特定间接展成法		蜗轮≠工具齿轮 $i_0 = z \cos \gamma' - \sin \gamma'$ $a_0 = a \cos^2 \gamma'$ $\gamma' = \arccos \left( \frac{i_0}{\sqrt{1+i^2}} \right) - \arctan \left( \frac{1}{i} \right)$ $\beta = 0^\circ$	

## 2 蜗杆的加工

### 2.1 蜗杆齿面加工的要害

1) 这种蜗杆的最大加工特点在于它属于展成法加工。蜗杆齿面由蜗杆与工具齿轮齿面啮合时产生的一系列直线接触线所构成,这些直线切于一条脊线(即界限曲线),该齿面也是此脊线的切线曲面。这种齿面是一种可展曲面,见图 21.4-1。

2) 随着传动设计参数,尤其是工具齿轮平面倾角  $\beta$  值的不同,接触线的分布可以发生很大的变化(见图 21.4-2),因此加工时,要先了解该蜗杆的工具齿轮齿面上接触线的分布,并调整砂轮,使砂轮平面覆盖所有接触线。

3) 这种蜗杆与普通环面蜗杆相比,轴截面内的齿厚沿整条螺旋线长度分布,见图 21.4-3。看来,这似乎形成了自然修形,但这却是啮合形成正确齿面的必然

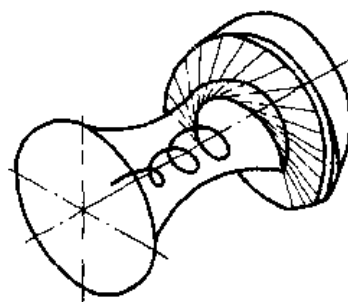


图 21.4-1 平面包络环面蜗杆的螺旋面

结果,并不意味着这种蜗杆的入口、出口端的磨削余量比中间大。只是当用切削普通环面蜗杆的方法粗切这种蜗杆并进行磨削时,将产生首、末出现火花而中间没有火花的现象。对于大型蜗杆的磨削,首、末端的这种相对差别会相当大,因此要考虑采用磨削余量均化的措施,这可以通过特殊的切削方法或增加粗磨工序来解决。

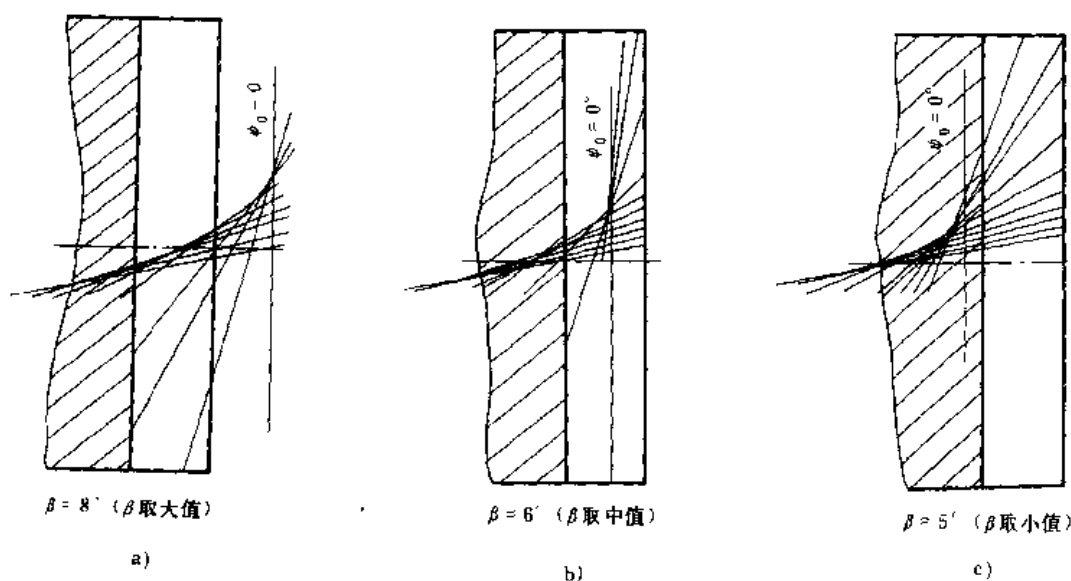


图 21.4-2 工具齿轮平面倾角  $\beta$  对接触线之影响

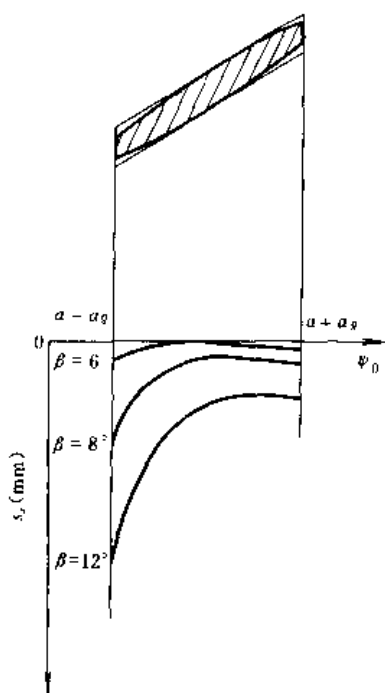


图 21.4-3 平面包络环面蜗杆轴截面齿厚分布

## 2.2 蜗杆齿面的一般加工方法

在上面介绍的四种平面包络环面蜗杆中,加工方法没有本质区别,根据目前实际应用情况,本节着重介绍这种蜗杆齿面的一般加工方法。

### 2.2.1 加工用的机床

(1) 对机床的要求 平面包络环面蜗杆的加工因属展成法加工,其制造精度与机床、刀具的自身精度和加工过程的调整操作密切相关。因此机床选择得当和精度可靠是保证蜗杆精度的重要前提之一。

选择或设计蜗杆加工机床时,必须考虑:

1) 机床必须能提供在两个内在联系的交错轴(通常以垂直交错居多)之间的对滚运动,以实现工具齿轮与被切蜗杆的展成啮合过程,并且具有能加工优于6级精度齿轮的运动精度。

2) 必须具备使工具齿轮能作圆周进给的差动机构,进给量最小可达0.01mm。

3) 工具齿轮能作径向进给,最小进给量为0.05mm。

4) 要求机床分度链能达到1/5的最小减速比,以满足各种常用传动比蜗杆的加工要求。

5) 如果蜗杆及滚刀的切削与磨削加工采用同一机床时,机床主轴应有较大的调速范围,最低转速甚至可达0.1r/min。

6) 为了能进行车铣加工,机床必须具有足够的刚

性。

7) 机床要便于蜗杆的装卸。

(2) 机床的实际选择 由于上述要求与直廓环面蜗杆加工时基本相同,机床选用也十分相近,实际选用如下:

1) 对于大批生产,应根据能同时完成切槽、切齿、磨齿等多种工序设计制造专用机床。

2) 对于一般情况,最好将滚齿机加以改装。

3) 对于只加工典型和变型传动的蜗杆的情况,可设计制造车床式的专用加工机床。

使用普通车床改装化费较大,不易保证要求的精度,一般适用于粗切齿槽。

(3) 滚齿机改装 普通滚齿机已经具备加工这种蜗杆的一切机构和功能,但其滚刀主轴转速偏高;刀架的结构也常常不能满足蜗杆直径和长度方面的要求,并且装卸工件不方便。因此需作相应的改装。

1) 为了在普通滚齿机上铣削和磨削蜗杆,必须大大降低机床主轴的转速,为此可在电动机至机床主传动之间,串入一减速器,又为了使机床工作台在非工作行程时转速不致过低,须越过串入的减速器,另外安装一台电动机,以便通过超越离合器  $M_2$  将较高转速直接输入机床的主传动中。图21.4-4所示为Y31125E滚齿机主传动改装的原理图。改装前后滚齿机刀杆的转速见表21.4-2。

2) 为了在普通滚齿机上加工直径与长度较大的蜗杆,以及为了便于装卸工件,必须重新设计与制造专用的刀架。通常是把刀架加长,把主轴向外移,在滚刀轴的头部加装卡盘,另一端装上顶尖。

刀架改装设计时,目的在于充分利用机床的功能,尽量扩大它的适用范围,但也要充分注意改装后刀架还应保留适当的刚性。

这种刀架改装后,仍然可以用于加工齿轮,只是刚性相对较差。

(4) 环面蜗杆专用车床 这是一种既像卧式滚齿机,又像车床的加工环面蜗杆的专用机床。使用车床进行改装是过去常用的方法之一。但由于车床功能与环面蜗杆加工机床的要求差距很大,改装时丢弃的部件太多,需增加的零部件又不少。因此近年来倾向于设计专用车床。图21.4-5是这种机床传动原理的一例。

### 2.2.2 磨具与刀具

(1) 磨具 根据平面包络环面蜗杆的形成原理,它的齿面应由一平面齿工具齿轮展成。通常以磨削作为这种蜗杆齿面的最终成形加工方法。此时所用的磨具是关键。在磨削蜗杆时,砂轮平面作为展成蜗杆的工具齿轮的一侧齿面起作用。磨具的设计以及在机床上

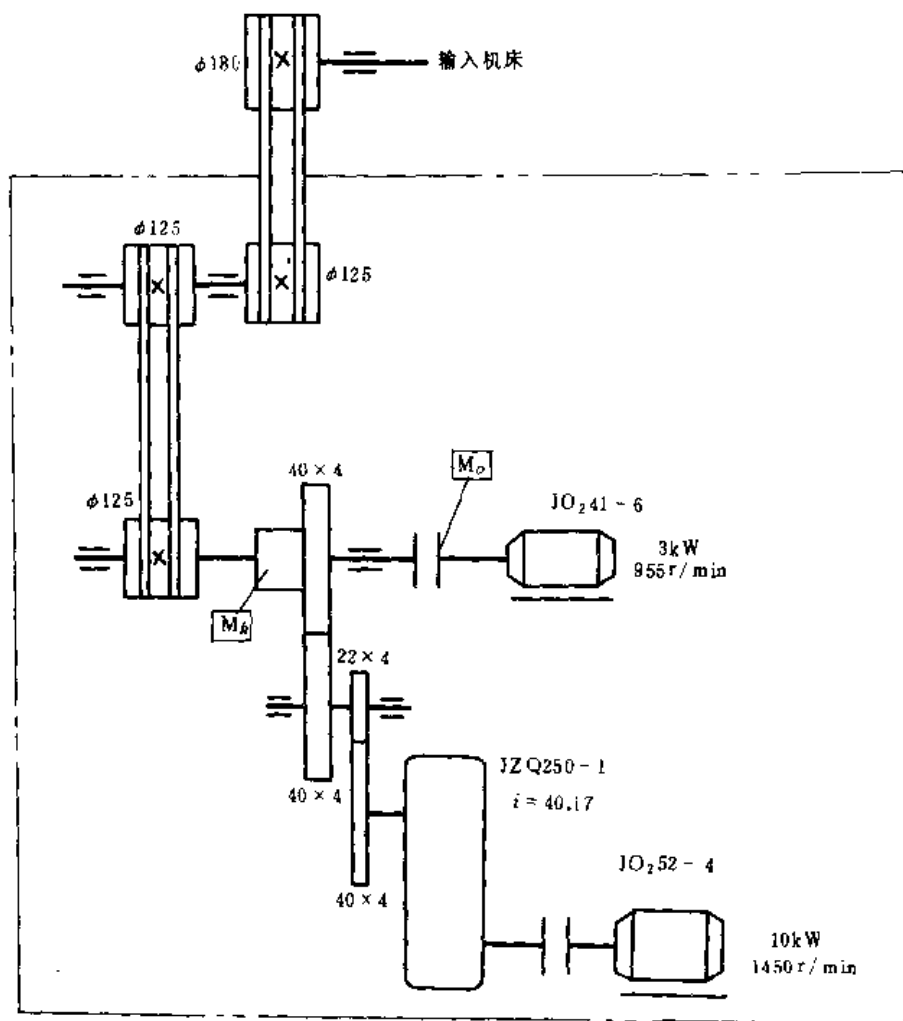


图 21.4-4 滚齿机主传动减速原理

表 21.4-2 Y31125E 滚齿机改装前后主轴转速

(r/min)

A/B		$\frac{22}{62}$	$\frac{28}{56}$	$\frac{35}{49}$	$\frac{42}{42}$	$\frac{49}{35}$	$\frac{56}{28}$	$\frac{62}{22}$
改装后	第一档	0.72	1	1.4	2	2.9	4	5.7
	第二档	0.21	0.3	0.43	0.61	0.86	1.2	1.7
改装前		16	22.4	31.5	45	63	90	125

的安装调整都应以此为依据。图 21.4-6 为目前应用最多的一种磨具结构原理图。该磨具由主轴、切向滑轨、基准圆盘、支座、径向滑轨等五部分组成。它具有结构简单、适应性强、调整方便等优点。

(2) 刀具 为了提高生产率,蜗杆在磨削之前,必须先粗切出齿面,粗切齿面使用的刀具主要有车刀盘和锥形指状铣刀两种。

1) 蜗杆齿面理论上应由一平面齿形的工具齿轮展成,因此车刀应是直刃的,而且切削刃直线应位于假想工具齿轮齿平面的啮合区内。为了改善切削性能和效率,车刀置于假想的工具齿轮的主平面中,即刀头直刃所代表的直线与蜗杆齿形圆相切,而切削过程切削刃并不沿假想齿平面移动。因此,粗切蜗杆所使用的车刀及其安装方式实际上与切削普通直线齿环面蜗杆时

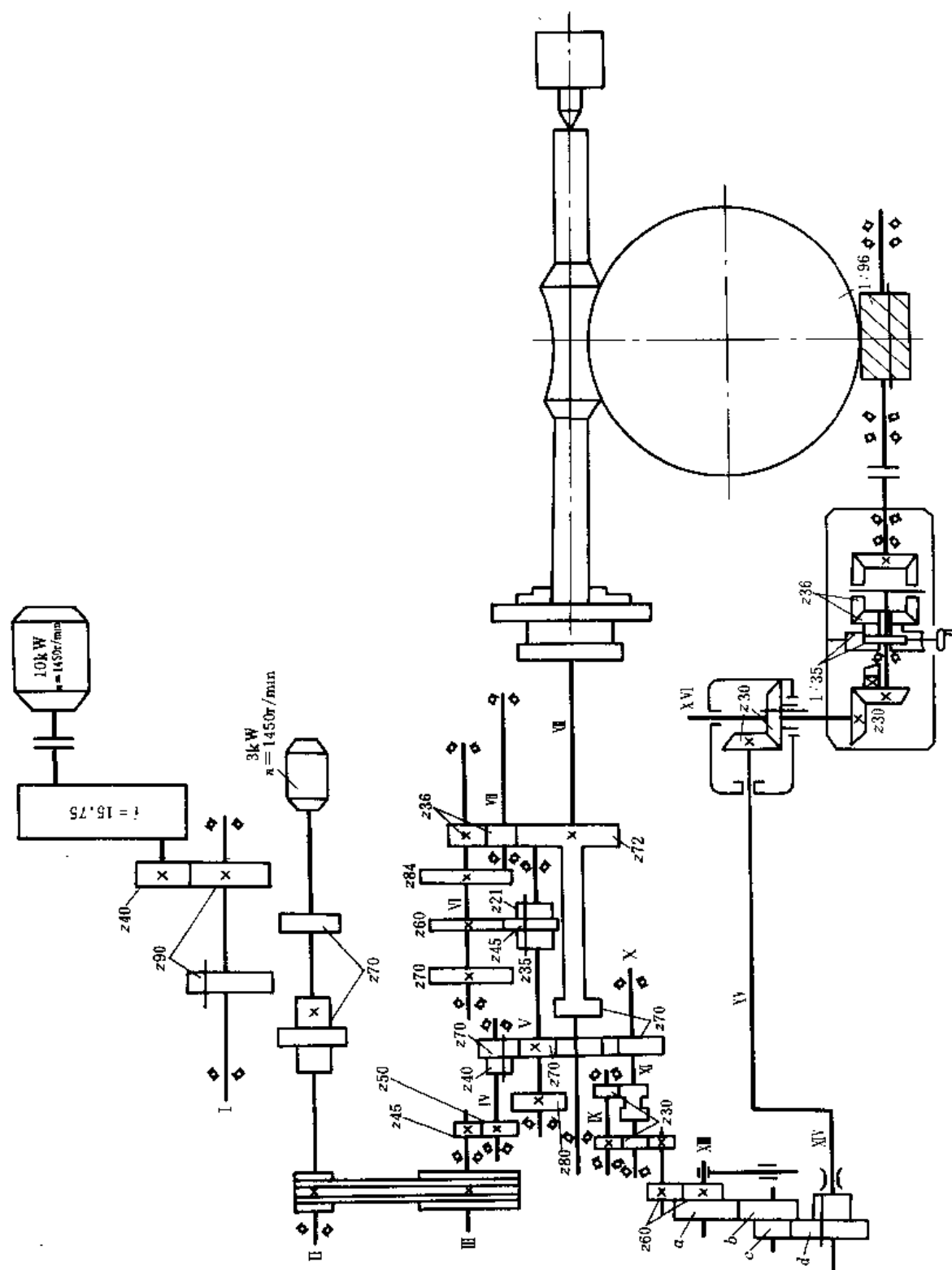


图 21-45 环面蜗杆车床传动原理图

相同,不同的只是由于作为粗加工,对刀具的安装精度要求稍低。

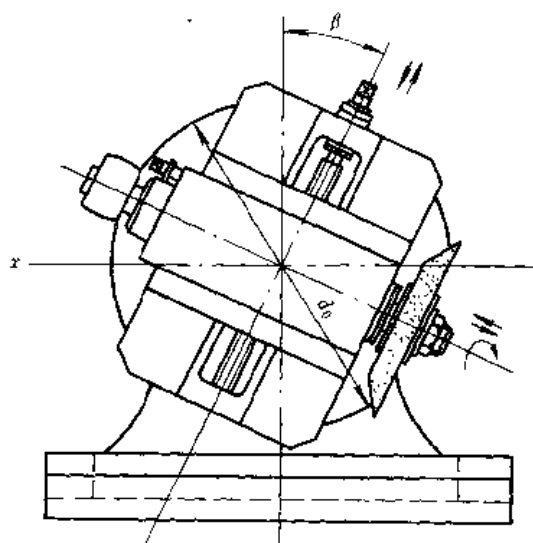


图 21.4-6 加工蜗杆的磨具结构原理图

2) 对于尺寸较大的蜗杆,为提高精切加工效率,可采用铣削加工。根据这种蜗杆的形成原理,采用单角度盘状铣刀的平面铣削,完全符合蜗杆的形成原理,加工以后所留的磨削余量均匀,是比较理想的粗加工方案。但由于这种铣头的振动问题不易解决,所以目前生产中实际采用的还是锥形指状铣刀。铣刀的半锥角可近似取作等于蜗杆工具齿轮的法向压力角,其直径 $d_0$ 等于工具齿轮轮齿法向弦齿厚 $\bar{s}_n$ 及蜗杆喉部两倍单面精加工余量 $\Delta$ 之和;

$$d_0 = \bar{s}_n + 2\Delta$$

铣刀的切削速度: $v = 10 \sim 20 \text{ m/min}$ ;蜗杆的转速: $n_1 = 1/15 \sim 1/150 \text{ r/min}$ 。

精加工余量 $\Delta$ 因蜗杆的模数及热处理方式而异,模数小或采用氮化处理时的 $\Delta$ 较小,模数大或采用渗碳淬火处理时, $\Delta$ 较大。但 $\Delta_{\min} \geq 0.2 \text{ mm}$ 。

图 21.4-7 所示为采用锥形指状铣刀粗切蜗杆的通用铣头;所用铣刀的典型工作图见图 21.4-8。

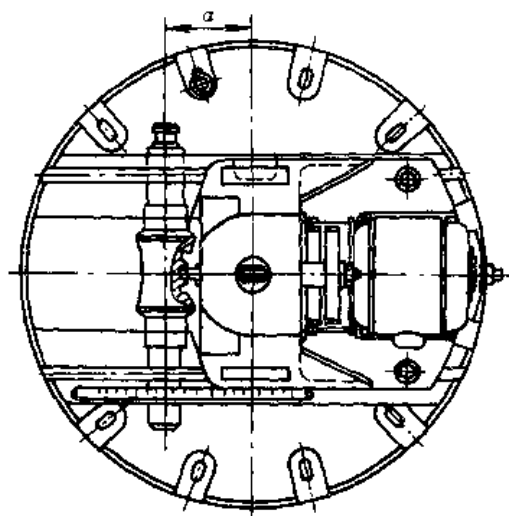


图 21.4-7 粗切蜗杆的通用铣头

### 2.2.3 蜗杆齿面的加工步骤

图 21.4-9 所示为这种蜗杆的零件图一例。

蜗杆基本属于轴类零件,齿面以外部分的加工,都属于一般轴类零件的加工。蜗杆的加工大致分三个阶段,见表 21.4-3。

蜗杆精加工阶段的磨齿是制造平面包络环面蜗杆的一道极其重要的工序。磨齿质量的高低,直接影响到传动副的安装和使用性能。在这道工序中,除了要得到一定厚度的齿形外,还要保证齿距精度、齿面粗糙度等项技术要求。其工作步骤为:

1) 蜗杆齿顶圆弧中心的找正。

2) 调整磨头(见图 21.4-6)。

3) 磨削齿面。磨削单头蜗杆时,先磨一侧齿面,然后调转磨头磨另一侧齿面。磨多头蜗杆时,应把每条螺纹的侧面磨削完后再进给,以保证每条螺纹齿厚均匀。最后一次进给磨削以后,要反复磨两三遍。磨削时采用

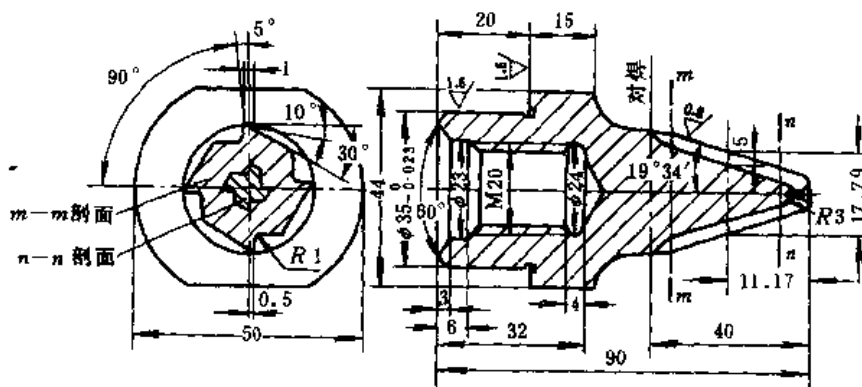


图 21.4-8 粗切蜗杆用的指状锥形铣刀工作图

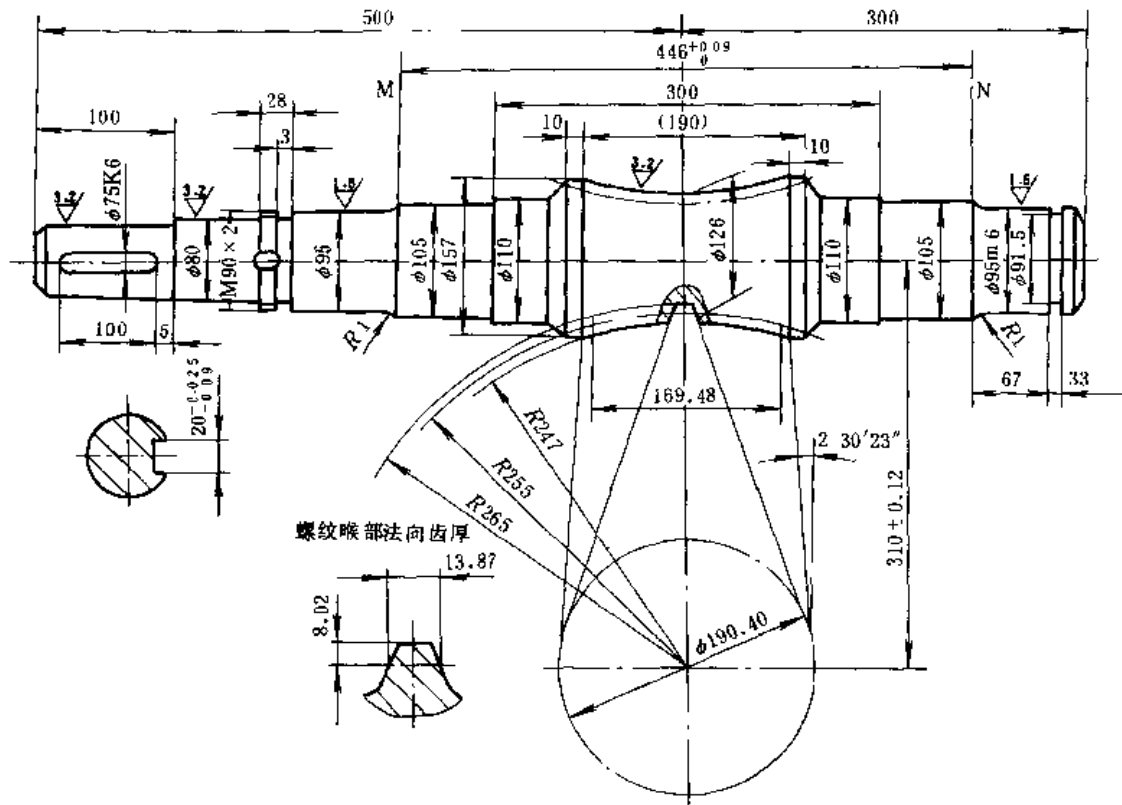


图 21.4-9 蜗杆零件图

(模数  $m=10\text{mm}$ ; 蜗杆齿数  $z_1=1$ ; 蜗轮齿数  $z_2=51$ ; 右旋; 喉部导程角  $\gamma=5^\circ11'40''$ ;  
全齿高  $h=18$  包围蜗轮 齿数  $n=6$ , 母平面倾角  $\beta=8^\circ18'$ )

的砂轮,其磨料成分为氧化铝或碳化硅,形状为 PX 形、中软、粒度  $40^\# \sim 80^\#$ 。中心距  $300\text{mm}$  以下的蜗杆,采用的砂轮直径为  $100 \sim 150\text{mm}$ ;中心距  $300 \sim 600\text{mm}$  时,砂轮直径为  $200 \sim 250\text{mm}$ ;磨削时圆周进给量为  $0.01 \sim 0.03\text{mm}$ ,工件转速一般为  $4 \sim 10\text{r/min}$ 。

表 21.4-3 蜗杆加工主要工序

项 目	工 序 内 容
毛坯制造阶段	钳工划线平均留件余量,右端打 $60^\circ$ 中心孔。粗车毛坯、超声探伤、调质处理
粗加工阶段	车全部外圆,粗磨有关外圆及端面、车齿部螺纹。半精磨齿面(对模数较大的蜗杆)、钳修并去除两端不完整螺纹、氮化或淬火处理
精加工阶段	精磨有关外圆及端面、精磨齿面(或加抛光)使零件完全达到零件图规定的尺寸精度和表面粗糙度

### 3 蜗轮的加工

#### 3.1 斜平面齿蜗轮的加工

##### 3.1.1 机床及刀具

斜平面齿蜗轮最好在滚齿机上铣削。铣齿时采用单齿分度径向进给。使用一对单角度盘铣刀,铣刀安放在滚刀架的刀轴上。图 21.4-10 所示为斜平面齿蜗轮零件图。铣刀结构见图 21.4-11。

##### 3.1.2 蜗轮齿的加工

(1) 工艺基准的找正和调整 这种蜗轮齿面的加工,是一种成形加工,两铣刀之间距离的误差与滚刀架倾斜角度的误差,直接影响蜗轮齿面的精度,因此,加工前必须进行如下调整:

1) 测量刀轴端面圆跳动与径向圆跳动。端面圆跳动量应调整到不大于  $0.01 \sim 0.02\text{mm}$ ,径向圆跳动量不大于  $0.05\text{mm}$ 。



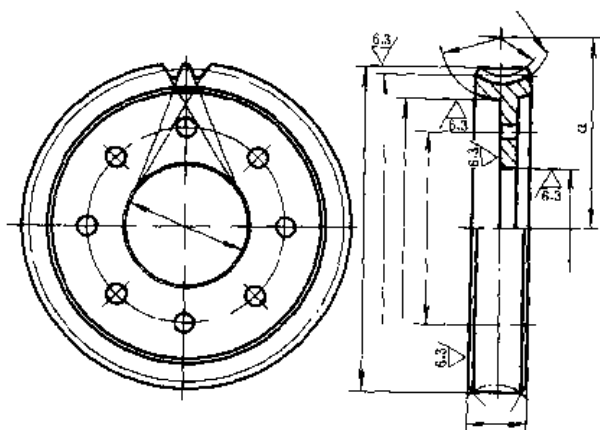


图 21.4-10 斜平面齿蜗轮零件图

2) 找正刀杆,使其与工作台轴线的垂直度误差为  $0.02/300$ 。

3) 找正工作台心轴,其径向圆跳动量不大于  $0.03\text{mm}$ 。

4) 将铣刀刃口用油石研磨好,穿上刀杆,两把铣刀之间加厚度为  $W$  的垫圈,所用垫圈的两端面平行度误差在  $0.01\text{mm}$  之内。

$W$  值可按下式计算:

$$W = d_{bc} / \cos \beta$$

式中  $d_{bc}$ ——齿形圆直径(mm);

$\beta$ ——母平面倾角。

5) 以上工作台心轴为基准,找好两把刀的对称,不对称误差一般控制在  $0.10\text{mm}$  左右,然后卸下一把铣刀,垫上一个厚度与铣刀相等的垫圈,检查留下的一把铣刀的偏摆度,其误差不大于  $0.05\text{mm}$ 。

6) 按刻度盘扳转刀架,扳转的角度等于母平面倾角  $\beta$ 。如图 21.4-12 所示用角度尺校对扳转的角度(扳角度前使铣刀中心高对好蜗杆副中心高)。

7) 装夹并找正蜗轮毛坯,通常情况,径向圆跳动量不大于  $0.05\text{mm}$ ,端面跳动不大于  $0.03\text{mm}$ 。

## (2) 铣齿

1) 对刀。在铣刀杆位于水平位置时先将铣刀的中心对准轮宽中心,再向上或向下(根据齿的倾斜方向及铣削的齿侧决定)偏移  $G/2$  值。

$G$  值按下式计算:

$$G = d_{b0} \tan \beta$$

2) 装好分度交换齿轮,并用百分表控制分度误差(有单齿分度机构的可不用)。

3) 碰皮后吃刀铣第一面,吃刀深度  $H$  可按下式计算:

$$H = h / \cos \alpha$$

式中  $h$ ——全齿高(mm);

$\alpha$ ——齿形角。

4) 换刀。铣完一侧之后,将刀卸下,换上一个与该刀一样厚的垫圈,并在对称位置(相距  $W$  的距离)装上另一把刀。用高度尺在刀架上找一个基准点,测好后把刀架降下或上升一个精确的  $G$  值,详见图 21.4-12,误差不大于  $0.02 \sim 0.03\text{mm}$ ,以保证铣刀刀刃与理论齿形相吻合。

5) 控制齿厚铣另一侧齿面。一般分两刀铣成,第一刀使齿厚稍留一些余量,检测后再铣到尺寸。

6) 清根。铣完齿后,常在齿根部残留两小块余量,见图 21.4-13,这时可以用比齿槽窄一些的锯片铣刀铣一次。如果残留余量不多,也可

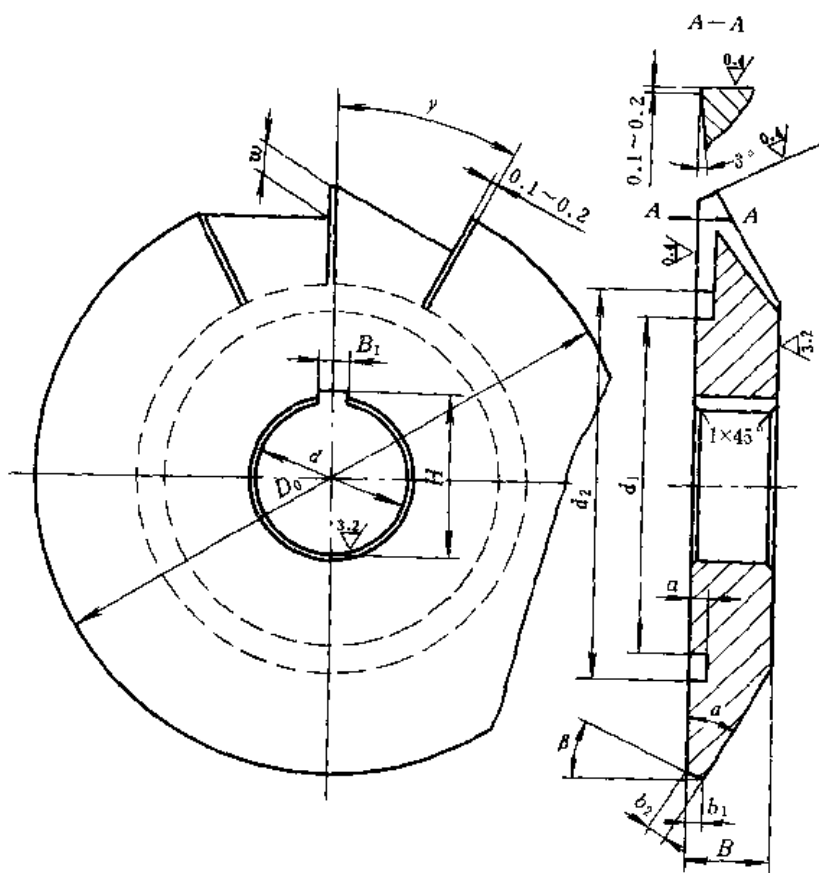


图 21.4-11 平面齿蜗轮铣刀



(续)

顺序	名称	符号	单位	公 式	图 示 或 说 明	计算结果
16	滚刀喉部 齿根圆 半径	$R_{f0}$	mm	$R_{fj} = R_{f1} + 1$	为避免加工时由于蜗轮毛坯外径或其他原因造成滚刀根部发生干涉。应适当加大齿根圆弧半径	266
17	滚刀工作 部分长度	$L'$	mm	$L' = L + \frac{2p}{z'}$ 式中 $p$ —节距 $t = \pi m$	1) 为消除蜗杆副齿面两端间的干涉通常应使 $L' > L$ 2) 左右两端倒角与蜗杆相同, 一般取 $45^\circ$	218.5
18	滚刀喉部 顶圆直径	$D'$	mm	$D' = 2(a - R_{a0})$		130.6
19	滚刀大 圆直径	$D''$	mm	$D'' = 2[a - \sqrt{(R_{a0})^2 - (0.5L')^2}]$		182.08
20	滚刀喉部 法向齿厚	$s_{a1}'$	mm	$s_{a1}' = s_{a1} - \Delta s$ 式中 $\Delta s$ —减薄量	按图 14.4-9 规定 $s_{a1} = 13.87\text{mm}$ , 一般取 $\Delta s = (0.5 \sim 1.5)$	12.47
21	测量齿高	$h_{a1}'$	mm	$h_{a1}' = h_{a1} + 0.23m$	按图 14.4-9 规定 $h_{a1} = 8.02\text{mm}$	10.32
22	滚刀的 沟槽数	$n$		一般在 $n = 4 \sim 10$ 的范围内选取	1) 最好铣出的沟槽数 $n$ 与蜗杆头数 $z_1$ 无公因数存在 2) 结合刀具其他部位的尺寸综合考虑选出的 $n$ , 应保证刀具具有足够的强度和在刃磨时砂轮不会发生干涉	6
23	滚刀导槽 的选择				1) 当 $z_1 = 1 \sim 3$ 时, 开直沟槽就行了 2) 当 $z_1 > 3$ 时, 应尽量开螺旋沟, 其方向与滚刀螺旋方向相反, 为了有利于形成齿侧后角, 应把沟槽螺旋线与蜗杆螺旋线的正交点选在入口到喉部的 $\frac{1}{2}$ 处	直沟
24	滚刀沟槽 底圆弧 半径	$R$	mm	$R = R_{f0} + 1$	当沟槽为平底时, 只要沟槽的底线比滚刀喉部齿根底 1mm 就行了	267
25	滚刀内 孔直径	$d'$	mm	1) 先按表 14.4-5 初选 2) 校验滚刀体喉部内壁的最小厚度不得小于 $0.25d'$	1) $d'$ 是根据滚刀的强度和刀体的刚度决定的 2) 在设计键槽时, 刀体壁厚应保持下面的不等式: $\frac{D'}{2} - H - \left(t - \frac{d'}{2}\right) \geq 0.25d'$ 式中 $H$ ——螺旋沟槽深度 $H = R - R_{a0}$ $t$ ——孔底到键槽顶的高度: 根据表图 $t = 44.6\text{mm}$	40
26	滚刀内 孔空刀 处直径	$d''$	mm	$d'' = d' + 2$		42
27	滚刀刀台 直径	$D_0$	mm	1) 当沟槽底为平底时: $D_0 \leq 2(a - R) - 2$ 2) 当沟槽底为弧形沟时: $D_0 \leq 2[a - \sqrt{R^2 - (0.5L')^2}] - 2$	1) 滚刀两端的圆柱刀台, 主要用于测量滚刀的径向跳动, 也可用作调整中心距的辅助测量基准 2) 刀台两端应倒棱	70

(续)

顺序	名称	符号	单位	公 式	图 示 或 说 明	计算结果
28	滚刀刀台长度	$L_g$	mm	一般至少取 $L_g = 8 \sim 12$		15.75
29	滚刀总长	$L''$	mm	$L'' = L' + 2L_g$		250
30	滚刀切削刃带宽度	$f$	mm	一般取 $f = 0.10 \sim 0.30$	在刃磨方便可靠的情况下, 尽量取小值	0.1~ 0.15
31	齿侧后角				根据实际情况, 以有利于切削为前提来选择左、右后角 $\alpha_1, \alpha_2$	$5^\circ \sim 10^\circ$
32	前角					$0^\circ$

表 21.4-5 滚刀最小刀杆直径 (mm)

$D'$	$d'$	$D'$	$d'$
50~70	22	130~188	40
70~90	27	180~240	50
90~130	32	240~300	60

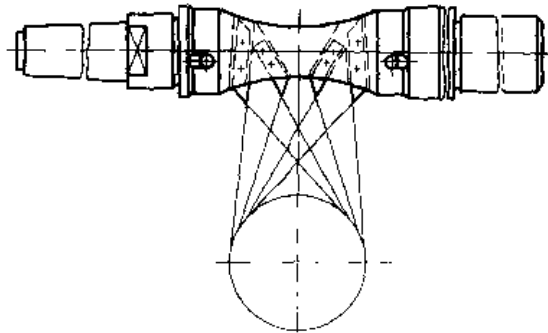


图 21.4-15 粗切蜗轮的飞刀

### 3.2.2 蜗轮粗切飞刀

与加工直廓环面蜗杆传动的蜗轮情况类似, 当用滚刀切削蜗轮时, 滚刀的两个边齿担负着约占蜗轮齿加工的 80% 的切削量。因此, 在成批生产中, 为了提高滚刀的使用寿命, 可先用双刀头或四刀头的飞刀对蜗轮进行粗加工。这种飞刀实质上是齿数很少的滚刀, 它的刃廓按磨削滚刀的同样方法用平面砂轮包络形成。图 21.4-15 所示为粗切飞刀。这种飞刀由于刃廓是在刀头固定以后, 磨削成形的, 因此刀杆的制造工艺性比普通环面蜗轮飞刀好得多。

### 3.2.3 简易滚刀

当蜗杆的头数  $z_1 \geq 3$  时, 可采用沿基本蜗杆的一条螺旋线布置飞刀头的方式。这种刀具兼有飞刀和滚刀的特点, 既保证蜗轮齿面有足够精度, 制作工艺性比多头滚刀大大改善。图 21.4-16 为这种刀具的一种结构图。

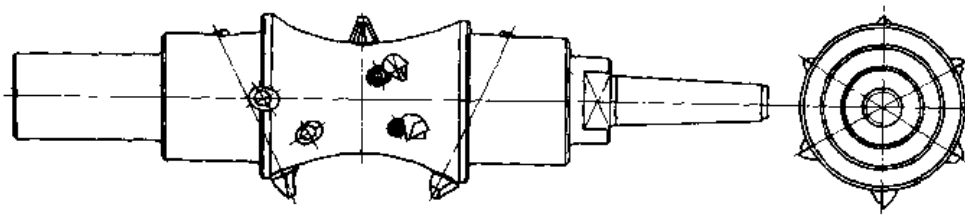


图 21.4-16 加工蜗轮的简易滚刀

## 4 蜗杆副的安装与调整

### 4.1 蜗杆及蜗轮的轴向调整

这种传动副对安装误差的敏感性较高, 即使制造得十分精确, 由于安装调整不当, 也会使传动的性能特别是效率降低。安装调整的目的, 主要是使传动的蜗轮和蜗杆具有确定的、符合其共轭啮合的相互位置。即应

使蜗轮与蜗杆的相对关系尽量符合滚刀与蜗轮的相对关系。为此, 当安装蜗杆时, 可参照图 21.4-17 所示的方法, 利用安放于蜗轮轴承上的测量轴 1 和量具 2 及蜗杆轴承套的垫片 3 确定蜗杆的轴向位置, 以保证蜗杆喉圆与蜗轮轴线共面。

在安装蜗轮时, 可参照图 21.4-18 所示的方法用专用量具并以蜗杆轴颈为基准, 调整蜗轮的轴向位置, 使蜗轮的喉圆与蜗杆的轴线共面。

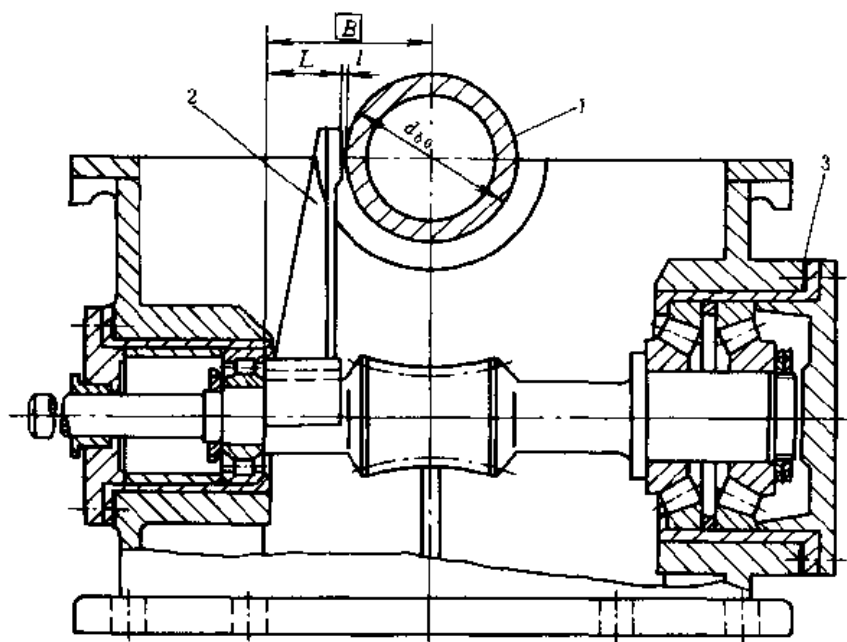


图 21.4-17 蜗杆的轴向调整

1—测量轴 2 量具 3—调整垫

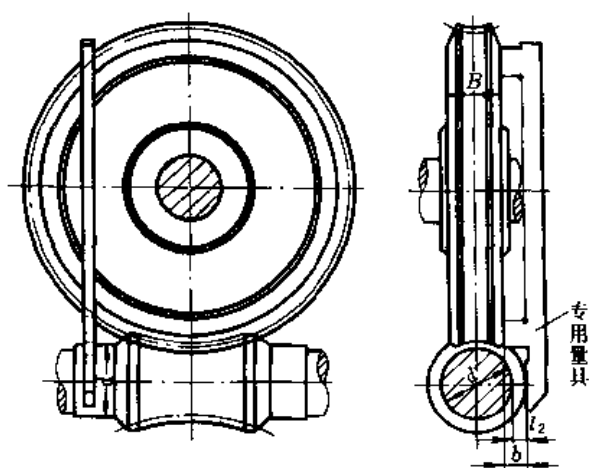


图 21.4-18 蜗轮的轴向调整

## 4.2 蜗杆副的接触区及相应的调整

制造这种传动副时,蜗轮零件图上应该给出其具体的接触区图,使装配调整时有所依据。

通常在蜗杆副初步安装好以后,要在蜗杆齿面上薄薄地涂以着色剂并转动蜗杆然后观察蜗杆副齿面的接触区。图 21.4-19 表示蜗杆副正常接触,安装得当。图 21.4-20 所示为不正常接触的接触区,此时可以对蜗杆进行轴向调整,使蜗杆沿箭头方向移动,即向接触重的那一面移动。

图 21.4-21 所示为蜗轮偏置接触区及其调整方向。

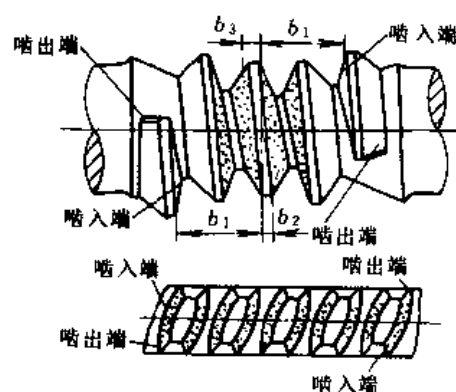


图 21.4-19 蜗杆副正常接触区

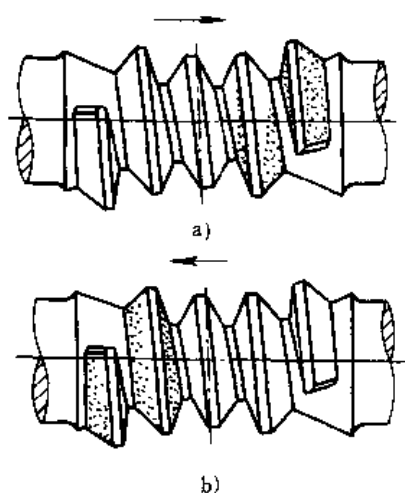


图 21.4-20 蜗杆副不正常接触区及其调整方向

图 21.4-22 所示为中心距有偏差时的蜗杆接触区。

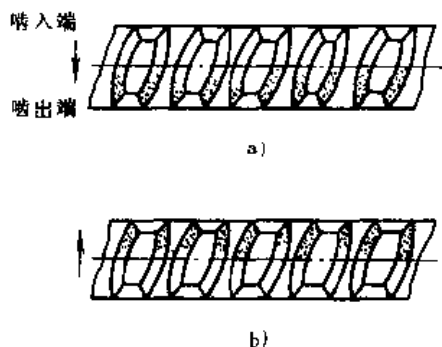


图 21.4-21 蜗轮偏置时的接触区及调整方向  
a) 啮出端接触偏重情况 b) 啮入端接触偏重情况

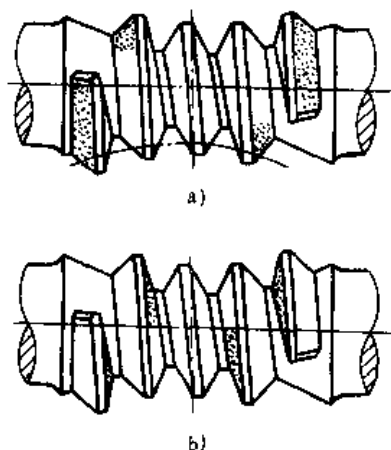


图 21.4-22 有中心距偏差的蜗杆接触区  
a) 中心距偏小情况 b) 中心距偏大情况

## 第5章 精密平面蜗轮、蜗杆加工

### 1 材料和毛坯的配备

精密平面蜗轮、蜗杆是一种以蜗轮为基础件的蜗杆传动副,其中配对件包络蜗杆(TP 蜗杆)的齿面是以蜗轮的平面直齿齿面为产形面在共轭运动条件下包络形成的。这种蜗轮副具有啮合齿数多、齿面间容易建立动力润滑油膜以及便于实行精确加工制造等一系列优点。因此,在机床与天文望远镜中作为精密传动副,已经获得良好效果。

为了使这种精密传动副在使用中能够经久地保持甚至能逐步自行改善它的啮合特性和传动精度,在齿部材料的配备选用上,应尽量考虑使蜗轮齿面能经久不变,使工作过程中的磨合主要发生在蜗杆齿面上,以便更好地发挥多齿同时啮合的效果和平均误差的作用,并进一步减小传动工作时的短周期误差和提高传动的平稳性。

为此,蜗轮材料的硬度宜高于蜗杆材料的硬度,使之更加耐磨。通常可以采用淬硬或不淬硬的钢材、球墨铸铁或耐磨铸铁来制作蜗轮,而包络蜗杆则用铸铁或青铜制作。当两者都用铸铁制作时,蜗轮齿面硬度应比蜗杆齿面硬度高 20HS 以上。

除了在材料配对上需作上述特殊考虑外,对于材质的其他方面的要求,与普通精密蜗杆副基本上一样,即要求材料内部组织均匀、晶粒细密,无气孔、缩松、裂纹、夹杂物等各种缺陷,并且具有良好的尺寸稳定性。

蜗轮齿坯在精加工齿部以前,可用普通渐开线齿轮滚刀或角度铣刀粗切出齿槽,除齿面留适当精加工余量外,其余部位全部加工达到最终尺寸。如蜗轮采用齿圈形式套装在基体零件上,则齿部精加工应尽可能在装成一体后进行,并且加工完成后不再松动或重新拆装,以免损失加工精度。

根据工作情况,蜗杆齿坯还有整体式和拼装式两种。后者常为铸铁或青铜的空心蜗杆套装在钢轴上,以适应齿部和转轴的不同工作要求。此外,也有将蜗杆齿部材料直接熔铸在钢质的基体上,形成双金属的组合结构。

套装式的蜗杆如条件限制须待全部精加工完成后才能装配到工作轴上时,则精加工过程应具有与最终工作时尽量一致的径向与轴向定位状况,以减少附加定位误差。为了根本地消除这种误差,最好将蜗杆齿坯与工作轴在实际工作的托架或专用的工具托架上按最终工作状况装配好,在这种工艺基准与使用基准完全一致的情况下实际齿部精加工。

齿坯通过冷热加工产生的内应力会影响尺寸的稳定性。这需要在精加工前的整个工艺过程中穿插安排几次稳定处理工序(例如油煮定性处理)充分地消除内应力见表 21.6-2。

### 2 平面蜗轮齿部的精加工

通过精加工使蜗轮齿部的齿形、齿向、齿厚和齿距

这四项主要参数达到规定的精度指标,同时使齿面粗糙度符合最终要求。

## 2.1 精加工方式及几种实用加工法

通常齿轮加工时有展成加工与成形加工两种方式,平面蜗轮的齿部精加工,最适宜采用后者。因所用工具结构简单,加工后齿形精度容易得到保证。

这种成形加工按照分度方法的不同又可分为单齿分度和连续分度两类。

其中,最方便实用的单齿分度成形加工,是铣齿和磨齿。由于这类加工法对每个齿实行分别加工和分别控制,分齿精度可不依赖于加工所用的机床,而由测量工具来保证。因此,对于加工设备没有很高的要求,甚至可以自制简易设备来完成。还由于成形切齿时工件位置固定,也易获得较满意的齿向精度。缺点是操作比较繁琐,生产效率较低。

要克服上述缺点,可以使单齿分度的整个加工和控制过程实现自动化,或者改用连续分度方式。现实可行的连续分度成形加工法是在滚齿机上采用飞刀滚切。单个飞刀头相当于滚刀的一个齿,由于没有展成过程,刀头的刃口形状直接确定了工件的齿形。这样的飞刀容易制造。但是连续滚切的过程要求机床的分度链具有足够的精度,才能保证加工后的齿距精度。

### 2.1.1 盘形铣刀成形精铣齿

这种方法适用于加工齿面硬度不太高的蜗轮。可以利用普通的滚齿机来完成。加工前的准备工作,主要是工件按径向和轴向基准精确找正以及对刀。对刀是保证切削刃与工件齿形圆相切并获得足够的齿高,这可用平尺对光检查,并按切出的结果复测校正。

加工过程中,刀具只沿工件轴向作垂直进给运动,而径向与轴向位置固定不变,这样可保证各个齿形的一致性。当完成一次往复切削动作且刀具退出工件后,旋转工件进行分度,再重复另一齿的切削过程。分度方法有如下两种:

1) 依靠机床分度。当机床工作台的分度副精度足够时,可利用它来分度。直接利用它的单齿分度机构,或适当计算好分度交换齿轮,使其中某个交换齿轮的一整转或几整转相应于工件的一次分度。

2) 依靠标准分度器件分度。将可能获得的标准分度器件,如分度板、经纬仪或光栅式、电磁式、圆感应同步器式、端面齿盘式等任意一种精密分度装置与工件同轴安装,用以指示每次分度的准确位置。

### 2.1.2 盘形砂轮成形磨齿

本方法适用于齿部淬硬或要求精度较高的情况,作为最终的齿部精加工工序。磨削过程与铣削过程相

似,可借用盘形砂轮磨齿机的一部分动作或自制简易的专用设备来完成。修整砂轮时金钢笔沿切于齿形圆的直线轨迹,用以得到正确的砂轮工作面直母线。同样可根据试磨结果进行校核。

磨齿过程的特点是砂轮的每次往复行程只能去除一部分余量,然后通过工件多次的圆周进给才能达到最终位置。由于砂轮磨削能力的变化和损耗,若按照上述铣齿时的分度方法确定磨削终止位置,不易保证精确的齿距精度。

可靠的办法是直接监控齿面的实际磨削量。即在精磨前预先测出每个齿的积累误差以确定每个齿所要求的修磨量。再设计制造一套上置式磨量监控装置(图21.5-1),随所磨齿而装设在蜗轮的适当位置上,保证磨齿时测杆可抬起避开砂轮,而当砂轮退出后又可放下测杆监测齿面的实际磨去量。

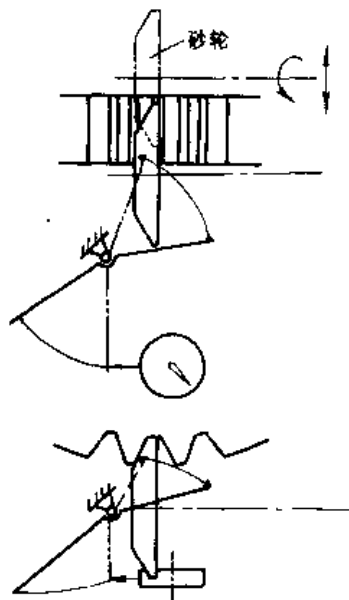


图 21.5-1 上置式磨量控制装置

铣齿时用作分度的各种测量手段都可以用来测定磨齿后的齿距误差,并可作为再次修磨的依据。这样的反复测磨过程一直进行到满足精度要求时为止。

### 2.1.3 飞刀成形滚切加工

这是连续分度加工,适用于非淬硬齿面。这种加工方法具有操作简便,生产率较高,刀具容易制备等优点。缺点是工件齿距精度受机床所限。

飞刀盘可自行设计制造。刀盘在滚刀架上的安装调整与采用滚刀滚切齿轮时一样。刀头的前刀面装成与假想的刀具分度圆螺旋角垂直。此螺旋角 $\delta_s$ 按下式计算:

$$\sin \delta_s = \frac{m}{d_0}$$

或分别精切两侧齿面。

根据本章 2.1.3 节中提出的应避免分度传动链中的间隙造成不利于切削的影响,可使工件对刀具的切削抗力与工作台的转向相反。但当两侧齿面在同一次切削中完成时,总有一侧不符合这一要求。为此,可以将不符合上述要求的车刀反装,使前刀面向下,在整个分度传动链反转的情况下完成这一侧的精切削。

### 3.1.2 磨削法

适合于作为钢以外其他材质蜗杆的精加工。可以获得更良好的表面质量,并有可能采取措施减少机床遗传误差的影响。

当利用普通滚齿机时,必须设法降低工件蜗杆的转速,以适应磨削的要求。

为了使碟形砂轮的端平面能够作为磨削工作面且完全替代假想的蜗轮产形齿面,以省去车削时那样的相对垂直进给运动,不但应当使这个工作面切于齿形圆(可由修砂轮的金刚笔的运动轨迹来保证),而且应当使它完全包容蜗轮齿面上的理论接触区。为此,可先计算出蜗轮齿面上接触区的位置。根据画出的接触区使砂轮中心高放置到偏离蜗杆中心高(即蜗轮中间平面)的最佳高度位置上,具体偏置量  $h$  可由作图或计算确定(见图 21.5-2)。

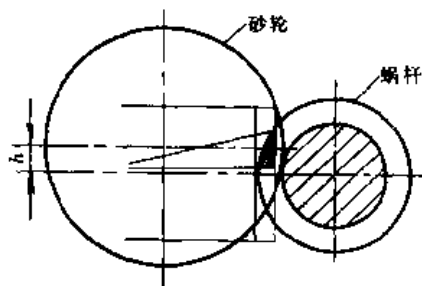


图 21.5-2 确定砂轮偏置量  $h$

当磨削不同侧齿面时,这一偏置量大小相同,方向相反。

整套磨具安放在滚齿机工作台上,并可作相对于工作台的圆周进给运动。与车削时一样机床必须有准确的分度链运动,不同之处是磨削时工作台只在有效范围内作往复旋转,并且运转速度慢得多。

### 3.1.3 用移位磨削法提高加工精度

在展成法加工的蜗杆齿面螺旋线上,不可避免地带有由机床分度链遗传形成的误差,表现为螺旋线上的短周期误差波。减少这种误差的一种方法是移位加工法。这实际上是设法造成机床误差传给工件时的不同相位,然后重复切削。相当于使误差波在工件上逐次作相位移动和重叠,从而产生削低误差波和提高误差

波频率的效应。

由于这种误差数量甚小,只有几微米到几十微米。因此,在车削加工时这种减小误差的措施实际上难以奏效。但是,在磨削加工时,却可以作为一种方便有效的方法加以运用。

现以分度链误差为正弦波并且作半个波长的相位移动为例,说明移位磨削的实际做法和效果(图 21.5-3)。

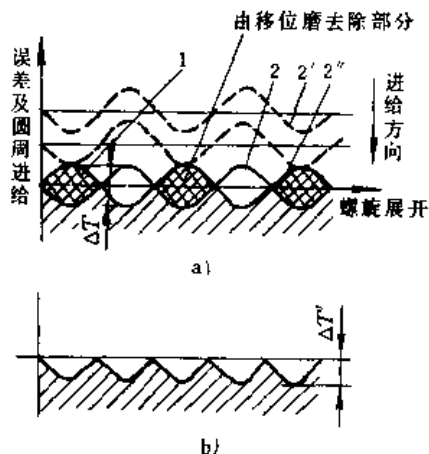


图 21.5-3 移位磨过程及效果

a) 移位磨过程中 b) 移位磨结果

图中曲线 1 为经过第一次磨削后展开的齿面螺旋线。当砂轮离开齿面后停车,并开始移位。即先脱开分度链,单独使工作台带着整套磨具转过半个误差波(通常等于工作台分度蜗轮的半个齿距)。再使分度链重新联结。然后,使整套磨具相对于工作台转回到原来的位置附近,按照理想要求希望达到曲线 2 的位置。但实际上,由于停车时位置的随意性以及移位过程中传动链中的间隙,这样的理想位置难以直接达到。

可以使磨具转回时稍留一点量,先达到曲线 2' 处,这时一开始砂轮将磨不到蜗杆齿面。通过圆周进给,砂轮开始沿曲线 2' 磨到波峰,再逐渐扩大磨削长度。当进给达到曲线 2 时,由图可见,磨到与磨不到的长度恰好相等,这就是判断终止进给位置的特征。为了便于观察,在移位磨开始前需预先将齿面着色,以便检查。上述半波移位的最佳效果将是使齿面周期误差缩小一半,而误差频率提高一倍。

上述方法可以推广到对一个误差波作 4 等分甚至  $p$  等分移位。理论上可以使原始的周期误差  $\Delta T$  缩小到  $\Delta T'$ ,即

$$\Delta T' = \frac{\Delta T}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{p} \right)$$

但由于操作比较麻烦和准确判断终止磨削位置随等分数的增多而越来越困难,所以通常以作到 4 等分为宜。



式中  $a$  —— 蜗轮副中心距(mm);  
 $d_{m_1}$  —— 齿形圆直径(mm);  
 $d_p$  —— 量棒直径(mm);  
 $\psi$  —— 设计的蜗杆投影齿形半夹角(rad)。

根据在工件上量表的读数与对零时读数的差值  $\Delta d_z$ , 可按下式算出实际投影齿形半角与设计值  $\psi$  之间的差值  $\Delta\psi$ (rad)

$$\Delta\psi \approx - \frac{\sin\left(\psi - \frac{\pi}{z_2}\right) \tan\left(\psi - \frac{\pi}{z_2}\right)}{d_{m_1} - d_p} \Delta d_z$$

式前负号代表两者变动方向相反。

3.2.3 投影齿距的测量

借用 3.2.1 节中量表法测量投影齿形的工具, 装在一个精密分度转台上。即可用绝对量法测出蜗杆的每一个投影齿距。

3.2.4 螺旋齿面短周期误差的测量

上述测投影齿距的装置, 当分度转台能进一步细分时, 可在蜗杆轴上装一相同分度数的分度板, 逐点测出齿面短周期误差。

也可以采用相对量法。即蜗杆按分度板每转过一个等分角, 被测的投影齿形随着绕转台中心转过一个角度。将这个角度量与工作台的一个常角转动量作比较, 可得出—差值。依次进行这样的比较, 所得差值的累计结果应与已测定的对应齿的投影齿距差相等。根据这一定约条件可算出由这些等分点组成的齿面周期误差。计算方法与用相对量法测算齿轮齿距时相似。

产生绕工作台单方向常角转动的方法见图 21.5-8。工作台上附加的一个测量臂可在两个固定的扭簧测微表限制下作常角转动。向前时随同转台及齿形量具一起转动, 反转时单独地转回到起始位置点上。

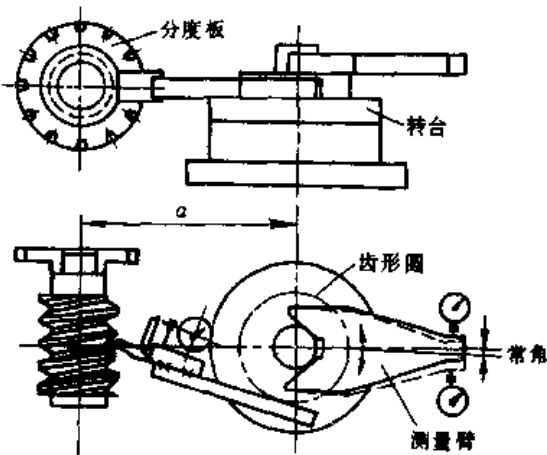


图 21.5-8 相对量法测蜗杆齿距

4 平面蜗轮副装配质量的检测和调整

平面蜗轮副装配后的齿面接触状况, 除了反映出加工质量外, 也反映出装配位置的正确性。其中, 主要的两项装配误差因素是蜗杆轴向的对中性和蜗轮副中心距。可用以下方法检测并进行调整。

4.1 光隙法

当蜗杆分别以不同齿侧与蜗轮齿面啮合接触时, 观测沿蜗杆全长各齿面间的光隙。通过对蜗杆位置的调整, 使左右齿面间的光隙最大限度地达到全长均匀一致。

4.2 印痕法

蜗杆齿面上涂一层薄薄的着色剂, 在轻微制动下使蜗轮副进行啮合运转。根据所得到的齿面印痕情况进行蜗杆位置的调整。

蜗轮齿面上的理论接触区印痕及接触线分布情况见图 21.5-9。与此相应的蜗杆齿面接触情况应为螺旋线全长接触。

当存在装配误差时, 蜗轮齿面的接触印痕将出现某一部位加重, 相反的部位减轻甚至不接触。变化关系见表 21.5-1。

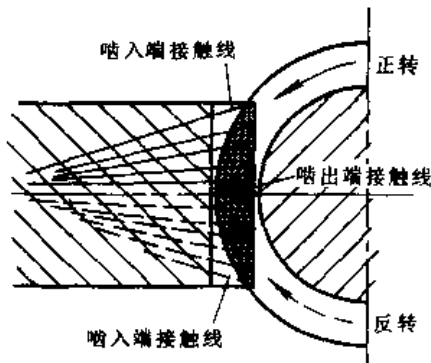


图 21.5-9 蜗轮齿面理论接触区

表 21.5-1 蜗轮齿面接触印痕变化情况

装配误差特征		接触印痕加重趋向
中心距改变	增大	入口区, 并偏向蜗轮齿顶
	减小	出口区, 并偏向蜗轮齿根
蜗杆轴向位置改变	入口端趋近中心	入口区, 并偏向蜗轮齿根
	入口端离开中心	出口区, 并偏向蜗轮齿顶

## 第6章 法向直廓精密圆柱蜗杆、蜗轮加工

法向直廓(ZN)蜗杆端面上的齿廓是延伸渐开线,轴向剖面上的齿廓是凸形曲线,齿或齿槽在法向剖面为直边齿廓。可以用砂轮端面磨削齿形。因而能够制造啮合平稳、耐磨性好、且传动效率高的高精度蜗杆蜗轮。这种齿廓的蜗杆副,广泛用作各种精密机械传动的分度元件。在机床工业中,用作各种齿轮加工机床、刻线机、分度转台等的分度蜗杆蜗轮。

### 1 高精度圆柱分度蜗杆蜗轮的加工

#### 1.1 高精度分度蜗轮制造工艺

图 21.6-1 为 YG3780 型蜗轮母机的分度蜗轮与工作台装配图。蜗轮主要参数、精度指标及技术条件如下:

主要参数  $m=3\text{mm}$ ,  $z_2=300$ ,  $\alpha=12^\circ$

精度指标 静态:相邻齿距差  $3\mu\text{m}$

齿距累积误差  $15\mu\text{m}$

动态:周期误差  $1.37''$

运动误差  $6.87''$

技术条件 材料 ZCuSn10Pb1。离心铸造,不允许有砂眼、气孔、缩松等。硬度  $90\sim 120\text{HBS}$ ,硬度不均匀性 $\leq 15$ 。与工作台装配后精加工齿形。齿面粗糙度达  $R_a 0.40\mu\text{m}$ 。齿长两端倒角长  $5\text{mm}$  深  $0.7\text{mm}$ 。

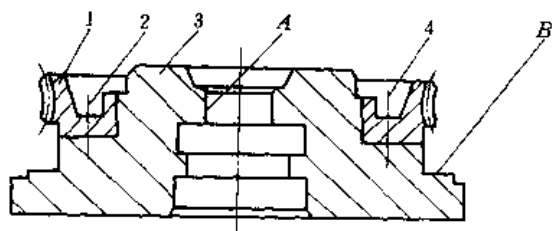


图 21.6-1 分度蜗轮与工作台的装配图

1—蜗轮 2—定位销 3—工作台 4—压紧螺钉  
A、B——定位基面

分度蜗轮制造工艺过程见表 21.6-1,其说明如下:

1) 材料选择及时效处理。锡青铜(ZCuSn10Pb1)能承受较大的齿面压力和相对滑动。因此,耐磨性能十分良好,使用寿命长。

加工过程中先后进行两次时效处理。第一次在粗车后进行,主要消除铸造坯件和粗车时产生的较大内应力;第二次时效在粗切齿形后进行,消除粗切齿形时产生的内应力。

2) 精加工齿形时先校正内孔 A 及平面 B(见图 21.6-1),此孔和平面是实际工作时的定位基准。因而保证了加工和工作基准的重合,消除了变换基准带来的误差。

3) 自由剃齿或自由珩齿时,工件由剃齿刀或珩磨蜗杆驱动。与机床分度链无关,从而减少周期误差。自由剃(珩)时,工件安装在精度很高、转动很灵活的夹具上。剃齿刀或珩杆既是切削刀具又是驱动件。

表 21.6-1 分度蜗轮制造工艺过程

序号	工序名称	加工说明及简图
1	铸造坯件	离心浇铸,清除砂粒及浇冒口、飞边、毛刺等
2	粗车	各内外圆留余量 $4\text{mm}$ ,端面留余量 $2\text{mm}$ ,倒角
3	人工时效	1) 工件平置于井式电炉中,每件间用等高垫铁 $6\sim 8$ 块等分垫平 2) 以 $45^\circ\text{C/h}$ 匀速升温至 $150\sim 460^\circ\text{C}$ ,保温 $7\sim 8\text{h}$ ,断开电源,随炉冷却至 $150^\circ\text{C}$ 左右,取出工件。放在干燥通风处冷至常温
4	半精车	蜗轮外径、大端面、内孔一次装夹加工,孔与外径的径向圆跳动量不大于 $0.05\text{mm}$ ,与大端面的垂直度允差不大于 $0.03\text{mm}$ ,各部位留余量 $1.5\text{mm}$ ,内孔车至 H8
5	划线钻孔	划各孔位置线,钻各过孔至尺寸,铰销孔缩小 $2\text{mm}$ ,去毛刺
6	粗滚齿顶圆	校正夹具,其径向圆跳动量在 $0.02\text{mm}$ 以内,校平滚刀轴,其水平度误差不大于 $0.02'/300\text{mm}$ ,调整中心距在 $\pm 1\text{mm}$ ,径向滚切齿顶圆环面及齿形
7	钳作	齿部倒棱、去毛刺
8	时效处理	人工时效方法同序号 3。天然时效:将工件置于室外一年以上
9	精车内孔和基准端面	校正内孔及基准端面,其圆跳动量在 $0.05\text{mm}$ 以内,压紧,精车内孔和基准端面,孔与端面的垂直度允差不大于 $0.005\text{mm}$ ,端面只允许中凹

(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
10	钳作	1) 将蜗轮装在工作台上,接触面间不允许有缝隙 2) 按蜗轮上的过孔钻工作台上的过孔,并攻螺纹 3) 钻铰锥销孔 4) 装上定位锥销,并拧紧压紧螺钉
11	精车	工件放在专用夹具上,校正内孔⑥、端面③,其圆跳动量在 0.01mm 以内,压紧,进行加工: 1) 车端面①、②、③至图中要求 2) 车内孔⑥、外圆⑤至图中要求 3) 倒角④至 $1 \times 45^\circ$  1—工作台 2—蜗轮 3—专用夹具
12	半精滚齿形	校正内孔 A、端面 B,其圆跳动量在 0.01mm 内,校平滚刀轴,水平度达 0.01/400mm,径向滚切: 1) 精滚切齿顶圆环面至图中要求 2) 半精滚齿形,中心距至 $a \pm 0.5\text{mm}$ 3) 滚切齿长两端,倒角至图中要求  A、B—校正基准

(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
13	钳作	倒棱、去毛刺
14	精滚齿形	校正工件内孔 A,其径向圆跳动量在 0.002mm 以内,端面 B 的圆跳动量在 0.003mm 以内。校平滚刀轴,水平度达 0.002/400mm。调整机床中心距达 $a \pm 0.01\text{mm}$ 。调整机床分度蜗杆及滚刀轴,其轴向窜动量不大于 0.001mm。校正滚刀轴肩,其径向圆跳动量不大于 0.002mm。两端轴肩跳动值高低方向同向。滚刀转速 10~15r/min。径向进给量 0.03~0.05mm/r(工件)。待机床空运转平稳后精滚齿形,加工要求:滚刀保持清洁,工件不允许发热,用 10% 透平油和 90% 的煤油组成的混合油作冷却液,且应十分清洁。切至中心距后,作 2~3 整圈的无进给修整切削  A、B—校正基准
15	剃齿和珩齿	机床、工件等调整同序号 14。强制剃齿或自由剃齿、径向进给量 0.02mm/(工作台)、低速剃削。强制珩齿或自由珩齿,径向进给量 0.01mm/r(工作台),高速珩磨
16	选配蜗轮蜗杆最佳啮合精度	在蜗杆副动精度测试仪上,每测量完 $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ 后,将蜗杆沿轴向移动一个距离,再重复测量,直至测得最佳精度为止。蜗杆副啮合侧隙 0.03~0.05mm
		每道工序完成后检查

## 1.2 高精度分度蜗杆制造工艺

图 21.6-2 为 YG3780 型蜗轮母机的分度蜗杆。主要参数、精度指标及技术条件如下:

主要参数:  $m_n = 3\text{mm}$ ,  $z_1 = 1$ ,  $p_z = 9.4248\text{mm}$ ,  $d_1 = 100\text{mm}$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\gamma' = 1^\circ 43' 36''$ , 齿形 ZN, 右旋;

精度指标:  $\delta t_b = 0.003\text{mm}$ ,  $\delta t_{bz} = 0.004\text{mm}$

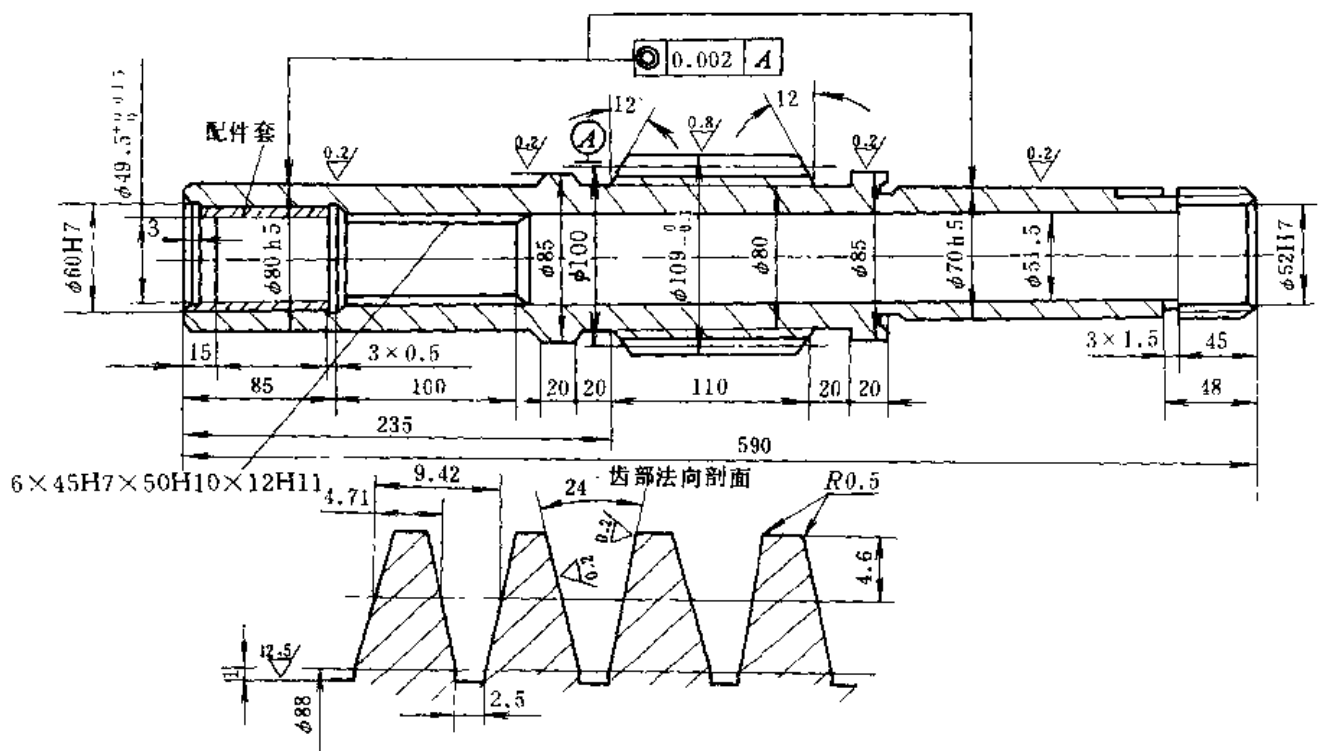


图 21.6-2 分度蜗杆

技术条件:材料:18CrMnTi,硬度:62HRC,轴颈外圆与齿形用同一基准加工。齿顶磨圆角  $R0.5\text{mm}$ 。去掉厚度小于  $1\text{mm}$  的不完整齿。

### 1.2.1 分度蜗杆制造工艺过程

表 21.6-2 所列分度蜗杆的制造工艺过程,其说明如下:

1) 渗碳前磨削齿面、轴颈外圆和端面,在于保证这些重要部位渗碳层的均匀性。因为粗糙的表面渗碳层深浅不匀,会因淬火、磨削热等因素造成裂纹而报废。

2) 轴颈外圆、端面和齿面的磨削工序有 5~6 个工序。而每次磨削后都油煮定性。这样能控制每次只磨去较少余量和磨削较短的时间。保证工件不致因磨削发热而产生裂纹。多次油煮定性可以消除磨削产生的应力,从而保证精度稳定。

3) 在内孔的右端,作了长  $20\text{mm}$  的工艺花键孔,在于保证拉削花键孔时的精度,以及保证以花键孔定位磨削外圆的精度。

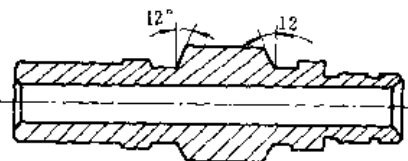
4) 在孔的两端装上两个硬度很高的高速钢堵头并作出中心孔,保证精磨轴颈外圆、端面和齿形时有一个精度很高的基准。

5) 多次磁力探伤检查是为了及时发现加工过程中可能产生的裂纹,避免作无用的再加工。导磁探伤

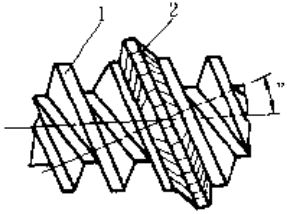
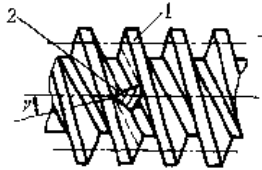
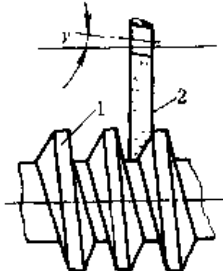
检查后,必须退磁。不然将影响后续加工的精度。

表 21.6-2 分度蜗杆制造工艺过程

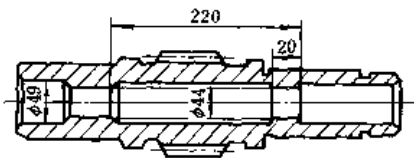
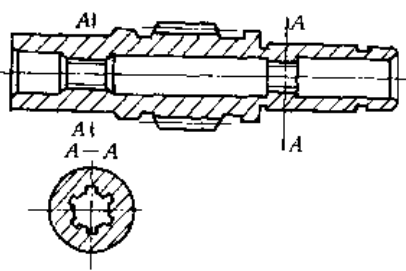
序号	工序名称	加工说明及简图
1	锻造坯件	锻坯,退火
2	粗车	车全长,每端留碳层 $2\text{mm}$ 。打中心孔。车外圆及端面留余量 $2.5$ 及 $1.5\text{mm}$ 倒角 $1\times 45^\circ$
3	钻孔	工件一端夹持外圆,另一端用中心架支承。校正外圆;钻通孔,留余量 $4\text{mm}$
4	热处理	正火
5	精车	工件一端夹持外圆,另一端用中心架支承。校正外圆 1) 打两端 $60^\circ$ 中心孔表面粗糙度达 $R_{3.2}\mu\text{m}$ 。工件夹持在顶尖间校正 2) 车需要淬硬的各外圆、端面。分别留余量 $0.8$ 和 $0.3\text{mm}$ 。切空刀槽 3) 倒 $12^\circ$ 及 $1\times 45^\circ$ 角



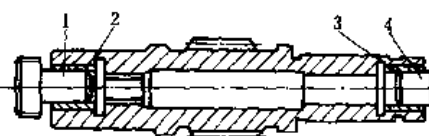
(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
6	粗加工 齿形	<p>工件夹持在顶尖间校正</p>  <p>1—蜗杆 2—铣刀 γ—导程角</p>  <p>1—蜗杆 2—车刀 γ—导程角</p> <p>粗铣(上图)或粗车(下图)蜗杆齿形,齿厚按精切蜗轮齿形的滚(剃)刀的实测齿厚留余量 <math>1^{+0.1}_0</math> mm</p>
7	钳作	去两端齿厚小于 1mm 的不全齿,并倒棱去毛刺
8	粗磨外 圆、端面	工件夹持在顶尖间校正,磨需要淬硬的外圆、端面,分别留余量 $0.65^{+0.05}_0$ mm 和 $0.2^{+0.05}_0$ mm
9	粗磨齿形	<p>工件夹持在顶尖间校正,磨齿形,齿厚按精切蜗轮齿形的刀具留余量 <math>0.7^{+0.05}_0</math> mm 磨齿顶圆角至 R0.8mm</p>  <p>1—蜗杆 2—砂轮 γ—导程角</p>
10	磁力探伤	工件夹持在顶尖间检查有无裂纹,退磁
11	热处理	渗碳,校正弯曲不大于 0.2mm
12	研中心孔	研中心孔,表面粗糙度 $R_a 1.6 \mu\text{m}$
12	磨中心架 夹持部位	工件夹持在顶尖间在两端轴颈上磨中心架夹持部位,长 50mm,表面粗糙度 $R_a 1.6 \mu\text{m}$ ,圆柱度误差小于 0.005mm

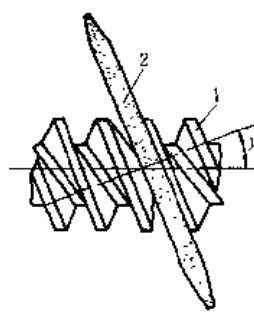
(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
14	车碳层	<p>工件一端外圆夹紧,另一端外圆用中心架支承。然后校正</p> <p>1) 车去不需淬硬的外圆上的渗碳层</p> <p>2) 车内孔</p> <p>3) 切空刀槽及倒角至要求</p> 
15	铣削	工件在台钳上夹紧,并校正;精铣键槽,并去棱角毛刺
16	热处理	淬火,62HRC,校正弯曲不大于 0.1mm,喷砂
17	研中心孔	研中心孔,表面粗糙度达 $R_a 0.8 \mu\text{m}$
18	第一次半精磨外圆、端面	工件夹持在顶尖间,然后校正;磨各外圆、端面,分别留余量 $0.04^{+0.02}_0$ mm 和 $0.15^{+0.02}_0$ mm
19	第一次半精磨齿形	<p>1) 磨蜗杆齿形,齿厚按精切蜗轮齿形的刀具齿厚留余量 <math>0.04^{+0.02}_0</math> mm</p> <p>2) 磨齿顶圆角至 R0.7mm</p>
20	磁力探伤	磁力探伤检查,退磁
21	车内孔	夹持工件一端外圆、另一端外圆用中心架支承,校正 0.01mm 内,车 $\phi 44$ mm 孔至 $\phi 45\text{H}11$ ,两端 H7 孔留余量 $0.5^{+0.1}_0$ mm(见工序 14 简图)其余内孔至图要求。倒角 $1 \times 45^\circ$
22	拉削	<p>工件装在专用夹具上校正,拉花键孔</p> 
23	校推孔	工件装在专用夹具上校推孔键孔至要求,并倒棱去毛刺
24	油煮定性	工件置于 $180^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 的油炉中煮 8~10h
25	校推孔	工件装在专用夹具上,校推花键孔
26	第二次半精磨外圆	工件装在花键磨用心轴上,心轴装在顶尖间,磨各外圆留余量 $0.25^{+0.05}_0$ mm

(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
27	车削	工件一端夹外圆,另一端外圆用中心架支承,校正,径向跳动量在0.005mm以内车两端中心孔粗糙度达 $R_a 3.2\mu\text{m}$
28	第一次油煮定性	工件置于 $180^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 的油炉中煮8~10h
29	研中心孔	研中心孔,表面粗糙度达 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ,接触面不小于70%
30	第三次半精磨外圆、端面	工件装在顶尖间校正,磨各外圆及基准端面,分别留余量 $0.12_{-0.02}^{+0.02}\text{mm}$ 和 $0.06_{-0.01}^{+0.01}\text{mm}$
31	第二次半精磨齿形	工件装在顶尖间校正,磨齿形,齿厚按精切蜗轮齿形刀具的实测齿厚留余量 $0.2_{-0.02}^{+0.02}\text{mm}$ ,磨齿顶圆角至图样要求
32	磁力探伤	检查有无裂纹,退磁
33	油煮定性	工件置于 $180^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 的油炉中煮8~10h
34	精车内孔	夹持工件一端外圆,另一端外圆用中心架支承,校正,径向圆跳动量在0.005mm以内 1) 车去长20mm的花键孔至 $\phi 45_{+0.01}^{+0.1}\text{mm}$ (见工序4简图) 2) 精车两端H7孔至要求,并车消气槽及倒角至图要求
35	钳作	装好配件套及堵头,见下图  1、4—堵头 2、3—套
36	研中心孔	工件装在两研磨顶尖间,校正两端轴颈,径向圆跳动量在0.015mm以内研中心孔,表面粗糙度达 $R_a 0.4\mu\text{m}$
37	第四次半精磨外圆、端面	工件装在顶尖间校正 1) 半精磨轴颈外圆,留余量 $0.07_{-0.01}^{+0.01}\text{mm}$ 2) 精磨齿部外圆至图中要求 3) 半精磨基准端面,留余量 $0.04_{-0.01}^{+0.01}\text{mm}$
38	第三次半精磨齿形及精磨螺纹	工件装在顶尖间校正 1) 精磨螺纹至图中要求 2) 半精磨齿形,按精切蜗轮齿形的刀具实测齿厚留 $0.1_{-0.02}^{+0.02}\text{mm}$ 余量
39	油煮定性	工件置于 $180^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 的油炉中煮8~10h
40	研中心孔	研磨中心孔,表面粗糙度达 $R_a 0.4\mu\text{m}$ ,接触面积不小于85%

(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
41	精磨外圆、端面	工件在顶尖间上活校正,低速磨削 1) 精磨轴颈外圆至图中要求 2) 精磨基准端面至图中要求
42	精磨齿形	工件装在顶尖间校正,导程交换齿轮,砂轮齿形角按精切蜗轮齿形的刀具调整,或与剃齿刀在相同调整下磨削。调整机床前后顶尖同轴度达 $1000 \pm 0.005$ 。顶尖针径向跳动达0.001mm,消除工作台爬行。低速磨削,工件不允许发热,余量磨完后,作2~3次往复行程的无进给修正磨削 精磨齿形,齿厚按精切蜗轮齿形的刀具齿厚减小 $0.03\sim 0.05\text{mm}$  1—蜗杆 2—砂轮 $\gamma$ —导程角
43	钳作	取下堵头
44	精车	工件一端夹紧外圆,另一端外圆用中心架支承,校正轴颈径向圆跳动量在0.001mm以内精车铜套内孔至要求,并倒角 $1 \times 45^\circ$
45	与蜗轮配对检查	蜗轮副安装在动精度检测仪上,配检 $\Delta T'$ 、 $\Delta T''$ 和接触面
46	钳作	抛光轴颈外圆及齿形
		每道工序完成后检查

### 1.3 高精度蜗轮滚刀的结构特点及制造

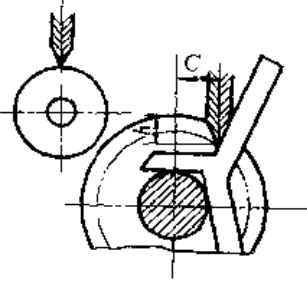
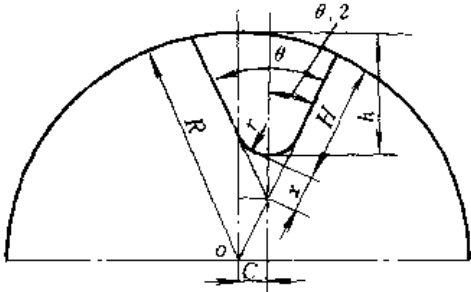
(1) 结构特点 图21.6-3是加工YG3780型蜗轮母机分度蜗轮齿形的高精度蜗轮滚刀及专用心轴。

其结构与普通蜗轮滚刀比较有下列特点:

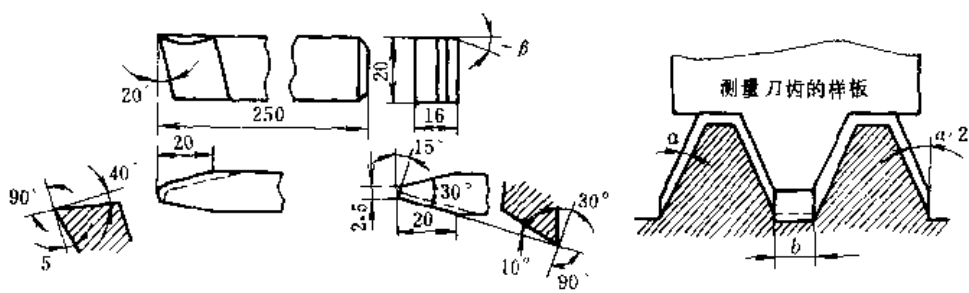
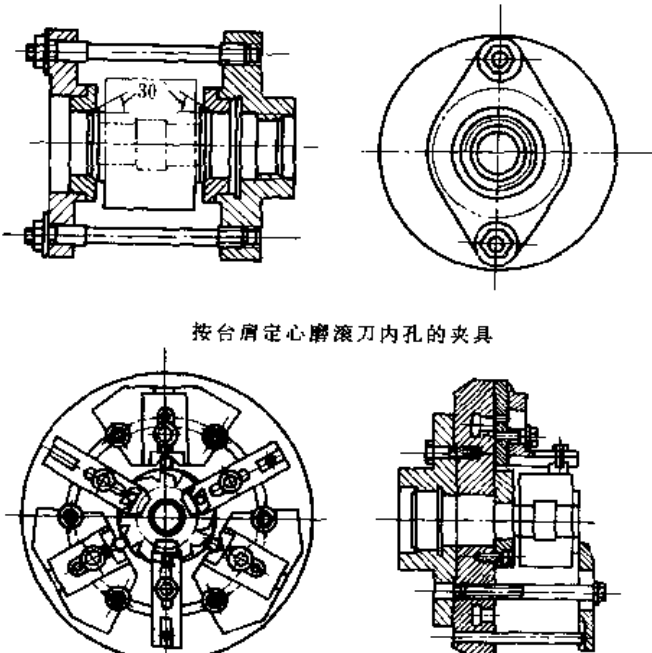
1) 圆周刀槽数为普通蜗轮滚刀的2倍左右。  
2) 刀齿铲磨部分减少,为普通蜗轮滚刀的 $1/3 \sim 1/4$ 。

3) 为了减少滚刀的安装误差和提高制造精度,采用专用滚刀轴,即当滚刀内孔及两端面精磨后,将滚刀装在已作好的心轴上。然后精磨滚刀轴台、刀齿前刀面和精铲磨刀齿齿顶和齿侧面,并精磨支承套外圆。滚刀精磨以及使用后的重磨过程都不卸下心轴。

(续)

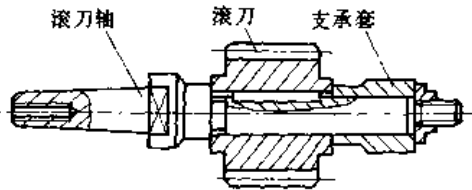
序号	工序名称	加工说明及简图
6	铣容屑槽	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;">   </div> <p style="text-align: center;">用样板安装铣刀位置                      求铣刀位移量和工作台升高量</p> <p>工件装在专用心轴上,一端夹持在分度头上,另一端顶在顶尖上校正径向圆跳动,铣床工作台旋转角度等于滚刀容屑槽倾斜角。按下式计算容屑槽导程交换齿轮:</p> $i = \frac{X P_{zB}}{S_k}$ <p>式中 <math>i</math>——交换齿轮比;  <math>X</math>——分度头参数;  <math>P_{zB}</math>——铣床工作台纵向进给丝杠导程;  <math>S_k</math>——滚刀容屑槽导程</p> <p>利用样板对准铣刀位置,铣刀位移量和工作台升高量按以下公式计算:</p> $C = \frac{(R - H - x) \sin \frac{\theta}{2}}{\cos \omega}$ $x = r \frac{1 - \tan \frac{\theta}{2}}{\tan \frac{\theta}{2}}$ $h = R - \frac{x}{\cos \frac{\theta}{2}} - \frac{C}{\tan \frac{\theta}{2}}$ <p>式中 <math>C</math>——铣刀位移量;  <math>h</math>——铣床工作台升高量;  <math>R</math>——工件滚刀外圆半径;  <math>H</math>——容屑槽深度(包括加工余量在内);  <math>\omega</math>——容屑槽倾斜角;  <math>\theta</math>——容屑槽槽形角;  <math>r</math>——槽底圆角半径</p>
7	铣齿部不铲磨部分	工件安装及机床交换齿轮调整同序号6,铣去齿部不铲磨部分
8	钳作	去掉两端齿厚小于齿 $\frac{1}{3}$ 厚度的不全齿,并去毛刺、打印记
9	热处理	退火:工件在井式炉中加热至 $600 \sim 620^{\circ}\text{C}$ 后,取出放在不通风干燥处冷却
10	粗磨孔	工件装在三爪卡盘上,校正夹紧。磨孔至H7,留余量0.3mm
11	粗磨外圆、端面	工件装在专用心轴上和顶尖间,磨外圆,留余量 $0.25^{+0.05}_{-0}$ mm;磨端面留余量0.1mm,径向圆跳动量不大于0.01mm
12	粗磨前刀面	工件装夹在专用心轴上和顶尖间,磨前刀面,径向性允差 $\pm 0.01\text{mm}$

(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
13	铲齿形	 <p>铲齿侧面用的车刀</p> <p>刀齿的检验样板</p> <p>工件装在专用心轴与顶尖间,用左图所示的车刀铲齿形两侧面及齿顶、齿底面,用右图所示的检验样板进行齿形检查</p>
14	热处理	<p>淬火:工件在 150°C 的硝酸钠溶液中洗净。加热步骤如下:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 在预热炉中加热至 600~650°C,保温时间按每毫米直径 3min 计算</li> <li>2) 继续升温至 820~850°C,保温时间同前</li> <li>3) 工件在电解盐槽中继续升温至 1270~1280°C,保温时间按每毫米直径 4~5s 计算</li> </ol> <p>在 40~50°C 的油中冷却。淬火后进行三次回火。回火温度分别为 540°C、560°C 和 580°C,每次保温 2~3h。然后在炉中冷却至 400°C。取出在空气中冷却至常温。硬度 63HRC</p>
15	去油及喷砂	工件在 150°C 的硝酸钠热溶液中洗净后喷砂处理
16	磁力探伤检查	探伤检查工件有无裂纹,然后退磁
17	精磨内孔	 <p>按台肩定心磨滚刀内孔的夹具</p> <p>按铲制面定心磨滚刀内孔的夹具</p> <p>工件装在专用夹具上校正(见上图),精磨孔留研磨余量 0.01~0.02mm,表面粗糙度达 <math>R_a 0.8\mu m</math></p>
18	研磨孔	研磨孔至图中要求
19	磨端面	工件装在心轴与顶尖间,精磨端面,其圆跳动量达到 0.002mm 以内



(续)

序号	工序名称	加工说明及简图
20	钳形	将滚刀、刀杆及支承套如图所示精确装配  滚刀杆及支承套装配图
21	研中心孔	研刀杆两端中心孔
22	磨台阶外圆	工件装夹在顶尖间,校正刀柄锥度及支承外圆径向圆跳动,跳动量在0.002mm以内。精磨台阶外圆,其径向圆跳动量在0.002mm以内
23	磨前刀面	工件装夹在顶尖间校正。精磨前刀面,径向性允差 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内
24	粗铲磨齿形	工件装夹在顶尖间校正。铲磨齿顶面及齿侧面,留余量 $0.12_{-0.02}^0\text{mm}$
25	精铲磨齿形	工件装夹在顶尖间校正,刀柄锥度及支承套外圆径向圆跳动量在0.02mm以内。铲磨齿顶面及内侧面及齿顶圆角至图中要求
26	抛光	抛光齿形面
27	渗氮或涂层	进行辉光离子渗氮或涂氮化钛层
		每道工序完成后进行检查

(4) 高精度单头切向蜗轮滚刀 图 21.6-4 所示为高精度单头切向蜗轮滚刀,其结构特点有:

1) 刀齿经过铲磨,由粗、精两部分组成。粗切齿左右齿面导程不等,形成沿轴向变齿厚的刀齿。其外圆等的设计参数与一般蜗轮滚刀相同。精切齿的外圆小于粗切齿的外圆,但大于相配蜗杆的外圆。

2) 加工粗切齿时,分别按左右齿面的导程搭配交换齿轮进行。加工精切齿时则按标准导程搭配交换齿轮。

3) 用这种滚刀加工蜗轮时,可降低工件齿面粗糙度,但只能采用切向进给。

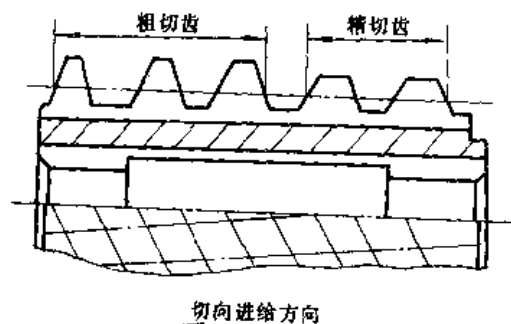


图 21.6-4 高精度单头切向蜗轮滚刀

#### 1.4 蜗轮剃齿刀的制造工艺

蜗轮剃齿刀用来剃削经过精滚齿后的蜗轮齿形。剃削余量为0.1mm左右。剃削时,剃齿刀转速很低,在20r/min左右。工作台每转的进给量为0.02mm。剃齿刀只切去蜗轮齿面上很薄的一层金属。

常用的蜗轮剃齿刀有不开容屑槽与开容屑槽两种结构形式。

不开容屑槽的蜗轮剃齿刀与蜗杆相似,见图21.6-5。不同处仅在于螺旋面上加工出代替容屑槽的浅槽,并留出很多0.3~0.4mm宽的刃带。这种剃齿刀的使用范围较开容屑槽的剃齿刀更广泛,可兼用于自由剃齿或强迫剃齿,刀齿数较后者多,制造也较简单。

开容屑槽的蜗轮剃齿刀与蜗轮滚刀相似,见图21.6-6,也称滚剃刀。这种剃齿刀不能用于自由剃削加工。制造方法与蜗轮滚刀基本相同。所不同者,仅在于经过铲磨的刀齿侧面要像磨蜗杆齿形一样磨出0.05~0.1mm的刃带,刀齿顶部可不铲磨。由于开有容屑槽,刀齿数减少。并且如果螺旋齿导程和容屑槽导程不一致,将会造成刃带宽窄不均匀而影响剃削效果。若制造精度高,这种剃齿刀的切削性能将比不开容屑槽的剃齿刀好,特别是剃削铜蜗轮时效果更佳。

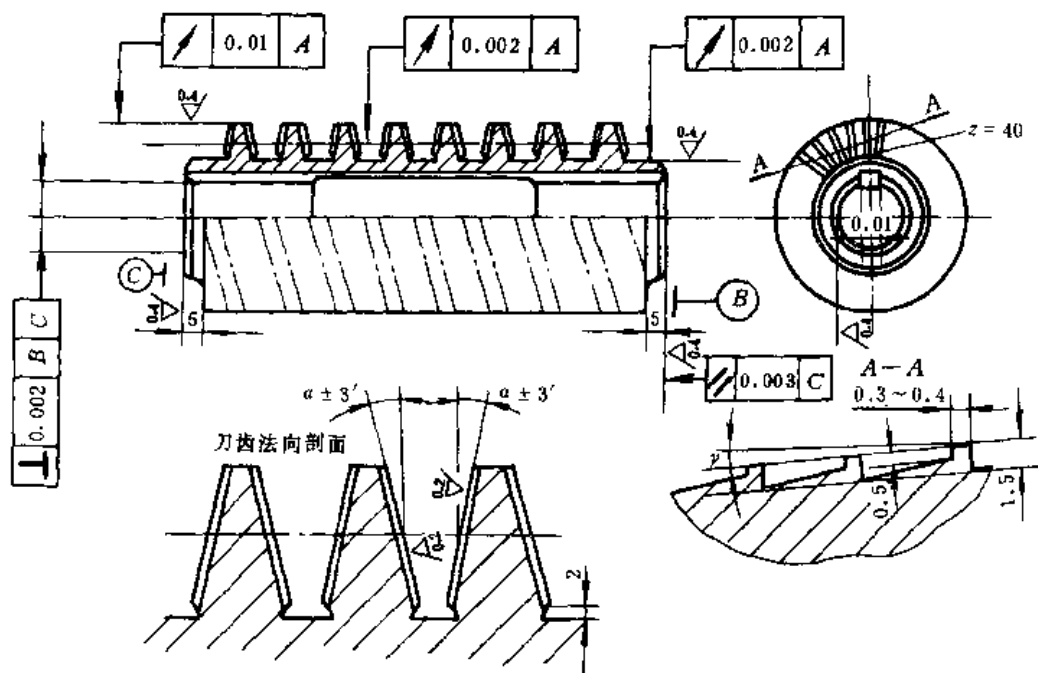


图 21.6-5 不开容屑槽的蜗轮剃齿刀

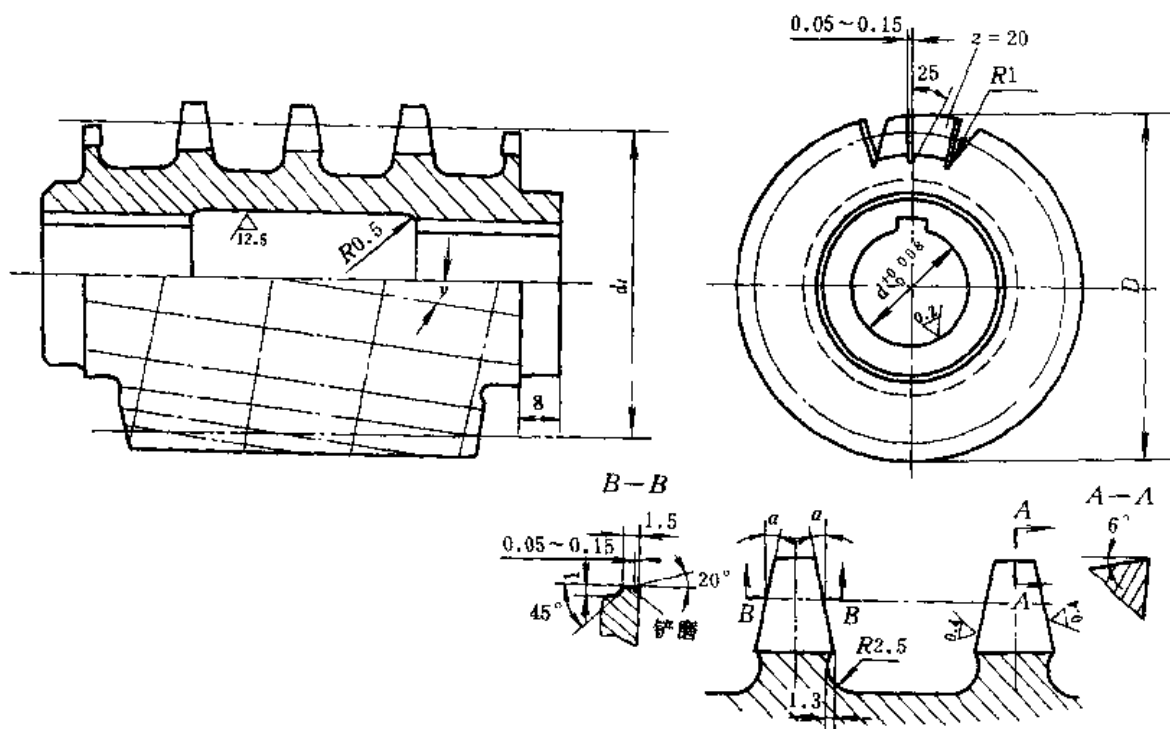


图 21.6-6 开容屑槽的蜗轮剃齿刀

#### 1.4.1 蜗轮剃齿刀的制造工艺

蜗轮剃齿刀的制造与蜗轮滚刀大致相同, 现仅就不开容屑槽剃齿刀的刃带的形成过程加以说明:

形成剃齿刀刃带的浅槽在装有专用插头的铣床上进行加工, 见图 21.6-7 剃齿刀装夹在分度头与铣床工作台顶尖之间。分度头控制分齿, 轴向移动量则由分度

头通过交换齿轮由铣床工作台提供。分齿转角的大小按刀刃数而定。

专用插头由铣床主轴 7 驱动, 曲柄连杆 2 使滑板 3 和固定在滑板上的插刀 4 一起作往复运动。

插刀前刀面与剃齿刀的准圆柱相切, 见图 21.6-8 粗插剃齿刀的浅槽时用图 21.6-9a 所示双边刃插刀加

工。精插浅槽时,用图 21.6-9b 所示的单边刃插刀左右分别进行,或将插刀组合后进行加工见图 21.6-9c,插刀刃间的距离即是剃齿刀刃带的宽度。

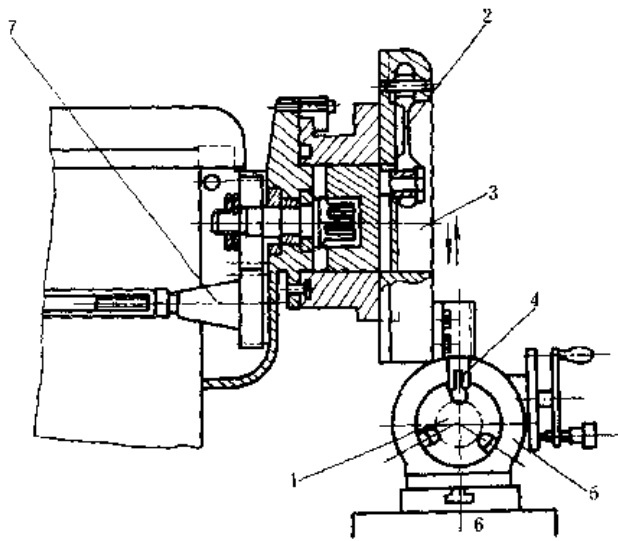


图 21.6-7 在铣床上加工剃齿刀刃带间的浅槽  
1—工件 2—曲柄连杆 3—滑板 4—插刀  
5—分度头 6—铣床工作台 7—铣床主轴

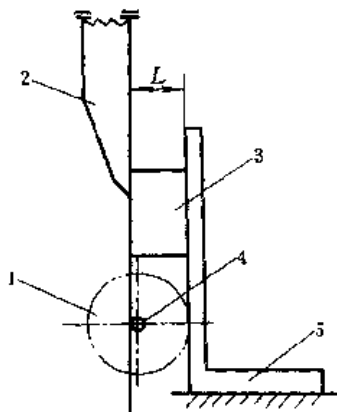


图 21.6-8 加工剃刀浅槽时插刀的安装  
1—剃齿刀 2—插刀 3—块规  
4—剃齿刀准圆柱 5—90°角尺

插削刃带间浅槽时,插刀应保持锋利,防止产生积屑瘤,不然,会损坏刃带。为了使刃带宽窄均匀,插削后可手工修整。

淬火是剃齿刀制造中的关键工序,由于刃带窄小易被烧坏,应严格控制升温速度和保温时间。淬火及精磨刃带后,进行离子渗氮或涂氮化钛层以延长使用寿命。

#### 1.4.2 蜗轮齿形的珩磨加工

与蜗轮剃齿加工相似的珩磨工艺,可提高蜗轮的齿形精度。

珩磨用的珩杆的形状、参数和不开容屑槽的剃齿刀相似,见图 21.6-10。但用珩磨蜗杆珩磨蜗轮齿形时,珩杆转速越高效果越好。因此,珩磨最好在专机上进行,并宜用自由珩齿法加工。

珩磨蜗杆的结构除包齿式(图 21.6-10)外,还有全齿式(珩杆齿部全由磨料组成)。全齿式珩杆适用于加工模数不大于 2mm 的蜗轮。

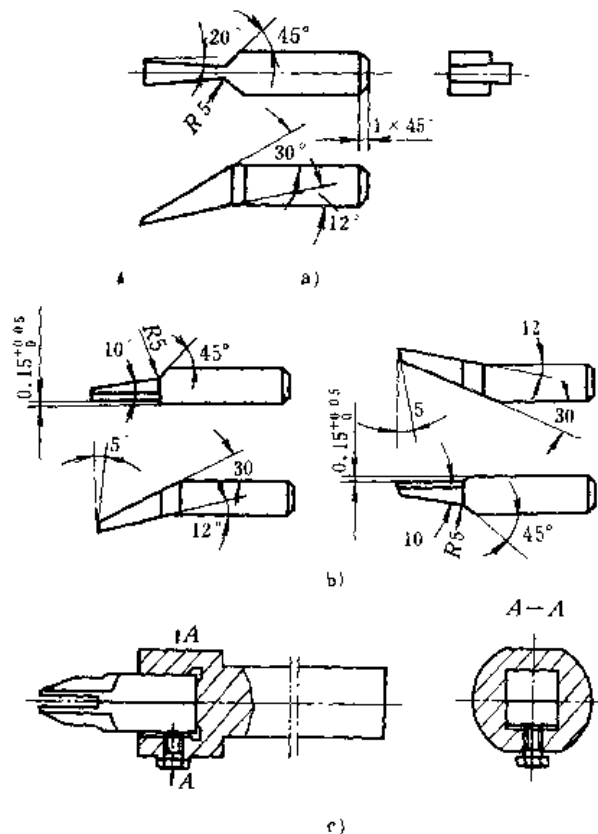


图 21.6-9 插刀及其组合

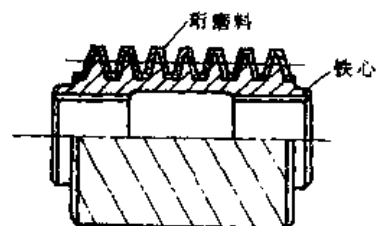


图 21.6-10 珩杆

#### 1.5 自由剃齿夹具

自由剃削蜗轮齿形时,工件必需装夹在如图 21.6-11 所示的专用的剃齿夹具上。这种夹具具有特别高的精度。蜗轮在夹具上能够十分灵活地转动。

夹具的径向和轴向圆跳动量控制在  $2\mu\text{m}$  内。平面推力轴承的滚珠形状和尺寸误差小于  $0.5\mu\text{m}$ 。轴承滚

制在  $1\mu\text{m}$  之内。但这种结构仅适用于低速运转。通常限制分度蜗杆转速不大于  $30\text{r/min}$ 。

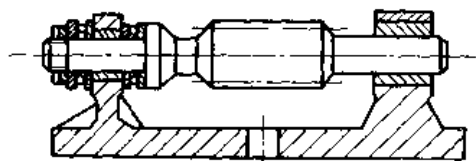


图 21.6-14 滚齿机分度蜗杆部件的结构

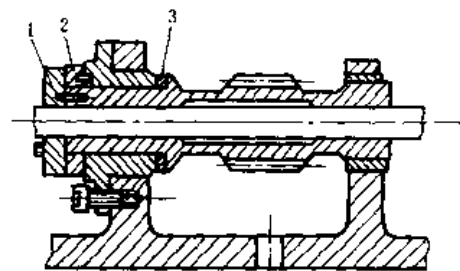


图 21.6-15 分度蜗杆部件改进结构

1、2、3—垫圈

2) 精化、改进滚刀主轴部件结构。图 21.6-16 是改进后的主轴部件结构，其中使用四个经研磨而平行度误差不大于  $1\mu\text{m}$  的平面垫圈，取代推力球轴承。

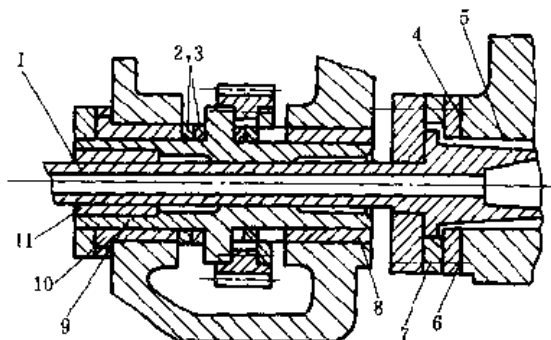


图 21.6-16 改进后的滚刀主轴部件结构

1—滚刀主轴 2、3—垫圈 4—刀架支承面 5—刀架前端支承孔  
6、7—垫圈 8、9、10、11—套

精化、调整的方法为：用一根圆柱度极高的研磨心轴精研套 8、套 10 及刀架前端支承套的内孔，并以研磨心轴为基准，研刮刀架前端支承孔端面，保证三孔同轴且与端面的垂直度误差不大于  $3\mu\text{m}$ 。控制垫圈 7 的厚度，使其比主轴台阶的厚度厚  $2\mu\text{m}$ 。以保证正常润滑。套 11 外圆与套 9 内孔过盈配合。主轴外圆按套 11 孔配磨，间隙量控制在  $1\mu\text{m}$  内。这样就能控制主轴窜动量不大于  $1\mu\text{m}$ 。

(3) 将 7 级精度的分齿交换齿轮提高到 5 级精度。

(4) 加装机械式误差校正机构，提高机床传动链精度。

用误差校正机构降低滚齿机传动链误差，国内外已有广泛应用，效果显著。目前使用的校正机构有机械式、电磁式、感应同步器式等几类。国内常用的机械式校正机构又分凸轮摆杆式、偏心轮式、杠杆式以及行星齿轮式等几种。

图 21.6-17 为用于 OF-10 滚齿机的校正机构。这是一套独立部件，需用时可将其安装在机床分齿箱内。由空套在分度蜗杆轴上的齿轮  $d$  将运动传入校正机构。通过行星齿轮系、校正凸轮 2、3 和摆杆上的滚轮等将校正运动和分齿运动一起由齿轮 4 传送给齿轮 5 使分度蜗杆副得到更精确的分齿运动，可使机床传动链误差降低 70% 左右。

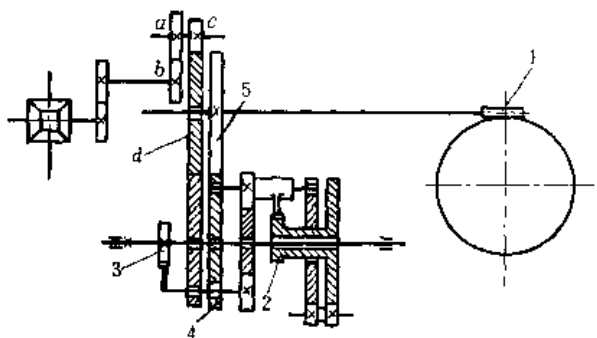
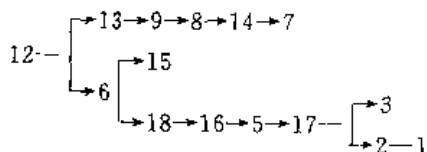


图 21.6-17 机械行星齿轮式校正机构(-)

1—分度蜗杆 2、3—校正凸轮  
4、5—齿轮 a、b、c、d—分齿挂轮

图 21.6-18 是用在 YG3780 型蜗轮加工机床上的误差校正机构，本机构装设在切分为前后二段的分度轴中间。传动及校正原理如下：

全部传动关系如下：



累积误差校正运动为：

$7 \rightarrow 15 \rightarrow 18 \rightarrow 16 \rightarrow 5 \rightarrow 17 \rightarrow 2 \rightarrow 1$

周期误差校正运动为：

$4 \rightarrow 3 \rightarrow 17 \rightarrow 2 \rightarrow 1$

校正累积误差时，上述机构保证分度蜗轮每转一周，误差校正凸轮 7 相对滚轮 15 也转一周，这可由下式验证：

$$\frac{43}{30} \times \frac{28}{40} = \frac{300+1}{300} = \frac{301}{300}$$

校正周期误差时，要求分度蜗杆每转一转滚轮 3 相对于周期误差凸轮 4 转一周。本机构中，周期误差校

正凸轮 4 固定在不转动的底座上,而滚轮 3 与分度蜗杆同转,上述要求得到保证。

校正机构放大系数的推算:根据校正机构中的传动关系、误差校正凸轮的基圆半径值  $R_0$ 、行星齿轮的内数比、机床分度蜗轮副的速比,以及摆杆的臂长  $L$  等参数,按图 21.6-19 可以算出校正机构的放大系数  $E(\text{mm/s})$ ,和凸轮的半径增量  $\Delta R$ 。

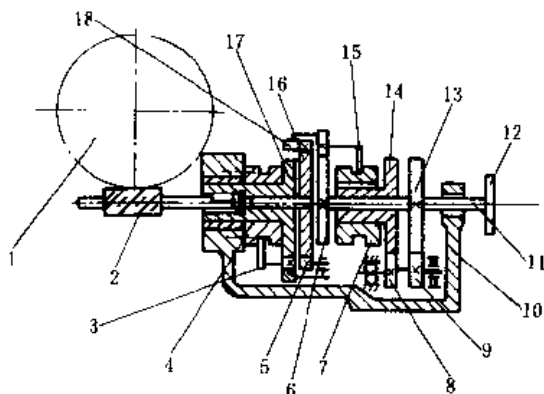


图 21.6-18 机械行星齿轮式校正机构(二)

1—分度蜗轮( $z=300$ ) 2—分度蜗杆( $K=1$ ) 3、15—摆杆滚轮 4—周期误差校正凸轮 5—行星齿轮( $z=12$ ) 6—架 7—累积误差校正凸轮 8—差动轮( $z=28$ ) 9—差动轮( $z=30$ ) 10—底座 11—分度轴 12—分齿轮  $d$  13—差动轮( $z=43$ ) 14—差动轮( $z=40$ ) 16—太阳轮( $z=44$ ) 17—套 18—行星齿轮( $z=12$ )

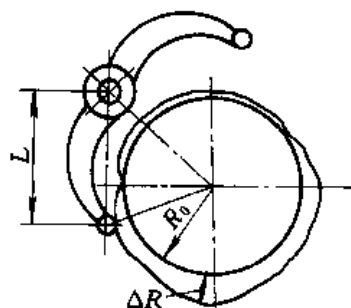


图 21.6-19 摆杆、滚轮与凸轮

$L$ —摆杆臂长(mm)  $R_0$ —校正凸轮基圆半径(mm)  $\Delta R$ —凸轮的半径增量(mm)

$$E = \left( \frac{\pi}{360^\circ \times 60 \times 60} \times \frac{z_k z_{2分} \sqrt{4L^2 - R_0^2}}{z_{1分} z_{行}} \right)$$

$$\Delta R = E \delta t_{gz} \text{ (或 } E \Delta T)$$

式中  $z_k$ ——太阳轮齿数(44);

$z_{2分}$ ——分度蜗轮齿数(300);

$z_{行}$ ——行星齿轮齿数(12);

$\delta t_{gz}$ ——滚齿机分度蜗轮副累积误差;

$z_{1分}$ ——分度蜗杆齿数(1);

$L$ ——摆杆臂长(91mm);

$R_0$ ——校正凸轮基圆半径(60mm);

$\Delta T$ ——滚齿机传动链周期误差。

根据上式及图 21.6-20 可求得:

$$E \approx 0.46 \text{ mm/s}$$

$$\Delta R = 0.46 \delta t_{gz} \text{ (或 } 0.46 \Delta T)$$

式中  $\delta t_{gz}$ ——测得的累积误差曲线各点与基准点的相对数值;

$\Delta T$ ——测得的周期误差曲线上各点与基准点的相对数值。

相应的校正凸轮各处的半径  $R$  值为:

$$R = R_0 + \Delta R$$

图 21.6-21 为对应于图 21.6-20 的机床累积误差曲线的校正凸轮。现举例求出图 21.6-20 上的点 12 在凸轮上的角度位置和半径值。

$$\theta_{12} = \frac{L_{12}}{L} \times 360^\circ = \frac{120}{215.5} \times 360^\circ = 171^\circ 46'$$

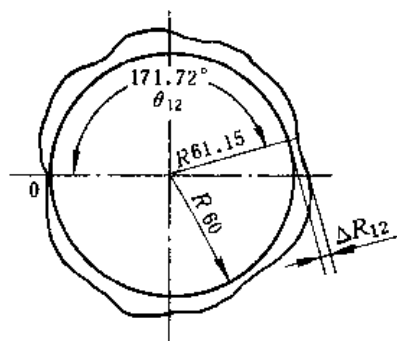


图 21.6-21 累积误差校正凸轮

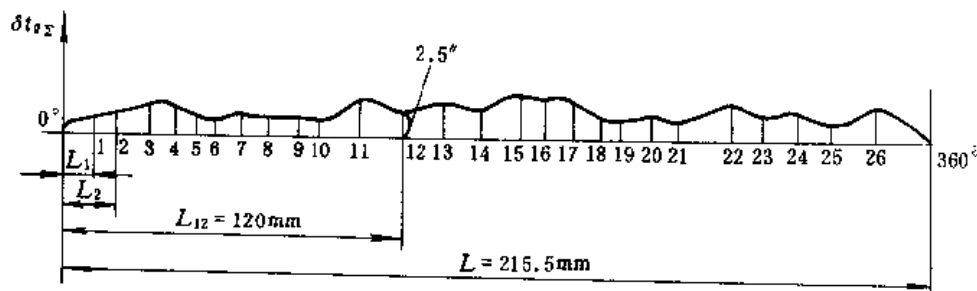


图 21.6-20 机床动态测量的累积误差曲线

$$R_{12} = R_0 + \Delta R_{12} = (60 + 1.15) \text{ mm} = 61.15 \text{ mm}$$

$$\Delta R_{12} = E \delta t_{\theta 12} = (0.45 \times 2.5) \text{ mm} = 1.15 \text{ mm}$$

式中  $\theta_{12}$  ——点 12 在凸轮上的角度位置;

$R_{12}$  ——点 12 在凸轮上的半径值;

$\Delta R_{12}$  ——点 12 处的半径增量;

$\delta t_{\theta 12}$  ——点 12 处的累积误差(此处为  $2.5''$ )。

周期误差( $\Delta T$ )的量值很小,有时近似于正弦曲线分布。此时,凸轮可简化做成一个偏心轮。偏心量  $e$  (mm)用下式计算。

$$e = \frac{1}{2} E \Delta T$$

式中  $\Delta T$  ——周期误差曲线的平均峰值(mm)。

## 1.7 精磨蜗杆齿形的机床及砂轮选择与修整

### 1.7.1 精磨蜗杆齿形的机床

图 21.6-22 所示为 NO47-4 型自动分度蜗杆磨床,其主要参数如下:

磨削最大直径和长度:304.8mm×1016mm

顶尖间最大距离:1066.8mm

磨削最大导程:304.8mm

磨削最大螺旋角:45°

工件最大重量:45.4kg

该磨床可以磨削 ZA、ZN、和 ZI 等齿形的蜗杆。机床有控制冷却液温度的制冷装置。可将冷却液的温度控制到 15°C。机床安装在 20°C±1°C 的恒温室内。安装地基应坚固防震。机床有校正螺距误差的靠模装置。

### 1.7.2 精磨蜗杆齿形时砂轮的选择

为保证精磨蜗杆齿形的精度和表面粗糙度,除正

确选用机床和切削规范外,正确选用砂轮的粒度和硬度也十分重要。

砂轮粒度主要按蜗杆齿形大小(即模数大小)决定。模数大的蜗杆选用粗粒度砂轮,模数小的蜗杆选用细粒度砂轮。例如模数 6mm 的蜗杆,可用粒度 100<sup>#</sup>~120<sup>#</sup> 的砂轮精磨齿形。模数 1mm 的蜗杆可用粒度 180<sup>#</sup>~200<sup>#</sup> 的砂轮精磨齿形。

砂轮硬度按蜗杆硬度选择。高精度蜗杆齿部均淬硬至 62HRC 以上。应选用中软的 ZR<sub>2</sub> 白色或棕色氧化铝砂轮进行精磨。对不淬硬的蜗杆,可选用较硬的碳化硅砂轮进行精磨。

### 1.7.3 精磨蜗杆齿形时砂轮的修整

蜗杆齿形精度取决于砂轮廓形的修整精度。为了修整出近似正确的砂轮廓形,上述蜗杆磨床上备有砂轮齿形修整器,其中利用金刚笔的空间圆弧轨迹可修整出近似正确的砂轮廓形。图 21.6-23 表示出近似修整砂轮廓形的原理。金刚笔尖 A 的回转平面  $u$  和通过砂轮锥面母线 DE 且与砂轮锥面相切的平面 V 形成夹角  $\theta$ 。当 A 绕其回转轴 O—O 运动时,就能在通过砂轮轴的平面 Q 中修整出 DBE 的凹形曲线。其凹入量约等于 BC。选择不同的  $\theta$  角,并调整金刚笔尖的径向位置,即可修整出不同形状的砂轮廓形。

磨削法向直廓蜗杆时,砂轮圆弧半径的近似计算可参见本篇第 1 章 2.2.2。

然而,实践证明,保证精切蜗轮所用的刀具与配对蜗杆的齿形一致,即能取得良好的工作接触精度,过分地追求理论准确的齿廓,往往导致增加工艺难度和降低经济性。

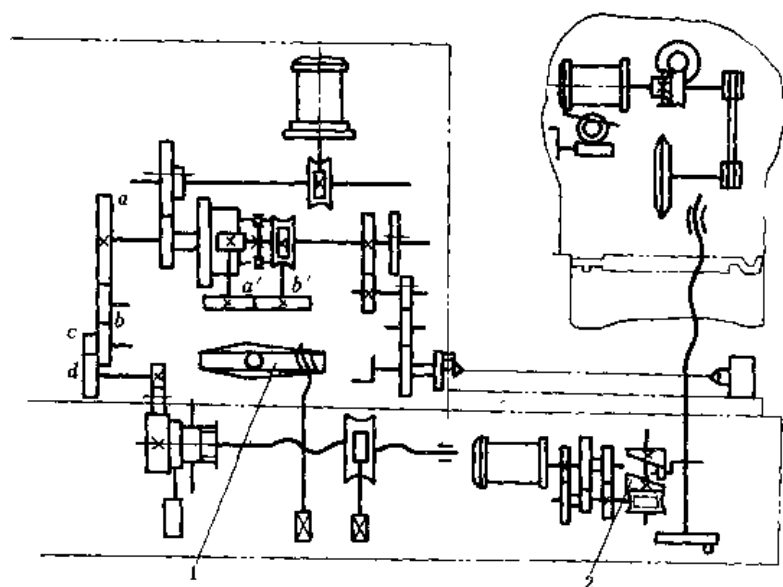


图 21.6-22 NO47-4 型自动分度蜗杆磨床  
a, b, c, d—导程交换齿轮 a', b'—速度交换齿轮 1—螺距误差校正机构 2—凸轮机构

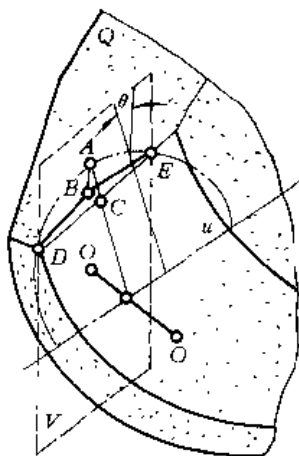


图 21.6-23 砂轮曲线廓形修整原理

## 2 精密多头圆柱蜗杆副加工

精密多头圆柱蜗杆副，常用作高速滚齿机和仪表滚齿机的分度蜗轮副。为了保证制造精度，多头蜗杆副的蜗轮齿数 $z_2$ 一般与蜗杆齿数 $z_1$ 构成不能整除的速比关系。这样就能避免精切蜗轮时刀具的分度误差和齿距误差反映到蜗轮上，影响蜗轮的加工精度。

### 2.1 精密多头圆柱蜗杆副的制造工艺

精密多头蜗杆副的制造工艺与单头高精度蜗杆副的制造工艺基本相同，只是多头蜗杆副的蜗轮一般采

用切向进给法加工齿形。

### 2.2 精密多头蜗轮滚刀

多头蜗杆副因其蜗杆齿数较多( $z_1=2\sim 10$ )及蜗轮齿数较少，难以达到较高的制造精度，特别是难以保证接触精度。

采用图 21.6-24 的特殊结构的切向滚刀加工多头蜗杆副的蜗轮，能保证蜗轮的精度和蜗杆副的接触精度。图示滚刀为加工钟表滚齿机分度蜗轮用的刀具。其参数和精度为：

参数：齿形 ZN，模数 2mm，8 头，分度圆直径 26mm，左旋。

精度及技术条件：齿距极限偏差 0.002mm，分头误差 0.002mm，螺旋线偏差：每转 0.003mm；每 3 转 0.005mm，刀齿前刃面径向性允差： $+0.01\text{mm}$ ，圆周齿距累积误差：0.025mm，容屑槽导程及其允差： $(132.7\pm 1.3)\text{mm}$ ，齿形直线性允差：0.003mm，淬火硬度 62HRC，材料：M42，每头螺旋线只留 1 个精刀齿（标准齿）。碳化物偏析：3~4 级。

这种滚刀的结构和制造有以下特点：

粗刀齿左右齿侧的导程不等，形成沿轴向变齿厚的刀齿。但最厚的粗刀齿的厚度必须小于精刀齿的厚度。

每头螺旋线上仅留有 1 个精刀齿。其左右齿侧导程相等，并等于与所切蜗轮相配蜗杆的导程。

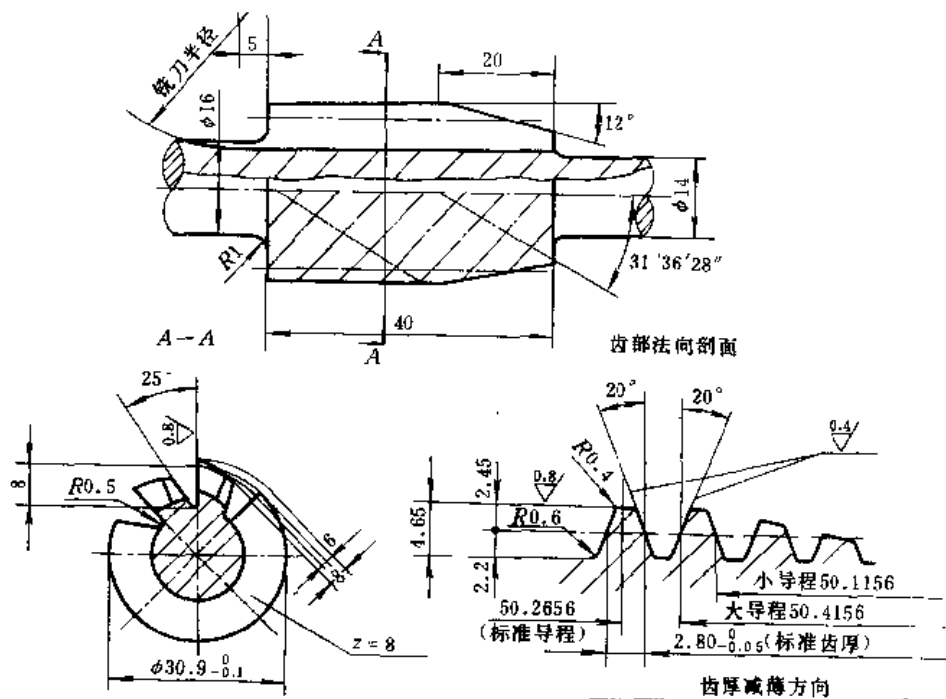


图 21.6-24 切向多头蜗轮滚刀

切削时,每个刀齿的切削量相等,因而使用时间长。

蜗轮的齿形由精刀齿最终切成,从而保证了蜗轮齿形的一致性,使蜗轮副接触精度得以提高。

精铲磨刀齿时,先按精刀齿导程搭配交换齿轮,铲磨全部刀齿,待精度和齿厚达到要求后,再按粗刀齿左右齿面的导程交换齿轮,将粗刀齿磨薄,但以不磨到精刀齿为限。

### 3 精密双导程圆柱蜗杆、蜗轮加工

双导程蜗杆副中,蜗杆左右齿面导程的数值不等,蜗杆齿厚沿轴向逐渐增减。所以又称变齿厚蜗杆。

双导程蜗杆副用在中心距不调整的结构中。装配啮合时,将蜗杆从轴向旋入。啮合侧隙的大小,由改变蜗杆的轴向位置来调整。

#### 3.1 精密双导程蜗杆齿形加工

双导程蜗杆的齿形与普通蜗杆一样,可以设计成ZA、ZN或ZI型。图21.6-25为ZN型双导程蜗杆。制造方法与单导程蜗杆基本相同,但齿形加工时,应分别按左右齿面的导程搭配交换齿轮进行加工。当模数不小于5mm时,先用厚度小于蜗杆最小齿底宽度的刀具按公称导程搭配交换齿轮切槽。然后,再搭配交换齿轮用精切刀具分别修切左右齿面。

双导程蜗杆齿厚的控制:齿厚应在标准齿厚处进行测量。在标准齿厚处的圆周上刻出线痕。标准齿的齿厚以精切蜗轮齿形的刀具(滚刀或剃齿刀)的标准齿的实际齿厚为基准,再减去一个侧隙量。

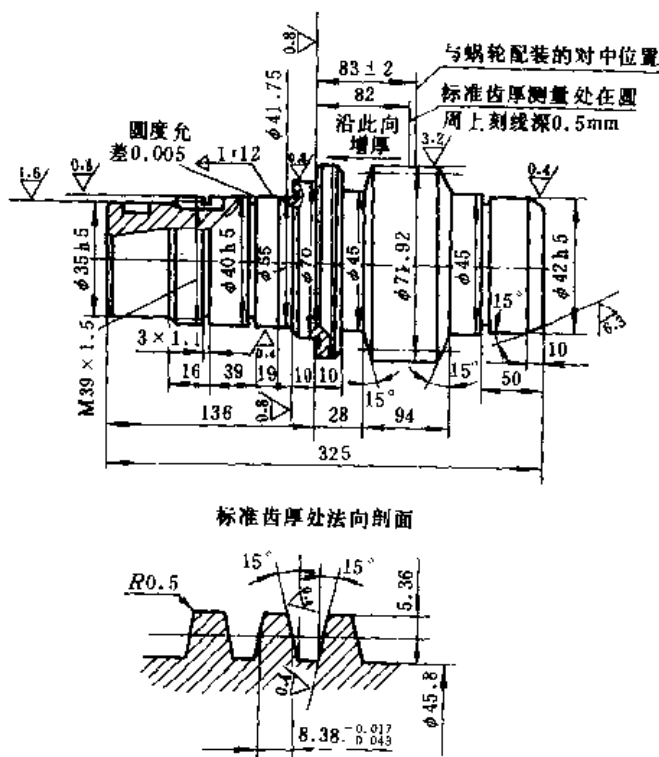
#### 3.2 精密双导程蜗轮齿形加工

双导程分度蜗轮(见图21.6-26)的加工方法,除齿形外,其余与单头分度蜗轮基本相同。

双导程蜗轮齿形精确而简便的加工方法,是用径向蜗轮滚刀(剃齿刀)按径向进给进行切齿。刀具的标准齿必须通过滚齿机工作台中心,见图21.6-27。而且,刀具的安装方向,应与蜗杆蜗轮的安装方向一致。

如果双导程蜗杆副是多头蜗杆副,蜗轮齿形也可以用切向滚刀或飞刀按切向进给法加工。但刀具的最大齿厚应小于蜗杆的最小齿槽。切向滚齿时分别按左右齿面的导程搭配差动交换齿轮,分两道工序切削。由于左右齿形两次切成,齿厚较难控制。保证齿厚准确的方法,是在切好第一侧齿面后,测准轮齿厚度,将刀具轴向移动一个距离(这个移动量等于测得的齿厚减去标准齿的齿厚),然后再加工另一侧齿面。

双导程切向蜗轮滚刀,也可以用按左右齿面导程分别设计成的两把单导程滚刀代替。刀齿厚度与切齿方法和双导程切向滚刀切齿时相同。



精度等级	5	螺旋方向	右
齿型	法向直廓	齿形左边的螺旋角	$4^{\circ}58'44''$
齿数	1	齿形右边的螺旋角	$4^{\circ}48'58''$
公称模数	5.36	蜗杆轴向移动1mm时的轴向齿厚增量	0.033
公称导程	16.839		
导程	齿形左边	相配蜗轮齿数	48
	齿形右边	公称节圆直径	61.2

图 21.6-25 双导程分度蜗杆