

第 22 篇 摆线、谐波及非圆齿轮加工

主 编 王贵海(第二炮兵学院)

编写人

审稿人

第 1 章 何卫东 李力行

王贵海

曹云龙(扬州琼花传动机械总厂)

巨宏正(秦川机床集团有限公司)

第 2 章 许元礼(国防科工委后勤部应用技术研究所)

尹仪芳(中国科学院电工所)

第 3 章 尹种芳(天津第一机床厂)

吴序堂(西安交通大学)

王贵海

第 1 章 摆线齿轮加工

1 概述

摆线针轮行星减速器的制造,关键是对摆线轮、针齿壳、输出轴和双偏心套 4 个关键件的加工。

为了充分发挥摆线针轮行星减速器多内啮合,承载能力大、传动平稳的优点,在加工工艺上要特别注意保证摆线轮优化齿形的精度、摆线轮齿与针轮齿的分度精度、摆线轮上输出机构等分销孔及输出轴上输出机构等分销孔的分度精度。下面分别加以论述。

2 摆线轮加工工艺

2.1 摆线轮的材料选择

作为减速器的关键零件之一的摆线轮,无论其齿面、等分销孔及轴承孔都担负着最重要的传递力的使命,其受力情况复杂,因此,摆线轮的材料必须具有高强度、良好的切削加工性、淬透性及回火稳定性,并经适当的热处理后能获得较高的硬度和耐磨性。

摆线轮的材料通常选用 GCr15 或者 GCr15SiMn,其中以 GCr15 应用最为广泛。但对规格(尺寸)较大的摆线轮应选用 GCr15SiMn 以增加其淬透性。

2.2 摆线轮的加工工艺路线

根据摆线轮的技术要求(见第 8 篇表 8.1-8、图 8.1-40),确定摆线轮的工艺路线如下:

下料→锻造→球化退火→粗车(内、外圆及两平面)→粗钻销孔→时效→半精车→半精镗销孔→打标→铣摆线齿廓→淬火→探伤、检查硬度→磨两平面→磨轴承孔→磨销孔→磨摆线齿廓→探伤→倒角。其中标记应成对打在同一位置,以后的铣齿、磨销孔、磨齿等工序必须标记重叠成对加工。

2.3 摆线轮热处理工艺

2.3.1 球化退火

为了降低锻件硬度,以利切削加工,并使其组织成为均匀分布的细粒状珠光体,为以后的淬火提供良好的原始组织,且淬火后获得最佳的力学性能,必须对摆线轮锻造坯件进行球化退火。

图 22.1-1 为摆线轮坯件退火工艺简图,退火后坯件达到的硬度 GCr15 为 170~207HBS,GCr15SiMn 为 179~217HBS。摆线轮球化退火应注意以下几项:

(1) 为了获得最佳的退火组织,必须严格控制锻造加热温度、终锻温度以及冷却方式,力求锻造后的组织为细珠光体类型及细小的网状碳化物。

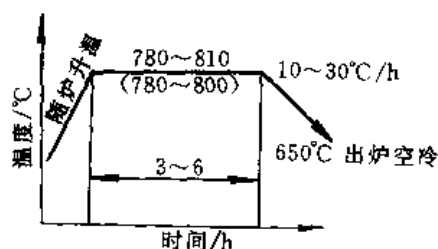


图 22.1-1 摆线轮坯件球化退火工艺图

摆线轮坯件锻造加热与冷却工艺规范见表 22.1-1。

表 22.1-1 摆线轮坯锻造工艺规范

材料	加热温度/°C	终锻温度/°C (不低于)	冷 却
GCr15	1050~1080	830~860	散放于干燥的地方进行空冷或者吹风冷却,不允许成堆堆放冷却
GCr15SiMn	1030~1100	830	大于 600~650°C 单独放在地上冷却(空冷) 低于 600~650°C 埋在砂中缓慢冷却 低于 100°C 时坯件出灰

(2) 根据加热设备的均温性、工件大小、装炉方法及装炉量确定正确的保温时间。

(3) 冷却速度不应太快,否则球化不完全,坯件的硬度增加,不易进行切削加工,冷却速度太慢则碳化物颗粒粗大,从而使切削性能变坏。

(4) 退火后要在不同的炉子温度区域选取试样进行检查。

2.3.2 淬火

(1) 根据不同规格摆线轮的厚度,确定其不同的加热温度,各种规格(机型)摆线轮淬火加热温度见表22.1-2。

表 22.1-2 摆线轮淬火加热温度

材 料	机 型 号	加热温度/°C
GCr15	B10~B18	845~850
	≥B22	845~860
GCr15SiMn	≤B22	820~830
	B27~B33	825~835
	B39~B45	835~840
	≥B55	835~845

(2) 加热时间包括升温及保温时间。升温时间与装炉方式、装炉量、加热方式等有关。在炉中加热时,升温时间按装炉量确定,为15~20s/kg。

保温时间根据不同规格减速器摆线轮的厚度确定,其保温时间见表22.1-3。

表 22.1-3 摆线轮淬火保温时间

材 料	机 型 号	保温时间/min	
		盐 炉	电 炉
GCr15	B10~B18	9~12	12~15
	≥B22	12~15	15~20
GCr15SiMn	B10~B18	10~12	14~16
	B22	12~15	16~18
	B27	15~19	18~20
	B33	19~22	20~24
	B39	22~24	24~26
	B45	24~26	26~28
	≥B55	—	32~33

(3) 摆线轮淬火的冷却介质为22号L-AN全损耗系统用油、10号轻柴油等,冷却方法采用快速插入后强力搅动,自动摇筐等方法。

摆线轮淬火后,还需进行回火处理,回火温度为150~180°C;回火时间为2.5~3h。

除此以外,还可以通过冷处理进一步减少淬火组织中残余奥氏体量,使剩余的少量的奥氏体更加稳定,从而增加硬度和尺寸稳定性。冷处理的工艺规范为:

淬火后→冷却到室温→流动水冲洗→-70°C冷处理→保温1~1.5h。

冷处理通常采用冷冻机和干冰酒精溶液(最低温度为-78°C)。

2.4 摆线轮的机械加工工艺

在摆线轮整个机械加工过程中,摆线轮的齿廓和等分销孔的加工是至关重要的。下面分别介绍比较典型的几种加工方法。

2.4.1 摆线轮齿廓的加工

(1) 在滚齿机上改装铣削头用立铣刀铣摆线齿廓

1) 加工原理 这种加工方法是根据短幅外摆线的第一种形成方法,即外滚法来加工摆线轮齿廓的。

如图22.1-2所示,当滚圆 r 相对基圆 R 做纯滚动时,滚圆内点 M 的轨迹就是短幅外摆线。如若把一个半径为 r_c 的圆之圆心固定在 M 点上,当滚圆 r 相对基圆 R 做纯滚动时即可得到与 r_c 圆相切的短幅外摆线的等距曲线。

现在假定将半径为 r_c 的铣刀装在 M 点的位置上,或者说把铣刀安装在铣削头的偏心轴套上,其偏心距为 a ,而将摆线轮毛坯固定在滚齿机的工作台上。加工摆线轮齿廓时,铣刀自转的同时还绕偏心轴套的中心线做偏心转动,工件绕工作台中心转动。如果偏心轴套的转速(铣刀偏心运动转速) $n_{\text{刀套}}$ 与工作台的转速 $n_{\text{工作台}}$ 之比满足式(22.1-1),此时铣刀就将在摆线轮上铣出一条连续的短幅外摆线的等距曲线,即齿数为 z_c 的摆线轮的齿廓曲线。

$$\frac{n_{\text{刀套}}}{n_{\text{工作台}}} = \frac{R}{r} = z_c \quad (22.1-1)$$

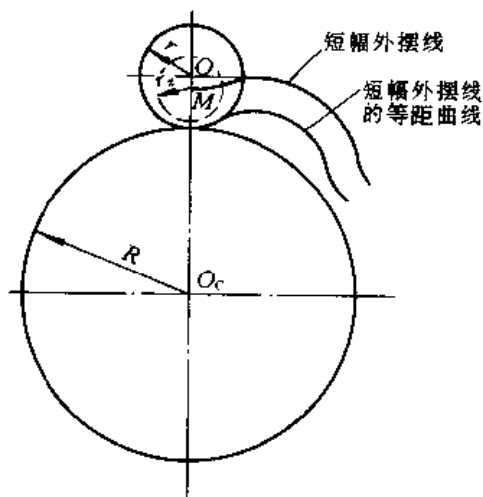


图 22.1-2 短幅外摆线形成原理图

2) 滚齿机床的改装 将原滚齿机的刀架滑板全部拆除,换以自行设计制造的铣削头即可。用以改装的滚齿机型号可以根据工厂的实际情况和加工需要而定,现以Y38-1型滚齿机为例。

和偏心套7(图22.1-5)组成的双偏心结构,通过调整偏心轴与偏心套的相对角度位置来实现不同的偏心距。

通常在偏心套与偏心轴上刻有相应的刻度线,当需要调整偏心距时,松开偏心轴与偏心轴套之间的锁紧螺母,将偏心轴上相应的刻度线转到偏心轴套上基准刻线的位置上(对正),然后固紧锁紧螺母。

铣削头铣削摆线轮齿廓时的铣齿运动同样是由滚齿的分齿交换齿轮传动系统来实现的。如前所述,改装之铣削头的公转转速与原滚刀转速保持一致,因而原滚齿机的交换齿轮计算公式完全适用于铣削头铣摆线轮齿廓。表22.1-4为摆线轮铣齿分齿交换齿轮表。

表 22.1-4 摆线轮铣齿分齿交换齿轮表

摆线轮齿数 z_c	a	b	c	d
9	48	20	50	45
11				55
13			40	42
17		60	60	34
23				46
29				58
35		30	30	35
43				43
59				59
71				71
87				87

交换齿轮计算公式(以Y3150E为例):

$$\frac{ac}{bd} = 24 \times \frac{1}{z_c} \quad (22.1-2)$$

式中 a, b, c, d ——分齿交换齿轮;

z_c ——摆线轮齿数。

铣削头铣摆线轮时的进给运动可分为径向进给运动和轴向进给运动,以Y3150E滚齿机为例,其径向进给运动是靠手动实现的,方头手摇手柄每旋转一周,工作台水平移动2mm,其刻度盘上每小格为0.02mm,铣削摆线轮齿廓时其径向进给量为0.05~0.10mm/r。

因为铣削摆线轮时,摆线轮齿形沿轴向一次形成,无需上下走刀,只需快速进给及退出。用于工件的装卸,铣刀上下位置的少量调整可通过手动进行。

滚齿机铣削摆线齿廓铣削头结构总装图见图22.1-7。

此种加工方法只需对已有的旧滚齿机床,拆除刀架及其滑板部分,换以摆线铣削头即可。加工所用刀具为普通标准立铣刀,通用性强。它可以加工摆线轮的外摆线齿廓,又可以用来加工针齿壳的内摆线。其生产效率和精度均一般,对生产批量不大的情况是比较理想的一种加工方法。

(2) 在插齿机上用半圆头插刀插齿

1) 加工原理 这是将插齿机改装成靠模插齿机对摆线轮进行摆线齿廓切削加工的一种方法。其齿廓的形状是由靠模凸轮的形状确定的。图22.1-8为靠模插齿机插削摆线轮摆线齿廓示意图。

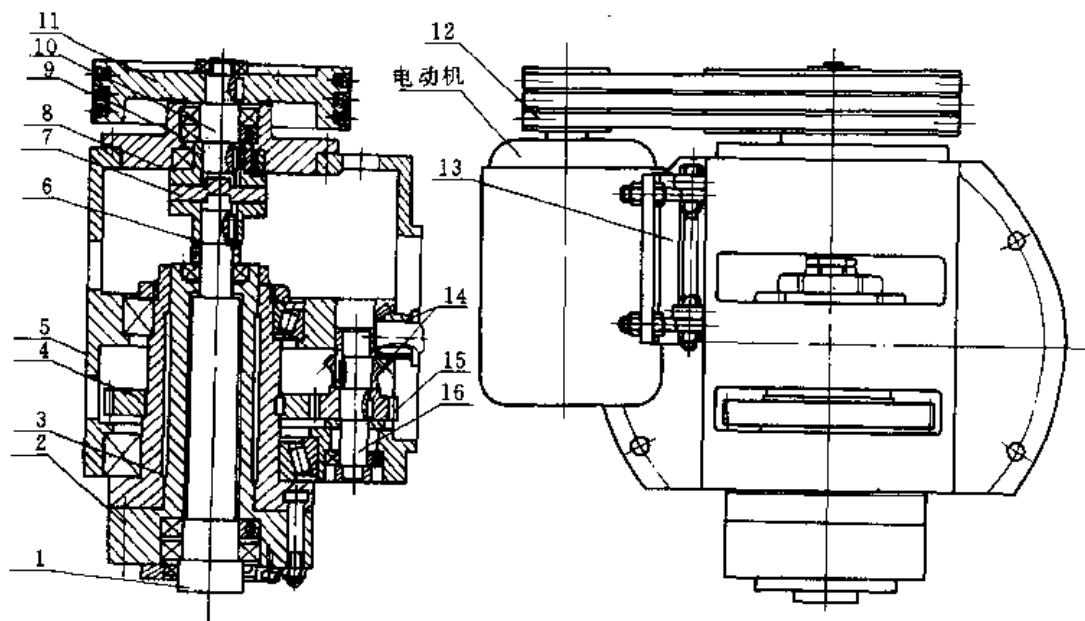


图 22.1-7 铣削头总装图

1—主轴 2—偏心轴 3—偏心轴套 4—齿轮 5—箱体 6~8—十字滑块联轴器 9—连接套
10—轴 11,12—带传动 13—支承板 14—锥齿轮 15—齿轮 16—连接轴

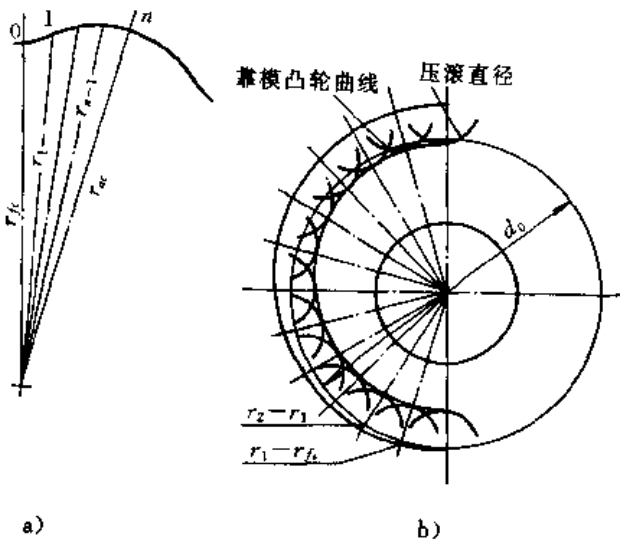
3) 靠模凸轮的设计与制造 靠模凸轮曲线通常可以由设计计算方法和样板法两种方法获得。

表 22.1-5 插齿分齿交换齿轮表

摆线轮齿数	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
9	33	20	30	45
11				55
13				65
17				85
23		40	24	46
29				58
35				70
43				86
59		80		59
71				71
87				87

设计计算法是取凸轮的基圆直径 d_0 等于 Y54A 型插齿机上进给凸轮的基圆直径, 将基圆 d_0 分成若干等分, 利用凸轮转一转摆线轮转一齿的关系, 将对应的摆线轮所转的角度代入摆线轮齿廓方程式内, 便可以求得齿廓上各点的极半径值。在基圆 d_0 上, 对应各等分转角, 用摆线齿廓上相应点极半径与前一点极半径之差值取点作为中心, 以 Y54A 插齿机上靠模凸轮的压滚直径为直径绘图, 其等距曲线即为靠模凸轮曲线。

图 22.1-10 为用设计计算法求靠模凸轮曲线。



动 O_H 轴上装的偏心套 9, 使工作台 8 绕 O_H 转动(即公转)。

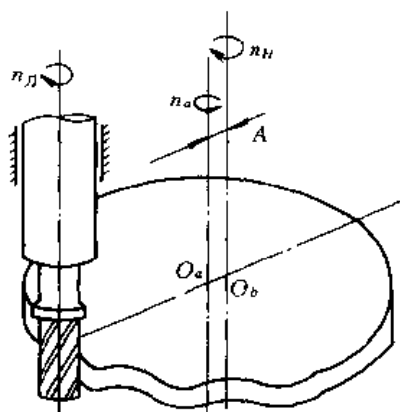


图 22.1-13 在立铣上铣摆线齿廓的原理

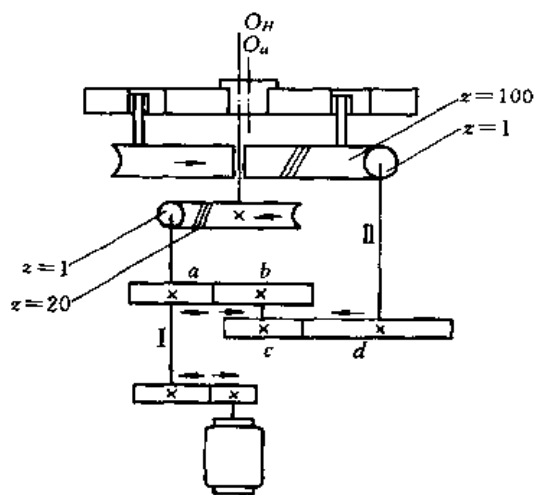


图 22.1-14 夹具的传动原理

自转运动的传动路线为：电动机通过一对齿轮 1、3 带动轴 I 转动，并经过交换齿轮 a, b, c, d 带动轴 II 转动。轴 II 上的蜗杆 11 带动空套在 O_H 轴上的蜗轮 10 转动，在蜗轮 10 上装有柱销 6。柱销与套在其上的柱销套 7 一同插入工作台 8 上的柱销孔中，当蜗轮 10 转动时，通过柱销、柱销套作用于柱销孔使工作台绕偏心套的中心 O_A 转动(即自转)。

公转与自转的转速比应满足以下关系，

$$\frac{n_H}{n_A} = -z_c$$

式中 z_c ——被加工摆线轮齿数。

为了满足上式的关系，只要调整交换齿轮 a, b, c, d 的齿数。

由图 22.1-14 可知， n_a 与 n_H 的关系为

$$\frac{n_H}{n_a} = -\frac{1}{20} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{d}{c} \cdot \frac{100}{1} = -5 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{d}{c}$$

若要

$$\frac{n_H}{n_a} = -z_c, \text{ 只要}$$

$$-5 \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{d}{c} = -z_c$$

即

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{5}{z_c} \quad (22.1-7)$$

例如铣 $z_c=11$ 的摆线轮，则其交换齿轮的齿数应为

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{5}{11} = \frac{30}{44} \times \frac{40}{60}$$

为了使夹具能加工偏心距不同的摆线轮，需要更换偏心套和柱销套。偏心套的偏心距应等于被加工摆线轮的偏心距 A ；根据孔销式 W 机构的原理，柱销套的直径与柱销孔直径、偏心距 A 之间的关系应满足以下关系，即：

$$\text{柱销套直径} = \text{柱销孔直径} - 2A$$

有些工厂采用可调式双偏心套(见图 22.1-15a)代替一系列的单个偏心套。把偏心套 2 相对于偏心套 1 转动，达到所需要的偏心距后，用骑缝螺钉 3 将两者固定，使其不能再做相对转动。

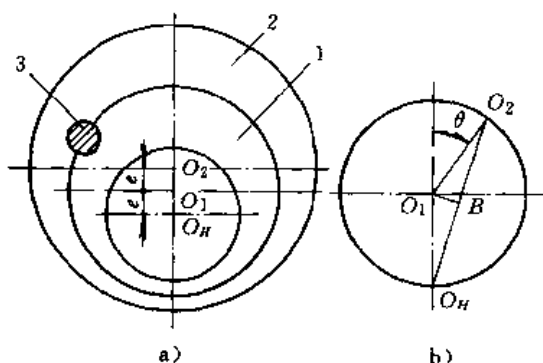


图 22.1-15 双偏心套的原理

a) 结构原理 b) 偏心距调整计算方法

设 O_H 为轴的回转中心， O_1 为偏心套 1 的中心， O_2 为偏心套 2 的中心；并设偏心套 1 对 O_H 的偏心距为 e ，偏心套 2 对 O_1 的偏心距也为 e 。当偏心套 2 相对偏心套 1 转过一角度 θ 时(见图 22.1-15b)，则 O_2 相对于轴的回转中心 O_H 的偏心距 A 为

$$A = \overline{O_H O_2} = 2\overline{O_H B} = 2e \cos \frac{\theta}{2} \quad (22.1-8)$$

双偏心套的原理如图 22.1-15 所示，若设计时取 $e=4$ ，则式(22.1-8)简化为

$$A = 8 \cos \frac{\theta}{2}$$

因此，如要求的偏心距 $A=8\text{mm}$ 时，则需使：

$$\cos \frac{\theta}{2} = 1 \quad \text{即 } \theta = 0^\circ$$

如要求的偏心距 $A=4\text{mm}$ 时,则需:

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{1}{2} \quad \text{即 } \theta = 120^\circ$$

根据上式可确定两个偏心套相对角度位置和骑缝销钉孔的位置。加工销孔时,应把两个偏心套装在一起,按偏心距准确调整好后进行。

这种加工方法比较简单易行,加工精度和效率一般,适用于中等批量,小规格的摆线轮加工。

(6) 在摆线磨床上磨齿 摆线磨床也是根据短幅外摆线的第二种形成法磨削摆线轮齿廓的。磨床的工作原理是模拟摆线针轮行星减速器的传动原理,砂轮相当于针齿,工作台上的工件相当于做行星运动的摆线轮。在加工过程中,砂轮对工件的切削运动就相当于一个针齿与摆线轮的啮合运动,砂轮表面修整成针齿半径 r_s 的圆弧,磨削时砂轮除转动外,只作上下往复运动,因此形成摆线的展成运动是由工作台的行星运动来实现的。

图 22.1-16 是 Y7654 型摆线磨床的传动系统图。

由机床传动系统图可知,工作台的运动由公转和

自转运动两部分组成。

公转运动是由电磁调速异步电动机 4 经过一对 V 带轮 5、6 (传动比等于 2) 传给一对交错轴斜齿轮 7、8,斜齿轮 8 带动工作台中间的主轴 O_H 转动。在主轴 O_H 的锥面上装有精度很高的偏心套 12,通过偏心套使工作台 11 作逆时针方向的公转运动。其转速为

$$n_H = n_{\text{电机}} \times \frac{1}{2} \times \frac{24}{48} \quad (22.1-9)$$

自转运动是由电磁调速异步电动机 4 经过一对 V 带轮 5、6 带动分齿交换齿轮 A、B、C、D,再带动精密的传动蜗杆 10 和蜗轮 9,使蜗轮作顺时针方向转动。在蜗轮 9 与工作台之间装有一个十字滑块联轴器。通过十字滑块联轴器将蜗轮的转动传递给工作台,使工作台做顺时针方向转动,即自转运动,其转速为

$$n_i = n_{\text{电机}} \times \frac{1}{2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{C}{D} \cdot \frac{2}{99} \quad (22.1-10)$$

式中 A, B, C, D ——分齿交换齿轮齿数。

由摆线针轮行星减速器的传动比

$$i_{HC} = \frac{\omega_H}{\omega_C} = \frac{n_H}{n_C} = -z_c$$

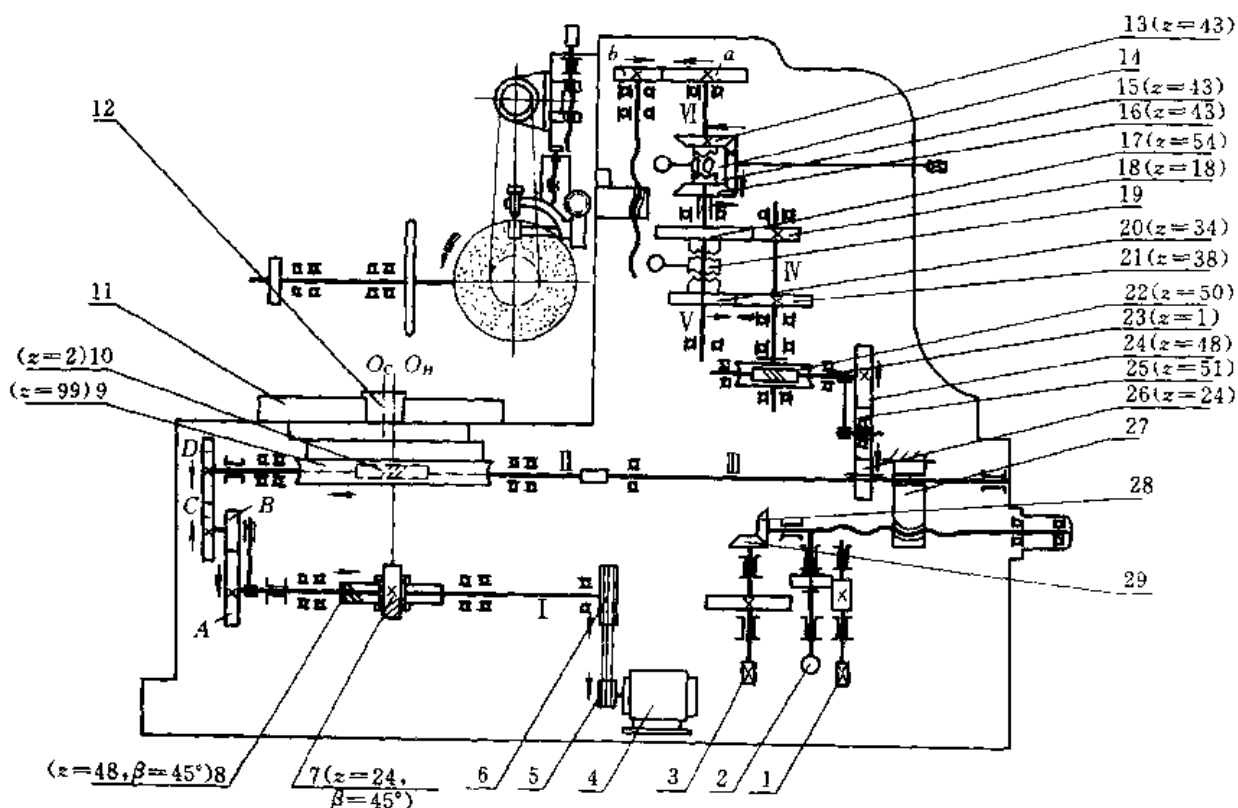


图 22.1-16 Y7654 型摆线磨床传动系统图

- 1、2、3—手柄 4—电动机 5、6—带轮 7、10、23—蜗杆 8、9、22—蜗轮 11—工作台
12—偏心套 13、15~18、20、21、24~26、28、29—齿轮 14、19—离合器 27—螺母座

可知,工作台的公转转速与自转转速之比等于被加工工件的齿数 z_1 。由式(22.1-9)和公式(22.1-10)可得

$$\frac{n_H}{n_c} = -\frac{24}{48} \left/ \left(\frac{A}{B} \cdot \frac{C}{D} \cdot \frac{2}{99} \right) \right. = -z_1$$

经整理后得分齿交换齿轮比为

$$\frac{A \cdot C}{B \cdot D} = \frac{99}{4z_1} \quad (22.1-11)$$

因此我们可以根据所加工的摆线轮的齿数来选择所需分齿交换齿轮的齿数。

在 Y7654 型摆线磨齿机上,分齿交换齿轮可按表 22.1-10 选取(QC001 型摆线磨齿机同)。

表 22.1-10 分齿交换齿轮表(Y7654)

摆线齿数 z_1	A	B	C	D
9	84	56	66	36
11				44
13				52
17				68
23			33	46
29				58
35				70
43				86
59	33	59	60	80
71	60	80	33	71
87				87

为了使摆线轮整个齿厚都能得到磨削,就必须使砂轮作上下垂直移动。其运动是在蜗杆 10 右端用一个套筒式联轴器与花键轴 III 相联接。当蜗杆 10 转动时通过齿轮 26、25 和 24 带动立柱上蜗杆 23、蜗轮 22 转动,在轴 IV 上装有直齿轮 21、18,始终与在轴 V 上空转的齿轮 20、17 啮合着。用手柄使离合器 19 的端面牙齿与齿轮 20 端面上的牙齿接合,就得到一组粗磨的垂直进给速度;另一种情况是用手柄使离合器 19 的端面牙齿与齿轮 17 端面上的牙齿接合,就可得到一组精磨的垂直进给速度。当粗磨或精磨位置选定后,动力经过离合器 19 传给轴 V。轴 V 的运动又传给离合器 14,在离合器 14 与锥齿轮 16 端面上的牙齿接合时,经过锥齿轮 15、13 使轴 VI 的转向与轴 V 相反,再经过垂直进给交换齿轮 a 和 b 使丝杠做逆时针方向转动,这时丝杠带动砂轮架滑座向下移动。当离合器 14 与锥齿轮 13 端面上的牙齿接合时,轴 VI 的转向与轴 V 相同,这时砂轮架滑座向上移动。

调整机床时,可用手柄操纵离合器 14 使砂轮架滑座上下移动;在正常运转时,是用装在砂轮架滑座上的

两个限位撞块操纵离合器 14,使砂轮架滑座自动换向。

工作台每转一转,砂轮在垂直方向的进给量计算如下:

粗磨时的垂直进给量:

$$S_{\text{粗}} = 1 \times \frac{99}{2} \times \frac{24}{51} \times \frac{51}{48} \times \frac{1}{50} \times \frac{38}{34} \times 1 \times \frac{a}{b} \times 2 = \frac{1881}{1700} \times \frac{a}{b} \quad (22.1-12)$$

精磨时的垂直进给量:

$$S_{\text{精}} = 1 \times \frac{99}{2} \times \frac{24}{51} \times \frac{51}{48} \times \frac{1}{50} \times \frac{18}{54} \times 1 \times \frac{a}{b} \times 2 = \frac{33}{100} \times \frac{a}{b} \quad (22.1-13)$$

根据工件的材料、硬度和加工表面粗糙度等实际情况,按表 22.1-11 选用合适的交换齿轮,以求得适宜的垂直进给量。

表 22.1-11 垂直进给交换齿轮表

交换齿轮		工作台转 转垂直进给量/mm	
a	b	粗 磨	精 磨
20	70	0.32	0.09
25	65	0.42	0.13
30	60	0.56	0.16
34	56	0.67	0.20
40	50	0.89	0.26

Y7654 摆线磨床的径向进给亦有粗进给和精进给两种。

粗进给时,把手柄 2 推进,转动方头手柄 3,经过锥齿轮 29 和 28 使丝杠转动,丝杠就带动固定在立柱上的螺母座 27 移动,这样就可使立柱壳体作前进和后退的动作,从而达到对工件的径向进刀和退刀。

精进给时,把手柄 2 拉出,使手柄 2 上的齿轮与手柄 1 和 3 上的齿轮相啮合,然后转动手柄 1 就可以得到对工件的精进给量。

偏心量的调整:

当磨削工件的偏心距不同时,可根据所磨工件的偏心距来选择工作台 11 中不同规格的偏心套 12 来达到加工不同的摆线轮工件的目的。需注意的是,在老式 Y7654 和 QC001 型摆线磨齿机中,蜗轮 10 与工作台 11 之间采用孔销式 W 机构,加工不同偏心距的摆线轮时应成组调换偏心套和与其匹配的柱销套,每组包括一个偏心套和三个柱销套,并应满足:

柱销套外径 = 工作台上柱销孔直径 - 2a

式中 a——偏心距。

(7) 砂带磨齿 用砂带磨削摆线轮齿廓是利用现

有的摆线磨床,更换其磨头,用砂带对摆线轮齿廓进行精加工的一种方法。与前面的磨齿法比较,砂带磨削为全齿宽切削,无需垂直进给,因而磨削效率提高,另外砂带比砂轮轻,转动惯量小,因而电动机功率的利用率提高。图 22.1-17 为砂带磨削示意图。

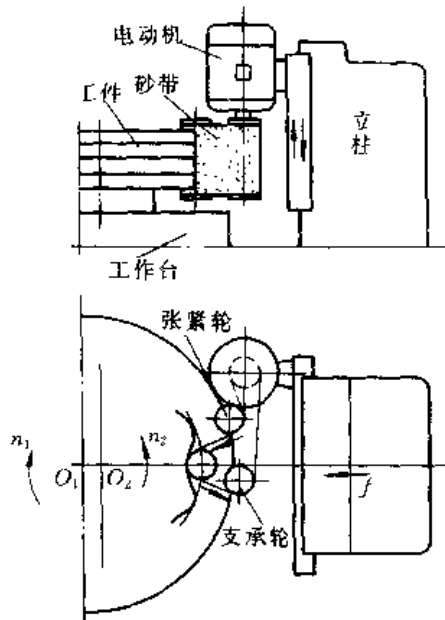


图 22.1-17 砂带磨削法示意图

砂带磨削的有关工艺参数:

砂带粒度: $60^{\#} \sim 100^{\#}$

砂带速度: $17 \sim 25 \text{ m/s}$

工作台转速: $75 \sim 125 \text{ r/min}$

切入进给速度为: $0.02 \sim 0.04 \text{ mm/r}$ 。

砂带磨削法具有磨削过程中砂带掉砂比较严重;砂带带长增加需经常调整及对摆线轮齿廓粗加工的加工精度要求高等缺点。

(8) 二齿差传动摆线轮齿廓的加工 由“二齿差”摆线针轮传动原理可知,在“二齿差”传动中摆线轮的齿廓是由两条相位相差半个周节的“一齿差”摆线轮齿廓相交而形成,见第 8 篇图 8.1-18。

所以“二齿差”摆线轮齿廓的加工完全可以和“一齿差”摆线轮齿廓的加工一样,只不过是其全部齿廓曲线需工作台(工件)转两周,即 720° 才能完全形成,而工作台(工件)转一周时只能加工出一条齿数为 $1/2z_c'$ (z_c' 为“二齿差”摆线轮齿数)的齿廓曲线来。因此,在具体的加工操作当中各分齿交换齿轮的计算公式中的工件(摆线轮)的齿数 z_c 应取 $1/2z_c'$ 。

举例说明,假设现需磨削一个齿数为 25 的“二齿差”摆线轮时,由公式(22.1-11)可得其交换齿轮计算公式为

$$\frac{A}{B} \cdot \frac{C}{D} = \frac{99}{4 \times 1/2z_c'} = \frac{99}{4 \times 12.5}$$

上式意味着,加工时当摆线轮转一转时只能加工出一条齿数为 12.5 的齿廓曲线;而当摆线轮转第二转时则加工出另一条与第一条相同的齿廓曲线。因为两条齿廓曲线的齿数为 12.5,所以加工出来的两条齿廓曲线的相位就必定与第一条齿廓曲线相差半个齿(半个周节)。这样加工出来的两条曲线就形成了“二齿差”传动的摆线轮的齿廓曲线。

由上述可知,“二齿差”传动中摆线轮是由两条相位相差半个周节的二条“一齿差”摆线轮的齿廓曲线相交而成的,所以其齿顶为一尖点。尖点削弱了齿顶部强度,同时还将在传动中引起较强的噪声,因此需优选出一条与齿形工作部分圆滑相连的齿顶修形曲线来修掉齿顶尖点。齿顶修形曲线的优选方法及加工方法在第 8 篇第 1.2 节中已有详细介绍。

当加工“二齿差”传动的摆线轮的齿数为偶数(如 $z_c=18$)时,加工方法与上述略有不同。

此时,“二齿差”传动摆线轮的齿廓曲线就不可能通过一次连续分度加工完成,而是要在加工完成第一条,即 $z_c=9$ 的齿廓曲线后进行第二次重新分度,再加工第二条 $z_c=9$ 的齿廓曲线,二者相位相差同样为半个周节。当加工完第一条曲线后,脱开分齿交换齿轮传动链,用手动将工作台(工件)转过半个周节的角度,然后再重新合上分齿交换齿轮进行第二条与第一条完全相同的齿廓曲线的加工。其齿顶修形的操作与前述相同,即不论加工奇数齿或偶数齿都是一样的。

2.4.2 摆线轮销孔的加工

1. 摆线轮销孔的粗加工与半精加工

摆线轮销孔的粗加工一般可采用钻削加工,而销孔的半精加工则多采用镗削加工。目前还没有定型的加工机床,一般都是利用自制的简易设备,在车床上或卧式铣床上及自制的销孔镗床上实现。其基本加工原理如图 22.1-18 所示。工件与分度盘固连并同轴作间断的旋转分度运动。加工过程中,镗头作高速旋转,走刀可以由工件(工作台)移动来实现,也可以由镗头的移动来实现;而进给运动则是由镗头自身通过调整刀头或进刀偏心机构来实现。工作的回转中心与镗头中心的距离,则是根据工件的销孔分布圆半径,一次性调整好。

2. 摆线轮销孔的精磨

摆线轮销孔的磨削加工与半精镗大致相同,只是为了使砂轮获得较充分的磨削线速度及进刀,摆线轮必须实现以销孔中心为回转中心,工件偏心地安装于机床主轴上,偏心距等于销孔分布圆半径。工件与分度

盘固定可进行间断分度。加工过程中,工件绕销孔中心线旋转,砂轮作轴向进给和径向进给。具体加工方法有:

(1) 在普通磨床(内孔磨或万能磨)上附加偏心分度胎具磨削摆线轮销孔,图 22.1-19 为偏心分度胎具结构图。

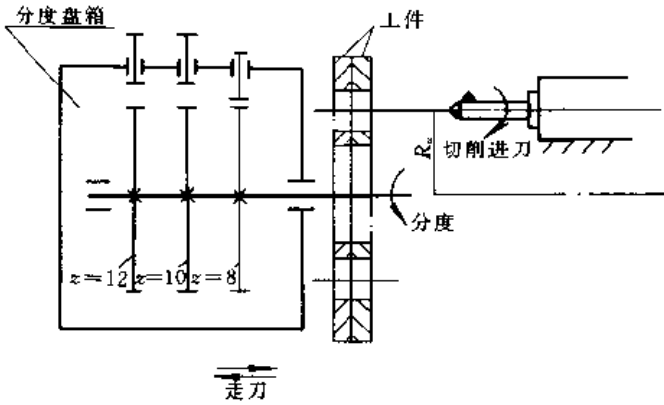


图 22.1-18 销孔磨削示意图

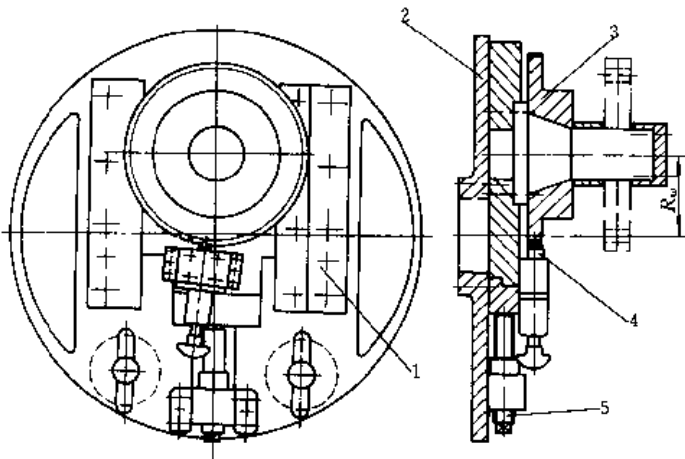


图 22.1-19 偏心分度胎具结构图

通过连接花盘 2 或锥形轴与机床主轴连接。松开滑枕 1 的压紧螺钉,可用丝杠 5 调节中心尺寸 R_w ,保证摆线轮销孔分布圆中心尺寸 D_w ;拔出定位插销 4,转动分度板 3 进行分度。为提高胎具的通用性,分度板的齿数应为摆线轮销孔数的公倍数,分度板的齿距误差及累积误差应不低于工件的 $1/2$ 。分度板与摆线轮工件均装在胎具的心轴上并夹紧。由于胎具体上心轴、分度板滑块、摆线轮等均偏离胎具的回转中心,为了转动时平衡起见,必须在其相对的位置上配置平衡块,以保证运转时的平衡。

上述加工方法,也可以在车床上附加磨头来实现。

这种加工方法对于加工较大规格的摆线轮有一定困难,因为其回转半径大,必要时可把床头相应加高。

(2) 在立式机床上磨削摆线轮销孔。这种加工方法可以适应较大规格的摆线轮销孔磨削加工。立式销孔磨削机床传动系统如图 22.1-20 所示。

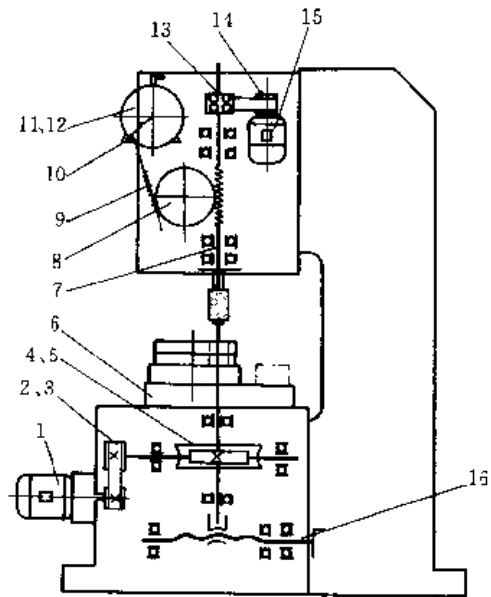


图 22.1-20 立式销孔磨床传动系统图

其工作台的转动是由调速电动机 1 通过带轮 2、3 传动给蜗轮和蜗杆 4、5 带动工作台 6 转动的。

根据不同规格的摆线轮销孔的磨削加工要求,调节调速电动机可获得不同的转速。

工件的径向进给是由手动实现的,通过微动调节机构(齿轮副及蜗杆副)16 拖动工作台移动。

砂轮轴的传动是由电动机 15 通过一对带轮 13、14 带动砂轮轴转动。

磨削加工的轴向进给运动是由无级变速器 11 传动偏心盘 12 和调节转臂 10 带动驱动丝杠 9,再带动转盘 8 使砂轮轴 7 实现的。通过无级变速器可获得不同的进给速度;调节转臂 10 可改变偏心距的大小,以获得不同的进给行程。调整丝杠 9 可将砂轮轴提高或降低,以保证砂轮的正确行程位置及修整砂轮和便于工件装卸。

摆线轮销孔加工的分度精度是由多齿分度盘的分度精度来保证的。

(3) 用行星磨头磨削摆线轮销孔。加工过程中的轴向进给运动(走刀)和径向进给运动都是由磨头来实现的,工件只作间断的分度运动而不作回转运动,因此,这种加工方法对大规格摆线轮特别适用。由于有行星磨头的公转运动,就避免了前面所述两种加工方法所存在的因工件的偏心回转运动而影响了加工精度和其加工范围的缺点。

图 22.1-21 为行星磨头传动原理图。

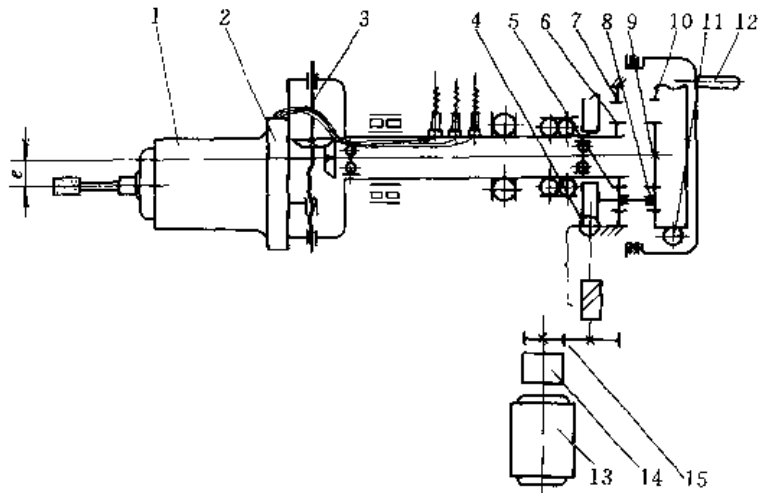


图 22-1-21 行星磨头传动原理图

行星磨头的砂轮是由变频电动机 1 驱动,通过变频机组的调整,可使磨头获得四种不同的转速。

砂轮偏心距 e 的粗调是由手柄 12 实现的;而细调则是由手柄 11 实现的。砂轮的公转是由电动机 13,经无级变速器 14、齿轮 15、蜗杆副 4,再经齿轮 5、6、7、8、9、10 而传动的。磨头滑板 2 上的传动丝杠 3 上面装有双螺母和弹簧机构,从而消除了丝杠的传动间隙。

行星磨头的结构紧凑,使用和调整极为方便可靠,且进给运动可以实现无级调速。

行星磨头以其独特的加工方式,使它具有较高的加工精度和广泛的加工范围。

行星磨头磨削孔径为:20~100mm;

砂轮自转转速为:3000、4500、7500、10500r/min;

砂轮公转转速为:30~100r/min;

砂轮最大进给量为 50mm。

3 针齿壳加工工艺

3.1 针齿壳材料选择

针齿壳可选用灰铸铁,碳素铸钢等材料。对于灰铸铁,随着牌号增高,强度增加,但切削性能降低,加工后获得的表面粗糙度值增大。HT250 以下的牌号,生产工艺较简单,成品率高,成本低,残余应力小,HT250 以上牌号的铸件,需采取适当的工艺措施。与铸铁相比,铸钢的机械性能较高,但其铸造性能以及切削加工性比铸铁差,且铸钢的成本相对较高,因此在摆线针轮行星减速器中,针齿壳一般采用 HT200 牌号的灰铸铁,而很少采用铸钢件。

3.2 针齿壳的加工工艺路线

根据针齿壳的技术要求(见第 8 篇表 8.1-8,图

8.1-41)确定针齿壳的加工工艺如下:

铸造→清砂→人工时效→粗车→二次人工时效→精车→钻、镗、铰针齿销孔→钻孔及攻螺纹→铣内摆线(或者车内孔)→去毛刺。

3.3 针齿壳的热处理工艺

针齿壳铸件在浇注冷却过程中,由于铸件的壁厚不均,各部位的冷却速度不同,会产生很大的内应力,这样在铸件经切削加工后,由于内应力的重新分布而引起变形。对于精度要求较高的针齿壳来说,在切削加工前和切削加工过程中进行必要的消除内应力退火是非常重要的。图 22-1-22 是针齿壳消除内应力的退火规范。

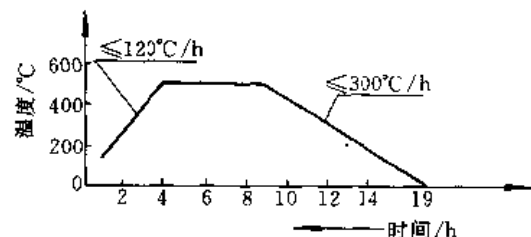


图 22-1-22 针齿壳消除内应力退火规范

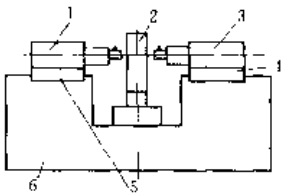
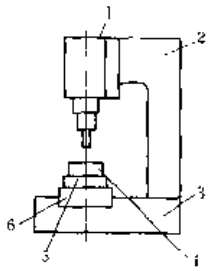
3.4 针齿壳的机械加工工艺

在整个针齿壳的机械加工过程当中,针齿销孔的加工最为重要。它的加工精度高低将直接影响摆线针轮行星减速器传动性能的好坏,因此,它就成为针齿壳机械加工工艺中的关键。另外针齿壳内摆线的加工也是比较困难的,因为它的加工无法在普通机床上完成,需要在专用设备上加工。

3.4.1 针齿壳针齿销孔的加工

目前针齿壳针齿销孔的加工方法很多,归纳起来主要有如下几种加工方式,见表 22.1-12。

表 22.1-12 针齿销孔的加工方式

加工方式	加工示意图	加工机床	加工特点
卧式双向加工	 <p>1、3—高锰钻铤钻头 2—分度机构 4、5—动力滑台 6—床身</p>	专用机床	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缩短了刀具的刀杆长度,提高了刀杆的刚度 2. 分度盘分度 3. 工作效率高 4. 铝、镉铰削头的机床,同轴度要求高
立式双向加工		立式钻床 立式精镗床	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缩短了刀杆长度,刀杆刚性得到了提高 2. 使用多齿分度盘分度 3. 加工效率较低 4. 定位基准不统一
立式单向深孔加工	 <p>1—主铰箱 2—立柱 3—床身 4—工件 5—精密分度盘 6—工作台滑板</p>	立式钻床 立式精镗床	<ol style="list-style-type: none"> 1. 使用多齿分度盘分度 2. 刀杆刚度相对较差 3. 使用较广泛
卧式单向深孔加工		数控加工 中心机床	<ol style="list-style-type: none"> 1. 自动分度 2. 自动换刀 3. 生产效率较高 4. 精度较高 5. 机床成本高

值得注意的是,针齿销孔的加工深度与其直径之比值较大,且多为二支点或者三支点结构,故孔的同轴度与平行度乃是其加工的关键所在。下面就几种最常用的加工方法作简要介绍:

(1) 在 Z535 型立式钻床上加工针齿销孔 在 Z535 立式钻床上加工针齿销孔,多采用多齿分度盘进行分度。将多齿分度盘置于纵向滑板上(需另外制作,装配在钻床工作台上),分度盘上面联接一夹具体,用于针齿壳的定位与夹紧。装上夹具体后,需对其进行校正,使其定位平面相对纵向滑板的平行度不低于 5 级精度;定位止口相对于多齿分度盘的回转中心线的径向圆跳动不低于 6 级精度。

在夹具体上装上针齿壳工件后,还应校正其与机座相配合的止口外圈的径向圆跳动应低于图样相应要求的最大公差值。

在加工前,首先应在直径方向上(相对 180°)试钻两孔,进行中心距校正,然后锁紧纵向滑板,才能对针齿壳进行加工。

针齿壳针齿销孔的钻孔切削参数,见表 22.1-13。

对于 B33 以上机型号的针齿壳(销孔直径大于和等于 $\phi 20$ 的针齿壳)可在 T716A 型立式精镗床上加工,方法与在 Z535 立式钻床上加工时基本一样。T716A 立式精镗床钻针齿销孔的切削参数见表 22.1-14。

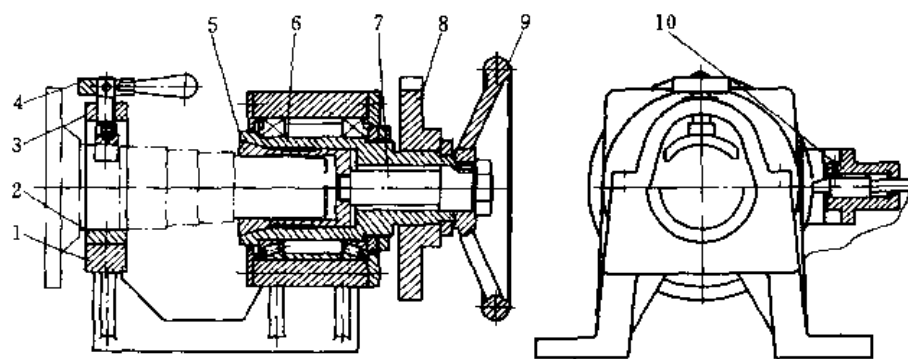


图 22.1-24 加工柱销孔的夹具体装配图

1- 座体 2- 衬套 3- 支承罩 4- 压紧手柄 5- 弹性夹头
6- 支承轴 7- 拉杆 8- 分度盘 9- 手轮 10- 对定部件

滚压加工的有关工艺参数为:

滚压余量: 0.02~0.06mm

实际压入量: 0.015~0.03mm

经滚压加工后, 其表面粗糙度值可减小 1~2 级以上。

4.3.2 立钻加工柱销孔(以 Z535 立式钻床为例)

在 Z535 立式钻床上加工柱销孔, 需在工作台上配置一纵向滑板, 滑板上装一夹具体, 用以上同样方式安装夹紧, 利用分度盘进行柱销孔的分度。

Z535 立式钻床加工柱销孔的工艺参数为:

钻头转速: 275~590r/min

进给量: 0.11mm/r

粗镗镗刀转速: 400~750r/min

进给量: 0.11~0.15mm/r

加工余量: 0.8~1.5mm

精镗镗刀转速: 530~1200r/min

进给量: 0.11mm/r

加工余量: 0.1~0.2mm

镗刀刀头材料为硬质合金。

5 偏心套加工工艺

5.1 偏心套材料选择

偏心套的材料通常采用优质中碳钢, 其中尤以 45

优质碳素钢最为常用。对于强度高、尺寸小或者有其他特殊要求的偏心套, 亦可采用合金钢。

5.2 偏心套的加工工艺路线

根据偏心套的技术要求(见第 8 篇), 确定其加工工艺路线如下:

下料→粗车→调质→精车内孔→插键槽→精车双偏心外圆→精磨双偏心外圆。

5.3 偏心套的机械加工工艺

在偏心套的整个机械加工过程中, 其双偏心外圆的加工是关键所在。它的加工精度将直接影响到摆线针轮行星减速器的传动质量和性能。

偏心套双偏心外圆多采用偏心的中心孔心轴(偏心心轴)在车床上和外圆磨床上进行加工的。

当偏心距大于 4mm 时, 采用有双偏心中心孔的心轴, 利用两个偏离心轴中心线对称 180°分布的两个中心孔, 分别加工偏心套的双偏心外径。

当偏心距小于 4mm 时, 只能用有一个偏心中心孔的心轴。加工偏心套时, 可在加工完一个偏心外圆时, 从心轴上取下偏心套, 将其调转 180°重新装入心轴上再加工另一个偏心外圆。为了保证调头时定位的准确性, 可采用圆柱销做为定位键。详见图 22.1-25。

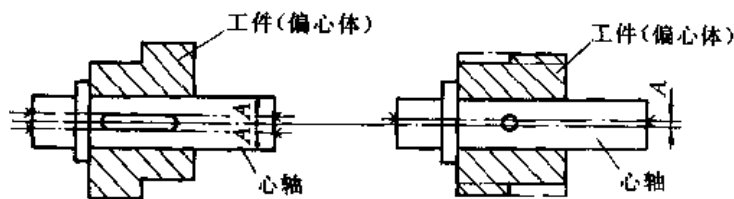


图 22.1-25 加工偏心套的偏心心轴

a) 双偏心心轴 ($A > 4\text{mm}$) b) 单偏心心轴 ($A \leq 4\text{mm}$)

第2章 谐波齿轮制造工艺

1 加工工艺

1.1 柔轮的加工

1.1.1 材料的选择及热处理工艺

谐波齿轮传动,是柔轮在反复地可控弹性变形的基础上,来传递运动和动力的。在长期运行过程中,柔轮要承受交变的疲劳应力的作用,还要承受切应力的作用,运行工况较差。为了保证柔轮具有足够的工作寿命,因此对柔轮的材料选择及热处理工艺,要严格控制。

柔轮通常采用 30CrMnSiA 和 35CrMnSiA 等耐疲劳材料。采用十字徽拔锻造工艺,可以改变纤维方向,使柔轮具有横向环状纤维,以提高柔轮的耐疲劳强度。为了使柔轮具有良好的机械性能和耐疲劳强度,需对柔轮进行调质处理,其硬度为 32~36HRC。柔轮的材料选择及热处理规范见表 22-2-1。

在小功率传递运动和信号的场合,柔轮的材料可用非金属材料代替,经常使用的材料如表 22-2-2 所示。这些材料便于使用模具,批量加工,但其强度和尺寸稳定性均不如金属材料。

表 22-2-1 柔轮金属材料的力学性能和热处理规范

材 料 牌 号	淬 火 温 度 /℃	冷 却 介 质	回 火 温 度 /℃	力 学 性 能				
				硬 度 (HB)	抗拉强度 σ_b	抗压强度 σ_{bs}	疲 劳 极 限	
							σ_{-1}	τ_{-1}
10CrNi	800~810	油	500	280	1000	800	460	270
40CrNiMoA	830~850		610	≥302	1100	950	600	310
37CrNiA	810~840		552~573	321~387	1100	1000	550	320
36CrNiMoVA	850~860		590	≥331	1150	1000	—	—
30CrMnSiA	890~910		540	337~390	1100	850	480	280
30CrMoA	860~890		460	≥320	1100	900	420	240
20CrNiA	820~840		500	≥292	950	850	430	240
12Cr2Ni4A	780~855		180~200	≥320	1100	850	500	250

表 22-2-2 塑料柔轮基本物理机械性能

材料牌号	密 度 /(g/cm ³)	线膨胀系数 /(10 ⁻⁵ /°C)	抗拉强度	抗压强度	断裂强度	疲劳极限 σ_{-1} /MPa	拉伸弹性模量 E/10MPa	泊松比 μ	硬度 (HBS)
			σ_t	σ_{hc}	σ_k				
MPa									
卡普伦 V 6-0.5-988-66	1.16	9.8	100~110	120~125	120~150	300	20600~23100	0.44	20~25
卡普伦 SN	1.55	—	350~450	250~350	400~500	—	25000~30000	0.42	25~30
缩醛树脂 36-13-8-64	1.4	8.1	65~70	130	90~110	350	29000~35000	0.35	20~25
环氧酚醛 清漆合成物 6EI-60	1.21	7	55~65	160~170		180~190	38000~47000	0.35	23~24HV

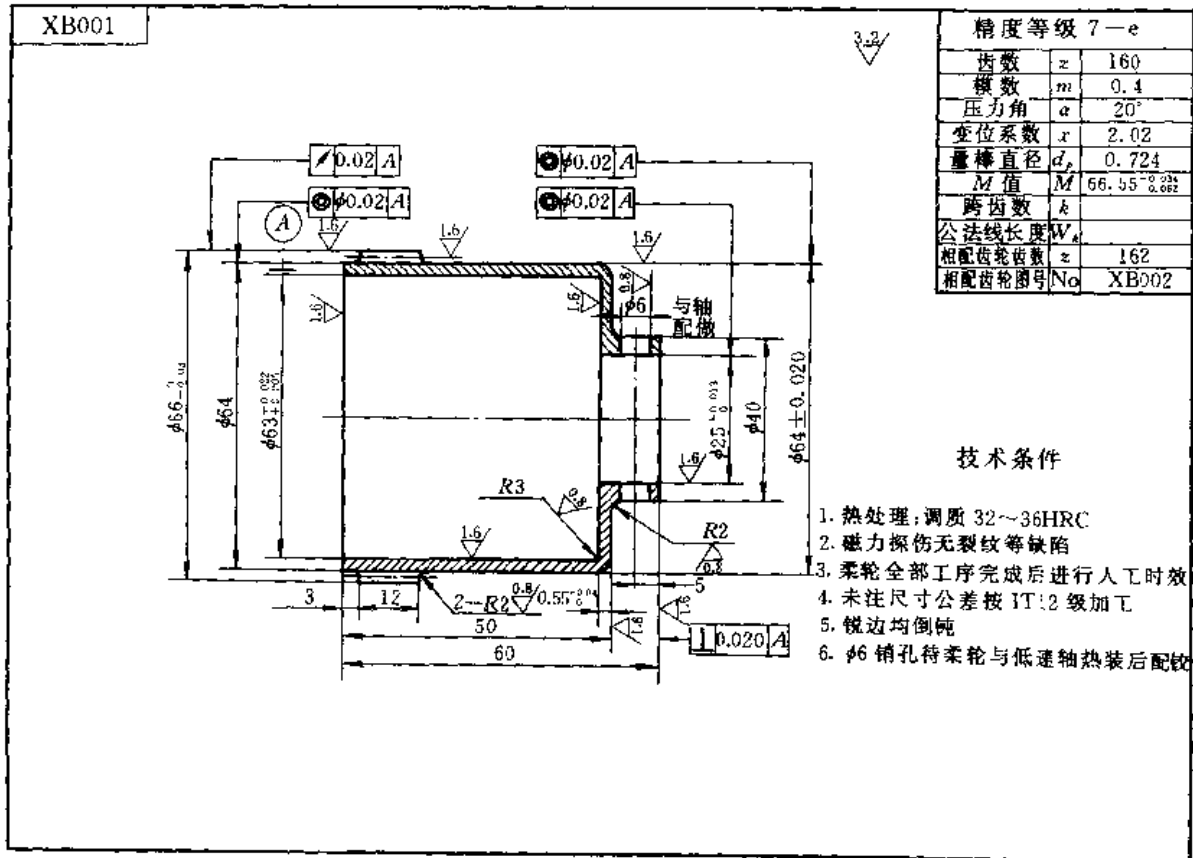


图 22.2-1 柔轮零件图

1.1.2 工艺路线

下料→化验→锻造→正火→粗车→调质→精车→
探伤→滚齿→时效

1.1.3 零件图

柔轮的零件图见图 22.2-1。

1.1.4 精度要求

柔轮内孔按 H7 级精度加工, 柔轮齿面粗糙度要求达到 $R_{a1.6\mu m}$ 或更小, 所有圆角处均需光滑过渡, 避免产生应力集中。轮齿精度一般在 6~7 级。齿侧间隙用 M 值控制, 其公差值按 GB2363-90 选取, 选用负值。

1.1.5 加工所用机床、刀具及工装

机床: YG3612 滚齿机(最大直径 $D=135\text{mm}$ 最大模数 $m=1.5\text{mm}$)

刀具: 滚刀, 压力角为 20° , 模数 $m(\text{mm})$, 如下:

0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.40 0.50
0.60 0.70 0.75 0.80 1.00 1.25

工装: 滚齿所用心轴, 见图 22.2-2。

滚齿所用计量工具, 因齿轮模数很小, 只能用三针测量轮齿的 M 值, 控制轮齿的最终加工尺寸精度。三针的直径和轮齿模数有关, 模数/量棒直径 $[m(\text{mm})/D_p(\text{mm})]$ 的具体数据如下:

0.10/0.201	0.15/0.291
0.20/0.402	0.25/0.433
0.30/0.572	0.40/0.724
0.50/0.866	0.60/1.008
0.70/1.302	0.80/1.141
1.00/1.732	1.25/2.311

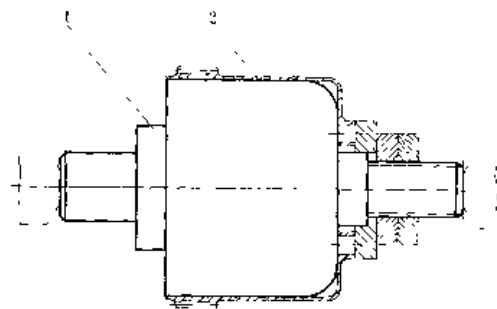


图 22.2-2 柔轮滚齿心轴

1—心轴 2—柔轮

1.2 刚轮的加工

1.2.1 材料的选择及热处理工艺

刚轮的使用工况较柔轮好, 强度储备也很大, 因此刚轮的材料一般选用 45 钢, 调质处理即可, 其调质硬

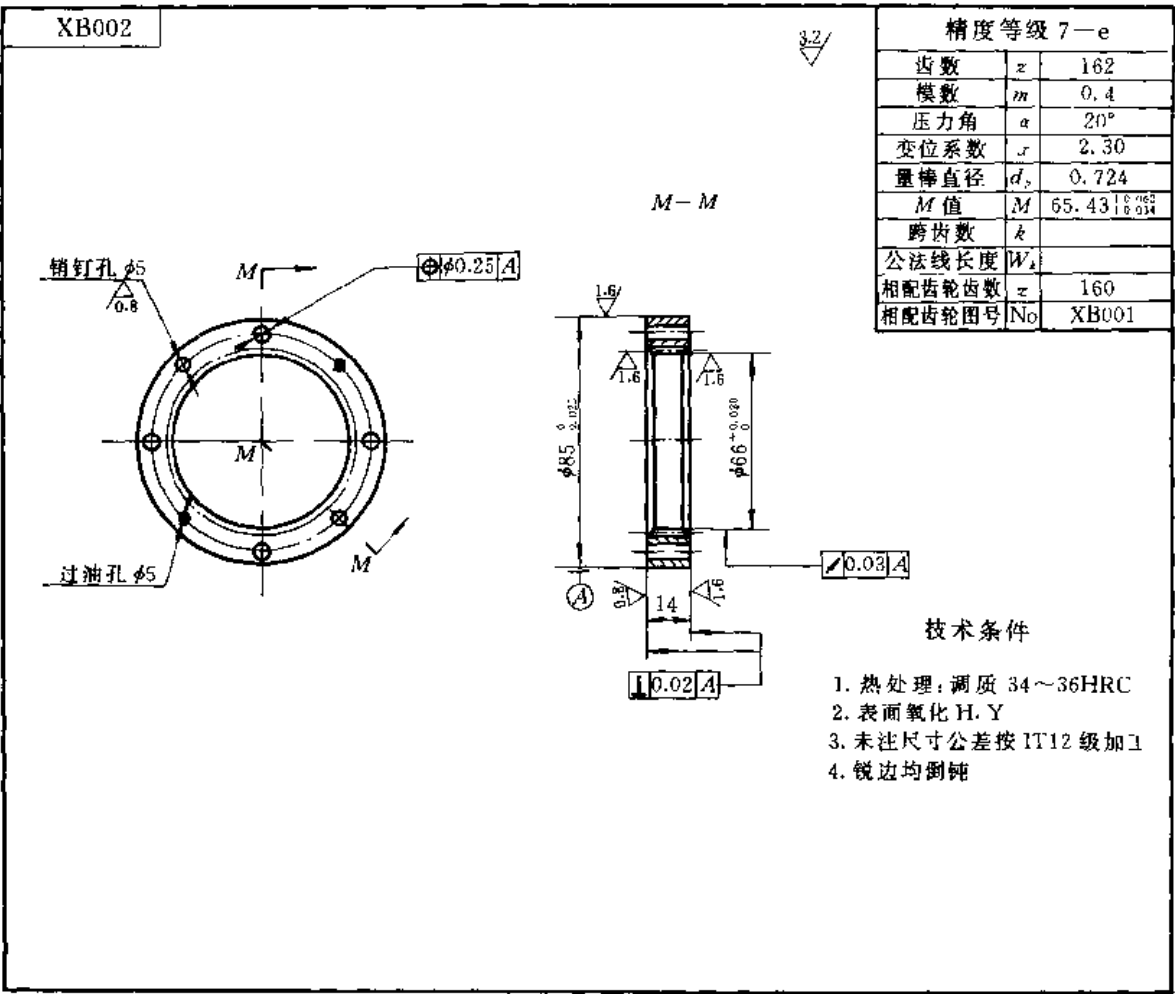


图 22.2-3 刚轮零件图

度为 28~36HRC。刚轮的材料也有用 50 钢或 40Cr, 以及用非金属材料, 如尼龙 1010、尼龙 66、聚甲醛和聚砒等。

1.2.2 工艺路线

下料→粗车→调质→精车→插齿

1.2.3 零件图

刚轮的零件图见图 22.2-3, 其技术要求详见图。

1.2.4 精度要求

刚轮切齿时是以前外圆定位, 检查内孔及端面的跳动, 以保证切齿的精度(即控制齿圈的径向跳动), 因此其内孔及外圆均按 H7 和 h7 设计。轮齿精度一般在 6~7 级, 齿面粗糙度为 $R_a 1.6\mu m$, 齿侧间隙用 M 值控制, 其公差值按 GB2363-90 选取, 选用正值。

1.2.5 加工所用机床、刀具及工装

机床: Y5120A 插齿机(最大直径 $D=200mm$, 最大模数 $m=4mm$)。

HY-014A 插齿机(最大直径 $D=160mm$, 最大模数 $m=1mm$)。

刀具: 锥柄插齿刀, 压力角为 20° , 其模数 m

0.10	0.15	0.20	0.25
0.30	0.40	0.50	0.60
0.70	0.80	1.00	1.25
1.50	1.75	2.00	

插齿所用工装见图 22.2-4。

插齿所用计量工具仍用三针, 其规格同柔轮所用之三针。

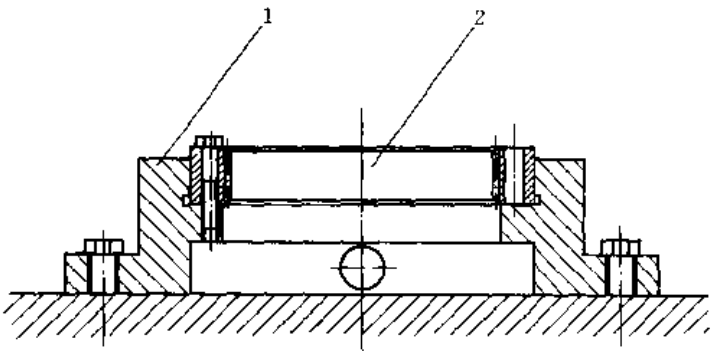


图 22.2-4 刚轮插齿工装

1-胎具 2-刚轮

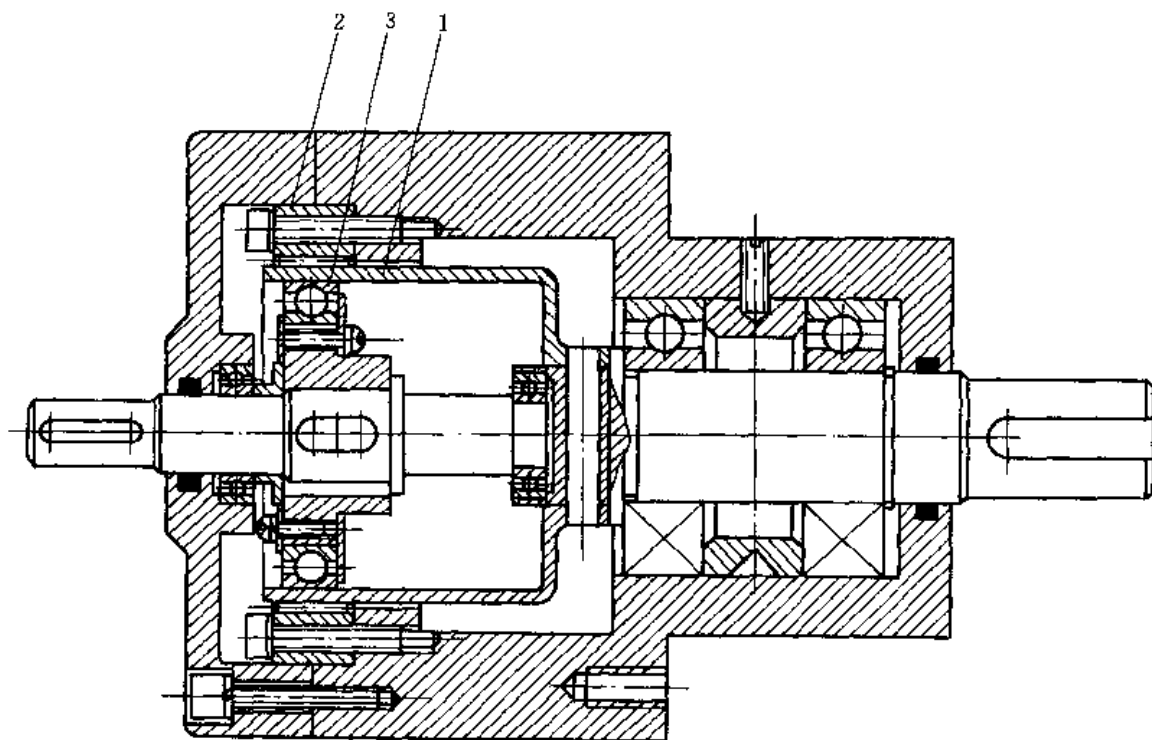


图 22.2-6 总装配图

1-柔轮 2-钢轮 3-凸轮

- 1) 高速轴和波发生器的装配;
- 2) 柔轮和低速轴的装配;
- 3) 刚轮和壳体的装配;
- 4) 端盖的装配;
- 5) 减速器总成。

2.3.1 高速轴和波发生器部分

以高速轴为主体,其他零件依次装配的顺序为:凸轮→柔性轴承→挡片→铆钉→键→高速轴→高速轴两端支承轴承→调整垫片(检查凸轮的长短轴径向跳动,应在要求的公差范围内,在柔性轴承的滚动体上和其外廓均涂上润滑脂)。

2.3.2 柔轮和低速轴部分

以低速轴为主体,其他零件依次装配的顺序为:柔轮→压片→螺钉→垫圈→销钉→低速轴上两支承轴承→顶环→轴用挡圈(用V形架支承检查柔轮的齿圈径向跳动,在齿圈上和轴承上均涂上润滑脂)。

2.3.3 刚轮和壳体部分

以壳体为主体,其他零件依次装配的顺序为:刚轮→螺钉→垫圈→销钉→壳体的密封(O形密封圈或骨架密封圈)→顶环螺钉→透气塞→垫片→密封。

2.3.4 端盖部分

端盖装上密封圈,配好紧固用螺钉和垫圈。

2.3.5 减速器总成

低速轴组件装入壳体,紧好固定顶环的紧定螺钉,

将高速轴组件的凸轮装入柔轮内孔中。此时应注意,装入凸轮后要防止柔轮相对刚轮。在齿啮部分产生偏心(不对称);盖好端盖,拧紧端盖螺钉;钉上商标,到此,减速器装配完毕。

3 性能测试、跑合及出厂要求

谐波减速器出厂前每台都要在试验室进行空载、满载以及超载跑合试车。当振动、噪声和温升数值达到所要求的指标时,方能清洗、换油、组装出厂。

3.1 性能测试项目

性能测试的项目很多,对于一般要求的谐波传动,其运动精度及回差由设计和加工保证,不再进行理论计算或实际测试;用于具有伺服传动的系统中,则要对运动精度和回差进行测试,以保证系统的要求。有特殊要求的,还需进行减速器的扭转刚度测试、效率测试、起动力矩测试等等。

3.1.1 运动精度和回差的测试

在伺服系统中,一般对运动精度和回差(空回),均有不同程度的要求。

运动精度和回差的测量方法,分静态测量和动态测量两种。静态测量如图 22.2-7 所示。静态试验台上装置各件的顺序为:光学分度头 1,谐波减速器 2,十二面棱体 3,准直光管 4。测量时由光学分度头带动谐波

减速器的输入轴,减速器的输出轴带动十二面棱体旋转,当消除传动系统的间隙,并定好十二面棱体相对准直光管的定位基准后,使准直光管依次对准十二面棱体每个面的指示线,便可顺序地得到光学分度头上反映的不同刻度数。相邻两刻度之差的最大和最小值,经过计算便可得到谐波传动装置的静态运动精度。静态回差也是采用以上装置,向某一方向旋转并消除间隙后,定好十二面棱体相对准直光管的定位基准,记下光学分度头的刻度,然后向同一方向旋转一圈半以上,再反向旋转,使十二面棱体对准准直光管的刻度,便可得到光学分度头的刻度。两次刻度之差,经过计算便可得到谐波传动装置的回差。

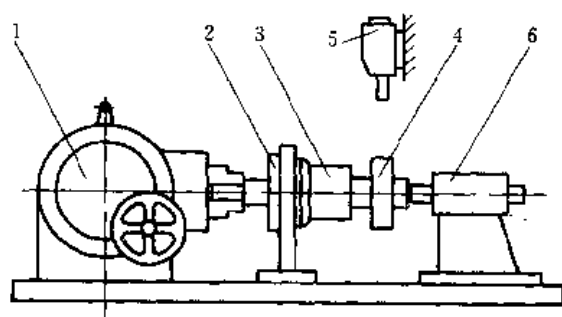


图 22.2-7 静态运动精度和空间测试简图

1-光学分度头 2-支架 3-被测谐波减速器
4-多面棱体 5-准直光管 6-尾座

动态测量如图 22.2-8 所示,动态试验台上装置各件的顺序为:低速轴端圆光栅 1,谐波减速器 2,带轮 3,与谐波高速轴相连的圆光栅 4,传动链测量仪 5,动力源(电动机和带轮)6。动态测量时,电动机带动皮带轮,使谐波减速器的高速轴旋转,从而使高、低速轴端的两个光栅同时得到信号,并送到传动链测量仪中,经过比较,在打印纸上便可打出该装置的运动精度及回差。该装置的测量精度很高,更接近减速器的使用情况。

3.1.2 扭转刚度的测试

在一些特殊的传动中,如何服系统中,要求整个系统的弹性变形引起的空回尽量小,因此对谐波减速器提出了测试刚度的要求,从而为用户的整体设计及使用提供原始数据。刚度的测试如图 22.2-9 所示。

测量的原理是将减速器和减速器的输入轴均固定在试验台上,通过法码在输出轴上加一力偶,使之相对减速器产生一个微小的转角。此转角通过加在输

出轴上的百分表测出。

测得的数据经过处理即可得到刚度曲线,如图 22.2-10 所示。

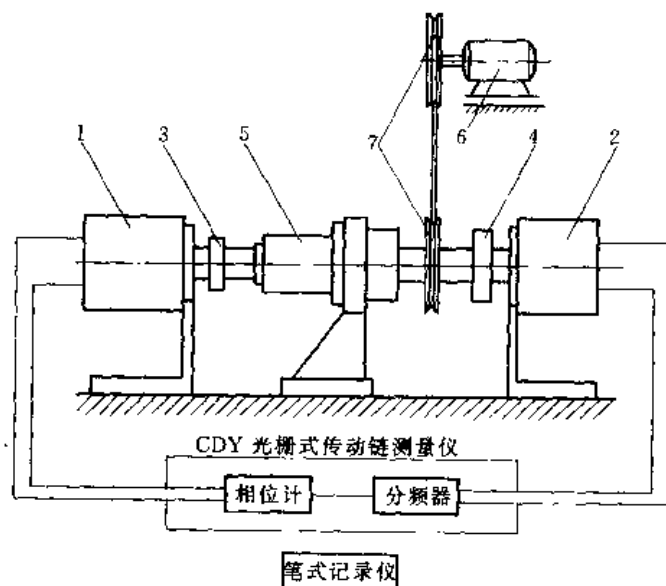


图 22.2-8 动态运动精度和空间测试简图

1-低速档光栅角位移传感器 2-高速档光栅角位移传感器 3、4-联轴器 5-被测谐波减速器
6-电动机 7-带轮

3.1.3 起动力矩的测试

起动力矩是衡量谐波减速器系统的内阻(摩擦、磨损及内部惯量)大小和系统的灵敏度的重要指标。特别在伺服系统中,对此数据均有一定的要求。

其测试方法如图 22.2-11 所示,减速器轴上固定一个较大直径的圆盘,将准直光管调好零位,通过绳索

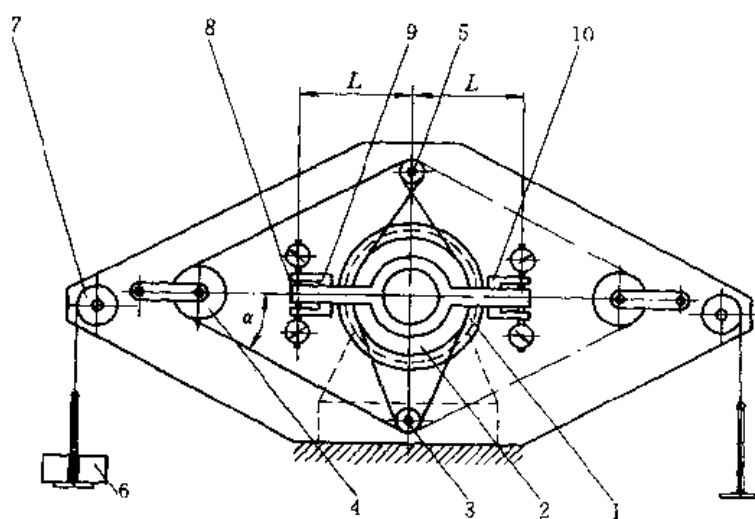


图 22.2-9 扭转刚度的测试简图

1-被测谐波减速器 2-加扭盘 3、4、5、7-滑轮
6-砝码 8-测量杆 9、10-支架

和滑轮,将法码所产生的力矩,加在输出轴上。法码的重量是逐渐加上去的,加到用于监视的准直光管指示离开零位为止,所得到的法码重量和圆盘半径的乘积即为起动力矩。此法最少测三次,取其平均值。一般起动力矩应小于谐波减速器的输出力矩的5%。

3.2 跑合

跑合的目的之一是通过跑合去掉加工中产生的毛刺,使柔轮和刚轮的啮合更加平稳,达到良好的运行效果;其次是通过跑合和加载跑合,更进一步检验设计、工艺、加工及装配等方面所暴露出的问题。如出现问题,会产生异常的振动、噪声,并伴随而来的还会产生减速器的运行温度升高,以至于润滑油变色。因此跑合是减速器出厂前,必不可少的质量检查手段。只有通过

空载、满载和超载跑合,减速器的振动、噪声和温升,均达到设计要求时,方能解体、清洗、换油、装配、出厂。谐波传动运转试验台,参见图22-2-12。

跑合工艺规范

空载跑合:减速器正、反转各2h;

加载到额定载荷的50%,正、反转各2h;

加载到额定载荷的75%,正、反转各2h;

加载到额定载荷的100%,正、反转各2h;

超载到额定载荷的150%,正、反转各1.5min。

3.3 出厂要求

减速器跑合过程中,应运行平稳,无异常的振动和噪声,一般的温升不超过35℃;润滑油不得泄漏。

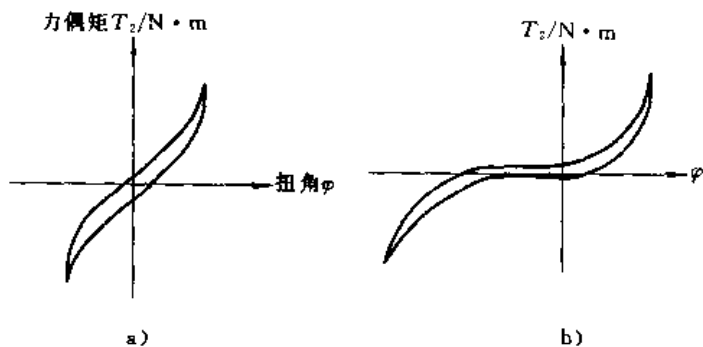


图 22.2-10 刚度曲线图

a) 没有游隙的传动 b) 具有游隙的传动

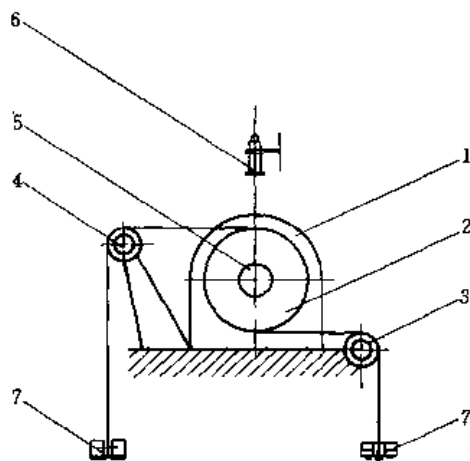


图 22.2-11 起动力矩的测试

1—被测谐波减速器 2—加载盘 3、4—滑轮
5—反射镜 6—准直光管 7—法码

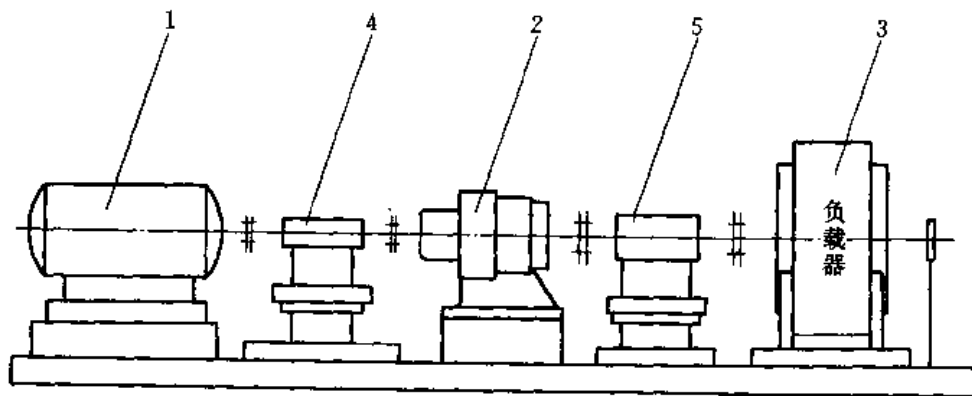


图 22.2-12 谐波传动运转试验台简图

1—电机 2—被测谐波减速器 3—磁粉加载器 4、5—转矩传感器

由 z_n 来选择模数铣刀的号数(参见第25篇第1章1.2节齿轮铣刀刀号的划分)。

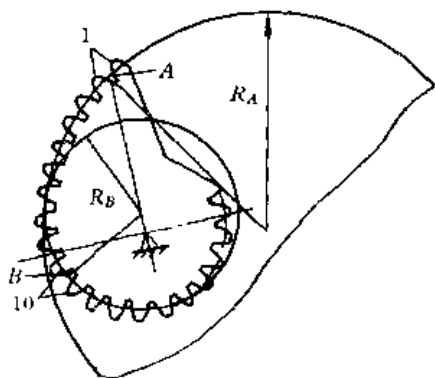


图 22.3-5 非圆齿轮的曲率半径

目前国内应用最广的非圆齿轮是变形椭圆齿轮。对于这种齿轮,为避免利用式(22.3-4)求解 θ 时的复杂计算,可利用椭圆积分表求解,以方便制造。现介绍如下:

由图 22.3-6 知: n 阶变形椭圆的生成,即将椭圆的向径 ρ 对应的极角缩小 n 倍(由原来的 $n\theta$ 变成 θ) 而得到。它的方程式为

$$\rho = \frac{p}{1 \mp e \cos n\theta} \quad (22.3-7)$$

式(22.3-7)中“ \mp ”号的用法:当从变形椭圆的长轴计算时,用“-”号;从短轴计算时,用“+”号(见图 22.3-6)。

变形椭圆的弧长计算公式为

$$S = p M_n \int_0^{\phi} \sqrt{1 - K_n^2 \sin^2 \phi} d\phi \quad (22.3-8)$$

式中 $\rho = a(1 - e^2)$; $M_n = \frac{\sqrt{1 + (n^2 - 1)e^2}}{n(1 - e^2)}$;

$$K_n = \frac{ne}{\sqrt{1 + (n^2 - 1)e^2}}$$

a ——椭圆的长半轴;

e ——椭圆的偏心率;

n ——变形椭圆的阶数。

式(22.3-8)中的 S 相当于参数 ϕ 由 $0 \rightarrow \phi$ 的弧长,

即图 22.3-6a、b 中的 $\widehat{3'2'}$ 。当要从 $1'$ 点算起时,即要计算弧长 $\widehat{1'2'}$ 时,应为

$$\begin{aligned} \widehat{1'2'} &= \widehat{3'1'} - \widehat{3'2'} = p M_n \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K_n^2 \sin^2 \phi} d\phi \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{\phi} \sqrt{1 - K_n^2 \sin^2 \phi} d\phi \right) \\ &= p M_n \left[E\left(K_n, \frac{\pi}{2}\right) - \epsilon(K_n, \phi) \right] \end{aligned} \quad (22.3-9)$$

式中 $E\left(K_n, \frac{\pi}{2}\right)$ ——第二类完全椭圆积分;

$\epsilon(K_n, \phi)$ ——第二类椭圆积分。

由变量替换式

$$\sin n\theta = \frac{\cos \phi \sqrt{1 - e^2}}{1 \pm e \sin \phi} \quad (22.3-10)$$

式(22.3-10)中“ \pm ”号的用法:当从变形椭圆的长轴计算时用“+”号;从短轴计算时用“-”号。同时,由图 22.3-6 知:当 $\phi = -\frac{\pi}{2}$ 时, $n\theta = \pi$, $\theta = \frac{\pi}{n}$ 。将 $\phi = -\frac{\pi}{2}$ 代入式(22.3-9),可得变形椭圆的单元曲线段 $1'5'$ 长 $S_{\frac{\pi}{n}}$

$$\begin{aligned} S_{\frac{\pi}{n}} &= p M_n \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K_n^2 \sin^2 \phi} d\phi \right. \\ &\quad \left. - \int_0^{-\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - K_n^2 \sin^2 \phi} d\phi \right) \\ &= 2p M_n E\left(K_n, \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (22.3-11)$$

变形椭圆整个周长上的单元曲线段的数目 $= 2\pi / \frac{\pi}{n} = 2n$ 。由式(22.3-11)可得变形椭圆的整个周长 S_{2n}

$$S_{2n} = 2n S_{\frac{\pi}{n}} = 4np M_n E\left(K_n, \frac{\pi}{2}\right) \quad (22.3-12)$$

当 $n=2$ 时,为二阶变形椭圆(见图 22.3-6),即变形椭圆齿轮中应用最广的卵形齿轮,其节曲线的周长 S_{2n}

$$S_{2n} = 8p M_2 E\left(K_2, \frac{\pi}{2}\right) \quad (22.3-13)$$

所以 $E\left(K_2, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{z\pi m}{8p M_2} \quad (22.3-14)$

式中 z ——卵形齿轮的齿数;

m ——卵形齿轮的模数(mm)。

前面说过,由起始齿槽 A 点到第 N 个齿槽 P 点间的节曲线长为 $N\pi m$ 。将此值代入式(22.3-9),可得

$$N\pi m = p M_2 \left[E\left(K_2, \frac{\pi}{2}\right) - \epsilon(K_2, \phi) \right]$$

所以 $\epsilon(K_2, \phi) = E\left(K_2, \frac{\pi}{2}\right) - \frac{N\pi m}{p M_2}$

将式(22.3-14)代入上式,可得

$$\epsilon(K_2, \phi) = \frac{\pi m}{p M_2} \left(\frac{z}{8} - N \right) \quad (22.3-15)$$

由式(22.3-15)求出 $\epsilon(K_2, \phi)$ 后,查第二类椭圆积分表可得 ϕ 值。将 ϕ 值代入变量替换式(22.3-10),可得 θ 值。将 θ 值代入式(22.3-7)可得 ρ 值。

由式(22.3-5)和式(22.3-7)可推出 μ 的计算式:

$$\mu = \arccot \frac{\mp n e \sin n\theta}{1 \mp e \cos n\theta} \quad (22.3-16)$$

式(22.3-16)中“ \mp ”号的用法:当从变形椭圆的长轴计算时,分子和分母均取“-”号;从短轴计算时,均取“+”号。

将上面已求出的 θ 和 ρ 值, 并 $n=2$ 代入式(22.3-16), 可求出 μ 值。然后将 θ 、 ρ 和 μ 值代入式(22.3-1), 可求出加工用的调整机床数据。

对于图 22.3-4 所示的一般非圆齿轮, 分度铣齿时的调整机床数据的计算, 只能先按被铣齿槽到起始齿槽间的节曲线长 S , 由式(22.3-4)解出 θ 值, 然后由非圆齿轮的节曲线方程式 $\rho=\rho(\theta)$ 求出 ρ 值, 再由式(22.3-5)求出 μ 值。将 θ 、 ρ 和 μ 值代入式(22.3-2)和式(22.3-3), 可求出加工用的调整数据。

没有凹点的卵形齿轮和一般非圆齿轮, 其外形轮廓(内顶曲线)的加工, 也可以在普通卧式铣床上进行。加工时, 先用圆柱铣刀按图 22.3-3 和图 22.3-4 铣出起始点处的外形尺寸, 然后以此为起点, 按分度铣齿时的调整数据, 升降、平移工作台和转动工件, 逐齿铣出整个外形轮廓。这样铣出的外形轮廓虽不是连续曲线, 但因内轮传动时, 齿根部有间隙, 故实用中可满足要求。

为了提高分度铣削法的加工效率, 不论是铣齿和铣外廓, 均可将 n 个工件串联在一起, 在一次安装中加工。加工时应注意的是, 铣齿加工和外廓加工起始位置的一致性。

2.1.2 按非圆齿轮近似节曲线加工

对一些要求传动比变化规律不太严格的椭圆齿轮副, 为便于制造, 可用近似椭圆内齿轮副来代替。如图 22.3-7 所示, 近似椭圆由 4 段光滑连接的圆弧组成。由近似椭圆的作图法知: $BD=a-b$, $AC=CD$, 且 $O_2C \perp AD$ 。

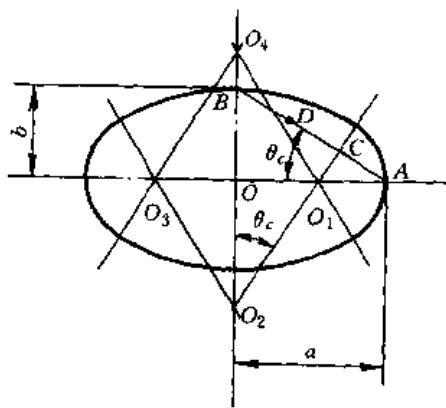


图 22.3-7 近似椭圆的画法

设椭圆的焦距为 C , 偏心率为 e , $e=c/a$, $b=\sqrt{a^2-c^2}$, 则

$$\tan \theta_c = \frac{b}{a} = \sqrt{1-e^2} \quad (22.3-17)$$

一对尺寸相同的椭圆齿轮副的传动比变化范围 V_r 为其最大传动比 $i_{21\max}$ 和最小传动比 $i_{21\min}$ 之差, 即

$$V_r = i_{21\max} - i_{21\min} = \frac{a+c}{a-c} - \frac{a-c}{a+c} = \frac{4e}{1-e^2} \quad (22.3-18)$$

所以
$$e = -\frac{2}{V_r} \pm \sqrt{\frac{4}{V_r^2} + 1} \quad (22.3-19)$$

如令 $AB=d$, $O_2B=R$, $O_1A=r$, 则

$$\begin{cases} R = \frac{BC}{\sin \theta_c} = \frac{d(d+a-b)}{2b} \\ r = \frac{AC}{\cos \theta_c} = \frac{d(d-a+b)}{2a} \end{cases} \quad (22.3-20)$$

或

$$\begin{cases} \frac{R}{a} = \frac{1+\cos \theta_c - \sin \theta_c}{2\sin \theta_c \cos \theta_c} \\ \frac{r}{a} = \frac{1-\cos \theta_c + \sin \theta_c}{2\cos^2 \theta_c} \end{cases} \quad (22.3-21)$$

式(22.3-21)经 Town 氏变换后, 可写为

$$\begin{cases} \frac{R}{a} = \frac{1-\sin \theta_c}{\cos \theta_c (\cos \theta_c + \sin \theta_c - 1)} \\ \frac{r}{a} = \frac{1-\cos \theta_c}{\cos \theta_c (\cos \theta_c + \sin \theta_c - 1)} \end{cases} \quad (22.3-22)$$

按式(22.3-21)或式(22.3-22)计算出的近似椭圆与椭圆的长轴和短轴尺寸均相同, 但其轮廓稍有改变: 从短轴到两圆弧的切点附近, 近似椭圆的轮廓在椭圆轮廓以外; 从切点附近到长轴, 近似椭圆的轮廓在椭圆以内。Town 氏计算指出: 对于 $i_{21\max}=4$ 的椭圆内齿轮副, 当随圆长轴半径 $a=1\text{in}$ 时, 节曲线的最大偏离量为 0.005in 。该偏离量与 a 值成正比, 且 $i_{21\max}$ 值越小, 偏离值也越小。

若令 $K=i_{21\max}:i_{21\min}=\frac{a+c}{a-c}:\frac{a-c}{a+c}=\left(\frac{a+c}{a-c}\right)^2$, 对于 $K \leq 4$ 的椭圆齿轮, 其近似椭圆的 4 个圆弧中心 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 距椭圆的对称中心 O 较近。如图 22.3-8 所示: $M=a-r$, $N=R-b$, $\tan \theta_c = M/N$ 。

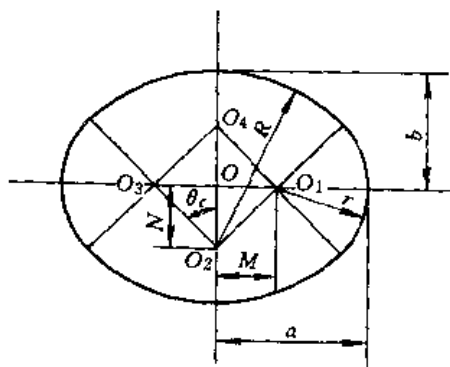


图 22.3-8 近似椭圆齿轮的 4 个圆心

近似椭圆的 4 段圆弧的总长应等于近似椭圆齿轮的齿数 Z 与齿距 p 的乘积, 即

$$zp = 4 \left[R\theta_c + r \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c \right) \right] \quad (22.3-23)$$

大圆弧 R 上的总齿数 z_R

$$z_R = \frac{zR\theta_c}{R\theta_c + r\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)}$$

将式(22.3-22)中的 R 和 r 代入上式,得

$$z_R = \frac{z(1 - \sin\theta_c)\theta_c}{(1 - \sin\theta_c)\theta_c + (1 - \cos\theta_c)\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)} \quad (22.3-24)$$

同理可得小圆弧 r 上的总齿数 z_r :

$$z_r = \frac{z(1 - \cos\theta_c)\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)}{(1 - \sin\theta_c)\theta_c + (1 - \cos\theta_c)\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)} \quad (22.3-25)$$

将式(22.3-22)中的 R 和 r 代入式(22.3-23),得近似椭圆内轮的节曲线周长 $z\rho$:

$$z\rho = \frac{4a\left[\theta_c(1 - \sin\theta_c) + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)(1 - \cos\theta_c)\right]}{\cos\theta_c(\cos\theta_c + \sin\theta_c - 1)} \quad (22.3-26)$$

$$\text{令 } Q = \frac{4\left[\theta_c(1 - \sin\theta_c) + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right)(1 - \cos\theta_c)\right]}{\cos\theta_c(\cos\theta_c + \sin\theta_c - 1)} \quad (22.3-27)$$

$$\text{则 } z\rho = aQ \quad (22.3-28)$$

由式(22.3-27)、式(22.3-17)和式(22.3-19)知: Q 值由 θ_c 确定,而 θ_c 是 e 的函数, e 又是 V_r 的函数。

表 22.3-1 给出了各种不同最大传动比 $i_{21\max}$ 时的 V_r 、 e 、 θ_c 、 R/a 、 r/a 、 M/a 、 N/a 和 Q 值。供制造者参考。

在切制近似椭圆齿轮时,如图 22.3-9 所示:可分别绕 4 个中心回转,以进行分度铣削。为了便于制造和减少加工调整计算,要求齿轮副中的两个齿轮完全相

同。这样,齿轮的齿数必须是奇数,在长轴一端上为齿峰;长轴另一端上为齿槽。由于两个齿轮完全相同,还可在一次安装中加工出。

加工时,为了便于对刀,应从带齿槽的长轴一端 0 开始加工(见图 22.3-9)。这样,对刀后,工件不需要转位,便可进行切削加工;在绕回转中心 O_1 ,按角度 A_1 分度铣完第 1 段圆弧上的齿槽后,转过角度 A_2 ,然后将回转中心移到第 2 段圆弧中心 O_2 上。转过角度 A_3 ,铣出第 2 段圆弧上的第 1 个齿槽 3 后,再按角度 A_4 分度铣完第 2 段圆弧上的所有齿槽。以下按与上述相同的操作顺序铣出全部齿槽。

角度 A_1 (rad)至角度 A_{12} (rad)的确定:由上面公式计算出的 R 、 r 和 θ_c ,其中齿距 $p = \pi m$,可求得

$$A_1 = A_7 = \frac{p}{r}$$

$$A_2 = A_{12} = \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) \cdot 2A_1$$

$$A_3 = A_{11} = \frac{p - A_2 r}{R}$$

$$A_4 = A_{10} = \frac{p}{R}$$

$$A_5 = A_9 = 2\theta_c - A_3 - 7A_4$$

$$A_6 = A_8 = \frac{p - A_5 R}{r}$$

为了实现 4 个圆弧中心 O_1 、 O_2 、 O_3 和 O_4 的回转,需要做专用心轴。但当 4 个中心相距太近或太远时,用专用心轴定心便难实现,这时可绕椭圆齿轮传动时的回转中心(椭圆的一个焦点)回转,以进行铣齿分度(图 22.3-10)。但分度后,必须使铣床工作台作水平和垂直移动,以调整工件相对于刀具的切削位置。

表 22.3-1 不同最大传动比 $i_{21\max}$ 时的参数值

$i_{21\max}$	V_r	e	θ_c	θ_c/rad	$\frac{R}{a}$	$\frac{r}{a}$	$\frac{M}{a}$	$\frac{N}{a}$	Q
1.25	0.45	0.1111	44°49'	0.7823	1.0044	0.9895	0.0105	0.0106	6.2638
1.50	0.83	0.2000	44°24'	0.7752	1.0146	0.9658	0.0341	0.0348	6.2199
1.75	1.18	0.2727	43°53'	0.7661	1.0281	0.9365	0.0635	0.0660	6.1649
2.00	1.50	0.3333	43°18'	0.7560	1.0434	0.9051	0.0949	0.1006	6.1053
2.25	1.81	0.3846	42°42'	0.7454	1.0599	0.8737	0.1263	0.1368	6.0448
2.50	2.10	0.4386	42°05'	0.7347	1.0771	0.8431	0.1569	0.1736	5.9853
2.75	2.39	0.4667	41°29'	0.7241	1.0948	0.8140	0.1860	0.2104	5.9277
3.00	2.67	0.5000	40°53'	0.7137	1.1127	0.7864	0.2136	0.2467	5.8726
3.25	2.94	0.5294	40°18'	0.7035	1.1307	0.7604	0.2395	0.2824	5.8201
3.50	3.21	0.5556	39°44'	0.6936	1.1489	0.7361	0.2639	0.3174	5.7703
3.75	3.48	0.5789	39°11'	0.6840	1.1670	0.7133	0.2867	0.3516	5.7232
4.00	3.75	0.6000	38°39'	0.6747	1.1851	0.6919	0.3081	0.3857	5.6785

铣床工作台移动数据的计算方法如下:

(1) 铣小圆弧 r 上的齿槽(图 22.3-10a);

$$\text{水平移距 } S_r = L_r \sin \alpha_r$$

$$\text{垂直移距 } H_r = L_r - L_r \cos \alpha_r$$

式中 $L_r = OC + OO_1 = c + a - r$

c ——椭圆齿轮的焦距;

α_r ——被铣齿槽中心线与长轴的夹角,此时 $\alpha_r =$

$2A_1$ (见图 22.3-9)。

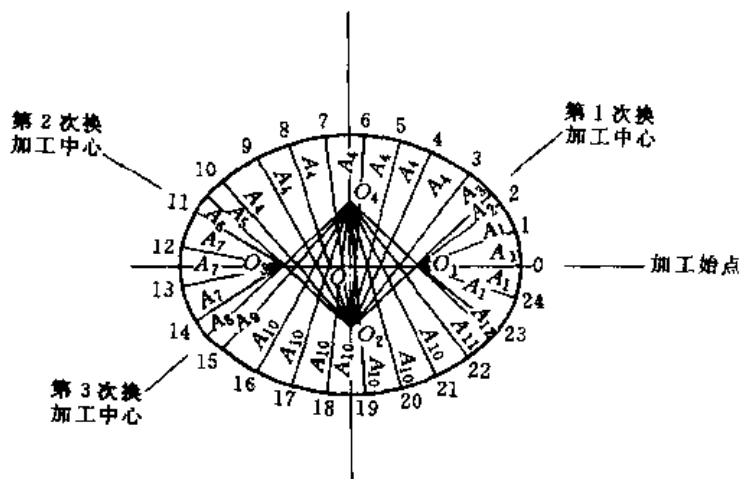


图 22.3-9 近似椭圆齿轮的分度铣削法

(2) 铣大圆弧 R 上的齿槽(图 22.3-10b)

$$\text{水平移距 } S_R = L_R \sin \omega$$

$$\text{垂直移距 } H_R = (L_r + r) - (L_R \cos \omega + R)$$

式中 $L_R = \sqrt{c^2 + (R - b)^2}$

$$\omega = 180^\circ - (\alpha_R + \beta)$$

α_R ——被铣齿槽中心线与短轴的夹角,此时

$\alpha_R = \theta_r - (A_2 + A_1)$ (见图 22.3-9)

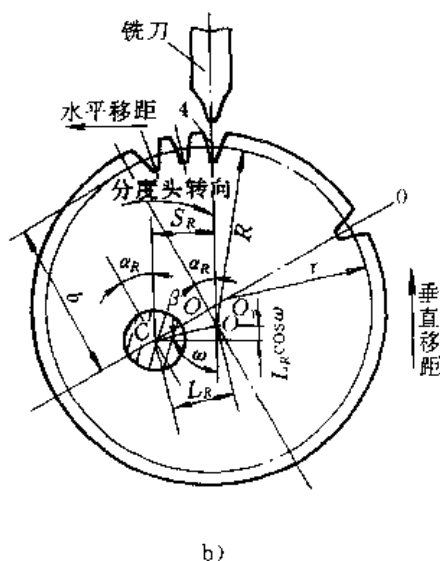
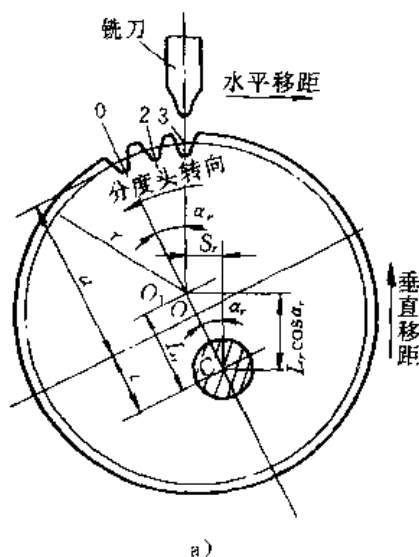


图 22.3-10 工作台的移距调整法

a) 铣 r 段上的齿槽 b) 铣 R 段上的齿槽

$$\beta = \arctan \frac{c}{R - b}$$

按近似椭圆齿轮铣齿时的刀号选择比较简单。可以按大、小圆弧上的当量圆齿轮的齿数选择刀号。

$$z_{D_R} = \frac{2R}{m}$$

$$z_{D_r} = \frac{2r}{m}$$

式中 z_{D_R} 和 z_{D_r} ——大圆弧 R 上和小圆弧 r 上的当量圆齿轮齿数;

m ——椭圆齿轮的模数(mm)。

对于设计中要求偶数齿的椭圆齿轮,因互相啮合的两个齿轮不完全相同,不能在一次安装中加工。但由于偶数齿齿轮的轮齿对长轴和短轴的分布均有对称性,加工时可减少分度角度的计算和操作调整次数。因此,当工件批量较大时,为提高加工效率,形状相同的偶数齿齿轮也可在一次安装中加工。

上述两种单分度铣齿法的切削用量选择与普通圆柱齿轮的单分度铣齿法相同,即可根据齿轮的模数、材料性质、加工精度和表面粗糙度要求来选择切削用量。

2.2 化学蚀剂法加工非圆齿轮

2.2.1 加工原理和方法

化学蚀剂法(Photo Chemical Machining, PCM)是一种利用化学蚀剂来加工零件的方法。其加工方法和步骤如下:

(1) 按被加工零件的实际尺寸放大许多倍(例如 20 倍)绘制零件图,称为样图。

(2) 按样图照相,将样图再缩小到零件实际尺寸,通过照相排版,制成零件的反像底片。

(3) 按零件的反像底片对薄金属板进行感光涂料,形成一种保护膜(与零件形状相同的膜片)。

(4) 将涂上保护膜的薄金属板放入蚀剂溶液中,将无保护膜的金属蚀制掉,即成零件。

(5) 将制成的零件放在溶剂中清洗,除去上面的保护膜,然后用清水洗净并烘干。

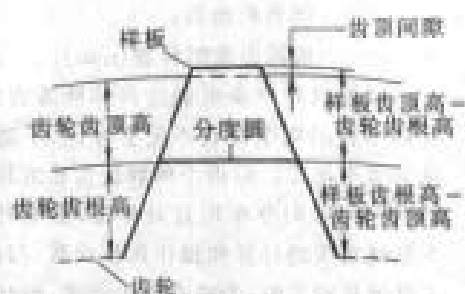


图 22.3-11 样板的齿形

以上得到的是与被加工零件形状相同的薄金属片。仪器中应用的非圆齿轮由 4~5 层 0.006in (0.1524mm) 厚的薄金属板叠合而成,以保证齿轮有好的质量。叠合最好用点焊连接,也可用环氧树脂等粘接,不论采用哪一种方法,组装时必须用夹具保证叠合层的同心,如果定心孔蚀制过小,组装后应再进行扩孔或铰孔,以达到图样要求。

2.2.2 样图的绘制

绘制非圆齿轮样图时,应先绘制一个非圆齿轮副中形状比较简单的齿轮,用它做样板,按展成原理再绘制另一齿轮的样图。这样,可防止两个非圆齿轮啮合时发生干涉。

对于一些传动速度慢、负载小的非圆齿轮副,绘制

样图时,先绘制的齿轮的齿形可用直线代替,用它作为样板时,要对其齿高进行修正。如图 22.3-11 所示,样板齿形的齿顶高和齿根高恰好与齿轮齿形相反,这样才能用它来展成出另一个齿轮的共轭齿形。

图 22.3-12 示出了一个指数曲线齿轮副中的输入齿轮齿形利用已绘制好的输出齿轮齿形(样板的展成过程(说明从略),输出齿轮齿形是用直线齿形代替的。在计算机普及的今天,展成齿形可由计算机来完成,此外,两个齿轮的齿形还均可用解析法计算出,用计算机绘制成放大图形(样板)。

2.2.3 加工范围和精度

化学蚀制法广泛用于电子和航天工业,用以制造平板形精密小圆柱齿轮和小非圆齿轮,加工成本较低,特别是当加工批量小和齿轮的几何形状复杂时,最为适用和经济。

化学蚀制法的加工精度主要决定于样图的绘制精度,被加工件的制造公差在样图中给定,其公差值可参考美国 Photo Chemical Machinery Institute of Evanston Illinois 制定的 PCMI-0-300 技术规范。一般金属板越薄,加工精度越高。

该方法的主要优点是可直接由图样来制造零件,是一种比较方便的仿形加工法。由于零件形状的改变很容易通过图样来改变,因此可以缩短制造周期。再者,用该方法加工出的零件没有内应力和毛刺,可减少零件变形和去毛刺工序。但这种方法也有一些缺点,如金属的去除比较慢,生产量不能大,而且加工误差随金属板的厚度增大而增大。因此,对于厚度大的非圆齿轮,通常要由金属板的叠合来制造,增加了组装这一附加成本,并且齿轮的质量和精度均比用传统的加工法加工出来的稍低一些。

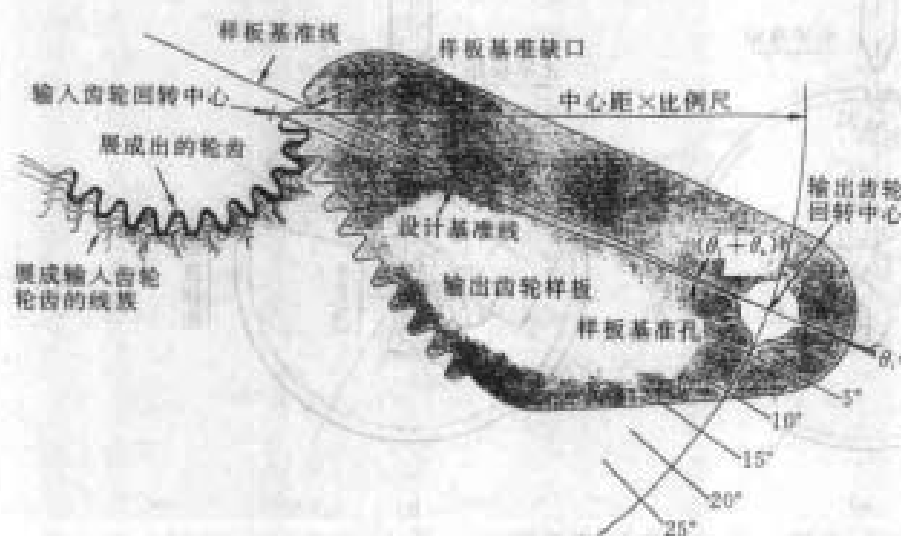


图 22.3-12 用样板展成齿形

$$\theta_0 = \theta_{max} K^2$$

θ_0 —输出齿轮转角
 θ —输入齿轮转角
 K —指数齿轮常数

$\theta_0 / (^\circ)$	$\theta_0 / (^\circ)$	$(\theta_0 + \theta_0) / (^\circ)$
0	2.00	2.00
5	2.20	7.20
10	2.42	12.42
15	2.67	17.67
20	2.94	22.94
25	3.24	28.24

2.3 数控线切割法加工非圆齿轮

2.3.1 加工范围和精度

利用数控线切割法加工非圆齿轮是一种适应性很强的加工方法。不论非圆齿轮节曲线的曲率变化多复杂、齿轮的模数和宽度多大及轮齿是否经过淬硬均可加工。并且不论轮齿在节曲线上的分布是否连续,齿轮的整个轮廓(包括所有齿廓)均可在一次安装中加工完毕。由于加工可在热处理后进行,因此没有加工后因热处理引起变形之弊。其加工精度和加工表面粗糙度可满足一般传动用非圆齿轮的要求。例如,加工一对如图22.3-13所示的非圆齿轮(用于铣削等螺旋角指状齿轮铣刀的沟槽时,传动机构中用的一对齿轮);模数 $m=2\text{mm}$ 、齿数均为 $z=56$ 、齿宽约 10mm 、中心距为 125mm 。其中心距变动量小于 0.2mm 、转角误差小于 $10'$ 。

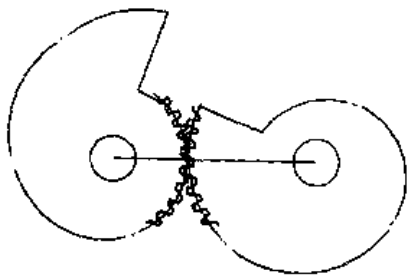


图 22.3-13 数控线切割出的一对齿轮

这种加工法的缺点是编制加工程序较麻烦,加工效率较低。上述一对齿轮的加工机动时间大约需 9h 。

2.3.2 加工原理和方法

数控线切割加工非圆齿轮,即利用电极丝(钼丝)沿非圆齿轮的整个轮廓进行切割而成。为了保证加工精度,必须精确地计算出非圆齿轮沿节曲线分布的各个轮齿的齿形方程式。齿形方程式虽可直接求出,但算法比较复杂,一般用当量圆柱齿轮齿形来代替理论齿形。

如前2.1.1节所述,所谓当量圆柱齿轮齿形,即各个轮齿的当量圆柱齿轮齿形。如图22.3-5所示,齿槽1中点A的密切圆半径(曲率半径)为 R_A 。非圆齿轮齿槽1的齿形近似于齿数为 $z_{DA}=2R_A/m$ 的当量圆柱齿轮齿形(m 为非圆齿轮的模数)。

为了求出其他齿的齿形,例如第10个齿槽,必须截取弧 $\widehat{AB}=(10-1)\pi m$ 。齿槽弧长中点B的密切圆半径为 R_B ,则非圆齿轮齿槽10的齿形近似于齿数为 $z_{DA}=2R_B/m$ 的当量圆柱齿轮的齿形。同理可求出非圆齿轮所有齿的当量圆柱齿形。

普通圆柱齿轮齿形的求法比较简单,不在此赘述。目前数控线切割机床的数控系统与数控插齿机和数控滚齿机一样,一般只有直线和圆弧插补功能。因此编程

时,要把当量圆柱齿轮的齿形用许多直线段或圆弧段来逼近。对于 $m \leq 4$ 的齿轮,其有效渐开线部分用两段圆弧逼近,即可满足精度要求。非圆齿轮的齿顶和齿根轮廓曲线均是节曲线的等距线。因齿顶和齿根均不参加啮合,为了加工方便,均可用直线逼近。这样,非圆齿轮的所有齿的齿形均可由直线和圆弧来逼近,以实现在数控线切割机上加工。

非圆齿轮传动都有对号啮合的特点(详见本章2.6.1)。加工时要特别注意起始啮合点零线的定位。如图22.3-14所示:当主动齿轮节曲线的零线在齿槽中点时,则从动齿轮节曲线的零线在齿峰的中点,两者的齿形在节曲线上错过 $1/2$ 齿距的弧长。

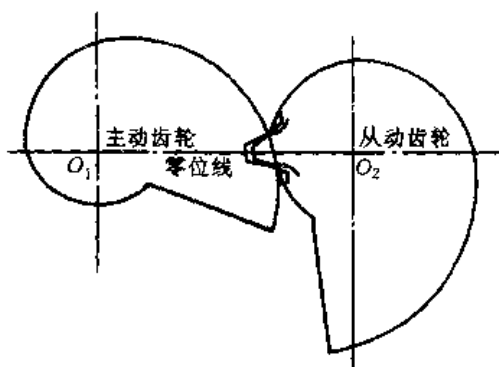


图 22.3-14 一对非圆齿轮的定位零线

2.3.3 加工程序编制

数控线切割机床加工程序的编制方法与后面介绍的数控齿轮机床的加工程序编制方法基本相同,即首先按被加工零件的形状制定加工路线和确定起始加工点。按零件的精度要求确定逼近当量齿形用的圆弧段长和段数,然后进行数值计算。根据数值计算得出的数据编制加工程序。数值计算的步骤如下:

(1) 按非圆齿轮的节曲线方程,模数和中心距,确定主、从动齿轮上每个齿槽弧长中点的向径 ρ 和极角 θ (图22.3-15)。

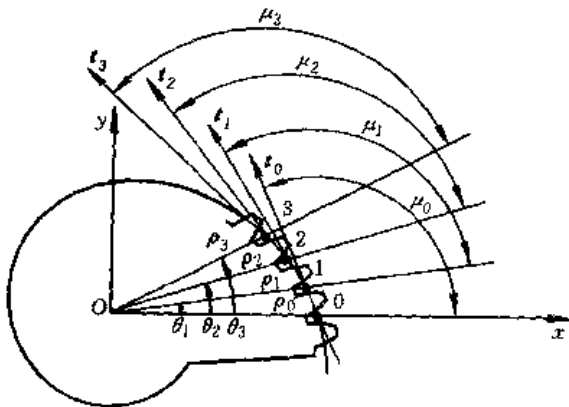


图 22.3-15 非圆齿轮的极坐标表示法

的齿轮经淬火后会产生很大变形。

由于滚轧法加工非圆齿轮有如上许多优点,而且生产效率又高,故为今后大量生产非圆齿轮之重要途径。

2.4.2 轧制方法和冷轧设备

1. 轧制方法

非圆齿轮的冷轧方法只能采用自由分度方式,即只需对轧轮(轧制工具)或非圆齿轮两者之一给予强制转动。这样整个轧制设备就比较简单,轧轮采用圆齿轮也容易制造。

用圆形轧轮轧制非圆齿轮时,两者之间的运动关系如同圆齿轮和非圆齿轮传动时一样。如图 22.3-18 所示,轧制时,轧轮 1 按一定方向以一定进给压力 Q ,边进给边轧制。由于轧轮 1 与非圆齿坯 2 对滚时中心距发生变化,轧制力也因之而发生变化。同时,轧制力给予齿坯轴的力矩也有很大变化。这样就难以形成平稳的回转运动,而且还可能造成啮合不好而脱开,因此这样轧制方式不能采用。

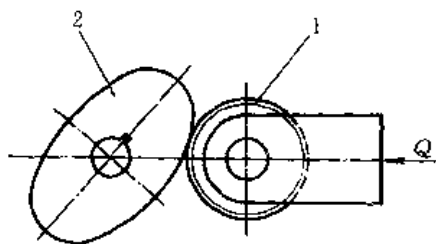


图 22.3-18 车轧轮轧制非圆齿轮原理图

1—轧轮 2—非圆齿坯

为了尽可能使轧制时的回转运动平稳,可采用如图 22.3-19 所示机构。轧制工具由两个轧轮 1 组成。两轧轮装在叉形架 3 上,其中心距 A 固定,叉形架 3 用销轴 4 与支座 5 相联,并可绕销轴 4 摆动。轧制时的进给压力 Q 通过销轴 4 传给叉形架 3 上的两个轧轮 1。当非圆齿坯 2 回转一周时,两轧轮 1 加给非圆齿坯 2 上的轧制力 F_1 和 F_2 随齿坯外周不同位置而变化,因此,轧入量也随之变化而呈变量。为保证一定的轧入量,在齿坯 2 的两侧装与非圆齿轮节曲线相同形状的样板 6 (见图 22.3-20);在轧轮 1 的两侧装有轴环 7。当轧入深度到样板 6 与轴环 7 接触时,便不能再继续轧入。

在轧制开始时,首先要对齿坯 2 外周上进行齿数分度。为此,先将分度轧轮 $1'$ 装在叉形架 3 上的一个轧轮轴上。在另一个轧轮轴上装上与分度轧轮 $1'$ 相应的分度轴环 $7'$ 。利用轴环 $7'$ 与样板 6 的接触,来控制分度时的轧入量。这样,在进行齿数分度轧制时,当轧入深

度到样板 6 与轴环 $7'$ 接触时,分度轧轮 $1'$ 便在齿坯 2 的外周上分度出所需的齿数。

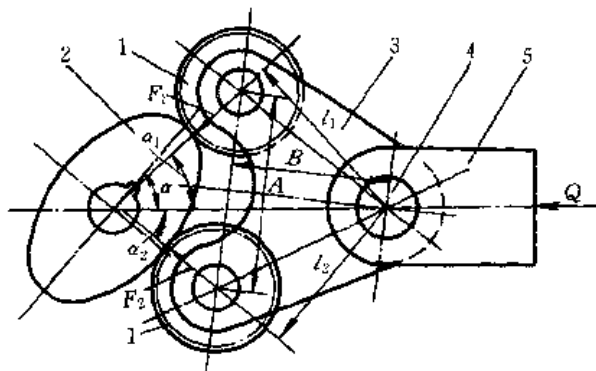


图 22.3-19 双轧轮轧制非圆内轮原理图

1—轧轮 2—非圆齿坯 3—叉形架
4—销轴 5—支座

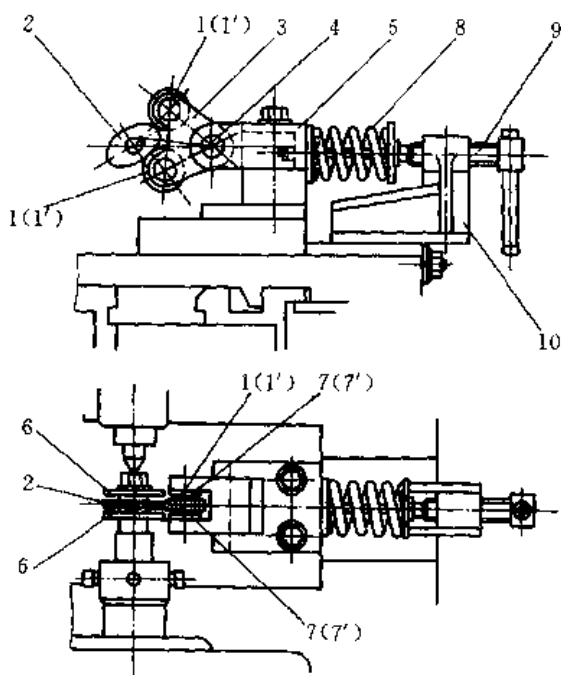


图 22.3-20 冷轧装置的结构示意图

1—轧轮 1'—分度轧轮 2—非圆齿坯 3—叉形架
4—销轴 5—支座 6—样板 7—轴环 7'—分度轴环 8—压缩弹簧 9—手动丝杠 10—支座

齿数分度后,在两个轧轮轴上换装精轧用的轧轮 1 和精轧用的轴环 7,并调整好,然后进行精轧。

2. 冷轧设备

采用上述方法冷轧非圆齿轮时,其冷轧设备可利用车床加以改装而成,如图 22.3-20 所示:将车床床鞍上的小刀架和进刀丝杠卸下,装上支承轧轮叉形架 3 的支座 5 和轧入进给加压装置(由圆柱形压缩弹簧 8 和手动丝杠 9 及其支座 10 组成)。转动丝杠 9,可使支

(续)

螺旋角 β	模数 m	齿数 z	齿宽与模数 之比 b'/m	凸起系数 K
30°	1.25	60	6.1	0.55
30°	1.25	60	7.7	0.69
30°	1.25	60	8.6	0.71
30°	2.5	60	3.2	0.29
30°	2.5	60	3.7	0.35
30°	2.5	60	4.5	0.47
45°	1	55	5.0	0.45
45°	1	55	6.0	0.53
45°	1	55	8.0	0.69
45°	1	55	10.0	0.76
45°	1	55	16.0	0.91
45°	1	55	20.0	0.99
45°	2	30	3.6	0.35
45°	2	30	4.0	0.48
45°	2	30	5.0	0.54
45°	2	30	5.5	0.57
45°	2	30	6.0	0.65

在轧制非圆齿轮时,因其节曲线上各点的曲率半径不同,当量圆柱齿轮的齿数不同,故非圆齿轮每个齿的 K 值不同。但当非圆齿轮的模数较小 ($m=1\sim 2\text{mm}$) 和齿数较多时, K 的影响不大,可把 K 视为常数,按表 22.3-2 来选数。并认为齿坯外周曲线是节曲线的等距线。如图 22.3-22 所示:已知非圆齿轮节曲线方程 $\rho=\rho(\theta)$ 。从节曲线上任一点 P 作该点切线 i 的垂线 PQ ,令 $PQ=h'$ (h' 为非圆齿轮齿坯的齿顶高), $h'=m(1-K)$,则 $\overline{OQ}=\rho_r$ (ρ_r 为非圆齿轮齿坯外周向径)。由几何关系可得齿坯外周曲线的极坐标方程:

$$\begin{cases} \rho_r = \sqrt{m^2(1-K)^2 + \rho^2 + 2m(1-K)\rho\cos\zeta} \\ \phi = \theta + \beta \end{cases} \quad (22.3-36)$$

式中 ϕ ——向径 ρ_r 的极角(°);

ζ ——切点 P 处向径 ρ 的延长线与该点法线 PQ 的夹角(°), $\zeta = \mu - 90^\circ$ 。

由式(22.3-5)知 $\mu = \arctan \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\theta}}$

β ——向径 ρ_r 和向径 ρ 之间的夹角(°)。

$$\beta = \arctan \left(\frac{m(1-K)\sin\zeta}{\rho + m(1-K)\cos\zeta} \right)$$

4. 齿坯外周的分度

采用自由分度方式轧制圆柱齿轮时,开始要在齿坯外圆上分度出齿数。当轧轮外圆与齿坯外圆接触转动时,由于从动轴上总会有摩擦阻力存在。当阻力较大

时,轧轮齿顶和齿坯外周之间就会产生滑动。轧制非圆齿轮时,开始自然也要在齿坯外周上分度出齿数,但因轧制时,轧轮在被迫作回转运动的同时,还要作摆动。因此,在轧轮齿顶和齿坯外周之间会产生更大的滑动。这样,与轧制圆柱齿轮一样,在计算分度用的轧轮齿顶圆直径时,更需要考虑这一滑动量。

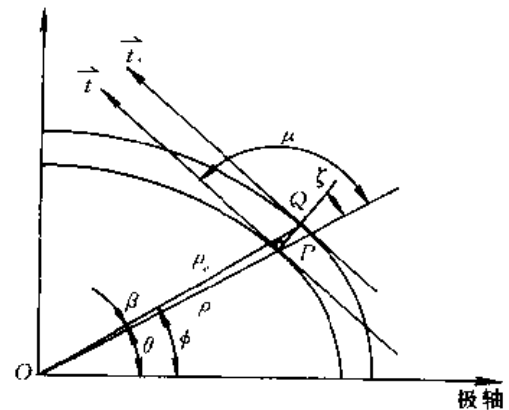


图 22.3-22 非圆齿轮齿坯外周曲线

如已知非圆齿轮齿坯外周曲线的极坐标方程(见式(22.3-36)),并假定齿坯轴每转过一个齿距的滑动量为 S_r ,则得

$$\frac{\pi d_1}{z_1} = \frac{1}{z_2} \int_0^{2\pi} \rho_r d\phi - S_r \quad (22.3-37)$$

式中 d_1 ——分度轧轮的齿顶圆直径;

z_1 ——分度轧轮的齿数;

z_2 ——非圆齿轮的齿数。

整理后可得

$$d_1 = \frac{z_1}{\pi d_2} \int_0^{2\pi} \rho_r d\phi \left(1 - \frac{z_2 S_r}{\int_0^{2\pi} \rho_r d\phi} \right)$$

$$L = \frac{z_2 S_r}{\int_0^{2\pi} \rho_r d\phi} \quad (22.3-38)$$

L 称为滑动系数,代入上式后可得

$$d_1 = \frac{z_1}{\pi d_2} \int_0^{2\pi} \rho_r d\phi (1 - L) \quad (22.3-39)$$

非圆齿轮的滑动系数 L 值也可像圆柱齿轮一样,通过试验得到。另外, L 也与从动轴的支承方式、轴承类型和齿坯材料等因素有关。表 22.3-3 是圆柱齿轮的滑动系数。对于非圆齿轮也可参照此表选取 L 值,但要取得稍大一些。

表 22.3-3 滑动系数 L 的值

轴承类型	齿坯材料		
	硬 铝	黄 铜	低碳钢
滚动轴承	0.0025	0.002	0.001
滑动轴承	0.007	0.006	0.004

5. 轧轮、样板和轴环

(1) 轧轮 轧轮材料采用模具钢,切齿后进行淬火处理。精轧用的轧轮采用标准齿轮,分度用的轧轮采用变位齿轮。为了确定分度轧轮的外径 d_1 ,先将轧制圆柱齿轮的凸起系数 K 和滑动系数 L (见表22.3-2和表22.3-3)作为参考值,代入式(22.3-35)和式(22.3-39)求出初始 d_1 值,按此值做出轧轮,进行轧制非圆齿轮。轧制时测出滑动量 S ,然后代入式(22.3-38)计算出滑动系数 L 。再按这个滑动系数来确定分度轧轮的外径 d_1 。

(2) 样板和轴环 样板和轴环的材料均采用碳素钢(碳的质量分数为0.5%),加热到850℃油淬火,然后在150℃进行回火。

如图22.3-20所示,非圆齿坯2的两侧各放一块相同的样板6,两个轧轮1(或分度轧轮1')的两侧均各放一个相同的轴环7(或分度轴环7')。这样,在轧制前可用来调整非圆齿坯轴和两个轧轮轴之间的平行度。在轧制时,还可用来防止因轧制力的变化造成非圆齿坯轴与轧轮轴不平行。

前面已经提到,样板的形状和尺寸与非圆齿轮的节曲线相同;精轧用的轴环外径与精轧用的轧轮分度圆直径相同。由于分度用的轧轮外径比精轧用的轧轮外径小,因此,分度用的轴环外径比精轧用的轴环外径大。具体数值可见表22.3-4。

表 22.3-4 轧轮与轴环的基本参数 (mm)

轧轮 $m=1, z=60, \alpha=20^\circ$ 直齿圆柱齿轮		
分度用	分度直径	60.0
	齿顶圆直径	60.8
	轴环外径	61.5
精轧用	分度直径	60.0
	齿顶圆直径	62.0
	轴环外径	60.0
轧轮 $m=1.25, z=48, \alpha=20^\circ$ 直齿圆柱齿轮		
分度用	分度直径	60.0
	齿顶圆直径	61.0
	轴环外径	62.0
精轧用	分度直径	60.0
	齿顶圆直径	62.0
	轴环外径	60.0

2.5 改装切齿机加工非圆齿轮

利用前面所述的加工方法加工非圆齿轮,虽然在精度上可达到一定要求,但在生产率上,除滚轧法外,一般均很低,往往难以满足生产需要。利用普通机床改装成切齿机来加工非圆齿轮,不论在加工精度和生产率上,均比较高,而且设备成本要比正规的数控切齿机

床低很多,因此,是我国目前解决非圆齿轮加工问题的重要途径之一。

2.5.1 数控改装加工

数控改装加工是利用普通机床,按数控机床加工原理改装成数控机床。

利用插齿机改装成的数控插齿机适于各种规格的非圆齿轮加工。改装成的数控滚齿机特别适于加工大型非圆齿轮。1989年我国第一台由Y54A型插齿机改装成的YKD54A型数控插齿机投入生产;1991年我国第一台由Y58型插齿机改装成的YKD58型数控插齿机投入生产;1994年我国第一台由Y3180型滚齿机改装成的Y3180CNC型数控滚齿机投入生产,均获得很大效益。这些改装的数控机床的加工原理和加工调整与正规的数控插齿机和数控滚齿机完全相同,详见本章2.6节。

2.5.2 靠模改装加工

靠模改装加工是利用普通机床按靠模仿形加工原理改装成靠模切齿机,用以加工非圆齿轮。其加工精度一般高于普通铣床的分度铣齿法,加工的表面粗糙度也较小,而生产率的提高最为显著。

由于非圆齿轮应用最多的场合是在流量计中,而流量计中的这些齿轮的结构特点是高度(齿宽)较大,故适于用靠模插削法加工。

(1) 加工原理 图22.3-23所示是1:1仿形靠模加工原理图。靠模齿轮1与工件2(非圆齿轮)的形状、模数、齿数和齿形角完全相同,且位于同一轴上;圆齿轮5与插齿刀的模数、齿数和齿形角完全相同。通过中间传动机构4(传动比 $i=1:1$)保证同步回转。加工时,插齿刀3除作往复切削运动和让刀运动外,由圆齿轮5驱动作同步回转。与此同时,圆齿轮5驱动靠模齿

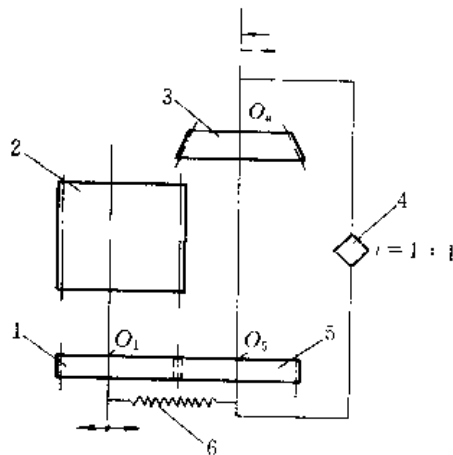


图 22.3-23 非圆齿轮靠模加工原理

1—靠模齿轮 2—工件 3—插齿刀 4—传动机构
5—圆齿轮 6—拉力弹簧

轮1回转和沿 O_5O_1 中心连线方向移动,从而使工件2作同步回转和移动。这样,插齿刀3和工件2的滚切运动。便由圆齿轮5和靠模齿轮1的无间隙啮合传动来保证。圆齿轮5和靠模齿轮1之间的无间隙啮合传动由拉力弹簧6来控制。

当在此机床上加工非圆齿轮的外廓(齿顶曲线)时,将插齿刀换成圆形插刀。圆形插刀的外径一般等于插齿刀的分度圆直径或稍大一些,以增大使用寿命。加工时,刀具的外圆与工件的外廓不要求保证纯滚动。实践证明,这对加工精度和加工表面粗糙度并无影响。圆形插刀刀前角一般为 5° ,后角为 6° 。

(2) 加工调整 加工开始时,插齿刀必须远离工件;为了能完成插齿刀对工件的快速趋近、滚切切入和多次进刀,插齿刀又必须能快速和慢速接近工件。这样,就要求插齿刀中心 O_3 在加工调整和加工过程中,能沿 O_5O_1 中心连线方向移动。当切入后进行滚切加工时,插齿刀中心 O_3 应固定不动。

加工起始点的选择和对刀方法,以及切削用量的选择详见本章2.6节。

(3) 加工精度分析 加工时,当插齿刀3进刀到工件2的齿深后,只有插齿刀3的滚动节圆与圆齿轮5的滚动节圆一致(即1:1仿形),才能准确地加工出工件2。但由于插齿刀3是一个变位齿轮,且变位系数随刃磨而变化,因此很难保证上述条件。除非按插齿刀的刃磨变化,准备很多圆齿轮5,否则会带来加工误差。因此,靠模法的加工精度一般低于数控机床的加工精度。但靠模法的生产率,一般不比数控机床的生产率低。

靠模齿轮1的制造精度因目前有了精密数控机床,一般均可保证。因此,利用靠模法加工非圆齿轮,如对刀准确、仿形机构精度准确,刀具刃磨后引起的误差能消除,可以达到较高精度的。此外,如在改装的机床结构条件允许情况下,增大仿形比例,加工精度还可能提高。

2.6 数控机床加工非圆齿轮

利用数控机床加工非圆齿轮是目前最先进的加工方法。

2.6.1 数控加工程序

(1) 按工件图样要求制定加工路线 在制定加工路线时,首先应按工件的形状特点选择起始加工点。当非圆齿轮的曲线为封闭型曲线时,起始加工点应选择曲线不重要的部位,以防因接刀处有误差而影响工件精度;当非圆齿轮或凸轮的曲线为非封闭型曲线时,因无接刀问题,起始加工点可选在曲线的任一端开始

处。但为了便于计算加工程序,最好选在曲线方程的极轴一端。

选择好起始加工点后,一般应从该点对刀。对刀后,即从该点开始加工。这样,不但可保证工件的加工精度,也可提高加工效率。工件加工完毕后,退离刀具,同时将工件和刀具均复位到原始加工位置,再卸下工件。

加工时,工件和刀具的一切运动均靠加工程序控制。因此,在编制加工程序时必须注意:在工件和刀具复位时,工件和刀具的滚切运动关系不能破坏。否则,在加工下一个工件时要重新对刀。

(2) 对刀调整 非圆齿轮有对号啮合的特点,即一对相啮合的非圆齿轮有一个原始啮合起点,而且在啮合传动中,要严格保证啮合齿之间的相对位置关系。这样,就要求在开始加工时,刀具和工件有严格的位置关系:刀具上的齿要对准工件开始加工处的齿槽,或刀具上的齿槽对准工件开始加工处的齿峰。

对刀用的工具是对刀规(又称对刀样板)。对刀规与加工夹具之间有严格的定位关系。详见本章2.6.2节。

(3) 切削用量的确定 非圆齿轮切削用量的选择原则与圆柱齿轮相同,即根据齿轮的模数大小、材料性质、加工精度和表面粗糙度要求来确定。对于齿宽较大、安装定位孔和安装支承面又较小非圆齿轮(如流量计中的非圆齿轮),因受加工夹具刚度的限制,应选择比圆柱齿轮小一些的切削用量。

对于带有凹形轮廓的非圆齿轮,一般不能用滚削法加工。

(4) 编制加工程序 数控机床加工由加工程序控制。当工件的加工路线、对刀位置和切削用量确定后,再根据工件的精度和表面粗糙度要求进行加工程序编制。编制步骤如下:

1) 程序段长度的确定 目前加工非圆齿轮的数控系统,一般为一次插补系统。用此系统加工非圆齿轮的节曲线时,是以连续的折线段来逼近曲线。这样就产生了由逼近而造成的加工误差问题。

如图22.3-24所示,设在工件曲线上取一小段弧线 \hat{ab} 。因 \hat{ab} 很小,可近似认为是一段小圆弧,其曲率半径为 R 。当以弦 \overline{ab} 逼近曲线 \hat{ab} 时,便产生了误差 δ 。 δ 值一般应控制在工件精度允差值的 $1/5 \sim 1/10$ 范围内。对于非圆齿轮,通常取 $\delta = (1/5 \sim 1/10) \Delta_{\epsilon}$ (Δ_{ϵ} 为非圆齿轮或凸轮的径向圆跳动允差值)。 δ 值称为编程允差。

由于工件曲线上各点的曲率半径 R 不同,故对于同样的 δ 值所对应的弧长 \hat{ab} 不等。曲率半径 R 越小,对

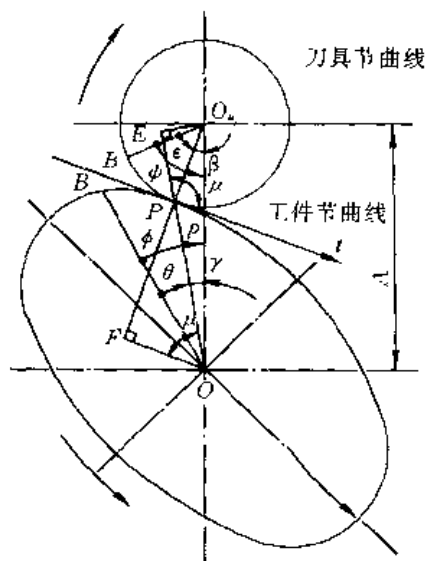


图 22.3-25 数控插齿加工原理图

(2) 求 ψ 、 ϕ 和 A

$$1) \quad \psi = \epsilon + \beta \quad (22.3-41)$$

$$\epsilon = \frac{S}{R_s} \times \frac{180}{\pi}$$

式中 S — 程序段长(mm); R_s — 插齿刀的节圆半径或圆形插刀的外圆半径(mm)。

$$\beta = \arcsin \frac{\rho \sin(\mu - 90^\circ)}{R_s + \rho \cos(\mu - 90^\circ)}$$

式中 ρ — 工件 P 点处的向径(mm)。由式(22.3-5)知: $\mu = \arctan \frac{\rho}{d\rho/d\theta}$

$$2) \quad \phi = \theta + \gamma \quad (22.3-42)$$

式中 θ — 工件 P 点处的极角(°); γ — 工件向径和刀具与工件中心连线之间的夹角。

$$\gamma = \arctan \frac{R_s \sin(\mu - 90^\circ)}{\rho + R_s \cos(\mu - 90^\circ)}$$

$$3) \quad A = \sqrt{\rho^2 + R_s^2 + 2\rho R_s \sin\mu} \quad (22.3-43)$$

(3) 为了实现微机系统对机床三个坐标、 ψ 、 ϕ 和 A 的控制,首先按式(22.3-41)、式(22.3-42)和式(22.3-43)求出 ψ 、 ϕ 和 A 值,再求出 $\psi - \psi_0$ 、 $\phi - \phi_0$ 和 $A - A_0$ 值。然后换算成微机系统能接受的脉冲数或线性值。

1) 当微机系统接受脉冲数时,三个坐标的脉冲数:

$$Z = \frac{\psi - \psi_0}{\Delta\psi} (\lambda)$$

$$Y = \frac{\phi - \phi_0}{\Delta\phi} (\lambda)$$

$$X = \frac{A - A_0}{\Delta A} (\lambda)$$

式中 $\Delta\psi$ 、 $\Delta\phi$ 、 ΔA — 机床三个坐标的脉冲当量。 $\Delta\psi$ 和 $\Delta\phi$ 的单位为(°)/ λ , ΔA 的单位为 mm/ λ ;

 Z 、 Y 、 X — 机床三个坐标的脉冲数。

2) 当微机系统接受线性值时,要把脉冲数换算成毫米数。当微机系统的最小设定单位为 0.001mm 时,换算单位为 1 个脉冲相当于 1/1000mm,则

$$Z = \frac{\psi - \psi_0}{\Delta\psi} \cdot \frac{1}{1000}$$

$$Y = \frac{\phi - \phi_0}{\Delta\phi} \cdot \frac{1}{1000}$$

$$X = \frac{A - A_0}{\Delta A} \cdot \frac{1}{1000}$$

(4) 因数控插齿机的微机系统为增量系统,故需求出各个坐标的脉冲数增量或线性值增量:

$$\Delta Z = Z_i - Z_{i-1} (\lambda) \text{ 或 (mm)}$$

$$\Delta Y = Y_i - Y_{i-1} (\lambda) \text{ 或 (mm)}$$

$$\Delta X = X_i - X_{i-1} (\lambda) \text{ 或 (mm)}$$

(5) 按求出的 ΔZ 、 ΔY 和 ΔX 编制加工程序,然后将程序输入到微机系统中,即可进行加工。

2. 加工调整

数控插齿机加工时的主运动(切削运动)的调整和普通插齿机相同,即根据切削速度和切削行程长度来确定刀具每分钟往复行程数。加工时的切入运动通常也是采用滚切切入。每次切入深度和切入次数均由加工程序控制。径向进给量和圆周进给量也均由加工程序控制,但在加工进行中可由数控柜上的速度倍率旋钮进行调节。

前面已经提到,加工时的关键调整工序是对刀,对刀方法随工件而异,现介绍加工非圆齿轮的对刀方法。以应用最广泛的流量计中的卵形齿轮(二阶变形椭圆内轮)为例,说明如下:

1) 如图 22.3-26 所示,将夹具 1 装在机床工作台上(夹具上先不要装工件)。用百分表 2 找正夹具 1 的定位心轴 5。当百分表 2 的跳动不超过 0.01mm(因卵形内轮较高,定位心轴 5 较长,必须在心轴 5 的上下两处找正)时,再用百分表 2 检查夹具 1 的支承端面。如百分表 2 的跳动不超过 0.005mm 时,将夹具 1 紧固在工作台上。

2) 如图 22.3-27 所示,以夹具上的定位心轴 5、菱形销 6 和支承端面定位,将对刀规 1 装在夹具上。用百分表 2 触及对刀规 1 的侧面(该面与对刀规 1 上的定心孔和菱形销定位孔的中心连线平行。该中心连线为对刀规 1 尖头的对称线)。移动工作台或刀架(随机床

结构而异),在对刀规1侧面全长上(长度一般为100mm),百分表2的读数差不应超过0.01mm。否则要通过微动回转工作台进行调整

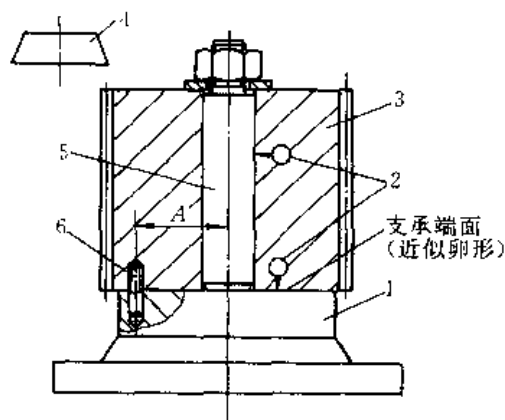


图 22.3-26 加工卵形齿轮夹具

- 1- 夹具 2- 百分表 3- 工件 4- 插齿刀
5- 定位心轴 6- 菱形销

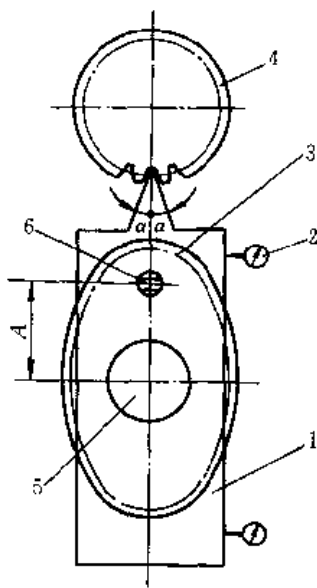


图 22.3-27 加工卵形齿轮对刀方法

- 1- 对刀规 2- 百分表 3- 工件 4- 插齿刀
5- 定位心轴 6- 菱形销

3) 移动工作台或刀架,使对刀规1的尖头(尖头两侧面的夹角 2α 的对称线通过对刀规1上的定心孔和菱形销定位孔的中心连线。 α 为插齿刀4的压力角)插入插齿刀4的齿槽。用塞尺检查尖头和齿槽两侧面之间的间隙是否均匀。否则,必须通过微动回转刀轴进行调整。

4) 退出工作台或刀架,取下对刀规1。以夹具上的定位心轴5、菱形销6和支承端面定位,将工件3装在

夹具上,紧固后即可进行加工。

以上调整中应注意的是:为提高加工精度,要使对刀调整后的工作台和刀轴的反向间隙与滚切加工时的反向间隙在同一方向上。

按图22.3-27所示的对刀规对刀后切出的齿轮在长轴上为齿峰。如果要求在长轴上为齿槽时,对刀规的尖头部分应做成如图22.3-28所示的形状。头部V形槽的对称线应通过对刀规定心孔和菱形销定位孔的中心连线。

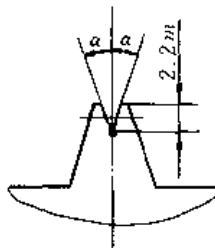


图 22.3-28 凹槽对刀规

当齿轮的模数较小时,由于V形槽的加工比较困难,仍可用图22.3-27中所示的对刀规进行对刀。对刀后,将插齿刀沿加工时的滚切方向转过半个齿距角,再进行加工。

另外,为了便于保证加工定位精度,夹具、对刀规和工件上的菱形销定位孔必须由同一钻铰模加工出。为防止夹具的定位心轴和菱形销磨损后产生间隙,影响加工定位精度,在装对刀规和工件到夹具上时,必须向同一旋向靠紧菱形销。此旋向即把工件紧固到夹具上时的旋向。

前面已经说过(见2.5.2节靠模改装加工),非圆齿轮的外廓(齿顶曲线)可用圆形插刀加工,但当外廓曲线有凹点时,刀具外径要小于外廓曲线凹点处的曲率半径。如果此时的刀具外径小于插齿时的插齿刀公称直径,则不能使用插齿时的加工程序,而应按稍小于此时的刀具外径重新编程,以保证外廓曲线的精度和增大刀具使用寿命。

3. 数控插齿机和插齿机的数控改装

(1) 数控插齿机

1) 加工范围和精度 数控插齿机除能完成普通插齿机的加工范围外,还可加工各种形状的非圆齿轮和凸轮(包括各种形状的腰形轮)。当工作台附加螺旋升降机构后,还可加工多螺圈非圆齿轮。

目前我国数控插齿机的出厂精度标准按加工圆柱齿轮考核,定为6级(GB10095-88 齿轮精度标准);齿面粗糙度定为 $R_{a}3.2\sim 1.6\mu\text{m}$,实践中某些精度较高的数控插齿机的加工精度可达5级。

的参数,以及切削用量等参数输入系统,进行自动编程后随之进行加工。这样,省去了加工程序的数值计算、填写程序单和输入程序等工作,给用户带来极大方便。

(2) 插齿机的数控改装 利用普通插齿机改装成数控插齿机,是解决我国目前数控插齿机价格昂贵、难以推广应用的一个重要途径。近几年来,已改装成功的数控插齿机有 YKD54(Y54CNC)型、YKD54A(Y54ACNC)型和 YKD58(Y58CNC)型数控插齿机。它们是分别由 Y54 型、Y54A 型和 Y58 型插齿机改装而成,主要为满足国内生产流量计的企业对加工卵形齿轮和腰形轮的需要。

插齿机经数控改装后的加工精度,一般比改装前提高 1~1.5 级。如 YKD54A(Y54ACNC)可达 6 级。YKD58(Y58CNC)可达 7~6 级(均按 GB10095-88 圆柱齿轮精度标准考核)。改装后的加工范围、加工精度和加工件表面粗糙度,以及生产率均与正规同类型数控插齿机相同。加工出的卵形齿轮使流量计精度提高的程度,也与正规同类型数控插齿机相同。

下面以改装的 YKD54A(Y54ACNC)型数控插齿机为例,介绍如下:

1) 机械部分 如图 22.3-31 所示,改装时尽量利

用原机床结构:如机床的上、下床身、刀架、工作台、主驱动箱、刀轴往复传动机构和让刀机构均保持不变,只改变了分齿传动、圆周进给运动、径向进给运动、刀架手摇移动和工作台快速回转等机构。这样,取消了原机床的分齿交换轮架、圆周进给箱、径向进给箱、刀架手摇机构和工作台快速回转机构。

改装后,由微机系统柜通过三个 110BYG01B 型五相混合式步进电机(或 130SZKX-05 型直流伺服电机)经中间传动齿轮副 A/B,分别控制工作台回转、刀轴回转和刀架移动。为提高刀架移动精度、消除移动反向间隙,并防止爬行,采用了滚珠丝杠副传动。为了便于加工各种类型工件,将工作台台面改为带 T 形槽的台面。并在台面外圈装上带游标的圆刻度尺。用以检查工件加工完毕后,工作台是否回原点,以保证加工下一个工件时起始位置的准确性。另外,为适应加工非圆齿轮高度较大这一特性(如流量计中的卵形齿轮),必须在上、下床身之间加入一个中间垫(厚度 70~100mm),使插齿机刀轴支承刀具的端面到工作台台面之间的距离增大。

当机床采用三个 110BYG01B 五相混合式步进电机驱动时,为开环控制。其加工精度、加工件表面粗糙

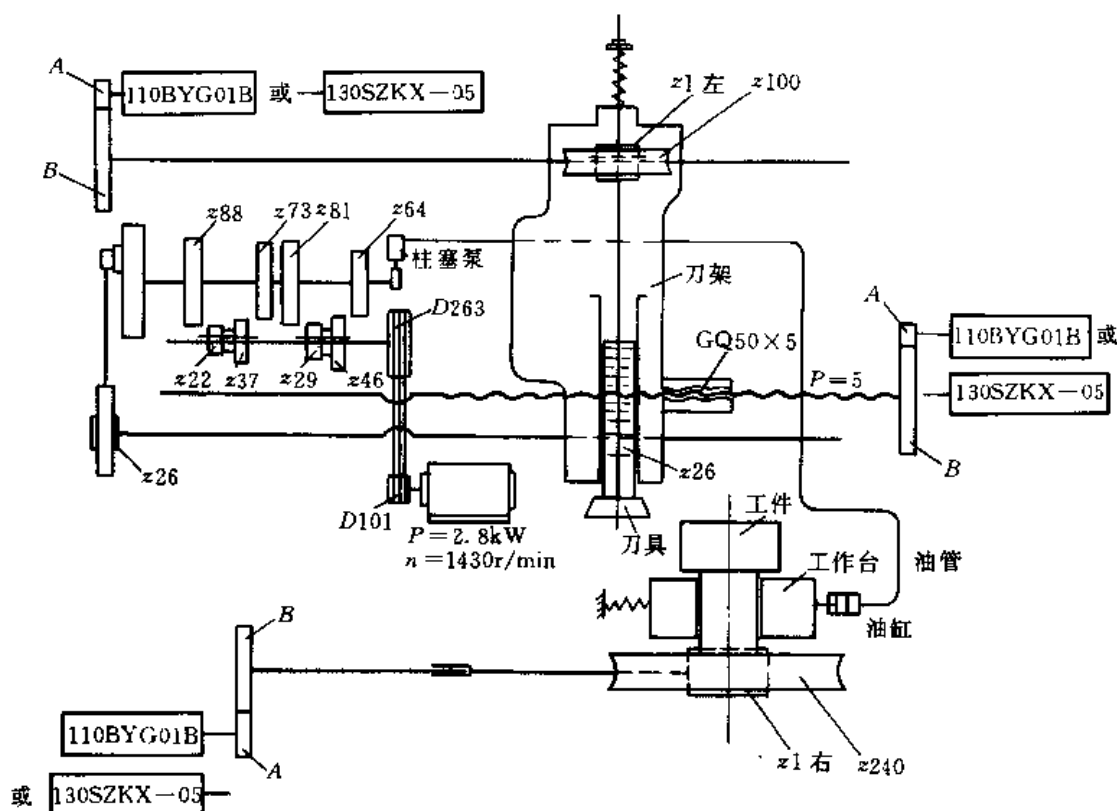


图 22-3-31 YKD54A(Y54ACNC)型数控插齿机传动系统图

度和生产率均能满足一般非圆齿轮的要求(为流量计中的卵形齿轮),可使机床的制造成本大大降低。由图 22.3-31 知:如设定驱动刀轴回转和工作台回转的步进电机的步距角为 $0.36^\circ/\lambda$;刀轴移动的步进电机的步距角为 $0.72^\circ/\lambda$,则三个数控坐标轴的脉冲当量如下:

a. 刀轴回转坐标的脉冲当量 ΔB

$$\Delta B = \left(0.36 \times 3600 \times \frac{25}{108} \times \frac{1}{100} \right) / \lambda = 3''/\lambda$$

b. 工作台回转坐标的脉冲当量 ΔC

$$\Delta C = \left(0.36 \times 3600 \times \frac{35}{63} \times \frac{1}{240} \right) / \lambda = 3''/\lambda$$

c. 刀轴移动坐标的脉冲当量 ΔY

$$\Delta Y = \left(\frac{0.72}{360} \times \frac{21}{105} \times 5 \right) \text{mm}/\lambda = 0.002\text{mm}/\lambda$$

以上三个数控坐标轴的脉冲当量符号 ΔB 、 ΔC 和 ΔY 是当采用 GMT-CNC 微机系统时,该系统规定的符号。

2) 电气部分 原机床的强电部分只取消了工作台快速回转电动机的控制线路,其他均不变。机床改装后采用的微机系统为 GMT-CNC 系统,或安泰一型 CNC 系统。这两种系统均具备前面微机系统一节中提到的功能,而且均能通过表格形式直接将工件和刀具等参数输入系统,进行自动编程后随之进行加工,故使用极为方便。

(3) 数控插齿机和数控改装插齿机一览表 表 22.3-5 中列出了国内外数控插齿机和数控改装插齿机的型号、规格和性能。

表 22.3-5 国内外数控插齿机和数控改装插齿机

机床型号(生产厂)		YKD5130 (天津第一机床厂)	YKD5180 (天津第一机床厂)	YKD54A	YKD58	Genertron I (英国 Sykes 公司)	LS304CNC (德国 Lorenz 公司)	SH251CNC (日本 三菱公司)
机床规格和性能								
最大加工模数/mm		6	6	6	6	6	6	6
最大加工直径/mm	外齿	300	600	300	800	400	300	250
	内齿	250	600	300	1000	360	300	120+刀径
最大加工齿宽/mm		60	280	130	180		70	60
插齿刀最大行程长度/mm		75	300	140	200	70(可订货到 100)	82	
插齿刀每分钟往复行程数/(次/min)		100~800 (无级)	20~120 (7级)	83~240 (4级)	25~150 (7级)	150~1500 (无级)	75~600/ 125~1000 (无级)	250~1350 (无级)
插齿刀每往复行程的圆周进给量/(mm/双行程)		无级,正常使用 0.05~0.5	无级,正常使用 0.05~0.5	无级,正常使用 0.05~0.5	无级,正常使用 0.05~0.5	0.05~2.5 (无级)	对 $\phi 100\text{mm}$ 工件或插齿刀: 1.2~4800mm/min	0.05~3.5 (刀径 $\phi 100\text{mm}$)
插齿刀每往复行程的径向进给量/(mm/双行程)		无级,正常使用 0.01~0.1	无级,正常使用 0.01~0.1	无级,正常使用 0.01~0.1	无级,正常使用 0.01~0.1	0.02~0.2 (无级)	0.05~2400mm/min	0.01~0.05
插齿刀支承面到工作台台面的距离/mm		80~155	90~390	100~240	245~445		90+ ⁺ ~190+ ⁺	
插齿刀中心线到工作台中心线的距离/mm		0~225	0~380	-104~350	0~650			
最小让刀量/mm		0.4	0.65	0.4	0.65			
让刀方式		刀架摆动让刀	刀架摆动让刀	工作台移动让刀	刀架摆动让刀	刀架移动让刀	刀架摆动让刀	刀架摆动让刀

(续)

机床型号(生产厂)	YKD5130 (天津第一机床厂)	YKD5180 (天津第一机床厂)	YKD54A	YKD58	Genertron I (英国 Sykes 公司)	LS304CNC (德国 Lorenz 公司)	SH25HCNC (日本三菱公司)
机床规格和性能							
主电动机容量	$P=1\text{kW}$ $n=3000/$ 1500r/min (晶闸管调速)	$P=7.5\text{kW}$ $n=1450\text{r/min}$	$P=2.2\text{kW}$ $n=960\text{r/min}$	$P=7.5\text{kW}$ $n=1450\text{r/min}$	$P=25\text{kW}$ (直流电机)	$P=16.5\text{kW}$ (直流电机)	$P=5.5\text{kW}$ (A.C. 主轴电机)
数控轴的驱动和控制方式	直流伺服电机驱动, 半闭环控制	直流伺服电机驱动, 半闭环控制	混合式步进电机驱动, 开环控制	直流伺服电机驱动, 半闭环控制	直流伺服电机驱动, 半闭环控制	直流伺服电机驱动, 半闭环控制	直流伺服电机驱动, 半闭环控制
驱动电机容量	$P=1.4\text{kW}$ $n_{\text{max}}=$ 1500r/min	$P=2.5\text{kW}$ $n_{\text{max}}=$ 1000r/min	最大静转矩 $13.7\text{N}\cdot\text{m}$ 最高运行频率 70kHz	$P=2.5\text{kW}$ $n_{\text{max}}=$ 1000r/min			
数控轴的脉冲当量	工作台回转	1s/°	2s/°	3s/°	6s/°	3.6s/°	
	刀轴回转	1s/°	2s/°	3s/°	6s/°	3.6s/°	
	工作台移动	0.001mm/°	0.002mm/°	0.002mm/° (刀架移动)	0.004mm/°	0.001mm/°	
微机系统	FANUC-BESK 3MA	FANUC-BESK 3MA	清华 GMT-CNC	清华 GMT-CNC	Sykes Genertron I -CNC		
主机外形尺寸: 长×宽×高/cm	235×94 ×192	300×125 ×432	200×130 ×213	370×125 ×442	288×171 ×225		
主机净重/kg	约 3000	约 8500	约 3500	约 9000		约 8000	5600

① e 为床身加高值(50, 100, 150, 200mm)。

2.6.3 数控滚齿

1. 加工原理

数控滚齿的加工原理与普通滚齿基本相同,也是利用滚切法进行加工,即加工时滚刀的节线和非圆齿轮的节曲线做纯滚动。与普通滚齿不同的是实现滚切运动的传动控制方式和切削用量的控制方式有所区别。

如图 22.3-32 所示。设在加工开始位置时,滚刀节线和非圆齿轮节曲线在 A_0 点相切(a 图)。这时与非圆齿轮相固联的极轴与切线 A_0t 的正方向间的夹角为 $\theta_0 - \mu_0$ 。当滚刀节线和非圆齿轮的节曲线滚切到 A 点时(b 图),与非圆齿轮相固联的极轴与切线 At 的正方向间的夹角为 $\theta + \mu$,则非圆齿轮转过的角度为

$$\phi = (\theta + \mu) - (\theta_0 + \mu_0) \quad (22.3-44)$$

这时,瞬时回转中心沿滚刀节线走过的距离为 $\widehat{A_0A}$ 。该距离等于沿非圆齿轮节曲线滚过的弧长 $\widehat{A_0A}$ 。令

$$\widehat{A_0A} = \widehat{A_0A} = S,$$

因为

$$O_2O = A_0A - OA + O_2A,$$

所以,与滚刀相固联的坐标系 $x_2O_2y_2$,其原点 O_2 在固定坐标系 xOy 中的位置 x_{02} 为

$$x_{02} = S - \rho \cos \mu + \rho_0 \cos \mu_0 \quad (22.3-45)$$

与非圆齿轮相固联的极坐标系原点 O_1 ,在固定坐标系 xOy 中的纵坐标 y_{01} 为

$$y_{01} = \rho \sin \mu \quad (22.3-46)$$

由滚刀坐标原点 O_2 的轴向位移 z_{02} 和滚刀的头数 z ,可以求出滚刀转角 Ψ :

$$\Psi = (S - \rho \cos \mu + \rho_0 \sin \mu_0) \cdot \frac{360}{\pi m_n z} \quad (22.3-47)$$

式中 m_n ——滚刀法向模数,即被切直齿非圆齿轮的模数(mm)

$$\text{由式(22.3-4)知: } S = \int_0^\phi \sqrt{\rho^2 + \left(\frac{d\rho}{d\theta}\right)^2} d\theta$$

由式(22.3-5)知:
$$\mu = \arctan \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\theta}}$$

与数控插齿相同,加工时,为了求出各个程序段对应的滚刀转角 ψ 、非圆齿轮的转角 ϕ 和非圆齿轮中心 O_1 与滚刀节线的距离 y_{01} 三个坐标值,以便进行编程,必须先求出各个程序段对应的非圆齿轮的极角 θ 、向径 ρ 和 μ 角。其计算步骤如下:

(1) 求 θ 、 ρ 和 μ 设程序段长为 S ,由式(22.3-11);当 $S_1=0, S, 2S, 3S \dots nS$ (n 为正整数)时,求出 $\theta = \theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$ 。将 θ_i 代入已知的非圆齿轮节曲线方程 $\rho = \rho(\theta)$,可求出相应的 $\rho_0, \rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots \rho_n$ 。再由式(22.3-5),可求出相应的 $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_n$ 。

(2) 求 ψ 、 ϕ 和 y_{01} 将上面已求出的 θ 、 ρ 和 μ 值,代入式(22.3-49)、式(22.3-46)和式(22.3-48),可求出 ψ 、 ϕ 和 y_{01} 。

(3) 为实现微机系统对 ψ 、 ϕ 和 y_{01} 三个坐标值的控制,要先按各个程序段求出相对应的三个坐标的增量值 $(\psi_i - \psi_{i-1})$ 、 $(\phi_i - \phi_{i-1})$ 和 $(y_{01i} - y_{01i-1})$ 。然后换算成微机系统能接受的脉冲数或线性值,再进行编程。其计算步骤与前面“2.6.2 数控插齿”一节相同。

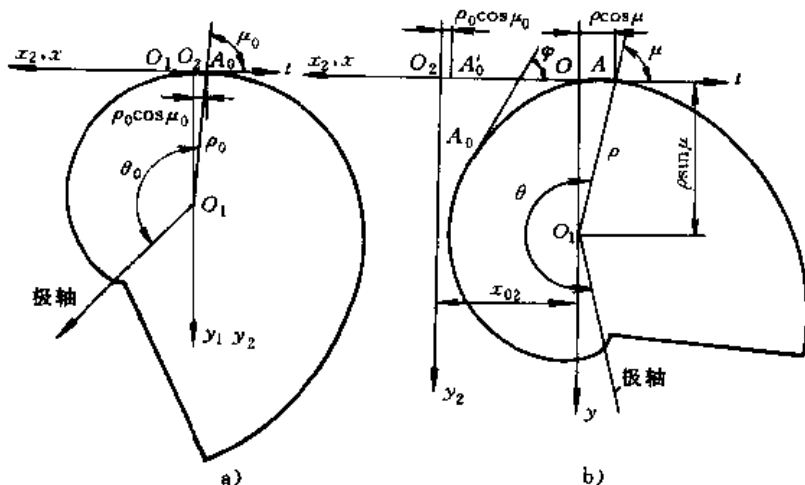


图 22.3-32 数控滚齿加工原理图

以上所述的是三坐标(滚刀回转、工作台回转和工作台移动)数控滚齿机(又称三轴数控滚齿机)的加工原理。

有些数控滚齿机:如 YK3480 型数控滚齿机和 Y3180CNC 型数控滚齿机,其滚刀轴的运转仍由一般电动机或主轴电动机驱动。在滚刀传动轴或中间传动轴上装一编码器。这样,滚刀每转一转,编码器可发出许多信号用以控制工作台回转和工作台相对于滚刀节线垂直方向的位移,以完成加工非圆齿轮所需的三个坐标联动。

设滚刀每转一转,编码器等间隔地发出 n 个信号,

则编码器每发出一个信号,滚刀沿节线走的距离为 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ (n 为正整数。 $k=1, 2, 3, \dots, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$ 。由微机系统中的分频、倍频部分完成。其数值由编程允差 δ 的计算结果来选定)。

如取 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ 为编程用的一个程序段长。将此值和式(22.3-41)、式(22.3-5)均代入式(22.3-17)中,可得:

$$k \cdot \frac{\pi m_n z}{n} = \int_{\theta_0}^{\theta} \sqrt{\rho^2 + \left| \frac{d\rho}{d\theta} \right|^2} d\theta \cdot \left[\rho \cos \left[\arctan \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\theta}} \right] - \rho_0 \cos \left[\arctan \frac{\rho_0}{\left(\frac{d\rho}{d\theta} \right)_{\theta_0}} \right] \right] \quad (22.3-18)$$

式(22.3-50)为以 θ 为变量的超越函数。它只能通过电子计算机求逼近近似解。其起始点处的极角为 θ_0 。由 θ_0 可逐段解出各个程序段对应的极角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$ 。

然后由非圆齿轮的节曲线方程 $\rho = \rho(\theta)$ 求出相对应的向径 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_n$ 。再由式(22.3-5)求出相对应的角度 $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_n$ 。将这些值代入式(22.3-46)和式(22.3-48),可求出一系列相对应的 ϕ 和 y_{01} 值。

当机床采用的微机系统为增量系统时,在求出各个程序段相对应的 $(\phi_i - \phi_{i-1})$ 和 $(y_{01i} - y_{01i-1})$ 值后,即可进行编程。

由此可知:在滚刀传动轴上,加一编码器,用以控制工作台回转和工作台移动。可省去一个数控轴。这样,不仅可降低机床的制造成本,还可降低

微机系统的故障率。但用 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ 作为程序段在校验编程允差 δ 时(见本章 2.6.1),不如按等弧长 S 作为程序段时容易。其原因是当滚刀沿节线走 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ 长度时,滚刀节线与非圆齿轮节曲线的对滚弧长不等于 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$,而是随着非圆齿轮节曲线的曲率变化而变化。一般情况下是大于或小于 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ 。曲率变化越小,越接近 $k \cdot \frac{\pi m_n z}{n}$ 。

由式(22.3-40),为便于分析,当用对滚弧长 S 代

替弦长 \overline{ab} 时,可得编程允差 δ 的校验公式:

$$\delta \leq \frac{S^2}{8R} \quad (22.3-49)$$

各个程序段相对应的对滚弧长 S_i 的大小、在用电子计算机通过逼近法求解式(22.3-18)时,从该式中的第一项计算结果中可以得到一系列值 $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ 。

在按式(22.3-49)校验 δ 时,应取 S_i 中的最大值,但与最大值相对应的曲率半径 R 不一定是最小值。除非将所有对滚弧长 S_i 相对应的曲率半径 R 值均求出后,代入式(22.3-49)进行比较计算,才能得出 δ 的最大值。为简化计算和更保险起见,可取非圆齿轮节曲线的最小曲率半径 R_{min} 和 S_i 中的最大值 S_{max} 进行校验,即应满足下式:

$$\delta \leq \frac{S_{max}^2}{8R_{min}} \quad (22.3-50)$$

当上式不能满足时,应减小 k 值,再进行校验。当只减小 k 值不能满足时,可增大 n 值(更换编码器),再进行校验,因此其计算工作量较大。

2. 加工调整

数控滚齿机加工时的主运动(切削运动)的调整与普通滚齿机相同,即按切削速度和滚刀直径来确定滚刀每分钟转数。加工时的每次切入深度、切入次数和进给量均由加工程序控制,滚切运动也由程序控制。但在加工进行中,可由数控柜上的速度倍率旋钮来调节滚切速度。

与数控插齿一样,对刀是加工时的关键工序。其对刀原理和对刀方法均与数控插齿相同。下面介绍加工非圆齿轮的对刀方法。

数控滚齿加工非圆齿轮用的夹具和对刀规的结构形式基本上与数控插齿相同。故夹具的安装和找正、对刀规的安装和找正等一系列操作,可参考数控插齿部分(见本章2.6.2.2)。对刀时应注意的是:必须将滚刀刀齿转位至刀齿的前刀面呈水平位置时,再进行对刀,以保证对刀精度。在切削过程中,当对刀规的尖头(见图22.3-27)或凹槽(见图22.3-28)与滚刀刀齿的齿槽或齿峰两侧面之间的间隙不均匀时,要通过使滚刀沿其轴向微动来调节,直到两侧面之间的间隙均匀为止。

以上调整中应注意的是:为提高加工精度,应使对刀调整后工作台回转、工作台移动、滚刀回转和滚刀轴向移动等的反向间隙与滚切加工时的反向间隙在同一方向上。

滚齿前的非圆齿轮外廓加工也可在数控滚齿机上进行。加工时采用圆柱形铣刀(与普通卧式铣床用的铣刀相同)。其加工程序与铣刀转速无关。如不再编程,可利用滚齿时的加工程序。铣削时,根据毛坯余量的大小

和材料性质,可分几次径向切入,直至铣削到外廓尺寸符合图样要求为止。

铣削外廓时,开始加工前也必须对刀。对刀的目的是使工件的长轴(如卵形齿轮的长轴)垂直于滚刀轴线,以保证滚齿时工件装在夹具上后,其长轴垂直于滚刀轴线,在长轴上形成齿峰或齿槽。

另外,为便于保证加工定位精度的一些注意事项,可参见数控插齿部分(见本章2.6.2.12)。

3. 数控滚齿机和滚齿机的数控改装

(1) 数控滚齿机

1) 加工范围和精度 数控滚齿机除能完成普通滚齿机的加工范围外,还可加工各种形状的非圆齿轮、小锥度齿齿轮和鼓形齿齿轮。

目前我国数控滚齿机的出厂精度标准按加工圆柱齿轮精度考核,一般为7级(GB10095—88齿轮精度标准)。齿面粗糙度为 $R_a 3.2 \mu m$ 。精度较高的数控滚齿机的加工精度可达6级。

2) 性能和结构特点 由数控滚齿加工原理知(见2.6.3节),为完成非圆齿轮的滚切加工,数控滚齿机一般应具备三个数控坐标轴(刀轴回转、工作台回转和工作台移动)。三个坐标轴的运动分别由三个伺服电机或步进电机单独驱动。三个坐标轴之间的运动关系由微机系统控制。目前我国生产的数控滚齿机最多有四个数控坐标轴(刀轴回转、工作台回转、工作台移动和刀架垂直上下移动)。

对于三个数控坐标轴(简称三轴数控)的滚齿机和前面已提到的在滚刀传动轴上加一编码器,而不用伺服电机或步进电机驱动回转的数控滚齿机(可称为二轴数控滚齿机),其刀架的垂直上下移动传动方式均与普通滚齿机相同。二轴数控滚齿机的刀轴回转驱动方式与普通滚齿机相同。

数控滚齿机加工过程中的一些辅助运动,如工作台的快速趋近和退出、工件的自动夹紧和松开、冷却液的自动开启和关闭,以及切削用量均由加工程序控制。加工调整时所需的各坐标轴的快、慢速点动可由数控柜上的点动按钮控制。通过改变加工程序来改变辅助运动的先后次序和切削用量非常方便。即使在加工进行中,通过数控柜上的旋钮也可改变滚切运动的快慢。

(2) 滚齿机的数控改装 利用使用过的普通滚齿机改装成数控滚齿机是解决当前数控滚齿机价格昂贵,难以推广应用的一个重要途径。已改装成功的数控滚齿机有Y3180CNC型数控滚齿机。它是由Y3180型滚齿机改装成的。主要为满足国内生产流量计的企业加工高度大的卵形齿轮。该机床的加工规格同原机床。加工精度可达7级(按GB10095—88)。机床的滚刀轴

回转驱动方式同原机床。在滚刀传动轴上装有编码器,用以控制工作台回转和工作台移动。工作台回转和工作台移动均由 ASM-L-17-25 型交流伺服电机单独驱动,可称为二轴数控滚齿机。

3 非圆齿轮的检测

非圆齿轮种类繁多,形状又比较复杂。目前尚无精度标准,也无专门检测非圆齿轮的仪器。因此,目前应用非圆齿轮的单位都是根据本行业需要来制定精度要求。非圆齿轮的检测也只能在齿轮通用检测仪器上和专门设计的检具上进行。

3.1 非圆齿轮的精度要求

3.1.1 齿侧间隙

一对非圆齿轮传动时,齿侧间隙的大小和均匀程度将直接影响工作平稳性和产品的精度。如流量计中的卵形齿轮,为了保证流量精度,卵形齿轮在流量计壳体内回转时,必须轻快和无卡死现象。因此在齿轮加工和装配时,必须控制齿侧间隙有足够大而且要均匀。一般根据卵形齿轮的模数和齿宽大小来规定齿侧间隙:当模数 $m=0.4\sim 2\text{mm}$ 和齿宽 $B=4\sim 300\text{mm}$ 时,齿侧间隙 $c_s=0.02\sim 0.4\text{mm}$ 。如对 $m=1\text{mm}$, $B=80\text{mm}$ 的卵形齿轮, $c_s=0.20\sim 0.25\text{mm}$,间隙均匀性在 0.05mm 以内。

流量计中的卵形齿轮齿侧间隙要求比较大的原因,是受流量计装配时两传动轴平行度的影响和流量计计量的液体的清洁度、粘度以及温度的影响。对于其他产品和用于传递动力机构中的非圆齿轮,一般齿轮的模数较大和齿宽较小,齿侧间隙也应较小。

3.1.2 齿向误差

齿向误差的大小直接影响齿轮的接触精度,也影响齿侧间隙的变化。流量计中卵形齿轮的齿向精度要求:当齿宽 $B=40\sim 180\text{mm}$ 时,齿向误差不超过 $0.02\sim 0.03\text{mm}$,齿宽小时取小值。

3.1.3 中心距变动量

一对非圆齿轮在双面啮合仪上,双面紧密啮合滚动时的中心距变动量的检验属于综合检验。它反映的误差是齿轮的径向误差、轮齿两面的误差和齿侧间隙变动引起的误差。

对于中心距小于 200mm 的非圆齿轮副,在双面啮合仪上检验时,如除去由齿侧间隙变动引起的中心距变动量(详见本章 3.2 节),其中心距变动量约为 0.05mm 。

3.1.4 转角误差和空回

1. 转角误差

转角误差是指一对非圆齿轮副传动时,当主动轮的转角为 ϕ_1 时,从动轮转角 ϕ_2 的实际值 ϕ_2' 与理论值之差。转角误差是衡量非圆齿轮传动的主要精度指标。

由一对非圆齿轮传动的转角函数关系式 $\phi_2=f(\phi_1)$ 知:对于一定数值的 ϕ_1 ,可求出 ϕ_2 ,则转角误差 $\Delta\phi_2$ 为

$$\Delta\phi_2=\phi_2-\phi_2' \quad (22.3-51)$$

对于中心距小于 200mm 的非圆齿轮副,一般应使 $\Delta\phi_2\leq 8'\sim 10'$ 。

2. 空回

空回是指一对非圆齿轮传动时,当主动轮反转,由于齿侧间隙等的影响,主动轮转过 $\Delta\phi_1$ 角度时,从动轮才开始转动,则主动轮的空回角度 $\Delta\phi_1$ 称为空回。空回与转角误差一样,是造成传动位置误差原因之一。由于非圆齿轮节曲线上各点的空回角度不同,需测出其最大空回角度 $\Delta\phi_{1\max}$ 。

对于中心距小于 200mm 的非圆齿轮副,一般空回角度 $\Delta\phi_1$ 不应超过 $2'\sim 4'$ 。

3.1.5 节曲线误差

非圆齿轮的节曲线误差是指单个非圆齿轮节曲线上某点的实际向径值与理论向径值之差,即误差值 $\Delta R=R_{\text{实}}-R_{\text{理}}$ 。将节曲线上各齿槽处的 ΔR 值测出后,可绘出实际节曲线与理论节曲线的形状误差。

3.2 非圆齿轮的测量方法

3.2.1 齿侧间隙的测量

如图 22.3-33 所示,将一对非圆齿轮以孔定位装在专用检具上。由人工进行滚动检查。利用塞尺(厚薄规)测量齿侧间隙。检具上的两个心轴的直径和中心距要与被测量的非圆齿轮的装配轴径和装配中心距相同。但中心距的公差带应相应稍小一些。两个心轴的平行度允差在纵横两个方向上均不得超过 $0.01\text{mm}/\text{全长}$ 。

3.2.2 齿向的测量

非圆齿轮齿向的测量方法与圆柱齿轮完全相同。测量时,先将非圆齿轮以孔定位装在检验用的心轴上,一般在齿向测量仪上测量。当齿向精度要求较高时,可在灵敏杠杆导程测量仪上测量。

3.2.3 中心距变动量的测量

非圆齿轮中心距变动量的测量方法与圆柱齿轮相同,也是在双面啮合仪上进行测量。不同的是没有测量用的标准非圆齿轮,而是将一对非圆齿轮本身在双面啮合仪上进行对滚测量。

对于圆柱齿轮,为了保证一定的齿侧间隙所必须的齿厚变薄,并不影响中心距变动量。但对非圆齿轮则不然,这种齿厚变薄会影响中心距变动量。因此,应该

在非圆齿轮中心距变动量的总量中减去由齿厚变薄而引起的中心距变动量后,才是真正的中心距变动量。

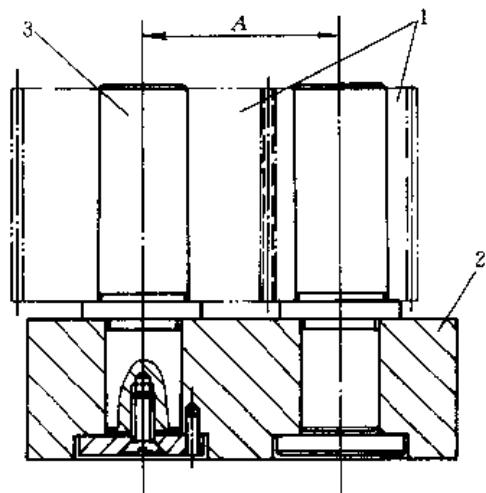


图 22.3.33 非圆齿轮齿侧间隙检具

1—非圆齿轮 2—检具体 3—心轴

如图 22.3.34 所示: ΔS_n 是两齿轮齿形法线 n_1, n_2 上的齿侧间隙。 tt 是通过两齿轮节曲线相切点 P 的公切线, mm 是节曲线在 P 点的法线。为消除齿侧间隙 ΔS_n , 齿轮副中之一应沿 mm 方向位移 Δy_m 。

$$\Delta y_m = \frac{\Delta S_n}{\sin \alpha_n}$$

式中 α_n —— 齿轮的齿形角。

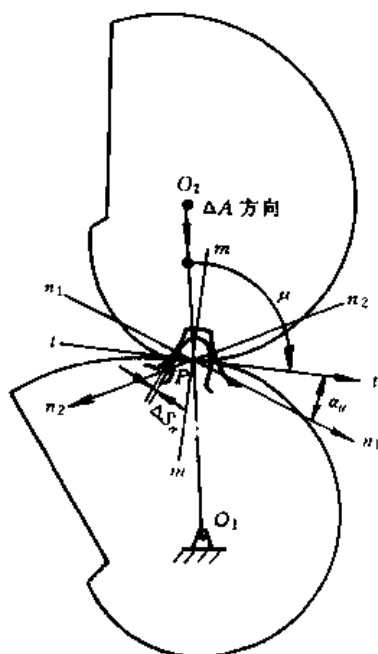


图 22.3.34 齿厚变薄对双面啮合仪读数的影响

沿 mm 方向的位移 Δy_m 可看成沿两轮中心连线 O_1O_2 的位移 ΔA 和垂直于 O_1O_2 方向的位移的几何

和。但垂直于 O_1O_2 方向的位移只能使被测量的齿轮绕自己的轴心线回转, 双面啮合仪上的百分表读数反映不出来。百分表读数反映的是 ΔA 。

$$\Delta A = \Delta y_m \sin \mu = \frac{\Delta S_n}{\sin \alpha_n} \cdot \sin \mu$$

设在开始测量点或某一基准点处, 由齿厚变薄而引起的中心距变动量为 ΔA_0 , 则

$$\Delta A_0 = \frac{\Delta S_n}{\sin \alpha_n} \cdot \sin \mu_0$$

这样, 由齿厚变薄而引起的被测量齿轮中心距的变化 δ_{yA} 为

$$\delta_{yA} = \Delta A - \Delta A_0 = \frac{\Delta S_n}{\sin \alpha_n} (\sin \mu - \sin \mu_0)$$

经变换后

$$\delta_{yA} = \frac{\Delta A_0 (\sin \mu - \sin \mu_0)}{\sin \mu_0} \quad (22.3-52)$$

式中 μ_0 —— 非圆齿轮开始测量点处的向径与节曲线切线正方向间的夹角;

μ —— 非圆齿轮任一测量点处的向径与节曲线切线 t 正方向间的夹角。

由式(22.3-5)知 $\mu = \arctan \frac{\rho}{d\rho/d\theta}$

结论: 用双面啮合仪测出的非圆齿轮副的中心距变动量是由两种因素造成的。一个是非圆齿轮的制造误差; 另一个是设计非圆齿轮时, 为得到一定的齿侧间隙 ΔS_n 而预先确定的齿厚变薄量。因此, 仅用双面啮合仪测出的中心距变动量 δ_A 来评定非圆齿轮的制造质量是不正确的, 而应由 $(\delta_A - \delta_{yA})$ 来评定非圆齿轮的制造质量。

3.2.4 转角误差和空回的测量

非圆齿轮的转角误差和空回的测量方法与圆柱齿轮相同, 也是在单面啮合仪上进行测量。测量时, 将齿轮副中的主动轮固定在光学分度头的回转轴上, 从动轮固定在缠绕仪的回轴上。调整两轮的中心距, 使等于理论中心距。旋转光学分度头手轮, 使光学分度头的读数 ϕ_1 为整数。此时, 因主动齿轮带动从动齿轮回转, 由缠绕仪读从动齿轮的回转角 ϕ_2 。将 ϕ_2 代入式(22.3-53), 即可得到转角误差 $\Delta \phi_2$ 。

当使主动齿轮由正向回转变为反向回转时, 可从光学分度头上读出主动齿轮的空回转角 $\Delta \phi_1$ 。

测量时, 应保证中心距的准确值, 以及测量系统的刚性和安装后的主动齿轮与从动齿轮两轴心线的平行性, 并要注意齿面的接触情况。否则, 测量结果不准确。

3.2.5 节曲线的测量

非圆齿轮节曲线的测量仪器由光学分度头和测长仪组成。称为节曲线形状检查仪, 可按图 22.3-53 所示

方法进行测量。

由平面啮合原理知,在齿条刀与被切齿轮共轭时,当瞬时回转中心为 P 点时,两者齿形的接触点是 m 点和 n 点。 m 点和 n 点是由 P 点向齿条刀刀齿的两个侧面所引垂线的垂足。

为了测量节曲线,需要正确选择测量用的滚柱直径。在测量节曲线上所有齿槽时,滚柱中心都必须位于节曲线上。这样,滚柱直径 d 必须满足下面的关系式:

$$d = S \cos \alpha_n = \left(\frac{\pi m_n}{2} - 2x \tan \alpha_n \right) \cos \alpha_n \quad (22.3-55)$$

式中 S ——齿条刀在节曲线上的齿厚;

m_n ——法向模数;

x ——齿条刀的移距(正移距时, x 为正数;负移距时, x 为负数);

α_n ——齿条刀的齿形角。

式(22.3-55)在测量螺旋齿非圆齿轮时仍然是正确的。

测量时,将被测的非圆齿轮装在光学分度头上。回转光学分度头,使光学分度头的回转角度等于非圆齿轮的一个齿距所对的中心角。然后用测长仪测出非圆齿轮节曲线的向径 R_g ,与理论向径 R_{π} 相比较,即可得节曲线的形状误差 $\Delta R (\Delta R = R_{\pi} - R_g)$ 。

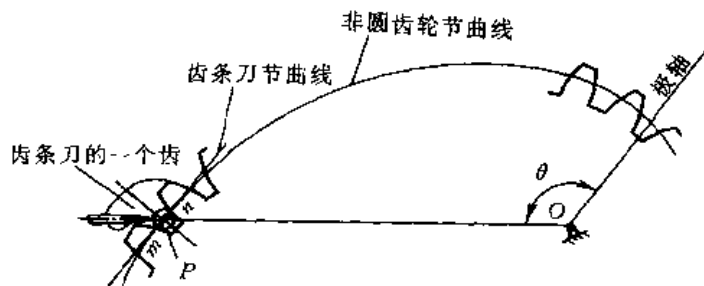


图 22.3-35 非圆齿轮节曲线测量原理图

参考文献

- 李福生,尹种芳,张遵莲,林子光,张作督,厉海祥编著. 非圆齿轮与特种齿轮传动设计. 北京:机械工业出版社, 1983.
- R. M. Peter. Producing Pseudo-elliptical gears. Machinery and Production engineering, 1972, 121(3134): 812~817.
- 侯祖龄. 近似分度法铣削椭圆齿轮. 机床, 1977, 1: 55~61.
- James T. Sharpsteen. Photo Chemical Machining of gears. Machine Design, 1981, 53(5): 107~111.
- 姚丽坤. 在数控线切割机床上加工非圆齿轮. 机床, 1985, 7: 18~20.
- 李福生等编译. 非圆齿轮. 北京:机械工业出版社, 1975.
- Ф. И. 李特文著. 齿轮啮合原理. 丁淳译. 上海:科学技术出版社, 1964.
- Ф. И. 李特文. Теория зубчатых зацеплений НАУКА, 1968.
- 朱震午编译. 齿轮的少无切削加工. 北京:机械工业出版社, 1975.
- [日]近久满雄著. 非圆形齿车制造法. 见:日本机械学会论文集(第3部), 1960, 26卷, №163: 441~447.
- 湖南省机械研究所情报资料室. 滚轧齿轮译文集. 湖南省机械工业局技术情报中心站和湖南省机械研究所情报资料室出版. 1974. 7.
- 戴有虎. 数控滚齿机加工非圆齿轮实例. 机床, 1987, 8: 21~25.
- 吴序堂,王贵海编著. 非圆齿轮及非匀速比传动. 北京:机械工业出版社, 1997.
- 李力行主编. 机械设计手册, 第24篇轮系, 第3章 摆线针轮行星传动. 北京:机械工业出版社, 1991.
- 张少名主编. 行星传动. 西安:陕西科学技术出版社, 1988.
- 郑州工学院机械原理及机械零件教研室编. 摆线针轮行星传动. 北京:科学出版社, 1978.
- 徐灏主编. 机械设计手册. 北京:机械工业出版社, 1991.
- 成大先主编. 机械设计手册. 北京:化学工业出版社, 1993.
- 谐波传动技术协作组主编. 谐波齿轮传动技术. 北京:冶金工业部建筑研究总院出版社, 1984.
- 范又功等编. 谐波齿轮传动技术手册. 北京:国防工业出版社, 1995.
- 司光展等编. 谐波齿轮传动. 北京:国防工业出版社, 1978.