



一种蜗杆螺钉的高速制造工艺

1 引言

本文所述蜗杆螺钉高速制造工艺的专业术语是“蜗杆螺钉强力刮齿”(WSPS)。虽然该技术的基本思路在多年前就已经面世,但仍未得以成为现实,其原因很简单:市场上没有能够使用现有的WSPS技术来精确制造蜗杆的滚齿机,因为若要以精确的同步运动来驱动刀具和工件,则需要有配备无啮合间隙和高分辨率编码器的直接驱动主轴。本文的目的是将WSPS作为新一代CNC加工中心的新工艺予以描述。

由于很难在互联网上找到关于WSPS的可靠资料,本文仅展示我公司在测试一种用滚齿机加工蜗杆的新工艺时的发现。本公司已与一家瑞士滚齿机制造商合作,该制造商提出了关于如何将WSPS工艺应用到传统滚齿机的基本思路,对于尺寸为0.3mm到1.5mm之间的小型蜗杆而言非常适用。和传统的标准滚齿机加工相比,使用新工艺后,这些小型蜗杆的制造周期时间缩短了3到5倍。因此,WSPS最适用于小型螺旋蜗杆加工,但对于尺寸较大和较宽的蜗杆加工不太适用。

2 基本原理

蜗杆螺钉强力刮齿与标准齿轮加工的原理正好相反。齿轮加工时,螺钉(滚刀)与直齿齿轮(工件)的啮合是一种相似的过程;而在蜗杆螺钉强力刮齿中,直齿齿轮(刀具)与螺钉(工件)的啮合是一种逆向的过程。

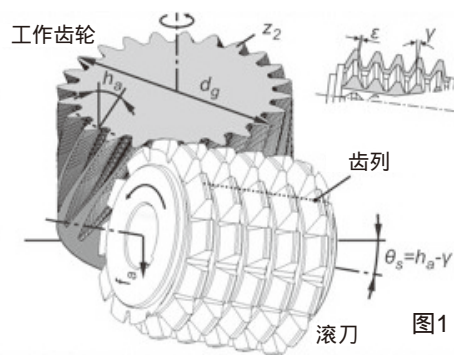


图1 - [齿轮滚切]



图2 - [蜗杆滚切]



图3 - [WSPS]

滚切可并入铣削类，但WSPS须并入车削类。

WSPS刀具外形上像一个有很多齿轮齿的圆形转轮，可归入切削类刀具。与沿着蜗杆轴线移动切割刀具从而使整个蜗杆成型不同，WSPS有很多齿轮齿转动并逐步切割材料。

WSPS不受螺纹数量的局限，主要受限于ZI渐开线的蜗杆成型。在某些情况下可以使用这种刀具实现ZA蜗杆成型，但还必须逐个案例进行研究。因为刀具必须通过蜗杆的导程角的大小调整才能倾斜，所以零件和刀具轴之间的切割角度往往随着模数和螺纹数量而有所变化，这也是蜗杆导程角被限制在25度左右的原因。导程角过大可能会导致刀具性能降低。

由于WSPS可归入车削类，因此该加工技术可实现非常高的表面光洁度。和车削一样，刀具加工几乎不会产生毛刺，虽然在入口和出口处可能会出现一些尖角。

3 蜗杆滚切与蜗杆强力刮齿之间的差异

3.1 切割速度

蜗杆滚切与蜗杆强力刮齿这两种技术之间最大的区别之一就是蜗杆滚切是一种铣削过程，而WSPS属于车削过程。蜗杆滚切的切割速度根据滚切的周长计算，而WSPS工艺的则根据蜗杆的节距直径计算。

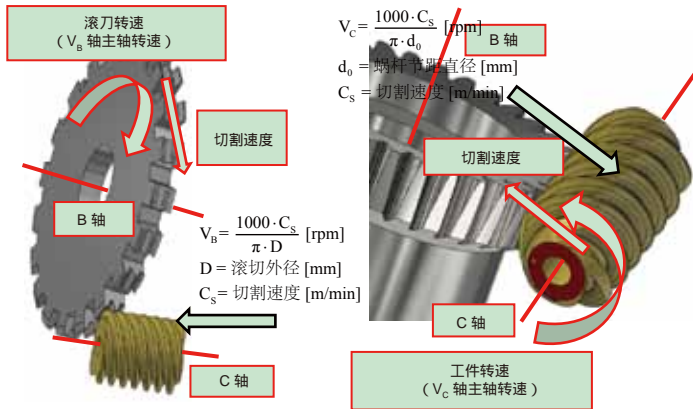


图8 - [蜗轮滚切速度]

图9 - [WSPS切割速度]

3.2 切割速度和进给速率

表1：蜗杆滚切或WSPS的常用切割速度和进给速率。

	蜗杆滚切		WSPS	
	切割速度 [m/min]	进给率 [mm/工件转速]	切割速度 [m/min]	进给率 [mm/工件转速]
黄铜	400	0.3	250	0.06
钢 (ETG100)	250	0.15	160	0.03

表1 - [切割速度]

蜗杆滚切和WSPS的切割速度和进给速率的不同源于两种工艺本身的差异。

3.3 轴转速和同步公式

标准滚切中，滚刀和工件之间的转速比可用以下公式计算：

$$V_C = \text{工件转速 [rpm]}$$

$$V_C = V_B \cdot \frac{Z_{\text{tool}}}{Z_{\text{gear}}}$$

Z_{tool} = 刀具的线程数

Z_{gear} = 齿轮的齿数

V_B = 刀具转速

对于滚刀的转速比工件快的情况，熟悉滚齿加工的人都不会感到意外。在开始计算之前需了解切削速度，因为滚刀的转速由将使用的切削速度决定。

但是，如上所述，在WSPS中，整个过程是逆向的。因此，与传统的滚切工艺相比，WSPS速度的计算也是反向的。工件转速可通过获取节距直径上的切削速度来计算。由于刀具的齿轮齿数较多，而蜗杆的节距直径较小，因此工件转速可达数千rpm，但刀具转速只能达到数百rpm。

V_B = 刀具转速 [rpm]

$$V_B = V_C \cdot \frac{Z_{\text{worm}}}{Z_{\text{tool}}}$$

Z_{tool} = 刀具的齿数

Z_{worm} = 蜗杆头数

V_C = 工件转速 [rpm]

在斜齿轮加工中，进给时必须对工件旋转轴进行角度补偿。在WSPS中，为了给齿轮的螺旋进行角度补偿，滚切时工件转速必须加大，但刀具转速须减小，从而补偿蜗杆的螺旋角度。

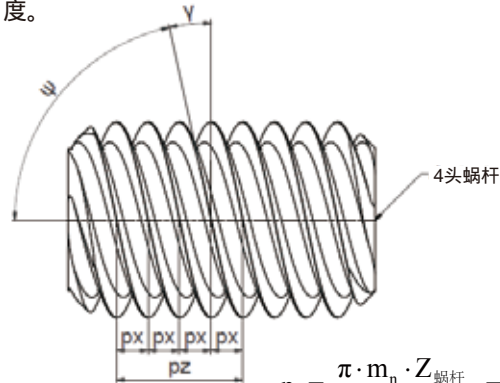


图10 - [蜗杆参数]

$$p_z = \frac{\pi \cdot m_n \cdot Z_{\text{蜗杆}}}{\sin(90-\gamma)} = \frac{\pi \cdot m_n \cdot Z_{\text{蜗杆}}}{\sin(\psi)}$$

m_n = 法向模数

γ = 导程角 [deg]

ψ = 螺旋角 [deg]

d_0 = 节距直径 [mm]

3.4 计算实例

以下实例为尺寸完美适用于WSPS的蜗杆，其模数为0.6 mm，渐开线为ZI轮廓。

蜗杆滚切和WSPS的周期时间都可以通过工件的进给速度

计算。工件的进给速度以毫米每工件转数决定，因此，周期时间直接取决于工件的转速。工件转动越快，周期时间越短。为了比较蜗杆滚切和WSPS之间周期时间的差异，我们将蜗杆滚

蜗杆模数 0.6		
参数	参数简称	值
法向模数	mn	0.6
模数轴向	mx	0.6143
压力角	an	15°00'00"
螺纹数量	z	4
偏移值系数	xr	0.967
导程角	γ0	12°24'00"
法向节距	pn	1.885 [mm]
导向轴	pz	7.72 [mm]
外径	da	12.704 [mm]
节距直径	do	11.177 [mm]
齿根直径	df	9.284 [mm]
基圆直径	db	6.9894 [mm]
齿高	hz	1.710 [mm]

图12 - [蜗杆数据]



蜗杆滚切

V_B = 滚刀转速 [rpm]

$$V_B = \frac{1000 \cdot \text{谱}_c}{\pi \cdot \text{滚刀直径}} = \frac{1000 \cdot 400}{\pi \cdot 70} = 1'819 \text{ [rpm]}$$

$D = 70$ = 滚刀外径 [mm]

$C_s = 400$ = 切割速度 [m/min]

$Z = 4$ = 螺纹数量 [-]

$Z_{\text{tool}} = 1$ = 刀具齿数 [-]

$$V_C = \frac{V_B}{Z} \cdot Z_{\text{tool}} = \frac{1'819}{4} \cdot 1 = 454 \text{ [rpm]}$$

预计加工时间 = 18 [秒]

WSPS

V_C = 工件转速 [rpm]

$$V_C = \frac{1000 \cdot C_s}{\pi \cdot d_0} = \frac{1000 \cdot 250}{\pi \cdot 11.177} = 7'120 \text{ [rpm]}$$

$d_0 = 11.177$ = 蜗杆节圆直径 [mm]

$C_s = 250$ = 切割速度 [m/min]

$Z = 4$ = 螺纹数量 [-]

$Z_{\text{tool}} = 37$ = 刀具齿数 [-]

$$V_B = \frac{V_C \cdot Z}{Z_{\text{tool}}} = \frac{7'120}{37} \cdot 4 = 769 \text{ [rpm]}$$

预计加工时间 = 7 [秒]

切的进给速度设置为0.3 mm/工件转速], WSPS的则设置为0.06 [mm /工件转速]。因为长度相同，所以可以确定周期时间因子。重要的是，与标准滚切不同，刀具的齿数齿数不影响周期时间，但滚刀上的螺纹数量对周期时间有影响。由于蜗杆滚切和WSPS的操作不同，功率因数须设置为0.8。刀具不能径向切割，工件进给的起始位置必须根据刀具的半径来偏移，且比标准蜗杆滚切的偏移量小。

$$CTF = \frac{\text{WSPS} [V_C \cdot \text{轴向进给率}]}{\text{滚切} [V_C \cdot \text{轴向进给率}]} \cdot 0.8$$

$$CTF = \frac{7120 \cdot 0.06}{454 \cdot 0.3} \cdot 0.8 = \underline{2.5}$$

使用WSPS工艺加工此部件的速度比蜗杆滚切快了2.5倍。这还是没有将WSPS和蜗杆滚切螺纹/线径加入比较，只是比较了蜗杆滚切的加工周期。这表明该工艺对于小型蜗杆的生产非常有优势。

要确定WSPS对哪种尺寸的蜗杆生产有优势以及哪些尺寸标准使用蜗杆滚切更为有利非常容易，可执行逆向计算：

$$CTF = \frac{V_C \cdot 0.06}{416 \cdot 0.3} \cdot 0.8 = 1$$

$$V_C = \frac{454 \cdot 0.3}{0.06 \cdot 0.8} = 2'270 \text{ [rpm]}$$

$$\frac{1000 \cdot C_s}{V_C \cdot \pi} = d_0 = \frac{1000 \cdot 250}{2'270 \cdot \pi} = \varnothing 35 \text{ [mm]}$$

当然，以上公式只是一个代表性的基本计算方式，但是它表明WSPS工艺对于节距直径在 $\varnothing 20$ mm以下的小型蜗杆加工是非常有吸引力的。

3.5 机械动力学

用于齿轮和蜗杆生产的常规滚齿机须将刀具轴从+30度旋转到-120度。使用WSPS工艺时，则需要 ± 30 度或 ± 45 度的旋转

滚刀头，这意味着机器设计也将更简单。

→ 与滚刀相反，WSPS刀具上没有螺旋线，这也是为什么刀头部分只能从蜗杆导向角旋转。

4 WSPS工艺介绍

4.1 机器配置

若需更好地了解WSPS工艺，请参照图15：WSPS机床轴配置。

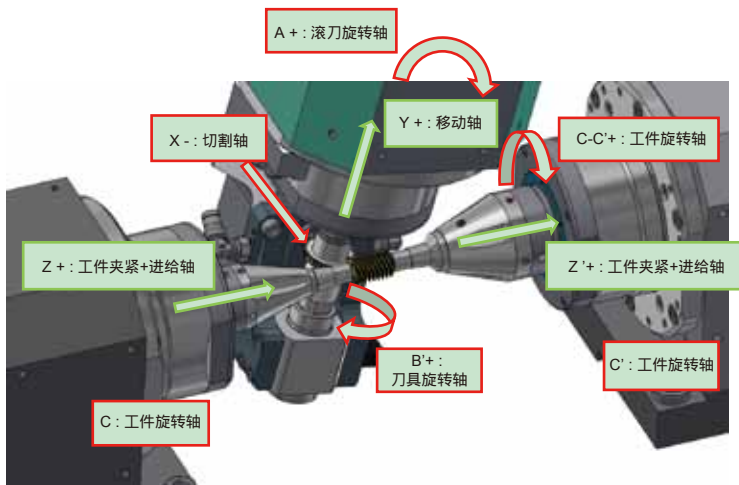


图15 - [机床轴配置]

在该机床轴配置中，刀具在加工蜗杆时无轴向运动。C-C' 主轴和尾座随着工件在Z-Z'上移动，Z-Z'为进给轴。非常重要的一点是，主轴和尾座都需要由直接驱动器驱动。任何间隙都会产生致使表面被破坏的加工振动。此外，旋转刚度也是一个重要因素。为了确保最高的精度，必须通过高分辨率编码器使三个主轴完全同步。若使用该工艺加工节距直径小于4mm的微型蜗杆，则工件主轴必须达到非常高的转速，且C-C'轴的理想转速高达20,000 rpm（参见下文计算结果）！如有必要，须使用驱动狗将工件固定在操作中心，否则一旦零件滑动就将出现振动，且将导致精度和质量上的损失。

$$V_c = \frac{1000 \cdot C_s}{\pi \cdot d_0} = \frac{1000 \cdot 250}{\pi \cdot 4} = 19894 \text{ [rpm] } !!!$$

$$d_0 = \text{蜗杆节距直径} = 4 \text{ [mm]}$$

$$C_s = \text{切割速度} = 250 \text{ [m/min]}$$

4.2 加工右旋或左旋蜗杆

在常规滚切工艺中，右旋或左旋蜗杆的加工通过将刀盘以A-或A+ 轴向旋转完成，这在WSPS工艺中也完全相同。但是，就像该工艺将滚切加工过程中的所有过程都反过来一样，右旋或左旋蜗杆加工中的旋转方向也是相反的。对于拥有左旋螺旋的斜齿轮，A轴应朝A+方向倾斜，但是在WSPS中，若朝A+方向倾斜A轴，则生产出来的将是右旋螺旋的蜗杆。

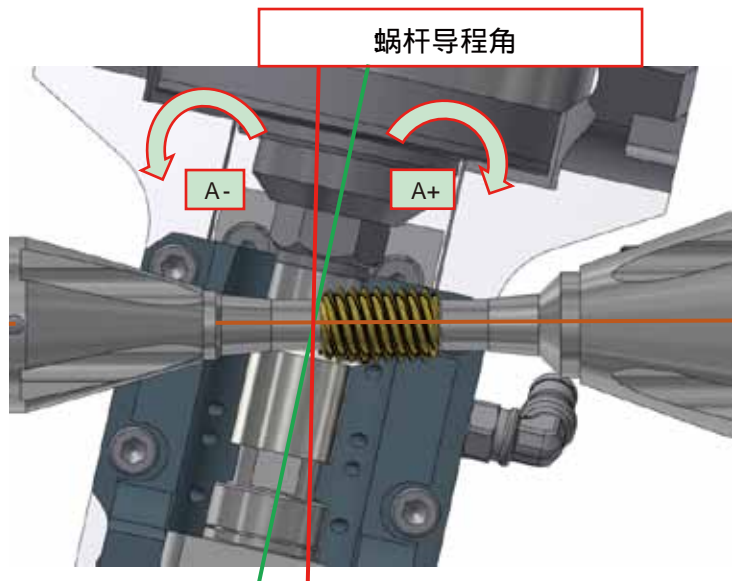


图16：右旋蜗杆加工中，刀盘朝A+方向旋转

- 右旋蜗杆：A轴朝A+方向旋转
- 左旋蜗杆：A轴朝A-方向旋转

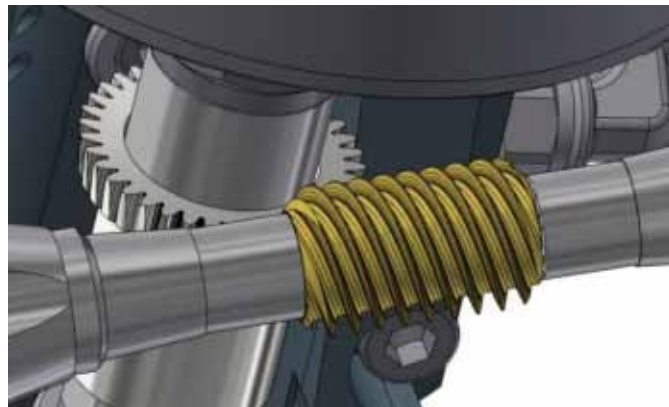


图17 - [刀具和蜗杆]

5 结论

WSPS工艺需使用新一代CNC机床，从而使3个主轴高度同步并获得高刚度和良好的排屑。

WSPS工艺是小型蜗杆大、小批量加工的未来方向。由于该工艺可缩短周期时间，客户可以将传统的蜗杆滚切加工数量分成两或三份，以适用于相应类型的蜗杆加工。WSPS工艺的加工质量和表面光洁度将优于当前使用的标准蜗杆滚切工艺。WSPS工艺与车削加工类似，因此足以满足这些要求。基于此，就算客户的蜗杆加工要求再苛刻，也将可以得到满足。

www.affolterchina.cn