

# 次摆线走刀在高速铣削窄槽结构中的应用

刘胤<sup>1</sup> 刘军<sup>1</sup> 杨芸<sup>1</sup> 焦刚<sup>1</sup> 胡小秋<sup>2</sup>

(1 航天科工惯性技术有限公司,北京 100074)

(2 南京理工大学机械工程学院,南京 210094)

**文 摘** 在阐述次摆线参数方程的基础上,基于 CAM/HSM 技术,将次摆线走刀方式应用于窄槽结构的高速铣削试验中,研究了次摆线走刀的铣削力变化规律、窄槽结构的表面粗糙度及其局部形貌,并建立了次摆线走刀高速铣削窄槽结构的铣削力模型。研究表明:次摆线走刀高速铣削窄槽结构有效可行,加工出了高质量的窄槽型腔表面 ( $Ra = 0.142 \mu\text{m}$ );次摆线走刀的铣削力呈周期变化,在走刀平面内,次摆线切削宽度方向上的铣削力是进刀宽度方向上的 4 倍;采用次摆线走刀加环切走刀策略加工窄槽结构,既改善了窄槽的铣削加工条件,又满足了高速铣削粗精加工的要求和原则。

**关键词** 次摆线走刀,高速铣削,窄槽

## Application of Trochoidal Tool Path in High Speed Milling Slot

Liu Yin<sup>1</sup> Liu Jun<sup>1</sup> Yang Yun<sup>1</sup> Jiao Gang<sup>1</sup> Hu Xiaoqiu<sup>2</sup>

(1 Inertia Technologies Co., Ltd., Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074)

(2 School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094)

**Abstract** Trochoidal parametric equation was formulated Based on CAM/HSM technology, Trochoidal tool path was applied to high speed milling slot experiments Milling force, surface roughness and local surface morphology were measured, observed and studied comprehensively. An analytical milling force model was defined depending on the study of milling force. The results indicated that trochoidal tool path in high speed milling slot is effective and feasible, and a high-quality slot surface ( $Ra = 0.142 \mu\text{m}$ ) is obtained. The milling force of trochoidal tool path is varied periodically. In the milling plane, the cutting force in trochoidal width direction is quadrupled to the width of trochoidal step ahead. Introduce circumferential cutting tool path to trochoidal peripherally, not only improved the slot of milling condition, but also meet the high speed milling of rough milling and finishing requirement.

**Key words** Trochoidal tool path, High speed milling, Slot

### 0 引言

现代飞机、航天器上越来越多地采用整体结构件,在这类结构件中广泛存在着狭缝及窄槽结构,且多以群缝、槽结构阵列分布。

目前,狭缝、窄槽结构的加工方法主要有:高能束加工、电火花加工、金属切削加工。传统的金属切削加工因切削力大,加工区域切削温度高,很难达到窄槽结构的尺寸精度及形位公差要求。高速切削技术具有切削力小、切削热低、材料去除率高和加工精度高<sup>[1]</sup>等诸多优点,在窄槽结构的加工方面具有很强

的优越性。

次摆线又称“长(短)幅旋轮线”,即一个动圆沿着一条定直线作纯滚动时,动圆外或动圆内一定点的轨迹,它可以用两个旋转运动实现连续轨迹<sup>[2~4]</sup>。随着高速切削技术的迅速发展,次摆线走刀方式在高速铣削 CAM 领域中的应用研究得到逐渐重视<sup>[5~9]</sup>。本文在阐述次摆线参数方程的基础上,总结了次摆线走刀的优点;基于 CAM/HSM 技术,利用次摆线走刀方式对某装备中具有窄槽结构的零件进行高速铣削加工,探讨了次摆线走刀加工窄槽的铣削力变化规律,

收稿日期:2009-05-04

基金项目:“十一五”国防基础科研资助项目(623010901)

作者简介:刘胤,1984年出生,硕士研究生,研究方向:高速铣削工艺、数控技术。E-mail:lyin180@163.com

测量了窄槽槽底表面粗糙度值,观察并分析了窄槽结构的局部形貌。

### 1 次摆线走刀的参数方程

次摆线走刀的刀具路径如图 1 所示,刀具刀刃上点  $P$  的运动轨迹是三种运动的合成:

- (1)  $P$  点绕刀具中心  $P_c$  的圆周运动 (自转, 转速为  $n_0$ );
- (2)  $P$  点作为刀刃上的一点, 随着刀具作圆周方向的平动 (公转, 转速为  $n_c$ );
- (3)  $P$  点作圆周平动一个循环 (2) 时, 在主切削方向的步进距离 (次摆线进刀宽度  $c$ )。

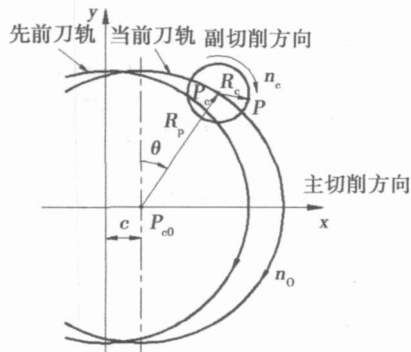


图 1 次摆线走刀的刀位轨迹及其参数

Fig 1 Trochoidal tool path and parameterization

因此,次摆线走刀的刀位轨迹 (刀具圆心  $P_c$ ) 为:

$$\begin{cases} x_c = R_p \sin \theta + (c) / 2 \\ y_c = R_p \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

铣刀刀刃  $P$  点坐标位置为:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_c^2 \quad (2)$$

联立式 (1)、式 (2) 得

$$\{ [R_p \sin \theta + (c) / 2 - x]^2 + [R_p \cos \theta - y]^2 - R_c^2 = 0 \} \quad (3)$$

式 (3) 即为次摆线走刀的参数方程。式中  $R_p$  为刀具在当前刀轨中的公转半径,  $R_c$  为刀具在当前刀轨中的自转半径, 亦即刀具半径,  $c$  为次摆线走刀在主切削方向的进刀宽度,  $\theta$  为当前刀轨中的刀位点相对于先前刀轨坐标系在公转圆周方向上的转角。

### 2 次摆线走刀的优点<sup>[8-11]</sup>

(1) 次摆线走刀的复合运动高效率地去除毛坯材料, 缩短粗加工用时, 提高切削效率, 减少加工成本。

(2) 次摆线走刀对型腔的拐角位置均作圆角处理, 使得整个切削刀轨成为一条一阶导数光滑连续的曲线, 适合小直径铣刀的高速加工走刀方式, 在高硬材料的型腔加工中, 亦具有很大优势。

(3) 次摆线走刀的高速加工过程中, 刀具处于动态的全方位切削, 避免全刀宽切削, 降低了刀具的偏摆和颤振, 刀体圆周切削负载均衡, 刀具磨损被分散

在切削曲面上, 刀具疲劳破坏几率极小; 在一次走刀循环过程中, 刀具向前切削材料伴随着向后的空走刀, 自动排屑, 切削区域冷却充分, 改善切削条件, 维持高的切削速度, 延长刀具的使用寿命。

### 3 试验条件与方案

试验的加工对象是某装备中铝质平板型整体结构件, 如图 2 所示。该零件正反面具有直型槽腔和阵列窄槽结构, 窄槽宽度最小值为 1 mm; 中间薄壁腹板上按特定的倾斜角阵列分布着 32 条窄槽, 其尺寸均为 4.286 mm  $\times$  0.8 mm。零件材料为 3A21 铝合金, 其硬度和可加工性适中<sup>[12]</sup>。

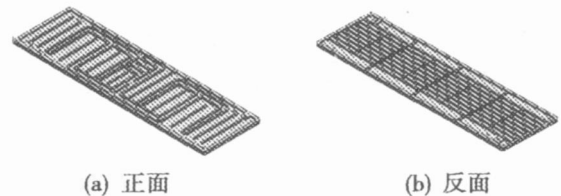


图 2 具有窄槽结构的整体结构件

Fig 2 Integral structure with slots

试验用机床是瑞士 Mikron XSM600 三轴联动高速铣削加工中心, 主轴最高转速 60 000 r/min; 刀具是 4.1 mm 硬质合金立铣刀, 结构参数见表 1<sup>[13]</sup>; 在 UG CAM 环境下, 确定了窄槽结构的螺旋进刀方式、次摆线铣削方式及其加工顺序<sup>[14]</sup>。铣削试验分三组进行, 其中次摆线走刀参数设置及工艺参数见表 2 表 3<sup>[13]</sup>。

表 1 试验用立铣刀结构参数

直径 /mm	齿数	前角 / (°)	后角 / (°)	螺旋角 / (°)	切削刃长度 /mm
4	2	15	14	25	6
1	2	15	14	30	1

表 2 次摆线走刀的参数设置

工艺参数	次摆线切削宽度 /mm	次摆线切削宽度 <sub>min</sub> /mm	次摆线切削步距 <sub>max</sub> /mm	次摆线进刀宽度 /mm
组	3.2	0.48	6.4	2
组	0.8	0.2	1.6	0.5

次摆线走刀高速铣削窄槽结构试验是在 20 恒温, 高压油雾冷却 (MQL 技术), 主轴振动范围 (CS-PO%) 保持在 5% 以内完成。试验过程中, 采用 YDX-9702 型压电测力仪、YE5850 型力电荷放大器和 NIPXI-1042Q 型虚拟仪器采集铣削力, 采样频率 12 kHz, 采样时间 60 s。试验完成后, 利用时代 TR100 接触式表面粗糙度仪测量窄槽底面粗糙度值, XTL-340 体视显微镜观察窄槽局部形貌。

表 3 铣削试验工艺参数

Tab 3 Process parameter of milling experiment

试验	铣刀直径 /mm	次摆线工艺 参数	主轴转速 /kr·min <sup>-1</sup>	切削速度 /mm·min <sup>-1</sup>	每齿进给量 /μm·齿 <sup>-1</sup>	进给速度 /mm·min <sup>-1</sup>	轴向切深 /mm
A	4	组	16	201	12	384	0.12~0.15
B	4	组	36	452	60	4320	1
C	1	组	32	100	40	2560	0.5

4 结果与分析

在试验过程中,小直径刀具以螺旋进刀方式进入窄槽加工区域后,以次摆线走刀方式进行高速铣削,其走刀路径如图 3 所示(图中路线 1 2 3 4 5 6 7 为立铣刀在次摆线一个循环内的走刀路径),试验后,窄槽型腔底面布满“鱼鳞状”刀痕(图 4)。

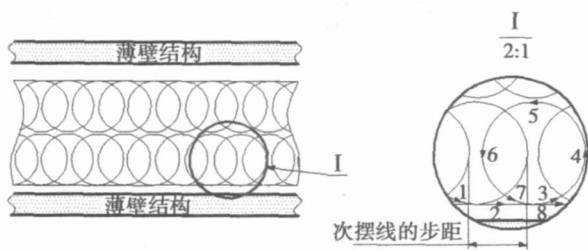


图 3 次摆线铣削的走刀路径

Fig 3 Tool path of trochoidal milling

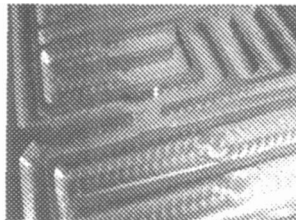


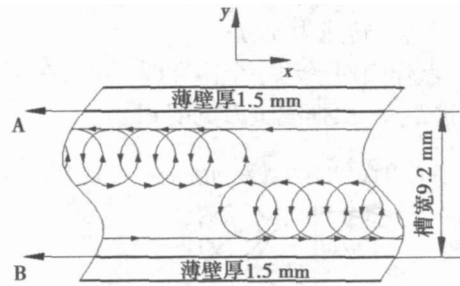
图 4 次摆线走刀的“鱼鳞状”刀痕

Fig 4 “Scale” tool mark of trochoidal tool path

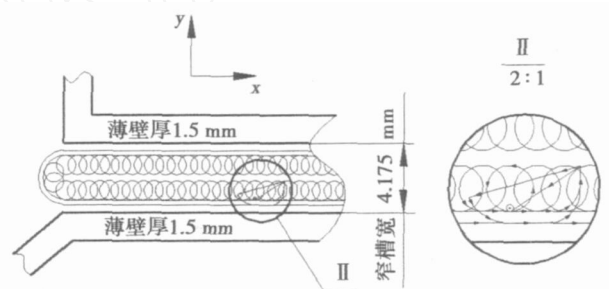
4.1 铣削力分析

在试验过程中,铣刀到达第一切削层后,在 x、y 方向进行次摆线铣削, 4 mm、1 mm 立铣刀次摆线走刀路径及其铣削力采集区域见图 5。

图 6 是 4 mm 立铣刀次摆线走刀过程中采集的铣削力幅值变化图,可以看出,在次摆线走刀过程中, x、y、z 方向上的铣削力呈周期变化。试验过后,从每组试验采集到铣削力数据列表中连续取出 100 个数据值进行分析,因篇幅所限,将三组试验的铣削力平均值列于表 4。结合表 4 与图 5 可以看出,在整个铣削过程中,次摆线切削宽度方向上(即 y 向)铣削力值最大,切削抗力最大,螺旋进刀方向上(即 z 向)铣削力值次之,进刀宽度方向上(即 x 向)铣削力值最小,且在次摆线走刀平面内,y 向上的铣削力值是 x 方向上的 4 倍。y 向与窄槽侧壁法线方向平行,在加工过程中窄槽侧壁易变形。



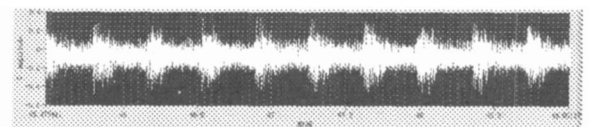
(a) 4 mm 立铣刀(次摆线参数组)



(b) 1 mm 立铣刀(次摆线参数组)

图 5 立铣刀走刀路径及其铣削力采集区域

Fig 5 Tool path of end mill and acquisition area of milling force



(a) x 方向



(b) y 方向



(c) z 方向

图 6 4 mm 立铣刀的铣削力变化幅值

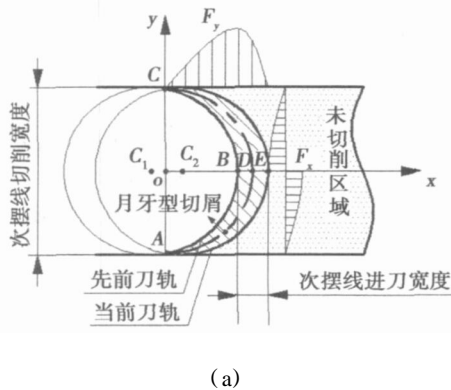
Fig 6 Milling force change in amplitude of 4 mm end mill  
在刀具直径及加工区域相同的前提下,比较试验 A 与试验 B 的铣削力值。x、y、z 方向上的铣削力值分别增大了 1.366、1.271 和 1.529 倍。试验 B 中主轴  
http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2010 年 第 1 期

转速虽然提高了 2.25 倍,但每齿进给量  $f_z$  与轴向切深  $a_p$  分别提高了 5 和 6.6 倍,致使  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的铣削力增大。从窄槽加工的表面质量看,试验 A 表面光滑,无残留毛刺,试验 B 表面粗糙,存在残留毛刺。可见,在次摆线参数一致的前提下,增大  $f_z$ 、 $a_p$  会增加刀具的切削抗力,切削步距大,表面质量变差,若  $f_z$  偏小,加工过程中,挤压代替切削,增大切削热,加速了小直径刀具的磨损。因此,窄槽粗加工阶段,次摆线走刀方式下,在满足刀具性能及周期切削力恒定的前提下,宜选择大的  $f_z$ 、 $a_p$ ,在保证窄槽侧壁变形量不增加的前提下,增加单位时间内的材料去除率,缩短加工时间,切屑热源迅速移开加工区域,减小窄槽结构的温升,减少热变形。试验 C 与试验 A、B 的铣削力值对比可知:在刀具直径不同、工艺参数不同的情况下,次摆线切削宽度方向上的铣削力始终最大。

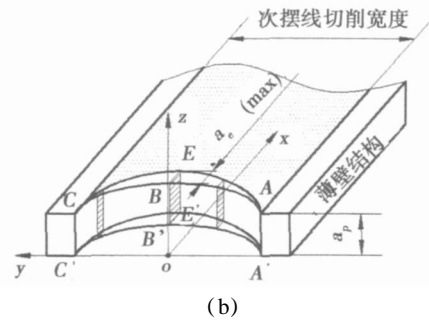
表 4 试验铣削力平均值

试验	次摆线参数	主轴转速 / $\text{kr}\cdot\text{min}^{-1}$	铣削力 /N		
			x向	y向	z向
A	组	16	0.481	1.957	1.276
B	组	36	0.657	2.487	1.951
C	组	32	0.460	1.748	1.486

在次摆线铣削窄槽结构平面内,刀具完成一次次摆线走刀,在进刀方向上,切削区呈月牙型,如图 7 所示。在图 7(a)中,该切削区域在  $y$  轴、 $x$  轴方向上的投影面积之比为 4,铣刀从 A 点切入,沿圆弧 ADC 铣削走刀,切屑厚度逐渐增大,在 BE 处达到最大值,随后切屑厚度逐渐减小至零, $x$ 、 $y$  方向的铣削力幅值如图 7(b)所示。在图 7(b)中,随着切削的进行,刀具与切削区域的接触线长度  $a_p$  保持不变,径向切深  $a_e$  逐步增加,切削面积亦不断增加,在次摆线进刀宽度方向上(即图 7(a)中  $x$  轴方向),切削面积  $BEEB$  达到最大值,此时,切削力最大,随着刀具逐步离开切削区域,切削面积逐步减小,切削力逐渐变小。随着次摆线循环切削,切削力幅值周期变化,试验所测数据很好地反映了这一变化趋势。



(a)



(b)

图 7 次摆线走刀高速铣削窄槽结构的铣削力模型

Fig 7 Analytical milling force model of trochoidal high speed milling slot

## 4.2 表面粗糙度分析

对窄槽底面不同区域进行了 5 次表面粗糙度测量,取样长度 2.5 mm,数据见表 5。

表 5 表面粗糙度测量值

试验	$R_a$ 测量值					平均值
A	0.16	0.11	0.13	0.21	0.10	0.142
B	1.03	1.14	1.07	1.72	1.12	1.52
C	0.75	0.72	0.67	0.63	0.81	0.716

试验 A 中,由于每齿进给量  $f_z$  及轴向切深  $a_p$  设置值较保守,铣削力值小,刀具振动幅度小,加工后窄槽表面质量光滑,无残留毛刺现象。试验 B 中,在次摆线工艺参数一致的前提下,提高切削速度,加大每齿进给量  $f_z$  和轴向切深  $a_p$ ,切削力增大,在满足了高材料去除率的粗加工要求时,表面加工质量变差。试验 C 中,采用第 1 组次摆线工艺参数,刀具螺旋进刀至切削层后,先以次摆线方式铣削型腔,再沿窄槽侧壁环切走刀,如图 5(b)所示,加工后窄槽侧壁不存在刀具振纹,侧壁和底面表面粗糙度值小,表面质量良好。

## 4.3 局部形貌分析

试验 A、B 中,4 mm 立铣刀按图 5(a)的走刀路径切削,在窄槽单侧以次摆线方式加工,另一侧则是直线走刀,由于次摆线进刀宽度大(等于刀具半径值),加工后观察发现:直线走刀的侧壁[图 8(a)中侧壁 A]表面光滑,无刀具振纹,而摆线走刀的侧壁[图 8(a)中侧壁 B、(b)中 D 处]表面存在残加工区域,表面质量差,刀痕明显。图 8(b)中窄槽底面 C 处存在刀具振纹和刀痕,月牙型切削区域明显。

试验 C 中,1 mm 立铣刀按图 5(b)的走刀路径切削。对窄槽局部形貌进行观察,图 9 列举了四处典型局部形貌特征。图 9(a)(b)(c)是 1 mm 立铣刀铣削宽 4.175 mm 窄槽时的次摆线走刀路径,在图 9(a)中,刀具先螺旋进刀至第一切削层,以次摆线铣削方式铣削窄槽型腔后,在次摆线走刀外围再沿窄槽侧壁环切走刀,如图 9(b)所示。加工完毕后,窄槽侧壁及底面光整,表面质量高( $R_a = 0.716 \mu\text{m}$ ),如图 9(c)

所示。图 9(d)中,宽 1.73 mm 的窄槽在采用 1 mm 立铣刀次摆线铣削过程中,因小直径刀具在大切深、高进给、宽摆线(0.8 mm)走刀方式下,刀刃频繁受到铣削过程中的交变弯曲应力与热应力的相互作用,以及次摆线空载走刀时的急剧冷却作用,切削区域内的刀刃部分有产生机械疲劳裂纹的危险,加工过程中发生铝屑粘刀现象,形成积屑瘤,不能及时脱离切削刃,排除出切削区域,局部温度偏高,窄槽在铣削、磨削共同作用下加工,导致窄槽侧壁底面表面形貌差,刀具振纹明显,如图 9(d)所示。

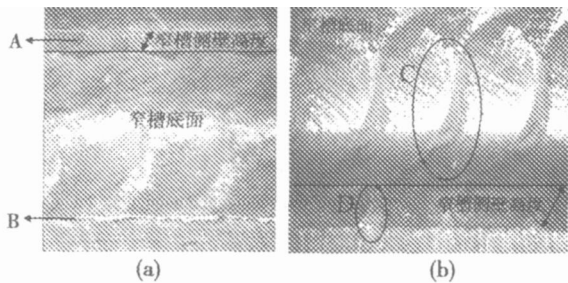


图 8 4 mm 立铣刀铣削宽 9.2 mm 槽的局部形貌 20 ×  
Fig 8 Local surface morphology of 9.2 mm width slot for 4 mm end mill

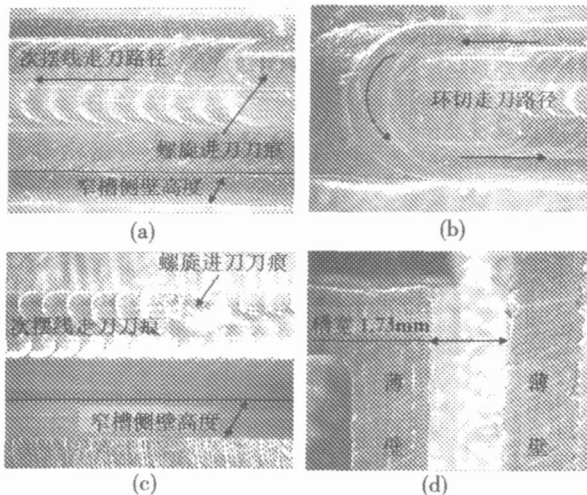


图 9 1 mm 立铣刀铣削宽 4.175 mm 槽局部形貌 20 ×  
Fig 9 Local surface morphology of 4.175 mm width slot for 1 mm end mill

从试验 A、B、C 的局部形貌观察分析可知,发生上述现象的主要原因是工艺参数设置不合理。次摆线进刀宽度和切削宽度设置值偏大,每齿进给量  $f_z$  及轴向进给量  $a_p$  偏大,虽然满足粗加工单位时间内材料去除率高的特点,但小直径刀具在这种工况下铣削,切削载荷偏大,刀具颤振,致使窄槽侧壁和底面出现刀痕及振纹,欠切区域明显,在窄槽精加工阶段,很难满足高速铣削精加工的“等载荷切削”原则,极易引起小直径刀具的磨损和崩刃。因此,合理安排工艺参数及走刀策略,以次摆线铣削型腔后沿侧壁环切走刀方式加工窄槽,既满足了粗加工要求,又符合了精加工

原则。

## 5 结论

(1) 将次摆线走刀方式应用于高速铣削窄槽结构中,加工出了高质量窄槽型腔表面 ( $R_a = 0.142 \mu\text{m}$ )。

(2) 次摆线切削区域呈月牙型,铣削底面存在“鱼鳞状”刀痕。次摆线走刀产生的铣削力周期性变化,在走刀平面内,次摆线切削宽度方向上的铣削力值是进刀宽度方向上铣削力值的 4 倍。

(3) 建立的次摆线走刀高速铣削窄槽结构铣削力模型有效可行,为开展高速次摆线走刀过程中铣削力的研究奠定了基础。

(4) 在高速铣削次摆线走刀策略方面,依据立铣刀结构参数,合理设置切削参数,采用次摆线走刀加环切走刀方式加工窄槽结构,既改善了窄槽的铣削条件,又满足了高速铣削粗精加工的要求和原则,通过系列试验已证明,该走刀方式完全能够指导实际生产。

## 参考文献

- 1 中国科技促进发展研究中心. 国家重点领域技术预测报告. 北京:科学技术部发展计划司, 1999
- 2 王保民. 关于摆线特性的研究. 机械科学与技术, 2002; 21(1): 61 ~ 62
- 3 黄恺, 李朝辉, 苏铁明. 数控摆线插补算法探讨. 辽宁工学院学报, 2000; 20(4): 11 ~ 12
- 4 葛秀光, 李佳, 王丽萍等. 摆线在多边形零件加工中的应用. 机床与液压, 2005; 33(2): 45 ~ 47
- 5 Trochoidal high speed machining [EB/OL]. Dalcen. <http://www.powemill.com/general/hsm.asp>
- 6 High speed machining [EB/OL]. NX. [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/nx/machining/machining/high\\_speed\\_machining.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/machining/machining/high_speed_machining.shtml)
- 7 Spiral high speed machining [EB/OL]. Cimatron. <http://www.cimatron.com/general.aspx?FolderD=38&lang=en>
- 8 OtkurM, Lazoglu I Trochoidal milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007; 47: 1 324 ~ 1 332
- 9 Matthieu Rauch, Emmanuel Duc, Jean-Yves Hascoet. Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009; 49: 375 ~ 383
- 10 Mark Albert. The right start for a fine finish. Modern Machine Shop, 2002; (4)
- 11 孙全平, 廖文和. 基于摆线的高速铣削刀轨生成算法研究. 机械制造, 2003; 41(5): 12 ~ 14
- 12 黄伯云. 中国材料工程大典 (第 4 卷). 有色金属材料工程 (上). 北京: 化学工业出版社, 2006
- 13 SANDVIK Coromill Plura for GC1620, GC1630, H10F, 2007
- 14 刘胤, 胡小秋. 基于 UG CAM 的薄壁件高速铣削走刀策略研究. 机床与液压, 2008; 36(5): 248 ~ 250

(编辑 吴坚)

<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010年 第 1 期