

文章编号 1004-924X(2015)10-2827-08

## 环面蜗轮滚刀测量机

石照耀\*, 于 渤, 叶 勇, 闫 璐

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:**基于圆柱坐标系测量原理,采用电子展成法研制了一台环面蜗轮滚刀测量机用于环面蜗轮滚刀的快速测量。该测量机通过对 3 个运动轴的闭环控制,使测头沿着被测误差项的路径运动来获取数据并完成测量。介绍了测量机的工作原理与构成,其为卧式结构,由花岗石床身、精密密珠主轴、滑动导轨和闭环控制系统构成。开发了环面蜗轮滚刀测量软件,实现了环面滚刀各项误差的快速精密测量。实验显示:该仪器可以对切削刃螺旋线误差、刃口齿形误差和容屑槽周节误差进行测量,测量的合成不确定度分别为 2.35、2.45 和 2.94  $\mu\text{m}$ ,均小于圆柱齿轮滚刀标准 GB/T6084—2001 中对应误差项公差 的 1/3,满足 AA 级精度的环面滚刀各项误差的测量要求,验证了该测量机的功能与可靠性。该测量机也可以用于环面蜗杆、圆柱蜗杆及圆柱滚刀的测量。

**关键词:**环面蜗轮滚刀;滚刀测量;螺旋线误差;齿形误差;周节误差

**中图分类号:**TG87;TG501 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2827

## Hourglass hob measuring machine

SHI Zhao-yao\*, YU Bo, YE Yong, YAN Lu

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement  
Technology & Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

**Abstract:** By using electronic generative metrology, an hourglass hob measuring machine is developed based on the measuring principle of cylindrical-coordinate system. In the control of three moving axes, the machine allows a probe to move along the measuring path controlled by a closed loop system to obtain the data and implement the measurement. The working principle and constitution of the machine are introduced. The machine is based on a horizontal structure and consists of a granite base, a precision spindle, sliding guides and a closed-loop control system. An hourglass hob measuring software is developed to measure each deviation of the hourglass hob precisely. The practical measurement results indicate that the machine can inspect the cutting edge helix deviation, cutting edge tooth profile deviation and the circular pitch deviation, and the measurement uncertainties are 2.35  $\mu\text{m}$ , 2.45  $\mu\text{m}$  and 2.94  $\mu\text{m}$ , less than one third of the tolerances of the deviations in GB/T6084—2001, respectively. It satisfies the requirement of hourglass hobs with accuracy class AA for high precision measuring of each deviation and verifies the function and stabilization of the measuring machine. The machine can measure the hourglass worm, cylindrical worm and the cylindrical hob as well.

**Key words:** hourglass hob; hob measurement; helix deviation; tooth profile deviation; circular pitch deviation

收稿日期:2015-04-23;修订日期:2015-06-27.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 3B001013201301)

## 1 引言

环面蜗杆传动时,其蜗杆是凹圆弧为母线的回转体。根据蜗杆齿面成形方法不同可分为直廓环面蜗杆、平面包络环面蜗杆、渐开面包络环面蜗杆和锥面包络环面蜗杆等<sup>[1,2]</sup>。与圆柱蜗杆相比,其参与啮合的齿数多,承载能力强。

环面蜗轮滚刀主要用于对环面蜗轮的加工,环面滚刀的精度直接影响环面蜗轮的加工质量,因此需要控制其精度。环面滚刀与环面蜗杆具有相同的理论曲面,这类曲面形状复杂,使得滚刀的测量一直是技术难题。

滚刀测量属于齿轮测量范畴,其测量技术也经历了比较测量法、机械展成法和电子展成法 etc 发展。Samputensili 公司的 Su-130 型滚刀测量仪、Fette 公司的 UWM 型滚刀测量仪和 Klingelnberg 公司的 PWF250/300 型滚刀检查仪利用了机械展成法。Klingelnberg 公司的 P 系列、大阪精机的 GC-HP 系列、Fette 公司的 PKM630/300、M&M 公司的 2000 与 3000 系列齿轮测量中心都采用了电子展成法<sup>[3]</sup>。我国滚刀测量技术历经了成都量具刃具厂的机械展成式 GDY250/300 和成都工具研究所的电子展成式 CGW300,但迄今的测量技术研究局限于圆柱滚刀测量。针对这种复杂几何形状齿面的测量研究主要是在三坐标测量机(CMM)和齿轮测量中心计算机数控机(CNC)上对环面蜗杆的齿形误差和螺旋线误差进行测量<sup>[4,5]</sup>。这些研究的测量项目单一,且只能测量环面蜗杆。目前,国内外尚没有关于环面蜗轮滚刀测量的研究,而环面蜗轮滚刀的质量对蜗轮的加工精度有决定性影响,其检测技术的缺失严重阻碍了环面蜗杆副传动的推广应用。

为解决环面滚刀测量问题,本文基于圆柱坐标系测量原理,采用电子展成法,研发了环面蜗轮滚刀测量机。通过测量实践,证明该测量机可以检测环面蜗杆的切削刃螺旋线误差、刃口齿形误差和容屑槽周节误差,实现了环面蜗轮滚刀的精密测量。

## 2 测量原理

环面蜗轮滚刀工作曲面形状复杂,表征其误差的项目多,最主要的误差项目为切削刃螺旋线

误差、刃口齿形误差和容屑槽周节误差。

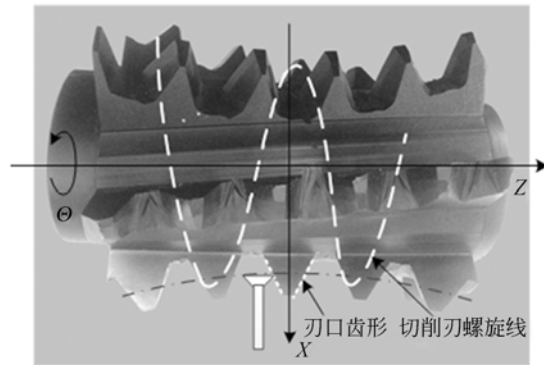


图 1 环面蜗轮滚刀

Fig. 1 Hourglass hob

环面蜗轮滚刀是回转体,其测量可采用圆柱坐标系测量原理<sup>[6]</sup>。如图 1 所示,采用圆柱坐标系表示滚刀螺旋线的模型为  $f_{hl}(x, z, \theta)$ ,通过控制测头沿着 X 轴和 Z 轴移动,滚刀绕  $\theta$  轴转动,完成切削刃螺旋线误差测量。刃口齿形是前刀面与滚刀侧面的交线,其方程可以表示为  $f_a(x, z, \theta)$ ,以切削刃螺旋线误差的测量方式,对滚刀刃口上齿高方向均匀分布的离散点进行扫描测量,完成刃口齿形误差的测量。

普通圆柱滚刀导程是不变的,因此根据每个刃口相对起测刃口转过的角度,可计算出该刃口相对起测刃口的理论轴向距离,再根据测头值和轴向光栅值,获得实际轴向距离,它们的差值即该刃口的误差,其大小都是相对起测刃口的值。与普通滚刀不同,环面蜗轮滚刀的导程是变化的,每个刃口的误差并不是相对起测刃口的值。该测量原理首先确定了实际滚刀刃口上某一点位置,根据该点径向坐标值和其相对作为加工基准的端面的距离,可以近似确定该点对应的理论点坐标,以这一点为基准点,将理论齿面坐标系与机床坐标系重合。其次按照圆柱坐标系测量原理,对滚刀进行切削刃螺旋线误差测量,获得每一个被测刃口的坐标值,根据这些点坐标,利用最小距离法,重新调整理论齿面坐标系与机床坐标系的位置关系。最后,在确定了理论齿面坐标系与机床坐标系的关系后,对滚刀各项误差进行测量,测量数据经过处理,得到的误差值为被测刃口的误差,并不是相对起测刃口的相对误差。起测刃口位置则可以根据测量需求进行选择,也可以测量全部刃口,然后根据需要,在评定时截取对应刃口。

### 3 测量机的工作原理及构成

#### 3.1 工作原理

环面蜗轮滚刀测量机采用电子展成法,即通过计算机、驱动装置及传动装置组成的展成系统,形成滚刀曲面上某种特定空间曲线,例如螺旋线、齿廓线等<sup>[7]</sup>。如图 2 所示,控制径向(X轴)、轴向(Z轴)两个方向的直线运动和主轴(Θ轴)回转运动,实现沿着空间任意曲线的运动,同时用数据采集系统获取测头和各轴光栅的测量数据,采用测量软件对所获得的数据进行处理,比较实际值与理论值,得出环面蜗轮滚刀的各项误差。

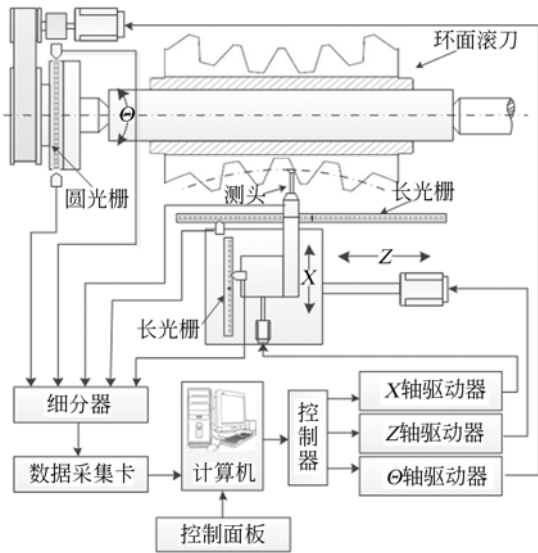


图 2 测量机原理图

Fig. 2 Principle of measuring machine

#### 3.2 测量机构成

测量机采用卧式结构,由机械系统、测控系统和测量软件等组成,如图 3 所示。

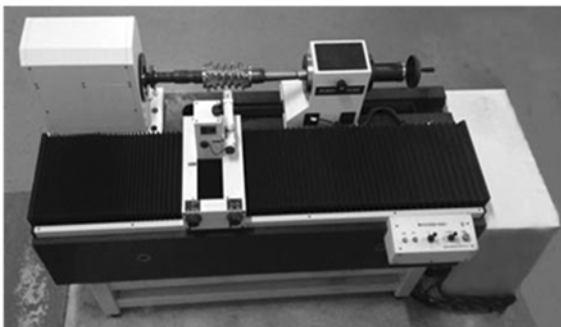


图 3 测量机

Fig. 3 Measuring machine

#### 3.2.1 机械系统

测量机械系统如图 4 所示,青花岗石床身置于机架之上,光栅座固定在床身上,尾座可在床身上沿 Z 向移动。Z 向滑座置于花岗石床身上,可沿床身上的 V 平导轨做 Z 向移动,行程为 850 mm。X 向滑座置于 Z 向滑座上,可沿 X 向移动,行程为 150 mm。测头传感器置于 Y 向测头座上,可沿 Y 向调整测头传感器的高度位置,Y 向行程为 70 mm。测量时,将工件安装在前顶尖与尾顶尖之间,由带动物带动工件与光栅主轴同轴转动。

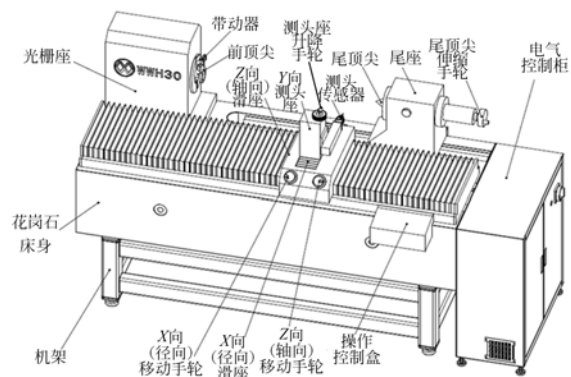


图 4 测量机机械系统

Fig. 4 Mechanical system of measuring machine

3 个交流伺服电机分别安装在 Z 向、X 向及光栅主轴,通过滚珠丝杠及同步带驱动 Z 向滑座、X 向滑座以及光栅主轴;Z 向、X 向分别安装了高精度直线光栅,回转主轴安装了高精度圆光栅,共同构成了三轴三联动的闭环系统。

##### (1) 光栅主轴部件

如图 5 所示,为增强主轴刚性,采用“死”顶尖方式,即顶尖不动而工件转动。高精度圆光栅安装在高精度的滚子轴承上。该滚子轴承的内环、外环、端面压环及滚子均经过精细研磨加工,径向及轴向均为过盈配合,在实现了高回转精度的同时,还能承受较大的径向与轴向载荷。进行测量时,伺服电机驱动小带轮,通过同步带带动大带轮,大带轮与带动物固连,经拨叉带动工件转动。转动的角度由与大带轮同轴安装的圆光栅测出。主轴径向跳动量为  $1 \mu\text{m}$ ,端面跳动量为  $1.5 \mu\text{m}$ 。

##### (2) 导轨部件

测量机的轴向导轨与径向导轨均采用滑动导轨形式,分别如图 6、图 7 所示。轴向导轨采用

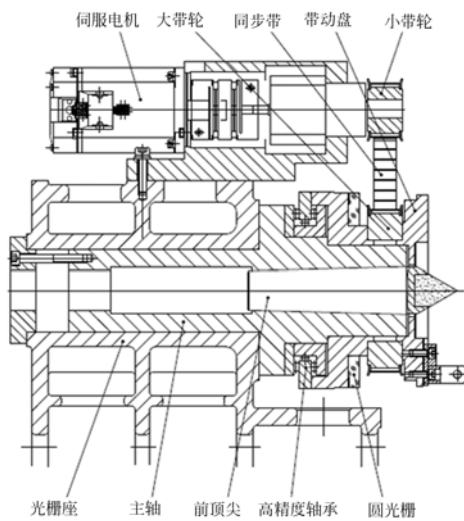


图 5 光栅主轴结构

Fig. 5 Structure of spindle

“V-平”方式,径向导轨采用矩形布置方式。在导轨的滑动面,均贴有高分子导轨软带,其特点是耐磨性好,动、静摩擦特性一致。轴向滑座与径向滑座均采用伺服电机驱动,滚珠丝杠作为传动机构。

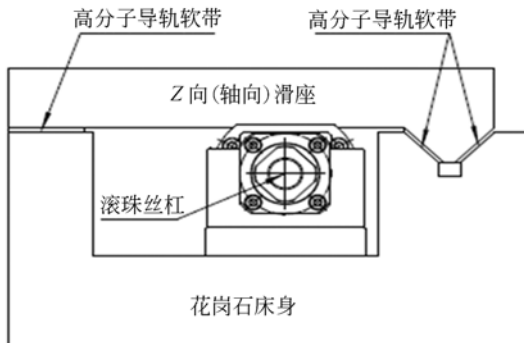


图 6 轴向导轨结构

Fig. 6 Structure of axial guideway

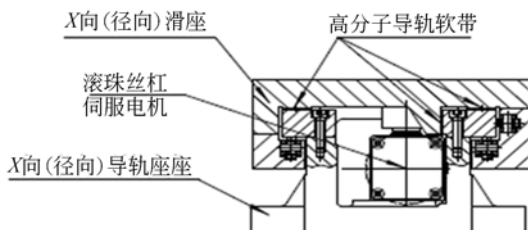


图 7 径向导轨结构

Fig. 7 Structure of radial guideway

### 3.2.2 测控系统

控制系统采用基于 Turbo PMAC2 的多轴运动控制器<sup>[8]</sup>,是集运动轴控制、PLC 控制以及数据采集为一体的多功能运动控制器,它与伺服系统,各运动轴的光栅系统组成全闭环控制系统。上位机通过以太网与控制器通讯,进行高速数据交换。该控制系统克服了半闭环系统的缺陷,位置环的采样直接取自安装在最后一级机械上的位置反馈元件长圆光栅,从而可以对机械传动过程中的误差进行实时补偿,实现高精度位置控制。由于环面蜗轮滚刀的测量需要对数据进行高速采集,而 PMAC 控制器的数据采集及传输频响不能满足对环面蜗轮滚刀的测量,所以采用计数频率为 10 MHz,采样周期为  $7.5 \mu\text{s}$  的高速数据采集卡来完成对测量数据的采集,保证了该测量机对环面蜗轮滚刀的测量要求。测量机主轴采用刻线为 28 800 的高精度圆光栅( $\pm 1''$ )和 1 组对径安装的读数头,2 个读数头的细分数均为 100,分辨率为  $0.45''$ ,可以消除偏心的影响;X、Y、Z 3 个直线光栅采用高精度直线光栅,并进行 100 细分,分辨率为  $0.2 \mu\text{m}$ ,保证了测量机的测量精度。测量机测头采用电感测头,其信号经放大等处理后再 A/D 转换得到其测头位移值,测头量程为  $\pm 0.6 \text{ mm}$ ,分辨率为  $0.15 \mu\text{m}$ 。测量机的 Z 轴和 X 轴各安装了电子手轮,其信号进入控制器,用于这 2 轴的微小运动。测量机控制面板上安装了控制 X、Z、 $\Theta$  轴运动的摇杆,用于非测量状态下各轴的点动运动;控制面板上设置急停开关,其直接控制各轴驱动器的紧急停止端和主电源,以便在紧急情况下使用。

### 3.2.3 测量软件

测量软件包括喉平面标定模块、控制模块、数据采集模块、数据处理模块和人机交互界面<sup>[9]</sup>。喉平面标定模块用于标定测量基准喉平面的位置;控制模块用于完成测量过程中的所有运动控制任务;数据采集模块实现了扫描测量过程中的数据采集功能;数据处理模块是对采集到的原始数据进行处理,得到被测误差,并绘制误差曲线;人机交互界面具有参数输入、标准选择、测量结果保存和打印报表等功能。

## 4 精度检定与分析

测量机的精度是保证测量可靠性的基础,影

响测量机精度的主要因素为机械系统误差、标准量误差和信号处理与软件算法误差<sup>[10]</sup>。

4.1 仪器精度检定

按照 JB/T10024-2008 卧式滚刀检测仪机械行业标准对本仪器进行检测<sup>[11]</sup>,检定中使用的圆柱滚刀,模数为 2.5 mm,精度等级为 AA 级,检定结果如下:

- (1) 轴向测量滑座运动与顶尖轴线的平行度
  - 上母线 200 mm(400 mm 芯轴):1 μm
  - 前母线 200 mm(400 mm 芯轴):1.5 μm
  - 上母线 300 mm(700 mm 芯轴):1 μm
  - 前母线 300 mm(700 mm 芯轴):2.5 μm
- (2) 径向测量滑座运动与顶尖轴线的垂直度
  - 测量长度 10 mm,误差 1.0 μm
  - 测量长度 25 mm,误差 1.5 μm
  - 测量长度 40 mm,误差 2.0 μm

(3) 测量圆柱滚刀螺旋线误差的重复性为 0.89 μm。

(4) 主轴系统 4 次转位测量误差为 0.45 μm。

4.2 精度分析

当所测量的环面蜗轮滚刀型号不同时,各种误差的影响也不同。以模数 9.25 mm,喉平面分度圆直径 80 mm 的滚刀为例,对整个测量机的不确定度进行分析,主要因素引入的不确定度如表 1 所示。

表 1 测量机不确定度分析

Tab.1 Uncertainty analysis of measuring machine

误差项目	误差值	不确定度分量 $u_i/\mu\text{m}$	
机械误差	上母线平行度 1 μm/300 mm	0.039 2	
	侧母线平行度 2.5 μm/300 mm	0.161 7	
	垂直度 2 μm/40 mm	0.333 3	
	滚刀安装偏心 1 μm	0.121 3	
标准误差	圆光栅精度 1"	0.019 2	
	轴向长光栅精度 3 μm/m	0.200 0	
	径向长光栅精度 1 μm/m	0.012 1	
测头精度	测头精度 0.7 μm	0.233 3	
	信号处理 圆光栅信号处理	0.015 μm	0.008 7
与软件算法误差	长光栅信号处理	0.2 μm	0.115 5
	算法误差	0.005 μm	0.002 9
切削刃螺旋线误差测量重复性	2.3 μm	2.3	

表 1 中的不确定度分量相互独立,按照不确

定度合成原理,可以得到切削刃螺旋线误差测量的合成不确定度  $u_c$  为:

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} = 2.36 \mu\text{m}. \quad (1)$$

同理也可以计算出刃口齿形误差测量和容屑槽周节误差测量的合成不确定度分别为 2.45 μm 和 2.94 μm。

由于国内外还没有关于环面蜗轮滚刀的精度标准,因此参照圆柱齿轮滚刀标准 GB/T6084-2001<sup>[12]</sup>。模数 9.25 mm 的 AA 级精度滚刀,其一转内切削刃螺旋线公差为 12 μm,刃口齿形公差为 8 μm,容屑槽周节公差为 45 μm,各项误差测量的合成不确定度均小于对应公差的 1/3,符合 AA 级圆柱齿轮滚刀测量要求。

5 测量实践

研制的测量机已经在工厂投入使用,经历了实践的检验。以平面二次包络环面蜗轮滚刀测量为例进行介绍,被测滚刀参数如表 2 所示。

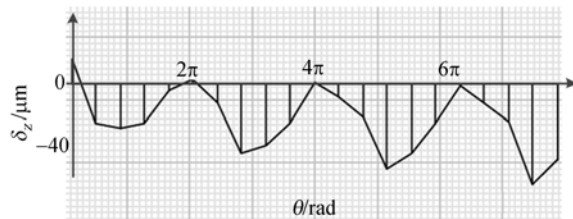
表 2 被测滚刀参数

Tab.2 Parameters of measured hob

参数	数值
中心距 ( $a/\text{mm}$ )	225
头数 ( $Z_w$ )	1
传动比 ( $i_{12}$ )	40
喉平面分度圆直径 ( $D_l/\text{mm}$ )	80
主基圆半径 ( $D_b/\text{mm}$ )	140
母平面倾斜角 ( $\beta/^\circ$ )	10
容屑槽数	6
容屑槽类型	直槽
测头半径 ( $r_p/\text{mm}$ )	1.035

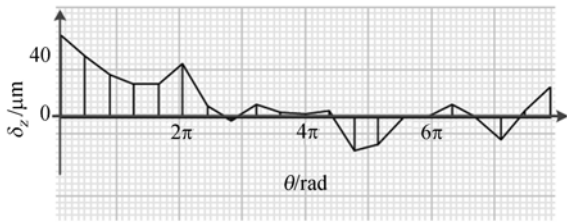
5.1 切削刃螺旋线误差

切削刃螺旋线误差曲线如图 8 所示,左右齿面的切削刃螺旋线误差分别为 80.8 μm 和 73.40



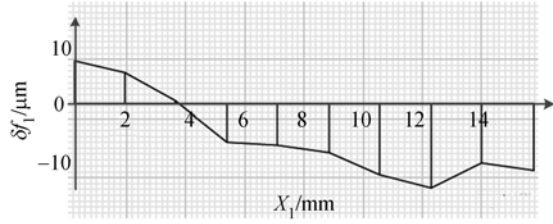
(a) 左侧齿面

(a) Left flank



(b) 右侧齿面  
(b) Right flank

图 8 切削刃螺旋线误差曲线  
Fig. 8 Helix deviation curves



(b) 右侧齿面  
(b) Right flank

图 9 刃口齿形误差曲线  
Fig. 9 Tooth profile deviation curves

μm。对滚刀进行 5 次重复测量,测量结果如表 3 所示,左右齿面的重复性测试结果分别为 2.0 μm 和 2.3 μm。

表 3 切削刃螺旋线误差重复性

Tab. 3 Measurement repeatability of helix deviation

测量次数	左齿面/μm	右齿面/μm
1	80.8	73.4
2	81.4	71.1
3	79.4	73.5
4	80.5	71.9
5	79.4	72.5
重复性	2.0	2.3

5.2 刃口齿形误差

刃口齿形误差曲线如图 9 所示,左右齿面齿形误差<sup>[13]</sup>分别为 19.7 μm 和 23.7 μm。对滚刀进行 5 次重复测量,测量结果如表 4 所示,重复性测试结果分别为 2.4 μm 和 2.1 μm。

表 4 刃口齿形误差重复性

Tab. 4 Measurement repeatability of tooth profile deviation

测量次数	左齿面/μm	右齿面/μm
1	19.7	23.7
2	20.5	23.2
3	18.1	22.7
4	18.9	21.6
5	18.4	22.8
重复性	2.4	2.1

5.3 容屑槽周节误差

容屑槽周节误差曲线如图 10 所示,容屑槽周节误差为 0.100 1°。对滚刀进行 5 次重复测量,测量结果见表 5,重复性测试结果为 0.004 1°,为了与圆柱齿轮滚刀标准相符,将其转换为喉平面内分度圆上弧长为 2.9 μm。

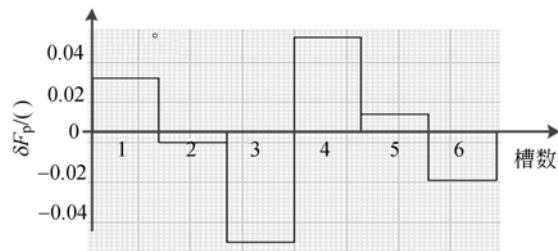


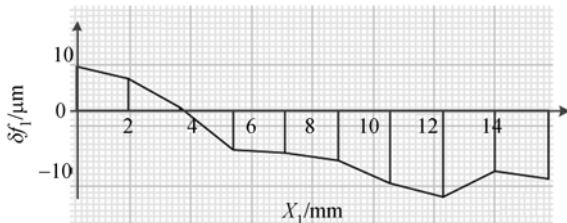
图 10 容屑槽周节误差

Fig. 10 Circular pitch deviation curve

表 5 容屑槽周节误差重复性

Tab. 5 Measurement repeatability of circular pitch deviation

测量次数	测量结果/(°)
1	0.100 1
2	0.0972
3	0.098 7
4	0.101 3
5	0.099 3
重复性	0.004 1



(a) 左侧齿面  
(a) Left flank

以上列出了针对一种型号滚刀的检测结果,实践生产当中,对中心距 50 mm 到 250 mm 之间的所有型号滚刀进行了检测,检测结果证明该测量机可以实现环面蜗轮滚刀的精密测量。

## 6 结 论

本文基于电子展成法研制了全数控环面蜗轮滚刀测量机,具有快速、精密、全自动等特点。可以实现环面蜗轮滚刀的切削刃螺旋线误差、刃口

齿形误差和容屑槽周节误差等误差项目的快速精密测量。测量实践证明该测量机测量这三项误差的合成不确定度分别为  $2.35 \mu\text{m}$ 、 $2.45 \mu\text{m}$  和  $2.94 \mu\text{m}$ ,均小于 GB/T6084-2001 中对应误差项公差的 1/3,符合 AA 级精度圆柱齿轮滚刀的测量要求,类比圆柱齿轮滚刀标准,该仪器可以满足 AA 级精度环面蜗轮滚刀的测量要求。

此外,该测量机还可以对环面蜗杆、圆柱蜗杆及滚刀、丝杠、螺杆等螺纹曲面进行测量。

## 参考文献:

- [1] 周良堉. 环面蜗杆修形原理及制造技术[M]. 北京:国防科技大学出版社,2005.  
ZHOU L Y. *Hourglass Worm Modification Principle and Manufacturing Technology* [M]. Beijing: National University of Defense Technology Press, 2005. (in Chinese)
- [2] MOHAN L V, SHUNMUGAM M S. Geometrical aspects of double enveloping worm gear drive [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009; 2053-2065.
- [3] 石照耀. 现代滚刀测量仪器概况[J]. 磨床与磨削, 1992, (1): 14-17.  
SHI ZH Y. Status of modern hob measuring machine [J]. *Grinder and Grinding*, 1992, (1): 14-17. (in Chinese)
- [4] 秦大同, 颜佳, 张光辉. 平面包络环面蜗杆加工误差诊断及提高制造精度的研究[J]. 机械传动, 1996, 2: 34-37.  
QIN D T, YAN J, ZHANG G H. Diagnosis of machining errors and improvement of manufacture precision on plane-generated hourglass worm [J]. *Mechanical Transmission*, 1996, 2: 34-37. (in Chinese)
- [5] 姬永军, 劳奇成. 基于齿轮测量中心的环面蜗杆测量研究[J]. 工具技术, 2008, 12: 102-105.  
JI Y J, LAO Q CH. Study on measurement of hourglass worm with gear measuring center [J]. *Tool Engineering*, 2008, 12:102-105. (in Chinese)
- [6] 王立鼎, 姜志峰, 王晓东, 等. 超精密渐开线齿形的测量方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 980-985.  
WANG L D, LOU ZH F, WANG X D, *et al.*. Measuring methods of ultraprecision involute tooth profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 980-985. (in Chinese)
- [7] 石照耀, 叶勇, 丁毅, 等. CNC 式高精度滚刀测量机[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 529-531.  
SHI ZH Y, YE Y, DING Y, *et al.*. CNC high precision measuring machine for hobs [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, 20(5): 529-531. (in Chinese)
- [8] 石照耀, 张斌, 林家春. 基于免形状测量模式的复杂形状测量机设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 6: 1377-1384.  
SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH. Design of measuring machine for complex geometry based on form-free measurement mode [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 06:1377-1384. (in Chinese)
- [9] 荣根, 汤洁. 齿轮测量软件架构设计分析[J]. 机械传动, 2013, 7: 85-87.  
RONG G, TANG J. Design and analysis of gear measure software architecture[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013, 7: 86-87. (in Chinese)
- [10] 石照耀. 复杂螺旋曲面特征线测量的理论与技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2001.  
SHI ZH Y. *Research on the theory & technology of measurement for characterized curves of complex helicoidal surfaces* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [11] JB/T10024-2008, 卧式滚刀测量仪[S].

JB/T10024-2008, Horizontal hob measuring machine [S]. (in Chinese)

[12] GB/T6084-2001, 齿轮滚刀通用技术条件[S].

GB/T6084-2001, General technical specifications for gear hobs [S]. (in Chinese)

[13] ILLES D, SANDOR B. The analysis of cutting ed-

ges of face gear hob with analytical calculation and three coordinate measuring machine [C]. *The 11th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments, Aachen and Braunschweig*, 2013: 30-36.

#### 作者简介:



石照耀(1964-)男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,博士生导师,1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为齿轮工程及精密测试技术与仪器。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn



于 渤(1987-)男,辽宁阜新人,博士研究生,2011年于北京化工大学获得学士学位,主要研究方向为精密测试技术及仪器。E-mail: dr\_yubo@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)