

# 插齿刀凸曲前刀面加工对刀方法研究

李学光 张树仁 史国权 宋林森

长春理工大学, 长春, 130022

**摘要:**插齿刀凸曲前刀面磨削加工中,砂轮的初始位置直接影响插齿刀凸曲面的加工精度及齿形精度。采用对射型激光传感器设计了对刀方案,并设计制造了对刀装置,用于确定插齿刀凸曲面加工时砂轮相对于插齿刀的初始磨削位置。应用对刀装置进行了对刀实验,实验结果验证了对刀方案的可行性。应用加工的插齿刀进行了齿轮插齿实验,齿轮的检测结果表明,所设计的对刀装置能够满足插齿刀凸曲面加工需求。

**关键词:**插齿刀;凸曲前刀面;对刀装置;激光传感器

**中图分类号:** TG502

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.22.009

## Research on Tool Presetting Method for Manufacturing of Pinion Cutter with Convex Curved Rake Face

Li Xueguang Zhang Shuren Shi Guoquan Song Linsen

Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022

**Abstract:** As for NC machining of convex curved rake face of a pinion cutter, the original position of grinding wheel is very important for the machining precision and tooth profile precision. Herein, tool presetting scheme was designed by using laser sensor, the tool presetting device was designed and manufactured, the original position of grinding wheel could be ascertained by using the device. The tool presetting experiments were done, the results of tool presetting experiments testify the feasibility of the scheme, gear shaping experiments were done also, and the results of gear shaping show that the tool presetting device can satisfy the demands of the manufacturing of pinion cutter with convex curved rake face.

**Key words:** pinion cutter; convex curved rake face; tool presetting device; laser sensor

## 0 引言

数控加工中,必须保证刀具相对于加工工件之间的准确位置。经济型数控机床的对刀一般通过对刀仪或简易的对刀方法来实现<sup>[1-3]</sup>,对于一些专用的数控机床及数控设备,为保证加工质量,常采用光电传感器、激光传感器<sup>[4-6]</sup>等检测元件设计专门的对刀装置。

利用插齿刀凸曲前刀面加工机床进行插齿刀前刀面的数控加工<sup>[7-9]</sup>,插齿刀所有刀齿的前刀面经一次装夹加工完成,在原前刀面的基础上加工出凸曲面,必须保证实际加工出的凸曲前刀面的形状和位置与理论凸曲面的形状和位置相吻合,即插齿刀每齿凸曲前刀面必须与原有的前刀面一一对应,否则会造成每齿的左右两侧刃不对称,而且造成周节累计误差超差,因此,在进行加工之前,必须保证砂轮相对于插齿刀处于正确的位置。本文主要研究凸曲前刀面加工对刀方法,设计制造专门的对刀装置,保证加工之前砂轮相对于插齿刀刀齿能够准确定位。

## 1 凸曲前刀面加工中砂轮与插齿刀的相对位置关系

插齿刀安装在机床伺服主轴上,为保证插齿刀加工后的齿形精度,砂轮轴的轴线必须与插齿刀的轴线相交,砂轮架水平放置在机床的中托板上,所以砂轮轴的轴线与插齿刀的轴线调整在同一空间高度上,即插齿刀的轴线与砂轮轴线相对于机床中托板等高,在机床设计及安装调整时,应保证插齿刀轴线到中托板的距离与砂轮轴轴线到中托板的距离相等,插齿刀与砂轮架在机床中的布局如图1所示。

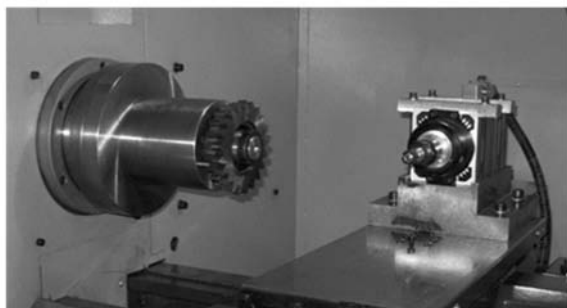


图1 砂轮与插齿刀布局

收稿日期:2012-04-16

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20085018)

为保证插齿刀磨削后的齿形精度,除了要求砂轮轴的轴线与插齿刀的轴线在同一高度之外,还要保证磨削插齿刀每齿前刀面时砂轮初始位置的准确性。如果砂轮磨削每齿前刀面时初始位置有偏差,则磨削出来的凸曲前刀面的渐开线投影将产生齿形误差,每齿的左右渐开线不对称。如果砂轮初始位置有偏差,再加上每齿自身原有的偏差,则后续的累计误差将达到一个最大值,齿形精度很难保证,因此,在进行插齿刀前刀面磨削时必须进行精确的初始位置定位,保证砂轮的运动轨迹(凸曲面的形状)与插齿刀磨削前的齿形重合。为了实现砂轮相对于插齿刀初始位置的准确定位,本文选用激光传感器作为位置检测元件,并设计专门的对刀装置。

## 2 激光传感器选型

激光传感器从发光部发出信号光后在受光部接收被测物反射回来的光量(反射型),或在受光部接收被测物的遮光量(对射型)从而得到输出信号。考虑到所研制的插齿刀凸曲前刀面加工机床的结构及插齿刀的构形特点,且由于插齿刀凸曲前刀面不是平面,而是一个凸曲面,采用反射型激光传感器测量时,无法保证激光光点落在每齿前刀面相同的位置,精度无法保证,相比之下,对射型激光传感器不受凸曲面形状的影响,因此选用对射型激光传感器来设计对刀装置,选用的激光传感器的型号是 LV-S71,放大器型号是 LV-11SA。

对射型激光传感器检测原理如图 2 所示。

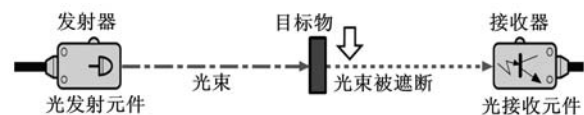


图 2 对射型激光传感器检测原理

## 3 插齿刀凸曲前刀面加工对刀方案设计

### 3.1 对刀原理

根据插齿刀磨削时砂轮相对于插齿刀的磨削运动,采用激光传感器实现插齿刀初始位置的定位,通过检测插齿刀相邻两齿的渐开线侧后刀面的投影位置,结合机床数控系统伺服主轴的角度控制,以实现插齿刀磨削时砂轮初始位置的精确定位。对刀方案如图 3 所示。

激光传感器有两个指示灯,首先,通过激光传感器的发射端发出信号,在发射端与接收端之间产生一光柱,发射端和接收端分别置于插齿刀在机床上安装位置的两侧,通过操作数控机床,使插

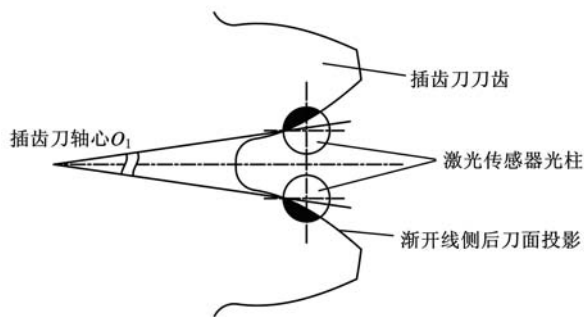
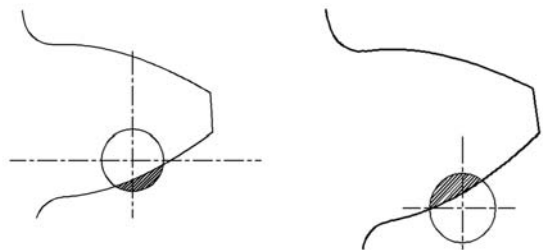


图 3 对刀方案

齿刀绕着轴心旋转。当插齿刀渐开线齿面的边缘遮挡住光柱时,信号开始减弱,此时,指示灯 1 灭;继续旋转插齿刀,当插齿刀齿边缘遮挡住光柱的 1/2 时,激光传感器的指示灯 2 熄灭,此时,结合机床主轴伺服系统,记下机床操作面板屏幕上角度的数值,然后反方向旋转插齿刀,使得相邻齿的边缘遮挡住激光传感器发射的光柱。重复上述动作,当激光传感器的指示灯熄灭时,记下机床操作面板屏幕上角度的数值,通过对两个角度进行换算,即可确定两齿间的中线位置,此位置即为砂轮磨削的起始点。

由于激光传感器发射的光柱有一定的直径尺寸,而且只有当发射端与接收端之间的光柱被遮挡住一定比例时,信号才能触发,所以为了减小对刀误差,设计了如下对刀验证方法:通过从上下两个方向遮挡光柱,来验证对刀的准确性。由于插齿刀刀齿的渐开线投影是一曲线,而且在测量时,插齿刀相邻两齿的边缘分别触发光柱的上下沿,取两次测量的平均值作为砂轮的初始磨削位置,实验过程如下:用同一齿的边缘分别遮挡住光柱的上下部分,记录数控机床显示屏上的角度值,计算出平均值作为该齿的测量角度,如图 4 所示;再用相邻齿的边缘分别遮挡住光柱的上下部分,记录数控机床显示屏上的角度值,计算出平均值作为该齿的测量角度,如图 5 所示,最后把这两个角度的平均值作为砂轮的初始磨削位置。

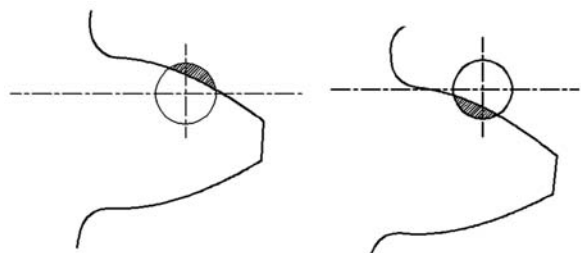


(a)C 轴角度为  $-25.862^{\circ}$  (b)C 轴角度为  $-26.567^{\circ}$

图 4 1号齿单边测量

### 3.2 对刀精度分析

对刀实验结果及分析如下:



(a) C轴角度为 $-16.794^\circ$  (b) C轴角度为 $-16.072^\circ$

图5 2号齿单边测量

(1) 1号齿单边测量。逆时针测量:信号触发时C轴(机床伺服主轴)角度为 $-25.862^\circ$ ,见图4a;顺时针测量:信号触发时C轴角度为 $-26.567^\circ$ ,见图4b;C轴角度平均值为 $-26.2145^\circ$ 。

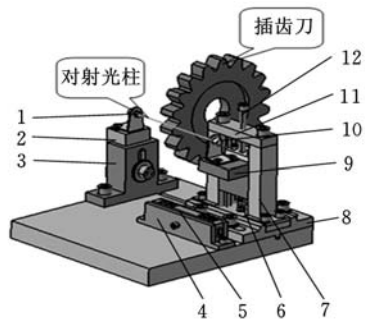
(2) 2号齿单边测量。顺时针测量:信号触发时机床C轴角度为 $-16.794^\circ$ ,见图5a;逆时针测量:信号触发时C轴角度为 $-16.072^\circ$ ,见图5b;C轴角度平均值为 $-16.433^\circ$ 。

通过计算,1号齿与2号齿之间C轴角度的平均值为 $-21.32375^\circ$ 。

对上述方法进行验证,如果每次从光柱的上下两部分进行遮挡,信号触发时光柱遮挡的比例如果相等,则上述方法等同于对图4a、图5a或图4b、图5b的测量结果;如果通过校准和验证,误差值满足使用要求,则可以采用后者,简化测量过程。

按图4a、图5a所示方位进行测量,两齿之间对应C轴角度的平均值为 $-21.328^\circ$ ;按图4b、图5b所示方位进行测量,两齿之间对应C轴角度的平均值为 $-21.3195^\circ$ 。由计算和分析结果可看出,采用图4b、图5b所示的直接测量方式,误差值较小,为 $0.00425^\circ$ ,符合要求,因此在实际加工中,按该方式进行对刀测量,确定砂轮的初始位置。

根据上述原理,本文设计了一套用于插齿刀凸曲前刀面磨削时砂轮初始位置精确对刀装置,如图6所示,对刀装置主要由激光传感器、激光发射端、激光接收端、发射端高度调整机构、接收端高度调整机构组成,发射端和接收端可分别实现上下、左右、前后多个方向的调节,通过相应的机械结构来实现。插齿刀的尺寸规格发生变化时,通过调整对刀装置即可满足对刀要求。当激光器产生的激光经发射端发出时,接收端如果接收到发射端发出的激光,发射端与接收端之间产生一光柱,则激光传感器产生响应信号。如果在发射端与接收端之间的光柱被其他物体遮挡,则激



1. 激光接收端 2. 接收端滑块 3. 接收端导轨  
4. 传感器支架 5. 激光传感器 6. 弹簧  
7. 发射端导轨 8. 发射端滑台 9. 发射端滑块  
10. 激光发射端 11. 压盖 12. 调整丝杠  
(a)对刀装置模型



(b)对刀装置实物

图6 对刀装置的组成

光传感器产生中断信号,利用这一原理,对砂轮磨削时的初始位置进行检测。砂轮初始位置只有两种选择:一种是在两齿之间的角分线上(凸曲前刀面两齿间的波谷处),另一种是在每个齿的前刀面的对称中心线上(凸曲前刀面的波峰处)。为了避免磨削时在前刀面出现接刀痕迹,选择两齿间的角分线处作为砂轮的起始磨削位置,即砂轮的轴线与插齿刀轴线在同一高度,然后插齿刀两齿间的角分线与砂轮轴线平行且等高,通过检测相邻两齿的位置确定两齿的角分线的位置,由此确定出砂轮落刀点的初始位置。当物体遮挡住对射光柱的 $1/2$ 时,中断信号响应,保证相邻两齿的检测精度。

#### 4 插齿刀凸曲前刀面加工对刀装置对刀实验

为了确保插齿刀置于对刀装置中激光传感器的发射端和接收端之间,设计了安装插齿刀的工装,保证插齿刀与定位面之间形成一定尺寸的空间,确保激光传感器的接收端能够放置进去,安装夹具及安装效果如图7所示。

使用时,将对刀装置安装在机床的中托板上,将激光器的发射端与接收端置于插齿刀前刀面的

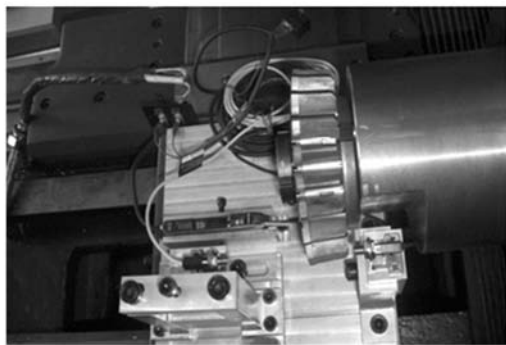


图 7 对刀装置对刀

左右两侧,发射端与接收端的高度通过丝杠螺母机构进行调节。首先固定接收端与发射端的高度,然后通过机床的控制系统控制伺服主轴的旋转运动,当插齿刀相邻两齿的表面在旋转过程中遮挡住光柱时,激光传感器将产生响应信号,通过机床实时坐标的数值的变化,即可确定相邻两齿间的角度及位置,测试情况如图 7 所示。

通过设置放大器的参数对激光光柱的遮挡触发进行控制,图 8 所示为针对测量中放大器参数变化的实验。图 8a 所示为放大器初始设置的参数,此时指示灯 1、2 亮,左右数字区两组数字设置为 2 倍关系,即当对射光光柱的 1/2 被遮挡时,信号触发。图 8b 所示为通过机床的数控系统使伺服主轴开始旋转,当右侧数字区的数值大于左侧数字区数值时,放大器状态不变。继续旋转伺服主轴,当插齿刀的某一刀齿遮挡住光柱的 1/2 时,指示灯 1 灭,此时右侧数字区的数值小于左侧数字区的数值,如图 8c 所示。继续旋转伺服主轴,当对射光柱完全被插齿刀刀齿遮挡时,信号灯 2 灭,右侧数字区数值变为零,如图 8d 所示。完成对刀后,对插齿刀的凸曲前刀面进行了加工。



(a) 预设参数

(b) 传感器读数大于预设值



(c) 传感器读数小于预设值

(d) 传感器读数为零

图 8 激光传感器状态变化

## 5 对刀精度验证实验

### 5.1 插齿实验参数

为验证所设计的对刀装置的对刀精度,应用加工后的插齿刀在一汽长春齿轮厂进行了插齿刀插齿实验,插齿刀材料、被加工齿轮的参数及插齿机的型号如表 1 所示,所选用的插齿工艺参数如表 2 所示。

表 1 插齿刀、齿轮参数及插齿机型号

插齿齿轮材料	齿轮模数、齿数	插齿刀材料	齿轮齿部硬度	插齿机型号	切削液
20CrMnTi	$m=5\text{mm}$ $z=25$	YT758	55HRC	Y5132CNC 数控插齿机	30 号 机油

表 2 插齿工艺参数 mm

冲程数 (次/分)	冲程长度	圆周进给量	径向切入量
75	52	0.15	0.15

### 5.2 插齿及对刀精度分析

齿轮插齿加工如图 9 所示,如果插齿刀凸曲前刀面磨削时砂轮的初始磨削位置不正确,用磨削后的插齿刀进行插齿加工,则会直接影响被加工齿轮的周节累计误差。实际加工后的齿轮齿形及周节累积误差的检测结果表明,左侧单齿齿距偏差 0.0098mm,左侧周节累计误差 0.0206mm,右侧单齿齿距偏差 0.0146mm,右侧周节累计误差 0.0203mm。通过对收集的切屑进行观察,插齿切屑呈亮白色,而且呈卷曲形状,没有发黑的情况,说明插齿刀的刃口锋利,刀具角度合适,切削性能较好;插削一件齿轮后,新构形插齿刀侧刃未发现微小崩刃,侧后刀面肉眼看不见磨损带出现,说明新构形插齿刀有较好的抗崩刃能力及抗磨损能力。被加工齿轮的检测结果表明,该对刀装置能够实现精确对刀,对刀精度能够保证插齿刀的加工精度。

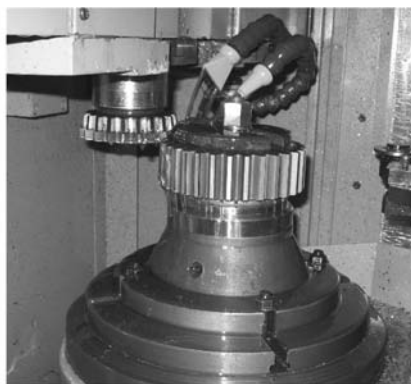


图 9 插齿实验

(下转第 2738 页)

- 2008 3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering, Xiamen, 2008; 892-895.
- [8] Lazzus, Juan A. Autoignition Temperature Prediction Using An Artificial Neural Network with Particle Swarm Optimization[J]. International Journal of Thermophysics, 2011, 32(5): 1-17.
- [9] Yin Fei, Mao Huajie, Hua Lin. A Hybrid of Back Propagation Neural Network and Genetic Algorithm for Optimization of Injection Molding Process Parameters[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3457-3464.
- [10] Shen Changyu, Wang Lixia, Li Qian. Optimization of Injection Molding Process Parameters Using Combination of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(2/3): 412-418.
- [11] Lee Z J, Ying K C, Chen S C, et al. Applying PSO-based BPN for Predicting the Yield Rate of DRAM Modules Produced Using Defective ICs [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9/12): 987-999.
- [12] Upenda J, Gupta C P, Singh G K, et al. PSO and ANN - based Fault Classification for Protective Relaying[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(10): 1197-1212.
- [13] Baczynski D. Application of Particle Swarm Optimization Algorithm in Process of Artificial Neural Networks Training for Short Term Forecasting [J]. Rynek Energii, 2010(4): 52-56.
- [14] Elragal, Hassan M. Improving Neural Networks Prediction Accuracy Using Particle Swarm Optimization Combiner [J]. International Journal of Neural Systems, 2009, 19(5): 387-393.
- [15] 刘金琨. 先进 PID 控制及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 162-170.
- [16] Kenned Y J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA, 1995: 1942-1948.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 徐胜男, 女, 1987 年生。武汉理工大学机电工程学院硕士研究生。主要研究方向为六自由度并联机器人控制算法。  
周祖德, 男, 1946 年生。武汉理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。  
艾青松, 男, 1981 年生。武汉理工大学信息工程学院副教授。  
刘 泉, 女, 1963 年生。武汉理工大学信息工程学院教授、博士研究生导师。

(上接第 2688 页)

## 6 结束语

采用对射型激光传感器设计了专门的对刀装置, 通过该对刀装置的使用, 实现了插齿刀凸曲面加工时砂轮相对于插齿刀初始磨削位置的精确定位。应用该对刀装置进行了对刀实验, 实验结果验证了对刀方案的可行性; 使用该对刀装置进行了插齿刀凸曲面前刀面的磨削加工, 应用加工后的插齿刀进行了插齿实验, 对被加工的齿轮进行了检测, 检测结果表明: 该对刀装置能够实现精确对刀, 能够保证砂轮磨削时初始位置的精确定位。

## 参考文献:

- [1] 常家东. 加工中心对刀仪器研制[J]. 机床与液压, 2005(8): 32-33.
- [2] 张秀萍. 数控机床的对刀原理及常用的对刀方法[J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(4): 73-75.
- [3] 江惠明. 数控铣床应用中的几种对刀方法[J]. 现代机械, 2011(6): 23-24.
- [4] 叶俊. 数控车床光电式简易对刀装置[J]. 广西轻工业, 2008, 24(1): 58-59.

- [5] 陆卫东, 沈勇, 吴健. 激光对中仪的原理及应用[J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(3): 137-142.
- [6] 王俊元, 刘刚. 刀具几何参数光学测量系统设计与分析[J]. 测试技术学报, 2007, 21(6): 510-514.
- [7] 李学光, 张树仁, 史国权, 等. 插齿刀凸曲面前刀面磨削方法研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(21): 2551-2554.
- [8] Li Xueguang, Shi Guoquan, Zhang Shuren. Experimental Research on Machining Process for Convex Curved Rake Face of Pinion Cutter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 80/81: 495-500.
- [9] Li Xueguang, Zhang Shuren, Shi Guoquan. Development of Processing Machine for Convex Curved Rake Face of Pinion Cutter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121/126: 1614-1619.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 李学光, 男, 1979 年生。长春理工大学机电工程学院讲师、博士。主要研究方向为精密、超精密加工、检测及装备。发表论文 15 篇, 主编教材一部, 获部级科技进步三等奖 2 项。  
张树仁(通讯作者), 男, 1950 年生。长春理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。  
史国权, 男, 1965 年生。长春理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。  
宋林森, 男, 1974 年生。长春理工大学机电工程学院副教授。