

文章编号 1004-924X(2007)03-0390-06

基于光栅投影技术的刀具磨损三维特征提取方法

姜 宇^{1,2}, 杨国辉³

(1. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

3. 哈尔滨工业大学 电子与通信信息技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:提出了利用激光光栅投影技术对硬合金刀具磨损图像进行检测的方法。利用采集待测物体栅线图样中未变形区域包含的相位信息,使用最小二乘迭代法将数据拟合,得到了理想参考面相位分布参数。由于不需另外采集实物参考面变形光栅图像,不仅减少了实物参考面的采集步骤,而且不需要对实物参考面相位进行求解。实验表明:该方法利用数控机床换刀间隙进行检测,实现了在线测量。同时,该方法测量磨损区域的最大宽度、最大面积、磨损区域的周长、 z 方向最大深度参数的标准差和相对精度都小于0.01,具有较好的三维形貌轮廓检测精度。

关键词:激光技术; CCD; 光栅投影; 刀具磨损; 三维形貌

中图分类号: TN249; TP391 **文献标识码:** A

3D feature extract method for tool wear based on grating projection

JIANG Yu^{1,2}, YANG Guo-hui³

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150001, China;

3. Microwave Technological Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Image detection method for carbide tool wear based on laser grating projection is presented. Phase information in undesformed areas that belongs to object shadow and data regression with the least-squares iteration are used to obtain phase distribution parameters on the ideal reference plane. For unnecessary to collect deformed grating images of object reference plane, it reduces operation steps and takes no solution for the phase of object reference plane. Experiments show that the method realizes the on-line measurement by detecting the parameters during the time slots caused by replacing tools of numerical control machine. Also, the measurement data of maximum width, maximum area, circumference and maximum depth in z direction of wear region come to the results that measurement standard deviation and relative accuracy are no more than 0.01. Therefore, this method is a precise 3D profilometry of wear area.

Key words: laser technique; CCD; grating projection; tool wear; 3D profilometry

收稿日期:2006-01-22; 修订日期:2006-12-18.

基金项目:哈尔滨工程大学基础研究基金项目(No. 002080260732)

1 引言

切削刀具是关系制造成本和工件质量的重要因素。刀具磨损的自动检测分为直接法和间接法^[1,2]。直接法是直接检测刀具磨损面的数值大小;间接法是通过检测与刀具磨损状态相关的物理信号来估计刀具磨损状态,分为光学和非光学方法^[3]。间接检测方法中,最为常见也较为有效的方法有切削力检测、声发射检测和电机电流/功率检测等,在某种程度上能够实现在线检测^[4]。

刀具磨损的间接在线检测是分析实际切削过程中的信号,然后将其与最优切削过程的参考信号相比,适用于大批量生产的刀具状态监测。对于变化的加工环境和不同的工件,间接法必须调整比较过程中的阈值,因此一些模糊神经网络被应用到参数的自调整中。间接法主要的缺点是无法得到刀具磨损的真实几何尺寸,影响测量结果的因素多。

直接在线检测刀具磨损的方法是利用基于图像分析的计算机视觉方法,具有非接触、可得到磨损精确量、使用方便且速度快的优点。但其检测效果取决于采集图像处理 and 磨损的模式识别,可以使用各种边界检测和纹理特征的识别方法。该方法的缺陷是只能分析刀具磨损的二维特征^[5],缺少磨损区域的三维描述能力。

本文提出一种基于激光栅格投影的刀具磨损图像检测方法。该方法使用卤素灯照明,同时将激光栅格投影到检测表面,利用 CCD 摄像机采集图像。编写宏代码计算软件 Image tool 分析的结果,从而得到磨损区域宽度、面积、周长和磨损深度,得到磨损区域的三维信息。

2 光栅三维形貌测量原理

光栅投影轮廓测量系统根据摄像机光轴和投影装置光轴的空间位置不同,可分为相交轴系统和平行轴系统^[6]。以相交轴系统为例,如图 1 所示, R 为参考平面, C 为摄像机镜头光心, P 为投影系统镜头光心, A 为被测物体上任一点,摄像机光轴与参考面 R 相交于点 o ,以 o 点为原点建立坐标系 $o-xyz$,其中 x 轴与图面平行, y 轴与图面垂直, z 轴与摄像机光轴重合。光栅投影时的成

像面为平面 I ,在平面 I 上,光栅投影为平行等间距条纹,设其节距为 p 。

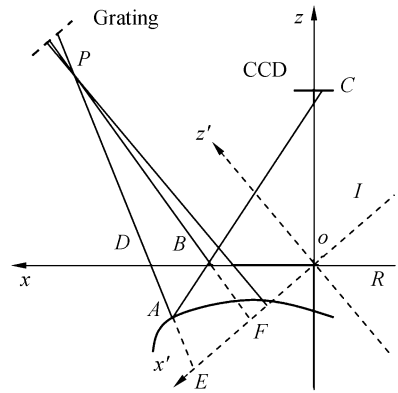


图 1 光栅投影及图像采集系统构成

Fig. 1 System architecture of grating projection and image acquisition

平面 I 实际上是被投影光栅的共轭像面,也是形貌测试分析中常用的光栅虚拟像面,该像面上光栅是等间距的,便于后续分析。另外以 o 点为原点建立另一坐标系 $o-x'y'z'$,使 $x'o'y'$ 平面与 I 平面重合,并且 x' 轴与 I 面上条纹方向垂直, z' 轴与投影系统的光轴方向平行。设坐标系 $o-xyz$ 可以依次绕 x 轴、 y 轴、 z 轴旋转 α 、 β 、 γ 角度后与坐标系 $o-x'y'z'$ 重合, B 、 D 点分别是 A 点与两光心连线跟参考面的交点。设 P 和 B 点在 $o-x'y'z'$ 坐标系中的坐标分别为 $P(x_P', y_P', z_P')$, $B(x_B', y_B', z_B')$, B 点在 $o-xyz$ 坐标系中的坐标为 $B(x_B, y_B, z_B)$,由坐标系 $o-xyz$ 与坐标系 $o-x'y'z'$ 的旋转关系, B 点在两坐标系下坐标有如下的变换关系^[7]:

$$\begin{aligned} x_B' &= x_B \cos \beta \cos \gamma + y_B (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) \\ y_B' &= y_B \cos \beta \sin \gamma + y_B (-\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma) \\ z_B' &= x_B \sin \beta - y_B \sin \alpha \cos \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

由空间解析几何可知,已知 P 、 B 两点在坐标系 $o-x'y'z'$ 中的坐标,可求得在 $o-x'y'z'$ 下该空间直线方程为:

$$\frac{x' - x_P'}{x_B' - x_P'} = \frac{y' - y_P'}{y_B' - y_P'} = \frac{z' - z_P'}{z_B' - z_P'}, \quad (2)$$

又平面 I 的方程为

$$z' = 0, \quad (3)$$

由平面 I 以及直线 PB 的方程可得直线 PB 与平面 I 的交点 F 坐标为

$$\begin{aligned} x_F' &= x_P' - \frac{(x_B' - x_P')z_P'}{z_B' - z_P'} \\ y_F' &= y_B' - \frac{(y_B' - y_P')z_P'}{z_B' - z_P'} \\ z_F' &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

参考面上 B 点与 I 平面上 F 点的相位是相同的,也就是有

$$\phi(x_B, y_B, 0) = \phi(x_F', y_F', 0) = \phi_0 + \frac{2\pi x_F'}{p} \quad (5)$$

将式(4)和(1)代入式(5),用 x, y 替换 x_B, y_B 可得更一般的形式

$$\phi(x, y) = \frac{a + bx + cy}{1 + dx + ey} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \phi_0 \\ b &= \frac{2\pi \cos \beta \cos \gamma}{p} - \frac{\phi_0 \sin \beta}{z_P'} - \frac{2\pi x_P' \sin \beta}{z_P' P} \\ c &= \frac{2\pi (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)}{p} + \\ &\quad \frac{\phi_0 \sin \alpha \cos \beta}{z_P'} - \frac{2\pi x_P' \sin \alpha \cos \beta}{z_P' p} \\ d &= -\frac{\sin \beta}{z_P'} \\ e &= -\frac{\sin \alpha \cos \beta}{z_P'} \end{aligned} \quad (7)$$

从式(7)不难知道,如果能精确测定测量系统的几何参数与光学参数,就完全可以得到理论参考面的相位分布,从而在形貌测量中无需采集参考面上的栅线图样。但是,由于投影系统和摄像机系统的光心只是假想的空间点,光栅投影时的成像平面 I 也只是假想的理想面,所以要精确测定这些参数非常困难,因此本文没有通过测定实验系统的这些参数来获取理想参考面相位分布,而是用另外的办法。在实际形貌测试实验中可以注意到,待测物体一般是放在一参考平面上的,因此在采集变形栅线图样的时候,实际上也采集了一小部分参考面上的栅线图样,于是就可以利用变形栅线图样解调后与参考面上未变形部分对应的相位信息,通过最小二乘迭代法对这些数据进行拟合,从而求得由系统参数决定的理想参考面分布函数的待定参数 a, b, c, d, e , 这样即可获得理想参考面的相位分布。

为求式(6)中的待定系统 a, b, c, d, e , 采用最小二乘迭代法求解超定非线性方程组。将式(6)

展开为一阶 Taylor 级数形式,

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \phi_e(x, y) + \frac{\delta a + x\delta b + y\delta c}{1 + dx + ey} \\ &\quad \frac{(a + bc + cy)(x\delta d + y\delta e)}{(1 + dx + ey)^2} + o(\delta) \end{aligned} \quad (8)$$

其中下标 e 表示有误差的量; o 表示无穷小量。由上式可以形成迭代过程,步骤如下:

(1)选取变形栅线图样解调后未变形区域对应的若干像素点,假定迭代初始数值 $d(0) = e(0) = 0$, 则 $a(0), b(0), c(0)$ 可由如下线性方程组求得

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_M & y_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^{(0)} \\ b^{(0)} \\ c^{(0)} \end{bmatrix} = \Phi \quad (9)$$

其中 $\Phi = [\varphi(x_1, y_1), \varphi(x_2, y_2), \dots, \varphi(x_M, y_M)]^T$, M 为所取最小二乘像素点个数。

(2)计算出的第 k 次迭代结果后,将其代入(8)线性方程组中,求取未知量 $\delta a(k+1), \delta b(k+1), \delta c(k+1), \delta d(k+1), \delta e(k+1)$, 则可得第 $k+1$ 次迭代结果为

$$\begin{aligned} &[a^{(k+1)}, b^{(k+1)}, c^{(k+1)}, d^{(k+1)}, e^{(k+1)}]^T = \\ &[a^{(k)}, b^{(k)}, c^{(k)}, d^{(k)}, e^{(k)}]^T + \\ &[\delta a^{(k+1)}, \delta b^{(k+1)}, \delta c^{(k+1)}, \delta d^{(k+1)}, \delta e^{(k+1)}]^T \end{aligned} \quad (10)$$

(3)重复第 2 步,直到满足足够的精度要求。

3 实验系统构成

检测系统的构成图和实物图分别如图 2 和图 3 所示,主要由卤素灯照明、激光光栅投影器、望远镜、CCD 摄像头、图像采集卡、计算机构成。

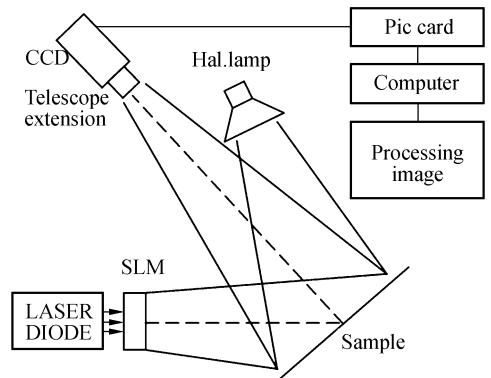


图 2 测量系统构成图

Fig. 2 Architecture of measurement system

为了分析磨损区域与未磨损区域间的差异,需要调整硬质合金刀片采光的强度和角度,突出所要分析的刀具部位。将具有 768(H)×493(V) 像素分辨率的 Panasonic GP-MF130 型号 CCD 摄像机、激光二极管、空间光调制器(SLM)和卤素灯相连接以获得最强的辐射度。将照明角度和强度调整到最佳状态,以增强前刀面和后刀面的图像采集效果。

在摄像机上安装一个焦阑透镜系统以减小透视畸变带来的影响,并调整焦阑透镜系统的光圈到其焦点,使得只有平行光线可以通过。由于反射物体处于无限远位置,所以不存在透视畸变问题,且增益与透镜距离无关。

CCD 摄像机拍摄 5 mm×5 mm 的区域,此幅图像的分辨率约为 10 μm。变形光栅图像经过模/数转换为 256 级灰度数据文件,然后由自编处理软件进行处理。考虑到傅里叶变换轮廓术中频移时由于主频点难以准确找到而导致测量系统误差的问题,在处理过程中没有按一般傅里叶变换轮廓术的基频移中处理,而是直接在用滤波器取出基频后就作逆变换,求取相位以便描述起三维形貌。

4 实验验证

为了实现在线测量,在森精 NT4300 DCG/

700C 型复合加工机的 NC 程序中对刀具的运动轨迹和进给率进行编程。在每次换刀间隙使刀具移动到检测位置进行检测,由于换刀之后用其他刀具进行加工,同时,高速加工过程中不可能允许进行图像采集,因此这种换刀间隙检测可以认为是在线检测。

不使用冷却材料的条件下,在复合加工机上进行刀具磨损的检测实验。在不涂膜的硬质合金刀片上观察磨损不断增长的现象。复合加工机停止之前,转动工件 15 min。然后将刀具定位,记录后刀面磨损和刀口磨损,并将其存储到计算机中。每隔 10 min 就重复一次这个过程。

在同一照明条件下,对已得到的刀具磨损剖面进行五次测量,重复计算刀具磨损参数。并通过下式进行估计,

$$R = t_{v,p} S, \quad (11)$$

其中, S 为标准差(STD),即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(V(i) - \bar{V})^2]}{N-1}}, \quad (12)$$

其中

$$\bar{V} = [\sum_{i=1}^N V(i)]/N, \quad (13)$$

表 1 给出对后刀面磨损重复测量的实验结果。从中可以看出,测得的参数几乎没有变化。

表 1 实验结果

Tab. 1 Experimental results

实验数据	磨损区域的 最大宽度(mm)	磨损区域的 最大面积(mm ²)	磨损区域的 周长(mm)	磨损区域 z 方向的 最大深度(mm)
1	0.45	0.21	1.94	0.35
2	0.45	0.21	1.94	0.40
3	0.45	0.21	1.95	0.35
4	0.45	0.22	1.95	0.44
5	0.45	0.20	1.94	0.40
平均值	0.45	0.21	1.95	0.30
标准差	0.00	0.01	0.01	0.01
$t_{v,p}, (v=8, p=95)$	2.85	2.85	2.31	2.75
相对精度	0.005	0.01	0.01	0.01

用傅里叶变换相位解调法对刀具磨损面进行了实际测量。下面的图像显示了实际测量结果的情况,图 3 为采集的变形栅线图,图 4 为用本文算法计算的结果描述的刀具表面三维效果。图 5 为扫描隧道显微镜测量的三维形貌效果图。

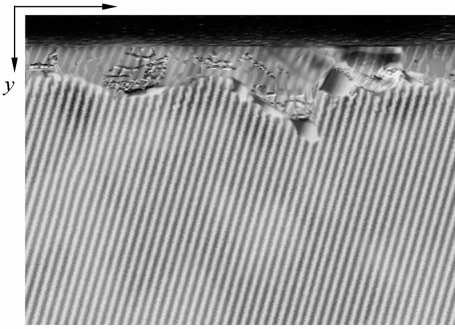


图 3 采集的变形栅线图

Fig. 3 Deformed grating collected

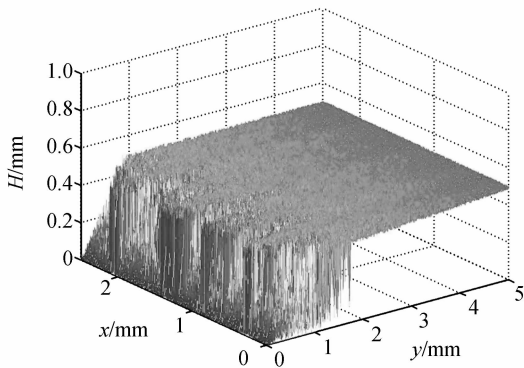


图 4 由本文算法计算结果描述的刀具表面三维效果

Fig. 4 3D graph obtained by the algorithm

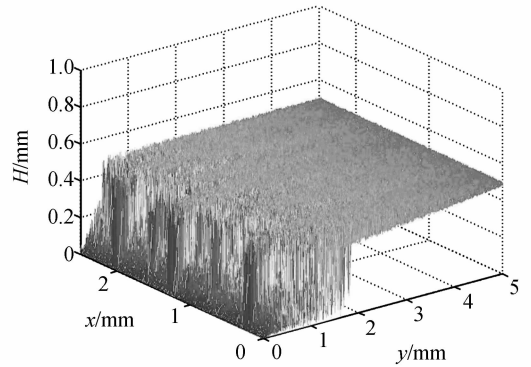


图 5 利用扫描隧道显微镜测量得到的三维形貌效果图

Fig. 5 3D pattern measured by scanning tunneling microscope

5 结 论

本文提出的刀具磨损检测方法利用变形光栅提取磨损表面三维形貌信息。通过对形貌检测中理论参考面相位分布规律的分析,研究了三维形貌轮廓检测技术中的参考面相位自动生成技术。由于不需另外采集实物参考面变形光栅图像,不仅减少了实物参考面的采集步骤,而且不需要对实物参考面相位进行求解,这样就可以真正实现只采集一幅图像解调形貌,从而提高测试速度,简化检测系统。利用该方法对硬合金刀具后表面磨损进行检测,实验表明,该方法测量曲线和扫描隧道显微镜方法测得结果相互吻合。测量磨损区域的最大宽度、最大面积、磨损区域的周长、 z 方向最大深度参数的标准差和相对精度都小于 0.01。同时,由于是在换刀间隙进行测量,因此该方法为在线测量方法,与传统方法相比提高了检测速度。

参考文献:

- [1] 王建军, 王颖. 光栅法在船体横扭角测量中的应用[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(3): 371-375.
WANG J J, WANG Y. Application of raster metering to hull transverse twist measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 371-375. (in Chinese)
- [2] 朱向冰, 付绍军, 叶为全, 等. 对变线距光栅干涉测量中的环形条纹的分析[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(6): 634-637.
ZHU X B, FU SH J, YE W Q, *et al.*. Explanation of the round interference fringes in the measurement of varied-line-space gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 634-637. (in Chinese)
- [3] MAGEE J, SIDHU J, COOKER L. A prototype laser forming system [J]. *Opt. Laser Eng.*, 2000, 34(4): 339-353.
- [4] ALHABAIBEH A, GINDY N. A new approach for systematic design of condition monitoring systems for milling

processes [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2000, 107 (2): 243-251.

- [5] CHUNG K T, GEDDAM A. A multi-sensor approach to the monitoring of end milling operations[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, 14(2): 15-20.
- [6] YANG Z Q, WU D X, ZHEN Y C. Study of angular nonlinearity in 2D optical scanning[J]. *Laser Technol.*, 2004, 28(3): 262-265.
- [7] HUANG L, TAO C K, TANG K, *et al.*. A new 3D dimension reconstruction algorithm based on surface in the LCSM system[J]. *Laser Technol.*, 2004, 28(1): 55-57.

作者简介:姜宇(1974—),女,哈尔滨工程大学信息与通信工程学院副教授,博士后,硕士生导师,主要研究方向为光电检测技术与仪器、智能算法在测量中的应用、微波非电量测量及宽带微波网络技术。E-mail:jy35cn@163.com