

文章编号: 1001-4888(2018)05-0807-09

工件粗糙度在线检测的试验研究^{*}

李业学¹, 张学林², 徐福卫¹, 李长江¹

(1. 湖北文理学院 材料学院, 湖北襄阳 441053; 2. 南洋理工大学 材料科学与工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 采用分形几何与图形图像学等交叉学科理论, 基于分形布朗函数, 本文提出了用于描述工件表面粗糙度的灰度图像自仿射维数计算新方法。在提出上述理论的基础上, 采用高速摄像机拍摄工件车削的实时过程, 计算工件的灰度图像自仿射维数, 评估不同时刻工件表面粗糙度变化, 进而提出可实现在线检测工件表面粗糙度的新技术。研究显示: (1) 工件表面图像揭示了其表面存在清晰可见的切痕和纹理, 但粗糙度不大, 同时计算出的对应灰度图像自仿射维数较小, 这与描述表面粗糙度的维数定义是吻合的, 因而, 灰度图像自仿射维数能很好地描述工件表面的粗糙度特征。 (2) 在初始车削不稳定状态时, 灰度图像自仿射维数较大, 灰度图像自仿射维数随着进刀量增加而增大, 这些结论与传统检测技术所得结论是一致的, 由此充分表明, 本文所提的灰度图像自仿射维数计算理论是正确的, 基于该理论所提的在线检测技术也是实用可行的。

关键词: 粗糙度; 灰度图像自仿射维数; 在线检测; 车削; 高速摄像机

中图分类号: O38 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-065

0 引言

表面粗糙度是表征加工工件质量的重要量化指标, 它直接影响到零件的耐磨、耐腐蚀、抗疲劳与接触刚度等性能, 同时也影响到零件在产品中的配合稳定性与密封性等^[1]。因此, 在机械工件加工中, 选择一个简单且行之有效的描述工件表面粗糙度的参数不仅具有重大的理论意义, 且在工件质量在线检测中具有重要实用价值。

已有研究在工件在线检测领域做了许多富有成效的工作^[2], 特别是工件切削后的表面粗糙度问题。描述工件表面粗糙度最常用的参数的是轮廓算术平均偏差 Ra ^[3], 测定轮廓算术平均偏差的方法有很多种, 依据将测量仪器与被测工件接触与否, 分为接触式测量和非接触式测量^[4]。对于接触式测量, 当探针或其他测量部件划过被测工件表面时, 容易划伤被测表面, 这不仅可能损坏精加工后的工件表面, 且探针接触在工件表面时力度差异会影响测量精度, 鉴于接触式测量的弊端, 因而, 在精加工过程中的工件表面测量基本上都采用非接触式测量。非接触式测量方法包括: 光切法、干涉法等。无论是光切法还是干涉法, 都是通过光学原理测定出工件表面的三维坐标, 而后依据规范选定基准线, 并根据相关公式计算出轮廓算术平均偏差 Ra , 显然, 轮廓算术平均偏差 Ra 测定需精确选择基准线, 基准线选定的准确与否直接影响表面粗糙度测定的精准程度, 理论上最小二乘中线是理想的基准线, 但在实际应用中很难获得, 因此一般用轮廓的算术平均中线代替, 且测量时可用一根位置近似的直线代替^[5]。由于基准线在实际测量中不能精确确定, 导致了轮廓算术平均偏差 Ra 作为描述工件表面粗糙度存在不可规避的缺陷。另外, 即使能精准选择基准线, 并由此精确测定轮廓算术平均偏差 Ra , 但是该参数描述的是在基准

^{*} 收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-05-23

基金项目: 湖北省教育厅重点项目(D20172601)资助

通讯作者: 李业学(1977—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 分形与在线检测技术。Email: warmhearted520@163.com

线处的表面剖切线的粗糙度,也就是说,它描述的是线的粗糙度,而不是整个面的粗糙度。

分形维数是描述线、面粗糙度的有效数学参数^[6]。自 1973 年 Mandelbrot 首次提出分形和分维以来,分形维数理论经历从三角形棱柱表面积法^[7]、投影覆盖法^[8]、立方体覆盖法^[9]、修正的立方体覆盖法^[10]等。采用这些分形维数理论描述表面粗糙度的前提是通过激光表面仪测定表面三维坐标,也就是说,必须将车床停机后取下工件测定三维坐标,而后计算其分形维数^[11],显然,停机将影响生产效率和车削精度,使得实时在线检测工件表面粗糙度无从谈起。

在图像维数计算过程中,不是借助各类设备直接获取表面三维坐标,而是采用图像处理方式间接获取表面三维坐标,结合图像维数计算理论,从而方便简洁地测量表面粗糙度,这使得在线检测工件表面粗糙度成为可能。Pentland^[12]开创了研究灰度图分形几何特征的先河,他探讨了大自然各种美景的图像维数,如山川、河流、树叶等,并依据灰度图像维数进行图像划定分界。随后大量研究继续深入探讨了灰度图像维数计算方法,并将灰度图像维数理论应用于各个领域,如:刀具车削后的表面形貌描述^[13,14],地质学节理面表面形貌描述^[15],计算机中的图形图像处理等。以上探讨的图像维数一般限于自相似维数,然而,Mandelbrot 等^[16]研究揭示,各种材料表面的分形几何特征更多表现为自仿射性。因而,本文拟定采用分形布朗函数探讨灰度图像的自仿射维数计算方法,提出描述工件表面粗糙度的新方法,并将该理论应用于工件表面粗糙度在线检测技术中。

本文研究内容包括:基于机械学、图形图像学、分形几何学等交叉学科理论,提出灰度图像自仿射维数的计算方法;在此基础上,采用高速摄像机“看清”高速旋转工件的实时车削过程,基于图像处理获取工件灰度图像表面三维坐标,计算描述工件表面粗糙度的图像自仿射维数变化,以实现在线检测工件表面粗糙度的目标。

1 表面粗糙度计算新方法

1.1 灰度表面的构建

利用图像转换或拍摄所得灰度图像,采用 Matlab2015 编程语言,编制相关计算软件,提取灰度图像的灰度值,以像素点所在位置作为横纵坐标 x, y ,以该像素点的灰度值依材料实际尺寸的换算值 $I_H(x, y)$ 作为高度值^[9],构建三维欧氏空间的一个点 $(x, y, I_H(x, y))$,以此类推,在每个像素点处构建一个对应三维空间点,依次连接这些点,构造一个空间曲面,命名为灰度表面。

1.2 灰度图像自仿射维数计算

分形布朗函数是描述各类表面自仿射分形特征的有力工具。设存在分形布朗函数 $F_H(x, y)$,依据其定义,对于给定的 Hurst 指数 $0 < H < 1$, $x, y \in \mathbb{R}^2$,在概率空间 (Ψ, A, P) 上的随机函数 $F_H(x, y)$,它满足以下条件:

(1) $F_H(x, y)$ 连续且 $F_H(0, 0) = 0$;

(2) 对于变量 $\Delta x, \Delta y \in \mathbb{R}^2$,增量 $F_H(x + \Delta x, y + \Delta y) - F_H(x, y)$ 服从数学期望为 0、方差为 $\sigma^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^H$ 的高斯分布。其概率密度函数可表示为:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^H}} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^H}\right] \quad (1)$$

增量绝对值的数学期望存在如下关系:

$$E(|F_H(x + \Delta x, y + \Delta y) - F_H(x, y)|) \propto (\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2})^H \quad (2)$$

选取正比系数 K ,并两边取常用对数可得:

$$\log[E(|F_H(x + \Delta x, y + \Delta y) - F_H(x, y)|)] = H \log(\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}) + \log K \quad (3)$$

考虑到研究的具体对象为工件车削中的灰度图,像素点的灰度换算值 $I_H(x, y)$ 即为分数布朗函数 $F_H(x, y)$ 。将 $I_H(x, y)$ 代入上式,即可求解灰度图的 Hurst 指数 H ,具体的方法是:在坐标系中绘制 10 组点 $(1/2 \log(\Delta x^2 + \Delta y^2), \log[E(|I_H(x + \Delta x, y + \Delta y) - I_H(x, y)|)])$,采用最小二乘法线性拟合这 10 个点,拟合的斜率即为 Hurst 指数 H 。

鉴于由分型布朗函数构造的是一个自仿射分形,为此,在借鉴自相似分形覆盖法时,必须充分考虑自相似分形和自仿射分形间的以下两点差异:

(1) 不能如同在覆盖自相似分形时采用边长相等的形或体进行覆盖,在覆盖自仿射分形时,必须换之以长方形、体等不等边形体进行覆盖。

(2) 覆盖自相似分形时,对于 1~2 维分形曲线,采用 2 维形进行覆盖;覆盖 2~3 维分形体时,采用 3 维体覆盖,以此类推,覆盖 $n-1 \sim n$ 维分形,应采用 n 维体进行覆盖。

本文探讨的是一个具有普适特征的 $n-1 \sim n$ 维自仿射分形,测量自仿射分形的维数前,需构建一个标准的用于覆盖自仿射分形的量测码尺,即 n 维体。选取 n 个区间 $[P_i, Q_i], i = 1, 2, 3, \dots, n$, 其区间长度为:

$$L_i = Q_i - P_i = ux_i \quad (4)$$

其中, x_i 是坐标的参数因子。当 i 在 $1, 2, 3, \dots, n$ 中取不同值时, L_i 中至少有一个与其他值不相等。

对上述 n 个区间 $[P_i, Q_i]$ 进行叉乘运算,在欧式空间中构建一个不等边的 n 维体 A , 即

$$A = [P_1, Q_1] \times [P_2, Q_2] \times \Lambda \times [P_i, Q_i] \times \Lambda \times [P_n, Q_n] \quad (5)$$

用构建好的 n 维体 A 覆盖 $n-1 \sim n$ 维自仿射分形,覆盖它所需的 n 维体 A 的总数为:

$$N = \frac{\Delta F_H(L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_{n-1})}{L_n} \times \prod_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{L_i} \quad (6)$$

将式(4)代入式(6)可得:

$$N = \frac{\Delta F_H[u(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1})]}{ux_n} \times \prod_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{ux_i} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{u^H \Delta F_H(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1})}{ux_n} \times \prod_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{ux_i} \\ &= \left[\frac{\Delta F_H(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1})}{x_n} \times \prod_{i=1}^{n-1} \frac{T_i}{x_i} \right] u^{H-n} \propto u^{H-n} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{其中, } \Delta F_H[u(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1})] = u^H \Delta F_H(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n-1}) \quad (9)$$

依据分形定义可知:

$$N \propto u^{-D} \quad (10)$$

比较式(9)与式(10)可得:

$$D = n - H \quad (11)$$

考虑到研究的灰度曲面处于 3 维欧氏空间中,故 n 取 3,代入式(11)可得,Hurst 指数和自仿射维数间存在如下关系:

$$D = 3 - H \quad (12)$$

由式(3)求解 Hurst 指数 H ,而后代入式(12),即可求得描述工件表面粗糙度的灰度图像自仿射维数 D 。

2 灰度图像自仿射维数理论在工件表面粗糙度在线检测中的应用

为检验在线检测技术及所依据理论方法的正确性,并演示在线检测技术的实际操作方法,本文展示了一个工件粗糙度在线检测案例,即:基于所提方法,采用高速摄像机拍摄车削过程中的工件表面,依据获取的实时表面图片,计算灰度图像自仿射维数,实现在线检测评估工件粗糙度的目的。

2.1 在线检测设备与参数选取

本试验采用 NAC 公司生产的 Memrecam HX-3E 高速摄像机(见图 1),相机最高拍摄速度可达到 220000 帧/秒,满幅分辨率 2560×1920 下最高速度可达 2000 帧/秒,快门速度最快可达到 $1.1 \mu s$,存储卡容量为 32G。试验中,考虑到工件旋转速度设定为 180 转/分,转速并不大,在保证能清晰拍摄工件旋转中车削纹理刻痕的前提下,尽可能选择较小的拍摄帧率、较高的像素分辨率,较大拍摄时长。因此,本文选取拍摄帧率 2000 帧/秒,照片分辨率 1024×640 。已有研究显示^[14],传统的停机检测工件质量方法

中,在一定范围内,背吃刀量对粗糙度有影响,但影响不太显著。为了测定本文所提在线检测方法的有效性和敏感度,文中特选取背吃刀量作为研究参数,分别为 0.5mm 和 1mm。工件进给速度设定为 30mm/min。

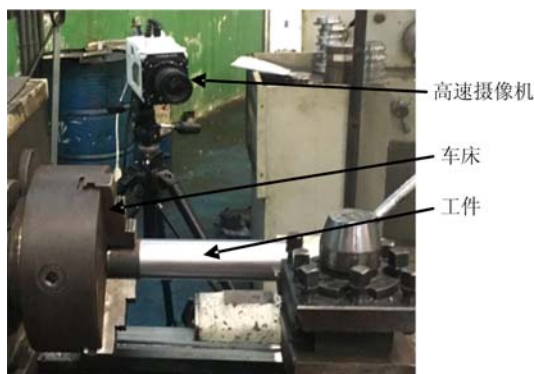


图 1 高速摄像机拍摄工件车削过程试验图

Fig. 1 Experiment on turning process of workpiece shot by high speed camera

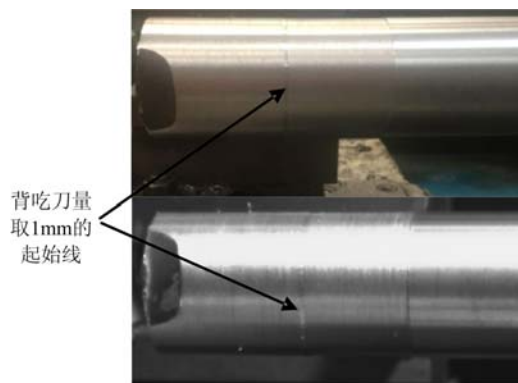


图 2 数码相机拍摄的真彩图和高速相机拍摄的灰度图

Fig. 2 True color image shot by digital camera and gray image shot by high speed camera

2.2 在线检测工件车削时粗糙度的操作方法

本文选择铸铁作为车削原材料,铸铁表面有一层灰黑色的氧化膜,为避免其初始颜色对后期灰度图片数据处理造成负面影响,先将氧化膜车削去除,直至工件表面光洁无杂质。获得公称直径 54.45mm 的圆柱体工件。架设高速摄像机,调整其高度,使摄像机视线垂直拍摄工件测表面,在低光条件下,调焦至图像清晰,设置拍摄帧率为 2000 帧/秒,调试拍摄范围,保证图像最佳清晰度。设置好车床转速和进给速度,背吃刀量 0.5mm,启动车床,工件开始旋转,当转速达到稳定的 180r/min 后,启动高速摄像机开始拍摄,拍摄至满存储容量 32GB 后停机。为获得更清晰的工件表面彩色静态图片,试验中用数码相机拍摄了车床停机后的工件表面照片(见图 2)。为避免车削温度对随后试验的影响,前次试验结束后,停机半小时以上,等待工件冷却至常温。将背吃刀量增大至 1mm,在同一根试验工件上开始车削,与上次试验不同的是,车削工作开始时,立即同步启动高速摄像机开始拍摄,这是为了测试描述工件质量的参数(图像自仿射维数)对工件表面形貌变化的敏感度。

为探讨车削过程中表面形貌变化情况,拍摄的视频文件被导出成灰度图片(见图 2)。由于工件以 180r/min 的速度在旋转,摄像机以 2000 帧/秒的速度拍到的不是同一个侧面,研究的对象没有可比性,为此,为了研究对象具有可比性,从导出的 4 万张图片中,每间隔 4s 提取一组图片,这样摄像机每次拍摄到的是工件的同一个侧面。同时考虑到试验存在偶然误差,每一组图片包含 3 张灰度图,提取的时刻分别是 t 、 $t+0.002$ 、 $t+0.004$ ($t=0s, 4s, 8s, 12s, 16s, 20s$),总共提取了 18 张图片。本次试验选取了 0.5mm 和 1mm 两种背吃刀量,抽取的图片总计 36 张,图 3 给出了当背吃刀量分别取 0.5mm 和 1mm 时 t 时刻的工件表面灰度图片。

在高帧率的高速拍摄条件下,试验中必须用卤钨灯对工件表面进行补光,但强光照在工件表面存在反光现象。为避免反光对试验结果带来的负面影响,在处理数据时,我们选取下半个侧面作为研究对象。这一方法不会影响工件各个面的检测工作,因为工件在旋转,同时高速摄像机间隔 0.0005s 拍摄一张照片,如果需要研究工件不同侧面或部位的车削质量,只需要抽取不同时刻的图片即可。为此,我们以抽取图片时刻车削面的最右端线作为右基准线、圆柱体工件最下端作为底部基准线,在侧面灰度图中反向截取 46.6×39.9 mm 区域的矩形图片(如图 3(a)(c)),以 jpg 格式保存图片(如图 3(b)(d))以备分析处理。

2.3 在线检测试验分析及与已有研究结论的对比研究

基于文中提出的灰度图像自仿射维数计算理论,采用 Matlab2015(一种高级技术计算语言),文中编制了工件表面灰度图像自仿射维数计算程序,将处理好的 36 个图像输入计算程序,计算对应维数(见

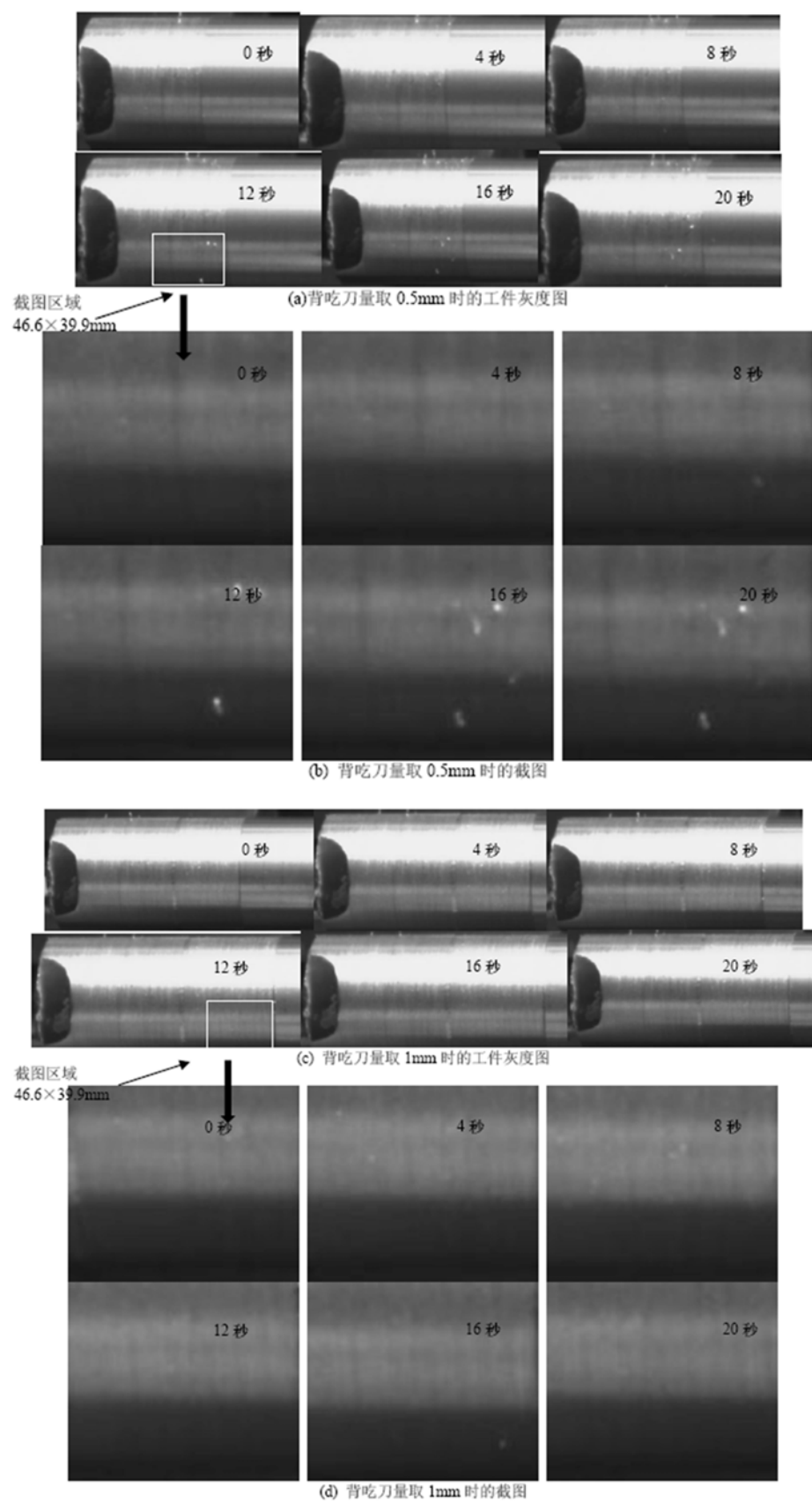


图3 背吃刀量取 0.5mm、1mm 时工件灰度图和对应截图

Fig. 3 Gray image and corresponding intercepted image of workpiece with the back cutting depth of 0.5mm、1mm

表 1)。基于灰度图像自仿射维数统计表,我们绘制了当背吃刀量分别取 0.5mm、1mm 时维数随时间变化的关系曲线图,并给出了灰度图像自仿射维数变化的趋势线(见图 4)。在图 4 中,三角形点表示背吃刀量取 1mm 时的灰度图像自仿射维数,圆点表示背吃刀量取 0.5mm 时的对应值;实线表示背吃刀量取 1mm 时的灰度图像自仿射维数的趋势线,虚线指背吃刀量取 0.5mm 时对应值的趋势线。分析表 1 与图 4 可得:

表 1 灰度图像自仿射维数
Tab. 1 Self-affine dimension of gray image

时间/s	背吃刀量 0.5mm 时的维数	背吃刀量 1mm 时的维数
0.000	2.058	2.117
0.002	2.079	2.12
0.004	2.086	2.136
4.000	2.053	2.106
4.002	2.069	2.105
4.004	2.076	2.117
8.000	2.056	2.114
8.002	2.082	2.102
8.004	2.063	2.11
12.000	2.075	2.109
12.002	2.07	2.118
12.004	2.06	2.115
16.000	2.059	2.123
16.002	2.076	2.101
16.004	2.053	2.114
20.000	2.053	2.097
20.002	2.079	2.102
20.004	2.051	2.108

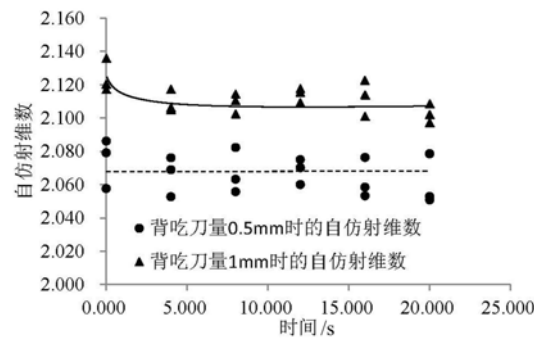


图 4 工件在车削过程中灰度图像自仿射维数的变化规律
Fig. 4 Changing rule on gray image self-affine dimension of workpiece being turning

(1) 验证图像自仿射维数理论

从图4与自仿射维数统计表1可以看出,在所有选取的工件表面图片中,其计算的自仿射维数处在区间 $[2.051, 2.136]$ 内,维数相对较小,且在所有自仿射维数中,最大值也不超过2.136。这表明,无论背吃刀量取0.5mm还是1mm,所有车削工件表面粗糙度较小,相对比较平整。从拍摄的车削完工后的工件表面照片也可以看出,整个工件表面除了车削纹理和切痕外,不存在额外的凹凸不平的形貌特征(见图2)。这表明,当工件表面粗糙度较小时,灰度图像自仿射维数也较小,反之亦然,这与分形维数的定义正好吻合,即:表面越粗糙,则维数越大。因而,工件表面灰度图像维数能正确揭示工件表面的粗糙特征,是一种正确可行的自仿射分形维数。同时,采用上述理论,基于高速摄像技术,能实时给出不同时刻的灰度图像维数变化,或者说不同时刻工件表面粗糙度变化,实现在线检测工件表面粗糙度的目的。这表明,本文所提方法是一种可行的实时检测工件表面粗糙度的新方法,避免了传统方法为检测工件质量需停车、装卸工件等流程而导致的生产效率低下,同时,新方法为降低产品次品率打下了坚实的技术基础。

(2) 验证自仿射维数对工件车削状态变化的反应敏感度

当背吃刀量取1mm时,从自仿射维数图(见图4)中趋势线可以看出,与其他时刻相比,0s相邻(0.000s、0.002s、0.004s)时刻的自仿射维数相对较大,过了这个时刻,维数持续下降,然后几乎保持定值。与此不同的是,当背吃刀量取0.5mm时,整个维数几乎一直保持不变。这是因为:为了检测自仿射维数对工件车削状态变化的反应敏感度,试验中,当背吃刀量取0.5mm时,车削进行一段时间直至过程平稳后开始拍摄;而当背吃刀量取1mm时,车削与拍摄同时开始。车削刚开始时,工件旋转速度由0增加至180r/min,这是一个由慢到快不断变化的过程,刀尖与工件间的车削力也随着工件转速变化而不断变化,车削力的改变导致了工件表面切痕深浅不一,纹理粗细不均,体现在量化参数上则是自仿射维数较大。而0.5mm深度的车削拍摄是转速达到180r/min的平稳状态后开始的,因而不存在上述现象。上述现象表明,灰度图像自仿射维数对表面车削状态变化反应敏感,能很好地在线检测工件加工过程中的粗糙度变化。

(3) 背吃刀量变化对工件表面粗糙度影响

在图4中显示,相比背吃刀量选取0.5mm时的自仿射维数,背吃刀量选取1mm时工件表面维数更大,这是因为,背吃刀量越深,车刀在工件表面的车削力更大,切屑与刀具前刀面挤压严重,材料容易发生粘结,工件表面粗糙度随之增加,因而测定的自仿射维数较大。这与传统方法采用停机测定表面粗糙度所得结论是一致的,即:在一定条件下,随着背吃刀量加深,工件表面粗糙度增加。与传统研究结论对比分析可知,本文所提实时在线检测工件粗糙度的技术是正确可行的。

总之,计算所得工件表面灰度图像自仿射维数较小,与动静态图像揭示的工件表面粗糙度不大相符合;工件初始车削过程的不平稳导致自仿射维数的增加,以及自仿射维数随着背吃刀量增加而增大,与传统停车测试的结论一致。上述的一致与相符充分表明,本文所提的工件质量在线检测方法是正确可行的。相对传统检测技术,本技术可做到实时在线检测工件粗糙度,因而有其优势。

3 结论

本文基于分形几何学、机械学和图像学等多交叉学科理论,提出了灰度图像自仿射维数计算方法。利用高速摄像机拍摄铸铁车削加工过程,探讨车削过程中工件表面形貌变化规律,提出了工件粗糙度的在线检测新技术,为提升工件加工效率、顺利实施全自动化生产奠定了技术基础,本文主要研究结论有:

(1) 提出了一种用于描述车削过程中工件表面粗糙度的灰度图像自仿射维数计算方法。

(2) 相机拍摄的静态照片与高速摄像机记录的视频资料揭示,工件车削过程中的表面存在纹理和一些刻痕,但总体上表面粗糙度不大,同时计算的灰度图像自仿射维数较小,这正好符合分形维数定义,即:表面越粗糙则分形维数越大。进而表明灰度图像自仿射维数能有效量化工件表面粗糙度特征。另外,基于本文所提灰度图像维数理论,结合高速摄像技术,能有效实现工件粗糙度在线检测的目的。

(3) 试验中设定了灰度图像自仿射维数对工件车削过程中状态变化的敏感度测试程序。当背吃刀

量取 1mm 时,车削与拍摄同步进行,摄像机记录了工件转速由 0 增大至 180r/min 这段从不稳定到稳定的车削过程,依据灰度图像计算出的灰度图像自仿射维数也出现了由大变小直至保持定值的变化规律。这表明,灰度图像自仿射维数对工件车削过程中的变化反应敏感,依据上述两参数实施在线检测工件粗糙度是行之有效的。

(4) 背吃刀量加深导致工件车削过程中描述表面粗糙度的图像自仿射维数增加。这与传统停车检测工件车削后的质量所得结论“一定条件下背吃刀量增加引发工件表面粗糙度增大”是一致的。这些也表明,本文所提的在线检测方法是理论上正确、工程上可行的新技术。相对传统检测技术,本文所提技术能实时在线检测工件粗糙度,在技术上有其优势。

参考文献:

- [1] 周凌青,许胜,孙姚飞,等.薄壁件加工表面粗糙度建模与主动监控技术[J].精密制造与自动化,2016(3):22—25 (ZHOU Lingqing, XU Sheng, SUN Yaofei, et al. Modeling and monitoring on surface roughness of thin-wall workpiece during manufacturing[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2016(3):22—25 (in Chinese))
- [2] 陈爱弟,王信义.零件加工质量(尺寸和表面粗糙度)在线检测技术研究[J].中国工程科学,2000,2(12):73—77 (CHEN Aidi, WANG Xinyi. Study on online testing of workpiece quality(size and surface roughness) [J]. Engineering Sciences, 2000, 2(12):73—77 (in Chinese))
- [3] 肖维灵,陈海波,殷琰.表面粗糙度对 Glidcop 和 Q345 低周疲劳寿命影响的试验研究[J].实验力学,2014,29(4):417—425 (XIAO Weiling, CHEN Haibo, YIN Yan. Experimental study of surface roughness effect on low cycle fatigue life of Glidcop and Q345 [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4):417—425 (in Chinese))
- [4] 李惠芬,蒋向前,李柱.三维表面形貌的功能评定方法[J].宇航计测技术,2001,21(6):19—26 (LI Huifen, JIANG Xiangqian, LI Zhu. Functional evaluation methods on the 3D surface topography[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2001, 21(6):19—26 (in Chinese))
- [5] 崔长彩,蒋向前,李小改,等. ISO5436-2 的表面形貌评定基准[J].光学精密工程,2009,17(5):1063—1071 (CUI Changcai, JIANG Xiangqian, LI Xiaogai, et al. Assessment mean lines of surface texture based on ISO5436-2[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5):1063—1071 (in Chinese))
- [6] Grzesik W, Brol S. Wavelet and fractal approach to surface roughness characterization after finish turning of different workpiece materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 209(5):2522—2531.
- [7] Clarke K C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method[J]. Computers and Geosciences, 1986, 12(5):713—722.
- [8] Xie H P, Wang J A. Direct fractal measurement of fracture surfaces[J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 1999, 36(20):3073—3084.
- [9] Zhou H W, Xie H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock [J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5): 751—762.
- [10] 张亚衡,周宏伟,谢和平.粗糙表面分形维数估算的改进立方体覆盖法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3192—3196 (ZHANG Yaheng, ZHOU Hongwei, XIE Heping. Improved cubic covering method for fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3192—3196 (in Chinese))
- [11] Li Y X, Gao M Z. Study on IFD calculated theory and nature of true color image[J]. Surface Review and Letters, 2012, 19(3):1250031—1250043.
- [12] Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes[J]. IEEE PAMI, 1984, 6(6):661—674.
- [13] Prasad B S. Experimental investigation to predict the condition of cutting tool by surface texture analysis of images of machined surfaces based on amplitude parameters[J]. International Journal of Machining & Machinability of Materials, 2008, 4(2):217—236.
- [14] 王志强,宫虎,房丰洲.长度分形维数在微铣刀磨损状态识别中的应用[J].振动、测试与诊断,2016,36(3):592—598 (WANG Zhiqiang, GONG Hu, FANG Fengzhou. Recognition of wear condition of micro milling tool based on length fractal dimension [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3):592—598 (in Chinese))

Chinese))

- [15] Peng R D, Yang Y C, Ju Y, et al. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images[J]. Science Bulletin, 2011, 56(31):3346—3357.
- [16] Mandelbrot B B, Van Ness J W. Fractional brownian motions, fractional noises and applications[J]. SIAM Review, 1968, 10:422—437.

Experimental study on online detection of workpiece roughness

LI Ye-xue¹, ZHANG Xue-lin², XU Fu-wei¹, LI Chang-jiang¹

(1. School of materials, Hubei University of Science and arts, Xiangyang 410053, Hubei, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract: Adopting interdisciplinary theory of fractal geometry and graphics and iconography, based on fractal Brown function, a new method for self affine dimension calculation of gray-scale image is proposed in this paper for describing the surface roughness of workpiece. On the basis of above theory, the real time process of workpiece turning was recorded by high-speed video camera; the self-affine dimension of workpiece gray-scale image was calculated; the variation of workpiece surface roughness at different time was evaluated; and then, a new technology to on-line detect workpiece surface roughness was proposed. Results show that (1) the images reveal that there are clearly visible cut marks and textures on workpiece surface, but the roughness is not very obvious. At the same time, the self affine dimension of corresponding gray image is smaller, which is consistent with the definition of dimension describing surface roughness. Therefore, the self-affine dimension of gray image can well describe the roughness characteristics of workpiece surface. (2) The self-affine dimension of gray-scale image is larger in the initial turning unstable state, and dimension increases with the increase of knife feeding amount, which is consistent with those obtained by traditional detection techniques. Above results show that the proposed theory of calculating the self-affine dimension of gray image is correct, and the on-line detection technique based on the theory is also practical and feasible.

Keywords: roughness; gray image self-affine dimension; on-line detection; turning; high-speed video camera