

DOI: 10.7652/xjtuxb201904020

高阶高斯滤波和 Radon 变换结合的缸体特征提取

戴嘉程¹, 曾文涵², 杨文军¹, 卢文龙^{1,3}, 刘晓军¹, 秦红玲⁴

(1. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室, 430074, 武汉; 2. 英国哈德斯菲尔德大学 EPSRC 国家未来计量联盟, HD1 3DH, 英国哈德斯菲尔德; 3. 深圳华中科技大学研究院, 518061, 广东深圳; 4. 三峡大学水电机设备设计与维护湖北省重点实验室, 443002, 湖北宜昌)

摘要: 针对缸体表面特征以沟槽为主、方向性显著的特点,提出了使用高阶高斯回归滤波预处理与 Radon 变换相结合对表面的沟槽特征进行提取的方法。高阶高斯回归滤波抑制了边界效应,使得表面数据能被全部用于分析,提高了数据的使用率,同时减轻了异常值对滤波结果的影响,防止了沟槽形状带来的极值对滤波中线提取的干扰。在 Radon 变换过程中,为了防止沟槽密集处由于特征方向性减弱造成的特征提取困难,将沟槽特征整体的提取简化为对沟槽中心线的提取。考虑到沟槽底部极小值点分布与中心线之间的强相关性,使用深沟槽底部极小值点拟合确定中心线的位置。浅沟槽与轻微划痕也会留下极小值点,对深沟槽极小值点的提取造成干扰,因此引入深度阈值将两者区分。对样本分析后,得到沟槽的主要角度为 19.5°、91.1°、165.6°。表面沟槽整体缺陷率为 35.95%,大于单条沟槽缺陷率。与从二维轮廓线提取的表面特征结果对比表明,采用该方法所提取的缸体三维表面特征不仅包含了更多的特征信息,而且特征提取结果对表面局部的极值具有更强的稳健性。

关键词: 高阶高斯回归滤波;Radon 变换;气缸表面风貌;三维表面轮廓

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0136-07

Cylinder Surface Feature Extraction Combining High-Order Gaussian Filter with Radon Transform

DAI Jiacheng¹, ZENG Wenhan², YANG Wenjun¹, LU Wenlong^{1,3}, LIU Xiaojun¹, QIN Hongling⁴

(1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. The EPSRC Future Metrology Hub, University of Huddersfield, Huddersfield, HD1 3DH, UK; 3. HUST-Shen Zhen Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518061, China; 4. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Aiming at multiple-groove-like features with obvious orientation on cylinder bore surface, a new method of groove feature extraction by combining high-order Gauss regression filter pre-processing with Radon transform is proposed. The high-order robust Gauss regression filter suppresses the boundary effect so the whole measured surface data can be applied to the analysis, and the interference of extremum caused by groove features on filtering mean surface extraction is prevented. In the Radon transform process, the whole extraction of groove features is simplified to the extraction of the centre line of grooves to avoid the difficulty of feature extraction caused by the weakening of feature orientation in dense grooves. Considering the

收稿日期: 2018-10-19。 作者简介: 戴嘉程(1995—),男,硕士生;秦红玲(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675167);深圳市科技创新基础研究资助项目(JCYJ2017030717134710)。
网络出版时间: 2019-01-03 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181228.1608.004.html>

strong correlation between the distribution of the minimum points at bottom of groove and the centre line, the centre line location is determined by fitting the minimum points at the bottom of the deep groove. Shallow grooves and slight scratches also leave minimal points to interfere with the extraction of minimal points in deep grooves, so the depth threshold is introduced to distinguish the interference. Experimental results show that the main angles of grooves are 19.5° , 91.1° and 165.6° ; the overall defect rate of the surface groove reaches 35.95%, larger than that of a single groove. Compared with the surface feature extracted from the two-dimensional contour line, the three-dimensional surface feature extracted with this method contains more feature information and has stronger robustness to the local extremum of the surface.

Keywords: high-order Gaussian regression filter; Radon transform; cylinder surface topography; 3D surface contour

气缸表面特征的形状与分布影响发动机效率、油耗、废气排放等性能,对于发动机整体性能有着至关重要的影响。气缸表面的沟槽是气缸表面重要的特征,主要功能是存储润滑油,为摩擦副提供润滑。准确提取表面的沟槽信息对于评定缸体的储油、润滑、磨损等功能特性具有重要意义^[1-2]。

长久以来,人们基于对二维表面轮廓线的分析,研究发动机零件表面性质。ISO 1302:2002 标准建立了一套基于二维表面轮廓线的参数标准,并且得到了广泛的应用。气缸表面经过珩磨处理后,表面特征具有明显的空间方向性,这些特征会直接影响气缸表面的功能。因此,基于二维轮廓线的参数体系不足以全面地描述表面形貌,还需要从表面的三维特征信息入手以解决相关问题^[3]。

随着表面测量技术的发展,可以精确地提取三维表面形貌。为了对表面特性做出适当的评价,需要能够从三维表面数据中准确提取特定表面特征的方法。

由于经珩磨处理的气缸内表面以沟槽等直线特征为主,所以 Radon 算法因对方向性特征敏感而被广泛使用。Beyerer 等针对珩磨表面沟槽特征提取时的缺陷检测问题,提出了 Radon 变换在沟槽信息提取中的可能^[4]。Anderberg 等使用了 Radon 变换作为珩磨沟槽的提取算法,并取得了一定的效果^[5-8]。

通过直接测量,得到的是包含了缸体形状信息的原始数据,若未去除缸体表面形状特征而直接对这些表面原始数据进行三维特征提取会存在诸多问题。例如,在表面沟槽特征分布杂乱的情况下,由于沟槽特征分布密集,会导致特征方向性下降,从而使 Radon 变换识别能力下降。对于图像角落里的被截断的沟槽特征,由于较为短小, Radon 变换的提取效

果也不甚理想。

本文给出了一种结合高阶高斯回归滤波和 Radon 变换的气缸表面三维特征提取算法,可以提取出较为清晰的珩磨表面沟槽特征。

1 缸体表面特征预处理

通过直接测量,得到的缸孔表面数据含有缸孔形状特征,需要分离出不同的表面成分才能进一步对表面特征进行分析。ISO 标准中最常用的高斯滤波算法定义如下

$$\int_{-\infty}^{\infty} (z(\xi) - w(x))^2 s(\xi - x) d\xi \Rightarrow \min w(x)$$

式中: x 表示表面上进行高斯滤波的一个具体位置,因为高斯滤波需要对全部数据与 x 位置处数值差的平方进行一次加权平均,所以需要引入 ξ 对全部表面数据进行一次遍历; $z(\xi)$ 表示高斯滤波过程中遍历的数据值; $w(x)$ 为需要求取的滤波中线在 x 位置的值; $s(\xi - x)$ 为在 x 位置滤波时 ξ 位置分配到的权重,使用高斯权函数分配。通过定义,可以解得滤波中线 $w(x)$ 如下

$$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(\xi) s(x - \xi) d\xi = z(x) \otimes s(x)$$

虽然理论上传统高斯滤波能够提取出较好的滤波中线,但在实际操作中,传统高斯滤波有着边界效应、对异常值敏感两个缺点。为了克服这两个缺点,本文采用稳健的高阶高斯回归滤波算法^[9]。

传统高斯滤波算法存在边界效应。当高斯滤波算法直接应用于表面计量时,会导致数据序列首尾一定长度内数据产生较大偏差。所以,传统高斯滤波算法结果需要将边界部分截除,降低了数据的使用率^[10]。

边界效应产生的原因是实际滤波中数据范围有

限。定义中高斯滤波的范围是 $-\infty \leq x \leq \infty$,但实际应用中滤波算法的范围是有限的,即 $0 \leq x \leq l$,滤波算子在处理数据边界时会部分超出表面数据区域外,从而产生了边界效应。为了抑制边界效应,需要对在数据区域边界的滤波算子进行归一化处理,改变滤波算子在边界处的权值分布,以消除边界效应的影响^[11]。

表面计量应用中,高斯滤波公式为^[10]

$$\int_0^l (z(\xi) - w(x))^2 s(\xi - x) d\xi \Rightarrow \min w(x)$$

对 $w(x)$ 求偏导,结果为

$$w(x) = \frac{\int_0^l z(\xi) s(\xi - x) d\xi}{\int_0^l s(\xi - x) d\xi} = z(x) \otimes s_{\text{MOD}}(x)$$

式中: $s_{\text{MOD}}(x) = s(x) / \int_0^{(i)} s(\xi - x) d\xi$ 为归一化的滤波算子。

图1所示为传统高斯滤波和高阶高斯滤波对同一表面轮廓滤波结果的对比。从中可以看出,传统高斯滤波结果存在严重的边界效应,通过算子修正,高斯回归有效抑制了滤波结果的边界效应。

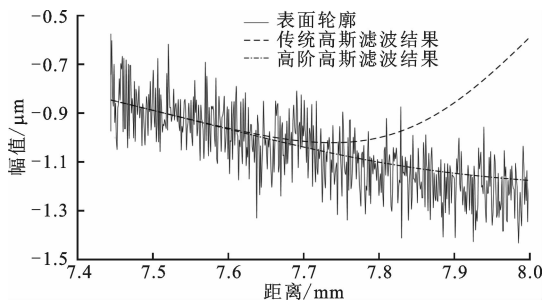


图1 传统高斯滤波的边界效应

传统高斯滤波的另一个缺点即为对异常值敏感,极个别异常值会显著影响滤波结果,导致算法稳健性不足。缸体表面存在的沟槽特征会拉低滤波中线,从而引起滤波结果在沟槽处的畸变,最终导致对于沟槽特征评定的误差^[12]。

为修正上述传统高斯滤波在处理缸体表面时存在的问题,本文采用稳健的滤波方法^[13-16],定义如下^[9]

$$\begin{aligned} & \int_0^l (z(\xi) - x(x) - \beta_1(x)(\xi - x) - \\ & \beta_2(x)(\xi - x)^2)^2 s(\xi - x) \delta(r) d\xi \Rightarrow \\ & \min w(x) \beta_1(x) \beta_2(x) \end{aligned}$$

式中: $\delta(r)$ 、 $\beta_1(x)$ 和 $\beta_2(x)$ 是二阶高斯滤波引入的系数。

$\delta(r)$ 是垂直方向上的权重,大小与 $r(i, \xi)$ 有关。

$r(i, \xi) = z(\xi) - w(\xi)$,是原始表面与该次拟合结果的差, i 表示拟合迭代的次数。通过该项,可以将拟合结果的偏差作为负反馈引入拟合公式。首次迭代运算时设 $\delta(r) = 1$,每次迭代该项的改变为^[10]

$$\delta(i+1, \xi) = \left(1 - \left(\frac{r(i, \xi)}{C_B}\right)^2\right)^2; \left|\frac{r(i, \xi)}{C_B}\right| < 1$$

式中: C_B 是基于中值统计的量,与提取结果和原表面的拟合程度有关, $C_B = 4.4 \times \text{Median}(|r(i, \xi)|)$ 。反复迭代至 $\delta(r)$ 不变时即可认为结果稳定。

高斯滤波的阶数对算法结果有直接的影响。图2所示为0阶与2阶高斯回归滤波的结果在边缘部分的对比。从中可以看出,0阶高斯滤波的结果受到整体形状的影响,在边界位置有一定的偏离,2阶高斯滤波有着更好的拟合效果。 n 阶数高斯滤波算法复杂度为 $O(n^2)$,随着阶数提升,求解滤波方程的算法复杂度以指数升高,但精度提升有限。在处理缸套表面时,阶数选择2已经有足够好的处理效果^[17]。

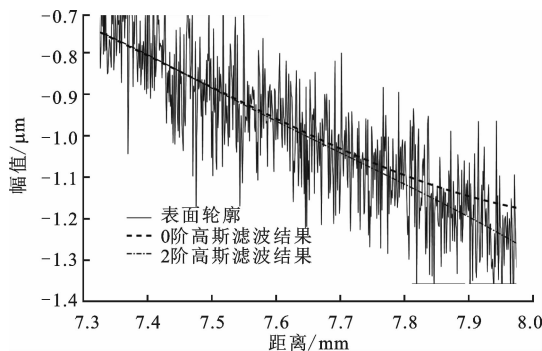


图2 高阶高斯滤波结果的对比

将上述方法推广到三维空间就可以得到三维的高阶高斯滤波算法^[9]。图3所示为原始的三维表面形貌数据,可以看出有着明显的孔形。图4是经过高阶高斯滤波后得到的表面形貌数据和传统高斯滤波处理得到的表面形貌数据,可以看出,高阶高斯滤波处理后缸孔形状已经被完全去除。为了更直观展现高阶高斯滤波与传统滤波算法的差异,本文从两种算法滤波结果的同一位置提取出表面二维轮廓线进行比对,结果如图5所示。从图5可以看出,传统高斯滤波算法在边界位置有着较大的偏离,而高阶高斯滤波结果对表面形状有着更好的拟合。

2 改进的表面特征提取算法

2.1 Radon 变换用于缸体表面沟槽信息的提取

Radon 变换的基本原理是,从空间不同角度对表面数据进行泛函积分,结合多个角度不同的积分结果从而对表面数据的特征进行分析。从原理可以

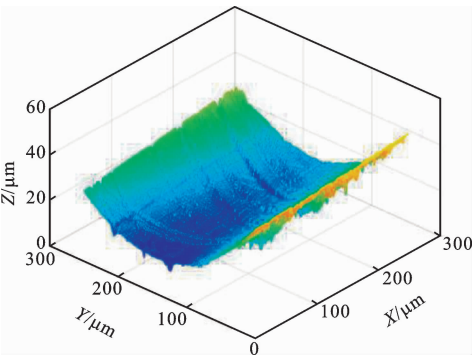
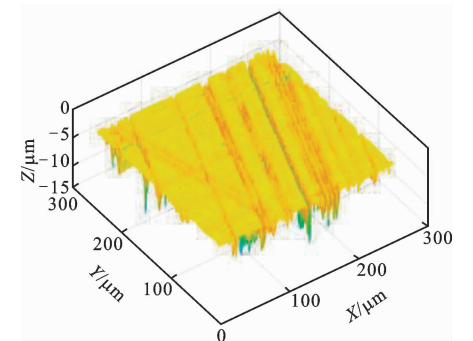
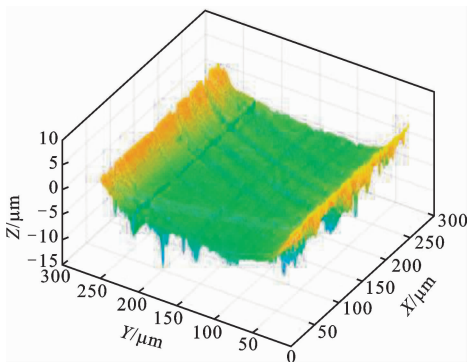


图 3 原始的三维表面形貌数据



(a) 2 阶高斯滤波



(b) 传统高斯滤波

图 4 2 阶高斯滤波与传统高斯滤波处理结果的对比

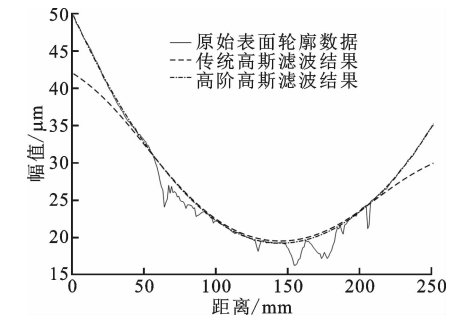


图 5 两种滤波方式截取二维轮廓线与原始轮廓线的对比

然而,经过珩磨加工后的表面除了有明显的较深沟槽外,还有很多平台上的较浅的沟槽特征和其他因素造成的轻微划痕,这些浅沟槽和轻微划痕虽然不明显,但在深沟槽的提取过程中会对结果造成干扰。其次,在深沟槽分布密集的情况下,沟槽特征的方向性也会减弱。所以,直接使用 Radon 变换提取沟槽特征的效果并不理想。

2.2 基于 Radon 变换的改进的表面沟槽信息提取

针对影响 Radon 变换效果的因素,需要对提取数据进行预处理,增强目标特征的方向性,以获得更好的提取结果。

为了增强沟槽密集处的方向性,采用简化目标特征的方法,选择沟槽中心线作为提取目标。沟槽中心线对比沟槽整体,简化了沟槽的宽度信息,增强了特征的方向性,有利于 Radon 变换准确提取。简化的宽度信息可以在之后的步骤中进行补充提取。

排除浅沟槽和轻微划痕对信息提取的干扰。选择以深度参数为标准将沟槽特征进行分类,去除没达到深度阈值的提取结果。选择深度阈值的参考标准是 JB/T 5082.7—2011^[20],以表面支撑率 5% 位置为基准向下 4 μm 作为深度阈值。在标准中,通过二维表面轮廓线与这条线的相交情况,判断样品内深沟槽数量,所以选择这条线作为排除浅沟槽和轻微划痕的深度阈值。但是,在实验过程中发现 4 μm 作为深度阈值过大,大部分沟槽深度不足 4 μm,强行套用标准会导致大量沟槽无法被识别。所以,对深度阈值做出修改,选择表面支撑率 5% 位置为基准向下 0.6 μm 作为深度阈值。深度阈值的主要目的是排除浅沟槽和轻微划痕的影响,所以深度阈值的选择有较大自由度,根据待测表面的加工精度,选择合适的深度即可。

通过深度阈值筛选保留下的提取结果中大部分就是需要的深沟槽的提取结果,除此之外还存在少量不成线形的独立点,这些点是表面孔缺陷或浅沟槽部分超过阈值造成的。这些不成线形的独立点会在之后的 Radon 变换提取中被忽略,对算法结果不会产生很大的影响。

假设沟槽横截面形状标准对称,则沟槽特征中心线位置与沟槽底部极小值点分布位置重合。实际中,沟槽底部极小值点位置分布与中心线位置有着较强的相关性,可以通过获得沟槽底部极小值点位置来拟合中心线位置。

图 6 所示为直接提取出的全图极小值点的位置。从图 6 可以看出,在浅沟槽和轻微划痕影响下,

看出,Radon 变换对表面的方向性特征十分敏感,适合对具有强烈方向性的珩磨沟槽特征的提取^[18-19]。

表面数据梯度跳变位置众多,产生了很多分布杂乱的极小值点。在众多分布杂乱的点中,深沟槽底部极小值点的位置并不明显。通过深度限制,去除大部分没达到阈值的极小值点,结果如图7所示。图中大部分来自于浅沟槽和轻微划痕的极小值点被去除,剩下的极小值点已经组成了较为明显的线条形状。

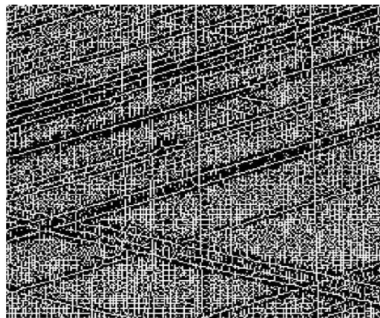


图6 未经深度筛选的极小值点图

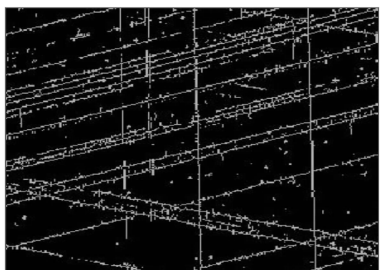


图7 经过深度筛选后的极小值点图

对图7的数据进行Radon变换,结果见图8。其中横坐标表示对数据泛函积分的角度,纵坐标表示直线距离中心点的距离 x' 。从直线垂线角度对直线特征积分时,积分结果为不同角度积分结果中的极大值,会在图中留下明显的亮点。图8中明显的亮点即表示沟槽中心线的位置信息。

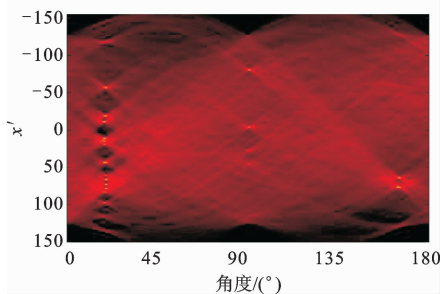


图8 对极小值点图变换得到的图像

对图8中亮点位置进行准确提取,将提取结果进行反向Radon变换,结果如图9所示。图9显示,主要沟槽特征已被提取,密集处沟槽中心线提取效果优良,角落较短的沟槽中心线也能提取,整体结果较好。

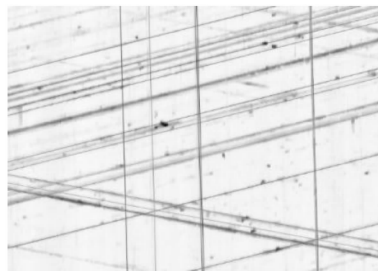


图9 沟槽中心线的提取结果

获得沟槽特征中心线位置信息后,要以此为依据提取沟槽宽度信息作为补充,最终结果如图10所示,图中灰白色区域即为表面深沟槽覆盖区域。

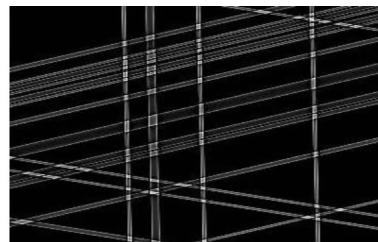


图10 沟槽区域探测结果

3 结果和分析

综合利用高阶高斯回归滤波的稳健性和Radon变换对特征方向性敏感的优点,将二者有机结合,可以对珩磨加工所得表面的沟槽特征进行清晰的提取。对上文中的样品进行分析,得到如表1所示提取结果。

通过Radon变换加补偿的宽度信息提取到的区域是沟槽理想状态下的区域面积。以零高度面为分界,区域内高出的部分作为沟槽片状覆盖缺陷,通过两者面积占比可以判断出沟槽完整程度。参考Dimkovski对片层覆盖缺陷的描述^[5],设置缺陷率参数 E ,定义为

$$E = S_b/S_g$$

式中: S_b 是指沟槽缺陷的面积; S_g 指沟槽的理想面积。这两个值可以通过结果中像素点的数量获得。 E 主要表现了沟槽的完整程度,相对完整的沟槽可以更好地贮存润滑油和碎屑,对表面润滑性质具有正面作用。结合提取结果,通过计算可知该样品整体沟槽缺陷率 $E=35.95\%$ 。可以看出,整体沟槽缺陷率远大于单个沟槽的缺陷率,说明沟槽之间存在较多的交叉部分,而且交叉部分为非缺陷成分。

为对比验证,选择相同样品表面随机一处轮廓线,通过该轮廓线分析,得到沟槽的几何特征。选择分析的位置如图11所示。

表 1 高阶高斯回归滤波与 Radon 变换结合算法的沟槽特征提取结果

珩磨角度 /(°)	沟槽宽度 / μm	沟槽深度 / μm	沟槽缺陷率 /%
19.5	4.94	-2.56	10.94
		-1.63	16.20
		-1.40	10.65
		-1.09	10.75
		-1.06	11.56
		-1.04	11.16
	7.41	-5.28	9.16
		-2.62	13.63
		-2.34	5.82
		-2.34	11.06
		-2.33	10.96
		-2.18	11.80
91.1	9.88	-1.69	9.34
		-1.22	9.01
		-2.55	21.92
	5.91	-2.10	15.00
		-1.72	10.53
		-1.01	10.65
165.6	7.89	-1.18	10.53
		-0.74	10.26
	4.70	-0.75	11.08
		-3.31	10.99
	7.05	-2.09	11.20
		-3.37	10.59
	9.40	-1.96	10.99



图 11 二维轮廓线选择的分析位置

分析得到二维轮廓线见图 12,选择 $-0.1\text{ }\mu\text{m}$ 处作为理想平面, $-0.7\text{ }\mu\text{m}$ 处作为判断深沟槽存在的临界阈值。判断存在沟槽的标准如图 13 所示,最低点需要小于临界阈值,宽度为两边与理想水平面的交点横坐标的差值。需要注意的是,除了标准形式的沟槽外,也存在如图 14 所示需要进行合并的深沟槽,合并后选择最深处的点作为沟槽的最低点计入深度。基于二维轮廓线的沟槽特征提取结果见表 2。

对比不同提取方法得到的数据可知,通过二维

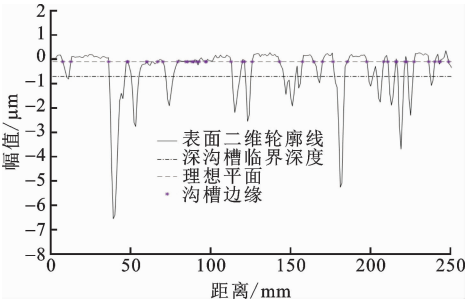


图 12 表面二维轮廓线

表 2 基于二维轮廓线的沟槽特征提取结果

沟槽宽度/ μm	沟槽深度/ μm
5.12	-0.71
11.62	-6.42
11.83	-2.65
9.35	-1.80
7.06	-2.08
4.86	-2.44
14.39	-1.81
5.47	-0.86
8.91	-5.13
10.61	-1.65
5.09	-1.78
5.41	-3.57
4.56	-2.19
3.82	-0.97

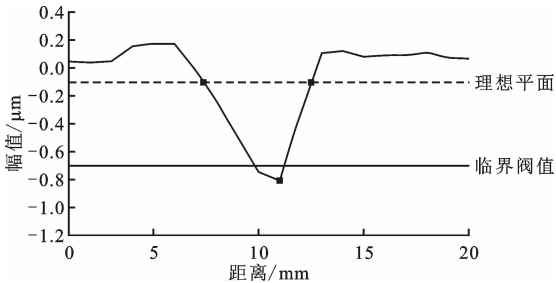


图 13 二维轮廓线沟槽定位

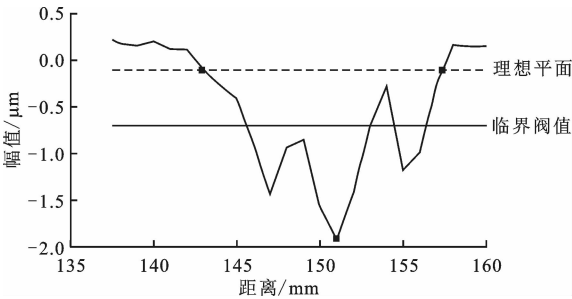


图 14 二维轮廓线上沟槽的合并

轮廓线无法得到珩磨沟槽三维空间中的方向信息,也无法得到沟槽缺陷对形状完整性的影响。在对沟

槽深度的测量中,依照通过 Radon 变换得到的中心线位置测量沟槽深度,可以降低局部极值的影响,25 条沟槽中深度超过 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的仅有 1 条。基于二维轮廓线的测量中,由于取样位置恰好经过第 2 条沟槽与孔缺陷重合的位置,使得结果中出现 2 条超过 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的深沟槽,该结果显然受到了局部极值的影响。

两种算法对沟槽宽度描述存在差异。在基于二维轮廓线的测量中,宽度定位是基于理想平面与二维轮廓线的交点位置,这使得宽度的测量结果会受到理想平面位置选择和沟槽局部极值的影响。Radon 变换方法中,宽度由整个沟槽特征宽度均值决定,所以两种算法得到的宽度信息有较大差距。表 1 中沟槽宽度最大为 $9.88\text{ }\mu\text{m}$,而表 2 中有 4 条沟槽宽度超过了 $10\text{ }\mu\text{m}$,这种差距是由沟槽边缘不整齐导致宽度不均匀造成的。所以,在描述沟槽整体对表面性能影响上,Radon 变换方法得到的沟槽信息更为准确;在描述特定沟槽具体的状态时,基于二维轮廓线的描述更为准确。

4 结 论

本文提出了一种高阶高斯回归滤波和 Radon 变换相结合的气缸表面特征提取算法:使用高阶高斯回归滤波对表面纹理数据进行预处理,然后结合 Radon 变换的特点将其运用在气缸珩磨表面沟槽特征的提取上。将本文算法对气缸表面沟槽特征提取结果与通过二维轮廓线提取的沟槽特征进行了对比,结果表明,通过本文算法提取的沟槽三维纹理特征具备更丰富的表面信息,而且特征提取结果对表面局部极值也更稳健,测量结果不会受到理想平面选择的影响。

从基于二维轮廓特征提取结果可以看出,部分中心线距离较近的沟槽存在可以合并的情况,较浅的沟槽退为非主要的特征被附近较深的大沟槽合并,但是在 Radon 变换提取中,则没有考虑到这一现象,因此在之后的工作中,关于沟槽合并、合并标准的研究值得进一步深入。

参考文献:

- [1] PEHNELT S, DOLLINGER P, OSTEN W, 等. 气缸工作表面形状的评定 [J]. 国外内燃机, 2014(4): 59-62.
- [2] 石言广,王永芳,刘必峰. 内燃机气缸套内孔研珩网纹的研究 [J]. 内燃机与配件, 2015(3): 36-37.
- SHI Yanguang, WANG Yongfang, LIU Bifeng. On

the internal combustion engine cylinder liner bore honing research textured [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2015(3): 36-37.

- [3] 李伯奎. 基于三维表面气缸套内孔平台珩磨网纹的技术要求与检测 [J]. 润滑与密封, 2008, 33(9): 51-54.
- LI Bokui. Specification and inspection for cylinder liners plateau honing cross hatch based on three-dimensional surface [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(9): 51-54.
- [4] BEYERER J, PUENTE LEÓN F. Detection of defects in groove textures of honed surfaces [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(3): 371-389.
- [5] DIMKOVSKI Z, ANDERBERG C, BENGTGÖRAN R, et al. Quantification of the cold worked material inside the deep honing grooves on cylinder liner surfaces and its effect on wear [J]. Wear, 2009, 267(12): 2235-2242.
- [6] BENGT-GÖRAN R, LARS B, DIMKOVSKI Z. On variation of surface topography and robust product performance [J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 1-7.
- [7] ANDERBERG C, CABANETTES F, DIMKOVSKI Z, et al. Cylinders liners and consequences of improved honing [EB/OL]. [2018-09-19]. http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2_239106/FULLTEXT02.pdf.
- [8] DIMKOVSKI Z, ANDERBERG C, OHLSSON R, et al. Characterisation of worn cylinder liner surfaces by segmentation of honing and wear scratches [J]. Wear, 2011, 271: 548-552.
- [9] ZENG W, JIANG X, SCOTT P J. Fast algorithm of the robust Gaussian regression filter for areal surface analysis [J]. Meas Sci Technol, 2010, 21: 9-17.
- [10] MURALIKRISHAN B, RAJA J. Computational surface and roundness metrology [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008: 67-92.
- [11] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. Analytic Chemistry, 1964, 36(8): 1637-1639.
- [12] 张梦倩. 离散曲面三维形状表征及滤波方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 43-45.
- [13] ANDERSON R. 现代稳健回归方法 [M]. 李丁, 译. 上海: 格致出版社, 2011: 30-44.
- [14] 温江涛,王玉田,孙洁娣. 基于稳健滤波技术的测量异常值处理的研究 [J]. 传感技术学报, 2002, 15(4): 374-376.

(下转第 149 页)