

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.01.05

刮板细度计非接触测量数据处理研究

金挺, 陈挺

(浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 对基于光谱共焦技术搭建的刮板细度计斜槽面深度测量装置的非接触测量数据进行处理算法研究。引入高斯滤波对整段测量数据进行滤波分析, 再分左上平面、右上平面、斜槽底面三段进行高斯滤波, 分离三个测量面的表面粗糙度信号及波纹度信号, 解算出粗糙度值。对于高斯滤波中线, 利用最小二乘法进行拟合, 结果表明左右上平面的直线倾斜度一致, 可拟合为一条直线。以再次拟合的直线为基准线, 求得斜槽面扫描点至基准线的深度值, 得到斜槽面深度标称值为 $90\ \mu\text{m}$ 的示值误差为 $0.27 \sim 1.97\ \mu\text{m}$ 。与电感测微仪接触测量所得数据进行比对, 结果表明本文提出的刮板细度计非接触测量数据处理方法准确可靠。

关键词: 刮板细度计; 光谱共焦; 非接触测量; 高斯滤波; 最小二乘法

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)01-0027-04

Research on Non-contact Measurement Data Processing of Fineness of Grind Gage

JIN Ting, CHEN Ting

(Zhejiang Institute of Metrology, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The processing algorithm of the non-contact measurement data of the fineness of grind gage based on the spectral confocal technology is studied. The Gaussian filter is used to filter and analyze the whole measurement data, and then the Gaussian filtering is carried out in three sections of upper left plane, upper right plane and bottom surface of the chute. The surface roughness signal and waviness signal of the three measuring surfaces are separated and the roughness value is calculated. The least square method is used for Gaussian filter median line. The filtering results show that the inclination of the straight lines on the left and right upper planes are consistent and can be fitted into one straight line. Taking the straight line fitted as the datum line, the depth from the scanning point of the chute surface to the datum line is obtained, and the indicating error of the nominal value of the chute surface depth of $90\ \mu\text{m}$ is $(0.27 \sim 1.97)\ \mu\text{m}$. Compared with the data obtained from the contact measurement of inductance micrometer, the results show that the data processing method for noncontact measurement is feasible and the measurement results are accurate and reliable.

Key words: fineness of grind gage; spectral confocal; non-contact measurement; Gaussian filtering; least square method

0 引言

刮板细度计是一种测量颗粒大小为微米量级的计量器具, 广泛应用于化工等领域^[1]。刮板细度计的检定工作依据 JJG 905-2010《刮板细度计检定规程规定》开展, 示值误差项目采用电感测微仪进行测量, 表面粗糙度采用表面粗糙度比较样块或粗糙度测量仪进行测量。

针对目前采用电感测微仪接触测量所存在的接触点尺寸较大导致定位不准确、测量时磨损接触表面等不足, 文献[2]提出了一种基于光谱共焦传感器的刮板细度计非接触测量方式^[2]。光谱共焦传感器是一种高准确度、非接触式新型亚微米级位移传感器^[3-6], 被广泛应用于超精密几何量^[7]、膜厚测量^[8-9]、表面结构扫描^[10-11]、表面粗糙度测量^[12]、航空发动机测量^[13]、圆度测量^[14]等领域, 已成为近年来研究的热点。

采用光谱共焦位移传感器进行非接触测量时, 需要对扫描得到的数据进行处理才能解算出检定项目的结果。

本文对刮板细度计非接触测量数据处理方法进行研究, 利用高斯滤波对数据进行处理分析, 并利用最小二乘法拟合, 同时得到刮板的示值误差及表面粗糙度两个检定项目的测量结果。将解算结果与电感测微仪的直接测量数据进行比对, 验证本文提出的数据处理算法的可行性和准确性。

1 高斯滤波原理

高斯滤波是国际 16610-21 标准及国内 GPS 体系中 GB/T18777 规定的表面粗糙度评定所用的滤波方法^[15-16]。其滤波原理为: 在对某一点数据进行滤波时, 利用高斯权函数对该点和该点前后一定宽度内的数据进行加权, 再将加权后的值进行累计, 即可得到

滤波后的数据。高斯滤波的权函数为

$$h(t) = \frac{1}{a\lambda_c} e^{-\pi(\frac{t}{a\lambda_c})^2} \quad (1)$$

式中: a 为常量; λ_c 为截止波长; t 为空间域变量。

高斯滤波中线 $w(x)$ 可由高斯权函数与原始轮廓数据 $y(x)$ 卷积得到

$$\begin{aligned} w(x) &= y(x) * h(x) \\ &= \int_{-\lambda_c}^{\lambda_c} h(x_t) y(x + x_t) dx_t \end{aligned} \quad (2)$$

设每段取样长度 l 内采样点数为 N , 则对公式(2)进行离散化处理可得

$$w(i) = \frac{1}{a \times N} \sum_{i_t=-N}^{i_t=N} e^{-\pi(\frac{i_t}{a \times N})^2} y(i + i_t) \quad (3)$$

求得高斯滤波中线 $w(i)$ 后, 对此中线进行最小二乘法拟合, 计算任意扫描点到拟合直线的距离即可得出刮板细度计的示值误差测量结果。利用原始轮廓信号 $y(i)$ 减去高斯滤波中线 $w(i)$ 后, 可得粗糙度信号 $r(i)$, 按照表面粗糙度常规计算方法, 即可得出刮板细度计刮板的粗糙度值。

2 实验结果

2.1 系统搭建

基于光谱共焦技术, 针对刮板细度计刮板的斜槽面搭建了非接触扫描测量装置。选用法国 STIL 公司的 CL 系列光谱共焦位移传感器, 其测量范围为 $0 \sim 400 \mu\text{m}$, 样品斜率 $\pm 28^\circ$, 准确度为 45 nm , 测量光点直径为 $5 \mu\text{m}$ 。运动平台选用美国 Aeroteck 高精度纳米级定位直线平台, 型号为 ANT130, 运动行程为 160 mm , 单方向重复性为 $\pm 0.025 \mu\text{m}$, 最小步进为 $0.01 \mu\text{m}$ 。上位机采用 LabVIEW 软件平台进行运动控制及数据处理。搭建的测量装置如图 1 所示。

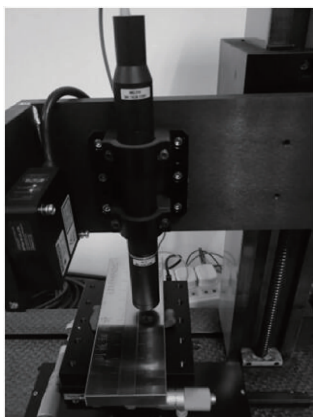


图 1 非接触扫描测量装置实物图

2.2 高斯滤波处理

将刮板细度计放置于五维调整架工作台表面, 并调整到合适位置, 使光谱共焦传感器测量光点落在深度值为 $90 \mu\text{m}$ 的刻线附近, 沿平行于刻线的方向行进扫描。扫描得到 5848 组幅值和横向位移数据。原始轮廓数据如图 2 所示。

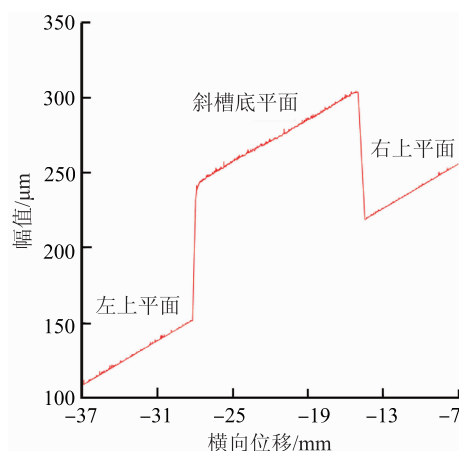


图 2 原始轮廓扫描结果

利用高斯滤波对此原始轮廓进行滤波处理, 拟分离出粗糙度信号。滤波结果如图 3 所示。

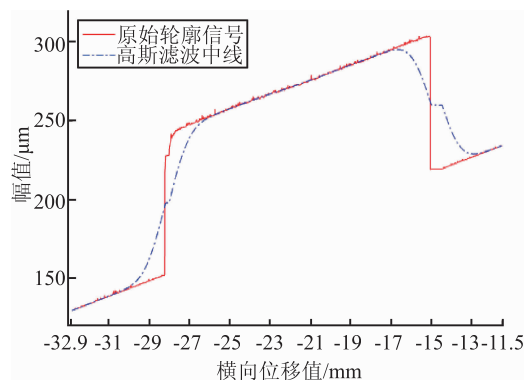


图 3 整段扫描数据高斯滤波后结果分析

由图 3 可知, 高斯滤波中线偏离实际轮廓较多, 表明常规高斯滤波不适用于阶跃陡峭的轮廓表面的处理^[17]。鉴于此, 对图 2 轮廓线中左上平面、斜槽底平面、右上平面数据分别进行高斯滤波处理。以右上平面为例, 高斯滤波处理结果如图 4 所示。处理后得到的左边上平面、右边上平面、斜槽底平面的表面粗糙度 R_a 值分别为 0.187, 0.141, 0.323, 符合规程对此项目的要求。

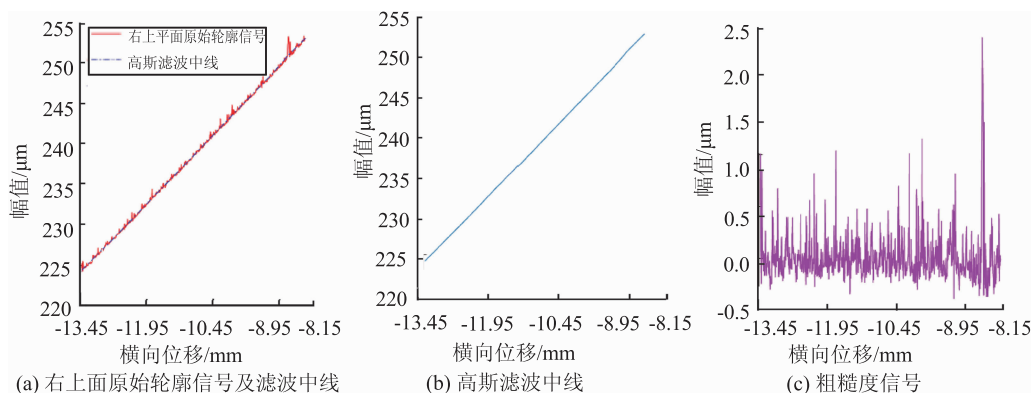


图4 右上平面扫描数据高斯滤波后结果分析

2.3 中线数据的进一步处理

将高斯滤波中线作为对刮板细度计表面结构轮廓的表征,采用最小二乘法^[18]进行进一步处理。设理想拟合直线为

$$y = kx + b \quad (4)$$

式中: k , b 分别为拟合直线的斜率和截距; x 为横向位移值; y 为幅值, 也为高度或者为深度值。

对三段高斯滤波中线进行最小二乘法拟合, 得到左上平面、右上平面、斜槽底平面的三条拟合直线分别为

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.004941x + 0.291643 \\ y_2 &= 0.004948x + 0.290567 \\ y_3 &= 0.004686x + 0.374362 \end{aligned} \quad (5)$$

由结果可见, 左上平面直线 y_1 、右上平面直线 y_2 的倾斜角度分别为 0.2831° , 0.2836° , 两条直线倾斜度相差 $1.8''$, 此差异可忽略不计。因此可以将两条直线拟合为同一条直线, 作为解算斜槽底面深度的基准线。拟合结果为

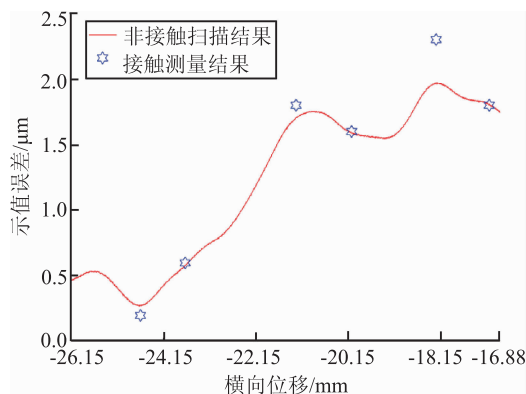
$$y_{\text{基准线}} = 0.004889x + 0.289942 \quad (6)$$

2.4 示值误差最终处理结果

按照规程要求, 将刮板的上表面作为基准平面, 解算斜槽底面的深度。以拟合的 $y_{\text{基准线}}$ 作为基准, 任意坐标点到直线的距离计算公式为

$$D_i = \frac{|kx_i - y_i + b|}{\sqrt{1 + k^2}} \quad (7)$$

式中: k , b 分别为基准直线的斜率和截距; D_i 为斜槽底面的深度值; (x_i, y_i) 为斜槽底面扫描点的坐标值。斜槽底面深度标称值为 $90 \mu\text{m}$ 的示值误差计算结果为 $0.27 \sim 1.97 \mu\text{m}$, 如图5所示。规程规定此项目检定的最大允许误差 (MPE) 为 $\pm 2.5 \mu\text{m}$, 测量结果符合规程要求, 且提供了斜槽深度的更多细节, 反映了此刻线处斜槽底面的深度变化情况。

图5 $90 \mu\text{m}$ 刻线处斜槽底的示值误差处理结果

应用 Mahr 公司型号为 M1240 的电感测微仪, 采用量程为 $\pm 200 \mu\text{m}$, 分辨力为 $0.01 \mu\text{m}$, MPE 为 $\pm 0.08 \mu\text{m}$ 的档位, 按照规程规定的检定方法, 在 $90 \mu\text{m}$ 刻线点测得相对位置附近几个离散点的示值误差结果分别为 $0.2, 0.6, 1.8, 1.6, 2.3, 1.8 \mu\text{m}$, 与利用本文提出的方法对刮板细度计非接触测量数据进行处理后的结果比对如表1所示。

表1 不同测量方法示值误差比对结果 μm

电感测微仪结果	非接触测量结果	相差
0.2	0.28	0.08
0.6	0.58	-0.02
1.8	1.70	-0.10
1.6	1.58	-0.02
2.3	1.97	-0.33
1.8	1.81	0.01

根据表1可知, 利用本文提出的方法对刮板细度计非接触测量数据进行处理后的结果与高准确度电感测微仪测得的结果差异很小, 可证明本文提出的数据处理方法准确可靠。

3 结论

针对刮板细度计深度测量的非接触扫描数据处理问题,使用高斯滤波方法进行分段滤波,解决深谷或者台阶的边界畸变问题,分离出粗糙度信号及表面波纹度信号。将刮板细度计左右平面的两条直线拟合为一条直线,作为深度测量的基准线,求得斜槽面扫描点至基准线的深度值,得到斜槽面深度标称值为 $90\text{ }\mu\text{m}$ 的示值误差为 $0.27\sim 1.97\text{ }\mu\text{m}$ 。与电感测微仪接触测量所得数据进行比对,验证了本文提出的刮板细度计非接触测量数据处理方法的可行性与准确性。未来将进一步开展刮板的平面度和横向直线度两个检定项目的数据处理方法研究。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 905 - 2010 刮板细度计检定规程[S]. 2010.
- [2] 陈挺, 卢歆, 吴春晖, 等. 刮板细度计示值误差非接触自动校准装置[J]. 计测技术, 2019, 39(5): 40 - 43.
- [3] 闫勇刚, 刘志浩, 朱小平, 等. 光谱共焦传感器校准方法对比分析[J]. 计量学报, 2019, 40(6A): 23 - 28.
- [4] 位恒政, 王为农, 任国营, 等. 光谱共焦传感器探测误差的研究[J]. 计量学报, 2017, 38(6A): 94 - 97.
- [5] 王津楠, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于白光 LED 的光谱共焦位移传感器[J]. 中国测试, 2017, 43(1): 69 - 73.
- [6] 陈挺, 周闻青, 卢歆, 等. 光谱共焦技术在精密几何量计量测试中的应用[J]. 计测技术, 2015, 35(S1): 4 - 6.
- [7] 汪钦臣, 方益民. 光谱共焦精密几何量测量台研制[J]. 中国测试, 2019, 45(11): 79 - 83.
- [8] Miks A, Nobak J, Novak P. Analysis of method for measuring thickness of plate-parallel plates and lenses using chromatic confocal sensor[J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3259 - 3264.
- [9] Zhou D W, Gambaryan R T, Stephan P. Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(2): 273 - 283.
- [10] 石钊铭. 基于线阵光谱共焦的舰载显控台 LED 软板涂胶微纳级三维测量[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(8): 146 - 150.
- [11] 杨锐, 云宇, 解滨, 等. 光谱共焦三维形貌仪用超大色散线性物镜组设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(5): 1 - 5.
- [12] 胡佳成, 崔廷, 王婵媛, 等. 燃气表气阀配合面表面粗糙度稳健高斯算法[J]. 计量学报, 2014, 35(5): 420 - 424.
- [13] 毕超, 刘洪光, 徐昌语, 等. 基于光谱共焦技术的叶尖间隙测量方案研究[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(2): 14 - 18.
- [14] 蓝河, 雷大江, 钱林弘, 等. 基于光谱共焦位移传感器的非接触式回转误差测量系统[J]. 制造技术与机床, 2017, (3): 141 - 145.
- [15] ISO 16610 - 21 Geometrical product specifications (GPS) - Filtration-Part21: Linear profile filters: Gaussian filters [S]. 2011.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18777 - 2009 产品几何技术规范 (GPS) 表面结构轮廓法相位修正滤波器的计量特性[S]. 2009.
- [17] 许景波, 聂家立, 王升, 等. 基于粗大误差估计的表面测量稳健滤波方法研究[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 391 - 395.
- [18] 谢张宇, 姜志华, 朱惠臣, 等. 基于三维点云螺纹中轴线的拟合方法研究[J]. 计量学报, 2020, 41(8): 918 - 925.

收稿日期: 2020 - 12 - 01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0206305); 浙江省市场监督管理局科研项目(20150216, 20180104)

作者简介



金挺(1973 -), 男, 浙江人, 高级工程师, 一级注册计量师, 二级考评员, 长期从事长度几何量计量方法及装置研究。



陈挺(1982 -), 男, 浙江人, 高级工程师, 工学硕士, 一级注册计量师, 二级考评员。长期从事几何量精密计量测试、光通信计量、虚拟仪器应用等研究, 已发表论文 10 余篇。