

激光扫描粗糙度测量仪的研制

龚育良*

摘要: 介绍激光扫描粗糙度测量仪的测量原理、结构及结果。本测量仪根据激光在工作表面的反射散射原理,应用激光扫描技术、数据采集、A/D转换和定标曲线的计算机拟合,整个测量过程在单板机控制下自动完成。测量粗糙度 R_a 的分辨率为 $0.001\mu\text{m}$,测量重复精度为 $0.006\mu\text{m}$ 。

关键词: 激光,扫描,粗糙度,测量

A Instrument on Surface Roughness Measurement with Laser Scanning

Gong Yuliang*

ABSTRACT: By employing the principle of laser reflecting scattering from the surface of the work piece and the laser scanning technique allied with computered data collection, A/D transition and calibration curve fitting, the instrument can measure the surface roughness automatically. The resolution and reproducibility of the roughness measurement are $0.001\mu\text{m}$ and $0.006\mu\text{m}$ respectively.

KEY WORDS: laser, scanning, roughness, measurement

表面粗糙度是对零件加工表面形貌所有微小间距和峰谷不平度的微观几何尺寸特征的综合评价。由于表面形貌特征强力地影响金属和非金属的表面性能,因此,它不仅在传统的摩擦、磨损和润滑领域中,而且在密封、流体动力学、接触力学、电和热的传导乃至表面电化性质等方面日益得到科学技术人员的关注。在现代化的连续生产,如20辊轧机上轧制极薄带、冷轧不锈钢带和高级铝质装饰材料等都存在表面质量的监控和保证问题,传统的触针法

1989-02-22 收稿

• 物理系 (Department of Physics)

和光学法无法解决这个问题。应用计算机技术和扫描技术的激光反射散射比法测量表面粗糙度能满足不接触、快速、连续和实时在线测量的要求，为此研制了LSA-1型激光扫描粗糙度测量仪。经本测量仪在北京第二量具厂，第二纺织机械厂等几个单位进行的测量试验来看，这种测量仪可对 $R > 0.22\mu\text{m}$ ($\nabla 9$ 以上)的工件加工表面进行不接触的快速测量。而且本测量仪依据的原理和采用的先进技术原则上可移植到在线测量上，当然尚有一些问题有待今后改进和解决。

1 激光散射测量表面粗糙度的原理和实验依据

当激光束以一定的入射角照射到经过研磨或轧制加工的金属表面时，除一部分被吸收外，大部分被反射和散射。如在反射方向放置一观察屏，屏上将出现反射光斑（核心亮

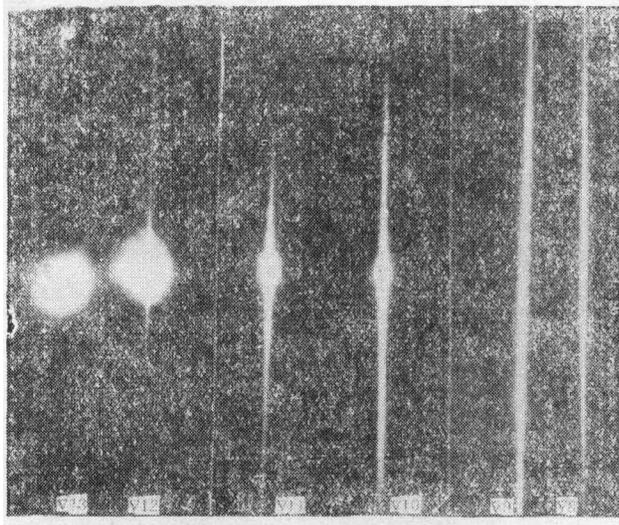


图1 不同粗糙度表面的图谱

Fig.1 Atlas for differential surface roughness

斑)，在它的两侧有许多小的光斑（散斑）形成的光带，反射光核和散射光带形成了与表面粗糙度有关的图谱，图1为不同粗糙度等级表面的相应图谱。由图看出，随着粗糙度级别的提高，反射光斑越来越强，而散射光带越来越弱，光带的宽度也随之变窄，反射光和散射光的比随粗糙度级别的提高而增大。

$\nabla 9$ 以上不同粗糙度表面图谱的差别是很大的，但 $\nabla 9$ 以下，镜面反射光点已经消失，只有形状类似的散射光带，图谱的差别已不明显，因此反射散射比法适于测量高粗糙度的工作表面。

根据上述原理，对反射散射比法测量表面粗糙度的各种测量条件和因素进行的较系统的实验和分析表明，虽然入射角小于某一临界角后，反射散射比 R 和粗糙度 R_a 不是单值关系。但在相当大的入射角范围内，尤其是 $R_a < 0.2\mu\text{m}$ 范围内， R_a 不但是 R 的单值函数，而且 R_a 随 R 变化的反应比较灵敏。因此，对于光滑表面，该法是一种简单可靠的测量表面粗糙度的方法。它对接收距离、光源功率、环境条件都无苛刻的要求^[1]，这就为研制相应测量装置提供了有力的实验依据。

2 仪器总体设计与结构

仪器总体结构如图 2 所示。激光束以 60° 入射角照射到被测表面上，反射形成的核心光斑和散射形成的光带分别被硅光电池 D_2 和 D_1 吸收后转换为电信号，经放大后送入 A/D 转换板，由 TP801B 控制器进行数据采集和 A/D 转换，最后由 TP-801B 进行数据处理并打印出测量结果。

(1) 光源与探测器。激光器为一般测量用的 $2 \sim 3\text{mW}$ He-Na 激光器。光电接收转换器 D_1

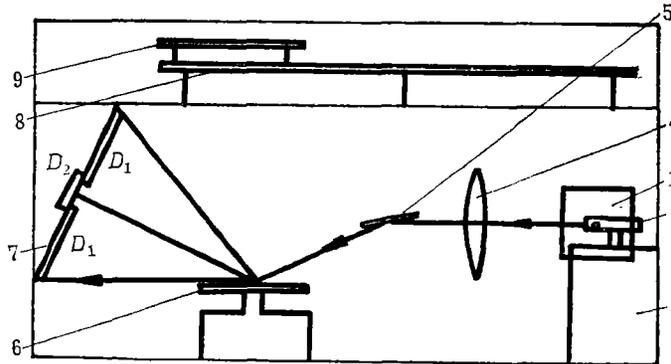


图 2 激光扫描表面粗糙度测量仪结构图

- 1 He-Na 激光器 2 二十四面旋转镜 3 直流马达 4 透镜 5 反射镜
6 样品平台 7 硅光电池 8 TP801B 单板机 9 A/D 转换和打印接口电路
10 单板机电源 11 变压器 12 马达电源

Fig.2 Schematic diagram of configuration for laser scanning roughness

和 D_2 分别由 18 块和 3 块性能相同的硅光电池并联而成，其中 D_2 的高度应大于反射光核的线度， D_1 高度要保持足够长，以保证吸收到足够的散射光能。

(2) 扫描系统。采用高惯量局部照明的旋转多面镜作为扫描器的偏转元件。如图 3 所示，激光束入射到多面镜上，当多面镜发生 $\Delta\theta$ 角位移时，反射光束发生 $2\Delta\theta$ 角位移。每当多面镜转过一个面，反射光完成一次扫描。若 N 为多面镜的面数， n 为马达每分钟转数，则扫描角为 $2\theta = 2(360/N)$ ，扫描频率 $\nu = nN/60$ 。将扫描的反射点置于透镜焦点上，透过透镜便得到一系列平行的扫描光束，扫描宽度为 $2X = 2f \tan \theta = 2f \tan (360/N)$ ，式中 f 为透镜

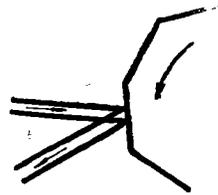


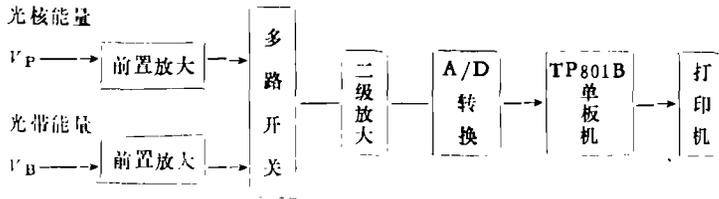
图 3 多面镜扫描

Fig.3 Polyhedron scanning

焦距。本仪器有二种工作方式：当多面镜不转时为定点测量方式；当多面镜旋转时为扫描测量方式，所以光电转换器 D_1 和 D_2 的宽度应大于扫描宽度。

(3) 数据处理系统。系统框图如下所示。

单板机接口电路由 3 部分组成：①小信号放大，多路开关；②A/D 转换采用高精度、高速 12 位芯片 A/D 574，12 条数据线直接通过 PIO A 口的 8 条和 B 口的高 4 位的 4 条线输入，



中断采集处理，经A/D转换后的数据须经过移位处理；③打印机接口电路。

3 定标问题

测量表面粗糙度除传统的触针方法外，还有光学方法、应用电磁现象的方法以及依赖于粗糙表面与所接触的流动气体或流动液体相互作用的方法。现在的国标是以触针法为依据制订的。实际上各种不同的测量方法得到的粗糙度之间是有差异的或者说不一致的。用斜截面法测得轮廓最大峰至谷的粗糙度和用触针法测试的结果比较，最大的不一致甚至达到100%。用物理光学法确定的粗糙度比触针测量仪测量的相应粗糙度普遍地大一倍。最近国际间的实践证明，甚至标准化实验室之间也能出现10%的差异^[2]。因此表面粗糙度测量仪的定标问题是一个比较复杂的理论和实际问题。用激光散射方法测量粗糙度的潜在力量很明显，测量速度十分高，它有可能实时检验加工小零件的表面粗糙度，可取代那些不可靠的离线的抽样检验方法。但正如上面指出的，此方法也存在一个定标和如何与国标相吻合的问题。

反射散射比法测定粗糙度 R_a 的绝对定标公式为

$$\frac{V_F}{V_B} = \frac{W + (1 - W) \int_0^{\alpha_1} f(\theta) d\theta / \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) d\theta}{(1 - W) \int_0^{\alpha_2} f(\theta) d\theta / \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) d\theta} \quad (4)$$

对于本仪器，入射角 $\alpha = 60^\circ$ ，接收距离 $d = 130\text{mm}$ ， $t_1 = 2\text{mm}$ ， $t_2 = 62\text{mm}$ ，激光波长 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$

$$W = \frac{\int_0^{\alpha_1} e^{-2(2h/Rz)^2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} h \cos 60\right) dh}{\int_0^{\alpha_2} e^{-2(2h/Rz)^2} dh}$$

$$= e^{-\left(\frac{t_1}{2\lambda} Rz\right)^2} = e^{-\left(\frac{5\pi}{2\lambda} Rz\right)^2}$$

$$\alpha_1 = \text{tg}^{-1} \frac{t_1}{d} = 0.0154 \quad \alpha_2 = \text{tg}^{-1} \frac{t_2}{d} = 0.445$$

$$\varphi_1 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f(\theta) d\theta / \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) d\theta = 0.4916$$

$$\varphi_2 = \int_0^{\alpha_1} f(\theta) d\theta / \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta) d\theta = 0.0190$$

所以反射散射比法绝对定标公式为：

$$\frac{V_P}{V_B} = \frac{e^{-\left(\frac{5\pi}{2\lambda} R_0\right)^2} + 0.01903[1 - e^{-\left(\frac{5\pi}{2\lambda} R_0\right)^2}]}{0.4961[1 - e^{-\left(\frac{5\pi}{2\lambda} R_0\right)^2}]}$$

用本仪器对标准样块测定其相应的 D_2/D_1 得到的定标曲线与上面公式算得的定标曲线变化趋势是相同的, 但 D_2/D_1 的变化范围以及 D_2/D_1 对 R_a 变化的敏感程度都没有原公式所表明的那样大。这是由于我们的 He-Na 激光器是多模的, 所以入射光束并非 TEM₀₀ 模, 接收器的转换性能不是理想线性的, 表面随机高度分布中的 h_{max} 和触针法制定的 R_a 、 R_z 之间也只是一种近似关系, 再加上光学法测得的粗糙度与触针法测得的粗糙度之间存在较大差异, 因此我们没有应用上面的绝对定标公式。为了与国标规定的粗糙度 R_a 相符合, 采用相对的定标法进行定标, 在本仪器的测量范围内 ($R_a < 0.22 \mu\text{m} \nabla 9$ 以上), 选择一组标准样块, 由中国计量科学研究院检测其粗糙度 R_z 和 R_a 测试结果通知书为 (C 字第 88069 号), 然后用本仪器测量相应的反射散射比 R 。从而得到相对定标曲线, 如图 4 所示。

4 测量与数据处理

(1) 反射散射比 $R = V_P/V_B$ 的测定。反射光核能量和散射光带能量分别被 D_2 和 D_1 硅光电池吸收后转换为电信号, 经前置放大后, 由 TP801B 控制连续采集 256 个 V_P 和 V_B 值, 再由打印机打出 V_P , V_B 和 $R = V_P/V_B$ 的平均值。

(2) 数据数理。根据测得的 R , 便可由定标曲线得到相应的粗糙度 R_a 值。为了应用计算机直接给出 R , 根据相对定标曲线, 应用最小二乘法原理进行四次多项式拟合, 即设

$$R = a_0 + a_1 R_a + a_2 R_a^2 + a_3 R_a^3 + a_4 R_a^4$$

根据定标曲线的 10 组 (R_a, R) 值, 应用汇编语言拟合程序在 TRS-80 微型机上拟合得多项式系数为:

	十进制	十六进制
a_0	0.41496	003C6A H
a_1	-0.16698	FF81AA H
a_2	0.01634	FCF142 H
a_3	0.00139	F8585B H
a_4	-0.20874×10^{-3}	F58F92 H

定标曲线的拟合工作在仪器调试时完成。多项式计算由 TP801 B 完成并打印出 R_a 。

由于运算放大器零点的漂移和电子元件性能稳定性等影响, 仪器定标后要定期用标准样块作标准, 校准时适当修改软件中的放大系数以保证 R 在规定的范围内即可。

测量时只要将样品放到样品台上, 调整样品位置, 使反射光点射到 D_2 上, 按下相应的操作键, 在 TP801 B 控制下本测量仪即完成 V_P 、 V_B 、 R 和多项式计算, 并打印出 V_P 、 V_B 、 R 和粗糙度 R_a 。

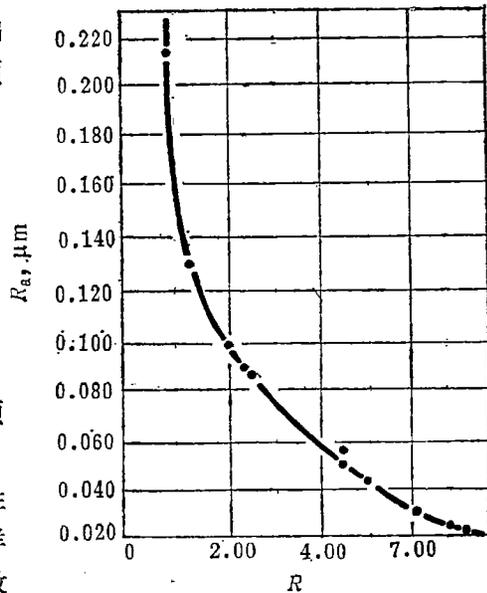


图4 相对定标曲线 (反射散射比 R)

Fig.4 Relative graduation curve

(3) 测量精度和仪器分辨率问题。粗糙度 R_a 的测量精度主要决定于反射散射比 R 的测量精度和定标曲线的拟合精度。经测定 R 的测量精度(ΔR)为0.035,由它经多项式计算引起的 ΔR_a 为0.0006。而定标曲线的拟合精度 $\sqrt{\Delta R^2} = 0.006$,可见定标曲线的拟合精度比 R 的精度低一个数量级,所以粗糙度 R_a 的测量精度 ΔR_a 主要决定于拟合精度。

要从理论上讨论反射比法测定 R_a 的分辨率问题是比较复杂的,我们只从实际测量和 R 的测量精度两个方面来讨论。两块粗糙度 R 比较接近的样块测量数据为:

$$\begin{aligned} R_{a1} &= 0.072 & R_1 &= 3.35 \\ R_{a2} &= 0.069 & R_2 &= 3.45 \end{aligned}$$

R 取三位有效数字,则 $\Delta R = 0.01$;能辨别的 $\Delta R_a = 0.0003$ 。另一方面 R 的测量精度 $\Delta R = 0.035$,经过多项式运算引起的 $\Delta R_a = 0.0006$ 。所以能辨别的最小 ΔR_a 决定于 R 的测量精度,即 $\Delta R_{a, \min} = 0.0006$,加上其它未考虑到的因素,有理由判定 R 的分辨率为0.001。

(4) 测量时间问题。测量时间是指测量256次测出粗糙度 R_a 的平均值的时间。它由以下几部分组成:

采集和转换一次 V_P 和 V_B 的时间 $130\mu s$ (其中A/D转换时间 $40\mu s$,初始化和数据处理时间为 $90\mu s$)。

采集和转换256次的时间为 $130 \times 256\mu s$

计算平均 $V_P, V_B, R = V_P/V_B, R_a = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4$ 并打印相应值的时间为 $900\mu s$ 。

所以总计测量平均 R 的时间为

$$130 \times 256 + 900 = 33180\mu s = 33ms$$

(5) 扫描测量问题。对于面积较大的工件,表面粗糙度分布是不均匀的,因此用扫描方式测得的粗糙度比用定点法测得的粗糙度更能反映表面的实际情况。例如对一块 $20mm \times 40mm$ 的工件用定点法在 $40mm$ 长度内测定10个点的 R_a ,其分布如图5所示, R 在 $0.0305 \sim 0.0621$ 范围内波动。用扫描法测得的 $R = 0.035$,10点平均 $R_a = 0.0424$,实际上是把 R 看成是虚线分布那样求得的平均值。实际分布当然不会那样。扫描方法测得的 R_a 是在 $40mm$ 范围

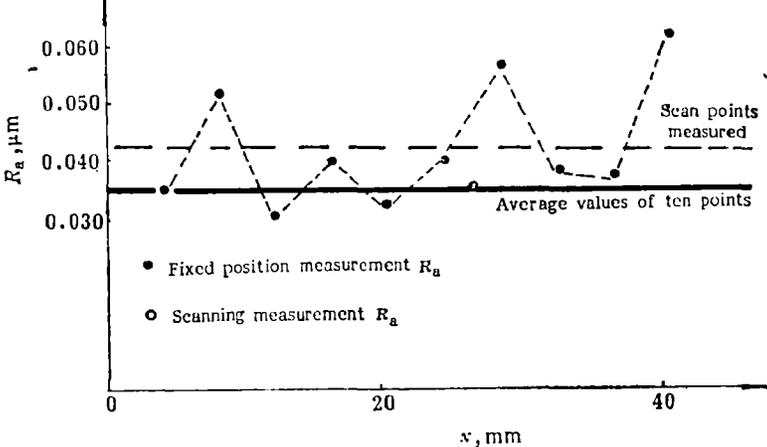


图5 定点测量与扫描测量的比较
Fig.5 Contrast of fixed position and scanning measurement

内测定200多个点的平均值, 所以更能反映整个表面的粗糙程度。

5 仪器主要技术指标和有关参数

- (1) 粗糙度测量范围: $R_a < 0.22 \mu\text{m}$ ($\nabla 9$ 以上)
- (2) A/D转换线性误差: 3路, 1.2LSB; 5路, 0.6LSB
- (3) 反射散射比 R 测量精度: $\Delta R = 0.035$, $\frac{\Delta R}{R} = 1.3\%$
- (4) 定标曲线拟合精度: $\sqrt{\overline{\Delta R_a^2}} = 0.06$
- (5) 粗糙度 R_a 测量精度: $\Delta R_a = 0.006 \mu\text{m}$
- (6) 粗糙度分辨率(能辨认的最小 ΔR_a) $0.001 \mu\text{m}$
- (7) 扫描宽度: 450mm
- (8) 扫描频率: 1 600~2 400Hz
- (9) 电源: 交流220V
- (10) 功耗: 40 W
- (11) 体积480mm × 258mm × 400mm
- (12) 测量时间: 33ms

主要技术性能指标与国际同类测量方法比较如下:

项 目	LSA-1型	国际文献
分辨率 ΔR_a	0.001 μm	0.001 μm [4]
重复精度(均方根差)	0.006 μm	0.001 μm [4]
测量时间	33ms (测量256次平均值的时间)	20ms (未注明测量256次还是128次等)

参 考 文 献

- 1 龚育良, 徐文华, 李希英、张弘. 计量学报, 1985, 6(3): 221
- 2 托马斯 T R. 粗糙表面测量、表征及其应用. 杭州. 浙江大学出版社. 1987: 53, 63, 187
- 3 程路, 张炳泉. 物理学报, 1980, 29(12): 1570
- 4 Robinson G M, Moran P J, Peterson R W, Englund C D. IEEE, Trans, Magn. (USA) .1984; MAG-20 (5); pt.1:915
- 5 Janson D G, Rowrke J M, and Bell A C. J. Eng. Lnd. (Trans. ASME), 1984, 106 (1):34