

# 光切法在动态表面粗糙度检测中的应用

## Application of Light-section Method to Roughness Measurement on Dynamic Surface

(1.电子科技大学;2.华南理工大学)李 博<sup>1</sup> 黄镇昌<sup>2</sup> 全燕鸣<sup>2</sup>

LI BO HUANG ZHEN-CHANG QUAN YAN-MING

**摘要:**应用光切显微镜、CCD 摄像机、虚拟仪器和图像处理技术开发了表面粗糙度动态检测系统,利用光切法获得运动表面形貌,再使用图像处理技术提取轮廓特征计算评定参数。通过与触针式仪器进行测量对比实验,论证了检测系统能达到较高的精度。应用检测系统进行了动态检测实验,分析了样本表面的振动和运动速度对检测系统的影响。实验证明,在被测表面的振动幅度小于景深的前提下,该图像检测系统能够应用于动态检测表面粗糙度,适用的速度范围可达到:0~2000rpm (3.14m/s)。

**关键词:**表面粗糙度;光切法;在线检测

**中图分类号:**TH741 **文献标识码:**A

**Abstract:**A dynamic measurement system of surface roughness was developed which consists of light-section microscope and CCD camera as well as image processing software. The dynamic surface profile can be obtained by light-section method. The evaluation parameter of roughness can be calculated according to the surface profile detected with image process technology. Comparing the measurement results with that of stylus instrument it is proved that the system has good measurement accuracy. The effect of surface vibration and speed on dynamic measurement was analyzed in experiment. The result shows that the system can be applied to dynamic measurement of surface roughness at the rotate speed ranged from 0 to 2000rpm(3.14m/s), when the amplitude of surface vibration is less than the depth of field of microscope.

**Key words:**Surface Roughness; Light-section Method; In-process Measurement

技术创新

### 1 前言

随着机械加工及检测自动化水平的提高,表面粗糙度的在线检测逐渐引起重视。传统的触针式仪器基于机械接触式的测量特点显然不适合用于在线检测,而光学方法具有非接触测量、不损伤被测表面的特点,已成为表面粗糙度测量技术的发展趋势。

在众多基于光学原理的表面粗糙度测量方法中,光干涉法和光学探针法对检测环境的振动较敏感,难以应用于在线检测;而间接比较式的测量方法能够实现快速检测,对检测环境的适应性较好,适合应用于在线的动态检测。已有许多学者研究了应用间接比较式的方法动态检测表面粗糙度。李亚非、董敏、孟克等人分别提出了基于光学散射原理的表面粗糙度在线检测方法。王文和雒建斌等人提出采用被测表面激光反射图的暗区比和亮区比动态检测表面粗糙度。B.Y.Lee 研究了被测表面的图像特征参数与表面粗糙度特定参数之间的关系,提出了基于机器视觉的表面粗糙度动态检测方法。这些工作均在表面粗糙度在线检测研究方面作了有益的探索,然而,间接比较式测量方法的固有缺陷是无法获得被测表面的轮廓,难以客观、全面、准确地评定表面粗糙度。因此,研究可获得表面形貌的高精度、自动、快速在线检测技术,仍然是今后的一个重要方向。

传统光切法具有可获得表面光学轮廓进行测量的特点,本文研究将图像处理技术应用于光切法测量,建立表面粗糙度自动、快速、多参数测量系统,通过与触针式仪器进行测量对比实验,论证

其检测精度;并通过动态检测实验分析其动态适应范围。

### 2 系统原理及构成

#### 2.1 光切法测量原理

光切法是利用光切原理来测量表面粗糙度的方法。如图 1 所示,在光切显微镜中一束平行光带以一定角度 (一般  $=45^\circ$ ) 投射到被测表面上,光带与表面轮廓相交的曲线影像即是被测表面截面轮廓曲线的反映。表面粗糙度轮廓高度  $h$  和横向距离  $S$  的计算公式为:

$$h = h' \cos \alpha = \frac{h'}{\sqrt{2}V} \quad (1)$$

$$S = \frac{S'}{V} \quad (2)$$

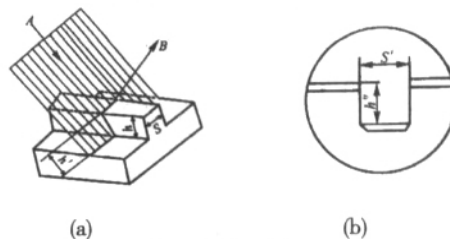


图 1 光切原理

式中  $h'$ 、 $S'$  分别为显微镜中表面粗糙度轮廓图像的高度和横向距离,  $V$  为物镜的放大倍数。

#### 2.2 系统构成

将 CCD 摄像机固定在 9J 型光切显微镜的相机接口上, CCD 摄像机从显微镜中获取表面粗糙度光切图像的视频信号,通过图像采集卡传入计算机中进行处理。应用虚拟仪器开发平

李博: 硕士 助教

基金项目:广东省自然科学基金项目(编号:31323)

台 LabVIEW 及其视觉应用功能开发出软件程序, 利用图像处理技术, 如: 图像滤波、增强、二值化、边缘检测等, 从光切显微图像中提取出表面轮廓信号, 再通过信号处理程序计算出多个表面粗糙度评定参数, 包括: 轮廓最大高度  $R_z$ 、轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、轮廓均方根偏差  $R_q$ 、轮廓偏斜度  $R_{sk}$ 、轮廓单元平均宽度  $S_m$ 、轮廓支承长度率  $R_{mr}(C)$  以及轮廓支承长度率曲线等。

在图像检测系统中, 目标物体的几何参数是用图像像素数来表示的, 要使检测系统应用于实际的检测, 必须先对系统进行标定, 也就是计算出图像中一个像素代表被测物多大的物理尺寸。我们使用显微镜标准刻度尺分别对使用不同放大倍数物镜下的检测系统进行了标定。

### 3 系统检测精度的对比实验

将检测系统与触针式仪器进行对比测量实验, 以触针式仪器的测量结果为参考标准验证本系统的测量精度。使用多个不同样本进行检测实验的结果列于表 1, 表中每个样本的测量数据分成两行, 第一行是 TR200 测量结果, 第二行是本检测系统测量结果。两种方式的检测结果基本相符合, 证明该检测系统具有与触针式粗糙度仪相当的精度。受显微镜分辨率限制, 检测系统的测量范围是:  $0.4\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ 。

表 1 两种方式的测量实验结果对比

S/N	材料	物镜类型	取样长度 (mm)	采样间隔 (mm)	$R_a(\mu\text{m})$	$R_z(\mu\text{m})$	$R_q(\mu\text{m})$	$R_{sk}$	$S_m(\mu\text{m})$	$R_{mr}(C=50\mu\text{m}/R_z)$
1	铜		2.5		10.86	33.68	11.68	-0.512	277.7	63.20%
		7X	2.458	1.6	10.4	37.48	11.07	-0.355	262.07	57.55%
2	铜		0.25		0.575	2.66	0.697	-0.122	83.3	58.00%
		60X	0.287	0.187	0.558	3.23	0.69	-0.185	46.36	59.43%
3	铝		0.8		7.943	25.44	8.761	0.526	200	36.20%
		30X	0.85	0.369	7.286	30.19	8.412	0.732	144.58	31.89%
4	铝		0.8		0.804	4.25	1.008	0.131	100	55.00%
		60X	0.862	0.187	0.852	4.37	0.996	-0.408	80.15	55.49%
5	铜		0.8		1.727	10.65	2.124	0.425	160	33.40%
		30X	0.85	0.369	1.873	10.84	2.379	0.319	81.57	35.82%
6	铜		0.8		0.842	4.269	0.967	-0.067	133.3	49.60%
		60X	0.862	0.187	0.774	6.06	0.959	-0.047	92.05	46.72%

### 4 动态检测实验

工件样本表面的运动速度和振动的幅度是影响动态检测的主要因素, 因此, 对检测系统的速度和振动的适应性进行了实验分析。利用电机驱动的转动机构驱动被测工件样本(直径  $R=30\text{mm}$ )旋转, 用光电转速仪测量样本表面的转速, 同时检测系统对样本的表面粗糙度进行动态检测; 转动机构的转速可在  $0 \sim 3500\text{rpm}$  范围内调节, 而工件在转动机构驱动下的振动幅度可达到约  $80\mu\text{m}$ 。

#### 4.1 振动对动态检测影响的实验

在光切显微镜中分别使用放大倍数最小和最大的 7X、60X 物镜进行动态检测实验。从实验中发现, 当使用 60X 物镜时, 样本表面的振动使得光带图像跳动过大而难以实现动态检测; 而当使用 7X 物镜时, 在同样的动态条件下, 检测系统对样本表面的振动并不敏感, 能够获得效果较理想的图像实现动态检测。原因是光学成像系统有一定的景深范围, 在动态检测的情况下, 样本表面的振动使得物距是不断变化的, 当物距的变化超出了景深的范围后, 光学系统将难以形成清晰的图像。显微镜景深的计算公式为:

$$DOF = 152.5 \frac{n \cdot \lambda}{(N.A.)^2 \cdot \Gamma} \quad (4)$$

式中  $n$  为物镜物方媒质折射率 (在空气中  $n=1$ ), 是物镜

中光的波长,  $N.A.$  为物镜的数值孔径, 为物镜放大倍数。

当显微镜所用物镜的放大倍数越大, 数值孔径  $N.A.$  也越大, 显微镜的景深会越小, 对检测表面的振动会越敏感。在本图像检测系统中, 进入显微镜物镜中的光带是绿光, 波长约为  $540\text{nm}$ , 而数值孔径  $N.A.$  通常被标注在物镜外壳上 (7X 物镜为 0.1, 60X 物镜为 0.55), 根据公式 4 可以计算出显微镜在 7X、60X 物镜中的景深分别为  $1176.4\mu\text{m}$ 、 $4.5\mu\text{m}$ 。由此可以解释实验现象: 因为工件在转动机构驱动下的振动幅度达到约  $80\mu\text{m}$ , 在使用 60X 物镜时, 振动幅度已远超出景深, 故难以形成清晰图像; 而在使用 7X 物镜时, 振动没有超出景深, 故仍然可以获得效果较好的图像。

#### 4.2 速度对动态检测影响的实验

假设在动态检测时被测表面的振动幅度没有超出景深, 则被测表面的速度在使用不同放大倍数物镜时对动态检测的影响是相同的, 因此, 可以只使用 7X 物镜进行实验。在实验中, 调节转动机构产生不同的转速, 用光电测速仪测量出相应的转速值, 用检测系统的摄像装置获得在该转速下的表面粗糙度光切图像, 再经过软件程序处理得出检测结果。

如图 2 所示, 是在几种转速下获得的图像。实验结果如下:

当转速约在  $0 \sim 500\text{rpm}$  范围内时, 所获得的动态图像与静态图像比较接近, 区别主要在于动态时获得图像的位置与静态时的不同。

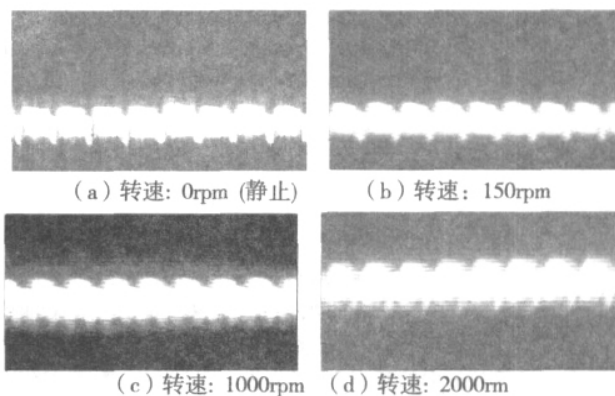


图 2 在不同转速下获得的光切图像

当转速约在  $500 \sim 2000\text{rpm}$  范围内时, 随着速度的增加, 所获得的图像逐渐出现重叠, 原因是摄像装置的快门速度相对滞后, 使得样本在转动过程中表面多个位置的光带图像同时出现在同一幅图像中。然而, 观察图像的特点可以知道, 在代表表面轮廓的图像边缘处, 虽然局部细节变得平滑, 但边缘整体并没有出现严重的失真, 仍然能反映出表面轮廓的特征, 因此可以从重叠的图像中提取出边缘信息进行检测。如图 3 所示, 是分别对图 2 中的静止图像和转速达到  $2000\text{rpm}$  的动态图像进行处理后提取出来的边缘特征, 由图可知两者的轮廓特征比较相似, 主要区别在于动态的图像在细节上较平滑, 而这种区别对表面粗糙度的评定结果影响并不大。

当转速约在  $2000\text{rpm}$  以上时, 动态图像的边缘变得较模糊, 与静态下的图像边缘有较大的差异。

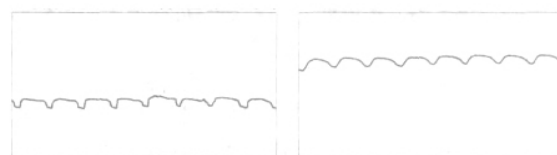


图 3 从图像中提取的边缘特征

将不同转速下的动态检测结果列于表 2, 从表中的数据可知, 当运动速度在 0~2000rpm(3.14m/s)范围内时, 动态检测结果与静态下的检测结果基本一致。当运动速度大于 2000rpm 时, 由于图像边缘严重失真, 使测量结果出现较大偏差。

表 2 动态检测表面粗糙度的实验结果

转速 (rpm)	$Ra$ ( $\mu m$ )	$Rz$ ( $\mu m$ )	$Rq$ ( $\mu m$ )	$Rsk$	$Sm$ ( $\mu m$ )	$Rmr$ ( $c=50\%Rz$ )
0	8.32	39.97	10.3	0.997	145.85	26.04%
450	8.71	35.38	10.42	0.92	145.27	25.00%
650	8.36	33.25	9.62	0.76	148.53	27.60%
1000	8.44	30.72	9.62	0.7	152.79	30.73%
1500	8.47	31.89	9.7	0.705	152.51	30.21%
2000	8.92	38.56	10.36	0.78	151.36	26.82%
2500	12.49	47.42	13.98	0.43	152.2	37.24%

## 5 结论

本文基于光切法的图像检测系统可获得表面形貌的光学轮廓, 实现表面粗糙度的自动、快速、多参数测量, 并达到与传统触针式仪器相当的测量精度。通过动态检测实验分析了检测系统的动态适应范围, 实验证明: 在被测表面的振动幅度小于景深的前提下, 检测系统具有较好的速度适应性, 可适用于被测表面运动速度在 0~2000rpm(3.14m/s)范围内的动态检测。

本文的创新点是将光切法应用于动态表面粗糙度的检测, 并对其动态适用范围作了实验研究, 在表面粗糙度的在线检测技术上作了一定的探索。

### 参考文献

- [1]D.J.Whitehouse. Trends in Instrumentation for roughness and form measurement. Proceedings of SPIE -- Volume 2088, February 1993, pp. 2- 17.
- [2]周莉莉, 赵学增. 表面粗糙度的激光及相关在线测量方法. 激光杂志, 2004,25(3):4- 8.
- [3]李亚非, 董树信. 磨削表面粗糙度在线实时测量的研究. 宇航计测技术, 1990,10(6):13- 17.
- [4]董敏, 王陆莹, 马继光. 磨削过程中表面粗糙度的在线测量系统. 仪表技术与传感器, 1999,(6):37- 39.
- [5]孟克, 王东红. 表面粗糙度的光学在线检测. 哈尔滨工程大学学报, 2003,24(5):560- 562.
- [6]W.Wang P.L.Wong and J.B.Luo etc. A new optical technique for roughness measurement on moving surface. Tribology International, 1998,31(5):281- 287.
- [7]雒建斌, 王文, Patrick P.L.Wong 等. 表面粗糙度的激光在线测量. 清华大学学报(自然科学版), 1999,39(2):6- 10.
- [8]B.Y.Lee, Y.S.Tang. Surface roughness inspection by computer vision in turning operations. Machine tools and Manufacture. 2001,41(9):1251- 1263.
- [9]B.Y.Lee, H.Juan and S.F.Yu. A study of Computer Vision for Measuring Surface Roughness in the Turning Process. Advanced Manufacturing Technology. 2002, 19(4):295- 301.
- [10]朱文坚, 谢小鹏, 黄镇昌. 机械基础实验教程. 北京:科学出版社, 2005:126- 128.
- [11]王开远. 表面粗糙度标准的应用. 机械工业标准化与质量, 2003,(7):1- 5.
- [12]西安工业学院应用光学课件设计组. 应用光学. <http://gdx.xait.edu.cn/jingpin/yingguang/others/k/index1.htm>.
- [13]熊永超, 贺春东, 杨伟红. 基于 CCD 技术的非接触在线检测仪. [J]微计算机信息(测控自动化), 2005,21(4):178- 179.

作者简介:李博(1977-), 男(汉族), 广东茂名市人, 电子科技大学中山学院助教, 硕士, 主要从事现代检测技术、虚拟仪器应用的研究。Biography: Li Bo (1977- ), Male (the Han nationality), Maoming city, Guangdong province, Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Assistant, Master, Research area: Measurement, Virtual instrument.

(528402 广东中山 电子科技大学中山学院自动化工程系)李博

(510640 广东广州 华南理工大学 机械工程学院)黄镇昌

全燕鸣

(Department of Automatization Engineering, Zhongshan Institute, University of Electronic Science and Technology of China, Zhongshan 528402, China.) Li Bo

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)Huang

Zhen- Chang Quan Yan- Ming

通讯地址:(528402 广东中山 电子科技大学中山学院自动化工程系)李博

(收稿日期:2007.2.13)(修稿日期:2007.3.15)

(上接第 109 页)

作者简介:张予生(1962-), 男, 汉, 电气工程师, 主要从事电气技术工程项目开发和电气设备维护等工作;王明武(1980-), 男, 汉, 在读硕士生, 研究方向为工业控制网络技术与应用;王永华(1963-), 男, 汉, 教授, 河南省信息化电器重点实验室学术带头人, 研究方向为工业自动化技术集成与应用, 信息化工业测控电器与系统的开发与应用。

Biography:Zhang Yusheng(1962-), male, Han nationality, electric engineer, major in the work of electrical engineering technique and maintenance, and etc.

(450002 河南郑州 州轻工业学院后勤保障处)张予生

(450002 河南州 州轻工业学院 河南省信息化电器重点实验室)王明武 王永华

通讯地址:(450002 河南郑州 州轻工业学院后勤保障处)张予生

(收稿日期:2007.2.13)(修稿日期:2007.3.15)

(上接第 111 页)

[2]谭永红.基于 BP 神经网络的自适应控制[J].控制理论与应用, 1994, 11(1): 84-88.

[3]Ku C C, Lee K Y. Diagonal Recurrent Neural Networks for Dynamic Systems Control[J]. IEEE Trans. on Neural Networks, 1995, 6(1):144-155.

[4]凌云.基于单片机的真空炉温控系统 [J] 微计算机信息, 2002,3:31-32.

作者简介:凌云(1965-), 男(汉族), 湖南平江人, 湖南冶金职业技术学院自动化教研室主任, 副教授, 主要从事智能控制及单片机应用开发工作。

Biography:Ling Yun, male and born 1965, and is an associate professor at Hunan Metallurgical Professional Technology College. Main research field: intelligent control and microprocessor controlling technology.

(412000 湖南 湖南冶金职业技术学院)凌云 李毅梅 彭华夏

通讯地址:(412000 株洲 株洲市大坪路 18 号)凌云

(收稿日期:2007.2.13)(修稿日期:2007.3.15)