

文章编号: 1001-3806(2016)03-0447-04

电子调制的激光相干粗糙度测量技术研究

王辉林, 董元丽

(山东理工大学 机械工程学院, 淄博 255049)

摘要: 表面粗糙度对机械产品的使用性和可靠性有重要影响。为了实现远距离测量零件表面粗糙度, 采用基于激光多普勒效应的电子直接调制激光的相干法进行了表面粗糙度测量。应用激光多普勒效应克服了工作距离的影响; 使用电子直接调制提高了测量速率, 降低了成本; 采用相干法实现了交流锁相放大, 有效控制了系统噪声。经过测量过程的统计误差控制、标定和比较可知, 所设计的系统测量不确定度可达1‰。结果表明, 该技术具有远距离测量且精度高的特点, 对表面粗糙度的测量具有一定的指导意义。

关键词: 激光技术; 表面粗糙度; 直接调制; 不确定度

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.031

Study on measuring technology of roughness based on electronic modulation laser coherence

WANG Huilin, DONG Yuanli

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The reliability and the usability of mechanical products largely depend on their surface roughness. In order to achieve long-distance measurement of surface roughness of mechanical parts, a method of electronic direct modulation laser coherence based on laser Doppler effects was put forward to measure the surface roughness. The application of laser Doppler effects can reduce influence of working distance. The speed of measurement was improved and the cost was reduced by using electronic direct modulation method. By using coherent method, alternative phase lock amplification was realized and the system noise was effectively controlled too. The experimental results show that the uncertainty degree of the measurement system can be reached 1‰ after controlling the statistical error and calibrating the experiment data during measurement process. The study has a certain guiding significance on the measurement of surface roughness.

Key words: laser technique; surface roughness; direct modulation; uncertainty

引言

零件的使用性能与表面粗糙度有很大关系。目前, 零件加工表面精度要求越来越高, 对测量方法提出了更高的要求^[1]。现阶段测量表面粗糙度的方法主要有比较法、触针法、光切法等^[2]。比较法利用触觉和视觉来评定表面粗糙度, 人的主观因素对测量结果的影响较大; 触针法受触针半径的限制, 使测量精度受到很大影响; 光切法需要人工取点, 测量效率较低。为了克服工作距离、试件材料对测量的影响, 降低成本、提高仪器的精度和适用性, 在理论计算和光电检测技术试验的基础上, 选择应用激光多普勒频移测速原理,

积分得到位移; 采用电子直接调制比激光外调制成本低、体积小、环境适应性好^[3]; 采用相干法并锁相放大可以消除零点漂移提高信噪比。经过系统误差分析, 只要有效控制半导体激光器驱动电路的频率和寄生参量变化的影响, 这种技术与激光外调制技术达到相同的效果。

1 设计原理及数学模型

电子调制的激光相干法对零件轮廓进行测量的光路如图1所示。调制驱动器对半导体激光器直接调制, 调制激光($f_0 + f_s$)分成 f_1 和 f_2 两束频率相同的光, 测量光束 f_1 经过平面镜 S_1 , $\lambda/4$ 波片 M_1 和透镜 L_1 , 照射到被测物体上, 产生的散射光($f_0 + f_s + f_D$)经过 S_3 和 L_2 被光电探测器接收。参考光束 f_2 经过 $\lambda/4$ 波片 M_2 , S_2 和 L_2 由光电探测器接收^[4], 实现相干检测。其中, f_s 为调制频率, 实验中取 $f_s = 100\text{MHz}$, f_D 为激光经过被测物体散射形成的多普勒频移, 即^[5]:

作者简介: 王辉林(1962-), 男, 高级实验师, 现主要从事激光与光电精密测量技术的研究。

E-mail: zccyff@gmail.com

收稿日期: 2015-02-09; 收到修改稿日期: 2015-05-28

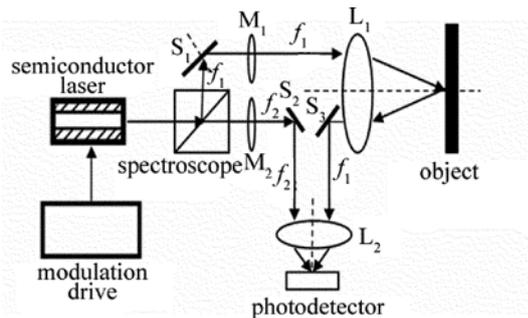


Fig. 1 Optical path of contour measurement

$$f_D = \frac{2v_y \cos\theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中, θ 为反射光线与物体垂直速度方向间的夹角, λ 为激光波长, v_y 为与试件垂直方向上的速度。若探头不动, 试件水平匀速运动, v_y 的积分可得到试件垂直方向的位移:

$$S_y = \int_0^t v_y(t) dt \quad (2)$$

采用与微观不平高度有关的表面粗糙度 R_a 来评定参量轮廓的算术平均偏差, 反映物体表面轮廓。

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |S(x)| dx \quad (3)$$

式中, L 为取样长度, $S(x)$ 为取样长度上各个点到基准线的距离, 即所求垂直方向上的位移。

2 半导体激光器直接调制形成相干光

通过控制调制电流 I , 改变腔体的介电常数 ϵ , 工作在稳定的单模状态下, 即可将激光器调谐到所希望的波长和频率^[6]。光强度调制的原理^[7]如图2所示。

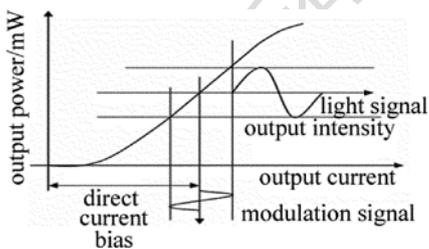


Fig. 2 Working principle of light intensity modulation

激光器的输出功率与输入的电流信号成比例, 用正弦调制电流 $I(t)$ 进行调制^[8]。

则其频率响应函数为:

$$\eta = \frac{gI_m / (eV)}{\omega_0^2 - \omega_m^2 + i\omega_m \left(\frac{1}{\tau_s} + \tau_p \omega_0^2 \right)} \quad (4)$$

式中, ω_0 为固有频率, e 为电子电量, ω_m 为调制频率, g 为比例常数, V 为有源区体积, τ_s 为自发电子寿命, τ_p 为光子寿命, I_m 为调制电流。由图3看出, 频率低于4GHz时响应平坦^[9], 研究所用的100MHz正弦调制波频率低、容易实现, 且较稳定, 调制后的测量光与参考

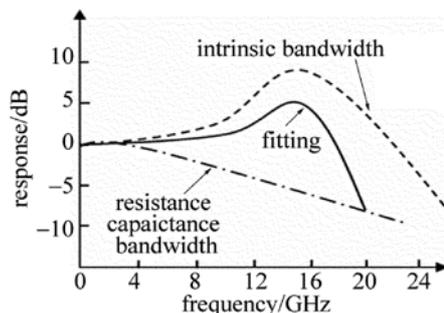


Fig. 3 Frequency response of a semiconductor laser

光的电场强度 E' 为:

$$E' = A_0 \cos[2\pi(f_0 + f_s)t + \phi] \quad (5)$$

式中, A_0 为调制后激光的幅值, ϕ 为调制后的相位。

3 光电检测系统设计

3.1 系统设计框图

信号经过混频、锁相放大、频率跟踪, 记录多普勒频移 Δf , 再经过数据处理得到表面粗糙度 R_a 。其测量的整体框图如图4所示。

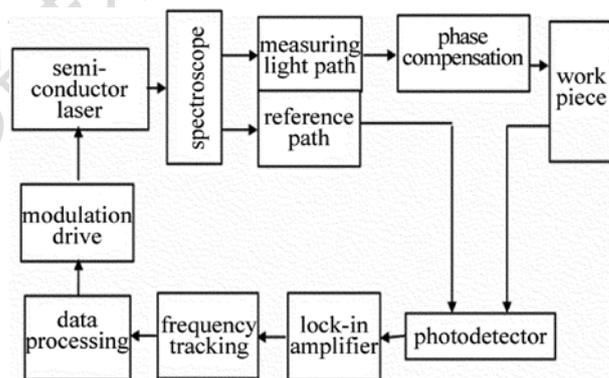


Fig. 4 Overall block diagram of surface roughness measurement

频率为 f_1, f_2 的两束光被光电探测器接收后, 其电场强度为^[10]:

$$\begin{aligned} E &= M[A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2)] = \\ &= MA_1^2 \cos^2(2\pi f_1 t + \phi_1) + MA_2^2 \cos^2(2\pi f_2 t + \phi_2) + \\ &+ MA_1 A_2 \cos[2\pi(f_1 + f_2)t + (\phi_1 + \phi_2)] + \\ &+ MA_1 A_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, M 为光电探测器的灵敏度; A_1, A_2 和 ϕ_1, ϕ_2 分别为测量光与参考光的幅值和相位。两束光会合后产生拍频信号 Δf (即 $f_1 - f_2$)。由于光电探测器所能响应的频率较低, 所以不能响应激光的频率、和频项和倍频项, 只能接收其中的差频项。故光电探测器接收后输出的电信号为:

$$U = U_0 \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \phi) \quad (7)$$

式中, t 是时间, U_0 是光电探测器交流信号的幅值, 应

用光路相位补偿使得相位变量 $\Delta\phi = 0$ 。

3.2 器件选取

选用控制性能较好的红外半导体激光器,其响应波长为 900nm ~ 1700nm,以及饱和光功率为 2mW、灵敏度为 0.85A/W 的 InGaAs PIN 光电二极管。

3.3 激光频率稳定性控制电路要求

对驱动电路采取稳压、稳流、稳频和过流保护措施后,才能有效控制正弦信号的稳定性,减小谐波分量带来的误差^[11],产生稳定的 100MHz 的正弦调制信号。

3.4 激光器寄生参数的电路补偿

半导体激光器的等效电路图如图 5 所示,寄生参量为电阻 R 、电感 L 、电容 C_1 和 C_2 。

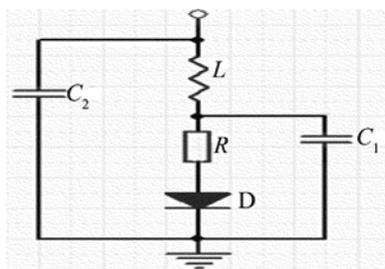


Fig. 5 Circuit diagram of a laser diode

其频率响应特性为^[12]:

$$A = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中, Q 是与 R, L 和 C 有关的量, ω 为信号频率。

分析(8)式可知,根据等效电路,在调制驱动器输出端和激光器的输入端设计阻抗自适应匹配电路,可以降低寄生参量变化产生的影响。

4 实验测量与不确定度分析

4.1 实验测量

取一块 $R_s = 1.6\mu\text{m}$ 的平磨加工标准块,依据系统的原理搭建的实验系统和三丰公司 CS-3200 轮廓仪进行比较测量。用 LabVIEW 对数据进行处理显示,测量轮廓曲线如图 6 和图 7 所示。

多次实验记录的数值如表 1 所示。

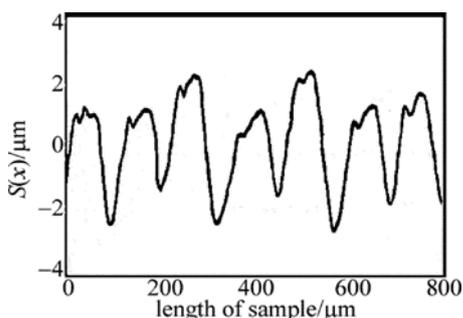


Fig. 6 Measurements results of CS-3200

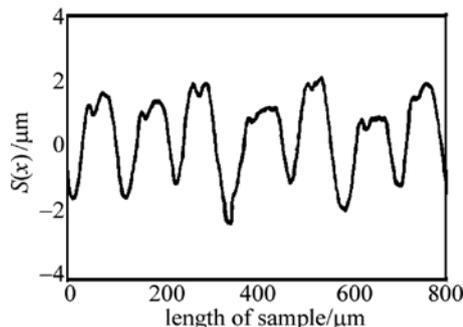


Fig. 7 Measurement results of the experimental system

Table 1 Surface roughness evaluation parameter R_a measured by CS-3200 and the experimental system

	CS-3200			the experimental system		
$R_a/\mu\text{m}$	1.5965	1.6033	1.6005	1.5975	1.6035	1.6004
	1.6035	1.5963	1.6049	1.6029	1.5998	1.6041
	1.6002	1.6037	1.6008	1.6006	1.6038	1.6005

平均值为:

$$\bar{R}_a = 1.6014\mu\text{m} \quad (9)$$

系统误差为:

$$e = \frac{1.6014 - 1.6}{1.6} \times 100\% = 0.091\% \quad (10)$$

4.2 不确定度分析

4.2.1 驱动电路引起的不确定度 $U(\omega)$ 由上面分析可知,驱动电路会对半导体直接调制产生影响,对驱动部分采取了稳频的措施后,使得误差不高于 0.03%,正态分布估计其不确定度为 0.015%。

4.2.2 寄生参量产生的不确定度 $U(Q)$ 寄生参量经电路补偿后,产生的误差大大降低。分析验证寄生参量产生的误差不高于 0.02%。用矩阵分布估计其误差为 0.008%。

4.2.3 工作距离变化产生的不确定度 $U(d)$ 工作距离的变化也会产生误差。实验证明,当工作距离在 10mm ~ 400mm 范围内时,由工作距离变化引起的相对不确定度为 0.0510%。

4.2.4 探测器孔径产生的不确定度 $U(\theta)$ ^[13] 因为探测器孔径的影响,使得入射光线和反射光线之间存在一个偏角,因此入射光线与反射光线的夹角在 $(\theta - \Delta\theta, \theta + \Delta\theta)$ 的范围内变化,所以由光电探测器产生的误差为 0.080%,用矩阵分布估计其不确定度为 0.0462%。

4.2.5 温度产生的不确定度 $U(T)$ ^[14] 通过对相关资料的查阅,当温度在 0°C ~ 50°C 时,放大电路产生的误差为 0.005%,用三角分布估计其不确定度为 0.002%。

4.2.6 其它因素产生的不确定度 $U(n)$ 除以上误差因素,还包括湿度、气压、电磁、杂散光等干扰,实验

室环境误差总体小于0.040%。用反正弦分布对其进行不确定度估计为0.028%。其合成的标准不确定度为^[15]：

$$U = \sqrt{U(\omega)^2 + U(Q)^2 + U(d)^2 + U(\theta)^2 + U(T)^2 + U(n)^2} = 0.076\% \quad (11)$$

由以上分析可以看出,不确定度小于1‰,达到了高精度测量要求。

5 结束语

对于高精度、非接触的表面粗糙度测量,现代光电测量是一种有效的技术。在理论分析的基础上,设计了基于激光多普勒效应,电子直接调制激光的相干光电表面粗糙度测量系统;通过比较实验可以看出,该技术具有远距离测量、性价比高、适用性好、精度高的特点,对零件表面微观轮廓测量具有很好的应用价值。

参 考 文 献

- [1] RAO C B, KALYANASUNDARAM P, RAJ B. Laserscattering for-surface roughness measurement[J]. Surface Roughness Monitoring, 2001,43(4):165-269.
- [2] WANG H L, LIU Ch H. Study on measuring technology on surface roughness based on laser acousto-optic modulation[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2013, 35(6): 797-800(in Chinese).
- [3] LUO Y, XU J M, HUANG J, et al. High speed semiconductor light sources based on direct modulationand external modulation[J]. Infrared and Laser Engineering 2008, 37(2):200-204(in Chinese).
- [4] GAO Ch M, WANG H L. Research on detection technology of optical fiber acousto-optic modulation based contour[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 1062-1066(in Chinese).
- [5] HUO L, ZENG X D, AN Y M, et al. Vibration measurement and analysis by means of laser Doppler heterodyne principle [J] Laser Technology, 2011, 35(5): 600-602(in Chinese).
- [6] LI H C, HE Y Ch, ZHOU H. Coherence of a direct modulating diode laser[J]. Applied Laser, 1994, 14(4):161-163(in Chinese).
- [7] JIA F X, DING Zh L, YUAN F. Design on high frequency amplitude modulation of laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 37(11):1174-1177.
- [8] FENG Ch G. On the semiconductor laser and modulation techniques [J]. Cable Television Technology, 2004, 11(20):71-74(in Chinese).
- [9] HUNSPERGER R G. Integrated optics: theory and technology[M]. 6th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 207-214(in Chinese).
- [10] LI Y. Research on modulation technology of high power semiconductor laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013:20-33(in Chinese).
- [11] ZHANG Ch. Drive circuit design of modulation semiconductor laser [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013,28(6): 71-73(in Chinese).
- [12] LIN T, LIN N, MA X J, et al. Effects of parasitic parameters on the modulation characteristics of semiconductor laser diodes[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3): 295-300(in Chinese).
- [13] ZHOU J, FENG Q Q, MA Sh G, et al. Error analysis of reference-beam laser Doppler velocimeter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2581-2587(in Chinese).
- [14] ZOU S Ch, WANG G. Effect of temperature and other factors on performance of CCD data acquisition circuit[J]. Astronomical Research & Technology, 2006, 3(3):275-282(in Chinese).
- [15] FEI Y T. Error theory and data processing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010: 82-88(in Chinese).