

文章编号: 1001-3806(2012)03-0353-04

激光锁定成像在钢轨磨耗测量系统中的应用

吴柯庆 余学才* 吴福华 张 蕾

(电子科技大学 光电信息学院 光学工程系 成都 610054)

摘要: 应用图像处理技术进行野外火车钢轨测量实验时,不可避免遇到外界强太阳光的干扰问题。为了能有效消除太阳光的干扰作用,采用了激光锁定成像的方法,通过外接控制电路触发激光器并让电荷耦合器件同步采集图像,运用激光锁定成像原理,获得高质量的钢轨轮廓曲线。通过大量实验验证,激光锁定成像的应用使得钢轨磨耗输出的结果更稳定,而且能够适应较大范围内变化的外界环境光干扰。结果表明,激光锁定成像能保证测量系统的稳定性,从根本上消除测量过程中出现的各种随机误差。

关键词: 激光技术;背景光;锁定成像;钢轨磨耗

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.017

Application of laser lock-in imaging in rail wear measurement

WU Ke-qing, YU Xue-cai, WU Fu-hua, ZHANG Lei

(Department of Optical Engineering, School of Physical Electronics, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: When the rail wear measurement is carried out in the wild, the interference from outside strong sunlight is inevitable. In order to eliminate the interference effect of sunlight effectively, a laser lock-in imaging technology was utilized. An external controlling circuit triggered the lasers and CCD image acquisition synchronously, and high quality image was achieved by means of laser lock-in imaging method. Lots of experiments verified that laser lock-in imaging makes the output of the rail wear more stable and adapt to a wide range interference of outside complicated background light. Experimental results show that laser lock-in imaging can guarantee stability of the measurement system, fundamentally eliminating the random measurement errors.

Key words: laser technique; background light; lock-in imaging; rail wear

引言

随着铁路的发展,轨道的安全保障要求也随之提高。铁路钢轨磨耗主要是由于轮轨接触摩擦、导向及冲击做功等引起的钢轨断面损失,而且随着牵引吨位不断提高,行车密度越来越大,钢轨磨损就越大。钢轨磨耗检测成为了铁路检测部门钢轨检测的一个重要指标。钢轨磨耗主要包括垂直磨耗和侧面磨耗,这项检测主要用于钢轨伤害程度的指标,对磨耗严重的钢轨需要实时监测或者达到一定损坏程度后需要更换钢轨。

目前我国铁路轨道磨耗检测的主要方式还是手工卡尺测量,通过固定钢轨非工作边的轨头与轨腰的下颚,对定义的钢轨磨耗点进行测量。这种接触式测量

方法的精度能满足检测要求,但受测量环境的影响,测量效率低下。非接触式测量是从20世纪末开始研究的,国外取得了一些成绩,但国内目前还处于实验研究阶段。随着计算机技术和图像处理技术的发展,此项目也得到了充分的发展^[1-3]。

非接触式钢轨磨耗测量主要是通过激光垂直照射钢轨断面,通过CCD获取钢轨断面轮廓曲线,再进行图像处理得到实际轮廓曲线,从而计算出钢轨的磨耗值,所以,钢轨轮廓图像的目标图像质量对测量的结果有很大的影响。不同背景光下经常会出现图像太暗或太强的情况,严重干扰目标图像的提取,同一测试点在不同的背景光干扰下输出的值跳动很大,而且无规律,甚至在强背景光下无法提出到目标图像,所以,目标图像的质量直接影响测量系统的稳定性。

激光主动成像^[4-5]的优点在于其激光单色性好、方向性强,通过滤光片能滤除大量的背景光。但在野外进行测量的过程中,由于强太阳光和未知光源的影响,采集到的图像仍会出现强背景干扰的情况。这些背景光严重影响了钢轨图像的质量,给光带曲线的提取带

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2010AAJ206)

作者简介: 吴柯庆(1987-),男,硕士研究生,主要从事光图像处理和目标检测的研究。

* 通讯联系人。E-mail: x.yu3333@gmail.com

收稿日期: 2011-07-26; 收到修改稿日期: 2011-09-14

来了很大困难。处理后的图像因受外界环境光的干扰,测量结果会出现很大误差。一些特殊环境下的检测项目需要用到激光主动成像的距离选通技术,从而达到滤除背景光的目的。而钢轨磨耗测量系统由于其成像特点和要求,需要一种更简洁有效地去除背景光的办法。为了满足这个要求,将参考文献[6]中所提出的激光锁定成像方法用于获取高质量的钢轨轮廓曲线。

1 锁定成像系统测量原理

钢轨磨耗测量系统的原理图^[7]如图1所示,由两个激光器、一个 CCD、一个光栅测距的计程器以及一个外围控制芯片组成,所有的硬件都安装在一个小车上。两个激光器对称垂直照射钢轨的同一个切面,CCD 以与激光切面成一定的角度采集钢轨切面的轮廓曲线。

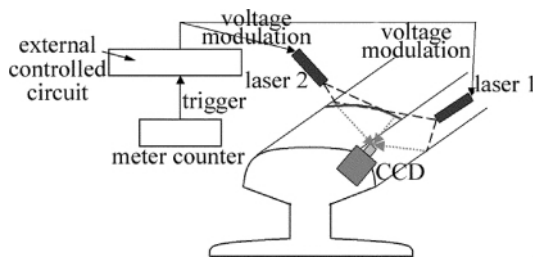


Fig. 1 Measurement system

非接触式的钢轨磨耗测量方法解决了测试的效率问题,但测试的精度却受采集到的钢轨图像曲线的影响。CCD 读入的图像容易受外界环境的干扰,在野外实验时,如遇上艳阳天,就会有大量太阳光线进入 CCD。即使加了滤波片、通过增大激光光强来减小 CCD 曝光时间,CCD 采集到的图像仍然会受到强背景光的干扰,输出的磨耗结果就会出现误差,而且有很大的随机性,对系统的稳定性产生了很大的干扰作用。

激光锁定成像主要原理是通过调制电压来控制激光器的输出特性并同步采集若干帧图像,按照锁相环中鉴相原理,从背景光中将所需要的激光照射目标所成的像提取出来,完全消除背景光影响。通过控制电路的调制电压来控制激光器的输出,假设在一个激光器调制周期内 CCD 采集 N 帧图像,第 m 帧图像在点 (x, y) 处的灰度值 $G(m)$ 可表示为:

$$G(m) = G_b(m) + G_g(m) \quad (1)$$

式中 $G_b(m)$ 是背景光成像灰度值,也包含 CCD 内部干扰信号, $G_g(m)$ 为激光散射的钢轨轮廓图像灰度值。如果激光器调制电压是正弦信号,那么钢轨轮廓目标区域图像的灰度值 $G_g(m)$ 可表示为:

$$G_g(m) = G_{g0} [1 + \xi \sin(\omega m \Delta t + \phi)] \quad (2)$$

式中 G_{g0} 为不加调试电压激光器额定电压工作下采集

到的钢轨目标区域图像灰度值 ξ 为调制强度; ϕ 为调制信号的相位信息,为已知常数; ω 为电压信号调制角频率; Δt 为采集两幅图像之间的时间差。

对获得的钢轨轮廓图像进行滤波处理,和已知的调制频率信号进行乘法运算,可以得到滤波后的图像灰度值分布 $G_m(m)$:

$$G_m(m) = \{ G_b(m) + G_{g0} [1 + \xi \sin(\omega m \Delta t + \phi)] \} \times \sin(\omega m \Delta t) = [G_b(m) + G_{g0}] \sin(\omega m \Delta t) + \frac{1}{2} G_{g0} \xi \cos \phi + \frac{1}{2} \xi G_{g0} \cos(2\omega m \Delta t + \phi) \quad (3)$$

对 $G_m(m)$ 进行单周期内采集到的图像进行图像灰度值的积分,由于是离散信号,这里是求和:

$$G_m = \sum_{m=1}^N G_m(m) = \frac{1}{2} G_{g0} N \xi \cos \phi \quad (4)$$

式中 G_m 表示 m 帧图像求和后的灰度值分布, N 表示图像的帧数。在一个周期内,频率信号得到了滤除。由处理后的结果(4)式可知,背景灰度值 $G_b(m)$ 几乎被完全滤除,只输出目标区域的图像灰度信息和调制信号的相位成正比例关系,比例系数是 $\frac{1}{2} N \xi \cos \phi$ 。这种模式类似于锁相环的鉴相原理,输出信号和输入信号的相位有关。经锁定成像处理后,图像的灰度值信息能有效地滤除背景光,进而提取出复杂背景光下的高质量钢轨轮廓曲线图像。

野外测量时,CCD 采集到的图像质量和外界光的干扰有很大关系,而且变化无规律,通过图像处理算法的处理很难达到消除背景光干扰的目的,外部 CCD 性能参量(如曝光时间、增益等)的调节也不能动态适应各种情况。采用激光锁定成像的方法,通过激光器的调制信号,从图像中分离出钢轨的轮廓,滤除了环境光的影响,从而能让整个系统适应不同环境干扰下钢轨轮廓图像的稳定采集,不会出现亮块区域情况。图1中,通过定制的外围控制芯片来模拟正弦信号发生器,通过计程器定点触发芯片来调制激光输出信号,对 CCD 采集到的图像在 PC 机中和正弦调制信号频率信息进行处理,输出滤除了背景光的钢轨轮廓灰度图,保证了磨耗值的稳定输出,进而提高了测量的准确性。

2 激光锁定成像软件流程图

图像处理的流程如图2所示。在实际钢轨测量的过程中,需要提前录入一些基本信息。光栅尺计程器通过串口随时都在更新里程数据,当到达采样点后,开始采集图像。通过控制芯片触发激光器调制信号使激光器发光,并在一个调制周期内使 CCD 同步采集两帧图像。得到目标钢轨图像后,先进行标定还原^[8]处

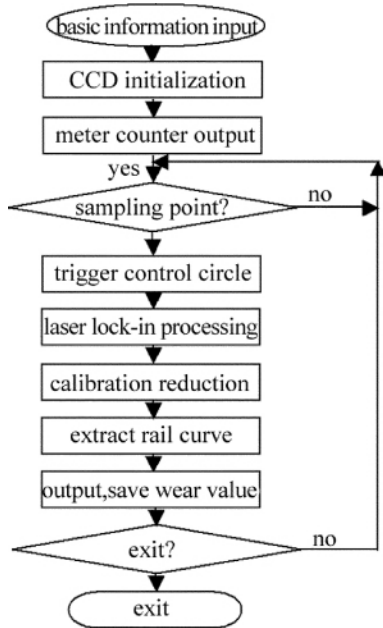


Fig. 2 Flow chart of image processing

理,主要是矫正在成像过程中的旋转、平移、镜头成像后变形等,这样就能得到钢轨切面轮廓的真实曲线。还原处理后,还需通过二值化^[9]、细化^[10]等一系列处理进行图像曲线单像素骨架的提取,这个单像素曲线骨架就是实际钢轨断面轮廓曲线。通过对曲线骨架和标准理论曲线特征磨耗点在计算机坐标中的对比,得到钢轨的磨耗值,并实时输出和保存。当未得到开始采集图像信号时,不进行图像采样。

3 实验结果和讨论

实验中采用波长为 650nm、功率为 100mW 的红光激光光源,最大帧频为 40Hz 的 CCD 采集图像,控制芯片由单片机芯片开发而成。实验过程中,分别测试在各种背景光的干扰下目标图像的获取。实验中采用的钢轨磨耗块为铁路检测部门定制的轨头,通过对目标图像的获取并输出磨耗值,可以看到钢轨磨耗值的输出一直很稳定,大大降低了外界环境光对系统稳定性产生的不良影响。

图 3a 和图 3b、图 3c 和图 3d、图 3e 和图 3f 3 组图像分别为相同条件下,直接获取图像和经过激光锁定成像后进行帧间差分处理后获取图像的对比。通过触发激光调制信号内,CCD 同步采集钢轨轮廓信息。由于钢轨磨耗系统的动态测量要求,在每个调制周期内取两帧图像。第 1 组图像中,图 3a 图像较暗,目标图像几乎完全湮没,如果直接进行二值化提取曲线轮廓就会出现大面积的断裂的情况,那么图像细化后就只有部分曲线;第 2 组图像中,图 3c 背景光较强,目标曲线的对比度也不高,经细化处理后钢轨侧面会出现大

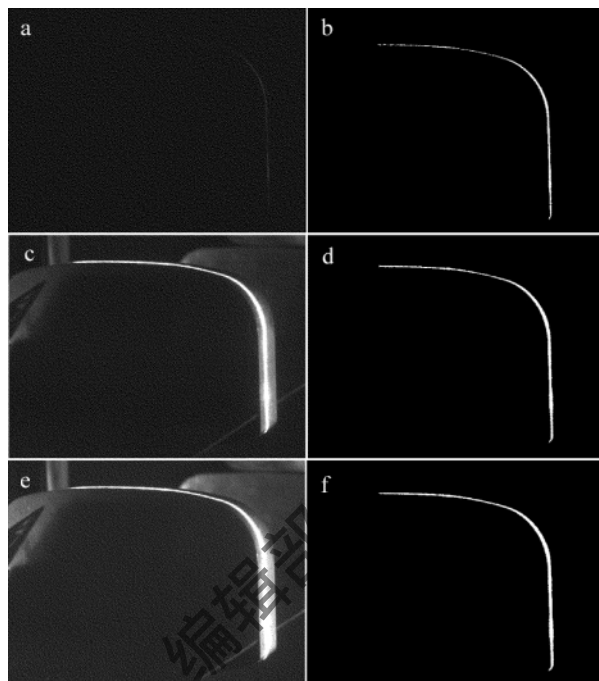


Fig. 3 a—original image in weak background b—lock-in processing image in weak background c—original image in strong background d—lock-in processing image in strong background e—original image in stronger background f—lock-in processing image in stronger background

量的毛刺现象;第 3 组图像中,图 3e 的钢轨轮廓曲线和背景光在钢轨侧面几乎融合,很难从背景光中提取到钢轨的轮廓曲线。经过激光锁定成像处理后,由处理后的图像图 3b、图 3d、图 3f 可知,目标图像清晰可见,而且对比度很高,背景光的滤除达到了很好的效果。

上面 3 组图从弱背景光到强背景光,背景光强度在一个较大的范围内变化的时候,激光锁定成像仍能从背景中有效地分离出目标图像。只要提取出高质量的光带,对后面图像的钢轨轮廓曲线骨架的提取就降低了难度。而且,通过大量实验表明,在激光锁定成像的条件下,磨耗值的输出基本上不受环境光变化的影响,输出很稳定,系统的稳定性得到了大大的提高。

表 1 为不同背景光干扰下系统测出的磨耗值,所示测试结果满足测量要求。其中测试钢轨型号为 60kg,钢轨标准块为铁路部门定制的用于测量的钢轨轨头。理论值为铁路检测部门专门的测量工具(万能工具显微镜)测试的数据,测量精度很高,能达到 0.01mm,这里采用的是 0.1mm 为精度的数据。实验 1、实验 2 和实验 3 中分别对应上面图 3a、图 3c、图 3e 3 种不同背景光下磨耗的输出值,实验 4~实验 8 为其它各种不同背景光条件干扰下系统测试结果。从表中的数据可以看到,测量系统有很大的稳定性。

Table 1 Rail wear measurement data under different background light interference

60kg standard rail	theoretical value	experiment 1	experiment 2	experiment 3	experiment 4	experiment 5	experiment 6	experiment 7	experiment 8
lever wear value/mm	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.0
vertical wear value/mm	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1

激光锁定成像在钢轨磨耗测量中的应用能很好地消除背景光,能够保证系统在不同的背景环境光的作用下减小测量的误差。但由于要同时采集两幅图像,而且是动态测量,所以对 CCD 的帧频提出了很高要求。实验中采用 40Hz 的 CCD 进行图形采集,PC 机的主频为 AMD 双核处理器 2.99GHz,能达到以上实验效果。只有在 CCD 较短曝光时间和计算机较快处理速度情况下,才能保证采集到图像的准确度。否则,就会出现前后两帧图像的背景不一致,此时的激光锁定成像就会产生误差。

4 结论

非接触式钢轨磨耗的测量因其高效率必将成为钢轨磨耗测量系统发展的趋势,但这种方法却存在易受外界环境干扰影响的缺点。为了能够更好地测量出钢轨磨耗值,测量系统的抗外界光的干扰能力必须很强。激光锁定成像技术能够很好地分离目标图像信息和外界环境光的图像信息,从复杂的背景光中提取出目标轮廓曲线,消除了外界环境光的干扰作用。目标图像的稳定能确保系统在各种外界环境光干扰下能够正常工作,进而大大提高了钢轨磨耗测量的准确度,提高了测量系统的实用性。

参考文献

[1] DING D W, JI Sh B, WANG L Zh. Photoelectric real-time detection

system for rail abrasion [J]. China Railway Science 2006 27(1): 64-67(in Chinese).

- [2] JIN W R, ZHAN X Q, JIANG B H. Non-contact rail-wear inspecting system based on image understanding [C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers 2007: 3854-3858.
- [3] LI Zh H. The design of rail wear cross section high precision measurement [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008: 1-48(in Chinese).
- [4] DAI D D, SUN H Y, HAN Y, *et al.* Image quality assessment of laser active imaging system [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(9): 986-990 (in Chinese).
- [5] YI S Y, SUH J H, HONG Y J, *et al.* Active ranging system based on structured laser light image [C]//Proceedings of SICE Annual Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2010: 747-752.
- [6] SU K, YU X C, ZHU L X, *et al.* Target image acquisition in strong background light using laser lock-in image [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1293-1297(in Chinese).
- [7] YANG L J. Research and implement of steel rail abrasion measurement system based on computer vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University 2008: 25-36(in Chinese).
- [8] PENG X Q, SONG W A, MA J J. Test system of the rail abrasion [J]. Foreign Electronic Measurement Technology 2008 27(10): 32-34(in Chinese).
- [9] HE X C, YUNG N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK: IEEE Computer Society 2004: 791-794.
- [10] WANG W H, SUN J H, LIU Zh *et al.* Stripe center extraction algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement [J]. Laser & Infrared 2010 40(1): 87-90(in Chinese).

(上接第 352 页)

- [7] WANG Sh B, FAN Y, WU H X, *et al.* Property of laser-induced shockwave with confinement [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(8): 981-984(in Chinese).
- [8] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, *et al.* Physics study of laser produced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics, 1990 68(2): 775-784.
- [9] DEVAUX D, FABBRO R, TOLLIER L, *et al.* Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(4): 2268-2273.
- [10] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. Materials Science & Engineering, 1996, A210(1/2): 102-113.
- [11] ZHANG X Q, ZHOU J Zh, WANG G L, *et al.* Technology of laser peening and its application [J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(10): 26-28(in Chinese).
- [12] ZHANG W W, YAO L Y. Micro-scale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(2): 18-24.
- [13] ZHOU J Zh. Study on the mechanism of shock wave loading and the property of deformation of sheet metal of laser shock forming [D]. Zhenjian: Jiangsu University, 2003: 13-30(in Chinese).
- [14] YANG Ch J, ZHANG Y K, ZHOU J Zh, *et al.* Analysis and experiment on deformation of sheetmetal by laser shock wave [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(s1): 40-43(in Chinese).
- [15] HONG X, WANG Sh B, GUO D H, *et al.* Study of the properties of the shockwave induced by high-power laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 1998 25(8): 743-747(in Chinese).