

# 嵌入式激光轮对磨损在线检测

郭苗军,于隽雅,邱选兵,郭安邦,王建帅,徐海燕,李传亮

(太原科技大学 应用科学学院,太原 030024)

**摘要:** 高铁轮对轮廓表面磨损的精密测量对于高铁稳定安全运行具有重要的研究意义.基于此,研制了一种基于激光三角测量原理的嵌入式高铁轮对表面磨损测量装置.以低功耗 STM32F103 单片机为主控制器,采用 TCD1500C 作为位移感光元件,软件模拟了 CCD 驱动时序,并利用主控制器内部模数转换器将 CCD 放大后的电压信号转换为数字信号,对数字信号进行 FIR 滤波和二值化处理,再由三角测距原理拟合得到轮对尺寸参数.同时,利用蓝牙通信接口将测量数据传输至上位机虚拟仪器面板中,在 PC 端进行可视化显示和结果分析.结合实际测量和安装尺寸,在 ZEMAX 中模拟和优化了 Ernostar 透镜组,以消除由于焦距变化引起的像差.采用线性拟合对模拟轮对测量进行了校准,并使用校准后的装置对模拟磨损轮对进行在线测量.实验结果表明,该实验装置最大可测量磨损程度可达 32 mm,测量精度达 21.28  $\mu\text{m}$ ,测量分辨率为 6  $\mu\text{m}$ ,满足轮对表面磨损精度测量需求.

**关键词:** 高铁轮对;线阵 CCD;激光三角测距法;FIR 数字滤波;嵌入式系统

**中图分类号:** TP394.1;TH691.9

**文献标志码:** A

高铁轮对是高铁最重要的部件之一,其表面磨损程度是保证高铁的高速安全行驶的重要参数之一.目前,国内高铁轮对测量仍然采用第四代检查器和轮径尺的人工手动检测方式,其工作强度大、准确度低、速度慢.随着高铁轮对数量的急剧增加,人工测量方法已经成为阻碍我国高铁快速发展的重要瓶颈之一<sup>[1]</sup>.

激光测距技术以其非接触、实时检测、分辨率高等优势广泛应用于工业制造、航空航天以及遥感等领域<sup>[2]</sup>.在轮对表面磨损检测中,瑞士 ELAG 公司基于激光三角测距法的 OPTIMESS 激光位移传感器较为广泛,集成了高精度的导轨装置,可以自动控制实现在线精密测量<sup>[3]</sup>,其缺点是成本高.国内,武汉鸿诚远大研制的 HYTM-J 便携式激光轮对踏面测量仪,测量精度达到  $\pm 0.03$  mm,其采用蓝牙与计算机连接实现数据共享<sup>[4]</sup>;领邦科技研发的轮对自动检测机,虽然适应各型号轮对,但是不便于携带,而且检测速度较慢,无法满足快速和大量检测的要求<sup>[5]</sup>.本文基于激光三角测量原理<sup>[6-7]</sup>,利用半导体激光器、透镜、光阑和线阵 CCD 研制了模拟轮对快速非接触精密测量装置,采用蓝牙接口将数据实时传输至上位机进行显示和建模.

## 1 工作原理

本文采用斜射式激光三角测量法,该方法多用于测量对象表面光滑的对象,其测量精度相对较高<sup>[8-9]</sup>,非常适合轮对表面磨损测量.

激光三角测量法原理图如图 1 所示,当激光器出射的光与被测对象表面的法线方向以某一夹角入射到该被测对象的表面上时,被测面的散射光或反射光被透镜聚焦后的光斑应该满足 Scheimpflug 条件<sup>[10-11]</sup>

$$\tan(\theta_1 + \theta_2) = \beta \tan \theta_3, \quad (1)$$

**收稿日期:** 2019-09-28; **修回日期:** 2019-10-25.

**基金项目:** 国家自然科学基金(U1610117;U1810129;11747068);山西省重点学科建设经费和山西省“1331 工程”重点创新团队建设计划(1331KIRT);江西中医药大学现代中药制剂教育部重点实验室开放基金;山西省重点研发计划(201803D31077;201803D121090);山西省高等学校优秀青年学术带头人(2018);太原科技大学重型机械教育部工程研究中心“重型机械”本科生创新基金项目(20173001).

**作者简介(通信作者):** 郭苗军(1985—),男,山西长治人,太原科技大学讲师,研究方向为激光测量、量子光学, E-mail: guomiaojun85@sina.com.

当被测对象产生位移时,聚焦后的光点在 CCD 光敏感面上也随之移动,根据相似三角形原理,那么

$$x = \frac{ax' \sin \theta_3 \cos \theta_1}{b \sin(\theta_1 + \theta_2) - x' \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}, \quad (2)$$

其中,  $x$  为被测对象位移,  $x'$  为光线在探测器上的位移,  $a, b$  分别为物距和相距,  $\theta_1$  为光轴与被测对象表面法线之间的夹角;  $\theta_2$  为成像透镜光轴与被测对象表面的法线之间的夹角;  $\theta_3$  为 CCD 光轴与成像透镜光轴之间的夹角. 在高铁轮对的实际测量中,通过测量光点在 CCD 上位移,代入(2)式进行理论计算即可得到待测目标位移.

## 2 硬件设计

激光轮对检测装置的硬件框图如图 2 所示.在图 2 中,系统主要由上位机软件、主控电路、激光器、线阵 CCD 信号前置处理电路、光学组件、蓝牙通信电路以及液晶显示等部分组成.本节着重介绍主控单元、CCD 及光学组件、信号前置处理电路.

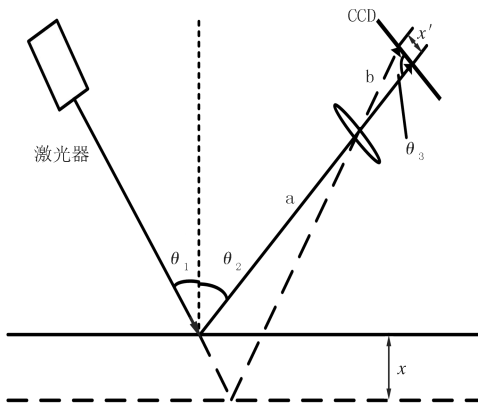


图1 检测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of detection principle

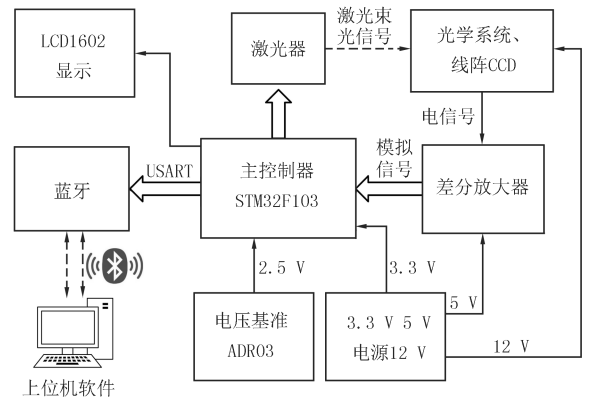


图2 硬件框图

Fig.2 Block diagram of hardware

### 2.1 主控模块

主控模块核心为 ST(意法半导体)公司研制的 STM32F103(STM32).该芯片工作频率可达 72 MHz<sup>[12]</sup>, 可实现轮对信息的快速采集和处理;内部集成 ADC 可降低仪器成本<sup>[13]</sup>;有多个定时器可以同时产生驱动 CCD 的多路信号;高速 USART 和 USB 通信接口可以实现数据快速传输,此外该芯片具有 3 种低功耗模式,在达到精准测距的同时可降低系统功耗.

STM32 主要功能包括:激光器的驱动,线阵 CCD 的驱动时序模拟,信号采集和数字滤波,测量结果数据的计算、显示以及通信.其中,模拟信号的采集是确保数据准确的关键.为了提高 ADC 转换的稳定性和准确性,采用高精度超低温漂 ADR03 基准电压源作为 STM32 的参考电压输入.

### 2.2 TCD1500C 电路

TCD1500C 是 TOSHIBA 公司研制的线性图像传感器,有 5 340 个像素点<sup>[14]</sup>.该芯片的驱动信号电平为 5 V,而 STM32 I/O 口电平为 3.3 V,因而在设计电路时,采用 74HC14 芯片,该芯片控制端兼容 3.3 V TTL 电平,输出为 5 V TTL 电平,可以满足 CCD 的驱动要求.

CCD 的 OS 引脚输出信号为负电压、有效信号峰值较小,且信号中有 RS 干扰<sup>[15]</sup>.DOS 引脚为补偿输出端,该信号也有 RS 信号干扰.因此 CCD 输出需要经信号处理后,方可进入 ADC 采样,为了增加输出阻抗,在 OS 和 DOS 引脚增加射级跟随器电路<sup>[16]</sup>.OS 和 DOS 信号都含有 RS 信号干扰,这两个信号的偏置电压较大,但有效信号幅值很小,因此采用 AD8629 低漂移、低噪声运放放大器进行差分放大,并在输出端增加了 RC 低通滤波电路,这样可以有效抑制信号中的共模噪声和低频噪声.

### 2.3 光学系统设计

由于高精度的光学测量对光学设计要求较高,而实际透镜存在一定的厚度从而导致位移变化时,成像光

斑几何形变,从而造成成像误差<sup>[17]</sup>.根据高斯光学成像原理,在 ZEMAX 软件中模拟不同平凸、凹凸透镜等 4 种透镜组合的 Ernostar 的透镜组方式,透镜组的原理图如图 3 所示.透镜组的前三个镜片可以产生一个长焦距,而第四片透镜可将焦距重新缩短,这样的结构可以很好地控制眩光和散射.此外前三片透镜可校正场曲和轴向色差,前两个透镜用以减小系统的高级相差,增大物镜的相对孔径,优化该结构可以实现最小像差的高质量成像光学系统,可保证落在 CCD 上的光斑会聚性更好,减少杂散光.

### 3 软件设计

#### 3.1 软件流程图

软件分为 CCD 驱动、电荷信号的采集以及通信三部分.轮对信息采集分为:激光器调制程序、CCD 时序程序、AD 转换与数字滤波.软件流程为:系统启动后,首先对所有外设进行配置,然后等待控制命令.当收到“开始测量”指令时,驱动激光器和 CCD,ADC 采集信号差分放大后信号,后对数据进行 FIR 滤波,将得到的轮对信息存到 MCU 闪存中,并在 LCD1602 上显示.当 MCU 接收到“发送数据”指令时,将存在闪存中的数据通过蓝牙或 USB 发送到上位机存入数据库建模.

#### 3.2 CCD 驱动信号

TCD1500C 的典型驱动频率为 1 MHz,参考数据手册中时序可以得到 CCD 驱动信号 SH、Φ、RS、SP 具体参数.考虑到 STM32F103 的时钟为 72 MHz 所以设计了如下各路脉冲的参数:方波 Φ 时钟脉冲信号的频率为 0.1 MHz,占空比为 50%;方波 RS 脉冲信号的频率为 0.2 MHz,占空比为 20%;SP 信号频率为 0.2 MHz,占空比为 20%,但是 RS 相位比 SP 转移信号要提前 1 μs;方波 SH 积分时间的脉宽为 1 500 ns.为了实现 TCD1500C 驱动,所以在程序设计中使得四路信号整体多循环 100 个周期,充分保障 OS 信号转移完全.

#### 3.3 数字滤波器

由 TCD1500C 数据手册可知,RS 信号每次复位时都会输出一个光脉冲,因此 OS 引脚输出信号频率为 0.2 MHz,通常把信号通道的实际带宽限制在奈奎斯特的 70%~80%之间,即截止频率在 0.15 MHz 左右.所以设置 FIR 滤波器截止频率为 10 kHz,可以有效地滤除高频噪声.在得到 FIR 滤波截止频率后,可以使用 MATLAB 生成 FIR 系数  $b(n) = fir(n, W_n)$ ,其中,  $n$  为滤波器表达式中阶数减一,  $W_n$  是介于 0 和 1 之间的数字,对应奈奎斯特频率,即归一化采样频率,可通过

$$W_n = \frac{f_c}{0.5f_s}$$

求得.上式  $f_s$  代表采样频率,  $f_c$  代表 FIR 截止频率.以下为滤波器 Z 变换表达式

$$B(z) = b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-N}.$$

在 STM32F103 中集成高速 12 位 AD 转换器,最大采样频率 200 kSPS,根据采样定理可知,可以满足系统的需求.AD 采样值经过 MCU 计算得到电压值,经过 FIR 滤波器进行处理即可得测量结果.

#### 3.4 机车轮对磨损检测的虚拟仪器设计

机车轮对磨损检测虚拟仪器是由 Labwindows/CVI 编写<sup>[18]</sup>.该实验装置采用 USB 方式实现上位机与单片机之间的通信.在上位机一端,虚拟仪器通过硬件 USB 接口或无线蓝牙传输的方式将数据传送给单片机,实时显示轮对测量缺陷情况,并对轮对磨损情况存入数据库.

## 4 实验结果及分析

#### 4.1 实验装置

由于实际高铁轮对体积大,测量不方便,所以论文进行了一个轮对模型的模拟测量,其测量系统实物图如图 4 所示.实验中,模拟轮对高 50 mm,轮缘厚 8 mm,上台面直径 100 mm,下台面直径 78 mm.激光器出射光照射在轮对上,激光经轮对表面反射,经过聚光透镜后由孔径光阑屏蔽杂散光,最后汇聚到线阵 CCD 上,信号经过 MCU 采集处理后即可计算得测量值,结果在 LCD 上显示,同时由蓝牙传输至上位机.由于

CCD 对于光照极为敏感, 在外界日光或其他强光作用下会迅速达到饱和状态导致无法分辨有用信号, 因此设计了遮光罩, 在工作时遮光罩盖在核心板、孔径光阑及聚光透镜上, 起到遮蔽外界光照的作用. 为模拟真实轮对检测条件, 将轮对放在旋转台和升降台上, 扫描过程中通过旋转台和升降台配合实现模拟轮对的三维运动.

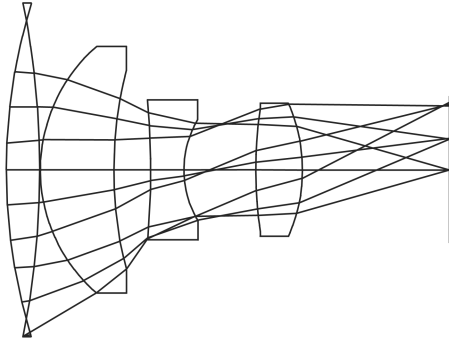


图3 Ernststar透镜组示意图

Fig.3 Ernststar lens group schematic diagram

## 4.2 信号处理

在无光时, 原始信号为高电平, 光斑照射的位置输出为负电压, 且含有很大噪声. 信号在前置差分放大电路处理后, 噪声明显减少, 且将输出变为正电压. ADC 采样数据经过 FIR 滤波器后信号如图 5 所示, 可见输出信号为信噪比较高的方波信号. 最后信号经过二值化处理后就转化为标准的方波信号, 准确地反映了光斑位置的变化情况.

## 4.3 标定与轮对测量

为得到测量值与位置信息的定量关系, 需要对实验装置进行标定. 将仪器按图 4 进行安装, 将轮对更换为一个漫反射屏, 将漫反射屏幕安装在有刻度的导轨上, 以 0.1 mm 为间隔移动反射屏, 共移动 2 mm, 每移动一次进行一次采样. 设备标定实验结果如图 6 所示, 图中的点为实验获得原始数据, 经过拟合可得测量值与位置信息的关系式

$$y = 2\,846.77 \text{ mm} - 164.49x,$$

其中,  $x$  指光斑中心位置在 CCD 上的位置,  $y$  为测量值, 由该公式可得装置的理论测量分辨率为  $6 \mu\text{m}$ , 由于 TCD1500C 有 5 340 个光敏单元, 该实验装置理论量程为 32 mm.

得到测量值与位置信息的定量关系后, 对光滑的高铁轮对进行实际测量, 实验装置如图 4 所示. 实验以  $3^\circ$  为单位沿垂直方向旋转, 以相同纵向间隔上升, 每个高度采样 120 个点, 共采集 7 组数据. 轮对测量结果如图 7 所示, 不同曲线代表不同高度, 从图 7 中可以看出该实验装置的测量精度为  $21.28 \mu\text{m}$ .

由于轮对为钢铁制品, 硬度较高, 难以做出形状规则的磨损, 因此在轮对表面贴上厚度均匀的窄纸条作为轮对的模拟轮对磨损, 用精度为  $1 \mu\text{m}$  的螺旋测微器测得该纸片的厚度为  $388 \mu\text{m}$ . 模拟缺陷轮对数据采集方法与以上实验相同, 所得实验结果如图 8 所示. 从图 8 可以明显看出轮对的模拟缺陷, 计算得纸片平均厚度为  $364.47 \mu\text{m}$ , 测量误差为  $23.53 \mu\text{m}$ , 相对误差为  $0.06\%$ .

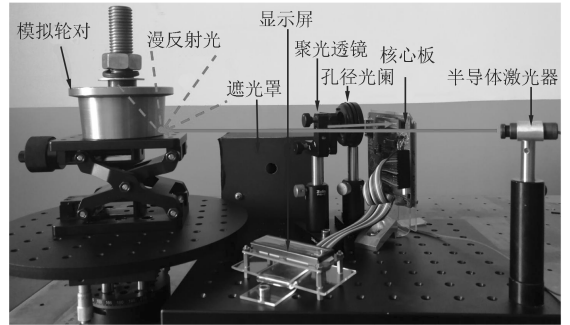


图4 模拟轮对检测系统实物图

Fig.4 Picture of simulated wheelsets detection system

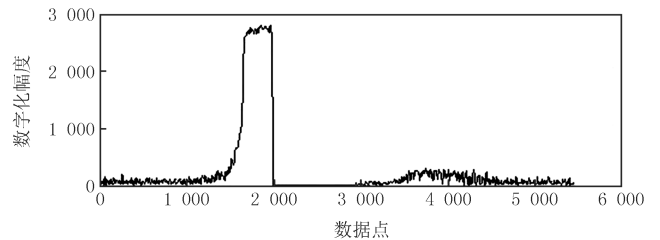


图5 数字滤波信号

Fig.5 Digital filter signal

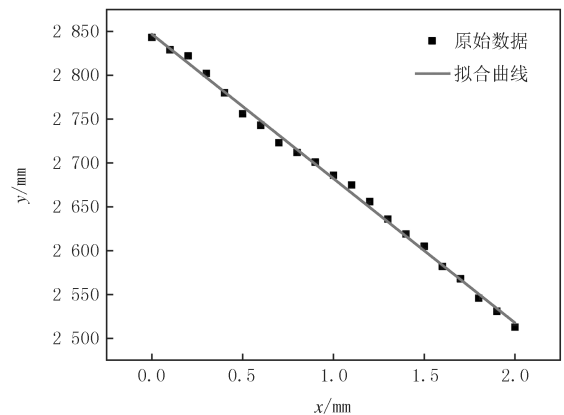


图6 原始数据及线性拟合

Fig.6 Raw data and linear fitting

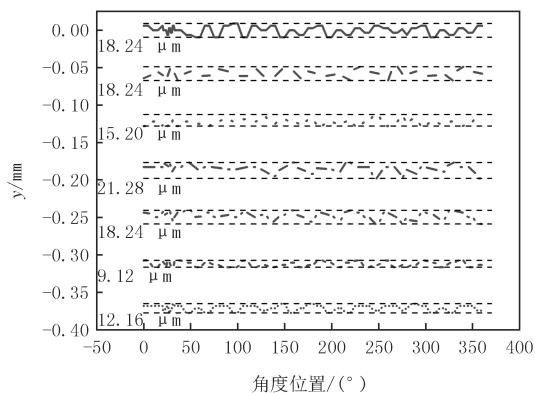


图7 无磨损轮对测量结果

Fig.7 The plot of wheelsets measurement

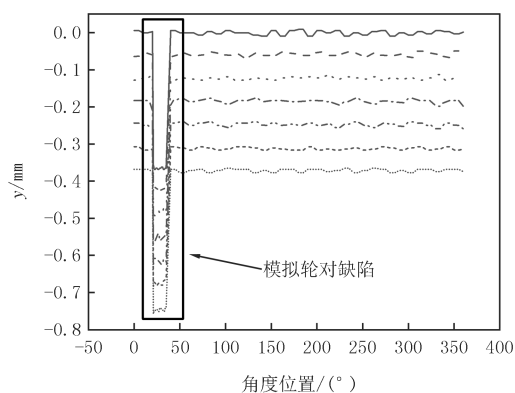


图8 模拟轮对磨损测量结果

Fig.8 The measure results of simulative wheelsets with abrasion

## 5 结论

设计了一种基于激光三角测距原理的高精度激光轮对检测装置,该装置具有设备体积小、成本低、精度高、非接触式无损测量等优点.实验对比了轮对无缺陷和模拟轮对缺陷的情况,轮对缺陷可以明显地检测到,证明该装置具有很强的实用性.实验结果表明,该实验装置最大可测量磨损程度可达 32 mm,测量精度为 21.28  $\mu\text{m}$ ,可满足轮对表面磨损测量需求.未来应提高 AD 采样精度、优化透镜组设计和数字信号处理,以提高轮对检测得精度和分辨率,以适应未来更精密的测量需要.

## 参 考 文 献

- [1] 张绍恩,付德利,王维平,等.LLJ-4B型铁道车辆车轮第四种检查器的研制[J].铁道技术监督,2007,35(4):44-45.  
ZHANG S E,FU D L,WANG W P,et al.Research of the Fourth Type of Wheel Inspector for LLJ-4B Type of Railcars[J].Railway Quality Control,2007,35(4):44-45.
- [2] 李雅倩,付献斌,周坤.CCD分段测量的光学位移测量系统[J].光学精密工程,2011,19(9):2036-2042.  
LI Y Q,FU X B,ZHOU K.Optical displacement measuring system by CCD segmental measurement[J].Optics and Precision Engineering,2011,19(9):2036-2042.
- [3] 黄凌开.瑞士 OPTIMESS 奥特迈斯数字激光测量技术与铁路应用[C]//中国铁道学会重载铁路建设养护与装备安全研讨会论文集.北京:[出版者不祥],2015:481-490.  
HUANG L K.Digital laser measurement technology and railway application of OPTIMESS oatmeys,Switzerland[C]//Proceedings of the seminar on maintenance and equipment safety in heavy-haul railway construction of China railway society,Beijing:[s.n.],2015:481-490.
- [4] Portable intelligent wheel tread measuring instrument[EB/OL].[2019-05-21].<http://www.whhcyd.com/prodetail-9869437.html>.
- [5] Railway vehicle wheelset automatic detection equipment[EB/OL].[2019-05-21].<http://c.gongkong.com/leadertech/p44615.html>.
- [6] 乐开端,王创社,赵宏,等.激光轮廓测量中的光强自动控制研究[J].光子学报,1998,27(4):348-351.  
LE K D,WANG C S,ZHAO H,et al.Light intensity auto-controlling in laser 3D-measurement[J].Acta Photonica Sinica,1998,27(4):348-351.
- [7] 许贤泽,翁名杰,徐逢秋,等.正交调制降频相位式激光测距[J].光学精密工程,2017,25(8):1979-1986.  
XU X Z,WENG M J,XU F Q,et al.Phase laser ranger based on quadrature modem and frequency reduction[J].Optics and Precision Engineering,2017,25(8):1979-1986.
- [8] 杨静,谢海椿,邢宗义.基于激光位移传感器的便携式轮对测量仪[J].仪表技术与传感器,2017(4):41-44.  
YANG J,XIE H C,XING Z Y.Portable wheelset measuring instrument based on laser displacement sensor[J].Instrument Technique and Sensor,2017(4):41-44.
- [9] 何平,尤志毅,杨旭东.一种新型高精度激光轮对检测装置[J].电子技术应用,2004,30(2):31-32.  
HE P,YOU Z Y,YANG X D.A new high-precision laser wheelset detection device[J].Electronic and Applied Technology,2004,30(2):31-32.
- [10] 王晓嘉,高隼,王磊.激光三角法综述[J].仪器仪表学报,2004,25(z3):601-604.  
WANG X J,GAO J,WANG L.Survey on the laser triangulation[J].Chinese Journal of Scientific Instrument,2004,25(z3):601-604.
- [11] 董元丽,王辉林.电子调制的激光相干法表面轮廓测量技术研究[J].激光与光电子学进展,2016(1):120-125.

- DONG Y L, WANG H L. Study on measuring technology of surface profile based on electronic modulation coherence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016(1): 120-125.
- [12] 温泉源, 纪元法, 孙希延, 等. 基于 ARM+FPGA 的相位平滑伪距差分定位方法[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 63-68.  
WEN Q Y, JI Y F, SUN X Y, et al. Carrier phase smooth pseudorange differential positioning method based on ARM+FPGA[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(4): 63-68.
- [13] 华锦修, 史守圆, 程乐峰, 等. 适用于自动需求响应的分体式智能用电测控终端[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 140-148.  
HUA J X, SHI S Y, CHENG L F, et al. Split-type smart power measurement and control terminal for automated demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 140-148.
- [14] 占伟伟, 卢海燕, 蔡莉, 等. 基于 CPLD 的石英水平摆倾斜仪 CCD 驱动设计[J]. *地震地磁观测与研究*, 2014, 35(z3): 253-257.  
ZHAN W W, LU H Y, C L, et al. Design of CCD driver for quartz horizontal pendulum tiltmeter based on CPLD[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2014, 35(z3): 253-257.
- [15] 廖平, 任成, 杨小雨. 基于线阵 CCD 的高精度位移传感器前端设计[J]. *光电工程*, 2017, 44(5): 498-504.  
LIAO P, REN C, YANG X Y. Front-end design of high precision displacement sensor based on linear array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(5): 498-504.
- [16] 袁敏杰, 陈骥. 激光位移传感器中线阵 CCD 驱动方法的设计[J]. *电路与系统*, 2015(4): 23-31.  
YUAN M J, CHEN J. Design of CCD driving method for laser displacement sensor central array[J]. *Open Journal of Circuits and Systems*, 2015(4): 23-31.
- [17] 张正琦, 陶卫, 杨红伟, 等. 激光三角测距中的光斑形状修正[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s): 57-65.  
ZHANG Z Q, TAO W, YANG H W, et al. Correction of spot shape in laser triangulation ranging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 57-65.
- [18] 吴应发, 刘路路, 赵柯莹, 等. 基于 Labwindows/CVI 的大气激光通信误码率测试[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 55-59.  
WU Y F, LIU L L, ZHAO K Y, et al. Bit error rate test of atmospheric laser communication based on Labwindows/CVI[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(3): 55-59.

## Investigation of on-line embedded laser measurement instrument for wheelsets wear

Guo Miaojun, Yu Junya, Qiu Xuanbing, Guo Anbang, Wang Jianshuai, Xu Haiyan, Li Chuanliang

(School of Applied Science, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The precision measurement of the surface abrasion of the high-speed train wheelsets(HSTW) is essential for ensuring the safety and smoothness for their work. A portable wheelsets instrument was developed to in-situ measure the surface abrasion of HSTW based on laser triangulation method. A 32-bit low-power microcontroller(STM32F103) was employed as the main controller. A CCD chip(TCD1500C) was also used to sense the displacement. The analog signal output from TCD1500C sensor which was driven by software simulation time sequence was converted to digital signal by the on-chip ADC(analog to digital converter) of the STM32F103. The raw data were filtered by a digital FIR(Finite Impulse Response) filter and binarized by a preset threshold. Then, some surface abrasion parameters can be calculated with the triangulation method. Meanwhile, the measurement data can be transmitted to a computer virtual instrument programmed for visual display and data processing through the bluetooth communication interface. Additionally, with consideration of the installation and measurement size, the Ernostar lens group was designed and optimized in ZEMAX to eliminate aberrations produced by the variable focal length. The linear fitting strategy was utilized to calibrate the developed instrument. Then the calibrated instrument measured the simulated HSTW which had a preset defect. The experimental results show that the measuring range, precision and resolution are 32 mm, 21.28  $\mu\text{m}$ , and 6  $\mu\text{m}$ , respectively. It can qualified the requirements of the measurement of the surface abrasion of the HSTW.

**Keywords:** wheelsets; linear array CCD; laser triangulation principle; digital FIR filtering; embedded system