

文章编号: 1001-3806(2009)06-0575-04

应用于铁轨平直度检测的激光测量系统的研究

刘鹏^{1,2}, 高立民^{1*}, 乐开端³

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 为了能够对铁轨的平直度参量进行精确测量, 设计了一种基于自准直原理的嵌入式激光测量系统, 其检测系统主要由图像采集和传输模块、图像处理和数据处理模块及激光测距模块组成, 系统将接收的光斑图像通过一系列图像处理, 将距离参量和图像参量带入自准直算法中, 求得铁轨平直度偏移量, 并能够保证其测量精度在 0.3mm。结果表明, 该系统可以在一定程度上代替传统的轨道测量方法, 使得测量过程更加简便、精确。

关键词: 测量与计量; 准直测量; 灰度重心算法; 动态阈值分割; 铁轨平直度

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.005

Laser measurement system for rail linearity

LIU Peng^{1,2}, GAO Li-min¹, YUE Kai-duan³

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to measure the rail linearity accurately, an embedded laser detection system, composed of image acquisition and transmission module, image processing and data-processing module, laser range module, was designed based on autocollimation theory. After a series of image processing, the images and distance parameters were sent to the autocollimation algorithm, and the rail linearity offset can be obtained with a measuring accuracy of 0.3mm. The system can replace the traditional manner of rail detection, also make the detection process more simple and accurate.

Key words: measurement and metrology; autocollimate measurement; grey centroid; dynamic threshold segmentation; rail linearity

引言

铁道铁轨在经过长时间使用之后, 在某些路段铁轨会发生弯曲、下沉等形变, 从而导致直线度等参量超过建设初期的安全设计指标, 会产生一系列事故隐患。因此需要技术人员定期对铁轨直线度进行检测。在传统铁轨检测时, 技术人员凭借肉眼或者简易装置进行标定, 这些测量方式误差太大, 给整个测量工作带来了很大的局限性。因此, 作者提出一种测量更加精确的、基于嵌入式系统的自准直测量系统, 该系统通过激光测量、图像处理 and 自准直校准等方法对轨道进行检测, 能够保证对铁轨平直度的偏移量测量精度在 0.3mm 的范围内, 满足了日常检测工作的需求。

1 系统工作原理

铁轨直线度检测仪主要由激光发射端系统和直线

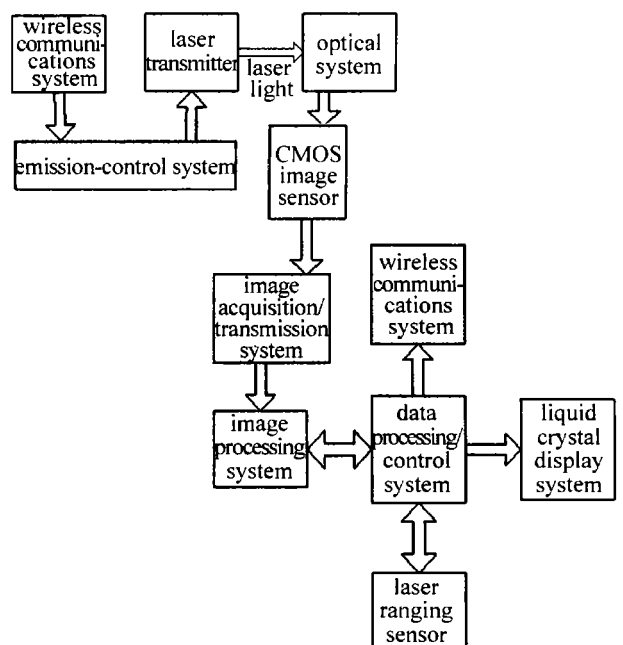


Fig. 1 Block diagram for rail linearity detection

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775172)

作者简介: 刘鹏(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究工作是光电检测。

* 通讯联系人。E-mail: glm@opt.ac.cn

收稿日期: 2008-09-01; 收到修改稿日期: 2008-12-02

度检测端系统两部分构成。其系统原理框图见图1。

激光发射端系统由半导体激光器、准直透镜和无线通讯模块构成,准直透镜能够保证激光光斑在100m处成像半径不大于40mm,通讯模块可以由检测端控制激光器的亮灭;直线度检测系统由图像采集/传输、图像/数据处理、激光测距传感器、通讯控制4个模块组成,其模块功能如下。

(1) 图像采集和传输部分:由光学系统、图像采集和传输系统构成,其光学系统光路如图2所示,激光

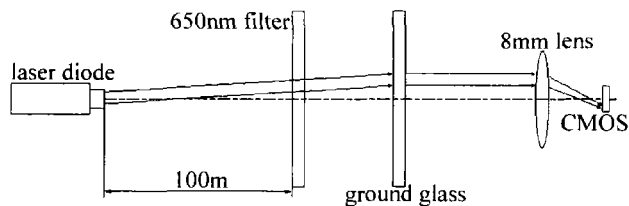


Fig. 2 Optical principle of rail linearity detection

发射端发出一束准直激光,光束沿铁轨传播100m后成像在直线度检测仪上的650nm滤光镜上,然后照射在毛玻璃表面,CMOS图像传感器对光斑图像进行接收和采集。图像采集和传输系统由CMOS传感器OV9625, ARM处理器LPC2124, USB2.0芯片CY7C68001组成^[1]。

(2) 图像与数据处理部分:由带USB2.0接口的工业控制机PC104和上位机图像、数据处理软件构成,CMOS传感器接收到的图像通过USB2.0接口将实时图像上传到PC104上,图像处理软件对光斑图像进行基于中值滤波图像去噪法、基于最大类间方差法(Otsu法)的动态阈值分割法、基于重心法的光斑坐标检测法、自准直校正处理后,得出偏移量数据。

(3) 激光测距传感器:精度为1mm,测量距离110m,通过RS232与上位机软件进行通讯,测量时,能够即时得到检测端和发射端的距离数据,并送入数据处理系统进行处理。

(4) 通讯控制部分:由PC104、上位机控制软件和无线通讯模块构成,可以在图像处理的同时通过无线通讯对激光发射端进行中断控制,保证激光测距与图像处理进行分时处理,从而使测距过程不受到激光发射端的干扰。

2 直线度检测原理

2.1 激光光斑图像处理

检测端沿被测轨道向发射端移动,准直激光束沿铁轨面射到其靶面,每隔5m对靶面激光光斑的图像进行测量,将测量值带入自准直测量原理中,可以得到被测铁轨的偏移量。要完成对铁轨直线度的高精度测量,关键是对激光靶面的图像的细化处理测量和精确

定标。在图像处理算法中采用了中值滤波去噪法,最大类间方差法(Otsu法)的动态阈值分割法,基于重心法的光斑坐标检测法,基于自准直测量的检测方法。

2.1.1 中值滤波图像去噪 CMOS接收的图像由于存在外界光的干扰,所以需要去除噪声,中值滤波可以有效地消除孤立噪声,同时克服图像细节的模糊,对图像边缘有保护作用。因此,对图像首先进行中值滤波去噪,然后再能对图像进行准确的灰度分割^[2]。

2.1.2 基于最大类间方差法(Otsu法)的动态阈值分割 该算法是用阈值把图像像素划分为两类,通过使划分后得到的两类的类间方差最大来确定最佳阈值^[3-4]。

设图像 $I(i,j)$ 灰度级范围为 $R=[0,L-1]$,各灰度级出现的概率为 P_i ,阈值 t 将图像像素分为两类: $C_0=[0,K]$ 和 $C_1=[K+1,L-1]$ 。两类的概率为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^K P_i \text{ 和 } \omega_1 = 1 - \omega_0, \text{ 两类的平均灰度为 } \mu_0 = \frac{\mu_i}{\omega_0}$$

$$\text{和 } \mu_1 = \frac{\mu_i}{1 - \omega_0}, \text{ 其中 } \mu = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i, \mu_i = \sum_{i=0}^t iP_i, \text{ 准则函数}$$

定义两类的类间方差为: $\sigma_B^2 = \omega_0\omega_1(\mu_0 - \mu_1)^2$,最优阈值 t^* 通过求类间方差的最大值得到:

$$t^* = \arg \max_{t \in R} \sigma_B^2 \quad (1)$$

2.1.3 基于灰度重心法的光斑坐标检测 常用的光斑中心定位算法有重心法、Hough变换法^[5]、最小二乘法 and 空间矩算法等。考虑到系统本身的测量要求,采用灰度重心算法实现^[6]。假设光斑位于2维靶面坐标系中,大小为 $M \times N$,灰度图像 $I(i,j)$ 中目标的灰度重心 (x_0, y_0) 为:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N iT(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T(i,j)}, y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N jT(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T(i,j)} \quad (2)$$

式中, $T(i,j)$ 为权值。图像经过二值化处理后, $T(i,j)$ 表示为:

$$T(i,j) = \begin{cases} I(i,j), & (I(i,j) > t) \\ 0, & (I(i,j) \leq t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, t 为区别目标和背景的阈值。

2.2 铁轨直线度自准直测量原理

在铁轨上选择A,B两个参考点,其距离为100m。在A,B处分别放置激光发射端和检测端。激光通过标定后沿铁轨直线发射,在检测端进行成像,成像图像通过探测仪内部软件进行图像处理,可检测到第1个光斑在靶面成像位置 (X_0, Y_0) ,以激光发射点和靶面中心为Z轴建立虚拟坐标系(坐标轴分别为X,Y,

Z), 光斑的空间坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , 见图3。

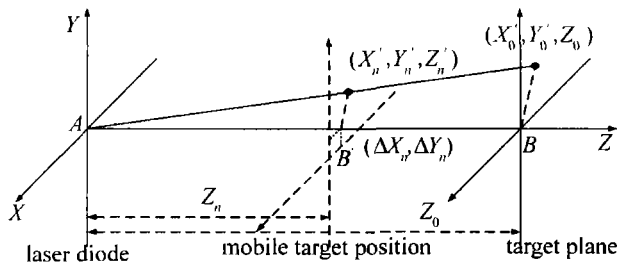


Fig. 3 Schematic diagram of rail linearity detection

在虚拟坐标系中为激光光线建立直线方程:

$$\begin{cases} X' = \lambda X_0 \\ Y' = \lambda Y_0 \\ Z' = \lambda Z_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, λ 为待定参数。

然后将检测仪向 A 点方向移动 5m, 光斑在靶面位置变为 (X_1, Y_1) , 光斑在最开始建立的坐标系的空间坐标变为 (X_1', Y_1', Z_1') , 此时, 已知 Z_1' 值 (即 Z_1 值), 可以由直线方程算出 λ , 再由 λ 反算出此时的 X_1', Y_1' 。即:

$$\begin{cases} X_1' = \frac{Z_1}{Z_0} X_0 \\ Y_1' = \frac{Z_1}{Z_0} Y_0 \\ \lambda = \frac{Z_1}{Z_0} \end{cases} \quad (5)$$

由以上推导可得此测量位置偏移虚拟坐标系 Z 轴的偏移量 $(\Delta X_1, \Delta Y_1)$, 即:

$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1 - X_1' = X_1 - \frac{Z_1}{Z_0} X_0 \\ \Delta Y_1 = Y_1 - Y_1' = Y_1 - \frac{Z_1}{Z_0} Y_0 \end{cases} \quad (6)$$

同理, 可以再将检测端移动 5m, 得出下一个探测位置偏移量 $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$, 即:

$$\begin{cases} \Delta X_2 = X_2 - X_2' = X_2 - \frac{Z_2}{Z_0} X_0 \\ \Delta Y_2 = Y_2 - Y_2' = Y_2 - \frac{Z_2}{Z_0} Y_0 \end{cases} \quad (7)$$

由上式可以推得每个探测点位置偏移量 $(\Delta X_n, \Delta Y_n)$, 即:

$$\begin{cases} \Delta X_n = X_n - X_n' = X_n - \frac{Z_n}{Z_0} X_0 \\ \Delta Y_n = Y_n - Y_n' = Y_n - \frac{Z_n}{Z_0} Y_0 \end{cases}, (n = 0, 1, 2, \dots, 19) \quad (8)$$

连续测量 19 个点, 最终根据每次测量位置的偏移量可得知检测铁轨的平直度。

3 实验过程

对采集的光斑图像 (见图 3) 分别进行中值滤波去噪、灰度图像阈值分割^[7]、光斑求重心^[8-9], 其结果如图 4 ~ 图 6 所示。

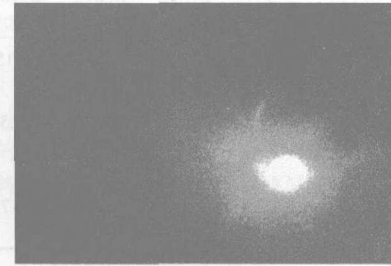


Fig. 4 Spot image on target plane



Fig. 5 Median filter image

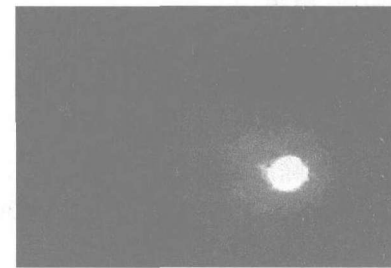


Fig. 6 Gray threshold segmentation image

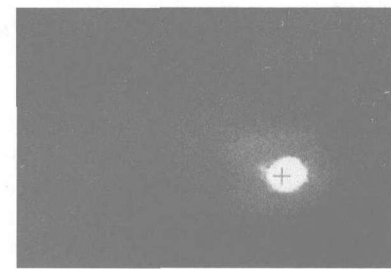


Fig. 7 Calculation gray centroid

选取 100m 全新标准铁轨线路进行标定实验, 在测量要求范围内, 可以假定该轨道为理想状态下的无形变轨道, 可以对仪器精度进行标定。部分点测得实验数据见表 1。

可以看到, 对标准轨测量的偏移量基本稳定在 0.3mm 的范围内, 满足之前根据铁轨施工标准提出的 0.3mm 的精度要求, 不过系统整体还存在一定的误差引入, 特别是对水平偏移量的测量时, 因为人为对仪器的操作原因, 会带入一定的使用误差, 在后面的工作中将会对铁轨夹紧装置进行更加细致的设计, 最大的减

Table 1 The offset data measured on the 100m standard rail

distance/m	100.012	95.121	90.115	80.125	70.142	60.132
horizontal offset/mm	0.115	0.231	0.169	0.120	0.245	0.312
vertical offset/mm	0.158	0.147	0.012	0.014	0.185	0.017
distance/m	50.189	40.147	30.158	20.147	10.155	5.102
horizontal offset/mm	0.187	0.362	0.188	0.214	0.255	0.147
vertical offset/mm	0.114	0.238	0.163	0.144	0.175	0.014

少人为带来的误差。

4 结束语

提出了一种全新的解决铁轨直线度检测的测量系统,该系统主要由嵌入式采集、处理模块、激光测距模块和无线通讯模块构成,其与图像处理 and 自准直算法相配合,能够保证系统对轨道的检测精度达到0.3mm,可以在一定程度上代替传统的轨道测量方法,使得测量过程更加简便、精确。

(上接第567页)

点的位置。通过消除激光频率跳变的影响,得到了倍频 Nd:YAG 激光器的调谐范围为 563625GHz ~ 563688GHz,转换为波长范围为 532.2093nm ~ 532.2688nm。结果表明,碘吸收谱线法可以作为测量倍频 Nd:YAG 激光器调谐波长的一种有效方法。

参 考 文 献

- [1] ZANG E J, CAO J P, ZHONG M Ch, *et al.* Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 33-340 (in Chinese).
- [2] KANE T J, BYER R L. Monolithic unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt Lett*, 1985, 10(2): 65-67.
- [3] ARIE A, BYER R. Laser heterodyne spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532nm [J]. *J O S A*, 1993, B10(11): 1990-1997.

参 考 文 献

- [1] SI Q, CAI H Y, HUANG Z H, *et al.* Design of a real-time acquisition system of CMOS image based on USB2.0 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(4): 117-119 (in Chinese).
- [2] LU Z Q. C/C++ image processing program [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 184-221 (in Chinese).
- [3] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [4] HAN S Q, WANG L. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 91-94 (in Chinese).
- [5] ZHANG X H, YANG K T. An improved 2-D hough transform method for extracting laser spot parameter [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(10): 995-997 (in Chinese).
- [6] WANG H F, WANG D B, LIU S Q. Research on auto identify and measurement approach of laser target image [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(6): 564-566 (in Chinese).
- [7] ZHONG Z L, ZHOU B, HE Y Q, *et al.* Laser spot location in imaging laser detecting systems [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(3): 248-251 (in Chinese).
- [8] SUN A X, WANG J, HE H X, *et al.* Testing precision analysis of centrobaric of laser facula [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 667-679 (in Chinese).
- [9] YANG J X, ZHUANG Y F, SHEN W X, *et al.* Precise measurement of the effective area of laser spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(10): 1263-1266 (in Chinese).
- [4] HONG F L, ISHIKAWA J. Hyperfine structures of the R(122)35-0 and p(84)33-0 transitions of $^{127}\text{I}_2$ near 532nm [J]. *J Opt Commun*, 2000, 183(1/4): 101-108.
- [5] LI J, BAI X D. The parameters optimization of Doppler broadened iodine at 532nm Nd:YVO₄ laser frequency stabilization [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 50-52 (in Chinese).
- [6] ZANG E J, CAO J P, LI Y, *et al.* 532nm iodine molecular optical frequency standards [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, 34(2): 203-208 (in Chinese).
- [7] HALL J L, MA L S, TAUBMAN M, *et al.* Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd:YAG laser [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(2): 583-586.
- [8] FORKEY J N, LEMPERS W R, MILES R B, *et al.* Corrected and calibrated I₂ absorption model at frequency-doubled Nd:YAG laser wavelengths [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(27): 6729-6738.