

文章编号: 1001-3806(2020)02-0183-07

基于位置敏感探测器的轨距在线监测系统研究

刘子英, 张靖, 邓芳明

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要: 为了实时了解铁路轨道的轨距变化情况, 研制了一种实时在线监测轨距变化的测量系统。采用位置敏感探测器和激光发射器作为测量元件实时采集轨距的变化信息, 建立数学模型计算轨距的偏移量, 通过组合算法来获取两根钢轨移动状态后的偏移量, 并通过二次插值算法对位置敏感探测器进行非线性补偿以提高位置敏感探测器的精度和准确度; 采用控制器局域网络总线和通用分组无线服务技术将一定区域内的轨距变化信息发送到监控中心进行显示; 通过和现有二级铁路轨距尺分别对同一模拟轨道进行了测量实验。结果表明, 该系统的测量精度为 0.32mm, 达到了目前轨道检测行业所规定的 1mm 精度要求。

关键词: 激光技术; 轨距监测; 位置敏感探测器; 组合算法; 非线性补偿

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.02.008

Research of on-line monitoring of rail distance system based on position sensitive detector

LIU Ziying, ZHANG Jing, DENG Fangming

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to know the variation of rail gauge in real time, a real-time on-line gauge monitoring system was developed. Position sensitive detector and laser emitter was used as measuring elements for real-time acquisition of gauge change information. Mathematical model was established to calculate the offset of the gauge. The offset of two rails after moving was calculated by the combination algorithm. The position sensitive detector was compensated by quadratic interpolation algorithm to improve the accuracy and accuracy of position sensitive detector. The gauge change information in certain area was sent to the monitoring center for display by using controller area network bus and general packet radio service communication technology. The same simulation track was measured by the existing two-stage gauge gauge. The results show that, measurement accuracy of the system is 0.32mm. It meets the precision requirement of 1mm stipulated by track inspection industry at present.

Key words: laser technique; gauge monitoring; position sensitive detector; combination algorithm; nonlinear compensation

引言

铁路轨道基础设施是列车运行的基础, 轨道的状态检测有利于保障列车顺利通行。铁路轨道作为列车运行的基础, 经常会受到列车轮对的横向冲击, 使得钢轨横移, 增加了两钢轨的间距, 导致轮轨之间的关系发生变化, 严重时会造成列车发生脱轨或爬轨事故。

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(51767006); 江西省重点研发计划资助项目(20181BBE50019); 江西省应用研究培育计划资助项目(20181BBE58015); 江西省教育厅科学技术资助项目(180310)

作者简介: 刘子英(1964-), 女, 教授, 研究方向为检测与监测控制。

E-mail: 151696128@qq.com

收稿日期: 2018-11-16; 收到修改稿日期: 2019-05-16

虽然 JJG 219-2015《标准轨距铁路轨距尺》^[1] 中对轨尺做了一个标准限定, 但是采用轨尺检测轨距的方法需要人工现场检测, 劳动强度大, 且不具有实时性。目前主要采用非接触式测量方式对轨距进行检测。国外铁路发达国家在轨检车上安装光发射器向钢轨上发射光束, 并通过光接收器或摄像头接收钢轨上反射回来的光信息计算轨距^[2]。但是这种方法需要轨检车在轨道上运行才能对轨距进行检测, 不具有实时性。我国借鉴了国外检测轨距的先进技术, 并研发了适用于国内轨道的轨距检测系统。参考文献[3]中提出了一种钢轨轮廓特征曲线来检测轨距的方法, 采用两个激光摄像式传感器, 并建立了空间姿态非线性标定模型^[3]。但是该方法对激光摄像式传感器的安装要求严格, 车体振动或摆动都会增加该系统的测量误差。

参考文献[4]和参考文献[5]中提出了一种基于图像处理技术的轨距检测方法,采用4台 CCD 摄像机采集钢轨半截面轮廓的图像信息,并通过图像分析、立体视觉算法来计算轨距值^[4-5]。但是该方法容易受到车体振动的影响,增加了图像处理的难度。参考文献[6]和参考文献[7]中采用激光技术与相机结合成一个视觉轨距检测系统,通过摄像机接收激光扫描后的钢轨轮廓来测量轨距^[6-7],但是该方法采用的阈值分割法处理的图像会丢失大量的信息,造成测量误差偏高。参考文献[8]和参考文献[9]中提出了一种将2维激光传感器安装在铁轨两栖综合检测车上对轨距进行测量的系统^[8-9],采用激光三角原理对采集到的数据进行处理,实现了非接触式动态实时检测,但是该方法需要移动检测车才能对轨距进行测量。参考文献[10]和参考文献[11]中提出了一种基于元模型的轨距估算方法,将所测得的轨道、车轮轮廓的数据创建测量情景对轨距进行测量,但是该方案是针对一种车型设计出来的,对于其它车型的模拟情景需要另设模型^[10-11]。

本文中提出了一种基于位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)的轨距在线监测系统,该系统通过确定照射到 PSD 上的激光束位置来计算轨距的变化量,并将检测到的轨距实时变化信息传输到监控中心进行显示。该装置的探测器铺设在轨道和接触网支柱上,不受车体振动的影响,且安装简单、实时性强、检测精度高。

1 轨距在线监测系统设计方案

利用照射到 PSD 上的激光束会改变其光电流分布的特性^[12],将 PSD 安装在接触网支柱上,激光发射器安装在钢轨上,当激光发射器随着钢轨偏移时,照射到 PSD 上的光斑位置也发生了变化,再根据光斑引起的光电流输出值来计算光斑移动位置,进而计算出钢轨偏移量。铁路沿线的监测节点之间采用控制器局域网(controller area network, CAN)总线连接起来,每220个监测节点中间设置中央处理器,对各个节点采集到的轨距变化信息进行处理分类,并采用通用分组无线服务技术(general packet radio service, GPRS)将处理后的信息发送至监控中心,提醒工作人员轨距变化超限的位置及轨距变化量,设置在监测节点上的指示灯也会跟随着轨距变化是否超出阈值进行指示。当轨距超出预设值时,控制器控制指示灯亮起,表明该处轨距变化超出了阈值,需要修整,铁路职工到达现场后,根据指示灯的状态即可知道需要修整的轨距位置。

图1为轨距监测系统结构示意图。

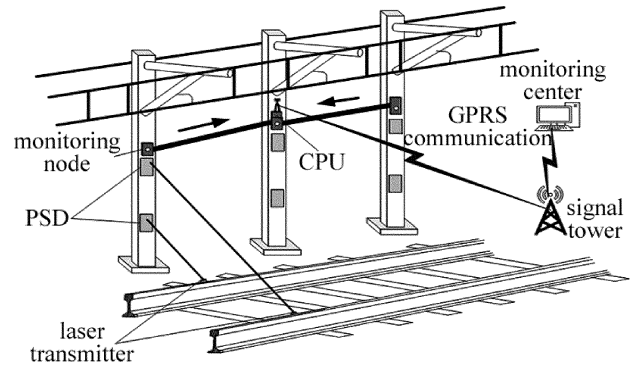


Fig. 1 Structure diagram of gauge monitoring system

2 轨距测量原理

安装在轨底上的激光发射器向安装在接触网支柱上的 PSD 发射激光束,当激光发射器随着钢轨移动时,打到 PSD 上的光斑位置也发生了变化。PSD 上光斑的移动位置反映在了钢轨移动位置上,通过计算两股钢轨的偏移量既可计算出轨距的变化量,图2为轨距测量原理图。

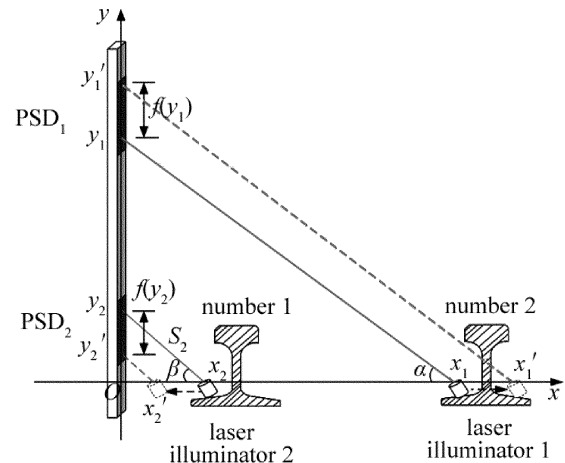


Fig. 2 Gauge measurement schematic

激光发射器1、激光发射器2分别发射出的激光束到达 PSD₁ 和 PSD₂ 之间的距离 AB, CD 分别为 S₁, S₂。采用相位式激光测距原理来计算出 S₁ 和 S₂^[13]。

设定钢轨校准时激光发射器1和激光发射器2到接触网支柱之间的水平距离 AO, CO 分别为 x₁, x₂, 激光发射器1的发射光与水平方向上的夹角 α 之间的关系为:

$$\cos \alpha = \frac{x_1}{S_1} = \frac{x_1}{\lambda_0(N + \Delta N)} \quad (1)$$

式中, x₁ 为激光发射器1到接触网支柱的距离, S₁ 为激光发射器1发出的激光束的距离, λ₀ 为调制光波波长, N 为相移的整周期数, ΔN 为相移不足整周期数的余数^[14-16]。

同理可以得出激光发射器2的发射光与水平方向上的夹角 β 之间的关系。由于钢轨在水平移动和竖直方向上移动时,水平夹角不发生改变,所以确定了 x_1, x_2 的值即确定了 α 和 β 的值。

设定钢轨校准时激光发射器1和激光发射器2打到PSD₁和PSD₂上的点 O_1, O_2 为初始点。由于1号钢轨和2号钢轨会发生同样的移动,所以先对1号钢轨移动状态进行研究,2号钢轨同理。1号钢轨向右移动或向上凸起时,激光发射器1打到PSD₁上的光斑位置高于 O_1 点,PSD₁上的光斑移动距离为:

$$f_1(y) = \int_B^{B_1} k dy \quad (2)$$

式中, k 为光斑从 y_1 到 y_1' 的单位量,本设计中取PSD₁的测量精度, B 为 O_1 的纵坐标, B_1 为激光发射器1打到PSD₁上的光斑向上移动后的纵坐标。

1号钢轨上凸的移动量即为光斑在PSD₁上的移动距离,向右移动量为:

$$f_1(x) = \frac{f_1(y)}{\tan\alpha} = \frac{\int_B^{B_1} k dy}{\tan\left\{\arccos\left[\frac{x_1}{\lambda_0(N + \Delta N)}\right]\right\}} \quad (3)$$

1号钢轨向左移动或沉降时,激光发射器1打到PSD₁上的光斑位置低于 O_1 点,PSD₁上的光斑移动距离为:

$$f_2(y) = \left| \int_B^{B_2} k dy \right| \quad (4)$$

式中, B_2 为激光发射器1打到PSD₁上的光斑向下移动后的纵坐标。

1号钢轨沉降的移动量即为光斑在PSD₁上的移动距离,向左移动量为:

$$f_2(x) = \frac{f_2(y)}{\tan\alpha} = \frac{-\int_B^{B_2} k dy}{\tan\left[\arccos\left[\frac{x_1}{\lambda_0(N + \Delta N)}\right]\right]} \quad (5)$$

同理可以得出2号钢轨上凸的移动量 $f_3(y)$,向右移动量 $f_3(x)$,向左移动量 $f_4(y)$,沉降的移动量 $f_4(y)$ 。

所以轨距的偏移量 Δx 根据1号钢轨和2号钢轨的移动状态来进行组合计算。根据轨距定义:轨距是铁轨(钢轨)顶面16mm范围内两股钢轨作用之间的最小距离可以得出,所以 Δx 为1号、2号钢轨变化后的位移偏移量。采用组合算法来计算1号钢轨和2号钢轨移动状态后的偏移量,图3为轨距的偏移量 Δx 计算值。

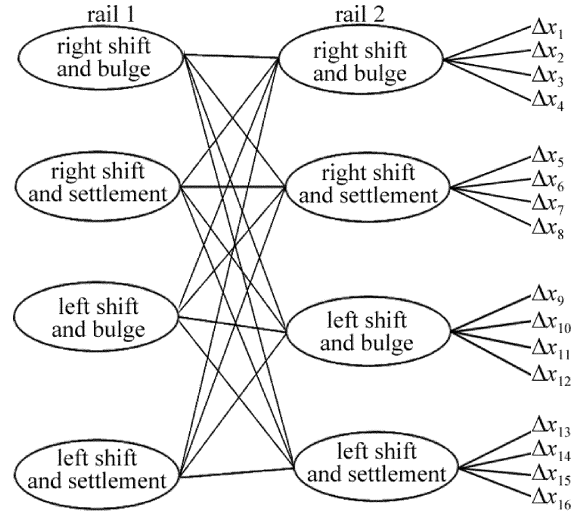


Fig. 3 Calculated value of gauge offset Δx

由图3可知,计算其中一个组合的轨道偏移量,其它的同理可得。本设计中选取1号钢轨的右移上凸和2号钢轨的右移上凸的组合 Δx_1 进行计算。图4为 Δx_1 的计算模型。

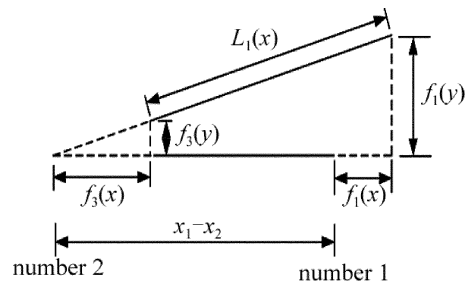


Fig. 4 Calculation model of Δx_1

$$L_1(x) = \sqrt{[f_1(y) - f_3(y)]^2 + [(x_1 - x_2) - f_3(x) + f_1(x)]^2} = \sqrt{\left[\int_{y_1}^{y_1'} k dy - \int_{y_2}^{y_2'} k dy \right]^2 + \left[(x_1 - x_2) - \frac{\int_{y_2}^{y_2'} k dy}{\tan\left\{\arccos\left[\frac{x_2}{\lambda_0(N + \Delta N)}\right]\right\}} + \frac{\int_{y_1}^{y_1'} k dy}{\tan\left\{\arccos\left[\frac{x_1}{\lambda_0(N + \Delta N)}\right]\right\}} \right]^2} \quad (6)$$

$$\Delta x_1 = L_1(x) - L \quad (7)$$

式中, $L_1(x)$ 为1号、2号钢轨变化后的轨距, L 为两钢轨校准后的轨距。

3 PSD位置测量

3.1 PSD 位置测量原理

位置敏感探测器 (PSD) 是一种对入射光敏感器件, 照射到器件上的光产生光电流, 通过计算光电流的分布来确定器件敏感面的光的位置, 进而计算光移动的距离^[17]。 X_1, Y_1, X_2, Y_2 为 PSD 的 4 个电极管脚, 具有一定能量的光子入射到 PSD 的光敏面上的任意一点 (X, Y) 时, 光电流在光敏面上以面电流的形式扩散, 最终流向 PSD 的 4 个电极管脚, 根据 4 个电极管脚上的电流来计算光敏面上光斑的移动位置^[18-19], 即:

$$\begin{cases} X = L_x \frac{(I_{X_1} + I_{Y_2}) - (I_{X_2} + I_{Y_1})}{2(I_{X_1} + I_{Y_1} + I_{X_2} + I_{Y_2})} \\ Y = L_y \frac{(I_{X_1} + I_{Y_1}) - (I_{X_2} + I_{Y_2})}{2(I_{X_1} + I_{Y_1} + I_{X_2} + I_{Y_2})} \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_x 和 L_y 为 PSD 的边长, X 和 Y 为入射光点在 PSD 光敏面上的坐标。 $I_{X_1}, I_{Y_1}, I_{X_2}, I_{Y_2}$ 分别为 X_1, Y_1, X_2, Y_2 上的输出电流。 由于激光发射器 1 和激光发射器 2 的光信号调制频率为 f_0 , 且 PSD 的 4 个电极管脚上采集到的信号均为交流信号, 所以采用相敏检波技术^[20]对频率为 f_0 的激光在 PSD 的光敏面上产生的交流信号进行解调, 即在 PSD 的处理电路上添加相敏检波电路, 只对激光发射器的光信号进行解调, 进而得出光斑的位置。 该技术只解调预设好频率为 f_0 的激光信号, 可以消除其它光源的干扰, 使其信噪比和抗干扰能力得以提高。 图 5 为 2 维 PSD 探测原理图。

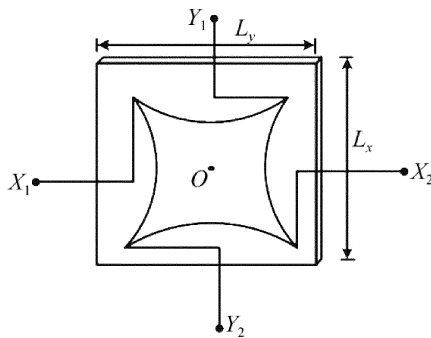


Fig. 5 2-D PSD detection schematic

钢轨校准时 PSD₁ 和 PSD₂ 上的初始点 O_1, O_2 的光斑坐标为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$, 那么 PSD₁ 上的入射光点从 (X_1, Y_1) 向上移动到 (X_1', Y_1') 、向下移动到 (X_1'', Y_1'') 的距离即分别为激光发射器 1 打到 PSD₁ 上的光斑移动的距离 $f_1(y)$ 和 $f_2(y)$, 同理 (X_2, Y_2) 向上移动到 (X_2', Y_2') 、向下移动到 (X_2'', Y_2'') 的距离分别为 $f_3(y)$ 和 $f_4(y)$ 。 考虑到钢轨在竖直方向上发生的位移很微小, 且对轨距产生的影响非常小, 所以 PSD 上的 X 方向的变化忽略不计。 从而可得:

$$\begin{cases} f_1(y) = \int_{Y_1}^{Y_1'} k dy \\ f_2(y) = \left| \int_{Y_1}^{Y_1''} k dy \right| \\ f_3(y) = \int_{Y_2}^{Y_2'} k dy \\ f_4(y) = \left| \int_{Y_2}^{Y_2''} k dy \right| \end{cases} \quad (9)$$

3.2 PSD 的非线性补偿

由于 PSD 容易受除目标物以外的背景光和电路暗电流的影响, 导致 PSD 器件输出信号的精度和可靠性降低^[21-22]。 此外受其制造工艺和感光面积等因素的影响, 导致它的光敏面上阻性不均匀, 导致 PSD 输出存在非线性, 这一缺陷增加了 PSD 的测量误差。 所以本设计中采用二次插值算法对 PSD 进行非线性补偿, 提高 PSD 的测量精度和数据的置信度。

二次插值算法是一种用于一元函数 $f(\alpha)$ 在确定的初始区间内搜索极小点的一种方法。 利用直线逼近代替初始区间内的实际曲线^[23], 对 PSD 的线性误差进行校正。 PSD 表面是一种分布许多离散点形成的矩形网络形状。 任意给定一个测量点 $M(x, y)$, 取最靠近 M 点的 9 个定点的方阵作为补偿网格, 如图 6 所示。

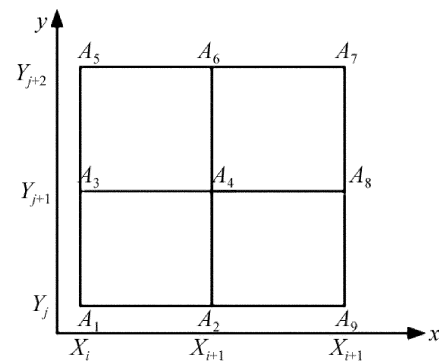


Fig. 6 Compensation grid for quadratic interpolation algorithm

取任意一个矩形区域 $A_1A_2A_3A_4$ 这 4 个顶点对应的误差函数值分别为 $E_x(A_1), E_x(A_2), E_x(A_3), E_x(A_4)$, 其中 A_1 点的插值函数为:

$$\varphi_1(x, y) = \frac{(x_{i+1} - x)(y_{j+1} - y)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)} \quad (10)$$

式中, x_i, y_j 为网格点的实际测量值。 同理可以得出其它 3 点的插值函数。 令该矩形内任意一点 (x, y) 的误差函数为 $E_x(x, y)$ 。 那么同理可以通过 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9$ 这 9 个顶点的误差函数的线性组合来表示 $M(x, y)$ 点的位置误差函数 $E_x(x, y)$ 和 $E_y(x, y)$, 即:

$$E_x(x, y) = \sum_{q=j}^{j+2} \sum_{p=i}^{i+2} \prod_{k=1, k \neq p}^{i+2} \left(\frac{x - x_k}{x_p - x_k} \right) \times$$

$$\prod_{l=j, l \neq q}^{j+2} \left(\frac{y - y_l}{y_q - y_l} \right) E_x(x_p, y_q) \quad (11)$$

$$E_y(x, y) = \sum_{q=j}^{j+2} \sum_{p=l}^{i+2} \prod_{k=1, k \neq p}^{i+2} \left(\frac{x - x_k}{x_p - x_k} \right) \times \prod_{l=j, l \neq q}^{j+2} \left(\frac{y - y_l}{y_q - y_l} \right) E_y(x_p, y_q) \quad (12)$$

式中, p, q 表示 $A_1 \sim A_4$ 这 9 个顶点最接近 $M(x, y)$ 的点所在的位置, 即顶点的坐标点的角标; k, l 表示与位置 p, q 最接近的位置。其中, 把 $\varphi(p, q, k, l) = \prod_{k=1, k \neq p}^{j+2} \left(\frac{x - x_k}{x_q - x_k} \right) \prod_{l=j, l \neq q}^{j+2} \left(\frac{y - y_l}{y_q - y_l} \right)$ 称为系数函数。

当补偿网格是均匀的时候, 补偿网格的 9 个顶点的坐标可以用两个 1 维矩阵来表示^[23], 即: $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3], \mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, Y_3]$ 。由 $X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3$ 这 6 个坐标值来确定系数函数 $\varphi(p, q, k, l)$ 。可根据下式取点阵来作为二次插值算法的插值:

$$\begin{cases} |x_{i+1} - x| < \Delta x \\ |y_{j+1} - y| < \Delta y \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} x_{i+2} = x_{i+1} + \Delta x \sin \alpha \\ y_{j+2} = y_{j+1} + \Delta y \sin \alpha \\ x_i = x_{i+1} - \Delta x \sin \alpha \\ y_j = y_{j+1} - \Delta y \sin \alpha \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 为 PSD 光敏面 x, y 方向上的步距。且二次插值算法的插值余项为:

$$R_n(x, y) = \frac{1}{(n+1)!} \left(\frac{\partial^{n+1} E}{\partial x^{n+1}} + \frac{\partial^{n+1} E}{\partial y^{n+1}} \right) \phi_{n+1}(x, y) \quad (15)$$

式中, $\phi_{n+1}(x, y)$ 为构建出来的插值函数, 因为 A_2, A_3, A_4 都在过 A_4 的两条直线上, 所以可以构造 $\phi_{n+1}(x, y)$ 如下:

$$\phi_1(x, y) = C_1(x_{i+1} - x)(y_{j+1} - y) \quad (16)$$

式中, $C_1 = [(x_{i+1} - x_i)(y_{j+1} - y_j)]^{-1}$ 。

由于 E_x, E_y 的每一阶导数可近似小于 1%, 取样间隔为 1mm, 那么误差估计值为:

$$R_2(x, y) = \frac{1}{(2+1)!} \times (1\% + 1\%) \times 1 \times 1 = 3.33 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (17)$$

因此采用二次插值算法对 PSD 进行非线性补偿, 大大提高了 PSD 的精度, 有利于检测轨距细微的变化。

4 实验

4.1 系统验证

为了验证系统的检测轨距的精度和实时性, 采用本系统和现有标准轨尺在学校实验基地的轨道上进行测量实验分析。由于基地钢轨不能移动, 没法测量轨距变化后的偏移量, 所以采用滑轨来模拟钢轨移动, 记录每次移动滑块后的距离与标准轨尺检测两滑块之间的距离做对比, 进而计算出轨距监测系统的精度。图 7 为轨距监测系统测试场景图。

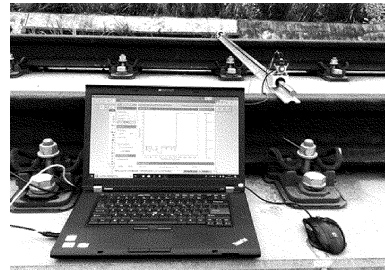


Fig. 7 Test scenario of rail gauge monitoring system

轨尺采用二级铁路轨距尺, 《标准轨距铁路轨距尺》TB/T 1924-2008, 规格为 GJC-JG0, 轨距尺的轨距测量范围为 1427mm ~ 1470mm, 轨距测量精度为 0.20mm。任意选取长度为 200m 的两股钢轨作为检测对象, 并选取 8 个不同位置分别进行多次实验, 且轨尺和系统测试的位置、次数相同, 得到本系统和轨尺测得的数据如表 1 所示。

Table 1 Comparison between the ruler of railway gauge and the system

test location	measurement method	average value/mm	difference/mm	standard deviation/mm
1	ruler of railway gauge	1434.14	-0.35	0.09
	system	1434.49		0.30
2	ruler of railway gauge	1435.18	-0.29	0.09
	system	1435.47		0.29
3	ruler of railway gauge	1433.17	-0.37	0.10
	system	1433.54		0.29
4	ruler of railway gauge	1436.17	0.61	0.12
	system	1435.46		0.27

continue

test location	measurement method	average value/mm	difference/mm	standard deviation/mm
5	ruler of railway gauge	1433.17	-0.31	0.11
	system	1433.48		0.27
6	ruler of railway gauge	1435.19	-0.34	0.10
	system	1435.53		0.32
7	ruler of railway gauge	1434.19	-0.28	0.10
	system	1434.47		0.31
8	ruler of railway gauge	1434.18	0.22	0.09
	system	1434.40		0.28

通过对比分析了本系统与轨尺分别测量的8组实验数据,可以得出轨距检测系统与轨尺对同一位置的轨距测量平均差值最大可达到0.61mm,轨距检测系统的标准差最大为0.32mm。

4.2 误差分析

通过 MATLAB 对第一处位置测得的数据进行曲线拟合,以此来对比分析轨距检测系统与轨尺在测量过程中产生的误差。图8为轨距检测系统与轨尺所测数据拟合曲线。从图中可以看出,轨尺检测的数据点比较集中,拟合曲线趋于平缓,其中包含了读数误差和由于轨尺与钢轨发生机械摩擦造成的误差以及读数误差。而轨距检测系统检测到的数据点相对比较发散,使得它的拟合曲线相对变化比较快,这是由于轨距检测系统在做实验过程中采用了滑轨来模拟钢轨移动,使得测量过程中出现了人为误差和机械误差。由于本系统采用相敏检波技术消除了背景光的影响,所以背景光对轨距检测系统造成的影响是很小的,可以忽略不计。再从表1中可以得出,轨距检测系统的标准差最大为0.32mm,而轨尺的标准差最大达到了0.12mm,明显轨距检测系统的误差接近于标准轨尺的测量误差,表明轨距检测系统具有实时性强、检测精度高特点。

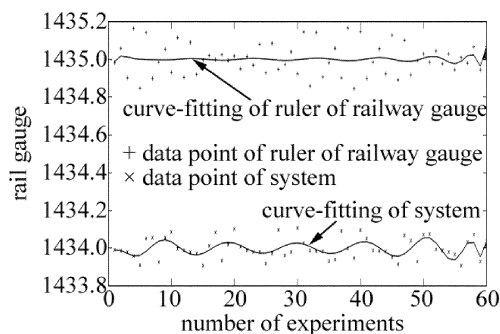


Fig. 8 Curved curve of rail gauge measurement system and the measured data

5 结论

本文中设计了一套采用 PSD 和激光发射器相结合的轨距在线监测系统,在每根接触网支柱上安装两个相同的 PSD,并在每根接触网支柱下方对应的两股钢轨轨底上安装相同的激光发射器,通过激光发射器在 PSD 上移动的位置来计算轨距的变化量,并采用 CAN 总线技术将一定区域的轨距变化量信息汇集起来,经 GPRS 技术发送至监控中心显示。利用二次插值算法对 PSD 的非线性误差进行补偿,将 PSD 的测量精度提高到 3.33×10^{-4} mm。最后通过对比分析轨距检测系统与轨尺检测同一轨道的数据得出,轨距检测系统的误差较低,精度翻了 1 倍,标准差最大为 0.32mm,达到了目前轨道检测行业所规定的 1.00mm 精度要求。

参考文献

- [1] WANG Y M, LU M. Interpretation of JIG 219-2015 'track gage for standard gauge rail way' [J]. Railway Quality Control, 2016, 44 (8):13-17 (in Chinese).
- [2] CHEN D Sh, TIAN X Y. Development of China's high-speed railway track detection technology [J]. Railway Engineering, 2008 (12):82-86 (in Chinese).
- [3] XIONG Sh Y, CHEN Ch J, WANG F, et al. Research on a new method of dynamic gauge detection [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (7):1825-1831 (in Chinese).
- [4] ZHENG Sh B, CHAI X D, HANG G G, et al. Research on gauge detection method based on machine vision [J]. Urban Mass Transit, 2010, 13 (9):73-76 (in Chinese).
- [5] ZHENG Sh B, CHAI X D, AN X C, et al. Railway track gauge inspection method based on computer vision [C]//2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. New York, USA: IEEE, 2012:1292-1296.
- [6] MIN Y Zh, WANG H X, KANG F, et al. Research on railway gauge detection system based on image sensor [J]. Laser Technology, 2015, 39 (3):344-348 (in Chinese).
- [7] WANG Y. Synchronous trigger design of laser camera based on GJ-6 track detection system [J]. China Railway Science, 2018, 39 (4):

- 139-144 (in Chinese).
- [8] SHI H M, ZHANG J K. Research on gauge detection system based on laser triangulation principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9):1934-1940 (in Chinese).
- [9] TANG W, LONG Y, XIE Y, *et al.* A channel rail gauge detection system of modern tram [C]//2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). New York, USA: IEEE, 2018:1-5.
- [10] KARTTUNEN K, KABO E, EKBERG A. Estimation of gauge corner and flange root degradation from rail, wheel and track geometries [J]. Wear, 2016, 366/367:294-302.
- [11] BAE J, KIM J. A rail detection algorithm based on pair particles filtering [C]//2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). Hong Kong, China: APSIPA, 2017:1440-1443.
- [12] ASHAR A Z, GANESH N, NARAYAN K S. Hybrid perovskite-based position-sensitive detectors[J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 2(4):1-4.
- [13] KONG Q. Research and implementation of phase laser ranging technology [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2018:10-11 (in Chinese).
- [14] SONG H, ZHANG Y F, WU Ch P, *et al.* Underwater phase laser ranging calibration method[J]. Infrared and Laser Technology, 2019, 48(4):0406008 (in Chinese).
- [15] HAI Y, LI Y, MA X H, *et al.* Optical system design for small size laser ranging[C]//2015 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM). New York, USA: IEEE, 2015:115-118.
- [16] XU Y, ZHU X, CHEN S H, *et al.* Optical design of dynamic focusing system for laser processing[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). New York, USA: IEEE, 2017:1-2.
- [17] ZHANG M, LIANG Y B. Experimental study on two-dimensional quadrilateral position sensitive detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2):459-464 (in Chinese).
- [18] ZHANG H, CHEN Y S, GEN T W, *et al.* Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12):1217002 (in Chinese).
- [19] JIANG X D, YU J Y, ZHU L K. Research of combined navigation technology based on position sensitive detectors[J]. Laser Technology, 2019, 43(3):335-340 (in Chinese).
- [20] HUANG P, CHEN B, LI Y. Displacement detection system based on phase sensitive detection and position detector[J]. Laser Technology, 2017, 41(2):235-239 (in Chinese).
- [21] XU C, TIAN S Y, YANG J Ch. Two-dimensional PSD nonlinear correction algorithm based on fuzzy neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(2):50-54 (in Chinese).
- [22] LIN Q S, YANG X J, WANG J X, *et al.* Two-dimensional PSD nonlinear correction of improved BP neural network[J]. Laser Technology, 2012, 36(1):124-126 (in Chinese).
- [23] LI Q, LI T Z, XIE A Zh. Two-dimensional PSD nonlinear correction based on newton interpolation algorithm[J]. Journal of Shandong University of Technology (Science and Technology Edition), 2015, 29(3):69-72 (in Chinese).