

DOI: 10.13382/j.jemi.B2105005

# 高精度钢轨端面坡度测量算法研究\*

李筠<sup>1</sup> 梁坤<sup>1</sup> 杨海马<sup>1</sup> 邹星林<sup>1</sup> 李凡<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 上海瑞纽机械股份有限公司 上海 201314)

**摘要:**当前国内在焊接钢轨之前需要通过塞尺与角度尺等接触式工具测量钢轨垂直度与端面坡度,由于人工测量步骤复杂,测量效率低,故研究了一种基于激光轮廓仪非接触式钢轨测量系统。系统由4个激光轮廓仪采集钢轨整个端面及侧面信息,然后运用二面角原理完成钢轨端面与侧面、端面与底面夹角的计算,最后再通过直角尺模型测得端面坡度。经现场测试,钢轨垂直度的重复测量误差小于 $0.2^\circ$ ,测量精度最高可达 $0.3^\circ$ ,端面坡度极限误差达到 $0.04\text{ mm}$ 。实验结果证明所设计系统能够高效而又稳定地完成钢轨垂直度的检测工作,满足实际测试要求。

**关键词:**钢轨检测;垂直度;垂直坡度;直角尺模型

**中图分类号:** TP311.1; TN29      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Research on high precision slope measurement algorithm for rail end face

Li Jun<sup>1</sup> Liang Kun<sup>1</sup> Yang Haima<sup>1</sup> Zou Xinglin<sup>1</sup> Li Fan<sup>2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Railnu Machinery Crop, Shanghai 201314, China)

**Abstract:** At present, it is necessary to measure the rail verticality and end slope by contact tools such as feeler gauge and angle gauge before welding rails in China. Due to the complicated manual measurement steps and low measurement efficiency, a non-contact rail measurement system based on laser profilometer is developed. Four laser profilers collect the information of the whole end face and side of the rail, then use the principle of dihedral angle to complete the calculation of the angle between the end face and side, end face and bottom surface of the rail. Finally, the end face slope is measured by the right-angle ruler model. After the field tests, the repeated measurement error of rail verticality is less than  $0.2^\circ$ , the measurement accuracy can reach up to  $0.3^\circ$ , and the limit error of end face slope reaches  $0.04\text{ mm}$ . The experimental results prove that the designed system can efficiently and stably complete the inspection of rail verticality and meet the actual test requirements.

**Keywords:** rail inspection; verticality; slope of end face; right-angle ruler mode

## 0 引言

随着我国基础设施的快速发展,钢轨产量显著增加,需要全自动化检测设备来满足钢轨生产需求。钢轨端面的垂直度以及端面坡度是钢轨焊前检测的重要参数,钢轨在焊接前必须进行检查,以确保钢轨的质量是否符合标准。

近年来,结构光视觉系统因为具有精度高、实时性好

的特点,在钢轨非接触测量中得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。文献[6-7]基于激光轮廓仪获取钢轨4个外形轮廓,实现钢轨断面尺寸的测量和外形轮廓的拼接。文献[8-9]使用激光轮廓仪获取钢轨表面信息,实现扭曲度与平直度的测量。文献[10]利用激光轮廓仪获取端面信息测量钢轨垂直度,但是对钢轨端面坡度没有过多介绍,且测量结果受转台偏转角度影响较大。

根据我国铁路标准 TB/T2344-2012<sup>[11]</sup>,对于50、60、75 kg/m 等不同类型的钢轨,端部坡度  $D$  应为:  $D \leq$

收稿日期: 2021-12-10      Received Date: 2021-12-10

\* 基金项目:中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放基金(2021-ZDKF-4)、国家自然科学基金联合基金(U1831133)项目资助

0.8 mm。因此本文针对端面垂直度和端面坡度参数进行了讨论,介绍了一种精确的端面垂直度与端面坡度非接触式测量系统,搭载左侧传感器的转台旋转后,获取钢轨整个端面信息然后利用二面角原理与直角尺模型完成测量。本系统具有精度高,用时短等特点。

## 1 钢轨端面数据获取及处理

### 1.1 数据获取

激光轮廓仪检测系统由前送轨装置、后送轨装置和检测滑台 3 部分组成,如图 1 所示。

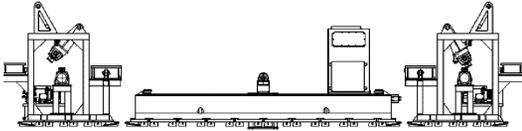


图 1 激光轮廓仪测量系统

Fig. 1 Laser profilometer measuring systems

前后送轨装置主要负责钢轨的移动,检测滑台主要由一个搭载 4 个激光轮廓仪的金属外壳和行走履带组成,行走履带负责检测滑台的前后移动,4 个激光轮廓仪分别用于检测钢轨上下左右 4 个表面轮廓的具体参数,左右两侧的小型伺服电机装有激光轮廓仪,上下激光轮廓仪固定在机械平台内。为了测量端面参数,需要用到左、右和底部的激光轮廓仪。激光轮廓仪在钢轨端部和底部形成一条明亮的轮廓线,根据三角测量原理<sup>[12-15]</sup>,可以得到钢轨轮廓信息,然后数据通过以太网传输到上位机。滑台检测系统的结构如图 2 所示,而测量端面参数的具体测量步骤如下:

- 1) 通过前送轨装置将被测钢轨送至检测区。
- 2) 滑台内部装有光电开关,滑台在机械平台上以 0.2 m/s 的速度运行,当光电开关到达钢轨端部时产生信号,滑台停止运行,实现定位。
- 3) 滑台回退一段距离到测量钢轨端部合适位置,当伺服电机平台开始转动探测端面时,滑台静止不动。
- 4) 小型伺服电机驱动左侧检测平台偏转  $15.1^\circ \sim 18.5^\circ$ ,在此角度范围内,激光轮廓仪打开激光扫描整个钢轨端面,此角度范围由钢轨端面左侧、右侧和左侧检测平台的相对位置确定,如图 3 所示。随后数据集通过以太网实时传输到上位机。
- 5) 伺服电机驱动左侧检测平台回到原位。然后,检测滑台开始以 0.2 m/s 的恒定速度移动。底部传感器每 4 ms 由可编程逻辑控制器(PLC)触发。上位机使用左侧传感器数据和底部数据计算端面参数。

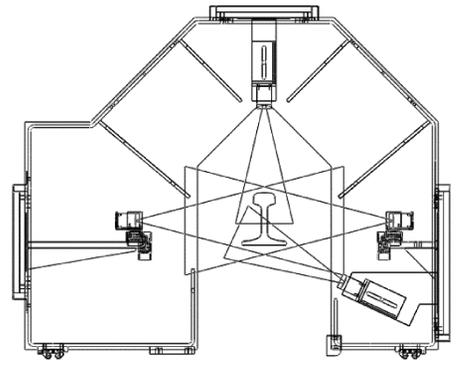


图 2 检测滑台

Fig. 2 Inspection slide



图 3 数据采集

Fig. 3 Data capture

### 1.2 坐标转换

上位机采集的数据集是左下两个激光轮廓仪中的轮廓坐标信息,需要将这些摄像机坐标系转换成一个公共的世界坐标系,以便随后进行端面垂直度与端面坡度的计算。

首先,定义一个传感器坐标系,  $O_s$  为传感器的光学中心,  $Z_s$  为传感器的光轴。传感器坐标系由  $O_s$ 、 $X_s$ 、 $Y_s$  和  $Z_s$  组成,而空间坐标系的基准坐标系称为“世界坐标系”,它是由观测原点  $O_w$ 、 $X_w$ 、 $Y_w$  和  $Z_w$  组成,可以用来描述现实世界中物体的位置。传感器坐标系和世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移向量  $\mathbf{T}$  来描述。假设点  $P$  在世界坐标系的坐标为  $[X_w \ Y_w \ Z_w]^T$ ,在传感器坐标系中的坐标为  $[X_s \ Y_s \ Z_s]^T$ ,则点  $P$  的坐标满足:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{R}$  是一个  $3 \times 3$  的正交单位矩阵,包含 3 个自由分量:偏转角  $\theta_1$ 、倾斜角  $\theta_2$  和旋转角  $\theta_3$ 。  $\mathbf{T}$  表示三维平移矩阵,包含 3 个自由分量。  $T_x$ 、 $T_y$  和  $T_z$  分别表示两个坐标系原点在  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴上的偏移量。

$$\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T \quad (2)$$

如图4所示,根据上述坐标转换关系定义了世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$ 。

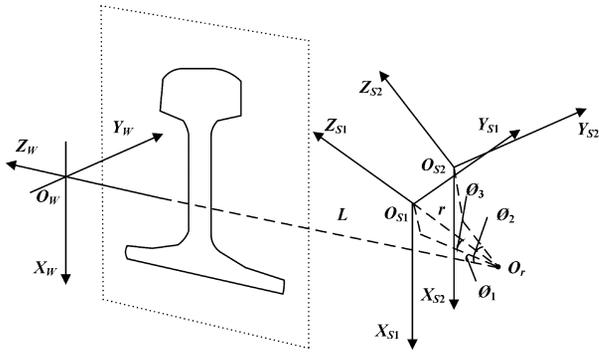


图4 端面坐标系转换

Fig. 4 End face coordinate system conversion

在本文中,世界坐标系设置在钢轨前部的中点,而伺服电机将轴  $O$  旋转到相同的高度,  $O_r - O_w$  的延长线定义为  $Z_w$ , 平行于钢轨底部,  $L$  表示世界坐标系原点和旋转伺服电机轴之间的距离,  $r$  表示从旋转轴或到传感器坐标系原点  $O_{s1}$  和  $O_{s2}$  的距离。  $L, r$  是可测量参数,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  是  $O_{s1}$  和  $O_{s2}$  所在传感器坐标系的偏转角。连接传感器坐标系中心和轴的直线与水平面之间的角度为  $\theta_3$ 。倾角  $\theta_2$  和旋转角  $\theta_3$  都等于0, 偏转角  $\theta_1 = -\theta_3, R$  和  $T$  描述如下:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} -r \cdot \sin\theta_3 \\ -r \cdot \cos\theta_3 \cdot \sin\theta_1 \\ L - r \cdot \cos\theta_3 \cdot \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(1),将  $O_{s1}$  的等高线数据坐标转换为  $O_w$ 。相同的,在式(3)和(4)中,使用  $\theta_2$  代替  $\theta_1$ , 实现从  $O_{s2}$  到  $O_w$  的转换。这样,就完成了左侧传感器与底部传感器坐标系的坐标转换。可以通过测量或计算  $R, T$  来确定转换到世界坐标系  $O_w$  的  $O_{s3}, O_{s4}$  等高线数据坐标。原理图如图5所示。

对于  $O_{s3}$  和  $O_{s4}$  的旋转矩阵  $R$ , 偏转角度和旋转角度均为0, 而倾斜角度  $\theta_2 = -\theta_3$ 。  $R$  的表达如下:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & \sin\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$O_{s3}$  和  $O_{s4}$  的平移向量  $T_3$  为:

$$T_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(1),可以得到  $O_w'$  坐标系下底部坐标数据。

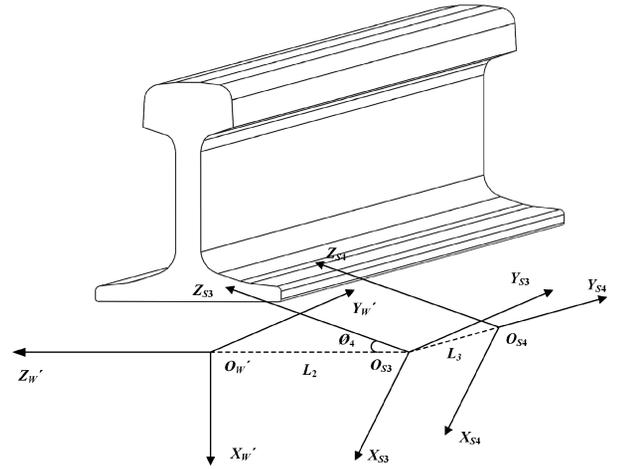


图5 底部坐标系转换

Fig. 5 Bottom coordinate system conversion

也可以通过坐标系转换得到  $O_w'$  和  $O_w$ 。这样,用于计算端面垂直度与端面坡度的所有等高线数据的坐标均被转换到一个坐标系中。

## 2 垂直度

### 2.1 钢轨垂直度

钢轨的垂直度是指钢轨的端面、底面和侧面是否两两垂直,如图6所示。系统测量时转台转动不固定角度,激光轮廓仪每间隔3mm扫描一次获取整个端面的信息,然后在钢轨端面分别选取不同的3个区域(a、b、c),如图7所示,每个区域求平均值得到3个虚拟的点。

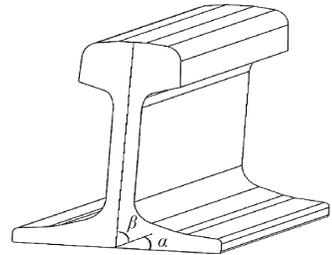


图6 钢轨端面垂直度示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rail end perpendicularity

行走平台扫描钢轨时,分别在侧面和底面一系列点的坐标  $x$  (点至传感器测量中心的距离), 坐标  $y$  (点至传感器的距离), 找出传感器测得的距离最小的点作为两个平面的分界点, 分别对两个不同面上的点进行线性回归。用最小二乘法<sup>[16-18]</sup>测量钢轨底面和侧面上的3个点, 构造钢轨端面、侧面和底面的平面方程。具体方法如下:

1) 钢轨的端面、侧面和底面已知3个不同点的坐标, 可求出每个面的坐标方程:

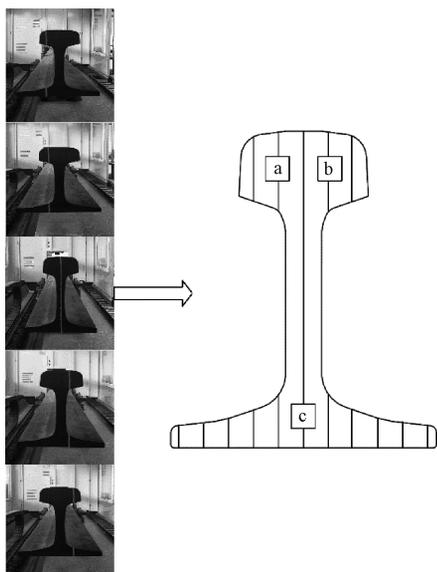


图 7 钢轨垂直度测量原理

Fig. 7 Principle diagram of rail perpendicularity measurement

$$\text{端面: } A_1 \cdot X + B_1 \cdot Y + C_1 \cdot Z + D_1 = 0 \quad (7)$$

$$\text{侧面: } A_2 \cdot X + B_2 \cdot Y + C_2 \cdot Z + D_2 = 0 \quad (8)$$

$$\text{底面: } A_3 \cdot X + B_3 \cdot Y + C_3 \cdot Z + D_3 = 0 \quad (9)$$

2) 已知每个面的平面方程可以得到其法向量。端面法向量  $(A_1, B_1, C_1)$ , 侧面法向量  $(A_2, B_2, C_2)$ , 底面法向量  $(A_3, B_3, C_3)$ 。

3) 利用法向量的夹角求出钢轨端面与侧面, 端面与底面的余弦值:

$$\cos\alpha = \frac{A_1 \cdot A_2 + B_1 \cdot B_2 + C_1 \cdot C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} + \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} \quad (10)$$

$$\cos\beta = \frac{A_1 \cdot A_3 + B_1 \cdot B_3 + C_1 \cdot C_3}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} + \sqrt{A_3^2 + B_3^2 + C_3^2}} \quad (11)$$

式中:  $\alpha, \beta$  分别表示端面与侧面、端面与底面的夹角。

4) 求出  $\alpha, \beta$  的值分别与标准角度尺测量的数据对比分析, 判断该方法是否合格。

### 2.2 钢轨端面坡度

钢轨端面坡度是指直角尺一边紧靠钢轨底面与钢轨侧面, 直角尺另一边在钢轨端面自适应后所能测得的最大值, 该方法旨在建立基于实际人工测量的激光轮廓仪非接触式端面坡度测量的直角尺数学模型, 模型建立后, 通过实验测试, 提高了模型的适应性。自适应模型的结果如图 8 所示。

由于是测量钢轨端面坡度, 所以选择钢轨轨腰上一条完整的端面轮廓线, 如图 9 所示。

系统中激光轮廓仪的激光点间距是 0.2 mm, 因此, 以标准钢轨高度为 176 mm 为例, 这根端面轮廓线的点数为 880 个, 这就是原始的端面曲线。

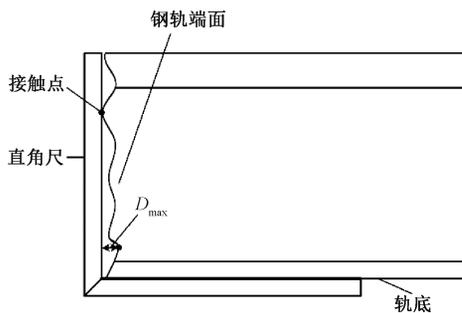


图 8 直角尺模型

Fig. 8 Model of a right-angle ruler

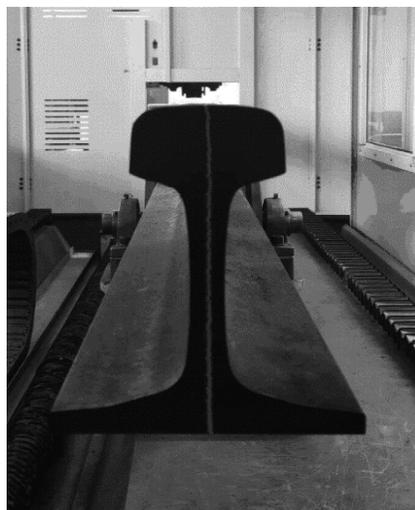


图 9 端面轮廓线

Fig. 9 End profile lines

图 10 为端面坡度的求取算法。

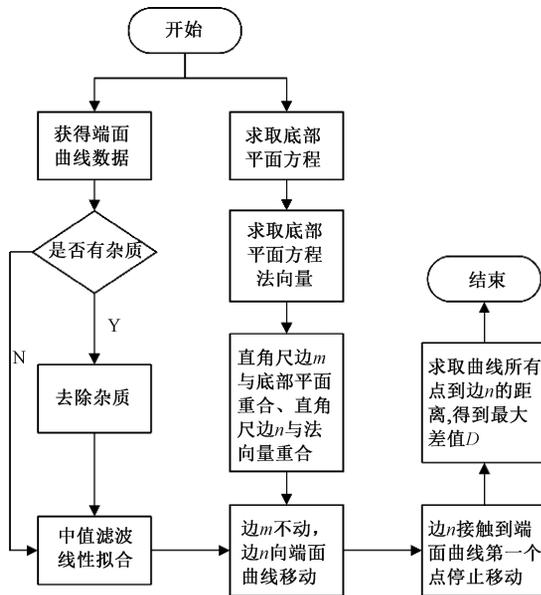


图 10 端面坡度求取算法

Fig. 10 Algorithm for finding the slope of the end face

端面坡度求取算法步骤如下:

1) 因为钢轨焊接现场环境恶劣,所以在测量之前首先利用原始曲线判断钢轨端面是否存在杂质,若是存在杂质,则去除掉。

2) 由于端面坡度数值对机器测量精度要求很高,所以在实际操作过程中,一些外部因素可能会干扰激光轮廓仪,导致数据集远离理想的数据集采集,数据出现异常点或部分数据丢失等,这些外部因素可能会导致系统对端面坡度的检测不准确和不稳定。为此,有必要采用中值滤波的方法<sup>[19-20]</sup>,尽量减少可能出现的数据异常的影响,并确保测量结果的准确性和稳定性。当去除杂质或毛刺后,使用中值滤波,用下面的公式来求出滤波后的  $x$  元素。

$$y_i = \text{Median}(J_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

$$J_i = \{x_i - rl, x_i - rl + 1, k, x_i - 1, x_i, x_i + 1, k, x_i + rr - 1, x_i + rr\} \quad (12)$$

式中:  $y$  表示过滤后  $x$  中元素的数量,  $J_i$  表示输入序列  $x$  中以第  $i$  个元素为中心的子集,索引元素在  $x$  的范围之外等于 0,  $rl$  是中值滤波的左秩,  $rr$  是右秩。

3) 得到中值滤波曲线后,进行线性拟合,根据实际检测,钢轨端面为平面,激光轮廓仪获得的数据符合线性模型。因此,本文选择了最小二乘法线性拟合<sup>[21-22]</sup>。

假设  $x$  和  $y$  之间的函数关系可以用式(13)表示:

$$y = ax + b \quad (13)$$

式中:  $a$  和  $b$  是两个常数。对于任何端面测量点  $(x_i, y_i)$ ,  $E$  用式(14)计算。

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2 \quad (14)$$

使用一阶偏导数,上面的  $a$  和  $b$  便可得到,即最小二乘法拟合曲线。

4) 端面曲线处理完毕后,利用上述的钢轨底部平面方程与端面曲线建立直角尺模型。首先求得底部平面方程的法向量,直角尺模型中的直角尺的一边  $m$  与底部平面方程求取的平面重合,方向沿着钢轨轴向方向。直角尺模型中直角尺的另一边  $n$  与平面方程的法向量所在的直线重合,方向沿着钢轨端面向上。模型如图 11 所示。

5) 直角尺边  $m$  位于底部固定不变,直角尺边  $n$  可以在直角尺边  $m$  轴向方向上自由滑动,直角边  $n$  由远及近滑动直至接触端面曲线的第 1 个点停止。如图 12 所示。

6) 计算端面曲线上所有的点到直角边  $n$  的距离,然后求出最大差值  $D_{\max}$ ,此最大数值即为钢轨端面坡度值。如图 13 所示。

### 3 测量结果分析

为了验证系统的重复性,选取 4 根不同的标准 60 轨

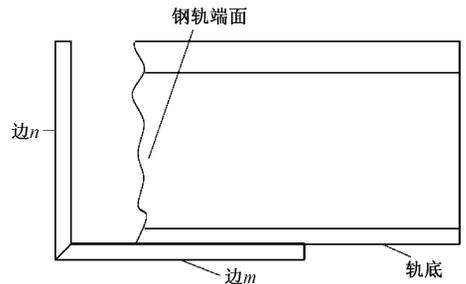


图 11 直角尺模型

Fig. 11 Model of a right-angle ruler

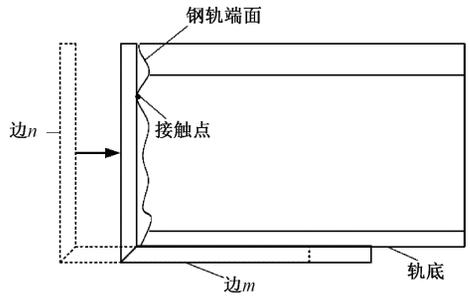


图 12 直角尺模型

Fig. 12 Model of a right-angle ruler

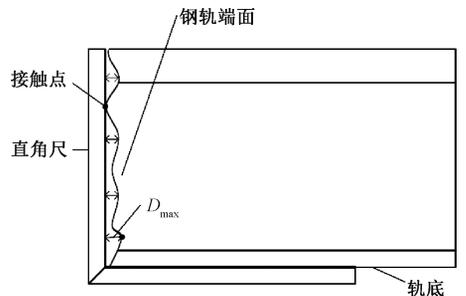


图 13 直角尺模型

Fig. 13 Model of a right-angle ruler

对钢轨轨头进行 30 次测量。测量结果如图 14 所示。极限误差是指垂直度与端面坡度最大值与最小值之间的差值,极限误差反映了测量结果的最大波动范围。从图 14 中可以得出,垂直度的极限误差不超过  $0.3^\circ$ ,标准差不超过  $0.172^\circ$ ,而钢轨端面坡度的极限误差不超过  $0.04 \text{ mm}$ ,标准差不超过  $0.018 \text{ mm}$ ,说明系统整体不稳定性相对较小,波动范围也相对收敛。由于钢轨垂直度计算使用的是整个端面数据,每次采集的钢轨端面特征相同,而钢轨的端面坡度计算采用的是端面中心的数据,每次转台采取此帧时角度固定,位置相同,所以系统重复性较高。

为了验证系统的准确性,采用精度为  $0.1^\circ$  的角度尺和精度为  $0.02 \text{ mm}$  的直角尺对钢轨端侧、端底垂直度以及端面坡度进行标准测量,测量结果与系统测量结果对

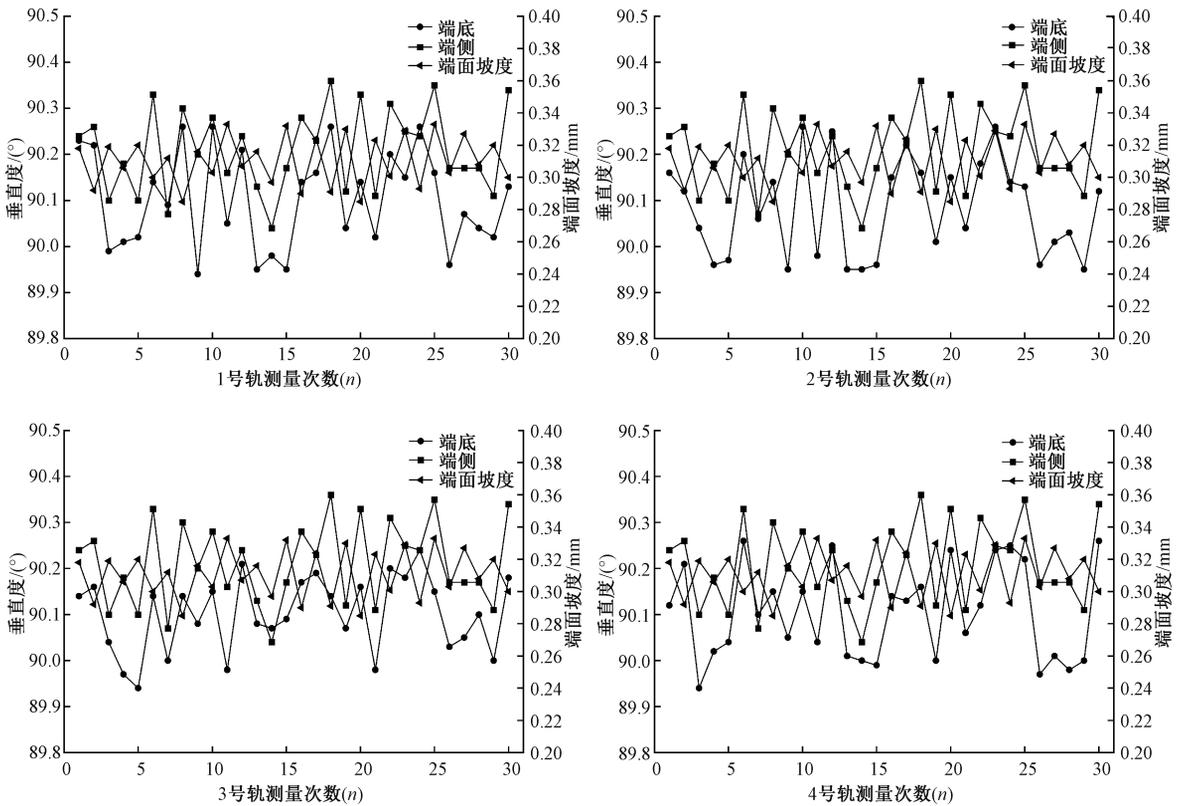


图 14 4 根钢轨测量结果

Fig. 14 Results of four rail measurements

比,如表 1、2、3 所示。由表可知端面垂直度测量结果与标准角度尺测量结果误差的范围在 $\pm 0.3^\circ$ 内;端面坡度测量结果与标准直角尺对比结果的误差范围在 0.07 mm 内,结果显示系统测量结果与人工测量结果误差较大,分析发现端面坡度数值平均值总是小于标准直角尺数值,结合实际人工测量原理发现出现较大误差是因为人工在进行标准端面坡度测量时使用的是直角尺与塞尺,而塞尺的自身宽度为  $d$ ,所以人工测量会因为塞尺宽度的原因略微偏小一些。误差生成原理如图 15 所示。

表 1 钢轨端底垂直度结果对比

Table 1 Comparison of rail end bottom verticality results ( $^\circ$ )

钢轨编号	钢轨端面与底面垂直度		标准端底垂直度	误差
	最大值	最小值		
#1	90.26	89.98	90.1	0.28
#2	90.28	89.99		0.29
#3	90.26	89.96		0.30
#4	90.24	89.98		0.26

补偿此误差,即  $D = D_1 + \delta_d$ ,其中  $D$  是系统测量值、 $D_1$  是人工测量值、 $\delta_d$  为距离最大值点  $d/2$  处的点的数值与最大值之间的差值。系统的测量结果与标准直角尺测量结果的极限误差在 0.04 mm 内,满足 TB/T2344-2012 铁路要求。所以此钢轨垂直度与端面坡度算法满足检测

表 2 钢轨端侧垂直度结果对比

Table 2 Comparison of rail end-side verticality results ( $^\circ$ )

钢轨编号	钢轨端面与侧面垂直度		标准端侧垂直度	误差
	最大值	最小值		
#1	90.36	90.07	90.2	0.29
#2	90.36	90.06		0.30
#3	90.32	90.06		0.26
#4	90.34	90.06		0.28

表 3 钢轨端面坡度结果对比

Table 3 Comparison of rail end slope results (mm)

钢轨编号	钢轨端面垂直坡度		标准端面坡度	误差
	最大值	最小值		
#1	0.36	0.29	0.3	0.07
#2	0.32	0.28		0.04
#3	0.35	0.30		0.05
#4	0.34	0.31		0.05

要求,系统测量具有较好的重复性与稳定性。

## 4 结论

本文采用非接触式测量系统代替人工使用角度尺、直角尺和塞尺测量焊前钢轨端面垂直度与端面坡度。通

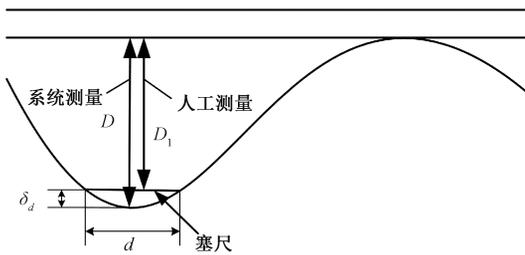


图15 误差产生原理

Fig. 15 Error generation schematic

过4个激光轮廓仪采集钢轨端面数据,随后坐标转换成统一坐标系,然后上传至上位机进行处理。首先采取不同的3个区域计算端面垂直度,然后再使用直角尺算法计算得到端面坡度。测试结果与人工测量结果基本一致。实验证明,该系统具有良好的稳定性与测量精度,满足实际测量的要求,对实现测量钢轨端面垂直度及端面坡度的自动化和智能化具有一定的提高和借鉴意义。

### 参考文献

- [1] 崇爱新,尹辉,刘艳婷,等.基于双目视觉的无缝线路钢轨纵向位移测量方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(11):82-89.  
CHONG AI X, YI H, LIU Y T, et al. Research on longitudinal displacement measurement method of seamless track rail based on binocular vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 82-89.
- [2] 占栋,于龙,肖建,等.钢轨轮廓全断面高精度动态视觉测量方法研究[J].铁道学报,2015,37(9):96-106.  
ZHAN D, YU L, XIAO J, et al. Research on high-precision dynamic vision measurement method for full section of rail profile [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 96-106.
- [3] 廖麟志,陈琪.基于CCD的钢轨表面几何尺寸非接触式测量方法[J].机械工程师,2013(12):61-62.  
LIAO L ZH, CHEN Q. Non-contact measurement method of rail surface geometry based on CCD [J]. Mechanical Engineer, 2013(12): 61-62.
- [4] 李耀东.基于机器视觉的钢轨轨头轮廓非接触测量技术的研究[D].北京:北京交通大学,2017.  
LI Y D. Research on non-contact measurement technology of rail head profile based on machine vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [5] 徐晋卿,陈唐龙,占栋,等.基于机器视觉的钢轨轮廓测量方法研究[J].传感器与微系统,2014,33(4):27-30.  
XU J Q, CHEN T L, ZHAN D, et al. Research on rail

contour measurement method based on machine vision [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(4): 27-30.

- [6] 陈十进,刘瑾,杨海马,等.非接触式钢轨三维轮廓参数检测系统研究[J].仪表技术与传感器,2019(5):64-67.  
CHEN SH J, LIU J, YANG H M, et al. Research on non-contact rail 3D contour parameter detection system [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(5): 64-67.
- [7] 包亚俊,刘瑾,杨海马,等.基于激光轮廓仪的非接触式钢轨轮廓形检测系统[J].电子科技,2020,33(8):28-33,86.  
BAO Y J, LIU J, YANG H M, et al. Non-contact rail profile detection system based on laser profiler [J]. Electronic Science and Technology, 2020, 33(8): 28-33, 86.
- [8] 包亚俊,刘瑾,杨海马,等.高精度钢轨扭曲度检测算法研究与应用[J].仪表技术与传感器,2020(8):112-117.  
BAO Y J, LIU J, YANG H M, et al. Research and application of high precision rail torsion detection algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(8): 112-117.
- [9] 方睿,李筠,杨海马,等.非接触式钢轨平直度及扭曲度测量研究[J].光学仪器,2017,39(5):8-14.  
FANG R, LI J, YANG H M, et al. Research on non-contact measurement of rail straightness and torsion [J]. Optical Instruments, 2017, 39(5): 8-14.
- [10] 苏焯,李筠,杨海马,等.非接触式钢轨类大构件垂直度测量方法研究[J].电子测量技术,2019,42(15):123-127.  
SU Y, LI J, YANG H M, et al. Research on measuring method of verticality of non-contact large rail components [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 123-127.
- [11] 铁路工务段.中华人民共和国铁道部铁路线路维修规则[M].北京:中国铁道出版社,2006.  
Railway works depot. Rules for the Maintenance of Railway Lines of the Ministry of Railways of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [12] 章金敏.基于激光三角法的物体三维轮廓测量系统[D].武汉:武汉理工大学,2015.  
ZHANG J M. 3D contour measurement system based on laser triangulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [13] 孙有春,庞亚军,白振旭,等.激光三角测量法应用技术[J].激光杂志,2021,42(4):1-8.

- SUN Y CH, PANG Y J, BAI ZH X, et al. Application technology of laser triangulation [J]. Laser Journal, 2021, 42(4): 1-8.
- [14] 李雯. 基于激光轮廓传感器的钢轨外形检测系统[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- LI W. Rail shape detection system based on laser contour sensor [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.
- [15] 宋腾. 车轮踏面磨损检测技术研究及仪器开发[D]. 青岛: 青岛大学, 2017.
- SONG T. Research and instrument development of wheel tread wear testing technology [D]. Qingdao: Qingdao University, 2017.
- [16] 王荣忠, 高秋英, 王得军. 基于最小二乘法的曲线拟合及其简化算法[J]. 传感器世界, 2021, 27(10): 8-10, 25.
- WANG R ZH, GAO Q Y, WANG D J. Curve fitting based on least square method and its simplified algorithm [J]. Sensor World, 2021, 27(10): 8-10, 25.
- [17] HUANG ZH H, ZHU Z F, AN Q, et al. Global-local image enhancement with contrast improvement based on weighted least squares [J]. Optik, 2021, 243: 167433.
- [18] 鲁伟俊, 彭希锋, 陈爽. 基于最小二乘法的非接触缺陷检测方法研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 78-82.
- LU W J, PENG X F, CHEN SH. Research on non-contact defect detection method based on least square method [J]. China Instrumentation, 2020(8): 78-82.
- [19] 陈健, 郑绍华, 余轮, 等. 基于方向的多阈值自适应中值滤波改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 156-161.
- CHEN J, ZHENG SH H, YU L, et al. Improved algorithm of multi-threshold adaptive median filtering based on direction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(2): 156-161.
- [20] LEE W CH, TAI P L. Defect detection in striped images using a one-dimensional median filter [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 1012.
- [21] 莫小琴. 基于最小二乘法的线性与非线性拟合[J]. 无线互联科技, 2019, 16(4): 128-129.
- MO X Q. Linear and nonlinear fitting based on least squares [J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(4): 128-129.
- [22] 高秋英, 王丽丽, 王荣忠. 最小二乘法曲线拟合及优化算法研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(11): 100-101.
- GAO Q Y, WANG L L, WANG R ZH. Research on least squares curve fitting and optimization algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(11): 100-101.

## 作者简介



**李筠**, 2002 年于北京理工大学获得博士学位, 现为上海理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为检测技术与信息处理。

E-mail: lijuny@usst.edu.cn

**Li Jun** received her Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2002. Now she is an associate professor and master supervisor in University of Shanghai for Science and Technology. Her main research interests include automatic detection technology and information processing.



**杨海马** (通信作者), 2015 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为上海理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为三维扫描及重建技术。

E-mail: snowyhm@sina.com

**Yang Haima** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences in 2015. Now he is an associate professor and master supervisor in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include 3D scanning and reconstruction technology.