

# 高铁静态限界测量的二维扫描传感器的设计和标定

卢钢<sup>1\*</sup>, 刘常杰<sup>1</sup>, 石春珉<sup>2</sup>, 贾鑫林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

<sup>2</sup>中铁检验认证中心有限公司机车车辆检验站, 北京 100015

**摘要** 针对接触式测量高铁机车静态限界效率低、精度低、耗时长、劳动强度大等问题, 基于回转射线簇测量的原理, 研制出新型的高铁静态限界二维扫描传感器。传感器安装在运动轨道上, 可实现静态限界的高效自动化测量。借助高精度大理石平面对传感器进行标定, 建立测量系统的坐标系, 结合外部标定, 将传感器测量结果转换到轨道坐标系下的三维坐标, 从而得到高铁的静态限界测量数据。实验验证, 该传感器精度优于 1 mm, 满足了静态限界测量的需求。

**关键词** 测量; 激光测量; 标定; 二维扫描; 静态限界; 回转射线

中图分类号 TH862 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.051204

## Design and Calibration of Two-Dimensional Scanning Sensor for Static Clearance Measurement of High-Speed Train

Lu Gang<sup>1\*</sup>, Liu Changjie<sup>1</sup>, Shi Chunmin<sup>2</sup>, Jia Xinlin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Vehicle Inspection Station, China Railway Test & Certification Center Co. Ltd., Beijing 100015, China

**Abstract** Herein, to address the problems of low efficiency and accuracy, long time consumption, and high labor intensity of the contacting measurement on static clearance of high-speed locomotive train, a new two-dimensional scanning sensor of static clearance of high-speed train is developed based on the rotating clustered-ray measurement principle. Static clearance can be efficiently and automatically measured by installing the proposed sensor on a moving guide rail. The sensor is calibrated using a high-precision marble plane, and a coordinate system for the measurement system is established. Sensor measurement results are converted to three-dimensional coordinates in the orbital coordinate system via external calibrations. Thus, the static clearance measurement data of high-speed train can be obtained. Experimental results show that the accuracy of this new sensor is more than 1 mm, which satisfies the requirement of static clearance measurement.

**Key words** measurement; laser measurement; calibration; two-dimensional scanning; static clearance; rotating ray

**OCIS codes** 120.0280; 280.3400; 280.3420; 150.1488

## 1 引言

铁路机车车辆静态限界是当机车车辆静止时, 各部位距轨面的最高尺寸和距轨道线路中心线的垂直面最宽尺寸的轮廓。为保证车辆安全运行, 需要对限界上的点的在轨道坐标系下的三维坐标进行精确测量。现有的机车车辆限界测量方法是根据国家 GBT 16904 标准, 采用标准限界规配合人工手动的接触式测量方法<sup>[1-3]</sup>, 该方法手工测量, 具有检测效

率低, 检测精度依赖于工人的测量熟练度等缺点。天津大学前期开发了机车限界非接触测量系统<sup>[4]</sup>, 该系统通过二维扫描传感器上下和横向运动来检测车辆的静态限界。其二维扫描方式是由伺服电机带动精密丝杠旋转实现的, 该方法虽然结构简单, 但具有体积大、检测时间长等缺点。基于以上的测量现状, 本文设计并开发了一种全新的高铁静态限界测量的二维扫描传感器, 该传感器基于回转射线簇原理<sup>[5]</sup>, 由高精度转台和相位式激光测距传感器组合

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-08-10; 录用日期: 2019-09-02

\* E-mail: lugangtju@163.com

而成,可对高铁车厢在列车前行方向进行二维形貌扫描。

## 2 系统的设计方案与测量原理

### 2.1 系统设计方案

本传感器应用于新型高铁静态限界测量系统中,测量系统的整体结构如图 1 所示。当高速列车停靠在测量系统中时,车身四周的二维扫描传感器对列车前进方向(副扫描方向)进行扫描测量,并由伺服电机带动二维扫描传感器在主扫描方向进行运动,从而获得列车的静态限界值。本文主要介绍的是系统中二维扫描传感器的设计和标定。

### 2.2 传感器的设计方案

二维扫描传感器的具体结构如图 2(a)所示,由相位式激光测距传感器和高精度转台通过转接板连接组合。这样的设计使只具有一维测距功能的激光测距传感器具有二维扫描的功能。在二维扫描的过程中需要实现  $x$ 、 $y$  方向测量精度均优于 1 mm 的目标。其中激光测距传感器选取的是 ACETECH 公司的 LMS501 高精度相位式激光测距传感器,该传感器的检测精度为 0.5 mm,响应频率为 10 Hz。高精度转台为华天科远光电公司 MRSA60,该转台通过脉冲式步进电机控制转台的精确

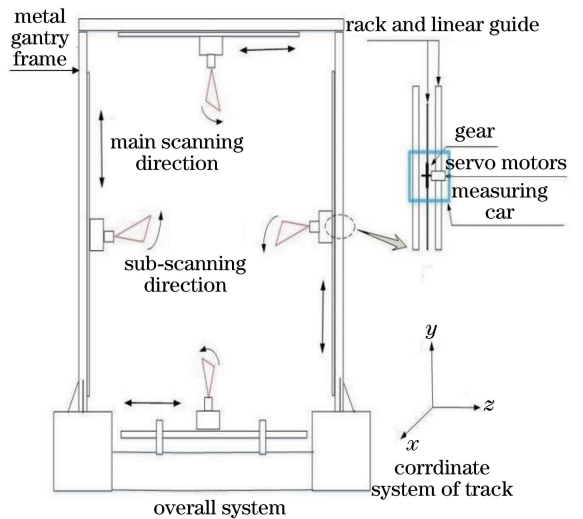
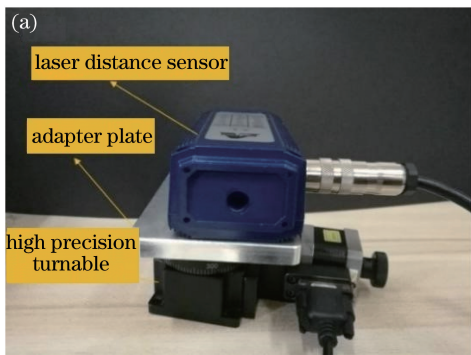


图 1 整体系统设计图

Fig. 1 Design diagram of overall system

旋转角度,重复定位精度小于  $0.01^\circ$ ,分辨率为  $0.0003125^\circ$ 。经过对传感器的标定和对激光测距值和转台旋转角度的数学计算,本传感器可确定被测点  $x$  方向和  $y$  方向的坐标。

如图 2(b)所示,传感器通过转台旋转的方式实现测量传感器在扫描方向(即列车前进方向,图 1 所示的框架轨道坐标系中  $x$  轴方向)的扫描测量,再通过坐标变换,将被测点的坐标转换到车身坐标系下。

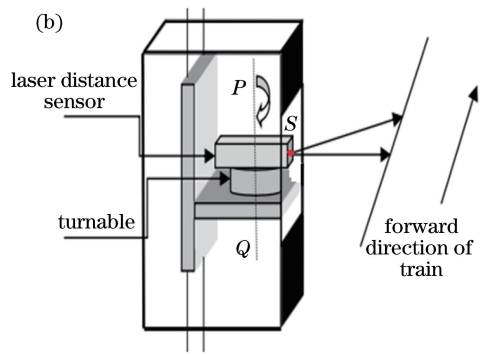


图 2 传感器设计图。(a)传感器实物图;(b)扫描过程示意图

Fig. 2 Picture of sensor design. (a) Physical picture of sensor; (b) schematic of scanning process

### 2.3 传感器的测量原理

本传感器采用回转射线簇的测量原理<sup>[5]</sup>,假定空间中存在一条测量射线,该射线具有给出由出射点到被测点之间距离的能力,该射线绕过出射点且在垂直于该射线的回转轴线上旋转<sup>[6-7]</sup>,便可完成平面内被测点相对于旋转中心的极距信息的提取,即回转射线测量模型<sup>[8-9]</sup>。如图 2(b)所示,直线  $PQ$  为测量系统的回转轴线,该直线与旋转平面相交点

$O$  为传感器的回转中心,点  $S$  为激光射线出射点,显然传感器回转中心与射线的出射点不重合,因此需要对本传感器进行标定<sup>[10]</sup>,才能基于回转射线簇的测量原理进行二维坐标计算和测量。

## 3 标定实验和精度验证实验

### 3.1 传感器标定过程

采用经过精细打磨的大理石平面对系统进行标

定,系统标定示意图如图 3(a)所示。以转台的回转中心为坐标系原点,以回转中心与转台未旋转时激光射线的出射点的连线为 X 轴,正方向指向大理石平板方向,与之垂直的方向为 Y 轴,激光光束的旋转面为 XOY 平面,将这个坐标系定义为转台坐标系,标定后坐标系就不再改变。O 点为转台的旋转中心,S 点为激光射线的出射点,T 点为被测点的位置, $\alpha$  为转台较初始位置旋转的角度。OS 长度为  $d$ ,ST 的长度为激光测距传感器实测的距离  $l$ , $\theta$  为激光射线 OS 和 ST 之间的夹角。可以通过几何关系推导出在转台坐标系下二维点坐标  $(X, Y)$  和激光测距仪测得距离  $l$ ,转台旋转角度  $\alpha$  之间的关系,即

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = (d \quad l) \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \cos(\alpha + \theta) & \sin(\alpha + \theta) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

因此,只需要标定出旋转中心与射线出射点连线的长度  $d$  和激光射线与上述直线的夹角  $\theta$ ,即可通过传感器示数和转台旋转角度,由(1)式求解出被测点坐标。

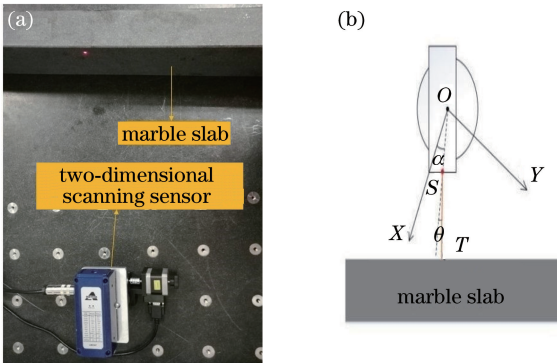


图 3 系统标定实验图。(a)系统标定实验装置;

(b)标定实验示意图

Fig. 3 Picture of system calibration experiment.

(a) System calibration experimental device;

(b) sketch map of calibration experiment

### 3.2 标定实验

标定过程如图 3(b)所示,将转台和激光测距仪固定在光学平台上,在其对面固定一块高精度加工的大理石平板,大理石平板直线度为  $10 \mu\text{m}$ ,远高于整个测量系统的测量精度,因此在标定过程中,可将大理石平板认为是一条直线。开启激光器测量,每隔  $5^\circ$  读取一次激光器的读数,从而根据转台的旋转角度、激光器的读数,解算  $d$  和  $\theta$ 。

首先将实验获得的每一组  $d$  和  $\theta$  代入,写出每个点在转台坐标系下的二维坐标值,然后任取其中两点,以这两点的坐标值计算出直线方程,最后将其

余各点代入直线,以满足直线方程。根据三角函数的转换特性,可写出一个非线性二次方程组,此方程组没有求根公式,因此求精确解十分困难,可采用迭代法解方程。采取 Jacobi 迭代法,只需要 4 个点即可求解出所需的  $d$  和  $\theta$ ,并进行多次迭代,理论上误差可达  $10^{-6}$ 。

标定方法解决了由于安装和机械加工造成的系统误差,但由于激光测距传感器具有随机误差,使得在传感器与被测物均固定的情况下重复测量所得到的数值有偏差。为减小这一误差,可在标定的过程中对同一个点测量 50 次,并采用五点三次平滑法对数据进行滤波,五点三次平滑法利用多项式最小二乘逼近来对采样点实行平滑滤波,算法简单,效果较好<sup>[11]</sup>。滤波后再取所有数据的平均值作为该次测量的测量值。滤波后的实验数据如表 1 所示。

表 1 滤波后标定实验的数据

Table 1 Data of calibration experiment after filtering

$\alpha / (^\circ)$	$l / \text{mm}$
0	479.012
5	466.836
10	459.813
15	457.197
20	458.516
25	464.185
30	474.299
35	489.330
40	509.724

任意选取滤波后的四组数据,代入(1)式,可得到 4 个带有  $d, \theta$  两个未知数的点坐标的表达式,即

$$\begin{cases} X_1 = d \cos \alpha_1 + l_1 \cos(\alpha_1 + \theta) \\ Y_1 = d \sin \alpha_1 + l_1 \sin(\alpha_1 + \theta) \\ X_2 = d \cos \alpha_2 + l_2 \cos(\alpha_2 + \theta) \\ Y_2 = d \sin \alpha_2 + l_2 \sin(\alpha_2 + \theta) \\ X_3 = d \cos \alpha_3 + l_3 \cos(\alpha_3 + \theta) \\ Y_3 = d \sin \alpha_3 + l_3 \sin(\alpha_3 + \theta) \\ X_4 = d \cos \alpha_4 + l_4 \cos(\alpha_4 + \theta) \\ Y_4 = d \sin \alpha_4 + l_4 \sin(\alpha_4 + \theta) \end{cases} \quad (2)$$

由于被测物的直线度优于传感器的精度,可认为检测的是一条直线,因此将  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$  联立直线,表达式为

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}. \quad (3)$$

而  $(X_3, Y_3), (X_4, Y_4)$  应在联立的直线上,因此可以得到一个方程组,即

$$\begin{cases} \sin^2\theta + \cos^2\theta = 1 \\ X_3 - X_1 = \frac{Y_3 - Y_1}{Y_2 - Y_1} \\ X_4 - X_1 = \frac{Y_4 - Y_1}{Y_2 - Y_1} \end{cases} \quad (4)$$

通过 Jacobi 迭代法进行多次迭代,可以将  $d$  和  $\theta$  解出,在解算后,已知转台的旋转角度和激光测距传感器的读数,即可求得扫描点的二维坐标。

3.3 标定精度验证实验

根据标定过程对系统进行标定实验,得到激光测距传感器的激光出射点和转台的旋转中心连线长度  $d$  为 97.136 mm,该直线与激光器出射激光的夹角  $\theta$  为  $-0.03^\circ$ ,即激光测距传感器的安装与图 3(b) 的安装方式相反。将表 1 滤波后的实验数据根据 (1) 式计算出二维坐标值,任取两点求解直线方程,计算剩余点到直线的距离,可验证标定的精度。使用旋转角度为  $0^\circ$  与  $40^\circ$  的两点求解直线,直线方程为  $-3.51167X - Y + 2022.99 = 0$ ,计算其余点到直线的距离,实验数据如表 2 所示。

表 2 标定精度验证实验数据

Table 2 Data of calibration accuracy verification

$\alpha / (^\circ)$	Two-dimensional coordinate (X, Y)	Distance of point to line / mm
0	(576.15, -0.25)	0
5	(561.55, 48.61)	0.65
10	(547.73, 96.98)	0.70
15	(534.51, 143.24)	0.75
20	(522.71, 189.82)	0.66
25	(508.83, 238.00)	0.51
30	(495.00, 286.90)	0.60
35	(480.55, 337.87)	0.66
40	(465.05, 389.88)	0

经过计算,所有点到直线的距离均小于 0.8 mm,可认为系统标定的精度高于 0.8 mm。

3.4 测量系统的精度验证实验

在标定过后,对该二维扫描传感器进行精度验证。对设备精度的检验需要比设备精度更高一级的量具,量块也叫块规,由耐磨材料制造,横截面为矩形,并具有一对相互平行测量面的实物量具。两平行平面称为测量面,测量面很平,又很光洁(表面粗糙度  $R_a \leq 0.016 \mu\text{m}$ )<sup>[12]</sup>,因此采用量块对二维扫描传感器进行实验。此外通过更换量块,还可以对不同形状的标准件进行形貌扫描。

实验操作过程如图 4(a) 所示,将五个量块按照图 4(a) 摆放,量块后端紧贴大理石平板。鉴于量块

的精度远远高于设备的检测精度,可以认为量块端面平面度很好,且任意两个量块端面之间的距离差是已知的。用标定好的测量设备进行二维扫描,采用测量的数据,通过(1)式进行计算,可以得到每个测量点的二维坐标。为使测量结果更加显而易见,对点云图像进行了处理,将部分数据删除,仅保留量块平行于大理石平面的表面数据。点云图像如图 4(b) 所示。

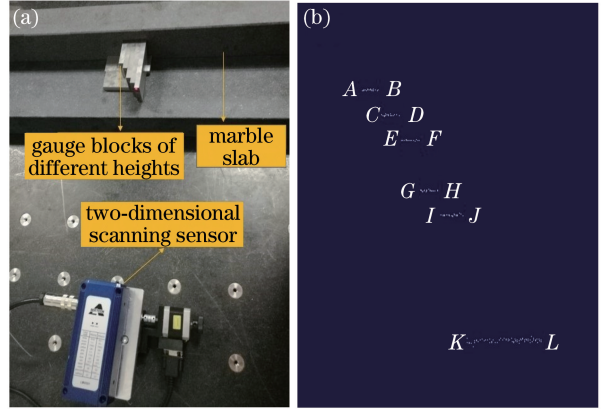


图 4 实验装置及测量数据。(a)精度验证实验装置; (b)量块点云图

Fig. 4 Experimental device and measurement data.

(a) Device of accuracy verification experiment; (b) point cloud of gauge block

由于量块表面和大理石平面相对于测量系统精度较高,因此将平面上的点拟合成直线,然后计算直线间的间距,并与量块高度的差值进行比较,即可评价测量系统的精度。将量块在相同的扫描起点与终点重复扫描 10 次,任取其中一点,计算 X 与 Y 方向的标准差,可评价测量系统的重复性。选取旋转角度为  $1^\circ$  时的数据来计算重复性。具体的实验数据如表 3、4 所示。

表 3 精度验证实验的数据

Table 3 Data of accuracy verification experiment

Line label	Spacing of line / mm	Height difference of gauge block / mm
AB-CD	10	10.8
CD-EF	10	9.1
EF-GH	20	20.6
GH-IJ	10	9.5

通过计算可以算出 X 方向的标准差为 0.136 mm, Y 方向的标准差为 0.148 mm。两个方向的标准差均小于 0.15 mm,可以认为系统的重复性良好。拟合直线间距与量块高度差的差的绝对值



表4 重复性精度验证实验的数据

Table 4 Data of repeatability accuracy verification experiment

Serial number	X /mm	Y /mm
1	416.073	7.262
2	415.673	7.255
3	415.863	7.489
4	415.987	7.065
5	416.106	7.598
6	415.995	7.336
7	415.789	7.258
8	415.857	7.154
9	416.033	7.218
10	415.778	7.369

均在 1 mm 内,虽然拟合直线时会去除部分极值点,结合测量标准差分析,可认为检测精度在 1 mm 以内。

## 4 结 论

针对原有的接触式、非接触式测量高铁车厢静态限界的方法所具有的问题,基于回转射线簇原理设计了应用于静态限界测量的新型二维扫描传感器。对该传感器进行了标定和精度验证。实验证明,该传感器精度优于 1 mm,且重复性良好、扫描速度快,很好地满足了高铁车厢静态限界的测量需求,即将替换原有的在中铁检验认证中心有限公司机车车辆检验站的二维扫描传感器并投入使用。

## 参 考 文 献

- [1] Standard metrology institute of ministry of railways. Checking of rolling stock clearance for standard gauge railways Part 2: clearance treadle: GB/T 16904.2-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.  
铁道部标准计量研究所. 标准规矩铁路机车车辆检查第 2 部分: 限界规: GB/T16904.2-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [2] Han M, Han B L, Li H Y, et al. Calculation method of the distance between railway out-of-gauge goods and structure gauge [J]. China Railway Science, 2011, 32(1): 122-126.  
韩梅, 韩伯领, 李红艳, 等. 铁路超限货物限界距离计算方法[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 122-126.
- [3] Guo Y, Liu C J, Liu G, et al. Non-contact automatic measurement system for the static clearance of rolling stock[J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 134-138.

郭寅, 刘常杰, 刘刚, 等. 机车车辆静态限界非接触式自动测量系统[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(1): 134-138.

- [4] Wu B, Zhuang X, Liu C J, et al. Research on calibration method of static railway vehicle clearance gauge [J]. Journal of Transduction Technology, 2013, 26(1): 58-62.  
吴斌, 庄洵, 刘常杰, 等. 铁路机车车辆静态限界测量系统校准方法研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 58-62.
- [5] Wu Z G, Zeng Z M, Li X Q, et al. Non-contact on-machine dihedral angle measurement approach based on rotary ray-scanning mechanism [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508001.  
吴振刚, 曾周末, 李兴强, 等. 非接触回转射线二面角在机测量方法[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508001.
- [6] Liu X B, Wang Z, Lin L, et al. Measuring method for deep hole straightness based on single laser beam rotation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031203.  
刘新波, 王仲, 林立, 等. 基于单激光束旋转的深孔直线度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031203.
- [7] Liu X B, Wang Z, Luo Q Y, et al. On-machine measurement of hole diameter based on single laser beam rotation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041204.  
刘新波, 王仲, 罗庆跃, 等. 基于单激光束旋转的圆孔直径在机测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041204.
- [8] Liu X B, Wang Z, Su Y, et al. Measurement of parallelism between rotating axis and guideway of a machine tool based on approximation hole center positioning method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11): 1108015.  
刘新波, 王仲, 苏野, 等. 基于逼近式定心法测量机床回转轴对导轨的平行度[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108015.
- [9] Wang Z, Su Y, Liu X B, et al. An approximation hole center positioning method by rotating laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0608001.  
王仲, 苏野, 刘新波, 等. 回转激光位移传感器逼近式孔心定位方法[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0608001.
- [10] Wang Y W, Fu L H, Zhao Y, et al. Calibration method for optical axis perpendicular error of laser

- sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0410002.
- 王祎雯, 付鲁华, 赵炎, 等. 激光传感器光轴垂直度误差标定方法 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0410002.
- [11] Wu W, Chen B, Wu J F, et al. Study on reverse deduction of reservoir-inflow based on cubical smoothing algorithm with five-point approximation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(12): 100-102.
- 武炜, 陈标, 吴剑锋, 等. 基于五点三次平滑算法的入库流量反推研究 [J]. 水利水电技术, 2013, 44(12): 100-102.
- [12] Xu J, Che X, Yuan X H. The origin of the gauge block and the development of its measurement technology[J]. Enterprise Standardization, 2010(4): 63.
- 徐及, 车轩, 原晓慧. 量块的起源及其测量技术的发展 [J]. 品牌与标准化, 2010(4): 63.