

# 基于光斑位置传感器的长导轨准直系统

罗 凯<sup>1</sup>, 陈培锋<sup>1\*</sup>, 王 英<sup>1</sup>,

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了长导轨直线度检测的目的, 采用了激光作为参考基准线, 二维光斑位置传感器作为光电转换器件的方法, 当固定在导轨滑块上的二维光斑位置传感器沿着导轨移动时, 光斑的位置数据会通过蓝牙模块传输到终端上, 输入位置信息之后, 软件会自动绘制出导轨的二维直线度曲线。理论分析计算出激光偏角带来的误差远小于 $1\mu\text{m}$ 。通过高精度位移平台实验验证了系统的精度, 达到了 $3.4\mu\text{m}$ 。实际使用时, 检测了 $7.2\text{m}$ 的长导轨, 取得了长导轨的直线度数据, 结果表示重复精度可达 $5\mu\text{m}$ , 这一结果对长导轨直线度测量的研究是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 激光准直; 比对实验; 光斑位置传感器

中图分类号 : TH741 文献标识码 : A

## Long guide rail collimating system based on Position-Sensitive Detector

LUO Kai<sup>1</sup>, CHEN Pei-feng, WANG Ying,

(1. School of optical and electronic information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to measure the straightness of long guide rail, we take the laser as optical reference line and the two-dimensional position sensitive detector as the optical-electrical converter. With the two-dimensional PSD moves along the guide rail, the data of the spot position will be transferred to the terminal equipment through the bluetooth module. After we input the data of the spot position, the software will automatically draw the curve of the guide rail's two-dimensional straightness. Theoretically, we figured out the error caused by the laser deflection angle is much less than  $1\mu\text{m}$ . We also used the high precision displacement platform to verify the accuracy of the system, which reached  $3.4\mu\text{m}$ . In actual use, we tested the  $7.2\text{m}$  long guide rail and got its straightness data, the result showed that its repeatable precision reached  $5\mu\text{m}$ . The result is helpful in the research of long guide rail straightness measurement.

**Key words:** laser technique; laser alignment; contrast experiment; position sensitive detector

### 引 言:

导轨直线度<sup>[1][2]</sup>是评价机床质量的重要指标,直接影响到机床加工出来的产品精度和机床质量,在机床生产过程中,检测机床直线度并进行修正<sup>[3-5]</sup>是提升机床质量关键的环节。

导轨直线度的传统检测方法,有平尺法、钢丝法等,目前国内普遍采用的通用工具如水平仪、自准直仪等<sup>[6]</sup>,多是以测量元件的精度为基准,人为引入的误差较大,其检测精度难以满足目前工业界的需要<sup>[7]</sup>。

激光具有高方向性以及高亮度等优点,非常适合作为测量的基准,使用激光作为测量基

---

作者简介: 罗凯 (1993-), 男, 研究生, 现主要从事光学电子器件的研究。

\*通讯联系人。pfchen@hust.edu.cn

准的测量方法与传统测量方法相比具有测量精度高,体积小,且几乎不受被测导轨长度的制约等优点<sup>[8]</sup>。随着科技的发展,直线度检测发展至自动测量<sup>[9]</sup>,其中尤其以图像控制器 (Charge-coupled Device, CCD) 或光斑位置传感器<sup>[10]</sup> (Position-sensitive Device, PSD) 等光电传感器为核心的激光准直技术被不断应用在直线度检测领域中<sup>[11-13]</sup>,使得直线度准直精度至少提升了一个数量级<sup>[14]</sup>。本文介绍的基于 PSD 的长导轨准直系统,以精度为 $3.4\mu\text{m}$ 的 PSD 为接收器,测量 $7.2\text{m}$ 米长的导轨时,重复精度优于 $5\mu\text{m}$ 。

### 1 工作原理

如图 1 为系统原理图所示。导轨直线度测量系统主要分为三个部分：发射模块，接收模块和处理模块。发射模块发出激光，接收模块探测激光光斑重心，并且固定在导轨滑块上随之一起运动，处理模块负责处理、展示数据。向处理模块中输入导轨的坐标后，处理模块会显示导轨的直线度偏差曲线，标出导轨不同位置的直线度偏差。

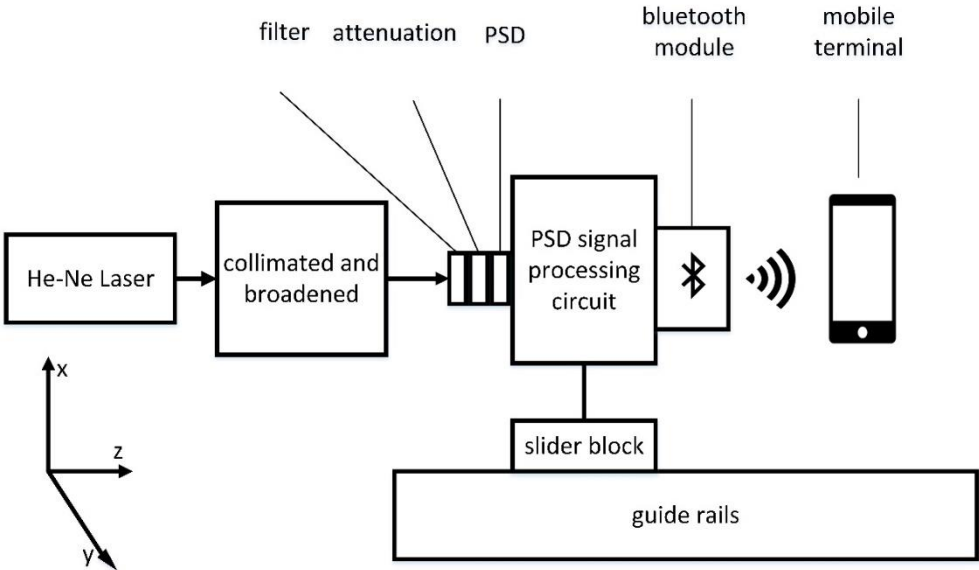


Fig.1 sketch map of the system

发射模块由氦氖激光器和透镜组组成。氦氖激光器发出激光之后,经过透镜组的准直与放大,与导轨平行地发射到接收模块上。经过处理之后的激光准直性良好<sup>[15]</sup>。光斑直径不超过 $2\text{mm}$ ,功率约为 $5\text{mW}$ 左右<sup>[16][17]</sup>。

接收模块主要由红光滤光片、衰减片、PSD、PSD 处理电路和蓝牙模块组成。其主要功能是检测出光斑的重心坐标并通过蓝牙模块发送给移动终端。红光滤光片作用在于把自然光和氦氖激光器发出的红光( $632.8\text{nm}$ )分离。衰减片作用在于将接收到的激光功率控制在 $1\text{mW}$ 以下。PSD 主要功能是检测光斑的重心位置,中心区域的检测精度可以达到 $3.4\mu\text{m}$ 。由于 PSD 输出信号会受到暗电流,非线性失真等因素的负面影响,我们给 PSD 配套使用了一块处理电路板(滨松公司 C9069)用于提高 PSD 检测的精确性。蓝牙模块用于和移动终端的远程通信。整个接收模块用铝制外壳包裹用于使用现场屏蔽电磁干扰和灰尘。

处理模块即移动终端,可以是安卓手机或者笔记本电脑,安装了为实验特制的软件之后即可以接收实验数据,在输入导轨坐标之后,能够绘制导轨的直线度曲线,并标明导轨每个位置的直线度偏差,精确到 $5\mu\text{m}$ 。如图 2,为手机上绘制直线度曲线的软件图。

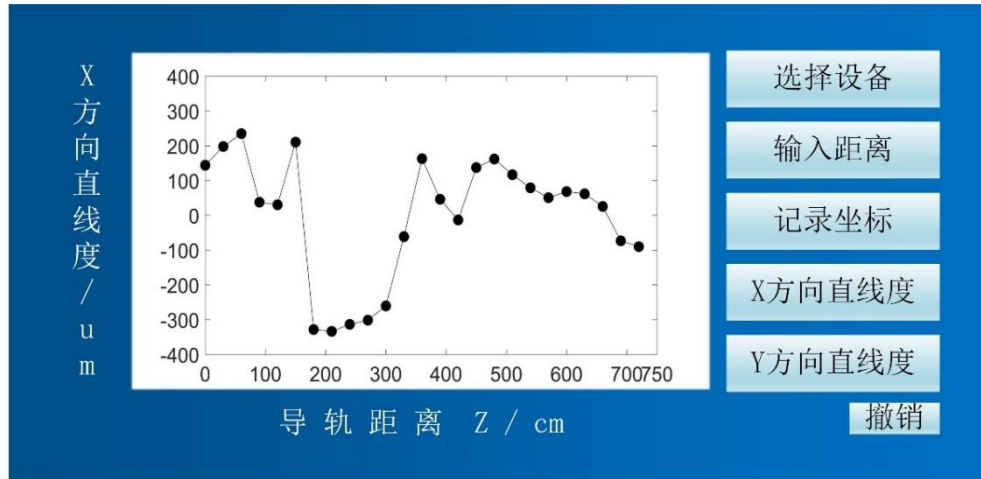


Fig.2 software interface figure

## 2 硬件设计

激光器用的是 Reallight 公司生产的氦氖激光器输出单模激光，功率约为5mW<sup>[18]</sup>。扩束准直使用的分别是焦距为80mm以及200mm的凸面镜，80mm镜片焦点处放置直径为0.1mm的小孔进行空间滤波。滤波后激光准直性和单色性得到增强。

接受模块核心部件 PSD 为日本滨松公司生产的S1880型二维位置传感器，光斑重心测量精度为 3.4μm。PSD 安装在 C9069 型电路板上，PSD 接受光斑后输出光斑的重心坐标给电路板，由于 PSD 本身的枕形结构<sup>[19]</sup>，电路板使用了特定的算法<sup>[20][21]</sup>修正了这一结构带来的误差<sup>[22]</sup>。输出接口为 RS232 串行接口，接上蓝牙模块即可在30m内进行数据的无线传输。

## 3 验证实验

### 3.1 关于 PSD 倾斜带来的误差分析

从图 1 原理图中可以看出，接收模块的核心部件 PSD 是固定在滑块上的，PSD 始终垂直于导轨，而导轨并不是完美的直线，存在着左右与上下的起伏，因此随着滑块在导轨上的滑动，PSD 和激光不再是垂直的关系，两者之间存在一个偏角 $\alpha$ ，这个偏角会对 PSD 测量的坐标产生影响<sup>[23]</sup>。

图 3 为激光偏角的原理图，其中直线 AC 代表激光，A 点是滑块移动之前激光与 PSD 的交点，C 点是滑块移动之后激光与 PSD 的交点。直线 AB，BD 是辅助线，AB 平行于导轨，BD 垂直于 AC。

当导轨出现倾斜时，测量系统测得的光斑位移为线段 BC，设为D，实际上的导轨偏差位移为线段 BD，设为d，测量误差设为 $\delta$ 。直线 AC 和直线 AB 之间的夹角设为 $\alpha$ 。则有以下关系：

$$\delta = D - d \quad (1)$$

$$= D(1 - \cos \alpha) \quad (2)$$

导轨在直线度测量之前都会经过普通水平尺的测量，精度为 $0.029^\circ = 0.5\text{mm/m}$ 。所以， $\alpha$ 小于 $0.029^\circ$ 。另外D，即线段BC长度被 PSD 的直径限制，小于6mm，由此可以算出：

$$\delta < 12\text{mm} \times (1 - \cos 0.029^\circ) = 0.00153\mu\text{m} \quad (3)$$

远小于 $1\mu\text{m}$ ,相对于 PSD 的精度 $3.4\mu\text{m}$ 来说可以忽略不计。因此激光偏角对直线度测量造成的误差可以忽略不计。

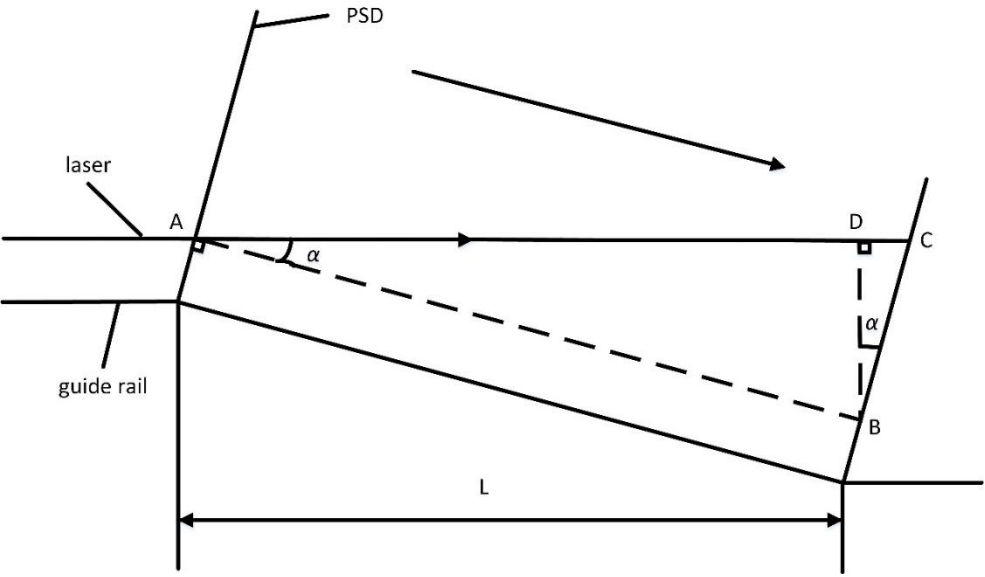


Fig.3 measurement error caused by laser deflection angle

### 3.2 PSD 精度验证实验

日本滨松公司给出 PSD 的参考精度为 $3.4\mu\text{m}$ 。为了验证长距离情况下 PSD 的使用精度，我们采取了高精度位移平台来进行验证实验，位移平台精度达到 $1\mu\text{m}$ ，激光器固定在距离 PSD $10\text{m}$ 处，检测装置和位移平台一起移动，读出位移平台上的数据和 PSD 导轨准直系统给出的位移数据，接着进行比较，观察 PSD 的精度，如表一。

Table 1 displacement of micro-displacement platform and PSD

| Theory displacement/ $\mu\text{m}$ | Actual Displacement/ $\mu\text{m}$ | Deviationvalue/ $\mu\text{m}$ |
|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 56                                 | 54.70                              | 1.30                          |
| 43                                 | 44.40                              | 1.40                          |
| 229                                | 232.50                             | 3.50                          |
| 107                                | 109.45                             | 2.45                          |
| 233                                | 235.82                             | 2.82                          |
| 115                                | 116.35                             | 1.35                          |
| 69                                 | 71.70                              | 2.70                          |
| 232                                | 232.50                             | 0.50                          |
| 107                                | 106.05                             | 0.94                          |
| 59                                 | 58.10                              | 0.90                          |
| 58                                 | 61.59                              | 3.59                          |
| 120                                | 119.60                             | 0.40                          |
| 60                                 | 61.59                              | 1.59                          |
| 59                                 | 58.10                              | 0.90                          |
| 105                                | 105.30                             | 0.30                          |

从表中可以看出，一共15组数据，平均误差为 $1.64\mu\text{m}$ ，最大误差为 $2.70\mu\text{m}$ ，标准差为

1.06 $\mu\text{m}$ ，小于3.4 $\mu\text{m}$ 。基于以上数据我们可以得出结论，PSD 的测量精度达到了3.4 $\mu\text{m}$ 。

### 3.3 导轨精度检测实验

为了检验导轨准直系统的实际使用情况,我们在河南某数控机床有限公司开展了现场实验,检测了还没有经过准直的机床。导轨长度为8m,由于接受模块在导轨上的滑块本身长30cm,不可以移出导轨,所以我们只测了7.2m的长度,每隔30cm测一个点,一共测了25组数据,重复测试了3次。

导轨在 X,Y 方向上的直线度如图 3。导轨三次测量的标准差如图 4。

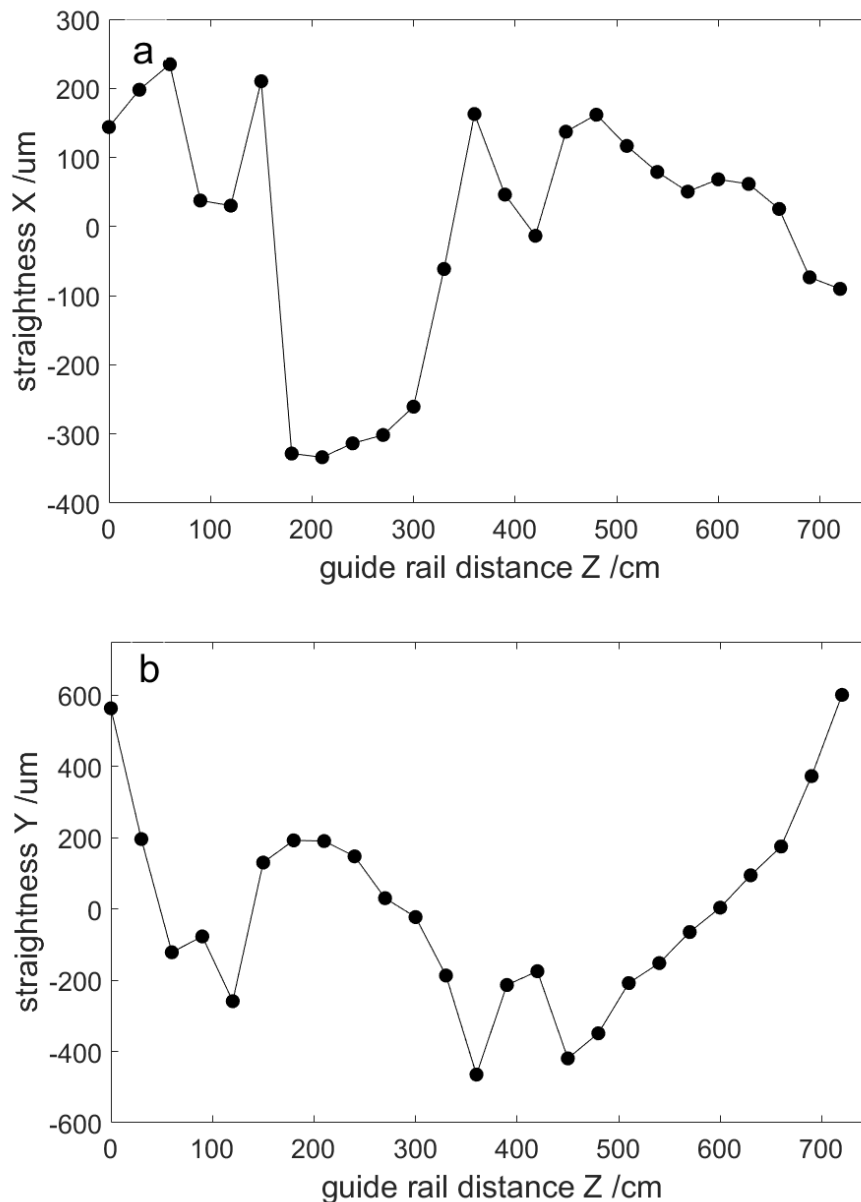


Fig.4 straightness of the guide rail

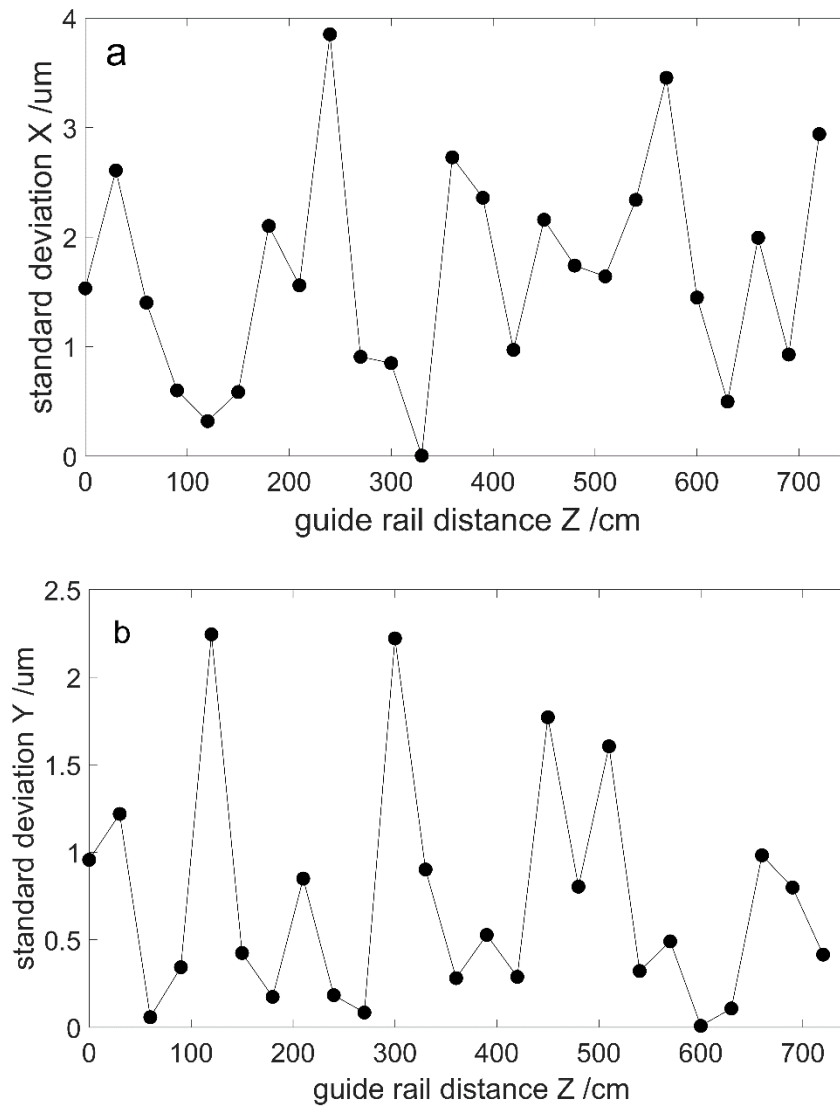


Fig.5 standard deviation of the straightness

从图 3 中可以看出机床导轨在 X（水平）,Y（垂直）方向上的直线度。从图中可以看出 X 方向上的偏差较小, Y 方向上偏差较大,这是由于导轨安装的方式决定的, X 方向没有螺丝固定,精度主要依赖于导轨出厂时的精度,本身不易产生偏移。Y 方向由螺丝固定,螺丝的松紧会造成导轨的形变,从而引起导轨的起伏,即 Y 方向上的误差。

从图四中可以看出,导轨 X、Y 方向重复精度都小于 $4\mu\text{m}$ ,满足我们 $5\mu\text{m}$ 的精度要求。这意味着工人可以根据这些数据进行机床准直的调节,预期调节精度可以达到 $5\mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

设计出了一套安装简单,使用方便的导轨准直系统,能够满足高精度导轨直线度的测量要求。通过理论计算,排除了激光偏角的影响,通过实验验证了 PSD 的精度,达到了 $3.4\mu\text{m}$ ,通过工厂的实验,证明导轨准直系统在测量 $7.2\text{m}$ 长的导轨时,重复精度可以达到 $5\mu\text{m}$ ,满足高精度导轨直线度的测量要求。

## 参考文献:

- [1] WANG Y P. Research of Flatness and Linearity Testing System[D].Shenyang: Shenyang University of Technology,2004:9-38(in Chinese).  
王玉平.平面度和直线度检测系统的研究.[D]沈阳: 沈阳工业大学. 2004:9-38.
- [2] YUE W L, WU Y. A Fast Evaluation Method for Flatness and Straightness Tolerance by Means of Incremental Algorithm[J] Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 120-123.  
岳武陵,吴勇.平面度和直线度误差的快速评定——增量算法[J]计量学报, 2008,29(2): 120-123.
- [3] HUANG F G, CUI Ch C. Comparison of evaluating precision of straightness error between least square method and least envelope zone method[J] Optics and Precision Engineering, 2007 15(6):879-893.  
黄富贵,崔长彩. 评定直线度误差的最小二乘法与最小包容区域法精度之比较[J]光学精密工程, 2007 15(6):879-893.
- [4] LI Y J, ZHENG Z G. Calculation of straightness error and computerization[J] China Measurement Technology,2007,33(3):67-69.  
李亚军, 郑志刚. 直线度误差的数据处理及程序设计[J]中国测试技术, 2007,33(3):67-69.
- [5] HU Z X. Research on digitized evaluation theory and algorithm for the straightness error[D] Hunan: Hunan University,2012:15-94(in Chinese).  
胡仲勋.直线度误差数字化评定理论与算法研究[D]湖南: 湖南大学, 2012:15-94.
- [6] SONG Q. Research on Straightness Measurement System of Long Rails Based on 2D-PSD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 2-20(in Chinese).  
宋庆.基于 2D-PSD 的长导轨直线度测量系统的研究[D]长春: 长春理工大学, 2014: 2-20.
- [7] LI F. Study on Straightness Testing System of Super-Length Guideway[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2002: 2-15(in Chinese).  
李飞.超长导轨直线性测试系统研究.长春: 长春理工大学, 2002: 2-15.
- [8] LV A M, WANG Z X, HE AN Z, et al. Measuring the Straightness of the Long Slideway Using PSD[J] Journal of Transducer Technology,1996,5:55-56.  
吕爱民, 王志兴, 贺安之, 袁红星.用 PSD 测试长导轨准直度[J]传感技术, 1996,5:55-56.
- [9] JIA T X, XU X P, DONG W B. Design of Automatic Testing System for 2D Position Sensitive Detector(PSD)[J]. Instrument Technique and Sensor,2012, No. 10:67-69.  
贾天祥, 徐熙平, 董文博.二维位置敏感探测器(PSD)自动测试系统[J]仪表技术与传感

- 器, 2012, No. 10:67-69.
- [10] MA Ch G, YUAN H X, HE An Zh. Research of anti-jamming in facula orientation[J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 308-310(in Chinese).
- 马春光, 袁红星, 贺安之. 基于相位的 PSD 定位定理.[J]激光技术, 2002, 26(4): 308-310.
- [11] MOU L N. Displacement detection system design based on PSD [D]. Taiyuan: North Central University, 2007 2-30.
- 牟丽娜, 基于 PSD 的位移检测系统设计[D].太原: 中北大学, 2007 2-30.
- [12] LIU P, GAO L M, LE K D. Laser measurement system for rail linearity[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 575-578(in Chinese).
- 刘鹏, 高立民, 乐开端. 应用于铁轨平直度检测的激光测量系统的研究.[J]激光技术, 2009, 33(6): 575-578.
- [13] HU Ch D, LI Y Q, Zh X, et al. Laser alignment measuring and testing equipment based on interference fringe[J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 522-525(in Chinese).
- 胡长德, 李咏强, 周欣, 诸葛晶昌, 齐浩. 基于干涉条纹的激光准直技术的检测系统[J]激光技术 2009, 33(5): 522-525.
- [14] YANG Sh L, SU Y B, HE J T, et al. Study of measurement accuracy of position sensitive detectors[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 830-834(in Chinese).
- 杨淑连, 宿元斌, 何建廷, 魏芹芹, 盛翠霞, 申晋. 位置敏感探测器测量准确度的研究.[J]激光技术 2014, 38(6): 830-834.
- [15] FENG Q B, LIANG J W. Development of a single mode fiber laser collimator[J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 357-360(in Chinese).
- 冯其波, 梁晋文. 单模光纤激光准直仪的研制[J]激光技术, 1994, 18(6): 357-360.
- [16] LV AI MIN, YUAN H X, HE An Zh. The research in the influence of beam spot on the precision of PSD[J] Laser Technology, 1998, 22(5): 294-297(in Chinese).
- 吕爱民, 袁红星, 贺安之. 光斑模式对 PSD 定位的研究.[J]激光技术, 1998, 22(5): 294-297.
- [17] LV AI MIN, YUAN H X, HE An Zh. Experimental study of the effect of light source on position precision of PSD[J] Laser Technology, 2000, 24(3): 192-195(in Chinese).
- 吕爱民, 袁红星, 贺安之. 位置指示光源对 PSD 定位精度影响的实验研究[J]激光技术, 2000, 24(3): 192-195.
- [18] FENG Q B, ZHANG B, KUANG C F. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36: 279-283.



- [19] SONG C, Yeng Chai Soh. Linearity Indices and Linearity Improvement of 2-D Tetralateral Position-Sensitive Detector[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, SEPTEMBER 2010 VOL. 57, NO. 9:2310-2316.
- [20] LIU Ch, MA Y, Nonlinear correction of PSD with genetic algorithm based on neural network[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2015 29(8):1157-1163.
- 刘春, 马颖. 遗传算法和神经网络结合的 PSD 非线性校正.[J]电子测量与仪器学报, 2015 29(8):1157-1163.
- [21] LIN Q S, YANG X J, WANG J X, et al. 2-D nonlinear correction in an improved BP neural network[J] Laser Technology, 2012, 36(1):124-130.
- 林青松, 杨孝敬, 王军晓, 张聚伟. 改进型 BP 神经网络的 2 维 PSD 非线性校正.[J]激光技术, 2012, 36(1):124-130.
- [22] LI Zh K, QIN Y Y. Research of on-line measurement and non-linearity correction of two dimension PSD device[J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 370-372(in Chinese).
- 李中科, 秦永元. PSD 器件自动化标定与非线性修正技术研究.[J]激光技术, 2004, 28(4): 370-372.
- [23] Ekinici O, Mayer JRR. Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(12/13):1997-2004.