

分类号\_\_\_\_\_

学号 M201571975\_\_\_\_\_

学校代码 10487\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

華中科技大學

# 硕士学位论文

## 基于位置探测器（PSD）的长导轨 直线度测量系统研究

学位申请人： 罗 凯

学 科 专 业： 光学工程

指 导 教 师： 陈培锋 教授

答 辩 日 期： 2017. 5. 18

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering**

**Study on long guide rail straightness  
measurement system based on  
Position-Sensitive Detector (PSD)**

**Candidate : Luo Kai**

**Major : Optical Engineering**

**Supervisor : Prof. Chen Peifeng**

**Huazhong University of Science & Technology  
Wuhan 430074, P. R. China**

**May, 2017**

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：          年          月          日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于          保密 ☐，          在 \_\_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。  
不保密 ☐。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

日期：          年          月          日

指导教师签名：

日期：          年          月          日

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 摘要

直线度是限制实际直线相对于理想直线变动量的一种形状公差。直线度误差是导轨质量最重要的衡量指标，直接决定了导轨的工作性能。传统直线度误差测量方法比如拉钢丝法和平尺法虽然简单，但是具有测量效率低、精度低的缺点，而新型的测量仪器虽然具有精度高的优势但是价格昂贵，难以满足实际需要。鉴于此，本课题以长导轨直线度误差为研究对象，兼顾精度和经济性的要求，提出了激光作为参考基准线，二维 PSD 作为光电传感器件的新型测量方法。

本文针对测量的要求设计了总体的检测方案：

理论上对测量原理进行了分析，验证了方案的可行性。搭建了以二维 PSD 为核心，氦氖激光器发出的激光束为参考基准线的长导轨直线度测量系统。设计了蓝牙模块用于数据远程传输，应用 Python 编写了基于最小二乘法的直线度误差计算程序。设计了高精度位移平台的对照实验验证了二维 PSD 的精度，达到了 $3.4\mu\text{m}$ 。设计了实测实验，在工厂检测了 $7.2\text{m}$ 的长导轨，结果表示重复精度可达 $5\mu\text{m}$ 。通过理论建模和实测实验对可能引起系统测量误差的各种因素进行了分析。本系统能够有效地解决长导轨直线度检测的难题，为高精度长导轨直线度测量提供了一种简单高效的方案。

**关键词：**激光技术    激光准直    比对实验    PSD

## Abstract

Straightness is a form tolerance which limits the variation of the actual straight line relative to the ideal straight line. Straightness error is the most important measure index of the guide rail's quality, which directly determines the working performance of the guide rail. Traditional straightness error measurement methods such as ruler and steel wire are simple, but have the disadvantage of low efficiency and low precision. Although the new type of the measuring instruments have the advantage of high precision, its price is too expensive to meet the actual needs. In view of this, this paper takes the long guide rail's straightness error as the research object, taking into account the precision and the economic requirement, and proposed the new measurement method which take the laser as the reference line and the two-dimensional spot position sensor as the photoelectric sensor.

In this thesis, the overall detection scheme is designed for the measurement requirements:

We have theoretically analyzed the measurement principles and verified the feasibility of the scheme. The long guide rail straightness measurement system takes the two-dimensional spot position sensor as the core, the beam emitted by the He-Ne laser as the reference line. We designed the Bluetooth module for remote data transmission and used the Python writing the straightness error calculation program based on the least squares method. We verified the accuracy of the two-dimensional spot position sensor by a high-precision displacement platform control experiment, reaching  $3.4\mu\text{m}$ . We designed experimental experiments and tested the 7.2m long rail at the factory, the results showed a repeatability up to  $5\mu\text{m}$ . At last, We analyzed the various factors that may cause systematic measurement error through theoretical modeling and experiments. As a result, a new method is provided for long guide rail's straightness error measurement, which is simple and efficient.

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

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	II
1 绪论	
1.1 概述 .....	(1)
1.2 准直技术的发展与现状 .....	(1)
1.3 项目来源及技术指标要求 .....	(2)
1.4 本文主要研究内容 .....	(3)
2 长导轨直线度测量系统的总体设计	
2.1 直线度测量系统的总体结构 .....	(5)
2.2 直线度测量系统各器件工作原理 .....	(5)
2.3 直线度误差评定方法 .....	(12)
2.4 本章小结 .....	(16)
3 长导轨直线度测量系统的硬件设计	
3.1 接收模块的硬件设计 .....	(18)
3.2 发射模块的硬件设计 .....	(23)
3.3 本章小结 .....	(28)
4 长导轨直线度测量系统的软件设计	
4.1 软件功能需求分析与体系结构 .....	(29)
4.2 开发工具 Python 简介 .....	(30)
4.3 直线度测量系统软件界面 .....	(31)

# 华中科技大学硕士学位论文

---

4.4	核心算法设计 .....	(32)
4.5	本章小结 .....	(34)
5	系统实验及误差	
5.1	系统校准 .....	(35)
5.2	实验研究 .....	(36)
5.3	误差分析 .....	(38)
5.4	本章小结 .....	(42)
6	总结与展望	
6.1	总结 .....	(43)
6.2	展望 .....	(43)
	致 谢 .....	(45)
	参考文献 .....	(46)
	附录 1 攻读学位期间发表论文目录 .....	(49)

## 1 绪论

### 1.1 概述

导轨的形状为脊或者槽，作用是减少设备之间的摩擦，制作材料通常是金属。导轨中设在支撑构件上的导轨面为承导面，它比较长，称为静导轨；另一个导轨面设在运动构件上，它比较短，称为动导轨，导轨由这两个部分组成。导轨可以承担相当的额定负载和扭矩，即使在高负载的工作条件下亦可实现高精度的直线运动<sup>[1]</sup>。

针对本文主要研究的机床导轨，有以下三种基本功能：

- (1) 为承载体的运动导向。
- (2) 为承载体提供光滑的运动表面。
- (3) 把机床切削所产生的力传到机床上，减少对被加工零件产生的影响。

导轨的精度对于机床生产出来的产品的质量具有重要的影响。机床作为工作母机，其动态特性直接决定了加工精度，而机床导轨是机床各主要部件相对位置和运动的基准，它的精度直接影响了机床成形运动之间的相互位置关系。导轨精度是产生工件形状误差和位置误差的重要因素。因此，生产机床的工厂在机床出厂之前需要对导轨的性能进行检测，保证导轨在负载和空载条件下均具有足够的导向精度，能够满足客户的需求<sup>[2]</sup>。

几何精度是导轨最重要的质量衡量指标之一，就直线运动的导轨而言，几何精度指的是导轨在竖直平面内的直线度、导轨在水平面内的直线度以及两条导轨之间的平行度。本系统主要研究导轨在竖直平面内的直线度和水平面内的直线度。

### 1.2 准直技术的发展与现状

总的来说，准直技术的发展经历了以下几个阶段<sup>[3]</sup>：

(1) 拉钢丝法：该方法使用年代较早，在精度要求不高的时候使用广泛，优点是简单直观，缺点是由于钢丝受重力自然下垂、钢丝的扭结或者风吹引起的钢丝偏摆会产生误差。随着现在机械设备的安装以及测量精度的要求越来越高，这种方法已经不能满足工业上的需求了。



# 华中科技大学硕士学位论文

---

(2) 传统的光学准直法: 就是使用自准直光管和自准直望远镜进行直线度的测量。测量精度较拉钢丝法有很大的提升, 但是也存在着显著的缺点, 主要在于安装调试不方便, 瞄准以及调焦时存在误差。而且, 使用距离也有限制, 一般可靠工作距离小于三十米, 距离过长, 则这种方法获得的像质会比较模糊, 照度也比较低。

(3) 最新采用的激光准直技术: 激光相对于其他的准直方式具有绝对的优势, 因为激光的准直性和高亮度是拉钢丝法没有办法达到的, 另外相较于传统的光学准直方法激光具有相干的优势, 这些优点使得激光准直技术自激光发明以来就得到了迅速的推广。发展至今, 工业化激光器无论是从价格方面或者种类方面相比于传统的方法都已经有了巨大的优势, 一般来说, 激光器的工业化应用无非加工与测量两种, 其中加工一般使用大功率的二氧化碳激光器, 而测量方面, 如果精度要求低, 一般使用半导体激光器, 价格便宜使用方便, 如果精度要求高, 一般使用氦氖激光器, 性能稳定准直程度高, 便于长距离测量。

从准直技术的发展可以看出传统的测量导轨直线度的方法, 如平尺法、钢丝法等, 测量精度取决于平尺和钢丝的精度, 人为引入的误差非常大。而间接测量法多是用准直激光束作为测量基准, 简单直观, 操作方便, 而且在精度方面优势明显<sup>[4]</sup>。

目前国内厂家普遍采用水平仪、自准直仪等通用工具, 检测精度低, 难以满足目前高精度产品的需要。随着科技的发展, 工业上对设备精度的要求会越来越高, 以 CCD 或 PSD 等光电传感器为核心的激光准直技术会取代目前低精度的测量技术<sup>[5][6]</sup>。

本课题以氦氖激光器发出的经过准直的光束作为参考基准线, 二维 PSD 作为光电转换器件, 获取光斑的重心坐标, 当固定在导轨滑块上二维 PSD 沿着导轨移动时, 光斑的重心位置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, 实现了长导轨直线度的求取。为高精度长导轨直线度误差的测量提供一种新型测量方法, 研制出了使用方便、价格低、性能稳定的长导轨直线度精密测量系统<sup>[7][8]</sup>。

## 1.3 项目来源及技术指标要求

目前, 各应用领域对长导轨的直线度测量的需求越来越多, 精度要求也越来越高, 而由于性能方面的差异, 许多科研单位、高校院所、工业部门以及国防装备所使用的

# 华中科技大学硕士学位论文

---

测量仪器都来自与国外公司。高昂的价格给机床的生产厂家带来了不小的负担，不利于国产机床的产业升级。国产的长导轨直线度测量设备的研制势在必行<sup>[9]</sup>。

受国内一家机床企业的委托，本项目需开发一套高精度的长导轨直线度测量设备，技术指标如下：

(1) 在 7m 的长导轨检测过程中，设备测量精度要求不低于 $5\mu\text{m}$ ，这也是高精度机床的判定标准。

(2) 设备使用简单，安装方便，测试结果显示直观，工人能够明确识别。

(3) 设备稳定性高，能够防摔防尘，在较脏的环境下能够使用。

(4) 相比于国外的设备具有价格优势。

## 1.4 本文主要研究内容

本课题主要涉及到激光技术和半导体光斑探测器技术，涉及了光学电学、精密仪器测量等领域，主要研究内容如下所示：

(1) 导轨的定义，功能，以及导轨精度对于机床的重要性。分析阐述本系统研究的目的与意义。

(2) 在详细研究了厂家需求之后，提出了基于 PSD 的长导轨直线度测量方案，该方案由配套的 PSD 和具有高准直度的氦氖激光器等核心部件组成。在详细分析各个器件参数的情况下，针对系统的各种需求进行了分析，基于 PSD 的工作原理对系统参数进行了分解与设计。

(3) 直线度测量系统的硬件设计，在比较了各种类型 PSD 之后选择了 S1880 型 PSD，考虑到氦氖激光器发散角小、光斑质量好的特性选择其作为参考基准线，研究了 PSD 的使用条件之后设计了铝制外壳、650nm 滤光片、20%衰减片分别用于防摔防尘、滤去背景光、调节激光功率。数据处理方面，为了数据远程无线传输使用了蓝牙模块。

(4) 直线度测量系统的软件设计，使用功能强大的 Python 开发出了各平台通用的导轨直线度误差测量软件，终端和蓝牙进行远程通信，获取当前位置光斑重心的 X(横向)Y(纵向)坐标，再输入当前位置信息即可获得光斑空间坐标，重复进行直到导轨测量完成，软件即可基于最小二乘法算出每个点的直线度误差，并绘制出了 X 方向(横向)和 Y 方向(纵向)的直线度误差曲线。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

(5) 系统实验与误差分析：通过高精度位移平台验证 PSD 的精度为 $3.4\mu\text{m}$ ，通过实测实验验证系统精度为 $5\mu\text{m}$ 。从理论误差，外界环境误差和系统本身误差三个方面分析了系统的误差来源，通过理论建模估计了误差的大小并给出了相应减小误差的手段。

## 2 长导轨直线度测量系统的总体设计

### 2.1 直线度测量系统的总体结构

本项目开发一套适合现场应用的长导轨直线度测量系统，如图 2-1 为本项目采用的系统方案系统原理图。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。发射模块采用具有高光束质量的氦氖激光器和光束准直系统组成，其目的是发出高准直度激光束作为准直参考标准线，接收模块由 PSD，PSD 处理电路等组成，能够探测激光光斑重心，并且固定在导轨滑块上随之一起运动，处理模块可以是手机也可以是电脑，负责处理、展示数据。向处理模块中输入 PSD 的位置坐标后，处理模块会显示导轨的直线度偏差曲线，标出导轨在不同位置的直线度偏差。

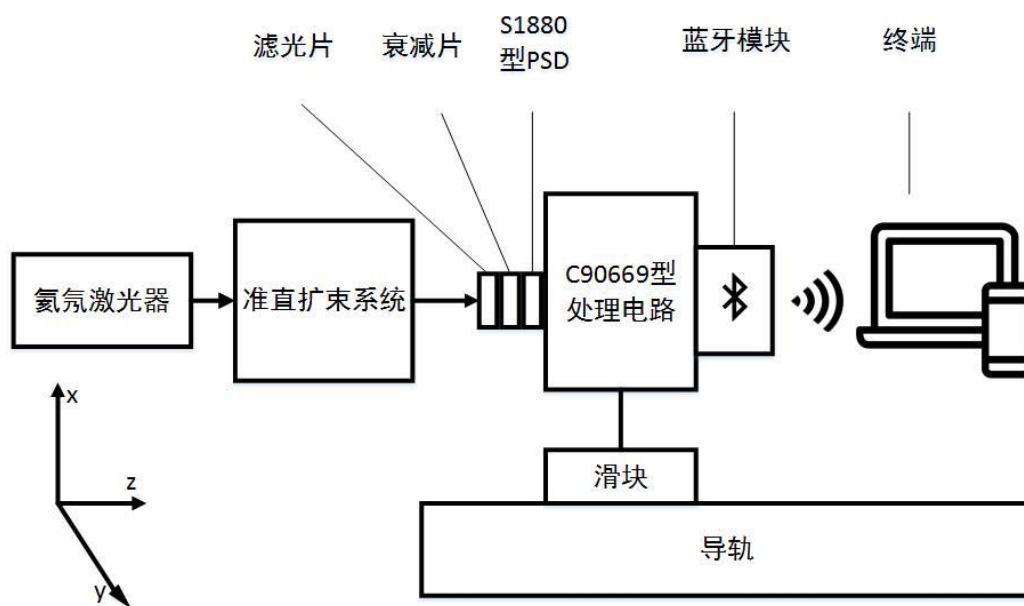


图 2-1 系统原理图

### 2.2 直线度测量系统各器件工作原理

#### 2.2.1 长导轨直线度测量系统工作流程

长导轨直线度测量系统的工作流程是：在测量过程中，氦氖激光器被置于导轨的

# 华中科技大学硕士学位论文

---

一端，固定在非常稳定的底座而不是导轨上，激光发射波长为 632.8nm 的红光，激光采用扩束器准直，激光通过扩束器准直，同时进行空间滤波，获得光斑大小合适的高准直度的测量光束。接受模块采用红光波段的滤光片去除背景杂散光，只允许激光光斑入射到接收模块上，同时采用功率衰减片将激光功率进一步降低。采用功率衰减的原因是由于本系统所采用的PSD接收的激光功率最大为1mW，如果激光功率超出 PSD 接收量程会影响测量测量的精度。通过衰减片后波长为632.8nm，功率小于为1mW 的红光准直光束入射到 PSD 器件接收面上，光电转换器件将光束重心位置信号转化为电信号，输出给配套电路板，电路板对 PSD 输出的电压信号进行滤波修正之后，蓝牙模块将光斑的重心数据远程传输给无线终端。接收模块固定在滑块上，随着滑块的滑动，导轨各个位置处的光斑的重心坐标也被不断发送到终端上。终端对这些不同位置处的光束重心位置进行处理，通过最小二乘法拟合出一条最接近的虚拟直线，光斑坐标相对这条虚拟直线的偏差反映了相应导轨位置处的导轨直线度偏差。数据采集完成后，终端对空间坐标数据进行处理，绘制出导轨在 X 方向（横向）和 Y 方向（纵向）的直线度曲线

## 2.2.2 发射模块器件工作原理

发射模块主要由氦氖激光器和准直扩束透镜组组成。

氦氖激光器是最适合用于准直领域的激光器之一。氦氖激光器由于属于气体激光器，激光介质对光束质量影响很小，所以在所有类型的激光器中，氦氖激光器具有最好的光束质量，高光束质量为本项目能够适用于长导轨测量奠定了基础。虽然氦氖激光器的体积比较大，但高光束质量和较低的价格还是具有明显的优势。

如图 2-2，为氦氖能级图，反映了氦氖激光器的发光原理，氦氖激光器一般具有激光管和稳压电源两个部分，稳压电压提供稳定的高压。激光管从结构上可以分为三个部分：放电管、两端的电极和产生谐振条件的的激光谐振腔。放电管中充入氦气和氖气用于充当激光介质。如图 2-2 可知，氖原子处于基态而氦原子处于二能级，两端电极加上高压，氖原子会跃迁并与氦原子发生碰撞，氦原子能量传递给氖原子使得氖原子跃迁而氦原子回到基态。稳定的供能使得这一现象不断发生，发生受激辐射，氦氖激光器发出三种波长的光，经过反射镜的选择得到 632.8nm 的红光。

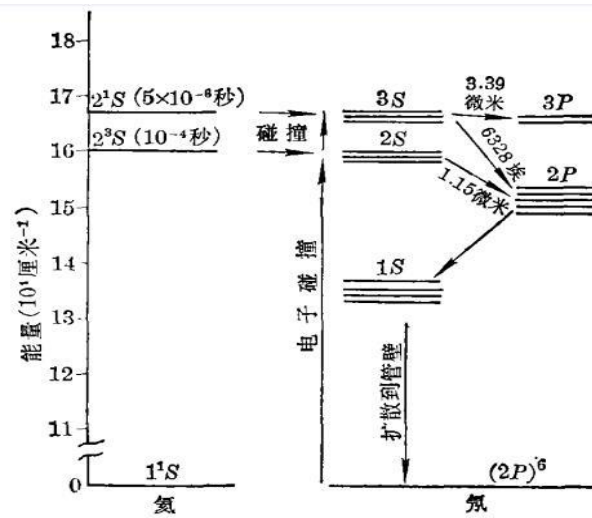


图 2-2 氦氖能级图

氦氖激光器具有良好单色光、相干性、准直性和稳定性，相比于其他类型激光器具有巨大的优势：

(1) 氦氖激光器是气体激光器，气体原子具有确定的能级结构，使得氦氖激光波长是纯净的单色光，线宽极窄，相干长度极大。相比于能带发光的半导体激光器具有巨大优势。

(2) 气体激光器原子能级结构确定，氦氖激光器发射激光波长不受温度波动影响。

(3) 氦氖激光器发出激光会经过谐振腔的优化，发出的激光发散角小于 10mrad。适合作为准直基准线。

使用准直扩束透镜组的目的是压缩发散角，同时让光斑的大小可控，从而满足在整个测量长度范围内使激光束能够处于 PSD 器件的受光面积之内。针对本系统使用的 S1880 型 PSD，光斑的直径不应超过 5mm，光斑直径过大，超出了 PSD 的核心检测区域，会削减测量精度同时加大激光准直调节的难度。

氦氖激光器发出的光束为稳定的高斯光束，我们通过一个倒置的望远镜系统对其进行扩束准直。基本的光路原理图如图 2-5 所示，其中  $\omega_0$  为入射到望远镜准直系统上的氦氖激光光束腰斑， $\theta_0$  为入射光束发散角，经过短焦距透镜 L1 的汇聚作用，光束汇聚于 L1 焦点，光束腰斑为  $\omega'_0$ ，发散角为  $\theta'_0$ 。在透镜 L1 焦距位置放有半径略大于  $\omega'_0$  的小孔，目的在于滤去光束中可能存在的高阶模分量，尽可能提高激光光束质量。长焦距透镜 L2 对光束进行准直放大，光束腰斑放大为  $\omega''_0$ ，发散角缩小为  $\theta''_0$ 。

# 华中科技大学硕士学位论文

定义整个望远镜准直系统的准直倍率为 $M'$ ，用于衡量准直扩束透镜组的性能。

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta_0''} \quad (2-1)$$

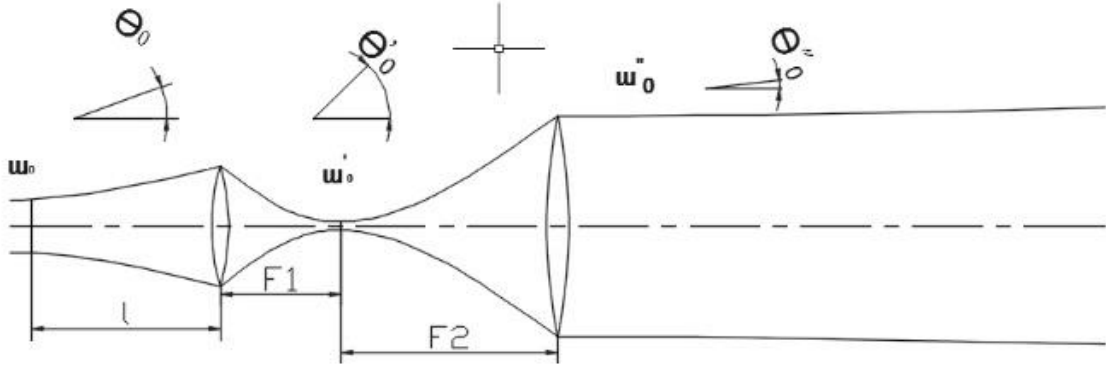


图 2-3 扩束准直结构

短焦距透镜 $L_1$ 的焦距为 $F_1$ ，当满足条件 $F_1 \leq l$ 时，短焦距透镜将高斯光束汇聚在前焦面上，得到一个极小的光斑：

$$\omega'_0 = \frac{\lambda F_1}{\pi \omega(l)} \quad (2-2)$$

为了计算双透镜系统的准直倍率 $M'$ ，先分析单透镜的作用，设焦距为 $F$ ，光腰与透镜距离为 $l$ ，对于腰斑大小为 $\omega_0$ 的物高斯光束发散角为：

$$\theta_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (2-3)$$

通过焦距为 $F$ 的透镜后，像高斯光束的发散角为：

$$\theta'_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega'_0} \quad (2-4)$$

当 $l = F$ 时， $\omega'_0$ 达到极大值：

$$\omega'_0 = \frac{\lambda F}{\pi \omega_0} \quad (2-5)$$

此时有：

$$\theta'_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi \omega'_0} = 2 \frac{\omega_0}{F} \quad (2-6)$$

$$\frac{\theta'_0}{\theta_0} = \frac{\pi \omega_0^2}{F \lambda} = \frac{f}{F} \quad (2-7)$$

对于扩束准直系统，有：

$$\frac{\theta'_0}{\theta_0} = \frac{\pi \omega_0^2}{F 2 \lambda} = \frac{\frac{2 \lambda}{\pi \omega'_0}}{\frac{2 \lambda}{\pi \omega_0}} = \frac{\omega_0}{\omega'_0} \quad (2-8)$$

将式（2-12）带入，有：

$$\frac{\theta'_0}{\theta_0} = \frac{\pi}{\lambda F 2} \omega_0 \omega'_0 = \frac{F 1 \varpi_0}{F 2 \varpi(l)} \quad (2-9)$$

由此可以得出扩束准直结构对高斯光束准直倍率：

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta''_0} = \frac{F 2 \varpi(l)}{F 1 \omega_0} = M \frac{\varpi(l)}{\omega_0} = M \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \approx \frac{F 2}{F 1} \quad (2-10)$$

实验中我们选取的透镜参数为焦距为80mm的短焦距凸透镜和200mm的长焦距凸透镜。基于式（2-10）和透镜参数我们可以计算出扩束准直结构的准直倍率为 $\frac{200mm}{80mm} = 2.5$ 。即氦氖激光器发出的高斯光束发散角被压缩了2.5倍，光斑直径从1mm扩大为2.5mm，在8米内的光斑大小满足测量所需要的条件。

### 2.2.3 接收模块器件工作原理

接收模块主要组成成分是 PSD 以及配套使用的信号处理电路。

PSD的全称是 Position Sensitive Detector，即位置敏感探测器，是基于半导体横向光电效应实现光斑位置探测功能的光电器件。横向光电效应指的是：当金属-半导体结的一面或者 p-n 结的一面受到非均匀辐射时，平行于结的一面会出现电势差。



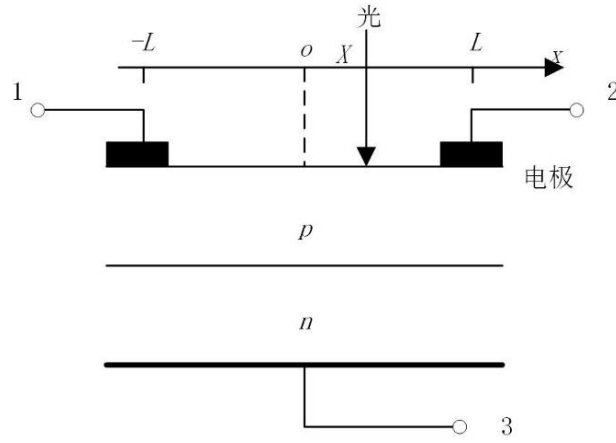


图 2-4 一维 PSD 原理图

如图 2-4 为一维 PSD 的原理图，如果没有光照 PSD 表面没有横向电势差，没有电流。如果一束光打在了 PSD 的 P 区，由于横向光电效应的存在，光生电子和空穴被激发，p-n 结耗尽区域电子空穴对分离，电子在电场的作用下向 n 区移动，空穴向 p 区域移动<sup>[10][11]</sup>。

由于 n 区域的掺杂浓度高，导致 n 区域的电导率很大而且欧姆接触，所有 n 区域电势均匀分布，等电势层形成。而相对的 p 区域电阻率大，空穴会在 p 区域堆积并形成横向的电势差，接着在横向电势差的作用下，横向电流会形成，此时光生空穴会离开照射区。纵向回注漏电流会形成，因为运动空穴抵消部分空间电荷，空穴会向 n 区移动，电子会向 p 区移动。

实际使用中，器件一般工作在反向偏置状态，若光生电流远大于漏电流和反向饱和电流，且 p 层电阻率均匀分布，当考虑稳态时，可以认为光生电流在 p 层按电阻分流，接着以 PSD 的中心为坐标原点，若总光电流为  $I_L$ ，PSD 光敏面长度为  $L$ ，光敏面总电阻为  $R_0$ ，如果负载电阻不可忽略，设两边均为  $R_L$ ，则

$$I_1 + I_2 = I_L \quad (2-11)$$

$$I_1 = \frac{\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2}{L} X \right) R_0 + R_L}{R_0 + 2R_L} I_L \quad (2-12)$$

$$I_2 = \frac{\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2}{L} X \right) R_0 + R_L}{R_0 + 2R_L} I_L \quad (2-13)$$

$$X = \frac{L(R_0 + 2R_L)}{2R_0} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) \quad (2-14)$$

又因为负载电阻和面电阻相比极小，所以公式可以简化为：

$$X = \frac{L}{2} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) \quad (2-15)$$

由以上公式可知，从电极 1,2 输出的电流只要经过适当的放大以及运算处理就能够得到  $\left(\frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}\right)$  意味着只要知道电极 1,2 电流大小以及 PSD 光敏面长度就能够得到光斑位置，而且因为我们采取的是除法运算，消除了光源波动对测量位置的影响，这对 PSD 精度的提高帮助很大。另外我们还可以在得到光斑位置的同时得到入射光的强度，从电极 3 输出的电流即是总光电流  $I_L$ 。

实际上使用的 PSD 一般采取 p-I-n 结构,并且在电极 3 上加负偏压，这样可以增大耗尽层厚度并且减小结电容，提高了灵敏度以及响应速度。一般来说直接从电极输出的电流很小，同时为了满足负载电阻小的条件，我们会先接电流-电压转换器将电流转化为电压信号，再处理电压信号得到光斑位置。为了消除背景光以及暗电流的影响，我们还会使用 PSD 信号处理专用的集成电路。

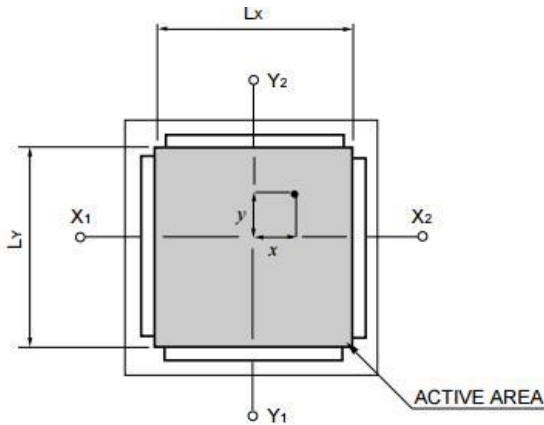


图 2-5 表面分流型 PSD 结构图

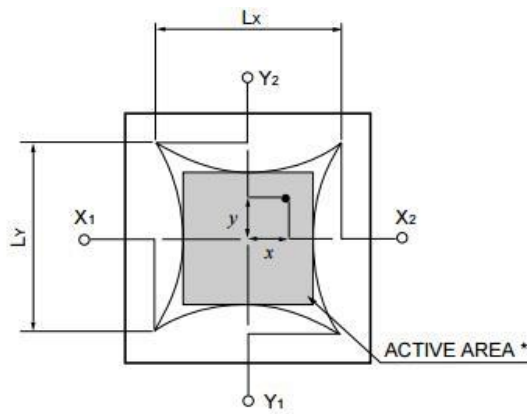


图 2-6 改进表面分流型 PSD 结构图

二维 PSD 与一维 PSD 基本原理相同，只是位置公式有些修正，表面分流型以及改进表面分流型结构分别如图 2-3 和 2-4。对于表面分流型，有：

$$\frac{X}{L} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (2-16)$$

$$\frac{Y}{L} = \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \quad (2-17)$$

对于表面分流改进型有：

$$\frac{X}{L} = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (2-18)$$

$$\frac{Y}{L} = \frac{(I_3 + I_2) - (I_1 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (2-19)$$

直线度测量系统之所以采用 PSD 而非 CCD 是因为，相比于 CCD，PSD 有着更高的位置分辨率，更快的反应速度以及非常低的暗电流，并且 PSD 只是检测光斑的重心，并不依赖光斑的形状或者大小。

处理电路和 PSD 是配套使用的，用来接收 PSD 四个引脚的电压，计算出光斑的重心坐标，并将信号以 RS232 的接口输出给蓝牙模块，其中处理电路需要12V直流电源。

此外接收模块还包括蓝牙模块和铝制外壳等配件。

## 2.2.4 处理模块

处理模块即终端，有电脑、安卓手机等可以选择，处理模块工作前要求先连接上蓝牙。蓝牙模块将光斑重心平面坐标远程传输给处理模块，输入 PSD 当前的位置信息，即可得到光斑重心空间坐标。为了显示机床不同位置的光斑坐标，需要同时给出 PSD 在导轨上的位置坐标。机床安装完毕后，机床数控系统可以直接输出 PSD 的位置坐标。如果机床在没有安装完毕前的生产过程中就需要进行校准，此时还没有安装电机，接收模块的位置信息可以手动输入。按照一定的间隔要求在导轨的不同位置处重复采集光斑位置数据，直到接收模块从导轨的一端运行到另一端，处理模块会检测所有数据，并根据事先写好的算法绘制出导轨在 X 方向（横向）上的直线度以及 Y 方向(纵向)上的直线度曲线。工人根据直线度曲线对机床进行调节，直至机床的准直精度达到要求。

## 2.3 直线度误差评定方法

在获得光斑重心空间坐标后，依次连接可得到导轨空间曲线，在此基础上可以对直线度误差进行评定。直线度误差检测国家标准中提到了三种常见的方法，依次有两

端连线法、最小二乘法还有最小区域包容法，分别介绍并推导计算公式如下<sup>[12][13]</sup>：

## (1) 两端连线法

如图 2-7 为两端连线法直线度误差计算示意图，假设实验取得采样点数为  $n$ ，连接第一个点和最后一个点，得到两端点连线为  $l_{BE}$ ，这条直线就是直线度评定所采用的基准直线，接着计算每个数据点到参考直线的距离，并求取其中的最大值  $d_{max}$  和最小值  $d_{min}$ ，将二者作差即可解除导轨直线度误差值。推导过程如下：

如图 2-7 所示，假设基准直线  $l_{BE}$  表达式为：

$$y = Ax + B \quad (2-20)$$

已知两端点坐标为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_n, y_n)$ ，则基准直线方程可以写成：

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_n - y_1}{x_n - x_1} \quad (2-21)$$

带入式 (2-20) 可解得：

$$\begin{cases} A = \frac{y_n - y_1}{x_n - x_1} \\ B = \frac{(x_n - x_1)y_1 - (y_n - y_1)x_1}{x_n - x_1} \end{cases} \quad (2-22)$$

则第  $i$  个采样点到基准直线的距离为：

$$d_i = \frac{y_i - (Ax_i + B)}{\sqrt{A^2 + 1}} \quad (i = 1 \dots n) \quad (2-23)$$

则对于给定方向上的直线度误差值  $f_{BE}$  有：

$$f_{BE} = d_{max} - d_{min} \quad (2-24)$$

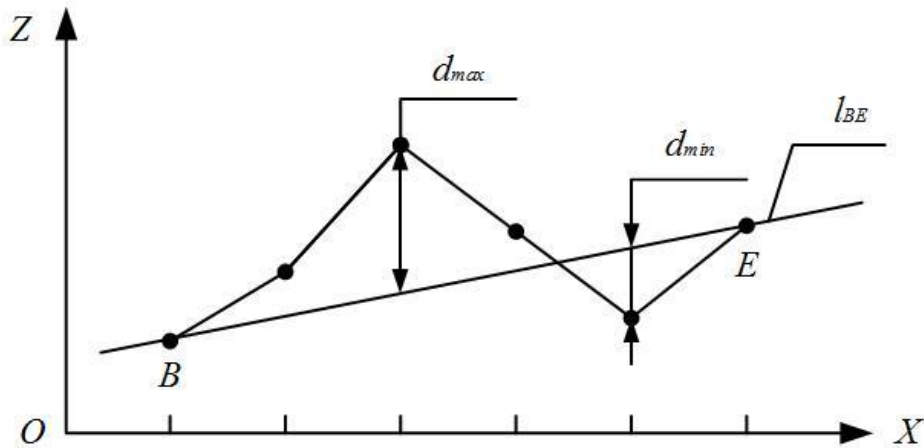


图 2-7 两端连线法

## (2) 最小二乘拟合法

如图 2-8 所示, 其中直线 $l_{LS}$ 为采样点的最小二乘拟合曲线, 本方法以该线作为直线度评定的基准直线, 设位于 $l_{LS}$ 两侧采样点中距离其最远的两个数据点分别设定为 $d_{max}$ 和 $d_{min}$ , 接着以此两点至 $l_{LS}$ 两的纵坐标距离之和作为被测导轨的直线度误差<sup>[14]</sup>。推导过程如下:

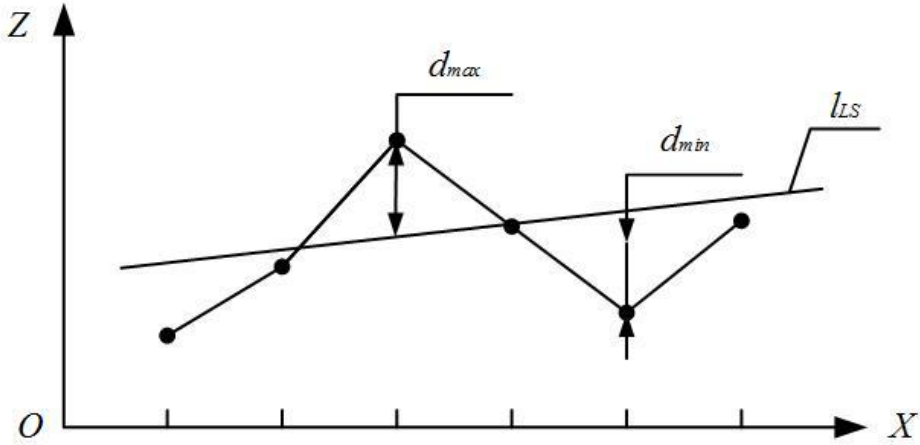


图 2-8 最小二乘拟合法

现假设采样点数目为 $n$ , 坐标分别记为 $(x_i, y_i) (i = 1 \dots n)$ , 最小二乘拟合直线表达式记为 $y = kx + b$ , 其中  $k, b$  分别为拟合直线的斜率及截距。由最小二乘原理, 确定其目标函数为:

$$F(k, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \quad (2-25)$$

应满足等式:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (2-26)$$

带入式 (2-25) 可得:

$$\begin{cases} k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \end{cases} \quad (2-27)$$

带入采样点坐标可求得  $k, b$ 。沿  $y$  轴到拟合直线的距离为:

$$h_i \approx y_i - k_i x - b \quad (2-28)$$

直线度误差设为 $f_{Ls}$ ，可表示为：

$$f_{Ls} = |h_{max}| + |h_{min}| \quad (2-29)$$

最小二乘法运算流程图如 2-9 所示<sup>[15]</sup>。

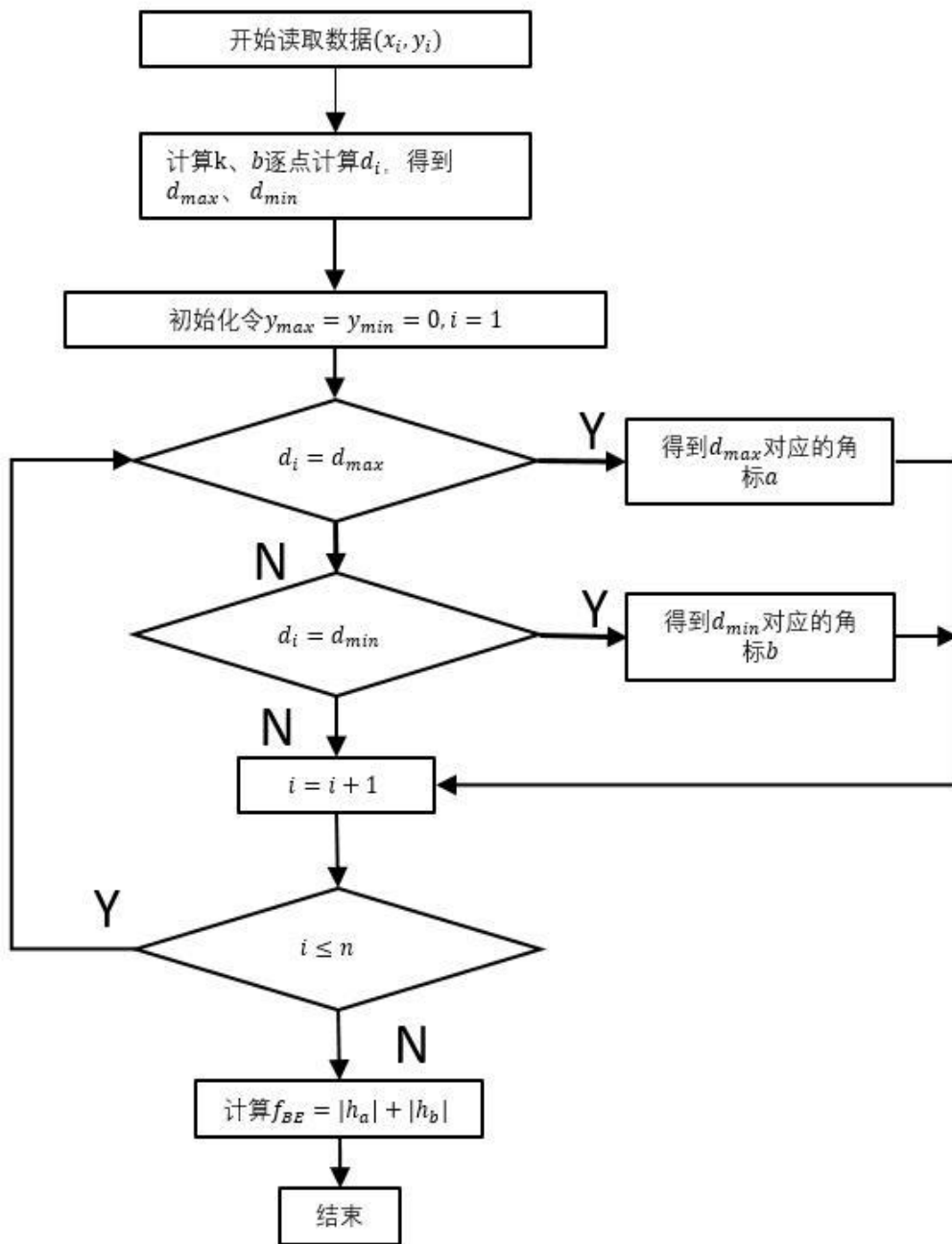


图 2-9 最小二乘法流程图

### （3）最小区域包容法

2004 年国家标准中明确指出直线度最小包容区域在平面上的定义为：包容实际直线，且具有最小宽度的两平行直线之间的区域<sup>[16]</sup>。

如图 2-10 和 2-11 为最小区域包容法的示意图，其中图 2-10 为低-高-低的形式，图 2-11 为高-低-高的形式。如果是图 2-10 低-高-低的形式，那么参考直线就位于所有数据点的下方，计算数据点到参考直线的距离即可。其中一定存在距离为零的点。而两端连线法和最小二乘法则不一定。如果是图 2-11 高-低-高的形式，则参考直线位于所有数据点的上方，计算直线度需要取绝对值，同样一定存在零点。

相比于两端连线法和最小二乘法，最小区域包容法难以用公式表达，不能直接用数学公式表示出来，需要使用逐步逼近的方式计算。一般来说需要先采用最小二乘法计算出所有数据点的最小二乘拟合直线，接着设定最小二乘拟合直线的斜率为变量，并在此基础上逐步逼近最小值，计算量很大，不方便估计运算时间。

在充分比较了上述三种计算方法的优势和劣势之后，我们决定采用最小二乘法作为我们的直线度计算方法，即用最小二乘拟合直线作为参考基准线计算每个数据点的直线度<sup>[17]</sup>。理由如下：

（1）最小二乘法的运算量相比于两端连线法提升不了多少，但是运算时间可以估计，适合用程序编写，最小区域包容法的计算量太大，工作时间不好估计，容易引起程序的崩溃。

（2）最小二乘法的精度相比于两端连线法提升了很多，而相对于最小区域包容法并没有明显劣势。通过大量实验和软件编写实验证明最小二乘法的精度劣势并不会对实验造成影响。

（3）结合实验的实际需求，我们的最终目的只是把导轨准直，精度要求达到五微米，选取最小二乘法作为拟合直线可以降低工人调节的工作量。而且最小二乘拟合直线本身就反映了导轨和准直激光之间的夹角，可以规避部分误差。

综上所述，本项目评定直线度的方法采用最小二乘法，实践证明是满足生产要求的。

## 2.4 本章小结

系统的总体设计以及方案实施是一个项目开发过程的首要环节，也是一个项目能

否成功的重要保证。本章介绍了导轨直线度测量系统的主体框架，解释了导轨直线度测量系统的运行原理，将准直体系分成了发射模块，接收模块以及处理模块三个部分来介绍直线度测量系统的构成以及各部分的功能。并给出了直线度误差评定的方法。

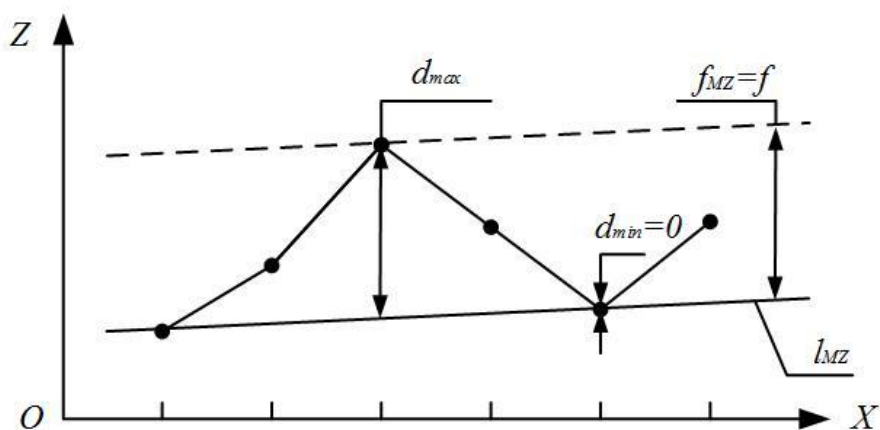


图 2-10 低-高-低最小区域包容法

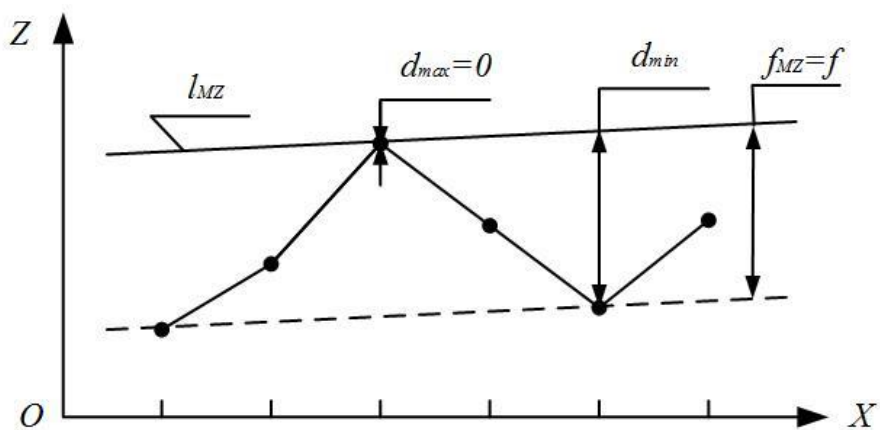


图 2-11 高-低-高最小区域包容法



## 3 长导轨直线度测量系统的硬件设计

根据第二章所描述的长导轨直线度测量系统总体设计方案，在综合考虑了直线度测量系统的各种需求之后，对该系统使用的各部分硬件进行了设计与优化。本章介绍了该系统各硬件的选型、原理以及使用条件。

### 3.1 接收模块的硬件设计

#### 3.1.1 PSD 的选择

PSD 是整个直线度测量系统中最关键的器件，PSD 的精度直接决定了直线度测量系统精度的上限，并且该器件的稳定性也决定了系统能否最终投入工业使用。因此，该器件的选择非常重要，我们首先考虑该器件的选型<sup>[18][19]</sup>。

基于前期调研，我们对国内外的各种 PSD 进行了详细的对比。对于国产 PSD，由于国内在制造这种传感器方面缺乏一定的技术工艺积累，虽然价格方面有优势，但是精度最高只能达到 $10\mu\text{m}$ ，相比于国外知名厂商生产的 PSD，精度差了1~2个数量级，另外从稳定性方面考虑，国产光斑位移传感器与国外也存在一定的差距。因此，我们优选进口的 PSD。在调研了一系列国外产品后，我们最终发现日本滨松公司生产的 S1880型PSD以及 Thorlabs 公司的PDQ80A这两款可以符合我们的需求。对这两种产品进行详细比对，我们发现PDQ80A虽然精度在 $100\text{mW}$ 激光照射的情况下能达到 $0.75\mu\text{m}$ ，但是接收光斑的面积比S1880型PSD小得多，直径为 $7.8\text{mm}$ ，而S1880型PSD为 $12 \times 12\text{mm}$ 。而且从使用条件方面考虑，PDQ80A需要繁琐的配件，从特定的电源到特定的控制器，特定的激光器，这不仅限定了它的使用范围，也提升了不少成本。相比于使用方便，只需用高精度电压表或者配套电路板就能使用的S1880型PSD，PDQ80A还是更适合在实验室的环境，而不是我们期望的工业环境下使用。最终我们选择S1880型PSD应用于该系统<sup>[20]</sup>。该型号 PSD 如图 3-1 所示，其有效感光面积为 $12 \times 12\text{mm}$ 、分辨率为 $1.5\mu\text{m}$ 。

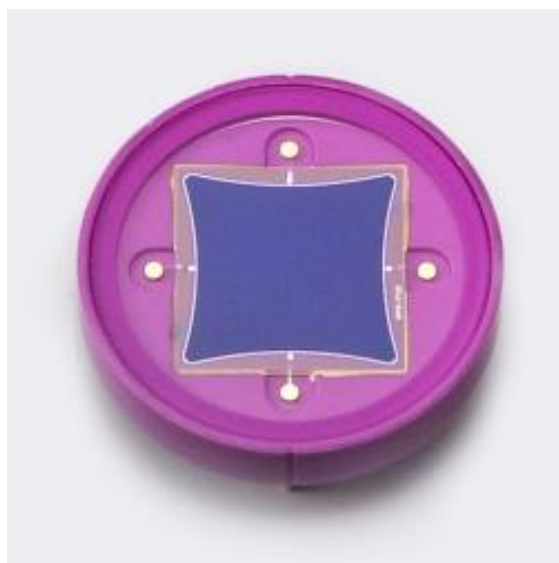


图 3-1 S1880 型 PSD

其参数如表 3-1。

表 3-1 S1880 型 PSD 参数表 3

感光面积	12 x 12 mm
封装	陶瓷
峰值波长（典型值）	920 nm
光灵敏度（典型值）	0.6 A/W
光谱响应范围	320 to 1060
暗电流（最大值）	500 nA
上升时间（典型值）	1.5 $\mu$ s
结电容（典型值）	300 pF
极间电阻（典型值）	10 k $\Omega$
测试条件	典型值，Ta=25 $^{\circ}$ C

S1880型PSD的最大感光面积虽然为 $12 \times 12\text{mm}$ ，存在不同区域的精度不一样的问题，这是由PSD设计时的枕型结构所决定的<sup>[21]</sup>。为了实际使用时有参考，滨松公司使用如表 3-2 所示的条件，对 PSD 的精度进行了检测。

表 3-2 S1880 型 PSD 检测条件表

光源种类	LED(900nm)
光斑大小	$\varnothing 200\mu\text{m}$
频率范围	1kHz
光电流	1 $\mu\text{A}$
电路系统输入噪声	1 $\mu\text{V}$ (1kHz)

总体定性考虑，PSD 的精度和光电流的大小成正比，和 PSD 感光面积、系统噪声成反比。如图 3-2，为 S1880 型 PSD 的不同精度的区域分布。

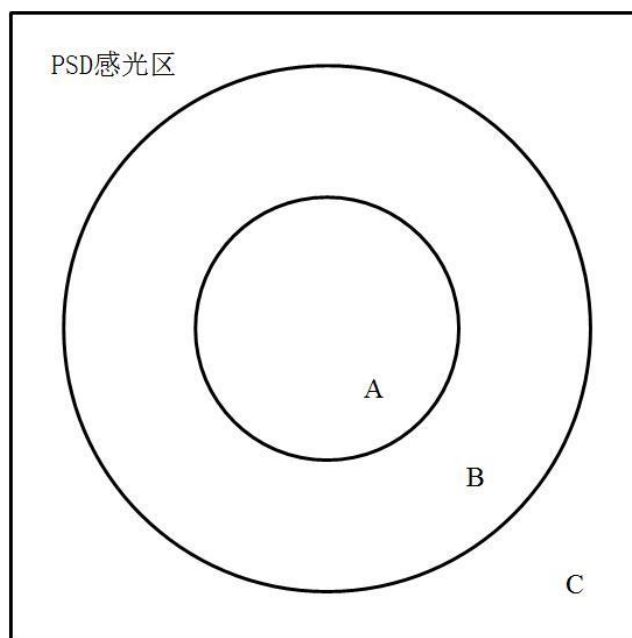


图 3-2 S1880 型 PSD 感光区域分布

其中，PSD 感光区域与其精度的关系，如下表 3-3。

表 3-3 S1880 型 PSD 精度分布表

区域	形状参数	精度
A	$\varnothing 5\text{mm}$	1.50 $\mu\text{m}$
B	$\varnothing 10\text{mm}-\varnothing 5\text{mm}$	3.44 $\mu\text{m}$
C	12 x 12 mm- $\varnothing 10\text{mm}$	8.00 $\mu\text{m}$

其中 A 区域为一个直径为 $\varnothing 5\text{mm}$ 的圆，B 区域为一个外径 $\varnothing 10\text{mm}$ ，内径 $\varnothing 5\text{mm}$ 的圆环，C 区域为除了 A、B 区域以外的 PSD 感光区域。

# 华中科技大学硕士学位论文

这种不同感光区域的精度差异限制了照射在 PSD 上光斑的位置以及大小，为了取得良好的检测效果，我们需要将光斑的大小限制在4mm以内，这也是发射模块的必须实现的目标。

## 3.1.2 信号处理电路以及外壳的设计

如图 3-3，为S1880型PSD配套使用的信号处理电路C9069，C9069是日本滨松公司专为枕型二维PSD位置探测而设计的直流信号处理电路。该电路最终输出数字信号，可以通过RS232接口与电脑相连，能精确反应入射光斑的光强大小级位置坐标，同时也可以直接输出探测器模拟信号，这个可以用来作检测<sup>[22][23]</sup>。当该模拟信号直接连接电压表后，电压表的电压直接代表了位置数据，电压代表距离 PSD 中心的距离，1V=1mm。



图 3-3 电路板 C9069

当然电路板并非必须，我们也可以直接使用电压表连接S1880型PSD的四个引脚，然后根据公式计算出光斑重心位置。但是这种方式对电压表的精度要求很高，容易引入不必要的误差。另外，我们自己设计信号处理电路，在成本上并不占优势，性能与稳定性方面也难以企及C9069的，同时还会耗费大量的时间和精力，因此我们直接使用

了该配套的信号处理电路。

表 3-4 C9069 型电路板参数表

参数	符号	最小值	标准值	最大值	单位
转换阻抗	Tz	—	$1 \times 10^5$	—	V/A
反馈电容	Cf	—	100	—	pF
输入电流	$I_{IN}$	$1 \times 10^{-5}$	—	$9 \times 10^{-5}$	A
信号转换时间	Tr	5	—	—	mS
数字输出格式	—	—	12 位	—	—
数模转换输出电压	Vo	-10		+10	V
电源电压	Vcc	+9	+12	+18	V
电流消耗	Icc	—	200	—	mA

如图 3-4 是为PSD和C9069电路设计加工的铝制外壳，其主要功能是：

- (1) 给PSD和C9069提供保护以及固定，提高系统的可靠性。
- (2) 防止灰尘等进入接收模块，对器件造成不可逆的损坏。
- (3) 模块化设计，方便添加各种外设模块。
- (4) 限制入射的光线路径，只允许接收氦氛激光器正入射的光斑，背景光和杂散光必须经过滤光片和衰减片的处理，保证了测量的精确性。



图 3-4 铝制外壳

### 3.1.3 通信模块的设计

如图 3-5 为通信模块。将 RS232 接口的数据通过蓝牙发送到终端上。该传输的极限距离为 30m，使用之前须确保已经完成蓝牙模块与终端的配对，并且设置发射端与接收端波特率相匹配，否则无法完成数据读取。蓝牙模块通过八位拨码开关设置工作模式以及波特率。而一块专用的充电锂电池则能够确保该模块的长时间续航。



图 3-5 蓝牙模块电路图

## 3.2 发射模块的硬件设计

### 3.2.1 激光器的选择

首先我们需要确定的是激光器的波长，这取决于 S1880 型 PSD 的光谱响应情况。如图 3-6 为照射在 S1880 型 PSD 上激光的波长和光灵敏度的关系曲线，实验条件为 25 摄氏度，检测波长范围为 350nm – 1050nm，从图 3-6 上可以看出，波长为 950nm 时 PSD 的光灵敏度是最高的，约为 0.62A/W。波长处于 620nm – 1020nm 时，光灵敏度处于 0.4A/W 以上，在接受范围内。从 PSD 光谱响应的角度出发，激光器的波长我们需要确保在 620nm – 1020nm 之间<sup>[24]</sup>。

如图 3-7，为 S1880 型 PSD 的波长与温度系数的关系曲线，从上图可以看出，当波长处于 320nm – 880nm 区间时，温度系数稳定在 0%/°C 左右，这意味着，温度波动对



PSD 在这个波段范围内的入射光的响应度影响非常小。这使得工作波长选在这个范围内，探测器会有很好的热稳定性。从温度系数的角度出发，激光器的波长应当处于 320nm – 880nm 区间内<sup>[25]</sup>。

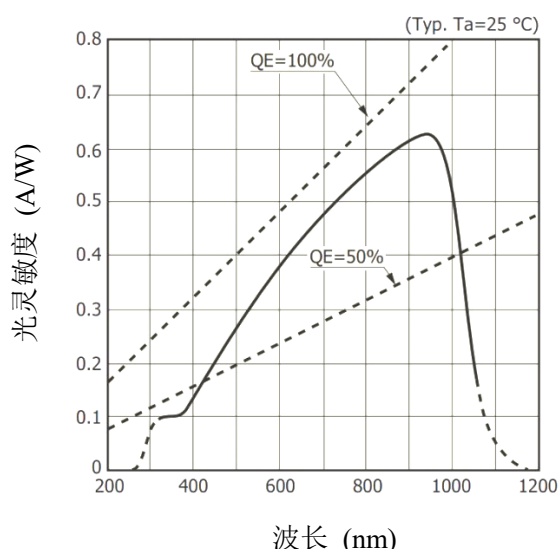


图 3-6 PSD 波长与光灵敏度曲线

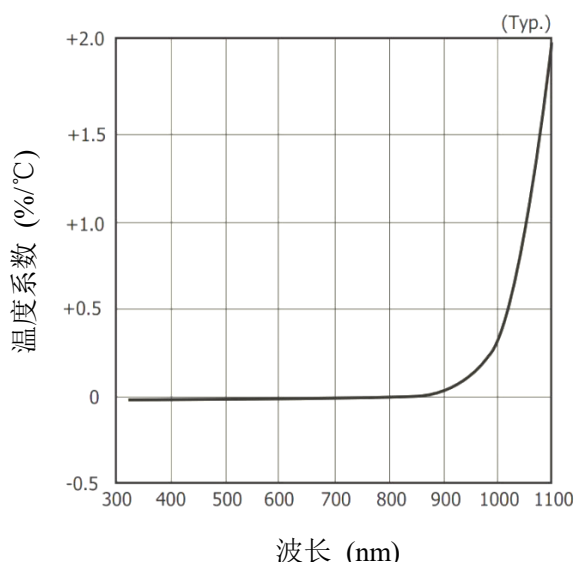


图 3-7 PSD 波长与温度系数曲线

综上所述，我们选择的激光器的波长应该处于 620nm – 880nm 区间，在这个区间内，选择可见光红光，将会大大简便我们的测量。激射红光的常见激光器有半导体红光激光器和氦氖激光器。在对两者进行比对之后我们决定选用氦氖激光器，理由如下：

(1) 出于激光器的功率稳定性考虑，氦氖激光器具有显著的优势。市面上绝大多数的半导体红光激光器的厂家都是购买半导体激光管后自行封装，质量良莠不齐，同一个厂商生产的产品可能都差别很大，而且就单个产品而言其功率随时间波动也很大，对测量精度会有相当大的影响。氦氖激光器相比于半导体激光器则稳定的多，以本系统使用的大恒光电公司生产的 DH – HN250 型激光器为例，其 3 小时功率稳定性小于 5%。

(2) 以激光输出波长来看，氦氖激光器比半导体激光器有更好的波长稳定性。一般地，半导体激光器中心波长一致性比较差，不同批次之间的产品都具有差距，所以厂商一般会标明一个波长范围，例如 Melles Griot 公司生产的半导体激光器 56RCS004/HS (28mW) 系列的波长范围为 636–641nm。另外，半导体激光器输出激光的波长还会随着壳体温度的改变而发生温漂，一般地，温度变化二十度，波长会偏移几个纳米。而氦氖激光器的输出激光的原理决定了输出的波长为稳定的 632.8nm，并不

会因为生产批次不同而改变，也不会因为工作温度的变化或者功率的变化而发生变化。

(3) 从光束质量的角度考虑，半导体激光管发出的激光束的发散角非常大，而且横向和纵向的发散角并不相同，所以绝大多数半导体激光器都需要预先对半导体激光器发出的激光进行光束整形。而氦氖激光器的光束质量则在各种激光器中排名靠前，发散角较小，光强分布接近完美的高斯分布，相较而言，更加满足实验要求。

(4) 从价格方面考虑，一般的半导体激光器的确比氦氖激光器要便宜不少，而且可以很方便的对功率进行各种调制，但能够应用在本系统中，满足使用条件的高端半导体激光器价格则并不比氦氖激光器低，而且本系统中激光器功率最好能保持稳定，一般不需要调制，所以本系统选用氦氖激光器作为入射光源。

在氦氖激光器中我们选择了大恒光电的DH-HN250型氦氖激光器，主要原因如下：

(1) 激光器输出波长稳定，性能稳定，满足实验要求，在 3 小时的工作中，功率波动小于5%。

(2) 激光器的光斑质量好，准基模输出，经过扩束准直能够保证在8m 左右的范围内光斑直径都小于4mm。使用CCD检测光斑质量发现光斑光强分布几乎为完美的高斯分布，厂家使BeamStar检测仪检测出横模为 $TEM_{00}$ 模<sup>[26][27]</sup>。

(3) 该款激光器想较于国外的氦氖激光器价格方面有优势，技术参数上却并不逊色，有较好的性价比。



图 3-8 DH-HN250 型氦氖激光器



## 3.2.2 准直扩束结构的设计

扩束准直结构使用的是两片平凸透镜，主要材料为K9玻璃，具有良好的光学特性，焦距分别为80mm和200mm，构成望远系统结构，其准直倍率为2.5。使用中，微调离焦量来调节光束光腰的位置以及准直效果，确保在整个测量距离内光斑大小不超过 PSD 最佳测量精度区域。一般地，我们调节光腰位置在测量导轨的中点处，这样能保证最佳测量效果<sup>[28]</sup>。

## 3.2.3 滤光片与衰减片的选择

滤光片与衰减片的选择受到氦氖激光器型号的影响，滤光片一般采用单片无色透明的玻璃作为基底，在玻璃的两个表面镀膜。



图 3-9 红光滤光片

滤光片的波长选择取决于氦氖激光器的实际功率和波长，DH – HN250型激光器的功率为 2MW，波长为632.8nm，因此我们选择了中心波长为 650nm 的红光滤光片，如图 3-10 所示，为该滤光片透射光谱曲线，从图上可以看出，当激光波长小于 600nm 或者大于 700nm 时，滤光片会将激光完全截止。在625nm – 680nm段的激光透过率超过 80%。

为测试滤光片的效果，我们利用DH – HN250型激光器和S1880型PSD，进行了一组对照实验<sup>[29][30]</sup>。首先在室外，阳光充足的环境下将滤光片放置在 PSD 之前，PSD 测

量光强的大小以电压信号显示，重复测量多次，光强显示结果都不超过0.05V，PSD 测量光强的最小刻度是 0.01v，移走滤光片，PSD 光强显示结果超过10V量程，达到了22V。该实验在一定程度上说明滤光片的滤光效果非常好，背景光中包含的红光成分带来的误差很小，可忽略不计。

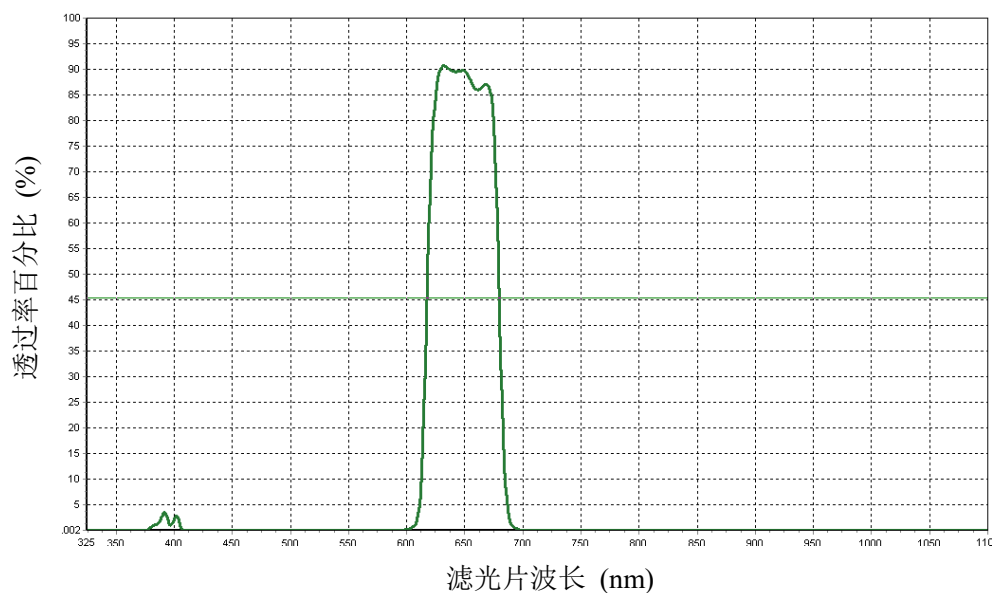


图 3-10 滤光片波长与透过率曲线

衰减片又叫中性密度镜，简称 ND 镜（Neutral Density），是一种减光滤镜，本身镜片呈现灰色色调，是一种通过灰色度层来降低进光量的滤镜，对所有波长的光线都有衰减效果。

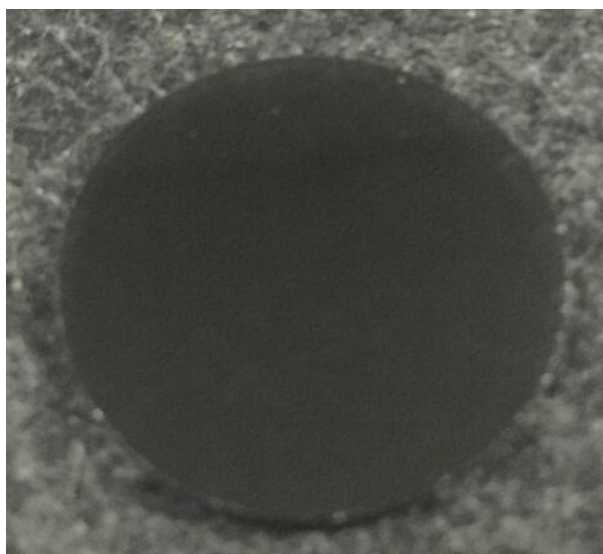


图 3-11 20%透过率衰减片

# 华中科技大学硕士学位论文

---

本系统使用衰减片的目的是为了降低进入PSD的氦氖激光器的光斑功率，S1880型PSD能接收的最大功率是 1mW，而DH – HN250型激光器发出的功率为4mW，所以我们使用了20%透光率的ND镜，如图 3-11，PSD接收到的功率被控制在在0.8mW左右，使得 PSD 能够工作在正常区域内<sup>[31][32]</sup>。而且由于PSD本身的特性<sup>[33][34]</sup>，在不超过 PSD 的10V量程的情况下，光电压越大，检测精度越高，0.8mW十分接近最高精度。

为了检测衰减片和滤光片是否能达到我们需要的实验效果，我们尝试了一组对照实验。在外界阳光充足的情况下，首先检测PSD直接接收到的背景光的光强，光强电压信号显示在22V左右，将衰减片和滤光片置于PSD之前，滤光片在外，衰减片在内，两者用平行度很高的垫圈隔开。实验结果显示光强电压信号保持为 0v，这说明将滤光片和衰减片的配合使用，消除了背景光对测量的影响<sup>[35]</sup>。

## 3.3 本章小结

本章详细介绍了长导轨直线度测量系统的硬件设计思路，根据我们的实际需求，仔细阐述了每一个器件的功能，使用的限制以及选择的理由，从接收模块的核心PSD型号的选择以及理由出发，分别介绍了配套的C9069电路板，氦氖激光器DH – HN250这三项核心部件，以及铝制外壳、蓝牙模块、扩束准直结构、滤光片和衰减片这些功能部件。

## 4 长导轨直线度测量系统的软件设计

### 4.1 软件功能需求分析与体系结构

软件设计的首要任务是进行需求分析，软件设计人员需要在与需求方进行充分沟通以及对实际工作环境进行准确了解的情况下，明确整个系统的工作目标以及为了完成这个目标，系统所应该具有的每一项功能，这是系统设计工作成功重要的前提条件。

为了确保软件设计的成功，我们进行了现场实验并且与现场工人讨论了软件的使用方式，明确了用户的以下需求：

- (1) 软件操作简单，具有良好的通用性和可移植性。
- (2) 能够远程测量，单人即可完成操作。
- (3) 测量开始后能够自动存储PSD坐标数据。

(4) 测量完成后自动生成 X 方向（横向）和 Y 方向（纵向）的直线度曲线，图片可以保存放大，方便用户对照曲线对导轨进行修正工作。

基于用户的需求，绘制出了软件的流程图，如图 4-1。开始测量之后，用户需要确定所测导轨的长度以及间隔，接着连接上蓝牙模块，选择数据传输端口，观察是否有坐标显示，如果并没有光斑的坐标数据，说明端口选择错误，用户需要更换正确的端口。在选择了正确的端口之后，X 方向（横向）和 Y 方向（纵向）的数据会自动显示，这个数据是检测系统在300ms之内测得的100组坐标的平均值。之后用户输入此时PSD在导轨上的位置，点击记录数据，即完成了一组空间坐标的记录。当记录工作完成后，软件会自动绘制 X 方向（横向）和 Y 方向（纵向）的直线度曲线，用户可以选择保存直线度曲线。

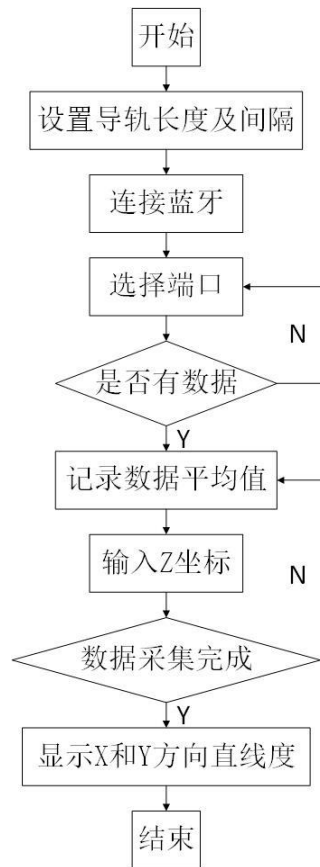


图 4-1 软件设计流程图

## 4.2 开发工具 Python 简介

本系统的软件开发平台为Windows 10，是美国微软公司所研发的新一代跨平台及设备应用的操作系统，也是目前最通用最安全的操作系统。而开发工具Python是目前最受欢迎的程序设计之一，能够在各种操作平台上使用，功能十分强大，非常符合软件开发的趋势，满足本系统的设计需求。

Python是一种面向对象的解释型计算机程序设计语言，由Guido van Rossum于1989年发明，是一款纯粹自由的开源软件。相比于通常采用的C++，Java具有鲜明的特征与优势：

(1) 高层语言，语法简洁易学，能够让开发者专注于解决问题本身而不是花费大量的时间在语言细节上，不用去考虑如内存管理之类其他语言花费大量时间考虑的问题。

(2) 免费开源。Python是一款自由开源的软件，这意味着我能自由使用别人的代

码开发并发布自己的软件而不用担心法律上的纠纷。

(3) 可移植性强, 由于Python的开源特性使得Python几乎可以不用修改的用在任何一个平台上, 比如基于安卓系统的手机, 平板电脑等。

(4) 可扩展性强, 作为一种胶水语言, Python可以调用其他语言写的程序用来加快自己的运行速度。

(5) 丰富的功能, 因为Python具有丰富的标准库, 当软件需要某种功能的时候, 只需要调用其他开发者提供的库文件就能执行一系列其他语言难以做到的事情。

基于我们系统软件的需求和Python的各种优点, 我们决定使用Python作为我们的开发语言。

## 4.3 直线度测量系统软件界面

如图 4-2 为软件的界面。使用PyQt设计了软件的界面, 因为Python自带的界面设计软件功能较弱, 只用Python实现了后台功能。其中PyQt是一个创建GUI(graphical user interface)应用程序的工具包。它是Python编程语言和Qt库的成

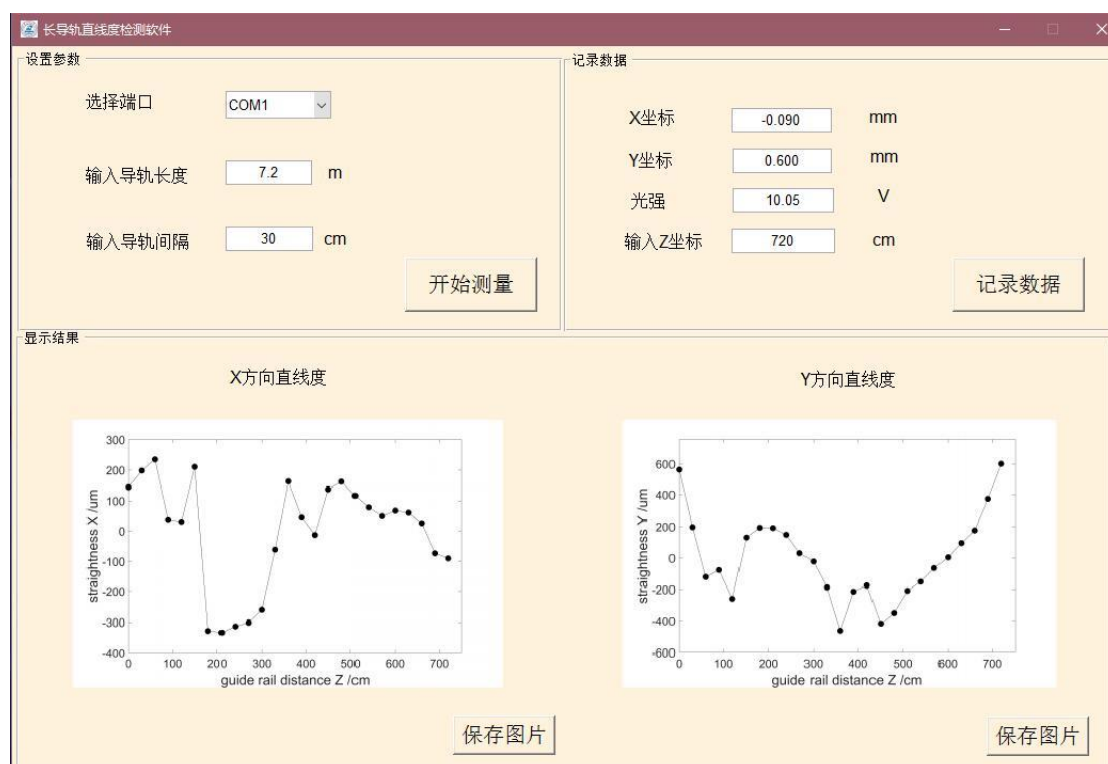


图 4-2 直线度测量系统软件界面

功融合。而Qt库是目前最强大的库之一。它有超过300类，将近6000个函数和方法。它是一个多平台的工具包，可以运行在所有主要操作系统上，包括UNIX，Windows和Mac。

界面设计方面，我们设置了三个部分方便用户的识别与使用，其中左上角为第一部分，用户首先设置参数，先点击下拉条选择通信端口，接着输入带测导轨的长度以及测量间隔，最后点击开始测量按钮完成这部分操作。右上角为第二部分，用于记录数据，其中X坐标、Y坐标以及光前是点击了开始测量按钮后自动显示的，而Z坐标，即PSD所处的位置，需要手动输入，测完数据之后点击记录数据即可。第三部分为显示结果，并不需要操作，在导轨数据测量完成后会自动显示X方向以及Y方向的直线度，图片可以保存，保存之后可以放大用于辅助修正导轨。

## 4.4 核心算法设计

软件的关键部分在于数据的获取与使用最小二乘法求直线度<sup>[36]</sup>，我们将着重对这两部分进行介绍，其中截取数据获取部分代码，并从可读性方面考虑优化如下：

```
import sys#引入系统模块，用于处理I/O流
import serial#引入串口模块，用于打开计算机串口，获取数据
import statistics#引入统计模块，用于计算数据平均值
ser = serial.Serial("com3",38400)#选择好端口以及设置好波特率
def getData(ser, amount):#定义获取数据函数，获得数据为10 * amount
    data = []
    while amount != 0:#如果amount不为零则继续从端口获得数据
        ser.flushInput()
        tmp = ser.readline()
        if(len(tmp) == 10):#如果数据长度达到 10 则令amount - 1
            amount -= 1
            data.append(tmp)
    return data
def countXYZ(data):#定义好翻译函数，用于将数据流翻译成坐标及光强
```

```
x=[]
y=[]
z=[]
for tmp in data:
    x.append(float(int(tmp[0:3],16))*12.0/4096.0)
    y.append(float(int(tmp[3:6],16))*14.0/4096.0)
    z.append(float(int(tmp[6:9],16))*36.0/4096.0)
return [6.0-sum(x)/len(x),sum(y)/len(y)-7.0,sum(z)/len(z),\#得到坐标及光强
statistics.variance(x),statistics.variance(y),statistics.variance(z)]\#计算方差
while True:
    data = getData.ser,100)\#不停获取数据。
```

数据获取代码流程图如图。

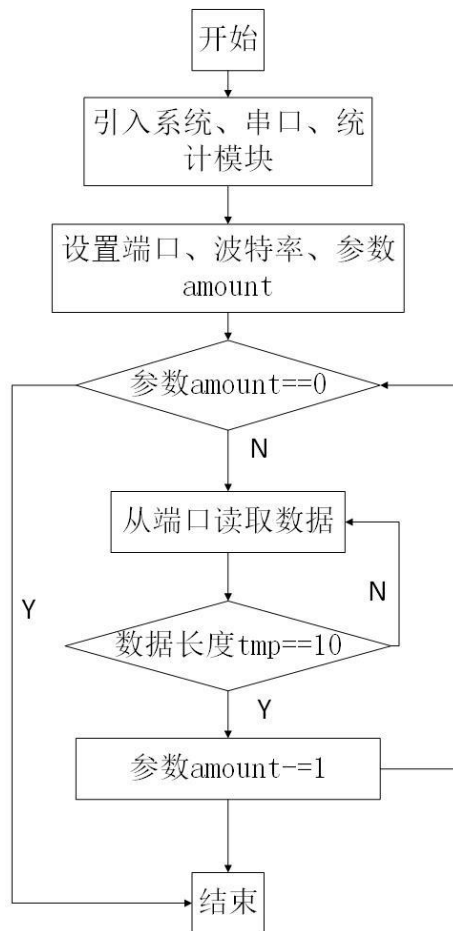


图 4-3 获取数据流程图



# 华中科技大学硕士学位论文

---

直线度计算方式采取了最小二乘法<sup>[37][38]</sup>，其中关键步骤在于用 `leastsq` 模块获取了拟合直线，再计算每个点到直线的距离，从而得到直线度。截取部分代码如下：

```
import numpy as np#引入数据处理模块
from scipy.optimize import leastsq#引入最小二乘法模块
def func(p,x):#定义需要拟合的函数 func
    k,b=p
    return k*x+b
def error(p,x,y,s):#定义需要拟合的误差 error
    return func(p,x)-y #x、y 都是列表，故返回值也是个列表
p0=[100,2]#定义试验用的参数，用于寻找均方差之和最小的系数
Para=leastsq(error,p0,args=(x,y,s)) #把 error 函数中除了 p 以外的参数打包到 args 中
k,b=Para[0]#得到所需参数，拟合直线的斜率与系数
straightness_error = abs(k * x - y + b)/((-1)*(-1) + k * k)**0.5#计算得到直线度误差
```

## 4.5 本章小结

本章介绍了导轨直线度测量系统的软件设计部分，首先介绍了软件开发的需求与目标，接着介绍了使用的工具Python以及利用Python以及PyQt写出的界面，最后给出了关键算法的代码。解释了整个系统的数据处理过程<sup>[39]</sup>。

## 5 系统实验及误差

### 5.1 系统校准

本文3.1.1节详细描述了S1880型PSD的原理，其中涉及到PSD精度部分时提到虽然日本滨松公司给出S1880型 PSD 的参考精度为3.4 $\mu\text{m}$ ，但 PSD 不同部分的精度是不一样的，越靠近 PSD 中心精度越高，误差最高达到6.5 $\mu\text{m}$ 。为了保证实验的精度，验证 PSD 的精度是必要的<sup>[40]</sup>。

为了验证S1880型 PSD 的精度，基于高精度的位移平台设计了校准实验，高精度位移平台精度达到1 $\mu\text{m}$ 。高准直度氦氛激光器发出激光作为参考基准，光斑直径小于4mm，距离S1880型 PSD 超过10m，光斑重心对准 PSD 中心，PSD 接收重心坐标距离原点小于0.5mm时开始测量。PSD 固定在高精度位移平台上，随之一起移动。随机移动位移平台，记录位移平台数据以及光斑重心坐标，计算 PSD 位移数据，并与位移平台数据进行对比。实验时确保光斑重心与原点间距小于1mm，否则重新测量。记录实验数据，如表 5-1。

表 5-1 高精度位移平台验证实验表

位移平台检测 位移数据/ $\mu\text{m}$	PSD 检测 位移数据/ $\mu\text{m}$	PSD 误差/ $\mu\text{m}$
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

# 华中科技大学硕士学位论文

由表 5-1 可知,重复测量 15 次,其中 PSD 和高精度位移平台的误差平均值为 $1.64\mu\text{m}$ ,标准差为 $1.06\mu\text{m}$ ,存在极少偏离正常值的数据,是由于实验时存在的平台晃动以及随机误差引起。基于以上数据以及分析可以认为 PSD 误差小于 $3.4\mu\text{m}$ ,满足测量条件,能够完成高精度导轨准直的需求。

## 5.2 实验研究

为了检验导轨直线度测量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导轨。如图 5-1,右上角为接收模块,固定在滑块上并随之一起移动,高精度氦氖激光器发出的激光照射在 PSD 上,图上背景光强烈,肉眼看不清光斑,在这种背景光强烈且灰尘较多的地方,系统仍然能够正常工作并保持精度,充分验证了系统的稳定性。



图 5-1 实测实验现场

实测实验检测导轨长度为 $8\text{m}$ ,固定在导轨上的滑块长度为 $30\text{cm}$ 且不可以移出导轨,否则滑块导轨间的钢珠会掉落,实验时能够检测的导轨长度不超过 $7.4\text{m}$ ,实际检测了 $7.2\text{m}$ 长导轨,步长为 $30\text{cm}$ ,一共获得 25 组数据,为保证结果可靠,进行了 3 次重复实验。

如图 5-2,图 5-3 分别为导轨在 X (横向)、Y (纵向) 方向的直线度误差曲线,如图 5-4,图 5-5 分别为三次测量计算得到的 X (横向)、Y (纵向) 方向的直线度标准差曲线。

从图 5-2 可以看出导轨在 X (横向) 方向上,先正向偏离大概 $250\mu\text{m}$ ,再反向偏离至 $350\mu\text{m}$ ,最后在正向偏离至 $200\mu\text{m}$ 左右。如图 5-3,导轨在 Y (纵向) 方向上,

100cm至600mm，偏差较小，两端误差偏离较大，最高达到600 $\mu\text{m}$ ，远远大于 X（横向）方向的平均误差。这是由于导轨本身的性质决定的，导轨在 Y（纵向）上有螺丝钉固定，调节松紧，螺丝的松紧本身会造成导轨的误差，而导轨在 X（横向）上没有螺丝钉，X（横向）方向的误差在导轨出厂前就会经过粗调，故 Y（纵向）方向上误差大于 X(横向)方向误差。

从图 5-4，图 5-5 中可以看出，导轨无论是在 X（横向）方向还是 Y（纵向）方向上直线度重复 3 次的标准差都小于5 $\mu\text{m}$ 。可以得出结论，准直系统的精度达到了5 $\mu\text{m}$ ，满足高精度导轨的准直要求。工人根据测得的导轨直线度曲线可以对导轨进行调节，使得导轨的直线度得到提升。

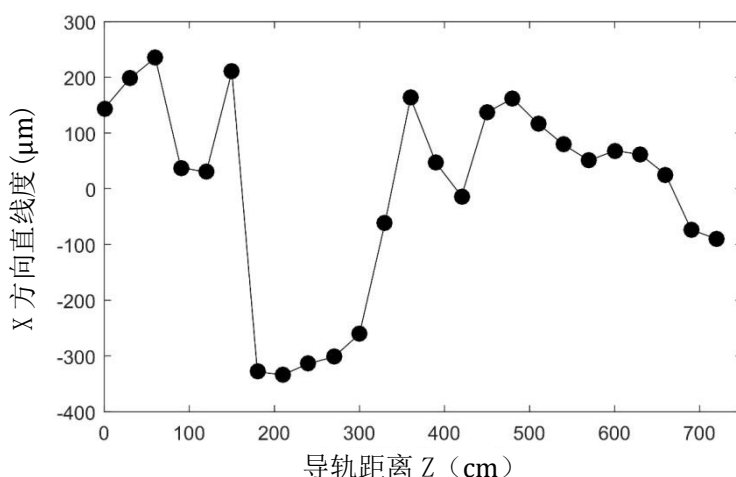


图 5-2 X 方向直线度曲线

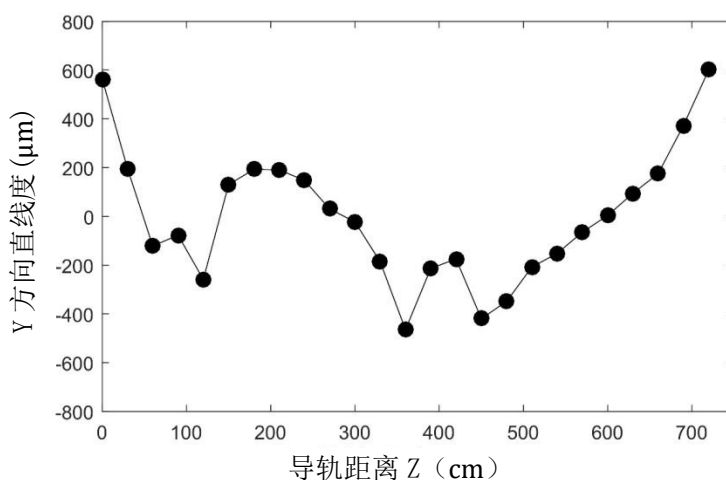


图 5-3 Y 方向直线度曲线

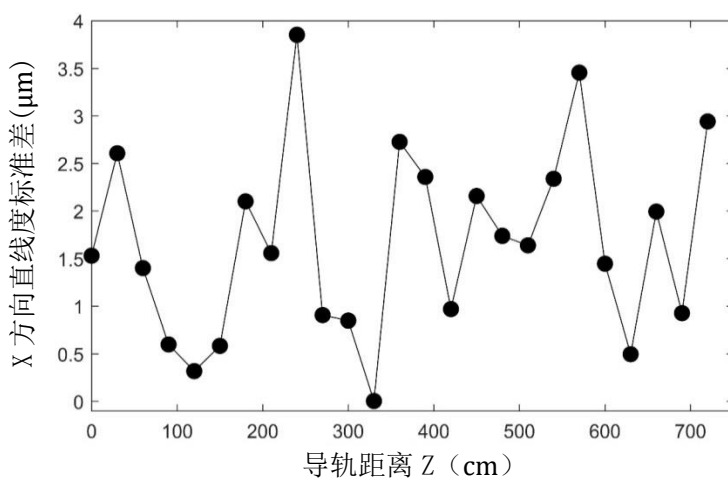


图 5-4 X 方向直线度标准差曲线

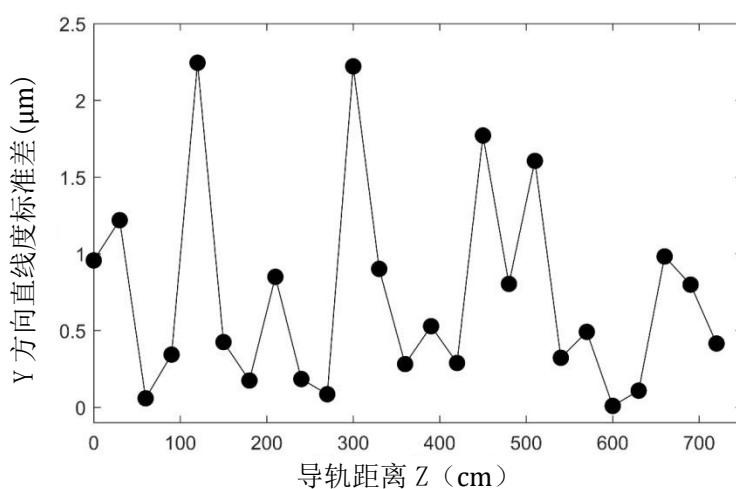


图 5-5 Y 方向直线度标准差曲线

## 5.3 误差分析

### 5.3.1 系统建模误差

从图 2-1 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>[41][42]</sup>。

图 5-6 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：

$$\delta = D - d \quad (5-1)$$

$$= D(1 - \cos \alpha) \quad (5-2)$$

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：

$$\delta < 12\text{mm} \times (1 - \cos 0.029^\circ) = 0.00153\mu\text{m} \quad (5-3)$$

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。

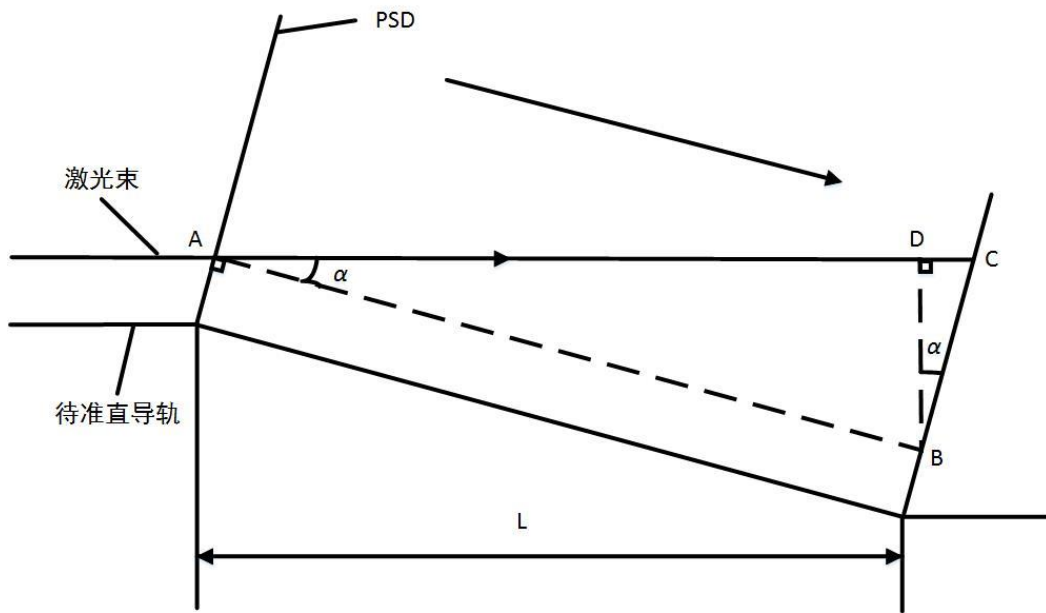


图 5-6 激光偏角原理图

### 5.3.2 外界环境带来的误差

我们实验时发现，由于系统精度较高，平台的振动也会对实验结果产生巨大的影响，尤其是在高楼层的光学平台上进行实验时，用力按压桌面，PSD 的数据也会发生显著变化。为了克服这部分的干扰，实验时都是在稳定地基上进行，并且给激光

# 华中科技大学硕士学位论文

---

器配置了稳固的实验平台，降低振动的干扰，同时接收模块由于有较厚铝制外壳的存在，而且用螺丝固定在导轨上，也能在实验过程中保证相当的稳定，因此平台振动对测量结果基本不造成影响。

外界温度的变化也会对系统精度产生影响。外界温度主要是通过影响光学元件如氦氖激光器、PSD 等的特性带来误差。但本实验主要在室温下进行，测量时间不会超过 4 小时，温差不会超过 $5^{\circ}\text{C}$ ，使用的是氦氖激光器，由于本身的发光机理特殊决定了温度变化并不会影响氦氖激光器的输出波长，而氦氖激光器DH-HN250的功率在室温下工作三小时功率变化不超过5%，可以认为氦氖激光器输出激光光斑的重心并没有发生变化。PSD 这类光敏器件在外界温度的变化下容易产生暗电流，起到类似于背景光的负面作用，因此 PSD 需要配套专门的电路板用于减轻暗电流带来的影响。电路板在温度变化的情况下也容易产生温漂等失真现象。

对系统精度有影响的外界环境因素主要有背景光、外界温度和平台振动，这些因素给系统带来的误差属于随机误差，并不能完全消除，只能在实际测量的过程中尽可能的避免这些因素的影响，并通过取平均的手段减少这部分误差。由外界引入的随机误差大致为 $\Delta = 0.02\%$ 。

### 5.3.3 系统本身的误差

系统误差来源于三个方面：实验使用的光学元件本身存在精度误差，实验用电路板存在零漂温漂现象，实验时处于调试准直阶段的导轨不能安装电机，PSD 的位置坐标（即 Z 坐标）只能靠人工读取，人为引入了误差。

实验中使用的二维PSD的各项性能指标对于实验的精度具有至关重要的影响，由表 3-1 可知 PSD 存在最高为500nA的暗电流，而氦氖激光器打在 PSD 上的功率为0.8mW，PSD 光灵敏度为0.6A/W，产生光电流为0.48A，暗电流约为正常工作光电流的百万分之一，可以忽略不计。而从图 3-2 可知，PSD 存在枕型误差，使得边缘部分输出电流与光斑坐标为非线性关系，为了避免这部分误差，实验时限制了入射光斑的大小，将光斑直径限制为4mm，同时调节激光器，确保入射光斑打在 PSD 的中心部分，即 PSD 的A区，以保证系统的精度。

实验时使用的C9069型电路板引入的误差主要取决于运算放大器的零点漂移和

A/D转换的量化误差。C9069型电路板中含有较多的模拟元器件，容易被外界电压和温度影响，其中运算放大器的零漂和温漂带来的失真无法完全消除。因为运算放大器都是直接耦合的，而直接耦合式放大电路的各级Q点会相互影响，在各级放大的作用下，处于第一级的微小扰动会对输出端产生巨大的影响。实验时，将运算放大器的输入端进行短接，用高精度的直流电压表检测输出端，发现输出端电压非零且正缓慢的发生变化。这种现象称之为零点漂移现象，可以通过使用高质量的稳压电源以及低零漂高输入阻抗的运算放大器来降低这部分误差。量化误差定义为正负二分之一一个单位分辨率，由表 3-1 中的数据可知，C9069型电路板数字输出格式为 12 位，X 方向（横向）量程为12mm和 Y 方向（纵向）量程为14mm，故 X 方向（横向）单位分辨率为 $\frac{12mm}{2^{12}} = 2.930\mu m$ ，量化误差为 $\pm \frac{12mm}{2 \times 2^{12}} = \pm 1.464\mu m$ ，Y 方向（纵向）单位分辨率为 $\frac{14mm}{2^{12}} = 3.417\mu m$ ，量化误差为 $\pm \frac{14mm}{2 \times 2^{12}} = \pm 1.709\mu m$ 。需要说明的是，量化误差只是反映了检测系统最高能够达到的精度，并不是说每次测量都会造成一个单位分辨率的误差，它作为电路输出部分的误差，已经包含了外界环境、暗电流以及零漂等因素带来的误差，只是起到一个放大误差的作用，在特定的情况下，X 方向（横向）误差会被放大到 $2.930\mu m$ ，Y 方向（纵向）误差会被放大到 $3.417\mu m$ 。

在高精度机床生产的各个环节中，安装电机和数控系这一环节只能在已经准直完成的导轨上进行，导轨准直的过程中没有电机自动指示位置，PSD 的位置（Z 方向坐标）只能通过人工读取，肉眼读数误差约为1mm，这一部分将会带来误差。建立模型如图 5-7。

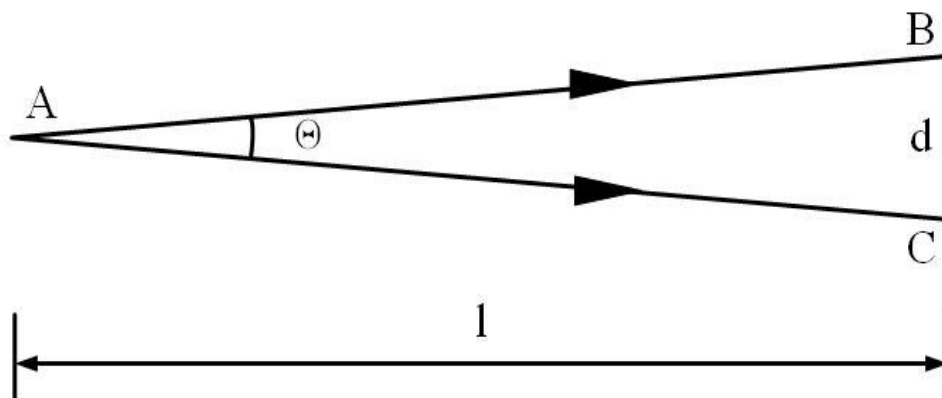


图 5-7 光束最大夹角示意图



# 华中科技大学硕士学位论文

---

其中 A 点为氦氖激光器所在位置，氦氖激光器从 A 点发出激光打在 PSD 上，线段 BC 代表激光器能够照射到的 PSD 的部分截面，激光轨迹处于直线 AB 和 AC 之间。文中 3.1.1 节提到，接收光斑的区域被严格控制在 PSD 的 A 区域以内，A 区域直径不超过 5mm，且光斑直径不小于 1mm，设定 d 为线段 BC 的长度，则有  $d = 4\text{mm}$ ，即激光照射范围直径为  $d = 4\text{mm}$ 。设导轨长度为 l，则有  $l = 7.2\text{m}$ ，激光最大摆动角为  $\theta$ ， $\theta \approx d/l = 5.6 \times 10^{-4}\text{rad}$ 。当测量间隔为 30cm 时，每次测量的摆动角  $\Delta\theta \approx \theta/25 = 2.2 \times 10^{-5}\text{rad}$ 。

肉眼读取坐标的误差在 1mm 左右，设定肉眼观测误差为  $\Delta l = 2\text{mm}$ ，误差方向与导轨平行，则每次测量时相邻两个数据点之间由于肉眼观测导致的误差最大为  $\Delta d = \Delta l * \Delta\theta = 2\text{mm} * 2.2 * 10^{-5}\text{rad} = 0.044\mu\text{m}$ ，第一个数据采集点和最后一个数据采集点之间的测量误差最大为  $\Delta d * \theta = 1.1\mu\text{m}$ 。

综上所述，系统误差中光学元件的精度误差对系统精度影响极小，电路板 A/D 转换的量化误差包含了其他种类的误差，并可能对误差起到放大作用，肉眼观测带来的测量误差不超过  $1.1\mu\text{m}$ 。

## 5.4 本章小结

本章主要描述了 PSD 的精度验证实验，用高精度的位移平台检验了 PSD 的测量精度，达到了  $3.4\mu\text{m}$ 。进行了现场实验，实验结果说明长导轨直线度测量系统的精度达到了  $5\mu\text{m}$ ，满足高精度测量标准。将实验误差分为建模误差，外界环境误差和系统本身误差三部分，对误差来源进行了介绍和估计。

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

在分析和对比了现有的长导轨直线度测量方案的基础上，阐述了本系统所采用的基于二维 PSD 的准直技术，详细介绍了系统的硬件设计和软件设计。总的来说，本文工作具体包括以下几个方面：

(1) 在充分了解并对比了现有长导轨准直技术的基础上，提出了兼顾经济与性能的新方案。详细介绍了新方案各种器件的工作原理并选择了合理的直线度算法，为长导轨直线度测量系统建立了坚实的理论基础。

(2) 在硬件设计方面，从核心部件二维 PSD 开始，详细介绍了选择该硬件的理由，硬件的参数和使用条件，阐述了硬件设计的思路。解决了背景光干扰，抗摔防尘，光斑功率超标和光斑过大影响测量等问题。

(3) 在软件设计方面，在充分考虑了功能性与通用性的情况下，使用 Python 开发了出了直线度检测软件，实现了系统的数据采集与处理，直观展示了导轨在 X 方向（横向）与 Y 方向（纵向）的直线度误差。

(4) 通过高精度位移平台验证 PSD 的精度达到了  $3.4\mu\text{m}$ ，在工厂进行了现场实验，验证系统的调节精度可以达到  $5\mu\text{m}$ ，满足高精度长导轨的检测要求。分析了系统存在的误差，并估计出了各种误差对系统精度带来的影响。

### 6.2 展望

本文对长导轨直线度测量系统做了大量的工作，取得了一定的成果，但是由于研究设计时间较短，研制成本限制等原因，导致研究工作中还有很多可以改进的部分：

(1) 氦氖激光器可以选用光斑更小，准直程度更好的进口激光器，这样不用进行扩束准直就能满足测量长导轨的条件。

(2) 二维 PSD 的位置坐标只能用肉眼读取，这给系统带来了一定的误差，可以选择给滑块安装一种方便拆卸，自动读取位置的高精度电机用于提升精度，减轻测量时的工作量。

(3) 实验之前为了保证二维 PSD 处于最佳工作状态, 需要将激光光斑对准 PSD 的中心, 检测长导轨时氦氛激光器微小的角度变化就会导致激光光斑偏离 PSD 中心区域, 所以需要花费大量的时间来调节锁死激光器的角度。通过给接收模块安装电机编写程序可以做到自动对准, 能够节省不少工作量。

(4) 接收模块的集成度可以提高, 蓝牙模块的电路板可以和 C9069 电路板集成到一块电路板上, 共用一个电源, 减少接收模块的体积。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 致 谢

本文是在陈培锋教授的殷切关怀与悉心指导下完成的，从项目立项到系统设计，从硬件选择到软件对比，从现场实验到误差分析，每一句话、每一个字都凝聚着教授的汗水与心血，凝聚着导师对学生成材的殷切希望。作为一个马克思主义者，陈培锋教授具有渊博的知识，开阔的视野，乐观风趣的性格与脚踏实地的作风，从学术和生活上对我们进行了无微不至的指导，教育我们如何生活、如何工作、如何为更美好的中国而奋斗，在此我向我的导师陈培锋教授表示深切的谢意与祝福！

本论文的完成也离不开师母王英副教授的关怀，回想起两年前刚保送研究生时，对自己的能力有所怀疑，是师母在这关键时刻给予我鼓励，放心的把各种教学软件的任务交给了我，在我感觉困难的时候给予我鼓励，培养了我的独立完成项目的信心，让我最终能够圆满完成任务。王老师如春风般的性格与时刻为学生奉献的精神让我们非常感动，感恩之情难以用言语度量，谨以最朴实的话语致以最崇高的敬意。

这两年来，实验室的师兄们给予了我们这些晚辈无私的帮助与热心的指导，让我们顺利开展了研究生工作，回想起邹自宏、张自豪、李喜师兄在我们面前展示厨艺的日子，心中满满的都是感动。同时也感谢实验室的梁乔春、夏冰冰、刘著新师兄，他们给我们树立了努力奋斗的榜样。胡阿健师兄和李姝沫师姐给我们展示了爱情的美好。非常幸运遇到这么多优秀的前辈，无论是已经毕业还是仍在科研道路上奋斗的师兄师姐们永远是我们奋斗道路上的明灯。

同时，和我一起进入实验室的余晓畅，张传发硕士和付健、龚磊博士。我们在这两年一起在科研道路上奋斗，一同体会成长的心酸与快乐，建立起了深厚的友谊，这段友谊是我生命中的宝贵财富，无论我走到哪，身处何方都会有这么一点温暖的回忆陪伴着我。让我在遇到困难时不放弃，身处顺境时不自满。

最后，感谢所有曾经帮助过我的人，我一定不辜负你们的期待，在生活中，在工作上作出更大的成绩，为中国更美好的明天而奋斗终身。

## 参考文献

- [1] 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. 激光技术, 2009, (6): 575-578
- [2] 胡长德, 李咏强, 周欣等. 基于干涉条纹的激光准直技术的检测系统, 激光技术, 2009, 33(5): 522-525
- [3] 宋庆. 基于 2D-PSD 的长导轨直线度测量系统的研究: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2014
- [4] 李飞. 超长导轨直线性测试系统研究: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2002
- [5] 吕爱民, 王志兴, 贺安之等. 用 PSD 测试长导轨准直度. 传感技术, 1996, 5: 55-56
- [6] 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. 仪表技术与传感器, 2012, (10): 67-69
- [7] 曹向群, 鲍超, 顾瑾. 位置敏感探测器(PSD)的进展. 光学仪器, 1998, 20(1): 36-41
- [8] 马春光, 袁红星, 贺安之. 基于相位的 PSD 定位定理. 激光技术, 2002, 26(4): 308-310
- [9] 牟丽娜. 基于 PSD 的位移检测系统设计: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2007
- [10] Li Zhongke, Qin Yongyuan. Research of on-line measurement and non-linearity correction of two dimension PSD device. Laser Technology, 2004, 28(4): 370-372
- [11] Ekinci O, Mayer J R R. Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(12/13): 1997-2004
- [12] 王玉平. 平面度和直线度检测系统的研究: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004
- [13] 岳武陵, 吴勇. 平面度和直线度误差的快速评定——增量算法. 计量学报, 2008, 29(2): 120-123
- [14] 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. 光学精密工程, 2007, 15(6): 879-893

# 华中科技大学硕士学位论文

---

- [15] 李亚军, 郑志刚. 直线度误差的数据处理及程序设计. 中国测试技术, 2007, 33(3): 67-69
- [16] 胡仲勋. 直线度误差数字化评定理论与算法研究: [博士学位论文]. 湖南: 湖南大学, 2012
- [17] 李新, 石峰. 平面直线度误差评定中最小包容区域法算法的研究. 计量与测试技术, 2016, (12): 67-68
- [18] 吕爱民, 袁红星, 贺安之. 光斑模式对 PSD 定位的研究. 激光技术, 1998, 22(5): 294-297
- [19] 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. 激光技术, 2000, 24(3): 192-195
- [20] Feng Qibo, Zhang Bo, Kuang Cuifang. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module. Optics & Laser Technology, 2004, 36: 279-283
- [21] Song Cui, Yeng Chai Soh. Linearity Indices and Linearity Improvement of 2-D Tetralateral Position-Sensitive Detector. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(9): 2310-2316
- [22] 刘春, 马颖. 遗传算法和神经网络结合的 PSD 非线性校正. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1157-1163
- [23] 林青松, 杨孝敬, 王军晓等. 改进型 BP 神经网络的 2 维 PSD 非线性校正. 激光技术, 2012, 36(1): 124-130
- [24] 杨淑连, 宿元斌, 何建廷等. 位置敏感探测器测量准确度的研究. 激光技术, 2014, 38(6): 830-834
- [25] 冯其波, 梁晋文. 单模光纤激光准直仪的研制. 激光技术, 1994, 18(6): 357-360
- [26] Knapp W, Bringmann B. Straightness measurement Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47 (7/8): 1053-1058
- [27] Jywe Wenyuh, Chen C J. A new 2D error separation technique for performance tests of CNC machine tools. Precision Engineering, 2007, 31(4): 369-375
- [28] 曹学东, 范天泉, 吴时彬等. 几何量测量技术进展. 红外与激光工程, 2008, (5): 884-889
- [29] 赵辉, 浦昭邦, 刘国栋. 基于双频激光干涉技术的高精度直线度测量装置. 中国

# 华中科技大学硕士学位论文

---

激光, 2001, 28(7): 637-640

- [30] Kuang Cuifang, Feng Qibo. A novel method to enhance the sensitivity for two-degrees-freedom straightness measurement. Measurement Science and Technology, 2007, 18(12): 2795-3800
- [31] 杨永江. 横向调制线偏振光测量导轨直线度的方法研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008
- [32] 李晓蕾. 图像法实现导轨直线度测量系统的研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2007
- [33] 于丽霞, 王福明. 一维器件 PSD 及其在测量中的应用. 现代电子技术, 2007, (7): 143-144
- [34] 曾超, 李峰, 徐向东. 光电位置传感器 PSD 特性及其应用. 光学仪器, 2002, 24(4-5): 30-33
- [35] Woltring H J. Single- and dual-axis lateral photodetectors of rectangular shape. IEEE Trans. Electron Devices, 1975, 22(8): 581-590
- [36] 袁红星, 王志兴, 贺安之. PSD 非线性修正的算法研究. 仪器仪表学报, 1999, 20(3): 271-274
- [37] Schaefer P, Williams R D, Davis G K, et al. Accuracy of position detection using a position-sensitive detector. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(4): 914-919
- [38] Wang W, Busch-Vishniac I J. The linearity and sensitivity of lateral effect position sensitive devices—An improved geometry. IEEE Trans. Electron Devices, 1989, 36(11): 2475-2480
- [39] Petersson G, Linholm L. Position sensitive light detectors with high linearity, IEEE J. Solid-State Circuits, 1978, 13(3): 392-399
- [40] 罗凯, 陈培锋, 王英. 基于光斑位置传感器的长导轨准直系统激光技术. 激光技术, 2017
- [41] 王正林, 刘静梅, 欧阳艺. 激光引偏角测量不确定度分析. 激光与红外, 2013, (12): 1348-1350
- [42] 马文礼, 郭永洪, 沈忙作, 莫萍. 激光偏角测量技术研究. 光电工程, 2001, (1): 36-38

## 附录 1 攻读学位期间发表论文目录

- [1] 罗凯, 陈培锋, 王英. 基于光斑位置传感器的长导轨准直系统. 激光技术  
录用日期: 2017 年 4 月 23 日 (署名单位: 华中科技大学)