

“华为杯”第二届中国研究生创芯 大赛—Synopsys 企业命题

论文题目：新型四象限激光定位

传感器设计及其系统开发

参赛单位：西安电子科技大学

队伍名称：芯缘译码

指导老师：李迪

参赛队员：刘爽 范立东 甘晓文

完成时间：2019.07.28

摘 要

随着激光器在工业、国防、科研上的应用越来越广，对激光束光斑中心的精准定位需求越来越高，尤其是当外界工作环境发生变化时，常常需要调校出现漂移现象的光斑中心。目前四象限光伏探测器因其响应时间很短、响应度高、且可以在实际中形成连续的位置信号，成为了主流的位置定位传感器。但是存在以下两个问题，一是四象限的十字狭缝的制作工艺，会引入非系统误差；二是每个象限的光电半导体不可能保证参数一致，因此造成的输出不一致性将会引入很大的定位精度误差。

本项目基于传统四象限存在的问题，首先设计了新型的四象限定位传感器，由四块光电半导体和立体十字缝隙结构巧妙镶嵌而成，有效地降低了非系统误差。同时对四象限传感器的工作原理进行了建模以及基于 TCAD SILVACO 的定位原理仿真，确定了定位系统的可实施性以及提出了转向阈值这一重要的校正信号。

然后，基于自行设计的新型定位传感器，设计了以第一象限 Q1 和第二象限 Q2 中心线为定位目标的一维定位系统。整个定位过程第一步为 ARC EM 处理器通过控制步进电机驱动器，实现对电动平移台的移动；第二步为新型四象限传感器将 532nm 激光器输出的光信号转换为电信号，并通过 AD 模块将数据采样到 ARC EM 处理器；第三步为在 PC 机利用 ARC GNU 工具链开发环境进行实时电压值输出，并通过控制电动平移台进行光斑中心校准。

最后，在定位系统硬件实现的基础上，提出的双差分算法将传统的四象限传感器多象限之间的输出差分，转变成脉冲激光开启前后单象限的输出差分，解决了各象限输出信号不一致问题。实测的采样结果和定位结果表明，在优化转向阈值电压这一参数后，新型四象限的定位功能以及双差分的算法，可以有效地将激光光斑中心定位到 Q1 和 Q2 象限之间的中心线上。

关键词：ARC EM，四象限定位传感器，差分算法，光斑中心

ABSTRACT

With the increasing use of lasers in industry, national defense, and scientific research, the need for precise positioning of laser beam spot centers is increasing, especially when the external working environment changes, it is often necessary to adjust the flare phenomenon. center. At present, the four-quadrant photovoltaic detector has become a mainstream position-positioning sensor because of its short response time, high responsiveness, and the ability to form continuous position signals in practice. However, there are two problems. First, the fabrication process of the four-quadrant cross slit introduces non-systematic errors. Second, the optoelectronic semiconductor of each quadrant cannot guarantee the same parameters, so the output inconsistency will be greatly introduced. Positioning accuracy error.

Based on the problems of the traditional four-quadrant, this project firstly designed a new four-image limit position sensor, which is ingeniously inlaid by four optoelectronic semiconductors and three-dimensional cross gap structure, which effectively reduces the non-systematic error. At the same time, the working principle of the four-quadrant sensor is modeled and the positioning principle simulation based on TCAD SILVACO is used to determine the implementability of the positioning system and the important correction signal of the steering threshold.

Then, based on the new positioning sensor designed by ourselves, a one-dimensional positioning system with the first quadrant Q1 and the second quadrant Q2 centerline as the positioning target is designed. The first step of the entire positioning process is to control the movement of the electric translation stage by controlling the stepper motor driver by the ARC

EM processor; the second step is to convert the optical signal output by the 532 nm laser into an electrical signal for the new four-quadrant sensor, and pass the AD module. The data is sampled to the ARC EM processor; the third step is to perform real-time voltage value output on the PC using the ARC GNU toolchain development environment, and to perform spot center calibration by controlling the electric translation stage.

Finally, based on the hardware implementation of the positioning system, the proposed double-difference algorithm transforms the output difference between the traditional four-quadrant sensor and multiple quadrants into the output quadrant of the single-quadrant before and after the pulse laser is turned on, which solves the inconsistency of the output signals of each quadrant. . The measured sampling results and positioning results show that after optimizing the steering threshold voltage, the new four-quadrant positioning function and the double-difference algorithm can effectively locate the center of the laser spot to the center line between the Q1 and Q2 quadrants.

Keywords: ARC EM, Positioning detector of four quadrant, Difference algorithm, Spot center

目录

第一章 绪论.....	2
1.1 研究目的和意义.....	2
1.2 作品难点和创新.....	2
第二章 原理分析.....	5
2.1 新型四象限传感器的结构及原理.....	5
2.2 新型四象限传感器的建模分析.....	7
2.3 基于 TCAD SILVACO 的仿真验证.....	10
第三章 系统实现与开发.....	15
3.1 系统整体结构实现.....	15
3.2 系统硬件电路实现.....	16
3.2.1 AEC EM 处理器.....	16
3.2.2 电动平移台.....	16
3.2.3 电机驱动模块.....	18
3.2.4 AD 采样模块.....	20
3.2.5 激光器模块.....	21
3.2.6 硬件互联.....	22
3.3 双差分算法的实现.....	23
第四章 系统验证和测试.....	25
总结.....	28
参考文献.....	30

第一章 绪论

1.1 研究目的和意义

高斯激光广泛用于激光切割、激光测距、激光手术、激光核聚变、激光微加工、激光通讯等领域。随着激光定位技术的不断发展，对激光定位的精度要求越来越高，尤其是在以下领域：（1）在医学领域，癌症治疗、视力激光矫正等涉及功率超短脉冲激光应用的手术中，需多次快速精准的光路校正。（2）在工业领域，功率激光切割使用的激光器需要经常进行调校，来保证切割要求的精度。（3）在国防领域，所处环境的变化会引起激光器光斑中心的漂移，因此需要定期校正光路来确保激光光斑位置。（4）在科研领域，以可控核聚变为目标的美国“国家点火计划”和中国的“神光工程”，都需要高功率激光精准打靶控制。

激光定位的技术核心是寻找光斑中心位置，现有的技术方案有：热敏纸法、针孔法、刀口扫描法、CCD 成像法、四象限法等。热敏纸法、针孔法定位不准确；刀口扫描法操作繁琐且需要高精度的光能量计；CDD 成像法目前应用广泛，但会出现强光白饱和问题因此不适合用于功率激光。

1.2 作品难点和创新

如激光通信、激光制导、激光准直、激光雷达，在这些应用中，对激光光斑的精确定位是最为重要的一个环节，是相关探测系统进行精准测量的基础^①。高精度位置检测及其定位技术在电子网板生产线、半导体集成器件制造及精密加工业等领域有着广泛的应用。随着大规模集成电路朝着高集成化、微型化方向发展，在光刻工序中印有电路图案的每一层模板相对于硅片表面的位置误差限制在十几个纳米范围内，这使得高精度定位显得尤为重要。显然，2 个平面的相对位置的确定关键在于定位精度，这就给精密定位技术提出了新的研究内容：① 2 个平面相对位置的微小偏差能否被灵敏检测出；②能否在此基础上实现高精度自动

定位。近年来随着精密定位技术的不断创新，实现高精度定位的方法已成为研究的重点^{②-④}。光电探测器主要分为三种：电荷耦合器(CCD, Charge-Coupled Detector)、位置敏感探测器(PSD, Position Sensitive Detector)以及四象限探测器(QD, Quadrant Detector)。

电荷耦合器 CCD 是一种用来探测光的硅片，也叫光电转换器件。不同于以往的固态电子器件对于信息的存在和表达方式，CCD 采用电荷作为信号的载体，因此在信息的表达上，具有更高的灵敏度^⑤。但是 CCD 的制造工艺及其繁琐，导致成本普遍很高，大面阵 CCD 的价格更是极高。位置敏感探测器(PSD)是一种能测量光点连续位置的光电传感器。当光照在 PSD 的感光板上时，感光板两端电极会流出电流，因为两端电流的大小与光点照在感光板上的位置有关，所以通过对两端电流的比较，可以推出光点在感光板上的位置。PSD 由于是模拟线性元件，需要 AD 转换，所以信号有较大的失真。同时 PSD 具有温度漂移，受环境光影响也较大，导致测量精度不是很高，因此在进行高精度定位时，效果并不好。

四象限探测器(QD)是由四个完全相同的光电二极管组成的光电探测器件。QD 属于光伏探测器，其响应时间很短，采用倍增效应可达到很高的响应度，由于 QD 可产生连续的电信号，在实际中可以形成连续的位置信号，那么便可以对四个完全相同的光电二极管产生的信号进行处理便可以进行定位。目前传统四象限传感器存在以下主要问题：（1）四块光电半导体材料构成四象限的光电二极管，四个之间无法做到保持参数完全一致，因此在定位时四个光电二极管的输出信号存在一定的误差，这将影响定位的精度；（2）传统四象限传感器有着复杂的制作流程，最主要包括四块光电半导体的对准形成十字象限之间的缝隙，对准通常是由制作人员在显微镜下进行对准，缝隙在几百微米级别，引入的非系统误差将影响定位精度。

传统四象限探测器存在的主要问题将会很大程度上影响定位精度，

为了解决这些问题本项目对四象限传感器进行设计，形成了自主开发的新型四象限传感器。针对于四象限光电二极管的参数差异性，本项目利用脉冲激光的特性开发新算法来实现激光定位；针对于粘接形成四象限缝隙引入的非系统误差，本项目巧妙的设计了一套新型四象限传感器结构，有效的降低了非系统误差，因此可有效提升传感器的定位精度。

第二章 原理分析

基于校正引导激光入射的新型四象限光电传感器作为整个定位系统的核心模块，起着把照射在传感器上的光敏面的光信号转化为光电流信号的重要作用，是整个激光定位系统实现的前提之一。为了实现新型四象限传感器的设计和定位系统开发，需要从新型四象限光电传感器的工作原理出发，建立对应的数学模型和相应的半导体器件仿真模型，从而验证其定位功能。

2.1 新型四象限传感器的结构及原理

新型四象限传感器的提出是为了解决目前传统四象限传感器存在的问题，其由四块光电二极管和一套立体十字缝隙结构巧妙组合而成，新型光电四象限传感器的结构示意图如图 2-1 所示。利用了激光照射在新型光电传感器光敏面上，进一步产生光电流信号传送给定位控制中心系统来实现光斑中心定位和光路调校。

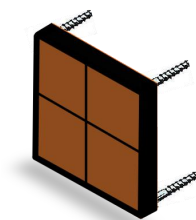


图 2-1 新型四象限传感器结构图

新型四象限传感器的立体十字缝隙结构是由两块黑色不透明绝缘材料固定形成，其版图尺寸如图 2-2 所示，起固定四块光电二极管以及管教功能线的引出作用。

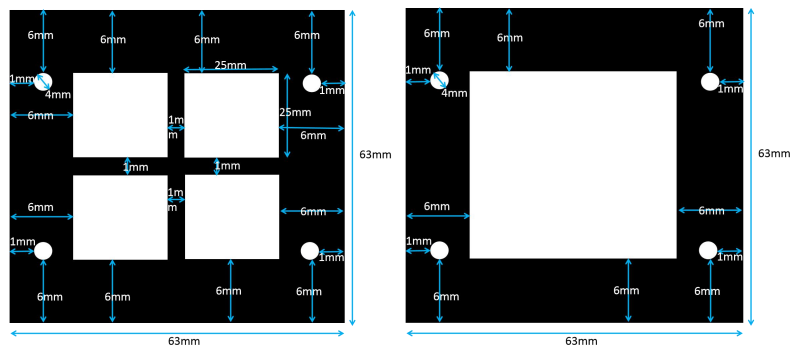


图 2-2 立体十字缝隙结构版图尺寸示意图

四块光电二极管的尺寸是和立体十字缝隙结构中的象限尺寸相同，那么便可以被固定在四个象限从而形成新型四象限传感器结构。新型四象限传感器的具体尺寸见表 2-1 所示，象限缝隙尺寸为 $100\mu\text{m}$ ，四个象限都是由 $25\text{cm}\times 25\text{cm}$ 构成，因此四块光电半导体的尺寸便是 $25\text{cm}\times 25\text{cm}$ ，这使得半导体巧妙的被镶嵌在立体十字缝隙结构，因此整体的误差主要来源于立体十字狭缝结构的加工精度，是高于传统四块半导体的粘接精度。图中的白色区域为待嵌入的半导体窗口，两块结构通过螺丝固定形成新型传感器的固定部分。

表 2-1 新型四象限光电传感器的具体尺寸

传感器组成部分	长度（cm）	宽度（cm）	厚度（cm）
半导体衬底	25	25	0.32
立体十字缝隙结构	63	63	0.28
电极	\	\	\

新型四象限光电传感器的其余黑色区域便是挡光和绝缘区域，当激光被照射在黑色区域上时被吸收，因此不会因为激光的反射问题而影响光电半导体的输出信号，只有当激光照射到白色区域镶嵌的光电半导体时，从而可进行系统的定位工作。

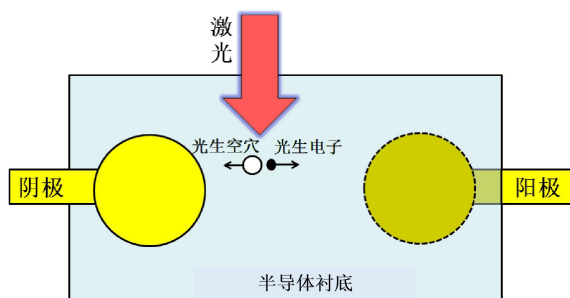


图 2-3 新型四象限传感器的内部工作图

四象限传感器的半导体工作的原理是激光入射到半导体衬底上，进一步将激光信号转化为电流信号。图 2-3 给出了四象限光电传感器的内部工作图，当激光照射到传感器上的光敏面时，入射的光子被传感器的半导体材料吸收后，会使得价带电子受到激发跃迁至导带，那么就产生了成对的价带空穴和导带电子，也叫作光生载流子。由于四象限传感器本身有一定的阻抗，所以当电流信号经过传感器和外围电路的阻值，电流信号进一步变成了实验中所需的电压信号。由于我们项目初步把半导体材料定义为 Si，我们的激光波长为 532nm 的绿光，由于 Si 对绿光吸收程度很强基本完全吸收，那么产生的光电信号比一般的半导体材料强，因此为了保护传感器可以不加偏置偏压，但是该信号的前提是要求被 ARC 处理器识别。后期根据项目的进展情况，可以研究和分析 GaAs 材料以及 GaN 材料的半导体衬底在定位系统中的应用

2.2 新型四象限传感器的建模分析

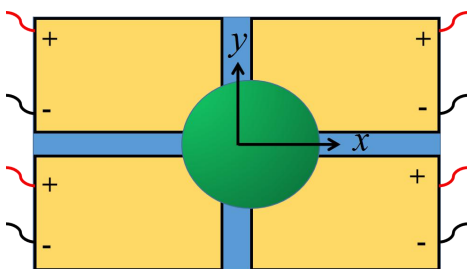


图 2-4 激光垂直入射传感器的示意图

图 2-4 中给出了激光光斑与四象限的位置关系，由以上分析可知激

光信号变为电流信号是传感器接收到了光子的作用，并且光斑中心的偏移量与各个象限接收到的光子数有着密切的关系，经查阅资料可以得到光斑中心在 x 、 y 轴的偏移量与光子的个数满足以下关系：

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{N_1 + N_4 - N_2 - N_3}{\sum N_i} \\ \Delta y = \frac{N_1 + N_2 - N_3 - N_4}{\sum N_i} \end{cases} \quad (i=1,2,3,4) \quad (2-1)$$

其中 Δx 、 Δy 表示光斑中心在 x 、 y 轴的偏移量， $N_i (i=1,2,3,4)$ 表示激光打在第 i 个象限上传感器接收到的光子数。

由以上分析推论可以得到，位置的偏移量的变化的实质便是激光照射在四象限光敏面上的能量发生了变化，即 Δx 、 Δy 与传感器上接收到的光子数有着紧密的关系，又考虑到激光打在象限上的激光光强 Q 与光子数有着以下关系：

$$Q \propto N$$

又因为打在四象限的光强信号与成像的光斑面积有关，由于高斯光打在不同的象限光强分布不同。激光照射在四个象限的光敏面上，由于要考虑四象限传感器的缝隙宽度，这里我们假设四象限的缝隙宽度一样均为 d ，4 个象限区的宽度均为 l 。图 3 给出的是激光的光斑半径，也是激光的束腰半径，那么高斯光强的分布便为

$$p(x, y) = \frac{2p_0}{\pi r^2} e^{-\frac{2(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 给出了高斯分布光斑能量表达式， r 是激光的光斑半径， p_0 是激光垂直打在传感器上的总能量， (x_0, y_0) 是激光的光斑中心。

图 2-4 给出了激光照射四象限传感器的示意图，考虑激光符合高斯分布的情况，那么我们可以计算出四个象限的光强，即

$$\begin{cases} p_1 = \iint_{s_1} p(x, y) ds_1 \\ p_2 = \iint_{s_2} p(x, y) ds_2 \\ p_3 = \iint_{s_3} p(x, y) ds_3 \\ p_4 = \iint_{s_4} p(x, y) ds_4 \end{cases} \quad (2-3)$$

基于图 2-4 我们可以分析出每个象限的区域，那么（2-3）式便转化为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{2p_0}{\pi r^2} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}+l} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}+l} e^{-2\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{r^2}} dx dy \\ p_2 = \frac{2p_0}{\pi r^2} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}+l} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}-l} e^{-2\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{r^2}} dx dy \\ p_3 = \frac{2p_0}{\pi r^2} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}-l} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}-l} e^{-2\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{r^2}} dx dy \\ p_4 = \frac{2p_0}{\pi r^2} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}-l} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}+l} e^{-2\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{r^2}} dx dy \end{cases} \quad (2-4)$$

为了对（2-4）式进行仿真和结果分析，把(2-4)式转化成误差函数的表达形式

$$\begin{cases} erf = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \\ p_1 = \frac{p_0}{4} \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}+l-x_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}-x_0\right)\right) \right] \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}+l-y_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}-y_0\right)\right) \right] \\ p_2 = \frac{p_0}{4} \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-x_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-l-x_0\right)\right) \right] \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}+l-y_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}-y_0\right)\right) \right] \\ p_3 = \frac{p_0}{4} \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-x_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-l-x_0\right)\right) \right] \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-y_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-l-y_0\right)\right) \right] \\ p_4 = \frac{p_0}{4} \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}+l-x_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(\frac{d}{2}-x_0\right)\right) \right] \left[erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-y_0\right)\right) - erf\left(\frac{\sqrt{2}}{r}\left(-\frac{d}{2}-l-y_0\right)\right) \right] \end{cases}$$

由上述传感器的工作原理可知，传感器的电流和光强的大小成正比，而电流与电压成正比，所以

$$\begin{cases} V_x = k_x \frac{p_1 + p_4 - p_2 - p_3}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4} \\ V_y = k_y \frac{p_2 + p_3 - p_1 - p_4}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4} \end{cases} \quad (2-5)$$

2.3 基于 TCAD SILVACO 的仿真验证

作为器件物理仿真工具，可以模拟半导体的电学、热学和光学特性，并在二维或者三维的情况下仿真光电半导体的直流、交流的时域响应。Atlas 通过语句对所需半导体 Si 的材料性质进行定义申明，并把设计的器件区域划分成网格，借助于计算机数值计算模块，按照有限元的思想和选用的器件物理模型计算每个网格格点处的物理运算结果。因此对网格的合理划分（包括网格的疏密程度和网格比例），有利于 Atlas 数值计算的快速、收敛和运算结果的精确，通常除了对网格的划分之外还要选择合适的模型及运算算法，在速度、收敛性和精确性上折中选择。图 2-5 给出了 Atlas 的仿真流程图，先在网格中设定器件结构和掺杂信息，通过测试的结果来查看器件的特性输出，并通过电路测试获得电路特性，并且该过程是可逆的。

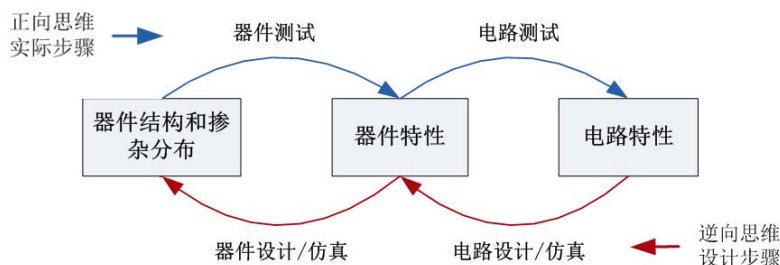


图 2-5 激光垂直入射传感器的示意图

仿真物理模型采用的是半导体物理和固体物理中成熟的物理方程模型或者经验公式，通常会不断更新发表在 IEEE 上科研成果，并把这些模型成果制成可以供用户调用的相应库（Silvaco library）。Atlas 中

的模型都是基于半导体物理中的泊松方程和连续性方程，可以在语句中申明定义材料电子和空穴迁移率、复合速率、载流子浓度、少子寿命等参数。Atlas 中的仿真过程就是通过用户调用以上模型，调整相关参数并将这些参数带入每个网格格点处的物理方程，并计算对应网格格点处的计算光电流、场强。

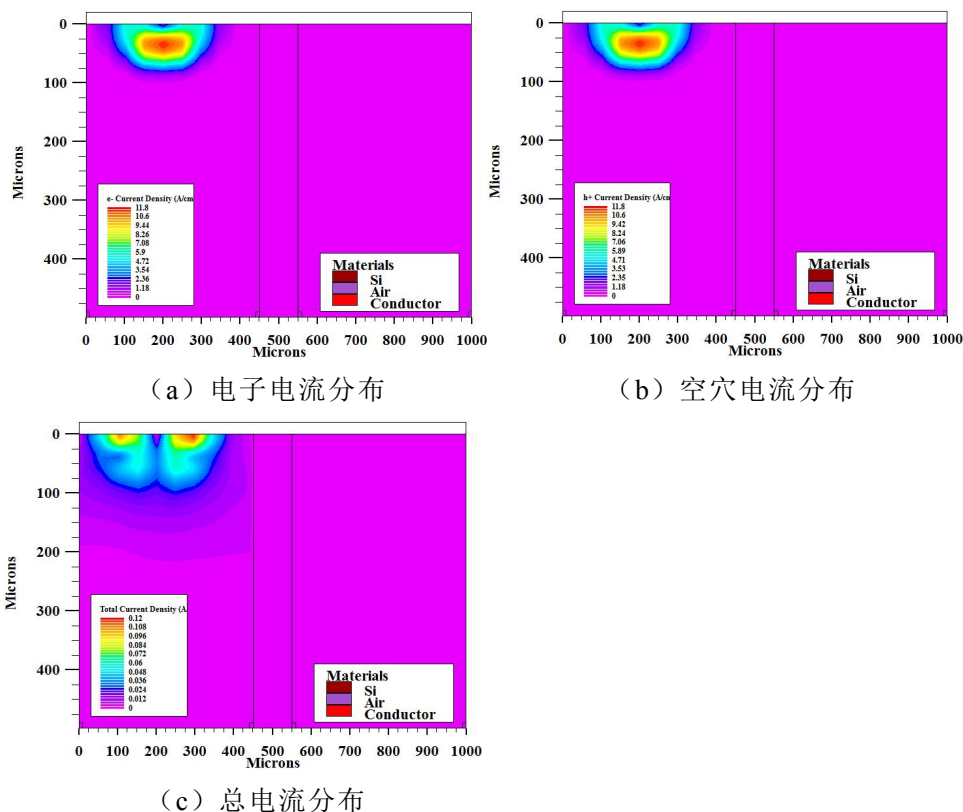
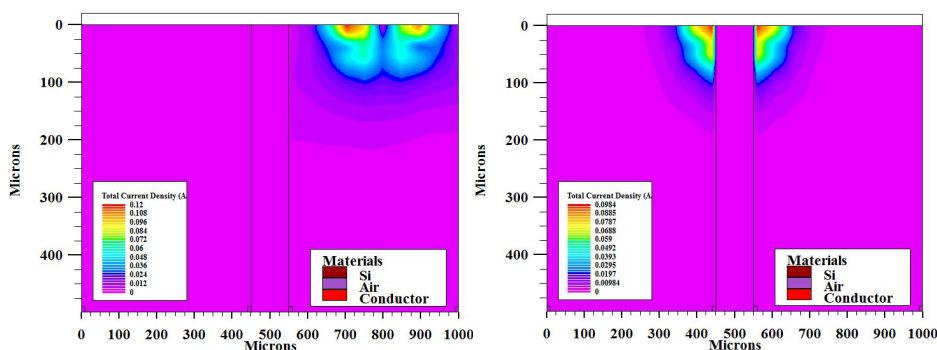


图 2-6 传感器上偏第二象限 Q2 时的电流分布示意图

为了进一步验证四象限传感器的工作原理，采用 SILVACO 的 Atlas 模块对四象限光电传感器的定位原理进行分析，以定位第一象限 Q1 和第二象限 Q2 的中心线的一维定位来研究传感器的定位功能。图 2-6 给出了激光照射在第一象限 Q1 时的电流分布图，包括了 (a) 电子电流分布，(b) 空穴电流分布，(c) 总电流分布。当激光照射在四象限传感器的光敏面时会激发出电子-空穴对，由于电中性原理，那么对应的电子和空穴的数目是一致的。图 2-6 所示为当激光偏离第一象限 Q1 和第

二象限 Q2 中心线的示意图，可以看出此时激光位于第二象限 Q2 处 200 μm 处，对 (a) 电子电流分布图和 (b) 空穴电流分布图进行详细分析，得到电子和空穴的分布和电流大小是完全一致，呈现出相同的不同区域颜色分布。此时对应的总电流分布是由电子电流和空穴电流的叠加形成，如图 (c) 总电流分布所示，此时整个电流位于第二象限 Q2，由于光斑中心已经偏离到 Q2 象限，因此此时对应的 Q1 象限是没有电流输出的。



(a) 光斑偏 Q1 象限时总电流分布 (b) 定位成功时总电流分布

图 2-7 传感器上偏第二象限 Q2 时的电流分布示意图

图 2-7 分别给出了 (a) 光斑偏 Q1 象限时的总电流分布，(b) 激光定位系统定位成功时的总电流分布示意图。相比于图 2-6 中的 (c) 图，可以得到此时光电流主要位于 Q1 象限，已经偏离 Q1 象限和 Q2 象限的中心线，位置为 800 μm 处，那么对应的 Q2 象限也是没有光电流存在。2-7 图的 (b) 给出了激光定位成功时的光电流分布，可以发现此时 Q1 和 Q2 象限都存在一定的光电流，按照分布来看，可以发现光电流的分布在 Q1 和 Q2 象限中是完全对称且一致的，代表激光定位系统定位到了激光光斑的中心。根据以上的特性分析可以得出，如果 Q1 象限和 Q2 象限对应的光电半导体特质保持一致，那么理论上定位到 Q1 象限和 Q2 象限的中心线对应的精度是非常高的。激光的分布是呈现出高斯分布，存在高斯能量的最高点，这使得激光光斑的形状呈现出圆形，其中圆形

光斑的半径是高斯激光的束腰半径，即高斯能量降低到 $1/e$ 对应的位置处，也表明了圆形的激光光斑是整个激光的能量主要的分布区域。由于高斯激光的能量对称性，所以激光本身也呈现出了对称一致性。象限的巧妙对称与圆形光斑对称性便是四象限传感器定位的核心关键。

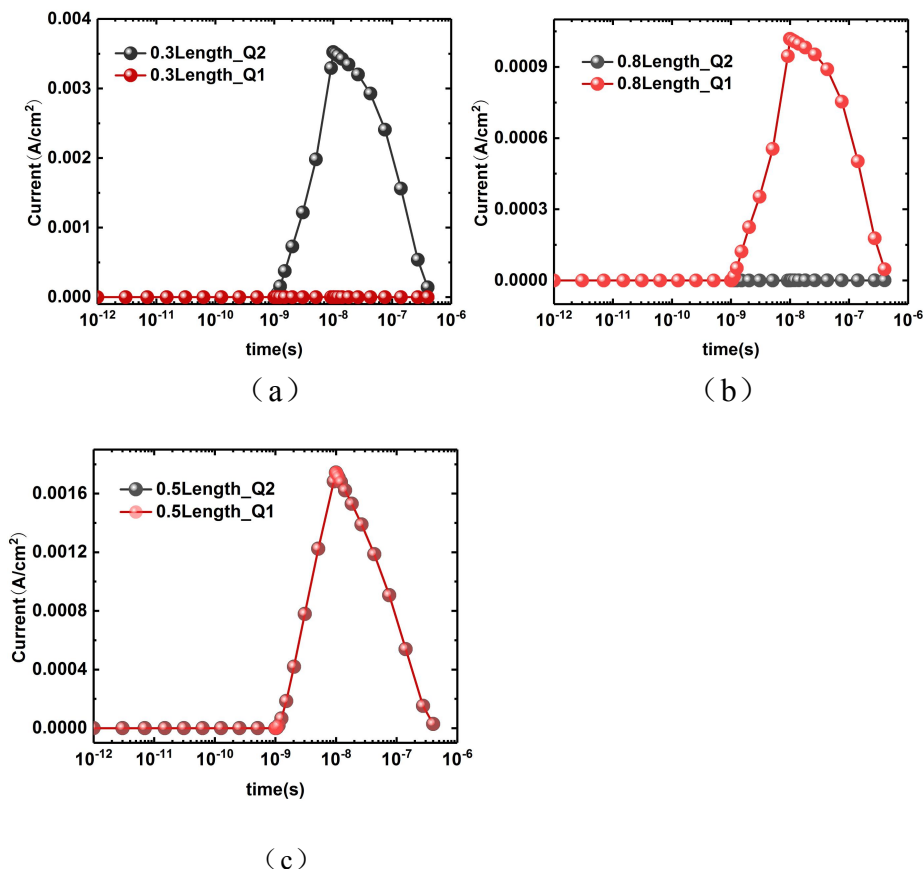


图 2-8 不同定位状态下对应的各象限电流大小

由以上的电流分布图可以利用电流分布来获得激光的定位状态，以下给出详细的信号输出关系。当激光处于图 2-8 (a) 状态时，黑色的 Q2 象限有对应幅值为 $0.0035 A/cm^2$ 输出脉冲信号，而红色 Q1 象限对应的输出为 $0 A/cm^2$ 输出，这是与图 2-6 (c) 是相对应的，由于此时激光器位于 Q2 象限，将在 Q2 象限产生一定的电流分布，那么可以判定此时激光光斑中心已经偏离 Q1 和 Q2 象限的中心线，便可以通过算法产生一个方向校正信号来让激光光斑中心向中心线移动。当激光处于图

2-8 (b) 状态时, 黑色的 Q2 象限无输出脉冲信号, 而红色 Q1 象限对应的输出幅值为 $0.001\text{A}/\text{cm}^2$ 脉冲信号, 这是与图 2-7 (a) 是相对应的, 由于此时激光器位于 Q1 象限, 将在 Q1 象限产生一定的电流分布, 那么可以判定此时激光光斑中心已经偏离 Q1 和 Q2 象限的中心线, 因此通过算法产生转向阈值校正信号来让激光光斑中心向中心线移动。对应于图 2-7 (b) 状态, 此时对应的输出脉冲如图 2-8 (c) 所示, 此时可以发现 Q1 象限和 Q2 象限的输出完全重合, 幅值均为 $0.0018\text{A}/\text{cm}^2$, 此时表明激光的光斑中心定位到了 Q1 象限和 Q2 象限。

综上, 从新型传感器的结构, 建模以及基于 SILVACO 的原理仿真验证表明了该方案是可以实施的, 提出的新型结构可以为定位系统提供传感器硬件设备结构、建模的分析可以为定位的算法设计提供支撑依据, 原理仿真不仅验证了方案的正确性, 也可以提供传感器校正系统的方向判别参数。

第三章 系统实现与开发

3.1 系统整体结构实现

为了验证以上提出的新型四象限传感器结构及其相关原理分析，我们开发以 Q1 象限和 Q2 象限中心线的一维定位来验证新型四象限传感器的定位功能。

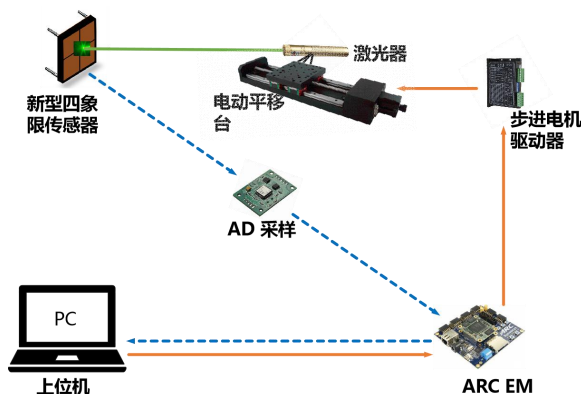


图 3-1 Q1 象限和 Q2 象限中心线定位的系统实现

图 3-1 给出了 Q1 象限和 Q2 象限中心线定位的整体系统实现，其中整个系统包括了新型四象限结构部分、激光器模块、电动平移台、步进电机驱动模块、AD 采样模块、ARC EM 处理器以及上位机。整个定位过程为，ARC EM 处理器通过控制步进电机驱动器，实现对电动平移台的移动。新型四象限传感器将 532nm 激光器输出的光信号转换为电信号，并通过 AD 模块将数据采样到 ARC EM 处理器，并在 PC 机上利用 ARC GNU 工具链开发环境进行实时四个象限的电压输出和定位状态显示。PC 机启用定位算法来进一步刷新 ARC EM 处理器的定位命令，从而进入新一轮的采样定位状态。

3.2 系统硬件电路实现

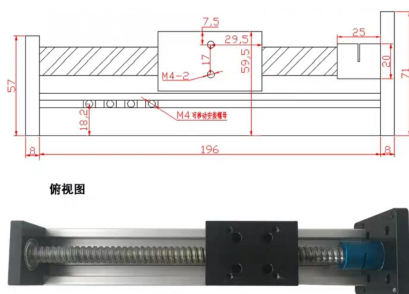
3.2.1 AEC EM 处理器



图 3-2 ARC EM 处理器

整个核心的算法处理平台我们采用如图 3-2 所示的 ARC EM 处理器，该处理器是 Synopsys 公司推出的 32 位 RISC 结构微处理器产品，致力于在满足应用所需的处理性能前提下，以尽可能的低处理器功耗和尽可能小的芯片面积来实现高效能和低成本。采用 ARC EM7D 系列是功耗最低、面积最精简的 ARC 处理器内核，使用三级流水线技术可提供约 900MHz 的主频和 1.77DMIPS/MHz 的性能，能耗效率可达 3W/MHz，内核面积仅为 0.01mm²。主要面向深嵌入式超低功耗应用领域以及数字信号处理领域，如 IoT（Internet of Things，物联网）、工业微控制器、机顶盒、汽车电子等。选择该处理器是因为初衷在激光器的控制，直流激光器因为长期的工作会因为积聚大量的热量，会对激光器带来不必要的热损伤，因此可将激光器的工作状态改为脉冲的工作方式，具体的脉冲频率可随定位系统要求而改变，从低频到高频都可以选择作为定位系统的研究内容。

3.2.2 电动平移台



(a) 单轴线轨滚珠丝杆滑台 (b) 57 电机

图 3-3 电动平移台组成

图 3-3 所示的一维电动平移台包括精密单轴线轨滚珠丝杆滑台以及 57 两相步进电机组成，表 3-1 给出电动平移台的详细参数。

表 3-1 单轴线轨滚珠丝杆滑台详细参数

类型	参数
滑台丝杆	直径 16mm 螺距 10mm
最大负载	20KG
定位精度	$\leq 0.03\text{mm}$
丝杆	长度 500mm

在表 3-1 中，滑台中的丝杆直径为 16mm，丝杆的导程也就是螺距为 10mm，代表电机转动一圈滑块移动的距离，整个滑台可以承受的重量为 20KG，这表明可以有效的进行三维的安装，定位精度是小于 0.03mm，具体取决于算法的精度以及驱动器的细分设置，整个丝杆可以滑动的距离是 500mm，这也是激光定位系统的有效定位区域。电机的参数如表 3-2 所示。

表 3-2 57 电机详细参数

类型	参数
步距角	1.8°
步距角精度	$\pm 5\%$
温度漂移	80°C MAX
环境工作温度	$-20^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$

绝缘电阻	100M Ω Min 500V DC
电阻公差	$\pm 10\%$
电感公差	$\pm 20\%$
耐压	500V AC 1 minute
径向跳动	0.02 mm
轴向跳动	0.08mm

表 3-2 给出了详细的电机参数，我们最终在实际系统的操作过程中，为了提升定位精度，设置的电机 800 个脉冲下行走的距离为 1mm，由于采用前进一次同时完成采样一次的算法控制，那么最终电动平移台每一次便前进 1.25 μm 进行光斑中心的校准。

3.2.3 电机驱动模块

考虑到电动平移台的 57 电机模块是两相步进电机，因此我们采用 M6600 两相步进电机驱动器，输入电压为 9-40V，输出电流为 0.5A-4.0A，最大的脉冲细分可以达到 6400 步/转。信号输入为单端输入方式，通过脉冲来控制方向，细分可以设置到 32 细分，当其静止时电流自动减半，同时采用光耦隔离信号输入，因此具有强的抗干扰能力。具有过热、过流、欠压锁定、输入电压防反接保护等功能。以下分别介绍驱动模块接口介绍和应用介绍。

◆信号输入端

信号输入端包括 PUL+、PUL-的脉冲输入信号，默认脉冲上升沿有效，为了让响应脉冲信号有效的控制电机，脉冲宽度应大于 1.2 μs 。还包括 DIR+、DIR-的方向输入信号，采用高/低电平信号对方向进行控制，为保证电机可靠换向，方向信号应先于脉冲信号至少 5 μs 建立。电机的初始运行方向与电机绕组接线有关,互换任一相绕组(如 A+、A-交换)可

以改变电机初始运行方向。也包括 ENA+和 ENA-的使能输入信号，也叫脱机信号，用于使能或禁止驱动器输出。使能时,驱动器将切断电机各相的电流使电机处于自由状态,不响应步进脉冲。当不需用此功能时,使能信号端悬空即可。

◆电机绕组连接

电机绕组连接包括 A+、A-的电机 A 组绕组，也包括电机的 B+、B-绕组的电机 B 组绕组。A+、A-、B+、B-输入端口都需和电机的两相信号线 A+、A-、B+、B-进行连接，对应到实际的接线图中，便是电机红线接 A+、电机绿线接 A-、电机黄线接 B+、电机蓝线接 B-。

◆电源电压连接

电源电压连接包括 VCC 以及 GND 输入端口，其中 VCC 为直流电源的正，范围为 9-42V DC，GND 为直流电源的负，为接地端口。在实际的接线中，我们采用 S-120 型开关电源供电，输出功率为 120W，给 VCC 提供的电源为 24V。

◆状态指示

其中状态的指示是 LED 指示灯显示驱动目前的状态，电源指示灯，故障指示灯。当驱动器接通电源时,该 LED 常亮;当驱动器切断电源时,该 LED 熄灭。若上电灯电源指示灯,故障指示灯。当驱动器接通电源时,该 LED 常亮;当驱动器切断电源时,该 LED 熄灭。若上电灯不亮,代表出现故障。当故障被用户清除时,绿色 LED 常亮。故障原因:①请检查电源接线或使用电压是否在使用范围之内。②过流保护(对地短路;对 VM 短路;输出之间短路(错相)):断电检查接线是否正确;③过温保护:冷却一段时间待驱动器温度降下来之后再使用,或者加装散热风扇。

◆接线方式

输入信号接口有两种接法，可根据系统需要采用共阳极接法或共阴极接法，此处我们采用的是共阴接法。由于 ENA 端可不接，ENA 有效时电机转子处于自由状态(脱机状态)，这时可以手动转动电机转轴完成

需要调节，手动调节完成后，再将 ENA 设为无效状态，以继续自动控制。为了防止驱动器受干扰，控制信号采用屏蔽电缆线。脉冲和方向信号线与电机线和电源线分开至少 10cm 以上，否则电机噪声容易干扰脉冲方向信号引起电机定位不准，系统不稳定等故障。

◆细分设定

驱动器采用拨码开关来进行细分设定和运行电流，有 SW1-SW6 个拨码开关，其中 SW1、SW2、SW3 是细分的精度设置，SW4、SW5、SW6 是驱动电流设定。实际的设定为 4 细分，即脉冲为 800，SW1 设定 ON 状态，SW2 设定 OFF 状态，SW3 设定 OFF 状态。对于电机的电流大小控制问题，在实际的运行中发现电流过大会使得电机的功耗增加，同时也会出现发热严重的问题，因此我们设定电流为 1.0A，峰值电流为 1.2A，那么对应的 SW4 设定 ON 状态，SW5 设定 OFF 状态，SW6 设定 ON 状态

3.2.4 AD 采样模块

AD 采样模块我们使用的是 PCF8591，PCF8591 是一个单片集成、单独供电、低功耗、8-bit CMOS 数据获取器件。PCF8591 具有 4 个模拟输入、1 个模拟输出和 1 个串行 IIC 总线接口。PCF8591 的 3 个地址引脚 A0，A1 和 A2 可用于硬件地址编程，允许在同个 IIC 总线上接入 8 个 PCF8591 器件，而无需额外的硬件。在 PCF8591 器件上输入输出的地址、控制 and 数据信号都是通过双线双向 IIC 总线以串行的方式进行传输。

PCF8591 主要性能指标：

- ★单电源供电
- ★PCF8591 的操作电压范围为 2.5V-6V
- ★低待机电流
- ★通过 I2C 总线串行输入/输出
- ★PCF8591 通过 3 个硬件地址引脚寻址

- ★PCF8591 的采样率由 I2C 总线速率决定
- ★4 个模拟输入可编程为单端型或差分输入
- ★自动增量频道选择
- ★PCF8591 的模拟电压范围从 VSS 到 VDD
- ★PCF8591 内置跟踪保持电路
- ★8-bit 逐次逼近 A/D 转换器
- ★通过 1 路模拟输出实现 DAC 增益

AD 模块在激光定位系统中起的作用为，新型四象限传感器接收到的光信号脉冲转化为电信号脉冲，将四路的电信号脉冲通过四个通道转送给 ARC EM 处理器，对应的是将电脉冲信号的模拟量转化为对应的各个象限的电压输出。对于模块的接线，左边和右边分别外扩 2 路排针接口，分别说明如下：左边 AOUT 芯片 DA 输出接，AIN0 芯片模拟端口接第一象限输出电压端口；AIN1 芯片模拟端口接第二象限输出电压端口；AIN2 芯片模拟端口接第三象限输出电压端口；AIN3 芯片模拟端口接第四象限输出电压端口。右边 SCL IIC 时钟接口接 ARC EM 处理器的 SCL IIC 口，SDA IIC 数字接口接 ARC EM 处理器的 SDA IIC 端口。GND 模块地外接 ARC EM 处理器的 GND 端口，VCC 电源外接 ARC EM 处理器的 VCC 端口。同时设定在开发环境中定义 PCF8591 AD 模块的器件地址为 0x48，那么对应的四个象限电压输出的通道地址定义为 0x40，0x41，0x42，0x43，将 AD 模块采样的信号分别传送到寄存器 CHANNEL_0，CHANNEL_1，CHANNEL_2，CHANNEL_3，那么便可以对采样的数据进行处理。

3.2.5 激光器模块

激光器作为 532nm 的光源将起着触发新型传感器的功能，根据半导体的知识，激光器 532nm 光源是对应的触发禁带宽度是大于 Si 半导体材料的 1.12eV 的禁带宽度，那么可以被新型四象限传感器所吸收，从而在新型四象限传感器中产生光生载流子，从而随着载流子输运到每个

象限的正负极从而便可以产生被识别的电压信号。激光器的尺寸为 $15.8\text{cm} \times \text{直径 } 2.2\text{cm}$ ，我们将 18650 电池的 3.7V 电压供电改为 3V 的直流源供电，工作环境为 $15\text{-}30^{\circ}\text{C}$ ，输出的最大功率为 200mW 。在实际的调试过程中，供电电压为 3V 时输出的光功率可以在新型四象限传感器上达到 100mV 的电压变化量，因此对于新型四象限光电传感器便可以不需要外加的直流偏置来提升激光器所产生的输出电压值， 100mV 的变化量是可以作为整个激光定位的方向校准量。

3.2.6 硬件互联

上面依次详细地介绍了 Q1 象限和 Q2 象限中心线定位的系统的各个模块，包括了 Q1 象限和 Q2 象限中心线定位的系统实现。

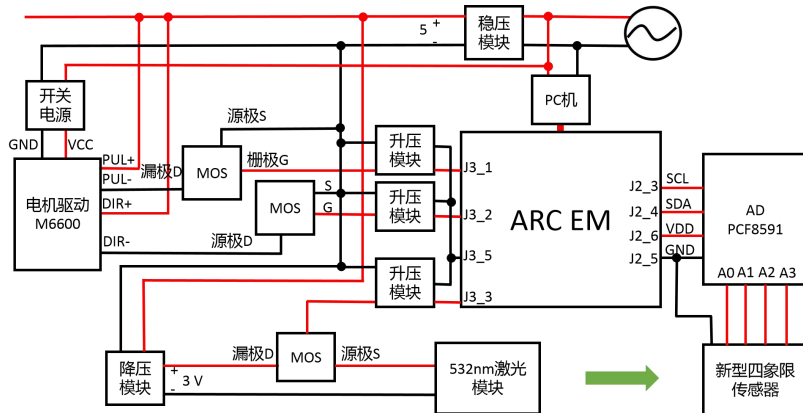


图 3-4 定位系统硬件互联电路图

图 3-4 给出了激光定位系统的硬件互联电路图，其中电源部分包括了 220V 交流电源通过 PC 机给 ARC EM 处理器供电，同时 PC 机与 ARC EM 处理器的互联也提供数据通信功能； 220V 交流电源通过开关电源输出的直流电压 24V 给电机驱动 M6600 供电； 220V 交流电源通过降压模块 USB 接入到了 5V 直流稳压模块，输出的 5V 直流电压将给电机驱动模块的 PUL+ 和 DIR+ 提供信号，输出的 5V 直流电压通过降压模块输出 3.0V 给激光笔提供电源信号。

ARC EM 使用到了 J3 的 GPIO 端口来进行电机和 532nm 激光器的控制，1 端口（ $0\text{x}10000$ ）、2 端口（ $0\text{x}20000$ ）和 3 端口（ $0\text{x}40000$ ）经过

了三个升压模块，接入到了三个 MOS 场效应管 IRFP250PBF 的栅极，去分别控制驱动电机驱动模块 PUL+端口的脉冲数控制信号，DIR+端口的方向控制信号，和激光器的电源正极端口信号，同时 ARC EM 处理器 J3 的 5 端口分别分别接到升压模块和降压模块的 GND 信号端口。ARC EM 处理器的数据通信用到了 J2 IIC 的 3、4、6、5 端口，分别代表着 SCL、SDA、VDD 以及 GND 端口，与 AD 采样模块的 PCF8591 的 SCL、SDA、VDD、GND 端口相连实现数据流通信。AD 模块的四个通道 A0、A1、A2、A3 分别与新型四象限传感器的第一象限输出端、第二象限输出端、第三象限的输出端和第四象限的输出端相连，新型四象限传感器的共地端与 AEC EM 处理器 J2 的 5 端口 GND 相连。532nm 激光器与新型四象限传感器的互联方式为光信号互联。

3.3 双差分算法的实现

基于传统四象限的建模以及 SILVACO 仿真验证表明了是可以实施的，但是在实际的硬件调试时，发现 Q1 象限的光电半导体材料和 Q2 象限的光电半导体材料本身因为工艺和外界因素会带来输出的偏离，它们的输出电压无法相等，因此在此基础上我们提出了双差分算法来完成对系统的实现。

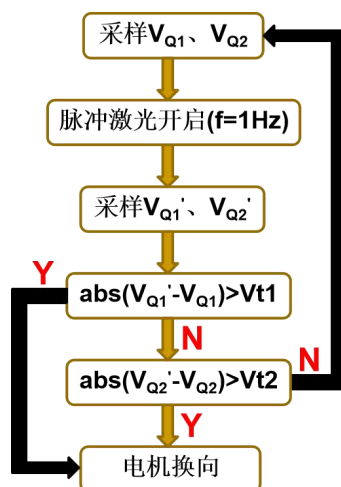


图 3-5 核心的算法流程

图 1 给出了定位系统的核心算法流程,首先 AD 模块进行初始采样,采样到的 Q1 象限的输出电压为 V_{Q1} , Q2 象限输出的电压值为 V_{Q2} 。设定脉冲激光的频率为 1Hz,经过初始采样后脉冲激光开启后,照射在新型四象限传感器便会产生输出电压,即 AD 模块会采样到 Q1 象限和 Q2 象限的新电压信号值 V_{Q1}' 和 V_{Q2}' 。设定第一象限 Q1 的转向阈值电压为 V_{t1} ,第二象限 Q2 的转向阈值电压为 V_{t2} ,设定转向阈值电压的行为是至关重要的,代表的含义表示在整个激光校准的过程中的识别转向,利用转向信号可以控制电动平移台的移动。

整个系统平移一次(前进 $1.25\mu\text{m}$),即在 532nm 激光器的一个脉冲开启的周期内,完成对新型四象限传感器四个通道的输出电压值进行采样,完成 Q1 象限和 Q2 象限的阈值电压判别,完成下次平移方向的判别。定位系统重复执行上述算法,当满足以下双差分条件时

$$\text{abs}[\text{abs}(V_{Q1}' - V_{Q1}) - \text{abs}(V_{Q2}' - V_{Q2})] < \varepsilon \quad (1)$$

则可以判定激光定位传感器完成定位成功,此时激光器的光斑中心位于 Q1 象限和 Q2 象限的中心线,其中变量 ε 是双差分的判别准则值,在实际系统的算法设定中是取 0 值。

即使 Q1 象限和 Q2 象限存在差异,第一次差分为脉冲激光开启前后的差分,这个差分值是取决于 Si 半导体吸收 532nm 的特性,即使 Q1 和 Q2 象限的输出电压值存在偏差,但是脉冲开启前后施加在 Q1 和 Q2 象限得到的变化量基本一致。第二次差分是 Q1 和 Q2 象限之间变化量的差分,利用这个差分与双差分的判别值 ε 进行比较,则可以在很大程度上提升激光光斑中心的定位精度。

第四章 系统验证和测试

基于新型四象限传感器的 Q1 象限和 Q2 象限的定位系统，以及提出的双差分算法在第三章已经进行了详细地展开了论述。下面采用定位系统收集 PC 机实时输出的采样结果，采样次数代表电机总共走的步数，一步对应的电机前进 $1.25\mu\text{m}$ ，图 4-1 到图 4-4 分别给出了在不同转向阈值电压下输出电压值和输出电压差值随采样次数的变化关系图，电机在前进一次同时完成采样一次。

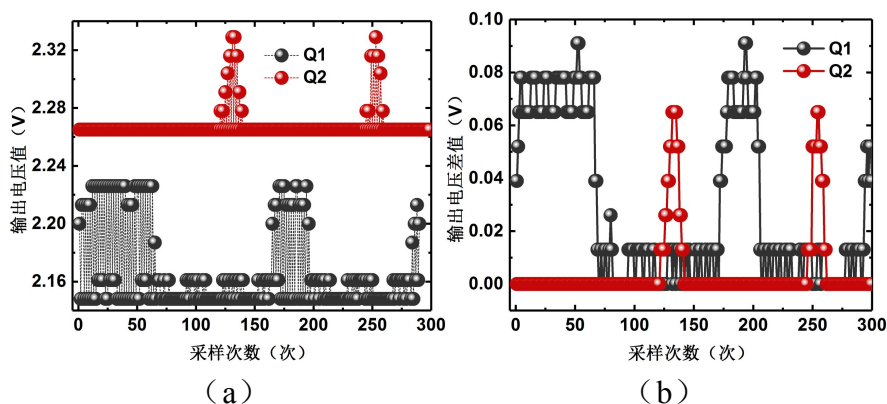


图 4-1 $V_{t1}=90\text{mV}$ 和 $V_{t2}=60\text{mV}$ 的采样结果

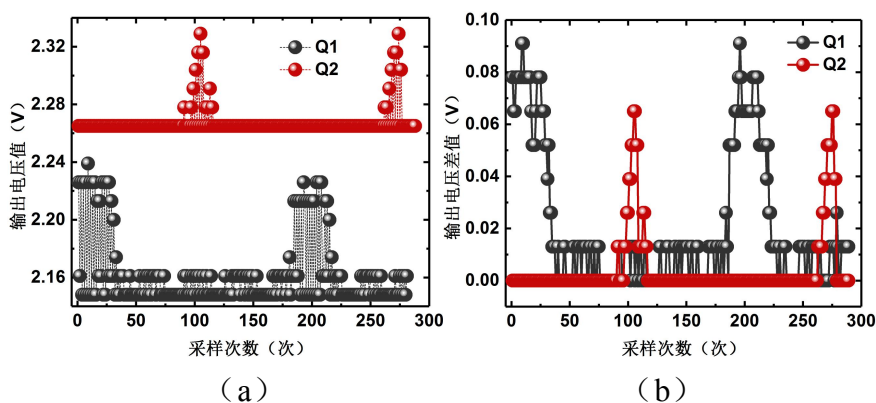


图 4-2 $V_{t1}=80\text{mV}$ 和 $V_{t2}=60\text{mV}$ 的采样结果

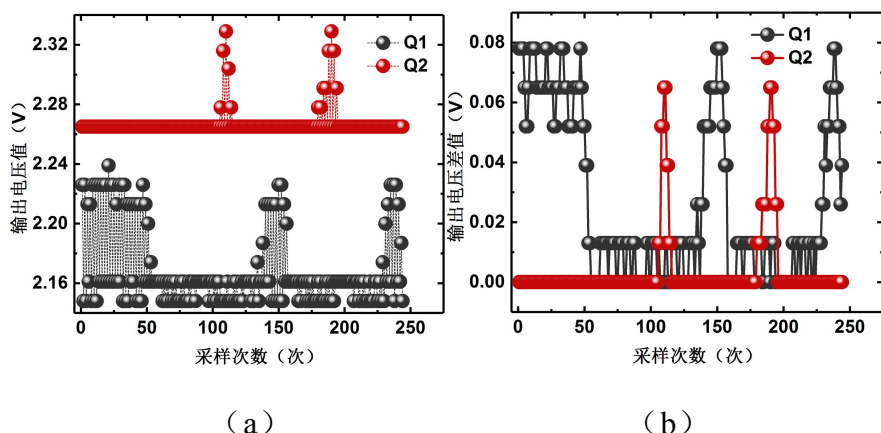


图 4-3 $V_{t1}=70\text{mV}$ 和 $V_{t2}=60\text{mV}$ 的采样结果

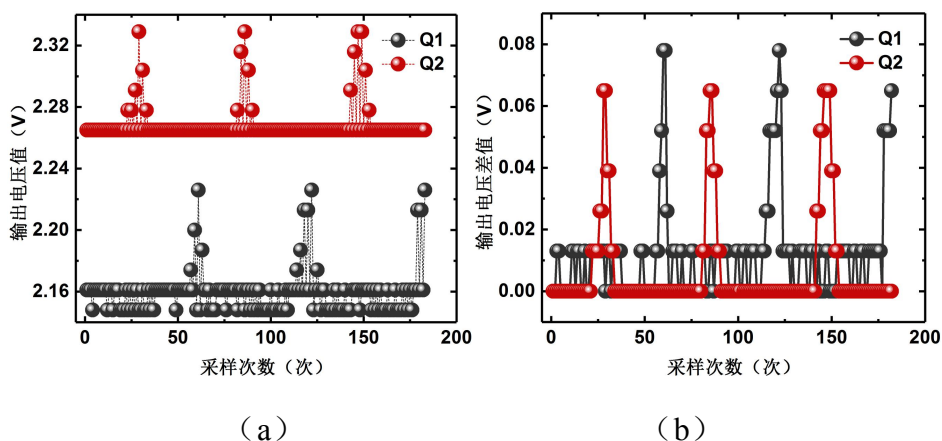


图 4-4 $V_{t1}=60\text{mV}$ 和 $V_{t2}=60\text{mV}$ 的采样结果

图 4-1 (a)、图 4-2 (a)、图 4-3 (a)、图 4-4 (a) 中分别给出了在不同转向阈值电压下，Q1 象限和 Q2 象限对应的电压输出，我们可以发现，由于 Q1 象限的光电半导体材料和 Q2 象限的光电半导体材料本身因为工艺和外界因素会带来输出的偏离，它们的输出电压无法相等。Q2 的输出电压值一直高于 Q1，如果采用传统的四象限差分算法，那么按照两个象限输出电压值相等时标记为定位成功，那么实际情况下光斑中心则会偏到 Q1 象限中去，不可能与两象限的中心线完全重合。同时可以看出 Q1 象限相比于 Q2 象限其输出点压值存在周期性的波动，这更将很大程度上影响定位的精准性。

考虑到制作 Q1 象限和 Q2 象限对应的半导体是存在差异性的，且这种差异性不可避免，两块半导体材料的性质参数不可能达到完全一致。因此第三章双差分的算法被提出用于解决此问题，图 4-1（b）、图 4-2（b）、图 4-3（b）、图 4-4（b）是第一次差分之后得到的差值随着采样次数而变化的关系图，可以发现，尽管两个象限各自输出电压差值是存在不一致的现象，但是每个象限在脉冲开启前后的输出电压差值的最低点是存在一致的。可以看到，当脉冲上升时，代表光斑中心偏离某一象限，当到达象限对应的转向阈值之后，那么电动平移台将会换向校准。当位于红色脉冲和黑色脉冲之间最低点时，代表着激光光斑中心定位成功，最低点的选取便可以通过改变双差分的判别值 ε 进行调整。经过两个象限不同的转向阈值 V_{t1} 和 V_{t2} 的优化，最终确立了图 4-4 所示的采样结果，两个象限对应的转向阈值电压均为 60mV。综上，以 Q1 象限和 Q2 象限的采样结果表明了该系统是可以成功实施的，同时也验证了新型四象限传感器的定位功能。

总结

本次项目主要实现了新型四象限传感器的结构设计，并完成了以 Q1 象限和 Q2 象限的中心线一维定位系统的设计，验证新型四象限传感器的定位功能，在其中，发现了传统的差分算法所带来的误差将很大程度上影响激光的定位精度，因此提出了双差分算法取得了良好的定位效果。整个定位过程首先为 ARC EM 处理器通过控制步进电机驱动器，实现对电动平移台的移动。然后新型四象限传感器将 532nm 激光器输出的光信号转换为电信号，并通过 AD 模块将数据采样到 ARC EM 处理器。最后并在 PC 机上利用 ARC GNU 工具链开发环境进行实时四个象限的电压输出，控制电动平移台的一维定位。

其中，整个系统的创新点在于：

(1) 传统的四象限传感器的半导体十字狭缝是粘接而成，这样会带来非系统误差，而自行设计的新型四象限传感器通过将四块硅光电半导体，巧妙地镶嵌到了立体缝隙结构中，这将有效地减少非系统误差所带来的影响。

(2) 新控制算法将传统四象限传感器多象限之间的输出差分，转变成脉冲激光开启前后单象限的输出差分，解决了各象限输出信号不一致问题。

(3) 新型传感器的成本较低，这是源于将高精度粘接工艺的成本转向了十字镶嵌结构的加工精度，而后者在相同条件下很容易实现。同时采用的 ARC EM 处理器具有低功耗、芯片面积小和高性能的特点，因此在系统的硬件实现方面具有很大的优势性。

作品同时也存在需要完善的地方，首先，整个激光定位系统是基于 Q1 象限和 Q2 象限的中心线定位的一维定位系统，还可以增加二维系统来进一步验证新型传感器的性能，即将两象限的中心线定位转变为四象限的十字中心定位，后期我们可以进一步完善。

非常感谢这次参赛经历！除了学会了团队合作精神以外，同时我们作为一名半导体人，将自己所学的半导体知识和所研究的课题方向运用到实际的作品中去，这对于我们来说是质的提升，非常具有意义的，谢谢！

参考文献

- ①周洁. 一种高精度激光束跟踪系统设计[D]. 南京信息工程大学, 2012.
- ②Kanjilal A K, Narain R, Sharma R, et al. Automatic mask alignment without a microscope[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1995, 44(3):806-809.
- ③Liu J, Furuhashi H, Torii A, et al. Precision position control systems using moire signals[C]// IEEE IECON, International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. IEEE, 1995:968-972 vol.2.
- ④Zhou L, Liu J. Precision alignment system using laser moire sensor [A] .In :The 2nd Japan-China Symposium on Mechatronics [C] .Chengdu,China 1997.16-18.
- ⑤李曦. 基于 QD 的精确定位技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.