

# 二维平面光电跟踪瞄准系统的设计\*

夏江涛, 肖韶荣

(南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 基于四象限探测器和精密步进系统, 以超低功耗单片机 MSP430 为核心设计了自动跟踪瞄准装置。自动跟踪入射光束信号的漂移, 实现了入射光束的二维自动跟踪和瞄准。设计方案以集成电路为主, 可靠性高, 可扩展性强, 控制精度高, 二维平面的位移精度小于  $5\mu\text{m}$ 。该系统已调试成功, 达到预期的设计目标。

关键词: 跟踪; 瞄准; 光电探测; 定位; 控制

中图分类号: V249.325 文献标志码: A

## Design of 2-D Optoelectric Autotrack & Collimating

XIA Jiangtao, XIAO Shaorong

(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on four-quadrant photoelectric detection and precise stepping system, an autonomous sight tracking unit based on ultra-low power consumption SCM MSP430 was designed. It was used to auto-track the drift of incident laser beam and the 2-D sight tracking of the incident laser beam was realized. The project mostly based on integration circuits has the advantages of high dependability, high expansibility and high controlling precision less than  $5\mu\text{m}$ . The system has been debugged successfully and the anticipated goal has been achieved.

Keywords: tracking; sight; photoelectric detection; positioning; control

### 0 引言

由于受到大气环境等因素的影响, 激光在大气传输过程中, 会发生光束漂移现象。因此, 准确地实现光束捕获和跟踪对于激光通信、激光雷达等光电系统的应用具有重要的意义。为了能够自动对准移动中的被测目标, 要求光电接收系统能够自动地捕获光斑的漂移量, 自动调整接收装置的位置, 保证接收到的光束中心位于有效接收范围的中心。

目前主要采用四象限探测器和 CCD 器件作为前端探测单元, 由于四象限探测器的体积小、响应快、成本低, 更适合广泛的使用, 因此文中在原系统的基础上以超低功耗单片机 MSP430 为核心, 采用高性能专用集成电路设计的调理电路, 构建了由四象限光电探测器和精密步进系统组成的自动跟踪装置, 实现了入射光信号的二维平面光电自动跟踪, 使入射光信号自动保持在光

电接收装置的中心位置, 有效提高了光电系统的综合性能<sup>[1]</sup>。

### 1 系统的总体设计

#### 1.1 系统组成

光电跟踪瞄准系统主要由光电探测器、前置放大电路、低通滤波电路、次级放大电路、A/D 转换电路、控制器和执行机构等 7 部分组成。系统总体设计如图 1 所示。

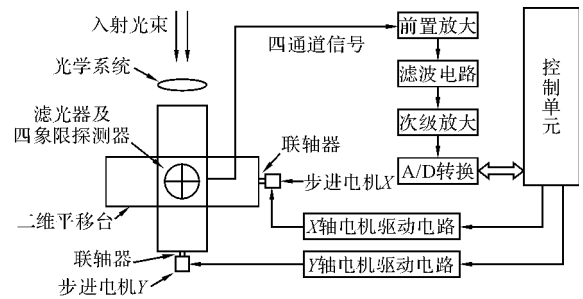


图 1 系统原理框图

\* 收稿日期: 2008-09-13

基金项目: 南京信息工程大学科研基金(S8107239001)资助

作者简介: 夏江涛(1979-), 男, 河南南阳人, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 光电系统及信号处理。

## 1.2 系统工作原理

四象限探测器是一种基于四象限分解法设计的位敏器件,目标光信号经光学系统后在四象限探测器上成像,当目标成像不在光轴上时,4个象限上输出的信号幅度不相同。根据各象限上能量分布的比例可计算出目标的亮度中心位置,以确定目标的空间位置,即检测目标具体方位可以归结为像斑相对于探测器中心的偏移量大小和方向的计算。文中使用四象限加减求解法来提取目标偏移量,基本公式如下:

$$\begin{cases} E_X = \frac{S_A + S_D - S_B - S_C}{S_A + S_D + S_B + S_C} \\ E_Y = \frac{S_A + S_B - S_C - S_D}{S_A + S_B + S_C + S_D} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_X$ 和 $E_Y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 轴上的偏移量, $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D$ 分别为像斑在4个象限上的分布面积。

探测器的4路输出信号经过一致性好的四通道处理电路,输出电压与各象限的光通量成正比,即通过输出电压信号的采集和处理以获得像斑的偏移量。四象限探测器的输出电压等级一般在 $mV$ 以下,需要进行前置放大以提高信号强度;为了减少背景光噪声的干扰,在前端还设置了合适的滤光器;前置放大电路后面通过滤波电路以降低噪声干扰,滤波器的截止频率由输入信号的特征决定;为与A/D采样电路匹配,一般需要设计次级放大电路对信号进行二级放大;数据采集过程由单片机控制,并由控制器对采集到的各路数据进行处理,按照程序逻辑,控制后续的电机驱动电路,以使二维执行机构按照要求动作,保证光束接收器处于良好的接收位置<sup>[1-4]</sup>。

## 2 系统单元的设计

### 2.1 光电探测器

系统中采用瑞普北光电子的2CR61-4型四象限探测器作为前端探测器。该探测器直径为 $17mm$ ,总有效面积为 $224mm^2$ ,开路电压大于 $450mV$ ,短路电流大于 $44\mu A$ ,对波长 $0.8\mu m$ 的入射光达到最大响应度,适合红光及近红外光的探测。实验中,选用波长为 $632.8nm$ 的He-Ne激光器作为实验光源,响应度可以达到最大响应度的82%,光电转换效率较高,且可见红光有利于实验中的观察。系统中选择四象限光电探测器的输出电压作为有效测量信号。

### 2.2 放大电路

系统中选用AD620来设计前置放大电路和二级放大电路,AD620是一种低功耗、低噪声、高精度的仪表放大器,具有很好的直流特性和交流特性,适合用于光电探测系统中。AD620仅需要一个外接精密电阻就可以设置放大倍数为 $1\sim 1000$ 。AD620是在传统的三运放组合方式改进的基础上研制的仪用放大器,提供了双极差分输入,可以有效消除共模成分,输入偏移电流比一般情况低10倍。差分放大倍数为:

$$G = 49.4 k\Omega/R_g + 1 \quad (2)$$

式中 $R_g$ 为外接精密电阻。

AD620的输出电压与参考端REF有关。系统中,将REF端接地,即输出电压为对地电压值,外接电阻的大小根据探测器输出信号范围、滤波电路输入输出信号范围、A/D转换电路输入信号范围来确定,实验中前置放大倍数、次级放大倍数分别设置为3.2和6。

### 2.3 滤波电路

实验中,输入光信号为连续光,前置放大电路的输出主要为直流电压信号。在实验中发现,外界灯光会引入 $100Hz$ 的干扰,开关电源也会引入 $50Hz$ 的干扰。为了有效滤除低频干扰信号,系统中选用MAX293来设计有源低通滤波电路。MAX293是MAXIM公司出产的8阶低通开关电容滤波器,具有外接元件少、参数匹配简单、不受本身频率特性影响的优点,可以根据信号的频率范围很方便的进行设计和调整。MAX293属于切比雪夫滤波器,在通带允许纹波的情况下,由通带到阻带所需过渡带最小。MAX293可使用片内振荡器产生时钟信号,也可以外接时钟信号。如果采用MAX293内部振荡器产生时钟信号,只需要外接一个漏电小、无极性的电容即可准确地设置振荡频率。计算公式为:

$$f_{osc} = 10^5/3C_{osc} \quad (3)$$

式中: $f_{osc}$ 为内部振荡器频率,单位为kHz; $C_{osc}$ 为外接电容,单位为pF。

MAX293的振荡频率与转角频率比为100:1,转角频率可设置范围为 $0.1Hz\sim 25kHz$ 。系统中,MAX293采用 $\pm 5V$ 双电源供电,选用 $33nF$ 的外接电容,转角频率设置为 $10Hz$ ,经实验验证,完全可以满足现场信号的要求,输出的电压信号纹波非常小<sup>[5]</sup>。

## 2.4 A/D 转换电路

系统的输入信号为四通道同步信号,为保证准确测量各通道的信号参数,保持各路输入信号间的相位关系不变,以获取光斑在探测器上的准确位置,应该对 4 个通道的模拟信号同时采样,因此选用了 MAXIM 公司的 MAX125 作为本系统的 A/D 转换器。MAX125 是高速  $2 \times 4$  通道同步采样 14 位逐次比较型模数转换器,采样速率可达到 76ksps(四通道),完全满足本系统的要求。MAX125 包含有 4 个采样/保持放大器,每个同步采样/保持放大器前端均有双路选择器,故实际上总共允许有 8 路模拟信号输入。芯片供电电源为  $\pm 5V$ ,输入模拟信号有效电压范围为  $\pm 5V$ ,但可承载  $\pm 17V$  的电压,有效避免外界对芯片冲击而造成的损失。MAX125 有 4 个存放转换数据的 14 位 RAM,可通过 4 个连续的读控制信号依次读出 4 个转换数据。MAX125 采用并口输出方式,方便于单片机控制器的数据读取。系统中,通过单片机的脉冲输出信号 A/D 转换器提供 16MHz 的外部时钟脉冲<sup>[6]</sup>。

## 2.5 控制单元

系统的控制单元采用的是 TI 公司推出的 MSP430F1  $\times \times$  系列单片机。16 位 MSP430F1  $\times \times$  系列混合信号单片机,是新型的低功耗、高速、高性价比单片机的典范,它的处理能力强、运行速度快、功耗很低。该芯片充分运用各种超低功耗设计手段,使芯片电路的电流极小,在低功耗模式 4,即 LPM4 时可达  $0.1\mu A$ ;该系列单片机具有内置的 FLASH 存储器,最大程序代码空间为 60KB,数据存储空间 2KB,具有 48 个 I/O 引脚;超低功耗的数控振荡器技术,可以实现频率调节和无晶振运行;片内集成 12 位 A/D、16 位定时器、模拟比较器、多种串行接口、PWM、看门狗定时器等模块。MSP430F1  $\times \times$  系列的开发相当简便,利用单片机本身具有的 JTAG 接口,可以在 PC 上通过 JTAG 控制接口实现程序的下载、调试,极大方便了系统的开发和后期维护工作。MSP430 系列单片机的软件开发支持汇编和 C 语言,极大方便了开发人员的程序设计工作,大大缩短了软件开发周期。

系统中使用的单片机型号是 MSP430F133,该芯片内置 2 个带捕捉/比较寄存器功能的 16 位定时器 Timer\_A3 和 Timer\_B3,可实现 PWM

输出;2 个具有中断功能的 8 位并行端口 P1 和 P2,4 个 8 位并行端口 P3~P6;一个模拟比较器,8 路 12 位 A/D 转换器;片内有 8KB 的 FLASH 程序存储器,256 字节的 RAM;256 字节的信息 FLASH,可用来存储各种参数,一般无需外加存储器。完全可以满足本系统的使用要求<sup>[7-9]</sup>。

## 2.6 执行机构

系统中的执行机构由二维平移台和步进电机机构。二维平移台的移动由两个螺距为 3mm 的滚珠丝杆来控制,两个丝杆分别由两个步进电机来驱动。系统中选用步距角为  $0.36^\circ/0.72^\circ$  的五相混合式步进电机,半步工作状态,采用五角型接法。平移台的移动精度为:

$$\text{移动精度} = \text{步距角} \times \text{螺距} / 360^\circ = 0.36^\circ \times 3\text{mm} / 360^\circ = 3\mu\text{m} \quad (4)$$

步进电机驱动电路采用 SI-7502(SLA5011/SLA6503)驱动芯片组成的五相混合式步进电机驱动器,采用恒流斩波方式驱动,最大输出持续电流可达 7A。电源电压选用 24V 直流电源,能够满足二维平移台移动所需的扭矩。SI-7502(SLA5011/SLA6503)驱动芯片由日本 SANKEN 公司开发,使用该芯片只需外接 3 个电阻、1 个二极管和 1 个电容,即可实现步进电机的全桥恒流驱动,充分体现了集成功放电路外围电路简单、性能稳定可靠、控制功能全面的特点。驱动电路由单片机直接控制,仅需单片机根据工作方式输出相应的控制信号即可,实现了步进电机驱动电路的智能化、高精度、高可靠性。在实际工作中,如果需要进一步提高执行机构的移动精度,一方面可以提高机械部件的精密程度,也可以利用细分驱动方式减小步进电机的步距角。

## 3 系统硬件结构

光电跟踪瞄准系统采用实时工作方式。在工作过程中,探测器的 4 路输出信号分别经过各路处理电路后,由 14 位 A/D 转换电路对 4 路模拟信号同时进行采样,然后由控制单元依次从 A/D 转换器的寄存器中读取转换结果,根据程序逻辑和处理算法,对前端光斑的接收位置进行判断,以输出相应的控制信号,驱动执行机构的步进电机,对接收位置进行实时调整。整个过程中,可以实现完全的自动控制。但考虑到系统的

人工可控性,设置了几个操作键,通过自动/手动模式切换,满足某些情况下人工操作二维平移台的需要。系统的硬件连接如图 2 所示。

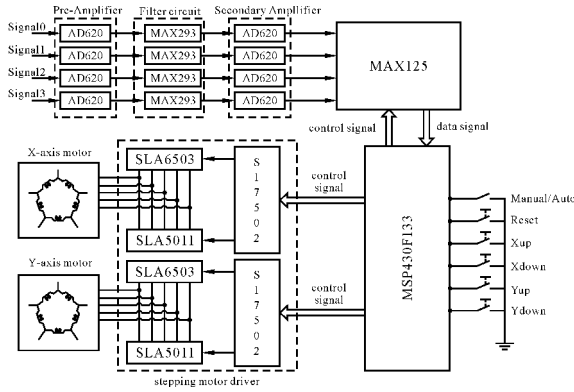


图 2 系统硬件结构图

系统的手动控制量均为开关量,Reset 为系统复位端,Manual/Auto mode 为手动/自动模式切换端,Xup/Xdown/Yup/Ydown 分别用来手动控制二维平移台的移动,每按一下,移动一步。在 Auto 工作模式中,系统对 4 路输入信号实时采集,自动调整二维平移台的位置,以保证光信号的光斑重心位于四象限探测器的中心位置,整个工作过程自动实现,实时循环执行。

### 4 系统程序设计

系统采用 MSP430F133 单片机作为控制核心,该单片机采用精简指令集,只有 27 条核心指令,指令周期可达 125ns,开发环境采用的是 IAR 公司提供的 Embedded Workbench 集成环境,使用 C 语言编程。程序流程如图 3 所示<sup>[9-10]</sup>。

### 5 讨论

系统采用四象限探测器作为前端探测单元,低功耗单片机 MSP430 作为核心控制单元,利用光电技术、电子技术、自动控制技术以及精密的步进系统实现了二维光电跟踪瞄准系统的设计。文中给出了系统设计方案,采用高性能的专用集成电路,优化了程序流程,大大地提高了原系统的性能。方案的可移植性好、可扩展性强,可以根据需要方便地调整电路参数及程序,以满足不同的工作要求。利用通信技术,可实现远程控制及集中控制。

系统已调试成功,并进行了应用试验,系统

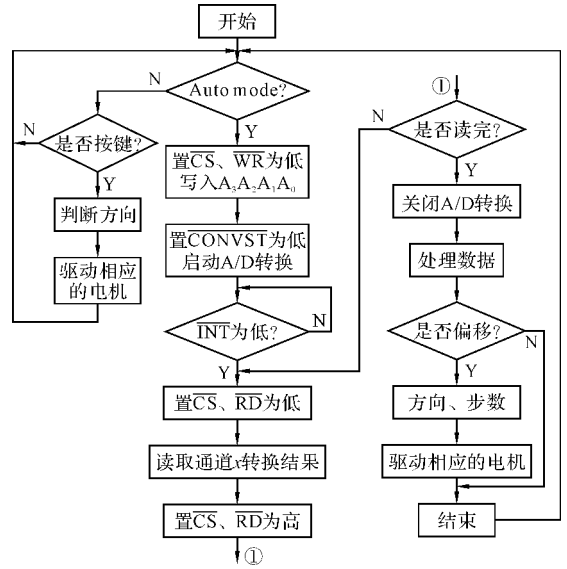


图 3 程序流程图

的二维平移精度可达到  $3\mu\text{m}/\text{步}$ ,有效提高了原系统的控制精度,并进一步实现了系统的小型化和低功耗设计目标,达到预期的开发目的。该系统对于激光探测、激光雷达、激光测量技术的广泛应用具有较大的应用价值和前景。

#### 参考文献:

- [1] 冯龙龄,邓仁亮.四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨[J].红外与激光工程,1996,25(1):16-21.
- [2] 西尔瓦诺.多纳特.光电仪器:激光传感与测量[M].西安:西安交通大学出版社,2006.
- [3] 舒柏宏,陆启生.四象限探测器的激光破坏及其对光学制导的影响[J].强激光与粒子束,1997,9(3):463-465.
- [4] 刘欣.基于半导体激光光纤组件的直线度测量方法与系统研究[D].北京:北方交通大学,2003.
- [5] MAXIM. MAX293-MAX297 Datasheet [EB/OL]. <http://www.maxim-ic.com.cn/>.
- [6] 张龙,周瑞,司栋森,等.基于 TMS320F2812 高速数据采集系统的设计与实现[J].光电与控制,2007,14(1):129-132.
- [7] 陶德峰,马履中. MSP430 单片机在平面五连杆机构控制中的应用[J].机械设计与研究,2003,19(1):34-35.
- [8] 秦龙. MSP430 单片机应用系统开发典型实例[M].北京:中国电力出版社,2005:15-72.
- [9] 王德银. MSP430 系列单片机实用 C 语言程序设计[M].北京:人民邮电出版社,2005:17-100.
- [10] 李文伟. MSP430 系列 C 语言环境下的软件设计实用技巧[J].化工自动化及仪表,2004,31(6):36-38.