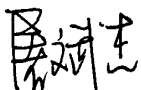


---



## 浙江大学研究生学位论文独创性声明

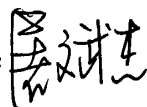
本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。


学位论文作者签名:  签字日期: 2011 年 03 月 10 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将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、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名: 

导师签名: 

签字日期: 2011 年 03 月 10 日

签字日期: 2011 年 3 月 10 日

---

## 致 谢

研究生刚入学时的情景还历历在目，却转眼就要毕业了，时光飞逝的确不假，两年零九个月的研究生生活就这样匆匆结束了。一路走来，得到了许多老师、同学和朋友的帮助，在这里对大家表示衷心的感谢。

首先感谢导师金仲和老师，尽管金老师平时工作非常繁忙，但他还是从百忙之中抽出时间来悉心指导我的毕业设计，包括论文的选题、创新点的提出以及论文完成过程中碰到的难题，金老师都给予了莫大帮助，使我有信心和动力去攻克一个个难题，最终圆满完成论文要求。金老师严谨的治学态度、敏锐的科学洞察力、独到的见解和强烈的创新意识使我获益颇多。

感谢王昊老师，王昊老师平易近人，待人热情，总是热心帮助我解决学习、生活中碰到的问题，无论是平时的学习还是毕业设计中碰到的难题，王老师总会不厌其烦地帮忙解决。

感谢郑阳明老师、吴昌聚老师、金小军老师、郑伟老师和王慧泉老师，无论是在学术论文的撰写还是平时的学习工作上你们都给予了我很大的指导和帮助。

感谢康晓黎老师、骆温明老师、丁纯老师对我生活上的帮助和关怀。

感谢韩柯师兄，在姿控组的学习中，韩柯师兄给了我很大的帮助。师兄平时合理的任务分配以及难题的悉心解答，使我得到了很好的锻炼机会，同时也让我少走了不少弯路。

感谢张钰师兄、杨牧师兄，师兄对我生活给予了很大帮助，同时也让我学会了待人处事的道理。

感谢和我同届的朱小丰硕士、周阳硕士、张立军硕士、向甜博士、张顾洪博士、杨伟君博士和徐兆斌博士，感谢有你们的一路陪伴。

感谢蔡波硕士、沈国权硕士和王志远硕士在我毕业设计中所做的工作；感谢陈宇睿硕士、丁立聪硕士、汪宏浩博士对我的帮助和支持。

感谢我的父亲和母亲，谢谢你们一直对我生活和学习的关心和支持。

屠斌杰

2011-01



## 摘要

太阳传感器作为一种重要的姿态确定传感器,已经被广泛应用于卫星等航天器的姿态确定系统中。数字式太阳传感器作为太阳传感器的一种实现方式,具有精度高、抗干扰能力强的特点。普通的数字式太阳传感器通常采用太阳平行光线经 MEMS 掩膜上小孔成像的原理,来实现太阳角度的测量,由于图像传感器像平面尺寸和精度的束缚,这些传感器的视场范围一般在  $\pm 60^\circ$  左右,当太阳角度超出视场范围时,传感器就无法正常工作。

针对普通数字式太阳传感器的不足,本文提出了一种适合于微小卫星姿态确定系统应用的数字式太阳传感器设计方法,该传感器采用了浙江大学研制的全景环形镜头,具有  $120^\circ \times 180^\circ$  的大视场范围,同时由于采用了外围电路简单且功耗低的 CMOS 图像传感器作为传感器的光探测器件,使得该传感器具有较低的系统功耗。此外,在兼顾系统精度和繁杂度的基础上,文中提出了一种简易、灵活的设计方法,简化了系统硬件设计,从而进一步降低了系统功耗,缩小了系统体积。

文中对基于全景环形镜头的数字式太阳传感器工作原理进行了分析,比较了其与普通传感器之间的异同。在工作原理基础上,本文提出了包括光学系统设计、器件选型及硬件设计在内的系统设计方案。然后,文中着重介绍了数字信号处理部分的设计,该部分由 XILINX 公司的 Spartan 3A 系列 FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 和 Silicon Laboratories 公司生产的微控制器实现。在此设计基础上,文中创建了该传感器模型,并提出了求解模型参数的方法。此外,为了完成传感器的标定与测试,文章还介绍了自动化标定、测试实验平台的搭建方法。最后,本文在该实验平台基础上对传感器进行了标定和测试工作,同时还对实验结果进行了分析,给出了系统的实测指标。实验测试结果表明该太阳传感器的视场、精度、功耗和体积均满足微小卫星定姿系统的要求。

关键词：数字式太阳敏感器；大视场；CMOS 图像传感器；全景环形镜头；质心法；传感器标定

## Abstract

Sun sensor, as an important attitude determination sensor, has been widely used in attitude determination system of micro-satellites and other aircrafts. Digital sun sensor is a part of sun sensor and it has the advantage of high precision and good anti-jamming ability. The principle of general sun sensor is based on the pinhole imaging, which is realized by pinhole on the MEMS mask. However, restricted by the size of image area and measure accuracy, the field of sun sensor is only about  $\pm 60^\circ$ . When the angle of sun is out of the field, the sun sensor cannot work properly.

According to these deficiencies, a design method of digital sun sensor which is suitable for the micro-satellite is presented in this paper. The optical system of the sensor is composed of panoramic annular lens, which is developed by Zhejiang University. The sun sensor has a large field of  $120^\circ \times 180^\circ$ . Besides, the sensor uses the CMOS image sensor as the light detector and it can reduce the power consumption of the system. While considering the measure precision and complexity, this paper presents a simple and flexible design method, which can reduce power consumption and volume of the system.

Based on the panoramic annular lens, this paper analyzes the principle of sun sensor and also compares the difference between the general sun sensor and this design. This paper gives the detail design scheme of the sun sensor, including the design of the optical system, the selection of devices and the hardware design. Then this paper introduces the design of the digital processing unit, this unit is composed of FPGA and micro-controller. After the primary design, a sensor model and the parameter solution of the model is presented by this paper. Besides, in order to finish the test and calibration of the sun sensor, this paper introduces the design of the auto test and calibration platform. At last, we give the test result and analyze the error source. The result of testing indicates that the sun sensor can meet the requirement of attitude determination system which is needed by micro-satellite.



**Keywords:** digital sun sensor, large field, CMOS image sensor, Panoramic Annular Lens, digital centroid-finding, sensor calibration

致 谢 .....	I
摘 要 .....	III
Abstract .....	V
目 次 .....	VII
1. 绪论 .....	1
1.1 课题背景 .....	1
1.2 课题研究的目的及意义 .....	1
1.3 太阳敏感器分类 .....	2
1.3.1 模拟式太阳敏感器 .....	2
1.3.2 数字式太阳敏感器 .....	3
1.4 太阳敏感器研究现状概述 .....	4
1.5 本文主要研究内容 .....	7
2. 太阳敏感器工作原理 .....	9
2.1 普通数字式太阳敏感器原理 .....	9
2.2 本文研究的数字式太阳敏感器原理 .....	12
2.2.1 全景环形光学镜头 .....	12
2.2.2 工作原理 .....	13
2.3 本章小结 .....	14
3. 太阳敏感器方案设计 .....	15
3.1 系统结构 .....	15
3.2 光学系统设计 .....	16
3.3 器件选型 .....	17
3.3.1 CMOS 图像传感器选型 .....	18
3.3.2 数字逻辑器件选型 .....	20
3.3.3 微控制器选型 .....	21
3.4 本章小结 .....	23
4. 太阳敏感器硬件设计实现 .....	25

4.1	硬件接口 .....	25
4.1.1	FPGA 与 OV2640 接口 .....	25
4.1.2	微控制器与 OV2640 接口 .....	26
4.1.3	FPGA 与微控制器接口 .....	28
4.2	FPGA 内部逻辑 .....	30
4.2.1	图像数据采集模块 .....	30
4.2.2	背景亮度提取模块 .....	34
4.2.3	质心求解模块 .....	36
4.3	本章小结 .....	38
5.	太阳敏感器软件设计实现 .....	39
5.1	OV2640 驱动程序 .....	40
5.2	通信程序 .....	42
5.2.1	微控制器与 FPGA 通信程序 .....	42
5.2.2	微控制器与上位机通信程序 .....	44
5.3	亮度阈值扫描程序 .....	47
5.4	坐标—太阳角度转换程序 .....	50
5.5	本章小结 .....	51
6.	太阳敏感器标定及测试 .....	53
6.1	标定、测试平台搭建 .....	53
6.1.1	硬件实验环境搭建 .....	53
6.1.2	软件实验环境搭建 .....	55
6.1.3	测试平台误差 .....	57
6.2	太阳敏感器标定与测试 .....	59
6.2.1	敏感器模型 .....	59
6.2.2	标定、测试实验 .....	60
6.2.3	误差分析 .....	61
6.3	本章小结 .....	65
7.	结论 .....	67
	参考文献 .....	69
	作者简介 .....	73

## 1. 绪论

### 1.1 课题背景

皮卫星等微小卫星以其研制周期短、成本低、灵活性强,越来越受到各航天研究机构的重视。特别是随着新能源技术、微电子以及通讯技术的发展,以集成电路和微机电为主要技术的皮卫星也得到了迅速发展。

浙江大学早在 2000 年就启动了皮卫星的研制工作,经过 10 年的不懈努力,终于在 2010 年 9 月成功发射了两颗“皮星一号 A”皮卫星,标志着我国首颗公斤级皮卫星的研制成功。太阳敏感器是一种重要的卫星姿态敏感器件,本文将设计一种符合皮卫星姿控系统的太阳敏感器,以此提高整个卫星的定姿精度。

### 1.2 课题研究的目的及意义

卫星姿态确定系统中存在着多种不同类别的姿态敏感器,如陀螺仪、地平探测仪、磁强计、地球重力传感器、红外地球探测器、太阳敏感器和星敏感器等<sup>[1][2]</sup>。其中太阳敏感器是一种十分常用的姿态敏感器,它通过测量太阳光线矢量来实现卫星姿态的确定。与其他几类姿态敏感器相比,太阳敏感器具有设计简单、功耗低及体积小等优点。太阳敏感器的这些优点使其被广泛应用于微小卫星的姿态确定系统中。

随着卫星对姿态控制精度要求的不断提高以及小卫星、皮卫星等微小卫星的发展,太阳敏感器逐渐向着小型化、模块化、长寿命的方向发展<sup>[3]</sup>。尽管太阳敏感器具有许多优点,并且已经被广泛应用于卫星的姿态确定,但由于器件和光学系统的限制,其仍存在着一些不足。其中视场上的不足是研究者较为关心的,目前数字式太阳敏感器的视场大小一般在 $\pm 60^\circ$ 左右,至少需要在卫星上安装三个此类太阳敏感器来实现全方位的太阳角度测量。对于皮卫星等微小卫星来说,敏感器数量上的增加会加重其功耗上的负担。因此在皮卫星上采用少量太阳敏感器实现整个视场的捕获具有十分重要的意义。而皮卫星对太阳敏感器在小型化和低功耗方面的需求也使得太阳敏感器的设计具有一定的特殊性。

浙江大学成功发射的“皮星一号 A”皮卫星上搭载了一个相机有效载荷,用于对地球进行成像。该相机有效载荷中采用了由浙江大学现代光学仪器国家重点实验室设计研制的全景环形光学镜头作为其光学部件,可以不借助机械转动装置实现 360° 环景成像。此外,此系统中选用功耗较低的 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, 互补型金属氧化半导体) 图像传感器作为其相机有效载荷的重要组成部分。经卫星传回的图像数据显示,该 CMOS 图像传感器工作良好,捕获到了清晰的地球图像。经可行性分析可知,“皮星一号 A”皮卫星上所搭载的相机有效载荷经过一定的设计可以研制成具有较大视场的数字式太阳敏感器,从而在功耗及体积符合皮卫星要求的情况下,使得皮卫星增加了一个姿态测量器件,进而弥补其模拟太阳敏感器精度较低的不足,为其姿态确定系统的性能提升做出贡献。

### 1.3 太阳敏感器分类

#### 1.3.1 模拟式太阳敏感器

模拟太阳敏感器也叫余弦检测器。这类敏感器是根据硅太阳电池输出电流随太阳入射角按余弦规律变化原理设计的,如图 1-1 所示。太阳电池面  $dA$  面积上的辐射能通量  $dE$  为<sup>[4]</sup>:

$$dE = \bar{P} \cdot \bar{n} dA \quad (1-1)$$

式中  $\bar{n}$  为太阳电池面的单位法线矢量,  $\bar{P}$  给出电磁辐射能流的方向和量值。因此,光电池输出的电流  $I$  正比于太阳光入射角  $\theta$  的余弦:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (1-2)$$

将上述两个相同余弦检测器适当组合,把输出电流进行适当处理可以获得其组合的输出电流与太阳光相对于某一基准轴夹角之间的特定函数关系<sup>[4]</sup>。

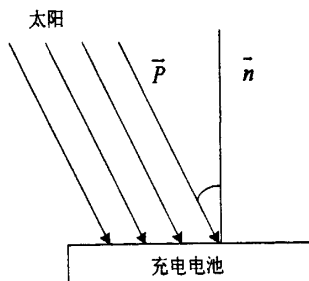


图 1-1 模拟式太阳敏感器

模拟太阳敏感器视场范围一般在  $20^\circ \sim 30^\circ$ ，精度在  $1^\circ$  左右。其视场和精度指标较数字式太阳敏感器相比都相对较低。但由于模拟太阳敏感器工作原理和硬件电路简单，通常作为卫星等航天器的粗定姿传感器。

### 1.3.2 数字式太阳敏感器

随着航天任务复杂程度的提高，姿态确定与控制系统对定姿传感器的精度也提出了更高要求。显然模拟太阳敏感器在视场和精度上都已经不能满足这类需求。同时由于数字器件的发展，一种新的太阳敏感器出现了，此类太阳敏感器利用覆盖掩膜的图像传感器作为探测器平面，并通过提取捕获图像上的条纹或质心信息来判断太阳角度<sup>[5][6]</sup>。此类太阳敏感器就是现在被广泛应用于卫星姿态确定系统的数字式太阳敏感器。经过几十年的发展，数字式太阳敏感器能够满足在质量、功耗、精度、模块化等方面越来越高的要求。

数字式太阳敏感器的构成主要包括三个方面：光学头部、光电传感器部分和信号处理部分。通过计算太阳光线在探测器上相对中心位置的偏差来实现太阳矢量的求解。其中光学头部主要实现太阳光线的前期处理，使其满足后续光电传感器部分的输入要求；光电传感器部分一般由太阳光线探测器实现，用于测量太阳光线的强度及投射位置信息，主要有线阵式和面阵式两种；信号处理部分实现探测器信号的处理，并将此信号通过一定算法转换为太阳角度信息。

数字式太阳敏感器的视场范围一般在  $\pm 60^\circ$  左右，精度可以达到  $0.05^\circ$  以上。此外，为了避免受到太阳能电池板和地面反光等杂光影响，一般会在光线探测器之前加入滤光片，用来衰减入射太阳光强，使其不工作于饱和状态<sup>[5]</sup>。

## 1.4 太阳敏感器研究现状概述

最早出现的数字式太阳敏感器是码盘式太阳敏感器。它的应用范围很广，能适用于三轴稳定卫星和自旋稳定卫星。同时它的视场大，精度在  $0.5^\circ$  到几十角秒范围内。

卫星向皮、纳等微小型卫星的发展趋势使得太阳敏感器研制也正在逐步向着低功耗、小型化、模块化方向发展。虽然码盘式太阳敏感器有很多优点，但由于码盘与太阳电池靠粘接等工艺实现，使得太阳电池不可能做得很小<sup>[7]</sup>，从而限制了这类太阳敏感器向小型化、模块化方向的发展。

数字式太阳敏感器中唯一的测量器件是图像传感器，是数字式太阳敏感器的核心器件。当前数字式太阳敏感器主要采用的图像传感器包括 CCD (Charge Coupled Device, 电荷耦合器件) 图像传感器和 CMOS 图像传感器<sup>[8]</sup>。CCD 是在上世纪 70 年代才开始出现并发展的，由于具有尺寸小、工作可靠性高、重量轻、噪声小、动态范围大等特性，使得它在太阳敏感器领域迅速发展<sup>[9]</sup>。从 20 世纪 80 年代以来，西欧、美国及日本等国产品已处于使用阶段。如日本宇宙科学研究所和东京芝浦电机公司开发的 CCD 太阳敏感器采用 2048 个像素的 CCD 线阵作为探测器，每个像素尺寸为  $14\mu\text{m}\times 14\mu\text{m}$ 。如果视场为  $\pm 50^\circ$ ，则平均的角度分辨率为  $3'$  左右。为了使得太阳敏感器在整个视场范围内具有均匀的角分辨率，设计者在 CCD 图像传感器上面加了棱镜<sup>[7]</sup>。到目前为止，CCD 图像传感器在数字式太阳敏感器上的应用已经比较成熟，其在大视场下能达到  $0.01^\circ$  的定姿精度，在小视场下则可达角秒级<sup>[10]</sup>。下面是采用 CCD 图像传感器作为光电探测器的数字式太阳敏感器的一些例子。

- 俄罗斯地球物理协会研制的 CCD 太阳敏感器。关键的技术指标：角度测量误差： $12''$ ；系统功耗： $600\text{mW}$ ；重量： $280\text{g}$ ；体积： $70\text{mm}\times 70\text{mm}\times 50\text{mm}$ ；视场大小： $92^\circ\times 92^\circ$ <sup>[3]</sup>。

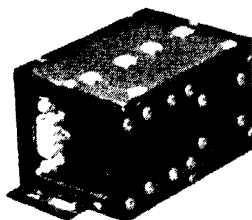


图 1-2 俄罗斯地球物理协会的 CCD 太阳敏感器

- 意大利伽利略公司研制的 CCD 太阳敏感器。该敏感器采用了 2048 元长线列探测器<sup>[3]</sup>。关键的技术指标：系统误差和随机误差分别为  $0.06^\circ$  和  $0.005^\circ$ ；光学部件和电路板体积分别为： $170\text{mm}\times 94\text{mm}\times 85\text{mm}$  和  $204\text{mm}\times 152\text{mm}\times 121\text{mm}$ 。



图 1-3 意大利伽利略公司的 CCD 太阳敏感器

- 荷兰 TNO-TPD 公司研制的 CCD 太阳敏感器。该敏感器光学部分由 CCD 线阵和与线阵垂直的狭缝组成，由此来实现太阳方位角的测量。两个安装位置互相垂直的模块来完成两轴坐标测量。其直接测量精度在  $0.10^\circ$  左右，在进行校正后，精度可达到  $0.02^\circ$ 。

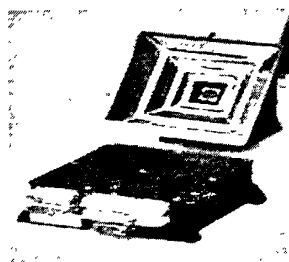


图 1-4 荷兰 TNO-TPD 公司的 CCD 太阳敏感器

- 美国 GoodRich 公司研制的 13-517 型太阳敏感器<sup>[11]</sup>。该太阳敏感器由多个其



他型号太阳敏感器组成，用于特殊的航天飞行任务，视场为  $128^{\circ} \times 168^{\circ}$ ，精度优于  $0.3^{\circ}$ ，功耗 300mW。



图 1-5 美国 GoodRich 公司的 CCD 太阳敏感器

CMOS 图像传感器出现于上世纪 60 年代，但受到工艺水平的限制，其各方面性能都较差。到 90 年代初期，英国爱丁堡大学研究人员研制出 PPS (Passive Pixel Sensor, 被动像素传感器)，此类器件结构简单，但在噪声控制和灵敏度等方面都不及 APS (Active Pixel Sensor, 主动像素传感器)，因而其应用也受到了限制<sup>[12]</sup>。为了适应空间技术发展，美国喷气推进实验室 (JPL) 开始研究 APS。近些年来，各国 APS 技术研究机构，都在致力于提高 CMOS 图像传感器的性能，如优化工艺、集成数字处理及控制电路、减小像素尺寸。近几年来，随着集成电路设计技术和工艺水平的提高，CMOS 图像传感器的一些性能指标已接近甚至超过 CCD 图像传感器<sup>[13][14]</sup>。虽然，APS 在灵敏度、分辨率、噪声控制等方面仍不及 CCD 出色，但是它在成本、功耗以及整合度等方面的优点，让它在应用于针对微小卫星的数字式太阳敏感器时独具优势。近些年，国内外都有研究院所在进行基于 APS 数字式太阳敏感器的研制。荷兰国家应用科学研究中心 TPD 研究所 (TNO TPD) 在光学传感器的研发上具有较长历史，其根据不同空间任务需要设计了多种光学敏感器作为 AOCS (Attitude and Orbit Control System, 姿态轨道控制系统) 子系统的测量器件，图 1-6 所示即为该研究所研制的太阳敏感器的工程结构模型，该敏感器采用 CMOS APS 作为图像探测器，并利用 FPGA 来实现数字信号的处理<sup>[15]</sup>。目前，以 APS 为核心的姿态敏感器研制工作在北美、欧洲等国家已经发展得较为成熟，其主要应用于微小卫星的姿态确定和控制系统。

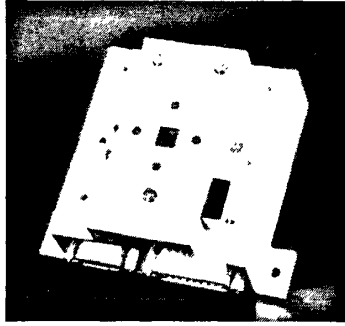


图 1-6 TNO-TPD 设计的太阳传感器工程结构模型

## 1.5 本文主要研究内容

本文从微小卫星的姿态确定系统要求出发,在充分研究国内外数字式太阳传感器的基础上,结合自身系统特殊性,提出了一种具有视场大、功耗低且体积小等特点的数字式太阳传感器。

第 1 章绪论阐明了本课题研究的目 的及意义,对模拟式太阳传感器和数字式太阳传感器进行了简单介绍,此外,本章还对数字式太阳传感器的发展现状进行了总结。

第 2 章对比介绍了普通数字式太阳传感器和本课题研究的数字式太阳传感器在工作原理上的异同,指出了本课题所研究太阳传感器的优缺点及其使用的场合。

第 3 章给出了本课题所研究数字式太阳传感器的设计方案,从系统的构成到每部分器件选型,都作了详细介绍。

第 4 章主要介绍了数字式太阳传感器的硬件设计实现。硬件实现部分主要涉及到各单元之间接口电路的设计,并对 FPGA 内部数字逻辑和时序设计进行了介绍。

第 5 章主要介绍了数字式太阳传感器的软件设计实现。软件设计采用模块化设计的思想,分为四个模块:图像传感器驱动程序模块、通信程序模块、亮度阈值扫描程序模块以及坐标-太阳位置转换程序模块。

第 6 章主要介绍了搭建太阳传感器标定及性能测试环境的详细步骤。提出了一种新颖的自动化标定平台搭建方案,同时结合建立的太阳传感器数学模型,测得了此模型的相关参数,并进行了传感器性能测试。

第7章对本课题所研究的数字式太阳敏感器进行了总结,提出了下一阶段需要改进的地方。

## 2. 太阳传感器工作原理

太阳传感器工作原理是整个传感器设计的基础,本章将介绍本文研究的传感器工作原理,为方案设计提供理论依据。

### 2.1 普通数字式太阳传感器原理

普通数字式太阳传感器由光线引入装置、图像传感器和数字信号处理单元组成。光学引入装置通常由加工了小孔(MEMS工艺实现)的掩膜来实现;图像传感器则作为小孔所形成光斑的检测器,可以将太阳光线在图像传感器像平面上的投影亮度和分布进行数值离散化处理;数字信号处理单元则将投影在像平面上的图像信息转换为太阳角度信息。

根据天文学观测,太阳光源亮度强且具有一定准直性,其张角在 $0.5^\circ$ 左右。对于数字式太阳传感器来说,太阳光线可以看被作是平行光线。太阳光线通过光线引入装置上的小孔,在图像传感器的像平面上产生一个光点。像平面则是有许多像元组成的二维图像探测阵列。光点所在的像平面坐标是由像元来决定的,一个像元代表一个坐标单位。

普通数字式太阳传感器通过对图像传感器捕获图像进行分析,得出光斑的位置,从而得到太阳的方位角。

在普通数字式太阳传感器中,太阳方位角求解算法会随着光学引入器种类变化而不同,光学引入器结构越复杂,相应算法复杂度也越高。在这些多样的光线引入器中,单孔结构的光线引入器是最为常见的,也是比较简单的一种。为方便说明问题,本文以单孔结构光线引入器为例,介绍普通数字式太阳传感器的工作原理。

由图 2-1 的几何关系,我们可以得出太阳光线和已知坐标轴之间的角度关系 [16].

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_s}{X_s}\right) \quad (2-1)$$

$$\beta = \arctan \left( \frac{\sqrt{X_s^2 + Y_s^2}}{h} \right) \quad (2-2)$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为太阳光线在坐标轴 X、Z 上的角度， $X_s$ 、 $Y_s$  为太阳光线经小孔后在像平面上所成光点的坐标值， $h$  为掩膜与像平面之间的距离。假设图像传感器的像平面为  $A \times A$  大小的正方形，忽略其他因素，我们可以得到此数字式太阳传感器的视场大小  $W$  为：

$$W = \pm \tan^{-1} \left( \frac{A}{2h} \right) = \pm \tan^{-1} \left( \frac{N \times p}{2h} \right) \quad (2-3)$$

其中  $N$  是像平面边长  $A$  上像元数个数， $p$  是像元边长，即

$$p = \frac{A}{N} \quad (2-4)$$

由式 (2-3) 我们发现，太阳传感器的视场大小与像平面尺寸和光线引入器高度有关，增大像平面尺寸或缩短光线引入器高度都可以增大太阳传感器的视场，前者违背了小型化设计思想，后者则会降低测量精度。在卫星应用中，要求太阳传感器的测角范围是  $360^\circ$ ，即要求在  $360^\circ$  范围内的任一位置都要能够测量到太阳角度，在实际设计中，综合考虑上述因素，太阳传感器的视场要求一般在  $\pm 60^\circ$  左右，因此实际应用中往往会由三个太阳传感器来共同组成  $360^\circ$  的视场要求<sup>[17]</sup>。

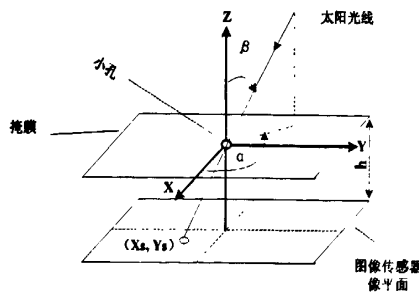


图 2-1 常见数字太阳传感器工作原理图

除了上述单孔结构掩膜的光线引入器外，实际应用中还设计出了结构更为复杂的光线引入器，而这种设计上的改变主要是为了更大的视场或者更高的测量精度，下面列举一些实际应用中的光线引入器。

1) 多孔结构掩膜<sup>[18]</sup>。

为了提高精度，多孔结构掩膜通过对几个小孔阵列进行平均的方法来消

除随机误差。这类掩膜配合大尺寸的 APS 探测器，能够提高像元的空间分辨率。多孔掩膜如图 2-2 所示。

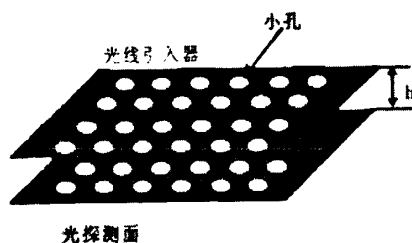


图 2-2 多孔结构掩膜

### 2) 球形多孔复用<sup>[19]</sup>。

球形多孔复用结构把传统太阳敏感器中的平面掩膜改成了多孔球面罩，如图 2-3 和图 2-4 所示。这种球形多孔复用罩提出的主要目的是为了增大太阳敏感器的视场，但同时会降低敏感器的精度。

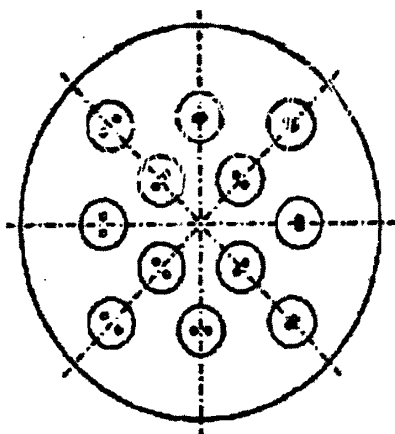


图 2-3 多孔球面罩孔对

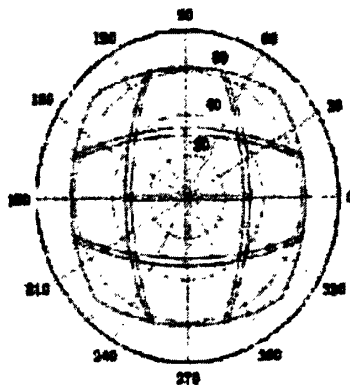


图 2-4 多孔球面罩视场划分

### 3) 狭缝式结构掩膜。

狭缝式结构掩膜与小孔掩膜相比，一般选用线阵式的光探测器，因为太阳平行光线经过这种类型的掩膜后在探测器上成的像范围只在一定的线宽内。由于所需检测的成像点数比较少，因此在算法上相对简单，在检测时间上也相应缩短，从而可以提高太阳敏感器的更新率。如多伦多瑞尔森大学航空电子仪器实验室研制的 SS-411 数字式太阳敏感器就是采用了这种结构的掩膜，如图 2-5 所示，相应采用的光探测器则是 TAOS 公司生产的 256×1 线性传感器阵列，该芯片结构相对简单，能有效缩减太阳敏感器体积，另外，由于算法简单，该太阳敏感器采用

了 Silicon Labs 公司生产的微控制器就实现了所有的算法<sup>[20]</sup>。

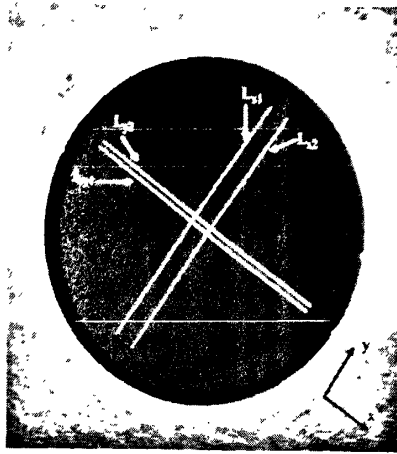


图 2-5 狭缝式结构掩膜

## 2.2 本文研究的数字式太阳敏感器原理

### 2.2.1 全景环形光学镜头

全景环形光学镜头由全景环形透镜 PAL (Panoramic Annular Lens) 组成。PAL 基于平面圆柱透视成像 (FCP), FCP 则是用投射方法将透镜周围圆柱区域的景物转换到一个平面, 从而将空间  $360^\circ$  全景投影到二维有限平面<sup>[21]</sup>。利用 PAL 构成的成像系统, 不采用机械转动装置就可完成  $360^\circ$  视野的捕获, 进而使得系统满足小型化要求。目前, PAL 在航空、航天、水下机器人视觉、医学中都有应用。

在 FCP 映射中, 所有平行的光线聚焦在一个点上, 而在传统的透视方法中不同方向的平行光线聚焦在一条水平线的不同点上。图 2-6 是平面圆柱透视的示意图。有图可知, 增大视场可以通过减小  $\beta$  或增大  $\alpha$  实现, 但  $\alpha$  和  $\beta$  值将受玻璃折射率的限制。环形 FCP 像的宽度对应着角  $\alpha$  的范围, 与光轴成同一角度点的集合对应于像平面上则是一组同心圆。环形像的宽度对应垂直的 (侧向) 视场角, 而像上的同心圆的点有着同样的相对透镜光轴的锥角, 因此 PAL 无景深限制, 即景深为无穷远。而锥角  $2\beta$  角的两边绕光轴旋转  $360^\circ$  后所形成的圆锥区域是不能成像的, 这一区域在二维平面上对应的  $\beta$  半径以内为圆形盲区<sup>[22]</sup>。

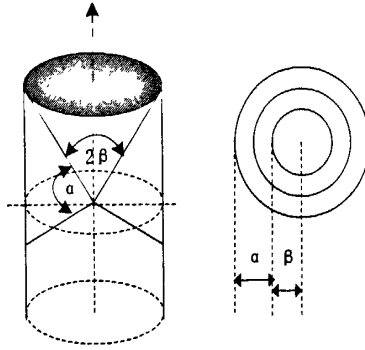


图 2-6 FCP 工作原理示意图

### 2.2.2 工作原理

本文研究的数字式太阳传感器，其光学部分采用全景环形光学镜头，因此在工作原理上会与采用开孔掩膜作为光学部件的太阳传感器有较大差异。

本文研究的太阳传感器工作原理如图 2-7 所示，由图 2-1 和图 2-7 比较可知：普通掩膜式太阳传感器成像对象是太阳光线经小孔后投射在像平面上的光斑，光斑的形状和大小与太阳形状及大小无关，只取决于小孔形状及掩膜到像平面之间的距离。本文研究的太阳传感器，其成像对象则是太阳经 PAL 在像平面上的光斑，所以光斑大小和形状由太阳和 PAL 共同决定。

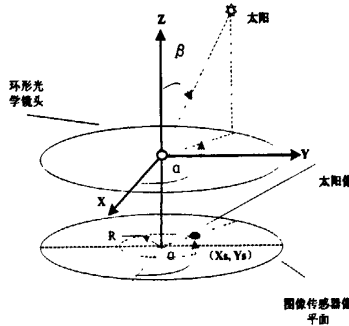


图 2-7 本文研究的太阳传感器工作原理图

此外，根据 2.2.1 介绍的 PAL 的成像原理可知，与传统相机光学系统不同，PAL 所成的像，其像高满足  $f\cdot\beta$  的关系，即：

$$H = f \cdot \beta \tag{2-5}$$

公式 (2-5) 中  $H$  为像高， $f$  为 PAL 焦距， $\beta$  为太阳光线与 PAL 光轴的夹角。像高  $H$  在具体实现时，可以通过计算光斑中心坐标到像平面中心的距离来获取，



而焦距  $f$  则由 PAL 设计时给出, 那么要获取角度  $\beta$ , 只要计算出光斑中心坐标即可。另一角度  $\alpha$  的计算方法则与 2.1 介绍的掩膜式太阳敏感器的计算方法一致。

根据上述分析及图 2-7 的几何关系, 我们可以得到本文提出的太阳传感器角度测量方法, 具体公式如下:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctan\left(\frac{Y_s}{X_s}\right) \\ \beta &= R/f \\ R &= \sqrt{X_s^2 + Y_s^2}\end{aligned}\tag{2-6}$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为太阳光线在坐标轴 X、Z 上的角度值,  $X_s$ 、 $Y_s$  分别太阳光线经小孔成像后在像平面上所成像的 X 和 Y 坐标,  $f$  为镜头焦距。

### 2.3 本章小结

本章首先介绍了普通太阳传感器工作原理, 指出了其在视场上的不足。探讨了增大传感器视场的一些方法, 并通过对比, 给出了基于全景环形光学镜头的太阳传感器设计原理。

### 3. 太阳传感器方案设计

本章以太阳传感器工作原理为理论依据，给出传感器的设计方案。该数字太阳传感器采用全景环形镜头和滤光膜作为光学部件，并利用 CMOS 图像传感器捕获太阳光斑，最后由 FPGA 和微控制器实现太阳角度信息的提取和转换。

#### 3.1 系统结构

本文研究的数字式太阳传感器系统结构如图 3-1 所示，主要由光学部分、图像传感器及数字信号处理单元构成。光学部分由全景环形光学镜头和滤光膜组成，图像传感器选用 CMOS 图像传感器，数字信号处理单元由 FPGA 和微控制器实现。

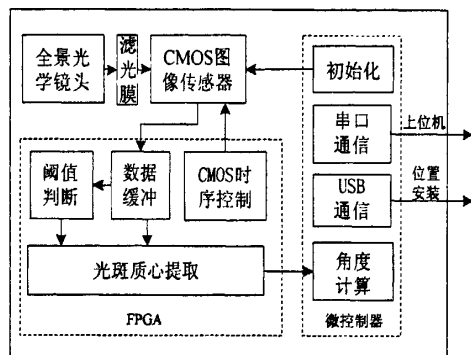


图 3-1 本文设计的太阳传感器系统框图

太阳实体首先经 PAL 光学成像，考虑到太阳光线强度会使 CMOS 图像传感器工作于饱和状态，因此考虑在 PAL 后级加上滤光膜，对光强进行一定比例的衰减。经滤光膜衰减后的太阳光斑将成像于 CMOS 图像传感器像平面上。图像传感器将其像平面上的太阳像转换成图像数据传送给数字信号处理单元。数字信号处理单元中的 FPGA 接收 CMOS 图像传感器传输的图像数据，根据上一帧图像的背景亮度估计，产生当前帧的亮度阈值信息，作为图像数据二值化的判断条件。FPGA 内部将从二值化的图像数据中提取太阳光斑坐标信息，并通过和微控制器之间的接口，传送给微控制器。微控制器将采集到的光斑坐标信息转换为相应太阳角度，并根据上位机的采样指令，将最终的太阳角度信息传送给上位机。

### 3.2 光学系统设计

光学系统设计工作主要包括 PAL 设计和滤光膜选取。

本文所研究太阳敏感器中采用的 PAL 是由浙江大学现代光学仪器国家重点实验室和我们实验室协同设计的。PAL 的设计主要依据后级选用的图像传感器相关参数。

与后级 OV2640 图像传感器匹配的 PAL 光学系统,在设计时满足的指标如下表<sup>[23]</sup>。

表 3-1 光学系统指标

系统口径	8mm ~ 15mm
光谱范围	486nm ~ 656nm
视场	0° ~ 60°×360°
焦距	1.07mm
入瞳大小	0.26mm
分辨率	100pl/mm

此外,要求镜头满足  $f-\theta$  成像 ( $f$  指焦距,  $\theta$  指视场角), 为与 CMOS 探测器配合安装, 后焦距应不小于 5mm。

镜头光路图如图 3-3 所示; 镜头实物图如图 3-2 所示; 由于受玻璃折射率的限制, 此镜头的中心存在 0°~30°范围的盲孔, 此盲孔的存在会影响视场的大小。

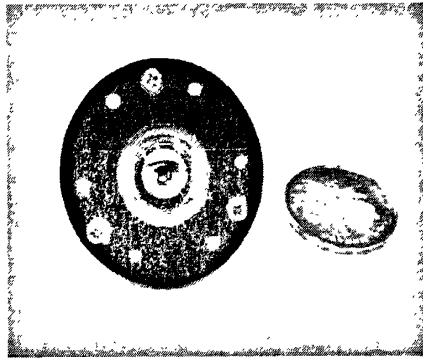


图 3-2 PAL 实物图

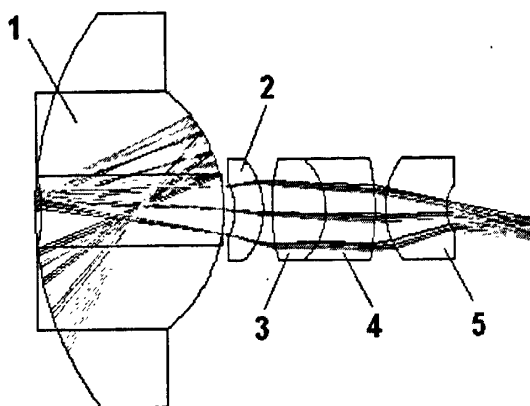


图 3-3 PAL 光路图

太阳光线强度会使 CMOS 图像传感器饱和，因此在设计时加入了滤光膜，用来衰减 PAL 镜头之后的光线，使其处于图像传感器光强感知范围内。在设计时选取了不同的滤光膜进行对比实验，实验效果如图 3-4 和图 3-5 所示，分别为菲林片和巴德膜滤光效果。

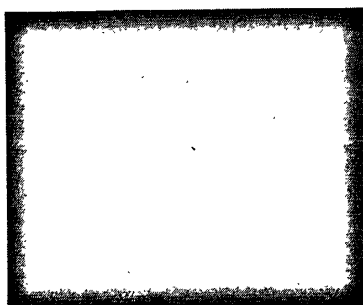


图 3-4 菲林片滤光效果

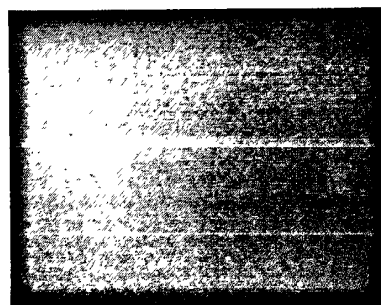


图 3-5 巴德膜滤光效果

由图 3-4 我们发现，经菲林片滤光后捕获的太阳光斑收敛性差，图像不规则，杂光干扰严重，这必然会增加图像处理难度，进而降低测量精度，所以菲林片作为滤光膜其效果不是很理想。而由图 3-5 可知，经巴德膜衰减后的太阳光斑像收敛性好，成像规则，杂光少，滤光效果理想。经上述实验对比及分析，本文设计的太阳传感器中选用巴德膜作为滤光膜，而事实上，巴德膜已经被天文爱好者广泛应用与日食的观测，这也从另一方面证实了巴德膜作为滤光膜的合理性。

### 3.3 器件选型

该小节将对本文所研究数字式太阳传感器的器件选型进行介绍。主要包括

CMOS 图像传感器、FPGA 以及微控制器选型。

### 3.3.1 CMOS 图像传感器选型

CMOS 图像传感器有不同型号的器件可供选择,以国外器件居多,目前比较有名的厂家有美光科技公司、意法半导体有限公司、美国豪威公司(OmniVision)、美国 Foveon 公司以及比利时大学微电子中心(IMEC)。国内对 CMOS 图像传感器技术研究较多的机构有西安交通大学、华北工学院、中国科学院微电子研究中心等<sup>[24]</sup>。

综合考虑产品性能、成熟度以及技术支持等方面因素,本设计中选用 OmniVision 公司生产的型号为 OV2640 的 CMOS 图像传感器。OV2640 是一款高度集成的低电压 CMOS 图像传感器,最大分辨率为 1600×1200,单个芯片内集成了图像传感器和图像处理器。OV2640 提供的格式及采样模式灵活,包括整帧图像、子采样、比例缩放或开窗模式,同时支持 8 位和 10 位数据宽度。用户通过 SCCB (Serial Camera Control Bus, 串行相机控制总线)接口可以对传感器进行配置,使其工作在不同模式<sup>[25]</sup>。太阳传感器在很大程度上实现低功耗是通过图像传感器开窗操作来实现的,开窗操作功能依赖于 CMOS APS 图像传感器的特殊设计。OV2640 具有开窗操作的功能,因此为了满足太阳传感器低功耗要求,本设计中使用 OV2640 的开窗功能,将其分辨率设置为 800\*600<sup>[26]</sup>。OV2640 内部功能框图如图 3-6 所示。

OV2640 图像更新率在 UXGA (1600×1200)分辨率下可达 15 帧/秒,用户可以对图像测质量、格式以及输出数据传输方式进行配置。在实际应用中所需的大多数图像处理 OV2640 都能在其内部提供,如曝光控制、伽马值调节、白平衡、色彩饱和度调节、色调、白点消除、噪声消除等等,都可通过传感器的 SCCB 接口进行配置。同时,在 OV2640 内部嵌入了一个图像压缩引擎,用以降低对图像传输数据量的要求,但会增加一定的功耗。此外,OmniVision 公司在这系列图像传感器芯片中加入了拥有专利权的传感器技术,通过减少或消除固定模式噪声、拖尾效应等对图像造成的污染,从而有效提高成像质量。

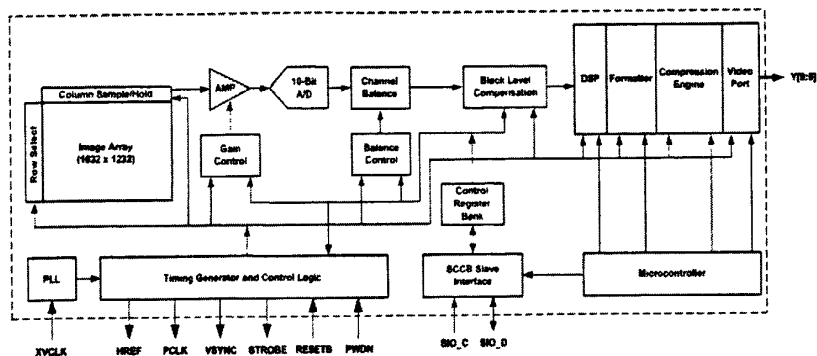


图 3-6 OV2640 功能框图

表 3-2 给出了 OV2640 的关键性能指标。

表 3-2 OV2640 关键性能指标

工作电压	核心电压	1.3VDC±5
	模拟电压	2.5~3.0VDC
	IO 电压	1.7V~3.3V
功耗	工作状态	125mW (15fps UXGA YUV 模式) 140mW (15fps UXGA 压缩模式)
	待机状态	600μA
温度范围	工作温度	0°C~50°C
最大传输速度	UXGA/SXGA	15fps
	SVGA	30fps
	CIF	60fps
信噪比		40dB
动态范围		50dB
最大曝光时间		1247×t <sub>ROW</sub>
像素尺寸		2.2μm×2.2μm
固定模式噪声		<1% (V <sub>PEAK-TO-PEAK</sub> )
暗电流		15mV/s@60°C

根据 OV2640 提供的芯片资料分析，其分辨率、功耗、更新速度、噪声参数等都能很好满足本设计的要求，因此在本设计中选用 OV2640 作为图像传感器。

### 3.3.2 数字逻辑器件选型

本设计中选用 FPGA 作为太阳敏感器数字信号处理单元中的数字逻辑实现部件,其主要功能是完成 CMOS 图像传感器的采样控制和图像数据中太阳亮度阈值及光斑坐标信息的提取。

设计中实际选用 XILINX 公司生产的 SPARTAN-3AN 系列 XC3S50AN 芯片作为可编程逻辑器件。SPARTAN-3AN 系列芯片具有低功耗、高密度等特性,其内嵌可在系统编程的 Flash 存储器,用于存放 FPGA 配置程序及其他非易失数据,不需要再外接配置芯片。SPARTAN-3AN 系列芯片主要用在对空间约束的应用中,如刀片服务器、医疗设备、汽车信息自动化、信息通讯业务、GPS 等小型消费类产品。SPARTAN-3AN 系列芯片将 FPGA 和 Flash 技术集成在一起,既减小了 PCB 布局又提高了系统的稳定性。芯片内部配置接口做到了完全自我约束,增强了设计可靠性。此外,SPARTAN-3AN 系列芯片也是世界首创的具有多加载模式的非易失 FPGA 芯片,支持两种以上的配置文件,实现固件升级、测试以及多系统配置方案<sup>[27]</sup>。

SPARTAN-3AN 系列芯片主要资源如图 3-7 所示,主要包括:

- Configurable Logic Blocks(CLBs): 可配置逻辑块。包含灵活的查找表,以实现附加的逻辑存储单元,如触发器或锁存器。
- Input/output Blocks(IOBs): 输入输出块。控制 I/O 引脚与内部逻辑之间的数据流。IOBs 支持双向数据流,如三态操作。IOBs 还支持可变化的信号电平标准,包括一些高性能差分标准,及双速率寄存器。
- Block Ram: 提供以 18-Kbit 方式的双通道数据存储模式。
- Multiplier Blocks: 接收 18 位二进制数作为乘法器输入,并计算出乘法结果。
- Digital Clock Manager(DCM) Blocks: 数字时钟管理块。提供自校准,全数字的分布、时延、乘、除及相移时钟信号的解决方案。

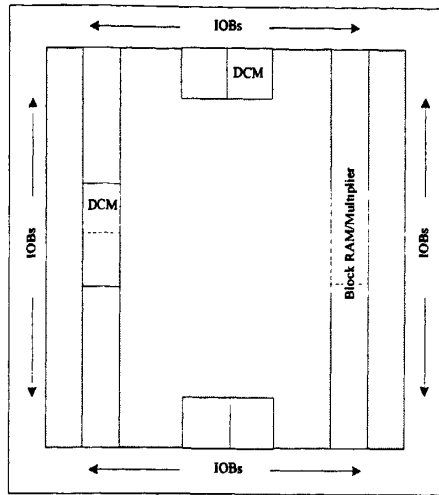


图 3-7 SPARTAN-3AN 系列芯片资源

本设计选用的 XC3S50AN 所含内部资源如表 3-3。

表 3-3XC3S50AN 内部资源

Device	Equivalent Logic Cells	CLBs	Slices	Distributed RAM bits	Block RAM Bits	Dedicated Multipliers	DCMs	Maximum User I/O
XC3S50AN	1584	176	704	11K	54K	3	2	108

### 3.3.3 微控制器选型

本设计中选用单片微控制器作为太阳敏感器信号处理单元中的控制器，主要完成图像传感器驱动、光斑坐标与太阳角度信息转换、亮度阈值扫描及与上位机通信的功能，单片微控制器的加入是为了弥补可编程逻辑器件控制不灵活、开发周期长的不足。

设计中选用 Silicon Laboratories 公司生产的 C8051F340 微控制器，该芯片内嵌高速 8051 $\mu$ C 内核，完全兼容 8051 指令集；采用流水线指令结构，70%以上指令为 1~2 周期指令，速度达 48MIPS，可扩展中断。除了以上特性外，C8051F340 内部具有丰富的资源，能够满足不同开发任务的需求，其功能框图如图 3-8 所示。



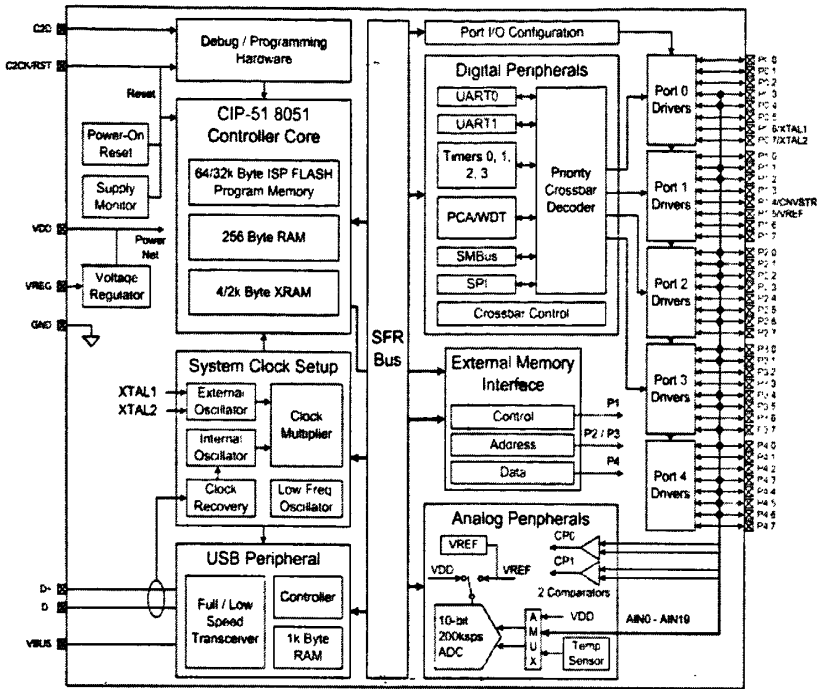


图 3-8 C8051F340 功能框图

C8051F340 内部比较重要的资源如下[28]:

- USB (Universal Serial Bus, 通用串行总线) 功能控制器, 具有 8 个灵活的端点管道; 集成了接收器, FIFO 达 1KB, 最高通信速度达 12Mbps, 满足高速数据通信要求;
- 自带电源管理功能;
- 精确的内部校准 12MHz 晶振, 且具有 4 倍频电路, 最高可产生 48MHz 时钟;
- 片内自带 64KB Flash 存储器, 可用作程序存储和数据存储;
- 片内自带 4352Bytes RAM (256+4KB);
- I2C、UART 及增强的 SPI 接口, 满足一般串行数据通信要求;
- 4 个内置通用 16 位定时器;
- 带供电电压监视器和时钟丢失检测器, 同时带有硬件看门狗, 确保程序的可靠性;
- 40 个 I/O 资源, 耐压能力 5V;

设计中将 C8051F340 上的 USB 接口用作数字式太阳敏感器标定及调试的高速接口, PC 端软件可通过此高速接口获取原始图像数据, 用作太阳敏感器标定位置安装、模拟光源测试及滤光膜筛选等用途。UART 接口则在敏感器最终投入

使用时用作与上位机通信的接口，主要接收上位机传入的控制信息，并将传感器测量结果及其他系统信息反馈给上位机。

C8051F340 带有一系列用于确保其程序运行可靠性的措施，如自带供电电压检测，在检测到供电电压低于一定水平时，可产生警告，对系统进行复位；片内自带的硬件看门狗可以确保程序在跑飞状态下进入复位，避免程序一直处于出错状态；片内的温度传感器，可以检测芯片的温度，当温度过高或者过低时，可向系统发出报警，使系统采取相应应急措施。同时，C8051F340 的复位源相当丰富，包括上电复位、外部复位、电源监测异常复位、时钟丢失复位、看门狗定时器溢出复位、软件复位及 Flash 故障复位等。在程序可靠性上采取的措施使其能更好适应复杂的空间环境。此外，C8051F340 可通过软件设置使其进入休眠和睡眠这两种低功耗模式，进而有效降低系统功耗，满足太阳传感器低功耗要求。

### 3.4 本章小结

本章给出了太阳传感器的设计框图，列出了光学系统的设计参数，比较了滤光膜筛选结果。并结合设计框图，分析了系统器件选型依据，详细介绍了包括 CMOS 图像传感器、FPGA 及微控制器在内的各器件的性能及资源。



## 4. 太阳传感器硬件设计实现

在整体方案设计的基础上,本章将介绍太阳传感器硬件设计。硬件设计主要包括各芯片、模块之间的接口设计以及 FPGA 内部的数字逻辑设计。

### 4.1 硬件接口

#### 4.1.1 FPGA 与 OV2640 接口

FPGA 与图像传感器 OV2640 之间的接口主要用于图像数据的传输。FPGA 提供给 OV2640 24MHz 的时钟,此时钟在 OV2640 内部经时钟管理单元后产生其工作主时钟。同时,OV2640 在工作时钟同步下产生帧同步信号 VSYNC、行同步信号 HSYNC 和像素时钟信号 PCLK, FPGA 通过检测这些信号来完成图像数据的接收。VSYNC、HSYNC 及 PCLK 信号的时序关系将在 4.2 节中作详细介绍。

图 4-1 所示为 FPGA 和图像传感器 OV2640 之间的连接关系图。其中 RST 为 OV2640 硬件复位引脚, PWDN 为掉电模式控制引脚, FPGA 能够通过 RST 和 PWDN 引脚的控制来实现 OV2640 硬件复位和掉电模式控制,以降低系统功耗。图像传感器与 FPGA 之间的数据总线宽度为 8 位,由于算法只关心光斑像的亮度信息,因此将图像传感器配置于 YUV422 数据输出格式, FPGA 只获取像素点 Y 分量,因此每个像素点对应 1Byte 数据。

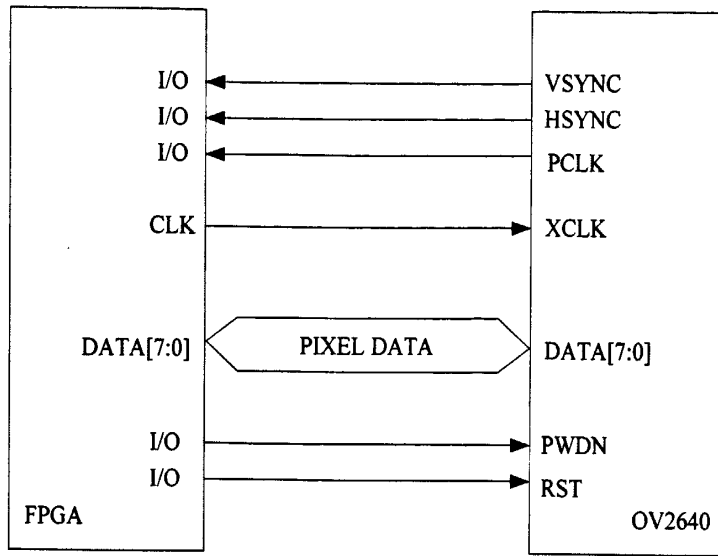


图 4-1 FPGA 与图像传感器连接关系图

#### 4.1.2 微控制器与 OV2640 接口

微控制器 C8051F340 通过 SCCB 总线来对图像传感器 OV2640 进行初始化操作。SCCB 总线是由 OmniVision 公司制定的三线制串行总线，用来控制其生产的图像传感器，但为了减少芯片引脚数目，SCCB 兼容双线制串行模式。

SCCB 总线支持主/从机模式，在具体应用时，图像传感器作为从机，由主机对其进行相关控制。一个主设备通过 SCCB 总线连接和控制至少一个从设备。三线制的 SCCB 除了提供时钟和数据外，还有一个片选信号 SCCB\_E，使其可以连接多个从设备。当然，经过修改的二线制串行总线则省略了片选信号 SCCB\_E，因此只能通过 SCCB 接口连接一个从设备<sup>[29]</sup>。

SCCB 三线制和二线制连接方式分别如图 4-2 和图 4-3 所示。

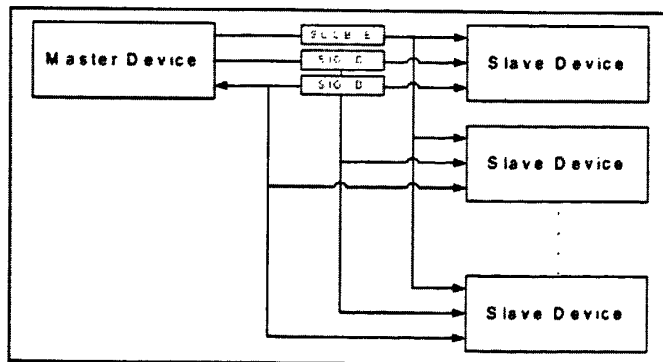


图 4-2 SCCB 三线制模式连线图

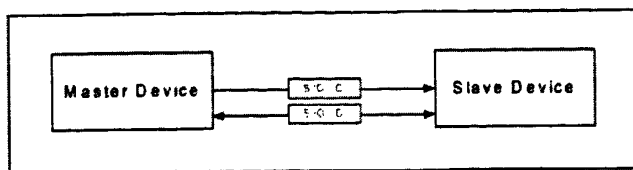


图 4-3 SCCB 双线模式连线图

SCCB\_E 作为芯片选通信号，由主设备提供，低电平有效。SCCB\_E 从高电平变为低电平表示一个传输的开始，SCCB\_E 从低电平变为高电平表示一个传输的结束。在数据传输期间，该信号维持在低电平，当 SCCB\_E 为高电平时意味着此时总线为空闲状态。

SIO\_C 为串行时钟信号，由主设备提供，在该信号控制下，串行数据逐位移入或移出。总线空闲时，主设备驱动 SIO\_C 信号为高电平，在开始传输之后，当 SIO\_C 被驱动为逻辑 0，则一个数据开始传输，在数据传输过程中 SIO\_C 的高电平状态表示一位数据已被传输。因此，数据位 SIO\_D 只能在 SIO\_C 为低电平时出现。

SIO\_D 是串行数据信号，可以由主设备或从设备来驱动。当总线空闲时，该信号可以保持悬空或者三态。高电平表示逻辑 1，低电平表示逻辑 0。

由于在本设计中用到了二线制模式，故下面针对此工作模式进行介绍。一次数据传输，由数据传输开始、数据传输和数据传输结束三个步骤构成。一次数据传输过程如图 4-4。

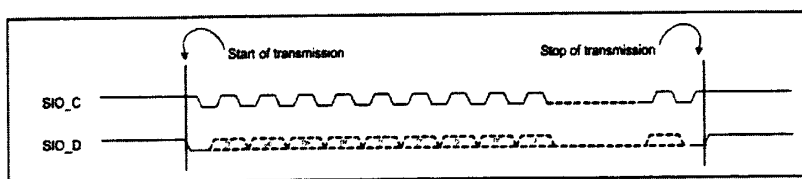


图 4-4 二线制数据传输时序图

传输开始。当总线空闲时，主设备将 SIO\_D 信号驱动为高电平。当 SIO\_D 信号由高变为低，且此时 SIO\_C 为高电平时，传输开始。传输开始时序如图 4-5 所示。读写操作总是由主设备发起，并且只在传输开始以后才进行。当主设备产生停止信号或者再一次发起传输开始信号，完整的写操作才结束；同样的，主设备产生停止信号或者再次发起传输开始信号，完整的读操作才结束。

数据传输。在传输开始信号给出以后，数据传输过程便开始，主设备在 SIO\_C

的同步下以位为单位向从设备写或读数据。

传输结束。当 SIO\_C 信号为高电平，且主设备将 SIO\_D 信号从低电平驱动至高电平时，传输结束信号便由主设备给出了。图 4-6 所示即为传输结束时序图。

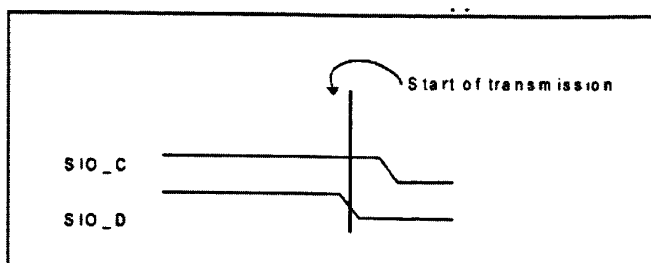


图 4-5 传输开始时序图

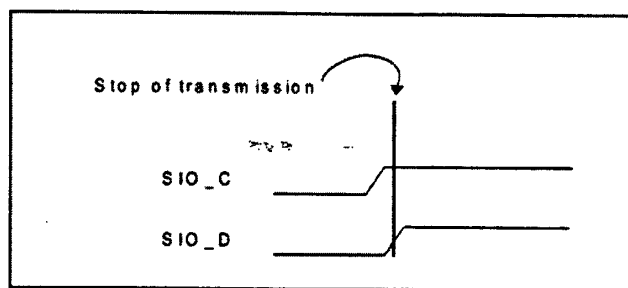


图 4-6 传输结束时序图

为满足 SCCB 总线时序，设计中采用 I/O 口时序模拟的方法来完成 SCCB 读写驱动的实现。

### 4.1.3 FPGA 与微控制器接口

FPGA 与微控制器之间存在双向数据通信，主要包括 FPGA 向微控制器传输图像数据、太阳光斑坐标信息；微控制器向 FPGA 发送配置命令和相关工作参数，用于切换太阳传感器的工作模式。

从程序设计通用性和规范性考虑，本设计中通过 FPGA 内部逻辑电路的设计将其扩展为微控制器外部数据寻址对象，即通过微控制器简单的外部寻址指令就可以实现与 FPGA 之间的双向数据通信。

对于微控制器 C8051F340 来说，其用于存储数据的 XRAM 包括两部分：片上 XRAM (4kBytes) 和片外 XRAM。特别的，在 C8051F340 器件内部存在 EMIF (External Memory Interface, 扩展存储接口)，此接口可以方便实现与外部存储器之间的数据通信。通过外部寻址指令 MOVX 及数据指针 (DPTR) 可以访问

外部数据空间。C8051F340 外部数据存储器寻址空间为 64k Bytes，即需要 16 根地址线来进行地址选择。EMIF 接口可工作在地址线复用模式和非复用模式，简单来讲，C8051F340 可以通过 8 位宽度的 P3 口和数据总线 P4 口的分时复用来实现 16 根地址线，即复用模式，另外，C8051F340 也可通过 P2 和 P3 口的组合来实现 16 根地址线，即非复用模式。为了充分利用 C8051F340 及 FPGA 的 I/O 资源，在设计中采用复用模式的寻址方式，通信的数据宽度为 8 位。

图 4-7 为 C8051F340 外部寻址时序图。其中高 8 位数据线由 P3 提供，低 8 位地址线由对数据总线 P4 的提前锁存来实现，ALE (Address Latch Enable) 为锁存使能信号。RD 和 WR 分别为读写使能信号。

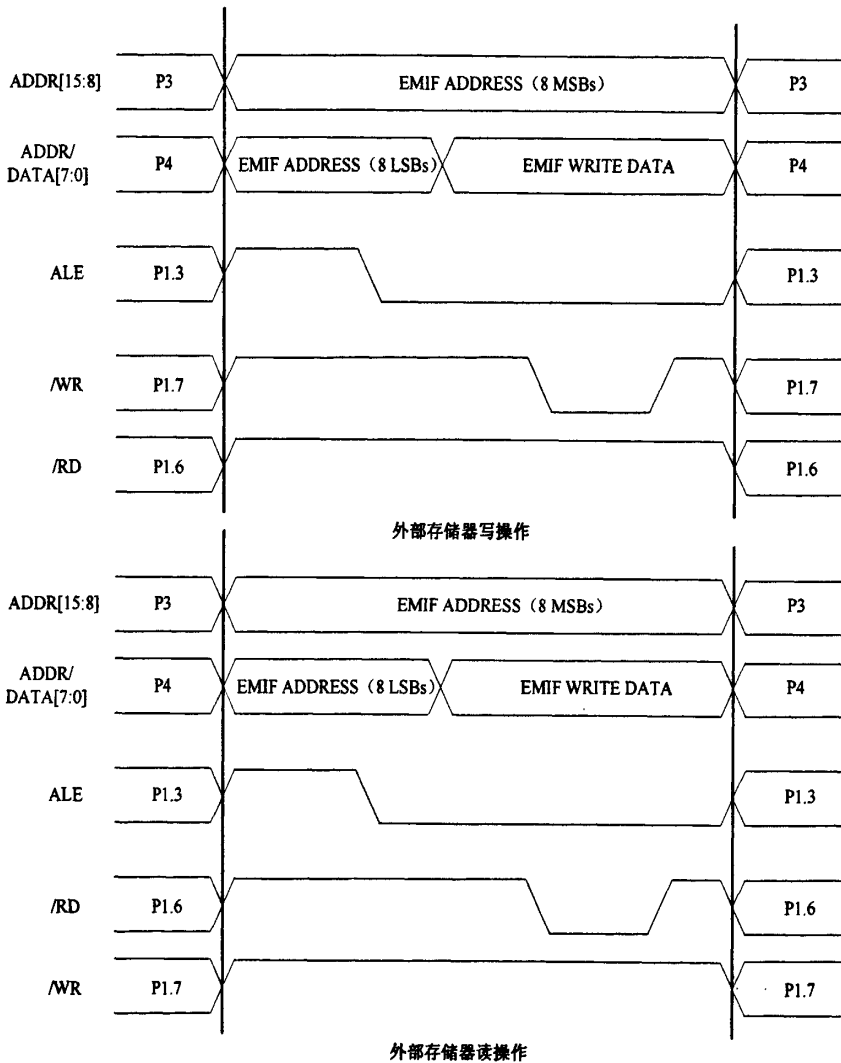


图 4-7 C8051F340 外部数据空间寻址时序图

FPGA 与 C8051F340 连接关系如图 4-8 所示，其中低 8 位地址锁存由



FPGA 内部的锁存器资源来实现, 因此 C8051F340 与其之间的接口就变得十分简洁。

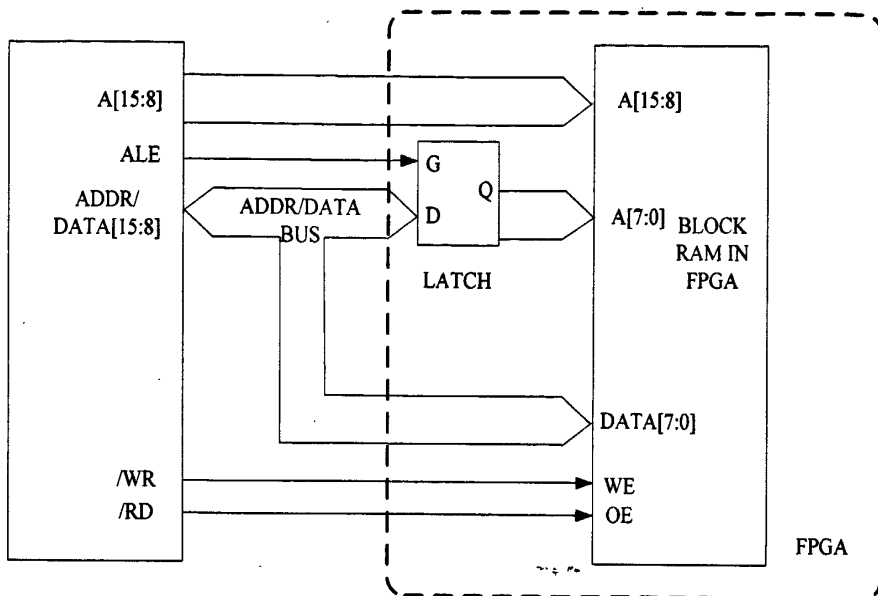


图 4-8 FPGA 与 C8051F340 连接关系图

当然 FPGA 内部的 Block RAM 资源是有限的, 设计中选用的 XC3S50AN 芯片, 其内部 Block RAM 为 54kbits, 因此对于 FPGA 来讲, 16 根地址线并不会完全使用到。事实上, 即使我们要传输图像数据, 我们也是以单行数据为传输单位的, 因此对于 800×600 的分辨率来讲, 加之考虑数据乒乓操作要求, 2kBytes 的 Block RAM 就能满足设计的要求。

在设计时, 不同通信内容是根据地址范围来划分的, 此处, 我们规定地址范围: 0x0000~0x031F 为行数据存放地址, 地址范围: 0x0320~0x032F 为光斑坐标信息存放地址, 地址范围: 0x0330~0x033F 为工作模式及运算参数存放地址。

## 4.2 FPGA 内部逻辑

### 4.2.1 图像数据采集模块

图像数据采集模块主要完成图像传感器图像数据采集功能, FPGA 根据 OV2640 提供的同步信号来实现图像数据的缓冲, 缓冲得到的数据将被传递到背景亮度提取模块和质心求解模块, 以实现相应算法。

在设计图像数据采集模块前需先理解图像传感器帧、行等同步信号的时序要求。图 4-9 描述了 SVGA 格式下 OV2640 信号的时序关系。具体表现为：帧同步信号 VSYNC 下降沿表示一帧图像数据传输开始，在 VSYNC 为低电平期间，行同步信号 HSYNC 以行为单位周期性出现，当 HSYNC 为高电平时，图像数据在像素时钟 PCLK 的上升沿出现在图像传感器数据总线上，FPGA 在像素时钟的下降沿将图像数据锁存到 Block RAM，完成一行数据的缓存。

FPGA 在以行为单位对图像数据进行缓存时，为防止与其他算法实现模块读取数据的冲突，设计时采用了对两块 Block RAM 进行切换操作的方法来解决这个问题。具体思路为：在算法实现单元向缓冲区 A 进行取数操作时，图像采集控制模块将当前采集到的图像数据存入缓冲区 B，反正亦然，以此实现缓冲区物理空间上的隔离，有效解决读写操作冲突问题。

根据图 4-9 和图 4-10 时序关系，在具体实现该模块功能时采用如下设计方法：图像数据采集模块检测到 VSYNC 下降沿时，将缓冲区标志初始化为 1，在 VSYNC 为低电平期间，采集模块在每个 HSYNC 的下降沿将缓冲区标志取反来进行缓冲区的切换操作，当缓冲区标志为 1 时，缓冲区 A 用作当前行图像数据的缓冲区，后续算法模块读取缓冲区 B 数据；反之，当缓冲区标志为 0 时，缓冲区 B 用作当前行图像数据的缓冲区，后续算法模块读取缓冲区 A 数据。Block RAM 的地址则由 11bit 长的计数器来实现，当检测到 VSYNC 下降沿时，地址计数器被清零，此后在每个像素点时钟的上升沿，地址计数器就加 1，需要注意的是由于采用的是 YUV422 格式，每个像素点（2 Bytes）对应两个像素时钟，因此实际地址计数器值是像素点个数的两倍，而我们关心的只是 Y 分量（1 Byte），故在最后将地址计数器作为 Block RAM 地址值时只取其[11:1]位，即我们只储存 Y 分量，丢弃 UV 分量。

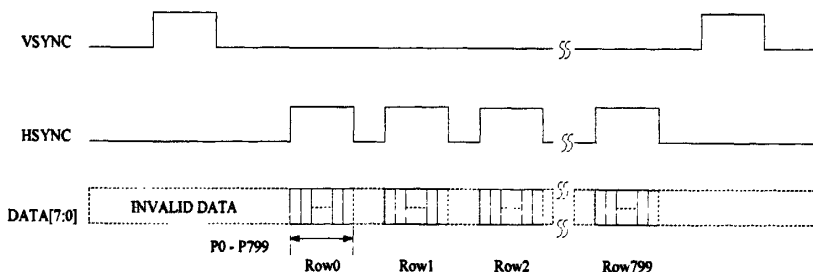


图 4-9 SVGA 帧时序关系图

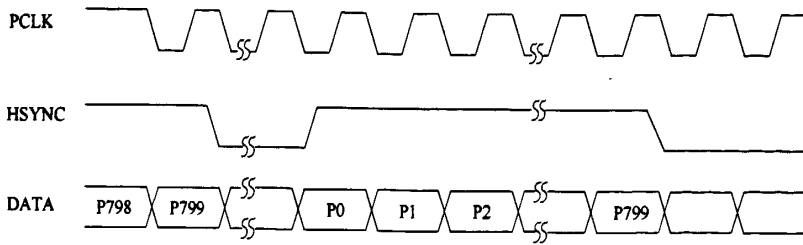


图 4-10 像素时钟与行同步信号时序关系图

设计中用到了 XILINX 公司的 IP 核工具来生成用于图像数据缓存的双口 RAM，该双口 RAM 由 FPGA 内部的 Block RAM 资源实现，其接口如图 4-11 所示。读、写操作分别通过端口 A 和端口 B 来完成。

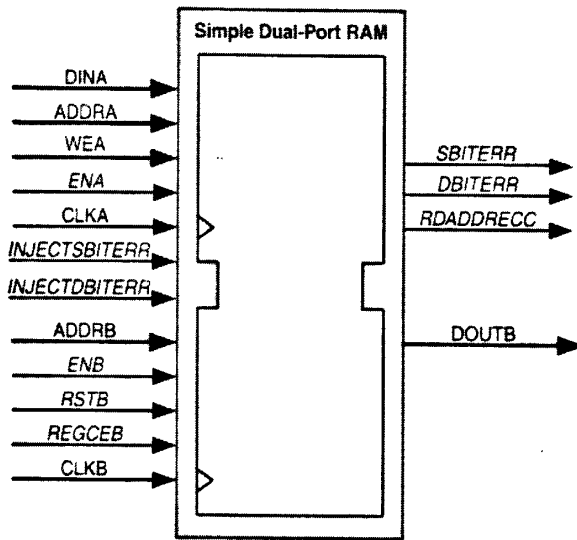


图 4-11 双口 RAM 示意图

图 4-11 中各信号功能在表 4-1 中列出。

表 4-1 双口 RAM 信号列表<sup>[30]</sup>

名称	方向	描述
DINA	输入	通过端口 A 写入 RAM 的数据端口
ADDRA	输入	端口 A 写操作地址信息
WEA	输入	端口 A 写操作使能
ENA	输入	端口 A 时钟使能 (取消使能将禁止端口 A 的一切操作)
CLKA	输入	端口 A 写操作同步时钟
DOUTB	输出	通过端口 B 读取 RAM 的数据端口

ADDRB	输入	端口 B 读操作地址信息
REGCEB	输入	端口 B 寄存器输出使能
ENB	输入	端口 B 时钟使能 (取消使能将禁止端口 B 的一切操作)
CLKB	输入	端口 B 读操作同步时钟

注: 图 4-11 中 SBITERR、DBITERR、INJECTSBITERR、INJECTDBITERR 和 RDADDRESSC 这几个信号在本设计中未使用。

对双口 RAM 的写、读操作分别由 FPGA 和微控制器来实现, 其中双口 RAM 的 CLKA 信号由像素时钟 PCLK 提供, 即在每个像素时钟下降沿将图像数据写入双口 RAM; ENA、REGCEB 信号一直置为使能状态; WEA 信号根据前面提到的缓冲区切换标志来进行置位, 当缓冲区切换标志为 1 时, 作为缓冲区 A 的双口 RAM, 其 WEA 将置位使能, 反之则为取消使能; ADDRA 和 ADDR B 信号由地址计数器产生; DINA 信号与图像传感器 8 位数据总线相连; CLKB 和 ENB 信号由 FPGA 和微控制器来提供, 当只传输图像数据给上位机时, CLKB 和 ENB 由微控制器提供, 当 FPGA 对缓冲的图像数据进行相关运算时, 其将提供这两个信号。

图 4-12 给出了对双口 RAM 进行读写操作的仿真图。

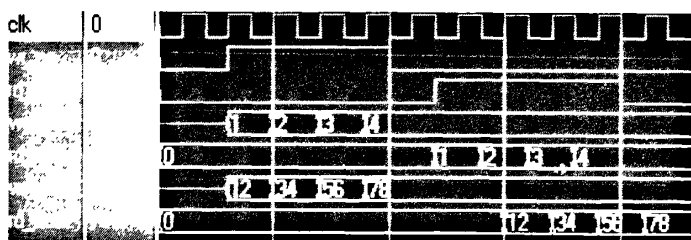


图 4-12 双口 RAM 读写仿真结果

由仿真图可知, FPGA 对双口 RAM 的操作时序符合设计要求。

为了进一步验证 FPGA 对图像数据的缓冲效果, 我们用微控制器读取 FPGA 双口 RAM 中存放的图像数据, 并以行为单位通过控制器自带的 USB 接口传至 PC 端上位机, 由于 MCU 与 FPGA 之间接口速度的影响, 在此操作时必须降低图像传感器帧频率。图 4-13 为 PC 端获取到的原始图像数据 (测试阶段用普通镜头代替全景环镜头, 图像只包含 Y 分量), 说明 FPGA 对图像缓冲的功能正常。



图 4-13 采集到的图像数据

#### 4.2.2 背景亮度提取模块

用质心法提取太阳光斑质心时，需将采集得到的图像数据进行二值化转换，在对像素点二值化时要用到亮度阈值作为判断依据，即大于亮度阈值的点标记为 1，否则标记为 0。

由于外界光强会随着时间、角度发生变化，如果采用固定的亮度阈值则不能适应环境亮度的变化。要实现亮度阈值信息的可调节，有两种方案可供完成该功能：一种方案，FPGA 逻辑模块提取一帧图像的亮度信息，作为亮度阈值；另一种方案，微控制器通过扫描方式，向 FPGA 发送亮度阈值信息，FPGA 返回过阈值像素点个数，作为微控制器调节亮度阈值的判断依据，当其扫描到一个合适亮度阈值时（过阈值像素点个数处于一定区间内），就将当前发送的亮度阈值作为质心求解模块二值化判断依据。值得注意的是，第二种方案还要求 FPGA 在正常工作时向微控制器时时传输过阈值点个数，当其判断到过阈值点个数超出设定的区间时又将重新调整亮度阈值这一参数，大致调整趋势为当点数过少时，降低亮度阈值，点数过多时，提高亮度阈值。综合比较方案一和方案二，我们可以发现方案一比较简单，工作方式单一，且实时性好，但其灵活性和阈值判断效果稍差；方案二较为复杂，但灵活性和判读效果均要好于方案一，由于存在阶段性扫描的问题，故其在实时性上劣于方案一。

考虑到上述方案一和二都有各自的优缺点，本设计中保留了这两种方案来进行亮度阈值确定，上位机可根据实际应用需求来灵活选择这两种方案。一般来讲，

在实时性要求较高,且对精度要求较低的情况下可选用方案一,当实时性要求一般,精度要求较高时,可考虑选用方案二。这一节中先介绍方案一的具体实现方法,方案二将在第5章中详细介绍。

方案一将通过全景环形光学镜头到达 CMOS 靶面中心的所有光能量进行累加,然后再对一帧 CMOS 图像求平均值,得出背景平均光能量灰度级,这样就可以确定系统的阈值。此方案可以根据背景光的能量来唯一确定当前帧的平均灰度级,并将其作为下一帧质心求解模块的阈值,所以它可以根据背景光的能量来改变系统的阈值,实现阈值自动调节功能。

如果背景光强太大,CMOS 像元会进入饱和状态,影响质心求解算法的质量,故在第3章光学系统设计中提到了滤光膜,其可以衰弱进入 CMOS 靶面的光线强度,因此可以保证 CMOS 像元不处于饱和状态。此外,加入滤光膜可以保证一定的信噪比,从而顺利地进行光斑和背景的分离。

背景亮度信息的提取算法比较简单,如式 4-1 所示。其中  $G_{th}$  为一帧图像的平均灰度级,  $G_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列像素点的灰度值,  $N$  为行数,  $M$  为列数。

$$G_{th} = \frac{\sum_{i=1}^{N=600} \sum_{j=1}^{M=800} G_{ij}}{800 \times 600} \quad (4-1)$$

用 FPGA 逻辑实现这一算法时,如果完全从公式(4-1)出发,按照估算,一帧图像的亮度信息之和最大可达  $800 \cdot 600 \cdot 255 = 0x74BAD00$ ,需要 28bits 位宽的加法器来实现这一算法,比较消耗资源,而采用分子逐次减去分母的做法,可以减少加法器位宽,并能避免使用除法器。具体思路为:每个新像素点数据出现时,先判断分子是否大于分母,若分子大于分母,则分子减去分母,另一计数器加 1,反之,则分子加上新像素点灰度级。当一帧图像结束后,计数器中存放的即为背景亮度信息值。图 4-14 为 FPGA 内部背景亮度信息提取部分结构图。

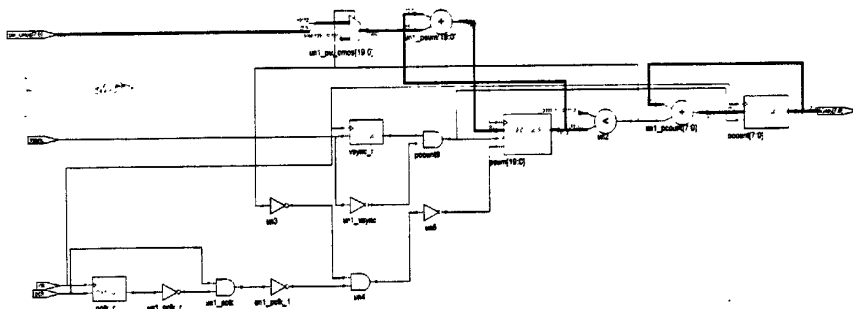


图 4-14 自动阈值提取模块 RTL

由综合结果可知,在这个模块实现时用到了两个加法器,并未使用到除法器。

图 4-15 是背景亮度提取模块的仿真图,在本次仿真中选用的测试图片经 MATLAB 计算得到的亮度信息和仿真结果一致,说明该功能模块设计正确。

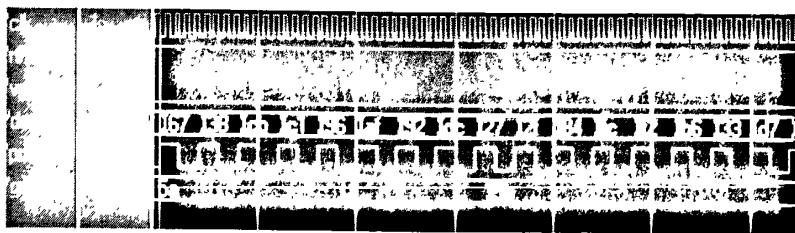


图 4-15 背景亮度提取仿真结果

### 4.2.3 质心求解模块

质心求解模块主要实现像平面上太阳光斑中心坐标的计算,该模块是整个系统中较为关键的部分,因为后续质心坐标和太阳角度之间的转换会直接用到该模块计算得到的信息。

首先来分析基于 CMOS 图像传感器进行光斑质心算法实现的相关理论依据。在用 CMOS 图像传感器确定光斑位置时,位置坐标以像素为单位,此时,光斑并不是一个理想的几何点,其光强近似服从高斯分布。采用质心算法,可以实现光斑所在位置的精确提取。

根据傅里叶分析得出,高斯分布的光斑位置检测具有较高的精度,其中一种截断高斯分布光斑的数学模型如式(4-2)所示:

$$f(x,y) = \begin{cases} F_{\max} \cdot \frac{\exp\left[-\left(\frac{r}{R_0}\right)^2\right] - \exp\left[-\left(\frac{R}{R_0}\right)^2\right]}{1 - \exp\left[-\left(\frac{R}{R_0}\right)^2\right]} & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases} \quad (4-2)$$

由上式可知,函数的最大值为  $F_{\max}$ ,该分段函数以  $R$  为边界,当像素点落在半径  $R$  以外时,其亮度为 0。它相当于定义了一个半径为  $R$  且在边界上连续的光斑函数,而式中  $R_0$  和  $R$  的比值  $R/R_0$  确定了光斑函数分布的形状<sup>[31]</sup>。

更复杂的模型,第  $i$  行第  $j$  列像素上感受到的光强可以描述为:

$$I_y = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} f(x, y) dA + n(i, j) \quad (4-3)$$

其中,  $A_s$  为像平面大小,  $f(x, y)$  为光斑光强分布,  $n(i, j)$  为系统噪声分布。

图像传感器内部模数转换器在对亮度信息进行转换时, 会存在  $\pm 1$  的量化误差, 量化结果为  $G_{ij}$ , 我们设定一个阈值  $T$  来对图像传感器捕获的图像进行边界划分。经边界划分之后, 理论上图像仅在  $i = i_0, i_f$  及  $j = j_0, j_f$  上将大于阈值  $T$ 。

因此, 该光斑的质心可以定义为<sup>[31]</sup>:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} i(G_{ij} - T)}{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} (G_{ij} - T)} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} j(G_{ij} - T)}{\sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} (G_{ij} - T)} \quad (4-4)$$

在用 FPGA 实现光斑质心计算时, 从式 (4-4) 的质心定义出发我们发现, 无论是  $x$  还是  $y$  坐标的求解, 其分母将会是一个比较大的值, 特别当检测光斑较大且落于阈值范围内的光斑灰度值也较大时, 分母作为乘累加结构, 将会是一个非常大的数值, 另外, 当图像分辨率增大时, 这种效果变得更为明显。在设计时如果没有给乘累加结构分配足够的数据宽度, 势必会导致分母的溢出。为了解决这个问题, 下面给出了几个可以考虑的解决方案:

1. 增大 FPGA 内部乘累加结构中加法器的数据宽度。考虑极限情况时加法器所需的宽度: 整帧图像均过阈值, 此时加法器最大和为:

$$sum = 255 \sum_{i_0}^{i_f} \sum_{j_0}^{j_f} i, \text{ 当图像分辨率为 } 800 \times 600 \text{ 时, } sum = B71B0000H, \text{ 由此}$$

可见该方案会增加加法器结构复杂程度, 增加 FPGA 逻辑资源开销。

2. 提出过阈值像素点有效个数概念。即当大于阈值点的像素点个数落于一个区间范围内时才认为此次光斑检测有效, 这也意味着被检测物体的光斑有效面积必须落于一个范围内。该方案具有一定局限性, 适应环境的能力较差。
3. 将过阈值像素点的灰度值归一为 1, 即将质心计算公式中的  $(G_{ij} - T)$  用 1 来代替。该方法在理论上会影响一定测量精度, 但是经实验验证, 该方法对精度的影响相比其他噪声的干扰可以忽略。

经上述三种解决方案分析, 本设计中采用方案三来简化质心求解算法。经简



化的质心算法可以表示为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i_0}^{i_r} \sum_{j_0}^{j_r} i}{N_{th}} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i_0}^{i_r} \sum_{j_0}^{j_r} j}{N_{th}} \quad (4-5)$$

其中  $N_{th}$  为检测到的过阈值像素点个数。FPGA 在实现质心检测算法时变得十分简单。用一个 8 位的比较器对每个像素点灰度值与亮度阈值进行比较, 当检测到该像素点灰度值大于阈值时, 由累加器 1 和累加器 2 分别对当前点行和列值进行累加, 同时计数器对过阈值点进行一次计数。设计中选择的累加器 1 和 2 及计数器的宽度均为 32 位, 可以有效防止数据溢出。同时考虑到系统中微控制器擅于高精度运算, 因此 FPGA 并未计算出最后结果, 只是把 32 位的分母和分子值通过 FPGA 与微控制之间的数据接口传给微控制器, 让其辅助完成质心坐标的求解, 该方法可以有效提高坐标计算精度, 免去了 FPGA 实现高精度小数除法运算的麻烦。

表 4-2 是 FPGA 和微控制器与 MATLAB 对相同图像质心求解结果的比较, 可见本设计采用的质心求解算法工作正常。

表 4-2 本设计质心求解与 MATLAB 求解结果比较

组号	本设计计算结果	MATLAB 计算结果	误差
1	156.432, 108.811	156.432, 108.811	0
2	156.398, 108.791	156.398, 108.791	0
3	156.342, 108.689	156.342, 108.689	0
4	156.377, 108.707	156.377, 108.707	0
5	156.304, 108.681	156.304, 108.681	0

### 4.3 本章小结

本章主要介绍了太阳敏感器硬件实现的方案设计, 包括芯片之间硬件接口及 FPGA 内部逻辑实现。硬件接口包括 FPGA 与图像传感器 OV2640 间接口、微控制器与 OV2640 接口和 FPGA 与微控制器接口; FPGA 内部逻辑实现三个功能模块: 图像数据采集模块、背景亮度提取模块以及质心求解模块。

## 5. 太阳传感器软件设计实现

本设计中的太阳传感器软件运行平台是微控制器，采用的是 C51 编程语言，开发环境为 silicon labs 的集成开发环境，选用 Keil 公司的 C51 编译器。软件采用模块化划分的设计思路，便于软件再开发和升级。根据功能模块的划分，软件主要可分为四部分功能模块：图像传感器驱动程序模块、通信程序模块、亮度阈值扫描程序模块以及坐标-太阳位置转换程序模块。微控制器主程序流程图如图 5-1 所示。

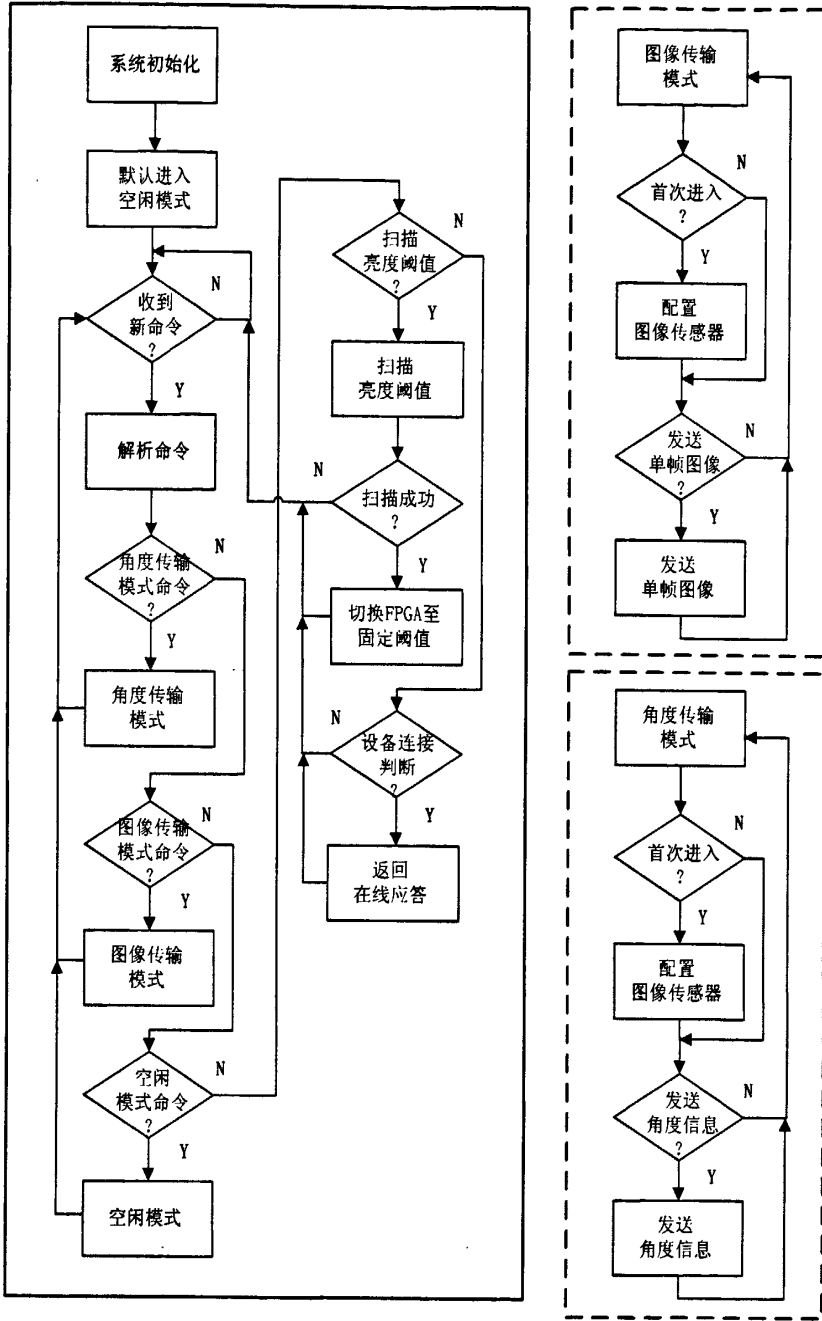


图 5-1 微控制器主程序流程图

### 5.1 OV2640 驱动程序

根据第 4 章中的介绍，微控制器 C8051F340 与图像传感器 OV2640 之间为 SCCB 总线相连，驱动程序是微控制器通过 SCCB 总线向 OV2640 内部工作寄存器配置相关信息来实现的。

C8051F340 内部没有 SCCB 接口, 因此只能通过 GPIO 模拟 SCCB 总线时序的方法实现基本的 SCCB 读写操作。设计中选用 C8051F340 的 P1.0 和 P1.1 口来分别实现 SCCB 总线中的 SCL 和 SDL。C8051F340 与普通的 51 单片机不同, 其 GPIO 比较特殊, 可以通过控制器内部寄存器的配置来实现不同工作模式。如每个端口引脚都可以配置为模拟输入或数字 I/O, 被选择作为数字 I/O 的引脚还可以被配置为推挽或漏极开路输出。

根据 SCCB 总线的电气特性要求, 微控制器内部初始化程序将其用来实现 SCL 和 SDL 的 GPIO 端口配置为数字 I/O, 并禁止“弱上拉”, 硬件设计时在 SCL 和 SDL 引脚加上拉电阻。程序设计时只需用简单的  $P1^0=1$  和  $P1^0=0$  语句来分别实现 SCL 引脚的高低电平。

根据第 4 章介绍的 SCCB 总线读写时序要求, 可以用 C 语言模拟出单字节读写函数: `SCCB_Byte_Read` 和 `SCCB_Byte_Write`。下面再介绍一下 OV2640 寄存器访问的方法。向 OV2640 寄存器写数据时, 必须先用 SCCB 写函数提供 OV2640 的写操作设备地址 0x60, 紧接着提供要访问寄存器地址, 最后写入数据; 同样, 向寄存器读数据时, 也要先用 SCCB 写函数提供 OV2640 的读操作设备地址 0x61, 再提供要读取寄存器地址, 最后由微控制器提供串行时钟将寄存器内部的数据读出, 可见其操作流程与 I2C 器件类似。

实现 OV2640 寄存器读写函数之后, 驱动程序的编写可以通过对这两个基本操作的组合来实现。

编写 OV2640 驱动程序最困难的是如何理解其内部每一个寄存器的含义。与大多数图像传感器生产厂家一样, OmniVision 公司对其内部寄存器的配置有很多未作说明, 这主要是处于产品保密方面的考虑。因此在对 OV2640 进行驱动编写前, 需要向 OmniVision 公司的技术支持索取一份符合自己使用要求的配置表, 而分辨率、帧频率等常见的设置信息, 可以通过公开的芯片资料来获取, 芯片资料上对这些寄存器都有较为详细的说明。

本设计中实现的驱动程序主要针对公开的寄存器进行配置, 与其他应用场合不同, 作为太阳传感器的光探测器件, 这里我们编写了较为简易的驱动程序, 主要包括: 通用初始化、帧频率设置、分辨率设置、曝光时间设置、输出格式设置和白平衡控制, 驱动程序功能框图如图 5-2 所示。

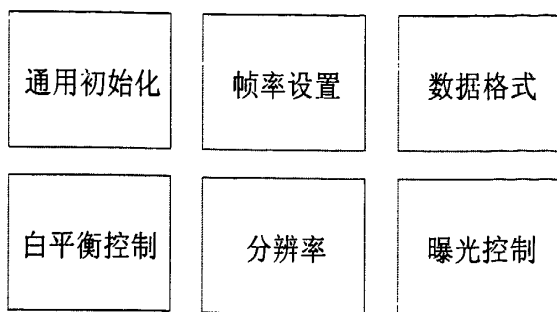


图 5-2 驱动程序功能框图

程序对 OV2640 的配置主要集中在切换太阳敏感器工作模式时。当将太阳敏感器切换至正常工作模式时，即传输太阳角度信息，此时可以提高图像传感器帧频率，并将其分辨率设置为  $800 \times 600$ ，输出数据格式为 YUV422，因为 FPGA 内部高速工作时钟可以完全保证图像传感器实时信息检测。而在将太阳敏感器切换至图像传输模式时，必须降低图像传感器帧率，将输出格式设置为 JPEG 压缩图像，这是因为微控制器在向上位机传输图像数据时其带宽受限，微控制器程序可通过接受上位机的指令来设置不同图像分辨率，以满足不同时刻的应用需求。另外，图像传感器传感范围内，太阳目标只占很小一部分，加之滤光膜的存在，使得所采集到的图像大部分为黑色区域，为了避免 OV2640 自动曝光功能降低帧频率和增大系统功耗，程序在大部分情况下将关闭传感器的自动曝光功能。

## 5.2 通信程序

本节所涉及的通信程序主要包括两个方面，一方面是微控制器与 FPGA 之间的通信，另一方面是微控制器与上位机之间的通信。前者通信的主要内容是图像数据与运算相关参数，FPGA 向微控制器传输图像数据，反之，微控制器则向 FPGA 传输其运算所需的相关参数；后者通信的内容包括上位机向微控制器发送命令，控制其工作状态的切换等操作，微控制器则根据上位机的指令返回太阳敏感器系统的一些参数，包括太阳角度信息、系统工作状态等信息。下面首先介绍微控制器与 FPGA 之间通信程序的设计。

### 5.2.1 微控制器与 FPGA 通信程序

如 4.1.3 节所介绍，本设计将微控制器与 FPGA 之间的通信接口设计为微控

制器数据接口，其接口时序满足其 XRAM 寻址时序要求，该部分时序主要由 FPGA 内部数字逻辑电路完成。设计中微控制器与 FPGA 通信内容是通过通信地址来划分的，地址范围：0x0000~0x031F 为行数据存放地址，地址范围：0x0320~0x032F 为光斑坐标信息存放地址，地址范围：0x0330~0x033F 为工作模式及运算参数存放地址。通信是由微控制器发起的。

在微控制器与 FPGA 通信的时候，必须存在一个同步信号，特别是图像数据和角度等信息的传递，是以一帧图像周期作为基本通信周期的。对于微控制器来讲，其必须在合适的时候向 FPGA 读取数据，以保证所取得的数据正确有效。考虑到该问题的存在，设计中主要运用如下方法来实现两者间通信的同步。

在 4.2.1 节图像数据采集模块中，给出了 SVGA 帧时序关系图，由图我们可以发现，当行同步信息 VSYNC 由高变低之后到行同步信号 HSYNC 处于低电平的这一段时间内，即通常所说的消影期，FPGA 不进行图像数据运算，利用这一段时间上的空隙，微控制器可以向 FPGA 读取上一帧图像的光斑坐标等信息。我们的做法是让 FPGA 在检测到 VSYNC 信号由高变低的跳变后，给出一个新一帧图像开始信号 Frame\_Start，该信号通过 FPGA 内部走线连接到其 I/O，该 I/O 又与微控制器的外部中断引脚相连。当 FPGA 发出该帧起始信号时，微控制器便进入外部中断服务程序，在中断服务程序中将程序中的帧检测标志置为有效，在微控制器跳出该外部中断，便立刻向 FPGA 读取角度等信息。

上面所介绍的是角度等信息的读取，因为涉及的数据量较小，相对比较简单。当然，微控制器除了向 FPGA 获取角度信息外，在图像传输模式下，还要向其获取图像数据。在获取图像数据的时候，FPGA 除了要提供帧起始信号外，还要提供行起始信号。具体做法是，如 4.2.1 节图像数据采集模块中给出的 SVGA 帧时序关系图所示，FPGA 在行同步信号由高变低，即每一行图像数据结束的时候，给出行起始信号 Column\_Start，让微控制器读取刚刚缓存在 BLOCK RAM 内部的一行图像数据。此处，微控制器对 Frame\_Start 和 Column\_Start 信号的获取方式有所不同，前者 Frame\_Start 信号的获取是通过外部中断的方式，而此处对 Column\_Start 信号的获取则是用查询的方式来进行的。微控制器对一帧图像数据接收的过程便可以归纳为：首先，FPGA 给出帧起始信号，使微控制器进入外部中断服务程序，其对帧检测标志置为有效后便退出中断服务程序，转到主程序接

收第一行图像数据,当微控制器检测到 Column\_Start 信号为有效时,便用 XRAM 寻址方式依次获取一行中的每一个像素点数据,经过循环操作,微控制器便可获得一帧完整的图像数据。由于微控制器采用了查询的方式来检查 Column\_Start 信号,FPGA 为了满足与低速接口之间通信,其一直将 Column\_Start 信号保持有效,直到检测到微控制器的第一个读操作为止。

### 5.2.2 微控制器与上位机通信程序

微控制器与上位机之间通信程序分成两个部分,一部分为 USB 通信程序,作为传输图像信息的快速通道,用于传感器标定和安装位置的校准;另一部分为串口通信程序,是太阳敏感器正式工作时的通信接口,用于上位机与其之间命令和角度等信息的交流。

#### 1) USB 通信程序设计。

微控制器端 USB 设备驱动程序的开发是基于 Silicon Laboratories 公司提供的开发包实现的。与传统复杂的 USB 设备驱动程序编写相比,Silicon Laboratories 公司提供的 USBXpress 开发包大大简化了 USB 通信程序的开发。USBXpress 开发包涵盖了主机端和设备端的所有驱动函数功能,支持 C8051F34X 设备的 USB 通信。USBXpress 开发包中包含主机端的设备驱动、主机端设备驱动安装程序、主机端的动态链接库和设备端的函数库文件。

设备端的函数库文件提供了支持 C8051F34X 设备 USB 通信的 API 函数,这些函数可以在 Keil uVersion3 编译环境下被编译通过。

设备端 USB 数据传输过程需要符合一定操作规范。在进行数据传输之前,须得先后调用函数对 USB 时钟和 USB 接口初始化。

完成 USB 时钟使能和初始化工作后,设备端通过调用相关 API 就可以实现与主机端通信了。而设备端与主机端的通信一般是通过 USB 中断服务函数来实现的,一旦有 USB 中断事件到来,设备端便进入中断服务程序,在中断服务程序中首先调用中断标识获取函数来获取中断标识,即判断该中断是由哪一 USB 事件产生的。中断标识获取后,程序便可以根据该标识来完成相应的处理。

设备端,即微控制器,在向 FPGA 获取数据并进行数据转换后,将调用写操作函数向上位机发送此数据。值得注意的是,本文中所涉及到的上位机会因太阳

传感器使用阶段不同而发生改变：当太阳传感器用于标定和安装位置调整时，上位机就是第 6 章中用于参数标定的 PC 机；而当其在标定完成后用于正常太阳角度传感时，上位机则指的是姿态控制系统中的处理器。前者与上位机的通信接口为高速的 USB，后者与上位机的通信接口则为速率较低的 UART 接口。

太阳传感器与姿态控制系统上位机之间的通信方式为 UART 通信，速率相对较低，其通信速率为 9600bit/s。但是由于太阳传感器主要用途是太阳角度信息的传感，因此通信协议的设计会比图像传输模式协议的设计更为复杂。

微控制器与上位机之间存在如下几种信息交互：

- 控制指令。该类控制指令主要用于切换太阳传感器工作状态，例如：图像传感器配置状态、图像传输状态和太阳角度信息传输状态等。
- 配置状态。太阳传感器根据上位机的配置要求对 CMOS 图像传感器进行配置。
- 图像传输状态。主要用于标定时图像数据的传输。
- 太阳角度信息传输状态。该状态为传感器正常工作时缺省状态。

分析以上四种信息交互，可将通信划分为两类。一类是上位机向传感器发送控制指令以及传感器对此指令进行反馈，此类通信信息量较少，因此在本设计中将此通信的数据设置为固定长度。另一类是图像数据和太阳角度信息的通信，数据量较大，因此单独设置其通信的数据格式。两类数据通信格式描述分别见表 5-1 和表 5-2。

表 5-1 控制指令和反馈通信数据格式

上位机控制指令				
帧头 (BYTE1)	命令字(BYTE2)	BYTE3-BYTE11	帧尾 BYTE12	描述
0xFE	M_F340_ALIVE(0xAA)	填充 0x00	0xDD	判断传感器是否在线
	M_CMOS_S(0x7A)	图像分辨率、帧率等参数		切换传感器到图像传感器配置状态，并附带配置参数
	M_CMOS_E(0x7E)	填充 0x00		结束图像传感器配置
	M_IMG_S(0x5A)	填充 0x00		切换传感器到图像传输状态
	M_IMG_E(0x5E)	填充 0x00		结束传感器图像传输



	M_IMG_T(0x5C)	填充 0x00		一幅图像读取命令
	M_INFO_S(0xEA)	填充 0x00		切换传感器到角度信息传输状态
	M_INFO_E(0xEE)	填充 0x00		结束传感器角度传输
	M_INFO_T(0xEC)	填充 0x00		一组角度信息读取命令
反馈信息格式				
帧头 (BYTE1)	命令字(BYTE2)	BYTE3-BYTE11	帧尾 BYTE12	描述
0xFE	S_F340_ALIVE(0xAB)	填充 0x00	0xDD	表明传感器在线
	S_CMOS_S(0x7B)	填充 0x00		表明收到 M_CMOS_S 命令并执行成功
	S_CMOS_E(0x7F)	填充 0x00		表明收到 M_CMOS_E 命令并执行成功
	S_IMG_S(0x5B)	填充 0x00		表明收到 M_IMG_S 命令并执行成功
	S_IMG_E(0x5F)	填充 0x00		表明收到 M_IMG_E 命令并执行成功
	S_IMG_T(0x5D)	填充 0x00		表明收到 M_IMG_T 命令, 接下来将发送图像数据 <sup>1</sup>
	S_INFO_S(0xEB)	填充 0x00		表明收到 M_INFO_S 命令并执行成功
	S_INFO_E(0xEF)	填充 0x00		表明收到 M_INFO_E 命令并执行成功
	S_INFO_T(0xED)	填充 0x00		表明收到 M_INFO_T 命令, 接下来将发送角度信息 <sup>2</sup>

注 1: S\_IMG\_T 反馈信息之后将发送图像数据帧, 数据帧格式在下表 5-2 作描述。

注 2: S\_INFO\_T 反馈信息之后将发送角度数据帧, 数据帧格式在下表 5-2 作描述。

表 5-2 数据帧格式

图像数据帧			
帧头 BYTE1~2	分辨率 BYTE3	图像格式 BYTE4~ N-2	帧尾 BYTE N-1~ N
0x8D9E	图像宽 BYTE3[7:4] BYTE3[7]:800 BYTE3[6]:320 BYTE3[5]:160 BYTE3[4]:80	BYTE4[7]:YUV BYTE4[6]:YCbCr4:2:2 BYTE4[5]:RGB565 BYTE4[4]:RGB555 BYTE4[3]:RGB444	0xEDED

	图像高 BYTE3[3:0] BYTE3[3]:600 BYTE3[2]:240 BYTE3[1]:120 BYTE3[0]:60 缺省:320×240	BYTE4[2]:GRB4:2:2 BYTE4[1]:× BYTE4[0]:× 缺省:YUV	
角度数据帧			
帧头 BYTE1~2	角度 1 BYTE3~BYTE 6	角度 2 BYTE7~BYTE1 0	过阈值点数 BYTE11~12
0x8D9E	4bytes 组成 float 数据类型	4bytes 组成 float 数据类型	[0,65535]
			平均亮度 BYTE13
			0x8D9E
			帧尾 BYTE14~15
			0x8D9E

微控制器程序在上位机的控制下进行程序运行状态的切换。各个程序状态之间切换的示意图如图 5-3 所示。

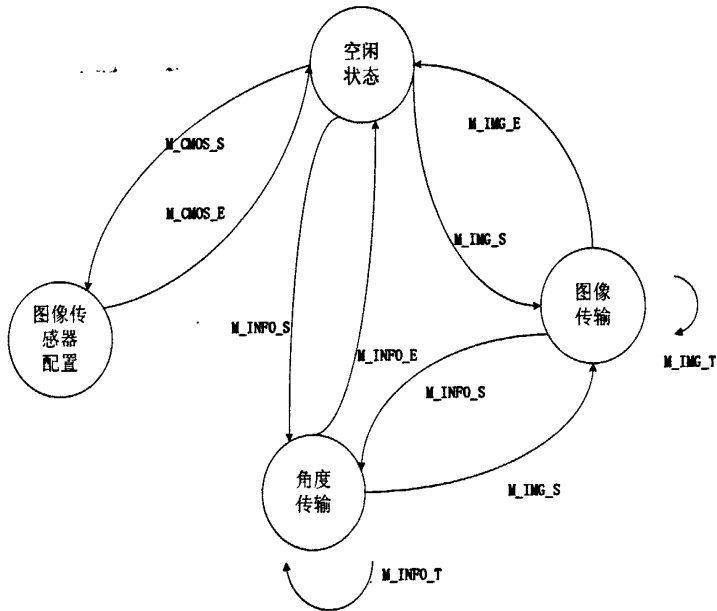


图 5-3 微控制器程序状态切换示意图

### 5.3 亮度阈值扫描程序

为实现像平面上所成太阳光斑中心的检测，首先得确定一个亮度阈值作为图像二值化判断依据。如 4.2.2 节所述，本设计中将采用两种方法来完成亮度阈值的确定。第一种方法已经在 4.2.2 节中作了详细说明，本小节将着重介绍第二种方法，即微控制器扫描亮度阈值方法。此方法具有精度高的优点，但是相对于方法一，其扫描的过程要花费相对较长时间。

亮度阈值扫描程序设计思路简单，其扫描过程如图 5-4 所示：首先确定一个有效亮度阈值区间，即扫描程序在进行阈值扫描的时候，其阈值必须处于这个有效亮度区间内。然后确定一个过阈值点个数有效区间，这个区间规定检测到的过阈值点个数必须处于这个范围之内。下一步，扫描程序从有效亮度阈值区间的最小值开始扫描，在扫描过程中对符合过阈值点个数区间的阈值进行记录，在扫描完成后，取这些符合条件的阈值的平均值作为最终阈值参数。最后，微控制器将这个阈值参数通过其与 FPGA 之间的通信接口配置到 FPGA 内部，同时将 FPGA 的自动阈值判断模块关闭，此后，FPGA 便利用这个阈值参数作为太阳质心检测的判断依据。当然，在每次微控制器向 FPGA 获取角度数据的时候，会附带获取由 FPGA 计算得到的过阈值像素点个数信息，因此，微控制器可以根据这个数据来作为是否要进行新一轮扫描的依据。

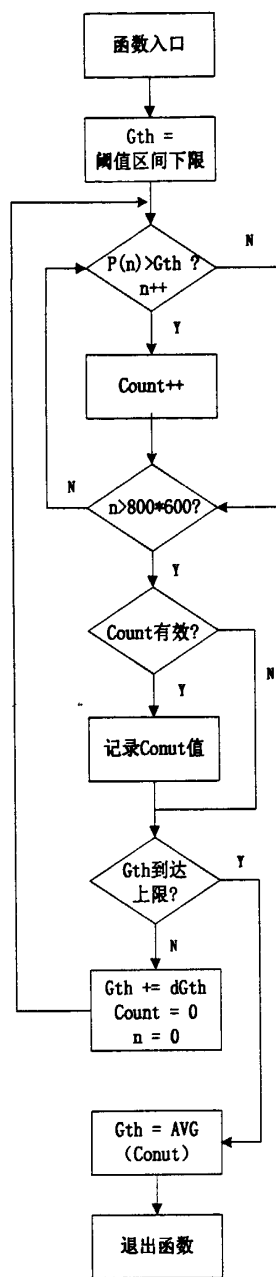


图 5-4 亮度阈值扫描程序流程图

亮度有效阈值区间和过阈值点有效个数区间可以一起确定，本设计中采用实验的方法来确定。对标准太阳光斑照片进行不同阈值下二值化处理，观察二值化效果。区间的下限应保证二值化之后能观察到圆形的太阳光斑，若下限取值太小，会使噪声的干扰影响质心求解精度；区间的上限应使得过阈值点个数在一定范围内，如果上限取值太大，则减少过阈值点个数，降低测量精度。经过具体实验和分析，本设计中采用的有效亮度阈值范围为[30,200]，此阈值区间对应的过阈值点数区间为[100,500]，为了增强程序的适应能力，本设计中适当拓展了该区间

的上下限，因此，最终的过阈值点数区间为 $[80,600]$ 。图 5-5 为阈值边界值下的光斑分割结果。

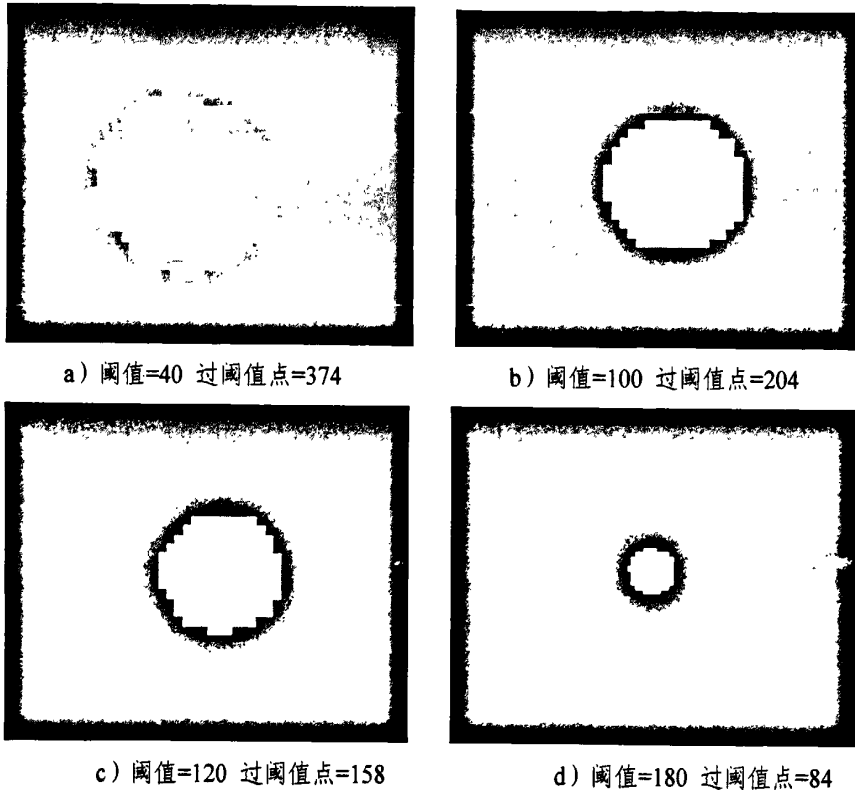


图 5-5 太阳光斑分割效果

#### 5.4 坐标—太阳角度转换程序

微控制器从 FPGA 获取太阳光斑质心坐标后，要通过坐标-太阳角度的转换来获得最终的太阳角度信息，该部分程序实现这一功能。

要实现坐标-太阳位置之间转换，首先要建立起两者之间的关系，根据第 2 章对本设计工作原理的分析，我们可以得到质心坐标和太阳角度之间转换表达式。事实上，第 2 章中给出的转换关系在实际中并不能直接拿来使用，因为之前为了分析问题的方便，在给出转换关系前作了一些约束，即只是作了理想条件下的分析，没有对很多因素进行考虑。要使传感器能真正应用于姿态测量系统中，必须建立起一个符合实际应用环境的传感器模型，这一模型的建立在第 6 章中作详细介绍。由于转换程序设计主要是涉及到包括三角函数求解等在内的数学运算，因此该小节中将不再对这些过程进行介绍，具体内容请参考第 6 章。

## 5.5 本章小结

本章介绍了包括 SCCB 读写操作在内的 OV2640 图像传感器的驱动程序设计,详细说明了微控制器与 FPGA 和上位机之间的通信程序设计方法,并制定了一套结构合理的数据通信格式。介绍了亮度阈值扫描的流程,给出了如何确定扫描区间的方法。



## 6. 太阳传感器标定及测试

在传感器的设计和安装过程中,由于设计和安装工艺的差别,势必会存在误差,这些误差的存在会降低传感器精度。与其他传感器研制过程一样,太阳传感器作为一种角度传感器,在研制的后期要进行一项非常重要的工作,即太阳传感器的标定与测试工作。本设计根据该传感器的特点,搭建出了一套特殊的传感器标定和测试试验平台,并将利用该平台完成太阳传感器的标定和测试。本章将对这一部分工作作详细介绍。

### 6.1 标定、测试平台搭建

#### 6.1.1 硬件实验环境搭建

标定、测试平台的硬件实验环境由 LED 光源、高精度双轴转台、PC 机及太阳传感器组成。LED 光源主要用来作为太阳仿真器,高精度双轴转台用于产生一定的太阳角度,PC 机用于实验数据的采集和对转台的控制,太阳传感器则是标定的对象。本平台的搭建具有自身特点,主要原因是本设计研究的太阳传感器与普通的数字式太阳传感器在原理上存在较大差异。下面将通过与普通数字式太阳传感器对比的方式来对该平台作下介绍。

普通的数字式太阳传感器利用了太阳光线为平行光的特点,故在此类太阳传感器的标定环境中,会对太阳仿真器作如下要求:一是输出的平行光束要根据需要进行转动或移动;二是仿真器要能实时监测输出的平行光束的光辐照度,并利用光反馈信号对光束辐照度进行控制以达到长时间稳定的要求。常见的太阳仿真器基本组成如图 6-2 所示,主要包括:光源、聚光系统、光学积分器、光准直系统、电源控制器系统及冷却系统。其中,光源通常采用超高压球形短弧氙气,它亮度高、电弧体积小,是理想电光源。其色温可达 6000K 且十分稳定,是常见的太阳替代物;聚光系统设计精度的高低将影响光辐照度和光辐照均匀度,该系统的作用是把氙气灯发射的光能量有效地汇聚到光学积分器前端;光学积分器的功能由仿真太阳辐射的发光圆盘实现,使仿真器照射的工作面和工作区体积内获



得均匀的光辐照度；光准直系统的作用是产生平行光束；电源控制系统则利用光照面的硅光电池产生反馈信号来实时调节工作电流以获得稳定的电路输出<sup>[33]</sup>。

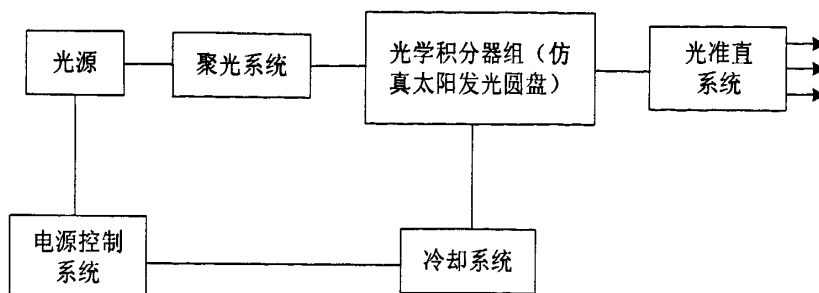


图 6-1 太阳仿真器结构框图

根据第 2 章中介绍，本设计中由全景环形光学镜头对太阳直接成像，即图像传感器检测的对象是太阳像，这与普通数字式太阳传感器不同。因此，本设计不宜采用上述的太阳仿真器。

经过实验测试，测试平台最后选用了 LED 光源作为简易的太阳仿真器。设计中对该光源的亮度和成像大小作了要求，亮度的调节可通过调节电流来实现，而成像光斑大小则可通过调节光源与太阳传感器镜头之间距离来完成。下面对比了太阳传感器分别对太阳和太阳仿真器成像的图像数据，发现其亮度和面积均相似。因此平台搭建时采用 LED 光源作为太阳仿真器是可行的。值得注意的是，考虑到太阳光源和 LED 光源在亮度上存在的巨大差异，所以测试平台中的太阳传感器是不加滤光膜的。

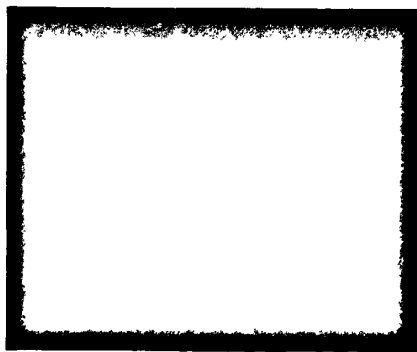


图 6-2 太阳成像图像



图 6-3 LED 太阳仿真器成像图像

平台中选用了六三五四研究所研制的 2TS-450 型高精度双轴转台来产生仿真所需的太阳角度。其关键技术指标如表 6-1。外部 PC 机通过串口可以实现双轴转台位置和转动速度的设定，设定频率可以达到 100Hz。

表 6-1 2TS-450 型双轴转台技术指标<sup>[34]</sup>

内框	位置状态要求	转角范围	连续回转
		角位置测量分辨率	0.36"
		角位置定位精度	±3"
		角位置定位重复性	±1"
	速率状态要求	速率范围	±0.001°/s ~ ±500°/s
		速率分辨率	0.0001°/s
		速率精度及平稳性	$\omega < 1^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-3}$ (1°平均)
			$1^\circ/\text{s} \leq \omega < 10^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-4}$ (10°平均) $\omega \geq 10^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-5}$ (360°平均)
外框	位置状态要求	转角范围	连续回转
		角位置测量分辨率	0.36"
		角位置定位精度	±3"
		角位置定位重复性	±1"
	速率状态要求	速率范围	±0.001°/s ~ ±300°/s
		速率分辨率	0.0001°/s
		速率精度及平稳性	$\omega < 1^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-3}$ (1°平均)
			$1^\circ/\text{s} \leq \omega < 10^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-4}$ (10°平均) $\omega \geq 10^\circ/\text{s}$ , $3 \times 10^{-5}$ (360°平均)

实验平台实物如图 6-4 所示。

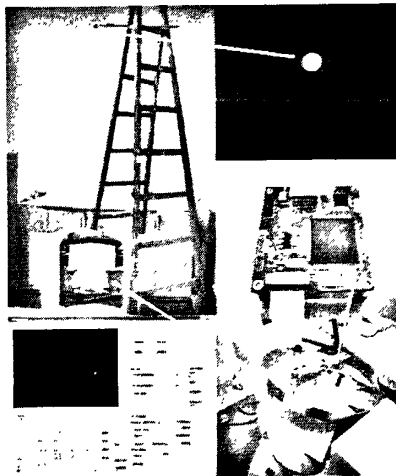


图 6-4 实验平台实物图

### 6.1.2 软件实验环境搭建

在标定和测试阶段需要采集大量的传感器样本点，用作传感器标定及精度分析的数据来源。如果采用手动方式来完成此项工作，必定要花费大量时间。因此，我们在平台搭建过程中，开发了一套自动化测试软件，在实际标定、测试工作实施时，实验人员只需输入一些简单的参数就可完成敏感器样本点的采集工作，十

分便捷。

标定、测试软件开发环境为 VC++ 6.0, 主要包括命令控制、转台控制以及角度和坐标信息采集三个功能模块。

命令控制功能模块用于切换太阳传感器的工作模式, 使其分别工作在图像传输和坐标传输模式。我们将太阳传感器在双轴转台上安装完毕后, 可将传感器切换至图像传输工作模式, 单击“单帧捕获”按钮就可以捕获到当前传感器获取的图像数据, 然后测试软件会将该图像在其“图像预览”处显示, 实验人员就可以根据显示的图像判断安装位置是否正确。此后, 可将太阳传感器切换到坐标传输工作模式, 单击“获取坐标”按钮就可获取太阳光斑在像平面上的坐标等信息。

转台控制模块实现转台的自动化控制。从数据点采集的灵活性考虑, 本模块中加入了角度步进间隔参数的设置, 可通过步进间隔设置来调整采集点疏密程度。软件控制双轴转台的接口为 PC 机串口, 其控制协议如下<sup>[34]</sup>:

双轴转台控制数据帧由 12 个字节组成, 分别为: 0xCC, 0xCC, CF, D7, D6, D5, D4, DF, D3, D2, D1, D0。CF 为内框控制字, DF 为外框控制字。对于外框, CF=0x80 表示停车指令, 其他字节为任意值; CF=0x81 表示角位置指令; CF=0x82 表示角速率指令。对于内框, DF=0x90 表示停车指令, 其他字节为任意值; DF=0x91 表示角度位置指令, DF=0x92 表示角速率指令。

角位置指令中, D7、D6、D5、D4 分别表示内框角位置指令的角位置参数(单位值  $0.0001^\circ$ ); D3、D2、D1、D0 分别表示外框角位置指令的角位置参数。角度范围均为  $0-360^\circ$ 。假设内框角度为  $+10^\circ$ 、外框角度为  $-20^\circ$ , 则:

$10/0.0001=100000$  转换为十六进制为 00 01 86 A0。

$(-20+360)/0.0001=340000$  转换为十六进制为 00 33 E1 40, 则生产的 12 字节数据帧为 0xCC 0xCC 0x81 0x00 0x01 0x86 0xA0 0x91 0x00 0x33 0xE1 0x40。

角速率指令中, D7、D6、D5、D4 表示内框角速率值(单位是  $0.0001^\circ/\text{s}$ ); D3、D2、D1、D0 表示外框角速率值。设内外框的速率为  $-10^\circ/\text{s}$ , 则以二进制补码的形式给出。

角度和坐标信息采集模块用于采集太阳传感器传输过来的坐标等信息, 并对此信息进行记录。

在自动数据采集过程中, 实验人员可以在转台控制模块中设定转台内外框的

步进间隔以及初始角度，设置好这些参数后，点击“自动步进”按钮，测试软件就能按照设置的参数通过串口对双轴转台的位置进行控制，并对不同位置点进行采样并记录到本地磁盘。数据采集完毕后，可将保存的实验数据导入到 MATLAB 中进行分析处理。图 6-5 为标定、测试软件截图。

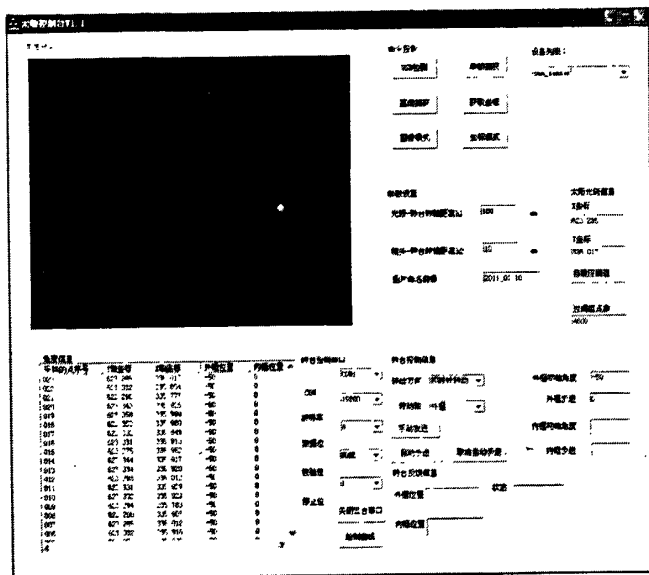


图 6-5 标定、测试软件截图

### 6.1.3 测试平台误差

我们在对该平台的介绍中提出，可以通过对转台的控制来产生不同的太阳角度。但事实上，在本设计中，要想由转台和 LED 光源直接产生精确的测量角度是一件比较困难的事情。如图 6-6 所示，对于普通的太阳传感器，其太阳仿真器产生的是平行光源，转台通过自身的转动就可以使得太阳传感器与太阳仿真器平行光线之间形成一定的夹角，而由转台转动产生的角度变化和太阳传感器待测量的角度值变化是一致的，因此虽然转台初始设定的角度和实际的传感器与太阳光线角度之间有个偏差，但是只要转台精度够高，此偏差是不会累积的，也就是说可以在传感器最后的测量结果中减去一个固定的初始偏差即可得到真正的测量误差值。

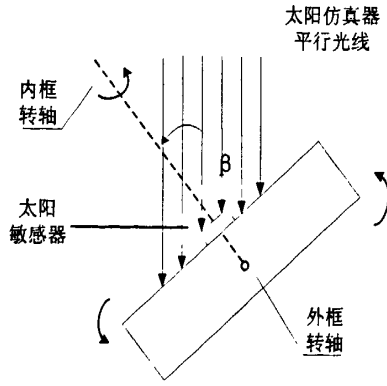


图 6-6 普通太阳仿真器工作示意图

值得我们注意的是，本设计测量角度的产生要复杂一些。如图 6-7 所示，转台绕外框转轴转动后的角度  $\beta$  值与实际 LED 光源与传感器光轴之间的角度  $\beta'$  并不完全一致。两者之间存在如下关系：

$$\beta' = \arcsin \left( \frac{h_1 \cdot \sin \beta}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 - 2h_1 h_2 \cdot \cos \beta}} \right) \quad (6-1)$$

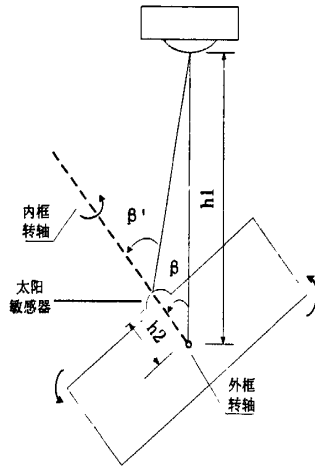


图 6-7 光源-传感器光轴角度偏差示意图

其中， $h_1$ 、 $h_2$  分别为 LED 光源和全景环形镜头到转台外框转轴的距离。在实际对太阳敏感器进行精度标定时，需用由式(6-1)转换后的  $\beta'$  代入第 6.2 节中的公式计算光斑的中心坐标。

## 6.2 太阳传感器标定与测试

### 6.2.1 传感器模型

传感器模型本质上是一组描述太阳光斑中心坐标和太阳矢量之间关系的数学表达式。实际应用中的传感器模型，与第2章中介绍的传感器成像原理相比，要更为复杂。式(2-6)只是简单地建立了光斑中心坐标和太阳角度之间的关系，此关系通常只在理想情况下成立。在实际操作中，诸如光学镜头安装偏差、设计误差等因素都需要考虑<sup>[35]</sup>。

在本文研究的太阳传感器模型中，安装引起的偏差成为我们建立该模型主要考虑的因素<sup>[36][37]</sup>，主要包括：

1. 光轴与像平面中心之间的偏差 $(x_0, y_0)$ 。

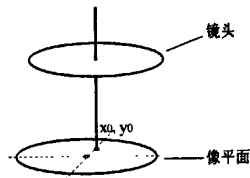


图 6-8 中心点偏差示意图

2. 像平面 X 轴与安装轴之间的角度偏差  $\alpha_0$ 。

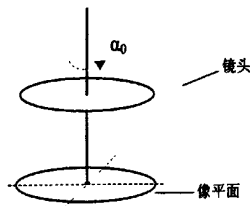


图 6-9 坐标轴安装偏差示意图

3. 光轴与传感器安装平面法线的角度偏差  $\beta_0$ 。

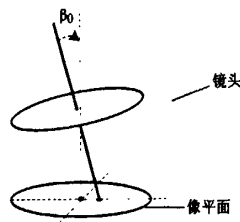


图 6-10 光轴安装偏差示意图

4. 光学镜头的焦距设计偏差  $f_0$ 。

综合考虑以上 4 点，我们可以得到如下传感器模型<sup>[38]</sup>：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (f-f_0) \cdot (\beta-\beta_0) \cdot \cos(\alpha-\alpha_0) - x_0 \\ (f-f_0) \cdot (\beta-\beta_0) \cdot \sin(\alpha-\alpha_0) - y_0 \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

在上述传感器模型中，存在 5 个参数需要确定，分别为  $f_0$ 、 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $x_0$  和  $y_0$ 。确定模型参数的方法在数据标定中比较常见，具体思路为：分别改变角度  $\alpha$  和  $\beta$ ，敏感器通过“质心法”计算得到光斑质心坐标的观测值  $(x_0, y_0)$ ，并将该坐标发送至 PC 端上位机软件。将角度信息  $(\alpha, \beta)$  代入式 6-2 所描述的传感器模型可以得到光斑中心的坐标值  $(x, y)$ 。假设角度  $(\alpha, \beta)$  集合个数为  $N$ ，则我们可以采集到  $N$  组光斑中心坐标观测值  $(x_0, y_0)$ ，并且根据模型可以计算得到  $N$  组光斑中心坐标  $(x, y)$ 。

在采集完  $N$  组光斑坐标信息后，通过 MATLAB 等工具，寻求最优解，使得坐标集合  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{0i}, y_{0i})$  之间距离平方和最小，就可以确定模型中的 5 个参数，损失函数为：

$$L = \sum_{i=1}^N \left( \left( (f-f_0) \cdot (\beta-\beta_0) \cdot \cos(\alpha-\alpha_0) - x_0 - x_{0i} \right)^2 + \left( (f-f_0) \cdot (\beta-\beta_0) \cdot \sin(\alpha-\alpha_0) - y_0 - y_{0i} \right)^2 \right) \quad (6-3)$$

确定传感器模型参数之后，可以根据式 6-4 计算太阳角度信息。

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \arctan\left(\frac{y+y_0}{x+x_0}\right) + \alpha_0 \\ \frac{\sqrt{(x+x_0)^2 + (y+y_0)^2}}{f-f_0} + \beta_0 \end{pmatrix} \quad (6-4)$$

## 6.2.2 标定、测试实验

在建立敏感器模型基础上，可通过 6.1 节中建立的标定、测试平台来进行标定实验，这样就可以确定敏感器模型的几个参数，从而完成整个太阳敏感器标定工作<sup>[40]</sup>。

敏感器模型参数标定实验中，第一步工作要得到一定数目的采样点。实验中，我们在测量的两个角度上以一定角度步进间隔进行取点<sup>[38]</sup>。第 2 章讲到全景环镜头存在约  $\pm 30^\circ$  的盲区，因此角度  $\beta$  在范围  $[-90^\circ \sim -30^\circ]$  及  $[30^\circ \sim 90^\circ]$  内，以  $8^\circ$  为间隔进行取值，而角度  $\alpha$  则可在范围  $[-90^\circ \sim 90^\circ]$ （只取半周，另半周不需参与标定工作），以  $8^\circ$  为间隔进行采样点选取，共取得约 300 个采样点。这些工作是

通过平台软件控制双轴转台实现的，其中角度步进参数在平台软件上进行设置。采样结束后，将那些无效数据剔除掉，所谓无效数据就是过阈值点数目处于有效区间之外的采样点，这样便得到整理后的采样点集合。

根据式(6-3)及得到的采样点集合，我们利用MATLAB的lsqnonlin函数来对之前建立的这个非线性模型进行最小均方最优解求解，得到式(6-2)模型中的5个参数分别如下：

$$f_0 = 0.11\text{mm} \quad \alpha_0 = 1.12^\circ \quad \beta_0 = -1.96^\circ$$

$$x_0 = 419.26 \quad y_0 = 196.39$$

该组参数所对应的残差为0.24像素点，与此像素点等效的角度测量精度为 $0.4^\circ$ 左右，误差如图6-11。

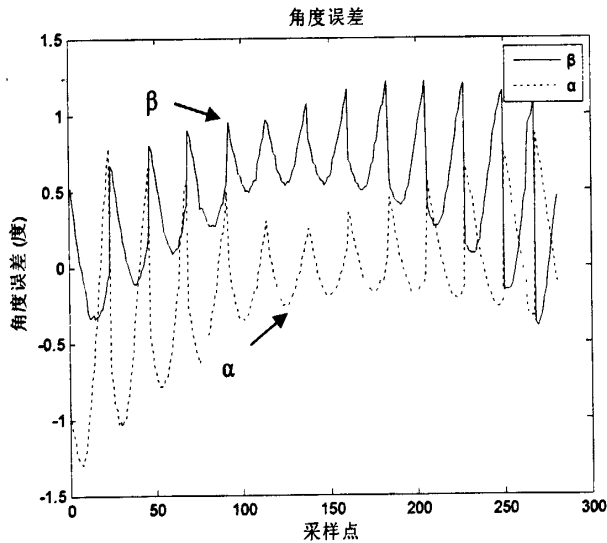


图 6-11 原始数据角度测量误差

图中实线部分是角度 $\beta$ 测量误差，虚线部分是角度 $\alpha$ 测量误差，其均方差分别为 $0.38^\circ$ 和 $0.43^\circ$ 。

### 6.2.3 误差分析

根据6.2.2节标定和测试的结果我们发现此数字式太阳传感器存在较大误差，该误差主要由几个部分组成：传感器自身误差、测量环境引入误差。

首先分析传感器自身误差。随机误差是传感器自身误差的主要来源，随机误差也称为偶然误差和不定误差，是在测定过程中一系列有关因素微小的随机波动



而形成的具有相互抵偿性的误差。在我们设计的数字式太阳传感器系统中，随机误差主要是由CMOS图像传感器的噪声产生的，CMOS图像传感器噪声包括暗电流、固定模式噪声和读取噪声等。暗电流噪声在CMOS图像传感器的噪声中占主导地位，暗电流是指光电二极管在没有光照情况下产生的放电现象，并随着温度升高而增大。暗电流的减小和控制除了在系统设计时考虑加入温控系统外，只能通过芯片设计者调整芯片功耗分布来优化。为了测试传感器自身随机误差的大小，我们做了一组实验。实验通过采样同一转台位置下太阳传感器的测量结果来计算系统的随机测量误差。

实验结果如图6-13所示，对此数据计算后得出该太阳传感器自身的随机测量误差为 $0.009^\circ$ ，此随机误差远远小于图6-11中的误差。因此，可以推测出图6-11中的主要测量误差是由测量环境引入的。

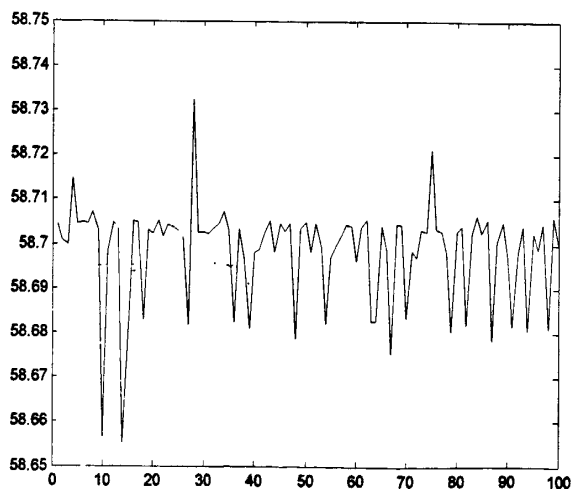
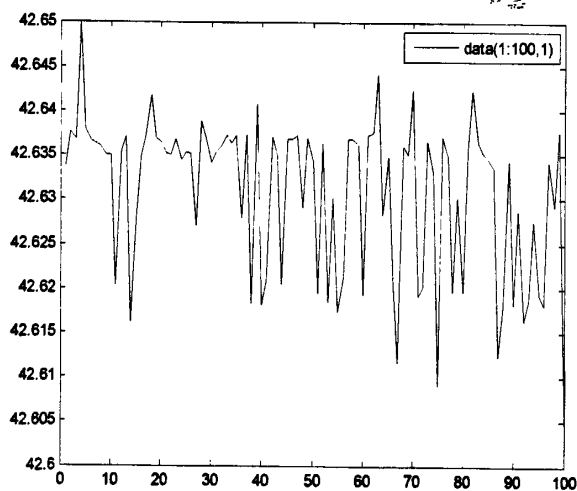


图 6-12 角度  $\alpha$  和  $\beta$  随机误差曲线

下面对测量环境引入误差进行分析。由图6-11测量结果可观察到标定后的测量值存在较为明显的周期性误差，其主要表现为：对于固定的入射角 $\beta$ ，其角度测量误差会随着 $\alpha$ 值的改变而变化，并具有明显规律，同样角度 $\alpha$ 自身误差也存在着周期性变化的规律。经分析，我们得出此系统误差主要是由太阳传感器未安装在转台中心引起的，如图6-13所示，当转台的外框处于固定位置时，即转台设定的理想角度 $\beta$ 不变，此时转台绕内框转轴转动，由于传感器中心轴和转台内框中心轴之间的偏差，会导致测量的 $\beta$ 值发生周期性变化。图中 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 分别是中心偏差测得的角度值， $dR$ 是太阳传感器光轴偏离转台转轴的距离；而 $\beta$ 值的周期性变化也同时导致测量的 $\alpha$ 值发生变化。

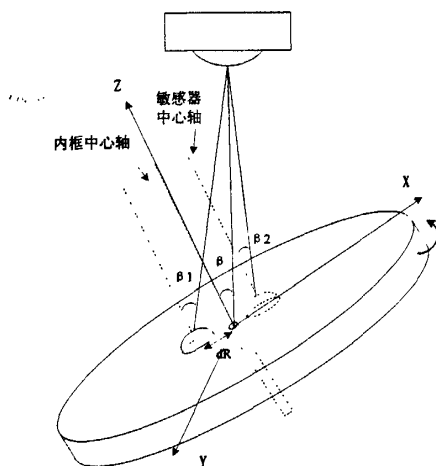


图 6-13 太阳传感器中心轴-转台内框轴线偏差

为了验证此误差分析的合理性，我们用 MATLAB 对该误差值进行了仿真分析。由于在转台绕外框转动时，太阳模拟器坐标值会发生变化，为了分析问题的方便，仿真中假定外框不动，转台只绕着内框转轴转动，因此，太阳仿真器坐标为定值，理想的  $\beta$  值也应该为一个常数。此时，太阳传感器坐标为  $SunP = [X_{sun}, 0, Z_{sun}]$ ，转台中心坐标为  $CenterP = [0, 0, 0]$ ，太阳传感器中心坐标为  $SensorP = [x, y, 0]$ 。其中， $Z_{sun}$  为太阳传感器到转台平面的垂直距离， $X_{sun}$  为太阳传感器的 X 坐标， $x = dR * \cos(\theta + \theta_0)$ ， $y = dR * \sin(\theta + \theta_0)$ ， $\theta \in [0, 360^\circ]$ ， $\theta_0$  的加入是为了使仿真数据顺序与实际采样点顺序一致。有了这些关键点的坐标，我们可以得到传感器光轴矢量和太阳仿真器到传感器中心矢量，分别如下式：

$$\begin{aligned} \overline{V_{opaxis}} &= [0, 0, 1] \\ \overline{V_{sun-sensor}} &= [dR \cdot \cos(\theta + \theta_0) - X_{sun}, 0, dR \cdot \sin(\theta + \theta_0) - Z_{sun}] \end{aligned} \quad (6-5)$$

通过几何关系我们可以计算得到带误差的测量值  $\beta'$  为:

$$\beta' = \arccos \theta \left( \text{norm} \left( \overline{V_{opaxis}} \right) \cdot \text{norm} \left( \overline{V_{sun-sensor}} \right) \right)$$

显然, 在转台绕内框转轴转动时, 带误差的  $\beta'$  测量值不是常数, 下图即为仿真值与测量值的对比图。

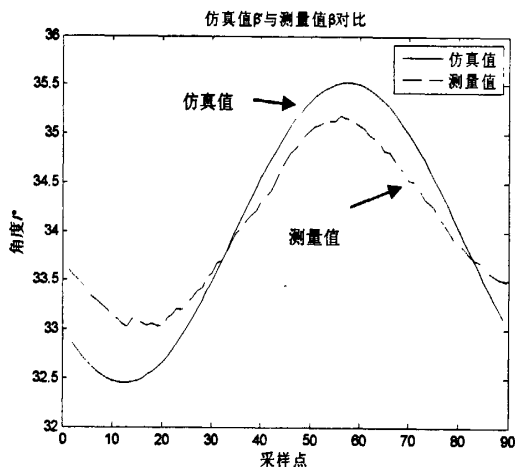


图 6-14 仿真值与测量值对比图

由上图可知, 仿真值与测量值随着转台转动其变化趋势大体一致, 由于在建立测量环境引入误差模型时考虑的要素较为简单, 因此不能非常准确地补偿此误差, 只能证明测量误差主要是由传感器在转台上安装位置偏差带来的。为了更好地补偿测量环境引入的误差, 我们采用多项式拟合的方法来对测量误差进行补偿, 补偿后的结果如图6-14所示。补偿后角度  $\beta$  和  $\alpha$  的测量误差值均为  $0.02^\circ$ , 能真实反映传感器的测量精度。

当然，上述误差的补偿只是为了去除测量环境的误差干扰，从而真实反映数字式太阳传感器的测量误差，在实际使用中并不需要用上述方法对测量结果进行补偿。

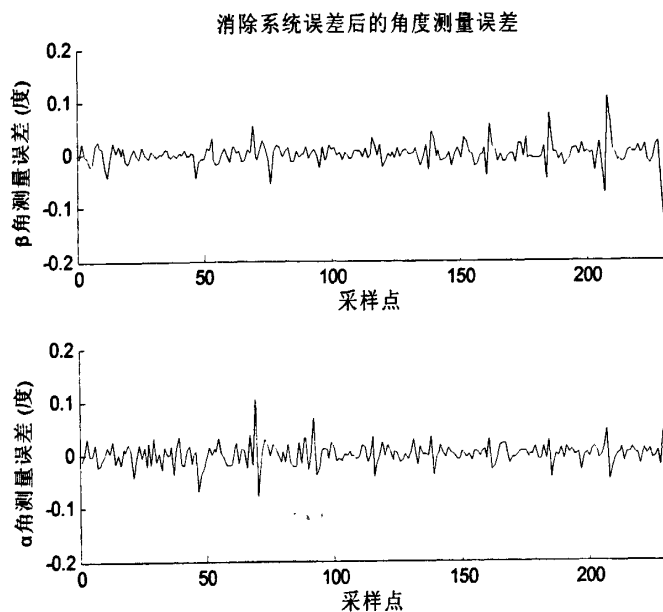


图 6-15 补偿后的角度测量误差

### 6.3 本章小结

本章对标定及测试的软硬件平台搭建进行了详细介绍，比较了该太阳传感器与普通太阳传感器在标定和测试方法上的异同，给出了测试平台的误差。建立传感器模型，通过搭建的实验平台实现了精度标定工作，并对测试误差进行了分析，结合测量过程中引入的误差，给出了传感器的真实测量精度。



## 7. 结论

测试结果表明本文设计的数字式太阳传感器具有  $120^{\circ} \times 180^{\circ}$  的视场范围, 在视场范围内具有  $0.02^{\circ}$  测量精度, 此外该传感器功耗小于  $400\text{mW}$ 、体积为  $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 40\text{mm}$ , 能满足微小卫星姿态确定系统要求。

本设计充分利用了全景环形镜头视场大的成像特点, 从其工作原理出发, 设计了一种新颖的数字式太阳传感器。在设计过程中, 通过比较与普通太阳传感器之间的异同, 提出了自己的设计思路。在传感器设计前期, 通过借助 MATLAB 等仿真工具对此太阳传感器的可行性进行了仿真分析, 在此仿真分析的基础上, 综合考虑微小卫星系统对太阳传感器功耗、体积、精度等的特殊要求, 设计出了一套适合微小卫星用太阳传感器方案。这些设计上的考虑, 在系统结构、器件选型等方面得到了体现。当然由于受时间和实验条件的限制, 在设计中也存在着一些不足和缺憾, 希望能在下一代数字式太阳传感器中进行提高和改进。下面对设计中存在的不足进行说明, 并对下一代传感器的改进提出一些建议。

- 1) 数字信号处理部分结构优化。本设计中选用了 FPGA 和微控制器组合来实现数字信号处理功能, 充分发挥了 FPGA 数字逻辑的处理能力和微控制器流程控制的能力。在设计初期, 打算将数字逻辑和流程控制都整合到 FPGA 内部, 但考虑到 FPGA 内部软核调试的不便, 没有采取此方案。下一版本可考虑采用 soc 的设计思想将两部分功能都集成于 FPGA 来完成, 这样做的好处是可以减少传感器系统的体积并提高系统的可靠性。
- 2) 算法的优化。本设计中对太阳光斑质心的计算是对整个像平面过阈值点进行乘累加实现的, 这样做的缺点是计算速度相对较慢, 并且会增加系统的功耗。比较好的做法是在进行质心计算时, 先进行一轮粗略的图像扫描, 此次扫描的目的是获取太阳光斑的大致位置, 我们称之为 ROI (Region of Interest, 感兴趣区域), 下一步再对此部分区域进行计算, 此类处理不仅能提高传感器更新速度, 而且还能降低系统功耗<sup>[39][40]</sup>。
- 3) 标定、测试平台改进。虽然本设计中的标定、测试平台较好完成了传感器的标定与测试工作。但是, 如第 6 章中所指出的, 由于平台设计的不足, 导致

标定后的结果不能直接反映敏感器的测试精度，需要对平台误差进行补偿后才能得出真实的测试精度，在一定程度上将影响最终指标的判定。希望今后能对该平台进行改进，以实现更为有效的标定与测试。

## 参考文献

- [1] W. van Herwaarden. Low-cost satellite attitude control sensors based on integrated infrared detector arrays. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2001. 50(6): 1524-1529.
- [2] M. M. Birnbaum. Spacecraft attitude control using star field trackers. *Acta Astronautica*.1996. 39: 763-773.
- [3] 何丽,胡以华. 太阳敏感器原理技术发展浅析[J]. *传感器世界*, 2006(1): 12-14.
- [4] 刘量栋,刘慎钊,孙承启等.卫星控制系统仿真[M].北京:宇航出版社,2003.
- [5] Ninomiya, Keiken; Ogawara, Yoshiaki; Tsuno, Katsuhiko; Akabane, Satoshi. High accuracy sun sensor using CCDs. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1988: 1061-1070.
- [6] Kouzmin, Vladimir S; Cheremoukhin, Gennadi S; Fedoseev, Victor I: Miniature sun sensor, *SPIE Proceedings*.1996, vol.2739: 407-410.
- [7] 徐明庚、王素素、鲍百容等. 卫星姿态动力学与控制(3). 北京: 中国宇航出版社. 2003.
- [8] 尤政,李涛. CMOS 图像传感器在空间技术中的应用[J]. *光学技术*. 2001, 28(1): 31-35.
- [9] 李松. 数字式太阳敏感器标定与抗干扰分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 2009.
- [10] Battiato S, et al. Bayer Image Enlargement Using Correlated Color Components. *Digest of Technical Papers. IEEE International Conference on Consumer Electronics*. 2002: 230-231.
- [11] Jaroslav C, Jaroslav V, Jiri B Frantisek. A simple low cost digital sun sensor for micro-satellite. 2005-19.
- [12] 朱鸿泰. 高精度太阳敏感器的发展. *红外*, 2003, 11: 1-6.
- [13] El Gamal A., Eltoukhy H.. CMOS image sensors[J]. *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, 2005, 21(3): 6-20.



- [14] Modha K. N., Stockford I. M., Light R et al.. A custom CMOS sensor for pyramidal adaptive optics system[C]. IEEE Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, Vancouver, 2008: 1-4.
- [15] de Boom, C.W.; Leijtsens, J.A.P.; v. Duivenbode, L.M.H.; van der Heiden, N.; Micro Digital Sun Sensor: System in a Package. MEMS, NANO and Smart Systems, 2004. ICMENS 2004. Proceedings. 2004 International Conference on. 2004: 322-328.
- [16] Feifan Chen, Jing Feng, Zhiwei Hong. Digital sun sensor based on the vernier measuring principle[J]. Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, 2006 (17): 2494-2498.
- [17] Pablo Ortega, Gema López-Rodríguez, Jordi Ricart, et al. A Miniaturized Two Axis Sun Sensor for Attitude Control of Nano-Satellites. IEEE SENSORS JOURNAL, 2010, 10(10): 1623-1632.
- [18] 邢飞, 尤政, 张高飞. 基于 MEMS 光线引入器的太阳敏感器技术. 功能材料与器件学报. 2008, 14 (1): 246-250.
- [19] 陈凡胜. 大视场高精度太阳敏感器的实现[J]. 红外, 2004(9): 10-15.
- [20] John Enrighta, Doug Sinclairb, Chris Li. Embedded algorithms for the SS-411 digital sun sensor. Acta Astronautica, 2009(64): 906-924.
- [21] 程惠全, 姚炜勇, 杨国光, 等. 全景环形成像的转像系统设计[J]. 光电工程, 2002, 29(2): 16-19.
- [22] 侯惠杰. 全景环形成像展开算法的研究[D]: [硕士学位论文]. 浙江: 浙江大学信息学院, 2006.
- [23] 牛爽. 皮卫星全景环形凝视透镜光学系统技术报告(内部报告).
- [24] 李继军; 杜云刚; 张丽华等. CMOS 图像传感器的研究进展. 激光与光电子学进展. 2009,4: 45-52.
- [25] OmniVision Technologies Inc. OV2640 Datasheet. 2006.
- [26] Ning Xie, Albert J.P. Theuwissen, Bernard Büttgen1, et al. Micro-Digital Sun Sensor: an Imaging Sensor for Space Applications. Industrial Electronics (ISIE), IEEE International Symposium. 2010: 3362-3365.
- [27] XILINX. Spartan-3AN FPGA Family Datasheet. XILINX Corp, 2007.

- [28] Silicon Laboratories Inc. C8051F34x Datasheet. Revision 0.5, 2006.
- [29] OmniVision Technologies Inc. Serial Camera Control Bus Functional Specification. Application Note. Version 2.0. 2002.
- [30] XILINX. Block Memory Generator V3.1 Product Specification. 2009.
- [31] 孟范涛, 佟首峰, 郭惠等. 基于 FPGA 的高速实时光斑质心检测系统的设计. 仪器仪表用户. 2009, 16 (2): 68-69.
- [32] Silicon Laboratories Inc. USBXpress's Guide. Revision 1.7, 2007.
- [33] 刘量栋, 刘慎钊, 孙承启等. 卫星控制系统仿真[M]. 北京: 宇航出版社, 2003.
- [34] 六三五四研究所. 双轴速率位置转台说明书. 2010.
- [35] 屠斌杰, 韩柯, 王昊, 金仲和. 大视场数字式太阳敏感器设计. 传感技术学报, 2011 年第 3 期.
- [36] Carl Christian Liebe, Sohrab Mobasser, Youngsam Bae, et al. Micro Sun Sensor[J]. IEEE Proceeding Aero space Conference, Piscataway[C]. NJ: IEEE, 2002(5): 2263-2273.
- [37] John P.Enright. Design Optimization of a Digital Sun Sensor for Use With Parametric Processing. IEEE Transaction On Instrumentation and Measurement, 2008, 57(10): 2188-2195.
- [38] John Enrighta, Doug Sinclairb, Chris Li. Embedded algorithms for the SS-411 digital sun sensor. Acta Astronautica, 2009(64): 906-924.
- [39] Yukinobu Sugiyama, Munenori Takumi, "A High-Speed CMOS Image Sensor with Profile Data Acquiring Function", IEEE Journal of Solid-State Circuits, VOL. 40, No. 12, December 2005: 2816-2822.
- [40] O. Schrey, J. Huppertz. A 1K×1K High Dynamic Range CMOS Image Sensor with On-Chip Programmable Region of Interest Readout. IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 37, NO. 7, July 2002: 911-914.



## 作者简介

### 教育经历:

- 2004.09 ~ 2008.07 浙江工业大学, 电子信息工程 本科  
2008.09 ~ 至今 浙江大学, 微电子学与固体电子学专业 硕士研究生

### 攻读硕士学位期间发表的论文:

1. 屠斌杰, 韩柯, 王昊, 金仲和. 大视场数字式太阳传感器设计. 传感技术学报, 2011年第3期.

### 攻读硕士学位期间受理的专利:

2. 韩柯、向甜、朱小丰、屠斌杰、王昊、金仲和. 小卫星姿态控制地面仿真装置及方法. 200910155796.7, 2009-12-18.

1000

1000