

合肥工业大学

硕士学位论文

基于高精度算法的太阳动态跟踪技术研究

姓名：李保来

申请学位级别：硕士

专业：光电信息工程

指导教师：刘志健

201204

基于高精度算法的太阳动态跟踪技术研究

摘 要

当前能源危机和环境问题频发，太阳能以其清洁无污染且能量巨大受到人们的重视。一般来说高效的利用太阳能需要高精度的太阳动态跟踪技术，在已有的一些研究中，大多采用简洁算法，尽管实现了基本的跟踪功能，但是精度较差。还有一些光电传感器跟踪方法，实时性和精度比较高，但是受外界影响比较大。

本文是在高精度传感器的基础上，研究高精度太阳位置跟踪算法。

本文介绍能源现状，分析当前太阳跟踪技术的研究现状及其应用情况。并且介绍了太阳运动基本规律，对视日轨迹动态跟踪法、光电探测器动态跟踪方法和二者相结合的跟踪方法三种方法进行了说明和比较。根据高精度算法设计动态跟踪系统，分别研究了 GPS 技术及应用、基于 GPS 的高精度动态跟踪算法、光电探测器动态跟踪算法和机械动力部分的设计等技术。根据改进的算法进行软件部分的实现，使用 QT 开发工具设计软件部分，实现了基于传感器的高精度算法的界面演示，直观地展示了算法的运行结果。取合肥南一环某处作为观察点，选取 NASA 官方计算器作为标定，分析基于 GPS 的视日轨迹跟踪算法精度。验证得知本算法可以达到系统设计的高精度要求，对后续相关的研究和应用提供一定的参考。

本文研究的动态太阳跟踪系统具有高精度、动态性、全天候、全方位和自调节等特点，对于高精度太阳跟踪、太阳能利用率的提高、太阳辐射参数的测量、气象参数测量和沙尘暴的监测等都有着极大的实际意义。

关键字： 太阳位置；算法；动态跟踪；GPS；光电传感器

Research of Dynamic Solar-tracking Technology Based on High-precision Algorithm

ABSTRACT

In the contemporary society where energy crisis happens frequently, therefore solar energy are attracting pupils for its clean and huge energy. To harness solar energy efficiently it is necessary to employ the highly precise dynamic solar-tracking technique. Simple algorithms were often employed in some studies to approach the basic tracking with worse precision.

Based on the High-precision sensors, the position of the sun tracking algorithms were studied.

The current energy status was introduced and the research status and application of the solar-tracking technology were analyzed. The basic principle of the solar motion was introduced, and the technology of astronomical sun-tracking, electro-optical sun-tracking and their combination were elaborated. According to the high-precision algorithm design dynamic tracking system, the technology and application of the GPS was studied and high-precision dynamic tracking algorithms based on GPS, photo detector dynamic tracking algorithm and technique of mechanic power were analyzed. The software of the improved algorithm was achieved. And the interface of the high-precise algorithm based on the sensors was demonstrated by the software of the QT design. The running results was presented explicitly. The 1st ring of the city of Hefei was chose as the observation spot, and the GPS based algorithm accuracy was analysed with the calibration of NASA official calculator. The algorithm was verified to meet the need of application and will provide much valuable reference for the consequent research and application.

The tracking system studied here has attributes of high precision, dynamic, all-weather capability, comprehension and self-adjusting. It is of great practical significance in highly precise solar-tracking, utilization improvement, measurement of solar radiation and meteorological parameters and monitoring of sandstorm.

Keywords: Position of the Sun; Algorithm; Dynamic Tracking; GPS; Photoelectric Sensors;

致 谢

硕士研究生的学习即将结束，三年的学习生活使我受益匪浅。

首先，我要深深感谢我的导师刘志健副教授和李保生副研究员。刘老师和李老师为人谦和，平易近人。在论文的写作过程中，每当我有所疑问，他们总会放下繁忙的工作，不厌其烦地指点我。他们严谨的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励我的一生，他们对我的关心和教诲我更将永远铭记。借此机会，我谨向刘老师和李老师致以深深地谢意。

其次，我还要感谢邓迁、冯宝联、方鑫等学弟学妹们的积极配合，感谢肖新、王成顺、张伯昆、张岳同、张连弟等舍友们的帮助，感谢周海洋和姚大杰等同门的互相支持和促进，感谢 319 研究生工作室的周正卿等所有同学的帮助和支持。感谢陈静同学，感谢她在机械设计方面给予我极大的帮助。与他们的交流和讨论使我开阔了视野，受到了很多有益的启发，在各位同学的共同努力之下，我们始终拥有一个良好的生活环境和一个积极向上的学习氛围，能在这样一个团队中度过，是我极大的荣幸，和大家默契的合作是完成项目和论文研究课题的重要保证。

当然我最需要感谢的是我的父母、姥姥和姐姐，没有他们的无私付出，我肯定不会有今天的成绩。无论在精神还是物质上他们都是我最坚强的支援，所以借此机会我向他们表达自己的感激之情。

最后，我要感谢参与我论文评审和答辩的各位老师，他们给了我一个审视几年来学习成果的机会，让我能够明确今后的发展方向，他们对我的帮助是一笔无价的财富。我将在今后的工作、学习中加倍努力，以期能够取得更多成果回报他们、回报社会。

作者：李保来

2012 年 4 月

插图清单

图 2-1	地球绕太阳运行示意图.....	5
图 2-2	天球坐标系.....	6
图 2-3	赤道坐标系.....	7
图 2-4	地平坐标系.....	9
图 2-5	太阳高度角方位角示意图.....	10
图 2-6	光电传感器基本应用原理.....	11
图 2-7	四象限光电探测器结构示意图.....	12
图 2-8	四象限光探测器实物图.....	12
图 2-9	四象限光电探测器工作流程图.....	13
图 2-10	基于图像传感器的光电探测的原理.....	13
图 3-1	GPS 卫星的运行示意图.....	16
图 3-2	GS-87GPS 芯片外形图.....	19
图 3-3	GS-87 芯片集成串口电路图.....	20
图 3-4	合肥市南一环某处 2011 年 5 月 1 日白天的太阳高度角曲线图.....	26
图 3-5	合肥市南一环某处 2011 年 5 月 1 日白天的方位角曲线图.....	26
图 4-1	CMOS 图像传感器对日跟踪流程图.....	29
图 5-1	CE318 太阳辐射计实物图.....	31
图 5-2	CE318 太阳辐射计结构示意图.....	31
图 5-3	动力系统原理示意图.....	32
图 5-4	步进电机结构图.....	32
图 5-5	步进电机控制原理结构图.....	33
图 5-6	双轴太阳跟踪系统结构图.....	34
图 6-1	QtCreator 项目文件编辑界面.....	36
图 6-2	界面编辑界面.....	37
图 6-3	太阳动态跟踪系统原理图.....	38
图 6-4	获得 GPS 目标数据的流程图.....	39
图 6-5	设置算法软件实现.....	39
图 6-6	NASA 官方网站的高精度计算器.....	40

表格清单

表 3-1 GS-87 模块 SIRFIII 芯片参数 19

表 3-2 NEMA-0183 数据帧种类说明 20

表 3-3 \$GPGGA 帧信息内容 21

表 6-1 2012 年奇数月份一号 12 点整的太阳角度 40

表 6-2 2012 年奇数月份一号 12 点整的太阳角度 40

表 6-3 两种计算器的计算结果误差比较 41

第一章 引言

1.1 课题背景

1.1.1 太阳能利用的现状和特点

为了保证人类能源的长期使用，同时考虑到保护环境，当前对清洁无污染的天阳能进行开采利用已是一大趋势。如果说 20 世纪是石油世纪，21 世纪就是新能源世纪^[1]。

中国蕴藏着丰富的太阳能资源，太阳能利用前景广阔。中国光伏发电产业于 20 世纪 70 年代起步，经过 30 多年的努力，已迎来了快速发展的新阶段。

当今世界，能源问题一直是举足轻重的重大问题之一。目前世界使用的能源主要是不可再生的化石能源，如石油、煤炭、天然气等。据权威人士估计，世界上已经探明的石油储量仅可开采 40 多年；天然气可开采 70 年左右；煤的储量较丰富，可开采 200 年^[3]。地球上可以使用的资源是有限的，矿物质燃料在数量上也是有限的，但是人类消耗能源的速度却在迅猛的增长。资源短缺，环境污染和人类生存彼此互相影响。因此，目前许多国家就开展能源研究方面的工作。

太阳能作为一种清洁无污染的能源，发展前景非常广阔，太阳能发电已成为未来全球解决能源危机的最具独特优势的重要途径。太阳能作为一种能源，与煤炭、石油、天然气、核能等常规能源相比有以下优缺点^[3]：

1、优点

(1) 普遍性：太阳光的照射几乎没有地域的限制，可直接利用。虽然在纬度不同的地区存在着太阳辐射的不均匀性，但是相对而言，在地球上绝大多数地区太阳能的辐射还是具有极大的普遍性的优势。

(2) 无害性：对于太阳能的开发利用不会对环境造成污染，这一点在环境污染越来越严重的今天显得尤为重要。

(3) 巨大性：相对于常规能源的局限性而言，太阳能在储量上具有“无限性”，基本上可以保证人类的长期使用而不必担心资源的枯竭问题。

(4) 长久性：对于太阳的核能产生速率来讲，其存贮的氢足以使用上百亿年的使用，对于只有几十亿年寿命的地球来讲，可以认为太阳的能量是取之不竭的。

2、缺点

(1) 分散性：对于地球来讲，尽管太阳辐射的总量巨大，但平均面积的能流密度相对很低，这种分散性不利于开发利用。

(2) 不稳定性：由于太阳光的照射不仅要受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制，同时还会受到晴、阴、云、雨等随机因素的影响，所以地球表面接收到的太阳光照并不是持续稳定的，这对于工业化开发利用太阳

能造成了很大的困难。

(3)效率低和成本高:当前无论是在理论上还是在技术上,天阳能的利用的都已经相当的成熟。但是目前实际中使用的天阳能利用装置效率低,并且成本高,和常规能源相比在经济上还不具备优势。

鉴于上述特点,研究高精度太阳跟踪算法对于能源利用有着重大的现实意义。虽然目前有一些较成熟的利用太阳能的技术,但是在利用率上不够理想,为了提高太阳能利用效率,有必要对太阳追踪技术进行一些探讨研究。

1.1.2 一般太阳能利用途径介绍

太阳能实际是利用太阳的辐射能量,地球上的化石燃料、风能等能源其实来源都是太阳辐射能量的转化。太阳能的利用总体上来说有如下几种途径^[4,5]:

(1)光热转换

将吸收到的太阳辐射能直接转化为热能进行利用。该途径的使用历史悠久,技术发展最为成熟,工业化程度较高,目前国内外广泛使用的太阳能热水器就是基于光热转换的原理工作的。

(2)光电转换

根据“光电转化”的原理,将采集到的太阳辐射能转化为电能,然后进行利用,一般称为“光伏发电”。光电转换技术应用范围广泛,近年来在各个领域中发展迅速,特别是在发电行业中被大力应用。

(3)光化学转换

在化学方法下光能同样可以转为电能,并且可以进行制氢等化学应用。光化学转化作为一种较新的途径,目前正在被广泛研究中。

(4)光生物转换

光生物转换主要是通过植物的光合作用储存太阳能^[5]。该途径近年来才引起特别关注,也正处于研究中。

上述几种利用途径中,光热转换和光电转换是应用最为普遍的两种。其实所有的太阳能转换途径都有一个共同的特点,就是需要接收到太阳的辐射能量,然后才可以通过转换装置进行能量的转化。由此可见,是否可以接收到更多的太阳能,太阳辐射能的收集效率就至关重要,这就要在实际使用中利用高精度的太阳跟踪的算法,只有满足一定精度的算法才可以明显地提高太阳能转化为电能等能量方式的效率。

1.2 高精度太阳跟踪算法研究的意义

当今世界,对于人类来说,太阳能是一种储量巨大并且全世界都可以实现自由公平利用的清洁能源,所以,太阳能的利用将会是本世纪重大的能源研究课题。

我国地处北半球亚欧大陆的东部,主要处于温带和亚热带,具有丰富的太

阳能资源。太阳能利用中，光伏发电是相当重要的一种方式，但是光伏发电一般依赖于对日跟踪装置，如果跟踪精度不高将直接降低光伏转化效率，使太阳能的利用效率也无法提高。研究精度比较高的太阳跟踪算法，对于推动太阳能的普及利用，具有重要的现实意义。

提高太阳能利用率的方法通常有跟踪和聚焦两种。其中，跟踪是指让太阳光线以入射角度为零照射到太阳能利用装置上，相对于固定发电装置，相同条件下，自动追踪发电设备的发电量可以提高 35%以上^[6]。

本课题的研究意义在于利用相对高精度的算法，实现对太阳位置的高精度的计算，以用于后续各类需要精确追踪太阳位置的系统设计。另外本算法利用湿度传感器智能应对天气变化，利用 GPS 位置传感器对系统位置进行实时监测。

1.3 太阳跟踪技术的研究现状

近年来，对太阳跟踪技术的研究越来越受到重视，太阳跟踪技术发展迅速。在已有研究的基础上，国内外都在积极研究相关技术，已经取得了很多的成果。

国外对于该技术的研 究已经趋于成熟。国内专家学者也相继开展了这方面的研究，1992 年推出了太阳灶自动跟踪系统；1994 年《太阳能》杂志介绍了单轴液压自动跟踪器，完成了单向跟踪；国家气象局计量站在 1990 年研制了 FST 型全自动太阳跟踪器，并且成功的应用于太阳辐射观测^[7,8]。

目前，由于受成本的影响，太阳跟踪系统普遍采用半自动单轴跟踪方式。在一些高精度的太阳跟踪应用中，国内大多是采用进口仪器，这主要是因为国内在一些关键技术上无法取得突破性进展，导致无法形成成熟的仪器。鉴于目前太阳位置算法的研究现状，未来国内在太阳跟踪技术的研究水平上亟待提升，这也使得本课题的研究具有了很大的实际意义。

当前的研究中，太阳跟踪原理主要分为两类：

(1) 视日轨迹跟踪

利用天体运行规律算法进行计算推导。主要是基于某个天球坐标系下面，根据已有的数据比如经纬度、海拔、时间等一些已知数据，在理论上计算出某一时刻太阳应该出现的方位角和高度角等信息，然后结合所得数据设计追踪系统，实现控制设备对太阳位置的动态跟踪。

(2) 光电探测器跟踪

主要是利用光电传感器探测太阳位置信息，然后通过一系列的光电信息处理算法，得出对应的太阳位置信息，然后根据所得数据计算系统所需数据，最终驱动机械设备去智能追踪太阳位置。

目前，以上两种太阳跟踪方式是主要的自动追踪太阳位置的技术，也是国内外该领域研究者的研究热点。本文对这两种技术做了比较详细的探讨研究，

并借鉴一些现有国内外算法和系统设计的技术，提出一种改进的精度可以满足对太阳的辐射度进行高精度测量的太阳跟踪算法。

1.4 本课题主要研究内容

本文所研究的课题同时受到国家自然科学基金（41075024）资助和教育部科学技术研究项目（108073）资助。

本文主要是在太阳位置追踪系统中，利用一些高精度的传感器对一些控制和跟踪算法所需的参数进行测量，然后参考并改进已有的跟踪算法，在理论上实现实时计算太阳的位置角度值。其研究意义在于可以使太阳能电池板在有限的使用面积内截获更多的太阳辐射能量，达到对太阳能的最大吸收状态，提高太阳能的利用效率，增加太阳能发电系统的工作效率。

另外，本课题对于其它相关的一些气象数据的测量监控、环境保护等方面的应用也有着极大的现实意义。

下面对本文的组织结构进行介绍：

第一章主要阐述了本课题的研究背景、目的、意义，并对国内外太阳能利用的研究现状做了介绍。

第二章是太阳运动基本规律的基础上，分别介绍了视日轨迹动态跟踪方法、光电探测器动态跟踪方法和两者相结合的方法。

第三、四、五章是根据高精度算法设计动态跟踪系统，依次研究了 GPS 应用技术、基于 GPS 的高精度动态跟踪算法设计、光电探测器动态跟踪算法和机械动力设计技术。

第六章是根据已有的算法进行软件部分的实现，使用 QtCreator 开发整个跟踪的核心算法部分，直观地展示了算法的计算结果。最后选取合肥南一环某处作为试验地，进行算法验证，并选取 NASA 官方计算器的计算结果作为标定，分析基于 GPS 的视日轨迹天文算法结果，验证得知本文改进的算法精度是满足要求的。

第七章对全文做了总结，在分析本文设计的系统的优缺点的基础上，对课题的下一步研究做了展望。

1.5 本章小结

本章主要是对太阳能利用的背景进行了介绍。其中主要包括太阳能利用技术的优缺点、研究的意义、相关技术的情况等，最后给出了本文各章的主要内容。

第二章 太阳追踪系统原理和设计

2.1 地球太阳之间的位置关系

众所周知，一天之内有昼夜之分，一年中又有四季之分。当然这都是自然现象，都是因为地球自转以及地球绕太阳公转引起的。

地球每天都会自西向东绕着通过它的南极和北极的假想轴自转一周，通常这根轴被称为“地轴”。地球自转一周 360° 形成一个昼夜，又因为人们把一昼夜分为 24 小时，所以地球每小时自转 15° 。

地球除了自转之外，还绕太阳在偏心率很小的椭圆轨道上运行，称为公转，其周期为一年。地球公转的轨道称为“黄道”，公转轨道所在的平面称为“黄道面”。地球的自转轴与黄道面的法线的夹角为 $23^\circ 27'$ ，即地球赤道面和黄道面有 $23^\circ 27'$ 的夹角，称为“黄赤夹角”。当地球公转时，自转轴的方向始终不变，这就导致了阳光照射地球的时候，有时候直射赤道位置，有时候偏北又有时候偏南，从而形成了地球上春夏秋冬四季的变化^[9]。图 2-1 为以春分、夏至、秋分、冬至四个典型季节日代表地球公转的运行图。

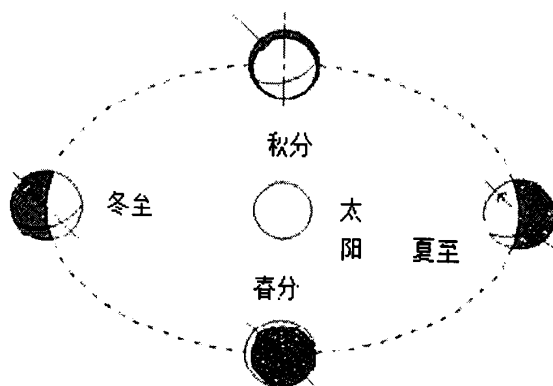


图 2-1 地球绕太阳运行示意图

地球绕太阳运行一周用时一年，计时 365 天 5 小时 48 分 46 秒，这一周期在天文学上称为一个“回归年”。但是在实际的日历中，我们规定一年是 365 天，称为“平年”，并且每四年增加一天为 366 天称为“闰年”。

研究太阳跟踪系统时，有必要对日地相对位置关系进行一些了解认识，特别是太阳和地球之间的坐标系的知识，以及一些太阳位置的参数如高度角、方位角和时角等。

2.2 地球与天球坐标系位置关系

地球上任何一点的位置都可以用两个参数表示，即纬度 ($-90^\circ < \phi < 90^\circ$) 和经度 ($-180^\circ < \lambda < 180^\circ$)。纬度对应于地心至地球表面任意一点之间的连线和其在赤道平面上投影之间的仰角。对于经度而言，一条通过地球南北两极的假想线被称为子午线，这些经线的经度值是固定的。通过英国皇家格林尼治天文台

原址的子午线被定义为 0° 子午线，即大家熟知的本初子午线。对于地球上任意一点的来说，将天空分成两部分且直接在头顶穿过的假想线就是该位置的子午线。

为确定地球表面任意一点接收的太阳能，还需要掌握经纬度以外的其它信息。如果将地球坐标系扩展到整个天球范围，就能计算出太阳相对于地球上任意一点水平面的精确位置。如图 2-2 所示为天球坐标系。

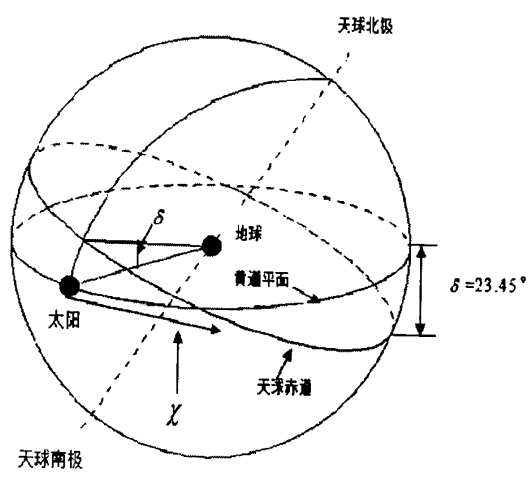


图 2-2 天球坐标系

天球是一个假想的无限大球体，它以地球为中心，其它天体投影到它的上面。这一概念可以用来测量各个星体之间在距离上和角度上的相对位置。天球的南北极和地球的南北极对应。天球赤道和地球赤道位于同一个平面。与地球的纬度类似，天球上某一物体的赤经角(χ)通过向东沿天球赤道测量得到。赤经线从天球一极连接到另一极，定义春分时候赤经角 $=0^\circ$ ，此时太阳位于赤道正上方。

与地球纬度的概念类似，天球上的赤纬角(δ)是对天球赤道南向和北向的偏角。赤纬线和天球赤道平行，角度在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间。由于地球全年都在绕轨道转动，这看起来像是太阳在与天球赤道成 23.45° 的倾斜角绕黄道平面旋转，角度在 $-23.45^\circ \sim 23.45^\circ$ 之间；在赤道点，春分和秋分时 $\delta = 0^\circ$ ，冬至时 $\delta = -23.45^\circ$ ，夏至时 $\delta = 23.45^\circ$ [10]。

相对于地面上的观察者，太阳的位置一直在变化，要实现对太阳的自动跟踪，就需要明确太阳的运动规律。为了能够精确地描述天阳在某一点的位置，就必须采用坐标代表它的位置，一般研究用到的天球坐标系主要有把天球中心和太阳中心重合的黄道坐标系、把天球中心和地球中心重合的赤道坐标系和把天球中心和观察者位置重合的地平坐标系。

2.2.1 黄道坐标系

对于地球上的观察者来说，地球公转一圈，相当于太阳在天空中移动一圈，

那么我们便把太阳的这个运动轨迹称为黄道。黄道和赤道平面相交于春分点和秋分点^[9]。

平行于黄道在天球上可以作无数个小圆，即黄纬圈。通过黄极可以作无数个大圆，即黄经圈，其中过春分点的黄经圈是黄道坐标系中经度（黄经）度量的起始圈。

黄经是一种两面角，即黄道坐标系中的经度。直观上可以看作春分点所在的黄经圈平面与天体所在的黄经圈平面之间的夹角。黄经的度量是以春分点所在的黄经圈为起始圈，在黄道上沿逆时针方向进行的。其值的大小范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 。

黄纬是一种线面角，即黄道坐标系中的纬度。可以看作天体与天球中心的连线和黄道平面之间的线面夹角。黄纬以黄道面为起点面，向南、向北两个方向延伸计算，从黄道面到黄北极的角度取值范围为 $0^{\circ}\sim +90^{\circ}$ ，从黄道面到黄南极角度取值范围为 $0^{\circ}\sim -90^{\circ}$ 。

黄道坐标系是以黄道为基圈，以经过春分点的黄经圈（半圆）为始圈（相当于平面直角坐标系的纵轴），以春分点为原点组成的天球坐标系，它的经度叫黄经（ λ ），是天体所在的黄经圈：终圈同始圈的角距离，即终圈与始圈所夹黄道的一段弧，以春分点为起点，在黄道上逆时针（左旋）度量，从 0° 到 360° ，它的纬度叫黄纬（ β ），是天体相对于黄道的角距离。从黄道开始，沿终圈向北为 0° 到 90° ，向南为 0° 到 -90° 。黄道坐标系主要应用于太阳、月亮及行星在天球上的运动位置的研究中。

2.2.2 赤道坐标系

以天赤道 QQ' 为基本圈，以天赤道和天子午圈的交点 Q （靠近南点 S 的交点）为原点的天球坐标系，称为赤道坐标系。如图 2-3 所示，在赤道坐标系中，北天极 P 是基本圈的极，所以经过 P 点的大圆都垂直于天赤道，经过 P 点和球面上的太阳（ $S_{\odot}$ ）的大圆（时圈）亦垂直于天赤道，两者交与 B 点^[10,11]。

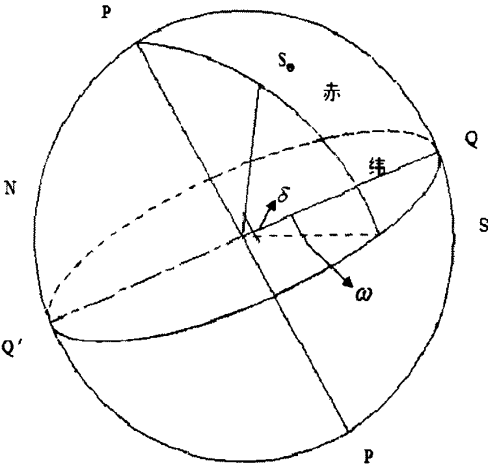


图 2-3 赤道坐标系

在赤道坐标系中，太阳 $S_{\odot}$ 的位置由下列两个坐标决定^[10,11]：

第一个坐标是圆弧 QB ，称为时角(ω)。 ω 是从天子午圈上的 Q 点开始计算的，顺时针方向计量所得值为正值，反之则为负，即上午为正下午为负。

第二坐标是圆弧 $BS_{\odot}$ ，称为“赤纬”，以 δ 表示，规定 δ 从天赤道开始计算。

太阳赤纬 δ 值无时无刻不在变化着，但是在一天之内， δ 变化范围不会超过 0.5° 。因此，在假设每一天的太阳赤纬角为一个恒定不变的值时，所引入的误差小于 0.5° 。

2.2.3 地平坐标系

地平坐标系是目前天文研究中最直观的天球坐标系，也是天文观测中最常用到的。地平坐标系中，基本圈是地平圈，基本点是天顶和天底。

地平圈是观测点地平面无限扩展交于天球形成的大圆。从观测点位置作直线垂直于地平面，在地平面上该直线与天球的交点称为天顶，在地平面下交点为天底。

由于天球的半径长度任意同时地球半径相对极小，观测点位置可以认为和地心重合，地平圈圆心可看成地心，这与观测点所在位置地平面在天球上是完全一致的。过天顶和天底与地平圈垂直的大圆称为地平经圈，同理与地平圈平行的小圆称为地平纬圈。

地轴无限延长形成天轴，其和天球相交于两点，对应地球北极的点称为北天极，地球南极相对应的则为南天极。通过天顶和天北极的地平经圈（当然也通过天底和南天极），与地平圈有两个交点；靠近天北极的点为北点，靠近天南极的点为南点。根据面北背南、左西右东的原则，可以确定当东点和西点，即面向北点左 90° 为西点，右 90° 为东点。这样就确定了地平圈上的东、西、南、北四方点。

因为地平坐标系以观察者所在地为中心点，以该地的地平线作为参考平面，将天球分为上半球和下半球，下半球则是被地球本身遮蔽，因此可以忽略地球下半球的天体运动的轨迹，其中上半球的顶点称为天顶，下半球的顶点称为天底。地平坐标系是以真地平为基本圈，以南点 S 为原点的天球坐标系。

在地平坐标系中以天顶 Z 作为基本的极，所有经天顶 Z 的大圆都垂直于真地平。因此，通过天顶 Z 和太阳 $S_{\odot}$ 的大圆也垂直于地平面，两者的交点是 M ，地平坐标系如图 2-4 所示。

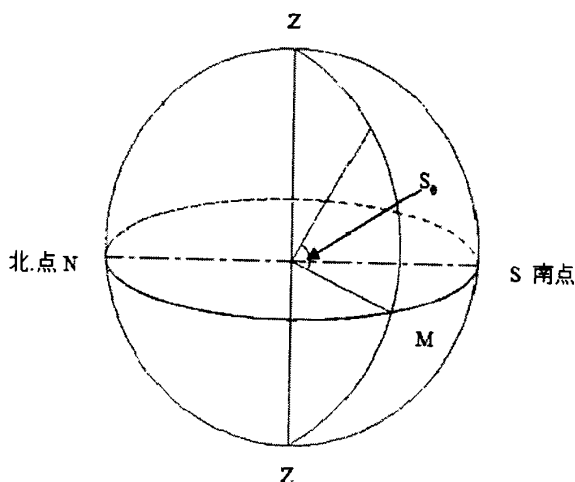


图 2-4 地平坐标系

仰角 ($0\sim90^\circ$) 也称为高度角, 是天体和观察点所在地平线的夹角, 方位角是沿着地平线测量的角度, 其定义为正北方起点, 以水平顺时针方向旋转, 最终返回正北方向, 角度范围为 $\pm 180^\circ$ 。地平坐标系固定在地球上, 所以天体出现在天球上的高度和方位随着时间改变; 外一方面, 因为参考平面是参观者所在的地平面, 所以相同的天体在相同时间从不同的地点观察, 会有不同的高度和方位角度^[12]。

在地平坐标系中, 太阳 $S_\odot$ 的位置由以下两个坐标决定:

第一个坐标是圆弧 $ZS_\odot$, 一般称为“天顶角”, 以 θ_s 表示; 当然也可以用圆弧 $S_\odot M$, 即“太阳高度角”, 以 α_s 表示, 天顶角 θ_s 和高度角 α_s 二者有以下关系: $\theta_s + \alpha_s = 90^\circ$ ^[10]。

第二个坐标是圆弧 SM , 称为“方位角”, 以 γ_s 表示, 并取南点 S 为起点, 向西 (顺时针方向) 计算为正, 向东 (逆时针方向) 计算为负^[10]。因此, 地平坐标系是以太阳高度角和方位角所组成的天球坐标系。

2.2.4 三种坐标系的比较

因为黄道坐标系本身是以太阳移动的轨迹为其基准面, 将黄道坐标系的原理用于太阳追踪研究中并没有很大实际意义。黄道坐标系的功能在于展示太阳系中天体的运动情形, 一般是先计算出天体的黄纬和黄经之后, 再经过一系列的数学换算才能得到观察点直观的物理位置 (如地平坐标系的高度角、方位角等)。

当然若是单以坐标系定位的优劣而言, 赤道坐标系较为方便, 因为定量赤道坐标系的参数 (赤纬角和时角) 赤纬在一天之内的变化量极小 ($\pm 0.064^\circ$)。对追踪器而言可以减少追日的耗能, 且时角规律性的变化使得追踪系统的设计趋于简单化。当然赤道坐标系也有它的缺点, 那就是机构的时角轴心必须正对于地球的自转轴, 这样才能实现机械结构转动与地球的自转一致, 常用的定位

做法是采用与天文仪器赤道仪相同的原理，将时角转轴轴心对准北极星，但是此做法的误差太大，而且还容易受到外界因素的干扰而精度不高。

在地平坐标系中，随着观察者所在地的经纬度变化，使得每个地区观察到的太阳角度不同，其优点是定量此坐标系的两项参数（仰角、方位角）的物理意义简单，不像赤道坐标系要定位极轴的位置，在追踪器机械结构上容易实现，因此本文的算法研究采用地平坐标系^[12]。

2.3 常用太阳动态跟踪方式

相对于地球来说，太阳的运动轨迹是一个范围，不是固定不变的，仅仅只是在一个方向上对太阳位置进行追踪是不精确的，所以对太阳的全方位的跟踪需要使用双轴跟踪系统。双轴跟踪是根据观察者所采用的天球系统，通过驱动两台步进电机转动装置，实现其轴线指向太阳，采用地平坐标系统支撑机构比较简单，跟踪过程也是比较稳定可靠^[2]。

目前国内外跟踪太阳的方法可以分为三种：视日运动轨迹跟踪方法、光电跟踪方法、视日运动轨迹跟踪和光电跟踪相结合的方法。

2.3.1 视日轨迹跟踪方式

相对于观察者而言，太阳的位置是一直在按照某种规律变化的。视日轨迹跟踪方法是根据日地之间的运行规律，采用一定的天文算法对太阳位置进行计算，从而实现对太阳的跟踪^[4]。无论采用哪一种天球坐标系，都可以通过一些算法进行计算得到太阳位置的参数，对太阳的位置进行跟踪。本文所研究的视日运动轨迹跟踪方法是在地平坐标系下进行讨论的。

在地平坐标系下，通过在数学上对太阳轨迹的预测可完成对日跟踪。在时角坐标系中，赤纬角和时角在日地相对运动中任何时刻的值是可推导的，利用天文三角形之间的关系式便可以得到太阳和观测者之间的位置关系^[2]。太阳高度角和方位角示意图如图 2-5 所示。

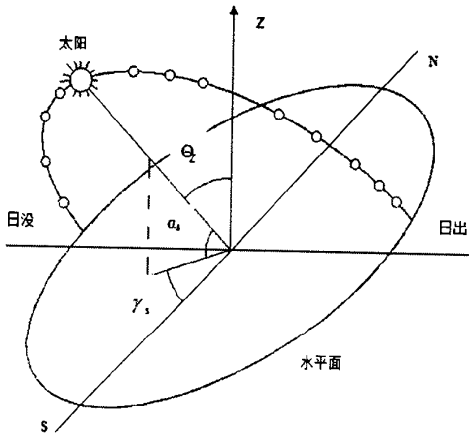


图 2-5 太阳高度角方位角示意图

太阳高度角 α ，太阳方位角 γ_s ，其中 δ 为太阳赤纬角， ω 为时角。换算公式如下：

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2-1)$$

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2-2)$$

太阳赤纬角 δ 可由 Cooper 方程式近似计算， n 为一年中的天数，如在春分， $n=81$ ，则 $\delta=0$ 。在时角 ω 的计算中， T 为当地时间，按小时计算，地球自转一周为 360° ，时间为 $24h$ ，地球每 $1h$ 自转的角度定义为太阳时角 ω ，则 $\omega=15^\circ$ ，正午 $\omega=0^\circ$ ，其他时刻则等于离正午的小时数乘以 15° ，上午为负值，下午为正值^[13]。

$$\delta = 23.45 \sin(360 \times \frac{284 + n}{365}) \quad (2-3)$$

$$\omega = (12 - T) \times 15 \quad (2-4)$$

实际中，太阳的运动轨迹由观察点的经纬度和当地的标准时间大致确定，当然海拔、气温、气压等也会对其轨迹产生一定的影响。但是在已有的技术中，我们可以利用高精度的全球定位系统得到满足要求的地球上任意一点的地理经纬度和当地时间，提供给计算太阳位置的算法进行计算即时太阳的位置数据，同时还保证了跟踪系统的精度、可靠性和实时性等。

2.3.2 光电探测器跟踪方式

光电传感器中常用的有光敏电阻、光敏晶体管和光电耦合器等。其原理是光电效应，当光照射物体时，由于受到一连串具有能量光子的轰击，物体材料中的电子吸收光子能量而发生响应的电效应，如电导率变化、发射电子等^[14]。

光电探测器主要是利用光电传感器进行探测光源信息，光电传感器通过光电转化电路将采集的光信号转化为电信号，然后根据电信号的变化计算得到太阳位置数据。在跟踪探测装置中，光电传感器安装靠近遮光板，调整遮光板就可以使遮光板对准太阳。光电管受阳光照射输出的微电流作为偏差信号，经放大电路放大，由伺服系统计算之后可以调整跟踪装置跟踪太阳。光电传感器基本应用原理如图 2-6 所示。

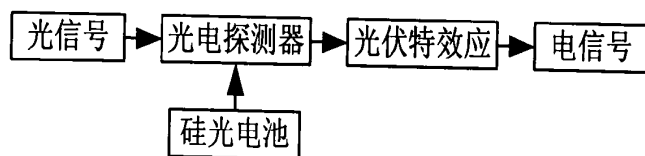


图 2-6 光电传感器基本应用原理

下面介绍两种比较典型的使用光电传感器的探测太阳位置的方法，一种是利用硅光电池设计的太阳追踪系统，另一种是利用图像传感器设计的太阳追踪系统。

(1) 四象限光电探测器

四象限光电探测器主要用到一种硅光电池,它是一种常见的光电传感器件,在激光准直、光电跟踪、激光制导等领域被广泛的应用。四象限光电探测器一般都是由四个参数完全相同的光电二极管按照四个象限位置进行安装。四象限光电探测器的设计结构如图 2.7 所示,实物图如图 2-8 所示。

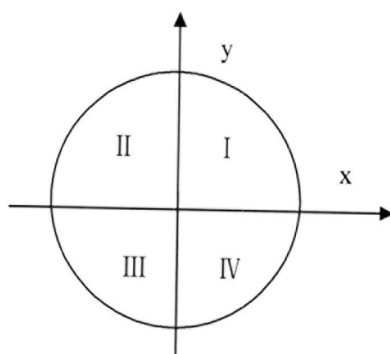


图 2-7 四象限光电探测器结构示意图

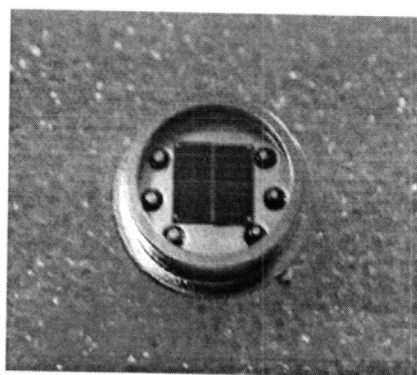


图 2-8 四象限光探测器实物图

当有光束通过光学系统照射到四象限探测器的表面上时,会在其上形成一个光斑。事先设计当光束直射时光斑在各个象限的面积相等,各个象限的光照面积会对应产生对应强度的光电流输出,光电流通过串联的电阻后即可转化为电压信号输出。当光线直射进入时,光斑在各个象限面积相等,四个象限输出的电压信号相同,否则四个象限的输出光电流信号不相等,转化为不等的电压值信号输出,此时比较四个象限的输出即可确定光信号源的方位,然后利用系统的动力系统调节四象限探测器的位置,直至在一个允许误差范围内使光线直射在四象限探测器上,完成对光源如太阳的跟踪^[15]。四象限光电探测器工作流程如图 2-9 所示。

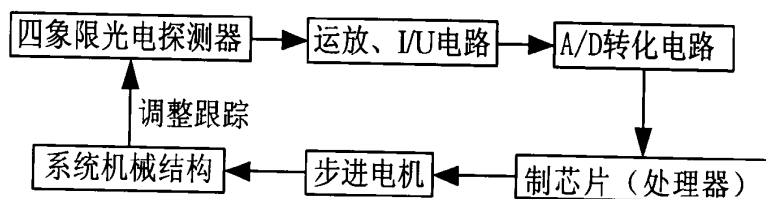


图 2-9 四象限光电探测器工作流程图

四象限光电探测器不可避免的会产生一些误差,通常有如下几种误差产生:

- ①背景光、探测器制造误差;
- ②四象限器件四个象限的不均匀性和灵敏度差异等都会影响到整个系统的对准精度;
- ③硬件电路的噪声引起的误差。

(2) 基于图像的光电探测器

简单来讲,基于图像的光电探测器是采用一片集成芯片和一个镜头代替光敏电阻探测太阳位置的变化,这种基于图像的光电探测方法,可以直观、准确地获得太阳的位置信息^[7]。整个跟踪系统在设计时结构可以更加简单,设计成本也相对较小,最终也提高了跟踪精度。

基于图像的光电探测器主要是利用小孔成像的原理,对于光线经过光学系统所成的光斑,利用图像传感器进行有效接收采集,然后转化为数字图像信号进行处理。

利用软件工具,对所得的数字信号进行处理,根据光斑所成图像的数字特征,利用数字图像处理算法进行推算,便可以得到太阳位置相对于当前接收镜头的位置角度。

经过相关的转化计算,驱动步进电机进行调整镜头位置,实现太阳光线垂直于镜头接收屏入射,最终实现动态跟踪太阳光线的目的。基于图像传感器的光电探测原理如图 2-10 所示。

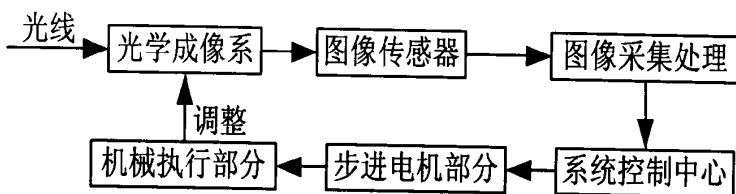


图 2-10 基于图像传感器的光电探测的原理

2.3.3 视日轨迹和光电跟踪相结合方式

视日运动轨迹跟踪法易于实现并且计算简单,不同位置对应改变其对应的经纬度等参数值就可以应用,节省硬件开支等。但是计算时会不可避免有计算误差。同时,由于视日运动轨迹跟踪法是开环控制方法,无法自己修正运行过程中产生的误差,长期使用会导致误差越来越大。

光电探测器跟踪方法虽然灵敏度高、结构设计简单，但也存在着响应慢、精度差、稳定性差和受天气影响大等缺点。

由上可见，将视日轨迹跟踪方法和光电探测器跟踪方法两者结合起来，各取其优点，尽量克服其缺点，便可以极大的提高跟踪精度和系统的稳定性，实现满意的跟踪效果。在系统运行的过程中，以视日运动轨迹跟踪方法为主，以光电探测器即时测得的数据作为反馈，随时修正系统结构的角参数，减小误差积累。如此便可以实现在任何气候下都可以精确地跟踪太阳的位置，并且跟踪过程稳定可靠，目前是重点研究的太阳跟踪技术。

2.3.4 三种跟踪方式的比较

视日轨迹跟踪方法、光电跟踪方法以及二者相结合的方法，三种太阳跟踪方法各有优缺点。

1、视日轨迹跟踪方法可以利用已有算法，方便快捷地计算地球上某一观察点处太阳的角度，并将数据反馈到控制系统，使得追踪系统随时取得位置数据，实时驱动机械结构追踪太阳，这样可以克服一些特殊天气和意外状况的干扰。当然，该跟踪方式也有一些固有缺点，算法过程都相对复杂，从而会增加控制系统的成本。作为开环系统，无角度反馈值做调整，长时间计算的话会产生积累误差。如果要求高精度的话，不仅对机械结构的加工水平有较严格的要求，而且与仪器的安装是否正确也密切相关。一般需要通过仪器底部的水平准直仪将底面调节到与地面保持水平，使跟踪结构的高度角零点处于地面水平面内等^[2]。这些都使得视日轨迹追踪方法在实际中精度并不高。

2、光电探测器方式灵敏度高，结构设计相对简单。但是也存在一些不足，比如受天气影响很大，无法在阴雨天正常工作，而且在外界光源被乌云等物体干扰导致太阳无法照到光电传感器上的时候，会致使跟踪系统无法正常工作，跟踪效率大大降低，有时候甚至引发一些执行错误。

3、视日轨迹方法和光电跟踪方法相结合的方法主要是整合两者的优点，做到了优势互补，克服了单一跟踪方法的缺陷，以实现高精度、全天候和智能控制下的跟踪太阳。其缺点是系统设计成本较高，技术也有待深入研究，实现过程较为复杂，高精度传感器成本也较高^[1]。

2.4 本文太阳动态跟踪系统设计

考虑到设计要求，本研究采用视日轨迹跟踪和光电探测器跟踪相结合的跟踪方法，文中第六章将会具体介绍整体系统设计。

本系统具体跟踪过程中以视日轨迹跟踪天文算法为主，以光电探测器跟踪方法为辅。整个系统主要由太阳跟踪算法设计模块、机械设计模块、GPS 模块、步进电机模块和光电探测器跟踪反馈模块等组成，基于地平坐标系动态跟踪太阳。

本系统采取的太阳跟踪策略是：在天气允许的白天情况下，根据 GPS 采集到的当地的经纬度、海拔等地理信息，利用高精度视日轨迹跟踪算法，计算当前位置的太阳高度角和方位角等信息，处理所得角度信息，经过计算转化为步进电机需要驱动的角度及其对应的步数，然后驱动机械执行结构进行运动达到目标位置，使得追光镜筒正对准太阳的位置，以用于测得最强的实时太阳辐射强度等数据。

系统跟踪期间，每隔一定时间，利用光电探测器跟踪反馈模块测得的太阳位置作为反馈信息进行系统精度修正，消除积累误差。关于光电探测器跟踪算法，本文第四章将介绍关于利用光电探测器进行太阳跟踪的算法，即基于摄像头传感器的太阳跟踪算法，通过图像处理算法求得当前太阳位置。

2.5 本章小结

本章主要是介绍了太阳运动的基本规律，几种主要的天球坐标系，特别是地平坐标系的知识。然后介绍了几种常见的太阳跟踪技术和原理，主要是视日轨迹太阳跟踪方法、四象限光电探测器跟踪方法、基于图像传感器的跟踪方法、以及视日轨迹跟踪算法和光电跟踪算法相结合的跟踪方法。最后采用视日轨迹跟踪方法和光电探测器方法相结合的方法进行了本文系统的设计，并介绍了本跟踪系统设计的基本原理。

本章对太阳跟踪系统在基本原理上进行了介绍，为跟踪系统的具体实现提供了理论支撑。

第三章 基于 GPS 的高精度视日跟踪算法模块

3.1 GPS 模块介绍

3.1.1 GPS 基本组成

GPS 是英文 Global Positioning System（全球定位系统）的简称。GPS 卫星所发送的导航定位信号是一种可供无数用户共享的空间信息资源，通过处理可以得到我们需要的数据信息，包括经纬度、海拔、时间等。本文在算法的设计中采用 GPS 模块测得的观察点的经度、纬度、海拔高度三个数据进行计算，精度较高，例如可以满足适用于太阳辐射计设计所需的精度要求。

GPS 模块由空间部分、地面控制部分和用户设备三大部分组成，为了对它有一个初步的认识，下面分别对这三部分进行介绍。

(1) 空间部分

空间部分主要是对天空中人类发射的 GPS 卫星的总称。根据卫星运行的开普勒第一定律，人造卫星是在一个椭圆的轨道上运行，而地球则位于该椭圆的一个焦点的位置^[12]。GPS 卫星的运行示意图如图 3-1 所示。

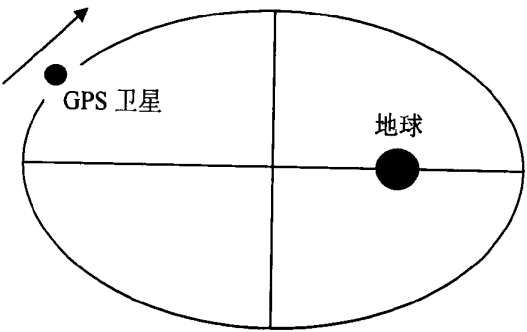


图 3-1 GPS 卫星的运行示意图

在图 3-1 的椭圆面上分布着 6 个 GPS 卫星运行的轨道平面，一共分布 24 颗卫星，此外还有 4 颗备用卫星在轨运行。设计的 GPS 卫星分布可以使得在地球上任意位置都可以至少观察并接收到 4 颗卫星的信息，因此我们可以在时间上连续不断地采集得到观察点所在位置的经纬度、海拔等数据。另外 GPS 卫星有两种电码可用：一组为 C/A 码，精度相对较低，主要是供民间商用；另一组为 P 码，精度较高但是专门供美国军方使用，民间无法解读。

(2) 地面控制部分

地面控制部分是地面监控系统的总称。对于 GPS 系统整体来讲，地面监控部分可以说是核心部分，主要是因为地面控制部分提供了用于导航的所有星历数据。地面监控部分又包括如下几部分：一个主控站、三个注入站和五个监控站。

地面监控站主要的功能有以下几个^[16]：

- ① 检测 GPS 信号。监视测量飞越监测站上空的所有 GPS 卫星的伪距等信

息值，并反馈给主控站；

② 收集数据。主站收集各个监测站测得后反馈回来的数据，并计算卫星星历、相对距离，大气校正等数据；

③ 计算导航电文并注入。首先是主控站根据采集的信息计算卫星的星历等信息，并将这些信息送到注入站。然后注入站使用注入信号将所得的导航电文信息注入到相应卫星；

④ 状态诊断和卫星调度。主控站对整个地面监控系统进行监控，当卫星出现问题时，主控站便对其运行轨道进行修正，必要时还能够启用备用的卫星。

(3) 用户设备部分

主要功能是捕获到按一定卫星截止角所选的 GPS 卫星，然后对这些卫星的运行进行跟踪^[16]。

当用户设备部分接收到卫星信号后，就可测得接收天线至 GPS 卫星的伪距离和距离的变化率，从而解调计算出卫星本身的有关信息数据。然后根据所得数据，用户接收机的微处理芯片进行定位等相关计算，就可以得到例如经纬度、海拔、时间等可供利用的信息。

3.1.2 GPS 工作原理

GPS 的工作过程一般有五个逻辑步骤，分别是三角测量、GPS 接收机利用电磁波信号的传播时间计算距离、获取精确的时间系统、获取卫星在天空中的位置和修正卫星信号通过大气层产生的误差。

(1) 三角测量

整个全球定位系统核心是利用太空中的 GPS 卫星作为参考点对地球上的观察点进行位置定位，其原理是接收机利用三颗卫星的距离计算得到地球上任何一点的位置信息，但是至少需要三颗卫星才可以计算位置。

(2) 距离测量

测量到卫星的距离是通过测量无线电信号到卫星所需的时间得到的。这里有一个假设就是卫星和接收器都是在完全相同的时间产生伪随机码，那么我们通过比较到达接收器的伪随机码和接收器的随机码，便可以得到传输花费的时间，用光的速度乘以传播花费的时间便可以得到距离。

(3) 获取精确的时间

准确的时间是衡量卫星距离的关键，因为装有原子钟的卫星时钟是准确的，接收机就不必太准确。那么一个额外的卫星测距便可以检验出这样的不准确引起的误差，相当于获取了高精度的时间。

(4) 获取卫星的位置

若要采用卫星作为参考物进行距离测量，我们就必须知道他们的精确位置，因为 GPS 卫星的轨道是非常明确的。美国国防部会检测卫星运行轨道的微小变化，轨道的偏差信息将会作为参数发送到卫星，卫星再将这些参数信息随着时

间信号广播给 GPS 用户。

(5) 误差修正

GPS 信号在通过含有电粒子的电离层和对流层的水蒸汽环境时会产生传输误差，目前有误差建模和双频接收的方法可以减少这种误差。在地面上时，信号可能会受到所谓的多路径误差，目前主要是利用先进的多路径抑制技术减小这种反射误差。当然还有一些与接收机有关的误差和人为的误差，其中人为的误差是主要误差。

由上可知，GPS 的工作原理基础是三角测量，GPS 接收机利用电磁波信号的传播时间计算距离以供三角测量计算使用，为了得到电磁波信号传播时间，全球定位系统需要精确的时间系统，当然我们使用第四个卫星解决了这个问题，除了距离还需要卫星在太空中的位置。最后还要修正 GPS 信号通过大气层等产生的延迟误差等。

3.1.3 GPS 的应用特点

GPS 系统的特点主要是全球性、全天候、实时性、高精度、高效率、抗干扰、多功能、多用途等^[16]，下面分别简单介绍。

(1) 全球性和全天候

GPS 系统可以为全球任何地点和近地空间的各类用户提供连续的、全天候的导航等信息，用户只管接收信号不必发送信息，因而可以满足大量的用户使用。

(2) 实时性和高精度

GPS 定位时在 1 秒内可以取得数次位置数据，基本达到实时动态的提供信息数据，同时还可以连续提供三维位置、三维速度和精确的时间信息。目前的 C/A 码的实时定位精度可以达到 20~50m，速度精度为 0.1m/s，利用特殊处理之后可达到 0.005m/s，相对定位可达毫米级别。

(3) 高效率和抗干扰

目前，GPS 系统基本可以实现随时定位，极大的提高了效率，同时 GPS 采用扩频技术和伪码技术，不会受到外界其他信号的干扰。

(4) 多功能和多用途

GPS 系统是军民两用的，其功能全面并且用途广泛，在军事上具有极大战略意义，在民用上可应用于农业、林业、交通水利、航空、通讯、测绘、城市建设等多个领域，具有极大的利用价值。

3.1.4 本文采用 GPS 模块的主要性能参数

经过考察之后，本文选用 GSTAR 品牌的 GS-87 型 GPS 模块，该 GPS 模块集成有串口，配备串口转 USB 设备之后便可以立刻采集 GPS 数据，方便快捷易于使用，GPS 芯片外形如图 3-2 所示。



图 3-2 GS-87GPS 芯片外形图

GSTAR 的 GS-87 模块采用 SIRFIII 的导航芯片,是当前灵敏度较高的模块;该模块外形精巧、性能稳定,接收机可以在小型的封装里输出数据^[18]。GS-87 芯片组主要参数如表 3-1 所示:

表 3-1 GS-87 模块 SIRFIII 芯片参数

GS-87 模块 SIRF3 芯片参数		
芯片组	SIRF3 芯片组	
冷启动时间	低于 45 秒, 平均 42 秒	
卫星通道	并行 20 通道	
脉冲延时	100ms	
灵敏度	-159DB	
操作温度	摄氏 -40°至+85°	
工作电压	3.3V 至 5.5V (VDC)	
定位资料更新	1s	
定位精度	位置	10m 圆周误差
	速度	0.1m/s
	时间	1ms
适用范围	海拔高度	小于 18km
	速度	小于 515m/s
	加速度	最大 4g
天线连接方式	外接天线	
地球坐标系	QGS84	
数据特性	I/O 信息	全双工串行 TTL 接口
	数据传输速率	4800 (默认)、9600、19200、38400 可选
	格式	SIRF 二进制和 NEMA-0183 协议
	数据输出	GPGLL 可选

3.1.5 GPS 通信协议 NEMA-0183 协议

GS-87 模块通讯接口采用串口模式，传输数据是基于 NEMA-0183 协议进行解释,NEMA-0183 协议共提供 8 种 GPS 导航相关的信息:\$GPGSV,\$GPGSA,\$GPGGA,\$GPRMC,\$GPVTG,\$GPGLL,\$GPZDA,\$GPDTM。数据采集原理是 GS-87 芯片连接 RS-232 串口，然后再通过该串口连接到手持设备（比如笔记本、PDA 等）上，其电路示意图如图 3-3 所示。

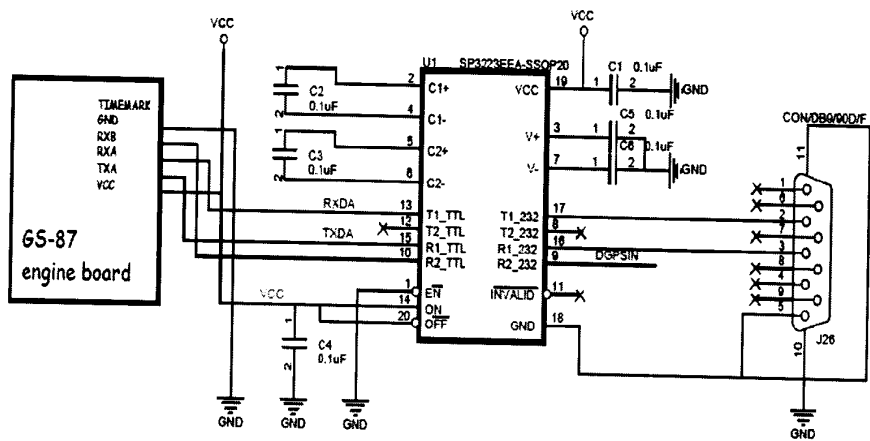


图 3-3 GS-87 芯片集成串口电路图

下面对其数据信息帧简单介绍，首先介绍数据帧的种类，如表 3-2 所示。

表 3-2 NEMA-0183 数据帧种类说明

序号	序号	说明	最大帧长(字节)
1	\$GPGGA	全球定位数据	72
2	\$GPGSA	卫星 PRN 数据	65
3	\$GPGSV	卫星状态信息	210
4	\$GPRMC	运输定位数据	70
5	\$GPVTG	地面速度信息	34
6	\$GPGLL	大地坐标信息	72

下面举例介绍\$GPGGA 语句，这是一帧 GPS 定位的主要数据，也是使用最广的数据，同时本文也主要采用该语句进行计算。

\$GPGGA 数据格式: \$GPGGA,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>*hh<CR><LF>。

实际采集例子: \$GPGGA,085025.000,3150.7539,N,11717.4181,E,1,08,1.2,20.2,M,0.4,M,,0000*5B。

本文的算法将使用表 3-3 中的经度、纬度和海拔高度值进行计算。对其内容介绍如表 3-3 所示。

表 3-3 \$GPGGA 帧信息内容

\$GPGGA	数据帧 ID	
<1>	085025.000	UTC 时间
<2>	3150.7539	纬度, 格式为 <i>ddmm.mmmm</i> (度分)
<3>	N	纬度半球, <i>N</i> 或 <i>S</i> (北纬或南纬)
<4>	11717.4181	经度, 格式为 <i>dddmm.mmmm</i> (度分)
<5>	E	经度半球 <i>E</i> (东经) 或 <i>W</i> (西经)
<6>	1	GPS 状态: 0: 未定位, 1: 非差分定位, 2: 差分定位, 6: 正在估算
<7>	08	正在使用解算位置的卫星数(00~12)
<8>	1.2	<i>HDOP</i> 水平精度因子(0.5~99.9)
<9>	20.2	海拔高度(−9999.9~99999.9), <i>M</i> 表示单位米
<10>	0.4	地球椭球面相对大地水准面的高度, <i>M</i> 表示单位米
<11>	空	差分时间
<12>	0000*5B	差分站 ID 号(0000~1023)

3.2 基于 GPS 的高精度视日轨迹算法设计

本算法是基于《天文算法》^[19]进行改进的一种高精度算法，主要是依据 Reda 和 Andreas 的算法^[20]，对计算太阳高度角和方位角所用参数进行修正，另外还考虑了气压、温度、海拔高度产生的视差^[20]。

设计中利用 GPS 传感器对所需参数进行测量，极大地降低了误差，最后计算合肥南一环某处某一时间的太阳高度角和方位角等参数，并验证得知本文改进的算法的精度满足实际需要。

1、时间系统概念

UT：世界时，或称格林威治平太阳时，是以地球自转为基础的时间计量系统，它以平子夜作为 0 时开始，单位是平太阳时^[19]，有时候也称为 UT1。

TAI：国际原子时，由国际计量局综合全球数十个实验室的近二百台原子钟的读数，通过一定算法平均而得的时间计量系统。

UTC：协调世界时，以原子时为基准的一种时间计量系统，其时刻与世界时 UT1 (UT) 时刻差不超过±0.9s。

TT (TDT)：地球力学时，定义为地球表面的时间标准。

下面是上面参数之间的关系式（单位：秒）：

$$TT = TAI + 32.184 \quad (3-1)$$

$$UT = TT - \Delta T \quad (3-2)$$

$$UT = UT1 = UTC + \Delta UT1 \quad (3-3)$$

式中 ΔT 为世界时和地球力学时(TT)的差值，单位为秒。参考美国国家航空即太空总署 NASA 网页有关 ΔT 计算的式子，可以得到 ΔT 在一年中的定值。 $\Delta UT1$ 用来调整地球不规则的转速。

2、儒略日计算

星历表的计算中使用的日期为儒略日(Julian Day)，儒略日是一种不用年月日的长期计日法，简称 JD，其计算方法如下：

$$JD = 365.25 \times (Y + 4716) + 30.6001 \times (M + 1) + D + B - 1524.5 \quad (3-4)$$

其中 Y 为年份，例如 2010、2011 等，M 为月份，例如一月记为 1，以此类推。要注意的是若 $M < 3$ ，则公式中的 M 和 Y 需要修正为 $Y = Y - 1$ 、 $M = M + 12$ 。

D: decimal time，是将时间转化为天数的形式，例如某个月的 2 号 12 时 30 分 30 秒 (UT)， $D = 2.521180556$ ，注意的是将当地时间转换为世界时。

B: 若计算的 $JD < 2299160$ ，则 $B = 0$ ，表示采用儒略历 (Julian calendar)；若 $JD > 2299160$ ，则 $B = 2 - A + A/4$ ，其中 $A = Y/100$ ，表示采用格里历 (Gregorian calendar)。

计算历日，以力学时计算的儒略日 (Julian Ephemeris Day, JDE)：

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (3-5)$$

计算儒略世纪 (Julian century, JC) 以及历世纪 (Julian Ephemeris Century, JCE)，JCE 是以力学时计算的儒略世纪，另外还需要计算千禧年 (Julian Ephemeris Millennium, JME)，计算如下：

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (3-6)$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (3-7)$$

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (3-8)$$

3、日心黄经 L、日心黄纬 B 和日心经度向量 R

日心的意思是以太阳中心计算地球位置，首先计算地球日心经度的 L_0 项：

$$L_{0i} = A_i \times \cos(B_i + C_i \times JME) \quad (3-9)$$

$$L_i = \sum_{i=0}^n L_{0i} \quad (3-10)$$

其中 A_i 、 B_i 、 C_i 分别为星历表中的第 i 行 A、B、C 的值，n 为行数，地球

对应 L_0 为 64 行，其余 L_1 到 L_5 的计算类似 L_0 [19]。

计算地球日心经度 L （单位：弧度）：

$$L = \frac{L_0 + L_1 \times JME + L_2 \times JME^2 + L_3 \times JME^3 + L_4 \times JME^4 + L_5 \times JME^5}{10^8} \quad (3-11)$$

将弧度转化为度：

$$L(\text{in degree}) = \frac{L(\text{in radians}) \times 180}{\pi} \quad (3-12)$$

其中 L 的角度范围为 0° 到 360° ，地球日心经度 B 和经度向量 R 的计算流程同 L 。

将 L 、 B 带入下面的式子中可得到太阳黄纬 β 和黄经 Θ ：

$$\begin{cases} \Theta = L + 180^\circ \\ \beta = -B \end{cases} \quad (3-13)$$

4、黄经章动 $\Delta\psi$ 和斜章动 $\Delta\epsilon$

地球章动的原因是太阳和月球潮汐力的影响，下面计算地球因为围绕太阳公转及月球影响导致的地轴偏离的参数，单位为度。

月球和太阳之间的平均伸张度（elongation）：

$$X_0 = 297.85036 + 445627.11148 \times JCE - 0.0019142 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (3-14)$$

太阳的平均近点角（anomaly）：

$$X_1 = 357.52772 + 35999.05034 \times JCE - 0.0001603 \times JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (3-15)$$

月球的平均近点角：

$$X_2 = 134.96298 + 477198.867398 \times JCE - 0.0086972 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{56250} \quad (3-16)$$

月球的纬度角距（argument of latitude）：

$$X_3 = 93.27191 + 483202.017538 \times JCE + 0.0036825 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (3-17)$$

月亮的升交点经度（longitude of the ascending node）：

$$X_4 = 125.04452 - 1934.136261 \times JCE + 0.0020708 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000} \quad (3-18)$$

根据章动模型 IAU2000 的计算方法，可得：

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i \times JCE) \times \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right) \quad (3-19)$$

$$\Delta\epsilon_i = (c_i + d_i \times JCE) \times \cos\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right) \quad (3-20)$$

其中 a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 为参数 a 、 b 、 c 、 d 第 i 列的参数， X_0 到 X_4 如上得到，

$Y_{i,j}$ 是 Y_0 至 Y_4 在第 i 列的参数, 计算可参照 Reda 和 Andreas 的算法^[20]所附的周期表。

最后计算出的黄经章动 $\Delta\psi$ 和斜章动 $\Delta\varepsilon$ 如下:

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000} \quad (3-21)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (3-22)$$

5、太阳真实黄纬 β 、真实黄经 λ 和黄赤交角 ε

前面计算得到的黄纬数值即为太阳真实黄纬 β , 因为无论地轴的岁差或章动现象变动如何, 太阳的黄纬必定接近 0° 。地心测量的太阳视黄经受到章动的影响, 修正后的太阳视黄经计算公式如下: (单位为度)

$$\lambda = \Theta + \Delta\psi + \Delta\tau \quad (3-23)$$

其中 $\Delta\tau = -\frac{20.4898}{3600 \cdot R}$ 为修正参数。

黄赤交角指黄道面和地球赤道的夹角, 不考虑地轴章动时可以将此夹角视为定值 ($\varepsilon = 23^\circ 26' 20.52''$), 算法中考虑章动现象, 所以真实的黄赤交角需要将地轴偏斜的数值 (斜章动 $\Delta\varepsilon$) 加上平均黄赤交角 (ε_0), 计算公式如下:

平均黄赤交角 ε_0 (单位为弧秒) 其中 $U = \text{JME}/10$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = & 84381448 - 468093U - 1.55U^2 + 199925U^3 - 51.38U^4 - 249.67U^5 - 39.05U^6 \\ & + 7.12U^7 + 27.87U^8 + 5.97U^9 + 2.45U^{10} \end{aligned} \quad (3-24)$$

真实的黄赤交角 ε (单位为度) 如下:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (3-25)$$

6、太阳赤经 α , 太阳赤纬 δ 和太阳视角 H

计算由地球中心测得的赤经 α 、赤纬 δ 和当地时角 H :

$$\tan\alpha = \frac{\sin\lambda\cos\varepsilon - \tan\beta\sin\varepsilon}{\cos\lambda} \quad (0^\circ < \alpha < 360^\circ) \quad (3-26)$$

$$\sin\delta = \sin\beta\cos\varepsilon + \cos\beta\sin\varepsilon\sin\lambda \quad (3-27)$$

$$H = v + l_{\text{local}} - \alpha \quad (3-28)$$

其中 v 为恒星时, l_{local} 为观察点的地理经度 (东经为正, 西经为负)。

实际上一般观察太阳位置会因为地理条件的不同产生误差, 所以在计算太阳位置角度时候, 需要先修正视差造成的角度误差。

太阳水平视差角度:

$$\xi = 8.794/3600 \times R \quad (3-29)$$

视差修正参数项 μ (经度):

$$\tan\mu = 0.99664719 \times \tan\varphi \quad (\varphi \text{ 为地理经度}) \quad (3-30)$$

修正参数项 x :

$$x = \cos u + (E/6378140) \times \cos\varphi \quad (3-31)$$

其中 E 为观察点当地的海拔高度, 单位为米。

视差修正参数项 y :

$$y = 0.99664719 \times \sin u + (E/6378410) \times \sin\varphi \quad (3-32)$$

因为视差导致的赤经的角度变化量 $\Delta\alpha$:

$$\tan(\Delta\alpha) = \frac{-x \sin\xi \sin H}{\cos\delta - x \sin\xi \cos H} \quad (3-33)$$

修正为真实赤经 δ' :

$$\delta' = \frac{(\sin\delta - y \sin\xi) \cos(\Delta\alpha)}{\cos\delta - x \sin\xi \cos H} \quad (3-34)$$

修正为真实时角 H' :

$$H' = H - \Delta\alpha \quad (3-35)$$

3.2.1 计算太阳仰角及方位角算法原理

在太阳辐射计中, 步进电机控制跟踪太阳的方位角和俯仰角, 实现对太阳的跟踪。未经大气折射修正的太阳仰角计算公式如下, 单位为度:

$$e_0 = \text{Arcsin} \left(\sin\varphi * \sin\delta' + \cos\varphi * \cos\delta' * \cos H' \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3-36)$$

考虑大气折射的影响 Δe , 修正公式如下, 单位为度:

$$\Delta e = \frac{P}{1010} \times \frac{283}{273 + T} \times \frac{1.02}{60 \times \tan \left(e_0 + \frac{10.3}{e_0 + 5.11} \right)} \quad (3-37)$$

其中 P 为当地的年平均大气压强, 单位为毫巴 (millibar), T 为当地年平均气温, 单位为 $^{\circ}\text{C}$, e_0 如上计算, 单位为度。可得真实太阳仰角 e , 单位为度:

$$e = e_0 + \Delta e \quad (3-38)$$

天顶角和仰角互余, 可得天顶角 a 的计算公式, 单位为度: $a = 90 - e$

修正后的太阳方位角 Γ 计算公式如下, 单位为度:

$$\Gamma = \text{Arctan2} \left(\frac{\sin H'}{\cos H' * \sin\varphi - \tan\delta' * \cos\varphi} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3-39)$$

转化为专门应用于太阳辐射的方位角 Φ , 范围为 0° 到 360° , 单位度:

$$\Phi = \Gamma + 180 \quad (3-40)$$

另外可以根据年月日时间信息计算得到日出日落时间, 方法可以借鉴 Reda 和 Andreas 的算法^[20] 的附录 2。

3.2.2 算法实际计算试验

在设计中要求跟踪太阳的精度比较高，下面就用此算法计算合肥市南一环某处观察点的应用情况。

该观察点的地理坐标位置为（经度为+117.271155°，纬度为+31.845336），海拔为 18 米，以上数据可以通过 GPS 传感器获得。并且已知该地点的年平均气压为 101.25kpa，即 1012.5millibars，年平均气温为 15.7℃，所处时区为+8， ΔT 在 2011 年取值为 65 秒。

下面用本算法计算合肥该处的 2011 年 5 月 1 日的太阳位置(方位角、高度角)和太阳日出日落时间^[21]。经计算得到日出时间为 5 时 25 分 4 秒，日落时间为 18 时 50 分 37 秒^[21]，然后画出高度角曲线图如图 3-4、仰角曲线图如图 3-5，角度值的取值时间为从早上 6 时到下午 18 时，单位为度：

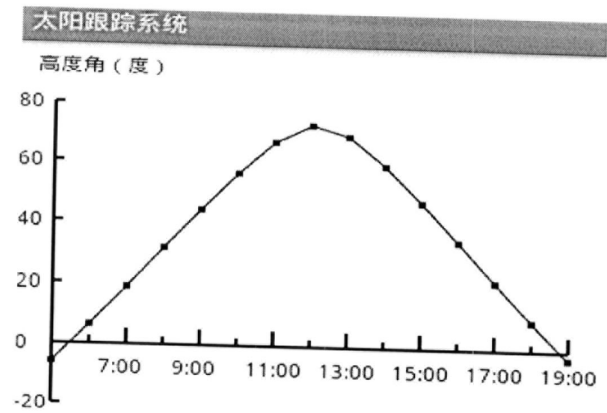


图 3-4 合肥市南一环某处 2011 年 5 月 1 日白天的太阳高度角曲线图

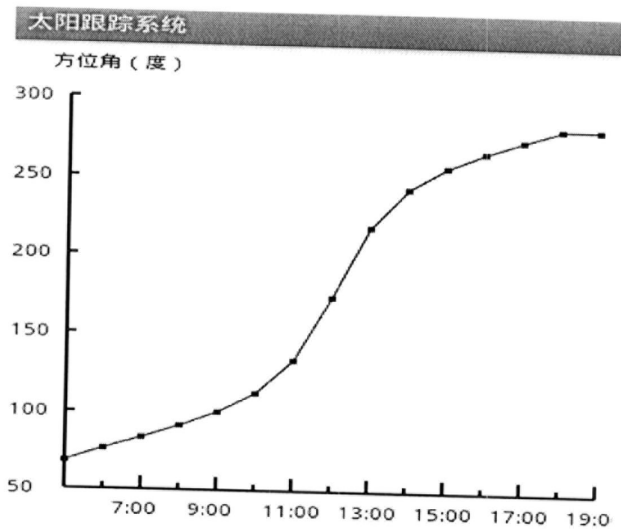


图 3-5 合肥市南一环某处 2011 年 5 月 1 日白天的方位角曲线图

本研究中,利用 GPS 传感器动态获取观察点位置信息作为参数，然后借鉴 Reda 和 Andreas 的太阳位置算法，计算太阳位置数据。该方法设计可以满足系统的移动性，而且在精度上来说也满足要求，本算法对于高精度太阳跟踪、太阳辐射强度等信息的测量都具有现实意义^[21]。

3.3 本章小结

本章主要是介绍了 GPS 的基本知识和应用原理，对于本研究对 GPS 模块的开发使用提供了理论基础，然后详细介绍了一种高精度的太阳位置算法，并使用该算法实际计算某地太阳位置角度，利用得到一些数据进行算法可行性验证，同时还对所得太阳位置角度的数据进行了画图说明。

本章提出了本文研究所需的视日轨迹跟踪算法，并逐步说明了该算法的具体计算，这样便在理论上给出了本文系统核心算法基础，然后通过实际计算某地太阳角度验证了本算法的可行性，可以对于太阳跟踪系统的设计提供了算法设计依据。

第四章 基于图像的动态光电探测模块介绍

传统的光电探测跟踪一般都采用一级传感器跟踪方式，在结构上由位置检测器、控制部件和跟踪头组成，设计较简单，使用也较为广泛。系统的跟踪精度和传感器的精度直接相关，只要可以准确地接收到透镜系统聚焦过来的光斑，光电池就可以实现跟踪太阳位置，所以也比较容易实现，且具有较高的跟踪精度。当然，考虑到系统结构的设计问题，该跟踪系统只能实现在一定的角度范围之内有效跟踪太阳，如果太阳不在跟踪的范围之内，或者是其它情况导致的比如无光斑的情况，则无法正常工作。

基于图像的光电探测器可以极大的克服传统光电探测器的缺点，实现更方便快捷、精度更高和抗干扰的动态跟踪。

4.1 基于图像的光电传感器的介绍

图像传感器产品主要分为 CCD、CMOS 以及 CIS 传感器三种。本文主要介绍 CCD 摄像头和 CMOS 摄像头两种图像传感器^[22,23]。

电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 是 20 世纪 70 年代开始发展的新型半导体图像传感器。CCD 包含大量的感光单位，当受到光线照射时，其感光单位将会产生电信号，此时将这些电信号组合起来，就构成了一幅完整的数字图像信息^[24]。

随着半导体材料技术以及微细计算的迅速发展，CCD 的结构日益精细，功能也越来越强大，在成像、测量、图像处理和识别等方面已经被广泛的应用，其稳定可靠和高分辨率的优势正逐渐表现出来^[25]。CCD 主要是利用电荷信号进行图像处理，其工作原理主要是分为四个部分：电荷的注入产生、电荷存贮、电荷运输、电荷的检测^[23,26,27]。

CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 图像传感器，是将光敏元件、放大器、A/D 转换器、存储器、数字信号处理器和计算机接口电路等集成在一块硅片上，具有结构简单、处理功能多、成品率高和价格低廉等特点^[28]。CMOS 图像传感器已经实现数字化输出，并且可软件编程控制，因此在一些非高端的应用中被广泛采用。

在实际使用中，图像采集卡主要是用作图像采集部分和图像处理部分的接口^[29]。

CMOS 图像传感器因为具有高集成度、高速、小体积、低价格等特点，所以在低端应用的市场上占据着很大的份额；CCD 图像传感器由于其结构具有的低噪声、高分辨率画面和高灵敏度等质量特性使得其在高端应用市场上占极大的份额^[3,30]。

与 CCD 图像传感器进行比较，CMOS 图像传感器一般具有如下的优点^[2]：

(1)集成度高。一般 CMOS 传感器都可以整合光电转换、信号放大以及 A/D 转换等电路在一起。

(2)功耗小。相同条件下，仅仅和 CCD 功耗的 1/8 相差不多。

(3)整合简单。可以实现整个电路系统的精简，整合之后使电路效率更高，最终提高了整个系统的抗干扰性和稳定性。

在对太阳的跟踪中，主要是要求图像传感器易于系统的嵌入设计，灵活读取局部图像信息，功耗小以及方便供电等，综合比较之后采用 CMOS 图像传感器对太阳跟踪系统进行设计。

4.2 CMOS 图像传感器对日探测跟踪原理

4.2.1 跟踪系统原理

系统的基本软件流程为：首先对各功能模块和控制参数进行数据设置的初始化，然后通过图像采集模块获取目标图像信息，再利用图像处理算法对获得的图像数据处理，根据计算结果判断太阳位置，得到太阳位置数据之后就可以驱动机械结构跟踪太阳。系统设计流程图如图 4-5 所示。

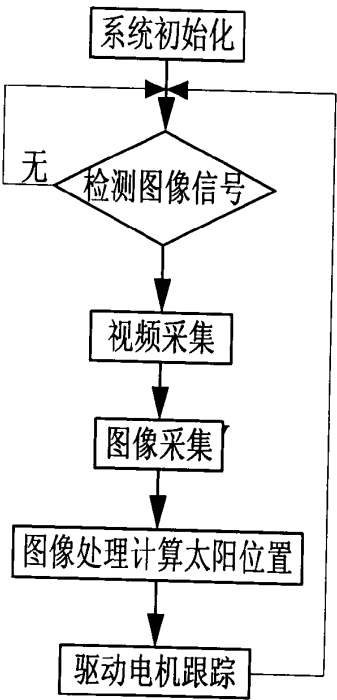


图 4-1 CMOS 图像传感器对日跟踪流程图

4.2.2 CMOS 图像传感器跟踪算法介绍

基于图像传感器的对日跟踪系统在定位和跟踪时，采用的方法主要分为两种：波门跟踪和相关跟踪^[3]。

波门跟踪算法主要分为边缘跟踪算法和形心跟踪算法。形心跟踪算法又可以细分为面积平衡法跟踪、双边缘中心跟踪、质心跟踪等，CMOS 图像传感器

采用质心跟踪算法，所以下面主要介绍质心跟踪的算法。

在质心跟踪算法设计中，一个均匀的二维目标真正的中心是质心。假设有 n 个质量单元，其质量为 m_k ， X ， Y 轴的方向坐标分别为 x_k 和 y_k ，则质量距分别为^[3]：

$$m_x = \sum_{k=1}^n x_k m_k \quad (4-1)$$

$$m_y = \sum_{k=1}^n y_k m_k \quad (4-2)$$

形心即质量中心坐标为：

$$\bar{x} = \frac{\sum x_k m_k}{\sum m_k} \quad (4-3)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_k m_k}{\sum m_k} \quad (4-4)$$

另外，实际中采用下式计算质心跟踪算法的误差，式中 A_t 为目标面积， $S=1$ 为目标点， $S=0$ 为非目标点：

$$e_x = A_t^{-1} \iint x s(x, y) dx dy \quad (4-5)$$

$$e_y = A_t^{-1} \iint y s(x, y) dy dx \quad (4-6)$$

系统采集到的目标图像是个带有太阳光斑的图片，所以太阳光斑和背景的灰度值区别非常明显，并且由于太阳距离相当远，小孔成的像占采集到的图像的面积很小，一般为 4 到 5 个像素点。

本算法是采用逐个比较采集到的图像的像素点值的方法，求得最大像素值及其对应的坐标，并把它作为太阳的真正光点像位置，然后通过对该点位置的调整就可以实现对太阳的动态跟踪。

4.3 本章小结

本章主要是介绍了光电传感器的原理和应用，并进行了性能比较，然后阐述了图像传感器 CCD 和 CMOS 的原理特性等。结合太阳跟踪实际使用，采用 CMOS 图像传感器介绍了太阳跟踪算法原理。

本章内容对于光电探测器跟踪反馈模块的设计提供了很大的参考，特别是为基于图像传感器的太阳跟踪算法提供了设计依据。

第五章 太阳追踪系统机械与动力模块介绍

本章的机械动力设计部分主要借鉴法国 CIMEL 公司制造的 CE318 型自动跟踪扫描的太阳光度计，该仪器的主要功能就是可以实现自动跟踪太阳位置，采用双轴马达步进电机，跟踪精度优于 0.1° ^[31,32,33]，其实物图如图 5-1 所示。

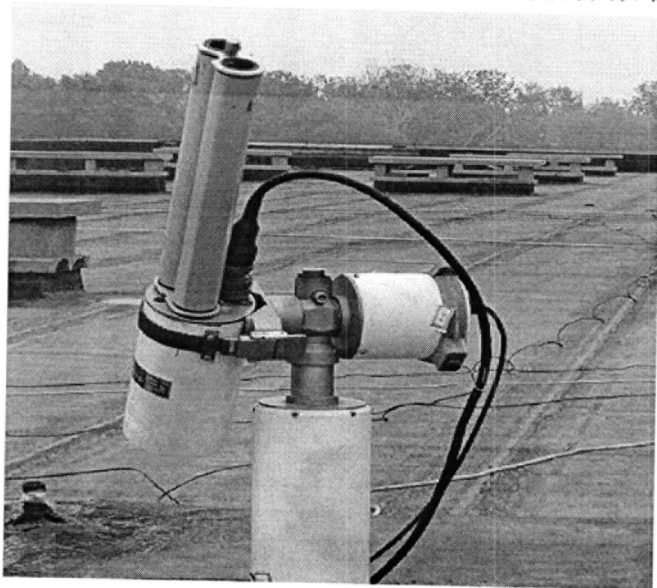


图 5-1 CE318 太阳辐射计实物图

CE318 太阳辐射计主要是由传感系统、伺服系统和控制系统三部分组成。其结构图如下图 5-2 所示。

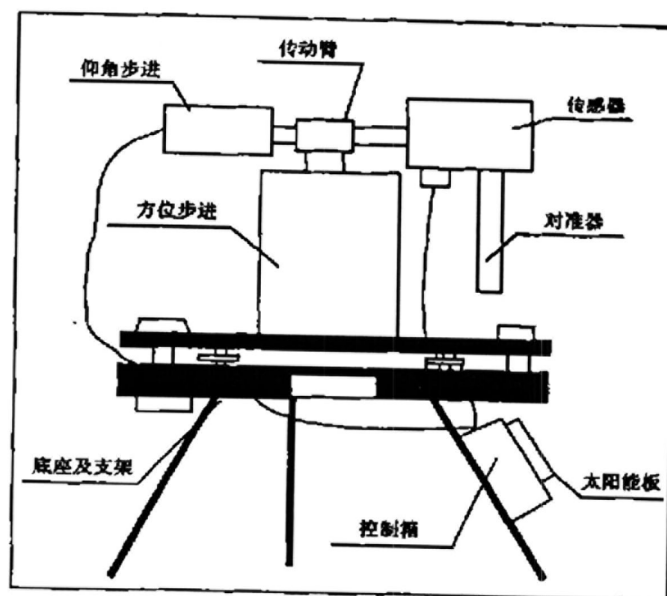


图 5-2 CE318 太阳辐射计结构示意图

其中传感器系统采用双镜筒装置，利用四象限光电探测器进行跟踪，另外在镜筒中还有一些测量辐射强度的装置，传感器中有湿度传感器可以在降雨等

天气状况下暂停仪器的工作。伺服系统主要是由方位步进电机和天顶角步进电机组成，两个电机分别通过控制线和控制中心相连，控制系统则通过控制程序进行驱动步进电机，实现仪器的跟踪探测。控制系统集成在控制箱内，包括控制盒、电池块和太阳能电池板^[34]。

5.1 动力系统设计介绍

微处理器计算得到太阳的位置后，通过控制线输出控制信号给步进电机，步进电机驱动机械结构转动一定的角度，实现跟踪太阳。

一个完整的步进电机控制系统应含有步进电机、步进驱动器、直流电源以及控制器(脉冲源)^[7]。动力系统设计原理流程图如图 5-3 所示。

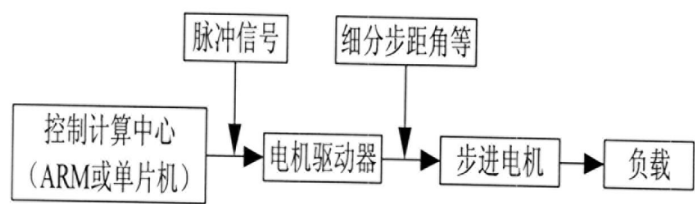


图 5-3 动力系统设计原理示意图

5.1.1 步进电机选型

因为对太阳的跟踪在角度上来说是一个随机的过程，所以一种可以精确控制的电机，由此步进电机就成了最为合适的选择。步进电机结构图如图 5-4 所示。

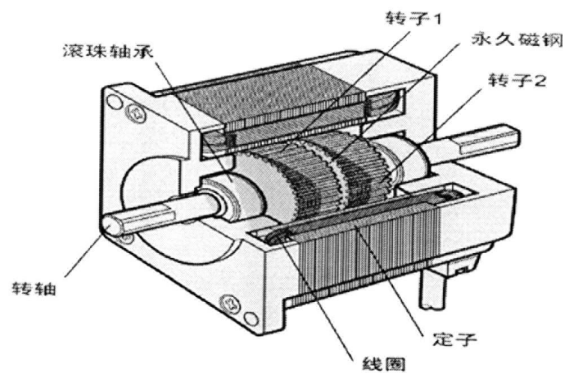


图 5-4 步进电机结构图

因为步进电机的转动是一步一步进行的，故叫做步进电机。而且还有一个特点就是步进电机的步数和输入的脉冲信号是同步的，每一个输入的脉冲信号对应电机的转子的一步，这样很大程度上易于进行数字控制。一般来讲步进电机有如下特点^[7]：

- (1) 不失步的情况下，步进电机的角位移与输入脉冲数严格成正比，一般步进电机的精度为步距角的 3-5%，不存在累积误差，具有良好的跟随性。
- (2) 与驱动器组成开环数控系统，简单可靠，价格低廉，另外它也可以用

于闭环数控系统组建。

(3) 动态响应快，易于启停、正反转及变速，另外步进电机外表允许的最高温度取决于不同电机磁性材料的退磁点。

(4) 速度可以在很大的范围之内平滑转变，即使在低速运行状态下也可以获得较大的转矩，因此可以直接驱动负载。

电机驱动电压越高，电机电流越大，负载越轻，电机体积越小，则共振区向上偏移，反之亦然。一般来说步进电机可以分为三大类：反应式、永磁式、混合式^[35]。太阳跟踪系统需要保证整个装置运转的平稳可靠，故在原理上来讲应该采用混合式步进电机。

5.1.2 步进电机驱动器选型

步进电机驱动器是一种能使步进电机运转的功率放大器，能把控制器发来的脉冲信号转化为步进电机的角位移，可以通过控制脉冲频率实现精确调速，控制脉冲数就可以精确定位。其步进电机控制原理结构图如图 5-5 所示。

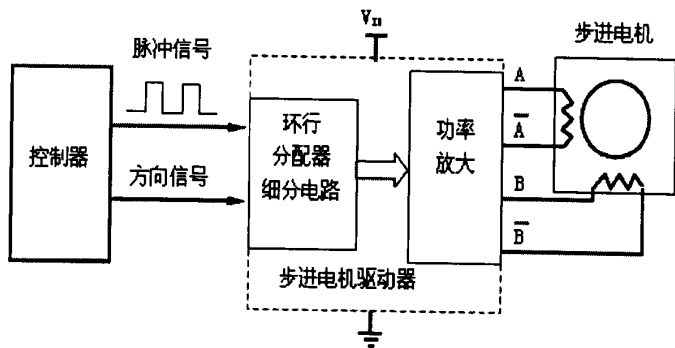


图 5-5 步进电机控制原理结构图

步进电机的精细运转离不开步进电机驱动器的调节，二者组成一个系统，二者协同工作才可以实现驱动效果，在驱动系统中步进电机对驱动器有以下基本要求^[7,37]。

- (1) 相数、通电方式和电压电流等参数满足电机的工作要求；
- (2) 需要满足在步进电机启动和运行时候的频率要求；
- (3) 在最大的限度上可以抑制步进电机的震荡现象；
- (4) 稳定性好，可以抗干扰。

步距角的大小由转子齿数和运行拍数决定的，由于受制造工艺的影响，齿数不可能做的很多，因此步进电机的步距角一般都很大^[7,37]。步距角比较大可能会导致一些问题，比如不能够精确定位、导致震荡和失步、运行效率不高等，从而使得步进电机应用场合受到极大限制。

目前采用的脉冲技术可以极大的增大步进电机精度，其原理就是通过控制电路，将步距角细分为更小的步距角。因此结合实际，在太阳跟踪系统中应该采用具有细分功能的步进电机驱动器。

5.2 系统机械结构设计

在理论上讲，若要实现跟踪太阳轨迹，使得太阳的入射光线角度为零，就需要采用双轴太阳跟踪系统，在高度角和方位角上同时跟踪天阳位置。双轴太阳跟踪系统的结构又可以分成两种：在时角坐标系下设计的极轴式太阳全方位跟踪系统，在地平坐标系下设计的地平坐标系双轴太阳全方位跟踪系统^[38]。

本文算法的计算可得到太阳的高度角和方位角，所以可以在地平坐标系下建立双轴太阳跟踪系统，建立起跟踪系统的运动和太阳位置之间的对应关系。结合实际应用场合的要求，双轴太阳跟踪系统应当满足以下基本条件：

- (1) 可以在一个比较大的范围内进行运动，因为太阳运动轨迹是一个面积区域，并要避免极限位置锁死。
- (2) 可以适应对太阳高度角和方位角动态追踪，结构简单易于加工操作，价格合理，光学结构设计满足系统要求。

采用了高度角方位角双轴跟踪，本太阳跟踪装置是从高度角和方位角上进行跟踪运动，方位轴垂直于地平面完成对方位角的跟踪，高度轴是垂直于方位轴，完成对高度角的跟踪。系统设计的双轴式跟踪系统结构图如图 5-6 所示：

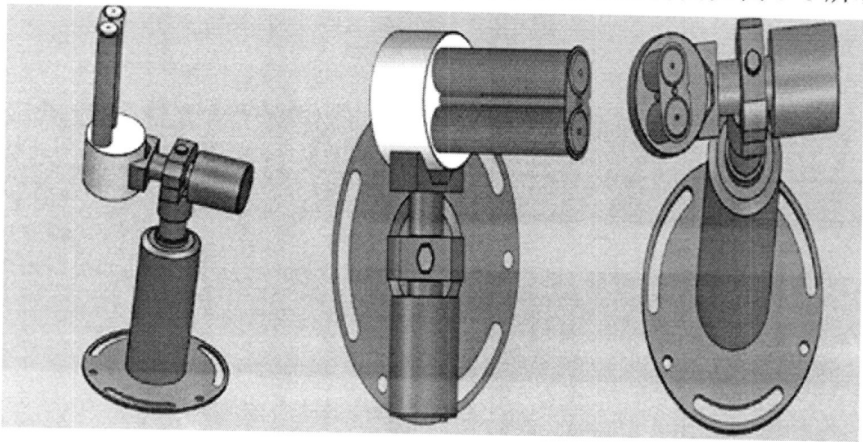


图 5-6 双轴太阳跟踪系统结构图

跟踪系统的底座上支撑的为方位轴，可以自由转动 360°，步进电机就安装在该轴上进行方位角的跟踪，当然步进电机是由滚动轴承进行支撑连接，这一设计可以实现对于方位角的跟踪。

控制高度角的步进电机位垂直于支撑轴安装，由滚动轴支撑，可以驱动高度轴在 0~90°范围内的跟踪太阳的高度角。在实际的系统运行中。方位角步进电机的工作和高度角步进电机的工作互不影响，可以同时实现对于太阳高度角和方位角的动态全方位跟踪。

5.3 本章小结

本章首先介绍了 CE318 型太阳辐射计的设计原理，然后借鉴该型太阳辐射计，对太阳跟踪系统的机械动力部分进行了初步设计，在原理上对步进电机和

步进电机驱动器进行了介绍，然后介绍了驱动系统相应设备的选型等知识，最后对于太阳跟踪的机械结构框架进行了设计。

本章意义在于给出了本研究中机械动力部分的参考设计模式，为下一步机械动力系统设计提供了方向，这样便对整体太阳跟踪系统提供了具体的跟踪实现模式，基本上确定了跟踪的方法。根据实现系统机械动力运行跟踪的需要，可以方便地对太阳跟踪算法的进行目的性的选择。

第六章 系统软件仿真模块

对本文跟踪算法研究之后，作者决定采用 windows 下基于 C++语言的 QT 开发工具进行软件开发，实现对太阳跟踪算法的界面化展示，对于下一步的在 ARM 开发板上的开发提供了便利，本文这里主要是实现上位机上的算法实现和逻辑设计。

6.1 软件设计平台 QT 介绍

和 VC 开发软件类似，QT 也是基于 C++，主要是用于开发图形用户界面的开发工具，它是由诺基亚公司开发推出的，具有跨平台操作的特征。相对于 VC 软件来讲，QT 带有更多的 API 库函数，特别是它可以开发出视觉效果更炫的界面，因此被广泛应用于嵌入式的界面开发之中。QT 可以完全面向对象，开发中易于扩展使用，可以避免重复开发等，真正的可以做到组件编程。QT 从开始被商业化以来，已经被全世界各国开发人员所认同和采用，在它的基础上开发出来了大量的成功的应用程序。其实 QT 和 Windows 平台上的 MFC，OWL，VCL 等图形开发库以及 X Window 上的 Motif，Openwin，GTK 界面开发库都是类似的东西。相对而言，QT 有自己独特的优点，比如强大的跨平台开发特性、丰富的图形开发界面库函数以及丰富的技术文档等^[38]。其项目开发过程截图如图 6-1 和图 6-2 所示：

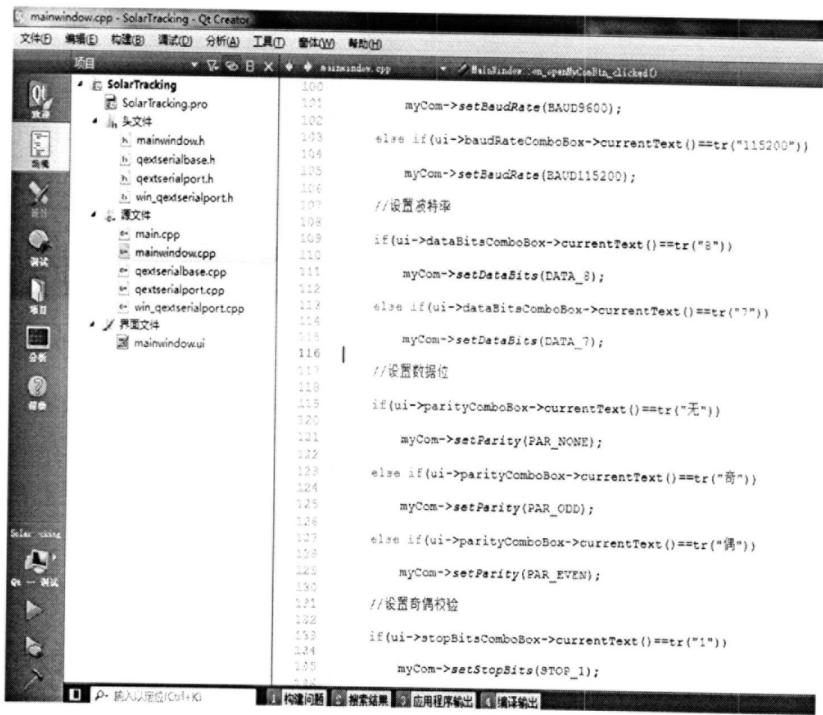


图 6-1 QtCreator 项目文件编辑界面

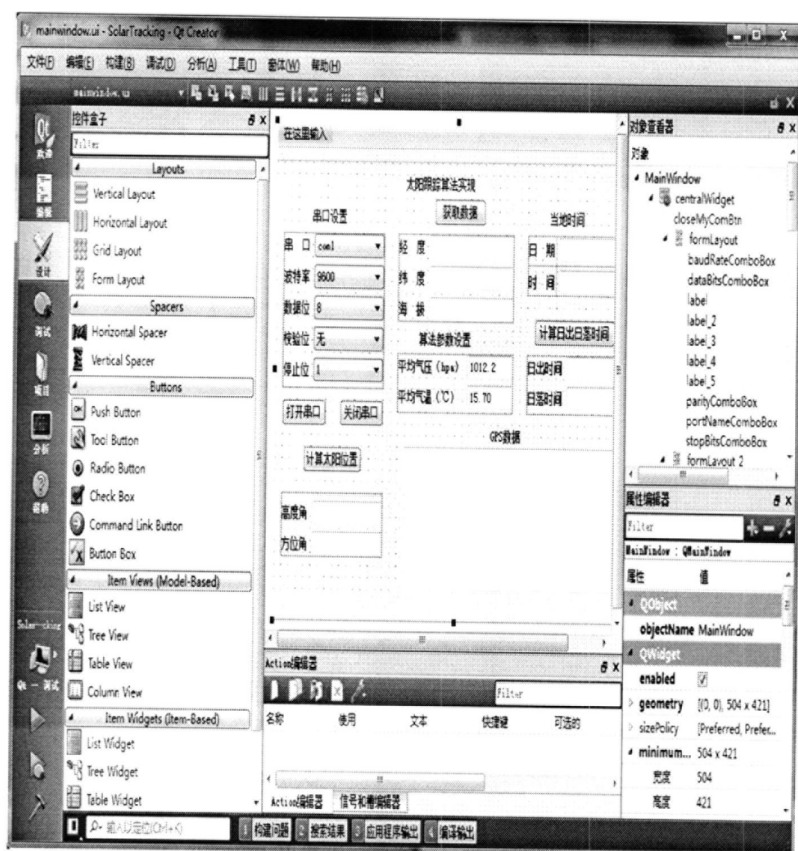


图 6-2 界面编辑界面

本软件是在 windows7 下进行软件开发，安装 Qt4.7 较新的版本，使用 QtCreator 进行软件实现，最终实现了对 GPS 数据的读取，并处理取得的经纬度、海拔等实时数据。利用所得 GPS 数据和设置数据计算太阳即时高度角和方位角。

6.2 系统整体流程设计

系统开始运行之后，首先进行数据的初始化，然后接受 GPS 数据进行分析计算，首先计算日出日落时间并和本地时间比较，判断是否白天，若在日出前则继续等待日出，否则接着利用湿度传感器判断天气是否允许，若湿度超过一定限度则不运行系统，若天气允许则利用高精度算法计算太阳位置，然后转化为步进电机需要转动的步数，再驱动装置进行跟踪。然后判断是否日落，若日落则停止计算太阳位置，并且驱动追踪装置归零等待下一次的追踪过程，否则继续计算太阳位置，继续跟踪太阳运动。光电探测器模块可以反馈参数给系统，防止积累误差。

系统流程如图 6-3 所示，具体实现程序见附录 1（不考虑光电探测校正）。

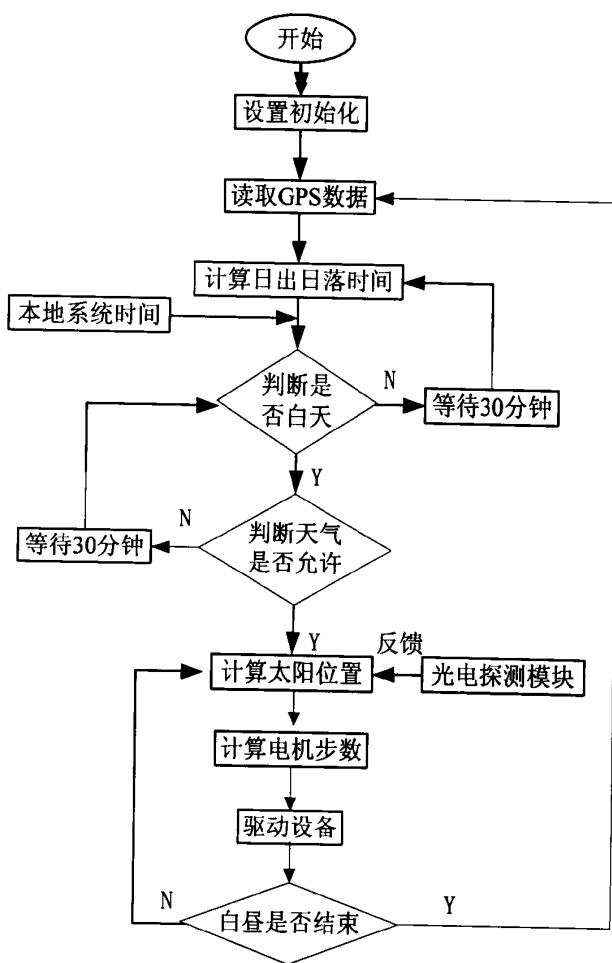


图 6-3 太阳动态跟踪系统原理图

6.2.1 GPS 数据的处理流程

本文中采用的 GPS 芯片型号是 GS-87, 这个型号的 GPS 具有效能高、功耗低的特点, 是一种智能的卫星信号接收的开发模块。它采用美国瑟孚公司所设计的卫星定位接收芯片, 在使用中可以满足专业定位的精度要求以及个人使用中的特定要求, 是一种功能全面而且强大的 GPS 开发模块^[39]。

NMEA-1083 协议制定的目的是在不同的导航设备之间建立一个无障碍通信的标准, 是 GPS 卫星导航系统中非常重要的一个协议。GPS 接收机基于上述通信协议进行解读 GPS 数据, 然后将经纬度信息、海拔高度和世界时等信息数据输出到终端设备使用。NMEA-0183 协议定义的语句非常多, 常用的语句有 \$GPGGA、\$GPGSA、\$GPGSV、\$GPRMC、\$GPVTG、\$GPGLL 等。

因为本算法中不需要所有的 GPS 数据, 所以需要对以 NMEA-0183 协议发来的数据进行解析处理, 取得所需数据。首先是读取 GPS 数据到字符串数组中, 然后对数组进行处理, 判断目标语句和对应的目标信息数据。流程图如图 6-4 所示:

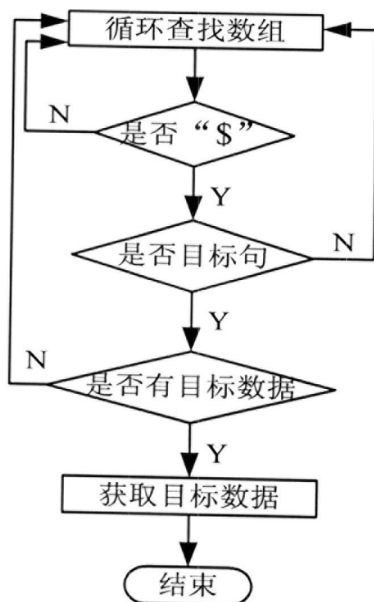


图 6-4 获得 GPS 目标数据的流程图

本部分的功能在 QT 中的实现代码见附录 2。

6.2.2 GPS 动态计算太阳角度的算法软件实现

本软件设计主要是实现算法仿真，首先通过串口读取 GPS 数据，需要设置串口参数；然后获取经纬度和海拔数据；再计算日出日落时间；最后计算太阳的高度角和方位角，软件设计如图 6-5 所示。

MainWindow

太阳跟踪算法实现

串口设置

串口: com1
波特率: 9600
数据位: 8
校验位: 无
停止位: 1

获取数据

当地时间

时间: 13:07:38
日期: 2012-04-27

算法参数设置

平均气压 (hpa): 1012.2
平均气温 (°C): 15.70

计算日出日落时间

日出时间: 5:29:00
日落时间: 18:48:00

计算太阳位置

高度角: 69.0876
方位角: 215.761

GPS数据

```

GPGGA,050921.130,3150.7698,N,11717.4701,E,0,00,
,31.4,M,0.4,M,0.0000*78
$GPRMC,050921.130,V,3150.7698,N,11717.4701,E,,
270412,,N*7D
$GPVTG,,T,,M,,N,,K,N*2C
$GPGGA,050922.134,3150.7698,N,11717.4701,E,0,00
,,31.4,M,0.4,M,0.0000*7F
$GPRMC,050922.134,V,3150.7698,N,11717.4701,E,,
  
```

2012-04-27 13:07:38 星期五

图 6-5 设置算法软件实现

6.3 算法的精度研究

基于 GPS 高精度算法，上述软件计算合肥南一环某地 2012 年奇数月份的第一天的 12: 00 的太阳天顶角和方位角，结果保留三位有效数据，采用四舍五入，所得数据如表 6-1 所示(单位: 度):

表 6-1 2012 年奇数月份一号 12 点整的太阳角度

月份	1	3	5	7	9	11
天顶角	54.669	39.365	16.435	9.076	23.508	46.065
方位角	175.923	170.749	172.834	157.288	172.997	181.719

下面利用 NASA 网站的官方实验室计算器进行相同时间的太阳天顶角和方位角的计算，基于地球上某一点的日期、时间和经纬度，该 NASA 官方的计算器可以计算公元前 2000 年到公元 6000 年的太阳天顶角和方位角，最终计算误差可以控制在±0.0003°之间。

用该官方计算器计算 2012 年奇数月份一号中午 12 点的太阳高度角和方位角，所得数据如下表 6-2 所示:

表 6-2 2012 年奇数月份一号 12 点整的太阳角度

月份	1	3	5	7	9	11
天顶角	54.646	39.352	16.430	9.074	23.501	46.048
方位角	175.923	170.749	172.834	157.288	172.997	181.719

该计算器的界面是网页形式提供的，设置部分截图如图 6-9 所示:

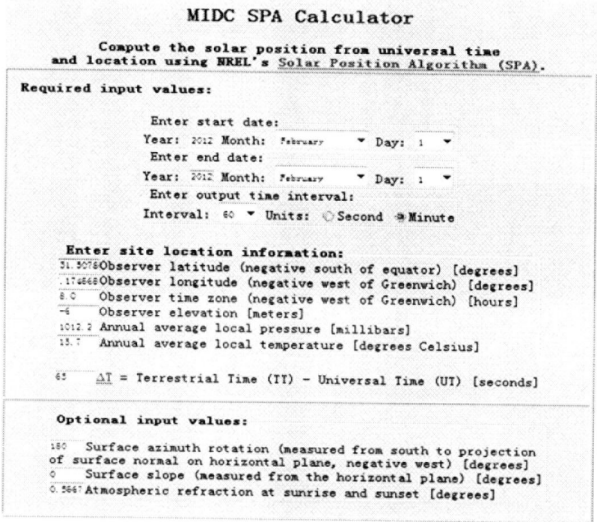


图 6-6 NASA 官方网站的高精度计算器

前后计算得到的对应数据进行相减我们可以得到数据如表 6-3 所示(单位:度):

表 6-3 两种计算器的计算结果误差比较

月份	1	3	5	7	9	11	平均误差
天顶角	0.023	0.017	0.005	0.002	0.007	0.017	0.0118
方位角	0	0	0	0	0	0	0

由表 6-3 中计算结果可知, 本文的基于 GPS 的算法和在相同条件下 NASA 官方实验室的计算器的计算结果误差很小。在保留小数点之后三位小数的情况下, 天顶角平均误差为 0.0118°, 方位角平均误差是为 0°。

另外, 由表 6-3 可知天顶角最大误差为 0.023°, 最小为 0.002°, 虽然相对于 0.0003°来说较大, 相对于 CE318 的光电跟踪方法的±0.1°的追踪精度来说, 本算法基本可以满足天顶角±0.025°和方位角小于±0.001°的计算精度。由此可见, 本算法是满足高精度太阳跟踪系统的高精度要求的。

6.4 本章小结

本章主要是对系统软件进行了设计, 实现对串口 GPS 数据进行采集, 然后处理得到 GPS 数据, 利用得到的数据和若干手动设置参数进行计算, 得到特定时刻和地点的太阳高度角和方位角, 实现了高精度的太阳位置算法的仿真计算。最后把本算法结果和 NASA 计算器计算结果进行比较, 得到的两者误差小于 0.1°, 基本可以保证天顶角优于±0.025°和方位角优于±0.001°的追踪精度, 从而验证了本算法可以满足太阳跟踪系统设计中的高精度要求。

通过本章中对太阳跟踪系统的核心算法进行具体计算、对比验证等处理, 从而得出了本文所提出算法的精度是满足设计要求的结论, 在算法理论上对本系统的设计精度进行了一定的探讨研究。

第七章 总结与展望

随着相关硬件技术的发展和算法理论的不完善,近年来高精度太阳动态跟踪技术发展迅速,取得了一系列的成果,特别是在能源和气象等领域的研究中取得了一些重要的进展。

本文主要研究了一种动态计算太阳位置的高精度算法,并设计了相关的跟踪系统子模块。借鉴法国 CIMEL 公司的 CE318 太阳辐射计对机械动力部分进行了设计,对利用光电探测器跟踪太阳的技术进行了研究,介绍了基于图像的动态跟踪算法。重点介绍了一种高精度太阳轨迹算法,并借助 QT 软件和 GPS 开发模块对其进行了仿真实现。经过和 NASA 官方计算结果对比,得知本文算法精度满足动态太阳跟踪系统的要求。

本文所提出的高精度太阳动态跟踪技术主要有以下几个特点:

(1) 高精度。本文的太阳轨迹算法基本可以保证天顶角优于 $\pm 0.025^\circ$ 和方位角优于 $\pm 0.001^\circ$ 的追踪精度,考虑到 CE318 型太阳辐射计的四象限光电跟踪方法的 $\pm 0.1^\circ$ 的追踪精度,并且该型辐射计已经可以实现高精度的太阳位置跟踪计算,可以推知本算法具有高精度的优点。

(2) 动态性。系统设计中采用 GPS 模块采集观察地点的地理信息,由于 GPS 传感器实时接收卫星数据的特点,所以系统可以实现随时随地的动态地计算太阳位置,从而实现对太阳的动态跟踪。

(3) 全天候。因为系统的设计中不涉及天气因素,而且 GPS 传感器也可实现全天候的工作,视日跟踪算法不必考虑天气因素,所以本文所研究的高精度太阳动态跟踪系统可以全天候运行。

(4) 全方位。本跟踪系统中采用地平坐标系,设计双轴跟踪系统从高度角和方位角两个维度上跟踪太阳位置,实现了全方位跟踪太阳。

(5) 自调节。采用光电探测器进行辅助跟踪,将利用光电探测器得到的太阳位置参数反馈给跟踪系统,使系统实现自调节,可以消除视日跟踪算法的固有的积累误差。

以上优点对于高精度太阳跟踪、太阳能利用率的提高、太阳辐射强度的测量、气象数据测量和沙尘暴的监测等都有着极大的现实意义。当然,因为实验条件的限制,时间仓促和水平有限,本文的研究还有一些需要继续改进的地方。

下面对本课题研究的不足之处和改进方法进行一些说明和展望。

(1) 本文设计的系统还有待完备。本设计中光电探测器跟踪部分虽然在原理上进行了介绍,但是在实际中还需要实物实现,以便在实际使用中对跟踪系统进行反馈。

(2) 本文所述算法只是在理论上进行了可行性验证。文中介绍的算法还需要进一步验证是否适合实际采用,有可能在实际利用时会产生一些算法无法克

服的误差，比如算法积累误差、算法过于复杂引起的问题等，都有可能導致一些实际跟踪的问题。

本文系统下一步还需要继续改进算法和其它部分，特别是光电探测器部分和机械设计部分需要继续具体实现，并且要继续在实际中验证本系统的稳定性。

可以展望对于高精度动态太阳跟踪技术的研究将会越来越受到重视。随着太阳跟踪技术的研究和发展，该技术在实践中将会被越来越多的采用，并且将会被广泛应用于太阳能利用、气溶胶监测和气象环境的监测等领域。

参考文献

- [1] 刘昌盛. 独立式小型光伏发电系统的研制[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2007.
- [2] 任松林. 主动式太阳跟踪及驱动系统研究与设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] 金晶晶. 太阳光线自动跟踪装置[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2004.
- [4] 田卫娟. 基于 FPGA 的太阳自动跟踪系统的研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [5] 尤金正. 基于图像传感器的闭环式太阳跟踪控制器的研究与实现[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [6] 陈维, 李戡洪. 太阳能利用中的跟踪控制方式的研究[J]. 能源工程, 2003, (3):18-21.
- [7] 刘丽微. 基于视觉的太阳光线自动跟踪装置[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- [8] 夏小燕. 大范围太阳光线跟踪传感器及跟踪方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [9] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009:8-16.
- [10] Robert Foster, Majid Ghassemi. 太阳能—可再生能源与环境[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 8-10.
- [11] 陈志豪. 太阳能供暖/热水组合系统的实验与模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [12] 张智凯. 被动式双轴太阳追踪器之追控系统开发[D]. 台湾: 台湾国立中央大学, 2008.
- [13] 王金奎. 日辐射及逐时辐射模型的适用性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [14] 王涛. 基于球面结构的太阳跟踪装置控制系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2005.
- [15] 冯静, 张龙, 刘先立. 四象限太阳传感器的设计[J]. 能源研究与利用, 2010(4): 12-13.
- [16] 梁迪. GPS 在太阳能追光系统中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [18] 董明瑞. 邮政储蓄银行运钞车报警监控系统[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [19] Meeus, J. "Astronomical Algorithms". Second edition 1998, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, USA.
- [20] I. Reda, A. Andreas, "Solar position algorithm for solar radiation applications," NREL/TP-560-34302, January 2008.
- [21] 李保来, 李保生, 刘志健. 用于移动式太阳辐射计的高精度太阳跟踪方法

- [J]. 能源与节能, 2011, 68: 67-68.
- [22] 赵建林. 高等光学[M]. 国防工业出版社, 2002.
- [23] Bobroff N. Recent advance in displacement measuring interferometry[J]. Meas Sci Technol. 1993(4):907-926.
- [24] 付翠花. 基于编辑距离的眉毛识别方法的研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- [25] 何胖洋. 基于 LCD 目标板的 MTF 测量方法研究[D]. 合肥: 合肥工大学, 2010.
- [26] 刘奋飞. 基于线阵 CCD 的快速瞄准与定位技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [27] 张广军. 光电测试技术[M]. 中国计量出版社. 2003.
- [29] 王高. 窄脉冲激光波长测试技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [28] 刘文其. 迈克尔逊干涉条纹分析系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [30] 熊平. CCD 与 CMOS 图像传感器特点比较[J]. 半导体光电, 2004, 25(1): 1-4.
- [31] Measurement Protocol For Direct Solar Measurements Using Sun Photometers, SIMBIOS Project, Code 970.2, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20770.
- [32] Sun-photometer reaserch, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e dell'Oceano-Institute of Atmospheric and Oceanic Sciences, <http://www.isao.bo.cnr.it/~r-Adiclim/fotometl.html>.
- [33] Sun Photometer Model SPUV BULLETIN SPUV6-10, <http://www.yesinc.com>.
- [34] 陈征. CE318 太阳光度计基本结构与安装使用[J]. 陕西气象, 2002, 5:43-44.
- [35] 边永生. 小型天线参数的自动化测量[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [36] 刁洪泉. 基于 DSP 的三相混合式步进电机脉冲细分驱动系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [37] 李鹏, 廖锦城, 蔡兰兰, 杨培环, 吴贺利等. 双轴太阳跟踪系统运动控制规律的研究[J]. 机械制造, 2010, 48(550): 23-26.
- [38] 刘伟平. 通过嵌入式系统 GPRS 实现 PC 机与手机通信的研究与开发[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [39] 陈坤. 基于 OSEK/VDX 规范的远程车载控制器的开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.

攻读硕士学位期间发表的论文

1. 李保来, 李保生, 刘志健. 用于移动式太阳辐射计的高精度太阳跟踪方法 [J]. 能源与节能, 2011, 68: 67-68.