

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除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，也不包含为获得宁夏大学或其它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了谢意。

研究生签名：谭伟田

时间：2014年6月3日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解宁夏大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意宁夏大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：谭伟田

时间：2014年6月3日

导师签名：柯泽林

时间：2014年6月5日

摘要

我国荒漠化土地面积为 262.2 万平方公里, 约占国土面积的 27.4%。土地的沙漠化为大风起沙提供了物质源泉。中国北方地区沙尘暴发生越来越频繁, 且强度大, 范围广, 给居民生产生活带来了很大影响。沙尘暴的预警与防治能有效的降低这些影响。与以往气象监测手段不同, 本文提出了利用沙尘环境参数监测平台深入沙漠腹地获取沙尘暴形成的条件和运动的规律, 从沙尘暴的源头研究和预防沙尘暴。

根据沙尘环境参数监测平台的设计要求, 监测平台由单片机 8051F020 作为核心处理器, 外接风速传感器、风向传感器、风蚀传感器、气压传感器、空气温湿度传感器、沙埋传感器、状态传感器以及 SIM908 GPS 模块。采集的传感器数据先经过数字滤波程序处理, 然后经过标度变换转换为沙尘暴研究所需要的数据参数, 最后通过串口将转换后的数据参数送至上位机。采用中值滤波和滑动平均滤波相结合的数字滤波, 来消除脉冲干扰和减小随机误差对测量的影响。

沙埋传感器根据电容原理设计, 通过单片机检测振荡电路的振荡频率可以计算出传感器的电容值, 由电容值可以计算出沙埋的深度。状态传感器由单片机 8051F410 控制加速度传感器和地磁传感器, 并对从传感器读取的测量数据进行数据处理。为了提高传感器的测量精度和可靠性, 沙埋传感器和状态传感器都在内部设计了校准功能。

系统采用 Altera 公司的 Cyclone II EP2C5T14418 FPGA 芯片配合处理器选择与传感器的连接, 各传感器通过外接电路使通信接口统一为串口。这样设计可以在某模块通信出现问题时, 便于替换或采用备用通路。系统的模块化设计, 便于团队的分工和合作, 提高了开发的效率。

关键词: 沙尘信息监测, 单片机, 传感器, 模块化设计

Abstract

Nowadays, the area of desertified land in China is about 2,622,000 square kilometers, accounting for 27.4% of national territory area. The desertification of land is the primary cause of sandstorm. In northern China, sandstorm occurred more frequently and serious, which brings great influence on people's lives. Detecting and preventing of sandstorm will effectively reduce the wastage of sandstorm.. Different from the way of researching sandstorm before, we find a new way of researching sandstorm. Discard old meteorological monitoring method, this paper proposed to use the dust environment parameters monitoring platform into desert hinterland to get the data of the formation of sandstorm and the law of movement, and prevent sandstorms from the source.

According to the requirement of parameter in sand-dust environment parameter monitor platform, Microcomputer C8051F020 was used in the monitoring platform to control wind-speed sensor, wind-direction sensor, wind-erosion sensor, air-pressure sensor, air-temperature sensor, air-humidity sensor, sand burial sensor, the status sensor, and GPS SIM908 module. The data which read from sensor can be changed into parameter which research for sandstorms by digital filtering and data conversion process. The monitoring platform sends the data which has already changed to host computer through the serial port. Digital filtering use median filter and moving average filter to eliminate the influence of glitch and random error during measuring.

The sensor of sand burial-depth is designed by capacitance principle. The sand-burial-depth can be calculated by the capacitance value. The frequency of oscillator circuit depends on the value of the capacitance. And the sand-burial-depth can be calculated by counting the oscillation frequency of oscillator circuit. The status sensor is form of microcomputer C8051F020, acceleration sensor and magnetism-sensor. To improve the accuracy and reliability, the calibration function has been designed in the status sensor and sand burial-depth sensor.

Microcomputer C8051F020 connects with sensors and collects data from sensors by coordinating with Cyclone II EP2C5T144I8 FPGA chip. The system is designed in modularized circuit. Every sensor has a unified interface by using an external circuit, which is convenient to debug the system, so as to improve the efficiency of the development.

Key words: Sand-dust information monitoring, Microcomputer, Sensor, Modular-design

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究沙尘暴的意义	1
1.2 国内外对沙尘暴的研究现状	1
1.3 设计沙尘环境参数监测平台的意义	2
1.4 课题来源和内容安排	3
1.5 本章小结	4
第二章 沙尘环境参数监测平台的设计	5
2.1 监测平台的技术指标	5
2.2 监测平台的系统设计	6
2.3 本章小结	14
第三章 沙尘环境参数监测平台的硬件电路	15
3.1 监测平台的电路结构	15
3.2 电源电路	15
3.3 传感器连接电路	17
3.4 FPGA 的电路	18
3.5 本章小结	18
第四章 沙尘环境参数监测平台的软件设计	19
4.1 系统程序结构	19
4.2 与上位机通信程序	19
4.3 数据采集程序	21
4.4 数据处理程序	25
4.5 沙埋传感器软件设计	27
4.6 状态传感器软件设计	28
4.7 本章小结	30
第五章 测试与总结	31
5.1 系统测试	31
5.2 总结	32
参考文献	33
附录	35
附录 1 CRC 校验程序	35
附录 2 SHT11 驱动程序	35
致谢	39
个人简介	41

第一章 绪论

1.1 研究沙尘暴的意义

沙尘暴是沙暴和尘暴两者兼有的总称,是指强风把地面大量沙尘物质吹起并卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度小于一千米的严重风沙天气现象^[1,2]。沙尘暴主要发生在冬、春季节,这是由于冬、春季干旱地区降水很少,地表非常干燥松散,抗风蚀能力很弱,每当有大风刮过时,就会将大量的沙尘卷入空中,形成沙尘暴天气。沙尘暴天气多发生在内陆沙漠地区,源地主要有撒哈拉沙漠和北美中西部地区,澳大利亚也是沙尘暴天气的主要源地之一^[3]。

沙尘暴是一种危害性极大的全球性自然灾害天气现象,严重威胁着人民群众的生命和财产安全。在我国,塔里木盆地周边地区、吐鲁番-哈密盆地经河西走廊、宁夏平原至陕北一线和内蒙古阿拉善高原、河套平原及鄂尔多斯高原均为高发地区^[4,5]。沙尘暴会带来房屋倒塌、交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等危害,以及污染自然环境,破坏作物生长等后果。每年沙尘暴都会给国民经济建设和人民生命财产安全造成严重的损失和极大的危害。据不完全统计,2010年4月24日甘肃省民勤等地区遭受强沙尘暴袭击,造成130多万人受灾,3.33万公顷农田绝收,直接经济损失达9.37亿元^[6,7]。

2011年9月15日英国《Nature》杂志以焦点新闻方式发表了题为“Science enters desert debate”的文章,认为“当前人们主要关注于土地退化、荒漠化所造成的水土流失和粮食减产的监测和评估,虽然科学家们已经通过卫星遥感数据进行荒漠化研究,但是这些研究仅能反映地表温度和植被盖度等宏观特征,接下来科学家们应该开始寻找土地退化和荒漠化的因素以及如何演化的机制”^[8]。因此,进行荒漠化和沙尘暴起因研究对沙尘暴预测和科学防治具有非常重要的现实意义。

1.2 国内外对沙尘暴的研究现状

作为一个深受沙尘暴之害的国家,目前国内对荒漠化的研究已经比较深入和系统。如:2001年中国建成了全世界最大的沙尘暴监测站,这个监测站位于宁夏沙坡头,占地2平方公里。根据接收到的散射光的强弱,计算出不同高度的空气中沙尘物质的含量、分布结构以及运动速度等数据,从而准确地监测到沙尘暴的过境过程。北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室从生态学的角度研究了土壤的水蚀监测以及土壤侵蚀等问题。北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室从地理学角度进行了区域自然灾害的系统研究。兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室从力学和电磁学的角度研究了沙丘的运动以及风沙起电现象。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所(寒旱所)进行了风沙边界层动力学与床面形态等方面的研究^[9]。

我国对于沙漠化的研究始于上世纪五十年代,中科院治沙队在兰州等地区进行了大规模的考察,对于沙化地区的自然条件与环境、风沙的运动规律、农田操场的防风固沙、沙区水土资源的开发与利用等方面进行了合理又系统的研究。到上世纪九十年代后期,我国初步形成了沙漠化科学的理论框架和研究方法建立了一批定位研究示范试验站,带动了对于沙漠化的监控与防治^[10]。

二十一世纪,我国对于沙漠化的研究进入了一个新的发展阶段。目前,我国对沙尘暴的研究主要集中在基于地面观测网、遥感手段对沙尘暴进行监测和预报。在沙尘暴的地面观测方面:中

国气象局于 2001 年建立了基于能见度和天气现象的沙尘暴观测网；中国环境监测总站于 2010 年建成了 82 个沙尘暴监测站，可实时监测沙尘暴的过程。在沙尘暴的遥感监测方面：中国气象局早期发展了沙尘暴卫星遥感监测的方法，目前通过自有或使用国外卫星的遥感数据（热红外、可见光、近红外探测通道观测、紫外观测、多角度偏振观测、激光雷达）进行沙尘暴研究。沙尘暴的预报手段主要是借助超级计算机技术进行数值计算，实现对沙尘暴天气过程的短期预报，如中国气象局于 2007 年开发的亚洲沙尘暴数值预报系统 CUACE/Dust^[11]。

国外对于沙漠化的研究，最早要追述到上世纪三十年代在美国。一些美国的学者通过对于土壤风蚀的系统研究，带动了沙漠化过程中风沙动力学的发展。同时，前苏联也开展了相关的研究，创造了工程与生物的防治方法。二十世纪七十年代初，由于非洲撒哈拉地区沙漠化的速度迅速增长，联合国于 1977 年召开了荒漠化大会，世界各国也相继开展了对于沙漠化的系统研究，其研究的主要内容包括沙漠化的环境背景、形成的物理过程和生物过程、动态监测与评估和沙漠化的防治等方面^[12]。

随着各国学者从不同角度对于土壤风蚀、风沙地貌等各个因素进行大量的研究，以及电子产品不断升级，沙漠化的防控系统也跟着不断地更新换代。目前国外在沙漠化方面主要基于雷达遥感技术进行研究。如美国沙漠研究中心关注于沙丘场的演化，以色列本-古里安大学则关注于荒漠化的监测。目前由德、澳、日、美等多国组建的全球旱地研究观测网致力于旱地的可持续利用、沙丘的演化以及沙尘暴的过程研究。在沙尘暴起因与预警方面，2007 年世界气象组织组建了沙尘暴预警评估系统，该系统致力于全球范围的沙尘暴过程的持续观测，以获取沙尘暴过程的更多信息^[13]。

综上所述，现有的沙尘暴观测主要依赖于由常规气象站组成的地面沙尘暴观测网和基于卫星遥感监测的沙尘暴信息网。地面沙尘暴观测站多数设立在沙漠边缘（极个别除外），空间分布密度低，获取沙漠和沙漠化信息的地面观测方法主要采用定点、人工测量的方法，同时还会受到信息采集供电的制约。卫星遥感监测的方法适合大尺度宏观研究，主要用于沙尘暴期间宏观参数（如沙尘输送高度、垂直分布、路径、范围、通量）的观测。但是存在空间分辨率和光谱分辨率较低等问题。另外，对于沙尘暴形成的三个基本条件（物质条件：沙源；动力条件：大风；局部地热条件：大气状态）中，物质条件沙源的观测手段有限，对于沙尘暴起沙的过程的观测则更少。根据 1961-2006 年间沙尘暴数据统计结果，沙尘暴的年发生天数和次数的峰值均在沙漠腹地，最高总天数达 75 天，沙漠腹地是沙尘暴最主要的发源地。深入沙漠腹地针对沙粒尺度、沙丘尺度的探测和细观性研究是认识和掌握沙尘暴起因、运动规律的积极有效途径。因此，利用沙漠机器人和无线传感器网络深入沙尘暴源地进行沙尘信息监测的研究，可将沙尘暴观测和预报的空间尺度由遥感观测的大尺度缩小为源区内的小尺度，同时将观测时间推前至小尺度涡旋系统生成的初期，从而将推动沙尘暴研究走向深入。

1.3 设计沙尘环境参数监测平台的意义

所谓对沙尘暴的监测就是指长期、系统的观察和测定一定地理范围内的整层大气、土壤的状况以及其变化的过程、规律，为沙尘暴的预测、环境影响评估等方面提供重要的数据依据。而沙漠自古就是人类的禁区，沙漠腹地环境恶劣，气候干旱缺水，不适应人类生存。所以深入沙漠腹地建立观测站，不仅成本高、难度大，而且不易维护。

早期对沙漠气象的研究只能依靠在沙漠边缘建立用人工日夜监测的气象观测站来获取沙漠的气象信息。目前我国虽然已经在沙漠的深处建立了两座人工监测的气象站,可是在沙漠深处的恶劣的环境给检测人员的生活带来的很大的困难,也为气象站的维护产生很大的费用。位于内蒙古阿拉善盟的拐子湖气象站作为全国仅有的两个深入沙漠戈壁的气象站之一,2013年4月还需要六名工作人员日夜值班监测气象数据,维护气象站的运行。

2006年,兰州干旱气象研究所和甘肃省治沙研究所组成联合考察队,在庫姆塔格沙漠建立了国内第一个沙漠自动气象站,用来对风、温、湿等气象要素的进行实时观测和数据采集,为深入分析揭示庫姆塔格沙漠中沙尘暴的形成和发展的机理提供研究数据。

在沙漠腹地建立移动的信息监测平台,国内在这方面目前还是空白。沙尘环境参数监测平台通过搭载沙漠机器人,深入沙漠腹地,监测周围的环境参数,获取沙尘暴形成和运动的数据,这在国内尚属首次。

沙漠里恶劣的环境、极端的天气和地形的不断变化都对沙尘环境参数监测平台的性能提出了很高的要求。沙尘环境参数监测平台需要在沙漠腹地稳定可靠地工作,从而为沙尘暴的研究提供可靠的数据基础。

多个监测平台通过无线通信组成近距离监测沙尘暴的传感器网络。通过多点沙漠腹地沙粒运动信息的采集,系统的获取沙尘暴的形成和发展的小尺度数据,同时将观测时间推前至小尺度涡旋系统生成的初期,从而推动对沙尘暴研究,使其更加深入。

1.4 课题来源和内容安排

本论文的研究内容来源于科技部下的国际合作项目:“沙漠腹地沙尘监测与信息获取技术合作研究”,项目编号2011DFA11780。沙尘环境参数监测平台作为该项目的信息采集部分,为后续的研究提供了可靠的数据基础。本论文主要对以下工作进行了阐述。

(一)根据研究沙尘暴所需要的监测参数,以及监测平台所处的工作环境,选择合适的传感器,并设计监测平台的结构,详细内容见论文的第二章。

(二)根据各传感器、处理器和各元器件的工作电压、功耗以及对工作环境的电气要求,选择合适的电源转换电路。利用开发板搭建采集中心和各传感器的连接电路,利用开发板和面包板搭建沙埋传感器和状态传感器的电路。各电路测试无误后,完成监测平台的电路的设计,详细内容见论文的第三章。

(三)设计监测平台的数据采集程序,读取各传感器的测量数据,并对读取的数据进行数字滤波和标度变换。根据各传感器的通信协议编写驱动程序。设计监测平台与上位机的通信协议,并根据协议编写监测平台与上位机的通信程序。设计沙埋传感器和状态传感器的标定程序、数据测量程序以及通信程序,详细内容见论文的第四章。

(四)完成监测平台的电路板上元器件的焊接,并在对监测平台的电源电路、采集电路以及各传感器模块调试无误后,完成监测平台的组装。对监测平台的性能进行测试,并评估其是否能达到设计指标。对本人在项目中所做的工作进行了总结,并对以后的研究做了展望,详细内容见论文的第五章。

除了以上这四部分外,论文的第一章介绍了研究背景和研究意义。

1.5 本章小结

本章主要介绍了本论文的选题背景、国内外的研究现状和研究意义，以及本论文主要论述的内容和章节的安排。

第二章 沙尘环境参数监测平台的设计

2.1 监测平台的技术指标

沙漠里的恶劣环境不仅使人类的生存受到挑战,对于电子产品的稳定性和可靠性来说也是一个很大的挑战。沙漠里的冬夏温差和昼夜温差都很大,一年中日平均气温相差可高达五十摄氏度以上。沙漠昼夜温差也很大,夏天午间的地面温度甚至可达到六十摄氏度以上,到了夜里气温又会降至十摄氏度以下。白天的暴晒和高温和夜里的严寒都对传感器和处理器的正常工作的可靠性产生很大的压力。

沙漠的另一个特点就是风沙大、风力强,最大风力可达 10-12 级。强大的风力卷起大量的浮沙,形成凶猛的风沙流,不断吹蚀地面,风沙滚滚,沙丘流动。当风沙刮起时,监测平台不仅要稳定可靠地测量风速、风向、风蚀等气象信息,同时又要保证监测平台本身即不能被风沙吹倒,又不能被沙丘埋没而无法正常工作。

对于沙漠的酷热和严寒,设计要求监测平台工作温度从零下二十摄氏度至零上六十摄氏度。对此所有沙尘环境参数监测平台使用的电子元器件、接插件、电路板和传感器都选用工业级标准,其工作范围扩大至从零下四十摄氏度至零上八十五摄氏度。

针对沙漠里风沙大,风吹沙走,沙丘流动,从而产生监测平台在沙丘的坡面倾斜和监测平台被沙流埋没的问题。设计要求对监测平台的倾斜程度和被沙埋的深度做出测量。我们在监测平台上安装了沙埋传感器和三轴加速度传感器。对监测平台的被沙粒埋没的深度和平台倾斜的程度做出测量,同时将数据提供给监测系统。监测系统根据监测平台提供的沙埋深度数据和平台倾斜程度数据可以对监测平台在倾斜或被沙流埋没的情况下测量的数据进行修正并控制沙漠机器人做出相应的反应。在保证测量数据准确可靠的同时,也为监测平台的正常工作提供可靠的状态信息。

根据中央气象局的地面观测规范,对沙尘暴做如下定义:强风将大量地面的尘沙卷入空中,致使空气变的特别浑浊,当能见度小于 1 千米时就形成了沙尘暴。根据能见度的等级,中央气象局在地面气象观测规范里将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴。浮尘是指尘土、细沙均匀地悬浮在空中,使水平能见度小于 10km;此时浮尘多为远处的尘沙经上层气流传播而来,或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细小颗粒悬浮在空中而成,太阳呈现白色,远距离的景物呈现黄褐色;扬沙是指由于大风将地面沙尘吹到空中,使空气相当混浊,水平能见度在 1~10km 以内;沙尘暴是指由于强风将地面大量的沙尘吹起,卷入空中,致使空气很混浊,水平能见度小于 1km,天空呈现沙褐色,甚至红褐色^[14]。

徐启运与胡敬松在一九九七年对沙尘暴天气的强度分别以单点强度和区域强度进行了划分。由系统性(如锋面)天气引发邻近地区两个气象观测站点以上能观测到的沙尘暴天气,称为区域性沙尘暴天气。反之,由非系统性天气(如局部地区强对流)引发的零星的沙尘暴观测站观测到的沙尘暴称为局地性沙尘暴。单点沙尘暴天气的强度以瞬间的极大风速以及水平最小能见度作为划分标准,而区域或局地性沙尘暴天气的强度是以沙尘暴天气过程影响中最强的一个监测站观测到的强度作为标准^[15]。单点沙尘暴的强度等级标准如表 2-1 所示:

表 2-1 中国西北地区沙尘暴天气强度划分标准

强度	瞬间极大风速/ (m/s)	最小能见度/ (m)
特强	≥10 级或 ≥25	0 级: <50
强	≥8 级或 ≥20	1 级: <200
中	6-8 级或 ≥17	2 级: 200-500
弱	4-6 级或 ≥10	3 级: 500-1000

徐启运与胡敬松对沙尘暴的气象要素描述如下: 特强沙尘暴的前沿像一道黑墙一样迅速向前推移。过境后, 气象要素变化十分剧烈, 过境前温度很高, 气压很低, 天气晴好, 风速很小; 过境时, 顿时狂风大作、沙尘飞扬, 气压猛升、温度剧降^[16]。

根据徐启运与胡敬松对沙尘暴强度的定义和对沙尘暴的描述, 可以得出沙尘暴的形成和发展与气温、气压、风力等环境参数有关。

根据国外 Gillette 等的研究成果表明, 若要达到沙尘暴的起沙要求, 无干扰的沙丘临界摩擦速度为六十厘米每秒至一百五十厘米每秒, 有干扰的沙丘临界摩擦速度为二十厘米每秒至一百厘米每秒, 根据中性边界层的风廓线方程, 卡曼常数取 0.4, 沙漠地区的粗糙度取 1.0×10^{-4} , 经过计算可以得到: 无干扰的情况下, 沙尘暴起沙时, 要求风速在 10 米高度时为 17.3 米/秒到 43.2 米/秒, 有干扰的情况下, 沙尘暴起沙时, 要求风速在 10 米高度时 5.8 米/秒到 28 米/秒^[17]。

根据以上对沙尘暴的描述和风力对沙尘暴起沙的计算, 监测沙尘暴需要测量风速、风向、风中的沙粒含量、空气温度、大气压力等气象参数。

为了系统全面的监测沙尘暴的形成和运动的气象要素, 沙尘环境参数监测平台需要监测风速、风向、风蚀量、大气压力、空气温度、空气湿度等环境参数, 以及构成传感器网络的监测平台的地理位置参数^[18]。另外为保证平台监测数据的准确性, 还需要测量监测平台的状态信息, 利用平台的方向和倾斜程度以及沙埋深度数据对监测的环境参数进行修正。

综上所述, 对沙尘环境参数监测平台的设计做出以下性能指标要求:

- (一) 具备较宽的温度工作范围, 在负二十摄氏度至六十摄氏度的温度范围内正常工作。
- (二) 较大的风速测量范围, 可测量最大风速需达到四十米每秒。
- (三) 对现场的风速、风向、风蚀量、大气压力、空气温度等环境参数的进行实时的数据采集, 数据信号处理, 数据分析。数据采集时延<10S, 数据精度达到 10 位。
- (四) 能准确有效的测量监测平台的位置信息, 误差<50 米。
- (五) 对监测平台的倾斜程度, 和方向等状态参数进行实时采集, 数据信号处理, 数据分析。数据采集时延<10S, 数据误差<5 度。
- (六) 能够持续在沙漠腹地稳定工作半年以上, 系统在死机或工作状态异常时, 能够自动重启。当某个传感器不能正常工作时, 系统能够监测出来, 并报告给上位机。

2.2 监测平台的系统设计

根据监测平台的技术指标要求, 在设计监测平台时, 选用风速传感器、风向传感器和风蚀传感器分别来测量风速、风向和风中沙粒的含量以及沙粒的运动速度等参数; 选用大气压力传感器和空气温湿度传感器来测量大气的压力和空气温度以及湿度, 选用地磁传感器测量平台的方向参数对风向进行修正。平台通过内置 GPS 定位系统来给出监测平台的位置信息, 利用加速度传感器

来获取监测平台的倾斜参数，利用沙埋传感器来获取监测平台的沙埋深度参数。

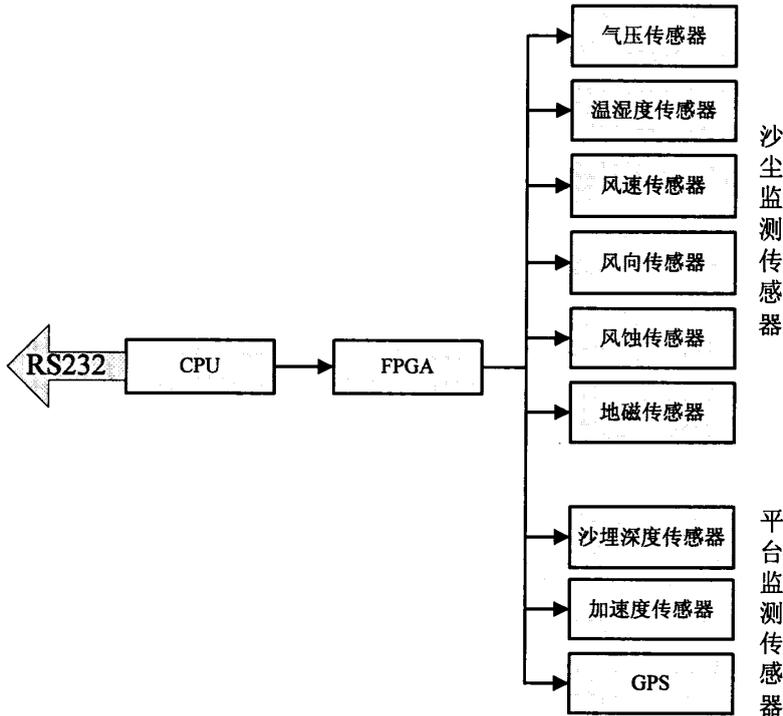


图 2-1 沙尘环境参数监测平台系统结构图

沙尘环境参数监测平台采用处理器和 FPGA 协作配合控制各个传感器，并采集各个传感器数据，通过对传感器测量的数据进行数据处理，获取周围环境信息和平台状态以及位置信息，然后将数据传送给上位机，系统结构图如图 2-1 所示。

为了提高开发效率，加快开发速度，方便系统的调试和测试，以及以后系统的升级，沙尘环境参数监测平台采用模块化设计。处理器和 FPGA 共同构成数据采集和数据处理模块，集成在主板上。各传感器安装在平台的固定位置，并采用通用的数据通信接口，经过连接线连接至采集中心^[19]。

通过将处理器嵌入传感器内部，实现传感器的智能化，使传感器的通信接口采用通用的数字接口，并在沙埋传感器和地磁传感器内部设计添加了传感器的校准功能，从而提高这两个传感器的测量精度以及可靠性。

2.2.1 处理器的选型

沙尘环境参数监测平台的核心处理器采用 Silicon Labs 公司的 C8051F020 单片机，该单片机内部资源丰富，输入输出端口灵活方便，抗干扰能力强，稳定性好。它是完全集成的混合信号系统级 MCU 芯片，主要具有以下特性：

- 最高可达 25MIPS 的高速、流水线结构的 8051 兼容的微控制器核；
- 64 个通用输入输出端口；
- 片内具有上电复位电路、VDD 监视器和温度传感器；
- 片内集成了非侵入式、全速的、可在系统下调试的接口；
- 12 位 100kps 的 8 通道 ADC，带 PGA 和模拟多路开关；

- 两个12位DAC，并具有可编程的数据更新方式；
- 高精度的内部振荡器，振荡频率可高达24.5MHz，且可编程；
- 高达64K字节的可在系统下编程的片内Flash存储器；
- 高达4352字节的片内RAM；
- 硬件可实现的SMBus/I²C接口、增强型的SPI串行接口和两个UART串口；
- 5个通用的16位定时器；
- 片内看门狗定时器；
- 可寻址64K字节地址空间的外部数据存储接口；

8051F020单片机的片内Flash存储器具有可在程序运行时的擦写的功能，并提供了擦鞋的接口，可用于存储用户的非易失性数据^[20]。用户软件对所有外围设备具有完全的控制权限，可以关闭某一个或者所有外围设备以节省功耗。片内Silicon Labs二线（C2）开发接口允许使用安装在最终应用系统上的产品对MCU在不占用片内资源的情况下进行全速、非侵入式、在系统下地调试。调试过程中可以观察和修改寄存器的值和存储器中的值，还可以进行断点、单步运行和复位命令的操作。当使用C2进行程序调试时，所有的模拟外设和数字外设都可以全功能运行。两个C2接口引脚可以与用户功能共享，从而使在系统下调试功能时可以不占用封装引脚^[21]。C8051F020原理框图如图2-2所示。

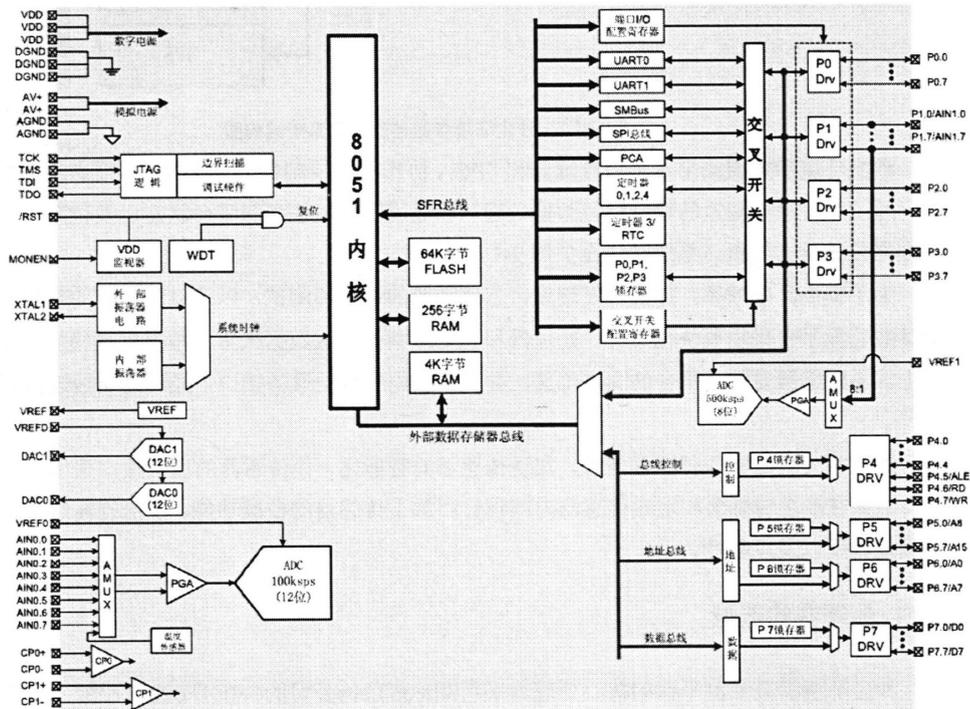


图 2-2 C8051F020 原理框图

2.2.2 FPGA 的选型

FPGA 采用 Altera 公司的 Cyclone II EP2C5T144I8 芯片, Cyclone II 系列器件采用 TSMC90nm 低 K 绝缘材料工艺技术，这种技术结合 Altera 低成本的设计方式，使之能够在更低的成本下制造出更大容量的可编程逻辑器件。最多可高达 68416 个逻辑单元，622 个可用输入输出引脚和 1.1M

比特的嵌入式寄存器。Cyclone II 器件可以在单个芯片上支持复杂的数字系统，从而可以做到在成本上和 ASIC 竞争。EP2C5T144I8 是一款比较常用的 Cyclone II 系列 FPGA，支持将多种数字电路直接嵌入芯片内部进行设计电路。

2.2.3 沙埋深度传感器的设计

沙埋深度传感器是一款根据电容原理而设计，用来测量监测平台被沙粒埋没深度的传感器。它带有校准功能，并采用通用串行 UART 作为传感器的接口，通过 UART 串口通信就可以读取测量数据或进行校准。它是利用 LC 振荡电路的相关知识 with 电容的特性，设计而成的一种电容式传感器。它根据电容大小的变化来测量沙埋的深度。

电容 C 的大小与两极板之间介质 ε 有关。当在电介质为空气的两极板之间加入另一种介质沙粒后，电容 C 的大小也会发生变化，由电容 C 组成的振荡电路的振荡频率 f 也会随之而发生变化。因此，可以通过对振荡频率 f 的测量，计算出电容 C 的大小，进而通过电容 C 的大小可以计算出沙埋的深度。

(一) 沙埋深度与电容的关系

设 ε 为极板间介质的介电常数， k 为静电力常量， d 为两板间距离， S 为两极板的面积 $S = hl$ ， h 为极板的长度， l 为极板的宽度，则电容 C 为：

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon S}{4\pi kd} = \frac{\varepsilon hl}{4\pi kd} \quad (2-1)$$

$$C \propto h \quad (2-2)$$

若变化前电容为 C_0 ，变化后电容为 C_1 ，空气的介电常数为 ε_0 ，沙粒的介电常数为 ε_1 ，沙埋的深度为 h_0 ，则电容变化量 $\Delta C = C_1 - C_0$ 。

$$\Delta C = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) h_0 l}{4\pi kd} \quad (2-3)$$

(二) 沙埋深度和振荡频率的关系

根据 LC 振荡器的振荡原理，选择参数 L 为固定值。通过 LC 的组合，振荡器起振。LC 振荡器的频率计算公式为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-4)$$

由此可以计算出待测的电容数值。

根据沙埋深度与电容，可推导出振荡频率的变化量 Δf 与沙埋高度变化量 Δh 之间的关系：

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\Delta C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{\varepsilon\Delta hl}{4\pi kd}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi\varepsilon\Delta hll}{kd}}} \quad (2-5)$$

$$\Delta h \propto \frac{1}{(\Delta f)^2} \quad (2-6)$$

可以计算出沙埋深度 $h_1 = h_0 + \Delta h$ 。

由式 2-6 可以得出，沙埋深度与振荡电路的振荡频率值是高次的非线性关系，而随着引入周围环境的参数，计算公式会更加的复杂。同时随着外界环境的变化，环境参数也会发生改变。因此如果利用该公式计算沙埋深度的话，需要直接利用多次测量来确定该公式的参数，测量次数少了，可能会因为测量误差的引入，使误差扩大；而测量次数多了，又会使计算特别复杂，同时也使标定程序比较繁琐，带来应用的不便。故在本课题中，采用多线段拟合沙埋深度与振荡频率的曲线作为沙埋深度的计算公式，可以很好地解决这个问题。利用多个线段来拟合沙埋深度与振荡频率的曲线，可以根据对沙埋深度的精度要求选择线段的个数。另外线段的函数表达比较简单，

只需要确定零点和斜率就可以确定该线段的表达式。故标定时只需测量两个点的数据就可以很好地计算出该线段的表达式。利用多个线段拟合曲线只需要标定 $N+1$ 个点，就可以计算出 N 个线段的拟合曲线函数，这样不仅简化了计算，也使传感器的校准操作简单易行。当周围测量环境发生改变时，根据测量精度的要求，确定拟合曲线线段的个数，定出标定点，并对标定点进行标定测量，经过计算就可以得出各个线段的表达式，将这些线段的表达式组合起来就组成了沙埋深度和采样频率值的表达式。采用多线段拟合沙埋深度与振荡频率的曲线作为沙埋深度的计算公式，可以很直观简洁地达到控制系统误差，提高测量沙埋深度的精度。

经过多次的测试，根据对沙埋深度测量精度的要求，本论文中采用三个线段来模拟沙埋深度和振荡频率的曲线，选取三个线段的四个端点作为标定点来计算沙埋深度和采样频率值的表达式。这四个点分别为平行金属板的两端点和两个三分点。

沙埋传感器由单片机、振荡电路和平行板电容器组成。单片机选用 Silicon Labs 公司的 C8051F410 单片机，C8051F410 单片机是一款完全集成的混合信号的低功耗片上系统型单片机^[22]。作为嵌入沙埋传感器的单片机，它具有以下优点：

- 1、具有片内可编程高精度振荡器，振荡频率可高达 24.5MHz。不用再外接振荡电路，可以直接在程序内设置为片内晶振，并选择晶振频率。
- 2、带有 32K 字节可系统上编程片内 Flash 存储器，2304 字节片内 RAM。足够大的空间可以用来存放传感器的程序和数据，同时 Flash 的可系统上编程支持将传感器的标定数据存储存在 Flash 上。
- 3、片内带有增强型 UART 串口和看门狗定时器。增强型 UART 串口可直接用于传感器的通用接口，使用简单方便。内部看门狗定时器可防止程序跑飞，在程序跑飞时，使系统复位。

沙埋传感器由单片机采集振荡电路的振荡频率，通过沙埋深度和电路振荡频率的表达式计算出沙埋深度。数据采集系统可通过 UART 串行接口访问传感器并读取测量数据。另外可以通过 UART 串行口发送指令沙埋传感器，并操作沙埋传感器进行标定操作，从而可以计算出沙埋深度和电路振荡频率的表达式参数。

2.2.4 状态传感器的设计

状态传感器是一款利用加速度传感器和磁场传感器而设计，用来测量监测平台的方向和倾斜的程度的传感器。状态传感器利用加速度传感器和磁场传感器分别测量的重力加速度和地磁场在以监测平台为坐标的三个轴上的分量，通过对这三个轴上分量的计算得出监测平台当前的方向和倾斜程度。

当监测平台水平放置时，监测平台所受到的重力和监测平台的垂直轴平行，即在监测平台垂直轴上的重力加速度为 g ，在水平面的两个轴上分量为 0。当监测平台倾斜时，监测平台所受到的重力不再和监测平台的垂直轴平行，重力加速度和监测平台的垂直轴产生一个角度，记为 A ，则 A 就为监测平台的倾斜角度。这时在监测平台垂直轴上的重力加速度为 $g * \cos A$ ，在监测平台平行面上的重力加速度为 $g * \sin A$ 。

假设加速度传感器测得重力加速度在 X 轴的分量为 X_a ，在 Y 轴的分量为 Y_a ，在 Z 轴的分量为 Z_a 。则监测平台倾斜的角度 A 为：

$$A = \cos^{-1} \frac{Z_a}{g} \quad (2-7)$$

$$g = \sqrt{X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2} \quad (2-8)$$

假设磁场传感器测得地磁场在 X 轴的分量为 X_b ，在 Y 轴的分量为 Y_b ，由正北方向顺时针旋转至监测平台 X 轴方向所转过的角度值为B。则B的计算如下：

$$B = \tan^{-1} \frac{Y_b}{X_b} \quad \text{当 } Y_b \text{ 大于 } 0 \text{ 时} \quad (2-9)$$

$$B = \tan^{-1} \frac{Y_b}{X_b} + 180 \quad \text{当 } Y_b \text{ 小于 } 0 \text{ 时} \quad (2-10)$$

状态传感器由 Silicon Labs 公司的 C8051F410 单片机连接 ADXL345 加速度传感器和 HMC5883 磁传感器组成。利用加速度传感器 ADXL345 来测量重力加速度，根据重力加速在以平台为坐标的三个轴上的分量，根据式 2-7 可以计算出监测平台的倾斜程度。利用磁传感器 HMC5883 来测量地磁作用力，根据地磁作用力在以平台为坐标的三个轴的分量，根据式 2-9 和式 2-10 可以计算出监测平台的方向角。（注：从正北方向顺时针旋转至监测平台所扫过的角度记为监测平台的方向角，本文以下监测平台的方向角都采用这种表述。）

单片机通过 I²C 总线与 ADXL345 和 HMC5883 连接，并将单片机的 UART 端口作为传感器接口。状态传感器系统结构图如图 2-3 所示：

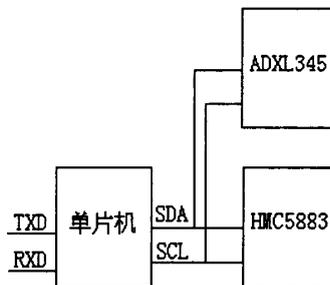


图 2-3 状态传感器的系统结构图

C8051F410是完全集成的混合信号的低功耗片上系统型单片机。C8051F410具有内部可编程高精度振荡器，振荡频率可高达24.5MHz，片内32K字节可系统上编程Flash存储器，2304字节片内RAM，硬件SMBus/I²C接口、和增强型UART串口，以及内部看门狗定时器。8051F410单片机作为状态传感器的内部处理器具有处理速度快，运算能力强，数字通信接口丰富，性能稳定，可靠性好，性价比高等优势。

ADXL345 是一款超低功耗的可测量 3 轴加速度的传感器。它的分辨率高达 13 位，测量范围可达 16g，测量数据采用 16 位 2 进制补码表示，并可通过 I²C 总线直接访问读取。ADXL345 加速度传感器采用多晶硅表面微加工结构，它体积小，功耗低，测量范围宽，性能稳定可靠，非常适用于嵌入式系统测量加速度。即可以用来测量重力加速度也可以测量运动或冲击导致的加速度^[23]。

霍尼韦尔公司的 HMC5883 是一个带有数字接口的高集成度表面贴装弱磁传感器。常用于低成本罗盘和磁场检测领域，它内部带有放大器，自动消磁器、驱动器偏差校准电路和 12 位的模数转换器^[24]。能使罗盘的精度控制在 1 度到 2 度。它具有以下特点：

- 1、集成度高，体积小，贴片封装尺寸 3.0*3.0*0.9mm，便于集成在嵌入式系统内部。
- 2、精度高，能在 8 高斯的磁场中实现 5 毫高斯的分辨率，可以测量出非常微小的磁场变化，从而可以计算出监测平台的方向微小的变化。
- 3、最大输出频率可达 160Hz，可以快速的测量出磁场变化，从而可以计算出监测平台的方

向的变化。

4、低电压工作（2.16-3.6V）和超低功耗（100uA），在电量有限的嵌入式系统内可以工作更长的时间。

5、内置驱动电路，I²C 数字接口，使应用更加方便。

处理器 C8051F410 通过 I²C 总线与 ADXL345 和 HMC5883 进行通信，并将传感器测量的数据读进处理器。处理器对采集的传感器数据进行数据处理，并将处理后的数据存储，等待采集系统通过 UART 串行接口读取。

为了使传感器测量的数据更加准确可靠，状态传感器的内部带有 HMC5883 校准功能，用来减小周围磁场对地磁场的干扰和因加工工艺带来的系统误差。校准步骤如下：通过 UART 串行接口向传感器发送开始校准指令，同时开始将状态传感器慢慢旋转一周，在此期间处理器会自动采集 HMC5883 的测量数据并保存。等旋转完毕，再通过 UART 串行接口向传感器发送校准完毕指令。此时处理器开始分析采得的测量数据，并根据刚才的测量数据计算传感器数据的修正参数。

2.2.5 气压传感器选型

气压传感器测量监测平台所在位置的大气压力，在沙尘环境参数监测平台中采用的是武汉新普惠有限公司的 PHQY 大气压力传感器，该传感器利用 MEMS 技术在单晶硅片上加工出真空腔体和惠斯登电桥，其中电阻应变片采用正温度系数，利用它对压力的灵敏度是负温度系数，再通过恒流源给电桥供电，这样就可以很好地改善温度特性，使其具有线性度好，稳定可靠的优点。该传感器采用 TTL 电平的数字 UART 串行接口，使用简单方便。

PHQY 大气压力传感器测量范围 10 帕-1100 百帕，分辨率 10 帕，测量精度 30 帕，工作电压 12V，功耗 24mW，工作温度范围零下五十摄氏度至八十摄氏度。

2.2.6 风速风向传感器选型

风速和风向传感器测量监测平台所在位置的风速和风向，在沙尘环境参数监测平台中分别采用武汉新普惠有限公司的 PHWS 风速传感器和 PHWD 风向传感器。

目前地面气象自动观测系统的风速传感器主要有三种常用的类型。一种是采用小型风杯风速传感器，一种是机身旋桨式的风速传感器，另外一种二维超声波风速传感器。PHWS 风速传感器属于第一种类型的三杯式风速传感器。该传感器的最大能承受风力为 75m/s。

因受力面的不同，当有风吹过时，风就会推着风杯转动，风速越大转动就越快。当风杯转动时，带动与风杯同轴的转盘旋转。转盘上有一处磁性材料，转盘下方安装有霍尔感应器件。当磁性材料经过霍尔元件上方时，霍尔元件两端产生微弱电压，经放大整形后形成标准脉冲，用计数器记下每秒的脉冲数，通过公式计算即可得出相应的风速。

PHWD 风向传感器采用一个低惯性风向标连接一个精密电位器，风向标的转动通过电位器转换成电压值，经过模数转换，并将转换值代入计算公式就可得出需要测量的风向。该传感器具有量程大、线性好、稳定可靠等优点。

PHWS 风速传感器测量范围 0-70 米/秒，分辨率 0.1 米/秒，准确度 0.3+0.03*V 米/秒，V 表示测量的风速，工作电压 12V。

PHWD 风向传感器测量范围 0-360 度，分辨率 1 度，准确度 3 度，工作电压 12V。

这两款传感器工作电压为 12V，并采用 TTL 电平 UART 串行通信接口，使用简单方便。

2.2.7 风蚀传感器选型

风蚀传感器测量在一定面积内,沙粒撞击该平面的动能,和沙粒的个数。在沙尘环境参数监测平台中采用美国的 H11-LIN 风蚀传感器。

H11-LIN 风蚀传感器有两根数据输出线,对应输出两个数据量,一个是沙粒撞击的动能,另一个是撞击的颗粒数。沙粒撞击的动能输出是该传感器的主要输出量,每次沙粒的撞击使传感器的应变片产生形变,应变片的形变会产生相应的电荷量,这个电荷量与沙粒撞击的动能成正比,当电荷量积累到一个阈值时,传感器就会放电,产生一个输出脉冲,应变片恢复到原来的形状等待下次粒子的撞击。故传感器输出的脉冲反应的是确定的能量累计,该能量和沙粒撞击的动能的累积成正比。标定系数的确定是在一次风蚀过程中用总质量除以总的动能输出脉冲数,通过标定系数和传感器的输出粒子动能脉冲数就可以粗略的得出风蚀过程中沙粒的重量。第二种输出是撞击的颗粒数,每个粒子只有具备足够的能量才能产生一个脉冲。由于粒子的质量、速度对产生的能量的影响,因此没有规定最小的粒子的测量尺寸。由于粒子的速度、拽力系数和质量的不同,它的最小粒子的直径很难确定。传感器可以测量低速撞击传感器时直径大约在 50 到 70 微米的粒子,不能测得 10 到 50 微米的粒子^[25]。

H11-LIN 风蚀传感器工作电压 12V,工作电流 70 毫安。

2.2.8 空气温湿度传感器选型

空气温湿度传感器测量监测平台所在位置的空气温度和空气湿度,在沙尘环境参数监测平台中采用 SHT11 温湿度传感器。

SHT11 温湿度传感器是一款内含校准电路并采用数字信号输出的温湿度复合传感器。该传感器内部包含一个电容性聚合物测湿敏感元件和一个用能隙材料制成的测温敏感元件,并将敏感元件和信号处理电路经过专利 CMOS 技术加工集成在一块微型电路板上。该传感器内部包含一个 14 位模数转换电路。模数转换后的数字信号可以通过串行接口读出。它具有体积小、功耗低、响应速度快、抗干扰能力强、稳定性好、可靠性高等优点^[26]。

SHT11 温湿度传感器测量温度范围零下四十摄氏度到一百二十摄氏度,测量精度 0.4 摄氏度,湿度测量范围 0-100%,测量精度 3%,工作电压 2.4V-5.5V。

SHT11 温湿度传感器采用两根信号线作为串行通信的接口,SCL 作为时钟线,SDA 作为数据线,与 I²C 通信相似,但不兼容^[27]。

2.2.9 GPS 模块选型

GPS是全球定位系统的英文缩写,该模块用来测量监测平台所在的地理位置信息,返回所在位置的经纬度值,在沙尘环境参数监测平台中选用SIM908移动通信模块。

SIM908模块是一款由美国高通公司生产的内部带有GSM、GPRS和GPS功能的移动通信模块。通过AT指令就可以设置SIM908的工作模式,以及访问该通信模块内部的GPS功能模块,读取相应的经纬度信息。SIM908通信模块采用串行UART作为通信接口,模块的工作电压为4V,VDD_EXT输出电压2.8V,可通过对该管脚的监测来判断该通信模块是否正常工作。GPS的天线接口管脚GPS_ANT与GPS的射频天线连接,并且要保证阻抗控制在50欧姆左右。引脚SIM/VDD、SIM/DATA、SIM/CLK、SIM/RST与SIM卡的电路相连^[28]。

SIM908通信模块的开机方式有引脚PWRKEY开机和AT指令开机，本系统使用引脚PWRKEY开机方式，PWRKEY通过三极管和电阻与单片机相连，开机时通过把PWRKEY信号线拉低，延迟一段时间后再将信号线释放来开机。PWRKEY引脚已在该通信模块内部上拉到3V。

GPS系统的所有卫星采用统一的时钟，通过接收到相应卫星传来的时间信息来推算出无线电波在空间的传输时间，从而可以计算出目标和卫星的距离，通过接收多个卫星的时间信息，可计算出与这些卫星间的距离差，卫星运行在围绕地球的固定轨道上，根据空间三维坐标，若已知测量点与四个以上卫星的距离差就可以计算出该测量点所在的空间位置坐标。SIM908通信模块计算出该模块所在位置信息后，将数据转换为地球表面的经纬度信息，并以字符串的格式输出。

2.3 本章小结

本章主要介绍了沙尘环境参数监测平台的技术指标以及核心处理器、FPGA 和各传感器的选型。对所选用的传感器的性能和参数做了简要介绍，对自行设计的沙埋传感器和状态传感器的设计原理做了说明。

第三章 沙尘环境参数监测平台的硬件电路

3.1 监测平台的电路结构

为了提高开发效率,加快开发速度,整个系统电路采用模块化设计,将除空气温湿度传感器 SHT11 和风蚀传感器 H11-LIN 以外的所有传感器的硬件接口统一设计成为串行 UART 接口,并通过 FPGA 与处理器相连。温湿度传感器 SHT11 的通信接口直接连接至处理器的输入输出端口。将风蚀传感器 H11-LIN 信号线连接至 FPGA,经过 FPGA 信号采集电路后转换为 16 位的整形数,并模拟串行 UART 接口作为通信接口。这样电路设计不仅使系统的电路简单明了,同样也使系统的调试更加的简单方便,便于后期的维护和各传感器模块的测试以及接口的更换,同时也有利于系统的移植,为系统的升级和优化带来了便利。

沙尘环境参数监测平台硬件电路分为主板部分和传感器部分,在主板电路上集成了 CPU、FPGA、电源模块和 SIM908 通信模块。根据测量需要,风速传感器、风向传感器、气压传感器、温湿度传感器、沙埋传感器、状态传感器均需安装在平台外部的固定位置。这些传感器的电源线和信号线通过航空插头与主板相连接。

风速传感器、风向传感器、气压传感器、沙埋传感器、状态传感器、SIM908 的信号线与 FPGA 的管脚相连。处理器的控制信号线 A、B、C 和 UART 接口与 FPGA 的管脚相连接,通过控制信号线 A、B、C 电平的高低,控制 FPGA 将处理器的 UART 接口和相应传感器的通信接口连通。温湿度传感器信号线直接连接至单片机输入输出端口。风蚀传感器将信号线连接在 FPGA 的管脚上,FPGA 通过计算器采集风蚀传感器输出的信号,并将计数器的数据存贮至指定位置,通过 FPGA 内部电路模拟 UART 接口,等待处理器读取数据。系统硬件总体结构图如图 3-1 所示:

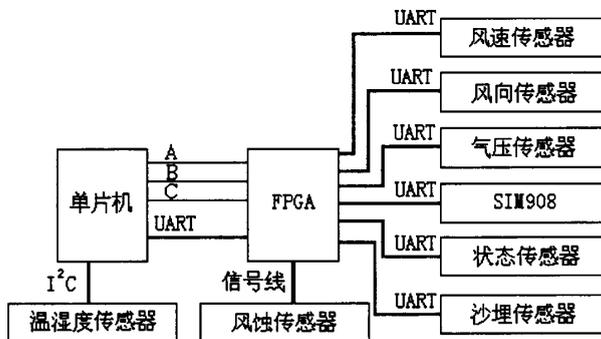


图 3-1 沙尘环境参数监测平台的硬件结构图

3.2 电源电路

沙尘环境参数监测平台由沙基机器人携带的 24V 蓄电池供电。电源转换电路将 24V 电压转换为各模块的工作电压,给各模块供电。H11-LIN 风蚀传感器、PHWS 风速传感器、PHWD 风向传感器和 PHQY 气压传感器的工作电压均为 12V,状态传感器、沙埋传感器、SHT11 温湿度传感

器和 8051F020 单片机以及 FPGA 工作电压为 3.3V, SIM908 通信模块内部带有电源转换芯片, 其工作电压为 5V。监测平台电源需提供 12V、5V、3.3V 三种供电电压。PHWS 风速传感器、PHWD 风向传感器和 PHQY 气压传感器的工作电流为 2-10mA, H11-LIN 风蚀传感器工作电流为 70mA, 12V 供电电流总共约 100mA。SIM908 通信模块待机状态下工作电流为 10mA, 通信状态下工作电流为 140mA, 开启通信的瞬间脉冲电流会到达 2A。8051F020 单片机使用两路串口通信, 5 个 I/O 控制端口, 每个输出端口的输出电流估算为 10mA, 则单片机工作电流约为 100mA。FPGA 使用了 12 个输入引脚和 7 个输出引脚, 每个输出引脚的输出电流估算为 20mA, 则 FPGA 的工作电流估算为 200mA。沙埋传感器工作电流约为 100mA, ADXL345、HMC5883 和 SHT11 均是低功耗传感器, 工作电流都在微安级。电源电路工作时, 12V 电压供电电流约为 100mA, 5V 电压供电电流约为 140mA, 并在开启时会有 2A 的电流脉冲, 3.3V 电压供电电流约为 400mA。

电源电路采用 LM7812 电压转换芯片将 24V 转换至 12V, 可输出最大电流 1A, LM7805 电压转换芯片 24V 转换至 5V, 可输出最大电流 1A, 在 5V 的电压端并联一个 1000uF 的电容为脉冲电流提供能量。X1117-3.3 电压转换芯片将 5V 转 3.3V, 可输出最大电流 1A。

将 24V 电源的电源端连接至 LM7812 的管脚 1, 地端接在管脚 2, 此时管脚 3 和管脚 2 之间的电压即为 12V。将 LM7812 换为 LM7805, 采用同样的接法, 管脚 3 和管脚 2 之间的电压即为 5V。将 5V 电源的电源端接 X1117-3.3 的管脚 3, 地端接在管脚 2, 此时管脚 1 和管脚 2 之间的电压即为 3.3V。24V 转换至 12V 的电压转换电路图如图 3-2 所示。24V 转换至 5V 的电压转换电路图如图 3-3 所示。5V 转换至 3.3V 的电压转换电路图如图 3-4 所示。

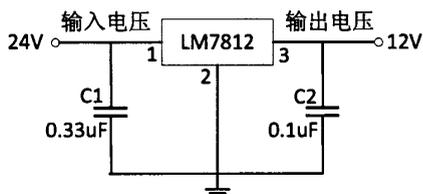


图 3-2 24V 转 12V 电压转换电路图

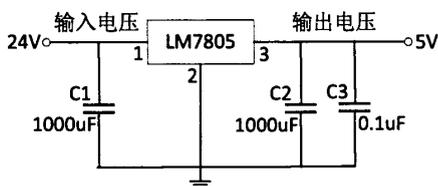


图 3-3 24V 转 5V 电压转换电路图

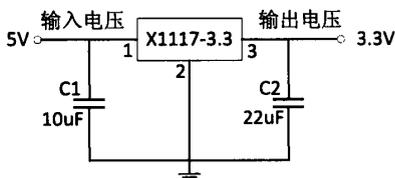


图 3-4 5V 转 3.3V 电压转换电路图

3.3 传感器连接电路

3.3.1 UART 接口传感器的连接电路

PHQY 气压传感器、PHWS 风速传感器、PHWD 风向传感器、沙埋传感器、状态传感器和 SIM908 通信模块的通信接口采用的都是 UART 串行接口，这些传感器的信号线通过 FPGA 连接至单片机的 UART 串行接口。

UART 串行接口传感器的电路连接图如图 3-5 所示：

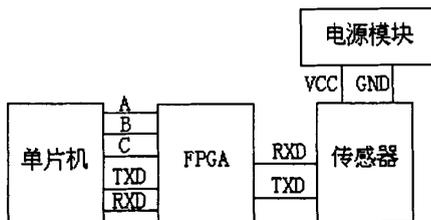


图 3-5 UART 接口传感器的电路连接图

3.3.2 SHT11 温湿度传感器的连接电路

SHT11 温湿度传感器的通信接口采用的是 I²C 总线接口，该传感器的信号线直接连接至单片机的输入输出端口^[29]。SHT11 温湿度传感器的电路连接图如图 3-6 所示：

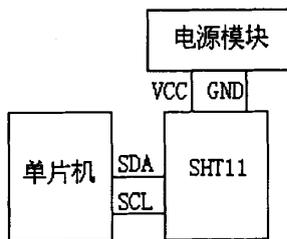


图 3-6 SHT11 温湿度传感器的电路连接图

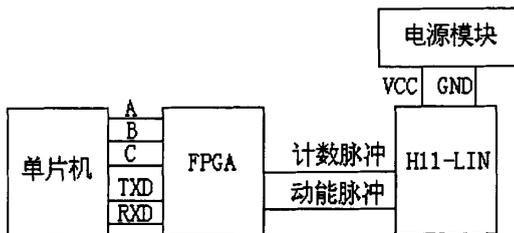


图 3-7 H11-LIN 风蚀传感器的电路连接图

3.3.3 H11-LIN 风蚀传感器的连接电路

H11-LIN 风蚀传感器通过两个信号线输出脉冲来输出测量数据，一根信号线输出的脉冲个数

表示撞击粒子的个数，另一根信号线输出的脉冲个数表示撞击粒子的动能，H11-LIN 风蚀传感器的电路连接图如图 3-7 所示：

风蚀传感器的信号线连接至 FPGA 的管脚，FPGA 通过内部的计数器对两路脉冲信号进行计数，并将数据存储。FPGA 通过内置模拟串口作为数据的读取接口，等待处理器的读取。

3.4 FPGA 的电路

FPGA 的内部电路可分为风蚀传感器信号采集电路和 UART 串行接口连接的控制电路。风蚀传感器的信号采集电路包括一个串口模拟电路，两个脉冲计数器，和一个存储器。采集电路通过计数器记录风蚀传感器输出的粒子个数脉冲和粒子动能脉冲，并将计数器的数据存储至存储器，存储器通过串口模拟电路与 UART 串行接口连接控制电路相连接，等待处理器的选择连通并读取数据。

UART 串行接口连接的控制电路根据处理器的控制信号选择将处理器的 UART 串行接口与相应传感器通信接口连接，并阻断别的传感器通信接口。FPGA 电路的结构图如图 3-8 所示。

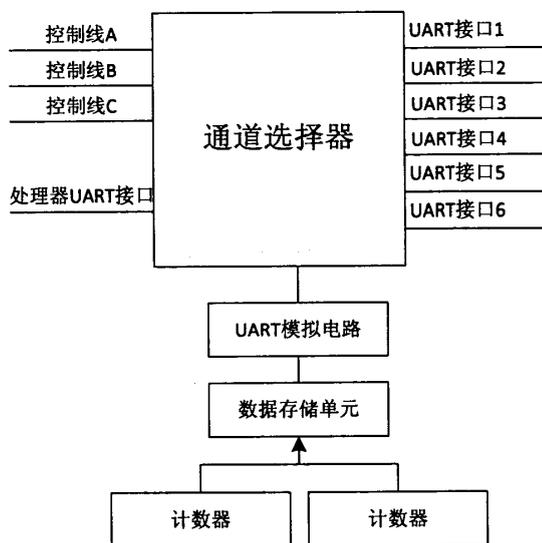


图 3-8 FPGA 电路结构图

3.5 本章小结

本章主要介绍了沙尘环境参数监测平台的电路结构，电源电路和采集中心和传感器的连接电路以及 FPGA 的内部电路。

第四章 沙尘环境参数监测平台的软件设计

4.1 系统程序结构

沙尘环境参数监测平台系统的程序按模块分为三个部分，分别为监测平台的程序，自行设计的沙埋传感器的程序和有多个传感器构成的状态传感器的程序。其中监测平台的程序分为测量程序和与上位机的通信程序，沙埋传感器的程序分为数据采集程序、校准程序和通信程序，状态传感器的程序分为数据采集程序、校准程序和通信程序。系统程序结构图如图 4-1 所示。

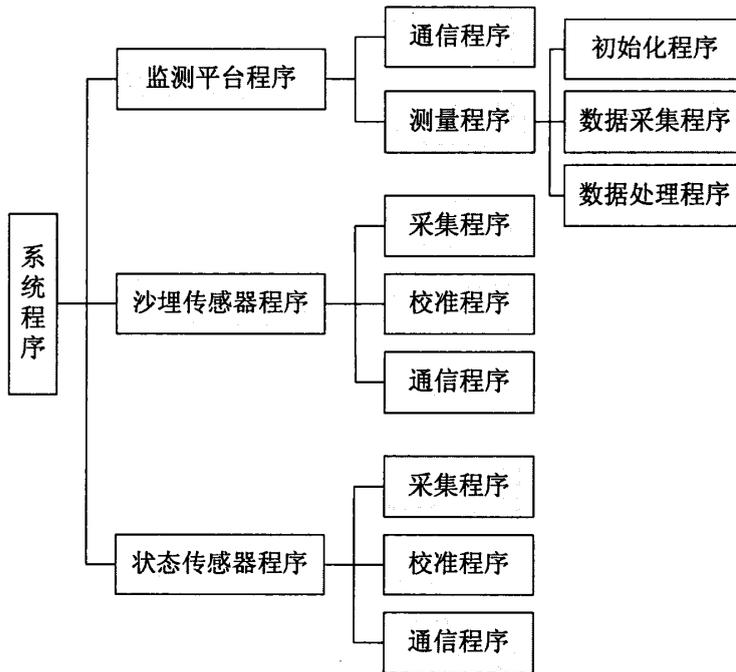


图 4-1 沙尘环境参数监测平台程序结构图

4.2 与上位机通信程序

监测平台通过 8051F020 单片机的 UART0 接口与上位机通信，通信的波特率设置为 4800，通信数据格式为 8 位数据位，1 位停止位，无校验位。根据定义的通信帧格式，上位机向监测平台发送指令，监测平台接收到上位机发送的指令后，将指令地址与本机地址相对比，地址匹配，数据校验无误，则将本平台采集的数据送至上位机。沙尘环境参数监测平台与上位机通信程序流程图如图 4-2 所示。

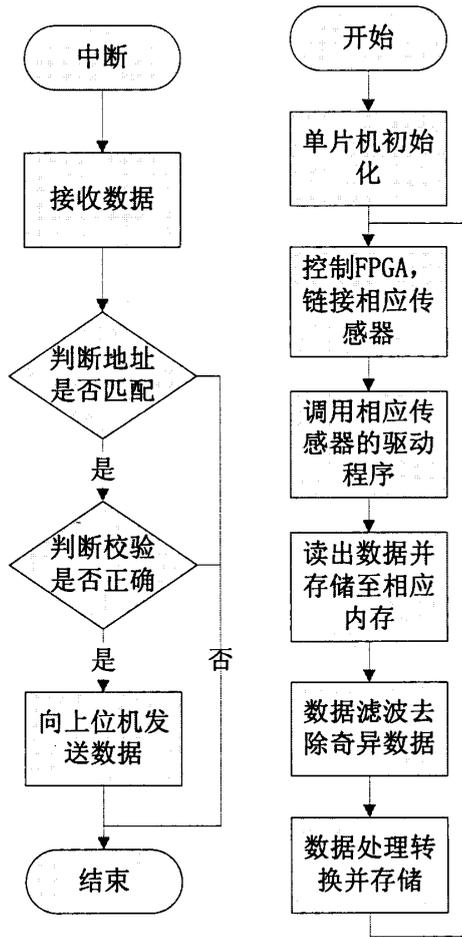


图 4-2 通信程序流程图

4-3 监测平台测量程序流程图

4.2.1 UART 串口的通信设置

C8051F020 单片机内部有两路 UART 串行接口，UART0 用于和上位机通信，UART1 用于和各个传感器通信^[30]。UART0 设置为波特率为 4800，8 位数据位，1 位停止位，无校验位，UART1 设置为波特率为 9600，8 位数据位，1 位停止位，无校验位^[31]。其中 UART0 采用中断的方式接收上位机发送的指令，UART1 采用查询的方式接收传感器发送的数据。

4.2.2 与上位机通信的帧结构

监测平台与上位机通信帧的内容包括起始字节、指令和数据，数据校验采用 CRC 校验，CRC 检验程序见附录。监测平台与上位机通信中接收到上位机发送的数据帧结构如表 4-1 所示，监测平台与发送至上位机的数据帧结构如表 4-2 所示。监测平台接收到上位机发送的数据：0x7e+地址+指令+校验，监测平台向上位机发送数据：0x7e+地址+指令+数据+校验。目前定义的通信指令只有读取数据指令 0x10。

表 4-1 接收到上位机的数据帧格式

起始字节 (S)	地址 (A)	指令 (C)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	1 个字节	2 个字节

表 4-2 发送至上位机的数据帧格式

起始字节 (S)	地址 (A)	指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	1 个字节	N 个字节	2 个字节

监测平台返回的数据由风速、风向、气压、空气温度、空气湿度、沙粒动能、沙粒个数、监测平台的方向、重力在监测平台三个轴上的分量构成，其中风速、风向、气压、空气温度、空气湿度、沙粒动能、沙粒个数和监测平台的方向均为两个字节的整形数，高字节在前低字节在后，重力在三个轴上的分量由一个字节的有符号字节型数据表示。风速、空气温度、空气湿度数据分别为相应参数的十倍，气压数据为相应参数的十分之一。所有数据高字节在前，低字节在后。

4.3 数据采集程序

测量程序作为监测平台的主程序分为单片机初始化程序、数据采集程序和数据处理程序。初始化程序主要配置单片机的上电工作状态，打开单片机内部的各项功能模块。数据采集程序通过 C8051F020 的 UART1 与各传感器通信，根据各传感器的通信协议读取传感器内部的测量数据。数据采集程序包括串口通信选择程序与传感器的通信程序，串口通信选择程序通过控制 FPGA，选择单片机串行 UART1 接口与相应传感器的通信接口相连接，见图 3-8。与传感器的通信程序根据各传感器的通信协议，通过 UART1 向传感器发送指令，读取该传感器的测量数据。数据处理程序对采集的测量数据进行滤波处理，并将处理后的数据转化为系统所需的物理参数。数据处理程序包括滤波程序和数据转换程序。沙尘环境参数监测平台的测量程序流程图如图 4-3 所示。

4.3.1 PHQY、PHWS 和 PHWD 的通信协议

武汉新普惠有限公司的 PHQY 大气压力传感器、PHWS 风速传感器和 PHWD 风向传感器通信协议相同，并且采用相同的通信帧结构。每帧内容包括地址、指令和数据，数据校验采用 CRC 校验。

(1) 向传感器写入地址指令发送的数据帧结构如表 4-3 所示，接收到的数据帧结构如表 4-4 所示。采集中心发送数据：0x00+0x10+地址+校验，接收到传感器返回的数据：0x00+0x10+校验。

表 4-3 写入传感器地址发送数据帧结构

指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
2 个字节	一个字节	两个字节

表 4-4 写入传感器地址接收数据帧结构

指令 (C)	校验 (V)
2 个字节	两个字节

(2) 读去传感器地址指令发送的数据帧结构如表 4-5 所示, 接收到的数据帧结构如表 4-6 所示。采集中心发送数据: $0x00 + 0x20 + \text{校验}$, 接收到传感器返回的数据: $0x00 + 0x20 + \text{地址} + \text{校验}$ 。

表 4-5 读取传感器地址发送数据帧结构

指令 (C)	校验 (V)
2 个字节	两个字节

表 4-6 传感器读地址接收数据帧结构

指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
2 个字节	一个字节	两个字节

(3) 读取传感器测量数据指令发送的数据帧结构如表 4-7 所示, 接收到的数据帧结构如表 4-8 所示。采集中心发送数据: $\text{地址} + 0x03 + 0x00 + 0x00 + 0x01 + \text{校验}$, 接收到传感器返回的数据: $\text{地址} + 0x03 + 0x00 + \text{测量数据} + \text{校验}$ 。

表 4-7 读取传感器数据发送数据帧结构

地址 (A)	指令 (C)	控制字 (D)	校验 (V)
一个字节	2 个字节	2 个字节	2 个字节

表 4-8 读取传感器数据接收数据帧结构

地址 (A)	指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
一个字节	2 个字节	2 个字节	2 个字节

在接收和发送的数据中地址为一个字节, 范围是 1-255, 校验数据由两个字节, 校验方式采用 CRC 校验, 测量数据为两个字节的整形数, 高字节在前, 低字节在后。CRC 检验程序见附录。

4.3.2 沙埋传感器通信协议

沙埋传感器驱动程序通过调用 UART1 串口程序, 根据定义的通信帧格式, 向沙埋传感器发送读取数据指令, 读取测量数据。每帧内容包括起始字节、指令和数据, 数据校验采用 CRC 校验, CRC 检验程序见附录。沙埋传感器的控制指令除了读取数据指令外, 还包括标定端点指令, 计算相应线段的零点和斜率指令, 以及读取相应线段的零点和斜率指令。采集中心和沙埋传感器的通信帧的定义包括通信帧格式和定义的控制字。

(1) 与沙埋传感器通信发送数据的帧格式如表 4-9 所示, 接收到传感器返回数据的帧格式如表 4-10 所示。采集中心发送数据: $0x7e + \text{指令} + \text{校验}$, 接收到传感器返回数据: $0x7e + \text{指令} + \text{数据} + \text{校验}$ 。

表 4-9 向沙埋传感器发送数据的帧结构

起始字节 (S)	指令 (C)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	2 个字节

表 4-10 接收到沙埋传感器返回数据的帧结构

起始字节 (S)	指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	N 个字节	2 个字节

(2) 采集中心与沙埋传感器通信中, 通过定义的指令控制传感器执行相应的操作, 定义的指令有读取测量数据指令、标定指令和读取标定数据指令。定义的指令如表 4-11 所示。

表 4-11 与沙埋传感器通信中定义的控制字

指令	说明
0x10	读取测量数据
0x20	标定下端点
0x21	标定三分之一点
0x22	标定三分之二点
0x23	标定上端点
0x30	读取线段一的零点和斜率值
0x40	读取线段二的零点和斜率值
0x50	读取线段三的零点和斜率值
0x31	计算线段一的零点和斜率值
0x41	计算线段二的零点和斜率值
0x51	计算线段三的零点和斜率值

当采集中心向沙埋传感器发送指令读取测量数据时, 返回的数据为两个字节整形数的测量数据。标定某点时, 返回的数据为对应点的测量数据两个字节的整形数。计算某线段的零点和斜率值时, 返回的数据为对应线段的斜率乘以 100 的整形数, 两个字节。读取某线段的零点和斜率值时, 返回的数据为对应线段的斜率乘以 100 的整形数和零点乘以 100 的整形数, 四个字节。所有数据高字节在前, 低字节在后。

4.3.3 状态传感器通信协议

状态传感器的驱动程序通过调用 UART1 串口程序, 根据定义的通信协议和帧格式, 向状态传感器发送读取数据的指令, 读取状态传感器的测量数据。数据帧的内容包括起始字节、指令字节、数据字节和校验字节, 数据校验采用 CRC 校验, CRC 检验程序见附录。状态传感器定义的指令除了读取测量数据指令外, 还包括开始校准指令和校准完成指令。通过向状态传感器发送不同的指令, 控制状态传感器进行相应的操作。状态传感器定义的通信帧格式如下:

(1) 采集中心与状态传感器通信时, 采集中心发送的数据帧格式如表 4-12 所示, 接收到传感器返回的数据帧格式如表 4-13 所示, 采集中心发送数据: 0x7e + 指令 + 校验, 接收到传感器返回数据: 0x7e + 指令 + 数据 + 校验。

表 4-12 向状态传感器发送数据的帧结构

起始字节 (S)	指令 (C)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	2 个字节

表 4-13 接收到状态传感器返回数据的帧结构

起始字节 (S)	指令 (C)	数据 (D)	校验 (V)
一个字节 (0x7e)	1 个字节	N 个字节	2 个字节

(2) 采集中心与状态传感器通信中, 通过定义的指令控制传感器执行相应的操作, 定义的指令有: 读取测量数据指令、开始校准指令和校准完成指令。定义的指令如表 4-14 所示。

表 4-14 与状态传感器通信中定义的控制字

指令	说明
0x10	读取测量数据
0x20	开始校准
0x30	校准完成

当采集中心向状态传感器发送指令读取测量数据时, 返回的数据为 8 个字节四个整数数, 分别为重力加速的在三个轴的分量和监测平台的方向角。开始校准时, 返回的数据为确认信息, 一个字节 (0x01)。校准完成时, 返回的数据为校准的斜率乘以 100 的整数数和校准的零点乘以 100 的整数数, 为四个字节。所有数据高字节在前, 低字节在后。

4.3.4 SIM908 的通信指令

SIM908 驱动程序通过调用 UART1 串口程序, 向 SIM908 模块发送 AT 指令^[32,33]。使用的 AT 指令及功能如下:

AT+CGPSPWR=0 关闭 GPS 电源
 AT+CGPSPWR=1 打开 GPS 电源
 AT+CGPSRST=1 GPS 自动重启
 AT+CGPSINF=1 输出 GPGGA 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=2 输出 GPGLL 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=4 输出 GPGSA 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=8 输出 GPGSV 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=16 输出 GPRMC 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=32 输出 GPVTG 格式的 GPS 信息
 AT+CGPSINF=64 输出 GPZDA 格式的 GPS 信息

在这里系统采用 GPGLL 格式的 GPS 信息。GPGLL 格式数据包括 7 个由 ASCII 码字符串组成的字段, 字段间用 “,” 隔开。各字段信息和数据格式如下:

字段 0: \$GPGLL, 语句 ID, 表明该语句为 GLL 地理定位信息
 字段 1: 纬度 ddmm.mmmm, d 表示度, m 表示分 (前导位数不足则补 0)
 字段 2: 纬度 N (北纬) 或 S (南纬)
 字段 3: 经度 dddmm.mmmm, d 表示度, m 表示分 (前导位数不足则补 0)
 字段 4: 经度 E (东经) 或 W (西经)
 字段 5: UTC 时间, hhmmss.sss, h 表示时, m 表示分, s 表示秒 (前导位数不足则补 0)
 字段 6: 状态, A=定位, V=未定位

字段 7: 校验值

检测平台的应用地点在我国, 处于地球的北半球和东半球, 故驱动程序只将字段 1 和字段 3 的信息提取出来并以字符串的形式返回。

4.3.5 SHT11 温湿度传感器驱动程序

SHT11 驱动程序根据 SHT11 通信协议时序操作 C8051F020 单片机的输入输出端口与温湿度传感器 SHT11 进行通信^[34]。根据所实现的功能, SHT11 温湿度传感器驱动程序分为以下 5 个函数, 1、启动测量函数; 2、读取一个字节数据函数; 3、写入一个字节数据函数; 4、写指令函数; 5、数据读取函数。Sht11 驱动程序见附录。

4.4 数据处理程序

数据处理程序包括数据滤波程序和数据转换程序。数据滤波程序根据设计的数据滤波算法编写, 其目的是消除测量中的随机误差和脉冲干扰。传感器测量的 AD 值与其测量的物理量存在一个转换公式, 数据转换程序就是根据这个转换公式将从传感器读出的 AD 值转化为有实际意义的物理参数。

4.4.1 数据滤波算法

在测量中, 测量值和真实值之间的差异叫做测量误差, 测量误差分为系统误差和随机误差, 系统误差是指在相同的观测条件下, 会表现出一定的规律性的偏差。有时也被称作统计偏差。系统误差可以通过优化系统的设计来控制。随机误差也称为偶然误差和不确定误差, 是由于在测量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。在信号的传输中和 AD 的量化中都会产生随机误差。在单次测量中, 随机误差的符号和大小都具有不确定性, 多次测量时, 随机误差会表现出符合统计学规律的变化。

为了确保数据的精度和可靠性, 除了选择更高精度的传感器和设计硬件电路时采用精度更高、可靠性更好的器件外, 对采集到的数据进行加工处理也可以使得到的数据更为准确可靠。数字滤波就是一种很好地去除奇异数据, 消除随机误差的办法。

数字滤波具有无需硬件, 可靠性高, 易于实现, 使用灵活方便等优点。在沙尘环境参数监测平台中采用中值滤波法和滑动平均滤波法相结合的复合滤波法。首先采用中值滤波滤除采样数据中的脉冲性干扰, 然后对中值滤波后的采样数据进行平均滤波, 消除随机干扰。这种方法不仅可以滤除明显的脉冲干扰, 而且还能有效的抑制随机误差^[35]。

中值滤波是一种典型的非线性滤波器, 它运算简单, 在滤除脉冲噪声的同时可以很好地保护信号的细节信息。对某一被测参数连续采样 n 次 (一般 n 应为奇数), 然后将这些采样值进行排序, 选取中间值为本次采样值。

滑动平均滤波法把 N 个测量数据看成一个队列, 队列的长度固定为 N , 每进行一次新的采样, 把测量结果放入队尾, 而去掉原来队首的一个数据, 这样在队列中始终有 N 个“最新”的数据。将 N 个连续采样值 (分别为 X_1 至 X_N) 相加, 然后取其算术平均值作为本次测量的滤波值, 它能很好的抑制随机干扰。滤波器的算法如下:

- 1、建立滑动数据窗口(宽度 n);

- 2、用冒泡法排序;
- 3、选取中间的数据加入平均滤波队列的队尾;
- 4、对平均滤波队列内的 N 个数据取算术平均值。

4.4.2 测量数据的标度变换

从传感器读出的测量数据往往只是传感器将测量的量进行量化后的 AD 值,并不具备实际的物理意义。因此需要对这些数据进行标度变换,得出系统所需要的有意义的物理参数。

传感器测量的 AD 值与其测量的物理量存在一个转换关系,在本系统中用到的各传感器的测量值与其测量的物理量转换公式如下:

(一) 风速的计算

$$V_w = V_f / 10 \quad (4-1)$$

风速的计算公式如式 4-1 所示。 V_w 表示风速,单位为米/秒, V_f 表示从风速传感器读出的数据。

(二) 风向的计算

$$F_w = F_f + F_p \quad (4-2)$$

$$F_p = \tan^{-1} (B_y / B_x) \quad (4-3)$$

风向的计算公式如式 4-2 所示。 F_w 表示从正北方向顺时针旋转至风向所扫过的角度,单位为度, F_f 表示从风向传感器读出的数据,表示从监测平台顺时针旋转至风向所扫过的角度, F_p 表示从正北方向顺时针旋转至监测平台的方向所扫过的角度,单位为度,由地磁传感器测量数据计算得出。 B_y 表示从地磁传感器读出地磁力在平台左方向的分量 B_x 表示从地磁传感器读出地磁力在平台前向的分量。注:平台和风向传感器方向一致。

(三) 气压的计算

$$P_a = P_t * 10 \quad (4-4)$$

气压的公式如式 4-4 所示。 P_a 表示大气压强,单位为帕, P_t 表示从气压传感器读出的数据。

(四) 空气湿度的计算

$$H_a = \frac{-4.0845 * H_t^2}{10000} + 0.5872 * H_t - 2.0468 \quad (4-5)$$

空气湿度的计算公式如式 4-5 所示。 H_a 表示空气湿度的百分比, H_t 表示从 SHT11 中读出的关于湿度的测量值。

(五) 空气温度的计算

$$T_a = 0.04 * T_t - 39.7 \quad (4-6)$$

空气温度的计算公式如式 4-6 所示。 T_a 表示空气的温度值,单位为度, T_t 表示从 SHT11 中读出的关于温度的测量值。

(六) 经纬度信息的计算

$$W = W_d + W_m / 60 \quad (4-7)$$

$$W_d = (d_0 - 48) * 10 + (d_1 - 48) \quad (4-8)$$

$$W_m = \frac{m_0 * 10^4 + m_1 * 10^3 + m_2 * 10^2 + m_3 * 10 + m_4 - 48 * 11111}{1000} \quad (4-9)$$

$$J = J_d + J_m / 60 \quad (4-10)$$

$$J_d = (d_0 - 48) * 100 + (d_1 - 48) * 10 + (d_2 - 48) \quad (4-11)$$

$$J_m = \frac{m_0 * 10^4 + m_1 * 10^3 + m_2 * 10^2 + m_3 * 10 + m_4 - 48 * 11111}{1000} \quad (4-12)$$

根据 GPGLL 数据格式, 纬度信息格式为 $d_0d_1m_0m_1.m_2m_3m_4m_5$, 经度信息格式为 $d_0d_1d_2m_0m_1.m_2m_3m_4m_5$ 。根据检测平台对位置信息的位置精度要求, 计算公式如式 4-9 和式 4-12 所示。 W 表示北纬度, 单位为度, W_d 表示纬度的度数分量, W_m 表示纬度的分数分量。 J 表示东经度, 单位为度, J_d 表示经度的度数分量, J_m 表示经度的分数分量。

4.5 沙埋传感器软件设计

沙埋传感器程序包括数据转换程序和校准程序。数据转换程序根据计算公式将采得频率值转换为以毫米为单位的沙埋深度。校准程序通过对测量点的标定校准该段函数的参数值, 达到提高传感器测量精度以及可靠性的目的。

4.5.1 数据转换公式

单片机通过转换函数将采得频率值转换为以毫米为单位的沙埋深度值。转换函数由三段线段的函数构成, 三段线段由 (f_0, s_0) , (f_1, s_1) , (f_2, s_2) , (f_3, s_3) 四个点顺序连接。转换公式如式 4-13 所示。

$$s = k * f + b \quad (4-13)$$

当 f 大于 f_1 小于 f_0 是 k 的值如式 4-14 所示, b 的值如式 4-15 所示。

$$k = \frac{(s_1 - s_0)(f - f_0)}{(f_1 - f_0)} \quad (4-14)$$

$$b = s_0 - \frac{(s_1 - s_0)f_0}{(f_1 - f_0)} \quad (4-15)$$

当 f 大于 f_2 小于 f_1 时将 (f_1, s_1) , (f_2, s_2) 分别替换式 4-14 和式 4-15 中的 (f_0, s_0) , (f_1, s_1) 即可得到 k 和 b 的值。当 f 大于 f_3 小于 f_2 时将 (f_2, s_2) , (f_3, s_3) 分别替换式 4-14 和式 4-15 中的 (f_0, s_0) , (f_1, s_1) 即可得到 k 和 b 的值。

4.5.2 传感器的校准程序

传感器的校准可以很好地控制系统误差, 提高传感器的测量精度, 以及传感器的可靠性。因传感器的制作工艺问题和周围环境对传感器测量时产生的影响, 不仅不同的传感器的特性曲线不同, 甚至在不同测量环境下同一个传感器的特性曲线也会发生变化。传感器参数标定功能的设计可以很好地解决这个问题。从而提高传感器的测量精度, 使其具有更好的可靠性^[36,37]。

沙埋传感器为简化数据计算提高传感器的稳定性, 利用三个线段模拟曲线的方法。因此只需对这三个线段的零点和斜率进行标定, 就可以确定传感器的特性曲线^[38]。

选取传感器的零点、三分之一点、三分之二点、和顶点作为三个线段的端点。只需确定这四个点的测量值就可以计算出三个线段的零点和斜率, 从而得出沙埋深度和振荡频率的拟合函数。

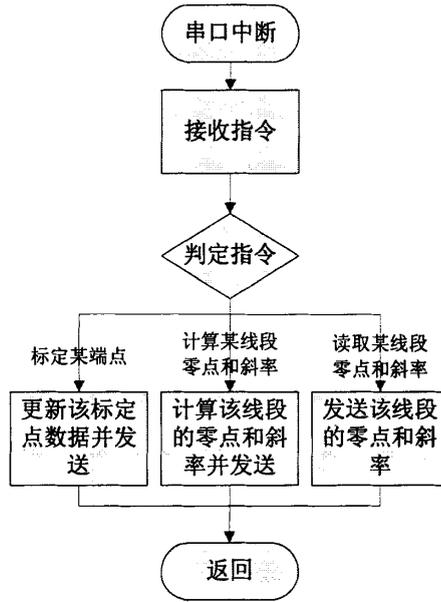


图 4-4 沙埋传感器校准程序的流程图

传感器的标定由串口发送指令控制，根据接收的指令执行相应操作。标定指令分为三类：1. 标定某个端点：将当前频率测量值作为该点的标定值；2. 计算某线段的零点和斜率值：根据该线段端点的标定值计算该线段的零点斜率；3. 读取某线段的零点和斜率值：返回该线段的零点和斜率值。标定指令格式如下：

发送：0x7e+标定指令+校验

返回：0x7e+ 数据+ 校验

校验方式采用 CRC 校验，CRC 检验程序见附录，校验数据为两个字节，详细标定指令见表 4-11，标定程序的流程图见图 4-4。

4.5.3 与采集中心的通信

沙埋传感器通过 8051F410 的 UART 串口与采集中心通信，将转换后的测量数据发送至采集中心，同时也通过串口接收到控制字，进行标定操作。通过定义的通信帧格式，沙埋传感器与采集中心通信，在接收到采集中心发送的指令后，根据相应指令执行相应的操作。沙埋传感器定义的指令包括读取数据指令、标定某端点指令、计算某线段零点和斜率指令和读取某线段零点和斜率指令。当接收到读取数据指令，传感器将转换后的数据发送至采集中心；接收到标定端点的指令，则标定相应的端点；接收到计算某线段零点和斜率的指令，则计算该线段的零点和斜率；接收到读取某线段零点和斜率的指令，则将该线段的零点和斜率发送至采集中心。每个通信帧的内容包括起始字节、指令和数据，数据校验采用 CRC 校验，CRC 检验程序见附录。详细通信协议见 4.3.2 沙埋传感器通信协议。

4.6 状态传感器软件设计

状态传感器的程序包括数据转换程序和 HMC5883 磁传感器校准程序。数据转换程序将取得

ADXL345 加速度传感器内部的 AD 值和 HMC5883 磁传感器内部的 AD 值经过计算公式分别转换为以 100 为单位重力加速 (g) 的重力加速度值和当前传感器方向值 (即得出当前与正北方向偏差的角度)。HMC5883 磁传感器旋转时地磁分量的对称性 (可由在某一点测得地磁分量的大小和方向相同得出) 来消除加工工艺和周围磁场干扰带来的误差, 达到提高传感器测量精度以及可靠性的目的^[39]。

4.6.1 数据转换公式

在程序初始化时设置 ADXL345 加速度传感器的测量范围为-4g 到+4g, 即 14 位 AD 的值对应-4g 到+4g。将其在 X、Y、Z 轴上的分量经过式 4-16 转换后, 等待采集中心读取。

$$f(x) = \frac{100 \cdot x}{4096 \cdot 4} \quad (4-16)$$

假设从 HMC5883 磁传感器读出内部的 AD 值中 X 轴分量为 X_b , Y 轴分量为 Y_b , 则由正北方向顺时针旋转至 HMC5883 磁传感器 X 轴方向转过的角度值为 B 。B 的计算如下:

$$B = \tan^{-1} \frac{Y_b}{X_b} \quad \text{当 } Y_b \text{ 大于 } 0 \text{ 时} \quad (4-17)$$

$$B = \tan^{-1} \frac{Y_b}{X_b} + 180 \quad \text{当 } Y_b \text{ 小于 } 0 \text{ 时} \quad (4-18)$$

将这个角度值 B 记录, 并作为当前传感器的方向等待采集中心的读取。

4.6.2 HMC5883 磁传感器的校准

在理想的情况下, 将磁传感器旋转一周, 则测出的地磁场在水平面 X 轴和 Y 轴的方向分量为 X_b 、 Y_b , 将 X_b 和 Y_b 标示在坐标轴上, 其轨迹应该是一个圆, 可在实际测量中, 周围有铁质物体的存在, 铁质物体会干扰或弯曲地磁场, 此时测出的磁场在坐标图上的轨迹就不再是圆, 类似椭圆^[40]。

为补偿周围的干扰, 可引入因数 K 来将椭圆改为圆, 并计算出偏移值 B , 将圆心定为原点。

$$X_B = K * X_b + B \quad (4-19)$$

$$Y_B = Y_b + B \quad (4-20)$$

将磁传感器旋转一周测得在 Y 轴上的最大值为 Y_{max} , 最小值为 Y_{min} 在 X 轴上的最大值为 X_{max} 最小值为 X_{min} , 则可推算出 K 和 B 的计算如下:

$$K = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (4-21)$$

$$B = \frac{Y_{max} + Y_{min}}{2} \quad (4-22)$$

传感器的校准由串口发送指令控制, 当接收到校准开始指令后, 传感器内部的单片机开始记录下测量在 X 轴 和 Y 轴上的最大值和最小值, 当收到校准完成指令后, 传感器通过记录的 X 轴 和 Y 轴上的最大值和最小值计算 K 和 B 。校准指令如下:

发送: 0x7e + 校准指令 + 校验

返回: 0x7e + 校验

校验方式采用 CRC 校验, CRC 检验程序见附录, 校验数据为两个字节。校准指令共有两个, 0x10 表示开始校准, 0x30 表示校准完成。

4.6.3 与采集中心的通信

状态传感器通过 8051F410 的 UART 串口与采集中心通信，根据定义的通信帧格式，根据定义的通信帧格式，接收到采集中心发送的指令后，根据相应指令执行相应的操作后发送采集中心所要的数据。每帧内容包括起始字节、指令和数据，数据校验采用 CRC 校验，CRC 检验程序见附录。详细通信协议见 4.3.3 状态传感器通信协议。

4.7 本章小结

本章的主要内容是沙尘环境参数监测平台的软件设计，分别对采集中心的数据采集程序、数据处理程序、和上位机通信程序，沙埋传感器的数据转换程序、校准程序、通信程序以及状态传感器的数据转换程序、磁传感器的校准程序、通信程序做了说明和介绍。

第五章 测试与总结

5.1 测试

沙尘环境参数监测平台采用模块化设计，监测平台分为数据采集模块（即主板电路）和各传感器模块。采集模块和传感器模块的通信接口采用了通用的 UART 接口。因此在调试时各模块能很方便地与计算机相连，并利用计算机串口调试助手进行调试。这样能很方便的找到问题所在，极大的提高了开发效率。在调试的过程中还使用了万用表、示波器以及单片机开发板。

在系统调试的过程中，先通过计算机串口调试助手对各个模块进行调试。各模块测试正常检查无误后，通过航空插头将各传感器模块连接至主板模块，完成整个监测平台的组装。然后对监测平台进行了功能测试、稳定性测试和抗电磁干扰测试。

在实验室模拟环境下，通过计算机的串口和监测平台与上位机的通信接口连接，对监测平台进行了功能测试，结果表明监测平台运行正常，各传感器采集数据正常。对串口助手截图如图 5-1 所示。

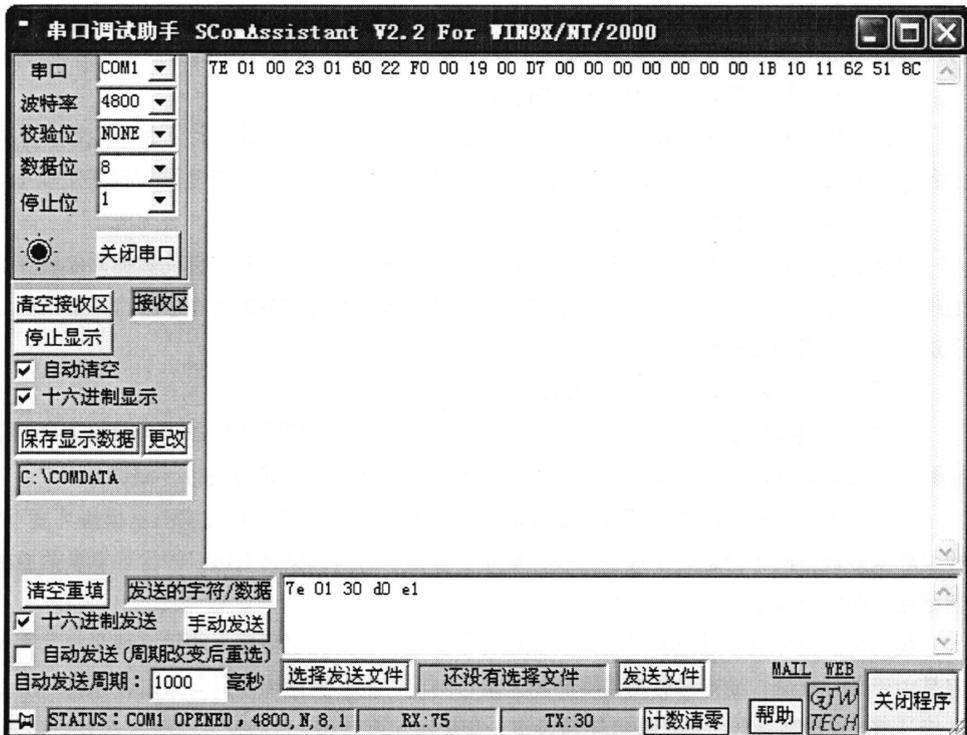


图 5-1 串口助手调试监测平台数据截图

通过串口助手向采集平台发送 0x7e 0x01 0x30 0xd0 0xe1 表示读取监测平台 1 的测量数据。收到采集平台 1 发送回的数据 0x7e 0x01 0x00 0x23 0x01 0x60 0x22 0xf0 0x00 0x19 0x00 0xd7 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x1b 0x10 0x11 0x62 0x51 0x8c。表示监测平台测量的数据为风速 3.5 米/秒、风向角 352 度、气压 89440 帕、气温 2.5 度、空气湿度 21.5、动能脉冲数、撞击粒子

数和沙埋深度均为 0,平台方向角 27 度,重力加速度三个轴的分量分别为 X 轴 0.16g、Y 轴 0.17g、Z 轴 0.98g。与当时的测量环境相吻合,表示监测平台功能正常。

另外对监测平台不断地运行一周进行观察,观察期间未发现异常,监测平台工作正常,表明监测平台初步达到了设计要求。

5.2 总结

本论文的研究内容来源于科技部下的国际合作项目:“沙漠腹地沙尘监测与信息获取技术合作研究”。该项目通过在沙漠腹地即沙尘暴的源头,对沙尘信息近距离不间断的监测和数据采集,对沙尘暴进行小尺度的分析研究,从而达到预防沙尘暴和防治土地沙漠化的目的。在该项目中我隶属于沙尘参量传感器及其供电技术组,我的主要工作是传感器的数据采集(即沙尘信息监测平台的设计)。本论文作为该项目的一部分,主要阐述了沙尘信息监测平台的设计背景和意义,以及沙尘信息监测平台的设计和实现,以及监测平台中相关传感器的设计和选型。本论文通过以下方面对沙尘信息监测平台的设计和实现进行了描述:

(一) 沙尘环境参数监测平台的系统设计

根据研究沙尘暴需要的数据参数,选择所需要的传感器种类。依据模块化设计的理念,制定出整个系统的结构图,选择处理器和传感器的型号,并设计了市场上没有的沙埋传感器,利用现有的传感器进一步设计了状态传感器。

(二) 沙尘环境参数监测平台的电路设计

根据各模块的供电要求设计了电源电路,根据各模块的工作电路设计了接口电路,并将主板上各模块的工作电路组合在一起就构成了主板电路。各传感器通过接口电路连接在主板上。

(三) 沙尘环境参数监测平台的软件设计

根据各个传感器的通信协议编写了传感器的驱动程序,以及监测平台的数据采集程序、数据处理程序和与上位机的通信程序。并根据对沙埋传感器和 HMC5883 磁传感器的测量原理,编写了这两个传感器的校准程序。

(四) 沙尘环境参数监测平台的测试

在实验室模拟环境下,将监测平台连接至计算机,通过计算机串口助手与检测平台通信,对检测平台功能实现进行了测试。并对监测平台的长时间运行的稳定性进行了测试。

经过一年多的努力,沙尘环境参数监测平台已初步搭建完成。经过实验室模拟环境下测试,沙尘环境参数监测平台达到了最初的设计要求。但由于时间和条件有限,沙尘环境参数监测平台还存在一些问题需要进一步的研究。

我们对沙尘环境参数监测平台的功能进行了测试,在实验室环境下能很好地完成其测量任务,但是由于条件有限,没有与更高精度的测量进行对比,故其测量误差只有通过传感器的测量误差进行计算。故监测平台的测量精度还需要进一步的测定和改善,从而使监测平台具有更高的精度。另外我们在实验室对沙尘环境参数监测平台的长时间工作的稳定性进行了测试,监测平台工作稳定,但相对于实验室的环境,沙漠深处的环境更加的恶劣和多变,因此监测平台的可靠性还需进一步验证和提高。

参考文献

- [1] 马素艳. 一次强沙尘暴过程的诊断分析和数值模拟[D]. 南京信息工程大学, 2013.
- [2] 顾润源, 孙永刚, 韩经纬, 等. 内蒙古自治区天气预报手册[J]. 气象, 2012: 324-354.
- [3] 熊洁. 全球主要沙尘源区分布及其沙尘气溶胶变化特征的模拟分析[D]. 南京信息工程大学, 2013.
- [4] 杨艳, 王杰, 田明中, 等. 中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 465-472.
- [5] 缙倩倩, 韩致文, 杜鹤强, 等. 中国沙尘暴源区及其治理研究述评[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1559-1564.
- [6] 沈洁, 李耀辉, 胡田田. 一次特强沙尘暴成因及近地面要素脉动特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34: 507-517.
- [7] 杨东华. 沙尘暴的危害及防治对策[J]. 环境研究与监测, 2013, 4: 021.
- [8] Gilbert N. Science enters desert debate [J]. Nature, 2011, 477(7364): 262.
- [9] 刘拓. 中国土地沙漠化及其防治策略研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [10] 王涛, 赵哈林. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 299-311.
- [11] 宫立山. 沙尘暴景象的参数化建模与绘制研究[D]. 浙江大学, 2012.
- [12] 王涛. 沙漠化研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2009 (3): 290-296.
- [13] 王式功, 董光荣. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356.
- [14] 俞卫平, 周诗健, 王伟. 地面气象观测规范[J]. 2003: 35-40.
- [15] 张广兴, 李霞. 沙尘暴观测及分级标准研究现状[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 586-591.
- [16] 徐启运, 胡敬松等. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析[J]. 中国减灾, 1996, 6(3): 42-45.
- [17] 王炜. 南开大学 东亚沙尘暴形成机制概念模型的理论分析[J]自然灾害学报. 2011年4月.
- [18] 胡玉峰. 自动气象站原理与测量方法[J]. 气象, 2005, 31(4): 96-96.
- [19] Evans P B. Embedded autonomy: states and industrial transformation[M]. Princeton: Princeton University Press, 1995.
- [20] Gupta G S, Mukhopadhyay S C. C Programming for Silabs C8051F020 Microcontroller[M] // Embedded Microcontroller Interfacing. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 49-65.
- [21] 潘琢金. C8051F020/1/2/3 混合信号 ISPFLASH 微控制器数据手册[D]. 沈阳: 新华龙电子有限公司, 2002.
- [22] 潘琢金. C8051F410/1/2/3 混合信号ISP FLASH微控制器数据手册[D]. 沈阳: 新华龙电子有限公司, 2006.
- [23] 李兴法, 尹冠飞. 数字式加速度传感器ADXL345的原理及应用[J]. 黑龙江科技信息, 2010 (036):2-2.
- [24] 胡宁博, 李剑, 赵祥云. 基于 HMC5883 的电子罗盘设计[J]. 传感器世界, 2011, 17(6): 35-38.
- [25] Barchyn T E, Hugenholtz C H. Field comparison of four piezoelectric sensors for detecting aeolian sediment transport[J]. Geomorphology, 2010, 120(3): 368-371.

- [26] 孟臣, 李敏, 李爱传. I²C 总线数字式温湿度传感器 SHT11 及其在单片机系统的应用[J]. 国外电子元器件, 2004 (2): 50-54.
- [27] 陆志远. 基于电力载波的温室监控系统设计[D]. 宁夏大学, 2013.
- [28] 陈海轮. 基于 SIM908 定位系统的硬件设计[J]. 电子世界, 2013 (23).
- [29] 邓彬伟. 嵌入式系统 I/O 设备驱动模式和结构的研究[D]. 华中师范大学, 2005.
- [30] 赵建领. 51 系列单片机开发宝典[M]. 电子工业出版社, 2007.
- [31] Sen Gupta G, Moi-Tin C. New frontiers of microcontroller education: Introducing SiLabs ToolStick University daughter card[C]. Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing, 2008. SUTC'08. IEEE International Conference on. IEEE, 2008: 439-444.
- [32] 彭颖, 郭泽林. 嵌入式快递跟踪仪的设计与实现[J]. 科技信息, 2013 (3): 183-184.
- [33] Command R. AT+ CGMSCLA SS=< class>[J]. SIM908 AT Command Manual_V1.01, 2011.
- [34] 陆荣鑑, 李品, 孙周. SHT10 传感器在温湿度监测系统中的应用[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(9): 136-138.
- [35] 向红军, 雷彬. 基于单片机系统的数字滤波方法的研究[J]. 电测与仪表, 2005, 42(9): 53-55.
- [36] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [37] 赵茂泰. 智能仪器原理及应用[M]. 电子工业出版社, 1999.
- [38] 张凯. 基于嵌入式系统的通用电子测量仪器关键技术的研究[D]. 西安电子科技大学, 2005.
- [39] 方婵畅. 电子式互感器数字量输出校验系统[D]. 华中科技大学, 2011.
- [40] 李秉玺, 赵忠, 孙照鑫. 磁阻传感器的捷联式磁航向仪及误差补偿[J]. 传感技术学报, 2003, 16(2): 191-194.

附录

附录 1 CRC 校验程序

```
unsigned int CRC_jiaoyan(unsigned char date ,unsigned int pre_date)
{
    unsigned char i;
    unsigned char flag;
    unsigned int temp0;
    temp0=date;
    temp0=temp0^pre_date;
    flag=0;
    for(i=0;i<8;i++)
    {
        if((temp0&0x0001)==0)
        {
            flag=0;
        }
        else
        {
            flag=1;
        }
        temp0=temp0>>1;
        if(flag==1)
        {
            temp0=temp0^CRC_DATE;
        }
    }
    return(temp0);
}
```

附录 2 SHT11 驱动程序

```
#include <c8051f020.h>
#include "extern.h"
#define DATA_IN DATA_OUT
sbit DATA_OUT = P2^6;
```

```
sbit SCK = P2^7;
void s_transstart(void)
{
    unsigned char i;
    P2MDOUT |= 0x40;
    DATA_OUT=1; SCK=0;
    for(i=0;i<9;i++)
        { SCK=1;
          delay(1);
          SCK=0;
          delay(1);
        }
    DATA_OUT=1; SCK=0;
    delay(2);
    SCK=1;
    delay(2);
    DATA_OUT=0;
    delay(2);
    SCK=0;
    delay(5);
    SCK=1;
    delay(2);
    DATA_OUT=1;
    delay(2);
    SCK=0;
}
void s_write_byte(unsigned char value)
{
    unsigned char i;
    P2MDOUT |= 0x40;
    for (i=0x80;i>0;i/=2)
    {
        if (i & value)
            DATA_OUT=1;
        else DATA_OUT=0;
        delay(2);
        SCK=1;
        delay(5);
        SCK=0;
    }
}
```

```
    }
    DATA_OUT=0;
    SCK=1;
    delay(2);
    SCK=0;
    DATA_OUT=1;
}
unsigned char s_read_byte(unsigned char ack)
{
    unsigned char i,val=0;
    P2MDOUT &= ~0x40;
    for (i=0x80;i>0;i/=2)
    { SCK=1;
      delay(2);
      if (DATA_IN) val=(val | i);
      SCK=0;
      delay(2);
    }
    DATA_OUT=!ack;
    SCK=1;
    delay(5);
    SCK=0;
    DATA_OUT=1;
    return val;
}
void set_suffer(unsigned char flag,unsigned char data0)
{
    s_transstart();
    s_write_byte(flag);
    s_write_byte(data0);
}
void init_sht11(void)
{
    set_suffer(0x06,0x01);
}
unsigned int get_temp(unsigned char flag)
{
    unsigned char temp;
    unsigned int temp0;
```

```
temp0=0;
s_transstart();
s_write_byte(flag);
P2MDOUT &= ~0x40;
while((DATA_IN==1)&(temp0<2000))
{
    temp0++;
    delay(100);
}
temp=s_read_byte(1);
temp0=temp;
temp=s_read_byte(1);
temp0=(temp0<<8)+temp;
temp=s_read_byte(1);
return(temp0);
}
```

致谢

时间如白驹过隙，两年的学习生活即将结束，作为人生中阳光灿烂的日子，这段时间使我受益匪浅，也令我记忆深刻。感谢我的导师杨泽林教授，感谢您在研究生期间对我的教导和帮助，从开学伊始加入智能沙漠项目组到沙尘监测平台的设计和制作，从论文的开题到材料的积累和论文的撰写，您严谨的治学态度和认真的工作作风都一直激励和督促着我前进；感谢李春树老师，每当有问题需要您的帮助，您总是平易近人地帮我解答；感谢宿舍的兄弟，陪伴我一起度过了这两年的快乐时光；感谢306沙漠传感器实验室的兄弟姐妹们，因为有你们在一起的欢声笑语，调试程序的枯燥、测试硬件的无聊，也变得有趣热闹；感谢我的家人，感谢你们的支持和陪伴，我的每一次进步都离不开你们的支持和鼓励。

随着夏天的到来，毕业的日子也要到了。感谢各位评委老师在百忙之中抽出时间审阅我的论文，敬请评委老师对我的论文批评斧正。感谢每一位老师，是您们带领着我在知识的海洋探索，我的成长离不开您们的教导。祝愿您们身体健康，生活愉快，桃李满天下！

此页不缺内容

个人简介

基本情况

姓名：谭伟田

性别：男

民族：汉

籍贯：河南 周口

出生年月：1987年9月

教育与工作经历

2005年9月—2009年6月	郑州大学	电子信息科学与技术	本科
2012年9月—2014年6月	宁夏大学	电子与通信工程	硕士
2009年7月—2011年6月	河南省日立信股份有限公司	研发部	研发员

研究生期间参与的项目

1、沙漠腹地沙尘检测与信息获取技术合作研究（2012/9—至今）

该项目由宁夏大学和上海交通大学、中科院寒旱所、美国宾夕法尼亚大学合作。科技部下的国际合作项目。项目编号 No. 2011DFA11780。

2、基于物联网技术的高原农业温棚环境因子采集与自动控制系统（2013/3—2013/10）

青海创新基金项目，采用嵌入式技术，由系统自动控制温室大棚的温湿度，及光照和二氧化碳含量，应用物联网技术，可用手机远程查看并控制仪表。

研究生期间获奖情况

全国研究生数学建模大赛三等奖（2013年12月）

宁夏大学C语言程序设计大赛一等奖（2013年9月）