

中文图书分类号：TP24

密 级：公开

UDC：621

学 校 代 码：10005



硕 士 专 业 学 位 论 文

PROFESSIONAL MASTER DISSERTATION

论 文 题 目：远程天文台硬件控制系统设计

论 文 作 者：王川中

专业类别/领域：工程硕士/机械工程

指 导 教 师：苏丽颖 副教授

论文提交日期：2019 年 5 月

UDC: 621
中文图书分类号: TP24

学校代码: 10005
学 号: S201601151
密 级: 公开

北京工业大学硕士专业学位论文

(全日制)

题 目: 远程天文台硬件控制系统设计

英文题目: REMOTE OBSERVATORY HARDWARE
CONTROL SYSTEM DESIGN

论 文 作 者: 王川中

专业类别/领域: 工程硕士/机械工程

研 究 方 向: 现代机械系统设计

申 请 学 位: 工程硕士专业学位

指 导 教 师: 苏丽颖 副教授

所 在 单 位: 机械工程与应用电子技术学院

答 辩 日 期: 2019 年 5 月

授予学位单位: 北京工业大学

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，也不包含为获得北京工业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。

签名: 王川中

日期: 2019 年 5 月 25 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名: 王川中

日 期: 2019 年 5 月 25 日

导师签名: 李研弟

日 期: 2019 年 5 月 28 日

摘 要

天文学是一门以观测为主的科学,对观测工具和观测环境都有十分苛刻的要求。远程天文台的应用,不仅在很大程度上克服了人类现代化进程对观测环境的影响,而且解决了地面望远镜台址恶劣观测环境和人类生存环境之间的矛盾。随着多波段时域天文学的快速发展,远程天文台逐渐显露出优势,成为时域天文学研究的重要工具,而国内还没有自主、成熟、稳定的系统可以应用到远程天文台的建设当中,严重阻碍了天文台的推广与发展。因此,设计一套标准化、高稳定性、易推广的远程天文台系统具有非常重要的意义。

用户与远程天文台的连接控制是核心,是整个系统运行的基础,是远程天文台建设第一个需要解决的问题。本文的主要内容是设计一套可编程的集成硬件控制系统,作为观测系统和各观测设备的桥梁,连接远程天文台常用设备,实现远程连接与控制等操作。本文的主要工作内容包括以下几方面:

首先,通过模块化设计,将远程天文台常用功能进行封装集成,根据各模块功能选择合适的芯片,并以芯片为核心设计逻辑连接关系,完成远程天文台硬件控制系统总体设计方案。

其次,根据总体设计方案,进行关键的电路原理图设计,包括调压模块电路设计、AVR 单片机系统电路设计、GSM/GPRS 芯片外围电路设计、TCP/IP 芯片外围电路设计、单片机控制逻辑电路设计和监控电路设计等。

然后,结合信号完整性、电源完整性和电磁兼容性规则,进行 PCB 设计设计,包括叠层设计、PCB 布局、PCB 布线、加工工艺的选取、打板和贴片制作出实物等。

最后,设计 PCB 电路板驱动程序,为硬件系统设计上位机连接测控软件,并对硬件控制系统做性能测试。

论文中设计的远程天文台硬件控制系统完成了第一版的设计,已可以满足基本的连接控制需要。

关键词: 远程天文台; 时域天文学; 集成控制; 信号完整性

Abstract

Astronomy is an observation-based science with very demanding requirements for observational tools environments. The application of Remote Observatories largely overcomes the impact of the human modernization process on observational environments, and resolves the contradiction between the obscure observation environment the ground telescope site and the living environment for human. With the rapid development of time domain astronomy, remote observatory is becoming an important tool for time domain research by virtue of its advantages. However, there is not yet a stable and independently developed system for the construction of public observatories, which largely impedes the promotion of the Observatories. Therefore, a set of standardized, highly stable and easy-to-promote remote observatory systems is urgently needed.

The connection control between the user and the remote observatory is the core and the basis for the operation of the entire system. Therefore it is the first problem that needs to be solved in the construction of the remote observatory. The main content of this paper is to design a programmable integrated hardware control system, as a bridge between the observation system and the observing equipment, connecting the common equipment of a remote observatory, and realize the remote connection and control operations. The main contents of this dissertation include the following aspects:

Firstly, through the modular design, the common functions of remote observatories are packaged and integrated, and the appropriate chip is selected according to the function of each module. With the main chip as the core, the logical connection relationship is designed, the standard interface is reserved, and the overall design scheme of the remote observatory hardware control system is completed.

Secondly, according to the overall design scheme, the key circuit schematic design is carried out, including: power distribution network design, AVR single-chip peripheral circuit design, GSM/GPRS chip peripheral circuit design, TCP/IP chip peripheral circuit design, single-chip control logic circuit design and monitoring circuit design and so on.

Thirdly, based on a comprehensive consideration of signal integrity, electromagnetic compatibility and power integrity, the PCB design was introduced in detail, the processing technology was set, the board and the patch were made, and the physical objects were produced.

Finally, the PCB board driver is designed for, and the PC is connected to the measurement and control software for the hardware system. A final test on the hardware control system were conducted.

The remote observatory hardware control system presented in this dissertation is

the first version of the design, which could meet the basic needs for connection and control.

Keywords: Remote observatory, time domain astronomy, integrated control, the signal integrate

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	4
1.2 远程天文台基本介绍	6
1.2.1 远程天文台硬件控制系统.....	6
1.2.2 远程天文台软件控制系统.....	8
1.3 远程天文台的典型应用	9
1.3.1 天文选址.....	9
1.3.2 科学研究.....	10
1.3.3 教育和公众科学.....	11
1.4 课题来源及本文研究内容	13
1.4.1 课题来源.....	13
1.4.2 本文主要研究内容.....	13
第 2 章 远程天文台硬件控制系统方案设计.....	15
2.1 远程天文台功能模块设计	15
2.1.1 控制功能模块.....	16
2.1.2 通用功能模块.....	17
2.2 远程天文台硬件控制系统芯片选型	18
2.2.1 单片机模块 ATmega 16	18
2.2.2 GSM 模块 SIM800C	19
2.2.3 网络模块 W5500.....	20
2.3 远程天文台硬件控制系统总体结构框图设计	22
2.4 本章小结	24
第 3 章 远程天文台硬件控制系统原理图设计.....	25
3.1 调压模块电路设计	25
3.1.1 电源输入控制电路.....	25
3.1.2 网络模块调压电路.....	26
3.1.3 手机模块调压电路.....	27

3.2 AVR 单片机系统电路设计	29
3.2.1 芯片供电电路.....	29
3.2.2 外部复位电路.....	30
3.2.3 外部晶振电路.....	30
3.2.4 ISP 下载接口电路.....	30
3.3 W5500 系统电路设计	31
3.3.1 外部晶振电路.....	31
3.3.2 SPI 串口连接电路.....	31
3.3.3 其他引脚外围电路.....	32
3.4 SIM800C 系统电路设计	33
3.4.1 芯片供电电路.....	33
3.4.2 RTC 电源电路	34
3.4.3 开关机和自启动电路.....	34
3.4.4 指示灯电路.....	35
3.4.5 串口电平匹配电路.....	35
3.4.6 SIM 卡接口电路	36
3.4.7 芯片外围引脚电路.....	37
3.5 继电器控制电路设计	38
3.5.1 继电器介绍.....	38
3.5.2 继电器控制电路.....	39
3.6 监控模块电路设计	40
3.6.1 监控方案介绍.....	41
3.7 本章小结	41
第 4 章 远程天文台硬件控制系统 PCB 设计	43
4.1 硬件系统 PCB 设计原理	43
4.1.1 信号完整性.....	43
4.1.2 电磁兼容性.....	44
4.1.3 电源完整性.....	45
4.2 硬件控制系统 PCB 叠层设计	46
4.3 硬件控制系统 PCB 布局	46
4.3.1 元器件排列规则.....	47
4.3.2 PCB 电气性能	47
4.3.3 系统电磁干扰.....	48
4.3.4 系统散热性能.....	48

4.3.5 特殊需求注意.....	49
4.4 硬件控制系统 PCB 布线.....	50
4.4.1 电源与地线之间布线注意事项.....	50
4.4.2 对于线拐角的处理.....	50
4.4.3 一般信号线布线.....	50
4.4.4 差分信号布线.....	52
4.4.5 匹配长度的蛇形走线.....	52
4.4.6 PCB 敷铜处理.....	53
4.4.7 PCB 设计规则检查.....	54
4.5 硬件控制系统 PCB 加工.....	55
4.6 本章小结.....	56
第 5 章 远程天文台硬件控制系统软件设计与测试.....	57
5.1 硬件控制系统驱动设计.....	57
5.1.1 控制模块 MCU 驱动设计.....	58
5.1.2 监控模块 MCU 驱动设计.....	59
5.1.3 手机模块 MCU 驱动设计.....	60
5.2 控制命令对照表设计.....	61
5.3 硬件控制系统性能测试.....	62
5.3.1 硬件控制系统测控软件设计.....	63
5.3.2 软件实验调试.....	64
5.4 本章小结.....	65
结 论.....	67
参考文献.....	69
攻读硕士学位期间所发表的学术论文.....	73
致 谢.....	75

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

1.1.1 研究背景

远程天文台的历史可以追源至 20 世纪 60 年代末期^[1], 计算机电子机械接口已经普及, 天文学家开始尝试程控望远镜。但是由于早期计算机电子技术不发达, 低压情况下还难以克服电子噪声的影响, 因此使用计算机控制机电设备特别具有挑战性, 使得远程天文台在早期发展缓慢^[2]。随着计算机与自动控制技术的进步, 望远镜程控技术得到极大的提升, 远程天文台也得以迅速发展。目前, 远程天文台技术的研究已成为天文观测技术领域的一个热点。2009 年, 在首届“机器人自主观测研讨会”上, 参会者按照时间发展顺序将远程天文台定义了四个发展阶段: 自动执行望远镜(1968—1975)、远程操作望远镜(1975—1984)、程控自主天文台(1984-至今)和远程智能天文台(未来)^[5]。

第一阶段, 自动执行望远镜(Automated Scheduled Telescope), 即一架可以按照预先编制好的观测流程运行, 无需远程操作者实时干涉(例如不需要观测人员手动调节赤道仪)的望远镜。自动执行望远镜的发展史与自动光电望远镜(Automatic photoelectric telescope, APT)的发展密切相关^[6]。



图 1-1 威斯康辛大学自动光电测光望远镜

Fig.1-1 Computer-controlled telescope at University of Wisconsin

1968 年, 威斯康辛大学的 Code 和他的助手们完成了最早的自动光电测光望远镜 (如图 1-1), 首次实现了用一台 4K RAM 的 PDP-8 通用型数字计算机控制一架 0.2 m 口径的反射式望远镜来进行自动测光^[7]。这个望远镜被认为是第一个自动执行望远镜。自动执行望远镜可以低成本收集大量高质量的天文数据, 并且定期对大量变星进行光度观测, 极大的提高了望远镜的观测效率。

第二阶段, 远程操作望远镜(Remotely Operated Telescope), 即一套能够按照观测者要求, 执行远程观测的望远镜。1975 年, 天文学家通过计算机微波链路实现闭环操控相距 30 公里的一台 0.75 米的山地望远镜(如图 1-2)。该系统可以快速准确的将数字信号回传到计算机控制的设备上, 特别适合重复性的观测测试^[8]。在 1976—1977 年间, 前苏联高加索山 6 m 地平式大望远镜 BTA (Big Telescope Alt-azimuth 如图 1-3) 和美国怀俄明州红外天文台 2.3 m 望远镜成功完成计算机远程控制, 被认为是第一批实现计算机控制的大型望远镜。1983 年, 在美国亚利桑那州凤凰城, Boyd 和 Genet 完成了一台 0.25 m 口径的 Phoenix 望远镜的远程操作。这架望远镜可以根据观测列表自动寻星, 为一个个目标进行测光。这是世界上第一套可以执行预定作业的望远镜系统^[9]。



图 1-2 0.75 米的山地望远镜

Fig.1-2 0.75m mountain telescope

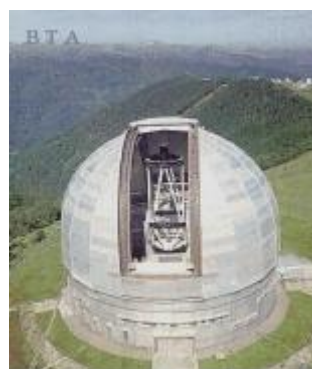


图 1-3 高加索山 6 m 地平式大望远镜

Fig.1-3 Caucasus 6 m Large Ground Telescope

第三阶段, 程控自主天文台(Robotic Autonomous Observatory), 即一架能够执行各种远程观测, 并且能够在观测任务执行过程中, 无需任何人的协助, 自主适应各种变化的望远镜。早期的程控自主天文台主要用来实现在晴夜中对一系列事先定义好的目标进行测光观测。自动光电测光望远镜服务就是其中代表性的例子^[10]。最早的一套 APT 放置在美国霍布金斯山上 (如图 1-4), 它知道何时日落, 能感知雨雪^[11]。1985 年前后, 《望远镜的微机控制》一书出版 (如图 1-5), 纠正了以前探索过程中产生的许多误区, 并解决了大量技术上的问题, 标志着远程天文台进入了一个新的发展时代。

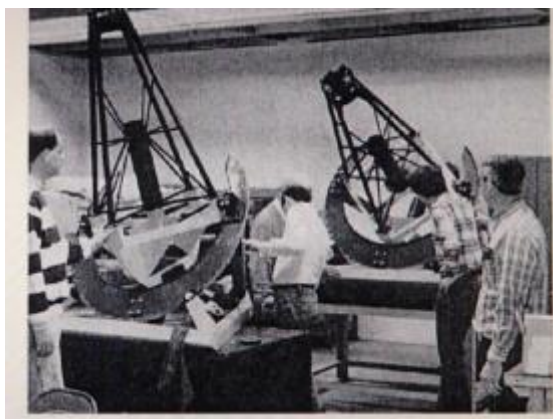


图 1-4 早期自动望远镜光电服务案例

Fig.1-4 Early APT units service case

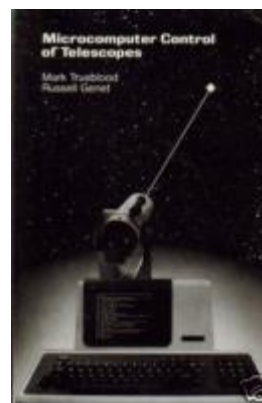


图 1-5 “望远镜的微型计算机控制”一书

Fig.1-5 Microcomputer Control of Telescopes

随着网络技术、现代信息技术和智能控制技术等技术的进步以及时域天文学研究热点的到来,人们逐渐意识到程控天文台在开启人类在非静态和暂现事件等方面对宇宙的观测能力,远程天文台进入了又一个探索时代。一些科学家设想将多个不同位置且独立运行的自主天文台通过网络连接,统一协调调度组成一个望远镜观测网络,极大地提升了观测时域和空域的覆盖^[12]。无人参与的自主观测和全球组网的特性,使得程控自主天文台特别适合非静态、暂现事件的捕捉和观测,以及变源的长期监测^[13],例如超新星爆发、新星爆发和 γ 射线暴及其余辉观测等。近年来,一批程控天文台建成,同时还诞生了一批程控天文台网络,比如 ROBONET(安放在澳大利亚、夏威夷和卡纳瑞群岛的 3 架 2 m 望远镜,如图 1-6)、BOOTES (安放在西班牙、新西兰、中国、墨西哥、南非或南美的 6 架 60cm 望远镜,如图 1-7)、ROTSE-III(安放在土耳其、美国、澳大利亚和纳米比亚的 4 架 0.45 m 望远镜)等。



图 1-6 RoboNet-1.0 全球站点位置示意图

Fig.1-6 RoboNet-1.0 Global site location map

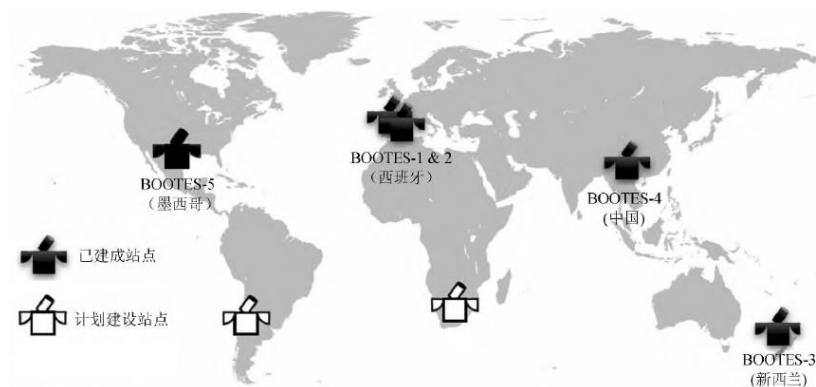


图 1-7 BOOTES 全球站点位置示意图

Fig.1-7 BOOTES Global site location map

第四阶段，程控智能天文台(Robotic Intelligent Observatory)，即一个由人工智能系统进行智能决策观测的自主天文台。这是未来将要努力的方向。

远程天文台的发展是一个自动化控制技术不断优化升级的过程，目的是更加充分的解放人力，使得观测效率越来越高，甚至是实现智能决策观测。自动执行望远镜和远程操作望远镜的观测模式，还停留在有人操作或有人参与的阶段。目前天文学家重点关程序控自主天文台，可以实现在本地无人值守或无人干预的情况下完成自主观测。至于程控智能天文台，它使天文台自主运行变得更加智能化，这还依赖于未来人工智能技术的进一步发展。

1.1.2 研究意义

天文学是研究宇宙结构和演变、宇宙空间天体的科学，它的研究具有重大的科学和应用意义^[14]。基础理论的发展是人类科技水平进步的必要条件。天文学关注的前瞻性问题的提出和解决，对自然科学基本理论的研究起着十分重要的作用；天文学的发展也促进了其他学科的发展和进步，如物理学、空间科学、生物学和计算机科学等，它是当代推动社会进步和高科技发展最活跃的前沿科学之一；天文学知识还是人类自然观和宇宙观养成的重要部分，这些观念对人类的心理、认知和信仰等都有深刻的影响，可以作为提升全民科学素养的引领性学科。

天文学同时是一门以观测为主的学科，良好的观测工具和观测环境是天文研究必不可少的条件。望远镜的发明和使用，开启了人类探索星空历史的新篇章。随着望远镜性能的不断改进和提高，天文学也经历了飞越式的发展，迅速推进着人类对宇宙的认知^[15]。然而，城市现代化进程的推进，造成严重的光污染和空气污染，对天文观测产生了极大的影响。如图 1-8 为 2018 年全球光污染分布图，从图中可以看出在人类集聚的地方几乎都受到不同程度光污染的影响。为了尽可能获得理想的观测数据，往往将观测台站选择在人口稀少、远离城市和海拔较高

的山上又或者是沙漠，甚至遥远的太空^[16]。这些地方由于交通不便、食物补给困难以及氧气稀薄等客观因素的存在，不适合人类长期驻扎，因此远程观测也就变得尤为重要。远程天文台的出现恰恰为这一问题的解决提供了良好的方案，通过一次性安装调试，实现远程操控甚至是自主观测，不仅解决了人与观测环境间的矛盾，而且还极大的提高了观测效率。

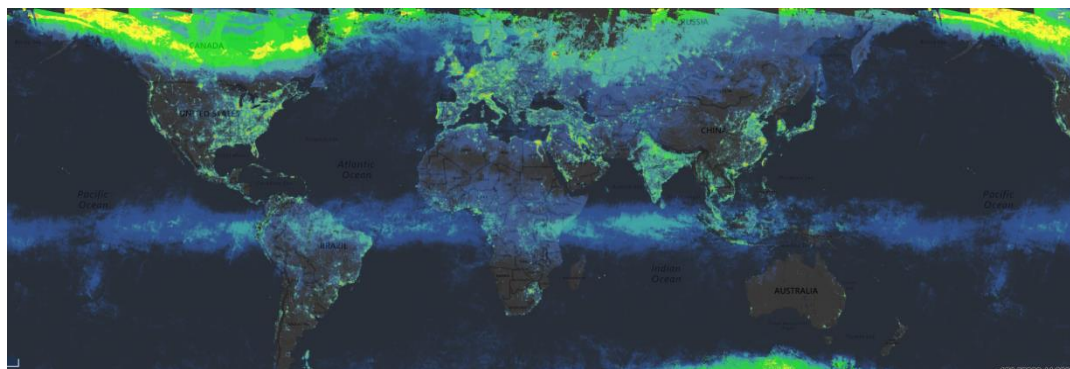


图 1-8 2018 年全球光污染分布图

Fig.1-8 Global Light Pollution Distribution Map in 2018

远程天文台作为计算机技术和望远镜技术发展的产物，其整个系统结构十分复杂，是一个高度自动化的天文观测工具^[17]。新的观测技术和观测工具的应用，为天文学家进行科研活动提供了强有力的武器。远程天文台的出现不仅克服了观测环境和人生存环境的矛盾，而且凭借在连续观测、快速反应等方面的独特的优势，推动了多波段时域天文学的快速发展，为天文学研究开辟了新的研究领域^[18]。远程天文台最初起源于专业天文观测研究的需求，目前已进入天文学研究的方方面面。随着时代的进步，远程天文台在天文学教育、天文科普、公众科学方面也开始发挥重要作用。

远程天文台的研制、建造和运行采用了精密机械、结构力学、材料、光学、电子、自动控制、计算机和信息技术等学科的前沿知识，是一个多学科交叉的复杂系统^[15]。与国外相比，我国远程天文台的发展起步比较晚，不仅在望远镜数量上存在着极大的差距，而且在望远镜程控技术上的差距更为明显。在数量上我国目前用于科研型的专业望远镜数量难以满足需求，国内用于公众科普型的望远镜更是少之又少^[19]。在程控技术上硬件的控制管理往往是多种功能模块的拼接，系统的可靠性和兼容性比较差，更无法迁移推广。硬件控制系统是用户与远程天文台连接控制的核心，是整个系统运行的基础。当前，我国还没有一个成熟的设计可以应用到公众天文台的建设中，以满足远程观测等需求，非常不利于我国时域天文学和天文科普教育的发展，因此设计一套稳定可靠的硬件控制系统具有非常重要的意义。

1.2 远程天文台基本介绍

远程天文台由望远镜、赤道仪、CCD、全天相机、气象站、计算机等设备构成，具有多个自动化的软件与硬件子系统，它们之间通过相互协调控制实现程控观测的功能。远程观测对系统硬件和软件的可靠性都提出了非常严格的要求，操作系统不仅必须保护设备，还必须能够自动执行由观测者指导的操作。当前较先进的天文台，不仅仅需要能够将望远镜指向目标天体进行随动曝光拍摄，还能够根据传感器以及观测程序感知观测环境，甚至可以根据拍摄结果自我调整，如星云居中、检测和调整焦点、调节曝光、识别结果以及甚至决定要做什么等。下面对远程天文台硬件控制系统和软件控制系统的基本情况进行归纳介绍。

1.2.1 远程天文台硬件控制系统

远程天文台由于观测位置、观测环境、观测目的的差别，导致其在器件种类、选型、结构和功能上千差万别。但如果将整个远程天文台硬件控制系统按照功能划分，几乎所有的天文台硬件系统都具有一些通用的功能系统，用来支撑起最基本的天文观测任务^[20]。这些功能系统可以归纳为圆顶系统、望远镜观测系统、电源管理系统、计算机控制系统和辅助系统 5 大类。如图 1-9 为一个简易的远程天文台结构示意图。

(1) 圆顶系统

天文圆顶是地面光学天文台最为显著的标志性建筑物，是望远镜系统的重要外围设备之一，也是保护望远镜等精密仪器设备免受风吹日晒雨淋等恶劣天气袭击的屏障^[21]。圆顶控制主要通过控制器、传感器和电机等设备实现。控制器主要负责与上位机通信，接受计算机发送的控制指令。传感器负责采集圆顶天窗转速、位置以及天窗的开关状态等信息。当然圆顶的类型有好多种，除了圆顶还有平移顶，所起到的作用也一样的，只是平顶的控制相对简单些。

(2) 望远镜观测系统

望远镜观测系统是整個天文台的核心部分，几乎所有重要数据的采集都是基于此系统。观测系统一般包括望远镜、支架、滤光轮和 CCD 等基本设备。天文望远镜是机械、光学和电子技术结合的产品。不同的研究方向，对望远镜的要求也不同，如搜索快速光学瞬变现象需要望远镜系统具有快速反应的能力^[22]。望远镜支架主要分为赤道式和地平式，用来辅助望远镜定位方向和抵消地球的自转影响^[23]。地平式有水平和垂直两个转轴，结构相对简单，运行时需要两轴同时转动，并随时间的推移变换转速才能追踪天体。赤道式也有两个轴，其中一个指向极轴方向，另一个只需要与地球自转方向相反，就可以保证天体一直在望远镜视野中。

滤光轮、CCD 用来辅助望远镜采集图像数据，并传送给计算机做进一步研究。

(3) 电源管理系统

电源是整个天文台系统运行的动力来源，由于天文台设备复杂多样的用电需求，导致供电系统中强电和弱电同时被需要^[24]。随着新一代集成电路的发展，出现 3.3V、1.8V 甚至更低的电压需求。较低的电压往往抗干扰能力也比较差，对电源的输出质量提出了很高的要求。电源管理系统负责统一管理电源输出，一方面负责提高电源输出质量，另一方面负责管理设备电源。电源管理的内容还包括电源系统跟踪、监控和为欠压过流等情况提供必要的失效保护等。许多远程天文台还配备 UPS 不间断电源，保证现场断电时，依然可以完成一些现场命令，比如关闭圆顶来避免设备毁坏。

(4) 计算机控制系统

计算机控制系统除了对望远镜本身进行检测、控制和保护外，还要对天文台其他附属设备进行控制和数据收集^[25]。首先，在现场计算机上运载观测控制软件，控制软件通过获取现场状态信息，发送控制命令决策整个现场的工作。其次，计算机控制系统还负责将采集到的现场状态数据和观测数据进行存储、计算和远程传输。在实际情况中，现场往往配备多台计算机设备。一方面提供计算资源，避免多进程任务发生时，单台计算机无法同时响应的问题^[26]。另一方面设置设备冗余，保证现场一台计算机出现故障，不至于使系统完全瘫痪。

(5) 辅助系统

远程天文台实现自主观测还需要一些关键的辅助设备，如气象站、全天相机、监控、GPS 和恒温系统等设备，实现远程监控管理。

气象站：带有云、雨、湿度、雪、沙风和高速风等的传感器，检测现场环境状况。现场控制计算机接收气象数据进行初始化望远镜处理，决定是否可以开圆顶实行观测。

全天相机：一般由电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)和鱼镜头组成，它能够获取张角 $-160^{\circ}\sim 160^{\circ}$ ，环视 360° 的景象^[27]。全天相机一般用于天文台站的环境监测，并通过高性能 CCD 捕捉弱光及特定波段的光学数据，广泛适用于大视场的图像数据获取。

监控：监控分为室内监控和室外监控。室内监控主要用来查看室内设备状况。室外监控除了可以用来查看户外周围环境和圆顶开关状态外，还可以用来记录一些天文现象。

GPS：在天文测量中，时间的测量是一项不可或缺的工作，占有极其重要地位^[28]。GPS 时间具有全天候、高精度的特点，用于天文台实时授时。

恒温系统：恒温系统可以保证天文台各设备工作温度维持在正常工作的范围

内。稳定的温度可以保障观测环境没有气流等波动影响，有利于获得优质的视宁度。

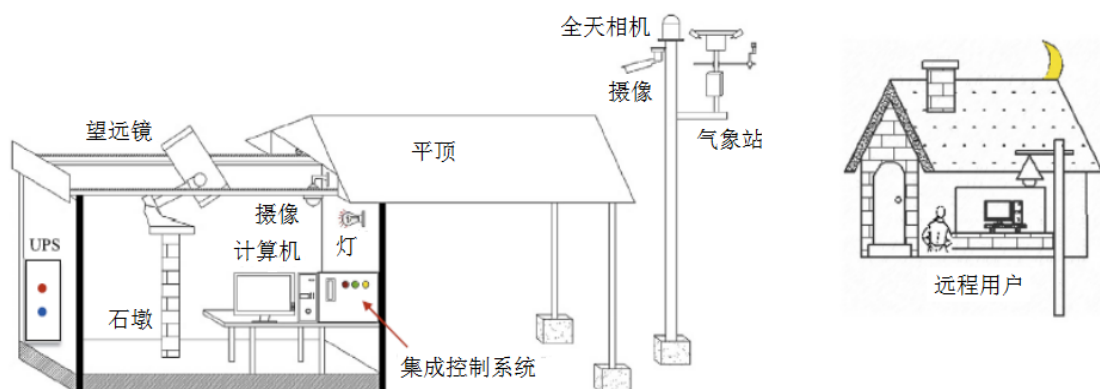


图 1-9 远程天文台结构示意图

Fig.1-9 Remote observatory basic structure diagram

1.2.2 远程天文台软件控制系统

望远镜软件控制系统的是天文望远镜自主观测的核心，是天文技术研究中的一个重要方向^[29]。望远镜控制系统经历了从手动观测到计算机控制再到程控自主的过程。未来望远镜控制系统将向着更加高度智能化的方向发展。望远镜软件控制系统的出现，减轻了观测人员操作望远镜的复杂性，避免了重复性工作，从而极大地提高了观测效率^[30]。

软件服务于硬件，由于望远镜结构不同，导致软件设计时存在较大差异，但从系统功能的角度来看^[31]，可概括为数据采集系统、数据存储系统、数据处理系统、网络通信系统、计划调度系统 5 大部分。

(1) 数据采集系统

数据采集系统负责全面采集与观测相关的各种数据和信息，提供这些数据信息来源的则是底层的硬件设备与各种传感器，包括望远镜、滤光片、CCD 相机、圆顶、气象站、全天相机等。

(2) 数据存储系统

数据存储系统用来保存由各传感器设备运行产生的实时数据，并存储、归档处理过的图像数据以及工程数据。实时数据包括望远镜产生的观测数据、天文台系统的运行状态信息、气象站和各种传感器收集的环境信息等。数据存储系统不仅存储未加工过的原始信息，还将存储经过数据处理系统处理之后的信息。

(3) 数据处理系统

原始数据需要经过有效处理才能充分发挥其科学价值。数据处理系统的设计可分为数据基本处理和数据挖掘两部分。基本数据处理流程相对固定，可以通过

使用计算机编程来实现流水线式的处理。数据挖掘是数据处理更高级的阶段,通过使用某些智能算法分析现有数据得出更进一步的数据是天文台“自主”的重要体现。

(4) 网络通信系统

网络通信包括核心控制模块与界面的通信、各设备控制模块与核心控制模块的通信。不管是人与机之间的通信还是机器与机器间的通信,都需要定义通信协议来保证各个模块能够进行准确通信。远程观测的必要条件是远端和现场之间的快速数据传输系统,这个同样需要网络通信系统的支持。

(5) 计划调度系统

计划调度系统相当于传统天文台中观测人员的作用,起到执行观测流程,进行观测任务调度和决策的作用。计划调度系统是實現整个望远镜系统自主观测的核心。计划调度系统控制着整个系统的运行与协同工作。系统不仅需要下达观测任务、切换观测事件实现科学意义最大化,还同时还肩负着保障自身物理安全的职责,在任何情况下都必须先保证自身的安全。自身安全是远程天文台稳定运行,实现无人值守的重要指标。

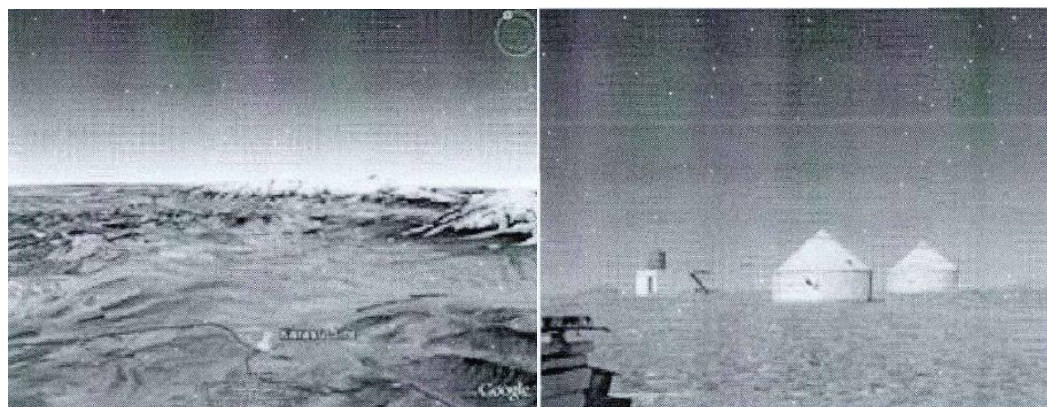
1.3 远程天文台的典型应用

远程天文台的巨大优势在于它可以放置在偏远地区,实现无人值守。望远镜程控化也极大地提高了天文观测效率。同时,计算机快速准确地操作提高了望远镜的整体精度并降低了出错的可能性。随着全球自动观测设施数量的持续增加,自动化、程控化、网络化水平也在不断提高。这对于专业天文学家而言,它基于对事件的快速反应和对物体的连续观察,开辟了全新的天文学领域。对于学生、爱好者、公众来说,它允许用户通过互联网探索真实的天文事件,为天文科普提供了一种全新的方法^[32]。下面详细介绍目前远程天文台的几个典型的应用。

1.3.1 天文选址

天文台选址是开展天文学研究的一项基础性工作,天文台台址的优良与否将直接影响到观测数据的质量^[33]。一方面,科学地发现优质的天文台址,并对其有效利用,对于我国未来安置大型地面光学望远镜及红外观测设备具有深远的意义。另一方面,天文台建好后,天文观测的数据又为天文研究提供了依据,也推动了我国太空探索和宇宙探测事业进一步深入。由于现代光学或红外望远镜对环境的特殊要求,天文台的站点一定是建立在晴夜多、大气视宁度等级低、气候干燥、城市干扰少的地点。而具备这样条件的地址基本上都是在海拔较高、人烟稀少环

境恶劣的高山或高原地区。天文台选址过程中需要对候选台址进行定点监测，通过大量观测资料的积累分析，并与国际优秀台站进行比较，从而判定新的台址是否适合下一代大型望远镜的建设^[34]。



a) 局部地形
a) Local terrain
b) 监测地点环境
b) Monitoring location environment

图 1-10 新疆卡拉苏监测点局部地形和站点

Fig.1-10 Xinjiang Karasu monitoring point local terrain and site

天文台址的确定需要进行长期监测，选址中面临的最大问题是候选站点条件太过偏僻和艰苦，恶劣的环境条件不适合选址工作人员长期工作和居住。如图 1-10 显示了我国新疆卡拉苏监测点局部地形和站点的恶劣气候条件。这种条件下如果采用现场人工观测的方式，要求选址人员做到长期留守、昼夜观测、连续监测各项天文条件极不现实。这不但需要选址工作者付出巨大的艰辛，还大大影响了观测数据的连续性和持久性。利用远程天文台远程控制和自主观测的功能，在天文台选址过程中观测人员可以在较为舒适的环境中，远程操控观测设备，大大简化了人力的付出，降低对选址人员的要求，极大地提高选址观测数据的质量，这对于天文选址具有重要的意义。

1.3.2 科学研究

如今，天文学已经进入了一个飞速发展的阶段，大天区巡天计划的实施、各种大型望远镜的建造、极地望远镜和空间望远镜的发展，让细致、更深入地揭示宇宙以及宇宙中各种天体和生命的奥秘成为了可能。与此同时，天文研究学术领域也风起云涌。基于光变特性开展的时域天文学研究，无疑将是今后很长一段时间的热门研究领域，将为行星的探索和认证、广义相对论的验证、高能天体的能源之谜、黑洞的物理起源及本质等不同天文学尺度的前沿热点问题提供可能的解答^[35]。



图 1-11 利物浦望远镜

Fig.1-11 Liverpool Telescope

从 21 世纪开始,人们开始意识到天文台程控自主观测在研究非静态和暂现事件等方面的巨大优势,以程控自主观测技术为基础的时域天文学研究成为目前天文学研究中的一个新热点。基于现代时域天文学的研究特点,使天文学研究不只依赖于大型的 10-40 米级别的望远镜。小口径望远镜具有大视场、易部署并容易实现自动化等优势,探测的几率和测量结果基本上也和每年的观测时间成正比,成为时域天文学研究的主力工具。例如英国的利物浦望远镜(如图 1-11),实现了完全自主观测,开展了如恒星异变性光学研究(所有恒星都是可变的)、近地物体追踪、伽玛暴余辉观测等很多新领域的研究项目^[36],在科学研究上起到良好的示范作用。

当前,我国时域天文学研究正处于刚刚起步的阶段,缺乏大天区系统的时域天文观测数据、缺乏基础的用于时域天文观测的软件以及相应研究领域的基本储备^[37]。因此我国急需加入到国际时域天文的研究领域中,提升我国在时域天文研究领域中的国际影响力和国际地位。

1.3.3 教育和公众科学

天文学是一门古老且神秘的科学,近代科学以天文学的革命为开端,在现代科学体系中天文学被列为六大基础科学之一。天文学的每一次重大突破都为科学的发展指明了新方向,带动了科学整体的发展。天文学深深的根植于并应用于我们的日常生活中,以它独特的魅力向人们展示宇宙的广阔和绚丽,同时也促进了人们对宇宙的好奇心和求知欲。通过天文学的教育和普及可以提高大众对科学的兴趣,促进公众思考,帮助人们掌握科学的思维方法,不断增强公众的科学意识,提高人们的科学素养,树立正确的宇宙观。

在目前天文教学中，由于天文学的特殊性，给老师教学带来了很多挑战^[38]。天文学的三维空间和大尺度的时空特征，不容易通过实验来解释，甚至有些教师对自己所教授的天文知识理解也不深刻；天文学作为一门观测科学，对其基本知识的学习，必须结合对宇宙星空的观测。然而即便是在建有天文台的学校，由于多方面原因，在天文授课时也不可能实时进入课堂。因为天文观测必须在晴朗的夜空才能实现，所要观察的天体也要处于最佳的观测时间和位置，而对于固定上课时间的学生来说未必能同时具备这些外部条件。

远程天文台的发展和普及，为目前天文学教育和科普所面临的问题提供了很好的解决思路^[39]。远程天文台可以部署在观测环境相对较好的地点，通过远程操作甚至是自主运行，方便教育开展；远程天文台可以获取真实天文数据，并方便实现资源共享，为学生探索宇宙奥秘提供了环境；远程天文台还可以建立在不同时区上，很好的避开了学生作息时间与大多数天文观测时差问题。英国的Bradford Robotic Telescope(BRT, 如图 1-12)是远程天文台在教育应用上最典型的事例。BRT 位于特内里费岛的泰德山上，于 1993 年开始通过网络开放运行，至今已经完成了数万次观测请求。另外 BRT 还为英格兰的教师提供高水平国家科学课程，直接参与到天文学的教学中。



图 1-12 英国的布拉德福德程控望远镜

Fig.1-12 British Bradford Robotic Telescope

公众科学倡导公民参与科学研究，从而有力地补充职业天文学家无力或无暇顾及的领域^[40]。星明天文台始建于 2007 年（如图 1-13），是由国内爱好者建立的业余天文台，实现了基本的远程观测能力，并向公众开放观测申请。星明天文台和中国虚拟天文台（China VO）联合开展的 PSP 公众超新星搜寻项目，是首次基于国内业余天文观测数据策划实施的全民科学项目，是专业天文队伍和业余天文队伍深度合作的一次成功尝试，为公众科学教育提供了一种全新的方式。远程天文台方便易操作的网络化的特点，让公众不止是停留在了解天文的基础上，

更能参与到天文学的科学研究中^[41]。



图 1-13 星明天文台

Fig.1-13 Xing Ming Observatory

1.4 课题来源及本文研究内容

1.4.1 课题来源

本课题受国家自然科学基金（11573019，11803055，U1731120），国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金（U1531246，U1731125，U1731243），中国科学院“十三五”信息化建设专项（XXH13503-03-107），国家科技部国家科技基础条件平台项目“国家地球系统科学数据共享服务平台”，“国家基础科学数据共享服务平台”（DKA2017-12-02-07），江苏省高等学校自然科学研究项目（17KJB160001）的资助。

1.4.2 本文主要研究内容

本文致力于解决远程天文台设计建设过程中硬件设备连接控制的问题，为远程天文台建设提供一套标准化、可复用、稳定性高的硬件连接控制系统，实现用户与设备间的连接过渡，具体内容安排如下：

第一章为绪论。首先介绍了远程天文台的四个主要发展阶段和研究意义，论述了远程天文台在目前发展建设中遇到的问题，提出对远程天文台硬件系统改良设计的迫切性；随后详细总结介绍了远程天文台的基本结构和关键技术；最后通过几个典型的应用场景进一步论述了远程天文台的发展前景。

第二章介绍了本文总体的设计思路。首先通过调研远程天文台功能需求进行模块化功能设计，其次根据功能模块设计需求进行芯片选型，并提出远程天文台

硬件控制系统整体设计方案。

第三章根据整体设计方案，并结合实际情况，对整体系统进行原理图设计。主要对系统中涉及到的主要功能模块的电路原理图进行了详细设计介绍。

第四章主要结合信号完整性分析、电磁兼容性和电源完整性相关原则，对硬件系统进行 PCB 设计。详细介绍了硬件 PCB 的叠层设计、布局设计、信号布线设计。最后通过制定加工工艺完成硬件部分设计。

第五章主要是为制作完成的 PCB 电路板设计驱动程序，与硬件系统相辅相成，共同实现硬件控制系统功能的逻辑控制功能。另外为了方便实现对系统的测试，为硬件控制系统设计了上位机专用的测控软件，并对硬件系统进行了性能测试。

第 2 章 远程天文台硬件控制系统方案设计

远程天文台硬件控制系统作为天文台设备和用户连接的桥梁，其整体的功能和稳定性决定了整个天文台系统运行的功能和稳定性，是远程天文台建设的第一步。在具体计划执行前，需要综合考虑各个要素对整个天文台硬件控制系统进行总体规划，然后设计出一套整体的控制方案。本章节将采用模块化设计对硬件系统进行功能设计，然后将模块组合连接，完成方案设计，具体设计包括以下几个部分。

2.1 远程天文台功能模块设计

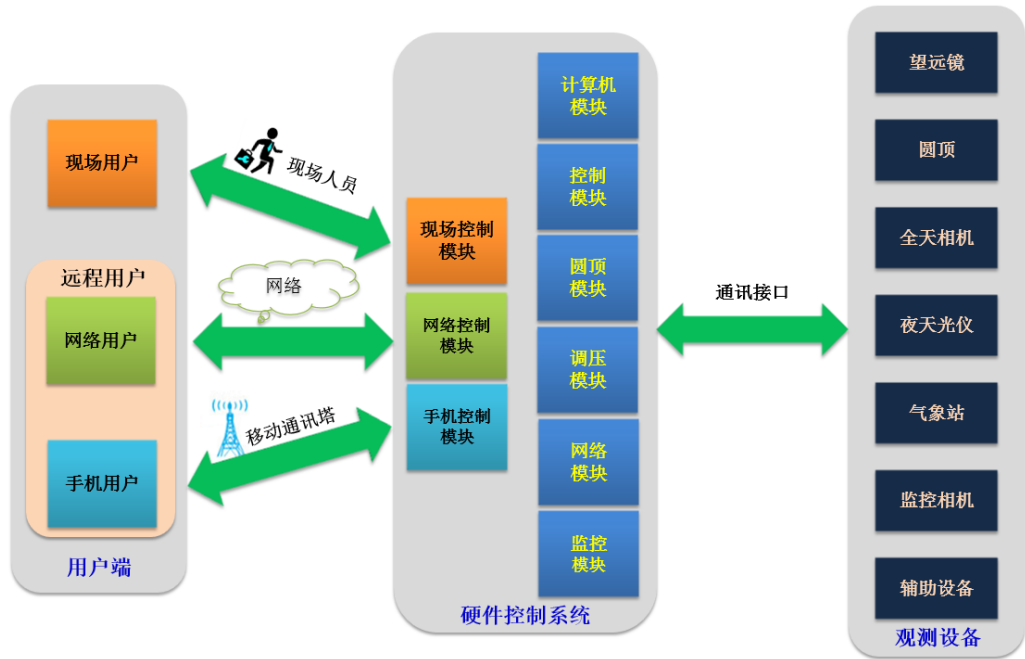


图 2-1 远程天文台功能模块框图

Fig.2-1 Remote Observatory function module block diagram

天文台设备繁多，功能复杂，因此我们采用了模块化设计方案。首先将天文观测常用功能模块化，然后再将这些模块进行组合，通过信号连接与软件控制将各个模块功能进行协调以构成完整的新系统。模块化的方案既可以降低整体设计的复杂性，有利于模块分工，还可以使程序设计、调试和维护等操作简单化，更有利于日后代码的进一步升级、维护以及整体设计的综合优化，改变某个子功能也只需要改变相应模块即可。硬件控制系统作为天文台设备和用户连接的桥梁，既需要考虑不同用户的需求，又需要考虑观测设备的便捷控制，因此我们对硬件

系统进行设计时，一方面考虑对接不同的用户，另一方面考虑对接天文台观测设备，远程天文台功能模块框图如图 2-1 所示。系统主要分控制功能模块和通用功能模块两大部分，即桥梁的两端。通过这些标准化的模块，既可以方便的将望远镜、圆顶、全天相机等观测设备连接在硬件控制系统上并实现对其的控制，又可以为用户提供控制接口。下面对这些功能模块进行详细介绍。

2.1.1 控制功能模块

控制功能模块主要分成 3 部分，分别是现场控制模块、网络控制模块和手机控制模块，用于满足多种用户需求。

(1) 现场控制模块

现场控制模块主要实现现场用户对望远镜的直接高效控制。现场控制功能是最基础的功能，是实现远程控制的第一步。传统的现场控制方法主要是通过开关来控制望远镜设备。由于计算机网络通讯技术的发展，计算机以其方便快捷的优点替代开关控制，通过在局域网中建立信道，实现对现场设备的直接控制。本设计方案采用计算机控制的同时，还提供了开关接口供用户选择。

(2) 网络控制模块

计算机互联网已经成为今天人们生活中不可或缺的工具，互联网高效快速信息传递的能力、信息交换不受空间限制的能力、多种形式实现信息交换的能力，使其在远程控制中发挥着重要的优势。互联网技术发展的同时推动物联网技术迅速发展，可以方便的将现场设备接入到网络中。传输到智能网关的设备信息，经 Internet 网络可以在各种信息终端上显示，方便人们及时获取远程天文台现场状态数据，透彻了解设备运行状况。同理，远程天文台控制数据传输到智能网关，经 Internet 网络传输给现场设备，从而实现远程控制。

(3) 手机控制模块

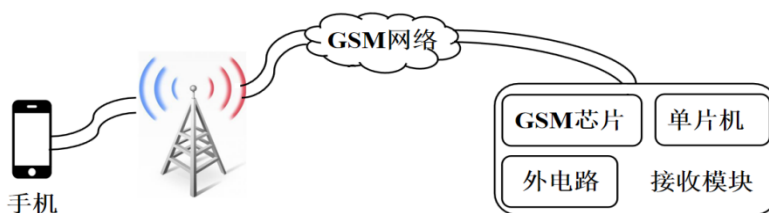


图 2-2 GSM 通讯原理图

Fig.2-2 GSM communication schematic

GSM(Global System for Mobile communication)系统在目前移动通讯中应用十分广泛。由于 GSM 网络已经实现了在全国范围内联网，不仅具有极大的网络的

覆盖范围，而且还为用户节省了昂贵的建网和维护费用。利用 GSM 网络可以无线传递信息的功能，将其嵌入在远程天文台硬件系统中。利用短信传递控制信息，很好地解决了有线传输的缺陷，使天文台控制更加灵活。同时随着个人手机的普及率越来越高，将手机作为传递信息的载体，与单片机结合构成集成应用系统有着强大的生命力和广阔的应用空间^[42]。本设计基于 GSM 和 AVR 单片机构成 GSM 短信息系统通信平台，实现手机控制。通讯原理如图 2-2 所示。

2.1.2 通用功能模块

本设计通用功能模块主要分成 6 部分，分别是计算机模块、控制模块、圆顶模块、监控模块、调压模块和网络模块，用于实现远程天文台所需要的功能。

(1) 计算机模块

计算机模块通过网络协议挂载在硬件控制系统上。在天文台运行过程中，主要负责加载望远镜观测软件和观测设备驱动，实现对天文台设备的控制。此外计算机模块还要完成必要的计算、传输和备份等功能。本设计的计算机也可以使用 ARM 微型计算机代替，使整个硬件控制系统更加集成化和小型化。

(2) 控制模块

天文观测需要众多设备支撑（如望远镜、赤道仪、CCD、全天相机、散热带、滤光轮等），单独对每个设备进行控制工作量大、效率低。控制模块通过单片机系统逻辑控制连接在继电器上的现场观测设备，实现观测设备的集中逻辑控制。

(3) 圆顶模块

天文圆顶是天文台的保护装置。由于本设计主要针对小型的望远镜控制，所以本文选择了较为简单的平移顶作为设备保护屏障，这样可以简化控制流程。在设计过程中只需圆顶模块完成开顶和关顶两个逻辑功能，再配合一套完整的电机控制监控电路就可以实现对整个平顶的监控。

(4) 调压模块

调压模块是整个系统的核心模块。所有的设备、芯片运行都离不开电压的驱动。本设计中使用不间断电源（UPS）对 220V 设备供电，同时再将 220V 交流电通过降压、整流、稳压、滤波等操作得到需要的直流电压供硬件系统使用。UPS 主要是为系统提供时间以完成应急措施，例如断电后关闭圆顶、数据保存等。

(5) 监控模块

监控模块主要通过单片机电路，将外部设备信息转化成单片机引脚信息。这样可以通过读取单片机引脚间接判断外设的运行状态，有发送有反馈，使系统运行更加安全稳定。本设计还充分利用监控数据，在控制命令运行前，先与监控数据进行计算比较，这样可以避免用户重复执行某些命令，使系统更加智能高效。

（6）网络模块

网络模块为需要进行网络信息交互的设备提供输入输出的接口，使设备能够方便实现网络信息交互。网络模块与控制模块连接，就可以实现控制模块网络信息交互，由控制模块将控制命令进行解析，从而实现了网络控制。网络模块与圆顶模块连接，同理可以是实现远程网络控制圆顶开合。网络模块与监控模块连接，可以实现将现场的监控数据通过网络传递给远程的用户，实现远程网络监控。

2.2 远程天文台硬件控制系统芯片选型

器件的选型是设计过程中的重要一环，远程天文台恶劣的工作环境，对器件提出了许多独特的要求，比如要求器件有较大的工作温度范围和超强的稳定性能等。目前市场上的元器件品种繁多，同一类芯片在价格、封装、功耗、性能方面也存在很大的差异，在进行设计时需要从系统的功能性、可靠性、经济性、方便开发、使用和测试等多方面综合考虑，通过分析比较来确定最适合的元器件^[43]。本设计采用嵌入式技术进行设计，所用器件都采用了工业级产品以满足天文观测在低温或高温等环境下的操作。选用 ATmega 16 作为逻辑控制芯片、W5500 作为网络通讯芯片、SIM800C 作为 GSM 通讯芯片，各芯片的具体性能如下：

2.2.1 单片机模块 ATmega 16

ATmega16 单片机是基于增强型 RISC 结构的低功耗、高性能 8 位 CMOS 哈佛结构微控制单元，工作温度为 -55-125℃。由于其先进的精简指令控制集以及单时钟周期执行单指令，使的 ATmega16 的数据吞吐率可以达到 1 MIPS/MHz，从而减缓了整个系统在处理速度和功耗之间的矛盾。

如图 2-3 为 ATMega16 的结构框图，相对于较早也较成熟的 PIC 系列单片机、51 系列单片机，AVR 单片机在功耗、速度、功能和结构等方面具有独特的优势：

- IO 口驱动能力强，系统时钟相同时 AVR 的运行速度最快；
- 芯片内部集成的 SRAM、Flash ROM、EEPROM 容量较大；
- 支持 ISP 在线编程和烧写、EEPROM、Flash 支持反复烧写；
- 具有上电看门狗、启动延时、自动复位、集成内部振荡器等功能；
- 内部资源丰富一般都集成 SPI、USART、TWI、PWM 通讯口，以及丰富的中断源；
- 外部时钟晶振不分频，单个周期执行单条指令，芯片执行速率快；
- 采用哈佛总线结构，处理器可直接访问全部的程序存储器和数据存储器。

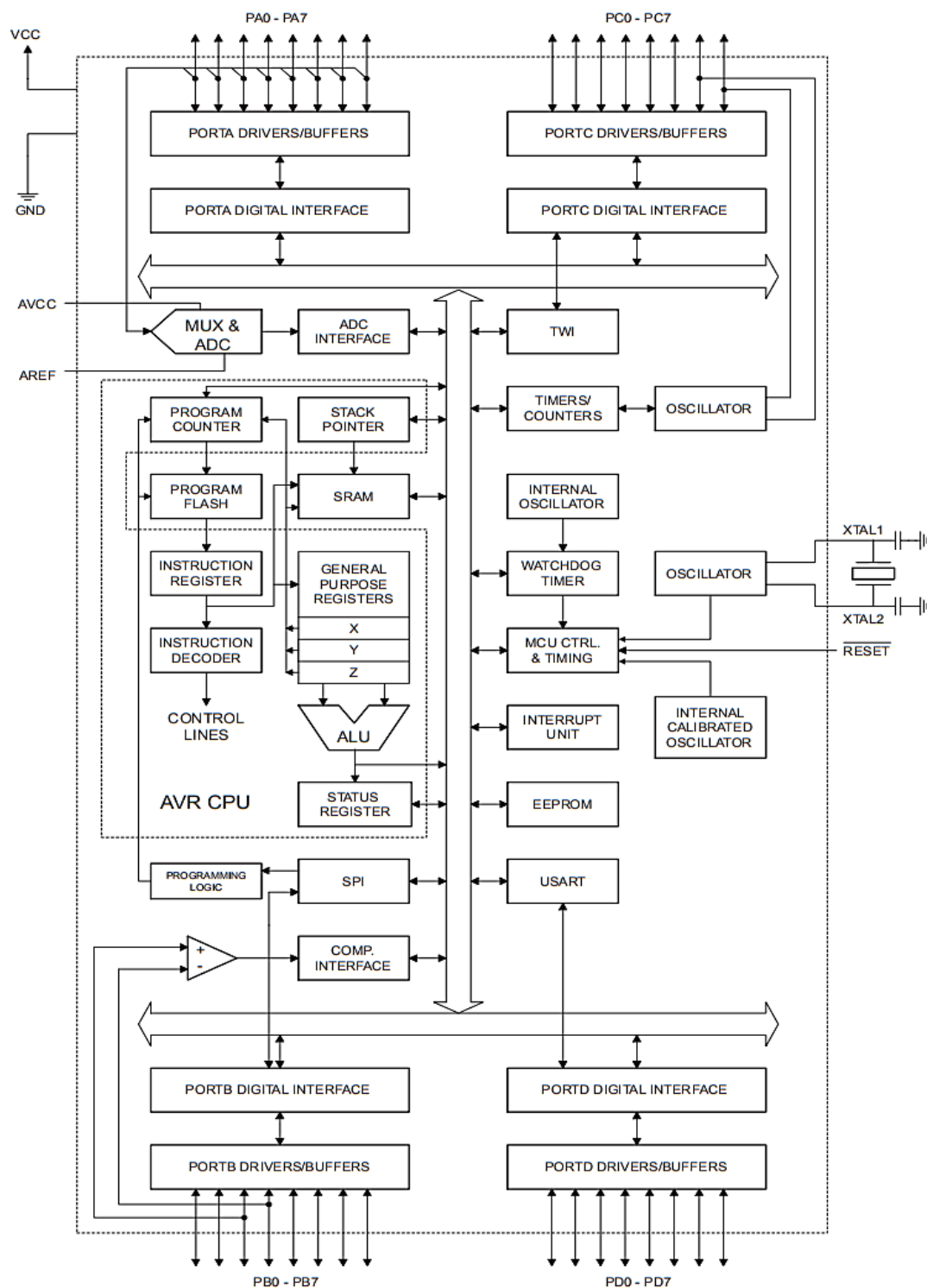


图 2-3 ATMega16 结构框图

Fig.2-3 ATMega16 block diagram

2.2.2 GSM 模块 SIM800C

SIM800C 模块是芯讯通公司生产的 GSM 调制解调器，该产品支持标准的 AT 命令，可以提供短消息、GPRS 数据、GSM 语音等业务。SIM800C 模块同时

可支持 4 频 GSM/GPRS 的工作频段。该模块工作温度为 $-40-80^{\circ}\text{C}$ ，尺寸只有 $17.6*15.7*2.3\text{ mm}$ ，几乎可以满足所有用户应用中对空间尺寸的要求。图 2-4 给出的是 SIM800C 功能框图。

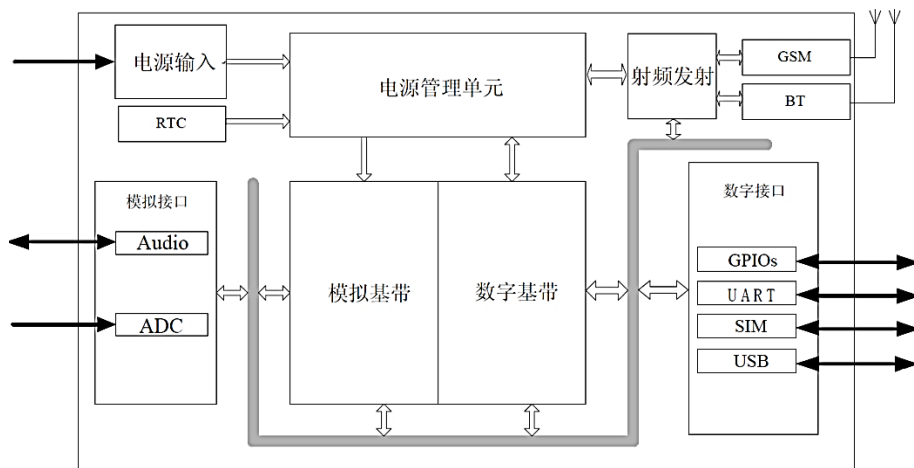


图 2-4 SIM800C 模块功能框图

Fig.2-4 SIM800C module functional block diagram

从整体功能上看，SIM800C 主要由模拟基带、数字基带、电源管理单元、射频发射等部分组成。GSM 基带是整个模块的核心，处理着模块内部各种信号的传输、转换、放大等过程。射频发射部分完成对射频信号的接收和发送等处理。

从数据接口上看，SIM800C 的数据传输接口是一个串行异步收发器。使用该数据接口可以同 AVR 单片机对接，实现相互通讯。模块支持 1200bps 到 115200bps 范围内的自动波特率检测功能，在自动波特率模式下可以自主适应主机应用的波特率。

2.2.3 网络模块 W5500

W5500 模块是韩国 WIZnet 公司推出的一款以太网连接控制芯片，工作温度范围为 $-40-85^{\circ}\text{C}$ ，它将计算机网络体系结构中的前四层进行了整合，即传输层、网络层、数据链路层和物理层，并在模块内部使用硬件的方式实现了 TCP/IP 协议栈。协议栈可以支持 IPv4, TCP, UDP, IGMP, ICMP 以及 PPPoE 等协议，W5500 模块结构框图如图 2-5。W5500 实现网络包处理依靠内嵌的 32K 字节片上缓存。W5500 提供更加快捷、简便的嵌入式以太网方案，使用时只需要了解一些简单的 Socket 编程就可以实现以太网应用。另外全硬件 TCP/IP 协议栈完全独立于主控芯片，无需移植繁琐的 TCP/IP 协议栈降低主芯片负担，可有效应对网络病毒等攻击，提高系统安全性能。

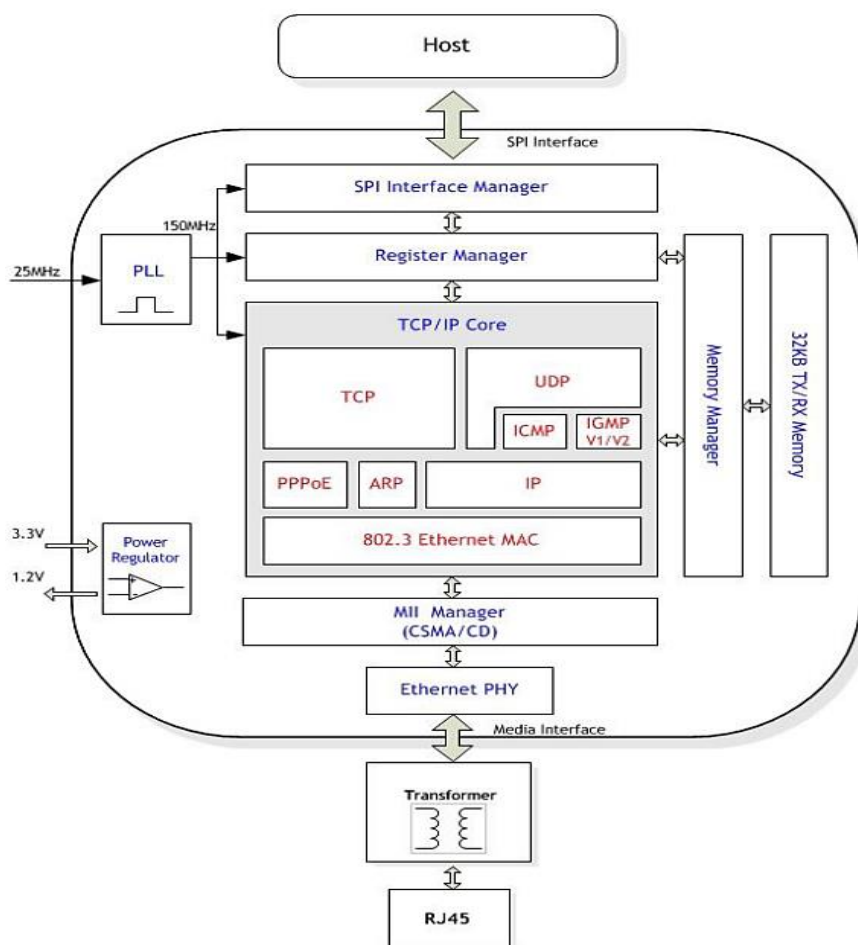


图 2-5 W5500 结构框图

Fig.2-5 W5500 block diagram

W5500 数据输入输出使用高效 SPI 串行接口，因而容易与主控 MCU 整合，实现高速网络通讯。使用 W5500 的优势在于互联网连接方案简易。下面对传统的软件 TCP/IP 协议栈方案和最新的硬件 TCP/IP 协议栈方案进行对比。

(1) 传统的软件 TCP/IP 协议栈方案

传统的以太网接入方案如图 2-6，比如 USR-TCP232-T2 串口转以太网方案。该方案由 MCU 主控制器、MAC 数据链路层控制器芯片、PHY 物理层芯片以及网络接口共同实现以太网的物理连接，通过将 TCP/IP 协议代码植入主控芯片中实现通信及上层应用。

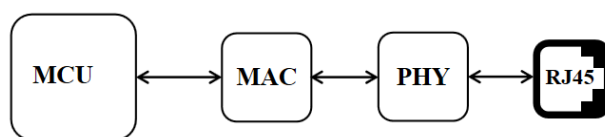


图 2-6 传统以太网接入方案图

Fig.2-6 Traditional Ethernet access scheme

在传统的以太网接入方案中，主控 MCU 需要不断地响应中断，在一定程度上占用了主控 MCU 大量的运算时钟资源。在内存方面，即使我们采用轻量级的 TCP/IP 协议栈，也会为占用主控芯片超过 40KB 的内存资源，这对于本身内存资源匮乏的单片机来说负荷过重。从安全性的角度讲，这种以太网接入方式有受到恶意攻击的风险。

(2) 最新的硬件 TCP/IP 协议栈方案

硬件协议栈芯片联网方案如图 2-7 所示，由 MCU 主控制器、硬件协议栈芯片再加上网络接口，便可方便的实现单片机联网。比如本设计中的 W5500 串口转以太网方案，所有的处理 TCP/IP 协议的工作都是通过硬件协议栈芯片来完成，减轻了 MCU 工作负担的负担，使 MCU 芯片联网更加简单。

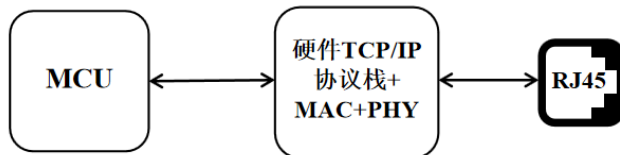


图 2-7 硬件协议栈芯片方案图

Fig.2-7 Hardware protocol stack chip scheme

2.3 远程天文台硬件控制系统总体结构框图设计

根据上面设计的功能模块和选出的芯片型号，相互连接得到如图 2-8 所示的远程天文台硬件控制系统总体结构框图。硬件控制系统负责逻辑连接和天文台各设备的控制，通过接入本地网络交换机实现网络通讯，望远镜设备产生的观测数据可以通过交换机连接到互联网，从而传输给终端用户。

在总体硬件控制系统设计中，使用了两片 AVR 单片机系统电路与控制继电器电路连接构成控制模块和圆顶模块。控制模块连接望远镜、CCD、全天相机和照明灯等设备的电源线，这样就可以通过改变单片机引脚电平控制天文台设备运行，比如启动和停止 CCD 的电源等。圆顶模块控制的设计原理与此类似，另外该模块上还设计了现场开关控制，虽然开关的触发较少但需要优异的稳定性，因此我们将其设计为一个单独的模块，其可以接收来自网络、短消息以及控制按键的控制指令，通过继电器触发圆顶的开关。圆顶的开关连接在圆顶控制电路上，圆顶控制电路通过热继电器、交流接触器、限位开关、电机等完成现场顶的开合动作。

使用一片 AVR 单片机与继电器触点和控制模块引脚相连构成监控模块。监控模块工作时会不断记录控制模块发出的控制命令和设备执行结果。这个设计十

分重要，比如远程用户通过网络发送开启 CCD 的指令，通过取得的监控数据就可以判断出控制模块是否正确发送命令和 CCD 是否已经在运行。W5500 芯片工作电路接 RJ45 网口构成网络模块。网络模块分别与控制模块、监控模块、圆顶模块通过 SPI 协议连接，再将网络模块连接本地交换机，就可以将各模块连接到网络中。

SIM800C 工作电路构成手机控制模块，手机控制模块通过 UART 串口与 AVR 单片机连接，完成短信解析和发送。控制模块、监控模块、圆顶模块和手机模块通过 TWI 协议相互连接，实现各模块间相互通讯，形成闭环控制系统。手机控制通常在应急情况下使用，当网络故障发生时，我们可以通过手机发送一条关闭圆顶和望远镜的信息。手机控制系统接收到短信后解析、执行信息内容，同时通过短消息反馈当前设备状态给用户。用户通过短信内容可以判断圆顶和设备是否已经成功关闭。UPS 电源通过稳压器、整流桥、LDO 稳压芯片获得 5V、4V、3.3V 电压给各个模块供电。

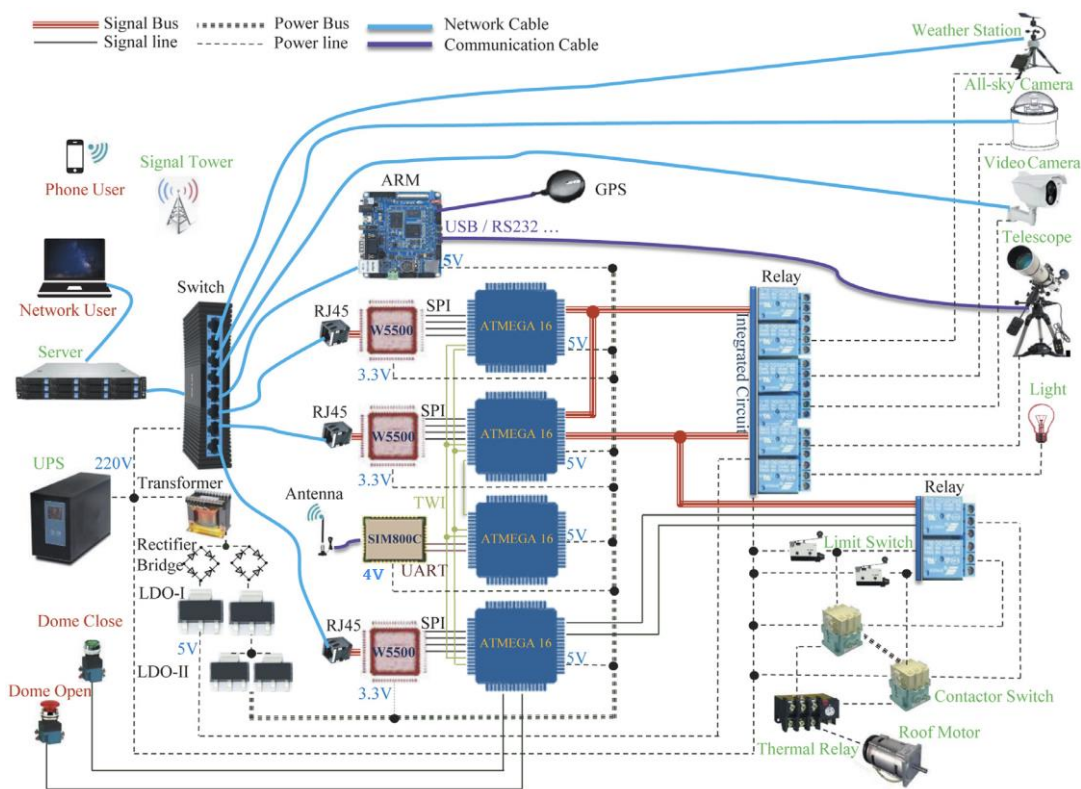


图 2-8 远程天文台总体结构框图

Fig.2-8 Remote Observatory overall structure block diagram

根据以上设计需求，从产品的角度出发，要求本硬件控制系统需要实现的技术指标特点如下：

- 10 路继电器控制设备接口，根据设备运行需求，设置 6 路常闭接口，4

路常开接口；

- 3 路网络信息传输接口；
- 3 路现场开关控制引脚，可以外接开关（以做硬件消抖）；
- 4 路 4 引脚单片机 NC 引出 IO 引脚，用于扩展功能；
- 1 个 SIM 卡卡座接口；
- 1 个射频天线接口；
- 1 路总电源输入接口；
- 1 路集成 ISP 程序下载接口；
- 芯片间可以进行及时通讯以同步数据；
- 工作环境复杂，需要很宽的工作温度适应范围；
- 其它等。

2.4 本章小结

本章主要陈述了远程天文台硬件控制系统整体方案设计的过程。首先通过模块化设计，将远程天文台硬件控制常用功能进行整合设计，得到系统总体功能框图，并对各个功能模块作用进行了详细的论述。其次，根据功能框图并结合远程天文台工作条件，选出合适型号的功能芯片。最后，结合选出的功能芯片引脚和工作情况，设计出远程天文台总体硬件逻辑连接结构框图。本章的工作是后续原理图设计、PCB 设计和软件的整体依据，是决定远程天文台硬件控制系统整体性能的关键设计。

第3章 远程天文台硬件控制系统原理图设计

上一章通过实际需求分析，提出了远程天文台硬件控制系统整体设计方案。本章将根据整体设计方案，进行电路原理图设计。将整体设计方案简化为如图 3-1 所示的模块逻辑框图，调压模块接收输入电源并给整个系统供电，设备控制和平顶控制采用 AVR 实现，网络接口采用 W5500 实现，GSM 采用 SIM800C 实现，设备管理接口和网络管理接口采用继电器电路实现，设备监控需要 AVR 与设计监控电路实现。下面分别介绍这些模块核心电路的设计原理。

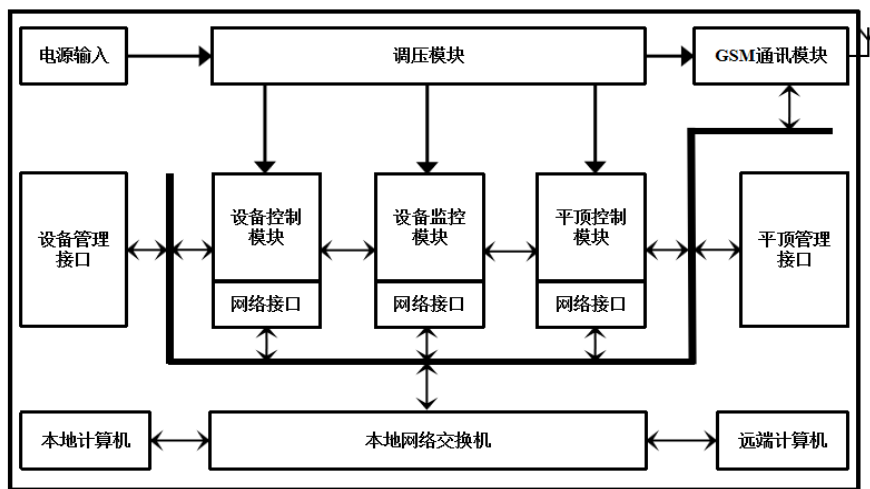


图 3-1 远程天文台模块逻辑框图

Fig.3-1 Remote observatory module logic block diagram

3.1 调压模块电路设计

调压模块负责为所有其他电路设备提供电能，调压电路设计的合理性关系到整个控制系统运行的稳定性，是电路设计中非常关键的一个环节。本节主要介绍硬件控制系统的调压模块电路设计。由于本设计硬件系统上使用的元器件额定电压都在 5V 及以下的范围内，因此硬件系统调压模块设计时只需要一个 5V 电源输入，其他的供电需求由 5V 去转化。本设计调压模块包括电源输入控制电路、网络模块调压电路和手机模块调压电路。

3.1.1 电源输入控制电路

电源输入控制电路如图 3-2 所示，电源输入电路的目的是去除输入电源噪声，为系统提供经稳定、干净的直流电压，其中 VCC_5V_IN 为外部输入的电压，S1

为整个系统的电源开关。当 S1 闭合，系统上电，同时可以看到 D1 发光二极管点亮。低频差模扼流环 L1 和固态电容 C1 构成 LC 滤波电路，除去输入电源中的低频交流成分，保留稳定的直流电压。使用差模扼流环一方面可以去除 DC/DC 直流电源不断开合，产生大量交流成分。另一方面线圈中的电流会在线圈周围产生磁场。当线圈电流变化时，感应出的电动势会产生与电流方向相反的感应电流，阻碍这种电流变化，保持工作电流稳定。固态电容 C1 的优点是体积小、容量大且使用温度范围广，主要用来去除电源低频噪声。C3 钽电容与 C2 普通电容并联，一方面是提高滤波的频率范围，另一方面钽电容能够提高电源稳压输出的快速响应能力。当电源负载阻抗发生突变时，稳压电源由于自身原因快速反应不足，此时并联在电源端的电容会提供快速的电流变化来稳定电压。

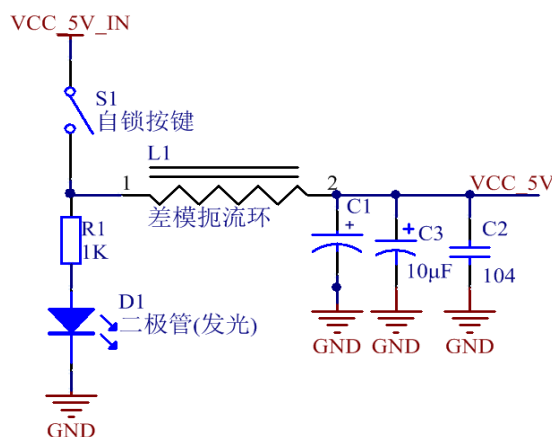


图 3-2 电源输入控制电路图

Fig.3-2 Power input control circuit diagram

3.1.2 网络模块调压电路

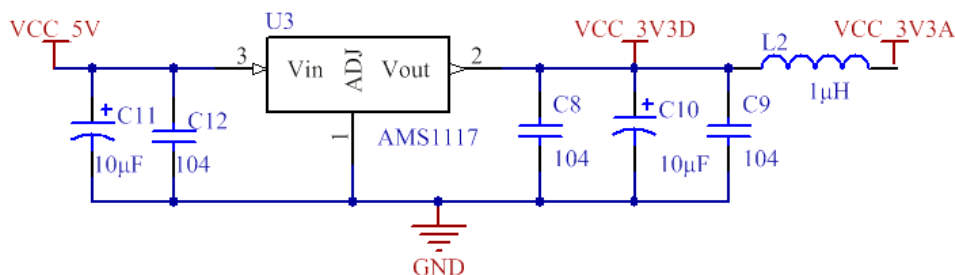


图 3-3 网络模块调压电路

Fig.3-3 Network module pressure regulation circuit

网络模块调压电路如图 3-3 所示，主要为网络模块核心芯片 W5500 提供工作电能。本文使用 AMS1117 电源芯片将 5V 电压转换成 3.3V 数字电压和 3.3V 模拟电压。AMS1117 是一个正向低压降稳压芯片，内部集成过热保护和限流电路，

可以防止芯片发生过高的结温，是便携式供电的最佳选择。AMS1117 系列的稳压器有多种固定电压版与可调版可选，本文选用固定输出电压为 3.3V、1%的精度度的芯片，工作温度-40-125℃，管脚定义如表 3-1 所示。

表 3-1 ASM 1117 管脚定义
Table 3-1 ASM 1117 Pin Definitions

管脚号	管脚名称	I/O	功能
1	GND/ADJ	_/O	地/ADJ
2	V _{OUT}	O	输出电压
3	V _{IN}	I	输入电压

在变压电路中，为了确保 AMS1117 的稳定性，要求输出需要连接一个较大的钽电容。因此本电路输入旁路电容 10 μ F 钽电容和 104 普通电容。电源输出测试如图 3-4，满足要求。W5500 工作电路同时需要模拟电源输出，因此在 3.3V 数字电源后再接入 LC 滤波电路，一方面可以将数字电源和模拟电源隔离开，另一方面在每个集成电路电源端子接小容量的高频滤波电容，也是为了在源头抑制集成块的高频浪涌电流，提高稳压电源的高频特性。

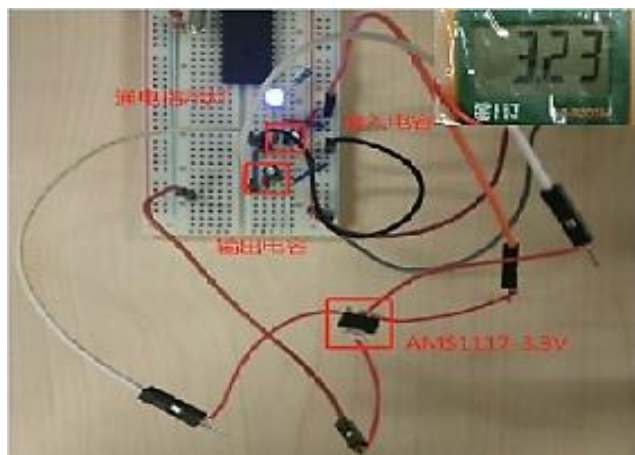


图 3-4 ASM 1117 电路测试图

Fig.3-4 ASM 1117 circuit test chart

3.1.3 手机模块调压电路

手机模块调压电路如图 3-5 所示，主要为手机模块核心芯片 SIM800C 提供工作电能。因为 GSM 在注册网络时会产生高达 2A 的电流，因此需要选择具有快速响应能力的电源芯片。本文选用 MIC29302 稳压芯片，该芯片专门应用在低电压情况，且需要电源快速瞬态响应的场景。此外该稳压芯片还有过压保护，可以防止过流。封装脚定义如表 3-2 所示。

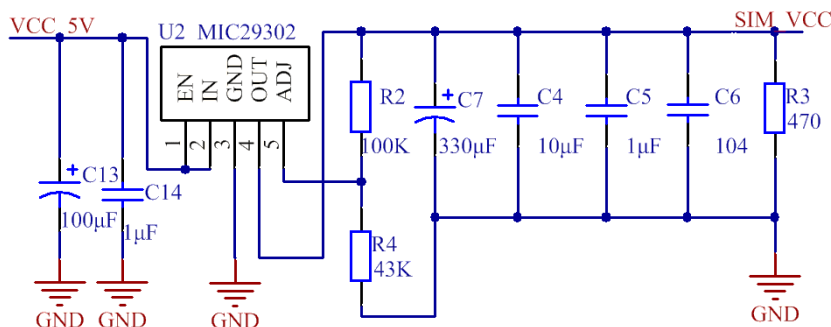


图 3-5 手机模块调压电路

Fig.3-5 Mobile phone module pressure regulation circuit

表 3-2 MIC29302 管脚定义

Table 3-2 MIC29302 Pin Definitions

管脚号	管脚名称	I/O	功能
1	EN	I	使能
2	IN	I	输入电压
3	GND	_/_O	地
4	OUT	O	输出电压
5	ADJ	_/_O	ADJ

在手机模块调压电路设计时，通过 MIC29302 稳压芯片将 5V 电压转换成 4V 电压输出，并能提供最大 3A 的电流输出。在模块 VBAT 端放置 2 个较大的钽电容，防止 VBAT 电压跌落超过模块最小电压 3.4V，导致模块重启。在电源端放置小电容，可以滤除 GSM 的 900M 和 1800M 的干扰，导致 MCU 重启。在电源输出电路上使用多个电容并联，可以增大容值，减小容抗，大大提升电源质量。可调输出电压端，两个匹配电阻的关系如下：

$$R_1 = R_2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{1.24} - 1 \right) \quad (3-1)$$

式中 R_1 ——第一个电阻值；

R_2 ——第二个电阻值；

V_{OUT} ——要求输出的电压值。

由公式 (3-1) 可知 R_1 和 R_2 的关系，从而计算出电阻值。根据电路图测得电源输出如图 3-6，满足要求。该模块的电源使能引脚，低电平时会关断模块电源。在电源模块出现异常时，可以通过该引脚关闭模块电源使模块彻底复位。这个功能在实际应用中十分关键，电路设计时将 EN 引脚上拉到输入电源，同时通过一个电阻接到主控制器上，运行时控制主控制器电平，可以使模块复位。



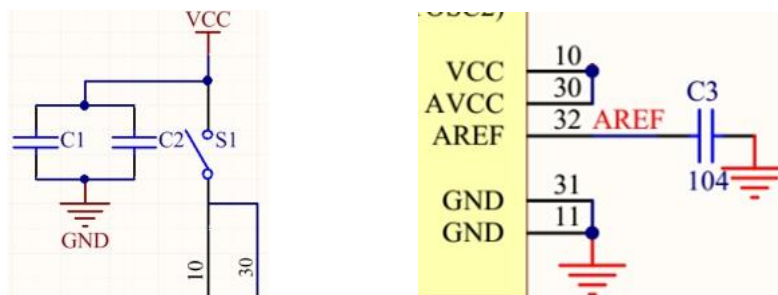
图 3-6 MIC29302 电路测试图

Fig.3-6 MIC29302 circuit test chart

3.2 AVR 单片机系统电路设计

在远程天文台的整体设计中，控制模块、监控模块、圆顶模块和手机模块的功能运行均是由单片机参与完成的。天文台的现场操控以及远程操控，最终都是通过控制单片机对下位机发送指令，实现各指令对应的功能。AVR 最小系统的稳定性能将直接影响到后续开发。因此对单片机系统电路的设计十分关键。

3.2.1 芯片供电电路



a) 电源输入电路

a) Power input circuit

b) 芯片电源引脚电路

b) Chip power pin circuit

图 3-7 芯片供电电路

Fig.3-7 Chip power supply circuit

图 3-7 为 AVR 单片机供电电路，芯片使用 5V 供电，在芯片电源引脚处并联两个电容滤除噪声后，通过开关连接 VCC 引脚。由于本设计中不涉及到 A/D 转换，因此将 AVCC 与 VCC 连接在一起。A/D 的模拟基准输入引脚 AREF，不使用 AD 转换时可以悬空，一般是通过电容接地。芯片上所有的 GND 引脚要做共地处理。

3.2.2 外部复位电路

图 3-8 为 AVR 单片机外部复位电路。AVR 单片机内置上电复位电路，外部复位电路设计时，由于芯片低电平复位，在上电自动复位后，在 RST 引脚处接一个上拉电阻，防止运行过程中复位。10uF 的电容 C2 用来消除干扰和杂波。K1 按键接地，可以在按下时拉低 RST，使单片机完成复位。

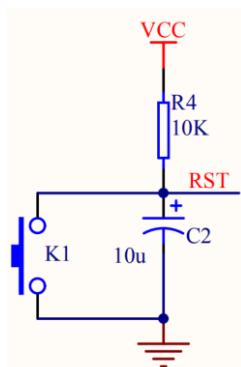


图 3-8 外部复位电路

Fig.3-8 External reset circuit

3.2.3 外部晶振电路

ATmega16 内置 RC 振荡线路，出厂默认内部振荡大小为 1MHz，精度比较低。在电路整体设置好后可以通过修改单片机熔丝位启用外部晶振。如图 3-9 为 ATmega16 外部晶振电路。

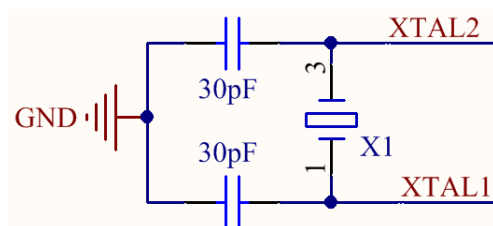


图 3-9 外部晶振电路

Fig.3-9 External crystal oscillator circuit

3.2.4 ISP 下载接口电路

图 3-10 为 ISP 调试下载接口电路，由于该电路不需要任何外围元器件，PB7（SCK）、PB6（MISO）、PB5（MOSI）和复位脚功能可以不受 ISP 的干扰。

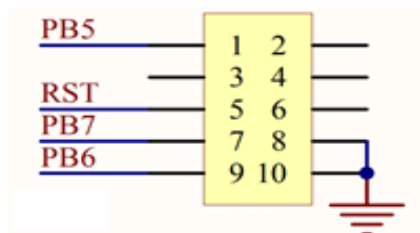


图 3-10 ISP 下载接口电路

Fig.3-10 ISP download interface circuit

3.3 W5500 系统电路设计

网络模块是天文台远程控制的关键，远程天文台系统中所有功能模块的网络信息交互全都依靠网络模块实现。W5500 芯片作为网络模块的核心部件，其工作电路好坏决定了网络通讯性能，电路设计如下：

3.3.1 外部晶振电路

外部时钟输入输出引脚 XI、XO 外接 25MHz 晶振，如图 3-11 所示。

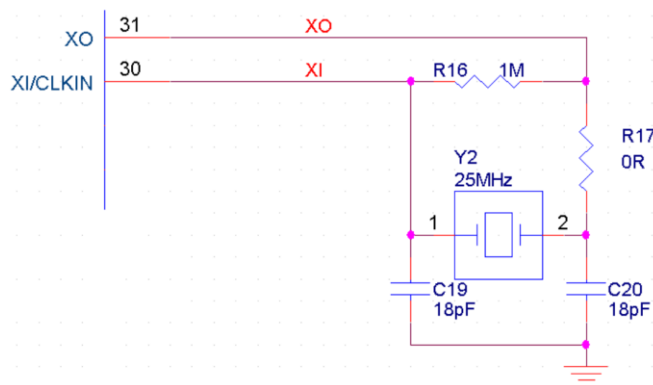


图 3-11 外部晶振电路

Fig.3-11 External crystal oscillator circuit

3.3.2 SPI 串口连接电路

W5500 提供了 SPI 串行外部接口连接外设主机实现通讯，共有 MISO、MOSI、SCSn 和 SCLK 4 路信号。MISO 和 MOSI 分别为 W5500 的 SPI 主机输出从机输入和主机输入从机输出接口，用来完成信息交互。SCSn 为 W5500 的 SPI 片选接口，低电平时该引脚有效，即高电平不选用，低电平 SPI 选用。SCLK 为 W5500 的 SPI 时钟接口，作为 SPI 从机工作该引脚用于接收 SPI 主机的时钟信号。W5500 与 MCU 的连接方式如图 3-12 所示，实际使用时往往在 SCSn 引脚上接一个上拉电阻，防止误操作。

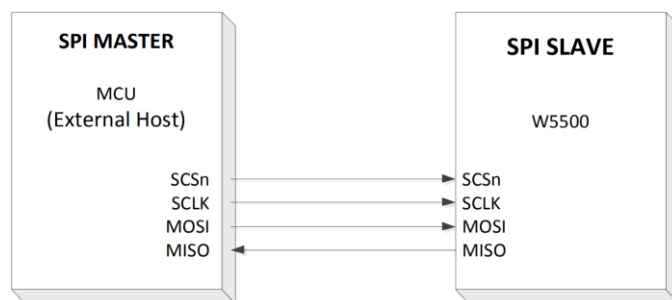


图 3-12 W5500 与 MCU 串口连接图

Fig.3-12 W5500 and MCU serial port connection diagram

3.3.3 其他引脚外围电路

根据芯片说明书介绍，芯片电源分为数字电源和模拟电源两类，使用时 AGND 和 AVDD 分别接模拟地和模拟 3.3V 电源。VDD 和 GND 分别接数字 3.3V 和数字地；EXRES1（10）引脚按照要求和模拟地之间接一个 12.4K Ω ，精度为 1% 的电阻，电路参考图如 3-13 所示。

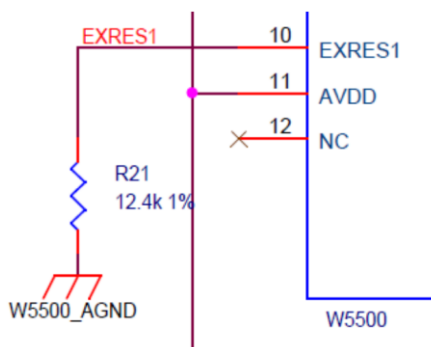


图 3-13 外部参考电阻电路

Fig.3-13 External reference resistor circuit

VGB（18）引脚为带隙输出电压，必须悬空；外部参考电容引脚 TOCAP（20）必须连接一个 4.7 μ F 参考电容；1V2O（22）引脚为 1.2V 稳压输出，这是内部稳压器的输出电，该引脚必须连接一个 10nF 电容；芯片 RSVD 引脚必须全部接地。

NC 引脚、SPDLED 网络速度指示灯引脚（显示当前网络速度状态）、DUPLD 全/半双工指示灯（显示当前连接的双工状态）悬空。

INTn（36）中断输出引脚，低电平有效，使用时将该引脚接上拉电阻，防止误操作；RSTn 重置引脚，低电平有效，该引脚保持至少 500 μ s 可以使 W5500 复位重置，使用时该引脚接上拉电阻，防止误操作。同时通过一电阻接到主控单片机 IO 引脚上，实现主机控制复位功能。

PHY 工作模式由 PMODE2（43）、PMODE1（44）和 PMODE0（45）三个引

脚电平状态决定。本设计使用所有功能，启动自动协商，电路设计连接表现为3个引脚全接上拉电阻。

RXN/RXP 信号对为差分信号接收。TXN/TXP 信号对为差分信号传输。LINKLED(25)低电平为建立连接，连接网络指示灯用来提示连接状态。ACTLED(27)连接活动状态指示灯显示数据收发时载波侦听活动情况，低电平时有载波侦听信号。网络通讯接口使用带网络变压器的 RJ45。差分对信号对应相接，LINKLED 接 RJ45 Green 灯，绿灯常亮代表与对端网口互联成功。ACTLED 接 RJ45 Yellow，黄灯闪烁代表有数据传输。

根据如上配置，设计出 W5500 芯片引脚外围电路，如图 3-14 所示。

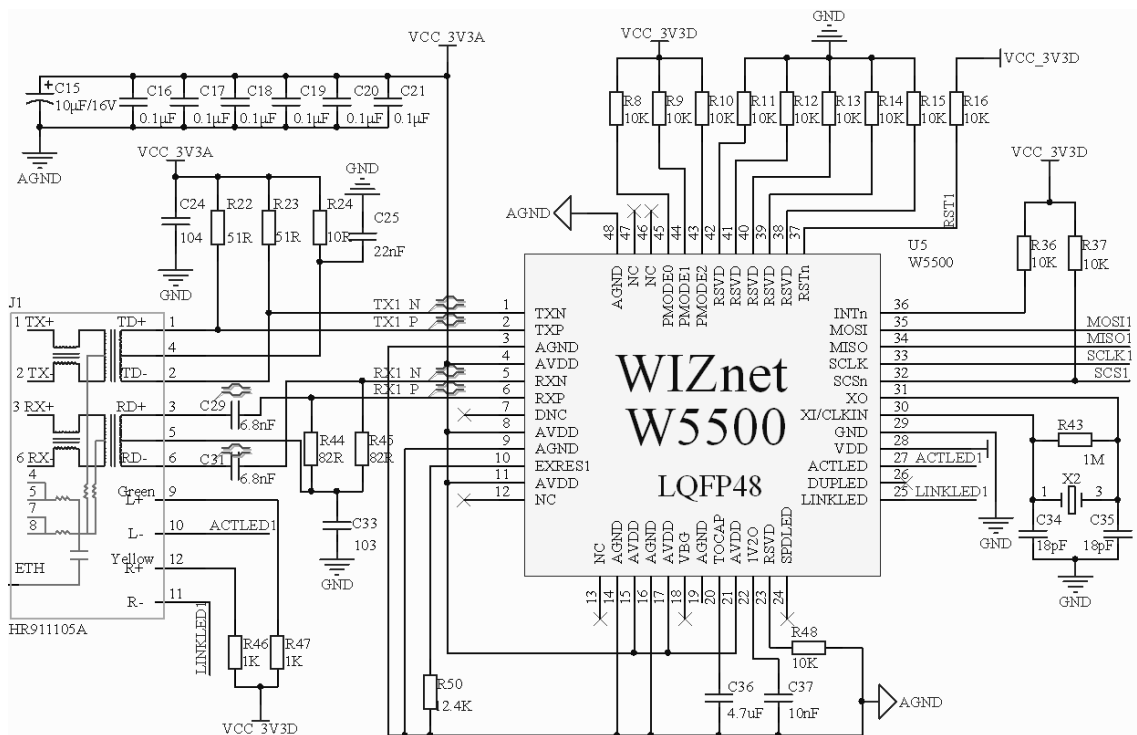


图 3-14 W5500 引脚外围电路

Fig.3-14 W5500 pin peripheral circuit

3.4 SIM800C 系统电路设计

SIM800C 是手机模块的核心芯片，负责接收发送手机短信，从而实现短信控制。因此，使用手机控制功能时，先要设计 SIM800C 芯片系统电路。

3.4.1 芯片供电电路

SIM800C 的输入电压范围是 3.4V 到 4.4V，一般使用 4V 接入 VBAT。模块

以最大功率发射时，会产生一个高达 2A 的瞬时峰值电流，导致 VBAT 产生较大的电压跌落。设计时在 VBAT 端接入一个大的旁路电容，根据实际需求并联使用 100 μ F 钽电容和一个 1 μ F~10 μ F 的陶瓷电容。增加 33pF 和 10pF 电容去除高频干扰。同时为了防止浪涌对芯片的损坏，在模块 VBAT 引脚上使用一个 5.1V/500mW 的齐纳二极管。图 3-15 为芯片 VBAT 输入供电电路。

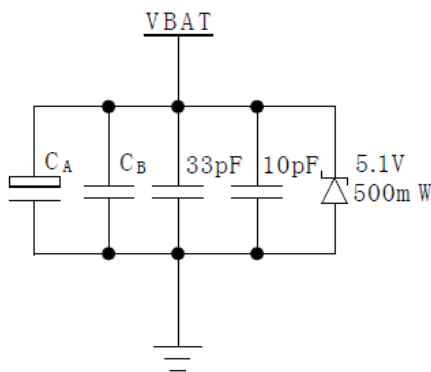


图 3-15 VBAT 输入电路

Fig.3-15 VBAT input circuit

3.4.2 RTC 电源电路

当 VBAT 断开后，用户需要保存实时时钟，因此 VRTC 引脚应该外接大电容或者电池。当外接大电容时，能保持实时时钟 1 分钟。在设计 RTC 电源使用时，选择使用外部大电容给模块内部的 RTC 供电方式，RTC 电源设计电路如图 3-16 所示。

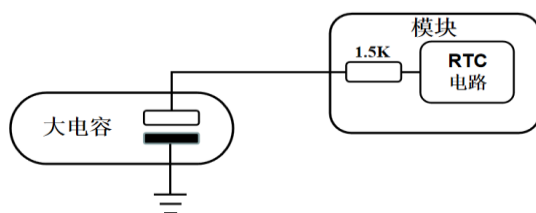


图 3-16 RTC 电源电路

Fig.3-16 RTC power circuit

3.4.3 开关机和自启动电路

PWRKEY 引脚模块内部已经上拉至 VBAT，通过拉低 PWRKEY 可以实现模块的开启和关闭。开关机和自启动电路如图 3-17 所示，图中去掉电阻 R₂ 关闭自启动电路。

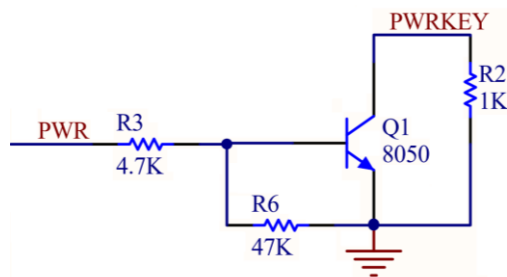


图 3-17 开关机和自启动电路

Fig.3-17 Switching machine and self-starting circuit

3.4.4 指示灯电路

指示灯电路一路提示模块是否上电，另一路 NETLIGHT 网络状态指示灯提示模块是否联网成功。NETLIGHT 信号引脚的工作状态如表 3-3 所示，指示灯电路设计如图 3-18 所示。

表 3-3 Netlight 工作状态

Table 3-3 Netlight working status

网络灯状态	工作状态
1 熄灭	关机
64ms 亮/ 800ms 熄灭	没有找到网络
64ms 亮/ 3000ms 熄灭	注册到网络
464ms 亮/ 300ms 熄灭	GPRS 通讯

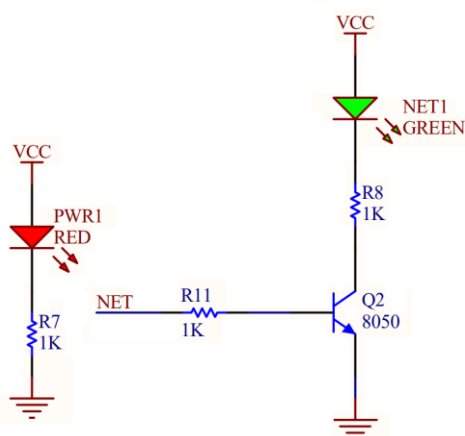


图 3-18 指示灯电路

Fig.3-18 Indicator circuit

3.4.5 串口电平匹配电路

手机控制功能要求手机模块和单片机要进行信息传递，由于单片机和

SIM800C 电平不匹配，要实现两个不同电压的模块进行通讯，必须进行电平信号转换，转换电路如图 3-19 所示。TTL 串口电平匹配电路，通过 VDD 可以调节匹配电平。悬空时可以和 3.3V 和 5V 系统直接使用，如果在使用过程中遇到问题，可以将 VDD 接到 MCU 的 VCC 上。

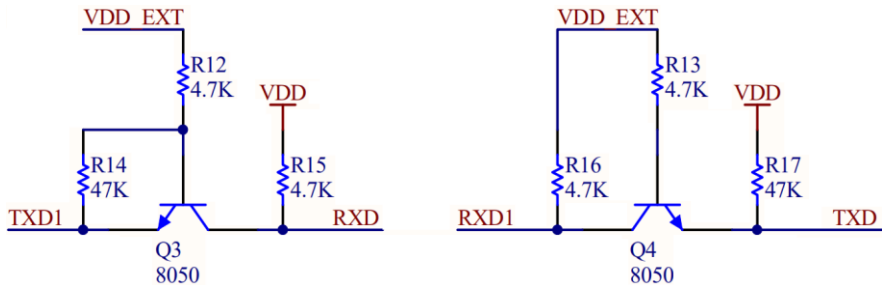


图 3-19 串口电平匹配电路

Fig.3-19 Serial level conversion circuit

3.4.6 SIM 卡接口电路

芯片的外部 SIM 卡接口支持 GSM Phase 1 规范、GSM Phase 2+规范和 FAST 64 kbps SIM 卡。SIM 卡正常电压值为 3V 或者 1.8V，电源由芯片模块内部的电压稳压器卡提供。SIM 接口引脚的定义见表 3-4。

表 3-4 SIM 接口引脚的定义

Table 3-4 SIM interface pin definition

引脚名称	引脚序号	功能
SIM_VDD	18	SIM 供电，根据 SIM 卡的类型自动选择输出电压，可以为 3.0V 或者为 1.8V 输出电流约为 10mA。
SIM_DATA	15	SIM 卡数据 I/O
SIM_CLK	16	SIM 卡时钟
SIM_RST	17	SIM 卡复位
SIM_DET	14	SIM 卡在位检测脚

如图 3-20 是使用 8 引脚 SIM 卡座设计的 SIM 卡接口电路。在 SIM 卡电路中使用 SMF05C 器件来做静电保护。在模块和 SIM 卡之间串接 22Ω 电阻用于匹配这两者之间的阻抗。SIM_DATA 数据信号线在模块内部未接上拉，需要通过外接上拉电阻保证电平稳定。

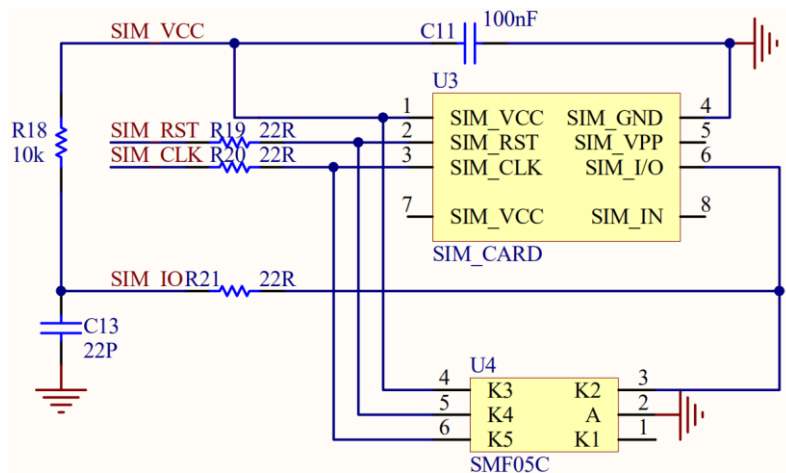


图 3-20 SIM 卡接口电路

Fig.3-20 SIM card interface circuit

3.4.7 芯片外围引脚电路

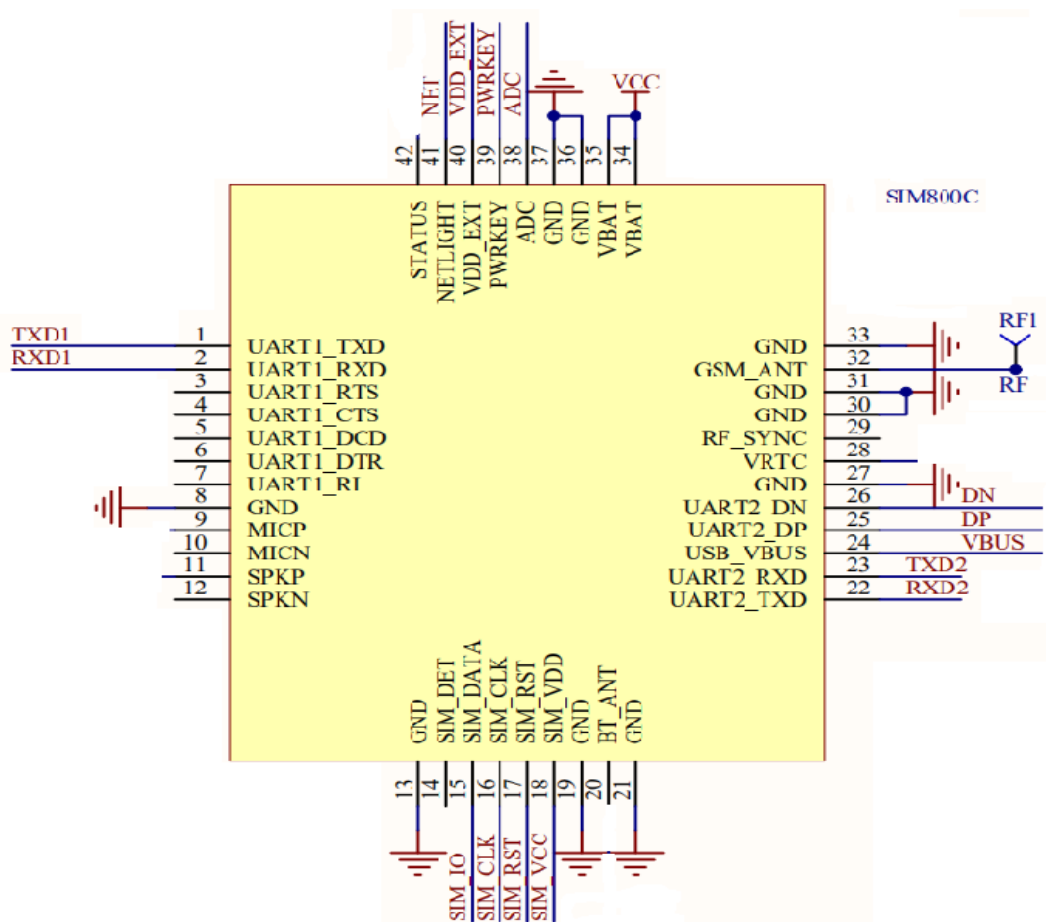


图 3-21 芯片引脚连接图

Fig.3-21 Chip pin connection diagram

最终设计完成的芯片引脚连接电路如图 3-21 所示。SIM800C 芯片 GND 引脚全部接地，电源地使用 36, 37 引脚。SIM800C 提供了两个天线接口，分别为 GSM 天线接口 GSM_ANT，蓝牙天线接口 BT_ANT。天线接口使用 GSM_ANT 接口，连接 GSM 天线，BT 天线悬空。

SIM800C 提供了 USB 调试接口、音频接口、数模转换(ADC)、RF_SYNC 射频同步信号接口和 STATUS 运行状态指示灯接口这些功能全部没有使用到，这里做悬空处理。

3.5 继电器控制电路设计

继电器是最常用的一种电控器件，通常应用于自动控制电路中，它由输入回路(又称控制系统)和输出回路(又称被控制系统)组成，通常用于使用较小的电流去控制较大电流的应用中，在电路中可以起电路转换、自动调节、安全保护等作用。本文通过单片机控制继电器输入回路，从而实现逻辑控制输出回路的天文台观测设备。

3.5.1 继电器介绍

根据设计需求，继电器需要选择具有两组控制引脚，耐压为交流 220V 的继电器。其中一组引脚用来接天文台观测设备，另一组引脚作为监控引脚。本文选择带两组转换开关，型号为 HF115F-JQX-115F-005 的继电器。线圈电阻为 62Ω ，额定电压为 5V，额定功率 400mA。触点耐电流 8A，耐压 AC250V。以其中一组转换开关为例，工作原理如下：

(1) 当继电器线圈两端未达到吸合电压时，继电器公共端与常闭端接通，工作原理如图 3-22 所示。

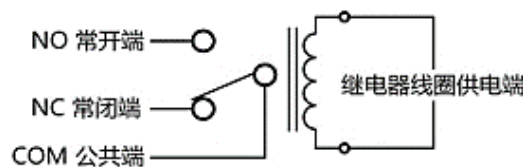


图 3-22 继电器线圈无电压

Fig.3-22 Relay coil without voltage

(2) 当继电器线圈两端电压达到吸合电压时，继电器公共端与常开端接通，工作原理如图 3-23 所示。

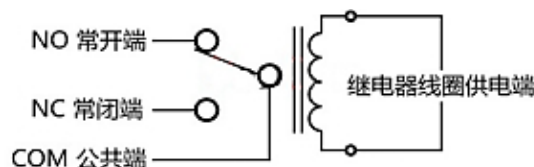


图 3-23 继电器线圈达到吸合电压

Fig.3-23 The relay coil reaches the pull-in voltage

（3）当继电器触点开关闭合时，设备工作，触点开关断开则不工作，其工作原理如图 3-24 所示。



图 3-24 继电器控制外设原理

Fig.3-24 Relay control peripheral principle

3.5.2 继电器控制电路

根据继电器参数由 $P=UI$ 算得线圈额定电流为 80mA，由欧姆定律 $U=RI$ 可以算得继电器工作电流为 56~120mA（大于单片机引脚输出能力 40mA）。因此选择三极管开关电路对控制电路电流进行放大控制。控制电路如图 3-25 所示。

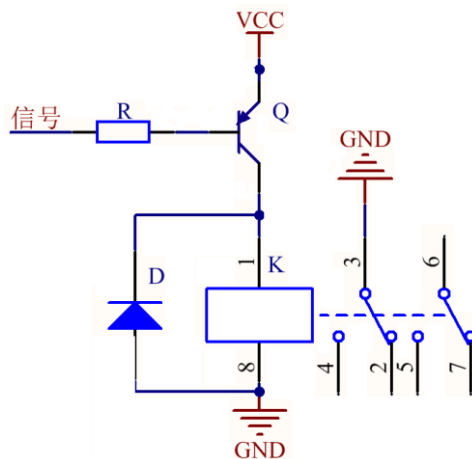


图 3-25 继电器控制电路

Fig.3-25 Relay control circuit

D 为续流二极管。继电器内部线圈断电时会产生很大的反向电动势，可能会击穿继电器电路上驱动三极管，因此在继电器驱动电路中使用二极管泄放掉多余电流，以保护继电器驱动管。

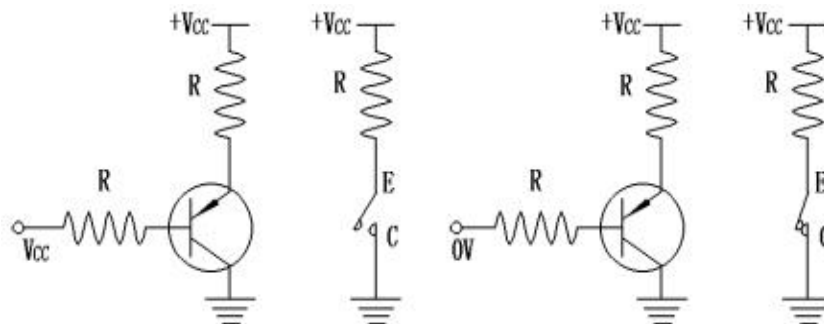


图 3-26 三极管截止状态和饱和状态工作原理图

Fig.3-26 Triode cut-off state and saturation state working principle diagram

Q 为 PNP 三极管。三极管有饱和区、截止区和放大区三个工作区，而开关特性则是利用三极管工作在截止区和饱和区的特性。处于截止区时，电流无法流过，相当于开关处于开状态。处于饱和区时，电流接通，相当于开关处于闭合状态。三极管开关状态原理见图 3-26。

我们要根据负载工作电流来选择三极管型号。继电器线圈额定电流 80mA，所以三极管的集电极允许通过的电流应该高于这个电流。由于电流较小，一般的小功率三极管如 8550，9014 都可以，本文选用 S8550 (0.5A)。

R1 为基极电阻。为了让三极管进入饱和状态，必须提供一定的基极电流。已知集电极 80mA，放大系数值 β 可以在三极管的参数中找到，这里为了方便计算取值 200，得出基极电流 I_B 为：

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{80}{200} \text{mA} = 400 \mu\text{A} \quad (3-2)$$

三极管工作时发射结的压降大约为 0.7V。因此基极电阻 R 的大小为：

$$R = \frac{U_B}{I_B} = \frac{U - U_{\text{降}}}{I_B} = \frac{5 - 0.7}{0.4} \text{K}\Omega \approx 10.7 \text{K}\Omega \quad (3-3)$$

为了使三极管工作更加稳定，从而达到深度饱和的工作状态。将电阻缩小 10 倍，这里取 $R=1\text{k}\Omega$ 。

3.6 监控模块电路设计

监控电路是远程天文台硬件设计过程中必不可少的一部分。它可以帮助用户获得现场设备的运行状态，以及反馈用户控制命令是否被正确执行，从而保证现场设备运行的准确性。然而现场设备运行使用的电能大部分是 220 交流电，而硬件控制系统使用的是 5V 及以下的直流弱电。这就涉及到一个小电压监控大电压

的问题，本节介绍解决该问题的方案。

3.6.1 监控方案介绍

对 220V 设备状态的监控方法，可以分成直接监控和间接监控两种。直接监控一般都是设法降压测量或者隔离测量，带来的后果就是增加了许多的外设，不利于硬件系统小型集成化的设计理念。因此，本文考虑使用间接测量的方法，通过检测继电器多余触头动作，间接的反映天文台设备工作状态。这也是本文在选用控制继电器型号时，选用具有两组转换触头的主要原因。一组触头用于连接外部 220V 设备作为开关使用。多余的转换触头连接 MCU 引脚来检测当前的开关状态。由于继电器两组触头逻辑动作同步，多余引脚的状态就可以间接的用来反映设备当前的运行状态。监控电路设计如图 3-27 下

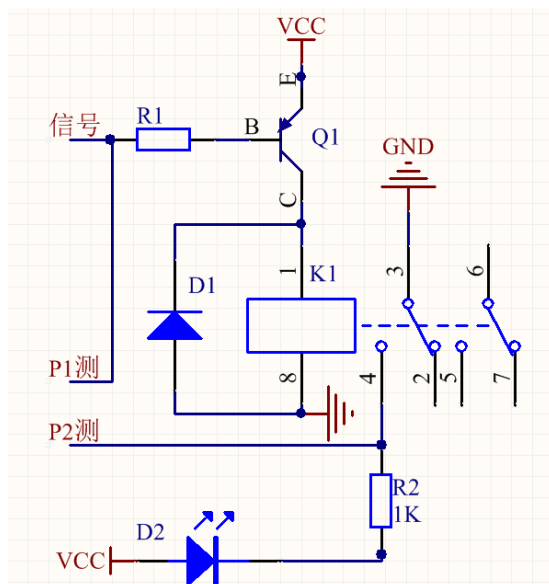


图 3-27 继电器多余触头监控电路

Fig.3-27 Relay redundant contact monitoring circuit

3.7 本章小结

本章根据远程天文台整体逻辑框图，详细介绍了硬件控制系统中核心电路原理图设计方法。首先根据各元器件用电需求，设计了调压模块电路。硬件系统中所有的电能供应都来自调压模块。其次结合各芯片设计说明书，设计了单片机系统电路、W5500 系统电路和 SIM800C 系统电路。系统电路是保障芯片运行的必要条件，在完成芯片系统电路设计后，围绕系统电路设计了继电器控制电路，实现最主要的逻辑控制功能。最后，给系统设计监控电路，实现闭环控制。

第4章 远程天文台硬件控制系统 PCB 设计

印制电路板（Printed Circuit Board, PCB）设计是远程天文台硬件控制系统实现加工制造的重要步骤。本章以电路原理图电气连接关系为基础，并结合信号完整性、电磁兼容性和电源完整性的相关要求对硬件 PCB 设计。

4.1 硬件系统 PCB 设计原理

4.1.1 信号完整性

信号完整性（Signal Integrity, SI）是指信号在传输路径上的质量。具有良好信号完整性的电路表现为信号能够在规定时间内不失真的从源端传送到接收端^[44]。反射、串扰以及过冲是信号完整性中最常见和最重要的问题，反射指的是当信号沿着传输线传播时，如果传输线阻抗发生变化，那么其中一部分信号将沿着与原传播方向相反的方向反射，另一部分继续传输的信号也会产生一定的失真。反射信号程度的计算方式为

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4-1)$$

式中 Z_1 ——分界面前区域的瞬态阻抗；

Z_2 ——分界面后区域的瞬态阻抗。

从式（4-1）可以看出，两个区域阻抗差异越大，反射的信号量越大。当信号线中有电流流过时会产生磁场，而磁场之间的干扰就是串扰的来源。串扰是两条信号线之间的耦合，信号线之间的互容和互感会引起信号线上的噪声。过冲为信号谷值或峰值超过设定电压。电路中过分的过冲会导致元器件失效。

对于一个实际的 PCB 系统，信号不完整通常由电路板设计中多种因素共同引起，如元器件布局不合理、高速信号布线不合理以及层叠结构设计不合理等问题。下面介绍可能引起信号不完整问题的常见情况并给出解决方法^[45]。

（1）单一网络的阻抗变化

单一信号网络的信号质量问题，主要是由传输线的阻抗不连续引起的，如网络中的拐角、过孔、T 型结构以及接插件等都会引发反射和失真等信号完整性问题。在 PCB 设计中可以通过缩短走线长度并对导线阻抗进行控制的方法来解决该信号完整性问题。

（2）相邻网络间的串扰

多个网络间的信号质量问题，主要由于信号串扰造成的。当信号并行传输时，信号间的互容和互感会产生影响信号传输质量的串扰噪声，从而引起逻辑翻转等问题。在 PCB 设计中可以通过缩短相邻信号走线长度并增加相邻传输线之间的距离等方法来降低信号间的串扰。

（3）电源平面和地平面的轨道塌陷

轨道塌陷是电源平面和地平面之间的电压波动，该波动是由于高频开关器件状态发生快速翻转，形成了很大的瞬态开关电流所导致。在 PCB 设计中可以通过增加去耦电容并缩小相邻电源和地平面之间的介质厚度等方法来改善该问题。

（4）电磁干扰问题

电磁干扰有两个干扰源，一个是差分信号由于线长不等，转化为共模信号，并在外部的双绞线上进行传输，另一个是地平面上出现的电压波动在外部屏蔽线上产生的共模电流。在 PCB 设计中可以通过走差分线进行补偿以及在电路板外部增加屏蔽层等办法来降低电磁干扰。

4.1.2 电磁兼容性

电磁兼容（Electromagnetic Compatibility, EMC）是指设备在电磁环境中能够正常运行，同时不会对环境中的其他设备产生电磁干扰。因此，EMC 包含了两个方面的要求，分别是电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）和电磁敏感性（Electromagnetic Susceptibility, EMS）两部分。EMI 指的是设备或系统在运行过程中产生的不利于其他系统的电磁噪声不能超过一定的限值。EMS 指的是设备或系统在运行过程中对周围电磁环境影响的抵抗能力。

PCB 设计中常见的电磁干扰包括传导干扰、串音干扰和辐射干扰。传导干扰主要通过导线耦合以及共模阻抗耦合来影响其他电路。串音干扰是由电磁性干扰和电容性干扰所引起的，通常发生在相邻的电路系统中。辐射干扰是由于空间电磁波辐射引起，主要是内部走线间的共模电流辐射干扰。PCB 的电磁兼容设计主要考虑以下几个方面^[46]。

（1）电路板层叠划分

电路板中电源层、地层、信号层的相对位置关系，以及电源平面、地平面的分割对电路板的 EMC 指标至关重要。PCB 设计中合理的层叠结构设计不仅能够提高系统的稳定性，而且可以减少布线的工作量。

（2）元器件布局、布线策略

PCB 上各种模块的相对位置也会对电路的 EMC 产生很大的影响，因此需要根据各模块工作时对 EMC 敏感程度的不同进行分组，同组元器件集中摆放，并确保各组间在空间上互不干扰。PCB 布线中对电源线、地线以及关键信号线进

行合适的处理也能很大程度的提高电路板的 EMC 性能。

(3) 储能、旁路和去耦电容

电路设计时在电源电路和芯片供电引脚需要接入一些电容才能满足电路工作时要求的低噪声和低纹波。电容按功能可分为 3 类, 分别为储能、旁路和去耦电容。储能电容用来为芯片提供所需要的电流, 并缩小电路中电流的变化范围, 从而减小辐射。旁路电容通过产生交流旁路消除无用的能量来提高系统配电质量, 同时还具备滤波功能, 可以滤除电路系统中由元器件等产生的无用噪声。去耦电容一方面抑制噪声对其他芯片的干扰, 另一方面通过提供一个局部的直流电源给有源器件来减少开关噪声在系统上的传播。

4.1.3 电源完整性

随着电子系统向低电压、大电流、高速和高密度的趋势发展, 电源完整性问题日益凸显。电源完整性 (Power Integrity, PI) 问题就好比一个生态系统, 每一颗用电芯片都需要能够汲取到正常工作的能源。怎样快速稳定的为每一个芯片提供稳定的电源供给是电源完整性的本质问题。因此在设计电源分配网络 (Power Distribution Network, PDN) 时, 不仅需要为电路提供纯净的电源, 还要为高速信号提供低噪声回路。首先了解电源噪声产生原因, 如下:

(1) 稳压芯片本身的特点, 决定其输出电压出并不恒定且会有一定的波纹。而对于这部分噪声我们也只能接受。

(2) 当负载电流需求快速变化时稳压电源无法实时响应。稳压芯片的工作原理是通过其输出电压的变化的反馈, 调整其输出电流, 从而把输出电压调节回额定输出值。当负载瞬态电流变化频率超出一定范围时, 稳压源的电压输出会出现跌落, 从而产生电源噪声。

(3) 电源路径阻抗和地路径阻抗在负载产生瞬态电流时产生压降。瞬态电流流经焊盘引脚时, 由于寄生电感的存在也必然会产生压降, 因此负载芯片电源引脚处的电压会随着瞬态电流的变化而波动, 这就是阻抗产生的电源噪声。

根据电源噪声产生的原因可知, 添加去耦电容是去除电源噪声最主要的方法。这种方法对降低电源分配网络的阻抗和提高瞬态电流的响应速度都十分有效。旁路电容可以把不必要的共模 RF 能量从易受影响的区域泄放掉。防止噪声进入电源网络, 从而影响整个系统; 储能电容做临时电源, 电源导线瞬态电流造成线路压降时, 短时间为负载供电, 以防止电源纹波过高; 实际应用时, 由于各种原因导致电容变得不“完美”, 降低了电容的滤波效果。因此, 使用时还需要注意电容选择、摆放位置、安装间距、安装方式等。

4.2 硬件控制系统 PCB 叠层设计

在设计 PCB 电路板之前,先需要根据整体电路的规模、电路板的大小和 EMC 设计的要求来确定电路板层数。层叠结构是抑制电磁干扰的一个重要手段,也是影响 PCB EMC 性能的一个重要因素。从板层屏蔽效果的角度看,使用地平面作为基本电平参考点的屏蔽效果要远远优于使用电源平面,因此在多层 PCB 设计中应优先选用地平面作为参考平面^[47]。另外在设计中要采用偶数层数的层叠设计以防 PCB 出现弯曲。

从布线角度看,PCB 层数越多越有利于布线,但是相应的制板成本和难度也会随之增加。通过考虑远程天文台硬件控制系统特殊信号线如差分线、敏感信号线的数量和分布情况确定信号层数。本文根据对实际器件预布局的情况,看出特殊信号线附近的高速信号线数量少且距离分布较远。因此综合各方面因素,选用 2 层板进行 PCB 设计,直接在顶层和底层走特殊信号线,节省成本。

由于选择双层板,这时顶层和底层为两个相邻内层,因此在 PCB 布线时需要注意垂直走线来防止信号间产生串扰。另外 PCB 设计中需要考虑高速信号的阻抗匹配,阻抗计算公式为

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{Er + 1.41}} \times \ln_e \left(\frac{5.98H}{0.8W + t} \right) \quad (4-2)$$

式中 Er ——板材的相对介电常数;

H ——板材介质厚度;

W ——导线线宽;

T ——导线线厚。

式(4-2)除了导线线宽可以自行设置,其余参数都需由 PCB 生产厂家提供,因此将目标阻抗值提供给厂家,由厂家根据计算结果进行阻抗匹配。因此在设计完层叠结构和阻抗之后,最好与 PCB 厂家评估一下,现有的工艺是否能满足设计要求。

4.3 硬件控制系统 PCB 布局

PCB 叠层设计完成以后,紧接着开始进行元器件布局。PCB 电路板整体布局和元器件摆放位置的合理性是影响硬件控制系统性能的关键要素之一。好的元器件布局往往可以提高硬件系统整体电气性能和稳定性能,降低后期 PCB 布线的难度。同时兼顾到系统的可安装性、热设计和美观性等^[48]。布局前还需要考虑印刷电路板尺寸,PCB 尺寸过大时,走线线路变长,造成延线阻抗增加,抗噪声

能力下降，成本也随之增加。PCB 尺寸过小时，导致系统散热性能变差，邻近线条易受干扰。因此首先需要对 PCB 的尺寸和外形，给出一个合理的定位。PCB 尺寸确定后，再开始进行 PCB 布局。本设计布局主要考虑以下几个方面^[49]：

4.3.1 元器件排列规则

在通常条件下不允许元件重叠，一般情况下将所有的元件布置在 PCB 的同一面上，只有在顶层元件过密的情况下，才适当的将一些尺寸小且发热量小的器件，如贴片电容、贴片 IC、贴片电阻等放在底层。

元器件间距考虑到焊接、检查、测试、安装需要，元器件间的间隔不能太小。贴片与贴片、贴片与插件、贴片与安装孔等要考虑最小间距。尺寸较大的元件，要留有一定的间距，这样有助于器件的焊接和返修。为了保证元器件安装时的稳定性，要求位于板边缘的器件离板边缘至少 2 个板厚的距离。

元件的排布在整个板面上应疏密一致、均匀分布。在保证电气性能的前提下，使用网格点设置，将元件平行或垂直放置排列在栅格上，不但保证设计的美观，而且易于装焊和批量生产。

电源插座以及连接器的布置应该优先考虑方便插拔，尽量布置在 PCB 板子的四周。

4.3.2 PCB 电气性能

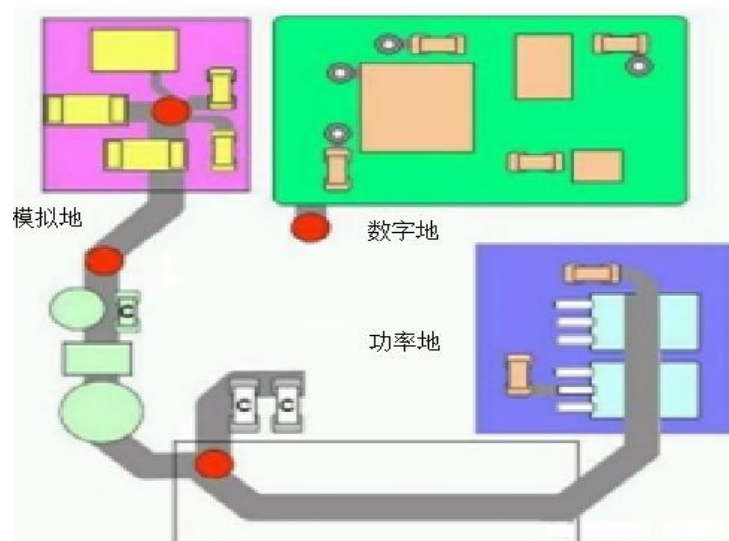


图 4-1 PCB 数字地模拟地处理

Fig.4-1 PCB digital ground analog processing

布局前，先按电路的特点将整个电路分为几个单元电路或模块，确定特殊元

件和单元模块电路位置，并以每个单元电路的核心元件（如控制芯片）为中心，其它的元件要按一定的顺序均匀、整齐紧凑地围绕单元模块布局在 PCB 板上。

为了提高滤波效果，IC 去藕电容要尽量靠近芯片连接引脚。涉及到多个电容时，电容的摆放顺序为先经过大电容，再经过小电容，且小电容离器件最近。

在布局时，还要分析信号类型。电路中同时存在数字电路和模拟电路时，最基本的原则就是把数字电路和模拟电路分开（如图 4-1 所示）。本文中在整个硬件控制系统电路，绝大多数信号类型都是数字信号，只有在 W5500 电路中有模拟地信号输出。在处理这部分模拟信号地时，采用单点接地的方式将数字电路和模拟电路分离开，这样可以防止地信号的相互串扰而影响某些敏感元件。布局时设计单点接地的位置尽量靠近板子电源地的入口，这样可以保障电流总是按最短路径流回的原理，可将 EMC 降到最小。处理方法如图 4-2 所示。

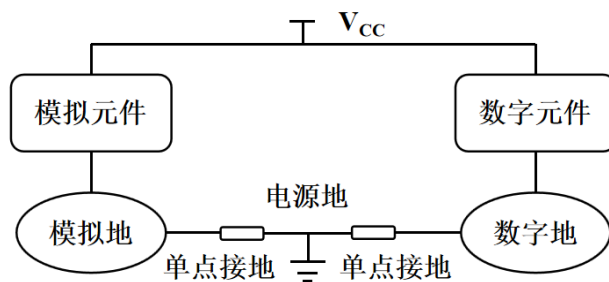


图 4-2 单点接地原理图

Fig.4-2 Single point grounding schematic

4.3.3 系统电磁干扰

布局时另一个原则是低速信号不要和高速信号接近。对于较敏感的元器件，应该加大元件与辐射源之间的距离或加以屏蔽。远程天文台硬件系统中，W5500 中含有高速时钟信号和差分信号。由于高速信号对噪声更加敏感，布局的时候，应该给这些信号预留出布线路径，避开干扰源。

4.3.4 系统散热性能

对于发热元件和功率较大的器件，应优先安排在利于散热的位置，并为其保留足够的空间，必要时可以单独设置散热器。在核心芯片和功率器件下方打散热孔，以降低温度，减少对邻近元件的影响。在整个 PCB 板空置的位置打散热孔，提高系统整体的散热性能。

4.3.5 特殊需求注意

(1) SIM800C 天线

天线输出引脚与天线连接器的走线越短越好；射频信号不要贯穿整个主板；射频信号远离 SIM 卡以及电源芯片等。

(2) SIM800C SIM 卡

SIM 卡面积较大，并且本身没有防 EMI 干扰器件，比较容易受干扰；保证 SIM 卡远离天线及产品内部的天线延长线；SIM 卡尽量靠近模块摆放。

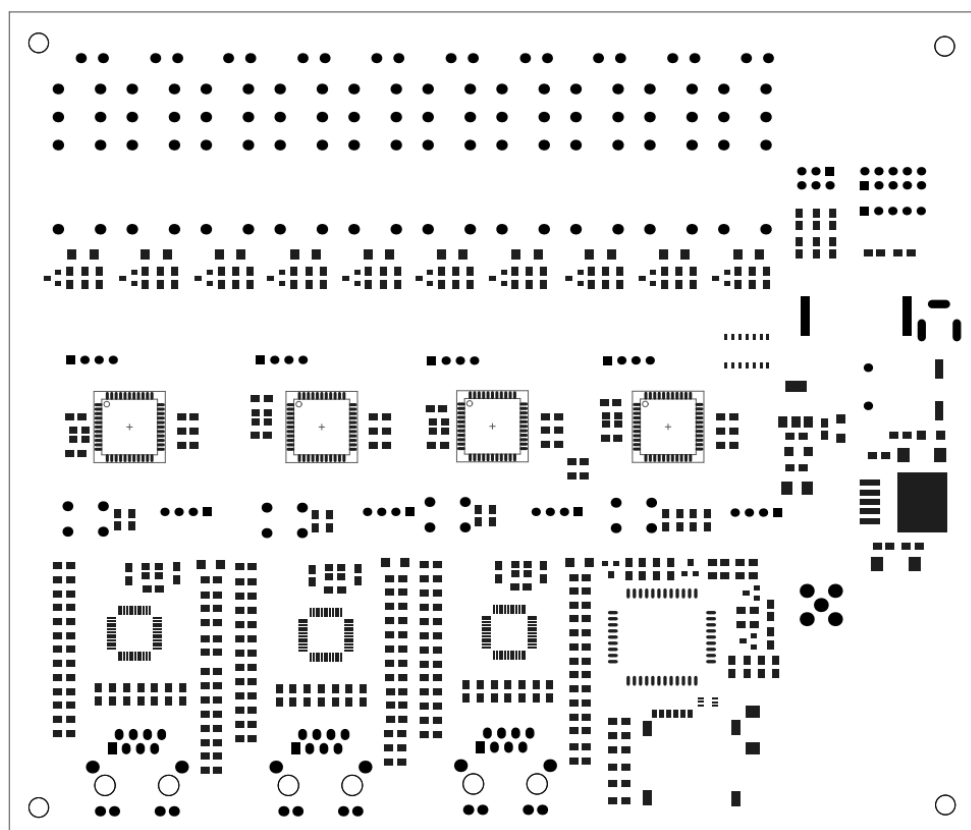


图 4-3 硬件系统 PCB TOP 层布局

Fig.4-3 Hardware system PCB TOP layer layout

综合考虑以上因素，最终绘制 AD 单板布局如图 4-3。几个核心控制模块作为数字电路的核心器件放置在单板中间位置，控制继电器统一放置在板子上端，整个网络信号通信接口放置在板子下端，电源模块放置在板子右侧，方便实现插接。整个单板由上到下构成控制、逻辑、通讯结构。本文设计中所有的器件都放在了 TOP 层，整个 BOTTOM 层为地网络层，提高系统抗干扰性。

4.4 硬件控制系统 PCB 布线

PCB 外形和元件位置确定后，考虑 PCB 布线。布线需要根据元件的位置进行，遵循 PCB 走线“最短、最直”的原则。PCB 板中的走线线宽主要由流过它的电流值和绝缘层基板与导线间的粘附强度决定。而且在条件允许的情况下，尽可能使用宽线，尤其是电源线和地线。以下是具体注意细节：

4.4.1 电源与地线之间布线注意事项

(1) 要在电源、地线之间加上去耦电容。布线顺序一定要经过了电容之后再连接到芯片的管脚。

(2) 尽量加宽电源和地线，一般为地线最宽，电源线次之，信号线最窄。

(3) 在印制板上将未使用的部分进行大面积的覆铜并作地线使用。

4.4.2 对于线拐角的处理

从原理上说，线路中的拐角走线的方式会引起传输线线宽变化，造成阻抗的不连续。以直角走线为例，对信号主要产生三个方面的影响，首先拐角可以等效为容性负载，减缓信号传输上升时间，其等效电路图如图 4-4 所示；其次直角造成阻抗不连续，引发信号的反射；最后直角尖端还会产生 EMI 影响其他系统。因此布线原则是锐角最差，直角次之，钝角再次之，直线最好。

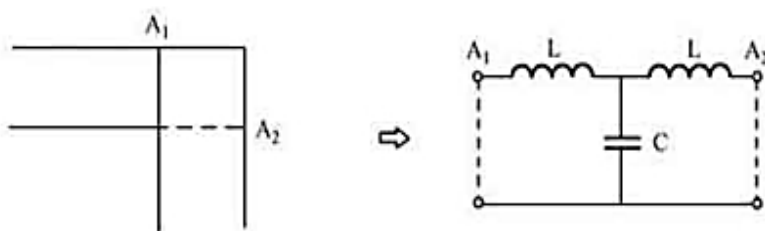


图 4-4 直角的高频等效电路

Fig.4-4 Right angle high frequency equivalent circuit

4.4.3 一般信号线布线

(1) 控制走线间距

信号线布线间距遵循 3W 原则，这里 3W 是指相邻线之间要保持不少于 3 倍线宽的距离，如图 4-5 所示。3W 原则可保证 70% 的线间电场不互相干扰。如想

要达到 98% 的标准，可使用 10W 规则。

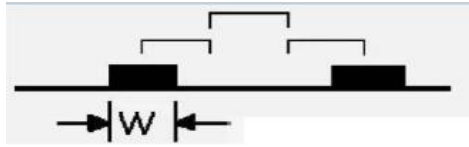


图 4-5 3W 原则原理图

Fig.4-5 3W principle schematic

(2) 控制走线宽度

PCB 的载流能力取决于线宽、铜皮厚度、容许温升等因素。设计时可参考表 4-1。

表 4-1 PCB 铜厚、走线宽度和电流的关系

Table 4-1 PCB copper thickness, trace width and current relationship

铜皮厚度 35 μ m		铜皮厚度 50 μ m		铜皮厚度 70 μ m	
宽度 mm	电流 A	宽度 mm	电流 A	宽度 mm	电流 A
0.15	0.20	0.15	0.50	0.15	0.70
0.20	0.55	0.20	0.70	0.20	0.90
0.30	0.80	0.30	1.10	0.30	1.30
0.40	1.10	0.40	1.35	0.40	1.70
0.50	1.35	0.50	1.70	0.50	2.00
0.60	1.60	0.60	1.90	0.60	2.30
0.80	2.00	0.80	2.40	0.80	2.80
1.00	2.30	1.00	2.60	1.00	3.20
1.20	2.70	1.20	3.00	1.20	3.60
1.50	3.20	1.50	3.50	1.50	4.20
2.00	4.00	2.00	4.30	2.00	5.10
2.50	4.50	2.50	5.10	2.50	6.00

(3) 控制走线方向

在 PCB 布线时，应尽量避免输入和输出端的导线相邻平行。为了减少不必要层间串扰，应避免不同层的信号线在相邻层走同一方向，且相邻层间的走线最好成正交结构。当 PCB 布线受到结构限制难以避免出现平行时，应考虑用地平面隔离。图 4-6 显示了相邻层的走线方向设计方法。

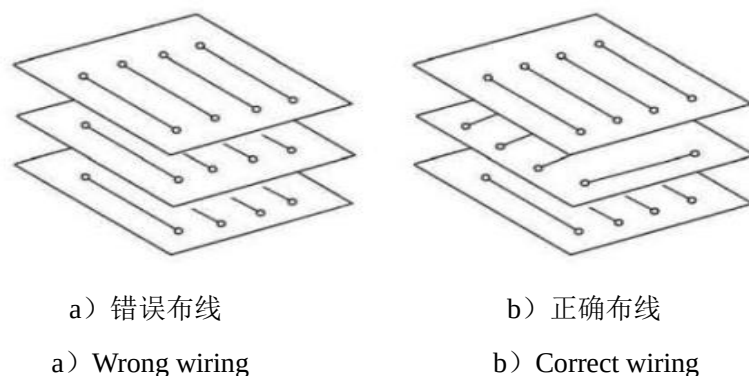


图 4-6 相邻层走线方向

Fig.4-6 Adjacent layer routing direction

4.4.4 差分信号布线

差分信号是驱动端发送两个等值、反相的信号，接收端通过比较这两个电压的差值来判断逻辑状态是“0”还是“1”。差分线即为承载差分信号的那一对走线。差分信号和普通的单端信号走线相比，最明显的优势是抗干扰能力强，能有效抑制 EMI 并确保时序定位精确。本文中网络模块中涉及到差分信号，布线原则如下。

(1) “等长、等距”原则

等长是指两条线的长度要尽量一样长。主要是为了保证两个差分信号时刻保持相反极性，减少共模分量；等距是指两线的间距要一直保持不变。主要是为了保证两线间差分阻抗一致，减少信号的反射。

(2) “尽量靠近”原则

差分线靠近是为了增强两条线间的耦合，既可以提高对噪声的免疫力，还能充分利用磁场的相反极性来抵消对外界的电磁干扰。

(3) “等长比等距更重要”原则

相比较而言，线长不匹配对时序的影响比间距不等造成的影响要大得多。因此，差分线的设计中最重要的规则就是匹配线长，其次是尽量满足两线平行。

4.4.5 匹配长度的蛇形走线

蛇形线是布线中最常使用的走线方式（如图 4-7 所示）。其主要目的就是调节延时，满足系统时序设计要求。由于蛇形线会破坏信号质量，改变传输延时，布线时要尽量避免使用。但实际设计中，为了保证信号有足够的保持时间，或者减小同组信号之间的时间偏移，往往不得不故意进行绕线。



图 4-7 几种蛇形走线结构

Fig.4-7 Several serpentine routing structures

4.4.6 PCB 敷铜处理

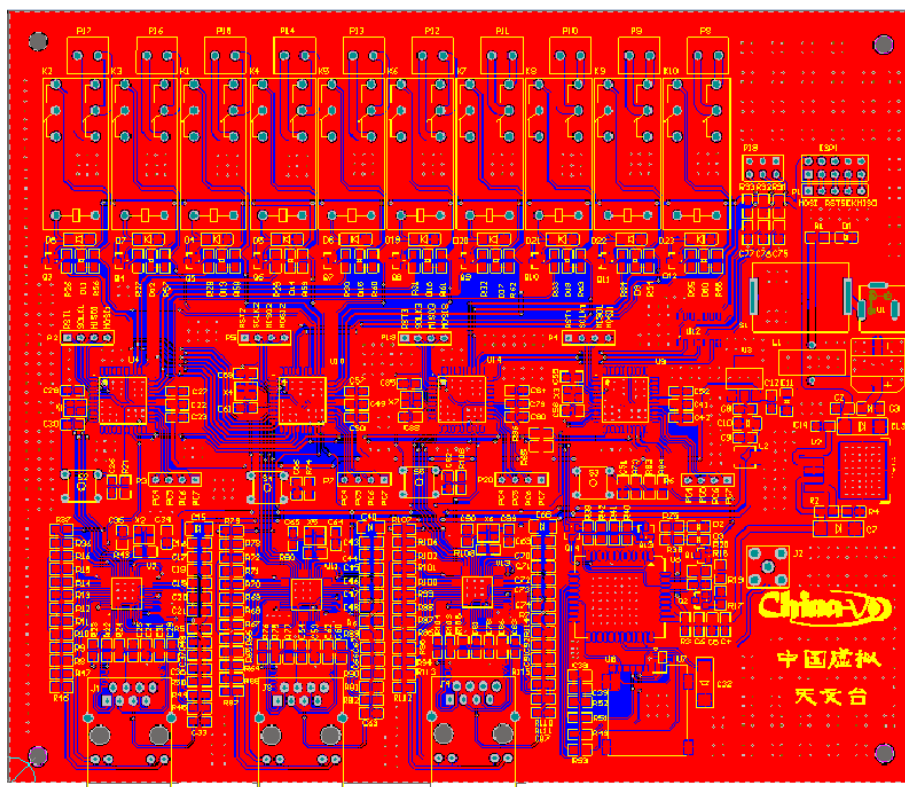


图 4-8 PCB 覆铜效果图

Fig.4-8 PCB copper effect diagram

双层 PCB 板，好处是两面都可以布线。可以使布线更容易，但是在电路设计时最好是元件与布线在一面，另外一面敷铜作为地线平面，如图 4-8 所示。连续的敷铜地线具有如下好处：

- (1) 不需要专门的地线。
- (2) 地电阻小，可以减少电流传导噪声。
- (3) 给每一条信号都加了连续电容，可以有效抑制辐射噪声。
- (4) 像一个屏蔽层，阻止电磁辐射噪声。

4.4.7 PCB 设计规则检查

在整个 PCB 电路绘制完成后，需要再次对 PCB 板进行检查，这样才能更好的保证设计的电路板是合格产品。我们一般检查有如下几个方面：

(1) 连接性检查：检查是否所有网络都有电气连接，对一些不理想的线形进行修改。

(2) 线宽检查：电源线和地线的宽度是否合适，在 PCB 中是否还有能让地线加宽的地方。高速信号线是否存在会引起阻抗变化的线宽突变。

(3) 安全间距检查：线与线，线与贯通孔，贯通孔与贯通孔，线与元件焊盘，元件焊盘与贯通孔之间的距离是否合理，是否满足生产要求。

(4) 关键信号检查：对于关键的信号线是否采取了最佳措施，如加保护线，长度最短，输入线及输出线是否被明显地分开。

(5) 丝印检查：检查 PCB 中所加的丝印是否清晰，尤其要确保元器件编号不被元器件遮挡，方便后期调试。

图 4-9 所示是经过如上设计规则原理后绘制出的硬件控制系统整体 PCB 布线图。

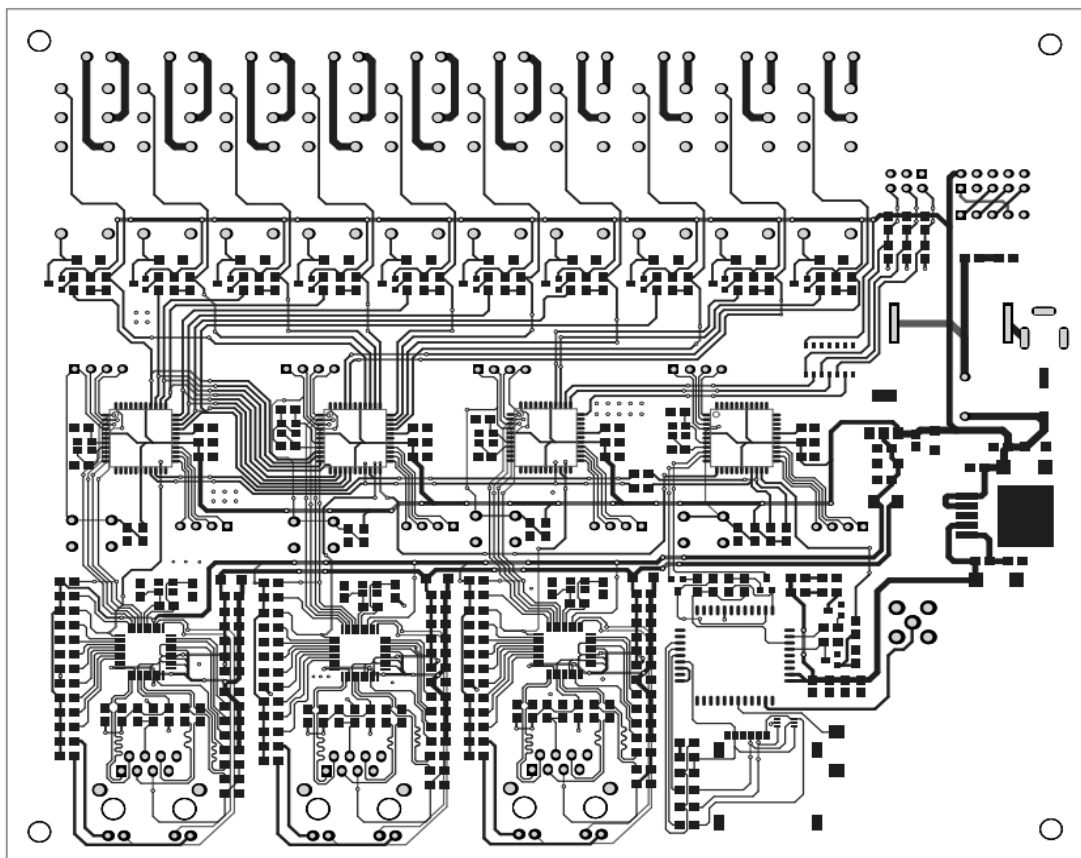


图 4-9 硬件 PCB 整体布线图

Fig.4-9 Hardware PCB overall wiring diagram

4.5 硬件控制系统 PCB 加工

完成 PCB 布局、布线等过程以及设计规则检查后导出元器件清单、Gerbera 文件、坐标文件以及钢网文件。同时确定加工工艺，本设计采用两层板，加工工艺为普通工艺：FR-4，绿油白字，有铅喷锡，过孔盖油，1.6mm 板厚、铜厚 1oz。联系厂家协商相应问题后，购买器材、打板、贴片，加工完成后的远程天文台硬件控制系统如图 4-10。图 4-11 为本设计最终集成效果设计图。



图 4-10 控制系统 PCB 板

Fig.4-10 Control system PCB board

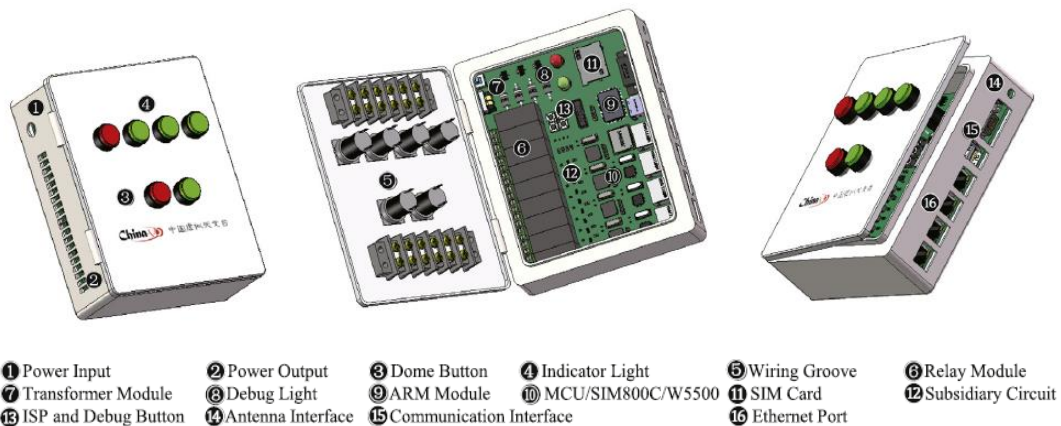


图 4-11 硬件控制系统集成效果图

Fig.4-11 Hardware control system integration renderings

远程天文台工作环境复杂，需要同时适应高温或严寒等条件，在硬件控制系统设计制造时不仅所有使用到的元器件统一选用工业级产品，而且通过整体合理性的设计将元器件进行逻辑整合，提升了整个系统的性能，其最终设计相关参数如表 4-1 所示：

表 4-2 远程天文台硬件控制系统相关参数

Table 4-2 Relevant parameters of the remote observatory hardware control system

序号	名称	参数值
1	输入电压	5V DC
2	额定电流	0.46A
3	最大电流	3.2A
4	工作温度	-30℃ - 85℃
5	相对湿度	5% - 85%

4.6 本章小结

本章主要介绍了远程天文台硬件控制系统 PCB 电路板的设计原则和过程。首先详细介绍了 PCB 设计中需要依据的 3 大原理，分别是信号完整性、电磁兼容性和电源完整性。然后结合 PCB 设计原理并针对本设计实际情况，详细介绍了 PCB 板叠层结构，PCB 布局，PCB 布线等几个方面的设计。最后通过制定加工工艺，对硬件控制系统进行打板并贴片，制作做出实物。

第5章 远程天文台硬件控制系统软件设计与测试

远程天文台运行过程中，本地往往是无人值守的，且观测流程一般都需要根据实际情况进行实时调整。硬件设计的工作只是提供一个个独立功能，只有配合软件驱动才能将各个模块功能联系在一起，真正组成一个稳定强大的系统。远程天文台驱动软件的设计主要实现远程用户实时获取本地运行情况，并实现对天文台的远程操控。下面对驱动软件的设计做具体介绍，并完成对本文硬件控制系统的实验测试。

5.1 硬件控制系统驱动设计

驱动程序的设计要充分结合已设计的硬件控制系统。本设计实现多种控制模式的同时，通过对模块中的单片机编程可以实现各个组件的相互协调，完成控制命令的解析执行、数据的同步、中断的执行以及监控数据的传输等操作，形成一个闭环的系统，进而实现天文台远程操控的功能，程序设计流程如图3所示。

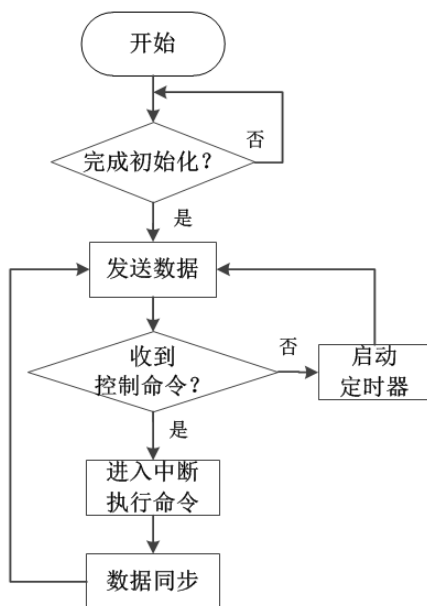


图 5-1 硬件控制系统程序设计流程图

Fig.5-1 The programming flow diagram for the hardware control system

首先，系统上电后进行初始化，包括建立本地网络、连接 GSM 通讯通道、中断启用、看门狗启动等，初始化成功后，模块通过网络与短消息将设备状态信息发送给用户以确定设备的正常运行；然后，等待网络、本地或短消息的控制信息。在此期间，若无控制消息，系统将启动定时器进行计时，实现每隔一定时间

间隔,通过网络将监控信息发送给用户。若收到控制消息,将进入新的中断模式,计时器中断失效,控制模块对信息进行解析并执行相应的操作,监控模块监测到变化后对各模块进行数据同步,并将状态信息转换后发送给用户。在整个程序运行期间,如果程序出现死循环等异常,则会启动看门狗复位使程序重启。驱动软件实现的三种控制方式中,本地控制是天文台现场的直接操作,因此具有最高的控制优先级。短消息命令的优先级次之,其通常在网络故障等环境下使用,是一种应急的控制方式,网络控制命令的优先级最低。

上面介绍了本文驱动软件的总体功能。本文在驱动程序的具体设计过程中,采用 C 语言编程,分别对硬件系统中 4 个主控单片机编程,详细设计流程如下,为了方便说明,先对 4 个控制模块的主控单片机进行如下定义:

- 控制模块 MCU ——AVR-1
- 监控模块 MCU ——AVR-2
- 手机模块 MCU ——AVR-3
- 圆顶模块 MCU ——AVR-4

5.1.1 控制模块 MCU 驱动设计

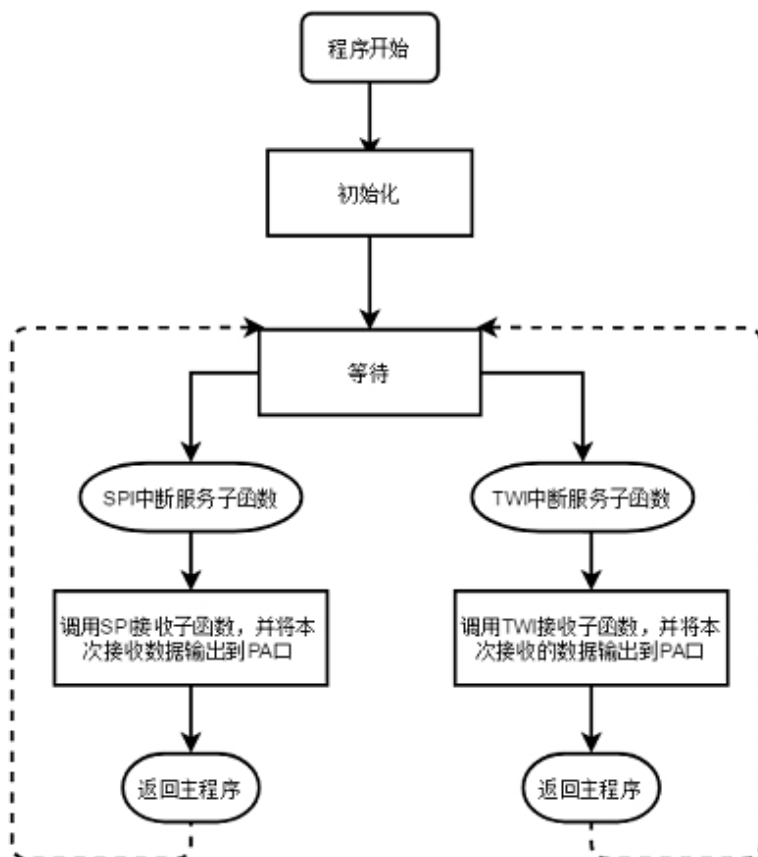


图 5-2 控制模块 MCU 程序流程图

Fig.5-2 Control module MCU program flow chart

控制模块和圆顶模块实现功能使用的方法类似，因此在程序设计上也几乎相同。本文使用控制模块做说明，程序设计主要分为初始化和程序等待两大部分，程序流程图如图 5-2 所示。

(1) 程序初始化设计

根据电路设计低电平触发继电器动作，因此引脚初始化设置为输出，且全部高电平。网络模块复位引脚低电平有效，连接引脚初始化为输出且高电平。通讯协议 TWI、SPI 初始化，并开启程序接收中断和看门狗复位使能。

(2) 程序等待设计

在程序执行过程中，如果接收到 SPI 数据，则程序进入 SPI 中断服务子函数，解析计算并执行接收数据，完成一系列动作后返回主程序等待下一次通讯。

在程序执行过程中，如果接收到 TWI 数据，则程序进入 TWI 中断服务子函数，解析计算并执行接收数据，完成一系列动作后返回主程序等待下一次通讯。

5.1.2 监控模块 MCU 驱动设计

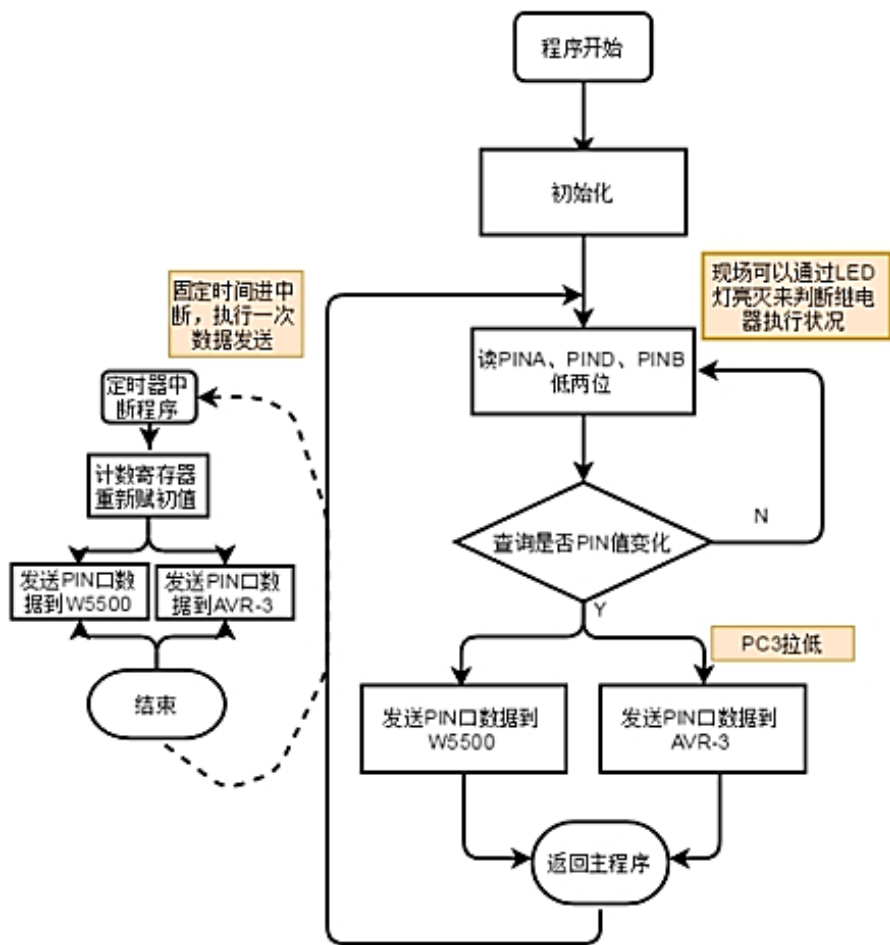


图 5-3 监控模块 MCU 程序流程图

Fig.5-3 Monitor module MCU program flow chart

监控模块 MCU 的程序设计主要分成初始化和循环检测两大部分，程序流程图如图 5-3 所示。

(1) 程序初始化设计

监控控制模块 MCU 引脚状态的引脚，初始化设置引脚为输入，且全部高电平。继电器监控引脚分两路，一路接电源上拉 LED 显示，另一路接继电器多余触点，当继电器发生动作时，对应的 LED 灯亮，并将引脚拉为低电平。初始化设置为引脚输入且全部高电平。连接监控模块复位的引脚初始化为输出且高电平。通讯协议 TWI、SPI 初始化，并开启定时器中断和看门狗复位使能。

(2) 循环检测设计

初始化完成后，单片机开始循环检测引脚变化情况。如果引脚没有变化，将会在固定时间进入定时器中断，定时将当前的监控数据发送出去。如果引脚发生变化，则将变化后的引脚数据通过 SPI 协议发送给网络模块。同时拉低 PC3 引脚让主机发起通讯，通过 TWI 协议发送引脚数据给手机控制 MCU。

5.1.3 手机模块 MCU 驱动设计

手机模块 MCU 的程序设计主要分成初始化、循环检测和串口中断三大部分，流程图如图 5-4 所示。

(1) 程序初始化设计

手机模块复位引脚低电平有效，连接引脚初始化为输出且高电平。通讯协议 TWI、USART 初始化，并开启串口中断和看门狗复位使能。定义全局数组，保存状态值。

(2) 循环检测

循环判断引脚是否发起主机接收 TWI 信息。如果是，则进入判断短信使能位，如果是未使能，则返回主循环。如果是使能短信，则关闭短信使能，发送监控内容短信息，再返回主程序；如果主程序判断是发起主机接收，则开启 TWI 接收监控信息，并保存。此时再次判断短信使能，如果是未使能，则返回主循环。如果是使能短信，则关闭短信使能，发送监控内容短信息，再返回主程序。

(3) 串口接收中断

在整个初始化完成后，期间如果接收到串口数据，即接收到短信，则进入 USART 串口中断服务函数。系统调用串口接收函数，并将接收的数据保存在数组中，再将数据计算后分别通过 TWI 传递给对应单片机，整个过程执行完毕后，退出中断，回到主程序，等待下一次中断发生。

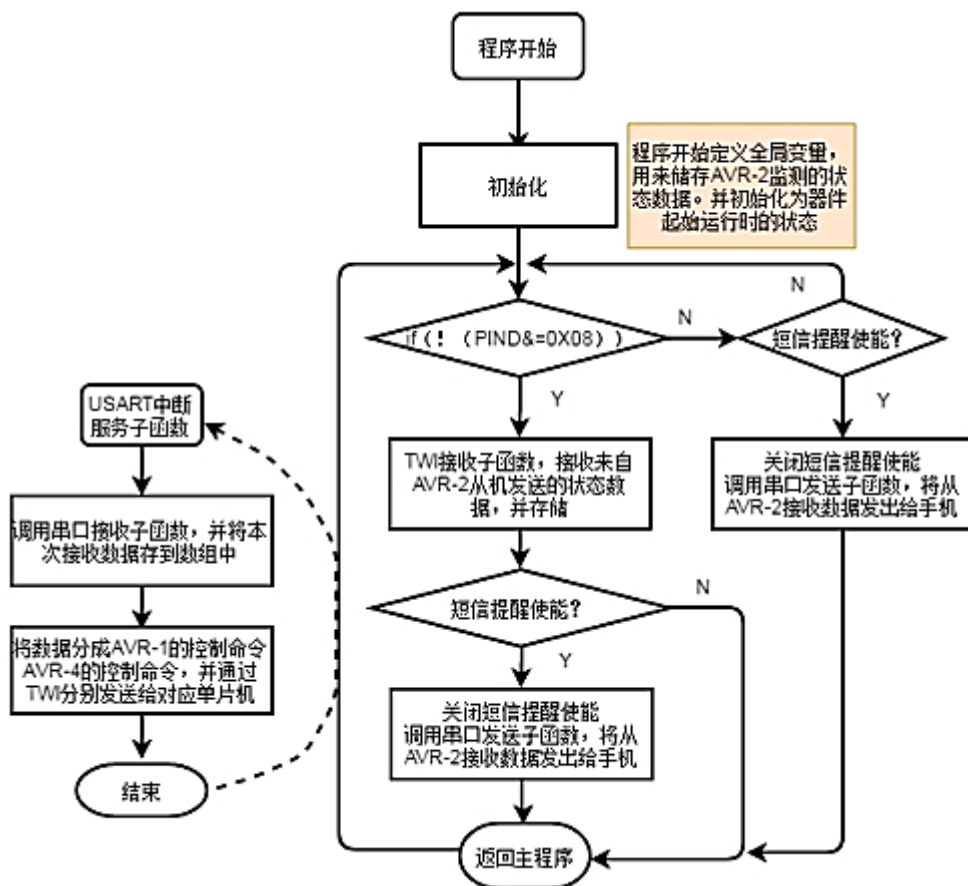


图 5-4 手机模块 MCU 程序流程图

Fig.5-4 Mobile phone module MCU program flow chart

5.2 控制命令对照表设计

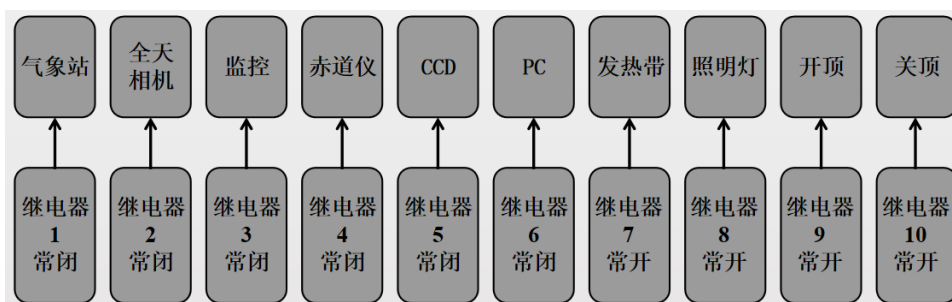


图 5-5 继电器连接图

Fig.5-5 Relay connection diagram

为了便于本模块的使用和管理，方便用户对控制命令的记忆，我们将控制模块上的所有继电器进行设备功能设定，制定了控制命令对照表，并在驱动程序中添加通用的信息解析和状态信息转换功能。信息解析是将本地、网络与短消息的内容，通过预定义的对照表将其转换成模块可以直接执行的二进制指令，状态信

息转换是预定义对照表的反操作，将可执行命令解析成用户易于理解的内容。图 5-5 为硬件系统继电器对应连接图，在常闭继电器接口上连接需要持续运行的设备，常开继电器接口上连接断续运行的设备。定义好硬件系统每个继电器对应的设备后，就可以确定驱动每个设备对应的控制机械指令。将这些机械指令一一替换成我们容易理解的语言，制成控制命令对照表，如表 5-1 所示。

表 5-1 控制命令对照表

Table 5-1 Control command comparison table design

命令内容	机械指令	命令功能	命令内容	机械指令	命令功能
Onled	&=~0X80	开灯	Onequ	=0X08	开赤道仪
Offled	=0X80	关灯	Offequ	&=~0X08	关赤道仪
Onheat	&=~0X40	开发热带	Onmonitor	=0X04	开监控
Offheat	=0X40	关发热带	Offmonitor	&=~0X04	关监控
Onpc	=0X20	开 PC	Onallsky	=0X02	开全天相机
Offpc	&=~0X20	关 PC	Offmonitor	&=~0X02	关全天相机
Onccd	=0X10	开 CCD	Onweather	=0X01	开气象站
Offccd	&=~0X10	关 CCD	Offweather	&=~0X01	关气象站
Onroof	=0XB0	开顶	Offroof	=0XD0	关顶

上面设置了每个设备对应的控制命令，为了更加方便用户的使用，本文还将天文台运行过程中常配合使用的操作制成了控制组合指令，如表 5-2 所示。

表 5-2 控制组合命令对照表

Table 5-2 Control combination command comparison table

命令内容	机械指令	命令功能
Run	0X00FF	照明、发热带关；PC、CCD、赤道仪、监控相机、全天相机、气象站开；
Onall	0X003F	照明、发热带开；PC、CCD、赤道仪、监控相机、全天相机、气象站开；
Offal	0X00C0	照明、发热带关；PC、CCD、赤道仪、监控相机、全天相机、气象站关；
Rstart	0X80C0	照明、发热带关；PC、CCD、赤道仪、监控相机、全天相机、气象站关；

5.3 硬件控制系统性能测试

硬件控制系统的整体性能是公众天文台稳定运行的前提，稳定性主要表现在通讯链路长时间的正常运行，是本设计关注的重点。为方便系统的调试与测试，我们使用 JAVA 语言进一步开发了本硬件系统的调试软件。该软件运行在计算机上，通过网络与硬件控制系统驱动软件对接，实现网络控制。

5.3.1 硬件控制系统测控软件设计

硬件控制系统测控软件主要是实现网络控制，核心功能是解决本设计硬件控制系统中多个模块同时建立网络通讯的问题。在程序运行后，弹出的程控天文台硬件系统控制面板界面如图 5-5 所示。使用时，用户通过输入不同模块的 IP 地址和端口，实现对不同模块的连接，发送与接收的消息会实时的显示在左边文本区域，该功能主要在软件调试与开发中使用。软件测试用于长时间稳定性测试，该功能可以在特定时长随机产生一定数量的测试命令，并限定两组相邻网络命令时间间隔不小于 1 秒钟。本软件的控制面板界面根据功能可以分成菜单、显示、控制和测试 4 个区域。



图 5-5 测控软件控制界面

Fig.5-5 Measurement and control software control interface

(1) 菜单区域

菜单区域包括“文件”和“帮助”两个下拉栏。“文件”包括退出程序功能、保存日志功能和保存上一次的修改功能。“帮助”中有软件使用方法的介绍。

(2) 显示区域

文本区域实现基本信息的显示，包括网络连接信息显示、操作命令显示、程序执行信息显示、接收信息显示、本机日期显示等。“清除显示”按钮可以实现清空文本区域。“清除发送”按钮可以实现清空控制区内 3 个发送文本框的内容。

(3) 控制区域

控制区域可以分成 3 大块，分别为设备模块网络设置区域、监控模块网络设置区域和平顶模块网络设置区域。每个网络操作区域都有 3 个文本框，分别用来输入服务器 IP 地址、端口以及操作命令。点击“连接”按钮实现建立本模块 socket

流通道，并将连接信息附加系统时间传递显示区域显示，同时按钮文本内容会从“连接”变成“断开”。再一次单击则又会变成“连接”，以此判断目前连接与否的状态。“发送”按钮实现将命令消息给服务器，并将消息附加系统时间传递显示区域显示。

(4) 测试区域

测试区域设计两个文本框，第一个文本框中输入随机数产生需要设定的时间，单位为秒。第二个文本框输入测试的次数。“开始测试”按钮实现单击后，建立 3 个 socket 流通道，开启 2 个线程，开启一个定时器，在设定时间内循环生成 2 个随机数发送给服务器。期间不断接受服务器发送来的数据信息并附加当前时间显示，同时将显示区域的状态信息输出保存为.TXT 文件。

5.3.2 软件实验调试

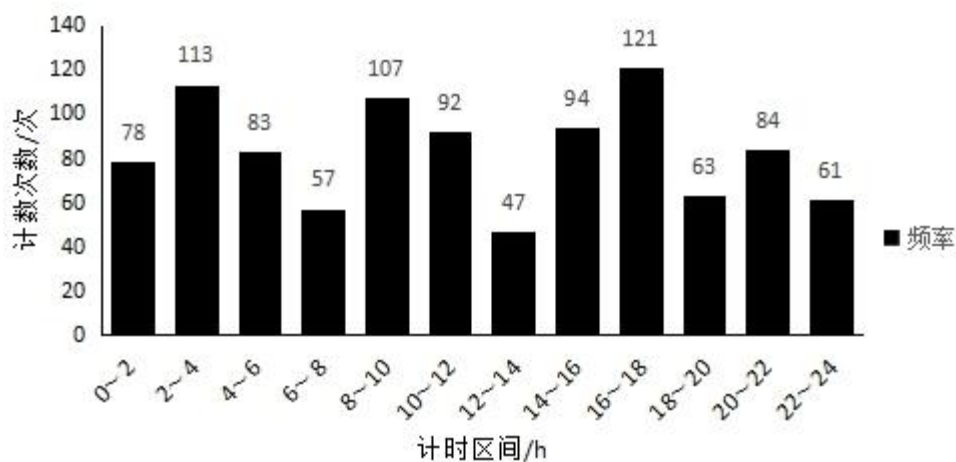


图 5-6 系统稳定性测试发送统计图

Fig.5-6 System stability send test chart

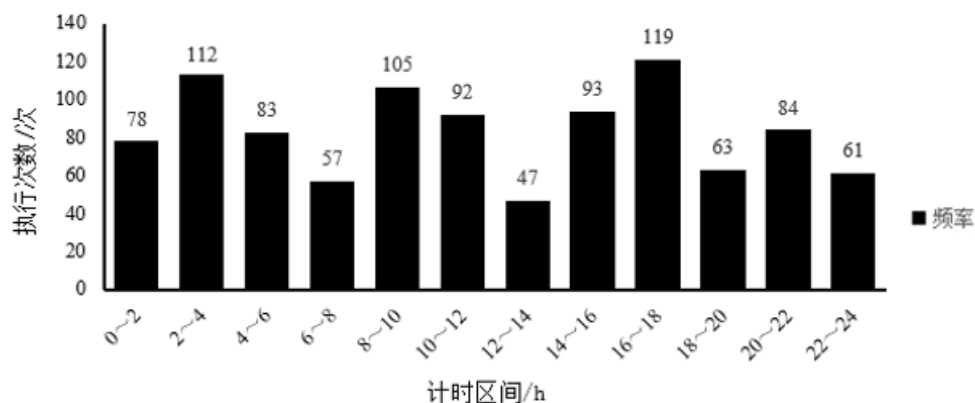


图 5-7 系统稳定性测试执行统计图

Fig.5-7 System stability implement test chart

以上工作都完成后，对硬件系统进行功能性和稳定性测试。系统接入 5V 电源，将上一节中的驱动逻辑代码烧写到芯片当中，插入 SIM 卡，通过网线将三个网络接口连接到交换机上，启动远程天文台调试软件并在软件中输入各模块对应 IP 和端口号，建立连接。测试方法是设定时间区间为 24 小时，软件在此时间区间内随机产生 1000 条控制命令，通过发送数据与返回的监控数据的对比验证系统的可靠性，网络控制命令发送的频率如图 5-6 所示，网络控制命令执行的频率如图 5-7 所示。图中横坐标为统计的时间段，每两小时作为一个统计段，纵坐标分别是该时间段内发送的命令次数和执行的命令次数。同时，在网络正常和突发中断的条件下分别通过短消息和按键触发控制指令，查看是否可以顺利执行。经过验证，在室温条件下，经过 24 小时的稳定性测试，数据正确率可以满足要求，另外在网络中断的条件下也进行了测试，可以实现设备的控制，系统稳定性可靠。

5.4 本章小结

本章主要对远程天文台硬件控制系统进行驱动程序设计，并对整个硬件控制系统进行了性能测试。首先结合本文设计需求，从宏观整体的角度讲述硬件控制系统的驱动软件设计，然后根据整体驱动设计功能要求，具体讲解硬件系统中各个模块的程序设计。此外本文还设计了控制命令编码表，方便用户使用本系统。驱动软件设计完成后，为了方便对本设计进行调试测试，进一步开发了专用的测控软件，并对整个硬件控制系统做了功能和稳定性测试，系统稳定可靠。

结 论

本文针对远程天文台设计过程中硬件设备控制问题展开研究，提出了一套标准化的硬件控制系统。系统作为观测系统和各观测设备的桥梁，连接远程天文台常用设备，实现集中操作控制。具体实现过程如下：

（1）调研远程天文台观测常用功能，通过模块化设计，将功能整合设计出整体功能模块框图。模块功能确定后，根据需求选出合理的元器件芯片，由芯片功能接口设计出远程天文台整体逻辑连接图。

（2）通过电路设计软件进行硬件系统电路原理图设计。首先，根据元器件用电需求合理设计电源分配网络。其次，结合各芯片说明书对核心芯片进行最小系统电路设计。最后，以几个核心芯片为中心设计外围控制电路和系统监控电路。

（3）结合信号完整性、电磁兼容性和电源完整性相关理论知识，完成 PCB 叠层设计、PCB 元器件布局、PCB 布线等设计。最后，联系 PCB 厂家，设计 PCB 加工工艺制作出 PCB 成品。

（4）使用 C 语言为设计好的 PCB 编写软件驱动程序，并使用 JAVA 语言为硬件控制系统设计专用上位机测控软件。最后，使用设计好的测控软件对硬件系统的整体功能和稳定性进行实验测试，证实设计可靠。

本文初步完成了远程天文台硬件控制系统，经过一些测试可以满足要求。但由于精力和知识有限，仍然存在一些设计不周的地方，有待进一步研究改进：

（1）SIM800C 是基于 GSM/GPRS 实现通讯。未来可以将 2G 芯片换成 4G 或 5G 芯片，更有利于后期功能扩展。

（2）现场控制继电器接口较少，后期可以添加更多的继电器，方便用户添加更多设备。

（3）驱动程序中基于手机控制的部分，短信息只能发送英文字符，而中文字符则无法识别，后期可以在程序中加入 Unicode 编码，实现解析中文短信内容。

参考文献

- [1] McNall J F, Miedaner J L, Code A D. A computer-controlled photometric telescope[J]. The Astronomical Journal ,1968 ,73: 756—761.
- [2] Lee R H, MacQueen R M, Mankin W G. A computer-controlled infrared eclipse telescope[J]. Applied Optics ,1970 ,9(12) : 2653—2657.
- [3] Dennison E W. Computer control of large telescopes[C]// R M West. Proceedings of Conference on Large Telescope Design, ESO/CERN Conference. Geneva ,1971: 363.
- [4] Robinson L B. On-line computers for telescope control and data handling [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1975, 13: 165—185.
- [5] Castrotirado A J. Robotic Autonomous Observatories: A Historical Perspective[J]. Advances in Astronomy ,2010 ,2010(1687-7969):8.
- [6] Stirling A. Colgate ,Elliott P. MOORE.A Fully Automated Digitally Controlled 30-inch Telescope[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific ,1975 ,565-575.
- [7] Castro-Tirado A J. Robotic autonomous observatories:a historical perspective[J]. Advances in Astronomy ,Volume 2010(2010), Article ID 570489 ,8 pages
- [8] Colgate S A, Moore E P ,Carlson R.A fully Automated Digitally Controlled 30-Inch Telescope[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1975 ,87(518):565-575.
- [9] Genet R M, “Introduction to automatic photoelectric telescopes(APTs),” International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication, no. 25, pp. 1—25, 1986.
- [10] Baliunas S, Boyd L J, R. Genet M, Hall D S, and Criswell S, “Automatic photoelectric telescope III the Mount Hopkins site,” International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication, no. 22, p. 47, 1985.
- [11] Genet R M, Boyd L J, Kissell K E, et al. THE AUTOMATIC PHOTOELECTRIC TELESCOPE SERVICE[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1987, 99(617):660-667.
- [12] 崔辰州, 李建, 蔡栩, 等. 程控自主天文台网络的发展 [J]. 天文学进展, 2013 ,31(2):141-159.
- [13] 徐明, 黄永锋. 伽玛射线暴及其余辉研究进展 [J] . 天文学进展, 2012 ,30(1) : 17—34.
- [14] 孙菁菁. 浅谈天文学研究对人类发展的意义[J]. 科技风, 2015(18):209.
- [15] 赵永恒. 天文望远镜的自动观测技术[J]. 科研信息化技术与应用, 2012,3(04):11-16.
- [16] 侯金良. 天文选址的主要参数及测量方法[J]. 天文学进展, 1994(02):126-132.
- [17] Wang J , Liu J J , Tang P Y , et al. A Study on Generic Models of Control Systems of Large Astronomical Telescopes[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, 125(932):1265-1276.
- [18] 肖延胜. 致力于中国时域天文在活动星系核领域的前沿研究——记中山大学物理与天文学院特聘研究员张雪光[J]. 海峡科技与产业, 2016(05):158-159.

- [19] 薛艳杰, 薛随建, 朱明, 崔辰州. 天文望远镜技术发展现状及对我国未来发展的思考[J]. 中国科学院院刊, 2014,29(03):368-375.
- [20] Smith A B ,Caton D B , Hawkins R L. Implementation and Operation of a Robotic Telescope on Skynet[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific ,2016 ,128(963):055002.
- [21] 陆栋宁, 黄垒, 陈颖为等. 85cm 天文望远镜圆顶和天窗自动化系统研制[J]. 天文研究与技术 ,2008 ,386-391
- [22] Wren J , Borozdin K , Brumby S ,et al. A Distributed Control System for Rapid Astronomical Transient Detection[M]// Distributed control system for rapid astronomical transient detection. 2002:156-163.
- [23] 吴国梁. 计算机控制的赤道仪系统设计[D]. 浙江大学 ,2008.
- [24] 陈林, 李淑琴, 林辉. 数字电源管理技术及电源管理总线[J]. 电气传动, 2007, 37(8):3-5.
- [25] 万育智, 戴灿澂. 用于 1.56 米天体测量望远镜的微计算机控制系统[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1983(00):262-272.
- [26] 程景全.天文望远镜原理和设计[M].北京:中国科学技术出版社 , 2004 ,119 -120.
- [27] 彭焕文, 辛玉新, 寿圣, 王传军, 伦宝利, 范玉峰. 丽江天文观测站全天相机介绍[J]. 天文研究与技术, 2015,12(01):89-95.
- [28] 张超, 郑勇, 李长会. GPS 在天文测量中的应用[J]. 全球定位系统, 2002 ,27(1):33-35.
- [29] 唐鹏毅. 南极多色测光太阳望远镜自主观测控制系统研究[D]. 中国科学技术大学, 2017.
- [30] 付映雪. NVST 分布观测控制系统框架研究[D]. 昆明理工大学, 2018.
- [31] Wren J A , Brumby S P ,Vestrand W T , et al. Distributed control system for rapid astronomical transient detection[C]// Advanced Global Communications Technologies for Astronomy II. International Society for Optics and Photonics ,2012:156-163.
- [32] Querci F R ,Querci M. Robotic telescopes and networks: New tools for education and science[J]. Astrophysics & Space Science , 2000 ,273(1-4):257-272.
- [33] 彭亚杰, 季凯帆, 梁波, 等. ASCOM 在选址望远镜远程控制中的可用性研究[J]. 天文研究与技术 ,2013 ,10(1):49-54.
- [34] 袁智. 天文选址自动系统中数据采集与远程监测关键技术研究[D]. 昆明理工大学, 2016.
- [35] Wang L , Cui X , Lamb D , et al. Time Domain Research in Astronomy[C]// Astro: the Astronomy & Astrophysics Decadal Survey. astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, 2009.
- [36] Guidorzi C ,Monfardini A ,Gomboc A ,et al. The Automatic Real - Time Gamma - Ray Burst Pipeline of the 2 m Liverpool Telescope[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific ,2006 ,118(840):288-296.
- [37] 肖延胜. 致力于中国时域天文在活动星系核领域的前沿研究——记中山大学物理与天文学院特聘研究员张雪光[J]. 海峡科技与产业 ,2016(5):158-159.

- [38] 丁一. 我国公众天文知识现状及天文教学方法研究[D]. 北京师范大学 ,2009
- [39] Im M , Choi C , Kim K. Lee Sang Gak Telescope (LSGT): A Remotely Operated Robotic Telescope for Education and Research at Seoul National University[J]. Journal of Korean Astronomical Society ,2015 ,48.
- [40] 叶泉志. 业余天文学在中国:现状与未来[J]. 天文研究与技术, 2018,15(02):245-256.
- [41] Han J , Wang C , Fan D , et al. Amateur public observatory I: The observatory and hardware integration system[J]. Astronomy and Computing, 2018, 25:89-93.
- [42] 李艳华, 陈慧明. 单片机控制 GSM 手机的技术及应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2005(02):73-75.
- [43] 胥泽飞. 基于 Zynq 的智能相机硬件设计[D]. 南京邮电大学, 2018.
- [44] 张木水, 李玉山. 信号完整性分析与设计[M]. 电子工业出版社, 2010.
- [45] 姜付鹏. 电磁兼容的电路板设计[M]. 机械工业出版社, 2011.5.
- [46] 王键, 张宗寅, 袁燕燕. 电容在 PCB 电磁兼容设计中的选择[J]. 科技创新与应用, 2018, 4:101-104.
- [47] 井探亮. 多层 PCB 层叠结构设计及分析[D]. 内蒙古大学, 2017.
- [48] 陈明文. 提高抗干扰能力的 PCB 布局[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 9(21):148-150.
- [49] 谢平. PCB 设计与加工[M]. 北京理工大学出版社, 2017.

攻读硕士学位期间所发表的学术论文

- 1 苏丽颖, 王川中.程控天文台硬件控制系统控制软件 V1.0. 软件著作权.登记号: 2018SR836807, 2018-10-19.
- 2 苏丽颖, 王川中.程控天文台硬件控制系统测控软件 V1.0. 软件著作权.登记号: 2018SR1016626, 2018-12-14.
- 3 Han J , Wang C , Fan D , et al. Amateur public observatory I: The observatory and hardware integration system[J]. Astronomy and Computing, 2018, 25:89-93.
- 4 韩军, 王川中, 王显海, 樊东卫, 崔辰州, 苏丽颖. 远程天文台集成控制板设计版图 : 中国, 18556871. 8[P]. 2018-11-08.

致 谢

在研究生的学习生活过程中，有很多人给予了我很大的帮助，在此对他们表达由衷的感谢。

首先，最要感谢的是我的恩师苏丽颖老师和校外指导老师崔辰州老师。本篇论文的完成离不开两位导师的悉心指导。导师们以扎实的理论基础、严谨的治学态度、认真的工作作风、和蔼耐心的态度指导着我，使我受益匪浅。在论文编写过程中，两位导师更是在百忙中多次指导修订，提出了许多宝贵的意见，使我的论文最终得以完成。在此，我衷心地感谢苏老师和崔老师，两位导师对我科研和生活上的帮助我终生难忘。

特别感谢国家天文台的韩军老师，在我论文课题开展过程中不仅多次提供指导意见，而且更是以身示教，使得课题能够保质保量的完成。在课题遇到困难时，韩老师总能给予帮助，不仅提供宝贵意见，而且教我解决问题的方法。韩老师认真严谨的态度值得我一生学习。

感谢国家天文台的樊东卫老师、许允飞老师、陶一寒老师在科研和学习上的指导和帮助。感谢国家天文台李正、韩叙、李珊珊、米琳莹、杨丝丝、李长华等在学习和生活上的关心和照顾。同时感谢中国科学院大学张磊同学，是我业余天文学知识的领路人。

感谢余跃庆、高国华、刘婧芳老师在课题方面给予极大支持和指导，在课题的研究过程中，学院的领导和老师也给予了热情的指导与帮助，在此表示衷心的感谢和崇高的敬意。

在平时的学习生活中，感谢实验室张双博士师兄、孔凡臣博士师兄、崔顺、王建、程艳霞、刘旋、陈振伟、以及师弟张会鹏、师妹魏洪苗等，在我生活及论文撰写过程中提供的帮助和支持。他们营造出的良好学习氛围是我研究得以顺利进行的保障，真诚无私的友谊和团结互助的情谊也助我解除了一些生活上的困难。

感谢我的家人始终如一的支持，没有他们的关心与理解我不会顺利地完成学业。尤其感谢我的父母，是他们给了我广阔的天空。他们永远都是我最可靠、最坚强的后盾，他们的关怀永远是我不断前进的动力源泉。

最后，再次由衷地感谢所有帮助过我的老师、同学、工作人员，谢谢你们！

王川中
2019年5月

