

51DANPIANJI YUANLI JI YINGYONG JISHU

51单片机



原理及应用技术

高 艺 郭振武 赵二刚 主编



化学工业出版社

51DANPIANJI YUANLI JI YINGYONG JISHU



51单片机》》》

原理及应用技术

高 艺 郭振武 赵二刚 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

51 单片机原理及应用技术/高艺, 郭振武, 赵二刚主编.
北京: 化学工业出版社, 2016.6
ISBN 978-7-122-26884-6

I. ①5… II. ①高… ②郭… ③赵… III. ①单片
微型计算机 IV. ①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 085790 号

责任编辑: 卢小林
责任校对: 王素芹

文字编辑: 张绪瑞
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 371 千字 2016 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

20 世纪 70 年代，单片机诞生了。此后，以 8051 系列为代表的 8 位单片机在全世界范围内流行和发展，在各个领域得到了广泛的应用。近年来，虽然以 ARM 为代表的 32 位控制器作为后起之秀也在迅速地发展，但 51 系列单片机在工业控制领域的应用仍然无法替代，它将继续发挥巨大的作用。

编者在高校从事单片机教学多年，在授课过程中，感觉单片机的理论比较艰涩，如果理论教学和实验教学脱节的话，很多学生在学习理论知识的时候就容易产生困惑和畏难情绪，在实验中也不能很好地将理论知识应用于实践开发。通过多年的探索，编者认为，将理论和实践教学统一起来，在实验中学习理论知识，有助于加深学生对于理论知识的理解，学习起来更加直观、生动。基于这个想法，编写了本教材。

本书的一个突出的特色是，注重理论和实践的结合。全书以实际应用为背景，以工程项目的设计和实现的全过程为主线。学习者以一名电子系统开发人员的角色，一步步地完成整个电子系统的设计。这样的学习方式有很多的优点：

首先，市场上的很多教材都是按知识点划分、以章节为单位介绍单片机的理论知识，但往往学习者学完了整本书，仍然无法有效地将这些知识点有机地串联、组织起来，应用到实际开发当中去。而本书一开始就为学习者展示了这个精心选取的、颇具代表性的单片机项目的功能模块、核心硬件模块及知识点结构，学习者首先在脑海中建立的是一个完整的单片机知识结构框架。在这个基础上，在本教材的指导下，不断地充实和完善这个知识结构，这样的学习方法效率高，目标明确，有助于知识的系统化和整体化。

其次，本书不仅重视理论和实验知识的传授，同时注重引导和培养学习者的项目开发思维，传授实际的项目开发经验。本书的第 2 章，着重介绍了电子系统方案设计流程、项目需求分析、系统方案设计、硬件结构建设等内容，并以流程图、框架图的方式直观地展示出来。这些内容在很多教材中是没有的，却是项目开发者在项目前期必须要面对和思考的，本书设身处地为学习者着想，在这方面着重加以指导。

此外，在本书的指导下，学习者以一名电子系统开发人员的角色，从零开始，经历了项目方案设计、软硬件开发环境建立、语言基础学习、单元模块学习和设计，最终将所有知识点整合起来，对项目进行综合设计和实现。在这个过程中，学习者如同经历了一次真实的项目开发过程。即使是初学者，在本书的指导下，每完成一个模块的设计和实现，都会获得一定的成就感，增强单片机学习的兴趣和乐趣。而随着这个项目的完成，看到亲手实现的这个综合性高、功能复杂的电子系统，学习者无论是在理论知识、动手能力、实践经验亦或是学习信心等方面，都将做好迎接更大挑战的准备。

在实际编写的过程中，笔者对于教材的细节也有较多的考虑和设计：考虑到了学习者的实际情况，注重运用 Proteus 和 Keil 进行软件仿真，使得学习者在开始学习的时候，不需要花

时间或金钱去制作或购买开发板和硬件；在程序基础的部分，介绍了汇编语言和 C 语言两种语言基础，这两种语言各有优点，建议学习者不要偏废，尽量全部掌握；为了使学习者一目了然，直观形象，笔者绘制了比较多的程序和设计流程图，特别适合初学者学习和理解；每一个步骤的软件截图和程序示例（包括注释）都非常详细，即使是自学者也能通过对照学习轻松掌握软件操作和程序设计。

本书除作为高等学校自动化相关专业教材外，还适合单片机开发爱好者、51 单片机开发技术人员及社会培训班学习和使用。

本书由南开大学高艺、郭振武、赵二刚主编，高艺完成了第 1 章和第 4 章的编写，赵二刚完成了第 3 章 1-5 节的编写、孟庆斌完成了第 3 章 6-8 节的编写，李晓晨完成了第 2 章的编写。本书配套实验系统的软硬件由张红宾、程如岐、鞠兰、赵鹏、葛付伟、刘广伟共同设计完成。司敏山、李文燕、李艳红、赵云红、刘冰雨、郭振武、王艳芳、张维、郑胤完成了课程资源建设，审阅全书并对所有程序进行了校验。在本书的编写过程中，得到了张宪老师大力支持，提出了不少宝贵意见，在此一并致以衷心的感谢。

学习者在阅读本书的过程中，有任何疑问或是交流探讨可以发邮件到 mcu_nk@126.com。相关同行专家和老师也欢迎与作者联系，共同参与本书的研究和完善工作，对于本书存在的疏漏之处，敬请批评指正。

编者
于南开大学

目录

CONTENTS

第1章 项目分析与项目规划	1
1.1 基础知识：微控制器系统概述	1
1.1.1 微控制器的发展	1
1.1.2 单片机的应用领域	2
1.1.3 电子系统方案设计流程	2
1.1.4 单片机的选型	2
1.2 项目课题：智能温室大棚环境监测终端	3
1.2.1 项目背景与意义	3
1.2.2 项目需求分析	4
1.2.3 系统方案设计	5
1.2.4 智能温室大棚环境监测的终端方案设计	6
1.2.5 知识点分析	6
第2章 准备任务	8
2.1 准备任务 1：单片机开发环境	8
2.1.1 开发板介绍	8
2.1.2 软件开发环境	12
2.1.3 准备子任务 1-1：LED 闪烁	13
2.2 准备任务 2：MCS-51 单片机组成原理	33
2.2.1 MCS-51 单片机组成结构	33
2.2.2 指令时序	41
2.3 准备任务 3：汇编语言基础	45
2.3.1 MCS-51 指令系统	45
2.3.2 汇编语言程序设计	56
2.3.3 汇编语言编程实例分析	57
2.4 准备任务 4：C51 语言基础	61
2.4.1 C51 基本语法	61
2.4.2 C51 编程风格	81
第3章 单元任务	84
3.1 单元任务 1：人机交互模块	84
3.1.1 LCD 显示	84
3.1.2 键盘接口	91

3.1.3 人机交互模块单元任务	94
3.2 单元任务 2: 安全红外检测模块	109
3.2.1 中断系统结构与原理	109
3.2.2 人体红外传感器 (PIR) 模块 HC-SR501	115
3.2.3 安全红外检测模块单元任务	116
3.3 单元任务 3: 实时时钟模块	122
3.3.1 定时/计数器的结构与原理	122
3.3.2 实时时钟模块单元任务	126
3.4 单元任务 4: PWM 电机控制	137
3.4.1 PWM 电机调速	137
3.4.2 STC12C5A60S2 系列单片机 PCA/PWM 应用	139
3.4.3 PWM 电机控制单元子任务	143
3.5 单元任务 5: 无线通信模块	148
3.5.1 串行口结构与原理	148
3.5.2 STC12C5A60S2 串口 2 原理及应用	158
3.5.3 蓝牙串口模块——HC-05	160
3.5.4 虚拟串口仿真环境的建立	162
3.5.5 单元子任务	168
3.6 单元任务 6: 光照强度检测模块	178
3.6.1 STC12C5A60S2 集成 ADC	179
3.6.2 光敏电阻	182
3.6.3 单元子任务 6-1: 光照强度测量与显示	183
3.7 单元任务 7: 温湿度采集模块	186
3.7.1 DHT11 温湿度传感器	186
3.7.2 单元子任务 7-1: 室内温湿度采集及显示	188
3.8 单元任务 8: 数据存储模块	193
3.8.1 AT24C02 存储器原理及应用	193
3.8.2 单元子任务 8-1: AT24C02 读写检测	199
第 4 章 综合任务: 智能温室大棚环境监测终端	208
4.1 任务目标	208
4.2 流程图分析	209
4.3 C51 程序	211
参考文献	216

第1章

项目分析与项目规划

1.1 基础知识：微控制器系统概述

1.1.1 微控制器的发展

20 世纪 70 年代初微处理器（MPU，Micro Processor Unit）问世后，将具有 CPU 功能的半导体芯片嵌入到电子系统中，逐渐成为电子系统设计领域的一种现代设计方法。尤其是 20 世纪 80 年代以后，随着微控制器（MCU，Micro Controller Unit）、数字信号处理器（DSP，Digital Signal Processor）、可编程逻辑器件（PLD，Programmable Logic Device）以及相关软件等技术的飞速发展，人们对电子系统功能的要求变得愈来愈复杂和智能。

微控制器（Micro Controller Unit，简称 MCU）也被称为单片机，采用超大规模集成电路技术把具有数据处理能力的微处理器 CPU、随机存取数据存储器（RAM，Random Access Memory）、只读程序存储器（ROM，Read-Only Memory）、输入/输出电路（I/O 接口），可能还包括定时计数器、串行通信口、显示驱动电路（LCD 或 LED 驱动电路）、脉宽调制电路（PWM，Pulse Width Modulation）、模拟多路转换器及 A/D 转换器等电路，集成到一块单块芯片上，构成一个最小而完善的计算机系统。单片机有着微处理器所不具备的功能，它可单独完成现代工业控制所要求的智能化控制功能，这是单片机最大的特征。单片机控制系统实现了智能化，从根本上改变了传统的控制方法和设计思想，是控制技术的一次革命，是一座重要的里程碑。现在单片机的应用领域越来越广泛，例如通信产品、家用电器、智能仪器仪表、过程控制和专用控制装置等。

在市场上，单片机品种繁多，各具特色，主要产品有 MCS-51 系列、Motorola 公司的 68 系列、Microchip 公司的 PIC16F/18F 系列等。MCS-51 是对所有兼容 Intel 8031 指令系统的单片机的统称，起源于 Intel 的 8031 单片机，后来随着 Flash 技术的发展，成为应用最广泛的 8 位单片机之一，其代表型号是 Atmel 公司的 AT89 系列。Intel 公司将 MCS-51 的核心技术授权给了其他公司，很多公司为满足不同的需求推出了功能略有不同 MCS-51 系列的兼容机型。目前主要的生产商及型号有：

- ① Intel：80C31、80C51、87C51，80C32、80C52、87C52 等。
- ② Atmel：89C51、89C52、89C2051、89S51、89S52 等。
- ③ Philips、华邦、Dallas、Siemens（Infineon）等公司的许多产品。
- ④ 国产宏晶 STC 单片机。

其中，STC 单片机以其低功耗、廉价、稳定的性能，占据着国内 51 单片机较大市场。

1.1.2 单片机的应用领域

单片机广泛应用于仪器仪表、家用电器、医用设备、航空航天、专用设备的智能化管理及过程控制等领域，大致划分如下。

(1) 在智能仪器仪表上的应用

单片机具有体积小、功耗低、控制功能强、扩展灵活、微型化和使用方便等优点，结合不同类型的传感器，可实现诸如电压、功率、频率、湿度、温度、流量、速度、厚度、角度、长度、硬度、元素、压力等物理量的测量。采用单片机控制使得仪器仪表数字化、智能化、微型化，且功能比起单纯采用模拟或数字电路更加强大，特别适用于精密的测量设备，如功率计、示波器、各种分析仪等。

(2) 在工业控制中的应用

单片机可以用来构成形式多样的控制系统、数据采集系统。例如工厂流水线的智能化管理、电梯智能化控制、各种报警系统、与计算机联网构成二级控制系统等。

(3) 在家用电器中的应用

现在的家用电器基本上都采用了单片机控制，从电饭煲、洗衣机、电冰箱、空调机、彩电等，无所不在。

(4) 在计算机网络和通信领域中的应用

当今的通信设备基本上都实现了单片机智能控制，无论是手机、电话机、小型程控交换机、楼宇自动通信呼叫系统、列车无线通信，还是日常工作中随处可见的移动电话、集群移动通信、无线电对讲机等等。

(5) 单片机在医用设备领域中的应用

单片机在医用设备中的用途也相当广泛，例如医用呼吸机、各种分析仪、监护仪、超声诊断设备及病床呼叫系统等等。

此外，单片机在工商、金融、科研、教育、国防航空航天等领域也都有着十分广泛的用途。

1.1.3 电子系统方案设计流程

单片机的应用系统由硬件和软件所组成。硬件指单片机、扩展的存储器、输入输出设备、控制设备、执行部件等组成的系统，软件是各种控制程序的总称。硬件和软件只有紧密相结合，协调一致，才能组成高性能的单片机应用系统。在系统的研制过程中，软硬件的功能总是在不断地调整，以便相互适应，相互配合，以达到最佳性能/价格比。图 1-1-1 所示为一个单片机系统方案设计的工作流程。

1.1.4 单片机的选型

面对种类繁多的单片机，在实际设计与应用时应该把握几个选型原则。

① 功能：首先是功能是否满足需要。在实际的开发中，可能会遇到特殊的需求，例如，需要两个串口，需要 IIC 总线，需要 CAN 总线，或者需要很大的程序空间，等等。不同的厂家生产了许多含有 MCS-51 内核的不同类型的单片机，或许有的正好可以满足需求，选择合适的单片机能够减少硬件扩展的麻烦。

② 性能：在实际的应用中，单片机的运行速度和抗干扰能力都是需要考虑的。

③ 价格：对于一个产品来说，价格是决定其竞争力的一个重要因素。因此，在选型时一定要注意，尽量不要选择具有许多不必要功能的单片机，那样会增加产品的成本。

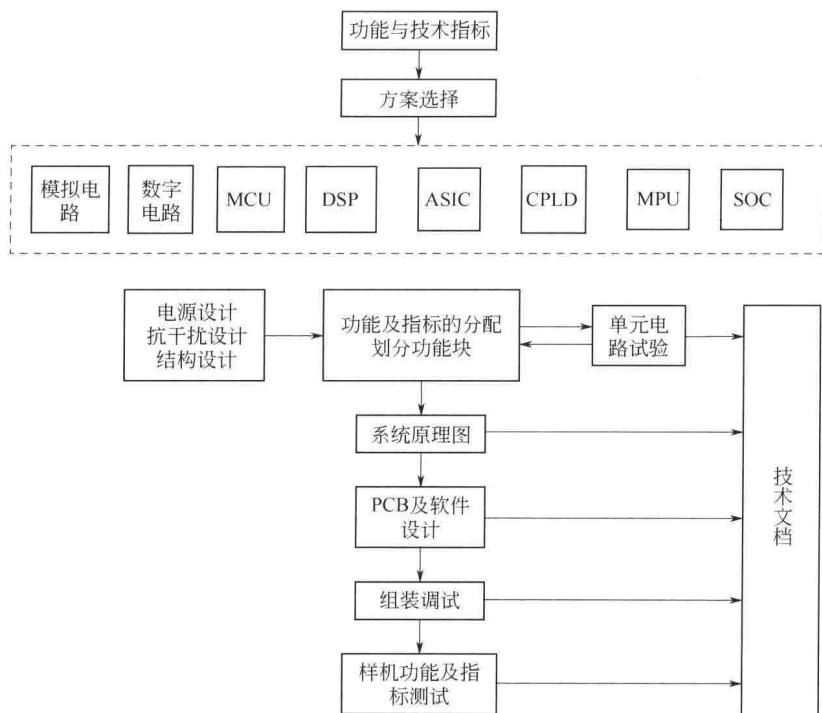


图 1-1-1 单片机系统方案设计的工作流程

④ 研发成本：研发成本是非常容易被忽略的一个因素。选择一款开发人员熟悉的单片机，将大大缩短开发周期。对一个产品而言，产品推向市场的时间往往是非常重要的，有时虽然只是稍晚了几个月，但是很可能已经很难推广了。

⑤ 系统冗余：一个系统的设计不可能尽善尽美，考虑到以后的系统优化，需要预留一定的资源。

⑥ 生产采购：有的单片机在国内很难购买，有的需要订货，这些情况在实际的生产中都造成生产周期的延长与成本的增加。选择单片机的时候，一定要选择容易购买、且有较长生命周期的产品。

1.2 项目课题：智能温室大棚环境监测终端

理论与实践相结合是学习单片机的最有效方法。本书以实际应用为背景，以工程项目的设计和实现的全过程为主线，学习者应将自己设定为一名电子系统开发人员，参与系统设计与编程工作，一步一步地完成整个电子系统设计。如果学习者能够对书中的论述进行批判性的学习，根据自己对实际应有需求的理解，发现原系统的不足之处，并有针对性地进行改进，将能达到更好的学习效果。

在智慧农业的背景下，我们以设计温室大棚监测系统为目标，展开微控制器系统设计的学习。在学习中，我们以实际应用需求为背景，从项目需求开始，将温室大棚监测系统的各个功能模块进行分解，将功能模块作为子任务，进行有针对性的学习。最终，将功能模块进行综合，形成一个完整的系统设计。

1.2.1 项目背景与意义

现代农业正在朝着智能化、精准化和集约化的方向发展。如何方便、有效地对温室农作

物的生长参数进行监测和控制,如何提高农业生产的信息化水平是目前设施农业、智能农业研究的重点。国内外都进行深入细致的研究,特别是发达国家在这方面应用相当广泛。自20世纪70年代以来,国外温室农业发达国家在温室环境配套工程技术方面也进行了大量研究,并取得了一些技术成果。以荷兰为代表的欧美国家温室园艺规模大、自动化程度高、生产效率高,温室农业主体设备温室内的光、水、气、肥等均实现了智能化控制;以色列的现代化温室可根据作物对环境的不同要求,通过计算机对内部环境进行自动监测和调控,实现温室作物全天候、周年性的高效生产;美国、日本等国还推出了代表当今世界最先进水平的全封闭式生产体系,即应用人工补充光照、采用网络通信技术和视频技术进行温室环境的远程控制与诊断、由机械人或机械手进行移栽作业的“植物工厂”,大大提高了劳动生产率和产品产出率。当前,我国的温室农业发展正在朝着智能化、精准化、信息化迈进,一些研究和试验正在紧张、有序地开展。国内有关科研院所温室环境管理系统、栽培模式、温室降温、补光、除湿和增施 CO_2 等方面也展开了卓有成效的研究工作,初步形成了具有中国特色的现代化设施农业技术体系。但是,国内温室农业整体上环境调控技术与设备落后,智能化程度不高,对于农作物的生长参数测控缺乏理论基础与量化指标。

本项目通过传感网络上的各个传感器监测温室里农作物的各种生长参数,利用传感器技术、Internet和GPRS技术把监测的数据进行传输、存储、分析,把分析得到的结论性数据用于对农作物的生长环境参数进行反向控制、调节,达到测试—分析—调节—测试的闭环控制。最终实现基于经济最优的温室环境参数调控和优化,为实现温室的高效、优质、高生产提供科学依据。

1.2.2 项目需求分析

温室环境包括非常广泛的内容,但通常所说的温室环境主要指空气与土壤的温湿度、光照等。智能温室监测系统通过各种传感器接收各类环境因素信息,通过逻辑运算和判断控制相应温室设备运作以调节温室环境。本系统主要具备以下几部分功能:

① 温湿度监测:通过温湿度传感器监测大棚室外空气环境温湿度、室内空气环境温湿度、地表温湿度、土壤温湿度等,并能对数据进行采集、分析运算、控制、存储、发送等。

② 光照度监测:通过光感和光敏传感器监测记录温室大棚内光线的强度,可以直接与相关的补光系统、遮阳系统等设备相连,必要时自动打开相关设备。通过无线传输技术将相关数据传送到用户监控终端。

③ CO_2 、 O_2 浓度监测:在温室大棚内部署 CO_2 浓度传感器,实时监测温室中 CO_2 的含量,当浓度超过系统设定阈值范围时,通过无线传输技术将相关数据传送到用户监控终端,由相关工作人员做出相应调整。

④ 报警控制:用户可设定某些参数指标的上限和下限。比如大棚温度应在 $30\sim 15^\circ\text{C}$ 之间,高于或低于这个温度范围都会产生报警信息,并在上位机中控平台和现场控制节点显示出来。

⑤ 灌溉、风机、遮阳调光等控制:水灌溉、风机控制以及遮阳调光系统,根据植物生长模式,可通过自动、手动方式进行操作。

⑥ 红外安全监测:对于外来人员闯入进行检测与报警。

⑦ 远程控制:现场采集设备将采集到的数据通过有线、无线、3G/2G无线网络传输到中控数据平台,用户从终端可以查看温室大棚现场的实时数据,并使用远程控制功能通过继电器控制设备或模拟输出模块对温室大棚自动化设备,如自动喷洒系统、自动换气系统、自动浇灌系统进行控制操作。

⑧ 监控终端:监控终端通过可视化、多媒体的人机界面实现以下主要功能:

- a. 温室大棚内植物生长环境状况全面显示、查询，包括各种参数、光照强度以及历史数据等；
- b. 向温室大棚内监控系统发出调度命令、调整设备运转状况，确保温室内为植物生长最适宜环境。

1.2.3 系统方案设计

1.2.3.1 系统组成

通常，能够满足上述需求的系统主要由以下三部分组成。

(1) 数据管理层（监控中心）

其中，硬件主要包括工作站电脑、服务器；软件主要包括操作系统软件、数据中心软件、数据库软件、农业温室大棚智能监控管理系统软件平台（采用 B/S 结构，可以在广域网进行浏览查看）、防火墙软件。

(2) 数据传输层（数据通信网络）

采用移动公司的 GPRS 网络传输数据，系统无需布线，构建简单、快捷、稳定。移动 GPRS 无线组网模式具有数据传输速率高、信号覆盖范围广、实时性强、安全性高、运行成本低、维护成本低等特点。

(3) 数据采集层（前端硬件设备）

其中，远程测控成套设备主要包括智能监测终端；传感计量设备主要包括温湿度传感器、二氧化碳传感器、光照传感器、土壤湿度传感器、遮阳幕、湿帘风机等。

1.2.3.2 网络拓扑

系统网络拓扑结构如图 1-2-1 所示。

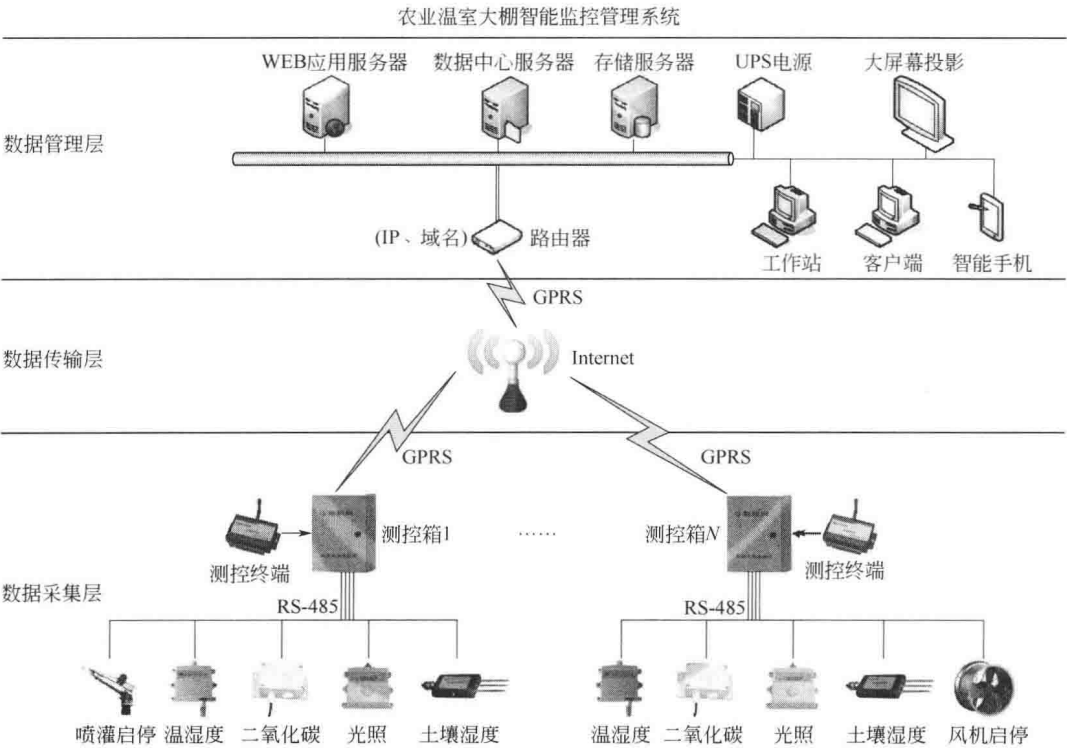


图 1-2-1 系统网络拓扑结构

1.2.3.3 系统方案的精简

为了适应初学者的学习，对智能温室大棚环境监测终端进行了简化。在传感器选择方面，仅选择了具有代表性的温湿度传感器与光照传感器；在远程监控方面，为便于实验，采用蓝牙通信代替 GPRS 通信；在执行机构方面，选择了风机模块，灌溉系统由于实验不便而放弃；在上位机方面，采用安卓智能手机作为上位机，为了简化上位机开发，采用“蓝牙串口”应用软件进行数据获取与传输。

1.2.4 智能温室大棚环境监测的终端方案设计

1.2.4.1 功能模块划分

本设计一共划分为以下 8 个功能模块。

① 人机交互模块：LCD 液晶系统状态显示；状态变化报警提示，告警状态变化，如温度突然升高或降低；系统设置按键输入。

② 安全红外检测模块：人体红外安全检测，对外来人员闯入报警。

③ 风机转速控制模块：根据采集的光照与温湿度信息，控制风机转速，保持温室内环境状态稳定。

④ 远程监控模块：利用蓝牙通信模块，实现安卓智能手机的远程监控。

⑤ 温湿度采集模块：温室大棚内温湿度值的采集。

⑥ 光照强度采集模块：温室大棚内光照值的采集。

⑦ 数据存储模块：温湿度、光照等信息的实时数据存入存储器。

⑧ 实时时钟模块：记录系统运行时间。

1.2.4.2 硬件结构

智能温室大棚环境监测终端硬件结构框图如图 1-2-2 所示。MCU 采用 MCS-51 系列兼容型单片机；人机交互模块采用 128×64 的 LCD 液晶显示模块，独立式按键输入；无线通信模块采用 HC-05 蓝牙串口模块；风机驱动模块采用 L298N 直流电机驱动；温湿度传感器采用 DHT11；光照采集采用光敏电阻；数据存储采用 IIC 存储器 AT24C02。

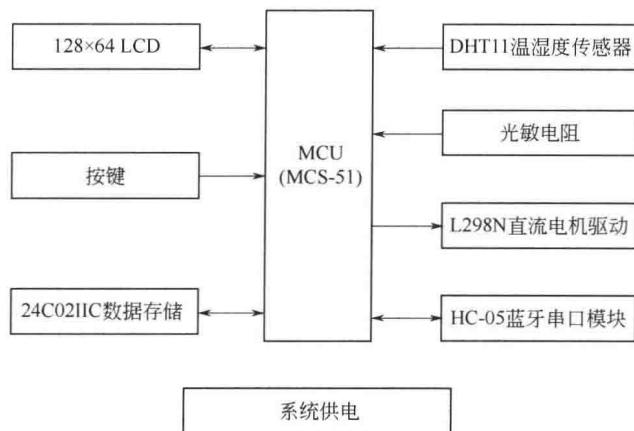


图 1-2-2 智能温室大棚环境监测终端硬件结构框图

1.2.5 知识点分析

将智能监测终端的系统功能划分为多个功能模块，每个功能模块都包含了多个知识点，从中抽取最核心的知识点作为学习的单元任务，最后将多个单元任务进行综合，就可以最终

实现智能温室大棚环境监测终端的设计。温室大棚监测系统各个功能模块、核心硬件模块及知识点划分如图 1-2-3 所示。

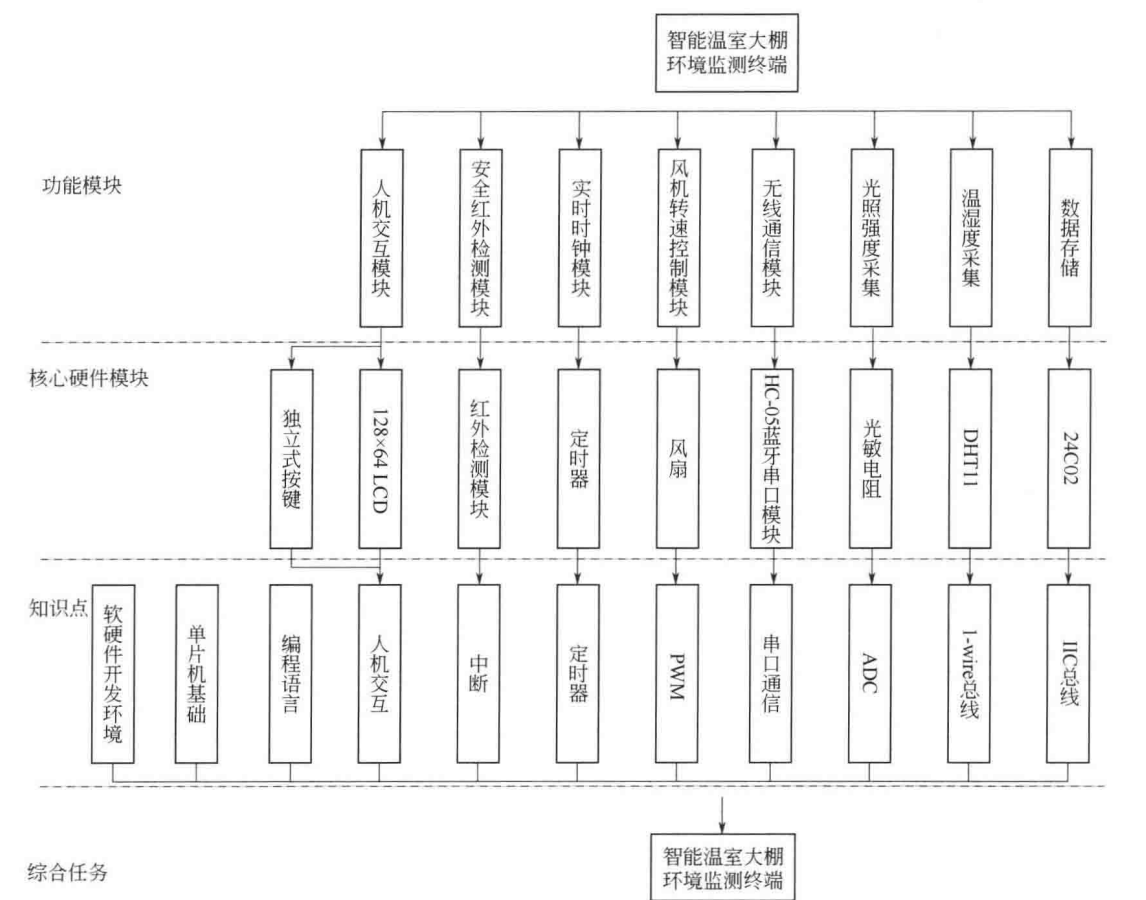


图 1-2-3 温室大棚监测系统各个功能模块、核心硬件模块及知识点结构图

第2章 | 准备任务

2.1 准备任务 1：单片机开发环境

★ 任务目标

- ① 了解单片机开发的硬件开发环境。
- ② 了解单片机开发的软件开发环境。
- ③ 掌握单片机开发的流程。
- ④ 结合准备子任务 1-1 “LED 闪烁”，建立单片机软硬件开发环境，并完成第一个单片机项目的开发。

2.1.1 开发板介绍

(1) 开发板简介

与本书配合的开发板硬件资源如下：

- ① STC12C5A60S2 单片机。
- ② 供电系统：直流 7~12V 或 USB 5V。
- ③ HC-05 蓝牙串口模块。
- ④ DHT11 温湿度传感器。
- ⑤ NRF24L01 接口。

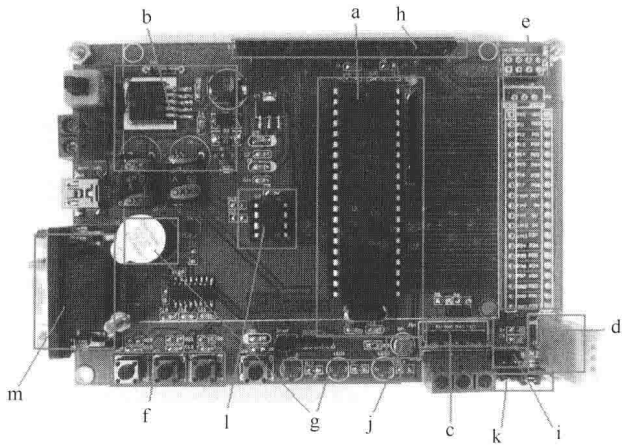


图 2-1-1 开发板实物图

- ⑥ 3 个点触式按键。
- ⑦ 3 个 LED；蜂鸣器。
- ⑧ 128×64 点阵式 LCD。
- ⑨ 人体红外传感器接口。
- ⑩ 光照检查接口。
- ⑪ 直流电机驱动接口。
- ⑫ IIC 存储器。
- ⑬ RS-232 串口接口。

开发板的实物照片如图 2-1-1 所示。

(2) 功能原理图及相关外设模块

- ① MCU 模块，如图 2-1-2 所示。
- ② 电源模块，如图 2-1-3 所示。
- ③ 按键与 LED 接口，如图 2-1-4 所示。

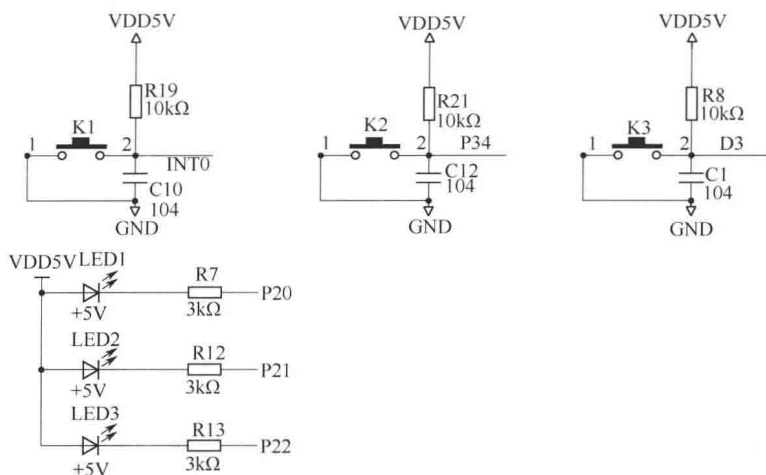


图 2-1-4 开发板-按键及 LED 接口部分原理图

④ LCD 接口，如图 2-1-5 所示。

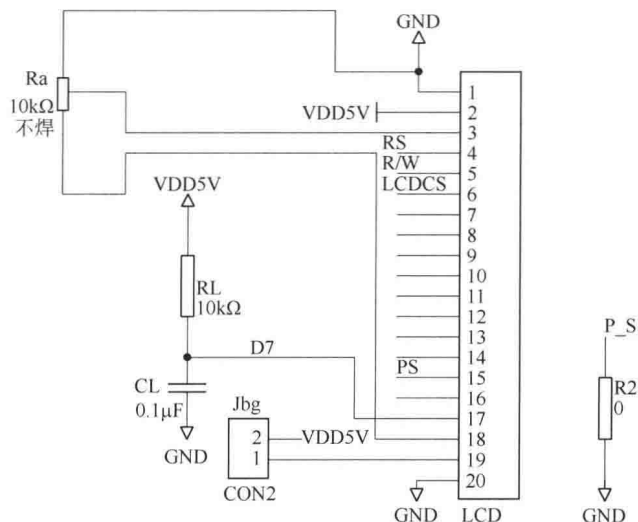


图 2-1-5 开发板-LCD 接口部分原理图

⑤ 蜂鸣器接口，如图 2-1-6 所示。

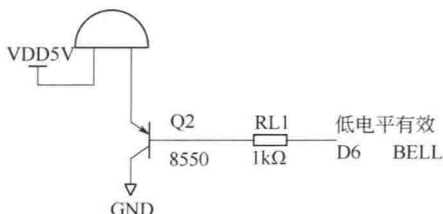


图 2-1-6 开发板-蜂鸣器接口部分原理图

⑥ 电机驱动接口，如图 2-1-7 所示。