

工程师自学笔记系列丛书

嵌入式C语言 技术实战开发

杨源鑫 侯继红 编著
陈锦勇 刘凯强



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

工程师自学笔记系列丛书

嵌入式 C 语言技术实战开发

杨源鑫 侯继红 陈锦勇 刘凯强 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了嵌入式开发和嵌入式 Linux 系统开发的基础知识,主要讲解:嵌入式 Linux 系统的基础知识;C 语言在嵌入式开发中的应用;嵌入式 Linux 应用开发基础,如系统文件 I/O 编程、进程、线程、进程间通信和网络编程,并结合若干项目,熟悉 C 语言在 Linux 应用开发中的流程和思路;C 语言在 Linux 驱动中的应用。本书通过大量实战项目,帮助读者融会贯通,使读者在实战中学到技术的精髓。

本书可作为计算机类专业本科生以及相关专业专科生编程类课程的教材,也可作为嵌入式开发的自学人员和工程技术人员的培训教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式 C 语言技术实战开发 / 杨源鑫等编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-5124-2710-5

I. ①嵌… II. ①杨… III. ①C 语言—程序设计
IV. ①TP312.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 097786 号

版权所有,侵权必究。

嵌入式 C 语言技术实战开发

杨源鑫 侯继红 陈锦勇 刘凯强 编著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:25 字数:533 千字

2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2710-5 定价:69.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

信息时代的发展离不开软件技术,各种编程语言层出不穷,各展风采。C语言,从创始至今虽已有40多年的历史,但依然在世界编程语言排行榜上遥遥领先,并广泛应用于各类软件的开发,这充分说明了C语言在现代软件技术中的实用性。作为一门通用的计算机编程语言,同时也是编程入门首选的第一语言,它的语法更接近于人类的逻辑思维表达。本书将围绕C语言在嵌入式系统中的应用进行论述。

为什么要写本书?

笔者在从事嵌入式软件开发过程中,陆续将自己的一些开发技巧和工作经验总结整理在本人的CSDN博客上,初衷是分享给刚入门学习嵌入式开发的学生或初级工程师;但后来在北京航空航天大学出版社的支持和鼓励下,便将博客上的内容集结成本书并面市。

本书的内容以实战为主,故需要有一定的C语言编程基础,并且需要了解一点硬件知识和与操作系统相关的基础知识。有了一定的基础后再来读本书,将理论与实践相结合,相信一定可以学到很多东西。

本书分为5章。第1章主要介绍什么是嵌入式开发,其间穿插一些基本的理论知识。第2章介绍当前热门的嵌入式Linux系统的基础知识,从学习命令开始,到vim编辑器的使用,以及Shell的基础编程等,学完第2章则为学习后面的内容打下了一定的基础。第3章为本书的重点,主要讲解C语言在嵌入式开发中的应用,并结合大量的实战项目,帮助读者融会贯通,在实战中

学习技术的精髓。第 4 章主要介绍嵌入式 Linux 应用开发基础,如系统文件 I/O 编程、进程、线程、进程间通信和网络编程,并结合若干项目,熟悉 C 语言在 Linux 应用开发中的流程和思路。第 5 章主要介绍 C 语言在 Linux 驱动中的应用,本章不涉及过多的知识,仅作为了解使用。以上知识,希望读者能够灵活应用,便可在今后的学习和工作中少走弯路,提升自信心。

本书由以下作者合作编写:

杨源鑫,负责编写除第 4 章以外的其他章节,并整理了侯继红和陈锦勇两位老师的教学案例,将其作为相关的实战项目内容。

侯继红,指导本书的编写工作。

陈锦勇,提供大部分实战项目的程序。

刘凯强,负责编写本书的第 4 章。

由于编者水平有限,书中难免存在不足,甚至错误的地方,读者若在学习过程中发现有误或不能理解的地方,欢迎批评指正和交流。

杨源鑫

2017 年 7 月

目 录

第 1 章 什么是嵌入式开发.....	1
1.1 概 述	1
1.2 嵌入式开发需要的知识储备	1
1.2.1 嵌入式硬件知识	1
1.2.2 嵌入式软件知识	5
1.3 常见的嵌入式开发平台	5
1.3.1 单片机系列	5
1.3.2 ARM 系列	5
1.4 嵌入式 ARM Linux 系统的构成	6
1.4.1 硬件电路基础	6
1.4.2 bootloader	6
1.4.3 内 核	6
1.4.4 文件系统	6
1.4.5 应用程序	6
1.5 本章小结	8
第 2 章 嵌入式 Linux 系统基础.....	9
2.1 Linux 系统简介	9
2.1.1 使用 VMware 虚拟机安装 Linux 操作系统	12
2.1.2 Linux 的基本命令	19
2.2 Linux 中 vim 编辑器的操作与编程	35
2.2.1 vim 编辑器的操作	35
2.2.2 在 Linux 下 Linux C 语言编程快速入门	41
2.2.3 在 Linux 下使用 GDB 调试代码	43
2.2.4 在 Linux 下 Shell 脚本基础编程快速入门	47
2.3 利用 Makefile 管理软件工程	59
2.4 在 Linux 下制作静态库和动态链接库的方法	62
2.5 本章小结.....	64

第 3 章 C 语言在嵌入式开发中的应用	65
3.1 嵌入式开发必知必会	65
3.1.1 数据段、代码段、堆栈段、BSS 段的区别	65
3.1.2 位、字、字节、字符等基础知识	68
3.1.3 进制转换基础知识	68
3.1.4 嵌入式常用位运算基础与深入学习	71
3.2 位运算项目	74
3.2.1 应用(一):如何分离一个数的高低位	74
3.2.2 应用(二):如何将两个字节合并为一个字节	76
3.2.3 应用(三):Linux 内核中实现的高低位互换函数	77
3.2.4 应用(四):用嵌入式 C 语言快速翻转一个数的二进制高低位	78
3.2.5 实战 1:如何对一个有规律的数组表进行位移(LED 彩灯案例)	80
3.2.6 实战 2:分离一个十六进制数取出相应的位 1 或位 0 (简单的音频解码案例)	82
3.3 预处理、const、static 以及字符串处理在嵌入式中的应用	86
3.3.1 宏定义与 typedef 的区别	86
3.3.2 const 关键字	96
3.3.3 static 关键字	98
3.3.4 sizeof 运算符	103
3.3.5 strcat 函数	105
3.3.6 strcpy 函数	107
3.3.7 strlen 函数	109
3.3.8 strcmp 函数	111
3.4 C 语言的内存管理与指针	113
3.4.1 一维数组	113
3.4.2 二维数组	119
3.4.3 C 语言之指针	122
3.4.4 为什么内存是线性分布的	131
3.4.5 深入浅出剖析函数指针与回调函数	135
3.5 面向过程的 C 语言也能面向对象	144
3.5.1 C 语言之结构体	144
3.5.2 C 语言之结构体对齐	147
3.5.3 C 语言结构体实现原理深入分析	150
3.5.4 结构体的封装性之结构体内嵌函数指针	152
3.5.5 结构体的继承性之结构体内嵌结构体	153
3.5.6 结构体的多态性之结构体中的 void * 万能指针	155
3.5.7 Linux 内核中 offsetof 宏与 container_of 宏深度剖析	157

3.5.8 什么是共用体、联合体与大小端.....	160
3.6 C 语言之标准 C 文件操作应用	163
3.6.1 fopen 函数和 fclose 函数	163
3.6.2 fread 函数和 fwrite 函数.....	165
3.6.3 fseek 函数.....	167
3.6.4 sprintf 函数	168
3.7 必须掌握的基本数据结构	170
3.7.1 链 表	170
3.7.2 队 列	179
3.7.3 栈	181
3.8 实战项目	184
3.8.1 熟悉 STM32 单片机库函数的使用	184
3.8.2 弹弹方块 C 语言实现	194
3.8.3 学生信息管理系统的实现	201
3.8.4 空洞文件与一次性产生多个文件	216
3.8.5 CheckSum 软件的设计原理与应用	218
3.8.6 使用 C 语言编写一个将二进制文件转换为 C 数组头文件的程序	220
3.8.7 数据压缩与解压缩算法的 C 语言实现	224
3.8.8 字符串编码解压缩算法	227
3.8.9 C 语言之查表法项目运用	229
3.9 本章小结	231
第 4 章 嵌入式 Linux 应用开发基础	232
4.1 文件 I/O 基础编程	232
4.1.1 open 函数与 close 函数	233
4.1.2 read 函数与 write 函数	235
4.1.3 lseek 函数	237
4.1.4 ioctl 函数	238
4.1.5 opendir 函数、readdir 函数与 closedir 函数	239
4.1.6 stat 函数	240
4.1.7 文件 I/O 小结	242
4.2 进程的实战开发	242
4.2.1 进程的定义	242
4.2.2 进程与程序的区别	243
4.2.3 fork 函数	243
4.2.4 vfork 函数	246
4.2.5 exec 函数族	248
4.2.6 特殊进程	251

4.3	进程间通信	256
4.3.1	管道	257
4.3.2	消息队列	261
4.3.3	共享内存	268
4.3.4	信号	274
4.3.5	信号量	278
4.4	多线程编程	281
4.4.1	线程与多线程的定义	281
4.4.2	进程与线程的区别与联系	281
4.5	网络编程	287
4.5.1	TCP/IP 协议栈	287
4.5.2	TCP 协议	288
4.5.3	UDP 协议	300
4.6	实战项目	304
4.6.1	Linux 下音频应用编程	304
4.6.2	Linux 下 FrameBuffer 简介	314
4.6.3	Linux 下 C 语言 BMP 图操作编程	320
4.6.4	Linux 下 C 语言 input 系统应用编程	324
4.6.5	简易 Linux 终端版聊天室应用编程	329
4.7	本章小结	338
第 5 章	C 语言在 Linux 驱动中的应用	339
5.1	简单的 Kconfig 编程	339
5.2	手把手教你实现字符设备驱动	345
5.3	手把手教你实现 misc 设备驱动	355
5.4	手把手教你实现外部中断	359
5.5	手把手教你实现中断底半部 tasklet 实现	364
5.6	手把手教你实现中断底半部 work queue 实现	371
5.7	手把手教你实现简单的 Linux 定时器	375
5.8	手把手教你实现 input 设备驱动程序	379
5.9	本章小结	386
参考文献		387
后 记		389

第1章

什么是嵌入式开发

1.1 概 述

随着电子和计算机技术的发展,嵌入式开发已成为当前最热门,也是最有用的一门技术之一,本书将带领读者进入这个奇妙而神奇的领域。本章将引导读者了解如何学习嵌入式开发,并使读者认识一些常见的嵌入式开发平台以及了解嵌入式系统的构成。

那么嵌入式具体是什么呢?嵌入式就是,以应用为中心,以计算机技术为基础,软硬件可裁剪,适应于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等有严格要求的专用计算机系统。这个说法很抽象,具体来说,手机、液晶电视机、智能手表和电冰箱等都使用了嵌入式技术。主流的嵌入式操作系统包括 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 、Vxworks、Nuclues 和 Linux。

1.2 嵌入式开发需要的知识储备

嵌入开发的知识储备主要包括两个方面:软件和硬件。下面将针对这两个方面进行简单说明。

1.2.1 嵌入式硬件知识

硬件就是指电路。电路方面的技术涵盖的知识非常多,例如,模拟电子技术、数字电子技术、高频电子技术,等等。如果想从事嵌入式开发,那么需要掌握以下最基本的知识。

1. 认识基本的电子元器件

要想了解什么是电阻、电容、二极管和三极管等有关电子元器件的知识,只需找一本介绍电子技术基础类的书籍即可,推荐康华光教授的《电子技术基础》一书。也可以发挥网络的作用,上网搜索介绍电子元器件的文章,推荐中国电子网(www.21ic.com)。只有了解了元器件,知道它们的具体作用,才能为看懂电路原理图打下良好的基础。

2. 学会看电路原理图

这一点非常关键。不求了解复杂电路的具体功能,不必掌握太多复杂的电路硬件知识,而应把重心放到软件上来,硬件方面只要掌握最基本的内容,比如,电路是怎样连接的? 连接到 CPU 或芯片的哪个引脚上? 这些是必须要了解的内容,因为在开发时需要查找电路原理图,找到某个引脚,然后根据芯片数据手册去配置该引脚的功能来驱动它,例如,图 1-2-1 是亚博科技的 51 单片机开发板的原理图,在 51 单片机上连接了许多电路模块和基本的硬件外设,包括 LED 灯、数码管、时钟芯片和按键模块,等等,软件开发人员需要了解原理图中各引脚的连接情况。

3. 掌握数字电子技术相关知识

同样推荐康华光教授的《电子技术基础》一书,请阅读数字部分。数字电路对嵌入式开发人员来说是重点,也是难点,有很多基础知识需要了解。从最基本的知识说起。学过计算机的人都知道,计算机与人类的对话是通过二进制代码进行的。那么什么是二进制代码? 就是 0 和 1。而在数字电子技术中,0 一般代表低电平,1 一般代表高电平。要想与计算机和嵌入式设备打交道,就一定要熟悉二进制,并熟练掌握二进制与十进制、十六进制、八进制等进制间的相互转换。了解进制转换以及电平信号 0 和 1 只是嵌入式开发的基础。

与数字世界打交道,一定会涉及数字逻辑方面的知识。关于逻辑,有“与”“或”“非”“异或”等相关的知识,掌握了这些知识,就可以设计出简单的数字电路,当然,前提是已熟悉数字电路最基本的与门、或门、非门、与非门、OC 门、或非门等相关的门电路,可根据逻辑电路的表达式和真值表来完成三人表决器、抢答器等好玩的数字电子电路作品,为今后学习组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路和脉冲电路等打下良好的基础。

在嵌入式开发中最经常要分析的就是时序图,例如图 1-2-2 是 LCD 1602 的时序图,本书不做分析,有兴趣的读者可自行搜索相关资料分析该时序图,其时序参数如表 1-2-1 所列。

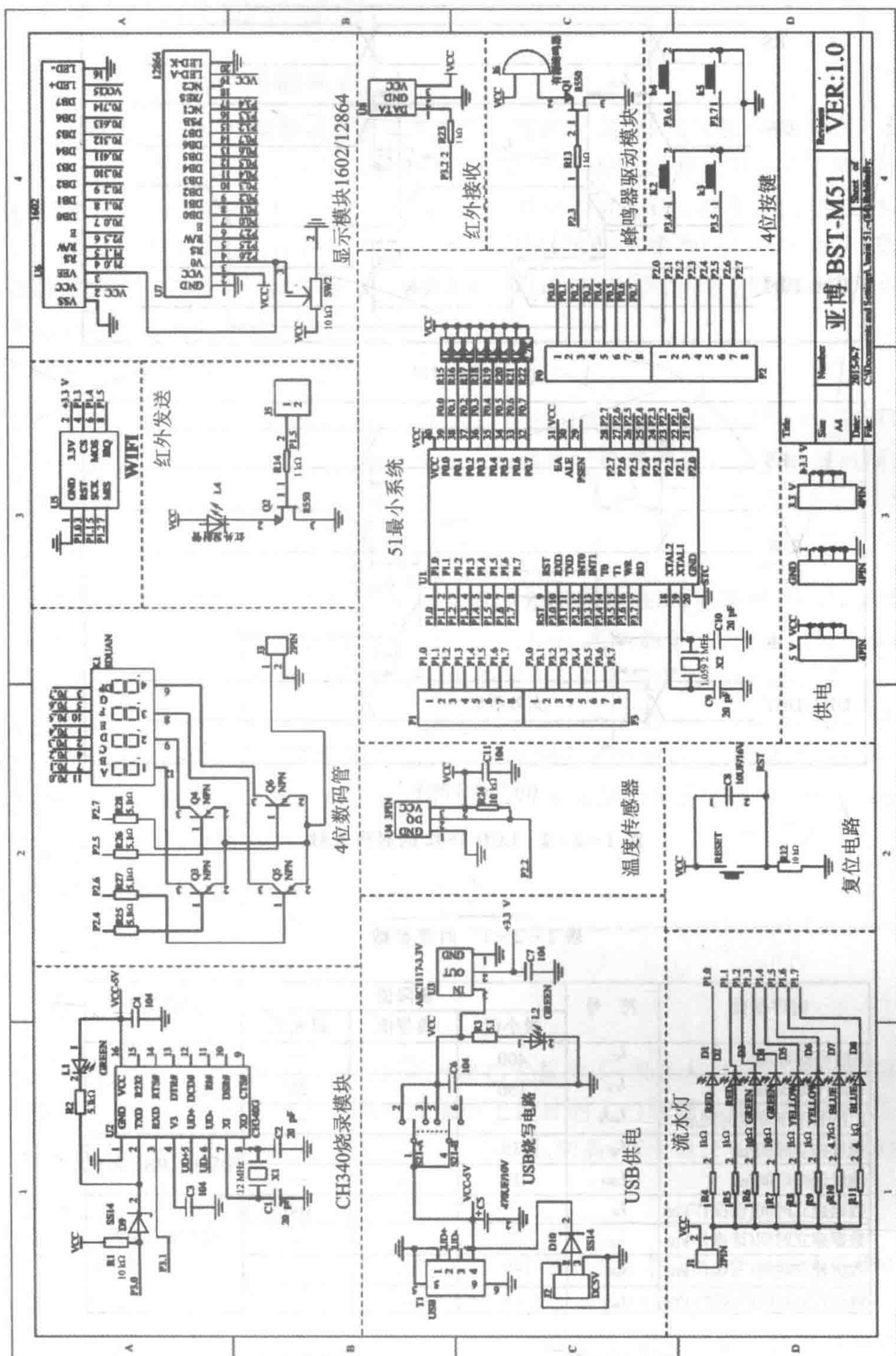
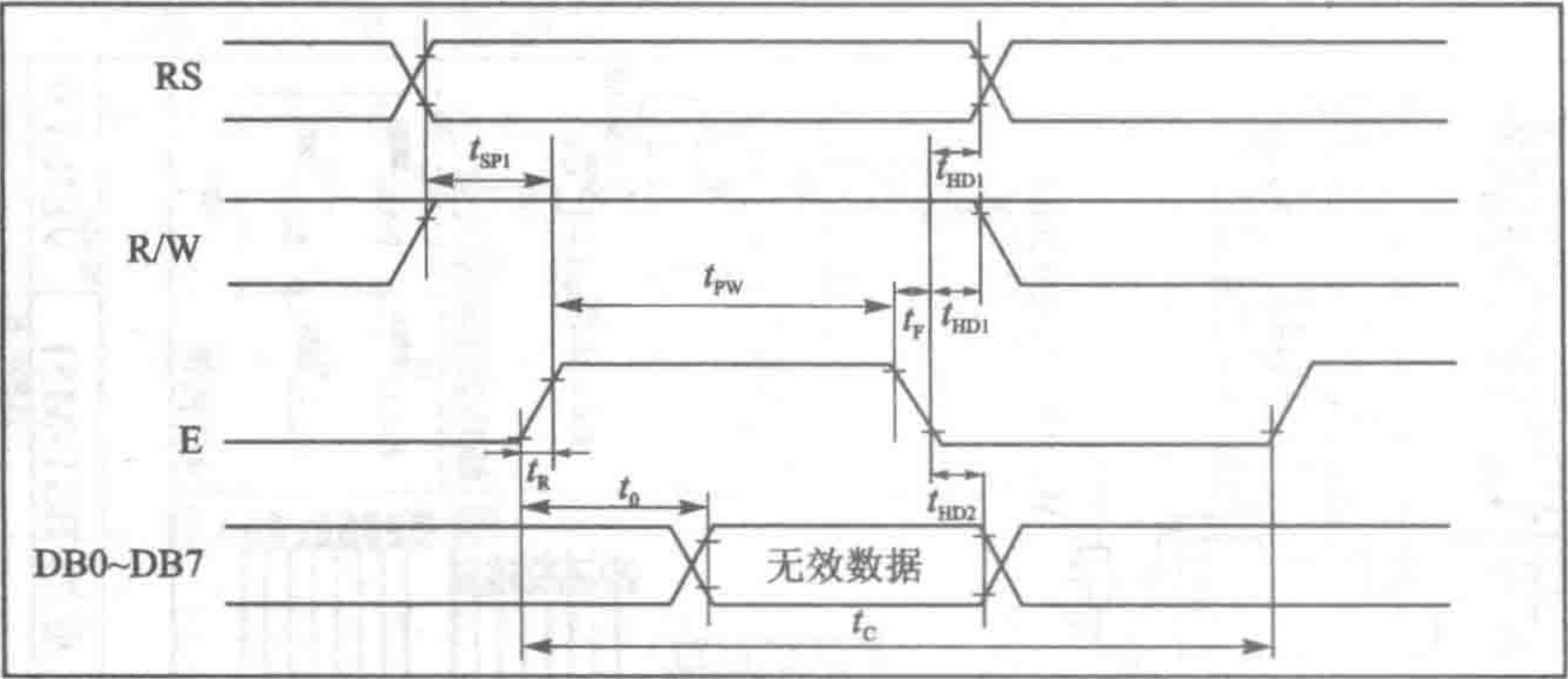
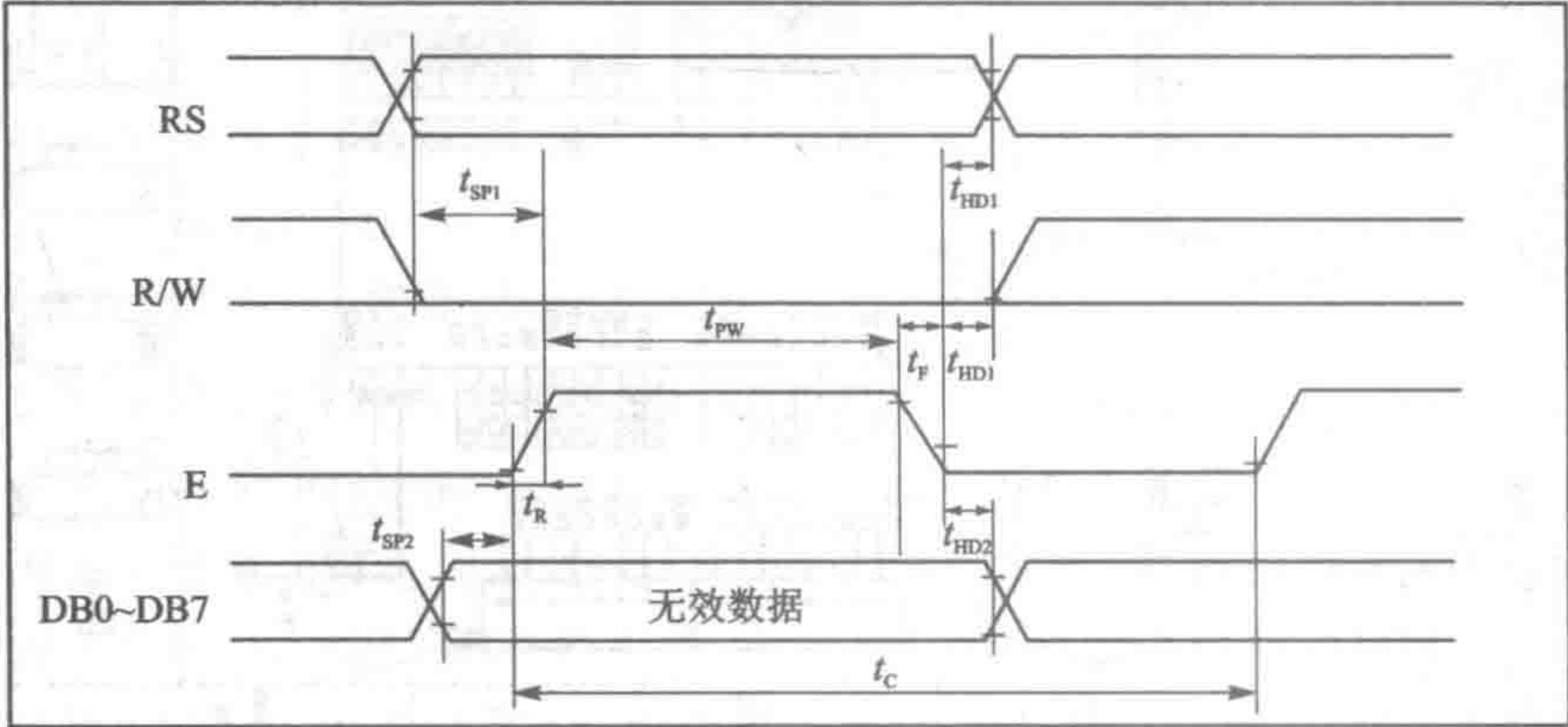


图1-2-1 亚博科技51单片机开发板



(a) 读操作时序



(b) 写操作时序

图 1-2-2 LCD 1602 的时序参数

表 1-2-1 时序参数

时序参数	符 号	极限值			测试条件
		最小值	典型值	最大值	
E信号周期/ns	t_C	400	—	—	引脚E
E脉冲宽度/ns	t_{PW}	150	—	25	
E上升沿/下降沿时间/ns	t_R, t_F	—	—	—	
地址建立时间/ns	t_{SP1}	30	—	—	引脚E、RS、R/W
地址保持时间/ns	t_{HD1}	10	—	—	
数据建立时间(读操作)/ns	t_D	—	—	100	引脚DB0~DB7
数据建立时间(读操作)/ns	t_{HD2}	20	—	—	
数据建立时间(写操作)/ns	t_{SP2}	40	—	—	
数据建立时间(写操作)/ns	t_{HD2}	10	—	—	

1.2.2 嵌入式软件知识

1. 编程语言相关的知识

在嵌入式开发中,编程语言主要是汇编语言和 C 语言,当然还有脚本语言 Shell 和 Python,取决于运用在哪个方面,如果用于底层驱动开发,那么只需要了解 C 语言和汇编语言就足够了。本书以 C 语言为主线,其他语言虽有所涉及,但不是主体。

那么 C 语言在嵌入式开发中涉及的最常用的知识有哪些呢? 有位运算、数组、指针、结构体、宏和文件操作等,其他的还有逻辑语句和循环语句等较复杂的知识,这些将会在后面的章节中以项目实例来归类介绍。

2. 单片机相关的知识

这部分推荐从 51 单片机开始入门,找一个学习视频,比如郭天祥的《十天学会单片机》,跟着视频的进度学习,后面需要提升理解的时候就需要详细了解微机原理方面的知识,但刚开始学习时可以暂时忽略。

3. 操作系统相关的知识

操作系统是个非常复杂的东西,涉及很多方面的知识,比如进程、线程、设备、驱动等。本书将会介绍最典型的操作系统——Linux 系统的基础知识,包括 Linux 的基本命令操作,vim 编辑器的使用,编译器的使用,学会搭建相关的服务器。对于想全面了解 Linux 系统的读者,推荐阅读《鸟哥的 Linux 私房菜》上、中、下册。对于具有 C 语言基础的读者,还可学到嵌入式应用开发方面的知识,为后续学习更深入的 Linux 驱动知识打下基础。在本书的第 5 章,将展现基于友善之臂 ARM Cortex-A9 Tiny 4412 的驱动开发。

1.3 常见的嵌入式开发平台

1.3.1 单片机系列

目前,在工作中使用 51 单片机的产品已经很少了,但在大学里 51 单片机应用技术仍然作为电类专业学生学习微处理器电子设计的入门课程。那么常见的 51 单片机都有哪些呢? 有凌阳、STM32、飞思卡尔系列、宏晶、富士通、PIC 和 MSP430 等。

1.3.2 ARM 系列

ARM 系列的微处理器有很多,本书第 5 章的内容是基于三星平台的 ARM Cortex-A9 微处理器,除了三星以外,还有 NXP(恩智浦)、MTK(联发科)、RK(瑞芯微)和高通系列。但是,不管基于什么平台,有多少种型号,只要掌握一种型号微处理器

的开发方法,即看原理图,查芯片手册了解寄存器的用法,再根据要求进行 I/O 口配置,完成驱动功能,就能触类旁通,轻松应对各种类型芯片的嵌入式开发。

1.4 嵌入式 ARM Linux 系统的构成

1.4.1 硬件电路基础

学习嵌入式系统开发所要了解的硬件电路并不多,只须掌握模拟电路、数字电路及常用的集成电路设计足矣。关于硬件方面的知识,在知识储备章节中已经提及,不再赘述。关于如何进行嵌入式开发,最常见的就是看电路原理图,了解硬件的连接方式;查硬件芯片数据手册,配置相关的寄存器以驱动硬件工作;根据手册分析相关硬件的协议并实现,比如 I²C、SPI、CAN 等协议;学会使用常用的仪器,比如万用表、示波器和函数信号发生器等。

掌握了以上基本的硬件电路知识和技能后,就做好了进行嵌入式开发的硬件准备。

1.4.2 bootloader

bootloader 即对应 Windows 系统的 BIOS。那么 BIOS 究竟是什么?从英文的意思可以看出,是基本输入/输出系统。在工作中,当开发电子产品,如手机、平板电脑及智能手表时,也有 bootloader,通常简称 uboot,其实它就是在操作系统运行内核之前的一段程序,通俗地说,就是一段单片机裸机程序,用来初始化基本的硬件,建立内存映射,并在经过一系列初始化后加载内核。

1.4.3 内 核

内核是操作系统的基本组成部分,一个操作系统的核心,基于硬件的第一层对软件的扩充。它提供操作系统的最基本功能,是操作系统工作的基础,负责管理系统的进程、内存、设备驱动程序、文件和网络系统,并决定着系统的性能和稳定性。

1.4.4 文件系统

在计算机中,文件系统(file system)是命名文件以及用于逻辑存储与恢复文件的系统。DOS、Windows、OS/2、Macintosh 和 UNIX 操作系统都有文件系统,在此系统中,文件被放置在分等级的树状结构中的某一处,这个树状结构构成了目录(Windows 中叫文件夹)或子目录。

1.4.5 应用程序

大多数用户都将应用程序理解成 APP,认为就是一个支持人机交互的界面,并

可以操作这个界面。但在嵌入式系统中,应用程序不仅仅是 APP,还是一段运行在操作系统上的 C 语言程序,即使是打印“hello world”这么简单的语句,也是一段应用程序;运行在 Android 系统上的一个服务,也是一个应用程序;甚至现在所使用的 Android 手机,在开机后进入的桌面界面,也是一个应用程序。

图 1-4-1 是 Windows 7 系统开机后进入的桌面界面。



图 1-4-1 Windows 7 系统界面

图 1-4-2 是 Ubuntu 系统的登录界面。

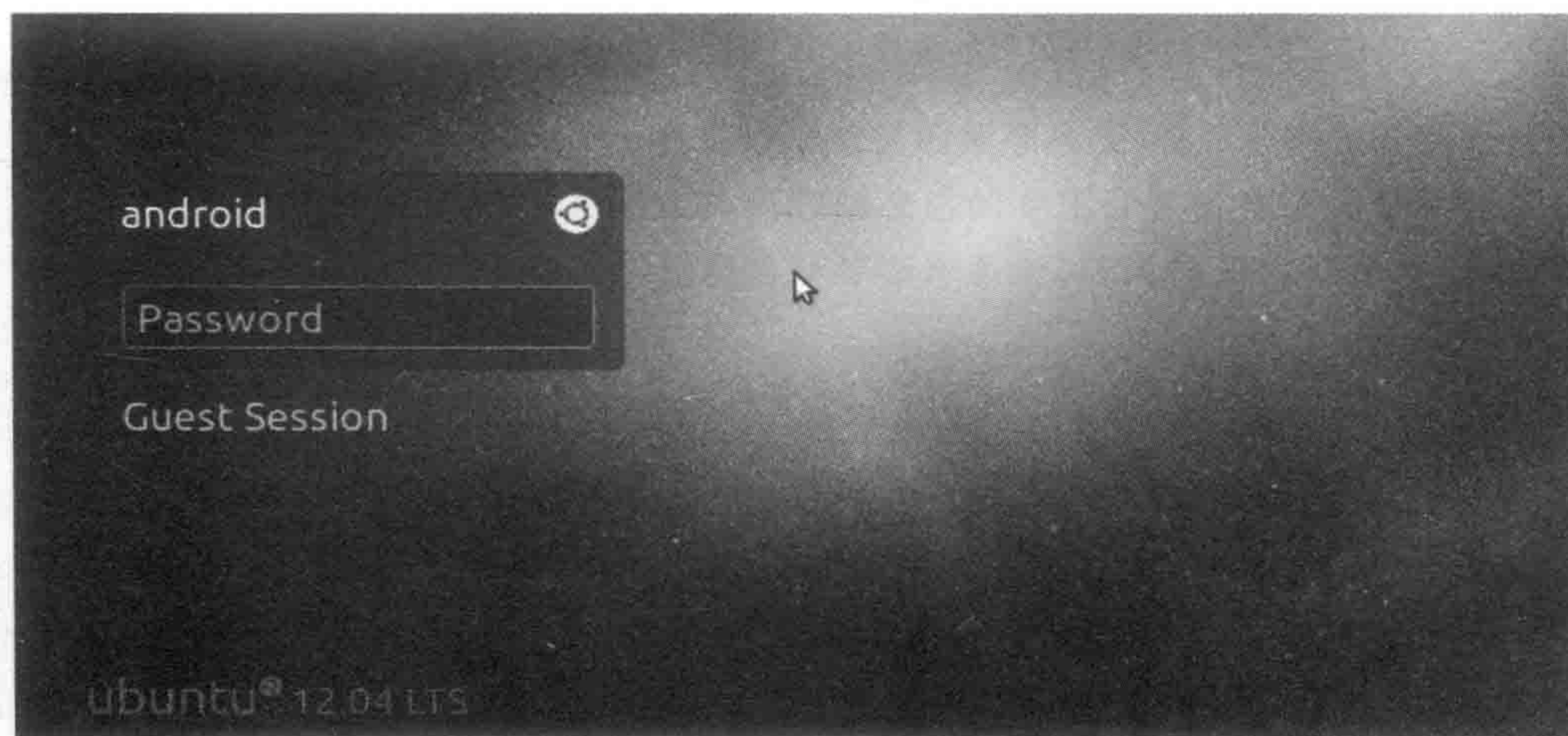


图 1-4-2 Ubuntu 系统登录界面

1.5 本章小结

本章简单介绍了嵌入式开发需要了解的知识和学习方法,以及常用的嵌入式开发平台和嵌入式系统的基本构成,引导读者了解嵌入式开发到底是什么。通过阅读本章,读者可以大致了解嵌入式开发的流程。在后续章节中,将结合大量实例进一步使读者学习和掌握这一开发流程。