

马 伟 编著

计算机 USB系统原理 及其主/从机设计

The Principle and Host/Device
Design of Universal Serial Bus



- ◆ 在嵌入式系统中，设计USB主机（Host）和设备（Device）
- ◆ USB协议原理、开发经验、设计实例及C语言源代码分析

计算机 USB 系统原理及其主/从机设计

The Principle and Host/Device Design of Universal Serial Bus

马 伟 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书在精练、准确地阐述 USB 协议原理的基础上,总结了设计 USB 系统所需的软件编程和硬件设计的基础知识,以及实际的项目开发经验。然后重点讲述了在嵌入式系统中 USB Host 功能的实现,包括嵌入式 USB 主机系统的原理、硬件电路设计和单片机的 C 语言源代码分析。最后,介绍了 USB 设备的开发,内容包括通用 USB 设备固件的源代码分析和设备实例。在这些内容中穿插了 USB 主机、Mass Storage 设备类、HID 类和 Hub 类等的协议。

本书不仅可作为大学高年级学生学习计算机硬件技术和系统原理课程的参考用书,也可作为高等院校研究生单片机与嵌入式系统教学、实验和开发的教学参考资料;同时,也适合作为工程师使用 USB 技术以及进行嵌入式 USB 主机系统设计和设备开发的指南。

图书在版编目(CIP)数据

计算机 USB 系统原理及其主/从机设计/马伟编著.
北京:北京航空航天大学出版社,2004.01
ISBN 7-81077-381-X

I. 计… II. 马… III. 电子计算机—接口
IV. TP334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 101396 号

计算机 USB 系统原理及其主/从机设计

The Principle and Host/Device Design of Universal Serial Bus

马 伟 编著

责任编辑 王慕冰

*

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(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:518.4 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-381-X 定价:29.50 元

序

如今,PC 机的 USB 接口为人们带来的方便是尽人皆知的,USB 鼠标键盘、USB 打印机、扫描仪、USB 硬盘、优盘,还有数码相机、数码录音机以及高速的视频传输领域……有的笔记本电脑则干脆取消了传统的串行口,所有外接设备统统使用 USB 接口。在数据采集、仪器和控制工程等方面,使用 USB 口与 PC 机交换信息有着传统串行口不可比拟的优点,它的星形拓扑结构允许一个 USB 口接入多台 USB 设备,它的信息包式的通信规范具有可靠性高、速度快的特点,它的 3 ms 内不使用就进入休眠态的规则,大大降低了功耗,USB 作为成熟的 IP 模块集成到单片机中,使之便于智能化又几乎不增加什么成本。而最近出现的 USB 主机技术、USB 主机和从机自适应 OTG 技术,使 USB 接口的应用脱离了 PC 机而进入更广泛的计算机嵌入式应用领域。

回想第一个做 USB 应用研究的,是我的一个优秀学生王云飞。作为因材施教生,他大学二年级就提前进入我的实验室。从 Motorola 拿到第一款有 USB 接口的单片机样片 MC68HC705JB4 是 1997 年秋天,那时,新出的 PC 机后面开始多了两个方形接口,就是 USB,人们还不知道如何使用它,甚至没有注意到它的存在。对 USB 应用的研究是从分析与认识 USB 鼠标开始的。当时最大的困难是我们的 PC 机上只有 Windows 95 操作系统,而 Windows 95 不支持 USB 协议,PC 机上的 USB 驱动程序需要用户自己编写。即使后来推出的 Windows 98,对 USB 设备的驱动程序支持也十分有限。从北京的微软到上海的微软,都得不到 PC 方面的技术支持,王云飞在编写 USB 驱动程序方面表现出非凡的才能。他的第一个 USB 应用作品,是将只有 RS-232 口的汉王手写板通过单片机的 USB 口接到 PC 机上,实现了汉王汉字识别程序的正常运行。在此基础上,1998 年协助“汉王”完成了 USB 接口手写板的产品设计。接下来的一个 USB 应用作品是“USB 安全钥”,用的是 MC68HC908JB8 单片机,安全钥中有加/解密算法,可实现在任何一台联网的 PC 上与远程服务器的身份互相认证。马伟也是在大学本科提前进入实验室的学生,对 USB 的认识是从对 USB 安全钥的改进开始的。随后,2001 年就开始瞄准 USB 应用的下一个目标——USB 主机。他的作品“嵌入式 USB 主机”获第 4 届 MOTOROLA 杯嵌入式处理器设计应用大奖赛单片机(MCU)组优秀奖。

清华大学有很多优秀学生和领先的课题。他们特别敏感,接受新事物快,把挑战新技术当作乐趣。仅仅将他们的成果和学位论文放在图书馆里提供有限的借用是极大的浪费。我鼓励他们以各种形式将他们的作品公开发表,奉献于社会。以研究论文为基础的出版物不同于翻译外文手册的译著,也不同于综合各种资料的编著,因为他们确实做过深入的工作,书中包含了他们对某一主题的认识和体会,这种授之于人的心得体会是最宝贵、最有用的。而从论文到书仍有大量辛苦繁杂的工作,而这一过程使认知得到了综合与提高,品味得到升华。马伟的这本书是在继承和总结了我实验室过去 USB 应用方面的研究成果和开发经验的基础之上,吸收了最新的 USB 技术成果,深入分析了 USB 协议规范原理,并对他所做的项目进行了详细的总结和阐述后完成的,其中也凝结了很多人的帮助和指导。我希望别的研究生也能效仿,把他们的成果奉献给更多的人。

本书从一个 USB 接口应用开发者的角度,阐述对 USB 协议的理解,描述 USB 开发过程中的要点和体会,给出 USB 设备与 USB 主机开发应用的实例,所附程序都是在应用中验证过的,可直接拿来使用。能让后人站在我们的肩膀上开始他们高起点的研究,我们感到欣慰。

邵贝贝
于 清华大学
2003 年 11 月

自序

把研究成果奉献给社会,是我的心愿。不少嵌入式应用方面的人士知道,我所在的实验室——清华大学 Motorola 单片机与 DSP 应用开发研究中心,以王云飞为代表在 USB 方面做过很多研究,两年前就期望我们能总结自己的开发经验,写一本侧重介绍 USB 系统原理及其开发技术的书籍。但当时我入这行时日尚浅,很多东西还在学习和研究之中,所以迟迟不敢下笔。

今天看来,当初的谨慎还算明智。因为假若当时仓促上阵,我总结的势必是三四年前的 USB 开发技术。这些技术在当时是非常领先和优秀的,但与今天的 USB 使用大环境而言,无疑是不合时宜的。

近几年 USB 技术的飞速发展是大家有目共睹的。它的应用已经很普及了。从市场的角度来说,USB 的“触角”几乎伸向了每一种计算机外设;从 USB 的开发环境来说,软件厂商为 USB 提供了越来越完善、甚至是非常漂亮的开发环境和软件支持,比如很多 PC 的操作系统中就已经包含了绝大多数的 USB 设备类的驱动程序。如今,PC 端开发 USB 的技术人员的部分工作,就只需要在软件向导的提示下、像使用普通软件一样来进行,最终编写出 USB 的驱动程序和用户软件,显然,技术难度下降了很多。

因此,在这种背景下,我认为当前最需要的就是如何把握 USB 最新的发展动向,如何把最有用、最领先的 USB 开发技术介绍给读者,这才是最有价值的。当然,这也是本书的根本宗旨,是我两年来时时刻刻都在冥思苦想的问题。

从本科念书时起,我就有幸能够师从邵贝贝教授,学习与研究嵌入式系统。直至今日,我始终着眼于 USB 系统。从改进和优化 USB 安全钥开始,到 2001 年底,追踪 USB 的最新动态,进行嵌入式 USB 主机和 USB OTG 项目的开发,力图把握住这两年 USB 的发展脉络。

扪心自问,这本书算不上经典,无非是抛砖引玉罢了。我只期望能把研究期间算不上成熟的心得与大家分享,但求能给大家提供一些经验与参考,能够激发一些灵感。除此之外,还有一点私心。那就是希望得到国内同行专家的批评指正,这种感觉,每一个把答卷交给老师的学生都能体会。这本书是我的答卷。

这里要提的是,我所从事的 USB 系统中的各种研究和各个项目的开发,以及以此取得的一点点成果都不是个人所能完成的。因此,借成书之际,我要表达一下对他们的感激与敬意。

当年清华大学校长梅贻琦先生曾经讲过,大学之道在明明德。所谓在明明德,就清华大学而言,正是薪火相传的清华精神。而这种精神的传播,也正依赖于师生的紧密关系,依赖于老师与学生在学术研究与日常生活中的相互交流与沟通。邵老师对我的学术品质乃至人格的影响都很大,从他那里传承到的那种无形的人生体验,将使我受益终生。

还要感谢我所在的实验室。我的研究,很大程度上依托于实验室在过去一段时间内对 USB 领域的研究成果。尤其是王云飞,他开发了很多优秀的 USB 项目,更难能可贵的是,他的很多项目都是在 USB 诞生的初期完成的,他边摸索、边实践,其中的难度和含金量自不必多言。后来,他转向 M·CORE 和 ARM 的研究,其中为 ARM 做的 Bootloader 是贴在网上共大

家使用的,据说国内 ARM 用户目前使用的系统初始化加载程序都是这份网上的 Bootloader。从我开始接触 USB,就得到了他的指引。此外,我的科研工作中也凝结了很多老师、同事的帮助和指导。我向他们表示衷心的感谢!

正是在清华大学和工程物理系良好的科研环境中,正是由于得到了许多老师在学业上的教诲、科研上的指导和生活上的关心,我在计算机 USB 系统以及嵌入式系统等领域内的认识才能不断深入。在此,向这些良师益友致以深深的谢意!

正是这些帮助和启迪,以及我的家人给予的巨大的精神鼓励,才使我顺利地完成本书写作。在成稿之际,向所有关心、帮助过我的人真诚地说一声谢谢!

马 伟
于 清华大学
2003 年 9 月

前 言

通用串行总线(Universal Serial Bus,简称 USB)从诞生发展到今天,已经将近 10 年。伴随着计算机技术的迅猛发展,USB 协议从 1.1 过渡到 2.0,作为其最重要指标的设备传输速度也从 1.5 Mbps 的低速和 12 Mbps 的全速提高到如今的 480 Mb/s 的高速。USB 作为过去几年里计算机和嵌入式领域中的热点,推动了计算机外设的飞速发展。毫无疑问的是,USB 已经占领了 PC 和外设的市场;而在未来,USB 又将以 OTG 再次引领计算机外设产业的发展方向,同时也将把计算机和嵌入式领域的学术研究带入更为深入的层次。

本书就是在这样一种背景之下,将主旨定为总结 USB 设备的开发技术,揭示新兴的嵌入式 USB 主机的原理和设计方法。简单地说,本书的内容包括两大块:协议原理和开发应用。

- **协议原理**:指的是 USB 协议。如果本书还是按部就班地介绍协议内容的话,就未免失去了新意。而且,USB 协议庞大、复杂,如何从学习者的角度来重新组织这些协议内容?如何能在准确阐述概念的前提下尽量以易于理解的语言进行描述?基于这些考虑,在书中,作者做了一些尝试,比如尽量压缩了协议的内容,明确了关键的概念,按照仔细推敲过的顺序来分章节叙述协议内容。书中以 USB 协议 1.1、2.0 为主线,还介绍了 HID 设备类协议、Mass Storage 设备类协议、Bulk - Only 传输协议、UFI 命令协议和 USB 主机协议等。每一种协议原理的分析,都是以实际的应用为背景来组织内容的。
- **开发应用**:USB 涉及的是技术性较强的学科内容,大量的项目是其主要的研究内容。作者对自己从事开发的 USB 相关项目进行了精心地挑选,从各个角度看,这些项目都不重复,而且基本兼顾了 USB 的嵌入式开发的主要内容。
 - **嵌入式 USB 主机系统原理及开发技术**是本书的特色和精华内容。分析了 USB 主机的各种协议,从硬件到软件详细讲述了嵌入式 USB 主机的设计细节。最后以支持 Mass Storage 类协议为实例介绍了嵌入式 USB 主机在科研和生产上的应用。
 - **USB 设备开发实例**选取的 3 个项目是面向 USB 设备开发的内容。

这些项目的基本情况如下:

项 目	USB 项目	核心 USB 芯片	本书侧重点
USB 设备开发技术	HID (Human Interface Device, 人机接口设备)类设备设计	内嵌了 USB 模块的单片方案,即 MC68HC908JB8	通用的 USB 固件的 C 语言源代码分析;HID 类协议;PC 端的 HID 程序设计方法
	Mass Storage(大容量存储设备)类		*
	Hub(集线器)类设计	内含固件的单片方案,即 GL652USB	USB Hub 在嵌入式系统中的灵活应用

续表

项 目	USB 项目	核心 USB 芯片	本书侧重点
嵌入式 USB 主机开发技术	嵌入式 Host(主机)系统的研究与设计	CPU+USB 主机接口芯片方案,即 MC68HC912D60A+SL811HS	嵌入式化的 USB 主机的主要协议及行为定义;CPU 与 USB 主机接口芯片的硬件接口设计;嵌入式 USB 主机协议栈的设计;嵌入式 USB 主机上的 Mass Storage 类协议的设计
	USB OTG(On - The - Go, 移动式 USB)设备的原理及开发		USB OTG 补充协议;USB OTG 接口芯片 ISP1362 功能介绍;USB OTG 设备的设计思路

* USB 移动存储设备是 USB Mass Storage 类设备的实现。而作者在嵌入式 USB 主机项目中实现的 USB 主机支持的 USB 设备类就是 Mass Storage 类。因此,USB 移动存储设备的设计及 Mass Storage 类协议等有关内容将与嵌入式 USB 主机放在一起介绍。

以上内容被安排成 5 部分:

第 1 部分简要介绍 USB 基本知识,讲述 USB 的产生及发展过程,并主要讨论 USB 的特点。最后,列举一些常用的 USB 的关键词以供参考和查阅。

第 2 部分是 USB 协议基础。分 3 章对 USB 协议进行了总结和叙述,即:第 4 章 USB 系统资源;第 5 章 USB 的机械和电气特性;第 6 章数据通信结构,详细介绍 USB 的数据结构等底层协议。

第 3 部分 USB 系统软硬件设计基础。这一部分是作者根据开发 USB 的经验总结的进行 USB 软硬件设计的必备知识和技能,以及 USB 的相关规范。

第 4 部分是嵌入式 USB 主机系统的原理和开发以及 USB OTG 的简单介绍。

第 5 部分则是 USB 设备项目的开发实例。

大部分章末编写了复习题,以便读者准确、快速地把握重点内容。

读者可以查看本书末的参考文献。作者在其中列举了几十个相关的著作。这些著作都是作者在开发 USB 时所翻阅和参考过的,其中很多内容都给了作者非常大的帮助,有些则给过灵感一现的提示。总之,完成一本讲述 USB 原理和开发的书籍,是需要站在前人的肩膀上的。这里,作者对引用过的或者从中获得过帮助的所有文献的作者们一并致谢!

在作者进行项目开发时,得到了很多 USB 硬件厂商的大力支持。他们分别是:Cypress 公司在上海的代理商提供了 SL811HS 的样片;Philips 北京公司提供了 ISP1362 的样片;NetChip 公司在北京的代理商提供了 NET2890 芯片的参考编程资料;Genesys 公司提供了 GL652USB 的样片和技术支持。在此,对他们表示衷心的感谢!

还要感谢北京航空航天大学出版社给予的大力支持,因为他们严谨、细致的工作,才使本书得以顺利地出版。

本书面向不同层次的读者:不仅可以作为大学高年级学生学习计算机硬件技术和系统原理课程参考用书;也是高等院校研究生单片机与嵌入式系统教学、实验和开发的教学参考资料;同时,也适合作为工程师使用 USB 技术以及进行嵌入式 USB 主机系统设计和产品开发的指南,书中提供了大量设计原理和源码以帮助和加速项目的开发。

由于 USB 所涵盖的学科范围非常广泛,而其技术本身也是在不断地推陈出新,因此要非常准确、完整、实用地描述 USB 系统体系确实不易。再加之作者水平所限,因此,书中难免存在着欠缺和不妥之处,希望 USB 专家、工程师及广大读者批评指正。

马 伟
于 清华大学
2003 年 7 月

目 录

第 1 部分 USB 概述

第 1 章 USB 技术的出现和发展	2
1.1 身边的 USB	2
1.2 计算机总线概述	3
1.3 USB 的出现和发展	5
1.3.1 传统的计算机接口的局限性	5
1.3.2 新型总线标准 USB 诞生	5
复 习 题	6
第 2 章 USB 的特点及优点	7
2.1 即插即用	7
2.2 广泛的软硬件支持	7
2.3 低功耗	7
2.4 可选择的多种速度模式	7
2.5 完备的总线拓扑结构	8
2.6 多种设备类	8
2.7 硬件结构标准化	8
2.8 低廉的价格	8
复 习 题	8
第 3 章 USB 关键字	9

第 2 部分 USB 协议基础

第 4 章 USB 系统资源	12
4.1 USB 系统模型	12
4.2 计算机平台上的 USB 系统	12
4.2.1 PC 上的 USB 系统组成部分	12
4.2.2 USB 在 PCI 总线上的位置	15
4.3 设备级的 USB 系统	16
4.3.1 USB Hub	16
4.3.2 USB 设备	17
4.4 USB 的拓扑体系	18

4.4.1	USB 的拓扑结构图	18
4.4.2	完整的 USB 系统软硬件组成	19
	复 习 题	20
第 5 章	USB 的机械和电气特性	21
5.1	USB 的机械特性	21
5.1.1	USB 图标	21
5.1.2	USB 接插件	21
5.1.3	USB 插座的 PCB 设计	23
5.1.4	USB 电缆	23
5.1.5	USB 电缆线编号与颜色	25
5.2	USB 的电气特性	25
5.2.1	USB 的供电模式	26
5.2.2	低功耗的实现	27
5.2.3	即插即用技术	27
	复 习 题	29
第 6 章	USB 数据通信结构	30
6.1	数据通信协议简介	30
6.1.1	通信协议的主要内容	30
6.1.2	USB 数据通信结构概况	31
6.1.3	二进制数的位发送顺序	31
6.2	二进制数的序列——域	32
6.2.1	同步域	32
6.2.2	标识域	33
6.2.3	地址域	34
6.2.4	端点域	35
6.2.5	帧号域	35
6.2.6	数据域	36
6.2.7	校验域	36
6.3	最基本数据单元——包	37
6.3.1	令牌包	37
6.3.2	数据包	38
6.3.3	握手包	38
6.4	数据传输类型	39
6.4.1	数据传输概论	39
6.4.2	中断传输	40
6.4.3	批量传输	42
6.4.4	同步传输	44
6.4.5	控制传输	46

6.5 数据流模型.....	51
6.5.1 端 点	51
6.5.2 管 道	51
6.5.3 USB 数据传输过程	51
复 习 题	53

第 3 部分 USB 系统软硬件

第 7 章 USB 协议栈设备框架及固件软件编程基础	55
----------------------------------	----

7.1 标准的 USB 描述符	55
7.1.1 设备描述符	56
7.1.2 配置描述符	59
7.1.3 接口描述符	60
7.1.4 端点描述符	62
7.1.5 字符串描述符	63
7.2 标准的 USB 设备请求命令	64
7.2.1 设备请求命令的格式	64
7.2.2 获取状态请求 GET_STATUS	66
7.2.3 清除特性请求 CLEAR_FEATURE	68
7.2.4 设置特性请求 SET_FEATURE	69
7.2.5 设置地址请求 SET_ADDRESS	70
7.2.6 获取描述符请求 GET_DESCRIPTOR	70
7.2.7 设置描述符请求 SET_DESCRIPTOR	71
7.2.8 获取配置请求 GET_CONFIGURATION	72
7.2.9 设置配置请求 SET_CONFIGURATION	73
7.2.10 获取接口请求 GET_INTERFACE	74
7.2.11 设置接口请求 SET_INTERFACE	75
7.2.12 同步帧请求 SYNCH_FRAME	75
7.3 USB 协议栈设备框架的软件实现	76
7.3.1 必需的一些常量	76
7.3.2 设备描述符的程序实现	77
7.3.3 配置描述符的程序实现	79
7.3.4 接口描述符的程序实现	80
7.3.5 端点描述符的程序实现	80
7.3.6 字符串描述符的程序实现	82
7.4 通用 USB 固件程序流程	84
7.4.1 USB 设备的暂态	84
7.4.2 USB 的枚举过程	86
7.4.3 USB 固件协议栈的整体描述	86
复 习 题	88

第 8 章 USB 设备类	90
8.1 USB 设备类简介	90
8.1.1 类的定义	90
8.1.2 类协议在整个 USB 协议体系中的位置	90
8.2 标准的 USB 设备类	92
复习题	93
第 9 章 USB 硬件设计基础	94
9.1 基本的 USB 硬件电路分析	94
9.1.1 USB 连接点电路	95
9.1.2 信号线配置电路	95
9.1.3 时钟电路	95
9.1.4 信号线上拉电路	95
9.1.5 USB 芯片及其外围电路	95
9.1.6 USB 中断信号电路	96
9.1.7 CPU 接口电路	96
9.2 USB 硬件系统的 PCB 设计基础	96
9.2.1 电磁兼容性简介	97
9.2.2 USB 系统中控制噪声的措施	97
复习题	98
 第 4 部分 嵌入式 USB 主机开发技术	
第 10 章 嵌入式 USB 主机系统规划	100
10.1 USB 主机嵌入式化的必要性和迫切性	100
10.1.1 为什么要开发嵌入式 USB 主机	100
10.1.2 嵌入式 USB 主机在数据存储和交换中的应用	101
10.1.3 嵌入式 USB 主机的应用前景分析	101
10.2 USB 主机协议简介	102
10.2.1 USB 主机接口的工业标准	102
10.2.2 USB 主机系统的功能	103
10.2.3 USB 主机系统的结构	103
10.2.4 USB 主机控制器	104
10.2.5 主控制器驱动程序	105
10.2.6 USB 核心驱动程序	106
10.3 USB Mass Storage 类协议	108
10.3.1 Mass Storage 类概述	108
10.3.2 单批量 Bulk - Only 传输协议	109
10.3.3 Mass Storage 的子类命令简介	112

10.4	USB 主机嵌入式化的主要思路	116
10.4.1	PC 上 USB 主机的工作原理总结	116
10.4.2	嵌入式 USB 主机的硬件设计思路	117
10.4.3	嵌入式 USB 主机的软件设计思路	117
10.5	嵌入式 USB 主机系统的软硬件规划	118
10.5.1	系统结构及其硬件设计	118
10.5.2	软件设计	120
	复 习 题	122
第 11 章	嵌入式 USB 主机系统的硬件设计	123
11.1	嵌入式 USB 主机接口芯片 SL811HS 介绍	123
11.1.1	SL811HS 的功能模块及特点	123
11.1.2	SL811HS 芯片引脚分布	124
11.1.3	SL811HS 的相关寄存器介绍	125
11.2	嵌入式 USB 主机核心 CPU 芯片 MC68HC912D60A 的介绍	130
11.2.1	MC68HC912D60A 的特性	130
11.2.2	MC68HC912D60A 的引脚介绍	132
11.2.3	MC68HC912D60A 相关寄存器简介	134
11.3	嵌入式 USB 主机系统的供电系统设计	139
11.3.1	供电系统电路	139
11.3.2	电压转换电路	139
11.3.3	电源指示电路	140
11.4	MC68HC912D60A 单片机最小系统电路设计	140
11.4.1	供电系统及引脚信号定义	140
11.4.2	时钟电路	141
11.4.3	BDM 背景调试模式接口电路	142
11.4.4	MC68HC912D60A 工作模式选择电路	143
11.4.5	单片机复位电路	143
11.5	SL811HS 外围电路设计	144
11.5.1	系统供电及引脚信号定义	144
11.5.2	时钟电路	144
11.5.3	USB 下行端口设计	145
11.5.4	复位电路	145
11.6	SL811HS 与 MC68HC912D60A 通信接口设计	146
11.6.1	MC68HC912D60A 通信引脚分配	146
11.6.2	SL811HS 与 MC68HC912D60A 的端口 I/O 电平比较	146
11.6.3	电平转换电路设计	148
11.7	系统其他模块的电路设计与实现	148
11.7.1	LCD 显示电路设计	149
11.7.2	键盘中断电路	149

11.7.3	串口通信电路	151
11.7.4	CAN 模块电路	151
11.7.5	系统运行状态的 LED 显示电路	152
11.8	嵌入式 USB 主机系统的 PCB 设计	153
11.8.1	元器件的布置	153
11.8.2	系统 PCB 布线	154
11.8.3	PCB 覆铜	155
	复 习 题	155
第 12 章	嵌入式 USB 主机系统的软件设计	157
12.1	开发工具及软件结构简介	157
12.1.1	MC68HC912D60A 单片机的开发工具	157
12.1.2	CodeWarrio 集成开发环境简介	158
12.1.3	嵌入式 USB 主机系统源文件清单	160
12.2	MC68HC912D60A 初始化及用户交互界面设计	160
12.2.1	MC68HC912D60A 的初始化程序设计	161
12.2.2	LCD 液晶驱动程序设计	162
12.2.3	键盘中断模块程序设计	170
12.2.4	LED 显示模块程序设计	174
12.2.5	串口通信模块程序设计	174
12.3	SL811HS 与 MC68HC912D60A 的通信程序设计	175
12.3.1	通信总线的定义	175
12.3.2	读数据	177
12.3.3	写数据	179
12.3.4	读/写批量数据	180
12.4	USB 主机的系统软件设计	181
12.4.1	嵌入式 USB 主机系统的核心程序之间的关系	181
12.4.2	SL811HS 的初始化	182
12.4.3	实现 USB 的设置、输入和输出事务	182
12.4.4	实现 USB 的数据传输方式	189
12.4.5	实现标准的 USB 请求命令	191
12.4.6	枚举设备和获取描述符	192
12.5	Mass Storage 类协议的程序设计	194
12.5.1	命令块封包 CBW 和命令状态封包 CSW 的定义	194
12.5.2	单批量 Bulk - Only 传输协议的程序设计	195
12.5.3	UFI 子类请求命令的实现	197
	复 习 题	197
第 13 章	嵌入式 USB 主机系统实例	198
13.1	嵌入式 USB 主机系统 Demo 的外观及使用	198

13.2	系统启动	199
13.3	USB 设备的连接与配置	201
13.4	主机和设备之间 Mass Storage 类协议数据通信	202
13.5	基于 FAT 系统的文件管理及实验	202
第 14 章	USB 协议 2.0 补充版本 On - The - Go 简介	205
14.1	什么是 USB On - The - Go	205
14.2	USB OTG 设备的功能	205
14.3	USB OTG 的机械层和电气层协议	206
14.3.1	USB OTG 的接插件	206
14.3.2	USB OTG 总线的电流要求	207
14.4	USB OTG 体系的软件描述	207
14.4.1	OTG 配置描述符	207
14.4.2	会话请求协议	208
14.4.3	主机交流协议	208
14.4.4	OTG 的软件结构	209
14.5	开发 USB OTG 设备	209
14.5.1	支持 USB OTG 的芯片	209
14.5.2	如何开发 USB OTG 设备	209
	复 习 题	209
第 5 部分	USB 设备开发技术	
第 15 章	通用的 USB 固件源代码分析	212
15.1	概 述	212
15.2	端点的数据读/写处理	213
15.3	控制传输与 USB 标准请求命令的处理	214
15.4	其他传输方式的实现	220
	复 习 题	221
第 16 章	USB Hub 设计	222
16.1	USB Hub 结构及功能简介	222
16.1.1	USB Hub 对 USB 体系的重要意义	222
16.1.2	USB Hub 的功能	223
16.1.3	USB Hub 的结构	223
16.2	USB Hub 的软件编程基础	225
16.2.1	USB Hub 的电源工作模式	225
16.2.2	USB Hub 的描述符	226
16.2.3	USB Hub 的类特定请求	228
16.3	基于 GL652USB 的 7 端口 USB Hub 的设计	229