

# USB 总线及其接口设计实现方法分析

张 萍\*

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

**摘 要** USB 由于速度快、使用灵活、易于扩展、支持即插即用和成本较低等一系列优良特性, 正逐步取代传统的接口总线而应用于计算机中。本文介绍了 USB 总线的产生发展、基本特点、体系结构及其接口的设计实现方法。

**关键词** 通用串行总线 USB 体系结构 接口

USB 即通用串行总线 ( Universal Serial Bus ), 是 Intel 、 Microsoft 等大厂商为解决计算机外设种类的日益增加与有限的主板插槽和端口之间的矛盾而提出制定的。它在传统的计算机结构基础上, 引入了网络的某些技术, 是计算机外设连接技术的重大变革, 已成为新型计算机接口的主流。一方面, 它是一种将适用于 USB 的外围设备连接到主机的外部总线结构, 可支持传输速率高达 480Mbps 的外设; 另一方面, 它又是一种通信协议, 支持主系统和多个 USB 的外围设备之间的可靠数据传输。

## 1 USB 的产生和发展

随着计算机应用的日益普及, 其外设也日益丰富。每一个外设都需要通过一个接口与计算机相连。当外设增多了以后, 就会产生许多问题。

首先, 外设增多, 计算机的接口也随着要增多。如果所有的接口均被用上, 就只能通过添加插卡来增加接口。但 PC 内部可增插插卡的数量受到插槽数目的限制。而且, 在对 PC 机进行功能扩展时, 必须对计算机很熟悉, 对接口卡的硬件资源 ( I/O 地址、内存、中断、DMA ) 需进行合理的配置, 因此扩展难度大。

其次, 随着科技的不断发展, 大量的新外设不断出现, 它们对计算机提出了更高的要求,

如高速度、双向传输数据等。传统的串 / 并行接口已不能满足数据通信的需要。

再次, 由于计算机的普及, 它越来越要求简单, 实用, 方便, 廉价。传统的计算机在进行外设安装时, 用户不得不面对多种不同的接口和数据, 如键盘、鼠标、并口、显卡、声卡等; 对于板卡式的外设, 还必须打开机箱; 外设连上后, 用户还必须安装新的软件并重启系统。这些既麻烦, 又容易出错。

正是为了解决传统微机外部总线结构的上述缺陷, 1995 年, 由 Compaq 、 Digital 、 IBM 、 Intel 、 Microsoft 、 NEC 和 Northern Telecom 七个在计算机与通信工业领先的公司组成联盟, 并建立 USB-IF ( USB 实施者论坛) 来推进采用 USB 标准的兼容设备的开发。1995 年 4 月, 正式制定了 USB0.9 通用串行总线规范; 1996 年, 公布了 USB 规范 1.0, 这是第一个为 USB 产品提出设计要求的标准; 1998 年, 在进一步对以前版本的标准进行阐述和扩充的基础上, 发布了 USB 标准 1.1, USB1.1 是目前推出的在支持 USB 的计算机与外设上普遍采用的标准。

1999 年 3 月, USB2.0 诞生, 它在原来 USB1.1 规定的 12Mbps 和 1.5Mbps 的基础上增加了第三个传输速度 480Mbps, 以适应下一代性能更高的 PC 外设。USB2.0 是 USB1.1 的自然演化, 与

\* 2000 级硕士研究生

其向前和向后兼容,从而为最终用户提供“无缝的”转换过程。如今,计算机主板都带有 USB 接口, Windows 也全面支持 USB 标准。很多外设制造商也采用 USB 标准开发产品,如 USB 扫描仪、USB 数码相机和数码摄像机、USB 键盘、USB 音频系统等。

## 2 USB 的特征

USB 与传统的外围接口相比,主要有以下一些特点:

(1)速度快。USB1.1 标准有高速和低速两种模式,主模式为高速模式,速率为 12Mbps,比串口快了整整 100 倍,比并口也快了十倍多。USB2.0 把速率提高到 480Mbps,并且多个高速外设可同时运行。

(2)支持热插拔和即插即用。采用 USB 接口的外设可以随时接入和拔离系统,而不需要关掉系统电源,而且原来需要配接插卡才能使用的一般外设,如果它配有 USB 接口,就不再需要添加插卡。USB 主机能够动态地识别设备的状态,自动给接入的设备分配地址和配置参数。这样一来,无需用户干预 USB 设备,也不涉及 IRQ 冲突等问题,为用户省去了硬件配置的烦恼,带来了极大的方便,真正做到了“即插即用”。

(3)易扩展。USB 采用的是易于扩展的树状结构,通过使用 USB Hub 的扩展,可连接多达 127 个外设。标准的 USB 电缆长度为 3 m (5 m, 低速)。通过 Hub 或中继器可以使外设距离达到 30 m。

(4)独立供电。USB 的每个端口可以输出最大达 5V、500mA 的电流。传统的一些外设就可以通过 USB 来供电,省去了电源插头。

(5)支持多媒体。USB 提供了对电话的两路数据支持,它可支持异步及等时数据传输,使电话可与 PC 集成。

## 3 USB 体系结构

### 3.1 总线的拓扑结构

USB 总线物理上是一个层叠的星形拓扑结构,也有人称为菊花链结构。该拓扑由主机 (Host)、集线器 (Hub) 和设备 (Function) 组成。一个 Hub 在每个星形结构的中心。图 1 是其结构模型示意图。

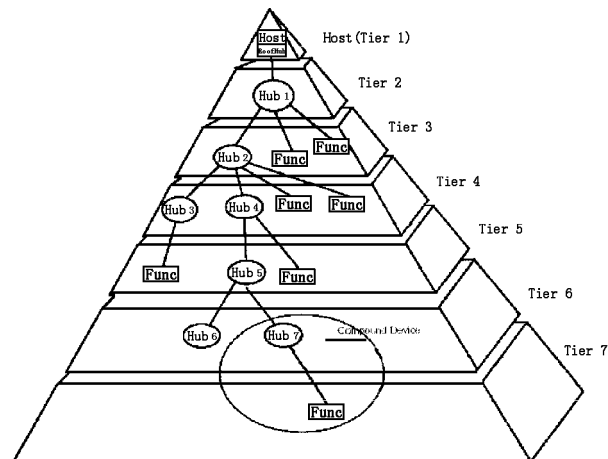


图 1 USB2.0 总线拓扑

(1)主机。在 USB 系统中只有一个主机,USB 系统与主机之间的接口称为主控制器 (Host Controller)。根 Hub 被集成在主机系统中,以提供一个和多个连接点。主机负责动态检测外设的接入和拔除,给新接入的设备分配地址和配置参数,管理主机与设备的数据通信,管理系统电源等。

(2)集线器。它是一种特殊的 USB 设备,主要用于扩展接口,以使系统连接更多的外设 (不超过 127 个);同时它也能动态识别外设的接入并负责电源的管理和分配。

(3)设备。通常由单独的外设实现,并由一根 USB 电缆连接到 Hub 的端口,它为系统提供了具体的功能,如扫描仪、键盘等。它们使用标准的 USB 数据结构和主机通信,能识别主机发出的各种命令,并对之作出响应。

### 3.2 物理接口

USB 通过一个 4 芯线电缆传输数据信号和电源。其结构如图 2 所示。

其中, D+ 和 D- 分别传输数据信号,传输的信号采用非归零反转编码 (NRZI) 的差分

数据格式, 用位填充缓冲的方法以确保数据传输。每个数据包之前是 SYNC 域, 用于同步位时钟。Vbus 为总线的电源线, 常为 +5V 电压。GND 为地线。

USB 2.0 支持三种传输速度: 高速 480Mbps; 全速 12Mbps; 低速 1.5Mbps。

所有设备都有一个上行或下行的连接, 上行连接器和下行连接器不可互换, 以避免集线器之间非法的、循环往复的连接。

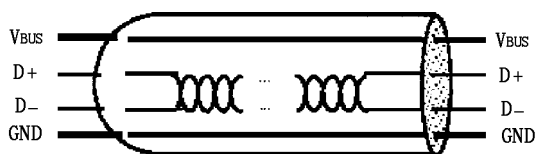


图 2 USB 电缆线结构

### 3.3 总线协议

USB 是一种轮询方式的总线, 主机控制器初始化所有的数据传送。每个总线执行动作按照传输前制定的原则, 最多传送 3 个数据包。

首先, 主机控制器发送一个描述传输动作的种类、方向、USB 设备地址和端口号的 USB 数据包, 即“令牌包”(token packet); 然后, 被寻址的 USB 设备从解码后的数据包中取出属于自己的数据。传输开始时, 由令牌包标志数据的传输方向, 然后发送端发送数据包。最后, 接收端也要相应发送一个握手的数据包以表明本次传输是否传送成功。

发送端和接收端之间的 USB 传输, 可视为在主机和设备端点之间的一条管道(Pipe), 如图 3 所示。有两种类型的管道(Pipe): 流(Stream)和消息(Message)。流的数据没有 USB 所定义的数据结构, 而消息数据则有。管道与数据带宽、传送服务类型和端口特性如方向、缓冲区大小有关。外设一上电, 消息管道即建立起来, 它作为缺省的控制管道, 给主机访问外设的状态和配置外设提供了一条路径。主机在完成对外设的配置后, 各流管道才建立起来。

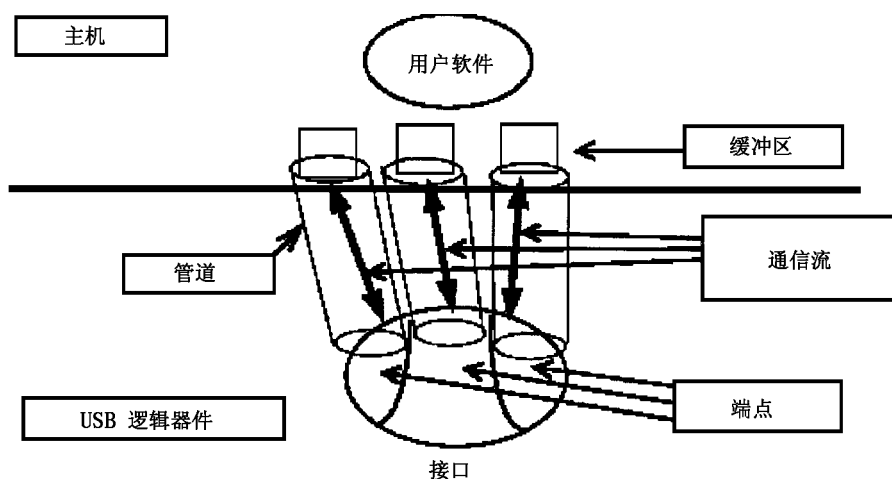


图 3 USB 的通信流

### 3.4 系统配置

USB 协议支持热插拔, 因此系统必须支持物理总线拓扑的动态变化。所有的 USB 设备都是通过某个端口接在 USB 上。集线器的状态指示器指明了 USB 设备是否被安装或拆除; 若安装, 则指明了 USB 设备端口。主机通过查询 Hub 来取回其状态指示。当外设插入时, 主机通过

设备控制通道来激活该端口并给 USB 设备以预设的唯一地址值。如果安装的是 Hub, 并有外设连在其端口上, 则上述过程对每个 USB 设备的安装都要重复一遍。

当 USB 设备从集线器的端口拔出后, 集线器关闭该端口, 并向主机报告该设备已不存在。USB 的系统软件将准确地进行处理, 如果去除

的是集线器,则系统软件将对集线器及连接在其上的所有设备进行处理。

### 3.5 容错性能

USB 提供了多种机制,如使用差分驱动、接收和防护,以保证信号完整;使用循环冗余码,以进行外设装卸的检测和系统资源的设置,对丢失和损坏的数据包暂停传输,利用协议自我恢复,以建立数据和控制通道,从而使功能部件避免了相互影响的副作用。上述机制的建立,极大地保证了数据的可靠传输。

在错误检测方面,协议中对每个包中的控制位和数据位都提供了循环冗余码校验,可对一位或两位的错误进行 100% 的恢复,并提供了一系列的硬件和软件设施来保证数据正确性。

在错误处理方面,协议在硬件和软件上均有措施。硬件的错误处理包括汇报错误和重新进行一次传输,传输中若还遇到错误,由 USB 的主机控制器按照协议重新进行传输,最多可进行 3 次,若错误依然存在,则对客户端软件报告错误,使之按特定方式处理。

### 3.6 数据流类型

USB 数据传输是在主机软件和 USB 设备上的一个特定端口之间进行。包括 4 类基本数据传输。它们是:控制传输、同步传输、中断传输及块传输。其不同类的数据传输执行不同的功能。

(1) 控制传输:控制传送采用了严格的差错控制机制,其数据传送是无损的。主要用于在连接时配置一个端口。

(2) 同步传输。用于传输连续的、速率固定的实时数据流。此类传输要求实时性强,低误码率和低时延,且占用大量的 USB 带宽。常用于声音传送。

(3) 中断传输。用于少量的,实时的但可靠的数据传送。这种数据可由设备在任何时刻发送,并且以不慢于设备指定的速度在 USB 上传送。比如回显或反馈响应。

(4) 块传输。用于大量数据传送。批量数据是连续传送的,在硬件级上使用错误检测以保证可靠的数据传输,在协议中引入了数据的可重复传送。它占用的带宽可变,比如打印机和扫描仪。

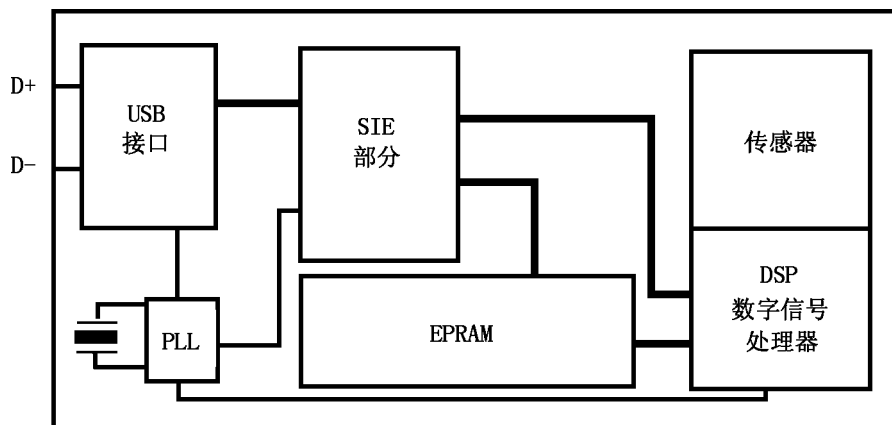


图 4 一个典型的 USB 功能器件的结构框图

## 4 USB 接口的设计实现方法

USB 总线接口处理电气层和协议层的互连。从互连的角度来看,相似的总线接口由设备及主机同时给出,例如串行接口引擎(SIE)。主机的 USB 总线接口由主机控制器实现,外

设的 USB 总线接口则由设备来实现,这里主要指外设的 USB 接口设计。在物理机制上,一个 USB 外设可以由四部分组成:用于实现和 USB 协议兼容的 SIE 部分;用于存储器件特征字、存储实现外设特殊功能程序及厂家信息的协议层(ROM);用于实现外设功能的传感器及对

数据进行处理 DSP 部分; 将外设连到主机或 USB HUB 的接口部分。如图 4 所示。

其中, SIE (串行接口引擎) 可以完成 USB 协议中规定的 80% ~ 90% 的通信工作, 是 USB 外设最重要的硬件组成部分, 它主要完成 NRZI 编解码, 加 / 去填充位, 产生数据的 CRC 校验码, 对数据包进行 CRC 校验, 数据的串 / 并和并 / 串转换, 检测和产生数据的同步字段和结束信号。

在微控制器和 USB 接口的选择上, 有以下三种方法:

#### 4.1 方法一

采用普通单片机加上专用的 USB 接口芯片。如图 5 所示

现在的 USB 专用接口芯片生产厂商很多, 如 National Semiconductor 公司的 USBN9602, 此芯片内部总共带有 7 个传送 / 接收 FIFO 缓冲

器, 广泛用于测控技术、数据采集、信号处理等; PHILIPS 公司的 PDIUSB12, 此芯片单片集成 SIE、FIFO 存储器、收发器及电压转换器, 并严格遵从 USB1.1 协议; 还有 ScanLogic 公司的 SL11 系列等。其中, Cypress 公司的 USB 接口芯片销售量为全球第一。其产品系列从低速, 中速到高速应有尽有, 每个系列中又有不同型号的几款, 同一系列不同型号的芯片在 RAM、端点的个数等指标上略有差异。

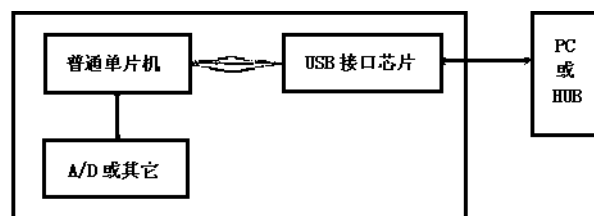


图 5 USB 接口设计方法一

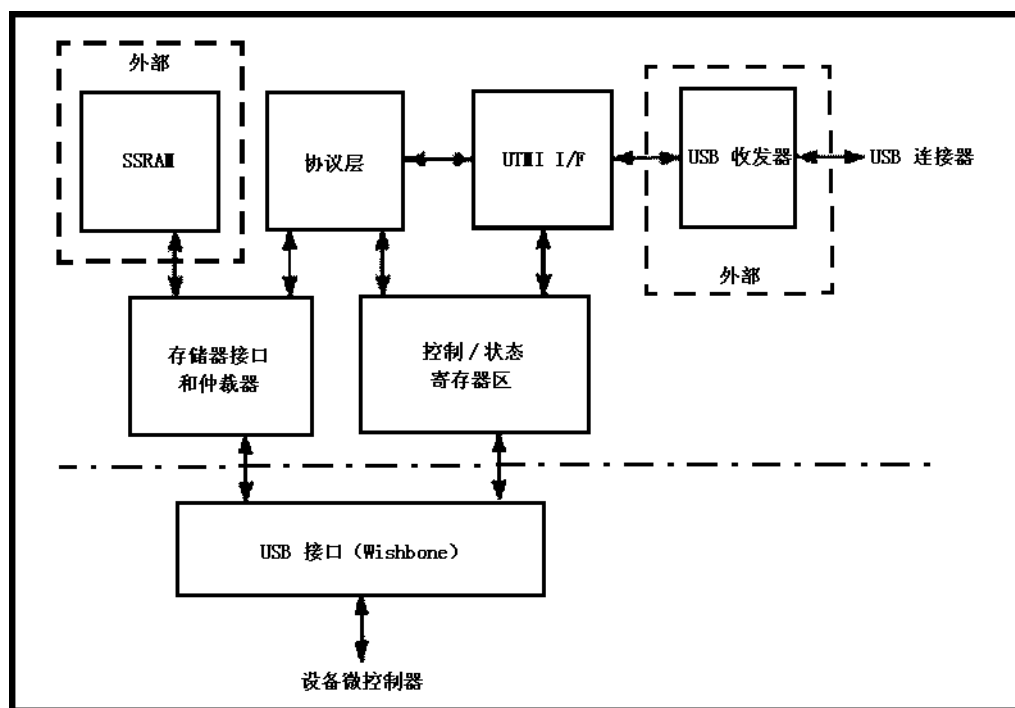


图 6 USB 的 FPGA 实现硬件原理框图

#### 4.2 方法二

随着 USB 技术的日益成熟, 一些芯片厂商推出了具备 USB 通信接口的单片机, 内部集成了 USB 专用芯片, 这些单片机处理能力强, 有

的还配备 Windows 驱动程序以及 Windows 开发库, 构成系统的电路简单, 调试方便。如 Motorola 公司的 MC68 系列, Intel 公司的 8X93 系列, Cypress 公司的 EZ-USB2100 系列等。这些单片

机处理能力强,有的本身就具备多路 A/D,构成系统的电路简单,调试方便,电磁兼容性好。Motorola 公司的单片机,其针对性较强,对游戏杆,显示器,鼠标等有不同的单片机及开发系统与之对应,例如用于开发游戏杆的 68HC05JB4,除了含有 USB 接口外,还有 6 路 8 位 A/D 变换输入端。Cypress 公司最新推出了带智能 USB 接口的单片机 EZ-USB,它集成了一个加强的 8051,一个智能 USB 引擎,一个 USB 收发模块, RAM,一个锁相环,且严格遵从 USB1.0 规范,支持远程唤醒。

### 4.3 方法三

采用 FPGA 加上普通的处理器,其中 FPGA 用以实现 USB 的 SIE 的功能,以适应各种不同的应用需要,节约成本,而且也便于根据 USB 版本的增强而相应改变。其实现的结构框图如图 6 所示。

整个结构由五个部分组成: USB 接口为微处理器和内部功能部件提供一个接口,它和 WISHBONE SoC Bus Specification 相一致;存储器接口和仲裁器协调微处理器和 USB 核的存储器存取之间的矛盾;协议层负责所有的 USB 数据的输入、输出和控制通信;控制/状态寄存器区存有控制、状态寄存器;UTMI I/F 是 USB 收发器的接口模块,负责处理外部数据收发器的接口状态、设备挂起/唤醒模式的控制以及发送和接收的数据缓冲等。

以上三种方法各有优缺点。对于第一种方法,可以利用现有的单片机开发系统,不必购买新的单片机开发系统,从而节省投资;但硬件设计和调试比较麻烦。对于第二种方法,要购买新的开发系统,投资较大,但硬件设计简

单,调试方便。第三种方法,实际上可以归于第一种方法之中,它具有第一种的优点,而且可以根据系统的要求而灵活配置,以便于日后系统的升级,是一种新的而且有效的设计方法。

## 5 结束语

USB 将即插即用技术带入 PC 机的外围输入输出设备,使得设备可进行热插拔和自动配置,使连接达到标准并得到简化,从而使 USB 成为最新的一种 PC 通信和 I/O 设备的标准接口,并得到了广泛应用。USB 总线接口的设计方法也有多种,可采用专用 USB 接口芯片外加微处理器,也可用实现 SIE 功能的 FPGA 加上微处理器,还可以采用带有微处理器的 USB 接口芯片。它们各有优缺点,可根据具体情况采用。

## 参考文献

- [1] Don Anderson, Universal Serial Bus Architecture, Addison Wesley Publishing Company, 1999
- [2] Universal Serial Bus Specification Revision 2.0
- [3] <http://www.usb.org>
- [4] <http://www.opencores.org>
- [5] 江胜,时亚弘,USB2.0 技术概述,计算机应用研究,2001(3)
- [6] 戴红梅,胡仁杰,USB 及 USB 外设的开发,电测与仪表,2000(12)
- [7] 黄维柱,许军,通用串行总线 USB,计算机应用研究,2001(2)
- [8] 陈启美,王刚,USB 技术概述,电力自动化设备,2001(2)
- [9] 刘丁,王云飞,USB 在数据采集系统中的应用,自动化与仪器仪表,2000(4)

### • 简 讯 •

## 基于半导体的宽带激光器

美国贝尔实验室的物理学家最近研制成功第一台基于半导体的宽带激光器。与现有的发射光脉冲的器件

不同,该激光器可在一个 2μm 的波长范围内发射连续的红外光束。贝尔实验室的物理学家还计划对这种激光器进行改进,使其发射可见光。他们认为这种激光器可以用于气体敏感、计量以及光通信。

□ 高国龙