义了 2 种供电模式:自供电和总线供电。

4.可选择的多速度模式

USB 提供了 3 种速度模式:低速的 1.5Mbps、全速的 12Mbps 和高速的 480Mbps。不同的速度可满足不同的外设需求。

5.完善的总线拓扑结构

USB 菊花链式的星形总线结构，能够支持多达 127 个外设的同时连接，充分满足外设的需求。以 USB Hub 为“中转站”的模式，大大降低了 USB 主机的工作负荷，使设备更稳定的工作。

6.多种设备类

从音频设备、大容量存储设备到 Mass storage 到人机接口设备 HID 等等，几乎各种计算机外设都可在 USB 中找到相应的支持。

7.硬件结构标准化

USB 协议规定了 2 种标准的接插件:A 型和 B 型。其中 A 型用于下行端口，即矩形口，B 型用于上行端口，即方形口。

8.低廉的价格

USB 获得了广泛的软硬件支持，有大量产品问世，必然降低 USB 从芯片到设备的价格；USB 体系结构决定了其软件协议的复杂，并因此换得了硬件上的相对简化，这又降低了系统成本。

2.1.2 USB 协议基础

2.1.2.1 USB 系统

一、USB 系统模型

USB 以 USB 主机为核心，以外围的 USB 设备为功能，组成了系统模型。USB 提供的是主机和设备中间的一种数据通信服务。USB 主机包括 PC 机和嵌入式主机 2 种类型，USB 设备就是各种计算机外设产品或各种嵌入式系统的设备。

主机是 USB 的核心，每一次 USB 数据通信都必须是由 USB 主机来发起的(远程唤醒模式除外)，主机管理着每个设备。随着计算机工业的飞速发展，主机嵌入式化是大势所趋。我们设计的具有主从 USB 接口的智能化数据采集处理系统在连接 PC 上位机的情况下完成的是 USB 设备的功能，但要实现脱机情况下将数据存储到 U 盘的功能，就要在系统中嵌入 USB 主机的功能。

USB 硬件:USB 主控制器/根 Hub、USB Hub、USB 设备(包括 USB 协议栈固件)

USB 软件(基于 PC 机):用户软件和 USB 设备类驱动程序、USB 核心驱动程序、USB 主控制器驱动程序。

二、PC 机平台上的 USB 系统

1. PC 机上的 USB 系统组成部分

PC 机上的 USB 同其他 PC 机组件一样，包括 2 部分:硬件和软件。硬件完成物理上的接口和实体功能，软件则和操作系统配合管理硬件，完成数据流传输。

PC 机体系上的 USB 主机包含 3 个部分。

USB 主控制器/根 Hub

它们是 PC 机上的硬件，一般由 USB 主控制器芯片、USB Hub 控制器芯片、USB 端口连接件及控制器外围电路等组成。

USB 主控制器芯片提供 USB 收发物理层，实现 USB 电缆上差模信号与数字信号的转换并提供端点的物理存储机制，还根据 USB 的传输机制自动管理各端点的存储与数据交换；它还提供与 CPU 的接口电路，通过以并行或串行的方式连接到 CPU 的总线上而建立与 CPU 的通信。在基于 PC 机的系统中，USB 主控制器是通过 PCI 总线和 CPU 进行通信的。

根 Hub 是 USB 的第一级 Hub，提供 USB 的物理接口。它直接提供下行端口，供外围设备连接使用。一般的 USB 主控制器芯片本身就集成了根 Hub 并直接以 D+和 D-两根引脚的方式提供端口连接点。

USB 系统软件

它主要指 PC 机上操作系统提供的一系列软件和驱动程序，主要由 USB 核心驱动程序和 USB 主控制器驱动程序组成。

USB 核心驱动程序，是整个软件体系的核心部分，起到了中间桥梁的作用，它被捆绑在 PC 机的操作系统中，解释 USB 设备类驱动程序发来的命令并将其转化为一个或多个 USB 传输，然后发送给 USB 主控制器驱动程序。

USB 主控制器驱动程序负责最底层的驱动任务，控制和管理硬件底层，负责将 USB 传输分解为总线事务发送给 USB 主控制器芯片，并最终将串行数据发送到电缆上。USB 核心驱动程序不与 USB 主控制器硬件直接打交道，而是通过 USB 主控制器驱动程序这个媒介来与 USB 主控制器硬件进行通信。

一般来说，USB 核心驱动程序和 USB 主控制器驱动程序由支持 USB 的操作系统来提供，而 USB 设备类驱动程序则由该特定 USB 设备用户自己来开发。

用户软件和 USB 设备类驱动程序

USB 设备类驱动程序，也叫做 USB 用户驱动程序，它把用户要求的 USB 命令发送给 USB 主控制器硬件，同时初始化内存缓冲区，用于存储所有 USB 通信中的数据。Windows 操作系统对于 HID 类和 Mass storage 类设备提供了设备类驱动程序，而对于大部分的 USB 设备类，用户和厂商还需自己开发类驱动程序。

用户软件主要指用户与 USB 系统之间的一种界面，它主要完成用户对于 USB 的控制，以及实时地进行一些数据的交互。

2. USB 在 PCI 总线上的位置

整个 PC 机上的 USB 是建立在 PCI 总线上的，PC 机与 USB 的物理连接是通过 PCI 总线来实现的。

三、设备级的 USB 系统

设备级的 USB 系统指的整个 USB 系统除去主机以外的组成部分，包括 USB 设备和 Hub。

1. USB Hub

集线器(Hub)是 USB 即插即用技术中关键一环。它提供了 USB 的连接端口(Port)，是将多个连接线集中在一起的设备。USB Hub 利用 USB 电缆上的电平变化可以检测下行端口上 USB 设备的接入或者移出，同时可确定设备的速度类型。

2. USB 设备

USB 设备从底层的物理和电气特性到上层的软件协议和数据结构都有严格的定义，分为很多 USB 类。每个 USB 设备都具有表明自身能力和所需资源的描述符，在设备第一次连接到主机上后，首先要接受主机的枚举，提供描述符，在得到主机的允许之后，设备就可以分得 USB 的带宽，进行数据传输。

USB 设备的结构可分为 3 个层次:USB 总线接口、USB 逻辑设备、功能模块。

总线接口是最底层的物理实体，以 USB 接口控制器作为核心，是 USB 发送和接受数据的接口。它通过电缆直接与 USB 主机交换串行数据，并可实现串行数据到并行数据的转换。

逻辑设备基本上就是 USB 协议栈的主体。它来处理总线接口和不同端点间的数据，实现 USB 的各种基本行为。

以上的 2 部分是所有 USB 设备所共同的部分，不同 USB 设备各自的特点是通过第 3 层次的功能模块来提供的。这些功能模块需要与逻辑设备交换数据，通过 USB 实现自身数据的传输要求，各种设备的类协议功能也是在这一层实现的。

2.1.2.2 USB 的机械和电气特性

一、USB 的机械特性涉及到 USB 的接插件和电缆的物理结构，这些内容在此不做介绍。

二、USB 的电气特性

USB 的电气特性包含了很多内容，这里主要讲述 USB 的电源管理特点及即插即用技术的实现[3]。

1. USB 的供电模式

USB 设备和 Hub 采用 2 种供电模式，即自供电(Self-Powered)和总线供电(Bus-Powered)。自供电模式中，USB 设备或者 Hub 能够自己提供电源，无需从 VBus 上提取电流。总线供电模式为耗电量小的设备提供了一种方便的连接方式，可完全从 BUS 总线的 VBus 获得所需的电流。

2. 低功耗的实现

USB 供电的工作状态也被分为 2 种，即正常工作(Normal)状态和挂起(Suspend)状态。如果总线供电设备在 3ms 内没有总线操作，即 USB 总线处于空闲状态的话，该设备就需要自动进入挂起状态，这时这个设备的功耗是非常低的，

这是 USB 低功耗的一个非常重要的特点。在设备进入挂起状态后，可以通过唤醒(Resume)操作来恢复到正常工作状态。

3. 即插即用技术

此技术包含 2 个技术层面，即热插拔和自动识别配置。热插拔的关键技术在于电路接插件插、拔期间强电流的处理。USB 在电缆及接插件的设计上充分考虑了这一点，使得这个瞬时的强电流被完全吸收，从而使 USB 设备实现了热插拔。另一个关键技术层面是系统设备的自动识别，即主机系统在没有人工干预的情况下，能够自动检测到设备的接入并能自动配置该设备，也能够自动检测到设备的拔出，从而释放系统资源。USB 主要是通过在信号线上的一些特殊处理来实现这一技术。可以将设备端的上拉电阻是连接在 D+还是 D-信号线上的情况作为 USB 主机判断全速设备与低速设备的一个重要指标。通过 USB 主机或 Hub 端信号线上的上拉和下拉电平的变化情况，USB 主机可以自动检测到设备的拔出和接入并可识别接入设备的速度。

2.1.2.3 USB 数据通信结构

USB 协议中最为复杂的是底层数据通信结构的内容，其中包括了最基本的数据传输单元、数据传输类型、数据传输机制及数据交换流程等。

一、数据通信协议简介

1. 通信协议的主要内容

通信是计算机硬件中较为复杂和难度较大的科研领域。一套完整的通信协议包含的内容有:

(1)提出系统的通信模型，用来确定传输什么数据、在何种硬件和软件实体间进行数据通信、实现什么特殊功能。

(2)提供数据的传输方法，包括最为底层的数据单元格式、硬件上的数据发送方式、整体的数据传输类型等。

(3)提供给用户的软件架构，如何在 PC 机或嵌入式系统上通过软件编程来控制和使用各种通信协议。

实际的通信协议中包含的内容远不只这些，下面以此为蓝本，描述 USB 通信协议中的重点:

(1)USB 整体通信模型:即 USB 的星型拓扑结构，以 USB 主机为核心，建立 USB 主机与 USB 设备间的数据通信，通过 USB Hub 作为节点连接主机与设备。定义完整的机械层和电气层特性。在 PC 机平台上建立在 PCI 总线之上。

(2)USB 数据通信协议:以差模串行信号为载体传送二进制代码来传输信号；数据包作为最基本的完整信息单元。数据包包括很多称为“域”的层次；以包为基础，构成 USB 的 4 种数据传输类型。组合不同传输类型，传输各种类型数据，实现 USB 的各种功能。

(3)软硬件架构:包括主机、Hub 与设备架构；主机与设备通信的流程、步骤；

软硬件设计等。

2. USB 数据通信结构概况

“包”是 USB 最基本的数据单元。按照包在整个 USB 数据传输中的作用不同，可分为 4 类:令牌包、数据包、握手包和特殊包。通过把包分解成更小的单元即“域”来区分不同的包。域又被分为 7 类。

以包为基础，USB 定义了 4 种数据的传输类型:控制传输、中断传输、批量传输和同步传输。每一种类型都由一定的包按照某种特定的格式组成。

在一种传输过程中，并不是通过一次传输来完成的，而是分为多个数据交换过程，即把数据分为多份，然后一次次地传输，直到所有的数据都发送完毕。因此，这其中的每一次数据交换过程就叫“事务”。每种传输方式都由很多事务来完成，每一笔事务由底层包组成。

3. 二进制数的位发送顺序

按照协议规定:USB 总线上首先发送最低有效位(LSB，右起第一个数)，然后发送近邻的下一位，最后发送最高有效位(MSB，左起第一个数)。

二、域和包

1. 二进制数的序列——域

域(Field)是 USB 中对一系列有统一意义的二进制数的称呼。由域组成包。域可分为:同步域(SYNC)、标识域(PID)、地址域(ADDR)、端点域(ENDP)、帧号域(FRAM)、数据域(DATA)、校验域(CRC)。

2. 包

包(Packet)是最基本的 USB 的数据单元，由一系列的域组成。USB 中定义了 4 种类型的包:令牌包、数据包、握手包和特殊包。

三、数据传输类型

1. 数据传输概论

USB 的传输，是 USB 面向用户的、最高级的数据结构。USB 定义了 4 种数据传输的类型，即控制传输、中断传输、批量传输和同步传输。

传输是由事务来组成的，而事务按照其特点可分为 3 种类型:输入(IN)事务、输出(OUT)事务和设置(SETUP)事务。任何传输都是由这 3 种事务组成的，不同的只是这 3 种事务的组合和搭配情况。但是在不同的传输类型中，相同事务的结果并不是完全一样。通常所提到的传输是由一笔事务组成的传输。

2. 四种数据传输

4 种数据传输类型在结构、数据包发送顺序、总线传输特点、数据包大小和支持设备类型方面的比较如下所示。

中断传输(Interrupt Transfer)可用于键盘、鼠标等 HID 设备的数据传输中，由 IN 事务或 OUT 事务组成。最简单的一种情况，一次中断传输仅由一笔 IN 事务或一笔 OUT 事务构成，这些事务统称为“中断事务”

批量传输(Bulk Transfer)主要用于大容量数据的传输中，如硬盘驱动器的接口、光盘刻录机接口及数码相机等。

同步传输(Isochronous Transfer，简写为 ISO)多用于音频流等需要恒定传输速率的数据传输中，比如音箱、显示器和摄像头等设备的接口。

控制传输(Control Transfer)是最为复杂的传输类型，也是最为重要的传输类型，是 USB 枚举阶段最主要的数据交换方式。USB 初次连接到主机后，通过控制传输来交换信息、设备地址和读取设备的描述符，这样，主机才能够识别该设备，并安装相应的驱动程序，其余的 3 种可能的传输方式才能够得以使用。

2.1.3 USB 主机技术

具有主从USB接口的数据采集处理系统通过USB口与PC上位机进行通信，实现了 USB 设备的功能，而在脱机的情况下实现与 U 盘的通信，是实现了 USB 主机的功能。下面我们将对课题涉及的 USB 主机技术作简要介绍[4]。

2.1.3.1 USB 主机嵌入式化

在 USB 拓扑结构中居于核心地位的是主机，所有的 USB 设备只能和主机建立连接，目前，大量扮演主机角色的是 PC 机。随着 USB 应用领域的扩大，人们希望 USB 能应用在没有 PC 机的领域中。这就需要在 USB 设备中嵌入 USB 主机模块，使其由传统的 USB 外设成为主机。这些嵌入式主机可直接与其他 USB 设备相连，实现特定功能，当需要连接到 PC 机上时，就让其恢复 USB 设备的功能，这就实现了 USB OTG。

USB On-The-Go 可译为“便携式 USB”(或“移动 USB”)，简记为 USB OTG，是 USB 主机嵌入式化的一种实现，已经成为业内热点。符合 USBOTG 的设备完全抛开了 PC 机既可作为 Host，又可作为外设。这类 OTG 设备也被称为双角色设备(Dual-Role Device，简称 DRD)，并能够根据接入设备的特性和数据传输过程中的情况，自动切换为主机或设备。这些正好符合本系统的设计目的。

2.1.3.2 USB 主机协议简介

传统意义的 USB 开发，仅是对 USB 外设的开发，USB 核心驱动程序和 USB 主控制器驱动程序都由 Windows 等操作系统提供。而实现 USB 主机的功能，就必须设计这两部分驱动程序。USB 主机协议描述了 USB 系统软件(核心驱动程序和主控制器驱动程序)的设计规范。

一、USB 主机接口的工业标准

常用的PC机基本上都采用了通用式主机控制器接口(UHCI)或开放式主机控制器接口(Open HCI)，这两套工业标准实现的 USB 主机的功能基本一样，实现过程有些不同。它们都由主机控制器(Host Controller，简写为 HC)和主机控制器驱动(Host Controller Driver，简写为 HCD)组成。这些标准的提出保证了 USB 系统的规范性，并强化了不同 USB 硬件和软件厂商的产品之间的兼容性。UHCI