

USB

应用开发实例详解

薛园园 赵建领 编著
华清远见嵌入式培训中心 审校

从USB开发基础讲起，引导读者快速入门
详细讲解USB开发环境构建、USB固件编程、USB驱动开发和上位机程序开发
16个综合实例，分析常用USB设备的电路设计、程序设计



本书全部电路图和源代码



 **人民邮电出版社**
POSTS & TELECOM PRESS



第 1 章 USB 概述

本章目 标

USB 全称为 Universal Serial Bus，即通用串行总线，是计算机上的一种新型的接口技术。由于 USB 接口有传输速率高、体积小、可向外供电等特点，使得计算机和外部硬件设备之间的连接和使用都十分方便。目前，计算机的外围设备如鼠标、键盘、移动硬盘、打印机等都开始采用 USB 接口来实现。在测控系统的设计工作中，也越来越多地采用高速 USB 接口技术，如高速数据采集等。了解和掌握 USB 的应用与设计已成为现代电子系统设计的一个重要部分，是电子工程师的重要技能。本章内容包括：

- USB 的产生
- USB 总线特点
- USB 的总线结构
- USB 的供电
- USB 的开发流程

1.1 USB 的产生

计算机具有良好的扩展性，依赖于其具备多种通信接口，如 RS232、RS485、并行接口、ISA 接口、PCI 接口和 PS/2 接口等。这些接口最初是在 20 世纪 80 年代由美国的 IBM 公司设计并广范应用于计算机上的，但是这些接口存在很多缺陷。

1. 规范不统一

这些老式接口大部分都是专用的，各自有各自的接口协议和连接器。例如，PS/2 用来接鼠标和键盘；RS232 用来进行串行通信；并行接口用来接打印机等。这些种类繁多的接口和协议规范给用户带来了极大的不便。

2. 体积庞大

RS232、RS485、并行接口、ISA 接口、PCI 接口和 PS/2 接口等老式接口体积比较大，占据了机箱和主板的很大一部分面积，这样不利于计算机的小型化。目前，便携式计算机基本上已经没有这些接口了，否则计算机的“便携”是无法实现的。

3. 扩展性差

这些老式接口一般只支持连接一个设备，无法扩展多个设备同时工作。如通过并行接口只能连接一台打印机，而不能连接多台。计算机主板上的接口数目是有限的，但随着工作和生活中大量外设的出现，计算机的接口无法扩展，显得很紧张。

4. 不支持热插拔

计算机主板上的老式接口一般均不支持热插拔，即在更改硬件连接后，需要重新启动计算机才能使硬件生效而正常工作。这主要是因为这些接口采用传统的 I/O 模式。当在计算机上连接外部设备时，外部设备被映射为 CPU 的 I/O 地址空间，同时被分配一个特定的中断请求 IRQ 或 DMA 通道。这种接口连接模式往往存在 I/O 地址冲突、指定的中断请求 IRQ 或 DMA 通道被占用的情况。此时，为了使该设备或新的设置生效，往往需要重新启动计算机，这使得外部设备和计算机的连接十分麻烦。

随着技术的发展和计算机应用的需要，上述问题越来越制约计算机的使用。因此，需要一个新型的计算机接口来解决这些问题。此时 USB 应运而生。USB 是一种外部设备与计算机进行连接通信的新型接口技术。1994 年 11 月，USB 规范由 Compaq、Digital Equipment、IBM、Intel、Microsoft、NEC 和 Northern Telecom 7 家公司共同提出。USB 接口技术的出现完美地解决了上述问题，简化了外部设备与计算机的连接过程，使计算机的外部设备扩展更加灵活方便。目前，各种计算机外部设备都在逐渐改为 USB 接口，大有取代其他接口的趋势。

1.2 USB 总线特点

USB 技术的出现，可以说是计算机接口技术的一大飞跃。目前，USB 以接口体积小、支持热插拔、即插即用、兼容性好、节省系统资源和成本低等优点迅速普及开来。USB 接口是一种新型、高效、快速、价格低廉、体积小和支持热插拔的串行通信接口，并且可支持多个外部设备的连接和通信。USB 接口即插即用的特点，可以在不重新启动计算机的情况下，直接将外部设备连接到计算机的 USB 接口并开始工作。

USB 总线接口及其规范与计算机上老式的接口相比，具有以下优点。

- 和计算机上的老式接口相比，USB 接口体积小，具有很明显的体积优势。在目前计算机小型化和集成化的趋势中，得到了广泛的应用。例如，笔记本电脑基本都配备了多个 USB 接口。

- USB 为共享式接口技术，支持多个外设的连接，其采用了“菊花链”式的扩展连接方式。多个 USB 设备可以通过 USB 集线器连接到同一个计算机 USB 端口。USB 规范中规定，一个 USB 主控制器可以连接最多 126 个外部设备，大大拓展了计算机的设备和功能扩展能力。

- USB 支持即插即用技术。当计算机上新连接一个 USB 设备时，操作系统自动扫描监测硬件的连接，通过对该设备的识别来加载对应的驱动程序。这样，USB 设备便可以正常工作。USB 接口的即插即用技术实现了设备的自动配置，无需任何用户手动配置，也不必每次连接设备都重启计算机。

- USB 支持热插拔技术。用户可以随时断开 USB 设备与计算机的连接，此时操作系统扫描到硬件的改动，自动停止该设备的资源。

- 计算机为 USB 主控制器分配一根 IRQ 线和一些 I/O 地址，USB 主控制器再为外部设备分配唯一的地址。这样，可以大大节省系统的硬件资源。

- USB 接口技术支持 3 种数据传输速率操作，包括低速 1.5Mbit/s、全速 12Mbit/s 和高速 480Mbit/s。这样便于不同的外部设备选择合适的数据传输速率来实现。

- USB 接口技术支持 4 种类型的传输模式：块传输、中断传输、同步传输和控制传输，可以满足不同外部设备的功能需要。

- USB 接口技术性价比高。目前，随着技术的发展和 USB 设备的普及，USB 的主控芯片、从控芯片以及 USB 电缆等价格都已十分低廉，USB 接口的性价比日益提高。

- USB 接口具有外部供电能力。计算机上的 USB 接口最大可以输出 500mA 的电流，输出电压为 5V，符合大多数的微处理器系统。USB 协议中制定了完备的电源管理方式，可以大大节省计算机和外部设备的功耗。

- USB 接口具有良好的兼容性。随着技术的发展，USB 规范包括 USB 1.0、USB 1.1、USB 2.0，以及无线 USB 和 USB OTG 等多个版本。这些 USB 规范协议都具有良好的向下兼容性。

这里将 USB 接口和其他主要计算机接口的性能进行比较，如表 1.1 所示。

表 1.1

常用计算机接口性能比较

接口类型	数据格式	传输速率	设备扩展数	电缆长度	是否支持热插拔
并行接口	并行	8Mbit/s	2 个或 8 个	≤10m	否
RS232 接口	串行	20kbit/s	≤2	≤30m	否
RS485 接口	串行	10Mbit/s	≤32	≤1200m	否
ISA 接口	并行	128Mbit/s	—	—	否
EISA 接口	并行	266Mbit/s	—	—	否
PCI 接口	并行	1056Mbit/s 2112Mbit/s	—	—	否
AGP 接口	并行	≥2112Mbit/s	—	—	否
以太网接口	串行	10Mbit/s、100Mbit/s、 1Gbit/s	≤1 024	≤500m	否
USB 接口	串行	1.5Mbit/s、12Mbit/s、 480Mbit/s	≤126	无要求	是
IEEE-1394 接口	串行	400Mbit/s、3.2Gbit/s	≤63	≤4.5m	是

在这里，早期的 USB 1.0 协议要求 USB 低速设备的电缆长度小于 3m，USB 全速设备的电缆长度小于 5m。后来，新的 USB 1.1 协议和 USB 2.0 协议中对电缆长度无特殊要求。从表中可以看出，USB 接口在速度、可扩展性等方面具有很大的优势，目前得到了广泛的应用。

1.3 USB 的总线结构

总体来说，一个典型的 USB 应用系统由 USB 设备、USB 主机和 USB 电缆组成，如图 1.1 所示。在 USB 总线系统中，一般称外部设备为 USB 设备，USB 设备主要包括 U 盘、移动硬盘、MP3、USB 鼠标、USB 键盘以及 USB 数据采集系统等。USB 主机则主要是具有 USB 端口的计算机。在 USB 数据传输过程中，由 USB 设备指向 USB 主机的数据传输称为上行通信，由 USB 主机指向 USB 设备的数据传输称为下行通信。

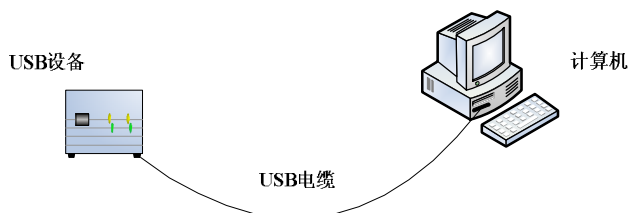


图 1.1 USB 设备的连接

下面将从 USB 主机和设备、USB 连接和 USB 系统的分层结构来介绍一下整个 USB 系统。

1.3.1 USB 主机和设备

USB 总线中最重要的就是 USB 主机和 USB 设备。USB 主机负责 USB 协议的处理，USB 设备则可以完成用户的特定功能，下面分别进行介绍。

1. USB 主机

包含 USB 主控制器，并能够控制完成主机和 USB 设备之间的数据传输的设备称为 USB 主机。广义上来说，USB 主机可以包括计算机或者其他具有 USB 主控芯片的设备，例如带有 USB Host 的 PDA。

在整个数据传输过程中，USB 主机处于主导地位。USB 主机启动数据和命令的传输，USB 设备被动地响应 USB 主机请求。在 USB 协议中规定，USB 系统中只允许一个 USB 主机存在，多个 USB 主机同时存在将会引起混乱。

2. USB 设备

随着 USB 接口的深入人心，USB 设备越来越丰富。按照 USB 设备功能的不同，可以分为两大类：USB 集线器和 USB 功能设备。下面分别进行介绍。

- USB 集线器是 USB 系统中的重要组件，其主要用于为 USB 主机系统提供额外的连接点，从而扩展 USB 主机的 USB 端口。USB 集线器它使得一个 USB 端口可以扩展连接多个设备，因此其又称为 USB HUB。USB 集线器的示意图，如图 1.2 所示。USB 集线器在 USB 系统中连接示意图，如图 1.3 所示。在系统中，USB 设备连接至 USB 集线器的下行端口，USB 集线器的上行端口与 USB 主机连接。在 USB 协议中规定，USB 集线器可以级联 5 级。

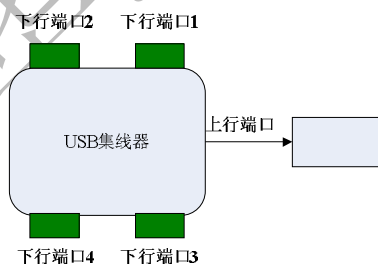


图 1.2 USB 集线器示意图

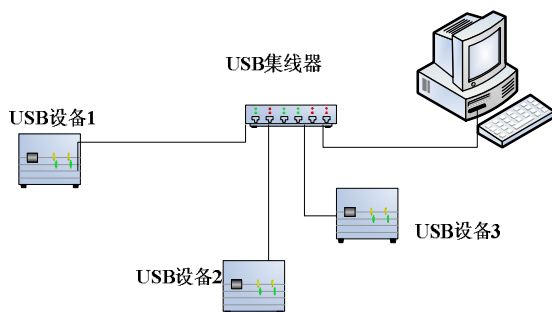


图 1.3 USB 集线器的连接

• USB 功能设备用于完成用户特定的功能，通常是一个独立的外部设备。典型的 USB 功能设有 U 盘、MP3、USB 鼠标、USB 键盘、移动硬盘等。这些 USB 功能设备用于扩展 USB 主机的功能，如计算机的 USB 键盘等；也可以用来进行数据传输，如 MP3 或 USB 数据采集系统等。每个 USB 功能设备内部都包含描述其功能和资源需求的配置信息，如 USB 带宽、接口种类等。在 USB 功能设备连接至 USB 主机时，USB 主机对其进行配置然后才可以使用。

1.3.2 USB 的连接

在 USB 协议中规定了 USB 连接器有两种：A 型和 B 型，如图 1.4 所示。USB 连接器的 A 型插座和 A 型插头互相匹配，而 B 型插座和 B 型插头互相匹配。一般来说，在 USB 主机或 USB 集线器的下行端口中常采用 A 型插座，因此 A 型插头总是指向上行的 USB 主机。USB 设备或 USB 集线器的上行端口常采用 B 型插座，因此 B 型插头总是指向下行 USB 设备或集线器。



图 1.4 USB 连接器

无论 A 型还是 B 型 USB 接头，其均有 4 根引线： V_{BUS} 、GND、 D_+ 、 D_- ，分别对应 USB 电缆的 4 根导线。其中，引线 V_{BUS} （红色）为 +5V 电源，GND 是地线（黑色），USB 主机通过这两个引线向外部设备供电。引线 D_+ （绿色）和 D_- （白色）是差分数据线，用于实现 USB 主机和 USB 设备的数据传输。

USB 主机和 USB 集线器、USB 设备和 USB 主机以及 USB 主机和 USB 集线器之间都需要通过 USB 电缆进行连接。USB 协议中规定了，USB 低速（1.5Mbit/s）、USB 高速（480Mbit/s）和全速（12Mbit/s）3 种数据传输速率。在 USB 协议中，对 USB 低速电缆和高速/全速电缆具有不同的要求，主要表现在如下几点：

- USB 低速电缆不需要屏蔽，USB 高速和全速电缆则需要屏蔽；
- USB 低速电缆不需要铜漏线，USB 高速和全速电缆则需要使用铜漏线；
- USB 低速电缆不需要双绞数据线，USB 高速和全速电缆则需要双绞数据线；
- USB 低速电缆不可作为分离电缆，USB 高速和全速电缆可作为分离电缆；
- USB 低速电缆不可作为束缚电缆，USB 高速和全速电缆可作为束缚电缆；
- USB 低速电缆对差分特征阻抗无特殊要求，USB 高速和全速电缆要求差分特征阻抗为 90Ω 。

1.3.3 USB 系统的分层结构

如果从系统设计和逻辑连接关系上考虑，USB 总线系统具有明确的分层结构。这种分层结构可以使 USB 总线适应多种设备的连接和识别。完整的 USB 应用系统可以分为逻辑功能层、设备层和总线接口层。下面分别进行介绍。

1. 逻辑功能层

逻辑功能层在 USB 应用系统中主要负责 USB 主机和 USB 设备之间的数据传输，由 USB 设备的功能单元和相应的 USB 主机程序组成。逻辑功能层中规定了数

据传输的类型，主要分为如下 4 种。

- 控制传输方式：用于在 USB 主机和 USB 设备之间实现对时间和速率都没有特殊要求的少量数据的传输。控制传输方式一般用于标准设备请求和自定义设备请求中，USB 主机通过控制传输读取或设置 USB 设备的配置信息。

- 块传输方式：用于在 USB 主机和 USB 设备之间实现对传输时间没有严格要求，但需要高速率的大量数据传输。

- 中断传输方式：用于在 USB 主机和 USB 设备之间传输少量对时间具有周期性要求的数据。中断传输方式在 HID 人机接口设备中经常使用，例如 USB 鼠标和 USB 键盘等。

- 同步传输方式：用于在 USB 主机和 USB 设备之间传输大量的、传输时间具有周期性，且速率恒定的数据。同步传输方式常用于视频和音频的数据传输等场合。

2. 设备层

设备层在 USB 应用系统中主要用于管理 USB 设备，分配 USB 地址、读取设备描述等。设备层的工作需要驱动程序、USB 设备和 USB 主机程序的支持。在设备层中，USB 主机程序可以获得该 USB 设备的能力。

3. 总线接口层

总线接口层在 USB 应用系统中主要用于实现 USB 数据传输时序。USB 总线数据传输使用了 NRZI 编码，即反向非归零编码。在总线接口层中，USB 控制器自动进行 NRZI 解码或编码，从而完成数据传输时序。总线接口层一般由 USB 系统硬件自动完成，常用的 USB 接口芯片集成了 USB 总线接口功能。

1.4 USB 的供电

USB 总线接口具有向外提供电源的能力，这样在一定程度上可以满足 USB 设备的电源需求。例如，USB 接口的鼠标和键盘以及 U 盘和移动硬盘等，这些都可以使用 USB 接口来供电。

USB 总线向外提供的电源电压为 5V，这非常适合于 TTL 信号的系统，特别是单片机系统。使用这个电源，可以在一定程度上为 USB 设备供电。这样便减少了电源设计，简化了 USB 系统结构。但是 USB 接口的供电能力是有限的，使用时需要仔细考虑 USB 设备的功率需求。

1.4.1 USB 接口的电源指标

在 USB 总线系统中，USB 主机或 USB 集线器通过 V_{BUS} 和 GND 两根引线向外部 USB 设备提供电源。USB 协议中规定，供电输出电压一般为 4.75V~5.25V，每个 USB 端口的最大输出电流为 500mA，并且电流可以程序控制。

在实际使用中，根据最大输出的电流不同，USB 端口可以分为高输出功率端口和低输出功率端口两种。其中，高输出功率 USB 端口最大的输出电流为 500mA，

而低输出功率 USB 端口最大的输出电流为 100mA。一般来说,大部分计算机的 USB 接口都是高输出功率 USB 接口,低输出功率 USB 端口主要用于 USB 集线器的下行端口中。

USB 总线的供电功率是有限的,USB 设备如果需要使用 USB 总线的电源,则需要保证整个系统的功率消耗在 USB 协议规定的范围内。对于功率消耗比较大的 USB 设备,应该采用自供电的方式以防止过多地消耗 USB 总线电源而导致工作不稳定。另外,对于必须采用 USB 供电的大功率设备,可以采用两个 USB 接口同时供电的方法,例如大容量移动硬盘。

1.4.2 电源分配

前面介绍的 USB 端口具有高输出功率和低输出功率之分。同样,USB 功能设备可以按照电流的消耗分为高功耗设备和低功耗设备。

- 高功耗设备的电流需求一般在 100mA~500mA。
- 低功耗设备的电流需求一般在 0mA~100mA。

如果按照 USB 设备的类型来区分,最常见的 USB 设备包括 USB 集线器和 USB 功能设备两种,下面分别介绍这两者的电源分配。

1. USB 功能设备

USB 功能设备可以采用总线供电,也可以采用自供电的方式。下面分别进行介绍。

- 总线供电的 USB 功能设备。此时,可以从 USB 总线上获得 0~500mA 的电流,但是受限于上行 USB 端口的供电能力。如果上行的 USB 端口只能提供 100mA 的电流,USB 功能设备也就只能最大获得 100mA 的电流。因此,总线供电的 USB 功能设备使用比较受限制,使用时一定要注意上行 USB 端口的能力。由于一般的上行 USB 端口至少均可以提供 100mA 的电流,对于电流消耗小于 100mA 的 USB 功能设备,则可以放心地使用 USB 总线供电。

- 使用自供电的 USB 功能设备时,如果 USB 功能设备的功率消耗比较大,需要大于 500mA 的电流,必须使用外部的电源进行供电。如果 USB 功能设备的电流消耗大于 100mA 而小于 500mA,此时,为了保证该 USB 设备在任何上行 USB 端口下都可以正常使用,也应该使用外部电源自供电。

上述两种方式依赖于 USB 设备的功率消耗以及上行 USB 端口的输出功率。对于 USB 功能设备,可以在其配置描述符中规定其电流需求。在 USB 功能设备上电的时候,首先作为低功率消耗设备来进行上电配置。在 USB 设备配置完毕后,便可以按照配置描述符中规定的电流值,从 USB 总线获得相应的电流。

在程序中,典型的 USB 设备配置描述符示例如下:

```
ConfigDscr:
    db 9 ;描述符长度
    db 2 ;描述符类型
    db (ConfigDscrEnd-ConfigDscr) mod 256
    ;长度(LSB)
```

```

db (ConfigDscrEnd-ConfigDscr) / 256
;长度(MSB)
db 1
;接口数
db 1
;配置数
db 0
;配置字符串
db 10000000b
;特性
db 20
;功率需求

```

ConfigDscrEnd:

最后一项表示了该 USB 设备的电流消耗需求。在这里，其值为 20，以 2mA 为基本单位。这里设定的电流需求为 $20 \times 2\text{mA} = 40\text{mA}$ 。由于电流消耗小于 100mA，此 USB 功能设备为低功率消耗设备。因此，使用时可以连接在高输出功率的 USB 端口，也可以连接在低功率的 USB 端口。

2. USB 集线器

USB 集线器用于扩展主机 USB 接口，其可以采用总线供电，也可以采用自供电的方式。对于总线供电的 USB 集线器，由于其从主机获得的最大电流为 500mA，再加上本身电路的消耗，因此最终可以向外部设备提供 400mA 左右的电流。这样，总线供电的 USB 集线器最多可扩展 4 个 USB 下行端口，且均为低输出功率 USB 端口。

对于自供电的 USB 集线器，由于电源可以提供更大的功率，因此其每个 USB 集线器的下行端口最大可以输出 500mA 的电流。自供电的 USB 集线器的下行端口可以配置为高输出功率端口，且对下行端口的数量没有限制。

这两种方式对 USB 集线器的下行端口的电流有不同的影响。因此在选择 USB 集线器时，一定要注意 USB 集线器的供电方式及其下行端口的输出功率。这直接关系到连接的 USB 设备能否正常工作。这里切记不能将一个高功率消耗的 USB 设备连接到总线供电的 USB 集线器上，这样该 USB 设备无法得到足够的工作电流，从而无法正常运行。

1.4.3 USB 电源管理

USB 总线协议中包含了完善的电源管理系统，可以实现 USB 设备的挂起、恢复等。合理使用 USB 电源管理，可以实现系统电源的有效使用和合理分配。

USB 设备的省电模式通过供电保持来实现，将 USB 设备进入挂起状态。供电保持采用的是一种软件控制的方式。USB 设备在挂起状态下，其电流消耗最低。在 USB 协议中，支持设备的选择挂起和全部挂起两种方式。选择挂起和全部挂起分别适用于 USB 功能设备和 USB 集线器。

- **USB 设备的选择挂起：**用于将某个 USB 设备挂起，进入省电模式。这种方式适用于单个 USB 设备的场合。
- **全部挂起：**用于将所有 USB 设备挂起，实现 USB 系统最小的功率消耗。这种方式适用于 USB 集线器，可以将 USB 集线器上的 USB 设备全部挂起。

USB 协议中通过电源管理来实现 USB 功能设备和 USB 集线器的挂起，下面就

分别介绍这两种设备对挂起的响应。

1. USB 功能设备的挂起

在 USB 协议中规定,如果 USB 功能设备在 3ms 内没有任何总线活动,则该 USB 功能设备便将自动进入挂起状态。在挂起状态下,USB 功能设备遵循如下的规则:

- USB 功能设备保持挂起前的状态,包括寄存器信息、变量信息等;
- USB 功能设备在挂起状态下需要不超过 500 μ A 的电流来维持当前 USB 状态;
- USB 功能设备在挂起状态下支持远程唤醒功能,可以通过外部触发信号使 USB 功能设备脱离挂起状态,从而恢复正常运行。

2. USB 集线器的挂起

在 USB 协议中规定,如果 USB 集线器在 3ms 内没有任何总线活动,则该 USB 集线器设备将自动进入挂起状态。此时,如果该 USB 集线器的下行端口连接有 USB 功能设备,则所有连接的 USB 功能设备将一同进入挂起状态。也就是说,USB 集线器进入全部挂起状态。

USB 集线器的挂起操作,需要同时将 USB 集线器和下行端口的所有 USB 功能设备置于挂起状态。USB 集线器的挂起操作步骤如下所示。

- (1) USB 集线器在 3ms 内没有任何总线活动。
- (2) USB 集线器内部的中继器进入等待开始状态。
- (3) USB 集线器将下行端口所连接的 USB 功能设备置于闲置状态。
- (4) USB 集线器保存内部变量和寄存器值的当前值。
- (5) USB 集线器保存各个下行端口的当前状态。
- (6) USB 集线器停止内部时钟。

在挂起状态下,USB 集线器遵循如下的规则:

- USB 集线器保持挂起前的状态,包括寄存器信息、变量信息等;
- USB 集线器进入挂起状态后,其将获得多余 500 μ A 的电流,这样可以为每个下行端口分配一定的供电保持电流;
- 当 USB 集线器有总线操作时,则 USB 集线器便脱离挂起状态,恢复正常运行;
- 当 USB 集线器任何一个 USB 功能设备被远程唤醒时,则 USB 集线器便脱离挂起状态,恢复正常运行。

1.5 USB 的开发流程

USB 系统的开发是指 USB 总线结构各个部分以及整体的开发。根据 USB 系统的组成,USB 系统的开发可以分为 3 类。

- USB 主控制器的开发：主要是计算机或者其他 USB 主控制器的设计。
- USB 集线器的开发：主要是 USB HUB 的开发和设计。
- USB 功能设备的开发：主要是各种用户特定功能设备的设计和开发。

一般以 USB 功能设备的开发最为广泛，因此这里仅介绍 USB 功能设备的开发。

USB 功能设备的开发流程如图 1.5 所示。USB 功能设备的开发步骤如下：

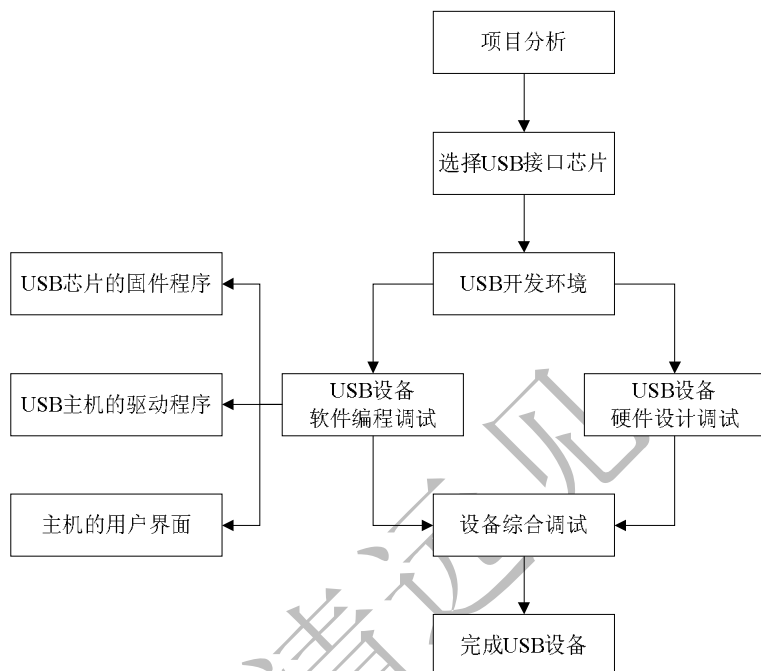


图 1.5 USB 设备的开发流程

(1) 项目分析。首先分析 USB 功能设备的功能需求，包括设备需要实现的所有功能，每个功能采用何种方式实现、设备的数据传输类型和速率、所需要的硬件资源等。

(2) 选择 USB 接口芯片。对 USB 功能设备的功能需求有了全面的了解后，便可以选择合适的 USB 接口芯片，如 USB 1.1 的芯片或者 USB 2.0 的芯片等。在芯片选型时，需要对各种 USB 芯片的资源和使用比较熟悉，这样便于比较各个芯片的性能，选择性价比最高的芯片进行设计。

(3) USB 软硬件开发。USB 芯片选型结束后，便可以开展实际的 USB 功能设备软硬件开发。软件开发涉及 USB 芯片的固件程序、USB 主机的驱动程序和主机的用户界面操作程序等。硬件开发则主要涉及设备功能组件、硬件接口、资源分配等。这些软硬件的设计和调试是分不开的。

(4) 设备综合调试。当 USB 功能设备的主要功能设计完成了，还需要最后对整个软硬件系统进行综合调试，以确保所需全部功能的完整和完善。

(5) 完成 USB 设备。当所有的功能都完美实现后，USB 功能设备设计完成，可以进行产品发布。

1.6 小结

本章首先了 USB 总线的产生、USB 总线的特点，接着详细讲解了 USB 总线的结构以及 USB 的供电要求，本章最后对当前常用的 USB 设备开发类型进行了分析，并给出了典型的开发流程。USB 总线是一个新型的总线结构，目前其得到了广泛的使用，大有取代老式接口的趋势。因此，学习和掌握 USB 总线的设计对以后的设备开发具有很大的帮助。

推荐课程： 嵌入式学院-嵌入式 Linux 长期就业班

- 招生简章: <http://www.embedu.org/courses/index.htm>
- 课程内容: <http://www.embedu.org/courses/course1.htm>
- 项目实战: <http://www.embedu.org/courses/project.htm>
- 出版教材: <http://www.embedu.org/courses/course3.htm>
- 实验设备: <http://www.embedu.org/courses/course5.htm>

推荐课程： 华清远见-嵌入式 Linux 短期高端培训班

- 嵌入式 Linux 应用开发班:
<http://www.farsight.com.cn/courses/TS-LinuxApp.htm>
- 嵌入式 Linux 系统开发班:
<http://www.farsight.com.cn/courses/TS-LinuxEMB.htm>
- 嵌入式 Linux 驱动开发班:
<http://www.farsight.com.cn/courses/TS-LinuxDriver.htm>