



10年口碑积累，成功培养50000多名研发工程师，铸就专业品牌形象

华清远见的企业理念是不仅要良心教育、做专业教育，更要做受人尊敬的职业教育。

## 《USB 应用开发实例详解》

作者：华清远见

专业始于专注 卓识源于远见

### 第 3 章 USB 的数据传输

---

本章目标

---

USB 总线接口简化了设备连接方式，同时也提供了完善的数据传输模式。在 USB 的协议中，按照传输数据量的大小、传输速率的高低以及对时间的要求，可以分为 4 种数据传输类型：块传输、中断传输、同步传输和控制传输。外部的 USB 功能设备、USB 集线器以及 HID 设备和 USB 主机之间便是通过这几种数据传输方式进行通信的。本章内容包括：

USB 控制传输

USB 块传输

USB 中断传输

USB 同步传输

专业始于专注 卓识源于远见

## 3.1 USB 数据传输简介

USB 总线接口协议对数据传输进行了严格的定义，通过软硬件的协作可以方便地实现 USB 主机与 USB 设备之间的双向数据传输。同时，USB 协议支持多种数据传输格式。

### 3.1.1 USB 数据传输流程

当外部的 USB 设备连接到 USB 主机之后，USB 设备便可以和主机进行数据通信。在通信过程中，自上而下需要涉及 4 个部分，分别为：主机软件、USB 总线驱动程序、USB 主控制器驱动程序和 USB 功能设备。USB 数据传输的整个流程，如图 3.1 所示。

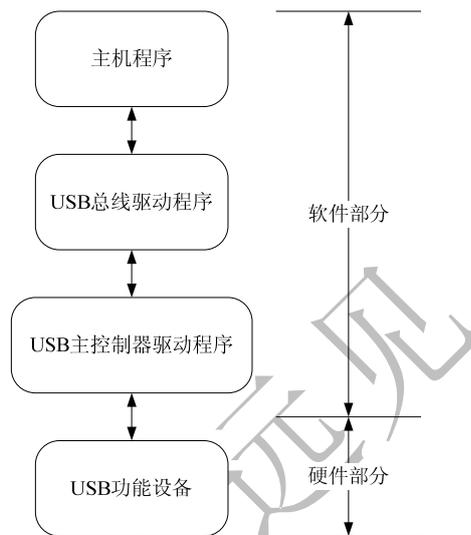


图 3.1 USB 数据传输

USB 功能设备和 USB 主机软件之间的通信，需要这几个部分的分工支持。这里以主机软件向外部 USB 设备发送数据为例，介绍整个数据传输流程。

(1) 主机软件将数据保存在发送数据缓冲区中，向 USB 总线驱动程序发送数据传输请求，即 I/O 请求包 (IRP)。

(2) USB 总线驱动程序对主机软件的 I/O 请求包 (IRP) 进行响应。将其中的数据转化为 USB 协议中规定的事务处理格式，并将其向下传递给 USB 主控制器驱动程序。

(3) USB 的主控制器驱动程序将每个事务处理，转化为一系列帧/小帧为单位的事务处理队列。这样处理是为了满足 USB 传输协议的要求，并保证传输中不超过 USB 的带宽。

(4) 在 USB 主控制器中，读取事务处理列表，将其中的事务处理以信息包的形式发送到 USB 总线上。可以使用块传输、中断传输、同步传输和控制传输 4 种传输方式。同时，也可以选择低速、全速和高速 3 种传输速率进行传输。

(5) USB 功能设备接收信息。USB 的 SIE 引擎自动解码信息包，并将数据保存在指定的端点缓冲区中，供 USB 进行处理。

对于 USB 功能设备向 USB 主机软件发送数据，如数据采集的过程，也必须经过这几个步骤。在这种情况下，整个数据流程相反，但同样涉及这 4 个软硬件部分。

### 3.1.2 USB 事务处理

在 USB 协议中，USB 的数据传输由信息包组成。这些信息包组合起来可以构成完整的事务处理。USB 事务处理是 USB 主机和 USB 功能设备之间数据传输的基本单位。USB 的信息包和事务处理具有特定的格式。

USB 事务处理是 USB 主机和 USB 设备数据通信的基础。一般来说，一个完整的 USB 事务处理包含 3 个阶段，如图 3.2 所示。各个阶段的功能如下。

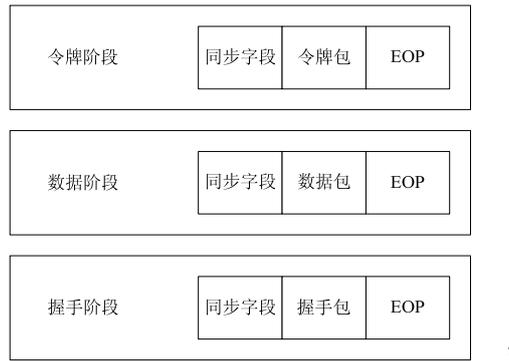


图 3.2 典型的事务处理过程

- 令牌阶段：其中定义了本次传输的类型，用于表征事务处理的开始。令牌阶段由同步字段、令牌包和 EOP 构成。这是所有的 USB 事务处理必须包含的阶段。
- 数据阶段：其中包含了本次传输的数据。其数据大小根据端点和传输类型而定，最大的数据量为 1024 字节。数据阶段由同步字段、数据包和 EOP 构成。
- 握手阶段：用于数据的接收方向发送方报告此次数据传输是否成功。握手阶段由同步字段、握手包和 EOP 构成。

不同的数据传输类型，可能包含的事务处理阶段不同，其中令牌阶段是必须的。在 USB 协议中，按照令牌阶段的不同，规定了 7 种令牌包。因此，可以根据令牌包的类型将 USB 事务处理分为以下 7 种。

- IN 事务处理：IN 事务处理用于实现 USB 设备到 USB 主机方向的数据传输。
- OUT 事务处理：OUT 事务处理用于实现 USB 主机到 USB 设备方向的数据传输。
- SETUP 事务处理：在 USB 协议中，使用 SETUP 的控制事务传输对 USB 设备进行配置。SETUP 事务处理是一种特殊的 USB 事务处理，其只在 USB 控制传输阶段使用。SETUP 事务的数据传输方向为 USB 主机到 USB 设备。
- PING 事务处理：PING 事务处理主要应用于高速数据传输中。
- SOF 事务处理：SOF 事务处理表示了一个 USB 帧或者 USB 小帧的开始。整个事务处理过程没有数据阶段，也不需要 USB 设备进行握手响应。
- SPLIT 事务处理：SPLIT 事务处理的目的是在 USB 高速数据传输的过程中，可以插入低速和全速 USB 数据传输。这样可以提高 USB 总线利用率。
- PRE 事务处理：PRE 事务处理只在 USB 主机和 USB 集线器之间进行。PRE 事务处理比较简单，USB 主机直接发送 PRE 令牌包即可。也就是说，PRE 事务处理不需要数据包和握手包。

在 USB 总线数据传输的时候，不可避免地有各种外界环境的干扰和信号处理的延迟等。这些都将造成数据传输的各种错误，例如传输超时、数据不同步、丢帧和握手信号的丢失等。在 USB 协议中，提供了超时控制机制、信息包错误机制、数据触发机制、EOP 错误控制机制和总线活动丢失控制机制等多种数据传输差错控制机制。

这些差错控制机制，从不同方面对可能的错误类型进行了分析和纠正，从而可以保证在数据传输过程中的可靠性。一般来说，不同的传输类型可能产生的错误不完全相同，采用的差错控制机制也就不同。

### 3.1.3 USB 数据传输类型

在 USB 协议中，定义了 4 种 USB 传输类型：控制（control）传输、块（bulk）传输、中断（interrupt）传输和同步（isochronous）传输。这 4 种数据传输类型在传输数据量的大小、传输速率的高低以及同步要求方面有各自的特点，如表 3.1 所示。

表 3.1 USB 的 4 种传输类型

传输类型	端点类型	输出方向	所传输数据的特点
控制传输	控制端点	IN 和 OUT	少量数据、无传输时间要求、传输有严格保证
块传输	块端点	IN 或者 OUT	大量数据、无传输时间和传输速率要求
中断传输	中断端点	IN 或者 OUT	少量或中量数据、有周期要求
同步传输	同步端点	IN 或者 OUT	大量数据、速率恒定、有周期性

下面分别介绍各种数据传输方式的特点和使用。

## 3.2 USB 控制传输

USB 控制传输主要用于传输少量的，对传输时间和传输速率均无要求，但必须保证传输的数据。USB 控制传输适用于低速、全速或高速设备。在实际的 USB 设备中，USB 控制传输主要用于 USB 主机和 USB 设备之间的配置信息通信，包括设备的地址、设备描述符和接口描述符等。用户也可以自定义操作，用来传输其他用途的数据。

在 USB 协议中，为控制传输保留了一定的总线带宽，并且 USB 主机的系统软件可以为其动态地调整其所需的帧/小帧时间，以确保其能够尽快得到传输。另外，USB 协议中还使用差错控制和重试机制来保证数据传输的正确性和可靠性。

在 USB 协议中，所有的 USB 设备都有控制传输方式。任何 USB 设备都必须在端点 0 的默认管道中支持控制传输。USB 的系统软件通过该管道来访问 USB 设备的状态，并对其进行配置。除了端点 0 以外，其他端点也可以支持控制传输。

### 3.2.1 数据包长度

在 USB 协议中，不同速率的端点对控制传输最大数据包长度的要求不同。在 USB 设备控制端点描述符中的 `wMaxPacketSize` 字段规定了控制事务所支持的最大数据包长度。

- 对于低速端点，该最大值必须为 8 字节；
- 对于全速端点，可以选择 8 字节、16 字节、32 字节或者 64 字节；
- 对于高速端点，其只能为 64 字节。

对于默认控制端点 0，其最大数据包长度信息包含在固件设备描述符 `wMaxPacketSize` 字段中。在 USB 设备上电时，USB 主机的系统软件将首先读取设备描述符的前 8 字节，并得到其默认控制端点所支持的最大数据包长度。在以后的控制事务中，就将使用这个最大长度。其余控制端点只能在 USB 设备配置结束后才能使用。

### 3.2.2 事务处理

USB 控制传输的事务处理过程包含建立、数据和状态 3 个阶段，每个阶段都由特定的事务组成。USB 控制事务处理的格式如图 3.3 所示。在控制事务处理的建立阶段，USB 主机采用 SETUP 事务向 USB 设备发送控制请求。SETUP 事务的数据字段长度为 8 字节，如表 3.2 所示。

表 3.2 SETUP 事务中数据字段的格式

地址偏移	字段名	长度	说明
0	<code>bmRequestType</code>	1	指明控制请求的特性
1	<code>bRequest</code>	1	指明控制请求的请求号
2	<code>wValue</code>	2	控制请求的参数

4	wIndex	2	控制请求的参数，主要用于传送索引值或偏移量
6	wLength	2	指明该控制事务数据阶段所需传输的字节数

SETUP 事务中数据字段的含义如下。

- **bmRequestType** 字段：用于指明 USB 控制请求的特性。该字段的 D7 位指明了数据传输方向：0 表示主机到设备，1 表示设备到主机。如果 wLength=0，则表示控制事务没有数据阶段，D7 位将被忽略；D6~D5 位指明了主机发送控制请求的类型：0 为标准 USB 请求，1 为设备类定义请求，2 为供应商自定义请求；D4~D0 位指明了该控制事务的接收方：0 表示设备，1 表示接口，2 表示端点，3 表示其他。当为接口或端点时，wIndex 字段需要指明具体的接口号或端点号。
- **bRequest** 字段：用于指明 USB 控制请求的请求号。例如，GETCONFIGURATION 的请求号为 08H，USB 设备请求 GETDESCRIPTOR 的请求号为 06H。
- **wValue** 字段：用于指明 USB 控制请求的参数。
- **wIndex** 字段：用于指明 USB 控制请求的参数，可以指向的端点或接口。指向端点时，D0~D3 位指出端点号；D7 位指出该端点的传输方向，0 表示 OUT，1 表示 IN，其余位均保留。指明接口时，D0 位~D7 位指出了一个接口号，其余位保留。
- **wLength** 字段：该字段指明 USB 控制事务数据阶段所需传输的字节数。对于控制 IN 请求，USB 设备返回数据的长度应小于等于 wLength 的值。对于控制 OUT 请求，wLength 字段指出主机将要发出的数据量，如果多于这个值，则 USB 设备响应无效。

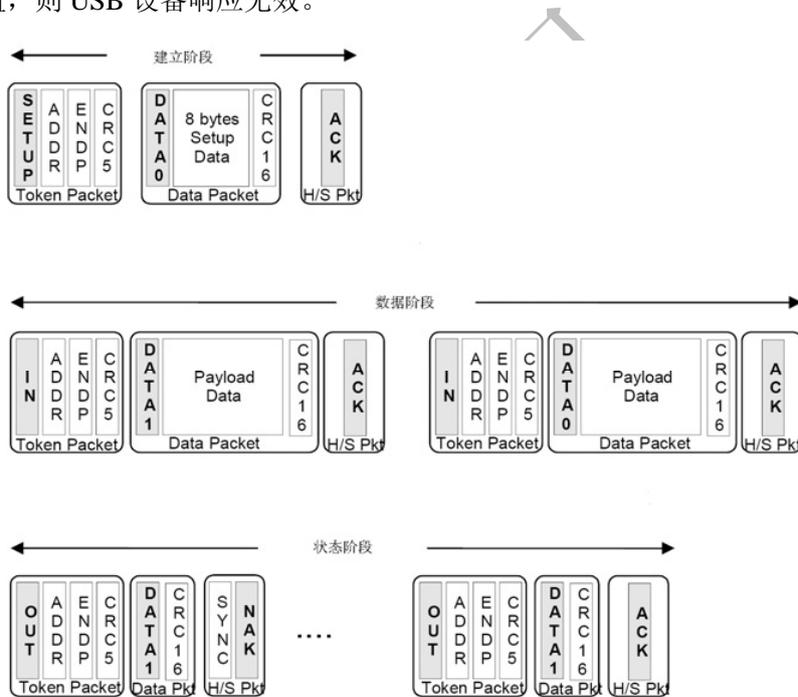


图 3.3 控制事务处理的格式

在 USB 控制事务处理中，数据阶段是可选的。数据阶段负责传输具有 USB 定义格式或设备类、供应商自定义格式的数据。数据阶段可以包括一个或多个 IN/OUT 事务。数据阶段的传输方向和长度均在建立阶段指定。

控制事务处理的最后一个阶段是状态阶段，由一个 IN 事务和一个 OUT 事务组成。在状态阶段中，USB 设备向 USB 主机报告控制事务建立阶段和数据阶段的传输结果。USB 控制传输的报告方向是从 USB 设备到主机。表 3.3 列出了控制传输的状态阶段的响应。

表 3.3 控制传输状态阶段的响应

USB 设备的状态	控制 OUT 传输	控制 IN 传输
设备忙	NAK	NAK
有错误	STALL	STALL

成功处理	数据包（零长度）	ACK
------	----------	-----

### 3.3 USB 块传输

USB 块传输只能用于高速或全速 USB 设备，其适合于传输大量的，且对传输时间和传输速率均无要求的数据。一般来说，块传输特别适合于打印机和扫描仪类的设备，因为这类设备要求很高的数据正确性，而对传输速率无太高要求。

在 USB 的数据传输过程中，块传输可以动态改变传输速率。当 USB 总线带宽紧张的时候，会自动为其他传输类型让出自己所占用的帧/小帧时间，而本身的数据传输将被延迟。这时，块传输的传输速率比较低，占用的传输时间长；当 USB 总线空闲的时候，其将以很快的速率传输，占用的传输时间短。

USB 块传输可以发送大量的数据而不会堵塞 USB 总线，但其传输时间和传输速率得不到保障。在 USB 协议中，采用差错控制和重试机制来确保数据传输的正确性和可靠性。

#### 3.3.1 数据包长度

在 USB 协议中，不同速率的端点对块传输最大数据包长度的要求不同。USB 设备在固件块端点描述符中的 wMaxPacketSize 字段，指明其块事务所支持的最大数据包长度。

- 对于全速端点，可以是 8 字节、16 字节、32 字节或者 64 字节；
- 对于高速端点，只能为 512 字节。

在数据传输中，如果块传输的数据量大于块端点所支持的最大数据包长度，则 USB 主控制器会把该传输分成多个块事务处理。中间的每个块数据的长度为最大长度，最后一个块事务负责传输剩余的数据，其长度可以小于或等于最大长度。

#### 3.3.2 事务处理

一个完整的 USB 的块事务处理过程包括令牌、数据和握手 3 个阶段，如图 3.4 所示。

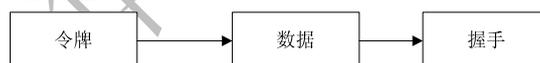


图 3.4 块事务的格式

在 USB 总线协议中，USB 使用特有的数据触发机制来保证数据包发送和接收的同步。数据触发机制是通过 USB 数据触发位和 DATA0/DATA1 数据包的匹配来实现的，如图 3.5 所示。在功能设备上电配置的时候，所有块端点的数据触发位都被初始化为 0。所以在块事务传输中，第一个数据包使用 DATA0，而第二个数据包应使用 DATA1，此后将交替使用数据包 DATA0 和 DATA1。在图 3.5 中，括号内的数据代表 USB 设备数据触发位的值。

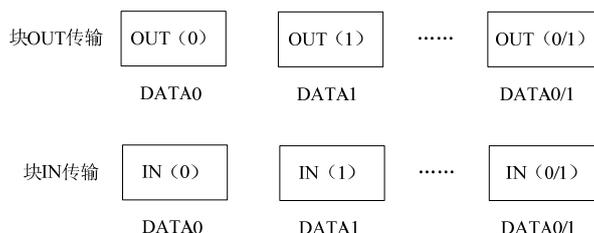


图 3.5 数据触发机制

根据数据传输的方向，块传输有不同的事务处理格式，分别介绍如下：

- 当 USB 主机需要接收数据时，它将向 USB 功能设备发送一个 IN 令牌包；
- 当 USB 主机准备发送数据块的时候，它将向 USB 设备发出一个 OUT 令牌包和一个 DATAx 数据包。

USB 的块事务处理端点是单向的，IN 或者是 OUT。如果 USB 设备需要双向块传输，则必须使用两个块端点，一个块端点用于 IN 传输，另一个块端点用于 OUT 传输。

## 3.4 USB 中断传输

USB 的中断传输可用于低速、全速和高速设备，适用于传输少量或者中量的，且对事务处理周期有要求的数据。一般来说，USB 中断传输适合于鼠标、键盘类设备，这类设备传输的数据量很少，而且要求响应快，具有固定的事务处理周期。

在 USB 总线协议中，为中断传输保留了总线带宽，以保证其能够在规定的时间内完成。USB 的中断传输不一定使用准确的传输速率。此外，USB 协议中还使用差错控制和重试机制来确保中断传输的正确性和可靠性。

### 3.4.1 数据包长度

在 USB 协议中，不同速率的端点对中断传输最大数据包长度的要求不同。在 USB 中断传输中，USB 设备中断端点描述符中的 `wMaxPacketSize` 字段，指明了其中断事务所支持的最大数据包长度。

- 对于低速端点，该最大值必须小于等于 8 字节；
- 对于全速端点，必须小于等于 64 字节；
- 对于高速端点，其必须小于等于 1024 字节。

另外，对于 USB 主控制器同样有要求。如果是低速中断传输，USB 主控制器必须能够支持最大数据包长度为 0 字节~8 字节；如果是全速中断传输，USB 主控制器必须能够支持最大数据包长度为 0 字节~64 字节；如果是高速中断传输，USB 主控制器必须能够支持最大数据包长度为 0 字节~1024 字节。

如果待传输的数据量大于协议中所支持的最大数据包长度，则 USB 控制器将数据传输分成多个中断事务处理。除最后一个中断事务外，前面每个中断事务处理数据包中，数据字段的长度都等于协议中规定的最大长度。最后的一个中断事务处理将负责传输剩余的数据，其长度可以小于或等于最大长度。

在 USB 协议中，高速 USB 设备默认接口设置的中断端点最大数据包长度不会大于 64 字节，如果需要使用更大的数据包长度支持，可以通过其他的设备配置或可替换接口设置来实现。

### 3.4.2 事务处理

一个完整的 USB 中断事务处理，包括 IN 传输和 OUT 传输，其具有令牌、数据和握手 3 个阶段。根据数据传输的方向，中断传输有不同的事务处理格式，分别介绍如下：

- 当主机准备接收中断时，其将发出 IN 令牌包，而 USB 设备将向其返回 `DATAx` 数据包、NAK 或 STALL 握手包；
- 当主机准备发送中断数据时，其将发出 OUT 令牌包和 `DATAx` 数据包，而 USB 设备将向其返回 ACK、NAK 和 STALL 握手包。

在 USB 协议中，USB 的中断事务处理是单向的。在 USB 的固件程序中，USB 设备的中断端点描述符会指出其管道所支持的传输方向：IN 或 OUT。中断管道实质上是一条数据流管道，其传输的数据不具有 USB 定义的格式。当其在 USB 总线上实际传输时，必须使用数据触发机制来保证数据包发送和接收的同步，以便于发送方能够确认其数据已经被成功接收。

## 3.5 USB 同步传输

USB 的同步传输只能用于高速或全速 USB 设备,适用于传输大量、速率恒定且对服务周期有要求的数据。一般来说,同步传输适合于音频和视频类设备,如 VCD 和 DVD 等视频播放设备,因为这类设备需要数据的及时发送与接收,而对数据的正确性与否可以有一定的容忍。

在 USB 协议中,为同步传输保留了总线带宽,以保证其能在每帧/小帧中都能得到服务。也就是说,同步传输将一直使用准确的传输速率,因此其传输时间是确定的、可以预测的。此外,为了确保数据传输的及时性,同步传输没有采用差错控制和重试机制。也就是说,USB 同步传输不能保证每次传输都是没有错误的。

### 3.5.1 数据包长度

在 USB 协议中,不同速率的端点对同步传输最大数据包长度的要求不同。在 USB 同步传输中,USB 设备同步端点描述符中的 wMaxPacketSize 字段,指明了其同步事务所支持的最大数据包长度。

- 对于全速端点,该最大值必须小于等于 1023 字节;
  - 对于高速端点,其必须小于等于 1024 字节,且高带宽端点可在每小帧中进行 2 个或 3 个高速同步事务。
- 另外,在 USB 同步传输系统中,USB 主控制器必须能够支持最大数据包长度 0 字节~1023 字节(全速同步传输)和最大长度为 1 字节~1024 字节(高速同步传输)。

USB 设备默认接口设置的同步端点最大数据包长度为 0 字节,如果需要使用非 0 的数据包长度,可以通过其他的设备配置或可替换接口设置来实现。

### 3.5.2 事务处理

一个完整的 USB 同步传输包括 IN 传输和 OUT 传输。同步事务传输只具有令牌和数据阶段,而没有握手阶段,如图 3.6 所示。根据数据传输的方向,同步传输有不同的事务处理格式,分别介绍如下:

- 当 USB 主机接收同步数据的时候,它将发出 IN 令牌包,USB 设备返回 DATAx 令牌包;
- 当 USB 主机发送同步数据时,其将发出 OUT 令牌包和 DATAx 数据包。

USB 的同步事务处理是单向的。在 USB 的固件程序中,USB 设备的同步端点描述符会指出其管道所支持的传输方向:IN 或 OUT。如果需要双向数据传输,则需要采用两个端点分别实行 IN 和 OUT 数据传输。

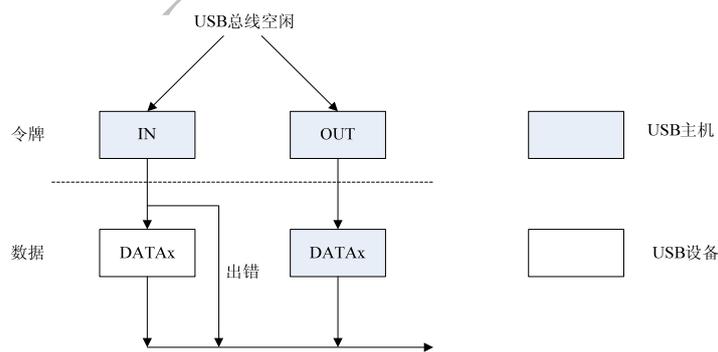


图 3.6 同步事务的格式

## 3.6 小结

本章首先介绍了 USB 数据传输的流程、事务处理以及数据传输类型,接着详细讲解了 USB 控制传输、USB 块传输、USB 中断传输和 USB 同步传输的数据包长度以及事务处理过程。所有的 USB 设备必须遵守这里介绍的数据传输类型,不同的设备根据需要可以具有不同的数据传输类型。学习和了解本章内容对以后的固件程序设计有很大的帮助。

## 联系方式

集团官网: [www.hqyj.com](http://www.hqyj.com)      嵌入式学院: [www.embedu.org](http://www.embedu.org)      移动互联网学院: [www.3g-edu.org](http://www.3g-edu.org)

企业学院: [www.farsight.com.cn](http://www.farsight.com.cn)      物联网学院: [www.topsight.cn](http://www.topsight.cn)      研发中心: [dev.hqyj.com](http://dev.hqyj.com)

集团总部地址: 北京市海淀区西三旗悦秀路北京明园大学校内 华清远见教育集团

北京地址: 北京市海淀区西三旗悦秀路北京明园大学校区, 电话: 010-82600386/5

上海地址: 上海市徐汇区漕溪路 250 号银海大厦 11 层 B 区, 电话: 021-54485127

深圳地址: 深圳市龙华新区人民北路美丽 AAA 大厦 15 层, 电话: 0755-25590506

成都地址: 成都市武侯区科华北路 99 号科华大厦 6 层, 电话: 028-85405115

南京地址: 南京市白下区汉中路 185 号鸿运大厦 10 层, 电话: 025-86551900

武汉地址: 武汉市工程大学卓刀泉校区科技孵化器大楼 8 层, 电话: 027-87804688

西安地址: 西安市高新区高新一路 12 号创业大厦 D3 楼 5 层, 电话: 029-68785218

广州地址: 广州市天河区中山大道 268 号天河广场 3 层, 电话: 020-28916067

