

第四节 智能传感器总线接口技术

智能传感器的总线技术现正逐步实现标准化、规范化，目前所采用的总线主要有以下六种：1-Wire 总线，I²C 总线，SMBus，SPI 总线，Micro Wire 总线，USB 总线。1-Wire 总线亦称单线总线，I²C 总线和 SMBus 属于二线串行总线，SPI 则为三线串行总线。智能传感器作为从机，可通过专用总线接口与主机进行通信。USB 是“通用串行总线”（universal serial bus）的英文缩写。USB 是由 Compaq、IBM、Intel、微软等公司于 1994 年共同提出的。USB 接口具有连接单一化、软件自动“侦测”以及热插拔的优点。

一、USB 总线接口

（一）USB 总线接口简介

通用串行总线 USB 是用来连接外围设备与计算机之间的新式标准接口总线。它是一种快速、双向、同步传输、廉价的并可以实现热插拔的串行接口。USB 技术是为实现计算机和通信集成而提出的一种用于扩充 PC 体系结构的工业标准。

USB 与传统的外围接口相比，主要有以下优点。

① 支持热插拔和即插即用。在 USB 系统中，所有的 USB 设备可以随时接入和拔离系统，USB 主机能够动态识别设备的状态，并自动给接入的设备分配地址和配置参数。这样，安装 USB 设备时，不必打开机箱，甚至在计算机工作时也无须关机和重新启动即可加、减已安装过的设备，也不必用手动跳线或拨码开关来设置新的外设。USB 的驱动程序和应用软件可以自动启动，USB 设备单独使用自己的保留中断，也不涉及 IRQ 冲突问题，不会同其他设备争用 PC 有限的资源，省去了硬件配置的烦恼，为用户带来了极大的方便。

② 数据传输速度快。快速性能是 USB 技术的突出特点，USB Ver1.1 标准有全速

12Mbit/s 和低速 1.5Mbit/s 两种模式，主模式为全速，它比串口快了 100 倍，比并口快了十多倍。USB Ver2.0 提供高达 480Mbit/s 的数据传输率，可以在其上开发功能更多的电子产品，包括高分辨率的视频摄像机、下一代的扫描仪和打印机，并且，在 USB 2.0 上可同时运行多个高速外设。

③ 易于扩展。通过 USB HUB 扩展，可连接多达 127 个外设，且各种外设均采用统一 USB 接口标准的连接器，大大地简化了安装过程。标准 USB 电缆长度为 3m (5m 低速)，通过 HUB 或中继器可以使外设距离达到 30m。

④ 独立供电。USB 接口提供了内置电源，它能向低压设备提供 5V 电源，因此，新的设备就不需要专门的交流电源了，从而降低了这些设备的成本，并提高了性价比。

⑤ 使用灵活。为适应各种不同类型外围设备的要求，USB 提供了 4 种不同的数据传输模式：控制 (control) 传输、同步 (synchronization) 传输、中断 (interrupt) 传输、批量 (bulk) 传输。

⑥ 支持多个外设同时工作，USB 系统支持多种数据传输的要求。数据带宽可以从几千到 480Mbit/s，它允许在同一电缆上传输实时和非实时数据，在主机和外设之间可以同时传输多个数据和信流，允许多个外设同时操作，并支持复合设备。

总之，USB 是一种电缆总线，支持在主机和各式各样的即插即用的外设之间进行数据传输。按照协议的规定，多个设备分享 USB 带宽，当主机和其他设备在运行时，总线允许添加、设置、使用和拆除外设。

(二) USB 系统的结构和传输方式

1. USB 的物理接口

USB 的物理接口包括电气和机械两方面规范。USB 2.0 有三种数据传输速率：USB 高速，480Mbit/s；USB 全速，12Mbit/s；USB 低速，1.5Mbit/s。

电气方面，USB 通过一种 4 线电缆与主机或 USB 与 HUB 相连接来传输信号和电源，

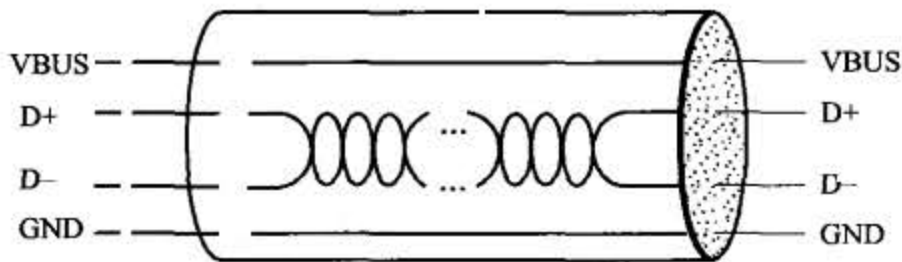


图 5-26 USB 电缆

如图 5-26 所示。在每个点到点段中，通过两根导线 (D+ 和 D-) 传送信号。在主机控制器和 HUB 之间可以高速传送全速和低速设备的数据，而在 HUB 和设备之间全速和低速传送数据。这种性能减少了全速或低速设备对高速设备带宽的影响。定义低速模式

是为了支持少量的低带宽设备如鼠标，这类设备不能太多，因为其数目越多对总线利用率的影响就越大。USB 采用位填充 NRZI 编码方案，每个数据包之前是 SYNC 域，用于同步位时钟。电缆中包括 VBUS 和 GND 两条线，用来向设备提供电源。VBUS 通常是 +5V 电压。

机械方面，所有的设备都有一个上行或下行的连接。上行和下行连接器在机械上不可以互换使用，这样消除了 HUB 上非法的回路连接。

2. USB 的结构

USB 规范将 USB 分为 5 个部分：控制器、USB 芯片驱动程序、控制器驱动程序、USB 设备以及针对不同 USB 设备的驱动程序。

① 控制器：主要负责执行由控制器驱动程序发出的命令。

② USB 芯片驱动程序：提供对 USB 的支持。

③ 控制器驱动程序：在控制器与 USB 设备之间建立通信信道。

④ USB 设备：包括与 PC 相连的 USB 外围设备，分为两类，一类设备本身可再接其他 USB 外围设备，另一类设备本身不可再连接其他外围设备。前者称为 USB 集线器（USB HUB），后者称为设备。或者说，集线器带有连接其他外围设备的 USB 端口，而设备则是连接在计算机上用来完成特定功能并符合 USB 规范的设备单元，如鼠标、键盘等。

⑤ 设备驱动程序：用来驱动 USB 设备的程序，通常由操作系统或 USB 设备制造商提供，就像平常的 Modem 驱动程序、打印机驱动程序等。

3. USB 数据传输方式

在主机和设备间数据交换存在两种通道：流通道和消息通道。总的说来，各通道之间的数据流动是相互独立的，一个指定的 USB 设备可以有多个通道。例如一个 USB 设备可建立向其他设备发送数据和从其他设备接收数据的两个通道。USB 体系结构支持 4 种基本的数据传输类型。

一般，每个 USB 设备由一个或多个配置控制其行为。使用多配置原因是对操作系统的支持；一个配置由接口组成；接口则是由管道组成；管道与 USB 设备的端点对应，一个端点可以配置为输入输出两个管道。在固件编程中，USB 设备、配置、接口和管道都用描述符报告其属性。

图 5-27 为 USB 多层次通信模型。端点 0 默认配置为控制管道，用来完成所规定的设备请求。其他端点可配置为数据管道。对开发而言，主要的大数据传输都是通过数据管道完成的。

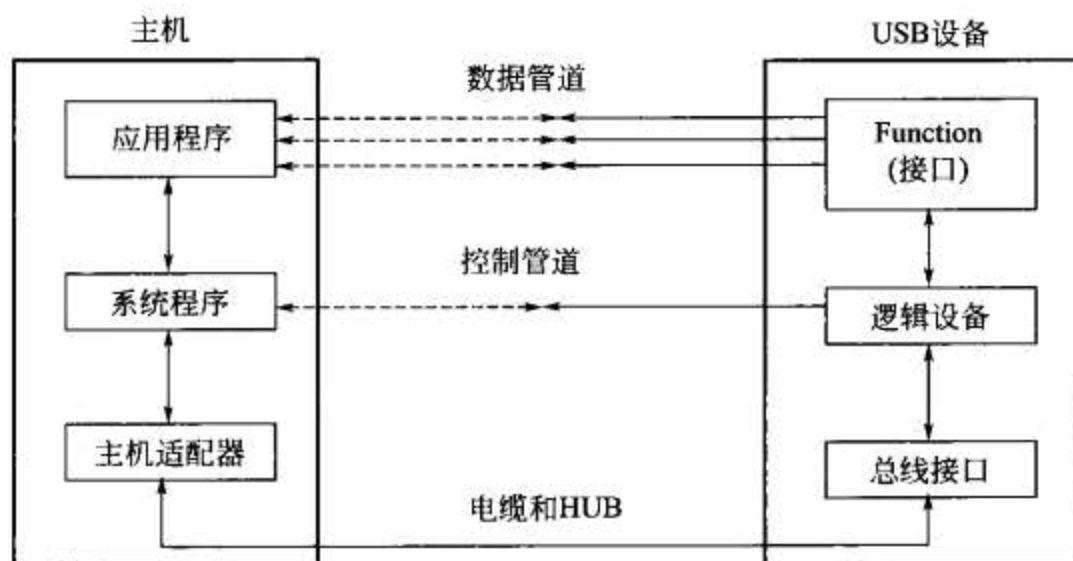


图 5-27 USB 多层次通信模型

USB 传输类型包括控制传输、等时传输、中断传输和批量传输，每种传输类型的传输速度、可靠性以及应用范围都不同。控制传输可靠性是最高的，但速度最慢；等时传输速度快，满足实时性，但可靠性低。在具体应用中，端点传输类型可根据传输速度和可靠性选择。

(1) 控制传输类型 支持外设与主机之间的控制、状态、配置等信息的传输，为外设与主机之间提供一个控制通道。该方式用来处理主机的 USB 设备的数据传输。包括设备控制指令、设备状态查询及确认命令。当 USB 设备收到这些数据和命令后，将依据先进先出的原则按队列方式处理到达的数据。

(2) 等时 (Isochronous) 传输类型 支持有周期性、有限的时延和带宽且数据传输速率不变的外设与主机间的数据传输。该类型无差错校验，故不能保证正确的数据传输，支持

像计算机-电话集成系统 (CTI) 和音频系统与主机的数据传输。

(3) 中断传输方式 传送的数据量很小, 但这些数据需要及时处理, 以达到实时效果, 此方式主要用在键盘、鼠标以及游戏手柄等外部设备上。

(4) 批传输方式 用来传输要求正确无误的数据。通常打印机、扫描仪和数码相机以这种方式与主机连接。这些外设与主机间传输的数据量大, USB 在满足带宽的情况下才进行该类型的数据传输。

在 USB 通信协议中, 主机是绝对主动, 设备只能是“听命令行事”, 通过一定的命令格式 (设备请求) 完成通信。USB 设备请求包括标准请求、厂商请求和设备类请求。设备的枚举是标准请求命令完成的; 厂商请求是用户定义请求; 设备类请求是特定的 USB 设备类发出的请求, 例如打印机类和 HID (人机接口) 类。固件编程中设备请求必须遵循一定的格式, 包括请求类型、设备请求、值、索引和长度。

二、I²C 总线接口

在现代电子系统中, 有众多的 IC 需要进行相互之间以及与外界的通信。为了提高硬件的效率和简化电路的设计, PHILIPS (飞利浦) 开发了一种用于内部 IC 控制的简单的双向两线串行总线 I²C, 它通过 SDA (串行数据线) 及 SCL (串行时钟线) 两根线在连到总线上的器件之间传送信息, 并根据地址识别每个器件。I²C 总线支持任何一种 IC 制造工艺, 并且 PHILIPS 和其他厂商提供了种类非常丰富的 I²C 兼容芯片。作为一个专利的控制总线, I²C 已经成为世界性的工业标准。

(一) I²C 总线的结构特点

任何 I²C 器件都可以连接到 I²C 总线上, 而每个总线上的器件也能和任何一个主控端沟通互相传送信息, 在总线上至少必须有一个主控端, 如微控器或 DSP, 每个主控端拥有相同的优先权, 且在 I²C 总线上加入或移除器件都非常简便。每个器件都有一个唯一的地址, 而且可以是单接收的器件 (例如 LCD 驱动器) 或者可以接收也可以发送的器件 (例如存储器)。发送器或接收器可以在主模式或从模式下操作, 这取决于芯片是否必须启动数据的传输还是仅仅被寻址。I²C 是一个多主总线, 如图 5-28 所示, 即它可以由多个连接的器件控制。

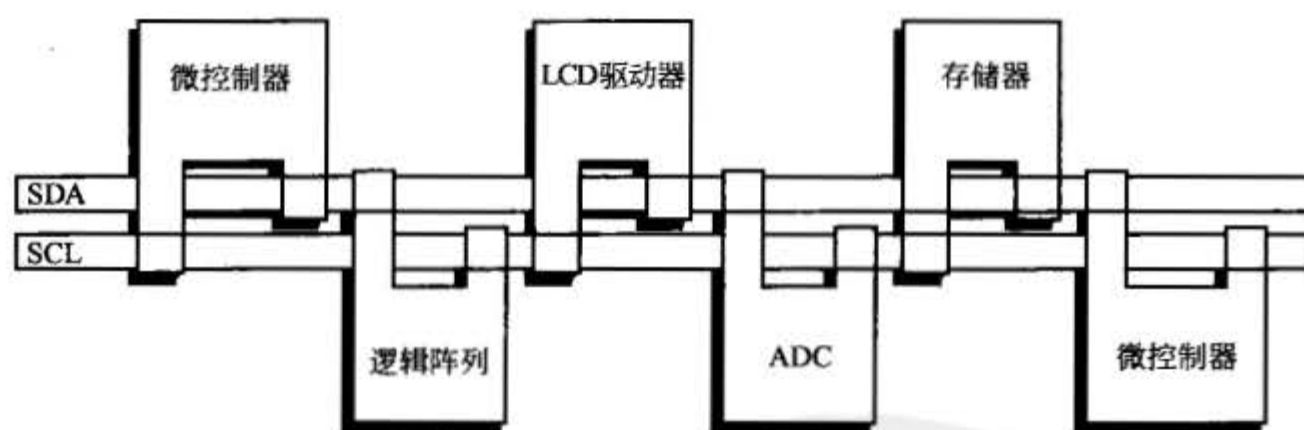


图 5-28 I²C 多主总线

采用 I²C 总线标准的单片机或 IC 器件, 其内部不仅有 I²C 接口电路, 而且将内部各单元电路按功能划分为若干相对独立的模块, 通过软件寻址实现片选, 减少了器件片选线的连接。CPU 不仅能通过指令将某个功能单元电路挂靠或脱离总线, 还可对该单元的工作状况进行检测, 从而实现对硬件系统的既简单又灵活的扩展与控制。如图 5-29 所示。总线的电

容总和必须低于 400pF，大约 20~30 个器件或 10m 的传输长度，以符合上升与下降时间的要求，每个器件必须驱动 3mA 形成逻辑低位，并在开漏极总线内置大约 2~10kΩ 的提升电阻与 0.4mA 的电流，并同时具有双向 I²C 总线缓冲器可以用来隔离总线上不同接线的电容，以带来更大（2000pF）与更长（2000m）的总线结构。

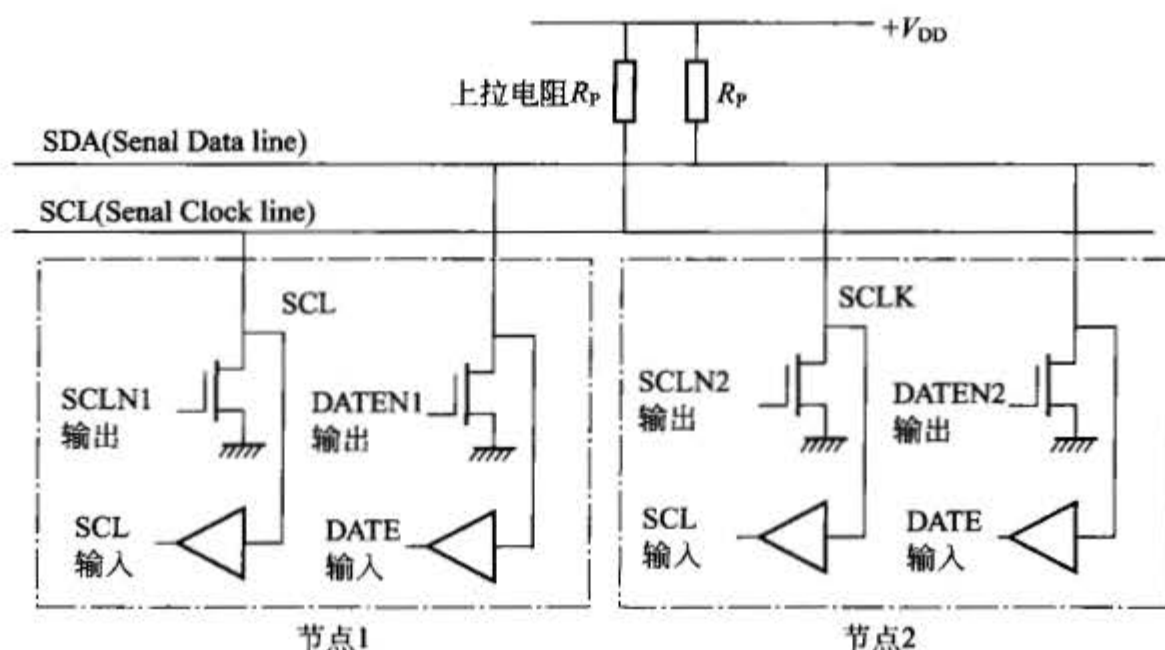


图 5-29 I²C 总线接口电路

像 MCS51 系列的 TXD 和 RXD 一样，传统的单片机串行接口的发送和接收一般都各用一条线，而 I²C 总线则根据器件的功能通过软件程序使其可工作于发送或接收方式。当某个器件向总线上发送信息时，它就是发送器（也称主器件），而当其从总线上接收信息时，又成为接收器（也称从器件）。主器件用于启动总线上传送数据并产生时钟以开放传送的器件，此时任何被寻址的器件均被认为是从器件。I²C 总线的控制完全由挂载在总线上的主器件送出的地址和数据决定。在总线上，既没有中心机，也没有优先机。

总线上主和从（即发送和接收）的关系取决于此时数据传送的方向。SDA 和 SCL 均为双向 I/O 线，通过上拉电阻接正电源。当总线空闲时，两根线都是高电平。连接总线的器件的输出级必须是集电极或漏极开路，以具有线“与”功能。

基本的 I²C 总线规范于 1992 年首次发布，其数据传输速率最高为 100Kbit/s，采用 7 位寻址。但是由于数据传输速率和应用功能的迅速增加，I²C 总线也增强为快速模式（400Kbit/s）和 10 位寻址以满足更高速度和更大寻址空间的需求。I²C 总线始终和先进技术保持同步，但仍然保持其向下兼容性。并且最近还增加了高速模式，其速度可达 3.4Mbit/s。它使得 I²C 总线能够支持现有以及将来的高速串行传输应用，例如 EEPROM 和 FLASH 存储器。

（二）I²C 总线上的时钟信号

挂载在 SCL 时钟线上的所有器件的逻辑“与”是 I²C 总线上传送信息时的时钟同步信号。SCL 线上由高电平到低电平的跳变将影响这些器件，一旦某个器件的时钟信号下跳为低电平，将使 SCL 线一直保持低电平，使 SCL 线上的所有器件开始低电平期。此时，低电平周期短的器件的时钟由低至高的跳变并不能影响 SCL 线的状态，这些器件将进入高电平等待的状态。

当所有器件的时钟信号都上跳为高电平时，低电平期结束，SCL 线被释放返回高电平，即所有的器件都同时开始它们的高电平期。其后，第一个结束高电平期的器件又将 SCL 线

拉成低电平。这样就在 SCL 线上产生一个同步时钟。由此，时钟低电平时间由时钟低电平期最长的器件确定，而时钟高电平时间由时钟高电平期最短的器件确定。

(三) I²C 总线上的数据传输

在数据传送过程中，必须确认数据传送的开始和结束。在 I²C 总线技术规范中，开始和结束信号（也称启动和停止信号）的定义如图 5-30 所示。当时钟线 SCL 为高电平时，数据线 SDA 由高电平跳变为低电平定义为“开始”信号；当 SCL 线为高电平时，SDA 线发生低电平到高电平的跳变为“结束”信号。开始和结束信号都是由主器件产生的。在开始信号以后，总线即被认为处于忙状态；在结束信号以后的一段时间内，总线被认为是空闲的，并等待下一次数据传输的开始。

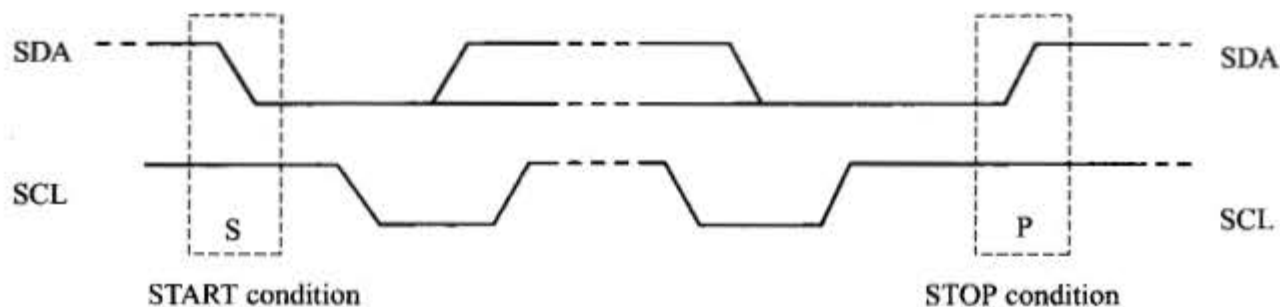


图 5-30 I²C 开始和结束信号的定义

I²C 总线的数据传输格式是在 I²C 总线开始信号后，送出的第一个字节数据用来选择从器件地址，其中前 7 位为地址码，第 8 位为方向位 (R/W)。方向位为“0”表示发送，即主器件把信息写到所选择的从器件中；方向位为“1”表示主器件将从从器件读信息。开始信号后，系统中的各个器件将各自的地址和主器件送到总线上的地址进行比较，如果与主器件发送到总线上的地址一致，则该器件即为被主器件寻址的器件，其接收信息还是发送信息由第 8 位 (R/W) 确定。

在 I²C 总线上每次传送的数据字节数不限，但每个字节必须为 8 位，而且每个传送的字节后面必须跟一个认可位 (第 9 位)，也称应答位 (ACK)。数据的传送过程如图 5-31 所示。每次都是先传最高位 MSB，通常从器件在接收到每个字节后都会作出响应，即释放 SCL 线返回高电平，准备接收下一个数据字节，主器件可继续传送。如果从器件正在处理一个实时事件而不能接收数据 (例如正在处理一个内部中断，在这个中断处理完之前就不能接收 I²C 总线上的数据字节)，可以使时钟 SCL 线保持低电平，从器件必须使 SDA 保持高电平，此时主器件产生一个结束信号，使传送异常结束，迫使主器件处于等待状态。当从器件处理完毕时将释放 SCL 线，主器件继续传送。

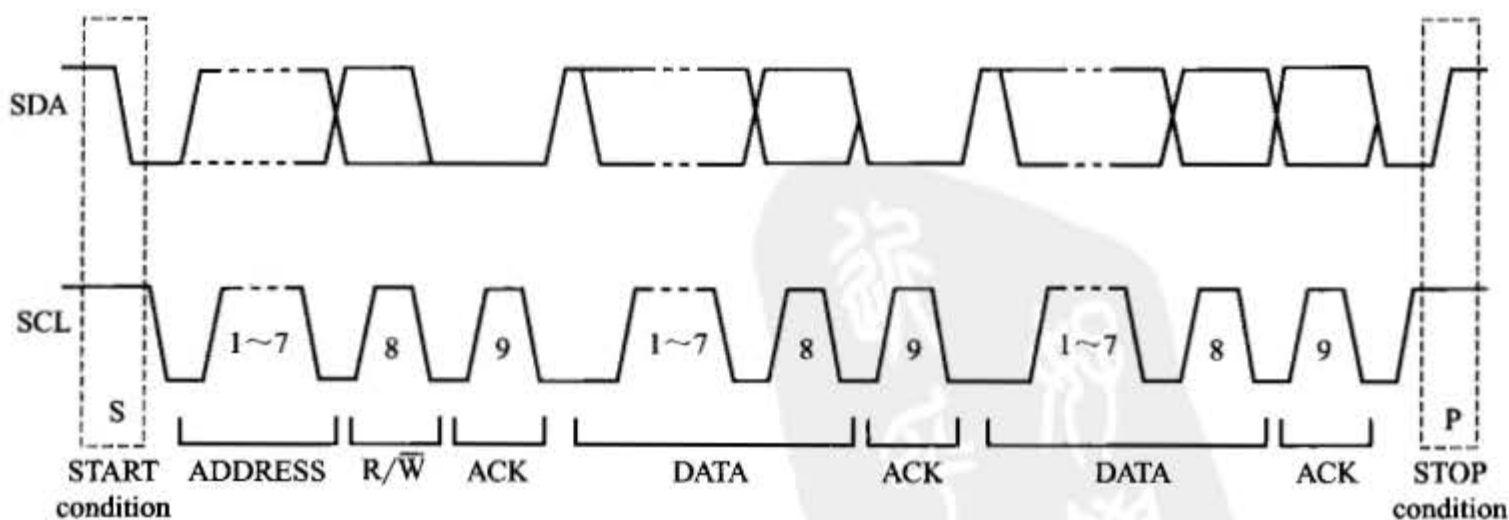


图 5-31 I²C 总线数据传输过程

当主器件发送完一个字节的的数据后，接着发出对应于 SCL 线上的一个时钟（ACK）认可位，在此时钟内主器件释放 SDA 线，一个字节传送结束，而从器件的响应信号将 SDA 线拉成低电平，使 SDA 在该时钟的高电平期间为稳定的低电平。从器件的响应信号结束后，SDA 线返回高电平，进入下一个传送周期。

I²C 总线还具有广播呼叫地址用于寻址总线上所有器件的功能。若一个器件不需要广播呼叫寻址中所提供的任何数据，则可以忽略该地址不作响应。如果该器件需要广播呼叫寻址中提供的的数据，则应对地址作出响应，其表现为一个接收器。

（四）总线竞争的仲裁

当总线上挂接有多个器件，有时就会发生两个或多个主器件同时想占用总线的情况。例如，多单片机系统中，可能在某一时刻有两个单片机要同时向总线发送数据，这种情况称为总线竞争。I²C 总线具有多主控能力，可以对发生在 SDA 线上的总线竞争进行仲裁，其仲裁原则如下：当多个主器件同时想占用总线时，如果某个主器件发送高电平，而另一个主器件发送低电平，则发送电平与此时 SDA 总线电平不符的那个器件将自动关闭其输出级。总线竞争的仲裁是在两个层次上进行的。首先是地址位的比较，如果主器件寻址同一个从器件，则进入数据位的比较，从而确保了竞争仲裁的可靠性。由于是利用 I²C 总线上的信息进行仲裁，因此不会造成信息的丢失。

尽管 I²C 总线结构没有并行总线那样大的吞吐能力，但由于连接线和连接引脚少，因此其构成的系统价格低，器件间总线简单，结构紧凑，而且在总线上增加器件不影响系统的正常工作，系统修改和可扩展性好。即使有不同时钟速度的器件连接到总线上，也能很方便地确定总线的时钟。因此带有 I²C 总线接口的器件可十分方便地用来将一个或多个单片机及外围器件构成单片机系统。

采用 I²C 技术的单片机以及外围器件已广泛应用于家用电器、通信设备及各类电子产品中，而且应用范围将会越来越广。目前世界上采用的 I²C 总线有两个规范，它们分别是由荷兰飞利浦公司和日本索尼公司提出的。现在广泛采用的是飞利浦公司的 I²C 总线技术规范，它已成为被电子行业认可的总线标准。

三、HART 协议简介

由于智能传感器都是数字式的，而在工业测试现场仍大量使用 4~20mA 模拟输出的系统（包括传感器、变送器及二次仪表等）。为解决这一技术难题，美国罗斯蒙特（Rosemount）公司提出了 HART 协议（highway addressable remote transducer protocol，可寻址远程传感器通信协议）作为过渡性标准。该通信协议具有与现场总线相似的体系结构以及总线式数字通信功能。

HART 协议采用“频移键控”（frequency shift keying，缩写为 FSK）技术。频移键控是频率调制的一种方法，调制信号只能在几个不同的固定频率之间变动，典型的例子是用二进制信号进行调频，用一个频率表示数据“1”，另一频率表示“0”。HART 协议是在 4~20mA 的模拟信号上叠加不同的频率信号，来代表所要传输或接收的数据。符合 Bell202 标准的 HART 协议信号波形如图 5-32 所示，数字频率信号的电流幅值为±0.5mA，数字信号分别用 1200Hz 代表逻辑“1”、2200Hz 代表逻辑“0”，信号传输速率为 1200bit/s。由于在一个周期内数字频率信号的平均值为零，因此不会对 4~20mA 的模拟信号产生影响，这是 HART 协议最重要的特点之一。它既保留了 4~20mA 过程控制信号的工业标准，又能在一

条双绞线上同时传输模拟信号和数字信号而互不影响,从而保证了 4~20mA 模拟系统与数字通信系统兼容性。在双绞线上可连接多台现场设备,构成多站网络,使不同厂家的产品互相通用。目前,许多国际上著名的公司已接受了 HART 协议,还成立了专门机构来推广 HART 协议。最近,我国也颁布了“国产符合 HART 协议智能仪表管理办法”并开始实行。因此,HART 协议已被认为是事实上的工业标准,但它仍属过渡性协议。

(一) HART 技术概况

HART 是“highway addressable remote transducer”(高速远程可寻址传感器)的缩写。

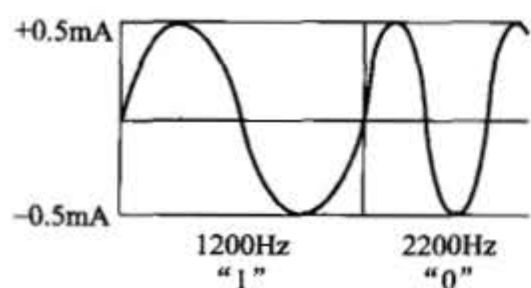


图 5-32 HART 协议的信号波形

HART 允许双路现场通信,它超越了普通的过程变量传输,能够在对现场智能设备的通信中传输更多的信息。HART 协议在不影响 4~20mA 信号的情况下以 1200bit/s 的速率进行通信,最大通信距离为 3000m,对于现场的一个设备,主站在 1s 内可以进行两次或更多次的刷新。由于 FSK 数字信号的相位连续,因此它对 4~20mA 信号没有干扰,见图 5-32。

HART 协议是主/从协议,也就是说现场设备(从站)只有在主站发出请求时才会有回应。HART 协议在中央控制或检测系统在对现场智能设备的信息通信中可采用不同的模式。HART 协议可提供多至两个主站(主/副),允许手操器等副主站在不影响主站的情况下在网络上进行系统的控制或监测。

HART 通信模式使用最多的是主/从模式,通信指令由主设备发出,现场设备(从设备)处于等待状态直至接收到主设备的指令后,进行指令的解析及对指令作出响应。在通信中,数字通信与 4~20mA 模拟信号同时传送,HART 协议允许将对现场设备的通信设置成点对点的通信或构造成多点通信网络,这种主/从通信模式中,来自从设备的数字信息在主设备上每秒刷新两次。

HART 的另一种模式是“阵发”(burst)模式,这种模式允许一个从设备连续不断地广播标准的 HART 响应信息,即自动执行某一特定的指令并对其作出响应而无须预先请求。只有在阵发模式中从设备可发出通信(其他模式中从设备只对主设备的请求作出响应),因而这种模式中可能引起与主设备的控制权的争用问题,所以一条链路上只能有一个阵发模式的从设备与主设备同时存在。这种可选模式的数字通信可设高刷新率,根据选择的指令不同,来自从设备的数字信息在主设备上每秒刷新 3~4 次。刷新率对一般点对点拓扑网络有严格的限制,只能以普通速率进行通信。考虑到安装费用,可以用 HART 的多点网络。HART 协议支持多个现场设备通过同一对线连接到网络中。在多点网络的应用中,与现场设备的通信限定为数字主/从模式,回路电流限定为最小值 4mA,与过程变量无关。

HART 信号的线材可与传统 4~20mA 使用相同的电缆。运行所需电缆长度与电缆类型和连接的现场设备数目有关。单芯屏蔽双绞电缆比多芯屏蔽双绞电缆的使用长度要长。一般来说,单芯屏蔽双绞电缆的使用长度可达 3000m,多芯屏蔽双绞电缆的使用长度为 1500m。如果使用距离短,还可以使用非屏蔽双绞电缆。在一些危险的场所,可通过 HART 信号的本质安全栅/隔离器来进行信号通信。

HART 指令集由三个部分组成,即通用指令、专用指令和常用指令。通用指令是所有 HART 设备必须配备的,用以提供支持 HART 技术的厂商之间的互用性。通用指令为用户工厂操作中提供大量的可访问信息,通用指令包括读制造商码和设备类型、读一次变量和单

位、读当前输出和量程百分比、读取多达四个预选定义的动态变量、读或写 8 字符标签及 16 字符描述符日期、读或写 32 字符信息、读变送器量程单位阻尼时间常数、读传感器编号和极限、读或写最终安装数和写登录地址等。专用指令是针对特殊设备访问的具有唯一性的指令，主要用于特殊的现场装置，专用指令包括读或写低流量截止值、启动停止或取消累积器、读或写密度校准系数、选择一次变量、读或写结构材料信息、调整传感器校准值等，这些命令可对设备进行一套新的组态。常用指令提供一些大多数设备所具有的访问功能，但这些功能不是所有设备支持的，对其使用是可选择的，使用时需有特殊说明。常用指令包括读四个动态变量之一、读或写动态变量用途、写阻尼时间常数、写变送器量程、校准置零间隔、设置固定的输出电流、执行自检、执行主站复位、调整 PV 零点、写 PV 单位、调整 DAC 零点与增益、写变换函数（平方根/线性）和写传感器编号等。通过 HART 技术，在对 HART 兼容的现场设备的读/写访问过程中获得大量的附加功能。HART 提供的一整套通信在反馈信息中囊括了设备状态信息，并扩展了错误检测信息，为设备提供了更多的安全保证。

最近，HART 技术又增加了设备描述语言（DDL）。使用 DDL，可使现场设备生产商对其产品建立完整的描述及相关特性，这样，任意一台计算机可以直接驱动现场设备，如同所有的 PC 机能够使应用程序与打印机对话，告知其按照应用程序的要求进行打印一样。借助于 DDL，通用的手持操作器也可以对任何基于 HART 技术的设备进行组态，其他类型兼容 DDI 的主站系统中也正在不断地推出，这使得 HART 技术的应用得到了进一步的推广。

（二）HART 协议优势

HART 协议是开放式的协议，用户可根据实际需要选择合适的产品及控制方案，且能保证产品之间的互用性，这是其他类型的技术和标准所难以达到的。HART 协议功能强大，使用方便，主要的优势如下。

① 一个 HART 设备在同一根连线上可同时提供几个变量信号，这有助于减少系统 I/O 点数和取样的通道数。例如，一个 HART 温度变送器同时可传输多点的温度或其他的压力、流量等信号。

② 可在系统运行中很方便地重新调整 HART 变送器的量程，即实时调整量程。

③ 可根据来自现场的智能化数据报告的代码作出相应的状态判断。

④ 可对现场设备和线路进行诊断，当设备发出报警信号时，提示运行人员对设备进行预处理。当设备发生故障时，可在向运行人员报警的同时对故障设备进行隔离。

⑤ HART 设备的 I/O 接口可与串口、传统的 I/O 或现场总线的 I/O 连接，可以很好地适应现场通信灵活的需要。

如今，越来越多的设备制造商的产品都支持 HART 协议，用户可以在现有工厂系统中自由选择适合的产品以满足自身需要。HART 与 4~20mA 信号很好的兼容性，使用户不必改动全部系统就可在现有 4~20mA 信号系统中扩充 HART 设备，大大降低了系统改造的风险，保证了工厂的稳定运行。HART 技术提供的有增强功能的现场通信在现场维护、安装及试运行期间可节省很多费用。HART 协议虽是模拟系统向数字系统转变过程中的过渡产品，但由于其在各方面所表现的优越性能使其在智能化仪表市场上占有很大份额，也将带动过程控制和过程管理进一步向前发展。