



陈启美
丁传锁 编著

计算机 USB接口技术

**The Technology
of USB Interface**

南京大学出版社



陈启美
丁传锁 编著

计算机 USB接口技术

**The Technology
of USB Interface**

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机 USB 接口技术/陈启美,丁传锁编著. —南京:
南京大学出版社,2003. 1

ISBN 7-305-03995-0

I. 计... II. ①陈... ②丁... III. 电子计算机-接
口 IV. TP334

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 108409 号

书 名 计算机 USB 接口技术
编 著 陈启美 丁传锁
出版发行 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093
电 话 025-3596923 025-3592317 传真:025-3303347
网 址 <http://press.nju.edu.cn>
电子邮件 [nupressl@ publicl.ptt.js.cn](mailto:nupressl@publicl.ptt.js.cn)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京人民印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张:22.25 字数:373 千
版 本 2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷
印 数 1—3000
ISBN 7-305-03995-0/ TP·249
定 价 38.00 元

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购
图书销售部门联系调换

前 言

为了方便外设的增添和适应现代计算机多媒体功能的拓展,USB 作为计算机外设接口技术的重要变革,应运而生。USB 在传统的计算机组织结构的基础上,引入了网络体系的设计思想。它具有终端用户的易用性、广泛的应用性、带宽的动态分配、优越的容错性能、较高的性能价格比等特点,从而成为计算机的主流接口。本书在扼要介绍 USB 的研制动机、技术目标和功能特色之后,系统地对 USB 的原理、体系、结构,以及应用等方面进行了描述。书中共有十一章:第一章导论、第二章体系结构概述、第三章 USB 数据流模型、第四章机械特性、第五章 USB 电气特性、第六章协议层、第七章 USB 设备架构、第八章 USB 主机:硬件与软件、第九章集线器规范、第十章 USB 驱动程序、第十一章 USB 控制器模块应用开发。

USB 技术堪称计算机与通信网络技术的天合之作。其一,从拓扑结构角度上看。在总线型的以太网中,各计算机终端同接在一条公用信道上,并由信道争用协议支撑,实现信息交互。这些终端设备,均属智能设备,具有识别地址信息,支持信道争用协议的能力。在计算机内部,CPU 与众多外围芯片的相连,则是通过三组总线实现,包括:数据总线(并行传输数据)、地址总线(选择信息交互的芯片),以及控制总线(决定传输方向的读写控制和支持中断方式等)。对于在一条“线缆”上链接多达 127 个设备的 USB 接口,不便采用计算机内部的多总线方式;由于这些设备又不具备计算机网络中的外设所具有的智能特性,因此采用了对端口的智能化处理方式,让端口与所连接的外设组合成了智能化的 USB 设备。USB 主机与这些 USB 设备的拓扑结构类似于总线网。

其二,从通信协议上看,USB 借鉴了网络协议的概念,确定相关的协议结构,包括帧结构、分层处理等。如参考了宽带网络中的通信协议,USB 设备可通过零通道向 USB 主机汇报配置要求,主机结合当前的带宽资源,预先协调好设备带宽的分配。又如,网络通信中有 Frame(帧)、Packet(包)、PDU(协议数据单元)之逐级划分,相类似地,USB 中有 Packet(包)、Transaction(事务)、Transfer(传送)等划分。

其三,从工作方式上看,计算机中有查询、中断、DMA 等方式,网络

传输中有异步、同步等方式。USB 中,则结合实际传输媒体的具体需求,运用了计算机及通信的理念,具有控制传送、批传送、中断传送、及同步传送四种方式。

其四,从软件层次来看。计算机和网络均有明确的软件层次,相应地,USB 主机软件符合 Windows WDM 模型,从上而下可依次分为:客户驱动程序、USB 驱动程序、HUB 驱动程序、主机控制器驱动程序等。从应用程序到总线的 USB 信息转换,依次为应用数据、IRP 报文、传送、事务和包。

其五,在电气特性上,由于 USB 的电缆远比计算机内部的总线长,因此沿用了网络通信中的差分传输技术,以抑制噪声,提高信噪比,实现高速传输。由于 USB 设备不一定自带电源,因此 USB 中具有自供电和总线供电两种方式。

书中,第一章的导论的目的在于对 USB 的特点、地位及工作原理展开讨论。从第二到第九章描述了 USB 原理、体系结构等方面内容,其中第三章 USB 数据流模型重点反映了 USB 的基本原理,第六章具体阐述 USB 协议,第七章和第八章分别从 USB 接口的两个侧面,即 USB 设备、USB 主机,叙述了其中的硬件、软件和工作原理,第九章专题对 USB 的特殊设备集线器进行了说明。第十章描述了操作系统对于 USB 驱动的具体编程。第十一章则以实际应用为背景,具体介绍了两类 USB 控制器模块的应用开发。书后附录给出了 USB 相关术语的解释。

在本书编写过程中,陈锁柱、王刚、张静、缪俊、周玉军、吴琨、夏耐、吴永辉、王胜、张盛等同学做了大量的工作。另外,本书参考了来自网站和其他方面的大量资料,在此一并表示感谢。

本书自成系统、便于自学,可作为高等学校计算机及相关专业的教材,也可作为科技人员的参考书。限于笔者的理论水平和实际能力,加之编写仓促,书中自然存有不少错误和缺陷,敬请读者不吝赐教。

编著者

2002 年 11 月

附:作者电子邮件地址 chenqimei@yahoo.com.cn

目 录

1	导论	1
1.1	USB 的背景	1
1.1.1	起因	1
1.1.2	特色	2
1.1.3	USB 设备的分类	3
1.1.4	USB 规范的目标	3
1.1.5	USB 规范的发展	4
1.2	微机系统与总线	4
1.2.1	微机系统构成	4
1.2.2	外部设备分类与特点	6
1.2.3	与串口、并口信息交互	7
1.2.4	总线的构想	9
1.2.5	总线数据传输	12
1.2.6	总线仲裁	14
1.2.7	PCI 总线	17
1.3	USB 总线在 PCI 总线上的实现	23
1.4	网络相关技术	24
1.4.1	计算机网络功能	24
1.4.2	网络体系结构	25
1.4.3	流量控制	26
1.4.4	服务质量	26
2	体系结构概述	28
2.1	USB 系统概述	28
2.1.1	总线布局	28
2.1.2	USB 的主机	28

2.1.3	USB 的设备	29
2.2	物理接口	29
2.2.1	电气特性	29
2.2.2	机械特性	30
2.3	电源	30
2.3.1	电源分配	30
2.3.2	电源管理	31
2.4	总线协议	31
2.5	容错性	32
2.5.1	错误检测	32
2.5.2	错误处理	32
2.6	系统设置	32
2.6.1	USB 设备的安装	32
2.6.2	USB 设备的拆卸	33
2.6.3	总线标识	33
2.7	数据流种类	33
2.7.1	控制传送	34
2.7.2	批传送	34
2.7.3	中断传送	34
2.7.4	同步传送	34
2.7.5	指定 USB 带宽	35
2.8	USB 设备	35
2.8.1	设备特性	35
2.8.2	设备描述	36
2.9	USB 主机:硬件和软件	37
2.10	体系结构的扩充	38
3	USB 数据流模型	39
3.1	USB 主机与外设视图	39
3.2	总线拓扑	41
3.2.1	USB 主机	41
3.2.2	USB 设备	41
3.2.3	总线的物理拓扑结构	42
3.2.4	总线的逻辑拓扑结构	42

3.3	USB 通信流	44
3.3.1	设备端点	45
3.3.2	通道	46
3.4	传送类型	48
3.5	控制传送	49
3.5.1	控制传送类型的数据格式	50
3.5.2	控制传送的方向	50
3.5.3	控制传送对包的大小的限制	50
3.5.4	控制传送对总线访问的限制	51
3.5.5	控制传送的数据顺序	53
3.6	同步传送	53
3.6.1	同步传送的数据格式	54
3.6.2	同步传送的方向	54
3.6.3	同步传送对包的大小的限制	54
3.6.4	同步传送对总线访问的限制	55
3.6.5	同步传送的数据顺序	55
3.7	中断传送	56
3.7.1	中断传送的数据格式	56
3.7.2	中断传送的方向	56
3.7.3	中断传送对包的大小的限制	56
3.7.4	中断传送对总线访问的限制	57
3.7.5	中断传送的数据顺序	59
3.8	批传送	59
3.8.1	批传送的数据格式	59
3.8.2	批传送的方向	59
3.8.3	批传送对包的大小的限制	59
3.8.4	批传送对总线访问的限制	60
3.8.5	批传送的数据顺序	61
3.9	传送的总线访问	61
3.9.1	传送管理	61
3.9.2	事务的跟踪	64
3.9.3	计算总线事务的时间	65
3.9.4	应用层和客户软件对缓冲区大小的计算	67
3.9.5	总线带宽归还	67

3.10	关于同步传送的一些特别考虑	68
3.10.1	典型的非 USB 同步应用	69
3.10.2	USB 时钟模型	71
3.10.3	时钟同步	71
3.10.4	同步设备	73
3.10.5	数据预缓存	80
3.10.6	SOF 跟踪	81
3.10.7	差错处理	81
3.10.8	为匹配速率而做的缓冲	82
4	机械特性	84
4.1	结构总述	84
4.2	连接器协议	84
4.3	电缆	85
4.4	电缆部件	85
4.4.1	可分离电缆部件	86
4.4.2	全速电缆部件	87
4.4.3	低速电缆部件	88
4.4.4	禁止使用电缆部件的情况	89
4.5	连接器的机械结构和材料要求	90
4.5.1	USB 图标	90
4.5.2	USB 连接器终端数据	91
4.5.3	系列 A 和系列 B 插座	91
4.5.4	系列 A 和系列 B 插头	94
4.6	电缆的机械结构和材料要求	97
4.6.1	概述	97
4.6.2	结构	98
4.6.3	电气特性	100
4.6.4	电缆环境特性	101
4.6.5	列表	101
4.7	电气、机械、环境一致性要求标准	101
4.8	USB 基础	107
4.9	印刷电路板参考图	107

5	USB 电气特性	111
5.1	信号的发送	111
5.1.1	USB 驱动器特性	111
5.1.2	数据信号的上升沿和下降沿	114
5.1.3	电缆发送信号的偏移	116
5.1.4	接收器特性	116
5.1.5	设备速度验证	117
5.1.6	输入端特性	118
5.1.7	信号的发送标准	119
5.1.8	数据的编码和解码	128
5.1.9	位填充	128
5.1.10	同步格式	131
5.1.11	数据信号的传输速率	131
5.1.12	帧间距及其调节	131
5.1.13	数据源信号的发送	132
5.1.14	集线器信号发送时序	133
5.1.15	接收端数据的抖动	135
5.1.16	电缆时延	137
5.1.17	电缆上的信号衰减	138
5.1.18	总线的周转时间和内部包的延时	139
5.1.19	端对端最大信号延迟	139
5.2	供电分配	140
5.2.1	设备的分类	140
5.2.2	电压落差的范围	145
5.2.3	挂起/唤醒期间的电压控制	146
5.2.4	动态加载与卸载	147
5.3	物理层	149
5.3.1	控制条件	149
5.3.2	总线定时/电气特征	149
5.3.3	时间波形	157
6	协议层	161
6.1	位定序	161
6.2	同步字段	161

6.3	包字段格式	161
6.3.1	包标识符字段	161
6.3.2	地址字段	163
6.3.3	帧号字段	164
6.3.4	数据字段	164
6.3.5	循环冗余校验	164
6.4	包格式	165
6.4.1	标记包	165
6.4.2	帧起始(SOF)包	166
6.4.3	数据包	166
6.4.4	握手包	166
6.4.5	握手应答(Handshake Response)	168
6.5	事务格式	169
6.5.1	批处理事务	169
6.5.2	控制传送	171
6.5.3	中断事务	174
6.5.4	同步事务	175
6.6	数据切换同步和重试	176
6.6.1	通过建立标记初始化	176
6.6.2	成功的数据事务	176
6.6.3	损坏、或者不被接受的数据	177
6.6.4	损坏的 ACK 握手	177
6.6.5	低速事务	178
6.7	错误检测和恢复	179
6.7.1	包错误种类	180
6.7.2	总线周转(Turn-around)时间	180
6.7.3	错误的 EOP	181
6.7.4	串扰(Babble)和活性丧失(Loss of Activity)的 恢复	182
7	USB 设备架构	183
7.1	USB 设备状态	183
7.1.1	基本的设备状态	183
7.1.2	总线标识	186

7.2 通用 USB 设备操作	187
7.2.1 动态连接与移去	187
7.2.2 地址分配	187
7.2.3 配置	187
7.2.4 数据传送	188
7.2.5 电源管理	188
7.2.6 请求处理	188
7.2.7 请求错误	190
7.3 USB 设备请求	190
7.3.1 bmRequestType 域	191
7.3.2 bRequest 域	191
7.3.3 wValue 域	191
7.3.4 wIndex 域	191
7.3.5 wLength 域	192
7.4 标准设备请求	192
7.4.1 清除特性(ClearFeature)	194
7.4.2 取得配置(GetConfiguration)	194
7.4.3 取得描述符(GetDescriptor)	194
7.4.4 取得接口设置(GetInterface)	195
7.4.5 取得状态(GetStatus)	195
7.4.6 设置地址(SetAddress)	197
7.4.7 设置配置值(SetConfiguration)	197
7.4.8 设置描述符(SetDescriptor)	197
7.4.9 设置特性(SetFeature)	197
7.4.10 设置接口(SetInterface)	198
7.4.11 同步帧(SynchFrame)	198
7.5 描述符	198
7.6 标准描述符的定义	199
7.6.1 设备	199
7.6.2 配置	201
7.6.3 接口	202
7.6.4 端点	204
7.6.5 字符串	206
7.7 设备类定义	207

7.7.1	描述符	207
7.7.2	接口与端点的使用	207
7.7.3	请求	207
8	USB 主机:硬件与软件	208
8.1	USB 主机概况	208
8.1.1	概论	208
8.1.2	控制机构	211
8.1.3	数据流	211
8.1.4	收集状态及活动统计数据	211
8.1.5	电气接口因素	212
8.2	主机控制器功能	212
8.2.1	状态处理	212
8.2.2	串行—并行转换	213
8.2.3	帧产生	213
8.2.4	数据处理	214
8.2.5	协议引擎	214
8.2.6	差错控制	214
8.2.7	远程唤醒	214
8.2.8	根集线器	215
8.2.9	主机系统接口	215
8.3	软件功能概论	215
8.3.1	设备配置	215
8.3.2	资源管理	217
8.3.3	数据传送	218
8.3.4	普通数据定义	218
8.4	主机控制器驱动器	219
8.5	USB D	220
8.5.1	USB D 概况	220
8.5.2	USB D 命令机制	221
8.5.3	USB D 通道机制	224
8.5.4	通过 USB D 机制管理 USB 系统	226
8.5.5	USB 的控制权转移	228
8.6	操作系统环境	228

9	集线器规范	229
9.1	概述	229
9.1.1	集线器结构	229
9.1.2	集线器连接	229
9.2	集线器帧计时器	231
9.2.1	帧计数器的同步	232
9.2.2	EOF ₁ 和 EOF ₂ 时刻	233
9.3	帧结束时的主机行为	235
9.3.1	最后发给主机的包	235
9.3.2	包的取消	235
9.3.3	事务完成预测	236
9.4	内部端口	237
9.4.1	不活动状态(Inactive)	237
9.4.2	挂起时延(Suspend Delay)	237
9.4.3	充分挂起(Fsus)	238
9.4.4	产生唤醒(GResume)	238
9.5	下行端口	238
9.5.1	下行端口状态描述	240
9.5.2	未连接检测计时器	243
9.6	上行端口	243
9.6.1	接收部分	243
9.6.2	发送器	245
9.7	集线器中继器	247
9.7.1	等待来自上行端口的包开始(WFSOPFU)	249
9.7.2	等待来自上行端口的包结束(WFEOPFU)	249
9.7.3	等待包开始(WFSOP)	249
9.7.4	等待包结束(WFEOP)	250
9.8	总线状态核定	250
9.8.1	端口错	250
9.8.2	速度检测	250
9.8.3	冲突	251
9.8.4	高速和低速行为	252

9.9	挂起和唤醒	253
9.10	集线器重启	254
9.11	集线器端口电源管理	254
9.12	集线器 I/O 缓冲器需求	256
9.12.1	上拉和下拉电阻	256
9.12.2	沿陡峭率控制(Edge Rate Control)	256
9.13	集线器控制器	257
9.13.1	端点组织	257
9.13.2	集线器信息结构和操作	257
9.13.3	端口变化信息处理过程	258
9.13.4	集线器和端口状态变化位图	259
9.13.5	电流过载报告和恢复	261
9.14	集线器配置	261
9.15	描述符	263
9.15.1	标准描述符	263
9.15.2	集线器类的描述符	264
9.16	请求	265
9.16.1	标准请求	265
9.16.2	类请求	266
10	USB 驱动程序	280
10.1	Windows 操作系统对 USB 的支持	280
10.1.1	Win 32 驱动模式	280
10.1.2	用户模式和内核模式	281
10.2	分层驱动	283
10.2.1	USB 驱动程序分层结构	283
10.2.2	设备和总线驱动	285
10.3	USB 设备驱动程序	286
10.3.1	USB 驱动程序接口	286
10.3.2	Windows 使用的设备驱动类型	290
10.3.3	自定义驱动	292
11	USB 控制器模块应用开发	295
11.1	USB 控制器模块	295

11.1.1	USB 控制芯片主体结构	295
11.1.2	USB 控制模块的划分	296
11.1.3	USB 控制模块的要素	296
11.1.4	USB 控制芯片的选择	297
11.1.5	常用的 USB 控制芯片	300
11.2	USB 设备模块的开发	304
11.2.1	系统结构	304
11.2.2	PDIUSB12 芯片特性和内部结构	305
11.2.3	软件设计	309
11.2.4	基于 USB 数据采集系统	316
11.3	USB 主机模块的开发	321
11.3.1	USB 主机和设备接口	321
11.3.2	ISP1160 的典型连接和软件模型	323
11.3.3	基于 ISP1160 的数码相机的可视监控系统	325
附录 1	USB 词汇参考	328
附录 2	网络资源	340

1 导 论

1.1 USB 的背景

作为计算机外设接口技术的重要变革,USB(Universal Serial Bus,通用串行总线)在传统的计算机组织结构的基础上,引入了网络的拓扑结构及其设计思想。USB 具有终端用户的易用性、广泛的应用性、带宽的动态分配、优越的容错性能、较高的性能价格比等特点,方便了外设的增添,适应了现代计算机多媒体的功能拓展,已逐步成为计算机的主流接口。20 世纪末,USB 是由 Compaq、Microsoft、Intel、Digital Equipment、IBM、NEC、Northern Telecom 等七家公司共同开发的。USB - IF 发布了通用串行技术规范,奠定了 USB 的技术基础。至于 USB 为何应运而生,并急速发展到接口的主流地位,这需要追溯到其研制动因。

1.1.1 起因

如何简化外围设备并拓展计算机应用,是 PC 机厂家注重的研究课题,而 USB 研制的具体动机主要基于:

1. 易用性

尽管对用户友好的图形化接口和一些软硬件机制的结合,加上新一代总线结构的引入使得计算机的冲突大量减少,但对于终端用户,并没有达到即插即用(Plug & Play)的特性,这正是 USB 研制的初衷。

2. 端口扩充性

外围设备的添加总是被端口数目限制着。USB 的端口具有不断扩充性,并提供了快速、双向、动态连接以及价格低廉等诸多特性,可满足 PC 机不断发展的需要。

3. 兼容性

多媒体技术的高速发展,智能终端和有源设备的大量使用,对 PC 机接口提出新的要求。USB 适应了外围设备的发展趋势,在技术上支持了高速与低速数据、智能与一般外设、有源与无源设备的兼容。

4. 电话的连接

计算机用于通信将成为主流,其中的数据流动需要一个广泛而又便宜