

## 第 27 章 USB On-The-Go (OTG)

### 目录

本章包含下列主题：

27.1 简介 .....	27-2
27.2 控制寄存器 .....	27-4
27.3 工作原理 .....	27-25
27.4 设备模式的操作 .....	27-39
27.5 主机模式的操作 .....	27-41
27.6 中断 .....	27-47
27.7 I/O 引脚 .....	27-50
27.8 调试和节能模式下的操作 .....	27-51
27.9 复位的影响 .....	27-53
27.10 电气规范 .....	27-54
27.11 寄存器映射 .....	27-55
27.12 相关应用笔记 .....	27-57
27.13 版本历史 .....	27-58

## 27.1 简介

PIC24F USB 模块包含以下特性：

- 主机和设备支持全速 USB 操作
- 低速主机支持
- USB On-The-Go 支持
- 集成的信号传输电阻
- 集成的模拟比较器，用于 VBUS 监视
- 集成的 USB 收发器
- 硬件执行事务握手
- 可在系统 RAM 中的任意位置进行端点缓冲
- 集成的 DMA 控制器，用以访问系统 RAM

通用串行总线（Universal Serial Bus，USB）模块包含模拟和数字元件，使用最少量的外部元件即可实现 USB 2.0 全速和低速嵌入式主机、全速设备或 On-The-Go（OTG）工作模式。

USB 模块由时钟发生器、USB 电压比较器、收发器、串行接口引擎（Serial Interface Engine，SIE）、上拉和下拉电阻以及寄存器接口组成。图 27-1 给出了 PIC24F USB OTG 模块的框图。

时钟发生器提供 USB 通信所需的 48 MHz 时钟。电压比较器监视 VBUS 引脚上的电压以确定总线的状态。收发器在 USB 总线和数字逻辑之间提供模拟转换。SIE 是一个状态机，它与端点缓冲区交换数据，并产生用于数据传输的协议。集成的上拉和下拉电阻省去了对外部信号传输元件的需要。寄存器接口使 CPU 可以配置模块并与模块进行通信。

<b>重要提示：</b>	USB 规范和其他第三方规范或技术的实现和使用可能需要从各种实体获取许可证，包括但不限于 USB Implementers Forum, Inc.（也称为 USB-IF）。您需自行负责获取关于任何适用许可义务的更多信息。
--------------	--



## 27.2 控制寄存器

USB 模块包含以下控制和状态寄存器：

- U1OTGIR 寄存器

U1OTGIR 寄存器记录 ID 和 VBUS 引脚的变化，使软件可以确定导致中断的事件。中断位可通过向相应中断位写入 1 来清零。

- U1OTGIE 寄存器

U1OTGIE 寄存器使能 U1OTGIR 寄存器中定义的对应该中断状态位。

- U1OTGSTAT 寄存器

U1OTGSTAT 寄存器用于访问 VBUS 电压比较器的状态，以及 ID 引脚消抖后的状态。

- U1OTGCON 寄存器

U1OTGCON 寄存器控制 VBUS 引脚以及上拉和下拉电阻的操作。

- U1PWRC 寄存器

U1PWRC 寄存器控制节能模式。

- U1IR 寄存器

U1IR 寄存器包含关于待处理中断的信息。某个中断位置 1 后，可通过向对应的位中写入 1 将其清零。

- U1IE 寄存器

U1IE 寄存器的值用于从各种中断信号中选择要作为 USB 中断信号的信号。USB 模块不能对该寄存器的值进行操作。将这些位中的任何一个置 1 会使能 U1IR 寄存器中的相应中断源。

- U1EIR 寄存器

U1EIR 寄存器包含关于待处理错误中断值的信息。将某个中断位置 1 后，可通过向对应的位中写入 1 将其清零。

- U1EIE 寄存器

U1EIE 寄存器的值用于从各种中断信号中选择要作为 USB 中断信号的信号。USB 模块不能对该寄存器的值进行操作。将这些位中的任何一个置 1 会使能 U1EIR 寄存器中的相应中断源。

- U1STAT 寄存器

U1STAT 寄存器是 16 级深 FIFO。它对于 CPU 是只读寄存器，对于 USB 模块是读 / 写寄存器。U1STAT 仅在 U1IR<TRNIF> 位置 1 时有效。

- U1CON 寄存器

U1CON 寄存器提供模块的各种控制信息。

- U1ADDR 寄存器

U1ADDR 寄存器从 CPU 一端可进行读 / 写，从 USB 模块一端是只读的。虽然寄存器的值会影响 USB 模块的设置，但该寄存器的内容在访问期间不会改变。

在设备模式下，该地址定义 USB 设备地址，地址由主机在 SETUP 阶段指定。固件写入地址来响应 SETUP 请求。当检测到 USB 总线复位时，该地址会被自动复位。在主机模式下，模块使用对应的令牌数据包来发送该寄存器中提供的地址。这使 USB 模块可以对所连接设备进行惟一寻址。

- U1FRMH 和 U1FRML 寄存器

U1FRMH/U1FRML 是只读寄存器。帧编号通过连接两个 8 位寄存器而构成。低字节位于 U1FRML 寄存器，高字节位于 U1FRMH 寄存器。

- U1TOK 寄存器

当模块作为主机工作时，U1TOK 是必需的读 / 写寄存器。它用于指定令牌类型 (PID<3:0>) 和主机处理器所访问的端点 (EP<3:0>)。写入该寄存器会触发一个主机事务。

- U1SOF 寄存器

U1SOF 门限寄存器是一个读 / 写寄存器，包含仅在主机模式下使用的 Start-of-Frame (帧起始) 门限值的计数位数。

为了防止数据包数据与每隔 1 ms 发送的 Start-Of-Frame (SOF) 令牌冲突，USB 模块不会在最后的 U1SOF 位时间内发送任何新事务。USB 模块会完成正在进行中的所有事务。SOF 中断在达到该门限时发生，而不是在出现 SOF 时发生。在 SOF 门限内启动的事务会被 USB 模块挂起，直到发送 SOF 令牌之后为止。

- U1BDTP1

U1BDTP1 寄存器是读 / 写寄存器，定义缓冲区描述符表 (Buffer Descriptor Table, BDT) 在系统存储器中的 16 位基址的高 7 位。BDT 强制为按 512 字节对齐。该寄存器使得可以对 BDT 进行实时重定位。

- U1CNFG1 寄存器

U1CNFG1 寄存器是读 / 写寄存器，用于控制模块的调试和空闲行为。该寄存器必须在使能模块前进行预配置。

- U1CNFG2 寄存器

U1CNFG2 寄存器是用于配置接口信号的读 / 写寄存器。

- 端点控制寄存器

端点控制寄存器控制对应端点的行为。

以下寄存器不是 USB 模块的组成部分，但与模块操作相关。

- OSCCON: 振荡器控制寄存器
- IFS1: 中断标志状态寄存器
- IEC1: 中断允许控制寄存器
- DEVCFG2: 器件配置控制寄存器

### 27.2.1 清除 USB OTG 中断

和器件级中断不同，USB OTG 中断状态标志不能用软件自由写入。所有的 USB OTG 标志位都实现为只能由硬件置 1 的位。此外，这些位只能在软件中通过写入 1 清零 (即执行 BSET 指令)。将 0 写入标志位 (即 BCLR 指令) 不起作用。

**注：** 在本章中，只能通过写入 1 清零的位称为“写 1 清零位”。在寄存器说明中，该功能用描述符“K”表示。

27.2.2 USB OTG 模块控制寄存器

寄存器 27-1: U1OTGSTAT: USB OTG 状态寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R-0, HSC	U-0	R-0, HSC	U-0	R-0, HSC	R-0, HSC	U-0	R-0, HSC
ID	—	LSTATE	—	SESVD	SESEND	—	VBUSVD
bit 7							bit 0

图注:	U = 未实现位, 读为 0						
R = 可读位	W = 可写位			HSC = 可由硬件置 1/ 清零的位			
-n = POR 时的值	1 = 置 1			0 = 清零		x = 未知	

bit 15-8	未实现: 读为 0
bit 7	<b>ID:</b> ID 引脚状态指示位 1 = 未连接电缆, 或一个 B 类插头已插入 USB 插座 0 = 一个 A 类插头已插入 USB 插座
bit 6	未实现: 读为 0
bit 5	<b>LSTATE:</b> 线状态稳定指示位 1 = 前 1 ms USB 线状态 (由 SE0 和 JSTATE 定义) 已稳定 0 = 前 1 ms USB 线状态未稳定
bit 4	未实现: 读为 0
bit 3	<b>SESVD:</b> 会话有效指示位 1 = A 或 B 设备上的 VBUS 电压高于 VA_SESS_VLD (如 USB OTG 规范中所定义) 0 = A 或 B 设备上的 VBUS 电压低于 VA_SESS_VLD
bit 2	<b>SESEND:</b> B 会话结束指示位 1 = B 设备上的 VBUS 电压低于 VB_SESS_END (如 USB OTG 规范中所定义) 0 = B 设备上的 VBUS 电压高于 VB_SESS_END
bit 1	未实现: 读为 0
bit 0	<b>VBUSVD:</b> A-VBUS 有效指示位 1 = A 设备上的 VBUS 电压高于 VA_VBUS_VLD (如 USB OTG 规范中所定义) 0 = A 设备上的 VBUS 电压低于 VA_VBUS_VLD

寄存器 27-2: U1OTGCON: USB On-The-Go 控制寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
DPPULUP	DMPULUP	DPPULDWN <sup>(1)</sup>	DMPULDWN <sup>(1)</sup>	VBUSON <sup>(1)</sup>	OTGEN <sup>(1)</sup>	VBUSCHG <sup>(1)</sup>	VBUSDIS <sup>(1)</sup>
bit 7							bit 0

图注:

R = 可读位

W = 可写位

U = 未实现位, 读为 0

-n = POR 时的值

1 = 置 1

0 = 清零

x = 未知

bit 15-8 未实现: 读为 0

bit 7 **DPPULUP:** D+ 上拉使能位  
1 = 使能 D+ 数据线上拉电阻  
0 = 禁止 D+ 数据线上拉电阻

bit 6 **DMPULUP:** D- 上拉使能位  
1 = 使能 D- 数据线上拉电阻  
0 = 禁止 D- 数据线上拉电阻

bit 5 **DPPULDWN:** D+ 下拉使能位 <sup>(1)</sup>  
1 = 使能 D+ 数据线下拉电阻  
0 = 禁止 D+ 数据线下拉电阻

bit 4 **DMPULDWN:** D- 下拉使能位 <sup>(1)</sup>  
1 = 使能 D- 数据线下拉电阻  
0 = 禁止 D- 数据线下拉电阻

bit 3 **VBUSON:** VBUS 上电位 <sup>(1)</sup>  
1 = VBUS 线上电  
0 = VBUS 线未上电

bit 2 **OTGEN:** OTG 功能使能位 <sup>(1)</sup>  
1 = 使能 USB OTG ; 使能所有 D+/D- 上拉和下拉位  
0 = 禁止 USB OTG ; D+/D- 上拉和下拉电路通过设置 HOSTEN 和 USBEN 位 (U1CON<3,0>) 在硬件中控制

bit 1 **VBUSCHG:** VBUS 充电选择位 <sup>(1)</sup>  
1 = VBUS 线设置为充电到 3.3V  
0 = VBUS 线设置为充电到 5V

bit 0 **VBUSDIS:** VBUS 放电使能位 <sup>(1)</sup>  
1 = VBUS 线通过电阻放电  
0 = VBUS 线不放电

注 1: 这些位仅在主机模式下使用; 不要在设备模式下使用。

寄存器 27-3: U1PWRC: USB 电源控制寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

HS, HC	U-0	U-0	R/W	U-0	U-0	R/W-0, HC	R/W-0
UACTPND	—	—	USLPGRD	—	—	USUSPND	USBPWR
bit 7							bit 0

图注:	HS = 可由硬件置 1 的位	HC = 可由硬件清零的位
R = 可读位	W = 可写位	U = 未实现位, 读为 0
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零
		x = 未知

- bit 15-8 未实现: 读为 0
- bit 7 UACTPND: USB 活动暂停位  
1 = 此刻不应暂停模块 (要求 GUARD 位置 1)  
0 = 模块可能已暂停或掉电
- bit 6-5 未实现: 读为 0
- bit 4 USLPGRD: 休眠保护位  
1 = 向 USB 模块指示它即将暂停或掉电  
0 = 未暂停
- bit 3-2 未实现: 读为 0
- bit 1 USUSPND: USB 暂停模式使能位  
1 = USB OTG 模块处于暂停模式; USB 时钟是门控的, 并且收发器置于低功耗状态  
0 = 常规 USB OTG 操作
- bit 0 USBPWR: USB 操作使能位  
1 = 使能 USB OTG 模块  
0 = 禁止 USB OTG 模块<sup>(1)</sup>

注 1: 不要清零该位, 除非 HOSTEN、USBEN 和 OTGEN 位 (U1CON<3,0> 和 U1OTGCON<2>) 都已清零。



寄存器 27-4: U1STAT: USB 状态寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15				bit 8			
R-0, HSC	R-0, HSC	R-0, HSC	R-0, HSC	R-0, HSC	R-0, HSC	U-0	U-0
ENDPT3	ENDPT2	ENDPT1	ENDPT0	DIR	PPBI <sup>(1)</sup>	—	—
bit 7				bit 0			

图注:	U = 未实现位, 读为 0
R = 可读位	W = 可写位
-n = POR 时的值	1 = 置 1
	HSC = 可由硬件置 1/ 清零的位
	0 = 清零
	x = 未知

- bit 15-8      未实现: 读为 0
- bit 7-4      **ENDPT3:ENDPT0:** 最后一个处于活动的端点的编号位 (代表上个 USB 传输更新的 BDT 号) <sup>(2)</sup>
- 1111 = 端点 15
- 1110 = 端点 14
- ....
- 0001 = 端点 1
- 0000 = 端点 0
- bit 3          **DIR:** 上次 BD 方向指示位
- 1 = 上次事务是发送传输 (TX)
- 0 = 上次事务是接收传输 (RX)
- bit 2          **PPBI:** 乒乓 BD 指针指示位 <sup>(1)</sup>
- 1 = 上次事务针对奇编号 BD 存储区
- 0 = 上次事务针对偶编号 BD 存储区
- bit 1-0       未实现: 读为 0
- 注      1: 该位仅对具有可用的偶编号和奇编号 BD 寄存器的端点有效。
- 2: 在主机模式下, 所有事务都通过端点 0 和端点 0 BDT 进行处理。因此, ENDPT<3:0> 将始终读为 0000。

寄存器 27-5: U1CON: USB 控制寄存器 (设备模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
U-0	R-x HSC	R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	SE0	PKTDIS	—	HOSTEN	RESUME	PPBRST	USBEN
bit 7							bit 0

图注:	U = 未实现位, 读为 0	
R = 可读位	W = 可写位	HSC = 可由硬件置 1/ 清零的位
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零
		x = 未知

- bit 15-7      **未实现:** 读为 0
- bit 6      **SE0:** 有效单端 0 标志位  
1 = 在 USB 总线上存在有效的单端 0  
0 = 没有检测到单端 0
- bit 5      **PKTDIS:** 数据包传输禁止位  
1 = 禁止处理 SIE 令牌和数据包; 接收到 SETUP 令牌时自动置 1  
0 = 使能 SIE 令牌和数据包处理
- bit 4      **未实现:** 读为 0
- bit 3      **HOSTEN:** 主机模式使能位  
1 = 使能 USB 主机功能; D+ 和 D- 上的下拉电路由硬件激活  
0 = 禁止 USB 主机功能
- bit 2      **RESUME:** 恢复信号传输使能位  
1 = 激活恢复信号传输  
0 = 禁止恢复信号传输
- bit 1      **PPBRST:** 乒乓缓冲区复位位  
1 = 将所有乒乓缓冲区指针复位到偶编号 BD 存储区  
0 = 乒乓缓冲区指针不复位
- bit 0      **USBEN:** USB 模块使能位  
1 = 使能 USB 模块和支持电路 (设备已连接); D+ 上拉由硬件激活  
0 = 禁止 USB 模块和支持电路 (设备已断开连接)

寄存器 27-6: U1CON: USB 控制寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R-x, HSC	R-x, HSC	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
JSTATE	SE0	TOKBUSY	RESET	HOSTEN	RESUME	PPBRST	SOFEN
bit 7							bit 0

图注: U = 未实现位, 读为 0  
R = 可读位 W = 可写位 HSC = 可由硬件置 1/ 清零的位  
-n = POR 时的值 1 = 置 1 0 = 清零 x = 未知

- bit 15-8 未实现: 读为 0
- bit 7 **JSTATE:** 有效差分接收机 J 状态标志位  
1 = USB 上检测到 J 状态 (低速模式下差分 0, 全速模式下差分 1)  
0 = 未检测到 J 状态
- bit 6 **SE0:** 有效单端 0 标志位  
1 = 在 USB 总线上存在有效的单端 0  
0 = 没有检测到单端 0
- bit 5 **TOKBUSY:** 令牌忙状态位  
1 = USB 模块在 On-The-Go 状态中执行令牌  
0 = 未执行令牌
- bit 4 **RESET:** 模块复位位  
1 = 产生了 USB 复位; 对于软件复位, 应用程序必须置 1 该位 10 ms, 然后清零  
0 = USB 复位已终止
- bit 3 **HOSTEN:** 主机模式使能位  
1 = 使能 USB 主机功能; D+ 和 D- 上的下拉电路由硬件激活  
0 = 禁止 USB 主机功能
- bit 2 **RESUME:** 恢复信号传输使能位  
1 = 恢复信号传输已激活; 软件必须置 1 该位 10 ms 然后清零, 来使能远程唤醒  
0 = 禁止恢复信号传输
- bit 1 **PPBRST:** 乒乓缓冲区复位位  
1 = 将所有乒乓缓冲区指针复位到偶编号 BD 存储区  
0 = 乒乓缓冲区指针不复位
- bit 0 **SOFEN:** Start-Of-Frame 使能位  
1 = 每隔 1 毫秒发送 Start-Of-Frame 令牌  
0 = 禁止 Start-Of-Frame 令牌

# PIC24F 系列参考手册

寄存器 27-7: U1ADDR: USB 地址寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
LSPDEN <sup>(1)</sup>	DEVADDR6	DEVADDR5	DEVADDR4	DEVADDR3	DEVADDR2	DEVADDR1	DEVADDR0
bit 7							bit 0

图注:

R = 可读位                      W = 可写位                      U = 未实现位, 读为 0  
-n = POR 时的值                1 = 置 1                      0 = 清零                      x = 未知

bit 15-8        未实现: 读为 0  
bit 7        **LSPDEN:** 低速使能指示位 <sup>(1)</sup>  
              1 = USB 模块工作于低速模式  
              0 = USB 模块工作于全速模式  
bit 6-0        **DEVADDR6:DEVADDR0:** USB 设备地址位

注    1: 仅限主机模式。在设备模式下, 该位未实现。

寄存器 27-8: U1TOK: USB 令牌寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
PID3 <sup>(1)</sup>	PID2 <sup>(1)</sup>	PID1 <sup>(1)</sup>	PID0 <sup>(1)</sup>	EP3	EP2	EP1	EP0
bit 7							bit 0

图注:

R = 可读位                      W = 可写位                      U = 未实现位, 读为 0  
-n = POR 时的值                1 = 置 1                      0 = 清零                      x = 未知

bit 15-8        未实现: 读为 0  
bit 7-4        **PID3:PID0:** 令牌类型标识符位 <sup>(1)</sup>  
              1101 = SETUP (TX) 令牌类型事务  
              1001 = IN (RX) 令牌类型事务  
              0001 = OUT (TX) 令牌类型事务  
bit 3-0        **EP3:EP0:** 令牌命令端点地址位  
              该值必须指定所连接设备上的一个有效端点。

注    1: 所有其他组合都被保留不用。

**寄存器 27-9: U1SOF: USB OTG Start-Of-Frame 门限值寄存器 (仅限主机模式)**

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15				bit 8			
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
CNT7	CNT6	CNT5	CNT4	CNT3	CNT2	CNT1	CNT0
bit 7				bit 0			

**图注:**

R = 可读位                      W = 可写位                      U = 未实现位, 读为 0  
-n = POR 时的值                1 = 置 1                      0 = 清零                      x = 未知

bit 15-8      **未实现:** 读为 0

bit 7-0      **CNT7:CNT0:** Start-Of-Frame 计数位值表示 10 + (n 字节的数据包大小); 例如:

0100 1010 = **64** 字节数据包  
0010 1010 = **32** 字节数据包  
0001 0010 = **8** 字节数据包

**寄存器 27-10: U1CNFG1: USB 配置寄存器 1**

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15				bit 8			
R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0
UTEYE	UOEMON	—	USBSIDL	—	—	PPB1	PPB0
bit 7				bit 0			

**图注:**

R = 可读位                      W = 可写位                      U = 未实现位, 读为 0  
-n = POR 时的值                1 = 置 1                      0 = 清零                      x = 未知

bit 15-8      **未实现:** 读为 0

bit 7      **UTEYE:** USB 眼图测试使能位

1 = 使能眼图测试  
0 = 禁止眼图测试

bit 6      **UOEMON:** USB  $\overline{OE}$  监视器使能位

1 =  $\overline{OE}$  信号有效; 它指示驱动 D+/D- 线的间隔  
0 =  $\overline{OE}$  信号无效 <sup>(1)</sup>

bit 5      **未实现:** 读为 0

bit 4      **USBSIDL:** USB OTG 空闲模式停止位

1 = 当器件进入空闲模式时, 模块停止工作  
0 = 在空闲模式下模块继续工作

bit 3-2      **未实现:** 读为 0

bit 1-0      **PPB1:PPB0:** 乒乓缓冲区配置位

11 = 使能端点 1 到 15 的奇 / 偶乒乓缓冲区  
10 = 使能所有端点的奇 / 偶乒乓缓冲区  
01 = 使能 OUT 端点 0 的奇 / 偶乒乓缓冲区  
00 = 禁止奇 / 偶乒乓缓冲区

**注 1:** 当 UTRIS 位 (U1CNFG2<0>) 置 1 时, 无论 UOEMON 设置如何,  $\overline{OE}$  信号都将有效。

# PIC24F 系列参考手册

寄存器 27-11: U1CNFG2: USB 配置寄存器 2

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

U-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	—	PUVBUS	EXTI2CEN	UVBUSDIS <sup>(1)</sup>	UVCMPDIS <sup>(1)</sup>	UTRDIS <sup>(1)</sup>
bit 7							bit 0

图注:			
R = 可读位	W = 可写位	U = 未实现位, 读为 0	
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零	x = 未知

- bit 15-5      **未实现:** 读为 0
- bit 4      **PUVBUS:** VBUS 上拉使能位  
1 = 使能 VBUS 引脚上的上拉  
0 = 禁止 VBUS 引脚上的上拉
- bit 3      **EXTI2CEN:** I<sup>2</sup>C™ 接口控制外部模块的使能位  
1 = 通过 I<sup>2</sup>C 接口控制外部模块  
0 = 通过专用引脚控制外部模块
- bit 2      **UVBUSDIS:** 片上 5V 升压稳压器构建器禁止位 <sup>(1)</sup>  
1 = 禁止片上升压稳压器构建器; 使能数字输出控制接口  
0 = 片上升压稳压器构建器有效
- bit 1      **UVCMPDIS:** 片上 VBUS 比较器禁止位 <sup>(1)</sup>  
1 = 禁止片上充电 VBUS 比较器; 使能数字输入状态接口  
0 = 片上充电 VBUS 比较器有效
- bit 0      **UTRDIS:** 片上收发器禁止位 <sup>(1)</sup>  
1 = 禁止片上收发器和 VBUS 检测; 使能数字收发器接口  
0 = 片上收发器和 VBUS 检测有效

注    1: 当 USBPWR 位置 1 (U1PWRC<0> = 1) 时, 绝不要更改这些位。

## 27.2.3 USB 中断寄存器

寄存器 27-12: U1OTGIR: USB OTG 中断状态寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	U-0	R/K-0, HS
IDIF	T1MSECIF	LSTATEIF	ACTVIF	SESVDIF	SESENDIF	—	VBUSVDIF
bit 7							bit 0

图注: U = 未实现位, 读为 0  
R = 可读位 K = 写入 1 清零该位 HS = 可由硬件置 1 的位  
-n = POR 时的值 1 = 置 1 0 = 清零 x = 未知

- bit 15-8 未实现: 读为 0
- bit 7 **IDIF**: ID 状态变化指示位  
1 = 检测到 ID 状态变化  
0 = ID 状态不变
- bit 6 **T1MSECIF**: 1 毫秒定时器位  
1 = 1 毫秒定时器已到期  
0 = 1 毫秒定时器未到期
- bit 5 **LSTATEIF**: 线状态稳定指示位  
1 = USB 线状态 (如 SE0 和 JSTATE 位所定义) 已稳定 1 ms, 但和上次不同  
0 = USB 线状态未稳定达 1 ms
- bit 4 **ACTVIF**: 总线活动指示位  
1 = D+/D- 线或 VBUS 上检测到活动  
0 = D+/D- 线或 VBUS 上没有检测到活动
- bit 3 **SESVDIF**: 会话有效改变指示位  
1 = VBUS 已超过 VA\_SESS\_VLD (如 USB OTG 规范中所定义) <sup>(1)</sup>  
0 = VBUS 未超过 VA\_SESS\_VLD
- bit 2 **SESENDIF**: B 设备 VBUS 改变指示位  
1 = 检测到 B 设备上 VBUS 改变; VBUS 已超过 VB\_SESS\_END (如 USB OTG 规范中所定义) <sup>(1)</sup>  
0 = VBUS 未超过 VA\_SESS\_END
- bit 1 未实现: 读为 0
- bit 0 **VBUSVDIF**: A 设备 VBUS 改变指示位  
1 = 检测到 A 设备上 VBUS 改变; VBUS 已超过 VA\_VBUS\_VLD (如 USB OTG 规范中所定义) <sup>(1)</sup>  
0 = 未检测到 A 设备上 VBUS 改变

注 1: 穿越 VBUS 门限值的事件可以发生在电压上升过程也可以发生在电压下降过程。

寄存器 27-13: U10TGIE: USB OTG 中断允许寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0
IDIE	T1MSECIE	LSTATEIE	ACTVIE	SESVDIE	SESENDIE	—	VBUSVDIE
bit 7							bit 0

图注:							
R = 可读位		W = 可写位		U = 未实现位, 读为 0			
-n = POR 时的值		1 = 置 1		0 = 清零		x = 未知	

bit 15-8	未实现: 读为 0
bit 7	<b>IDIE:</b> ID 中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 6	<b>T1MSECIE:</b> 1 毫秒定时器中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 5	<b>LSTATEIE:</b> 线状态稳定中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 4	<b>ACTVIE:</b> 总线活动中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 3	<b>SESVDIE:</b> 会话有效中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 2	<b>SESENDIE:</b> B 设备会话结束中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断
bit 1	未实现: 读为 0
bit 0	<b>VBUSVDIE:</b> A 设备 VBus 有效中断允许位 1 = 允许中断 0 = 禁止中断



寄存器 27-14: U1IR: USB 中断状态寄存器 (仅限设备模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/K-0, HS	U-0	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R-0	R/K-0, HS
STALLIF	—	RESUMEIF	IDLEIF	TRNIF	SOFIF	UERRIF	URSTIF
bit 7							bit 0

图注:	U = 未实现位, 读为 0		
R = 可读位	K = 写入 1 清零该位		HS = 可由硬件置 1 的位
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零	x = 未知

bit 15-8	未实现: 读为 0
bit 7	<b>STALLIF: STALL 握手中断位</b> 1 = 设备模式下事务的握手阶段中, 外设发送 STALL 握手 0 = 未发送 STALL 握手
bit 6	未实现: 读为 0
bit 5	<b>RESUMEIF: 恢复中断位</b> 1 = D+ 或 D- 引脚上观察到 K 状态 2.5 $\mu$ s (低速模式下差分 1, 全速模式下差分 0) 0 = 未观察到 K 状态
bit 4	<b>IDLEIF: 空闲检测中断位</b> 1 = 检测到空闲状态 (3 ms 或更长的连续空闲状态) 0 = 未检测到空闲状态
bit 3	<b>TRNIF: 令牌处理完成中断位</b> 1 = 处理完当前令牌; 从 U1STAT 寄存器读取 BDT 信息 0 = 未处理完当前令牌; 清零 U1STAT 寄存器或从 STAT 装入下个令牌。(清零该位会使 STAT FIFO 递增。)
bit 2	<b>SOFIF: Start-Of-Frame 令牌中断位</b> 1 = 外设接收到 Start-Of-Frame 令牌, 或主机达到 Start-Of-Frame 门限值 0 = 未接收到 Start-Of-Frame 令牌或未达到门限值
bit 1	<b>UERRIF: USB 错误条件中断位 (只读)</b> 1 = 发生了未屏蔽的错误条件; 只有 U1EIE 寄存器中使能的错误状态才能将该位置 1 0 = 未发生未屏蔽的错误条件
bit 0	<b>URSTIF: USB 复位中断位</b> 1 = 有效的 USB 复位已发生至少 2.5 $\mu$ s; 必须清除复位状态才能重新拉低该位。 0 = 没有发生 USB 复位

# PIC24F 系列参考手册

寄存器 27-15: U1IR: USB 中断状态寄存器 (仅限主机模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R-0	R/K-0, HS
STALLIF	ATTACHIF	RESUMEIF	IDLEIF	TRNIF	SOFIF	UERRIF	DETACHIF
bit 7							bit 0

图注: U = 未实现位, 读为 0  
R = 可读位 K = 写入 1 清零该位 HS = 可由硬件置 1 的位  
-n = POR 时的值 1 = 置 1 0 = 清零 x = 未知

- bit 15-8 未实现: 读为 0
- bit 7 **STALLIF**: STALL 握手中断位  
1 = 设备模式下事务的握手阶段中, 外设发送 STALL 握手  
0 = 未发送 STALL 握手
- bit 6 **ATTACHIF**: 外设连接中断位  
1 = 模块已检测到外设连接; 如果总线状态不是 SE0, 并且 2.5  $\mu$ s 内无总线活动, 则置 1  
0 = 未检测到外设连接
- bit 5 **RESUMEIF**: 恢复中断位  
1 = D+ 或 D- 引脚上观察到 K 状态 2.5  $\mu$ s (低速模式下差分 1, 全速模式下差分 0)  
0 = 未观察到 K 状态
- bit 4 **IDLEIF**: 空闲检测中断位  
1 = 检测到空闲状态 (3 ms 或更长的连续空闲状态)  
0 = 未检测到空闲状态
- bit 3 **TRNIF**: 令牌处理完成中断位  
1 = 处理完当前令牌; 从 USTAT 寄存器读取 BDT 信息  
0 = 未处理完当前令牌; 清零 USTAT 寄存器或从 STAT 装入下个令牌
- bit 2 **SOFIF**: Start-Of-Frame 令牌中断位  
1 = 外设接收到 Start-Of-Frame 令牌, 或主机达到 Start-Of-Frame 门限值  
0 = 未接收到 Start-Of-Frame 令牌或未达到门限值
- bit 1 **UERRIF**: USB 错误条件中断位  
1 = 发生了未屏蔽的错误条件; 只有 U1EIE 寄存器中使能的错误状态才能将该位置 1  
0 = 未发生未屏蔽的错误条件
- bit 0 **DETACHIF**: 断开连接中断位  
1 = 模块检测到外设断开连接; 必须清除复位状态才能重新拉低该位  
0 = 未检测到外设断开连接

寄存器 27-16: U1IE: USB 中断允许寄存器 (所有 USB 模式)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
STALLIE	ATTACHIE <sup>(1)</sup>	RESUMEIE	IDLEIE	TRNIE	SOFIE	UERRIE	URSTIE
							DETACHIE
bit 7							bit 0

## 图注:

R = 可读位

W = 可写位

U = 未实现位, 读为 0

-n = POR 时的值

1 = 置 1

0 = 清零

x = 未知

bit 15-8 未实现: 读为 0

bit 7 **STALLIE:** STALL 握手中断允许位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 6 **ATTACHIE:** 外设连接中断位 (仅限主机模式) <sup>(1)</sup>

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 5 **RESUMEIE:** 恢复中断位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 4 **IDLEIE:** 空闲检测中断位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 3 **TRNIE:** 令牌处理完成中断位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 2 **SOFIE:** Start-Of-Frame 令牌中断位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 1 **UERRIE:** USB 错误条件中断位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

bit 0 **URSTIE 或 DETACHIE:** USB 复位中断 (设备模式) 或 USB 断开连接中断 (主机模式) 使能位

1 = 允许中断

0 = 禁止中断

注 1: 在设备和 OTG 模式下未实现, 读为 0。

# PIC24F 系列参考手册

寄存器 27-17: U1EIR: USB 错误中断状态寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/K-0, HS	U-0	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS	R/K-0, HS
BTSEF	—	DMAEF	BTOEF	DFN8EF	CRC16EF	CRC5EF EOFEF	PIDEF
bit 7							bit 0

图注:	U = 未实现位, 读为 0		
R = 可读位	K = 写入 1 清零该位	HS = 可由硬件置 1 的位	
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零	x = 未知

bit 15-8	未实现: 读为 0
bit 7	<b>BTSEF:</b> 位填充错误标志位 1 = 检测到位填充错误 0 = 无位填充错误
bit 6	未实现: 读为 0
bit 5	<b>DMAEF:</b> DMA 错误标志位 1 = 检测到 USB DMA 错误条件; BD 字节计数字段指示的数据大小小于接收到的字节数。接收到的数据被截短。 0 = 无 DMA 错误
bit 4	<b>BTOEF:</b> 总线周转 (Turnaround) 超时错误标志位 1 = 发生总线周转超时 0 = 未发生总线周转超时
bit 3	<b>DFN8EF:</b> 数据字段大小错误标志位 1 = 数据字段的字节数不是整数 0 = 数据字段的字节数是整数
bit 2	<b>CRC16EF:</b> CRC16 失败标志位 1 = CRC16 失败 0 = CRC16 通过
bit 1	对于设备模式: <b>CRC5EF:</b> CRC5 主机错误标志位 1 = 令牌数据包由于 CRC5 错误而被拒绝 0 = 令牌数据包被接受 (无 CRC5 错误) 对于主机模式: <b>EOFEF:</b> End-Of-Frame 错误标志位 1 = 发生 End-Of-Frame 错误 0 = 禁止 End-Of-Frame 中断
bit 0	<b>PIDEF:</b> PID 检查失败标志位 1 = PID 检查失败 0 = PID 检查通过

寄存器 27-18: U1EIE: USB 错误中断允许寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
BTSEE	—	DMAEE	BTOEE	DFN8EE	CRC16EE	CRC5EE EOFEE	PIDEE
bit 7							bit 0

图注:

R = 可读位

W = 可写位

U = 未实现位, 读为 0

-n = POR 时的值

1 = 置 1

0 = 清零

x = 未知

- bit 15-8      **未实现:** 读为 0
- bit 7      **BTSEE:** 位填充错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 6      **未实现:** 读为 0
- bit 5      **DMAEE:** DMA 错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 4      **BTOEE:** 总线周转超时错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 3      **DFN8EE:** 数据字段大小错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 2      **CRC16EE:** CRC16 失败中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 1      对于设备模式:  
**CRC5EE:** CRC5 主机错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断  
对于主机模式:  
**EOFEE:** End-Of-Frame 错误中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断
- bit 0      **PIDEE:** PID 检查失败中断允许位  
1 = 允许中断  
0 = 禁止中断

## 27.2.4 USB 端点管理寄存器

寄存器 27-19: **U1EPn: USB 端点 n 控制寄存器 (n = 0 到 15)**

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 15							bit 8

R/W-0	R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
LSPD <sup>(1)</sup>	RETRYDIS <sup>(1)</sup>	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK
bit 7							bit 0

### 图注:

R = 可读位                      W = 可写位                      U = 未实现位, 读为 0  
 -n = POR 时的值              1 = 置 1                      0 = 清零                      x = 未知

- bit 15-8      **未实现:** 读为 0
- bit 7      **LSPD:** 低速直接连接使能位 (仅限 UEP0) <sup>(1)</sup>  
 1 = 使能直接连接到低速设备  
 0 = 禁止直接连接到低速设备
- bit 6      **RETRYDIS:** 重试禁止位 (仅限 UEP0) <sup>(1)</sup>  
 1 = 禁止重试 NAK 事务  
 0 = 使能重试 NAK 事务; 由硬件完成重试
- bit 5      **未实现:** 读为 0
- bit 4      **EPCONDIS:** 双向端点控制位  
 如果 EPTXEN 和 EPRXEN = 1:  
 1 = 禁止端点 n 的控制传输; 只允许发送和接收传输  
 0 = 使能端点 n 的控制 (SETUP) 传输; 同时允许发送和接收传输  
对于 EPTXEN 和 EPRXEN 的所有其他组合:  
 该位为无关位。
- bit 3      **EPRXEN:** 端点接收使能位  
 1 = 使能端点 n 接收  
 0 = 禁止端点 n 接收
- bit 2      **EPTXEN:** 端点发送使能位  
 1 = 使能端点 n 发送  
 0 = 禁止端点 n 发送
- bit 1      **EPSTALL:** 端点停止状态位  
 1 = 端点 n 已停止  
 0 = 端点 n 未停止
- bit 0      **EPHSHK:** 端点握手使能位  
 1 = 使能端点握手  
 0 = 禁止端点握手 (通常用于同步端点)

**注 1:** 这些位仅在主机模式下对 U1EP0 可用。对于所有其他 U1EPn 寄存器, 这些位始终未实现且读为 0。

## 27.2.5 USB VBus 电源控制寄存器

寄存器 27-20: U1PWMCON: USB VBus PWM 发生器控制寄存器

R/W-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0
PWMEN	—	—	—	—	—	PWMPOL	CNTEN
bit 15						bit 8	

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	—
bit 7						bit 0	

图注:

R = 可读位

W = 可写位

U = 未实现位, 读为 0

-n = POR 时的值

1 = 置 1

0 = 清零

x = 未知

- bit 15 **PWMEN:** PWM 使能位  
 1 = 使能 PWM 发生器  
 0 = 禁止 PWM 发生器; 输出保持在由 PWMPOL 指定的复位状态
- bit 14-10 **未实现:** 读为 0
- bit 9 **PWMPOL:** PWM 极性位  
 1 = PWM 输出低电平有效, 其复位状态为高电平  
 0 = PWM 输出高电平有效, 其复位状态为低电平
- bit 8 **CNTEN:** PWM 计数器使能位  
 1 = 使能计数器  
 0 = 禁止计数器
- bit 7-0 **未实现:** 读为 0

27.2.6 USB 帧寄存器

寄存器 27-21: U1FRML: USB 帧编号低字节寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	
bit 15							bit 8
R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0
帧计数低字节							
bit 7							bit 0

图注:			
R = 可读位	W = 可写位	U = 未实现位, 读为 0	
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零	x = 未知

bit 15-8      未实现: 读为 0  
bit 7-0      **FRM0<7:0>**: 11 位帧编号的低位  
              每当接收到 SOF 令牌时, 就用当前帧编号更新寄存器位。

寄存器 27-22: U1FRMH: USB 帧编号高字节寄存器

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	U-0
—	—	—	—	—	—	—	
bit 15							bit 8
U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	R-0	R-0	R-0
—	—	—	—	—	帧计数高字节		
bit 7							bit 0

图注:			
R = 可读位	W = 可写位	U = 未实现位, 读为 0	
-n = POR 时的值	1 = 置 1	0 = 清零	x = 未知

bit 15-3      未实现: 读为 0  
bit 2-0      **FRM0<10:8>**: 帧编号的高 3 位  
              每当接收到 SOF 令牌时, 就用当前帧编号更新寄存器位。



## 27.3 工作原理

本节简要概述 USB 工作原理，并随后介绍 PIC24F USB 模块实现细节和模块初始化要求。

### 27.3.1 USB 2.0 工作原理概述

USB 是异步串行接口，使用层式星形配置。USB 实现为主 / 从配置。在给定总线上，可以有多个（最多 127 个）从动方（设备），但只能有一个主控方（主机）。有三种模块实现方式：主机、设备和 OTG 双角色。

用户应理解 USB 开发者网站（[www.usb.org](http://www.usb.org)）上提供的 USB 文档。本节只进行了概述，并未包含实现符合 USB 规范的接口所需的所有信息。

#### 27.3.1.1 工作模式

以下概述中介绍了两种 USB 实现模式：主机和设备。支持双角色 OTG 实现，此时应用可以将其角色动态切换为主机或设备。

##### 27.3.1.1.1 主机

主机是 USB 系统中的主控方，负责识别与其连接的所有设备（枚举）、启动所有传输、分配总线带宽，以及为直接与其连接的所有总线供电 USB 设备供电。有两种类型的主机。

USB 标准主机：

- 支持大量设备。
- 该主机支持所有 USB 传输类型。
- 支持 USB 集线器，以允许同时连接多个设备。
- 可以更新设备驱动器以支持新设备。
- 对于每个端口，使用 A 类插座。
- 每个端口必须能够为已配置或未配置的设备提供最低 100 mA 的电流，为已配置设备提供最高 500 mA（可选）的电流。
- 必须支持全速和低速。能够支持高速。
- 这是典型的个人计算机实现。

嵌入式主机：

- 仅支持特定的一些设备，称为目标外设列表（Targeted Peripheral List，TPL）。
- 该类型主机只需要支持 TPL 中的设备所要求的传输类型。
- USB 集线器支持是可选的。
- 设备驱动器不要求是袖珍式的。
- 对于每个端口，使用 A 类插座。
- 只需要支持 TLP 中的设备所要求的速度。
- 每个端口必须能够为已配置或未配置的设备提供最低 100 mA 的电流，为已配置设备提供最高 500 mA（可选）的电流。
- 这是典型的单片机实现。

## 27.3.1.1.2 设备

USB 设备接受来自主机的数据和对数据请求进行响应。它执行一些外设功能，例如鼠标或数据存储设备。

- 功能可能取决于具体类或供应商。
- 在配置之前消耗 100 mA 或更低的电流。
- 在与主机成功协商之后最高可消耗 500 mA 的电流。
- 能够支持低速、全速或高速协议。高速支持要求实现全速。
- 支持控制传输。支持实现所需的数据传输。
- 可选择支持会话请求协议（Session Request Protocol, SRP）。
- 可以总线供电，也可以自供电。

## 27.3.1.1.3 OTG 双角色

OTG 双角色设备同时支持 USB 主机和设备功能。OTG 双角色设备使用微型 AB 插座。这使得可以连接微型 A 或微型 B 插头。微型 A 和微型 B 插头都具有一个额外的引脚（ID 引脚），用以指示连接类型。插头类型（微型 A 或微型 B）决定 OTG 设备的默认角色：主机或 USB 设备。检测到微型 A 插头时，OTG 设备将执行主机的角色。检测到微型 B 插头时，将执行 USB 设备的角色。

当一个 OTG 设备使用 OTG 电缆直接连接（微型 A 至微型 B）到另一个 OTG 设备时，可以使用主机协商协议（Host Negotiation Protocol, HNP）将角色在主机和 USB 设备这两者之间切换，而无需断开和重新连接电缆。为了区分两种 OTG 设备，使用了术语“A 设备”来指代连接到微型 A 插头的设备，使用“B 设备”来指代连接到微型 B 插头的 OTG 设备。

OTG 双角色作为主机工作（A 设备）：

- 仅支持特定的一些设备，称为目标外设列表（TPL）。不允许通用类支持。
- 只需要支持 TPL 中的设备所要求的事务类型。
- USB 集线器支持是可选的。
- 设备驱动器不要求是袖珍式的。
- 只使用单个微型 AB 插座。
- 只必须支持全速。能够支持高速和 / 或低速。
- USB 端口必须能够为已配置或未配置的设备提供最低 8 mA 的电流，为已配置设备提供最高 500 mA（可选）的电流。
- 支持主机协商协议（HNP）和会话请求协议（SRP）。主机可以将角色切换为设备。初始角色是作为主机还是设备由插入微型 AB 插座的插头类型（微型 A 或微型 B）决定。
- 当总线上电时，A 设备提供 V<sub>bus</sub> 电源，即使角色已使用 HNP 进行了切换。

OTG 双角色作为 USB 设备工作（B 设备）：

- 功能取决于具体类或供应商。
- 在配置之前消耗 8 mA 或更低的电流。
- 由于电流要求低，通常采用自供电，但在与主机成功协商之后最高可消耗 500 mA 的电流。
- 只使用单个微型 AB 插座。
- 必须支持全速。可选择支持低速和 / 或高速。
- 支持控制事务。支持实现所需的数据事务。
- 支持会话请求协议（SRP）和 / 或主机协商协议（HNP）。
- 当总线上电时，A 设备提供 V<sub>bus</sub> 电源，即使角色已使用 HNP 进行了切换。

## 27.3.1.2 协议

USB 通信要求使用特定的协议。以下小节概述所需的协议。

## 27.3.1.2.1 总线传输

USB 总线上的通信在进行传输的主机和设备之间发生。总线上可能有四种传输类型。每种传输类型都具有独特的功能。嵌入式或 OTG 主机可以仅实现它将使用的控制和数据传输。USB 2.0 规范定义了三种传输速度：480 Mbps（高速）、12 Mbps（全速）和 1.2 Mbps（低速）。PIC24F 器件支持全速和低速主机模式传输。

- 控制传输：这用于在枚举期间确定设备的类型，以及对设备进行控制。USB 带宽有一定的百分比确保用于控制传输。数据使用 CRC 进行验证，并会验证目标是否接收到数据。
- 中断传输：这是预定的数据传输，此时主机为传输分配时隙。该时隙分配导致定时对设备进行查询。数据使用 CRC 进行验证，并会验证目标是否接收到数据。
- 同步传输：这是预定的数据传输，此时主机为事务分配时隙。不对数据接收进行验证，但设备使用 CRC 对数据完整性进行验证。该传输类型通常用于音频和视频。
- 批量传输：这用于在不确保事务时间的情况下传送大量数据。用于该传输类型的时间从未分配给其他三种传输类型的时间中分配。数据使用 CRC 进行验证，并会验证是否接收到数据。

表 27-1 给出了每种传输类型的最大数据大小、带宽百分比、及时性和完整性信息。

表 27-1: 事务类型（全速工作）

事务类型	确保及时性	确保数据到达	最大数据包大小	带宽的最大百分比
控制	是	是	64	10% <sup>(1)</sup>
中断	是	是	64	90%
同步	是	否	1023	69%
批量	否	是	64	0-100%

注 1: 仅限数据阶段。根据 USB 规范，控制传输确保 10% 的总带宽。更多信息，请参见 USB 规范 2.0 的第 5 章。

## 27.3.1.2.2 端点和 USB 描述符

在总线上传输的所有数据都通过端点发送或接收。USB 支持设备最多具有 16 个端点。每个端点可以具有发送 (TX) 和/或接收 (RX) 功能。每个端点使用一种传输类型。端点 0 仅使用控制传输。

## 27.3.1.3 物理总线接口

## 27.3.1.3.1 总线速度选择

USB 规范定义了用作主机和设备时的全速操作，以及可选的低速和 / 或高速操作。数据线上拉电阻用于识别设备是全速操作还是低速操作。对于全速操作，D+ 线被上拉；对于低速操作，D- 线被上拉。

## 27.3.1.3.2 VBUS 控制

VBUS 是由主机或集线器提供的 5V USB 电源，用以使总线供电设备运行。是否需要 VBUS 控制取决于应用的角色。如果必须使能或禁止 VBUS 电源，则控制必须由固件管理。以下列出了 VBUS 要求。关于 VBUS 电气参数，请参见具体的器件数据手册。

- 标准或嵌入式主机通常总是为总线供电。
- USB 设备从不会为总线供电。
- OTG 双角色实现必须能够控制 VBUS，以满足主机和设备要求，以及支持 OTG 功能。OTG A 设备会为总线供电，并可以关闭 VBUS 来节省电能。

**注：** 设备可以将 VBUS 以脉冲形式发送作为 SRP 的一部分。

## 27.3.2 PIC24F 实现细节

本节详细说明 PIC24F USB 模块中如何实现 USB 规范要求。

### 27.3.2.1 总线速度

PIC24F USB 模块支持以下速度：

- 作为主机和设备全速工作。
- 作为主机低速工作。

### 27.3.2.2 端点和描述符

所有 USB 端点都实现为 RAM 中的缓冲区。CPU 和 USB 模块具有对这些缓冲区的访问权。为了在 USB 模块和 CPU 之间对缓冲区的访问权进行仲裁，使用了一个信号标志系统。每个端点均可配置为用于发送（TX）和 / 或接收（RX），并且每个端点可以具有奇编号或偶编号缓冲区。

缓冲区描述符表（BDT）用于将缓冲区定位到 RAM 中任意 512 字节边界处，以及提供状态标志。BDT 是位于 RAM 中的一个表，包含每个端点数据缓冲区的地址和关于每个缓冲区的信息（见图 27-2、图 27-3 和图 27-4）。每个 BDT 条目称为缓冲区描述符（Buffer Descriptor, BD），长度为 4 字节。每个端点使用 4 个描述符条目；因此，对于一个端点，必须分配 16 字节，即使该端点的所有缓冲区都将不使用。

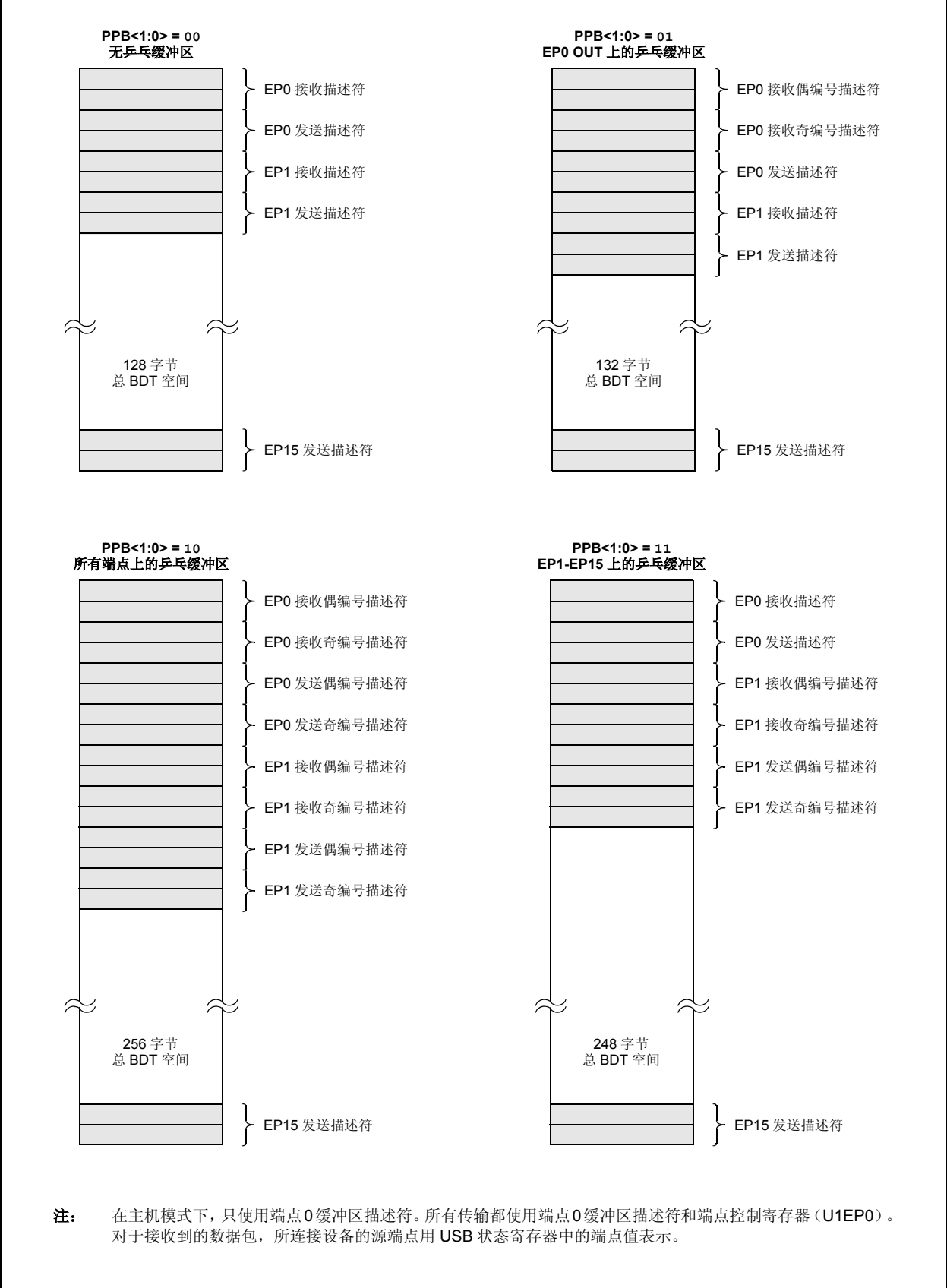
USB 模块使用 BDT 指针寄存器来计算缓冲区在 RAM 中的位置。BDT 的基址保存在寄存器 U1BDTP1 中。所需缓冲区的地址通过使用端点编号、类型（RX/TX）和 ODD/EVEN 位在 BDT 中计算出距离基址的偏移量而获得。BDT 表中检索到的条目保存的地址就是所需数据缓冲区的地址。

**注：** U1BDTP1 寄存器的内容提供 16 位地址的高 7 位；因此，BDT 必须对齐到 512 字节边界（见图 27-1）。

16 个端点中的每个端点都具有两个描述符对：两个用于要发送的数据包，两个用于接收到的数据包。每一个描述符对管理一个或两个缓冲区：一个偶编号缓冲区和一个奇编号缓冲区；最多需要 64 个描述符（ $16 * 2 * 2$ ）。

每个方向具有偶编号和奇编号缓冲区使 CPU 可以访问一个缓冲区中的数据，同时 USB 模块对另一个缓冲区收发数据。USB 模块会交替使用缓冲区，当对于缓冲区的事务完成时，会自动将 UOWN 位清零。交替使用缓冲区使 CPU 数据访问可以与数据传输同时进行，最大程度提高数据吞吐量。这种技术称为乒乓（ping-pong）缓冲。乒乓缓冲是可选的，必须使用 U1CNFG1 寄存器中的 PPB<1:0> 位进行配置。图 27-2 图解了端点在 BDT 中的映射。

图 27-2: 缓冲区映射



27.3.2.2.1 端点控制

每个端点都由端点控制寄存器 **U1EPn** 控制，该寄存器用于配置端点的传输方向、握手和停止属性。端点控制寄存器还允许支持控制传输。

**注：** 在主机模式下，端点 **0** 另外有一些位用于自动重试和集线器支持。

27.3.2.2.2 主机端点

主机通过单个端点（端点 **0**）执行所有事务。所有其他端点都应禁止，其他端点缓冲区都不使用。

27.3.2.2.3 设备端点

端点 **0** 必须实现，以便对 **USB** 设备进行枚举。设备通常会另外实现一些端点来传输数据。

27.3.2.3 缓冲区管理

因为 **PIC24F** 和 **USB** 模块共享缓冲区，所以使用了简单的信号机制来确定描述符和存储器中相关缓冲区的当前所有权。这种信号机制通过每个缓冲区描述符中的 **UOWN** 位实现。

当对于该缓冲区的事务完成时，**USB** 模块会自动将 **UOWN** 位清零。当 **UOWN** 位清零时，描述符由 **PIC24F** 拥有。**PIC24F** 可以自行修改描述符和缓冲区。

软件必须配置用于下一个事务的 **BDT** 条目，然后将 **UOWN** 位置 **1**，以将控制权返回给 **USB** 模块。

只有在已使用 **U1EPn** 寄存器使能对应端点时，缓冲区描述符才有效。**BDT** 在数据存储寄存器中实现，缓冲区描述符不会复位为已知状态。在通过 **U1EPn** 使能端点之前，用户需要先初始化缓冲区描述符。至少，在使能之前必须将 **UOWN** 位清零。

在主机模式下，在 **U1TOK** 寄存器（触发传输）之前不需要进行 **BDT** 初始化。

27.3.2.3.1 缓冲区描述符格式

缓冲区描述符有两种格式。

表 27-3 给出了当软件写描述符并将其交给硬件时的缓冲区描述符格式。

表 27-4 给出了当硬件写描述符并将其交回给软件时的缓冲区描述符格式。

表 27-2: BDT 地址生成

BDTBA<15:9>		ENDPOINT<3:0>	DIR	PPBI	FSOTG
15:9		8:5	4	3	2:0
bit 15-9	<b>BDTBA&lt;15:9&gt;</b> : BDT 基址位 7 位值由 <b>U1BDTP1</b> 寄存器的内容组成。				
bit 8-5	<b>ENDPOINT&lt;3:0&gt;</b> : 传输端点号位 0000 = 端点 0 0001 = 端点 1 .... 1110 = 端点 14 1111 = 端点 15				
bit 4	<b>DIR</b> : 传输方向位 1 = 发送: 主机对应于 <b>SETUP/OUT</b> ，功能对应于 <b>IN</b> 0 = 接收: 主机对应于 <b>IN</b> ，功能对应于 <b>SETUP/OUT</b>				
bit 3	<b>PPBI</b> : 乒乓指针位 1 = 奇编号缓冲区 0 = 偶编号缓冲区				
bit 2-0	由 <b>USB</b> 模块控制				

表 27-3: USB 缓冲区描述符格式: 软件 -> 硬件

31	30	29	28	27	26	25									16
UOWN	DTS	—		DTSEN	BSTALL	BYTE_COUNT<9:0>									
15															0
BUFFER_ADDRESS<15:0>															

bit 31 **UOWN:** USB 所有权位

- 1 = USB 模块拥有 BD 及其对应缓冲区。CPU 不得修改 BD 或缓冲区。
- 0 = CPU 拥有 BD 及其对应缓冲区。USB 模块忽略 BD 中的所有其他字段。

bit 30 **DTS:** 数据切换数据包位 <sup>(1)</sup>

- 1 = 如果 DTSEN = 1, 则发送 DATA1 数据包, 或检查所接收的 PID 是否 = DATA1
- 0 = 如果 DTSEN = 1, 则发送 DATA0 数据包, 或检查所接收的 PID 是否 = DATA0

bit 27 **DTSEN:** 数据切换同步使能位 <sup>(2)</sup>

- 1 = 使能数据切换同步——同步值不正确的数据包将被忽略
- 0 = 不会执行数据切换同步

bit 26 **BSTALL:** 缓冲区停止使能位

- 1 = 使能缓冲区停止; 如果接收到使用指定地址 BD 的令牌, 将发出 STALL (停止) 握手 (UOWN 位保持置 1, BD 值不变); 在任何 STALL 握手发生时, 对应的 EPSTALL 位将置 1
- 0 = 禁止缓冲区停止

bit 25-16 **BYTE\_COUNT<9:0>:** 字节计数位

字节计数表示一次传输中发送的字节数或接收的最大字节数。

bit 15-0 **BUFFER\_ADDRESS:** 缓冲区地址位

端点数据包数据缓冲区的起始地址 (见表 27-2)。

注 1: 除非 BDnST<DTSEN> = 1, 否则该位将被忽略。

2: DATA PID (DATA0/DATA1) 的期望值在 DATA0/1 字段中指定。

表 27-4: USB 缓冲区描述符格式: 硬件 -> 软件

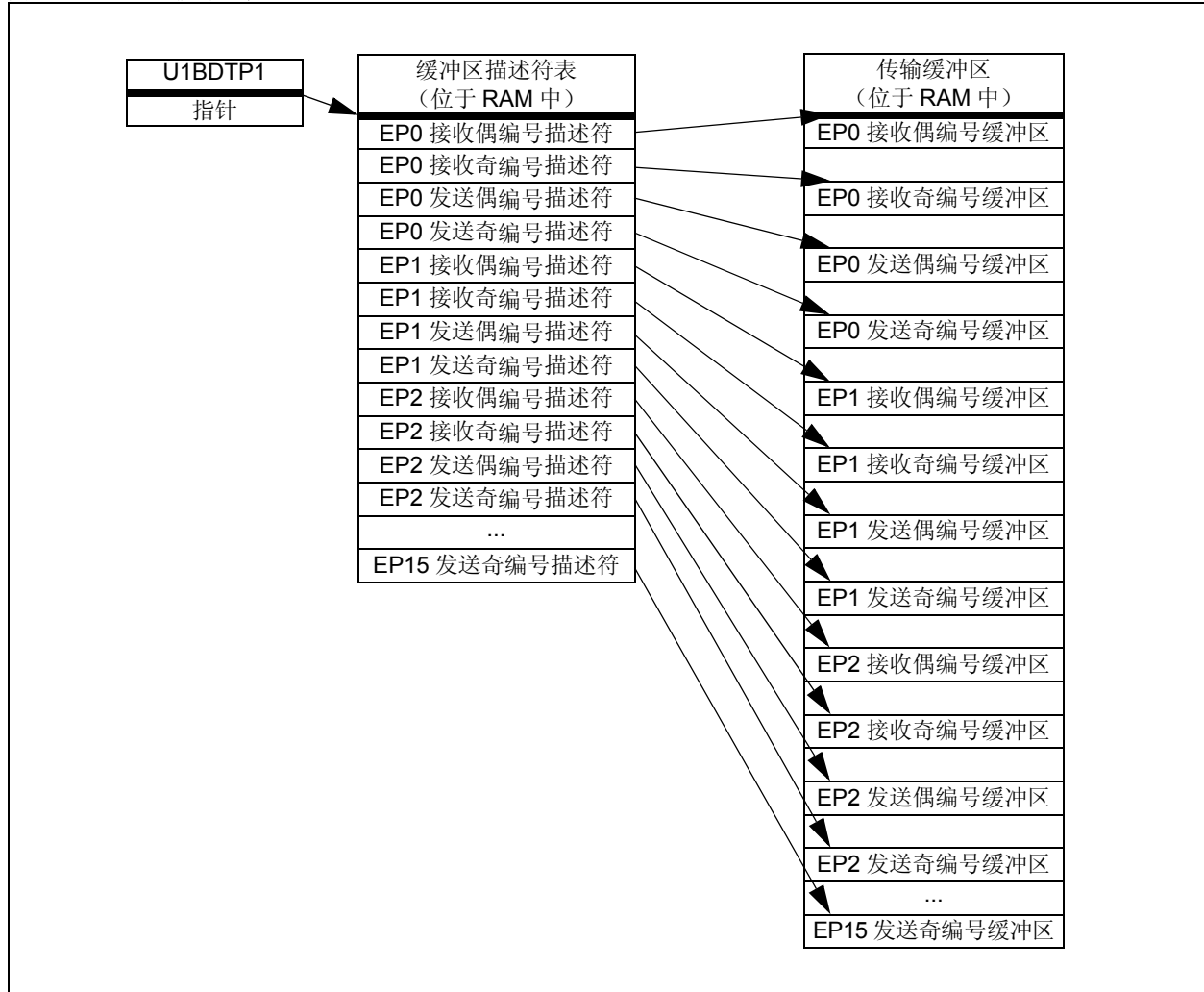
31	30	29	28	27	26	25									16
UOWN	DTS	PID<3:0>				BYTE_COUNT<9:0>									
15															0
BUFFER_ADDRESS<15:0>															

- bit 31     **UOWN:** USB 所有权位  
1 = USB 模块拥有 BD 及其对应缓冲区。CPU 不得修改 BD 或缓冲区。  
0 = CPU 拥有 BD 及其对应缓冲区。USB 模块忽略 BD 中的所有其他字段。
- bit 30     **DTS:** 数据切换数据包位 <sup>(1)</sup>  
1 = 接收到 DATA1 数据包  
0 = 接收到 DATA0 数据包
- bit 29-26 **PID<3:0>:** 数据包标识符位  
传输完成时的当前令牌 PID。回写的值是基于 USB 规范的令牌 PID 值。0x1 代表 OUT 令牌，0x9 代表 IN 令牌，0xd 代表 SETUP 令牌。  
在主机模式下，该字段用于报告上次返回的 PID 或传输状态指示。返回的值可能有：0x3 DATA0、0xb DATA1、0x2 ACK、0xe STALL、0xa NAK、0x0 Bus Time-out 和 0xf Data Error。
- bit 25-16 **BYTE\_COUNT<9:0>:** 字节计数位  
字节计数反映接收或发送的实际字节数。
- bit 15-0 **BUFFER\_ADDRESS<15:0>:** 缓冲区地址位  
端点数据包数据缓冲区的起始地址。

注    1: 对于外发数据包，该位不变。



图 27-3: 缓冲区管理



## 27.3.2.4 缓冲区描述符配置

每个 BDT 条目中的 UOWN、DTSEN 和 BSTALL 位控制端点的行为。

将 DTSEN 位置 1 将允许 USB 模块执行数据切换同步。如果到达的数据包具有错误的 DTS，则它将被忽略，缓冲区将保持不变。请注意，如果使能 DTSEN，当 DATA 位不匹配时，设备将向主机发送 NAK 来进行重新同步。

将 BSTALL 位置 1 时，如果 SIE 接收到的令牌将使用该位置的缓冲区描述符 (BD)，那么 USB 会发出 STALL 握手。对应的 EPSTALL 位将置 1，并发出 STALLIF 中断。当 BSTALL 位置 1 时，USB 模块将不使用该 BD (UOWN 位保持置 1，其余 BD 值不变)。当 SETUP 令牌传入已停止的端点时，会自动清零对应的 BSTALL 位。

字节计数表示将要发送或接收的字节总数。有效的字节计数为 0 至 1023。对于所有端点传输，字节计数由 USB 模块使用在传输完成时发送或接收的实际字节数更新。如果接收到的字节数超出固件写入的对应字节计数值，则溢出位将置 1，并且数据将被截断，以适应在 BTD 中给定的缓冲区大小。

## 27.3.3 硬件接口

### 27.3.3.1 电源要求

电源要求取决于应用，下面对其进行了概述。

- 设备

作为设备工作时，需要为 PIC24F 和 USB 收发器供电。概述请参见图 27-4。

- 主机

作为主机工作时，需要为 PIC24F 和 USB 收发器供电，并为 USB VBus 提供 5V 标称电源。电源必须能够提供 100 mA 或最高 500 mA 的电流，这取决于 TPL 中设备的要求。应用决定 VBus 电源是否可以由 PIC24F 应用禁止或从总线断开。概述请参见图 27-5。

- OTG 双角色

作为 OTG 双角色工作时，需要为 PIC24F 和 USB 收发器供电，并为 USB VBus 提供可开关的 5V 标称电源。当用作 A 设备时，必须向 VBus 供电。电源必须能够提供 8 mA、100 mA 或最高 500 mA 的电流，这取决于 TPL 中设备的要求。当用作 B 设备时，不得向 VBus 供电。概述请参见图 27-6。

### 27.3.3.2 VBus 升压稳压器接口

VBUSON 输出可用于控制片外 5V VBus 升压稳压器。VBUSON 引脚由 VBUSON 位 (U1OTGCON<3>) 控制。

图 27-4: USB 实现为设备时的一览图

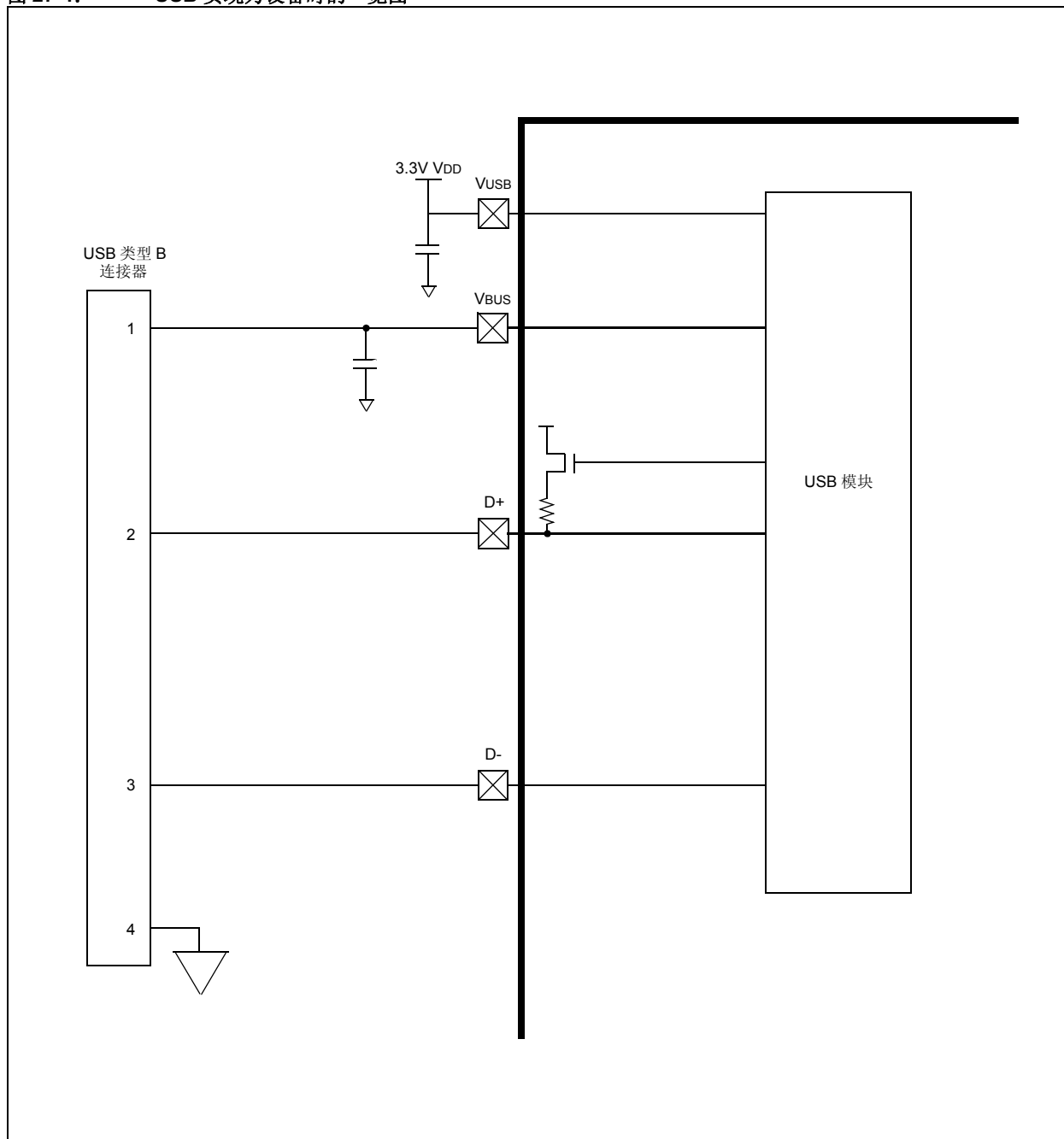


图 27-5: USB 实现为主机时的一览图

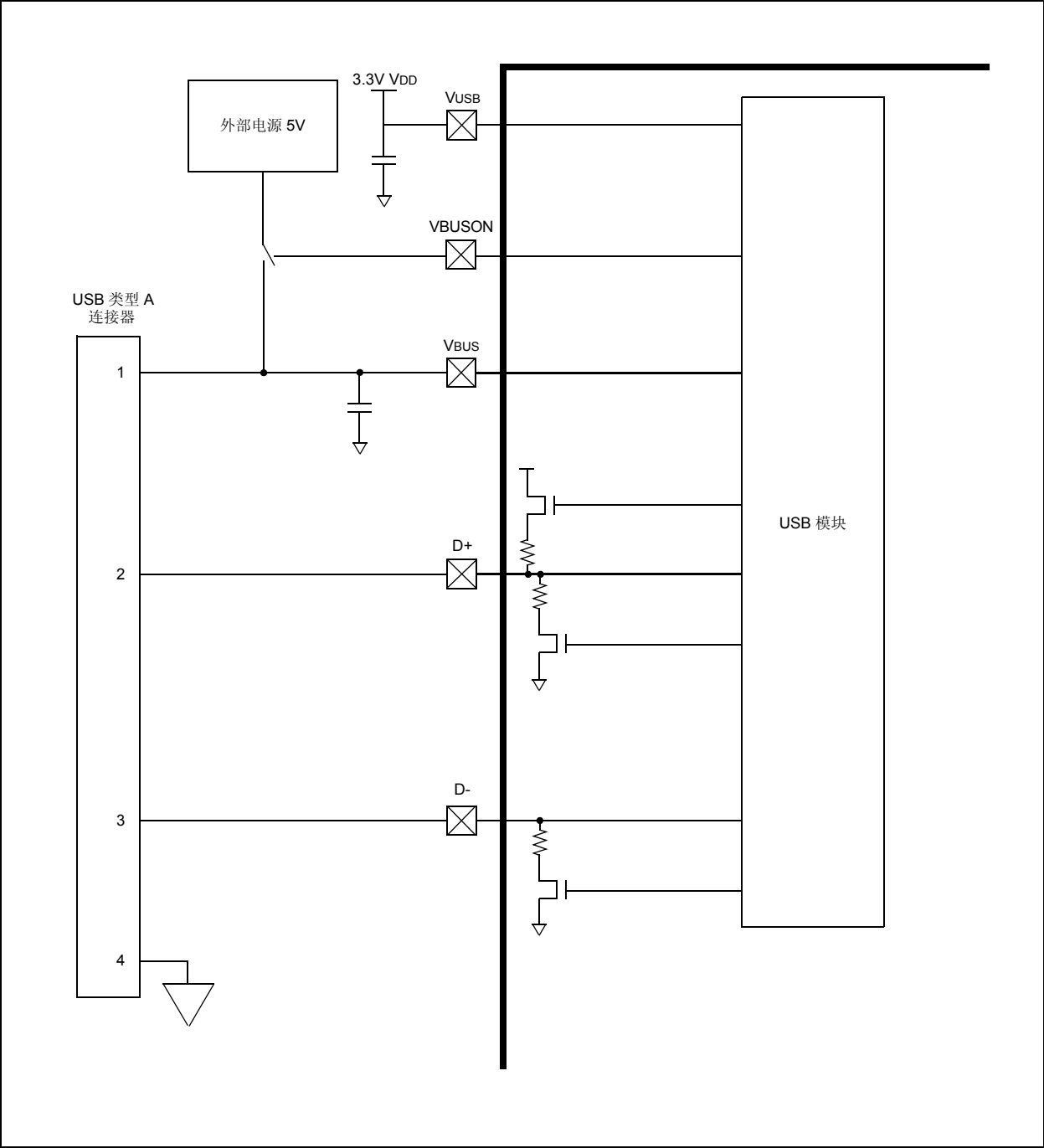
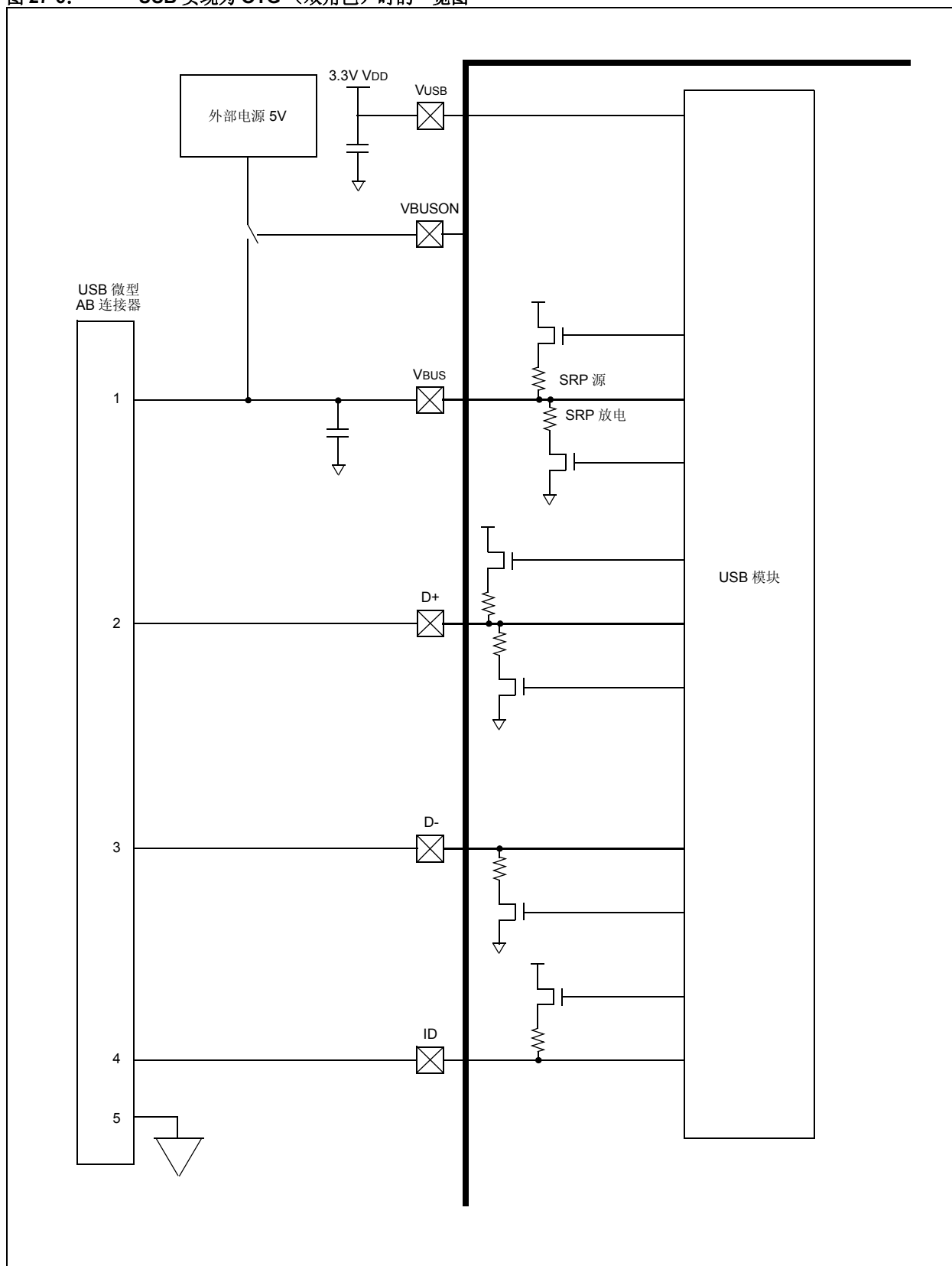


图 27-6: USB 实现为 OTG (双角色) 时的一览图



### 27.3.3.3 时钟要求

为了正确执行 USB 操作，USB 模块必须使用 48 MHz 时钟作为时钟源。该时钟源用于产生 USB 传输时序；它不是 SIE 的时钟源。SIE 使用与 CPU 相同的时钟源。

USB 模块时钟来自主振荡器（Primary Oscillator, POSC），用于 USB 操作。模块提供了 USB PLL 和输入预分频器，用于基于一系列输入频率产生 48 MHz 时钟。USB PLL 使 CPU 和 USB 模块可以使用 POSC 作为时钟源，在不同的频率下工作。

USB 模块也可以使用板载的快速 RC 振荡器（Fast RC oscillator, FRC）作为时钟源。使用该时钟源时，USB 模块将无法满足 USB 时序要求。FRC 时钟源用于在低功耗模式下工作时，使 USB 模块可以检测 USB 唤醒，并向控制器报告该情况。

### 27.3.4 模块初始化

本节说明正确初始化 OTG USB 模块必须执行的步骤。

#### 27.3.4.1 使能 USB 硬件

为了使用 USB 外设，软件必须将 USBPWR（U1PWRC<0>）设置为 1。这可以在启动引导序列中完成。

USBPWR 用于：

- 启动 USB 时钟。
- 在 USBPWR = 0 时将 USB 模块保持在其非活动状态。
- 选择 USB 作为必需 I/O 引脚的拥有者。
- 使能 USB 收发器。
- 使能 USB 比较器。

当 USBPWR 位清零时，USB 内核逻辑和寄存器将被复位。这就要求每当使能 USB 模块时，必须执行 USB 模块初始化过程。针对 USB 逻辑的任何配置访问都会被延迟，直到复位完成为止。

#### 27.3.4.2 初始化缓冲区描述符表

在使能给定端点之前，必须初始化该端点的所有描述符和方向。在复位后，对于发送和接收方向，所有端点使用偶编号缓冲区启动传输。当模块电源被禁止（U1PWRC<USBPWR>）时，或器件复位之后，缓冲区会被复位。

- 写发送描述符时，UOWN 位必须清零（由软件拥有）。所有其他发送描述符设置可以在将 UOWN 位置 1 之前的任意时间执行。
- 接收描述符必须完全初始化，才能接收数据。这意味着必须保留存储空间，用于接收到的数据包数据。指向该存储空间的指针和所保留的大小（以字节为单位）必须写入描述符。接收描述符 UOWN 位应初始化为 1（由硬件拥有）。DTSEN 和 BSTALL 位也应进行相应的配置。
- 如果接收到接收事务，而发送描述符 UOWN 位为 0（由软件拥有），那么 USB 模块将向主机返回 NAK 握手。这可能会导致主机重试事务。在主机模式下，在主机开始传输之前，不需要初始化 BDT。

## 27.4 设备模式的操作

下一节将说明如何执行常见的设备模式任务。在设备模式下，USB 传输在传输层执行。USB 模块会自动执行传输的状态阶段。

图 27-7: USB 模块框图

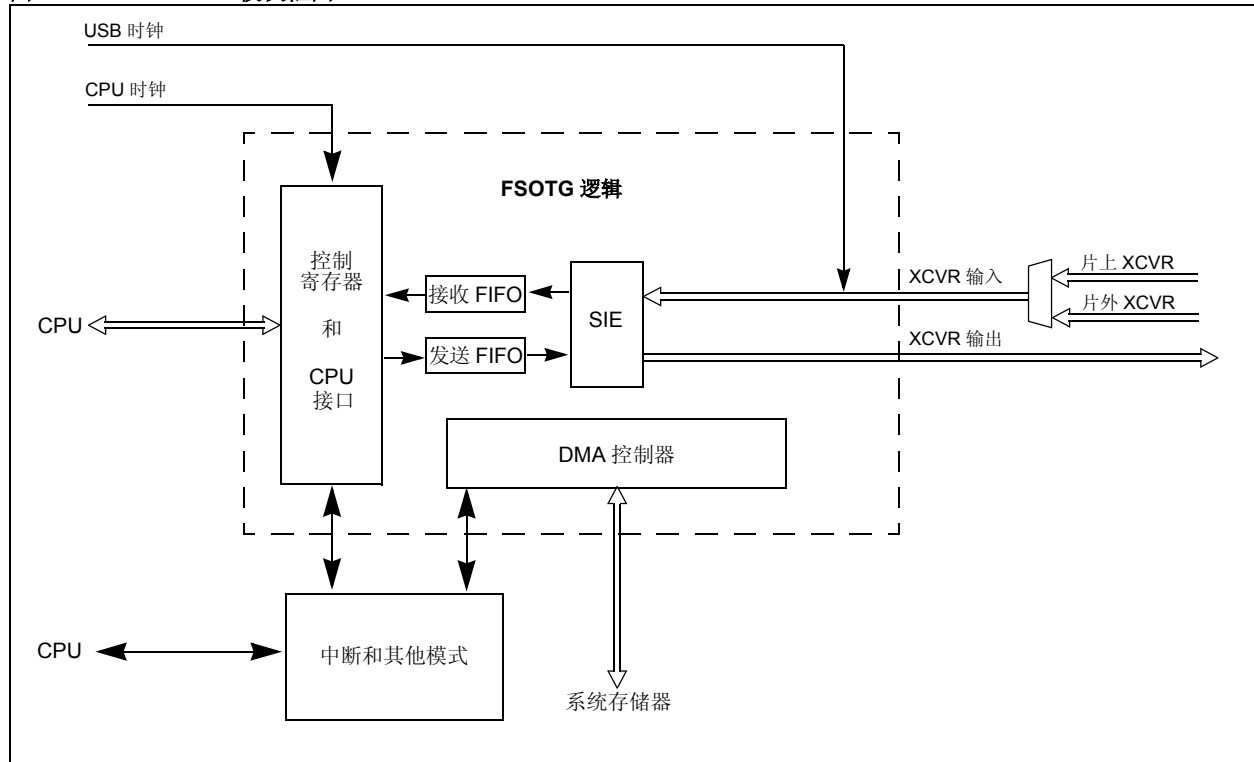
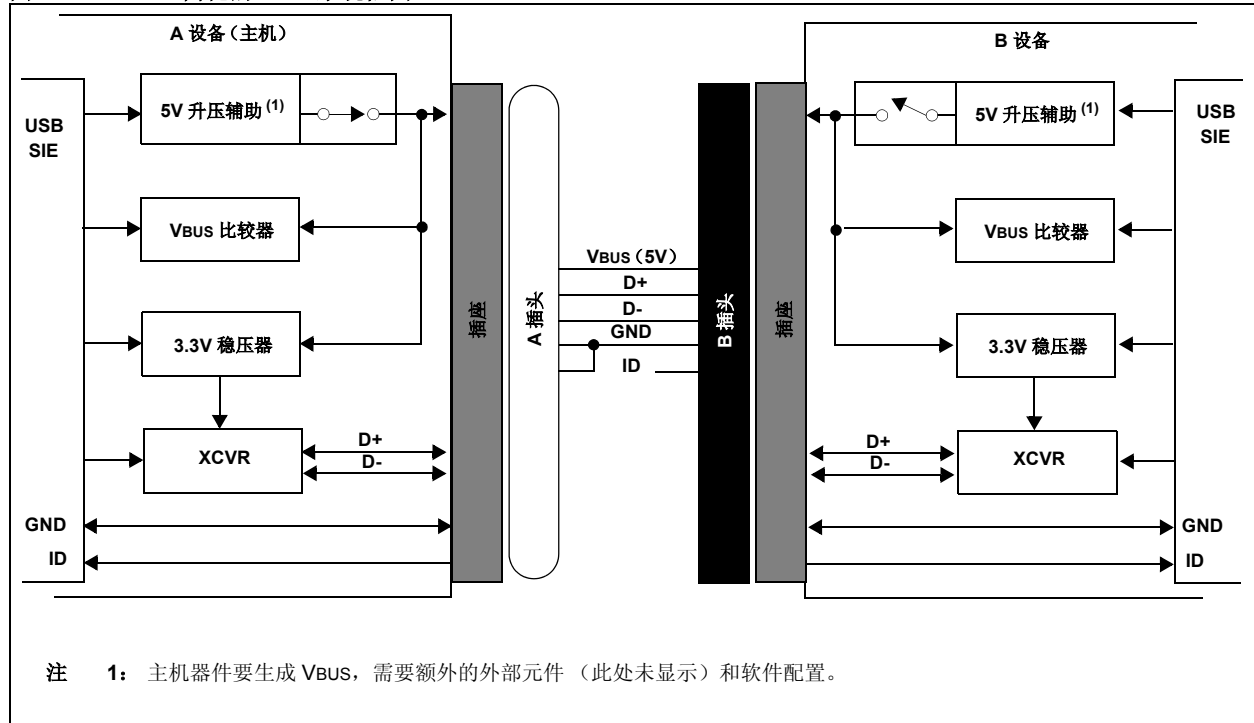


图 27-8: 简化的 USB 系统框图



## 27.4.1 使能设备模式

1. 通过使  $U1CON<PPBRST> = 1$  然后使  $U1CON<PPBRST> = 0$  将乒乓缓冲区指针复位。
2. 禁止所有中断 ( $U1IE = 0$  和  $U1EIE = 0$ )。
3. 清零任何现有的中断标志 ( $U1IR = 0xFF$  和  $U1EIR = 0xFF$ )。
4. 确认 VBUS 存在 (仅限非 OTG 设备)。
5. 使能 USB 模块 ( $U1CON<USBEN> = 1$ )。
6. 将  $U1OTGCON<OTGEN>$  设置为 1。
7. 使能端点 0 缓冲区以接收第一个设置数据包 ( $U1EP0<EPOUTEN> = 1$ ,  $U1EP0<EPHSK> = 1$ )。
8. 对 USB 模块上电 ( $U1PWRC<USBPWR> = 1$ )。
9. 使能 D+ 上拉电阻以发出连接信号 ( $U1OTGCON<DPPULUP> = 1$ )。

## 27.4.2 在设备模式下接收 IN 令牌

1. 按 USB 2.0 规范第 9 章中的说明连接到 USB 主机并枚举。
2. 创建数据缓冲区。装入要发送到主机的数据。
3. 在所需端点的适当 (偶编号或奇编号) 发送 BD 中:
  - a) 用正确的数据切换 ( $DATA0/1$ ) 值和数据缓冲区的字节计数设置状态寄存器 ( $BDnSTAT$ )。
  - b) 用数据缓冲区的起始地址设置地址寄存器 ( $BDnADR$ )。
  - c) 将状态寄存器的  $UOWN$  位设置为 1。
4. USB 模块接收到 IN 令牌时, 将自动发送该缓冲区中的数据。完成后, 该模块将更新状态寄存器 ( $BDnSTAT$ ) 并将传输完成中断 ( $U1IR<TRNIF>$ ) 置 1。

## 27.4.3 在设备模式下接收 OUT 令牌

1. 按 USB 2.0 规范第 9 章中的说明连接到 USB 主机并枚举。
2. 用您期望从主机接收到的数据量创建数据缓冲区。
3. 在所需端点的适当 (偶编号或奇编号) 发送 BD 中:
  - a) 用正确的数据切换 ( $DATA0/1$ ) 值和数据缓冲区的字节计数设置状态寄存器 ( $BDnSTAT$ )。
  - b) 用数据缓冲区的起始地址设置地址寄存器 ( $BDnADR$ )。
  - c) 将状态寄存器的  $UOWN$  位设置为 1。
4. USB 模块接收到 OUT 令牌时, 将自动接收主机发送到缓冲区的数据。完成后, 该模块将更新状态寄存器 ( $BDnSTAT$ ) 并将传输完成中断 ( $U1IR<TRNIF>$ ) 置 1。



## 27.5 主机模式的操作

在主机模式下，只使用端点 0。因为是主机启动所有传输，所以缓冲区描述符不需要初始化。在启动传输之前，必须先配置缓冲区描述符，这通过写 U1TOK 寄存器来完成。

下一节将说明如何执行常见的主机模式任务。在主机模式下，USB 传输由主机软件显式调用。主机软件负责传输的应答部分。同时，所有传输都是用端点 0 控制寄存器 (U1EP0) 和缓冲区描述符执行的。

## 27.5.1 使能主机模式并发现连接的设备

1. 使能主机模式 (U1CON<HOSTEN> = 1)。使能 D+ 和 D- 下拉电阻 (U1OTGCON<DPPULDNW> = 1 和 U1OTGCON<DMPULDNW> = 1)，禁止 D+ 和 D- 上拉电阻 (U1OTGCON<DPPULUP> = 0 和 U1OTGCON<DMPULUP> = 0)。将开始 SOF 生成。将 12,000 装入 SOF 计数器。通过将 SOF 使能位写为 0 (U1CON<SOFEN> = 0) 禁止 Start-of-Frame 数据包生成。
2. 使能设备连接中断 (U1IE<ATTACHIE> = 1)。
3. 等待设备连接中断 (U1IR<ATTACHIF>)。这是通过 USB 设备将 D+ 或 D- 的状态从 0 变为 1 (SE0 到 JSTATE) 发出信号的。发生后，等待设备电源稳定下来 (最小值为 10 ms，建议值为 100 ms)。
4. 检查控制寄存器 (U1CON) 中 JSTATE 和 SE0 位的状态。如果 U1CON<JSTATE> 为 0，则连接设备为低速；否则，设备为全速。
5. 如果连接设备为低速，则将地址寄存器中的低速使能位置 1 (U1ADDR<LSPDEN> = 1)，并将端点 0 控制寄存器中的低速位置 1 (U1EP0<LSPD> = 1)。如果设备为全速，则清零这些位。
6. 通过发送复位信号至少 50 ms 将 USB 设备复位 (U1CON<USBRST> = 1)。50 ms 后，终止复位 (U1CON<USBRST> = 0)。
7. 使能 SOF 数据包生成以保持所连接设备不进入暂停状态 (U1CON<SOFEN> = 1)。
8. 等待 10 ms 让设备从复位中恢复。
9. 按 USB 2.0 规范第 9 章所述执行枚举。

## 27.5.2 完成对所连接设备的控制事务

1. 完成所有步骤以发现所连接设备。
2. 将端点控制寄存器设置为双向控制传输 ( $U1EP0<4:0> = 0x0D$ )。
3. 将设备框架设置命令的副本放在存储器缓冲区中。关于设备框架命令集的信息，请参见 USB 2.0 规范第 9 章。
4. 初始化当前（偶编号或奇编号）发送 EP0 缓冲区描述符（BD），以传输某设备框架命令的 8 字节命令数据（即 GET DEVICE DESCRIPTOR）。
  - a) 将 BD 状态（BD0STAT）设置为 0x8008——UOWN 位置 1，字节计数为 8。
  - b) 将 BD 数据缓冲区地址（BD0ADR）设置为包含该命令的 8 字节存储器缓冲区的起始地址。
5. 在地址寄存器（U1ADDR<6:0>）中设置目标设备的 USB 设备地址。USB 总线复位后，器件 USB 地址将为 0。枚举后，它将设置为 1 到 127 之间的另一个值。
6. 将目标设备的默认控制管道端点 0 的 SETUP 令牌写入令牌寄存器（U1TOK = 0xD0）。该操作将在总线上启动 SETUP 令牌，后面跟着数据包。数据包完成后，将在 BD0STAT 的 PID 字段中返回器件握手。当模块更新 BD0STAT 时，将产生一个传输完成中断（U1IR<TRNIF>）。该操作将完成设置事务的设置阶段，如 USB 规范第 9 章中所述。
7. 要启动设置事务的数据阶段（即获取 GET DEVICE DESCRIPTOR 命令所需数据），要在存储器中设置缓冲区存储接收到的数据。
8. 初始化当前（偶编号或奇编号）接收或发送（对于 IN 是接收，对于 OUT 是发送）EP0 BD，以传输数据。
  - a) 将 BD 状态（BD0STAT）设置为 0xC040——将 UOWN 位设置为 1，将数据切换（DTS）设置为 DATA1，并将字节计数设置为数据缓冲区的长度（在本例中是 64 或 0x40）。
  - b) 将 BD 数据缓冲区地址（BD0ADR）设置为数据缓冲区的起始地址。
9. 用对于目标设备的默认控制管道端点 0 适当的 IN 或 OUT 令牌写入令牌寄存器（例如，对于 GET DEVICE DESCRIPTOR 命令的 IN 令牌（U1TOK = 0x90））。该操作将在总线上启动 IN 令牌，后面跟着从设备到主机的数据包。数据包完成时，将写入 BD0STAT 并产生一个传输完成中断（U1IR<TRNIF>）。对于单数据包数据阶段的控制传输，该操作将完成设置事务的数据阶段，如 USB 规范第 9 章中所述。如果需要传输更多数据，请返回步骤 8。
10. 要启动设置事务的状态阶段，要在存储器中设置缓冲区，以接收或发送零长度状态阶段数据包。
11. 初始化当前（偶编号或奇编号）发送 EP0 BD 以传输状态数据。
  - a) 将 BD 状态（BD0STAT）设置为 0x8000——将 UOWN 位设置为 1，将数据切换（DTS）设置为 DATA0，并将字节计数设置为 0。
  - b) 将 BDT 缓冲区地址字段设置为数据缓冲区的起始地址。
12. 用对于目标设备的默认控制管道端点 0 适当的 IN 或 OUT 令牌写入令牌寄存器（例如，对于 GET DEVICE DESCRIPTOR 命令的 OUT 令牌（U1TOK = 0x10））。该操作将在总线上启动 OUT 令牌，后面跟着从主机到设备的零长度数据包。数据包完成时，将用来自设备的握手更新 BD，并产生一个传输完成中断（U1IR<TRNIF>）。该操作将完成设置事务的状态阶段，如 USB 规范第 9 章中所述。

### 27.5.3 向目标设备发送全速批量数据传输

1. 完成所有步骤以发现并配置所连接设备。
2. 将 0x1D 写入 EP0 控制寄存器 (U1EP0)，以在使能握手时使能发送和接收传输。如果目标设备是低速设备，还要将低速使能位 (U1EP0<LSPDEN>) 置 1。如果希望硬件在目标设备在传输中产生 NAK 时无限期自动重试，可清零重试禁止位 (U1EP0<RETRYDIS>)。
3. 设置当前 (偶编号或奇编号) 发送 EP0 BD，以传输最多 64 字节。
4. 在地址寄存器 (U1ADDR<6:0>) 中设置目标设备的 USB 设备地址。
5. 将所需端点的 OUT 令牌写入令牌寄存器 (U1TOK)。该操作会触发该模块的发送状态机，开始发送令牌和数据。
6. 等待传输完成中断 (U1IR<TRNIF>)。这表示 BD 所有权已释放给微处理器，传输已完成。如果重试禁止位置 1，将在 BD PID 字段中返回握手 (ACK、NAK、STALL 或 ERROR (0xf))。如果发生暂停中断，等待中的数据必须离队，并清除目标设备中的错误状态。如果发生断开连接中断 (SE0 超过 2.5  $\mu$ s)，则目标已断开连接 (U1IR<DETACHIF>)。
7. 发生传输完成中断 (U1IR<TRNIF>) 时，可返回步骤 2 检查 BD 并将下个数据包入队。

**注：** USB 速度、收发器和上拉只应在模块设置阶段配置。模块使能时，建议不要改变这些设置。

#### 27.5.3.1 USB 使能 / 模式位

USB 工作模式由 3 个使能位控制：OTGEN (U1OTGCON<2>)、HOSTEN (U1CON<3>) 和 USBEN/SOFEN (U1CON<0>)。

OTGEN 用于选择外设是用作 On-The-Go 设备 (OTGEN = 1)，还是不用作 On-The-Go 设备。On-The-Go 设备在硬件中使用固件管理支持会话请求协议 (SRP) 和主机协商协议 (HNP)。

HOSTEN 控制器件的角色是 USB 主机还是 USB 设备。请注意，在 OTG 应用中，该角色可以动态更改。

当 USB 模块未配置为主机 (HOSTEN = 0) 时，USBEN 控制到 USB 的连接。

如果 USB 模块配置为主机 (HOSTEN = 1)，则 SOFEN 控制主机在 USB 链路上是否活动，且每隔 1 ms 发送 SOF 令牌。

请注意，在通过这些位使能 USB 之前，应当正确初始化其他 USB 模块控制寄存器。

## 27.5.4 模块操作

### 27.5.4.1 功能操作

以下步骤用于响应 USB 事务：

1. 软件预先初始化相应的缓冲区描述符（端点 n、DIR 和 PPBI），并将 OWN 位设置为 1。
2. 硬件从 USB 主机接收令牌 PID（IN、OUT 和 SETUP），并检查相应的缓冲区描述符。
3. 如果事务为发送（IN），则模块从数据存储器中读取数据包数据。
4. 硬件接收数据 PID（DATA0/1/2 和 MDATA），并发送或接收数据包数据。
5. 如果事务为接收（SETUP 和 OUT），则模块向数据存储器中写入数据包数据。
6. 模块将发出或等待握手 PID（ACK、NAK 和 STALL），除非端点是设置为同步端点（EPHSK 位 UEPMx<0> 清零）。
7. 模块将更新缓冲区描述符，并向 OWN 位写入 0（由软件拥有）。
8. 模块将更新 U1STAT 寄存器，并设置 TRNIF 中断。
9. 软件读 U1STAT 寄存器，并确定事务的端点和方向。
10. 软件读取相应的缓冲区描述符，完成所有必需的处理，然后清除 TRNIF 中断。

请注意，对于 IN 事务（主机从设备读取数据），在主机开始发送 USB 信号之前，所读取的数据必须就绪。否则，如果 UOWN 为 0，USB 模块将发送 NAK 握手。

### 27.5.4.2 USB 链路状态

#### 27.5.4.2.1 复位

作为主机时，软件需要驱动复位信号。软件可通过将 USBRST（U1CON<4>）置 1 完成该操作。根据 USB 规范，主机驱动复位信号的时间必须至少为 50 ms。（不要求是连续的复位信号。更多信息，请参见 USB 2.0 规范。）复位之后，在随后的 10 ms 内，主机不能启动任何下游通信。

作为设备时，在检测到复位信号持续 2.5  $\mu$ s 之后，USB 模块将发出 URSTIF（U1IR<0>）中断请求。软件必须在此时执行所有复位初始化处理。这包括将地址寄存器设置为 0x00 和使能端点 0。只有复位信号消失，然后再次检测到复位信号持续 2.5  $\mu$ s 之后，才会再次设置 URSTIF 中断。

#### 27.5.4.2.2 空闲和暂停

USB 总线的空闲状态是持续的 J 状态。当 USB 总线空闲时间达到 3 ms 时，功能应进入暂停状态。在活动期间，USB 主机会每隔 1 ms 发送一个 SOF 令牌，防止设备进入暂停状态。

如果 USB 链路处于暂停状态，则在启动任何总线活动之前，USB 主机或设备必须先驱动恢复信号。（USB 链路也可能断开。）

作为 USB 主机时，当软件将 SOFEN（U1CON<0>）清零之后，软件应认为链路处于暂停状态。

作为 USB 功能时，在检测到总线持续空闲时间达到 3 ms 时，硬件会设置 IDLEIF（U1IR<4>）中断。当 IDLEIF 中断标志位置 1 时，软件应认为链路处于暂停状态。

在检测到暂停条件时，固件可能希望通过将 SUSPEND（U1PWRC<0>）置 1 来使 USB 硬件进入暂停模式。硬件暂停模式会对 48 MHz USB 外设时钟进行门控，并将 USB 收发器置于低功耗模式。

此外，在链路暂停时，用户可将 PIC24F 置于休眠模式。

## 27.5.4.2.3 驱动恢复信号

如果软件希望将 USB 总线从暂停状态唤醒，可以将 RESUME (U1CON<5>) 置 1。这会导致硬件产生相应的恢复信号（对于主机，还包括以低速 End-Of-Packet (EOP) 作为结束信号）。

除非空闲状态持续至少 5 ms，否则 USB 功能不应驱动恢复信号。USB 主机还必须已经使能功能进行远程唤醒。

对于 USB 功能，软件将 RESUME 置 1 的时间必须为 1-15 ms，对于 USB 主机，时间为 >20 ms，然后将其清零来使能远程唤醒。关于 RESUME（恢复）信号的更多信息，请参见 USB 2.0 规范中的第 7.1.7.7 节、第 11.9 节和第 11.4.4 节。

写 RESUME 将会自动清除特殊硬件暂停（低功耗）状态。

如果器件是 USB 主机，在驱动其恢复信号之后，软件应至少将 SOFEN (U1CON<0>) 置 1。否则，USB 链路将还是恢复为暂停状态。此外，在驱动恢复信号之后的 10 ms 内，软件不能启动任何下游通信。

## 27.5.4.2.4 接收恢复信号

当 USB 逻辑在 USB 总线上检测到恢复信号的时间持续 2.5  $\mu$ s 时，硬件将设置 RESUMEIF (U1IR<5>) 中断。

接收到恢复信号的功能必须做好准备，开始接收正常的 USB 活动。接收到恢复信号的主机必须立即开始驱动自己的恢复信号。在 USB 链路上接收到任何活动时，特殊硬件暂停（低功耗）状态将自动清除。

当 PIC24F 处于休眠模式时，如果在 USB 链路上接收到任何活动（可能由于恢复信号或链路断开），将导致产生 ACTVIF (U1OTGIR<4>) 中断。这将导致从休眠中唤醒。

## 27.5.4.2.5 会话请求协议 (SRP)

非 OTG 应用不需要 SRP 支持。SRP 只能在全速时启动。关于 SRP 的更多信息，请参见 On-The-Go 补充规范。

在不使用 USB 链路时，OTG A 设备或嵌入式主机可以关闭 Vbus 电源。软件可通过清零 VBUSON (U1OTGCON<3>) 完成该操作。Vbus 电源关闭时，说明 A 设备已结束 USB 会话。

**注：** A 设备关闭 VBUS 电源时，B 设备必须断开上拉电阻的连接。软件必须通过清零 DPPULUP (U1OTGCON<7>) 和 DMPULUP (U1OTGCON<6>) 完成该操作。

任何时候 OTG A 设备或嵌入式主机都可以对 VBUS 重新供电（启动新的会话）。OTG B 设备也可以请求 OTG A 设备对 VBUS 重新供电（启动新的会话）。这是通过会话请求协议 (SRP) 实现的。

请求新会话前，B 设备必须先检查确定上个会话已结束。为此，B 设备必须检查：

1. Vbus 电源低于会话有效电压。
2. D+ 和 D- 都已为低电平至少 2 ms。

条件 1 会通过 SESENDIF (U1OTGIR<2>) 中断通知 B 设备。

软件必须手动检查条件 2。

B 设备可通过电阻将 VBUS 电源放电，来帮助达到条件 1。软件可通过将 VBUSDIS (U1OTGCON<0>) 置 1 完成该操作。

满足这些初始条件后，B 设备可开始请求新会话。新会话是通过 B 设备以脉冲形式驱动 VBUS 电源发起的。软件应通过将 VBUSCHG (UTOGCTRL<1>) 置 1 完成该操作。

然后 B 设备继续以脉冲形式驱动 D+ 数据线。软件应通过将 DPPULUP (U1OTGCON<7>) 置 1 完成该操作。数据线应保持高电平 5-10 ms。

A 设备检测到 SRP 信号 (通过 ATTACHIF (U1IR<6>) 中断或 SESVDIF (U1OTGIR<3>) 中断) 时, A 设备必须通过将 VBUSON (U1OTGCON<3>) 置 1 恢复 VBus 供电。

B 设备执行 VBus 电源脉冲驱动时不会监视 VBus 电源的状态。B 设备确实检测到 VBus 电源已恢复 (通过 SESVDIF (U1OTGIR<3>) 中断) 时, B 设备必须通过上拉 D+ 或 D- (通过 DPPULUP 位) 重新连接到 USB 链路。A 设备必须通过驱动 USB 复位信号完成 SRP。

#### 27.5.4.2.6 主机协商协议 (HNP)

使用微型 AB 插座的 OTG 应用必须支持 HNP。HNP 允许 OTG B 设备临时作为 USB 主机。A 设备必须首先使能 B 设备中的 HNP。关于 HNP 的更多信息, 请参见 On-The-Go 补充信息。HNP 只能在全速状态下启动。

由 A 设备使能 HNP 后, B 设备只需表示断开连接即可请求在 USB 链接处于暂停状态的任何时刻成为主机。这可通过清零 DPPULUP 在软件中完成。

A 设备检测到断开连接条件 (通过 URSTIF (U1IR<0>) 中断) 时, A 设备可以允许 B 设备作为主机接管。A 设备是通过发出全速连接信号完成该操作的。软件可通过将 DPPULUP 置 1 实现该操作。如果 A 设备以恢复信号响应, 则 A 设备保持为主机。

B 设备检测到连接条件 (通过 ATTACHIF (U1IR<6>)) 时, B 设备变为主机。B 设备在使用总线前驱动复位信号。

B 设备完成主机角色后, 停止所有总线活动, 将 DPPULUP 置 1 使其 D+ 上拉电阻。

A 设备检测到暂停条件 (空闲 3 ms) 时, A 设备将断开其 D+ 上拉电阻。A 设备也可以关闭 VBus 电源来结束该会话。

A 设备检测到连接条件 (通过 ATTACHIF 判断) 时, A 设备会恢复主机操作, 并驱动复位信号。

## 27.6 中断

USB 模块使用中断来向 CPU 告知 USB 事件，例如状态变化、接收到数据和缓冲区为空等事件。固件必须能够及时响应这些中断。

### 27.6.1 中断控制

USB 模块中的每个中断源都具有一个中断标志位和一个对应的允许位。此外，UERRIF 位 (U1IR<1>) 用于反映所有已使能的错误标志，它是只读位。该位可用于在 ISR 中查询 USB 模块的事件。

### 27.6.2 USB 模块中断请求产生

USB 模块可以基于多种事件产生中断请求。为了将这些中断传给 CPU，USB 中断进行了组合，使所有允许的 USB 中断都导致对中断控制器产生一个通用 USB 中断（如果允许了 USB 中断），请参见图 27-10。然后，USB 中断服务程序 (ISR) 必须确定是哪个或哪些 USB 事件导致了 CPU 中断，并提供相应的中断服务。USB 模块的中断寄存器分为两层。第一层的位包含了全部 USB 状态中断，位于 U1OTGIR 和 U1IR 寄存器中。U1OTGIR 和 U1IR 寄存器中的位分别通过 U1OTGIE 和 U1IE 寄存器中的对应位使能。此外，USB 错误条件位 (UERRIF) 会传递 U1EIR 寄存器中通过 U1EIE 寄存器位允许的任何中断条件。

### 27.6.3 中断时序

传输中断在传输结束时产生。图 27-9 给出了一些可以产生 USB 中断的典型事件序列，以及产生中断的时间。软件无法通过任何机制在 USB 模块中手动将中断位置 1。

中断允许寄存器 (U1IE、U1EIE 和 U1OTGIE) 中的值只会影响中断条件向 CPU 的中断控制器的传递。即使是未允许某个中断，还是可以查询中断条件，并提供中断服务。

### 27.6.4 中断服务

USB 模块将某个中断位置 1 后（在 U1IR、U1EIR 或 U1OTGIR 中），必须由软件写入 1 来清除。在 ISR 末尾，必须清零 USB 中断标志位 USBIF (IFS1<25>)。

图 27-9： USB 中断的典型事件

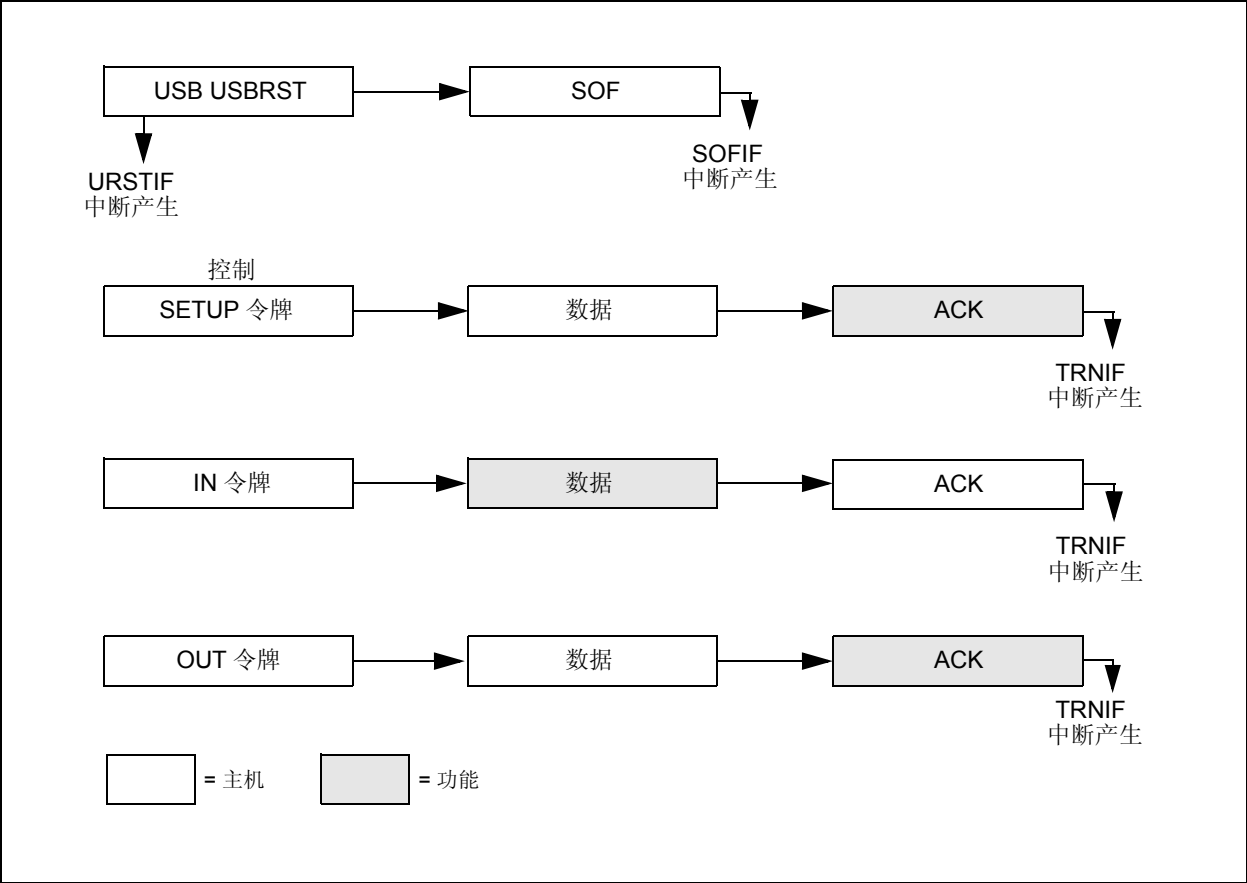
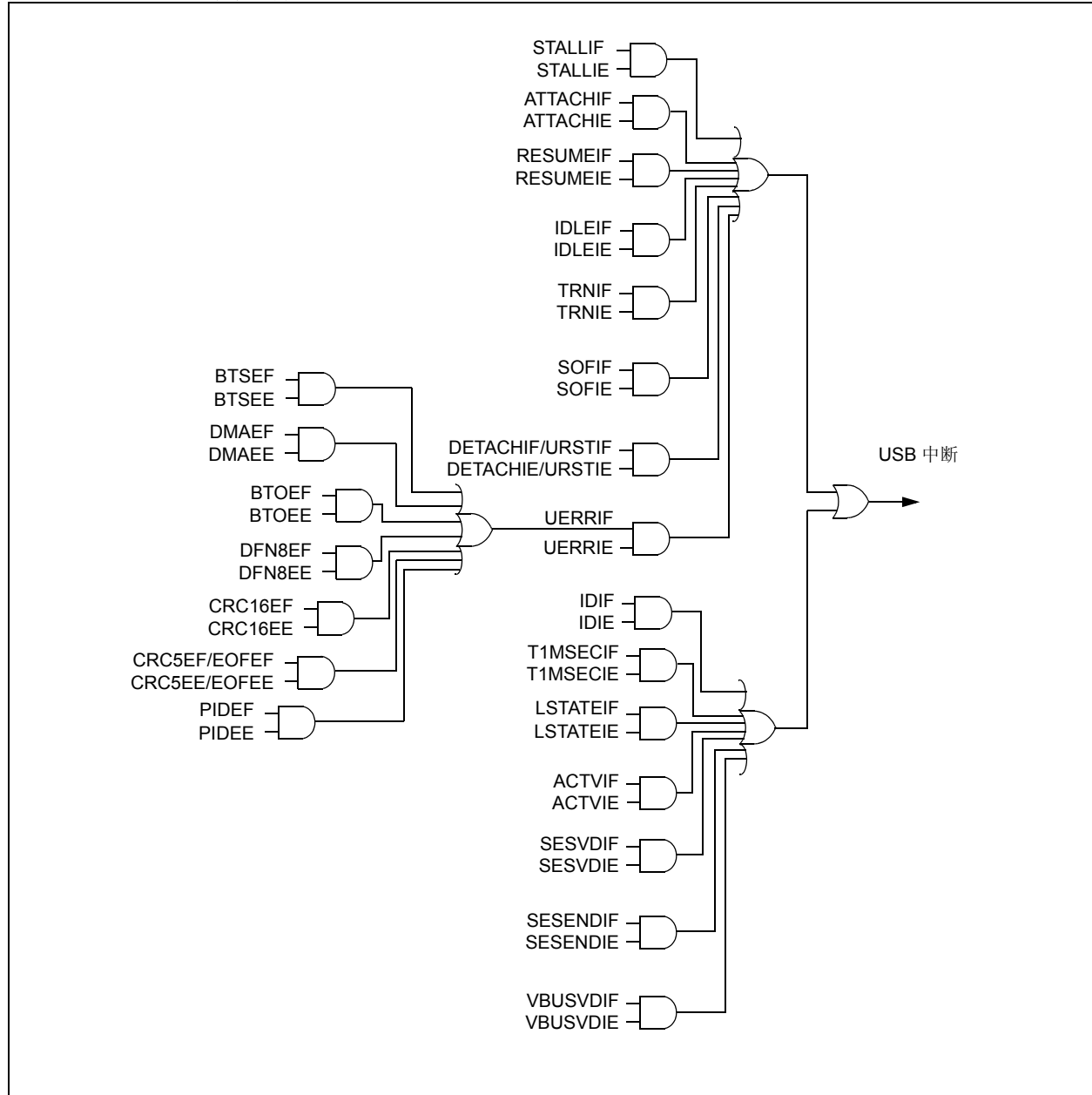




图 27-10: USB 中断逻辑



27.7 I/O 引脚

图 27-5 汇总了与 USB 模块相关的引脚的使用。

表 27-5: 与 USB 模块相关的引脚

模式	引脚名称	模块控制	控制位域 <sup>(1)</sup>	必需的 TRIS 位设置	引脚 类型	说明
主机						
	D+	USBEN		—	U, I/O	数据线 +
	D-	USBEN		—	U, I/O	数据线 -
	VBUS <sup>(2)</sup>	USBEN		—	P	USB 电源的输入， 连接到 OTG 比较器
	VBUSON	USBEN	VBUSON	—	D, O	输出以控制 VBUS 的电源 <sup>(2)</sup>
	VUSB <sup>(2)</sup>	—	—	—	P	USB 收发器的电源输入，内部 USB 稳压器的输出（如果使能）
设备						
	D+	USBEN		—	U, I/O	数据线 +
	D-	USBEN		—	U, I/O	数据线 -
	ID	USBEN		—	D, I	OTG 模式主机 / 设备选择
	VBUS <sup>(2)</sup>	USBEN	VBUSCHG, VBUSDIS	—	P	USB 电源的输入， 连接到 OTG 比较器
	VUSB <sup>(2)</sup>	—	—	—	P	USB 收发器的电源输入
On-The-Go (OTG)						
	D+	USBEN		—	U, I/O	数据线 +
	D-	USBEN		—	U, I/O	数据线 -
	ID	USBEN		—	D, I	OTG 模式主机 / 设备选择
	VBUS <sup>(2)</sup>	USBEN		—	A, I/O, P	USB 电源的模拟输入， 连接到 OTG 比较器
	VBUSON	USBEN	VBUSCHG, VBUSDIS VBUSON	—	D, O	输出以控制 VBUS 的电源 <sup>(2)</sup>
	VUSB <sup>(2)</sup>	—	—	—	P	USB 收发器的电源输入

图注： I = 输入，O = 输出，A = 模拟，D = 数字，U = USB，P = 电源

注 1： 所有引脚都遵循器件引脚优先级控制。请参见具体器件数据手册了解更多信息。

2： 所有 USB 引脚上 JTAG 边界扫描都不适用。

## 27.8 调试和节能模式下的操作

### 27.8.1 休眠模式下的操作

建议只在以下两种情况下使用休眠模式：

- USB 模块被禁止。
- USB 模块处于暂停状态。

在总线活动时将 USB 模块置于休眠模式会导致错误的 USB 设备行为。

当器件进入休眠模式时，为 USB 模块提供的时钟依然维持。对于 CPU 时钟源的影响取决于 USB 和 CPU 时钟配置。

- 如果 CPU 和 USB 使用的是主振荡器（POSC）源，则在进入休眠模式时，CPU 会从时钟源断开，而振荡器保持使能状态，用于 USB 模块。
- 如果 CPU 使用的是其他时钟源，则在进入休眠模式时，该时钟源会被禁止。USB 时钟源保持使能。

要进一步降低功耗，可以在将 CPU 置于休眠模式之前，将 USB 模块置于暂停模式。对于 CPU 时钟源的影响取决于 USB 和 CPU 时钟配置。

- 如果 CPU 和 USB 使用的是主振荡器（POSC）源，则在 CPU 进入休眠模式时，振荡器会被禁止。
- 如果 CPU 不与 USB 模块共用 POSC，则在 USB 模块进入暂停模式时，POSC 会被禁止。CPU 时钟源将在 CPU 进入休眠模式时被禁止。

当器件进入休眠模式时，USB 活动中断会被允许。当器件唤醒由于休眠而被禁止的时钟源时，活动中断将用于将器件从休眠中唤醒，而暂停将被重新使能。当使用活动中断来唤醒器件时，必须将振荡器起振时间和 PLL 锁定时间考虑在内。

### 27.8.2 空闲模式下的操作

当器件进入空闲模式时，USB 模块和 CPU 的时钟源依然维持。

当器件进入空闲模式时，USB 活动中断会被允许。当器件唤醒由于空闲而被禁止的时钟源时，活动中断将用于将器件从空闲中唤醒，而暂停将被重新使能。当使用活动中断来唤醒器件时，应将振荡器起振时间和 PLL 锁定时间考虑在内。更多信息，请参见第 10 章“节能特性”。

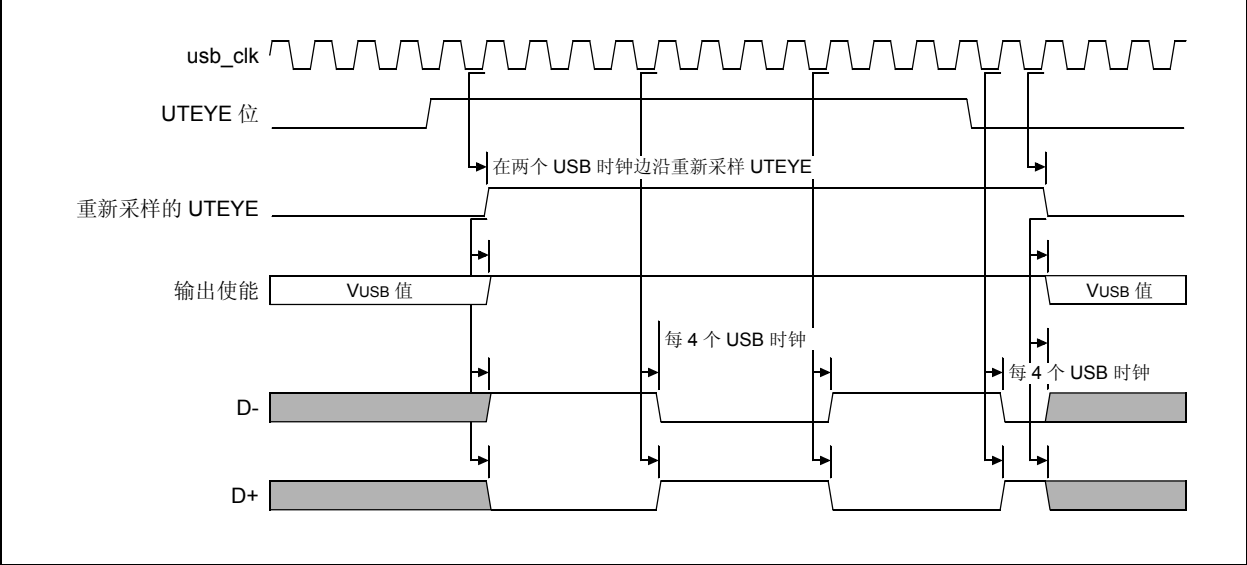
27.8.3 调试模式下的操作

27.8.3.1 眼图

为了协助进行 USB 硬件调试和测试，模块中包含了眼图测试发生器。该图在 UTEYE 位（U1CNFG1<7>）置 1 时由模块产生。USB 模块必须使能（USBPWR（PWRC<0> = 1）），USB 48 MHz 时钟必须使能（SUSPEND（U1PWRC<1>）= 0），并且模块不处于冻结模式。一旦 UTEYE 位被置 1，该模块将仅仿真从接收切换到发送状态，并开始发送 J-K-J-K 位序列。当使能了眼图测试模式时，该位序列将无限重复（见图 27-11）。

**注：** 该模块连接到实际 USB 系统时，不应将 UTEYE 位置 1。该模式用于电路板检验，并帮助进行 USB 认证测试。该测试不能正确测试从接收到发送状态的转换过程。该测试供系统开发人员了解 USB 信号中参杂的噪声，USB 信号噪声来自于电路板走线、阻抗不匹配和其他邻近系统元件的影响。

图 27-11： 眼图生成时序



27.8.3.2 USB  $\overline{\text{OE}}$  监视器

USB  $\overline{\text{OE}}$  监视器指示 USB 是在监听总线还是在主动驱动总线。当 U1CNFG1<UOEMON> = 1 时，该调试功能使能。

$\overline{\text{OE}}$  监控对于初始系统调试和眼图生成测试期间的示波器触发很有用。

### 27.9 复位的影响

所有形式的复位都会强制 USB 模块寄存器进入默认状态。

**注：** 复位后，USB 模块既不能确保 BDT 的状态，也不能确保 RAM 中包含的数据包数据缓冲区的状态。

#### 27.9.1 器件复位 ( $\overline{\text{MCLR}}$ )

器件复位将强制所有 USB 模块寄存器为其复位状态。这将关闭 USB 模块。

#### 27.9.2 上电复位 (POR)

POR 复位将强制所有 USB 模块寄存器为其复位状态。这将关闭 USB 模块。

#### 27.9.3 看门狗定时器复位 (WDT)

WDT 复位将强制所有 USB 模块寄存器为其复位状态。这将关闭 USB 模块。

27.10 电气规范

表 27-6: OTG 时序要求

参数 编号	符号	特性	最小值	典型值	最大值	单位	条件
USB313	VUSB	USB 电压	3.0	—	3.6	V	总线上的电压必须在此范围内以确保 USB 正常工作
USB315	VILUSB	USB 缓冲区的输入低电压	—	—	0.8	V	
USB316	VIHUSB	USB 缓冲区的输入高电压	2.0	—	—	V	
USB318	VDIFS	差分输入灵敏度	—	—	0.2	V	
USB319	VCM	差分共模范围	0.8	—	2.5	V	当达到 VCM 时，D+ 和 D- 之间的差值必须超出此值
USB320	ZOUT	驱动器输出阻抗	28.0	—	44.0	$\Omega$	
USB321	VOL	输出低电压	0.0	—	0.3	V	1.5 k $\Omega$ 负载连接到 3.6V
USB322	VOH	输出高电压	2.8	—	3.6	V	1.5 k $\Omega$ 负载接地

## 27.11 寄存器映射

表 27-7 中提供了与 PIC24F USB On-The-Go (OTG) 相关的特殊功能寄存器汇总。

表 27-7: USB OTG 寄存器映射

寄存器名称	地址	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	所有复位时的状态
U1OTGIR	0480	—	—	—	—	—	—	—	—	IDIF	T1MSECF	LSTATEIF	ACTVIF	SESVDF	SESENDIF	—	VBUSVDIF	0000
U1OTGIE	0482	—	—	—	—	—	—	—	—	IDIE	T1MSECF	LSTATEIE	ACTVIE	SESVDF	SESENDIE	—	VBUSVDIE	0000
U1OTGSTAT	0484	—	—	—	—	—	—	—	—	ID	—	LSTATE	—	SESVDF	SESEND	—	VBUSVD	0000
U1OTGCON	0486	—	—	—	—	—	—	—	—	DPPULUP	DMPULUP	DPPULDOWN <sup>(2)</sup>	DMPULDOWN <sup>(2)</sup>	VBUSON <sup>(2)</sup>	OTGEN <sup>(2)</sup>	VBUSCHG <sup>(2)</sup>	VBUSDIS <sup>(2)</sup>	0000
U1PWRC	0488	—	—	—	—	—	—	—	—	UACTPND	—	—	USLPGRD	—	—	USUSPND	USBPWR	0000
U1IR	048A <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	STALLIF	—	RESUMEIF	IDLEIF	TRNIF	SOFIF	UERRIF	URSTIF	0000
U1IE	048C <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	STALLIF	ATTACHIE <sup>(1)</sup>	RESUMEIF	IDLEIF	TRNIF	SOFIF	UERRIF	DETACHIE <sup>(1)</sup>	0000
U1IE	048C <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	STALLIE	—	RESUMEIE	IDLEIE	TRNIE	SOFIE	UERRIE	URSTIE	0000
U1IE	048C <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	STALLIE	ATTACHIE <sup>(1)</sup>	RESUMEIE	IDLEIE	TRNIE	SOFIE	UERRIE	DETACHIE <sup>(1)</sup>	0000
U1EIR	048E <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	BTSEF	—	DMAEF	BTOEF	DFN8EF	CRC16EF	CRCSEF	PIDEF	0000
U1EIE	0490 <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	BTSEF	—	DMAEF	BTOEF	DFN8EF	CRC16EF	EOFEF <sup>(1)</sup>	PIDEF	0000
U1EIE	0490 <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	BTSEE	—	DMAEE	BTOEE	DFN8EE	CRC16EE	CRCSEE	PIDEE	0000
U1STAT	0492	—	—	—	—	—	—	—	—	ENDPT3 <sup>(3)</sup>	ENDPT2 <sup>(3)</sup>	ENDPT1 <sup>(3)</sup>	BTOEE	DFN8EE	CRC16EE	EOFEF <sup>(1)</sup>	PIDEE	0000
U1CON	0494 <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	SE0	PKTDS	—	HOSTEN	RESUME	PPBRST	USBEN	0000
U1CON	0494 <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	JSTATE	SE0	TOKBUSY	USBRST <sup>(1)</sup>	HOSTEN	RESUME	PPBRST	SOFTEN <sup>(1)</sup>	0000
U1ADDR	0496	—	—	—	—	—	—	—	—	LSPDEN <sup>(1)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	0000
U1BDTP1	0498	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000
U1FRML	049A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000
U1FRMH	049C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000
U1TOK <sup>(2)</sup>	049E	—	—	—	—	—	—	—	—	PID3	PID2	PID1	PID0	EP3	EP2	EP1	EP0	0000
U1SOF <sup>(2)</sup>	04A0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000
U1CNFG1	04A6	—	—	—	—	—	—	—	—	UTEYE	UOEMON	—	USBSIDL	EXTI2CEN	UUVBUSDIS	UVCMPDIS	UTRDIS	0000
U1CNFG2	04A8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0000

图注: — = 未实现 (读为 0)。复位值以十六进制显示。

注 1: 模块工作在主机模式时的备用寄存器或位的定义。

2: 该寄存器仅在主机或 OTG 模式下有意义。

3: 仅限设备模式。在主机模式下, 这些位始终读为 0。

表 27-7: USB OTG 寄存器映射 (续)

寄存器名称	地址	Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	所有 复位时 的状态
U1EP0	04AA	—	—	—	—	—	—	—	—	LSPD <sup>(1)</sup>	RETRYD(S <sup>(1)</sup> )	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP1	04AC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP2	04AE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP3	04B0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP4	04B2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP5	04B4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP6	04B6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP7	04B8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP8	04BA	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP9	04BC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP10	04BE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP11	04C0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP12	04C2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP13	04C4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP14	04C6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1EP15	04C8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	EPCONDIS	EPRXEN	EPTXEN	EPSTALL	EPHSHK	0000
U1PWMRRS	04CC	USB 电源 PWM 占空比										USB 电源 PWM 周期						0000
U1PWMCON	04CE	PWMEN	—	—	—	—	—	PWMPOL	CNTEN	—	—	—	—	—	—	—	—	0000

图注: — = 未实现 (读为 0)。复位值以十六进制显示。

1: 模块工作在主机模式时的备用寄存器或位的定义。

2: 该寄存器仅在主机或 OTG 模式下有意义。

3: 仅限设备模式。在主机模式下, 这些位始终读为 0。



## 27.12 相关应用笔记

本节列出了与手册本章内容相关的应用笔记。这些应用笔记可能并不是专为 PIC24F 器件系列而编写的，但其概念是相近的，通过适当修改并受到一定限制即可使用。当前与 USB On-The-Go (OTG) 模块相关的应用笔记有：

标题

应用笔记编号

目前没有相关的应用笔记。

**注：**如需获取更多 PIC24F 系列器件的应用笔记和代码示例，请访问 Microchip 网站 ([www.microchip.com](http://www.microchip.com))。

## 27.13 版本历史

### 版本 A（2007 年 12 月）

这是本文档的初始发行版。