
Microchip 集线器的 USB 转 I2S 桥接功能

作者: Jeffrey Hunt Microchip Technology, Inc.
--

简介

集成电路间音频（Inter-IC-Sound，I2S）总线是用于连接音频器件（例如音频编解码器）的标准接口。

USB 音频/视频（Audio/Video，AV）设备类定义描述了用于与包含音频相关功能的设备进行通信的方法等。其中包括数字和模拟音频数据及其相关元数据，以及用于控制音频环境的功能（例如音量控制）。

Microchip USB 集线器通过 I2S 实现 USB 到音频设备编解码器的桥接器。这类器件仅支持 USB 音频设备类规范 v1.0。I2S 接口与 ADAU1961 编解码器进行 5 线连接。配置非常灵活，可以更改模拟器件 ADAU1961 的设置，甚至使用其他编解码器。

当音频编解码器通过 I2S 接口收发音频数据时，USB 音频设备控制数据会通过集线器的 I2C（主模式）接口进行传输。

有关实现的更多详细信息，请参见“参考资料”部分列出的器件数据手册。

章节

[第 1.0 节 “一般信息”](#)

参考资料

有关本文档中提及的特定器件的详细信息，请参见以下文档。

- 《Microchip USB4715 数据手册》
- *Microchip USB4914 Data Sheet*
- *Microchip USB4916 Data Sheet*
- *Microchip USB4925 Data Sheet*
- *Microchip USB4927 Data Sheet*
- 《Microchip USB4712 数据手册》
- 《MCP4902/4912/4922 数据手册》
- 《Microchip USB7002 数据手册》
- *Microchip USB7050 Data Sheet*
- *Microchip USB7051 Data Sheet*
- *Microchip USB7152 Data Sheet*
- *Microchip USB7056 Data Sheet*
- *Microchip USB7202 Data Sheet*
- *Microchip USB7250 Data Sheet*
- *Microchip USB7251 Data Sheet*
- *Microchip USB7252 Data Sheet*
- *Microchip USB7256 Data Sheet*
- 《Microchip USB7206 数据手册》
- *Microchip USB7216 Data Sheet*

AN3135

- *UM10204 I2C-bus specification and user manual*, <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- *Audio Device Class Spec v1.0*, http://www.usb.org/developers/docs/devclass_docs
- *ADAU1961 Data Sheet*, <https://www.analog.com/en/products/adau1961.html>

1.0 一般信息

Microchip 集线器通过向内置的集线器功能控制器（位于额外的内部USB端口上）发送主机命令来实现USB转I2S桥接功能。为了使桥接功能正常工作，默认情况下必须使能该内部集线器功能控制器。表1提供了有关每款器件的集线器功能控制器默认设置的详细信息，其中包括本文档所述的I2S桥接器实现。

表1：集线器功能控制器使能的默认设置

部件编号	器件摘要	集线器功能控制器默认设置
USB4715	5端口USB2.0 FlexConnect集线器	默认在端口5上使能
USB4914	3端口USB2.0多主机反射器集线器	默认在端口5上使能
USB4916	5端口USB2.0多主机反射器集线器	默认在端口7上使能
USB4925	3端口USB2.0双上行集线器	默认在端口4上使能
USB4927	5端口USB2.0双上行集线器	默认在端口6上使能
USB7002	4端口USB3.1 Gen1集线器	默认在端口6上使能
USB7050	带3个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen1集线器	默认在端口6上使能
USB7051	带2个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen1集线器	默认在端口6上使能
USB7052	带1个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen1集线器	默认在端口6上使能
USB7056	带1个USB PD端口的6端口USB3.1 Gen1集线器	默认在端口8上使能
USB7202	4端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口6上使能
USB7250	带3个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口6上使能
USB7251	带2个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口6上使能
USB7252	带1个USB PD端口的4端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口6上使能
USB7256	带1个USB PD端口的6端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口8上使能
USB7206	6端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口8上使能
USB7216	6端口USB3.1 Gen2集线器	默认在端口8上使能

1.1 支持的I2S桥接器特性

在基本操作中，I2S桥接接口枚举为USB设备，这符合*Audio Device Class Spec v1.0*。

该器件支持的默认音频特性如下：

- 48 kHz
- 6位/采样
- 立体声音频
- ADAU1961 音频编解码器

此外，可通过OTP将I2S桥接器配置为不同的音频特性和设置，甚至还可以配置其他编解码器。

AN3135

1.1.1 I2S桥接器的可配置特性

表2: I2S桥接器的可配置特性

参数	支持的值
采样频率 (fs)	8 kHz、11.025 kHz、12 kHz、16 kHz、22.05 kHz、24 kHz、32 kHz、44.1 kHz 和 48 kHz
MCLK 频率 (采样频率的倍数)	从 1*fs 到 1024*fs。 MCLK 可以是 fs 的任意倍数 (最高为 fs 的 1024 倍)。但是, 由于 I2S LRCLK 信号来自 MCLK 源, 因此建议仅使用 fs 的偶数倍。
音频采样大小	16 位/采样、24 位/采样和 32 位/采样
I2S 音频接口格式	I2S 模式、左对齐模式和右对齐模式
I2C 主控制接口频率	100 kHz 和 400 kHz
音频通道	单声道模式和立体声模式
使能和禁止 I2S 桥接器接口	仅音频输出 (扬声器接口) 仅音频输入 (麦克风接口) 音频输入和音频输出 (线路接口) 插孔检测接口
插孔检测	可使能或禁止音频插孔插入检测

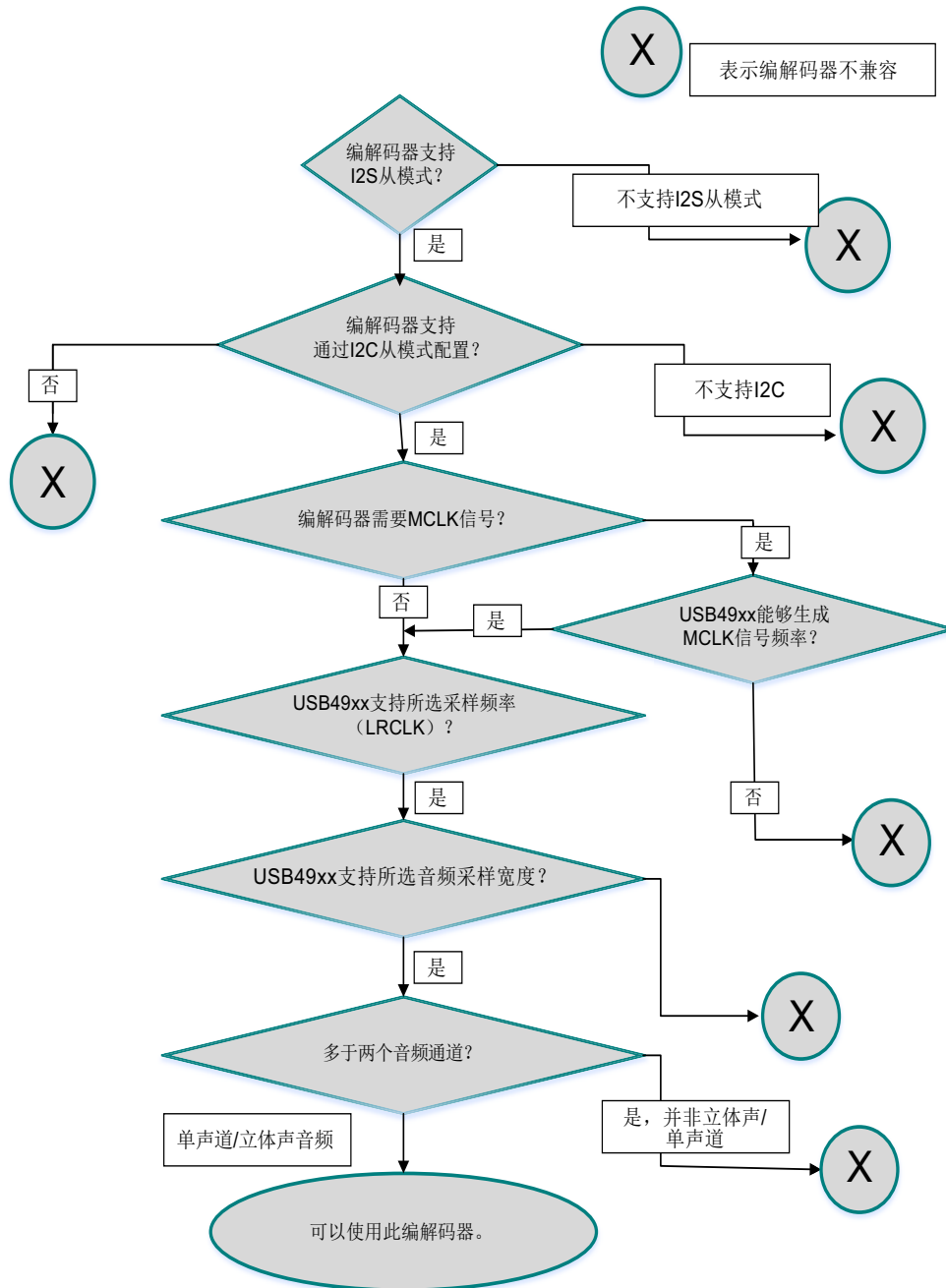
1.2 备选编解码器实现

I2S 桥接器默认使用 ADAU1960/1961, 但也可以使用其他编解码器。可参照以下核对事项来确定编解码器是否与 I2S 桥接器兼容。编解码器必须满足以下所有标准才能与 I2S 桥接器兼容。

1.2.1 I2S 桥接器编解码器兼容性核对事项

1. 编解码器支持 I2S 从模式。
2. 编解码器支持通过 I2C (从模式) 进行配置。
3. 编解码器无需外部 MCLK 信号, 或者 I2S 桥接器能够提供编解码器所需的 CLK 频率。
4. 编解码器能够接受 I2S 桥接器所能提供的 LCRLK 采样频率。
5. 编解码器能够接受 I2S 桥接器支持的采样宽度。
6. 编解码器有一个或两个 (不得超过两个) 音频通道。

图1: 确认编解码器兼容性



1.2.2 编解码器实现步骤

确认编解码器具备兼容性后，必须以OTP方式访问寄存器来配置编解码器和I2S桥接器。表3通过几个示例说明了更换其他编解码器可能需要的典型配置步骤。

表3： 音频参数配置

	更改音频采样频率	更改音频编解码器器件	更改音频采样分辨率（每次采样的位数）	更改音频通道数（立体声/单声道）	禁止扬声器/麦克风接口
第1步	修改USB音频描述符以通告新的采样频率。	修改编解码器初始化	修改USB音频描述符以通告新的采样分辨率。	修改USB音频描述符以通告支持的音频通道数。	修改寄存器配置以选择扬声器/麦克风接口。
第2步	修改MCLK频率（送至编解码器的MCLK信号的频率基本上是采样频率的N倍）。	根据新编解码器的工作要求修改MCLK频率（送至编解码器的MCLK信号的频率基本上是采样频率的N倍）。值N因编解码器而异。	根据新的每次采样的位数修改12S波特率。	修改I2S寄存器以配置单声道音频模式。	修改编解码器初始化序列，以便用户识别。
第3步	将ON位和活动位清零后才能修改参考振荡器模块寄存器。（输入/输出方向FIFO会累加音频采样，并设有用于与主机保持同步的上限阈值和下限阈值。阈值取决于采样频率。）	配置编解码器访问信息。	将ON位和活动位清零后才能修改参考振荡器模块寄存器。（输入/输出方向FIFO会累加音频采样，并设有用于和主机保持同步的上限阈值和下限阈值。阈值取决于每次采样的位数。此外，FIFO元素宽度随采样大小而变化。）	将ON位和活动位清零后才能修改参考振荡器模块寄存器。（输入/输出方向FIFO会累加音频采样，并设有用于和主机保持同步的上限阈值和下限阈值。阈值取决于音频流中的通道数。）	—

表3: 音频参数配置 (续)

第4步	修改编解码器初始化序列以支持新的采样频率。	符合编解码器的其他要求。例如, I2S 模式/左对齐模式/右对齐模式	修改编解码器初始化序列以支持新的位分辨率。	修改编解码器初始化序列以支持单声道模式。	—
-----	-----------------------	------------------------------------	-----------------------	----------------------	---

1.2.3 修改 USB 音频描述符

表4: 音频输出接口的 USB 描述符寄存器定义

寄存器地址	参数名称	大小	说明	支持的值
0xBFD240BA	Spkr_NrChannels	1	音频数据流中的通道数。	单声道——0x01 立体声——0x02
0xBFD240BB	Spkr_SubFrameSize	1	一个音频子帧 (采样) 占用的字节数。	0x02、0x03 和 0x04
0xBFD240BC	Spkr_BitResolution	1	音频子帧中可用位的有效位数。	16、24 和 32
0xBFD240BE	Spkr_SamFreq	3	该异步数据端点的采样频率 (48 kHz)。	8、16、32、44.1 和 48 kHz (这些是标准值)
0xBFD240C5	Spkr_MaxPacketSize	2	该端点的最大数据包大小。	0 到 1023 字节

表5: 音频输入接口的 USB 描述符寄存器定义

寄存器地址	参数名称	大小	说明	支持的值
0xBFD240EE	Mic_NrChannels	1	音频数据流中的通道数。	单声道——0x01 立体声——0x02
0xBFD240EF	Mic_SubFrameSize	1	一个音频子帧 (采样) 占用的字节数。	0x02、0x03 和 0x04
0xBFD240F0	Mic_BitResolution	1	音频子帧中可用位的有效位数。	16、24 和 32
0xBFD240F2	Mic_SamFreq	3	该异步数据端点的采样频率 (48 kHz)。	8、16、32、44.1 和 48 kHz (这些是标准值)
0xBFD240F9	Mic_MaxPacketSize	2	该端点的最大数据包大小。	0 到 1023 字节

AN3135

1.2.3.1 在USB描述符中自定义采样频率

自定义采样频率时，可能需要修改以下位域：

1) Spkr_SamFreq

该位域的长度为24位，包含采样频率的十六进制值。

2) Mic_SamFreq

该位域的长度为24位，包含采样频率的十六进制值。

3) Spkr_MaxPacketSize

由于每秒接收的数据量随采样频率的变化而变化，因此需要修改该位域。请参见[计算MaxPacketSize](#)。

4) Mic_MaxPacketSize

由于每秒接收的数据量随采样频率的变化而变化，因此需要修改该位域。请参见[计算MaxPacketSize](#)。

1.2.3.2 在USB描述符中自定义音频采样分辨率

自定义音频采样分辨率时，可能需要修改以下位域：

1) Spkr_SubFrameSize: 采样长度（字节数）

2) Spkr_BitResolution: 有效采样长度（位数）

3) Mic_SubFrameSize: 采样长度（字节数）

4) Mic_BitResolution: 有效采样长度（位数）

此外，可能还需修改以下位域：

1) Spkr_MaxPacketSize

如果采样长度改变了数据包大小，则需要修改该位域。请参见[计算MaxPacketSize](#)。

2) Mic_MaxPacketSize

如果采样长度改变了数据包大小，则需要修改该位域。请参见[计算MaxPacketSize](#)。

1.2.3.3 计算MaxPacketSize

每毫秒接收的数据量 = (采样频率 * 每次采样的字节数 * 音频流中的通道数) / 1000

根据音频端点描述符间隔位域，USB音频数据包间隔为每毫秒1个数据包。

对于48 kHz，16位立体声音频，每毫秒接收的数据量 = $(48000 * 2 * 2) / 1000 = 192$ 字节/毫秒。

对于44.1 kHz，16位立体声音频，每毫秒接收的数据量 = 177 字节/毫秒。

对于ISOC输出方向，送至扬声器的音频流的数据包大小保持不变，以便和主机保持音频同步。

对于ISOC输入方向，来自麦克风的音频流的数据包大小会随少数几次采样而变化，以便与主机保持同步。ISOC输入端点的最大数据包大小可通过[计算ISOC输入端点数据包大小](#)得出。

1.2.4 修改MCLK频率

I2S模块通过对MCLK进行分频来生成SCLK和LRCLK。一些编解码器也使用I2S主器件的MCLK作为内部时钟来执行操作。

通常，编解码器所需的MCLK信号的频率是256倍采样频率的倍数。例如：

- 1) 256倍采样频率
- 2) 512倍采样频率

依此类推。

1.2.4.1 生成MCLK

要通过源时钟生成MCLK频率，应使用参考振荡器控制模块。

MCLK频率 = Source_clock_frequency / (2 * 分频系数 (D))

时钟分频系数 (D) 分为：

- 1) 整数分频比 (N)
- 2) 小数分频比 (F)

参考振荡器控制模块有两个寄存器：

- 1) 表6——用于配置整数分频比
- 2) 表7——用于配置小数分频比

REFOCON寄存器包含ON位以及活动状态和控制位，用于保护REFOCON寄存器和REFOTRIM寄存器免遭意外修改。

注： 将ON位和活动位清零后才能修改参考振荡器模块寄存器。

表6： REFOCON寄存器

地址： 0xBF80A030

位位置	位域	权限	说明
31	Reserved_31	RO	写入该寄存器时，该位必须为0。
30:16	整数分频比	RW	允许使用0到0x7FFF的值。在此输入的值乘以2后用于分频。
15	ON	RW	1 = 使能参考振荡器模块 0 = 禁止参考振荡器模块
14	保留	RW	写入该寄存器时，该位必须为0。
13	保留	RW	写入该寄存器时，该位必须为0。
12	保留	RW	写入该寄存器时，该位必须为0。
11	保留	RW	写入该寄存器时，该位必须为0。
10	保留	RO	写入该寄存器时，该位必须为0。
9	保留	RW	写入该寄存器时，该位必须为0。
8	有效	RW	参考时钟请求状态位 1 = 参考时钟请求处于活动状态（用户不得更新该REFOCON寄存器） 0 = 参考时钟请求未处于活动状态（用户可更新该REFOCON寄存器）
7:4	保留	RO	写入该寄存器时，该位必须为0。

AN3135

表6: REFOCON 寄存器

地址: **0xBF80A030**

位位置	位域	权限	说明
3:0	Source_Clock	RW	<p>参考时钟源选择位。 从各个时钟源中选择一个作为参考时钟。 0100 - 1111 = 保留</p> <p>0011 = osc_clk[4]——240 MHz USB 时钟 /2 (通常为 POSC)</p> <p>0010 = osc_clk[3]——120 MHz USB 时钟 /4 (通常为 POSC)</p> <p>0001 = osc_clk[2]——96 MHz USB 时钟 /5</p> <p>0000 = osc_clk[1]——60 MHz 系统时钟</p>

表7: REFOTRIM 寄存器

地址: **0xBF80A034**

位位置	位域	权限	说明
31:20	小数分频比对应的值。 (=4096 * F)	RW	<p>微调位——选择与 REFO 时钟的 1/2 周期对应的整数分频比相加的小数分频比:</p> <p>0000_0000_0000 = 0/4096 (0.0) 分频比与整数分频比相加</p> <p>0000_0000_0001 = 1/4096 (0.0002441) 分频比与整数分频比相加</p> <p>1000_0000_0000 = 2048/4096 (0.500000) 分频比与整数分频比相加</p> <p>1111_1111_1110 = 4094/4096 (0.9995117) 分频比与整数分频比相加</p> <p>1111_1111_1111 = 4095/4096 (0.9997559) 分频比与整数分频比相加</p>
19:0	保留	RO	写入该寄存器时, 这些位必须为0。

1.2.5 修改FIFO阈值

USB音频接口有2个端点：同步输入方向和同步输出方向。

- 在ISOC输出端点上接收的数据存储在I2S_OUT_FIFO中，然后通过I2S总线传输到编解码器。
- 从I2S总线接收的数据存储在I2S_IN_FIFO中，然后通过ISOC IN端点传输到主机。

FIFO中基本元素的大小为16或32位，具体可通过表13中的FIFO元素模式位域来配置。修改音频采样分辨率时需要验证该位域。

1.2.5.1 ISOC_OUT_FIFO的阈值设置

主机将在每个帧上发送相同的数据量。例如，基于主机时钟以48 kHz发送数据。编解码器采样时钟与主机时钟异步。这会导致输出FIFO中的数据量发生变化。如果FIFO中的数据量超过上限阈值，则采样时钟会减小。如果数据介于上限阈值与下限阈值之间，则采样时钟保持不变。如果数据低于下限阈值，则采样时钟会增大。

ISOC数据包间隔 = 1 ms

1个数据包中的采样数 = (采样频率 / 1000)

ISOC_OUT_FIFO包含512个元素，相关设置请参见表13。

FIFO可容纳的数据包数 = 512 / (1个数据包中的采样数)

填充的数据量至少需要达到FIFO大小的50%。之后，才会开始通过I2S进行传输。FIFO的输出开始阈值可在表15寄存器的OUT_START_THRESHOLD参数中配置。

$OUT_START_THRESHOLD = (FIFO\ 可\ 容纳\ 的\ 数据\ 包\ 数 / 2) * (1\ 个\ 数据\ 包\ 中\ 的\ 采\ 样\ 数)$

USB数据包到达间隔允许的最大漂移为1 ms。为了监视该漂移，FIFO标记了上限阈值和下限阈值。

$OUT_FIFO_LOW_THRESHOLD = (OUT_START_THRESHOLD - 1\ 个\ 数据\ 包\ 中\ 的\ 采\ 样\ 数)$

$OUT_FIFO_HIGH_THRESHOLD = (OUT_START_THRESHOLD + 1\ 个\ 数据\ 包\ 中\ 的\ 采\ 样\ 数)$

注： 关于如何配置阈值，请参见表14和表15。

1.2.5.2 ISOC_IN_FIFO的阈值设置

来自编解码器的数据馈入ISOC_IN_FIFO。由于采样时钟与主机时钟异步，因此每个USB帧中捕捉的数据量将有所不同。该问题留给主机处理。输入FIFO有两个标记，即下限阈值（THRESHOLD_LOW_VAL）和上限阈值

（THRESHOLD_HIGH_VAL）。有三个寄存器用于确定每个帧中要返回多少数据。如果FIFO中的数据量超过上限阈值，则发送HI_PKT_SIZE大小的数据。如果数据介于上限阈值与下限阈值之间，则发送正常MID_PKT_SIZE大小的数据。如果数据低于下限阈值，则发送LO_PKT_SIZE大小的数据。

ISOC数据包间隔 = 1 ms

1 ms中记录的采样数 = (采样频率 / 1000)

ISOC_IN_FIFO包含512个元素，相关设置请参见表13。

FIFO可容纳的数据包数 = 512 / (1 ms中的采样数)

填充的数据量至少需要达到FIFO大小的50%。之后，才会开始通过USB ISOC端点进行传输。FIFO的输入开始阈值可在表16寄存器的IN_START_THRESHOLD参数中配置。

$IN_START_THRESHOLD = (FIFO\ 可\ 容纳\ 的\ 数据\ 包\ 数 / 2) * (每\ 毫\ 秒\ 的\ 采\ 样\ 数)$

AN3135

设计允许的最大漂移为 1 ms。为了监视该漂移，FIFO 标记了上限阈值和下限阈值。

$IN_FIFO_HIGH_THRESHOLD = (IN_START_THRESHOLD - \text{每毫秒的采样数})$

$IN_FIFO_HIGH_THRESHOLD = (IN_START_THRESHOLD + \text{每毫秒的采样数})$

注：关于如何配置阈值，请参见表 16 和表 17。

1.2.5.3 计算 ISOC 输入端点数据包大小

当数据介于上限阈值与下限阈值之间时，ISOC 输入端点的正常数据包大小为 MIDSIZE_PACKET。

$MIDSIZE_PACKET = (\text{每毫秒的采样数} * \text{音频通道数} * \text{每次采样的字节数})$ 。

可通过加减微型帧间隔中记录的采样数来调整漂移。

$HIGH_SIZE_PACKET = (MID_SIZE_PACKET + \text{每 } 125 \mu\text{s} \text{ 的采样数} * \text{音频通道数} * \text{每次采样的字节数})$

1.2.6 修改 12S 波特率

在 I2S 主模式下，使用 MCLK 作为源时钟来生成 I2S_SCLK 和 I2S_LRCLK。

$SCLK \text{ 频率} = (\text{采样频率} * \text{每次采样的位数} * \text{音频中的通道数})$

关于如何配置分频系数，请参见表 21。

1.2.7 修改编解码器初始化

音频编解码器与 UDC 之间通过以下两个协议建立通信：

- 1) 用于传输音频数据的 I2S 接口。
- 2) 用于执行初始化和控制操作的 I2C 接口。

1.2.7.1 修改编解码器初始化

外部编解码器芯片在初始化阶段通过 I2C 接口进行配置。初始化过程即为编解码器数据手册中给出的一系列寄存器配置。

编解码器初始化缓冲区的存储空间最多可存储 75 个 I2C 事务的数据。每个此类 I2C 事务最多可包含 11 个字节的数据（不包括从器件地址）。

表 8 给出了编解码器初始化缓冲区的构成。字节 0 位域指示相应 I2C 事务中将包含的数据字节数。

默认情况下，器件固件将在编解码器初始化缓冲区中包含一系列事务。并非所有器件的寄存器值及其写入顺序都是相同的，具体可能因固件版本而异。在开发针对编解码器初始化缓冲区的一系列事务时，建议通过 I2C 分析器观察 I2C 总线上的默认初始化序列。此操作将呈现编解码器初始化缓冲区的默认内容。如果不需要其中的任何默认事务，可通过在缓冲区中覆盖该事务将其删除。最佳做法是始终创建长度等于或大于默认列表的完整事务列表。

表 8： 编解码器初始化缓冲区

基址： 0xBFD23C00

偏移地址	字节 0——（最大为 11）	字节 1 至字节 11
0x00	事务 1 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
0x0C	事务 2 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
0x18	事务 3 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
:	事务 4 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
:	事务 5 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
:	事务 6 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
:	事务 7 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据
	
0x378	事务 75 的长度	编解码器中的寄存器地址 + 要配置的数据

1.2.7.2 编解码器访问信息

编解码器信息缓冲区包含：

- 指向编解码器音量和静音寄存器的指针，在通过主机执行音量更改和静音操作时会访问这些指针。
- 音量范围和音量分辨率信息，这些信息在收到Get_Max、Get_Min和Get_Resolution请求时发送到主机。

表9： 编解码器信息缓冲区

基址： 0xBF23780

位域	地址偏移量	大小（字节）	值
扬声器左声道音量控制——寄存器地址	0	4	扬声器左声道音量控制的编解码器寄存器地址
扬声器右声道音量控制——寄存器地址	4	4	扬声器右声道音量控制的编解码器寄存器地址
扬声器左声道静音——寄存器地址	8	4	扬声器左声道静音控制的编解码器寄存器地址
扬声器右声道静音——寄存器地址	0x0c	4	扬声器右声道静音控制的编解码器寄存器地址
扬声器音量分辨率值（dB）	0x10	4	音量能够产生的最小变化（用dB表示）。 （十六进制值采用IEEE754表示法）
保留	0x14	8	NA
I2C控制接口——要使用的时钟频率	0x1C	2	值： 1) 400 kHz时为0x0A0D 2) 100 kHz时
扬声器能够产生的最小音量	0x1E	2	编解码器支持的最小音量（dB）
扬声器能够产生的最大音量	0x20	2	编解码器支持的最大音量（dB）
0 dB音量对应的寄存器值	0x22	2	为使扬声器中产生0 dB音量而需配置的编解码器音量寄存器值
要设置的左声道初始音量	0x24	2	左声道的初始音量值（dB）
要设置的右声道初始音量	0x26	2	右声道的初始音量值（dB）
RESERVED2	0x28	2	NA
编解码器的I2C从器件地址	0x2C	1	编解码器的7位硬件从器件地址
初始化序列计数	0x2D	1	指定“编解码器初始化缓冲区”中包含的事务数（十六进制数）
编解码器寄存器地址宽度	0x2E	1	1——字节 2——字（2个字节） 4——双字（4个字节）
编解码器寄存器值位域宽度	0x2F	1	1——字节 2——字（2个字节） 4——双字（4个字节）
编解码器音量寄存器位大小	0x30	1	（左/右声道）音量控制寄存器中用作音量位域的位数

AN3135

表9: 编解码器信息缓冲区

基址: 0xBFD23780

位域	地址偏移量	大小 (字节)	值
编解码器静音寄存器位值	0x31	1	0——逻辑高电平表示静音 (或者) 1——逻辑低电平表示静音
编解码器左声道音量控制寄存器中的左声道音量位域的起始位	0x32	1	起始位值
编解码器右声道音量控制寄存器中的右声道音量位域的起始位	0x33	1	起始位值
编解码器左声道静音控制寄存器中的左声道静音位域的起始位	0x34	1	起始位值
编解码器右声道静音控制寄存器中的右声道静音位域的起始位	0x34	1	起始位值
ADAU1961	0x35	1	1——编解码器为ADAU1961 0——使用其他编解码器

1.2.7.3 音量控制参数

编解码器通常具有用于控制音量的寄存器。

表 10 以 AK4642EN 编解码器为例，对寄存器值与音量 (dB) 的关系进行了说明。

表 10: AK4642EN 的音量控制参数

DVL/R7-0	增益 (dB)	编解码器访问信息缓冲区中需要的参数
00H	+12.0 dB	扬声器能够产生的最大音量
01H	+11.5 dB	—
02H	+11.0 dB	—
:	:	—
18H	0 dB	0 dB 音量对应的寄存器值
:	:	—
FDH	-114.5 dB	—
FEH	-115.0 dB	扬声器能够产生的最小音量

从表 10 中可以推断出以下信息：

1. 音量随寄存器值的减小而增大（成反比）。默认情况下，Microchip I2S 桥接器不支持此类编解码器，需要使用 OTP 补丁才能支持。默认固件后续将支持寄存器值与音量成正比的编解码器。
2. 寄存器值与音量成线性关系。默认固件仅支持音量与寄存器值成线性关系的编解码器。如果二者成非线性关系，则需要使用 OTP 补丁。
3. 音量分辨率为 0.5 dB。

1.2.8 其他设置

1.2.8.1 使能和禁止 I2S 桥接器接口

I2S 桥接器能够控制更多设置：

表 11： 使能/禁止 I2S

地址：0xBFD23412；大小：1 字节

设置	值
禁止 USB 转 I2S 桥接器	0x00
仅音频输入模式	0x01
仅音频输出模式	0x02
音频输入和输出模式	0x03 (默认)

表 12： 使能/禁止 MIKE_DETECT 的 HID 接口

地址：0xBFD23413；大小：1 字节

设置	值
禁止麦克风检测 HID 接口	0x00
静音/取消静音音频输入模式	0x01
静音/取消静音音频输出模式	0x02
静音/取消静音音频输入和输出模式	0x03 (默认)

1.2.8.2 修改 I2S 模式

1.2.8.3 I2S 模式

在 I2S 模式下，发送器在 LRC 跳变后的第一个 SCK 下降沿驱动音频数据的 MSB。接收器在第二个 SCK 上升沿采样 MSB。当 LRC 为低电平时，发送左声道数据；当 LRC 为高电平时，发送右声道数据。每个帧都是先发送左声道后发送右声道数据。

要符合 I2S 标准，SPIxCON2 中的配置位必须按如下设置：

AUDMOD = 00, FRMPOL = 0, CKP = 1。

这些值将使 SDO 和 LRC 在 SCK 下降沿发生跳变，并使 SDI 在 SCK 上升沿进行采样，另外还会在 LRC 下降沿跳变时启动帧。表 22 的寄存器中包含寄存器配置位域。

1.2.8.4 左对齐模式

在左对齐模式下，发送器在 LRC 跳变时出现的 SCK 边沿驱动音频数据的 MSB。接收器在下一个 SCK 边沿采样 MSB。通常，使用对齐协议的编解码器默认在 SCK 上升沿发送数据，在 SCK 下降沿接收数据。另外，当 LRC 为高电平时，发送左声道数据；当 LRC 为低电平时，发送右声道数据，这一点与 I2S 模式相反。不过，每个帧依旧是先发送左声道后发送右声道数据。

要符合左对齐标准，SPXixCON 中的配置位必须按如下设置：

AUDMOD = 01, FRMPOL = 1, CKP = 0。

表 22 的寄存器中包含这些位域。

1.2.8.5 右对齐模式

在右对齐模式下，发送器在 SCK 的第 n 个发送边沿驱动音频数据的 MSB，以便使 LSB 出现在 LRC 跳变前的 SCK 接收边沿。当设置为发送 (DISSDO = 0) 时，该器件使用逻辑低电平驱动未使用的位槽 (bit slot) (音频之前)。当设置为接收 (DISSDI = 0) 时，该器件将忽略未使用的位槽。右对齐模式的配置如下：

AUDIOD = 10, FRMPOL = 1, CKP = 0。

表 22 的寄存器中包含这些位域。

1.2.8.6 配置单声道音频模式

音频协议功能可在左右声道同时发送单声道音频数据。当AUDMONO = 1时，移位寄存器使用每个FIFO存储单元两次，从而使两个通道具有相同的单声道音频数据流。当AUDMONO = 0时，移位寄存器使用每个FIFO存储单元一次，从而使两个通道具有不同的立体声音频数据流。接收数据不受AUDMONO的影响。

表22的寄存器中包含该位。

AN3135

1.2.9 配置寄存器

表 13: SPIXCON 寄存器

地址: 0xBF80A040

位位置	位域	权限	说明
31	frmen	保留	严禁修改
30	frmsync	保留	严禁修改
29	frmpol	保留	严禁修改
28	mssen	保留	严禁修改
27	frmsypw	保留	严禁修改
26:24	frmcnt	保留	严禁修改
23	mciken	保留	严禁修改
22:18	reserved_22_18	保留	严禁修改
17	spife	保留	严禁修改
16	enhbuf	保留	严禁修改
15	on	保留	严禁修改
14	frz	保留	严禁修改
13	sidl	保留	严禁修改
12	disssdo	保留	严禁修改
11:10	FIFO 元素模式	RW - 注: 为了避免更改保留位, 应使用 MPLAB® Connect 的 SetBit 和 ClearBit 功能	11 => 32 位 FIFO 元素, 音频采样有效大小 = 24 位, 每个通道的位数 = 32 (见 USB 音频描述符中的 SubFrameSize) 10 => 32 位 FIFO 元素, 音频采样有效大小 = 32 位, 每个通道的位数 = 32 (见 USB 音频描述符中的 SubFrameSize) 01 => 16 位 FIFO 元素, 音频采样有效大小 = 16 位, 每个通道的位数 = 32 (见 USB 音频描述符中的 SubFrameSize) 00 => 16 位 FIFO 元素, 音频采样有效大小 = 16 位, 每个通道的位数 = 16 (见 USB 音频描述符中的 SubFrameSize)
9	smp	保留	严禁修改
8	cke	保留	严禁修改
7	ssen	保留	严禁修改
6	ckp	保留	严禁修改
5	msten	保留	严禁修改
4	disssdi	保留	严禁修改
3:2	stxisel	保留	严禁修改
1:0	srxisel	保留	严禁修改
31	fifo_full	RO	
30	fifo_threshold_high	RO	
29	fifo_threshold_low	RO	
28	fifo_empty	RO	
27:19	threshold_high_val	RW	OUT_FIFO_HIGH_THRESHOLD
18:10	threshold_low_val	RW	OUT_FIFO_LOW_THRESHOLD
9:0	occupied	RO	

表14: OUT_FIFO_THRESHOLD_CTL

地址: 0xBF80A000

位位置	位域	权限	说明
31	out_enable	RW	严禁修改
30	out_started	RW	严禁修改
29:13	reserved_29_13	RO	严禁修改
12	out_swap	RW	严禁修改
11	mcu_access_enable	RW	严禁修改
10	dma_access_enable	RW	严禁修改
9	enable	RW	严禁修改
8:0	out_threshold_start	RW	OUT_THRESHOLD_START

表15: OUT_FIFO_START_CTL

地址: 0xBF80A004

位位置	位域	权限	说明
31	out_enable	RW	严禁修改
30	out_started	RW	严禁修改
29:13	reserved_29_13	RO	严禁修改
12	out_swap	RW	严禁修改
11	mcu_access_enable	RW	严禁修改
10	dma_access_enable	RW	严禁修改
9	enable	RW	严禁修改
8:0	out_threshold_start	RW	OUT_THRESHOLD_START

表16: IN_FIFO_START_CTL

地址: 0xBF80A004C

位位置	位域	权限	说明
31	in_enable	RW	严禁修改
30	in_started	RW	严禁修改
29:13	reserved_29_13	RO	严禁修改
12	in_swap	RW	严禁修改
11	mcu_access_enable	RW	严禁修改
10	dma_access_enable	RW	严禁修改
9	enable	RW	严禁修改
8:0	in_threshold_start	RW	IN_THRESHOLD_START

AN3135

表17: IN_FIFO_THRESHOLD_CTL

地址: 0xBF80A008

位位置	位域	权限	说明
31	fifo_enable	RO	—
30	fifo_threshold_high	RO	—
29	fifo_threshold_high	RO	—
28	fifo_empty	RO	—
27:19	threshold_high_val	RW	IN_FIFO_HIGH_THRESHOLD
18:10	threshold_low_val	RW	IN_FIFO_LOW_THRESHOLD
9:0	occupied	RO	—

表18: IN_ENDPOINT_HIGHPACKET_SIZE

地址: 0xBF80A010

位位置	位域	权限	说明
31:10	reserved_31_10	RO	写0
9:0	hi_pkt_size	RW	HIGH_PACKET_SIZE

表19: IN_ENDPOINT_MIDPACKET_SIZE

地址: 0xBF80A014

位位置	位域	权限	说明
31:10	reserved_31_10	RO	写0
9:0	mid_pkt_size	RW	MID_PACKET_SIZE

表20: IN_ENDPOINT_LOWPACKET_SIZE

地址: 0xBF80A014

位位置	位域	权限	说明
31:10	reserved_31_10	RO	写0
9:0	low_pkt_size	RW	LOW_PACKET_SIZE

表21: I2S_BAUDRATE_GENERATOR

地址: 0xBF80A070

位位置	位域	权限	说明
31:10	reserved_31_13	RO	保留, 写0
9:0	BRG	RW	BRG值满足以下关系: 波特率 = (MCLK频率) / (2 * (BRG + 1))

表22: SPICON2

地址: 0xBF80A080

位位置	位域	权限	说明
31:16	Reserved_31_16	RO	严禁修改
15	spisgnext	RW	严禁修改
14:13	Reserved_14_13	RW	严禁修改
12	frmerren	RW	严禁修改
11	spiroven	RO	严禁修改
10	spituren	RW	严禁修改
9	ignrov	RW	严禁修改
8	igntur	RW	严禁修改
7	auden	RW	严禁修改
6:4	Reserved_6_4	RO	严禁修改
3	audmono	RW	1 = 音频数据为单声道 (每个数据字在左右声道同时发送) 0 = 音频数据为立体声
2	Reserved_2	RO	严禁修改
1:0	audmod	RW	音频协议模式 11 = PCM/DSP 模式 10 = 右对齐模式 01 = 左对齐模式 00 = I2S 模式

1.3 编解码器配置示例——遵循相应准则

默认情况下，I2S桥接器针对ADAU1961编解码器进行配置，如表23所示。表24说明了如何针对备选编解码器AK4642EN配置I2S桥接器。

表23: ADAU1961编解码器的初始化序列

地址	字节0 (I2C事务的长度)	字节1 (AKM编解码器中的寄存器地址)	字节2 (寄存器配置值)
0x00	2	0x5	0x23
0x0C	2	0x0F	0x1
0x18	2	0x0E	0x1
0x24	2	0x9	0x91
0x30	2	0x0C	0x91
0x3c	2	0x0A	0x18
0x48	2	0x0D	0x18
0x54	2	0x0	0x6D
0x60	2	0x1	0x39
0x6c	2	0x1	0x79
0x78	2	0x2	0x14
0x84	2	0x4	0x3
0x90	2	0x10	0x27

表24: 编解码器信息缓冲区 (适用于AK4642EN)

位域	偏移地址	值	说明
扬声器左声道音量控制——寄存器地址	0	0xA	AK4642_REG_LDAC_VOL
扬声器右声道音量控制——寄存器地址	4	0x0D	AK4642_REG_RDAC_VOL
扬声器左声道静音——寄存器地址	8	0x0E	AK4642_REG_MODE_CTRL3
扬声器右声道静音——寄存器地址	0x0c	0x0E	AK4642_REG_MODE_CTRL3
扬声器音量分辨率值 (dB)	0x10	0.5 dB	音量分辨率为0.5 dB (十六进制值采用IEEE754表示法, https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html)
保留	0x14	NA	保留
I2C控制接口——要使用的时钟频率	0x1C	0x0A0D	400 kHz I2C 频率
扬声器能够产生的最小音量	0x1E	-115 dB	可达到的最小音量为-115 dB
扬声器能够产生的最大音量	0x20	12 dB	0 dB 音量对应音量控制寄存器中的值12
0 dB 音量对应的寄存器值	0x22	12 dB	0 dB 音量对应音量控制寄存器中的值12
要设置的左声道初始音量	0x24	0x60	-9 dB为初始音量

表24: 编解码器信息缓冲区 (适用于AK4642EN)

位域	偏移地址	值	说明
要设置的右声道初始音量	0x26	0x60	-9 dB为初始音量
RESERVED2	0x28	NA	保留
外部编解码器的I2C从器件地址 (7位地址)	0x2C	0x13	AKM编解码器的从器件地址
初始化序列计数	0x2D	13	初始化AKM编解码器所需的I2C事务数
编解码器寄存器地址宽度	0x2E	1	编解码器寄存器宽度为1字节
编解码器寄存器值位域宽度	0x2F	1	编解码器寄存器地址大小为1字节
编解码器音量寄存器位大小	0x30	8	扬声器音量为8位寄存器值范围0-255
编解码器静音寄存器位值	0x31	1	0——该位设置为逻辑高电平时实现静音 1——该位设置为逻辑低电平时实现静音
编解码器左声道音量控制寄存器中的左声道音量位域的起始位	0x32	0	起始位为Bit 0
编解码器右声道音量控制寄存器中的右声道音量位域的起始位	0x33	0	起始位为Bit 0
编解码器左声道静音控制寄存器中的左声道静音位域的起始位	0x34	5	静音位置为Bit 5
编解码器右声道静音控制寄存器中的右声道静音位域的起始位	0x35	5	静音位置为Bit 5
编解码器是否为ADAU 1961	0x36	0	0——其他编解码器芯片

注: 在AK4642中, 音量随寄存器值的增大而减小, USB49xx不支持此功能。需要使用固件OTP补丁修复音量控制操作, 这部分内容不在本文档的讨论范围内。

1.4 更改音频采样频率的配置示例

表25给出了将采样频率更改为8 kHz的示例。

表25: 将采样频率更改为8 kHz

参数	地址	大小 (字节)	值	含义	说明
USB 音频描述符相关的更改					
tSamFreq (I2S 输入)	0xBF80240F2	3	40 1F 00	8 kHz	输入方向采样频率
tSamFreq (I2S 输出)	0xBF80240BE	3	40 1F 00	8 kHz	输出方向采样频率
输入方向最大数据包大小	0xBF80240F9	2	0x28 0x00	40 字节	端点描述符的最大数据包大小
输出方向最大数据包大小	0xBF80240C5	2	0x28 0x00	40 字节	端点描述符的最大数据包大小
I2S 输入方向以 8 kHz 工作时的寄存器设置					
输入起始阈值	0xBF80A002	4	0x00 0x07 0x00 0xc0	256 次采样	Bit 0-8 为起始阈值
输入上限阈值	0xBF80A008	4	0x00 0xE0 0x43 0x08	264 次采样	Bit 19-27 为上限阈值
输入下限阈值				248 次采样	Bit 10-18 为下限阈值
输入中等数据包大小	0xBF80A014	4	0x20	32 字节	—
输入最大数据包大小	0xBF80A010	4	0x24	36 字节	—
输入最小数据包大小	0xBF80A018	4	0x1C	28 字节	—
I2S 输出方向以 8 kHz 工作时的寄存器设置					
输出起始阈值	0xBF80A004	4	0x00 0x07 0x00 0x00	256 次采样	Bit 0-8 为起始阈值
输出上限阈值	0xBF80A000	4	0x00 0xE0 0x43 0x08	248 次采样	Bit 19-27 为上限阈值
输出下限阈值				264 次采样	Bit 10-18 为下限阈值
以 8 kHz 工作时的频率相关寄存器设置					
REFOCONN	0xBF80A030	4	0x03 0x10 0x09 0x00	ON 位和活动 位清零	第 1 步 => 使能寄存器写操作
REFOCONN	0xBF80A030	4	0x03 0x10 0x3A 0x00	—	配置整数分频比
REFOTRIM	0xBF80A034	4	0x00 0x00 0x00 0x98	—	配置小数分频比
REFOCONN	0xBF80A030	4	0x03 0x91 0x3A 0x00	—	激活寄存器设置 (寄存器再次被写保护)
SPIXBRG	0xBF80A070	1	0x03	—	波特率配置寄存器

注: 本示例中不包含与 8 kHz 采样频率相关的编码更改。

1.5 不支持的特性汇总

- 1) I2S 桥接器仅支持 USB 音频类 1.0，不支持 USB 音频类 2.0。
- 2) 编解码器必须具备用于控制的 I2C 从接口。其他控制接口（例如 SPI）不受支持。
- 3) 不支持麦克风音频输入的音量控制。

AN3135

附录 A: 应用笔记版本历史

表 A-1: 版本历史

版本与日期	节/图/条目	更正
DS00003135A (2019年7月3日)	全部	初始版本

注:

MICROCHIP 网站

Microchip 网站 (www.microchip.com) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持** —— 数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持** —— 常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务** —— 产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

变更通知客户服务

Microchip 的变更通知客户服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 <http://microchip.com/support> 获得网上技术支持。

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点:

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信: 在正常使用且符合工作规范的情况下, Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为, 这种行为可能会违反《数字千年版权法案》(Digital Millennium Copyright Act)。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展之中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分, 因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品, 包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他任何方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利, 将来可能会发生更新。如需额外的支持, 请联系当地的 Microchip 销售办事处, 或访问 <https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices>。

Microchip “按原样” 提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保, 包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保, 或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下, 对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销, **Microchip 概不承担任何责任, 即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内, 对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔, Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额 (如有)。**如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用, 一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时, 会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明, 在 Microchip 知识产权保护下, 不得暗或以其他方式转让任何许可证。

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息, 请访问 www.microchip.com/quality。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、Liberio、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQL、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2023, Microchip Technology Incorporated 及其子公司版权所有。

ISBN: 978-1-6683-0899-8

全球销售及服务中心

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:
<http://www.microchip.com/support>

网址: www.microchip.com

亚特兰大 **Atlanta** Duluth, GA

Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 **Austin, TX** Tel: 1-512-257-3370

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX
Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC
Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto
Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

澳大利亚 **Australia - Sydney**
Tel: 61-2-9868-6733

印度 **India - Bangalore**
Tel: 91-80-3090-4444

印度 **India - New Delhi**
Tel: 91-11-4160-8631

印度 **India - Pune**
Tel: 91-20-4121-0141

日本 **Japan - Osaka**
Tel: 81-6-6152-7160

日本 **Japan - Tokyo**
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 **Korea - Daegu**
Tel: 82-53-744-4301

韩国 **Korea - Seoul**
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚
Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 **Malaysia - Penang**
Tel: 60-4-227-8870

菲律宾 **Philippines - Manila**
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 **Singapore**
Tel: 65-6334-8870

泰国 **Thailand - Bangkok**
Tel: 66-2-694-1351

越南 **Vietnam - Ho Chi Minh**
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

奥地利 **Austria - Wels**
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦
Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 **Finland - Espoo**
Tel: 358-9-4520-820

法国 **France - Paris**
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 **Germany - Garching**
Tel: 49-8931-9700
德国 **Germany - Haan**
Tel: 49-2129-3766400

德国 **Germany - Heilbronn**
Tel: 49-7131-72400

德国 **Germany - Karlsruhe**
Tel: 49-721-625370

德国 **Germany - Munich**
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

德国 **Germany - Rosenheim**
Tel: 49-8031-354-560

以色列 **Israel - Ra'anana**
Tel: 972-9-744-7705

意大利 **Italy - Milan**
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

意大利 **Italy - Padova**
Tel: 39-049-7625286

荷兰 **Netherlands - Drunen**
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

挪威 **Norway - Trondheim**
Tel: 47-7288-4388

波兰 **Poland - Warsaw**
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚
Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

西班牙 **Spain - Madrid**
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

瑞典 **Sweden - Gothenberg**
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 **Sweden - Stockholm**
Tel: 46-8-5090-4654

英国 **UK - Wokingham**
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820