

使用 PWM 控制数字 CPLD 的模拟输出

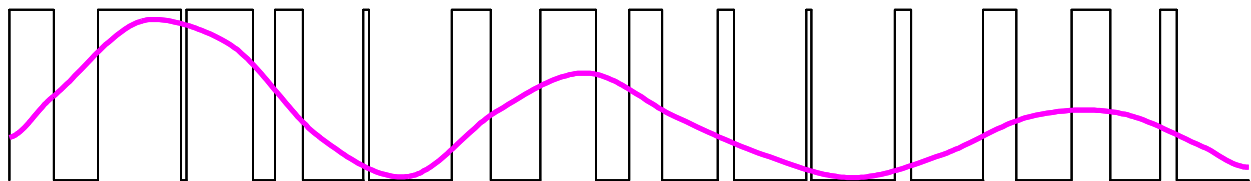
Altera® MAX® IIZ CPLD 虽然是数字可编程逻辑器件，但通用性很强，足以控制模拟系统。本白皮书介绍怎样单独使用 MAX IIZ CPLD 或者结合少量无源器件，替代数模转换器，驱动音频扬声器，控制 LED 亮度、电机速度以及伺服电机位置等。白皮书还将介绍脉冲宽度调制 (PWM) 技术，以及怎样在 MAX IIZ CPLD 中高效实现并使用 PWM。

引言

脉冲宽度调制器 (PWM) 是从数字元件中产生模拟输出的常用方法。PWM 替代数模转换器 (DAC)，产生与数字输入成比例的模拟电压或者电流。正如其名称所示，PWM 产生一串恒压或者恒流数字脉冲，脉冲宽度或者占空比与需要的模拟强度成正比。调制后的脉冲串可以通过低通滤波器，转换为模拟电压，但是一般不需要这样做。

图 1 是典型的模拟信号和数字 PWM 表示。一般而言，模拟信号有最大振幅、最小振幅，以及期间的连续电平。而 PWM 只有两个电平：最大和最小。

图 1. 模拟信号和等价的脉冲宽度调制



在将模拟信号转换为数字信号时，首先以载波频率对模拟信号进行采样。在一定采样周期下，模拟信号下的面积等于 PWM 脉冲下的面积。PWM 的关键原理是最大振幅时的短脉冲所含有的能量等于小振幅时连续模拟信号的能量。这一简单的公式决定了 PWM 电路所需要的采样频率：

$$F_{SAMPLE} = 2 \times F_{RANGE}$$

其中， F_{SAMPLE} 是模拟信号被转换成数字信号的频率， F_{RANGE} 是模拟信号被 PWM 再现的最大频率。在音频范围，电话是 4 KHz，而 MP3 播放器是 20 KHz。公式中的“2”来自 Nyquist 频率，它是从数字采样中再现模拟信号所需要的过采样率。

下一步是产生时钟来驱动 PWM 频率间隔。下面的公式决定了 PWM 频率：

$$F_{PWM} = 2 \times F_{RANGE} \times R$$

其中， F_{PWM} 是驱动 PWM 模块的频率， R 是分辨率。分辨率一般是 $2N$ 倍 (其中， N = 数字数据流字中的位数)，而对于要使用的 MAX IIZ PWM，任意分辨率都可以。

PWM 模拟输出应用

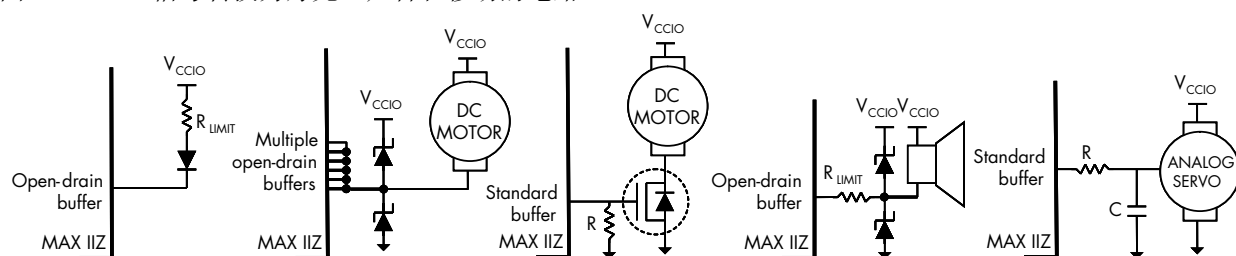
MAX IIZ PWM 三种最常用的模拟应用是 LED 驱动器、音频输出和电机控制。在这些应用中，MAX IIZ CPLD 可以控制灯光、声音和移动，实现以下功能：

- 灯光
 - 控制 LED 闪烁强度，以节省能源。
 - 显示背光强度
 - 三色 LED 颜色混合
- 声音

- 音频回放
- 声音报警消息
- 铃声和声响效果
- 键盘点击和音调
- 移动
 - 电机
 - 电话振动器
 - 游戏移动反馈
 - 控制报警振动
 - 散热风扇控制
 - 键盘触摸反馈
 - 伺服电机
 - 模拟控制电压
 - 数字控制脉冲

图 2 显示了怎样简单方便地连接 MAX IIZ CPLD 和 LED、扬声器或者电机。一般而言，只需要少量的外部元件。通常对 PWM 输出的误解是在使用它之前，必须通过某类滤波器将数字信号转换回模拟信号。在下面的例子中，只有模拟伺服电机需要滤波器。

图 2. PWM 信号转换为灯光、声音和移动的电



灯光

控制灯亮度的 PWM 是最容易理解的一种功能。人眼不能探测闪烁频率高于 240 Hz (4.2 ms 的周期) 的灯光，但是能够区别出数千个亮度级。在 4.2 ms 周期中，LED 接通时间百分比可以小到只有 0.01%，即 4.2 us，灯看起来只是比较暗，而没有闪烁。50% 占空比，即 2.1 ms 时，亮度看起来只有一半，而 100% 占空比时最亮。采用限流电阻来避免出现最亮输出，防止损害 LED 和 MAX IIZ I/O 缓冲。MAX IIZ CPLD 采用了 8-mA I/O 电流设置，限制输出电流，在材料表 (BOM) 中可以去掉一个电阻。

电机

MAX IIZ CPLD 可以直接驱动某些电机。一些微动电机有很大的失速电流，工作电流小于 100 mA，共用 PWM 信号可以驱动多路邻近输出。例如，微动电机的最大电流为 95 mA。每个 MAX IIZ I/O 额定为 16-mA 驱动。因此，6 个开漏 I/O 一起驱动电机，不会损害 MAX IIZ CPLD。

电机驱动电路电源和地采用了两个肖特基二极管。这些二极管一般为反向偏置，但在电源掉电，或者控制器断电后电机仍在运行时，它们会钳位由电机绕组产生的过冲或者下冲电压尖峰。图 2 显示了怎样使用金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 来驱动大功率电机。MOSFET 栅极上的下拉电阻使电机在电路板上电和断电期间保持停止状态。

PWM 速率控制非常简单。送给电机的能量为：

$$\text{电压} \times \text{电流} \times \text{时间} = \text{焦耳}$$

在一定的采样周期中，如果平均电压是最大值的 50%，或者在 50% 的采样周期中为最大值，那么，电机功率和 RPM 将不变。对于电机驱动器，建议的采样周期为：

$$F_{SAMPLE} = 1 / (2 \times (RPM_{MAX} / 60))$$

保持高于这一频率可以避免出现能够察觉到的振动。此外，在速度和功率控制中，可以采用小到只有 0.01% 的 PWM 分辨率。

声音

可能需要在音频输出（扬声器或者耳机）电路上加入限流串联电阻。由于扬声器是线圈绕组，因此，采用肖特基钳位二极管来防止绕组放电过冲和下冲非常重要，以避免损害 MAX IIZ I/O。常见的一种错误概念是音频输出需要滤波器将数字 PWM 信号转换为模拟电压。扬声器这种设备类似于电机，喇叭传给空气分子的能量也是：

$$\text{电压} \times \text{电流} \times \text{时间} = \text{焦耳}$$

在一定的采样周期中，如果平均电压是最大值的 50%，或者在 50% 的采样周期中为最大值，那么，扬声器产生音频压缩波形的能力是相同的。44.1 KHz 的 PWM 载波产生 CD 质量的频率范围，MPEG 音频为 11 KHz，而 8 KHz 用于数字电话应用。多个开漏 I/O 一起提高了 PWM 驱动扬声器的功率输出。对于音频 PWM 系统，控制使能的 I/O 数量能够直接控制音量。

伺服电机

传统的模拟伺服电机臂位置与伺服电机电源和地之间的控制电压成正比。通过低通 RC 滤波器，PWM 输出被转换为稳定的 DC 电压，设计的 RC 滤波值应具有与 PWM 采样频率相等的低通截止频率：

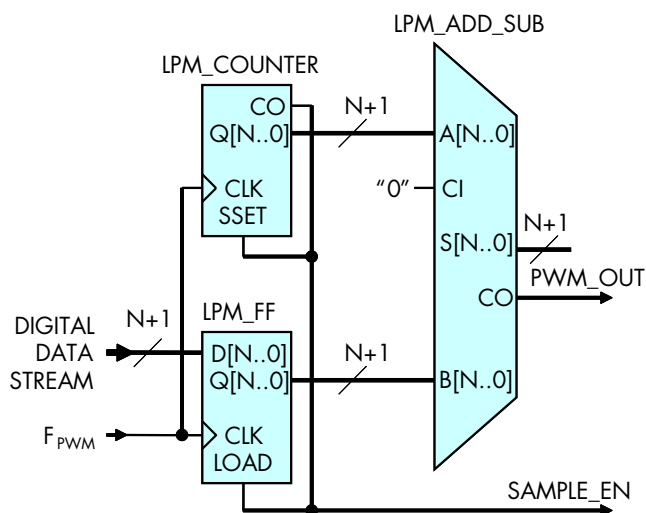
$$F_{SAMPLE} = 1 / (2 \times \pi \times R \times C)$$

小于 F_{SAMPLE} 的截止频率提高了稳定性，但是减小了响应时间，而大于 F_{SAMPLE} 的截止频率增大了抖动，但是减小了建立时间。新一代伺服电机使用数字脉冲宽度技术来指定伺服电机臂角度，因此，MAX IIZ PWM 可以直接驱动数字伺服电机。

实现 PWM

和其他 CPLD 体系结构相比，MAX IIZ 体系结构能够更高效地支持算术函数。字宽每比特只需要一个逻辑单元 (LE) 就可以实现计数器和加法器，MAX IIZ CPLD 的可编程特性使其很容易实现任意宽度和计数长度的计数器。图 3 所示为 MAX IIZ PWM 的三个组成部分，采用了 Quartus® II 软件的参数化宏库 (LPM) 来构建。使用 Quartus II 软件中的 GUI 工具来开发这些 LPM 模块——LPM_FF、LPM_COUNTER 和 LPM_ADD_SUB，该软件生成 Verilog、VHDL 和 AHDL 文件格式。 F_{PWM} -Hz 时钟源为 PWM 提供时钟。

图 3. MAX IIZ PWM



LPM_FF 中保持的数字值由 PWM 转换为模拟值。当 SAMPLE_EN 信号是 “1” 时，LPM_FF 被装入，根据数字数据流位宽来设置其宽度。

LPM_COUNTER 是二进制计数器，能够由 SSET 信号同步设置为任意起始值，典型值一般是 “0”。当计数器达到最大计数时，LPM_COUNTER 进位输出 (CO) 为 “1”。LPM_COUNTER CO 产生采样使能信号 SAMPLE_EN。采样周期一般是：

$$2^{(N+1)} / F_{PWM}$$

但是对于同步设置值，可以在 LPM_COUNTER MegaWizard® 插件中定制。可以将同步设置值分配为下面的值来实现分辨率为 M 级的 PWM：

$$2^{(N+1)} - M - 1$$

使用非 2^N 分辨率的例子包括以 1% 步长来控制 LED 亮度，使亮度从 0 增大到 100%，这需要 7 位计数器，其 M 值为 27。控制伺服电机臂以 1° 步长从 0° 移动到 245° 需要 8 位计数器，其 M 值为 10。

LPM_ADD_SUB 是二进制加法器，使用 LPM_COUNTER 和 LPM_FF 输出作为 “A” 和 “B” 输入。LPM_ADD_SUB 进位输入 (CI) 是常数 “0”，没有使用 LPM_ADD_SUB SUM 输出，PWM 输出 (PWM_OUT) 是 LPM_ADD_SUB CO。下面的三个例子解释了这一简单结构是怎样用于 4 位 PWM 的。

- 当 LPM_FF 采样是 “1” 时，LPM_COUNTER 序列从 0 到 15，因此，有 16 次加法。对于 16 个计数中的 15 个，0 至 14，加法器的 CO 是 “0”，计数值是 15 时，为 “1”，从而产生 1/16% 的占空比。
- 当 LPM_FF 采样是 “8” 时，对于计数 0 到 7，加法器的 CO 是 “0”，对于其他 8 个计数值，8 到 15，CO 是 “1”，从而产生 8/16% 的占空比。
- 当 LPM_FF 采样是 “15” 时，对于唯一的计数 0，加法器的 CO 是 “0”，剩余的其他 15 个计数值，1 到 15，CO 是 “1”，从而产生 15/16% 的占空比。

PWM 的资源利用率非常高。具有相同采样周期和分辨率的 PWM 可以共享一个 LPM_COUNTER，非 2^N 分辨率不会影响效率。表 1 列出了不同位宽所需要的 LE。

表 1. PWM LE 要求

模块	第一个 PWM*	其他 PWM ⁽¹⁾
LPM_FF	N	N
LPM_COUNTER	N	0
LPM_ADD_SUB	N	N
总计	$3N$	$2N$

注释:

(1) $N = \log_2(\text{分辨率})$

即使是最小的 MAX IIZ CPLD, EPM240Z, 也有 240 个 LE, 一个 8 位 PWM 只需要占用 MAX IIZ 资源的十分之一。十个 8 位 PWM 只需要占用 MAX IIZ 资源的 168/240。

结论

PWM 是将数字数据转换为模拟信号非常强大的工具。带有 PWM 的 MAX IIZ CPLD 能够控制系统中的所有模拟量, 包括灯光、声音和移动等。MAX IIZ 体系结构适合实现逻辑效率非常高的 PWM, 因此, 使用 PWM 输出来控制 LED、扬声器、电机和伺服电机等模拟元件时只需要少量的无源器件。

详细信息

- “数字伺服电机是怎样工作的?”:
www.servocity.com/html/how_do_servos_work_.html
- Nyquist 频率:
http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist_frequency
- 采样频率:
http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_frequency
- 资料: MAX II 器件:
www.altera.com/literature/lit-max2.jsp
 - 使用零功耗 CPLD 降低便携式应用的系统总成本:
www.altera.com/literature/wp/wp-01001-reduce-total-system-cost-in-portable-apps-using-max.pdf
 - 采用 CPLD 替代微控制器的六种方法:
www.altera.com/literature/wp/wp-01041-six-ways-to-replace-microcontroller-with-cpld.pdf
 - 使用零功耗 CPLD 有效降低便携式应用的功耗:
www.altera.com/literature/wp/wp-01042-using-zero-power-cplds-to-lower-power-in-portable.pdf
 - 使用 LED 作为亮度级传感器和发射器:
www.altera.com/literature/wp/wp-01076-led-driver-reduces-power-adjusting-intensity-ambient-light.pdf
 - 采用 CPLD 开发多点触摸屏和面板:
www.altera.com/literature/wp/wp-01086-multipoint-touchscreens-panels-cplds.pdf

致谢

- Rafael Camarota, 非易失产品线经理, 低成本产品组, Altera 公司。
- Judd Heape, 资深技术营销经理, 消费类和汽车业务部, Altera 公司。



101 Innovation Drive
San Jose, CA 95134
www.altera.com

版权 © 2008 Altera 公司。保留所有版权。Altera、可编程解决方案公司、程式化 Altera 标识、专用器件名称和其他所有专有商标或者服务标记, 除非特别声明, 均为 Altera 公司在美国和其他国家的商标和服务标记。所有其他产品或者服务名称的所有权属于其各自持有人。Altera 产品受美国和其他国家多种专利、未决应用、掩模著作权和版权的保护。Altera 保证当前规范下的半导体产品性能与 Altera 标准质保一致, 但是保留对产品和服务在没有事先通知时的变更权利。除非与 Altera 公司的书面条款完全一致, 否则 Altera 不承担由使用或者应用此处所述信息、产品或者服务导致的责任。Altera 建议客户在决定购买产品或者服务, 以及确信任何公开信息之前, 阅读 Altera 最新版的器件规范说明。