

## 音频产品 Buck 转换器设计考虑

Wiky Liao

South China

### 摘要

Buck 转换器是音频产品中不可或缺的重要器件。然而音频系统较为复杂，使得设计一颗合适的 Buck 转换器并非易事。本文从音频产品系统出发，深入分析 Buck 的输入电压、开关频率、轻载高效模式、软起动时间以及引脚布局对音频系统的影响，并对 Texas Instruments 当前新一代的 Buck 方案 – TPS6293x 进行了介绍，帮助用户打造高品质的音频产品。

### 目录

<b>1 音频系统介绍</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Buck 转换器主要指标设计考虑</b> .....	<b>3</b>
2.1 输入电压 .....	3
2.2 开关频率 .....	5
2.2.1 人耳可听频率 .....	5
2.2.2 差频干扰 .....	5
2.2.3 频率误差 .....	8
2.3 轻载高效 .....	8
2.4 软起动时间 .....	9
2.5 引脚布局 .....	10
<b>3 TPS6293x 介绍</b> .....	<b>11</b>
<b>4 总结</b> .....	<b>12</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>12</b>

### 图

<b>Figure 1. 音频系统典型框图</b> .....	<b>3</b>
<b>Figure 2. 功放驱动电路模型</b> .....	<b>4</b>
<b>Figure 3. TPA3116 输出功率和供电电压关系曲线</b> .....	<b>4</b>
<b>Figure 4. TPS54335A 差频干扰电路模型</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 5. TPS54335A 仿真波形</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 6. 输出电压频谱分析</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 7. TPS54302 开关频率范围</b> .....	<b>8</b>

<b>Figure 8. OOA 模式原理</b> .....	<b>9</b>
<b>Figure 9. 软起动仿真电路及参数设置</b> .....	<b>10</b>
<b>Figure 10. 软起动仿真波形对比</b> .....	<b>10</b>
<b>Figure 11. 引脚布局对比</b> .....	<b>11</b>
<b>Figure 12. TPS62933 引脚布局及 Layout</b> .....	<b>12</b>

## 表

<b>Table 1. TI 主流功放供电电压汇总</b> .....	<b>5</b>
<b>Table 2. TPS6293x 系列产品对比</b> .....	<b>11</b>

## 1 音频系统介绍

音频产品有较多的产品类型，如带线音箱（桌面音箱、Soundbar、监听音箱）、便携音箱（蓝牙音箱、拉杆音箱）、耳机（头戴耳机、TWS 耳机）等等。其典型系统如 Figure 1 所示。产品普遍支持多种音频源，如蓝牙、线路路输入 Line in 等等，通常需要一个 MUX（多路复用器）进行音源切换，之后通过音频 ADC 转换成 I2S 等数字音频接口，便于 DSP 进行相应的音效处理。处理完毕后通过音频 DAC 还原成模拟信号，通过音频功放来驱动扬声器发声。主控 MCU 则对整机进行基本的控制，如读取电位器位置调节音量、按键选择工作模式、LED 显示系统信息等等。

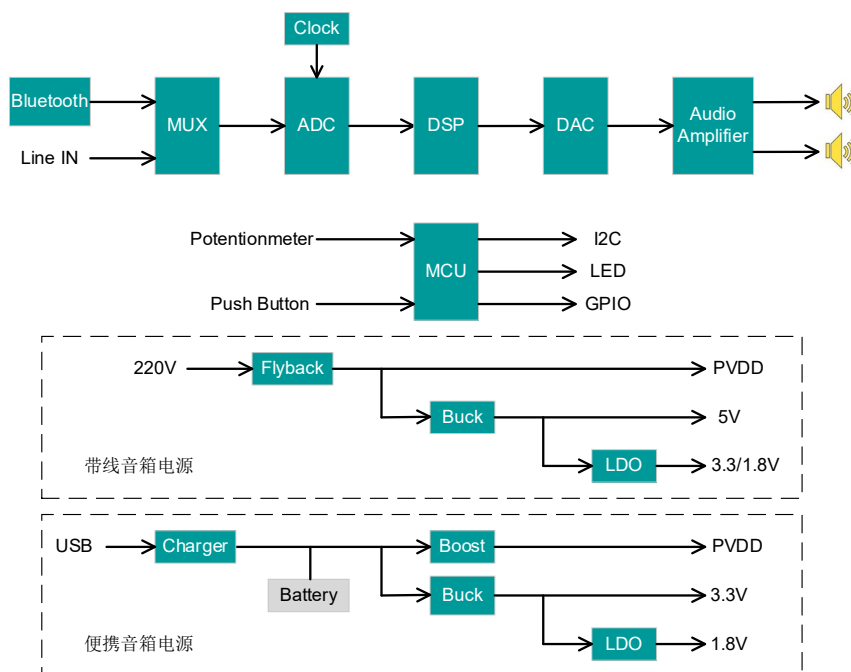


Figure 1. 音频系统典型框图

电源部分，带线音箱和便携音箱在设计上有较大差异。带线音箱需要从 220V 市电取电，一般通过反激拓扑来产生较高的直流电压给功放供电，之后通过 Buck 转换器将电压降至 5V 给模拟系统供电，再加一些 LDO 来产生 3.3V 或 1.8V 给数字部分供电。

便携音箱则因为带有电池，因此需要增加 charger 给电池充电。电池串数以一串或两串居多，电池电压较低，因此需要通过 Boost 转换器将电池电压抬高后给功放供电。而系统所需要的低压 3.3V 则由电池通过 Buck 转换器产生，再由另一颗 LDO 降至 1.8V。可以看到，无论是带线音箱还是便携音箱，Buck 都是不可或缺的重要角色。

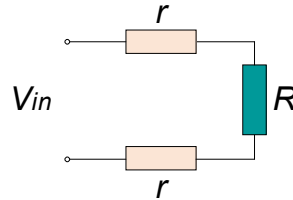
## 2 Buck 转换器主要指标设计考虑

### 2.1 输入电压

从前述的音频系统介绍可知，不同音频产品中 Buck 的输入电压是有区别的。在便携音箱产品中，Buck 的输入电压就是电池电压，只需要根据电芯的串数以及每节电芯的电压就可以估算出最高输入

电压值，电压相对不高。但是带线音箱则有很大不同，带线音箱产品中 **Buck** 的输入电压  $V_{in}$  是功放的供电电压  $PVDD$ ，这个电压直接决定了音频产品的输出功率，因此有必要进一步分析供电电压和输出功率的关系。

典型功放驱动电路如 **Figure 2** 所示。其中  $r$  为功放内阻， $R$  为扬声器阻抗， $V_{in}$  为功放的供电电压。



**Figure 2.** 功放驱动电路模型

根据欧姆定律可知，扬声器  $R$  的输出功率：

$$P_{out} = \left(\frac{V_{in}}{R+2r}\right)^2 \times R \quad (1)$$

从而换算得到输入电压：

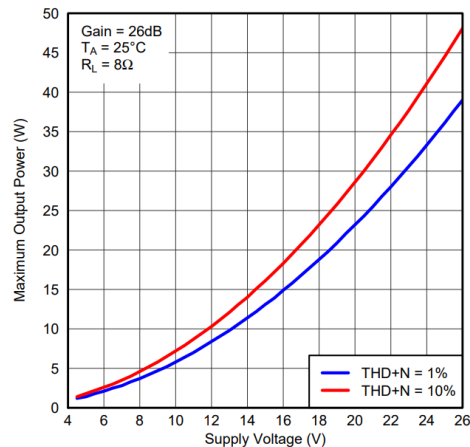
$$V_{in} = (R + 2r) \sqrt{\frac{P_{out}}{R}} \quad (2)$$

注意到公式(2)对应的  $V_{in}$  值是 **RMS** 值，因此  $V_{in}$  的最大值：

$$V_{inmax} = (R + 2r) \sqrt{\frac{2P_{out}}{R}} \quad (3)$$

因此，**Buck** 的输入电压，在公式(3)的基础上留一定的裕量即可。

不同功放因为内阻不一样，所以供电电压的计算会比较繁琐。一般功放的 **datasheet** 都会给出输出功率和供电电压的测试曲线，以 **TPA3116** 为例，在扬声器阻抗为 **8 欧姆** 情况下，其最大输出功率和供电电压的曲线如 **Figure 3** 所示。可以发现，根据 **TPA3116** 的内阻 **120mΩ**，套入公式(3)中进行计算，其结果和输出功率/供电电压的 **1% THD+N** 曲线完全吻合。



**Figure 3.** TPA3116 输出功率和供电电压关系曲线

在一些追求大输出功率的产品上，用户可能会给功放施加最高的供电电压，来达到最高的输出功率，这种场合下考虑 Buck 的输入电压时需要关注功放的最高耐压。Table 1 是 TI 当前主流功放产品的供电电压汇总。其中，26.4V 及以下的功放占绝大多数，针对的是中功率及以下的市场，也是市面上应用非常广泛的音频方案。

Table 1. TI 主流功放供电电压汇总

功放型号	PVDD_max
TPA3138/TPA3139	14.4V
TPA3116/TPA3118/TPA3128	26V
TAS57xx	26V
TAS58xx	26.4V
TPA32xx	>32V

## 2.2 开关频率

通常我们考虑 Buck 的开关频率时，主要关注的就是系统效率、外围尺寸、原件成本等指标。开关频率高会使得纹波变小，同等指标下可以缩小外围器件体积，节省了外围器件成本，但是开关损耗会相应变大，导致系统效率变差。反之亦然。然而在音频产品中，除了上述关注点外，开关频率的选择还需要考虑其它因素，相对复杂很多。其主要原因，就是因为音频产品带有扬声器，不仅可以播放音乐，也会将一些噪音放出来。因此在音频产品设计阶段，需要综合考虑多种因素，选取最合适的 Buck 开关频率。

### 2.2.1 人耳可听频率

众所周知，人耳可听的声音频率范围是 20Hz 到 20kHz。理所应当，Buck 的开关频率应该避免这个频率范围，不然容易引起电感啸叫或电容啸叫，影响扬声器的播放效果。实际上，刨除干扰扬声器的因素，Buck 在 20kHz 的开关频率工作时，系统需要非常大的电感值和输出电容来减小纹波，导致产品相对庞大且笨重，竞争力不强。因此 20kHz 开关频率的 Buck 已经几乎绝迹了，绝大部分的开关频率都在 50kHz 及以上，其中又以 200kHz 以上最为常见，这个频率已经完全错开了人耳可听频率范围，因此可以放心使用。

### 2.2.2 差频干扰

当系统上有多个开关型功率器件时，若它们在空间上比较接近，它们的差频信号可能会耦合出来并以噪声的形式干扰彼此的正常工作，这就是差频干扰现象。我们以 TPS54335A 为例，进一步描述这个现象。Figure 4 是 TPS54335A 的应用电路图，其开关频率设定为 342kHz。信号源 Vnoise 代表其它功率器件的开关噪声，设定其为幅值 100mV、频率为 352.8kHz 的方波，耦合到 TPS54335A 的补偿脚，模拟差频干扰。

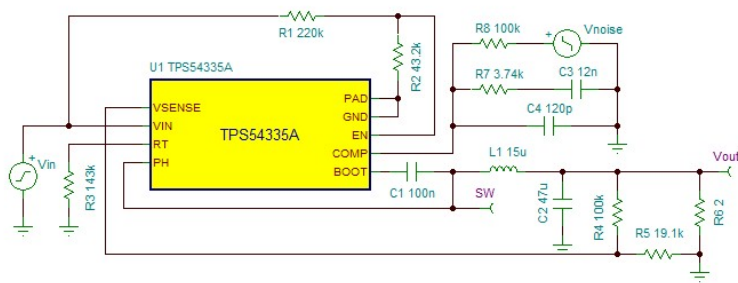


Figure 4. TPS54335A 差频干扰电路模型

利用 TINA-TI 工具，我们可以看到仿真结果如 Figure 5 所示。可以看到，输出电压除了预期的 342kHz 高频纹波外，还有 10.8kHz 左右的低频纹波，而这 10.8kHz 正是 352.8kHz 与 342kHz 之差，表明 TPS54335A 工作时受到了差频干扰。

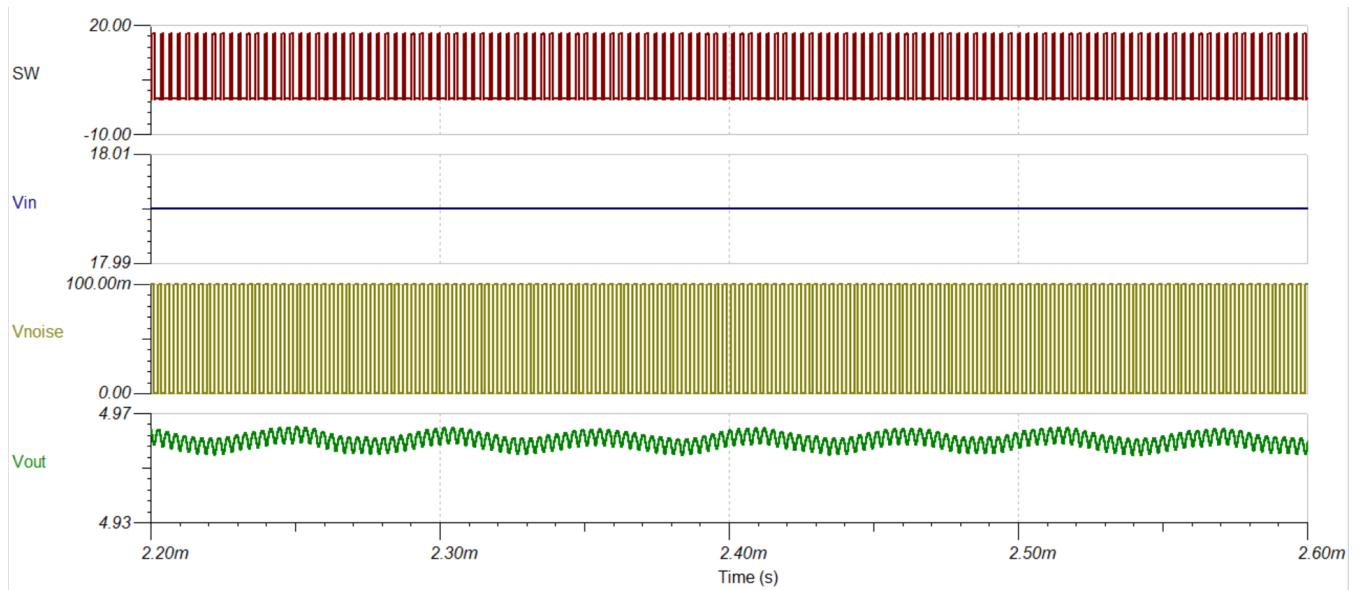


Figure 5. TPS54335A 仿真波形

进一步地，利用频谱分析仪，实测输出电压的频率分量如 Figure 6 所示。可以清晰地看到 10.4kHz 左右的低频分量的存在，并产生了对应的高次谐波。对于音频产品而言，这个差频很有可能通过扬声器播放出来，即使在不播放音乐的时候依然存在，用户体验非常差。因此音频产品需要重视差频干扰问题。

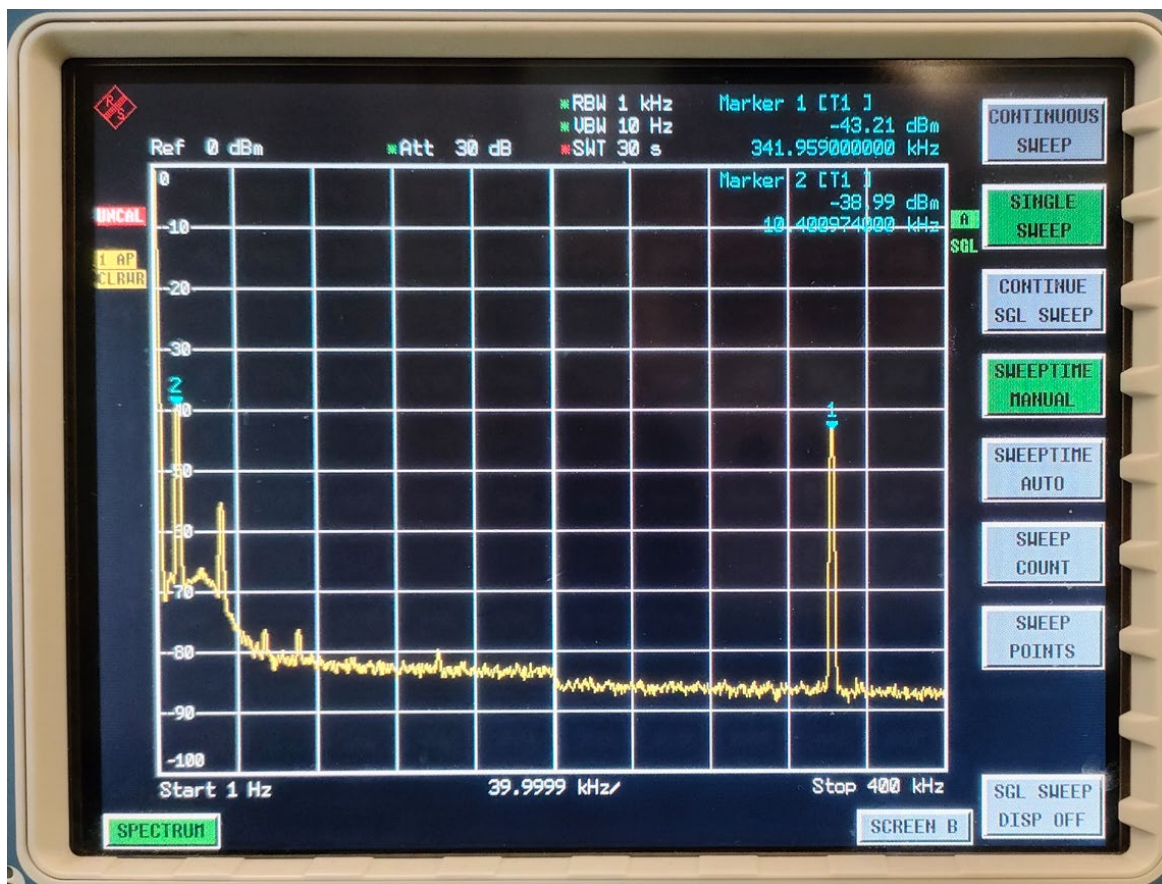


Figure 6. 输出电压频谱分析

常见的优化差频干扰问题的措施主要有：

- 1) 合理布局 PCB，尽量避免多个开关型功率器件近距离放置；
- 2) 增加滤波器，滤除低频信号；
- 3) 合理错开各个开关器件的频率范围。

合理布局 PCB 对产品的 layout 要求非常高，有可能产品需要来回改版好几次才能解决，效率不高；增加滤波器虽然可行，但也增加了硬件成本；合理错开各个开关频率是不同方案中高效且经济的选择，能从根源上解决差频干扰问题。对于音频系统而言，各个开关频率至少需要错开 20kHz 以上，才不会影响扬声器播放效果。

以带线音箱系统为例，根据前述框图，其开关型功率器件主要有：

- 1) Flyback: 开关频率通常低于 150kHz，以尽可能降低开关损耗；
- 2) Buck: 开关频率通常高于 200kHz，最高可到 MHz 级别；
- 3) 功放: 模拟功放的开关频率较宽，最高也可以达到 MHz 级别。数字功放开关频率则集中在 352.8kHz 和 384kHz 这两个频率。

Flyback 作为带线音箱中频率最低的开关型器件，其频率和 Buck/功放明显错开 20kHz 以上，可以放心使用。而 Buck 和功放的频率范围则有重叠，尤其是数字功放，需要重点考虑。

实际上，为了保证最佳的 THD+N 性能，数字功放开关频率一般选取为 I2S 音源采样率的整数倍，而 I2S 音源的标准采样率是 44.1kHz 和 48kHz，因此功放的开关频率一般固定为 352.8kHz 和 384kHz，也就是对应 44.1kHz 和 48kHz 的 8 倍。可以看到，数字功放的开关频率是不可更改的，想要让功放和 Buck 的开关频率错开，只能是更改 Buck 的开关频率。

因此对于音频系统，Buck 的开关频率需要和功放错开 20kHz 以上。对于数字功放而言，Buck 的开关频率需要低于 332.8kHz（352.8kHz 减去 20kHz），或者高于 404kHz（384kHz 加上 20kHz）。

### 2.2.3 频率误差

芯片的各项指标都是有范围的，开关频率也不例外，实际使用的时候需要加以留意。以 TPS54302 为例，其开关频率的典型值是 400kHz，这个频率理论上是可以和 352.8kHz 的功放搭配使用的，但是 TPS54302 的 datasheet 表明，其开关频率范围是 290kHz – 510kHz，和 352.8kHz 有重叠，如 Figure 7 所示，依然有可能发生差频干扰现象。另外有些 Buck 会增加扩频的功能，来帮助用户通过 EMI 测试。扩频会带来频率的偏移，同样需要重视。

OSCILLATOR					
f <sub>sw</sub>	Centre switching frequency	290	400	510	kHz

Figure 7. TPS54302 开关频率范围

综合上述分析，音频产品的开关频率需要综合多方面的因素。Buck 最好带有开关频率可调的功能，方便用户结合自己的实际情况，选用最佳的开关频率。

## 2.3 轻载高效

随着节能环保的呼声越来越高，相关的能效标准对电子产品的待机功耗提出了更高的挑战。美国的六级能效和欧盟能效认证，均要求电子产品的待机功耗低于 0.5W。在如此严苛的要求下，具有轻载高效功能（PFM）的器件将发挥重要的作用，Buck 也不例外。它的原理很简单，就是当负载降低时，减小系统的开关频率，进而降低开关损耗，从而提升轻载条件下的效率。只要负载足够轻，开关频率就会低于 20kHz。但是正如前述所提，20kHz 及以下的开关频率是音频系统所不愿意碰到的，因此音频系统常见的做法是外挂一个最低负载（如电阻），确保 Buck 的开关频率始终保持在 20kHz 以上。其缺点也很明显，就是无论轻载还是重载，这个最低负载始终存在，并且被白白浪费掉，没有给真正的负载利用上，导致系统整体效率略有降低。

TI 于 2019 年提出 Out-of-Audio（OOA）模式，以解决轻载条件下的可听噪声问题。其工作原理如 Figure 8 所示。当 Buck 的高侧 MOSFET 断开、低侧 MOSFET 导通后，电感电流开始降低，一旦监测到电感电流为零，低侧 MOSFET 将断开，同时启动内部的定时器开始计时，并且监测对应的 FB 引脚电压。假若在预设时间内 FB 电压低于阈值，则定时器终止，继续下一个 PWM 周期；若负载足够轻，导致在预设时间内 FB 电压仍未低于阈值，系统将强制开启低侧 MOSFET，将 FB 电压快速泄放至阈值以下（类似 FCCM 模式），然后继续下一个 PWM 周期。因此，这种模式的系统有了最小频



率值。只要合理设计定时器的值，就可以确保系统在轻载条件下频率依然超过 20kHz。OOA 模式不需要添加最低负载，在轻载和重载条件下都实现了高效率，是非常出色的解决方案。

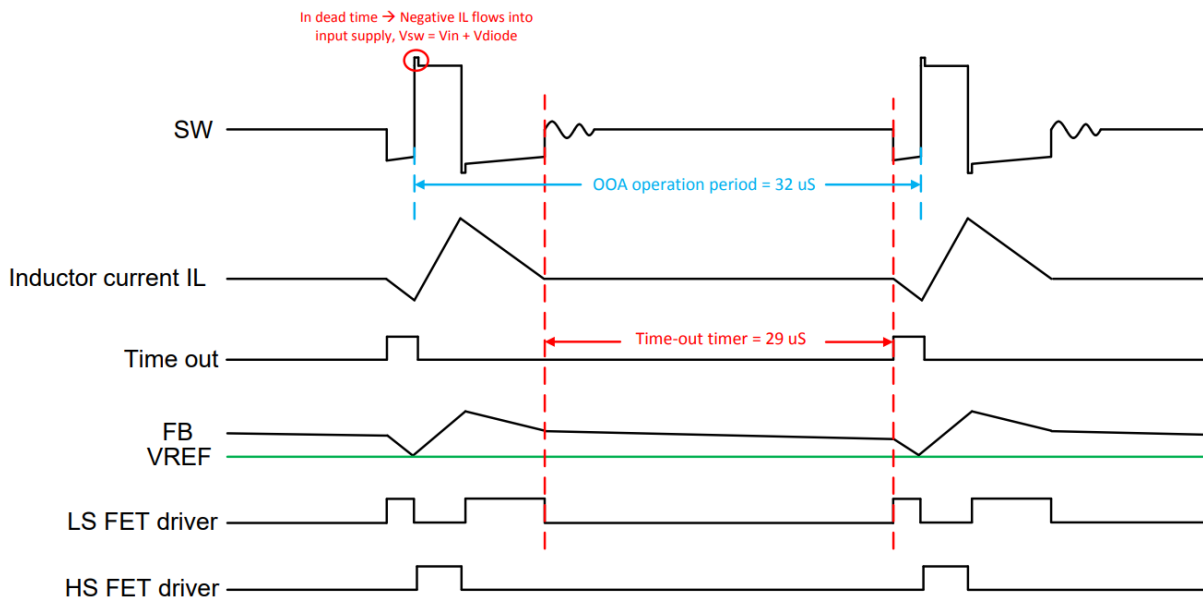


Figure 8. OOA 模式原理

## 2.4 软起动时间

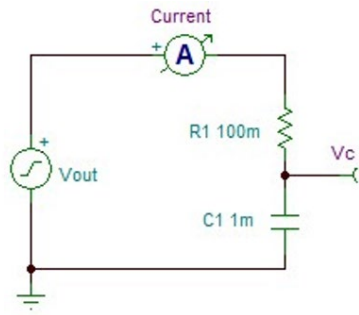
Buck 转换器启动的时候需要对输出电容进行充电，在启动瞬间，输出电容的充电电流会达到最大，之后缓慢下降。假若充电电流超过了 Buck 的过流点，Buck 的过流保护就会启动，芯片启动失败。为了确保正常启动，Buck 一般会采用软起动的办法。它的原理比较简单，即通过恒流源对电容进行充电，只要合理设计电流大小和电容值，就可以得到电容达到预设电压处的时间间隔（也就是软起动时间），输出电压就会按照预设的软起动时间从 0V 线性增大至稳定值。因此软起动可以有效减小启动电流。但是软起动时间并非越大越好，启动时间拉长会使得系统响应速度变慢，也会延长产品的开机时间。

对于音频产品，Buck 的负载之一是音频 ADC（如 PCM1808），Buck 的输出电压就是 ADC 的参考电压。正如我们所知，ADC 转换结果和参考电压有如下关系式：

$$Result = \frac{data}{2^n} \times V_{ref} \quad (4)$$

当参考电压变动时，ADC 的转换结果会相应变化。因此为了转换的准确性，通常会尽量减小电压纹波。增大电容是比较常见的做法，个别用户甚至会用 1000uF 的电容来达到优秀的转换效果。这么大的电容并联到输出端时，势必会增大启动时的充电电流，因此有必要分析在大输出电容下 Buck 需要多大的软起动时间。

不同软起动时间下的仿真电路如 Figure 9 (a)所示。R1 是等效的电容 ESR，C1 是对应的大电容。Vout 是 Buck 的输出电压，根据软起动时间的大小分别对 Vout 进行定义，Figure 9 (b)所示为设定软起动时间为 2ms。



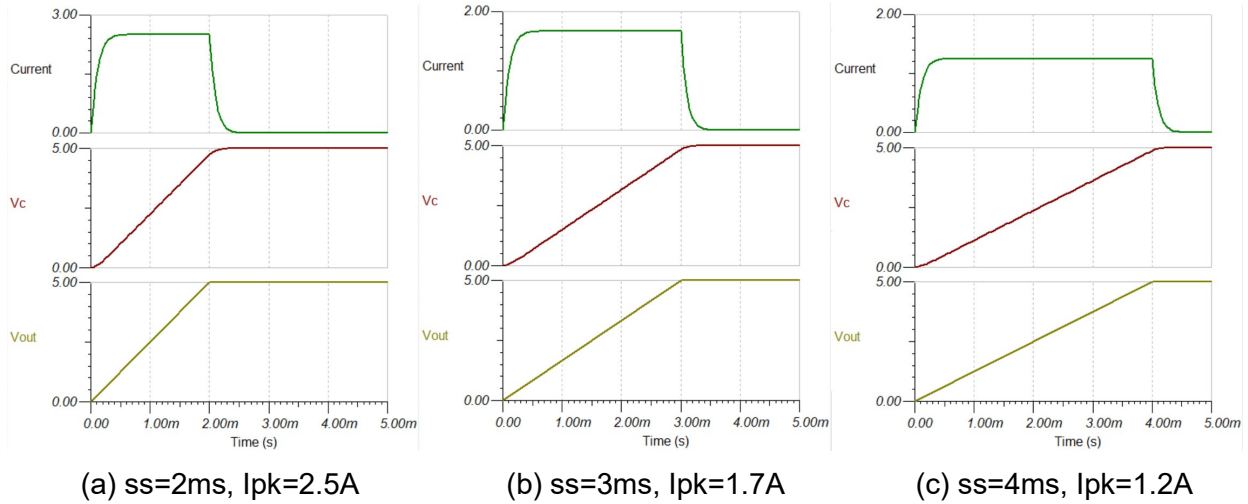
(a). 软启动仿真电路



(b). 软启动时间设置

Figure 9. 软启动仿真电路及参数设置

依次设定软启动时间为 2ms、3ms、4ms，得到启动电流波形如图 Figure 10 所示。可以看到，在 4ms 以上的软启动时间时，空载启动电流相对较小，并留有足够的带载启动空间。因此 Buck 的软启动时间最好是在 4ms 之上。



(a) ss=2ms, lpk=2.5A

(b) ss=3ms, lpk=1.7A

(c) ss=4ms, lpk=1.2A

Figure 10. 软启动仿真波形对比

## 2.5 引脚布局

一个好的 Buck 电路，除了正确配置好原理图，其 layout 也非常重要。一般 layout 需要尽可能将外围器件靠近对应引脚，缩短路径以减小寄生参数和回路面积。但有些 Buck 的引脚位置相对较差，以 Figure 11(a)所示为例，其对应的 layout 效果如图 Figure 11(b)。可以看到局部区域必须要在底层走线，增大了线路距离和寄生参数。同时地平面被割裂的较为分散，无法达到最佳的散热效果。假若能对 Buck 的引脚进行合理优化，如图 Figure 11(c)所示，让相关功能的电路在空间上相邻排布，那么 layout 时将大大缩小走线距离，减小 layout 的难度，如图 Figure 11(d)所示，整个布局紧凑有序，同时在底层有完整的地平面，PCB 的散热性能非常好。

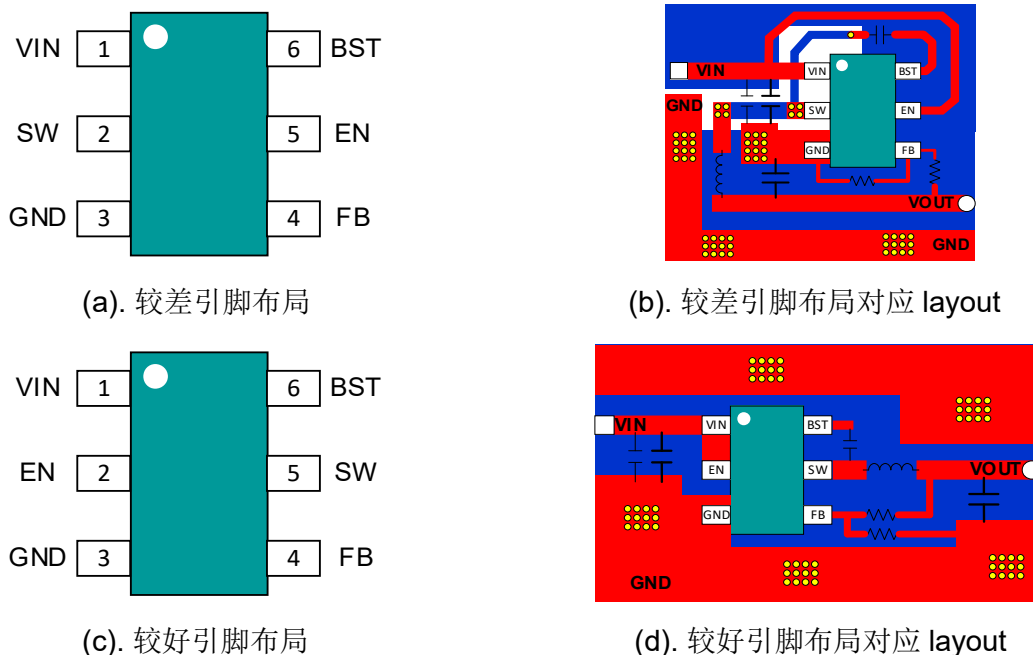


Figure 11. 引脚布局对比

### 3 TPS6293x 介绍

TPS6293x 是 TI 于 2021 年发布的新一代 Buck 方案，该系列一共有五个型号，按照电流大小、工作模式以及 Pin 7 引脚功能进行细分，具体型号分别是 TPS62932、TPS62933、TPS62933F、TPS62933P 和 TPS62933O，彼此差异如 Table 2 所示。

Table 2. TPS6293x 系列产品对比

Part Number	Output Current	Mode	Pin 7
TPS62932	2A	PFM	SS
TPS62933	3A	PFM	SS
TPS62933F	3A	FCCM	SS
TPS62933P	3A	PFM	PG
TPS62933O	3A	OOA	PG

TPS6293x 系列综合考虑了前述音频系统的各项设计挑战，并提出了出色的解决方案：

- 1) 输入电压最高支持 30V，完全可以覆盖中功率及以下音频产品需求；
- 2) 开关频率可调，支持 200kHz – 2.2MHz 的频率设定，方便用户根据系统灵活选择开关频率，避免差频干扰；
- 3) 全系列有 PFM、FCCM 以及 OOA 模式三个版本，满足用户多方面的系统要求。其中 OOA 模式设定系统最低频率为 30kHz，从根源上避免了轻载下的可听噪声问题；

- 4) 软起动时间可通过外部电容调节，不必再为大输出电容下的启动问题而发愁；
- 5) 合理布局引脚，如 **Figure 12** 所示。外围走线距离可以做的很短，减小了寄生参数；同时走线全部在顶层完成，在底层有完整的地平面，散热能力出色。

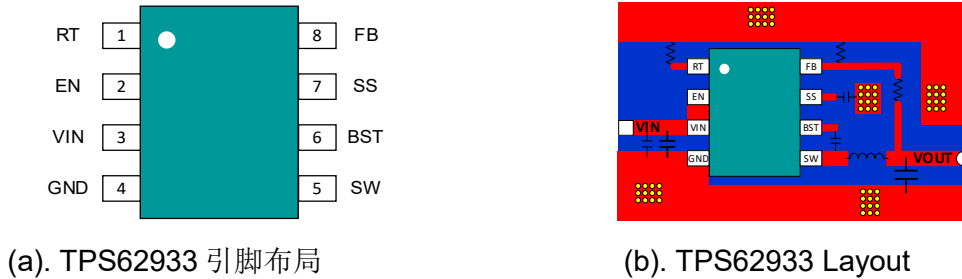


Figure 12. TPS62933 引脚布局及 Layout

除此之外，TPS6293x 在使能状态下的静态电流只有 12uA，功耗能力出色；另外支持扩频功能，帮助提高 EMI 性能；高低侧 MOSFET 的内阻只有 76mΩ/32mΩ，助力系统在 24V 转 5V 应用下仍有高达 90% 的转换效率。

## 4 总结

本文详细介绍了音频产品的系统架构，针对其中的 Buck 器件，依次从输入电压、开关频率、轻载高效模式、软起动时间以及引脚布局等方面，深入分析 Buck 转换器对音频系统的影响。并对 Texas Instruments 当前新一代的 Buck 方案 TPS6293x 进行了详细介绍，帮助用户构建高品质音频产品。

## 参考文献

1. TPS62933 datasheet 2022, Texas Instruments Inc.
2. Understanding OOA™ Operation, SLUA946, Zhao Ma, Henry Xie, Jason Wang, Eric Guo, Texas Instruments Inc.

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司