

# 在便携式应用中使用 D 类音频放大器

作者：Nicholas Holland、Greg Hupp 及 Andy Liang，德州仪器公司

## 摘要

高效率 D 类音频放大器正越来越多地被用在移动电话、智能电话、PDA 及其他类似便携式应用中，以取代 AB 类放大器。采用 D 类放大器可延长电池供电终端产品的工作时间，并产生更少的热量，从而解决设备的热设计问题。测试结果显示出 D 类放大器在延长电池工作时间及减少散热量上的优势。通过比较 AB 类和 D 类放大器架构，我们可看出，必须更多地关注 D 类放大器的板级设计。本文将着重讨论如何进行正确的板布局与元件选择，因为这对于采用 D 类放大器的设计来说非常关键。D 类放大器参数测量不同于传统 AB 类放大器，因此本文还将讨论 D 类放大器的测量技术。



## 引言

在手机、DVD 播放机、笔记本电脑及游戏机等便携式设备中集成音频，已经发展到这样一个程度，即设计人员正面临着如下考验：一方面需要将 MP3 及流视频等越来越多的特性集成到上述终端设备中，另一方面又必须保持或（甚至）减少整体功率预算。

这导致采用很多新的产品技术，例如采用 D 类音频功率放大器 (APA)。这些放大器可使设计人员节省电池电量，因为 D 类放大器比传统 AB 类（或线性）放大器具有更高的效率。为充分利用 D 类放大器的优势，必须了解 D 类放大器与 AB 类放大器工作原理的基本差异，因为在设计带有音频的系统时，每一种放大器技术都要求有不同的设计考虑。本文即介绍这两种放大器在工作原理上的差异。

我们将按 D 类放大器的工作原理来讨论这些设计考虑。板布局及外部器件选择与安放都是在使用 D 类放大器时所必须考虑的重要方面。此外，本章还将讨论采用良好的板布局及器件选择能带来哪些 EMI 改善。

最后，我们将详细讨论如何测量 D 类放大器一些基本参数，例如输出功率及 THD+N 等。

## D 类放大器与 AB 类放大器效率比较

D 类放大器具有远高于 AB 类放大器的效率。放大器的效率越高，由电池发热而浪费的功率就越少。图 1 显示和传统线性放大器的理论功耗相比，最新 D 类立体声音频功率放大器 TPA2012D2 的功耗与输出功率关系曲线。图中显示这两种放大器技术的功耗如何随输出功率改变。D 类放大器更高的效率可给音频设计人员提供两大好处：首先，对于便携式及电池供电应用来说，采用 D 类放大器可延长电池使用时间，因为由放大器发热而浪费的功率更少。此外，由于放大器散热更少，因此与 AB 类放大器相比，采用 D 类放大器的应用其热设计将变得更加简单。

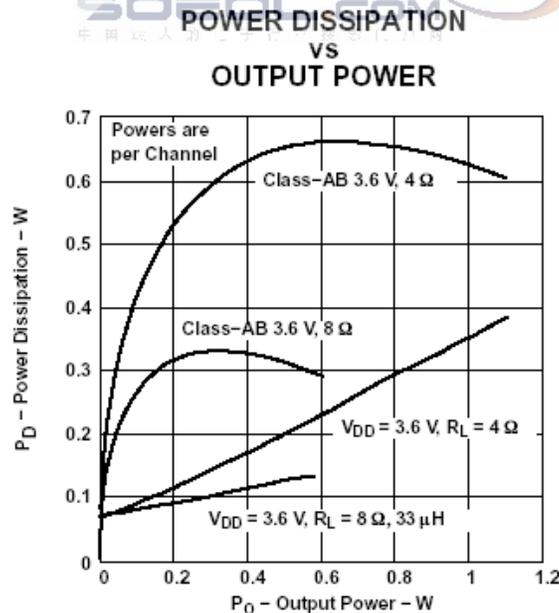


图 1：与 AB 类放大器的理论功耗相比，TPA2012D2 型 D 类放大器的功耗与输出功率关系曲线

功耗直接转换为电池使用时间。测量功耗的一种方法是在使用两种放大器的情况下测量电池的放电时间。图 2 显示 D 类放大器与 AB 类放大器分别和两组不同的三节 1.2V 镍氢 (NiMH) 电池相连时的电池放电时间曲线，其中将人朗读的声音作为放大器的音频输入源。

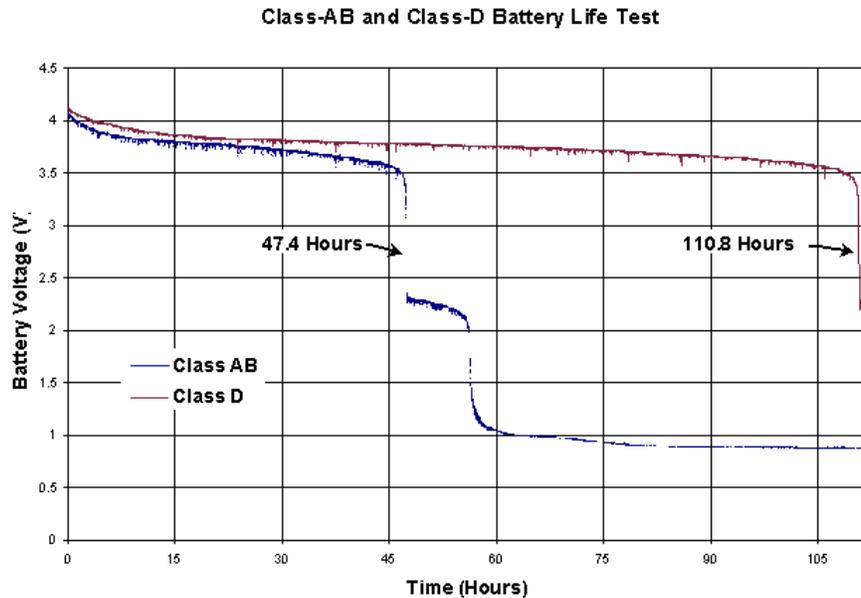


图 2: 在使用 D 类和 AB 类音频功放情况下的电池放电时间曲线  
图注: AB 类和 D 类放大器应用的电池使用时间, 电池电压, 时间 (小时)

从图中可看出, 低效率的 AB 类放大器 (蓝线) 比高效率的 D 类放大器 (红线) 更快地消耗完电池的电量。对于相同的输出功率, AB 类放大器要比 D 类放大器消耗更多的功率, 从而使电池的使用时间更短。

### AB 类放大器的效率

那么, 为何 AB 类放大器比 D 类放大器效率要低很多呢?

AB 类 (线性) 放大器为所需输出电压提供一个固定量的源电流。源电流等于 AB 类放大器在桥接负载 (BTL) 情况下的输出电流加静态电流。图 3 显示一个简化 H 桥 AB 类放大器输出级电流示意图。

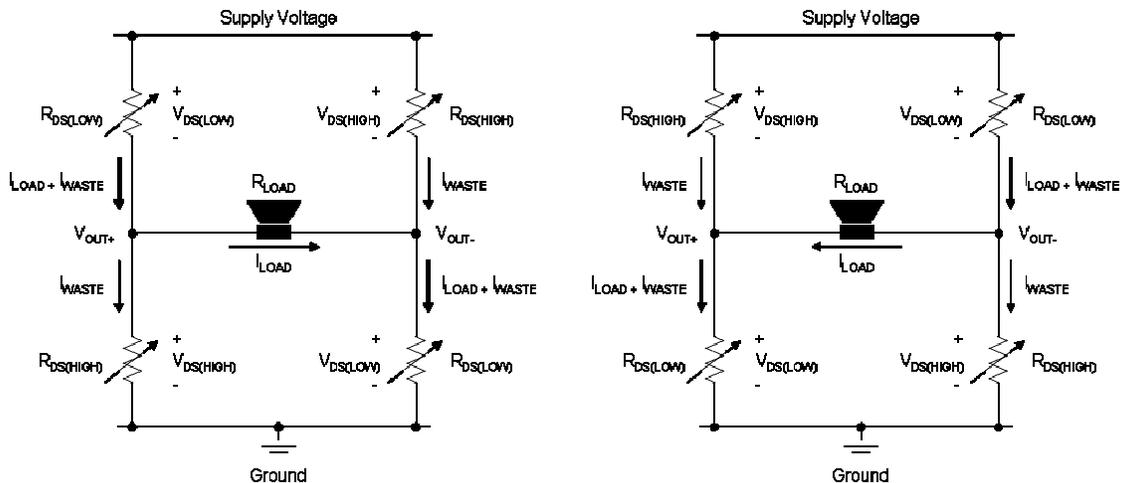


图 3: AB 类放大器简化 H 桥

图中将输出 MOSFET 表示为阻值随放大器输出电压变化的可变电阻。这些 MOSFET 的漏-源电阻会随输出电压的变化而改变。从源流过负载的电流会在所有 MOSFET 上产生压降。这些电流乘以 MOSFET 上的压降，便会在放大器中造成很大的功耗。这些 MOSFET 中的功耗就是 AB 类放大器效率低于 D 类放大器效率的主要原因。

### D 类放大器的效率

那么，为何 D 类放大器的功耗更少？

和 AB 类音频放大器相反，D 类音频放大器在一个给定时间内向负载提供一个固定量的功率。D 类放大器产生一个可使输出电压在电源轨之间切换的脉宽调制 (PWM) 信号，从而能在向负载提供驱动电流时仅在输出晶体管上产生很少的压降。D 类放大器 H 桥中的理想输出晶体管，可拥有等于零的  $R_{DS(ON)}$  (“开 (on)” 态漏-源电阻，即导通电阻) 及无穷大的  $R_{DS(OFF)}$  (“关 (off)” 态漏-源电阻，即关断电阻)。在这种情况下，D 类放大器输出级将从电源上向负载提供一个等量的功率（不包括由偏置电流及栅极驱动所引起的损耗）。由于所有 MOSFET 都具有一定的  $R_{DS(ON)}$  以及  $R_{DS(OFF)}$  不可能为无穷大，因此总会有一些功率损耗。图 4 将 MOSFET 表示为简化的“开”或“关”态开关。

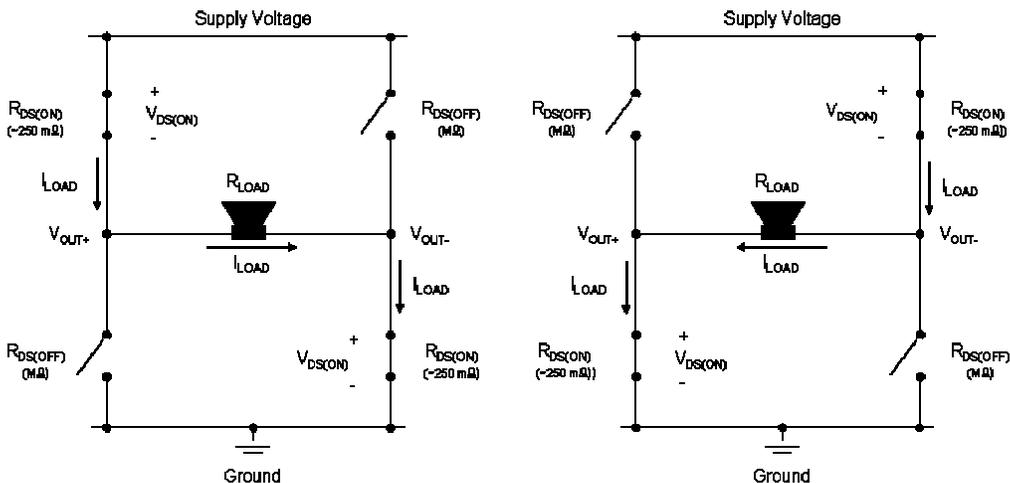


图 4: D 类放大器简化 H 桥

如图 4 所示，电流从电源通过第一个状态为“开”的MOSFET、再流过负载、最后流过后一个状态为“开”的MOSFET。由于两个MOSFET均完全饱和为“开”态，因此其上只有很小的压降。分压电路由 $R_{DS(on)}$ 、 $R_{DS(off)}$  及输出负载或扬声器 $R_L$ 组成，MOSFET的 $R_{DS(on)}$  极小，因此它上面几乎没有压降；相反，“关”态MOSFET的 $R_{DS(off)}$  值却很大，因此可忽略通过它们的电流。由此可见，D类放大器具有很高的效率，因为和AB类放大器相比，只有极少量的功率被输出MOSFET消耗掉。

尽管音频放大器选择对于您的电路设计非常关键，但印制电路板 (PCB) 布局也能决定您的设计是否能成功地满足指标要求。一些主要的 PCB 考虑因素为电源与接地布线、输入输出走线、元件选择与安放等。

### 采用 D 类放大器时的 PCB 布局

一项关键布局考虑因素为输入输出走线。这些走线的布局非常关键，因为输入可从输出上拾取噪声，且输出亦可将噪声辐射给其他电路。输入走线非常重要，因为耦合至输入上的任何噪声都会被放大器增益放大，进而引起音频失真或出现不希望的噪声。全差分输入音频放大器具有可抑制输入信号上共模噪声的优势。因此，即使输入信号为单端，适当的输入走线也能提高电路（甚至在强噪声环境下的）抗噪声能力。



图 5：不同输入实现

图例：全差分 DAC 与放大器，单端 DAC 与全差分放大器，单端 DAC 与放大器

在全差分结构中，输入走线并行并互相靠紧，以确保耦合至放大器一个输入端上的任何噪声都能以同样的幅度耦合至另一输入端。

有很多设计只允许采用单端音频信号，且一些用户认为全差分输入对其设计并没有多少好处。但情况并非如此，因为单端信号走线可与其他输入的交流地线平行。交流接地端走线应平行于音频信号及交流地，并尽可能靠近音频信号源。这使任何噪声均能同时耦合至音频信号与地线上，从而获得最大的共模噪声抑制。

放大器输出走线是另一个需要仔细考虑的因素。对于 D 类放大器，其输出信号为开关信号，如果不事先采取适当的措施，便会造成电磁干扰 (EMI)。一些电路有时会遇到这样的问题，即：输出走线经过或靠近音频输入信号或其他敏感信号与电路。这会使输出向这些电路辐射或将噪声耦合至其信号上。因此在布置输出走线时必须非常小心。这方面的一个常见例子便是翻盖手机的输出走线。

翻盖手机的下部与上部相连，并通过柔性电缆将数据及信号传输至上部。电缆中包括电源、地以及用于 LCD 显示的数据信号。一些手机的上部还装有免提扬声器，这意味着音频信号也需要通过这根电缆。如果走线时将开关信号 (D 类音频放大器) 紧靠 LCD 显示屏的数据信号，则有可能破坏 LCD 数据。因此，必须将这两种信号分开以免信号互相耦合；同时还必须用诸如铁氧体磁环等器件来消除开关信号的高频谐波对 LCD 显示屏的干扰。

必须将铁氧体磁环滤波器放置在适当的位置上，以使其效率最大。首先应尽可能将铁氧体磁环紧靠 IC 的输出引脚放置，然后再用电容来将其接地，并确保电容接地远离敏感模拟电路接地。如果不这样做，则从开关信号上滤掉的高频信号会耦合至信号地上，并可能对敏感模拟电路造成影响。对于 D 类放大器，还应使其输出走线长度最短，以免造成辐射而使产品不符合 FCC 及 CE 对 EMI 的要求。适当布线、采用铁氧体磁环滤波器以及减少走线长度等，都是一些可改进您设计的正确措施。

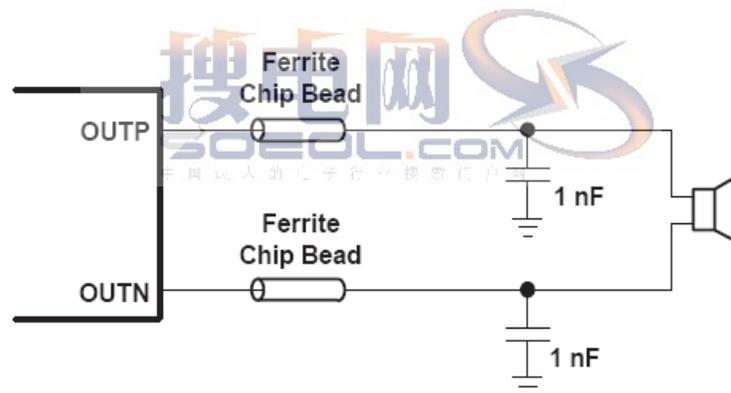


图 6：典型铁氧体磁环滤波器

除输入输出走线外，电源与接地布线也是一个重要因素，因其必须为所有电路提供足够的电源与接地。在布置电源及地线时，应考虑何处会形成回路。应进行适当布线以便能预测电流走向。对于接地布线，这意味着应采用星形接地。应将信号地与电源地及模拟地隔开。采用这些接地隔开措施可进行去耦及适当的信号接地。例如，图 7 显示对和 PGND 线而不是 AGND 线相连的 PVDD/PVCC 进行去耦。电源信号走线可类似于接地走线，如果需要的话，可将电源与模拟电源走线分开。铁氧体磁环滤波器的接地应能返回至星形接地，以免高频开关噪声对和接地面相连的任何信号造成影响。

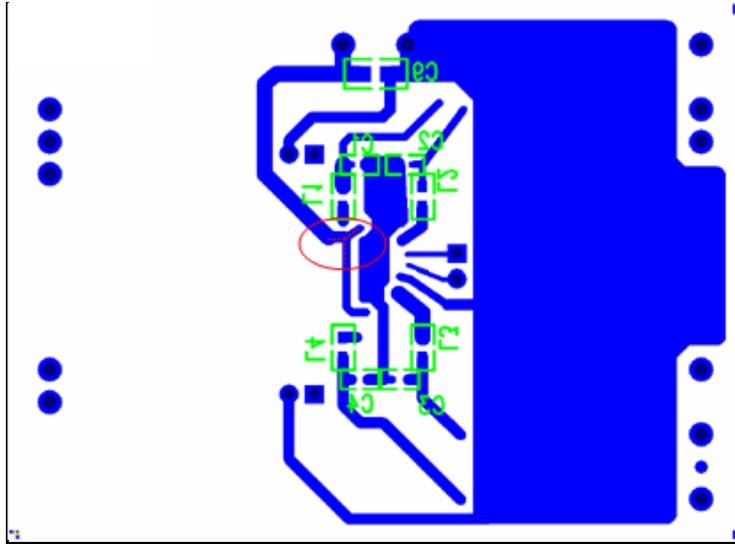


图 7：TPA2012D2 EVM 的电源与接地星形信号拓扑

在进行电路设计与布局时，外部元件选择与放置也是一个应予以考虑的重要因素。这些元件都是音频放大器正常工作所需的额外元件（如电阻、电容及铁氧体磁环等）。对于那些增益由输入电阻设置的音频放大器，应确保输入电阻尽可能紧靠输入引脚安放。这是因为输入引脚为汇总节点，且与电路其他地方相比，噪声更容易耦合至此节点中。因此，减少与输入引脚连接的走线长度可减少耦合噪声的机会。此外，输入电阻必须尽可能匹配，因为任何失配都会稍微改变放大器两端之间的增益，而这又会降低音频放大器的电源抑制比 (PSRR)，使得电源上的噪声能在扬声器上听到。但匹配或小容差电阻的昂贵价格也会妨碍了它的使用，因此必须进行折衷，且通常 5% 容差的电阻也能提供可接受的性能水平。

电源上的耦合电容应可能靠近 IC 放置。这些“本地”去耦电容可帮助使电源稳定，并能使尺寸较大的去耦电容放置在离芯片稍远的地方。另一个电容设计决定是选择输入隔直电容的值。输入隔直电容和放大器输入电阻一起形成一个高通滤波器。如果选用错误的电容值，则在到达放大器以前，一些音频信号即被衰减掉。可用下式来计算频率：

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times R_{IN} C_{IN}}$$

其中：R<sub>IN</sub> = 放大器输入阻抗

C<sub>IN</sub> = 输入端隔直电容

铁氧体磁环应按前面介绍的方法靠近放大器的输出引脚放置。挑选适当尺寸的铁氧体磁环对于提供适当的功能非常关键。电流额度必须恰好适合磁环，以免其饱和。如果电流额度太低以及磁环饱和，则就像发生了交流短路。如果出现这种情况，则铁氧体磁环滤波器将充当一个至开关输出的电容，此时电路就像在一个由该电容决定的频率以上短路。如果该短路使通过电容的能量过高，则放大器会触发短路保护并关断。当将电容直接放置在放大器输出引脚上时，也会出现类似的现象。电容有时也用于静电放电 (ESD) 保护，但必须小心，因为这种放置在输出引脚上的电容有可能会使放大器不工作。

## 测量 D 类放大器性能

测量线性放大器输出功率通常比较直接。由于 D 类放大器采用开关工作模式，因此不能用同样方法来测量其输出功率。对于 D 类放大器，由于测量设备的局限，必须对其输出进行低通滤波才能进行精确的输出功率测量。在用 Audio Precision (AP) 音频分析仪测量总谐波失真+ 噪声 (THD+N) 时也是如此。

德州仪器公司的 D 类音频功放系列 (TPA2000D 及 TPA3000D) 采用一种不需要使用输出滤波器的调制方案。但它们还是需要低通滤波器来进行输出功率或 THD+N 测量，以及减少 EMI。

250 kHz 的开关信号被当成为音频测量仪输入范围内的一个共模电压。一般地讲，音频分析设备在 250 kHz 频率上具有极低的共模抑制，因为它被设计成在整个音频波段内工作。

即使大多数音频分析仪都带有内部滤波，但其输入放大器仍不能对 PWM 信号的快速上升沿作出反应。为了不影响放大器的音频性能，可用一个 RC 滤波器来滤除 D 类放大器 PWM 输出中的 250 kHz 开关成分。

采用音频放大器的便携式设备通常都使用带有 3-32  $\Omega$  电阻的扬声器。重要的是需了解峰值输出电压  $V_{O(P)}$ 、峰-峰值输出电压  $V_{O(PP)}$  以及均方根 (RMS) 输出电压  $V_{O(RMS)}$  之间的关系。在计算功率时，可将输出电压 ( $V_O$ ) 规定为均方根值，并采用以下公式：

$$\text{Output Power (P}_O\text{)} = \frac{[V_{O(RMS)}]^2}{\text{Load Impedance (R}_L\text{)}}$$

其中：

$$V_{O(RMS)} = \frac{V_{O(P)}}{\sqrt{2}} \text{ 或 } V_{O(RMS)} = \frac{V_{O(PP)}}{2\sqrt{2}} \text{ (其中 } V_{O(P)} \text{ 为峰值电压, } V_{O(PP)} \text{ 为峰-峰值输出电压)}$$

典型的 THD+N 测量将噪声幅度、失真以及其他不希望的信号合并到一个测量中，并将其与基本测试频率幅度进行比较（通常采用百分比）。从理论上讲，在音频功放的输出上应只出现正弦波输入的基本测试频率。THD+N 测量要求提取基本测试频率并测量整个音频波段内的均方根电压（包括不希望的谐波与噪声，AP 能自动完成此项操作），然后再将测量值除以基本测试频率值，并以百分比来表示。

## 低通 RC 滤波器

图 8 所示的 RC 滤波器的截止频率被选择为大约 30 kHz，因为这正好位于音频频段以外，且能对更高的频率提供 20 dB/10 倍频程的衰减。

一阶 RC 滤波器的截止频率为：

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

通过简单的元件选择，亦即取 R 为 100  $\Omega$  以及 C 为 0.047  $\mu\text{F}$ ，即可得  $f_o$  为 33.86 kHz 以及图 8 所示的相应电路。

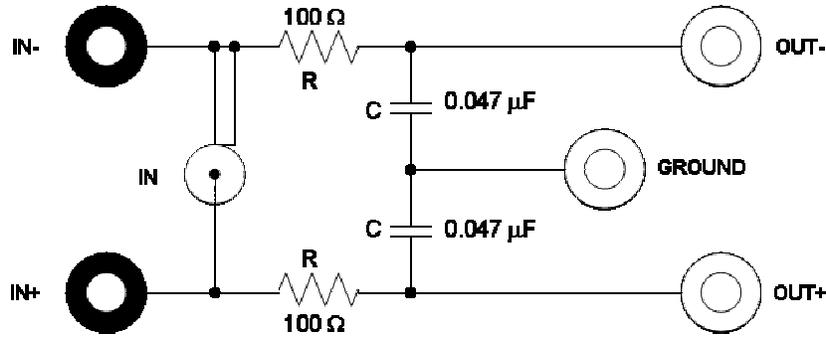


图 8: 用于一个通道的 RC 低通滤波器

注:

信号发生器、D 类放大器、滤波器盒以及示波器或 AP 全都应与一个地相连以消除任何共模电压，这一点非常重要。此外，还需采用一个电源地。

为简化 D 类放大器的输出功率及 THD+N 测量，德州仪器公司研制了一种基本上包含图 8 所示低通滤波器的双通道简单 RC 滤波器盒。

图 9 为该滤波器盒的顶视及内视图。



图 9: 德州仪器公司的 RC 滤波器盒顶视与内视图

“屏蔽”接头用于将整个滤波器盒接地。需要采用一个到静止地的连接（电源），且不与放大器及测量仪器使用同一个地。

此滤波器盒可用于使用示波器的输出功率测量以及使用 AP 的 THD+N 测量。滤波器盒被设计成易于在起始评估、原型开发或最终测试阶段与各种测量设备连接。采用图 8 所示的简单 RC 滤波器，不用滤波器盒也可完成这些测量。我们下面介绍如何用该滤波器盒来进行输出功率及 THD+N 测量。

### 输出功率测量

将滤波器盒连接在负载和示波器之间

### 在便携式应用中使用 D 类音频放大器

作者: Nicholas Holland、Greg Hupp 及 Andy Liang, 德州仪器公司

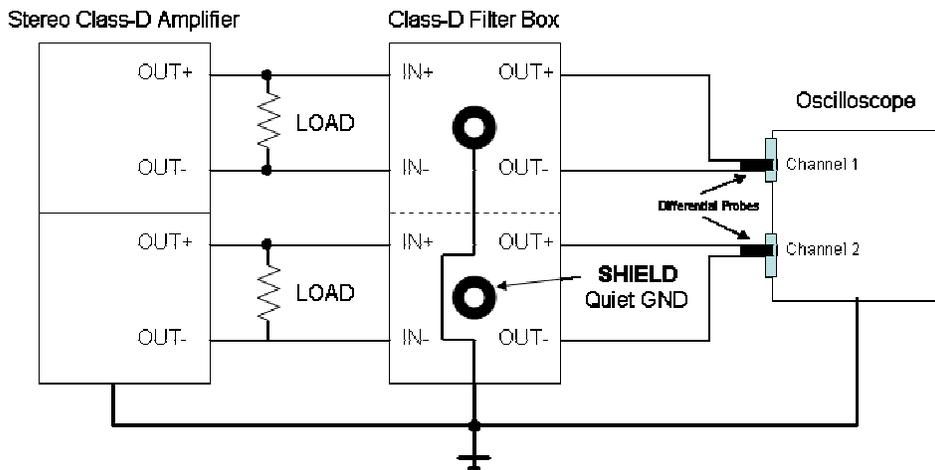


图 10: 用于输出功率测量的立体声音频 D 类放大器与 RC 滤波器盒

当正确设置用于单声道或立体声测量的测试电路后，即可用峰值电压（即示波器读数）及已知负载阻抗来计算每个通道的输出功率。请注意，这里计算的是放大器的平均输出功率。

注：此电路假设示波器采用差分探头。另一种选择是采用单端探头，并用数学函数来计算两个信号之间的差。用 RMS 电压表也可进行同样的输出电压测量。

举例：

一个通道的输出功率计算如下：

如果示波器上的峰值输出电压为 2 V 且负载  $R_L$  为  $8 \Omega$ ，则 RMS 电压为：

$$V_{O(RMS)} = \frac{V_{O(P)}}{\sqrt{2}} = 1.41V,$$

$$\text{Output Power } (P_O) = \frac{[V_{O(RMS)}]^2}{\text{Load Impedance } (R_L)} = 250mW$$

### THD+N 测量

测试设置类似于输出功率测试，但将一台 AP 与放大器输入及滤波器输出相连，如图 11 所示。

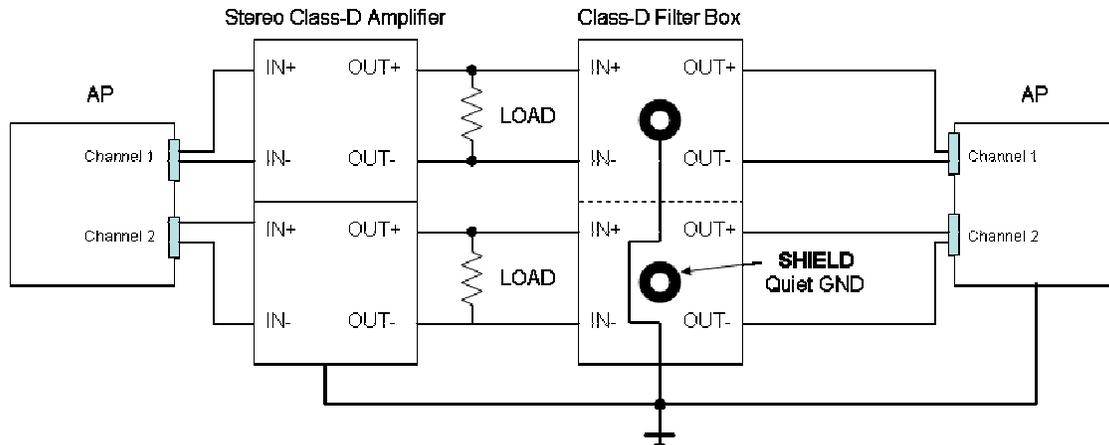


图 11：用于 THD+N 测量的立体声 D 类放大器与 RC 滤波器盒

音频分析仪的输入带宽通常由滤波器限定，以减少带外噪声。但这也会滤掉进行精确 THD+N 测量所需的高阶谐波。滤波器盒衰减所有非音频波段频率，从而能精确地重构原始音频波形。更高的频率对于这种测量并不重要，因其处于人耳能听见的频率以外。

## 结论

采用 D 类放大器，可使带有音频的便携式设备延长电池使用时间。在用 D 类放大器进行设计时，必须仔细考虑电路板布局及元件选择与安放，以免降低设备或系统的性能。最后，了解用于测量 D 类放大器输出波形的几种不同技术，对于精确测量其输出功率及 THD+N 来说也是非常必要的。



## 作者简介:

Nicholas Holland曾获英国布里斯托大学甲等硕士学位。他从 1996 年起加入德州仪器公司，在TI高性能模拟半导体部的欧洲许多机构工作过。Nicholas Holland目前任TI音频功率放大器产品营销经理。  
Email: [nick-holland@ti.com](mailto:nick-holland@ti.com)

Greg Hupp曾获弗吉尼亚理工学院电机工程学士学位。在他读本科时，Greg Hupp即在一个开发工业电源电子模块的研究生实验室帮助工作。他曾在位于弗吉尼亚Mineral市的Dominion电力公司的一家核发电厂担任 2 年的系统与维护工程师，并在位于弗吉尼亚Manassas市的洛克希德·马丁公司担任 1 年半的系统工程师。Greg Hupp还持有阿肯色州立大学电机工程硕士学位，目前任德州仪器公司音频功率放大器系统工程师。Email: [g-hupp@ti.com](mailto:g-hupp@ti.com)。

