

音频功率放大器分类与拓扑结构

引言

音频功率放大器作为音响系统的核心组成部分，其性能直接影响音质还原效果与整体能效。随着电子技术与音频需求的不断发展，各类放大器拓扑结构相继出现，在保真度、效率、体积、成本等方面各有特点，适用于不同的应用场景。

本文旨在系统梳理常见音频功率放大器的分类与工作原理，重点分析 A 类、B 类、AB 类、C 类及 D 类放大器的导通特性、效率、失真表现及其典型电路结构，并结合实际应用场景，探讨其在 Hi-Fi 音响、车载系统、便携设备等领域的适用性。通过对各类拓扑的对比与总结，为工程设计中的放大器选型与优化提供参考。

常见功放类型

功率晶体管的分类

| | A 类 | B 类 | AB 类 | C 类 |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|--|
| 导通角 α | $\alpha=360^\circ$ 或 2π | $\alpha=180^\circ$ 或 π | $180^\circ\sim 360^\circ$ 或 $\pi < \alpha < 2\pi$ | $\alpha < 180^\circ$ 或 $\alpha < \pi$ |
| 占空比 k | k=100% | k=50% | $50\% < k < 100\%$ | k<50% |
| 失真度 | 失真小 | 失真度高于 AB 类且有交越失真 | 可清除交越失真 | \ |
| 效率 | 50%以下 | 50%–78.5% | 50%–78.5% | \ |
| 晶体管在静态（无信号输入）时的集电极电流 I_{CQ} | 较大，晶体管在整个信号周期内导通 | 接近零，晶体管仅在半个信号周期内导通 | 较小，介于 A 类和 B 类之间 | 接近零或为负偏置 |

导通角波形示意图

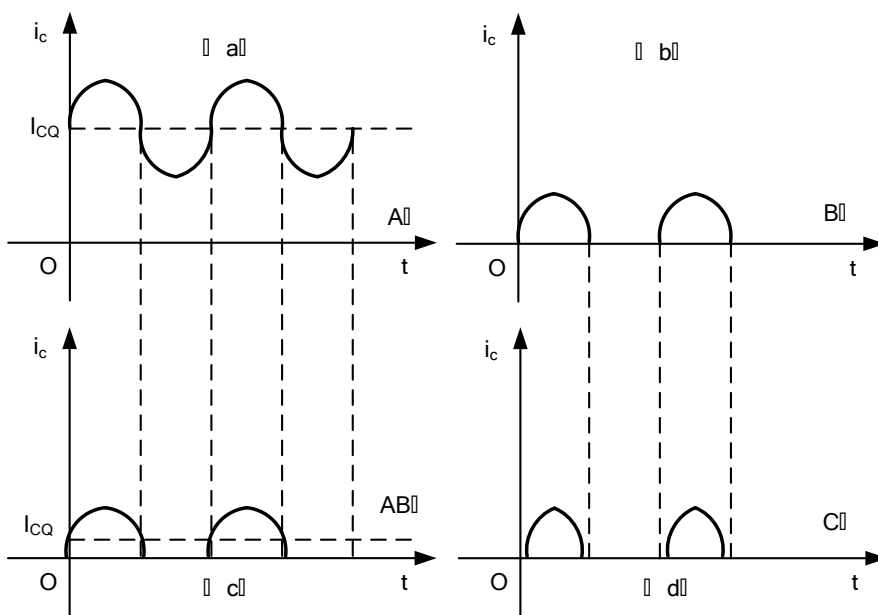


图 1.导通角波形示意图

A类、B类、AB类、C类、D类功放

- 1.在 A 类功率放大器中，晶体管在整个信号周期内 A 类功率放大器都处于导通状态，导通角为 $\theta = \omega = 360^\circ$ ；如图 1 (a) 所示。
- 2.在 B 类放大器中，晶体管的直流偏置 $I_c = 0$ ，晶体管仅在输入信号的半个周期内导通，导通角为 $\theta = 180^\circ$ ，正弦波的负半周期由另一个也工作在 B 类模式的晶体管提供，并在另一半周期导通；如图 1 (b) 所示
- 3.在 AB 类放大器中，晶体管偏置电流 I_c 不为 0，此电流要远小于交流输出电流的峰值。晶体管在输入信号比半周期稍微多一点的时间内导通，导通角大于 180° ，但远小于 360° ，即 $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ，正弦波形的负半周期由另 1 个也工作在 AB 模式的晶体管提供，并在稍微多于负半周期的间隔内导通。流经两个晶体管的电流合并成一个负载电流。在输入信号过零附近的一个间隔内两个晶体管均导通；如图 1 (c) 所示。
- 4.在 C 类放大器中，晶体管在短于半个周期的间隔内导通。晶体管的导通角小于 180° ，集电极电流的负半周期由另一个晶体管提供。集电极电流为脉动型电流，与其他类型放大器产生的电流相比，失真较明显。通过将输出经过并联 LC 谐振电路，滤除非线性失真。谐振电路调谐在输入信号的频率处，执行带通滤波器的作用，提供正比于电流波形中基频成分幅值的输出电压。这种类型的放大器用于通信电子线路的应用中，主要用于选频；如图 1 (d) 所示。
- 5.在 D 类放大器中晶体管工作在开关模式，即导通或截止。通过一个大电感，晶体管的输出连接到电源电压，同时通过一个 LC 电路 (图中未标记) 连接到负载，输出电压是对输入脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号的响应当晶体管处下截止状态时，电感 L 把它存储的能量提供给串联 LC 电路和负载。

主要类型音频功率放大器原理介绍

A 类功率放大器

A 类功率放大器又称为 A 类功率放大器 (Class A)，它是一种完全的线性放大形式的放大器。在 A 类功率放大器工作时，晶体管的正负通道不论有或没有信号都处于常开状态，这就意味着更多的功率消耗为热量，但失真率极低。晶体管在输入信号整个周期内都导通，导通角度为 360° 。A 类输出波形示意图与典型拓扑结构如图 2，图 3 所示。

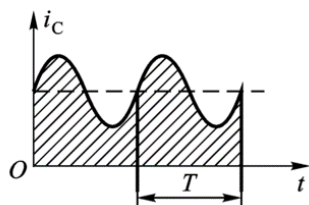


图 2.A 类输出波形示意图

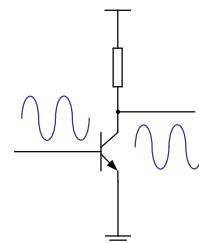


图 3.A 类典型拓扑结构

缺点：输入等于 0 时，静态功耗大；输入大幅值时，会出现削低失真；效率低。

优点：音质好。

B 类功率放大器

B 类功率放大器，它也被称为线性放大器，但是它的工作原理与 A 类功率放大器完全不同。B 类功放在工作时，晶体管的正负通道通常是处于关闭的状态除非有信号输入，也就是说，在正相的信号过来时只有正相通道工作，而负相通道关闭，两个通道不会同时工作，因此在没有信号的部分，完全没有功率损失。但是在正负通道开启关闭的时候，常常会产生跨越失真，特别是在低电平的情况下，所以 B 类功率放大器不是真正意义上的高保真功率放大器。在实际的应用中，其实早期许多的汽车音响功放都是 B 类功放，因为它的效率比较高。晶体管在输入信号半个周期内导通，导通角度为 180° 。B 类输出波形示意图与典型拓扑结构如图 4，图 5 所示。

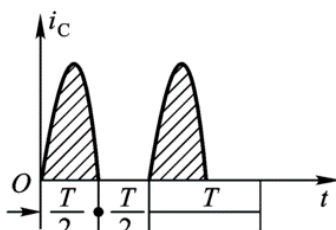


图 4.B 类输出波形示意图

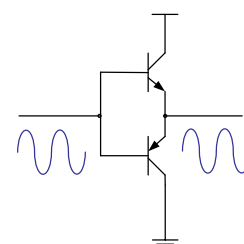


图 5.B 类典型拓扑结构

缺点：音质下降；存在交越失真。

优点：效率高。

注意事项：集电极静态电流等于 0，所以一个周期内的平均损耗小；但在另外半个周期内，集电极电流产生了严重的非线性失真。为解决这个问题，使用两个特性完全相同的异型晶体管轮流工作，形成一种推挽电路，从而获得完整的输出波形。

AB 类功率放大器

介于 A 类和 B 类之间，典型拓扑结构如图 6 所示，晶体管导通时间大于半个周期，但小于一个周期，导通角度大于 180° ，小于 360° ，通过设置较小静态电流使两个晶体管在过零区域同时导通，从而消除交越失真，在音质与效率之间取得良好平衡。

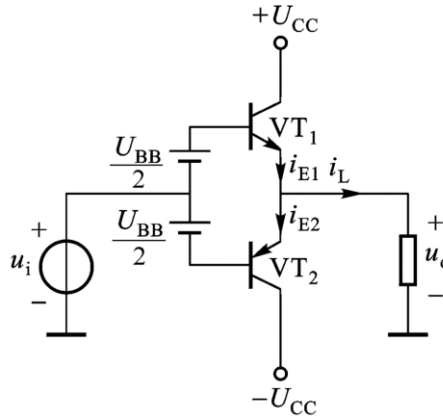


图 6.AB 类典型拓扑结构

优点：AB 类功率放大器相较于 A 类，效率更高；相较于 B 类，失真度更小；相较于 D 类，价格更便宜；

缺点：效率较低。

D 类功率放大器

现代 D 类放大器使用多种调制器拓扑结构，而最基本的拓扑组合了脉宽调制(PWM)以及三角波(或锯齿波)振荡器。图 7 为一个基于 PWM 的半桥式 D 类放大器简化框图。它包括一个脉宽调制器，两个输出 MOSFET，和一个用于恢复被放大的音频信号的外部低通滤波器(LF 和 CF)。如图 7 所示，p 沟道和 n 沟道 MOSFET 用作电流导向开关，将其输出节点交替连接至 VDD 和地。由于输出晶体管使输出端在 VDD 或地之间切换，所以 D 类放大器的最终输出是一个高频方波。

大多数 D 类放大器的开关频率(FSW)通常在 250kHz 至 1.5MHz 之间。音频输入信号对输出方波进行脉宽调制。音频输入信号与内部振荡器产生的三角波(或锯齿波)进行比较，可得到 PWM 信号。这种调制方式通常被称作"自然采样"，其中三角波振荡器作为采样时钟。方波的占空比与输入信号电平成正比。没有输入信号时，输出波形的占空比为 50%。

D 类放大器的工作原理是基于 MOS 管开关，MOS 管可以在极短的时间内完全导通和截止，因此效率极高，但是类似开关的工作模式增加了输出信号的失真。

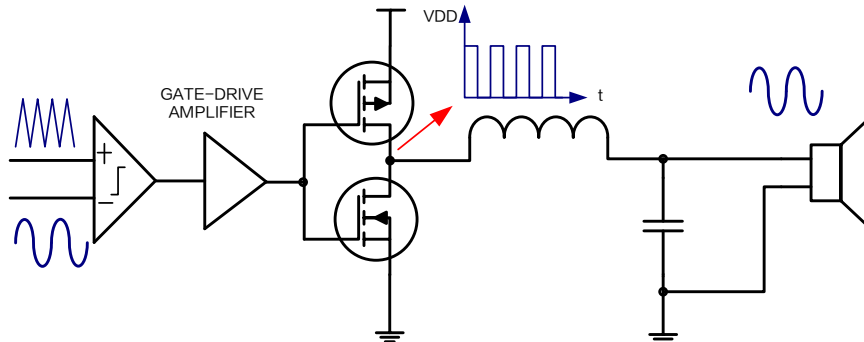


图 7.D 类拓扑结构

优点：功放发热小，器件工作温度低，寿命和可靠性都会明显提高；体积和重量都远小于模拟功放；体积、重量的大幅度降低。

缺点：系统复杂，失真大，存在开关失真与电磁干扰，部分需外接滤波电路。

结论

音频功率放大器的设计与选型需在音质、效率、成本、体积等多个维度中进行权衡。通过上述对各类功放原理、特点及应用场景的分析：

A 类放大器在音质方面表现最佳，失真极低，适合对保真度要求极高的音频系统，但其效率低下、发热严重，适用于小功率或不计功耗的高端音响设备。

B 类放大器具有较高的效率，但存在交越失真，音质一般，适用于对效率要求较高、音质要求不极致的场景，如部分车载音响或广播系统。

AB 类放大器在 A 类与 B 类之间取得较好平衡，失真较低、效率适中，成本相对合理，是目前应用最广泛的音频功放类型，适合大多数消费类音频设备。

C 类放大器由于导通角小、失真大，通常不用于音频放大，而主要用于通信系统中的射频信号放大，配合谐振电路实现选频功能。

D 类放大器采用开关模式工作，效率极高（通常 $>85\%$ ），体积小、发热低，适合便携设备、大功率音响系统及对能效要求高的场合。但其系统复杂度高，且存在开关噪声与失真，需配合滤波电路优化音质。

总体而言，在选择音频功率放大器时，应综合考虑：应用场景（如 Hi-Fi 音响、车载系统、便携设备等）；性能需求（音质、效率、功率）；成本与体积限制；系统复杂度与可靠性。

随着半导体工艺与调制技术的发展，D 类放大器的音质不断提升，其在高效音频系统中的占比预计将进一步扩大。而在高保真领域，A 类与 AB 类仍将保持其不可替代的地位。未来，智能功放与数字音频处理技术的融合，也将推动音频放大系统向更高集成度、更优音质与能效的方向发展。