



应用札记

ANC202405001

了解功率放大器分类

通信作者：成红玉

校阅：谭磊 姚若亚

试读：张进 代昕宇 赖臻

圣邦微电子（北京）股份有限公司

2024年5月27日

商标

SGMICRO 是圣邦微电子（北京）股份有限公司的商标。本文档中的所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2024 圣邦微电子（北京）股份有限公司 版权所有。

未经 SGMICRO 事先书面许可，任何单位或个人不得摘抄、复制或改编本文档的部分或全部内容。

欲了解更多关于 SGMICRO 的信息，请访问网站 www.sg-micro.com。

摘要

功率放大器是现代电子技术中不可或缺的组成部分，根据其工作原理、性能特点及应用领域等视角，可以将其划分为不同的类别。本文回顾了功率放大器按照工作状态分类（Class A ~ Class G）以及以输出结构的分类（OTL、OCL、BTL、互补 Class A、Class AB 和 Doherty），便于读者系统性地了解。

目录

| | |
|------------------------------|---|
| 1 概述..... | 2 |
| 2 工作状态分类..... | 2 |
| 2.1 Class A 放大器..... | 2 |
| 2.2 Class B 放大器..... | 2 |
| 2.3 Class C 放大器..... | 3 |
| 2.4 Class D 放大器..... | 3 |
| 2.5 Class E 放大器..... | 4 |
| 2.6 Class F 放大器..... | 4 |
| 2.7 Class G 放大器..... | 5 |
| 2.8 放大器类别及效率对比..... | 5 |
| 3 输出结构分类..... | 6 |
| 3.1 有输出变压器结构..... | 6 |
| 3.2 OTL 电路结构..... | 6 |
| 3.3 OCL 电路结构..... | 7 |
| 3.4 BTL 电路结构..... | 7 |
| 3.5 真差分输出互补 Class A 放大器..... | 8 |
| 3.6 Class AB 放大器..... | 8 |
| 3.7 Doherty 放大器..... | 8 |
| 4 参考资料..... | 9 |

1 概述

功率放大器是一种能够将低幅度电压或电流信号放大，取得更高功率输出的电路，包括提高输出电压、电流或者改变源阻抗。功率放大器精确复现输入信号，即电压波形和电流波形，或者至少部分复现，比如仅复现功率包络或保证频谱一致。功率放大器分类反映了早期广播电台射频信号放大器的产品设计迭代，输出结构分类则反映了音频功放设计的迭代。因其典型性和代表性，这些分类的概念被广泛接受，功率放大器的主力应用也从射频、音频拓展到了各种致动器、执行器，例如自动化设备中的电磁执行器（马达驱动波形合成、调节阀位控、磁悬吊控制），高频加热和激光驱动。

2 工作状态分类

功率放大器根据其工作状态分为 Class A、Class B、Class C、Class D、Class E、Class F 及 Class G 等¹。其中，Class A、Class B 和 Class C 通过调整晶体管的导通程度来实现对输入信号的放大，信号输出摆幅与输入信号全部或部分保留了比例关系；这三个分类输出与输入保持比例关系的摆幅与电源电压之间的关系不同，或者说电源电压空间的利用率不同。Class D、Class E、Class F 和 Class G 是开关态的，即输出在地和电源电压之间跳变、输出幅度跟输入信号的幅度没有直接关系；这几类放大器都需要输出路径上的储能槽路（即滤波节）来把开关状态的输出调理成与输入成比例的有效输出（Class B 和 Class C 输出幅度中部分与输入幅度成比例，也需要利用储能槽路减小输出信号的失真）。

2.1 Class A 放大器

晶体管在整个输入信号周期内都保持导通状态，输出信号的摆幅在电源电压范围内。Class A 放大器输出信号示意如图 1 所示。

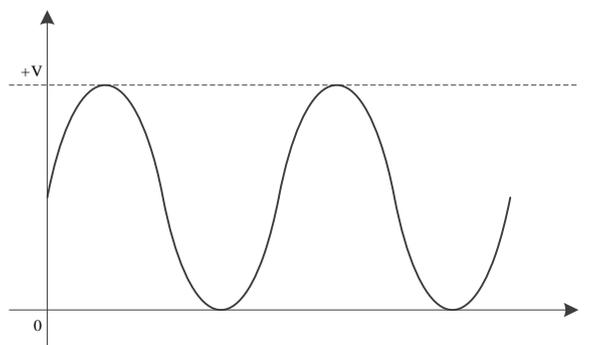


图 1 Class A 放大器输出信号示意图

2.2 Class B 放大器

晶体管仅在输入信号的半个周期内导通，输出信号摆幅只保留一半在电源电压范围内。Class B 放大器输出信号示意如图 2 所示，实线表示实际输出波形，虚线表示没有传递到输出的部分。

¹ Class G 以后的分类是厂家对产品的自定义分类，本文不对其进行阐释。

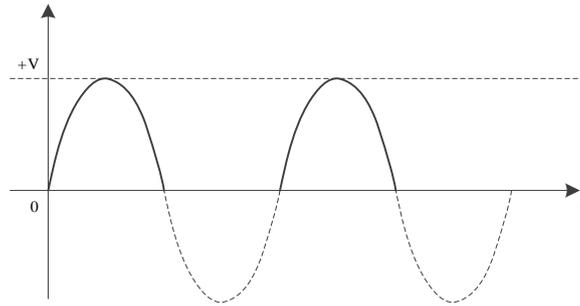


图 2 Class B 放大器输出信号示意图

2.3 Class C 放大器

晶体管的导通时间小于输入信号的半个周期，即仅有小于半周期的输出信号摆幅在电源电压范围内，并且输出为包含一部分基波功率的方波。Class C 放大器输出信号示意如图 3 所示，实线表示实际输出波形，虚线表示没有传递到输出的部分。

由下图可看出，Class C 放大器产生的失真大，输出信号富含谐波成分，需要在其输出路径上利用滤波器滤除高次谐波；同时波形顶部保留了信号的原始形状，这部分是有用的谐波信息。Class C 是对 Class B 的折中改进，比 Class B 的功率利用率高，谐波失真也大于 Class B。

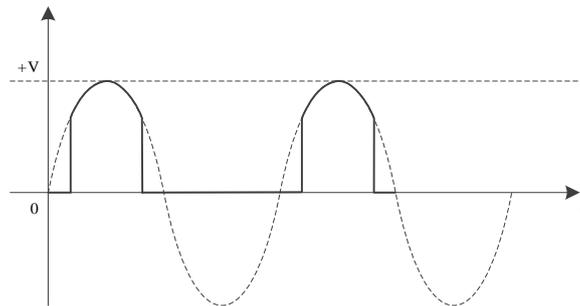


图 3 Class C 放大器输出信号示意图

2.4 Class D 放大器

Class D 放大器²采用脉宽调制（PWM）技术，利用输入模拟信号的幅度控制电压斩波的输出宽度，生成占空比正比于输入模拟信号幅度的 PWM 序列。PWM 序列的方波经低通滤波器进行滤波去除高频成分，还原为模拟信号输出^[1]。Class D 放大器工作模式波形示意如图 4 所示。

² Class D 功放因其高效率、小体积，多应用于便携式音频设备、音响系统，如本公司的 SGM2820（4.5V@2.4W）、SGM4703（24V@2×40W）等型号。

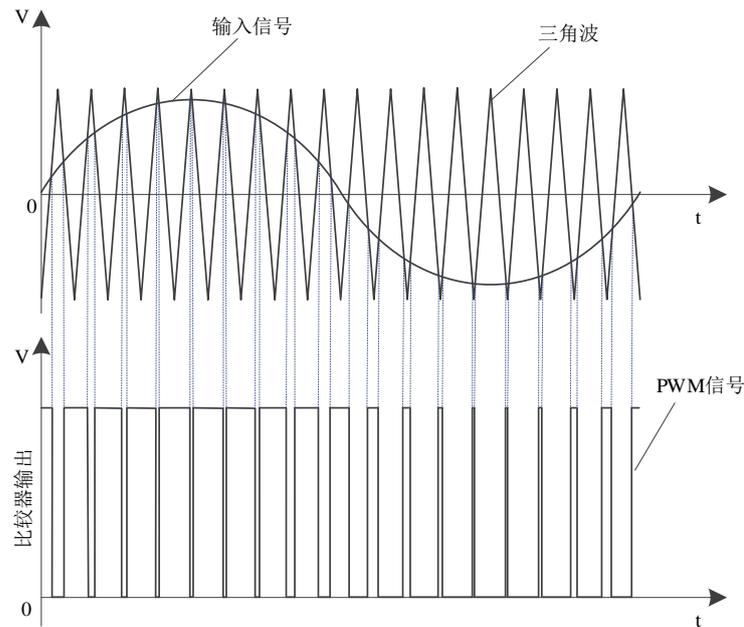


图 4 Class D 放大器工作模式波形示意图

2.5 Class E 放大器

Class E 放大器的原理与 Class D 一样，是 Class D 的电流对偶。将图 4 中的 PWM 信号转换为脉冲电流序列，经过滤波后该电流的平均值与需要的输出电流一致。

Tips: 电压斩波输出不能直接连接容性负载。方波电压接入电容相当于发生了一次短路，过大的浪涌电流会导致开关损坏。同样地，电流斩波输出不能直接向感性负载输出。方波电流接入电感时瞬时产生高压，导致开关承受过大的电压应力。在 Class D 和 Class E 放大器的斩波开关输出节点需要根据负载电容和电感串入补偿电感或电容来补偿负载的容性或感性，减小开关的电流和电压应力。配置这部分补偿电感或电容的目的并不是滤除斩波输出中的谐波，但可以与滤波需要的电感或电容合并设计。

2.6 Class F 放大器

Class F 放大器可以看作是在一个周期波形内只输出一次斩波脉冲的 Class D 放大器。Class F 通常用于调幅电台和调频电台的载波放大，即对一连串的周期波形放大。将输入信号与某个固定电平比较，大于该电平则输出为高、小于该电平则输出为低。在一个正弦周期内，只产生了一个斩波输出脉冲。这个脉冲的宽度与输入信号的幅度有关，需要通过一个低通滤波器滤除脉冲序列中的高频成分、保留与脉冲宽度有关的基波成分。Class F 放大器输出信号示意如图 5 所示。

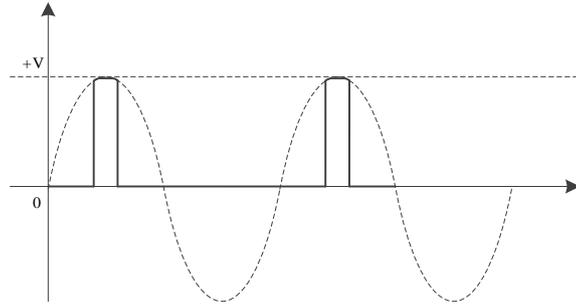


图 5 Class F 放大器输出信号示意图

2.7 Class G 放大器

Class G 类放大器³通常采用高、低两组工作电压 ($\pm V_H$ 和 $\pm V_L$) 供电, 工作在小信号电平时, 放大器采用较低电源电压, 并在信号电平增加后切换为较高电源电压。低幅度输出时有效传递到负载的电压是相对于低电压轨电源的, 高幅度输出时则是相对于高电压轨电源的。Class G 放大器这种电源轨切换设计, 既保持了信号的形状也提高了其工作效率^[2]。Class C 和 Class F 放大器仅适合放大正弦波式样的载波信号, 而对于像音频信号这种由多个频率正弦波叠加、大波上携带小波的信号则完全不适用。Class G 放大器输出信号示意如图 6 所示。

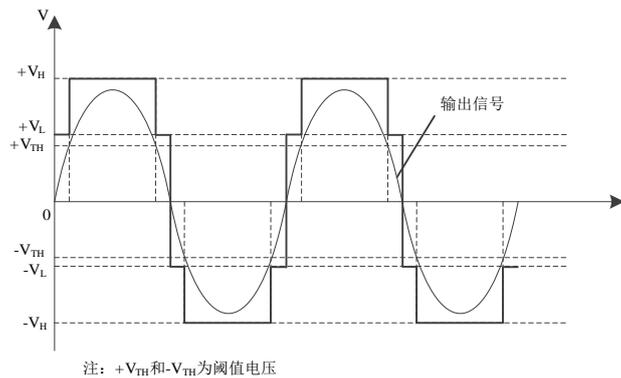


图 6 Class G 放大器输出信号示意图

2.8 放大器类别及效率对比

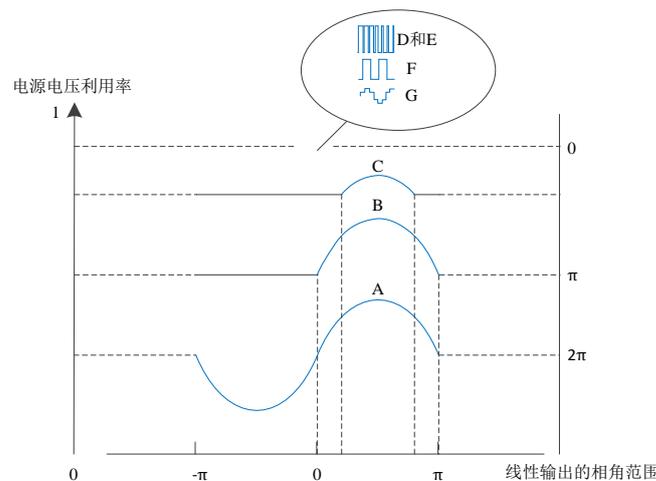


图 7 放大器类别和效率对比示意图

³ Class G 功放具有高效能、低失真特性, 多应用于高保真音响系统, 如本公司的 ft2815Q、ft2830P、ft2910P 等产品。

3 输出结构分类

3.1 有输出变压器结构

早期的收音机音频放大器使用电子管作为放大元件。电子管工作电压高、输出阻抗高，可以输出高电压但负载能力弱。通常使用一个变压器来完成阻抗匹配，使电子管放大器能驱动阻抗较低的喇叭，电路结构如图 8 所示。业界对输出结构的改进和分类都是相对于这种早期利用变压器输出的放大器来说的。如果不考虑输出变压器并联电感的作用，保持信号形状不因放大过程而改变，这个放大器工作在 Class A 类（考虑变压器并联电感和串联电感的滤波作用，其不失真工作范围略好于 Class A 类）。

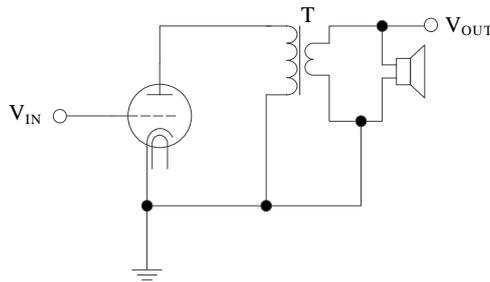


图 8 有输出变压器电路结构

3.2 OTL 电路结构

OTL（Output Transformer Less，无输出变压器）电路结构强调它是不需要输出变压器的功放。从电路的变化看，主要是使用低压大电流三极管取代了电子管，并且不再需要阻抗匹配变压器。电路架构如图 9 所示，它采用单电源供电方式，仍需要电容耦合隔离其输出端的直流偏置电压。如果保持信号的形状不变，则该放大器的最大输出范围是电源电压，属于工作在 Class A 类放大器。与有变压器的放大器相比，OTL 提供了更小的体积、更低的成本以及更高的保真度。然而，由于存在耦合电容，可能会影响电路的低频响应。

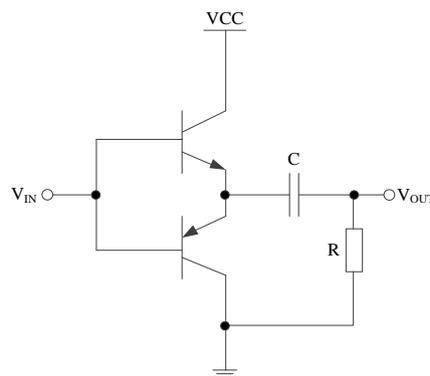


图 9 OTL 电路结构（省略了对两支三极管的偏置电路）

上图中的两支三极管，一个负责输出（推）电流、一个负责吸入（挽）电流，这种结构也叫做推挽输出结构。从两支输出三极管连接的形态来看，其外观类似南美印第安人的图腾柱，所以该电路结构也被称为图腾柱输出结构。

3.3 OCL 电路结构

OCL (Output Capacitor Less, 无输出电容) 电路结构采用对称双电源供电, 其电路架构如图 10 所示。该电路稳态时输出电压为 0V, 可省去输出电容, 直接将输出信号传递给负载, 从而避免了耦合电容可能带来的低频响应问题。

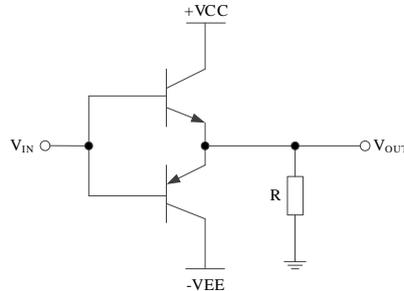


图 10 OCL 电路结构

3.4 BTL 电路结构

从 OTL、OCL 命名可以看出, 早期 BTL 电路结构是指 Bridge-tied Transformer Less (桥式无变压器)。BTL 对输出结构的关键改进是从单端输出变成了差分输出。后期 BTL 的概念演化成了 Bridge-Tied Load, 即桥接负载输出结构。如图 11 所示, BTL 是输出互补的两个 OTL 或 OCL 结构, 负载像座桥连接在两个推挽图腾柱中间。差分连接的效果使得负载两端的最大电压可达 VCC, 采用单电源达成了像 OCL 这样的双电源才能实现的最大输出幅度。

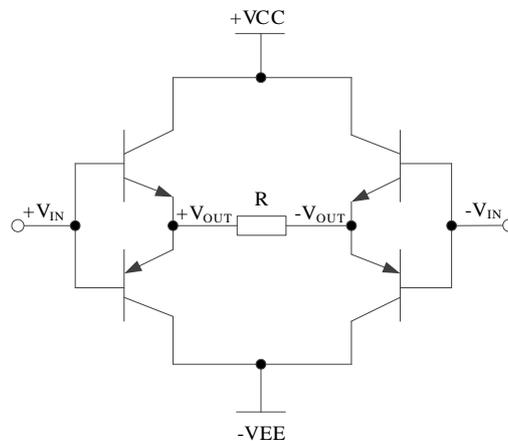


图 11 BTL 电路结构 (桥接负载输出)

SGM4891 等低功率音频放大器产品的简化示意如图 12 所示, 均为 BTL 输出结构^[3]。

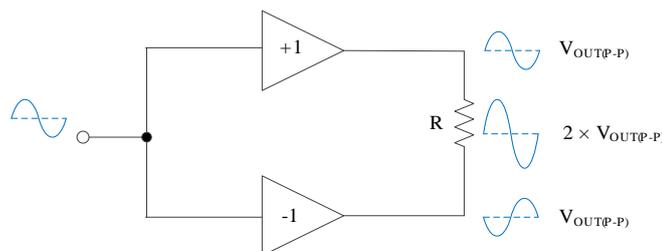


图 12 BTL 输出结构的集成音频放大器示意

3.5 真差分输出互补 Class A 放大器

真差分输出互补 Class A 放大器的电路结构以及输入输出波形示意如图 13 所示。该类放大器采用偏移的单端输入，工作在 Class A 模式。每个放大器分别相对于对方的输出放大输入信号。真差分是指其输出的平均电压可以不确定，但输出相减则完整输出信号。

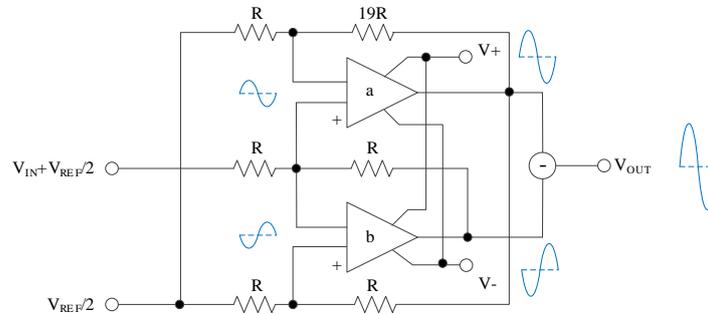


图 13 真差分输出互补 Class A 放大器结构

3.6 Class AB 放大器

Class AB 放大器⁴是真差分输出互补 Class A 放大器的一种，其电路结构与图 13 一致，但需要将两个放大器配置到不同增益。假设放大器 a 增益配置到 20，放大器 b 增益配置为 1，当输入信号变大时，放大器 a 会比放大器 b 提前饱和。以上述配置为例，放大器 a 刚饱和时放大器 b 摆幅仅是 a 输出幅度的 1/20。放大器 a 饱和后放大器 b 在剩下的 19/20 幅度空间里将继续保持线性差分输出。放大器 a 和 b 输出信号如图 14 所示。假定放大器 a 的增益足够高，则放大器 a 不是处在靠上饱和就是靠下饱和，这时放大器 b 总是相对于 a 输出半个正弦波。将两路输出信号相减，则可得到最大无失真摆幅接近于电源电压的两倍。当输入为小信号时，则不存在放大器饱和状态，输出信号示意如图 14 中红线所示。无论是 Class A 还是 Class D、Class E 和 Class G 均可接成 Class AB 输出结构来扩大其输出功率。

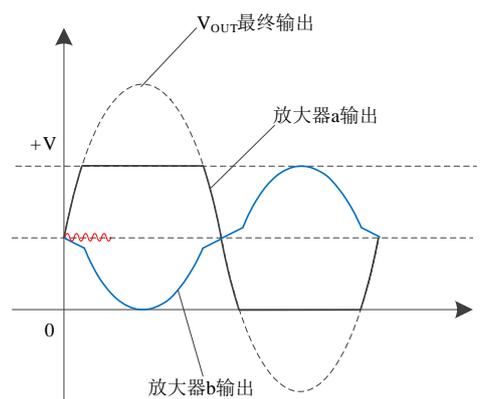


图 14 Class AB 放大器输出信号示意图

3.7 Doherty 放大器

因高频损耗激增，难以在高频应用中实施 Class D、Class E、Class G 这样的结构来改善功放的

⁴ Class AB 功率放大器产品多用于低功率音频驱动，如本公司的 SGM4895 (5V@1.3W)。

效率。如果把 Class G 看作是不同电压电源的组合改善效率，把真差分互补 Class AB 看作针对不同半波改换电源连接来改善效率，Doherty 放大器则是利用行波在不同时间接入不同数量的放大器来改善效率的方案。它利用传输线连接了两个放大器，峰值放大器仅在峰值前后输出，利用传输线将峰值放大器与主放大器的输出行波合并。电源电压不变，合成的行波幅度加倍。原理上讲两个放大器之间有 90° 错相，峰值放大器输出时来自主放大器的信号处于 0° 附近的低幅度，其输出电流不因主放大器的行波而减小，而在行波合并节点则出现幅度叠加。对于合并节点后的网络而言，幅度增加也可以看作源阻抗降低，从而可以获得更大功率。

Doherty 放大器电路结构如图 15 所示^[4]，由两个放大器 and 一组匹配网络组成。射频信号首先被分路器分成两路相移差 90° 的信号，分别接入主放大器和峰值放大器。当输入功率较低时，只有主放大器输出，输出等效负载为高负载 Z_c ，峰值放大器不工作；当信号功率超过主放大器的最大输出能力时，峰值放大器开始工作，负载匹配网络会将主放大器的等效负载阻抗从 Z_c 变为 Z_b ，同时将峰值放大器的负载阻抗从 Z_p 变为 Z_b 。此时，主放大器和峰值放大器电流都达到最大值，负载均为 Z_b ，功率输出达到最大。这种设计使得 Doherty 放大器能够在保持线性度的同时显著提高效率。Doherty 放大器被广泛用于 3G、4G 和 5G 移动通信系统以及其他无线电通信系统。

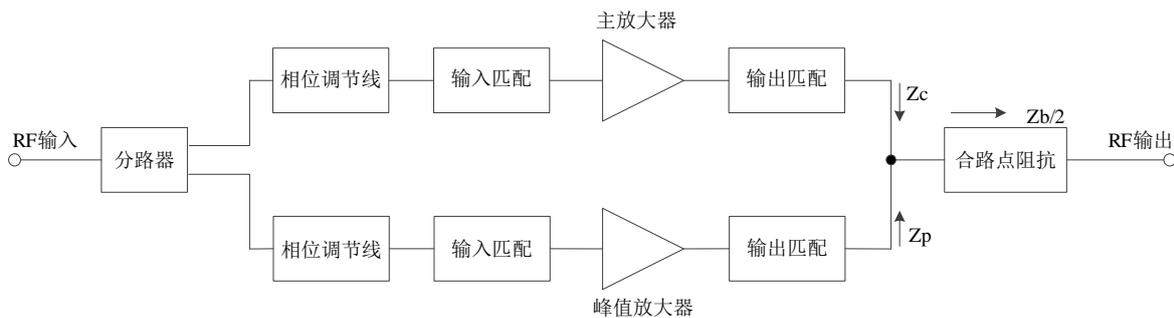


图 15 Doherty 放大器电路结构

4 参考资料

- [1] 放大器的常见种类[EB/OL]. (2019-10-19). <https://m.elecfans.com/article/1094942.html>.
- [2] 吴红奎. G 类放大器的基本原理及其应用[EB/OL].
- [3] Analog Devices, Inc. MAX4364/MAX4365 Datasheet [EB/OL]. (2017-11-17). <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX4364-MAX4365.pdf>.
- [4] 张玉兴, 陈会, 文继国. 射频与微波晶体管功率放大器工程[M]. 电子工业出版社, 2013.

修订记录

注意:历史版本的页码可能与当前版本的页码不同。

| 日期 | 版本 | 描述 |
|-----------|-------|------|
| 2024-5-27 | REV.A | 首次发布 |

重要声明

SGMICRO 保留更改电路设计、产品规格和产品描述的权利，恕不另行通知。

本文档内容仅供参考。本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何承诺。对于本文档中可能出现的错误，以及因本文档提供的信息和使用本文档而造成的任何附带或间接损失，本公司不作任何明示或暗示的陈述和保证。

此文档未授予任何知识产权许可。除了 SGMICRO 在其产品的销售条款和条件中声明的责任外，本公司概不承担任何其他责任。

www.sg-micro.com

联系方式

圣邦微电子(北京)股份有限公司

地址：北京市海淀区西三环北路 87 号国际财经中心 D 座
1106 室
邮编：100089
电话：010-88825716/17
传真：010-88825736

深圳办事处

地址：深圳市南山区科技园高新南六道 6 号迈科龙大厦
15 楼
邮编：518063
电话：0755-26715323/26715619
传真：0755-26748460

上海办事处

地址：上海市徐汇区漕溪北路 88 号圣爱大厦 1706 室
邮编：200030
电话：021-64396434
传真：021-64396434-804

台湾办事处

地址：台北市信义区基隆路二段 7 号 5 楼之 2
邮编：11052
电话：886-2-27583383