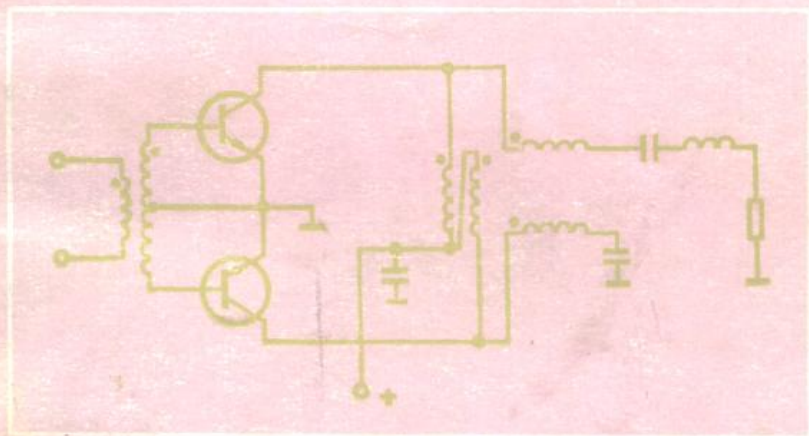


数字与模拟电子线路教学小丛书

D类和E类开关模式 功率放大器

胡长阳 编



高等教育出版社

数字与模拟电子线路教学小丛书

D类和E类开关模式 功率放大器

胡长阳 编

高等教育出版社

DT16/121
本书是一九八一年“电子线路教材编审小组”南京会议确定编写的。

全书共分三章。第一章绪论,着重介绍提高功率放大器效率的途径,分析了D类和E类功率放大器的特点;第二章讨论了D类开关模式功率放大器的类型、工作原理、功耗分析及设计和调整;第三章讨论了E类开关模式功率放大器的类型、工作原理、功耗分析及设计和调整。本书也体现了作者从科研中提出的新看法。本书物理概念清楚,系统性较强,文字通顺简练。

本书可作为高等院校无线电技术和电子类高年级学生、研究生和教师的参考书,也可供从事无线电工程技术工作的人员参考。

本书经“电子线路教材编审小组”委托黄贯光副教授审阅,同意作为高等学校教学参考书出版。

责任编辑:李永和

数字与模拟电子线路教学小丛书

D类和E类开关模式功率放大器

胡长阳 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.5 字数 72,000

1985年1月第1版 1985年1月第1次印刷

印数 0.000—6,760

书号 15010·0566 定价 0.76 元

12:0168

序 言

本书是一九八一年“电子线路教材编审小组”南京会议确定编写的。它扩展了高频电路中功率放大器部分的教学内容,可作为高等院校电子线路课程的教学参考书。

开关模式功率放大器是一类正在研究发展中的功率放大器。本书从工程观点出发,概括地介绍了晶体管 D 类和 E 类功率放大器的工作原理和工程设计,因而,也可以作为有关工程技术人员工作之参考。

编写本书的基础是近两年来编者在张肃文教授指导下所做的研究工作,书中一些有益的判断和结论均来源于实验。在编写过程中,又得到张肃文教授的热情帮助。完稿之后,又经黄贯光副教授仔细审阅后提出极为宝贵的修改意见。编者谨在此向张肃文和黄贯光二位先生致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,并且编写时间又较仓促,文中错误和缺点在所难免,热忱希望读者给予批评指正。

编 者

1983年8月于华中工学院

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 功率放大器提高效率的途径.....	1
§ 1.2 <i>D</i> 类和 <i>E</i> 类功率放大器的工作特点.....	3
1.2-1 <i>D</i> 类开关模式功率放大器的工作特点	4
1.2-2 <i>E</i> 类开关模式功率放大器的工作特点	6
第二章 <i>D</i>类开关模式功率放大器	9
§ 2.1 电压开关型 <i>D</i> 类功率放大器.....	9
2.1-1 放大器的工作原理	9
2.1-2 输出回路分析	23
2.1-3 输入回路分析	29
2.1-4 激励和激励功率	35
§ 2.2 电流开关型 <i>D</i> 类功率放大器.....	37
2.2-1 放大器的工作原理	37
2.2-2 恒流电感 L_1 和 L_2 的计算.....	41
2.2-3 实际电路	44
§ 2.3 <i>D</i> 类开关模式功率放大器的损耗分析.....	49
2.3-1 渡越损耗	49
2.3-2 饱和损耗	53
2.3-3 放大器的实际效率	54
§ 2.4 <i>D</i> 类开关模式功率放大器的设计与调整.....	56
2.4-1 设计思想	56
2.4-2 设计步骤	59
2.4-3 设计举例	61
2.4-4 <i>D</i> 类功率放大器的调整	65
第三章 <i>E</i>类开关模式功率放大器	69
§ 3.1 工作原理.....	72

3.1-1 集电极电压表达式	73
3.1-2 输出电压幅度	74
3.1-3 功率和效率	75
§ 3.2 电路参数的最佳计算	76
3.2-1 晶体管集电极的峰值电压和电流	76
3.2-2 按最佳条件计算函数 g	77
3.2-3 计算电路参数	78
§ 3.3 负载网络分析	79
3.3-1 负载网络有载 Q_L 的选取	79
3.3-2 电抗元件计算	82
§ 3.4 E 类开关模式功率放大器的损耗分析	83
3.4-1 渡越损耗	83
3.4-2 饱和损耗	84
3.4-3 负载网络的损耗	84
3.4-4 放大器的效率	84
§ 3.5 工程设计与调整	85
3.5-1 设计步骤	86
3.5-2 阻抗变换网络	89
3.5-3 设计举例	92
3.5-4 E 类功率放大器的调整	96
§ 3.6 其它 E 类电路形式	100
3.6-1 E 类推挽功率放大器	100
3.6-2 具有串联电感的并联调谐 E 类功率放大器	101
参考文献	104

第一章 绪 论

高频功率放大器是无线电发送设备的重要组成部分。它的主要任务是放大高频信号,使其达到足够的功率,以满足天线辐射的需要或技术指标要求。

高频功率放大器不仅应用于各种类型的发射机中,而且许多电子设备,如功率信号源、高频大功率加热设备和高频换流器等,也都广泛地用到。

高频功率放大器的主要技术指标有输出功率、效率、功率增益、带宽和谐波抑制等。由于发射机的输出功率和效率主要取决于高频功率放大器,对同一发射机来说,效率的提高意味着输出功率的增大,当输出功率一定时,效率的提高使消耗的电源功率减小,管子的耗散功率降低。这对于节省能源、使用较小的功率管输出较大的功率、减小设备的体积和重量都有颇大的实际意义。因此,提高功率放大器的效率一直是人们关注的重要课题,它推动了功率放大技术的不断发展。

§ 1.1 功率放大器提高效率的途径

功率放大器效率的提高,主要反映在放大器件工作状态的改进。从A类(甲类)、B类(乙类)低频功率放大器发展到C类(丙类)高频调谐式功率放大器(以下简称为高频功率放大器),目的都是为了提高功率放大器的效率。

8510451

A类工作状态, 通角(θ)为 180° , 理想效率为 50%; B类工作状态, 通角(θ)为 90° , 理想效率为 78.5%; C类工作状态, 通角(θ)小于 90° , 其效率比 B类更高。

由此可见, 功率放大器提高效率的途径是以减小通角和加大激励功率为代价的。现在要研究的问题是, 如何进一步提高效率?

一种方法是, 沿袭上面的方法, 继续增加激励和减小通角。对 C类高频功率放大器来说, 当通角减小到零时, 理想效率达到 100%, 但输出功率亦为零, 这是没有意义的。因而, 必须寻找新的途径。

功率放大器的效率, 包括放大器件(晶体管的集电极)效率和输出网络的传输效率两部分。功率放大器实质上是一个能量转换器, 它把电源供给的直流能量转换为交流能量。晶体管转换能量的能力常以集电极效率 η_c 来表示, 前面提到的效率都是以 η_c 定义来计算的。

若电源供给的直流功率为 P_{dc} 转换后的交流输出功率为 P'_o , 则

$$\eta_c = \frac{P'_o}{P_{dc}} = \frac{P'_o}{P'_o + P_c} \quad (1-1)$$

这里, P_c 为转换过程中消耗在集电极上的部分能量, 称为集电极耗散功率。如要提高效率(增加 η_c), 则应尽量减小集电极的耗散功率 P_c 。

已经知道, 集电极耗散功率 P_c 是集电极瞬时电压 v_c 与集电极瞬时电流 i_c 在一个周期 T 内的平均值, 即

$$P_c = \frac{1}{T} \int_0^T v_c i_c dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} v_c i_c d\theta \quad (1-2)$$

对于 A, B, C 类功率放大器来说, 由于功率放大管工作于有源状态, 集电极电流 i_c 与集电极电压 v_c 都比较大, 因而, 晶体管的集电极耗散功率 P_c 也比较大, 放大器的效率也就难于继续提高。

提高效率新的途径是使晶体管工作在开关状态, 即当 i_c 流通时 v_c 很小, 甚至趋近于零; 当 i_c 截止时, v_c 却达到很大。这样, 在任一时刻内, i_c 与 v_c 的乘积都很小, 甚至趋近于零, 因此, 晶体管的集电极耗散功率 P_c 亦很小, 甚至趋近于零。 D 类功率放大器正是按照这个原理来实现高效率放大的, 它的理想效率为 100%, 实际效率为 90% 左右。

E 类功率放大器在提高效率方面比 D 类更进一步。它是按照“ i_c 与 v_c 不同时出现”的道理来设计的。这样, 在任一时刻 i_c 与 v_c 的乘积均为零, P_c 亦为零。理想效率为 100%, 实际效率为 95% 左右。

本书将研究以晶体管为放大器件的 D 类和 E 类开关模式功率放大器。关于其它类型的高效率功率放大器, 请参阅参考文献[3]。

§ 1.2 D 类和 E 类功率放大器的工作特点

与 A, B, C 类功率放大器相比较, D 类和 E 类功率放大器的特点是, 晶体管工作于开关状态。

晶体管作为开关运用时, 通常是两种工作状态: 一种是饱和导通, 由于它的饱和压降很小(或内阻很小), 相当于“开关接通”, 简称“开”态; 另一种是截止状态, 由于它的内阻很大

(或电流很小), 相当于“开关断开”, 简称“关”态。由于 D 类和 E 类功率放大器中晶体管以开关方式工作, 所以, 这一类型放大器又统称为开关模式功率放大器。

1.2-1 D 类开关模式功率放大器的工作特点

图 1-1 为 D 类开关模式功率放大器的组成方框图。两只参数基本相同的晶体管, 在激励信号的作用下, 作为有源双刀单掷开关工作。“开”态(饱和导通)时, i_c 很大但 v_c 很小; “关”态(截止)时, i_c 趋于零而 v_c 却很大。因此, 在任何时刻 i_c 与 v_c 的乘积都很小, 即 P_c 很小, 从而实现了高效率放大。

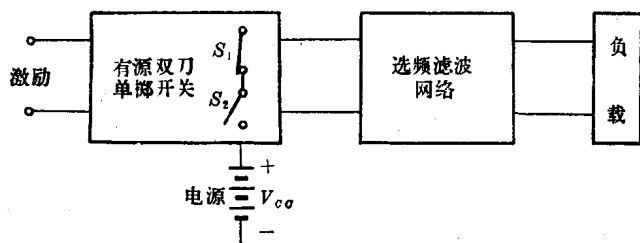


图 1-1 D 类开关模式功率放大器方框图

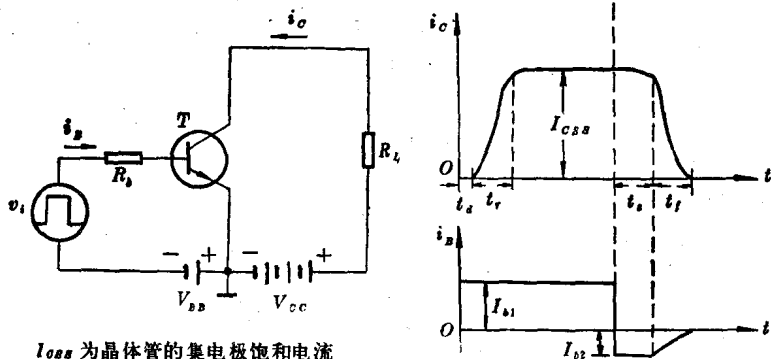
因为晶体管是开关工作, 所以, 集电极电压(或电流)是一连串规则的矩形波, 它包含丰富的谐波成分。加选频滤波网络的目的, 就是选出基频分量, 滤除不需要的谐波分量。这样, 在负载上就可得到所需要的基频电压或电流, 完成功率放大的任务。

D 类开关模式功率放大器的选频滤波网络, 与 C 类基本

相同。而 D 类工作状态比 C 类工作状态效率得到提高的根本原因是两管工作于开关状态。正是由于这一特点, 放大器输出信号的幅度与激励信号之间没有线性关系。这样, D 类功率放大器就不能放大幅度变化的信号, 而只能放大等幅信号。显然, 亦不能进行基极和发射极调幅, 只能进行集电极调幅。与 C 类比较, D 类放大器进行集电极调幅时可以获得比较高的效率。

D 类功率放大器的损耗功率有两方面: (1) 低频时, 主要是晶体管的饱和压降(或内阻)不为零所引起的损耗, 这是众所周知的; (2) 高频时, 除了饱和压降所产生的损耗外, 还有晶体管作为开关工作, 转换不理想所带来的损耗。由于晶体管的开关过程总是需要一定的时间, 假设 t_d 为延迟时间, t_r 为上升时间, t_s 为储存时间, t_f 为下降时间。

图 1-2 为正极性方波激励时, 晶体管的开



I_{CSS} 为晶体管的集电极饱和电流

图 1-2 晶体管的开关过程

关时间对集电极电流波形的影响。

晶体管由“关”到“开”(即由截止到导通),经历了 t_d 与 t_r 两个时间,合起来称为开启时间 t_{on} , $t_{on}=t_d+t_r$ 。从“开”到“关”(即从导通到截止),经历了 t_s 和 t_f 两个时间,合起来称为关断时间 t_{off} , $t_{off}=t_s+t_f$ 。总的的时间 $t_{on}+t_{off}=t_d+t_r+t_s+t_f$ 称为晶体管的开关时间。

显然,由于晶体管存在开关时间,使D类功率放大器在高频运用时发生了困难。如果开关时间只占信号周期很小的部分,放大器仍然可以保持高效率工作;若开关时间占去信号周期的较大部分时,就会发生晶体管该“开”时不能及时“开”,该“关”时不能及时“关”,因而,在开关转换的瞬间,两个晶体管可能同时导通或同时截止。这不仅使放大器的损耗增加,效率降低,而且还可能由于二次击穿作用使晶体管损坏。

为了克服上述缺点,一九七五年索科尔斯(Sokals)提出了高效率放大的新方法,这就是E类功率放大器^[10]。

1.2-2 E类开关模式功率放大器的工作特点

E类开关模式功率放大器由单个晶体管组成,它仍然工作于开关状态。图1-3为此放大器的电路组成方框图。

一般来说,E类放大器的晶体管在激励信号作用下,可以等效为一个非理想开关:“导通”时,等效开关的内阻不一定为零;“断开”时,等效开关的内阻也不一定为无限大。同样,开关“导通”与“断开”的转换时间也不必等于零。当开关按激励信号的频率周期性的工作时,就把来自电源的直流能量转变为交流能量,它的基波频率等于开关频率。为了使基频分

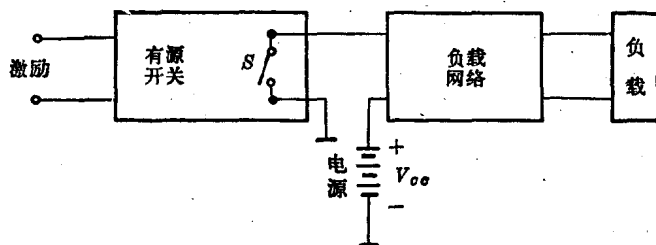


图 1-3 E 类开关模式功率放大器方框图

量输出最大,开关占空比约为 50%,即一半时间“导通”,另一半时间“断开”。负载网络可以包含一个低通或带通滤波器,以滤除不需要的谐波成分,并用以变换负载阻抗的数值。

E 类功率放大器的特点是,适当选取负载网络的参数,使它取得最佳的瞬态响应。也就是说,当开关“导通”(或“断开”)的瞬间,由于负载网络的瞬态响应,使得集电极电压(或电流)降为零后,才能“导通”(或“断开”)。这样,即使开关转换时间与信号周期比较已相当长时,也能避免晶体管同时产生大的电压与电流。这就避免了在开关转换期间晶体管产生功耗,从而克服了 D 类功率放大器的缺点。所以, E 类功率放大器的频率上限和效率均较 D 类高。

同 D 类一样, E 类功率放大器输出信号的幅度与激励信号之间不存在线性关系,所以, E 类功率放大器亦不能放大幅度变化的信号,只能放大等幅信号。当然也不能进行基极和发射极调幅,只能在集电极进行调幅。在这种情况下,能获得较好的线性,但对于晶体管的电流和耐压的要求比 D 类要高一些。

由于 E 类开关模式功率放大器是近几年提出的新型高效

率放大器，目前正处于理论和实验的研究阶段。这些研究表明，它还难于实现宽频带高效率的放大，距离实际应用还需一段艰苦的研究工作。随着电子器件的发展和技术的进步，E类开关模式功率放大器的应用范围仍然是很广阔的。

第二章 D 类开关模式功率放大器

一般晶体管开关模式 D 类功率放大器由一对晶体管和外部电路组成。在激励信号的作用下，两管轮流饱和导通和截止。

晶体管开关模式 D 类功率放大器的电路形式很多，按其电路组态可分为电压开关型和电流开关型两大类。工作时，如果两管集电极电压波形为矩形波的放大器，则称为电压开关型 D 类功率放大器；如果两管集电极电流波形为矩形波的放大器，则称为电流开关型 D 类功率放大器。

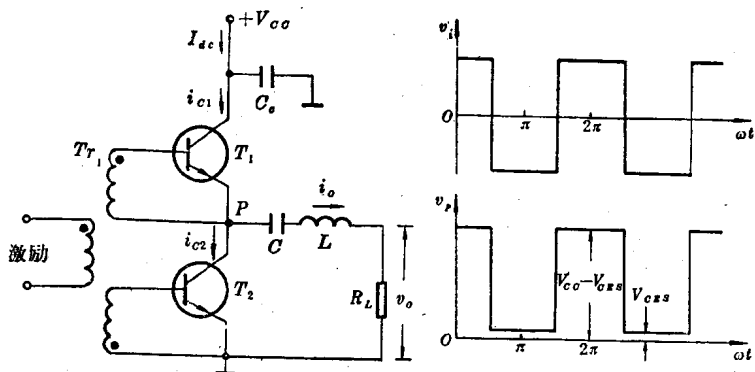
§ 2.1 电压开关型 D 类功率放大器

2.1-1 放大器的工作原理

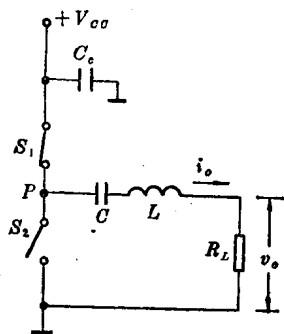
为了简化原理分析，假设：(1) 晶体管作为开关转换时的损耗可以忽略不计；(2) 输出端的调谐回路谐振于激励信号的基频；(3) 晶体管截止时无漏电流损耗，即内阻为无限大。

1. 准互补 D 类功率放大器

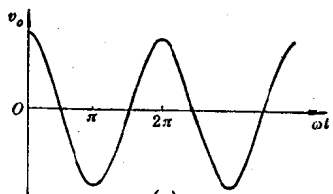
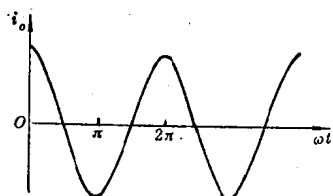
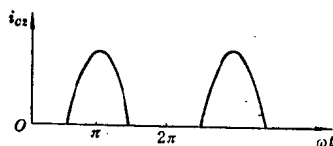
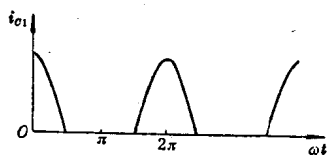
准互补放大器电路原理图如图 2-1(a)所示。其中， T_1 和 T_2 为两个参数基本相同的晶体管， LC 为输出端的串联调谐回路， R_L 为等效负载电阻， C_c 为高频旁路电容。输入变压器 Tr_1 使两管获得幅度相等、相位相差 180° 的输入信号。加在



(a)



(b)



(c)

图 2-1 准互补D类功率放大器
(a) 电路原理图; (b) 等效电路;
(c) 电压电流波形

变压器 T_{r1} 初级的激励信号,可以是正弦波或矩形波电压,而矩形波电压激励的效率更高。

若激励信号是基频为 f 的矩形波电压。在正半周时, T_1 管饱和导通,等效开关 S_1 闭合, T_2 管截止,等效开关 S_2 断开。负半周时刚好相反,即开关 S_1 断开 S_2 闭合。故可画出放大器的开关等效电路如图2-1(b)所示。

需要说明的是,今后在分析 D 类功率放大器时,对于饱和导通的晶体管,仍然考虑它的饱和压降,并且认为 $V_{CES1} \approx V_{CES2} = V_{CES}$ 。换句话说,在开关 S 闭合时,其上的电压不为零,而是管子的饱和压降 V_{CES} ,这更符合实际情况。

下面研究放大器正常工作时,各部分的电压电流波形,由此可说明放大器的工作原理。

当开关 S_1 闭合, S_2 断开时, P 点电压应为电源电压 V_{CC} 减去 T_1 管的饱和压降 V_{CES} 。当开关 S_1 断开, S_2 闭合时, P 点的电压则应等于 T_2 管的饱和压降 V_{CES} 。由此可见,在激励电压的作用下, $v_P(t)$ 应为一矩形波电压,所以称之为电压开关型 D 类功率放大器。

与此同时,由于输出(L, C, R_L)回路的选频滤波作用,输出电流 $i_o(t)$ 为一余弦波电流,其频率为激励信号的基频。显而易见,晶体管集电极电流 $i_{c1}(t)$ 和 $i_{c2}(t)$ 就应该是余弦脉冲[见图2-1(c)]。在等效负载电阻 R_L 上就可得到频率为 f 的余弦波电压,完成了放大功能。

由于两管高频电流在等效负载电阻 R_L 上的流向相反,偶次谐波相互抵消,输出的最低谐波是三次,所以,负载上的波形较好。