

高等学校试用教材

电子技术基础

中 册

华中工学院工业电子学教研室编

康华光 主编

人民教育出版社

内 容 简 介

本书是华中工学院自动控制系工业电子学教研室近年来在总结教学经验和学习国内外较新的教材和文献资料的基础上编写而成的。本书分上、中、下三册出版。上册包括：放大电路基础，频率特性与多级放大器，场效应管放大器以及反馈放大器与正弦波振荡器；中册包括：功率放大器，运算放大器，直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析；下册包括：脉冲数字电路基础，触发器与多谐振荡器，基本数字部件，场效应管数字集成电路和晶体闸流管电路。

书中通过各种半导体器件及电路，阐述电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。各部分内容均介绍了电路实例，并配有一定数量的例题和习题。

本书可供高等学校电力工程专业和与其相近的专业作为“电子技术基础”课程的试用教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

电 子 技 术 基 础

中 册

华中工学院工业电子学教研室编

康 华 光 主 编

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

北 京 印 刷 一 厂 印 装

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张 10.625 字数 249,000

1979年4月第1版 1979年10月第1次印刷

印数 1—105,000

书号 15012·0141 定价 0.89 元

目 录

第五章 功率放大器

5.1 射极输出器作为小功率放大器	2
5.2 互补对称功率放大电路	7
5.2.1 工作在乙类的基本互补对称电路	7
5.2.2 工作在甲乙类的互补对称电路	15
5.2.3 采用一个电源的互补对称电路	18
5.2.4 复合互补对称电路	22
5.3 变压器耦合功率放大器	27
5.3.1 变压器耦合单边功率放大器	29
5.3.2 变压器耦合推挽功率放大器	33
5.4 功率管的散热问题	38
5.4 半导体三极管的二次击穿	43
本章小结	46
参考文献	47
思考题和习题	48

第六章 运算放大器

6.1 直接耦合放大器及其特殊问题	52
6.1.1 级间耦合方式及电位移动电路	52
6.1.2 零点漂移	56
6.2 差动式放大器	58
6.2.1 差动式放大器的基本电路	58
6.2.2 射极耦合差动式放大器	61
6.2.3 具有恒流源的差动式放大器	69
6.2.4 差动式放大器的传输特性	73
小结	75
6.3 线性集成放大器	75
6.3.1 线性集成电路的特点	78

6.3.2	线性集成放大器典型电路分析	79
6.4	线性集成放大器的主要技术指标	93
6.5	运算放大器的线性应用	95
6.5.1	基本运算放大器	93
6.5.2	运算放大器的基本应用	110
* 6.5.3	有源校正和有源滤波电路	113
小结		142
6.6	运算放大器的非线性应用	144
6.6.1	比较器	144
6.6.2	非正弦波信号产生器	147
* 6.6.3	采样-保持电路	158
* 6.6.4	精密交直流变换器	161
小结		165
* 6.7	线性集成放大器使用时的一些实际问题	168
6.7.1	线性集成放大器的粗测	168
6.7.2	零点调整	170
6.7.3	自激振荡的消除	171
6.7.4	保护措施	172
6.7.5	提高输入电阻	175
6.7.6	提高输出功率	176
6.7.7	上升速率	178
附录	几种常用线性组件简介	182
1.	8 FC 1 低增益线性组件	182
2.	5 G 23 中增益线性组件	184
3.	8 FC 2 中增益线性组件	184
4.	8 FC 3 高增益线性组件	185
附表 1	几种线性组件主要参数表	186
参考文献		187
思考题和习题		188

第七章 直流稳压电源

7.1	单相桥式整流电路	197
-----	----------	-----

7.2 滤波电路	201
7.2.1 电容滤波电路	202
7.2.2 其他滤波电路	206
* 7.2.3 倍压整流电路	209
7.3 稳压管及简单稳压电路	211
7.3.1 硅稳压管	211
7.3.2 稳压管稳压电路的工作原理及参数选择	215
7.4 带放大器的串联反馈式稳压电路	221
7.4.1 电路的组成及稳压原理	221
7.4.2 提高稳压电源性能的措施	225
* 7.4.3 稳压电源质量指标与电路参数的关系	231
* 7.4.4 带放大器的串联反馈式稳压电路的设计	236
* 7.4.5 直流稳压电源实例	241
7.5 集成稳压电源	246
7.6 开关式稳压电源	250
本章小结	255
参考文献	256
思考题和习题	256

* 第八章 电子电路的计算机辅助分析

8.1 单管放大电路静态工作点的分析计算	233
8.1.1 各种形式电路的综合及电路方程	263
8.1.2 程序及应用举例	266
8.2 低频情况下负反馈放大器放大倍数的计算	270
8.2.1 交流等效电路及节点导纳矩阵方程	271
8.2.2 高斯-约当 Gauss-Jordan 消去法	273
8.2.3 计算程序及应用举例	278
8.3 有源网络的直流分析	282
8.3.1 矩阵的基本运算及其子程序	283
8.3.2 矩阵法构成电路节点方程	295
8.3.3 有源网络的直流分析程序及应用举例	301
8.4 有源网络的交流分析	306
8.4.1 有源网络交流分析与直流分析的比较	306

8.4.2 有源网络的交流分析程序	307
本章小结	326
参考文献	329
思考题和习题	330

第五章 功率放大器

功率放大器所要解决的主要矛盾是如何使半导体三极管本身的损耗小,在允许的非线性失真条件下,输出的信号功率尽可能大。本章首先通过射极输出器作为功率放大器的讨论,说明放大器工作在甲类时效率低的问题。接着介绍了工作在乙类和甲乙类的互补对称电路。虽然这种电路有一系列优点,但当负载电阻太大或太小时,将使管子的耐压或电流不易满足。随后简略地介绍了变压器耦合功率放大电路。最后,还讨论了功率管的散热与二次击穿等问题。

在科学实验和生产实践中,常常要求电子设备或放大器的最后一级能带一定的负载,例如,使扬声器的音圈振动发出声音,推动电机旋转,使继电器或记录仪表动作等,这就要求放大器能输出一定的信号功率。因此,通常将这最后一级称为功率放大器。

如前所述,放大电路实质上都是能量转换电路。从能量控制的观点来看,功率放大器和电压放大器没有本质的区别。但是,功率放大器和电压放大器所要完成的任务是不同的。功率放大器主要要求获得一定的不失真(或失真较小)功率,它通常在大信号状态下工作,因此,功率放大器包含着一系列在电压放大器中没有出现过的特殊问题,这些问题是:

(1) 要求输出功率尽可能大

为了获得大的功率输出,就要求功放管的电压和电流都有足够大的输出幅度,因此管子往往在接近极限运用状态下工作。

(2) 效率要高

由于输出功率大,因此直流电源消耗的功率也大,这就存在一个效率问题,就是把直流电能转换为信号电能的效率要高。

(3) 非线性失真要小

功率放大器是在大信号下工作,所以不可避免地会产生非线性失真,而且同一功放管输出功率越大,非线性失真往往越严重,这就使输出功率和非线性失真成为一对主要矛盾。但是,在不同场合下,对非线性失真的要求不同,例如,在测量系统中这个问题显得重要,而在控制电动机等场合,则以输出功率为主要目的,对非线性失真的要求就降为次要问题了。

(4) 半导体三极管的散热问题

在功率放大器中,有相当大的功率消耗在管子的集电结上,使结温和管壳温度升高。为了充分利用允许的管耗而使管子输出足够的功率,半导体三极管的散热就成为一个重要问题。

此外,在功率放大器中,为了输出较大的信号功率,管子承受的电压就要高,通过的电流就要大,功率管损坏的可能性也就比较大,所以功率管的损坏与保护问题也不可忽视。

在分析方法上,由于管子处于大信号下工作,故通常采用图解法。

5.1 射极输出器作为小功率放大器^[7]

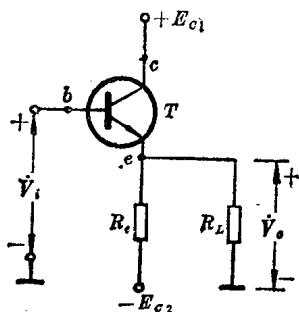


图 5.1.1 射极输出器

在第一章中,曾对射极输出器的某些特性进行了讨论,这种电路虽没有电压放大能力,但却有电流和功率放大作用。在实用中,为提高输入阻抗和扩大跟随范围,常采用图 5.1.1 所示的具有正负电源的射极输出器电路。现在就以此电路为例来进一步讨论它的输出功率和

效率等问题。

1. 电路工作状态分析

在图 5·1·1 电路中,通常 $E_{C1} = E_{C2} = E_C$ 。

在静态情况下,输入信号 $\dot{V}_i = 0$,这时,由 $-E_{C2}$ 和 R_e 确定三极管 T 的静态工作点。当忽略发射结的电压降时, $I_C \approx \frac{E_C}{R_e}$, $V_{CE} \approx E_C$,这种工作状态的图解如图 5·1·2 所示。

当 $\dot{V}_i \neq 0$,即有输入信号时,输出电压将在负载线允许的范围

内变化。由图 5·1·2 知,

在没有接 R_L 时,负载线由 R_e 决定,允许的输出电压范围约为 $2E_C -$

V_{CES} ,若忽略 V_{CES} ,则 $2V_{om} = 2E_C$,即输出电压的幅值 $V_{om} \approx E_C$ 。接上 R_L 后,负载线的斜率由 R_e 和 R_L 的并联值 R'_L 决定,显然,此时输出电压允许的变化范围减小了。当 v_i 朝负向变化,并使 T 截止时,

输出电压的幅度约为 $V_{om} \approx I_C R'_L = \frac{E_C}{R_e} R'_L = \frac{E_C R_L}{R_e + R_L}$,这就是在不失真情况下输出电压的最大幅值,即

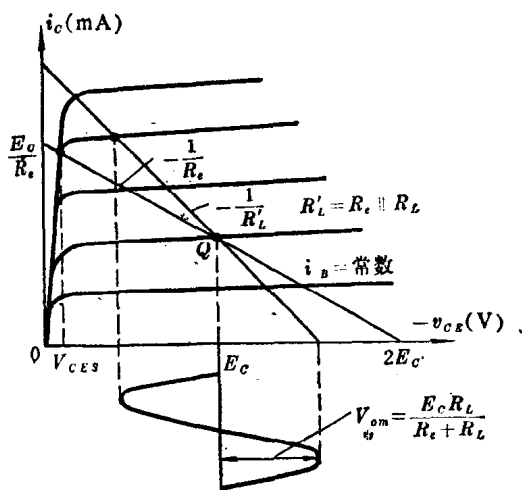


图 5·1·2 图 5·1·1 射极输出器作为功率放大器的工作状态图解

输出电压的幅度约为 $V_{om} \approx I_C R'_L = \frac{E_C}{R_e} R'_L = \frac{E_C R_L}{R_e + R_L}$,这就是在不失真情况下输出电压的最大幅值,即

$$V_{om\max} = \frac{E_C R_L}{R_e + R_L} \quad (5 \cdot 1 \cdot 1)$$

2. 计算

这里主要是讨论输出功率、效率和管耗等的计算。

(1) 输出到负载的功率

所谓输出功率,是指负载上得到的随信号变化的电压和电流

的乘积。衡量输出功率的大小要根据变化电压和变化电流的有效值来决定。当输入信号 V_i 足够大时, 在负载 R_L 上得到的输出电压有效值为

$$V_o = \frac{V_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{E_C R_L}{\sqrt{2}(R_e + R_L)} \quad (5.1.2)$$

所以, 负载上得到的输出功率为

$$\begin{aligned} P_o = I_o V_o &= \frac{V_o^2}{R_L} = \left[\frac{E_C R_L}{\sqrt{2}(R_e + R_L)} \right]^2 \frac{1}{R_L} \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{E_C^2 R_L}{(R_e + R_L)^2} \end{aligned} \quad (5.1.3)$$

根据式(5.1.3), 可求出最大输出功率随负载电阻 R_L 变化的条件。将 P_o 对 R_L 求导数, 并令 $dP_o/dR_L=0$, 则求得最大输出功率的条件为 $R_L=R_e$, 由此可算出图 5.1.1 所示射极输出器的最大输出功率为

$$P_{o,max} = \frac{1}{2} \times \frac{E_C^2 R_L}{(R_e + R_L)^2} = \frac{E_C^2 R_e}{2(R_e + R_e)^2} = \frac{E_C^2}{8R_e} \quad (5.1.4)$$

(2) 管耗

在跟随范围内, 使输出电压为 V_{om} 时, 必有某一输入电压 V_i 与之相对应, 因此, 在负载 R_L 上得到的功率为

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = \frac{V_{om}^2}{2R_L} \quad (5.1.5)$$

这时与输出电压 $v_o = V_{om} \sin \omega t$ 相对应, 在管子集电极产生的管耗为

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (E_C - v_o) i_C d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (E_C - v_o) (i_{R_e} + i_{R_L}) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (E_C - v_o) \left[\frac{v_o - (-E_C)}{R_e} + \frac{v_o}{R_L} \right] d(\omega t) \\ &= \frac{E_C^2}{R_e} - \frac{1}{2} V_{om}^2 \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_e} \right) \end{aligned} \quad (5.1.6)$$

上式说明,消耗在管子中的功率主要包括两部分,第一,静态时的损耗 $\frac{E_C^2}{R_e}$;第二,有信号时引起的管子损耗的变化,即上式的第二项,这个损耗变化值前面带了一个负号,所以实际上此负号表示 P_T 比静态时“少”消耗了这些功率,也就是由信号引起的输出到 R_e 和 R_L 上的功率。但真正供给负载 R_L 上的有用功率只是 $V_{om}^2/2R_L$,而 $V_{om}^2/2R_e$ 是消耗在 R_e 上的无用的信号功率。

(3) 直流电源供给的功率

直流电源供给的功率主要包括三部分： R_L 上得到的输出功率、管耗和 R_e 上消耗的功率。

由于在静态时, $V_o=0$, R_e 上的电压降为 E_C ,通过管子、 R_e 和电源的电流为 E_C/R_e ,显然 P_E 应等于 $2E_C$ 和通过管子静态电流 E_C/R_e 的乘积,因此,电源供给的总功率为

$$P_E = P_o + P_T + P_{R_e} = 2E_C \cdot \frac{E_C}{R_e} = 2 \frac{E_C^2}{R_e} \quad (5.1.7)$$

(4) 效率

由前面分析知,当 $R_L=R_e$ 时,在 R_L 上得到的最大输出功率为 $P_{o\max} = \frac{1}{8} \times \frac{E_C^2}{R_e} = \frac{1}{8} \times \frac{E_C^2}{R_L}$,而电源必须供给的功率为 $P_E = 2 \frac{E_C^2}{R_e}$,所以这个电路的最大效率为

$$\eta = P_{o\max}/P_E = \frac{E_C^2/(8R_e)}{2E_C^2/R_e} = \frac{1}{16} = 6.25\% \quad (5.1.8)$$

显然,只有6.25%的直流电能转换成为负载上的有用信号功率,这个效率是很低的。而且如果信号弱,输出功率将比 $E_C^2/8R_e$ 更小,效率更低。因此,射极输出器只能用在输出功率不大的场合。

那么,如何提高效率呢?这是我们要研究的问题。

3. 功率放大器提高效率的重要途径

根据前面的讨论,我们知道,图5.1.1所示射极输出器电路,在输入信号整个周期内都有电流流过三极管,这种工作方式称为

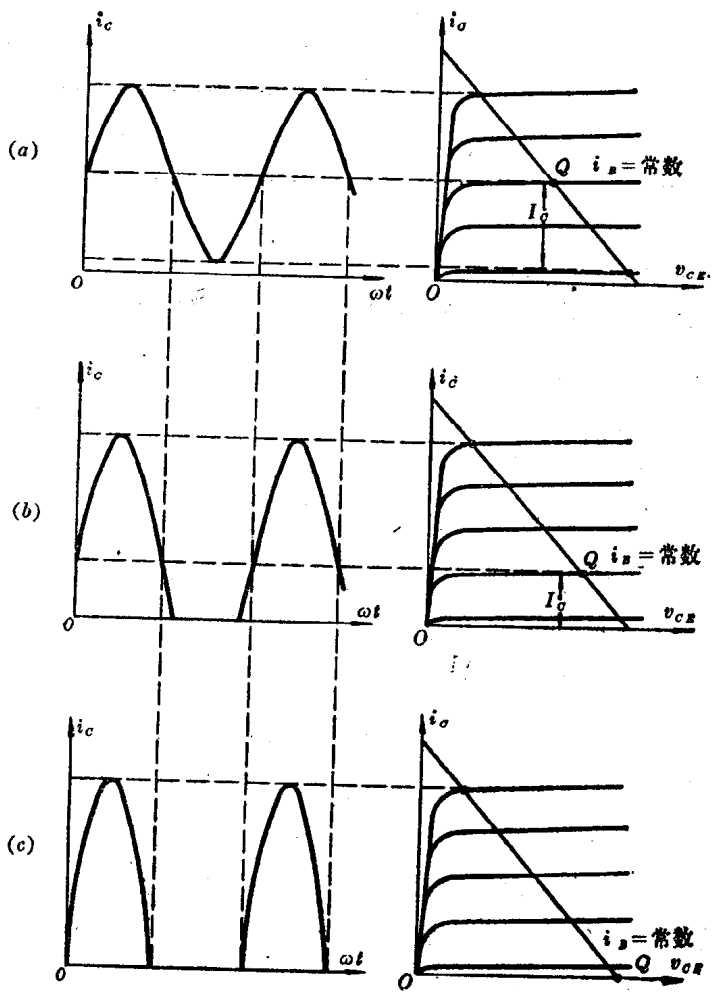


图 5.1.3 静态工作点 Q 下移对放大器工作状态的影响

- (a) 甲类放大在一周期内 $i_c > 0$
- (b) 甲乙类放大在一周期内有半个周期以上 $i_c > 0$
- (c) 乙类放大在一个周期内只有半个周期 $i_c > 0$

甲类放大。甲类放大的典型工作状态如图 5·1·3(a)所示。在甲类放大电路中,电源始终不断输送功率,所以图 5·1·1 所示电路在没有信号输入时,这些功率全部消耗在管子和 R_c 上,并转化为热量的形式散出。随着信号的输入,其中一部分转化为有用的输出功率,信号愈大,输送给负载的功率就愈多,效率则愈高。但如上所述,在图 5·1·1 所示电路中,工作在甲类放大时,效率最高也只能达到 6.25%^{*}。因此,甲类放大主要用于电压放大器。

怎样才能使电源供给的功率大部分转化为有用的信号输出功率呢?从甲类放大电路中我们知道,静态电流是造成管耗的主要因素,如果把静态工作点 Q 向下移动,如图 5·1·3(b)、(c)所示,则静态时消耗在管子和 R_c 上的功率可以显著降低,效率可提高。在图 5·1·3(b)中,有半个周期以上 $i_c > 0$; 图 5·1·3(c)中,一周期内只有半个周期 $i_c > 0$,它们分别称为甲乙类和乙类放大。甲乙类和乙类放大主要用于功率放大器中。

甲乙类和乙类放大,虽然减小了静态功耗,提高了效率,但都出现了严重的波形失真,因此,既要保持静态时管耗小,又要使失真不太严重,这就需要设计新的电路来解决。

5·2 互补对称功率放大电路

5·2·1 工作在乙类的基本互补对称电路

1. 电路组成

工作在乙类的放大器,虽然管耗小,有利于提高效率,但存在严重的失真,使得输入信号的半个波形被削掉了,这是一个很大的矛盾。如果我们用两个管子,使之都工作在乙类放大状态,但一个在正半周工作,而另一个在负半周工作,同时使这两个输出波形都能加到负载上,从而在负载上得到一个完整的波形,这样就能解决

^{*} 工作在甲类的其它功率放大电路,理想的最高效率可达 50%,详见 5·3·1 节变压器耦合单边功率放大器的讨论。

效率与失真的矛盾。

怎样实现上述设想呢？我们可以利用三极管具有 *NPN* 和 *PNP* 两种类型的特点，将一个 *PNP* 三极管代替图 5·1·1 的 R_c ，则电路改接成如图 5·2·1(a) 所示。

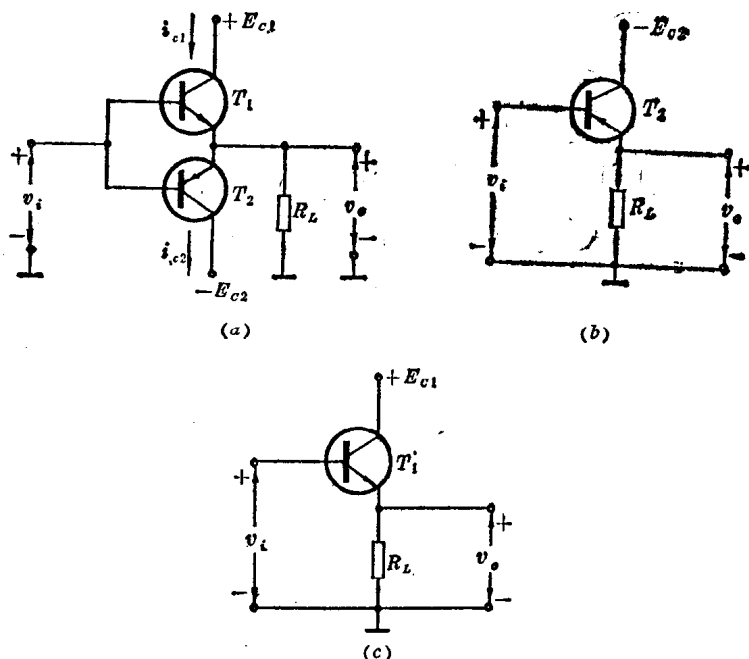


图 5·2·1 两射极输出器组成的基本互补对称电路

(a) 基本互补对称电路 (b) 由 *PNP* 管组成的射极输出器

(c) 由 *NPN* 管组成的射极输出器

这个电路可看成是由图 5·2·1(b)和(c)两个工作在乙类的射极输出器组成。

根据 *NPN* 和 *PNP* 管的特点，同时考虑到半导体三极管发射结处于正向偏置才导电，在图 5·2·1(a) 中，由于基极回路未引入偏流，所以当信号为正半周时， T_2 管截止，只有 T_1 管承担放大任务，有电流通过负载 R_L ；而当信号为负半周时， T_1 管截止，由 T_2

管承担放大任务，仍有电流通过负载 R_L ；这样，图 5·2·1(a) 所示基本互补对称电路实现了在静态时管子不取电流，而在有信号时， T_1 和 T_2 轮流导电，组成推挽式电路，由于两个管子互补对方的不足，工作性能对称，所以这种电路通常叫做“互补对称”电路。

2. 分析计算

图 5·2·2(a) 表示了图 5·2·1(a) 在 v_i 为正半周时 T_1 管的工作情况，图中假定，只要 $v_{BE} > 0$ ， T_1 就开始导电，则在一周期内 T_1 管导电时间约为半周期。图 5·2·1(a) 中 T_2 管的工作情况和 T_1 管相似，只是在信号的负半周导电。为了便于分析，将 T_2 管的特性曲线倒置在 T_1 的右下方，并令二者在 Q 点，即 $v_{CE} = E_C$ 处重合，形成 T_1 和 T_2 管的所谓合成曲线，如图 5·2·2(b) 所示。这时负载线通过 E_C 点形成一条斜线，显然，允许的 i_C 的最大变化范围为 $2I_{cm}$ ， v_{CE} 的变化范围为 $2(E_C - V_{CES}) = 2V_{cem} = 2I_{cm}R_L$ 。如果忽略管子的饱和压降 V_{CES} ，则 $V_{cem} = I_{cm}R_L \approx E_C$ 。

根据以上分析，不难求出工作在乙类的互补对称电路的输出功率、管耗、直流电源供给的功率和效率。

(1) 输出功率

根据前面分析，输出功率用管子的电压变化和电流变化(有效值)的乘积表示，则

$$\begin{aligned}
 P_o &= \frac{I_{cm}}{\sqrt{2}} \frac{V_{cem}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{cem}}{\sqrt{2}} \frac{V_{cem}}{\sqrt{2} R_L} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{V_{cem}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{E_C^2}{R_L} \quad (5 \cdot 2 \cdot 1)
 \end{aligned}$$

式(5·2·1)中 I_{cm} 和 V_{cem} 可以分别用图 5·2·2(b) 中的 AB 和 BQ 表示，所以 $\triangle ABQ$ 的面积就代表了工作在乙类的互补对称电路的输出功率的大小。显然， $\triangle ABQ$ 的面积愈大，就表明输出功率 P_o 也愈大。

(2) 管耗

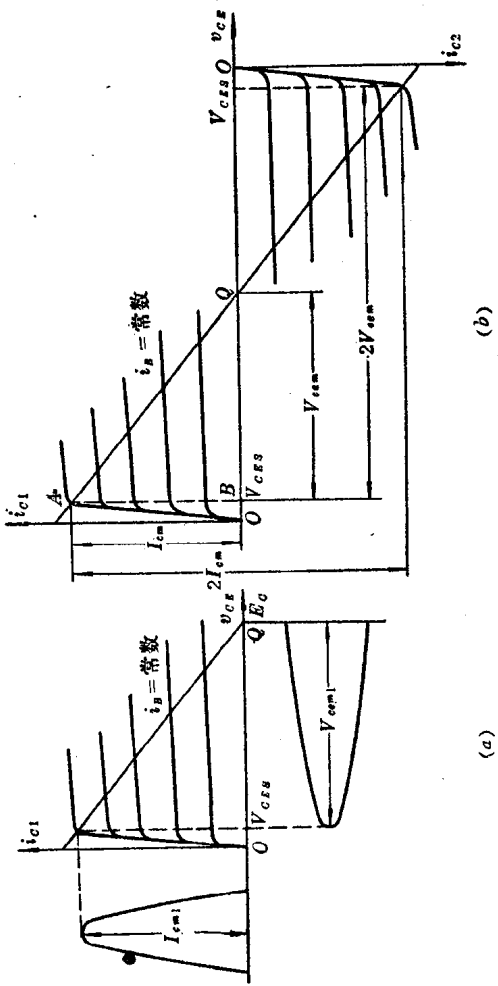


图 5.2.2 $E_{c1} = E_{c2} = E_c$ 时互补对称电路图解分析

(a) 图 5.2.1(a) 电路 v_i 为正半周时 T_1 管工作情况

(b) 互补对称电路工作情况

考虑到 T_1 和 T_2 在信号一个周期内各导电约 180° ，且通过两管的电流和两管两端的电压 v_{CE} 在数值上都分别相等（只是在时间上错开了半个周期）。因此，为求出总管耗，只需先求出单管的损耗就行了。设输出电压为 $v_o = V_{om} \sin \omega t$ ，则 T_1 管的管耗为

$$\begin{aligned}
 P_{T_1} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (E_C - v_o) \frac{v_o}{R_L} d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[(E_C - V_{om} \sin \omega t) \frac{V_{om} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) \right] \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{E_C V_{om}}{R_L} \sin \omega t - \frac{V_{om}^2}{R_L} \sin^2 \omega t \right] d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{R_L} \left(\frac{E_C V_{om}}{\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} \right) \quad (5.2.2)
 \end{aligned}$$

显然，当 $V_{om} = 0$ ，即无信号时，管子的损耗为零，当输出电压幅值 $V_{om} \approx E_C$ 时，由式 (5.2.2) 可求出工作在乙类的互补对称电路每个管子的管耗为

$$P_{T_1} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{E_C^2}{\pi} - \frac{E_C^2}{4} \right) = \frac{E_C^2}{R_L} \frac{4 - \pi}{4\pi} \quad (5.2.3)$$

而互补对称电路两管的总管耗为

$$P_{2T} = P_{T_1} + P_{T_2} = \frac{4 - \pi}{2\pi} \frac{E_C^2}{R_L} \quad (5.2.4)$$

(3) 直流电源供给的功率

直流电源供给的功率包括负载得到的功率和 T_1 、 T_2 损耗的功率两部分，即

$$\begin{aligned}
 P_E &= P_{T_1} + P_{T_2} + P_o = \frac{4 - \pi}{2\pi} \frac{E_C^2}{R_L} + \\
 &+ \frac{1}{2} \times \frac{E_C^2}{R_L} = \frac{2}{\pi} \frac{E_C^2}{R_L} \quad (5.2.5)
 \end{aligned}$$

(4) 效率

效率是负载得到的信号功率和电源供给的功率的比值。