

高等学校试用教材

电子线路

第三册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编

人民教育出版社

高等学校试用教材

电 子 线 路

第 三 册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编

人 民 教 育 出 版 社

本书是按一九七七年高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上,“电子线路”小组讨论修订的“电子线路教材编写大纲”编写的。可作为高等院校无线电技术类专业的试用教材。

全书共分五册。本册介绍了非谐振功率放大器、谐振功率放大器等典型大信号放大电路及正弦波振荡电路的工作原理、性能指标及设计原则。

本册加强了功率放大和振荡的基本概念及分析方法。

本书可供从事无线电技术工作的工人和技术人员参考。

本书责任编辑 李永和。

高等学校试用教材

电 子 线 路

第 三 册

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组编

•

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

潜江县印刷厂印装

•

开本 787×1092 1/32 印张 12 字数 289,000

1979年9月第1版 1982年2月湖北第4次印刷

印数 58,561—77,000

书号 15012·0208 定价 1.00 元

第三册 目 录

第三篇 功率放大电路

第十一章 非谐振功率放大器

内容提要	1
§ 11-1 单管功率放大器	4
11-1-1 单管功率放大器的图解分析	4
11-1-2 功率放大器的输出功率与效率	8
11-1-3 放大器功率的图示	11
11-1-4 功率放大器的矛盾	12
§ 11-2 变压器耦合乙类推挽功率放大器	18
11-2-1 乙类推挽放大电路的工作原理	18
11-2-2 输出功率、效率和管耗	21
11-2-3 乙类推挽放大器和甲类单管放大器的比较	25
11-2-4 功率放大器的非线性失真	27
*11-2-5 功率放大器的推动级	33
§ 11-3 无输出变压器功率放大器	35
11-3-1 变压器激励电路	36
11-3-2 互补对称电路	37
11-3-3 准互补对称电路	43
*11-3-4 集成化功率放大器	45
11-3-5 单端乙类推挽电路的基本关系式	47
§ 11-4 宽频带高频功率放大器	49
11-4-1 普通变压器的频率特性	50
11-4-2 宽频带传输线变压器	53
11-4-3 宽频带功率合成技术	65
§ 11-5 功率管的安全工作	77
11-5-1 功率管的散热	77
*11-5-2 半导体三极管的热不稳定性	82

*11-5-3 半导体三极管的耐压	85
*11-5-4 二次击穿和安全工作区	86
*11-5-5 功率放大管的并联和保护	89
*§ 11-6 应用举例	95
附录一 音频变压器的设计	100
附录二 半导体三极管最高结温与瞬时管耗的关系	107
附录三 电抗性负载的交流负载线	111
复习思考题	112
参考文献	113

第十二章 谐振功率放大器

内容提要	115
§ 12-1 谐振功率放大器的基本原理和分析方法	117
12-1-1 基本线路	117
12-1-2 谐振回路的作用	120
12-1-3 丙类工作为什么效率高	122
12-1-4 谐振功率放大器的分析方法	127
§ 12-2 谐振功率放大器工作状态的计算和分析	129
12-2-1 谐振功率放大器图解计算法	130
12-2-2 谐振功率放大器工作状态的 analysis	138
12-2-3 谐振功率放大器折线计算法	148
§ 12-3 在较高频率下半导体三极管谐振功率放大器工作状态的 特点	154
12-3-1 三极管基区少数载流子渡越时间的影响	155
12-3-2 发射极引线电感的影响	160
12-3-3 半导体三极管饱和压降随频率增加对放大器的影响	161
§ 12-4 谐振功率放大器线路	162
12-4-1 谐振功率放大器电路的组成	162
12-4-2 馈电线路	165
12-4-3 输出回路	169
12-4-4 级间回路	182
12-4-5 半导体三极管的并联与推挽运用	187
12-4-6 谐振功率放大器的调谐与调整	193

§ 12-5 谐振功率放大器功率管的安全工作	196
附录一 余弦脉冲系数表	199
附录二 高频功率半导体三极管的结构特点	202
附录三 用导抗图设计匹配网络的方法	204
复习思考题	209
参考文献	211

第四篇 正弦波振荡电路

第十三章 振荡原理

内容提要	212
§ 13-1 概述	212
§ 13-2 反馈振荡器的基本原理	217
13-2-1 反馈振荡器的典型电路及振荡的物理过程	217
13-2-2 反馈振荡器的自激条件和平衡条件	223
13-2-3 反馈振荡器的振幅稳定条件和频率稳定条件	230
13-2-4 振荡管偏置电路对振荡器性能的影响	238
§ 13-3 振荡器的占据现象和频率拖曳现象	243
13-3-1 振荡器的占据现象	243
*13-3-2 振荡器的频率拖曳现象	249
附录一 根轨迹法在自激振荡器中的应用	255
附录二 振荡器的非线性微分方程及其求解的方法	260
复习思考题	279
参考文献	280

第十四章 正弦波振荡器

内容提要	281
§ 14-1 LC 正弦波振荡器	282
14-1-1 三点式反馈振荡电路	282
14-1-2 场效应管和差分对振荡电路	290
§ 14-2 提高频率稳定度的措施	293

14-2-1	频率准确度和频率稳定度的定义	293
14-2-2	LC 反馈振荡电路频率稳定度的一般分析	295
14-2-3	减小外界因素变化的措施	300
14-2-4	减小 $\Delta\omega_0$ 、 ΔQ_0 和增大 Q_0 值的措施	302
14-2-5	减小 φ_{fk} 和 $\Delta\varphi_{fk}$ 的措施	308
14-2-6	LC 振荡器的设计考虑	314
§ 14-3	晶体振荡器	316
14-3-1	石英谐振器的性能和等效电路	317
14-3-2	晶体振荡器电路	331
14-3-3	晶体振荡器实例	343
§ 14-4	RC 正弦振荡器	346
14-4-1	RC 移相 (或选频) 电路	346
14-4-2	移相式 RC 振荡电路	349
14-4-3	串并联 RC 选频电路振荡器	351
§ 14-5	负阻振荡器	355
14-5-1	负阻的概念	355
14-5-2	负阻振荡原理	360
§ 14-6	放大器的寄生振荡	365
附录一	隧道二极管	370
复习思考题		372
参考文献		375
第三册	名词索引	377

第三篇 功率放大电路

第十一章 非谐振功率放大器

内 容 提 要

对功率放大电路的要求是在半导体三极管安全工作的条件下,高效率地输出足够大的功率。它在线路原理、分析方法、设计计算等方面都和前一篇所讨论的小信号放大电路有许多不同的特点。

功率放大电路按负载的性质不同可以区分为非谐振功率放大器和谐振功率放大器。本章介绍非谐振功率放大器,即放大器的负载是电阻性的放大器。例如,音频功率放大器就属于这一类型的功率放大器。

本章首先讨论了最简单的单管功率放大器原理,通过对单管功率放大器的分析,说明功率放大器特点和基本矛盾。第二节讨论了使用两个半导体三极管组成的推挽功率放大器。上述两种功率放大器都使用输出变压器作为阻抗变换元件。第三节讨论了目前广泛使用的无变压器单端推挽功率放大器。这种电路不需要输出变压器,从而避免了输出变压器所带来的缺点。第四节讨论了宽带高频功率放大器。着重介绍了传输线变压器的工作原理。第五节讨论了功率管安全工作的条件,这些条件(尤其是其中有关散热的条件)适用于所有的大功率电路。

本章最后介绍了一个音频功率放大器的实例，以便对功率放大器的线路有完整的认识。

功率放大器的任务是供给负载以足够大的信号功率。对于不同的放大器，其负载是不同的。例如，在音频放大器中是扬声器；在伺服放大器中是执行电机；在超声放大器中是换能器；在高频功率放大器中是天线等等。

功率放大器与小信号放大器比较有如下特点：

1) 输出功率大 放大器输出足够大的功率，意味着半导体三极管有大的动态工作电压和电流，并接近其极限运用状态。因此，保证管子安全工作就成为设计功率放大器必须着重加以考虑的问题之一。

2) 要求效率高 放大器的输出功率由直流电源功率转换而来，半导体三极管的作用是将直流电源功率按照输入信号的变化规律传送给负载。这种将直流功率转换成交流功率的转换效率就称为放大器的效率，其定义为

$$\text{效率}(\eta) = \frac{\text{负载上交流输出功率}(P_o)}{\text{集电极直流电源输入功率}(P_{dc})}$$

由于功率放大器的输出功率较大，如果效率低，一方面将增加直流电源的供电功率，不利于节省能源（节省能源对于可移动设备、空间设备是非常重要的）；另一方面将使管子集电极消耗功率增大，不利于管子的安全工作。因此，提高效率也是设计功率放大器必须着重加以考虑的问题之一。

综上所述，可见对于各种类型的小信号放大器的共同要求是在稳定工作条件下得到所需要的增益，而对于各种类型的功率放大器的共同要求是在半导体管安全工作的条件下高效率地输出所需功率。尽管小信号放大器和功率放大器都是对信号功率进行放

大的,但因对这两种放大器提出的主要要求不同,因此,功率放大器在线路和设计计算等方面有许多不同于小信号放大器的地方。而且,功率放大器的分析方法也与小信号放大器有区别。后者的交流特性可以用半导体管的小信号交流等效电路来进行分析。而功率放大器则因为信号幅度大,在分析时不能应用小信号等效电路,而必须考虑到三极管伏安特性的非线性。

功率放大器按工作频率的高低一般可区分为低频功率放大器和高频功率放大器。前者典型的例子是扩音机中的功率输出级,后者典型的例子是发射机的输出级。功率放大器按负载的性质又可以区分为非谐振功率放大器和谐振功率放大器。非谐振功率放大器的负载是电阻性(即负载中的电抗分量相对地可以忽略),通常用低频变压器或高频变压器实现所需的阻抗变换。谐振功率放大器的负载一般含有较大的电抗分量,并且用谐振回路实现所需的阻抗变换。低频放大器大都属于非谐振功率放大器,而高频放大器大都属于谐振功率放大器。但也有例外,如超声波发生器就其工作频率而言是属于低频功率放大器。但其负载是电-声换能器,它的等效阻抗含有较大的电抗分量,必须用谐振回路来实现阻抗变换,因此,它是谐振功率放大器。又如发射机中间各放大级采用的宽带变压器耦合的宽带功率放大器,这种放大器就其工作频率来说是属于高频放大器,但就其负载特点而言是非谐振功率放大器。

由于对功率放大器的工作原理和分析方法起决定性影响的因素不是工作频率的高低,而是负载性质的不同,因此,我们把功率放大器区分为非谐振功率放大器和谐振功率放大器两大类,分别加以讨论。

功率放大器按半导体三极管集电极电流流通时间的不同又可区分为甲类状态、乙类状态和丙类状态。三极管在信号的整个周

期中都有信号电流流通的工作状态称为甲类状态，而乙类状态三极管的信号电流只在信号的半个周期中流通，丙类状态三极管的信号电流的流通时间小于信号的半个周期。通常非谐振功率放大器采用甲类和乙类工作状态，而谐振功率放大器采用丙类工作状态。

本章讨论非谐振功率放大器，并以扩音机输出级作为讨论的主要对象。对于非谐振功率放大器，除了输出功率、效率、管子安全工作等项要求外，还要求减小非线性失真。小信号放大器由于信号幅度小，只要合适地选择直流工作点，非线性失真是不大的。但功率放大器的输出电压和电流动态范围比较大，设计不合理时可能因管子的饱和或截止而产生削波失真。即使正确设计，由于动态范围较大，也必须考虑其非线性失真。因此，非线性失真是非谐振功率放大器的重要指标之一。

概括地说，本章将研究非谐振功率放大器如何在半导体三极管安全工作条件下，高效率地、小失真地输出尽量大的信号功率。

§ 11-1 单管功率放大器

11-1-1 单管功率放大器的图解分析

功率放大器要高效率地输出所要求的功率，必须有一个合适的交流负载。但是在一般的情况下，外接负载不等于放大器所要求的交流负载，这就必须用变压器来实现阻抗变换。采用变压器耦合还有一个优点，就是变压器初级线圈对集电极的直流电流呈现很小的电阻，可以减小电源的功率损耗。因此，功率放大器采用变压器耦合而不采用阻容耦合。

图 11-1-1 是利用输出变压器进行阻抗变换的单管功率放大电路。图中 T_{r1} 是输入变压器， T_{r2} 是输出变压器。 R_{i1} 、 R_2 和 R_3

是建立和稳定工作点的偏置电阻。 C_1 对信号频率呈现很小的容抗,使输入信号全部加到三极管 $b-e$ 两端,避免了 R_2 的压降和 R_3 的交流负反馈。

当外接负载为 R_L , 输出变压器 T_{r2} 初级的匝数为 w_1 , 次级匝数为 w_2 时, 根据变压器阻抗变换的原理, 在变压器初级所呈现的交流负载为

$$R'_L = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 R_L = n^2 R_L \quad (11-1-1)$$

式中, $n = w_1/w_2$ 是变压器初级匝数与次级匝数的比值。

下面我们来分析图 11-1-1 所示的单管功率放大器。为了考虑三极管伏安特性的非线性, 必须采用图解分析的方法。图解法已经在第三章加以介绍, 它的步骤是: 首先作出无信号时的直流负载线; 其次确定三极管的静态工作点; 然后作出加入信号后的交流负载线, 以便在输出特性曲线上求得输出功率、管耗等。

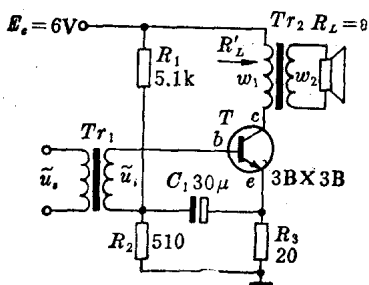


图 11-1-1 单管功率放大器

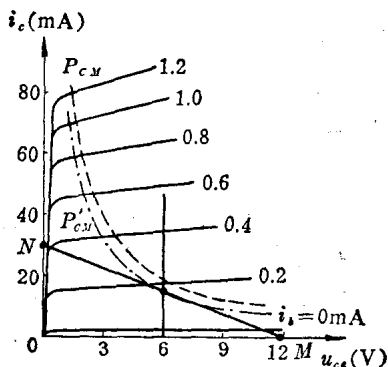


图 11-1-2 功率放大器的负载线

当输入信号电压 $\tilde{u}_i = 0$ 时, 输出变压器 T_{r2} 两端没有感应电压。如果考虑到变压器直流电阻和发射极电阻 R_3 上的直流压降远小于电源电压 E_c , 则可以认为 $u_{ce} = E_c$ 。因此, 直流负载线是一条垂直于横轴的直线, 与横轴交点为 $u_{ce} = E_c$ (本例中为 6 伏)。

图 11-1-2 是单管功率放大器输出特性及其负载线。

由于功率放大器电流、电压动态范围较大, 为防止电流负半周截止, 通常静态工作点电流 I_{bQ} 比小信号放大器大得多。为了使发射极电阻 R_3 上的压降不致过大, 功率放大器的发射极电阻比小信号放大器小得多, 本例中 $R_3=20$ 欧。为避免因 R_3 过小而使工作点稳定性下降, 应采用较小的下偏置电阻 R_2 (或者采用温度补偿的偏置稳定电路)。由于采用了输入变压器 T_{r1} 和旁路电容 C_1 , 因而 R_2 的减小不会象 RC 耦合放大器那样加大对信号的分流作用。

为了确定如图 11-1-1 所示的电路的静态工作点 Q , 可将该电路的偏置电路改画成如图 11-1-3a 所示的等效电路。图中 $E_b = \frac{R_2}{R_1+R_2} E_c = 0.55$ 伏, 是按戴文宁定理求出的等效电势。 $\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} = 470$ 欧是等效内阻。设三极管 3BX3① 的电流放大倍数 $\beta=80$, 则发射极等效电阻为 $(1+\beta)R_3 \approx 1.6$ 千欧。于是, 就可用图 11-1-3b 所示三极管 3BX3 的输入特性与“负载线” ($R=470+1600 \approx 2.1$ 千欧) 的交点 Q , 求出工作点的基极电流 $I_{bQ}=0.175$ 毫安。在图 11-1-2 的输出特性中, 由参变量为 $I_{bQ}=0.175$

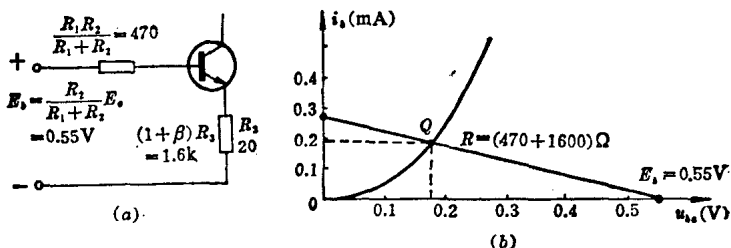


图 11-1-3 工作点电流的求解

① 由于单管功率放大器通常用于输出功率较小的场合, 故其输出管很少采用饱和压降较大的硅管。大多采用 PNP 型锗三极管。这里, 考虑到采用正压电源时叙述较方便, 特以 NPN 型的锗三极管 3BX3 为例进行讨论。

毫安的静态特性曲线和直流负载线的交点，可确定静态工作点的集电极电流为 $I_{cQ}=14$ 毫安。

在动态情况下，即放大器输入端加入正弦信号时，三极管集电极电流和电压均以工作点 Q 为中心摆动，这个摆动在三极管输出特性上的轨迹就是交流负载线，且交流负载线必然通过 Q 点，其斜率为

$$\frac{\Delta i_c}{\Delta u_{ce}} = -\frac{1}{R'_L}$$

式中，负号表示电流 i_c 增加时集电极电压 u_{ce} 下降，反之亦然。

值得指出的是，由图 11-1-2 交流负载线 MN 可以看出，基极电流小于 I_{bQ} 时的集电极瞬时电压高于电源电压 E_c 。这是因为当集电极电流减小，即 $i_c < I_{cQ}$ 时，变压器初级绕组的感应电势和电源电压的极性一致，此时集电极电压便等于电源电压与这个感应电势之和。当信号足够大时，集电极最高电压可达 $(E_c + I_{cQ}R'_L)$ 。如果负载电阻 R'_L 很大，则集电极最高瞬时电压可能超过 E_c 值很多。这是变压器耦合放大器和阻容耦合放大器的显著区别之一。在阻容耦合放大器中，集电极瞬时电压总是低于 E_c 值的。

等效负载电阻 R'_L 可用式(11-1-1)求出。设变压器初级和次级有效值电流分别为 I_1 和 I_2 。根据能量守恒定律可知，对于无损耗变压器有

$$I_1^2 R'_L = I_2^2 R_L$$

则利用式(11-1-1)可以写出

$$\frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} = n \quad (11-1-2)$$

实际上，变压器是有损耗的（低频损耗主要由变压器初、次级直流电阻引起的）。考虑到变压器的损耗，则有

$$I_1^2 R'_L \eta_T = I_2^2 R_L$$

式中， η_T 是变压器效率（通常 η_T 约为 0.7~0.85），由上式可得

$$R'_L = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \frac{R_L}{\eta_T} = \frac{n^2 R_L}{\eta_T} \quad (11-1-3)$$

设本例中 $\eta_T = 0.8$, 已知负载电阻 $R_L = 8$ 欧, 输出变压器的匝数比 $n = w_1/w_2 = 6.5$, 则可得等效负载电阻为 $R'_L = 420$ 欧。相应的交流负载线即为图 11-1-4 中的 MN 线。

11-1-2 功率放大器的输出功率和效率

如果放大器有正弦信号输入时, 变压器初级的交流电流和电压的振幅分别为 I_{cm} 和 U_{cm} , 则放大器的输出功率为

$$P_o = \frac{1}{2} I_{cm} U_{cm} = \frac{1}{2} I_{cm}^2 R'_L \quad (11-1-4)$$

显然, 输出功率 P_o 和输入信号大小有关, 输入信号越大, I_{cm} 和 U_{cm} 越大, 输出功率 P_o 就越大。但是输出功率有没有限制呢?

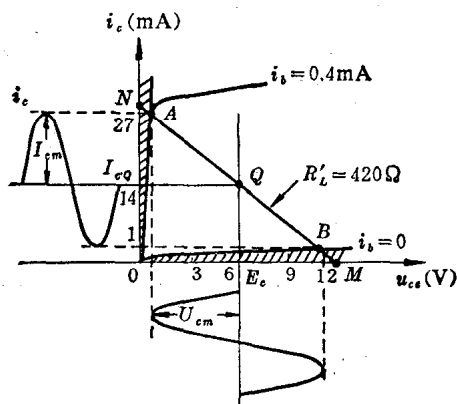


图 11-1-4 放大器的最大输出功率

我们可利用图 11-1-4 来说明这个问题。由图可以看出, 集电极电流的正半周只能达到 A 点, 因为当集电极电流增大到 A 点之后, 继续增大基极信号电流 i_b , 集电极电流 i_c 则不再增加, 致使电流正半周出现平顶失真。此时输出电压正好是负半周。对于 PNP 管则相当于输出电压的正半周。 A 点由交流负载线 MN 和临界饱和线相交而得, A 点的横坐标称为饱和压降 V_{CES} 。因此, 这半周的输出电压(电流正半周)的最大峰值不会超过 $(E_c - V_{CES})$ 。

集电极电流的负半周只能达到 B 点。它是负载线 MN 与 $i_b = 0$

所对应的输出特性 $i_o = I_{CEO}$ 的交点, 也就是说 $i_o = I_{CEO}$ 时电流“截止”(严格地说, 只有当 $i_b = -I_{CBO}$, $i_o = I_{CEO}$ 时三极管才截止。但 $i_b < 0$ 时, 输出信号已出现明显失真。故粗略地认为 $i_b = 0$ 、 $i_o = I_{CEO}$ 便出现截止)。当 i_b 继续减小时, 集电极电流 i_o 不再减小, 于是输出电流负半周出现平顶失真。可见输出电流负半周的最大峰值不应超过 $(I_{oQ} - I_{CEO})$ 。当静态工作点选择在交流负载线中点时, 输出的最大功率为

$$P_{\text{omax}} = \frac{1}{2} (E_c - V_{CES}) (I_{oQ} - I_{CEO}) \quad (11-1-5)$$

本例中 $I_{oQ} = 14$ 毫安, 已知三极管的 $V_{CES} = 0.4$ 伏, $I_{CEO} = 1$ 毫安, 并设静态工作点处在交流负载线的中点, 则

$$P_{\text{omax}} = 0.5(6 - 0.4)(14 - 1) \times 10^{-3} = 36.4 \text{ mW}$$

如果考虑到变压器损耗和发射极电阻的损耗, 负载电阻 R_L (如扬声器) 真正得到的功率还要小些。设变压器效率 $\eta_T = 0.8$, 则扬声器功率

$$P_{L\text{max}} = P_{\text{omax}} \eta_T = 36.4 \times 10^{-3} \times 0.8 \approx 29 \text{ mW}$$

由于三极管临界饱和线 OA 的斜率通常很大, 即 $V_{CES} \ll E_c$; 其次 I_{CEO} 通常也很小, 即 $I_{CEO} \ll I_{oQ}$, 因此, 在近似计算中饱和压降 V_{CES} 和 I_{CEO} 可忽略不计。由于交流工作点选择在交流负载线的中点, 即

$$I_{oQ} = E_c / R'_L \quad (11-1-6)$$

于是式(11-1-5)便可改写成

$$P_{\text{omax}} = \frac{1}{2} E_c I_{oQ} = \frac{1}{2} \frac{E_c^2}{R'_L} \quad (11-1-7)$$

利用这个近似公式就可估算出单管功率放大器最大可能输出的功率。我们把这种功率放大器称为甲类功率放大器。其特点是三极管在整个信号周期中有信号电流流通, 因而信号电流是一个完整的正弦波。

现在我们来讨论电源供给的直流功率和放大器的效率。当放大器无信号输入时,三极管的工作点电流为 I_{cQ} , 直流电源供给的功率 $P_{dc} = E_c I_{cQ}$ 。当有正弦信号输入时,集电极电流 i_c 波形如图 11-1-4 所示,交流分量的振幅为 I_{cm} 。而电源电压 E_c 是不变的。因此电源供给的瞬时功率为

$$p_{dc} = E_c i_c = E_c (I_{cQ} + I_{cm} \sin \omega t)$$

这个瞬时功率在一个周期中的平均值就是电源供给的平均功率

$$P_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_{dc} d\omega t = E_c I_{cQ} \quad (11-1-8)$$

由式可知,当有正弦信号输入时,电源供给的平均功率 P_{dc} 等于静态时电源所供给的功率。 E_c 越高, I_{cQ} 越大, P_{dc} 也越大。本例 $P_{dc} = 6 \times 14 \times 10^{-3} = 84$ 毫瓦。

根据上式和式(11-1-4)就可求得功率放大器的效率

$$\eta = \frac{P_o}{P_{dc}} \times 100\% = \frac{1}{2} \frac{I_{cm} U_{cm}}{I_{cQ} E_c} \times 100\% \quad (11-1-9)$$

由式可见,信号越强,放大器效率越高。利用式(11-1-7)可求出最大效率

$$\eta_{\max} = 50\%$$

如果考虑饱和压降 V_{CES} 和穿透电流 I_{CEO} 的影响,实际甲类功率放大器的最大效率仅为 $40 \sim 45\%$ 。本例 $\eta_{\max} = 36.4/84 \approx 43\%$ 。必须指出,放大器效率并不包括变压器的损耗。因为输出功率 P_o 是消耗在变压器初级等效负载 R'_L 上的功率,没有扣除变压器的损耗功率。

由此可见,甲类功率放大器的输出功率小于电源供给功率的一半,而其余大半部分消耗在三极管的集电极上。当没有信号输入时,也就没有功率输出,这时电源供给的功率全部消耗在管子上。从以上讨论可更清楚地说明:放大器的输出功率是由直流电