

晶体管电路

第二册

清华大学 电子工程系 编
工业自动化系

科学出版社

73.769
503
2:1

晶 体 管 电 路

(第二册)

清华大学 电子工程系 编
工业自动化系

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是清华大学电子工程系和工业自动化系在最近几年的教育革命实践中编写的。第一册包括半导体器件原理及交流放大器、直流放大器、反馈放大器、调制式放大器、运算放大器等晶体管小信号放大电路的内容；第二册包括功率放大器、正弦波振荡器、直流稳压电源、可控硅元件及其应用等内容。

本书对于晶体管电路的基本概念、基本原理和基本分析方法作了比较深入的讨论，并通过各部分的例题和习题介绍了一批工程实用电路。

本书可供大学自动控制或相近类型的专业作为电子学课程的教材使用，也可供具有初中以上文化程度的工人和工程技术人员自学和参考。

晶 体 管 电 路

(第二册)

清华大学 电子工程系 编
工业自动化系

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

北京新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1974 年 7 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1974 年 7 月第一次印刷 印张：14 插页：2

印数：0001—305,850 字数：363,000

统一书号：15031·73

本社书号：235·15—7

定 价：1.05 元

目 录

第八章 功率放大器	575
第一节 从单管功率放大电路看功率放大的矛盾	575
一、什么是功率放大	575
二、单管变压器耦合功率放大电路	581
三、功率放大的矛盾	590
第二节 乙类推挽放大	591
一、乙类推挽放大电路的引出和工作原理	591
二、乙类推挽电路的图解分析	594
三、输出功率、效率、管耗和耐压的计算	597
四、计算举例	604
*五、设计举例	607
*附录 输出变压器的制造工艺	612
第三节 无输出变压器的推挽功率放大器	621
一、一分为二看变压器	621
二、互补对称式电路	621
三、无输出变压器的功率放大器举例	625
小结	635
*第四节 功率放大管的散热和并联	636
一、衡量散热能力的一个参数——热阻	637
二、热阻的计算	639
三、晶体管散热问题计算举例	641
四、晶体管并联时的考虑	643
五、晶体管并联后的均流问题	646
*第五节 功率管的损坏和保护	648
一、由于热不稳定现象而损坏	648
二、由于超过晶体管的耐压而损坏	650
三、由于二次击穿现象而损坏	652
小结	659
第六节 功率放大器的应用举例	660
一、3瓦手提扩音器	660
二、直流电动机的调速	664

第九章 正弦波振荡器669

第一节 正弦波振荡的条件与 RC 移相式振荡器 670

一、正弦波振荡的条件..... 671

二、RC 移相式振荡器 673

小结 683

第二节 采用 RC 选频网络的正弦波振荡器 686

一、RC 选频网络的频率特性 686

二、采用 RC 串-并联选频网络的正弦波振荡器 697

三、采用双 T 选频网络的正弦波振荡器..... 700

四、RC 选频放大器 703

五、RC 正弦波振荡器实例 706

第三节 LC 振荡器 718

一、LC 并联谐振电路 718

二、LC 振荡器的工作原理 723

三、LC 振荡器的应用实例 734

*四、LC 振荡器的设计 738

*五、LC 振荡器的调整 742

*六、频率稳定度..... 744

*附录 变压器反馈式振荡器起振条件的推导..... 749

*第四节 石英晶体振荡器..... 751

一、石英晶体的压电效应及等效电路..... 751

二、石英晶体振荡器的分类及工作原理..... 753

三、进一步提高频率稳定度的措施..... 755

四、两种高稳定度石英晶体振荡器的实例..... 757

五、晶体振荡器的测试调整..... 763

第十章 直流稳压电源767

第一节 整流和滤波..... 768

一、单相半波整流和滤波..... 769

二、常用的整流滤波电路..... 773

三、整流滤波电路参数的选择..... 782

四、复式滤波器..... 785

小结 790

*附录一 整流滤波电路的参数和曲线..... 794

*附录二 小功率电源变压器的设计与制造	797
第二节 直流稳压电源	802
一、 硅稳压管稳压电路	803
二、 串联型晶体管直流稳压电源	811
三、 串联型晶体管稳压电源的设计	821
四、 稳压电源的调试步骤及安装测试中的注意事项	826
小结	831
*第三节 串联型稳压电源的稳定度计算及改善电源性能的措施	834
一、 稳压电源稳定度的计算及其改善措施	834
二、 提高稳压电源温度稳定性的措施	845
三、 扩大稳压电源输出电压调节范围的措施	848
四、 稳压电源的安全措施——过流保护	850
五、 提高稳压电源效率的措施——开关型稳压电源	857
第四节 串联型稳压电源的应用电路	860
一、 放大部分为“恒流源负载”的稳压电源	861
二、 两级差动放大、集电极输出型稳压电源	863
三、 采用辅助电源 U_0 的晶体管稳压电源	865
四、 高稳定度的稳压电源	865
五、 宽范围可调的稳压电源	866
六、 线性组件稳压电源	867
第十一章 可控硅元件及其应用	871
第一节 可控硅元件	873
一、 可控硅的工作原理	874
二、 可控硅的伏安特性与电压定额	876
三、 可控硅的电流定额与温升	880
四、 控制极特性及触发电压、电流与功率	884
*五、 可控硅的开通与关断过程	886
*六、 其他可控硅	888
小结	890
第二节 可控整流	891
一、 单相半波可控整流	892
二、 双半波可控整流	902
三、 单相桥式可控整流	905

*四、三相可控整流	913
小结	919
第三节 触发电路	920
一、单结晶体管及其触发电路	921
*二、三相半控桥的触发电路	931
*三、晶体管触发电路	934
小结	939
*第四节 有源逆变	939
一、电能的流转	940
二、双半波与单相桥式逆变电路	942
三、三相半波与三相桥式逆变电路	946
四、逆变失败与控制角的限制	949
五、有源逆变的应用举例	952
小结	957
*第五节 交流调压	957
一、单相交流调压	958
二、三相交流调压	964
小结	965
*第六节 逆变器和直流断续器	966
一、逆变器	966
二、直流断续器	973
小结	975
第七节 可控硅的串并联与保护	975
一、可控硅的并联应用	975
二、可控硅的串联应用	977
三、可控硅的过电流保护	978
四、可控硅的过电压保护	979
小结	985
*附录一 整流电路的交流分量与电抗器的选用	986
*附录二 有功电流、无功电流及功率因数	989
本书符号说明	994
本书部分习题答案	1005

第八章 功率放大器

内 容 提 要

功率放大器是一个以输出功率为重点的放大器。在这种放大器中,晶体管主要起能量转换的作用,即把电源的能量转换为由信号控制的能量。它所解决的主要矛盾是如何使晶体管本身的损耗小而输出的功率大。为了揭露上面所提出的矛盾,本章的第一节先从简单的单管甲类放大谈起,指出利用变压器耦合可以把管子转换出来的功率有效地传给负载,但是效率仍然比较低。在第二节中,说明为了改进上述缺点,引出乙类推挽放大。为了进一步提高输出功率和效率,在功率放大器的原理和形式方面还不断有所发展,第三节介绍了无输出变压器的功率放大器。在这以后,本章着重讨论了输出变压器的工艺、功率管的并联和散热、功率管的击穿和保护等实际问题。

第一节 从单管功率放大电路看功率放大的矛盾

一、什么是功率放大

在一台电子设备中,一个多级放大器的最后一级总要带一定的负载,例如使扬声器发出声音,推动电动机旋转,或者接到可控硅的控制极。总之,需要输出一定的功率。因此这一级通常叫做功率放大级。

“任何运动形式,其内部都包含着本身特殊的矛盾。”功率放大器和电压放大器有共同的地方,即二者都是为了放大信号,所以在电路结构和分析方法上基本相同;但也有不同的地方,电压放大器以放大电压的变化为主,功率放大器则要输送一定的功率。因此

如何能使负载得到尽可能大的输出功率,就构成了它的特殊要求。需要指出的是,输出的功率并不是管子本身给的,而是由电源通过管子给的,晶体管所起的作用,只是把电源的能量按照输入信号的变化规律传送给负载,在这里,能量只是从一种形式转化为另外一种形式。因此我们不能认为晶体管把功率放大了,而是要按照放大的意义来理解:即以输入信号的较小能量来控制由电源流到负载的电流,使负载得到较大的能量,体现了“以小控制大、以弱控制强”的作用。这就是功率放大的含意。

为了说明什么是输出功率,以及为使负载得到一定的输出功率电源必须给出多少功率这两个问题,我们先来研究一个以扬声器(通常称为喇叭)为负载的放大电路,如图 8-1 所示。这是一个象第三章图 3-25 那样的工作点稳定电路,在给定的参数下,它的

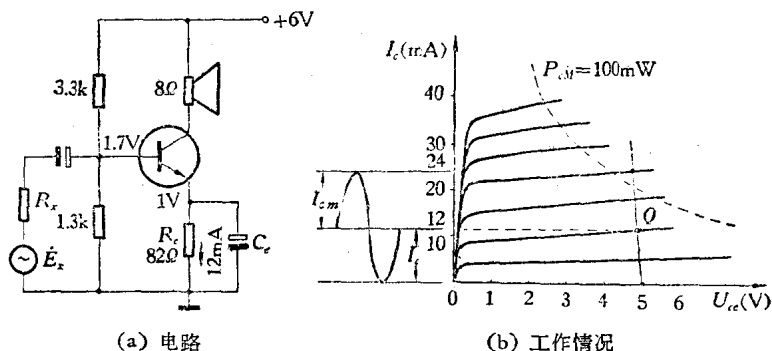


图 8-1 把扬声器接到放大管集电极的工作情况

静态工作点 Q 和有关的电压、电流值已标在图中,即 $U_{ce} \approx 5V$, $I_c = 12mA$, $U_{be} = 0.7V$ 。当有输入信号时,工作点将沿着交流负载线上下移动。假定 C_e 的数值很大,工作时它两端的电压基本不变,因此交流负载线的斜率只是由 $8\Omega^*$ 来决定。为了防止过分失真

* 扬声器的音圈除了代表损耗功率那一部分用电阻表示外,还有电感。 8Ω 一般是指在 400Hz 时的阻抗值。为了分析方便起见,近似认为负载是 8Ω 纯电阻。

和管子的过损耗*, 将输入信号调整到使 I_c 由零变到 24mA , 则根据交流负载线的斜率可知与之相对应的 U_{ce} 变化将为 $24\text{mA} \times 8\Omega = 192\text{mV} \approx 0.2\text{V}$ 。现在的问题是, 在这种情况下扬声器所得到的功率和电源所给出的功率各有多大。

1. 输出到扬声器的功率

首先要指出的是, 所谓输出功率实质上是指变化的电压和变化的电流的乘积, 而不是直流电压和直流电流的乘积, 因为后者只能使扬声器的纸盆移动一下位置, 而只有交变的电压和电流才能使它前后往复运动发出声音。

其次是衡量输出功率的大小要根据变化电压或变化电流的有效值而不是瞬时值。所以在上述工作条件下, 我们首先求出集电极电流变化部分的有效值是 $12 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 8.4\text{mA}$, 由此可得出输出功率 P_{sc} 是

$$\begin{aligned} P_{sc} &= (8.4 \times 10^{-3})^2 \times 8 = 576 \times 10^{-6}\text{W} \\ &= 0.576\text{mW} \end{aligned}$$

这个数值比一个人讲话所给出的功率**还要小得多, 显然不适合作为扩音之用。

2. 电源给出的功率

现在再来看一下为了使负载得到上面所说的功率, 电源究竟要给出多大的功率(记作 P_E)。它是否也等于 0.576mW 呢?

根据电工学中关于计算功率的原则和图 8-1 中的 i_c 波形可知***

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt$$

其中 $e = E_c$, $i = I_c + I_{cm} \sin \omega t$

* 在实际运用时, 可以允许瞬间的过损耗。

** 大概在几毫瓦到几十毫瓦之间。

*** 假设 i_c 波形为正弦并且忽略流过偏置电阻的电流。

则

$$\begin{aligned} P_E &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_c(I_c + I_{cm} \sin \omega t) d(\omega t) \\ &= E_c I_c \end{aligned} \quad (8-1)$$

把具体数值代入得

$$P_E = 6 \times 12 \times 10^{-3} = 72 \text{ mW}$$

计算的结果说明这样一种情况：要使负载得到 0.576 mW 的功率，电源要给出 72 mW 的功率。我们通常把这两个功率之比称为效率，记作 η ，则

$$\boxed{\eta = \frac{P_{sc}}{P_E}} \quad (8-2)$$

将数值代入，

$$\eta = \frac{0.576}{72} = 0.008 = 0.8\%$$

也就是说，以这样的电路作为功率放大，它的效率还不到百分之一。

3. 输出功率的分析

为了要改善这种效率低的情况，我们把注意力先集中在分析一个晶体管在工作时本身消耗了多少功率，同时它又是如何把电源的功率转换成为负载所得到的输出功率的。图 8-2 表示了管子在有信号输入时工作点沿交流负载线由 A 到 B 反复变化的情况。

由图中可知

$$\begin{aligned} u_{ce} &= U_{ce} - U_{cem} \sin \omega t \\ i_c &= I_c + I_{cm} \sin \omega t \end{aligned}$$

则消耗在管子里面的功率 P_T 是

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{ce} i_c d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [U_{ce} I_c + (U_{ce} I_{cm} \\ &\quad - U_{cem} I_c) \sin \omega t - U_{cem} I_{cm} \sin^2 \omega t] d(\omega t) \end{aligned}$$

注意到第二项积分值为零，第三项积分值为 $-\frac{1}{2} U_{cem} I_{cm}$ ，则

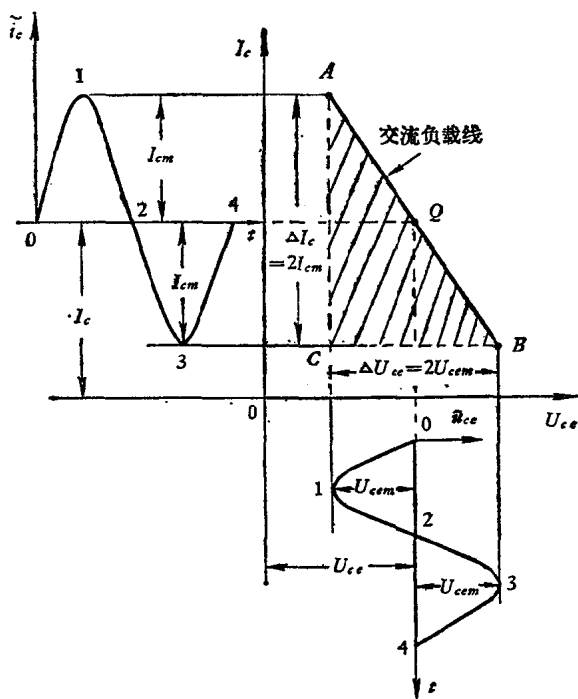


图 8-2 输出功率的分析

$$P_T = U_{ce}I_c - \frac{1}{2} U_{cem}I_{cm} \quad (8-3)$$

式 (8-3) 说明消耗在管子里的功率可以认为是由两部分组成：第一部分是静态时的损耗 (因为只与静态值有关)；第二部分是信号时的损耗 (因为只与变化的幅值有关)，这个损耗，由于前面带了一个负号，所以实质上是输出功率 (记作 P_{sc})，即

$$P_{sc} = \frac{1}{2} U_{cem}I_{cm} \quad (8-4)$$

为了从输出特性上分析方便起见，我们可以把输出功率和总的变化量 (即 ΔI_c 和 ΔU_{ce}) 相联系，并且进一步和由它们组成的三角形面积相联系。由图 8-2

$$U_{cem} = \frac{\Delta U_{ce}}{2}, \quad I_{cm} = \frac{\Delta I_c}{2}$$

则

$$P_{sc} = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta U_{ce}}{2} \times \frac{\Delta I_c}{2} = \frac{1}{8} \Delta U_{ce} \Delta I_c \quad (8-5)$$

而图中三角形 ABC 的面积是

$$\Delta ABC = \frac{1}{2} \Delta U_{ce} \Delta I_c$$

则

$$P_{sc} = \frac{1}{4} \Delta ABC \quad (8-6)$$

联系到图 8-1 中管子的工作情况是 $\Delta U_{ce} = 0.192\text{V}$, $\Delta I_c = 24\text{mA}$, 则 $P_{sc} = \frac{1}{8} \times 0.192 \times 24 = 0.576\text{mW}$, 这也正是前面所计算出来的、负载所得到的功率, 从而说明了负载所得到的功率是通过管子转换出来的这样一个重要关系。

4. 提高效率的措施

前面的分析指出, 如果把一个 8Ω 的扬声器直接接到晶体管的集电极作为负载, 在有信号输入时, 它只得到半个毫瓦多一些的交流功率, 但是电源却要供给七十多毫瓦的功率(还没有把偏流电阻所消耗的功率计算在内), 所以这种放大形式在作为功率放大时, 它的效率还不到 1%, 这是非常不经济的做法, 必须加以改进。

怎样来提高效率呢? 看起来关键在于如何能把管子的输出功率由小转化为大, 同时使不必要的损耗由大转化为小。而要实现这种转化, 就必须改变图 8-1 中的工作状态。

我们先研究一下如何提高管子的输出功率。图 8-2 中对于工作状态的分析表明, 输出功率可以由工作范围所组成的三角形面积来表示。所以要提高输出功率就要加大三角形的面积, 换一句话说, u_{ce} 和 i_c 的变化必须大, 这就要求做到以下几点:

(1) 输入信号必须使工作点在交流负载线上有足够大的移动范围。当晶体管的工作状态既不超过 P_{CM} , BU_{ceo} (一般 I_{CM} 允许少量超过) 所规定的限制区, 又能使其输出功率达到最大值, 就称为“尽限运用”状态。甲类放大的尽限运用状态可见图 8-7。

(2) 提高电源电压和选用电流容量大和功率容量大的管子, 这样就能使三角形的斜边向右上方移动, 也加大了它的面积。但是这种做法往往受到具体条件的限制。通常电源电压业已固定, 管子型号不能更改, 那么另外一种可能就是:

(3) 改变交流负载线的斜率。例如把图 8-3 (a) 中的负载线改成图 8-3 (b) 中的样子, 则输出功率就会大为增加。现在的问题

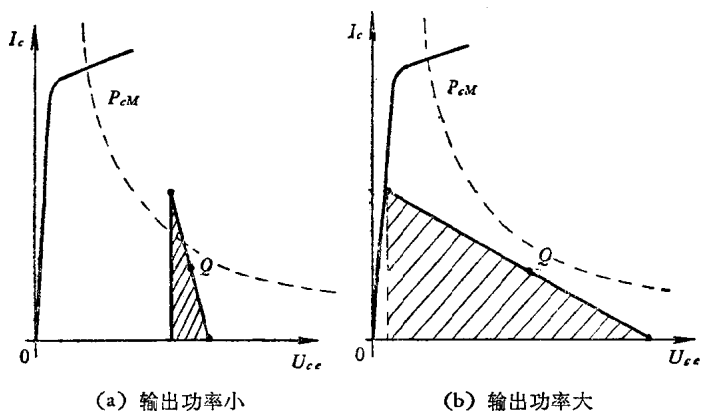


图 8-3 改变交流负载线的斜率可以使输出功率增加

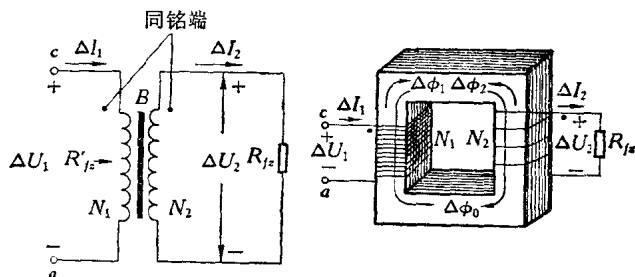
是: 在一般情况下, 负载是早已确定好的, 它的阻值不能任意更改, 我们是否可以在不更动负载阻值的情况下 (例如已确定为 8Ω), 还能够改变交流负载线的斜率, 来提高输出功率呢? 回答是可以的, 不过要多加一个元件, 这个元件就是变压器。下面就来介绍利用变压器耦合的功率放大电路。

二、单管变压器耦合功率放大电路

1. 变压器的作用

在没有开始讨论具体电路之前, 我们先在这里复习一下变压

器的作用。图 8-4 是一个变压器的工作情况示意图,它有两组线圈,接到能源方面的称为原边(或称初级),接到负载方面的称为副边(或称次级)。当有恒稳的直流电流通过原边线圈时,由于磁通无变化,线圈两端无感应电压,所以线圈相当于短路(实际上还有铜线的电阻),副边无输出。当有一个变化的电流 ΔI_1 流过原边时,它将在铁芯的磁路中产生一个变化的磁通 $\Delta \phi_1$,于是在原边和



(a) 变压器的图示 (b) 变压器工作情况的示意图

(图中标出的是某一瞬时的极性)

图 8-4 变压器的工作情况

副边都产生了感应电压 ΔU_1 和 ΔU_2 , 而 ΔU_2 加在 R_{l2} 两端又产生了变化电流 ΔI_2 , 根据电磁感应定律, ΔI_2 所产生的变化磁通 $\Delta \phi_2$ 总是抵制 $\Delta \phi_1$ 的, 结果在铁芯中实际的变化磁通 $\Delta \phi_0$ 是二者之差, 即

$$\Delta \phi_0 = \Delta \phi_1 - \Delta \phi_2 \quad (8-7)$$

我们可以把 $\Delta \phi_1$ 看成是由两部分组成, 一部分被 $\Delta \phi_2$ 所抵销, 另一部分是剩下来的 $\Delta \phi_0$, 它是产生 ΔU_1 和 ΔU_2 的主要因素, 它们之间的关系如图 8-4(b) 中所示。

在上述情况下, 变压器两个线圈之间的电压 ΔU_1 和 ΔU_2 是什么关系, 流过的电流 ΔI_1 和 ΔI_2 又是什么关系呢? 我们先来看 ΔU_1 和 ΔU_2 的关系。前面已经提到 $\Delta \phi_0$ 是原、副边线圈所共有的变化磁通, 如果原、副边的匝数分别为 N_1 和 N_2 , 则

$$\Delta U_1 = N_1 \frac{\Delta \phi_0}{\Delta t}, \quad \Delta U_2 = N_2 \frac{\Delta \phi_0}{\Delta t}$$

把两式相比即得

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8-8)$$

即感应电压和线圈匝数成正比,哪一边线圈的匝数多,它两端的感应电压也就比较高。

现在再看 ΔI_1 和 ΔI_2 的关系。大家知道,磁通量和线圈通电流后所产生的安匝数成正比。为了实现前面所提到的磁通关系,原边的安匝数 $N_1 \Delta I_1$ 在和副边的安匝数 $N_2 \Delta I_2$ 相平衡后还要有一定的裕量以维持 $\Delta \phi_0$ 的流通,这部分的安匝数为 $N_1 \Delta I_0$ 。它们三者的关系可写作

$$N_1 \Delta I_1 = N_2 \Delta I_2 + N_1 \Delta I_0 \quad (8-9)$$

ΔI_0 称为激磁电流,也就是当副边线圈开路时,为了产生和外加变化电压 ΔU_1 相对应的感应电压所需要的变化电流。在正常工作情况下,激磁电流往往是负载电流的 10% 甚至更少,因此在式 (8-9) 中 $N_1 \Delta I_0$ 和 $N_2 \Delta I_2$ 相比,前者可以忽略不计,于是乃有

$$N_1 \Delta I_1 \approx N_2 \Delta I_2 \quad (8-10)$$

即原、副边的安匝数基本相等,或者说原、副边的变化电流和它们的匝数成反比;匝数多的一方变化电流小,匝数少的一方变化电流大。

利用变压器能够实现电压转换和电流转换这样一个特点,就可以实现电阻或阻抗的转换。我们现在所关心的是:如果在变压器的副边接上一个电阻 R_{Lz} 如图 8-4(a) 中所示,那么在原边来看,这个电阻究竟有多大。把这个问题用数学的语言来表示就是:

已知 $\frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} = R_{Lz}$, 求 $\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = ?$

利用公式 (8-8) 和 (8-10) 不难得出

$$\Delta U_1 = \frac{N_1}{N_2} \Delta U_2, \quad \Delta I_1 = \frac{N_2}{N_1} \Delta I_2$$

所以

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2}$$

令 $\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$ 为折合到原边的电阻, 记作 R'_{fz} , 则上式可写为

$$R'_{fz} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_{fz} \quad (8-11)$$

式中的 $\frac{N_1}{N_2}$ 称为变压器的变比, 通常用 n 来代表, 则

$$R'_{fz} = n^2 R_{fz} \quad (8-12)$$

这样, 我们对变压器转换电阻的作用就有一个具体的了解。

例如, 把一个 8Ω 的负载电阻接到一个 $3:1$ (即 $\frac{N_1}{N_2} = n = 3$) 的变

压器的副边, 那么反映到原边的电阻就是 $R'_{fz} = 3^2 \times 8 = 72\Omega$ 。

我们可以采用不同的变比, 把负载电阻转换成为所需要的、比较合适的数值。这种做法通常称为“匹配”。接到管子输出部分(集电极回路)的变压器称为输出变压器, 接到输入部分(基极回路)的变压器称为输入变压器。

总起来说, 一个变压器, 如果不考虑它的线圈电阻、铁芯损耗和漏磁通的影响, 可以认为具有以下几点:

- (1) 对应于直流电压或电流, 变压器的原边相当于短路。
- (2) 如果副边开路, 则变压器的原边相当于一个电感, 这个电感和原边的匝数有关, 它决定激磁电流的大小。
- (3) 如果副边短路, 则原边也相当于短路。
- (4) 如果副边接上一定的阻抗, 则反映到原边的等效阻抗是它的 n^2 倍。
- (5) 在原边输入多少功率, 副边就得到多少功率。

现在我们就把负载通过一个变压器再接到放大管的集电极回路, 看这样做是否能够提高输出功率。

2. 变压器耦合电路的分析

图 8-5 是一个利用变压器耦合的功率放大电路。从形式上看, 它和图 8-1 的区别只在于集电极负载的形式, 所以我们主要讨