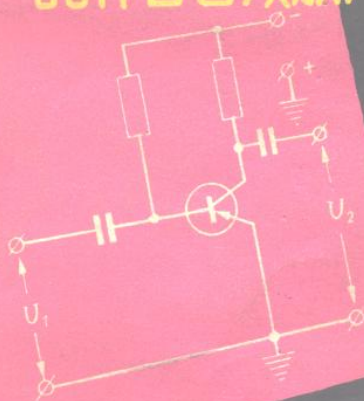


无线电
技术知识
翻译丛书

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \beta_d \frac{R_H}{R_{\beta_H}}$$

晶体管音频放大器的计算



苏联 П. А. 波波夫著

李洛童译

人民邮电出版社

晶体管音频放大器的计算

苏联 И. А. 波波夫 著

李 洛 童 译

人民邮电出版社

П. А. ПОПОВ
РАСЧЕТ ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1960

内 容 提 要

本书介绍晶体管音频放大器的简单计算方法, 这种方法是基于把晶体管表示成电流分配器。讨论了晶体管的连接电路、各级匹配问题、输出级的计算、反馈电路以及工作点温度稳定电路。所有基本原理都附有计算举例。

本书供设计和制作晶体管放大器的技术人员、无线电系师生和有基础的无线电爱好者阅读。

晶体管音频放大器的计算

著 者: 苏联 П. А. 波波夫

译 者: 李 洛 童

出版者: 人民邮电出版社

北京东四6条13号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者: 北京市印刷一厂

发行者: 新华书店

开本 787×1092 1/32

1964 年 4 月北京第一版

印张 3 6/32 页数 51

1964 年 4 月北京第一次印刷

印刷字数 71,000 字

印数 1—28,300 册

统一书号: 15045·总1376—无378

定价: (科 6) 0.42 元

前 言

随着第一批半导体放大元件——晶体管的制成，差不多同时也研究出了計算晶体管电路的方法，这种方法的基础是把晶体管表示成有源四端网络的形式。

虽然如此，但是仍有很多无线电爱好者，甚至专业人员，他们会組配和計算电子管电路，但是对晶体管电路的结构原理和計算方法了解得不够。

其原因一部分是由于沒有清楚地理解晶体管等效电路，一部分是由于計算公式比較繁雜，其中有很多項和很多因子，有时会掩盖了公式結構本身。

本书介紹的計算方法和一般采用的方法稍有区别，它是以晶体管动态电流放大系数这一概念为基础的。这一概念和把晶体管看作是电流分配器的观点結合起来，使电路的定性分析比較容易，并能使公式大为簡化，而实际上并不会改变公式的結構，不会减低計算的准确度。

虽然本书的内容只限于音頻放大器的計算問題，但是所提出的方法，在計算无线电接收設備或其它設備的任何一級时，也可以应用。

所有的基本原理都用例子來說明，建議讀者先自己作一作这些題目，然后再和书上对照一下看是否正确。

事先熟悉一下晶体管作用的物理原理（現在有很多讲这个問題的书，可看任何一本），再来研究本书的材料就比較容易了。

II. 波波夫

目 录

前言

第一章 晶体管的连接电路

1. 晶体管是一个电流分配器	1
2. 晶体管的等效电路	3
3. 共基极电路	6
4. 共发射极电路	11
5. 共集电极电路	16
6. 有关计算方法的几点说明	18

第二章 晶体管工作点的建立和稳定

7. 晶体管的集电极反向电流和各电极中的电流	20
8. 工作点的温度稳定	26
9. 稳定效率	28
10. 分压器稳定电路	32
11. 滤波电阻的影响	34
12. 计算中的几个问题	34

第三章 多级电路的计算

13. 阻容耦合放大器	36
14. 在高频上工作的特点	43
15. 发生器和负载的匹配	46
16. 放大级的变压器耦合	49
17. 晶体管放大级的匹配特性	52

第四章 输出级(功率放大器)的计算

18. 单端输出级	55
19. 输出级中的非线性失真	63
20. 推挽输出级	69
21. 倒相级	77

07179

第五章 反饋电路的計算原理

22. 晶体管电路中的反饋	79
23. 并联反饋	81
24. 串联反饋	83

第六章 晶体管的参数及其測量

25. 确定电流发生器等效电路的参数	88
26. 晶体管参数的測量	91

第一章 晶体管的连接电路

1. 晶体管是一个电流分配器

真空三极管和半导体三极管（晶体管）构成的电路表面上很相似，人们常常以此为理由把这两种放大器件以及它们的特性进行类比。但实际上这些器件的作用原理和特性是不同的。因此最好一开始就掌握和清楚地了解晶体管的工作特点。

从下述假想的实验中，可以明了晶体管和电子管的根本区别。

我们象图 1, a 所示的那样，用两个面结合型二极管 Δ_1 和 Δ_2 、阻值各为 1—3 千欧的电阻 R_1 和 R_2 以及电池 B_1 、 B_2 接成一个电路。

不难看出，在所选用的电池极性下，第一个二极管接成通流方向，在由这个二极管和电池 B_1 所组成的电路中，流过较大的电流 I_1 。第二个二极管接成阻流方向， $\Delta_2 B_2$ 电路中的电流 I_2 （二极管 Δ_2 的反向电流）要比 I_1 的数值小得多。连接两电池公共点的导线中的电流，等于电流 I_1 和 I_2 之差：

$$I_3 = I_1 - I_2 \approx I_1.$$

如果现在把连接两个二极管 n 电导区的导线换成也是具有 n 型电导的长半导体棒（图 1, b），那末，在电路各分支中的电流基本上不会变化。

我们开始逐渐减小棒的长度。当棒长减到只有几个微米时，即半导体棒变成一个把两个 p 型电导区隔开的 n 型电导的薄层时，我们会碰到一个奇妙的现象：公共导线中的电流 I_3 急剧减小，而电流 I_2 则增加同样的数值，并变得差不多等于电

流 I_1 了。

棒长的量变引起了电路支路中电流分配的质变。我们从两个面结合型二极管($n-p$ 结)得到了一个面结合型三极管(晶体管), 其中左面的 $n-p$ 结起着发射结的作用, 而右面的 $n-p$ 结起着集电结的作用。 n 型电导层就是基极。

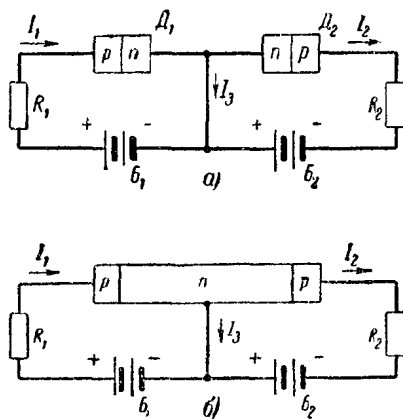


图 1 对晶体管作用原理解释

进入 n 区后, 不是由于电场的作用而移动, 而是按照扩散的规律, 由载流子浓度高的区域向浓度低的区域移动。空穴的主要部分到达右面的 $n-p$ 结, 被它的加速电场所吸引, 组成电流 I_2 。只有很小一部分空穴达不到集电极, 好像是分流到基极电路中一样(和 n 区中的电子复合), 从而组成电流 I_3 。

I_2 和 I_3 的比值和 $n-p$ 集电结的电压以及 R_2 的阻值几乎无关, 即使电阻 R_2 比 n 型半导体层的电阻值大几十倍, 电流 I_2 也可能比电流 I_3 的数值大几十倍到几百倍。

由此可见, 面结合型晶体管是一个分配电流的装置, 它把一个电极(发射极)中的电流在另外两个电极(集电极和基极)

右面二极管电路中的电流急剧增长可以这样来解释。在上述电路中, n 型电导的半导体层中基本上没有电场(第一个电池的电动势差不多完全降落到电阻 R_1 上, 第二个电池的电动势差不多完全降落到右面接成阻流方向的 $n-p$ 结上)。因此, 载流子(空穴)由左边的 p 区

間进行分配，分配的电流并不和接到这两个电极的支路中的电阻成反比，而是遵从一個严格确定的关系。这个关系决定于扩散規律，因而归根到底是决定于这些电极的结构。

2. 晶体管的等效电路

現在我們在图 1, a 的电路中增加一个交流电动势发生器 E 和两个电容器 C_1 、 C_2 ，象图 2 所示的那样连接；在图 2 中，晶体管已經是用公认的代表符号来表示了。

当在发射极电路中接入交流电动势时（設此电动势的交流振幅值比电池 E_1 的电压小），发射极电流将变成脉动的，其中出現交流分量 I_{θ} 。这又使集电极电路中出现电流交流分量 I_K （由于电荷的扩散），使基极电路中出现电流交流分量 I_G 。

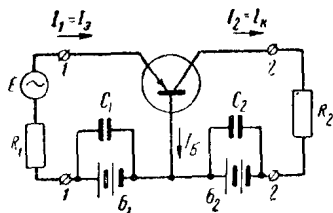


图 2 按共基极电路连接的晶体管放大器

我們把晶体管看成接有三条支路（发射极引綫、基极引綫和集电极引綫）的电路节点；由于流入节点的总电流应当等于流出节点的总电流，所以得到：

$$I_{\theta} = I_K + I_G.$$

由此可見，基极电流等于发射极电流和集电极电流之差，而集电极电流永远小于发射极电流，并且經实验表明，它和发射极电流成正比：

$$I_K = \alpha I_{\theta},$$

式中的 α 通常在 0.9—0.99 的范围内。

比例系数

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}$$

称为晶体管共基极电路短路状态的电流放大系数。

对这个公式需要作一些说明。首先要指出，这里谈的是发射极和集电极电路中的电流交流分量。第二，如果把端子 1-1 看成所述电路的输入端，把端子 2-2 看成输出端，那末可以看到，基极在这个电路中（对交流分量说）是一个输入端子和一个输出端子的公共电极。这一论断只有当电容器 C_1 和 C_2 在所述频率下的容抗很小，可以看作等于零时才是正确的。

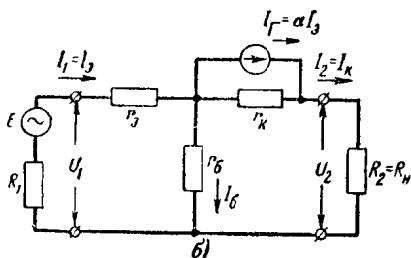
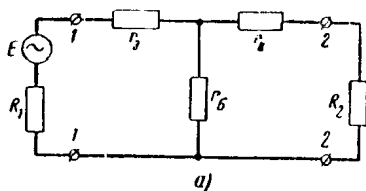


图 3 晶体管放大级的等效电路

a—不正确的电路；б—具有附加电流发生器的正确电路

最后，短路状态的条件，是表示放大系数 α 应当在负载电阻 $R_2 = 0$ 的情况下进行测量。但实际上可以取 $R_2 = 100$ 欧、甚至 $R_2 = 1000$ 欧，这样并不会影响测量的精确度。*

但是怎样对我们所得到的电路进行计算呢？

大家知道，发射结、集电结和形成基极的半导体薄层，都具有某些确定的电阻，分别等于 r_E 、 r_K 和 r_G 。

* 晶体三极管的集电结电阻 r_K 通常为兆欧级，因此 R_2 为 100 欧、1000 欧时， $R_2 \ll r_K$ ，可认为 $R_2 = 0$ 。（编者注）

因此，为了計算，看来似乎可以对上述放大器作出这样的等效电路，其中晶体管被代換为三个互相連接的电阻(r_o 、 r_e 和 r_k)，如图3,a所示。

在現代的小功率晶体管中， r_o 的数值为几十欧， r_e 为几百欧， r_k 为几百千欧。很容易看到，如果在这一等效电路的輸入端加上发生器 E ，則在电阻 r_k 和 R_2 中的电流将比电阻 r_o 中以及基极电路中的电流小得不能比拟，这是和实际情况矛盾的。

必須用某种方法改变輸入电流在等效电路各支路間的分配。如果在电路中再加一个电流发生器或电压发生器，就可以做到这一点。具有电流发生器的电路比較明显易懂，因此以后将只討論这种电路。

电流发生器所指的是具有无限大的內阻、因而所产生的某一电流值与負載电阻无关的装置。

在图3,a等效电路中的电阻 r_k 上并联一个能产生电流 $I_r = \alpha I_o$ 的电流发生器，然后来研究所得到的电路(图3,b)，并設負載电阻 $R_k \approx 0$ 。

很明显，电流 I_o 将流过电阻 r_o ，然后流过 r_e ，而不分流到 $r_k + R_k$ 电路中 ($r_k \gg r_e$)。相似地，附加发生器的电流 $I_r = \alpha I_o$ 将完全流过电阻 R_k 和 r_e ，而不分流到电阻 r_k 中 ($r_k \gg r_e + R_k$)，也不分流到輸入电路中 (我們把輸入电流 I_1 看作是給定值，而这就等于是輸入端接一个內阻为无穷大的发生器)。

容易看到，在所得到的等效电路中，当在发射极电阻中流过电流 $I_1 = I_o$ 时，在負載电阻中将流过电流 $I_2 = \alpha I_o$ ，而在基极电阻中将流过这两个电流之差：

$$I_e = I_1 - I_2 = I_1 - \alpha I_1 = I_1(1 - \alpha).$$

因此，当正确选择 r_o 、 r_e 、 r_k 和 α 的数值时，所得到的电路将完全反映了电流在晶体管各个电极間分配的情况。

在分析等效电路时，我們沒有考虑輸入电流和附加发生器的电流有一部分是流过电阻 r_K 的。严密的計算表明，为了在輸出电路中得到电流 $I_2 = \alpha I_1$ ，接入电路中的电流发生器不应当是 $I_T = \alpha I_1$ ，而应当是 $I_T = a I_1$ ，这里

$$a = \alpha - \frac{r_0}{r_K}(1 - \alpha).$$

当 r_0 、 r_K 和 α 为一般数值时， a 的表示式中的第二項很小。为了明显起见，我們設 $a = \alpha$ 。

例 1 設图 3.6 电路中的 $\alpha = 0.95$ 、 $I_1 = 2$ 毫安、 $R_H \ll r_K$ ，求負載电阻 R_H 中的电流 I_2 和基极电阻 r_0 中的电流 I_0 。

解：

$$1) I_2 = \alpha I_1 = 0.95 \times 2 = 1.9 \text{ 毫安};$$

$$2) I_0 = (1 - \alpha) I_1 = (1 - 0.95) \times 2 = 0.1 \text{ 毫安}.$$

3. 共基极电路

大家知道，在足够低的頻率下，电子管的屏极电流，在屏栅特性曲綫的直綫段范围内，和控制栅极与阴极間所加电压成正比。在沒有栅流的工作情况下，电子管輸入电路內消耗的功率极小，在計算时可以不予考虑。因此，电子管可以很方便地看作是电压控制的器件。电子管級的主要特性（有时常常是唯一的特性）是电压放大系数

$$K_U = \frac{U_2}{U_1},$$

式中 U_1 是輸入电压，而 U_2 是放大級輸出端上的电压。

晶体管放大器的情况有所不同。我們已經知道，只有在晶体管輸入电路中有电流时，輸出电路中才有电流。考虑到輸出电流和輸入电流間存在着比例关系，最好是把晶体管看成为电流控制的器件，并用放大級的电流放大系数值 K_I 来表示該級的放大

特性:

$$K_I = \frac{I_2}{I_1},$$

式中 I_2 是該級的輸出電流 (通過負載電阻的電流), 而 I_1 是該級的輸入電流。

但是, 為了在晶体管級輸入電路中產生電流, 就必須在它的輸入端上加上某一電壓 (因為 $R_{BX} \neq 0$), 因而也就是加上某一確定的功率。因此, 級的放大特性也可以用功率放大係數 K_p 的大小來表示。

在實際計算中, 也應用電壓放大係數 K_U 的概念。

選擇那種計算方法 (按電流、功率或電壓計算), 決定於所計算電路的特性和功用。

我們來推導按共基極電路接成的晶体管放大級 (圖 3, б), 在 $R_H \ll r_K$ 的條件下, 各個電流和電壓間的基本關係式。

根據前節的敘述, 我們有:

電流放大係數

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} = \alpha; \quad (1)$$

電壓放大係數

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_2 R_H}{I_1 R_{BX}} = \alpha \frac{R_H}{R_{BX}}, \quad (2)$$

式中 R_{BX} 是晶体管的輸入電阻。

為了確定 R_{BX} , 我們以輸入電路的電流和電阻值來表示輸入電壓值:

$$U_1 = I_3 r_3 + I_6 r_6 = I_1 r_3 + I_1 (1 - \alpha) r_6.$$

將等式的各項除以 I_1 , 得

$$R_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = r_3 + (1 - \alpha) r_6. \quad (3)$$

所得到的式子具有简单的物理意义：沿电阻 r_0 流过全部输入电流，因而式中 r_0 值的系数等于 1（即不用折算）。沿电阻 r_0 只流过一部分电流。结果在输入电阻的公式中只出现相应部分的 r_0 。

式(1)、(2)和(3)很明显，并便于记忆和计算。但是只有当 $R_H \ll r_K$ 时，或更严格地说，当 $R_H \rightarrow 0$ 时，这些公式才是正确的。

如果负载电阻 R_H 和集电极电阻 r_K 可以相比时，则晶体管中的过程将大为复杂：

1. 对负载旁路的电阻 r_K 和 r_0 开始表现出影响；负载中的电流减小。

2. 原有的电流分配（在 $R_H \ll r_K$ 时的电流分配）发生变化，使得晶体管输入电阻变化。

分析表明，负载电阻为任意值时的计算公式具有下列形式：

$$K_I = \alpha \frac{r_K + r_0}{r_K + r_0 + R_H};$$

$$K_U = \alpha \frac{r_K + r_0}{r_K + r_0 + R_H} \cdot \frac{R_H}{r_0 + r_0 \left(1 - \alpha \frac{r_K + r_0}{r_K + r_0 + R_H} \right)};$$

$$R_{BX} = r_0 + r_0 \left(1 - \alpha \frac{r_K + r_0}{r_K + r_0 + R_H} \right).$$

将这些公式和 $R_H \ll r_K$ 时的公式相比可以看到，它们和后者的区别只是在系数 α 后面多了一个因数 $\frac{r_K + r_0}{r_K + r_0 + R_H}$ 。

公式的这一特点，使我们能够和电子管参数类似地引入一个晶体管动态电流放大系数的概念。大家知道，电子管在负载电阻不等于零时的工作，可以用动态参量来说明，例如可以用动态放大系数 μ_A 和动态互导 S_A 来说明。这两个参数永远小于

相应的静态参数 ($\mu_{\pi} \leq \mu$; $S_{\pi} \leq S$), 并随着负载电阻的增大而减小。例如:

$$\mu_{\pi} = \mu \frac{R_i}{R_i + R_{\pi}},$$

式中 R_i 是电子管的内阻。

和电子管情况下相似, 我们将用动态电流放大系数 α_{π} 来表明晶体管在负载电阻不等于零时的放大特性。

动态电流放大系数 α_{π} 小于或等于静态电流放大系数:

$$\alpha_{\pi} = \alpha \frac{r_{\kappa} + r_{\sigma}}{r_{\kappa} + r_{\sigma} + R_{\pi}} = \alpha \frac{r_{\text{БЛХ.}\sigma}}{r_{\text{БЛХ.}\sigma} + R_{\pi}}, \quad (4)$$

式中 $r_{\text{БЛХ.}\sigma} = r_{\kappa} + r_{\sigma}$ 是晶体管共基极电路在输入电路开路时的输出电阻 (即当发射极电路断开时, 在集电极引线 and 基极引线间测得的电阻)。

引用参数 α_{π} 以后, 在任何负载电阻情况下的电流、电压放大系数以及放大级输入电阻值的表示式, 都和 $R_{\pi} \ll r_{\kappa}$ 时的形式相同, 只不过是把其中的 α 值换成了 α_{π} :

$$K_I = \alpha_{\pi}, \quad (5)$$

$$K_U = \alpha_{\pi} \frac{R_{\pi}}{R_{\text{БХ}}}, \quad (6)$$

$$R_{\text{БХ}} = r_{\sigma} + r_{\sigma}(1 - \alpha_{\pi}). \quad (7)$$

功率放大系数

$$K_P = K_I K_U = \alpha_{\pi}^2 \frac{R_{\pi}}{R_{\text{БХ}}}. \quad (8)$$

在 $R_{\pi} \approx 0$ 和 $R_{\pi} \neq 0$ 两种情况下的公式外表上相似, 说明在具有不同负载时, 放大级中的过程的特性是相同的。如果在 $R_{\pi} \approx 0$ 时, 发射极电流按照系数 α 和 $(1 - \alpha)$ 的比例在集电极和基极间分配, 那末, 在 $R \neq 0$ 时, 晶体管仍和以前一样是一个电流分配器, 不过现在发射极电流中有等于 α_{π} 的部分流入

集电极电路，而剩下的等于 $(1-\alpha_R)$ 的部分流入基极电路。

很明显，共基极电阻级的电流放大系数永远小于 1。

电压和功率放大，只是由于放大级的输入电阻和负载电阻不同才得到的。

研究图 3,6 电路图中各电流的方向可以看到，放大级的输出电压和输入电压同相。

有时为了计算的目的，需要知道放大级的输出电阻值，它等于电压 U_2 和电流 I_2 的比值，这里的 I_2 是在下述情况下求得的：即在放大级的输出端间加一个电压源 U_2 ，同时将该级输入电路中的电动势除去，而在输入端间接一个电阻 R_r, R_r 等于在正常工作条件下向该级进行馈电的发生器的内阻。

共基级放大级的输出电阻决定于发生器的内阻值 R_r ，并等于：

$$R_{\text{вых}} = r_{\text{вых.г}} \left(1 - \frac{\alpha r_{\text{г}}}{r_{\text{г}} + r_{\text{г}} + R_r} \right). \quad (9)$$

分析共基极放大级的公式可以得出结论，当负载电阻 R_n 增加时，该级的电流放大系数降低（由于 α_R 减小），输入电阻增加，电压放大系数增高，并趋于某一极限。当 R_n 增加时，功率放大系数开始时逐渐增加，在某一 R_n 值时达到最大值，然后开始下降。

负载中得到最大功率时的负载电阻很大（等于放大级的输出电阻），在实际中很难实现，因为随着 R_n 的增加，当集电极电流通过这一电阻时，电池在这个电阻上的电压降就要增大。

例 2 求 П 13 型晶体管按图 2 接成共基极放大级时的电流、电压和功率放大系数 (K_I, K_U 和 K_P)，设 $R_2 = R_n = 20$ 千欧。

在解这个问题和以后的问题时，设：

$r_{\text{г}} = 20$ 欧； $r_{\text{г}} = 600$ 欧； $r_{\text{к}} = 1.33$ 兆欧； $\alpha = 0.95$ 。

解:

$$1) K_I = \alpha_R = \alpha \frac{r_{\text{БВХ.Б}}}{r_{\text{БВХ.Б}} + R_{\text{II}}} = 0.95 \times \frac{1.33 \times 10^8}{1.33 \times 10^8 + 20 \times 10^3} = 0.935;$$

$$2) R_{\text{BX}} = r_{\text{э}} + r_{\text{с}}(1 - \alpha_R) = 20 + 600(1 - 0.935) \approx 60 \text{ 欧};$$

$$3) K_U = \alpha_R \frac{R_{\text{II}}}{R_{\text{BX}}} = 0.935 \times \frac{20 \times 10^3}{60} \approx 312;$$

$$4) K_P = K_I K_U = \alpha_R^2 \frac{R_{\text{II}}}{R_{\text{BX}}} = 0.935^2 \times \frac{20 \times 10^3}{60} = 288.$$

4. 共发射极电路

我们来讨论图 4, a 所示电路的工作。在这个电路中, 发生器象以前一样接在发射极和基极之间, 但是晶体管在电路输入端和输出端间的公共电极 (对交流分量而言) 是发射极。因此这个电路叫做共发射极电路。

首先要指出, 晶体管各电极间的电流分配与晶体管对交流而言的连接电路无关, 也就是说, 和晶体管那一个电极作为电路输入端和输出端的公共电极无关。因此, 对于所述电路, 当 $R_{\text{II}} \approx 0$ 时, 仍然是 $I_{\text{K}} = \alpha I_{\text{э}}$ 和 $I_{\text{с}} = (1 - \alpha) I_{\text{э}}$ 。

由此可见, 图 4, a 所示放大器的等效电路可以象图 4, б 那样来表示, 图中为了明显起见, 用箭头来表明各个元件中电流的正方向 (在绘制等效电路时, 我们忽略了电阻 $R_{\text{с}}$ 的分流作用, 这个电阻在实际电路中是用来保证所需直流状态, 并假定电容 C_1 , C_2 和 $C_{\text{э}}$ 对交流而言是短路的)。图 4, б 中电阻 $r_{\text{э}}$, $r_{\text{с}}$ 和 r_{K} 的数值仍旧和图 3, б 电路中一样。

但是图 4, б 的电路的工作过程与实际情况不太符合。的确, 附加发生器在电路负载电阻中所产生的电流是和发射极电流成正比。而实际电路从被放大信号源取得的电流 (输入电流), 其数值不等于发射极电流, 而是等于基极电流。换句话