OHM 电子电气入门丛书

图解 电子电路讲座 2

放大电路

〔日〕雨宫好文　小柴典居　主编
砂泽学　著
商福昆　译　白玉林　校

科学出版社　OHM社
2000　北京

需要全本请访问 www.ertongbook.com

主 编 的 话

本讲座所面向的是正准备学习电子电路的读者，或是曾经学过但还想从头系统地整理一下这方面知识的读者。也可用于大学、高等专科相关专业师生的教学参考和公司新员工的教育培训。

自初版发行以来，已过了十多年时间，始终深受各方面读者的厚爱。随着世界上科学技术的进步，此次决定修订增补。对初版中叙述不充分的内容予以补充，对冗长部分予以割爱，从而完成了全面修订和大幅度增补。

在本系列讲座修订过程中，我们仍然忠实沿袭以下 4 点初版的编辑方针

（1）只要具备高中毕业的数学知识，再综合本书每章各节所介绍的基础知识，就能读懂全文。

（2）用简洁的粗线条组成技术骨架，着重于基本原理的阐述，对其最新应用方面则不作重点叙述。

（3）文章叙述简洁平易，尽力避免冗长。

（4）灵活使用脚注、例题、插图、附录等，使全书主干清晰，避免分散主题。

本书的作者砂泽学先生，他就职于电电公社（现 NTT)研究所时，就从事集成电路研究工作，并致力于公司的职工教育培训。他积累多年的经验，用丰富的例题结合实际展开设计方法，并进行精辟的总结。特别在以硅晶体管为主流的今天，研究适合硅晶体管的偏置法，以十分准确、简单的近似式表示增益、输入阻抗等，这些新思路均已在本书初版介绍过，使人受益匪浅。

通过这次改版，本书内容更加充实，错误之处也得到匡正。特别是将集电极电流采用互导表达的习惯，使之在学习 FET（场效应晶体管）等效电路时，读者也无需改变思路，作为主编，我们十

分高兴。也希望能对读者有所裨益。最后谨对为本系列讲座改订出版而尽力的欧姆社(OHMSHA)出版部各位深表谢意。

主编谨记

前　言

本书以准备自己动手，初次制作晶体管放大器的读者为对象，介绍简明的设计理论和实际的设计方法。

对于想制作晶体管放大器的人来说，最关心的是：为了掌握晶体管的工作原理，是不是必须首先学习高深的半导体理论？其实，对于并非设计晶体管本身，而是设计运用晶体管的放大器为目的的人来说，不一定需要掌握严密的半导体理论。当然，诸如用欧姆定律表示流过电阻的电流与电阻两端电压的关系这样的基本知识以及晶体管的特性等，还是应该掌握的。

本书出于这种考虑，在严谨的晶体管理论的基础上，将晶体管特性的本质，以最简单的公式进行表示，运用这些特性表达式，便可很容易的设计晶体管放大器。为此，书中举出了大量的基本放大器的例题，仔细分析、掌握这些例题的解题思路，便可深入理解晶体管放大器的设计思路和设计方法。

由于本书是作为设计晶体管放大器的入门书写的，所以，对需要晶体管特性方面较高深知识的中频放大器和高频放大器等未纳入其中。这些内容可在充分掌握本书内容之后，进一步学习。我确信本书所述的各项内容，将为此打下坚实的基础。

本书采用了深入浅出的叙述方式，希望能使得尽可能多的读者理解其中的内容，至于是否能达到预期的效果，则有待读者评判。本书中若有不足及不当之处请读者批评指正。

最后，尽管本书著者曾在研究所进行过十余年的电路研究工作，仍感学识有限。可是，主编者名古屋大学雨宫好文教授、东洋大学小柴典居教授以及出版者欧姆社（OHMSHA)的各位,却将执笔本书的机会给予了我并不吝赐教，多有忠告，在此谨表谢意。

著　者

再版前言

本书初版问世后,已经过了十多年时间。此间,技术上发生了划时代的变化,电子技术、数字技术取得了引人注目的进步。与此同时，很多读者对本书以晶体管放大器模拟电路的基本内容为对象，施以简明而实际的叙述给予了好评。所以本书在十年后的今天,得以再版。

随着集成电路技术的飞速发展和应用范围的不断扩大，半导体产业将以 MOS 集成电路,MOS 超大规模集成电路产品为主。从这种意义上讲，这次再版有必要补充叙述有关 MOS FET(场效应晶体管)的内容。为此,也应对集成电路的基础知识,给以一定程度的介绍，但本书的主旨是学习放大器，加入这些内容，显得多余,最后决定割爱。请读者参考已经出版的优秀的教科书,掌握集成电路方面的知识。

基于以上的考虑,这次的改订,以补充初版的不足为目的,加入了用 FET(场效应晶体管）构成放大器的有关内容，而全书的基本结构没有变化。

本书若对学习电子学的广大读者能有微薄的帮助，将十分欣慰。

著　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

1　设计晶体管放大器的基础知识

1.1　什么是放大器 …… 10
1.2　电压、电流符号的表示方法 …… 11
1.3　晶体管特性及放大作用 …… 12
1.4　什么是交流等效电路 …… 17
1.5　放大器性能的表示方法 …… 18

2　晶体管放大器的偏置法

2.1　偏置条件和负载线 …… 28
2.2　晶体管的特性和工作点的关系 …… 30
2.3　偏置电路的设计方法 …… 34

3　甲类单级放大器及 *RC* 耦合放大器的设计

3.1　晶体管和单级放大器的等效电路 …… 44
3.2　甲类单级放大器的设计 …… 65
3.3　*RC* 耦合二级放大器的设计 …… 85

4　直接耦合放大器的设计

4.1　发射极接地、集电极接地二级直接耦合放大器 …… 92
4.2　反馈偏置型发射极接地二级直接耦合电路 …… 94
4.3　差动放大器 …… 100
4.4　达林顿电路 …… 109

5 场效应晶体管(FET)放大器的设计

5.1 FET 的特征 …… 116
5.2 FET 的分类和结构 …… 116
5.3 JFET 的主要特性和工作原理 …… 117
5.4 JFET 的传输特性和输出特性 …… 120
5.5 JFET 的偏置方法 …… 122
5.6 源极接地单级放大器 …… 129
5.7 漏极接地单级放大器（源极输出器） … 137

6 反馈放大器的设计

6.1 什么是反馈放大器 …… 142
6.2 反馈放大器的种类 …… 144

7 功率放大器的设计

7.1 功率放大器的结构和种类 …… 164
7.2 电阻负载甲类功率放大器 …… 166
7.3 变压器耦合甲类功率放大器 …… 168
7.4 乙类推挽功率放大器 …… 170
7.5 乙类推挽放大器的交叉畸变的改善 … 175
7.6 功率放大器的电路举例 …… 177

8 运算放大器的设计及其应用

8.1 运算放大器的原理 …… 186
8.2 运算放大器的基本用法 …… 188
8.3 运算放大器的电路举例及其特性 … 192
8.4 运算放大器的应用实例 …… 194

1

设计晶体管放大器的基础知识

本章学习目的与内容

在这一章中首先说明什么是放大器。其次简单地复习晶体管的特性。同时阐述晶体管作为放大器怎样更好地发挥作用，放大器的性能表示方法等问题。

1.1　什么是放大器

用图 1.1 所示的装置来考虑放大器的概念，这是一种具有输入端子①-①′,输出端子②-②′，电源端子以及接地端子的装置。在电源端子与接地端子之间接有直流电源，在输入端子①-①′间加有微弱的电信号，从输出端子②-②′得到比输入信号功率更大的信号时，则称此装置为放大器，其作用称为放大作用。以身边的例子来讲，立体声装置用的放大器相当于图 1.1 的装置，输入信号是将刻在录音槽上的声音信号利用拾波器（限幅）变为数 mV 以下的电信号，在此例中得到的输出，是利用放大的信号使话筒的声音线圈振动，相当于话筒响声。

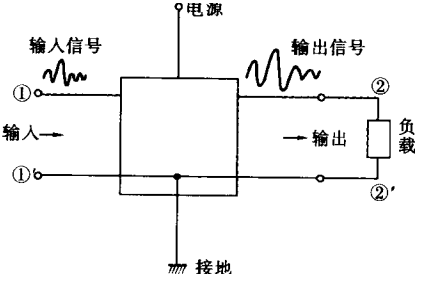


图 1.1　放大的概念

一般为了得到输出，将接在放大器输出端子上的装置称为负载，在电子学中，用负载阻抗一词表示。例如将音频线圈阻抗为 8Ω 的话筒接到放大器上，其负载阻抗则为 8Ω。

在考虑放大时，重要的是对图 1.1 的装置必须由直流电源供电的问题，就是说放大器的定义，是利用输入信号控制直流电源的电能，用与其输入信号成比例增大的变化量作为输出的装置。乍一看好像输入信号本身在增大，成为很大的输出信号似的，而其实其能量是由直流电源供给的。

按上述定义的放大器在比较其输入信号与输出信号的大小时，其各自的能量的大小，就是说如不比较电功率的大小则无意

义。例如，我们看看图 1.2 所示的变压器的作用，图中将匝数 n_1、n_2 选为 $n_2 > n_1$，则对输入电压 v_1 可以得到振幅大的输出电压 $v_2 = (n_2/n_1)v_1$。但输出电流为 $i_2 = (n_1/n_2)i_1$，而输入信号的能量与输出信号的能量比即电功率比没有增大。这就是说变压器没有放大作用，只有电压、电流、阻抗等的变换功能。

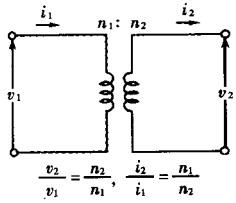


图 1.2 变压器的作用

放大器有电压放大器、电流放大器、功率放大器等，但其本质上是输入功率 <输出功率，输出的放大部分变为直流电源能量这一点是不变的，因而晶体管起到放大的中心作用。

1.2 电压、电流符号的表示方法

如 1.1 节中叙述的那样，放大器是将直流电源能量用随时间变化的输入信号来控制，得到与输入信号成比例增大的输出信号的装置。因而，放大器的各部分电压或电流中，含有直流成分及随时间变化的交流成分。在这种情况下，表示电压、电流的符号，在本书中采用如下规定：

(1) 直流成分，例如 I_B、V_{CE} 用大写字母，大写注脚表示。电源电压如 V_{CC}、V_{BB} 用大写字母，大写注脚 2 次重复表示。

(2) 随时间变化的成分，即交流成分，如 i_b、v_{ce} 用小写字母，小写注脚表示。

(3) 直流成分叠加交流成分的瞬时值如 i_B、v_{CE}，用小写字母，大写注脚表示。

(4) 有效值例如 I_b、V_{ce}，用大写字母加小写注脚表示。

根据上述这样的规定使用符号的方法，给出二、三个表示例子。

图 1.3 表示正弦波电压的例子，交流信号的瞬时值电压 v_{ce} 可用下式表示

$$v_{ce} = V_{Cp}\cos(2\pi f t + \phi) \qquad (1.1)$$

f表示频率，ϕ表示相位，t表示时间，V_{Cp}为交流信号的最大值。

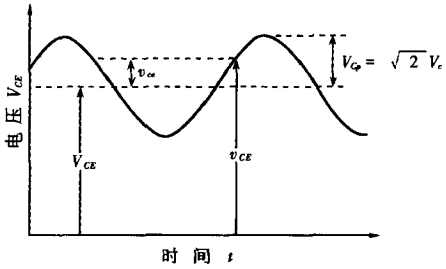


图 1.3 表示符号使用方法的电压波形例

因而，直流电压 V_{CE}叠加交流信号 v_{ce} 时的全瞬时值 v_{CE}用下式表示

$$v_{CE} = V_{CE} + v_{ce} = V_{CE} + V_{Cp}\cos(2\pi f t + \phi) \qquad (1.2)$$

直流电流 I_E 叠加交流电流 i_e 的电流全瞬时值 i_E可用下式表示

$$i_E = I_E + i_e \qquad (1.3)$$

1.3 晶体管特性及放大作用

根据使用材质的不同，晶体管分为锗晶体管、硅晶体管两大类。锗晶体管由于制造简便价廉，从而得到广泛应用。后来由于硅晶体管生产技术的突飞猛进，其特性比锗晶体管优越，而且应用也简便等原因，近来的晶体管厂家的生产目录中记载的晶体管品种，几乎被硅晶体管所占领。

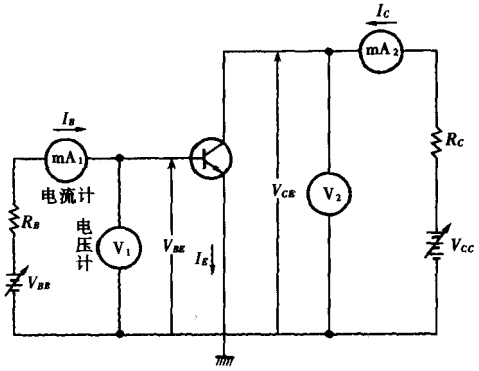
在本书中以硅晶体管为前提加以说明，下面简单地复习一下硅晶体管的特性与放大作用的关系。

正如 1.1 节所述，放大器是由直流电源供给能量作为前提，晶体管的放大作用当然也须供给合适的直流电压，成为有直流电流流通的状态，才开始有放大作用的可能。将形成这种状态称为设定偏置条件，为此所需的电路称为偏置电路。

晶体管的特性用如图 1.4 所示方法进行测定。此图是将 npn 晶体管发射极接地使用时的测量方法，在 pnp 晶体管情况下，将

需要全本请访问 www.ertongbook.com

电源、电压表、电流表的连接全部相反就可以了。



[注] 电压表为内阻高的直流电子电压表

图 1.4 发射极接地晶体管的静态特性测量电路

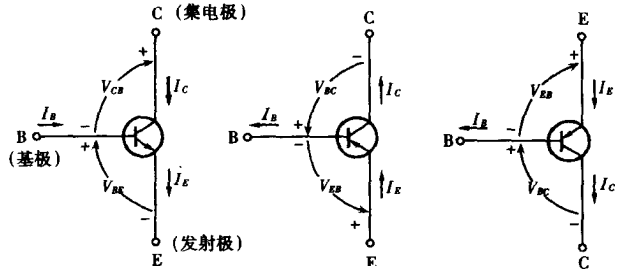
在图 1.5 中表示了晶体管的极性及电压、电流的方向，为了正确地使用晶体管必须牢记此图。

晶体管也是遵循基尔霍夫定律，基极电流 I_B、集电极电流 I_C、发射极电流 I_E 之间有如下关系

$$I_E = I_B + I_C \tag{1.4}$$

在使用发射极接地晶体管时，需知 I_B 与 I_C 的关系，将其定义为直流电流放大率 h_{FE}，可用下式表示

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \tag{1.5}$$



(a) npn 晶体管　　(b) pnp 晶体管　　(c) pnp 晶体管

图 1.5 晶体管的极性及电压、电流方向

图 1.6 及图 1.7 表示 npn 晶体管的特性例。

为了得到图 1.6，用图 1.4 调节 V_{BB}，例如将 I_B 设定为 50μA，然后将 V_{CC} 从零逐渐增高，每次将 V_{CE} 及与其相应的 I_C 值绘即可，对于 I_B 也反复这样进行，则可得出几条 I_C-V_{CE} 曲线。在图 1.6 上绘有 5条曲线，但对于此图表示的 I_B 值以外数值当然也可绘出同样的曲线。

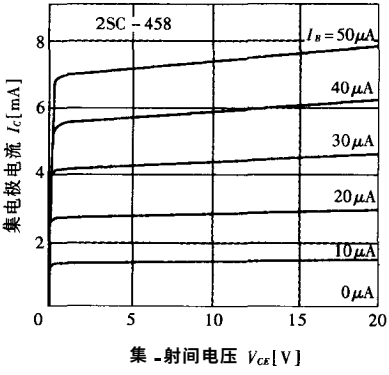


图 1.6　npn晶体管静态特性例(1)

由图 1.6，例如 $V_{CE}=10\text{V}$　$I_B=20\mu\text{A}$ 时，因 $I_C=2.8\text{mA}$，h_{FE} 可由式(1.5)求得

$$h_{FE}=\frac{2.8\times10^{-3}}{20\times10^{-6}}=140$$

发射极电流 I_E 由式(1.4)求得

$$I_E=2.8\times10^{-3}+20\times10^{-6}$$
$$=(2.8+0.02)\times10^{-3}=2.82\times10^{-3}\text{A}=2.82\text{mA}$$

几乎与 I_C 值相同。

将式(1.5)代入式(1.4)则得出下式

$$I_E=(1+\frac{1}{h_{FE}})I_C \qquad (1.6)$$

从上述例子可知，如果 h_{FE} 为相当大的数值则

$$I_E\approx I_C \qquad (1.7)$$

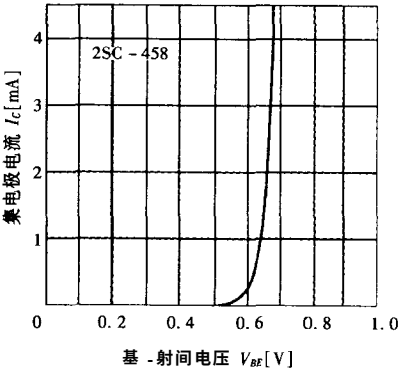


图 1.7　npn晶体管静态特性例(2)

再看看图 1.6，用上述例题 $V_{CE}=10\text{V}$，$I_B=20\mu\text{A}$ 时，因 $I_C=2.8\text{mA}$，则 $h_{FE}=140$。但 $V_{CE}=10\text{V}$，$I_B=30\mu\text{A}$ 时，则 $I_C=4.4\text{mA}$。

将此集电极电流的变化部分 4.4 - 2.8 = 1.6mA ,用基极电流变化部分 30 - 20 = 10μA 除得的值为 160 ,比 $h_{FE}=140$ 值大。

将此称为小信号电流放大率，用 h_{fe} 表示,定义如下

$$h_{fe}=\frac{I_{C2}-I_{C1}}{I_{B2}-I_{B1}}=\frac{\triangle I_C}{\triangle I_B} \tag{1.8}$$

现在的例题中 $h_{fe}=160$ 比 $h_{FE}=140$ 还大。

一般来讲 $h_{fe}>h_{FE}$ 但在设计电路时按下式

$$h_{fe}\approx h_{FE} \tag{1.9}$$

来计算较多，在本书中也采用此近似值计算。

$h_{fe}=160$ 表示输入电流变化得到 160 倍的输出变化，即意味着电流放大 160 倍，表示晶体管的放大作用。

图 1.7 表示基极 - 发射极间电压 V_{BE} 与集电极电流 I_C 的关系，但此曲线不论何种晶体管几乎是同样形状，V_{BE} 的值除处理大电流的功率晶体管外,几乎都在 0.6 ~ 0.7V 范围。

图 1.8 大致与图 1.7 相同，表示 V_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线，即表示晶体管的输入特性曲线。在图 1.8 上只表示 1 条曲线，实际上改变 V_{CE} 的数值可以描出多条曲线，因这些曲线几乎重叠，所以 V_{BE}-I_B 曲线通常用 1 条曲线表示。

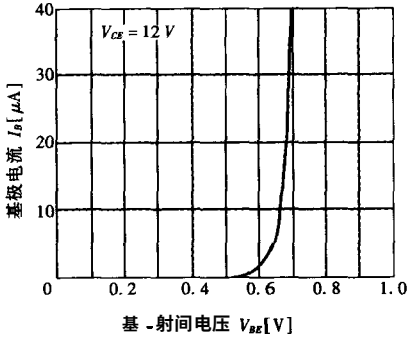


图 1.8 npn 晶体管的静态特性例(3)

以上说明了晶体管的静态特性，均以发射极端子作为共用端子使用的方法，即将晶体管发射极接地使用时的特性。此外也有将基极接地、集电极接地的使用方法，但最近的晶体管目录上记载的特性曲线几乎都是以发射极接地的特性。说明将晶体管发射极接地使用的情况较多。

为了从 V_{BE}-I_C 特性研究晶体管的放大作用，将图 1.7 的

$V_{BE}=0.6\text{V}$ 附近放大的图形就是图 1.9。在晶体管上加以适当的直流电压，基极-发射极间设定 V_{BE}，与其相应的集电极上有电流 I_C 流动，即设定偏置条件。此状态用图 1.9 上的点 Q 表示，将此点称为工作点或者偏置点。

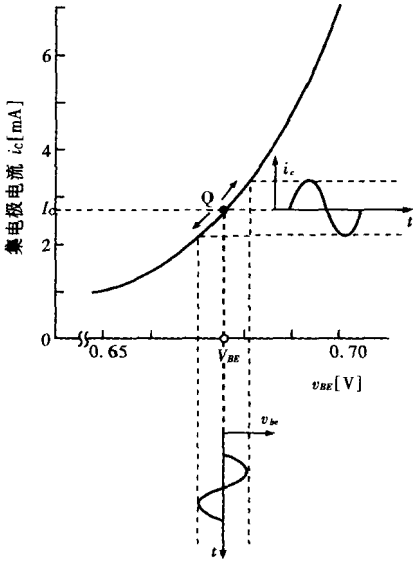


图 1.9 晶体管的输入作用

在图中所示的 V_{BE} 上叠加交流电压 v_{be} 时，则 Q 点沿曲线的箭头方向移动，集电极电流有变化，得到交流电流 i_c。

如果 $V_{BE}=0.675\text{V}$，v_{be} 的振幅为 5mV_p*时，$I_C=2.7\text{mA}$，$i_c=0.6\text{mA}_\text{p}$，则互电导 g_m 定义如下

$$g_m=\frac{i_c}{v_{be}} \tag{1.10}$$

$g_m=0.6\times10^{-3}/5\times10^{-3}=0.12\text{S}$，即 120mS。将此集电极电流变化分量 i_c 流过适当的负载电阻 R_L 作为电压变化量取出，其大小为 $|i_cR_L|$。

此时电压放大率 A_v 可用下式表示

$$|A_v|=\left|\frac{i_cR_L}{v_{be}}\right|=g_mR_L \tag{1.11}$$

以上例而言，如果 $R_L=1\text{k}\Omega$ 时，$|A_v|=0.12\times1000=120$，即输入信号电压成为放大 120 倍。正确的电压放大率计算方法在第 3 章叙述，这里对晶体管的放大作用有些概念就够了。

5mV_p 表示交流信号的峰值，有效值为其 $1/\sqrt{2}$，是 3.54mV。交流信号因为是用一般有效值表示，所以几 V 是表示有效值。特别希望用峰值表示时，则在单位上加注脚 p，如 10mV_pp 则表示峰值的倍值。$10\text{mV}_\text{pp}=5\text{mV}_\text{p}$。

1.4 什么是交流等效电路

在图 1.10 上所示的电容器 C_i，C_o 称为耦合电容，可以忽略

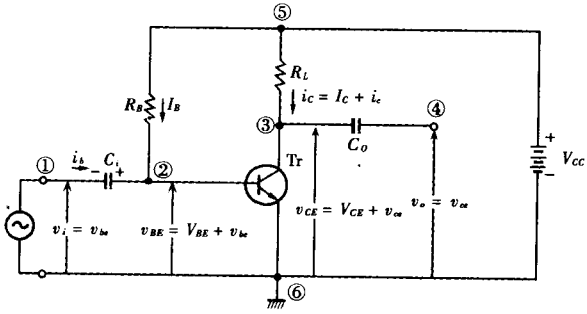


图 1.10 晶体管放大器的电压与电流

其电抗对信号的衰减，电容器容量很大，在第3章将作详细叙述。在本图中 C_i、C_o 等是起将交流信号短路的作用，即图 1.10的端子①与②是交流同电位，端子③与④也当作交流同电位考虑。

其次，电源端子⑤因无交流的变化，与接地端子⑥成等值。就是说，在交流方面，端子⑤与⑥都成为交流接地。

由上述情况看，图 1.10 的交流等效电路，可以像图 1.11 那样表示。晶体管的等效电路，假设以虚线包围形状表示，其详细情况将在第 3 章叙述。

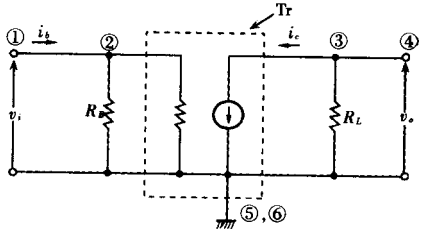


图 1.11 晶体管放大器的等效电路

在图 1.10 中考虑一下交流输出将如何表示。对于含有交流分量、直流分量的输出侧，应用基尔霍夫定律，于是有下式成立

$$V_{CC} = i_C R_L + v_{CE} = (I_C + i)R_L + (V_{CE} + v_{ce}) \quad (1.12)$$

对于直流分量因有下式关系

$$V_{CC} = I_C R_L + V_{CE} \quad (1.13)$$

将式(1.13)代入式(1.12),可得出对交流分量的关系式

$$I_C R_L + V_{CE} = (I_C + i_c)R_L + (V_{CE} + v_{ce})$$

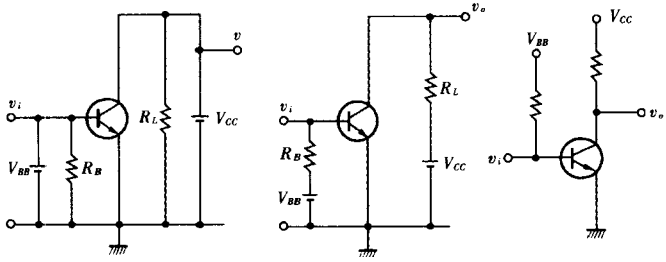
所以

$$v_{ce} = v_o = -i_c R_L \quad (1.14)$$

式(1.14)用图1.11的等效电路立刻就可得出，而负号表示输出电压 v_o 对集电极电流 i_c 恰好是反相。需要注意处理等效电路时不要忘记负号的意义。

已经清楚以上的等效电路的意义，但是实际的电路因也含有直流分量,特别是偏置法要注意,图1.12(a)上表示的那种加直流电压的方法是错误的。图1.12(a)是由于等效电路与实际电路混同而引起的错误。

而且，以前的说明中，直流电源电压是用电池符号表示的，但



(a)错误的偏置法　(b)正确的偏置法　(c)电路图画法

图 1.12　晶体管放大电路的偏置法

是正如图1.12(b)表示的，不是一一的写出而是如图1.12(c)那样多用省略表示。此时直流电源是用 V_{CC}、V_{BB} 等表示,注意它们是接在电源端子与接地端子之间。

1.5　放大器性能的表示方法

在本节中对于作为表示放大器性能的参数，即最重要的电压放大率，采用分贝的表示方法及其频率特性加以叙述。

需要全本请访问 www.ertongbook.com