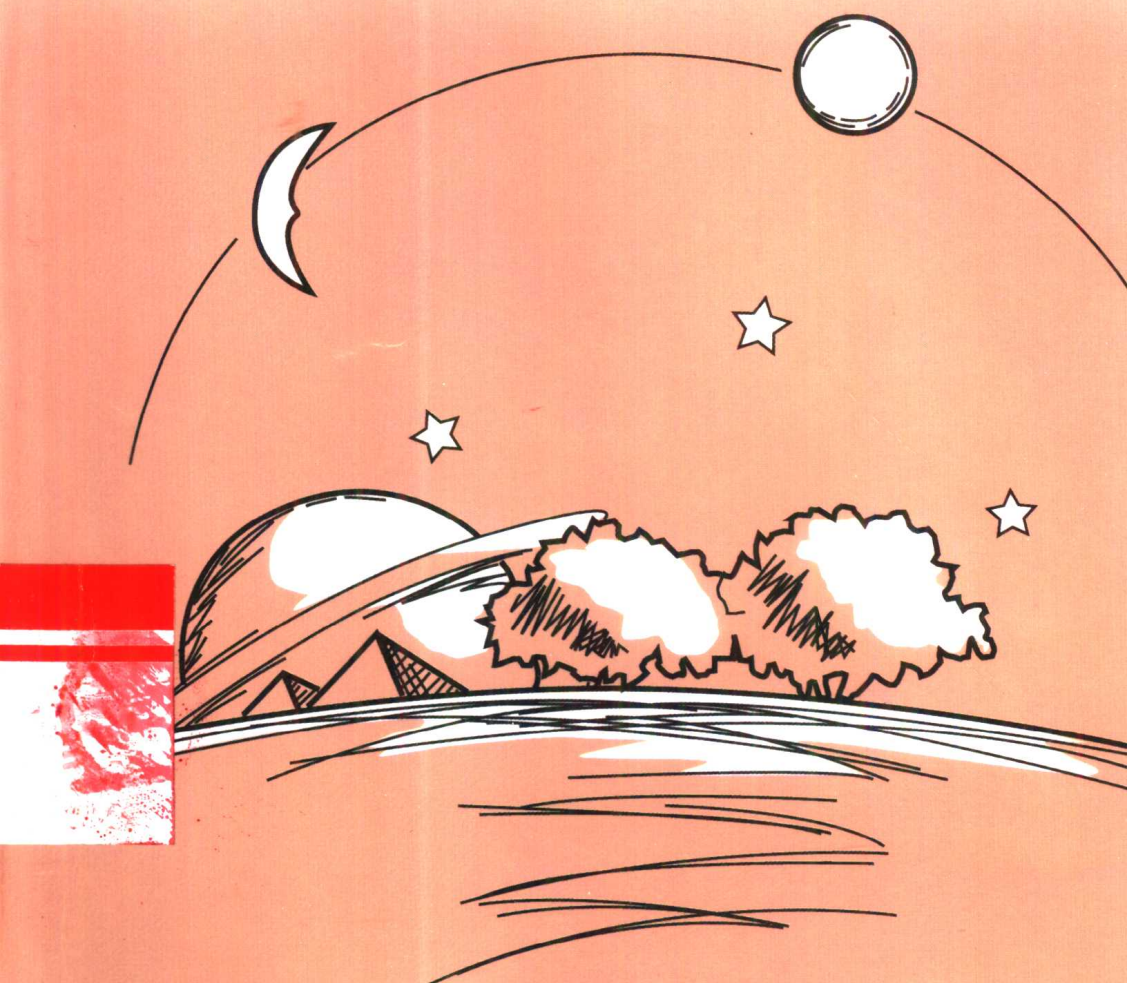


图解电子电路系列

2

模拟电路 I

〔日〕 佐野敏一 高木宣昭 竹内 守 著



科学出版社

OHM 社

00126186

TN710-64

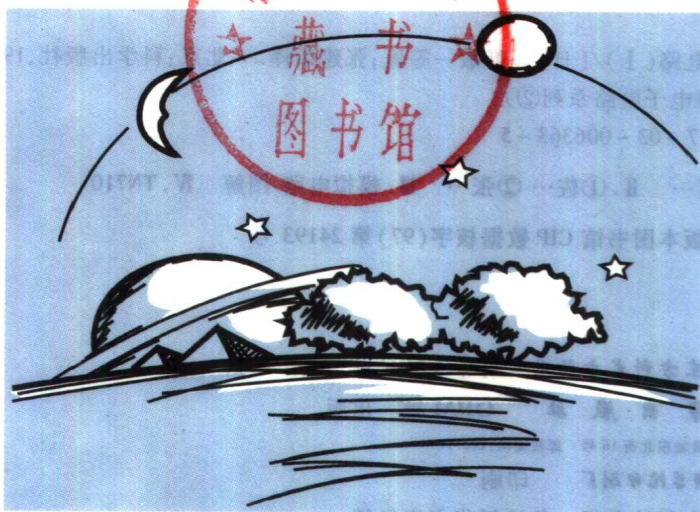
02

V1

图解电子电路系列②

模拟电路 (I)

〔日〕佐野敏一 高木宣昭 竹内 守 著
张 建 荣 译



科学出版社

OHM 社

2001



北航 C0544058

F046/217

图字:01-97-1034 号

Original Japanese edition

Etoki Denshikairo Shirizu② Anarogukairo(I)

by Nobuaki Takagi, Mamoru Takeuchi and Toshikazu Sano

Copyright ©1987 by Toshikazu Sano, Nobuaki Takagi and Mamoru Takeuchi

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. And Science Press

Copyright ©1997

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

絵とき電子回路シリーズ②

アナログ回路(I)

佐野敏一 高木宣昭 竹内 守 オーム社 1987

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路(I)/[日]佐野敏一等著;张建荣译. —北京:科学出版社,1997.2
(图解电子电路系列②)

ISBN 7-03-006363-5

I. 模… II. ①佐… ②张… III. 模拟电路-图解 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 24193 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

1997 年 12 月第 一 版 开本: A5(889×1230)

2001 年 3 月第二次印刷 印张: 6

印数: 5 001—10 000 字数: 184 000

定 价: 14.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

当今社会已进入电子时代。从事各种工作的人员或者学生,都直接或间接地与电子学有着密切的关系。

本书作为**图解电子电路系列**的第2卷,它面向日常使用晶体管、集成电路的人员或将要学习电子电路的人员。通俗易懂地讲解了放大电路的基本知识,同时从易学实用出发编排内容,使其能起到立竿见影的作用。

为了设计电路,首先应当理解所给出的电路,本书也按照这个指导思想去撰写。因此,在有助于理解的意义上将数学公式限制到必要的最小程度,尽可能地用图解方式解释其内容。即使跳过数学公式去阅读,也能正确理解电路的工作原理。而使用这些数学公式,则可以设计自己需要的放大电路。

各节中的“例题”及章末的“练习题”是为了更牢固地理解内容而设置的。希望大家边解答问题边往下读。如果本书能作为电子电路的启蒙书或者入门书来使用,作者就感到十分荣幸了。

在编写本书的过程中,参考了许多前辈的著作。值本书出版之际,向前辈们以及给予我们很多指导和帮助的欧姆社出版部的诸位表示衷心的感谢。

作 者

本书著作权和专有出版权受到《中华人民共和国著作权法》的保护。凡对本书的一部分或全部进行转载、或用复印机进行复制或在其它场合引用、以及录入电子设备等行为,均属侵害著作权,构成违法。

本书如需复制、引用、转载、改编时,必须得到版权所有者的许可。

如有任何疑问请与以下部门联系。联系时请尽量使用信函或传真形式。

科学出版社总编合作部 电话:010-64010643 传真:010-64019810

邮政编码:100717 地址:北京市东黄城根北街16号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 电话:010-82087401 传真:010-62072304

邮政编码:100029 地址:北京市朝阳区华严北里11号楼2层

目 录

1 章 放大电路的基础

1.1 放大的原理	1
1.1.1 放 大	1
1.1.2 晶体管的电流放大作用	3
1.1.3 静态特性	4
1.1.4 直流和交流的分离	6
1.2 基本放大电路	10
1.2.1 工作原理	10
1.2.2 各部分的波形	10
1.2.3 偏 置	11
1.2.4 动态特性	13
1.2.5 组合特性	14
1.3 放大倍数	19
1.3.1 放大倍数	19
1.3.2 分 贝	20
1.4 h 参数和等效电路	23
1.4.1 h 参数	23
1.5 基本放大电路的放大倍数和输入、输出 阻抗	28
1.5.1 输入、输出阻抗	28
1.6 放大电路的分类	30
1.6.1 放大电路	30
练习题	33

2 章 偏置电路

2.1 偏置的必要性	36
------------	----

2.1.1	偏 置	36
2.1.2	提供偏置的方法	37
2.2	偏置电路的种类和特点	39
2.2.1	双电源方式和单电源方式	39
2.2.2	固定偏置电路	40
2.2.3	自偏置电路	41
2.2.4	电流反馈偏置	41
2.3	稳 定 度	46
2.3.1	电路的稳定性	46
2.3.2	稳定系数	47
2.4	温度补偿电路	49
2.4.1	用非线性电阻进行补偿	49
2.4.2	用热敏电阻进行补偿	50
2.4.3	散热器	50
	练习题	52

3 章 低频小信号放大电路

3.1	RC 耦合放大电路的基础	54
3.1.1	RC 耦合放大的基本电路	54
3.1.2	电容的作用	55
3.1.3	用等效电路分析	57
3.1.4	最佳工作点的求法	59
3.2	频率特性和电容	61
3.2.1	信号频率和放大倍数	61
3.2.2	低频段放大倍数降低的原因	61
3.2.3	高频段放大倍数降低的原因	67
3.3	两级 RC 耦合放大电路	68
3.3.1	多级放大电路的放大倍数	68
3.3.2	两级 RC 耦合放大电路	68
3.4	射极跟随器放大电路	73
3.4.1	射极跟随器	73
3.4.2	射极跟随器的电压放大倍数	73

3.4.3 射极跟随器的输入、输出电阻	75
3.5 其他小信号放大电路	77
3.5.1 直接耦合放大电路	77
3.5.2 变压器耦合放大电路	78
练习题	82

4 章 负反馈放大电路

4.1 负反馈放大电路的原理	86
4.1.1 正反馈和负反馈	86
4.1.2 负反馈放大电路的原理	86
4.1.3 负反馈放大电路的特点	88
4.2 实际的负反馈放大电路	92
4.2.1 负反馈放大电路的分类	92
4.2.2 电流负反馈放大电路	92
4.2.3 电压负反馈放大电路	96
4.3 双重负反馈放大电路	99
4.3.1 局部反馈和多级反馈	99
4.3.2 双重负反馈放大电路	100
练习题	105

5 章 功率放大电路

5.1 功率放大电路的基本事项	108
5.1.1 集电极损耗	108
5.1.2 散热的重要性	108
5.1.3 失真	109
5.1.4 A,B,C类放大	109
5.2 A类功率放大电路	112
5.2.1 A类功率放大电路的特点	112
5.2.2 动态特性	112
5.2.3 失真	116
5.3 B类推挽功率放大电路	118
5.3.1 工作原理	118

5.3.2 交叉失真	118
5.3.3 动态特性	119
5.4 达林顿连接	123
5.5 SEPP 电路	125
练习题	127

6 章 高频放大电路

6.1 高频放大电路的基本事项	130
6.1.1 高频放大电路	130
6.1.2 理想的频率特性	130
6.1.3 用作高频晶体管的条件	131
6.2 单调谐电路	133
6.2.1 调谐电路的特性	133
6.2.2 利用中心抽头的阻抗变换	135
6.3 中和电路	137
6.4 AGC 电路	139
6.4.1 AGC	139
6.4.2 反向自动增益控制	139
6.4.3 正向自动增益控制	140
6.5 各种高频放大电路	141
6.5.1 中频放大电路	141
6.5.2 宽频带放大电路	141
6.6 高频功率放大电路	144
6.6.1 C 类放大的偏置	144
6.6.2 输出波形的失真	145
练习题	146

7 章 FET 放大电路

7.1 FET 放大电路	148
7.1.1 接地方式	148
7.1.2 静态特性	148
7.1.3 FET 的特点	150
7.2 偏置方法	151

7.2.1	固定偏置	151
7.2.2	自偏置	151
7.3	等效电路	153
7.3.1	等效电路	153
7.3.2	基本放大电路	154
7.4	FET 应用电路实例	156
7.4.1	低噪声前置放大器	156
7.4.2	高输入阻抗的电路	156
7.4.3	均衡放大器	157
	练习题	158

8 章 集成放大电路

8.1	集成电路的基础	160
8.1.1	集成电路的构造	160
8.1.2	集成电路的种类	160
8.2	集成电路内部的特殊电路	162
8.2.1	电平移动电路	162
8.2.2	直流恒流电路	162
8.2.3	差动放大电路	163
8.3	运算放大器的基本事项	165
8.3.1	运算放大器的特性	165
8.3.2	运算放大器中所用的术语	166
8.3.3	虚短路	166
8.3.4	基本放大电路	167
8.4	运算放大器的应用电路实例	170
8.4.1	前置放大器	170
8.4.2	均衡放大器	170
8.4.3	功率放大器	171
	练习题	172

练习题解答	173
-------	-----

1 章

放大电路的基础

住宅的门厅中安装的电子门铃、对讲电话机以及人们身边的无线电收音机等,由于其中有能放大微弱信号的放大电路,所以能从扬声器发出较大的声音。

以晶体管为中心构成各种电子电路时,放大电路是最基本的电路。

本章对晶体管电路的各部分波形等进行研究,理解怎样进行放大,学习晶体管放大电路的基础。其次,理解使晶体管具有放大作用必须在各电极上加适当的直流电压(偏置),并学习晶体管的静特性以及电流放大作用, h 参数,与此同时,还将介绍电流放大系数、电压放大倍数、功率放大倍数的求法。

1.1 放大的原理

1.1.1 放 大

把加到输入端的信号振幅放大并在输出端取出的动作称为放大(amplification),把实现此作用的电路称为放大电路,具有放大电路的装置称为放大器(amplifier)。

“将输入信号变成较大的输出信号”不是指信号本身放大。实际的放大电路如图 1.1 所示,使用晶体管放大器,用较小的输入信号控制电源提供的能量,在输出电路上取出较大的输出信号。

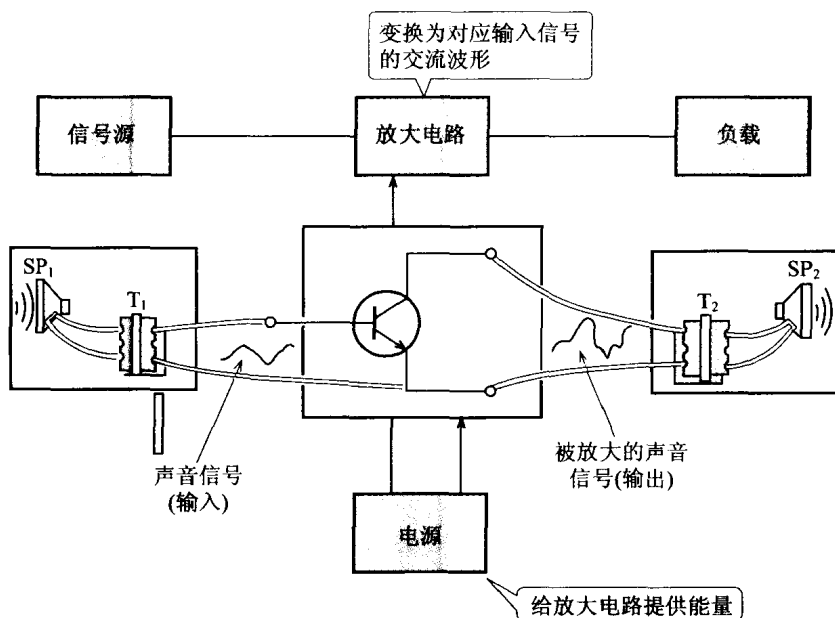


图 1.1 放大的原理图

根据所处理的输入、输出信号的大小,放大电路可以分为下面两类。一类是像使扬声器发出声音,或从天线发射极大的输出电波,或像使继电器动作那样,需要较大的输出功率时进行的放大。

另一类是处理振幅小的电压或电流的电路。

因此,把前者称为大信号放大电路,或者称为功率放大电路,后者称为小信号放大电路。

1.1.2 晶体管的电流放大作用

晶体管可以用小的基极电流(输入)控制大的集电极电流(输出)。现用基极接地电路、发射极接地电路对电流放大作用加以说明。

(a) 电流放大系数(基极接地电路)

在图 1.2 的基极接地电路中,使发射极-基极间的电压 V_{BE} 作少量变化,从而使发射极电流 I_E 只变化 ΔI_E 时,由于这种影响集电极电流也只变化 ΔI_C 。

这时,取 ΔI_E 和 ΔI_C 之比为

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \alpha = h_{fb} \tag{1.1}$$

把 α 称为基极接地的电流放大系数 (current amplification factor),或者称为小信号电流放大系数,用 h_{fb} 表示。

把集电极与发射极的直流电流之比称为直流电流放大系数,用 h_{FB} 表示以示区别。

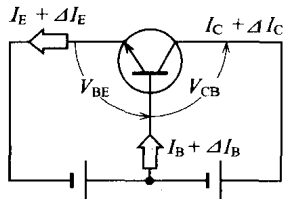


图 1.2 基极接地电路

$$\frac{I_C}{I_E} = h_{FB} \tag{1.2}$$

一般,结型晶体管的 α 或 h_{fb} 为 0.95~0.995,常取比 1 小的值。

(b) 电流放大系数(发射极接地电路)

现再对图 1.3 所示的发射极接地电路进行分析。

当基极-发射极间的电压 V_{BE} 作少量变化时,与此相应基极电流 I_B 仅变化 ΔI_B 。而且,发射极电流、集电极电流也分别仅变化 $\Delta I_E, \Delta I_C$ 。这时,用 β 表示 ΔI_B 和 ΔI_C 之比,把它称为发射极接地的电流放大系数,或称为小信号电流放大系数,用 h_{fe} 表示。

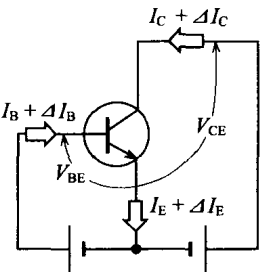


图 1.3 发射极接地电路

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta = h_{fe} \tag{1.3}$$

把发射极和基极的直流电流之比称为直流电流放大系数,用 h_{FE} 表示以示区别。

$$\frac{I_C}{I_B} = h_{FE} \quad (1.4)$$

由式(1.1)和式(1.3),用 α 表示 $\beta = h_{fe}$ 时,即为

$$h_{fe} = \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E - \Delta I_C} = \frac{\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}}{1 - \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1.5)$$

在式(1.5)中,假定 $\alpha = 0.995$,则 $\beta = 199$ 。这表明,当基极电流(输入端)发生某种变化时,集电极电流(输出端)就会出现 199 倍基极电流的变化,很小的基极电流的变化可以控制较大的集电极电流,把它称为晶体管的电流放大作用。

1.1.3 静态特性

实际上,为了使晶体管用作电路元件,必须很好了解加在各电极上的电压与各部分流过的电流之间的关系。由于晶体管的特性具有非线性,不能简单地进行电路计算,一般采用表示单个晶体管电特性的静态特性进行计算。

由于晶体管的接地方式不同,静态特性也不同,这里就以常用的发射极接地电路为例进行分析。图 1.4 是求静态特性的测量电路。

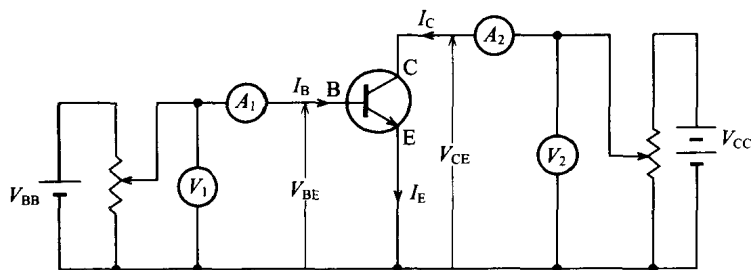


图 1.4 发射极接地的静态特性测量电路

(a) 输出特性

在图 1.4 的测量电路中,将基极电流 I_B 固定,分析集电极电流 I_C 的变化相对于集电极-发射极间的电压 V_{CE} 的变化,就可以得到图 1.5 所示的 $V_{CE}-I_C$ 静态特性。

把此特性称为**集电极特性**或**输出特性**。由此可知, V_{CE} 在 $0 \sim 1V$ 附近时

I_C 急剧增加,但 V_{CE} 超过 1V, I_C 几乎不变。这是因为在基极-集电极结面因扩散而移动的电子由于受到加在这个结面电压 V_{CE} 的作用被集电极吸引而变成集电极电流 I_C ,表示输出电阻大。

由此,利用晶体管的放大作用时,要使用 I_C 不急剧变化的 $V_{CE}=1[V]$ 以上的区域。

(b) 输入特性

将集电极-发射极间的电压 V_{CE} 固定,分析基极-发射极间的电压 V_{BE} 的变化引起的基极电流 I_B 的变化,就得到图

1.6 所示的特性。把此特性称为**基极特性**或者**输入特性**。

由于在基极-发射极间加正向电压,因此,基极-发射极间的电阻变小,它很接近 pn 结正向时的电压-电流特性。

(c) 电流转移特性

集电极-发射极间的电压 V_{CE} 一定,表示输入端的电流 I_B 和输出端的电流 I_C 的关系,这就是图 1.7。由此图输出电流相对输入电流为

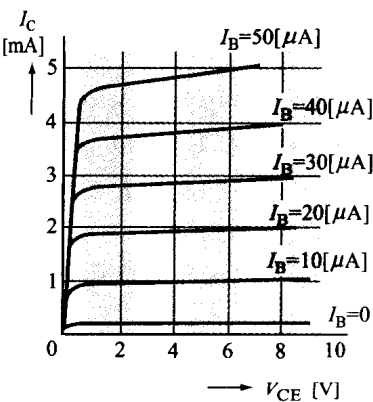


图 1.5 $V_{CE}-I_C$ 特性

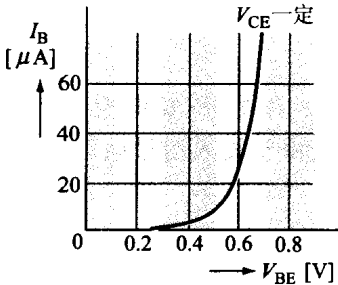


图 1.6 $V_{BE}-I_B$ 特性

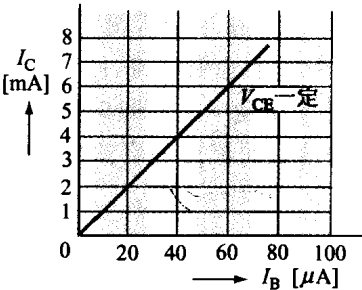


图 1.7 I_B-I_C 特性

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{6 \times 10^{-3}}{60 \times 10^{-6}} = 100$$

流过的电源 I_C 相当于 I_B 的 100 倍。 I_B 和 I_C 之比就是直流电流放大系数 h_{FE} 。

1.1.4 直流和交流的分离

若晶体管的基极流过的电流为直流电流和交流信号电流的重叠时,则集电极电流也为直流电流和交流信号电流的重叠。由于直流电流放大系数 h_{FE} 和小信号电流放大系数 h_{fe} 的值不同,若能分开考虑直流分量和交流分量,那将会很方便。

电压、电流等的符号原则上如下所述。

V_{BE}, V_{CE}, I_B, I_C	直流分量的电压、电流
v_i, v_o, i_b, i_c	交流分量的电压、电流的瞬时值
v_{BE}, v_{CE}, i_B, i_C	含有直流分量和交流分量的电压、电流的瞬时值
V_i, V_o, I_i, I_o	交流分量的电压、电流的有效值
$V_{im}, V_{om}, I_{im}, I_{om}$	交流分量的电压、电流的最大值

在图 1.8(a)的直流电路中,基极流过直流电流 I_B ,集电极也流过直流电流 I_C 。现在这个直流电路中加上如图 1.8(b)所示的交流信号电压 v_i 时,分析一下基极中流过怎样的电流。

基极电流 i_B 由两部分组成,一部分是由于在基极-发射极间所加的直流电压 V_{BB} 而流过的直流电流 I_B ;另一部分是由于输入信号电压(交流) v_i

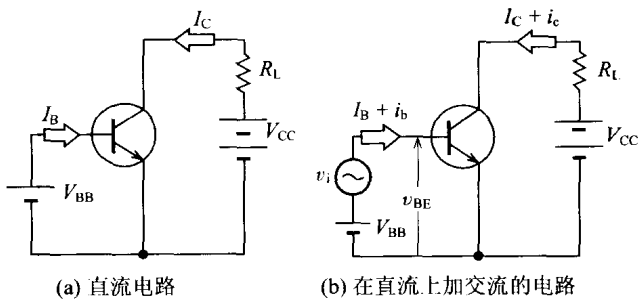


图 1.8

而流过的交流电流 i_b , 即为 $i_b = I_B + i_b$ 。

图 1.9 用波形示出这种情况。由此波形可以考虑将包含直流和交流的电路分为只有直流的电路和只有交流的电路, 这样就使电路的计算变得很简单。

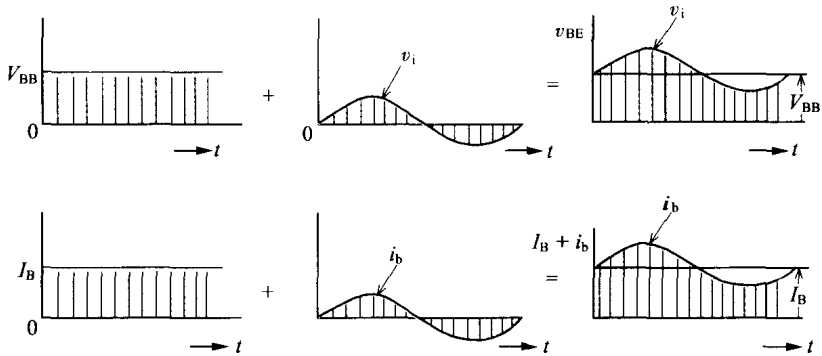


图 1.9 基极的电压、电流波形

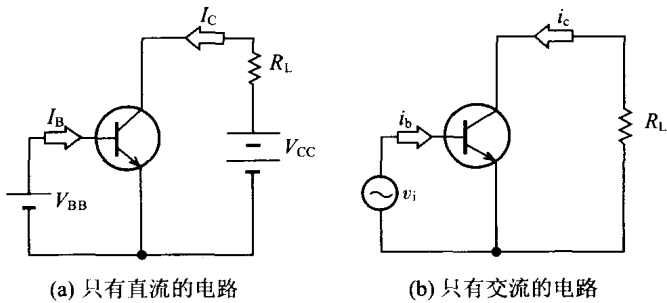


图 1.10 电路的分离



1. 在图 1.11 的晶体管电路中, 若基极电压 V_{BB} 从 0.2V 变化到 0.6V, 则基极电流 I_B 从 1mA 变到 5mA, 集电极电流 I_C 从 100mA 变到 300mA。这时求下面的值:

① 发射极电流的变化量。

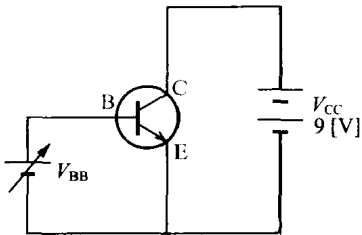


图 1.11 发射极接地电路