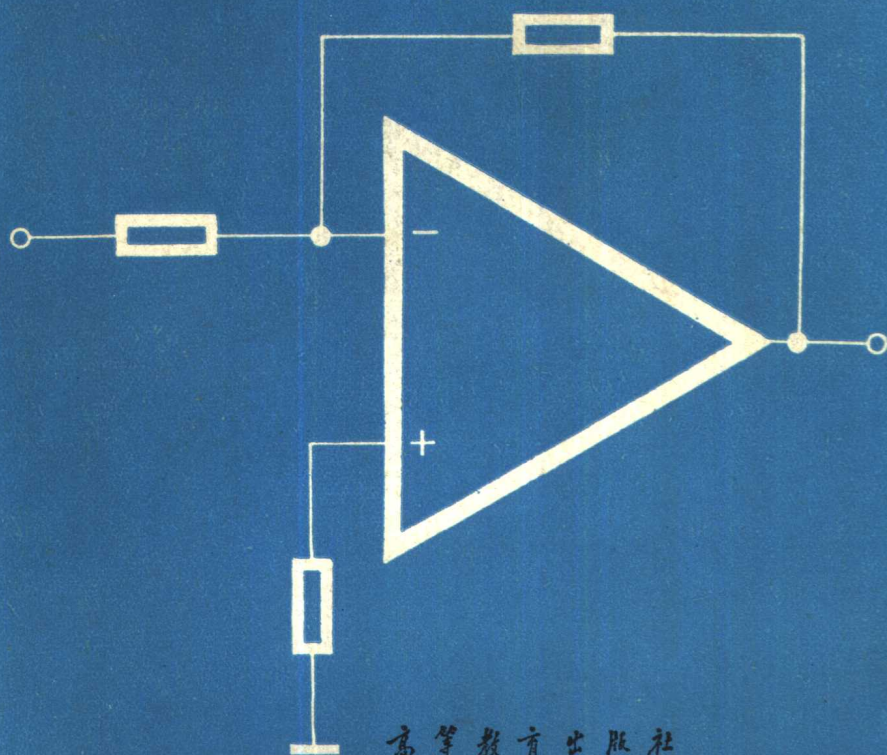


高等学校教材

模拟电子学

● 贾书圣 编



高等教育出版社

高等学校教材

模拟电子学

贾书圣 编

高等教育出版社

内 容 提 要

由于电子技术的飞速发展,国内外各类学校都在探索对电子学教材的改革,不断有新的教材问世。但长期以来,我国师范院校的电子学教材,始终未跳出1966年前形成的围绕三机组织教学的体系,很不适应当前电子技术发展的形势。

在高校理科无线电教材编审委员会师范小组的领导和支持下,北京师范大学的老教师们对全国一些师范院校电子学的教学进行了调查研究,并以“打好基础,面向发展,联系实际,培养能力”为教材建设的指导思想编写了此书。并在1986年教委和电子学会联合举办的学术交流会上,得到与会教师特别是师范院校老师们的首肯。

本书共九章,包括近二百个习题,可在90~120学时内讲完。本书具有以下特色:

(1)在教材结构上将分立电路和集成电路有机地结合起来,突出集成电路,删减了在分立电路中出现而在集成电路中不被采用的部分,加强了两者相同的部分。并兼顾电子技术当前实际和发展的趋向,适当增加新内容。(2)在分析方法上,注意吸收网络理论的有关结论,引入了复频域的分析方法。(3)用相乘的概念统一了调幅、检波和变频的原理。(4)注意处理好基本内容和提高性内容的关系,基本内容用普通型号字排版印刷,前后衔接,自成体系;提高性的内容,属于扩展知识方面的内容,用小号字排版印刷,穿插在相应章节,大小号字结合构成一种稍高水平的体系,这样可使教材具有很大的适应面,既适用于大学本科,也可供专科使用,还可作为自学者的读本。

责任编辑 郭玉凤

高等学校教材
模拟电子学

贾书圣 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 16.25 字数 390 000

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数 0001—2 210

ISBN7-04-002057-2/TN·107

定价 4.15元

前 言

电子技术的飞速发展,对电子学的教学提出了新的要求。近十几年来,国内外各级各类学校,都在探索对电子学的教材进行改革,不断有新的教材问世。但是,长期以来,我国师范院校的电子学教学,从大纲到教材,始终未能跳出1966年前后开始形成并加强的围绕三机(收音机、扩音机和电视机)组织教学的体系。显然,这是与电子技术发展的形势不相适应的。

1983年11月,高等学校理科无线电教材编审委员会在成都成立,并制订了理科电子线路教学大纲。参加编委会的师范院校的委员们,酝酿了对师范院校有关教学大纲的修订工作。会后,北京师范大学无线电电子学系前副主任尹俊华(编委)同贾书圣、李薇薇、张鹤登组成了调研小组,于1984年上半年南起广州北至哈尔滨,对师范院校电子学的教学进行了调查研究。在此基础上,提出了师范院校电子学教学改革的初步构想,并以“打好基础,面向发展,联系实际,培养能力”为教材建设的指导思想,拟出了相应的教材编写大纲(分为数字电子学、模拟电子学、苹果II微型机原理、电视机原理和苹果II PASCAL程序设计五篇)。1985年9月,师范院校的编委在上海召开了扩大会议,对上述意见给予了肯定,并建议以《数字电子学》和《模拟电子学》为必修教材,其余三篇为选修教材,组织教材编写工作。随后在天津举行的理科无线电教材编委会上,将《数字电子学》和《模拟电子学》正式列入了高教出版社的出版计划。《模拟电子学》初稿写成送审后,作者于1986年10月在教委和电子学会在屯溪联合举办的学术交流会上介绍

了这本书的特点以征询与会老师们的意见,得到了与会老师特别是师范院校老师们的首肯。

本书和《数字电子学》是作为师范院校非无线电专业必修课程编写的。为了使两本书篇幅均衡,也便于试行按先数字后模拟的体系教学,器件原理部分在《数字电子学》一书中讲授。本书则从器件模型出发,直接讲述电子线路。如果单独使用本书,可适当补充一点器件的知识,也可尝试直接从模型讲起。

本书共九章,包括近二百个习题,可在 90 至 120 学时内讲完。在体系安排和处理方法上,概括起来有以下特点:

1. 将分立电路和集成电路有机地结合起来,突出了集成电路。鉴于绝大部分分立电路都可看成是集成电路的构成单元,因而本书在选材上把只在分立电路中出现而在集成电路中不被采用的内容进行了删减,加强了二者相同的部分。这样就把分立电路和集成电路统一起来,把集成电路的内容渗透到了各章节之中,分立电路的基本知识并未削弱,集成电路却得到了加强。

2. 在分析方法上,注意吸收了网络理论的有关结论,引入了复频域的分析方法。这样,就把电路的时域响应和频率响应统一起来,为分析滤波器带来方便,也与国内理工科教材及国外同类教材相一致,便于读者互相参阅。

3. 用相乘的概念统一了调幅、检波和变频的原理,突出了集成模拟乘法器的应用。这就使非线性电路部分避免了以往教材中内容多、电路杂的缺点,也加强了集成电路应用的内容。

4. 兼顾了电子技术当前实际和发展趋向,适当增加了新内容。比如考虑到电子线路计算机辅助分析(CAA)和辅助设计(CAD)的需要,介绍了有源器件的大信号模型;考虑到集成电路的发展,用相当的篇幅介绍了集成运算放大器、比较器、功率放大器、宽带放大器、555 时基电路以及模拟乘法器的原理和应用;考

虑到大规模 MOS 模拟集成电路的发展, 初步介绍了开关电容滤波器。

5. 处理好基本内容和提高性内容的关系, 以适应不同教学对象的要求。基本内容用普通字号排印, 前后互相衔接, 自成体系。而属于扩展知识具有提高性质的内容, 则用小字排印穿插在相应章节之中, 大小字结合构成一种稍高水平的体系。这样就使教材具有较大的适应面, 既适用于大学本科, 也可供专科使用, 还可作为自学者的读本。

本书在编写过程中, 得到编委尹俊华老师的大力支持和鼓励。编委陈承志老师和北京电子学会电子学教育专业委员会电子线路分会理事长谢源清老师分别对本书初稿进行了审订, 提出了许多有益的意见。高静安同志为本书绘制了全部插图。在此一并致以最诚挚的感谢!

限于编者水平, 不妥乃至错误之处在所难免, 恳请专家和读者特别是使用这本教材的老师 and 同学们批评指正。

编者 1987 年 11 月
于北京师范大学

目 录

第一章 有源器件的模型	I
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 BJT 的低频模型	3
1.2.1 BJT 的大信号模型	3
1.2.2 BJT 的线性工作范围	10
1.2.3 BJT 的低频小信号模型——混合 π 模型	12
§ 1.3 FET 的低频模型	18
1.3.1 FET 的大信号模型	18
1.3.2 FET 的线性工作范围	22
1.3.3 FET 的低频小信号模型	22
本章小结	24
习题	24
参考文献	25
第二章 放大器基础	27
§ 2.1 概述	27
2.1.1 放大的过程和实质	27
2.1.2 放大器的性能指标	31
2.1.3 放大器的分析方法	38
§ 2.2 放大器的图解分析	39
2.2.1 静态分析	40
2.2.2 动态分析	43
2.2.3 波形失真和工作点的关系	46
§ 2.3 偏置电路	48
2.3.1 对偏置电路的要求	48
2.3.2 常见的分立偏置电路	50
2.3.3 常见的集成偏置电路	61
§ 2.4 单管放大器三种基本组态	65

2.4.1 共射(共源)组态	69
2.4.2 共基(共栅)组态	74
2.4.3 共集(共漏)组态	79
2.4.4 三种基本组态特性的比较	85
2.4.5 BJT的小信号 h 参数模型	86
§ 2.5 放大器的另一种重要组态——差动放大器	89
2.5.1 差动放大器的工作原理	90
2.5.2 大信号转移特性	92
2.5.3 小信号特性	95
2.5.4 变跨导式模拟乘法器	103
§ 2.6 有源负载放大器	111
2.6.1 电流源的动态电阻	112
2.6.2 有源负载共射放大器	114
2.6.3 有源负载射随器	116
2.6.4 有源负载差动放大器	119
§ 2.7 多级放大器	123
2.7.1 多级放大器需要考虑的几个问题	124
2.7.2 多级放大器增益的计算	129
§ 2.8 放大器的噪声	131
2.8.1 干扰的来源及其抑制方法	132
2.8.2 放大器的噪声和噪声系数	133
本章小结	135
习题	138
参考文献	155

第三章 放大器的频率响应 156

§ 3.1 引言	156
§ 3.2 复频域分析方法	157
3.2.1 正弦稳态下的网络函数及其零极点	157
3.2.2 网络函数的一般定义及其主要性质	159
3.2.3 零极点模型	164
3.2.4 频率响应曲线——波特图	165
§ 3.3 有源器件的高频响应	173
3.3.1 晶体管的高频模型和频率参数	173

3.3.2 场效应管的高频模型	177
3.3.3 密勒定理和单向化近似模型	178
§ 3.4 单级放大器的频率响应	182
3.4.1 CE 放大器的频率响应	182
3.4.2 CB 放大器的高频响应	183
3.4.3 CC 放大器的高频响应	191
§ 3.5 多级放大器的频率响应	192
本章小结	194
附录	195
一、拉普拉斯变换及其主要性质	195
二、常用函数的拉普拉斯变换	197
三、亥维赛展开定理——部分分式法	197
习题	198
参考文献	203

第四章 反馈放大器

§ 4.1 基本概念	204
4.1.1 反馈的基本概念	204
4.1.2 基本反馈方程式	207
4.1.3 反馈放大器的分类	209
4.1.4 反馈组态的判别	211
4.1.5 各种反馈组态对负载和信号源的要求	213
§ 4.2 负反馈的效果	213
4.2.1 提高了增益的稳定性	214
4.2.2 对非线性失真的改善	215
4.2.3 有利于提高信噪比	217
4.2.4 展宽频带	218
4.2.5 负反馈对输入、输出阻抗的影响	220
§ 4.3 反馈放大器的分析	227
4.3.1 建模的方法	227
4.3.2 分析举例	230
§ 4.4 反馈放大器的稳定性	241
4.4.1 负反馈放大器稳定工作的条件	242
4.4.2 稳定性的波特图分析法	244

4.4.3 相位补偿	247
本章小结	256
习题	257
参考文献	270
第五章 大信号线性放大电路	272
§ 5.1 大信号下的射极跟随器	272
§ 5.2 OCL 电路	276
5.2.1 工作原理、输出功率和效率	276
5.2.2 交越失真和电路的改进	279
5.2.3 复合管和准互补电路	281
§ 5.3 OTL 电路	284
§ 5.4 集成功率放大器	287
本章小结	290
习题	291
参考文献	293
第六章 集成运算放大器及其应用	294
§ 6.1 引言	294
§ 6.2 集成运放典型电路分析	295
6.2.1 F007 的基本工作原理	296
6.2.2 直流分析	299
6.2.3 小信号分析	304
§ 6.3 参数的测量和性能的扩展	309
6.3.1 集成运放的主要参数	309
6.3.2 主要参数的测量	312
6.3.3 扩展运放功能的方法	315
§ 6.4 集成运算放大器的应用	321
6.4.1 集成运放线性工作的理想模型	321
6.4.2 运算放大器的三种基本组态	323
6.4.3 集成运放应用举例	329
6.4.4 集成运放的运算误差	338
6.4.5 集成运放用作电压比较器	341
本章小结	348
习题	350

参考文献	359
第七章 波形产生电路	360
§ 7.1 引言	361
§ 7.2 正弦波振荡器	360
7.2.1 反馈振荡器的振荡条件	361
7.2.2 RC 振荡器	361
7.2.3 LC 振荡器	358
7.2.4 晶体振荡器	376
§ 7.3 张弛振荡器	380
7.3.1 方波和矩形波发生器	380
7.3.2 三角波和锯齿波发生器	386
本章小结	391
习题	393
参考文献	399
第八章 选频与滤波电路	400
§ 8.1 LC 调谐放大器	400
8.1.1 单调谐放大器	400
8.1.2 同步调谐和参差调谐	411
8.1.3 双调谐放大器	415
8.1.4 调谐放大器的稳定性	420
§ 8.2 宽带放大集中选择滤波的带通放大器	424
§ 8.3 无源滤波器	426
8.3.1 LC 滤波器	426
8.3.2 晶体和陶瓷滤波器	427
8.3.3 声表面波滤波器	423
§ 8.4 有源滤波器	429
8.4.1 RC 有源滤波器	430
8.4.2 开关电容滤波器	438
本章小结	441
习题	443
参考文献	448
第九章 频率变换电路	449
§ 9.1 引言	449

§ 9.2 频谱线性搬移电路	450
9.2.1 振幅调制	450
9.2.2 变频	459
9.2.3 调幅波的解调——检波	461
§ 9.3 频谱的非线性变换	474
9.3.1 调角波的性质	474
9.3.2 调频的方法	480
9.3.3 调频波的解调	487
本章小结	498
习题	499
参考文献	503
部分习题答案	504

第一章 有源器件的模型

§ 1.1 引言

电子线路和系统,不论是分立的还是集成的,都是由晶体管、场效应管、电子管等有源器件和电阻、电容、电感等无源元件组成的。任何一种器件,都是一个很复杂的物理系统。为了分析或设计电子线路和系统,就要把器件的主要电特性,用电路模型来模拟。因此,我们首先介绍在后续章节中经常使用的有源器件的模型。

可以想见,越是要全面而详尽地模拟实际的物理器件,所建立起来的模型也就必然越复杂,用这样的模型来分析和设计电路和系统,自然也就需要进行非常繁杂的计算。当然,这在计算机日益普及的情况下,已经算不上什么困难了。但是,实际工作中,常常并不需要对电路的分析过分地精确,人们也不希望离开计算机就“寸步难行”。因此,对有源器件,建立一些既简单又能模拟其主要特性的模型,是十分必要的。本章所介绍的模型,正是属于这一类。只有在计算机辅助分析和设计中,有时才需要更复杂的模型。这已经超出了本书的范围。

在具体讨论模型之前,有必要首先规定一套电参数的符号。因为在电子线路中,不仅要处理直流电压和直流电流的问题,还将处理变化的或交流的电压和电流的问题,而这些直流量和交流量又往往是叠加在一起的,因而还将遇到包含直流和交流的瞬时量。毫无疑问,从符号上对它们加以区别,会给今后的分析带来很大的

方便。

本书将用“主字母”加“下标”的两级符号来表示一个电参量，并约定：

凡是大写的主字母加大写的下标，表示直流量；而小写的主字母加小写的下标，则表示交流量。

例如，晶体管基极(b)-发射极(e)间的直流电压，用 V_{BE} 表示，而 b-e 间所加的交流瞬时电压，则用 v_{be} 表示。同样， I_B 表示基极的直流电流， i_b 表示基极电流的交流瞬时值。

如果在直流量上(例如 V_{BE})再叠加上交流量(例如 v_{be})，则为总的瞬时量，用小写字母加大写下标表示如 $v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$ 。

凡是主字母为大写，下标为小写，则表示为交流有效值，例如 V_{be} 为 b, e 极间的交流有效电压；如果是振幅值，通常在下标上再加注“m”，如 V_{bem} ；而相量 $V_{bem}e^{j\omega t}$ 用加“·”的符号 $\dot{V}_{be}$ 表示。

§ 1.2 BJT 的低频模型

双极结型晶体管(Bipolar Junction Transistor 简写 BJT)，简称晶体管，是由两个背对背而又互相影响的 PN 结组成的。它的工作原理和重要特性，读者已经熟悉。现在让我们从回顾 PN 结的特性出发，首先导出它的低频大信号模型，进而讨论它的线性工作范围并导出它的低频小信号模型。

1.2.1 BJT 的大信号模型

BJT 的大信号模型，是可以直接从讨论它的工作的物理过程中推导出来。在这里，我们不打算去涉及那些半导体物理的内容，而是从已有的结论中简捷地建立它的模型。这样做虽然理论上不够严密，但物理概念是清晰的。

首先，让我们回忆一下 PN 结的伏-安特性。设加在 PN 结两

端的电压为 V ，流过 PN 结的电流为 I ，则其伏-安关系为

$$I = I_S \left(\exp \frac{V}{V_T} - 1 \right) \quad (1-1)$$

其中 I_S 是反向饱和电流，它与少子的浓度有关。 $V_T = \frac{kT}{q}$ (q 是电子电量， k 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度) 是温度的电压当量，室温下 V_T 约为 26 mV。将式(1-1)的伏-安关系，用曲线表示如图 1-1 所示。

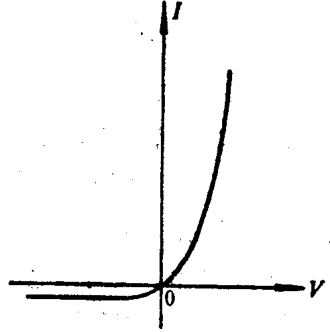


图 1-1 PN 结的 V - I 特性

晶体管是由相互影响的两个 PN 结构成的。以 NPN 型晶体管为例，当工作于放大状态时(发射结正偏，集电结反偏)其各极电流、电压关系以及内部的电流分配关系，可以用图 1-2 来描述。图中电流的方向和电压的极性，均按实际情况标示。我们已经知道，发射极电流 I_E 和集电极电流 I_C 的关系为

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad (1-2)$$

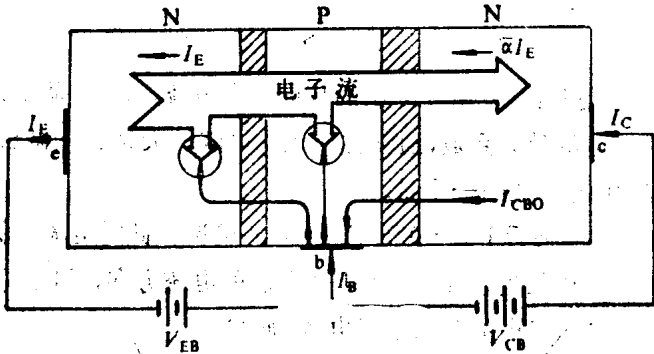


图 1-2 NPN 晶体管示意图

其中 α 是共基极电流放大系数, I_{CBO} 是发射极开路 ($I_E=0$) 时, c-b 间的反向饱和电流。上式表明, 发射极发射的电流 I_E , 在发射区和基区被复合掉一小部分, 剩下的部分 (αI_E) 扩散到集电结的边缘, 由于集电结反偏, 便被集电结的漂移场收集到集电区去。 I_E 的大小则决定于 e-b 间的电压, 显然 I_E 与 V_{BE} 的关系, 应当服从式 (1-1) 的关系。

式 (1-2) 只描述了晶体管在放大状态下的关系。为了导出更全面的关系, 让我们注意这样两件事: 一是式 (1-1) 描写的 PN 结的 V - I 关系, 不仅适用于 $V>0$ 的情况, 而且也适用于 $V<0$ 的情况; 二是晶体管发射极电流中渡越到集电结边缘的那一部分, 即 αI_E , 不仅在集电结反偏时被收集到集电极, 即使集电结所加的偏置为零, 其内部电场也会将它收集到集电极去。这就是说, 当 $V_{BC}=0$ 时, $I_C=\alpha I_E$ 。

现在, 让我们来看这样两种特殊情况:

首先, 当 $V_{BE}\neq 0, V_{BC}=0$ 时, 设此时发射极电流为 I'_E , 集电极电流为 I'_C , 根据上述讨论则有

$$I'_E = I_{ES} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right)$$

$$I'_C = \alpha_F I'_E$$

这里, I_{ES} 是 $V_{BC}=0$ 时发射结的反向饱和电流, α_F 是从发射极到集电极的电流放大系数, 通常称为正向电流放大系数。显然, 它与式 (1-2) 中的 α 是同一个量。

其次, 再来看 $V_{BC}\neq 0$ 而 $V_{BE}=0$ 的情况。此时电流从集电极发射由发射极收集, 如仍取图 1-2 所示的电流方向, 并以 I''_E 和 I''_C 分别表示发射极电流和集电极电流, 则有

$$I''_C = -I_{CS} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right)$$

$$I_E'' = \alpha_R I_C''$$

式中 I_{CS} 是 $V_{BE} = 0$ 时, 集电结的反向饱和电流, α_R 则是从集电极到发射极的电流放大系数, 通常称为反向电流放大系数。

如果 V_{BE} 和 V_{BC} 都不为零, 那么, 发射极电流 I_E 应为 I_E' 和 I_E'' 的叠加, 集电极电流 I_C 应为 I_C' 和 I_C'' 的叠加, 即

$$\left. \begin{aligned} I_E &= I_{ES} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \\ I_C &= \alpha_F I_{ES} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式(1-3)是有名的埃伯尔斯-莫尔 (Ebers-Moll) 方程式, 它反映了晶体管在任何偏置下的伏-安关系。通常为了分析上的方便, 总是把流入晶体管的电流规定为电流的正方向, 对于 NPN 晶体管来说, 图 1-2 中 I_E 应为负值, 因此式(1-3)通常表成

$$I_E = -I_{ES} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \quad (1-4a)$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) - I_{CS} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \quad (1-4b)$$

分析证明

$$\alpha_R I_{CS} = \alpha_F I_{ES} \quad (1-5)$$

对于 PNP 管来说, 电流、电压均应取相反的符号。

将式(1-4)稍加变换, 便可得到埃伯尔斯-莫尔方程另一种表达式:

$$I_E = -\alpha_R I_C - I_{EO} \left(\exp \frac{V_{BE}}{V_T} - 1 \right) \quad (1-6a)$$

$$I_C = -\alpha_F I_E - I_{CO} \left(\exp \frac{V_{BC}}{V_T} - 1 \right) \quad (1-6b)$$

式中

$$I_{EO} = (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{ES} \quad (1-7a)$$

是集电极开路 ($I_C = 0$) 时, 发射结的反向饱和电流, 而