



厦门大学

信息与通信工程系

---

## 电子线路I

### 第三讲——三极管知识归纳及重难点总结

---

厦门大学朋辈导师辅导计划

2024年11月9日

# 1 规范性符号约定

## 1.1 下标表示方法

1. 双下标。当下标中的两个字符相同时，如 $V_{CC}$ 、 $V_{BB}$ ，这表示电压源电压。当两个字符不同时，如 $V_{BE}$ 、 $V_{CE}$ ，这表示两点间的电压。
2. 单下标。当只有一个下标时，如 $V_B$ 、 $V_C$ ，这表示该标注点与地的电压。双下标可以由单下标给出 $V_{BE} = V_B - V_E$ 。

## 1.2 大小写使用方法

1. 直流量。使用大写字母加大写下标来表示，如 $I_B$ 、 $V_{BE}$ 。
2. 交流量。使用小写字母加小写下标来表示，如 $i_b$ 、 $v_{be}$ 。
3. 总瞬时量（交直流混合量）。使用小写字母加大写下标表示，如 $i_B$ 、 $v_{BE}$ 。
4. 交流有效值。使用大写字母加小写下标表示，如 $I_b$ 、 $V_{be}$ 。

# 2 交直流通路的绘制方法

## 2.1 直流通路

所谓直流通路，就是电路在直流激励作用下，直流量经过的通路。其一般绘制方法简记为：容开感短，流开压短

1. 容开感短。电容视为开路（断路），电感视为短路（导线）。
2. 流开压短。电流源视为开路，电压源视为短路，但是要保留内阻。

## 2.2 交流通路

所谓交流通路就是去除直流信号后，交流信号流经的通路，其一般绘制方法为：

1. 电容视为短路（导线）。
2. 去除直流信号源，电流源开路，电压源短路，保留内阻。
3. 如果直流偏置是由只有一端的电源给出，则该端视为接地。

# 3 晶体三极管工作原理

三极管，又称双极性晶体管（Bipolar junction transistor），具有开关特性和放大特性。在模拟电路中常用其放大特性构成各类放大电路，数字电路中利用其开关特性构成TTL门电路。

## 3.1 概念回顾和辨析

在讨论三极管的工作原理之前，我们先回顾几个关于三极管的概念。

1. 掺杂。在半导体材料中人为添加杂质原子的方式叫做掺杂，其程度常用掺杂浓度表示，定义为单位体积中的掺杂原子数量。常见的掺杂分为**P型掺杂**（空穴为多子）和**N型掺杂**（电子为多子）。

2. 三极管的两种组态和三个极。图1(a)给出了三极管的一种组态NPN型。晶体管一共有三个极，分别是发射极、基极和集电极。从图中可以看出其有两个PN结，一个在发射极和基极之间，另一个在集电极和基极之间。前者被称为发射结、后者被称为集电结。PNP型组态的三极管和NPN型类似，只是电流方向相反而已。因此，后文我们重点以NPN为例讲述。
3. 三极管的扩散情况。还记得我们在二极管中讲到的扩散现象么（高浓度向低浓度移动），由于三极管具有两个结，所以会在基极与集电极、基极与发射极间分别形成两个耗尽层。耗尽层存在势垒电压，这是三极管各结存在导通电压的原因。
4. 三个极的掺杂情况。在三极管中，各个极掺杂的浓度是不同的，发射极掺杂浓度最高，在NPN型三极管中发射极就有大量的自由电子；基极的掺杂浓度较低；集电极介于两者之间（但有时也会出现基极比集电极高）。
5. 三个极的作用。重掺杂发射极的作用是将电子发射或注入基极，因而得名发射极。轻掺杂基极的作用是将发射极注入的电子传输到集电极。集电极的作用是收集来自基极的绝大部分电子。

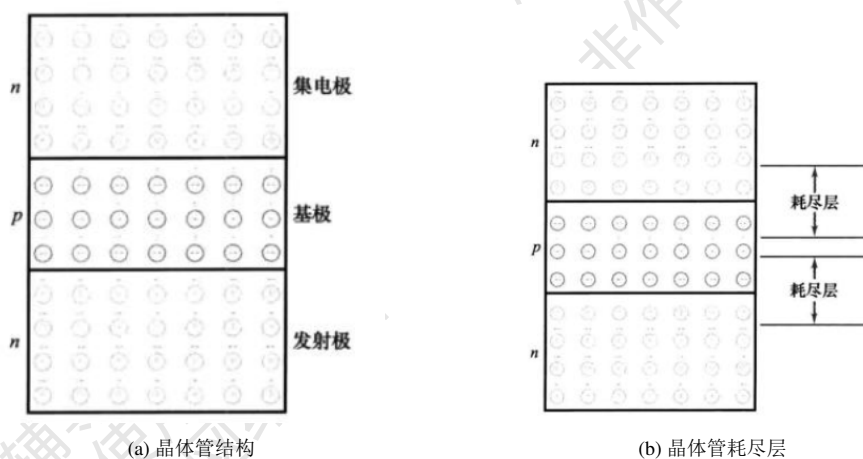


图 1: 晶体管NPN组态

### 3.2 外加偏置下的三极管

图2给出了三极管最常用的一种偏置类型，即发射结正偏、集电结反偏。下面我们从微观电子的角度出发讨论三极管的工作原理。

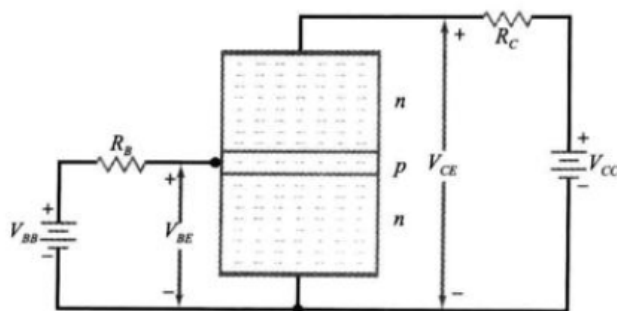


图 2: 外加偏置的NPN型三极管

#### 3.2.1 发射极电子

当发射结外加偏置电压高于其势垒电压（导通电压  $V_{BE(on)}$ ）时，重掺杂发射极的大量自由电子就会注入基极（漂移运动）。如果外加电压越大，单位时间内注入基极的电子数目就更多。

### 3.2.2 基极电子

当发射极电子进入基极后，理论上他们有两条路径，一种是从基极流出，另一种是流向集电极。绝大部分的电子最后将会继续流向集电极，原因有二：

1. 基极掺杂浓度不高，只有很少量的电子才会与基极的空穴复合，自由电子在基极存活的时间长。
2. 基极通常做的很薄，这意味着电子只需要通过很短的距离就可以到达集电极。

综上，只有很少的电子会最终从基极流出形成基极电流，绝大部分都是继续流向集电极。

### 3.2.3 集电极电子

自由电子到达集电极后，由于电源 $V_{CC}$ 的吸引，这些自由电子会流过集电极，到达集电极电压源的正极。

总结一下，电压 $V_{BB}$ 使发射极正偏，迫使发射极的电子进入基极。由于基极很薄而且掺杂浓度低，几乎所有的电子都可以扩散到集电极。这些电子流过集电极达到电源 $V_{CC}$ 的正极。从这个过程我们可以看出，整个电路中流动的电子数目主要是取决于发射极发射出来的电子数目，这个数目又由发射结偏置电压决定，集电结的偏置电压主要是起到吸引电子的作用，它不能决定电流大小（电子数目）。所以，后面所说的三极管等效电路中，CE之间可以看作是一个受BE电压控制的受控电流源。

## 4 晶体三极管电流

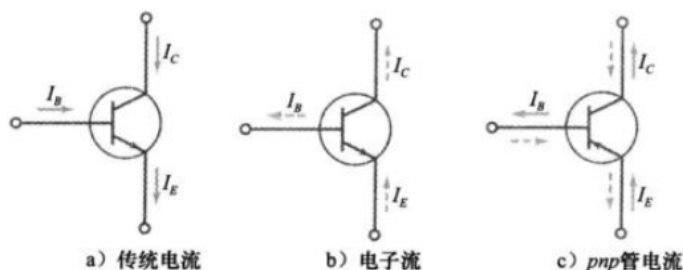


图 3: 晶体管的三种电流

设三极管基极、发射极和集电极电流分别为 $I_B$ 、 $I_E$ 和 $I_C$ ，定义 $\alpha$ 为集电极电流和发射极电流之比， $\beta$ 为集电极直流电流和基极直流电流之比，三极管电流之间的关系满足：

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C \approx I_E, I_B \approx 0$$

$$I_B \ll I_C$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \leq 1$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha I_E}{(1 - \alpha) I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

## 5 共发射极组态

晶体三极管有三种最常用的组态，共发射极、共集电极和共基极。共集电极和共基极我们会在后面的放大器章节重点讨论，现在我们主要了解最基本的共发射极组态。图4给出了共基极的基本电路。

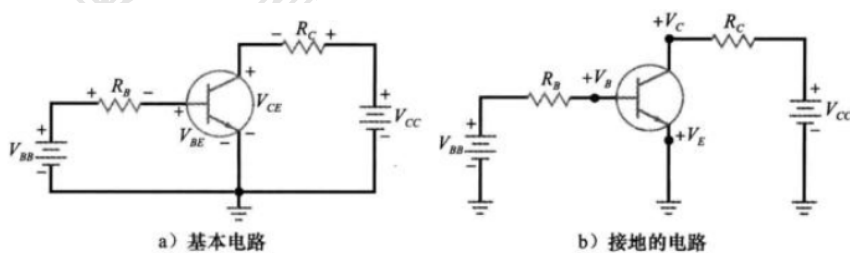


图 4: 三极管共发射极组态

### 5.1 三极管的伏安特性曲线

#### 5.1.1 基极特性（输入特性）

三极管  $I_B$  和  $V_{BE}$  之间的特性就如同普通的二极管特性曲线，可以使用前一讲的所有近似方法。  $I_B$  可以使用下式进行计算。

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

例如在图5中，  $V_{BB} = 2V$ ，  $V_{BE(on)} = 0.7V$ ，则

$$I_B = \frac{(2 - 0.7)V}{100k\Omega} = 13\mu A$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = \alpha I_C = (1 + \beta) I_B$$

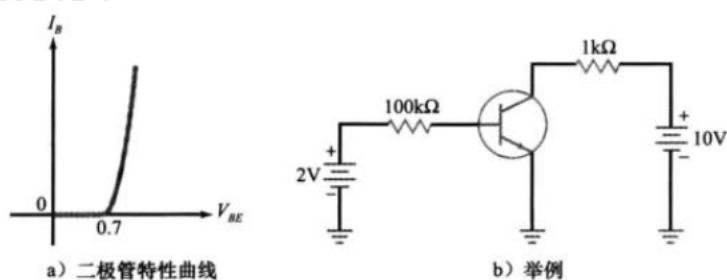


图 5: 基极特性

#### 5.1.2 集电极特性（输出特性）

在  $I_B$  电流一致时，由图6是三极管  $V_{CE}$  和  $I_C$  伏安特性曲线。

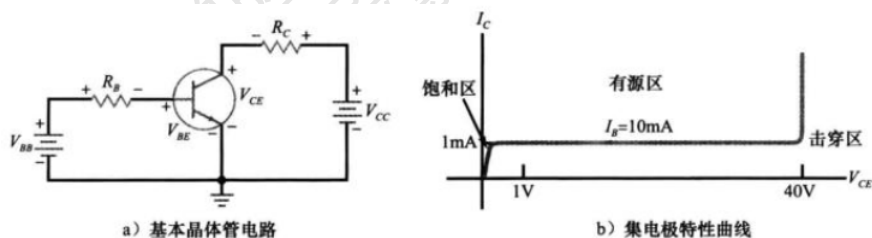


图 6: 集电极特性

由这个图我们可以给出三极管的三种工作区域：饱和区、有源区和击穿区。此处的有源区又可以称为放大区，但是为了和后面的CMOS管工作区域进行区分，我们这里仍然称他为有源区。

1. 饱和区。在 $V_{CE}$ 从零开始增加时，集电极电流迅速增加，该区被称为饱和区，因为集电极外加反向偏置电压不足以全部吸引集电极的自由电子，电子数目存在饱和。
2. 有源区。当 $V_{CE}$ 进一步增大时，到达集电极的自由电子被全部收集，进一步增加 $V_{CE}$ 并不能提高 $I_C$ ，因为集电极只能收集经过基极、源自发射极的电子。但实际上，有源区 $I_C$ 会随 $V_{CE}$ 增大而略微增大，这取决于三极管的制作工艺和性能。
3. 击穿区。由于晶体管集电结反偏，所以当电压过高时，集电结会被击穿，这是不能被允许的。

改变基极电路 $I_B$ ，我们可以得到一系列的集电结伏安特性曲线簇（图7）。

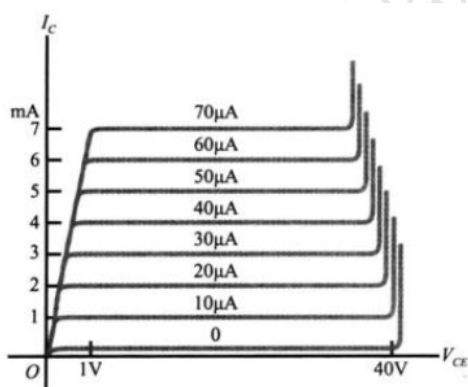


图 7: 集电极特性

综上，对于NPN管来说，其工作状态可以按照下面的步骤来进行判断：

1. 当三极管发射结反偏或者 $V_{BE} < V_{BE(on)}$ 时，三极管处于截止状态（发射极只有很少的电子流出）。
2. 当三极管发射结满足 $V_{BE} > V_{BE(on)}$ 时，发射极大量自由电子进入集电极。
3. 如果集电结正偏或者 $V_{CE} < V_{CE(sat)}$ 时，自由电子只有很少部分从集电极流出， $I_C$ 比较小且随 $V_{CE}$ 增大而增大，三极管处于饱和状态。
4. 如果三极管满足 $V_{CE} > V_{CE(sat)}$ 时，自由电子大量流出集电极， $I_C$ 几乎不随 $V_{CE}$ 变化而变化，三极管处于放大状态。
5. 如果 $V_{CE}$ 进一步增大超过限制，三极管被击穿。

## 5.2 NPN管和PNP管的工作状态判断辨析一览表

	截止区	饱和状态	放大状态
NPN	$V_{BE} < V_{BE(on)}$	$V_{BE} > V_{BE(on)} > 0, 0 < V_{CE} < V_{CE(sat)}$	$V_{BE} > V_{BE(on)} > 0, V_{CE} > V_{CE(sat)} > 0$
PNP	$V_{BE} > V_{BE(on)}$	$V_{BE} < V_{BE(on)} < 0, 0 > V_{CE} > V_{CE(sat)}$	$V_{BE} < V_{BE(on)} < 0, V_{CE} < V_{CE(sat)} < 0$



## 5.3 共发射极组态等效电路

### 5.3.1 大信号模型

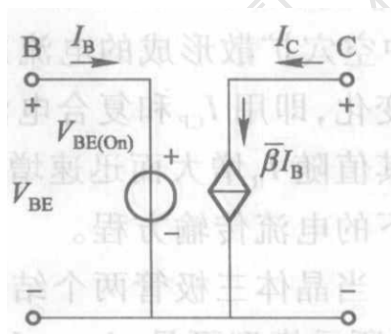


图 8: 大信号等效电路

三极管的大信号（直流）等效电路由图8给出， $I_B$ 的计算方法在基极特性这部分已经讲过，大家可以参照。三极管的大信号模型也就是直流通路分析的过程。一般不需要画出等效电路，直接利用电流方程计算即可。

### 5.3.2 小信号模型

三极管最常用的小信号等效模型就是图9所示的混合 $\pi$ 形电路。

1. 基极串联电阻 $r_{bb'}$ 。电阻 $r_{bb'}$ 是由基极引线电阻和基极体电阻组成，其值约为几十欧，通常由题目给出。
2. 发射结等效电阻 $r_{b'e}$ 。 $r_{b'e} = V_T/I_{BQ} = (1 + \beta)V_T/I_{EQ}$ 。记 $r_e = V_T/I_{EQ}$ ，则 $r_{b'e} = (1 + \beta)r_e$ 。（ $I_{BQ}$ 和 $I_{EQ}$ 表示静态工作电流）
3. 基区宽度调制效应修正电阻 $r_{ce}$ 。为了修正因三极管特性不理想导致的有源区集电极电流 $i_C$ 随 $v_{CE}$ 升高的现象，人们引入了厄尔利电压 $V_A$ （ $V_A < 0$ ）和电阻 $r_{ce}$ 来进行修正。 $r_{ce} = |V_A|/I_{CQ}$ ， $V_A$ 通常由题目给出。
4. 结电容 $C_{b'e}$ 和 $C_{b'c}$ 。集电结和发射结都存在结电容，他们与信号的频率有关，一般他们的值很小，通常不考虑。只有在高频时他们的影响才十分显著。
5. 跨导 $g_m$ 。因为 $i_c = \beta i_b = \beta v_{b'e}/r_{b'e}$ ，所以定义 $g_m = \beta/r_{b'e}$ 为发射结电压到集电极电流的转移跨导（单位：西门子S）。

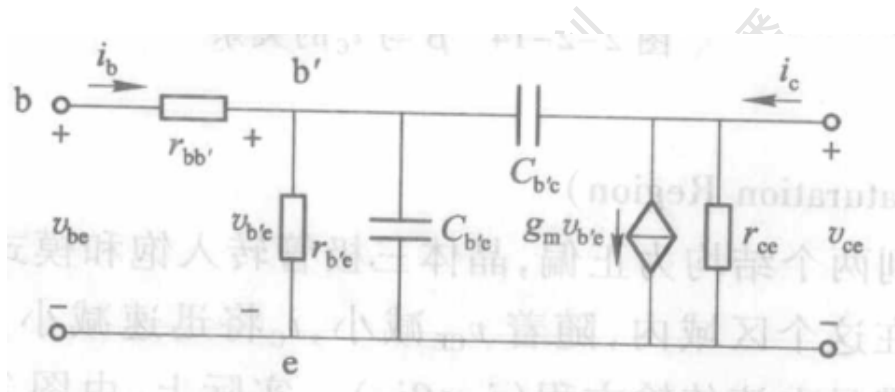


图 9: 小信号等效电路

## 6 三极管电路分析方法

对于三极管电路，主要有两种分析方法，一种是图解分析法，另一种是等效电路分析法。

## 6.1 图解分析法

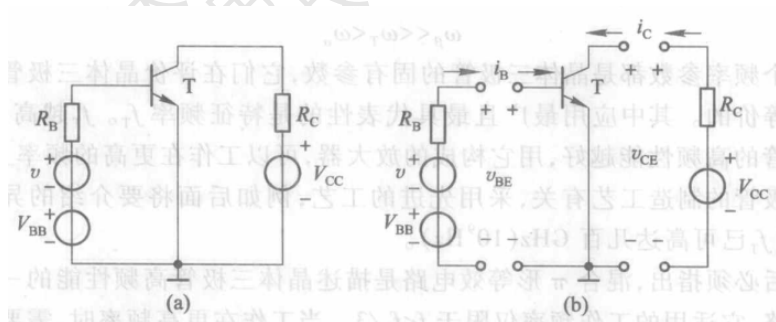


图 10: 一种晶体三极管电路

以图10所示的电路为例，可以列写直流输入线方程和负载线方程为：

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

若已知三极管的伏安特性曲线，我们就可以直接在图中绘制两个方程，找到静态工作点（Q点），并根据交流输入来得到相应的交流量和交流输出波形。

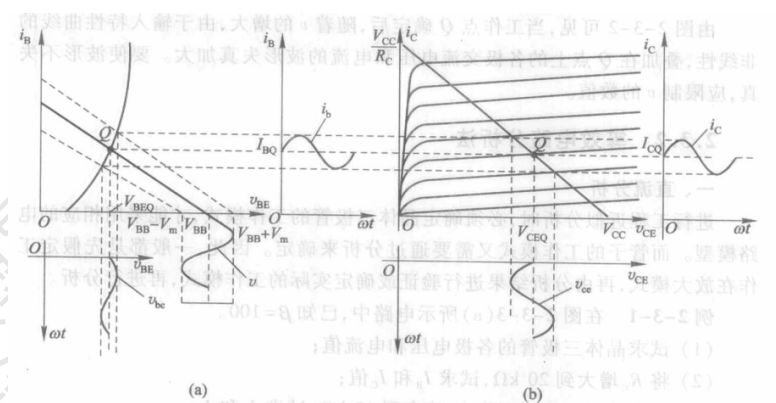


图 11: 图解分析法

## 6.2 等效电路分析法

### 6.2.1 静态工作点计算

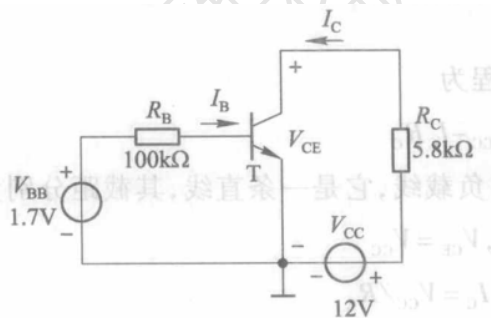


图 12: 等效电路分析例题一



以图12为例，下面给出了电路静态工作点计算的步骤。已知 $\beta = 100$ ， $V_{BE(on)} = 0.7V$

$$I_B = (V_{BB} - V_{BE(on)}) / R_B = (1.7 - 0.7) / 100 \times 10^3 = 10\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 1 \times 5.8 = 6.2V$$

## 6.2.2 交流等效电路计算

交流计算以例题二为例（图13），已知 $I_{CQ} = 1mA$ ， $v = 20\sin\omega t mV$ ， $\beta = 100$ ， $V_A = -100V$ 。

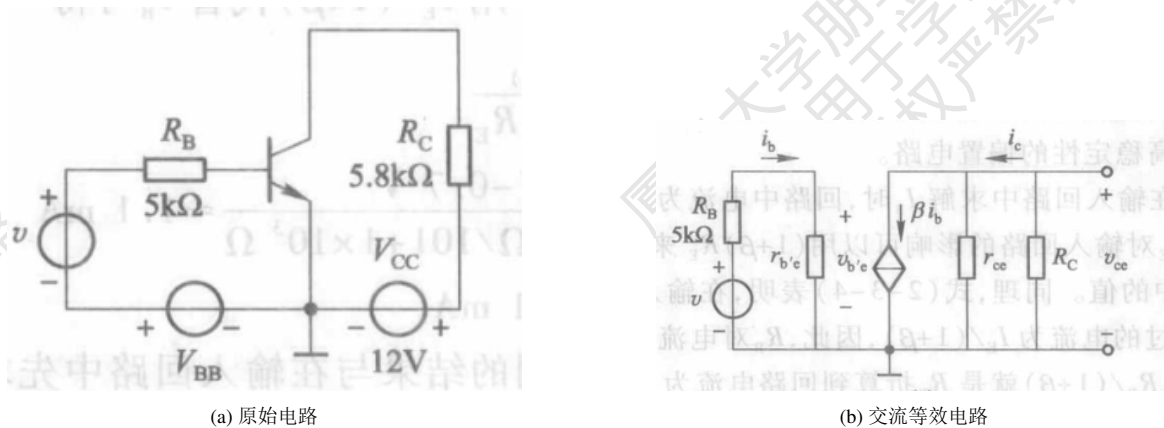


图 13: 等效电路分析例题二

$$I_{BQ} = I_{CQ} / \beta = 10\mu A$$

$$r_{be} = V_T / I_{BQ} = 26 / 0.01 \Omega = 2.6k\Omega$$

$$r_{ce} = |V_A| / I_{CQ} = 100 / 0.001 \Omega = 100k\Omega$$

$$i_b = v / (R_B + r_{be})$$

$$v_o = v_{ce} = i_c (r_{ce} // R_C) = \beta i_b (r_{ce} // R_C)$$

## 7 总结

本讲内容主要是围绕三极管的工作原理及其基本放大组态——共射组态展开，大家对于三极管工作原理了解即可，主要是需要掌握直流、交流通路的绘制方法以及三极管的直流交流分析方法。

## 参考文献

[1] 电子电路原理（原书第7版）. Albert Malvino, David J.Bates.

[2] 《电子线路（线性部分）》. 冯军, 谢嘉奎.