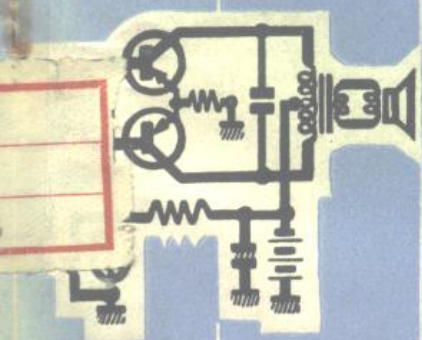


半导体手册
第8编



线性放大



科学出版社

《半导体手册》第8編

綫 性 放 大

《半导体手册》翻译组译

科 学 出 版 社

1 9 7 0

《半导体手册》第8编

线 性 放 大

《半导体手册》翻译组译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京西直门外三里河路2号

北京市书刊出版业营业许可証出字第061号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1970年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1970年9月第一次印刷 印张：5 1/4

字数：115,000

统一书号：15031·269

本社书号：3620·15-7

定价：0.40元

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

外国有的，我們要有，外国沒有的，我們也要有。

对于外国文化，排外主义的方針是錯誤的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借鏡；盲目搬用的方針也是錯誤的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

出版說明

本书是根据〔日〕半导体手册编委会编《半导体手册》1963年初版本译出。内容包括半导体物理学、半导体材料、晶体二极管和晶体三极管的工作原理、晶体二极管和晶体三极管、特种半导体器件、晶体二极管和晶体三极管特性、半导体电路理论、线性放大、振荡、调制与解调、脉冲电路、数字电路、电源、微波电路、参量放大器、数据等16编。

本书于1966年已全部译完，因工作量较大，未能及时出版。最近，我们征求读者意见，认为做为一般了解和查阅半导体电子技术的参考书，还应出版。我们遵照毛主席关于“**洋为中用**”的教导，为适应读者的要求，又继续进行审查校对，现将其单行出版。

本书主要特点是将半导体基础知识和应用技术综合汇编在一起的半导体电子技术的资料性参考书。书中在基础知识方面涉及的范围较为广泛，在应用技术方面介绍的比较全面，各编重点不一样，仅供读者参考。

原书中主要缺点表现在：有些编的内容尚有形式化的数学推导较多，物理分析较少；有些编在讲解概念和理论分析上有些模糊；有些编在文字和数字上有错误；有些编则为一些资产阶级学术权威和厂商吹嘘、捧场；有些编内容是从别的资料中传抄过来的，未经过实践验证。我们遵照伟大领袖毛主席“一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收”的教导，加以删

节和校正。

本书在译校过程中，很多工厂、学校、科研单位给予了很大的支持和热情帮助，并提出不少宝贵意见，我们对这些单位表示衷心的感谢。

由于外文、专业知识的限制，在文字翻译及技术概念的表达上不免会有错误，又由于我们毛泽东思想学习的不够好，所以对原书中的其他错误观点及存在的问题，未能指出和很好的批判，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

第一章 晶体三极管直流放大器	(1)
1.1 前言	(1)
1.2 直接耦合型直流放大器	(5)
1.2.1 不平衡型放大器	(5)
1.2.2 平衡型差动放大电路	(12)
1.2.3 其他应注意的事项	(19)
1.3 调制型直流放大器	(22)
1.3.1 调制器的现状	(22)
1.3.2 晶体三极管斩波器	(24)
1.3.3 晶体二极管斩波器	(27)
1.4 复合型直流放大器	(28)
1.4.1 复合型电路的结构	(28)
1.4.2 反馈电路的分析及其中心问题	(29)
1.4.3 反馈放大器的实际例子	(31)
1.5 结语	(33)
第二章 晶体三极管低频放大器	(35)
2.1 RC 耦合放大电路	(35)
2.1.1 RC 耦合放大电路的输入阻抗和增益	(35)
2.1.2 RC 耦合放大电路的功率效率	(38)
2.1.3 RC 耦合放大电路的频率特性	(40)
2.2 变压器耦合放大电路	(42)
2.3 甲类功率放大电路	(45)
2.4 乙类推挽放大电路	(52)
2.5 晶体三极管的散热装置	(56)

2.6	特殊电路	(58)
2.6.1	复合电路	(58)
2.6.2	高输入阻抗电路	(59)
2.6.3	低噪声电路	(61)
2.6.4	特性复原电路	(62)
2.6.5	限幅放大电路	(63)
2.6.6	无输出变压器电路	(65)
2.7	利用互补晶体三极管的电路	(68)
2.8	利用 NIC 的双向中继器	(70)
第三章	晶体三极管宽频带放大器	(73)
3.1	发射极接地式电阻耦合放大器	(73)
3.1.1	高频特性	(73)
3.1.2	高频补偿电路	(76)
3.1.3	低频特性	(78)
3.2	负反馈宽频带放大器	(78)
3.2.1	多路传输电话中继器用的负反馈放大器	(78)
3.2.2	电视上所用的负反馈宽频带放大器	(84)
3.3	其他宽频带放大器的电路例	(89)
3.3.1	低噪声放大电路	(89)
3.3.2	显象管驱动用高压输出电路	(89)
3.3.3	频率在几十兆赫以上的宽频带放大器	(91)
第四章	晶体三极管高频和中频放大器	(95)
4.1	晶体三极管的功率增益	(95)
4.2	单向化	(98)
4.3	稳定度	(104)
4.4	级间耦合电路	(105)
4.5	增益控制	(109)
4.6	温度特性	(112)
4.7	噪声指数	(114)

4.8	收音机用的高频放大器和混合电路	(116)
4.9	收音机用的中频放大器	(121)
4.10	电视调谐器电路	(127)
4.10.1	概说	(127)
4.10.2	构造	(127)
4.10.3	高频放大	(127)
4.10.4	混频	(131)
4.10.5	振荡	(132)
4.11	电视用的中频放大器	(132)
4.11.1	概说	(132)
4.11.2	单位电路	(134)
4.11.3	增益控制	(135)
4.11.4	输出电路	(136)
第五章	晶体三极管超高频放大器	(137)
5.1	普通超高频放大电路	(137)
5.2	使用同轴型晶体三极管接成的放大电路 ..	(138)
5.3	特殊放大电路	(141)
第六章	隧道二极管放大器	(143)
6.1	隧道二极管的一般特性	(143)
6.1.1	隧道二极管的阻抗特性	(143)
6.1.2	隧道二极管的噪声特性	(144)
6.1.3	隧道二极管的偏压法	(145)
6.2	隧道二极管放大器	(146)
6.2.1	直接式	(146)
6.2.2	环形器式	(147)
6.2.3	混合型	(148)
6.2.4	1/4 波长型	(149)
6.2.5	分布式	(150)
6.3	隧道二极管向下变频器	(151)

第七章 利用场效应晶体管的放大器	(154)
7·1 低频放大器	(155)
7·2 高频放大器	(155)
参考资料	(156)

第一章 晶体三极管直流放大器

1.1 前言^[1-4]

包含直流在内的信号源的放大方法,大致可以分为两种:一种是按照信号波形的原样放大的直接耦合放大方法;另一种是用适当的频率调制为载波后再加以放大的调制放大方法。前一种方法是单纯靠着电阻元件使放大器级间耦合的,因此,在设计上需要注意如何把适当的偏压加在放大级上,可是它具有除电路结构简单之外,而且频率特性也特别优良,能够放大从直流到几兆赫以上的信号波的优点。而其缺点是,徐缓的零点的偏移即漂移较大。后一种方法的放大级,可以使用适当的交流放大器,由于上述偏移可以被耦合电容器、变压器所阻止而不致输出,所以偏移只由一级所引起,故更可减少,但调制器却需要慎重考虑,例如在调制几微伏到几毫伏的直流分量时,普通通信所使用的调制器,已经完全不起作用。这是因为在一般直流放大的情况下,信号要比调制器使其能作非线性工作时的载波振幅要微小得多,而不能提高调制度的缘故。因此,在使用高性能的直流放大器时,为了能够取得足够的调制度,需要采用不混入载波的方法,例如使用那种装有机械接点开关的斩波器等。并且在想要提高响应速度时,必须使用载波漏泄特别小的半导体,例如晶体三极管或硅晶体二极管等平衡调制器。因此,调制放大器的性能,几乎全取决于调制器的性能,一般说来调制放大器比直接耦合放大器

漂移电平要大大提高,而相反频率特性却显著降低。

上述直流放大器,广泛应用于测定 pH 和微量光束等的理化仪表、利用热电偶测定温度的工业仪表、模拟电子计算机的各种运算用放大器以及自动化机器的各种控制电路等方面。

直到最近几年以前,还是电子管的全盛时期,但是由于稳定而价廉的晶体管的出现以及关于晶体管直流放大器的研究有了进展,所以最近晶体管直流放大器在数量方面大有超过电子管直流放大器的趋势,不久的将来,一定会出现晶体管直流放大器的全盛时期。不过,在现状下,还很难制出输入阻抗在几百千欧以上全部晶体管化直接耦合型直流放大器,还很难制出输入阻抗在几十到几百兆欧以上全部晶体管化可变容

量型调制器,并且在输出电压超过几十伏时,还有必须使用耐高压接线法或使用价格昂贵的晶体三极管的缺点。

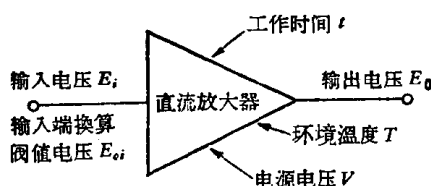


图 8·1 直流放大器的工作条件

图 8·1 示出了直流

放大器的工作条件。输入端换算的阈值电压 E_{oi} , 是电源电压 V 、环境温度 T 和工作时间 t 的函数^[2]。

$$E_{oi} = f(V, T, t) \quad (8.1)$$

$$\therefore dE_{oi} = e_d = \frac{\partial E_{oi}}{\partial V} dV + \frac{\partial E_{oi}}{\partial T} dT + \frac{\partial E_{oi}}{\partial t} dt \quad (8.2)$$

阈值电压 E_{oi} 的变量 dE_{oi} , 就是我们所说的漂移电压 e_d , 产生漂移电压的主要原因, 可以看出是 dV 、 dT 和 dt 这三种变化。因此, 要减少这种漂移电压, 必须采取下述各种措施:

(1) 减少各种变动量, 也就是说, 使电源电压和环境温度稳定 ($dV \rightarrow 0$ 和 $dT \rightarrow 0$), 并竭力缩短使用时间 ($dt \rightarrow 0$)。

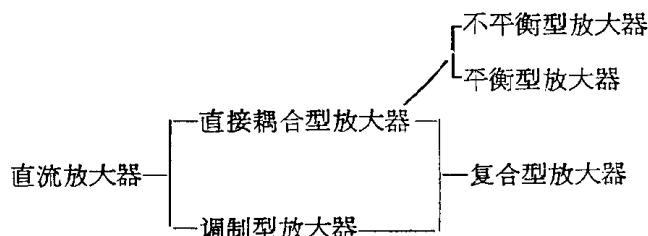
(2) 减少变动量的各系数。减少系数有下列两种方法:

① 使用 $\partial E_{oi}/\partial V$ 、 $\partial E_{oi}/\partial T$ 和 $\partial E_{oi}/\partial t$ 小的稳定元件。

② 差动地使用对于各种变动量特性大致相等的元件。例如采用象 $\partial E_{oi}/\partial V \rightarrow (\partial E_{oi1}/\partial V - \partial E_{oi2}/\partial V)$ 这样的差动(平衡)放大结构。

上述这些方法是直接耦合型结构和调制型结构都常使用的方法。不过,环境温度的变化,对晶体管直流放大器的影响比电子管直流放大器的影响还要大,电源电压对电子管直流放大器和晶体管直流放大器两者的影响都大,而经时变化给予晶体管直流放大器的影响似乎比给予电子管直流放大器的影响小得多,这种定量上的比较,将是今后的一件工作。

另外,直流放大器还有一种把上述调制型和直接耦合型组合起来使之具有两者的优点即漂移值低而响应速度高的复合型结构。所以,直流放大器可以分类如下:



现将上述电子管型和晶体管型的直流放大器的漂移电平为主体,把输入阻抗和放大带宽在现阶段下的最高技术水平示于图 8·2 中^[3]。在实际使用的时候,需要注意的是,由于电源电压和环境温度的变化以及外部噪声等等的关系,往往需要把漂移电平比上述的最高电平高 1—2 个数量级来考虑。

1.2 直接耦合型直流放大器^[4,5]

1.2.1 不平衡型放大器

[1] 因温度变化而引起的漂移 如上所述, 晶体管直接耦合型放大器的漂移的主要原因, 可以认为是由于温度的变化, 其次是由于电源电压的变化。因此, 我们首先来讨论因温度变化而引起的漂移, 这种漂移的原因, 主要有下列三点:

- ① 发射极、基极间晶体二极管的正向偏压的变化 ΔV_{be} ;
- ② 集电极截止电流的变化 ΔI_{c0} ;
- ③ 电流放大系数的变化 $\Delta \beta$ 。

晶体管不平衡型放大器的一般结构, 如图 8.3 所示。在它的特性之中, 将输入端的基极电流 I_b 对基极、发射极间电压 V_{cb} 的特性, 示于图 8.4; 将集电极电流 I_c 对电压 V_c 的特性, 示于图 8.5; 将表示放大系数 β 的 I_c-I_b 特性, 示于图 8.6。并都同时用折线近似法表示出特性因温度变化而引起的变动倾向。因此, 在图 8.3 的电路中能够成立的各种关系, 可以参照图 8.4—8.6 而用下式表示出来:

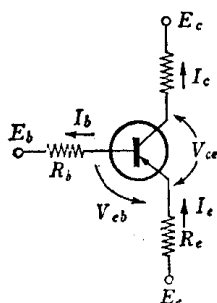


图 8.3 一般的晶体三极管直接耦合电路

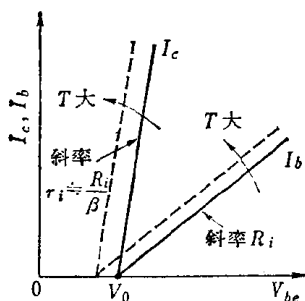


图 8.4 输入特性和传输特性的折线近似

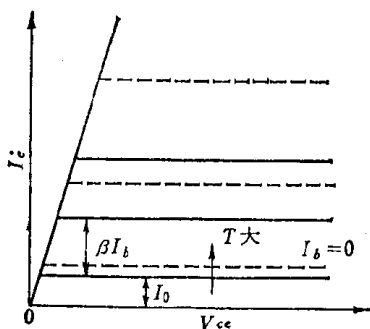


图 8.5 集电极特性的折线近似

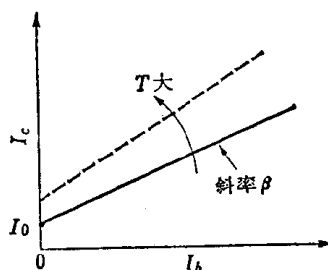


图 8.6 电流放大系数特性的折线近似

$$R_i I_b = V_{be} - V_0 \quad (8.3)$$

$$I_c = \beta I_b + I_0 \quad (8.4)$$

$$V_{be} = (E_c - E_b) - R_c I_c - R_b I_b \quad (8.5)$$

$$I_c = I_c + I_b \quad (8.6)$$

$$\therefore I_c = \frac{\beta(E_c - E_b - V_0) + I_0(R_i + R_b + R_c)}{\{R_i + R_b + (1 + \beta)R_c\}} \quad (8.7)$$

$$\doteq \frac{\beta\{(E_c - E_b - V_0) + I_{c0}(R_i + R_b + R_c)\}}{\{R_i + R_b + (1 + \beta)R_c\}} \quad (8.7')$$

式中设 $I_0 \doteq \beta I_{c0}$

根据式(8.3)和(8.4), 设 $I_b \gg I_0/\beta = I_{c0}$, 即可以得出图 8.4 中的输入电压对集电极电流 ($V_{be} - I_c$) 的折线近似关系。由于 V_0 、 I_{c0} 和 β 是环境温度宽度的函数, 所以设集电极端的漂移电流为 i_d , 根据式(8.7)可以得出下式:

$$dI_c = i_d = \left[(R_i + R_b + R_c) \left(\beta \frac{\partial I_{c0}}{\partial T} dT + \frac{I_c}{\beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T} dT \right) - \beta \frac{\partial V_0}{\partial T} dT \right] / [R_i + R_b + (1 + \beta)R_c] \quad (8.8)$$

另一方面, 根据式 (8.7) 设 E_b 为信号电压, 并根据式

(8·8) 来求因信号电压而产生的集电极电流 i_c 和 i_c/i_d , 便可以得到

$$i_c = -\beta E_b / [R_i + R_b + (1 + \beta)R_c] \quad (8·9)$$

$$\frac{i_c}{i_d} = \beta E_b / \left[\beta \frac{\partial V_0}{\partial T} - (R_i + R_b + R_c) \times \left(\beta \frac{\partial I_{c0}}{\partial T} + \frac{I_c}{\beta} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T} \right) \right] dT \quad (8·10)$$

由于输入端换算漂移电压 e_d 就是式 (8·10) 中 $i_c = i_d$ 时的 E_b , 因而可以得出下式:

$$\frac{e_d}{dT} = \frac{\partial V_0}{\partial T} - (R_i + R_b + R_c) \times \left(\frac{\partial I_{c0}}{\partial T} + \frac{I_c}{\beta^2} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T} \right) \quad (8·11)$$

因此, 根据电路的条件和所使用的晶体三极管的 V_0 、 I_{c0} 、 β 的温度系数即可确定哪一项对漂移最有影响。现在举例来说明这个问题。在输入端系恒流推动时, 设

$$[e_d/R_b]_{R_b \gg [R_i + (1 + \beta)R_c]} = i_{cd}$$

则变成为式 (8·12); 在输入端系恒压推动时, 设 $R_b \ll [R_i + (1 + \beta)R_c]$, 结果就变成为式 (8·11), 如后所述, 这种情况大多数近似于 $\partial V_0/\partial T$ 。

$$\frac{e_d/R_b}{dT} \Big|_{R_b \gg [R_i + (1 + \beta)R_c]} = \frac{i_{cd}}{dT} = - \left(\frac{\partial I_{c0}}{\partial T} + \frac{I_c}{\beta^2} \cdot \frac{\partial \beta}{\partial T} \right) \quad (8·12)$$

在普通的情况下, $\partial V_0/\partial T$ 项和 $\partial \beta/\partial T$ 项较大, $\partial I_{c0}/\partial T$ 项, 只要 I_{c0} 不特别大, 大多数不需要特别注意。特别是使用硅晶体三极管时, 尤其如此。把下列常用的数值代入式 (8·11) 中, 就可以明显看出这种情况。

即设 $R_c = 1$ 千欧, $R_b = 2$ 千欧, $R_i = 2$ 千欧, $I_c = 1$ 毫安, $\beta = 50$, $I_{c0}/\partial T = 0.1$ 微安/度, $\partial \beta/\partial T = 0.7/\text{度}$, $\partial V_0/\partial T = 2 \text{ 毫伏/度}$