

载波机晶体管电路 计算原理



煦 編 著

郵 电 出 版 社

73.1
59
21

載波机晶体管电路計算原理

张 煦 編著

人民郵電出版社

DL1757

内 容 提 要

本书讲述晶体管电路的特点和计算方法（第1至9章），晶体管在载波机部件的实际应用以及晶体管化载波机的制式（第10至18章）。前一部分以放大器为主，从等效电路和运用点恒定法讲到低频多级放大器的电压放大级和功率级的计算，进而分析频率响应和负反馈问题，讲到群放大器的计算，举有较多的计算例。后一部分对群放、载供、导频、音频终端、电源、载报、话音增音等设备举出了较多的实用电路。最后介绍了晶体管化载波增音站的分布和近几年来晶体管化载波机的各种制式和发展趋向。

本书可作为高等学校有关课程的参考书，也可供长途电信工程技术人员阅读参考。

载波机晶体管电路计算原理

編著者： 张 煦

出版者： 人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

（北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号）

印刷者： 北 京 市 印 刷 一 厂

发行者： 新 华 书 店 北 京 发 行 所

經售者： 各 地 新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

1965 年 8 月北京第一版

印张 12 12/32 页数 198

1965 年 8 月北京第一次印刷

印刷字数 328,000 字

印数 1—4,300 册

統一书号：15045·总1488—有316

定价：（科6）1.80 元

前 言

現代通信技术的发展非常迅速，通信网的組成越来越复杂，貫穿全国范围和省区范围的有长途明綫和电綫，也有微波中继綫路；散布各市县和广大地区的有市話电綫，又有农村綫路。这些有綫和无綫綫路上都要装用載波机，傳輸多路通信。随着通信技术的进步，載波机設備不断地繼續改进，向着提高质量和减低成本的目标前进。最近几年来，載波机設備改进的重要标志之一是部分或全部晶体管化。

晶体管（指晶体三极管）是近代无綫电电子学的重要产物，它有許多优点压倒电子管。載波机中的部件采用晶体管代替电子管后，不仅能够滿足长途通信的质量指标，并且能节约电源，縮小体积和降低成本。晶体管化促进了載波机的制式多样化，扩大了应用范围，使多路通信技术进入新的时代。

由此，对于长途通信或多路通信有关的技术工作同志和同学，在熟悉了載波机組成部分的設計原理以后，有必要集中地了解晶体管电路的特点和計算方法，晶体管在載波机部件的应用，以及晶体管化的載波机的制式。这就是編写本书的目的。

本书有十八章，可以分成两部分。第一部分从第一章至第九章，是关于晶体管电路的分析和計算。分析时着重于共发射极接法的 pnp 型晶体管，采用器件参数和 h 参数等效电路，但共基极和共集电极接法也有推导， z 、 y 、 a 参数也簡略讲到，这些参数可以互相轉換。书中詳細討論了晶体管运用点恒定法、偏源电路的計算、晶体管 RC 耦合、变量器耦合和直流多級放大器，以及甲类功率放大器、乙类推挽放大器的計算。然后着重地詳細分析晶体管放大器的頻率响应和負反饋，包括 α 、 β 、耦合电容、 α 額外相移和級联 RLC 网络对頻率响应的影響，又对 U_{CE} 桥負反饋的分析、 $K\beta$ 特性的摹拟原則和晶体管回波系数及敏感度的推导。其后，詳細分析晶体

管三点电路振蕩器、石英晶体振蕩器和电桥振蕩器等电路和振蕩条件。最后，簡略地讲到晶体管噪音和噪音值。

第二部分从第十章至第十八章，是关于晶体管电路在載波机的实际应用。讲到晶体管的明綫和电纜群放大器、晶体振蕩器、諧波发生器、載頻选择放大器、再生調幅分頻器、自动調节控制机构的直流放大器、导頻放大器、話音放大器、振鈴收受器、压缩扩展器、稳压电源設備、載波电报終端机、通用話音增音机、負阻抗增音机等許多部件中的晶体管电路。然后，簡單談到晶体管化載波增音站的分布，近几年来晶体管化載波机的各种制式和发展趋向。

书末附有載波机晶体管化的参考文献八十余篇。文中有些标题和句子的右上角括弧內的号碼就是参考文献号碼，便于讀者深入查考。书末还有几种常用晶体管的技术数据。

本书初稿于1960年2月正式写成，1961年9月向五年級同学讲授，最近补充一些材料，还是觉得很粗浅，缺点很多，希望讀者同志們惠然指正，以便繼續改进。

本书原稿出版前曾由蔣家仁、陆耀明、謝沅清等同志进行审讀，对于本书第一部分給予作者很多教益，特此表示感謝。

作者 1964年5月

目 录

前言

第 一 章	晶体管型式和特性	1
§ 1.1	晶体管的各种型式	1
§ 1.2	晶体管的三种基本接法	3
§ 1.3	晶体管的静态特性曲线	5
第 二 章	等效电路和性能计算	8
§ 2.1	共基晶体管的器件参数	8
§ 2.2	共发晶体管的器件参数	12
§ 2.3	共集晶体管的器件参数	16
§ 2.4	三种接法的器件参数计算比较	17
§ 2.5	晶体管的内在器件参数	20
§ 2.6	共基晶体管的 h 参数	22
§ 2.7	共发晶体管的 h 参数	27
§ 2.8	三种接法的 h 参数计算比较	32
§ 2.9	α, γ, a, h 各种参数的转换	37
第 三 章	运用点恒定和选择	45
§ 3.1	运用点不恒定的原由	45
§ 3.2	运用恒定度 S	47
§ 3.3	直流串联负反馈	49
§ 3.4	电阻分压电路	52
§ 3.5	直流并联负反馈	57
§ 3.6	根据恒定度计算偏源电路	61
§ 3.7	根据运用点极限计算偏源电路	66
§ 3.8	共基晶体管的运用点选择	75
§ 3.9	最大集电极耗散功率	79
§ 3.10	共发晶体管的运用点选择	83
第 四 章	多级放大器	87
§ 4.1	电阻电容耦合	87

§ 4.2	电阻电容耦合多級放大器	92
§ 4.3	变量器耦合多級放大器	96
§ 4.4	复合管接法	106
§ 4.5	直流放大器	108
第 五 章	功率放大器	110
§ 5.1	功率放大器的运用	110
§ 5.2	非綫性畸变	111
§ 5.3	諧波系数	114
§ 5.4	甲类功率放大器的計算	116
§ 5.5	推挽放大器	119
§ 5.6	乙类推挽放大器的計算	124
第 六 章	頻率响应	127
§ 6.1	α 值的頻率特性	127
§ 6.2	C_K 对高频响应的影响	129
§ 6.3	耦合电容对低频响应的影响	134
§ 6.4	RC 放大器頻率响应的計算	136
§ 6.5	α 額外相移对高频放大器的影响	139
§ 6.6	混合 π 等效电路	143
§ 6.7	級际网络对頻率响应的影响	145
第 七 章	反饋放大器	149
§ 7.1	串联負反饋	149
§ 7.2	并联負反饋	158
§ 7.3	負反饋放大器的 h'_s, h'_o 参数	167
§ 7.4	二級負反饋	172
§ 7.5	混联負反饋	175
§ 7.6	电桥負反饋	178
§ 7.7	多环路負反饋	186
§ 7.8	$K\beta$ 特性的摹拟	189
§ 7.9	回流差和敏感度	193
第 八 章	正弦振蕩器	200
§ 8.1	用 h 参数分析三点电路振蕩器	200

§ 8.2	用 y 参数分析三点电路振荡器	210
§ 8.3	有晶体的三点电路振荡器	219
§ 8.4	有低频晶体的振荡器	226
§ 8.5	电桥恒定振荡器	229
§ 8.6	RC 电桥振荡器	236
第九章	噪音值	240
§ 9.1	晶体管噪音特性	240
§ 9.2	噪音值 F	242
第十章	晶体管群放大器	246
§ 10.1	明线三路群放大器	246
§ 10.2	明线高四路群放大器	248
§ 10.3	平衡电缆六十路群放大器	249
§ 10.4	短距电缆廿四路群放大器	251
§ 10.5	区内电缆三路和长距电缆廿四路群放大器	252
§ 10.6	同轴电缆群放大器	256
第十一章	晶体管载频供给设备	262
§ 11.1	晶体振荡器	262
§ 11.2	饱和线圈谐波发生器	264
§ 11.3	载频选择放大器	265
§ 11.4	再生调幅分频器	268
第十二章	晶体管自动电平调节设备	272
§ 12.1	自动调节的反馈系统	272
§ 12.2	控制机构的直流放大器	274
§ 12.3	导频选择放大器	277
第十三章	晶体管音频终端设备	280
§ 13.1	话音放大器	280
§ 13.2	带内单频振铃接收器	288
§ 13.3	话音放大器和带内振铃接收器	292
§ 13.4	话音放大器和带外振铃接收器	294
§ 13.5	晶体二极管-三极管合用的压缩扩展器	297
§ 13.6	全用晶体三极管的压缩扩展器	303

第十四章 晶体管电源設備	308
§ 14.1 晶体管載波机电源設備特点	308
§ 14.2 晶体二极管穩压器	310
§ 14.3 利用开关作用的电源設備	311
§ 14.4 利用并聯調節器的电源設備	316
§ 14.5 直流升压裝置	318
第十五章 晶体管載波电报終端机	320
§ 15.1 一級調頻的載波电报	320
§ 15.2 二級調制的載波电报	326
第十六章 晶体管話音增音机	328
§ 16.1 通用話音增音机	328
§ 16.2 业务通信增音机	332
§ 16.3 負阻抗增音机	333
第十七章 晶体管載波增音站分布	341
§ 17.1 全綫晶体管式的增音站分布	342
§ 17.2 电子管式和晶体管式联合运用的增音站分布	344
第十八章 晶体管化載波机制式和发展趋向	348
§ 18.1 国外一些晶体管化的載波机制式	348
§ 18.2 載波机晶体管化发展趋向	372
附录 常用晶体管特性数据	376
参考文献	383

第一章 晶体管型式和特性

§ 1.1 晶体管的各种型式

通常所謂晶体管，是半导体锗或硅晶体三极管的简称。

晶体管主要有点接触和面结合两个类型。点接触型晶体管有两根金属须接触于半导体块上，它的作用决定于半导体与金属间的接触，和半导体的表面状态也有很大关系。面结合型晶体管则依赖于半导体内两种杂质材料间的结合。基本的面结合型是由两个 pn 结制成单块晶体半导体。由于种种原因，面结合型晶体管在目前得到极广泛的应用，远胜于点接触型。这里讨论的晶体管将集中于面结合型晶体三极管。

面结合型晶体管有许多不同的制造方法，其中最普通的是成长和合金法。成长结合法是把 n 型杂质细粒与极纯的锗在高温下烧溶，在适当的过程中加以 p 型杂质细粒，使成长为 $n-p-n$ 半导体的单块晶体，如图 1.1 所示，或者，成长为 $p-n-p$ 半导体。合金结合法是把产生 p 区的材料熔焊或合金于 n 型晶体。通常用铟作为杂质，当它和锗合在一起，就产生 p 区。

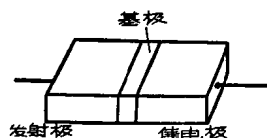


图 1.1

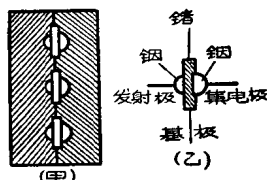


图 1.2

图 1.2 (甲) 示明合金法制造面结合型晶体管所用模具的形状。将小块 n 型晶体放在模中，两面有大小不同的两点铟，在氢中烧热至 500°C 高温，铟溶化，与锗焊固一起，并有化学作用相结合。就是说，铟在合金过程中进入锗的晶体结构，成为 $p-n-p$ 型半导体单块晶体。从炉中取出冷却时，接上三根金属线，大的铟点作为集电

极，小的銅点作为发射极， n 型块作为基极。合金法如用鎢代替銅，也可制成 npn 型半导体单块晶体。一般是用成长法制成 npn 型，用合金法制成 pnp 型。合金法易于大量生产；成长法对杂质的量和基极宽度控制較准确。目前低頻晶体管以合金法 pnp 型居多。

鎢和硅相比較，硅能耐受較高溫度，硅的結合溫度 T_j 高于鎢的結合溫度，而硅又能够在較高溫度保持較大耗散功率。所以，一般虽以鎢的应用較普遍，但在高溫運用条件下，硅比鎢为适宜。

为了能够在高頻率运用，晶体管有更多不同的制造方法。扩散基极晶体管就是其中的一种。在炉內烧热过程中，鎢块的一面沉积一层杂质，这杂质扩散入鎢的内部，形成基极区域。于是，发射极在这扩散基极上成为合金；原来的材料为集电极。这种制造方法可以得到很薄的基极宽度，因而能够在很高頻率运用。

另有一种高頻晶体管，称作表面壁垒晶体管。它不是利用半导体杂质，而是利用半导体和金属。首先在 n 鎢块两面噴射电解液，通以电流，使鎢的表面消蝕，直至鎢的厚度合于需要为止。这时，把金属电极鍍在鎢的两面，如图 1.3 所示。电流通过电解液的方法能够高度准确地控制鎢块厚度，因而也适合于很高頻率运用。这种晶体管的作用依赖于鎢块的表面状态，表面之下有空穴集中。当发射极触面得到正偏压时，有些空穴扩散經過基极区域；如果集电极触面得到負偏压，就收集这些空穴。这样，形成了 pnp 型晶体管。

最近几年来，还有其它更新的工艺制成更新型式的晶体管。

低頻放大和振蕩最常用的晶体管型式是由鎢晶体、用合金法、制成 pnp 型的 $\Pi 13$ 、 $\Pi 14$ 、 $\Pi 15$ 等型晶体管，尺寸如图 1.4 所示。特性数据与較早时期生产的 $\Pi 6$ 型类似。不到十年以前的 $\Pi 1$ 型 ($P_{\Sigma}=50$ 毫瓦， $f_a=0.1—1.6$ 兆赫) 已被 $\Pi 13-14-15$ 代替 ($P_{\Sigma}=150$ 毫瓦， $f_a=0.5—2.5$ 兆赫)。

低頻功率放大最常用的晶体管型式有鎢、合金法、 pnp 型的 $\Pi 201$ 、A、 $\Pi 202$ 、 $\Pi 203$ 等型晶体管。 $\Pi 201$ 、A 型常作为甲类功率放大器； $\Pi 203$ 型常作为共发乙类推挽放大器。

高频放大和振荡晶体管有锗、扩散基极的 $\Pi 401$ 、 $\Pi 402$ 、 $\Pi 403$ 等型,和锗、表面壁垒的 $\Pi 404$ 、 $\Pi 405$ 等型。

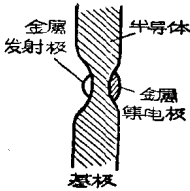


图 1.3

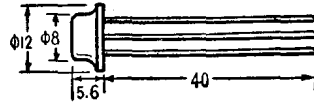


图 1.4

当然,这里列举的仅是少数最普通应用的有代表性的典型晶体管。手册上还记载有更多型式的晶体管。事实上,晶体管的生产制造还在不断改进,新的型式代替旧的型式,不断地推陈出新。

§ 1.2 晶体管的三种基本接法

晶体管有三个电极,当它用作四端网络时,有三种可能的接法。第一种是以发射极输入,集电极输出,基极为输入和输出的公共端,交流接地,称为共基电路,或称基极接地电路,如图1.5(甲)所示。第二种是以基极输入,集电极输出,发射极为输入和输出的公共端,交流接地,称为共发电路,或称发射极接地电路,如图1.5(乙)所示。第三种是以基极输入,发射极输出,集电极为输入和输出的公共端,交流接地,称为共集电路,或称集电极接地电路,如图1.5(丙)所示。

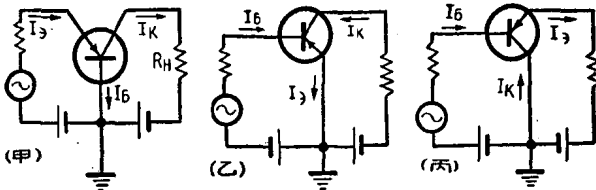


图 1.5

如果晶体管是 pnp 型,不论接成三种中任何一种电路,直流偏压总是集电极对基极为负,发射极对基极为正,如图上分别画出的

電池極性。 npn 型的直流偏壓極性恰相反。

晶体管三个電極的電流分配，不論何種接法，總是按照下列規律：

$$I_e = I_k + I_b.$$

即當發射極電流 I_e 流入時，集電極電流 I_k 和基極電流 I_b 都流出，如圖 1.5 (甲) 所示；或者，當基極電流 I_b 為輸入電流流入晶体管時，集電極電流 I_k 必然也流入，發射極電流 I_e 流出，分別如圖 1.5 (乙)、(丙) 所示。這樣，從電流方向來說，信號源加上共基電路或共集電路，輸入和輸出電流方向沒有改變，就是說，這兩種接法沒有發生任何相移。信號源如果加上共發電路，輸出電流方向與輸入電流相反，就是說，共發晶体管引起 180° 相移，和電子管柵極輸入、板極輸出時引起 180° 相移一樣。

當小幅度的交流信號加上共基晶体管，即輸入一定的 I_e 值時，晶体管輸出端在負載短路情況下量得的輸出電流 I_k 值略小於但很接近於輸入電流值。

$$I_k = \alpha I_e, \quad \alpha = 0.90 - 0.99$$

這是因為輸入信號加上發射極時，發射極與基極的 pn 結受到偏壓而處於導電狀態，載流子的擴散使電流大部分流往集電極。我們知道，輸出與輸入電流之比就是晶体管的電流增益，現在共基晶体管輸出短路時的電流增益 α 略小於 1，在 0.90—0.99 之間。如晶体管作為四端網絡，在共基接法， I_e 流入， I_k 流出， I_k 的方向與一般四端網絡習用的輸出電流流入的方向相反，故稱共基晶体管的電流增益為負。與此同時，基極電流應為發射極電流與集電極電流之差，它的值很小。

$$I_b = I_e - I_k = (1 - \alpha) I_e.$$

當共基晶体管輸出端連接負載電阻 R_L 而其值不太大時，晶体管的電流增益很接近於輸出短路時的電流增益：

$$K_i = -I_k / I_e = -\alpha.$$

在共基電路，晶体管的輸入電壓應為輸入電流 I_e 與輸入電阻

R_i 的乘积, 而输出电压应为输出电流 I_{π} 与负载电阻 R_n 的乘积。由此, 共基晶体管的电压增益为:

$$K_u = \frac{I_{\pi} R_n}{I_o R_i} = \alpha \frac{R_n}{R_i}.$$

如果负载电阻 R_n 值大于输入电阻 R_i 值, 则电压增益可能大于 1。共基晶体管电流增益为负, 电压增益为正, 相应地, 功率增益是:

$$K_p = |K_i| |K_u| = \alpha^2 \frac{R_n}{R_i}.$$

从上式看出, 只须负载电阻值大于输入电阻值, 晶体管就有电压放大和功率放大作用。就是说, 这样的晶体管电路可以作为放大器。

§ 1.3 晶体管的静态特性曲线

晶体管的静态特性常常由两种直流特性曲线图表达: 其一是输入特性, 其二是输出特性。

共基晶体管特性

在共基接法, 直流输入特性就是 $I_o - U_{\pi o}$ 曲线 ($U_{\pi o}$ 为参变量)。它们的关系是指数律的, 可近似地写成:

$$I_o \propto e^{qU_{\pi o}/kT}$$

式中 q 为电子电荷, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。在一定的发射极电压值以上, 很小的发射极电压变化将引起较大的发射极电流变化。所以发射极的偏源通常是恒流源。 I_o 是运用点的一个主要标志。

图 1.6 示出 pnp 型锗晶体管的典型输入特性曲线。可见, 集电极电压 $U_{\pi o}$ 值的大小对发射极电流 I_o 影响不显著。但如集电极开路, $I_{\pi} = 0$ 时, 因 $I_o = I_o + I_{\pi}$, 发射极电流全部流入基极; 在 $U_{\pi o}$ 较高时 I_o 受到基极电阻的限制, 故 $I_{\pi} = 0$ 的 I_o 曲线较低。

在共基接法, 直流输出特性就是 $I_{\pi} - U_{\pi o}$ 曲线, I_o 为参变量。图 1.7 示明 pnp 型锗晶体管的典型输出特性曲线。可见, 在很小的

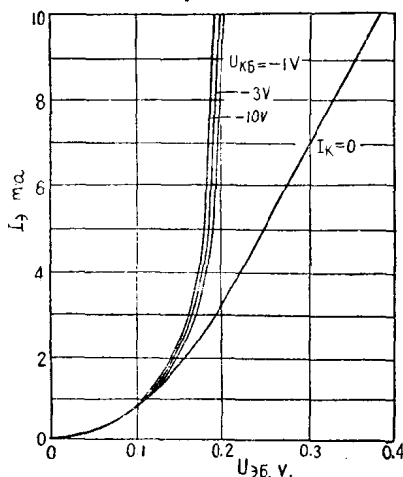


图 1.6

集电极电压时，集电极电流随着电压加大，但是，到了几分之一伏的电压以后（负的 U_{KB} 值），电流 I_K 变成定值，几乎与电压 U_{KB} 值无关。这个电压称为饱和电压。当发射极开路时， $I_E=0$ ，可能存在很小的集电极电流，写成 I_{K0} ，称为起始电流或截止电流。晶体管的运用点一般画在这种直流输出特性曲线族的图上， U_{KB} 是又一个主要标志。

当集电极固定在一个适当

的电压 U_{KB} 时，画出 I_K 与 I_E 的关系，称为晶体管的正向转移特性。

图 1.8 表示出这种特性的典型曲线。可见， I_K 总是稍小于 I_E ，它们增量的比值就是共基的电流放大比，即常称的 α 值：

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}.$$

于是，集电极电流写成：

$$I_K = I_{K0} + \alpha I_{E0}.$$

共发晶体管特性

在共发接法，输入电流为 I_E ，电压为 U_{BE} ，输出电流为 I_K ，电压为 U_{KB} 。它们可从共基的电流、电压换算，得出：

$$I_E = I_E - I_K,$$

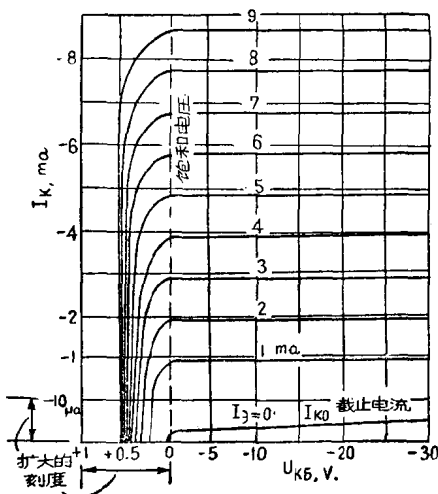


图 1.7

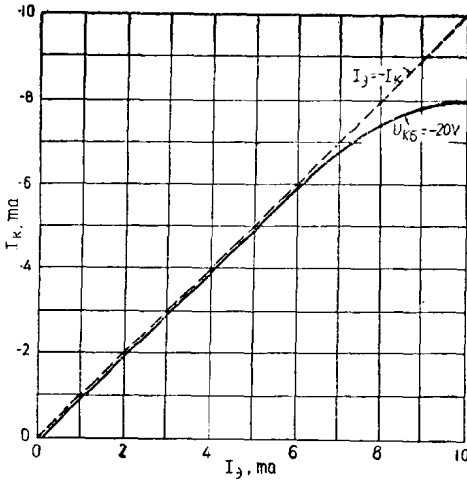


图 1.8

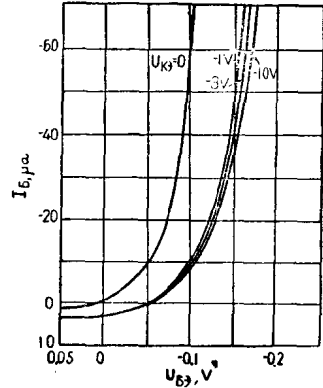


图 1.9

$$U_{KB} = -U_{CB},$$

$$U_{KB} = U_{KB} - U_{CB}.$$

图 1.9 表示出共发晶体管的典型输入特性曲线。与图 1.6 共基的输入特性曲线互相比较，可见，在同一基极与发射极间电压值之下， I_B 远小于 I_E ，并且方向相反。 $U_{KB}=0$ 时， I_B 较大， U_{KB} 加大时，载

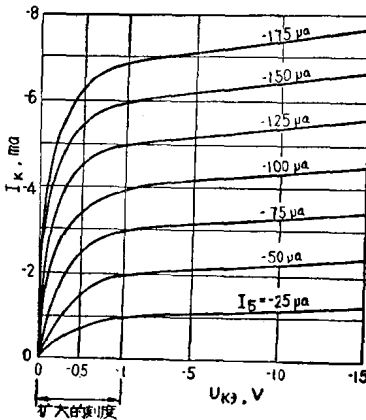


图 1.10

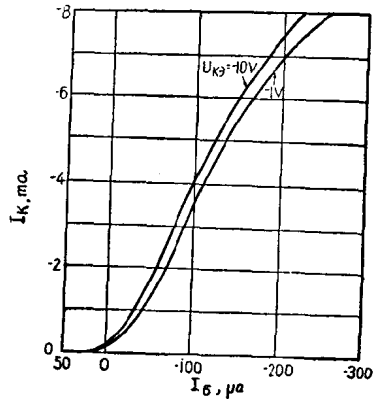


图 1.11

流子被吸引到集电极, I_0 較小。

图 1.10 表示出共发晶体管的典型輸出特性曲綫。可見, 曲綫是从零点出发的, 因 $U_{\kappa\delta}=0$ 时, $U_{\kappa\delta}=U_{\delta\delta}$, 集电极与发射极对基极的电位相等。图上又示出, I_{κ} 与 $U_{\kappa\delta}$ 有一定的关系, 到了饱和电压值, 关系較小而已。图 1.11 示出共发晶体管的正向轉移特性, 电流 I_{κ} 远大于 I_0 , 意味着共发的电流放大比远大于 1。

第二章 等效电路和性能計算

分析晶体管放大器性能的方法不外乎两种: 其一是图解法, 利用晶体管的輸出特性($I_{\kappa}-U_{\kappa\delta}$ 曲綫, I_0 为定值) 和輸入特性($I_0-U_{\delta\delta}$ 曲綫, $U_{\kappa\delta}$ 为定值), 选定晶体管的运用点, 从而求得放大器的性能; 其二是等效电路法, 把晶体管看作有源网络, 由等效电路代替, 从等效电路来分析放大器性能。对于小信号放大, 等效电路方法比較适宜。

等效电路可以利用器件参数, 也可以利用电路参数。所謂器件参数, 是指晶体管器件物理运用直接有关的参数; 利用器件参数可以較直接地結合半导体的特性。所謂电路参数, 是指晶体管作为四端网络时从輸入、輸出端測定的参数; 利用电路参数可以較直接地运用实验測量。

§ 2.1 共基晶体管的器件参数

共基晶体管的低頻等效电路先按照三个电极画成三个电阻的 T 形网络。但如果只有这样三个电阻的网络, 根据它們的数量級: $r_0 \approx 500$ 欧, $r_s \approx 25-50$ 欧, $r_{\kappa} \approx 500$ 千欧, $r_0 \ll r_{\kappa}$, I_0 將絕大部分流至 r_0 , I_0 近于 I_s , 而 I_{κ} 極小, 这与事实不符。所以, 等效电路内部必有电势或电流源。假設一个电流源 αI_s 跨接于 r_{κ} 上, 如图 2.1 所示, 它的內阻无限大。因 $r_{\kappa} \gg r_0$, 在負載 R_{κ} 被短路时, 电流源的电流几乎不流入 r_{κ} 而全部流过短路, 于是 $I_{\kappa} = \alpha I_s$ 。如果信号