

# 無線電發信原理

一九七四年

第一章 绪论.....	1
§ 1—1 无线电通信概述.....	1
§ 1—2 晶体管无线电发信设备.....	3
第二章 高频功率晶体管的特性.....	9
§ 2—1 晶体管高频特性.....	9
§ 2—2 大电流特性.....	21
§ 2—3 晶体管的安全工作.....	23
第三章 高频功率放大器.....	41
§ 3—1 高频功率放大器的基本工作原理.....	41
§ 3—2 高频功率放大器的工作状态.....	53
§ 3—3 集电极电流脉冲的分析.....	63
§ 3—4 高频功率放大器的负载特性.....	71
§ 3—5 高频功率放大器的馈电电路.....	77
第四章 振荡器.....	87
§ 4—1 振荡器的工作原理.....	87
§ 4—2 振荡器电路.....	97
§ 4—3 振荡器频率的稳定性与准确性.....	115
§ 4—4 石英晶体振荡器.....	123
§ 4—6 寄生振荡.....	132
第五章 输出级和中间级.....	142
§ 5—1 输出级概述.....	141
§ 5—2 复合输出级的分析.....	147

§ 5—3	输出级的调整	155
§ 5—4	强放管的安全保护	163
§ 5—5	并联与推挽电路	173
§ 5—6	中间级	176
第六章	振幅调制与键控	184
§ 6—1	振幅调制的一般概念	185
§ 6—2	基极调幅	192
§ 6—3	发射极调幅	200
§ 6—4	集电极调幅	201
§ 6—5	组合调幅	209
§ 6—6	振幅键控	212
第七章	频率调制与键控	218
§ 7—1	调幅的一般概念	218
§ 7—2	频调波及其频谱分析	219
§ 7—3	调制与调幅的比较	224
§ 7—4	调频电路	226
§ 7—5	频率键控	238

# 第 一 章 绪 论

利用电磁波在空间的传播来传递信息的通信方式叫无线电通信。它是整个通信系统中的一个重要组成部分，由于在现代战争中，对通信联络的要求是迅速、准确、保密、不间断，故无线电通信是最基本的军用通信手段。

## § 1—1 无线电通信概述

### 一、无线电通信电道的组成

无线电通信的主要特点是利用电磁波在空间的传播来传递信息。例如将一个地方的语言传递到另一个地方，这个任务是由无线电发信设备和发信天线、无线电收信设备和收信天线来完成的，这些设备和电磁波传播空间的媒介就构成了通常所说的无线电通信信道。图1—1是一个传递语言信息的无线电通信电道的方框图。

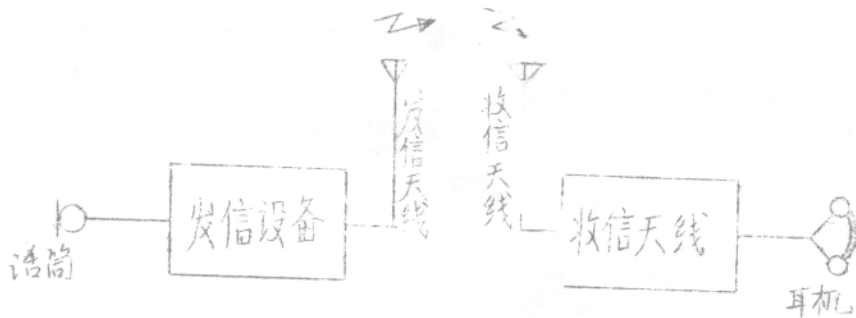


图 1—1 无线电通信电道的组成

### 二、无线电通信信道各部分的任务和作用

#### 1. 发信设备

(1) 产生具有一定功率的高频振荡。因为只有高频振荡才能被发信天线有效地辐射出去，只有具有一定功率才可能在空间建立一定强度的电磁场，并传播到较远的地方。

(2) 完成调制任务。调制就是使高频振荡的某一个参数（如振幅）随着要传递信息的电信号的瞬时值而变化的过程。因为通常要传递的信息转化成电信号后频率都比较低，不适于直接从天线上辐射，所以为了传递信息，就要把信息记载于高频振荡上，最常用的方法就是调制。

## 2. 发信天线

发信天线的作用是把发信设备产生的经过调制的高频振荡变为电磁波有效地辐射到空间。

## 3. 收信天线

收信天线的作用是把空间的电磁波变为高频感应电动势接收下来输送给收信设备。

## 4. 收信设备

(1) 选择和放大信号。因为收信天线上同时可能有许多电台辐射的电磁波产生高频感应电势，所以必须从中选出所需要的信号，抑制掉不需要的信号，选择出的所需要信号一般说来都是很微弱的，因而必须进行放大。

(2) 解调和还原。解调就是把代表信息的电信号从高频信号中分离出来；还原就是把解调出的电信号变换为传递的信息。

## 三、无线电通信使用的频率范围

无线电通信使用的频率都是高频，大致在30千赫以上。因为频率范围很宽，所以又常划分为几个波段，如下表所示。

表 1—1 波段的划分

波 段	波 长	频 率	主 要 用 途	
长 波	10000~1000m	30~3000KHZ	海上导航, 海岸— 潜艇通信	
中 波	1000~100m	3000KHZ~3MHZ	无线电广播	
短 波	100~10m	3~30MHZ	电报通信, 无线电 广播	
超 短 波	米 波	10~1m	30~300 MHz	电报通信、空中导 航、无线电广播、电视
	分米波	1~0.1m	300~3000MHZ	电视、雷达、空中 导航、接力通信、 其他专门用途
	厘米波	10~1cm	3000~30000MHZ	其他专门用途
	毫米波	10~1mm	30000~300000MHZ	雷达、空中导航、 其他专门用途

注：米波以下又称微波

军用无线电通信目前使用较广泛的是短波和超短波。

## § 1—2 晶体管无线电发信设备

### 一、晶体管发信设备的发展概况

自从本世纪二十年代以来直到五十年代末期, 无线电发信设备这一领域一直是为电子管所占领的。在五十年代初期, 晶体管技术有了发展, 但是, 由于当时晶体管在高频率大功率方面的性能低劣得很, 简直无法和电子管相比, 所以在整个五十年代, 虽然制造出了晶体三极管, 但是对无线电发信设备来说, 晶体管还是没有多少实用价值。

进入六十年代以后，由于晶体管技术方面的突破，采用了适应高频大功率的多发射极结构加上硅材料中载流子迁移率低和提纯困难等问题被解决。在短短的五六年的时间内晶体管就得到了突飞猛进的发展。到了六十年代末期，硅功率晶体管的输出功率（单位是瓦）和工作频率（单位是兆赫）的乘积达到了 $10^6$ 。近几年来又有新的发展。在晶体管生产技术发展的同时，最近几年又在电路结构上采用了功率合成等新技术，这更加快了向高频大功率进军步伐。

晶体管技术飞速的发展，打破了无线电发信设备长期被电子管垄断的局面。由于晶体管具有体积小，重量轻，结构牢固寿命长，耗电省等优点，便于实现电台小型化。因此，它在军用通信中受到极大重视。目前我军师以下装备的电台基本上实现了晶体管化。随着我国科学技术和电子工业的发展，晶体管无线电在我军通信中必将得到更广泛的应用。

## 二、无线电发信设备的组成

根据发信设备的任务，它可以有多种组成形式。最简单的发信设备是单级发信机，它由产生高频振荡的振荡器与发信天线组成，因缺点多早已被淘汰。目前最广泛应用的是比较完整的多级无线电发信机，

它的组成方框图如图 1—2 所示。

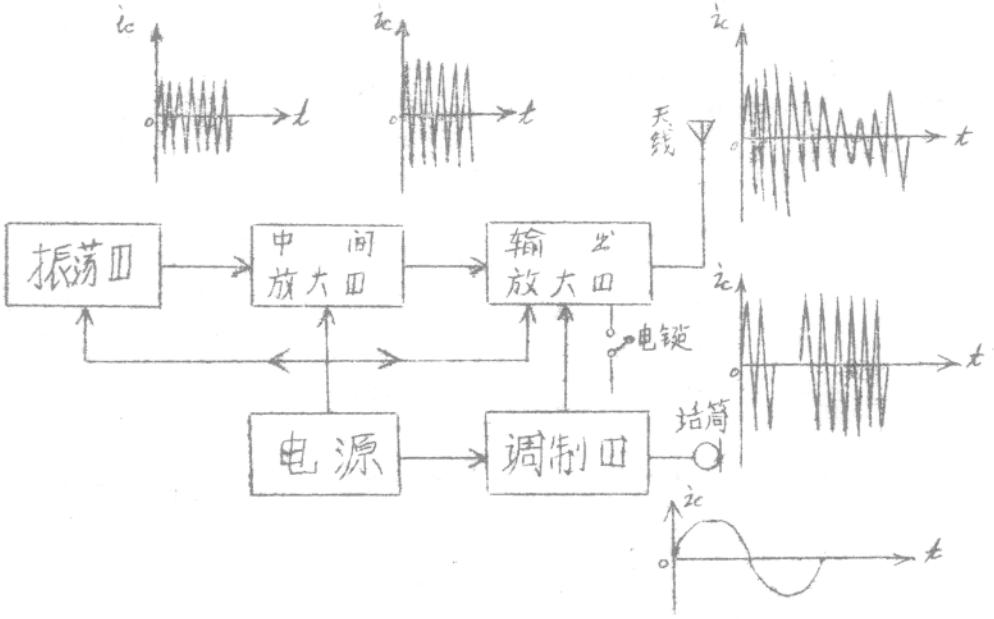


图 1—2 多级无线电发信机的组成方框图

1. 输出放大器：它是无线电发信机的最后一级，主要是产生足够大的高频功率输送给发信天线，同时滤掉不需要的频率成份（高次谐波），避免残波发射造成干扰。对于绝大多数的无线电发信机来说，调制信号对高频的调制也是在这一级进行的。

2. 振荡器：它是无线电发信机的第一级。是产生高频振荡的，有发信机的“心脏”之称。

4. 调制器：它是产生和放大被传递信号的，实际就是一个低频



放大器（发话）或低频振荡器（发调幅报）。

5. 电源：它供给无线电发信机各部分所需要的能量。

### 三、对无线电发信机的主要要求

无线电通信对无线电发信机的要求是多方面的，包括电性能、电声、结构和使用等方面。在电性能方面主要是以下几点：

#### （一）应该有足够的输出功率

无线电发信机的输出功率是指发信机输送到发信天线上（或馈线）的高频功率。输出功率越大，天线转换成的电磁波能量愈大，通信距离就越远；输出功率越小，天线转换成的电磁波能量小，通信距离就越近，因而发信机的输出功率是决定通信距离远近的重要因素（天线型式也有关系）。为了保证一定距离的无线电通信联络，发信机必须有足够的输出功率。

发信机功率的大小，是根据需要而定的，小的到十分之几瓦，大的到几百千瓦。在军用发信机中，十瓦以下的称为小功率发信机，十瓦至一千瓦之间的称为中等功率发信机，千瓦以上的称为大功率发信机。

发信机功率大小，在很大程度上决定了发信机的体积重量及使用条件。

#### （二）应该有较高的效率

无线电发信机的总效率是指发信机输出功率（送到天线的功率）

$P_A$  与全机输入总功率  $P_{总}$  的比值。即

$$\eta_{总} = \frac{P_A}{P_{总}}$$

如果发信机的效率高，对大功率发信机而言，可以减少电源的消耗（能量消耗），有较大的经济意义，对小功率发信机而言，减少电源的消耗，使电源的体积和重量都可减小，这对移动式的军用电台尤有重要的意义。通常发信机的效率在百分之几到百分之三十。

### （三）应该具有很高的频率准确度和频率稳定度

发信机的频率准确度是指频率表指示的频率与发信机实际工作频率的准确程度。发信机的频率稳定度是指实际工作中，在外界因素的影响下，发信机频率稳定不变的程度。

发信机的频率准确度越高，沟通联络就越迅速。这是因为，如果发信机的频率很准确，则接收机只要将度盘置于指定频率的位置上

（当然接收机频率也要很准确），不用寻找就可以沟通联络。

发信机的频率稳定度越高，通信联络就越稳定可靠。这是因为发信机的频率很稳定，已经建立的通信联络就不会发生因频率漂移而造成通信联络中断的现象，也不会因频率漂移使收信机经常进行跟踪，

发信机频率的准确和稳定，还可以使信号信道占用的频率变窄，减小对邻近频率电台的干扰，增加同一频段内容纳电台的数目。综上所述，发信机应该具有很高的频率准确度和频率稳定度。

#### (四) 应该具有较好的滤波性能

发信机中的高频功率放大器通常都工作在丙类状态，晶体管的集电极电流是一个脉冲，它里面包含着许多谐波分量，如果让谐波分量也通过天线辐射出去，那就会干扰其它无线电收音机的正常工作。因此，发信机应该具有较好的滤波性能。

对以上各方面的要求，我们不能平等看待，应根据发信机的用途，使用场所及其它条件，各有所侧重。有时这一指标显得特别重要，有时那一指标成为突出的要求。对此以后各章中还要进行详细讨论。

## 第二章 高频大功率晶体管特性

从第一章所介绍的发信机方框图可以看出，无论是中间级，还是输出级，它们的主要作用都是将主振级产生的高频振荡功率进行放大，因此统称为高频功率放大器，是我们研究的主要对象之一。

由于高频功率放大器的晶体管是工作在高频范围和大电流状态，具有许多与我们熟悉的低频小功率运用所不同的特点，如功率增益下降、内部回授加大、稳定性变差等。本章就着重研究晶体管高频大功率运用的特点，以此作为研究高频功率放大器的基础。

### § 2—1 晶体管高频特性

晶体管的高频特性突出表现在电流放大系数随频率升高而迅速下降，并出现了虚数分量，这使由它组成的放大器功率增益下降、输出电流、电压滞后于输入电流、电压。下面我们首先研究电流放大系数的高频特性。

#### 一、电流放大系数的高频特性

造成电流放大系数随频率升高而下降的因素主要有两个：

##### 1. 管内载流子渡越时间的影响

在三极管中，载流子从发射极到集电极的输运是靠它们从发射极扩散到基极，然后被集电极收集的，扩散需要一定的时间，这个时间就叫做载流子的渡越时间。因此集电极电流总是滞后于发射极电流。在低频时，这个延迟时间远小于信号的周期，可不

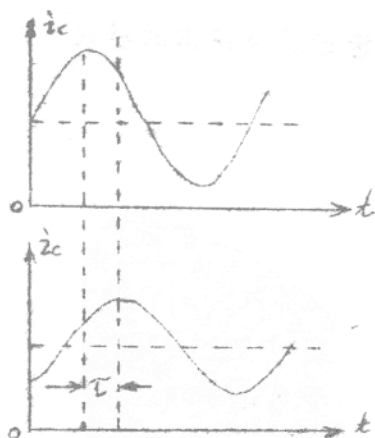


图 2—1 信号的延迟

考虑。但在高频时，它将能与信号周期相比拟，如图 2—1 所示，图中的  $\tau$  便是延迟时间。实际上不仅有信号的延迟，而且有集电极电流幅度的下降，这是渡越时间分散造成的。由发射极向集电极电流幅度的下降，这是渡越时间分散造成的。由发射极向集电极扩散的载流子在基区并不是沿着同一路径到达集电极的，路途有长有短，碰撞的机会会有多有少，因此运动速度有快有慢，到达集电极的时间也就有先有后。当频率很高时，有些信号正半周控制的载流子可能在信号负半周到达集电极，这样一来，就会出现信号正负半周产生的载流子互相抵消的现象，使集电极电流减小，因而电流放大倍数  $\alpha$  和  $\beta$  均要降低，如图 2—2 所示，图中，虚线表示集电极电流应该达到的最大幅度。

显然，频率越高，集电极电流延迟时间相对就越长，输出电流与输入电流之间的相移也就越大，同时，电流放大系数下降得也就越厉害。

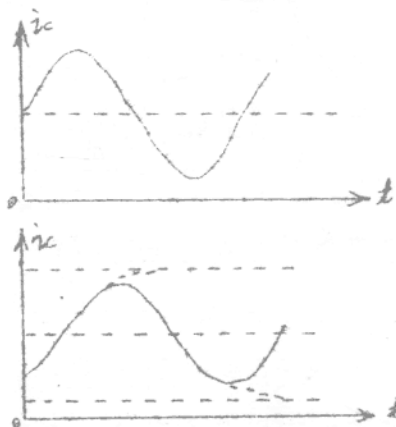


图 2—2 信号幅度的下降

载流子在基区扩散需要一定渡越时间的概念对我们来说并不是陌生的，它在《晶体管电路基础》中是用扩散电容充放电过程来表示的。发射极注入到基区的载流子由于存在渡越时间，不能一下子都扩散到集电极，而是一部分载流子向集电极扩散，形成传导电流，一部分载流子只是在基区靠近发射极边界处形成载流子一定浓度，这些载流子电荷被贮存在基区，相当于在发射结上并有一电容。信号为正半周时，载流子电荷密度增大，相当于对电容充电；信号为负半周时，电荷密度减小，相当于该电容放电。因此，我们也可以把电流放大系数的下降看成是扩散电容对高频信号分流的结果。

## 2. 集电极势垒电容的影响

我们知道，在发射结和集电结都存在势垒电容。而且由于发射结一般处于正向偏置，集电结处于反向偏置，前者的势垒电容较后者大。但在发射结上存在着更大的扩散电容，其势垒电容反而可以忽略不计，发射结总电容可达到几百微微法。而对集电结，扩散电容几乎不存在，主要起作用的是势垒电容，集电结的势垒电容使到达集电极的载流子不能全部形成集电极电流，有一部分将要对电容进行充电，信号频率越高，这个充电过程越显著。集电结势垒电容的分流作用，使高频运用时 $\beta$ 流放大系数进一步下降。

此外，载流子在集电结势垒区的渡越时间也是造成信号延迟及电流放大系数下降的一个因素。但由于载流子在集电结势垒区的运动是在电场力作用下的漂移运动，其渡越时间一般比作为扩散运动的基区渡越时间短得多，因而不是主要因素。

## 二、特征频率与最高振荡频率

既然电流放大系数是随频率上升而下降的，则工作频率高到一定程度，管子就会因电流放大系数太小而不堪使用。为了表示晶体管工作频率的范围，在《晶体管电路基础》中已经引入了共基极电路截止频率 $f_{\alpha}$ 和共发射极电路截止频率 $f_{\beta}$ 的概念。在高频功率放大器中，通常采用共发射极电路，但往往并不使用 $f_{\beta}$ 这个频率参数，这是因为当进一步提高工作频率时，晶体管并非不能工作，只不过 $\beta$ 继续下降而已。只有当 $\beta$ 下降到1以下时，才会完全丧失电流放大作用。因此在晶体管高频运用中以 $\beta=1$ 时的频率作为频率特性参数，把这个频率称为特征频率，以 $f_T$ 表示。

在实践中我们发现，当频率高于 $f_{\beta}$ 时，电流放大系数 $\beta$ 与所使用的频率 $f$ 是成反比关系变化的。也就是说，频率升高一倍，电流放

大系数就降低到原来的二分之一。用数学表示就是

$$\beta \cdot f = \text{常数} \quad (2-1)$$

根据定义， $\beta = 1$  时， $f = f_T$ 。这样

$$\beta \cdot f = 1 \cdot f_T = f_T \quad (2-2)$$

由此可见，特征频率等于  $f_T$  的任意频率与该频率  $\beta$  的乘积。因而我们测定一个高频晶体管的  $f_T$  时，并不必真正测量  $\beta = 1$  时的频率，只要在某一足够高的频率  $f$  ( $f > f_T$ ) 上测  $\beta$ ，二者乘积即为特征频率  $f_T$ 。晶体管手册的  $f_T$  栏内，一般都作为测试条件注明这个频率值。

由于  $f_T$  比较确切地反映了晶体管的高频性能，并且测量比较方便，所以是重要的高频参数。

图 2-3 示出了电流放大系数与频率的关系及  $f_c$ 、 $f_T$ 、 $f_\alpha$  的相对位置，可见  $f_c < f_T < f_\alpha$ 。

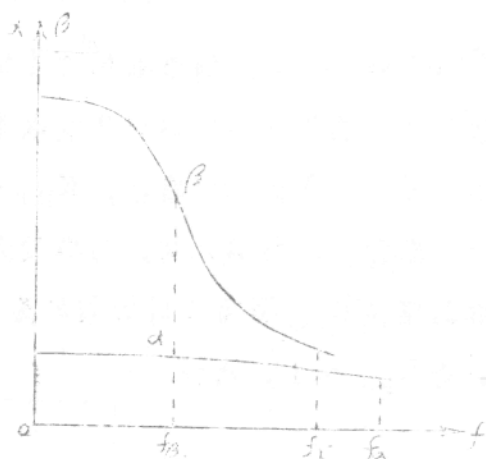


图 2-3 电流放大系数的频率特性

在研究晶体管高频特性时，除特征频率外，还经常应用最高振荡频率  $f_{max}$  这个频率参数。在

引入  $f_{max}$  之前，首先让

我们看一下功率放大倍数与频率的关系。

功率放大倍数是指输出功率与输入交流功率的比值，以  $K_p$  表示，即：

$$K_p = \frac{P_L}{P_i} \quad (2-3)$$

功率放大倍数也常用“功率增益”表示。用功率增益表示功率放大倍数时，(2-3)式变为

$$K_p(\text{db}) = 10 \log \frac{P_L}{P_i} \quad (2-4)$$

功率增益的单位是分贝 (db)。

我们已经知道，作为一个放大器，当输入、输出端都达到共轭匹配时，即信号内阻抗与放大器输入阻抗、负载阻抗与放大器输出阻抗皆共轭匹配，功率放大倍数最大。经分析，最大功率放大倍数  $K_{Pm}$  满足下列关系。

$$K_{Pm} = \frac{f_T}{8\pi r_{bb'} C_{b'c}} \cdot \frac{1}{f^2} \quad (2-5)$$

$r_{bb'}$  和  $C_{b'c}$  分别为晶体管的扩展电阻和集电结电容，它们的物理意义和影响将在下面高频等效电路中说明。

由(2-5)式可以看出， $K_{Pm}$  是与  $f^2$  成反比的，而  $\beta$  仅与  $f$  成反比，因此，随频率升高，功率放大倍数较电流放大系数下降更快。

我们定义  $K_{Pm}$  降为 1 时的频率为最高振荡频率  $f_{max}$ 。在(2-5)式中，令  $K_{Pm} = 1$ ，则得

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi r_{bb'} C_{b'c}}} \quad (2-6)$$

$f_{max}$  表示一个晶体管所能运用的最高极限频率，在此频率下，晶体管放大器已无功率放大作用。当  $f \geq f_{max}$  时，晶体管不能产生振荡，最高振荡频率的名称即由此而来。 $f_{max}$  也是标志晶体管高频特性的重要参数。

由于晶体管放大器的输出阻抗大于输入阻抗，所以在匹配联接时，



即使在特征频率上，即  $\beta$  值变为 1，无电流放大作用，功率仍可以得到放大（就象应用共基电路的情况），因此  $f_{max}$  是大于  $f_T$  的。

迄今为止，我们已经接触到晶体管的四个频率特性参数，它们之间的关系通常是

$$f_{\alpha} \approx (1.2 \sim 1.4) f_T, f_T > 15f_{\beta}$$

而  $f_{\alpha}$  与  $f_{max}$  是比较接近的。

### 三、晶体管高频特性曲线

当晶体管使用频率升高时，其输出特性曲线的形状与低频使用相比，将明显变坏，如图 2—4 所示。图中实线表示低频特性，虚线表示高频特性。两组曲线的主要区别是，高频应用时，集电极饱和电压加大（图中由低频的  $V_{CES}$  变为  $V'_{CES}$ ）。而且不象低频特性曲线那样，随集电极反向电压加大，脱离饱和区后，曲线族即变得平直而均匀，而是逐渐上升，曲线间距离逐渐拉开，这种现象在大电流区，即输出特性曲线的上部更为显著。形成这种情况的原因是与特征频率  $f_T$  或高频时的  $\beta$  值（对某一频率而言，

$$\beta = \frac{f_T}{f},$$

因而  $\beta$  与  $f_T$  是完全一致的）随集电极电压及集电极电流的变化

而变化分不开的。

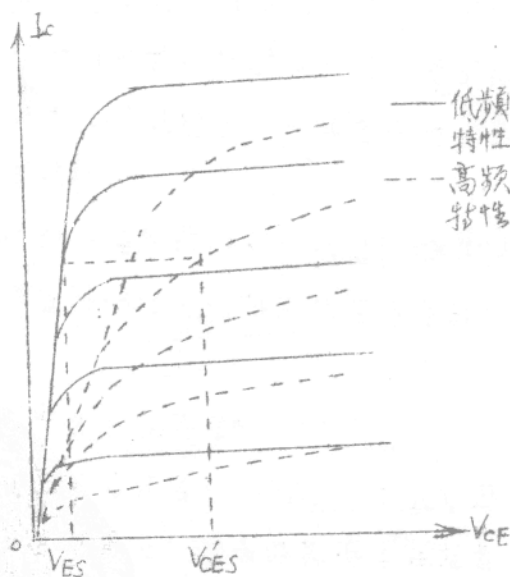


图 2—4 高频时特性曲线的恶化