

电 工 学

下 册

上海交通大学

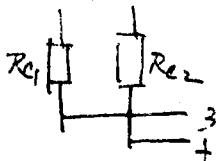
电 工 学

下 册

上海交通大学

1977.7.

改P10-13 图10-41
P10-17. 图. 10-44



目 录

第十一章 晶体管放大器

- 11-1 关于放大器的基本概念..... 1
- 11-2 单管交流电压放大器..... 6
- 11-3 前置多级交流电压放大器..... 24
- 11-4 功率放大器..... 32
- 11-5 放大器中的负反馈和射极输出器..... 42
- 11-6 直流放大器..... 52
- 11-7 相敏整流—放大器..... 62

第十二章 晶体管正弦振荡器

- 12-1 振荡概念..... 68
- 12-2 LC 振荡器..... 71
- ~~12-3~~ RC 振荡器..... 77
- ~~12-4~~ 石英(晶体)稳频振荡器..... 81

第十三章 整流器和直流稳压电源

- 13-1 整流电路..... 86
- 13-2 滤波电路..... 98
- 13-3 直流稳压电路..... 102

第十四章 可控硅整流电路

- 14-1 可控整流电路..... 114
- 14-2 单结晶体管触发电路..... 121

14-3	直流电动机的可控硅调速系统	128
14-4	三相半控桥式整流电路	131
14-5	具有阻容正反馈的晶体三极管触发电路	136

第十五章 脉冲数字电路（分立元件）

15-1	概述	141
15-2	门电路	146
15-3	记忆元件（双稳态触发器）	152
15-4	计数元件、计数器	157
15-5	译码器	161
15-6	微分电路、积分电路	165
15-7	单稳态触发器	169
15-8	施密特触发器	172

第十六章 数字集成电路基础

16-1	数字集成电路概述	175
16-2	逻辑代数及其应用	177
	练习题	190

第十七章 集成电路逻辑门

17-1	晶体管-晶体管逻辑“与非”门电路(<i>TTL</i> 电路)	192
17-2	扩展器	196
17-3	“与非”门的应用	199
17-4	高抗干扰数字集成电路(<i>HTL</i> 电路)	201

第十八章 集成电路触发器

18-1	<i>R-S</i> 触发器	204
18-2	<i>J-K</i> 触发器、 <i>D</i> 触发器	209

第十九章 脉冲数字电路的基本环节

19-1	计数器.....	216
19-2	寄存器.....	228
19-3	译码器.....	233
19-4	数字显示.....	241

第十一章 晶体管放大器

11-1 关于放大器的基本概念

一、用途和种类

放大器的功用是将微小的电信号（电压、电流或功率）增强到所需要的数值。扩音机就是放大器的一个应用实例。扩音机是先经过一个电压放大器把话筒传送出来的微弱电压加以放大后，去推动功率放大器，使喇叭发出比较响的声音来。

在工业生产和国防武备中，放大器的应用也非常广泛。例如自动调节仪表要求把反映温度、压力、流量等被控制量的微弱电压信号经过放大器放大后去推动执行元件，实现自动控制。又如在船舶自动舵、高炮自动瞄准、雷达天线驱动等伺服系统中（见图 11-1），需要应用放大器将检测装置所输出的微

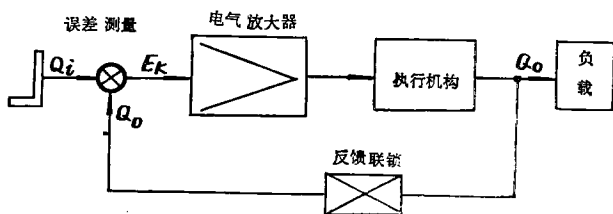


图 11-1 伺服系统结构图

弱的误差电压信号加以放大，以供给执行机构动作所需的功率，驱动负载工作。

原先，自动控制技术中应用的放大器主要采用电子管式、

电机式或磁性放大器等，而近十多年来，特别是无产阶级文化大革命以来，我国的半导体电子工业发展很快，晶体管放大器已被广泛采用，这是因为它具有体积小、重量轻、工作可靠、节电、坚固耐震等优点。根据自动控制中的不同要求，晶体管放大器大致有如图 11-2 所示的几种不同类型。

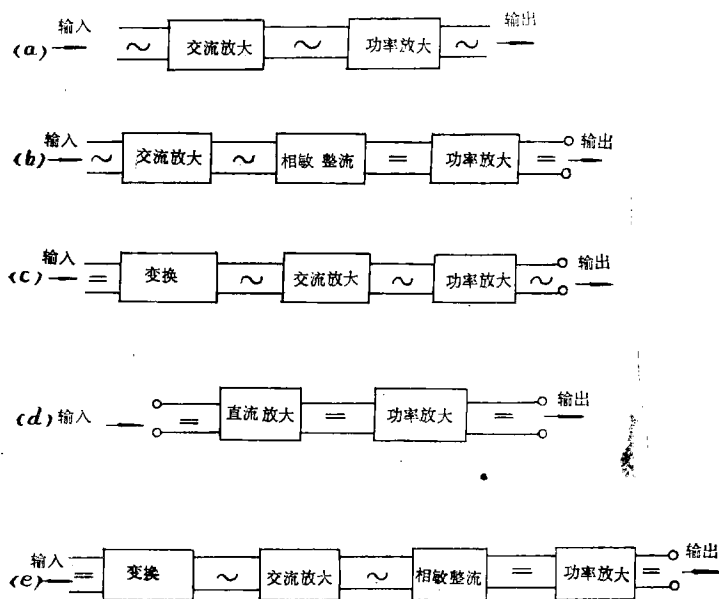


图 11-2 晶体管放大器的几种类型

图 (a) 中，输入信号电压是交流的，负载也是交流的，需先经前置交流电压放大器，将交流信号电压放大，再经功率放大器，输出足够的功率，推动交流负载（例如交流伺服电动机）工作。

图 (b) 中，输入信号电压是交流的，而负载却是直流的（例如直流电磁阀或直流伺服电动机等），需先经前置交流电

压放大器将交流信号电压放大后，再经相敏整流(放大)器变换成相应的直流电压信号，然后再进行功率放大，输出足够的直流功率，推动直流负载工作。

图(c)中，输入信号电压是直流的(缓慢变动的)，而负载却是交流的，需先用变换器将直流信号电压变换成交流电压，然后再经交流电压放大和功率放大，推动交流负载工作。

图(d)中，输入信号电压是直流的，负载也是直流的，则可采用直流放大器进行电压放大和功率放大，推动直流负载工作。

由于直流放大器的另点漂移现象(即当没有输入信号时，输出端有缓慢变动的、虚假的输出信号)难以完全克服，有时便避免直接采用直流放大器，而是先将直流信号电压变换成交流电压，再经交流电压放大器放大，然后通过相敏整流(放大)器还原成直流电压信号，最后经功率放大，推动直流负载工作(见图(e))。

综上所述，晶体管放大器的基本单元计有：交流电压放大器、功率放大器、直流放大器和相敏整流(放大)器等数种。

二、关于放大器的增益

怎样用数量来表示一个放大器放大微小信号的能力呢？

不论放大器的电路如何繁杂，但均可用一个四端网络来表示，更确切地说，放大器是个有源四端网络，如图 11-3 所示。

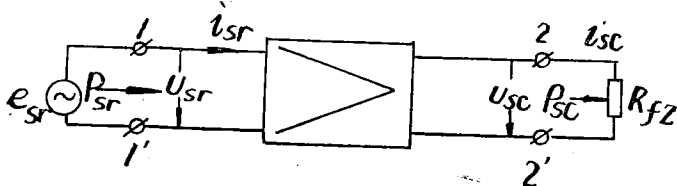


图 11-3 增益表示方法

端子 1-1' 叫放大器的输入端，需放大的信号电压 u_{sr} （称输入电压）由输入端输入。于是信号源便向放大器供给一定的电流 i_{sr} （称输入电流），显然，信号源要供给放大器一定的功率 $P_{sr} = U_{sr} \cdot I_{sr}$ （式中 U_{sr} 和 I_{sr} 分别为 u_{sr} 和 i_{sr} 的有效值）。 P_{sr} 叫做输入功率。

经放大器放大后，在输出端 2-2' 便可得到被放大的输出电压 u_{sc} 、输出电流 i_{sc} ，也就是说，从输出端 2-2' 可获得一个比输入功率大的输出功率 $P_{sc} = U_{sc} \cdot I_{sc}$ （式中 U_{sc} 和 I_{sc} 分别为 u_{sc} 和 i_{sc} 的有效值），这个功率被接在放大器输出端的负载 R_{Lz} 所吸取。在扩音机中，放大器的负载是喇叭；在控制电路中，放大器的负载可能是继电器，也可能是伺服电动机等。虽然负载是多种多样的，但它们有个共性，即都要从放大器吸取功率。为分析方便起见，我们常用一个负载电阻 R_{Lz} 来代替具体的负载，只要 R_{Lz} 与具体的负载从放大器吸取的功率相等即可。输出信号比输入信号在数值上增高的倍数叫做放大器的放大倍数，通常又称增益。增益的表示式即为：

$$\text{电压增益 } K_U = \frac{\text{输出电压变化幅度}}{\text{输入电压变化幅度}} \quad (11-1)$$

$$\text{电流增益 } K_I = \frac{\text{输出电流变化幅度}}{\text{输入电流变化幅度}} \quad (11-2)$$

$$\text{功率增益 } K_P = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P_{sc}}{P_{sr}} \quad (11-3)$$

放大器的增益是反映放大器放大微小信号的能力的主要指标。

对于某一个放大器而言，是否需要这三个增益都大呢？不是的。例如图 11-2(a) 中的前置电压放大器，其主要任务是放大电压信号的幅度，在设计这种放大器时，如何获得高的电压

增益是主要矛盾，因此，只有用电压增益才能表示出这种放大器的放大能力。而对于末级的功率放大器，其特点是要求它供给负载有较大的功率，因此如何获得最大的功率增益就是设计和评价这种放大器的主要指标。

三、放大器完整电路介绍

图 11-4(a) 是某伺服系统所采用的前置交流电压放大器，

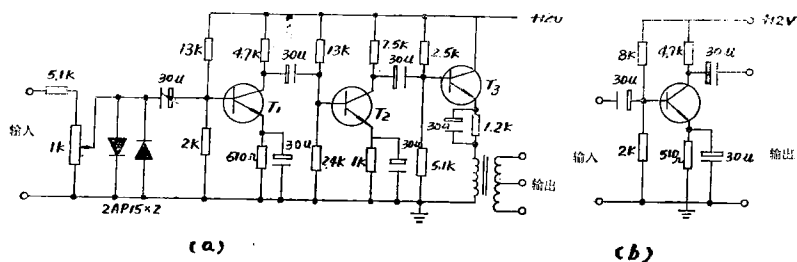


图 11-4 某伺服系统的前置交流电压放大器

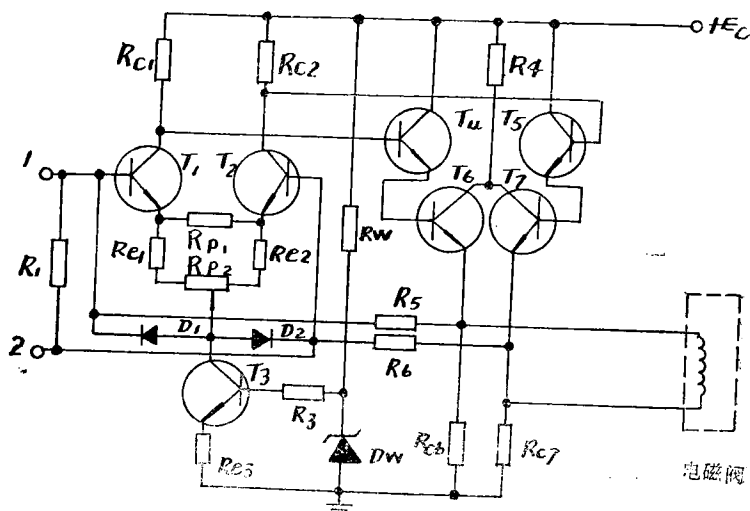


图 11-5 某伺服系统的直流放大器

输入是来自检测装置的反映失调角大小的交流电压信号，频率为 500HZ 。图 (b) 是其中单管的基本单元电路。

图 11-5 是另一伺服系统所采用的差动式直流放大器，输入是来自相敏整流器的直流电压信号，负载是直流电磁阀。

由以上两实例可看出，晶体管放大器总是由一两种基本的单元电路构成的，每一单元电路或包含一个晶体管（图 11-4(b)），或包含两个晶体管（图 11-5）。

遵照毛主席关于“解剖麻雀”和“由浅入深”的教导，我们将从放大器几种基本单元电路入手，着重介绍它们的基本原理和基本分析方法，然后再从单元到整体，以便对各类晶体管放大器有较全面的认识。

11-2 单管交流电压放大器

一、基本工作原理

1. 放大电路的组成

图 11-6(a) 是一个单管交流电压放大器电路， T 是 NPN 型晶体三极管，它是电路中的放大元件。

我们首先认识一下这个放大电路。先看输入电路：基极电源 E_b 通过电阻 R_b 供给发射结以正向偏压，以使三极管正常工作。在输出电路（集电极电路）中， E_c 是集电极电源，其极性是使三极管的集电结接成反向连接。（注：若是 PNP 管，则图中 E_b 、 E_c 的极性反接）。 R_c 叫集电极电阻，其作用是将集电极电流 i_c 的变化转换成集电极电压的变化，这是获得电压增益所必不可少的。我们知道，晶体三极管是一个电流控制元件，当输入端 $1-1'$ 加上交流信号电压 u_{sr} 时，将会引起基极电流作相应的变化，从而控制集电极电流也随基极电流而变，即三极管产生了电流放大作用，而 R_c 的作用就是把晶体管的

电流放大特性，以电压放大的形式表示出来。通过隔直电容 C_2 把集电极电压的交流部分取出来，这就是输出电压 \tilde{u}_{sc} 。电容 C_1 也起着“隔直”作用，否则，信号源如有直流通路，那么晶体管发射结的正偏压将受到影响。

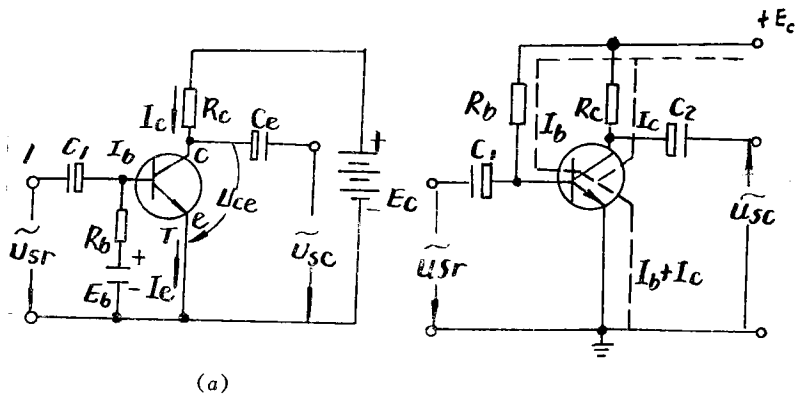


图 11-6 单管交流电压放大器

图 11-6(a) 需要两个电源 E_b 和 E_c 供电，在实用上很不方便。我们进一步认识这个电路便可发现， E_b 和 E_c 的负极是连在一起的，因此完全可以用 E_c 来代替 E_b ，因为 $E_c > E_b$ ，故只要适当增加 R_b (至 R_b') 便可维持 I_b 不变，这就变成了单电源供电的放大电路，如图

11-6(b) 所示。

2. 放大器的静态工作点

放大器的静态工作点就是指没有输入信号时 ($\tilde{u}_{sr} = 0$)，晶体管各电极的直流电流和电压。因此，静态工作点完全决定于放大电路的直

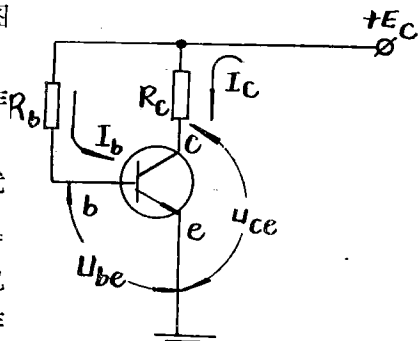


图 11-7 图11-6(b)的直流通道

流通道。图 11-6(b) 放大电路的直流通道如图 11-7。

根据欧姆定律可得静态时的基极电流（又称偏流） I_b 为：

$$I_b = \frac{E_c - U_{be}}{R_b}$$

其中 U_{be} 是发射结电压，由于发射结是正向偏置，故 U_{be} 很小，可忽略。于是

$$I_b \approx \frac{E_c}{R_b} \quad (11-4)$$

另外，根据三极管电流放大原理可知，静态时集电极电流 I_c 为：

$$I_c = \beta I_b + I_{c0}$$

一般穿透电流 I_{c0} 很小，可略去，则得

$$I_c \approx \beta I_b \quad (11-5)$$

而静态时集—射极之间的电压 U_{ce} 应为：

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c \quad (11-6)$$

根据式 (11-4)、(11-5) 和 (11-6) 便可确定放大器的静态工作点，同时也说明了在“静态”时晶体管各电极的电流、电压都是确定的直流量。

3. 放大器的放大作用和反相作用

在输入交流信号电压 \tilde{u}_s 后，基极的总电流 i_b 具有图 11-8(b) 的形式，它实际上是两个电流的合成：一个是直流工作电流 I_b ，另一个是由输入信号引起的交流电流 \tilde{i}_b ，交流的 \tilde{i}_b 驮载在直流的 I_b 上。

由于基极电流的变化使集电极电流也跟着变化，所以，集电极电流也可看成是两个电流的合成：一个是不变的直流 I_c ，另一个是交流 \tilde{i}_b 引起的交流 \tilde{i}_c ($\tilde{i}_c = \beta \tilde{i}_b$)，如图(c)所示。

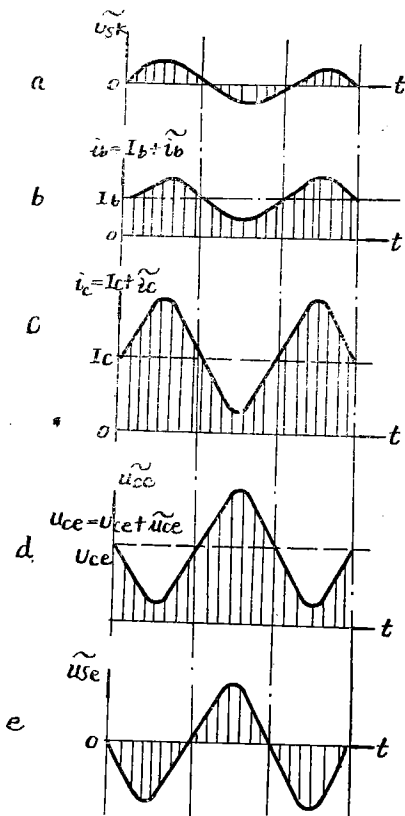


图 11-8 放大器在放大过程中各处电压电流的波形

同理，三极管 $c-e$ 极之间的电压（即管压降）也是由直流 U_{ce} 和交流 \tilde{u}_{ce} 两部分组成，如图 (d)，值得注意的是，当 i_c 的瞬时值增加时， R_c 两端的电压降也随之增加，所以这时三极管管压降 u_{ce} 的瞬时值反而减小，反之，当 i_c 减小时，将增加。可见， \tilde{i}_c 和 \tilde{u}_{ce} 之间的相位正好相差 180°

最后， u_{ce} 的交流成分 \tilde{u}_{ce} 经过耦合电容 C_2 传递到输出端，成为放大器的输出电压 \tilde{u}_{sc} ，而 u_{ce} 的直流成分 U_{ce} 被 C_2 所隔离，即 $\tilde{u}_{sc} = \tilde{u}_{ce}$ ，见图 (e)，从图中可见输出电压 \tilde{u}_{sc} 和输入电压 \tilde{u}_{sr} 是同频率的正弦电压，幅度

放大了，但两者的相位恰好相反，这叫做放大器的“反相”作用，也就是说，放大器一方面把微弱的输入电压 \tilde{u}_{sr} 加以放大，另一方面还使 \tilde{u}_{sc} 和 \tilde{u}_{sr} 在相位上相差 180°

从以上的分析可以看到，放大器的一个重要特点就是电路中同时存在着直流量和交流量两种成分，直流量决定了管子的直流工作状态，而交流量则代表着讯号的变化情况，各有各的

用途，二者不能混淆。在分析静态工作点时必须抓住电路的直流通路，而分析放大倍数等涉及变化讯号的问题时又必须抓住电路的交流通道。

二、放大器的图介分析法

利用晶体管的输入特性与输出特性曲线，通过作图的方法分析放大器的基本性能，称为图介法。图介法的主要任务有两个：一是决定放大器的静态工作点；二是估算放大器的放大倍数。图介法具有简单，直观等优点，它是解非线性电路的一种较简便的方法。

下面我们以一个具体的放大器电路为实例，来介绍图介法的分析步骤。

例：设某一单管交流放大电路如图 11-9(a) 所示。

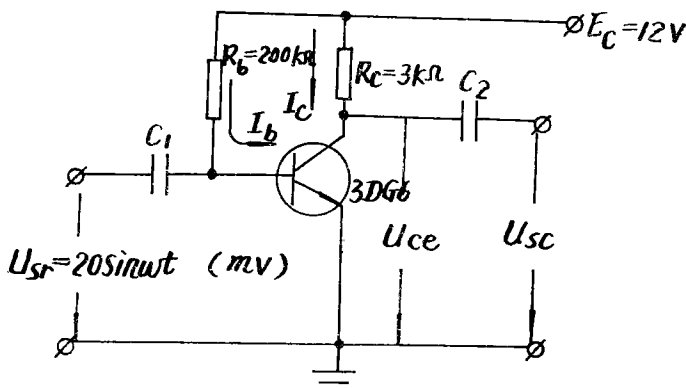


图 11-9(a) 单管交流放大器电路实例

现给出晶体管 3DG6 的输出特性 $I_c = f(U_{ce})$ 和输入特性 $I_b = f(U_{be})$ 如图 11-9(b)，当输入信号电压的有效值 $\tilde{U}_{sr} = 14.2\text{mV}$ 时，求输出电压大小和放大器的电压增益。

图介法可按下列步骤进行：

1. 先从输出特性曲线着手——作负载线

第一步要从输出特性曲线上确定静态工作点 (I_c 和 U_{ce})。

从电路可知, 当集电极电流 I_c 通过电阻 R_c 时, 将在其上产生压降, 根据欧姆定律, 集电极电压 U_{ce} 应为:

$$U_{ce} = E_c - I_c R_c \quad (11-7a)$$

该式的物理意义是: 从晶体管集电极外部电路来看, 电流 I_c 和电压 U_{ce} 应满足式 (11-7a)。

而从晶体管内部特性来看, I_c 和 U_{ce} 间又必须遵循输出特性曲线

$$I_c = f(U_{ce}) \quad (11-7b)$$

外部电路和晶体管构成集电极电路的一个整体, 因此, 在这个电路中流通的电流 I_c 和管子两端电压 U_{ce} 的值必须同时满足 (11-7a) 和 (11-7b) 两式。

在 I_c-U_{ce} 坐标系统中, 式 (11-7a) 是一条直线, 而式 (11-7b) 即为输出特性曲线。由数学可知, 只有直线 $U_{ce} = E_c - I_c R_c$ 和输出特性曲线 $I_c = f(U_{ce})$ 的交点的那些 I_c 和 U_{ce} 才同时满足式 (11-7a) 和 (11-7b)。

因此, 为了确定静态工作点, 首先需将 (11-7a) 直线绘到输出特性的同一坐标纸上, 方法如下。

两点便可决定一条直线, 通常是选择最容易确定的两个点:

先设 $U_{ce} = 0$ 时, 则

$$I_c = \frac{E_c}{R_c} = \frac{12V}{3K\Omega} = 4mA$$

于是在 I_c 轴上可找到 $I_c = 4mA$ 的 N 点。

再设 $I_c = 0$ 则可得

$$U_{ce} = E_c = 12V$$

于是在 U_{ce} 轴上可找到 $U_{ce} = 12V$ 的 M 点。

通过 M 、 N 两点联一条直线，它就是代表式 (11-7a) 的直线。

当电源电压 E_c 一定时，从图 11-9(b) 可见

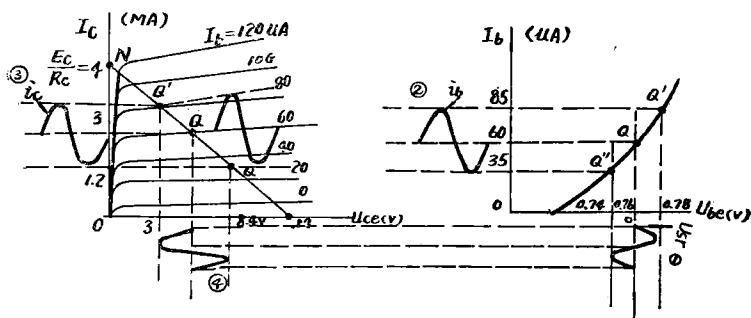


图 11-9(b) 放大器的图解法

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{ON}{OM} = \frac{I_c}{E_c} = \frac{E_c / R_c}{E_c} = \frac{1}{R_c}$$

可见 MN 的斜率只和 R_c 有关，我们把直线 MN 叫做直流负载线。 R_c 愈大，则 α 愈小。

作直流负载线 MN 的目的是为了确定静态工作点。

2. 确定放大器的静态工作点

正如前述，静态时的 I_c 和 U_{ce} 必须是直流负载线 MN 和输出特性曲线的交点的那些 I_c 和 U_{ce} 。但是在静态基极偏流 I_b 的大小尚未知道之前，单有直流负载线还不能确定出 I_c 和 U_{ce} 。而 I_b 可根据式 (11-4) 求出，即

$$I_b = \frac{E_c}{R_b} = \frac{12V}{200K\Omega} = 60\mu A$$

所以晶体管肯定是工作在 $I_b = 60\mu A$ 的那一条特定的输出特性上，于是，直流负载线 MN 与 $I_b = 60\mu A$ 的那条输出特性曲线的交点 Q 就是放大器的静态工作点。从图可得 $I_c = 2.1mA$ 、 $U_{ce} = 5.7V$ 、 $I_b = 60\mu A$ 。