



11.2 功率放大器

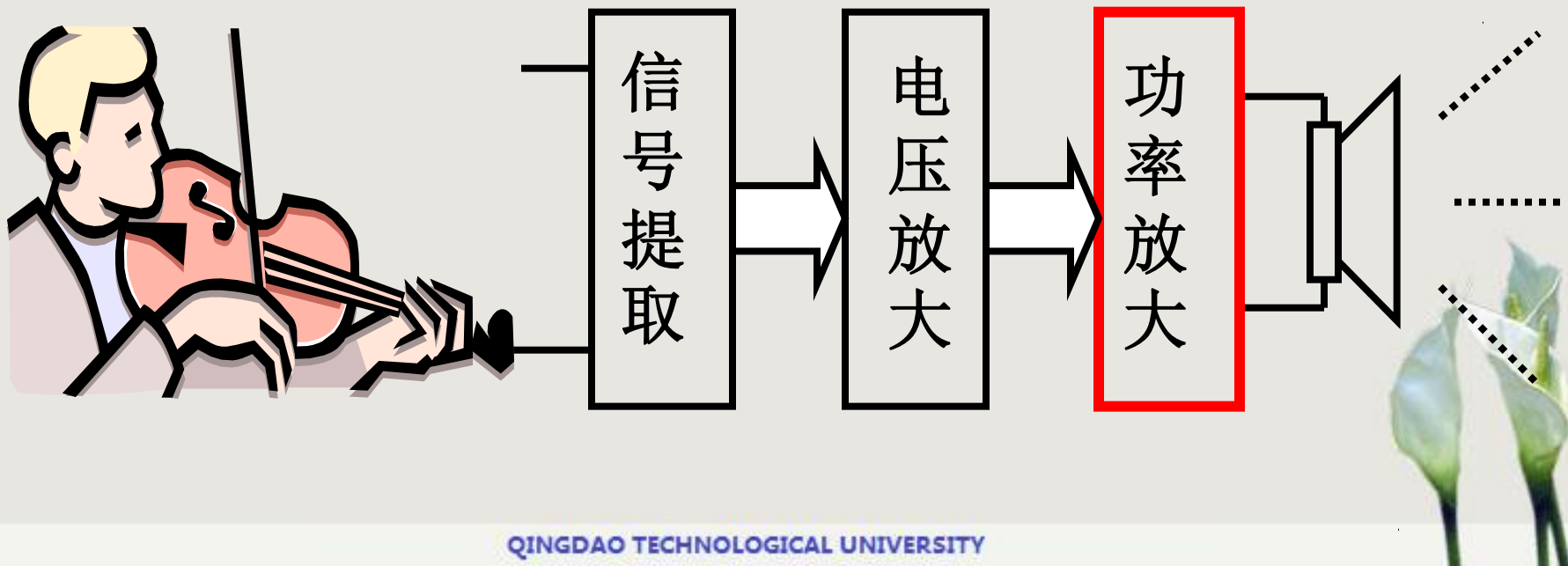
- 一、功率放大电路概述
- 二、互补对称功率放大电路
- 三、集成功率放大器



一.功率放大电路概述

功率放大器的作用： 用作放大电路的**输出级**，以驱动执行机构。如使扬声器发声、继电器动作、 仪表指针偏转等。

例： 扩音系统



1. 功率放大电路的基本要求

由于功率放大电路通常是在大信号状态下工作，因此对功率放大电路有以下三点基本要求：

(1) **输出功率尽可能大** 即要求输出电压和输出电流有足够大的幅度，因此，需要三极管在接近极限状态下工作。

(2) **效率要高** 由于输出功率大，因此直流电源消耗的功率也大，这就存在一个效率问题。定义放大电路的效率为

$$\eta = \frac{\text{负载得到的功率}}{\text{直流电源的输出功率}}$$

(3) **非线性失真要小**



2. 功率放大电路的分析方法

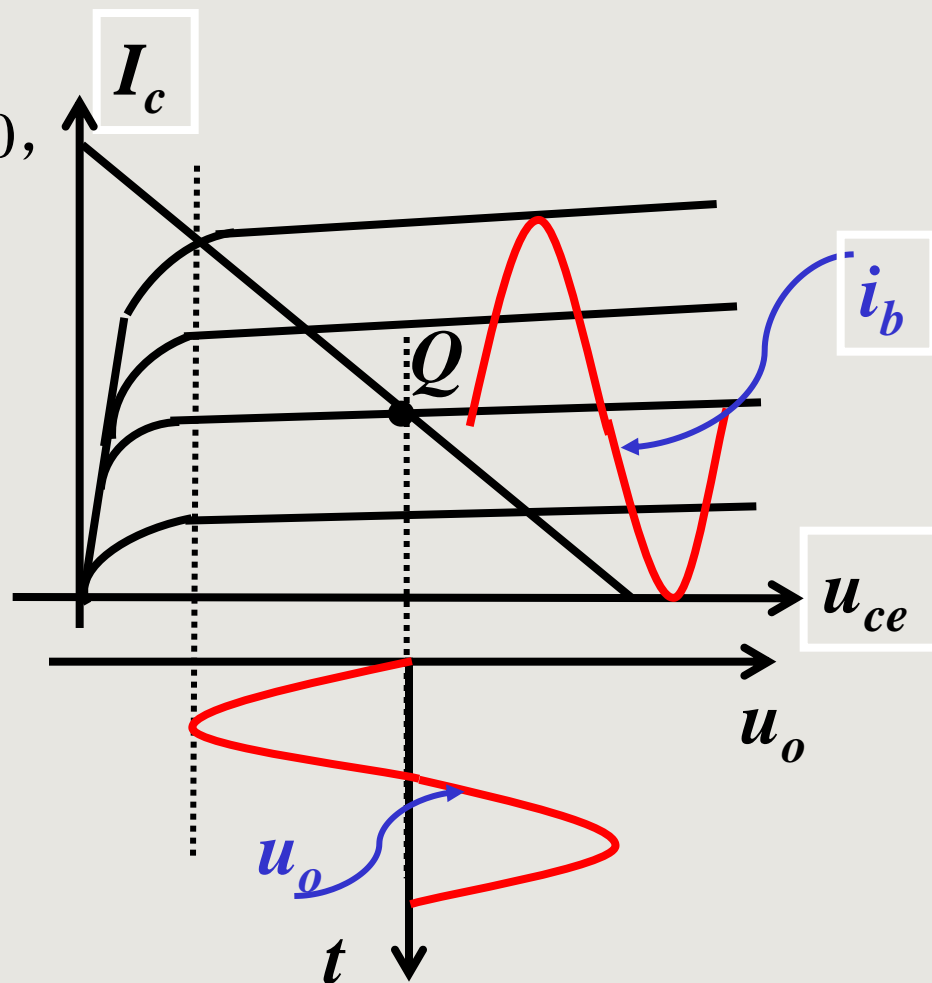
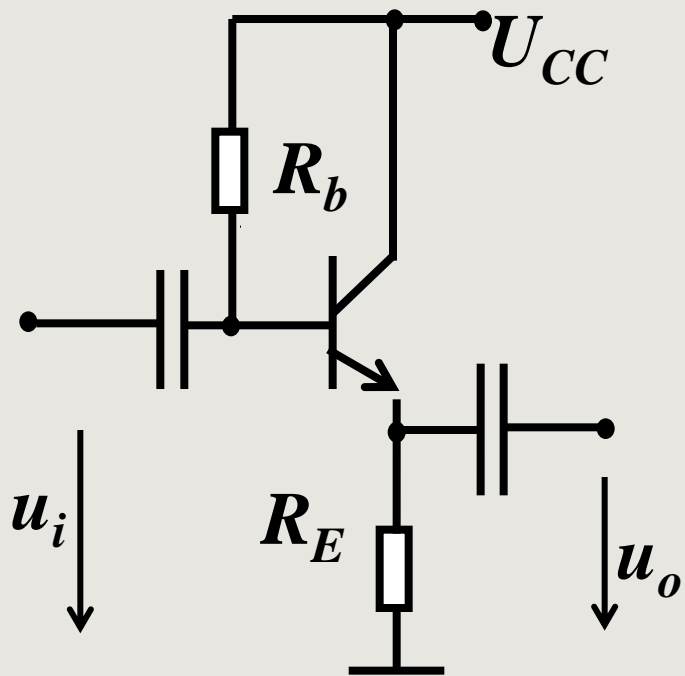
由于三极管工作在大信号状态下，微变等效电路法显然已不能运用，故通常采用图解法，由三极管的输出特性曲线研究放大电路的输出电压和效率。

3. 功率放大电路的三种工作状态

甲类、乙类和甲乙类。



甲类放大: 在整个周期中, $i_c > 0$,
Q点在交流负载线的中间



当有输入信号时, 集电极电流 $i_c = I_{CQ} + i_c$, 直流电源的输出功率为 $U_{CC} i_c$, 其平均值是 $I_{CQ} U_{CC}$, 这个功率中的一部分转化为有用的输出功率 P 。信号越大, 输出功率也越大, 但可以证明, 在理想情况下, 甲类放大电路的最高效率为 **50%**。

如何提高效率？

$$\eta = \frac{\text{负载得到的功率}}{\text{直流电源的输出功率}}$$

一是增大放大电路的动态工作范围以增加输出功率，二是减小电源的输出功率。

第一条途径很容易，但在甲类工作状态下，最高效率是50%；

第二途径就是在 U_{CC} 一定的前提下，使静态工作电流减小，即使静态工作点Q下移，减小静态管耗（甲类工作状态下，直流电源输出功率的平均值是 $I_{CQ}U_{CC}$ ）

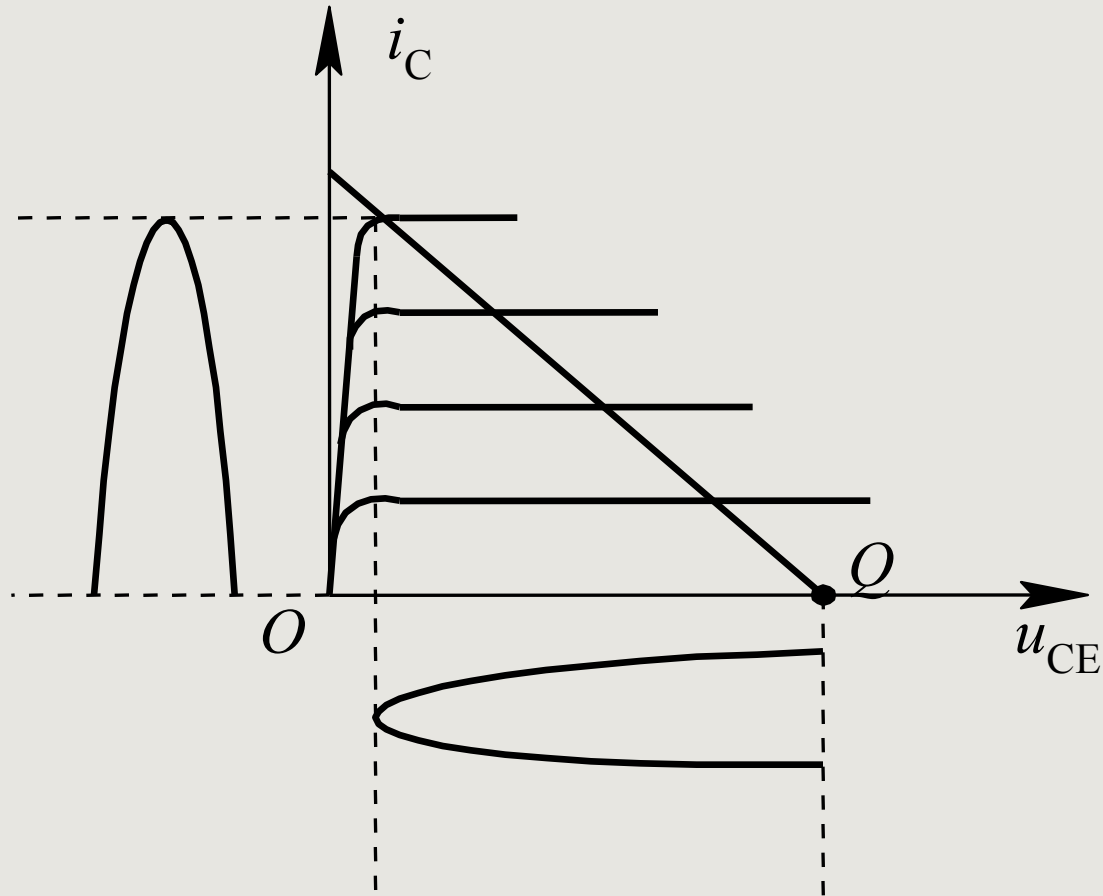
当Q点移至 $I_C=0$ 处时，静态管耗接近于零，放大电路的这种工作状态称为乙类状态

在乙类工作状态，放大电路的效率最高，但由于在信号的正半周才有集电极电流，输出信号只有半个波形





乙类放大： Q点在截止区

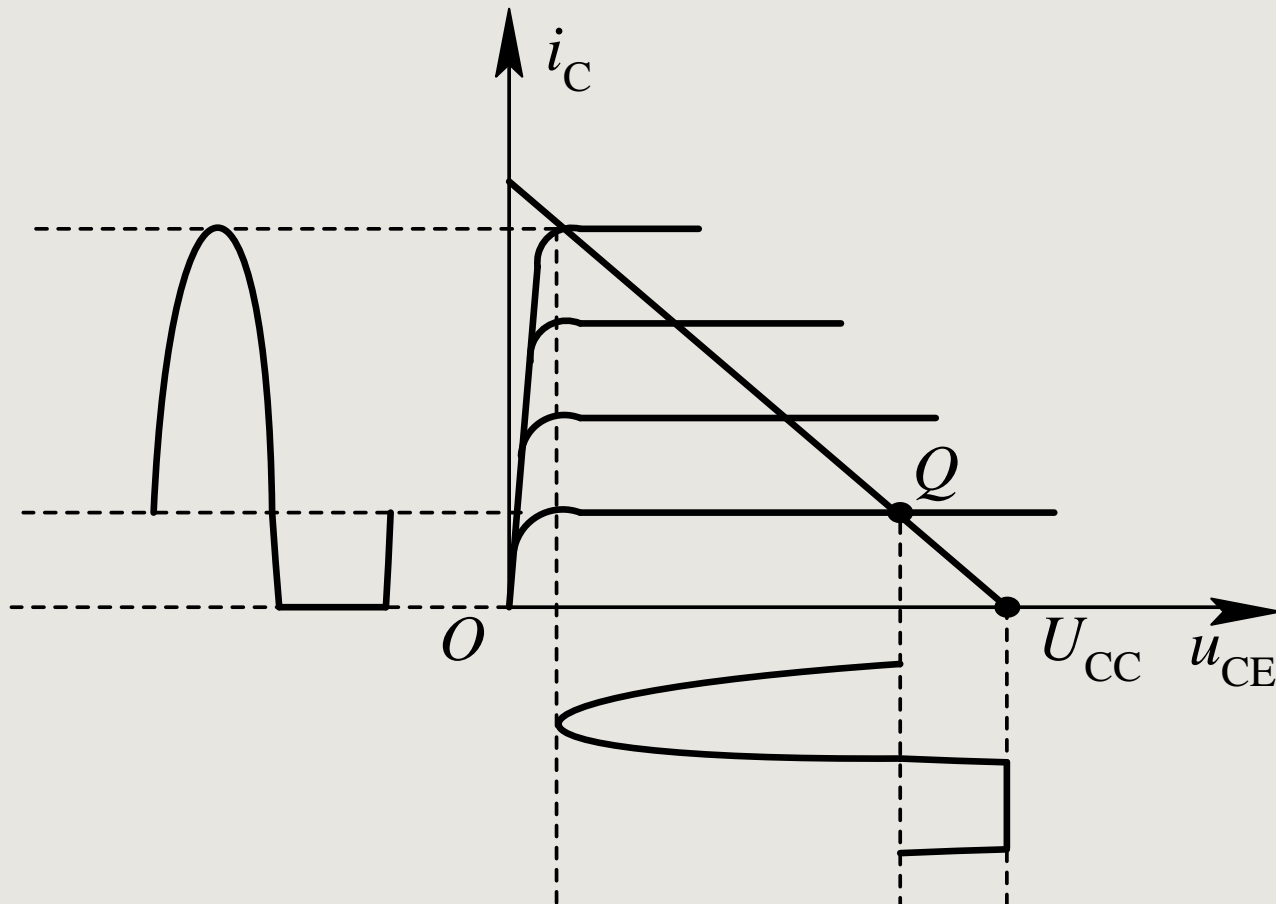


输出信号只有半个波形





甲乙类放大: Q点在截止区上方一点点



放大电路在乙类和甲乙类状态下，效率虽有提高，但出现了严重的波形失真，因此，既要使静态管耗减小，又要使失真不严重，需要在电路结构上采取措施。

二、互补对称功率放大电路(OCL)

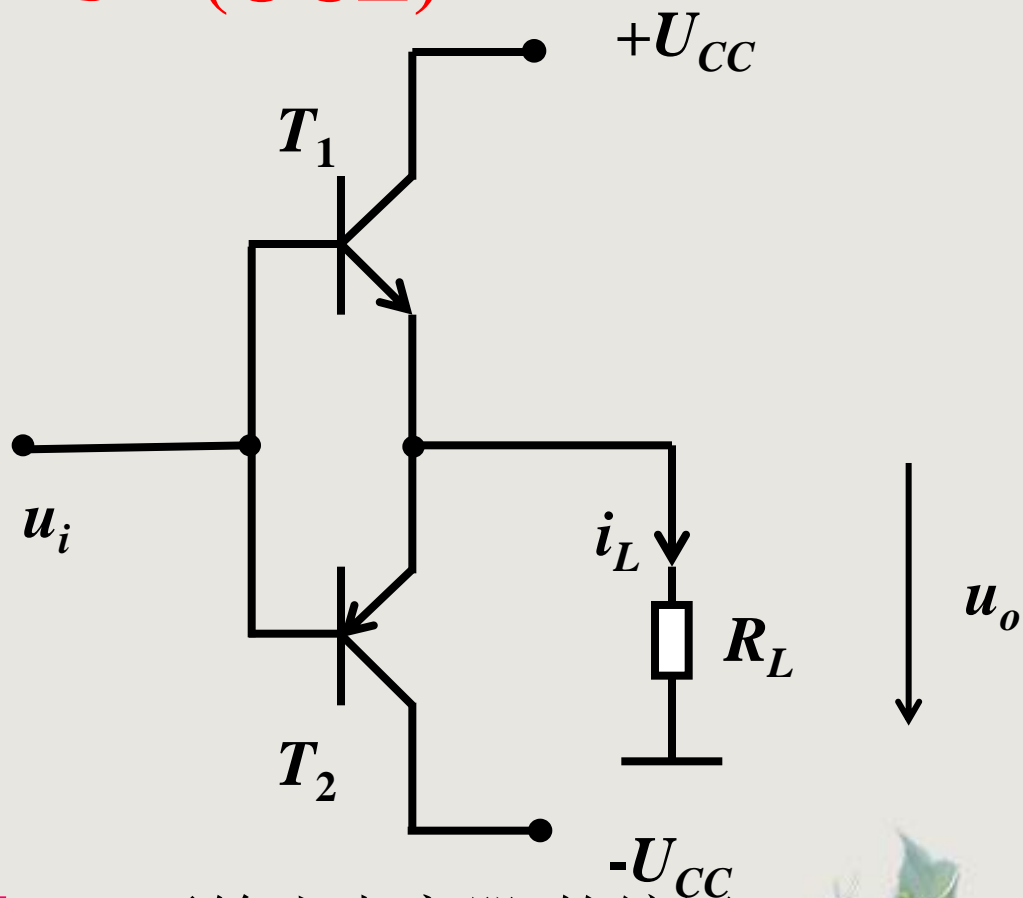
互补对称:

电路中采用两个晶体管:

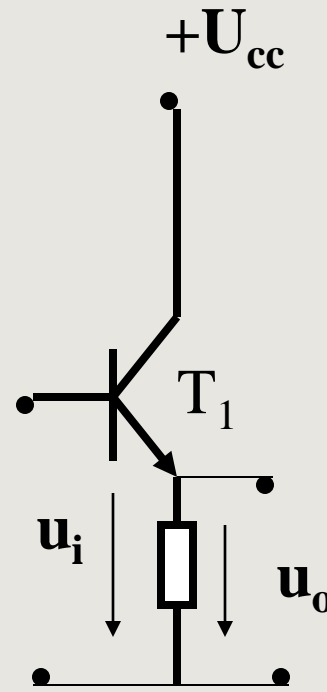
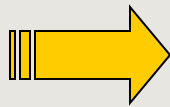
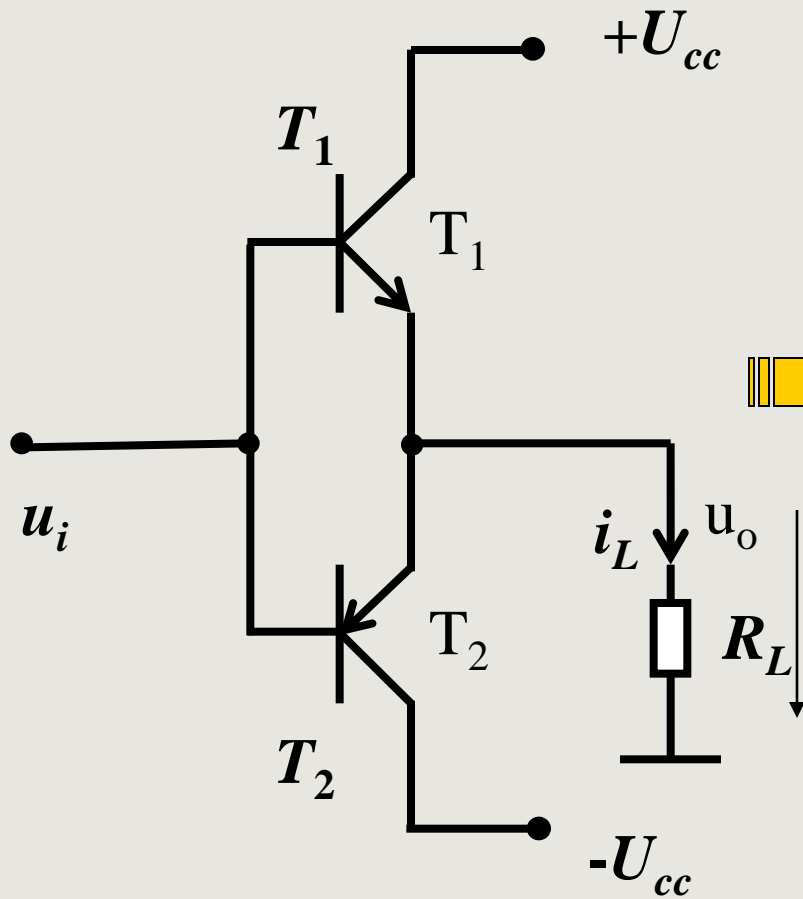
NPN、PNP各一支; 两管

特性一致;

对称电源: $+U_{CC}$, $-U_{CC}$ 组成互补对称式射极输出器

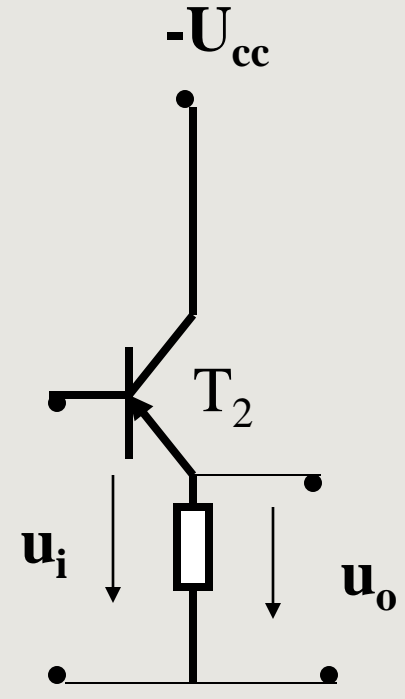
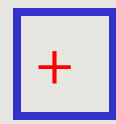


OCL: **O**utput **C**apacitor**L**ess(无输出电容器)的缩写



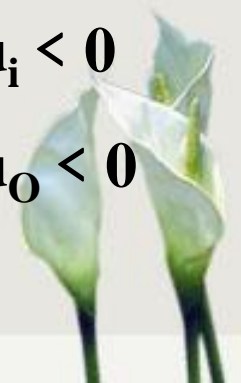
$$u_i > 0$$

$$u_o > 0$$



$$u_i < 0$$

$$u_o < 0$$



1. 工作原理（设 u_i 为正弦波）

静态时：

$u_i = 0V \rightarrow T_1、T_2$ 均不工作
 $\rightarrow I_C = 0, P_U = 0; u_o = 0V$

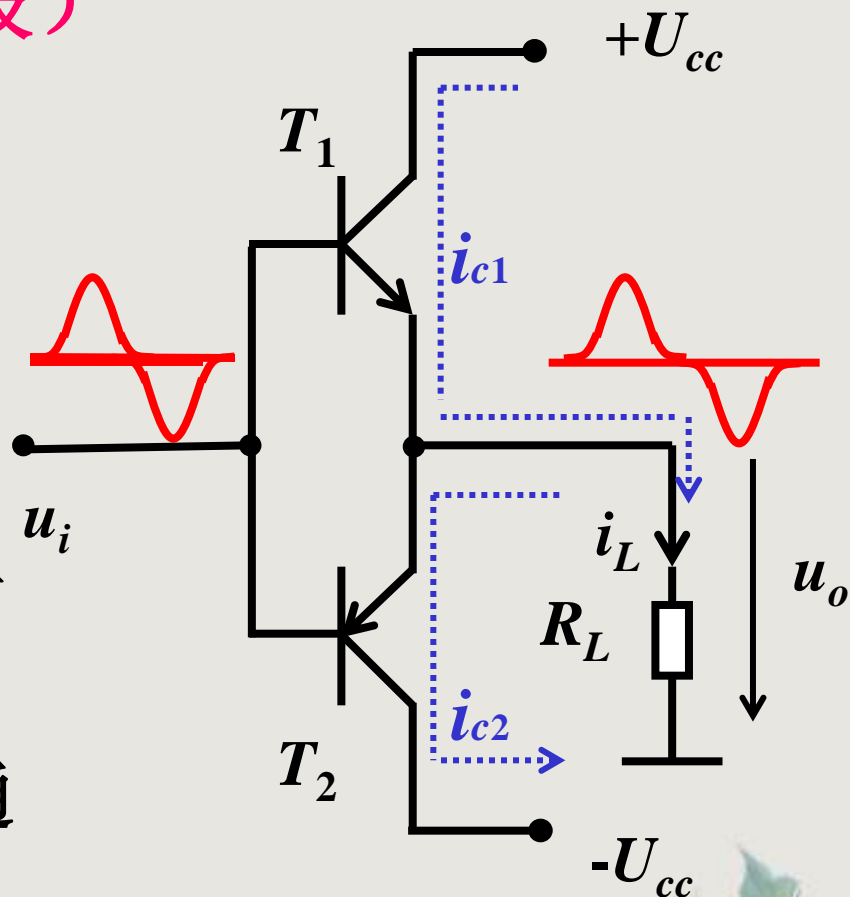
动态时：

$u_i > 0V \rightarrow T_1$ 导通， T_2 截止

$\rightarrow i_L = i_{c1}$;

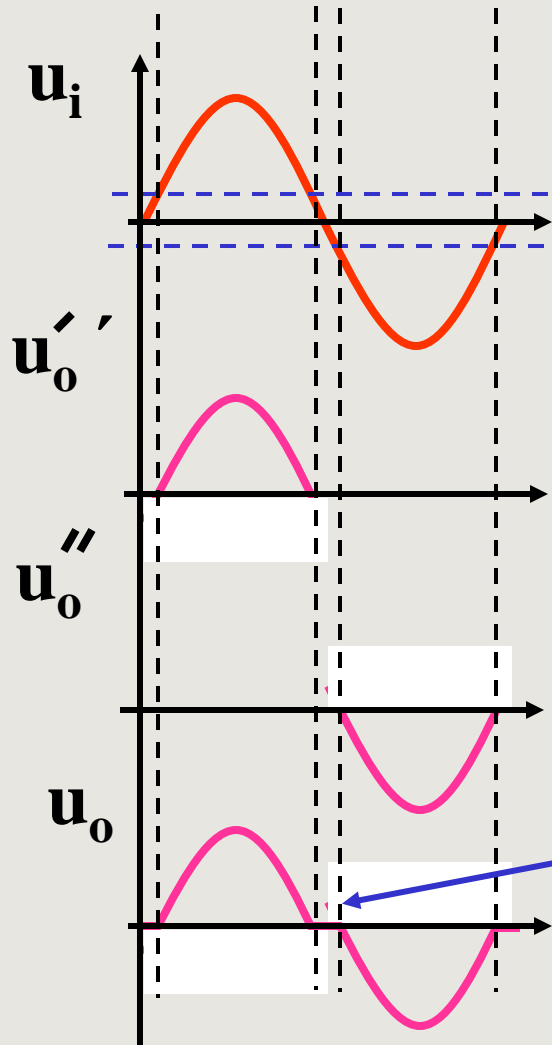
$u_i < 0V \rightarrow T_1$ 截止， T_2 导通

$\rightarrow i_L = i_{c2}$



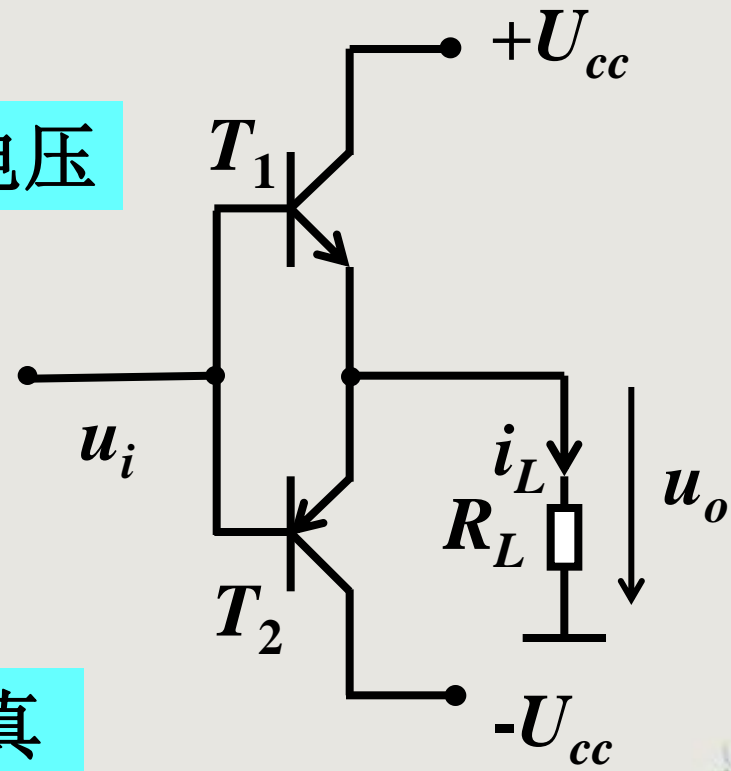
注意： $T_1、T_2$ 两个晶体管都只在半个周期内工作的方式。

输入输出波形图



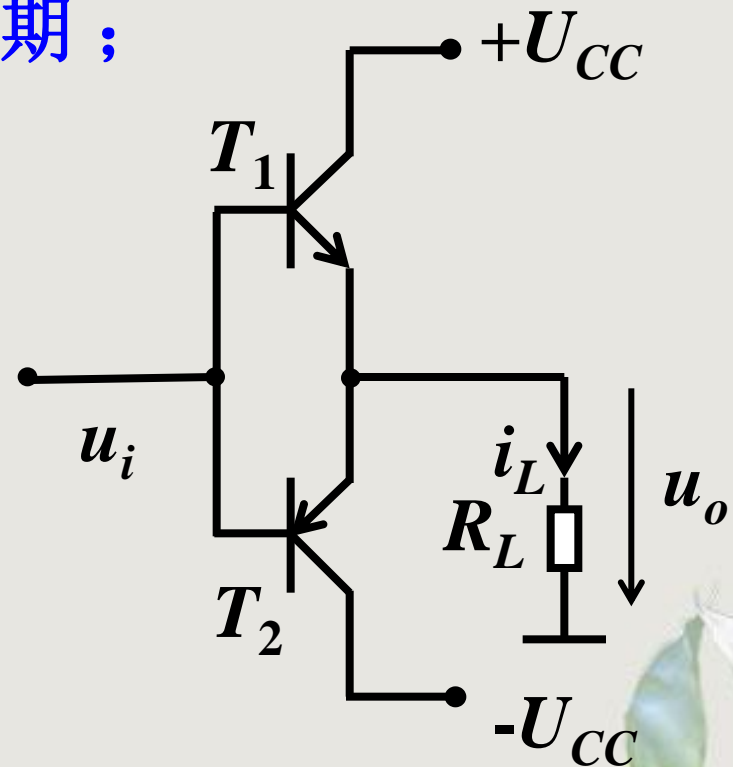
死区电压

交越失真



2.特点:

- (1) 静态电流 I_{CQ} 、 I_{BQ} 等于零;
- (2) 每管导通时间接近半个周期;
- (3) 存在交越失真。



3.分析计算

设电路工作在极限和乙类工作状态，输出电压的最大值为 U_{om} ，不考虑交越失真，则 $u_o=U_{om}\sin\omega t$ ，输出电压的有效值为 $\frac{U_{om}}{\sqrt{2}}$ 。电路的输出功率为

$$P_0 = \left(\frac{U_{om}}{\sqrt{2}} \right)^2 / R_L = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

直流电源提供的功率为

$$p_U = U_{CC} i_C = U_{CC} \cdot \frac{u_o}{R_L} = \frac{U_{CC} U_{om}}{R_L} \sin \omega t$$

两个电源各供电半个周期，故电源的平均功率为

$$P_U = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p_U d\omega t = \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC} U_{om}}{R_L}$$

电路的效率为

$$\eta = \frac{P_0}{P_U} = \frac{\pi}{4} \frac{U_{om}}{U_{CC}}$$



在极限状态下 $U_{om} = U_{CC} - U_{CES}$

在极限和理想情况下, $U_{om} = U_{CC}$ $\eta = \frac{\pi U_{om}}{4 U_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$

电源提供的功率与输出功率之差基本上等于三极管的管耗功率 P_T

$$P_T = P_U - P_O = \frac{2U_{CC}U_{om}}{\pi R_L} - \frac{U_{om}^2}{2R_L} \quad \text{与输出电压的幅值 } U_{om} \text{ 有关}$$

$$\frac{dP_T}{dU_{om}} = 0 \quad \longrightarrow \quad U_{om} = \frac{2}{\pi} U_{CC} \approx 0.63 U_{CC} \quad \text{时, } P_T \text{ 最大}$$

$$P_{Tm} = \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC}}{R_L} \cdot \frac{2}{\pi} U_{CC} - \frac{1}{2R_L} \left(\frac{2}{\pi} U_{CC} \right)^2 = \frac{2}{\pi^2} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

平均每只三极管的管耗为

$$P_{T1m} = \frac{1}{\pi^2} \frac{U_{CC}^2}{R_L} = \frac{2}{\pi^2} \cdot P_{om} = 0.2 P_{om} \quad P_O = \frac{U_{om}^2}{2R_L}$$

如果要求输出功率为 **10W**, 则需要二只额定管耗功率不小于 **2W** 的三极管



4. 电路的改进

问题的提出：因Q点在截止区，存在交越失真。

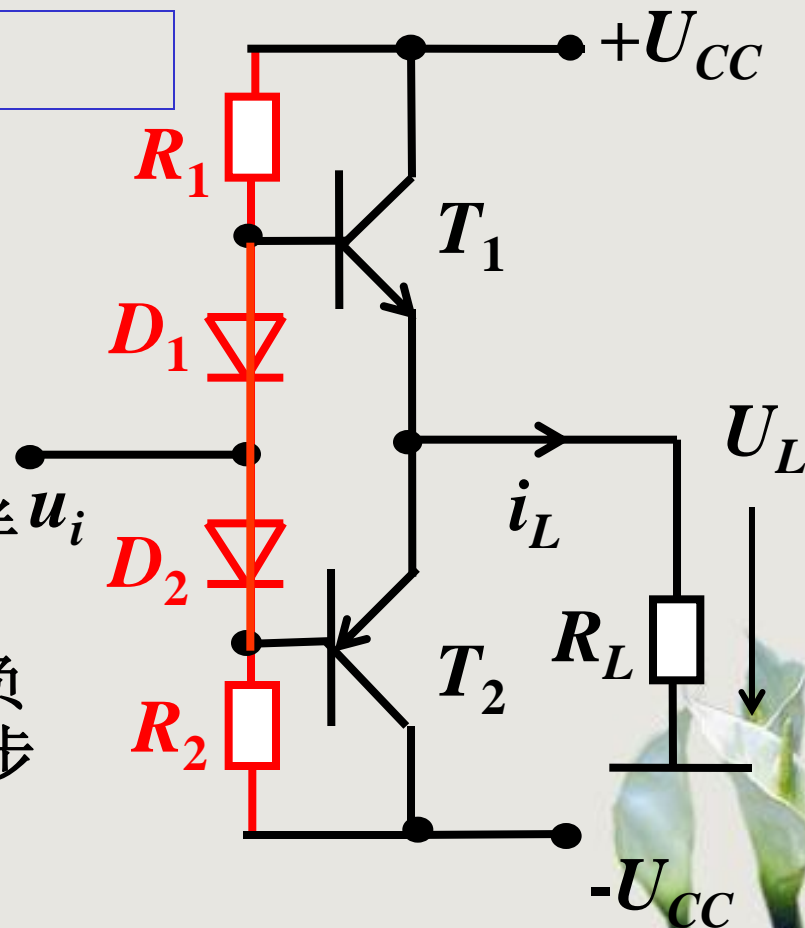
解决方法： 利用偏置电路克服交越失真。

电路中增加 R_1 、 D_1 、 D_2 、 R_2 支路

静态时： T_1 、 T_2 两管发射结电位分别为二极管 D_1 、 D_2 的正向导通压降，致使两管均处于微弱导通状态——**甲乙类工作状态**

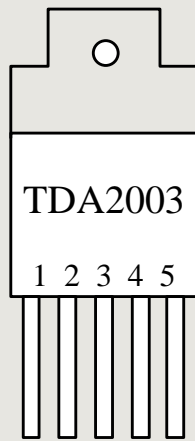
动态时： 设 u_i 加入正弦信号。正半周 T_2 截止， T_1 基极电位进一步提高，进入良好的导通状态；负半周 T_1 截止， T_2 基极电位进一步降低，进入良好的导通状态。

从而克服了交越失真

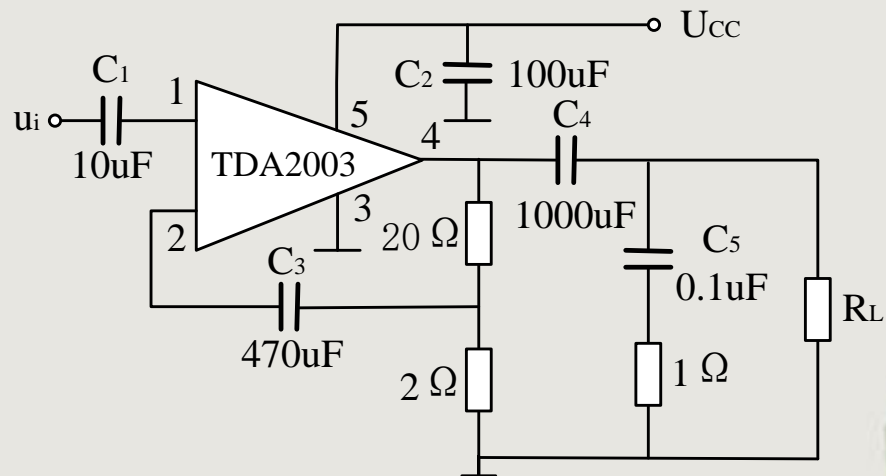


三、集成功率放大器

集成功放具有体积小、重量轻、可靠性好、价格低、温度系数好、功耗低、非线性失真小等优点。使用集成功放只需外接少量的阻容元件。TDA2003属中功率音频集成功放，最大输出功率为6W(负载为4Ω)，电源电压范围为6~20V，其输出级采用前述OTL互补对称放大电路。



- 1.同相输入
- 2.反相输入
- 3.地
- 4.输出
- 5.电源电压





§ 11.3 差分放大电路

一、零点漂移的产生与抑制

二、差动放大电路的工作原理

主要讨论的问题有：

差模电压放大倍数、共模电压放大倍数

差模输入电阻

输出电阻

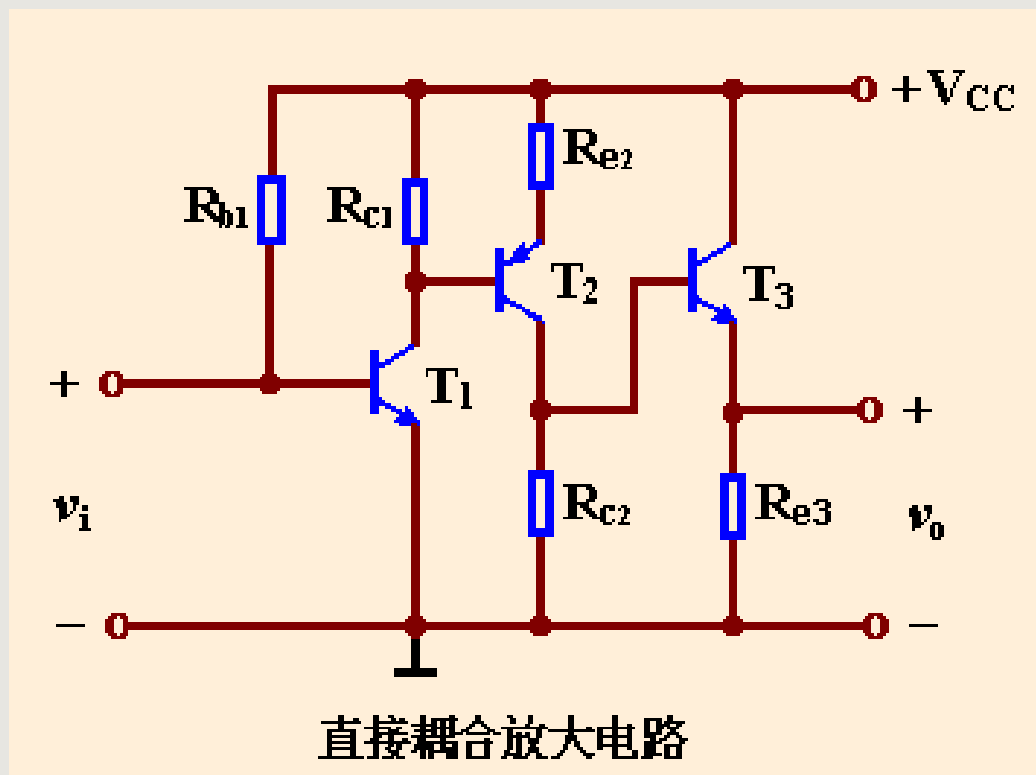
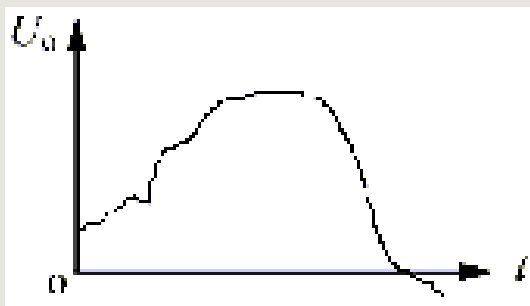


一、零点漂移的产生与抑制

零点漂移（零漂）：当直流放大电路的输入信号为零时，输出信号不为零（或不等于一个恒定的直流值），而是无规则地波动。

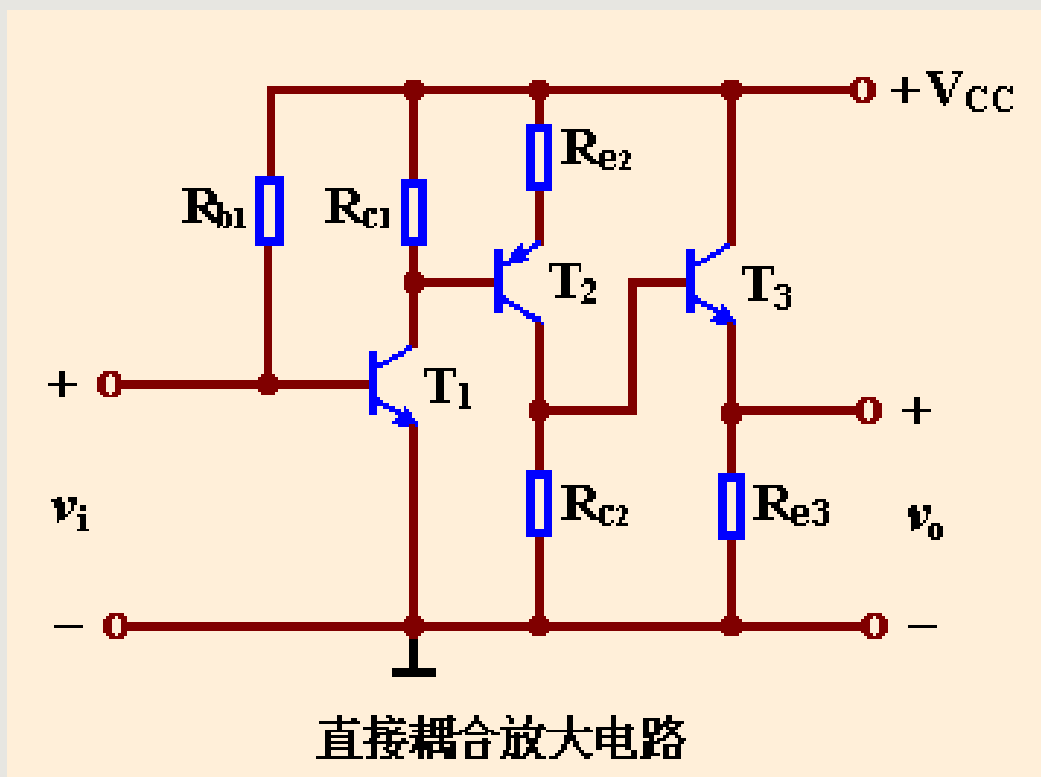
1. 零漂现象：

输入 $u_i=0$ 时，输出有缓慢变化的电压产生。



2. 产生零漂的原因:

由温度变化引起 当温度变化时，第一级放大器的静态工作点会发生微小变化，因为是直接耦合，前级产生的微小的漂移经过多级放大后送至末级，造成输出端产生较大的电压波动。因而零点漂移也叫**温漂**。

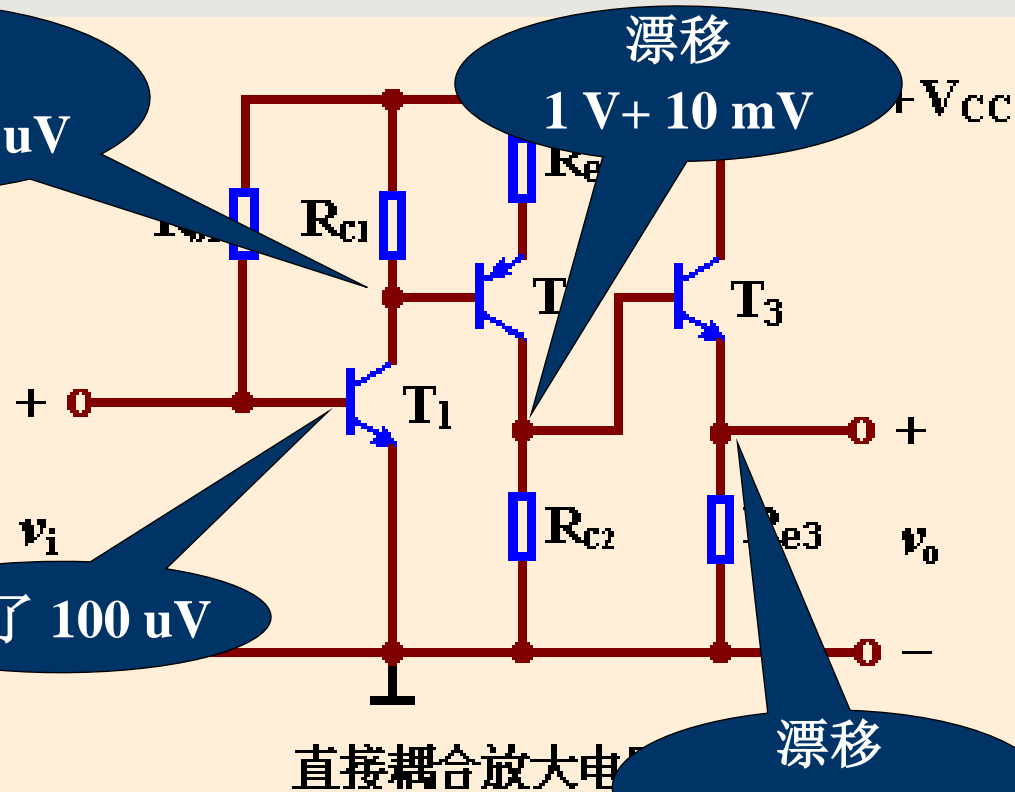


例

假设 $A_{V1} = 100$,
 $A_{V2} = 100$, $A_{V3} = 1$ 。

若第一级漂了 $100 \mu\text{V}$,
 则第一级输出漂移
 10 mV , 第二级输
 出漂移 1 V 。

若第二级也漂了 $100 \mu\text{V}$,
 则输出漂移 $1 \text{ V} + 10 \text{ mV}$ 。



👉 第一级是关键



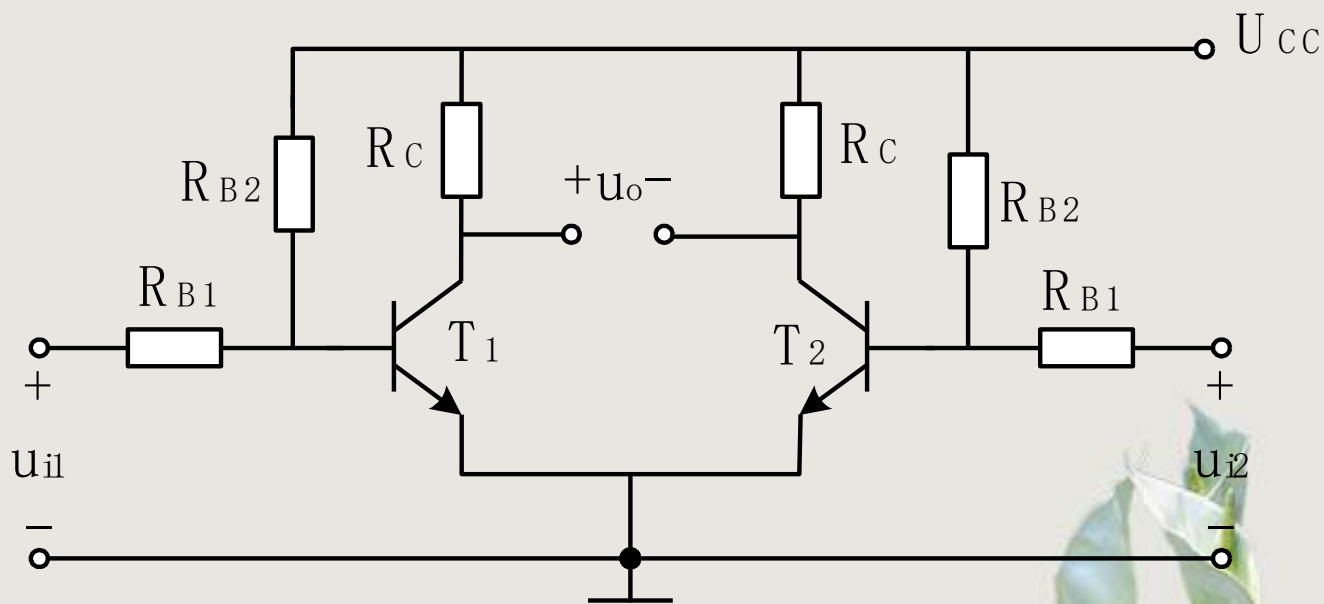
3. 减小零漂的措施

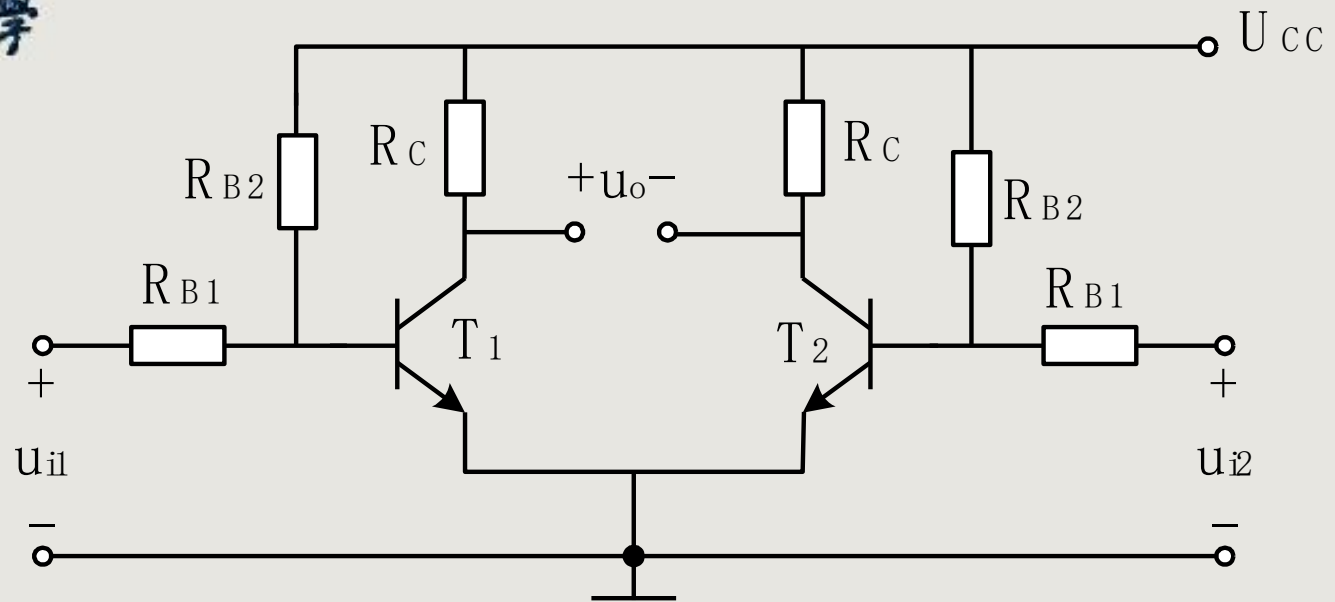
- 用非线性元件进行温度补偿
- 采用差分式放大电路

二、差动放大电路的工作原理

1. 基本差放电路

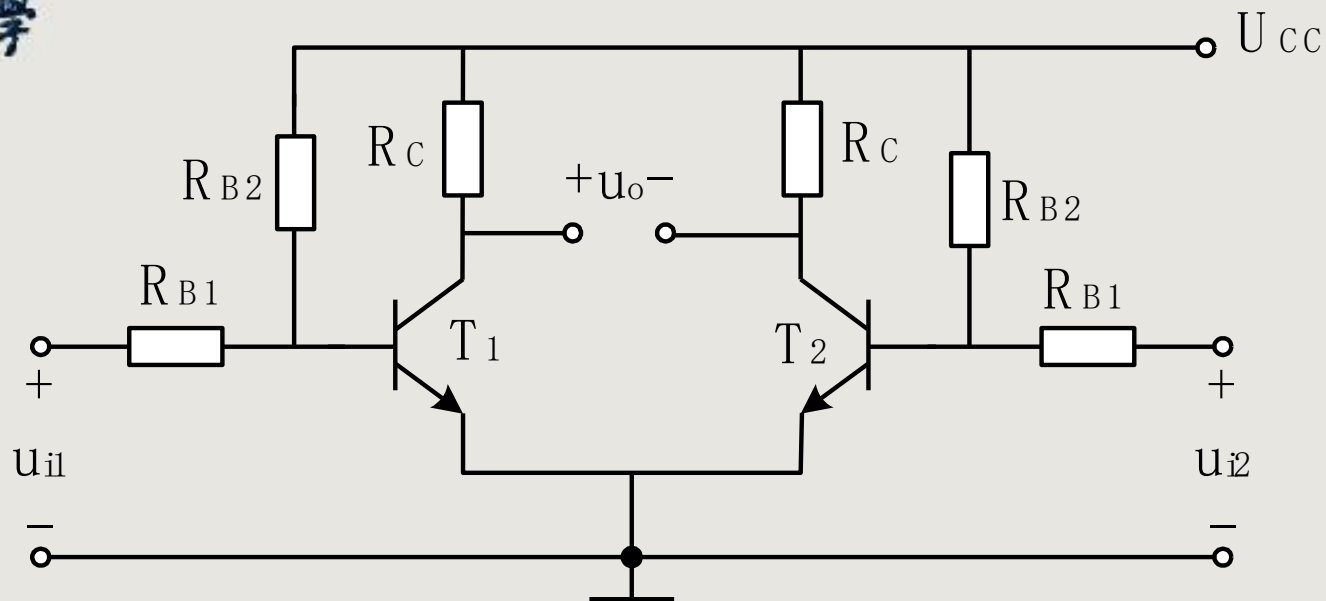
T_1 、 T_2 是两只特性完全相同的三极管，电路参数也完全对称。





当 $u_{i1}=u_{i2}=0$ 时， $V_{c1}=V_{c2}$ ， $u_o=V_{c1}-V_{c2}=0$ 。温度或电源电压变化时， V_{c1} 和 V_{c2} 同时变化，且变化的数值相等，输出电压保持为零，从而抑制了零点漂移。



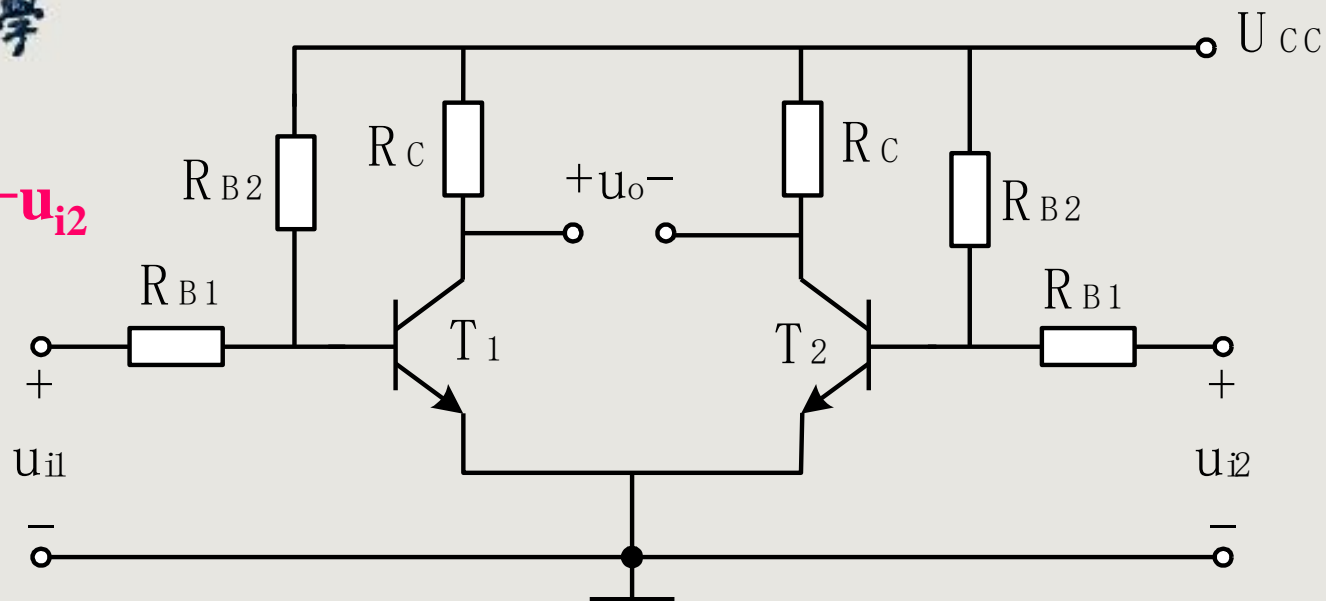


当有信号输入时，分以下几种情况分析：

(1) 共模输入 $u_{i1}=u_{i2}$

共模输入时，差动放大电路的两半电路中的电流和电压变化完全相同，输出电压为零，即差动放大电路的共模放大倍数为零。

(2) 差模输入 $u_{i1} = -u_{i2}$



设 $u_{i1} > 0, u_{i2} < 0$, 则

u_{i1} 使 T_1 的集电极电流变化 Δi_{C1} (正值), 集电极电位变化 Δu_{C1} (负值),

u_{i2} 使 T_2 的集电极电流变化 Δi_{C2} (负值), 集电极电位变化 Δu_{C2} (正值),

由于 $|u_{i1}| = |u_{i2}|$, 故 $|\Delta u_{C1}| = |\Delta u_{C2}|$,

$$u_o = \Delta u_{C1} - \Delta u_{C2} = 2 \Delta u_{C1} = 2 A_u u_{i1}$$

A_u 为单管电压放大倍数, 其定义为 $A_u = \frac{\Delta u_{C1}}{u_{i1}}$



(3) 比较输入

两个输入电压，既非共模，又非差模，它们的大小和极性是任意的，这种输入形式称为比较输入

$$u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$$

共模分量

$$u_{i1} = u_{ic} + u_{id}$$

$$u_{id} = \frac{1}{2}(u_{i1} - u_{i2})$$

差模分量

$$u_{i2} = u_{ic} - u_{id}$$

电路对共模分量没有放大作用，只对差模分量有放大作用，且

$$u_o = 2A_u u_{id} = A_u (u_{i1} - u_{i2})$$

差动放大电路的输出电压仅与输入电压的差值有关。



2. 典型差分放大电路分析

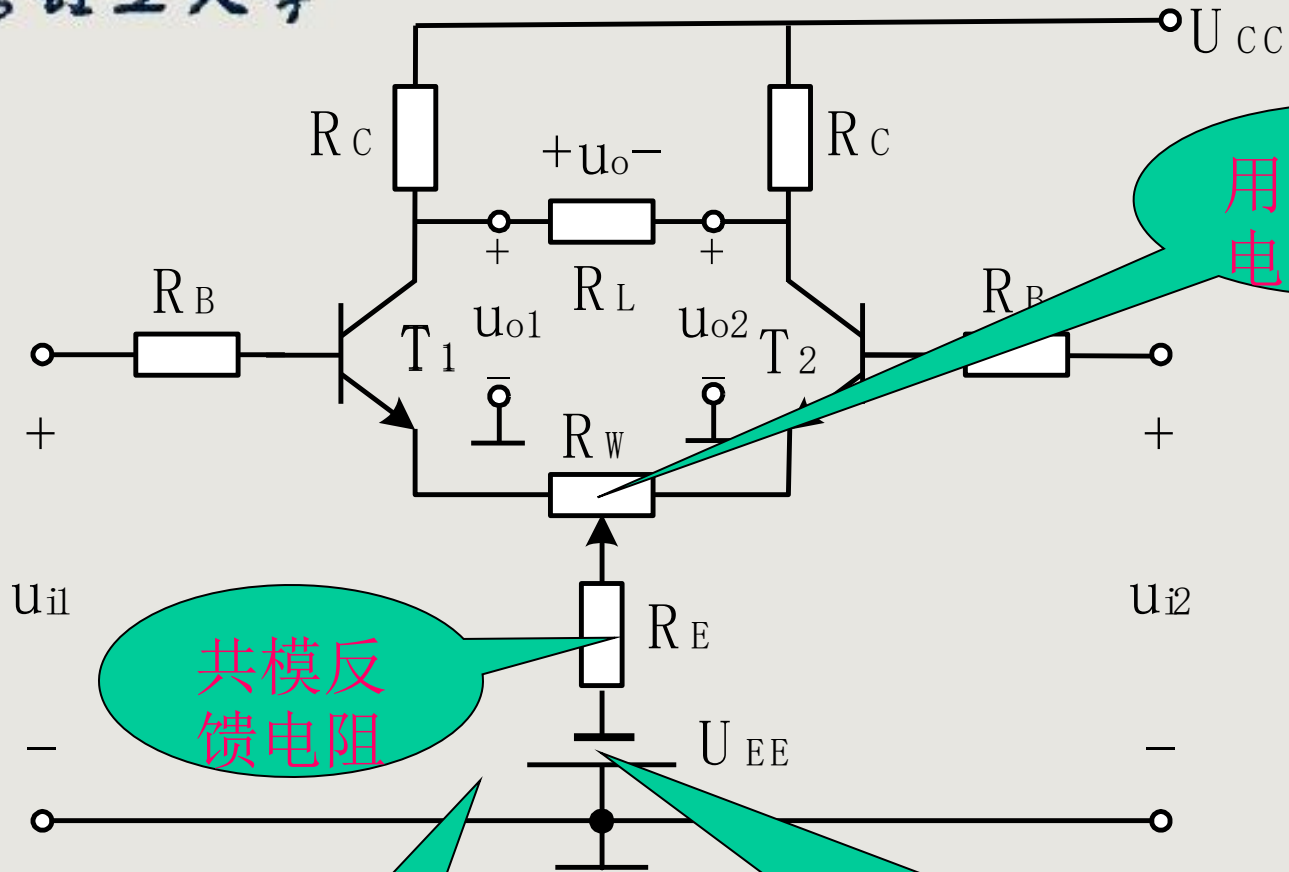
(1) 电路结构

基本差动放大电路是依靠电路和三极管的对称来抑制零点漂移。

有二个问题

- a. 三极管很难完全对称；
- b. 对每个三极管而言，集电极电位的漂移并未受到抑制，当采用单端输出时，漂移根本无法抑制；





用于微调
电路对称

共模反
馈电阻

补偿 R_E 两端的直流
压降，从而获得合
适的静态工作点

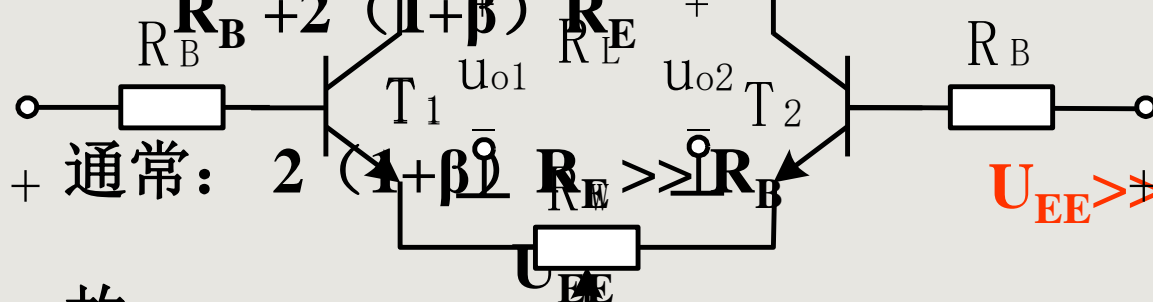
长尾式差动放大电路

(2) 静态分析

单边电路等效：电阻 R_E 上的电流是 $2I_E$ ； R_P 与 R_E 相比很小，可忽略。

$$R_B I_{BQ} + U_{BEQ} + 2R_E I_{EQ} = U_{EE}$$

$$I_{BQ} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{R_B + 2(1+\beta)R_E}$$



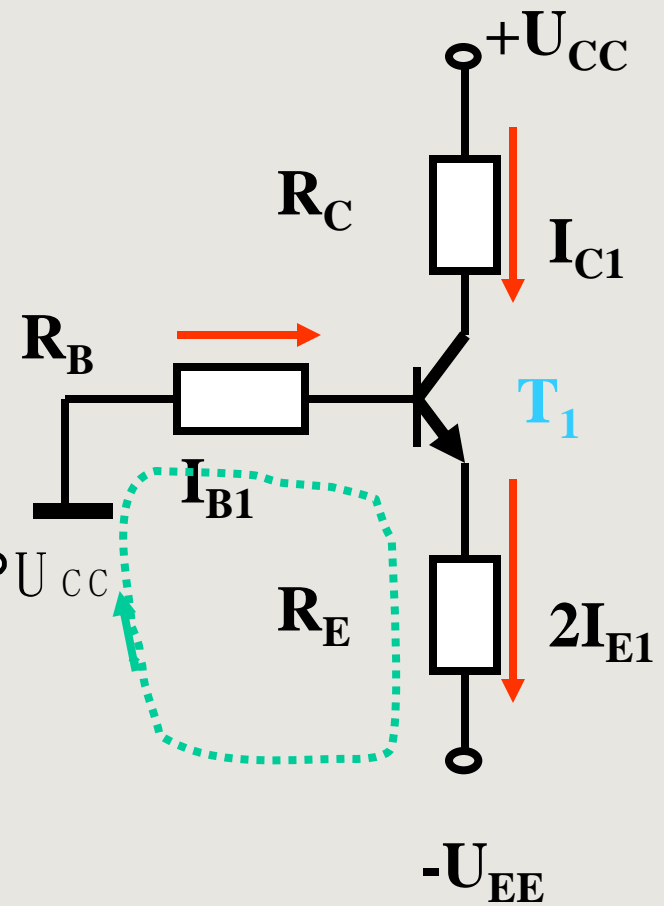
通常： $2(1+\beta)R_E \gg RB$

U_{i1}

$$I_B = I_{BQ} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{2(1+\beta)R_E}$$

$$I_{CQ} \approx \beta I_{BQ}$$

$$U_{CQ} = U_{CC} - I_{CQ}R_C \quad U_{EE} \text{ (对地电压)}$$

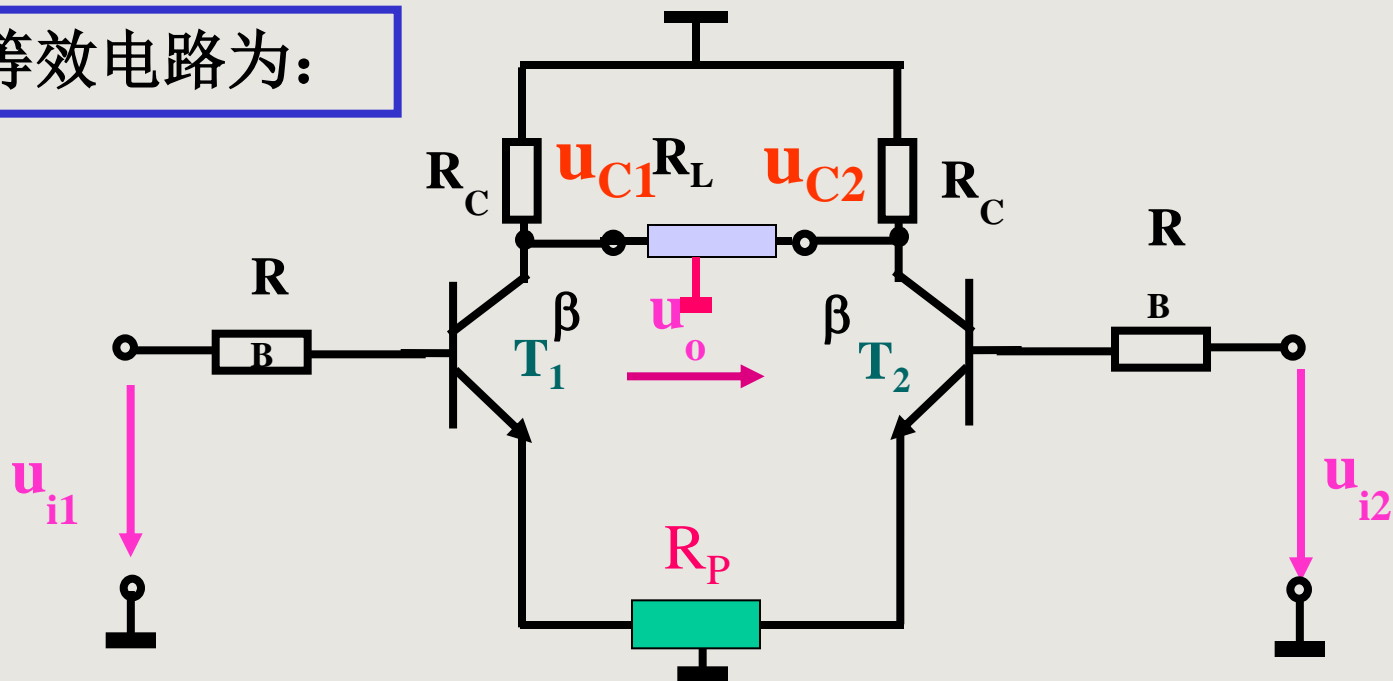


(3) 动态分析:

A. 差模输入 ($u_{i1} = -u_{i2}$)

因 u_{i1} , u_{i2} 引起 I_{E1} 、 I_{E2} 变化量大小相等、方向相反, 故电流 I_E 不变, R_E 上电压不变, 即 R_E 对差模输入信号而言是短路的。

动态等效电路为:



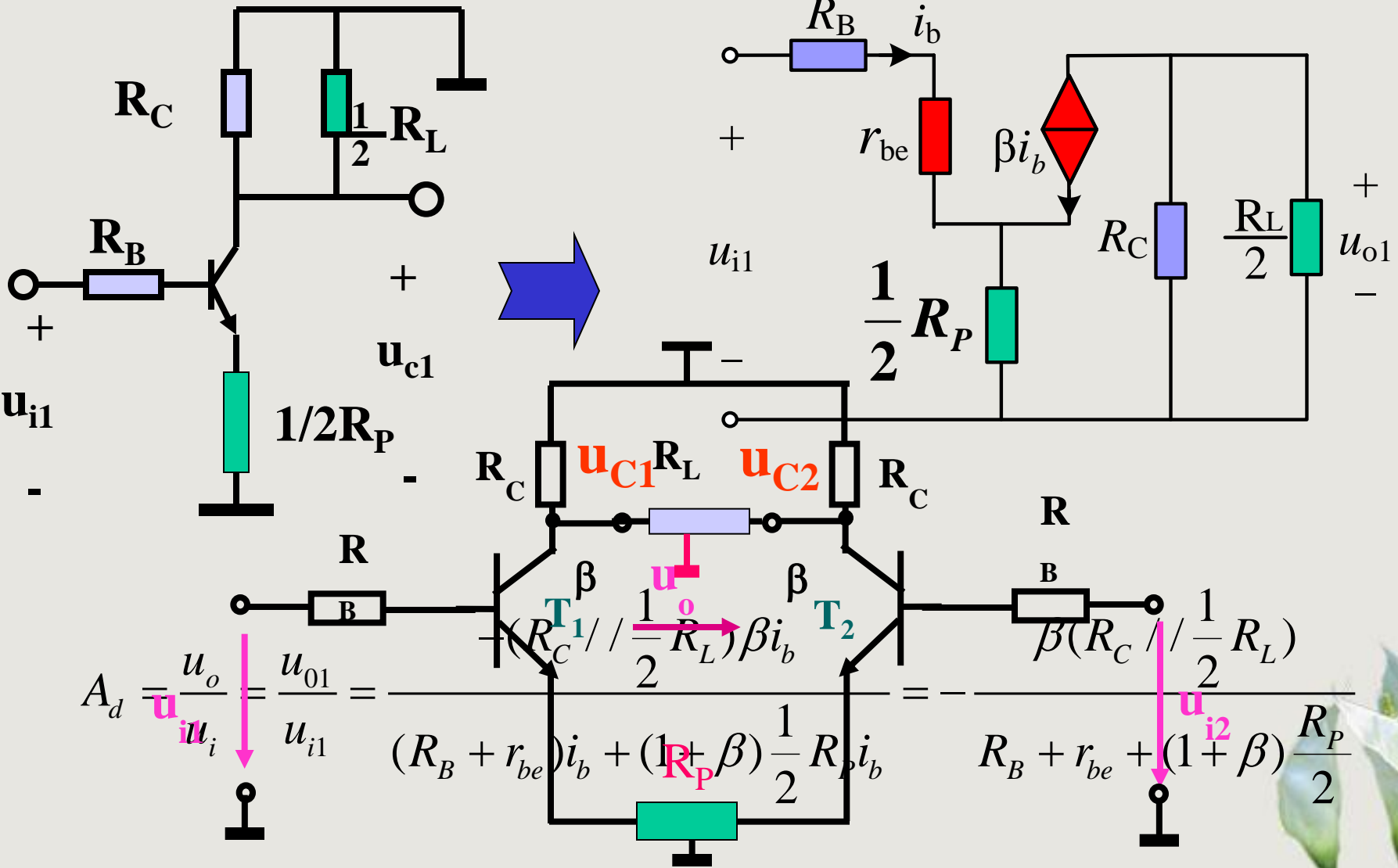
因对称, R_L 中点电位为零



单边电路等效为:

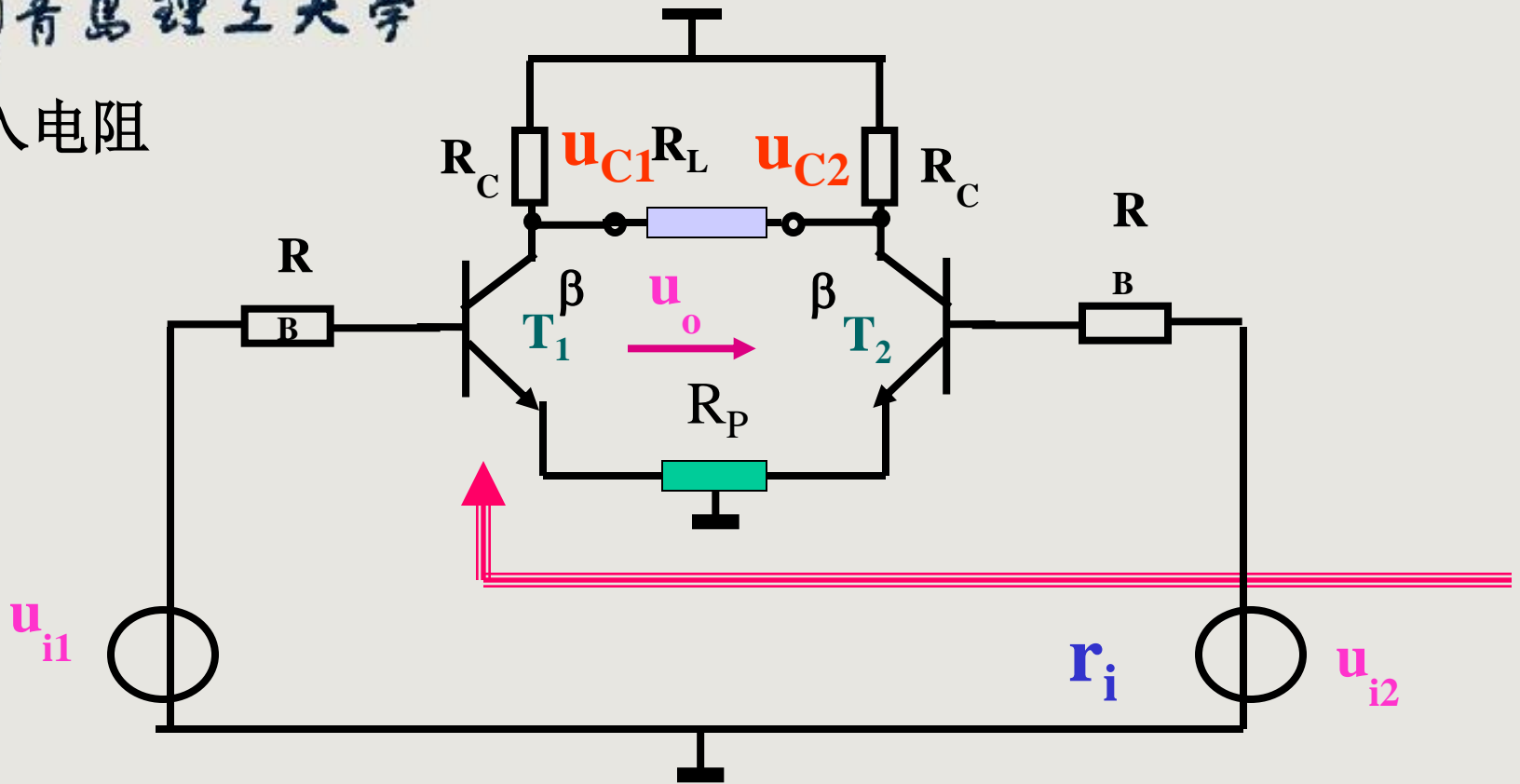
$$u_i = u_{i1} - u_{i2} = 2 u_{i1}$$

$$u_o = u_{o1} - u_{o2} = 2 u_{o1}$$





输入电阻

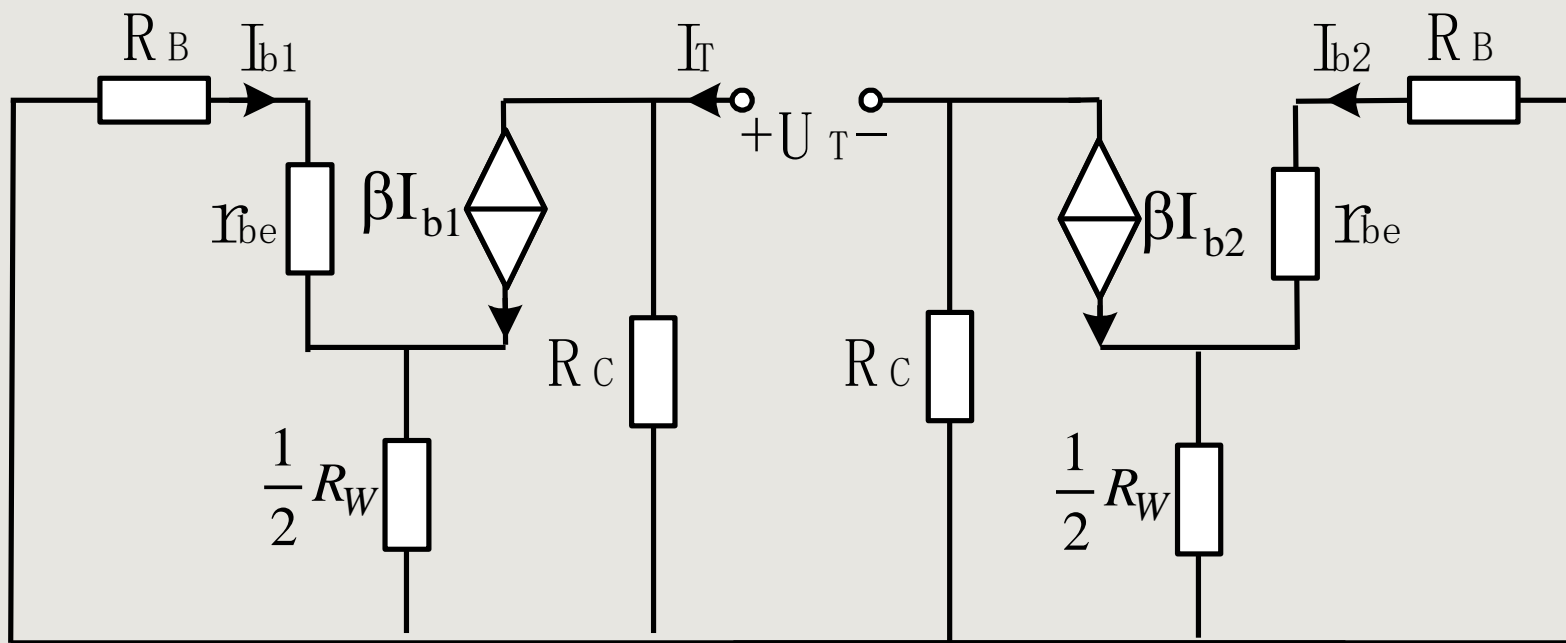


$$r_i = \frac{u_i}{i_i} = \frac{2u_{i1}}{i_i} = 2r_{i1} = 2[R_B + r_{be} + (1 + \beta) \frac{1}{2} R_P]$$



输出电阻

求输出电阻的微变等效电路



对基极回路，列KVL方程，可得： $I_{b1}=I_{b2}=0$ ，所以受控电流源可看作开路

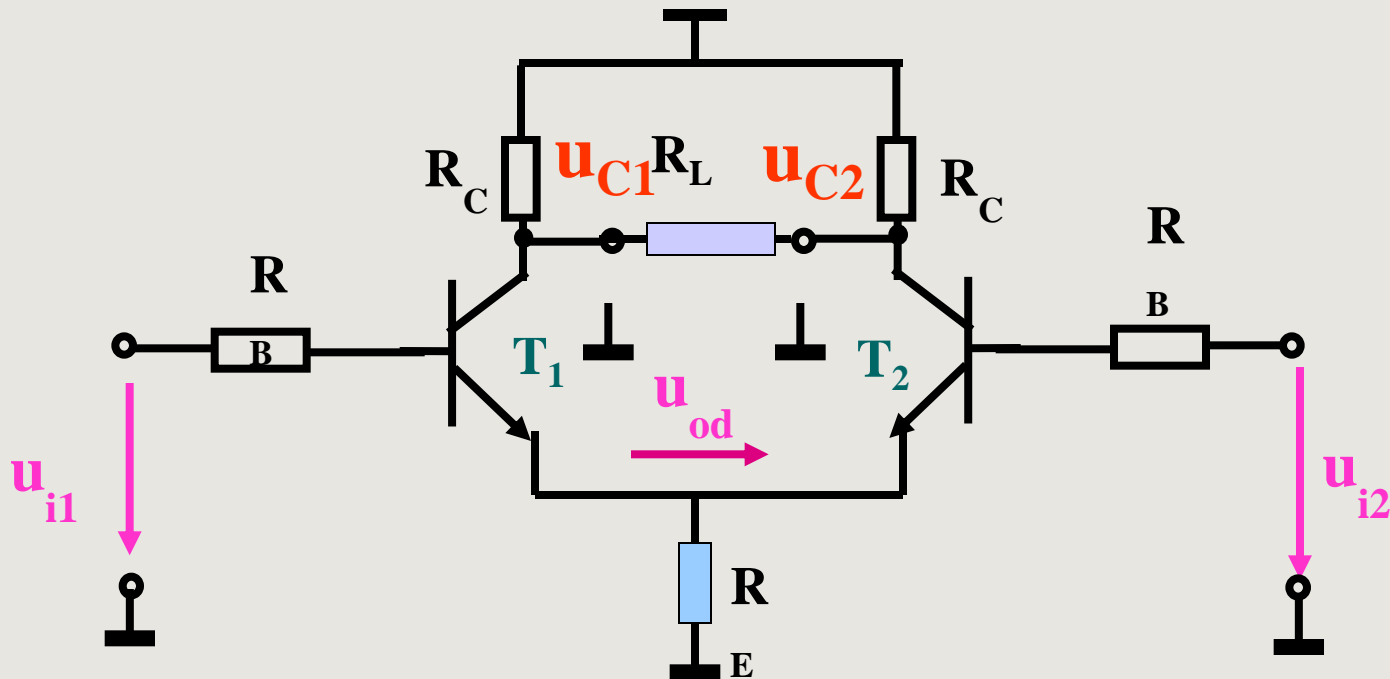
$$r_0 = \frac{U_T}{I_T} = 2R_C$$



B: 共模輸入 ($u_{i1} = u_{i2}$)

电路对称 $u_{C1} = u_{C2}$ 故: $u_{OC} = u_{C1} - u_{C2} = 0$

故: $A_C = \frac{u_{OC}}{u_i} = 0$ 实际电路 $A_C \neq 0$, 但很小



结论：差动放大电路能放大差模信号而抑制共模信号。

为了衡量抑制共模信号的能力—引入共模抑制比

共模抑制比(CMRR)的定义

CMRR — Common Mode Rejection Ratio

$$K_{CMRR} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{db(分贝)}$$

本电路 $K_{CMRR} \rightarrow \infty$

例：若 $A_d = -100, A_c = 0.1$

则 $K_{CMRR} = 20 \log | (-100)/0.1 | = 60 \text{ db}$





第11章：前8个练习题做会.

