

教 案

2025-2026 学年第二学期

课程名称 模拟电子技术

专业班级 电气自动化 251、3+251

总学时数 72 学时

任课教师 林凯燕

课程基本信息

课程名称	模拟电子技术			
课程性质	专业基础课	学分	4	
学时	总学时：72 学时。其中：课堂讲授 54 学时；实训/实验 18 学时；			
开课部门	机电工程系	任课教师	林凯燕	
授课专业、班级	电气自动化 251、3+251 班	开课学期	2025-2026 第二学期	
成绩评定	平时成绩占 40%；期末成绩占 60 %	考核方式	考试	
选用教材	书 名	主 编	出版社	出版日期
	模拟电子技术	胡宴如	高等教育出版社	2019 年
本课程在本专业人才培养方案中的地位和作用	<p>“模拟电子技术”是电子信息与电气工程、自动化等电类专业的专业基础课，具有较深的理论基础与较强的工程实践性。学生通过本课程的学习，能够对电子线路有理性认识，对模拟电子技术理论有基本理解，学会电子职业操作技能，初步能分析和调试模拟电子装置，并为学生学习后继课程和继续自学打下良好的基础。</p>			
本课程教学目标	<p>1、知识目标：熟悉常用模拟电子器件的性能特点及应用常识，具有测试常用电子器件的能力；掌握常见模拟功能电路组成、工作原理、性能特点及其分析方法；</p> <p>2、能力目标：能运用所学知识和技能解决问题，通过实验课学习具有正确使用常用电子仪器测量电路参数及排除故障的能力。把握整体知识结构，发展逻辑思维能力。</p> <p>3、职业素养目标：培养严谨求实的科学态度，养成独立思考的学习习惯和良好的职业道德。</p>			
素质(思政)内容与要求	<p>通过电子技术发展史的学习帮助学生树立科学发展的世界观，通过对我国电子技术的发展情况的学习，强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感，激励学生树立高远志向。</p>			
学生用主要参考资料	<p>宋学君等编：《模拟电子线路》 科学出版社。</p> <p>康华光等编：《电子技术基础》模拟部分 高等教育出版社。</p> <p>叶致诚编：《电子技术基础实验》 高等教育出版社。</p> <p>谢红等编：《电子技术基础学习指导与习题解答》 哈尔滨工程大学出版社。</p>			

《模拟电子技术》教案

课题：第一章 第 1.1 节 半导体基础知识

目的要求： 1. 了解本征半导体的结构和特征
2. 掌握杂质半导体的结构和特征
3. 牢固掌握 P 型和 N 型半导体的特点

重点难点： 重点 P 型和 N 型半导体的特点
难点 本征激发

教学方法： 结合电子课件讲解

教具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问 1. 三、四、五价化学元素有哪些？
2. 惰性气体有何特点？

课堂讨论 1. 何谓本征半导体？其导电能力由什么因素决定。
2. P 型和 N 型半导体的特点？
3. 半导体的导电能力与哪些因素有关？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

引言

模拟电子电路的核心是半导体器件，而半导体器件是由半导体材料制成的。因此，我们必须首先了解半导体的有关知识，尤其应当了解半导体的导电特性。

1.1.1 导体、绝缘和半导体

物质按其导电能力的强弱，可分为导体、绝缘体和半导体。

一. 导体

导电能力很强的物质，叫导体。如低价元素铜、铁、铝等。

绝缘体

导电能力很弱，基本上不导电的物质，叫绝缘体。如高价惰性气体和橡胶、陶瓷、塑料等高分子材料等。

三. 半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，叫半导体。如硅、锗等四价元素，其简化原子结构模型如图 1.1 所示。

为什么物质的导电能力有如此大的差别呢？这与它们的原子结构有关，即与它们的原子最外层的电子受其原子核束缚力的强弱有关。

1.1.2 本征半导体

纯净且呈现晶体结构的半导体，叫本征半导体。

一. 本征半导体结构

通过特殊工艺加工，可以使硅或锗元素的原子之间靠共有电子对—共价键，形成非常规则的晶体点阵结构。结果每个原子外层相对排满 8 个电子，形成相对稳定的状态。这种结

构整齐且单一的纯净半导体，叫本征半导体。如图 1-2 所示

二. 本征激发

在常温下，由于热能的激发，使本征半导体共价键中的价电子获得足够的能量而脱离共价键的束缚，成为自由电子。同时，在共价键中留下一个空位，叫空穴。这种产生自由电子和空穴对的现象，叫本征激发。温度一定，自由电子和空穴对的浓度也一定。

由于本征激发而在本征半导体中存在一定浓度的自由电子（带负电荷）和空穴（带正电荷）对，故其具有导电能力，但其导电能力有限。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入适量且适当的其他元素（叫杂质元素），就形成杂质半导体，其导电能力将大大增强。

一. N型半导体

在硅或锗本征半导体中掺入适量的五价元素（如磷），则磷原子与其周围相邻的四个硅或锗原子之间形成共价键后，还多出一个电子，这个多出的电子极易成为自由电子参与导电。同时，因本征激发还产生自由电子和空穴对。结果，自由电子成为多数载流子（称多子），空穴成为少数载流子（称少子）。这种主要依靠多数载流子自由电子导电的杂质半导体，叫 N 型半导体，如图 1-4 所示。

P 型半导体

在硅或锗本征半导体中，掺入适量的三价元素（如硼），则硼原子与周围的四个硅或锗原子形成共价键后，还留有一个空穴。同时，因本征激发还产生自由电子和空穴对。结果，空穴成为多子，自由电子成为少子。这种主要依靠多子空穴导电的杂质半导体，叫 P 型半导体。如图 1-5 所示。

无外电场作用，本征半导体和杂质半导体对外均呈现电中性，其内部无电流。

小结

半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。

在一定温度下，本征半导体因本征激发而产生自由电子和空穴对，故其有一定的导电能力。

本征半导体的导电能力主要由温度决定；杂质半导体的导电能力主要由所掺杂质的浓度决定。

P 型半导体中空穴是多子，自由电子是少子。N 型半导体中自由电子是多子，空穴是少子。

半导体的导电能力与温度、光强、杂质浓度和材料性质有关。

课题：第一章 第 1.2 节 PN 结及半导体二极管

- 目的要求：**
1. 理解 PN 结的形成机理。
 2. 掌握 PN 结、二极管的单向导电特性
 3. 了解稳压二极管和特种二极管的特点
 4. 了解二极管和稳压二极管的用途

重点难点: 重点 二极管的结构、特征和参数
难点 PN 结的形成

教学方法

手段: 结合电子课件讲解

教具: 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问 1. 半导体的导电能力与哪些因素有关?
2. P 型和 N 型半导体的特点?

课堂讨论 1. 同温下, 硅二极管和锗二极管的特性相同吗?
2. 同一只二极管, 当温度不同时, 其特性相同吗?
3. PN 结为何具有单向导电特性?

布置作业:

课时分配: 2 节

教学过程:

引言

本征半导体、P 型和 N 型半导体都不能单独构成半导体器件, PN 结才是构成半导体器件的基本单元。

1.2.1 PN 结的形成

在特殊工艺条件下, P 型和 N 型半导体交界面处所形成的空间电荷区, 称为 PN 结。

一. 多数载流子的扩散

在 P 型和 N 型半导体交界面两侧, 电子和空穴的浓度差很大。在浓度差的作用下, P 区中的多子空穴向 N 区扩散, 在 P 区一侧留下杂质负离子, 在 N 区一侧集中正电荷; 同时, N 区中的多子自由电子向 P 区扩散, 在 N 区一侧留下杂质正离子, 在 P 区一侧集中负电荷。结果, 在 P 型和 N 型半导体交界面处形成空间电荷区, 自建内电场 $\epsilon_{内}$ (从 N 区指向 P 区), 如图 1-6 所示。

二. 少数载流子的漂移

在内电场的作用下, P 区中的少子自由电子向 N 区漂移, 而 N 区中的少子空穴向 P 区漂移, 使内电场削弱。

三. 扩散与漂移的动态平衡

当内电场达到一定值时, 多子的扩散运动与少子的漂移运动达到动态平衡时, 空间电荷区不再变化, 这个空间电荷区, 就称为 PN 结。

空间电荷区无载流子停留, 故曰耗尽层, 又叫阻挡层或势垒层。无外电场作用时, PN 结内部虽有载流子运动, 但无定向电流形成。

1.2.2 PN 结的单向导电特性

一. PN 结加正向电压

PN 结加正向电压 (正偏) 时, 外电场与内电场反方向, 使空间电荷区变窄, 多子的扩散运动远大于少子的漂移运动, 由浓度大的多子扩散形成较大的正向电流, PN 结处于导通状态。此时, 其正向通态电阻很小, 正向通态管压降也很小, 如图 1-7 (a) 所示。

二. PN 结加反向电压

PN 结加反向电压 (反偏) 时, 外电场与内电场同方向, 使空间电荷区变宽, 多子扩散运动大大减弱, 而少子的漂移运动相对加强, 由浓度很小的少子漂移形成很小的反向饱和电流 I_s , PN 结处于截止状态。此时, 反向电阻很大。如图 1-7 (b) 所示。

PN 结正偏时导通，反偏时截止，故具有单向导电特性。其特性曲线如图 1-8 所示，电压 U 与电流 I 的关系式为

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_F}{U_T}} - 1 \right)$$

三. 反向击穿

当 PN 结所加反向电压达到 U_B 时，其反向电流急剧增加，叫反向击穿， U_B 叫击穿电压。

PN 结有雪崩击穿和齐纳击穿两种击穿状态。无论处于何种击穿时，反向电流只要不超过允许值，去掉反向电源后，仍能恢复单向导电性。

四. PN 结的电容效应

1. 势垒电容 C_T

当 PN 结的反偏电压变化时，空间电荷区随之变宽（相当于充入电荷）或变窄（相当于放出电荷），故具有电容效应，叫势垒电容，用 C_T 表示。

2. 扩散电容 C_D

当 PN 结的正偏电压变化时，P 区和 N 区中多子的浓度和浓度梯度均随之变化，也具有一定的电容效应，叫扩散电容，用 C_D 表示

3. PN 结的结电容 C_J

$$C_J = C_T + C_D$$

正偏时， C_D 起主要作用；反偏时， C_T 起主要作用。

1.2.3 半导体二极管

一. 二极管的结构

给 PN 结加上两个引线（管脚）和管壳即成二极管，接 P 区的管脚称阳极，接 N 区的管脚称阴极。

二. 二极管的类型

1. 按结构区分，如图 1-2 所示

点接触型：PN 结面积小，工作电流小，PN 结电容小，工作频率高。

面接触型：PN 结面积大，工作电流大，PN 结电容大，工作频率低。

2. 按工作频率区分

有高频管和低频管。

3. 按功率区分

有大功率管和小功率管。

4. 按用途区分

有普通管、整流管、稳压管、开关管等等。

三. 二极管的特性

1. 正向特性，与 PN 结相同

2. 反向特性，与 PN 结相同

3. 击穿特性，与 PN 结相同

4. 温度特性，温度升高时，二极管的正反向特性曲线均向纵轴靠近，如图 1-13 所示。

四. 主要参数

1. 最大整流电流 I_F ，又叫额定电流。

2. 最大反向工作电压 U_R ，又叫额定电压。

3. 反向饱和电流 I_S 。

4. 反向电流 I_R ，二极管未击穿时的电流值。

5. 最高工作频率 f_M 。

6. 直流电阻 R_D : $R_D=U_D/I_F$, 如图 1-14 所示。

7. 交流电阻 r_d : $R_D=\Delta U_D/\Delta I_D=du_d/di_d$, 如图 1-15 所示。

r_d 系指某一工作点的动态电阻。常温下, $r_d=U_T/I_D=26(\text{mv})/I_{DQ}$ I_{DQ} 为直流工作点的电流, 单位为 mA

1.2.4 稳压二极管

一. 结构

结构与普通二极管相似, 只是掺杂浓度比普通二极管大得多, 通常为硅材料稳压二极管。

二. 特性

正向特性曲线与普通二极管的正向特性曲线相似; 反向未击穿的特性曲线与普通二极管的反向击穿时的特性曲线相似。但稳压二极管的反向击穿特性曲线很陡。如图 1-16 所示。

三. 参数

1. 稳定电压 U_Z

2. 稳定电流 I_Z

3. 额定功率 P_Z

4. 动态电阻 r_z , $r_z=\Delta U_Z/\Delta I_Z$, r_z 很小。

5. 电压温度系数 α 。 $\alpha=\Delta U_Z/U_t \times 100\%$ 。 $U_Z>7V$ 时, α 为正温度系数; $U_Z<5V$ 时, α 为负温度系数; $5V<U_Z<7V$ 时, α 受温度的影响很小, $\alpha \approx 0$ 。

1.2.5 特种二极管

一. 发光二极管

将电能转换为光能的半导体器件。正偏时, 有正向电流通过而发光, 其正向通态管压降为 1.8—2.2V。

二. 光电二极管

将光能转换为电能的半导体器件。反向偏置下, 当光线强弱改变时, 光电二极管的反向电流随之改变。

三. 光电耦合器

光电耦合器由光电二极管和发光二极管组合封装而成。发光二极管为输入端, 光电二极管输出端。

四. 变容二极管

变容二极管的势垒电容随外加反向电压变化而变化。

小结

1. PN 结具有单向导电特性, 用 PN 结可以制造成多种多样的半导体器件。
2. 普通二极管、稳压二极管、特种二极管虽然都是由一个 PN 结构成的, 但其内部结构并不完全相同, 故其特性也不相同。
3. 二极管的特性和参数与温度的关系非常密切, 使用时应特别注意。
4. 使用二极管时, 不能超过其参数规定的额度。

课题：第一章 第 1.3 节 半导体三极管

- 目的要求：**
1. 掌握三极管的结构特点和类型。
 2. 牢固掌握三极管的外部工作条件。
 3. 掌握三极管的特性曲线。
 4. 了解三极管的主要参数及其与温度的关系。

- 重点难点：**
- 重点 三极管的特性
难点 三极管电流放大原理

教学方法

手段： 结合电子课件讲解

教具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问 1. 二极管具有什么特点？为什么？

2. 温度、管材对二极管的特性和参数有何影响？

课堂讨论 1. 三极管具有电流放大作用的内部依据和外部条件？

2. 三极管的特性曲线有三个区域，工作于各区域的条件？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观

强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

引言

半导体三极管又称为晶体管或双极性三极管，是组成各种电子电路的核心器件。

1.3.1 三极管的结构和类型

一. 结构

三极管有两个结，三个电极，三个区组成，如图 1-29 所示。

两个结：发射结和集电结

三个极：发射极 E，基极 B，和集电极 C

三个区：发射区；参杂浓度大。

基区；很薄，参杂浓度很小。

集电区：参杂浓度小，但面积大。

这种特殊结构是三极管具有电流放大作用的内部依据。

二. 类型

1. 按结构区分：有 NPN 型和 PNP 型。

2. 按材料区分：有硅三极管和锗三极管。

3. 按工作频率区分：有高频三极管和低频三极管。

4. 按功率大小区分：有大功率三极管和小功率三极管。

三. 工作条件 三极管有电流放大作用大外部条件。

1. NPN 型三极管： $V_C > V_B > V_E$

2. PNP 型三极管： $V_C < V_B < V_E$

无论何型三极管，其外部工作条件为：发射极正偏，集电极反偏

1.3.2 三极管的三种连接方式

1. 共发射极接法：发射极为交流输入和输出信号的公共端。
2. 共集电极接法：集电极为交流输入和输出信号的公共端。
3. 共基极接法：基极为交流输入和输出信号的公共端。

如图 1-30 所示。

1.3.3 三极管的电流放大原理

一. 载流子传输过程

以 NPN 型三极管为例进行分析，如图 1-31 所示。

1. 发射。发射结正偏，发射区中的多子电子大量地向基区扩散，形成发射极电流。
2. 复合。从发射区扩散到基区的电子，很少一部分与基区中的空穴相复合，形成基极电流的主要部分 I_{CN} 。
3. 收集。从发射区扩散到基区的电子，除很少部分被复合掉外，绝大部分电子向集电结扩散，且在集电结反偏电压的作用下，迅速漂移过集电结被集电区所收集，形成集电极电流的主要部分。同时，集电区少子空穴在集电结反偏电压的作用下向基区漂移，形成集电结反向饱和电流 I_{CBO} ，它是集电极电流的极小部分，也是基极电流的一部分。如图 1-32 所示。

二. 各极电流的关系

$$\begin{aligned} I_C &= I_{CN} + I_{CBO} & I_{CN} &= I_C - I_{CBO} \\ I_B &= I_{BN} - I_{CBO} & I_{BN} &= I_B + I_{CBO} \\ I_E &\approx I_{CN} + I_{BN} = I_C - I_{CBO} + I_B + I_{CBO} \\ I_E &= I_C + I_B \end{aligned}$$

三. 电流放大系数

1. 直流电流放大系数 β

$$\beta = I_{CN} / I_{BN} = (I_C - I_{CBO}) / (I_B + I_{CBO}) \approx I_C / I_B \quad (I_C \gg I_B \gg I_{CBO})$$

2. 交流电流放大系数 β

$$\beta \approx \Delta I_C / \Delta I_B$$

3. 穿透电流 I_{CEO}

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

1.3.4 三极管的特性曲线

一. 输入特性

$$i_B = f(u_{be}) \mid U_{CE} = \text{常数}$$

1. $U_{CE} = 0V$ 时

三极管的输入特性曲线，相当于二极管的正向特性曲线，如图 1-34 所示。

2. $U_{CE} = 1V$ 时

三极管的输入特性曲线将向右移。

3. $U_{CE} > 1V$ 时

三极管的特性曲线几乎与 $U_{CE} = 1V$ 时的输入特性曲线重合。

二. 输出特性

$$i_C = f(u_{ce}) \mid I_B = \text{常数}$$

输出特性曲线有三个主要区域。如图 1-35 所示。

1. 截止区

$U_{BE} \leq 0V, I_B \leq 0, I_C = I_{CEO}$, 三极管几乎不导通, 叫截止状态。

2. 放大区

$U_{BE} > 0.5 - 0.7$ (硅管), $U_{BE} > 0.1 - 0.3V$ (锗管), $U_{CE} \gg U_{BE}$, 当 U_{CE} 不变时,

$$I_C = \beta I_B$$

3. 饱和区

$U_{BE} > 0.5 - 0.7$ (硅管), $U_{BE} > 0.1 - 0.3V$ (锗管), $U_{CE} < U_{BE}, I_C < \beta I_B, I_C \neq \beta I_B,$

$U_{CE} > 0, U_{CES} = 0.3V$ (硅管), $U_{CES} = 0.1V$ (锗管)。

1.3.5 三极管的主要参数

一. 电流放大系数

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \mid U_{CE} = \text{常数}$$

二. 极间反向电流

$$I_{CBO}$$

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

三. 极限参数

1. 集电极最大允许电流 I_{CM}

2. 集电极最大允许功率损耗 P_{CM}

$$P_{CM} = U_{CE} I_C$$

3. 反向击穿电压

$$BU_{CBO} > BU_{CEO} > BU_{EBO}$$

为了安全起见, 应使三极管的 $U_{CE} < BU_{CEO}$

四. 温度对三极管参数的影响

1. 对 V_{BE} 有影响

2. 对 I_{CBO} 和 I_{CEO} 有影响

3. 对 β 有影响

如温度升高时, $V_{BE} \downarrow, I_{CBO} \uparrow, I_{CEO} \uparrow, \beta \uparrow$; 反之, 亦反之。

小结

1. 三极管有二个 PN 结, 三个电极, 三个区域, 这是三极管具有电流放大作用的内部依据。
2. 三极管进行放大时的外部条件: 发射结正偏, 集电结反偏。
3. 三极管的输出特性曲线有截止区, 放大区和饱和区。
4. 三极管处于放大状态时, $\beta^- = \beta$ 。
5. 温度对三极管的参数有很大影响。
6. 使用三极管时, 不能超过其极限参数值。
7. 三极管各极电流的关系为 $I_E = I_B + I_C$, 在放大区 $I_C = \beta I_B$ 。
8. 三极管有 NPN 型 PNP 型, 有硅管和锗管。

课题： 第二章 第 2.1 节： 放大电路工作原理

目的要求： 1、掌握基本放大电路的组成原则
2、掌握放大电路的直流通路和交流通路
3、理解放大电路的工作原理

重点难点： 重点 放大电路的工作原理
难点 放大电路的交流通路

教学方法： 结合电子课件讲解

教 具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问：
1、三极管的类型及外部工作条件？
2、三极管的特性曲线有何规律？

课堂讨论：
1、如何画放大电路的直流通路和交流通路？
2、放大电路中三极管各极电流和极间电压如何变化？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

二、授课内容

引 言

放大电路的任务是不失真地把微小信号放大到所需要的程度。本节首先分析放大电路的组成原则及工作原理。

2.1、放大电路工作原理

2.2.1、放大电路的组成

一、电路组成

基本共发射极放大电路如图 2-1 所示。

V——放大三极管

VCC——主电源、能源

VBB——发射结偏置电源

RC——直流负载电阻，用来确定直流工作点

RB——发射结偏置电阻

RL——负载电阻

RS、 u_s ——信号源的电压和内阻

C1、C2——耦合电容

二、工作条件

1、三极管应处于放大状态。即发射结正偏，集电结反偏。

2、能够输入和输出信号。

3、不失真地放大信号。

为了方便起见通常把 VCC 及 VBB 合并为一个直流电源，如图 2-2 所示。

2.1.2 直流通路和交流通路

一、直流通路

当交流输入信号为零时，电路中只有直流电流和电压，叫直流通路，又叫直流状态。此时，可把耦合电容视为开路。如图 2-3 (a) 所示

直流状态又叫静态。分析直流电路，叫直流分析，也叫静态分析。目的在于分析直流工作点，即求解： I_{BQ} 、 U_{BEQ} 、 I_{CQ} 、 U_{CEQ} 。

二、交流通路

当只考虑交流输入信号时的通路，叫交流通路，又叫交流状态。此时，耦合电容及直流电源 VCC 均视为短路。如图 2-3 (b) 所示。

交流状态，又叫动态。分析交流电路，又叫动态分析。目的在于分析交流放大倍数，输入电阻和输出电阻。

2.1.3 放大原理

一、静态分析

当交流输入信号为零时，只有直流电源 VCC 产生固定的直流电流 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 I_{EQ} 和直流电压 U_{BEQ} 、 U_{CEQ} 。

二、动态分析

当交流信号输入时，在三极管各极电流和极间电压中产生交流分量 i_b 、 i_c 、 u_{be} 、 u_{ce} 。由直流电源 VCC 和交流输入信号 u_i 共同作用的结果，产生如下电流和电压：

$$u_{BE} = U_{BEQ} + u_{be} = U_{BEQ} + U_{bem} \sin \omega t$$

$$i_B = I_{BQ} + i_b = I_{BQ} + I_{bm} \sin \omega t$$

$$i_C = I_{CQ} + i_c = I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$$

$$u_{ce} = -R_c i_c \quad (\text{RL 开路时})$$

经耦合电容滤去直流分量后，只输出交流分量 u_o ，电流及电压波形如图 2-9 所示。

小 结

- 1、三极管基本放大电路由三极管、耦合电容、电阻、直流电源、信号源及负载组成。
- 2、放大电路正常工作的条件是：三极管处于放大状态，能够输入和输出信号，且不失真地放大信号。
- 3、放大电路有静态和动态两种工作状态。进行静态分析时，耦合电容应开路；进行动态分析时，耦合电容和直流电源应短路。
- 4、在放大电路中三极管的各极电流和极间电压既含有直流分量，又含有交流分量，经电容隔去直流后，只输出交流信号。

课 题： 第二章 第 2.2 节： 放大电路的直流工作状态

目的要求：

- 1、掌握放大电路直流工作点的解析法及图解法
- 2、掌握电路参数对直流工作点的影响规律

重 点：直流工作点的解析法

难 点：电路参数对直流工作点的影响

教学方法：结合电子课件讲解

教 具：电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问：

- 1、如何画放大电路的直流通路和交流通路？
- 2、三极管放大电路的工作原理？

课堂讨论：

- 1、如何用图解法确定直流工作点？
- 2、电路参数如何影响直流工作点？

素质思政内容：帮助学生树立科学发展观

强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配：12 节

教学过程：

2.2 放大电路的直流工作状态

引 言

分析放大电路的直流状态，其目的不仅在于使三极管处于放大状态，而且应把直流工作点确定在最佳状态，以保证最大限度且不失真地放大信号。

2.2.1 解析法确定静态工作点

放大电路如图 2-2 (b) 所示。

根据如图 2-3 (a) 所示的放大电路的直流通路，首先取：

$$U_{BEQ} = 0.7V \text{ (硅三极管)}$$

$$U_{BEQ} = 0.3V \text{ (锗三极管)}$$

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

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

$$I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$

2.2.2 图解法确定静态工作点

- 1、用输入特性曲线确定直流工作点

$$i_B = f(u_{BE}) | U_{CE} = \text{常数} \quad \text{①}$$

$$u_{BE} = V_{CC} - i_B R_B \quad \text{②}$$

方程①的图象如图中曲线所示，方程②为直线方程，其图象如 AB 直线所示。二图象的交点 Q 即为直流工作点，其对应坐标分别为 U_{BEQ} 、 I_{BQ} 。如图 2—4 (d) 所示。

2、用输出特性曲线确定直流工作点

$$i_c = f(u_{CE}) I_{BQ} = \text{常数} \quad \text{①}$$

$$u_{CE} = V_{CC} - i_c R_C \quad \text{②}$$

方程①和②的图象的交点 Q 即为直流工作点，其对应坐标分别为 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 、 I_{BQ} 。

直流工作点应确定在直流负载线的中点附近，或者说确定在放大区的中央。如图 2—5 所示。这样可最大限度且不失真地放大信号。

2.2.3 电路参数对直流工作点的影响

一、 R_b 对 Q 的影响

因 R_c 、 V_{CC} 不变，直流负载线不变。

故当 R_b 增大时，则 Q 点沿直流负载线向下移动，输入信号幅度逐渐增大时，首先产生截止失真。反之，当 R_b 减小时，Q 点向上移动。如图 2—6 (a) 所示。

二、 R_c 对 Q 的影响

因 V_{CC} 、 R_b 不变， I_{BQ} 不变。

故当 R_c 增大时， $i_c = \frac{V_{CC}}{R_c}$ 减小，Q 点向左移动；反之，Q 点向右移动，如图 2—6 (b) 所示。

三、 V_{CC} 对 Q 的影响

因 R_b 、 R_C 不变。

故当 V_{CC} 减小时， I_{BQ} 减小，同时直流负载线向左平移，Q 点向左下方向移动；反之，Q 点向右上方移动。如图 2—6 (c) 所示。

为了克服电路参数对直流工作点的影响，直流电源 V_{CC} 应当采用稳压电源。 R_c 及 R_b 应采用十分稳定的电阻。

小 结

1、可用解析法和图解法确定放大电路的直流工作点，前者简便，较精确；后者麻烦，不很精确，但直观。

2、用解析法确定直流工作点时，首先依三极管的材料选取 U_{BEQ} 的值。再依具体直流电路计算出 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 I_{EQ} 、 U_{CEQ} 。

3、用图解法确定直流工作点时，步骤如下：

(1) 首先用图解法或计算法确定 U_{BEQ} 、 I_{BQ} 。

(2) 在输出特性曲线中画出直流负载线。

(3) 直流负载线与 I_{BQ} 对应的那条输出特性曲线的交点 Q 即为直流工作点。

(4) 最后确定 Q 点所对应的坐标 U_{CEQ} 、 I_{CQ} 。

课 题： 第二章 第 2.3 节 放大电路的动态分析

目的要求： 1. 熟练掌握放大电路的微变等效电路法。
2. 牢固掌握三种基本组态放大电路的分析方法。
3. 了解三极管放大电路产生非线性失真的原因及克服方法。

重 点： 放大电路的微变等效电路法。

难 点： 共集电极放大电路的动态分析

教学方法： 结合电子课件讲解

教 具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问： 1. 如何确定放大电路的直流工作点？
2. 电路参数如何影响直流工作点？

课堂讨论： 1. 在什么条件下才能应用微变等效电路法？
2. 三极管三种基本组态放大电路的特点？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

2.3 放大电路的动态分析

引言

当交流信号输入放大电路时，三极管各极电流和极间电压均发生变化，不仅有直流电源产生的直流分量，还有交流输入信号产生的交流分量。

2.3.1 图解分析动态电路

一、 交流负载线

对交流信号而言，在通带内，耦合电容 C1 和 C2 可视为短路，电源 VCC 也视为短路。交流负载电阻为：

$$R'_L = R_c // R_L \quad R'_L < R_c$$

交流负载线的斜率为：

$$\text{tg}\alpha = -\frac{1}{R'_L}$$

交流负载线必定要经过直流工作点 Q。

首先任意作一条斜率为 $-\frac{1}{R'_L}$ 的辅助线，如图 2-7 中的虚线所示。然后过 Q 点作一条

平行于辅助线的直线，该直线即为交流负载线。

或者取 $V'_{cc} = U_{CEQ} + I_{CQ}R'_L$ ，过 V'_{cc} 点和 Q 点作一条直线即为交流负载线。

二、 电流和电压波形

$$u_{BE} = U_{BEQ} + u_{be}$$

$$i_B = I_{BQ} + i_b$$

$$i_c = I_{CQ} + i_c$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}$$

$$u_{ce} = -R_c i_c$$

$$u_o = u_{ce}$$

波形如图 2 - 9 所示。

2.3.2 放大电路的非线性失真

一、产生非线性失真的原因

1. 三极管特性曲线的非线性引起的失真，如图 2-10 所示。
2. 直流工作点不适当引起的失真，如图 2 -11 所示。
3. 交流输入信号的幅值过大会引起双向失真。

最大不失真输出电压的振幅为： $U_{cem} = I_{CQ} R'_L$

二、克服非线性失真的措施

1. 从三极管输入特性曲线看，工作点 Q 应避开其弯曲部分，而确定在特性曲线线性度较好的地方。
2. 从输出特性曲线看，直流工作点 Q 应确定在直流负载线或交流负载线的中点，不可偏高和偏低。
3. 输入信号的幅值必须适当。

2.3.3 微变等效电路法

一、条件

当放大电路输入微变信号时，三极管各极电流和极间电压只在直流工作点附近很小的范围内变化。只要直流工作点 Q 选得适当，在微小信号作用下，三极管的输入特性曲线和输出特性曲线可视为一小段直线，这样就可以把非线性的三极管用一个线性电流控制电流源的模型来代替。进而建立整个放大电路的微变等效电路，然后按线性电路进行分析。

二、三极管的微变等效电路

三极管的微变等效电路如图 2- 15 所示。

从基极和发射极看，可视为一个电阻 r_{be} ；从集电极和发射极看，可视为一个电流控制电

流源 βi_b 。

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)}$$

$$r_{bb'} = 300\Omega \quad (\text{低频小功率管})$$

$r_{bb'}$ = 100Ω 左右（高频小功率管）

2.3.4 三种基本组态放大电路的分析

一、共发射极放大电路

电路如图 2-18(a)所示。

1. 静态分析

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b}$$

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

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)}$$

2. 动态分析

微变等效电路如图 2-18(b)所示。

$$(1) \text{ 电压放大倍数 } A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

$$R_L' = R_c // R_L$$

$$A_u = \frac{-\beta R_L' i_b}{r_{be} i_b} = \frac{-\beta R_L'}{r_{be}}$$

$$(2) \text{ 输入电阻 } r_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i}$$

$$r_i = R_b // r_{be}$$

$$(3) \text{ 输出电阻 } r_o = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_o}$$

利用外加电源法求解 r_o

使 $u_i = 0$, 则 $i_b = 0$, $\beta i_b = 0$

$$r_o = R_c$$

$$(4) \text{ 源电压放大倍数 } A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

$$A_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{r_i}{R_s + r_i} \cdot A_u$$

结论:

- (1) 输入电压与输出电压反相位/
- (2) 电压放大倍数大。
- (3) 输入电阻较小。
- (4) 输出电阻较大

二、共集电极放大电路

电路如图 2-19(a)所示。

1. 静态分析

$$I_{BQ} = \frac{V_{cc} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta) R_e}$$

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

$$I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_c$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)}$$

2. 动态分析

微变等效电路如图 2-19(b)所示。

(1) 电压放大倍数 A_u

$$R'_L = R_e // R_L$$

$$A_u = \frac{(1 + \beta) R'_L i_b}{r_{be} i_b + (1 + \beta) R'_L i_b} = \frac{(1 + \beta) R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R'_L}$$

当 $(1 + \beta) R'_L \gg r_{be}$ 时,

$$A_u \leq 1$$

(2) 输入电阻 r_i

$$r'_i = r_{be} + (1 + \beta) R'_L$$

$$r_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R'_L]$$

(3) 输出电阻 r_o

利用外加电源法求解 r_o ，如图 2-20 所示。

$$R'_s = R_s // R_b$$

$$r'_{be} = r_{be} + R'_s$$

$$I' = \frac{U_2}{R_e}$$

$$I'' = \frac{U_2}{r'_{be}} = -I_b$$

$$I_2 = I' + I'' - \beta I_b = \frac{U_2}{R_e} + \frac{U_2}{r'_{be}} + \frac{\beta U_2}{r'_{be}} = \left(\frac{1}{R_e} + \frac{1 + \beta}{r'_{be}} \right) U_2$$

$$r_o = \frac{U_2}{I_2} = R_e // \frac{r'_{be}}{1 + \beta}$$

结论：

- (1) 输出电压与输入电压同相位。
- (2) 电压放大倍数小于一而近似等于一。
- (3) 输入电阻很大。
- (4) 输出电阻很小。

三、共基极放大电路

1. 静态分析

$$U_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_c - I_{EQ}R_e$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)}$$

2. 动态分析

微变等效电路如图 2-21(b)所示。

- (1) 电压放大倍数 A_u

$$R'_L = R_c // R_L$$

$$A_u = \frac{-\beta R'_L i_b}{-r_{be} i_b} = \frac{\beta R'_L}{r_{be}}$$

(2) 输出电阻

$$r_o = R_c$$

(3) 输入电阻

$$r'_i = \frac{-r_{be} i_b}{-(1+\beta)i_b} = \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

$$r_i = R_e // r'_i = R_e // \frac{r_{be}}{1+\beta} \approx \frac{r_{be}}{1+\beta}$$

结论:

- (1) 输出电压与输入电压同相位。
- (2) 电压放大倍数大。
- (3) 输入电阻很小
- (4) 输出电阻大

小结

1. 在小信号作用下, 可用微变等效电路法分析放大电路, 其中三极管用线性电流控制电流源代替。
2. 三极管特性曲线的非线性、直流工作点不适当、输入信号的幅值过大, 都可能引起非线性失真。
3. 三种基本组态放大电路各有各的特点, 各有各的用途。
4. 放大电路指标有: 放大倍数、输入电阻、输出电阻、通频带、输出功率等。

课 题： 第二章 第 2.4 节 静态工作点的稳定及其偏置电路

目的要求： 1. 掌握放大电路的基本偏置方式及其特点。
2. 掌握稳定放大电路直流工作点的方法。

重 点： 分压式偏置电路的特点

难 点： 稳定直流工作点的原理

教学方法

手 段： 结合电子课件讲解

教 具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问： 1. 微变等效电路法的要领和条件？

2. 三种基本组态放大电路的特点？

课堂讨论： 1. 影响放大电路直流工作点的因素？

2. 如何稳定放大电路的直流工作点？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观

强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

2.4 静态工作点的稳定及其偏置电路

引言

本节介绍三极管放大电路的偏置电路及稳定直流工作点的方法。

2.4.1 偏置电路形式

一、固定偏置式

如图 2-18(a)所示， R_b 为偏置电阻。

$$I_{BQ} = \frac{V_{cc} - V_{BEQ}}{R_b}$$

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

结论：

优点：元件少、电路简单。

缺点：三极管参数 β 的变化将影响直流工作点；直流工作点不能稳定。

二、分压偏置式

如图 2-23 所示， R_{b1} 及 R_{b2} 为偏置电阻。

条件：若 $U_{BQ} = (5-10)U_{BEQ}$

$$I_1 = (5-10)I_{BQ}$$

则 $I_1 \approx I_2$ R_{b1} 与 R_{b2} 近似串联

$$U_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{cc}$$

$$I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

结论:

优点: U_{BQ} 与三极管的参数 β 无关, 与温度无关, 其值恒定; 同时 R_e 起直流电流串联负反馈的作用, 故直流工作点比较稳定。

缺点: 使用元件较多, 且必须满足一定条件。

3.4.2 稳定直流工作点的方法

一、影响直流工作点的因素

1. 电路参数的影响

电路参数 R_b 、 R_c 、 V_{cc} 影响直流工作点的规律前节已经分析过, 只要采用稳定的 R_b 、 R_c 、 V_{cc} , 即可克服这些参数对直流工点的影响。

2. 温度的影响

第一章已讲过, 温度升高时, β 增大, U_{BEQ} 降低, I_{CQ} 增大, 直流工作点升高; 温度降低时, 直流工作点降低, 影响放大电路的正常工作。

二、 稳定直流工作点的方法

1、保持工作环境温度稳定。

2、在放大电路的发射极 (或源极) 中串联电阻 R_e (R_s), 形成直流电流串联负反馈, 可稳定直流工作点。如图 2-23 中的 R_e 所示。

为了不降低交流电压放大倍数, 在 R_e 两端并联大容量的旁路电容 C_e 。在通带内, 对交流信号来说, C_e 短路, R_e 被 C_e 旁路, 不影响交流电压放大倍数。

R_e 稳定直流工作点的过程如下:

$$T \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{R_e} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow$$

$$I_{CQ} \downarrow \leftarrow I_{BQ} \downarrow \leftarrow$$

小结

1. 放大电路有固定偏置式和分压偏置式两种偏置电路, 各有优点和缺点, 但后者优于前者, 故后者用得比较普遍。
2. 温度是影响放大电路直流工作点的重要因素, 通常采用直流负反馈的方法来稳定直流工作点。

课 题： 第二章 第 2.5 节 多级放大电路

目的要求： 1. 掌握多级放大电路的耦合方式及其特点。
2. 掌握多级放大电路的分析方法。

重 点： 多级放大电路的分析方法

难 点： 后级对前级的影响

教学方法： 结合电子课件讲解

教 具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问： 1. 三种基本组态放大电路的特点？

2. 何种放大电路带负载的能力强？

课堂讨论： 1. 多级放大电路的级数对放大倍数和通频带有何影响？

2. 直接耦合式多级放大电路存在那两个主要问题？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观

强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

2.5 多级放大电路

引言

当单级放大电路的放大倍数达不到实际要求时，常把若干个基本放大电路连接起来组成多级放大电路。

2.5.1 多级放大电路的耦合方式

一、 阻容耦合式

阻容耦合式多级放大电路如图 2-30 所示。

C1----把信号源与放大电路耦合起来。

C2----把两级放大电路耦合起来。

C3----把负载与放大电路耦合起来。

优点： 1. 各级放大电路的直流工作点彼此独立，互不影响，便于计算和调试。

2. 电路比较简单，体积较小。

缺点： 1. 只能放大交流信号，不能放大直流及缓变信号。

2. 因为耦合电容的容量较大，故不易集成化。

二、直接耦合式

直接耦合式多级放大电路如图 2-32 所示。

优点： 1. 元件少，体积小，易集成化。

2. 既可放大交流信号，也可放大直流和缓变信号。

缺点： 1. 各级的直流工作点互不独立，彼此影响，计算和调试麻烦。

2. 零点漂移严重。尤其当第一级产生一定零点漂移时，经后面各级逐渐放大，最终会产生严重的零点漂移。

3. 前后级放大电路需要互相配合，并采取适当措施，才能保证各级的正常工作，如图 2-32 所示。

三、变压器耦合式

变压器耦合式多级放大电路如图 2-33 所示。

优点：1. 各级放大电路的直流工作点彼此独立，互不影响，便于计算和调试。

2. 可以进行阻抗匹配，以满足最大功率传输的要求。

缺点：1. 只能放大交流信号，不能放大直流及缓变信号。

2. 体积大，笨重，不能集成化，也不便于小型化。

3. 频率特性较差。

2.5.2 多级放大电路的计算方法

1. 首先计算出各级放大电路的直流工作电流： I_{EQ1} 、 I_{EQ2} 、 I_{EQ3} …… I_{EQn} 。

2. 计算出各级放大电路的 r_{be1} 、 r_{be2} 、 r_{be3} …… r_{ben} 。

3. 画出微变等效电路。

4. 从末级开始逐级向前推进，计算出各级的电压放大倍数 A_{u1} 、 A_{u2} 、 A_{u3} …… A_{un} 。

应当注意，后级放大电路是前级的负载。

5. 计算总电压放大倍数 A_u

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3} \cdots A_{un}$$

6. 计算输入电阻 r_i 和输出电阻 r_o

一般情况下，多级放大电路的输入电阻等于第一级的输入电阻，输出电阻等于末级的输出电阻。

小结

3. 多级放大电路的级间耦合方式有变压器耦合式、直接耦合式和阻容耦合式。各有优缺点，应依据具体条件和要求选择之。

4. 多级放大电路的级数越多，其总的放大倍数越大，而总的通频带越窄。

5. 在一般情况下，多级放大电路的输入电阻等于其第一级的输入电阻，输出电阻等于末级的输出电阻。

6. 在计算多级放大电路中各级的电压放大倍数时，应特别注意后级是前级的负载。

课题： 第五章 第 5.1 节 反馈的基本概念

目的要求： 1. 理解反馈的本质。
2. 掌握反馈电路的三个基本环节。
3. 理解反馈电路框图中各量的含意。
4. 掌握反馈电路闭环放大倍数的一般表达式。

重点难点： 重点 反馈电路框图中各量的含意

难点 闭环放大倍数的推导

教学方法： 结合电子课件讲解

- 教具：** 电子课件、计算机、投影屏幕
- 复习提问：** 1. 基本放大电路中 R_E 、 C_E 或 R_S 、 C_S 的作用？
2. 共集电极、共漏极放大器的性能特点？
- 课堂讨论：** 1. 反馈电路框图中 X_i 、 X_o 、 X_f 、 X_d 、 A_o 、 F 、 A_f 含意？
2. 反馈电路的放大倍数 A_f 的表达式？
- 素质思政内容：** 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感
- 课时分配：** 2 节
- 教学过程：**

引言

前面已经分析过各种基本放大电路的性能，但其某些性能指标往往满足不了实际需要。理论和实践证明，引入负反馈以后，可以大大改善放大电路的性能指标。

5-1 反馈的基本概念

5.1.1 反馈的定义

把放大电路的输出量（电压或电流）的一部分或全部，经一定形式的电路（反馈电路）送回到放大电路的输入端，与输入信号进行比较，就叫反馈。

5.1.2 反馈电路框图

详见教材图 5-1。

1. 反馈电路的三个环节：

基本放大电路 A_o ，反馈网络 F ，比较环节。

2. 几个概念：

X_i ----	输入信号	$A_o=X_o/X_d$ ----	开环放大倍数
X_o ----	输出信号	$F=X_f/X_o$ ----	反馈系数
X_f ----	反馈信号	$A_f=X_o/X_i$ ----	闭环放大倍数
X_d ----	净输入信号		

5.1.3. A_o 、 F 、 A_f 的关系式

1. 负反馈时

当反馈信号削弱输入信号，使净输入信号减小者，叫负反馈。

$$X_d=X_i-X_f, \text{ 则 } X_i=X_d+X_f$$

$$A_f=X_o/X_i=X_o/(X_d-X_f)=A_o/(1+A_oF)$$

2. 正反馈时

当反馈信号加强输入信号，使净输入信号增大者，叫正反馈。

$$X_d=X_i+X_f \text{ 则 } X_i=X_d-X_f$$

$$A_f=X_o/X_i=X_o/X_d-X_f=A_o/(1-A_oF)$$

负反馈用于改善放大电路的性能指标；正反馈用于振荡电路等。

小结

1. 反馈电路框图中的 X_i 、 X_o 、 X_f 、 X_d 各量，在实际电路中，它们不是取电压量，就是取电流量。
2. 反馈电路是由基本放大电路和反馈网络组成的闭环电路。
3. 若 X_f 与 X_i 比较结果使 X_d 减小，叫负反馈，其放大倍数 $A_f=A_o/(1+A_oF)$

若 X_f 与 X_i 比较结果使 X_d 增大，叫正反馈，其放大倍数 $A_f = A_o / (1 - A_o F)$
前者用于放大电路，后者用于振荡电路等。

课 题： 第五章 第 5.2 节 反馈的类型及分析方法 (5.2.1——5.2.2)

目的要求： 1. 了解反馈的类型
2. 掌握反馈类型的判别法
3. 牢固掌握负反馈放大电路的四种基本组态。

重点难点： 重点 反馈的类型
难点 反馈类型的判别

教学方法： 结合电子课件讲解

教具： 电子课件、计算机、投影屏幕

复习提问 1. 反馈电路由哪几个环节组成？其作用为何？
2. 负反馈放大电路的闭环放大倍数表达式？

课堂讨论 1. 依什么规律判别电压反馈和电流反馈？
2. 依什么规律判别正反馈和负反馈？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

5.2 反馈的类型及分析方法

5.2.1 反馈的类型

一、电压反馈和电流反馈

按取样信号不同，可以分为电压反馈和电流反馈。框图如图 5-2 和图 5-3 所示

1. 电压反馈：反馈信号取自输出电压信号， X_f 与 U_o 成正比。
2. 电流反馈：反馈信号取自输出电流信号， X_f 与 I_o 成正比。
3. 电压反馈和电流反馈均有两种基本取样形式。

二、 串联反馈和并联反馈

按反馈信号与输入信号的比较方式的不同，可以分为串联反馈和并联反馈。框图如图 5-5 和图 5-6。

1. 串联反馈 反馈信号与输入信号串联，即反馈电压信号与输入电压信号相比较
2. 并联反馈 反馈信号与输入信号并联，即反馈电流信号与输入电流信号相比较

三、交流反馈和直流反馈

1. 交流反馈 反馈只对交流信号起作用，即反馈信号只与交流信号有关。
2. 直流反馈 反馈只对直流信号起作用，即反馈信号只与直流信号有关。
3. 交直流反馈 反馈信号与交流信号和直流信号均有关系，叫交直流反馈。若反馈网络中串联电容，则只能为交流反馈；若在反馈电阻两端并联电容，则只能为直流反馈。

四. 正反馈和负反馈

1. 负反馈 反馈信号削弱输入信号，使净输入信号减小。
2. 正反馈 反馈信号加强输入信号，使净输入信号增大。

五. 负反馈放大电路的四种基本组态

1. 电压串联负反馈
2. 电压并联负反馈
3. 电流串联负反馈
4. 电流并联负反馈

5.2.2 反馈类型的判别方法

基本步骤:

1. 首先判别有无反馈
2. 判别是交流反馈或直流反馈
3. 判别是电压反馈或电流反馈
4. 判别是正反馈或负反馈
5. 判别是本级反馈或级间反馈

一、判别有无反馈

观察放大电路的输出回路与输入回路之间有无反馈电阻或反馈电容。有，则有反馈；无，则无反馈。

二、电压反馈与电流反馈的判别方法

从电路的输出端进行分析：

1. 用输出短路法进行判别。 R_L 短路， X_f 消失，则为电压反馈；否则，为电流反馈。
2. 按采样形式进行判别。 X_f 正比于 U_o ，则为电压反馈； X_f 正比于 I_o ，则为电流反馈。
3. 按电路结构判别。反馈网络与 R_L 并联，为电压反馈；反馈网络与 R_L 串联为电流反馈。

三、串联反馈与并联反馈的判别方法

从电路的输入端进行分析：

1. 按比较方式判别： X_f 与 X_d 串联，叫串联反馈； X_f 与 X_d 并联叫并联反馈。
2. 按电路结构判别：反馈网络与基本放大电路并联，叫并联反馈；反之，叫串联反馈
3. 按反馈信号的性质判别：反馈信号取电压量，为串联反馈；反馈信号取电流量，为并联反馈。

四、正反馈与负反馈的判别方法

用瞬时极性法判别正反馈或负反馈。

1. 可以从输入信号的瞬时极性变化分析起。
2. 也可以从输出信号的瞬时极性变化分析起。

若某端信号的起始瞬时极性与循环一周该信号的瞬时极性相反，为负反馈；反之，为正反馈。

五、交流反馈与直流反馈的判别方法

1. 若反馈电路中没有串联电容，为直流反馈或交直流反馈；反之，为交流反馈。
2. 若反馈电路两端并联有电容，为直流反馈；否则为交流反馈或交直流反馈。

小 结

1. 反馈的类型有：正反馈和负反馈；
 电流反馈和电压反馈；
 串联反馈和并联反馈；
 交流反馈和直流反馈。
2. 反馈放大电路有四种基本组态：
 电压串联负反馈；
 电流串联负反馈；
 电压并联负反馈；

电流并联负反馈：

3. 可按采样形式、电路结构、输出短路法判别电压反馈和电流反馈。
4. 可按比较方式、电路结构、反馈信号性质判别串联反馈和并联反馈。
5. 用瞬时极性法判别正反馈和负反馈。

课 题： 第 五 章 第 5.3 节 负反馈对放大电路的影响

目的要求： 1.掌握负反馈影响放大电路性能的规律。
2.了解负反馈放大电路对信号源的要求
3.了解负反馈放大电路与负载的配合规律

重点难点： **重点** 负反馈对放大电路 A_f 、 r_{if} 、 r_{of} 的影响规律

难点 A_f 、 r_{if} 、 r_{of} 、 BW_f 的计算方法

教学方法： 结合电子课件讲解

教 具： 电子课件 计算机 投影屏幕

复习提问： 1.电压负反馈和电流负反馈各稳定放大电路的哪个输出量？
2.负反馈放大电路四种基本组态各有何规律？

课堂讨论： 1.若输入信号有波形失真，负反馈能否改善放大电路输出信号的波形失真？
2.串联负反馈和并联负反馈对信号源各有何要求？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

5-3 负反馈对放大电路的影响

一、对放大倍数的影响

1. 使放大倍数减小

$$A_F = \frac{A_O}{1 + A_O F}$$

$$A_O F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \bullet \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_d}$$

$$\dot{X}_f \text{ 与 } \dot{X}_d \text{ 同相, } |A_O F| > 0$$

故 $|A_F| < |A_O|$

显然，负反馈使闭环放大倍数减小，减小为 A_O 的 $(1+A_O F)$ 分之一。

2. 提高放大倍数的稳定度

$$A_F = A_O / (1 + A_O F)$$

$$dA_f/dA_0 = [(1+A_0F) - A_0F] / (1+A_0F)^2 = 1 / (1+A_0F)^2$$

$$dA_f = 1 / (1+A_0F) = dA_0 / (1+A_0F)^2$$

$$dA_f/A_f = [1 / (1+A_0F)] dA_0/A_0$$

二、改善波形失真

1. 开环状态

由于放大电路中存在非线性元件，即使输入信号为正弦波形，输出信号也可能不是正弦波形，产生一定的波形失真，如图 5-15 (a) 所示

2. 闭环状态

(1) u_i 为正弦波

(2) u_o 波形失真：如正半周幅度大，负半周幅度小

(3) u_f 波形与 u_o 波形相似

(4) $u_d = u_i - u_f$ 则变为正半周幅度小而负半周幅度大，经过放大，波形得到改善。如图 5-15 (b) 所示。

三、对输入、输出电阻的影响

1. 串联负反馈使放大电路的输入电阻增大， $r_{if} = (1+A_0F) r_i$ 。

2. 并联负反馈使放大电路的输入电阻减少， $r_{if} = r_i / (1+A_0F)$

3. 电压负反馈使放大电路的输出电阻减少， $r_{of} = r_o / (1+A_0F)$

4. 电流负反馈使放大电路的输出电阻增大， $r_{of} = (1+A_0F) r_o$ 。

四. 对通频带的影响

引入负反馈后，可以展宽放大电路的通频带

小结

1. 直流负反馈可以稳定放大电路的静态工作点

2. 交流负反馈可以改善放大电路的诸多性能指标

3. 串联负反馈要求信号源近似为恒电压；并联负反馈

要求信号源近似为恒流源

4. 电压负反馈放大电路近似为恒压源；电流负反馈放大电路近似为恒流源

5. 负反馈只能削弱放大电路自身产生的波形失真和噪声，不能完全消除波形失真和噪声。更不能改善输入信号失真而引起的输出信号的失真。

课题： 第六章

第 6.1 节

零点漂移

第 6.2 节

差动放大电路

目的要求：

1. 了解零点漂移产生的原理
2. 掌握差放的基本结构及工作原理
3. 熟悉差模、共模信号及差放电路的计算
4. 熟悉差动放大电路的四种接法

重点难点：

- 重点 1. 零漂产生的原因及差放抑制零漂的原理
2. 差放电路的工作原理

难点 差放电路参数的计算

教学方法：

1. 用电子课件六进行教学（多媒体教室）
2. 复习多级放大器极间耦合引入零点漂移概念

教具：

电子课件

复习提问：

多级放大器如果采用直接耦合的方式，当 $U_i=0$ 时，输出为 0 吗？

为什么？

- 课堂讨论： 1. 差放为什么能减小零漂？
2. 差放能放大差模信号，抑制共模信号吗？

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

6.1 零点漂移

6.1.1 多级放大器级间直接耦合会使前后级 Q 点相互影响

- 稳定 Q 点的简单方法： 1. 加隔离电阻 R_B
2. 加射极电阻 R_E

6.1.2 多级放大电路直接耦合会产生零点漂移

一. 零点漂移：

1. 零点： $U_i=0$ $U_o=0$ 时，称为放大电路电压零点
2. 零漂： 放大电路零点随时间缓慢变化

二. 零漂产生原因：

1. 电源波动
2. 温度变化导致晶体管参数变化

零漂计量： 当 $U_i=0$ 时， U_{co}/A_u 之值为零漂计量

三. 克服零漂的办法：

1. 减小以上两因素的影响
2. 采用差动放大电路

6.2 差动放大电路

6.2.1 差动放大电路

一. 结构特点： 差放对管

(1) 基本型

(2) 双电源长尾式差放

二. 抑制零漂的原理：

1. 当 $U_{c1}=U_{c2}=0$, $U_o=U_{c1}-U_{c2}=0$
 $T \nearrow$ 产生 ΔU_c , 且差放对管 $\Delta U_{c1}=\Delta U_{c2}$
所以 $U_o=(U_{c1}+\Delta U_{c1})-(U_{c2}+\Delta U_{c2})=0$

三. 共模信号放大倍数

1. 共模信号： 大小相等，极性相同的一对信号 $U_{i1}=U_{i2}=U_{ic}$
2. 理想对称差放： $U_o=0$ $A_{uc}=U_o/U_{ic}=0$
非理想对称差放： $U_o \neq 0$ $A_{uc}=U_o/U_{ic}$ (很小)

四. 差模信号放大倍数

1. 差模信号，大小相等，极性相反的一对信号 $U_{i1}=-U_{i2}=1/2 U_{id}$
2. 理想对称差放 $U_o = U_{c1}-U_{c2} = (U_{c1}+U_{d1})-(U_{c2}-U_{d1}) = 2U_{d1}$
3. 电压放大倍数

$$A_{id} = U_o/2U_{id} = -\beta R_L' / (R_B+r_{be}) \quad (\text{极大})$$

五. 共模抑制比 (CMRR)

$$K_{CMRR} = |A_{id}/A_{uc}|$$

$$K_{CMRR}(\text{dB}) = 20 \log | A_{ud}/A_{uc} |$$

6.2.2 双电源长尾式差放

一. 结构

1. 双电源 $+U_{CC} -U_{EE}$
 - (1) 加大信号幅度
 - (2) $I_{B1} I_{B2}$ 由 $-U_{EE}$ 提供通路
2. 射极电阻 R_E :
 - (1) 稳定静态工作点
 - (2) 抑制零漂

差模信号作用时，两管集电极电流增量大小相等、极性相反，在 R_E 上二者相消，所以， R_E 上为原静态电流，对差模信号可视为短路。

二. 性能分析：

- (1) 差模输入： $U_{id} = U_{i1} - U_{i2}$
- (2) 共模输入： $U_{ic} = (U_{i1} + U_{i2})/2$

6.2.3 差动放大器的主要指标

- 一. 差模电压放大倍数： $A_{ud} = U_{od}/U_{id}$
- 二. 共模电压放大倍数： $A_{uc} = U_{oc}/U_{ic}$
- 三. 共模抑制比： $K_{CMRR}(\text{dB}) = 20 \log | A_{ud}/A_{uc} | (\text{dB})$
- 四. 差模输入电阻： $r_{id} = U_{id}/I_{id}$
- 五. 差模输出电阻： $r_{od} = U_{o=d}/I_{o=d}$

6.2.4 差动放大电路的四种接法：

- 一. 双端输入、双端输出
- 二. 双端输入、单端输出
- 三. 单端输入、双端输出
- 四. 单端输入、单端输出

四种接法的 A_{ud} 、 A_{uc} 、 $CMRR$ 、 r_{id} 、 r_o 的计算。

综上所述：1. 电压放大倍数仅与输出形式有关。

2. 输入电阻与接法无关。

课题：第六章 第 6.3 节 电流源电路

目的要求： 1. 熟悉镜像电流源，威尔逊电流源，比例等电流源电路工作原理
2. 熟悉电流源差动放大器的计算和分析

重点难点： **重点** 威尔逊电流源工作原理
难点 电流源差动电路的分析

教学方法： 用比较法比较五种电流源的特点及用途

教具：

复习（提问） 差动放大电路 R_E 的作用是什么？设有调“平衡电位器” R_p 的电路有什么优点。

课堂讨论： 五种电流源各有何特点及用途

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观

强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 2 节

教学过程：

集成电路中常用电流源电路（有电流源差动放大电路）

6.3.1 镜像电流源电路（P135）

一、结构： V_1 、 V_2 为组成对管， R_L 是后极电路的等效电阻

R 是限流电阻

二、原理： V_2 ： $I_0 = I_{C1} = I_R = \frac{U_{CL}}{R}$ 电流源

V_i 构成二极管 I_R 为电流源参考电源（2）作为元件

三、特点：（1）（2）（3）（4）

6.3.3 比例电流源

一、结构： V_1 、 V_2 的作用。

$R_{e1}R_{e2}$ 的作用

二、原理： $I_0 = I_{C1} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE3} - U_{bec}}{R}$

三、特点：具有更好的恒流特性

6.3.4 微电流源

一、结构： V_1 、 V_2 的作用。 R_{e2} 的作用

二、原理：由 6.3.3 电路 $R_{e1} = 0$ 则 $I_0 = I_{C1} \approx I_R = \frac{V_T}{R_{p2}} \ln \frac{I_R}{I_0}$

三、特点：例 4

6.3.5 多路电流源

介绍电路（略）

6.3.6 作为有源负载的电流源电路

一、电路

二、计算

三、特点

6.3.7 P129 恒电流源差动放大电路

一、电路： 差动电路、电流源电路

二、特点

课题：第六章 第 6.4 节 集成运算放大器介绍

第 6.5 节 集成运放的性能指标

- 目的要求：**
- 1.了解 007 集成运放的构成
 - 2.集成运放的组成及各组成部分的作用
 - 3.熟悉集成运放的性能指标
 - 4.本章小结
- 重点难点：**
- 重点** 运放的组成、运放的主要性能指标
- 难点** 运放的主要性能功能指标
- 教学方法：** 007 集成运放的组成及各级（用电子课件）分别介绍
- 教具：** 电子课件
- 复习（提问）** 差动放大器有什么优缺点？
- 课堂讨论**
- 1.集成运放由哪四部分组成？为什么输入级要采用差动放大器？
 - 2.集成运放有哪些主要性能指标？含义各是什么？
- 素质思政内容：** 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

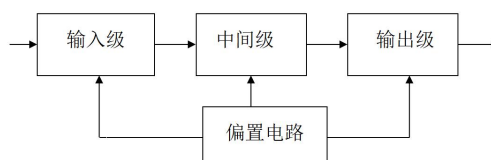
课时分配： 2 节

教学过程：

6-4 集成运放放大器

复习:差放放大器的优点

引入 F007 运放组成四部分：



6.4.1 偏置电路

一、结构

二、原理：
$$I_R = \frac{U_{CC} + U_{EE} - U_{BE12} - U_{BE11}}{R_5}$$

三、特点：大 r_{id} ，小 I_B 改善了集成运放的性能

6.4.2 输入级

一、结构：

二、工作原理及特点：CRRM 大， r_{id} 大， I_B 小、 r_{od} 小

6.4.3 中间级

一、结构

二、特点： $A_u > 1000$

（放大量特大）

6.4.4 输出级

一、结构

二、特点：1.放大作用

2.隔离作用

3.过载保护

6.5 集成运放的性能指标

一、开环差模电压放大倍数 $A_{od} = \frac{U_o}{U_{id}} > 10^7 (140dB)$

二、最大输出电压 $U_{op-p} \approx 10V$

三、差模输入电阻 $r_{id} \approx 2M\Omega$

四、输出电阻 $R_o = 0$

五、共模抑制比 $CMRR \rightarrow \infty$

六、其它： $U_{id\max}$ 、 $U_{ic\max}$ 、 U_{IO} 、 I_{IB} 、 I_{IO} 、3dB 带宽等

本章小结

一、差放电路：基本电路的工作原理

差模信号 ($U_{id} = U_{i1} - U_{i2}$) 的放大作用

共模信号 ($U_{ic} = (U_{i1} + U_{i2})/2$) 的抑制作用

$CMRR = 20 \log|A_d/A_c|$

二、电流源电路：23 种形式

三、运放电路的组成

运放的性能指标

课 题： 第 7 章 第 7.1 节 集成运放的应用基础

第 7.2 节 运算电路 (7.2.1)

目的要求： 1.深刻理解集成运放工作在线性区的条件和特点
2. 掌握反相比例运算电路的结构、工作原理及特点
3.掌握同相比例运算电路的结构、工作原理及特点
4.掌握电压跟随器的电路结构、工作原理

重点难点： **重点** 反相和同相比例运算电路的结构特点及 U_o 与 U_i 的关系
难点 理解集成运算工作在线性区的条件和特点

教学方法： 电子课件、课堂提问、课堂讨论、启发式

教 具： 电子课件

复习提问 1.知集成运放的 A_{od} ，电压传输特性估算出集成运放的线性输入范围
2.集成运放开环应用能否使运放工作在线性区？

课堂讨论 同相比例和反相比例电路分别作为一、二级组成两级放大电路
讨论其输出电压与输入电压之间的关系

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配：

教学过程：

7.1 集成运放的应用基础

复习： 上一章介绍了集成运放的符号及集成运放的电压传输特性如图示由电压传输特性曲线知，集成运放有线性工作区和非线性工作区集成运放的最大输出电压 $\pm U_{OM} = \pm 12V$, $A_{od} = 10^6$ 则最大线性输入电压为 $|U_{i_{max}}| = \frac{12}{10^6} = 12\mu V$ ，即只有 $|U_i| \leq 12\mu V$ 时运放才工作在线性区。

可见集成运放开环应用不能工作在线性区，要使集成运放工作在线性区，必需在集成运放外部电路引入负反馈。

7.1.1 理想运放的条件

理想条件： $A_{od} = \infty, r_{id} = \infty, r_{ic} = \infty, r_o = 0, CMMR = \infty, U_{IO} = 0, I_{io} = 0$ 等

用理想运放代替实际运放所产生的误差工程上是允许的

7.1.2 理想运放工作在线性区的特点

在线性区 $U_o = A_{od}(U_+ - U_-)$

$$U_+ - U_- = \frac{U_o}{A_{od}} = 0 \quad U_+ = U_- \quad \text{虚短路}$$

$$I_i = \frac{U_+ - U_-}{r_{id}} = 0 \quad \text{虚开路}$$

虚短路、虚开路是分析集成运放线性应用电路的出发点。

7.2 运算电路

7.2.1 比例运算

1. 反相比例运算电路

(1) 电路结构：从输出端到反相输入端引入负反馈，信号加到反相输入端

(2) U_0 与 U_i 关系 据图示电路及其参考方向

$$U_- = U_+ = 0 \quad i_1 = i_2 \quad \text{虚开}$$

/ \

虚路 虚开

$$\text{有 } \frac{U_i}{R_1} = -\frac{U_0}{R_2}$$

$$U_0 = -\frac{R_2}{R_1} U_i$$

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} U_i$$

若 $R_2 = R_1$ 则 $U_0 = -U_i$, $A_u = 1$ 称为反相器或反号器

平衡电阻 $R_p = R_1 \parallel R_2$

(3) 特点

① 电路引入了电压并联负反馈，输入电阻 $r_i = R_1$ 低输出电阻 $r_o = 0$

② 存在虚地 $U_- = U_+ = 0$

③ 共模输入信号 $U_{ic} = 0$ ，对于集成运放的共模抑制比要求不高

2. 同相比例运算电路

(1) 电路结构：从输出端到反相输入端引入负反馈，信号加到同相输入端

(2) U_0 与 U_i 关系

由图示参考方向：

$$U_- = U_+ = U_i \quad i_1 = i_2 \quad \text{虚开}$$

/ \

虚路 虚开

$$\text{有 } \frac{U_i}{R_1} = -\frac{U_0 - U_i}{R_2}$$

$$\text{整理后 } U_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_i$$

$$A_u = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

(3) 特点

① 电路引入了电压串联负反馈，输入电阻很大，输出电阻很小，可以认为 $r_i = \infty$

$$r_i = 0$$

② 共模输入信号 $U_{ic} = U_i$ ，对于集成运放的共模抑制比要求较高。

若同相比例运算电路中 $R_1 = \infty$ ， $R_2 = R_p = 0$

$$U_0 = U_i \quad \text{称为电压跟随器}$$

电压跟随器可以看成是同相比例运算电路的特例
此电路、电压跟随效果非常好

小结：

1. 分析集成运放线性应用电路的出发点
2. 对反相比例和同相比例运算电路进行全面比较

课题： 第 7 章 第 7.2 节 运算电路 (7.2.4——7.2.6)
第 7.3 节 有源滤波电路

目的要求：

1. 掌握积分运算电路的电路组成，输入输出关系。
2. 了解微分运算电路，对数和指数运算电路。
3. 熟悉模拟乘法器在乘法，除法等运算电路中的应用。
4. 了解有源滤波电路。

重点难点： 重点 积分运算电路
难点 有源滤波电路

教学方法： 电子课件，课堂提问，课堂讨论，启发式

教具： 电子课件

复习提问 两级运放电路分析（第一级反相求和，第二级差动运算）

课堂讨论

1. 利用模拟乘法器能否实现倍频？
2. 若能实现，画出电路图并分析。

素质思政内容： 帮助学生树立科学发展观
强化学生专业和学科所承担的使命与历史责任感

课时分配： 4 节

教学过程：

7.2.4 积分和微分运算电路

复习：两级运放电路分析

1. 积分运算电路
(1) 电路结构

反相比例运算电路中，反馈支路中的电阻换成电容即构成积分运算电路

(2) U_o 与 U_i 关系

由图示参考方向

$$U_o = -U_c = -1/c \int i_i dt = -1/RC \int U_i dt$$

(3) 实用的积分运算电路

在上述积分电路中，反馈电容两端并上一个大电阻即构成实用的积分电路。

2. 微分运算电路

(1) 电路结构

积分和微分互为逆运算，积分电路中的 C 和 R 互换位置即构成微分运算电路。

(2) U_o 与 U_i 关系

$$U_o = -R i_f = -R i_c = -RC dU_i/dt$$

实用微分电路，在输入端与电容 C 串接一个小电阻，可使微分电路的工作稳定性提高

7.2.5 对数和指数运算电路

1. 对数运算电路

电路结构：反相积分运算电路中的电容换成二极管则构成基本的对数运算电路

(1) U_o 与 U_i 关系

$$i_D = I_s (e^{U_D/UT} - 1)$$

$$i_i = i_D \approx I_s e^{U_D/UT}$$

$$U_o = -U_D$$

考虑上述各式得

$$U_o = -U_T \ln \frac{U_i}{RI_s}$$

指数运算电路

(1) 电路结构：对数电路中的二极管 D 与电阻 R 互换位置则构成指数电路

(2) U_o 与 U_i 关系

$$U_D = U_i - U_o = U_i$$

$$i_D = I_s e^{U_D/UT}$$

$$U_o = -i_D R = -I_s R e^{U_i/UT}$$

7.2.6 乘法运算电路

模拟乘法器的符号如图，它有两个输入端，一个输出端，两个输入端分别加上输入信号 U_x 和 U_y ，则输出

$$U_o = k U_x U_y$$

式中 k 为运算系数，由生产厂家定。

若两个输入端联在一起，加上输入信号 U_I ，可实现平方运算

即 $U_o = k U_I^2$

乘法器和集成运放配合可构成除法，开方，开立方等运算。除法电路如图：

$$U_{x1}/R_1 = U_2/R_2$$

$$U_2 = k U_o U_{x2}$$

所以 $U_o = -R_2/(kR_1) U_{x1}/U_{x2}$

若选 $R_2/R_1 = k$ 则有 $U_o = -U_{x1}/U_{x2}$

注意，此电路要求 U_{x2} 为正极

7.3 有源滤波电路

7.3.1 低通滤波电路

图 (a) 的通带电压放大倍数为

$$A_{up} = (1 + R_f/R_1)$$

截止角频率

$$\omega_0 = 1/RC$$

图 (b) 通带电压放大倍数

$$A_{up} = -R_f/R_1$$

截止角频率

$$\omega_0 = 1/R_f C$$

低通滤波电路的幅频特性如图示

7.3.2 高通滤波电路

图(a)为同相输入的高通滤波电路

通带电压放大倍数 $A_{up} = 1 + R_f/R$

截止角频率 $\omega_0 = 1/RC$

图(b)为反相输入高通滤波电路

通带电压放大倍数 $A_{up} = -R_f/R_1$

截止角频率 $\omega_0 = 1/R_f C$

高通滤波电路的幅频特性如图示：

小 结

1. 积分运算电路能起到波形变换作用
2. 模拟乘法器与集成运放配合可构成多种运算电路
3. 有源滤波器按工作频率分类及对应的频率特性