



模拟电路基础（下）

绪论与放大器基础

1.1 课程简介



➤ 课程性质：

模拟电路基础（下）——模拟电子技术基础（模电），又称低频电子线路，是电子电气类专业的技术基础课程。

➤ 课程基础：

高等数学、物理电学基础、电路分析(模拟电路基础（上）)

1.1 课程简介

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 课程特点:

非纯理论性课程，难？

实践性强

以工程的观点来处理问题

➤ 课程内容:

以器件为基础、以信号为主线，研究各种模拟电子电路的工作原理、特点及性能指标等。

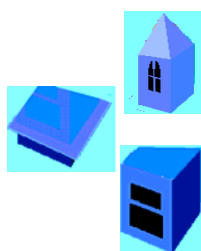
1.1 课程简介

4

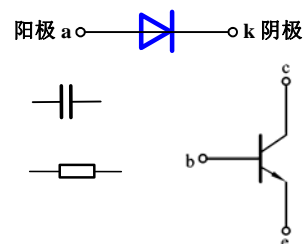


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

小积木块



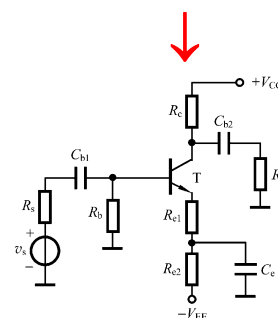
基本器件



大积木块



基本电路



1.1 课程简介

5

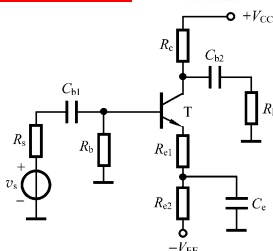


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

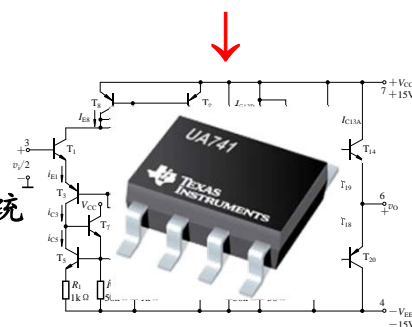
大积木块



基本电路



电路子系统



1.1 课程简介

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 学习目标:

掌握基本概念（器件）、基本电路、基本分析方法、基本实验技能，能够对常用的电子电路进行分析，同时对较简单的单元电路进行设计。

具有能够继续深入学习和接收电子技术新发展的能力，将所学知识用于本专业的能力。

- ◆会看：定性分析
- ◆会算：定量计算、功能电路设计计算
- ◆会选：电路形式、器件、参数
- ◆会调：测试方法、仪器使用、错误分析、EDA仿真

1.1 课程简介

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 课堂教材:

- 《模拟电子电路基础》 武汉大学电子线路课程组, 电子工业出版社 2022
- 《电子线路1》董尚斌、苏利、代永红编著, 清华大学出版社
- 《电子技术基础》(模拟部分第六版) 康华光主编, 高等教育出版社

➤ 参考教材:

- Behzad Razavi. Fundamentals of Microelectronics[M]. 第2版. 美国新泽西州Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础. 第5版. 高等教育出版社.

1.1 课程简介

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 网络资源:

- 童诗白《模拟电子技术基础》上海交通大学郑益慧
<https://www.bilibili.com/video/BV1wZ4y1g7kb>
- 电子技术基础(模拟部分) 华中科技大学 张林
<https://www.bilibili.com/video/BV1K7411L7aR>

1.1 课程简介

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 学习方法：

- 掌握电路基本理论的同时，学会从工程的角度思考和处理问题，学会使用合适的模型对电路进行合理的近似分析。
- 课前预习，勤于思考，注重课后习题训练。
- 注重实践训练，学会利用现代电子电路计算机辅助软件，对电路进行分析调试。
- 克服学习上的“畏难”情绪，独立完成作业。
- 注意老师对不同知识点的态度。

1.1 课程简介

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 学分与考核：

- 共计4学分（68学时）
- 授课方式：56学时理论课+12学时实验课
- 评分方法

到课率（10%）：回答问题，点名

作业（20%）：独立完成，严禁抄袭（学委收齐，放置讲台）

测验（20%）：随堂测验1-2次

期末考试（50%）：闭卷，要求高于55分

8道大题（近年）\不定项选择+填空+大题

1.1 课程简介

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

主要内容	学时
绪论、放大器概述	2学时
半导体物理、二极管及其电路	4学时
双极结型晶体管及其放大电路	12学时
场效应管及其放大电路	4学时
运算放大器原理（差分放大、镜像电流源、功率放大）	10学时
反馈放大电路	8学时
频域特性与频率响应	6学时
运算放大器的运用(运算、比较、滤波)	6学时
直流稳压电源、总复习	4学时

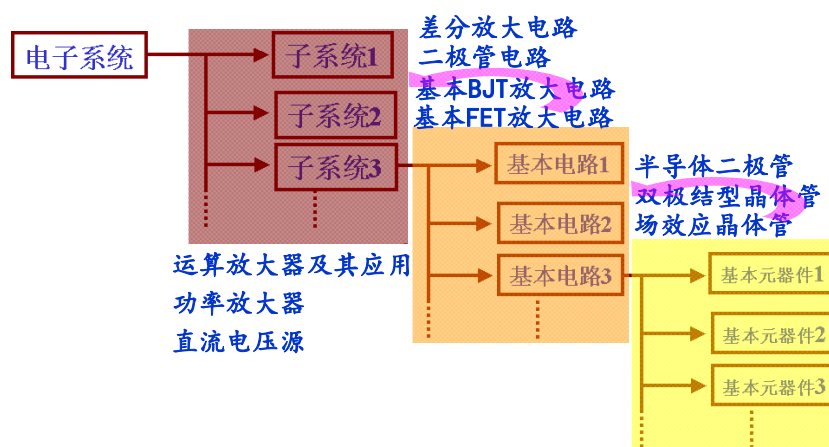
1.1 课程简介

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 教学安排:



1.2 电子科技发展简史

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

1883 年，美国发明家爱迪生发现了**热电子效应**，即爱迪生效应。



爱迪生效应示意图



爱迪生效应同后来的电子发现、**电子二极管**的发明密切相关，因此在科学史上具有重要意义。

1.2 电子科技发展简史

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电子管时代：

1904年弗莱明利用热电子效应制成了**电子二极管**，并证实了电子管具有“阀门”作用，电子二极管首先被用于无线电检波。

1906 年美国的德弗雷斯在弗莱明的二极管中放进了第三个电极—栅极而发明了**电子三极管**，从而建树了早期电子技术史上最重要的里程碑。



1.2 电子科技发展简史

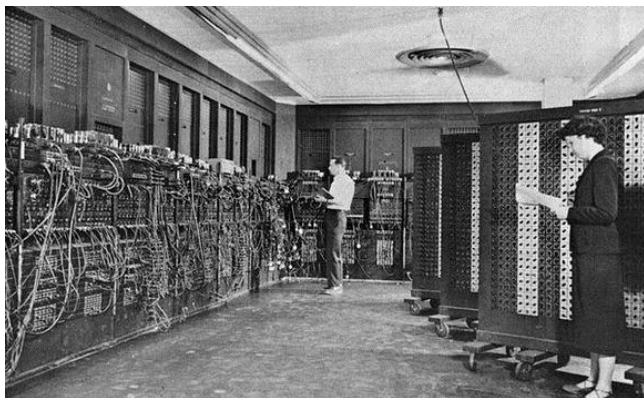
15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电子管时代：

1946年2月14日，世界上第一台通用计算机在美国宾夕法尼亚大学诞生。该计算机用**1.8万**只电子管，占地**170m²**，重**30t**，耗电**150kW**。



电子管的缺点：

- 1、功耗大
- 2、体积大
- 3、无法集成

1.2 电子科技发展简史

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电子管时代：



1.2 电子科技发展简史

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 晶体管时代：

1947 年美国贝尔实验室的肖克利、巴丁和布拉顿发明了**晶体管**。它的出现，标志着现代半导体产业的诞生和信息时代正式开启。



1.2 电子科技发展简史

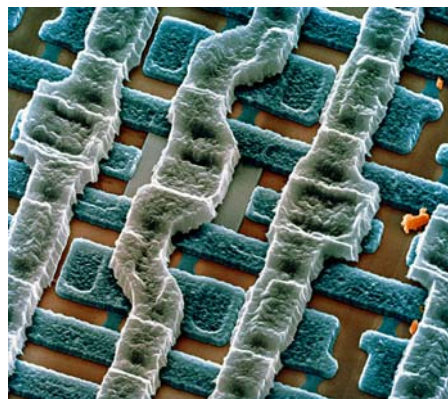
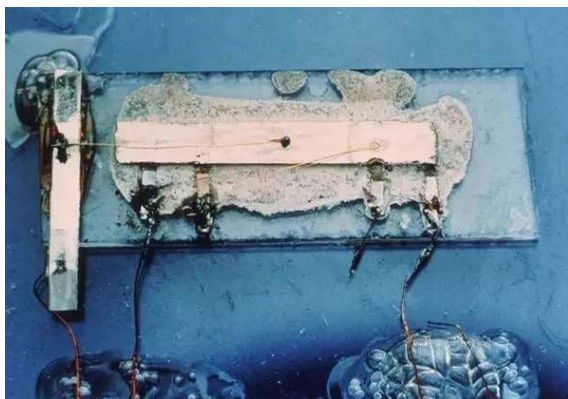
18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 集成电路时代：

1958 年，**集成电路**的第一个样品研制成功(美国德克萨斯公司, TI)。集成电路的出现和应用，标志着电子技术发展到了微电子技术阶段。



1.2 电子科技发展简史

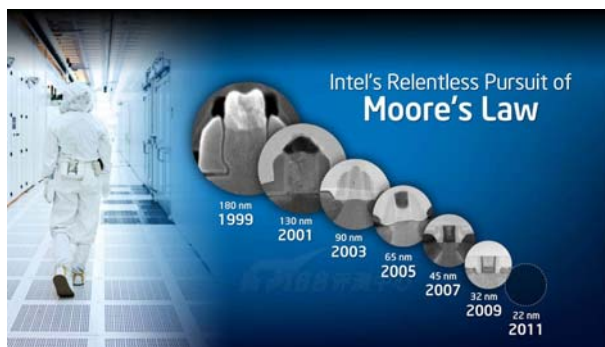
19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

Intel公司创始人之一Gordon E. Moore在1975年预言了集成电路芯片的发展规律。

摩尔定律：集成电路芯片上所集成的电路的数目每隔18-24个月就翻一番。



1.2 电子科技发展简史

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 片上系统(SOC)时代：

随着集成电路(IC)的设计与工艺水平日趋提高,诞生了将整个系统集成在一个微电子芯片上的系统芯片(System on Chip, 简称SOC)概念。



华为海思研发的商用7nm工艺的SOC—麒麟990处理器

SOC意味着在单个芯片上,就能完成一个电子系统的功能,而这个系统在以往往往需要一个或多个电路板,以及板上的各种电子器件、芯片和互连线共同配合来实现。

1.3 电子系统与信号

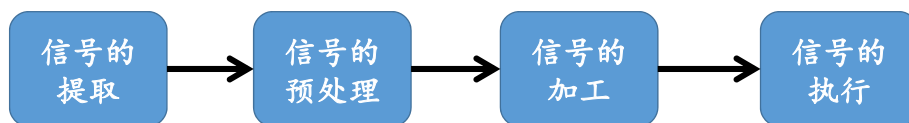
21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电子系统：

- 定义：由若干相互联接、相互作用的基本电路组成的具有特定功能的电路整体。
- 分类：数字电子系统、模拟电子系统



电子系统组成

1.3 电子系统与信号

22

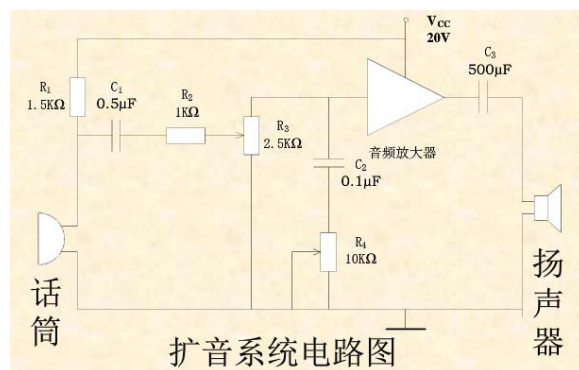


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 模拟电子系统的应用举例

模拟电子系统应用案例一：语音放大电路。

通过传感器话筒将声音转化为电信号，把微弱的电信号放大使负载(扬声器)获得大信号并发出声音。放大电路是语音放大电路研究的主要内容。



1.3 电子系统与信号

23

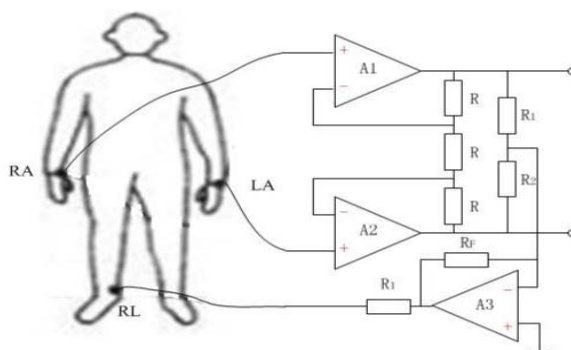


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 模拟电子系统的应用举例

模拟电子系统应用案例二：心电图放大器。

将脉搏传感器提取的微弱信号进行放大并显示、打印。心电信号十分微弱，频率一般在0.5-100Hz之间，幅度大约在10 μ V（胎儿）~5mV（成人）之间，所需放大倍数约为500-1000倍。



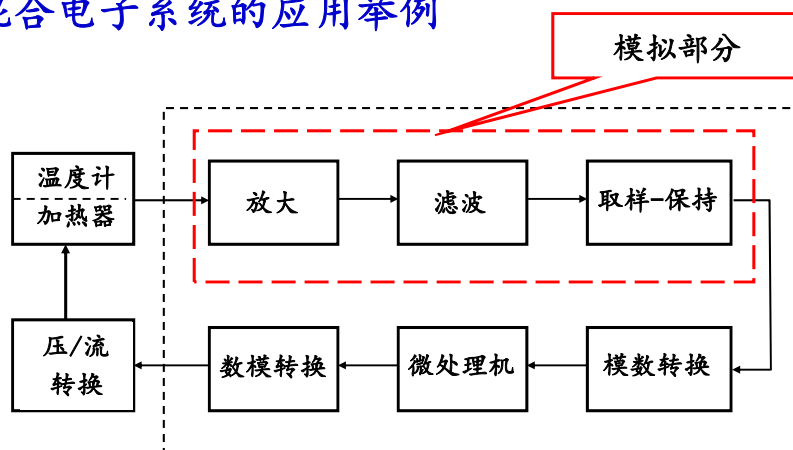
1.3 电子系统与信号

24



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 数模混合电子系统的应用举例



温度控制系统方框图

1.3 电子系统与信号

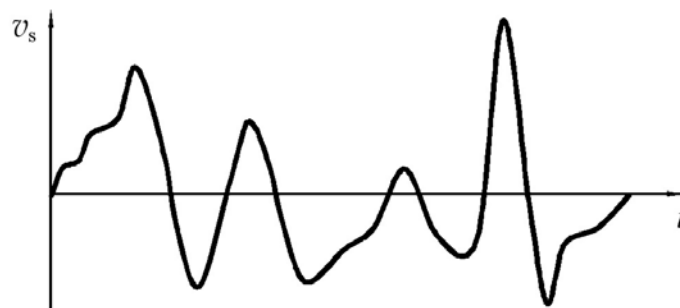
25



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 信号:

- 信息的载体



温度传感器输出的某一段信号的波形

1.3 电子系统与信号

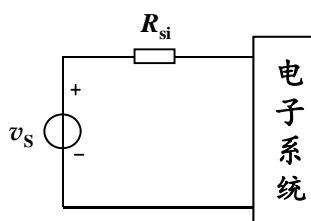
26



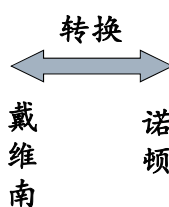
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 信号:

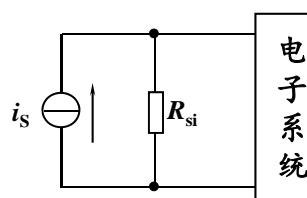
- 信号源的形式



电压源等效电路



$$i_s = \frac{v_s}{R_{si}}$$



电流源等效电路

1.3 电子系统与信号

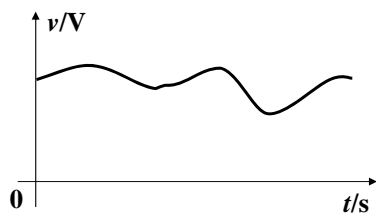
27



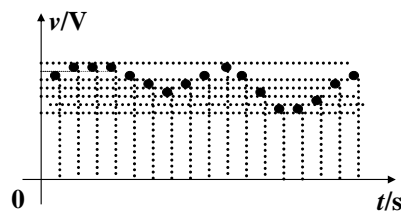
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

模拟信号：在时间和幅值上都是连续的信号。

数字信号：在时间和幅值上都是离散的信号。



(a) 时间、幅值均连续



(b) 时间、幅值均离散A/D转换器输出信号

处理模拟信号的电子电路称为模拟电路。

1.4 放大电路模型

28



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的基本概念 对应课本4.1节



- 放大的对象：变化量(交流量)
- 放大的本质：能量的控制
- 放大的特征：功率放大(电流、电压共同作用)
- 放大的基本要求：不失真

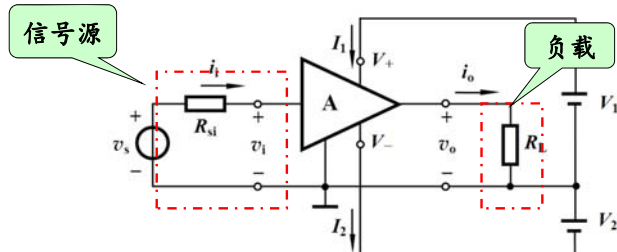
1.4 放大电路模型

29



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路的基本概念



电压增益 (电压放大倍数)

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

互阻增益

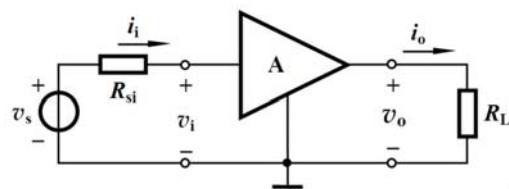
$$A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad (\Omega)$$

电流增益

$$A_i = \frac{i_o}{i_i}$$

互导增益

$$A_g = \frac{i_o}{v_i} \quad (\text{S})$$



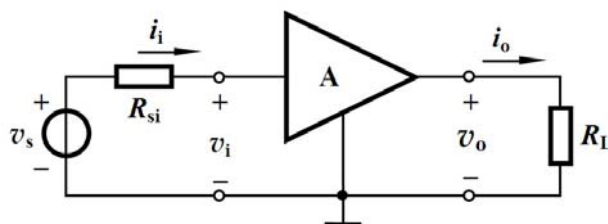
1.4 放大电路模型

30



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路模型



放大电路是一个双口网络。从端口特性来研究放大电路，可将其等效成具有某种端口特性的等效电路。

- 输入端口特性可以等效为一个输入电阻
- 输出端口可以根据不同情况等效成不同的电路形式

1.4 放大电路模型

31



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路模型

A. 电压放大模型

A_{vo} —— 负载开路时的电压增益

R_i —— 输入电阻

R_o —— 输出电阻

由输出回路得

$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

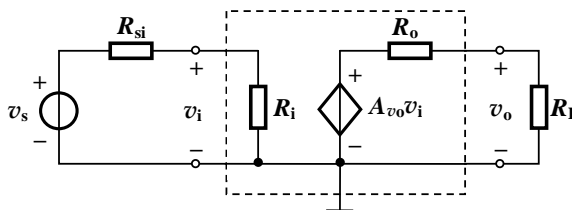
则电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

由此可见 $R_L \downarrow \longrightarrow A_v \downarrow$ 即负载的大小会影响增益的大小

要想减小负载的影响, 则希望...? (考虑改变放大电路的参数)

$$R_o \ll R_L \quad \text{理想情况} \quad R_o = 0$$



1.4 放大电路模型

32



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路模型

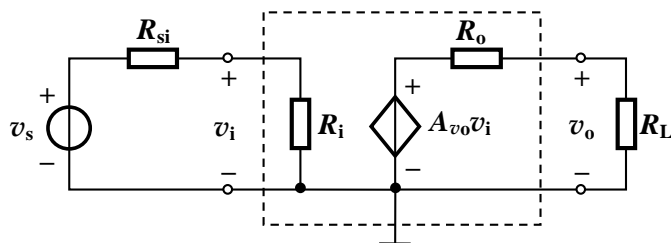
A. 电压放大模型

另一方面, 考虑到输入回路对信号源的衰减

$$\text{有 } v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s$$

要想减小衰减, 则希望...?

$$R_i \gg R_s \quad \text{理想情况} \quad R_i = \infty$$



1.4 放大电路模型

33

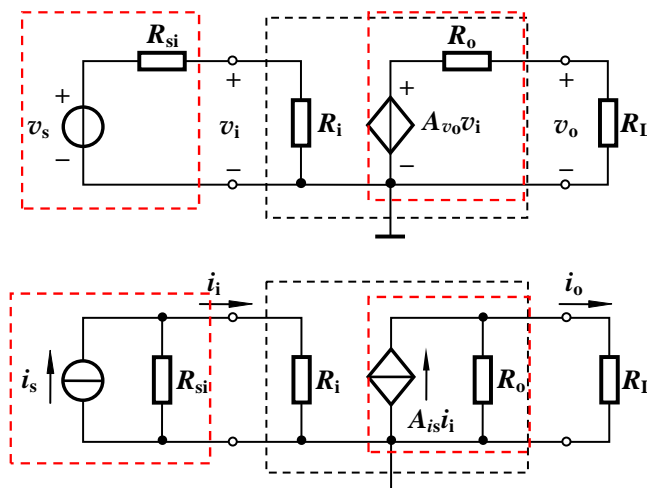


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路模型

B. 电流放大模型

关心输出电流与输入
电流的关系



1.4 放大电路模型

34



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 放大电路模型

B. 电流放大模型

A_{is} —— 负载短路时的电流增益

由输出回路得

$$i_o = A_{is} i_i \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

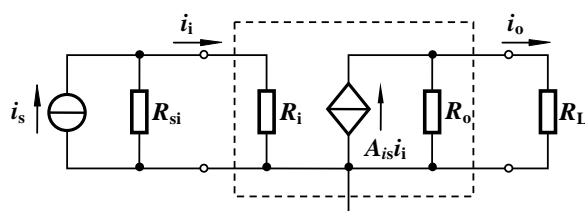
则电流增益为 $A_i = \frac{i_o}{i_i} = A_{is} \frac{R_o}{R_o + R_L}$

由此可见 $R_L \uparrow \rightarrow A_i \downarrow$

要想减小负载的影响, 则希望...? $R_o \gg R_L$ 理想情况 $R_o = \infty$

由输入回路得 $i_i = i_s \frac{R_s}{R_s + R_i}$

要想减小对信号源的衰减, 则希望...? $R_i \ll R_s$ 理想情况 $R_i = 0$



1.4 放大电路的主要性能指标

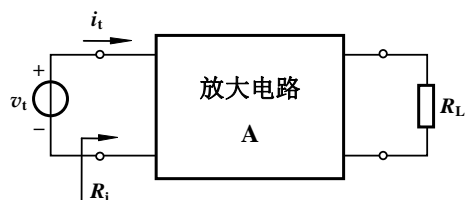
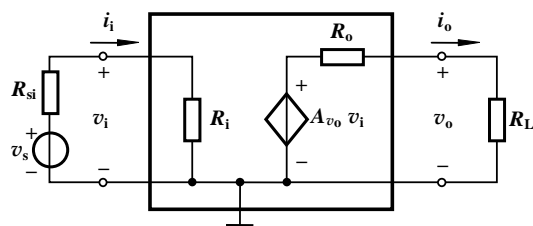
35



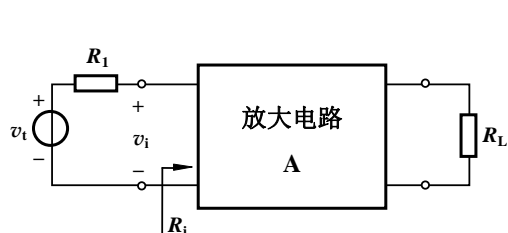
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 输入电阻

有两种求解思路：



$$R_i = \frac{v_t}{i_t}$$



$$\frac{v_t}{v_i} = \frac{R_i}{R_i + R_1}$$

$$R_i = \frac{R_1 v_i}{v_t - v_i}$$

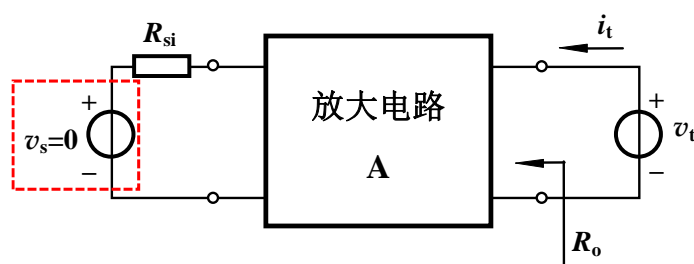
1.4 放大电路的主要性能指标

36



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 输出电阻



$$R_o = \frac{v_t}{i_t} \Big|_{v_s=0, R_L=\infty}$$

注意：输入、输出电阻为交流电阻

1.4 放大电路的主要性能指标

37



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 增益

反映放大电路在输入信号控制下，将供电电源能量转换为输出信号能量的能力。

四种增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad A_g = \frac{i_o}{v_i}$$

其中 A_v 、 A_i 常用分贝 (dB) 表示。

电压增益 = $20 \lg |A_v|$ (dB) 电流增益 = $20 \lg |A_i|$ (dB) 功率增益 = $10 \lg A_p$ (dB)

“甲电路的增益为20倍”和“乙电路的增益为20dB”，问哪个电路的增益大？

1.4 放大电路的主要性能指标

38



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应

在输入正弦信号情况下，输出随输入信号频率连续变化的稳态响应，称为放大电路的频率响应。

电压增益可表示为

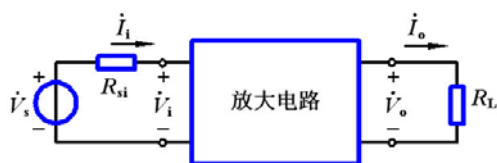
$$\begin{aligned} A_v(j\omega) &= \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \\ &= \left| \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \right| \angle [\varphi_o(\omega) - \varphi_i(\omega)] \end{aligned}$$

或写为 $\dot{A}_v = A_v(\omega) \angle \varphi(\omega)$

其中

$$A_v(\omega) = \left| \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \right| \quad \text{称为幅频响应}$$

$\angle \varphi(\omega) = \varphi_o(\omega) - \varphi_i(\omega)$ 称为相频响应



1.4 放大电路的主要性能指标

39



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率响应

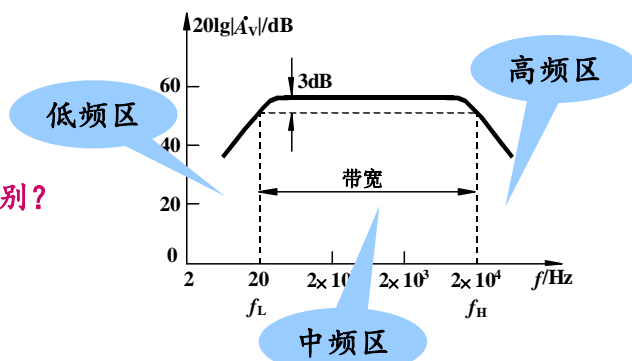
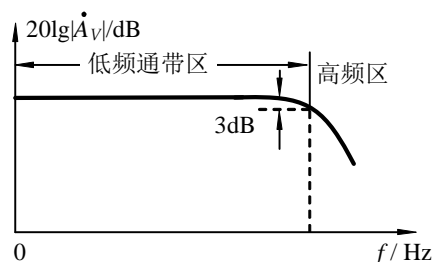
其中 f_H ——上限频率

f_L ——下限频率

$BW = f_H - f_L$ 称为带宽

当 $f_H \gg f_L$ 时, $BW \approx f_H$

直流放大电路的幅频响应与此有何区别?



普通音响系统放大电路的幅频响应

1.4 放大电路的主要性能指标

40

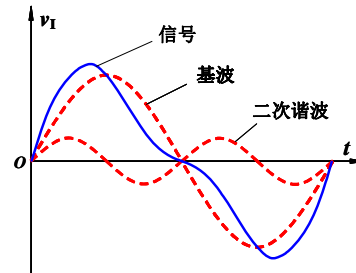
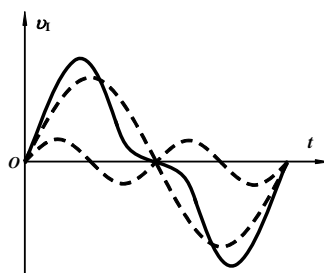


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 频率失真（线性失真）

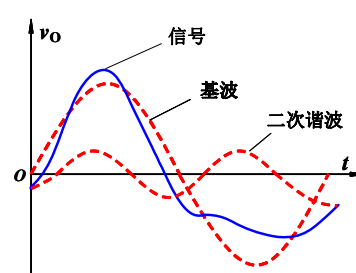
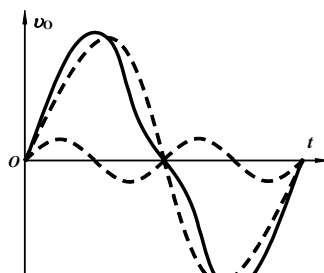
幅度失真：

对不同频率的信号
增益不同，产生的失真。



相位失真：

对不同频率的信号
时延不同，产生的失真。



1.4 放大电路的主要性能指标

41



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

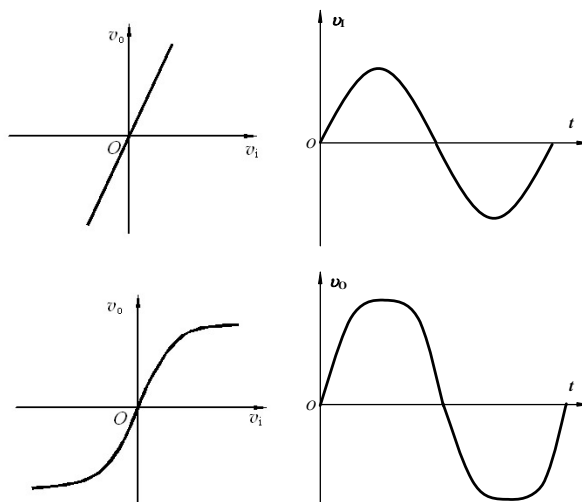
➤ 非线性失真

由元器件非线性特性引起的失真。

非线性失真系数：

$$\gamma = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{ok}^2}}{V_{o1}} \times 100\%$$

V_{o1} 是输出电压信号基波分量的有效值， V_{ok} 是高次谐波分量的有效值， k 为正整数。



绪论与放大器基础

42



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

知识点掌握要求

- 了解放大电路的基本概念和模型
- 熟练掌握输入电阻、输出电阻、增益的概念和计算方法；
- 掌握频率响应、频率失真（线性失真）、非线性失真的概念