

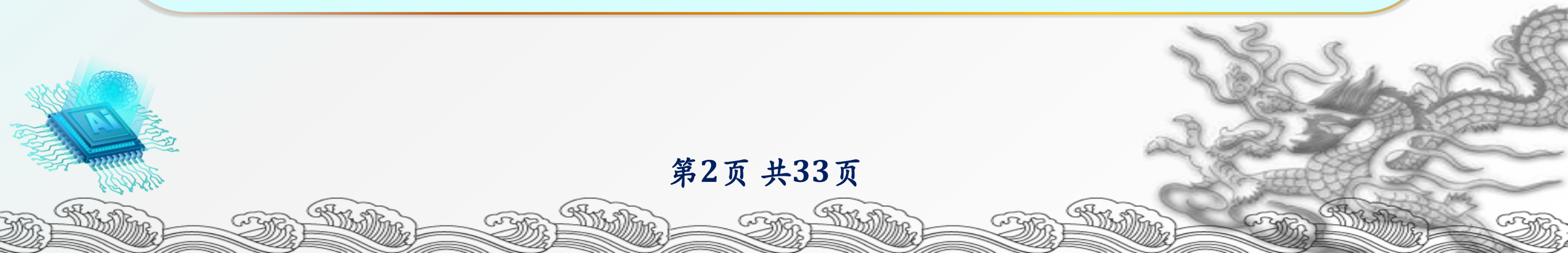
# 第3章 放大电路基础

现实世界的物理量通过传感器转为微弱的电信号，必须放大到一定的程度才能应用于各种仪器，微型计算机内部的模数转换模块能够接受的信号也是这个放大后的信号，因此，放大电路十分重要。本章介绍分立元件基本放大电路和集成运算放大电路，给出微型计算机中常用的单端放大电路、差分放大电路和采样保持电路，还给出了电子秤称重模块电路应用实例。



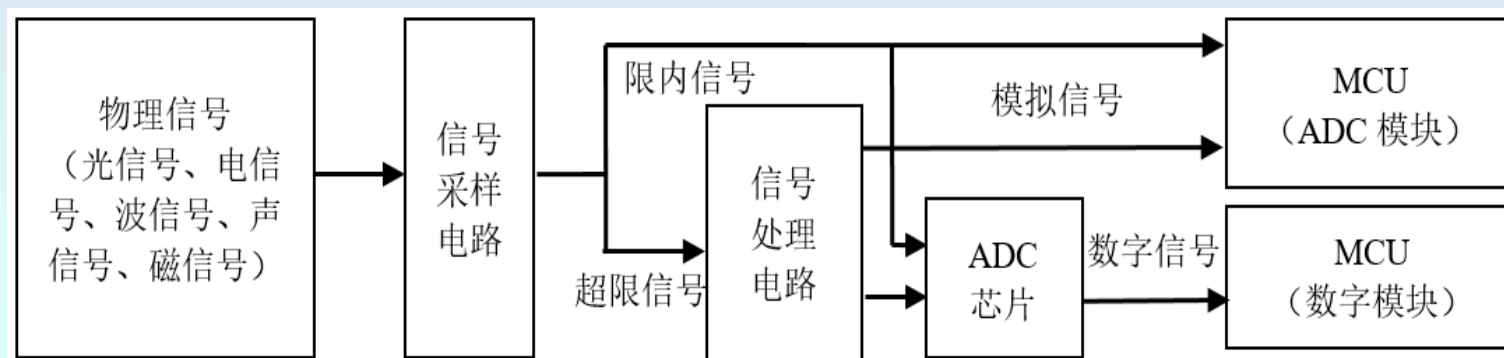
## 3.1 信号采样

为了实现现实世界的信息采集，需要将现实世界中的物理的、化学的、生物的信号进行采样和处理，最后传送至计算机系统。电信号具有易于放大、反馈、滤波、存储，以及适合远距离传输的特点，因而通常将各类现实世界中的信号通过采样换成电信号，然后对采样信号处理后传送至计算机以备应用系统使用。



## 3.1.1 物理信号采样流程

**物理信息**是指物理过程传递的信号，主要包括：声、光、温度、湿度、磁力、机械振动等。**物理信号**是用来载荷和表示物理信息的符号、状态和标志的物理媒介，比如：光信号、电信号、波信号、声信号、磁信号等。

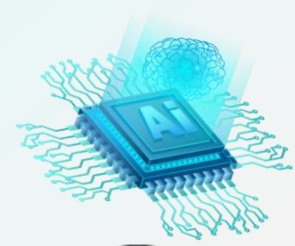


**演示例：**基于GEC的温度显示（运行电子资源..\03-Software\CH03下程序）

## 3.1.2 传感器

**传感器**是一种能感受到被测量物理信号的检测装置，能将感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出，用以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。

根据感知功能可将传感器分为光敏传感器、热敏传感器、气敏传感器、力敏传感器、磁敏传感器、湿敏传感器、声敏传感器、放射线敏感传感器、色敏传感器和味敏传感器等十大类。

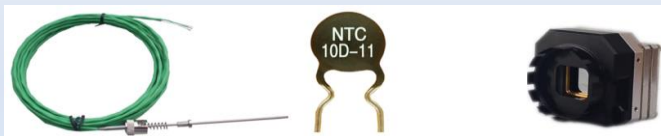




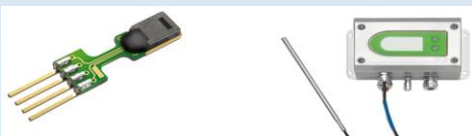
## 1. 光敏传感器



## 2. 温度传感器



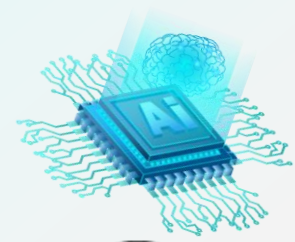
## 3. 湿度传感器



## 4. 压力传感器

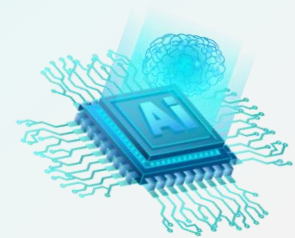


## 5. 声音传感器

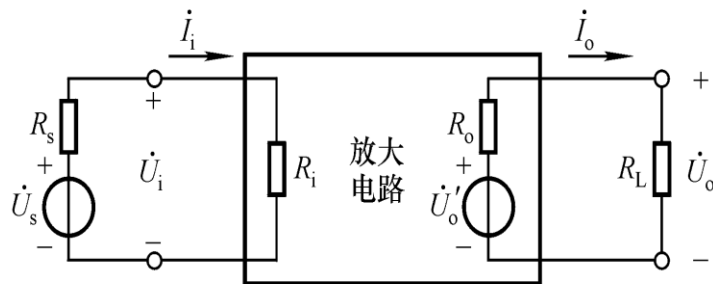


## 3.2 基本放大电路

放大电路中的“放大”是指用一个小的变化量控制一个较大量的变化，使变化量得到放大。前后变化要求一致，不“失真”，实现成比例线性放大。放大电路利用晶体管等有源器件实现能量的控制和转换，输入很小的电压、电流和能量，最后在负载上获得较大的电压、电流和功率，即将直流电源的能量转换为负载获取的能量。最常见的基本放大电路为共射极放大电路。



## 3.2.1 放大电路的主要性能指标 (掌握)



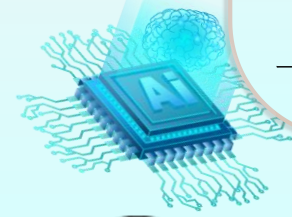
1. **放大倍数** (增益):  $A_u = \frac{U_o}{U_i}$

2. **输入电阻**: 输入电阻 $R_i$ 是从放大电路输入端看进去的等效电阻, 定义为输入电压有效值 $U_i$ 和输入电流有效值 $I_i$ 之比,  $R_i$ 越大越好, 表明放大电路从信号源索取的电流越小。  $R_i = \frac{U_i}{I_i}$

3. **输出电阻**: 任何放大电路的输出都可以等效成一个有内阻的电压源, 从放大电路输出端看进去的等效内阻称为输出电阻 $R_o$ , 越小越好。

$$U_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} U'_o$$

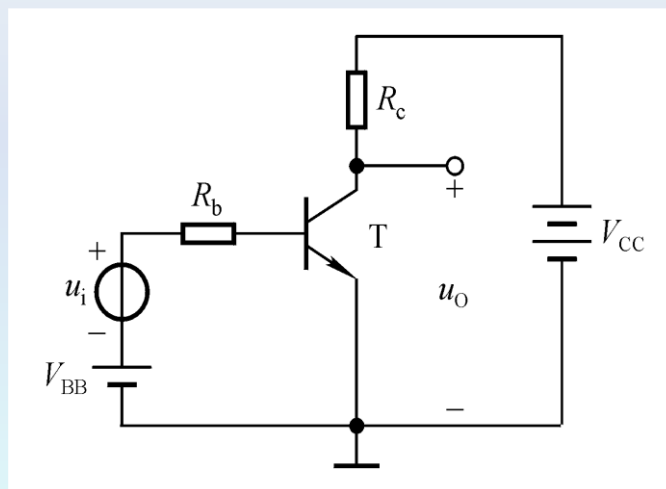
4. **通频带**: 用于衡量放大电路对不同频率信号的放大能力, 一般情况, 放大电路只适用于放大某一个特定频率范围内的信号。



## 3.2.2 共射放大电路工作原理 (掌握)

以NPN三极管组成的共射极放大电路为例。

### 1. 电路组成



$V_{BB}$  : 基极电源,  $R_b$  : 基极电阻,  $u_i$  : 输入信号  
 $V_{CC}$  : 集电极电源,  $R_c$  : 集电极电阻,  $u_o$  - 输出信号



## 2. 组成原则

(1) 必须保证三极管工作在放大区。

必须根据所用三极管的类型提供合适的直流电源，并设计合适的偏置电路来保证三极管始终处于放大区。

(2) 保证待放大信号能输入、放大后的信号能输出。

由于放大功能是以三极管为核心完成的，所以应在电路接法上保证待放大的信号 $u_i$ 能加到放大管的输入端口上，且同时保证放大后的信号 $u_o$ 能输送到负载上。

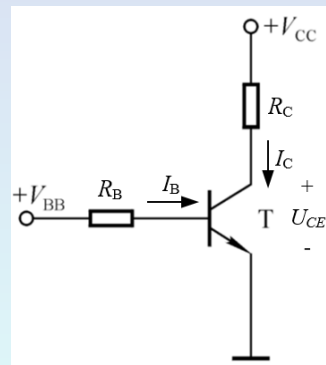
(3) 为使信号不失真，在没外加信号作用下，三极管不但要处于放大状态，还应有一个合适的静态工作点。



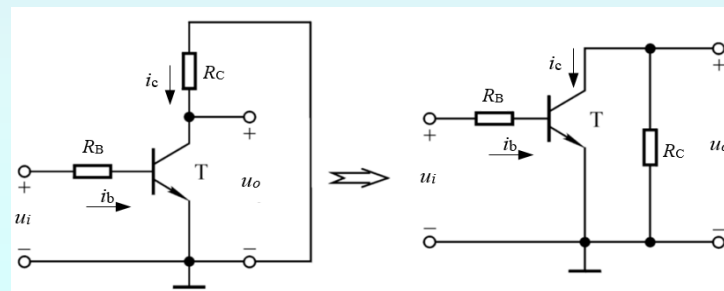
## 3. 工作原理分析

在放大电路中，直流量和交流信号总是共存的。因电容、电感等电抗元件的存在，直流量所流经的通路与交流信号所流经的通路是不完全相同的。为方便起见，常把直流电源对电路的作用和输入信号对电路的作用区分开来，分成直流通路和交流通路。

**直流通路**是在直流电源作用下直流电流流经的通路，也就是静态电流流经的通路，用于研究静态工作点。对于直流通路：（1）电容视为开路；（2）电感线圈视为短路（即忽略线圈电阻）；（3）信号源视为短路，但应保留其内阻。



**交流通路**是输入信号作用下交流信号流经的通路，用于研究动态参数。对于交流通路：（1）容量大的电容（如耦合电容）视为短路；（2）无内阻的直流电源（如 $+V_{CC}$ ）视为短路。



## 1) 静态分析 (重点掌握)

无输入信号 ( $u_i = 0$ ) 时电路的工作状态称为静态, 在输入回路中, 基极电源  $V_{BB}$  使基极与发射极间电压  $U_{BE}$  大于开启电压  $U_{on}$ , 并与基极电阻  $R_B$  共同决定基极电流  $I_B$ ; 在输出回路中, 集电极电源  $V_{CC}$  应足够高, 使集电结反向偏置, 以保证晶体管工作在放大状态, 因此集电极电流  $I_C = \beta I_B$ ; 集电极电阻  $R_C$  上的电流等于  $I_C$ , 因而  $R_C$  上的电压为  $I_C R_C$ , 从而确定了集电极与发射极间电压  $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ 。

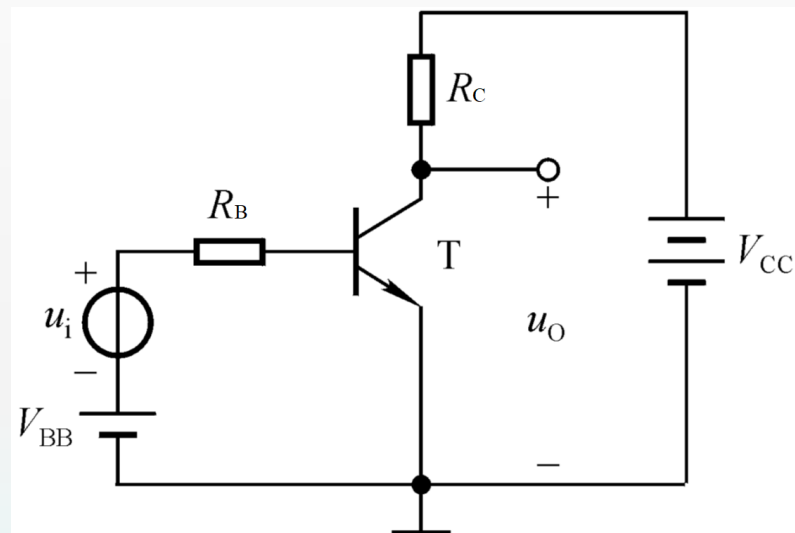
利用基尔霍夫电压定律得:

$$R_B I_B + U_{BE} = V_{BB}$$
$$I_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{BB}}{R_B}$$

式中,  $U_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$  (硅管);  $U_{BE} \approx 0.2 \text{ V}$  (锗管), 有时可忽略不计, 计算出  $I_B$  后, 继续计算  $I_C$ 、 $U_{CE}$ 。

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$



## 【例3-1】

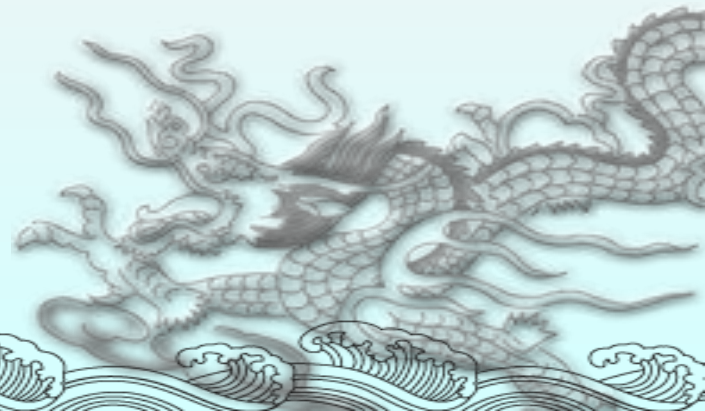
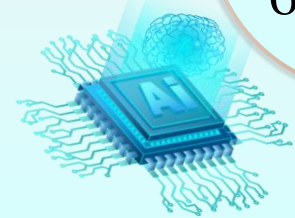
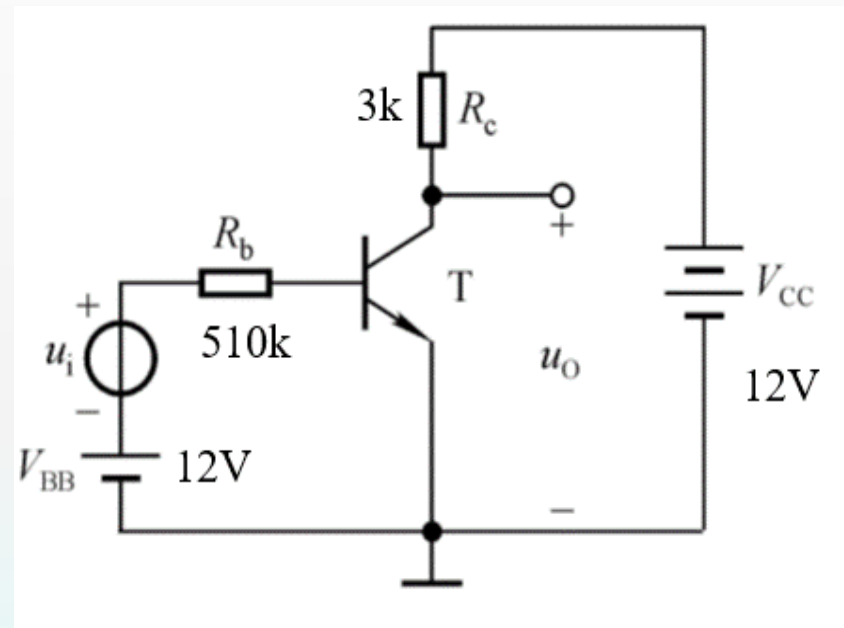
$V_{BB}=12\text{V}$  ,  $V_{CC}=12\text{V}$  ,  $R_b=510\text{k}\Omega$  ,  
 $R_c=3\text{k}\Omega$  , 晶体管的 $\beta=100$  ,  $U_{BE}=0.7\text{V}$  ,  
求解其静态工作点参数

【解】

$$I_B = (V_{BB} - U_{BE}) / R_b = (12\text{V} - 0.7\text{V}) / 510\text{k}\Omega \approx 22\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 22\mu\text{A} = 2200\mu\text{A} = 2.2\text{mA}$$

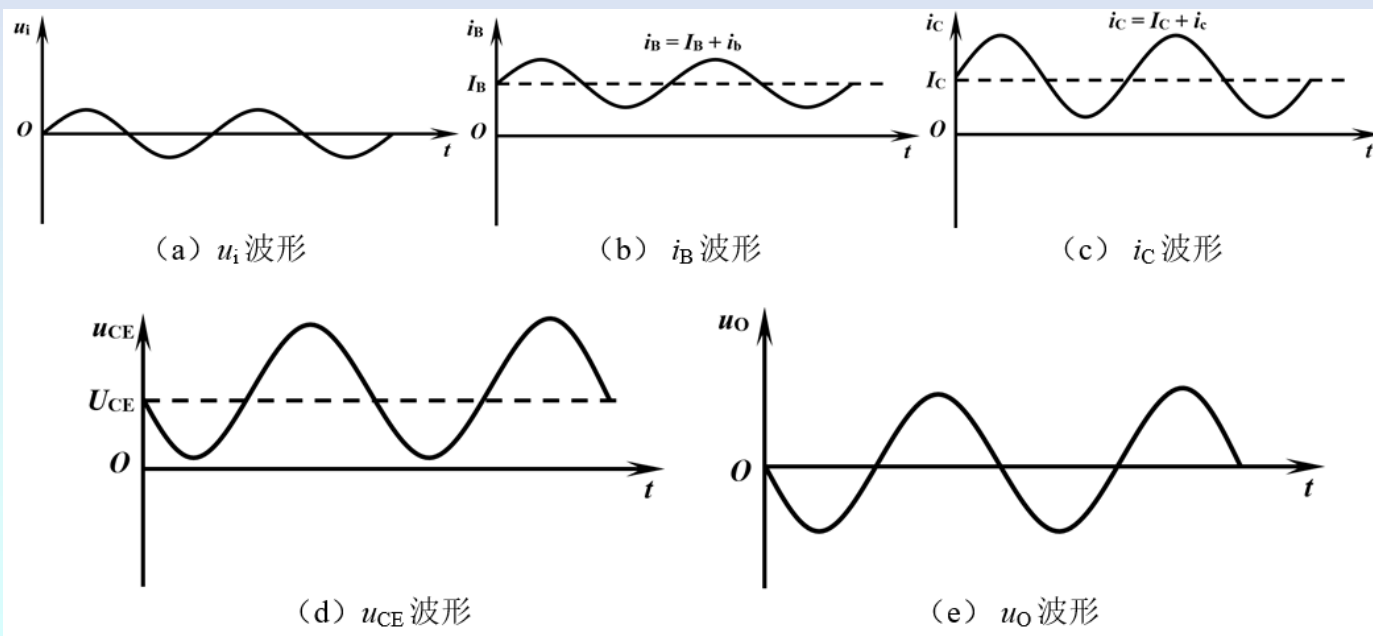
$$\begin{aligned} U_{CE} &= V_{CC} - I_C R_c \\ &= 12\text{V} - 2.2\text{mA} \times 3\text{k}\Omega = 12\text{V} - 6.6\text{V} = 5.4\text{V} \end{aligned}$$





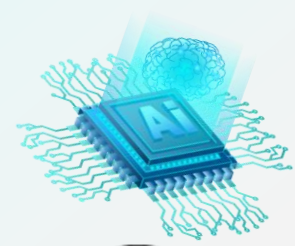
## 2) 动态分析 (了解)

在输入回路中，必将在静态电流 $I_B$ 上产生一个动态的基极电流 $i_b$ ；当然，在输出回路就可得到动态电流 $i_c$ ；集电极电阻 $R_c$ 将集电结电流的变化转化成电压的变化，即使得管压降 $u_{CE}$ 产生变化，管压降的变化量就是输出动态电压 $u_o$ ，从而实现了电压放大。直流电源 $V_{CC}$ 为输出提供所需能量。



## 3.3 集成运算放大电路

集成电路出现以后，使用分立元件进行放大已经很少，大部分使用集成运算放大电路。



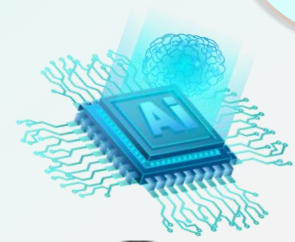
## 3.3.1 概述

### 1. 集成运算放大电路出现的背景与时间

**1947年三极管的出现**，给微弱信号放大提供了有效途径。但是分立元件放大电路具有一些缺点，如使用便利性不好、高性能比较难做、体积大等，人们不断探索，**1958年**，杰克·基尔比 (Jack Kilby) 成功研制出**世界上第一块集成电路**，**2000年**，基尔比因集成电路的发明被授予**诺贝尔物理学奖**。

自从**1964年**美国仙童半导体公司研制出**第一个单片集成运算放大器 $\mu A702$** 以来，集成运算放大器得到了广泛的应用，它已成为线性集成电路中品种和数量最多的一类。

集成运算放大电路，简称集成运放，它具有集成度高、使用便利、性能高、体积小等优点，在分立元件放大电路基础上向前迈出了一大步，在众多应用场合，取代了分立元件放大电路。



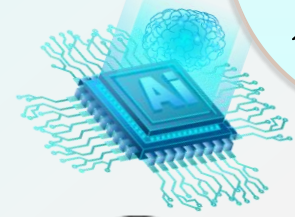


## 2. 集成运算放大电路的含义

集成运算电路将“管”和“路”紧密结合采用专门的制造工艺，把晶体管、场效应管、二极管、电阻和电容等元件及它们之间的连线所组成的完整电路制作在一起，使之具有特定的功能。集成放大电路最初多用于各种模拟信号的运算（如比例、求和、求差、积分、微分等），被称为集成运算放大电路简称**集成运放**，它在大多数情况下取代了分立元件放大电路。

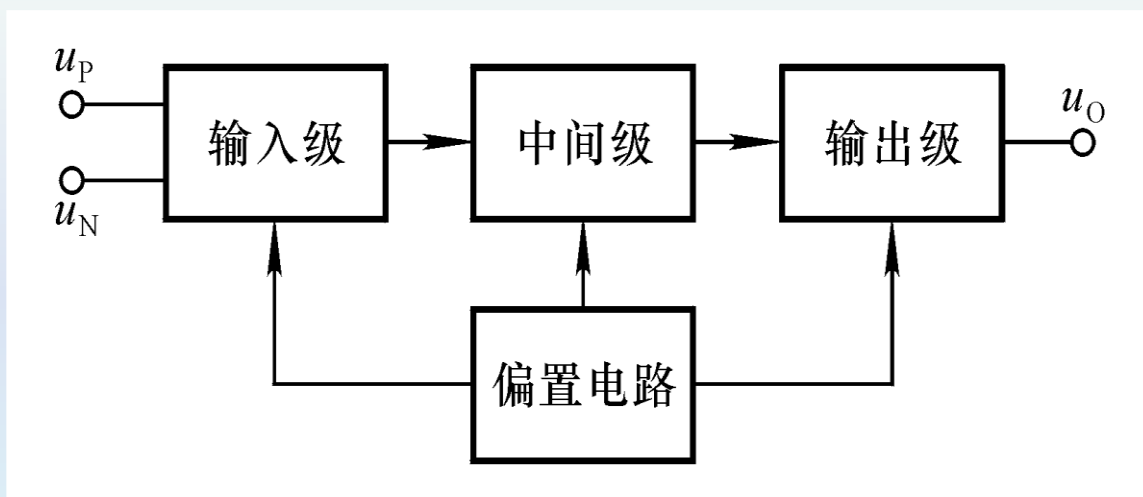
## 3. 集成运放制造工艺特点

- (1) **采用直接耦合方式**。因为硅片上**不能制作大电容**，所以集成运放均采用直接耦合方式；
- (2) **采用差分放大电路和恒流源电路**。因为相邻元件具有良好的对称性，而且受环境温度和干扰等影响后的变化也相同，所以集成运放中大量采用各种差分放大电路（作输入级）和恒流源电路（作偏置电路或有源负载）；
- (3) **采用复杂电路形式**。因为制作不同形式的集成电路，只是所用掩模不同，增加元器件并不增加制造工序，所以集成运放允许采用复杂的电路形式，以达到提高各方面性能的目的；
- (4) **采用有源元件取代高阻值电阻**。因为硅片上**不宜制作高阻值电阻**，所以在集成运放中常用有源元件（晶体管或场效应管）取代高阻值电阻；
- (5) **采用复合管结构**。集成晶体管和场效应管因制作工艺不同，性能上有较大差异，所以在集成运放中常采用复合形式，以得到各方面性能俱佳的效果。





## 3.3.2 集成运放电路模型



**输入级**又称前置级，它往往是一个双端输入的高性能差分放大电路。一般要求其输入电阻高，差模放大倍数大，抑制共模信号的能力强，静态电流小。

**中间级**是整个放大电路的主放大器，其作用是使集成运放具有较强的放大能力，多采用共射（或共源）放大电路。

**输出级**应具有输出电压线性范围宽、输出电阻小（即带负载能力强）、非线性失真小等特点。集成运放的输出级多采用互补对称输出电路。

**偏置电路**用于设置集成运放各级放大电路的静态工作点。

## 3.3.3 常用集成运算电路

**集成运算电路**是指利用集成运算放大器实现比例、加减、乘除、微分、积分、平方和开方等相关数学运算功能的电路。

### 1. 集成运放电路分析方法（重点掌握）

（理想近似线性分析）

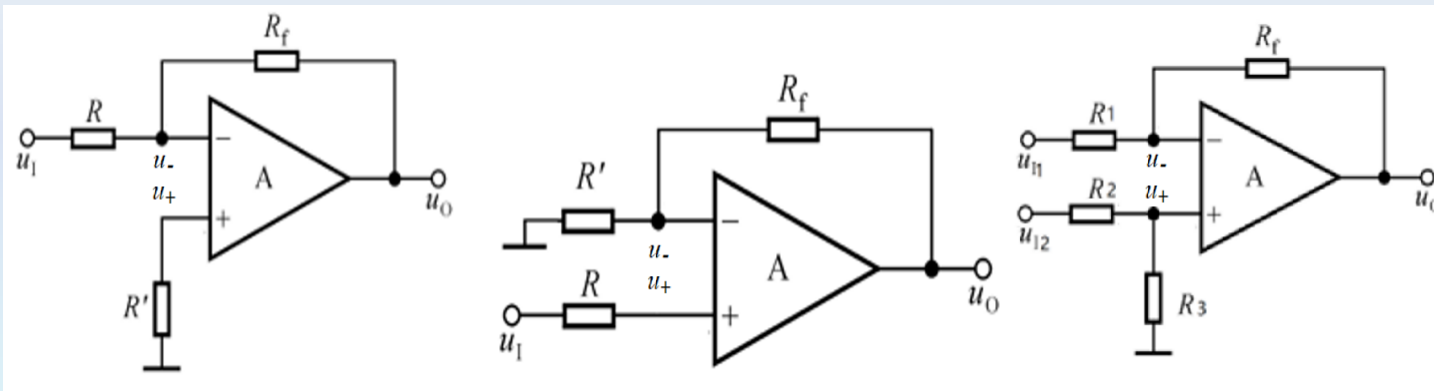
设集成运放同相输入端和反相输入端的电位分别为 $u_+$ 、 $u_-$ ，电流分别为 $I_+$ 、 $I_-$ 。当理想集成运放工作在线性区时，应满足：

(1) **虚短路**。 $u_- \approx u_+$ ，集成运放两个输入端处于“虚短路”。所谓“虚短路”是指集成运放的两个输入端电位无穷接近，但不是真正短路。

(2) **虚断路**。 $i_- = i_+ \approx 0$ ，集成运放两个输入端处于“虚断路”。所谓“虚断路”是指集成运放两个输入端的电流趋于零，但不是真正断路。



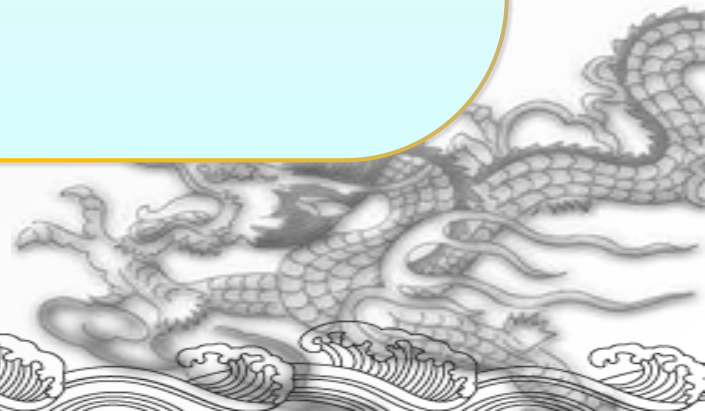
## 2. 集成运放电路输入方式 （要求推导）



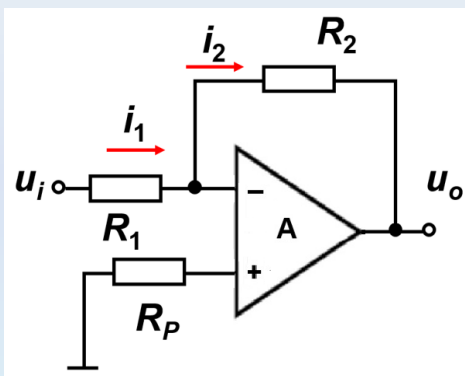
差动输入（重点）：求 $u_o$ 与 $u_{i1}$ 和 $u_{i2}$ 的关系

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + (1 + \frac{R_f}{R_1})(\frac{R_3}{R_2 + R_3})u_{i2} \quad (\text{如何推导出来?，课堂练习})$$

取 $R_1 = R_2$ 且 $R_3 = R_f$ ，此时 $u_o = \frac{R_f}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$  （重要应用）



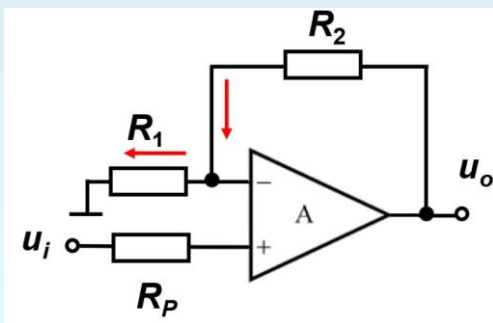
## 3. 比例运算电路 （要求推导）



**反相比例运算电路** 根据“虚短”和“虚断”的概念，有：

$$u_+ = u_- = 0, \quad i_1 = i_2 = 0$$

可以得到比例系数  $A_u = \frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_2}$ ，则  $u_o = -\frac{R_2}{R_1} u_i$

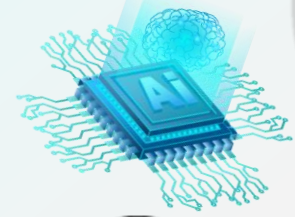


**同相比例运算电路**

根据“虚断”和“虚短”的概念，有  $u_+ = u_- = u_i$

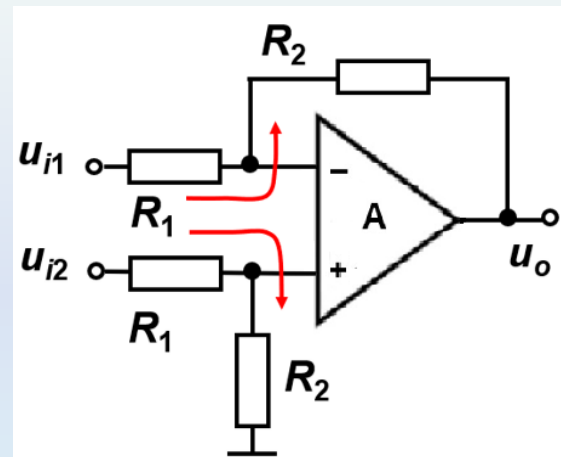
$$\frac{u_o - u_i}{R_2} = \frac{u_i}{R_1}$$

所以  $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_i$





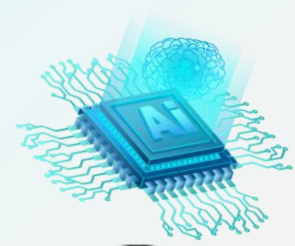
## 4. 加减差动运算电路（要求推导）



根据“虚断”和“虚短”的概念，即  $u_+ = u_-$ ， $i_- = i_+ \approx 0$

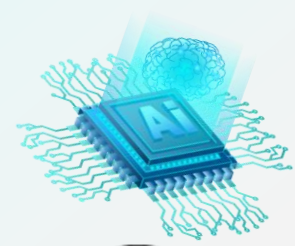
$$\frac{u_o - u_-}{R_2} = \frac{u_- - u_{i1}}{R_1}$$
$$\frac{u_{i2} - u_+}{R_1} = \frac{u_+}{R_2}$$

所以输出电压  $u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$  （在前面已经推导出）



## 3.4 微型计算机常用放大电路

一般传感器只能输出 $\mu\text{V}$ 级信号，而微型计算机引脚能够接受的是 $\text{V}$ 级信号，然后把它转换为数字量（模数转换），进行处理。这样就需要有 $\mu\text{V}$ 级信号放大成 $\text{V}$ 级信号的电路，通常使用集成运放集成芯片来进行，输入可以根据情况分为单端输入与差分输入。本节给出单端输入放大电路、差分输入放大电路，并给出电子秤称重模块的电路设计。

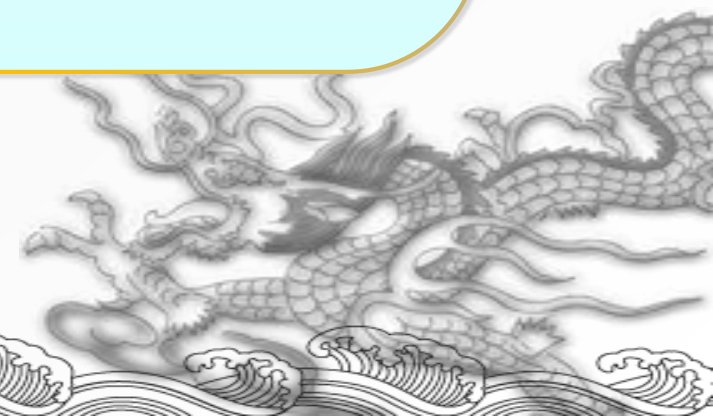
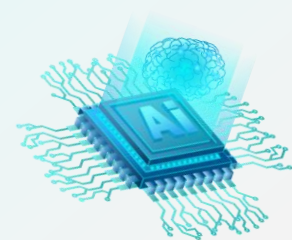
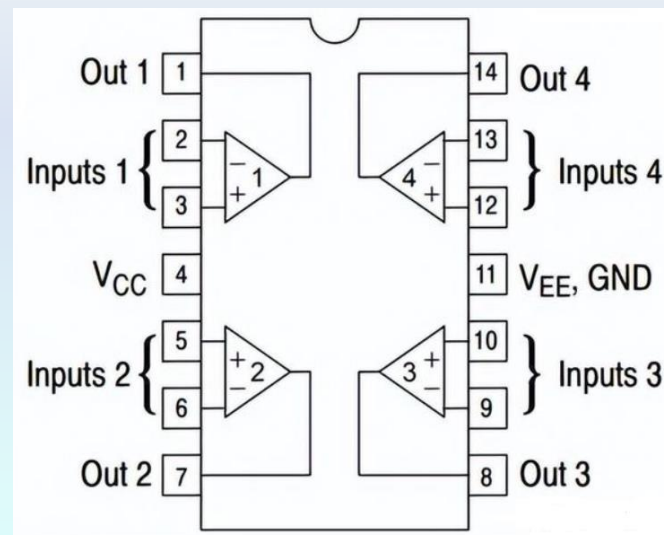


## 3.4.1 单端放大电路

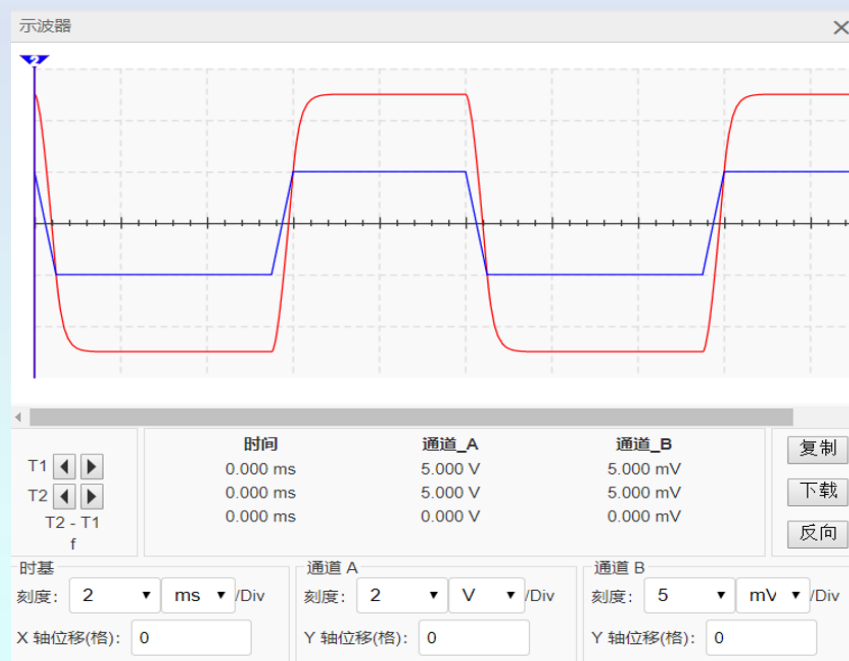
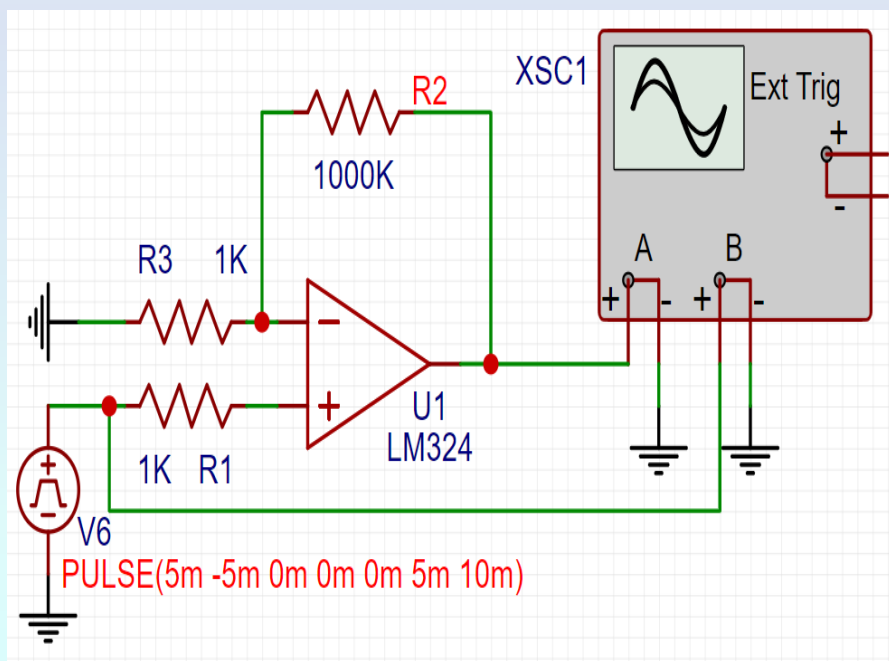
输入：mV级信号

输出：V级信号

使用芯片：14脚双列直插LM342  
四路集成运放



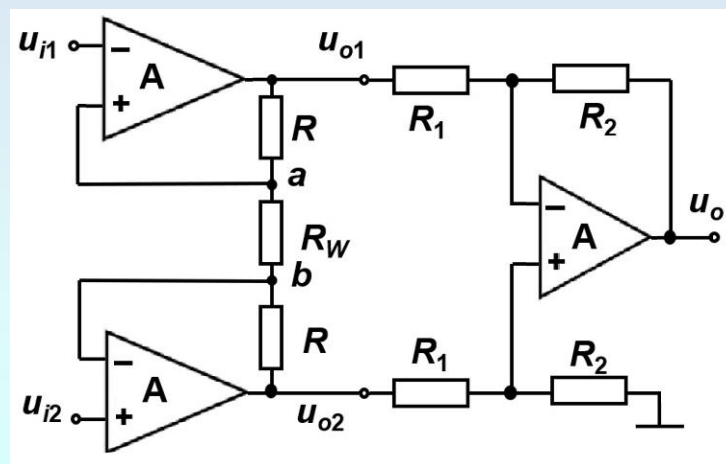
电路。电阻取值，例如：利用运放LM324完成的单端 $\pm 5\text{mV}$ 放大至 $\pm 5\text{V}$ 同相比例放大电路，输入电压范围为 $-5\text{mV}$ 至 $5\text{mV}$ ，放大倍数为 $R2/R3=1000$ 。





## 3.4.2 差分放大电路

用单个集成运放构成运算电路时存在两个缺点：（1）应考虑同相和反相输入端输入电阻的平衡，电阻的选择和调整比较困难。（2）对于每一个输入端，输入电阻都比较小。所以在大部分情况下均是采用多级放大的方式实现信号放大。



## 第一级：

根据虚短路：对第一个放大器有：  $u_a = u_{i1}$  ；对第二个放大器有：  $u_b = u_{i2}$

根据虚断路：图中a、b点与放大器相连的分支电路为 0

则  $R_W$  上电路与上下两个  $R$  上电路一致

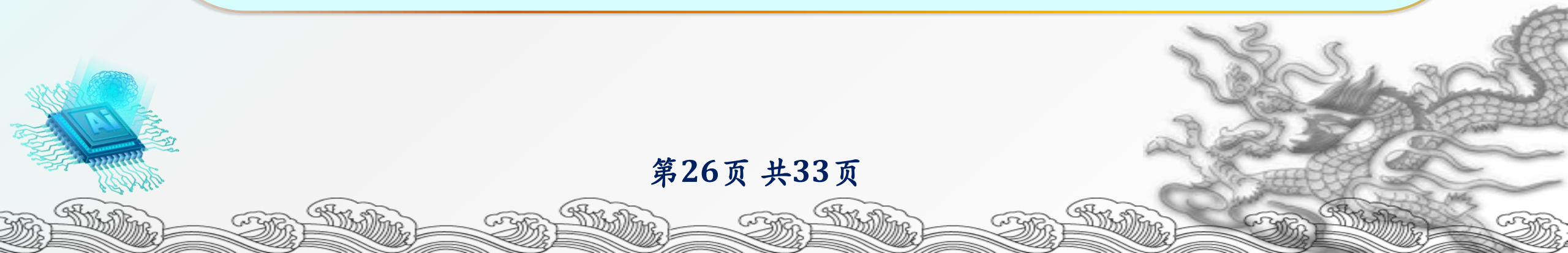
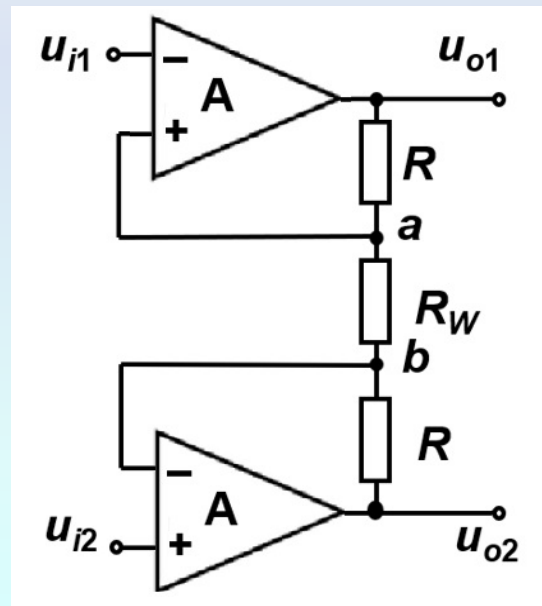
$$\text{通过 } R \text{ 的电流： } i_R = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_W}$$

$$\text{通过 } R_W \text{ 的电流： } i_W = \frac{u_a - u_b}{R_W}$$

令它们相等，则有：

$$\frac{u_{o1} - u_{o2}}{2R + R_W} = \frac{u_a - u_b}{R_W} = \frac{u_{i1} - u_{i2}}{R_W}$$

$$\text{有： } u_{o2} - u_{o1} = \frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1})$$



**第二级:**

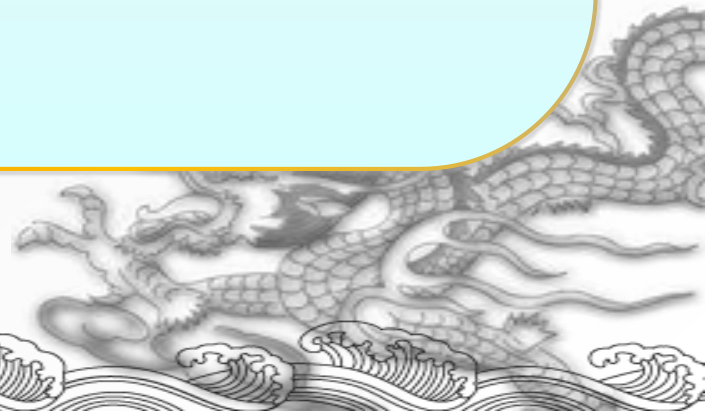
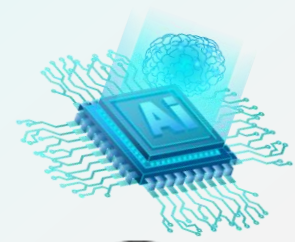
为差动放大电路，根据差动运算电路分析可得

$$\begin{aligned} u_o &= \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1}) \\ &= \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{2R + R_W}{R_W} (u_{i2} - u_{i1}) \end{aligned}$$

**第二级:**

为差动放大电路，根据差动运算电路分析可得

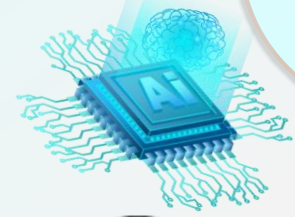
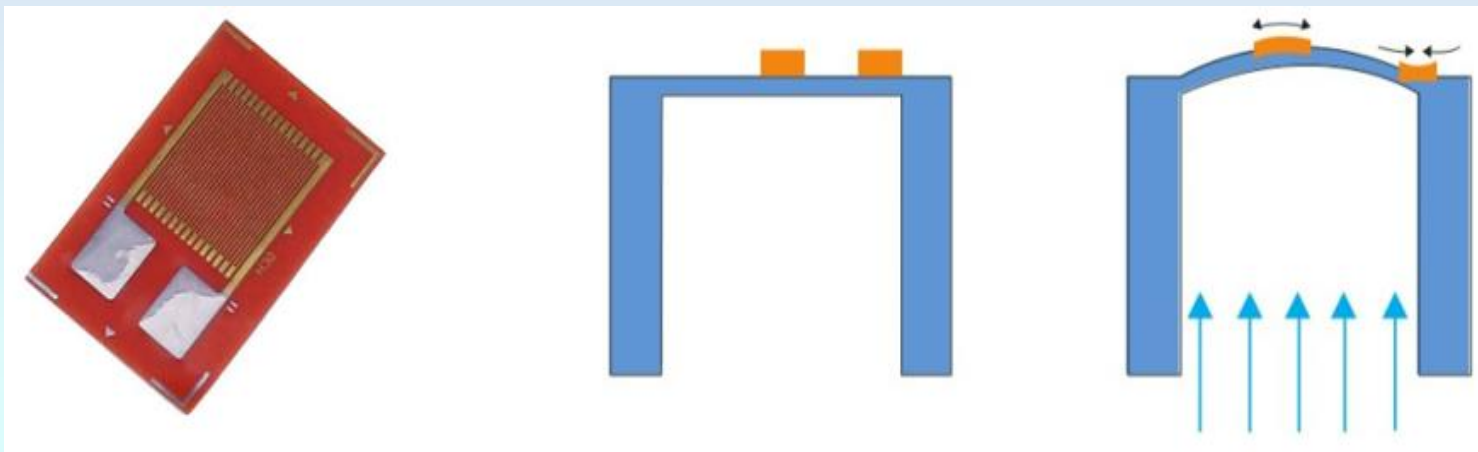
$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_{o2} - u_{o1})$$



## 3.4.3 应用实例：电子秤称重模块电路设计

### 1. 电阻应变片工作原理

电阻应变片式传感器是基于电阻应变效应原理工作的压力传感器。电阻应变片有金属应变片（金属丝或金属箔）和半导体应变片两类。被测压力使应变片产生应变：**当应变片产生压缩应变时，其阻值减小**；当应变片产生拉伸应变时，其阻值增加，如图3-25所示。应变片阻值的变化，再通过桥式电路获得相应的**毫伏级电压输出**。

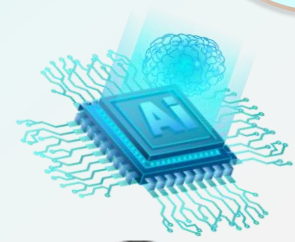
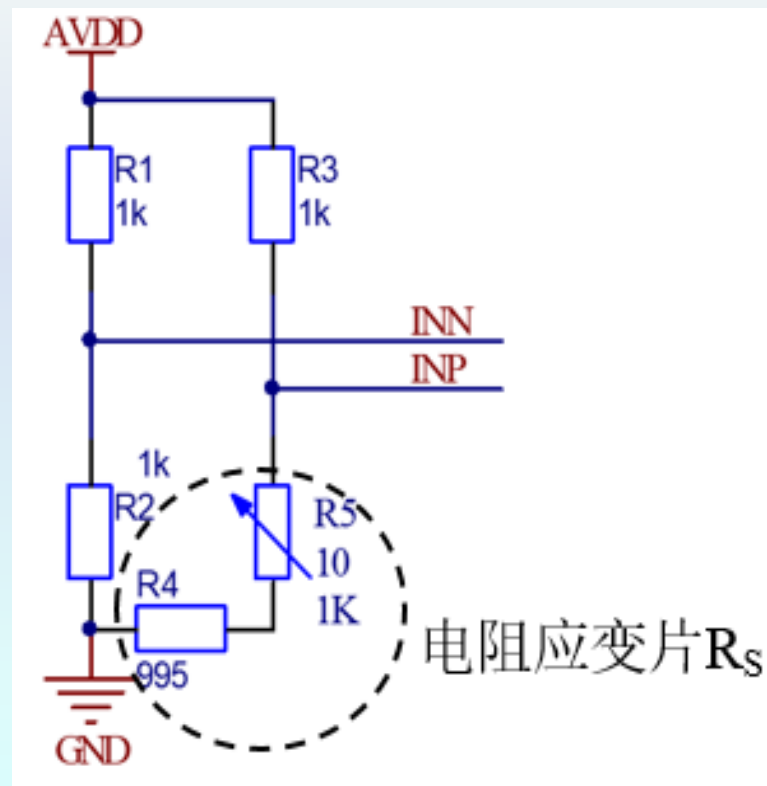




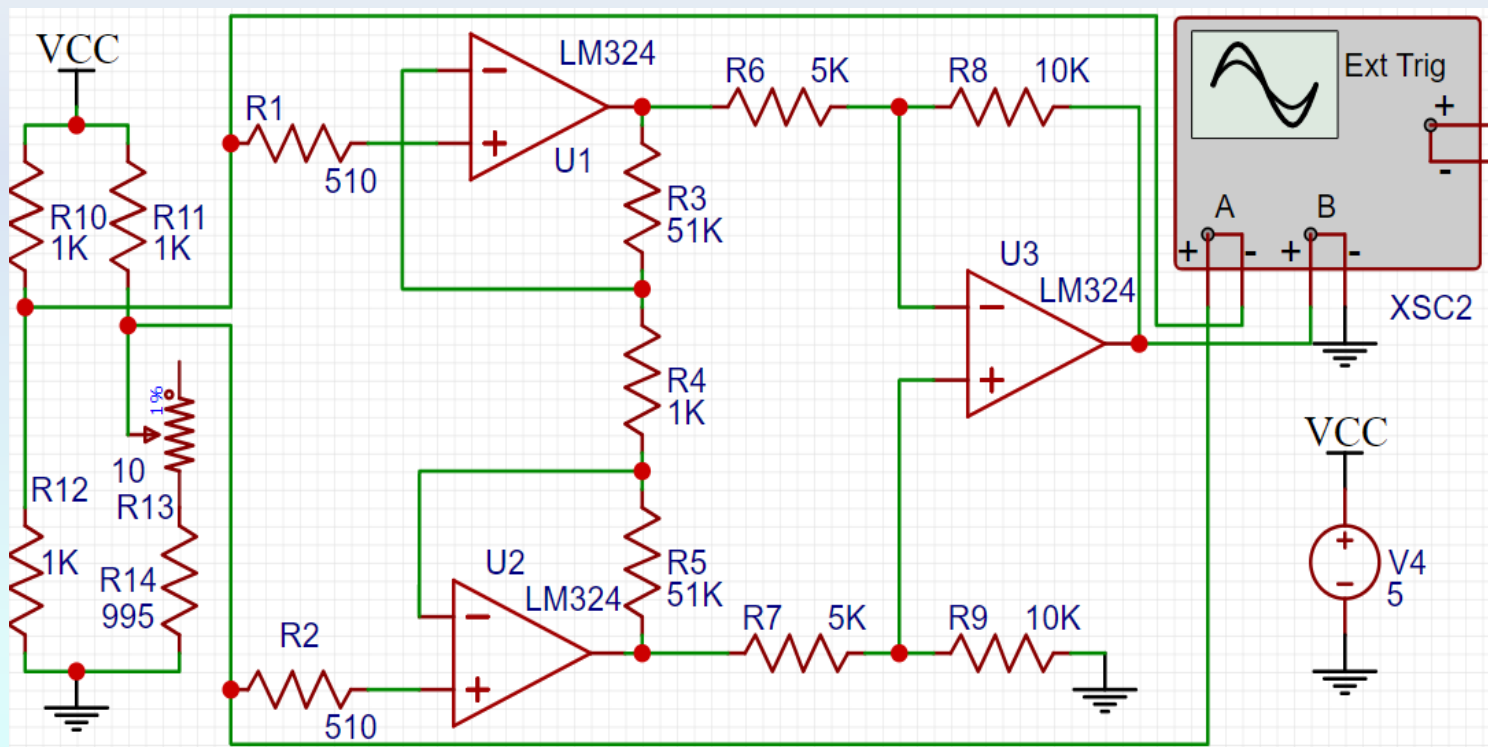
$R_1 \sim R_3$ 阻值为 $1k\Omega$ ，电阻应变片的阻值 $R_S$ 变化为 $995\Omega \sim 1005\Omega$ 。 $AVDD=5V$ ， $V_{INN}=AVDD/2=2.5V$ 。

当 $R_S=995\Omega$ 时，  
 $V_{INP}=AVDD \times R_S / (R_S + R_3) = 5 \times 995 / (995 + 1000) \approx 2.494V$ ， $V_{INP} - V_{INN} = -0.006V = -6mV$ 。

当 $R_S=1005\Omega$ 时，  
 $V_{INP}=AVDD \times R_S / (R_S + R_3) = 5 \times 1005 / (1005 + 1000) \approx 2.506V$ ， $V_{INP} - V_{INN} = 0.006V = 6mV$ 。



## 2. 称重模块放大电路



利用前面学习过的三运放仪表放大电路设计实现称重信号放大。

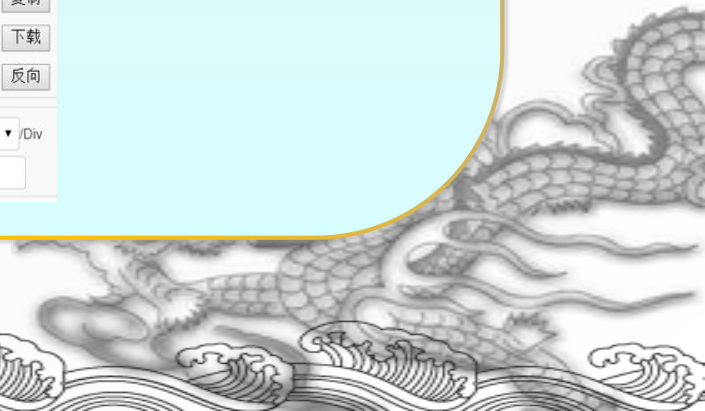
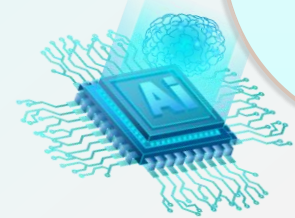
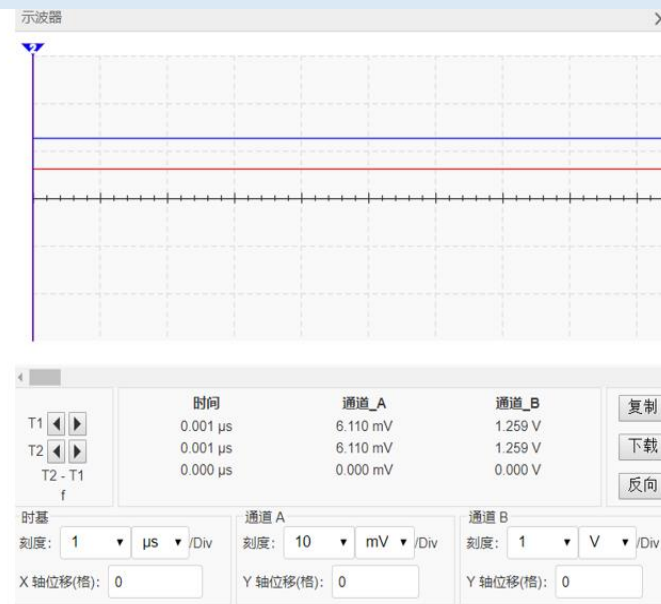
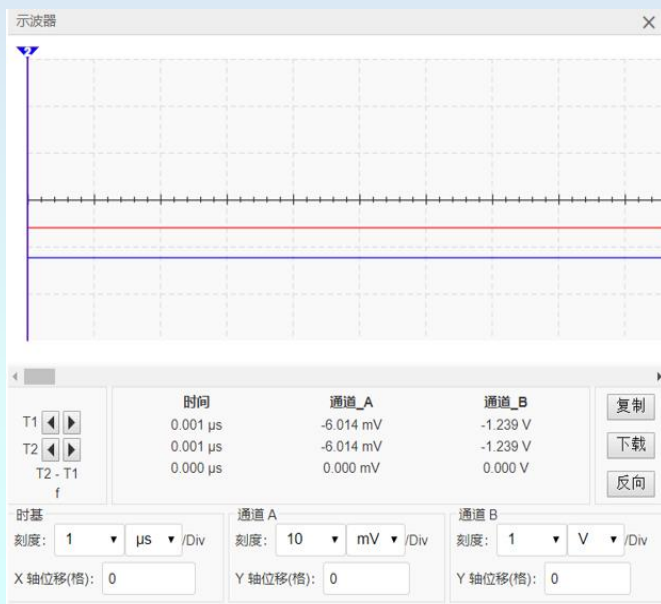
第一级放大倍数  $A1 = \frac{2 \times 51k + 1k}{1k} = 102$ ;

第二级放大倍数  $A2 = \frac{10k}{5k} = 2$ ;

系统放大倍数  $A = A1 \times A2 = 102 \times 2 = 204$ 。

输入电压为  $-6\text{mV}$  时，输出电压为  $-6\text{mV} \times 204 = -1208\text{mV} = -1.208\text{V}$ ;

输入电压为  $6\text{mV}$  时，输出电压为  $6\text{mV} \times 204 = 1208\text{mV} = 1.208\text{V}$ 。





电子秤实际使用时，电阻应变片发生拉伸形变，无拉伸时电阻值为1000Ω，最大量程时拉伸后电阻值到1005Ω，采样电阻网络产生的差分电压为0~ 6 mV，放大后输出电压为0~1.208V，AD转换后即可用于线性称重转化。若电子秤测量量程为0~30kg，微型计算机AD模块参数为：参考电压位3.3V，采样精度为16位，则电子秤相关物理量转换关系为：

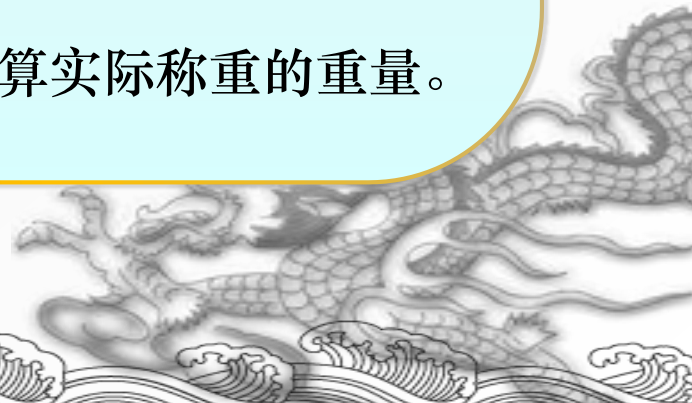
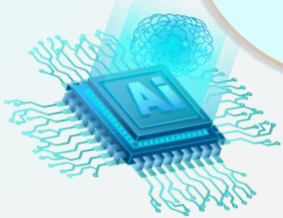
表3-1 电子秤相关物理量对应关系表

	电子秤量程 (kg)	电阻应变片电阻 (Ω)	采样电压 (mV)	放大电压 (V)	模数转换值
最小值	0	1000	0	0	0
测量值	$G_x$	$R_x$	$V_x$	$V1_x$	$ADC_x$
最大值	30	1005	6	1.208	$(1.208*65536)/3.3=23990$

在表3-1中测量值满足以下公式：

$$\frac{G_x}{30} = \frac{R_x - 1000}{5} = \frac{V_x}{6} = \frac{V1_x}{1.208} = \frac{ADC_x}{23990}$$

在微型计算机根据模数转换值 $ADC_x$ ，利用公式 $G_x = \frac{ADC_x}{23990} * 30$ 即可计算实际称重的重量。







*Thank you*

