



南京农业大学

机械电子学

Mechatronics

4 信号调理电路

安秋

南京农业大学工学院

信号调理电路

5 传感器的输出信号类型及其调理电路

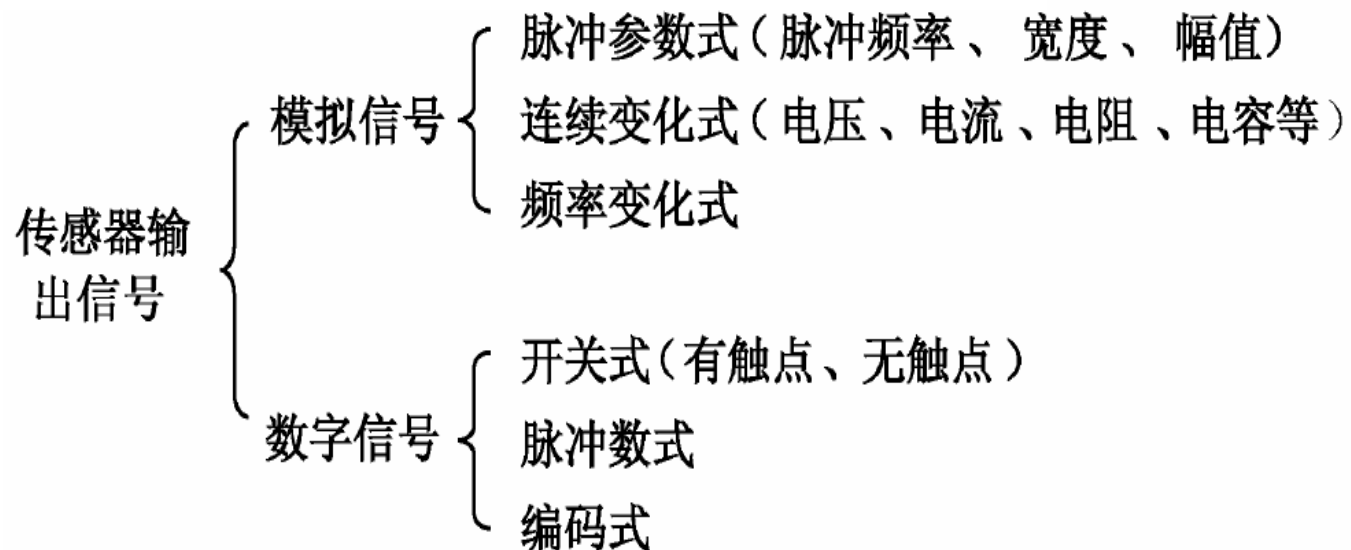
传感器的输出信号类型

阻抗匹配

电桥

电压/频率变换与频率/电压变换电路

传感器的输出信号类型



- (1) 电阻型
- (2) 电容型
- (3) 电感型
- (4) 互感型
- (5) 电压 (电势) 型
- (6) 电流型
- (7) 电荷型
- (8) 脉冲 (数字) 型

传感器的输出信号类型

(1) 电阻型：这类传感器将被测量通过敏感元件转换为电阻的变化。例如，铂电阻、铜电阻温度传感器将被测温度转换为电阻值的变化；热敏电阻传感器将被测温度转换为半导体电阻值的变化；电阻应变式传感器将被测的荷重（力、重量）、扭矩、转矩、拉力、张力、速度、加速度等转换为电阻应变片的阻值变化。

该类传感器的信号调理电路的作用是将电阻的变化转换为易于测量的电参数，如用电桥将电阻的变化转换成电压或电流输出；用振荡电路将电阻的变化转换成频率等。

传感器的输出信号类型

- **(2) 电容型**：这类传感器将被测量通过敏感元件转换为电容的变化。例如，电容式线位移、角位移传感器使电容器极板位置发生相对变化，从而改变电容量；电容式液位计将液位高度变化转换为电容量的变化；电容式荷重传感器通过弹性体的变形改变电容器极板的相对位置，从而使电容量变化；电容式振动传感器、加速度传感器、厚度传感器、同心度传感器、温度传感器将被测量的机械振动、加速度、厚度、偏心度、湿度等转换为电容量的相应变化。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是将电容量的变化转换为易于处理的电压或电流信号，或将其通过振荡电路转换成频率信号。

传感器的输出信号类型

- **(3) 电感型**：这类传感器将被测量通过敏感元件转换为电感量的变化。例如，电感式线位移、角位移传感器通过改变具有铁芯的电感的铁芯相对位置，使电感量随被测位移变化；速度、加速度传感器也是借助铁芯随速度、加速度的变化使传感器电感量发生变化的；电感式压力传感器则是利用弹性元件感受被测压力而产生变形，再由弹性体的机械变形带动传感器铁芯位移使电感量变化。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是将因被测量的变化而产生的电感量变化变换为易于处理的信号形式，如采用电感电桥将电感量的变化转换成电流或电压的变化；用振荡电路将电感量的变化转换成频率的变化。

传感器的输出信号类型

- **(4) 互感型**：这类传感器将被测量通过敏感元件转换为互感的变化。例如，差动变压器式传感器通过机械部件的传递将被测量的变化转化为差动变压器铁芯的位移，使激磁绕组与测量绕组间的互感发生变化；电涡流式传感器通过将测量的变化转化为测量线圈与被测物体之间的距离变化，使互感产生变化，从而导致测量线圈的电感量变化等。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是将互感或互感电势的变化转换为易于处理的电压或电流的变化，也可以将互感变化引起的电感量变化转换为电压、电流或频率的变化。

传感器的输出信号类型

- **(5) 电压（电势）型**：这类传感器将被测量通过敏感元件转换为电压或电势的变化。例如，热电偶将被测温度的变化通过热电偶感温转化为热电势的变化；光电池感受到温度（红外光）的变化后，将其转换为光电池输出电势的变化；霍尔元件可将被测的磁场强度或电流变化转换为霍尔电势的变化等。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是将这种微弱的电势或电压变化转变为较强的电压或电流的变化。

传感器的输出信号类型

- **(6) 电流型**：这类传感器会将被测测量通过敏感元件转换为电流的变化。例如，光敏二极管接收到被测光后，将光的变化转换为输出电流的变化；电流电离室接收到核辐射之后，将核辐射强度的变化转换为电离室输出电离电流的变化等。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是对由传感器输出的微弱电流进行放大，将其变换成较强的电压或电流。

传感器的输出信号类型

- **(7) 电荷型**：这类传感器会将被测测量通过敏感元件转换成输出电荷的变化。例如，压电式传感器，其敏感元件为石英或压电陶瓷等，可用于振动分析仪、加速度计、涡街式流量计等。压电片受力之后会转换为束缚电荷输出。
- 该类传感器的信号调理电路的作用是将电荷的变化转换为较强的电压或电流输出，这种电路通常称为**电荷放大器**。

传感器的输出信号类型

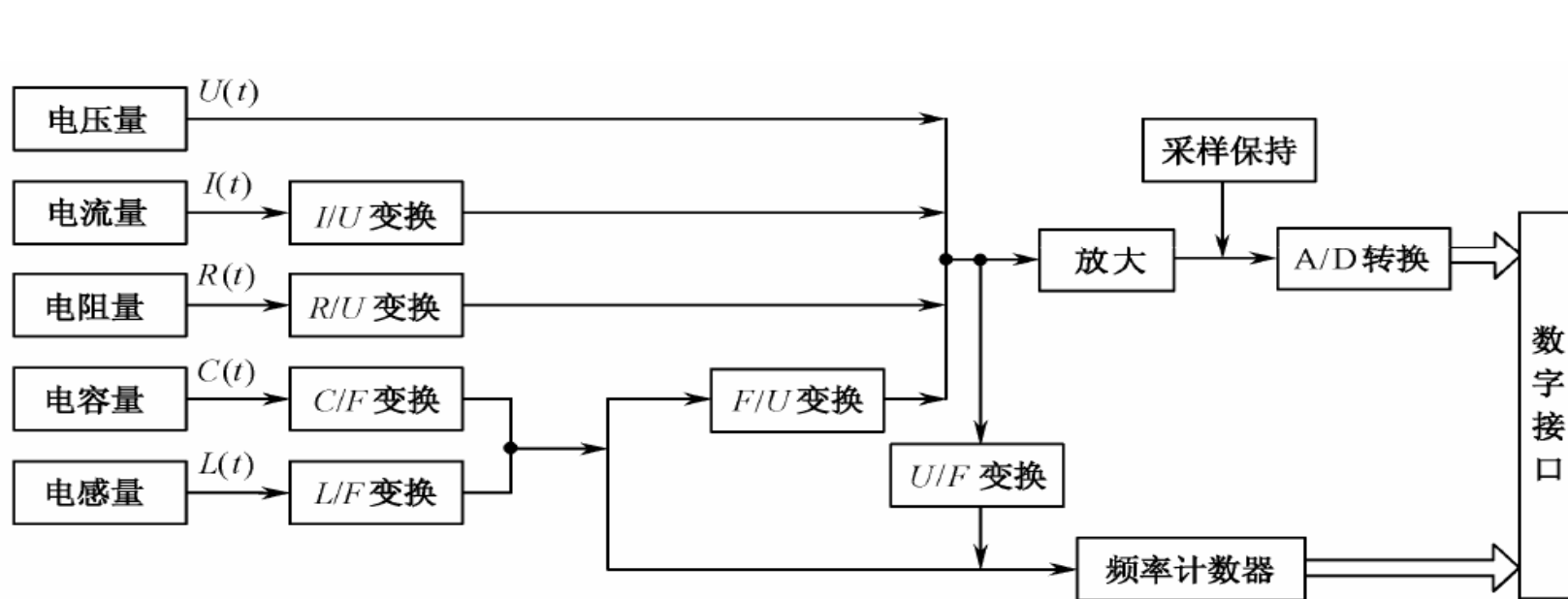
(8) 脉冲（数字）型：这类传感器会将被测测量通过变换转换成脉冲序列或数字信号。传感器输出的数字信号分为以下三类：

- ① **增量码信号。**增量码信号的特点是被测量值与传感器输出信号的变化周期数成正比，即输出量值的大小由信号变化的周期数的增量决定。采用光栅、磁栅、激光干涉法等测量位移时，传感器输出的信号为增量码信号。
- ② **绝对码信号。**绝对码信号是一种与被测对象的状态相对应的信号。例如，码盘的每一个角度方位对应于一组编码，这种编码称为绝对码。绝对码信号有很强的抗干扰能力，不管测量过程中发生什么情况，干扰过后，一种状态总是对应于一组确定的编码。
- ③ **开关信号。**开关信号只有0 和1两个状态，可视为绝对码只有一位编码时的特例。例如，行程开关、光电开关等传感器的输出就是开关信号。

该类传感器的信号调理电路的作用为：对于脉冲序列输出，它进行脉冲计数并将其转换成所需的信号形式；对于编码信号，它将编码输出转换成相应的数字信号。

传感器的输出信号类型

- 当传感器的输出信号为随时间连续变化的电参量，如电压、电流、电阻、电容或电感等模拟量时，模拟信号调理电路如图：



除了电容量与电感量信号往往采用振荡电路，将信号转换成频率的变化，然后用频率计数器来处理外，其他都以电压变化的形式出现和进行处理。

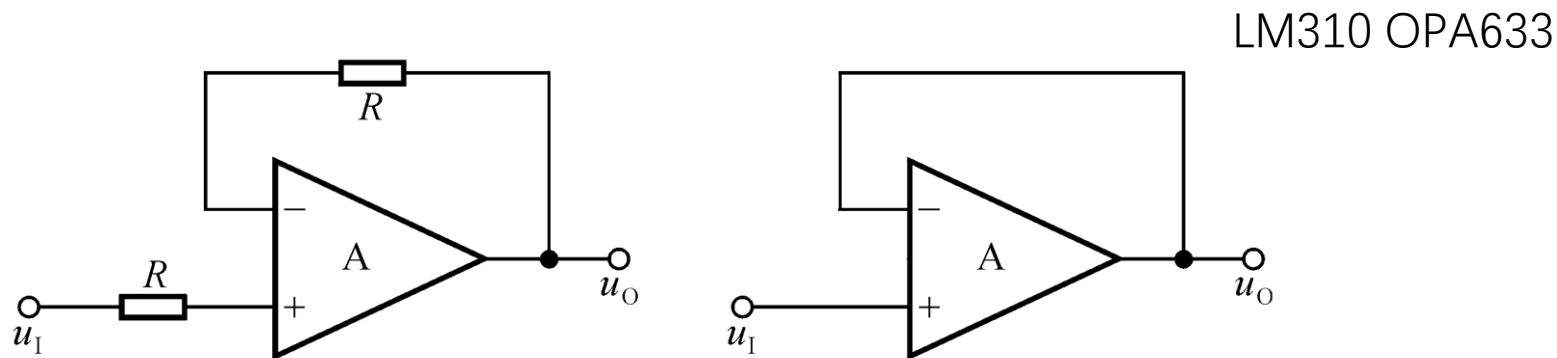
传感器的输出信号类型

- 对于图中没有列入的模拟频率变化信号，可直接用数字式频率计将其变为数字信息。
- 对于图中没有列出的模拟脉冲式信号，一般信号的脉冲幅值、宽度或间隔时间等参数与被测量呈比例，其中脉冲的幅值可以用检波电路拾取，然后通过模数转换电路转换成数字量；而脉宽式脉冲间隔时间信号，通常采用在信号出现期间对已知的一串标准时钟信号进行计数，从而得到相应的数字信息。

阻抗匹配

- 传感器作为信号源向后续电路输出代表被测量变化的信号。从输出端看，**信号源由两个参数描述：一是信号的强弱；二是信号源的内部阻抗（即输出阻抗）的大小。**输出阻抗的大小决定了传感器电路的结构形式。阻抗不匹配会使信号在各个环节的传输中严重畸变，导致严重的检测误差，因此，在调理过程中必须十分注意阻抗匹配问题。**一般阻抗匹配可由运放组成的跟随器完成。**
 - (1) 高输出阻抗型。
 - (2) 低输出阻抗型。

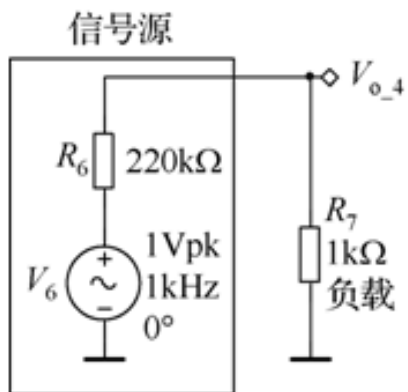
电压跟随器



电压跟随器的显著特点就是，**输入阻抗高，而输出阻抗低。**

在许多典型电路设计中，AD转换器之前会有一个电压跟随器，起到**阻抗变换**作用。一方面，将输入阻抗变得很高，这样，对于输入信号的影响可以做到很小。另一方面，输出阻抗变得很低，AD输入阻抗对输入信号的影响可以做到很小。

电压跟随器

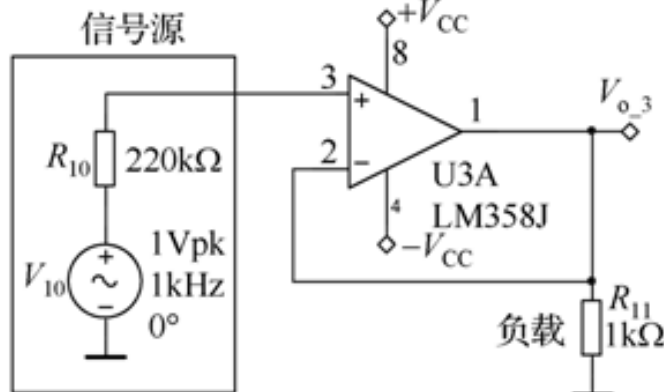


(a)

无电压跟随器时
负载上得到的电压

$$v_o = \frac{R_L}{R_s + R_L} \cdot v_s$$

$$= \frac{1}{100 + 1} \cdot v_s \approx 0.01 v_s$$



(b)

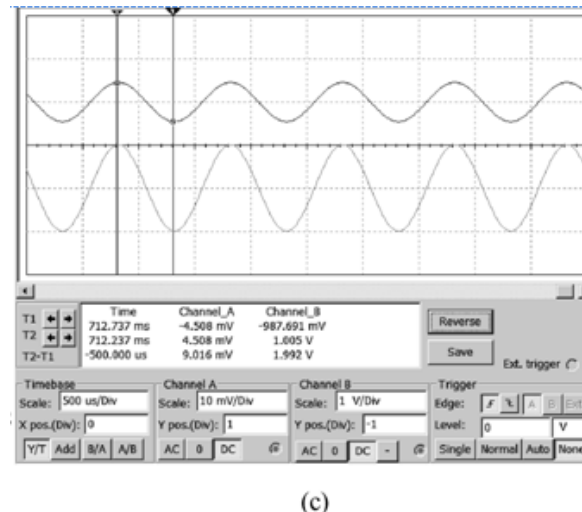
有电压跟随器时

$$i_p \approx 0, \quad v_p = v_s$$

根据虚短和虚断有

$$v_o = v_n \approx v_p = v_s$$

电压跟随器电路的输出电压与输入电压相等，
近似等同为一根理想的导线。

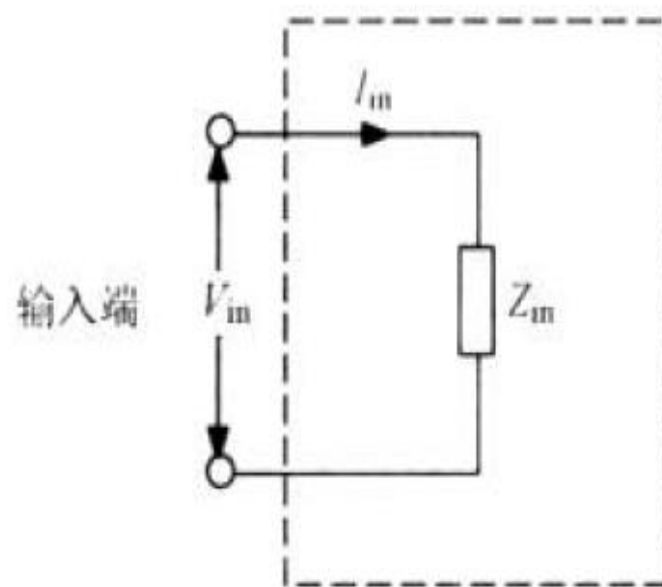
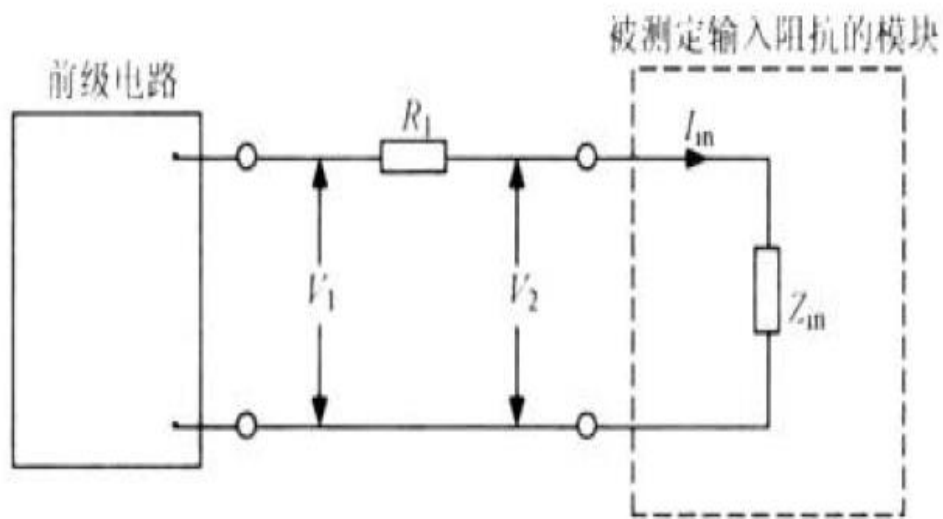


阻抗匹配

- **输入阻抗**：任何需要输入信号来工作的电路都具有输入阻抗，如放大器、滤波器等。输入阻抗同样可用强大的欧姆定律来计算：它等于输入端电压与输入电流的比值。

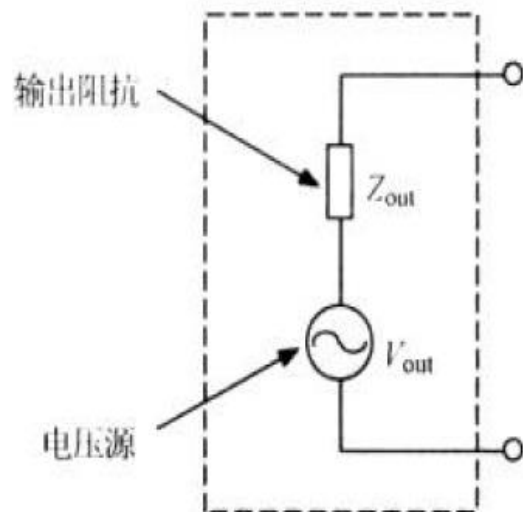
$$Z_{\text{in}} = \frac{V_{\text{in}}}{I_{\text{in}}}$$

- **输入阻抗的测定**

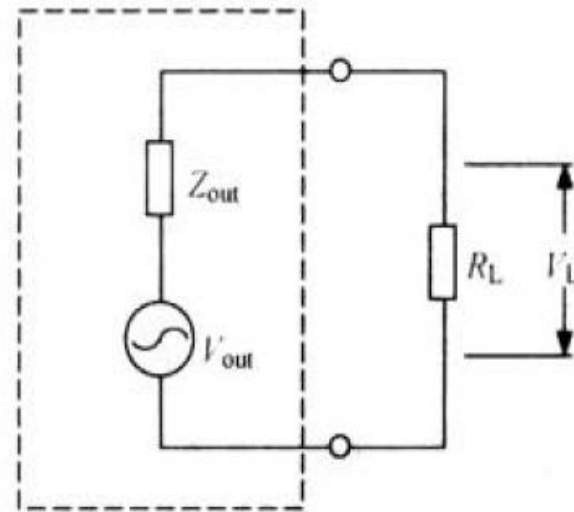


阻抗匹配

- **输出阻抗**：如果一个电路需要向下一级电路或器件输出信号，从输出端往电路里看，就是电路的输出阻抗。电路向外输出信号，也可看成是一个信号源。是信号源就会有电源内阻，于是可以用戴维南定理把无论多么复杂的电路等效成一个只有电压源和阻抗的等效电路，如图6所示，其中 Z_{out} 为输出阻抗， V_{out} 为开路输出电压。



用戴维南等效电路分析输出阻抗



输出阻抗与负载

阻抗匹配

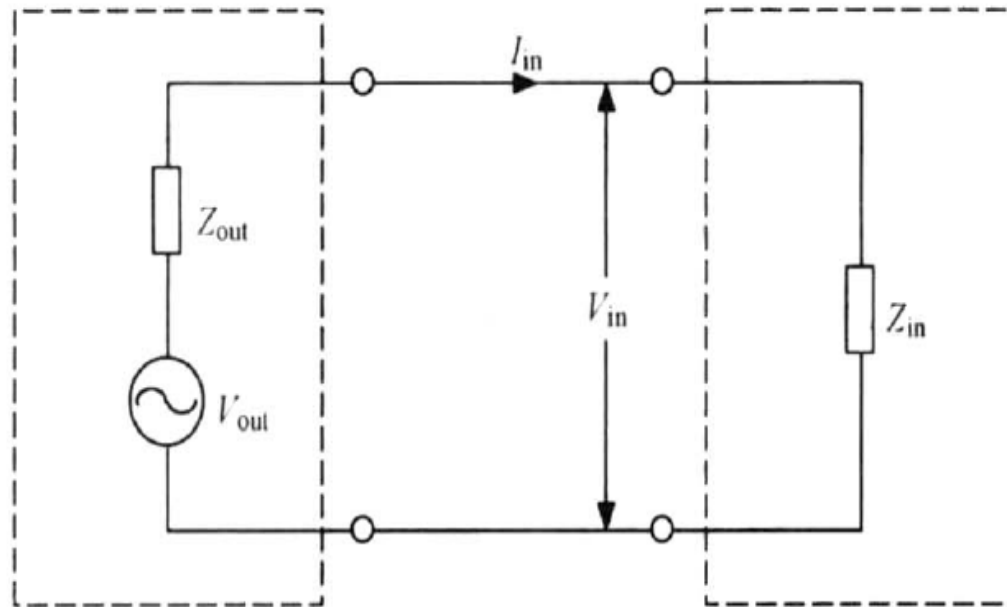
- 阻抗匹配与传输
 - 最大电压传输

$$V_{in} = V_{out} \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}}$$

$$Z_{in} > 10Z_{out}$$

- 最大功率传输

当 $Z_{out} = Z_{in}$ 时，也就是说**当前级电路的输出阻抗等于后级电路的输入阻抗时，功率可实现最大化传输。**

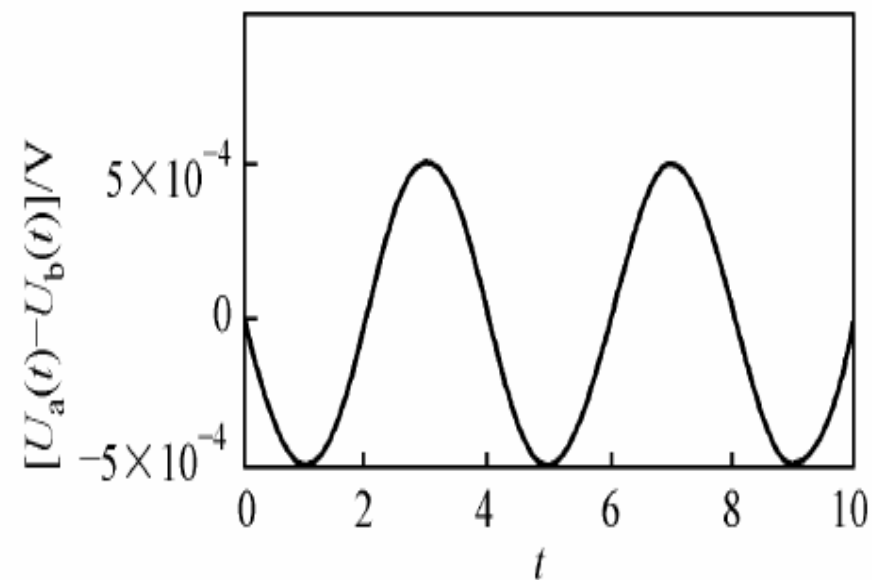
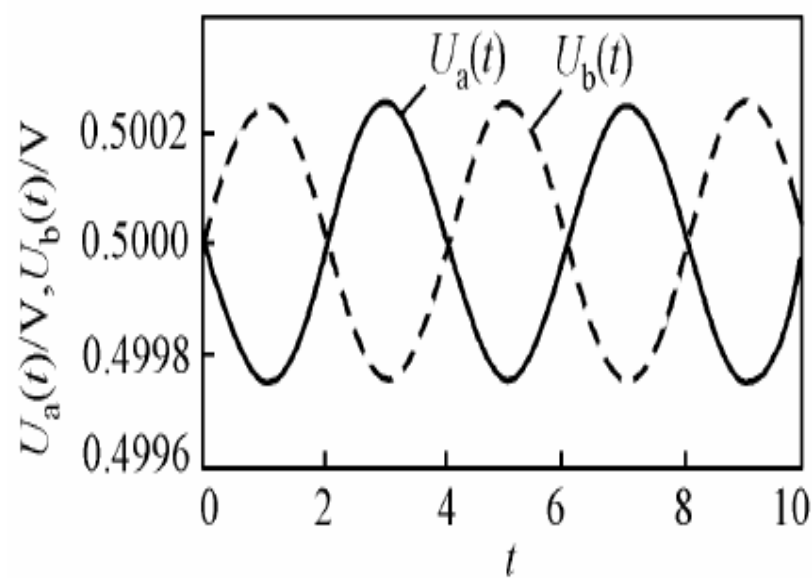
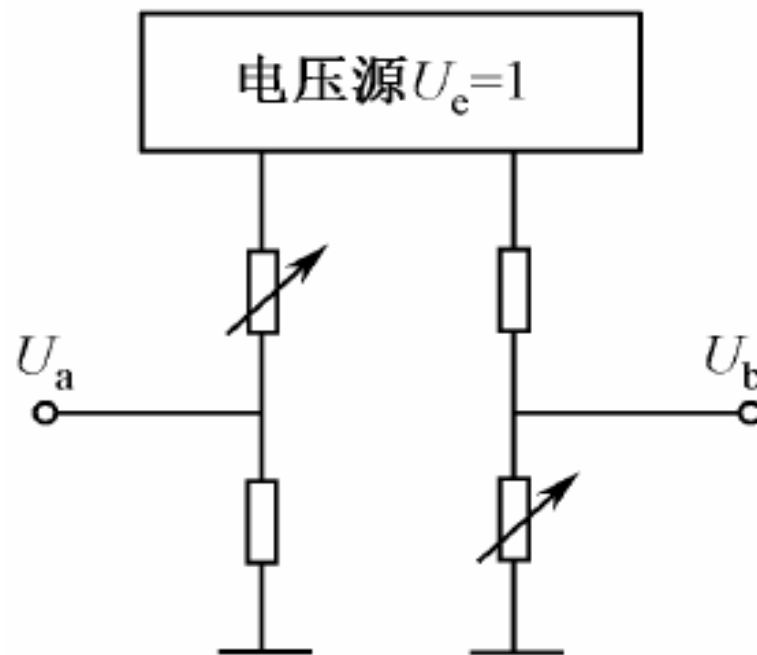


电桥

- 最常见的传感器大都是阻性元件，其价格低廉，与信号调理电路的接口也很简单。阻性元件可以制成对温度、应变或光敏感。利用这些简单的元件，可以测量很多复杂的物理量，如液体或固体流量（通过测量两个标定过的电阻的温差实现）、湿度等。
- 电阻的测量一般采用电桥结构，电桥测量转换电路是最常用的一种通用测量转换电路，可以将电阻、电容、电感等许多电路特征参数转换为电压（电流）信号，而且具有相对比较高的测量转换精度。从电桥的供电电源特性区分，电桥测量转换电路分为直流电桥和交流电桥两种类型，按其工作原理分又可分为归零法和偏值法两种，其中尤以偏值法的应用更为广泛。

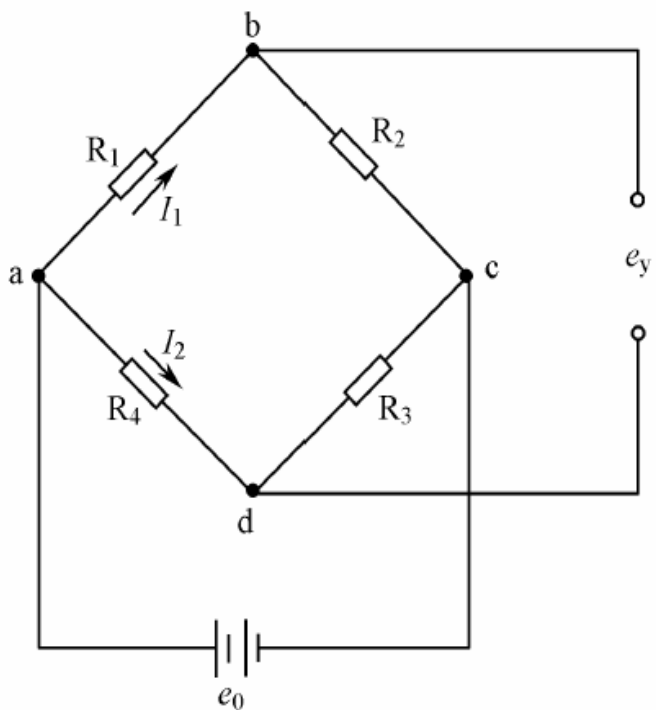
电桥

- 直流电桥



电桥

- 作为测量转换电路的直流电桥，其工作的原理是利用四个桥臂中的一个或数个电阻的阻值变化来引起电桥输出电压的变化，因此其桥臂可采用电阻式敏感元件组成并接入测量系统。



基本结构形式

$$e_y = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} e_0$$

直流电桥的平衡公式

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

当四个电阻中的任何一个或数个的阻值发生变化，使电桥的平衡不成立时，均可造成电桥输出电压发生变化，因此适当选取各桥臂电阻值，可使输出电压只与被测的量引起的电阻值的变化有关。

电桥

- 常用的直流电桥连接形式有半桥单臂、半桥双臂（差动电桥）和全桥连接。

半桥单臂

$$e_y = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} e_0 \quad \longrightarrow \quad e_y \approx \frac{\Delta R}{4R} e_0$$

半桥双臂（差动电桥）

$$e_y = \frac{\Delta R}{2R} e_0$$

全桥连接

$$e_y = \frac{\Delta R}{R} e_0$$

电桥

- 常用的直流电桥连接形式有半桥单臂、半桥双臂（差动电桥）和全桥连接。

全桥连接

$$R_1 \pm \Delta R_1, R_2 \mp \Delta R_2, R_3 \pm \Delta R_3, R_4 \mp \Delta R_4,$$

$$e_y = \frac{\Delta R}{R} e_0$$

$$R_1 = R + \Delta R_1, R_2 = R + \Delta R_2, R_3 = R + \Delta R_3, R_4 = R + \Delta R_4, \quad e_y = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) e_0$$

直流电桥的
和差特性

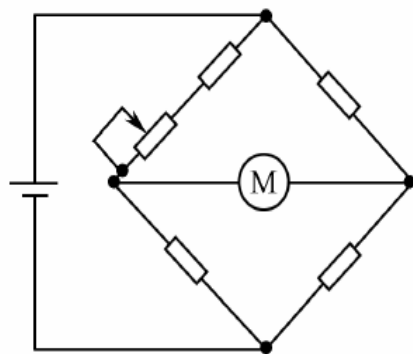
(1) 相邻两桥臂（如图中的 R_1 和 R_2 ）电阻的变化所产生的输出电压为该两桥臂各阻值变化产生的输出电压之差；

(2) 相对两桥臂（如图中的 R_1 和 R_3 ）电阻的变化所产生的输出电压为该两桥臂各阻值变化产生的输出电压之和。

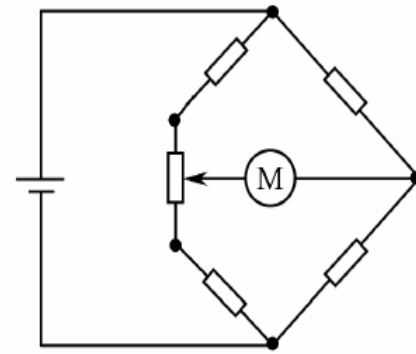


电桥

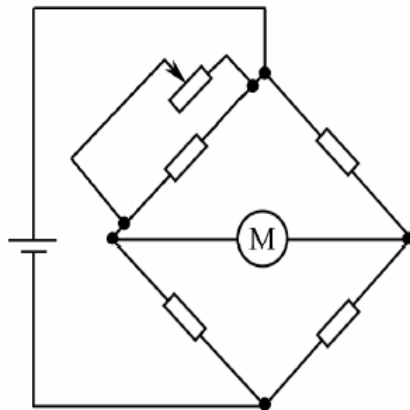
- 直流电桥的优点是电桥采用直流电源做激励电源，而直流电源的稳定性高；电桥的输出 e_y 是直流量，因此可用直流仪表测量，精度高；直流电桥与后接仪表间的连接导线不会形成分布参数，因此对导线连接的方式要求较低。另外，直流电桥的平衡电路简单，仅需对纯电阻的桥臂进行调整即可。



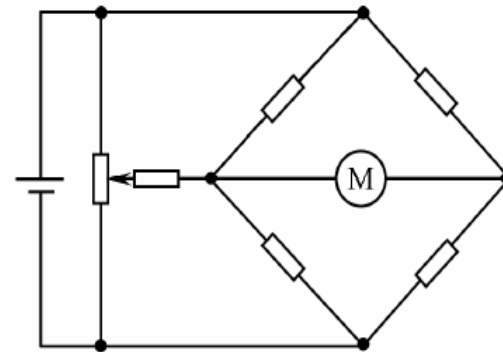
(a) 串联平衡



(b) 差动串联平衡



(c) 并联平衡

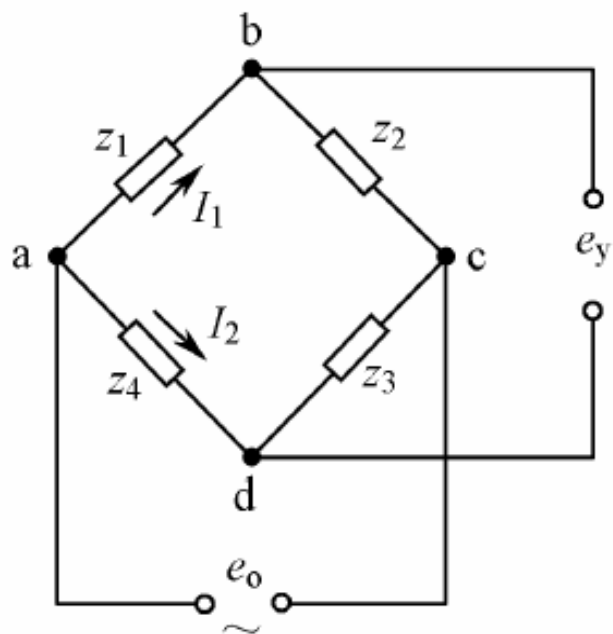


(d) 差动并联平衡

直流电桥适合于静态量的测量。

电桥

- 交流电桥
- 交流电桥的激励电源为交流电源，电桥的桥臂可以是电阻、电感或电容，如图所示，图中的 $z_1 \sim z_4$ 表示四桥臂的交流阻抗。



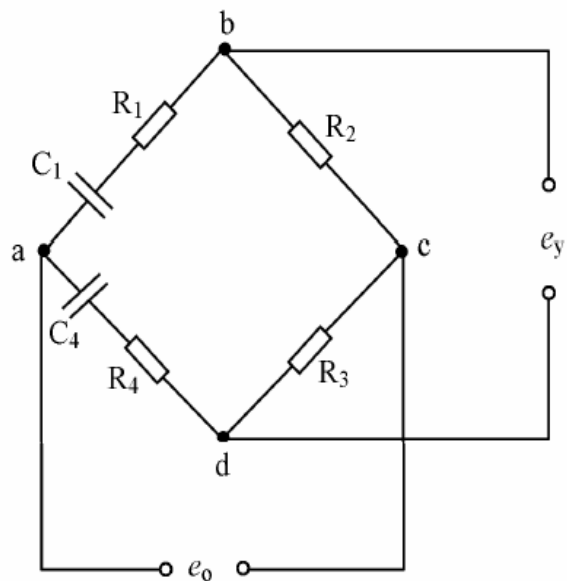
$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

$$\begin{cases} Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \\ \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4 \end{cases}$$

交流电桥平衡要满足两个条件：**两相对桥臂的阻抗模的乘积相等；阻抗角的和相等。**

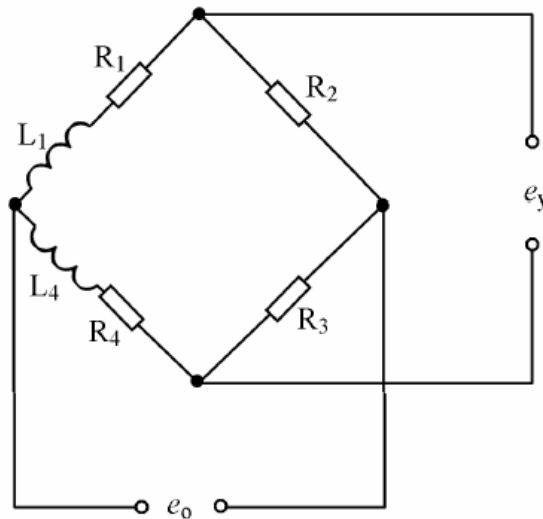
电桥

- 两种常见的交流电桥结构形式



(a) 电容式电桥

$$\begin{cases} R_1 R_3 = R_2 R_4 \\ \frac{R_3}{C_1} = \frac{R_2}{C_4} \end{cases}$$



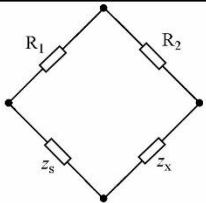
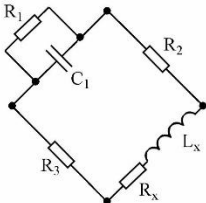
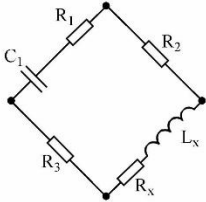
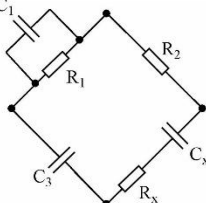
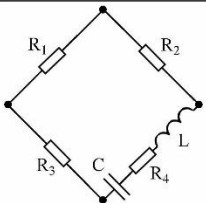
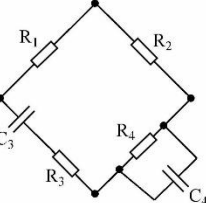
(b) 电感式电桥

$$\begin{cases} R_1 R_3 = R_2 R_4 \\ L_1 R_3 = L_4 R_2 \end{cases}$$

交流调平衡是指分别调节电容和电感两参数，使它们各自达到平衡。

电桥

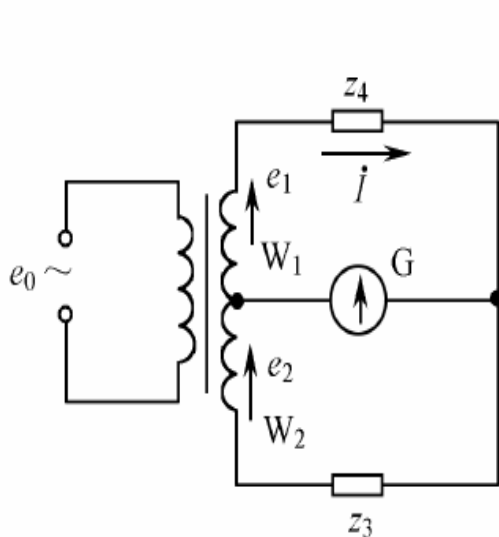
• 交流电桥

电桥形式	示 例	说 明
惠氏电桥		测量 L 或 C 的平衡方程: $z_x = z_s \frac{R_2}{R_1}$ 电感: $L_x = L_s \frac{R_2}{R_1}$, 电容: $C_x = C_s \frac{R_1}{R_2}$
麦氏电桥		测量 L 的平衡方程 (最好 $\omega L_x / R_x < 10$): $L_x = R_2 R_3 C_1$, $R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$
海氏电桥		测量 L 的平衡方程 (最好 $\omega L_x / R_x > 10$): $L_x = \frac{R_2 R_3 C_1}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}$, $R_x = \frac{\omega^2 C_1^2 R_1 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_1^2 R_1^2}$
西林电桥		测量 C 的平衡方程: $C_x = C_3 \frac{R_1}{R_2}$, $R_x = R_2 \frac{C_1}{C_3}$
谐振电桥		测量 L 或 C (f 已知), f (L 和 C 已知) 的平衡方程: $X_L = X_C$ 或 $L \cdot C = \frac{1}{\omega^2}$, $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
文氏电桥		测量 f 的平衡方程: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}}$, $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} + \frac{C_4}{C_3}$

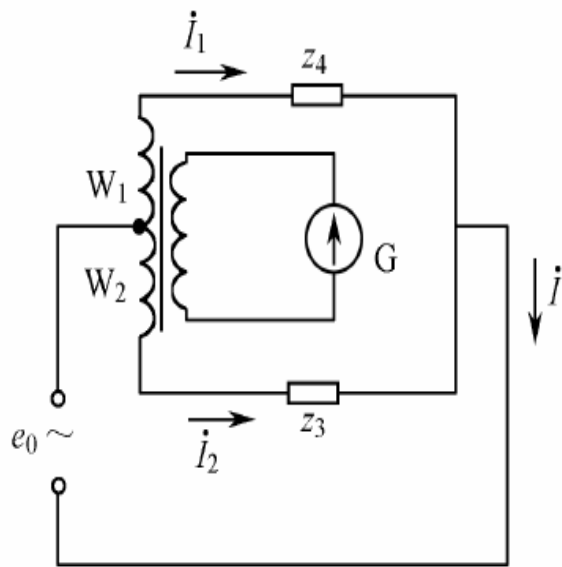
电桥

• 变压器式电桥

将变压器中感应耦合的两线圈绕组当做了电桥的桥臂



(a) 形式一



(b) 形式二

以上两种电桥中的变压器结构实际上均可设计成**差动变压器式传感器**，通过移动其中的敏感元件——铁芯的位置将被测位移转换为绕组间互感的变化，再经电荷转换为电压或电流输出量。与普通电桥相比，变压器式电桥具有较高的测量精度和灵敏度，且其性能也较稳定，因此在非电量测量中得到了广泛的应用。

电桥

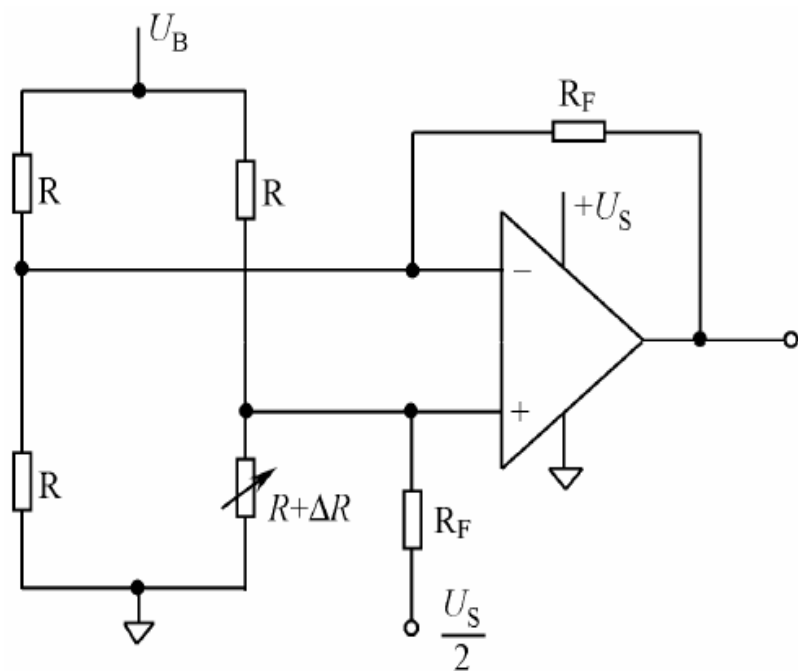
- 电桥电路的设计

- (1) 选择电路结构 (1、 2、 4个桥臂元件变化)。
- (2) 选择电压或电流型激励方式。
- (3) 选择比率测量工作方式。
- (4) 激励电压源或电流源的稳定性。
- (5) 电桥的灵敏度：满量程输出/激励电压，典型值为 $1 \sim 100\text{mV/V}$ 。
- (6) 电桥的满量程输出 (典型值)： $10 \sim 100\text{mV}$ 。
- (7) 精密、低噪声放大/调理技术。
- (8) 线性化。
- (9) 远程电桥驱动。

电桥

- 电桥输出放大

直流电桥的输出信号一般需要经过放大才能满足后续电路使用的要求。

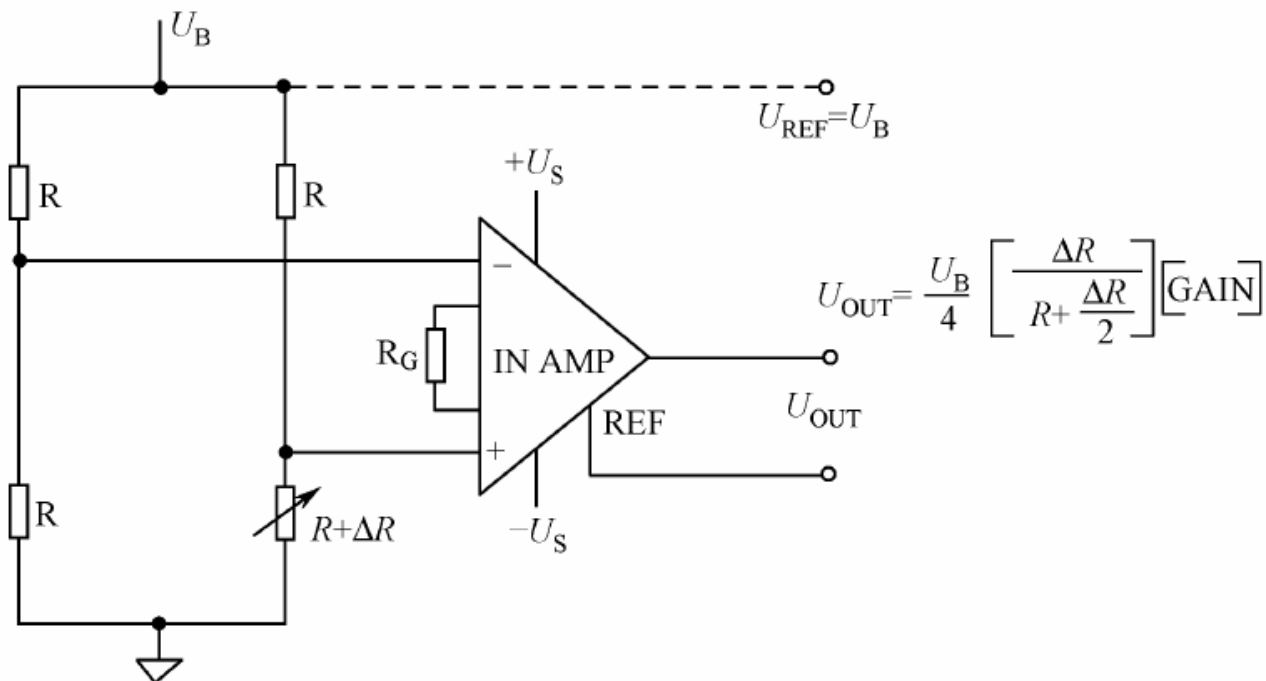


采用单精密运放电路作为桥式放大器

电桥

- 电桥输出放大

采用仪器放大器实现所需的放大功能

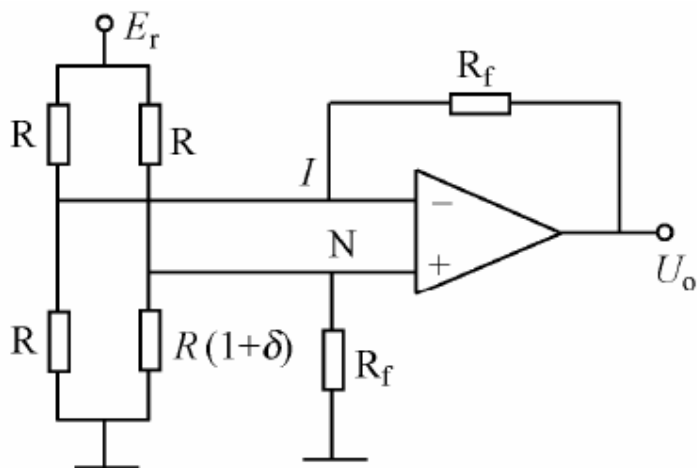


采用仪用放大器实现具有稳定增益和高 K_{CMR} 的电桥放大器

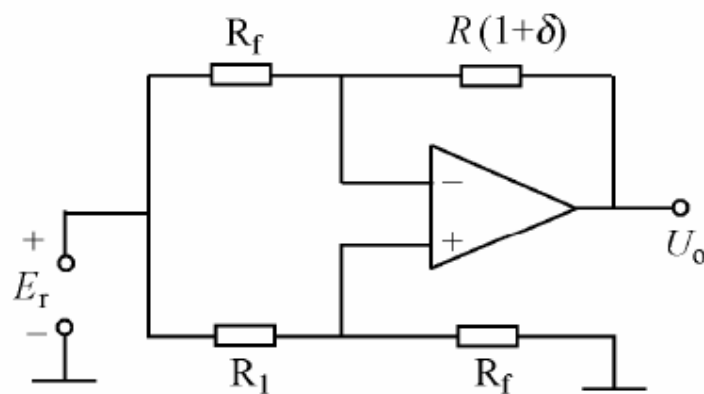
电桥

- 电桥输出放大

高精度和高灵敏度光敏电阻惠氏电桥测量转换电路



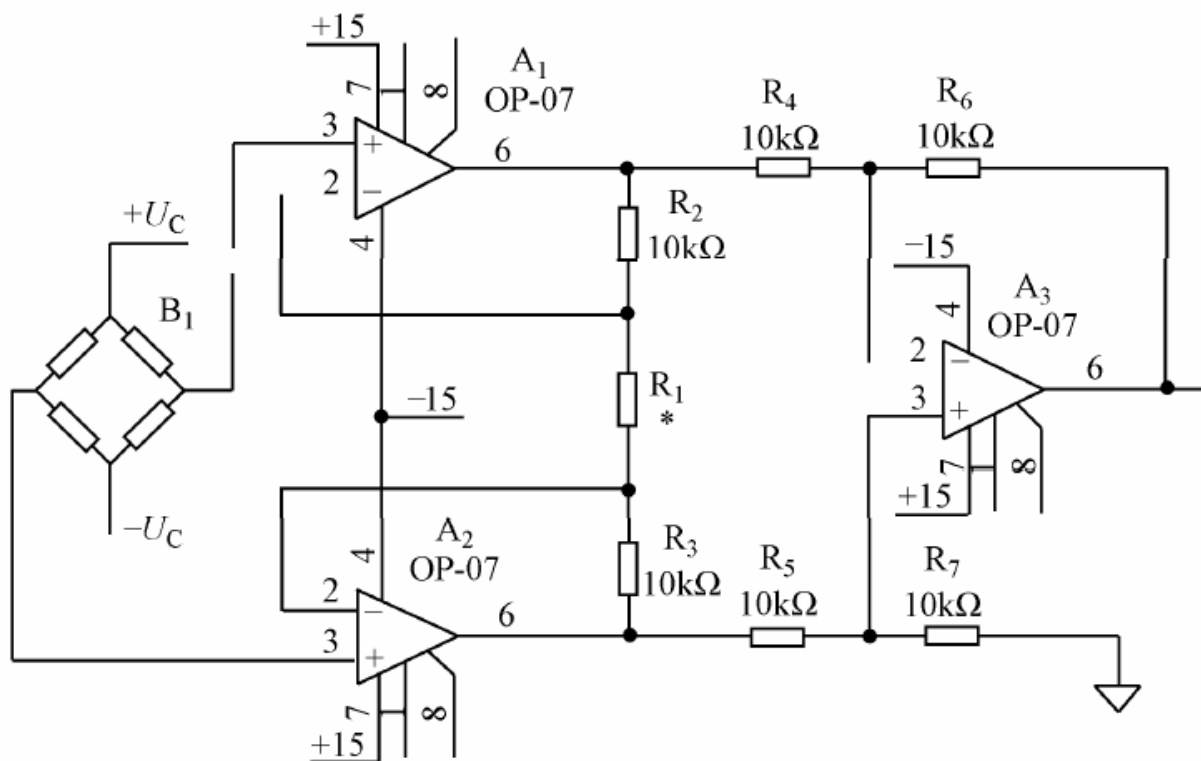
(a) 常规输入式电桥转换电路



(b) 反馈网络式电桥转换电路

电桥

- 电桥输出放大

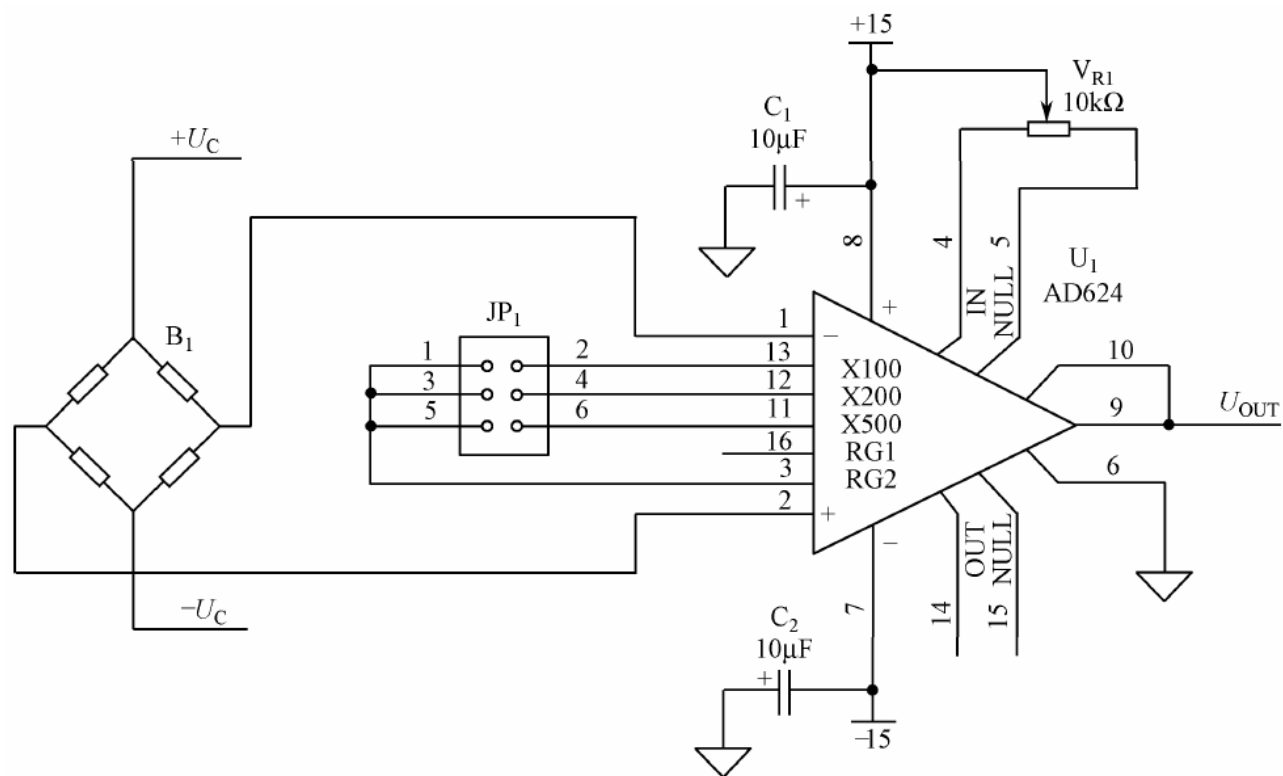


使用三运放的应变仪电桥测量转换电路

实用的、带非线性校正的、线性良好的应变仪电桥测量转换电路，它需要使用3个运算放大器来实现其功能。该电路的输入电阻达到 $1M\Omega$ 以上，共模抑制比也有大幅度提高，且放大器增益与应变电阻值无关，适用于工作频率要求不高，零漂小，精度要求优于0.1%的场合。

电桥

- 电桥输出放大



AD624的典型应用电路

电桥

- 电桥输出线性化

电桥电压的灵敏度定义为

$$K_U = \frac{\Delta e_y}{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)} = \frac{n}{(1+n)^2} E$$

式中， $n=R_2/R_1$ 为桥臂比。

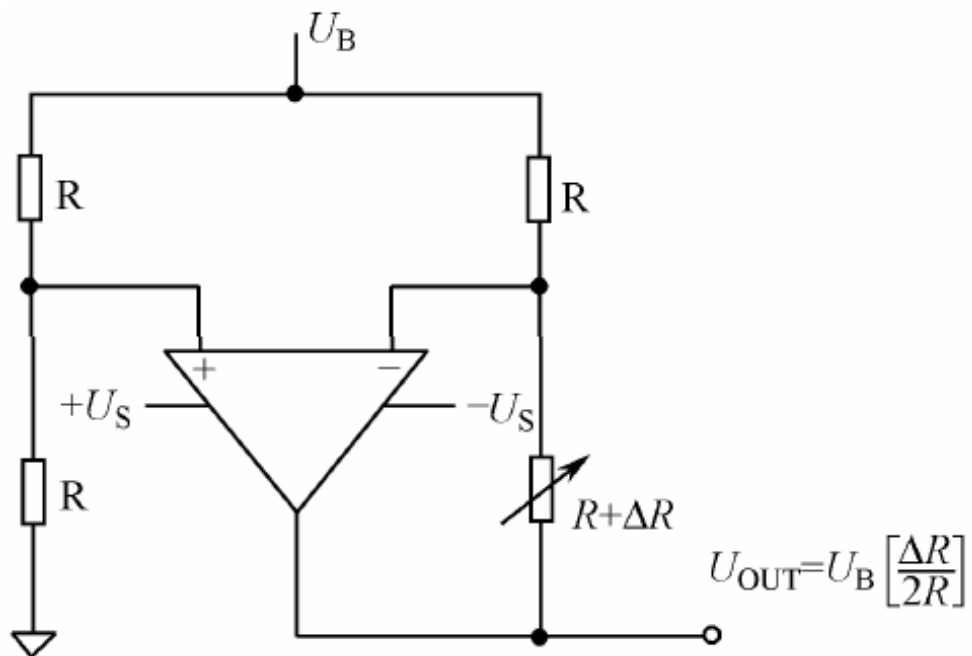
当 $n=1$ 时， K_U 为最大值。也就是说，在供桥电压确定后，
当 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 时，电桥电压灵敏度最高

当灵敏度高时，其非线性误差会升高。

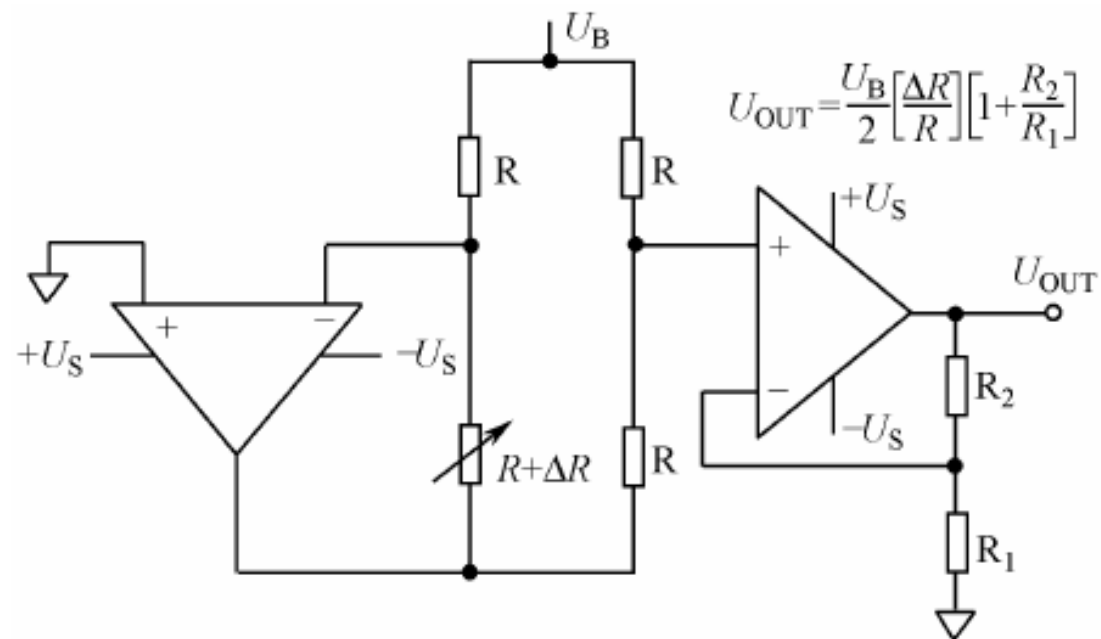
为了减小和克服非线性误差，常采用差动电桥。

电桥

- 电桥输出线性化



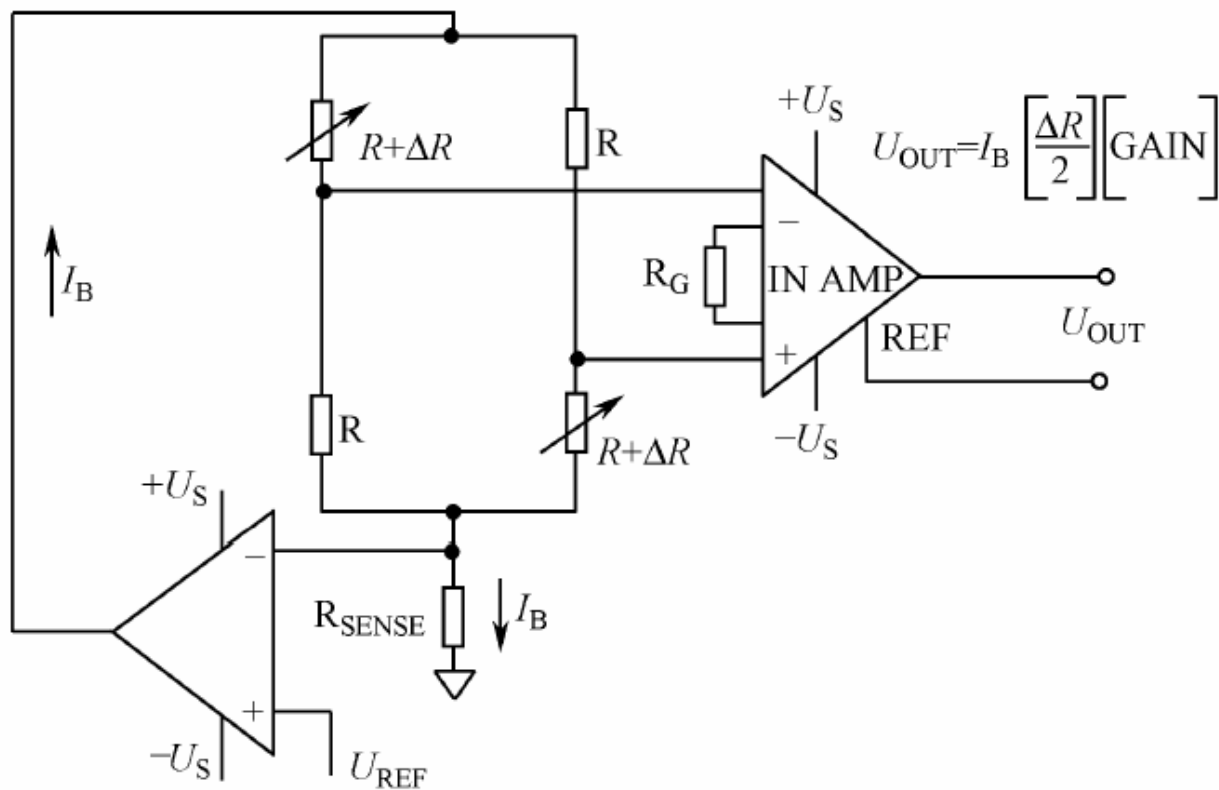
线性化单元件变化电桥（方法1）



线性化单元件变化电桥（方法2）

电桥

- 电桥输出线性化

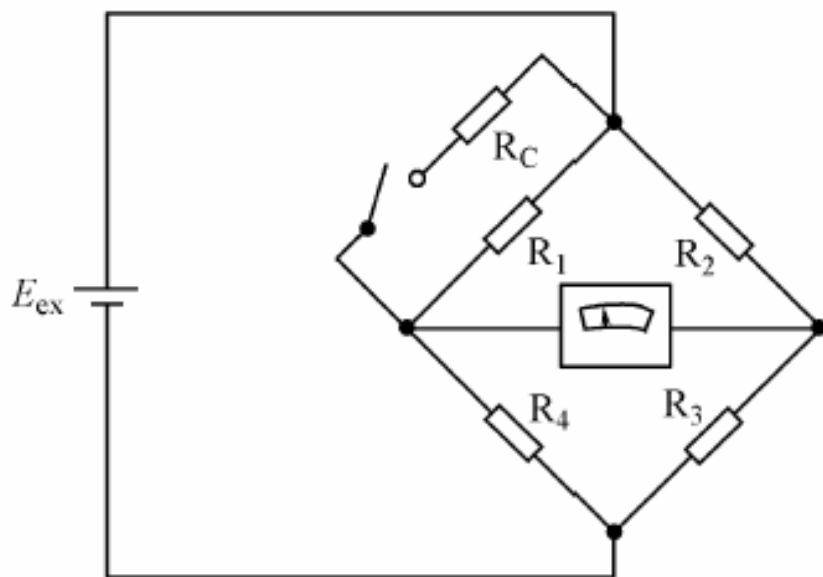


电流驱动、双元件变化型电桥的线性化电路

电桥

- 电桥的并联校正法

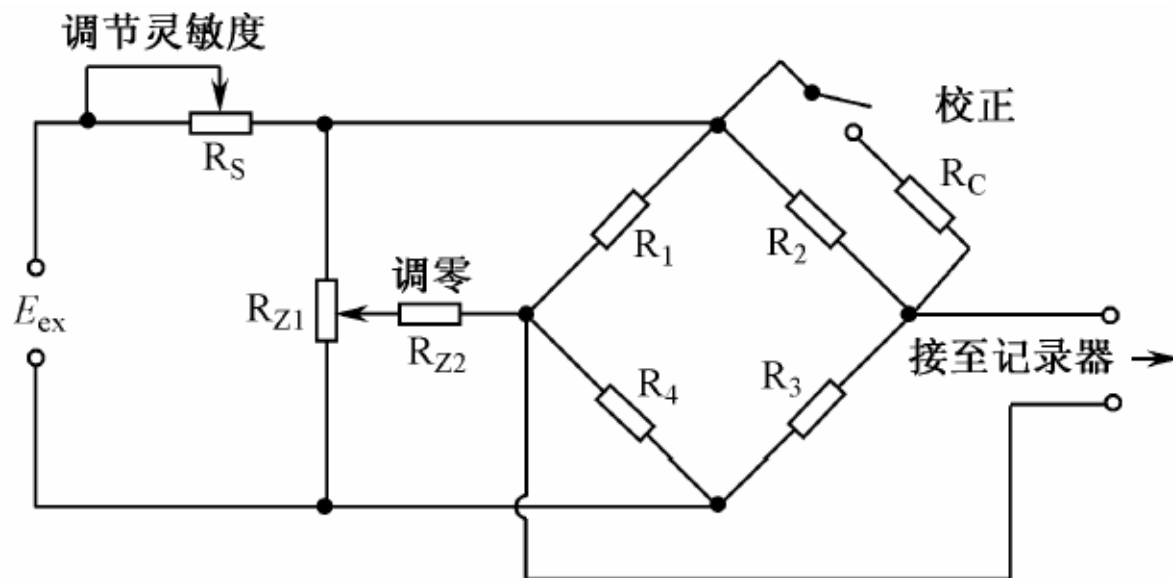
常常需要对电桥进行标定或校正，所采用的方法是对电桥直接引入一个已知的电阻变化，从而观察其对电桥输出的效果。



$$\Delta R = R_1 - \frac{R_1 R_C}{R_1 + R_C}$$

电桥

- 电桥的并联校正法



若 $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 < 1000\Omega$ (普通应变传感器)

则 $R_{Z2} \approx 100 R_1$

$R_{Z1} \approx 25\,000\Omega$

具有灵敏度调节、标定和调平衡等多种功能的电桥

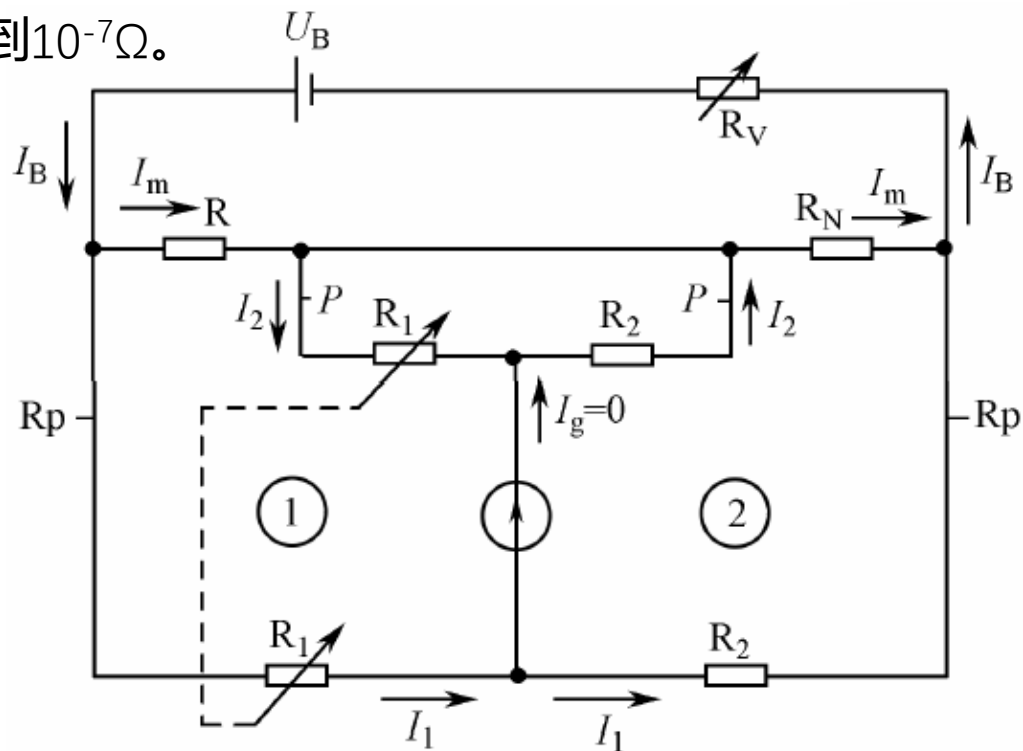
电桥

- 能测量小电阻值的电桥

测量如 $\text{m}\Omega$ 或 $\mu\Omega$ 量级的微小阻值

汤普逊电路 (Thomson bridge)

用汤普逊电桥可以测量最小阻值一直到 $10^{-7}\Omega$ 。



电压/频率变换与频率/电压变换电路



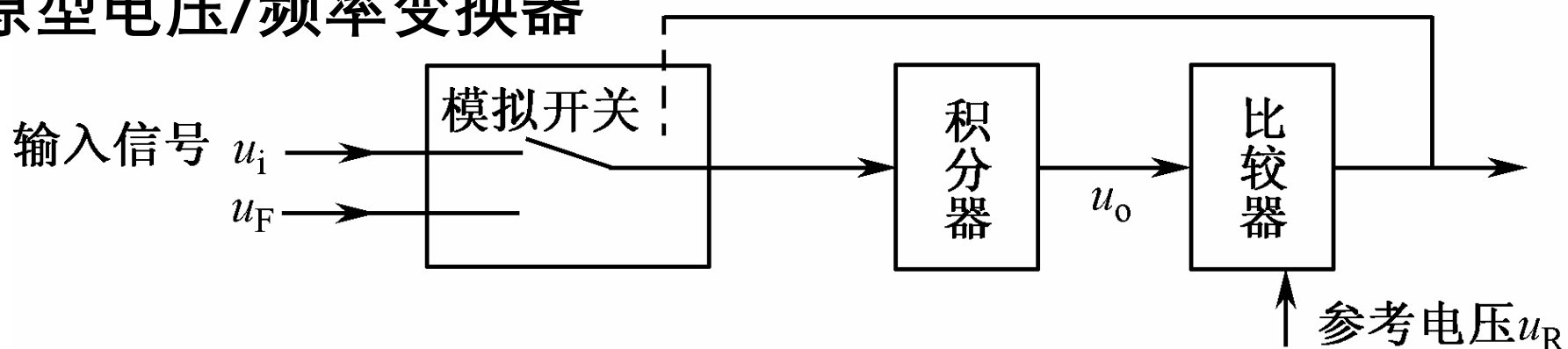
- 电压/频率变换

电压/频率变换（UFC）能把输入信号电压变换成相应的频率信号，即它的输出信号频率与输入信号的电压值呈正比，这就提供了一种简单的模拟数字转换方法。做这种变换的原因是对一个脉冲串进行传输和解码，要比一个模拟信号精确得多，特别是在传输线较长或干扰严重的情况下更是如此。电压/频率变换电路的应用十分广泛，在不同的应用领域有不同的名称：在无线电技术中，它被称为**频率调制（FM）**；在信号源电路中，它被称为**压控振荡器（UCO）**；在信号处理与变换电路中，它被称为**电压/频率变换电路或准模/数转换电路**。

电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 电压/频率变换

积分复原型电压/频率变换器



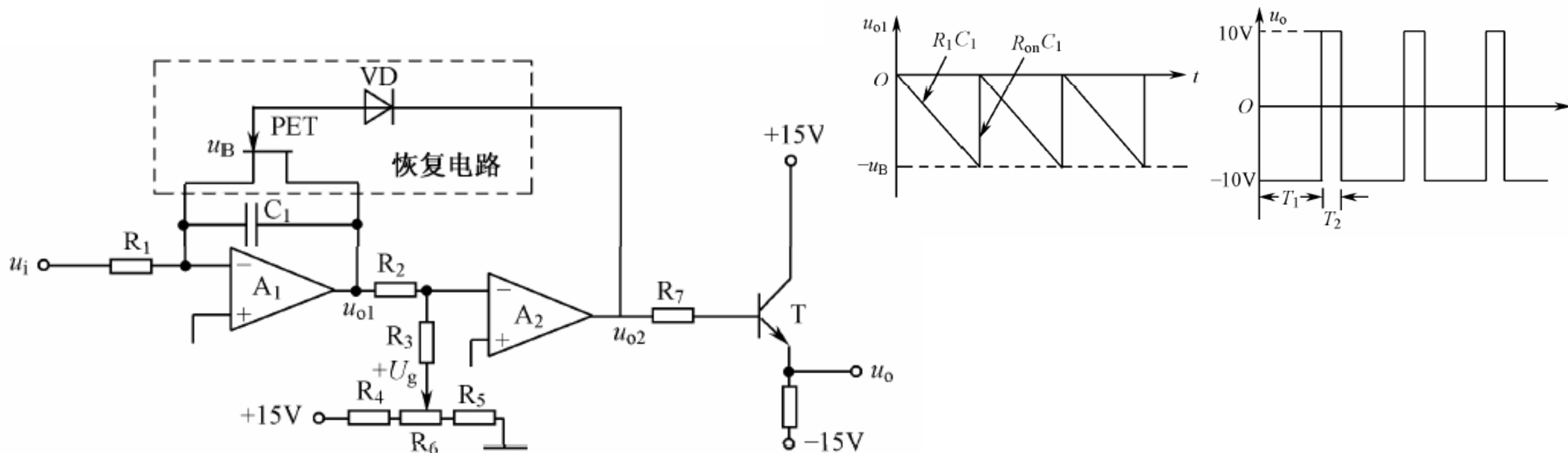
$$T_2 \ll T_1$$

$$f_o = \frac{1}{T_1 + T_2} \approx \frac{1}{T_1} \approx \frac{1}{\tau u_R} u_i$$

电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 电压/频率变换

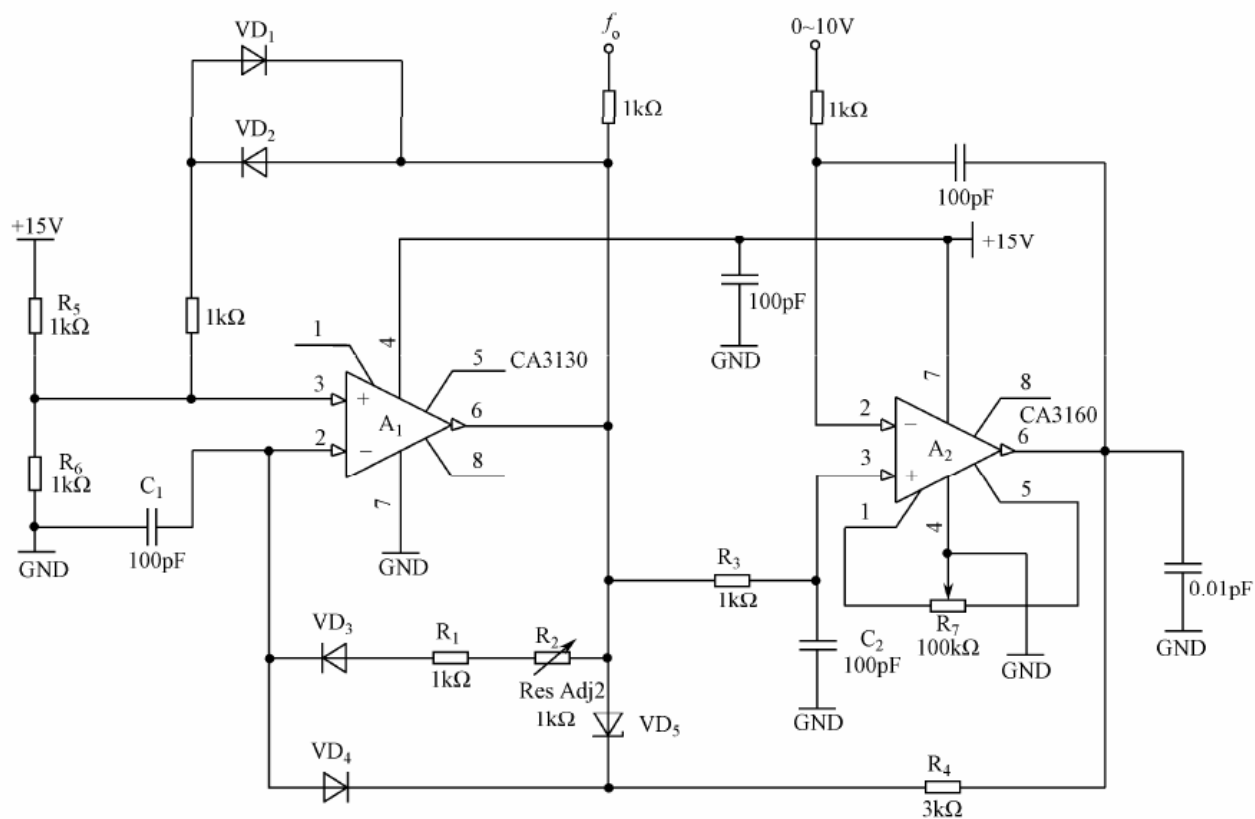
由集成运放组成的积分复原型电压/频率变换器及其输出波形



电压/频率变换与频率/电压变换电路

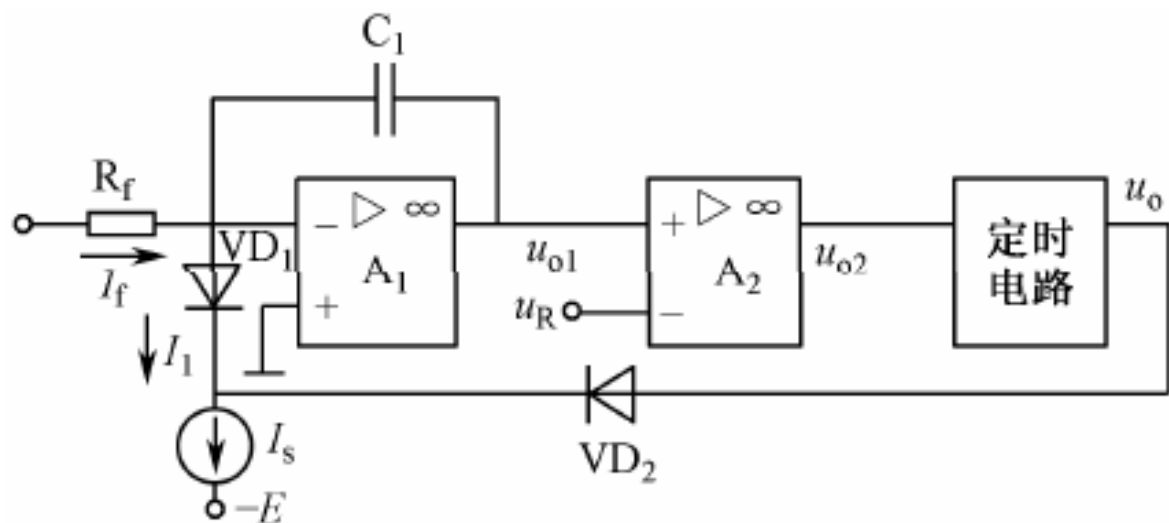
• 电压/频率变换

采用了多谐振荡器CA3130来产生恒定幅度和宽度的脉冲

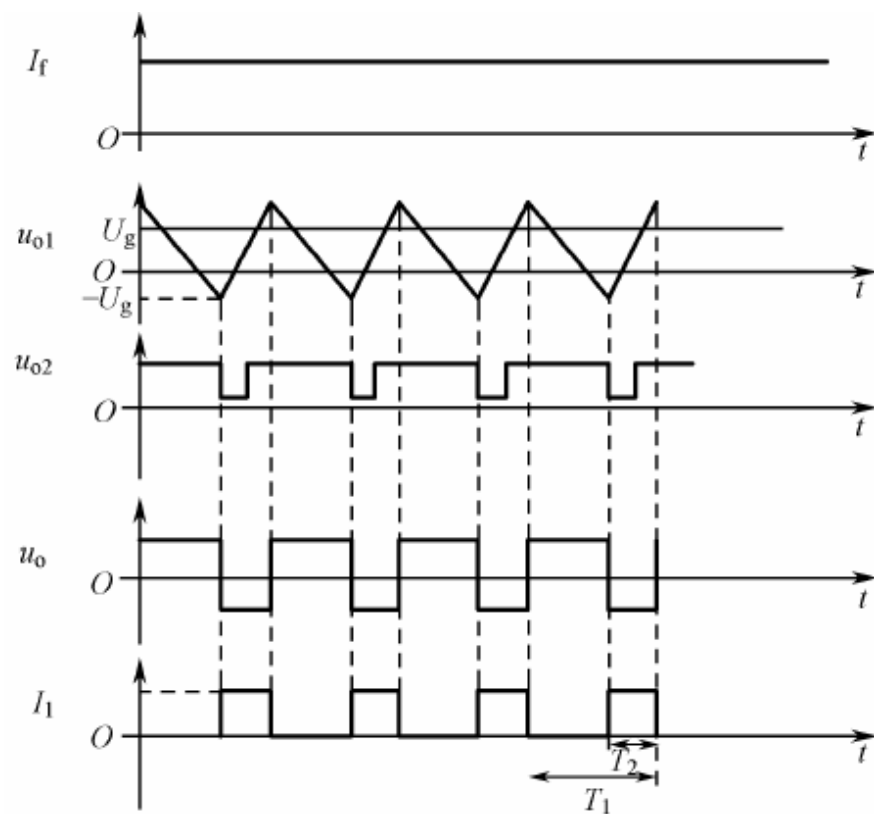


电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 积分复原型电压/频率变换器的精度和动态范围由于复位电路具有非线性特性而受到限制，**提高其精度的主要方法是缩短复位时间。**



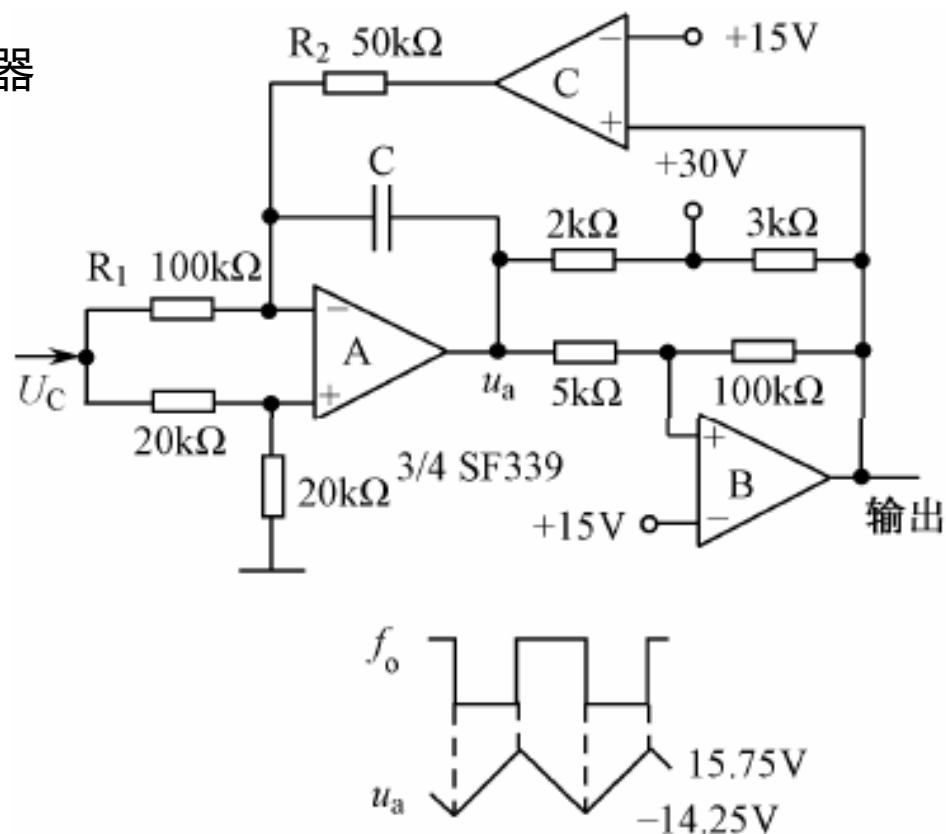
电荷平衡型电压/频率变换器的原理图及波形图



电压/频率变换与频率/电压变换电路

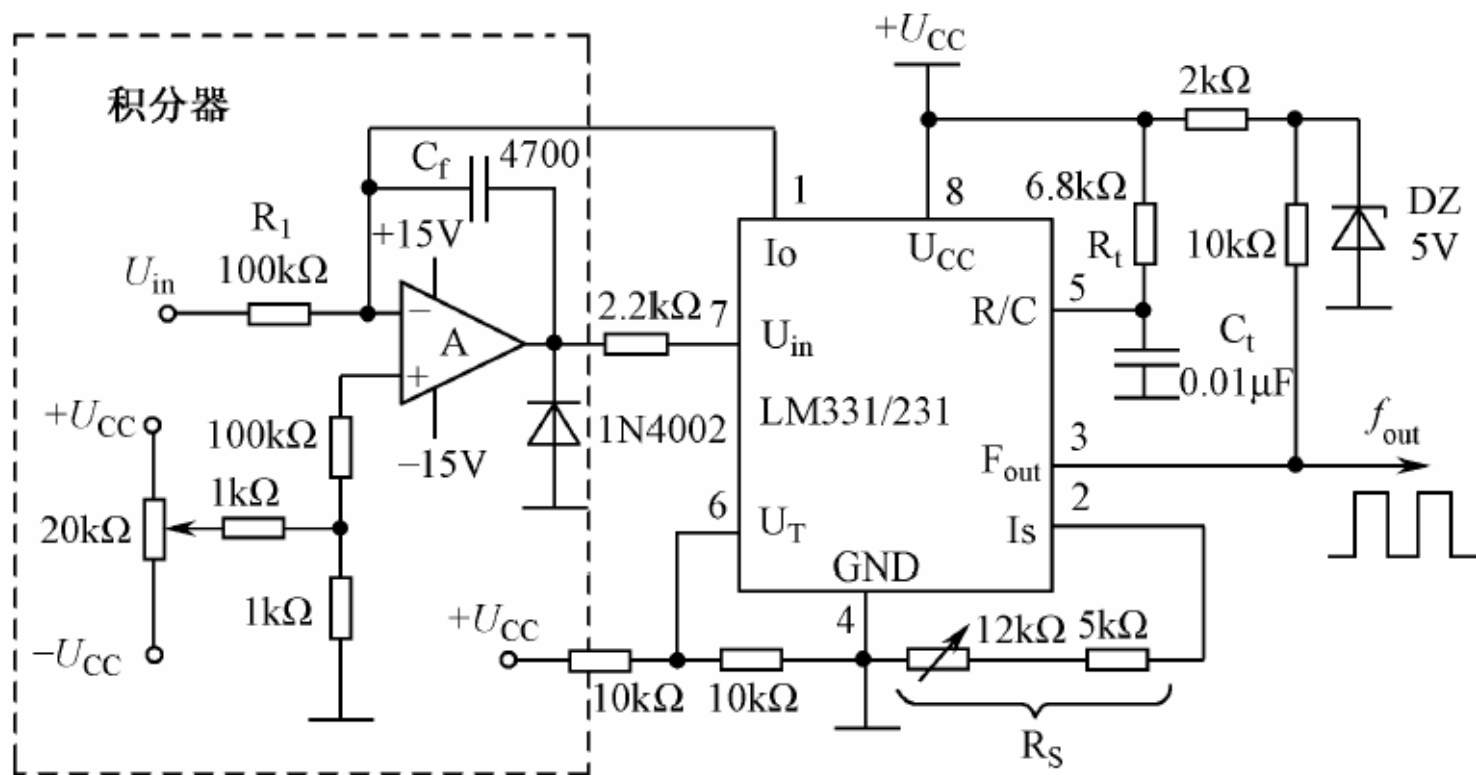
- 积分复原型电压/频率变换器的精度和动态范围由于复位电路具有非线性特性而受到限制，**提高其精度的主要方法是缩短复位时间。**

利用比较器SF339（或LM339）组成的压控振荡器



电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 集成电压/频率变换器



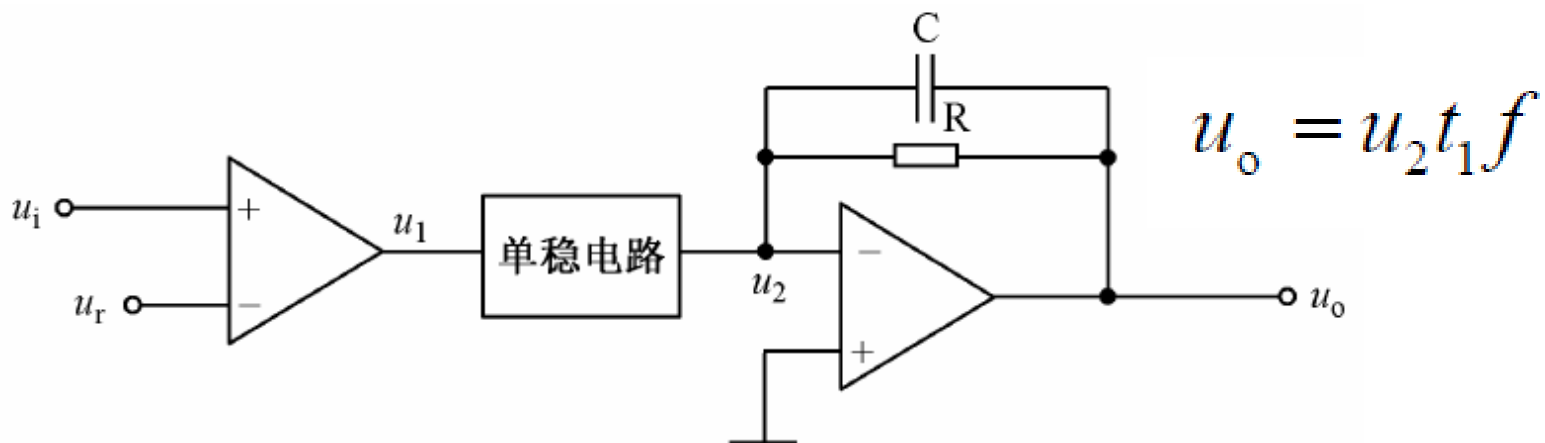
采用LM331 的高精度 U/F 转换电路

电压/频率变换与频率/电压变换电路

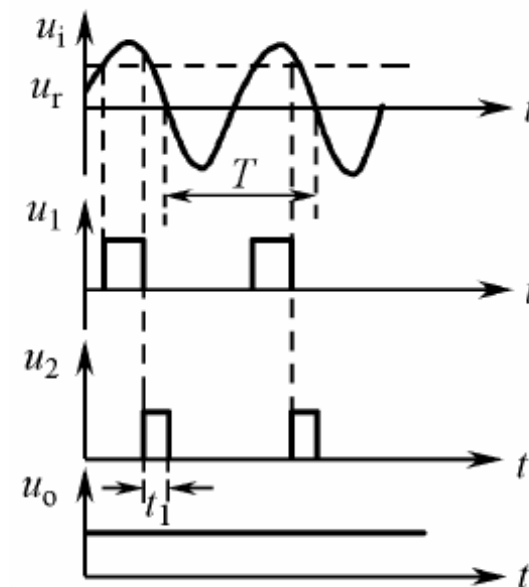


• 频率/电压变换

相对应的频率/电压变换电路有时也称**鉴频器**（Frequency Discrimination）或**准数/模转换电路**和**频率/电压变换电路（FUC）**。工程应用中的涡轮流量计和转速仪等就都需要将频率信号转换成电压信号，或者直接计数显示。

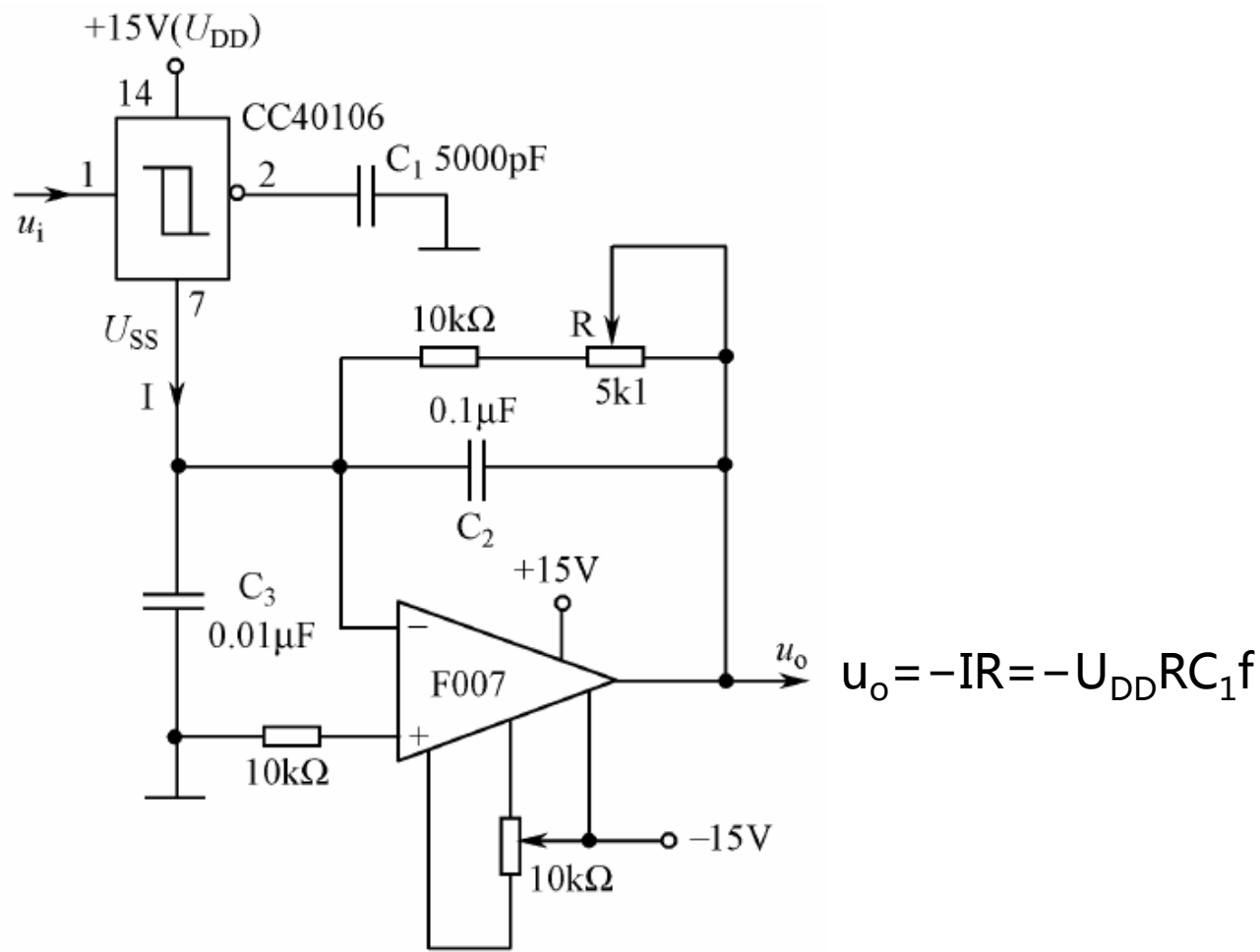


图中的 u_r 为整形电路的阈值； t_1 为单稳电路的定时时间； T 为输入信号的周期。



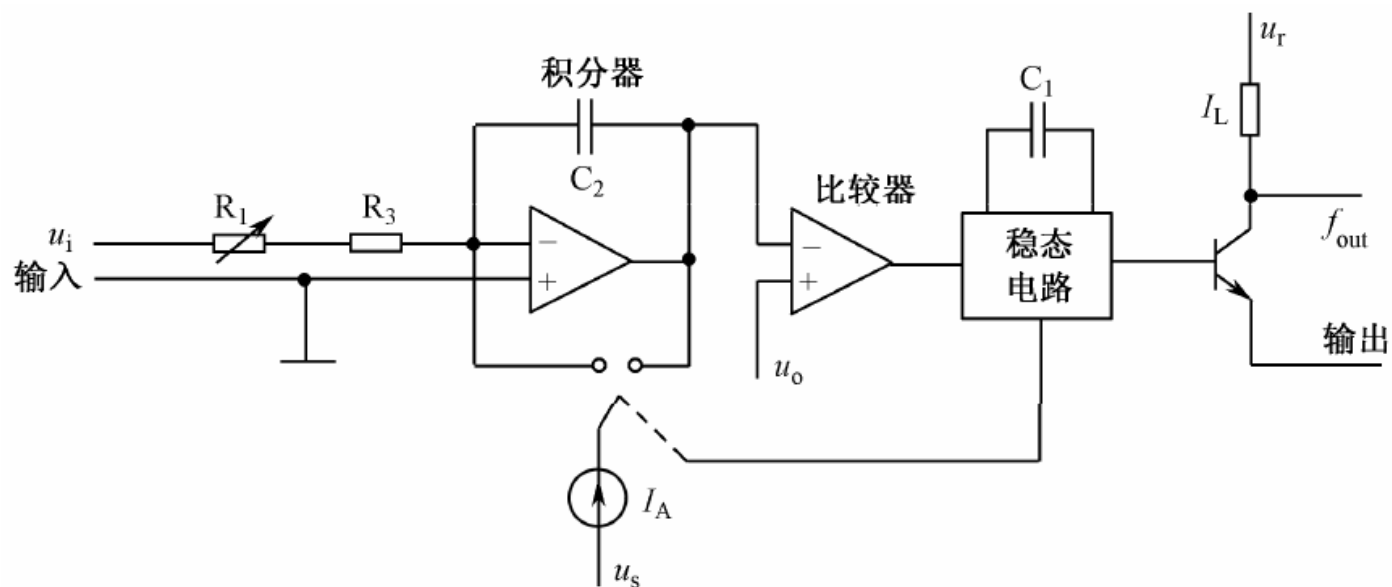
电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 频率/电压变换



电压/频率变换与频率/电压变换电路

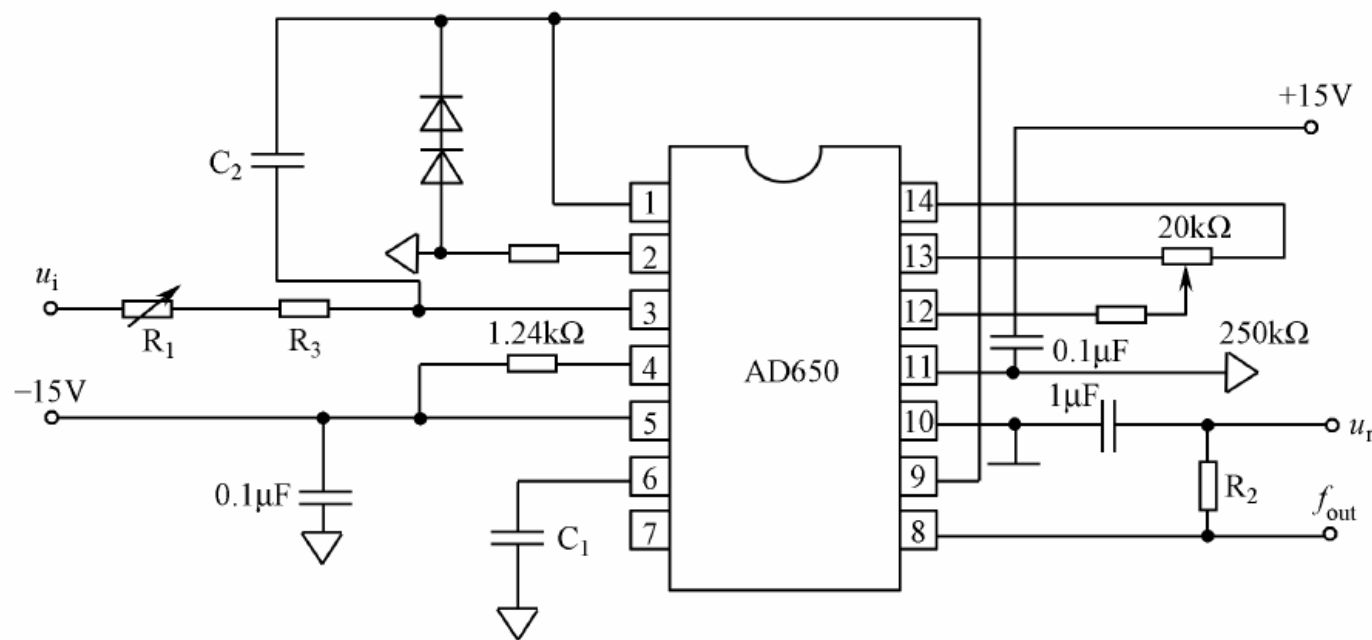
- 频率/电压变换 模拟集成U/F、F/U转换器



AD650 的组成原理图

电压/频率变换与频率/电压变换电路

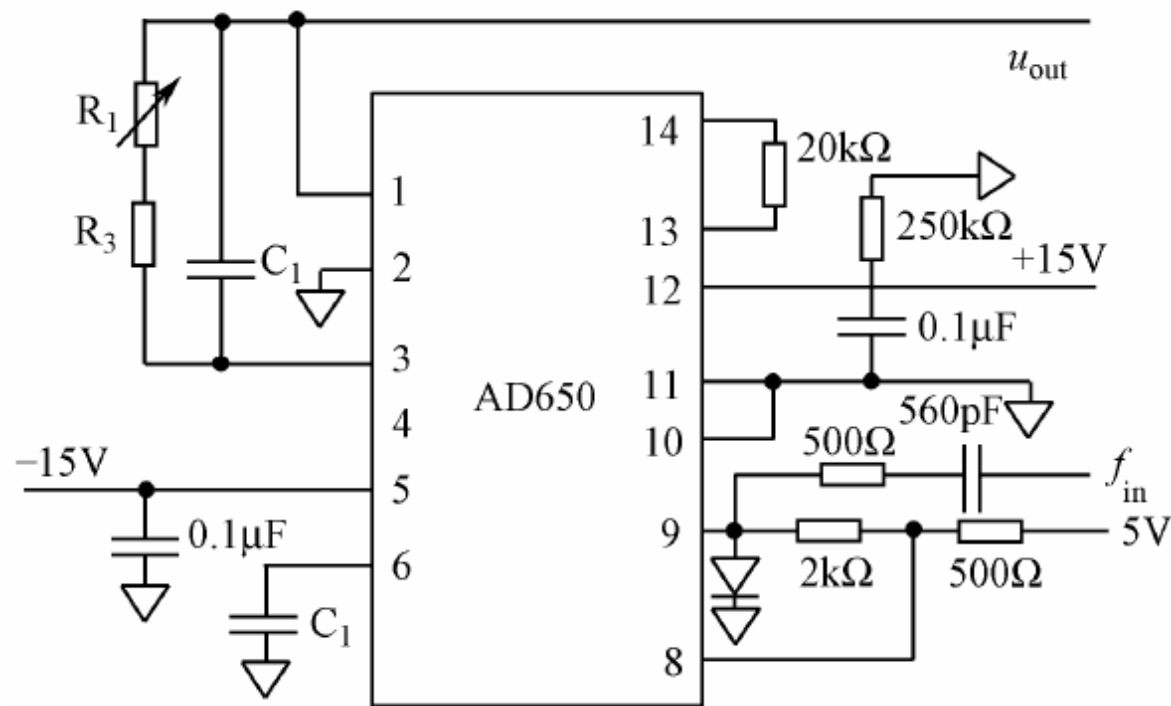
- 频率/电压变换 模拟集成U/F、F/U转换器



由AD650 实现的电压/频率转换电路

电压/频率变换与频率/电压变换电路

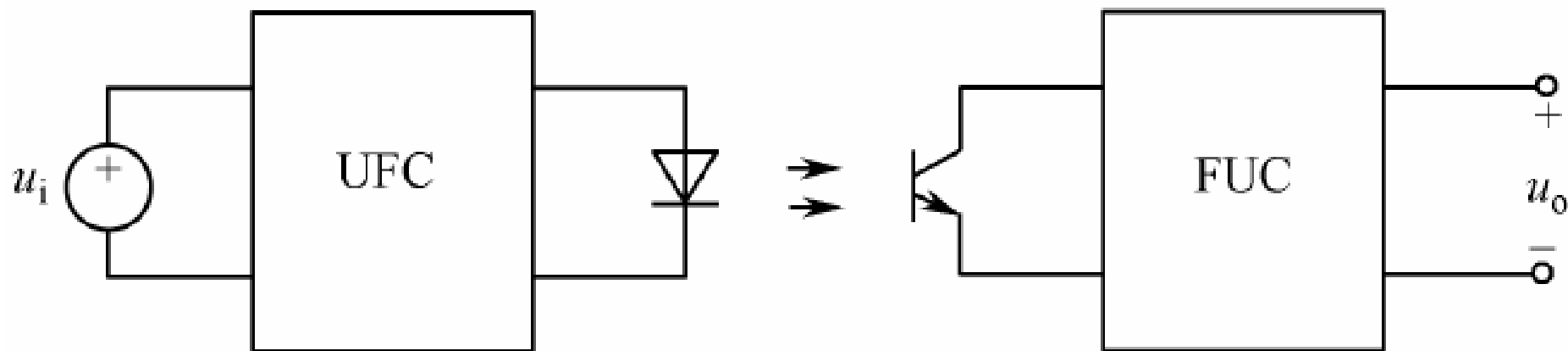
- 频率/电压变换 模拟集成U/F、F/U转换器



由AD650 实现的频率/电压转换电路

电压/频率变换与频率/电压变换电路

- 频率/电压变换 模拟集成U/F、F/U转换器



用隔离形式传递模拟信号的典型UFC-FUC结构