

文章编号:0253 - 2328(2001)04 - 0399 - 04

集成运放电路分析方法探析

王岳昭

(宁夏大学 学报编辑部,宁夏 银川 750021)

摘要:论述了利用“虚地”或“虚短”来分析带负反馈的集成运放电路及带负反馈的综合集成运放电路的分析方法,并进一步讨论了当集成运放电路在非线性区工作时,以及处于开环状态或正反馈状态时,利用转折点找出其输入输出关系的方法。

关键词:集成运放电路;虚短;虚地;转折点;负反馈;正反馈

分类号:(中图) TN401 **文献标识码:** A

当今世界电子技术飞速发展,集成电路正在逐步取代某些具有特定功能的分立元件电路。在目前使用的电子技术教材中,集成运算放大器的应用电路所占的分量也越来越大,由它们主要构成了信号运算电路、信号处理电路和信号发生器等。在实际应用电路中,由运算放大器构成了种类繁多、功能各异的电路,在分析这些电路时,用简洁、迅速的方法找出电路输出和输入之间的关系是非常重要的。

1 概念简介

1.1 线性区“虚短”与“虚地”的概念^[1]

“虚短”与“虚地”是集成运放电路工作在线性区时的非常重要的概念,它们是快速、简便地分析集成运放应用电路的工具。但是,要正确地使用好这一工具,就必须掌握其基本含义和使用条件。

“虚短”是理想集成运放电路工作在线性区时的一个重要结论。当集成运放电路为理想运算放大器时,其开环放大倍数 $A_{od} = \infty$, 由于工作在线性区,故输出与输入之间呈线性关系,即

$$V_o = A_{od}(V_- - V_+).$$

当输出电压为有限值时,由上式可知,其净输入电压 $V_- - V_+ = \frac{V_o}{A_{od}} \approx 0$, 所以 $V_- = V_+$, 即可以认为

和 两点之间是“虚短”的,这就是“虚短”的含义。如果在集成运放电路中, 直接接地或通过一个电阻接地,则 $V_- = 0$, 此时 $V_+ = 0$, 这时 点是 0,

而不是地,可以认为集成运放电路的反相输入端点是“虚地”。由此可见,“虚地”和“虚短”都是集成运放电路工作在线性区时得出的结论。“虚短”现象始终存在,而“虚地”只是“虚短”在某一特殊条件下的表现形式。“虚短”不一定是“虚地”,而“虚地”必定是“虚短”。因此,当集成运放电路工作在线性区时,判断是否存在“虚地”的条件是:当反相端作为信号输入端时,同相端直接接地或通过电阻接地。

要判断集成运放电路是否存在“虚短”,根据前面的推导可知,应先判断集成运放电路是否工作在线性区。因理想集成运放电路的开环放大倍数 $A_{od} = \infty$, 所以要使其工作在线性区,就必须在电路中引入一个深度负反馈,以减小加在集成运放电路输入端的净输入信号数值。如果集成运放电路处于开环状态或接有正反馈,由于 $A_{od} = \infty$, 即使输入信号很小很小,输出电压仍然极易超出线性范围,达到正向饱和值 V_{+} 和负向饱和值 V_{-} 。因此,判断集成运放电路是否存在“虚短”,应从集成运放应用电路的结构上观察在其输出与输入之间是否存在负反馈。

当输出电压从输出端经过反馈元件返送到反相输入端时,根据瞬时极性法可以判断为电压并联负反馈。又因集成运放电路的 A_{od} 很大,反馈系数不是很小,则一般情况下 $A_F \gg 1$, 故一般为深度负反馈。

理想集成运放电路工作在线性区时的另一结论是 $I_- = I_+ = 0$, 这也是分析集成运放电路的重要概念。

1.2 非线性区转折点的概念

收稿日期:2001 - 04 - 16

作者简介:王岳昭(1951 -),女,编审,研究机械制造和电气工程,科技编辑学。

当集成运放电路的工作范围超出线性范围时,其输出电压和输入电压之间就不满足

$$V_o = A_{od}(V_+ - V_-)$$

的表达式,这时只要 V_+ 和 V_- 点之间有很小的电势差,则输出电压要么为正向饱和电压 V_+ ,要么为负向饱和电压 V_- ,而 $V = V_0$ 为输出电压 V_o 的转折点^[2].

当 $V_+ > V_-$ 时, $V_o = V_+$;

当 $V_+ < V_-$ 时, $V_o = V_-$.

由于理想运放电路的 $r_i = \infty$,所以当集成运放电路工作在线性区时, $I_+ = I_- = 0$ 仍然成立.

集成运放电路是否工作在线性区,需要判断其是否引入了负反馈,如无负反馈存在,即处于开环状态,则集成运放电路工作在线性区;如有反馈存在,但是从输出端 V_o 引到同相端,即为正反馈,则集成运放电路也工作在线性区.因此,观察到集成运放电路是开环状态或引有正反馈,其必定工作在线性区.

当集成运放电路工作在线性区时,其输出电压何时从 V_+ 转换到 V_- ,需要确定参考电压 V_R 值. V_R 可以加在同相端,也可以加在反相端;可接小于信号电压范围内的任意值(固定电源电压),也可通过反馈电压分压得到.一旦 V_R 值确定了,则其输入输出的关系就是唯一的了.

2 实例及分析

2.1 利用“虚地”来分析带负反馈的集成运放电路

图 1 是五种不同的集成运放应用电路,观察该电路有以下三个共同点: 信号电压均从反相端输入; 输出电压 V_o 经反馈元件返送到反相输入端; 同相端直接接地或经过电阻接地. 根据前面的分析,由共同点可知,这五种集成运放应用电路都具有负反馈,所以它们工作在线性区内;由共同点可知,它们都存在“虚地”.所以在分析这些电路时利用“虚地”的概念,即 $V_+ = 0$ 和 $I_+ = 0$,就可得到 $i_i = i_f$ (i_i 为输入电流, i_f 为反

馈电流),快速、简便地找出电路中各电量之间的关系,从而找出输出与输入之间的关系^[3].

对图 1(c)所示微分器

$$i_i = C \frac{d u_C}{dt} = C \frac{d V_i}{dt}, \quad i_f = \frac{V_o}{R_F}$$

由 $i_i = -i_f$ 得

$$C \frac{d V_i}{dt} = -\frac{V_o}{R_F}, \quad V_o = -R_F C \frac{d V_i}{dt}$$

对图 1(d)所示对数运算电路

$$i_i = \frac{V_i}{R_1}, \quad V_o = -V_{BE} = -V_T \ln \frac{i_f}{I_s}$$

由 $i_i = i_f$ 得

$$V_o = -V_T \left[\ln \frac{V_i}{R_1 I_s} \right]$$

2.2 利用“虚短”来分析带负反馈的集成运放电路

图 2 是集成运放应用电路,观察这四种电路有以下三个共同点: 都引入了电压负反馈; 都存在“虚短”; 信号电压从同相端或两个端子同时输入. 由可知电路工作在线性区,由 $V_+ = V_-$ 可知 $V_+ = V_-$. 所以分析这类电路时,利用“虚短”的概念,即 $V_+ = V_-$ 和 $I_+ = I_- = 0$,就能迅速找出输出与输入之间的关系.

对图 2(a)所示同相加法器

由同相端 $I_+ = 0$,则

$$\frac{V_{i1} - V}{R_1} + \frac{V_{i2} - V}{R_2} = \frac{V}{R_F}, \quad V = R \left[\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right]$$

其中 $R = R_1 \parallel R_2 \parallel R_F$;

由反相端 $I_- = 0$,则

$$\frac{V}{R_1} = \frac{V_o - V}{R_F}, \quad V_o = \left[1 + \frac{R_F}{R_1} \right] V$$

根据 $V_+ = V_-$ 可得

$$V_o = \left[1 + \frac{R_F}{R_1} \right] R \left[\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right]$$

对图 2(b)所示基本低通滤波器

由同相端 $I_+ = 0$,则

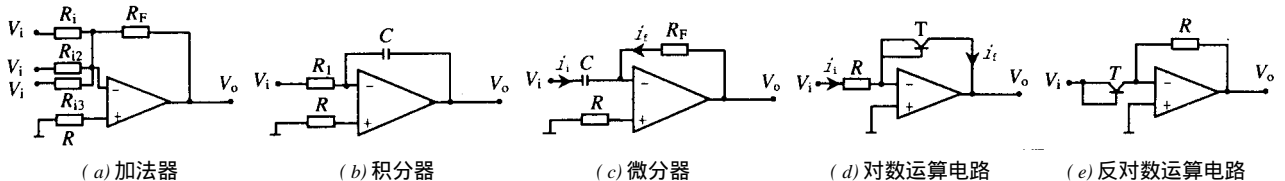


图 1 五种不同的集成运放应用电路

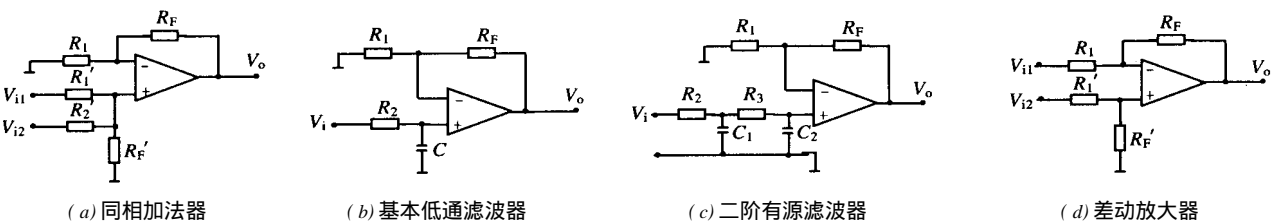


图 2 四种不同的集成运放应用电路

$$V = \frac{1/(j\omega C)}{R_2 + 1/(j\omega C)} \times V_i;$$

由反相端 $I = 0$, 则

$$V_o = \left[1 + \frac{R_F}{R_L} \right] V,$$

根据 $V = V$ 可得

$$V_o = \left[1 + \frac{R_F}{R_L} \right] \frac{V_i}{1 + j\omega CR_2}$$

2.3 带有负反馈的综合集成运放电路的分析

图 3 是两种集成运放应用电路, 都是由多种单个集成运放单元电路组合成的综合电路. 在分析这种电路时应先确定每个单元电路的工作状态, 即所引反馈的极性, 判断是否工作在线性区, 并确定其功能, 然后观察整个电路的信号通路, 以及各单元电路之间的关系, 找出输出与输入之间的关系^[3].

例如, 图 3(a) 中 A_1 为积分电路, A_2 和 A_3 为反相输入比例放大器. A_1 的输入信号为 V_o , 输出信号 V_{o1} 送到 A_2 的输入端, 而 A_2 的输出信号为 A_3 的反馈信号并与 V_i 叠加后加到 A_3 的输入端. A_1 和 A_2 两个运放电路的功能不同, 但又同时串联在 A_3 的反馈支路上, 且为负反馈, 故 A_3 的 $-$ 点为“虚地”点, $V_3 = 0, I_1 = -I_2$. 因

$$V_{o1} = -\frac{1}{RC} \int V_o dt, \quad V_{o2} = -V_{o1} = \frac{1}{RC} \int V_o dt,$$

$$I_1 = -I_2, \quad \frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_{o2}}{R_1},$$

所以

$$V_i = -V_{o2} = -\frac{1}{RC} \int V_o dt,$$

由此可见, 该电路可以实现微分运算, 即

$$V_o = -RC \frac{dV_i}{dt}.$$

图 3(b) 为绝对值放大器, 由 A_1, A_2 两个集成运放单元电路组合而成, 都具有负反馈. A_1 的输出信号 V_{o1} 与输入信号 V_i 在输入端叠加, D_1 和 D_2 的作用是使 A_1 在输入信号 V_i 为正值时, 输出信号 $V_{o1} = 0$.

当输入信号 V_i 为正值时, A_1 的输出信号 V_{o1} 为负值, 使 D_2 截止, $V_{o1} = 0$; 对于 A_2 , 由于 $V_{o1} = 0$, 所以 $I_2 = 0$, 这时 A_2 只有一个输入信号, 因此 $V_{o2} = -V_i R_F / R = -2V_i$, 由于 V_i 为正值, 所以 V_{o2} 为负值.

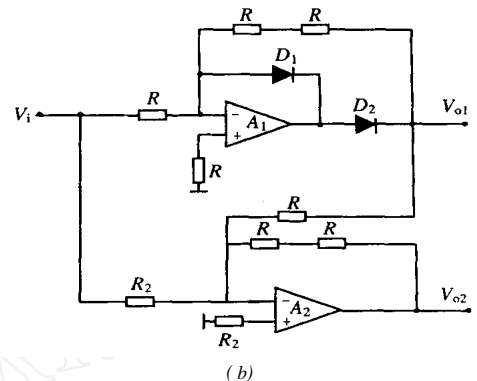
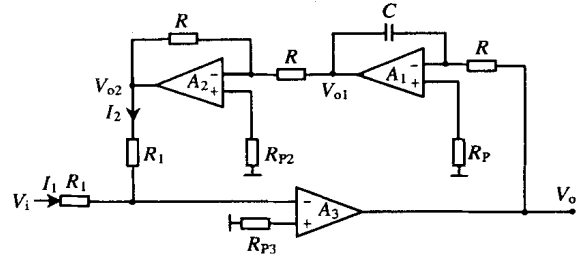


图 3 集成运放综合电路

当输入信号 V_i 为负值时, A_1 的输出信号 V_{o1} 为正值, 使 D_2 导通, $V_{o1} = V_{o2} = -V_i R_F / R_1 = -2V_i$, 这时 A_2 有两个输入信号 $I_1 = V_i / R_1, I_2 = V_{o1} / R_1$. 由于 A_2 为反相加法器, 因此

$$V = 0, \quad I_1 + I_2 = -I_f, \quad \frac{V_i}{R_1} + \frac{V_{o1}}{R_2} = -\frac{V_{o2}}{R_F},$$

$$V_{o2} = -R_F \left[\frac{V_i}{R_1} + \frac{-2V_i}{R_2} \right] = 2V_i,$$

由于 V_i 为负值, 所以 V_{o2} 仍为负值. 由此可见, 不论输入信号是正值还是负值, 其输出信号的极性总是不变的, 故称之为绝对值放大器.

2.4 在集成运放电路处于开环状态时利用转折点找出其输入输出关系

图 4 所示的五种集成运放应用电路都工作在开

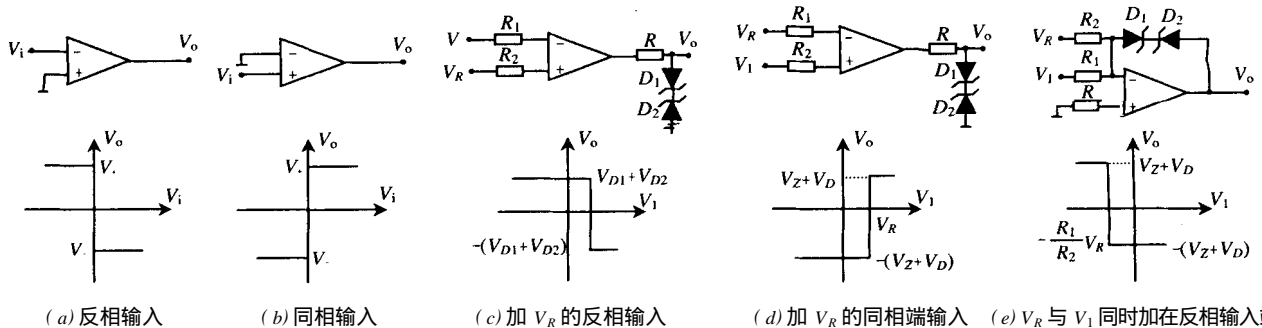


图 4 在开环状态下五种集成运放应用电路

环状态,利用开环增益很大的条件,将同相端与反相端的电压进行比较,并把比较结果反映在输出电压 V_o 上.

图 4(c)和(d)分别在同相端和反相端接参考电压 V_R ,当 $V_i = V_R$ 时,输出电压的状态翻转.用这种方法能检测出输入电压是否大于或小于特定值,故称为电平检测电路.(a)和(b)当 V_R 接地,即 $V_R = 0$ 时,输出电压在 V_i 过零时改变状态,故称为过零比较器^[3].

图 4(e)是求和型比较器,同相端接地 $V = 0$,根据上述分析可知,当 $V = 0$ 时, $V = V$,其输出电压状态翻转.

当 $V = 0$ 时,即

$$V = \frac{R_2 V_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 V_R}{R_1 + R_2} = 0,$$

则

$$V_1 = - \frac{V_R R_1}{R_2},$$

即当

$$V_1 > - \frac{R_1}{R_2} V_R \text{ 时, } V_o = - [V_Z + V_D],$$

$$V_1 < - \frac{R_1}{R_2} V_R \text{ 时, } V_o = [V_Z + V_D].$$

注意,这时切不可用“虚地”的概念来进行分析.

2.5 在集成运放电路处于正反馈状态时利用转折点找出其输入输出关系

图 5 所示电路是带有电压正反馈的集成运放应用电路,电路中 V 值取决于输出电压 V_o 与参考电压 V_R 的叠加.当 $V = V$ 时,其输出电压状态翻转.

当 $V_o = V_+$ 时

$$V = V_{R_1} = \frac{1}{R_2 + R_3} [R_3 V_R + R_2 V_+];$$

当 $V_o = V_-$ 时

$$V = V_{R_2} = \frac{1}{R_2 + R_3} [R_3 V_R + R_2 V_-].$$

由于 V_+ 与 V_- 的数值不同,故 V_{R_1} 与 V_{R_2} 的数值也不同,并在输入输出特性上呈现出滞回曲线的形状.滞回曲线上转折点 V_{R_1} 和 V_{R_2} 的数值可以通过改

变参考电压 V_R 的值来调整, V_R 值增大回环向右移动,反之向左移动,而回差宽度可通过改变 R_2 和 R_3 的阻值来调整.

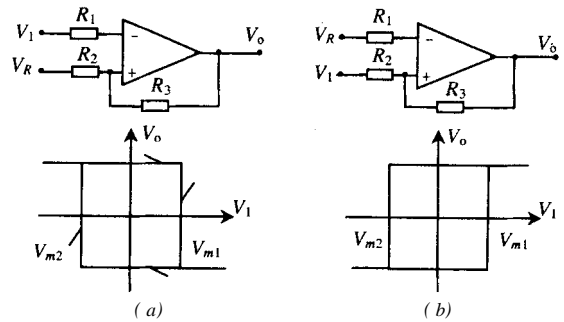


图 5 带电压正反馈的集成运放应用电路

由此可见,当集成运放电路处于开环状态时,只有一个转折点 V_R ,当输入电压由大到小或由小到大变化时,都在 V_R 点使其输出电压状态翻转.当集成运放电路引入正反馈时,存在两个转折点 V_{R_1} 和 V_{R_2} ,当输入电压由大变小时,所对应的转折电压是不同的,呈现出滞回特性.

3 结语

由上述讨论可知,在分析集成运放应用电路时,如电路中存在负反馈,则根据电路的不同利用“虚短”与“虚地”来进行分析;如电路在非线性区工作,应先找到转折点再进行分析.这样对不同的电路采用不同的分析方法,就能迅速地找出其输入输出关系.

参考文献:

- [1] 邱关源. 电路(上册)[M]. 北京:人民教育出版社,1983. 209 - 256.
- [2] 毛善同,朱新建. 复费率电能技术[M]. 北京:国防科技大学出版社,1989. 25 - 51.
- [3] 崔振远. 电子标准功率电能表中的乘法器[J]. 电子测量技术,1998,(4):18.

A study of the integrated transfer circuits analysis method

WANG Yue-zhao

(Editorial Department of Journal, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract :By means of the virtual earth or the virtual shortness in linearization and the turning point in non-linearization, the analysis method of the integrated transfer circuits are studied in this paper.

Key words :integrated transfer circuits; virtual shortness; virtual earth; turning point; negative feed back; positive feed back

(责任编辑 马 健 责任校对 王岳昭)