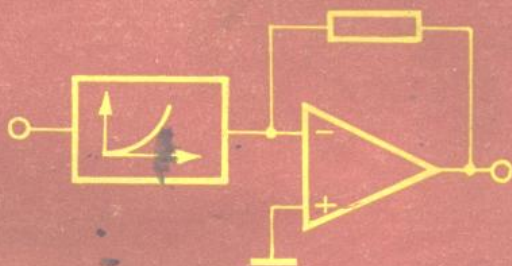


电子技术教学小丛书

集成运算放大器的 非线性应用

应百里 编



高等教育出版社

电子技术教学小丛书

集成运算放大器的 非线性应用

应百里 编



高等教育出版社

2585/14

内 容 简 介

本书是由高等学校工科电工教材编审委员会电子技术编审小组组织评选的“电子技术教学小丛书”之一。专题介绍集成运算放大器的非线性应用。书中比较系统地介绍了集成运放非线性应用中各种单元电路的工作原理、特性及应用,并介绍了一些典型电路的设计方法。为了加深读者对基础知识的理解,还列举了集成运放非线性应用的两个综合线路。对于专供非线性应用的模拟集成电路 J 631 (BG 307) 和集成定时器 5 G 555,也在有关章节作了介绍。各章均选编了一定数量的习题。

本书思路清楚,叙述简明通顺,便于阅读。可作为大学生学习电子技术的补充读物,也可供有关教师和工程技术人员参考。

本书由华中工学院康华光教授审阅。

电子技术教学小丛书

集成运算放大器的非线性应用

应百里 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.5 字数 91,000

1983年12月第1版 1984年10月第1次印刷

印数 00,001—9,200

书号 15010·0551 定价 0.71元

前 言

本书是“电子技术教学小丛书”之一，专题介绍集成运算放大器的非线性应用，是对电子技术基础教材中的有关内容加深加宽的阐述，可作为电子技术基础课程的教学补充读物。

全书共分九章。前八章介绍集成运算放大器非线性应用的单元电路，除阐述各单元电路的基本原理和特性外，还选编了部分设计与应用举例。第九章为综合读图。对于日益发展中的专供非线性应用的模拟集成电路，简要介绍了目前应用较广的集成电压比较器 J 631 (BG 307) 和集成定时器 5G555。全书各章均选编了一定数量的与正文关系密切的习题。

本书原稿由华中工学院康华光教授进行了审阅，并经全国高等学校工科电工教材编审委员会电子技术编审小组评选通过。在审稿过程中康华光教授提出了许多十分宝贵的意见，并对原稿中的不妥之处一一作了指正。在本书的编写过程中还得到了其他有关同志的大力支持和帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

由于水平所限，书中缺点与错误一定不少，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

引言	1
第一章 反馈限幅器	3
1.1 理想反馈限幅器	3
1.2 硅稳压管反馈限幅器	5
1.2.1 基本电路	5
1.2.2 改进的硅稳压管对称双向限幅器	7
1.3 电阻分压式反馈限幅器	8
1.4 应用举例	11
习题	12
第二章 非线性函数产生器	14
2.1 限幅型非线性函数产生器	14
2.1.1 r_1 为非线性电阻的限幅型非线性函数产生器	15
2.1.2 r_1 为非线性电阻的限幅型非线性函数产生器	20
2.2 扩展型非线性函数产生器	22
2.3 倒数型非线性函数产生器	25
2.4 应用举例	28
2.4.1 非线性传输特性的模拟	28
2.4.2 传感器非线性传输特性的矫直	28
习题	29
第三章 电压比较器	31
3.1 零电平比较器 (过零比较器)	31
3.2 任意电平比较器	33
3.2.1 差动型任意电平比较器	33

3.2.2 求和型任意电平比较器	34
3.3 窗孔比较器	36
3.4 集成电压比较器	37
3.4.1 电压比较器的特点	37
3.4.2 J 631 的内部电路和工作原理	38
3.5 应用举例	40
3.5.1 双限温度自动控制器	40
3.5.2 直流电动机脉冲调速系统	42
习题	44
第四章 施密特触发器	45
4.1 反相施密特触发器	46
4.2 同相施密特触发器	51
4.3 应用举例	53
4.3.1 零电平检测器	53
4.3.2 开关稳压器	53
习题	55
第五章 脉冲波形产生器和单稳态触发器	57
5.1 方波产生器	57
5.1.1 由反相积分器与同相施密特触发器构成的 方波产生器	57
5.1.2 由同相积分器与反相施密特触发器构成的 方波产生器	60
5.2 三角波产生器	61
5.3 锯齿波产生器	66
5.4 单稳态触发器	67
5.4.1 直接耦合正反馈的单稳态触发器	68
5.4.2 阻容耦合正反馈的单稳态触发器	70
5.5 集成定时器 5G 555	72

5.5.1	5G555 的内部电路、方框图和管脚说明	72
5.5.2	技术指标	75
5.5.3	三种基本工作方式	75
5.6	应用举例	80
5.6.1	电压-频率转换器	80
5.6.2	频率-电压转换器	80
	习题	81
第六章	检波器	83
6.1	精密整流(检波)器	83
6.1.1	精密半波整流器	83
6.1.2	精密全波整流器	87
6.2	采样-保持电路	89
6.2.1	反相型采样-保持电路	90
6.2.2	同相型采样-保持电路	91
6.3	峰值检波器	92
6.3.1	同相型峰值检波器	92
6.3.2	反相型峰值检波器	93
6.4	应用举例	94
6.4.1	精密死区模拟电路	94
6.4.2	周期快速测量电路	94
	习题	96
第七章	对数和反对数放大器	98
7.1	对数放大器	98
7.1.1	基本原理	98
7.1.2	具有温度补偿的对数放大器	100
7.2	反对数(指数)放大器	103
7.2.1	基本原理	104
7.2.2	具有温度补偿的反对数放大器	104

7.3 应用举例	108
习题	110
第八章 乘法器和除法器	111
8.1 对数-反对数乘法器和除法器	111
8.1.1 对数-反对数乘法器	111
8.1.2 对数-反对数除法器	112
8.1.3 对数-反对数乘法/除法器	113
8.2 压控电阻型乘法/除法器	116
8.3 时间分割乘法器	119
8.4 应用举例	120
8.4.1 交流电压有效值(均方根值)测量电路	120
8.4.2 振幅调制器	121
8.4.3 压控有源滤波器	122
习题	123
第九章 综合读图	125
9.1 脉冲电压峰值测量电路	125
9.2 TF型组装式仪表中的乘除组件	127
习题	132
参考文献	133
习题选答	135

引 言

集成运算放大器作为模拟集成电路的代表性器件,自六十年代中期开始,发展十分迅速,在电子技术各个领域中得到日益广泛的应用,已成为目前最通用的电子器件之一。尽管集成运算放大器的应用电路种类繁多,但按电路性质来分,基本上可分为线性与非线性两大范畴。本书将讨论运算放大器非线性单元电路的工作原理、特性和应用。

根据运算放大器的工作状态和外部网络元件的性质,我们可以把运算放大器非线性应用的单元电路分成以下三种类型:

一、运算放大器工作于小信号的线性放大区,外部网络含有非线性元件;

二、运算放大器工作于大信号的非线性区,外部网络不含有非线性元件;

三、运算放大器工作于大信号的非线性区,外部网络含有非线性元件。

在这三类电路中,因为运算放大器的工作状态不同,所以分析方法也将有所区别。在运算放大器线性应用的分析中对我们十分有用的“虚短”和“虚断”两个基本概念,在非线性单元电路的分析中应区别对待。“虚短”概念及其特例“虚地”概念引出的条件是运算放大器工作于线性放大区,因此它们只适用于工作在深度负反馈状态的第一类非线性电路。“虚断”概念引出的条件是运算放大器的开环输入阻抗很高和运算放

大器的两输入端之间的电位差 $V_i \approx 0$ ，这对于第一类非线性电路是适用的；而对于第二类和第三类非线性电路，尽管 $V_i \approx 0$ ，但由于运算放大器的开环输入阻抗很高，在 V_i 不特别大的情况下，流入运算放大器输入端的电流仍可略去不计，视为断路。这就是说，“虚短”概念只适用于第一类非线性电路，而“虚断”概念对于各类非线性电路都近似适用。尤其值得注意的是，有不少运算放大器非线性单元电路存在这样的情况：当输入信号 v_i 为某一极性时运算放大器工作于线性放大区，“虚短”概念可用；而当 v_i 为另一极性时，运算放大器工作于大信号的非线性区，“虚短”概念不能使用。总之，在分析运算放大器非线性应用的单元电路时，首要问题是要弄清运算放大器的工作状态。

第一章 反馈限幅器

本章将介绍由运算放大器构成的反馈限幅器，其电路结构比二极管并联限幅器要复杂一些，但性能要优越得多，因而得到了广泛的应用。反馈限幅器属于第一类非线性电路，所以在分析中可以运用“虚短”及其特例“虚地”概念。

限幅器是一种能限制输出信号幅度的电路，其特点是当输入信号超过某一特定值时，输出信号保持为某个固定值而不再跟随输入信号变化。常用的限幅器有两种：二极管并联限幅器和反馈限幅器。图 1.1 (a) 为二极管双向并联限幅器。设 D 为理想二极管，空载时其电压传输特性如图 1.1 (b) 所示。

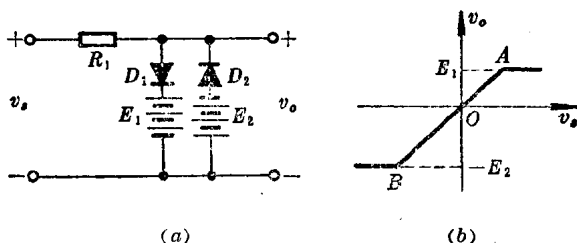


图 1.1 二极管并联限幅器
(a) 电路 (b) 电压传输特性

1.1 理想反馈限幅器

在图 1.2 (a) 所示的电路中，如果 D_1 、 D_2 为理想二极管， E_1 、 E_2 为理想电势源， A 为理想运算放大器，则此电路为一

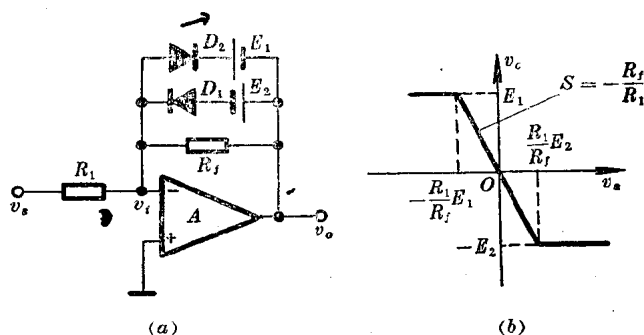


图 1.2 理想反馈限幅器
(a) 电路 (b) 电压传输特性

理想双向反馈限幅器。

当输入信号电压的绝对值较小时，输出电压的绝对值也较小， D_1 、 D_2 皆因反偏而截止，此时电路为一普通的反相比例器， $\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_f}{R_1}$ 。

随着 v_s 的增大， v_o 按比例下降。当 $v_s = \frac{R_1}{R_f} E_2$ ， $v_o = -E_2$ 时， D_2 开始转入导通状态。此后 v_s 如果继续增大，根据运算放大器“虚地”原理， $v_i = 0$ ， $v_o = v_i - E_2 = -E_2$ 不再变化，从而实现了下限幅。

同理，随着 v_s 的减小， v_o 按比例上升，当 $v_s = -\frac{R_1}{R_f} E_1$ ， $v_o = E_1$ 时， D_1 转入导通状态。此后 v_s 如果继续减小， $v_o = v_i + E_1 = E_1$ 保持不变，从而实现了上限幅。

理想反馈限幅器的电压传输特性如图 1.2 (b) 所示。当 $-\frac{R_1}{R_f} E_1 < v_s < \frac{R_1}{R_f} E_2$ 时，传输特性为一斜率等于 $-\frac{R_f}{R_1}$ 的直线；当 $v_s < -\frac{R_1}{R_f} E_1$ 和 $v_s > \frac{R_1}{R_f} E_2$ 时，传输特性的

斜率为 $\frac{dv_o}{dv_s} = -\frac{r_f}{R_1} = 0$ 。其中 r_f 为反馈网络的交流电阻。

当 D_1 、 D_2 为理想二极管， E_1 、 E_2 为理想电势源时， $r_f = 0$ 。我们把限幅器的正向限幅电平记为 V_P ，负向限幅电平记为 V_N 。对于图 1.2 (a) 所示的理想限幅器， $V_P = E_1$ ， $V_N = -E_2$ 。

实际反馈限幅器的限幅区中， r_f 不可能为零，且在一般情况下具有非线性特性。此外，在图 1.2 (a) 所示的理想反馈限幅器电路中用了两组浮地电源，这在实际应用中是十分不方便的。这些问题我们将在下面进行讨论。

1.2 硅稳压管反馈限幅器

1.2.1 基本电路

图 1.3 为硅稳压管双向反馈限幅器及其电压传输特性。

当 $|v_o|$ 与 $|v_s|$ 较小时，背靠背联结的两只硅稳压管中的一只将处于反向截止状态，该支路相当于开路，此时电路为一

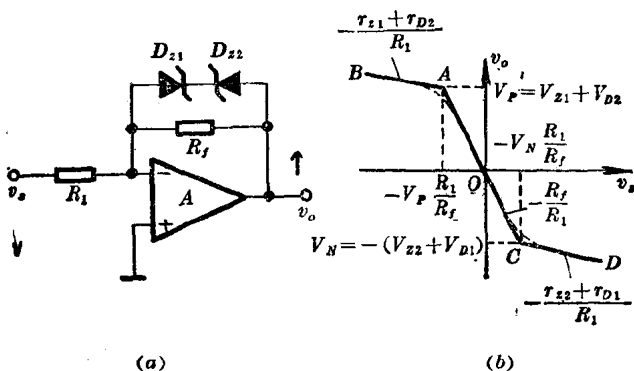


图 1.3 硅稳压管反馈限幅器
(a) 电路 (b) 电压传输特性

普通的反比例器, 即 $\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_f}{R_1}$ 。

随着 v_s 的减小, v_o 按比例上升。当 $v_o > (V_{z1} + V_{D2})$ 时, D_{z2} 正向导通, D_{z1} 反向击穿, 这时限幅器的等效电路如图 1.4 所示。其中 D_{z1} 与 D_{z2} 分别用虚线方框所示的折线等效电路代替。 V_{z1} 为 D_{z1} 的稳定电压, V_{D2} 为 D_{z2} 的正向压降, r_{z1} 和 r_{D2} 分别为反向击穿的 D_{z1} 和正向导通的 D_{z2} 的交流电阻。通常 $R_f \gg (r_{z1} + r_{D2})$, 所以限幅区反馈网络的交流电阻

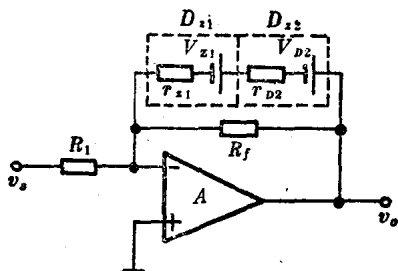


图 1.4 硅稳压管反馈限幅器的上限幅等效电路

$$r_{f1} = (r_{z1} + r_{D2}) \parallel R_f \approx r_{z1} + r_{D2}$$

AB 段电压传输特性曲线的斜率为

$$\frac{dv_o}{dv_s} = -\frac{r_{f1}}{R_1} \approx -\frac{r_{z1} + r_{D2}}{R_1} \quad (1.1)$$

AB 段的输出电压为

$$v_o = V_P - \frac{r_{f1}}{R_1} \left(v_s + V_P \frac{R_1}{R_f} \right)$$

随着 v_s 的减小略有增大。

同理, 当 $v_o < -(V_{D1} + V_{z2})$ 时, D_{z1} 正向导通, D_{z2} 反向击穿, 此时电路的工作情况与 $v_o > (V_{z1} + V_{D2})$ 时相似。其中

V_{D1} 为 D_{z1} 的正向压降, V_{z2} 为 D_{z2} 的稳定电压。正向导通的 D_{z1} 与反向击穿的 D_{z2} 的交流电阻分别为 r_{D1} 和 r_{z2} , 电压传输特性曲线 CD 段的斜率为

$$\frac{dv_o}{dv_s} = -\frac{r_{f2}}{R_1} \approx -\frac{r_{D1} + r_{z2}}{R_1} \quad (1.2)$$

CD 段的输出电压为

$$v_o = V_N - \frac{r_{f2}}{R_1} \left(v_s + V_N \frac{R_1}{R_f} \right)$$

随着 v_s 的增大略有下降。

由式(1.1)和式(1.2)可知, 为了获得良好的限幅特性, 要求 $(r_z + r_D) \ll R_1$ 。

硅稳压管双向反馈限幅器的限幅电平为

$$V_P = V_{z1} + V_{D2} \quad (1.3)$$

$$V_N = -(V_{z2} + V_{D1}) \quad (1.4)$$

如果 $V_D \ll V_z$, 则

$$V_P \approx V_{z1} \quad (1.5)$$

$$V_N \approx -V_{z2} \quad (1.6)$$

1.2.2 改进的硅稳压管对称双向限幅器

上述基本电路虽能完成限幅功能, 但存在下列问题:

1. 实际的硅稳压管反向击穿特性存在着一个弯曲的起始段, 从而使电压传输特性在限幅电平附近出现圆角, 如图 1.3(b) 虚线所示;

2. 硅稳压管的反向漏电流较大, 影响反相比例区 AC 段的斜率;

3. 硅稳压管的 V_z 会产生温度漂移, 因为 I_z 不可能保持为零温度系数时的值;

4. 硅稳压管的极间电容较大, 典型值为 700 pF , 极大地影响限幅器的动态特性。

为了克服这些缺点, 可采用图 1.5 所示的改进电路。在

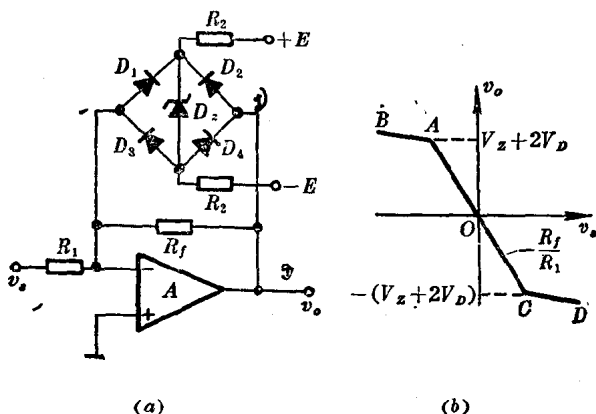


图 1.5 改进的硅稳压管双向限幅器
(a) 电路 (b) 电压传输特性

这个电路中, 由于增加了由 $+E$ 、两只 R_2 和 $-E$ 组成的偏压电路, 硅稳压管 D_z 始终工作于陡直的击穿区, 大大提高了限幅精度, 而且使极间电容对动态特性的影响大大减小。此外, 此电路还避免了 D_z 反向漏电流大的缺点。通过适当地挑选电阻 R_2 , 可使具有正温度系数的硅稳压管 D_z 的温度漂移被两只与之串联的具有负温度系数的硅二极管 D 的温度漂移基本抵消, 大大提高限幅电平的稳定性。

1.3 电阻分压式反馈限幅器

把电阻分压式二极管并联限幅电路作为反相运算放大器的反馈网络, 就构成了电阻分压式反馈限幅器, 如图 1.6 (a)

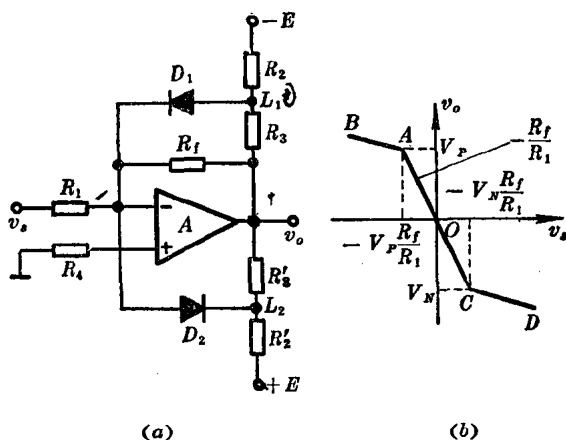


图 1.6 电阻分压式反馈限幅器
(a) 电路 (b) 电压传输特性

所示。其电压传输特性如图 1.6 (b) 所示。

当 $|v_o|$ 较小时, D_1 、 D_2 皆因反偏而截止, 电路进行反比例运算, $\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_f}{R_1}$ 。

随着 v_s 的逐渐减小, v_o 逐渐增大。根据叠加原理可知, L_1 点的电位 $v_{L_1} = v_o \frac{R_2}{R_2 + R_3} - E \frac{R_3}{R_2 + R_3}$ 也随之逐渐增大。当 $v_o = V_P$, $v_{L_1} = V_D$ 时, D_1 开始导通。此后 $v_{L_1} = V_D$ 保持不变, 流过 R_2 的电流不再变化。在 D_1 导通后, R_3 通过 D_1 与 R_f 并联, 由于 r_{D1} 很小, 可略去不计, 此时反馈网络的交流电阻为 $r_f = R_3 \parallel R_f$ 。通常 $R_3 \ll R_f$, 所以 $r_f \approx R_3$ 。电压传输特性曲线 AB 段的斜率为:

$$\frac{dv_o}{dv_s} = -\frac{R_3 \parallel R_f}{R_1} \approx -\frac{R_3}{R_1} \quad (1.7)$$