

运算放大器

国防工业出版社

73.87131

139

运算放大器

〔美〕 A. 巴尔纳

朱维麟 译

周宁华 校

zk562/04



内 容 简 介

本书是美国夏威夷大学电子仪器专业选修课的一本教材,叙述了运算放大器在线性电路中应用的基本知识。书中列举了200多个例题和习题,说明了一些实际的应用,并且扩大了本书的范围。其叙述方式和结构使读者对本书的内容比较易于接受和理解。可供有关方面的工人、工程技术人员以及高等院校仪器仪表、自动控制专业的师生参考。

OPERATIONAL AMPLIFIERS

Arpad Barna

John Wiley & Sons, Inc. 1971

*

运 算 放 大 器

朱维麟 译

周宁华 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

八九九二〇部队印刷厂印刷

*

850×1168¹/₃₂ 印张4³/₁₆ 104千字

1979年3月第一版 1979年3月第一次印刷 印数: 00,001—75,200册

统一书号: 15034·1779 定价: 0.55元

出版说明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，我们将《Operational Amplifiers》一书翻译出版，供有关方面的读者参考。

“运算放大器”这种器件的性能使电路设计能有很好的精确性、速度、可靠性和复制性。但是要达到这一点，必须使用仔细的和精密的设计技术。这本书正是向读者介绍运算放大器在线性电路中使用的一些基本知识。该书是在夏威夷大学电子仪器专业选修课教材的基础上写成的。书中列举了200多个例题和习题，说明了一些实际的应用，并且扩大了这本书的范围。此外，该书的叙述方式和结构使读者比较易于接受和理解。该书对有关方面的工人、工程技术人员和高等院校有关专业师生均有一定的参考价值。

由于我们水平所限，书中可能有不少缺点和错误，欢迎读者批评指正。

目 录

1. 运算放大器	1
性质	2
应用	3
习题	3
2. 理想运算放大器	8
同相放大器线路	9
倒相放大器线路	9
差值放大器线路	10
浮动输入差值放大器线路	10
习题	11
3. 反馈	14
同相反馈放大器线路	14
倒相反馈放大器线路	16
差值反馈放大器线路	18
电压跟随器线路	22
习题	23
4. 放大倍数的精度	23
运算放大器放大倍数的少量变化	29
反馈电阻的少量变化	31
输入电阻的少量变化	34
几种原因的变化	35
习题	36
5. 运算放大器的暂态响应和频率响应	39
滞后网络	39
串级的滞后网络	44
改进的滞后网络	48
超前网络	50

电压分压器网络	53
习题	56
6. 反馈放大器线路的频率响应和暂态响应	59
频率响应	59
暂态响应	63
习题	65
7. 反馈放大器线路的稳定性	67
由滞后网络组成的放大器线路	69
一般情况	74
习题	74
8. 补偿技术	76
滞后补偿	76
改进的滞后补偿	79
超前补偿	84
超前-滞后补偿	87
补偿线路	91
习题	92
9. 实际运算放大器的线性属性	97
共模放大倍数和共模抑制	97
输入阻抗	102
输出阻抗	104
电源电压抑制	106
习题	108
10. 实际运算放大器的其它特性	110
输入电流	110
输入失调电压	112
限制与限额	114
转换速率	115
噪声	117
习题	119
附录	122
表1 反馈放大器线路的放大倍数公式	122

表 2	网络传递函数	124
表 3	负反馈放大器线路的稳定性判据	126
表 4	在例题和习题中采用的运算放大器的典型特性	127
部分题解		127

1. 运算放大器

本章介绍运算放大器的特点及本书的主题。内容的详细叙述从2(章)开始。

虽然运算放大器已经使用了很长时间,但“运算放大器”这个术语在最近的十年中才获得广泛的承认。一个运算放大器(图1.1)

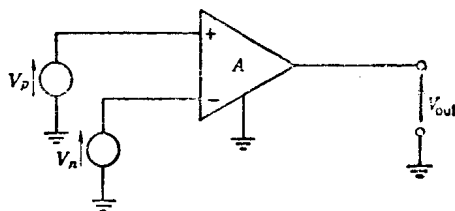


图1.1 运算放大器简图

的特点是输出电压 V_{out} 与两个输入电压 V_p 和 V_n 的差值成比例:

$$V_{out} = A(V_p - V_n) \quad (1.1)$$

运算放大器的一个特有的性质是放大倍数 A 为频率的函数,它在直流(零频率)时不为零,这个值通常就是 A (即频率函数)的最大值。

❖ ❖ ❖

例1.1 在一个由式 1.1 描述的运算放大器中, $A = 10000 / (1 + jf/1 \text{ 兆赫})$, 其中 f 是频率, $j \equiv \sqrt{-1}$ 。 A 的直流值,即它的零频率值是 $A_{DC} \equiv A(f = 0) = 10000$ 。放大倍数 A 的幅值 $|A| = 10000 / \sqrt{1 + (f/1 \text{ 兆赫})^2}$ 在频率 $f = 0$ 时有其最大值,该最大值等于 A_{DC} 。

❖ ❖ ❖

由式 1.1 得来的运算放大器的另一个特有的性质是：当两个输入电压都是零时，输出电压是零（至少在原理上是零）。这一点和其他形式的放大器大不相同，例如一个无电平移位的单级晶体管直流放大器，在零输入电压下其输出不可能是零。

性 质

理想上由式 1.1 描述的运算放大器的放大倍数 A 有完全确定的频率特性，即与信号电平、时间、温度都无关，并且对每个电路都是相同的。希望严格地满足式 1.1，即：当 $V_p = V_n$ （不管它们是多大）时， V_{out} 应当是零。

实际上，放大倍数 A 是信号电平、时间、温度、电源电压的函数，并且在各个电路之间 A 的变化有时达到 5 倍。运算放大器也有一个非零值的输入失调电压（典型值为几个毫伏），它叠加在 $V_p - V_n$ 上，并且随温度变化，也随电路而异。

❖ ❖ ❖

例 1.2 一个运算放大器具有直流放大倍数 $A_{DC} = 1000$ 和最大输入失调电压 $V_{OFF} = \pm 2$ 毫伏。因为对于零值输入电压，输出电压将是 $V_{out} = V_{OFF} A = \pm 2 \text{ 毫伏} \times 1000 = \pm 2 \text{ 伏}$ 范围内的某一值。因此，若 $V_p = V_n = 0$ ，则输出电压 V_{out} 在 -2 伏与 $+2$ 伏之间。

❖ ❖ ❖

当两个输入电压相等但不是零值时，即 $V_p = V_n \neq 0$ 时，输入电压的某个分数部分将出现在输出端，这个分数称为共模放大倍数 A_{CM} 。

❖ ❖ ❖

例 1.3 一个运算放大器具有共模放大倍数 $A_{CM} = 0.0001$ 。因此，若 $V_p = V_n = 1$ 伏，则输出电压（略去输入失调电压 V_{OFF} ）将是 $V_{out} = A_{CM} V_p = A_{CM} V_n = 0.0001 \times 1 \text{ 伏} = 0.1 \text{ 毫伏}$ 。

❖ ❖ ❖

理想上也希望流入运算放大器两个输入端的输入电流为零。实际上, 总有某些(可能十分小)输入电流。



例1.4 两个输入电流的平均值称作输入偏置电流。一个运算放大器具有最大输入偏置电流 $I_B = 40$ 微微安 $= 40 \times 10^{-12}$ 安。因此, 假定两个输入电流有相同的方向, 则两个输入电流的每一个都在零与 ± 80 微微安之间。然而, 由于控制优良的制造工艺, 两个输入电流彼此之差总会在15微微安之内。这就表示最大输入失调电流是15微微安。



运算放大器的性质在后几章中将详细讨论。一个运算放大器的非理想性是否重要, 取决于具体应用的要求。

应 用

在许多线路中, 例如在放大器、脉冲整形器、有源滤波器、波形发生器、比较器中可以利用运算放大器。在本章末尾的习题中说明了几种应用, 但是在以下的几章中, 将集中讨论运算放大器作为放大器的应用——对所有其他应用来说这种应用是基本的[●]。将看到, 借使用负反馈, 可以用牺牲其他的一些性能为代价来改善放大器电路的某些特性, 但有一些特性则不能被反馈所改变。例如, 电路的直流放大倍数和它的精确度能借反馈来改变, 而输入失调电压则不能被改善。

对所有的放大器线路都进行讨论是不可能的。重点将放在简单电路的分析上。这些简单电路可用作较大系统的构成部件。

习 题

1. 在图 1.1 中, 若 $V_p = 1$ 毫伏、 $V_n = 1.1$ 毫伏及 $A = 10000$,

● 作为应用的教程和参考书可阅 J. Eimbinder, Application Considerations for Linear Integrated Circuits, Wiley-Interscience, New York, 1970.

试确定输出电压 V_{out} 之值。

2. 若 $A=1000/(1+jf/10 \text{ 兆赫})$, 试确定 $f=10 \text{ 兆赫}$ 频率时的 $|A|$ 值。

3. 若 A 为上题所给之值, 试确定 $f=10 \text{ 兆赫}$ 频率时 A 的相角。

4. 一个运算放大器具有最大输入失调电压 $V_{OFF}=\pm 3 \text{ 毫伏}$ 和直流放大倍数 $A_{DC}=1000$ 。若输入电压为 $V_p=5 \text{ 毫伏}$ 和 $V_n=6 \text{ 毫伏}$, 试确定输出电压 V_{out} 的界限。

5. 一个运算放大器具有共模放大倍数 $A_{CM}=0.0002$ 。若输入电压为 $V_p=V_n=2 \text{ 伏}$, 试确定输出电压 V_{out} 的绝对值。

6. 在图 1.2 的线路中, $V_1=9 \text{ 毫伏}$ 、 $V_2=8 \text{ 毫伏}$ 、 $R_1=R_2=10 \text{ 兆欧}$, 并且运算放大器的最大输入失调电流为 15 微微安 。若 $A=1000$, 并且放大器满足式 1.1, 试确定 V_{out} 的界限。

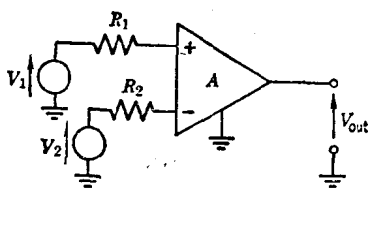


图 1.2

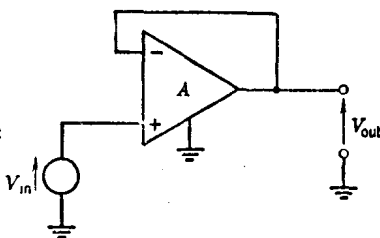


图 1.3

7. 试证明在图 1.3 (“电压跟随器”) 的线路中, 若式 1.1 适用并且 $A \rightarrow \infty$, 则 $V_{out}=V_{in}$ 。

8. 在图 1.4 中示出了一个用作积分器的运算放大器。试证明若运算放大器如式 1.1 描述及 $A \rightarrow \infty$, 并且具有零值输入电流, 则当开关 S 断开时 $V_{out}=(1/RC) \int V_{in} dt$ 。

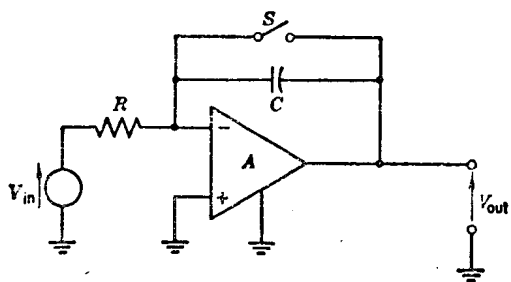


图 1.4

9. 试证明在图 1.5 的加法器线路中, 若四个运算放大器都如式 1.1 描述和 $A \rightarrow \infty$, 并且具有零值输入电流, 则 $V_{out} = (V_1 + V_2 + V_3)/3$ 。

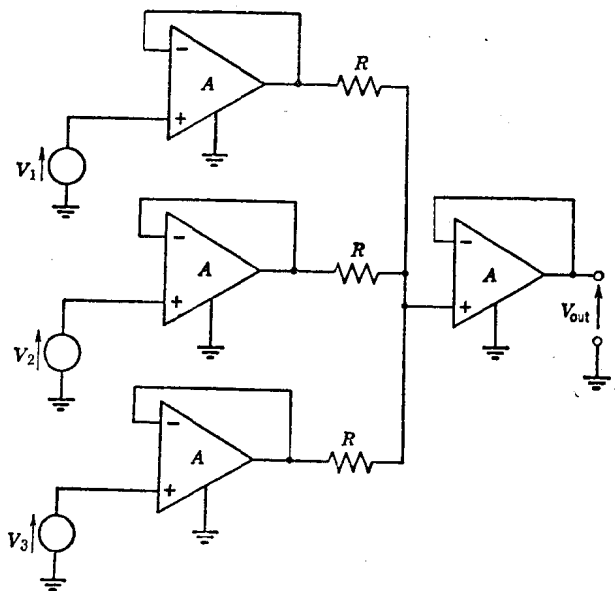


图 1.5

10. 试证明在图 1.6 的加法器线路中, 若运算放大器如式 1.1 描述和 $A \rightarrow \infty$, 并且具有零值输入电流, 则 $V_{\text{out}} = -(V_1 + V_2 + V_3)$ 。

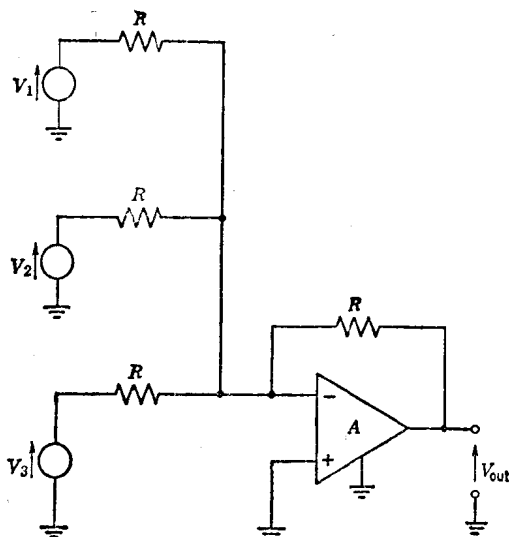


图 1.6

11. 试修改图 1.6 线路中的电阻值, 以使 $V_{\text{out}} = -(V_1 + 2V_2 + 3V_3)$ 。假定运算放大器如式 1.1 描述和 $A \rightarrow \infty$, 并且具有零值输入电流。

12. 求图 1.7 a 脉冲成形电路中的 V_{out} 。输入电压 V_{in} 如图 1.7 b 所示。假定运算放大器如式 1.1 描述和 $A \rightarrow \infty$, 并且具有零值输入电流。

13. 试证明在图 1.8 的线路中, 若方盒 B 由 $V_2 = \ln V_1$ 描述, 并且运算放大器 A 如式 1.1 描述及 $A \rightarrow \infty$, 则 $V_{\text{out}} = e^{V_{\text{in}}}$ 。

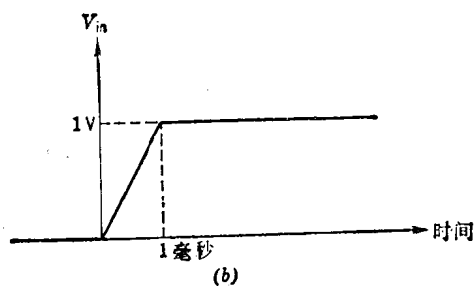
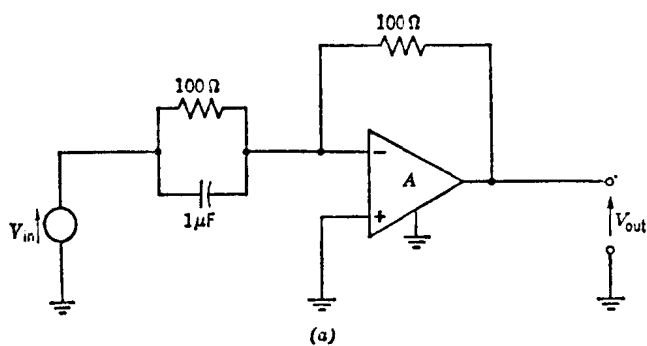


图 1.7

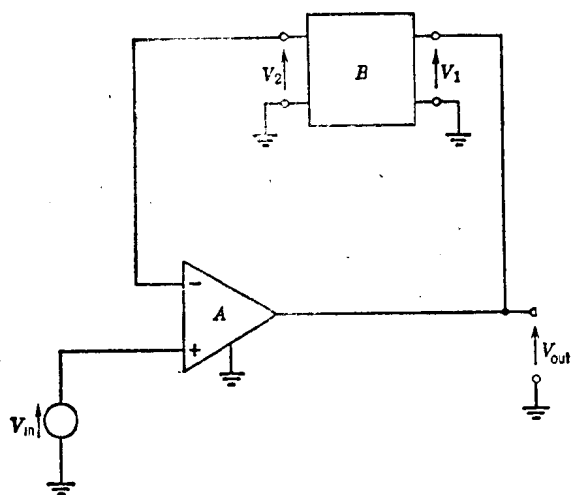


图 1.8

2. 理想运算放大器

一个理想运算放大器(图 2.1) 有两个输入端、一个输出端和一个接地端。输出端和接地端之间的电压 V_{out} 与电压 V_p (正 (+) 端和地端间的电压) 和电压 V_n (负 (-) 端和地端间的电压) 的

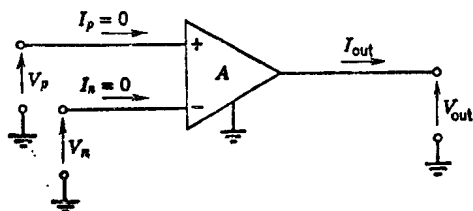


图 2.1 一个理想运算放大器

关系为:
$$V_{out} = A(V_p - V_n) \quad (2.1 a)$$

只要输出电流是有限的, 即只要

$$|I_{out}| < \infty \quad (2.1 b)$$

2.1 a 式就成立。量 A 称作运算放大器的放大倍数、开环放大倍数或差值电压放大倍数[●]。理想运算放大器还具有零输入电流, 即在图 2.1 中

$$I_p = I_n = 0 \quad (2.2)$$

由式 2.1 和 2.2 所描述的性质对于 V_p 和 V_n 的任何值都是成立的。因此, 如果(举例来说)一个理想运算放大器有输入电压 $V_p = V_n = 1$ 百万伏, 则输出电压为 $V_{out} = 0$ 。这一点是从式 2.1 得到的(虽然在实际上难于找到这样一个运算放大器)。在实际运算放大器中, 满足式 2.2 也是困难的。虽然在许多情况中可以忽略输入电流, 但它总不等于零。

● 在 2~4(章)中, 假设 A 与频率无关。 A 的频率特性在 5(章)中介绍。

同相放大器线路

用作同相放大器的一个理想运算放大器示于图 2.2。利用式 2.1 得到输出电压为

$$V_{\text{out}} = AV_{\text{in}} \quad (2.3)$$

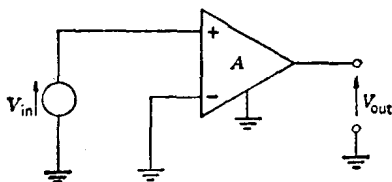


图 2.2 同相放大器线路

例 2.1 用作同相放大器的一个运算放大器具有放大倍数 $A = 5000$ 。输入电压是 $V_{\text{in}} = 1$ 毫伏。因此输出电压是 $V_{\text{out}} = AV_{\text{in}} = 5000 \times 1$ 毫伏 = 5 伏。

倒相放大器线路

用作倒相放大器的一个理想运算放大器示于图 2.3。利用式 2.1, 得到输出电压

$$V_{\text{out}} = -AV_{\text{in}} \quad (2.4)$$

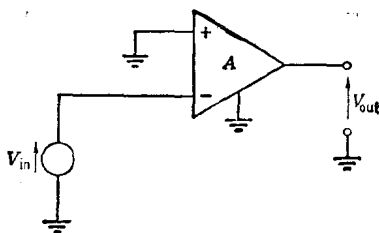


图 2.3 倒相放大器线路

例 2.2 用作倒相放大器的一个运算放大器具有放大倍数

$A=10000$ 。输入电压 $V_{in}=1$ 毫伏。所得到的输出电压是 $V_{out}=-AV_{in}=-10000 \times 1 \text{ 毫伏}=-10 \text{ 伏}$ 。

差值放大器线路

用作差值放大器的一个理想运算放大器示于图 2.4。利用式 2.1, 输出电压为

$$V_{out}=A(V_p-V_n) \quad (2.5)$$

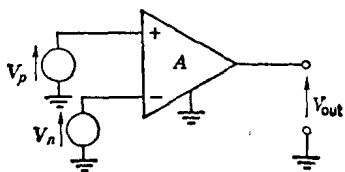


图2.4 差值放大器线路

✧ ✧ ✧

例 2.3 用作差值放大器的一个运算放大器具有放大倍数 $A=20000$ 。输入电压是 $V_p=9$ 毫伏和 $V_n=9.1$ 毫伏。所得到的输出电压为 $V_{out}=A(V_p-V_n)=20000 \times (9 \text{ 毫伏}-9.1 \text{ 毫伏})=-2 \text{ 伏}$ 。

浮动输入差值放大器线路

具有浮动输入的差值放大器示于图 2.5。由式 2.1 得到输出电压

$$V_{out}=AV_{in} \quad (2.6)$$

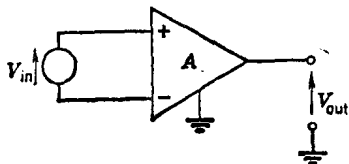


图2.5 具有浮动输入的差值放大器线路