

电子技术教学小丛书

运算放大器的误差 分析与补偿方法

赵永健 张雨文 编

高等教育出版社

电子技术教学小丛书

运算放大器的误差 分析与补偿方法

赵永健 张雨文 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是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。全书共分四章：第一章，基本概念与典型电路，概括介绍运算放大器的性能、参数和典型电路；第二章，运算误差分析，较详细地分析了静态和动态运算误差；第三章，稳定性判据，简要介绍了波特图法和根轨迹法；第四章，补偿方法，按超前与滞后两类补偿法分析并以实例说明。

本书可作为“电子技术基础”课程的教学参考书，也可作为电力类、自动化类高年级学生以及有关工程技术人员自学读物。

本书由华中工学院康华光教授审阅。

电子技术教学小丛书

运算放大器的误差分析与补偿方法

赵永健 张雨文 编

*

高等教育出版社出版
新华书店上海发行所发行
祝桥新华印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张4.875 字数100,000

1987年4月第1版 1987年8月第1次印刷

印数00,001—3,140

书号 15010·0647 定价0.84元

序 言

本书是根据一九八〇年全国高等工业学校电子技术基础教材会议制订的“电子技术教学小丛书”编写要求编写的。

本书在运算放大器的误差分析和稳定性的补偿方法方面,内容有所加深加宽,并且用国产集成运算放大器列举了较多的实例和实验数据,以求有利于实际应用。本书可做为教师备课的参考书,也可做为自控类、电力类高年级学生和有关工程技术人员的自学读物。

本书第一、四章由张雨文同志编写;第二、三章由赵永健同志编写。在编写过程中,得到华中工学院康华光教授和高等教育出版社张志军同志的具体指导和帮助,特致谢意。

由于水平所限,难免有错误遗漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 基本概念与典型电路

§1-1	运算原理与理想运算放大器	2
§1-2	运算放大器的闭环特性	5
§1-3	运算放大器的参数指标	14
§1-4	集成运算放大器典型电路	24

第二章 运算误差分析

§2-1	运算误差及影响运算误差的因素	40
§2-2	静态运算误差分析	40
§2-3	静态运算误差的综合考虑	57
§2-4	动态运算误差分析	59

第三章 稳定性判据

§3-1	概述	66
§3-2	运算放大器的传递函数和频率特性	70
§3-3	判断运算放大器稳定性的方法	72
§3-4	稳定裕度	92

第四章 补偿方法

§4-1	概述	95
§4-2	超前补偿	100
§4-3	滞后补偿	113
§4-4	由瞬态特性来检查相位补偿的质量	127
§4-5	超前和滞后补偿的设计举例	130

• 1 •

附录 1 国产集成运算放大器代表性电路的典型参数 ...	143
附录 2 国外集成运算放大器代表性电路的典型参数 ...	144
附录 3 集成运算放大器国内外型号对照表	146
参考文献	149

第一章 基本概念与典型电路

运算放大器是由两部分电路组成的，即基本运算放大器和输入与反馈网络。基本运算放大器是一个高增益（放大倍数）的直流放大器（大多为集成运算放大器），输入网络与反馈网络一般由无源元件（电阻、电容等）组成，经反馈网络向放大器提供深度负反馈。

图 1-1 表示一个运算放大器电路，它有两个输入端（反相

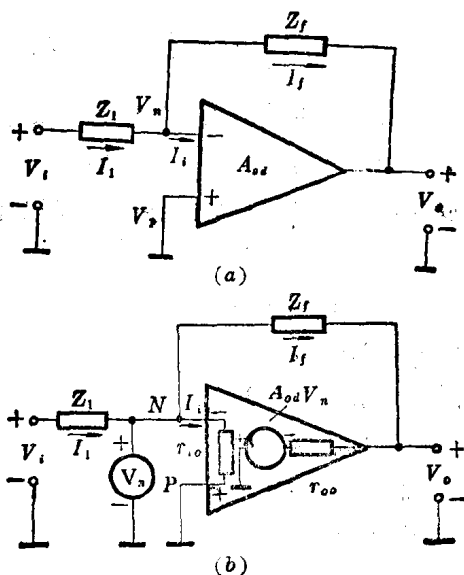


图 1-1 运算放大器电路

(a) 电路 (b) 等效电路

输入端 N 和同相输入端 P)，一个输出端。输入网络的阻抗用 Z_1 表示，反馈网络的阻抗用 Z_f 表示，基本运算放大器的差模电压增益用 A_{od} 表示。

由于基本运算放大器的差模电压增益 A_{od} 相当大，又引入了深度负反馈，因此，其闭环传递函数的值相当稳定，并且基本上由外接无源网络的参数所决定；只要改变外接无源网络的结构形式和参数值，便可以方便地获得各种各样的传递关系。因此，运算放大器不仅是电子模拟装置的核心，而且越来越多地用于自动控制、电气测量以及其他一些领域中。由于半导体集成工艺的发展，集成运算放大器已成为一种极为通常的模拟数据处理器件。

§1-1 运算原理与理想运算放大器

在运算放大器中，准确地模拟数学运算关系是在忽略了次要因素之后得到的。这种忽略了次要因素的运算放大器叫做理想运算放大器。理想运算放大器应具有以下的理想参数：

1. 差模电压增益 $A_{od} = \infty$
2. 开环输入电阻 $r_{io} = \infty$
3. 开环输出电阻 $r_{oo} = 0$
4. 输入偏置电流 $I_B = 0$
5. 共模抑制比 $CMRR = \infty$
6. 频带宽度 $BW = \infty$

实际上，完全理想的符合上述条件的运算放大器是没有的，但是，实际运算放大器的许多性能已与理想运算放大器相

当接近。把非理想的运算放大器当做理想的运算放大器，分析其闭环电路的特性，可以使分析过程非常简便，且可得到足够准确的结果。

图 1-1 (a) 所示反相输入运算放大器电路，其等效电路如图 1-1 (b) 所示，可以列出下列电路方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_i - V_n}{Z_1} &= I_1 \\ \frac{V_n - V_o}{Z_f} &= I_f \\ I_1 - I_f &= I_i \\ -A_{od}V_n + I_f r_{oo} &= V_o \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

放大器的输入阻抗为 r_{io} ，从输出端来看，根据戴维南定理，可以等效为一个电势为 $A_{od}V_n$ 、输出阻抗为 r_{oo} 的电压源。反馈阻抗跨接在输出端和反相输入端之间，于是 N 点的等效阻抗可表示为

$$Z_i = \frac{V_n}{I_f} \parallel r_{io}$$

而流过 Z_f 的电流 I_f 可表示为

$$I_f = \frac{V_n + A_{od}V_n}{Z_f + r_{oo}}$$

于是

$$Z_i = \frac{V_n}{I_f} \parallel r_{io} = \frac{Z_f + r_{oo}}{1 + A_{od}} \parallel r_{io} \approx \frac{Z_f + r_{oo}}{1 + A_{od}}$$

因为 r_{io} 的典型数据是几十千欧， r_{oo} 的典型数据是几百欧， Z_f 是几至几百千欧，而 A_{od} 又很大，所以这种近似是允许的。例如， $r_{io} = 20\text{k}\Omega$ ， $r_{oo} = 200\Omega$ ， $Z_f = 5\text{k}\Omega$ ， $A_{od} = 5 \times 10^4$ ，

于是, $\frac{Z_f + r_{o2}}{1 + A_{od}} \approx 0.1 \Omega$ 。可见, $Z_i = 0.1 // 20 \times 10^3 \approx 0.1 \Omega$ 。

由于这种特性,使得同相端与反相端之间的关系为 $V_n - V_p \approx 0$, 我们称为虚假短路; 当然, 这时基本运算放大器应工作在线性区, 而引入深度负反馈是保证该条件的措施。而 $I_i \approx 0$, 称为虚假断路。

当同相端接地时, 反相端称为虚地, $V_n \approx 0$ 。

考虑了 $I_i \approx 0$, $V_n \approx 0$ 之后, 方程组(1-1)可以改写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_i}{Z_1} &= I_1 \\ -\frac{V_o}{Z_f} &= I_f \\ I_1 &= I_f \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

于是, 可得反相运算放大器电路的传递关系式为

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_1} \quad (1-3a)$$

或

$$V_o = -\frac{Z_f}{Z_1} V_i \quad (1-3b)$$

式(1-3) 即反相运算放大器的基本运算公式。只要适当改变输入网络或反馈网络的参数, 便可以获得各种不同的数学运算关系。例如:

当 $Z_1 = R_1$ 、 $Z_f = \frac{1}{Cs}$ 时, 可得反相积分运算关系

$$V_o(s) = -\frac{1}{RCS} V_i(s)$$

表示为时域函数的形式为

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

当 $Z_1 = \frac{1}{Cs}$ 、 $Z_f = R$ 时, 可得反相微分运算关系 $V_o(s) = -RCsV_i(s)$;

其时域形式为

$$v_o(t) = -RC \frac{d}{dt} v_i(t)$$

§1-2 运算放大器的闭环特性

一、基本运算放大器的两种输入信号

基本运算放大器有两种输入信号, 即差模信号和共模信号, 如图 1-2 所示。差模信号指两输入端信号大小相等、极性

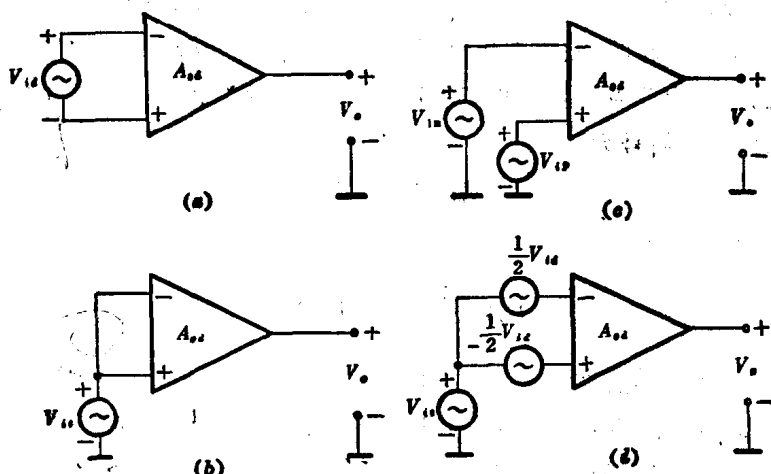


图 1-2 基本运算放大器的信号输入方式

(a) 差模信号

(b) 共模信号

(c) 混合信号

(d) (c) 图的等效电路

相反;共模信号指两输入端信号大小相等、极性相同。

图 1-2 (a) 表示差模信号的输入方式, V_{id} 表示差模信号, 它加在基本运算放大器的反相和同相输入端之间。此时基本运算放大器输出、输入间的关系是

$$V_o = -A_{od}V_{id}$$

式中, A_{od} 为基本运算放大器的差模电压增益。

图 1-2 (b) 表示共模信号的输入方式, V_{ic} 表示共模信号, 它同时加在反相和同相输入端上。此时基本运算放大器输出、输入间的关系是

$$V_o = A_{oc}V_{ic}$$

式中, A_{oc} 为基本运算放大器的共模电压增益。

差模信号是真正需要放大的有用信号; 而共模信号往往是各种干扰信号, 是应该抑制和消除的。实际上, 它们经常是混杂在一起的, 如图 1-2 (c) 所示。为了简化分析过程, 将它们分解为差模信号和共模信号两部分, 如图 1-2 (d) 所示。此时, 差模信号为

$$V_{id} = V_{in} - V_{ip}$$

共模信号为

$$V_{ic} = \frac{1}{2}(V_{in} + V_{ip})$$

在差模信号输入时, 根据差模信号与基本运算放大器输入端的接线方式, 又可分为三种情况: 即反相输入、同相输入和差动输入, 如图 1-3 所示。

图 1-3 (a) 表示反相输入接线方式, 输入信号 V_i 加到反相输入端和地之间, 同相输入端对地短路。于是, 输出、输入

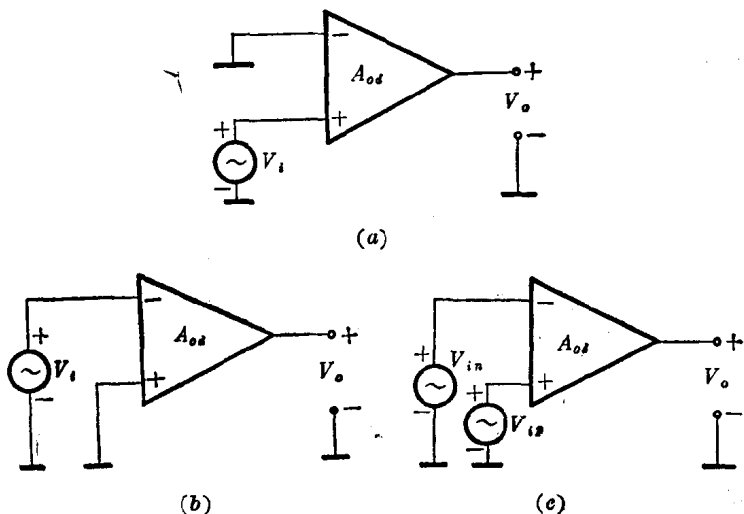


图 1-3 差模信号的三种引入方式

(a) 反相输入 (b) 同相输入 (c) 差动输入

之间的关系为

$$V_o = -A_{od}V_i$$

图 1-3 (b) 表示同相输入接线方式, 输入信号 V_i 加到同相输入端和地之间, 反相输入端接地。于是, 输出、输入之间的关系为

$$V_o = A_{od}V_i$$

图 1-3 (c) 表示差动输入接线方式, 即输入信号分别加到反相输入端对地、同相输入端对地之间。于是, 输出、输入之间的关系为

$$V_o = -A_{od}(V_{in} - V_{ip})$$

二、反相输入运算放大器的闭环特性

1. 电压增益 A_f

反相输入运算放大器电路如图 1-4 所示。根据式(1-3)可以得到其闭环电压增益为

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{Z_f}{Z_i} \quad (1-4)$$

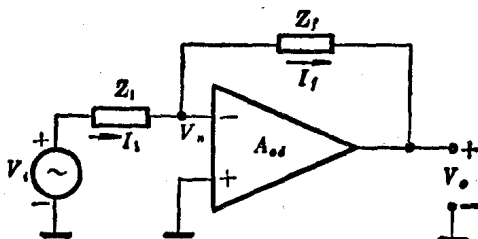


图 1-4 反相输入运算放大器电路

可见,反相输入运算放大器的闭环电压增益为负,其值与反馈网络和输入网络的参数有关,只要改变它们,就可以获得所需要的各种数学运算关系。

2. 输入阻抗 Z_{if}

图 1-5 是计算反相输入运算放大器闭环输入阻抗的等效

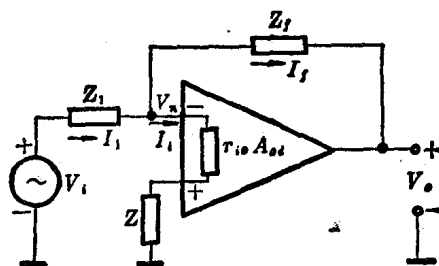


图 1-5 计算闭环输入阻抗的等效电路

电路。运算放大器的输入阻抗等于信号源电压 V_i 与流过信号源的电流 I_i 之比,即

$$Z_{if} = \frac{V_i}{I_i} = Z_1 + \frac{V_n}{I_i}$$

考虑到 $I_i = I_f + I_t$, $I_f = \frac{V_n - V_o}{Z_f}$, $I_t = \frac{V_n}{r_{io} + Z}$, $V_o = -A_{od}V_n$ 。

代入并整理化简后得

$$Z_{if} = Z_1 + \left[(r_{io} + Z) \parallel \frac{Z_f}{1 + A_{od}} \right] \quad (1-5)$$

上式表明, 反相输入运算放大器的闭环输入阻抗等于输入网络 Z_1 与虚地点等效阻抗的串联值。后者由两条并联支路构成, 一条是 $(r_{io} + Z)$, 一条是 Z_f 对输入回路的作用 $\frac{Z_f}{1 + A_{od}}$, 即 Z_f 在输入回路中的等效阻抗只是 Z_f 的 $\frac{1}{1 + A_{od}}$ 。当差模电压增益 A_{od} 足够大时, 电路的输入阻抗近似等于 Z_1 , 即

$$Z_{if} \approx Z_1$$

3. 输出阻抗 Z_{of}

图 1-6 为计算反相输入运算放大器闭环输出阻抗时的等

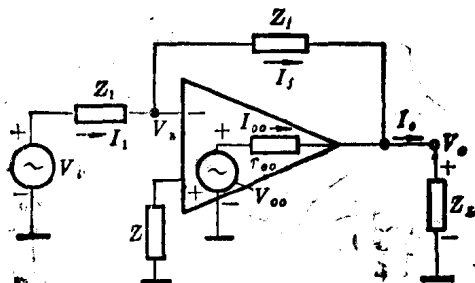


图 1-6 计算输出阻抗时的反相运算放大器电路

效电路, 图中 r_o 为运算放大器的开环输出电阻, V_{oo} 为开路输出电压。根据图 1-6 电路可以写出下列方程:

$$\begin{cases} V_{oo} = -A_{od} V_n \\ I_1 = \frac{V_i - V_n}{Z_1} \approx I_f = \frac{V_n - V_o}{Z_f} \\ \Delta V_o = \Delta V_{oo} - \Delta I_{oo} r_{oo} \\ \Delta V_i = 0 \\ \Delta I_o \approx \Delta I_{oo} \end{cases}$$

将上述方程联立求解,并整理化简后得

$$Z_{of} = -\frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = r_{oo} \frac{1}{1 + A_{od} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_f}} \quad (1-6)$$

上式表明,反相输入运算放大器的闭环输出阻抗 Z_{of} 比其开环输出电阻 r_{oo} 小得多,因此,其带负载能力很强。 Z_{of} 的数值与差模电压增益 A_{od} 有着密切的关系, A_{od} 越大, Z_{of} 越小;当 $A_{od} \rightarrow \infty$ 时, $Z_{of} \rightarrow 0$ 。

三、同相输入运算放大器的闭环特性

1. 电压增益 A_f

同相输入运算放大器如图 1-7 所示。它与反相输入运算

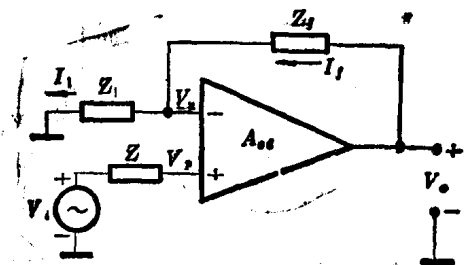


图 1-7 同相输入运算放大器

放大器的区别仅仅在于输入信号的引入位置交换了一下。注意,此时反馈信号仍然是作用到反相输入端,因为只有这样,

才能保证是负反馈。根据图 1-7 的电路可以写出下列方程：

$$\begin{cases} V_n = V_p = V_i \\ I_1 = \frac{V_n}{Z_1} = I_f = \frac{V_o - V_n}{Z_f} \end{cases}$$

解上述联立方程，得

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{Z_f}{Z_1} \quad (1-7)$$

上式即同相输入运算放大器闭环电压增益 A_f 的一般表达式。由该式可以看出，同相输入运算放大器的闭环电压增益 A_f 永远为正值，且不可能小于 1；适当选择 Z_f 和 Z_1 网络的形式与参数，也可以获得各种数学运算关系。

例如，图 1-8 所示电压跟随器电路，其特点是输出与输入同相且同值，即 $A_f = 1$ ，在式 (1-7) 中，令 $Z_f = 0$ ，即可获得所需的电路。输出电压跟随输入电压变化。

又如，同相输入的积分运算电路示于图 1-9 中。从图中可以看出

$$\begin{cases} V_p(s) = \frac{\frac{1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}} V_i(s) = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s} V_i(s) \\ V_o(s) = V_p(s) \left(1 + \frac{\frac{1}{C_2 s}}{R_2} \right) = \frac{1 + R_2 C_2 s}{R_2 C_2 s} V_p(s) \end{cases}$$

对上述联立方程式求解，并整理后，得

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s} \cdot \frac{1 + R_2 C_2 s}{R_2 C_2 s}$$

适当选择电路的元件参数，使 $R_1 C_1 = R_2 C_2$ ，则得到同相积分