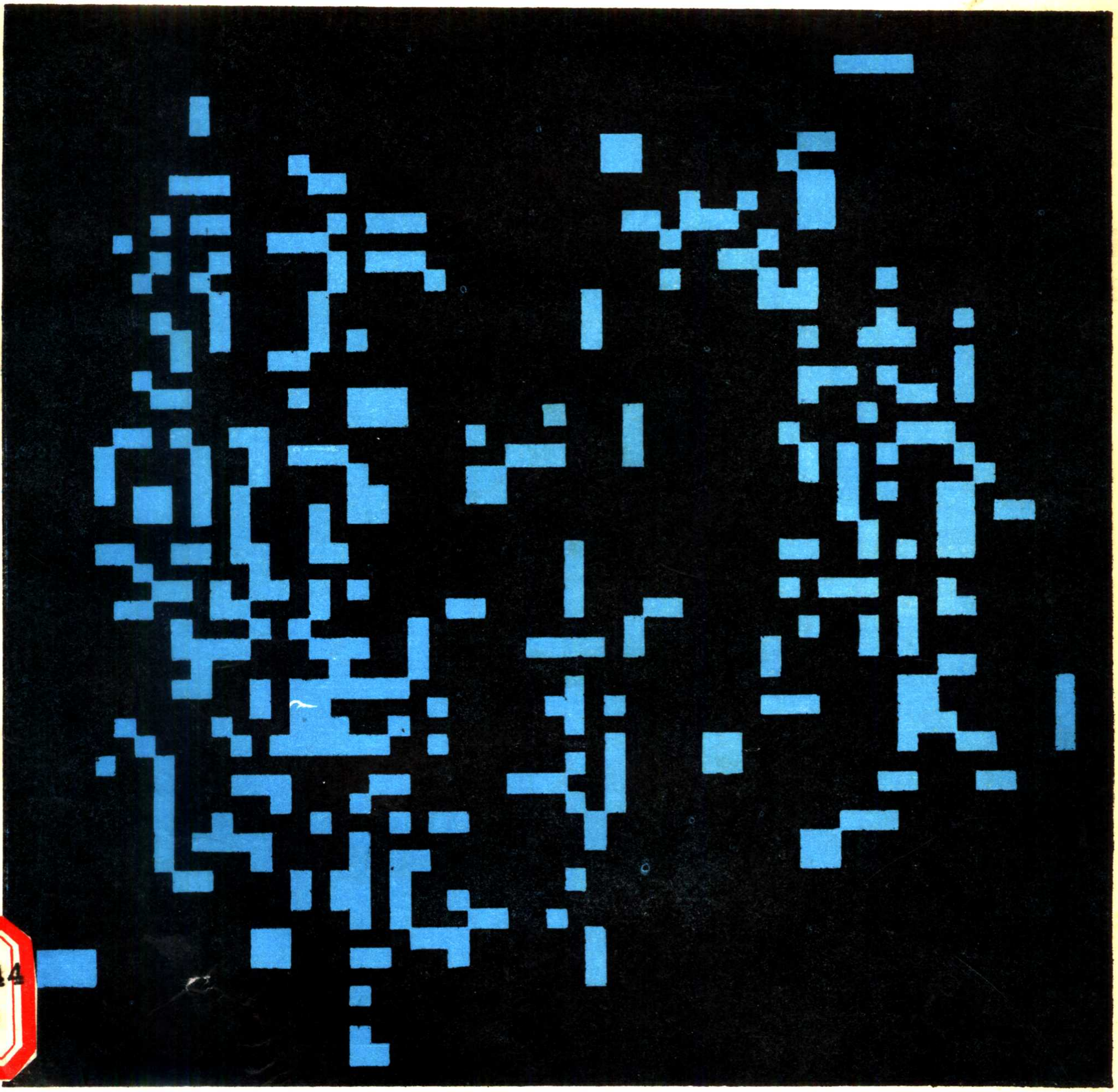
JICHENGYUNSUANFANGDAQITIJIE

集成运算放大器题解

· [日] 丹野頼元 著
· 曹国初 单金德 译
· 王学维 校



湖南科学技术出版社

集成运算放大器题解

〔日〕丹野赖元 著　曹国初　单金德 译　王学维 校

湖南科学技术出版社

内 容 简 介

集成运算放大器是集成电路家族中用途最广泛、价格最便宜的一类。它具有放大和各种运算（加、减、乘、除、微分和积分等）功能，并与其他国家的同类产品具有互换性，因而，几乎能被应用于一切电器领域中。

只有通过题解练习，才能定量地理解运算放大器的特性和功能，才能正确地使用、维护和设计集成运算放大器。本书集运算放大器题解之大成，是读者不可多得的良师益友。

本书共分为五章，在每一章的开头，对关键性的基础知识作了画龙点睛的介绍，进而以实际电路为例，从不同的角度介绍了详细的计算方法，最后，精选了一定数量的典型习题。在书末附有全部习题的答案。

书中汇集的题解典型、实用；解题步骤清晰；内容通俗易懂，便于自学。本书可供大专院校有关专业的师生、工程技术人员和自学者学习参考。

集成运算放大器题解

〔日〕丹野赖元 著

曹国初 单金德译

责任编辑：陈清山

*

湖南科学技术出版社出版

（长沙市展览馆路8号）

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1987年4月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：7.25 字数：173,000

印数 1——2,400

ISBN 7—5357—0120—5／TN・3

统一书号：15204・198 定价：1.90元

湘目 87—20

序　言

运算放大器是模拟计算机用来实现运算放大而发展起来的一种高增益差分放大器。根据其外接阻抗的种类不同，运算放大器能完成放大、积分、微分等各种功能，而且价格便宜，因此，被广泛地用来作为电子线路设计中的基本器件。

集成运算放大器虽然是由许多晶体管集成的，但在由运算放大器组成的电路中，却可以将其视为一单个的电子器件。因此，为了分析运算放大电路，对如何将该运算放大器作为一个电子器件来看待，这一点是至关重要的。

本书是为读者分析或设计运算放大电路时所必须掌握的基础理论而编写的习题集。全书共分五章，主要内容是分析运算放大电路的典型例题。第一章介绍的是使用运算放大器的基本知识，通过大量的例题阐述各种理想的和实际的运算放大器的增益、输入电阻、输出电阻的求解方法。第二章介绍了求解运算放大器特性的典型例题。从第三章至以后各章，分析具有各种功能的运算放大电路的典型例题。其中，第三章和第四章分别分析了线性电路和非线性电路的例题。第五章分析了各种类型的有源滤波器的例题。

书中各章均以最典型的问题作为例题予以分析，推导公式时，注意引导读者在理解电路工作物理意义的基础上进行，同时代入数据进行了计算。

本书可作为高等院校有关专业学生的参考书，亦可供青年工程技术人员参考。由于作者水平有限，书中缺点和错误在所难免，切望广大读者批评指正。

在本书编写过程中，曾参阅了国内外许多专著和论文，在此谨向这些作者表示感谢。此外，还要向担任本书发行的以森北出版社编辑部长大田三郎氏为首的有关各位所给予的关照，及牧野雅行氏给予的帮助，表示衷心的感谢。

著　者

1982年2月

参数符号表

A 电压增益
A_{cm} 共模增益
A_{fb} 闭环增益
A_{fbl} 低频闭环增益
A_l 低频开环增益
A_{0l} 开环增益
C 电容
C_c 补偿电容
$CMRR$共模抑制比
E 误差电压
E_i 输入折算误差电压
f 频率
f_l 转折频率
i 电流
I_B 偏置电流
I_{ES} 发射结反向饱和电流
I_S 二级管反向饱和电流
I_{0S} 输入失调电流
K 玻耳兹曼常数
Q 电荷
R 电阻
R_c 补偿电阻
R_i 运算放大器的输入电阻
R_{if} 闭环输入电阻
R_l 负载电阻
R_0 运算放大器的输出电阻
R_{0f} 闭环输出电阻
S 转移速率
t 时间
T 绝对温度
V_{BE} 晶体管发射结正向电压
V_D 二极管正向电压
v_i 运算放大器的交流差分输入电压
V_i 运算放大器的直流差分输入电压
v_n 运算放大器的反相输入电压
v_0 运算放大器的交流输出电压

V_0 运算放大器的直流输出电压
V_{0s} 运算放大器的输入失调电压
v_p 运算放大器的同相输入电压
v_1 输入电压
V_Z 稳定电压
β_f 反馈系数
θ 相位角

目　录

第一章　运算放大器基础

1.1　运算放大器

运算放大器一般是一种由差分输入直接耦合放大电路集成而成的高增益电压放大器，最初，它被作为模拟计算机的重要部件——高性能的直流放大器。随着电子技术的发展，目前已被制作成适应各种需要的集成块。由于这些集成块不仅可作交、直流放大器用，而且只要连接适当的外电路，还能实现除放大作用之外的多种功能。所以，集成运算放大器现已成为应用最普遍的电子器件之一。

典型的运算放大器如图1.1所示。它除了有两个输入端和一个输出端外，还可外接频率补偿电路、直流调零电路和电源等。通常用图1.2所示的电路符号表示。

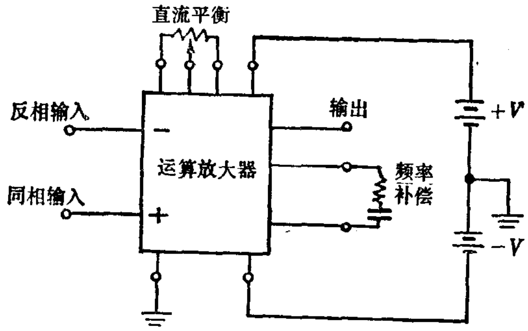


图1.1　典型的运算放大器电路

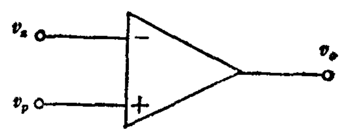


图1.2　运算放大器的电路符号

理想运算放大器具有如下性质：

（1）　增益为无穷大

（2）　通频带无穷大

（3）　同相输入端与反相输入端之间以及各输入端对公共端（地）之间的输入电阻为无穷大。

（4）　输出电流驱动容量无穷大

（5）　输出电阻为零

（6）　输入失调电压为零

（7）　输入电流为零

（8）　只对差模信号进行放大，能完全抑制共模信号

（9）　上述1～8项特性不受温度影响，即在任何工作温度下均成立。

然而，实际的运算放大器与理想状态总会有些差异，也就是说，现有的运算放大器都未能达到这些理想状态。但是，我们可以采用图1.3所示的等效电路来表示运算放大器的特性，其特性大致接近于理想状态。

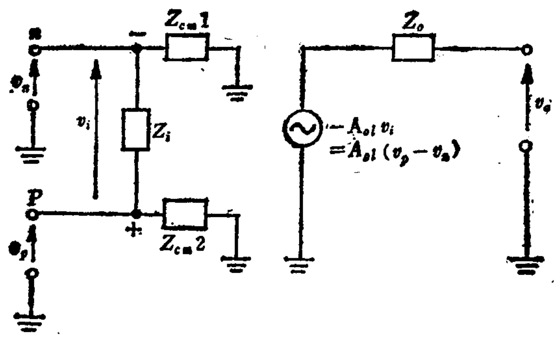


图1.3 运算放大器的等效电路

【例题1.1】 简述运算放大器的特性。

【解】 (1) 具有很高的电压增益。

(2) 能进行同相放大、反相放大及差分放大。

(3) 输入电阻很大。

(4) 输出电阻很小。

(5) 直流失调可达最小。

(6) 可进行温度补偿。

(7) 加上深度负反馈，可使高频特性得以改善。

(8) 在额定工作状态下，输出端可给负载提供最大的电流。

(9) 在差分输入状态下，能很好地抑制共模信号（即共模抑制比很高）。

【例题1.2】 试讨论实际运算放大器的特性与理想运算放大器的特性有哪些差异。

【解】 实际运算放大器与理想运算放大器特性的差异如下表所列：

特　　性	理想运算放大器	实际运算放大器
失调电压	0　V	0.5～5mV
失调电流	0　A	1nA～10μA
失调电压的漂移	0　V/℃	1～50μV/℃
偏置电流	0　A	1nA～100μA
输入电阻	∞　Ω	10KΩ～1000MΩ
通频带	∞　Hz	10KHz～2MΩ
输出电流	电源容量	1～30mA
共模抑制比	∞　dB	60～120dB
上升时间	0　秒	10nS～10μS
转移速率	∞　V/S	0.1～100V/μS
电压增益	∞	10^3～10^6
电源电流	0　A	0.05～25mA

【例题1.3】 在图1.1所示的运算放大器中，电源电压为

$$+V=15V,\qquad -V=-15V$$

而输出电压的上限值$+V_{sat}$和下限值$-V_{sat}$分别为

$$+V_{sat}=+13V,\qquad -V_{sat}=-13V$$

在开环增益$A_{0l}=200,000$的情况下，假定运算放大器其它特性为理想的，给两个输入端相对于公共端（地）分别加上下表所列的输入信号，求输出电压V_0的最大值及其极性。

	反相输入端的电压 Vn	同相输入端的电压 Vp
(a)	$-10\mu V$	$-15\mu V$
(b)	$-10\mu V$	$+15\mu V$
(c)	$-10\mu V$	$-5\ \mu V$
(d)	$+1.000001V$	$+1.000000V$
(e)	$+5mV$	$0\ V$
(f)	$0\ V$	$+5mV$

【解】 输出电压V_0应为同相输入端电压V_p和反相输入端电压V_n之差V_i的A_{0l}倍，即

$$V_0=V_i\times A_{0l}$$

而

$$V_i=V_p-V_n$$

如果$V_i\times A_{0l}$超过$+V$或$-V$，则V_0被抑制在$+V_{sat}$或$-V_{sat}$，其计算结果如下表中所列。

	V_i	V_0
(a)	$-5\ \mu V$	$-5\mu V\times 200000=-1.0V$
(b)	$+25\mu V$	$25\mu V\times 200000=+5.0V$
(c)	$+5\ \mu V$	$5\mu V\times 200000=+1.0V$
(d)	$-1\ \mu V$	$-1\mu V\times 200000=-0.2V$
(e)	$-5\ mV$	$-13V=-Vsat$
(f)	$+5\ mV$	$+13V=+Vsat$

1.2 反相放大器

如图1.4所示，在反相输入端加输入信号，将同相输入端接地的放大器叫反相放大器。反相放大器的主要特征是输出电压在相位上滞后输入电压180°。设运算放大器的开环增益为A_{ol}，输入电阻为R_i，输出电阻为R_o，则图1.4所示电路可用图1.5所示的等效电路来表示。

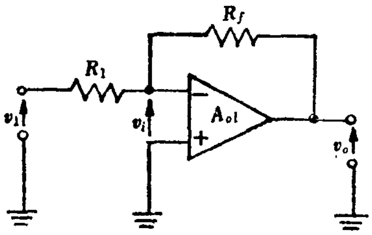


图1.4 反相放大器

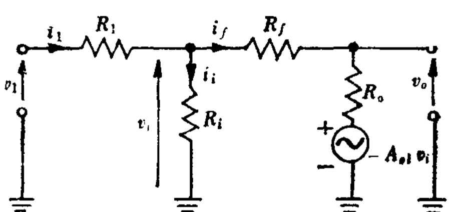


图1.5 反相放大器等效电路

当假定R_i为无穷大，R_0为0时，则该电路的电压增益A_{fb}可由下式给出

$$A_{fb}=\frac{v_0}{v_1}=-\frac{A_{0l}R_f}{R_1+R_f+A_{0l}R_1} \tag{1.1}$$

当A_{0l}很大时，A_{fb}可近似为

$$A_{fb}=-\frac{R_f}{R_1} \tag{1.2}$$

而输入电阻为

$$R_{if}=R_1 \tag{1.3}$$

另一方面，反相放大器可视为一种负反馈放大器，负反馈放大器的增益一般可用下式表示：

$$A_{fb}=\frac{A_0}{1-A_0\beta} \tag{1.4}$$

式中　A_0是无负反馈时的开环增益；β为反馈系数。于是可将(1.1)式写为

$$A_{fb}=-\frac{A_{0l}\left(\frac{R_f}{R_1+R_f}\right)}{1+\frac{A_{0l}R_f}{R_1+R_f}\left(\frac{R_1}{R_f}\right)}$$

由该式可见，将图1.4所示放大器视为负反馈放大器后，其A_0及β由以下两式确定：

$$A_0=-A_{0l}\frac{R_f}{R_1+R_f} \tag{1.5}$$

$$\beta=\frac{R_1}{R_f} \tag{1.6}$$

【例题1.4】　在图1.4所示的反相放大器中，$R_1=20\text{k}\Omega$，$R_f=400\text{k}\Omega$，假定运算放大器是理想的，试求该放大器的电压增益A_{fb}。

【解】　由于运算放大器的输入电阻很大，故可假定其输入电流为0。因此，对于图1.4所示电路来说，如下关系式成立：

$$\frac{v_1-v_i}{R_1}+\frac{v_0-v_i}{R_f}=0 \tag{1.7}$$

$$v_i=\frac{v_0}{-A_{0l}} \tag{1.8}$$

将（1.8）式代入（1.7）式得

$$\frac{v_1}{R_1}+\frac{v_0}{R_1A_{0l}}+\frac{v_0}{R_f}+\frac{v_0}{R_fA_{0l}}=0 \tag{1.9}$$

由该式解得

$$v_0=-\frac{v_1(R_f/R_1)}{1+\left(\frac{1}{A_{0l}}\right)\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right)} \tag{1.10}$$

因为A_{0l}至少为10^5，而R_f和R_1的值可取同一数量级，故必有

$$A_{0l}\gg\left(1+\frac{R_f}{R_1}\right) \tag{1.11}$$

所以，(1.10)式可近似为

$$v_0=-\frac{R_f}{R_1}v_1 \tag{1.12}$$

由该式可得反相放大器的增益为

$$A_{fb} = -\frac{R_f}{R_1} \tag{1.13}$$

可见，反相放大器的增益为负值，其大小仅取决于R_f与R_1的比值，与A_{0l}无关。

将所给数据代入(1·13)式得

$$A_{fb} = -\frac{400\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega} = -20$$

式中的负号说明输入与输出之相位差180°。

【例题1.5】 试计算图1.4所示反相放大器的以下各量的大小。

(*a*) $R_1 = 10\text{k}\Omega$，$A_{fb} = -20$时，R_f的值为多少？

(*b*) $R_f = 1\text{M}\Omega$，$A_{fb} = -40$时，R_1的值为多少？

【解】 将所给数据代入（1.13）式即可得所求各量之值。

(*a*) $R_f = -A_{fb}R_1 = 20\times 10\times 10^3 = 200\text{k}\Omega$

(*b*) $R_1 = \dfrac{R_f}{-A_{fb}} = \dfrac{10^6}{40} = 25\text{k}\Omega$

【例题1.6】 在图1.4所示的反相放大器中，$R_1 = 20\text{k}\Omega$，$R_f = 1\text{M}\Omega$，$A_{0l} = 50,000$。求该电路的闭环增益。

【解】 由（1.10）式知，闭环增益为

$$A_{fb} = -\frac{R_f/R_1}{1+\dfrac{1}{A_{0l}}\left(1+\dfrac{R_f}{R_1}\right)} \tag{1.14}$$

将所给数据代入上式得

$$A_{fb} = -\frac{10^6/20\times 10^3}{1+\dfrac{1}{5\times 10^4}\left(1+\dfrac{10^6}{20\times 10^3}\right)} = -49.95$$

可见，由于A_{0l}相当大，实际闭环增益与用(1.13)近似式所求得的$A_{fb}\approx -\dfrac{R_f}{R_1} = -50$非常接近。

【例题1.7】 在图1.4所示的反相放大器中，$A_{0l} = 10000$，$R_1 = 20\text{k}\Omega$，$R_f = 2\text{M}\Omega$。求当运算放大器的输出电阻$R_0 = 3\text{k}\Omega$，R_i为无穷大时，该电路的有效输出电阻R_{0f}。

【解】 图1.4所示电路的输出电阻，就是将输入信号源短路，从输出端往里看进去所求得的电阻。由于运算放大器的输入电阻为无穷大，所以，求输出电阻的等效电路便如图1.6所示。由该等效电路可得以下各式

$$v_i = \frac{R_1}{R_1+R_f}v_0 \tag{1.15}$$

$$i_0 = \frac{v_0-(-A_{0l}v_i)}{R_0} \tag{1.16}$$

$$i_l = i_0 + i_f \tag{1.17}$$

将（1.15）式代入（1.16）式得

$$i_0 = \frac{v_0 + A_{0l}\dfrac{R_1 v_0}{R_1+R_f}}{R_0} \tag{1.18}$$

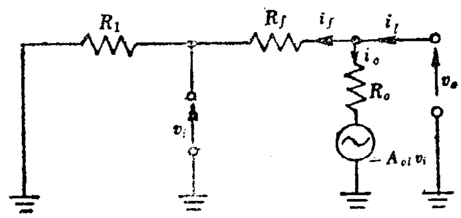


图1.6 求反相放大器输出电阻的等效电路

因为，当$i_f\approx 0$时，$i_l\approx i_0$。所以由（1.18）式可求得输出电阻为

$$R_{0f}=\frac{v_0}{i_l}\approx\frac{R_0}{1+A_{0l}\dfrac{R_1}{R_1+R_f}} \tag{1.19}$$

将所给数据代入该式后得

$$R_{0f}=\frac{3\text{k}\Omega}{1+10^4\times\dfrac{20\text{k}\Omega}{2000\text{k}\Omega+20\text{k}\Omega}}=30\Omega$$

【例题1.8】 在图1.4所示的反相放大器中，$A_{0l}=10000$，$R_1=20\text{k}\Omega$，$R_f=2M\Omega$。当运算放大器的输入电阻$R_i=200\text{k}\Omega$时，求该电路的有效输入电阻R_{if}。假定$R_0=0$。

【解】 由于图1.4所示反相放大器的输出电阻R_0为零，所以可将图1.5所示等效电路中的R_0用0表示。对该电路应用基尔霍夫定律可得以下各式：

$$v_1=i_1R_1+i_iR_i \tag{1.20}$$

$$v_1+A_{0l}v_i=i_1R_1+(i_1-i_i)R_f \tag{1.21}$$

$$v_i=i_iR_i \tag{1.22}$$

因由(1.21)式和（1.22）式可得

$$v_1=i_1(R_1+R_f)-i_i(A_{0l}R_i+R_f)$$

所以

$$i_i=\frac{i_i(R_1+R_f)-v_1}{A_{0l}R_i+R_f}$$

把该式代入（1.20）式便得

$$v_1=i_1R_1+R_i\frac{i_1(R_1+R_f)-v_1}{A_{0l}R_i+R_f}$$

将等式两边同乘以$A_{0l}R_i+R_f$并整理后得

$$v_1(A_{0l}R_i+R_f+R_i)=i_1(R_1A_{0l}R_i+R_1R_f+R_1R_i+R_iR_f)$$

由该式可得输入电阻R_{if}为

$$R_{if}=\frac{v_1}{i_1}=R_1+\frac{R_iR_f}{A_{0l}R_i+R_f+R_i}=R_1+\frac{R_f}{A_{0l}+1+R_f/R_i} \tag{1.23}$$

将所给数据代入上式得

$$R_{if}=20\text{k}\Omega+\frac{2000\text{k}\Omega}{10000+1+2000\text{k}\Omega/200\text{k}\Omega}=20\text{k}\Omega+\frac{2000\text{k}\Omega}{10011}$$
$$=20.19978\text{k}\Omega$$

当$R_i\gg R_f$，$A_{0l}\gg1$时，则（1.23）式可近似为

$$R_{if}\approx R_1+\frac{R_f}{A_{0l}} \tag{1.24}$$

将所给数据代入上式得

$$R_{if}=20\text{k}\Omega+\frac{2000\text{k}\Omega}{10000}=20.2\text{k}\Omega$$

从(1.24)式还可看出，如果A_{0l}为无穷大，则反相放大器的输入电阻R_{if}就等于R_1。

【例题1.9】 在图1.7所示的反相放大器中，运算放大器的开环增益A_{0l}、R_i及R_0分别为

$$A_{0l}=10000，R_i=200\text{k}\Omega，R_0=3\text{k}\Omega$$

而R_1，R_f及R_l的值为

$$R_1=20\text{k}\Omega，R_f=2M\Omega，R_l=50\text{k}\Omega$$

求该电路以下各量之值。

(a) 闭环增益A_{fb}

(b) 有效输入电阻R_{if}

(c) 有效输出电阻

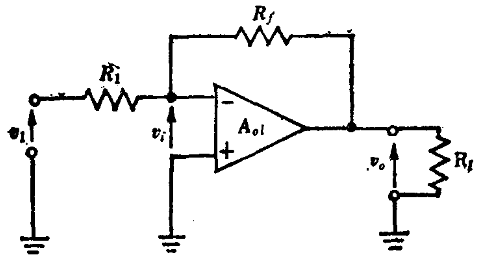


图1.7 考虑负载的反相放大器

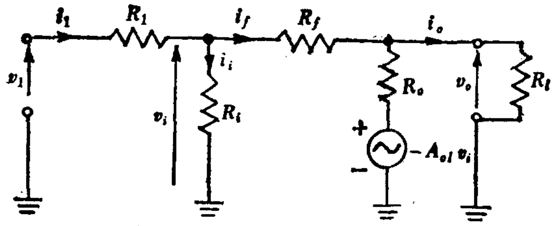


图1.8 考虑负载的反相放大器等效电路

【解】 (a) 闭环增益A_{fb}

图1.7所示电路可等效为图1.8，其电压、电流的正方向如图1.8中所示。对此等效电路应用基尔霍夫定律可得如下各式：

$$v_1 = R_1 i_1 + v_i \tag{1.25}$$

$$-A_{ol}v_i = v_i - R_f i_f - R_0(i_f - i_0) \tag{1.26}$$

$$v_0 = R_0(i_f - i_0) - A_{ol}v_i \tag{1.27}$$

$$i_1 = i_i + i_f \tag{1.28}$$

$$v_i = i_i R_i \tag{1.29}$$

$$v_0 = i_0 R_l \tag{1.30}$$

将（1.28）式，(1.29）式及（1.30）式代入（1.26）式得

$$\{(1+A_{ol})R_i + (R_f + R_0)\}i_i = (R_f + R_0)i_1 - \frac{R_0}{R_l}v_0$$

将上式整理后得

$$i_i = \frac{R_f + R_0}{(R_f + R_0) + (1 + A_{ol})R_i} i_1 - \frac{1}{(R_f + R_0) + (1 + A_{ol})R_i} \frac{R_0}{R_l} v_0 \tag{1.31}$$

将（1.29）式代入（1.25）式得

$$v_1 = R_1 i_1 + i_i R_i$$

再把（1.31）式代入上式得

$$v_1 = \frac{(R_1 + R_i)(R_f + R_0) + (1 + A_{ol})R_1 R_i}{(R_f + R_0) + (1 + A_{ol})R_i} i_1 - \frac{R_i}{R_l} \frac{R_0}{(R_f + R_0) + (1 + A_{ol})R_i} v_0 \tag{1.32}$$

然后将（1.28）式，(1.29）式及（1.30）式一并代入（1.27)式得

$$v_0 = R_0 i_1 - (R_0 + A_{ol}R_i)i_i - R_0 \frac{v_0}{R_l}$$

即

$$\left(1 + \frac{R_0}{R_l}\right)v_0 = R_0 i_1 - (R_0 + A_{ol}R_i)i_i \tag{1.33}$$

把（1.31）式所求得的i_i代入上式得

$$\left(1+\frac{R_0}{R_1}-\frac{R_0+A_{0l}R_i}{R_f+R_0+(1+A_{0l})R_i}\,\frac{R_0}{R_l}\right)v_0=\frac{R_i(R_0-R_fA_{0l})}{R_f+R_0+(1+A_{0l})R_i}\,i_1$$

所以

$$i_l=\frac{R_1\{R_l+R_0+(1+A_{0l})R_i\}+R_0(R_i+R_f)}{R_lR_i(R_0-R_fA_{0l})}v_0 \tag{1.34}$$

将（1.34）式求得的i_1代入(1.32)式，可求得电压增益为

$$A_{fb}=\frac{v_0}{v_1}$$

$$=\frac{R_lR_i(R_0-R_fA_{0l})\{R_f+R_0+(1+A_{0l})R_i\}}{\{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i\}\times[R_l\{R_f+R_0+(1+A_{0l})R_i\}+R_0(R_i+R_f)]-R_i^2R_0(R_0-R_fA_{0l})} \tag{1.35}$$

令（1.35）式中的$R_l\to\infty$，即可求得负载开路时的增益A_{fb}为

$$A_{fb}=\frac{R_i(R_0-R_fA_{0l})}{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i} \tag{1.36}$$

在本题中，因$R_l\gg R_0$，所以其增益可由(1.36)式近似计算。将所给数据代入(1.36)式中，便求得电压增益如下

$$A_{fb}=\frac{200\times10^3\times(3\times10^3-2\times10^6\times10^4)}{(20\times10^3+200\times10^3)(2\times10^6+3\times10^3)+(1+10^4)\times20\times10^3\times200\times10^3}$$
$$=-98.90$$

(b) 有效输入电阻

因为有效输入电阻为

$$R_{if}=\frac{v_1}{i_1}$$

将由(1.34)式求得的v_0代入(1.32)式并整理后得

$$v_1=\left[\frac{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i}{(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_i}+\frac{R_0R_i}{(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_i}\,\frac{R_i(R_fA_{0l}-R_0)}{R_l\{R_1+R_0+(1+A_{0l})R_i\}}\right]i_1$$

由该式可得

$$R_{if}=\frac{v_1}{i_1}=R_1+\frac{R_i(R_f+R_0)}{(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_i}+\frac{R_0R_i^2(R_fA_{0l}-R_0)}{\{(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_i\}[R_0(R_i+R_f)+R_l\{R_1+R_0+(1+A_{0l})R_i\}]} \tag{1.37}$$

输出端开路时的输入电阻，可由(1.37)式令其$R_l\to\infty$而求得，即

$$R_{if}=R_1+\frac{R_i(R_f+R_0)}{(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_i} \tag{1.38}$$

在本题中，因$R_l\gg R_0$，所以，有效输入电阻可用(1.38)式近似计算。将所给数据代入(1.38)式即可求得R_{if}如下

$$R_{if}=20\times10^3+200\times10^3\times\frac{(2\times10^6+3\times10^3)}{(2\times10^6+3\times10^3)+(1+10^4)\times200\times10^3}$$
$$=20.2\text{k}\Omega$$

(c) 有效输出电阻

求有效输出电阻的常用方法有两种。下面我们分别用这两种方法来求解。

(1) 用戴维宁定理求解

当输出端短路时，可画出其等效电路如图1.9所示。由该等效电路可得出以下关系式：

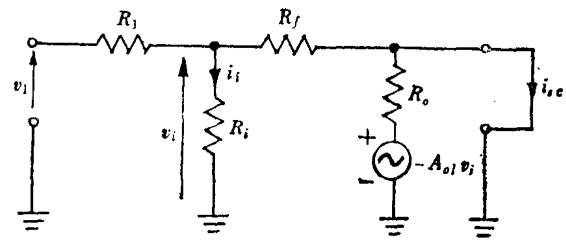


图1.9 输出短路时反相放大器的等效电路

$$\left.\begin{aligned} i_{sc} &= -\frac{A_{0l}v_i}{R_0}+\frac{v_1}{R_1+\dfrac{R_iR_f}{R_i+R_f}}\,\frac{R_i}{R_i+R_f} \\ v_i &= R_i\cdot i_i \\ i_i &= \frac{v_1}{R_1+\dfrac{R_iR_f}{R_i+R_f}}\,\frac{R_f}{R_i+R_f} \end{aligned}\right\} \tag{1.39}$$

由(1.39)式可求得短路电流i_{sc}为

$$i_{sc}=\frac{R_i(R_0-R_fA_{0l})v_1}{\{R_1(R_i+R_f)+R_iR_f\}R_0} \tag{1.40}$$

而输出端开路时的输出电压v_{0f}可用(1.36)式求得

$$v_{0f}=\frac{R_i(R_0-R_fA_{0l})}{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i}v_1 \tag{1.41}$$

因此，所求的有效输出电阻为

$$\begin{aligned} R_{0f}=\frac{v_{0f}}{i_{sc}} &= \frac{R_i(R_0-R_fA_{0l})}{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i}\,\frac{\{R_1(R_i+R_f)+R_iR_f\}R_0}{R_i(R_0-R_fA_{0l})} \\ &= \frac{(R_1R_i+R_iR_f+R_fR_1)R_0}{(R_1+R_i)(R_f+R_0)+(1+A_{0l})R_1R_i} \end{aligned} \tag{1.42}$$

将所给数据代入上式得

$$\begin{aligned} R_{0f} &= \frac{(20\times10^3\times200\times10^3+200\times10^3\times2\times10^6+2\times10^6\times20\times10^3)\times3\times10^3}{(20\times10^3+200\times10^3)(2\times10^6+3\times10^3)+(1+10^4)\times20\times10^3\times200\times10^3} \\ &= 32.93\Omega \end{aligned}$$

(2) 用将输入端短路由输出端往里看进去的方法求解

应用该方法求解可将图1.9所示电路等效为图1.10所示。将基尔霍夫定律用于该电路，即可得如下各式：

$$v_0 = i_f\left(\frac{R_1R_i}{R_1+R_i}+R_f\right) \tag{1.43}$$

$$v_0 = R_0(i_0-i_f)-A_{0l}v_i \tag{1.44}$$

$$v_i = \frac{R_1R_i}{R_1+R_i}i_f \tag{1.45}$$

将(1.45)式代入(1.44)式得

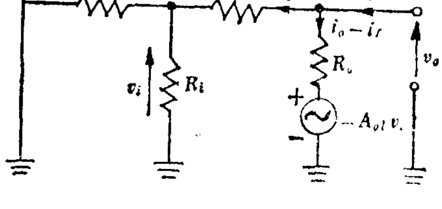


图1.10 输入端短路时反相放大器的等效电路

$$v_0 = R_0(i_0 - i_f) - A_{0l}\frac{R_1 R_i}{R_1 + R_i} i_f$$

即

$$v_0 = R_0 i_0 - \left(R_0 + A_{0l}\frac{R_1 R_i}{R_i + R_1}\right) i_f \qquad (1.46)$$

由(1.43)式和(1.46)式消去i_f后得

$$v_0 = R_0 i_0 - \left(R_0 + A_{0l}\frac{R_1 R_i}{R_1 + R_i}\right)\frac{v_0}{\left(R_f + \dfrac{R_1 R_i}{R_1 + R_i}\right)}$$

$$= R_0 i_0 - \frac{R_0(R_1 + R_i) + A_{0l}R_1 R_i}{R_1 R_i + R_f(R_1 + R_i)} v_0$$

将该式整理后得

$$\left\{1 + \frac{R_0(R_1 + R_i) + A_{0l}R_1 R_i}{R_1 R_i + R_f(R_1 + R_i)}\right\} v_0 = R_0 i_0$$

因此，输出电阻为

$$R_{0f} = \frac{v_0}{i_0} = \frac{(R_1 R_i + R_i R_f + R_f R_1)R_0}{(R_1 + R_i)(R_f + R_0) + (1 + A_{0l})R_1 R_i} \qquad (1.47)$$

显然，该式与(1.42)式求得的结果完全相同。

1.3 同相放大器

如图1.11所示，在运算放大器的同相端加上输入信号，而通过反馈电阻R_f和R_1把输出电压的一部分反馈到反相输入端的电路称为同相放大器。同相放大器的最大特点是输出电压与输入电压相位相同。

设运算放大器的开环增益为A_{0l}，输入电阻为R_i，输出电阻为R_0，则 图1.11所示电路可等效如图1.12所示。假设$R_i \to \infty$，$R_0 \to 0$，则该电路的电压增益A_{fb}可由下式给定：

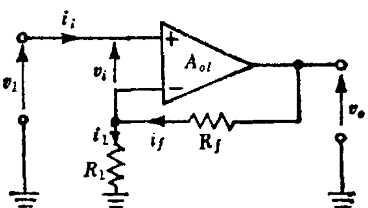


图1.11 同相放大器

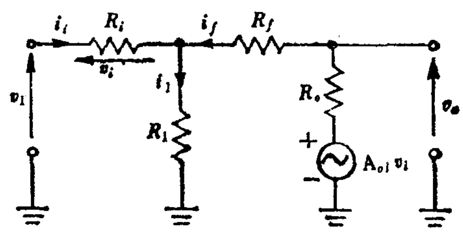


图1.12 同相放大器的等效电路

$$A_{fb} = \frac{v_0}{v_1} = \frac{A_{0l}}{1 + \dfrac{A_{0l}R_1}{R_1 + R_f}} \qquad (1.48)$$

当A_{0l}很大时，A_{fb}可近似为

$$A_{fb} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \qquad (1.49)$$

若把同相放大器视为负反馈放大器，则其反馈系数可表示为

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_f} \qquad (1.50)$$