

# 运标放大器应用

简介

# 运动健儿英雄传

有个

# 应用机器技术

介绍

——电自七四届第五次学工参攷——

上海市业余工业大学长宁区分校编  
上海纺织工学院电自专业翻印

一九七六·十一

## 前言

在毛主席“独立自主，自力更生”方针的指引下，我国电子工业战线上的广大工人和技术人员树立赶超世界先进水平的雄心壮志，在短短的几年中，先后试制成功了运放放大器，中频放大器，音频放大器，稳压电流等各种类型的线性集成电路，其中运放系列更有迅速的发展。在电子工业战线大好形势的鼓舞下，在深入开展批林批孔的运动中，电子工业战线上的同志们怀着加快社会主义建设，为人类作出较大贡献的愿望，发扬了连续作战的革命精神，克服了一个又一个技术难关，在短短的几个月里，先后试制出FC31低功耗运放放大器，FC-52高增益运放放大器，FE35射频中频放大器各种类型的线性电路，在最近又试制出了FC54低功耗高增益运放放大器和WY810三端式大功率稳压电流线性电路新品种。

随着社会主义建设事业的不断发展的需要，运放放大器也越来越多地在各条战线得到应用。为了使更多的同志了解运放放大器的性能技术指标，我们以FC52为例，将一些特性和应用线路介绍给大家，供各条战线上从事集成电路使用的同志作参考。

# 目 录

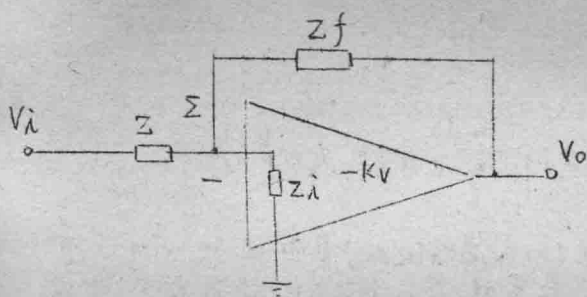
|     |                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------|
| 前言  |                                                        |
| 第一章 | 运放放大电路简介----- (1)                                      |
| 第二章 | FC52 高增益运放放大电路技术性能----- (2)                            |
| 二.  | FC52 运放放大电路的线路形式及工作原理                                  |
| 三.  | FC52 运放放大电路参数含义                                        |
| 第三章 | FC52 运放放大电路的测试方法----- (6)                              |
| 一.  | 测输入失调电压和失调电流                                           |
| 二.  | 测调零范围和静态功耗                                             |
| 三.  | 测开环电压增益和最大输出电压幅度                                       |
| 第四章 | FC52 运放放大电路的应用实例----- (9)                              |
| 一.  | 放大电路: (1) 反相放大电路<br>(2) 同相放大电路<br>(3) 双电流使用 OCL 功率放大电路 |
| 二.  | 运放电路: (1) 加法电路<br>(2) 加减法电路<br>(3) 积分电路<br>(4) 微分电路    |
| 三.  | 振荡电路: (1) 正弦波 RC 振荡电路<br>(2) 多谐振荡电路                    |
| 四.  | 电源电路: (1) 可调式稳压电源<br>(2) 恒流源                           |
| 附录一 | 用实验效应表证明放大电路的输入阻抗和输出阻抗 (20)                            |
| 附录二 | FC3 中增益运放放大电路性能及应用----- (21)                           |
| 附录三 | FC52 管脚排列----- (36)                                    |
| 附录四 | 线性电路企业型号命名方法----- (37)                                 |

# 第一章 运放简介

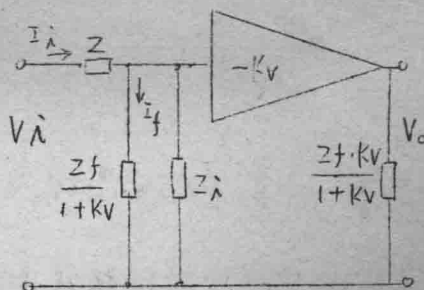
在模拟计算机中的核心部件就是运放放大器，所谓运放放大器也就是能完成对于各种函数的线性运算的放大器，例如进行比例、积分、微分、反相、加减……等。

运放放大器的结构和工作原理：

运放放大器实际上是一个深度反馈的放大器，它的结构如各 1-1 所示。



(a) 放大器的结构



(b) 运放放大器的等效电路

各 1-1

各中  $K_v$  是一个输入阻抗为  $Z_i$  的高增益直流放大器，它的放大倍数是负的。即： $\frac{V_o}{V_i} = -K_v$

而放大器的输出端通过阻抗  $Z_f$  反馈到放大器的输入端，阻抗  $Z$  为整个运放放大器的输入。对于这样的负反馈放大器，我们可以用米勒效应来证明（证明见附录 1）它的输入阻抗为  $\frac{Z_f}{1+K_v}$ ，输出阻抗为  $\frac{Z_f K_v}{1+K_v}$  的无反馈放大器；即等效为各 1-1b 所示的电路。

通常  $K_v \gg 1$  这样从  $\Sigma$  点看进去，就是一个输入阻抗非常小  $(\frac{Z_f}{1+K_v} \parallel Z_i)$  放大倍数为  $K_v$  的放大器，当  $K_v \rightarrow \infty$  时，输入阻抗  $\rightarrow 0$ ，原来的输入阻抗  $Z_i$  完全被  $\frac{Z_f}{1+K_v}$  所短路，即  $Z_i$  可以忽略不计，在整个放大器的输入端加上输入信号  $V_i$  时，流过  $Z$  的电流全部流入阻抗  $\frac{Z_f}{1+K_v}$ ，利用这样的近似，可以求出放大器的输出电压：

$$V_o = -K_v \cdot V_i = -K_v \cdot I_f \cdot \frac{Z_f}{1+K_v} \approx -I_f \cdot Z_f \approx -I_i Z_f$$



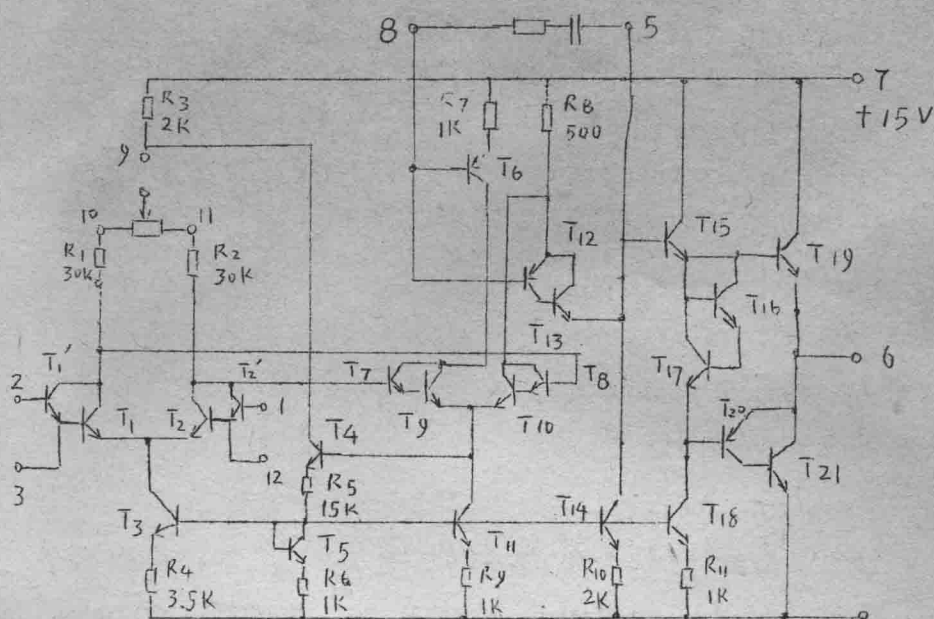


图 2-1

反馈作用，可提高放大器的共模抑制比 CMRR。

输入差分级的电压增益，当非达林顿输入时粗略估计为：

$$|K_1| \approx 20 \cdot I_{CT3} \cdot R_1 = 20 \times 3 \times 10^{-4} \times 3 \times 10^4 \approx 180 \text{ 倍}$$

2. 第二差分级：由  $T_7, T_9$  和  $T_8, T_{10}$  达林顿复合对组成，这样可以提高第二级的输入阻抗，有利于跟前级匹配，提高增益。达林顿对每一边的电流约为  $0.5 \text{ mA}$ ， $T_{11}$  为中间差分对的恒流源，工作电流约为  $1 \text{ mA}$ 。

这一级的电压增益很低，粗略估计为：

$$|K_2| \approx 10 \cdot I_{CT_{11}} \cdot R_3 \approx 10 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^2 \approx 5 \text{ 倍}$$

3. 中间放大级：由  $T_{12}, T_{13}, T_{14}$  和  $T_6$  组成，这一级主要起电压放大作用，同时还有电平移位作用。来自中间差分级的双端输出分别加至  $T_{12}, T_{13}$  复合管的基极和发射极，从集电极得单端输出，因  $T_{12}$  为横向 PNP 管  $\beta$  较大，与 NPN 管  $T_{13}$  复合成 PNP 管，可增加放大能力，並起电平移位作用。 $T_6$  作为二极管使用以获得正向压降  $0.7 \text{ V}$  左右使  $T_{12}, T_{13}$  能处于正常工作状态， $T_{14}$  为复合管的恒流源，也作为其负载，其工作电流为  $0.5 \text{ mA}$ ，由于采用

了有流负载和后级的射极跟随，输入阻抗很高，而使这级的电压增益很大。假设这个电路外接负载  $R_L$  为  $1K$ ， $T_{14}$ 、 $T_{15}$  的  $\beta$  均为 30 则反应到  $T_{15}$  输入阻抗约为：

$$R_{bT_{15}} \approx R_L \cdot \beta_{T_{14}} \cdot \beta_{T_{15}} \approx 10^3 \times 30 \times 30 = 900K$$

取  $T_{13}$ 、 $T_{14}$  的输出阻抗  $R_{eT_{13}}$ 、 $R_{eT_{14}}$  分别为  $300K$ ，则反应到中间级总的负载阻抗  $R_{eT_{13总}}$  约为：

$$R_{eT_{13总}} \approx R_{bT_{15}} // R_{eT_{13}} // R_{eT_{14}}$$

$$\approx 900K // 300K // 300K \approx 128K$$

则中间级总的电压增益  $K_3$  约为：

$$|K_3| \approx 40 \cdot I_{eT_{12}} \cdot R_{eT_{13总}}$$

$$\approx 40 \times 5 \times 10^{-4} \times 128 \times 10^3 \approx 2560 \text{ 倍}$$

由于这级增益很高，容易引起相移自激，故在⑤、⑧端为外接  $R$ 、 $C$  频率补偿，一般非达林顿取  $R=100\Omega$ ， $C=100p$ 。达林顿时取  $C=1000p$ ，具体数据也可按振荡情况酌情选取。

4. 互补输出级：由三部份组成。一是由  $T_{15}$  组成的射极跟随器，有利于前级与输出的匹配， $T_{18}$  为某恒流源和负载，工作电流为  $1mA$ ；二是由  $T_{16}$ 、 $T_{17}$  组成的线性补偿回路，可以消除输出波形正负波间的渡越畸变；三是由  $T_{19}$  NPN 管和  $T_{20}$ 、 $T_{21}$  组成的复合横向 PNP 管构成互补倒相推挽输出电路，采用复合，是为了提高负向电流的输出能力，输出级的电压增益小于 1。

所以整个运放总的总增益，当非达林顿输入时  $K_{总}$  约为：

$$K_{总} \approx K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \approx 180 \times 5 \times 2560 \approx 2 \times 10^6 \text{ 倍}$$

实际测试中，由于测试中的一些误差，开环电压增益的分布一般都在  $10^5 \sim 10^6$  左右。

## 二、各含义

1. 输入失调电压 ( $V_{os}$ )：这是指放大器的输出电压为另两输入端之间的直流电位差。主要是由运放输入差分对的前向电压  $V_{be}$  的不对称所造成的失调电压，在目前工艺水平下，通常是  $mV$  级数量。

2. 输入失调电流 ( $I_{os}$ )：这是指放大器输出电压为另两输入电流之差。其单位为  $\mu A$  或  $pA$ 。此项指标在高阻抗电路中有重要作用。

3. 失调电压温度漂移 ( $\Delta V_{os}/\Delta T$ ): 这是指放大器在规定工作温度范围内输入失调电压对温度的变化率。其单位是  $\mu V/^\circ C$ 。

4. 失调电流温度漂移 ( $\Delta I_{os}/\Delta T$ ): 这是指放大器在规定工作范围内输入电流对温度的变化率, 其单位为  $\mu A/^\circ C$ 。

以上二项是对运放漂移特性的重要量度。

5. 开环电压增益 ( $G_{OL}$ ): 这是指放大器在开环条件下输出电压变化对输入电压变化之比。如以倍数表示  $G_{OL}$ , 则以分贝表示的开环增益就是  $20 \lg G_{OL}$ 。开环增益越高, 作闭环运放使用的精度也越高, 同时闭环增益也越高, 对于给定的3分贝带宽, 闭环频率范围就越宽。一般说来低增益运放的  $G_{OL}$  范围为  $10^3 \sim 10^4$ , 中增益为  $10^4 \sim 10^5$ , 高增益可达  $10^5 \sim 10^6$ 。

6. 开环带宽 ( $\Delta f_{OL}$ ): 这是指放大器的开环增益下降3分贝时的频率宽度, 单位为  $Kc$  或  $Mc$ , 据此可以估计运放在指定反馈深度下可以利用的闭环带宽。

7. 最大输出电压幅度 ( $V_{opp}$ ): 一般是指放大器的输出电压波形在不削波的范围内, 输出电压幅度的正负峰值。单位是  $V$ 。此项指标对运放的动态范围和线性度有重要关系。

8. 静态功耗 ( $P_{CO}$ ): 这是指放大器在直流空载时所有功耗的总功率。单位是  $mW$ 。

9. 共模抑制比 ( $CMRR$ ): 这是指放大器的差模电压增益  $G_{dm}$  与共模电压增益  $G_{cm}$  之比。单位为分贝。通常规定

$CMRR = \frac{G_{dm}}{G_{cm}}$ , 实质上, 差模电压增益反映了有用讯号的电压增益, 而共模电压增益反映了干扰讯号的电压增益, 因此共模抑制比越高, 抗干扰越强。

10. 共模电压范围 ( $V_{cm}$ ): 这是指放大器所能承受的最大输入共模电压。超过这个电压, 运放器的共模抑制比将显著下降, 并出现严重畸变。其单位为  $V$ 。

11. 输入阻抗 ( $R_i$ ): 这一般是指放大器的差模输入阻抗。即当放大器输出端交流短路时在输入端所测得的电压变化与电流变化之比。因为差模输入阻抗要比共模输入阻抗小两个数量级左右 (除了场效应管作输入级的运放器以外) 所以差模输入阻抗成为运放输入阻抗的决定性因素。单位为  $K\Omega$  或  $M\Omega$ 。此项指标跟输入基极电流  $I_b$  很有关系,  $I_b$  越小, 则  $R_i$  越高。

12. 输出阻抗 ( $R_o$ ): 这是放大器输入端交流短路时, 在

输出端测得的电压变量与电流变量之比。其单位为  $\Omega$ 。

13. 最大输出电流 ( $I_{om}$ ): 这是指放大器的输出端所能承受的最大负载能力。单位为  $mA$ 。

14. 电流电压灵敏度 ( $\Delta V_{os} / \Delta V_{cc}$ ): 这是指放大器在规定的范围内, 输入失调电压对电流电压的变化率。单位为  $mV/V$ 。

## 第二章 FC52 的测试方法

下面将 FC52 主要参数的测试原理与方法按步骤介绍如下。

### 一、测输入失调电压与失调电流

1. 测试线路如各 3-1 所示, 先将  $K_1$  拨至调零短路处,  $K_2$  拨至达林顿输入 ①、② 端, 再将  $K_3$  合上, 即把  $R_3$ 、 $R_6$  短路, 此时可把输入端等效为电压源, 以直流电压读出  $V_{o1}$  折算到输入端, 即

$$V_{os} = \frac{V_{o1}}{R_4/R_2} = \frac{V_{o1}}{100}。$$

2. 将  $K_3$  打开, 有效直流电阻增至  $10K$ , 此时可把输入端等效为电流源, 于是输出电压  $V_{o2}$  将正比于失调电流  $I_{os}$ , 即

$$I_{os} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{R_4/R_2 / R_3} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{10^6}$$

若取  $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$  的单位为  $V$ , 则  $I_{os} = (V_{o1} - V_{o2}) (\mu A)$

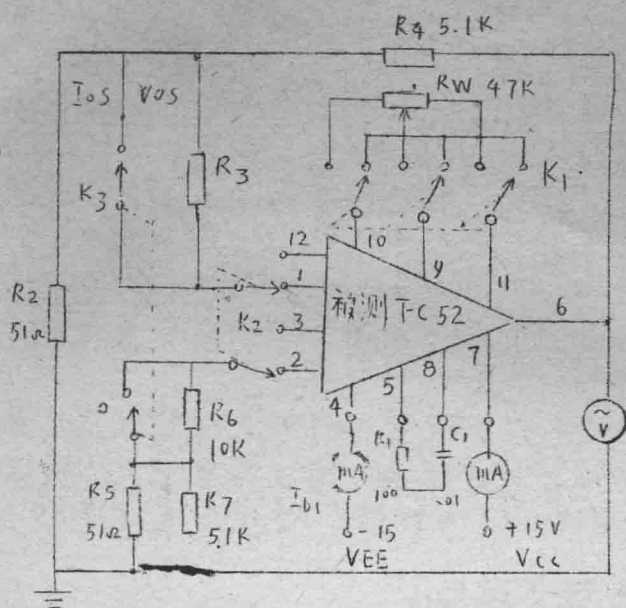
3. 如果达林顿  $V_{os}$ 、 $I_{os}$  二参中有一个不符合 E 档标准, 就测非达林顿端, 即将  $K_2$  拨至 ⑫、⑬ 端, 同样方法测非达林顿的失调电压与失调电流。

4. 在测试过程中, 应始终保持电路本为不起振荡, 为此在 ⑤、⑧ 两端必须加补偿电容, 为了避免多次调整, 在此  $R$  取  $100\Omega$ ,  $C$  取  $0.01\mu f$ 。

### 二、测调零范围 and 静态功耗:

1. 测试线路同上, 将  $K_1$  拨至调零 (即接入  $R_w$ )  $K_3$  打开, 调节  $R_w$  电位器, 看输出电压能否调到另侧, 同样将  $K_3$  合上, 调节  $R_w$  使输出电压调到另侧, 若不能就剔除 (因调不到另侧)

的电路往：是单向输出或线性不佳）。

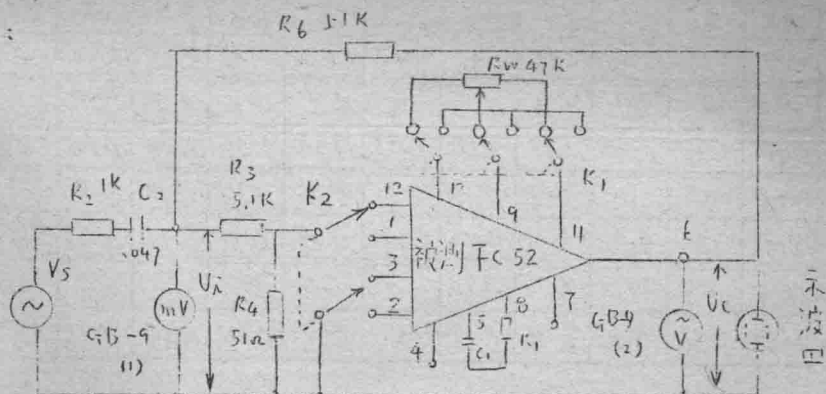


冬 3-1

2. 当输出为另时观察功耗电流表  $I_{cc}$ ,  $I_{ee}$  的读数, 则静态功耗为:  $P_{co} = 15(I_{cc} + I_{ee})$

三、测开环电压增益和最大输出幅度。

1. 测试线路见各 3-2 所示。输入讯号为 200 Hz 的正弦波经过  $R_3$  与  $R_4$  组成的分压口。衰减 100 倍以后加至被测放大器的反相输入端，调节讯号源  $V_s$  大小，观察电压表 GB-9(2)，使输出电压  $V_o$  为有效值 5V，然后从 GB-9(1) 中读出输入讯号  $V_i$  值。


$$\text{各 } 3 - 2$$

$$G_{OL} = \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{V_o}{V_i} = 100 \cdot \frac{V_o}{V_i} = \frac{5 \times 10^5}{V_i}$$

所以只要知道  $V_i$  值，便可以从下面的  $V_i \sim G_{OL}$  换算表直接换算成  $G_{OL}$  值（见表 3-1）

在各 3-2 的测试线路中， $R_0$  为稳定直流工作点的反馈电阻， $R_w$  为直流平衡电阻， $R_1, C_1$  为频率补偿元件，一般以 ①、③ 为输入端测试时， $R_1$  为  $100 \Omega$ ， $C_1$  为  $100 p$ ，而当 ①、② 为输入端时， $R_1$  为  $100 \Omega$ ， $C_1$  为  $1000 p$  若有振荡现象，可酌情增加  $C_1$  值，直到消振为止。

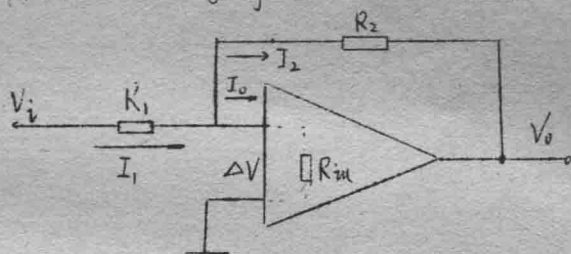
2. 加大输入讯号  $V_s$ ，观察示波面，使输出幅度最大而不削波，从示波面中读出正负向最大输出幅度  $V_{op-p}$ ，或从 GB-9 (2) 中读出最大输出电压  $V_{om}$  有效值，峰值与有效值的关系为：

$$V_{op-p} = \pm \sqrt{2} V_{om}$$

| 符号       | 单位            | 数 值      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $V_i$    | mV            | 0        | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^5$ | $\infty$ | 50   | 25   | 16.7 | 12.5 | 10   | 8.33 | 7.14 | 6.25 | 5.56 |
| $V_i$    | mV            | 1        | 1.1  | 1.2  | 1.3  | 1.4  | 1.5  | 1.6  | 1.7  | 1.8  | 1.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^5$ | 5        | 4.55 | 4.17 | 3.86 | 3.57 | 3.33 | 3.13 | 2.94 | 2.78 | 2.64 |
| $V_i$    | mV            | 2        | 2.1  | 2.2  | 2.3  | 2.4  | 2.5  | 2.6  | 2.7  | 2.8  | 2.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^5$ | 2.5      | 2.38 | 2.27 | 2.17 | 2.08 | 2    | 1.92 | 1.85 | 1.79 | 1.72 |
| $V_i$    | mV            | 3        | 3.1  | 3.2  | 3.3  | 3.4  | 3.5  | 3.6  | 3.7  | 3.8  | 3.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^5$ | 1.66     | 1.61 | 1.56 | 1.51 | 1.47 | 1.43 | 1.39 | 1.35 | 1.32 | 1.28 |
| $V_i$    | mV            | 4        | 4.1  | 4.2  | 4.3  | 4.4  | 4.5  | 4.6  | 4.7  | 4.8  | 4.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^5$ | 1.25     | 1.22 | 1.19 | 1.16 | 1.14 | 1.11 | 1.09 | 1.06 | 1.04 | 1.02 |
| $V_i$    | mV            | 5        | 5.1  | 5.2  | 5.3  | 5.4  | 5.5  | 5.6  | 5.7  | 5.8  | 5.9  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^4$ | 10       | 9.8  | 9.61 | 9.43 | 9.26 | 9.09 | 8.91 | 8.70 | 8.62 | 8.47 |
| $V_i$    | mV            | 6        | 7    | 8    | 9    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 100  |
| $G_{OL}$ | $\times 10^4$ | 8.33     | 7.14 | 6.25 | 5.56 | 5    | 2.5  | 1.67 | 1.25 | 1    | 0.5  |

## 第四章 FCS2 的应用实例

为了便于大家使用方便，我们将一些经过实践的典型电路的实例分或放大，运放振荡，电源等部份从原理到应用作一个简单介绍。  
以供大家参考。



### 一、放大电路

#### 1. 反相放大器

在图 4.1(a) 中其闭环增益推导如下：

$$I_1 = \frac{V_i - \Delta V}{R_1}; \quad I_2 = \frac{\Delta V + V_o}{R_2}$$

$$\therefore I_o \approx 0$$

$$\therefore I_1 \approx I_2$$

$$V_o = \Delta V (-G_{OL})$$

$$\therefore \frac{\Delta V - \Delta V}{R_1} = \frac{\Delta V + V_o}{R_2}$$

$$\text{将: } \Delta V = -\frac{V_o}{G_{OL}} \text{ 代入上式}$$

$$V_i = V_o \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_1}{G_{OL}} - \frac{1}{G_{OL}} \right)$$

$$\text{故其电压增益 } K_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-G_{OL}}{R_1/R_2 \cdot G_{OL} + R_1/R_2 + 1}$$

$$\therefore \frac{R_1}{R_2} G_{OL} \gg \frac{R_1}{R_2} + 1 \quad \therefore K_V \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

也可推导出以下几项计算公式：

$$V_o = -V_i \frac{R_2}{R_1}; \quad R_{in} \approx R_1; \quad R_{out} = R_o$$

式中：\$R\_{in}\$ 为反相放大器的输入阻抗 \$R\_o\$ 为 FCS2 本身的输出阻抗，\$R\_{out}\$ 为反相放大器的输出阻抗，\$K\_V\$ 为反相放大器电压增益，\$G\_{OL}\$ 为 FCS2 本身的开环增益。

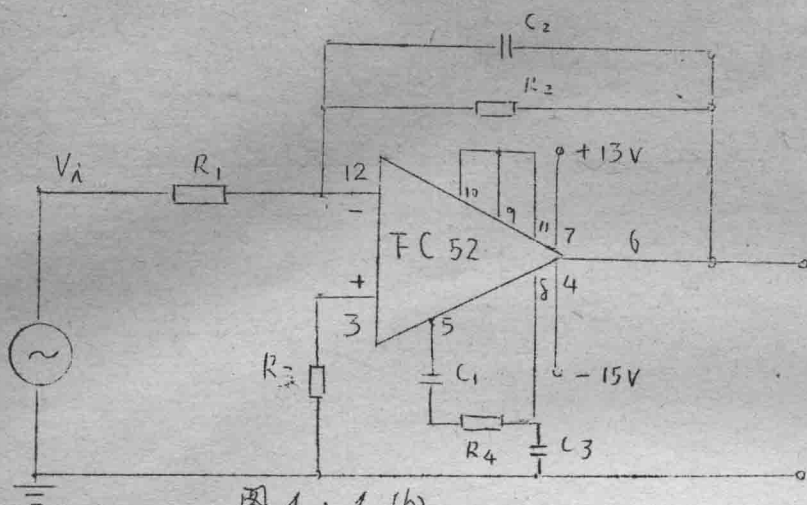


图 4 · 1 (b)

采用FC52组成反相放大器的实用电路见图4·1(b)所示。 $R_3$ 为直流平衡电阻，取 $R_3 = R_1 // R_2$ 。 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 均为频率补偿用，加深反馈比，可以展宽频带，故有KC数等级，采用不同反馈比的频响效果见表4·1图4·2。在反相放大器中，采用深反馈1:1或10:1的闭环条件下，往往会发生振荡，为了消振，一般增大补偿电容 $C_1$ 值，但有时还抑制不了，可采用 $C_2$ 电容作为中频负反馈， $C_3$ 作为高频旁路，消振效果显著。

| 反馈比<br>$R_2/R_1$ | $R_1$        | $R_2$ | $R_3$        | $R_4$        | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | KV   | $\Delta f$ |
|------------------|--------------|-------|--------------|--------------|-------|-------|-------|------|------------|
| 10000            | 10 $\Omega$  | 100K  | 10 $\Omega$  | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 80db | 13KC       |
| 1000             | 100 $\Omega$ | 100K  | 100 $\Omega$ | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 60db | 70KC       |
| 100              | 1K           | 100K  | 1K           | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 40db | 100KC      |
| 10               | 10K          | 100K  | 10K          | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 20db | 200KC      |
| 1                | 10K          | 10K   | 10K          | 100 $\Omega$ | 100p  | 27p   | 4700p | 0db  | 300KC      |

表 4 · 1

< 10 >

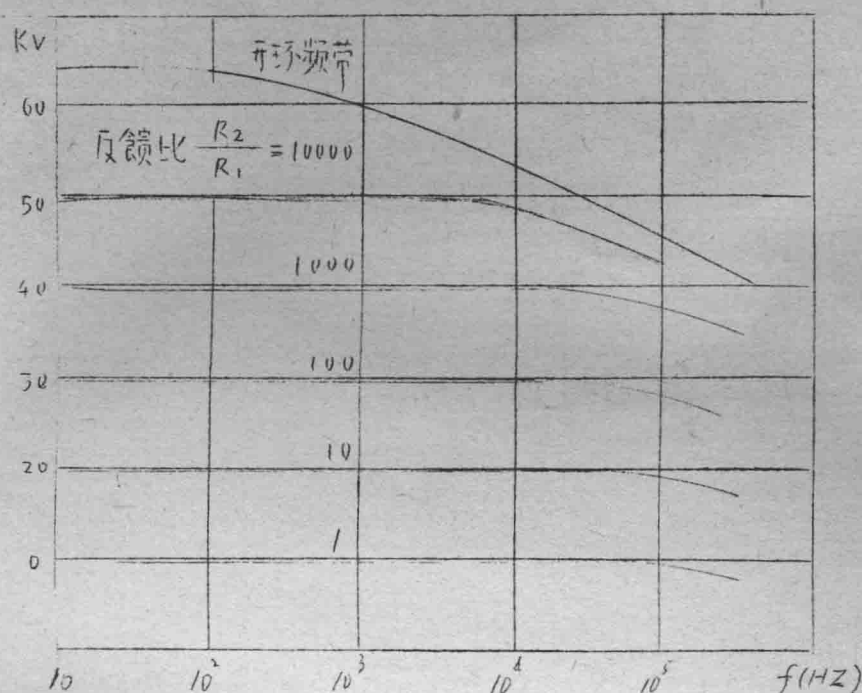


图 4.2

## 2. 同相放大电路

图 4.3 为同相放大器原理图

$$K_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{G_{OL}}{1 + G_{OL} \cdot R_1 / (R_1 + R_2)} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_o \approx V_i \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$R_{in} \approx \frac{R_i \times G_{OL}}{1 + R_2/R_1} \approx R_i \times G_{OL}$$

式中:  $1 + \frac{R_2}{R_1}$  是反馈系数

可见, 与反相放大电路的输入阻抗相比, 同相输入阻抗要大得多, 同相

电路的输出阻抗同反相电路可用一个公式, 即

$$R_{out} = R_o \frac{1 + R_2/R_1}{G_{OL}}$$

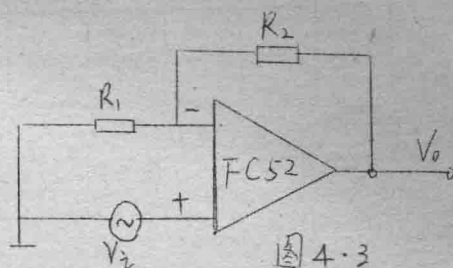


图 4.3

同相放大器的实用线路见图4.4。同样 $R_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 均为频率补偿使用。表4.2和图4.5为不同反馈比时的元件数据 and 频带宽度。

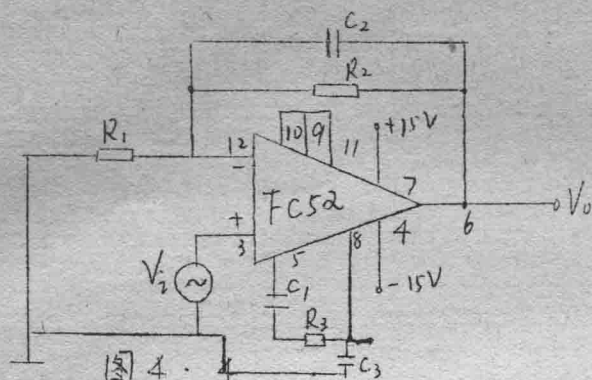


图 4.4

图 4.4

| 反馈比<br>$(1+R_2/R_1)$ | $R_1$        | $R_2$ | $R_3$        | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | KV   | $\Delta f$ |
|----------------------|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|------|------------|
| 10000                | 10 $\Omega$  | 100K  | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 80db | 20Kc       |
| 1000                 | 100 $\Omega$ | 100K  | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 0     | 60db | 100Kc      |
| 100                  | 1K           | 100K  | 100 $\Omega$ | 100p  | 0     | 820p  | 40db | 150Kc      |
| 10                   | 10K          | 90K   | 100 $\Omega$ | 100p  | 5p    | 820p  | 20db | 120Kc      |
| 1                    | 100K         | 10K   | 100 $\Omega$ | 100p  | 10p   | 820p  | 0db  | 70Kc       |

表 4.2