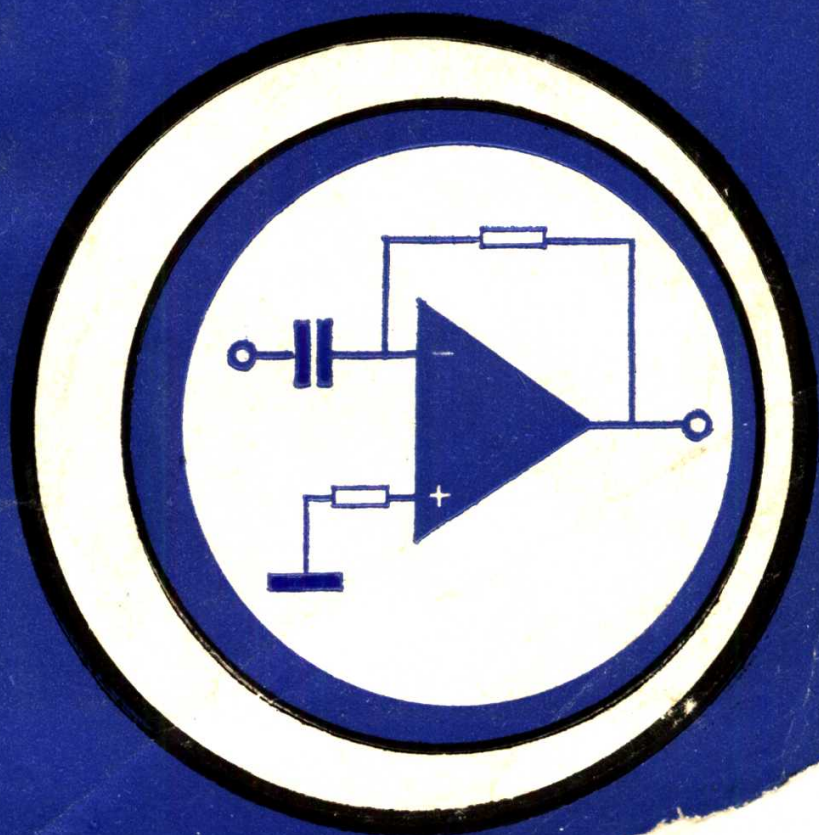


运算放大器 应用电路的分析

高继坤 杨焕明 编



● 北京理工大学出版社

运算放大器应用电路的分析

高继坤 杨焕明 编

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了运算放大器应用电路及其分析方法。全书分成线性应用和非线性应用两部分。在线性应用电路的分析中,除采用了经常使用的“虚短路”法以外,还介绍了简化的节点法及运算放大器的宏模型。书中介绍了利用SPICE程序分析运算放大器应用电路的实例。

该书汇集了大量的运算放大器的实用电路,内容新颖、深入浅出,可作为教学参考书,也可供工程技术人员参考。

运算放大器应用电路的分析

高继坤、杨焕明编

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 8.75 印张 192 千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-237-7/TN·16

印数: 1—2400 册 定价: 1.60 元

前 言

为了配合学生对《电子技术基础》课程中运算放大器一章的学习,更广泛地了解运算放大器应用电路及其分析方法,在多年教学实践及科研实践的基础上,编写了这本小册子。

全书共分八章,前六章重点分析了运算放大器的线性应用电路,最后两章分析了非线性应用电路。在线性应用电路的分析中,除采用了经常使用的“虚短路”法外,还介绍了简化的节点法,并对运放的宏模型及利用SPICE程序对滤波器电路的分析作了简介。全书汇集了大量的运放在各个领域中的实用电路,对开阔学生的眼界和思路是有益的。本书除作为教学参考书外,还可供工程技术人员作参考。

书中前六章由高继坤编写,第七、八章由杨焕明编写。俞宝传教授审阅了全部初稿,提出了许多宝贵的意见和建议,编者作了认真的修改。胡佑德教授对本书的编写给予了热情的支持,并对内容提出了宝贵的意见。吴荣仙同志在使用计算机时给予了帮助,在此谨致谢忱。

限于编者水平,书中会有不少缺点或错误,敬请读者批评指正。

编 者

1988、9、

目 录

第一章 集成运算放大器电路

- 1-1 概述..... (1)
- 1-2 集成运放电路介绍..... (1)
 - 一、 集成运放各组成部分的线路形式及工作原理 (1)
 - 二、 集成运算放大器电路 (20)
- 1-3 集成运放的主要技术指标..... (27)
- 1-4 集成运放的分类和选择..... (29)
 - 一、 集成运放的分类 (29)
 - 二、 集成运放的选择 (32)

第二章 运算放大器线性应用基础

- 2-1 理想集成运放的条件和基本特点..... (33)
 - 一、 理想运算放大器 (33)
 - 二、 理想运算放大器的基本特性 (34)
 - 三、 集成运放实现线性应用的条件 (36)
- 2-2 两种基本的运算放大器电路..... (37)
 - 一、 反相运算放大器 (37)
 - 二、 同相运算放大器 (45)

第三章 线性模拟运算器

- 3-1 反相输入的运算电路..... (53)
 - 一、 反相比例器 (53)
 - 二、 反相加法器 (56)
- 3-2 同相输入的运算电路..... (61)
 - 一、 同相比例放大器 (61)
 - 二、 跟随器电路 (63)
 - 三、 同相加法器 (67)
- 3-3 差动输入放大器电路..... (68)

一、	差动输入放大器的基本电路	(68)
二、	增益可调的差动运算放大器	(70)
三、	高输入阻抗的差动运算放大器	(72)
四、	高共模输入的差动运算放大器	(75)
五、	差动输入运算放大器的应用	(77)
3-4	微分器	(81)
一、	微分器的工作原理	(81)
二、	微分器的频率特性	(82)
三、	输入阻抗恒定的微分器电路	(84)
3-5	积分器	(86)
一、	反相输入的积分器	(86)
二、	同相输入的积分器	(96)
三、	和差积分器	(97)
四、	双重积分电路	(98)
五、	积分器在模拟计算机中的应用举例	(99)
3-6	有源校正电路	(102)
一、	比例-微分放大器(PD放大器)	(102)
二、	比例-积分放大器(PI放大器)	(104)
三、	比例-积分-微分放大器(PID放大器)	(107)
四、	应用举例	(108)
第四章 变换器电路		
4-1	电压-电流变换器	(112)
4-2	电流-电压变换器	(117)
4-3	电流-电流变换器	(123)
4-4	电压-电压变换器	(124)
第五章 有源RC滤波器		
5-1	一阶有源RC滤波器	(127)
一、	同相输入的一阶有源RC滤波器	(129)
二、	反相输入的一阶有源RC滤波器	(131)
5-2	二阶有源RC滤波器	(133)
一、	同相输入的二阶有源RC滤波器	(136)

二、反相输入的二阶有源RC滤波器	(152)
三、设计举例	(157)
5-3 回转器和模拟电感	(165)
一、回转器电路	(165)
二、回转器的用途	(166)
三、模拟电感电路	(168)
第六章 运放线性应用电路分析方法综述	
6-1 直接法	(175)
6-2 简化节点分析法	(175)
6-3 集成运放的宏模型简介	(187)
第七章 非线性应用	
7-1 比较器电路	(197)
一、开环比较器	(198)
二、正反馈下的比较器—滞回比较器(施密特触发器)	(199)
7-2 整流电路	(201)
一、理想整流电路	(201)
二、高速半波整流电路	(202)
三、理想全波整流电路	(203)
7-3 限幅电路与钳位电路	(205)
一、反馈式限幅电路	(205)
二、钳位电路	(206)
7-4 对数和反对数电路	(207)
一、对数电路	(207)
二、反对数电路	(211)
三、对数/反对数电路BG002模块	(213)
7-5 四象限乘法电路	(216)
一、变跨导乘法电路	(216)
二、四象限乘法电路	(218)
三、脉冲宽度高度调制式乘法电路	(223)
四、集成四象限乘法器MC1595L电路	(225)
7-6 自激振荡时间分割式乘除电路	(226)

一、	方框图及工作原理	(226)
二、	电路图及工作原理	(228)
第八章 波形发生器		
8-1	文氏电桥振荡器	(234)
一、	文氏电桥振荡器的原理	(234)
二、	用二极管作稳幅元件的文氏电桥振荡器	(237)
三、	用结型场效应管作稳幅元件的文氏电桥振荡器	(238)
8-2	方波发生器	(239)
一、	电路图	(239)
二、	工作原理	(239)
三、	振荡周期和频率的计算	(240)
四、	几点注意	(241)
8-3	三角波发生器	(241)
一、	电路图	(241)
二、	工作原理	(242)
三、	振荡周期和频率的计算	(243)
四、	几点注意	(244)
8-4	电压-频率转换器	(244)
一、	电路图	(245)
二、	工作原理	(245)
主要参考文献		(249)
附图一		
附图二		
附图三		

第一章 集成运算放大器电路

1-1 概述

集成运算放大器是一种高放大倍数的直接耦合放大器。目前，集成运放的放大倍数可高达 10^7 倍(140dB)。其输入阻抗很高，通常为 $100\text{k}\Omega$ — $10\text{M}\Omega$ 。输出阻抗很低，通常为 75Ω — 300Ω ，如5G24典型值为 75Ω 。集成运放工作在线性区时，输出与输入成线性关系，所以又称线性组件。由于它具有性能好、功耗低、体积小、可靠性高等优点，因此在工业自动控制、仪器仪表、计算技术、航天通讯等各个领域得到了普遍的应用。

集成运放有许多型号，每一种型号都有不同的电路结构。从使用的角度看，主要是了解它的参数和特性指标。本章只阐述较为典型的5G24和5G28型运算放大器的工作原理，以便了解它的指标和参数，为正确使用集成运放提供良好的基础。

1-2 集成运放电路介绍

一、集成运放各组成部分的线路形式及工作原理

运算放大器由输入级、中间级、输出级和偏置电路四部分组成。下面对各部分电路做一个简单的介绍。

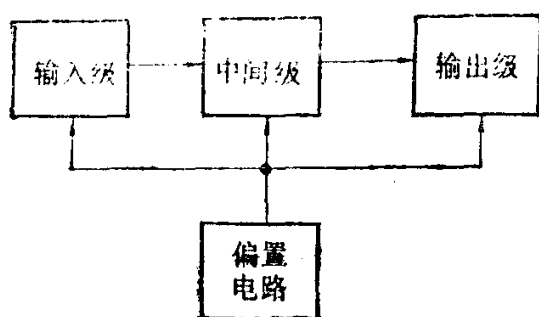


图1-1 运算放大器的组成方框图

1. 输入级 输入级是运算放大器关键的组成部分。对输入级的要求是：输入失调电压小、输入偏置电流小、放大倍数高、共模抑制比高和容许的差模与共模输入信号范围大。几乎所有运算放大器输入级都采用差动放大电路。我们首先扼要地介绍差动放大电路的特点，然后介绍几种典型的输入电路。

(1) 差动放大电路的共模抑制特性

在讲这个问题前，首先讲一下零点漂移的概念。什么是零点漂移呢？在直接耦合放大电路中，输入端信号为零时输出端电位偏离起始值的现象叫零点漂移。产生零点漂移的原因很多，如电源电压的波动，元件老化及温度变化造成静态工作点的变化。在直接耦合放大电路中，由于前级静态工作点的变化会作为后级的假信号被放大，因此末级的漂移往往很严重，有时甚至会淹没有用的信号，使放大电路丧失了对有用信号的放大能力。显然，放大电路输出端的漂移电压主要取决于第一级。因此，要想减小零点漂移，应着重减小输入级的零点漂移。

因为输出端的零点漂移与放大倍数有关，即放大倍数愈高，前级对后级的影响愈大，因此在实际应用中总是把输出

端的总漂移除以放大倍数，叫做折合到输入端的漂移电压，以此做为一个放大器的零点漂移指标。

采用差动放大电路可以有效地抑制零点漂移。

图1-2是典型的差动放大电路。它由两个对称的共发射极放大电路组成，三极管 T_1 及 T_2 特性相同($V_{BE1}=V_{BE2}$, $\beta_1=\beta_2$), $R_{C1}=R_{C2}=R_C$ 。静态时 $I_{E1}=I_{E2}$, $V_{C1}=V_{C2}$, 所以 $V_o=0$ 。

为说明电路的工作原理，我们首先引入“差模信号”与“共模信号”的概念。若作用在两个输入端的信号大小相等，相位相反(以地为参考点)称为“差模信号”；若两个输入端的信号大小相等相位相同，便称为“共模信号”。

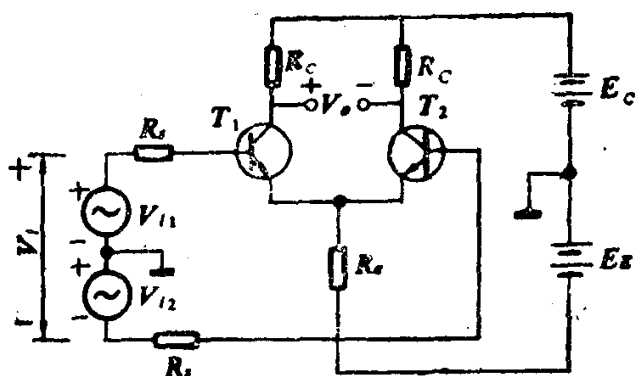


图1-2 差动放大器电路

在加入差模信号时，一管的电流增加，而另一管的电流将减小，在电路完全对称的情况下， I_{E1} 的增加量等于 I_{E2} 的减小量，所以流过 R_e 的电流 I_E 仍和未加信号时相同，故射极电位没有变化，即电阻 R_e 对差模信号没有负反馈作用，相当于短路。图1-3示出了差模信号输入时的交流电路。

在共模信号输入时，由于 $\Delta I_{C1}=\Delta I_{C2}$ ，流过 R_e 的电流增量为 $\Delta I_{C1}+\Delta I_{C2}=2\Delta I_{C1}$ ，则 $\Delta V_{Re}=R_e \cdot 2\Delta I_{C1}$

$= \Delta I_{C1} \cdot 2 R_e$ 。可见, R_e 对共模信号呈现双倍的负反馈作用。交流通路如图1-4所示。

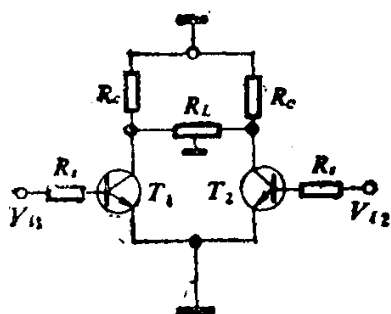


图1-3 差模输入时的交流通路

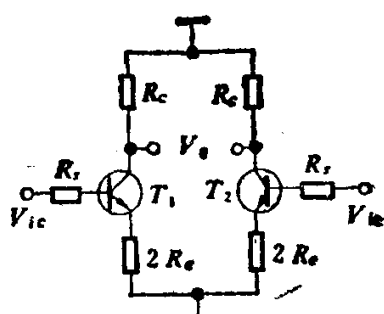


图1-4 共模输入时的交流通路

由于 $T_1 T_2$ 两管的零点漂移大小基本相同, 且方向相同, 故可视为共模信号。所以, 只要我们将有用的信号以差模形式输入, R_e 就把真假信号的差距拉开了, 使真信号得到了放大, 假信号得到抑制。

应该指出, 差动放大器不但可以抑制零点漂移, 而且对其他形式的共模干扰也具有抑制作用。电路对称程度越高, R_e 数值越大, 抑制作用也越强。然而, 加大 R_e , 一方面对集成电路是不合适的, 另外, R_e 愈大, 维持同样的工作电流所需要的负电源的电压也愈高。为此, 采用直流电阻较小而动态电阻很大的恒流源来代替 R_e 。

从三极管的输出特性看, 若工作点为 Q, 直流电阻

$$R = \frac{V_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

动态电阻

$$r = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

即 $r \gg R$ 。可以利用直流工作点稳定电路来产生恒流源。以恒

流源代替 R_c 的电路如图1-6所示。

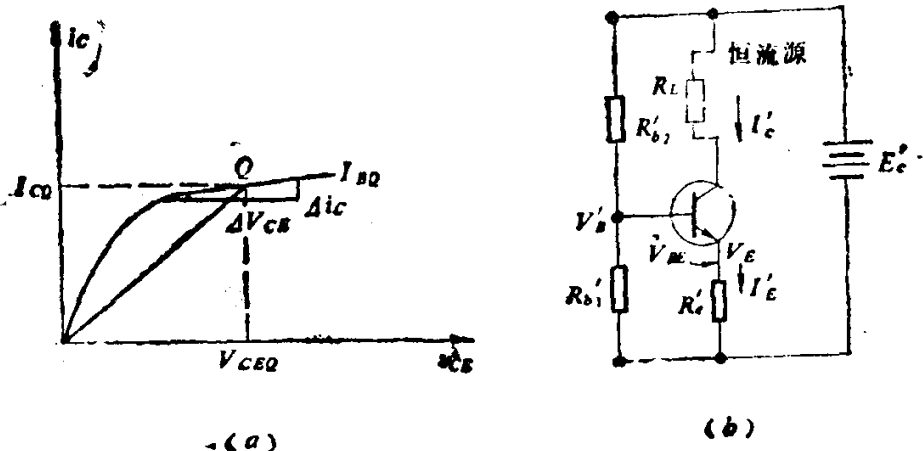


图1-5 (a)三极管的输出特性 (b)产生恒流源的基本电路

下面讨论差模和共模电压放大倍数的计算方法。

由图1-3及图1-4的差模和共模输入时的等效电路，可以导出差模和共模电压放大倍数。

一般而言，输入信号既非单纯的差模信号，也非单纯的共模信号，而是兼而有之的任意信号。设 V_{i1} 和 V_{i2} 为两个任意的输入信号，我们定义差模输入信号等于两个输入信号之差，即

$$V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$$

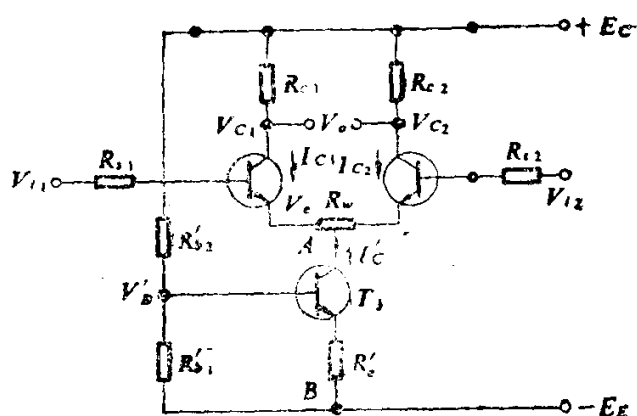
共模输入信号等于两个输入信号的平均值，即

$$V_{ic} = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2})$$

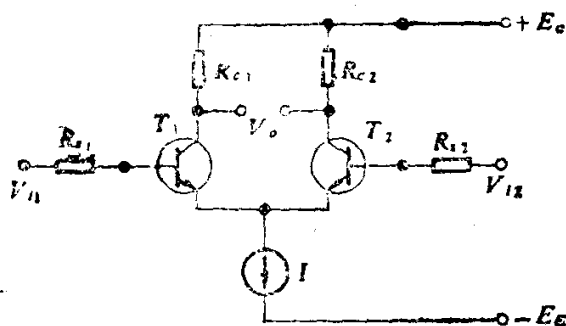
根据上面定义，可以得出

$$V_{i1} = V_{ic} + \frac{1}{2}V_{id}$$

$$V_{i2} = V_{ic} - \frac{1}{2}V_{id}$$



(a)



(b)

图1-6 (a)带有恒流源的差动放大电路 (b)一般表示法

可见，任何输入信号都可视为共模信号与差模信号的线性叠加。

首先讨论差模电压放大倍数。先假设共模信号为零，只有差模输入，则

$$V_{i1} = \frac{1}{2} V_{id}$$

$$V_{i2} = -\frac{1}{2} V_{id}$$

双端输出时的差模放大倍数

$$A_d = \frac{V_{od}}{V_{id}} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{V_{i1} - V_{i2}} = \frac{V_{o1} - (-V_{o1})}{V_{i1} - (-V_{i1})}$$

$$= \frac{2V_{o1}}{2V_{i1}} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{-\beta R'_L}{R_s + r_{be}} \quad (1-1)$$

因为 V_{o1} 与 V_{o2} 大小相等，相位相反，因此负载电阻 R_L 中点可视为地电位，故上式中

$$R'_L = R_c // \frac{R_L}{2}$$

单端输出时的差模放大倍数

$$|A_{d1}| = \frac{V_{o1}}{V_{id}} = \frac{1}{2} \frac{\beta R'_L}{R_s + r_{be}} \quad (1-2)$$

式中 $R'_L = R_c // R_L$ ， R_L 为输出端到地的负载电阻。

差模输入电阻定义为小信号条件下差模输入电压 V_{id} 与输入基极电流 I_b 之比。因为

$$V_{i1} = \frac{V_{id}}{2} = I_b(r_{be} + R_s)$$

则输入电阻

$$r_{id} = \frac{V_{id}}{I_b} = 2(r_{be} + R_s) \quad (1-3)$$

下面讨论共模放大倍数。在只有共模信号作用时，且电路完全对称的情况下，因为 $V_{o1} = V_{o2}$ ，故

$$V_o = V_{o1} - V_{o2} = 0$$

即双端输出时共模放大倍数

$$A_c = 0$$

单端输出时，根据前面的分析，因为发射极电阻相当于增加

了一倍，所以共模电压放大倍数

$$A_{e1} = \frac{V_{o1}}{V_{ie}} = \frac{-\beta R'_L}{R_e + R_o + (1 + \beta) 2 R_o}$$

通常 $(1 + \beta) \cdot 2 R_o \gg R_o + r_{be}$ ，于是上式可简化为

$$A_{e1} = - \frac{R'_L}{2 R_o} \quad (1-4)$$

对于带恒流源的差动放大电路， R_o 为恒流源的动态电阻，其值为(见图1-6)

$$r_{AB} = r_{ce} \left[1 + \frac{\beta R'_o}{r'_{be} + R'_o + R'_b} \right]$$

式中， r_{ce} 为 T_3 的动态电阻， $R'_b = R'_{b1} // R'_{b2}$ 。动态电阻 r_{AB} 的值很大，例如 $r_{ce} = 100 \text{ k}\Omega$ ， $r'_{be} = 1.4 \text{ k}\Omega$ ， $R'_o = 3.3 \text{ k}\Omega$ ， $R'_{b1} = 2.2 \text{ k}\Omega$ ， $R'_{b2} = 6.8 \text{ k}\Omega$ ， $\beta = 67$ ，可求出 $r_{AB} = 447 \text{ k}\Omega$ 。

对共模信号的抑制能力应该与对有用信号的放大能力相比较才有意义。共模抑制比 CMRR 就是将这两种能力进行比较的一个指标。其定义为

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_e} \right| \quad (1-5)$$

在理想对称情况下，双端输出时因 $A_e = 0$ ，故

$$\text{CMRR}_{(\text{双})} = \infty$$

单端输出时，将式(1-2)和式(1-4)代入到式(1-5)得到

$$\text{CMRR}_{(\text{单})} \approx \frac{\beta R_o}{R_o + r_{be}}$$

在任意信号输入时，根据线性电路的叠加原理，差动放大器的输出电压可以表示为

$$V_o = A_d V_{id} + A_c V_{ic}$$

双端输出时, 因 $A_c = 0$, 故

$$V_o = A_d V_{id} = A_d (V_{i1} - V_{i2}) \quad (1-6)$$

单端输出时

$$\begin{aligned} V_{o1} &= A_{d1} V_{id} + A_{c1} \cdot V_{ic} \\ &= A_{d1} \left[V_{id} + \frac{A_{c1}}{A_{d1}} V_{ic} \right] \\ &= A_{d1} \left[V_{id} + \frac{1}{\text{CMRR}} V_{ic} \right] \end{aligned}$$

若 $\frac{1}{\text{CMRR}} V_{ic} \ll V_{id}$, 则

$$V_{o1} \approx A_{d1} V_{id} = A_{d1} (V_{i1} - V_{i2}) \quad (1-7)$$

由此得出结论: 在电路完全对称、晶体管工作在线性放大区以及CMRR(单)很大的条件下, 不论采用何种方式输出, 差动放大器的输出电压都近似与两输入信号之差成比例。

图1-6的电路, 在两个输入端加上共模电压后($V_{i1} = V_{i2} = V_{ic}$), 虽然不会引起输出变化, 但共模抑制能力是有一定范围的, 使用时必需注意。

图1-6中, 两个差分管 T_1 、 T_2 的集电极电压 V_{c1} 或 V_{c2} 为

$$\begin{aligned} V_{c1} &= V_{c2} = E_c - I_c R_c \\ I_c &= \frac{I_o}{2} \end{aligned}$$

式中 I_o 为 T_3 管的集电极电流。如果 $V_{ic} \geq V_{c1}$ (或 V_{c2}), T_1 、 T_2 的集电结将正偏, 从而进入饱和。因此, 允许的共模电压的最大值为