

现代电子技术

常见故障分析与处理

何希才 苏文平 编著

科学技术文献出版社

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

本书主要介绍集成电路常见故障分析与处理,内容包括模拟集成电路、集成稳压器、数字集成电路等的基本应用,常见的故障分析与处理,设计制作时的实用技术,噪声及其抑制,并提供新型集成电路应用 50 多例。本书内容丰富,实用性强,可供高等学校有关专业师生、科技人员、工程技术人员、电子爱好者使用。

图书在版编目(CIP)数据

集成电路常见故障分析与处理/何希才,苏文平编著.
北京:科学技术文献出版社,1997.12
ISBN 7-5023-2849-1

I. 集… I. ①何…②苏… III. 集成电路-故障修复
IV. TN406

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 19375 号

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路 15 号 邮政编码 100038)

北京建华胶印厂印刷 新华书店北京发行所发行

1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 390 千字

科技新书目:416-156 印数:1—4000 册

定价:23.00 元

目 录

第一章 集成电路应用技术	(1)
1-1 概述	(1)
1-2 集成运放的应用	(1)
1-3 数字集成电路的应用	(21)
1-4 集成稳压器的应用	(45)
第二章 元器件故障的分析与处理	(51)
2-1 在用电阻设定增益的电路中,频率增高时,特性变坏	(51)
2-2 采用电阻分压器时频率特性变坏	(52)
2-3 滤波电路中采用叠层陶瓷电容器,每当调整时特性变坏	(53)
2-4 钽铝电容器发生爆裂	(53)
2-5 接入高通滤波电容时混入毛刺噪声	(54)
2-6 高通滤波电容爆裂后,电路的电压不升高	(55)
2-7 铝电解电容发热	(56)
2-8 峰值保持电路的保持特性不好	(56)
2-9 在 CMOS 逻辑电路中,使用无源延迟线时不匹配	(57)
2-10 平衡输出变压器的平衡度变差	(59)
2-11 铁氧体磁芯发热	(60)
2-12 采用齐纳二极管作为基准电压源,其稳定度差	(61)
2-13 齐纳二极管的电压加反,是否也能得到稳定基准电压	(62)
2-14 用齐纳二极管进行限幅时,频率特性变坏	(63)
2-15 驱动继电器的晶体管常被损坏	(64)
2-16 在运放的输出端接入晶体管电流放大器,输出短路时晶体管被损坏	(64)
2-17 TTL 电平不能激励功率 MOSFET	(65)
2-18 低损耗集成稳压器替换时常被损坏	(66)
2-19 同一类型的模拟开关替换时不能工作	(67)
2-20 8086 时钟集成芯片与 V30 互换时不能工作	(68)
2-21 ROM 写入时容易出错	(70)
2-22 继电器的触点产生火花,触点就会接触不良	(71)
2-23 100MHz 高频工作的电路中,继电器断开时隔离度变差	(72)
2-24 CdS 光电耦合器的温度特性变坏	(72)
2-25 防振电路中开关使用不良	(73)
第三章 运算放大器故障的分析与处理	(75)
3-1 在单电源工作的通用运放放大电路中,输出波形严重失真	(75)
3-2 由单电源工作运放组成差放电路时,电路不工作	(75)

3-3	单电源工作运放构成交流放大电路时,输出信号受电源电压变动的影	响	(76)
3-4	运放的输入过大时,输出波形改变极性		(78)
3-5	在用运放构成可变增益放大器中,改变增益设定时,频率特性也随之改	变	(79)
3-6	对于低漂移运放构成的高增益直流放大器,电源变动时漂移增大		(80)
3-7	微小电流输入放大器的温漂较大		(80)
3-8	在运放电路中,经过一段时间,电路不工作		(81)
3-9	半波整流电路中的输出变为全波整流电路的输出波形		(82)
3-10	在绝对值电路中,输出出现振幅差值		(84)
3-11	脉冲峰值检测电路的线性较差		(85)
3-12	在恒流输出电路中,输出电流和负载电阻变化时误差增大		(86)
3-13	运放的电源不一定是 $\pm 15\text{V}$		(87)
3-14	用宽频带运放构成缓冲器时,频率特性变坏		(88)
3-15	采用内部相位补偿的运放,容性负载时产生振荡		(89)
3-16	对于运放后接电流放大器的电路,接电容负载时电路振荡		(90)
3-17	在由高速、宽带运放构成的放大电路中,容性负载时特性变坏		(91)
3-18	宽带差动放大器的共模抑制比较低		(91)
3-19	低噪声运放的噪声仍很大		(92)
第四章	模拟电路的故障分析与处理		(94)
4-1	三端子集成稳压器构成的稳压电源,输出脉动电压大		(94)
4-2	在电源接通的同时,保护电路也动作		(95)
4-3	在处理宽频带信号电路中,输入阻抗随频率改变		(97)
4-4	在信号源阻抗高的电路中,采用 FET 源跟随器时,频率特性变坏		(97)
4-5	电路中采用处理脉冲信号的低通滤波器时,输出波形中出现尖峰		(98)
4-6	12dB/oct 的有源低通滤波器,对于频带以外的高频信号不能获得较大	的衰	
	减量		(100)
4-7	有源滤波器的动态范围窄		(101)
4-8	多重反馈型 BPF 的噪声大		(102)
4-9	在正弦波发生电路中,波形失真大		(102)
4-10	滤除电源交流声的陷波滤波器的滤波效果不好		(103)
4-11	在峰值保持电路中,不能完全复位动作		(105)
4-12	在由模拟开关构成的同步检测电路中,提高基准频率时,输出零漂电压就增	大	
			(105)
4-13	比较器 LM311 的输出波形不好		(107)
4-14	超过 100kHz 频率时,功率放大器的最大输出功率降低		(108)
4-15	工作一段时间后输出晶体管被损坏		(108)
4-16	在晶振电路中,频率为其 1/3 时发生振荡		(110)
4-17	环境温度降低时,晶振电路停止振荡		(111)
4-18	采用时钟音叉振子构成振荡电路时,电路不振荡		(112)
4-19	数字合成器的波形不好		(113)
第五章	数字电路的故障分析与处理		(114)

5-1	机械开关产生抖动的防止	(114)
5-2	逻辑电路中 CMOS 替换 LSTTL 时,电路不工作	(114)
5-3	在逻辑输入电路中 74HC04 换成 74LS04 时,电路误动作	(115)
5-4	用 TTL 输出驱动 CMOS 施密特电路时,电路工作不稳定	(116)
5-5	高速 CMOS 的不同厂家产品差异很大	(117)
5-6	对于高速 CMOS 逻辑电路波形产生过冲与振荡	(118)
5-7	高速 CMOS 接电容负载时延迟时间改变	(118)
5-8	单稳态多谐振荡器的输出脉冲宽度比设计值要窄得多	(119)
5-9	单稳态多谐振荡器的输出脉宽与定时电容值不成比例变化	(120)
5-10	在逻辑电路中,74123 的 TTL 换成 HC CMOS 的 74HC123 时,输出脉宽变宽	(120)
5-11	单稳态多谐振荡器的输出脉冲宽度变化	(121)
5-12	在时钟同步电路中采用 D 触发器时,不能消除抖动	(122)
5-13	数据锁存电路工作不同	(123)
5-14	电源接通时复位电路工作不稳定	(124)
5-15	用 TMZ84C011 时电源复位引起故障	(125)
5-16	在 GAL 的输入回路接 RC 时,电路不能工作	(126)
5-17	延长 GAL 的输出线时,出现高电平噪声	(127)
5-18	采用 Z84C015 的 PIO 时,数据被拔掉	(128)
5-19	采用时钟发生器 IC 进行定时中断,不能进行正确的定时	(129)
5-20	构成 ROM 保护电路时,电池后备的 RAM 工作	(131)
5-21	虽是相同的 PROM,但有不同部分	(132)
第六章	接口电路的故障分析与处理	(135)
6-1	模拟开关不能通过负电压	(135)
6-2	对于乘法型 DAC(AD7523),更换不同厂家产品时不工作	(136)
6-3	D/A 转换器的输出有脉冲状的噪声	(138)
6-4	蜂鸣器采用 FM 声源专用 IC 时,混入噪声,信噪比降低	(140)
6-5	用光电耦合器进行电气隔离时,电气上仍有联系	(141)
6-6	光电耦合器输出采用达林顿结构时,不能驱动 TTL 逻辑电路	(143)
6-7	高电压与信号电压隔离时,采用 SSR 经常产生误动作	(143)
6-8	采用隔离放大器时,无关的频率中出现噪声	(144)
6-9	脉冲发生器的输入回路采用光电耦合器时,速度低而引起误动作	(146)
6-10	SCSI 接口的终端负载引起误动作	(148)
6-11	串行接口的误动作	(150)
6-12	过采样简化了模拟滤波器,但波形得不到改善	(152)
6-13	单片机控制 LED 显示器时,在显示特定图形时停止显示	(152)
6-14	同轴电缆失配时,频率特性波动	(153)
第七章	实装时的故障分析与处理	(155)
7-1	在一块基板上无电源的 IC 仍能正常工作	(155)
7-2	在高阻抗电路中采用屏蔽线时,频率特性变坏	(155)

7-3	传感器输入端用接插件连接时产生噪声,不能获得传感器应有的性能	(156)
7-4	在基板上整流二极管紧靠安装时被烧毁	(156)
7-5	在测量装置上配置 CRT 时,噪声混入测量装置	(157)
7-6	CRT 画面受噪声的影响,画面晃动,颜色改变	(158)
7-7	在板 DC/DC 变换器的噪声易混入电路中	(159)
7-8	大电流/低电压的电路,工作不稳定	(159)
7-9	不能消除高速时钟噪声	(161)
7-10	电源线中的噪声不能消除	(162)
7-11	多个电路板连接时,基板地间的高频噪声不能消除	(162)
第八章	集成电路设计制作实用技术	(164)
8-1	数字集成电路设计制作实用技术	(164)
8-2	模拟集成电路设计制作实用技术	(168)
8-3	运算放大器应用电路设计制作技术	(172)
8-4	处理微弱信号电路的设计制作实用技术	(177)
8-5	高频电路设计制作实用技术	(180)
8-6	电源电路设计制作实用技术	(183)
8-7	集成电路设计制作时的接地技术	(188)
第九章	噪声及其抑制	(193)
9-1	噪声类型	(193)
9-2	线路滤波器与共模扼流圈	(198)
9-3	噪声的发生及其对策	(203)
9-4	屏蔽与接地	(205)
第十章	集成电路应用实例	(209)
10-1	低失真 10W 音频功率放大器	(209)
10-2	通用运放构成的高电压电路	(210)
10-3	采用功率运放构成的音频放大器	(211)
10-4	仪用差动放大器	(212)
10-5	可编程增益放大器	(214)
10-6	通用运放构成的 V-F/F-V(电压-频率/频率-电压)转换电路	(216)
10-7	0~-10V/1Hz~10kHz 的 V-F/F-V 转换电路	(217)
10-8	0~+10V/1Hz~10kHz 的 V-F/F-V 转换集成芯片	(218)
10-9	带输出电流缓冲器的前置放大器	(219)
10-10	低噪声磁头放大器	(221)
10-11	0.3W 音频功率放大器	(222)
10-12	2W 音频功率放大器	(224)
10-13	采用 LM1877 的 2W×2 功率放大器	(225)
10-14	10W 的音频功率放大器	(226)
10-15	电压反馈型高速宽带放大器	(227)
10-16	电流反馈型运放构成的高速宽带放大器	(228)
10-17	适用于容性负载的宽带放大器	(229)

10-18	宽带 VCA 电路	(229)
10-19	峰值保持电路	(231)

第一章 集成电路应用技术

1-1 概述

集成电路(IC)的显著特点是体积小、重量轻、工作可靠性高、寿命长。目前,集成电路不仅在电子计算机、通信、航空航天、自动控制等各个领域获得很大的发展和应用,而且早已进入家庭,如电视机、录像机、收录机和音响等各种电子电路中都得到广泛的应用。

集成电路的分类方法很多,若按制造工艺分,有半导体集成电路、膜集成电路和混合集成电路。半导体集成电路是目前生产量最大、品种繁多、发展迅速、应用最广泛的一种集成电路。半导体集成电路按其基本电路方式又可分为双极型和单极型两种。双极型集成电路又有TTL、DTL、ECL等多种电路。单极型集成电路又叫MOS集成电路,常见的MOS电路有PMOS、NMOS、CMOS等几种类型。

膜集成电路由于制造工艺复杂,成本较高,因而它的应用远不如半导体集成电路广泛。

若按集成度来分,半导体集成电路可分为小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)。小规模集成电路是指集成度少于10个门电路或少于100个元件的集成电路。中规模集成电路是指集成度在10~100个门电路之间,元件数目在100~1000个之间。大规模集成电路是指集成度在100个门电路以上,元件数目在1000个以上。超大规模集成电路是指集成度在1万个门电路以上或元件数目在10万个以上。

若按功能分有数字集成电路和模拟集成电路。数字集成电路是用来对数字信号进行运算和处理。它的基本单元是一些基本门电路,是以开和关两种状态或以高低电平来对应1和0两个二进制数字,并进行数字运算和存储,传输及转换。模拟集成电路是用来对模拟量进行运算和处理。按电路功能分为线性集成电路、非线性集成电路、功率集成电路和微波集成电路。按用途分有运算放大器、专用集成电路和集成稳压器等。

本书主要介绍模拟集成电路(运算放大器、集成稳压器)和数字集成电路常见故障的分析和处理以及应用技术。

1-2 集成运放的应用

1. 模拟集成电路使用注意事项

一般来说集成度越高,可靠性就越高(每个单元元件产生的故障率降低)。例如,相同功能的LSI比多个SSI组合的电路可靠性高。使用时应注意以下几点。

(1) 温度条件

各厂家产品目录都记载着集成电路保存与使用时所允许的温度范围。集成电路寿命主要受温度支配。保存温度,一般金属封装为 $-65^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$,塑料封装为 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$;相应的允许工作温度范围为 $-55^{\circ}\text{C}\sim+125^{\circ}\text{C}$, $0\sim+70^{\circ}\text{C}$,温度范围较窄。因此,消耗大电流的电路,一定要加散热器。

(2) 电气条件

集成电路耐热性差,过压、过流以及承受反向电压能力弱。因此,使用的电压与电流范围与产品目录中规定的最大额定值相比,应留有足够的余量。另外,在电路设计时,对于由外部电路产生的浪涌电压,感性负荷所引起的异常电压,一定要采取相应的措施。

(3) 机械使用条件

集成电路小型轻量,但能承受较强的机械应力。例如,可承受 0.2m/s^2 的力, $10\text{Hz}\sim 2000\text{Hz}$ 的振动以及 10m/s^2 的冲击力。然而,使用时应注意不要超过上述值,特别是管脚根部不要用力弯曲,外壳不要加较大压力。

(4) 实装与接线时注意事项

实装时,不注意焊接工艺,就会损坏集成电路。特别是加焊锡焊接时,超过最大额定温度与时间(一般温度为 260°C ,时间为 10 秒以内)就会过热,绝对禁止加无效的机械压力。

(5) 集成电路使用环境

用集成电路组装成系统电路时,希望在下述环境中使用。

- ①通风、散热条件好的地方,尽量避免温度过高。
- ②在有有毒气体、湿度较大的地方,应采取相应措施。
- ③避免机械振动和较大的冲击。
- ④在电源电压变化较大时,要注意过电压,并避免输出电路短路。

(6) 保存 MOS IC 注意事项

MOS IC 管脚的绝缘电阻非常高,若管脚开路保存,由于静电积累,会损坏内部 FET 管,因此要用铝箔包上保存。

2. 集成运放的基本使用方法

(1) 集成运放的电源供给方式

集成运放原则上有二个电源接线脚 $V+$ 和 $V-$, 但有不同的电源供给方式。虽电源供给方式不同,但原则上输入脚回规线务必固定于 $V+\sim V-$ 间某一点电位上。

① 电源供给方式

a. 对称双电源供给方式

运放电源多采用这种供电方式。相对于基准电位(地)的绝对值相等的正电源($+E$)与负电源($-E$)分别接于 $V+$ 和 $V-$ 的管脚上。输入脚的回规线接基准电位,接法如图 1-1 所示。从运放输出脚与基准电位之间取出输出电压。

这种方式可把信号源直接接到输入脚上,因此易于放大含有直流成分的信号,而输出电压振幅的有效范围可达到正负对称电源电压。

b. 非对称双电源供给方式

这种方式基本上与对称双电源供给方式相同。例如,运放使用的最大电源电压($V+\sim V-$ 间电压)为 30V , 输出信号电压需要的最大振幅为 $+15\text{V}$ 和 -5V , 这时采用 $+20\text{V}$, -10V 的非对称双电源供给方式比较合理(见图 1-2)。

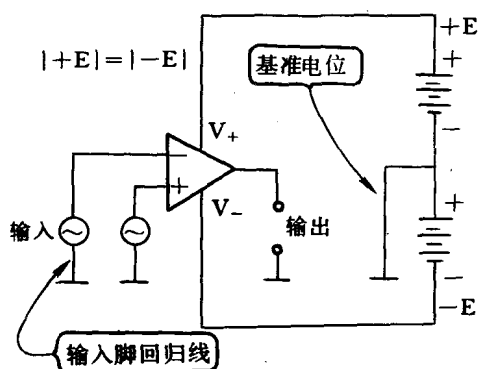


图 1-1 对称双电源供电

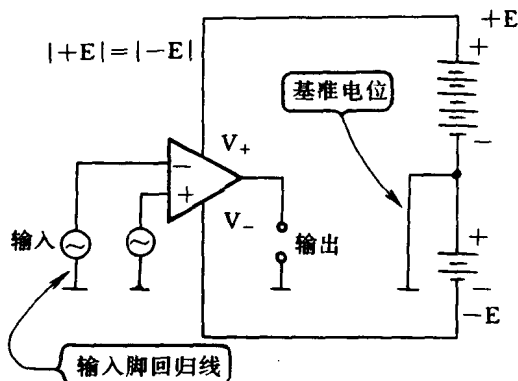


图 1-2 非对称双电源供电

c. 单电源供给方式

单电源供给方式如图 1-3 所示。这时输入脚的回规线要固定于 $V_+ \sim V_-$ 间某一电位。例如，在图 1-3 中用电阻 R_1 和 R_2 把电源电压 E 进行分压，确定回规线接点的电位。此时，这接点与基准电位间电压(图 1-3 中 R_2 两端电压)叫做偏置电压。 C_1 和 C_2 是降低偏置电源交流的内阻抗，需要隔掉输出中的直流成分时接入 C_3 。

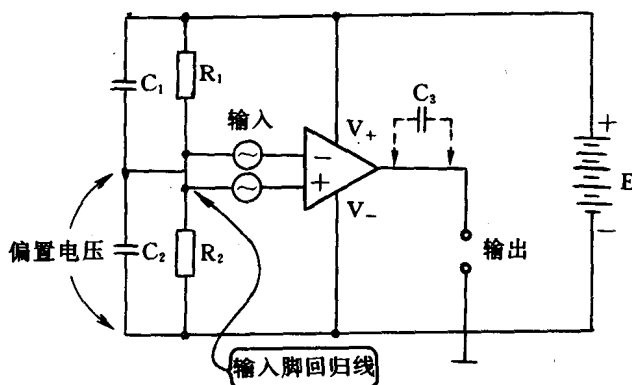


图 1-3 单电源供电

流经输出脚的负载电流的直流成分或低频成分的输出正负向振幅是不对称的，它极大影响流经 R_1 或 R_2 的电流，进而影响偏置电压。为减小这种影响，根据不对称的程度，减小 R_1 和 R_2 值，或者使内阻抗足够低，如图 1-4 所示。它是电压跟随器和 R_1 和 R_2 的分压电路的组合电路，实质上是把单电源变换为双电源。

②内部吸收电压与输出电压的有效范围

运放输出端的输出电压在电源电压的范围内。然而，为保证运放内部电路的有效状态，至少要在输出级晶体管与 FET 两端(运放电源与输出脚间)加最低限度的电压(见图 1-5 和图 1-6)。因此，运放输出有效电压范围是电源电压减去需要的最低限度的电压。这样，把输出电压

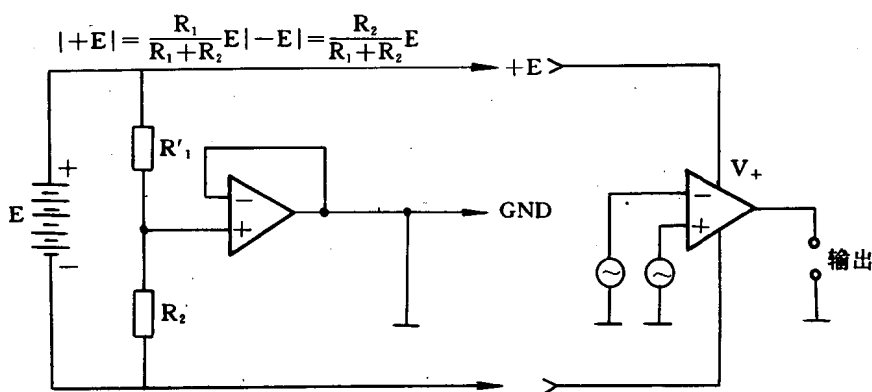


图 1-4 单电源变换为双电源

有效的电压变化范围称为输出电压的有效范围(图 1-5 中的 $\pm E_s$)。内部电路需要的电压称作内部吸收电压(图 1-6 中 $\pm E_{AB}$)。

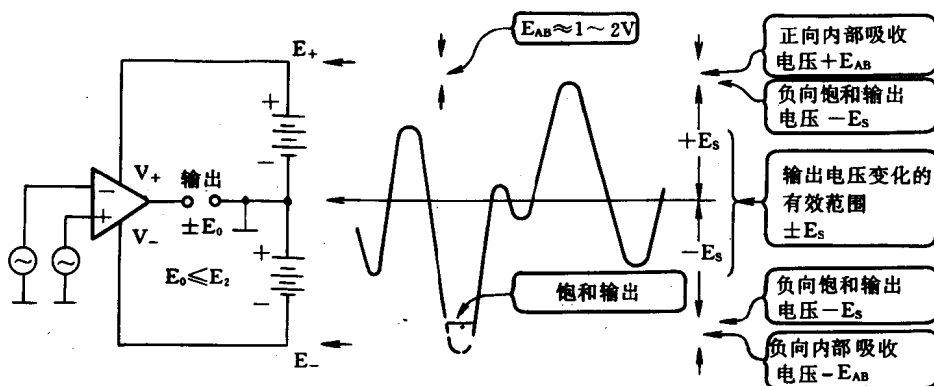


图 1-5 电源电压、内部吸收电压、输出电压有效范围之间的关系

有的运放内部负向吸收电压几乎接近于零,因此单电源供电时,可获得接近地电位的输出电压(如 LM324 等)。输出级为 CMOSFET 的运放,内部正向与负向吸收电压都接近于零(如 CA3140 等)。由图 1-6 可见,为保证运放有效工作,输出电压最大为 $\pm E_s$,则内部电路至少需 $\pm E_{AB}$ 以上电压。

③ 运放电源种类

目前,运放实用电源如下(见图 1-7)。

a. 桥式整流的对称双电源

一般是用桥式整流电路,将 10V 左右的交流电压经过整流获得对称正负直流电压的办法,如图 1-7(a)。当输入 220V 交流电压的变化达上限时, $V_+ \sim V_-$ 间电压不允许超过运放的最大额定电压。交流电压的变化达下限时,即使是最大负载,仍能保证运放输出电压的动态范围,按此原则设定电压范围。

为此,一般在整流输出加上稳压电路,供给运放稳定的电源电压。

b. 开关集成稳压器,DC-DC 变换器

为提高电源效率,减轻重量,目前广泛采用开关集成稳压器。这种稳压器适合用作各种电源。然而,这种电源最大缺点是在输出端存在脉冲状噪声电压。

最近,市场上销售的 DC-DC 变换器,是把数字电路的 5V 直流电压变换为 $\pm 15\text{V}$ 的对称电压,用作运放电源。其开关频率为几十到几百 kHz,因此,一定要选用加有高频噪声抑制措施的变换器。

c. 电池电源

电池大致分为一次电池(干电池)和二次电池(蓄电

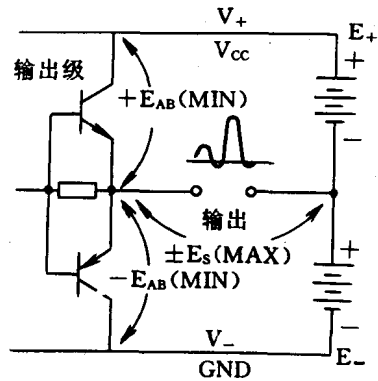


图 1-6 内部吸收电压 E_{AB} 的说明

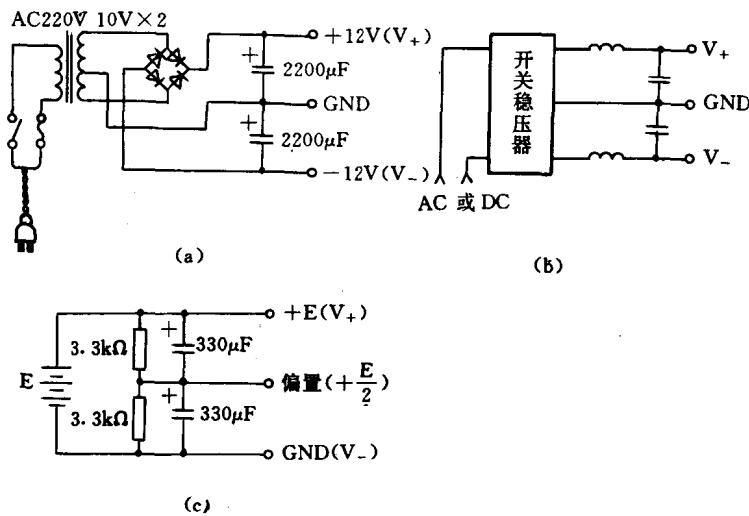


图 1-7 运放供电电源的选用

(a) 对称双电源; (b) 采用开关稳压器的电源; (c) 采用电池的电源

池),它们都是优质直流电源。但蓄电池使用不方便,而干电池直流容量小,可选作低耗型运放电源。

目前因干电池电压稳定性好、电流容量增大,运放广泛采用干电池供电。

运放使用的电源电压范围如下:通用运放:双电源为 $\pm 3\text{V} \sim \pm 18\text{V}$,单电源为 $6\text{V} \sim 36\text{V}$;单电源运放:双电源为 $\pm 1.5\text{V} \sim \pm 18\text{V}$,单电源为 $3\text{V} \sim 36\text{V}$;低耗运放:双电源为 $\pm 0.5\text{V} \sim \pm 18\text{V}$,单电源为 $1\text{V} \sim 36\text{V}$ 。

④ 电源的旁路与一点接地

对电源的最基本要求是电压稳定,内阻低,内部的残余噪声电压足够小。但装配上还要注意如下有关事项(见图 1-8)。

a. 一点接地

各单元电路的地应接在一点。电源的地,或者前级放大电路的地应选用噪声电压最小的接地点,一般选外壳(金属)作为接地点。多点接地易产生噪声。

b. 电源的旁路

低频信号的旁路电容为几个运放共用,采用图 1-8 中所示的大容量的电解电容。但对于几

十千赫以上的高频信号,各运放的 $V+$ 和 $V-$ 引脚与接地点之间要接上 $0.01\sim 0.1\mu\text{F}$ 的旁路电容。若不注意,电压突变时往往工作不正常。

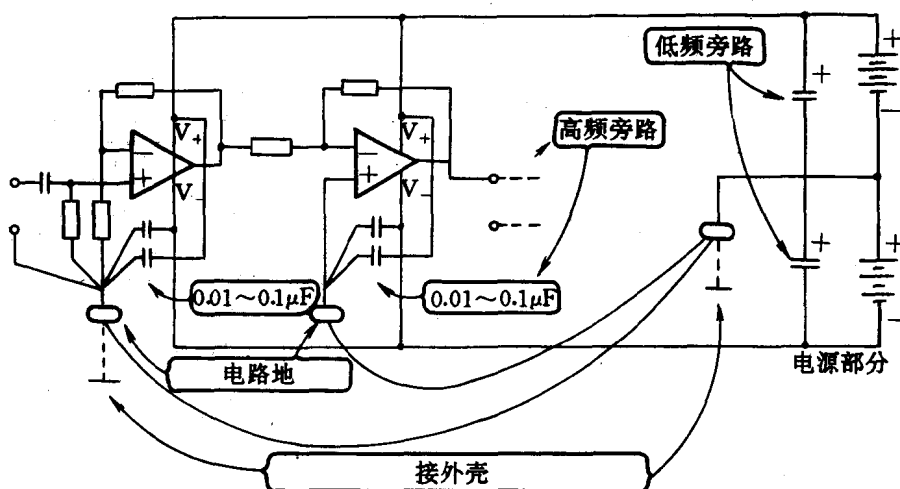


图 1-8 运放电源旁路与一点接地方法

(2) 输入/输出间相位关系及虚短路

为了正确分析有运放的电路工作原理,必须弄清运放的输入/输出电压的相位关系以及输入端虚短路的概念。

① 输入/输出电压的相位关系

运放基本上为差动放大器,加在运放同相输入端和反相输入端的电压与其输出电压之间的相位关系(或极性)如下。同时也可定义同相/反相输入端。

a. 同相输入端的电压相对反相输入端的电压是正方向增大,则输出电压是正方向增大,即为正极性输出。

b. 反相输入端的电压相对同相输入端的电压是正方向增大,则输出电压是负方向增大,即为负极性输出。

现分析图 1-9 所示的 10 倍放大倍数的运放。在任何情况下,运放都是把同相与反相输入端的电压差放大 10 倍。当同相输入电压大于反相输入端电压时,输出为正极性;同相输入端电压小于反相输入端电压时,输出为负极性。这样,了解同相与反相输入间相对电压的变化,就可知相应的输出电压的变化,这对于分析正负反馈电路的工作原理是很有用的。

② 虚短路

运放使用时一般加负反馈,选定外电路的常数可获得任意值的放大倍数,而运放自身(开环增益)放大倍数非常大,近似为无限大。因此,运放接入实际放大电路中,输入输出都能在有效范围内正常工作,输入输出间电压相互关系与图 1-9 有些不同,说明见图 1-10。

运放接入放大电路中,因为运放自身放大倍数为无限大,而输出电压为有效范围内的有限值。因此,同相与反相输入间差动输入电压接近于零,即为无限小。在正常工作状态下,可以认为同相与反相输入端是同电位,即为虚短路。

现假设差动输入电压是微小变化(有限值),经运放放大,应在输出端获得极大的输出电压。输出电压直接通过外部负反馈环馈送到输入端,使差动输入电压经常保持为零的平衡状态。反过来说,在加有负反馈的放大电路里,虚短路是适用的。

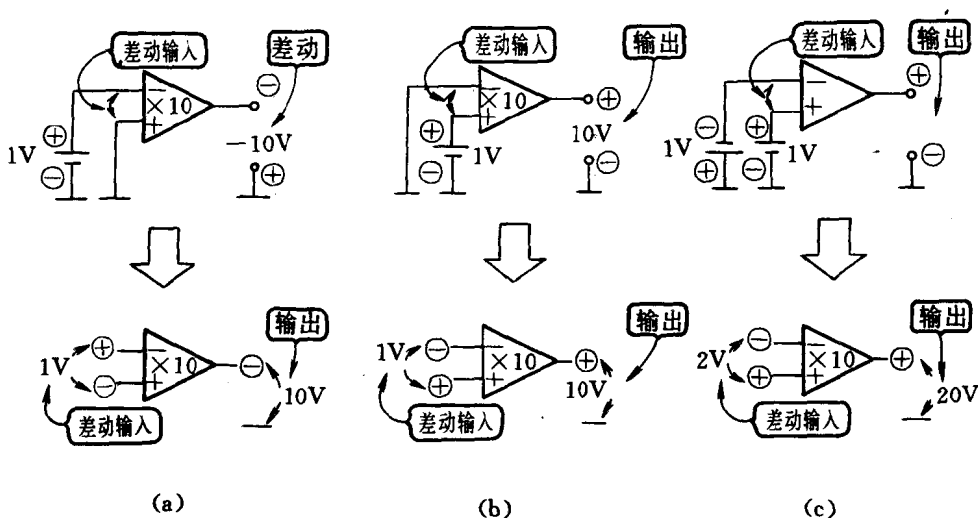


图 1-9 差动输入电压与输出电压之间相位(极性)关系

(a)反相输入大于同相输入;(b)反相输入小于同相输入;(c)反相输入等于同相输入

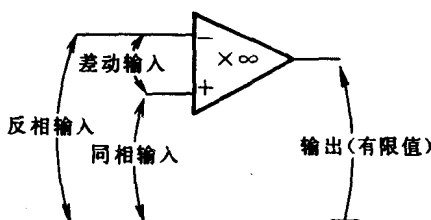


图 1-10 虚短路

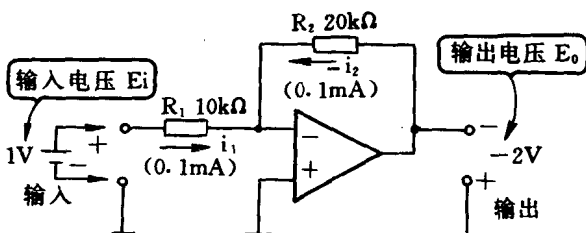


图 1-11 反相放大电路

(3)反相放大情况

图 1-11 是反相放大的基本电路,其输入电压与输出电压相位相反。运放同相输入端接基准电位(地),输入电压 E_i 经 R_1 加到反相输入端。这样,反相输入端相对于同相输入端仅是 E_i 的变化量。然而,这变化电压立即放大为反极性输出电压。输出电压经 R_2 电阻反馈送到反相输入端。因此,反相输入端与同相输入端经常保持同电位,即平衡状态。当然,这是认为运放自身的电压放大倍数(开环增益)为无限大,反相输入端电压相对于实际的同相输入端电压,可认为与 E_i 同极性,是无限接近于零的电压。

①电压放大倍数(A_v)

反相输入端与地同电位,设流经 R_1 的电流为 i_1 ,流经 R_2 的电流为 i_2 ,输入电压为 E_i ,输出电压为 E_o ,则 $i_1 = E_i/R_1$, $i_2 = E_o/R_2$ 。

根据克希霍夫定理, $i_1 + i_2 = 0$ (反相输入端的输入阻抗为无限大,则输入电流为零),即 $i_1 = -i_2$,电压放大倍数 $A_v = \frac{E_o}{E_i} = \frac{R_2 \times i_2}{R_1 \times i_1} = \frac{R_2 \times i_1}{R_1 \times i_1} = \frac{R_2}{R_1}$

(“-”表示极性相反)。即外接电阻 R_1 和 R_2 之比值决定电压放大倍数 A_v 。

②输入电阻(R_i)

这是从输入信号源 E_i 看放大电路的电阻, 因为 E_i 电压产生电流 i_1 , 据 $i_1 = E_i / R_i$ 知, 输入电阻为 $R_i = E_i / i_1 = R_1$ 。需要注意的是, 不要让信号源 E_i 负载过重, 即 R_1 值不要选得太小。

③输出电阻(R_o)

运放输出内阻非常低。应用时加有负反馈电路, 因此, 输出电阻可视为零。最大也只有几欧姆以下。

④电压放大倍数(A_v)的频率特性

一般来说, 运放自身开环增益非常大, 而频率特性较差。用通用运放构成电压放大倍数为 10~100 倍(20dB~40dB)的反相放大器, 小信号放大时频率约 100kHz 而大信号放大时, 在频率为 10kHz~20kHz 时, 放大倍数开始降低其它放大电路也有同样倾向因此, 有必要根据应用电路选择不同种类运放。一般来讲, 运放消耗电流越大或者 R_1 和 R_2 阻值越小, 频率特性越好。

(4)同相放大情况

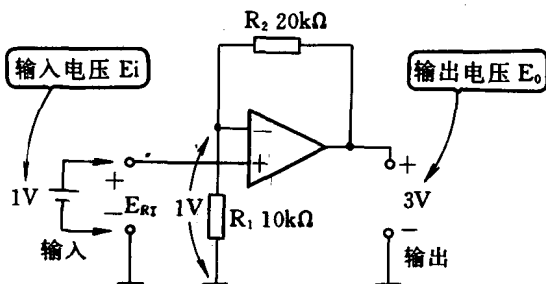


图 1-12 同相输入放大电路

同相放大基本电路如图 1-12。输入电压 E_i 与输出电压 E_o 同相位。输入电压 E_i 加在基准电位(地)与同相输入端之间, 输出电压 E_o 经 R_1 和 R_2 分压反馈送到反相输入端。

①电压放大倍数(A_v)

考虑到虚地, 则同相输入端的输入电压 E_i 与 R_1 两端电压 E_{R1} 相位相同, 大小相等。因而, 输入电压 E_i 与输出电压 E_o 之间有下列关系:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} \times E_o = E_i, \text{ 所以 } A_v = \frac{E_o}{E_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

由上述可知, 同相放大电路的放大倍数 A_v 也由负反馈环里的电阻 R_1 与 R_2 之比值决定。但是, 反相放大电路的反相放大倍数 A_v 可能小于 1, 但同相放大电路的放大倍数 A_v 不可能小于 1。

②输入电阻(R_i)

同相放大电路的输入电压 E_i 加在同相输入端与地之间。因此, 从输入信号源 E_i 看输入电阻 R_i , 它等于运放同相输入端的输入电阻。一般来说, 这电阻非常大 ($M\Omega$ 以上)。输出电阻 R_o 、频率特性与反相放大电路基本相同。

(5)差动放大电路

图 1-13 为差动放大电路。这种电路可看作是反相放大电路和同相放大电路的组合, 见图 1-14。

先设同相输入端的电压 $E_{i2} = 0$, 若忽略 E_{i2} 的内阻, 这时图 1-13 所示的电路可以看成是图 1-14(a) 所示的反相放大电路。同相输入端与地之间并联接入电阻 R_3 和 R_4 , 因为同相输入端的输入电阻非常大, 同相输入端可认为直接接地。 E_{i1} 的相应的放大电压为 E_{o1} , 它与 E_{i1} 的相位相反, 大小由 R_1 和 R_2 之比值决定, 即 $E_{o1} = A_v \times E_{i1} = (R_2 / R_1) E_{i1}$ 。

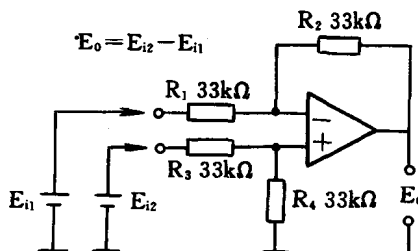


图 1-13 差动输入放大电路

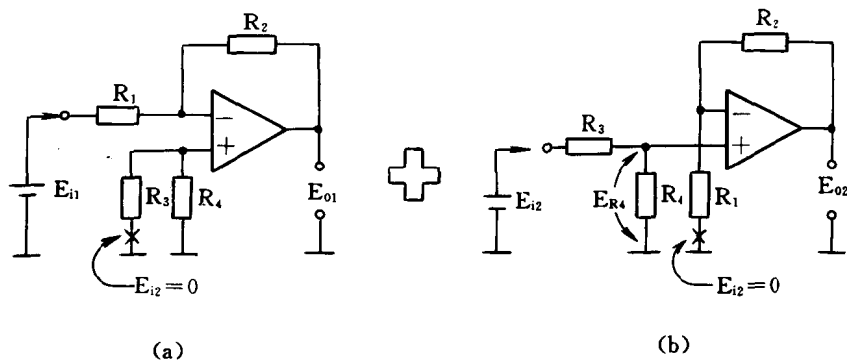


图 1-14 差动放大电路看作反相放大电路和同相放大电路的组合

(a)看作反相放大电路;(b)看作同相放大电路

再设反相输入端的输入电压 $E_{i1}=0$,可看作图 1-14(b)所示的电路,它是 E_{i2} 通过 R_3 和 R_4 分得的电压 E_{R4} 作为运放的输入电压,再把 E_{R4} 进行放大的同相放大电路。当然, E_{i1} 的内阻可以忽略,对于 E_{R4} 的放大倍数 $A_{V2}=E_o/E_i=1+(R_2/R_1)$ 。因此, E_{i2} 放大后的电压 $E_{o2}=A_{V2} \times E_{R4}$ 。

①差动放大电路的输出电压(E_o)

现分析 E_{i1} 和 E_{i2} 都不为零时的输出电压 E_o 。限于运放工作在有效电压范围内,可用重叠原理得 $E_o=E_{o1}+E_{o2}$,而 $E_{o1}=-(R_2/R_1)E_{i1}$, $E_{o2}=[(R_1+R_2)/R_1 \cdot R_4/(R_3+R_4)]E_{i2}$,特别在 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 时, $E_o=E_{i2}-E_{i1}$ 。

②从 E_{i1} 和 E_{i2} 看差动放大电路的输入电阻

从 E_{i2} 看,输入电阻就是 R_3+R_4 。当然,同相输入端的输入电阻为无限大。从 E_{i1} 看,输入电阻求法稍微复杂一些。如果 $E_{i2}=0$,从 E_{i1} 看,输入电阻等于 R_1 。这是因为反相输入电压等于地电位。

然而, $E_{i2} \neq 0$,反相输入端电压等于 E_{R4} ,因此, E_{i1} 形成的电流经 R_1 流入反相输入端,它随着 E_{i1} 与 E_{i2} 电压差向着增大方向变化。特别是 E_{i1} 为较大的正电压, E_{i2} 为较大的负电压,或者反之,从 E_{i1} 看,反相输入端的输入电阻远小于 R_1 。

(6)电压跟随器

电压跟随器是输入阻抗高,输出阻抗近似为零,电压放大倍数 $A_v=1$ 的同相放大电路。它无放大作用,只进行阻抗变换。因此,常用作缓冲放大器。

图 1-15 是电压跟随器的演变过程,图 1-15(c)为电压跟随器电路,输出电压全部反馈到反相输入端,即 100% 的负反馈。

这种电路容易自激,为防止跟随器自激,有的在运放内加有相位补偿电路,或者外接产品目录中规定容量的补偿电容。

(7)电流差动型集成运放

迄今为止,所讨论的集成运放都是以电压差动形式作为输入信号。为了使输入电压为零时输出也为零,并且也能得到正负两种输出电压,需要采用两组电源;为了减少漂移和提高增益,又增添了许多管子,这样就使集成电路的结构复杂,成本提高。其实在有些情况下,并不需要精度很高的集成电路,也不需要输入电压为零时输出为零,但是希望电源简化到只用一种,而且适应范围比较大(例如 $4V \sim 36V$),这时就可以考虑用电流差动型的集成运放电路。它的简化原理如图 1-16。

①电流差动型运放电路工作原理

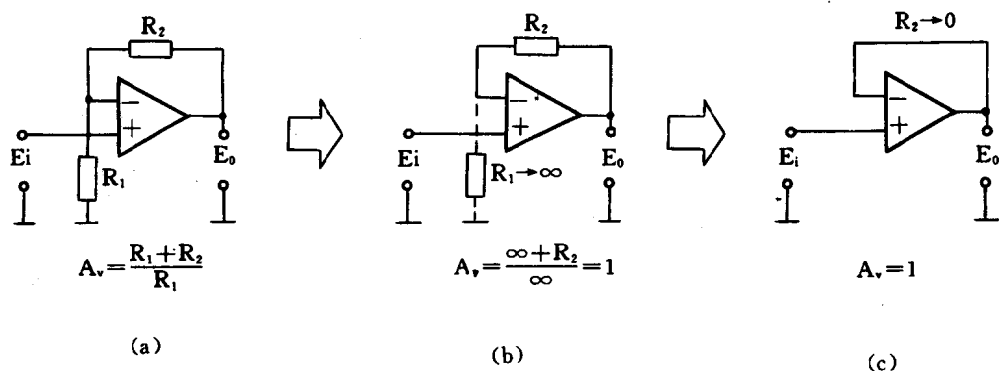


图 1-15 电压跟随器

(a)同相放大电路;(b) $R_1=\infty$;(c)电压跟随器

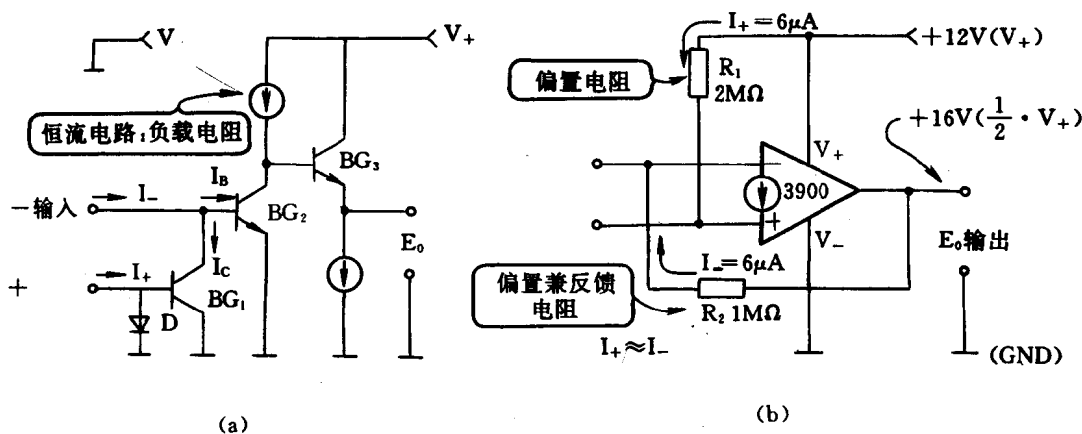


图 1-16 电流差动型运放电路

(a)电流差动型输入电路;(b)偏置电流设置方法

图 1-16 中的二极管 D 与晶体管 BG₁ 构成电流镜像电路,同相输入端电流 I₊ 常等于 BG₁ 集电极电流 I_c。现分析反相输入端的电流 I₋,因 $I = I_c + I_B$,而 $I_c = I_+$,所以 $I_B = I - I_+$ 。I_B 经 BG₂ 和 BG₃ 放大,得到输出电压 E_o,则 E_o 与电流 I 和 I₊ 之差成比例关系。即图 1-16(a)电路就成为电流差动型放大电路。

② 电流差动型运放的偏置电流

现在市场上出售的电流差动型运放是用单电源供电。因此,同相与反相输入端要提供偏置电流,方法如图 1-16(b)所示。

无输入信号时,输出直流电压 E_o 应设置为电源电压 V₊ 的一半。电压差动运放的正负两输入回规线接在 V₊~V 某一点电位(偏置电压)上,但电流差放,正负两输入端的偏置电流可以相同。即无输入信号时, $I_+ - I_- = 0$ 。

由图 1~16(b)可见,同相输入端的偏置电源用 V₊,反相输入端的偏置电源用 E_o。即是加直流负反馈,因此,可得到非常稳定的偏置电流。无信号输入时, E_o 为 V₊ 的一半,偏置电阻 R₂ 的值也可以设为 R₁ 的一半。这时 R₂ 除作为偏置电阻外,还兼作负反馈电阻,因此,根据偏置与负反馈要求选择 R₂ 电阻值。