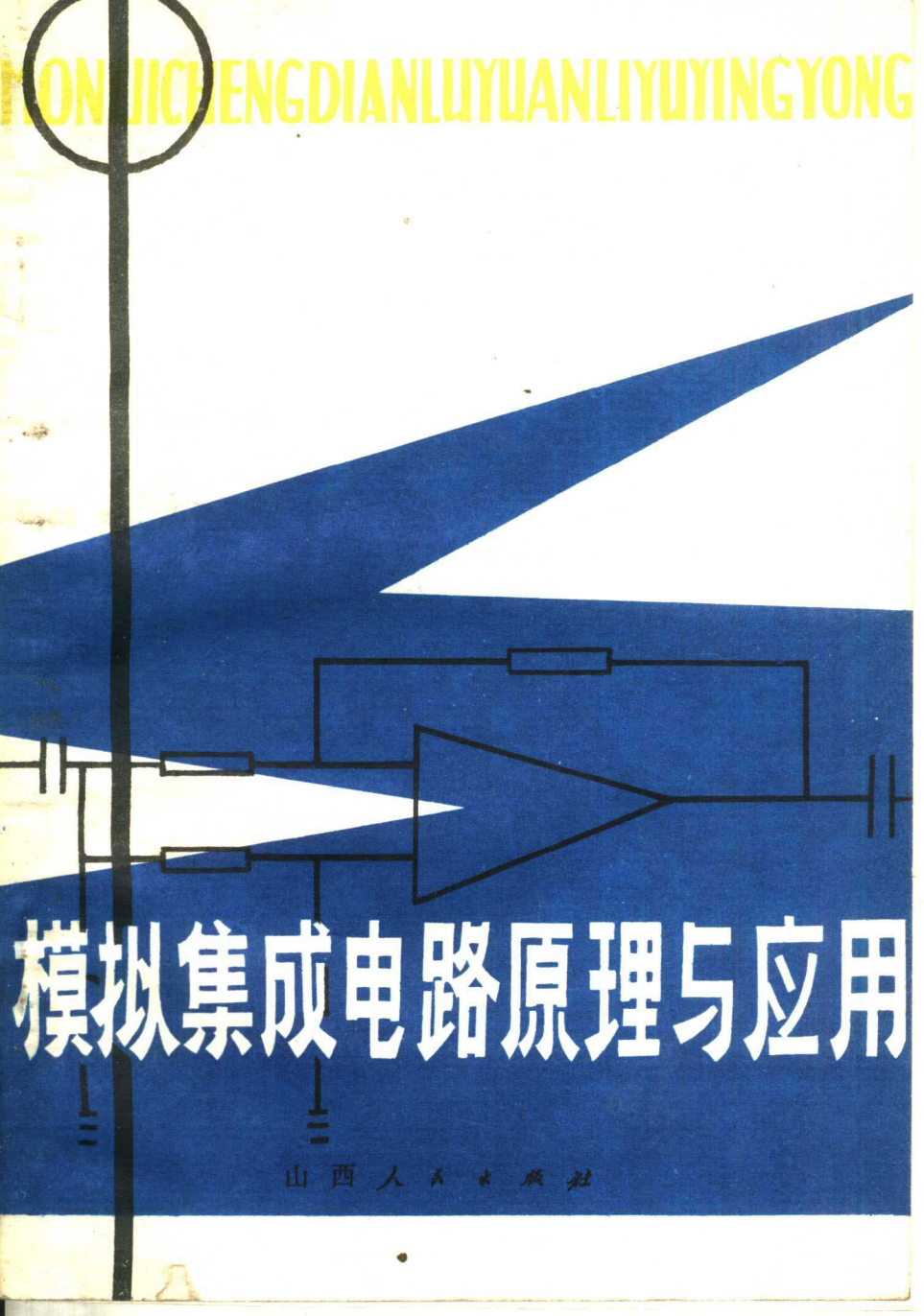


AN JICHENG DIAN LU YUAN LI YU YING YONG



模拟集成电路原理与应用

山西人民出版社

模拟集成电路原理与应用

乔廷元 张 琇

山西人民出版社

模拟集成电路原理与应用

乔廷元 张 琇

山西人民出版社出版 (太原并州路七号)

山西省新华书店发行 山西新华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 6.375 字数: 137千字

1981年11月第1版 1981年11月太原第1次印刷

印数: 1—10,000册

书号: 15088·135 定价: 0.65元

前 言

半导体集成电路，是近年来发展极为迅速的一种新型电路。所谓集成电路，是把一定数目的电阻、电容和晶体管元件集成在某一基片上，并具有某种功能的电路。集成电路的历史虽然不长，但由于它具有可靠性高、体积小、重量轻、功耗小等独特的优点，便于在国防、科学技术以及国民经济的各个部门广泛应用，从而得到了人们的高度重视，成为当前电子设备微小型化和提高工作可靠性的重要技术途径。目前，在空间研究、宇宙探索、电子计算机和通讯设备等方面的应用日益广泛，所起的作用日益显著。

电子技术的发展，经历了四个时代，一九〇四年出现的电真空器件为电子器件的第一代，第二代是一九四八年出现的晶体管，第三代便是一九五九年出现的集成电路，第四代则是一九六四年出现的大规模集成电路。分子电路是目前国内外探索的新器件之一，这一新技术将使电子元件跨入新的一代。

本书以作者在太原市举办的“集成电路”专题学习班讲义为基础，并参考了复旦大学的讲义《集成电路分析与设计》，以及国内外有关的资料编写而成。

本书从基础电路讲起，逐步阐述各种单元电路以及运算放大器和其它集成电路，并附有有关电路的应用实例。文字

通俗易懂，理论性、实用性较强。

在编写过程中，曾得到不少同志的帮助，并请吉三成教授审阅，在此一并表示感谢。

由于水平所限，缺点错误在所难免，希望读者批评指正。

作 者

1981年于太原工学院

目 录

第一章 模拟集成电路的概述	(1)
第二章 模拟集成电路基础电路	(4)
第一节 差分放大电路	(4)
一、差分放大电路的基本特点	(4)
二、差分放大电路参数的性能分析	(5)
第二节 负反馈放大电路	(24)
一、负反馈放大器的概念及分类	(24)
二、负反馈对放大器性能的改善	(26)
三、集成电路中常用的负反馈放大电路	(32)
第三节 直流运算放大器基础	(35)
一、运算放大器的概念及基础运算	(35)
二、差分输入直流运算放大器及相加点抑制 原理	(42)
三、运算放大器的特性参数计算	(44)
第三章 模拟集成电路的基本单元电路	(53)
第一节 差分输入级电路	(54)
一、基本差分输入级电路	(54)
二、复合差分输入级电路	(55)
三、互补差分输入级电路	(59)
四、场效应晶体管差分输入级电路	(62)
五、四种差分输入级电路性能比较	(65)

第二节 恒流源(电流源)电路	(65)
一、恒流源的概念	(65)
二、恒流源的主要作用	(65)
三、恒流源的种类与特点	(66)
第三节 电平位移电路	(73)
一、采用恒流源进行电平位移	(74)
二、采用P-N-P管进行电平位移	(76)
三、采用稳压管进行电平位移	(76)
第四节 有源负载	(77)
第五节 输出级电路	(79)
一、对输出级电路的要求	(79)
二、常用的输出级电路	(79)
第四章 运算放大器	(86)
第一节 运算放大器电路分析	(86)
一、5G922电路分析	(87)
二、 μ A709电路分析	(97)
三、几种双端输出变成单端输出电路	(102)
第二节 运算放大器主要参数的测试方法	(106)
一、静态功耗 P_0	(106)
二、运算放大器的失调与漂移	(107)
三、运算放大器的开环增益	(111)
四、放大器的输入阻抗、输出阻抗	(115)
五、差分运算放大器的共模抑制比	(120)
第三节 运算放大器的频率特性及闭环稳定性	(121)
一、放大器的开环频率特性和相位特性	(122)
二、闭环放大器的频率特性和闭环稳定	

性条件	(130)
三、放大器频率补偿技术	(133)
第四节 运算放大器使用的一般问题	(145)
一、集成运算放大器的电源	(145)
二、相位补偿	(147)
第五章 其它模拟集成电路	(149)
第一节 集成宽带放大器	(149)
一、集成宽带放大器的基本原理	(149)
二、集成宽带放大器典型线路介绍	(156)
第二节 集成稳压电源	(161)
一、晶体管直流稳压电源	(161)
二、集成稳压电源简介	(163)
三、集成稳压电源的主要组成部分	(164)
四、集成稳压电源举例	(177)
第六章 模拟集成电路的应用	(180)
第一节 运算放大器在模拟运算电路中的应用 ..	(180)
第二节 运算放大器在整流和滤波电路中的 应用	(181)
第三节 运算放大器在自动控制系统中的应用 ..	(183)
第四节 电视机专用集成电路	(185)
第五节 模拟集成电路在数字系统中的应用	(188)
一、比较器	(188)
二、数据传输	(190)
三、数据转换器	(191)

第一章 模拟集成电路的概述

早期，把数字电路以外的集成电路统称为线性集成电路。一九六七年，美国国际电子技术委员会才正式提出了模拟电路的概念，即把数字电路以外的电路称为模拟电路。模拟电路又分为线性电路和非线性电路两类：线性电路是指输出对于输入讯号的变化成线性关系的电路，如直流、低频、高频放大器、差分放大器和运算放大器等；非线性电路是指输出对于输入讯号的变化不成线性关系的电路，如对数放大器、振荡、混频、检波器、调制器和集成稳压电源等。

表示数量或变量的物理量，如长度、转角和电压等，称为模拟量。模拟集成电路就是以电压或电流为模拟量，并对该模拟量进行放大、转换的集成电路。数字集成电路则是用电讯号，开、关二态表示二进位的数值（0 和 1），并作其逻辑运算。

模拟集成电路种类繁多，用途极广，根据目前国内外的生产和应用，大致有以下几个方面：

1. 直流运算放大器

直流放大器能够放大频率很低的讯号或直流变化量，即低频响应从零开始。

直流运算放大器是由高倍率的直流放大器加深度反馈元件构成的，它能够完成反相、比例放大、加法、减法、微分

和积分等各种数学运算。

2. 集成稳压电源

稳压电源是电子设备中不可缺少的一部分，特别是精密仪器，更要求稳定度较高的电源。随着整机集成化的发展，稳压电源必然向集成化发展。近年来，由于工艺上的革新，线路上的改进，特别是散热和封装问题的逐步解决，使功率集成电路得到迅速发展，实现了大电流输出的集成稳压电源。这是目前很受重视的一种集成电路。

3. 在数字显示的转换技术和自动控制系统中，广泛采用了模拟比较器电路。

4. 在通讯数据传输中，采用了差分放大器，大大提高了抗干扰能力。

5. 电视机、收音机及医疗设备集成电路。

随着我国电子技术的日趋普及，电视机、收音机，医疗器械的产量与质量正在不断增加与提高，为了适应电子工业大量发展的需要，开始试制与批量生产电视接收机专用集成电路。电视接收机采用集成电路，可以节省大量的元件，缩短装配整机的流程，提高劳动效率。同时，由于集成技术工艺上的特点，可以使通常用分立元件组装的电路难于满足整机要求的局面扭转过来，从而提高了整机的质量指标。总之，采用集成电路是整机大量生产中一条多、快、好、省的途径。

5G32 电路，能完成电视机伴音系统中中频限幅放大和鉴频的任务，它与5G31配用可以完成整个伴音系统的功能，与原分立元件的伴音系统相比，不仅体积大为缩小，更重要的是比分立元件电路节省了近 $\frac{2}{3}$ 以上的元件，装配与调试时间

缩短4倍，性能较之分立元件电路优越，系统功耗降低一半，从而大大简化了电视机伴音系统的设计与装配。这些都显示了集成电路的前景是光明的。

以上是模拟集成电路的大致分类和应用情况。这里着重以运算放大器为主进行阐述，通过运算放大器线性和非线性电路的应用，说明各种电路的信号组合和运算。运算放大器是最典型的模拟集成电路，具有代表性。对运算放大器进行认真分析研究，可以掌握分析电路的一般规律。

第二章 模拟集成电路基础电路

模拟集成电路种类多、用途广、电路结构复杂，最基本的基础电路是由差分放大电路、负反馈放大电路和运算放大器构成的。

第一节 差分放大电路

差分放大电路，是模拟集成电路基本信号处理和增益级最佳结构的电路形式。该电路放大差模信号（大小相等，极性相反的两个信号），对共模信号（大小相等，极性相同的两个信号）有抑制作用。差分放大电路是一个“有差就动，无差不动”的放大电路。集成差分对具有卓越匹配，能获得良好的平衡。

差分对晶体管的工作电流，由具有温度补偿的可控恒流源供给，可以保证电路的增益，稳定直流工作点和其它重要特性，使其适于所要求的温度范围。该差分电路的电源为对称的正、负双电源，也可以采用单电源工作，但要求用一个外部的电压激励器网络来偏置晶体管基极，从而获得单端输出或平衡输出。

一、差分放大电路的基本特点

（一）差分放大电路的两个差分对之间具有良好的匹配，

是有效抑制各种干扰和克服零点漂移最好的电路形式。

(二)差分放大电路,可以避免采用高阻值电阻器(集成电路中高阻值电阻不易制造),因为该电路增益是电阻比的函数,而不是实际电阻值的函数。

(三)工作温度范围较宽,这是由于元件制造在同一个硅片上,元件的温度系数可以获得良好匹配。

(四)差分放大电路是用于模拟集成电路输入级,增益级和模—数转换电路耦合级的最佳电路。因此,适用于各种设备。如信号限幅、倍频、调幅、混频、信号发生、增益控制和转换比较结构等。

二、差分放大电路参数的性能分析

图(2-1-1a)是基本差分电路的电路图,图(2-1-1b)是其交流等效电路。 T_1 、 T_2 两个晶体管组成差分对, r_{bb} 为其基区电阻, r'_{be} 为其共发射极时发射结正向结电阻, R_{c1} 、 R_{c2} 分别为 T_1 、 T_2 的负载电阻, R_E 为发射极耦合电阻, R 为信号源内阻。信号由 T_1 和 T_2 的基极输入,集电极输出。 T_1 、 T_2 的输入信号分别为 V_{b1} 、 V_{b2} ,输出信号分别为 V_{c1} 、 V_{c2} 。设 R_b 为信号源内阻 R_G 和差分对基区电阻 r_{bb} 之和。

(一)交流分析

根据交流等效电路(图2-1-1b)列方程:

$$V_{b1} = i_{b1}(R_b + r'_{be}) + i_e R_E \quad (1)$$

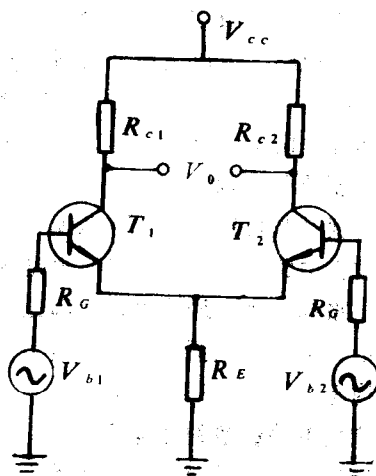
$$V_{b2} = i_{b2}(R_b + r'_{be}) + i_e R_E \quad (2)$$

$$i_e = i_{e1} + i_{e2} \quad (3)$$

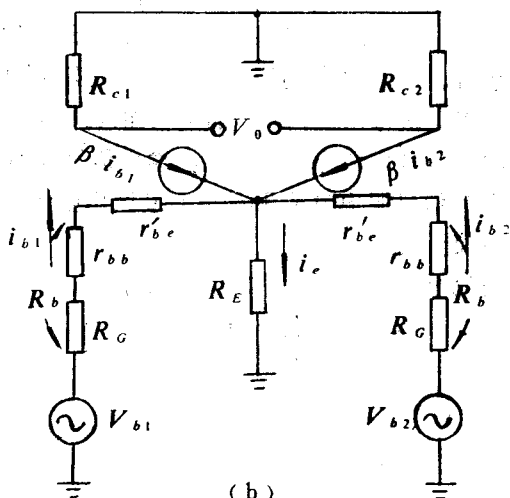
$$i_{e1} = (1 + \beta)i_{b1} \quad (4)$$

$$i_{e2} = (1 + \beta)i_{b2} \quad (5)$$

由(3)(4)(5)式得



(a)



(b)

图 (2-1-1)

$$i_e = i_{e1} + i_{e2} = (1 + \beta)(i_{b1} + i_{b2}) \quad (6)$$

由(1)+(2)得

$$V_{b1} + V_{b2} = (i_{b1} + i_{b2})(R_b + r'_{be}) + 2i_e R_E \quad (7)$$

将(6)代入(7)

$$V_{b1} + V_{b2} = (i_{b1} + i_{b2})[(R_b + r'_{be}) + 2(1 + \beta)R_E]$$

$$i_{b1} + i_{b2} = \frac{V_{b1} + V_{b2}}{R_b + r'_{be} + 2(1 + \beta)R_E} \quad (8)$$

由(1)-(2)得:

$$V_{b1} - V_{b2} = (i_{b1} - i_{b2})(R_b + r'_{be})$$

$$i_{b1} - i_{b2} = \frac{V_{b1} - V_{b2}}{R_b + r'_{be}} \quad (9)$$

设 R_E 很大, 则 $(1 + \beta)R_E \gg R_b, r'_{be}$

(8)+(9)得:

$$2i_{b1} = \frac{V_{b1} + V_{b2}}{2(1 + \beta)R_E} + \frac{V_{b1} - V_{b2}}{R_b + r'_{be}}$$

$$\approx \frac{V_{b1} - V_{b2}}{R_b + r'_{be}}$$

$$\therefore i_{b1} \approx \frac{V_{b1} - V_{b2}}{2(R_b + r'_{be})}$$

(8)-(9)得:

$$i_{b2} \approx \frac{V_{b2} - V_{b1}}{2(R_b + r'_{be})}$$

T_1 、 T_2 集电极对地的输出电压:

$$V_{c1} = -\beta R_{c1} i_{b1} = -\frac{(V_{b1} - V_{b2}) \cdot \beta R_{c1}}{2(R_b + r'_{be})} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_{c2} &= -\beta R_{c2} i_{b2} = -\frac{(V_{b2} - V_{b1}) \cdot \beta R_{c2}}{2(R_b + r'_{be})} \\ &= \frac{(V_{b1} - V_{b2}) \cdot \beta R_{c2}}{2(R_b + r'_{be})} \end{aligned} \quad (11)$$

T_1 、 T_2 两集电极之间的输出电压为：

$$V_0 = V_{c1} - V_{c2} = \frac{-(V_{b1} - V_{b2}) \cdot (R_{c1} + R_{c2}) \cdot \beta}{2(R_b + r'_{be})} \quad (12)$$

结果分析：

1. 差分放大器在差分输入，单端输出时， T_1 、 T_2 集电极（至地）的输出电压 V_{c1} 和 V_{c2} 幅度相同，相位相反，都正比于输入信号的电压差。

2. 在平衡输出时， T_1 、 T_2 两集电极之间的输出电压 V_0 ，也正比于输入信号的电压差，但放大倍数较单端输出时要大，若 $R_{c1} = R_{c2} = R_c$ 时，其放大倍数增大一倍。

3. 单端输入 V_{b1} （至地），单端输出 V_{c1} 为反相型；单端输出 V_{c2} 为同相型。单端输入，单端输出与差分输入，单端输出其输入阻抗、电压增益完全相同。

（二）转移特性

电路的输入量与输出量之间的关系称为转移特性。表示输入电压与输出电流之间的关系特性，称为电流转移特性，反映输入电压与输出电压之间的关系特性，称为电压转移特

性。由图 (2-1-2) 所示, 晶体管的发射极电流 I_e 与发射结电压 V_{be} 之间具有如下关系:

$$e^{\frac{q}{KT} V_{be}} \gg 1$$

$$I_e = I_s (e^{\frac{q}{KT} V_{be}} - 1) \approx I_s e^{\frac{q}{KT} V_{be}}$$

$$= I_s \exp \left(\frac{q}{KT} V_{be} \right)$$

式中 I_s 为集电极开路时, 发射结的反向饱和电流, 它是由工艺参数决定的常数。

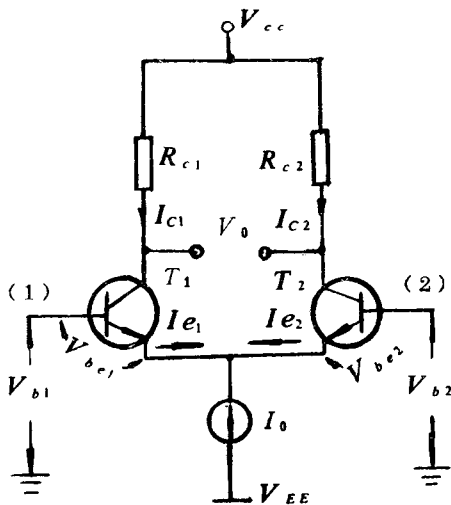


图 (2-1-2)

K ——波尔兹曼常数, 即 $K = 1.38 \times 10^{-23}$ 瓦·秒/°C

T ——绝对温度

q ——电子电荷, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 库伦