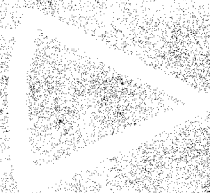


运算放大器

原理和应用



科学出版社

内 容 简 介

本书是一本介绍晶体管运算放大器设计和应用的专门论著。全书共十一章和三个附录。前五章系统地分析了与晶体管运算放大器设计有关的一些问题：差动放大级的信号特性，差动级的输入误差信号和热漂移，运算放大器的各单级、多级运算放大器以及相位补偿。这些问题对分析和设计集成电路运算放大器也是颇有助益的。后六章详细介绍了运算放大器的应用：线性电路应用，非线性电路的运算放大器，有源滤波器，模-数、数-模和采样网络，波形产生器以及调制和解调。这些应用对集成电路运算放大器同样也是适用的。附录中推导了有关公式并给出了各种指标的定义及其测试方法。

本书可供从事模拟和模拟数字混合计算技术，自动控制和测量技术的工人、工程技术人员和高等院校有关专业师生参考。

J. G. Graeme G. E. Tobey L. P. Huelsman

OPERATIONAL AMPLIFIERS

Design and Applications

McGraw-Hill, 1971

运 算 放 大 器

设计和应用

〔美〕J. G. 格雷姆 等编

何同杰 王志林 译
李伯虎 余汝成

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张：16 1/4

印数：0001—26,630 字数：368,000

统一书号：15031·179

本社书号：1042·15—8

定价：2.00 元

译 者 的 话

遵照毛主席关于“洋为中用”和“抓革命,促生产,促工作,促战备”的教导,我们翻译了《运算放大器——设计和应用》这本书。

运算放大器是电子模拟和模拟数字混合计算机中的核心部件。此外,在自动控制和测量技术中它也得到广泛的应用。

晶体管运算放大器是继电子管运算放大器之后出现的第二代产品。本书是关于晶体管运算放大器设计和应用的一本专门论著。书中在进行设计讨论时,重点是分析晶体管差动级的特性,如差动信号特性、共模特性、失调电压和失调电流等。在做应用介绍时是从具有双(反相和非反相)输入端的运算放大器入手,系统介绍了由运算放大器派生出来的各种部件。这就使得本书的基本内容对第三代产品——集成电路运算放大器的设计和应用也不乏其参考价值。

在本书翻译过程中承蒙吴朔平先生热情指导和耐心帮助,对此我们表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限,缺点错误在所难免,望广大读者批评指正。

译 者

目 录

第一部分 设 计

第一章	差动放大级的信号特性	1
1-1	低频差动信号特性	2
1-2	高频差动信号特性	8
1-3	差动级的共模特性	19
1-4	差动级的不平衡和共模抑制	27
1-5	差动级设计和特殊差动级	37
第二章	差动级的输入误差信号和热漂移	51
2-1	双极晶体管级的输入失调电压和漂移	52
2-2	场效应晶体管级的输入失调电压和漂移	59
2-3	输入偏置电流、失调电流和漂移	69
2-4	等效输入噪声电压和电流	81
第三章	运算放大器的各单级	94
3-1	输入级	94
3-2	中间级	99
3-3	输出级	109
3-4	输出电流限制	118
第四章	多级运算放大器	124
4-1	增益和频率响应	125
4-2	直流输入误差与热漂移	136
4-3	噪声特性和最佳噪声性能条件	144
4-4	斩波-稳定与变容二极管载波型运算放大器	159
第五章	相位补偿	175
5-1	频率稳定性和博德图分析	176

5-2	相位补偿方法	186
5-3	频率响应峰值和阶跃响应	198

第二部分 应 用

第六章 线性电路应用210

6-1	差动直流放大器	210
6-1-1	用一个运算放大器的差动直流放大器	211
6-1-2	用多个运算放大器的差动直流放大器	214
6-2	电桥放大器	217
6-3	模拟积分器	222
6-4	微分器	228
6-5	线路驱动放大器	230
6-6	交流耦合反馈放大器	232
6-7	电压-电流转换器	235
6-8	基准电压源和调节器	239
6-9	电压调节器	240
6-10	电流放大器	243
6-11	电荷放大器	244

第七章 非线性电路的运算放大器247

7-1	二极管限幅器网络	247
7-1-1	基本限幅器模型	247
7-1-2	串联限幅器	249
7-1-3	并联限幅器	251
7-2	反馈限幅器	253
7-2-1	电阻比率法	253
7-2-2	齐纳二极管反馈限幅器	255
7-2-3	精密限幅器	256
7-2-4	限幅器的应用	259
7-3	二极管函数产生器	262
7-3-1	二极管函数产生器的应用	269
7-4	对数放大器	273

7-4-1 对数放大器的应用	278
7-5 模拟乘法和除法	280
7-5-1 对数乘法器	280
7-5-2 四分之一平方乘法器	282
7-5-3 三角形平均乘法器	284
7-5-4 时间分割乘法器	285
7-5-5 变跨导乘法器	287
7-5-6 电流比率乘法器	289
7-5-7 模拟除法器	292
7-5-8 平方器和平方根器	292
第八章 有源滤波器	295
8-1 有源滤波器的特性	295
8-2 极点对、网络功能和参数	297
8-2-1 低通网络函数	297
8-2-2 高通网络函数	299
8-2-3 带通网络函数	299
8-2-4 带阻网络函数	300
8-3 滤波器的实现	301
8-3-1 无限大增益多路反馈电路	302
8-3-2 可控源电路	311
8-3-3 无限大增益状态变量电路	321
8-3-4 负导抗变换器电路	327
8-4 各种有源滤波器的调谐	330
8-5 放大器性能怎样影响滤波器性能	333
8-6 电路元件	337
8-6-1 电阻	337
8-6-2 电容	339
8-7 滤波器设计和调谐表	341
第九章 模-数、数-模和采样网络	348
9-1 多路装置	348
9-1-1 使用 MOS 场效应晶体管开关的多路装置	349
9-1-2 使用结型场效应晶体管开关的多路装置	350

9-1-3 其它的设计考虑	351
9-1-4 差动输入多路装置	353
9-1-5 多路装置的倍增	355
9-2 数-模转换器	357
9-2-1 数-模转换器设计	357
9-2-2 误差源	360
9-2-3 双极性工作原理	361
9-2-4 相乘数-模转换器	362
9-3 模-数转换器	363
9-3-1 使用数-模转换器的模-数转换器	364
9-3-2 计数斜坡式模-数转换器	367
9-3-3 连续计数斜坡式模-数转换器	368
9-3-4 逐次逼近式模-数转换器	368
9-3-5 双斜率积分器模-数转换器	370
9-4 采样-保持组件	372
9-4-1 采样-保持原理	372
9-4-2 采样-保持电路	374
9-5 峰值检波器	377
9-5-1 设计考虑	378
9-5-2 非反相峰值检波器电路	379
9-5-3 反相峰值检波器电路	380
9-5-4 “复原”和“保持”状态电路	382
9-5-5 峰-峰检波器	384
9-6 比较器	384
9-6-1 越零检测器	384
9-6-2 电平检测器	386
9-6-3 窗孔比较器	390
9-6-4 幅度分类器	392
第十章 波形产生器	396
10-1 方波产生器	396
10-1-1 使用一个运算放大器的方波产生器	397
10-1-2 高性能方波产生器	399

10-1-3 低成本方案	400
10-2 方波和三角波产生器	400
10-2-1 使用一个运算放大器的方波和三角波产生器	401
10-2-2 通用函数产生器	402
1. 方波和三角波产生器	403
2. 锯齿波产生器	406
10-2-3 二极管桥式三角波产生器	406
10-3 正弦波产生器	408
10-3-1 文氏电桥振荡器——一般叙述	408
10-3-2 精密的文氏电桥振荡器	409
10-3-3 便宜的文氏电桥振荡器	410
10-3-4 求积振荡器	412
1. 使用非线性限幅的求积振荡器	414
2. 具有幅值控制的求积振荡器	415
10-3-5 相移振荡器	418
10-4 脉冲电路——单稳态多谐振荡器	421
10-4-1 使用一个放大器的单稳多谐振荡器	421
10-4-2 精密的宽范围单稳多谐振荡器	424
第十一章 调制和解调	426
11-1 振幅调制	426
11-1-1 使用乘法器的振幅调制	426
11-1-2 脉冲振幅调制	427
1. 使用晶体管门的脉冲振幅调制	427
2. 使用精密限幅器的脉冲振幅调制	430
11-2 频率调制	430
11-2-1 电压控制振荡器	431
1. 高性能电压控制振荡器	431
2. 宽范围的电压控制振荡器	434
11-2-2 电压-频率转换器	435
1. 方波输出的电压-频率转换器	435
2. 脉冲序列输出的电压-频率转换器	438
3. 高性能的电压-频率转换器	440

11-3 脉宽调制器	442
11-3-1 用方波载波输入的电压-脉宽调制器	442
11-3-2 电压-脉宽转换器	445
11-4 解调	445
11-4-1 振幅解调	445
1. 压缩载波信号的相敏解调	446
2. 脉冲采样解调器	448
11-4-2 频率调制信号的解调	452
1. 时间平均式频率调制的解调	452
2. 测量周期式频率调制的解调	452
3. 使用锁相技术的频率调制的解调	454
11-4-3 脉冲宽度解调	457

附 录

附录 A 基础线路理论	459
A-1 基本概念	459
A-2 基本的反相电路	460
A-3 非反相电路	462
A-4 开环增益	463
A-5 频率响应和稳定性	465
A-6 共模信号考虑	468
A-7 输入失调电压	470
A-8 输入偏置电流	471
A-9 输入噪声电压和电流	472
A-10 输出阻抗	473
A-11 输入阻抗	474
A-12 其它参数	476
附录 B 性能特性的定义和测试	477
B-1 开环差动特性	477
B-1-1 开环电压增益 A	477
B-1-2 输出电阻 R_o	481

B-1-3	差动输入电阻 R_I	482
B-1-4	差动输入电容 C_I	483
B-1-5	单位增益带宽 f_c	484
B-2	输出信号响应	484
B-2-1	额定输出	484
B-2-2	摆率 S_r	485
B-2-3	全功率响应 f_p	486
B-2-4	调整时间 t_s	487
B-2-5	过载恢复时间	488
B-3	输入误差信号	489
B-3-1	输入失调电压 v_{os}	489
B-3-2	输入失调电压漂移	490
B-3-3	输入偏置电流 I_B	490
B-3-4	输入偏置电流漂移	491
B-3-5	输入失调电流 I_{os}	491
B-3-6	输入失调电流漂移	492
B-3-7	输入噪声电压 e_n	492
B-3-8	输入噪声电流 i_n	493
B-4	共模特性	494
B-4-1	共模抑制比 CMRR	494
B-4-2	共模输入电阻 R_{icm}	495
B-4-3	共模输入电容 C_{icm}	496
B-4-4	额定共模输入电压	496
附录 C	有源滤波器的敏感度	497
C-1	敏感度原理	497
C-1-1	敏感度的定义	497
C-1-2	低通敏感度函数	499
	单极点	499
	复数极点对	499
C-1-3	高通敏感度函数	499
	单极点	499
	复数极点对	500
C-1-4	带通敏感度函数	500

复数极点对	500
C-1-5 一些敏感度恒等式	501
C-2 敏感度函数的应用	502

第一部分 设计

第一章 差动放大级的信号特性

图 1-1 所示的差动放大级，对加在它的输入端之间的差动信号提供高的电压增益，而对两个输入端的相同电压表现的增益却很低。从而，希望的差动信号被放大时，几乎不受附加共模信号的影响。这类附加信号，往往是由长线中流过的信号电流或噪声干扰引起的。但是，正如将要叙述的，它们基本上被差动级抑制了。借助于它的共模信号特性，差动级也提供输入和输出静态电压电平的隔离。因为它的共模增益低，在输入端共模信号的变化虽大，而两个输出信号的静态或平均电平的变化却很小。

在本章，我们推导双极晶体管和场效应晶体管 (FET) 差动级的信号特性。

凭借差动级与共射和共源放

大器的相似性，用简化的方法导出这些放大级的差动增益、共模增益和有关的频率响应。然后分析由差动电路不平衡引起的共模信号灵敏度，即共模抑制品质因数。扼要介绍了有关

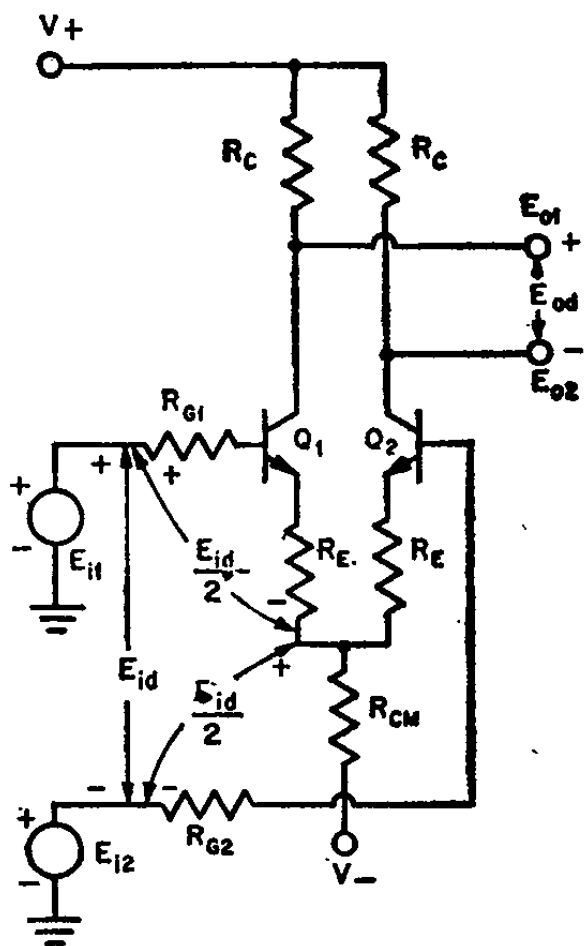


图 1-1 基本的双极晶体管差动级

差动放大级设计的这些和其它一些考虑,在本章和其它各章还提到了相应的详细分析.最后,通过叙述改善专门特性的几个差动放大级的设计结束本章.

1-1 低频差动信号特性

因为差动放大级是由图 1-1 中的 Q_1 和 Q_2 两个共射放大器组成的,从信号放大方式考虑,可以应用大家熟悉的共射分析.差动信号 E_{id} 加在两个晶体管的信号源电阻、发射极-基极结和发射极电阻上.如图所示,对在小信号下匹配的电阻和晶体管来讲, E_{id} 在放大级每边各降一半.元件不匹配的影响,在 1-4 节研究.差动输入信号的等分,在两个晶体管的发射极中引起相等而又相反的电流变化,致使由共模偏置电阻 R_{CM} 供给的总的级电流不变.相应的集电极信号电流引起相等而又相反的输出信号电压 E_{o1} 和 E_{o2} ,从而产生差动输出信号 E_{od} .

既然 R_{CM} 里的电流不受差动信号影响,在差动分析时可以忽略 R_{CM} ,于是剩下图 1-2a 的简化共射电路.输入信号的一半加到每个共射晶体管的输入电路上,并给出

$$\frac{E_{id}}{2} A_1 - \frac{-E_{id}}{2} A_2 = E_{o1} - E_{o2} = E_{od}$$

其中 A_1 和 A_2 是作为共射放大器的晶体管 Q_1 和 Q_2 的电压增益.

在电路平衡时, $A_1 = A_2$, 则差模增益变成

$$A = A_1 = \frac{E_{od}}{E_{id}}$$

因此,差动信号的放大系数等于差动电路的单边增益.把信号加到与差动电路的单边相同的共射放大器上,得到的增益等

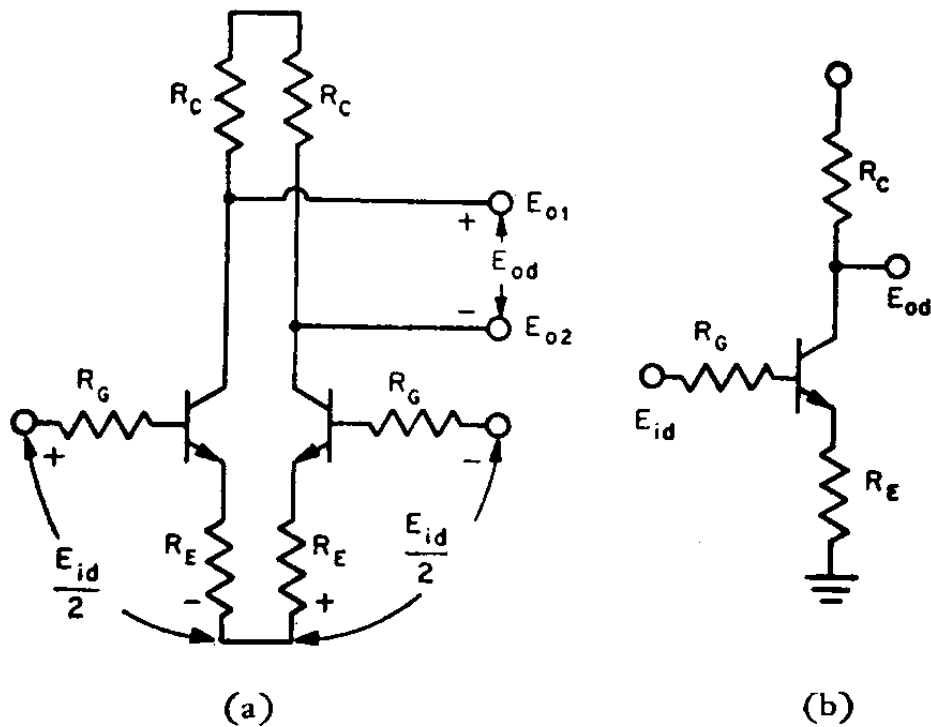


图 1-2 (a)平衡差动方式的信号电路和(b)等效的单晶体管电路

于该级的增益。因此，利用适于图 1-2b 等效电路的共射分析^[1]，便可求出差模增益。

图 1-3 的晶体管模型包括了对低频共射放大器是重要的一些原始特性。在该模型中没有考虑基极电阻 r'_b ，因为它太小，对将要讨论的共射特性影响不大。为表示普通的小信号晶体管特性，图中用符号 $\overline{T}$ 定义了典型值。反偏的集电极-基极结电阻即电阻 $r_c(1 - \alpha)$ ，它传导从集电极到基极的反馈电流并使输出电流产生器带上负载。把这个模型用于等效

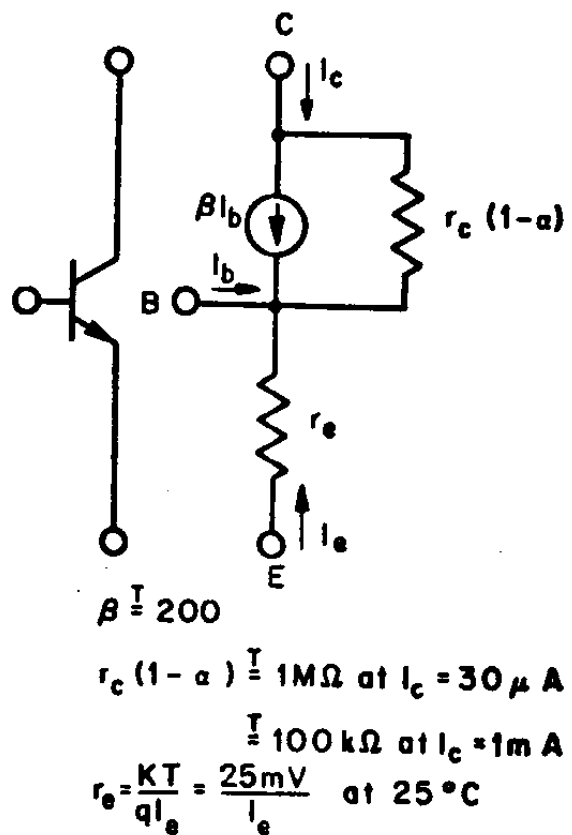


图 1-3 双极晶体管模型

共射电路，在 $R_c \ll r_c(1 - \alpha)$ 条件下，得出图 1-4 的增益分

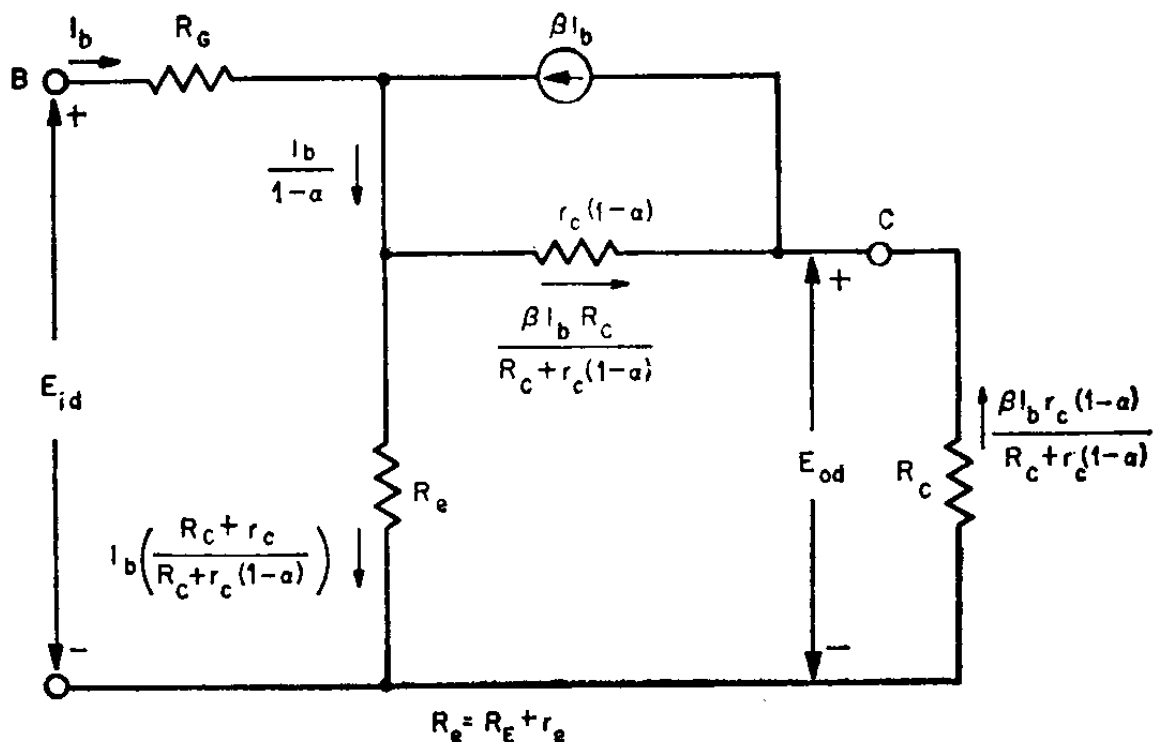


图 1-4 增益分析电路

析模型。根据所示电流,差动级的低频差模电压增益是

$$A_o \approx \frac{-\alpha R_C r_e}{R_e(R_C + r_e) + R_G[R_C + r_e(1 - \alpha)]} \quad (1-1)$$

其中

$$R_e = R_E + r_e \quad R_e \ll r_e(1 - \alpha)$$

通常集电极电阻远小于 $r_e(1 - \alpha)$, 则增益表达式简化为

$$A_o \approx \frac{-R_C}{R_e + R_G/\beta} \approx 10-100 \quad (1-2)$$

其中 $(1 - \alpha) \approx 1/\beta$ 。集电极电流大于 $30\mu\text{A}$ 时, $r_e(1 - \alpha)$ 降到兆欧以下, 为使偏置电压降与电源电平相适应, 集电极电阻也必须减小。因此, 在大多数情况下, 近似的增益表达式是准确的。在近似法不准时, 用简化式求出的增益偏大。

通过与共射晶体管作同样的比较, 可以求出差动级的差动输入和输出电阻。注意, 串联晶体管级的差动输入电阻是由图 1-4 单边级表示的共射放大器输入电阻的两倍。根据该

电路的共射输入电阻,差动输入电阻是

$$R_i \approx 2\beta R_e \frac{R_c + r_c}{\beta R_c + r_c} \quad \text{当 } (1 - \alpha) \approx 1/\beta \quad (1-3)$$

$$R_i \approx 2\beta R_e \quad \text{当 } R_c \ll r_c(1 - \alpha) \approx r_c/\beta \quad (1-4)$$

当集电极电阻接近 $r_c(1 - \alpha)$ 时,输入电阻下降,表现出反向集电极电阻 r_c 的反馈影响. 与差动级有关的两个输出电阻,是集电极电阻和出现在输出端上的合成电阻的并联值. 晶体管输出端显出的高电阻,表明该级把电流驱动到集电极电阻去的能力. 输出端之间,以串联方式出现的两个晶体管的输出电阻,为图 1-5 所示共射情况的两倍. 把对所示电路求出的电阻加倍,就得出了呈现在两个集电极电阻上的差动输出电阻.

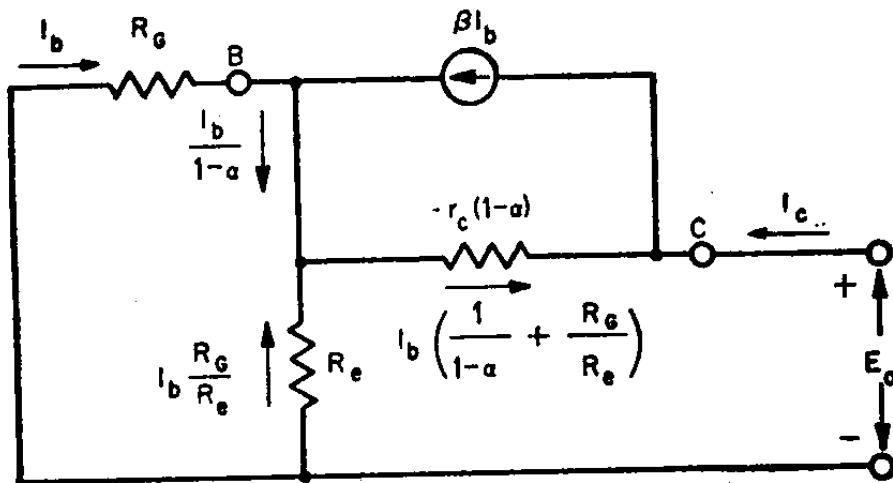


图 1-5 共射输出电阻分析电路

$$R'_o = 2 \frac{R_e R_G + R_e r_c + R_G r_c(1 - \alpha)}{R_e + R_G}$$

$$R'_o \approx 2r_c \frac{R_e + R_G/\beta}{R_e + R_G} \quad \text{当 } R_G \ll r_c \quad (1-5)$$

输出端的净输出电阻,能说明在负载两端产生电压的能力. 这个电阻是两个集电极电阻和方程 (1-5) 电阻的并联.

$$R_o \approx \frac{2r_c R_c (R_e + R_G/\beta)}{r_c (R_e + R_G/\beta) + R_G R_c} \quad \text{当 } R_c \ll r_c \quad (1-6)$$

$$R_o \approx 2R_c \quad \text{如果 } R_c \ll r_c(1 - \alpha) \quad (1-7)$$

通过结型场效应晶体管 (JFET) 差动级和共源场效应晶体管之间的类似比较, 可得出该级的特性. 在图 1-6 中规定

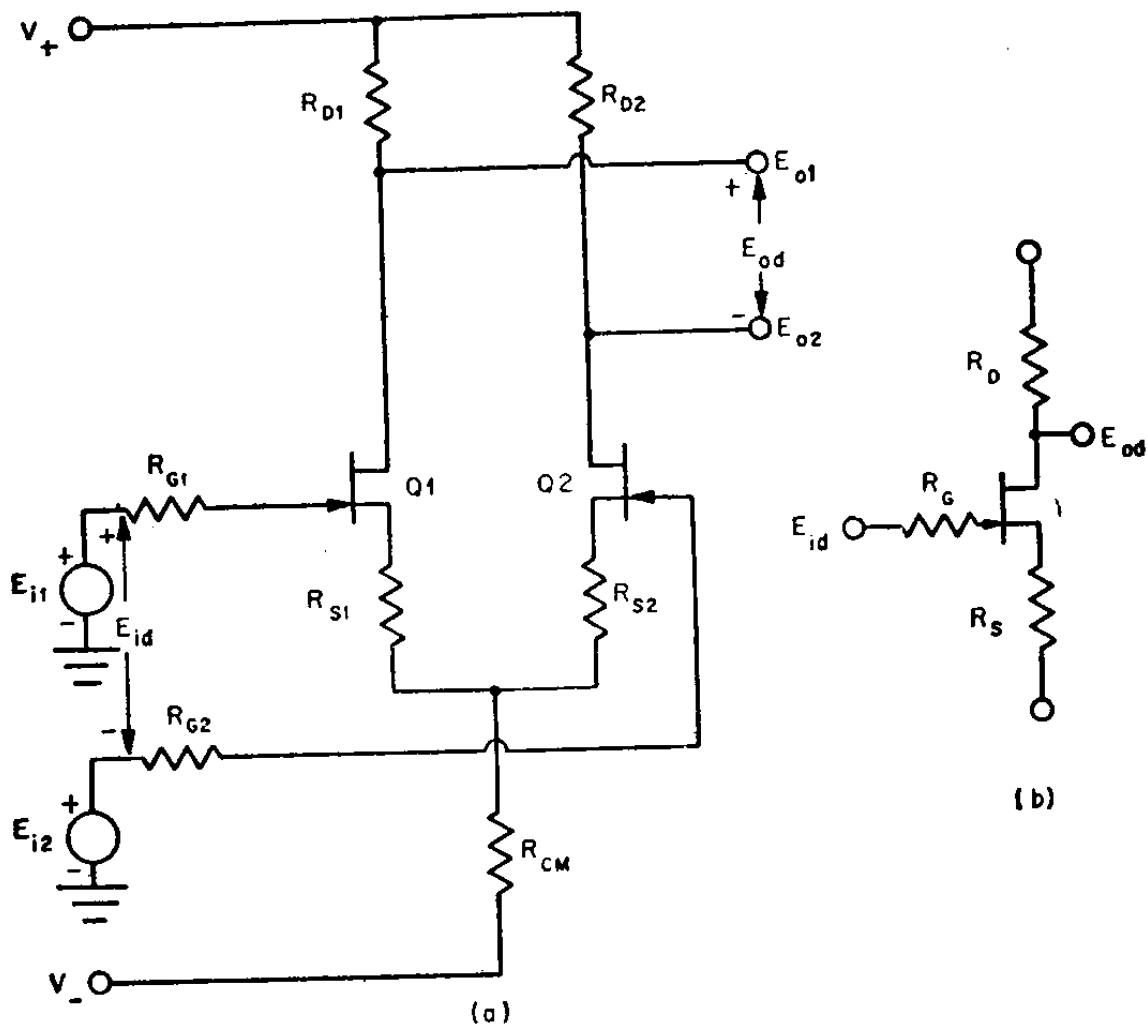


图 1-6 (a) 基本的 FET 差动级 (b) 单 FET 差动等效电路

了该级及其差模增益的等效共源电路. 在分析时, 把图 1-7a 的结型场效应晶体管直流模型^[2]用于上述的增益等效电路. 分析图 1-7b 的完整电路模型, 得出所标的电流. 那么, 场效应晶体管级的差模电压增益是

$$A_o = \frac{E_{od}}{E_{id}} = - \frac{g_{fs} R_D r_{ds}}{R_D + r_{ds}} \times \frac{1}{1 + \frac{R_G + R_S}{r_{gs}} + g_{fs} \frac{R_S r_{ds}}{r_{ds} + R_D}} \quad (1-8)$$