

图解实用电子技术丛书

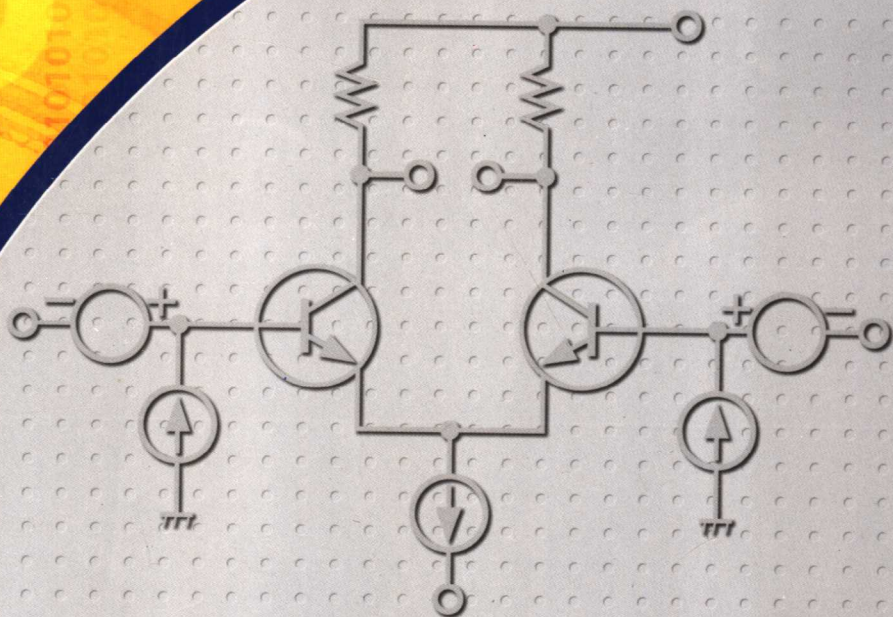
电子元器件应用技术

基于OP放大器与晶体管的放大电路设计

〔日〕黑田 彻 著

何中庸 译

边宇枢 校



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

电子元器件应用技术

基于 OP 放大器与晶体管的放大电路设计

〔日〕 黑田 彻 著

何中庸 译

边宇枢 校



科学出版社

北 京

图字: 01-2005-1159 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一,本书详细介绍了运算放大器的内部特性与工作原理,由浅入深、循序渐进。全书共分八章:第1章介绍利用晶体管制作简单的运算放大器;第2章则对通用型运算放大器与简单型运算放大器进行了比较;第3章和第4章介绍利用 SPICE 改善运算放大器的特性以及减少晶体管的失真;第5章和第6章分析三种运算放大器的电路结构与设计技巧;第7章介绍高速宽频带运算放大器;第8章则介绍低功耗、高性能 CMOS 型运算放大器。

本书内容难易适中、图文并茂,可供从事运算放大器内部电路设计的读者使用,也可作为电子、信息工程等专业师生与相关专业科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子元件应用技术/(日)黑田彻著;何中庸译. 边宇枢校. —北京:科学出版社,2005

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-016529-2

I. 电… II. ①黑…②何…③边… III. ①运算放大器-应用 ②晶体管电路-应用 IV. ①TN722.7 ②TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140290 号

责任编辑:肖京涛 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 1 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—4 000 字数: 216 000

定 价: 28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

译者序

有感于原著封面及封底的介绍文字,实有让读者一睹之必要,故在此加以引用。

倘若对运算放大器的内部电路加以分析并有所理解的话,必能大大提高对模拟电路的设计能力。

本书以迄今罕加详述的市面销售运算放大器 IC 的内部电路作为论述的焦点,针对如何增大放大倍数,如何实现高精度,怎样致力于实现低噪声,怎样实现高速宽频带化等等彻底进行验证。

而且公开了利用单个晶体管可优于运算放大器 IC 性能的放大器设计技术,同时介绍电路模拟器在电路设计上的有效利用方法。

各位只要一直阅读下去,相信必会感受到模拟电路设计的乐趣,进而掌握放大电路设计的要领。

最后,祝读者视野及思维因此书而大为开扩,并祈不吝指正。

前言

笔者开始接触运算放大器(OP Amp)大概是 30 年前的事,当时仅有单晶体(Monolithic)集成电路(IC)的运算放大器 $\mu\text{A} 709$ 等数种。发展至今,运算放大器集成电路的类型在选择上已非常多,而且有关运算放大器的专著不胜枚举。然而遗憾的是,这些书籍几乎全都是偏重于运算放大器的使用方法与应用电路的介绍。本人从中虽然获得宝贵的信息,却怀有点美中不足的遗憾。理由是,总觉得在运算放大器的资料手册中,对其类型固有的缺点不作积极地陈述,因此要想使隐藏的缺点显形,惟有透视分析运算放大器的内部电路。

鉴于此,本人数十年来,曾埋头致力于具有显著价值的运算放大器的内部电路分析的工作中。而且,在对内部电路进行分析时,挖掘出以下的好处:

- 增强对资料手册的阅读能力;
- 能够学会基本模拟(Analog)电路的设计方法;
- 可避免运算放大器的错误使用方法;
- 对于运算放大器的潜能得以一览无余;
- 培养对电路的美感,提升对电路设计的意愿。

基于此想法(理念),本书拟按照如下的框架(脚本)来分析运算放大器的内部电路。

第 1 章:利用五只单个的晶体管制作简单的运算放大器,一面测试基本的特性,同时学习运算放大器的专用术语与工作。

第 2 章:分析具有代表性的通用运算放大器集成电路 4558 的内部电路,并与第 1 章的五晶体管运算放大器做比较。

第 3 章:使用电路模拟器(Circuit Simulator)SPICE,改进第 1 章的五晶体管运算放大器,大幅提升特性。

第 4 章:市场销售的运算放大器集成电路难以实现的高性能放大器,可借助个体晶体管电路进行制作。再者,对由于晶体管寄生电容产生的非线性失真加以计算,并以专门的电路消除失真。

第 5 章:分析阐述 Bi-FET 型运算放大器与 5532 型运算放大

器,并进行研究。

第 6 章:分析阐述著名的高精度运算放大器与低噪声运算放大器 AD797,并研究上乘的电路技巧。

第 7 章:高速且宽频带型运算放大器的分析与应用实例。

第 8 章:对 5 V 以下的低电压单一电源工作的高性能 CMOS 型运算放大器的介绍。

附录中整理了一些晶体管的基础知识。

如果本书对把模拟电路的设计当作目标的学习者,从事运算放大器应用电路的诸位工程师们,以及有兴致想自行制作放大器的爱好者们有所帮助,则深感荣幸。

最后,谨向本书执笔期间承蒙热情鼓舞的远坂俊昭,给予发行机会的 CQ 出版株式会社,在企划与编辑上助一臂之力的蒲生良治先生,深致谢忱。

目 录

第 1 章 通过亲手制作晶体管电路学习运算放大器 1

1.1 运算放大器的概述	1
1.1.1 运算放大器具备的五个基本端子	1
1.1.2 两个输入端子与一个输出端子	1
1.1.3 运算放大器的放大倍数——差动 电压增益 A_{VD}	2
1.1.4 运算放大器的电源电压	2
1.1.5 理想运算放大器	2
1.2 五晶体管运算放大器的实验	3
1.2.1 运算放大器的内含——由晶体管组成的 放大电路	3
1.2.2 制作五晶体管运算放大器	4
1.2.3 五晶体管运算放大器的电路制作	5
1.2.4 作为正向放大器的实验	8
1.2.5 电压跟随器电路的实验	11
1.2.6 反向放大器的实验	12
1.3 运算放大器的交流(AC)特性	13
1.3.1 最大输出电压振幅相对频率的特性	13
1.3.2 转换速率(Slew Rate)	13
1.3.3 其他的交流特性	14
1.4 运算放大器的直流(DC)特性	15
1.4.1 输入偏置电流 I_B 与失调(Offset)电流 I_{IO} ...	15
1.4.2 输入失调电压 V_{IO}	15
1.4.3 最大输出电压相对负载电阻的特性	16
1.4.4 共模输入电压范围	17
1.5 运算放大器以负反馈使用时的稳定性	17
1.5.1 放大器与振荡器本质相同	17
1.5.2 增益用复数表示	18
1.5.3 表示频率特性的伯德图	19

1.5.4	开环增益的伯德图	20
1.5.5	伯德的稳定辨别法	20
【专栏】	与模拟 IC 设计有关的参考文献介绍	22
第 2 章 通用运算放大器 IC 4558 的分析		25
2.1	4558 的基本电路分析	25
2.1.1	原型名为 RC4558	25
2.1.2	电流镜像(Current Mirror)电路的基本原理 ...	26
2.1.3	插入发射极电阻的电流镜像电路	27
2.1.4	RC4558 内部的电流镜像电路	28
2.1.5	把电流镜像当成负载的差动放大电路	29
【专栏】	插入发射极电阻的电流镜像的分析	30
2.1.6	达林顿连接电路	32
2.1.7	互补发射极跟随器(Complementary Emitter Follower)	33
2.1.8	输出级的工作等级	35
2.1.9	输出级偏压的温度补偿	36
2.2	4558 的等效电路与电气特性	36
2.2.1	晶体管的小信号等效电路	37
2.2.2	局部的 h 参数从略的小信号等效电路	37
2.2.3	电流镜像负载差动放大电路的 小信号等效电路	38
2.2.4	发射极跟随器的小信号等效电路	39
2.2.5	RC4558 的开环增益相对于频率的特性	39
2.2.6	转换速率与相位补偿电容的关系	42
2.2.7	转换速率与增益带宽的关系	44
2.2.8	4558 的噪声-失真率特性	44
2.2.9	4558 的 DC 特性	44
第 3 章 用电路模拟器制作的正规运算放大器		49
3.1	使用 SPICE 模拟分析模拟电路	49
3.1.1	为何要使用电路模拟器	49
3.1.2	什么是 SPICE	49
3.1.3	SPICE 的电路文件(File)	51
3.1.4	仍须模型参数(Model Parameter)	51

3.1.5 借助 SPICE 的模拟种类	52
3.1.6 五晶体管运算放大器的模拟	53
3.2 改进五晶体管运算放大器	58
3.2.1 为增加最大输出电流的改进	58
3.2.2 为增加开环增益的改进	60
3.2.3 输入失调电压最小化	63
3.2.4 输入失调电压增加的原因	64
3.2.5 削减输入失调电压的简单方法	66
3.2.6 利用电流镜像电路与达林顿电路削减输入 失调电压	67
3.2.7 挑选初级差动晶体管的重要性	69
3.2.8 饱和防止电路	70
3.2.9 十晶体管正向放大器的频率特性	74
3.2.10 电源电压抑制比(Supply Voltage Rejection Ratio)的分析	78
3.2.11 十晶体管运算放大器的转换速率	80
附录 A 供理解 SPICE 模型的晶体管的等效电路	81
A.1 对 I - V 特性的计算有帮助的 Ebers-Moll 模型	81
A.2 活性领域	82
A.3 反接领域(又叫逆向活性状态)	83
A.4 饱和领域(又叫饱和状态)	84
A.5 有助于频率特性计算的 Hybrid π 型模式	84
A.6 基极-有效基极间电导 g_x	85
A.7 互导 g_m	85
A.8 有效基极-发射极间电导 g_π	85
A.9 Early 电压	85
A.10 结电容	87
A.11 转移时间与扩散电容	87
A.12 f_T 与 τ_F 的关系	89
【专栏】测试正向转移时间 τ_F	92
附录 B 频率特性的改善和对基极接地电路的复习	93
B.1 基极接地电路的特征	93
B.2 基极接地电路的输出静特性	94
B.3 基极接地电路的小信号等效电路	94
B.4 基极接地电路的输入电阻	95

B.5	基极接地电路的输出电阻 r_{ob}	96
B.6	基极接地放大电路的电压增益	96
B.7	基极接地放大电路的高频带频率特性	97
B.8	被电流源驱动的基极接地电路	97
第4章 基于晶体管优于 IC 的运算放大器设计		99
4.1	为何必须用单个半导体放大器	99
4.1.1	运算放大器集成电路固有的弱点	99
4.1.2	基于单个半导体——晶体管的 运算放大器电路	100
4.2	基于晶体管的运算放大器电路概述	100
4.2.1	所要设计的运算放大器电路的架构	101
4.2.2	采用 Folded Cascode 电路	101
4.3	设计初级 FET 差动电路须知	103
4.3.1	结型 FET 的基本特性	103
4.3.2	Cascode 电路的电压增益与频率特性	105
4.3.3	初级 FET 的选择	106
4.3.4	第二级晶体管 Tr_1 、 Tr_2 与输出级 Tr_5 、 Tr_6	107
4.4	应对基本电路充实内容	108
4.4.1	初级应做成 Cascode Bootstrap	108
4.4.2	计算第二级输出电压的失真率	112
4.4.3	利用 C_{ob} 消除电路促使失真率锐减	115
4.4.4	第二级的实际电路设计	116
4.4.5	抵消输出级晶体管的 C_{ob}	117
4.4.6	A 级互补的 C_{ob} 抵消电路	119
4.5	模拟、制作及实验	119
4.5.1	求相位补偿电容的最合适值	119
4.5.2	确认转换速率	124
4.5.3	制作所使用的零件	127
4.5.4	印制电路基板	127
4.5.5	电气特性的测试	129
附录 C 对由 C_{ob} 的电压依存性导致的 失真进行分析计算		132

第 5 章 通用运算放大器 IC 的分析 137

- 5.1 Bi-FET 型运算放大器 TL07x 系列的分析 138
 - 5.1.1 Bi-FET 制造过程(Process) 138
 - 5.1.2 两种电流镜像(Current Mirror) 139
 - 5.1.3 RC4558 的初级电流镜像(图(a)) 139
 - 5.1.4 TL07x 的初级电流镜像(图(b)) 141
 - 5.1.5 TL07x 与 TL08x 的噪声特性 141
- 5.2 Bi-FET 型运算放大器 LF353 的分析 143
 - 5.2.1 Widler 型电流镜像与 Wilson 型电流镜像 143
 - 5.2.2 LF353 的初级共源极电流 146
 - 5.2.3 转换速率的计算 146
 - 5.2.4 输出电流的限制电路 146
 - 5.2.5 输出阻抗相对频率的特性 147
 - 5.2.6 防止 Q_5 饱和的电路 148
 - 5.2.7 失真率特性与频率特性 148
- 5.3 Bipolar 运算放大器 NE5532 的分析 150
 - 5.3.1 输入端子间二极管的任务 150
 - 5.3.2 电流镜像与饱和防止电路 151
 - 5.3.3 横向(Lateral)PNP 晶体管 152
 - 5.3.4 前馈(Feed-forward)相位补偿 153
 - 5.3.5 非对称 AB 级工作的输出级 155

第 6 章 高精度、低噪声运算放大器 IC 的分析 157

- 6.1 高精度运算放大器的构成与 OP07 157
 - 6.1.1 高精度运算放大器 157
 - 6.1.2 输入偏置电流抵消电路 158
 - 6.1.3 减小输入失调电压的窍门 160
 - 6.1.4 OP07 的 AC 特性与噪声特性 160
 - 6.1.5 高精度运算放大器使用于 DC 伺服电路 ... 161
- 6.2 低噪声运算放大器与噪声分析的基础 163
 - 6.2.1 噪声波的大小以乘方平均值表示 163
 - 【专栏】 总体均值(Ensemble average) 163
 - 6.2.2 由电阻产生的热噪声 164
 - 6.2.3 理想双极性晶体管的散粒噪声 165
 - 6.2.4 理想双极性晶体管的噪声等效电路 166

6.2.5 差动放大电路的噪声等效电路	167
6.2.6 运算放大器的噪声等效电路	167
6.2.7 运算放大器的输入换算噪声电压密度	168
6.2.8 运算放大器的输入噪声电流密度	169
6.2.9 信号源电阻的影响	169
6.2.10 运算放大器的总输入噪声电压密度	170
6.2.11 反馈率的倒数——噪声增益(Noise gain) ...	172
6.3 低噪声运算放大器 AD797 的构成	172
6.3.1 AD797 的开环增益	172
6.3.2 AD797 的相位补偿电容	175
6.3.3 输出级的失真消除电路	175

第 7 章 高速宽频带运算放大器的分析 179

7.1 普通的高速宽频带运算放大器	179
7.1.1 高速宽频带运算放大器有两种类型	179
7.1.2 形成高速 PNP 晶体管的 VIP Process 的 LM61 系列	179
7.1.3 LM6361/6364 以局部电流反馈稳定化	181
【专栏】 有关局部电流反馈	182
7.1.4 确认开环增益的结果	182
7.1.5 负载电容大,仍不致振荡的结构	183
7.1.6 LM6361 系列的其他特性	183
7.1.7 LM6361 系列上位依赖 CB Process 的 AD847 系列	184
7.1.8 达林顿输出级仍具强而有力的 电容负载结构	185
7.1.9 JFET 源极跟随器输入的 OPA655(DG 与 DP 小)	186
7.2 截止频率不变化的电流反馈型运算放大器	187
7.2.1 普通的运算放大器与电压反馈型 运算放大器的缺点	187
7.2.2 电流反馈型运算放大器的工作原理	188
7.2.3 转移阻抗(Trans-impedance)的概念	190
7.2.4 以反向放大器使用时的闭环增益	193
7.2.5 如何看待电流反馈型运算放大器的	

输出阻抗	194
7.2.6 转换速率受限制的原因	194
7.2.7 容许差动输入电压低,需加注意	195
7.2.8 宽频带 AC-DC 变换器上的应用	195
7.3 JFET 输入高速宽频带运算放大器	196
7.3.1 基于 CB Process 的 AD845	198
7.3.2 基于 Difet Process 的 OPA627/637	199
7.3.3 显示高速性的重要参数——上升时间	200
7.3.4 OPA627 在宽频带平衡放大器方面的应用 ...	201
7.3.5 什么是平衡放大器上的共模抑制比	202
7.3.6 改善 CMRR 的同相负反馈技术	203
第 8 章 CMOS 型运算放大器 IC 的分析	205
8.1 CMOS 运算放大器的出现与高性能化	205
8.1.1 低功耗化与 Rail-to-Rail 动作	205
8.1.2 CMOS Rail-to-Rail 运算放大器 AD8532 ...	206
8.1.3 低失真的运算放大器 OPA340/350/2340 /2350	208
8.1.4 R-R 输入特有的中间摆动失真,需加注意 ...	210
8.1.5 避免中间摆动失真的方法	210
8.1.6 CMOS 的低噪声运算放大器 LMV751	212
8.2 更进一步发展的 CMOS 运算放大器族群	214
8.2.1 自行补正输入失调电压的 CMOS 运算放大器 TLC4501/4502	214
8.2.2 消除失调电压的结构	215
8.2.3 使用 TLC4501 的高精度电压源	217
8.2.4 在 2 V 以下工作的 CMOS 运算放大器 NJU7096	218
8.2.5 在低电源电压稳定振荡的正弦波振荡器方面的 应用	219
参考文献	223

第 1 章

通过亲手制作晶体管电路学习运算放大器

开始不妨先利用单个晶体管制作简单的运算放大器。一方面以该运算放大器测试其基本的特性,同时学习运算放大器的专业术语与工作原理。

1.1 运算放大器的概述

1.1.1 运算放大器具备的五个基本端子

请看图 1.1。运算放大器必定有以下的五个端子:

- 正向输入端子(NonInverting Input);
- 反向输入端子(Inverting Input);
- 正电源端子(写作 V_{CC} , $+V_{CC}$, V^+ , $+V_S$ 等等);
- 负电源端子(写作 V_{EE} , $-V_{EE}$, V^- , $-V_S$ 等等);
- 输出端子(Output)。

除此之外,还具备有“相位(频率)补偿端子”和“偏移与零调整端子”。

1.1.2 两个输入端子与一个输出端子

► 反向输入与正向输入

两个输入端子在运算放大器(OP Amp)记号之中写作“+”与“-”,并且如下识别。

- +: 正向输入端子;
- -: 反向输入端子。

在两个输入端子中的任何一个都可供加信号。运算放大器的正向输入端子至接地(Ground)间电压称为“正向输入电压 V_{NI} ”,反向输入端子至接地(Ground)间电压则称为“反向输入电压 V_I ”。再者,以后接地(Ground)都写作 GND。

► 两个输入电压之差——差动输入电压 V_{ID}

这是正向输入端子与反向输入端子间的电压，即

$$V_{ID} = V_{NI} - V_I \quad (1.1)$$

► 单端接输出 (Single End Output)

当运算放大器的输出端子只有一个，输出端子至 GND 间电压即为输出电压，像这样信号端子对的一端被接地就叫做单端接地“Single End”。

1.1.3 运算放大器的放大倍数——差动电压增益 A_{VD}

理想的运算放大器的输出电压 V_O 与差动输入电压 V_{ID} 成正比。该比例常数也就是放大倍数，叫做“差动电压增益 A_{VD} ”。即

$$V_O = A_{VD} \cdot V_{ID} \quad (1.2)$$

对于交流信号的差动电压增益称为“开环增益 (Open Loop Gain)”。一般记载于运算放大器的资料手册中的增益，是直流与差动电压增益，增益的特征是其值无限大。

1.1.4 运算放大器的电源电压

运算放大器基本上使用双电源。在正电源端子至 GND 间施加 $+5 \sim +15$ V 左右的电压，在负电源端子至 GND 间则施以 $-5 \sim -15$ V 左右的电压。不过，也有把负电源端子接地来使用的情形 (最近尤其以 5 V 单电源使用的事例特别多)。

另外，为使电路在图中看起来整洁，这里不把运算放大器的电源端子和电源线路画在电路图中。当然实际上必须如图 1.1 所示连接电源。

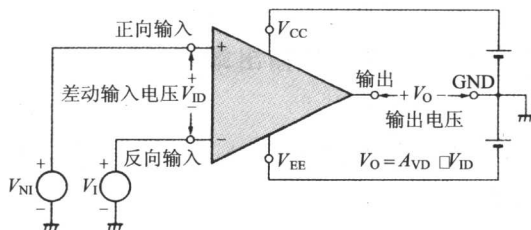


图 1.1 运算放大器的基本端子与加诸端子的电压

1.1.5 理想运算放大器

如图 1.2 所示，满足下列条件的运算放大器就叫做“理想运算放大器”。当然实际上并不存在理想运算放大器，但在应用电

路设计与分析时作为理想模式(Model)来思考就显得简单。

- 输入失调(Offset)电压为零;
- DC 输入电流为零;
- 输入电阻为 ∞ ;
- 输出电阻为零;
- 差动电压增益为 ∞ ;
- 无限的高速响应;
- 不产生噪声。

接近理想的运算放大器被称为优越的运算放大器,实际所使用的乃是个别的参数(Parameter)接近理想值的运算放大器。

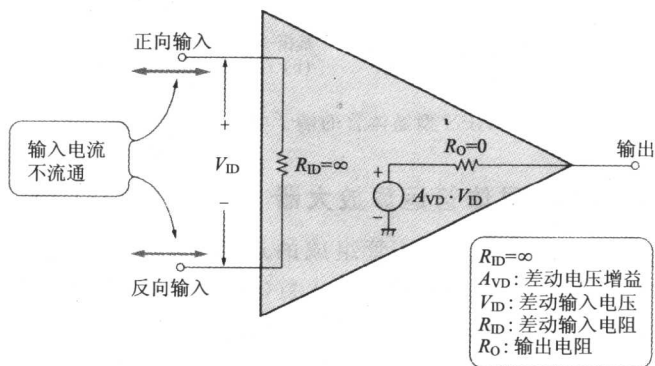


图 1.2 理想运算放大器

1.2 五晶体管运算放大器的实验

1.2.1 运算放大器的内含——由晶体管组成的放大电路

制作运算放大器之前,不妨简单地复习一下晶体管的工作原理。请看图 1.3。

倘若在 NPN 型晶体管的基极与发射极间施加正电压,而在集电极与发射极间供以正电压,就会有图 1.3(a)所示流向的电流流通。而且,发射极电流 I_E 、集电极电流 I_C 、基极电流 I_B 之间的关系如下。

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.3)$$

集电极电流与基极电流成比例关系。

$$I_C = h_{FE} I_B \quad (1.4)$$

该比例常数 h_{FE} 叫做“直流电流放大倍数”。

基极-发射极间电压 V_{BE} 与基极电流 I_B 之间有如图 1.3(b) 所示的关系。PNP 型晶体管, 虽然电压与电流的方位和 NPN 型晶体管完全相反, 但是式 (1.3) 与式 (1.4) 及图 1.3(b) 所示的关系仍然成立。

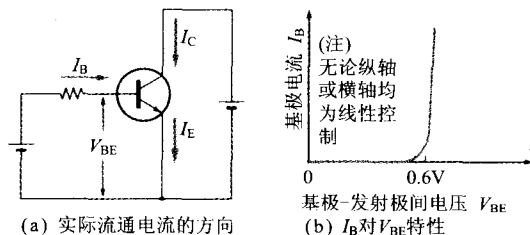


图 1.3 NPN 型晶体管的端子电流与端子电压

1.2.2 制作五晶体管运算放大器

在此所制作的是由晶体管组成的运算放大器, 如图 1.4 所示。这是作者在《晶体管电路设计》(CQ 出版社) 中所制作的东西。实物的运算放大器 IC 由众多的晶体管集成而成, 但是在此是以理解工作原理为目的, 而做成简易型运算放大器。

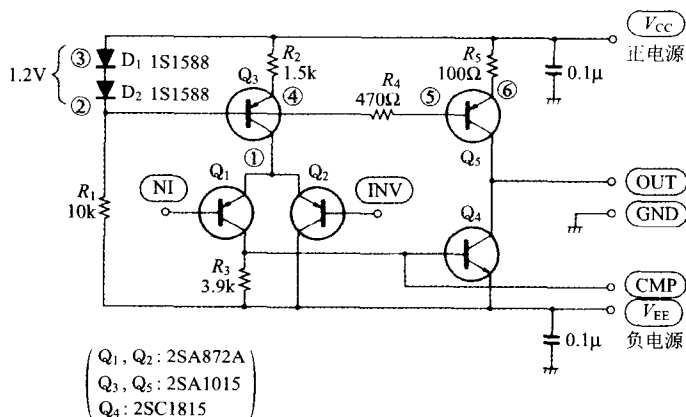


图 1.4 五晶体管运算放大器的电路构成

NI 是正向输入端子, INV 则为反向输入端子。电源端子至 GND 间的两个电容器是用以降低高频率下的电源阻抗, 俗称“旁