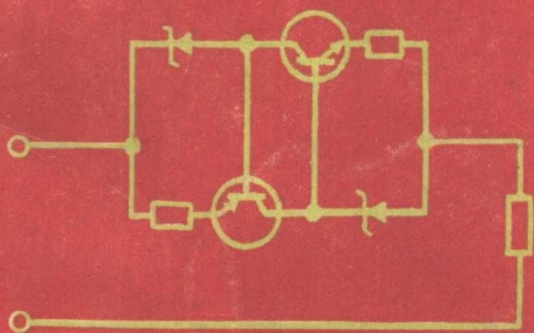


电子技术教学小丛书

# 直流稳定电源

彭日知 编



高等教育出版社

电子技术教学小丛书

# 直流稳定电源

彭日知 编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是由高等学校工科电工教材编审委员会电子技术教材编审小组组织评选的“电子技术教学小丛书”之一。主要讲述直流稳压电源和恒流源电路，较多地反映了线性集成电路的发展和应用。本书条理清楚，叙述简明通顺，便于阅读，可作为大学生学习电子技术的阅读材料，也可供有关教师和科技人员参考。

本书由华中工学院汤之璋教授审阅。

**责任编辑 张志军**

电子技术教学小丛书

### 直流稳定电源

彭日知 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

上海商务印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/32 印张 4.125 字数 85,000

1982年7月第1版 1983年8月第1次印刷

印数 00,001—10,000

书号 15010·0418 定价 0.53 元

## 序 言

本书是《电子技术教学小丛书》中的一个品种，专门论述直流稳定电源。

本书是在高等学校“电子技术基础”课程现行教科书的基础上编写的，要求它与教科书相衔接，但又要避免重复。因此，本书不写“电子技术基础”教科书中已有的如整流滤波、稳压管稳压电路、带比较放大环节的线性型串联式稳压电路等内容，而着重介绍恒流源器件、恒流源电路、电压基准电路、集成稳压器的应用、开关型稳压电源及直流稳定电源的设计等内容。

本书取材于近年来国内外一些电子技术书籍和杂志中有关直流稳定电源的较好文章，特别着眼于收集比较新颖的电源器件和电路，例如三端点集成稳压器、用集成稳压器来组成恒流源、用5G14来组成高压稳压电路、能带间隙电压基准、特别是功耗极小(微瓦级)的弱反型层CMOS电压基准电路、开关型稳压电源中调制脉宽的集成控制电路等等。

本书主要是作为与电子技术基础课程有关的老师和同学们的一本教学参考书，当然也可作为电工和电子工程技术人员电源参考书。

本书是在我国高等学校电工教材编审委员会电子技术编审小组的大力倡导下编写的。承沈尚贤教授、童诗白教授关怀；汤之璋教授审稿，在此一并表示衷心感谢。

由于编者学识见闻有限，书中选材可能有遗漏和不当，叙述解释可能有错误的地方，恳求广大读者和专家们批评指正。

编 者 一九八二年一月

# 目 录

## 第一章 恒流源器件与镜象恒流源电路

- 1.1 半导体恒流管..... 2
- 1.2 简单的镜象恒流源电路..... 5
- 1.3 简单镜象恒流源电路的其它形式..... 9
- 1.4 威尔逊恒流源电路..... 11
- 1.5 恒流放大电路..... 15

## 第二章 用集成运算放大器组成的恒流源电路

- 2.1 用集成运放器组成的精密恒流源电路..... 17
- 2.2 用集成运放器组成的多重精密恒流源电路..... 21
- 2.3 由差动电压控制的双向恒流源电路..... 22
- 2.4 利用恒流的测量电路..... 24
- 2.5 传感器短路电流的测量..... 27

## 第三章 用晶体管和稳压管或用稳压电源组成的恒流源电路

- 3.1 晶体管稳压管恒流源电路..... 29
- 3.2 双环恒流源电路..... 31
- 3.3 给蓄电池充电的实用恒流源电路..... 32
- 3.4 用集成稳压器来产生恒流..... 34

## 第四章 新型电压基准电路

- 4.1 用发光二极管作电压基准..... 36

4.2	用结型场效应管作电压基准	37
4.3	用稳压管、晶体管、二极管和电阻器组成的零温度系数 电压基准	39
4.4	用集成运算放大器和稳压管组成的精密电压基准电路	42
4.5	能带间隙电压基准电路和能带间隙恒流源电路	47
4.6	CMOS 温度变换器和 CMOS 能带间隙电压基 准电路	51
4.7	用发光二极管和硅晶体管组成的电压基准电路	54

## 第五章 稳压电源的过电流保护

5.1	晶体管限流型保护电路	57
5.2	差动放大兼限流保护	61
5.3	采用双稳态触发器的截流型保护电路	63
5.4	采用单结晶体管的截流型过电流保护电路	64
5.5	晶体管截流型过电流保护电路	65

## 第六章 线性型直流稳压电源的集成电路

6.1	5G14 单片集成线性型稳压器	70
6.2	三端点的集成线性型稳压器	73
6.3	用集成线性稳压器组成的正负稳压电源	76
6.4	双向跟踪线性稳压电源	78
6.5	输出电压和电流限额都连续可调的实验室用直流 稳压电源	79

## 第七章 直流稳压电源功能的扩展

7.1	直流稳压电源输出电压的提高和输出电流的扩大	81
7.2	用集成运放器变单向为双向稳压电源	82
7.3	用集成运放器变固定为宽调稳压电源	84
7.4	用低压集成运放器晶体管稳压管和电阻器等组成的	

高压稳压电源·····	86
7.5 用稳压电源作音频功率放大器·····	88
7.6 可编程序的数字稳压电源·····	89

## 第八章 开关型直流稳压电源

8.1 多谐振荡式开关型稳压电源·····	94
8.2 开关型稳压电源中 $LC$ 滤波器的计算·····	96
8.3 脉冲宽度调制·····	98
8.4 升压式开关型稳压电源·····	101
8.5 倒换电压极性的开关型稳压电路·····	102
8.6 不用工频电源变压器的半桥逆变式开关型稳压电源·····	103

## 第九章 直流稳定电源的设计

9.1 线性型直流稳压电源的设计举例·····	107
9.2 高压稳压电路的设计举例·····	116
参考文献·····	124

# 第一章 恒流源器件与镜象

## 恒流源电路

在科学实验和各种技术领域中，有许多需要稳定电流的地方。例如，高度稳定的电磁场、恒定的电镀电流、给蓄电池充电的恒定充电电流，给电动机或电阻炉起动的恒定起动电流等等，这些都应该用恒流源电路来供给。在测量技术中，某些元件器件的测试(例如大批电阻器阻值的测试和分级)、接触电阻的测量等工作也需要用到恒流源电路。在电子电路中，特别在集成电路中，有许多场合需要直流压降小但同时动态电阻大的元件。例如，稳压管稳压电路中的限流电阻、放大器中的集电极负载电阻、差动放大器中的两射极公共电阻、射极输出器中的射极电阻等都是，这些电阻最好都用恒流源器件或恒流源电路来代替。在工业自动化仪表中，也经常用到恒流源电路。

凡能够供给负载以恒定电流的器件和电路都称为恒流源器件和恒流源电路。恒流源电路可用恒流源器件来组成，也可用稳压管、晶体管、场效应管和集成运算放大器等器件来组成。理想的恒流源电路(图 1-1)在直流输入电压  $V_I$  波动和负载电阻  $R_L$  变动的情况下应能满足如下要求：

(1) 电路的直流输出电压  $V_O$  最小时可等于零，微变输出电阻  $R_o$  为无限大。或者说，理想的恒流源的输出电流  $I_o$  对输出电压  $V_O$  的关系为一条水平线，即  $I_o$  不随负载电阻  $R_L$  或



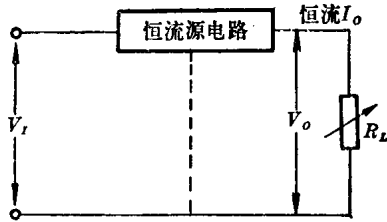


图 1-1 恒流源电路

电压  $V_O$  和  $V_I$  变化。

(2) 输出电流  $I_O$  的温度系数为零, 即  $I_O$  不随温度变化。

实际的恒流源电路当然很难实现上述的这些理想值, 但可力求接近它们。

如果负载电阻  $R_L$  能够始终保持不变, 则可将  $R_L$  直接跨接在稳压电源的两个输出端上来获得恒定电流。但是, 许多需用恒流源的实际负载, 例如晶体管、蓄电池和电磁场的线圈等等。它们的等效负载电阻都是经常变化的。因此, 在这种情况下, 不能用上述的简单方法从稳压电源来获得恒定电流, 而必须另外创立一些或者在稳压电源帮助下或者不依靠稳压电源的恒流源器件和恒流源电路。

## 1.1 半导体恒流管

结型场效应管在预夹断后显示出一段恒流特性。因此, 可以利用这段恒流特性而把结型场效应管作为恒流管使用。当把结型场效应管的源栅两极短接时, 则通过这管的恒流为  $I_{DSS}$ 。若在源栅两极间接入一个电阻器  $R_s$ , 如图 1-2a 所示,

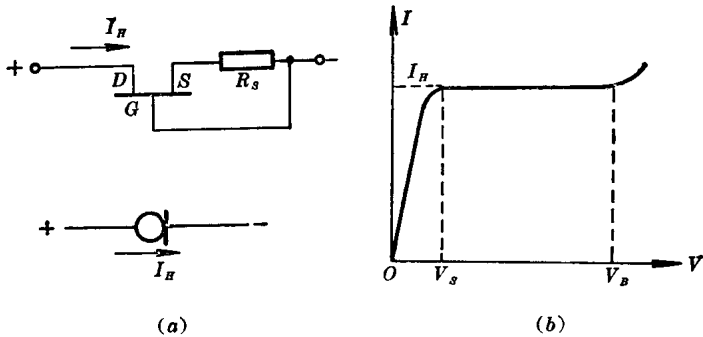


图 1-2

(a) 半导体恒流管及其符号 (b) 半导体恒流管的伏安特性曲线

则视  $R_s$  上电压降的大小, 恒流  $I_H$  可在 0 至  $I_{DSS}$  间取任何数值, 但这时  $V_{DG}$  必须大于  $2|V_P|$  以保证结型场效应管在恒流部运用。半导体恒流管具有直流压降小、动态电阻大、温度系数低、抗辐射能力强等一系列优点, 它们的电流对电压的特性曲线示于图 1-2b。

我国所生产的半导体恒流二极管有 2DH01~2DH6 系列<sup>[8]</sup>, 2DH01 恒流管的恒流  $I_H$  为 0.1 毫安, 2DH6 则为 6 毫安。2DH01~2DH6 全系列恒流二极管的恒流起始电压  $V_s$  为 0.5~4 伏, 恒流小的  $V_s$  也小; 击穿电压  $V_B$  有 30 伏、50 伏、70 伏和 100 伏四个品种; 动态电阻  $r_H$  为 0.2~5 兆欧,  $I_H$  小的  $r_H$  大; 温度系数  $\gamma = \frac{\Delta I_H / I_H}{\Delta T} = +0.3\% / ^\circ\text{C} \sim -0.5\% / ^\circ\text{C}$ , 其中  $I_H$  为 400 微安的恒流管的  $\gamma = 0$ 。

半导体恒流二极管的符号同普通二极管的符号有些相似, 所不同的是用一个小圆而不是用一个箭头来代表恒流二极管的正极, 短横仍代表负极(图 1-2a)。

半导体恒流管在电子技术中的应用是很多的。图 1-3 为一个线性型稳压电路，这个电路的比较放大环节是一个差动放大器。由图 1-3 可见，我们用一个恒流管  $H_c$  取代差动放大管  $T_3$  的集电极负载电阻  $R_c$ ，又用另一个恒流管  $H_e$  代替差动放大器的射极电阻  $R_e$ ，使这个放大级的电压增益和共模抑制比都达到很高的数值，从而将稳压电路的稳压性能提高一大步。

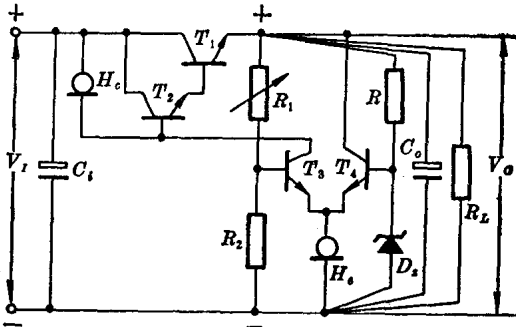


图 1-3 恒流管在直流稳压电路中的应用举例

下边来推导图 1-3 这个利用恒流管的稳压电路的输入调整因数  $S_V$  和输出电阻  $r_o$ 。由图 1-3 可写出：

$$\Delta V_I - r_H(\Delta I_{C3} + \Delta I_{B2}) = [r_{be2} + (1 + \beta_2)r_{be1}]\Delta I_{B2} + \Delta V_O \quad (1-1)$$

把  $H_e$  管视同对微变电流开路，并忽略  $D_2$  管的动态电阻，则

$$\Delta I_{C3} = \beta_3 \Delta I_{B3} \approx \frac{\beta_3 n \Delta V_O}{R_1 \parallel R_2 + r_{be3} + r_{be4}}$$

其中  $n = R_2 / (R_1 + R_2)$

又

• 4 •

$$\begin{aligned}\Delta I_{B2} &= \Delta I_{E1} / (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) \\ &= -\Delta V_o / (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) R_L\end{aligned}$$

所以

$$S_V = \frac{\Delta V_o}{\Delta V_I} \approx \frac{R_1 // R_2 + r_{be3} + r_{be4}}{n\beta_3 r_H} \quad (1-2)$$

足见恒流管  $H_c$  的动态电阻  $r_H$  越大, 则输入调整因数  $S_V$  越好。

若在式(1-1)中令  $\Delta V_I = 0$ , 假设  $r_H \gg [r_{be2} + (1 + \beta_2)r_{be1}]$  及  $r_H \Delta I_{C3} \gg \Delta V_o$ , 则可得图 1-3 稳压电路的内阻为

$$\begin{aligned}r_o &= -\frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_{E1}} \approx \frac{R_1 // R_2 + r_{be3} + r_{be4}}{n\beta_3(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)} \\ &\approx \frac{R_1 R_2 + 2r_{be3}}{n\beta_1 \beta_2 \beta_3}\end{aligned} \quad (1-3)$$

## 1.2 简单的镜象恒流源电路

在线性集成电路中, 常用晶体管来组成恒流源电路。图 1-4 就是一个用晶体管恒流源电路取代发射极电阻  $R_e$  的差动放大器。在图 1-4 电路中,  $T_1, T_2$  是一对差动放大管;  $T_3, T_4$  两晶体管和电阻  $R$  联合组成一个恒流源电路, 如虚线框内所示, 其中  $T_4$  是输出恒流的晶体管。就是这个  $T_4$  管取代了差动放大器中的射极电阻  $R_e$ 。

图 1-4 虚线框中所示的恒流源电路是美国人魏德拉(R. J. Widlar)在研究线性集成电路时为了稳定一个放大级的静态工作点而创造出来的<sup>[17]</sup>。魏氏发现并且看准了线性集成电路中做在同一块单晶硅小片上的几个相邻的晶体管的特

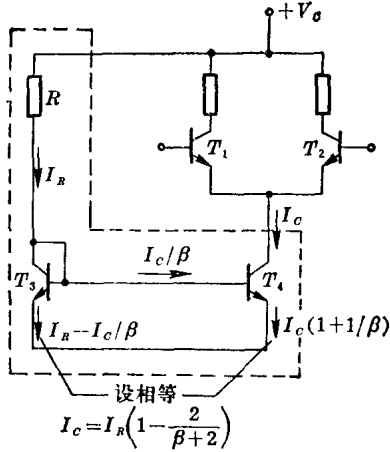


图 1-4 取代差动放大器中射极电阻  $R_e$  的简单  
镜像恒流源电路

性参数和温度状况十分近似。因此，他把两个以上这样的发射结都并联起来，而将其中的一个管子，例如图 1-4 中的  $T_3$  管的集基两极短接后用来作为基准管。然后通过电阻  $R$  从直流稳压电源  $+V_C$  向这个基准管  $T_3$  供电。由于  $T_3$ 、 $T_4$  等各管的基极是连在一起的，因此，它们的基极电流都同时得到供给。由图 1-4 可见，流过电阻  $R$  的电流为

$$I_R = \frac{+V_C - V_{BE3}}{R} \quad (1-4)$$

其中  $+V_C$  是直流稳压电源的稳定输出电压， $R$  为一个固定电阻， $V_{BE3}$  是基准管  $T_3$  的发射结电压。当温度和  $I_{E3}$  的数值都一定时， $V_{BE3}$  的数值也一定。并且  $V_{BE3}$  随温度变化的增减量同  $+V_C$  相较小得多。因此， $I_R$  是基本上恒定的，它的长期温漂约为 4%。我们称  $I_R$  为魏氏恒流源电路的基准电流。

基准管  $T_3$  虽然集基短接, 但不应当把它看成同只有一个  $PN$  结的二极管完全一样。 $T_3$  管射极电流  $I_{E3}$  的大部分在  $V_{CB} = 0$  的情况下仍然可以扩散到集电极而构成集电极电流  $I_{C3}$ ,  $I_{C3}/I_{B3}$  仍等于  $\beta$ , 而当  $\beta$  等于 50 或更大时,  $I_{C3}$  就很接近于基准电流  $I_R$  了。由于  $T_3$ 、 $T_4$  两管的发射结是并联的(图 1-4), 两管的特性参数和温度状况又很近似, 故可以认为  $I_{E3} = I_{E4}$ 。设两管的电流放大系数  $\beta$  较大, 则  $I_{C3} \approx I_{C4} \approx I_R$ 。因为  $I_R$  是恒定的基准电流, 所以输出电流  $I_{C4}$  也恒定, 从而图 1-4 这个电路被人们确认是一种恒流源电路。又由于有  $I_{C4} \approx I_R$  这个关系, 即电路的输出恒流  $I_{C4}$  好似基准电流  $I_R$  的镜像, 因此人们又称图 1-4 这个恒流源电路为简单的镜像恒流源电路。

$T_4$  管原来是一个放大管, 它的静态工作点由  $T_3$  管帮助来稳定。后来去掉  $T_4$  管的集电极负载电阻  $R_{c4}$ , 专门用它来作输出恒流  $I_{C4}$  的恒流源管, 如图 1-4 所示那样, 从此就产生出来了魏氏恒流源电路。

输出电阻是恒流源电路的一个重要质量指标。在魏氏恒流源电路中, 若输出恒流的晶体管的集射两极之间的电压有一个增量  $dV$ , 则此管的集电极电流将产生一个相应的增量  $dI_C$ 。 $\frac{dV}{dI_C}$  就是这个恒流源电路的输出电阻  $r_o$ 。 $r_o$  越大, 则一定  $dV$  所产生的  $dI_C$  越小, 也就是输出恒流受输出电压变化的影响越少。

图 1-5 是测量魏氏恒流源电路输出电阻时的电路接法。在此图中,  $+V_o$  和  $V$  都是直流稳压电源, 但  $V$  的数值小于  $+V_o$ 。 $dV$  是电压  $V$  的增量。量出  $dV$  及由这个  $dV$  所引起的

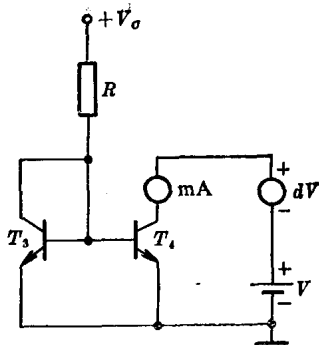


图 1-5 测量魏氏恒流源电路输出电阻的电路接法

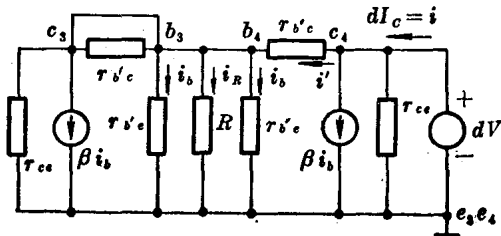


图 1-6 图 1-5 的微变等效电路

恒流  $I_C$  的变量  $dI_C$ , 就可得出魏氏恒流源电路的输出电阻  $r_o$ 。

也可从恒流源的电路参数来推算其输出电阻<sup>[15]</sup>。图 1-6 是图 1-5 的微变等效电路。在图 1-6 中, 忽略了晶体管  $T_3$  及  $T_4$  的基极电阻  $r_{bb'}$ ;  $T_3$  和  $T_4$  管的发射结间和集电结间的微变电阻分别用  $r_{b'e}$  和  $r_{b'c}$  代表,  $r_{ce}$  则代表集射两极间的微变电阻;  $\beta$  是  $T_3$  或  $T_4$  管的共射电流放大系数;  $R$  是限流电阻。这些参数之间有如下的数量关系:

$$r_{b'c} \gg r_{ce} \gg R > r_{b'e}, \quad \beta > 50$$

因此, 可以认为图 1-6 中的  $i' \approx \beta i_b \approx dV / r_{b'e} = g_{b'e} dV$ 。所以, 魏氏恒流源电路的输出电阻为

$$\begin{aligned}
 r_o &= dV/dI_C \approx dV/(g_c dV + 2g_b' dV) \\
 &= r_{ce} r_b' c / (r_b' c + 2r_{ce}) \approx r_{ce}
 \end{aligned}
 \tag{1-5}$$

### 1.3 简单镜象恒流源电路的其它形式

魏氏恒流源除图 1-4 的电路外，还有多种多样的其它形式。图 1-7a 是用一对横向 PNP 管组成的魏氏恒流源电路，其中  $I_R$  是基准电流， $I_C$  是供输出的镜象恒流； $+V$  为直流稳压电源。由于横向 PNP 管的  $\beta$  比较小，因此，在图 1-7a 电路中， $I_C$  和  $I_R$  相差较大。为了使  $I_C \approx I_R$ ，可以增加一个 PNP 管，接成如图 1-7b 或图 1-7c 的电路。

图 1-7d 是输出微安级恒流的电路，参考文献 [1] 495~499 页对该电路有详尽的分析。

图 1-7e 是一个两管射极回路中都接有电流负反馈电阻的简单镜象恒流源电路， $R_{e1}$  可等于  $R_{e2}$ ，也可以不等。这种恒流源电路在线性集成电路中用的很多，它的输出电阻比不用电流负反馈电阻的图 1-4 电路的高，而输出电流则小的多。

以上所介绍的各种简单镜象恒流源电路中的恒流，显然都是靠电源电压  $+V_C$  或  $+V$  的稳定来保证的。若电源电压不稳，则可多用两个晶体管来稳压和作温度补偿，如图 1-7f 所示。在此图中， $T_3$ 、 $T_4$  两管仍然分别是基准电流管和镜象恒流输出管。 $T_1$  管的集、基两极短接后反向运用作为稳压管，它的稳定电压为  $V_Z$ 。 $T_2$  管是  $T_1$  管的温度补偿管。 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  三管做在同一块单晶硅小片上并且靠的很近，因此，这三管的特性参数和温度状况都很一致。所以， $V_{BE2} = V_{BE3} =$



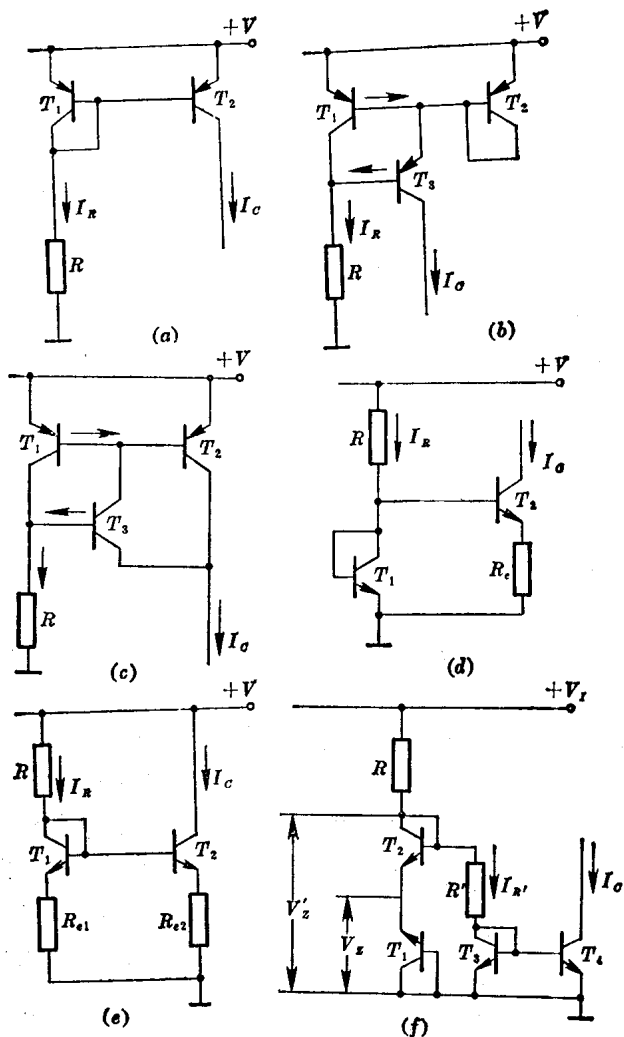


图 1-7 简单镜像恒流源电路的一些变种

- (a) 用一对 PNP 管的
- (b) 用三个 PNP 管的(之一)
- (c) 用三个 PNP 管的(之二)
- (d) 输出微安级恒流的
- (e) 具有电流负反馈的
- (f) 用于电源电压  $V_I$  不稳时的电路