

电源实用技术系列书



# 线性集成稳压电源实用电路

XIANXING JICHENGWENYADIANYUAN SHIYONG DIANLU

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

- 电压基准
- 三端集成稳压器
- 低压差线性稳压器
- 线性充电器电路
- 集成稳压器应用电路与工程设计



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

电 源 实 用 技 术 系 列 书

# 线性集成稳压电源实用电路

---

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书在简介了线性集成稳压电源工作原理和技术特性的基础上,以线性集成稳压电源实用电路为本书的核心内容,突出实用性,结合国内外线性集成稳压电源的应用和发展,全面系统地阐述了线性集成稳压电源的最新应用技术。

全书共七章,系统地介绍了线性稳压电源、电压基准、三端集成稳压器、低压差线性稳压器、线性充电器电路、集成稳压器的应用电路、集成稳压电源应用与工程设计。全书重点贯穿在线性集成稳压电源外围电路的设计及应用上。全书列举的稳压电源实用电路,可直接或经部分修改应用到电信、信息、航天、军事、教学和家电等领域的电子设备中。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、军事、家电行业从事电源开发、设计和应用的工程技术人员阅读,也可供高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

线性集成稳压电源实用电路/周志敏,周纪海,纪爱华编著. —北京:中国电力出版社,2006

(电源实用技术系列书)

ISBN 7-5083-4253-4

I. 线... II. ①周... ②周... ③纪... III. 线性集成电路-稳压电源-电源电路 IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 039902 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 7 月第一版 2006 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 507 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前言

本书为《电源实用技术系列书》之一。《电源实用技术系列书》主要以介绍各种常用电源的实用技术为主线，重点叙述其设计应用及最新实用技术。本系列书包括《逆变电源实用技术》、《阀控式密封铅酸蓄电池实用技术》、《开关电源实用电路》、《变频电源实用技术》、《线性集成稳压电源实用电路》。

随着电子技术的高速发展，电子系统的应用领域越来越广泛，电子设备的种类也越来越多，电子设备与人们的工作、生活的关系日益密切，而电子设备都离不开可靠的电源，对电源的要求更加灵活多样。电子设备的小型化和低成本化使电源以轻、薄、小和高效率为发展方向。

电源是各种电子设备必不可少的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性和可靠性指标。对于不同的电子设备和不同的应用场合，电子设备所需要的电源种类和对电源的输入与输出指标都有着不同的要求。在电子设备电源的设计上，要根据电子设备对电源提出的技术指标，发挥线性稳压器和开关稳压器的各自的特点，以此来满足电子设备对电源提出的不同的要求。

为此，本书结合国内外线性稳压电源技术的发展动向，重点介绍线性集成稳压电源应用电路和工程设计。本书力求做到通俗易懂和结合实际，以使从事线性稳压电源开发、设计、应用和维护人员能从中获益。读者可以以此为“桥梁”，系统的全面了解和掌握线性稳压电源的设计和应用技术。

本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内的专业学者和同行的大力支持。在此表示衷心的感谢。

由于时间短，水平有限，难免有错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

2006年2月

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第 1 章 线性稳压电源</b>      | 1   |
| 1.1 稳压电源的分类              | 1   |
| 1.2 稳压电源工作原理             | 4   |
| 1.3 集成稳压电路               | 16  |
| <b>第 2 章 电压基准</b>        | 22  |
| 2.1 电压基准的特性及选用           | 22  |
| 2.2 电压基准的应用电路            | 32  |
| <b>第 3 章 三端集成稳压器</b>     | 42  |
| 3.1 三端集成稳压器分类            | 42  |
| 3.2 三端集成稳压器应用电路          | 49  |
| 3.3 三端稳压器扩展应用电路          | 59  |
| 3.4 TL431 三端稳压器结构及技术特性   | 64  |
| 3.5 集成稳压器的选择             | 76  |
| <b>第 4 章 低压差线性稳压器</b>    | 78  |
| 4.1 低压差稳压技术              | 78  |
| 4.2 LDO 稳压器集成电路          | 84  |
| 4.3 LDO 稳压器的应用           | 108 |
| <b>第 5 章 线性充电器电路</b>     | 115 |
| 5.1 阀控密封铅酸蓄电池充电器         | 115 |
| 5.2 镉镍电池充电器              | 117 |
| 5.3 锂离子电池充电器             | 122 |
| 5.4 便携式设备中的锂离子电池充电器      | 148 |
| 5.5 多功能充电器               | 171 |
| <b>第 6 章 集成稳压器的应用电路</b>  | 190 |
| 6.1 稳压电源应用电路             | 190 |
| 6.2 线性集成稳压器的应用电路         | 216 |
| 6.3 LDO 稳压电源的应用电路        | 220 |
| <b>第 7 章 稳压电源应用与工程设计</b> | 226 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 7.1 稳压电源可靠性设计 .....        | 226        |
| 7.2 稳压电源的电磁兼容性 .....       | 242        |
| 7.3 稳压电源的抗干扰设计 .....       | 249        |
| <b>附录 1 稳压电源技术术语 .....</b> | <b>279</b> |
| <b>附录 2 PCB 技术术语 .....</b> | <b>288</b> |
| 参考文献 .....                 | 293        |



# 第 1 章



## 线 性 稳 压 电 源

### 1.1 稳压电源的分类

稳压电源分为交流稳压电源和直流稳压电源两大类(本书主要阐述直流稳压电源),而直流稳压电源又可分为化学电源、开关型直流稳压电源、线性直流稳压电源和混合型直流稳压电源(本书主要阐述线性直流稳压电源)。

#### 1.1.1 直流稳压电源的种类

直流稳压电源可分为化学电源、线性稳压电源和开关型直流稳压电源,它们又分别具有各种不同类型和不同的技术特性。

##### 1. 化学电源

化学电源是实用的原电池,其品种繁多,按其使用的特点大体可分为如下几类:

(1) 蓄电池。蓄电池具有可以多次反复使用,放电后可以对其充电使活性物质还原的特点,因而被广泛应用。蓄电池主要有铅酸蓄电池、镉镍、镍氢、锂离子电池等。

(2) 燃料电池。燃料电池一般以天然燃料或其他可燃物质如氢、甲醇、煤气等作为负极的反应物质,以空气中的氧或纯氧作为正极的反应物质。燃料电池的正、负极本身不包含活性物质,只是个催化转换元件。燃料电池与其他电池相比有如下特点:①能量转换效率高(节省燃料资源);②污染小、噪声低;③高度的可靠性;④适用能力强。

随着科学技术的发展,国外各电源公司积极的研制各种智能化电池;而在可充电电池材料方面,美国研制人员发现锰的一种碘化物,用它可以制造出便宜、小巧、放电时间长,多次充电后仍保持性能良好的环保型充电电池。

##### 2. 线性稳压电源

线性稳压电源是通过改变晶体管的导通程度来改变和控制其输出的电压和电流,在线性稳压电源中晶体管相当于一个可变电阻,串接在供电回路中。由于可变电阻与负载流过相同的电流,因此要消耗掉大量的能量并导致升温,电压转换效率低。线性稳压电源有一个共同的特点就是它的功率器件调整管工作在线性区,靠调整管极间的电压降来稳定输出。由于调整管静态损耗大,需要安装一个很大的散热器给它散热。由于线性电源的变压器工作在工频(50Hz)上,所以质量较大。

线性稳压电源优点是稳定性高,纹波小,可靠性高,易做成多路输出连续可调的电源。缺点是体积大、较笨重、效率相对较低。这类稳压电源又有很多种,从输出性质可分为稳压电源、稳流电源和集稳压、稳流于一身的稳压稳流(双稳)电源。从输出值来看可分固定输出电源、波段开关调整式和电位器连续可调式几种。从输出指示上可分指针指示型和数字显示式型等。

美国仙童(FC)公司于20世纪70年代初首先推出 $\mu A7800$ 系列和 $\mu A7900$ 系列三端固定式集成稳压器。它的问世是线性稳压电源集成电路的一大革命。它极大地简化了电源的设计与应用,

能以最简方式（类似于三极管）接入电路，并具有较完善的过电流、过电压、过热保护功能。目前，7800 系列和 7900 系列已成为世界通用系列，是用途最广、销量最大的集成稳压器。其优点是使用方便，不需作任何调整，外围电路简单，工作安全可靠，适合制作通用型、标称输出的稳压电源。其缺点是输出电压不能调整，不能直接输出非标称值电压，电压稳定度还不够高。

三端可调式集成稳压器是 20 世纪 70 年代末至 80 年代初发展起来的，是由美国国家半导体公司（NSC）首创的第二代三端集成稳压器。它既保留了三端固定式稳压器结构简单的优点，又克服了电压不可调整的缺点，并且在电压稳定度上比三端固定式稳压器提高了一个数量级。适合制作实验室电源及多种供电方式的直流稳压电源。它也可以设计成固定式来代替三端固定式稳压器，进一步改善稳压性能。

低压差集成稳压器是近年来问世的高效率线性集成稳压器，其输入、输出压差低至  $0.2 \sim 0.6\text{V}$ ，使电源效率大为提高。产品大致分三端固定式、三端（或多端）可调式两类。

跟踪式正、负压对称输出集成稳压器的特点是当正电压因某种原因而发生变化时，负电压输出能自动跟踪并产生相应的变化，使二者的绝对值仍相等。跟踪特性对于采用双电源供电的精密运算放大器尤为必要，可防止运放因正、负电源电压不对称而产生零漂。

### 3. 开关型直流稳压电源

开关型直流稳压电源是与线性稳压电源不同的一类稳压电源，它的电路型式主要有单端反激式、单端正激式、半桥式、推挽式和全桥式。它和线性电源的根本区别在于电路中的变压器不工作在工频而是工作在几十千赫兹到几兆赫兹。功率管不是工作在线性区，而是饱和及截止区，即工作在开关状态；开关型直流稳压电源也因此而得名。

无工频变压器式开关电源亦称低损耗电源，由于内部器件工作在高频开关状态，所以本身消耗的能量很低，电源效率可达 80%，甚至 90%，比普通线性稳压电源提高近一倍。开关型直流稳压电源所用集成电路分两种：单端或双端输出式脉冲宽度调制器、脉冲频率调制器。二者均可构成无工频变压器的开关电源。它们是利用体积很小的高频变压器来实现电压转换及电网隔离，因此能省掉体积笨重的工频变压器。

单片开关式稳压器是在 20 世纪 80 年代至 90 年代发展起来的一种开关式集成稳压器，它将脉宽调制器、功率输出级、保护电路等集成在一个芯片中。典型产品有意一法半导体有限公司（SGS-Thomson）生产的 L4960、L4970 两大系列，稳压器效率可达 90% 以上，并且输出电压连续可调，适合制造从几十瓦至几百瓦的开关电源。

单片开关电源属于 AC/DC 电源变换器，单片开关电源集成电路自 20 世纪 90 年代中期问世以来便显示出强大的生命力。单片开关电源具有高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳性能指标等优点，现已成为开发中、小功率开关电源、精密开关电源及开关电源模块的优选集成电路。

开关电源的优点是体积小，质量轻，稳定可靠；缺点相对于线性电源来说纹波较大（一般  $\leq 1\% U_{O(P-P)}$ ，好的可做到十几  $\text{mV}_{(P-P)}$  或更小）。

开关电源一般分为：

（1）AC/DC 电源。该类电源也称一次电源，它自电网取得能量，经过高压整流滤波电路得到一个直流高压，再供给 DC/DC 变换器，在 DC/DC 变换器输出端获得一个或几个稳定的直流输出电压，功率从几瓦到几千瓦均有，适用于不同场合。属此类产品的规格型号繁多，通信电源中的一次电源（AC220 输入，DC48V 或 24V 输出）也属此类。

（2）DC/DC 模块电源。随着科学技术飞速发展，对电源可靠性、容量/体积比要求越来越高，DC/DC 模块电源越来越显示其优越性，它工作频率高、体积小、可靠性高，便于安装和组合扩容，所以越来越被广泛采用。DC/DC 模块电源也称为二次电源，其输入为未经稳压的直流电，





在DC/DC变换器模块的输出端获得一个或几个稳定的直流输出电压。目前国内虽有相应模块生产,但因生产工艺未能赶上国际水平,故障率较高。DC/DC模块电源的突出优点是电路结构简单,效率高和输出电压、电流的纹波值接近于零。

### 1.1.2 稳压电源的技术指标

稳压电源的主要技术指标包括输入电压范围  $u$ 、输出电压  $U_o$ 、最大输出电流  $I_{om}$ 、最大输出功率  $P_{om}$ 、最大功耗  $P_{dm}$ 、电压调整率  $S_U$ 、负载调整率  $S_I$ 、电源效率  $\eta$  和输出纹波电压  $U_{RP}$  等。其中,电压调整率、负载调整率分别代表着输入稳压特性和输出稳压特性。

稳压电源的技术指标分为两种:一种是特性指标,包括允许的输入电压、输出电压、输出电流及输出电压调节范围等;另一种是质量指标,用来衡量输出直流电压的稳定程度,包括稳压系数、输出电阻、温度系数及纹波电压等。

由于输出直流电压  $U_o$  随输入直流电压  $U_i$  (即整流滤波电路的输出电压,其数值可近似认为与交流电源电压成正比)、输出电流  $I_o$  和环境温度  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 的变动而变动,即输出电压  $U_o = f(U_i, I_o, T)$ , 因而输出电压变化量的一般式可表示为

$$\Delta U_o = \frac{\partial U_o}{\partial U_i} \Delta U_i + \frac{\partial U_o}{\partial I_o} \Delta I_o + \frac{\partial U_o}{\partial T} \Delta T \quad (1-1)$$

或

$$\Delta U_o = K_U \Delta U_i + R_o \Delta I_o + S_T \Delta T \quad (1-2)$$

式中的三个系数分别定义如下:

(1) 输入调整因数

$$K_U = \left. \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} \right|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1-3)$$

$K_U$  反映了输入电压波动对输出电压的影响,实际上常用输入电压变化  $\Delta U_i$  时引起输出电压的相对变化来表示,给稳压电源接上额定负载,首先测出在标称输入电压时的输出电压值  $U_o$ ,然后连续调节输入电压,使之从规定的最小值一直变化到最大值,记下输出电压与标称值的最大偏差  $\Delta U_o$ ,则电压调整率为

$$S_U = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i} \times 100\% \quad \left|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1-4)$$

电压调整率也可定义为:在温度和负载恒定条件下,输入电压变化10%,输出电压的变化,单位为mV。当输入电压  $U_i$  (整流、滤波的输出电压) 在规定范围内变动时,输出电压  $U_o$  的变化应该很小,一般要求为  $U_i / U_o \leq 1\%$ 。

有时也以输出电压和输入电压的相对变化之比来表征稳压性能,称为稳压系数,其定义为

$$S_r = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i} \times 100\% \quad \left|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1-5)$$

稳压系数  $S_r$  表示在负载电流和环境温度不变的条件下,输入电压的相对变化量  $\Delta U_i / U_i$  与输出电压的相对变化量  $\Delta U_o / U_o$  之比。

稳压系数  $S_r$  大小,反映一个稳压电源克服输入电压变化的能力。在同样的输入电压变化条件下,  $S_r$  越小,输出电压的变化越小,电源的稳定度越高。通常  $S_r$  约为  $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。稳压系数  $S_r$  可写成如下形式

$$S_r = A_n \frac{U_o}{U_i} \quad (1-6)$$

$$n = R_2 / (R_1 + R_2)$$

式中  $A$ ——比较放大电路的放大倍数；

$n$ ——取样电路的分压系数。

从式(1-6)可得出取样电路的分压系数  $n$  愈大, 加入比较放大电路输入端的那部分输出电压变化量就愈大, 所以  $S_r$  就愈大。

(2) 输出电阻。稳压电源负载变化时(从空载到满载), 其输出电压  $U_o$ , 应基本保持不变, 稳压电源这方面的性能可用输出电阻表征。 $R_o$  反映负载变动时, 输出电压维持恒定的能力,  $R_o$  越小, 则  $I_o$  变化时输出电压的变化也越小。性能优良的稳压电源, 输出电阻可小到  $1\Omega$ , 甚至  $0.01\Omega$ 。输出电阻  $R_o$  是指输入电压及环境温度不变的条件下, 负载电流变化  $\Delta I_o$  引起输出电压变化  $\Delta U_o$  的程度; 也就是输出电压变化量  $\Delta U_o$  与负载电流变化量  $\Delta I_o$  的比值, 即

$$R_o = \left. \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \right|_{\substack{\Delta U_i = 0 \\ \Delta T = 0}} \quad (1-7)$$

$R_o$  反映负载电流  $I_o$  变化对  $U_o$  的影响, 输出电阻  $R_o$  的单位为  $\Omega$ 。

(3) 温度系数

$$S_T = \left. \frac{\Delta U_o}{\Delta T} \right|_{\substack{\Delta U_i = 0 \\ \Delta I_o = 0}} \quad (\text{mV}/^\circ\text{C}) \quad (1-8)$$

温度系数愈小, 输出电压愈稳定。当环境温度变化时, 会引起输出电压的漂移。良好的稳压电源, 应在环境温度变化时, 有效地抑制输出电压的漂移, 保持输出电压稳定。

(4) 纹波电压。纹波电压是指稳压电路输出端的交流分量, 一般为毫伏数量级, 它表示输出电压的微小波动。通常用有效值或峰峰值来表示, 即当输入电压为  $220\text{V}$  时, 在额定输出直流电压、直流电流的情况下测出的交流分量。应当指出的是, 经过稳压可以使整流滤波后的纹波电压大大降低, 降低的倍数反比于稳压系数  $S_r$ 。稳压系数  $S_r$  较小的稳压电路, 它的输出纹波电压一般也较小。

## 1.2 稳压电源工作原理

### 1.2.1 直流稳压电源

实际使用的稳压电源, 按其外特性, 可分为电压源和电流源。当一个电压源和一个电流源能够为同一个负载提供相同的电压、电流和功率时, 这两个电源对该负载来说是等效的, 可以互相置换, 这种置换称为等效变换。

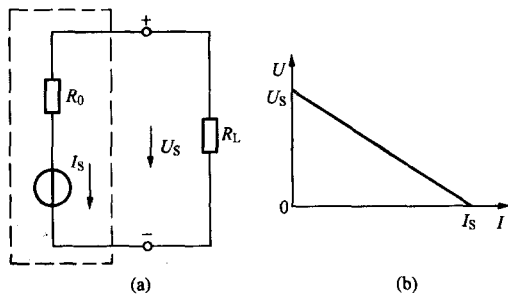


图 1-1 电压源特性图

(a) 原理图; (b) 理想外特性曲线

#### 1. 电压源

在电路分析课程中, 将能够向外电路提供电压的装置称为电压源。如, 电池、发电机等均是电压源。在物理学中, 电池表示成电动势  $E$  和内阻  $R_0$  相串联的电路模型, 电池是一个典型的电压源, 所以, 电压源也可表示成电动势和内阻相串联的电路模型。通常不使用电动势  $E$ , 而改用电压源所能输出的恒压值  $U_S$ , 如图 1-1 (a) 所示虚线框内部的电路。图中电压源旁的箭头为  $U_S$  的参考方向。 $U_S$  和  $E$  是不同性质

的两个物理量,  $U_S$  是描述电压源所能输出的恒值电压, 该值的大小与  $E$  相等, 设定的参考方向与  $E$  相反。当电压源与负载电阻  $R_L$  相连时, 描述电压源外特性的函数式是

$$U = f(I) \quad (1-9)$$

描述理想化电压源外特性的函数式是

$$U = U_S - IR_0 \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可见, 理想化电压源的外特性曲线是直线, 如图 1-1 (b) 所示, 图 1-1 (b) 又称为电压源伏 (U) 安 (A) 特性曲线。图 1-1 (b) 纵轴上的点, 为电压源输出电流等于 0 的情况, 相当于电压源处在开路的状态下。当电压源开路时, 电压源的输出电压  $U$  就等于  $U_S$ , 所以,  $U_S$  的值等于电压源的开路电压。图 1-1 (b) 横轴上的点, 为电压源输出电压等于 0 的情况, 相当于电压源处在短路的状态下 (实际上这是不允许的), 电压源输出电流为  $I_S$ , 所以,  $I_S$  称为短路电流。计算短路电流的表达式为

$$I_S = \frac{U_S}{R_0} \quad (1-11)$$

$U = f(I)$  曲线的斜率为  $R_0$ ,  $R_0$  越小, 斜率越小, 直线越平坦。当  $R_0 = 0$  时, 电源外特性曲线是一条平行与  $I$  轴的直线。具有这种外特性曲线的电压源输出电压保持恒定值  $U_S$ , 这种电压源称为理想电压源, 简称恒压源。将图 1-1 (a) 虚线框内部电路的电阻  $R_0$  去掉, 剩下的电路就是恒压源电路的模型。当恒压源的  $U_S$  值为 0 时, 该恒压源可看作一个短路元件。

## 2. 电流源

在电路分析课程中, 将能够向外界提供电流的装置称为电流源。如, 激励线圈产生恒定磁场的设备。在物理学中, 电流源可表示成输出电流  $I_S$  和内阻  $R_S$  相并联的电路模型, 如图 1-2 (a) 虚线框内部的电路所示, 图中电流源上的箭头为  $I_S$  的参考方向。

当电流源与负载电阻  $R_L$  相连时, 电流源向  $R_L$  提供的电流为  $I$ , 流过内阻  $R_S$  的电流为  $U/R_S$ , 描述电流源外特性的函数式是

$$I = f(U) \quad (1-12)$$

描述理想化电流源外特性函数关系的表达式是

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可见, 理想化电流源外特性曲线是直线, 如图 1-2 (b) 所示。图 1-2 (b) 纵轴上的点, 为电流源输出电压等于 0 的情况, 相当于电流源处在短路的状态下, 电流源输出电流为  $I_S$ 。图 1-2 (b) 横轴上的点, 为电流源输出电流等于 0 的情况, 相当于电流源处在开路的状态下 (实际上这也是不允许的), 当电流源开路时, 电流源输出电压  $U_S$  等于  $I_S R_S$ 。  $I = f(U)$  曲线的斜率为  $R_S$ ,  $R_S$  越大, 斜率越小, 直线越平坦。当  $R_S = \infty$  时, 电源外特性曲线是一条平行于  $U$  轴的直线。具有这种外特性曲线的电流源输出电流保持恒定值  $I_S$ , 这种电流源称为理想电流源, 简称恒流源。将图 1-2 (a) 虚线框内部电路的电阻  $R_S$  去掉, 剩下的电路就是恒流源电路的模型。当恒流源的  $I_S$  值为 0 时, 该恒流源可看作一个开路元件。

## 3. 电压源和电流源的等效变换

实现电压源和电流源互相置换的条件是: 电压源和电流源的外特性必须一样。凡是外特性一

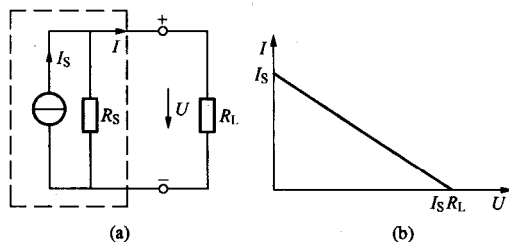


图 1-2 电流源特性图  
(a) 原理图; (b) 理想外特性曲线

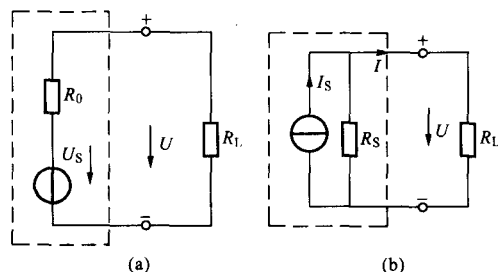


图 1-3 电压源和电流源图

(a) 电压源; (b) 电流源

样的电源, 对任何外电路而言都是等效的, 都可以进行互相置换。可互相置换的电源称为等效电源。在电路分析课程中, 用等效电源置换原电源后, 不影响外电路的工作状态。为了讨论置换的方法, 将电压源和电流源画在一起, 如图 1-3 所示。

由电压源的外特性方程式 (1-10) 和电流源的外特性方程式 (1-13) 可得: 当电压源和电流源满足  $U_S = I_S R_S$  和  $R_0 = R_S$  这两个条件时, 电压源和电流源的外特性就相同, 可以互相置换。

即将恒定电压为  $U_S$ , 内阻为  $R_0$  的电压源, 等效为恒定电流为  $I_S$ , 内阻为  $R_S$  的电流源, 反之也成立。电压源和电流源作等效变换时应注意的几个问题是:

(1) 电压源和电流源参考方向在变换前后应保持对外电路等效。在图 1-3 (a) 中,  $U_S$  的方向为上正下负, 对外电路而言, 电流是从“+”端流出, 经外电阻  $R_L$  流向“-”端。变换后的电流源在外电路中的电流应保持不变, 即从“+”端流出, 经外电阻  $R_L$  流向“-”端, 所以, 恒流源  $I_S$  的方向应从下流向上, 与  $U_S$  的方向正好相反。

(2) 电源的等效变换仅对外电路而言, 对电源内部是不等效的。例如, 当外电路开路时, 电压源的输出电流为 0, 电压源不产生功率, 内阻上也不消耗功率; 但对电流源来说, 其内阻上仍有电流流过, 内阻将消耗功率。

因恒压源的外特性是平行于电流轴的直线, 而恒流源的外特性是平行于电压轴的直线, 他们是两条完全不一样的外特性曲线, 所以恒压源和恒流源不能互相置换。

### 1.2.2 线性直流稳压电路

线性稳压电源一般由变压器、整流器和稳压器三大部分组成, 变压器把市电交流电压变为所需要的低压交流电。整流器把交流电变为直流电。经滤波后, 稳压器再把不稳定的直流电压变为稳定的直流电压输出。经整流滤波后输出的直流电压, 虽然平滑程度较好, 但其稳定性是比较差的。其原因主要有以下几个方面:

(1) 由于输入电压 (市电) 不稳定 (通常交流电网允许有  $\pm 10\%$  的波动), 而导致整流滤波电路输出直流电压不稳定。

(2) 当负载  $R_L$  变化 (即负载电流  $I_L$  变化时, 由于整流滤波电路存在一定的内阻, 使得输出直流电压发生变化。

(3) 当环境温度发生变化时, 引起电路元件 (特别是半导体器件) 参数发生变化, 导致输出电压发生变化。

整流滤波电路只适用于对输出电压要求不高的电路, 而大多数电子设备, 要求电源电压稳定。所以, 经整流滤波后的直流电压, 必须采取一定的稳压措施, 才能适合电子设备的需要。常用的稳压电路有并联型和串联型稳压电路两种类型。

#### 1. 稳压管稳压电路

(1) 稳压管稳压电路的工作原理。

图 1-4 为硅稳压管稳压电路, 市电交 220V 电压经变压器变压、桥式整流

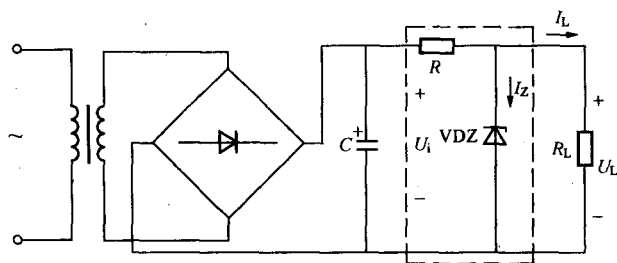


图 1-4 稳压管稳压电路



电路和电容滤波器滤波得到直流电压  $U_i$ ，再经过限流电阻  $R$  和稳压管  $VDZ$  组成的稳压电路接到负载  $R_L$  上。图 1-4 电路中的  $VDZ$  和  $R$  构成了稳压调节电路，因稳压元件  $VDZ$  与负载是并联连接的，故称并联型稳压电路。图中输入电压  $U_i$  就是整流滤波电路的输出电压， $R$  是限流、调压电阻，输出电压  $U_L$  就是稳压管  $VDZ$  的稳压值  $U_Z$ ，通过  $R$  的电流为

$$I = I_Z + I_L \quad (1-14)$$

且

$$U_L = U_Z = U_i - IR \quad (1-15)$$

电路中稳压管  $VDZ$  工作于反偏状态，该电路的稳压原理是：针对市电 220V 交流电压波动，当交流电源电压增加而使整流输出电压  $U_i$  随着增加，而  $U_i$  的升高又会引起输出电压  $U_L$ （即  $U_Z$ ）的增大。由稳压管的稳压特性可知， $U_Z$  的增大，势必引起  $I_Z$  的较大增大；于是限流电阻  $R$  上的电流  $I$  增大， $R$  上的电压降也增大，这在很大程度上让  $R$  承担了  $U_i$  的变化，从而使  $U_L$  基本上趋于稳定（ $U_i \uparrow \rightarrow U_L \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow \downarrow$ ）。反之，当  $U_i$  下降而引起  $U_L$  变小时，也会引起  $I_Z$  减小， $R$  上的压降  $U_R$  减小，同样保持了  $U_L$  的基本稳定。

同理，针对负载发生变化引起电压不稳定：当负载电流  $I_L$  变化（即  $R_L$  变化），当负载电流  $I_L$  增大时，在  $U_i$  不变的情况下，势必会引起  $U_L$ （即  $U_Z$ ）的减小，使  $I_Z$  有较大的下降，因而保持了总电流  $I$ （ $I = I_Z + I_L$ ）基本不变，使  $U_L$  基本稳定。

由以上分析可见，在这种稳压电路中，稳压管起着电流控制作用。即不论是由于  $U_i$  或  $I_L$  的变化，使输出电压  $U_L$  发生小的波动时， $I_Z$  都会产生较大变化。 $I_Z$  的变化或是改变了总电流的大小而调整了  $R$  上的压降，或是补偿了  $I_L$  的变化，结果都使  $U_L$  维持基本不变。 $R$  在电路中起着限流和调压作用。如  $R=0$ ，则会使  $U_i$ （远大于  $U_Z$ ）直接加于  $VDZ$  两端，引起过大的  $I_Z$ ，使  $D_Z$  损坏。另外， $R=0$  时，始终是  $U_L = U_i$ ，电路不会有稳压性能。因此，这种电路的稳压作用是稳压管  $D_Z$  和限流电阻  $R$  共同完成的。

(2) 主要特点。并联型稳压管稳压电源的优点是电路结构简单，负载电流变化较小时，稳压效果好；缺点是输出电压只能等于稳压管的稳定电压，允许电流的变化幅度也受到稳压管稳定电流的限制。只适用于功率较小和负载电流变化不大的应用。稳压管稳压电路的输出电压的大小是固定的，由稳压管的稳定电压决定，使用不方便。

## 2. 恒压源

恒压源电路结构。恒压源电路由稳压管稳压电路和运算放大器组成，如图 1-5 所示。图 1-5 (a) 是反相输入恒压源电路，其输出电压为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_Z \quad (1-16)$$

图 1-5 (b) 是同相输入恒压源电路，其输出电压为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_Z \quad (1-17)$$

恒压源的特点是：输出电压可调，端口电压随电流变化很小，即内阻  $r_o$  很小，输出电压更稳定。

## 3. 恒流源的特点与产品分类

恒流源亦称电流源或稳流源，它能向负载提供恒定的电流。目前，恒流源正向集成化、多用途的方向发展，并被广泛用于传感器、电子仪器、现代通信等领域。专用恒流源器件已有 50 多年的发展史。从早期的电子真空稳流管，发展成半导体恒流二极管 (CRD)、恒流三极管 (CRT)，现已进入集成恒流源（包括三端可调恒流源、四端可调恒流源、高压恒流源、恒流型集成温度传

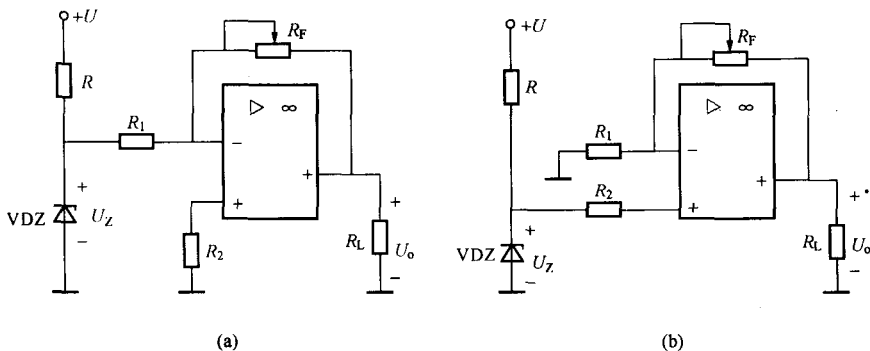


图 1-5 恒压源电路结构

(a) 反相输入; (b) 同相输入

感器)全面发展的新时期。

目前,国内外生产的恒流管与集成恒流源典型产品的分类情况见表 1-1。表 1-1 中的稳流管亦称镇流管,是电子真空器件。恒流二极管的恒定电流  $I_H$  为固定值。恒流三极管可在小范围 (0.08 ~ 7mA) 内调节  $I_H$  值。三端可调恒流源能在较大范围 (5 ~ 500mA) 内精细调节  $I_H$ 。四端可调恒流源不仅能在极宽范围 (3 $\mu$ A ~ 2.5A) 内对  $I_H$  进行精细调节,还能调节自身的电流温度系数  $\alpha_T$ , 使为正、负或等于零。高压集成恒流源的最高工作电压可达 100 ~ 150V。恒流式集成温度传感器则等效于高内阻且输出电流与温度成正比的恒流源,专用于测量温度。

表 1-1 国内外生产的恒流管与集成恒流源典型产品的分类

| 产品名称  |                | 型 号                    | 恒定电流 $I_H$ /mA                   | 封装形式              | 生产厂家                    |
|-------|----------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------------|
| 恒流管   | 稳流管            | WL1P ~ WL31P (10 种)    | 175 ~ 1000                       | J8 - 1B4          | 上海电子管厂                  |
|       | 恒流二极管<br>(CRD) | 2DH1 ~ 2DH15 (8 种)     | (0.08 ~ 0.15) ~<br>(0.85 ~ 1.15) | EC - 1 或 S - 1    | 江苏南通晶体管厂                |
|       |                | 2DH101 ~ 2DH115 (8 种)  |                                  |                   |                         |
|       |                | 2DH02 ~ 2DH60 (11 种)   | 0.2 ~ 6.0                        | EC - 1 或 EC - 2   | 杭州大学                    |
|       |                | 2DH022 ~ 2DH560 (18 种) | 0.22 ~ 5.60                      |                   | 浙江海门晶体管厂                |
|       |                | 1N5283 ~ 1N5314 (32 种) | 0.22 ~ 4.70                      | DO - 7            | 美国摩托罗拉公司                |
|       |                | CR022 ~ CR470 (32 种)   | 0.22 ~ 4.70                      | TO - 18           | 美国西利康尼克斯公司              |
|       |                | A122 ~ A561            | 1.2 ~ 5.6                        |                   | 日本石塚电子公司                |
|       | 恒流三极管<br>(CRT) | 3DH1 ~ 3DH15 (15 种)    | (0.08 ~ 0.15) ~<br>(5.30 ~ 7.00) | B - 1 或 S - 1     | 江苏南通晶体管厂                |
|       |                | 3DH101 ~ 3DH115 (15 种) |                                  |                   |                         |
| 集成恒流源 | 三端可调<br>式恒流源   | 3DH010 ~ 3DH050 (5 种)  | 5 ~ 500                          | B - 4 或 F - 2     | 杭州大学                    |
|       |                | 3DH011 ~ 3DH031 (3 种)  |                                  |                   |                         |
|       |                | W334, SL134/234        | 1 $\mu$ A ~ 10mA                 | TO - 46 或 TO - 92 | 北京半导体器件五厂等<br>美国国家半导体公司 |
|       |                | LM134/234/334          |                                  |                   |                         |
|       | 四端可调<br>式恒流源   | 4DH1 ~ 4DH15 (4 种)     | 3 $\mu$ A ~ 2.5A                 | B - 3 或 F - 2     | 杭州大学                    |
|       | 高压集成<br>恒流源    | 3CR3H (耐压 100V)        | 1.5 ~ 50                         | B - 3 (三端)        | 杭州大学                    |
|       |                | HVC2 (耐压 150V)         | 1 ~ 10                           | B - 3 (四端)        |                         |

续表

| 产品名称  | 型 号           | 恒定电流 $I_H/\text{mA}$    | 封装形式          | 生产厂家      |
|-------|---------------|-------------------------|---------------|-----------|
| 集成恒流源 | AD590, AD592  | $1\mu\text{A}/\text{K}$ | TO-52         | 美国哈里斯公司   |
|       | HTS1          | $1\mu\text{A}/\text{K}$ | TO-92         | 杭州大学      |
|       | TMP17         | $1\mu\text{A}/\text{K}$ | SO-8          | 美国模拟器件公司  |
|       | LM134/234/334 | $10\text{mV}/\text{K}$  | TO-46 或 TO-92 | 美国国家半导体公司 |

## 4. 串联型稳压电路

(1) 串联型直流稳压电源工作原理。典型的串联型稳压电路是由调整电路、取样电路、基准电源、比较放大电路和保护电路五个基本部分组成。其框图如图 1-6 所示。

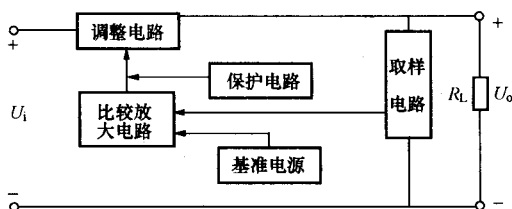


图 1-6 串联型稳压电路框图

没有放大环节的串联型直流稳压电源，因电路输出电压的变化量  $\Delta U_o$  是很微弱的，它对调整管的控制作用也很弱，因此稳压效果不够好，带有放大环节的稳压电源，就是在电路中增加一个直流放大器，把微弱的输出电压变化量  $\Delta U_o$  先加以放大，再去控制调整管，从而提高对调整管的控制作用，使稳压电源的稳定性能得到改善。当电网电压或负载变动引起输出电压  $U_o$  变化时，取样电路将输出电压  $U_o$  的一部分反馈回比较放大器，并与基准电压进行比较，产生的误差电压经放大后去控制调整管的基极电流，自动地改变调整管的集射极间电压，以补偿  $U_o$  的变化，从而维持输出电压基本不变。

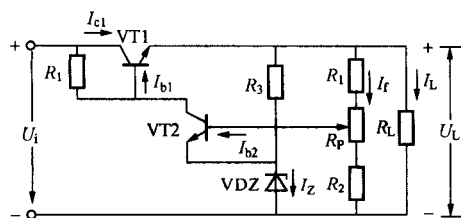


图 1-7 带有放大环节的串联型稳压电路

该电路的稳压过程如下：当输入电压  $U_i$  增加或负载电流减小时，将会引起输出电压  $U_L$  增加。 $U_L$  的增加量通过  $R_1$ 、 $R_2$  分压取样，使 VT2 的基极电压  $U_{b2}$  升高，由于 VT2 的射极电压  $U_{e2} = U_Z$  基本不变，所以 VT2 基极和发射极电压  $U_{be2}$  增加 ( $U_{be2} = U_{b2} - U_Z$ )， $I_{e2}$  增加，由于  $I_{e2}$  的增加使  $U_{e2}$  下降 ( $U_{e2} = U_{b1}$ )，使得 VT1 的基极和发射极的电压  $U_{be1}$  减小，导致  $I_{c1}$  减小，而  $U_{ce1}$  增大，使  $U_L$  基本上维持稳定。上述稳压过程可表示为：

该电路的稳压过程如下：当输入电压  $U_i$  增加或负载电流减小时，将会引起输出电压  $U_L$  增加。 $U_L$  的增加量通过  $R_1$ 、 $R_2$  分压取样，使 VT2 的基极电压  $U_{b2}$  升高，由于 VT2 的射极电压  $U_{e2} = U_Z$  基本不变，所以 VT2 基极和发射极电压  $U_{be2}$  增加 ( $U_{be2} = U_{b2} - U_Z$ )， $I_{e2}$  增加，由于  $I_{e2}$  的增加使  $U_{e2}$  下降 ( $U_{e2} = U_{b1}$ )，使得 VT1 的基极和发射极的电压  $U_{be1}$  减小，导致  $I_{c1}$  减小，而  $U_{ce1}$  增大，使  $U_L$  基本上维持稳定。上述稳压过程可表示为：

$$U_i \uparrow (\text{或 } I_L \downarrow) \rightarrow U_L \uparrow \rightarrow U_{be2} \uparrow \rightarrow I_{e2} \uparrow \rightarrow U_{e2} \downarrow (U_{b1} \downarrow) \rightarrow U_{be1} \downarrow \rightarrow I_{c1} \downarrow \rightarrow U_{ce1} \uparrow \rightarrow U_L \downarrow$$

同理，当  $U_i$  减小或  $I_L$  增大时， $U_L$  降低，通过上述调整过程又会使  $U_L$  上升，也维持  $U_L$  基本稳定。

## (2) 稳压电源的特性指标。

1) 输出电流  $I_L$  (即额定负载电流)。输出电流的最大值决定于调整管最大允许功耗  $P_{cm}$  和最大允许电流  $I_{cm}$ 。要求输出电流满足下式

$$I_L(U_{imax} - U_{omin}) \leq P_{cm}, I_L \leq I_{cm} \quad (1-18)$$

式中  $U_{imax}$ ——输入电压最大可能值;  
 $U_{omin}$ ——输出电压最小可能值。

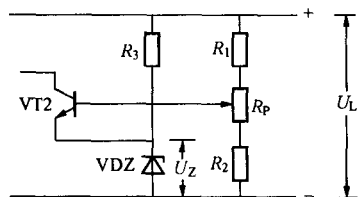


图 1-8 取样电路

2) 输出电压和输出电压调节范围。在固定的基准电压条件下, 改变取样电压比, 就可以调节输出电压, 如图 1-8 所示。由图 1-8 可知

$$U_{omax} = \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2} U_Z$$

$$U_{omin} = \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2 + R_p} U_Z \quad (1-19)$$

### 5. 运算放大器组成的调整管稳压电路

为了扩大稳压管稳压电路输出电流的变化范围, 可将稳压管稳压电路的输出端接到大电流三极管的基极, 而从发射极输出, 称为调整管稳压电路。

图 1-9 所示为由稳压管稳压电路和运算放大器组成的调整管稳压电路, 称为串联型稳压电路。将同相输入恒压源中运算放大器输出端接到大电流晶体管 VT 的基极, 从发射极输出便构成串联型稳压电路。

假设由于电网电压变化或负载电流变化引起输出电压  $U_1$  下降  $\rightarrow U_{i2}$  减少  $\rightarrow U_{be2} = U_{i2} - U_Z$  减少 ( $U_Z$  不变)  $\rightarrow I_{a2}$  下降  $\rightarrow U_{a2}$  上升  $\rightarrow I_{b1}$  增大  $\rightarrow I_{c1}$  增大  $\rightarrow U_{ce1}$  减少  $\rightarrow U_o = U_i - U_{ce1}$  增大, 抵消了  $U_1$  的下降, 使  $U_1$  保持不变。

同理, 当  $U_1$  增大时, 通过电路的调节亦可使  $U_1$  减少, 抑制了输出电压的增加, 使  $U_1$  保持不变。如果放大管的放大倍数足够大, 只要输出电压发生微小的变化, 就可以使调整管立即产生调整作用。

另外, 调节  $R_1$ , 也可以改变  $U_{i2}$ , 达到对输出电压  $U_o$  进行微调的目的。在稳压电路中, 由于流过调整管的电流等于负载电流, 所以调整管应选用大功率管, 并安装散热装置, 此外还需设有短路保护和过载保护电路。

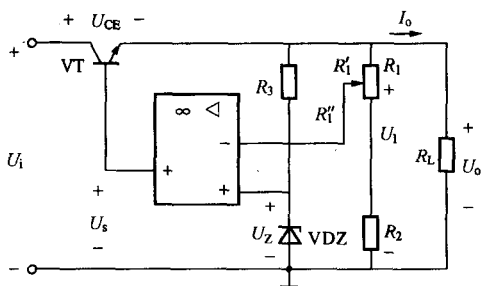


图 1-9 串联型稳压电路

### 6. 串联反馈式稳压电路

图 1-10 中  $U_i$  为串联反馈式稳压电路的输入电压, VT 为调整管, A 为比较放大电路,  $U_{REF}$  为基准电压, 它由稳压管 VDZ 与限流电阻 R 串联所构成的简单稳压电路获得,  $R_1$  与  $R_2$  组成分压反馈网络, 是用来反映输出电压变化的取样环节。

图 1-10 所示的稳压电路主回路是起调整作用的 BJT 晶体管 VT 与负载串联, 故称为串联式稳压电路。输出电压的变化量由分压反馈网络取样经放大电路 (A) 放大后去控制调整管 VT 的 c-e 极间的电压降, 从而

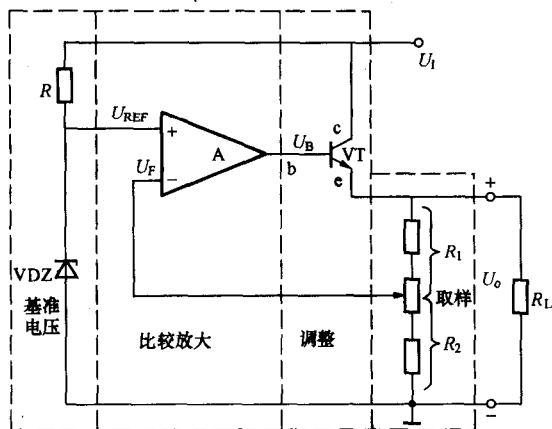


图 1-10 串联反馈式稳压电路的结构图





达到稳定输出电压  $U_o$  的目的。图 1-10 电路稳压原理可简述如下：当输入电压  $U_i$  增加（或负载电流  $I_o$  减小）时，导致输出电压  $U_o$  增加，随之反馈电压  $U_F = R_2 U_o / (R_1 + R_2) = F_U U_o$  也增加（ $F_U$  为反馈系数）。 $U_F$  与基准电压  $U_{REF}$  相比较，其差值电压经比较放大电路放大后使  $U_b$  和  $I_c$  减小，调整管 VT 的 c-e 极间电压  $U_{ce}$  增大，使  $U_o$  下降，从而维持  $U_o$  基本恒定。

同理，当输入电压  $U_i$  减小（或负载电流  $I_o$  增加）时，亦将使输出电压基本保持不变。从反馈放大电路的角度来看，这种电路属于电压串联负反馈电路。调整管 VT 连接成电压跟随器。因而可得

$$U_B = A_U (U_{REF} - F_U U_o) \approx U_o \quad (1-20)$$

或

$$U_o = U_{REF} \frac{A_U}{1 + A_U F_U} \quad (1-21)$$

式中， $A_U$  是比较放大电路的电压增益，是考虑了所带负载的影响，与开环增益  $A_{UO}$  不同。在深度负反馈条件下， $|1 + A_U F_U| \gg 1$  时，可得

$$U_o \approx \frac{U_{REF}}{F_U} = U_{REF} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (1-22)$$

式 (1-22) 表明，输出电压  $U_o$  与基准电压  $U_{REF}$  近似成正比，与反馈系数  $F_U$  成反比。当  $U_{REF}$  及  $F_U$  已定时， $U_o$  也就确定了，因此它是设计稳压电路的基本关系式。

值得注意的是，调整管 VT 的调整作用是依靠  $U_F$  和  $U_{REF}$  之间的偏差来实现的，必须有偏差才能调整。如果  $U_o$  绝对不变，调整管的  $U_{ce}$  也绝对不变，那么电路也就不能起调整作用了。所以  $U_o$  不可能达到绝对稳定，只能是基本稳定。因此，图 1-10 所示的系统是一个闭环有差调整系统。

由以上分析可知，当反馈越深时，调整作用越强，输出电压  $U_o$  也越稳定，电路的稳压系数  $g$  和输出电阻  $R_o$  也越小。

### 7. 实用串联型稳压电路

图 1-11 所示为带有放大环节的实用稳压电源电路。在图 1-11 中，BG1 是调整管，BG2 是比较放大管。输出电压变化量  $\Delta U_o$  的一部分与基准电压  $U_{REF}$  比较，并经 BG2 放大后输入到了 BG1 的基极。 $R_c$  是 BG2 的集电极电阻，又是 BG1 的上偏置电阻。 $R_1$ 、 $R_2$  是 BG2 的上、下偏置电阻，组成分压电路，把  $\Delta U_o$  的一部分作为输出电压的取样，送给 BG2 的基极，因此又叫取样电路。 $R_2$  上的电压  $U_{i2}$  叫取样电压。VDW 和  $R_3$  组成稳压电路，提供基准电压  $U_{REF} = U_{e2}$ 。

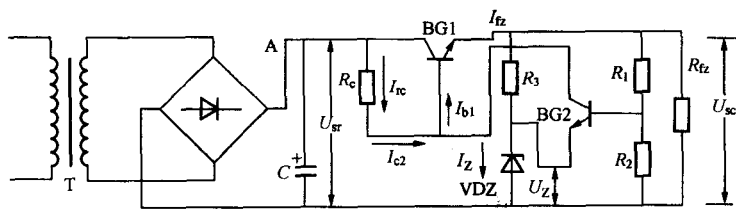


图 1-11 带有放大环节的稳压电源电路

从电路中可以看出，当输出电压  $U_o$  下降的时候，通过  $R_1$ 、 $R_2$  组成的分压电路的作用，BG2 的基极电位  $U_{b2}$  也下降了。由于基准电压  $U_{REF}$  使 BG2 的发射极电位保持不变， $U_{be2} = U_{b2} - U_{REF}$  随之减小。于是 BG2 集电极电流  $I_{c2}$  减小， $U_{e2}$  增高，即 BG1 的基极电位  $U_{b1}$  增高，使  $I_{c1}$  增加，管压降  $U_{ce1}$  减小，从而导致输出电压  $U_o$  保持基本稳定。BG2 的放大倍数越大，调整作用就越强，输