

无线电电子基本知识之三

晶体管整流稳压电源设计

乔 琛编著

北 京 出 版 社

无线电电子基本知识之三
晶体管整流稳压电源设计

Jingtiguan Zheng liu Wenya
Dianyuan Sheji

乔 琛编著

※

北 京 出 版 社 出 版
(北京崇文门外东兴隆街51号)
新华书店北京发行所发行
马 池 口 印 刷 厂 印 刷

※

787×1092毫米 32开本 5.25 印张 115,000 字

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数 1—3,800

书号: 15071·73 定价: 0.90元

目 录

引 言	(1)
一、整流电路	(2)
1. 半波整流电路	(2)
2. 全波整流电路	(5)
3. 倍压整流电路	(10)
二、平滑滤波器	(14)
1. 整流器的输出电压和纹波因数	(14)
2. 电容的滤波作用	(17)
3. 电感的滤波作用	(28)
4. RC滤波器和LC滤波器	(30)
三、稳压电源的工作原理	(36)
1. 整流器内阻对输出电压的影响	(36)
2. 使输出电压稳定的方法	(37)
3. 稳压电源的质量指标	(39)
四、稳压管稳压电路	(44)
1. 稳压管的工作原理	(44)
2. 稳压管稳压电路	(48)
五、简单串联型晶体管稳压电路	(63)
1. 电路工作原理	(63)
2. 设计要点	(65)
六、典型反馈式串联型稳压电路	(72)
1. 基本作用原理	(72)

2. 提高工作性能的方法	(75)
七、稳压电源的输出电压调节	(85)
1. 调节输出电压的方法	(85)
2. 扩大电压调节范围的方法	(87)
八、稳压电源的过流保护	(98)
1. 限流型保护电路	(98)
2. 截流型保护电路	(101)
九、实用的稳压电路	(105)
1. WYJ-72 型直流稳压电源	(105)
2. WYJ-6B 型直流稳压电源	(109)
3. 集电极输出直流稳压电源	(114)
十、其他类型晶体管稳压电源	(117)
1. 并联型晶体管稳压电源	(117)
2. 开关型晶体管稳压电源	(120)
3. 集成电路稳压电源	(124)
附录一 常用整流二极管稳压管主要特性参数	(134)
附录二 常用低频大功率晶体管主要特性参数	(140)
附录三 常用小功率晶体管主要特性参数	(144)
附录四 几种集成稳压电源主要特性参数	(152)
附录五 小型整流电源变压器的设计方法	(155)

引 言

任何电子设备，从一个部件到一个系统，都需要有电源供电。这里所说的电源，就是电子设备的能源。一般说来，电子设备直接需要的是平滑的直流电源。获取这种直流电源的手段很多，如干电池、蓄电池和太阳能电池等，都是经常使用的直流电源，但应用最广泛的，还是将交流市电转换成直流电源的供电方法。实现这种供电，通常需要经过以下几个步骤：首先，利用变压器将供电网供给的交流电压转换成所需数值的交流电压；然后经过整流元件整流，获得单向脉动电流；再送入滤波器滤除脉动成分；最后经过稳压（或稳流）装置将稳定的直流输送给用电设备。在图 0-1 中，分别以方框表示了上述供电过程，这也是通常称之为直流（或整流）稳压电源的典型结构形式。本书主要讨论的内容，就是这种典型的直流稳压电源。

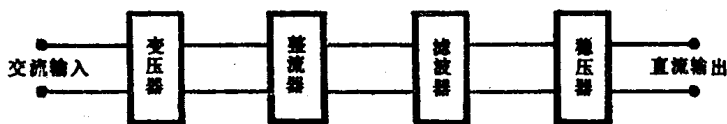


图 0-1

一、整流电路

1. 半波整流电路

图 1—1 描述了单相半波整流电路的工作原理。图中变压器 B 的作用，仅仅是将交流供电网的电压 U_1 ，利用适当的变比，使变压器次级得到所需要的交流电压 U_2 。假定 U_1 是正弦电压，则在正半周时（即 $0 < \omega t < \pi$ ），二极管 D 导通，有电流 I 通过负载 R_L ，负载两端便出现电压 U_o 。 I 和 U_o 也是正弦波形。但在负半周时（即 $\pi < \omega t < 2\pi$ ），因二极管 D 反偏而截止，回路被切断，所以 I 和 U_o 都消失。待下一个周期来到时，便再重复上述过程。于是，负载两端便得到了保留正半周，而负半周被切掉的单向脉冲电压。这种将交流电经过二极管变换成单向脉冲的作用，就称之为“整流”，上述电路就称为半波整流电路。这种整

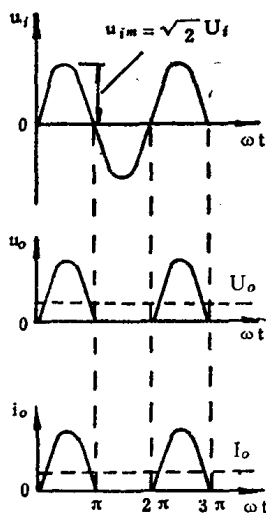
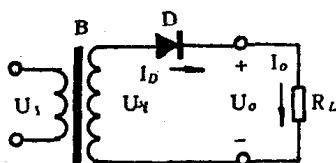


图 1—1

流电路虽然将交流电变成了脉动直流，但仍有零值和最大值的变化，而且存在电流的间歇，波动很大。

半波整流电路的输出直流电压与输入交流电压的相互关系为：

$$U_0 = 0.45 U_i \quad \text{或} \quad U_i = 2.22 U_0 \quad (1.1)$$

式中， U_0 代表输出直流电压，也就是图 1—1 中 u_0 电压波形的平均值； U_i 代表输入交流电压的有效值，也就是变压器次级线圈的电压 U_i 。

上式表明，这种整流电路的输出电压是很低的，其值还不到输入交流电压的二分之一。

半波整流电路的输出电流为：

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.45 \frac{U_i}{R_L} \quad (1.2)$$

式中， I_0 代表输出直流电流，也就是图 1—1 中 i_0 电流波形的平均值。因为直流电流 I_0 就是通过二极管的平均电流 I_{D0} ，所以， I_0 也是选择整流管的重要参数之一。但是，该电流的有效值要比平均值大得多，即

$$I_i = I_D = 1.57 I_0 \quad (1.3)$$

式中， I_i 和 I_D 分别表示通过变压器次级线圈和整流管的有效值电流。它是计算变压器次级伏安容量时的重要依据之一，即根据变压器次级的有效值电压 U_i 和有效值电流 I_i ，就可确定变压器次级的伏安容量（习惯上也称为功率），其关系式如下：

$$\begin{aligned} P_i &= U_i I_i = \frac{U_0}{0.45} \times 1.57 I_0 = 3.49 U_0 I_0 \\ &= 3.49 P_0 \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中， $P_0 = U_0 I_0$ ，是输出端负载的直流功率。

上式表明，变压器次级的功率（伏安容量）要比实际输

出的功率大得多，如果将（1.4）式改写成为下列形式，即

$$\xi = \frac{P_0}{P_i} = \frac{1}{3.49} = 0.29 \quad (1.5)$$

式中， ξ 称为变压器的利用系数。

由（1.5）式表明，在半波整流电路中，经变压器传递到负载的功率还不到30%。由此可见，半波整流电路是很不经济的，这是由于变压器次级线圈中的电流存在直流成分，造成直流磁化的结果，严格说来， ξ 应称为变压器次级的利用系数。因为变压器初级的工作情况有所不同，在初级线圈中不流通直流电流，所以，变压器初级的利用系数就比较高。此外，还应该说明的是，变压器利用系数既不是变压器效率，也不是功率因数，不应把它们混为一谈。

半波整流电路工作在负半周时，由于二极管被截止，所以变压器次级的电压将全部加在二极管两端。该电压就称为反电压，其最大值就是输入交流电压的最大值，即

$$U_{Rm} = \sqrt{2} U_i = \frac{\sqrt{2}}{0.45} U_0 = 3.14 U_0 \quad (1.6)$$

式中， U_{Rm} 代表最大反电压。在实际应用时，必须保证 U_{Rm} 值不超过二极管的反向击穿电压值。

在半波整流电路中，由于交流电的半个波形被切除，没有利用，而且通过变压器的电流又是单向的，存在着直流磁化，所以，变压器的利用率很低，损耗较大，经济指标差，只适宜于要求不高的小功率整流电路。

【例1.1】 在图1—1所示电路中，假定负载 R_L 需要得到9V的直流电压 U_0 ，5 A的工作电流 I_0 ，则变压器次级的交流电压至少应有：

$$U_1 = \frac{U_0}{0.45} = \frac{9}{0.45} = 20 \text{ V}$$

在实际工作过程中，由于二极管存在管压降，变压器次级绕组也有内压降，所以， U_1 的实际数值应比20V大些。例如，二极管的管压降为1V，变压器线圈的总内压降为0.5V，则 U_1 应取21.5V。因为负载电流为5A，所以通过变压器次级的有效值电流 I_1 为：

$$I_1 = 1.57 \times 5 = 7.85 \text{ A}$$

于是，求得变压器次级的伏安容量为：

$$P_1 = 7.85 \times 21.5 = 168.77 \text{ VA}$$

但是，实际输出的直流功率 P_0 却只有

$$P_0 = 5 \times 9 = 45 \text{ W}$$

由此可见，变压器的利用率是很低的。

整流管的选择，主要是根据整流电路中的工作电流和反电压。因负载电流为5A，这是通过整流管的平均电流，所以应选择整流电流大于5A的整流管。至于整流管的耐压，应根据变压器次级的电压来考虑。又因 U_1 为21.5V，所以最大反电压为

$$U_{Rm} = 1.41 \times 21.5 = 30.3 \text{ V}$$

故所选整流管的反向击穿电压应大于30.3V。

2. 全波整流电路

图1—2是常用的全波整流电路的形式之一。该电路实际上相当于把两个半波整流电路并在一起。其中，由 U_{11} 、 D_1 和 R_L 组成一个半波整流电路，以 U_{12} 、 D_2 和 R_L 组成另一个半波整流电路。 U_{11} 和 U_{12} 则利用变压器次级的中心抽头，构成大小相等、方向相反的两个电压。这样，当输入交流电

压为正半周时, U_{i1} 使 D_1 正偏而导通, 同时, U_{i2} 使 D_2 反偏而截止。负半周时, 工作情况正好相反, 即 D_2 导通, D_1 截止。如此交替工作, 结果使两个半周都有电流经负载 R_L 流通, 并且方向相同。所以, 输出电压 U_o 和输出电流 I_o 都要比半波整流时增大一倍。

全波整流电路的输出电压 U_o 和输入电压 U_i 的关系为:

$$\begin{aligned} U_o &= 2 \times 0.45 U_i \\ &= 0.9 U_i \\ \text{或 } U_i &\approx 1.11 U_o \end{aligned} \quad (1.7)$$

输出电流为:

$$\begin{aligned} I_o &= 2 \times 0.45 \frac{U_i}{R_L} \\ &= 0.9 \frac{U_i}{R_L} \end{aligned} \quad (1.8)$$

在以上式中, U_i 是整个变压器次级的一半电压的有效值 (即图中的 U_{i1} 或 U_{i2} 的

有效值)。这里的 I_o , 是指通过 R_L 的平均电流。对于每一只二极管来说, 其所通过的电流只有负载电流的二分之一。所以, 通过每个整流管和变压器次级每部分绕组的有效值电流为:

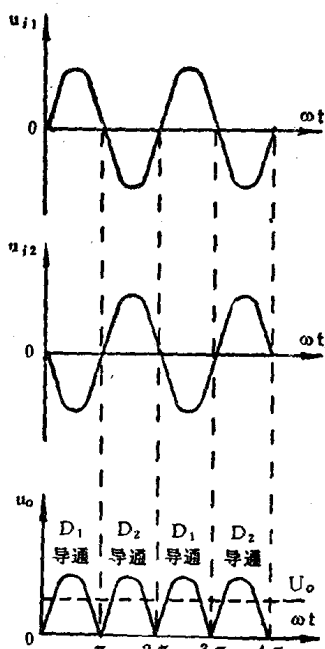
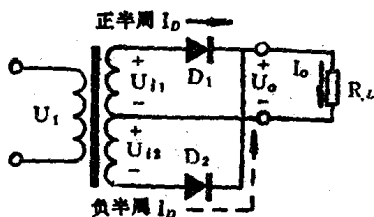


图 1-2

$$I_1 = I_D = 1.57 \times \frac{I_0}{2} = 0.785 I_0 \quad (1.9)$$

变压器次级每部分的伏安容量为：

$$P_{11} = U_1 I_1 = \frac{U_0}{0.9} \times 0.875 I_0 = 0.872 P_0 \quad (1.10)$$

变压器次级的全部伏安容量为：

$$P_i = 2 \times P_{11} = 1.744 P_0 \quad (1.11)$$

所以，变压器的利用系数为：

$$\xi = \frac{P_0}{P_i} = \frac{1}{1.744} = 0.573 \quad (1.12)$$

上列各式中的 $P_0 = U_0 I_0$ ，是输出端负载的功率。

在全波整流电路中，加在二极管两端的反电压与半波整流电路不同。当正半周时， D_1 导通， U_{11} 和 U_{12} 串联后（即变压器次级的全部电压）反向加在 D_2 上；负半周时， D_2 导通，该电压又反向加在 D_1 上。所以，出现在整流管两端的反向电压要比半波整流时增大一倍。其最大反电压为：

$$U_{Rm} = 2 \times \sqrt{2} U_1 = 3.14 U_0 \quad (1.13)$$

这种全波整流电路的工作质量，要比半波整流高得多。但变压器次级的绕组也要增多，同时整流管的反电压也比较高，这些则是它的缺点。

图 1—3 是另一种形式的全波整流电路，习惯上常称它为桥式整流电路。这是指它的外形结构而言的，实际上它并非真正的电桥。它的工作原理和图 1—2 电路基本相同。当正半周时， D_1 、 D_2 导通（ D_3 、 D_4 截止）；负半周时 D_3 、 D_4 导通（ D_1 、 D_2 截止）。任何半周都有电流通过负载 R_L ，并且方向相同。这种电路与图 1—2 电路之间的不同点，只

是在导通回路中多了一只二极管，变压器次级少了一个绕组。

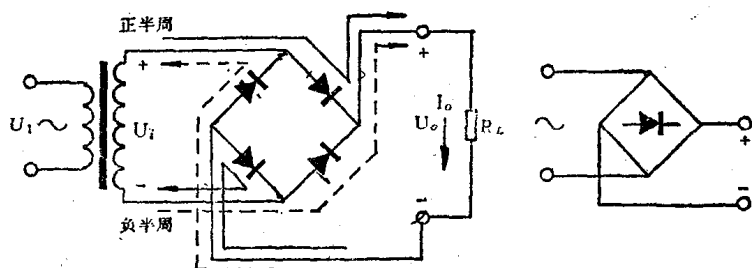


图 1-3

桥式整流电路的输出电压和输出电流，仍和前面介绍的全波整流电路一样，但整流管两端的最大反电压降低了。当正半周时，由于 D_1 、 D_2 导通， D_3 、 D_4 所承受的反电压基本上就是变压器次级的电压；负半周时，由于 D_3 、 D_4 导通， D_1 、 D_2 所承受的反电压情况也是如此。所以，整流管两端所承受的最大反电压为：

$$U_{Rm} = \sqrt{2} U_i = 1.57 U_o \quad (1.14)$$

这是因为正、负两个半周所构成的两次半波整流共用一个输入电压的结果。

由于桥式整流电路的变压器次级只需一个绕组，并在任何半周都有电流流通，且方向相反，这就使得变压器次级大体上处于正弦交流工作状态。因此，变压器次级的有效值电流也可按正弦波形来计算，即

$$I_i = 1.11 I_o \quad (1.15)$$

从而，变压器次级的伏安容量为：

$$\begin{aligned} P_i &= I_i U_i = 1.11 I_o \times 1.11 U_o \\ &= 1.232 P_o \end{aligned} \quad (1.16)$$

变压器的利用系数为:

$$\xi = \frac{P_o}{P_i} = \frac{1}{1.232} = 0.812 \quad (1.17)$$

表1-1

说 明	半 波	全 波	桥 式
直流输出电压 U_o 与交流输入电压 U_i 的关系	$U_o = 0.45U_i$ 或 $U_i = 2.22U_o$	$U_o = 0.9U_i$ 或 $U_i = 1.11U_o$	
通过整流管的平均电流 I_{D_o} 与直流输出电流 I_o 的关系	$I_{D_o} = I_o$	$I_{D_o} = 0.5I_o$	
通过整流管的峰值电流 I_{D_m} 与直流输出电流 I_o 的关系	$I_{D_m} = 3.14I_o$	$I_{D_m} = 1.57I_o$	
整流管所承受的反峰值电压 U_{R_m} 与 U_o 或 U_i 的关系	$U_{R_m} = 3.14U_o$ 或 $U_{R_m} = 1.41U_i$	$U_{R_m} = 3.14U_o$ 或 $U_{R_m} = 2.82U_i$	$U_{R_m} = 1.57U_o$ 或 $U_{R_m} = 1.41U_i$
通过变压器次级的有效值电流 I_i 与 I_o 的关系	$I_i = 1.57I_o$	$I_i = 0.785I_o$	$I_i = 1.11I_o$
变压器次级的伏安容量 P_i 与输出直流功率 P_o 的关系	$P_i = 3.488P_o$ ($P_o = U_o I_o$)	$P_i = 1.744P_o$ ($P_o = U_o I_o$)	$P_i = 1.232P_o$ ($P_o = U_o I_o$)
变压器次级的利用系数 ξ $\xi = P_o / P_i$	0.286	0.573	0.812
纹波因数 γ	1.21	0.484	
脉动系数	1.57	0.667	

注: 各整流器的输出端只接有电阻

由此可见, 桥式整流电路可使工作效率得到很大的提

高。目前，桥式整流电路是实际应用中最多的一种整流电路。

上述几种整流电路的主要性能参数见表 1—1。

【例 1.2】 在图 1—3 所示电路中，假定 $U_0 = 24\text{V}$ ， $I_0 = 3\text{A}$ ，则变压器次级所需的电压为：

$$U_i = 1.11U_0 = 1.11 \times 24 = 26.64\text{V}$$

考虑到二极管的管压降和变压器的内压降，实际的 U_i 值应适当取大一些。

由于每只整流管只通过输出电流的二分之一，所以，选择整流管时，其电流定额值可按 1.5A 考虑。此外，对于整流管的最大反电压值，可根据 U_0 来选择，也可根据算得的 U_i 选取，如

$$U_{Rm} = 1.57U_0 = 1.57 \times 24 = 37.68\text{V}$$

由 (1.17) 式，可算得变压器的次级功率为：

$$P_i = \frac{P_0}{\xi} = \frac{24 \times 3}{0.812} = 88.67\text{VA}$$

在以上的计算中，没有考虑整流管及变压器的内部功率损耗，因而实际的 P_i 取值应稍大些。

3. 倍压整流电路

图 1—4 是常用的倍压整流电路的形式之一，它的工作过程如下：当正半周时， D_1 导通，使 C_1 充电到输入交流电压的峰值 U_{im} ；负半周时， D_2 导通，使 C_1 两端的电压与电源电压串联起来对 C_2 充电。当负载电阻 R_L 很大时， C_2 的电压可保持接近于两倍输入交流电压的峰值，即 $2U_{im}$ 。所以，这是一种二倍压整流电路。

图 1—5 是另一形式的二倍压整流电路，它的工作过程

与图 1—4 相似。当正半周时, D_1 导通 (D_2 截止) 使 C_1 充电; 负半周时, D_2 导通 (D_1 截止), 使 C_2 充电。最后由 C_1 和 C_2 两个电容的电压串联起来构成输出电压 U_o 。当负载 R_L 比较大时 (也就是负载电流比较小), 电容的放电速度很慢, U_o 可接近两倍输入交流电压的峰值。

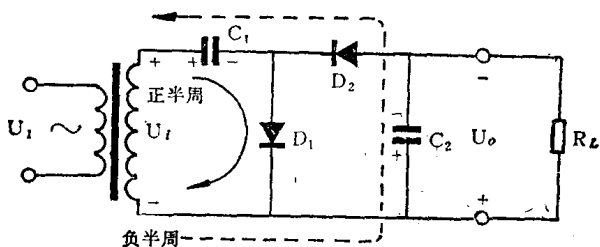


图 1—4

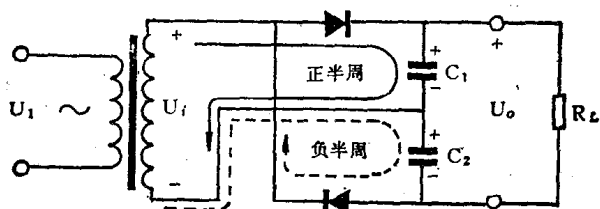


图 1—5

如上所述, 倍压整流电路的倍压作用, 主要是利用电容的充电来实现的。实际上也就是把电容所充得的电压逐个地串联起来, 组成一个总的输出电压。应用这一原理, 原则上可以组成任何倍数的倍压整流电路。

图 1—6 是一种三倍压整流电路, 它的工作过程是这样的: 当在第一个正半周时, D_1 导通, 使 C_1 充电到 U_{im} ; 负半周时, D_2 导通, U_i 与 C_1 的电压串联起来使 C_2 充电到 $2U_{im}$ 。在第二个正半周时, D_1 又导通, 由于 C_2 已有 $2U_{im}$ 电压, 因

而 D_3 也导通,使 C_3 充电到 $2U_{im}$ 。这种电路的输出电压 U_o ,是 C_1 的电压和 C_3 的电压之和,所以,输出电压为三倍于输入交流电压的峰值。这种三倍压整流电路共用三只二极管和三只电容器,其中除了 C_1 两端的电压为 U_{im} 外,其余电容两端的电压都是 $2U_{im}$ 。如果把 D_3 、 C_3 去掉,并从 C_2 两端输出电压,它就成为图1—4所示的二倍压整流电路。

倘若在图1—6中再增加一只二极管和一个电容器,就可以组成四倍压的整流电路。也就是说,每增加一只电容和一只二极管,就可增加一倍输出电压。用 n 只二极管和 n 只电容器,就可组成 n 倍于电源电压的倍压整流器。图1—7就是 n 倍压整流器的原理电

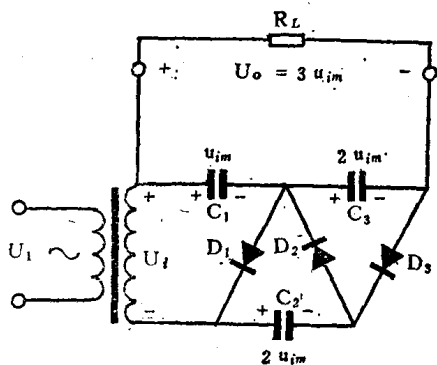


图 1—6

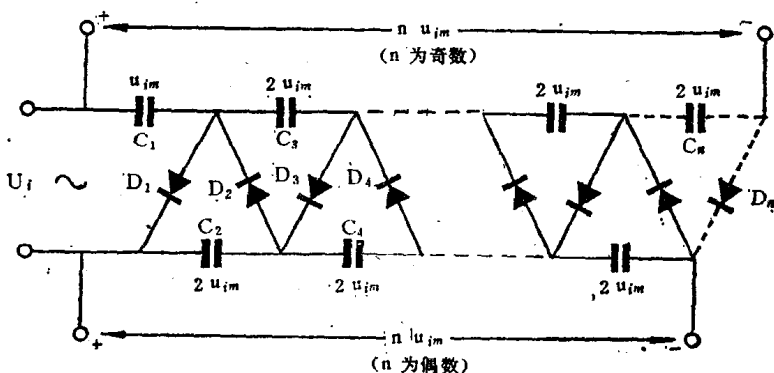


图 1—7

路。由于输出电压总是由电容两端电压的叠加，所以，从上部输出时，因为包括 C_1 两端的电压，必然是构成奇数倍的倍压输出；而从下部输出时，因为所有电容两端的电压都为 $2U_{im}$ ，故而构成的是偶数倍的倍压输出。

倍压整流电路，是利用低的交流电源和低耐压元件，以获取高的直流电压的一种好方法。但是，这种电路只适用于负载电流很小的场合，否则，不仅上述倍压关系不能成立，而且工作质量也很差。