

# 倍压整流电路的计算

李蜀川 杨忠孝 成友才

**摘要:**设计一种算法,详细推导倍压整流电路的充电过程,导出定量计算电容器电压的数学表达式,利用公式对对称、非对称倍压整流电路进行分析讨论,绘出了电容器电压充电曲线,并证明到底需要多少个充电周期才能达到倍压目的.本文还设计实验电路以验证推导结果的正确性.

**关键词:**倍压整流;冲击电流;跃变;初始值

**中图分类号:**TN702 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-4075(2002)01-0051-04

现代电子仪器、电子设备及家用电器中,在负载不重的小电流高电压供电场合,都广泛使用倍压整流电路.倍压整流,通过整流与滤波元件的组合,即可获得变压器次级输出电压峰值的二倍、三倍或多倍直流电压.但是,由于倍压整流电路的充电过程复杂,大量电子技术书籍在分析倍压整流电路工作原理时,对充电过程的描述多为定性分析,有的书籍甚至含糊不清,不利于读者理解.本文以二倍压整流电路为例,详细推导电容的充电过程,得出定量计算电容充电电压的数学表达式,并设计实验电路以验证推导的正确性.

## 1 倍压整流电路的经典分析

常用的二倍压整流电路有两种,一种叫桥式整流电路,如图 1.1 所示,变压器次级输出电压为正半周时, $D_1$  导通, $D_2$  截止,电源通过  $D_1$  对  $C_1$  充电,充至峰值  $\sqrt{2}U_2$ ;变压器次级输出电压为负半周时, $D_1$  截止, $D_2$  导通,电源通过  $D_2$  对  $C_2$  充电,充至峰值  $\sqrt{2}U_2$ ;向负载输出的电压为两电容器端电压之和,即  $V_1 \approx 2\sqrt{2}U_2$ .在负载不重的情况下, $C_1$ 、 $C_2$  两端电压能基本保持不变.这种电路的原理分析十分清晰,没什么争议.

另一种叫梯形二倍压整流电路,如图 1.2 所示,

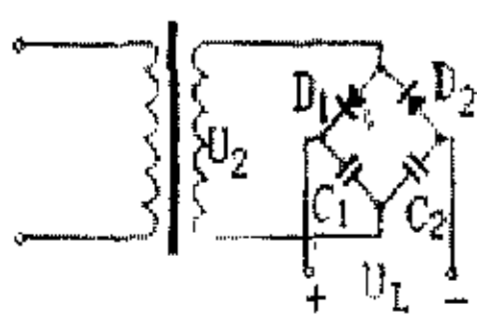


图 1.1

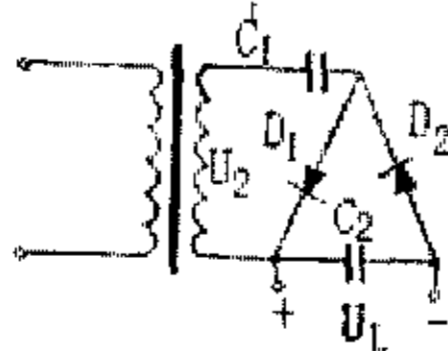


图 1.2

对其工作原理的描述,许多电子技术书籍都大同小异:“当变压器次级输出电压为正半周时,假定次级线圈上端为正,下端为负, $D_1$  导通, $D_2$  截止,电源对  $C_1$  充电,充至峰值  $\sqrt{2}U_2$ ,并基本保持不变.当变压器次级输出电压为负半周时,次级线圈上端为负,下端为正, $D_1$  截止, $D_2$  导通,这时  $C_1$  在正半周充的电压值  $\sqrt{2}U_2$  和线圈电压同极性迭加,其最大值为  $2\sqrt{2}U_2$ .这样经过几个周期之后, $C_2$  的电压基本上就是  $2\sqrt{2}U_2$  了,从而实现了二倍压整流.”它对二倍压整流电路原理分析的特点是:(1)对  $C_1$ 、 $C_2$  充电过程的描述,是定性而不是定量分析.(2)没能说明  $C_1$ 、 $C_2$  上电压的转移规律,以及  $C_2$  上的电压到底须要多少次充电才能达到  $2\sqrt{2}U_2$ .

## 2 倍压整流的分析计算

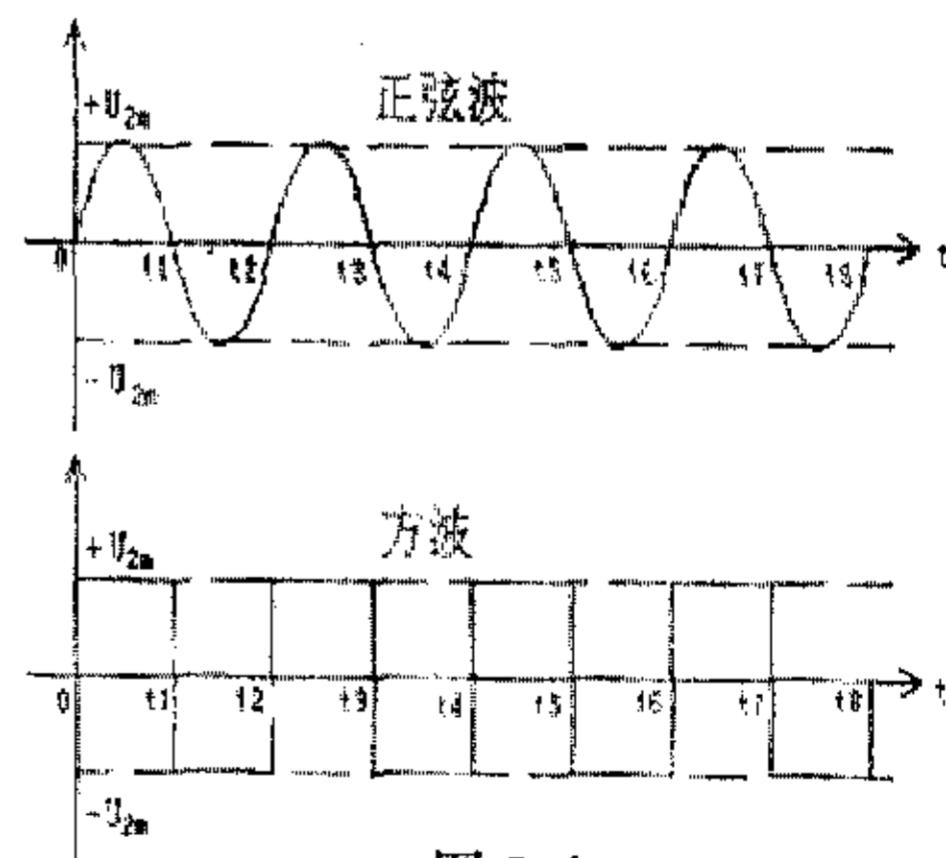


图 2.1

为了简化图 1.2 所示梯形二倍压整流电路的分

收稿日期:2001-11-06  
作者简介:李蜀川,南充教育学院理科部,讲师,四川南充,637000

析,设二极管正向导通电阻为零,视为短路;反向电阻为无穷大,视为开路.变压器副边按正弦规律变化的电压波形用正负交替变化的方波代替,方波的周期、峰值都与正弦波相同,如图 2.1 所示. $C_1$ 、 $C_2$  容量相同,电流、电压、电动势参考方向如下列各图所示.

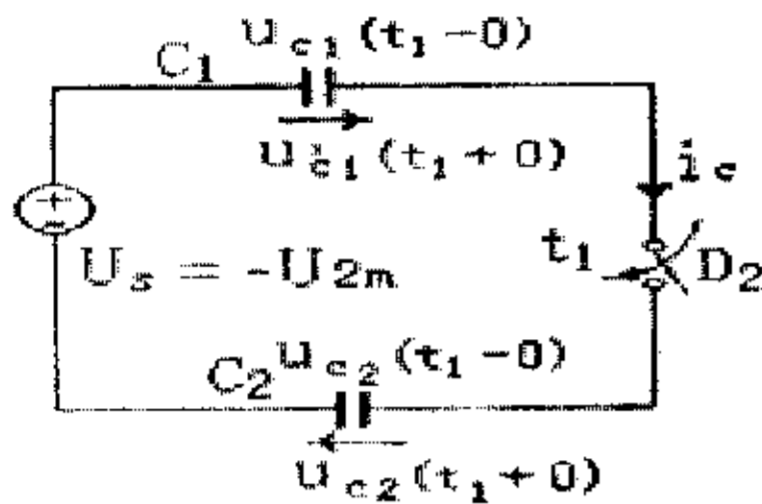


图 2.3

2.1  $0 \sim t_1$  期间,电源为第一个半周, $U_s = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ , $D_1$  正偏导通, $D_2$  反偏截止,其简化电路如图 2.3 所示.设电容器  $C_1$  无初始储能, $u_{c1}(0^-) = 0$ .在  $t = 0$  时刻  $D_1$  导通,电容  $C_1$  的电压立即跃变为  $U_s$  的峰值  $U_{c1}(0_+) = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ . $i_c$  是流过电容的冲激电流.

2.2  $t_1 \sim t_2$  期间,电源为第二个半周, $U_s = -U_{2m} = -\sqrt{2}U_2$ , $D_1$  反偏截止, $D_2$  正偏导通,其简化电路如图 2.3 所示.在  $t = t_1$  时刻  $D_2$  导通,电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压发生跃变,电容器  $C_1$  初始电压  $u_{c1}(t_1 - 0) = \sqrt{2}U_2$ ,设  $C_2$  无初始储能, $u_{c2}(t_1 - 0) = 0$ .根据基尔霍夫和电荷守恒定律列出方程:

$$u_{c1}(t_1 + 0) + u_{c2}(t_1 + 0) = -U_{2m} = -\sqrt{2}U_2 \quad ①$$

$$u_{c1}(t_1 + 0) = \frac{1}{C_1} \int_{t_1-0}^{t_1+0} i_c(t) dt + u_{c1}(t_1 - 0) \quad ②$$

$$u_{c2}(t_1 + 0) = \frac{1}{C_2} \int_{t_1-0}^{t_1+0} i_c(t) dt + u_{c2}(t_1 - 0) \quad ③$$

联立方程 ①②③ 求解得:

$$u_{c1}(t_1 + 0) = \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} = 0$$

$$u_{c2}(t_1 + 0) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (-2U_{2m}) = -U_{2m}.$$

2.3  $t_2 \sim t_3$  期间,电源为第三个半周, $U_s = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ , $D_1$  正偏导通, $D_2$  反偏截止,其简化电路如图 2.4 所示.在  $t = t_2$  时刻  $D_1$  导通,电容  $C_1$  的电压再次跃变为  $U_s$  的峰值  $u_{c1}(t_2 + 0) = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ .因  $D_2$  截止, $C_2$  上电压不变, $u_{c2}(t_2 + 0) = -U_{2m}$ .

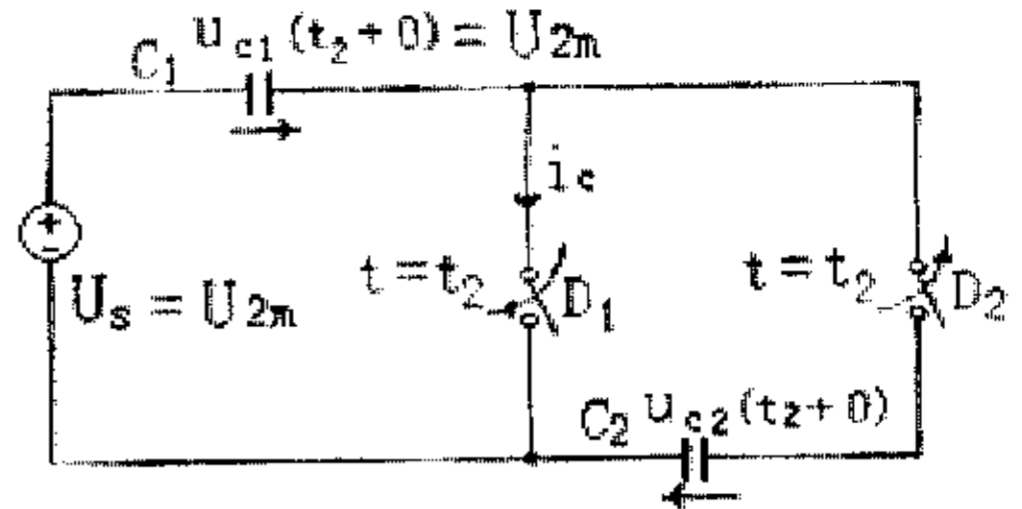


图 2.4

2.4  $t_3 \sim t_4$  期间,电源为第四个半周, $U_s = -U_{2m} = -\sqrt{2}U_2$ , $D_2$  正偏导通, $D_1$  反偏截止,其简化电路如图 2.5 所示.在  $t = t_3$  时刻  $D_2$  导通,电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压发生跃变,电容器  $C_1$  初始电压  $u_{c1}(t_3 - 0) = u_{c1}(t_2 + 0) = U_{2m}$ ;  $C_2$  初始  $u_{c2}(t_3 - 0) = u_{c2}(t_2 + 0) = -U_{2m}$ ;根据基尔霍夫和电荷守恒定律列出方程:

$$u_{c1}(t_3 + 0) + u_{c2}(t_3 + 0) = -U_{2m} = -\sqrt{2}U_2 \quad ①$$

$$u_{c1}(t_3 + 0) = \frac{1}{C_1} \int_{t_3-0}^{t_3+0} i_c(t) dt + u_{c1}(t_3 - 0) \quad ②$$

$$u_{c2}(t_3 + 0) = \frac{1}{C_2} \int_{t_3-0}^{t_3+0} i_c(t) dt + u_{c2}(t_3 - 0) \quad ③$$

联立方程 ①②③ 求解得:

$$u_{c1}(t_3 + 0) = \frac{1}{2} U_{2m} = U_{2m} - \frac{1}{2} U_{2m}.$$

$$u_{c2}(t_3 + 0) = -\frac{3}{2} U_{2m} = -U_{2m} - \frac{1}{2} U_{2m}.$$

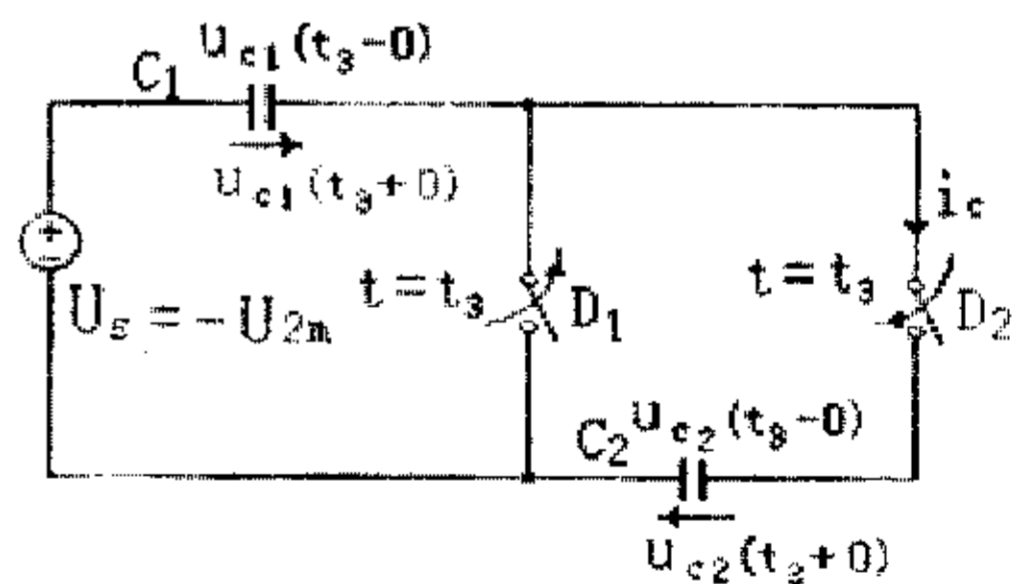


图 2.5

2.5  $t_4 \sim t_5$  期间,电源为第五个半周, $U_s = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ , $D_1$  正偏导通, $D_2$  反偏截止,其简化电路如图 2.6 所示.在  $t = t_4$  时刻  $D_1$  导通, $C_1$  电压跃变为  $u_{c1}(t_4 + 0) = U_{2m}$ .因  $D_2$  截止, $C_2$  电压保持不变  $u_{c2}(t_4 + 0) = -\frac{3}{2} U_{2m}$ .

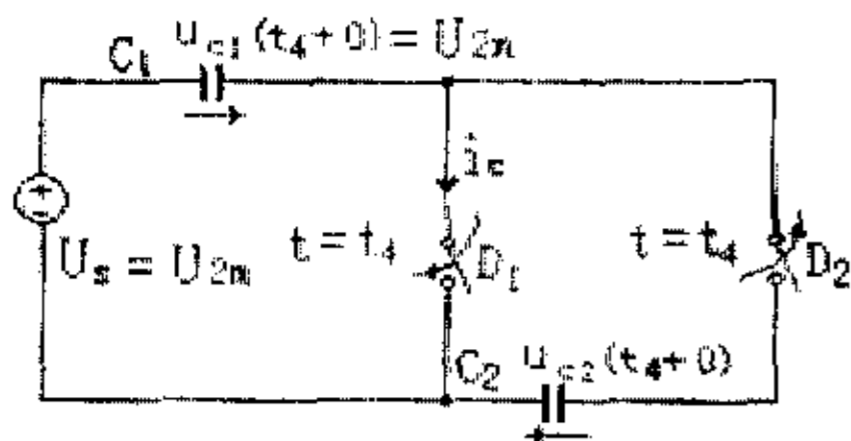


图 2.6

2.6  $t_5 \sim t_6$  期间,电源为第六个半周,  $U_s = -U_{2m}$ ,  $D_1$  反偏截止,  $D_2$  正偏导通,其简化电路如图 2.7 所示.在  $t = t_5$  时刻  $D_2$  导通,电容  $C_1$ 、 $C_2$  的电压发生跃变,电容器  $C_1$  初始电压  $u_{c1}(t_5 - 0) = U_{2m}$ .  $C_2$  初始电压  $u_{c2}(t_5 - 0) = u_{c2}(t_4 + 0) = -\frac{3}{2}U_{2m}$ ; 根据基尔霍夫和电荷守恒定律列出方程:

$$u_{c1}(t_5 + 0) + u_{c2}(t_5 + 0) = -U_{2m} = -\sqrt{2}U_2 \quad ①$$

$$u_{c1}(t_5 + 0) = \frac{1}{C_1} \int_{t_5-0}^{t_5+0} i_c(t) dt + u_{c1}(t_5 - 0) \quad ②$$

$$u_{c2}(t_5 + 0) = \frac{1}{C_2} \int_{t_5-0}^{t_5+0} i_c(t) dt + u_{c2}(t_5 - 0) \quad ③$$

联立方程 ①②③ 求解得:

$$u_{c1}(t_5 + 0) = \frac{3}{4}U_{2m} = U_{2m} - \frac{1}{4}U_{2m}$$

$$u_{c2}(t_5 + 0) = -\frac{7}{4}U_{2m} = -U_{2m} - \frac{1}{2}U_{2m} - \frac{1}{4}U_{2m}$$

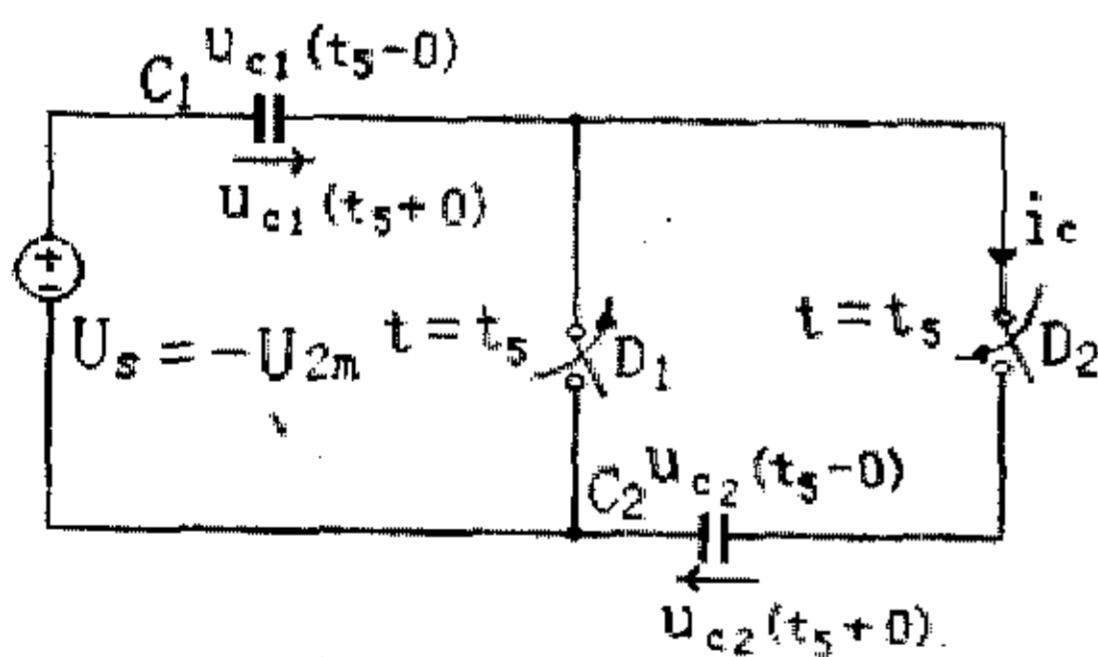


图 2.7

2.7 由前面的分析可导出计算  $C_1$ 、 $C_2$  电压的一般公式,  $n$  个周期 ( $2n$  个半周) 后,  $C_1$ 、 $C_2$  电压的表达式为:

$$u_{c1}(t_{2n-1} + 0) = U_{2m} - \frac{1}{2^{n-1}}U_{2m}$$

$$u_{c2}(t_{2n-1} + 0) = -(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{2^{n-1}})U_{2m} \\ = -2U_{2m}(1 - \frac{1}{2^n})$$

图 2.8 是电容器  $C_2$  的电压波形,电源用方波代替正弦波只是为了计算方便,不影响电压跃变规律和跃变幅度,对每次充电,我们可以将其分解为电容初始电压引起的跃变再叠加电源作用的结果.

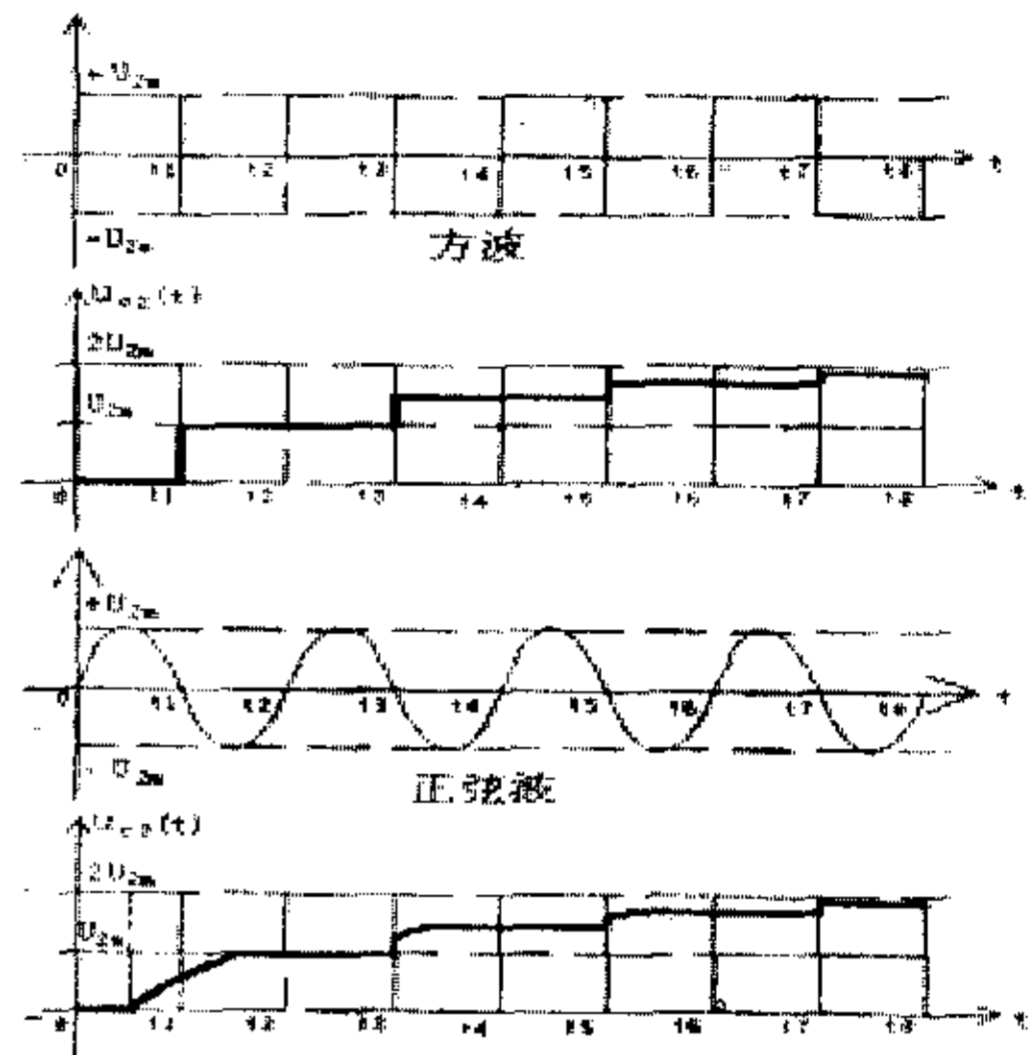


图 2.8  $C_2$  电压变化规律

### 3 模拟实验

图 3.1,是作者为验证前面的推导而设计的电路,稳压电源是功率为 100W 的晶体管串联型稳压电源,输出为  $U_0 = 12.9V$ ;电容  $C_1$ 、 $C_2$  均为  $220\mu F/400V$ ;  $D_1$ 、 $D_2$  是肖特基二极管;  $j$  是 12V 双触点高灵敏继电器,用来模拟正负交替的方波,

不按开关  $S$  时,其常闭触点  $j_1$ 、 $j_2$  闭合,电源输出上正下负,相当于方波的正半周,按开关  $S$  时,其常开触点  $j_1$ 、 $j_2$  闭合,电源输出上负下正,相当于方波的负半周.方波的周期为 20ms,继电器  $j$  的通断频率不可能那么快,但是好在  $C_1$ 、 $C_2$  的电压与周期无直接关系,而只与方波的跳变相关,所以上面的实验验证电路是有实际意义的.

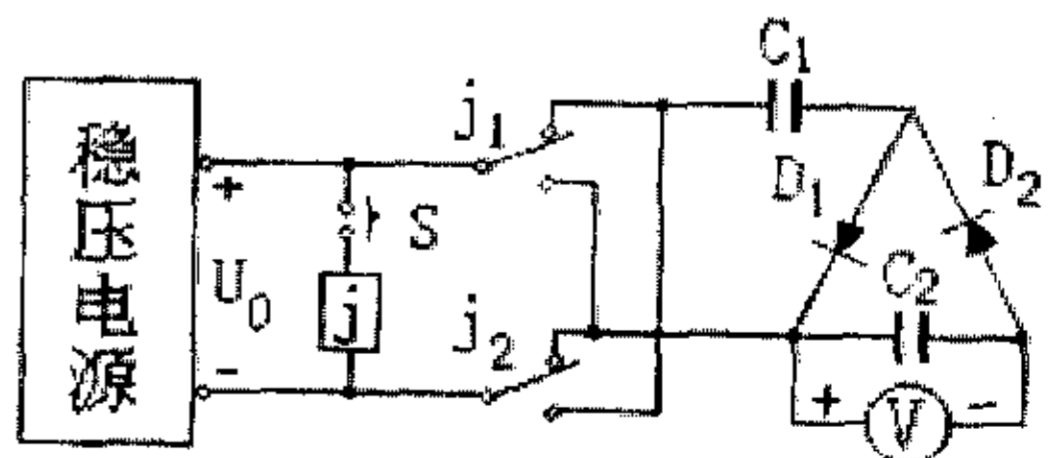


图 3.1

表 3.1

周期数	1	2	3	4	5	6	7	8	
C <sub>2</sub> 电压值	计算	12.9	19.3	22.4	24.1	24.9	25.3	25.6	25.7
	测量	12.4	18.4	21.4	23.1	24.1	24.5	24.7	25.0

上表是 C<sub>2</sub> 的电压实际测量值与计算值的比较,不难看出实际测量值与计算值吻合得相当好,从而证明了前面计算的正确性,表中的细微差异是电源、二极管内阻及电容漏电等原因引起的。

#### 4 结论

4.1 C<sub>1</sub> 在电源周期波作用下,电压是跳跃变化的,正半周时,不管 C<sub>1</sub> 的初始电压为多少,均被充至电源的峰值.负半周时,电源与 C<sub>1</sub> 共同作用,向 C<sub>2</sub> 中转移电荷,转移电荷的多少由电源电压峰值、C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 初始值决定.随着充电次数的增加,C<sub>1</sub> 的电压更加趋近 U<sub>m</sub>.

4.2 C<sub>2</sub> 的电压是阶梯上升的.每过一个周期 C<sub>2</sub> 被充电一次,C<sub>2</sub> 的电压就上升一个阶梯,只是越往后上升的阶梯越小.C<sub>2</sub> 每被充电一次,其电压就增加前一次增加量的一半,n 个周期后 C<sub>2</sub> 的电压  $uc_2 = -2U_{2m}(1 - \frac{1}{2^n})$ ,当  $n \rightarrow \infty$  时,  $uc_2 \rightarrow -2U_{2m}$ .这说明 C<sub>2</sub> 的电压必须经过无穷周才能达到 2U<sub>2m</sub>,但是从表 3.1 看出,当 n=5 时,  $uc_2 = -2U_{2m}(1 - \frac{1}{2^5}) = -$

$2U_{2m} \times \frac{31}{32} \approx -2U_{2m} \times 97\%$ ,这个值已经非常接近变压器输出电压峰值的二倍了,也就是说,我们可以认为 5 个周期后 C<sub>2</sub> 就被充至 2U<sub>2m</sub>.

4.3 以上分析的是 C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> 的特殊情况,若 C<sub>1</sub> ≠ C<sub>2</sub>,仿照前面的方法可以导出 n 个周期(2n 个半周)后 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 电压的表达式:

$$uc_1(t_{2n-1} + 0) = \frac{(C_1 - C_2)U_{2m}}{C_1 + C_2} + \frac{2C_1^2 U_{2m}}{(C_1 + C_2)^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} + \dots + \frac{C_2^{n-2}}{(C_1 + C_2)^{n-2}}\right) = \frac{(C_1 - C_2)U_{2m}}{C_1 + C_2} + \frac{2C_1 U_{2m}}{C_1 + C_2} \left[1 - \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2}\right)^{n-1}\right] \quad (1)$$

$$uc_2(t_{2n-1} + 0) = -\frac{2C_1 U_{2m}}{C_1 + C_2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_2^2}{(C_1 + C_2)^2} + \dots + \frac{C_2^{n-1}}{(C_1 + C_2)^{n-1}}\right) = -2U_{2m} \left[1 - \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2}\right)^n\right] \quad (2)$$

4.3.1 上面 ①、② 两式表明若 C<sub>1</sub> ≠ C<sub>2</sub>,C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 的电压充电规律是一致的,C<sub>1</sub> 的电压是跳跃变化的,C<sub>2</sub> 的电压是阶梯上升的,越往后上升的阶梯越小.

4.3.2 设 n = 1,即第二个半周后,若 C<sub>1</sub> < C<sub>2</sub>,  $uc_1 = \frac{(C_1 - C_2)U_{2m}}{C_1 + C_2} < 0$ ,说明 C<sub>1</sub> 在第一个半周充得的电荷全部向 C<sub>2</sub> 转移并被电源反向充电,C<sub>1</sub> 越小 uc<sub>1</sub> 越接近 -U<sub>2m</sub>,uc<sub>2</sub> 越远离 -2U<sub>2m</sub>,也就是说,C<sub>1</sub> 向 C<sub>2</sub> 转移的电荷越小.若 C<sub>1</sub> > C<sub>2</sub>,  $uc_1 = \frac{(C_1 - C_2)U_{2m}}{C_1 + C_2} > 0$ ,说明 C<sub>1</sub> 第一个半周充得的电荷只有部向 C<sub>2</sub> 转移.若 C<sub>1</sub> >> C<sub>2</sub>,  $uc_2 \approx -2U_{2m}$ ,也就是说只一次 C<sub>2</sub> 就被充电至 -2U<sub>2m</sub>.

#### 参考文献:

- 1 张国峰.晶体管直流稳压电源[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1984.
- 2 张惠,冯英.电源大全[M].成都:西南交大出版社,1993.
- 3 王至正,朱汉荣,肖福坤,等.电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,1990.

责任编辑:朱永金