

二极管峰值保持电路的分析*

李亚君
(浙江大学)

—

当被测量的物理量正比于某一非周期三角形脉冲的峰值时,为了读取被测量值,通常采用二极管峰值保持电路^[1,2]. 非周期的三角形电压脉冲,记为 $u_1(t)$, 如图 1 所示. U_m 是脉冲的幅值, t_1 和 t_2 分别是脉冲的前沿和后沿宽度, α_1 和 α_2 是脉冲前沿和后沿的斜率, 那么

$$\alpha_1 = \frac{U_m}{t_1}, \quad \alpha_2 = \frac{U_m}{t_2}.$$

常用的二极管峰值保持电路,如图 2 所示,图中 BG1 是射极跟随器, D 是开关二极管, C 是存储电容器, BG2 是源极跟随器. 为了便于分析,用 R_0 表示前级的输出阻抗,

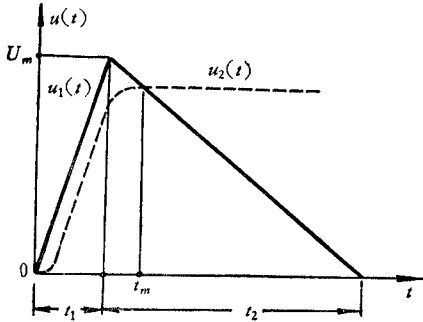


图 1

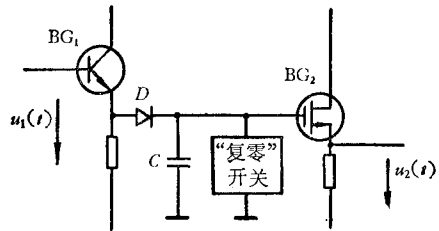


图 2

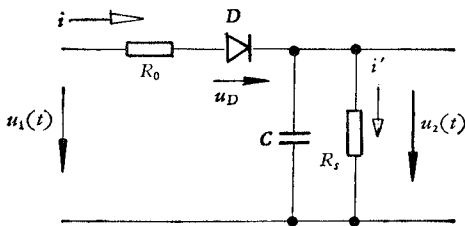


图 3

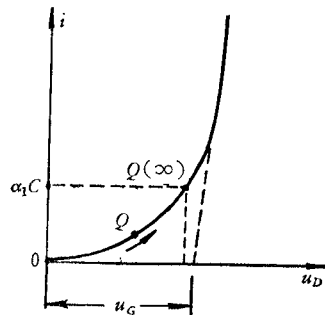


图 4

* 1979年11月5日收到。

R_s 表示后级的输入阻抗, 在 R_s 中还应包括存储电容器的漏电电阻和“复零”开关断开时的等效电阻.

在脉冲前沿作用时间里, 略去 R_s 的分流作用, 对于图 3 所示电路, 电路方程可以写成

$$iR_0 + u_D + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_1(t), \quad (1)$$

u_D 是二极管 D 两端的电压降, 它和电流 i 之间存在着非线性关系, 如图 4 所示. 图中 U_G 表示二极管的“门槛电压”在脉冲前沿作用的整个过程中

$$u_D \leq U_G, \quad (2)$$

本文将使用 Shockley 方程(指数曲线)来表示二极管的伏安特性

$$i = I_s [\exp(\gamma u_D) - 1], \quad (3)$$

其中 I_s 是二极管的反向饱和电流, γ 是一个和温度相关的系数. 若是在脉冲前沿作用时间里出现

$$u_D > U_G, \quad (4)$$

二极管的伏安特性就用折线来近似(图 4)

$$i = \begin{cases} 0, & \text{当 } u_D \leq U_G, \\ \frac{1}{R_D} (u_D - U_G), & \text{当 } u_D > U_G. \end{cases} \quad (5a)$$

$$(5b)$$

$\frac{1}{R_D}$ 是折线的斜率.

二

在(2)式所示的条件下, 将(3)式代入电路方程(1), 并加以整理, 可得

$$\left(\frac{1}{\gamma} \frac{1}{1+I} + I_s R_0 \right) \frac{dI}{dt} - \frac{I_s}{C} (\beta_1 - I) = 0, \quad (6)$$

其中

$$I = \frac{i}{I_s}, \quad (6a)$$

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1 C}{I_s}. \quad (6b)$$

在零值初始条件下解此微分方程

$$\frac{1}{1+I} \left(1 - \frac{I}{\beta_1} \right)^{k_1+1} = \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), \quad (7)$$

其中

$$\tau_1 = \frac{1}{\alpha_1 \gamma} \frac{\beta_1}{1 + \beta_1}, \quad (7a)$$

$$k_1 = \frac{C R_0}{\tau_1}. \quad (7b)$$

稳定的充电电流

$$(I)_{t \rightarrow \infty} = \beta_1 \text{ 或 } (i)_{t \rightarrow \infty} = \alpha_1 C. \quad (8)$$

这一结果是值得注意的: 稳定的充电电流只取决于脉冲前沿的斜率 α_1 与存储电容器 C 的乘积, 与二极管的非线性效应无关. 在作电路设计时, 射极跟随器 BG1 (图 2) 应能确保输出电流 $\alpha_1 C$. 比较 (6 b) 式和 (8) 式, 可以看出: β_1 就是稳定的充电电流对于 I_s 的相对值.

在脉冲前沿作用的整个时间间隔中, 充电电流是单调增长的 (证明从略), 即二极管的工作点 Q (图 4), 由原点开始 ($t = 0$), 沿着二极管的伏安特性曲线单方向地移动, 趋向于稳定点 $Q(\infty)$. 因此, 可以根据 $Q(\infty)$ 点的坐标作为判据, 用以决定采用 (3) 式或者 (5a、b) 式作为二极管的伏安特性. 采用 (3) 式的充分条件就是

$$(u_D)_{t \rightarrow \infty} \leq U_G,$$

或者

$$\beta_1 \leq \exp(\gamma U_G) - 1. \quad (9)$$

作为一个数字例子, 以硅开关二极管为例, 取 $\gamma = 39 \text{ V}^{-1}$, $U_G = 0.6 \text{ V}$, 上式成为

$$\beta_1 \leq 10^{10}. \quad (9a)$$

若将参数进一步具体化为

$$I_s = (10^{-9} - 10^{-11}) \text{ A}, \quad C = 0.1 \text{ } \mu\text{F}, \quad U_m = 10 \text{ V}. \quad (10)$$

那么, 式 (9 a) 转化为

$$t_1 \geq (0.1 - 10) \mu\text{S}. \quad (9b)$$

这就说明了, 在一般情况下, 只要脉冲前沿不小于微秒量级, 就得采用 (3) 式作为二极管的伏安特性. 由 (7 a), 可得

$$\tau_1 = \frac{1}{\alpha_1 \gamma} \frac{\beta_1}{1 + \beta_1} < \frac{1}{\alpha_1 \gamma},$$

或者

$$\frac{t_1}{\tau_1} > \gamma U_m.$$

在 $t = t_1$ 时刻, 将这一结果代入 (7) 式, 可得

$$0 < \frac{1}{1 + l} \left(1 - \frac{l}{\beta_1}\right)^{k_1 + 1} < \exp(-\gamma U_m),$$

取典型数据 $\gamma = 39 \text{ V}^{-1}$, 即使 U_m 在相当大的范围之内变化, 上列不等式的右端都与零值非常接近. 因此, 完全有理由认为

$$(I)_{t=t_1} = \beta_1. \quad (11)$$

在输入脉冲后沿作用阶段 ($t_1 < t \leq t_1 + t_2$), 忽略了 R_s 的分流作用, 电路方程

$$\left(\frac{1}{\gamma} \frac{1}{l + 1} + I_s R_0\right) \frac{dI}{dt} + \frac{I_s}{C} (I + \beta_2) = 0, \quad (12)$$

其中

$$\beta_2 = \frac{\alpha_2 C}{I_s}. \quad (12a)$$

以 (11) 式作为初始条件, 解微分方程 (12) 式, 可得

$$\frac{I+1}{\beta_1+1} \left(\frac{\beta_1+\beta_2}{I+\beta_2} \right)^{k_2-1} = \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_2}\right), \quad (13)$$

其中

$$\tau_2 = \frac{1}{\alpha_2 r} \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1}, \quad (13a)$$

$$k_2 = \frac{C R_0}{\tau_2}. \quad (13b)$$

若在 t_m 时刻输出信号取最大值, 如图 1 中虚线所示, 那么

$$(I)_{t=t_m} = 0. \quad (14)$$

应用这一条件于(13)式, 容易得到二极管峰值保持电路的捕获时间

$$t_m = t_1 + \tau_2 \ln \frac{\beta_2 + 1}{1 + \frac{\beta_1}{\beta_2}} + C R_0 \ln \left(1 + \frac{\beta_1}{\beta_2} \right), \quad (15)$$

和输出信号的峰值

$$u_2(t_m) = u_1(t_m) = U_m - \alpha_2 \tau_2 \ln \frac{\beta_2 + 1}{1 + \frac{\beta_1}{\beta_2}} - \alpha_2 C R_0 \ln \left(1 + \frac{\beta_1}{\beta_2} \right), \quad (16)$$

捕获精度用相对误差的形式来表示

$$\Delta U_m = \frac{U_m - u_2(t_m)}{U_m} = \frac{1}{U_m} K_1 + \frac{C R_0}{t_1} K_2, \quad (17)$$

其中

$$K_1 = \frac{1}{r} \frac{\beta_1}{\beta_1 - \frac{t_2}{t_1}} \ln \frac{\beta_1 + 1}{1 + \frac{t_2}{t_1}}, \quad (17a)$$

$$K_2 = \frac{1}{\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \ln \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right). \quad (17b)$$

由(17)式容易看出: 增加 U_m 、减小 C 或 R_0 有利于提高捕获精度. 由于二极管峰值保持电路是一种非线性电路, 非线性微分方程的闭合解(7)式和(13)式是以反函数的形式给出的. 但是, 用它们来计算电路的捕获时间和捕获精度是可能的, 所取得的结果也是严格的.

三

当超越了(9)式所提出的条件时, 譬如在(10)式所示的典型参数情况下, 输入脉冲信号的前沿达到了毫微秒或者微微秒量级, 由于对存储电容器的充电电流比较大. 这时, 二极管的伏安特性应按照折线处理, 若令

$$t_0 = \frac{U_G}{\alpha_1}.$$

当 $0 < t \leq t_0$, 二极管的伏安特性如 (5a) 式所示, 因此

$$u_2(t) = 0, \quad (18)$$

当 $t_0 < t \leq t_1$, 输入信号

$$u_1(t) = U_G \cdot \mathbf{1}(t - t_0) + \alpha_1(t - t_0) \cdot \mathbf{1}(t - t_0), \quad (19)$$

$\mathbf{1}(t)$ 是单位阶跃函数. 这时, 二极管的伏安特性如 (5b) 式所示. 输出信号(推导从略)

$$u_1(t) = \alpha_1(t - t_0 - \tau) + \alpha_1\tau \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right), \quad (20)$$

其中

$$\tau = CR, \quad R = R_0 + R_D.$$

稳定的充电电流

$$(i)_{t \rightarrow \infty} = \left[C \frac{du_2(t)}{dt} \right]_{t \rightarrow \infty} = \alpha_1 C, \quad (21)$$

也是只取决于脉冲前沿的斜率 α_1 和存储电容 C 的乘积. 作电路设计时, 应加以注意.

当 $t_1 < t \leq t_m$, 输入信号

$$u_1(t) = [U_m - \alpha_2(t - t_1)] \cdot \mathbf{1}(t - t_1). \quad (22)$$

输出信号(推导从略)

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (U_m - U_G) \\ &\quad - \alpha_2(t - t_1 - \tau) - \tau(\alpha_1 + \alpha_2) \\ &\quad \exp\left(-\frac{t - t_1}{\tau}\right) + \tau\alpha_1 \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right). \end{aligned} \quad (23)$$

当二极管的伏安特性用折线来近似时, 输入信号和输出信号之间的最小差值是 U_G (图 5), 由这一条件来决定电路的捕获时间

$$u_D = u_1(t_m) - u_2(t_m) = U_G,$$

由此可得

$$t_m = t_1 + \tau \ln \left\{ 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau}\right) \right] \right\}. \quad (24)$$

捕获电压

$$u_2(t_m) = U_m - U_G - \alpha_2\tau \ln \left\{ 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau}\right) \right] \right\}. \quad (25)$$

捕获精度用相对误差来表示

$$\Delta U_m = \frac{U_m - u_2(t_m)}{U_m} = \frac{U_G}{U_m} + \frac{\tau}{t_2} \ln \left\{ 1 + \frac{t_2}{t_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau}\right) \right] \right\}. \quad (26)$$

由上式容易看出: 减小电路的时间常数 τ (即减小 C 或者 R)、增加脉冲后沿的作用时间, 有利于得到高的捕获精度.

在图 5 中, t'_m 是输入信号和输出信号交点的时间坐标. 从 t_m 时刻到 t'_m 时刻, 二极管工作在 (5a) 式所示的那一段伏安特性曲线上, 因此无充电电流, 在忽略漏电电流的条件下, 输出电压保持不变. 在计算输出衰减时, 本文将忽略 t_m 和 t'_m 的差别.

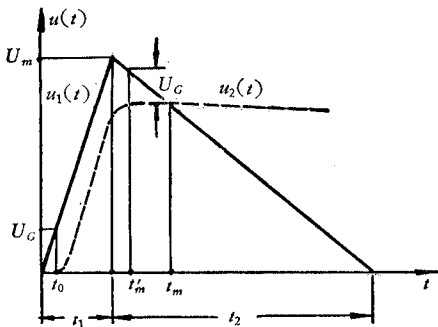


图 5

四

当 $t > t_m$, 存储电容器 C 将由充电状态转变为放电状态. 这时, 等效电路如图 6 所示, 图中 R_s 是漏电电阻, I_0 表示恒流性质的漏电电流, 它应该包括二极管的反向饱和电流和“复零”开关等效电路中的恒流成份. 应用诺顿定理, 算出输出信号(推导从略)

$$u_2(t) = u_2(t_m) - [u_2(t_m) + I_0 R_s] \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_m}{\tau_s}\right) \right], \quad (27)$$

时间常数

$$\tau_s = C R_s.$$

输出信号在单位时间里的衰减量称为输出衰减

$$\delta = \frac{u_2(t_m) - u_2(t)}{t - t_m} = \frac{u_2(t_m) + I_0 R_s}{t - t_m} \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_m}{\tau_s}\right) \right]. \quad (28)$$

引用近似关系

$$u_2(t_m) \simeq U_m, \quad 1 - \exp\left(-\frac{t - t_m}{\tau_s}\right) \simeq \frac{t - t_m}{\tau_s}.$$

(28)式可以写成

$$\delta \simeq \frac{U_m + I_0 R_s}{\tau_s} = \frac{1}{C} \left(\frac{U_m}{R_s} + I_0 \right) \frac{V}{s}. \quad (29)$$

这一结果对于二极管伏安特性的两种表示方法所取得的结果都能衔接.

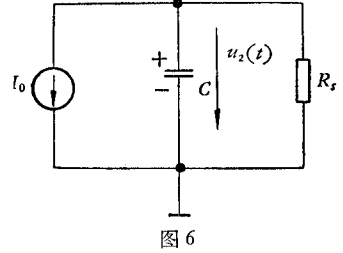
五

通过以上的工作可以得到如下结论:

1. 二极管的伏安特性用 Shockley 方程表示, 或者采用折线近似, 分界线如 (9) 式所示. 对于硅开关二极管, 在常用参数情况下 (9a) 式提出了参考数据.
2. 对存储电容器 C 的最大充电电流与二极管的非线性无关, 它取决于输入脉冲前沿的斜率 α_1 和 C 的乘积, 前级应能保证提供这一充电电流.
3. 为了提高捕获精度, 可以通过增加 U_m , 或者减小 C 和 R_0 来达到. 为了减小输出衰减, 应挑选反向饱和电流比较小的二极管, 尽可能地减小漏电电阻或者增加 C 的电容量, 在增加 C 时, 应该注意到前级能否提供所需要的充电电流.
4. 在实际工作中, 由于存储电容比二极管的结电容和其它杂散电容大得多, 因此本文略去了二极管的结电容等的影响; 若是考虑到它们的影响, 需要开展进一步的研究工作.

参 考 文 献

- [1] 光仪系曝光量测试仪研制小组, 浙江大学学报, 1980, 第1期, 第48页.
 [2] 陈威森, 激光, 6(1979), 42.



ANALYSIS OF THE DIODE PEAK-VALUE-HOLDING CIRCUIT

Li Ya-jun

(Zhejiang University)

When an input signal is a non-periodic triangular pulse, an analysis is made of the relation between the input and the output signals. On the basis of the analysis, calculations are made of the trapping time, trapping error and attenuation of the output signal.

The non-linear characteristic of the diode is considered according to two different conditions, in the case where the volt-ampere characteristic can be represented in exponential form. The author proposes an iteration form to solve the intermediate region of the two conditions.