

# 触发器动态研究<sup>1)</sup>

杜毅仁 周明德 李芳芸

## 摘 要

在研究触发器的动态过程中,我們考虑了隔离二极管的开关作用和触发脉冲的影响,介绍了一种简单直观的分析方法。

文中概括出触发器的七种典型翻轉过程和四种破坏情况,指出“交点在前沿的单調翻轉过程”的动态可靠性最高。

文中主要論点都有实验验证。

## 一、引 言

具有隔离二极管的触发器(图1),由于可靠性高,在实际中应用很广泛。当接成二进制计数器时,負向触发脉冲  $U_T$ , 有时可以直接从前面触发器的板极波形微分得到。本文的研究对象就是这种计数器中的某一級触发器的动态过程(这里指的是翻轉过程)。

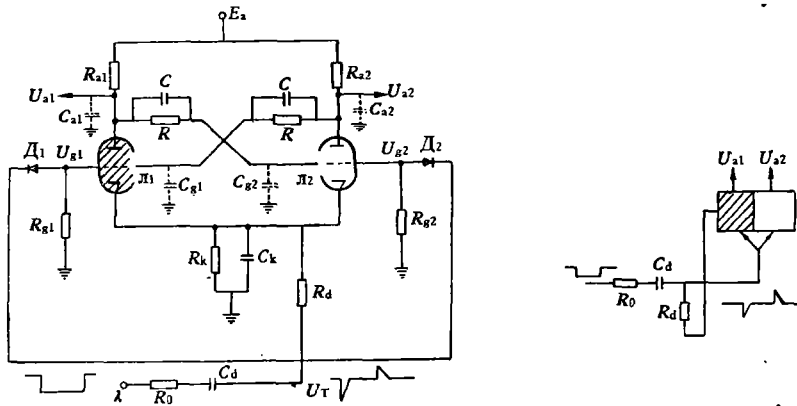


图1. 触发器电路及其符号

关于触发器的动态过程,曾有多人研究过<sup>[1,2,3]</sup>,但在前人的工作中,很少考虑隔离二极管在翻轉过程中的开关作用,研究触发脉冲对翻轉过程的影响,而在分析方法上也不够简单直观。本文将在前人的基础上,对上述問題进行某些探討。当将隔离二极管的开关作用和触发脉冲納入动态过程进行研究时,首先遇到的問題是如何进行分析。从实际工作中,我們总结出一个简单直观的分析方法,可以用来进行定性和定量分析,也可以用来指导設計。这是本文的第一个主要内容。本文的第二个主要内容是动态可靠性研究。我們概括了触发器七种典型翻轉过程,四种破坏情况,并提出了提高动态可靠性的措施。

1) 本文曾在1962年9月中国自动化学会元件与生产过程自动化专业会议上宣读。

## 二、动态分析方法

在介绍分析方法之前,先将本文所用主要符号列举于后(见图 2):

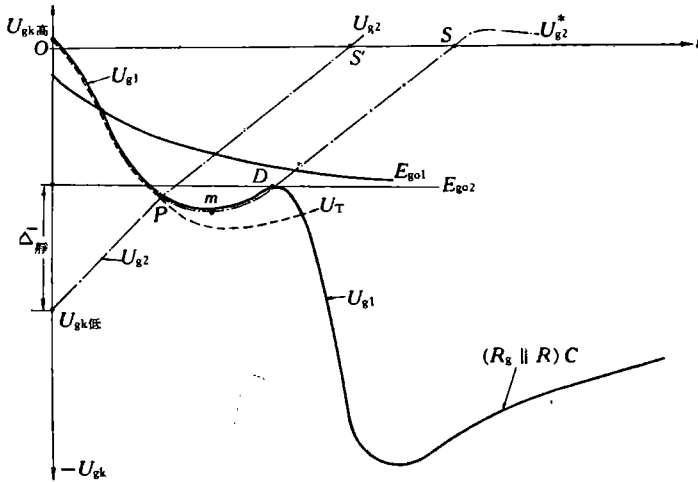


图 2. 波形分析法举例

- $U_T$ ——不考虑内因电压源影响的负向触发脉冲,又称外因电压;
- $U_{g2}$ ——不考虑外因电压源影响时触发器截止管的栅极电压,又称内因电压;
- $U_{g2}^*$ —— $P$  点以后  $U_T$  和  $U_{g2}$  的合成电压;
- $U_{g1}$ ——导电管栅极电压;
- $U_{a高}$ ——截止管板极电压;
- $U_{a低}$ ——导电管板极电压;
- $U_{gk低}$ ——截止管栅阴极电位差;
- $\Delta_{静}^-$ ——静态稳定储备,  $\Delta_{静}^- = U_{gk低} - E_{g02}$ ;
- $E_{g01}$ ——导电管截止栅偏压;
- $E_{g02}$ ——截止管开始导电的栅压;
- $\alpha$ ——电源变化百分数;
- $\beta$ ——电阻变化百分数;
- $\gamma$ ——电容变化百分数;
- $t_D$ —— $U_{g2}$  上升到  $E_{g02}$  的时间;
- $t_P$ —— $U_{g2}$  和  $U_T$  交点  $P$  所对应的的时间;
- $t_s$ ——触发器的翻转时间;
- $t_m$ —— $U_T$  到达最大值的的时间。

下面介绍的分析方法,我们称为波形分析法,现通过一个实例来说明,如图 2 所示(在图 1 中假定引入  $U_T$  以前,触发器的  $J_1$  导电,  $J_2$  截止,以后讨论都是如此)。为了突出主要内容起见,现假定阴极电压  $U_k$  不变,首先将  $E_{g01}$  和  $E_{g02}$  的时间波形画出,值得注意的是  $E_{g01}$  在翻转过程中是一个变量,它等于

$$E_{g01} = -\frac{U_{a1}(t) - U_k}{\mu_0},$$

式中  $U_{a1}(t)$  是导电管的板极电压,  $\mu_0$  是板流等于零时三极管的放大系数。忽略触发脉冲对截止管板压  $U_{a2}$  的影响, 则  $E_{g02}$  等于常数。

然后将  $U_T$ ,  $U_{g1}$  和  $U_{g2}$  的波形, 按动态过程画在同一坐标平面内, 如图 2 所示。由图 1 可知, 当  $U_T \leq U_{g1}$  时,  $A_1$  被接通, 否则  $A_1$  被截止。当  $U_T \leq U_{g2}$  时,  $A_2$  被接通, 否则  $A_2$  被截止。

由图 2 可知,  $U_T$  由  $U_{gk高}$  点下降到  $P$  点的过程中,  $A_1$  被接通,  $A_2$  被截止,  $U_{g1}$  是跟着  $U_T$  一起下降的, 这时,  $i_{a1}$  将减少,  $U_{a1}$  上升, 而后者将使  $U_{g2}$  由  $U_{gk低}$  向  $P$  点上升。到达  $P$  点时,  $U_{g2} = U_T = U_{g1}$ , 此时,  $A_1$  和  $A_2$  都被接通 ( $P$  点是  $A_2$  由截止变为接通的转折点)。  $U_T$  的下降电压将通过  $A_2$  进入  $A_2$  的栅极, 因而在该栅极上同时存在着两个变化方向相反的电压  $U_{g2}$  和  $U_T$ 。图中设  $P$  点以后  $U_T$  的下降速度比  $U_{g2}$  的上升速度快, 故合成电压  $U_{g2}^*$  将向下,  $U_{g1}$  将和  $U_{g2}^*$  一起下降。到达  $m$  点时,  $U_T$  前沿结束,  $U_{g2}^*$  则回升, 此时  $A_1$  仍然接通, 故  $U_{g1}$  仍然和  $U_{g2}^*$  一起回升。到达  $D$  点时, 原截止管  $A_2$  开始导电, 于是出现电流  $i_{a2}$ ,  $U_{a2}$  下降以后使  $U_{g1}$  下降, 从而使  $U_{g1}$  和  $U_{g2}^*$  分开,  $A_1$  也被截止。  $D$  点以后,  $U_{g1}$  继续下降,  $U_{g2}^*$  继续上升。当  $U_{g2}^*$  上升到  $S$  点时, 翻转过程结束, 接着开始恢复过程。在一般情况下, 恢复过程是不影响触发器翻转过程的可靠性的, 因此本文在这里不加以讨论。

由上述可知,  $U_T$  和二极管的开关作用, 对翻转过程的影响很大。当  $A_2$  被接通时 ( $P$  点以后), 截止管栅压将是内因电压  $U_{g2}$  和外因电压  $U_T$  的合成电压。这时,  $U_T$  的前沿将削弱  $U_{g2}$  的上升, 故对翻转不利。当  $A_1$  被接通时,  $U_T$  的后沿将是  $U_{g1}$  回升的原因之一, 故对翻转有害。当二极管被截止时, 栅压变化只决定于内因电压, 而与外因电压无关。显然,  $A_1$ ,  $A_2$  的接通和截止, 都会影响翻转过程。二极管何时被接通, 何时被截止, 又与  $U_T$  和  $U_{g1}$ ,  $U_{g2}$  的相对变化有关, 故不能把二极管的开关作用和翻转过程割裂开来。  $U_T$  是翻转过程的外因, 随着  $U_T$  的前沿和  $U_{g2}$  的相对速度不同, 以及  $U_T$  的幅度和宽度不同, 触发器将出现多种翻转过程(见后), 因而事先将  $U_T$  假定成某种特定波形, 然后研究触发过程的做法<sup>[1,2,3]</sup>, 实际上只研究了某一种翻转过程, 这样的研究有一定的局限性。

由图 2 的例子可以看出, 波形分析法有下列特点:

1. 考虑了二极管和  $U_T$  对翻转过程的影响, 因而可以比较全面、比较实际地研究触发器的翻转过程;
2. 由波形分析法, 先求出电路参数产生不连续变化的转折点, 诸如  $P$ ,  $D$  和  $S$  点, 然后逐段进行定量分析, 从而解决了二极管和  $U_T$  所引起的大范围内非线性问题的分析。由于上述转折点也是电压波形产生不连续变化的地方, 故在实验中很容易加以量测。

### 三、动态可靠性研究

根据大量实验研究和利用波形分析法进行分析的结果表明, 二极管的开关作用,  $U_T$  和  $U_{g2}$  的相对速度, 在极大程度上影响着触发器的翻转过程。概括起来共有七种典型翻转过程, 四种破坏情况, 现在分别叙述如下。

(一) 典型翻轉过程和分类

七种典型翻轉过程如图 3 所示, (A), (B), (B), ( $\Gamma$ ) 是  $U_{g2}$  和  $U_T$  前沿有交点的四种翻轉过程, 交点  $P$  以后的合成速度不外三种, 即向上、水平和向下, 如图 3 (A), (B), (B) 所示. 图 3 ( $\Gamma$ ) 也属于合成速度向下者, 它和图 3 (B) 不同之处在于  $P$  点位于  $E_{go2}$  以下. 这种翻轉过程, P. A. 尼特逊 (Neeteson) 曾进行过研究<sup>[2]</sup>, 称之为双截止翻轉过程.

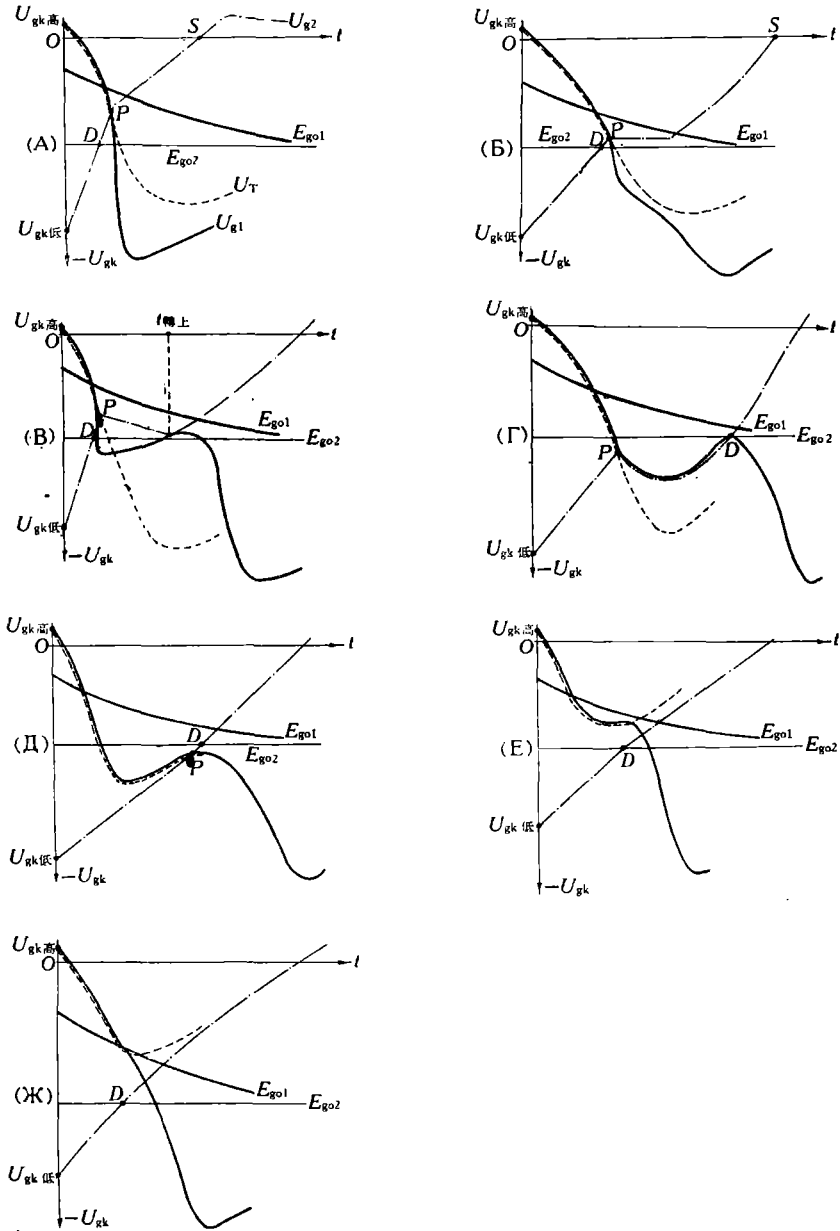


图 3. 七种典型翻轉过程

— · — · —  $U_{g2}$  和  $U_{g2}^*$ , - - -  $U_T$ , —  $U_{g1}$

图 3 (A) 是第五种, 它的特点是  $U_{g2}$  上升很慢, 只能和  $U_T$  后沿相交. 当触发脉冲幅度很小时,  $U_{g2}$  和  $U_T$  可能没有交点, 因而还有图 3 (B) 和 (C) 的两种翻轉过程. 进一步分析, 上述七种典型翻轉过程可以分成两大类, 即: 凡是下降变化的栅压  $U_{g1}$  没有回升现象者, 称为单调翻轉, 而  $U_{g1}$  有回升现象者, 则称为迂迴翻轉. 故图 3 (A), (B), (C) 属于单调翻轉 [图 3 (B) 实际上是临界情况, 我們也称它是单调翻轉], 其余都属于迂迴翻轉.

(二) 典型破坏情况和破坏定义

典型破坏情况共有四种. 第一种破坏是当  $U_{g2}$  上升速度很慢, 在它上升到  $E_{g02}$  之前,  $U_T$  后沿已经使  $U_{g1}$  回升到达  $E_{g01}$ , 因而使触发器不能翻轉 [如图 4 (A) 所示]. 这种破坏是由 P. A. 尼特逊<sup>[2]</sup>提出的. 第二种称为最小触发幅度破坏, 如图 4 (B) 所示. 这种破坏

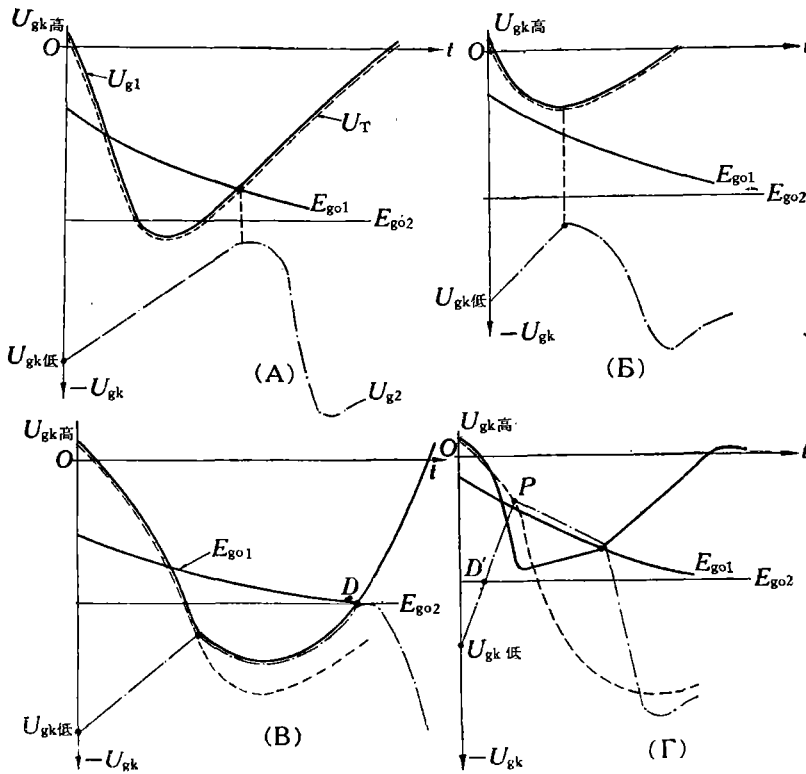


图 4. 四种典型破坏情况

.....  $U_{g2}$  和  $U_{g2}^*$ , - - -  $U_T$ , ———  $U_{g1}$

是由于触发脉冲幅度过小, 在  $U_{g2}$  上升未达到  $E_{g02}$  之前,  $U_T$  已回升, 又使  $J_1$  变成导电. 第三种破坏是由于  $U_T$  脉冲宽度太宽,  $U_{g2}$  上升速度也慢, 致使 P 点以后的合成电压  $U_{g2}^*$  上升缓慢, D 点交于  $E_{g01} = E_{g02}$  处 [如图 4 (B) 所示], 触发器处于临界破坏状态. 第四种破坏比较特别, 如图 4 (D) 所示,  $U_{g2}$  回降部分是在  $J_2$  导电区内 ( $J_2$  原来是截止管), 但由于内反馈结果, 迫使  $U_{g1}$  回升, 而当  $U_{g1}$  回升到  $E_{g01}$  时,  $U_{g2}$  还在下降, 致使触发器不能翻轉. 这种破坏我們称之为内因破坏. 与此相反, 前面三种, 都称为外因破坏.

由上述可知, 只要  $U_{g1}$  出现回升, 就有出现破坏的可能. 引起  $U_{g1}$  回升的原因, 可以

是内部的( $U_{a2}$  回升), 也可以是外部的( $U_T$  后沿)。归纳起来, 可得破坏的定义如下, 即: 凡是  $U_{g1}$  出现回升, 而  $U_{g1}$  在  $U_{g2}$  上升到  $E_{g02}$  之前回升到  $E_{g01}$ , 翻轉过程即遭破坏。显然, 只有迂迴翻轉过程才有出现破坏的可能, 而单调翻轉則沒有可能。

### (三) 提高动态可靠性的途径

内因电压  $U_{g2}$  与外因电压  $U_T$  的相对速度以及  $E_{g01}$  和  $E_{g02}$  之间的过渡带, 对提高动态可靠性起着重要作用。根据上述分析, 可以提高动态可靠性的途径有:

1. 使触发器具有交点在前沿的单调翻轉过程。在这一方面, 要求有适当的  $U_{g2}$  和  $U_T$  前沿的相对速度, 在其他条件允许下, 尽可能提高  $U_{g2}$  的上升速度, 适当减慢  $U_T$  的下降速度。提高  $U_{g2}$  上升速度的措施有: 加大  $C$ , 减小板极和栅极的分布电容, 采用互导大的电子管, 减小板极电阻  $R_a$ , 以及使触发器有一段时间处于两级正反馈工作<sup>[1]</sup> 等等。减慢  $U_T$  下降速度的措施有: 串联减速电阻  $R_0$ , 分压输出, 减慢  $U_a$  的下降速度等等。

2. 加大过渡带。在这一方面, 要求增加板极电位落差, 减慢  $U_{a1}$  的上升速度。在选择电子管时, 除注意截止栅压的大小外, 还应注意两个电子管截止栅压值的对称性。

3. 合理选择触发脉冲的幅度, 触发脉冲的幅度不宜过大也不宜过小, 一般比  $E_{g02}$  值大一些为宜。

4. 避开内因破坏区。当客观条件受到限制不可能单调翻轉时, 应设法避开内因破坏区, 因为内因破坏横插在迂迴翻轉区域中间。

在上述许多措施中, 有的是互相矛盾的, 因而在实际中, 应根据具体条件加以选择。在考虑提高动态可靠性时, 应把着眼点放在  $U_T$  和  $U_{g2}$  的相对速度上, 只有这样才能较好地解决一些互相矛盾的因素。

值得指出的是, 单调翻轉的板极波形是光滑的, 迂迴翻轉則不然,  $U_{g1}$  的回升部分, 会在  $U_{a2}$  开始下降部分引起一小坑(如图 5 所示), 这个小坑将使微分脉冲出现双峰, 影响下级触发器的翻轉过程。

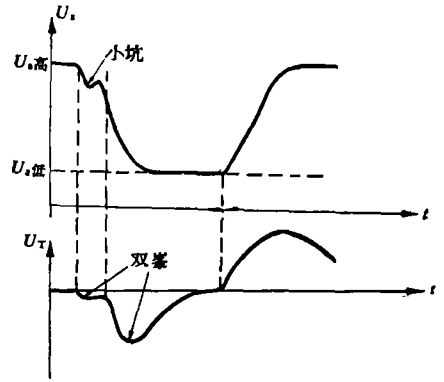


图 5. 迂迴翻轉的板极波形和微分波形

### (四) 阴极电位变化对翻轉过程的影响

对阴极自生偏压式触发器来说(图 1), 当  $R_k, C_k$  值相对于翻轉时间  $t_s$  不够大时, 在翻轉过程中,  $U_k$  将发生变化。  $U_k$  的变化对导电管来说, 起负反馈作用, 对截止管来说, 则起正反馈作用。经过适当的设计, 使  $U_k$  的变化对加速  $U_{g2}$  上升到  $E_{g02}$  的作用成为主要时, 将对翻轉过程有利。

### (五) 实 驗

现将部分实验结果列在表中, 以便进一步证明上述论点。图 6 是实验电路, 在触发器栅极上接有阴极跟随器, 以减少示波器对翻轉过程的影响。采用变化负载电容  $C_H$  的办

七种典型翻轉过程的栅极波形

序号	条 件	栅 极 波 形	討 論
I	$R_0 = 68$ 千欧 $C_d = 50$ 微微法 $C = 300$ 微微法 $R_d = 50$ 千欧 $C_H = 0$		$R_0$ 使 $U_T$ 減速, 故 $P$ 点以后 $U_{g2}$ 上升速度大于 $U_T$ 的下降速度. 它属于单調翻轉, 与图 3(A) 对应(由于 $C_H = 0$ , 故波形重台)
II	$R_0 = 50$ 千欧 $C_d = 20$ 微微法 $C = 100$ 微微法 $C_H = 200$ 微微法 $R_d = 62$ 千欧		$R_0$ 使 $U_T$ 減速, 但 $C_H$ 亦使 $U_{g2}$ 減速, 故 $P$ 点以后的合成速度接近等于零. 它属于临界情况, 与图 3(B) 对应
III	$R_0 = 0$ $C_d = 100$ 微微法 $R_d = 62$ 千欧 $C_H = 200$ 微微法 $C = 100$ 微微法		没有減速电阻 $R_0$ , 而是有着电容負載, 故 $P$ 点以后 $U_{g2}$ 上升速度小于 $U_T$ 下降速度. 它属于迂迴翻轉. 其中 $P$ 点在上者, 与图 3(B) 对应; $P$ 点在下者, 与图 3(G) 对应
IV	$R_0 = 0$ $C_d = 20$ 微微法 $C = 100$ 微微法 $C_H = 200$ 微微法		$C_d$ 減小, $U_T$ 变小且变窄, $C_H$ 使 $U_{g2}$ 減速, 故 $P$ 点交在 $U_T$ 后沿. 它属于交后沿的迂迴翻轉, 与图 3(D) 对应

(續)

序号	条 件	栅 极 波 形	討 論
V	$R_0 = 0$ $R_d = 40$ 千欧 $C_a = 20$ 微微法 $C_H = 200$ 微微法 $C = 100$ 微微法		$C_d$ 和 $R_d$ 都减小, $U_T$ 变小, $C_H$ 使 $U_{g2}$ 减慢, 故 $U_{g2}$ 与 $U_T$ 无交点, 由于 $U_{g2}$ 较慢, $U_{g2}$ 上升到 $E_{g02}$ 时, $U_{g1}$ 已开始回升, 它属于无交点的迂迴翻轉, 与图 3(E) 对应
VI	$R_0 = 0$ $C = 100$ 微微法 $C_a = 20$ 微微法 $R_d = 28$ 千欧 $C_H = 50$ 微微法		$R_d$ 进一步减小, $U_T$ 变得很小很窄, 由于 $C_H$ 不大, $U_{g2}$ 上升较快, 但 $U_{g2}$ 与 $U_T$ 仍无交点, 它属于无交点的单调翻轉过程, 与图 3(K) 对应

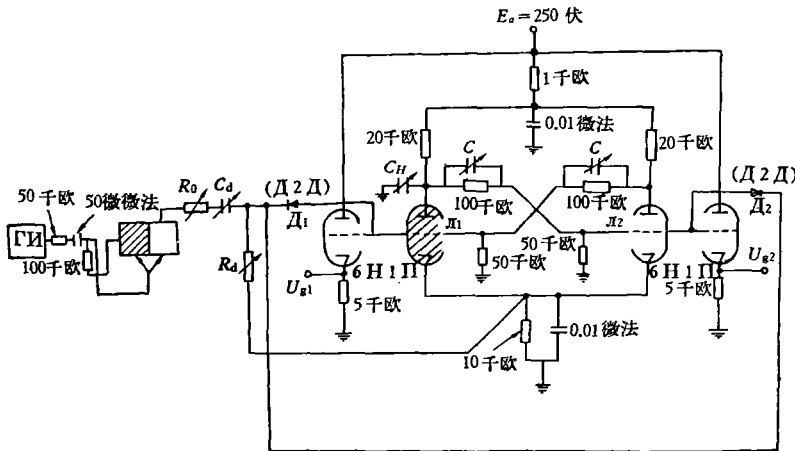


图 6. 触发器实验电路 (ГН 表示脉冲发生器)

法来改变  $U_{g2}$  的速度, 而  $U_T$  的变化则采用变化减速电阻  $R_0$  和  $C_a$  的办法, 这样, 可以得到各种典型的翻轉过程. 由于只在  $J_1$  板极加电容负载, 而拍照时, 又是同时拍出  $J_1$  和  $J_2$  栅极波形的上升和下降波形, 故一张照片中一共有四个波形. 我們比較感兴趣的是  $U_{g1}$



下降和  $U_{g2}$  上升的一組(照片中后面的一組)。拍照时,示波器的时标为 0.1 微秒,电压比例尺为 2.5 伏/毫米。

上述实验結果,証实了触发器将随着  $U_T$  和  $U_{g2}$  的相对速度不同出現多种翻轉过程的論点。实验結果与波形分析結果是相符的,这說明了波形分析法是一个比較好的动态分析工具。

#### 四、結 論

$U_T$  和隔离二极管的开关作用,在极大程度上影响着触发器的翻轉过程,因此必須將它們納入动态过程中加以研究。 $U_{g2}$  和  $U_T$  的相对关系,特别是两者的相对速度,是决定翻轉过程的主要因素,随着这个速度不同,触发器將出現多种翻轉过程。概括起来,可以将它們分成两大类,即单調翻轉和迂迴翻轉。交点在前沿的单調翻轉过程可靠性高,波形光滑,翻轉速度快,值得重視。而对典型破坏情况的研究,則表明只有当导电管的栅极电压  $U_{g1}$  出現回升时,才有出現破坏的可能。显然,迂迴翻轉有破坏的可能,单調翻轉則沒有这种可能。

提高动态可靠性的有效措施是力求达到单調翻轉,加大  $U_T$  和  $U_{g2}$  的速度差,加大过渡帶。总之,在考虑提高动态可靠性时,应把着眼点放在  $U_T$  和  $U_{g2}$  的相对速度上面,只有这样,才能比較好的解决互相矛盾的因素。

而波形分析法,則是一个比較簡單、直观的分析方法。

几年来,在程序控制机床的科研工作中,对触发器的动态过程,进行过一定的研究,毕业設計以此为題者,就有三屆。本文是上述工作的一个总结,参加总结的还有李衍达、陈禹六、李大义等同志,童詩白教授曾給予指导,并审閱了全文。

#### 参 考 文 献

- [1] 米耶罗維奇 Л. А., 杰里欽科 Л. Г., 脉冲技术, 陈金重譯, 国防工业出版社, 1960, 下册, 第十三章, 第 52 頁。
- [2] Neetson, P. A., Analysis of Bistable Multivibrator, Philips Technical Library, London, 1956.
- [3] Фейгин, М. И., К теории триггера, Памяти Александра Александровича Андропова, Издательство АН СССР, 1955, 300—333.

## THE DYNAMIC BEHAVIORS OF A SELF-BIASED BISTABLE MULTIVIBRATOR

DU YI-REN, CHOU MING-DE, LI FANG-YUN

This paper describes the dynamic behaviors of a selfbiased bistable multivibrator by the use of waveform analysis with special attention to the switching action of the isolation diodes and the effect of the symmetrical triggering pulse. Seven typical forms of transition and four typical forms of failure are introduced in which the monotonic transition case with the grid voltage intersection point at the leading edge of the triggering pulse gives the highest dynamic stability. Experimental results are included to illustrate the main points.