

第一章 TVS器件的特点、电特性和主要电参数

一、TVS器件的特点

瞬态（瞬变）电压抑制二极管简称TVS器件，在规定的反向应用条件下，当承受一个高能量的瞬时过压脉冲时，其工作阻抗能立即降至很低的导通值，允许大电流通过，并将电压箝制到预定水平，从而有效地保护电子线路中的精密元器件免受损坏。TVS能承受的瞬时脉冲功率可达上千瓦，其箝位响应时间仅为1ps（ 10^{-12} S）。TVS允许的正向浪涌电流在 $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ ， $T = 10\text{ms}$ 条件下，可达50~200A。

双向TVS可在正反两个方向吸收瞬时大脉冲功率，并把电压箝制到预定水平，双向TVS适用于交流电路，单向TVS一般用于直流电路。

二、TVS器件的电特性

1、单向TVS的V-I特性

如图1-1所示，单向TVS的正向特性与普通稳压二极管相同，反向击穿拐点近似“直角”为硬击穿，为典型的PN结雪崩器件。从击穿点对应的 V_C 值所对应的曲线段表明，当有瞬时过压脉冲时，器件的电流急剧增加而反向电压则上升到箝位电压值，并保持在这一水平上。

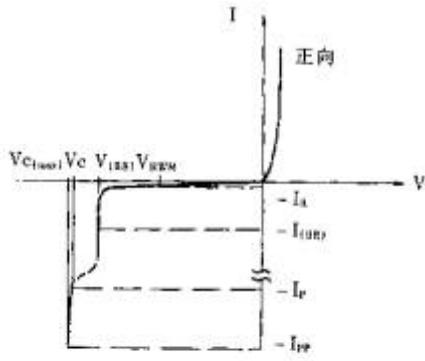


图 1-1

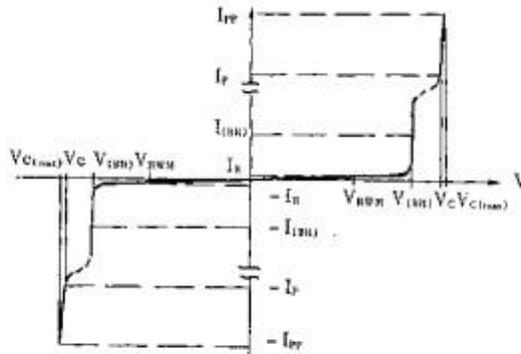


图 1-2

2、双向TVS的V-I特性

如图1-2所示，双向TVS的V-I特性曲线如同两只单向TVS“背靠背”组合，其正反两个方向都具有相同的雪崩击穿特性和箝位特性，正反两面击穿电压的对称关系为： $0.9 V_{(BR)(正)}/V_{(BR)(反)} \leq 1.1$ ，一旦加在它两端的干扰电压超过箝位电压 V_C 就会立刻被抑制掉，双向TVS在交流回路应用十分方便。

三、TVS器件的主要电参数

1、击穿电压 $V_{(BR)}$

器件在发生击穿的区域内，在规定的试验电流 $I_{(BR)}$ 下，测得器件两端的电压称为击穿电压，在此区域内，二极管成为低阻抗的通路。

2、最大反向脉冲峰值电流 I_{PP}

在反向工作时，在规定的脉冲条件下，器件允许通过的最大脉冲峰值电流。 I_{PP} 与最大箝位电压 $V_{C(MAX)}$ 的乘积，就是瞬态脉冲功率的最大值。

使用时应正确选取TVS，使额定瞬态脉冲功率 P_{PR} 大于被保护器件或线路可能出现的最大瞬态浪涌功率。

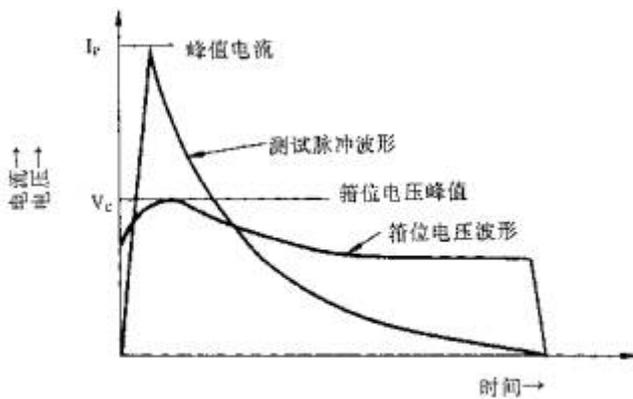


图 1-3

图1-3表明当瞬时脉冲峰值电流出现时，TVS被击穿，并由击穿电压值上升至最大箝位电压值，随着脉冲电流呈指数下降，箝位电压亦下降，恢复到原来状态。因此，TVS能抑制可能出现的脉冲功率的冲击，从而有效地保护电子线路。

峰值电流波形

- A、正弦半波 B、矩形波
- C、标准波（指数波形） D、三角波

TVS峰值电流的试验波形采用标准波（指数波形），由 T_R/T_P 决定。

峰值电流上升时间 T_R : 电流从 $0.1I_{PP}$ 开始达到 $0.9I_{PP}$ 的时间。

半峰值电流时间 T_P : 电流从零开始通过最大峰值后，下降到 $0.5I_{PP}$ 的时间。

其波形如图1-4所示。

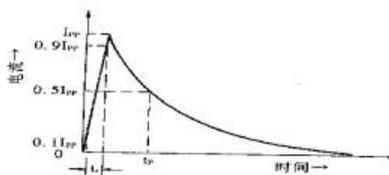


图 1-4

下面列出典型试验波形的 T_R/T_P 值：

- A、EMP波（图1-5）：10ns/1000ns B、闪电波：8 μ s/20 μ s C、标准波：10 μ s/1000 μ s

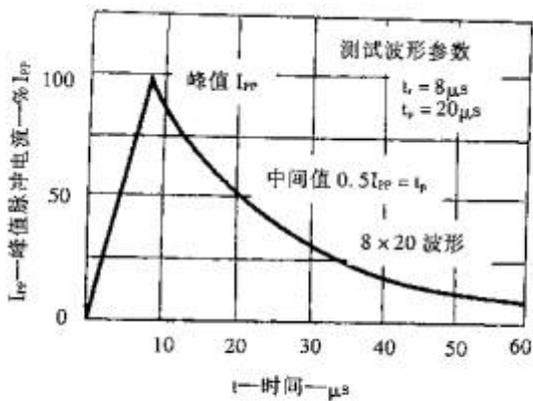


图 1-5 V_R

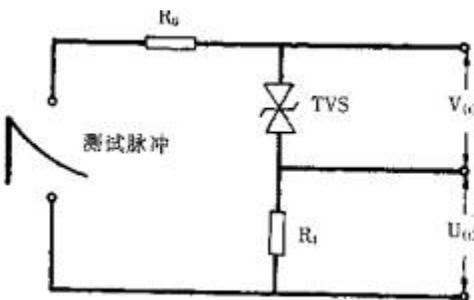


图 1-6

3、最大反向工作电压 V_{RWM} （或变位电压）

器件反向工作时，在规定的 I_R 下，器件两端的电压值称为最大反向工作电压 V_{RWM} 。通常 $V_{RWM} = (0.8-0.9) V_{(BR)}$ 。在这个电压下，器件的功率消耗很小。使用时，应使 V_{RWM} 不低于被保护器件或线路的正常工作电压。

4、最大箝位电压 $V_{C(max)}$

在脉冲峰值电流 I_{pp} 作用下器件两端的最大电压值称为最大

箝位电压。使用时，应使 $V_{C(max)}$ 不高于被保护器件的最大允许安全电压

即：箝位系数 $= V_{C(max)} / V_{(BR)}$

一般箝位系数为1.3左右。

最大箝位电压 $V_{C(max)}$ 的测试方法见4.4。

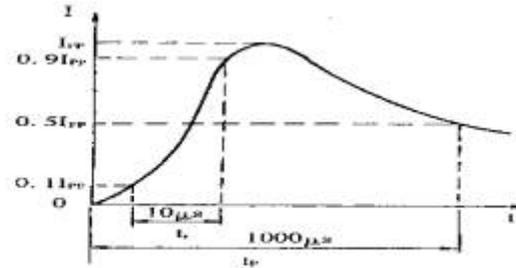


图 1-7

5、反向脉冲峰值功率 P_{PR}

TVS的 P_{PR} 取决于脉冲峰值电流 I_{pp} 和最大箝位电压 $V_{C(max)}$ ，除此以外，还和脉冲波形、脉冲时间及环境温度有关。

当脉冲时间 T_p 一定时， $P_{PR} = K_1 \dots \dots \cdot K_2 \cdot V_{C(max)} \cdot I_{pp}$

式中 K_1 为功率系数， K_2 为功率的温度系数。

典型的脉冲持续时间 t_p 为 1MS ，当施加到瞬态电压抑制二极管上的脉冲时间 t_p 比标准脉冲时间短时，其脉冲峰值功率将随 t_p 的缩短而增加。图1-8给出了 P_{PR} 与 t_p 的关系曲线。TVS的反向脉冲峰值功率 P_{PR} 与经受浪涌的脉冲波形有关，用功率系数 K_1 表示，各种浪涌波形的 K_1 值如表1所示。

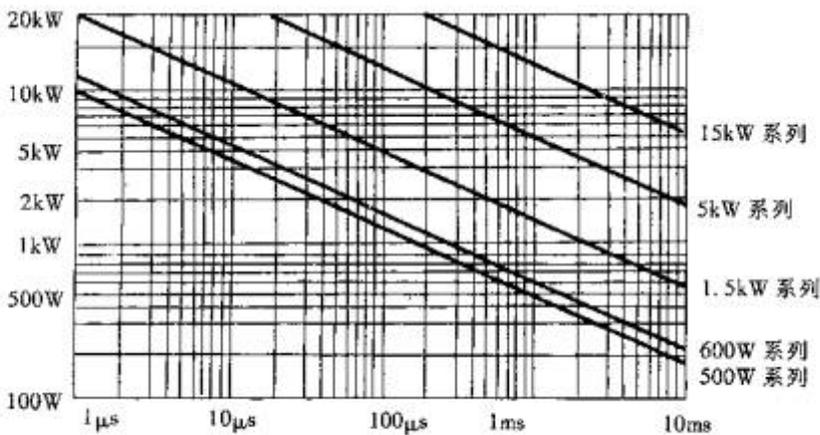


图 1-8 脉冲峰值功率与脉冲时间的关系

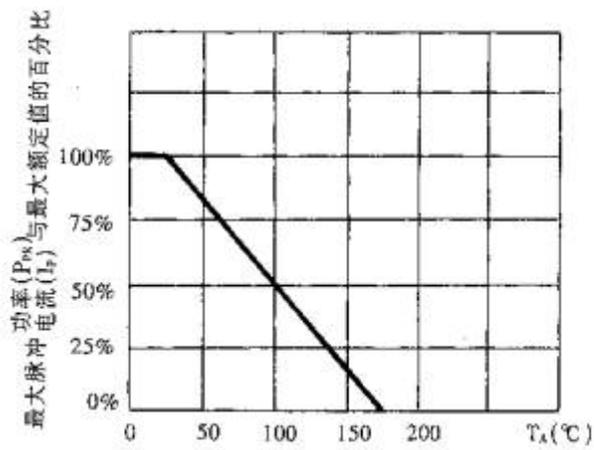


图 1-9 脉冲峰值功率降额曲线

表 1

波形	K_i
标准波 (试验波形) 	1.00
矩形波 	1.40
正弦半波 	2.20
三角波 	2.80

$$E = \int i(t) \cdot V(t) dt$$

式中： $i(t)$ 为脉冲电流波形， $V(t)$ 为箝位电压波形。

这个额定能量值在极短的时间内对TVS是不可重复施加的。但是，在实际的应用中，浪涌通常是重复地出现，在这种情况下，即使单个的脉冲能量比TVS器件可承受的脉冲能量要小得多，但若重复施加，这些单个的脉冲能量积累起来，在某些情况下，也会超过TVS器件可承受的脉冲能量。因此，电路设计必须在这点上认真考虑和选用TVS器件，使其在规定的间隔时间内，重复施加脉冲能量的累积不至超过TVS器件的脉冲能量额定值。

6、电容 C_{pp}

TVS的电容由硅片的面积和偏置电压来决定，电容在零偏情况下，随偏置电压的增加，该电容值呈下降趋势。电容的大小会影响TVS器件的响应时间。

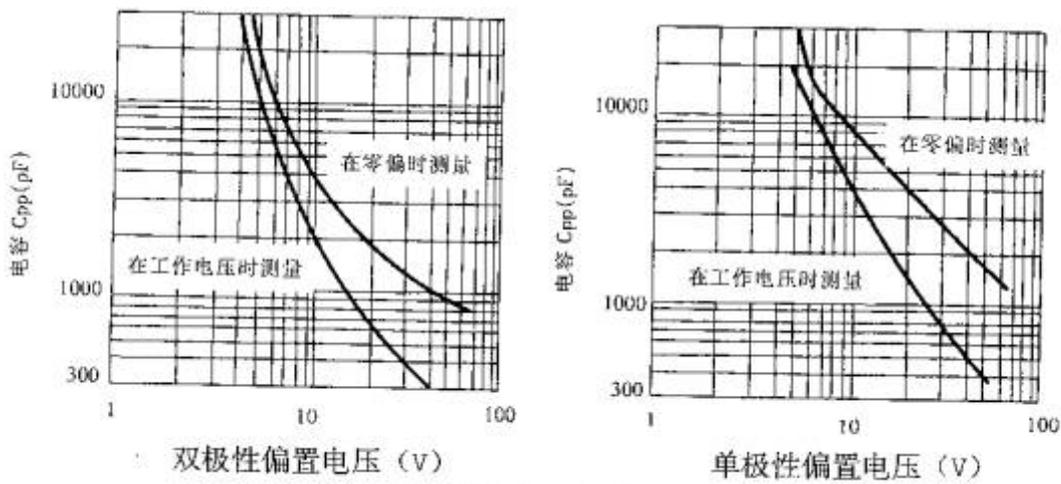


图 1-10 TVS 管的电容 C_{PP} 与偏置电压的关系

7、漏电流 I_R

当最大反向工作电压施加到TVS上时，TVS管有一个漏电流 I_R ，当TVS用于高阻抗电路时，这个漏电流是一个重要的参数。

第二章 TVS选用原则

在选用TVS时，必须考虑电路的具体条件，一般应遵循以下原则：

- 一、 大箝位电压 $V_C (MAX)$ 不大于电路的最大允许安全电压。
- 二、 最大反向工作电压（变位电压） V_{RWM} 不低于电路的最大工作电压，一般可以选 V_{RWM} 等于或略高于电路最大工作电压。
- 三、 额定的最大脉冲功率，必须大于电路中出现的最大瞬态浪涌功率。

下面是TVS在电路应用中的典型例子：

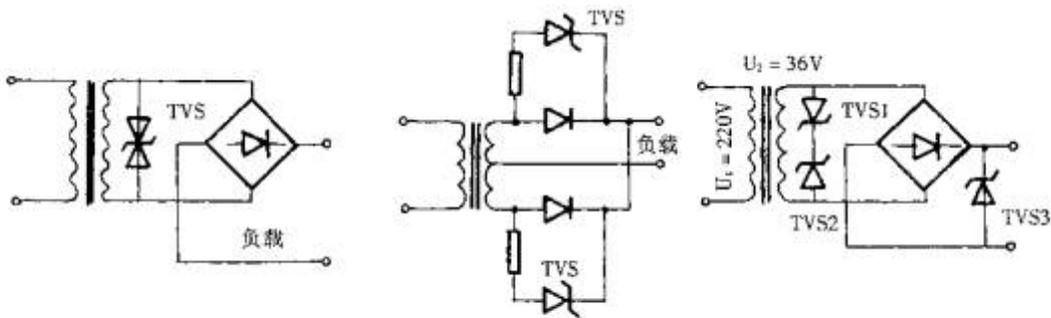


图 2-1

图 2-2

图 2-3

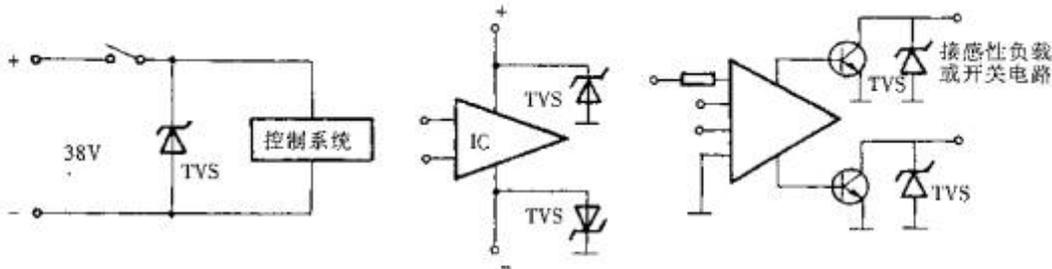


图 2-4

图 2-5

图 2-6

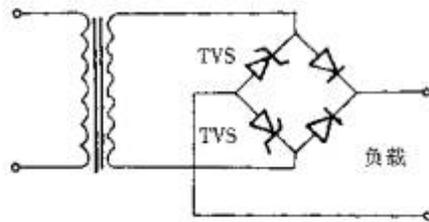


图 2-7 TVS 在电路中起保护和电压限制的作用

TVS用于交流电路：见图2-1，这是一个双向TVS在交流电路中的应用，可以有效地抑制电网带来的过载脉冲，从而起到保护整流桥及负载中所有元器件的作用。TVS的箝位电压不大于电路的最大允许电压。图2-2所示，是用单向TVS并联于整流管旁侧，以保护整流管不被瞬时脉冲击穿，选用TVS必须是和整流管相匹配。图2-3所示电路中，单向TVS1和TVS2反接并联于电源变压器输出端或选用一个双向TVS，用以保护整流电路及负载中的元器件。TVS3保护整流以后的线路元件，如电源变压器输出端电压为36伏时一般TVS1和TVS2的工作电压 V_R 应根据 $36 \times \sqrt{2}$ 来选择，其它参数依据电路中的具体条件而定。

TVS用于直流电路，图2-4所示TVS并联于输出端，可有效地保护控制系统。TVS的反向工作电压应等于或略高于直流供电电压，其它参数根据电路的具体条件而定。图2-5所示为两个单向TVS连接在电源线路中，用以防止直流电源反接或电源通、断时产生的瞬时脉冲使集成电路损坏。当电路连接有感性负载，如电机、断路器线圈、螺线管时，会产生很高的瞬时脉冲电压，图2-6中的TVS可以保护晶体管及逻辑电路，从而省去了较复杂的电阻/电容保护网络。图2-7电路中TVS起保护和电压限制的作用。

直流电中选用举例：

整机直流工作电压12V，最大允许安全电压25V（峰值），浪涌源的阻抗50M，其干扰波形为方波， $T_P=1MS$ ，最大峰值电流50A。

选择：1、先从工作电压12V选取最大反向工作电压 V_{RWM} 为13V，则击穿电压

$$V_{(BR)} = \frac{V_{RWM}}{0.85} = 15.3V;$$

2、从击穿电压值选取最大箝位电压 $V_{C(MAX)} = 1.30 \times V_{(BR)} = 19.89V$ ，取

$$V_C = 20V;$$

3、再从箝位电压 V_C 和最大峰值电流 I_P 计算出方波脉冲功率：

$$P_{PR} = V_C \times I_P = 20 \times 50 = 1000W$$

4、计算折合为 $T_p=1\text{MS}$ 指数波的峰值功率，折合系数 $K_1=1.4$ ，

$$P_{PR}=1000\text{W} \div 1.4=715\text{W}$$

从手册中可查到1N6147A其中 $P_{PR}=1500\text{W}$ ，变位电压 $V_{RWM}=12.2\text{V}$ ，击穿电压 $V(BR)=15.2\text{V}$ ，最大箝位电压 $V_C=22.3\text{V}$ ，最大浪涌电流 $I_P=67.3\text{A}$ 。可满足上述设计要求，而且留有一倍的余量，不论方波还是指数波都适用。

交流电路应用举例：

直流线路采用单向瞬变电压抑制二极管，交流则必须采用双向瞬变电压抑制二极管。交流是电网电压，这里产生的瞬变电压是随机的，有时还遇到雷击（雷电感应产生的瞬变电压）所以很难定量估算出瞬时脉冲功率 P_{PR} 。但是对最大反向工作电压必须有正确的选取。一般原则是交流电压乘1.4倍来选取TVS管的最大反向工作电压。直流电压则按1.1—1.2倍来选取TVS管的最在反向工作电压 V_{RWM} 。

图2-8给出了一个微机电源采用TVS作线路保护的原理图，由图可见：

- 1、在进线的220V_~处加TVS管抑制220V_~交流电网中尖峰干扰。
- 2、在变压器进线加上干扰滤波器，滤除小尖峰干扰。
- 3、在变压输出端 $V_{~}=20\text{V}$ 处又加上TVS管，再一次抑制干扰。
- 4、到了直流10V输出时还加上TVS管抑制干扰。

其中：双向TVS管D1的 $V_{RWM}=220\text{V}_{~} \times 1.4=308\text{V}$ 左右

双向TVS管D2的 $V_{RWM}=20\text{V}_{~} \times 1.4=28\text{V}$ 左右

单向TVS管D3的 $V_{RWM}=10\text{V}_{~} \times 1.2=12\text{V}$ 左右

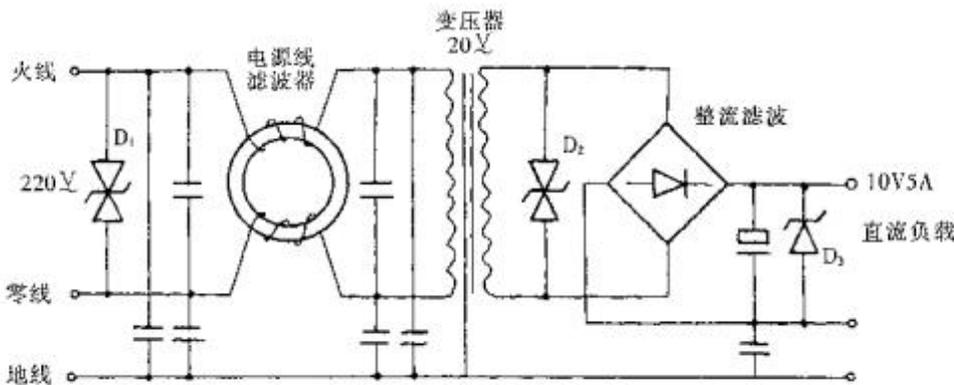


图 2-8

经过如上四次抑制，变成所谓的“净化电源”，还可以加上其它措施，更有效地抑制干扰，防止干扰进入计算机的CPU及存储器中，从而提高微机系统的应用可靠性。

从失效统计概率可知：微机系统产生100次故障，其中90次来自电源，10次是微机本身，可见电源的可靠性最重要，要提高整机可靠性，首先应提高电源的可靠性。

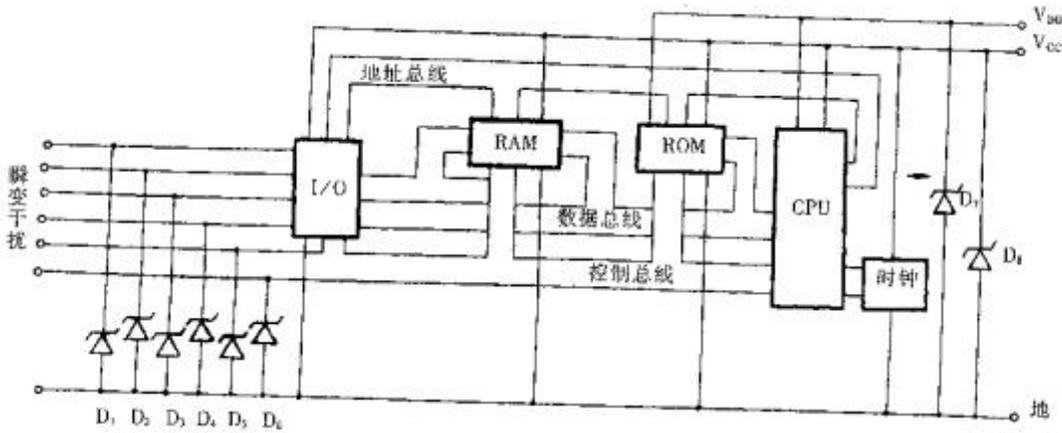
第三章 TVS应用实例

TVS在美国应用十分广泛，特别是在军事电子装备中非常重视，美国军标不但出牌了不少TVS器件的标准，同时在线路应用方面也有军标，如MIL-HDBK-978B《宇航用电子元器件手册》中第4.8节为“双极型瞬变电压抑制器”，文中列出不少TVS的应用实例。MIL-HDBK-338B《电子设备可靠性手册》中第7.4.4节为“瞬态和过应力保护”，文中也谈到了TVS的应用。

TVS在国内的应用，正处于推广应用的阶段，为了加深电路设计人员对TVS的认识，提高国产整机的可靠性，现将上述两个美国军标中译出的部分资料整理成文，推荐给广大电路设计人员参考使用。

一、 TVS在微机中的应用实例

图3-1是一个典型的微机系统，通过电源线、输入线、输出线进入的各种干扰或瞬变电压，可能使微机误动作出故障，特别是来自开关电源，微机近旁的电动机的开与关、交流电源电压的浪涌和瞬变、静电放电等场合都可能使系统产生误动作，严重时还可能损坏器件。将瞬变电压抑制二极管接到微机的电源线输入和输出线上，可防止瞬变电压进入“微机”总线，加强微机对外界干扰的抵抗能力，保证微机正常工作，提高其应用可靠性。由图1可以看出，使用TVS管的量是很多的。



二、 TVS管保护开关电源实例

对开关电源设计师来讲，必须对影响开关电源的三种瞬变类型进行保护：

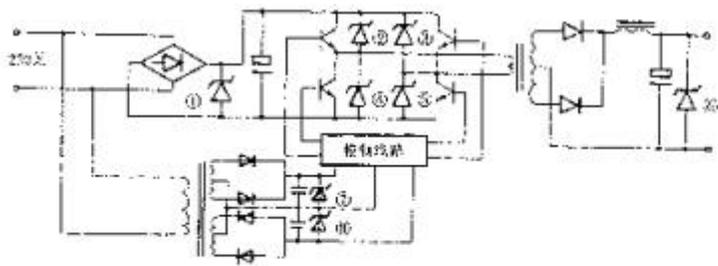
- 1、 由负载变化引起的瞬变电压（电感负载）；
- 2、 由电源线引入的瞬变电压；
- 3、 由开关电源内部发生的瞬变电压。

由于电源中需要保护的典型元器件有：

- 1、 高反压开关晶体管（VMOS管）
- 2、 高压整流器（高压流整流二极管）
- 3、 输出整流器（输出大电流整流二极管）
- 4、 内部控制电路（脉宽调制器等）

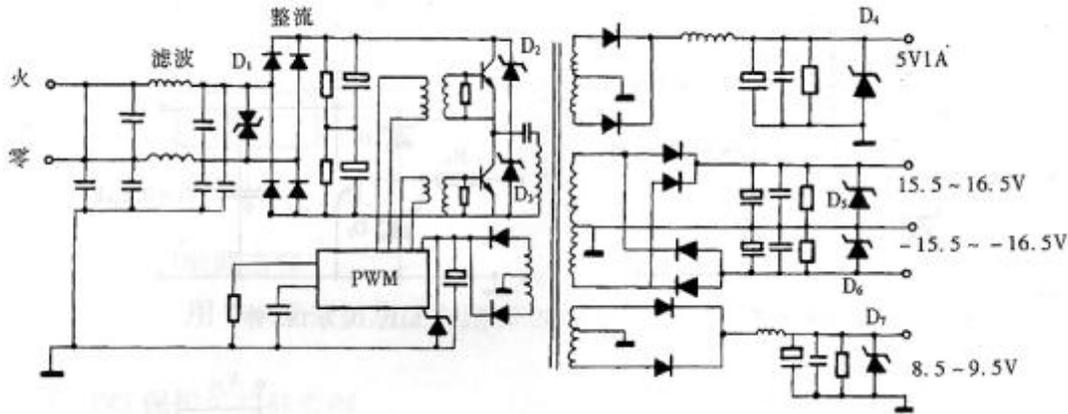
图3-2是典型开关电源中应用TVS的实例，由图可见共有八个TVS管，各自保护自己的对象，当然八个TVS管的特性也不同，从“击穿电压”、“最大脉冲峰值功率”、“脉冲峰值电流”到“箝位电压”等都有区别。图3是美国HP公司某仪器使用的开关电源，从图中可以看到该电源中所有瞬变电压抑制二极管的数量及情况。

由图1、2、3可以看出，国外应用TVS是非常普遍的，而且数量也是很多的，可见TVS对提高整机应用可靠性是至关重要的。



①~⑧共八个瞬变电压抑制二极管

图 3-2 典型开关电源中应用 TVS 实例 (MIL-HDBK-978A)



三、TVS保护直流稳压电源实例

图3-4是一个直流稳压电源，并有扩大电流输出的晶体管，在其稳压输出端加上瞬变电压抑制二极管，可以保护使用该电源的仪器设备，同时还可以吸收电路中晶体管的集电极到发射极间的峰值电压，保护晶体管。建设在每个稳压源输出端增加一个TVS管，可大幅度提高整机应用可靠性。

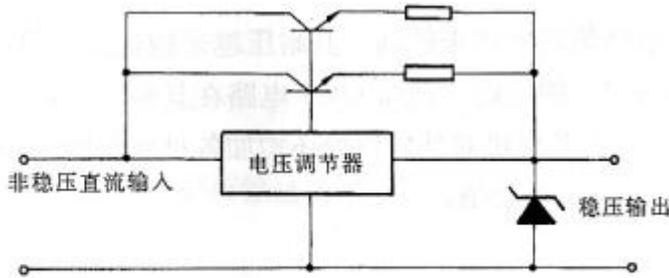


图 3-4 直流稳压电源上应用 TVS 实例 (译自 MIL-HDBK-978B)

四、TVS保护晶体管实例

各种瞬变电压能使晶体管EB结或CE结击穿而损坏，特别是晶体管集电极有电感性（线圈、变压器、电动机）负载时，会产生高压反电势，往往使晶体管损坏。建设采用TVS管作为保护器。图3-5为TVS保护晶体管的四种实例。

五、TVS保护集成电路实例

由于集成电路集成度越来越高，其耐压越来越低，容易受到瞬变电压的冲击而损坏，必须采取保护措施。例如CMOS电路在其输入端及输出端都有保护网路，为了更可靠起见，在各整机对外接口处还增加各种保护网络。图6中介绍了TTL及CMOS器件的有关保护措施。

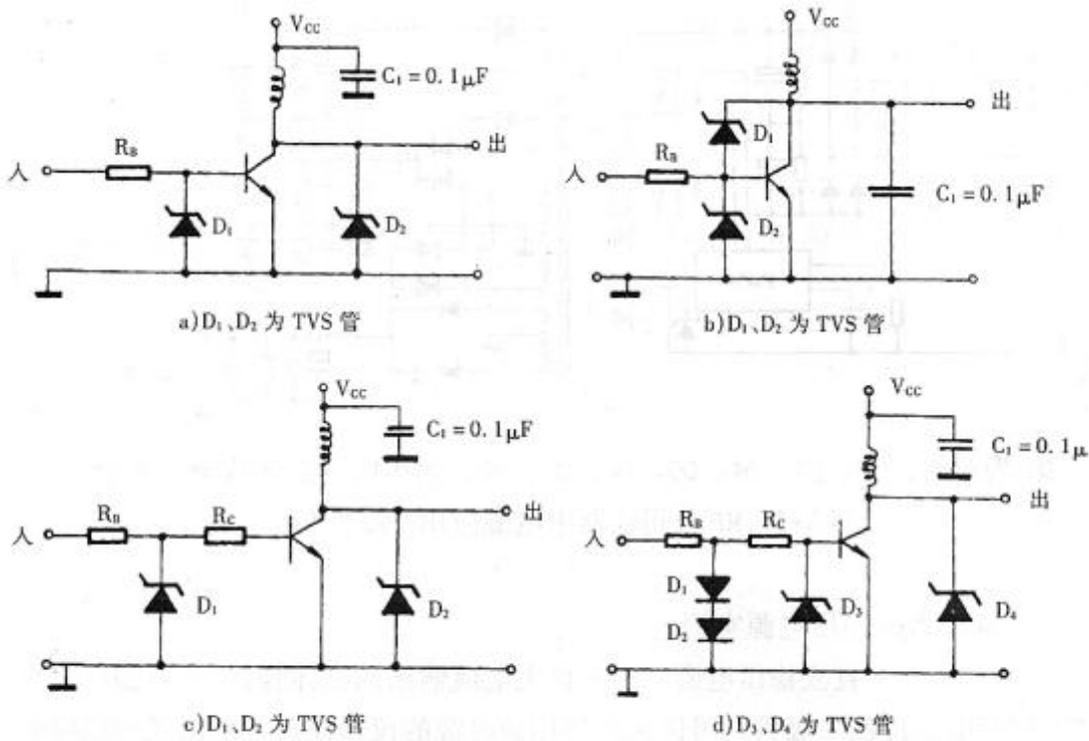


图 3-5 用 TVS 管保护晶体管实例 (译自 MIL-HDBK-338)

六、TVS 保护可控硅实例

可控硅可能误触发导致误动作，可控硅控制极电流不能太大，电压不能过高，必须采用各种保护措施。

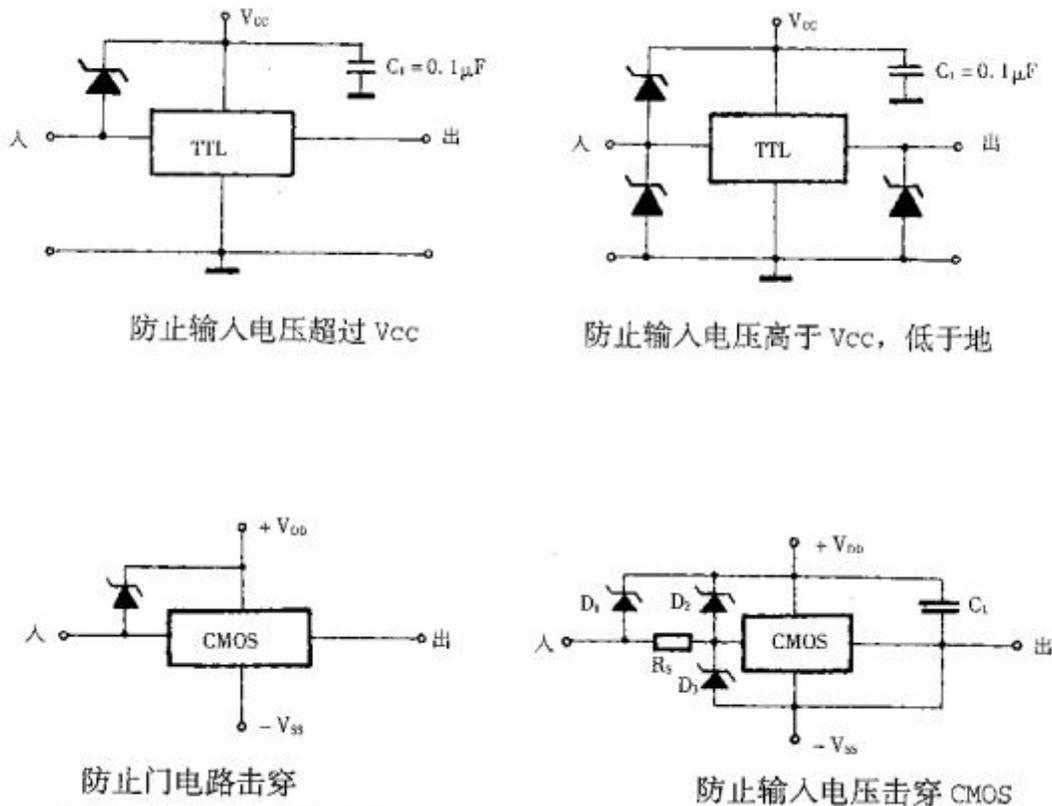
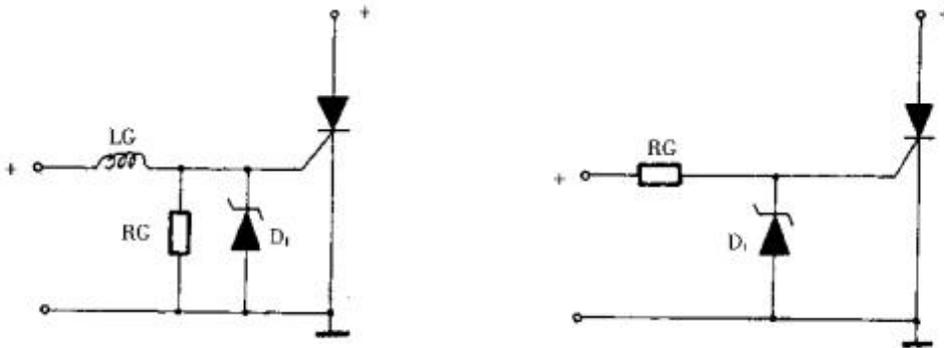


图 3-6 用 TVS 管保护集成电路和 CMOS 电路的实例 (译自 MIL-HDBK-338)

七、TVS 保护继电器实例

继电器有驱动线圈，当用大功率晶体管驱动时，应采取保护措施，如图5所示。有时也采用图8所示方法来抑制线圈中的高压反电势保护晶体管，哪个方案更好应根据实际情况决定。图中二极管允许的电源应比晶体管的工作电流大一倍左右，例如继电器线圈的最大电流1A，则二极管额定电流选2-3A左右，耐压则应大于电源电压的2倍左右，例如电源电压27V，则二极管耐压应为60V以上。



LG、RG 限制初始浪涌电流，D1 为 TVS 管 RG 限制控制门电流，D1 为 TVS 管

图 3-7 用 TVS 保护可控硅实例 (译自 MIL-HDBK-338)

继电器的触点往往用大电流去开关电动机等大电流电感负载，而电感在开关时有很高的反电势，而且有较大的能量，往往把触点烧坏或击穿产生电弧等，必须对触点采取保护，抑制电弧的产生，以保护继电器。但是这种电弧产生的浪涌电流很大，过去采用电容或者用电容串联电阻、二极管、二极管串联电阻等抑制方案，现在采用瞬变电压抑制二极管方案效果更好。

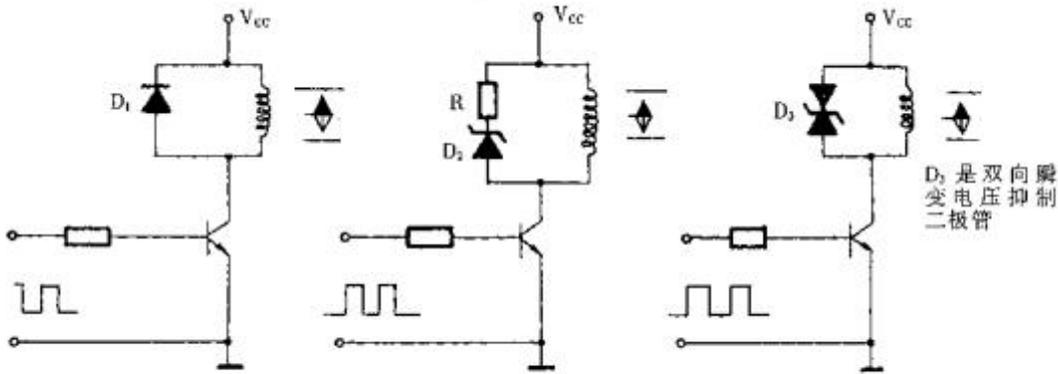


图 3-8 继电器线圈绕组反电势抑制应用实例

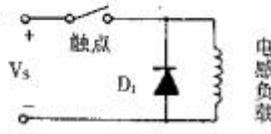
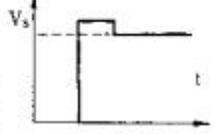
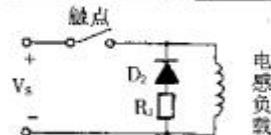
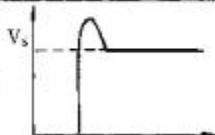
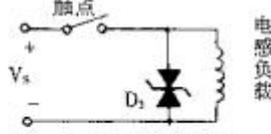
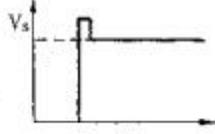
序号	继电器触点保护措施	触点间电压波形	说明
1	二极管保护 		<ol style="list-style-type: none"> 瞬变电压等于二极管 D_1 的正向压降 瞬态时间较长。
2	二极管加电阻保护 		<ol style="list-style-type: none"> 瞬变电压等于断开电流与 R 电阻的乘积加上 D_2 的正向压降 瞬态时间较短。
3	双向 TVS 保护 		<ol style="list-style-type: none"> 瞬变电压等于 D_3 的击穿电压 瞬态时间最短。

图 3-9 继电器触点保护的三种方法比较(译自 MIL-HDBK-338)

另外，MIL-HDBK-978推荐另一种在触点两端加上TVS管的保护措施见图10。

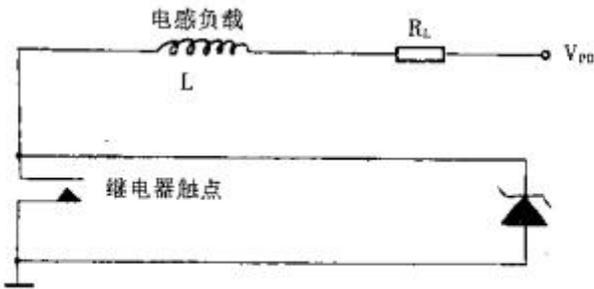


图 3-10 继电器触点保护措施(译自 MIL-HDBK-978)

美国军标举例说明TVS管的选取方法：

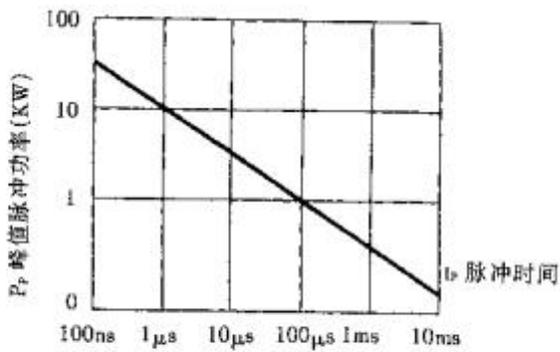
已知：TVS管的箝位电压 V_C ，负载电感 L 和电阻 R_L

计算：由图3-10可见：最大峰值电流 $I_p = \frac{V_{PD}}{R_L}$

最大脉冲峰值功率 $P_{PR} = I_p \times V_C$

脉冲时间 $T_p = \frac{V_{PD} / R_L}{V_C / L} = \frac{I_p}{V_C / L} = \frac{I_p \cdot L}{V_C}$

瞬变电压抑制二极管的脉冲峰值功率与持续时间有一定关系见图3-11，否则会烧坏TVS管。



脉冲占空比 0.1%

图 3-11 脉冲峰值功率与持续时间的关系

八、 TVS保护集成运放

集成运放对外界电应力非常敏感，在使用运放的过程中，如果因操作失误或采取了不正常的工作条件，出现了过大的电压或电流，特别是浪涌和静电脉冲，就很容易使运放受损或换效。

图3-12所示在运放差模输入端采取的过压损伤保护方法。

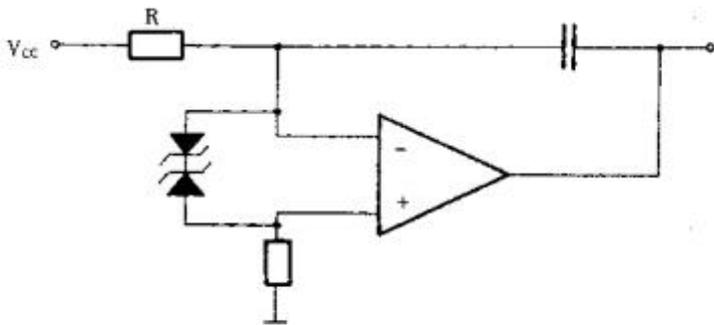


图 3-12 TVS 保护集成运放

如图所示的积分电路中，如果电容充放电到高电位，然后切断电源电压，就会在输入端产生瞬态电压，交出现大的放电电流，导致运放受损。如果电容值较大（如大于0.1 μ F），这种效应将会十分显著。

如图采用简单的保护电路，就能有效地防止差模电压过大，导致运放内部的电路失效。

九、 TVS抑制电磁脉冲干扰实例

美国哈里期公司对电子元器件抗辐射的论文中，谈及核爆炸引发强大的电磁脉冲，这种电脉冲在导线中引起感应电压，如果感应电压超过器件的击穿电压，就可能使元器件击穿失效，特别长线传输时，更能感应而产生较高的电压。

用瞬变电压抑制二极管并联在信号线及电源线上，可以吸收电磁脉冲引起的感应电压，保证系统的可靠性，避免辐射损坏元器件。

十、 用TVS防止感应雷电损坏微机系统实例

广州深圳海关计算机中上瞬变电压抑制器，提高了应用可靠性，受到用户好评。

南方打雷很多，雷电感应电压常常把计算机网中的部分计算机的集成电路击穿。每年有不少联网计算机因雷击而损坏，原因是分机与主机这间有200米以上的电缆，电缆中因雷电感应产生瞬态高压把计算机中的元器件击穿而损坏，产生较大的损失，在微机中加装很多瞬变电压抑制二极管后不再损坏。实践证明瞬变电压抑制二极管很实用，能提高整机应用可靠性，会产生较大的经济效益。

还有很多应用，例如对VMOS大功率三极管，在栅极与源机之间中上瞬变电压抑制二极管，可以防止栅极击穿（见图3-13）提高VMOS功率管的应用可靠性。

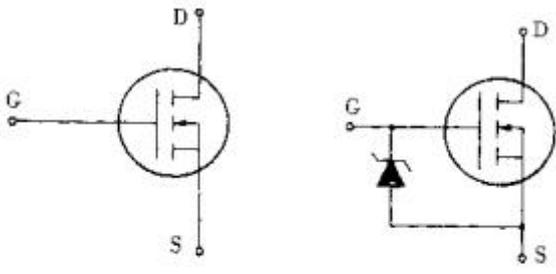


图 3-13 VMOS 管栅极加上 TVS 管