

压敏电阻器基础知识培训手册

(第一版)

孙丹峰 编著

二〇〇五年三月

第一章 通用型氧化锌压敏电阻器

1.1 什么是“压敏电阻器”

“压敏电阻器”是中国大陆通用的名词，在中国台湾地区，它被称为“突波吸收器”；在日本，它被称为“變阻器”；国际电工委员会（IEC）在其标准中称之为“voltage dependent resistor”（简称 VDR）；而在业界和学术界最广泛使用的名词则是“varistor”（即由 variable 和 resistor 两个英文单词组成的组合词）。从字面上理解，这些名词的含义为“电阻值随着外加电压敏感变化的电阻器”。

那么压敏电阻器的电阻值是如何随着外加电压变化敏感的呢？图 1-1-1 和表 1-1-1 可以给我们一个比较直观的说明。从中我们可以看到，型号为 20D201K 的压敏电阻器随着外加电压从 180V 上升到 420V，其电阻值从 18 MΩ 下降为 0.42Ω，在这个过程里，电压仅上升了 2.33 倍，而电阻值下降了 4280 多万倍。由此可见压敏电阻器的电阻值对外加电压的变化是非常“敏感”的。

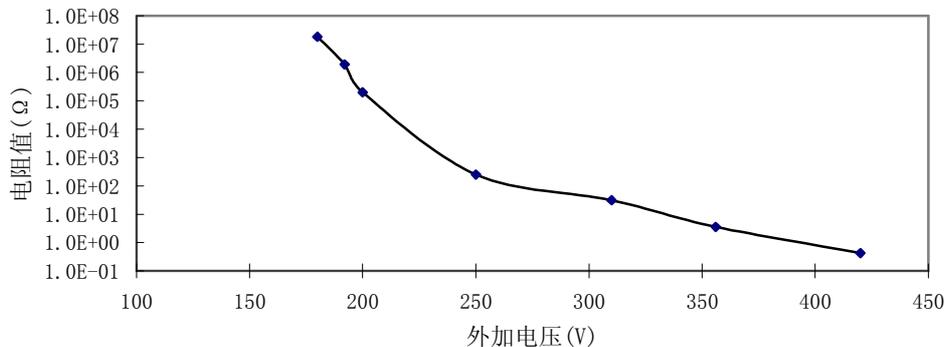


图1-1-1 20D201K压敏电阻电阻值与外加电压的关系

表 1-1-1 20D201K 压敏电阻器的电阻值随外加电压的变化

U (V)	180	192	200	250	310	356	420
R (Ω)	1.8×10^7	1.92×10^6	200×10^3	250	31	3.56	0.42

压敏电阻的确切定义可从材料、特性和用途三个方面综合得出。从材料组成上看，压敏电阻是由电子级粉体材料—氧化锌、氧化铋、氧化锑、氧化钛、氧化钴、氧化锰、氧化镍、氧化铬等多种氧化物合成的，其中，氧化锌的含量最高（约 90%），是主基料；其他各种过渡金属氧化物的含量相差很大，较多的占百分之几，较小的仅有十万分之几，被称为添加剂；压敏电阻就是由主基料和添加剂按照配方一一称好后，经球磨、喷雾造粒、干压成型、排胶、烧结、表面金属化、插片、包封、打标等一系列标准的精细电子陶瓷和通用元件工艺制造而成的。

从特性或功能上看，压敏电阻器是一种电阻值随着外加电压敏感变化的电阻器，因此它的主要用途是：异常过电压的感知、抑制和浪涌能量的吸收。

综上所述，我们可以给压敏电阻下这样一个定义：

压敏电阻是由在电子级 ZnO 粉末基料中掺入少量的电子级 Bi_2O_3 、 Co_2O_3 、 MnO_2 、 Sb_2O_3 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 Ni_2O_3 等多种添加剂，经混合、成型、烧结等工艺过程制成的精细电子陶瓷；它具有电阻值对外加电压敏感变化的特性，主要用于感知、限制电路中可能出现的各种瞬态

过电压、吸收浪涌能量。

从以上定义我们可以看出：压敏电阻器既是一种过电压的传感器（sensor），同时又是过电压的抑制器；因此我们对压敏电阻器的要求不仅包括它作为传感器的各种技术指标，而且也包括它作为动作元件的特性、寿命和安全要求。

由于压敏电阻器具有电阻值随着外加电压敏感变化的特性，所以它属于半导体陶瓷元件大家族中一员，其他的半导体陶瓷元件主要有，对温度敏感的 PTC、NTC 以及各种气敏、湿敏、光敏、磁敏等元件。

在压敏电阻的发展史上，除了氧化锌压敏电阻以外，还曾出现过齐纳二极管、SiC、硒堆、氧化锡等压敏电阻，由于齐纳二极管性价比较低、SiC、硒堆、氧化锡等压敏电阻的特性不能满足应用的需要，现在都被氧化锌压敏电阻取代；现在，我们一提到压敏电阻，几乎全部指的是氧化锌压敏电阻。

氧化锌压敏电阻起源于日本。1967 年 7 月，日本松下电器公司无线电实验室（Wireless Research Laboratory, Matsushita Electric Industry Co., Ltd）的松冈道雄在研究金属电极—氧化锌陶瓷界面时，无意中发现 ZnO+Bi₂O₃ 复合陶瓷具有压敏特性。进一步的实验又发现，如果在以上二元系陶瓷中再加入微量的氧化锰、氧化钴、氧化铬、氧化锑等多种氧化物，这种复合陶瓷的非线性系数可以达到 50 左右，其外特性类似两支反并联在一起的齐纳二极管，通流能力不亚于 SiC 材料，临界击穿电压可以通过改变元件的尺寸方便地加以调节，而且这种性能优异的压敏元件通过简单的陶瓷工艺就能制造出来，因而性能—价格比高。

1972 年美国通用电气公司（GE）购买了松下有关氧化锌压敏材料的大部分专利和技术诀窍。自从美国掌握了氧化锌压敏材料的制造技术以后，有关这种材料的基础研究工作得以大规模地进行。自 1980 年代起，对氧化锌压敏材料的研究逐渐走出了企业。在基础研究的指导和推动下，压敏电阻的性能得到不断的提升，应用领域不断扩大；产品的外形已从“阀片式”、“圆片引线式”发展到了“表面贴装式”和“阵列式”，使用电压等级已扩展到从 5 伏到 50 万伏的全系列，目前已经到了“有电必有压敏电阻”的程度。

1.2 压敏电阻器的伏安特性和电性能参数

与其他元件相比，压敏电阻器的电性能参数较多，若要很好地理解这些参数的意义，就要首先了解压敏电阻器的外加电压与流过压敏电阻器本体电流之间的关系，这个关系被称为伏安特性（V/I 特性）。

压敏电阻的典型伏安特性如图 1-2-1 所示。由该图看出，V/I 曲线可明显地分为三个区域：预击穿区（ $J=0\sim 10^{-5}A/cm^2$ ）、击穿区（ $J=10^{-5}\sim 10A/cm^2$ ）、回升区（ $J>10A/cm^2$ ）。

预击穿区的 V/I 特性呈现 $lgJ \propto E^{1/2}$ 的关系，如图 1-2-2 所示。

击穿区的特性呈现 $lgJ \propto lgE$ 的关

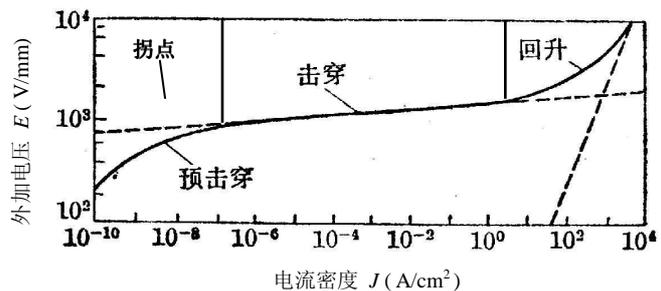


图 1-2-1 压敏电阻的伏安特性 (24°C)

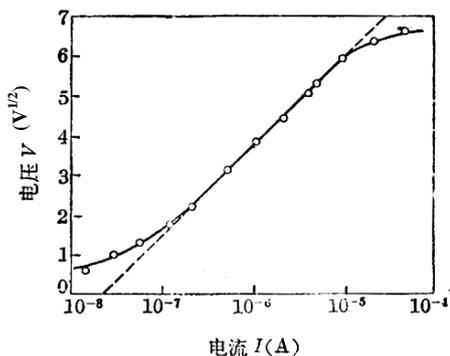


图 1-2-2 预击穿区的伏安特性

系，且可表示为：

$$J = (E/K)^\alpha \quad \text{或} \quad I = (U/K)^\alpha$$

(1.2.1)

式中，K 为常数、α 表示击穿区的非线性系数。

回升区的特性呈现 $J \propto E$ 的欧姆关系。

压敏电阻的伏安特性随温度的变化如图 1-2-3 所示。由该图可见预击穿区的 V/I 特性随温度变化很大，即在外加电压相同的情况下，流过压敏电阻的电流会随着环境温度的提高而大幅度增加；击穿区的 V/I 特性几乎不受温度的影响。

虽然每只压敏电阻都有它特定的 V/I 特性曲线，但是同规格压敏电阻的 V/I 特性曲线又是比较近似的，我们在产品说明书中只要给出每个规格产品的最典型 V/I 特性曲线，一般就可以满足用户的需要。

从压敏电阻的典型伏安特性曲线（图 1-2-1）我们可以很直观地理解压敏电阻的功能和大多数电性能参数的实际意义，及其它们的在应用中作用。下面，我们详细介绍压敏电阻的电性能参数。

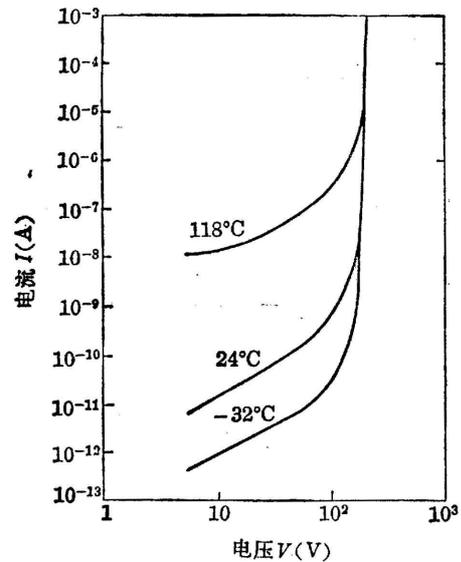


图 1-2-3 不同温度下的伏安特性

1.2.1 压敏电压 U_N (varistor voltage) 和直流参考电流 I_0

从压敏电阻的典型伏安特性曲线（图 1-2-1）我们可以明显地看出：压敏电阻在其 V/I 特性曲线的预击穿区内有一个拐点，这个拐点对应着一个特定的拐点电压和一个特定的拐点电流；当外加电压高于这个拐点电压，压敏电阻就进入“导通”状态（电阻值变小）；当外加电压低于这个拐点电压，压敏电阻就进入了“截止”状态（电阻值变大）。压敏电阻的最重要的特性就是电阻值随外加电压敏感变化， V/I 特性曲线中的拐点电压最能反应压敏电阻的这一重要特性，因此我们可以将拐点电压理解为压敏电阻的压敏电压 U_N （导通和截止两种状态之间的临界电压）。

由于压敏电阻是一种内部不完全均匀的陶瓷元件，即使是同一规格的压敏电阻，每只元件的拐点电流都不尽相同。为了标准化的需要，国际电工委员会（IEC）人为规定了两个测量压敏电阻拐点的直流参考电流 $I_0 = 1\text{mA}$ 和 0.1mA （ 1mA 用于瓷片直径 7mm 及其以上的压敏电阻器， 0.1mA 用于瓷片直径 5mm 及其以下的压敏电阻器）目前欧美国家已有只规定 1mA 为唯一的直流参考电流的发展趋势，但日本、中国大陆和中国台湾仍然普遍保持使用两种直流参考电流的方法。

由于拐点电流已被人为地规定了下来，因此压敏电压 U_N 一般用更直观的符号 $U_{1\text{mA}}$ 或 $U_{0.1\text{mA}}$ 表示，就更加方便，目前几乎所有的压敏电阻生产商都使用 $U_{1\text{mA}}$ 或 $U_{0.1\text{mA}}$ 来表示压敏电压。

从上面对压敏电压的定义上看，“压敏电压”一词已完全失去了其原有的拐点的含义。这是电子测量学和标准化与压敏电压的真实含义之间相互妥协的结果。多年的实践经验表明：IEC 定义的压敏电压与实际拐点电压虽然在数值上不相等，但在大多数情况下也比较相近，IEC 定义的压敏电压可视为拐点电压的近似值。在判定产品的压敏电压是否合格时，我们只能使用 IEC 的规定的方法，而不能使用测量实际拐点电压的方法（如晶体管图示仪测量法）。

通用压敏电阻器的瓷片直径有 5mm 、 7mm 、 10mm 、 14mm 和 20mm 五种，根据瓷片的截面积可知：IEC 规定的压敏电压所对应的电流密度 J 在 10^{-3}A/cm^2 的数量级上，因此处于压敏电阻器 V/I 特性曲线的击穿区。

压敏电压还有不同的称谓，如规定电流下的电压（IEC 的标准名词）、breakdown voltage（国际学术界的说法）、击穿电压（中国大陆学术界对 breakdown voltage 的中译）、崩溃电压（台湾学术界对 breakdown voltage 的中译）、阈值电压（世界物理学界的说法）、直流参

考电压、导通电压等等。

1.2.2 最大连续工作电压 MCOV (maximum continuous operating voltage)

由于压敏电阻具有正反向对称的伏安特性，因此它既可以应用于直流电路，也可以用于交流电路，最大连续工作电压 MCOV 指的是压敏电阻在应用时能长期承受的最大直流电压 U_{DC} 或最大交流电压有效值 U_{RMS} 。压敏电阻有一个非常特殊的特性：长期的静态功率很小，而瞬间的动态功率很大，如瓷片直径 20mm、 U_{1mA} 为 200V 的压敏电阻，其长期的静态功率仅有 1W，而在操作过电压下的瞬间动态功率却能达到 50,000W，在雷击过电压作用下的瞬间动态功率则高达 9,000,000W 以上。由于压敏电阻的静态功率很小，因此施加在压敏电阻两端的长期工作电压绝对要小于其压敏电压 U_N ，否则压敏电阻将因不堪重负而烧毁。

如压敏电阻用于交流电路，确定 U_{RMS} 的原则是：最大连续交流工作电压的峰值 ($\sqrt{2} U_{RMS}$) 不大于压敏电压 U_N 的公差 ($\pm 10\%$) 下限值，用公式表达则为：

$$U_{RMS} \leq \frac{U_N \times 90\%}{\sqrt{2}} \approx 0.64U_N \quad (1.2.2)$$

如压敏电阻用于直流电路，确定 U_{DC} 的原则是：压敏电阻在 U_{DC} 作用下的功耗与其在 U_{RMS} 作用下的功耗大体相等或略小与其在 U_{RMS} 作用下的功耗，以此原则得出的经验公式为：

$$U_{DC} \approx 1.3U_{RMS} \text{ 或 } U_{DC} \approx 0.83U_N \quad (1.2.3)$$

式 1.2.2 和式 1.2.3 是科学工作者通过对压敏电阻长期研究后总结出的经验公式，其正确性已得到世界范围的公认。仔细研究世界各国不同压敏电阻厂家的产品样本可以发现，有的厂家给出的 U_{RMS} 和 U_{DC} 是完全按照公式计算出来的，而有的厂家给出的 U_{RMS} 和 U_{DC} 则与计算值有些出入，笔者认为后者对用户采取了更负责任的态度；按照 IEC 相关标准的规定，生产厂家应通过标准的试验方法来确定其产品能够实际承受的 U_{RMS} 和 U_{DC} ，具体规定的方法是在 85℃ 的环境温度下，给压敏电阻持续施加 U_{RMS} 和 U_{DC} 的计算值，经过 1000 小时后，如果试品的 U_N 的变化不超过 $\pm 10\%$ ，则压敏电阻的 MCOV 可按计算值向用户承诺，如达不到要求，就必须降额并再经试验验证后向用户提交真实的 U_{RMS} 和 U_{DC} 值。

1.2.3 漏电流 I_L (leakage current)

在没有过电压的情况下，压敏电阻处于“截止”状态，因此不参与电路的正常工作；这时用户要求压敏电阻要安静地“休息”，所有参数都不能在规定年限内发生明显的变化，更不能出现发热、起火现象。但即使在不导通的情况下，压敏电阻两端仍然有一定的工作电压存在（通过上面的介绍，我们已经知道：这个长期施加在压敏电阻上的电压最大也不会超过规定的 U_{RMS} 或 U_{DC} ），同时压敏电阻在不导通的情况下也不是绝缘体，因此压敏电阻会在正常工作电压的驱动下产生一定量的泄漏电流（简称漏电流）。

IEC 对漏电流 I_L 较为普遍的定义是：环境温度 25℃ 时，在压敏电阻上施加其所属规格的最大连续直流工作电压 U_{DC} ，流过压敏电阻的直流电流。有的厂家根据用户的特殊需要对个别规格的压敏电阻也规定了交流漏电流（有效值）的指标和相应的测量方法。由于交流漏电流在使用上很不普遍，而且在测量上难度较大，这里不对它专门加以讨论，只需要指出一点：交流漏电流的大小不仅与交流电压（有效值）的大小有关，也和它的频率有关，频率越高，漏电流越大。另外，还有根据具体的压敏电压，按比例加压的测量漏电流的方法，这种方法一般仅用于压敏材料的研究，这里也不做详细介绍。

虽然大多数生产厂家都没有在产品说明书中规定漏电流的具体指标，但是它并非无关紧要；经验表明：压敏电阻出厂时的初始泄漏电流与压敏电阻的寿命特性和安全性都有较为密切的关系，因此比较内行的用户会提出特殊的漏电流要求。一般而言，在材料配方和烧结工艺固定的情况下，漏电流适中的压敏电阻具有较好的安全性和较长的寿命；漏电流过大通常

会造成压敏电阻发热,发热又会引起压敏电压的下降和漏电流的进一步上升(参见图 1-2-3),如此循环往复,最终压敏电阻就会因温度过高而起火燃烧,造成很坏的影响。漏电流过小也不一定是好现象,有时压敏电阻虽然初始漏电流很小,但使用很短一段时间后漏电流迅速增大到不安全的程度;当然,漏电流随加压时间的变化规律与配方和工艺密切相关,在大多数情况下,生产厂家通过控制漏电流的最大值就可以取得较好效果。

1.2.4 非线性指数 α (nonlinear coefficient)

非线性指数 α 是一个元件的电阻值是否随电压或电流变化和变化是否敏感的标志。前面我们已经提到,在其 V/I 特性曲线的击穿区,压敏电阻(非线性电阻器)的电流 I 和电压 U 之间的关系为: $I = (U/K)^\alpha$ ($\alpha \gg 1$, K 为常数);一般电阻器(线性电阻器)的电流 I 和电压 U 之间的关系为: $I = U/R$ (R 亦为常数)。比较这两个表达式可知:一般电阻器(线性电阻器)就是 α 取值为 1 时的压敏电阻器,因此公式 $I = (U/K)^\alpha$ ($\alpha \geq 1$, K 为常数)可视为线性电阻和非线性电阻的 V/I 关系的通用表达式。 $\alpha = 1$ 时为线性电阻,即电阻值不随电压变化; $\alpha > 1$ 时为非线性电阻(即广义的压敏电阻),即电阻值随电压变化(电压上升则电阻值下降), α 越大,电阻值随电压的变化就越明显,或曰电阻值对电压越敏感。

将公式 $I = (U/K)^\alpha$ 两边取对数展开可得:

$$\lg U = (1/\alpha) \lg I + \lg K \quad (1.2.4)$$

因此,非线性指数 α 的几何意义为,以双对数坐标法绘制的 V/I 特性曲线的斜率的倒数。我们已经知道,压敏电阻的 V/I 特性双对数曲线并不是一条直线,击穿区的特性接近于直线,但也不是严格意义上的直线,因此严格地说,压敏电阻的 α 值并不是一个常数,在不同的电压或电流下的 α 值是不同的。那么我们如何比较两只压敏电阻的非线性的高低呢?为了解决这个问题,IEC 规定:

$$\alpha = \frac{1}{\lg(U_{1mA}/U_{0.1mA})} \quad (\text{瓷片直径 } 7\text{mm 及以上的压敏电阻}) \quad (1.2.5a)$$

$$\alpha = \frac{1}{\lg(U_{0.1mA}/U_{0.01mA})} \quad (\text{瓷片直径 } 5\text{mm 的压敏电阻}) \quad (1.2.5b)$$

IEC 规定的非线性指数实际上只能表示压敏电阻在 $0.1\text{mA} \sim 1\text{mA}$ 或 $0.01\text{mA} \sim 0.1\text{mA}$ 之间的平均非线性指数。由于击穿区的特性接近于直线,而且上述电流区域处于击穿区内,因此 IEC 规定的非线性指数可以近似地表示压敏电阻击穿后的整体非线性特性的好坏。

1.2.5 残压 U_R (residual voltage)、残压比 K_R 和限制电压 U_p (clamping voltage)

残压 U_R 是指特定波形的浪涌(surge)电流流入压敏电阻器时,它两端电压的峰值。一般来说,流入压敏电阻器的浪涌电流的峰值都在 1mA 以上,对通用压敏电阻和防雷型压敏电阻而言,所谓特定波形指的是 IEC 本 60060-2: 1973 标准规定的 $8/20\mu\text{s}$ 标准雷电流波形,该波形如图 1-2-4 所示。

图 1-2-4 中, O_1 表示视在起点, T_s 称为视在前沿时间, T_r 称为视在半峰值时间, I_m 称为电流峰值。由于在示波器上很难精确地找到视在起点 O_1 , 所以视在前沿时间 T_s , 和视在半峰值时间 T_r 都采用近似方法测量,具体方法是:在示波器上先测量出 T_1 的值,然后用公式 $T_s = 1.25 \times T_1$ 近似得出 T_s 的值,视在半峰值时间 T_r 的实际测量的起点由 O_1 改为实际原点 O 。另外 IEC 允许用于测量的浪涌电流波形出现小幅度的反极性振荡。

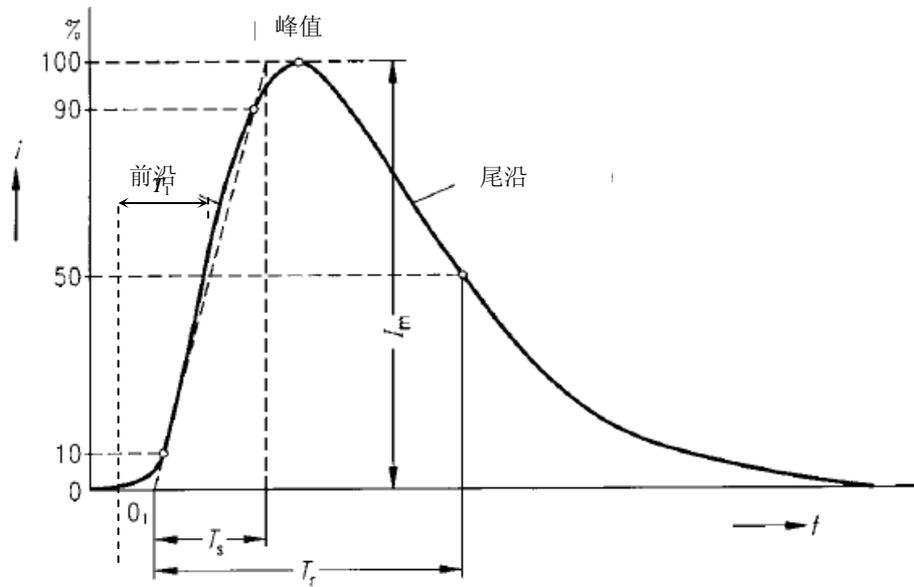


图 1-2-4 浪涌（突波）电流波形示意图

所谓 8/20 μ s 标准雷电流波形是广义的浪涌电流波形的一种，含义为视在前沿时间 $T_s=8\mu s \pm 10\%$ 、视在半峰值时间 $T_r=20\mu s \pm 10\%$ 、反极性振荡幅度不大于 20% 的浪涌电流波形，同时仪表量测 I_m 的误差不得超过 $\pm 10\%$ 。8/20 μ s 标准雷电流流过压敏电阻时，电流波形和电压波形的对应关系如图 1-2-5 所示，严格的说，电流波的峰值点和电压波的峰值点在时间上并不重合，电压波的峰值点一般略微超前于电流波的峰值点。

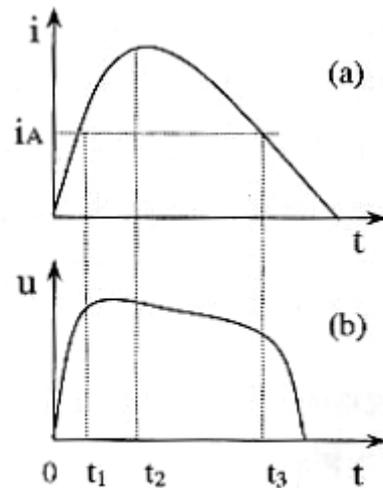


图 1-2-5 8/20 μ s 电流波与压敏电阻残压波形的对应关系

实际上，我们前面介绍的压敏电阻的伏安特性曲线的击穿区和回升区部分都是使用 8/20 μ s 标准雷电流波形逐点测绘出来的，也就是说：压敏电阻的伏安特性曲线的击穿区和回升区表示的是压敏电阻用 8/20 μ s 雷电波导通后的残压与 8/20 μ s 标准雷电流波形的电流峰值之间的关系。

应该指出的是：在电流峰值相同的情况下，流过压敏电阻的浪涌电流的波形参数不同，残压的具体测量值也会有所不同，视在前沿时间 T_s 对残压的影响比较大， T_s 越小残压 U_R 越大。

残压比 K_R 的定义公式为：

$$K_R = U_R / U_N \tag{1.2.6}$$

残压比可以比较直观地反应出压敏电阻限制过电压的能力，在压敏材料的研究工作中已得到广泛的应用，在防雷压敏电阻、避雷器阀片和高能型压敏电阻阀片中以成为标准电性能参数。

表 1-2-1 限制电压的考核电流 I_P 的规定值

瓷片直径 (mm)	5	7	10	14	20	25	32	40	34×34
I_P (A)	$U_N \leq 68V$	1	2.5	5	10	20	-	-	-
	$U_N > 68V$	5	10	25	50	100	150	200	300

所谓限制电压 U_p 是残压 U_R 的一种特殊形式,也是考核特定规格的压敏电阻抑制瞬态过电压能力的特征指标。首先,我们要针对不同片径的压敏电阻规定一个基本等效的考核电流 I_p ,每种片径的压敏电阻的限制电压 U_p 都要对应于这一规定好的考核电流(如表 1-2-1 所示)。其次,限制电压 U_p 并不是我们根据 I_p 测出的残压,而是各生产厂家自行规定的残压的上限值。因此,限制电压 U_p 实际上是生产厂家向用户承诺的每个规格产品的保护电压水平。

在 IEC 标准中,限制电压又被称为等级电流下的电压。

1.2.6 通流量(最大峰值电流/maximum peak current) I_m

压敏电阻能够承受的波形为 $8/20\mu s$ 的最大浪涌电流峰值,称为通流量 I_m 。“能够承受”的含义是,冲击后的压敏电压 U_N 的与冲击前相比不大于 $\pm 10\%$,且同时不能发生目视可见的机械损伤。目前大多数厂家在说明书中通常给出两个通流量指标,一个是冲击一次的指标,另一个是冲击两次(间隔 5 分钟)的指标。

1.2.7 最大能量 E_m (maximum permissible energy)

最大能量 E_m 是指压敏电阻能够耗散的规定波形的浪涌电流或脉冲电流的最大能量。能够承受的含义是,冲击后的压敏电压 U_N 的与冲击前相比不大于 $\pm 10\%$,且同时不能发生目视可见的机械损伤。

E_m 与电流波形密切相关,IEC 规定的能量测试波形为 2ms 标准方波,如图 1-2-5 所示。

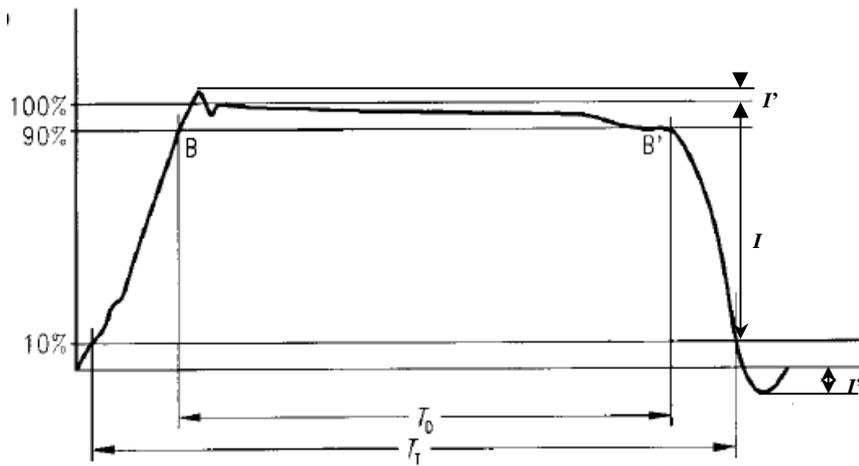


图 1-2-5 2ms 标准方波的波形参数示意图

图 1-2-5 中, T_D 称为有效方波持续时间(亦写做 $T_{0.9}$), T_T 称为有效方波总时间(亦写做 $T_{0.1}$), I_{2ms} 称为方波(平均)电流。IEC60060-2:1973 规定: T_D 的公差为 $+20\%$ 和 -0% , $T_T \leq 1.5T_D$, 同时 I'/I 和 I''/I 不超过 10% 。

2ms 标准方波电流流过压敏电阻时,压敏电阻的残压波形为 2ms 电压波,而且它比 2ms 电流波更加规整,我们用类似与测 I_{2ms} 的方法测出压敏电阻在 2ms 范围的平均残压 U_{2ms} 后,使用下式就可计算出压敏电阻的实际耗散能量:

$$E_{2ms} = U_{2ms} I_{2ms} \times 2 \times 10^{-3} \quad (\text{J}) \quad (1.2.7a)$$

在日本和美国一般采用 $10/1000\mu s$ 的浪涌电流能量来等效代替 2ms 方波能量,同一只压敏电阻承受 $10/1000\mu s$ 的浪涌电流的能量大体为承受 2ms 方波电流能量的 1.4 倍。 $10/1000\mu s$ 波形浪涌电流下的能量按下式计算:

$$E_{10/1000\mu s} = 1.4 U_{10/1000\mu s} I_{10/1000\mu s} \times 10^{-3} \quad (\text{J}) \quad (1.2.7b)$$

为压敏电阻规定最大能量的原因,是通用型压敏电阻在实际应用时不仅会遭受雷击过电

压,而且还会受到操作过电压的冲击;操作过电压是由电路中的电感性元件的充放电引起的一种感生电动势,它不仅电压高,而且放电时间较长(ms级),因此必须针对压敏电阻的操作过电压的能量耗散能力加以规定,才能确保压敏电阻的正常工作。

1.2.8 电压温度系数 TC (temperature coefficient)

如前所述,压敏电阻非线性 V/I 特性曲线的预击穿区的位置受温度的影响较大,击穿区受温度的影响较小。20D431K 规格压敏电阻在 $I \leq 1\text{mA}$ 范围内的 V/I 特性曲线随温度的变化如图 1-2-6 所示。

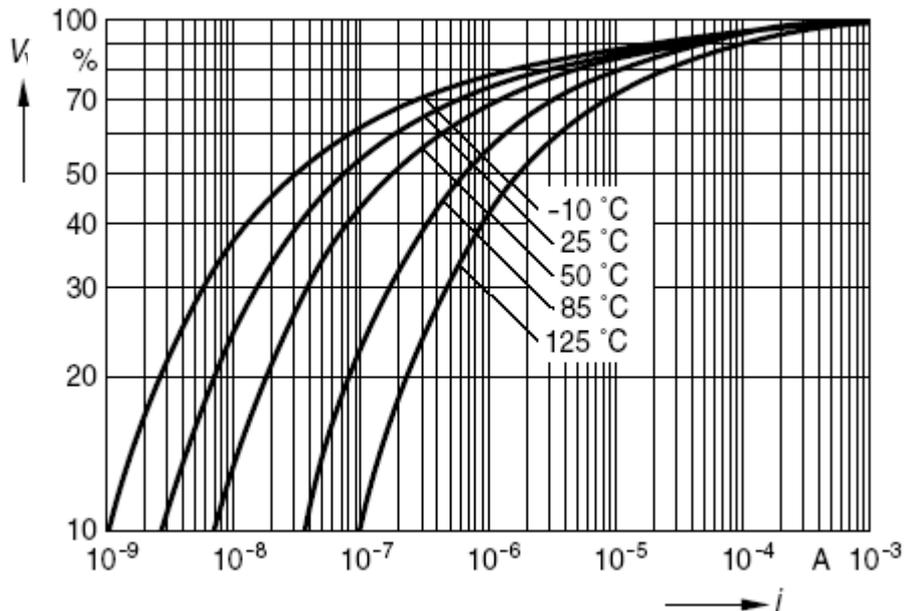


图 1-2-6 20D431K 压敏电阻 $V-I$ 特性曲线随温度的变化

从图 1-2-6 可以看出,在电流(直流)相同的情况下,压敏电阻的电压随温度的上升而下降,即压敏电阻的电压温度系数为负值。电流越小,电压随温度的变化越明显;1mA 以上的电压随温度的变化不明显,一般可以忽略不计。压敏电压 U_N 随温度的变化系数称为电压温度系数 TC ,其定义公式为:

$$TC = \frac{[U_N(T_{upper}) - U_N(25^\circ\text{C})] / U_N(25^\circ\text{C})}{T_{upper} - 25^\circ\text{C}} \times 100 \quad (\%/^\circ\text{C}) \quad (1.2.8)$$

式中, T_{upper} 为压敏电阻的上限类别温度(单位: $^\circ\text{C}$),即最高允许的使用温度。电压温度系数 TC 的定义公式实际上仅表示压敏电阻从常温到其上限类别温度范围内的平均电压温度系数,一般大于 $-0.05\%/^\circ\text{C}$ 。严格说,电压温度系数不是一个常数,在不同温度下, TC 值是不同的,不过通常不需要给出 TC 与温度的关系曲线。

1.2.9 电容量 C_0

压敏电阻在导通前的电阻值很大,可视为电介质材料,两个电极之间存在着 pF 级的电容。在工频下,如此之小的电容对被保护电路的正常工作几乎没有任何影响,但在高频或数字线路中,如不考虑压敏电阻的电容量,有时会造成信号失真或产生谐振。因此生产厂家应向用户提供压敏电阻的电容量参考数据(一般以最大值或典型值的方式),以使用户设计电路时参考。

压敏电阻的电容是目前它在高频电路和数字电路中应用较少的根本原因。

1.2.10 响应时间 τ

一般意义上的响应时间是指一个元件从具备动作的条件到它开始动作之间的时间差,但是压敏电阻的响应时间 τ 并不是这样定义的,因此需要特别加以注意,以免混淆。

在 IEEE C62.33-1982 标准中,压敏电阻的响应时间 τ 的定义如图 1-2-7 所示。图 1-2-7 中的电压 V_c 指压敏电阻对 8/20 μ s 标准雷电流波的残压;当浪涌电流的峰值相等,但视在前沿时间 T_S 比 8 μ s 更短时,残压 V_1 就会高于 V_c , ($V_1 - V_c$) 称作电压过冲 V_{OS} 。从 V_1 峰值点时间 t_1 到 50% V_{OS} 的过冲时间它 t_2 之间的时间宽度 τ ($t_2 - t_1$) 称作压敏电阻的“响应时间”。的测量值一般在 25ns 以内。

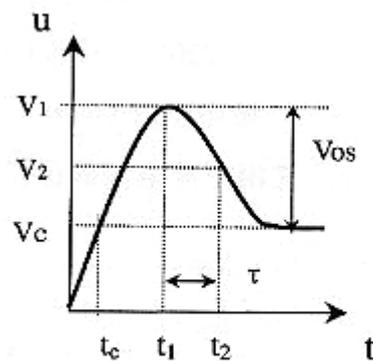


图 1-2-7 响应时间 τ 的定义

IEEE 定义的压敏电阻的响应时间 τ 并不是压敏电阻材料本身的特性,而是由测试波形、引线、印制电路版的布线方式、外部测试连接线,以及它们所构成的磁环路等外部原因造成的,根据这一定义,对 8/20 μ s 标准雷电流波或 $T_S > 8\mu$ s 的电流波,压敏电阻的响应时间 $\tau = 0$ 。

如果采用一般意义上的响应时间的概念,美国 GE 测定的压敏电阻材料本身的响应时间不到 1ns;加上引线后,整个元件的响应时间随引线的长度的增加可延长到 50ns 左右。

很多压敏电阻的用户并不了解压敏电阻相应时间的正确定义,通常将响应时间从一般意义上理解,并认为压敏电阻的相应时间没有半导体式的固体放电管 TVS 快。实际上,压敏电阻也是由一种半导体材料构成,它的响应时间与其他半导体材料的响应时间是类似的。压敏电阻和其他半导体过电压抑制元件的整体响应时间都比材料本身的响应时间大的多,因此 IEEE 标准 C62.62 第 7.12 条指出:“...对冲击电压波前的响应特性,依赖于侵入波的上升速率、冲击源阻抗、保护器件内部电抗的作用,以及抑制元件内部导电机理所决定的响应特性。换言之,对波前的响应,除了受抑制元件响应速度的影响外,更多地受到包括连接线阻抗在内的试验线路状态的制约。此外,在规定条件下测得的响应电压的峰值,对冲击保护的的目的而言,才是具有头等重要意义的特性。因此,对于本标准所述器件的典型应用而言,对波前的响应,被认为是一个可能引起误导的且没有必要的技术要求,在没有特殊要求的情况下,对波前的响应不应规定技术要求,也不进行试验、测量、计算或认证”。

1.2.11 脉冲电流稳定性 (一万次冲击寿命)

对压敏电阻施加峰值 I_a 的 8/20 μ s 标准雷电流波,单方向冲击 10^4 次,间隔时间 10s, I_a 的规定值见表 1-2-2,其后在室温中恢复,恢复时间 1~2 小时。恢复后压敏电阻器应满足下列要求:

外观检验: 不应有可见损伤,且标志清楚。

压敏电压 (规定电流下的电压): 变化率不大于 $\pm 10\%$ 。

表 1-2-2 各种规格压敏电阻的脉冲电流寿命值 I_a

瓷片直径 (mm)		5	7	10	14	20
I_a (A)	$U_N \leq 68V$	8	26	50	90	130
	$U_N > 68V$	20	100	140	200	250

通过了一万次冲击寿命考核,定性说明压敏电阻已具有承受多次雷电流冲击而不损坏的能力。由于该项考核的电流波形、电流峰值和冲击次数是在规定条件下进行的,所以并不能保证压敏电阻在波长大于 20 μ s 或电流峰值大于规定的 I_a 情况下,也能承受一万次的冲击。

1.2.12 额定功率 P_o (最大平均脉冲功率)

额定功率 P_0 是指在电流脉冲群作用下,压敏电阻器能承受且保持热稳定和不发生结构破坏的最大平均功率。在没有专门要求的情况下,电流脉冲波形为8/20 μ s、峰值为 I_a ,冲击 10^4 次(每50次改变一次冲击方向), I_a 的规定值见表1-2-2。每秒钟最大冲击次数 N 按下式计算:

$$N = \frac{0.9P_0}{U_p I_a \times 2 \times 10^{-5}} \quad (\text{次/s}) \quad (1.2.9)$$

式中: P_0 : 额定功率,见表1-2-3 (W)

U_p : 限制电压,见产品样本 (V)

使得试样的平均功率为 $P_0 \pm 10\%$, 其后在室温中恢复,恢复时间1~2小时。恢复后压敏电阻器应满足下列要求:

外观检验: 不应有可见损伤,且标志清楚。

规定电流下的电压: 变化率不大于 $\pm 10\%$ 。

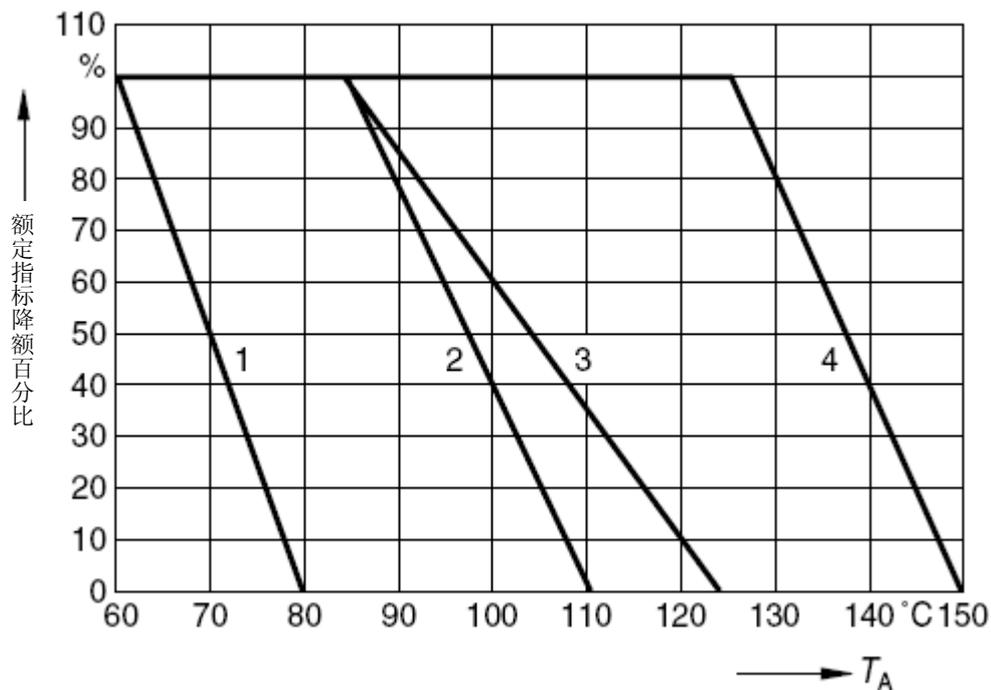
表 1-2-2 各种规格压敏电阻的额定功率 P_0 的规定值

瓷片直径 (mm)		5	7	10	14	20
P_0 (W)	$U_N \leq 68V$	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2
	$U_N > 68V$	0.1	0.25	0.4	0.6	1.0

额定功率或最大平均脉冲功率 P_0 具有两个实际应用意义。当直流或交流工作电压在短时间内(几个小时)超过了规定的 U_{DC} 或 U_{RMS} 时,如果压敏电阻在该电压下的实际有功功率不大于 P_0 ,则压敏电阻仍然是安全的,如果压敏电阻在该电压下的实际有功功率超过了规定的 P_0 ,则压敏电阻会在短时间内会因温度上升过快而损坏,甚至起火。当电路中存在周期性“毛刺”过电压时(如晶闸管的换向过电压),压敏电阻在该周期性过压作用下的平均功率也应小于 P_0 。

1.2.13 温度降额曲线和脉冲电流降额曲线

如前 1.2.8 所述,压敏电阻的 V/I 特性会随温度发生漂移。前面介绍的最大连续工作电



1. 高能型压敏电阻 2. 通用型及防雷型压敏电阻 3. 表面贴装式压敏电阻 4. 用压敏电阻

图 1-2-7 各种类型压敏电阻的温度降额曲线

压 (U_{RMS} 和 U_{DC})、通流量 I_m 、额定功率 P_o 、最大能量 E_m 五个性能指标的有效范围是下限类别温度到上限类别温度, 当使用的环境温度高于压敏电阻的上限类别温度时, 这五个指标都要按图 1-2-7 降低指标, 图 1-2-7 称为压敏电阻的温度降额曲线。

当脉冲电流的波宽不等于 $20\mu s$, 或脉冲电流的峰值小于一次通流量 I_m 时, 压敏电阻能够承受的冲击次数 n 将随着电流波宽 (等效方波持续时间) 和电流峰值的大小发生变化, 冲击次数与波宽和峰值之间的关系曲线称为脉冲电流降额曲线。相近规格压敏电阻的降额曲线是基本一致的, 我们公司在产品样本中, 采用分段方法向用户提供脉冲电流降额曲线, 14D820K~14D511K 规格的压敏电阻的脉冲电流降额曲线如图 1-2-8 所示。

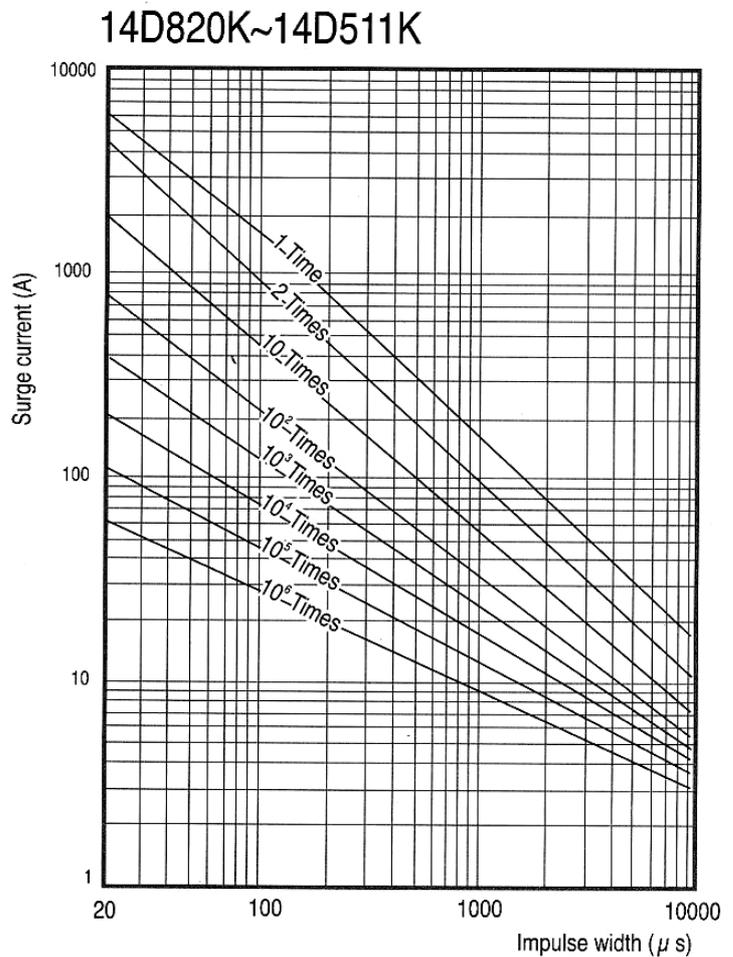


图 1-2-8 14D820K~14D511K 压敏电阻脉冲电流降额曲线

1.3 通用型压敏电阻的型号命名方法

目前世界各国的压敏电阻生产商实行两种形式的型号命名方法: 以松下电气为代表的日系型号命名法和以 门子为代表的 IEC 系型号命名法。

1.3.1 日系型号命名法

该命名法以 7 组英文字 和 数字组成的字符 代表产品型号:

□...□ □..□ □ □ □ □ □ □ □ □ □...□

说明:

- 3~4 个英文字 , 表示商标、厂名、产品代号等;
- 1~2 个英文字 , 表示压敏电阻产品系列代号, 具体代号厂家自定;
- 2 位 数字, 表示瓷片以 单位度量的名义尺寸 (圆的直径或正方形的边长);
- 1 个英文字 , 表示瓷片的形状, D 表示圆片、S 表示正方形片;
- 3 位 数字, 表示压敏电阻的名义压敏电压 ($U_{1mA}/ U_{0.1mA}$), 前两位数字表示实际压敏电压数字, 第三位数字表示后面 0 的个数; 如 201 表示 200V、182 表示 1800V、270 代表

27V；

1 个英文字，表示压敏电压的公差范围，有 K（±10%）、J（±5%）和 L（±15%）三种；

加，位数不确定；无加表示直引线的散装标准品，如有则表示压敏电阻的其他特征，如外引线、引线长度、编包装等，具体代号厂家自定；

日系型号命名法目前在日本、中国大陆、台湾、国普遍使用。

以松下电气的压敏电阻型号为例：

1.3.2 IEC 系型号命名法

IEC 通用压敏电阻的标准规定压敏电阻的规格代号中必须注明压敏电阻的最大连续工作电压（ U_{RMS} 或 U_{DC} ）的值，而规定注明压敏电压。以门子为代表的欧美压敏电阻生产商普遍采用 IEC IEC 系型号命名法，该命名法以 7 组英文字和数字组成的字符代表产品型号，具体如下：

□...□ □..□ □ □ □ □ ... □ □...□

说明：

3~4 个英文字，表示商标、厂名、产品代号等；

1~2 个英文字，表示压敏电阻产品设计或形式代号，具体代号厂家自定；

2 位数字，表示瓷片以单位度量的名义尺寸（圆的直径或正方形的边长）；

1 个英文字，表示压敏电压的公差范围，有 K（±10%）、L（±15%）和 M（±20%）三种；

2~4 位数字，表示压敏电阻的最大连续交流工作电压 U_{RMS} 的值；

加，位数不确定；无加表示直引线的散装标准品，如有则表示压敏电阻的其他特征，如外引线、引线长度、编包装等，具体代号厂家自定；

以门子压敏电阻型号为例：

第二章 通用型氧化锌压敏电阻器的接线方式和选型计算

由于 半导体器件中的 $p-n$ 结对过电压非常敏感且承受能力很差,所以随着 半导体器件在电力系、通系、计算机、家用电器、 中的大量使用,异常过电压对系稳定性和安全性的 也日 严重,对设备中可能出现的各种异常过电压施行防护 施目前已成为电路和系设计的重要组成部分。 为止,压敏电阻是应用最为广泛的过压保护元件。

电路中出现的过电压来源十分复,使用压敏电阻进行过压保护时,需要针对不同的来源采用不同接线方式和 型计算方法。为此,我们首先需要了解异常过电压的种类和特点。

2.1 异常过电压的破坏作用及其种类

我们通常将数值超过设计规定上限的电压,称为(异常)过电压。过电压对电路、元器件和系的破坏作用可大体分为以下几种状况:

- 1) 使计算机或 能化设备工作 (机),或使电路工作 ;
- 2) 使电路中的元器件性能下降、寿命 短,并因此造成系的 可 性下降;
- 3) 造成电路、元器件或绝缘的 性损坏;
- 4) 导 电器起火、 电等安全 。

通常我们将过电压分为以下雷击过电压、操作过电压、静电过电压和 过电压 类,现分述如下:

2.1.1 雷击过电压

雷 直接通过 加保护的 物和电气设备对地放电的情形,被称为“直击雷”。直击雷对击中目标产生的过电压极大,有的超过一百万伏,因此其 是毁 性的。不过直击雷 比较少见,而且现代 和 设备绝大多数都已加装了避雷装置(如避雷针等),因此直击雷的防护一般不属于压敏电阻的应用范围。

我们通常所说的雷击过电压一般是指“感应雷击过电压”。当 中有雷电发生或雷 通过避雷装置向地面放电时,雷电流将在其方圆 1.5km 范围内产生 度和频率都很高的电磁

动,因此在此范围内的电源 线等一切导体都会被此电磁 动感应出较高的瞬态过电压,即感应雷击过电压。雷击过电压一般都是 过低压配电系 中的导线(电线)对电气设备造成损 。

IEC61000-4-5 对低压配电系 中的感应雷击过电压给出了三种 度类别的 分方法,如图 2-1-1 所示。

按此标准规定,所谓“Class I(一类)”指从电线的引下线到用户 物的进线的 线,包括引入的 线、引出至户外的 线、电表与总配电 之间的连线、引入地下的 电等(从 物内引入地下的 电不在此类);“Class II(二类)”指 物内的主 线和较短的支路 线,包括配电 、 线和 、从总配电 至大型设备的较短的支路 线,以及照明线路等;“Class III(三类)”指终端出 和较长的支路 线;包括从二类区域配电装置引出的长 10m 以上的终端插 和从一类区域配电装置引出的长 20m 以上的终端插 。

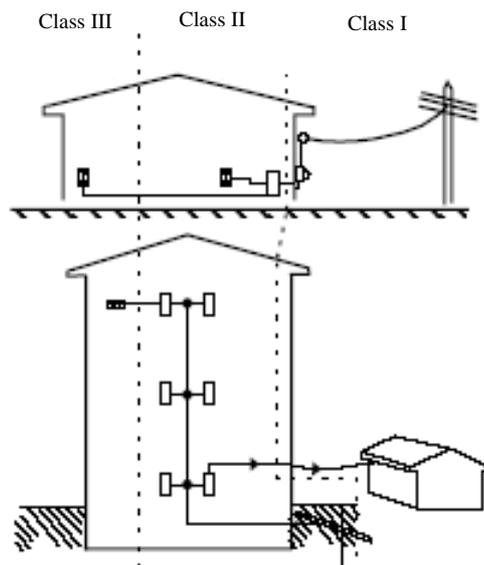


图 2-1-1 低压配电系的防雷等级 分

通用压敏电阻一般用于三类等级的雷击过电压保护。

IEEE 对三种不同雷 等级地理条件下 采取防雷 施的低压配电系 中的雷击过电压的发生率与过电压峰值进行了长时间的观 ，并得到图 2-1-2 所示的 计规律。图 2-1-2 中，LOW EXPOSURE、MEDIUM EXPOSURE、HIGH EXPOSURE 分别代表低、中、高三种不同的雷 等级，LOW EXPOSURE 和 MEDIUM EXPOSURE 等级最常见，HIGH EXPOSURE 非常 见。一般我们只考虑中低雷 等级下的雷击规律。

在中和低雷 等级下，低压配电系 遭受的年平均雷击次数与雷击过电压

的峰值的大小成反比，即发生次数多雷击造成的过压较低，而发生次数少的雷击造成的过压较高；这两种等级的曲线斜率相等。在雷击发生次数相同的情况下，雷 等级越高，雷击造成的过压越高；如在低雷 等级下，年平均发生 10 次的雷击所造成的过压为 0.5kV，而在中雷 等级下，同为年平均发生 10 次的雷击所造成的过压则高达 3kV。另外，雷击造成的过电压还会受到电气设备中的导体之间以及导体与大地之间的间 放电的影响。对户内使用的设备，间 放电电压一般为 6kV；而户外设备的间 放电电压一般为 10kV，个别的可达到 20kV。图 2-1-2 中的 直线代表户内设备的典型间 放电电压（6kV），它表示中雷 等级的雷击过电压虽然理论上可达到 6kV 以上，但由于间 放电的原因，过电压最多只能达到 6kV。

根据图 2-1-2，IEC61000-4-5 对安装于三类防雷区域的电气设备（如家电等）“ 中”地制 了用于认证测试的雷击过电压等级—0.5kV、1kV、2kV 和 4kV，基本 了中和低雷 等级的实际状况。美国 UL1449 标准则根据户内设备的典型间 放电电压为 6kV，将最高认证测试雷击过电压等级定为 6kV。就目前低压电器行业的实际状况而言，一般情况下使用 4kV 作为最高的认证测试的雷击过电压，如果进行 UL 安全认证则 用 6kV。

IEC 规定，雷击过电压采用 1.2/50μs 的标准雷电压波形（定义方法参见图 2-1-3），前述的雷击过电压的大小均指该电压波形的峰值（ V_{PEAK} ）。

对三类防雷区域电气设备的雷击测试采用复合波发生器进行，当该发生器的 出端为开路时， 出的开路电压波形为 1.2/50μs 的标准雷电压波形，模 防雷元件导通前的雷击过电压；当该发生器的 出端为短路时， 出的短路电流的波形为 8/20μs 的标准雷电流波形，模 防雷元件导通时流过的雷电流；复合波发生器还可以 出一个正常的工频正 交流电压，模 被测试电器的正常工作电压。

2.1.2 操作过电压

操作过电压是指电路中的电感性元部件（如变压器、电动机、线 等）被突然导通或切断时产生的过电压。

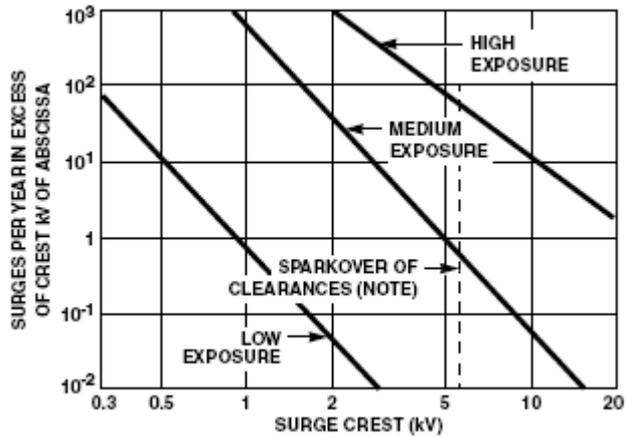


图 2-1-2 低压配电系 雷击过电压的发生率与过电压峰值和地理位置的关系

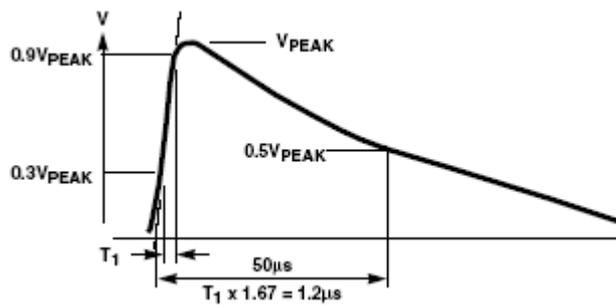


图 2-1-3 1.2/50μs 标准雷电压波形定义图

图 2-1-4 示出了一个小型电机控制回路中，由于电机被开关 S 切断产生过电压 V_1 的实测波形，从图中可见 V_1 在 S 开断过程中从正常的 120V DC，振荡 升至 1020V

与雷击过电压相比，操作过电压的持续时间较长（秒级），但造成的浪涌电流较小。

IEC60060-1.1989 规定用 250/2500 μ s 冲击电压波来模拟操作过电压。

2.1.3 静电过电压

当不同的物体之间发生接触或分离，就会在两个物体上产生静电，带有静电的物体与其他物体接触时，就会产生静电放电。一个常见的实例是人体与物体之间的接触会使人体带电，当人与电子设备（如手机）接触时，人体就会对电子设备放电，有时这种静电放电会对电子设备造成损坏。

静电放电的电压（静电过电压）一般很高，但时间很短（纳秒级）。

IEC61000-4-2 规定以图 2-1-5 所示电流波形来模拟静电放电过程，电流峰值 7.5A~30A，相应的静电过电压等级为 2kV~8kV。

静电过电压的抑制，一般采用表面贴装式压敏电阻 MLV 进行。

2.1.4 故障过电压

名义上，故障过电压是由于供电系统内出现各种人为和非人为的故障造成的过电压，如单相接地过电压、负序过电压、电压接地过电压、谐振过电压、电压过电压（如 220V 接为 380V）等。

过电压的持续时间比较长，在系统设计合理且施工规范的情况下，一般也要持续 0.1~60 秒，在施工质量低的情况下（如变压器接地电阻过大），持续时间会长达几个小时。

压敏电阻对故障过电压是无能为力的，而且长时间的过电压还会造成压敏电阻的起火燃烧和扩大化，因此针对这种类型的过电压，不仅不能使用压敏电阻进行保护，而且还要对压敏电阻施行“过热保护”，即当压敏电阻在故障过电压的作用下严重发热即将起火时，使用与之串联的热保护元件（如温度保险丝）将压敏电阻中的电流切断，从而避免压敏电阻的起火燃烧。当然，热保护元件动作后，压敏电阻就会被完全切除出电路，从而失去其他

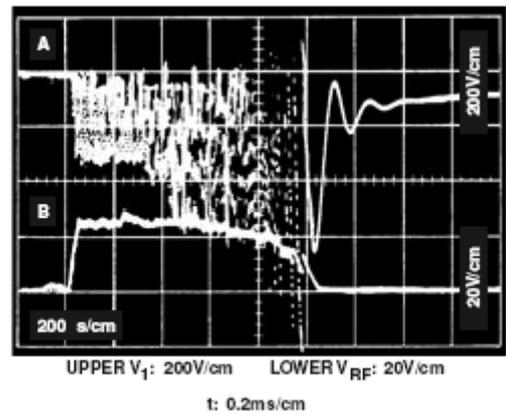
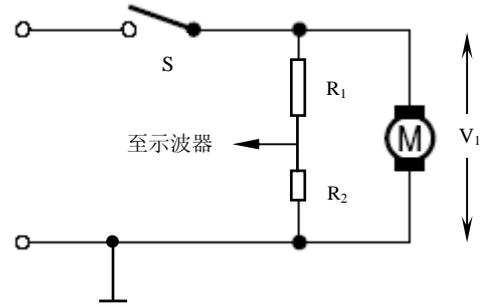


图 2-1-4 操作过电压的实测波形

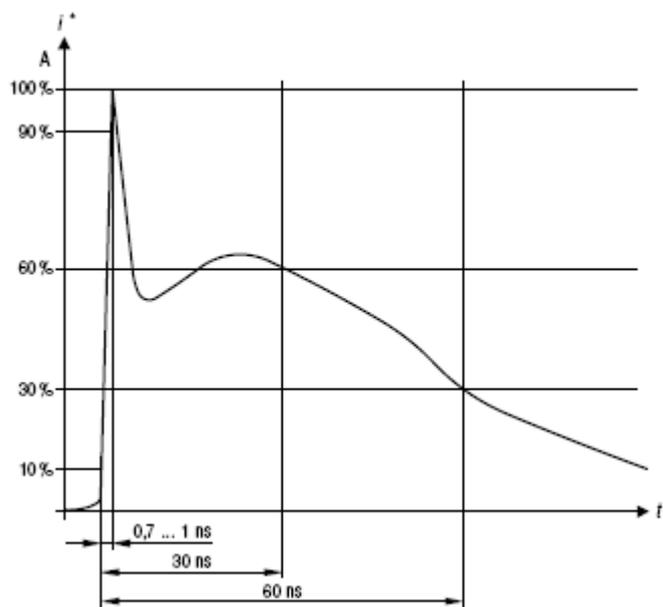


图 2-1-5 IEC61000-4-2 规定的静电放电电流波形

保护作用，因此当热保护元件动作后，应及时更换压敏电阻和热保护元件。

2.2 压敏电阻的保护接线方式

2.2.1 压敏电阻的防雷保护接线

用于防雷的压敏电阻应接于雷电来 的通道上和被保护设备的电源入 端，如图 2-2-1 和图 2-2-2 所示。

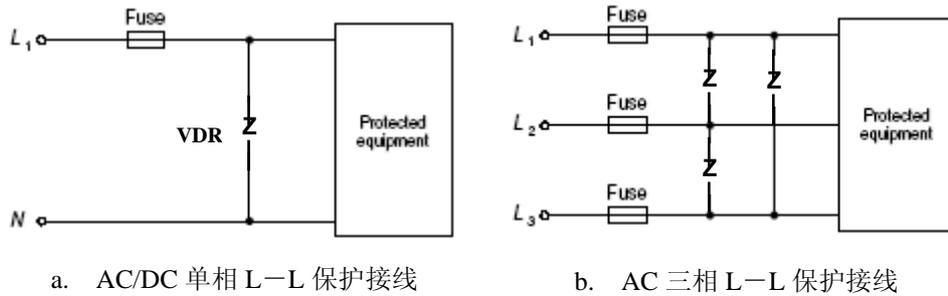


图 2-2-1 压敏电阻 L-L 防雷保护接线方法

图 2-2-1 所示的是压敏电阻 L-L 防雷保护的典型接线方法，所谓 L-L 指的是火线(line, L)与火线及火线与中线(neutral, N)。这种电源供电方式的特点是没有专门的保护接地线(PE 线，又称为地线 Ground)，在雷电沿着 L 线 击设备时，压敏电阻可以有效地抑制 L-L 和 L-N 之间的雷击过电压，但是 L、N 与大地（即设备外 ）之间也会产生雷击过电压，如果该过电压很高，会造成 L、N 与设备外 之间的绝缘击穿并引起人身伤 ，因此这种没有 PE 线的保护接线方式并不能很好地解决雷电防护问题。接有 PE 线的典型防雷保护接线方法如图 2-2-2 所

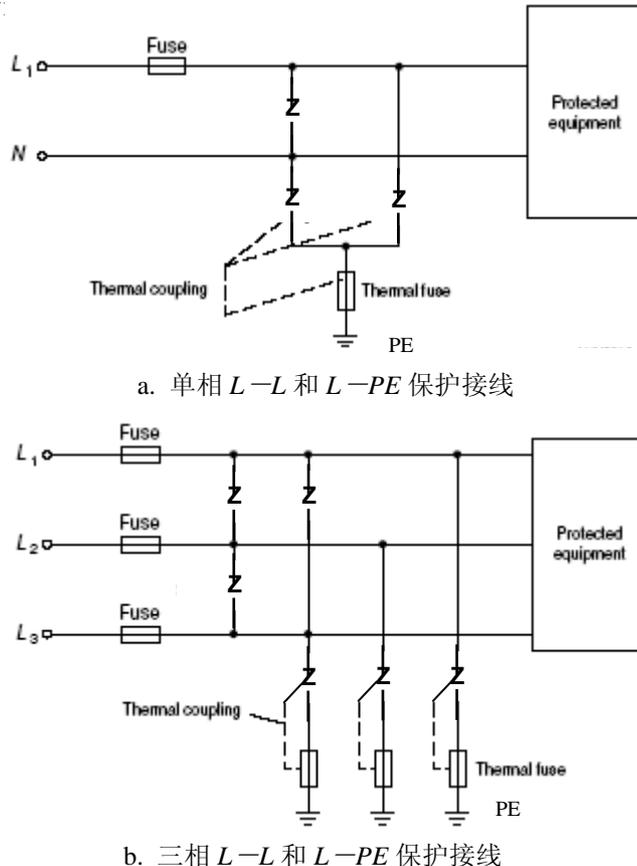
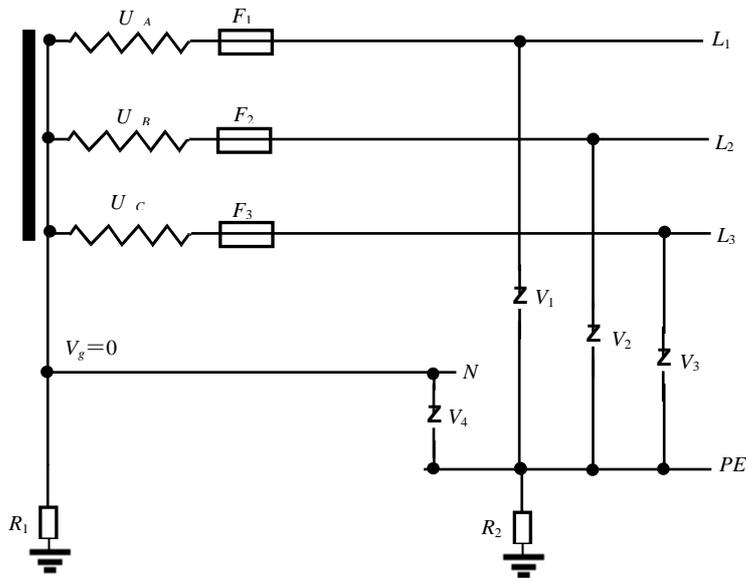


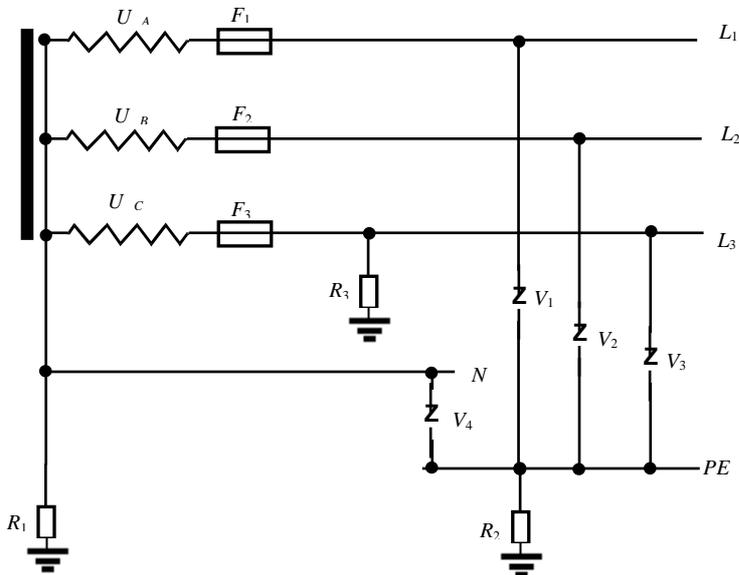
图 2-2-2 压敏电阻 L-L、L-PE 防雷保护接线方法



说明:

1. 设地地电位为 0。无单相接地时, R_1 、 R_2 中均无电流流过, N 线和 PE 线等电位且电位为 0;
2. $N-PE$ 之间的电位差为 0;
3. L_1-PE 之间的电位差为 U_A
4. L_2-PE 之间的电位差为 U_B
5. L_3-PE 之间的电位差为 U_C

a. 无单相接地 时的电路原理图



说明:

1. 设地电位为 0。 L_3 发生单相接地时, 有一电流 I_g 流过 R_1 和 R_3 且有: $I_g = \frac{U_{\phi C}}{R_3 + R_1}$, N 线电位 $V_g = -\frac{R_1}{R_1 + R_3} U_{\phi C}$ 或 $-U_C (R_3=0)$;
2. 无电流流过 R_2 , PE 线电位仍为 0;
3. L_1-PE 之间的电位差为 $U_{\phi A} + V_g - 0$ 或 $U_A - U_C (R_3=0)$ 时);
4. L_2-PE 之间的电位差为 $U_{\phi B} + V_g - 0$ 或 $U_B - U_C (R_3=0)$ 时);
5. L_3-PE 之间的电位差为 $-\frac{R_3}{R_1 + R_3} U_{\phi C}$ 或 0 ($R_3=0$ 时);
6. $N-PE$ 之间的电位差为 V_g 或 $-U_C (R_3=0)$ 时)。

b. 发生单相接地 时的电路原理

图 2-2-3 TTN 供电系 单相接地 的电路分

当供电电源（插）有专门的保护接地线（PE线）时，除了L-L之间的压敏电阻外，我们还可以在每个L和PE之间再接一只压敏电阻，这样L、N与大地之间的雷击过电压也可以通过压敏电阻被有效地抑制，从而避免绝缘击穿和人身伤害。

L-PE、L-N之间的压敏电阻在使用中必须要考虑过电压对它造成的安全（参见2.1.4）。L-PE之间的电压（即压敏电阻的连续工作电压）在正常情况下等于相电压（中国大陆地区为220V），N-PE之间的电压为0，因此LN-PE之间压敏电阻的压敏电压 U_N 通常是根据相电压最大值（ $220V \times 1.1 = 242V$ ）取的（ $U_N = 390V$ 规格，即 $\times \times D391K$ ）。但是当常见的TTN供电系统发生单相接地时，L-PE、N-PE之间的电压就会上升，如图2-2-3所示。当火线 L_3 发生单相接地时（图2-2-3a），整个供电系统的等效电路图如图2-2-3b所示；如 L_3 的接地电阻 R_3 等于0，则N-PE之间的电压由0上升至相电压（220V），而 L_1/L_2-P 之间的电压会由原来相电压220V上升到线电压380V。 $R_3=0$ 是理论上的最严重情况，实际上不可能为0，根据IEC61643-1的规定：L-PE之间的电压会上升45%，即 $220V \times 1.45 = 319V$ ，考虑+10%的电压允许误差，实际最大电压可达到351V。 $\times \times D391K$ 规格的压敏电阻最大只能承受250V的连续工作电压，因此当出现单相接地时，该规格的压敏电阻处于不安全状态。当N线的接地电阻 R_1 复合标准要求（ $\leq 10\Omega$ ）时，保护 F_3 通常可以在5~60秒内切断 L_3 ，从而使接地得以排除，在这种情况下， L_1/L_2-PE 、N-PE之间的压敏电阻有可能不起火或起火后自熄，但是当 $R_1 \gg 10\Omega$ 时，由于 I_g 小，保护 F_3 根本无法动作，单相接地因此无法排除， L_1/L_2-PE 、N-PE之间的压敏电阻将会长时间地承受过电压，起火燃烧问题将无法避免。

为避免L-PE、N-PE之间的压敏电阻在单相接地情况下出现起火燃烧的问题，我们通常采取加装贴近压敏电阻安装且与之串联的温度保护（thermal fuse）的方法，对压敏电阻进行过热保护，如图2-2-2所示。在允许的保护电压水平足够高的情况下，我们也可以采取提高压敏电压 U_N 的方法（在此例中 $\times \times D621K$ 或 $\times \times D681K$ ）来避免压敏电阻的起火燃烧。

2.2.2 压敏电阻的操作过电压保护接线

当压敏电阻主要用于抑制操作过电压时，一般采用将压敏电阻与电感性元部件并联的接线方法，如图2-2-4所示。

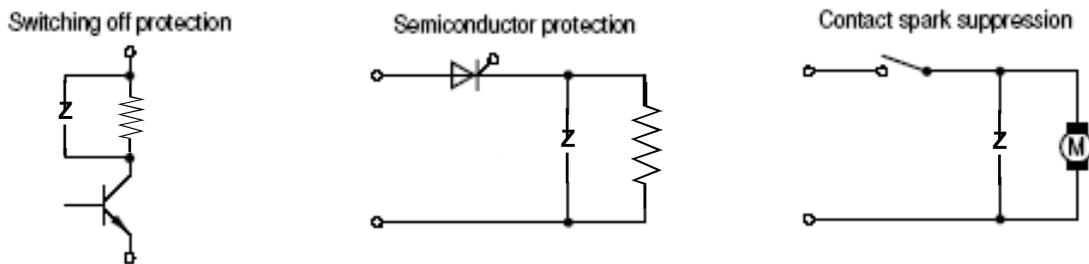


图 2-2-4 压敏电阻的操作过电压保护接线

2.3 压敏电阻过压保护的数学原理

2.3.1 压敏电阻抑制雷击过电压的数学原理

电路中感应到的雷击过电压可用一个冲击电压源来进行等效计算。当一个如图2-3-1所示的电路遭到雷击感应时，应用冲击电压源的概念，雷击就是在原有电路中加一个冲击电压源 V_S 和该高频冲击电压在线路中的等效阻 X_S （源阻，Source Impedance）；由于 $V_S \gg V_B$ ，所以在分雷击过电压时工频电压源 V_B 可被忽略不计，如图2-3-2所示。

对工频电压源 V_B 而言，设备电源线的阻是可以忽略不计的，但对高频率的等效雷电电压冲击源 V_S 而言，设备电源线的阻是不可忽略的因，我们可以将这个阻看成是冲击电压源的组成部分，并称之为源阻 X_S 。设备电源线的阻与电源线的长度和电压的频率有关。一条长约 5m 的电源线，其阻和频率的关系如图 2-3-3 所示

设备的电源线存在一定的电感和分布电容，一个从电源入设备的 $1.2/50\mu s$ 雷电电压在传到设备的入端时会变成 Ring Wave 波形（设入阻无大且无压敏电阻保护），该波形的典型频率为 100kHz，如图 2-3-4 所示。

压敏电阻接入电路后，如果冲击电压源 V_S 的峰值大于压敏电压 U_N ，压敏电阻导通并呈低阻态。由于被保护设备的入阻一般都大于与之并联的压敏电阻的导通阻 X_V ，所以流过压敏电阻的冲击电流峰值 I_P 及其压敏电阻两端的导通电压（残压） U_R 均不受被保护设备的影响。压敏电阻导通时的等效电路如图 2-3-5 所示。

根据定理，冲击电压源的短路电流 $I = V / \dots$

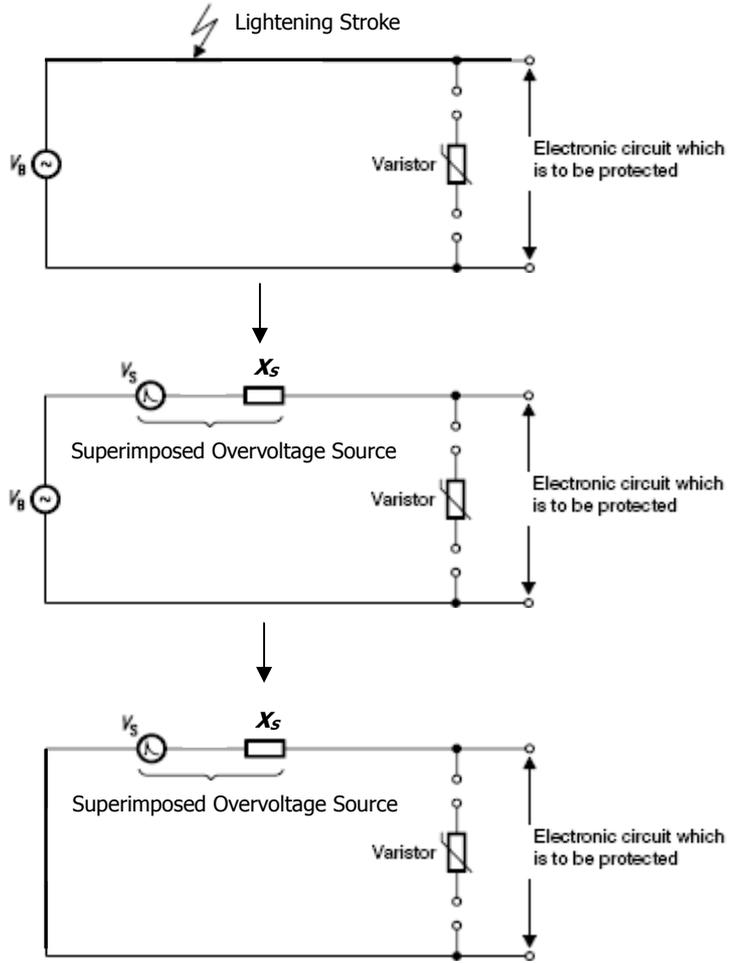


图 2-3-2 雷击过电压的等效模型

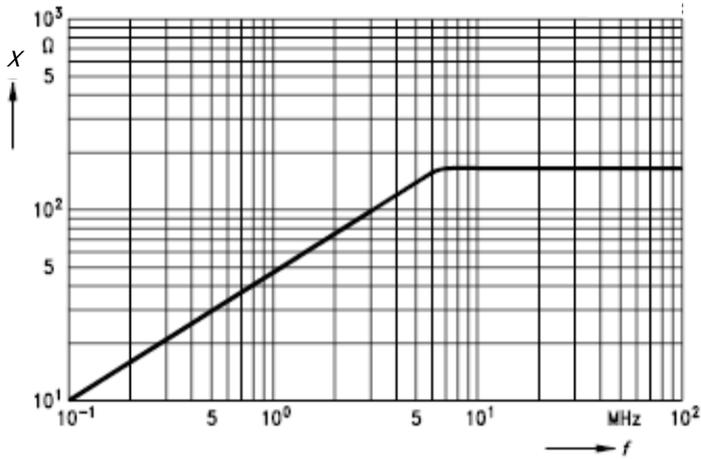


图 2-3-3 电源线阻 X 与频率 f 的关系

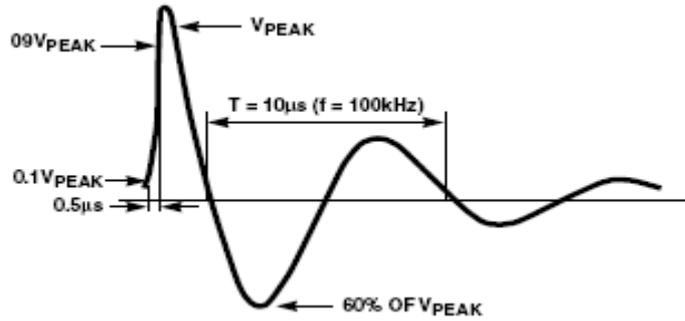


图 2-3-4 户内设备电源线末端开路雷击过电压的波形

1) 压敏电阻在多次雷击下的最大导通电压和最大导通电流

当过电压 V_S 使非线性的压敏电阻导通时，压敏电阻抑制过电压的原理如图 2-3-6 所示。图中，load line 是一条直线，它与压敏电阻 V/I 特性曲线的相交于 I ，与 V 相交于 V ；load line 与 V/I 特性曲线相交于 Q 点，该交点就是压敏电阻导通时的工作点，即：Q 点所对

应的电压 u_R 就是压敏电阻导通时的残压，所对应的电流 i_p 就是压敏电阻导通时流过的冲击电流峰值。生产厂家提供的 V/I 特性曲线均为压敏电压为正 差 (+10%) 时的情况，因此我们作图得到的 u_R 就是该规格压敏电阻最大的导通电压，得到的 i_p 也是压敏电压为正 差 (+10%) 时的导通电流，但 i_p 并不是导通电流的最大值。 实上，最大的导通电流 i_{pm} 发生在压敏电压为负 差 (-10%) 的情况下，我们可以用式 2-3-1 近似计算出 i_{pm} 的值。

$$i_{pm} = \frac{V_s - 0.9u_R / 1.1}{X_s} \tag{2-3-1}$$

由式 2-3-1 可知，在 V_s 和压敏电阻规格一定时，压敏电阻中的最大的导通电流 i_{pm} 与源阻 X_s 呈反比， X_s 越大， i_{pm} 越小。那么我们如何确定 X_s 的取值呢？

IEC61000-4-5 规定了三类防雷模 测试的标准，如表 2-3-1 所示。压敏电阻用户可以根据自 的整机的电源进线方式和使用环境来 定设计计算所需的 V_s 和 X_s 。

为了保证防雷模 测试能够 利通过，我们根据 定的 V_s 和 X_s 计算出 i_{pm} 后，还要从该规格压敏电阻的脉冲电流降额曲线上 出脉冲宽度 20μs、冲击次数为 10 的最大允许脉冲电流峰值 i_{max} （压敏电阻在连续 10 次雷击下的最大通流量），如果 $i_{max} > i_{pm}$ ，则该规格的压敏电阻满足该测试条件下的通流（surge）要求。

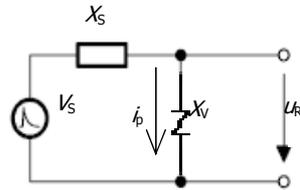


图 2-3-5 压敏电阻导通时的等效电路

表 2-3-1 IEC61000-4-5 规定的模 雷击测试标准

严 等级	开路电压 V_s (1.2/50μs) (kV)	源阻 X_s (Ω)		
		L-L / N	L/N-PE	其他
一级	0.5	2	12	42
二级	1	2	12	42
三级	2	2	12	42
级	4	2	12	42

模 雷电波冲击 10 次，正反向各 5 次，冲击时间间隔 60s

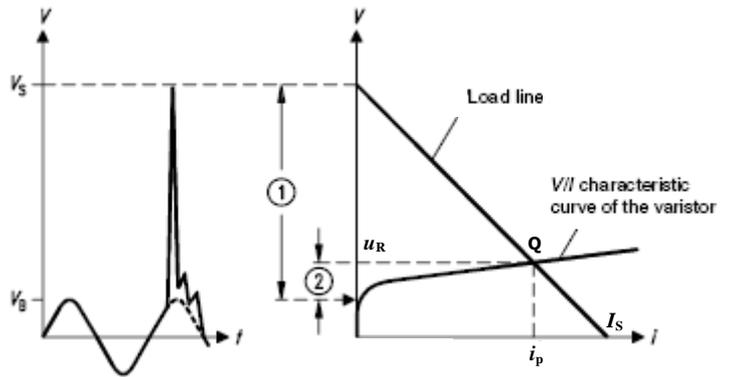


图 2-3-6 压敏电阻抑制过电压的原理图示

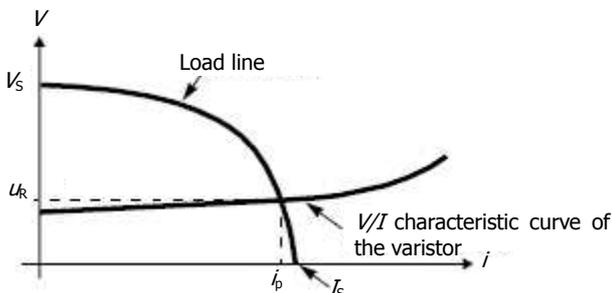


图 2-3-7 双对数坐标下的 load line

图 2-3-6 中的 load line 是在 V/I 特性曲线的坐标 度为十进制下的法，产品样本中的 V/I 特性曲线一般都是用双对数坐标表示，在双对数坐标下，load line 不是一条直线，它的形状如图 2-3-7 所示。

2) 压敏电阻在多次雷击下的的平均功率

从表 2-3-1 可以看出：IEC61000-4-5 规定的模 雷击测试要求在连续冲击 10 次、每次

间隔 60s 的条件下进行。在此条件下，由于间隔时间通常大于雷击持续时间，所以压敏电阻的平均功率 P 为：

$$P = \frac{16.4u_R i_{pm} \times 10^{-6}}{T} \tag{2-3-2}$$

式 2-3-2 中， T 为脉冲时间间隔。

用式 2-3-2 计算出平均功率 P 后，还需要在产品样本中找出该规格压敏电阻的额定功率 (rated wattage) P_0 ，如果 $P_0 > P$ ，则该规格的压敏电阻满足该测试条件下的功率耗散要求。

如果 $P_0 < P$ ，我们就可以缩短试验时的脉冲时间间隔，最小的时间间隔 T_{min} 为：

$$T_{min} = \frac{16.4u_R i_{pm} \times 10^{-6}}{P_0} \tag{2-3-3}$$

2.3.2 压敏电阻抑制操作过电压的数学原理

当过电压是由开断电感元件中的电流引起的，“浪涌电流 (surge current)” 及其等效波形参数可用下面的方法求出。

1) 操作波的浪涌电流峰值和等效方波持续时间

因为电感中的电流不能突变，所以在电感被开断时，压敏电阻中流过的电流与电感中的电流相等 (参见图 2-2-4)，此时后，压敏电阻中的电流 i 随电感磁能量的泄放逐步小，其规律符合指数数：

$$i = i_0 \exp(-t / \tau) \tag{2-3-4}$$

式中， i_0 为初始放电电流 (电感在被开断瞬间的电流)，时间常数 $\tau = L/R$ 可由电流通路上的电感量 L 和电阻 R 求出。从式 2-3-4 可以看出：当时间 $t = \tau$ 时，电流 i 已为初始放电电流 i_0 的 $1/e$ (约 37%)。根据数学原理，式 2-3-4 表示的指数曲线的积分面积相当于一个电流等于 i_0 、持续时间为 τ 的方波的面积；从电学的角度看这两种电流波形的电量相等，如图 2-3-8 所示。

τ 的大小取决于电感量 L 、电感线的直流电阻 R_C 和压敏电阻的导通电阻 R_V ，即：

$$\tau \approx \frac{L}{R_C + R_V} \tag{2-3-5}$$

压敏电阻的导通电阻 R_V 随着电流从 i_0 到 0 不断变化 (增大)，因此 τ 也是电流的函数。在工程计算中，一般定 R_V 为常数，它所对应的电流为 i_0 (从 V/I 特性曲线上找到 i_0 对应的电压 u_R ， $R_V = u_R / i_0$)。从严格的意义上说， V/I 特性曲线上的残压 u_R 是在电流波形为 $8/20\mu s$ 情况下测出的，对指数波形而言 u_R 会小一些，但一般不会影响到计算结果，以减少计算上的难度。

通过以上近似计算得到的 τ 基本上等效于压敏电阻脉冲电流降额曲线的脉冲宽度， i_0 相当于雷电波下的 i_{pm} 。在给定冲击寿命 (冲击次数 n) 的条件下，我们可以用与上节 (2-3-1 节) 相同的方法从降额曲线上找到与 n 对应的 i_{max} ，然后验证 i_0 是否小于 i_{max} 。

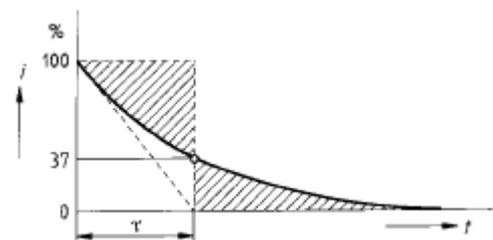


图 2-3-8 指数电流波形的等效方波

2) 压敏电阻对操作波的能量吸收能力

电感中存在着较大的磁能量，因此当它被开断时，磁能量就会转化为电能通过压敏电阻和电感线的直流电阻 R_C 放出来。电感中存的磁能 E_L 为

$$E_L = \frac{Li_0^2}{2} \quad (2-3-6)$$

能量 E_L 需要压敏电阻和电感线 的直流电阻 R_C 同承 , 但我们一般不考虑两者的分 比例, 并 设 E_L 全部由压敏电阻承 。压敏电阻的能量吸收能力 E_{\max} 为:

$$E_{\max} = \frac{0.9u_{\max}i_{\max}\tau}{1.1} \quad (2-3-7)$$

式中, i_{\max} 为压敏电阻脉冲电流降额曲线上对应着冲击寿命 n 和 的最大通流量; u_{\max} 为压敏电阻 V/I 特性曲线上 i_{\max} 所对应的最大残压 (压敏电压 差为 +10%)。如果 $E_{\max} > E_L$, 则该规格的压敏电阻满足能量吸收的要求。

3) 压敏电阻在连续操作下平均功率

在有些实际电路中存在着连续多次操作的情况, 如果实际存在这种情况且连续操作的时间间隔为 , 压敏电阻的平均功率 P 为:

$$P = \frac{E_L}{T + \tau} \quad \text{或} \quad P \approx \frac{E_L}{T} \quad (2-3-8)$$

如果压敏电阻的额定功率 $P_0 > P$, 则该规格的压敏电阻满足功率耗散的要求。

如果 $P_0 >> P$, 最小的时间间隔 T_{\min} 可设计为:

$$T_{\min} = \frac{E_L}{P_0} - \tau \quad \text{或} \quad T_{\min} = \frac{E_L}{P_0} \quad (2-3-9)$$

2.4 选型计算实例

2.4.1 选型计算前的准备工作

在 型前, 必须向用户详细了解以下情况, 并将有关技术信息 入 用户技术情况调查表, 如表 2-4-1 所示。

- 1) 被保护设备的最大工作/考核电压;
- 2) 被保护设备或部件的保护电压水平;
- 3) 被保护设备的雷击测试的电压等级 (即复合波发生器的开路电压) 和冲击次数、冲击间隔时间;
- 4) 压敏电阻的用途和安装位置;
- 5) 操作波发生源的电感量、初始放电电流、线 直流电阻、设计放电次数和最小时间间隔;
- 6) 其他。

2.4.2 实例一

低压电器 (内含 EPROM 等数个 IC 片) 曾在雷 发生过 IC 片损坏的问题。生产厂家考虑在产品的交流电源 ($L-N$ 之间) 加装压敏电阻, 要求我公司代为 型。经了解, 其主要技术信息如下 (参见图 2-4-1):

- 1) 该低压电器的电源部分为单相, 且只有两条进线 L 、 N 进入电源变压器初级端。
- 2) 电源变压器初级的额定电压为 $220V_{AC}$, 电压 差为 $\pm 10\%$, 但生产厂家出于安全考虑, 规定产品出厂前要将电压升高到 $380V_{AC}$ 考核 2 小时;
- 3) 电源入 端的保护电压水平为 $1800V$;
- 4) 雷击测试的条件为: 开路电压 $5kV$ ($1.2/50\mu s$)、源阻 2Ω , 连续冲击 10 次 (正反向各 5 次)、每次间隔 60s。

➤ 选型计算步骤

1) 压敏电压 U_N 的选定及预选型号

虽然该低压电器的额定电压是 $220V_{AC}$ ，但是我们应该按用户的考核电压的最大值作为压敏电阻的最大连续工作电压，即 $380V_{AC} \times 1.1 = 418 V_{AC}$ ， 本公司产品样本可 压敏电压 U_N 为 $680V$ ，预 压敏电阻型号为 $GNR14D681K$ 。

表 2-4-1 用户技术情况调 表

户技术信息	备注
1. 最大工作/考核电压: _____ V_{AC} _____ V_{DC}	工频电源的最大正 差和 情况下的电压上升已计入
2.1 压敏电阻安装位置: _____ 2.1 冲击测试开路电压: _____ kV 波形: _____ μs 连续冲击次数: _____ 次 时间间隔: _____ s 源阻 : _____ Ω 2.2 冲击测试短路电流: _____ kA 波形: _____ μs 等效方波持续时间: _____ μs 2.3 操作波发生源电感量: _____ H 初始放电电流: _____ A 线 直流电阻: _____ Ω 设计放电次数: _____ 次 最小时间间隔: _____ s 2.4 测试标准: _____ 严 等级: _____ 防雷分类等级: _____	L-L、L-N、L-PE、N-PE 1.2/50 μs 、10/700 μs 等 8/20 μs 、10/1000 μs 等 IEC 61000-4-5、UL1449 等 根据 IEC 61000-4-5 根据 IEC 61000-4-5 或 IEC 61643
3. 要求的保护电压水平: _____ V 参考电流: _____ A	
4. 产品系列 SMD-MLV <input type="checkbox"/> SMD-molded <input type="checkbox"/> Disk type <input type="checkbox"/> Block type (KM-L、KM-S) <input type="checkbox"/> Strap type <input type="checkbox"/>	须标明

2) 图解确定最大导通电压 u_R 和最大导通电流 i_{pm}

在 GNR14D681K 的 V/I 特性曲线（参见样本 p17）上绘出 $V_S=5KV$ 、 $X_S=2\Omega$ 的 load line，如图 2-4-2 所示（ V/I 特性曲线根据产品样本重 绘制）。图解得到交点 Q 所对应的 $u_R=1500V$ 。根据式 2-3-1，最大导通电流 i_{pm} 为：

$$i_{pm} = \frac{5000 - 0.9 \cdot 1500 / 1.1}{2} \approx 1890 \text{ (A)}$$

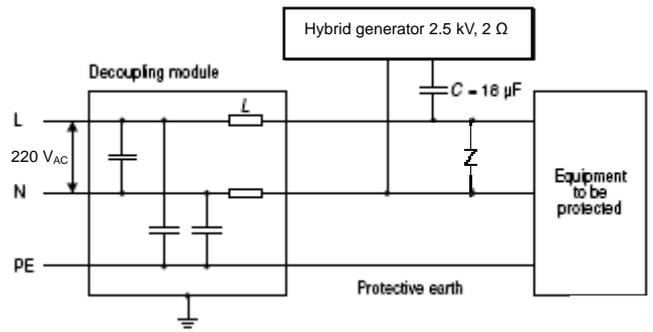


图 2-4-1 实例一中的雷击测试电路

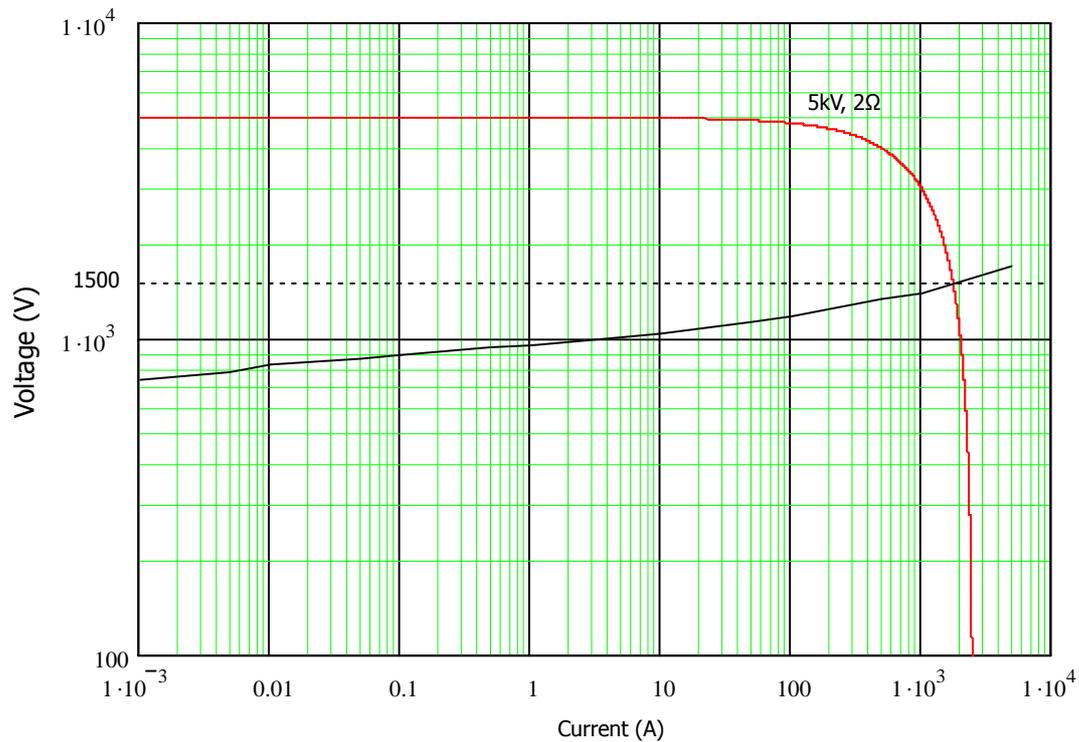


图 2-4-2 GNR14D681K 工作曲线

在 GNR14D681K 的脉冲电流降额曲线（参见样本 p22）上可以 出脉冲宽度 $20\mu s$ 、冲击次数为 10 的最大允许脉冲电流峰值 i_{max} 1600A，因此不满足 $i_{pm} < i_{max}$ 的通流条件，我们改 GNR20D681K。

在 GNR20D681K 的 V/I 特性曲线(参见样本 p19)上绘出 $V_S=5KV$ 、 $X_S=2\Omega$ 的 load line，如图 2-4-3 所示(V/I 特性曲线根据产品样本重 绘制)。图解得到交点 Q 所对应的 $u_R=1480V$ 。根据式 2-3-1，最大导通电流 i_{pm} 为：

$$i_{pm} = \frac{5000 - 0.9 \cdot 1480 / 1.1}{2} \approx 1895 \text{ (A)}$$

在 GNR20D681K 的脉冲电流降额曲线（参见样本 p23）上可以 出脉冲宽度 $20\mu s$ 、冲击次数为 10 的最大允许脉冲电流峰值 i_{max} 2300A，因此满足 $i_{pm} < i_{max}$ 的通流条件。

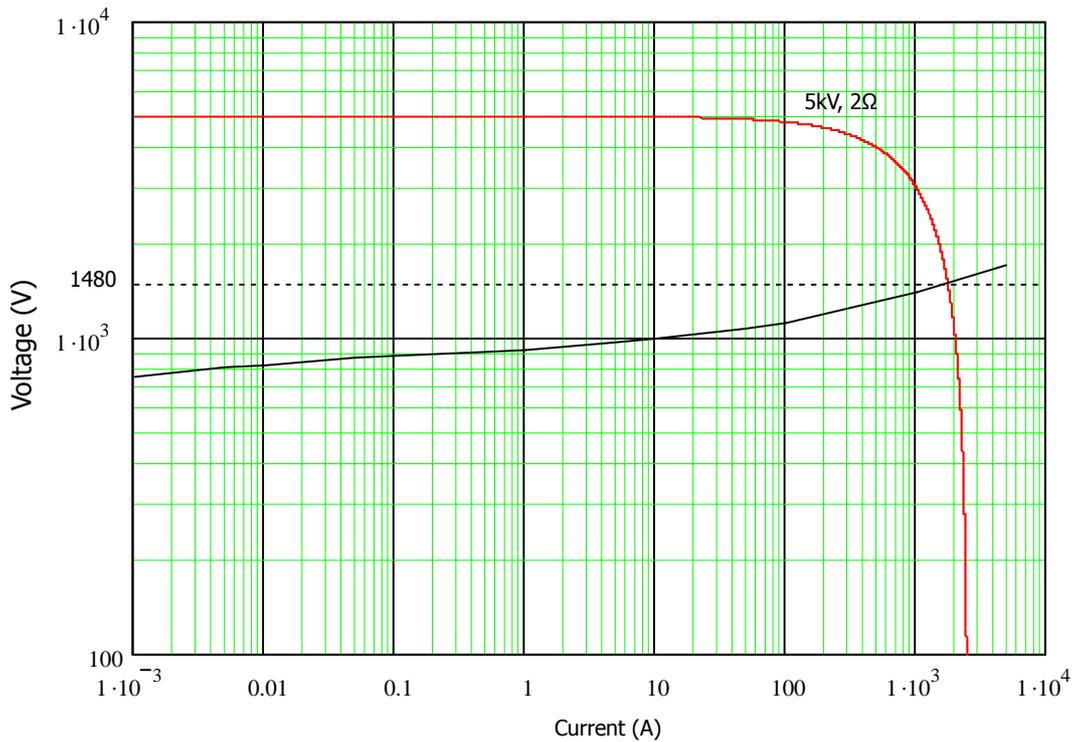


图 2-4-3 GNR20D681K 工作曲线

3) 多次雷击下的的平均功率

根据式 2-3-2, GNR25D681K 压敏电阻在连续冲击 10 次、每次间隔 60s 的条件下的平均功率为:

$$P = \frac{16.4 \cdot 1480 \cdot 1895 \cdot 10^{-6}}{60} \approx 0.74 \text{ (W)}$$

从产品样本中可以 出 GNR20D681K 的额定功率 $P_0=1\text{W}$, 此结果满足 $P_0>P$ 的要求, 因此 GNR20D681K 压敏电阻满足该测试条件下的功率耗散要求。

4) 保护电压水平校验

从图 2-4-3 得到的 $u_R=1480\text{V}$ 是 GNR20D681K 规格压敏电阻的最大导通电压, 此结果满足保护电压水平 1800V 的要求。

选型结论: 该低压电器电源的 $L-N$ 之间应 用 GNR20D681K 规格压敏电阻。

2.4.3 实例二

一个小电机控制回路 (参见图 2-1-4) 的等效电路如图 2-4-4 所示, 电路参数如下:

$$V_{DC} = 24 \pm 2 \text{ V}$$

$$L = 0.1 \text{ H}$$

$$i_0 = 2 \text{ A}$$

$$R_C = 12 \Omega$$

$$\text{开关设计动作寿命} = 10^6$$

$$\text{最短连续开关时间间隔} = 10 \text{ s}$$

$$\text{开关 点的保护电压水平} = 100 \text{ V}$$

► 选型计算步骤

1) 压敏电压 U_N 的选定及预选型号

压敏电阻的最大连续工作电压为 $(24+2)V_{DC}=26V_{DC}$ ，
本公司产品样本，可 压敏电压 U_N 为 33V，预 压敏
电阻型号为 GNR10D330K。

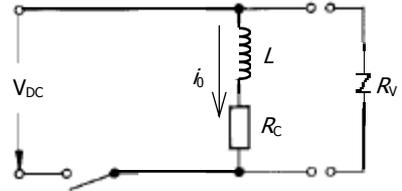


图 2-4-4 实例二中的等效电路

2) 操作波的浪涌电流峰值和等效方波持续时间

从 GNR10D330K 的 V/I 特性曲线（产品样本 p15）上找到 $i_0=2A$ 对应的电压 u_R 为 62V，
那么 $R_V = u_R/i_0 = 62V/2A = 31\Omega$ ，根据式 2-3-5，可得：

$$\tau = \frac{L}{R_C + R_V} = \frac{0.1}{12 + 31} = 2.33 \text{ (ms)}$$

从 GNR10D330K 的脉冲电流降额曲线（产品样本 p21），可 出对应冲击时间 2.33ms、
冲击次数 10^6 的 i_{max} 1.8A，此结果不满足 $i_0 < i_{max}$ 的通流条件，因此我们改 GNR14D330K。

从 GNR14D330K 的 V/I 特性曲线（产品样本 p15）上找到 $i_0=2A$ 对应的电压 u_R 为 56V，
那么 $R_V = u_R/i_0 = 56V/2A = 28\Omega$ ，根据式 2-3-5，可得：

$$\tau = \frac{L}{R_C + R_V} = \frac{0.1}{12 + 28} = 2.5 \text{ (ms)}$$

从 GNR14D330K 的脉冲电流降额曲线（产品样本 p22），可 出对应冲击时间 2.5ms、
冲击次数 10^6 的 i_{max} 3.5A，此结果满足 $i_0 < i_{max}$ 的通流条件，

3) 压敏电阻对操作波的能量吸收能力

根据式 2-3-6，可得电感 L 存的能量为：

$$E_L = \frac{Li_0^2}{2} = \frac{0.1 \cdot 2^2}{2} = 0.2 \text{ (J)}$$

从 GNR14D330K 的 V/I 特性曲线（产品样本 p15）上找到 $i_{max}=3.5A$ 对应的电压 u_{max}
为 58V，根据式 2-3-7，可得 GNR14D330K 的最大能量吸收能力为：

$$E_{max} = \frac{0.9u_{max}i_{max}\tau}{1.1} = \frac{0.9 \cdot 58 \cdot 3.5 \cdot (2.5 \cdot 10^{-3})}{1.1} = 0.42 \text{ (J)}$$

此结果满足 $E_L < E_{max}$ 的能量吸收要求。

4) 压敏电阻在连续操作下平均功率

根据式 2-3-8，在连续多次操作、间隔时间 $T = 10s$ 的情况下，GNR14D330K 的平均功
率为：

$$P = \frac{E_L}{T + \tau} = \frac{0.2}{10 + 2.5 \cdot 10^{-3}} \approx 0.02 \text{ (W)}$$

从产品样本中可以 出 GNR14D330K 的额定功率 $P_0=0.1W$ ，此结果满足 $P_0 > P$ 的要求，
因此 GNR14D330K 压敏电阻满足功率耗散要求。

由于 $P_0 \gg P$ ，我们可向用户 最小的连续动作时间间隔 T_{min} 的值（根据式 2-3-9）：

$$T_{min} = \frac{E_L}{P_0} - \tau = \frac{0.2}{0.1} - 2.5 \cdot 10^{-3} \approx 2 \text{ (s)}$$

5) 保护电压水平校验

GNR14D330K 压敏电阻最大导通电压为 56V，开关元件两端的电压为 $56V + 26V = 82V$ ，
此结果满足开关 点的保护电压水平 100V 的要求。