

第 14 章 电涌保护器 (SPD)

1 电涌保护器概述

1.1 信息化催生的新电器——电涌保护器 (SPD)

电涌保护器是低压电器中的一个新成员，以前一般把它称为低压避雷器，尽管“低压避雷器”的历史已经不短了，但主要作为电子信息产品安全保护用的“电涌保护器”，从一般保护电器中分离出来，形成一个独立的产品分支，还只有 10 多年的历史。电涌保护器的第一份国际技术标准 IEC61643-1 发表于 1998 年。

从技术的角度讲，电涌保护器是一种以伏安特性为非线性的元件作为主要功能元件，用来抑制瞬时过电压，泄放电涌电流，从而保护电器和电子设备的低压保护电器。它的英文名称叫 Surge Protective Device，简称 SPD。

瞬时过电压，或者称为浪涌过电压，主要来自三个方面：雷电，电气系统操作和静电，其中雷电是最主要的。

据统计，地球上平均每秒钟发生 100 次左右的雷击放电。这种放电将在以雷击点为中心的大约 2Km 范围内的电力线和通信信号线上，产生足够高的浪涌电压，它侵入到连接在这些线路上的计算机等信息技术设备和各种电气电子设备上，造成以下三种破坏效果：第一，干扰设备的正常工作，造成数据丢失或发生工作差错，或使设备暂时丧失正常功能；第二，使某些元器件性能劣化寿命减低；第三，造成某些元器件永久性破坏。严重时，这类干扰和损坏可能导致整个系统工作瘫痪，由此带来的间接损失和连带损失，常常是十分巨大的。例如，1972 年 8 月，山东境内一次雷击，京沪铁路线十多个车站信号设备受损，造成京沪全线瘫痪[1]。据统计，我国 1998-2001 年的 56 次重大雷电灾害(单次直接经济损失超过 100 万元者) 共计直接经济损失 14409.8 万元, 平均每次 257.3 万元[2]。有人统计了美国排名前 1000 名的企业因雷击造成的损失，高达一年 2 亿美元，平均每个企业 20 万美元。德国一家重要的电子保险公司报道说，因雷电和操作过电压造成的损失理赔，在 1984 年占理赔总数的 8.5%，到 1994 年上升到 35.5%，也就是说十年中翻了二番[3]。这些统计数字的背后反映了这样一些现实：

1. 现代信息技术产品的基础是集成电路芯片，在芯片集成度越来越高，功能越来越强大的同时，微电子元件的尺寸越来越细微，结果导致它耐受浪涌电流/电压的能力越来越低，对电冲击更加敏感。
2. 随着人类社会的日趋信息化，信息技术产品快速渗透到国民经济，国防安全，和人民生活的各个方面，产品的数量快速增加，因此浪涌电流/电压导致的损坏事件也呈快速上升的趋势。
3. 信息和网络产品是现代社会的“大脑和神经”，它们的故障所带来的经济的，政治的，或军事的损失往往是很大的。

中国是世界上雷电灾害严重的国家，正因为这样，政府对防雷减灾高度重视，许多省府已强制规定在一些场所或设施“必须”安装防雷装置，因此中国也是世界上防雷产业发展最快的国家之一。

1.2 电涌保护器的基本功能

SPD 是利用了电压/电流特性 (V/I 特性) 为“电压限制特性”的元件来完成抑制瞬时过电压，泄放浪涌电流这样的保护功能的。所谓电压限制特性是这样一种特性：当该元件两端电压低于它的阈值时，它的阻抗极高(几兆欧或更高)，只有很小的漏电流流过它，实际上处于截止状态；但当电压超过它的阈值时，它的阻抗迅速下降，可小到欧姆级或更小，处于充分导通状态，从而泄放浪涌电流；导通后只要

外加电压低于其阈值，或流过它的电流小于某个“维持电流”，元件便快速恢复到高阻截止状态。这种阻抗变化有“单调变化”和“突跳变化”两种不同的形式(图 2.14-1)，因此电压限制特性元件可进一步区分为“钳位型”和“开关型”两种不同类型。

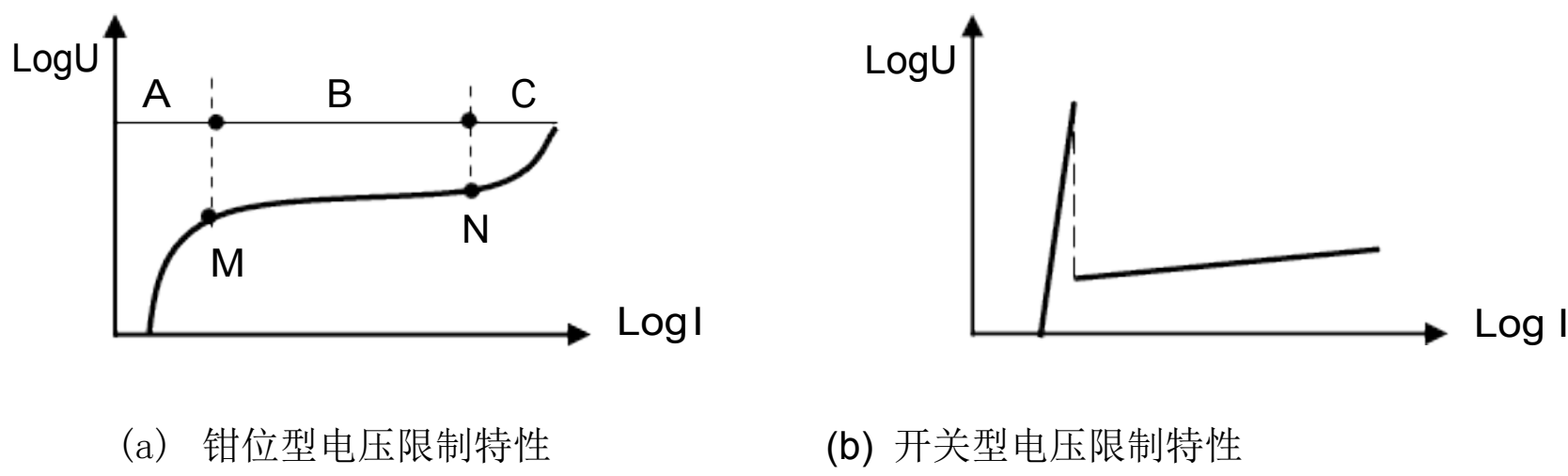


图 2.14-1 电压限制特性元件的 V/I 特性

用非线性元件构成的 SPD 的保护功能，可用图 2.14-2 的例子来说明。这里假定它用的是具有钳位特性的 SPD。该图表示了用 SPD 抑制雷电过电压，分流雷击产生的浪涌电流，保护计算机 PC 的一个例子。图中 220V 供电线 Lo 在 A 点进入室内，经过一段 Ls 线后在 B 点送到计算机 PC。在 B 点，两根电源线的每一根上都对地接了一只用压敏电阻构成的 SPD。它们在 220V 交流峰值电压 ($220 \times 1.41 = 310V$) 下的漏电流，例如为 $2\mu A$ 。也就是说它们的对地阻抗相当于 $310V / 2\mu A = 155M\Omega$ ，这时 SPD 呈“关断”状态。如果附近发生雷击放电时，在电源线的入口点 A，对地有 6000V 的瞬时过电压。室内线路 Ls 对这种瞬时冲击的阻抗 Zs 假定为 3.5Ω ，由于压敏电阻在大电流下的阻抗比 3.5Ω 小得多，因此 A 点对地会有大约 $6000V / 3.5\Omega = 1714A$ 的电流，这个电流通过 SPD 入地，B 点的对地电压由压敏电阻的特性所决定，例如大体为 900V。只要 PC 机的冲击耐压水平高于 900V，就不会因这样的雷击而损坏（图 2.14-2 仅用作原理说明，而不是实用电路）。

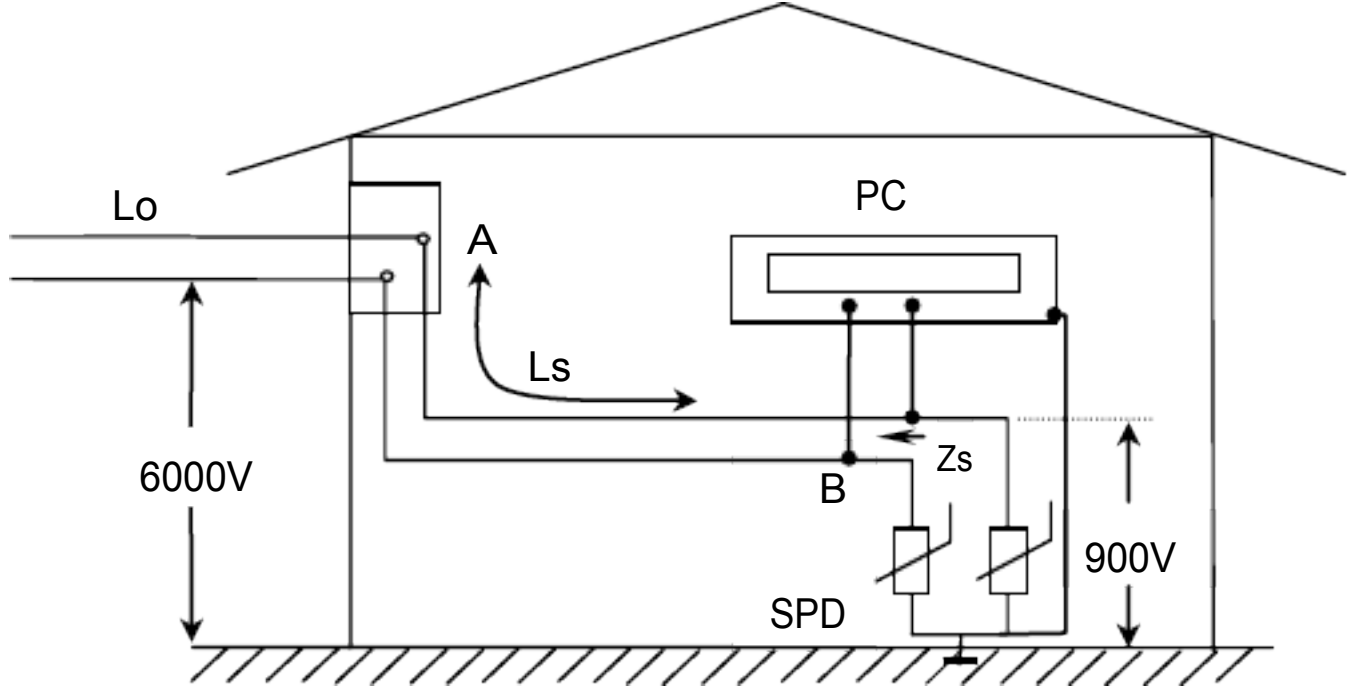


图 2.14-2 SPD 的保护功能

这个例子告诉我们，一个采用 SPD 的过电压保护系统，实际上包含了三个基本环节(图 2.14-3)：过电压源，保护器件，和被保护对象。保护器件 SPD 是这个系统的中间环节，它的上游是过电压源，下游是被保护对象。表征过电压源的基本参数是瞬时过电压（或浪涌电流）的峰值，波形，出现频度，以及对 SPD 呈现的源阻抗等。表征被保护对象的基本参数是冲击耐压或冲击抗扰度。SPD 的任务是在规定

的安装现场和规定的工作寿命期内，保证出现在被保护对象上的冲击都小于被保护对象允许的冲击耐电

压或冲击抗扰度，且 SPD 本身能耐受住过电压/电流的应力而不损坏。当我们考察 SPD 时，都应把它放在这样一个系统中来讨论。



图 2.14-3 采用 SPD 的过电压保护系统的三个基本环节

外部浪涌过电压侵入一台电气/电子设备的途径主要有四个：（1）从该设备的电源线进入；（2）从该设备的信号和数据线侵入；（3）从设备的接地线进入；（4）空间电磁场通过设备外壳侵入设备内部，在设备中产生感应电压。SPD 通常设置在电源线入口和信号数据线入口，因此可将 SPD 区分为电源保护用 SPD，和通信信号网络保护用 SPD（为简单起见，下面分别称为“电源用 SPD”和“信号用 SPD”）。

1.3 SPD 的产品特点

SPD 有以下几个特点是值得注意的：

1. 与电力避雷器相比，SPD 有两个显著的特点：一是在运行中 SPD 的导通频度远高于避雷器，其原因是电力线和通信线上的浪涌电压 U_p 出现的概率 P 有如下的规律：

$$P = c \cdot U_p^{-n} \quad (2.14-1)$$

式中 c 是个常数，指数 n 的值大体在 1-4 之间，随着具体系统和地点的不同而不同[4]。也就是说，浪涌电压的发生概率，随着电压值的降低而激增，因此低电压的 SPD 在运行中的导通频度远高于高电压的避雷器；二是 SPD 的保护对象大多是对浪涌很敏感的电子电气产品，而避雷器的保护对象是电力线路和变压器，电机等电工设备，它们耐浪涌过电压的能力要强得多。

2. SPD 只是综合防雷措施中的一个环节，也就是说 SPD 的防雷保护效果，不仅仅取决于它本身，而在很大的程度上受着其他措施正确与否的影响。防雷措施是包括“D-B-S-E”四个方面的综合技术措施，这四个方面是分流(Dividing)，均压(Bonding)，接地(Earthing)，和屏蔽(Shielding)。SPD 只是综合技术措施中的一项。

3. SPD 技术是多学科的边缘技术，从图 2.14-3 可以看出，它既要与冲击源(雷电过电压，操作过电压)配合，又要与被保护对象配合，因此 SPD 技术工作者要尽可能地掌握与 SPD 的接入点相关的知识。

4. SPD 产品正处在迅速发展，日趋成熟的成长期，一方面产品的品种和社会需求量快速增长，另一方面还有许多课题在业界存在着较大争议，有待解决，随着这些问题的解决和技术性能的提高，产品技术规范也在不断更新。

2 SPD 的主要功能元件

SPD 的功能元件，按其功能可区分为电压限制元件和电流限制元件两大类。电压限制元件与被保护对象并联，用来抑制出现在被保护对象上的过电压；电流限制元件与被保护对象串联/并联，用来切断，限制或分流涌入被保护对象的电流。每一个 SPD 中至少有一只电压限制元件，而电流限制元件只在一部分 SPD 中才用到，大多数电源用 SPD 内部没有电流限制元件。这两种功能元件都包含有几个不同的品种，它们的工作原理不同，特性不同，各有其优缺点。懂得这些元件，用好这些元件，是 SPD 的技术基础。这一节讨论它们的基本工作原理，结构和主要性能参数。

下面首先论电压限制元件。图 2.14-1 已经表明，电压限制元件按其工作特性可区分为钳位(clamping)特性和开关(switching)特性两大类。图 2.14-4 表示了具有这两类特性的具体元器件的种类。

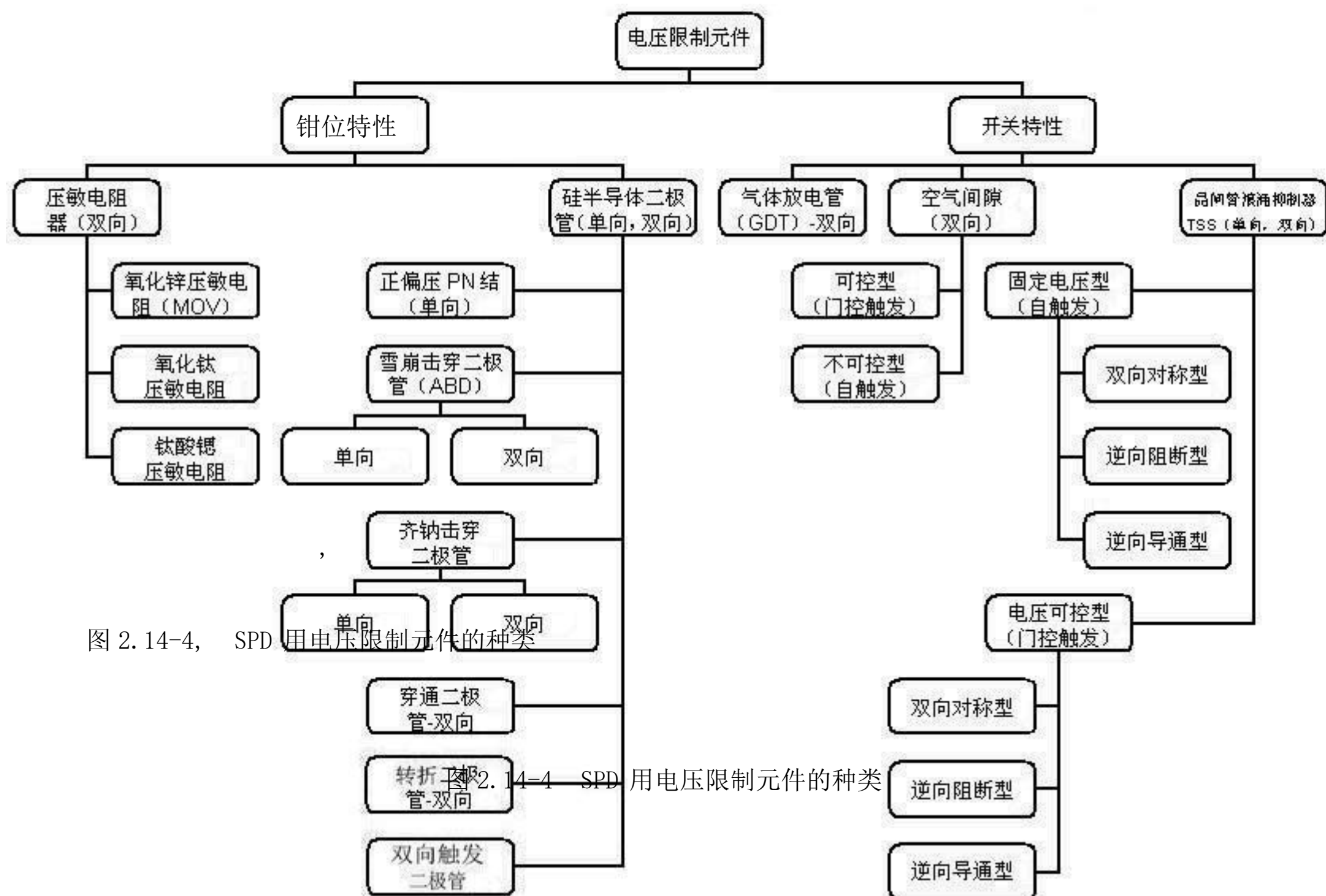


图 2.14-4 电压限制元器件的种类。

图 2.14-4 列出的各种元件不只是用于 SPD，在其他方面也有广泛的应用，当它们被用于 SPD 时，需要对它们的 SPD 所要求的性能参数作特别要求，而对于与 SPD 应用无关的项目则可不作要求。现在 IEC61643 标准系列已对 SPD 中使用较多的四种元件—MOV（氧化锌压敏电阻器），GDT（气体放电管），ABD（雪崩击穿二极管）和 TSS（晶闸管浪涌抑制器）—制定了专门的“SPD 用元件技术规范”。这里我们只对使用最多的钳位特性的压敏电阻器，和开关特性的气体放电管进行讨论。

1.1 压敏电阻器（MOV）

压敏电阻器，顾名思义是指在一定电流电压范围内，电阻值随电压而变，或者说电阻值对电压敏感的电阻器。在技术文件里，它的英文名称有三个：“Varistor”（variable resistor 的合成词），“Voltage Dependent Resistor”（简称为“VDR”），和“Voltage Sensitive Resistor”。

现行压敏电阻器的主导品种是以氧化锌为主体材料的“氧化锌压敏电阻器”，因为氧化锌是一种金属氧化物，故也称为金属氧化物压敏电阻器（英文名称 Metal Oxide Varistor），简称为“MOV”。用作 SPD 元件的 MOV 的技术标准是 IEC61643-331。

2.1.1 MOV 的结构和工作原理

压敏电阻器是一种用陶瓷工艺生产的化合物半导体元件，它的基本结构如图 2.14-5 所示。生产企业对外供货的产品形式主要有这样四种：带银电极裸片，焊接了金属引出端的电阻片，带绝缘封装层(环氧树脂, 有机硅漆等)的压敏电阻器，和装入塑料外壳中的压敏电阻器。

压敏电阻器的钳位型伏安特性，是由它的内部微观结构所产生的。这种元件是以氧化锌（ ZnO ）为基料，加入氧化铋等多种（一般 5-10 种）微量添加剂，制成陶瓷体，然后在陶瓷体的两面烧渗银浆电极，再在银电极上焊接引出线(片)，最后进行绝缘封装而成。

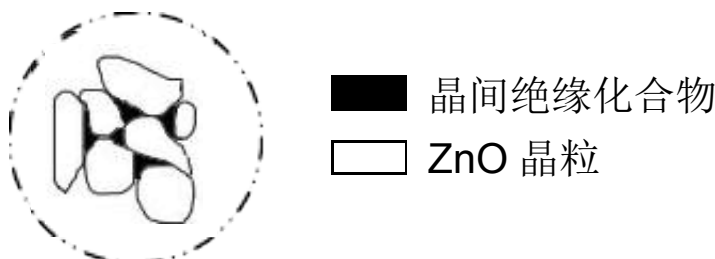
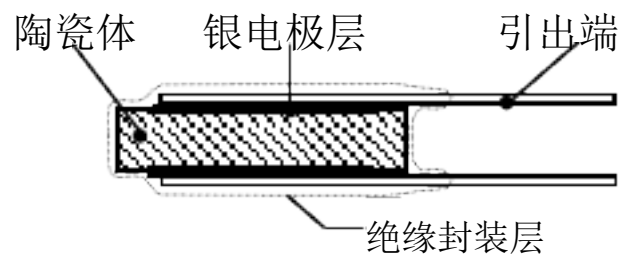


图 2.14-5， MOV 的基本结构

图 2.14-6 MOV 陶瓷体内部结构模型

陶瓷体是由许多粒径为几微米到几十微米的 ZnO 晶粒构成的集合体，多个晶粒的交汇处有在高温烧成中形成的多种绝缘化合物。这种结构可用图2.14-6 的模型来表示。

ZnO 晶粒是低电阻率（ $1\Omega\cdot\text{cm}$ 左右）的导体，相邻两个紧密接触的 ZnO 晶粒间有一个厚度大体为（30-50）nm 的过渡层，它的电阻率极高，且与两侧的 ZnO 晶粒之间形成对自由电子运动起阻挡作用的肖脱基势垒。实际测量得到的势垒电压大体在（2-3.5）V 左右。所以一对互相接触的晶粒就相当于一对“背对背”串联的电压为（2-3.5）V 的齐纳二极管，就是一个压敏电阻器单元。一只压敏电阻器陶瓷体，实际上是许多串/并联的压敏电阻器单元所构成的网络。

从上面的说明可以很自然地推论出MOV 的以下特性，记住这些特性有助于正确选用MOV。

1. MOV 两电极之间串联的单元数，以及总势垒电压，大体上与陶瓷体厚度成正比，而与晶粒尺寸成反比。
2. MOV 两电极的相对面积越大，并联单元数就越多，承受冲击电流的能力就越大。
3. 既然MOV 的电压大体上与厚度成正比，承受冲击电流的能力大体上与面积成正比，那么它承受功率和能量的能力就大体上与电阻体的体积成正比了。
4. ZnO 晶粒尺寸越大，每个单元的热容量就越大，承受功率和能量的能力就越大。
5. MOV 的制造水平，体现在内部晶粒 的“匀质化”程度上，每个晶粒的几何尺寸，形状，化学成分和物理特性的一致性，好，“健全的”单元数多，则电流在电阻体内的分布就均匀，承受电流，功率和能量的能力就大。
6. 在硅单晶半导体器件中，电压和电功率集中在PN 结区，而在MOV 中，势垒层散布在整个电阻体中，这就是压敏电阻器能承受比硅单晶器件大得多的冲击电流和能量的内在原因。

2.1.2 MOV 的伏安特性和等效电路

MOV 的伏安特性可以划分为 A，B，C 三个不同的特征区段（图 2.14-1. a）。电流很小的 A 区和电流很大的 C 区的共同点是，电压与电流的变化接近线性关系，而 B 区的特点是电流在很大范围内变化时，相应的电压变化很小，这就是所谓“高非线性”。通常把 A，B，C 三个区段分别称为“漏电流区”，“高非线性区”，和“上升区”。三个区段的分界点 M 和 N 不是很明确的，为方便起见，通常把 M 点的电流规定为 1mA，也就是说把 1mA 点视为压敏电阻器“截止”与“导通”两种状态之间的转换点，而把这

一点的电压则称作“直流参考电压”或“压敏电压”。N 点的物理意义是MOV 的电阻值已不能随电流的增大而进一步减小了，而趋近于一个最小值（图 2.14-7 的电阻体电阻 r_b ），这一点大体在电流密度为 $(3-4)\text{kA/cm}^2$ 的部位。MOV 在电路中的行为可以用图 2.14-7 的等效电路来描述。

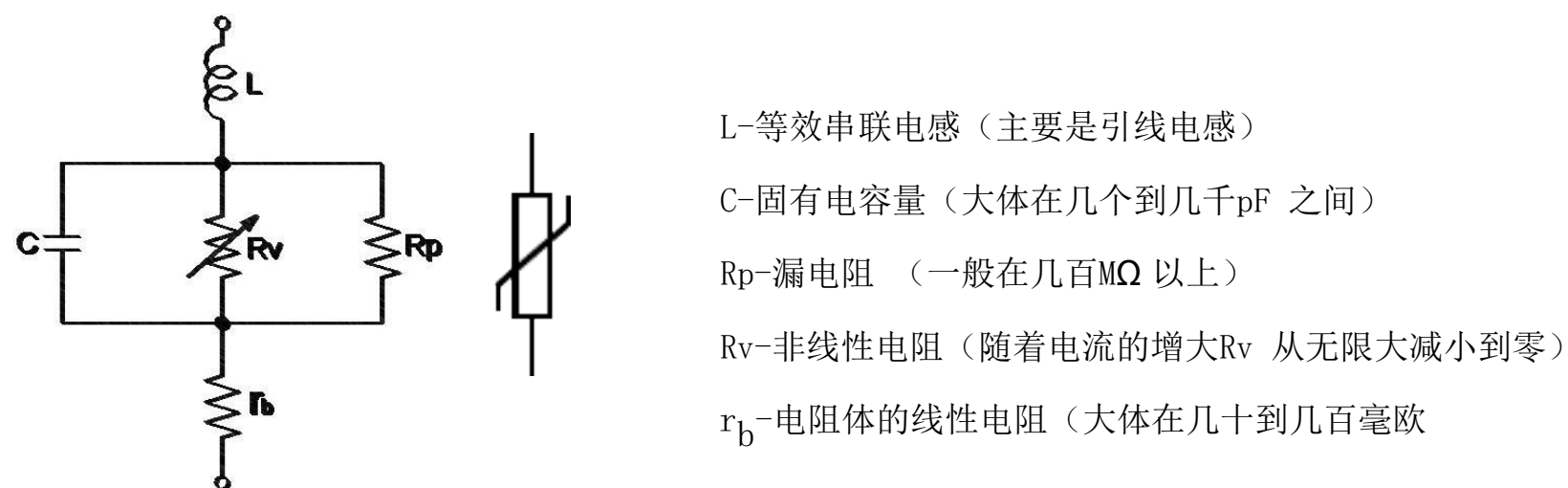


图 2.14-7 MOV 的等效电路和电路符号

2.1.2 MOV 的电性能和参数

与其它元器件一样，MOV 的性能参数可区分为“特性值”和“额定值”两种类型。特性值是可以直接测量得到的参数值，额定值是指MOV 的极限能力，或极限条件，超出这些极限，就可能引起损坏，额定值的符合性要通过一定的试验程序来验证。为叙述方便，这里把 MOV 的电性能参数划分为四个方面：常规性能，保护性能，系统电压耐受性，和冲击电流耐受性，下面分别叙述。

1. 常规性能

常规性能是指在生产和检验中经常测量的直流和交流参数，主要有压敏电压 U_n ，非线性指数 α ，漏电流和电容量 C_0 等四项。

(1) 压敏电压(直流参考电压) U_n

压敏电压 U_n 是以规定测试电流(dc, 1mA)测得的电压值，也称为“直流参考电压”。它是 MOV 的重要参数，MOV 的许多试验都是以 U_n 的变化率作为是否合格的判据的，MOV 的其他电压参数也往往以相对于 U_n 的比例来表示。例如，以“加压比” R_{ap} 来衡量MOV 上电压应力的大小， R_{ap} 也称为“荷电率”，它等于施加在MOV 上的交流电压峰值或直流电压值对于 U_n 的比值；以“限压比” R_{cla} 来衡量 MOV 抑制浪涌过电压的性能， R_{cla} 等于 MOV 的限制电压对于 U_n 的比值。

(2) 非线性指数 α

在高非线性区，MOV 的电流(I)/电压(U)关系通常用下面的实验方程来近似地描述

$$I = KU^\alpha \quad (\alpha > 1) \quad (2.14-2)$$

由式(2.14-2)式可写出

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^\alpha \quad (2.14-3)$$

式中的 α 称为压敏电阻的“非线性指数”，它的物理意义是伏安特性上某一点的静态电阻 (U/I) 是动态电阻（微变电阻 dU/dI ）的多少倍. 常规 MOV 大体在 $(0.1-100)\text{ma}$ 范围内的 α 最大，为 20-80 左右。一般来说 α 大的 MOV 耐受工频暂时过电压 (TOV) 的能力差，原因很简单，因为在同样加压比条件下， α 越大，工频电流就越大。因此，在SPD 中采用 α 较小的MOV。

(3) 漏电流

漏电流是判断和控制MOV 质量的重要参数，根据测试目的的不同，采用不同的测试电压，得到不同

的漏电流值。

在 MOV 的生产中，一般用 $(0.75U_N)$ 的直流电压来测量漏电流，这就避免了同一批产品中由于每只产品实际压敏电压值的不同对漏电流测试结果的影响。大多工业生产的 MOV 的这个漏电流在 $20\mu A$ 以下。

连接在工频交流电源的相线和地之间的 MOV 应控制其交流漏电流，因为这个漏电流太大将引起连接在上游线路的漏电保护开关误动作。

在 MOV 的交流电压老化试验中，则测量最大持续交流电压 U_c 下漏电流的电阻性分量 I_r ，因为在 MOV 的使用寿命期内，漏电流的电容性分量 I_c 基本不变，但 I_r 则随着 MOV 陶瓷体的老化而增大。刚投入使用的 MOV，主要是电容性电流，而接近寿终时，电阻性漏电流成为主要成分。所以，在 MOV 的使用过程中，通过鉴别其漏电流的电阻性分量(或功率损耗)，可判断其老化程度，决定是否要予以更换。MOV 的漏电流是个对温度敏感的量。温度越高漏电流越大，而且漏电流越小对温度越敏感。就 MOV 的质量而言，并非漏电流越小越好，漏电流的稳定性比它的初始绝对值更重要。

(1) 电容量 C_o

从图 2.14-5 所表示的 MOV 的基本结构来看，它相当于一只电容器，其电容量随着规格的不同，大体为几个 pF 到数千 pF。在这里要注意，与普通电容器不同，MOV 的 C_o 并不随其厚度的增大而减小，而是与压敏电压 U_N 成反比，即

$$C_o = K \cdot S / U_N \quad (2.14-4)$$

式中： S —电极面积， k —由瓷料配方和生产工艺决定的常数。可见，在电极面积，瓷料配方，和生产工艺一定的条件下，压敏电压越高，电容量 C_o 就越小。所以，两只 U_N 一样，但厚度不同的 MOV，它们的 C_o 是基本上一样的。

2. 保护性能—限制电压和限压比

MOV 的保护性能，即它抑制浪涌过电压的能力，是 MOV 最重要的使用性能，限制电压 U_{cla} 或限压比 R_{cla} 是表示这一性能的主要参数。 U_{cla} 是在规定的测试条件下，当规定波形和峰值的测试电流 I_x 流入 MOV 时，它两端电压的最大峰值。 R_{cla} 等于限制电压与压敏电压之比 ($R_{cla} = U_{cla} / U_N$)。

在规定电流下 MOV 的 R_{cla} 值主要取决于以下三个因数：限压比 R_{cla} 随着测试电流波上升速率 (di/dt) 的增大而增大； R_{cla} 随着流过 MOV 的电流密度 (A/cm^2) 的增大而增大；MOV 的瓷料配方和制造工艺对限压比 R_{cla} 有重要影响。

在 MOV 的生产和验收时，一般只测量某个规定电流值下的限制电压 U_{cla} ，常用的规定有以下三种：

(1) 以波形为 8/20，电流密度大体为 $6A/cm^2$ (当 $U_N \leq 68V$ 时) 或 $30A/cm^2$ (当 $U_N > 68V$) 的测试电流进行测量 (标准 IEC1051)。

(2) 以波形为 8/20 的标称放电电流 (电流密度大体为 $2000A/cm^2$) 进行测量 (标准 IEC61643-1)。

(3) 以规定大小的 1.2/50-8/20 组合波，叠加在最大持续交流电压 U_c 的峰点上进行测量 (标准 UL1449)。

在实际使用中往往要知道某个电流范围内的 R_{cla} 或 U_{cla} ，因此 MOV 的制造商通常给出最大放电电流以下的全部电流范围内的 $R_{cla}-I_p$ 曲线，或 $U_{cla}-I_p$ 曲线。图 2.14-9 是这种曲线的一个例子。

2. 系统电压耐受性能

MOV 的基本应用方式是与被保护对象并联, 因此它承受着与保护对象同样的工作电压(下面称它为“系统电压”)。对系统电压应当考虑三个数值: 名义值, 电源电压正偏差, 和故障条件下的暂时过电压(TOV)。MOV 的与系统电压的这三个数值相关的性能参数有: 最大持续工作电压 MCOV(交流或直流), 电压寿命, 伏-秒特性和TOV 耐受性。

(1) 最大持续工作电压(MCOV)

MCOV 是可以长期连续施加在MOV 上的最大工频电压有效值(U_c), 或直流电压值。它是通过电压寿命试验和动作负载试验来验证的。

(2) 电压寿命

压敏电阻器在规定的上限环境温度和最大持续工作电压下, 应具有所要求的期望寿命, 例如 10 年, 20 年等。一批产品是否具有期望的寿命年限, 可用加速寿命试验来验证。

(3) 伏秒特性

伏秒特性(U_r-t , 或 R_r-t) 是在规定环境温度下, 加在MOV 上的高于 U_c 值的电压 U_r (有效值), 与MOV 能保持热稳定的加电压时间 t 的关系曲线。也可把电压 U_r 表示成电压比 $R_r=U_r/U_c$ 。该特性对于在应用中判断MOV 在过电压条件下的工作稳定性是十分重要的。

(4) 暂时过电压(TOV)耐受性

当 TOV 峰值高于压敏电压 U_n 的 1.2 倍左右时, MOV 将很快热击穿。TOV 耐受性表示了 TOV 电压值与MOV 发生热击穿以前的耐受时间之间的关系。它是SPD “热脱离” 装置的设计依据。

3. 冲击电流耐受性。

经冲击电流作用后, MOV 的内部结构和宏观性能会发生一定的变化, 这种变化随着冲击强度由小到大表现为性能参数的可恢复性变化, 性能参数的劣化(不可恢复性变化)和结构性破坏三种形式。

用于考核 SPD 用 MOV 冲击电流耐受性的冲击电流主要有: 8/20 电流波, SPD 的 I 级试验电流, 1.2/50-8/20 组合波和 2ms 方波。有的使用场合还要求用100kHz 振铃波, 5kHz 振铃波, 工频半波进行试验。表征冲击电流耐受性的性能参数主要有: 单次冲击最大电流, 重复冲击电流减额特性, 单次冲击最大能量, 最大平均功率和通流容量(安秒资源)。至于电源用 SPD 所要求的 I 级试验电流, II 级试验最大放电电流, 标称放电电流, 和III级试验组合波, 将在SPD 中进行讨论。

(1) 单次冲击最大电流

MOV 能承受的 8/20 电流冲击一次的最大电流峰值。“能承受”的判据是冲击后 U_n 的变化 $\leq 10\%$ 。

(2) 单次冲击最大能量

MOV 能承受的 2ms 方波电流冲击一次的最大能量值。“能承受”的判据是冲击后 U_n 的变化 $\leq 10\%$ 。

(3) 最大平均功率

当 MOV 遭受连续脉冲作用时, 它的平均功率的允许最大值。

(4) 重复冲击电流减额特性

电流峰值减额特性 $I_p = f(\tau, n)$ 表示了MOV 能够承受的冲击电流峰值 I_p , 与“独立”冲击次数(n)

和冲击电流的等效方波时间宽度(τ)三者之间的关系。这里“能承受”的判据也是冲击后 U_n 的变化 $\leq 10\%$ 。

“独立”冲击是指相邻冲击的间隔时间足够长, 各次冲击之间无热累积效应。即相邻冲击的间隔时间足

够长，各次冲击之间无热累积效应。有了这个关系，只要知道了其中的两个参数，就可以确定第三个参数了。图 2.14-8 是这种特性的一个例子，图中纵座标是电流峰值的对数，横座标是脉冲时间宽度的对数，曲线参数是冲击次数(n)。

也可以把这个特性的纵座标(电流峰值 I_p)表示成相对值“电流减额系数”，即以最大峰值(20μ S, 1 次的 I_p)为“1”，其余峰值表示成它的分数。

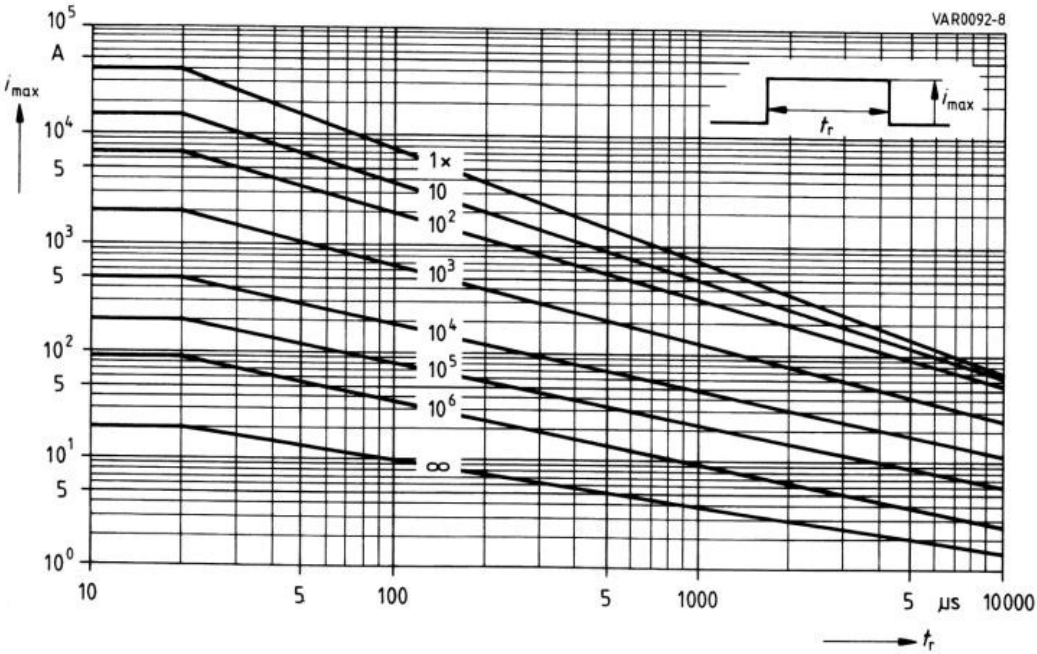


图 2.14-8 重复冲击电流减额特性 $I_p = f(\tau, n)$ 一例

4. 通流容量(安秒资源)

图 2.14-8 所表示的 $I_p = f(\tau, n)$ 特性，可以用下面的方程式来表达[5]

$$\begin{aligned} \text{Log} I_p + a \text{Log} \tau + b \text{Log} n &= C \\ \text{Log}(I_p \cdot \tau^a \cdot n^b) &= C \end{aligned} \tag{2.14-5}$$

式中 a, b, 和 C 是三个常数。(2.14-5)的两个式子是同一方程式的两种不同的写法。从这个方程可以看出，常数 C 的量纲是电流(I_p)和时间宽度(τ)的乘积，即“安秒”值，实际上它表示了在规定的寿终判据条件下(例如压敏电压下降 10%)，MOV 在其整个寿命期内所具有的通流容量的安秒数(As)，或者说“安秒资源”，其值为：

$$As = 10^C \quad (C \text{ 值由 2.1.5 式确定}) \tag{2.14-6}$$

式(2.14-6)中的C 值由式(2.14-5)决定。知道了一批MOV 的安秒资源As 值，就可以估算出MOV 的冲击电流寿命了。可以认为，在MOV 的工作过程中，这个安秒数消耗完后，它的寿命就终止了[6]。但要注意，这个安秒数并不等于浪涌电流的实际安秒数的累加，因为通流容量方程中的指数a 和 b 都不等于 1。

为得出一批MOV 的实际安秒资源As 值，可以从该批产品中抽出三组样品进行冲击试验，依据试验数据和式(2.14-5)求出a, b 和 C 三个常数，然后利用式 (2.14-6) 计算出 As 值。利用式 (2.14-6)，还可进行不同波形电流之间的等效变换。

2.1.3 MOV 的失效模式

MOV 的失效模式可归结为以下五种：

1. 劣化失效模式：MOV 的压敏电压相对于初始值的下降，超过了规定百分数(一般规定 10%)。
2. 短路失效模式：MOV 在故障过程中呈短路状态，故障后在系统电压下的电阻值小于100Ω。
3. 高限制电压失效模式：MOV 的限制电压，高于试验前的 110%。
4. 漏电流爬升(热不稳定)失效模式：MOV 的直流漏电流，或在最大持续交流电压 U_c 下的阻性电流，或功耗值,持续增大，向热不稳定方向发展。
5. 突然毁坏失效模式 (Catastrophic failure)：在这一模式中 MOV 突发性地完全失效。“突发性”是指无法通过事先检查或监测来预测，“完全失效”是指器件彻底丧失所有基本的功能。突然毁坏失效通常是过强的电压/电流应力，和/或器件有缺陷而造成的结构性破坏，导致突然失去所有基本的功能。

2.1.4 SPD 用MOV 的典型参数

表 2.14-1 CJV 型 MOV 的典型参数

电阻体名义直径	mm	14	20	25	32	34x34	40	50	60	80
最大平均功率Pm	W	0.6	1.0	1.2	1.2	1.4	1.4	1.5	1.6	2.0
标称放电电流In	kA	3	6	10	12.5	20	20	32	40	50
最大放电电流Imax	kA	7	12.5	25	30	50	50	65	80	100
I 级试验冲击电流	kA	0.85	1.5	3	3.5	6	6	9	12.5	15
组合波5000次Uoc	kV	1,2	2	4	4,5	8	8	12	16	20

注：1, 标称放电电流 I_n ,最大放电电流 I_{max} 的波形为 8/20,

2, 压敏电压 $U_n=200V-1200V$ ，最大持续交流电压 $U_{ac} \cong 0.62U_n$ （取整数值）；最大持续直流电压 $U_{dc} \cong 0.82U_n$ （取整数值），限制电压 $U_{cla} \cong R_{cla} \cdot U_n$ （ R_{cla} 见图 2.14-9）。

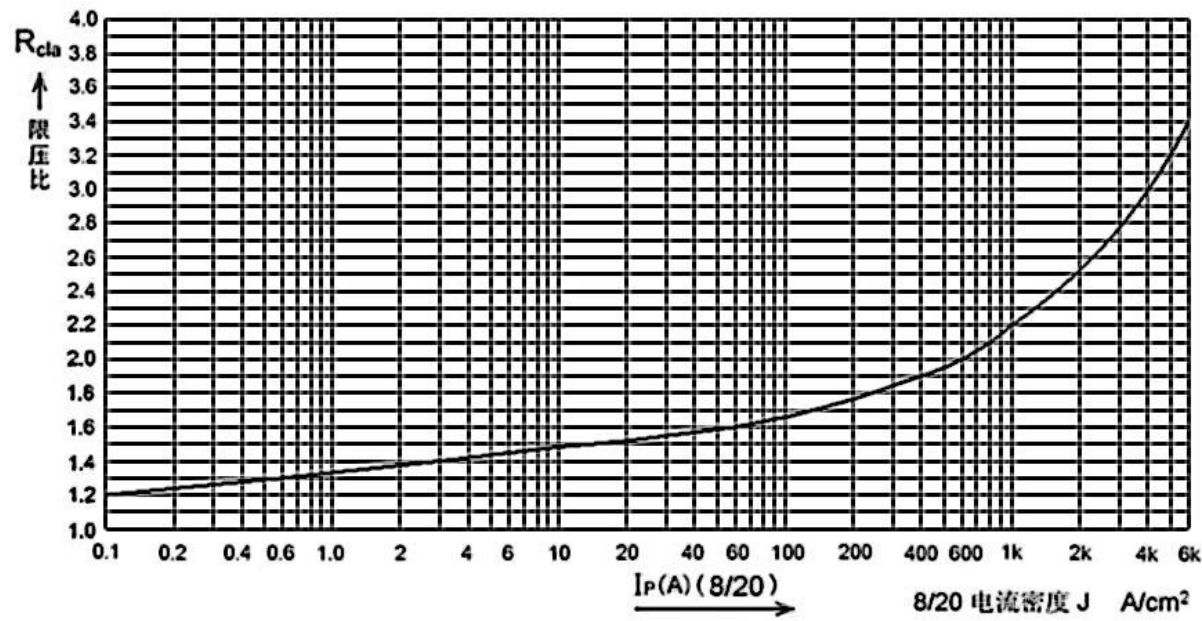


图 2.14-9 CJV 系列 MOV 的限压比 R_{cla} -电流密度 J_p 曲线

2.1.5 SPD 用MOV 的选用

SPD 用 MOV 的选用，就是依据 SPD 的要求确定MOV 电阻片的名义直径 d_o ，压敏电压下限 U_{nL} 和上限 U_{nh} 等三个主要参数。SPD 的要求应明确：最大放电电流 I_{max} ，系统标称电压交流 U_0 ，最大持续工作电压 MCOV，和 TOV 耐受能力，以及保护水平 U_P 和衡量 U_P 的测试电流 I_P 。选用MOV 的计算可按以下步骤进行：

1. 依据 I_{max} ，参照表 2.14-1 确定MOV 电阻片的名义直径 d_o （cm）和并联数目 n 。

2. 计算MOV 电阻片总的通流面积 $A = 0.785 \cdot n \cdot d_0^2 \text{ (cm}^2\text{)}$ 。
3. 计算测试限制电压时的电流密度 $J_P = I_P / A \text{ (A/cm}^2\text{)}$ 。
4. 依据 J_P 从图 2.14-9 查出 MOV 相应的限压比 $R_{cla.}$ 。
5. 计算 MOV 的压敏电压上限值 $U_{nh} \leq 0.9 U_P / R_{cla.}$ (系数 0.9 是为了确保 MOV 的限制电压不会大于保护水平 U_P)。
6. 计算 MOV 的压敏电压下限值 $U_{nL} \geq 1.41 \times (MCOV)$
7. 依据计算得到的 U_{nh} 和 U_{nL} ，在综合考虑限制电压，电压寿命和TOV 耐受性，以及生产的可能性等因素的基础上最后确定MOV 压敏电压的范围。

2.2, 气体放电管(GDT)

气体放电管，英文名Gas Discharge Tube (GDT)，是一种伏安特性为正反向对称的开关特性器件。用作 SPD 元件的GDT 的技术标准是IEC61643-311。

2.2.1 GDT 的结构和工作原理

GDT 有二极管和三极管两个品种，每个品种又有带引线和无引线两种形式。图2.14-14 表示了它们的外形，内部结构和电路符号。

从图 2.14-10 可以看出，GDT 的基本结构是在圆筒形的陶瓷外壳两端固定金属电极，方法是先将陶瓷外壳的端面金属化，然后与电极焊接，形成一个密封的圆筒，其中充有氖/氩气体，两电极之间保持一定间距，形成一个间隙。GDT 就是利用充气(非空气)间隙的电压击穿特性来工作的。

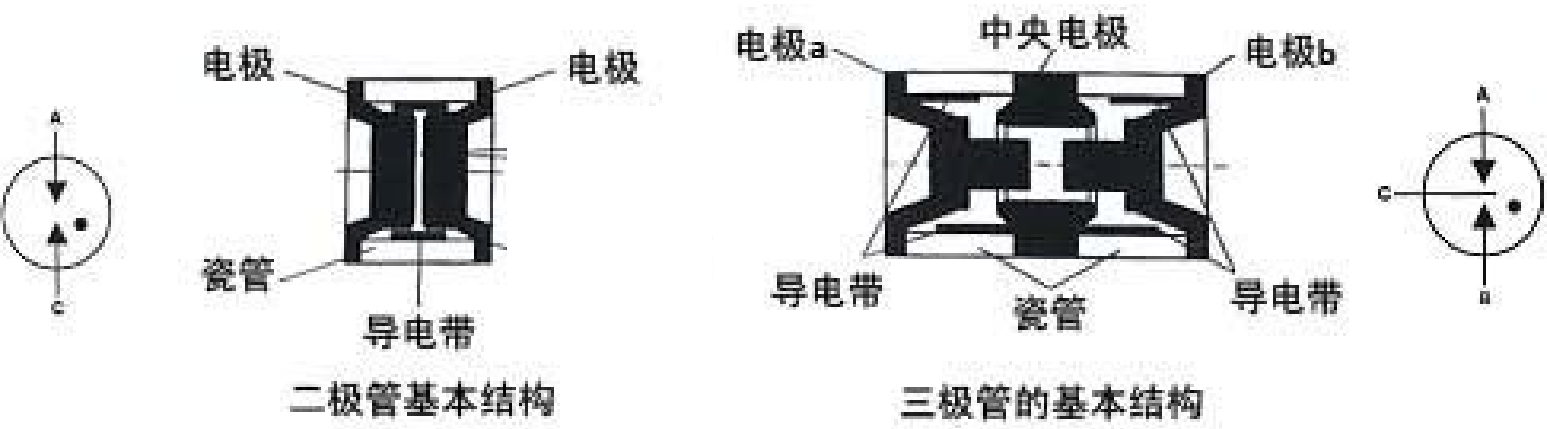


图 2.14-10 GDT 的内部结构和电路符号

气体介质的电压击穿特性是服从如图 2.14-11 所示的珀邢 (F. Paschen) 曲线的，图中，纵座标是击穿电压 (kV)，横座标是气体压力 (mmHg) 和电极间距 (cm) 的乘积。电极间距一般是小于 1mm 的，通过改变这个间距，改变充入的气体的种类和压力，以及电极的尺寸等，可以做成不同规格的 GDT。此外，在 GDT 电极的相对端面上还涂有激活化合物，以促使击穿导通时的电子发射，在陶瓷圆筒的内表面上涂复有导电带，用来改变电场分布，加快气体放电和提高放电参数的重复性。

图 2.14-12 表示了GDT 的伏安特性，以及它对正弦交流电压的响应。GDT 具有正/反向对称的伏安特性，图中只画出了它的正向的伏安特性。下面对它作简要说明：当 GDT 上的电压从零上升到 U_1 以前，电流为零。当电压达到击穿电压 U_1 时，气体击穿导电，外电路阻抗上有电压降，GDT 上的电压由 a 点跌落到 b 点，GDT 进入辉光放电区(图

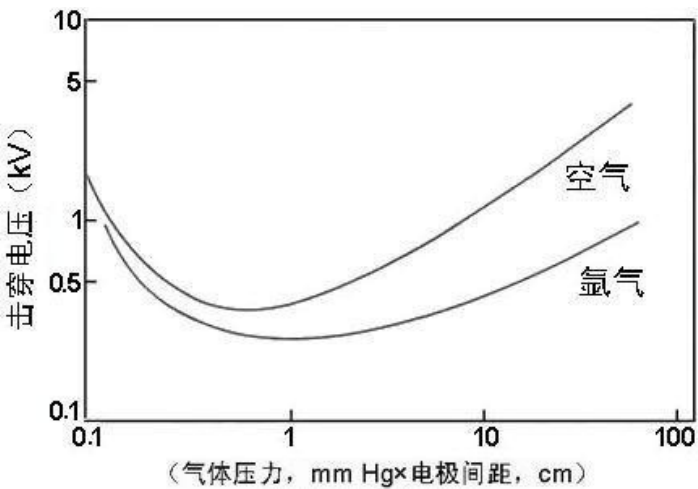


图 2.14-11 珀邢(F.Paschen)曲线.

中的 bc 段)。在辉光放电区,随着电流的增大,GDT 上的电压略有上升。当上升到 c 点即电流增大到 i_1 时,GDT 中的气体由辉光放电区突跳到弧光放电区(由 c 点跳变到 d 点)。辉光放电的最高点电压(c 点的电压)随着产品型号规格的不同大体在70V-150V。弧光放电区(图中的 de 段)的电压值很低(10V-35V 左右),而电流相当大,其等效电阻一般在毫欧级。因此弧光放电区的电流实际上取决于电源电压和源阻抗。进入弧光放电状态后,若外电压降低,流过GDT 的电流减小(e 点到 f 点)。当减小到维持弧光放电所需的最小电流 i_3 (其值随着具体型号规格的不同,大体在 10mA 到 100mA)时,弧光放电转变到辉光放电,电压突升(由 f 点突升到g 点)。随着辉光放电的进一步减弱,当达到熄弧电压 U_4 时熄灭,GDT 恢复为高电阻状态。

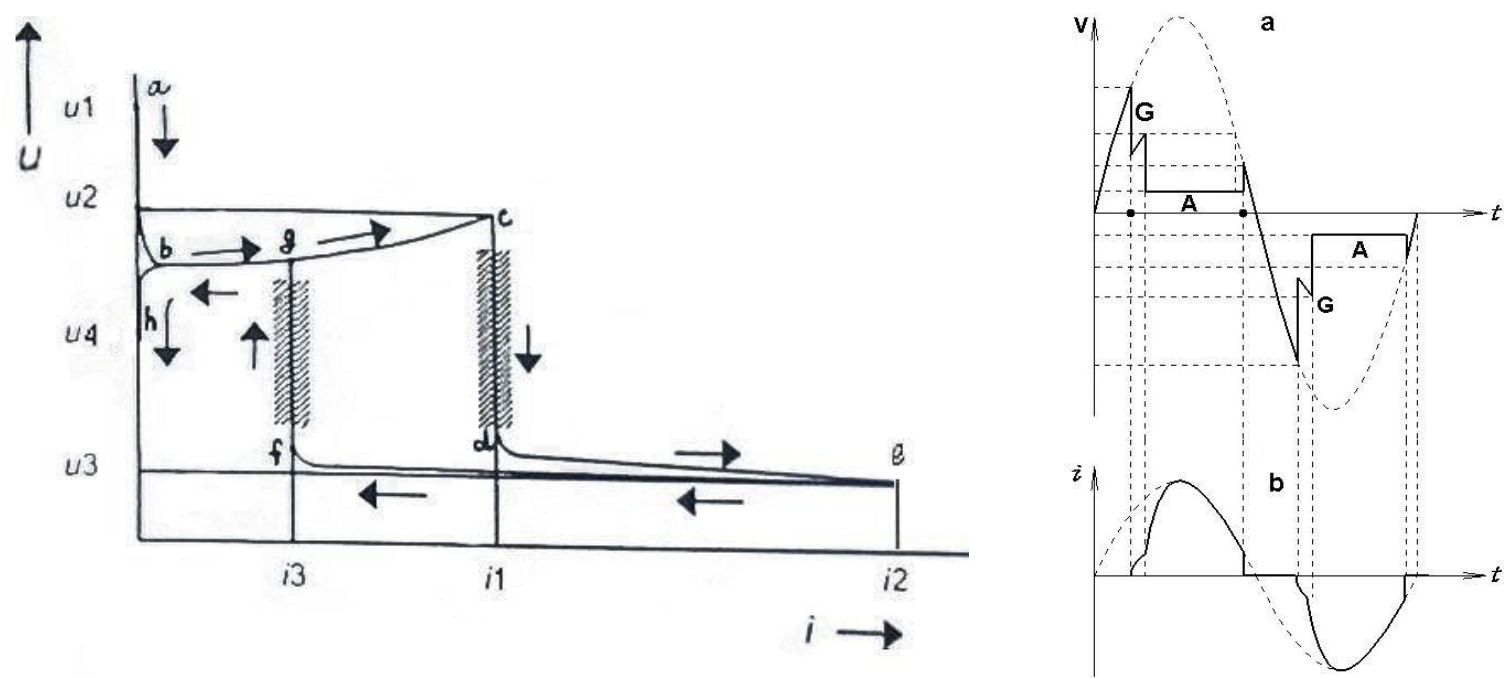


图 2.14-12 GDT 的伏安特性和对正弦电压的响应

最后要说明的一点是以前生产的GDT 中放有微量的放射性物质,目的是使GDT 中的气体予电离。现在的产品中大多没有了,对于含有放射性物质的产品,它的存放,使用和废旧处理应符合专门的规定。

2.2.2 GDT 的电性能参数

1. 直流击穿电压 U_{sdc}

以上升速率为 $100V/S \pm 10\%$ 的斜升电压测得的GDT 的击穿电压。直流击穿电压的名义值 U_{sdcn} 一般在 70V-1000V 之间,特殊定货的可做到4000V 或更高。GDT 击穿电压的实测值,由于受多种因素的影响, 测试结果的离散性较大,因此它的容差一般为 $\pm 20\%$ 。

2. 冲击击穿电压 V_{si}

GDT 的击穿电压是随着测试电压上升速率的增大而增大的。图 2.14-13 表示了 $U_{sdcn}=230V$ 的GDT,以不同上升速率 dv/dt 的测试电压所测得的击穿电压。从这个图可以看出,测试电压 $dv/dt=100V/\mu S$ 时的击穿电压大体是直流击穿电压的 1.5 倍, $dv/dt=1000V/\mu S$ 时约 2.2 倍。

通常把上升速率为 $1000V/\mu S \pm 20\%$ 的斜升电压测得的击穿电压称为GDT 的冲击击穿电压 V_{si} ,它不应大于规定值。

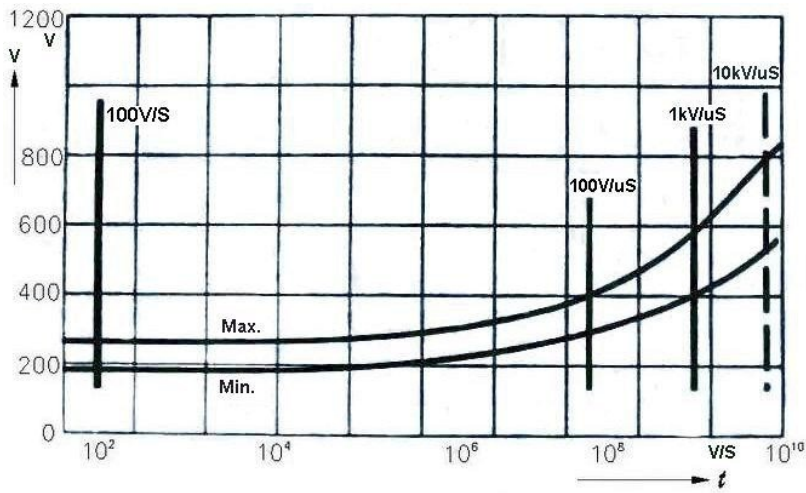


图 2.14.-13 GDT 的击穿电压与测试电压 dv/dt 的关系(样品的 $U_{sdcn}=230V$)

3. 绝缘电阻

GDT 的每个引出端对其他各引出端的绝缘电阻，不应低于 100MΩ。测试电压为 50Vdc (标称直流击穿电压 90V-150V 的GDT)，或 100Vdc (标称直流击穿电压高于 150V 的GDT)。

4. 电容量

GDT 的每个引出端对其他各引出端的电容量不应大于 20pF (实际上一般在 1pF-5pF)。测试信号频率 1MHz。GDT 低电容量使得它在工作频率高的信号SPD 中得到了广泛的应用。

5. 放电电流能力

表征 GDT 放电电流能力的参数主要有以下几项(见表 2. 14-3)：

- * 标称冲击放电电流-GDT 能够承受的 10 次 8/20 放电电流的峰值。
- * 最大单次冲击放电电流- GDT 能够承受的 1 次 8/20 放电电流的峰值。它大体是10 次 8/20 放电电流峰值的 2 倍。
- * 最大单次 10/350 放电电流- GDT 能够承受的 1 次 10/350 放电电流的峰值。
- * 标称工频放电电流-GDT 能够承受的 10 次 50-62Hz 工频放电电流的有效值，每次放电持续1S。
- * 冲击放电寿命-表 2. 14-2. 规定了寿命试验的电流波形，峰值和次数，必要时合同可以规定更严格的试验要求。

表 2. 14-2 GDT 的放电电流等级(IEC61643-311, 表 4)

等 级	工频放电 电流 1S, 10 次(A)	冲击放电电流		N 次脉冲电流的寿命试验		
		8/20 波, 10 次(kA)	10/350 波. 1 次(kA)	电流峰 值(A)	电流波形	
					10/1000	6/310 *
1	0.05	0.5		1	n=300	—
2	0.1	1.0		5		—
3	2.5	2.5	1	50		n=500
4	5	5	2.5	50		
5	10	10	4	100		
6	20	10	4	100		
7	20	20	4	200		
8	30	10	4	100		
9	40	20	4	200		

* 开路电压波形 10/700, 见 IEC61000-4-5 和 ITU-T K20。

6. 横向电压

将上升速率为 1000V/μ S 的斜升电压同时加在三极GDT 的两个放电间隙上时，两间隙击穿放电的时间差不应大于 200nS。

7. 直流过保持电压(DC holdover voltage)

GDT 在直流工作电压下承受冲击而击穿导通后，从冲击消失到 GDT 截止的时间，应小于规定值(例如 150mS)。这个时间与试验条件关系很大，合同应给予明确规定。

2.2.3 GDT 的失效模式.

GDT 的失效模式可归结为以下四种：

1. 短路失效模式：在这一模式中，GDT 永久性地短路了。
2. 低击穿电压失效模式：GDT 的直流击穿电压低于该批产品初始平均值的50%。
3. 高击穿电压失效模式：GDT 的直流或冲击击穿电压高于该批产品初始平均值的150%。
4. 低绝缘电阻失效模式：GDT 的绝缘电阻低于 $1\text{M}\Omega$ 。

3 低压配电系统用 SPD

粗略的统计表明，在过电压引起的电气/电子设备损坏中，从电源渠道侵入的浪涌所造成的损坏大体占 80%，因此现阶段电源用SPD 的用量最多。 电源用SPD. 的技术标准主要有：

GB 18802.1/ IEC61643-1 低压配电系统的电涌保护器-第 1 部分:性能要求和试验方法,

GB 18802. 2/ IEC61643-12 低压配电系统的电涌保护器-第 12 部分:选择和使用原则,

美国保险商试验室(UL)的标准UL1449，也是SPD 行业经常使用的标准。此外，我国通信，铁道等产业部门还依据本行业的应用特点制定了相应的行业标准。这些标准是我们讨论的依据。

3.1 电源用 SPD 的类型

SPD 中至少应有一只电压限制元件，根据该元件特性的不同，可把SPD 分为三类：

1. 钳位特性SPD—仅由钳位特性元件构成的SPD；
2. 开关特性SPD—仅由开关特性元件构成的SPD；
3. 混合特性SPD—既有钳位特性元件，又有开关特性元件构成的SPD。

不同特性的SPD，它们的测试方法，应用技术是有差别的。

技术标准 GB 18802.1 依据电源用SPD 安装地点的电磁环境的不同，将它划分为三个试验级别,符合各个试验级别要求的SPD 分别称为 I ， II ， III级试验SPD。

I 级试验SPD 安装在防雷保护区LPZ0B/LPZ1 的界面上，这里的SPD 可能要传导一部分直接雷电流。例如有直击雷防护的建筑物供电系统的入口处，即从供电变压器次级到供电设施的过电流断路器之间的固定连接式SPD, 包括瓦时表中的SPD。

II 级试验SPD 安装在防雷保护区LPZ1/LPZ2 的界面上，这里对雷电的暴露强度较 I 级试验弱，在这些部位不会有直接雷电流，但雷电冲击尚未得到足够的抑制。例如在供电设施过电流断路器负荷侧的固定连接式SPD, 包括安装在分配电盘中的SPD。

III级试验 SPD 安装在对雷电的暴露强度较 II 级试验SPD 安装部位更弱的地方，即 LPZ2 后续部位。一般来说这些部位的上游已经将浪涌电压限制到一定电平了，因此试验时不是规定电流值，而是规定电压 U_{oc} 。例如在配电盘后至少 10 米远处的 SPD，,带电源线的插座型 SPD，以及安装在被保护用电设备中的 SPD 等都列入III级试验SPD。

I 、 II 、 III级试验的差别见表 2.14-3，表中列出的几种试验电流/电压的意义如下：

I 级试验的“冲击电流 I_{imp} ”是个单极性电流波，电流从 0 上升到峰值 I_{peak} 的时间 $t_f \leq 50\mu s$ ，在不超过 10ms 的时间内所泄放的电荷量为Q, 比能为W/R，参数 I_{peak} ，Q 和W/R 应符合下面的关系：

$$Q = 0.5I_{peak} \quad (2.14-7)$$

$$W / R = 250I_{peak}^2 \quad (2.14-8)$$

式中参数的单位是：电流峰值 I_{peak} 为 kA；电荷量Q 为 As；比能W/R 为 J/Ω。

“标称放电电流” I_n 和 II 级试验“最大放电电流” I_{max} 都是 8/20 电流波。 I_n 代表了在 SPD 的安装地点预期出现频度相当高的浪涌电流峰值，而 I_{max} 的预期出现概率极小。现行的 SPD 技术规格书中，一般规定 $I_{max}=(2-3)I_n$ 。 I_n 在 I，II 级试验 SPD 中用于测量限制电压和动作负载试验的予处理试验。 I_{max} 用于 II 级试验 SPD 的动作负载试验。

III级试验 SPD 的测试都用 1.2/50-8/20 组合波，即其开路电压为规定值 U_{oc} 的 1.2/50 电压波，短路电流是峰值为 I_{sc} 的 8/20 电流波，且冲击发生器的输出阻抗 (U_{oc}/I_{sc}) = 2Ω 。

表 2.14-3 I，II，III级试验的试验脉冲

试验分级	用作对 SPD 分级的参数	予处理 15 次冲击的脉冲	动作负载试验的脉冲	测量限制电压的脉冲	
				钳位特性 SPD	开关和混合特性 SPD
I 级试验	冲击电流 I_{imp}	标称放电电流 I_n	冲击电流 I_{imp}	标称放电电流 I_n	标称放电电流 I_n 和 1.2/50 电压波
II 级试验	标称放电电流 I_n		最大放电电流 I_{max}		
III级试验	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}	组合波 U_{oc}

3.2 模数化SPD 模块的结构

现在使用数量最多的电源用SPD 是模数化SPD 模块。它和大多数低压终端电器一样，器件的宽度制成 9mm 的整数倍，且采用标准导轨安装。这种模块又有 “可分式” 和 “一体式” (整体式)两种。可分式模块的功能件与安装基座之间通过插头座连接，因而当功能块损坏后可以拔出更换。一体式的功能件 与安装基座是不可分的。图 2.14-14 示意性地表示了模数化SPD 模块的一种内部结构，整个结构装入一个塑料外壳中。

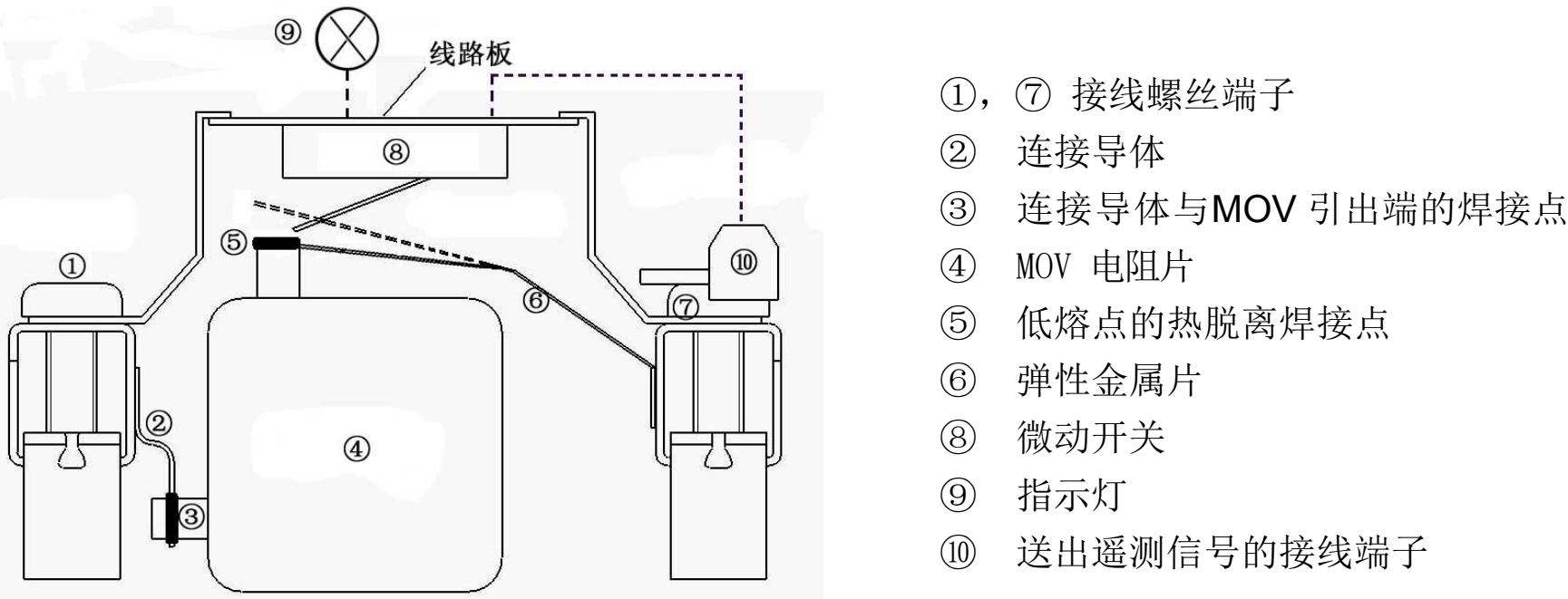


图 2.14-14 模数化 SPD 模块的一种内部结构。

SPD 模块中的构件，除了上一节讨论的电压限制元件外，还有：外壳, 接线端子，连接导体，脱离器，状态指示器和遥测信号接线端子等。下面讨论这些构件，有关脱离器及其状态指示的问题将在 “ 3.3，电源用 SPD 的安全性” 中进行讨论。

1. 外壳

SPD 模块的外壳大多用模压塑料绝缘外壳，常用材料为PBT 塑料或增强尼龙。SPD 技术标准对外壳提出了多方面的要求，主要是机械强度(撞击试验)，耐热性(提高温度条件下的球压试验)，阻燃性(850℃

的灼热丝试验)，耐漏电起痕，以及绝缘性(绝缘电阻和耐电压试验)等。外壳的防护等级(表征外壳防止外部固体异物进入壳内，防止人手触及带电部分或运动部件，和防止水进入壳内的防护程度的指标)一般要求达到IP20 等级。

1. 接线端子

确保 SPD 与外电路连接的接线端子的质量，对于SPD 的可靠工作有重要意义，但常被人们所忽视，故有必要予以强调。在产品设计中应确定流过每一个接线端子的最大放电电流，二端口 SPD 和输入/输出分开的一端口SPD 的接线端子，还应确定最大负载电流。接线端子的接线能力应与上述两个电流的要求相吻合，例如标称放电电流大于等于 5kA 时，接线端子至少要能夹紧截面积 4mm² 及以下的导线。在SPD 的生产和检验中，还应通过以下三项试验来保证接线端子的质量：按规定将导线接入接线端子后，通过对导线的拉力试验来检验连接的可靠性；经过接线试验后检验导线的外观应没有过度损伤，螺纹没有滑扣和损坏；测量接线端子与导线之间的接触电阻不应超过规定值(例如 0.05Ω)。

2. 连接导体

SPD 内部的连接导体应有足够的截面积，长度要尽量短。冲击电流载导体中的电流密度不能超过允许值，否则在大冲击电流下，导体的温升会太高，甚至熔断。现行的SPD 技术标准还没有给出内部导体电流密度的规定。下面提出一个铜导体的允许冲击电流密度 J (kA/cm²) 的粗略估算方法，该方法把冲击电流在导体中引起温升的过程近似地作为一个绝热过程来处理，即冲击电流产生的能量全部被导体吸收，使导体温度升高 ΔT (K)，于是只要给定允许的导体温升 ΔT ，就可以计算出导体的允许电流密度 J 了，铜导体的计算公式为：

$$J = 14.1 \sqrt{\frac{\Delta T}{k}} \quad (\text{kA/mm}^2) \quad (2.14-9)$$

式中， ΔT 为导体允许温升 (K)， k 为波形系数, 对于 8/20 电流波 $k=12.2$ ；对于 10/350 电流波 $k=250$ 。这样，若允许一次冲击电流引起的温升 $\Delta T=40\text{K}$ ，则铜导体的允许电流密度对 8/20 电流为 25.5 (kA/mm²)，对 10/350 电流为 5.6 (kA/mm²)。

SPD 中连接导体的长度要尽量短，以减小浪涌电流在连接线上所产生的电阻性压降和电感性压降，以及导线所受的电动力。一般来说SPD 中连接导体的电阻性压降相对于电感性压降要小得多，因此通常只考虑电感性成分。导体的分布电感可按 0.01μH/cm 来估计，于是一个 8/20-40kA 的冲击电流在 1cm 长导体上所产生的电感性压降大体等于：

$$u = L \frac{di}{dt} = 0.01(\mu\text{H}) \cdot \frac{40(\text{kA})}{8(\mu\text{S})} = 50\text{V}$$

这里把电流从零上升到峰值的过程近似看作是线性上升的过程。还要说明一点，就是在计算SPD 的限制电压时，严格来说不能把导体的电感性压降与电压限制元件的限制电压简单相加，因为两者的相位，即出现的时间点不相同。不过在实际工作中，作为一种留有余地的粗略估计，常把它们直接相加来计算整个 SPD 的限制电压。

3. SPD 中的电动力问题

SPD 中的放电电流峰值, 有时高达几 10kA, 或更高，因此结构设计时必须考虑电动力问题，能经受住电动力的反复作用。

一对在空气介质中的方向平行的载流导体，电流分别为 I_1 和 I_2 ，如果它们的平行相对的长度为 L ，

相互间距为a，则相互作用的电动力F 可用下式作近似计算：

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot (L/a) \quad (2.14-10)$$

式中：F 为电动力（牛顿）， I_1, I_2 为电流（安培），L 和 a 分别是两载流导体平行的长度和间距（用同一单位）。电动力 F 的方向是这样的：如果两个电流方向相同，则使载流导体相互靠近；如果两个电流方向相反，就将载流导体相互推开。电动力的大小还与两个载流导体的相对方向密切相关，两个载流导体并行时电动力最大，垂直时最小。所以SPD 的内部设计，为减小电动力，应尽量减少导体长度，加大两载流导体之间的距离，使两载流导体的走向相互垂直。

1. 电气间隙和爬电距离

电位不等的金属件之间的电气间隙和爬电距离，要满足SPD 技术标准GB18802.1 的要求，以防止浪涌入侵时构件之间发生跳火。

2. 灌封材料

有的 SPD 采用灌封环氧树脂或硅树脂等绝缘材料的办法，来将内部构件与外壳固定起来，在这种情况下，灌封绝缘材料的选择和确定正确的灌封工艺是非常重要的，灌封材料应满足以下几个方面的要求：

- （1）足够的绝缘性，防潮性和机械强度。
- （2）不燃性。SPD 必须保证在TOV 条件下和短路失效条件下不会起火。多数有机灌封材料，尽管它的阻燃性能满足V₀ 级的要求，但它仍是一种燃料，因此以少用为好。
- （3）与被灌封元件的化学稳定性。事实证明，有的灌封材料会与MOV 的陶瓷体发生化学反应，使MOV 型 SPD 的漏电流越来越大，最后烧坏。
- （4）热胀系数与外壳的匹配性。灌封材料的热胀系数与外壳不匹配，就会导致 SPD 存放一段时间后或经过温度循环试验后外壳开裂。

3. SPD 结构的冲击验证试验

一个新设计的 SPD，往往有设计人员考虑不到的问题，为了揭示这些问题，以便采取改进措施，应当在规定的最大放电电流范围内，从小到大地进行冲击验证试验，试验中重点检查以下五个方面：

- （1）测量SPD 内部的温度分布，找出过热点。
- （2）检查是否有跳火和击穿部位，以确定空气间隙和爬电距离是否足够。
- （3）检查SPD 内部各构件上的限制电压，研究进一步降低它们的可能性。
- （4）检查放电时和放电后一个短时间内是否有高频振荡，若有，应改进设计，将它消除；
- （5）检查电动力的影响和结构牢固性。

1.2 电源用SPD 的安全性

SPD 本身是一种安全保护器件，但在电路中特别是电源电路中接入SPD 后，又可能带来新的安全问题。SPD 的电压限制元件是并接在系统上的，无论是钳位特性元件还是开关特性元件，都有可能发生老化失效或短路，从而导致SPD 本身和/或系统起火，甚至出现人身电击的危险性。

SPD 的这种不安全性有两种情况：一是进入SPD 的电功率及其持续时间，超过了它保持热平衡的允许值，致使 SPD 的温度持续上升而引起燃烧。解决这一问题的对策是在SPD 中设置“过热脱离器”。二是一个过强的冲击电流或暂时过电压使SPD 突然（例如不足 1 秒）击穿短路，且SPD 的短路阻抗相对于电源阻抗很小，因此击穿后进入SPD 的功率并不大，结果它的温度达不到过热脱离器的动作温度，而使

短路状态长时间维持。解决这一问题的对策是在SPD 的电路中再加入“后备保护”。

3.3.1 SPD 的过热脱离器

下面讨论 SPD 中 MOV 漏电流持续增大，最终热击穿的原因，过热脱离器的技术要求以及当前过热脱离器存在的问题和改进措施等三个问题。

1. MOV 漏电流持续增大的原因

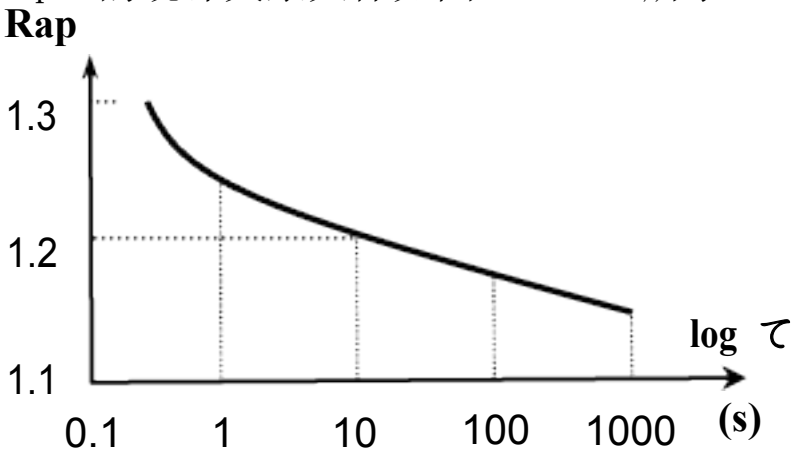
SPD 中的MOV 在正常工作寿命期内发生漏电流持续增大而热击穿的原因，主要有下面三个：

（1）SPD 安装地点的浪涌过电压的出现频度，幅值较大，使MOV 内在的安秒资源提前耗尽而进入劣化失效阶段。

（2）持续的较大的系统过电压。实验结果表明，当工频电压对MOV 的加压比 R_{ap} 大体在 0.6 左右时 MOV 型SPD 能在规定的寿命期内长期而稳定地工作。 R_{ap} 大体在 0.8-1.13 左右，SPD 能保持热稳定，即电阻体的温度，电阻性电流和功耗都能稳定在某个数值上，但稳定工作的持续时间将随着 R_{ap} 的提高而迅速减小。 R_{ap} 高到 1.14 以上，SPD 不能保持热稳定，很快发展到热击穿。MOV 耐受 工频过电压的时间（S），即从加上工频电压到它击穿短路的时间（ τ ），与加压比（ R_{ap} ）的统计关系大体如图 2.14-15 所示。

（3）SPD 存在制造缺陷，因而提前进入老化失效阶段。

例如灌封材料与MOV 发生化学反应，或者MOV 电阻片本身有早期失效问题。因此SPD 制造中应重视对MOV 的可靠性筛选，将有早期失效隐患的产品剔除。虽然上面讨论的是MOV 的热击穿，然而开关特性SPD 也有类似的问题。气体放电管，空气间隙等电



压开关型元件在数值不大的持续工频电流下也会出现短路失效，也应设置过热保护脱离器。

图 2.14-15 MOV 的工频过电压耐受性

2. 热脱离器的技术要求

目前 SPD 的大多过热脱离器都如图 2.14-14 所示，是在 MOV 的引出片上设置一个低熔点的焊接点，其熔化温度一般在 120℃-150℃，当焊接点的温度超过该熔点时，依靠弹性片或弹簧的弹力将电路连接拉断。这个脱离机构应满足下述基本要求：

（1）在给 SPD 通入电流，检验过热脱离器动作的试验中，应满足IEC61643-1 的三项要求：SPD 的表面温升不超过 120K，脱离器动作后 5min 内相对于环境温度的温升不超过 80K，脱离器的断路应可靠，在 SPD 的 U_c 电压下的漏电流不超过 0.5mA。

（2）在 SPD 规定的机械试验和气候试验中，以及SPD 的动作负载试验中，脱离器不应动作。

（3）脱离器在SPD 的 U_c 电压下动作时应有一定的开断能力。

我国邮电行业标准YD/T1235，依据通信行业中 SPD 的运行经验，对 SPD 的过热脱离器提出了更严格的要求，规定无论是钳位特性SPD，还是开关特性 SPD，都应设置脱离器，并将试验电流提高到 5A，要求 5A 工频电流通入SPD 时，脱离器能有效脱离。

3. 热脱离器的问题及其改进措施

提高热脱离器的工作可靠性是SPD 行业最重要的技术课题之一。目前 SPD 热脱离器主要有三个问题：一是误动作，即SPD 并未发生过热，脱离器就脱离了，主要原因是低熔点焊点的机械强度差，弹性力就

将它拉脱了。二是不动作，主要原因是热设计不合理和MOV 电阻片质量差。第三是脱离特性不一致，分散性大，主要原因是手工焊接，质量一致性差。提高 SPD 热脱离器技术性能的工作方向主要有以下四点：

(1) 开发一种新的低熔点接点材料，它要满足这样一些要求：熔点在 (130-150) °C；具有足够的机械强度，能够承受弹性零件的拉力；导电性良好，在 SPD 的最大放电电流下的温度要远低于它的熔点，且电压降要尽可能小，以免使 SPD 的限制电压明显增大；晶相稳定，能长期保持上述要求的性能；不含禁用材料，如铅，镉等。

(2) 改进SPD 内部的热设计，如尽可能将脱离接点设置在MOV 的中心位置，因为一般来说这一部位的温度最高；改善脱离接点与 MOV 之间的热耦合，减小它们之间的热阻，减小与脱离接点和MOV 相联结的其他构件的热容量等。总之要使 MOV 所产生的热量尽可能快和尽可能多地传导给脱离接点。从这一原则出发当多片 MOV 并联时，应在每一电阻片上分设脱离接点，那种多片共用一个脱离接点的做法是不合理的。

(3) 提高MOV 电阻片内部结构的均匀性，以提高它能耐受的过热温度，延长它耐受过电压的时间。

(4) 开发新的过热脱离机构，如加进电子控制电路等。

3.3.1 SPD 的后备保护

SPD 的过热脱离器是依靠热传导来工作的，它的响应时间一般要数秒钟，对于强过载引起的MOV “立即击穿”来不及响应，而 MOV 短路后，因其阻抗小，电源系统又供不出足够大的电流，因此热脱离接点始终不能脱离。在这种情况下，就要求在 SPD 的内部或外部有其他保护电器来将 SPD 短路后的工频电流切断，这种保护电器称为“后备保护”。

对于具有过电流保护功能的脱离器，多数SPD 采用外置式。通常是在SPD 外部的进线前端装设过电流保护电器（熔断器断路器或），因此我们可把过电流保护电器当作 SPD 的具有过电流保护功能的外置式脱离器。采用熔断器的问题是它不能同时满足SPD 的最大放电电流和工频额定电流的要求。于是，有人建议用 n 个小规格的MOV 并联来保证放电能力，而在每个小规格MOV 中串联熔断器。这个办法可以解决大浪涌电流值和小工频电流值的矛盾，但实施起来麻烦。使用断路器的问题是它的阻抗使限制电压明显升高，可以比使用熔断器所产生的残压高 0.1~0.25 倍。

这样如何选用与SPD 匹配的过电流保护器至关重要。选择 SPD 的过电流保护电器时，应该从以下三个方面进行考虑：

1. 必须符合GB/T 18802.12：2006《低压配电系统的电涌保护器（SPD）第12 部分：选择和使用导则》中规定“当 SPD 和过电流保护器配合时，在标称放电电流 I_n 下，建议过电流保护器不动作；当电流比 I_n 大时，过电流保护器动作是可以的。对于可复位过电流保护器，例如一个断路器，不应被这种电涌损坏。”

2. 要根据 SPD 安装处可能产生的最大短路电流以及 SPD 的短路电流耐受能力来选择过电流保护电器的额定电流值，结果是要保证“SPD 和与之相连的过电流保护器一起耐受的短路电流（当 SPD 失效时产生）等于或大于安装处预期产生的最大短路电流。”

3. 由于在电源进线端处还有过电流保护电器，它是用于对线路的过载和短路保护，因此当 SPD 短路失效时，要保证被保护设备供电的连续性，进线端处的过电流保护电器不应动作，而当作外置式脱离器的过电流保护电器应动作。

3.3.2 SPD 的状态指示

SPD 中设置脱离器后，应有相应的状态指示器，使SPD 安装现场的和远地的工作人员知道SPD 是否处在正常的工作状态，脱离器是否已动作。

安装在SPD 本体上的状态指示器有机械式和信号灯两种。机械式指示实际上是在SPD 示窗后设置一个绿红两色的指示片（杆），脱离器动作前为绿色，动作后为红色。如果是信号灯指示，约定的做法是脱离器动作前为绿色信号灯亮，动作后绿色信号灯亮熄灭。

送向远地的所谓“遥测信号”一般是微动开关接点的状态，脱离器动作时推动微动开关，使其接点状态改变。也可以送出两个不同电平的电压信号来表示脱离器是否动作。

3.3 SPD 中电压限制元件的组合

最简单的 SPD 中仅有一只 MOV 或一只电压开关元件，但在很多情况下为了提高某项性能指标，或获得一种新的功能，同一只SPD 中常常采用多个元件相组合的电路，这些元件可以是相同的，也可以是不同的。下面列举几种常用的多元件组合电路，它们是多个MOV 元件的并联，MOV 与 GDT 或空气间隙的并联，MOV 与 GDT 或空气间隙的串联。

3.4.1 多个MOV 的并联运用

SPD 中 MOV 并联运用的目的主要有三个：

1. 提高SPD 的放电电流能力，降低限制电压。现行的 MOV 电阻片的最大直径是 80mm，其最大放电电流为 8/20-100kA 波，如果要获得更大的放电能力，就必须将多个MOV 电阻片并联运用。即使最大放电电流小于 100kA，也常常采用多个小直径电阻片并联的办法来实现，因为现行的陶瓷生产技术在制作“直径/厚度比”大的陶瓷件时的合格率低，且制成品的内部结构均匀性差。

2. 对 SPD 增设“后备保护”。后备保护采用压敏电压比主保护元件高的 MOV，因此在一般情况下由主保护元件泄放浪涌电流，后备保护元件处在“待命休息”状态，一旦主保护元件失效脱离，后备保护元件就承担起保护作用，尽管它的限制电压高一点，但SPD 不会完全失去保护功能。

3. 将不同特性的MOV 电阻片并联，以满足一些特殊的性能要求。

对于第一种并联运用，其核心是保证电流在各并联元件中均匀分配，而且能够在整个工作寿命内保持这种均匀性。也就是说，并联各元件的“冲击电流-残压”特性应相同，而且不仅是初始状态相同，更主要的是老化后的特性仍然差别不大。这里所说的老化包括电压应力下的老化和冲击电流应力下的老化两个方面。实现这个目标的技术要点包括：

(1) 并联元件应是同一生产批的MOV 电阻片。

(2) 并联元件应经过电压/温度应力和冲击电流应力的老化筛选，剔出了有早期失效隐患的产品。

(3) 经过测量配对：在较低电流（例如 0.1 倍的标称放电电流）下测量限制电压，将该限制电压值相同（例如偏差不大于3%）的MOV 元件进行并联组装。之所以按较低电流下的限制电压进行配对，是因为随着冲击电流的增大，MOV 的非线性下降，同一电压下并联元件的电流差别“自动”减小，因而若保证了较小电流时的均流性，大电流时的均流性也就自然得到了保证。图 2.14-16 的曲线说明了这一点，冲击电流-限制电压特性分别为A，B 的两只元件并联，它们在大电流时的电流差 Δi_2 比较小电流时的电流差 Δi_1 小。

(4) 在安装工艺上应保证每个并联元件连接到并联公共点M, N (图 2.14-16) 的导体长度L 尽量相

同，因为导体长度不同，阻抗不同，会影响均流性。

(1) 必要时，在各并联支路中串联均流阻抗。

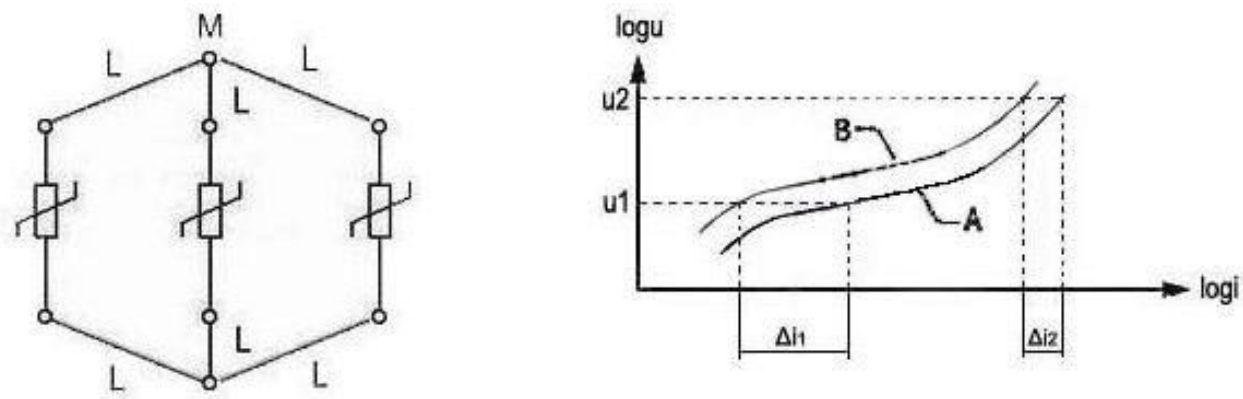
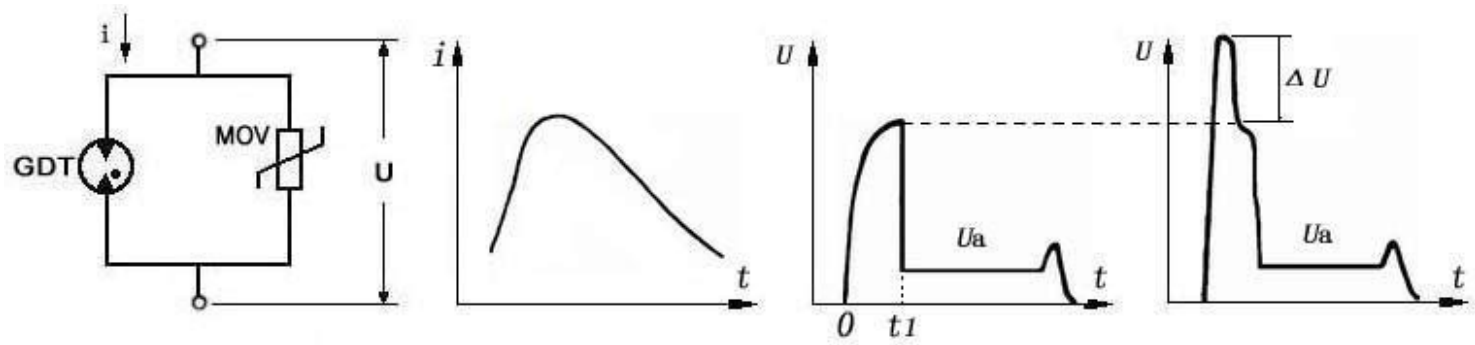


图 2.14-16 MOV 的并联

最后要说明一点，有人将市场销售的 MOV 型小放电电流的 SPD 直接并联，企图以此来扩展放电能力，理论分析和实践结果都证明这是行不通的，因为它们没有经过任何配对处理。按照正常的生产公差，即使是同一生产厂的同一批产品，它们的电流/电压特性相差 10% 是常事，由于在标称放电电流附近，MOV 的非线性指数大体在 10 左右，于是两只限制电压差 10% 的 SPD 并联，它们的电流比为 $1.1^{10} = 2.59$ 。例如，当 10kA 的浪涌电流侵入时，两只这样的 SPD 并联时，其中的电流可能分别是 2.78kA 和 7.22kA。可见，电流分配极不均匀，不能达到并联的目的。

3.4.2 MOV 与 GDT 或空气间隙的并联运用

GDT 或空气间隙具有放电电流大的优点，但由于气体的雪崩击穿需要时间，因此对浪涌的响应较慢，用 MOV 与之并联可克服这一缺点。图 2.14-17 表示了这个组合的工作特性：当浪涌电流（图 b）侵入时，MOV 首先导通，电压被 MOV 限制（图 c），当这个限制电压达到 GDT 或空气间隙的击穿电压（ t_1 时刻）时，GDT 或空气间隙击穿导通，电压跌落到弧光放电电压 U_a ，浪涌电流全部流入 GDT 或空气间隙，MOV 得到保护。因此这里可用放电能力小的 MOV。若仅有 GDT 或空气间隙，没有 MOV 与之并联，则限制电压波上有个尖峰 Δu ，（图 d），并联了 MOV 后，这个尖峰消失了（图 c）。这一组合方式兼有 MOV 响应快和 GDT/空气间隙放电电流能力大的优点。运用这一方式，已制造出 10/350 放电能力 100kA，响应时间 25nS，保护水平 1500V 的 SPD。



(a) 电路 (b) 入侵浪涌电流 (c) 并联组合的电压 (d) 没有 MOV 时的电压

图 2.14-17 MOV 与 GDT 或空气间隙的并联

3.4.3 MOV 与 GDT 或空气间隙的串联运用

MOV 与 GDT 或空气间隙的串联运用见图 2.14-18。由于两种元件流过同样的电流，因此它们的额定放电能力应相同。当浪涌侵入时这个串联组合的工作过程是这样的：

* 在浪涌侵入的初始时刻 t_0 ，串联组合两端的电压按两个元件的电容量分配，由于 MOV 的电容量有几

百到几千PF, 而GDT 只有 1-2PF, 因此电压几乎全部加在GDT 上, GDT 在 t_1 时刻击穿导通 (如果MOV 本身的电容量不够大, 可以在MOV 上再并联一个电容)。

* GDT 击穿导通后, 它两端的电压跌落到弧光放电电压 U_a , 而 MOV 上的电压突升到一个与此刻电流相应的数值 U_{z1} 。串联组合两端的电压= $U_{z1} + U_a$ 。

* 串联组合导通后, MOV 两端的电压随着浪涌电流的变化有不大的变化, 而GDT 上的电压基本上保持为 U_a 。这种状态一直维持到浪涌电流减小到小于GDT 的维持电流时, 串联组合关断 (t_3 时刻)。

从上面的分析可以看出, 串联组合两端的电压, 在一开始基本上等于GDT 或空气间隙的击穿电压, 以后基本上取决于MOV 的钳位电压。

使用这个串联组合的目的在于:

1. 切断 GDT 或空气间隙击穿导通后的续流。在这个串联组合中, 当组合两端交流电压的瞬时值低于 MOV 的压敏电压时, 流入组合的电流小于GDT 的维持电流时, 因而很快截止。
2. 切断MOV 的漏电流, 使MOV 在正常工作时不承受电压应力, 从而延缓了MOV 的老化, 延长了MOV 的工作寿命, 同时大幅度地降低了MOV 电容量对系统工作的影响。
3. 降低了单独用 MOV 时的限制电压。例如, 设计一个用于 50Hz/220V 单相电源, 标称放电电流 $I_n=10kA$ 的SPD:

若仅用MOV, 则选用直径 32mm, 压敏电压 620V 的 MOV 元件, 它在 $I_n=10kA$ 时的限压比大体是 2.3, 限制电压= $2.3 \times 620V = 1426V$ 。

若采用 GDT 与 MOV 的串联组合, 可选用直流击穿电压 $U_{dc}= 330V-380V$, 对 8/20 雷电流的放电能力能 $I_n=10kA$, $I_{max}=20kA$ 的 GDT, 和压敏电压=470V, 直径为 32mm 的MOV。按照 GB18802.1 的规定, 这个串联组合的限制电压是下面两个数值中的大值: 一是 GDT 的冲击击穿电压, 它小于 900V; 二是在 $I_n=10kA$ 时MOV 的限制电压与GDT 的弧光放电电压之和, 即 $2.3 \times 470 + 50 = 1131V$, 因此该组合的限制电压是 1131V, 比仅用MOV 时的 1426V 低了 295V。

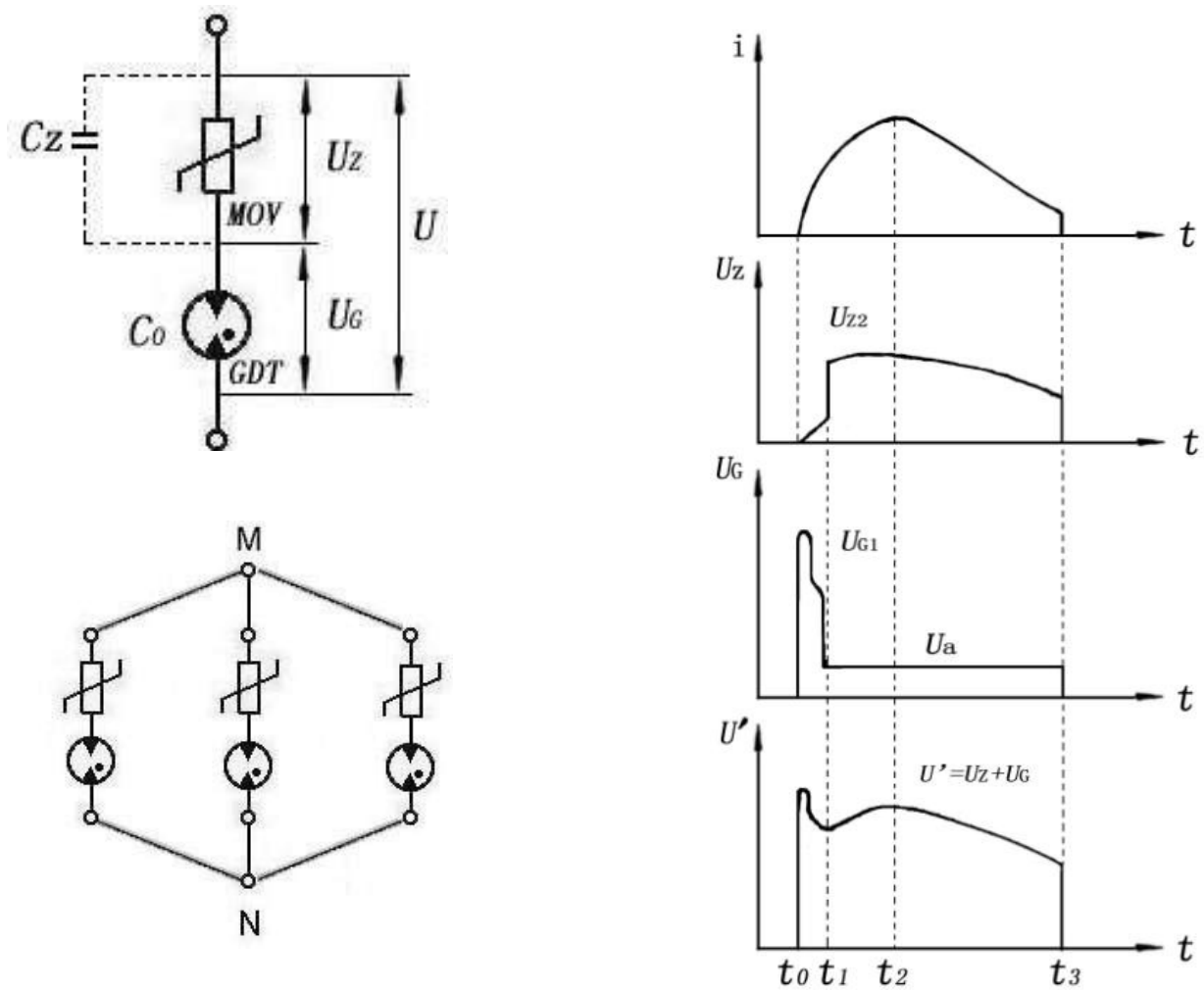


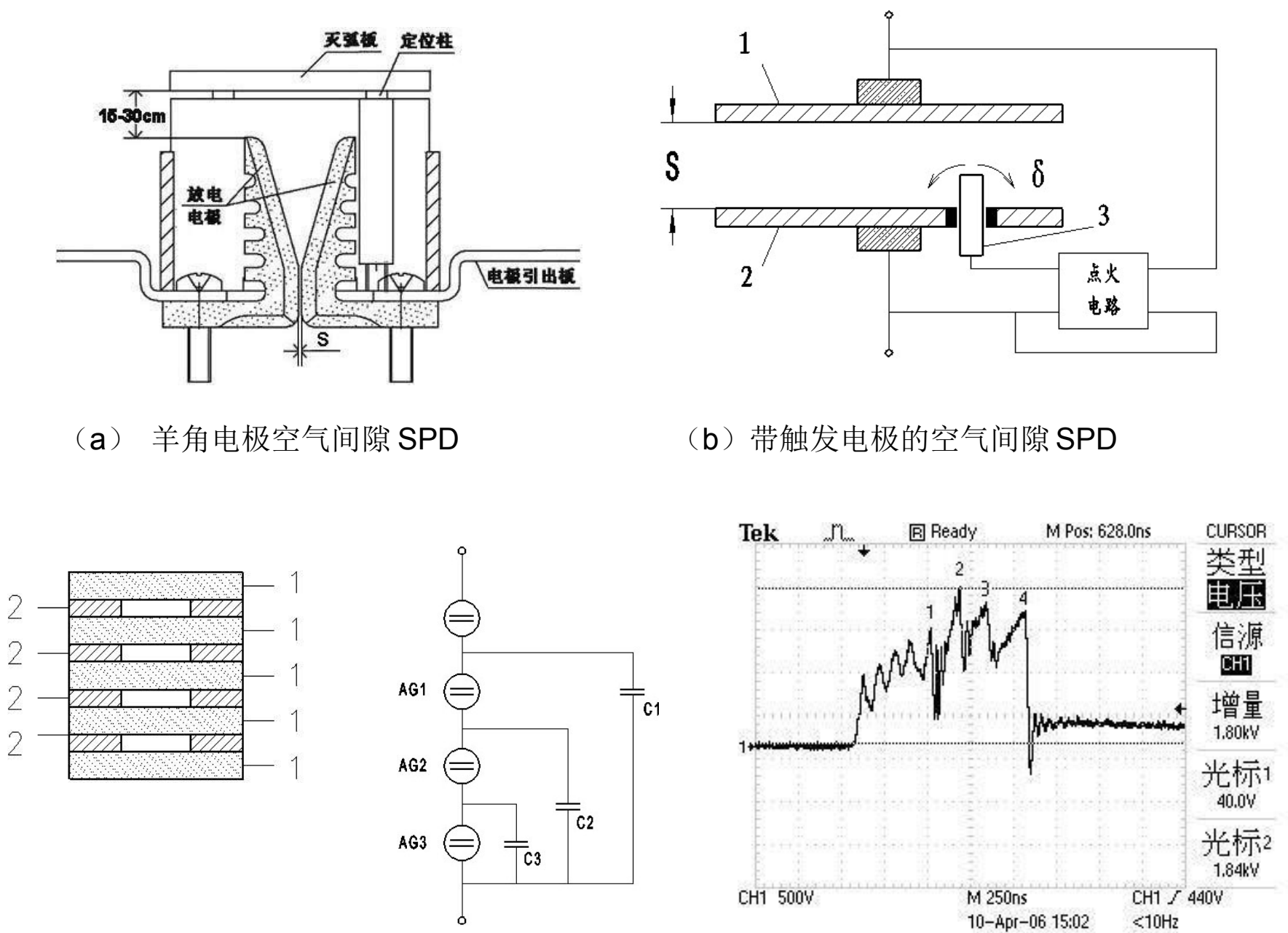
图 2.14-18 MOV 与 GDT 或空气间隙的串联

4. 提高放电电流能力。仅仅是 GDT 是不能用并联的办法来提高放电能力的，因为当并联组合中的一只 GDT 首先击穿导通后，电压就降到弧光放电电压，其他GDT 就不可能再击穿了。但采用GDT 与 MOV 的串联组合就可以并联（图 2.14-18），为此应选用这样的 MOV，使得当任何一个串联组合击穿导通后，在放电电流小于串联组合 I_n 的条件下，该组合两端的电压都能迫使其他串联组合也击穿导通，这样每个串联组合中的电流都不会过载。

顺便指出，将GDT 与 MOV 串联，再将这样的串联组合并联，以提高放电电流能力的这种做法中，也可不用 MOV 而用其他阻抗，如线性电阻器，电感器，或它们的组合。当然，这个串联组合依然有气体放电器件响应慢的缺点。

3.5，大放电能力的空气间隙SPD

近几年来，用作 I 级试验 SPD 的空气间隙型 SPD 有了长足的进展，放电电流能力已可达到 10/350-50kA 以上，熄灭电弧的能力也有明显提高。图 2.14-19 列举了三种空气间隙 SPD，其中带触发电极的空气间隙 SPD 和多层间隙 SPD 是近几年新开发的品种。



(c) 多层间隙 SPD 的结构，电路原理，和工作波形

图 2.14-19 三种空气间隙 SPD

图 2.14-19 (a) 表示了一种“羊角”电极 SPD。两个放电电极的间距 s 是决定放电电压的主要因素，当电极间击穿导通发生电弧时，羊角电极将电弧拉长和冷却，以加速电弧的熄灭。有的羊角电极上还套有一个灭弧罩。电极采用耐高温金属，以提高放电能力。有的空气间隙SPD 中还设置有产气材料，这种材料在电弧作用下能产生灭弧的气体，使电弧迅速熄灭。但当这种材料消耗完后就没有灭弧能力了。

图 2.14-19 (b) 表示了采用触发点火电极的SPD 的工作原理。它有主电极 1，2 和点火电极 3 等三

个电极。1-2 间的主放电间隙 S ，大于 3-2 间的点火间隙 δ ，因而 3-2 间击穿电压比 1-2 间的击穿电压低得多。当浪涌电压出现在 1-2 上时，间隙 δ 首先击穿导通，进而引起间隙 S 击穿导通。3-2 间的击穿电压由一个专门的点火电路来提供。采用这种设计可在一定程度上解决可靠性与低击穿电压的矛盾。因为，为了得到低的击穿电压，间隙 S 要小，一般 $S < 0.5\text{mm}$ ，但这样一来，因放电高温所挥发出来的导电颗粒就容易使主电极 1-2 间的绝缘电阻和击穿电压降低，甚至导致失效。采用点火电极后， S 就可用较大值，而点火电极 3 的击穿电流受触发电流的限制不会很大，可以反复地可靠工作。

图 2.14-19 (c) 表示了多层间隙 SPD 的工作原理(图中画出了四个间隙)。它是由电极片 1 与中间开孔的绝缘环 2 交叠而成的，并且除第一个间隙 AG1 外，其它各间隙对公共端之间都并接一个电容器(几百到数千 PF)。这样一来，当浪涌电压出现在这个组件上时，由于电容器 $C1$ 的旁路作用，电压几乎全部加在 AG1 上，因而间隙 AG1 首先击穿导通。同理推知，间隙 AG2, AG3, 将依此击穿导通。图中的示波图是从这个组件两端测得的电压波形，可以清楚地看出四个间隙依此击穿的过程。显然。当所有间隙都击穿后，组件两端总电压等于各间隙放电压降之和，只要它大于系统电压的峰值，那么，当浪涌电压消失后电流将自行截止，而不会发生续流。用于 220V 交流电源的这种 SPD 中含有 9 个间隙。

3.6 低压配电系统中 SPD 的配置

电源用 SPD 的制造和使用人员必须懂得 SPD 在低压配电系统中是怎样配置的，为此首先要了解低压配电系统的类型，标称电压，和系统中的过电压。对这一课题的深入了解可参考有关专著，例如参考文献[7]，这里只提出课题。

3.6.1 低压配电系统的分类和标称电压

低压配电系统有两种分类方法：一是按带电导体的相数和根数分类，二是按接地系统分类。按带电导体的相数和根数分类，常用的低压配电系统有以下五种：单相两线系统，单相三线系统，两相三线系统，三相三线系统 和三相四线系统，见图 2.14-20。

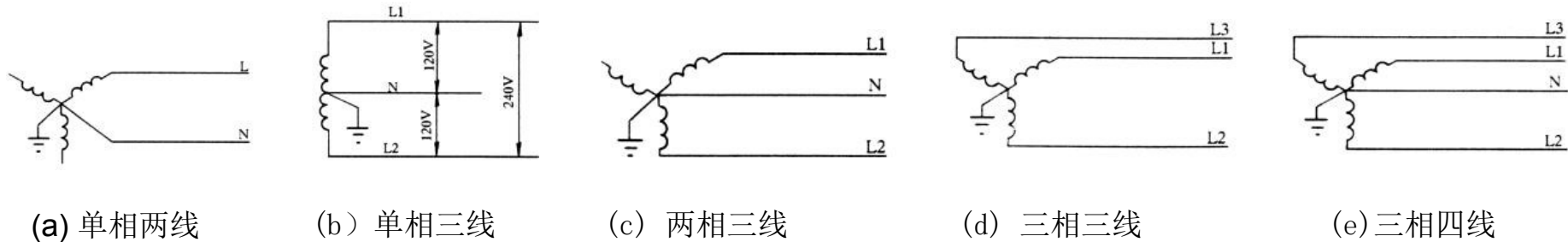


图 2.14-20 低压配电系统按带电导体的分类

低压配电系统按其接地系统的不同分为以下五种 TN-C, TN-S, TN-C-S, TT 和 IT 系统。我国 380/220 低压配电系统的电源端变压器，是 10/0.4KV 变压器，该变压器有两种接地状态—10KV 不接地系统和 10KV 经小电阻接地系统。这两种不同的接地系统，当 10KV 高压侧发生一相碰地故障时，在低压供电系统中造成的过电压是不同的，因此对 SPD 有不同的要求。低压配电系统的标称电压有：

单相系统的相电压 U_o —(110-120) V, (220-240) V, (254-277) V, 和 347V。

三相系统的“相/线”电压—120/208V, (220-240) / (380-415) V, (254-277) / (440-480) V, 347/600V。

3.6.2 SPD 与低压配电系统的协调

上面所述的各种低压配电系统对接入其中的 SPD 的要求是不同的，SPD 的设计和选用必须满足这些不同的具体要求，为此应考虑下面几个问题：

* 配电系统电压正偏差，即由于电网和电气装置运行条件的变化而引起的缓慢而持续的线间过电压。

- * 配电系统低压侧发生一相碰地故障时，出现在SPD 上的工频暂时过电压；
- * 配电系统高压侧发生一相碰地故障时，出现在SPD 上的工频暂时过电压；
- * 配电系统由于铁磁谐振等原因而出现在SPD 上的瞬时或暂时过电压；
- * SPD 本身失效短路过程所产生的暂时过电压，和系统预期灌入SPD 的短路电流。

上述问题不仅与配电系统是怎样的系统有关，还与SPD 的保护模式有关。所谓保护模式是指SPD 在系统中的连接方式，SPD 可以连接在配电系统的“相线-中性线（L—N）”，“相线-地线（L—PE）”，“中性线-地线（N—PE）”和两个不同的相线“相线-相线（L—L）”之间。通常，把（L-PE）和（N-PE）称为共模保护，而把（L-N）和（L-L）称为差模保护。

1. 配电系统的电压正偏差

由于发电机输出电压的波动，由于输电线长度的不同和负载电流的变动，都会使SPD 安装地点的电压发生波动。我国标准规定 220V 电网内的正偏差不大于 7%，一般按 10%计算，一些质量差的电网的偏差超过 10%也是有的，SPD 必须适应安装地点电网的实际情况。

2. 配电系统低压侧发生一相碰地故障，和SPD 短路失效所产生的过电压。

配电系统低压侧发生一相碰地故障在实际工作中是难免的，它将在另两个非故障相产生过电压。一端连接在相线上的SPD 的短路失效会引起同样的过电压。在TN-S（TN-C-S）接地系统中，当发生一相碰地故障时，因为它的“地”（PE）是通过导线与 N 线连通的，另外两个非故障相的对地电压，相对于相电压 U_o 的增高不多。但在TT 系统中，由于电气装置的保护接地与电源处的系统接地，在电气上不相关联，另两个非故障相对地电位将升高，其值一般不超过相电压的 50%（但 TT 系统中的L-N 间的电压基本上还是 U_o ，因为TT 系统中的一相碰地主要是使得N 线电位上升）。

考虑到电网电压的正常波动，配电系统低压侧发生一相碰地故障和SPD 短路失效等引起的过电压，以及 SPD 在运行中的老化等因数，我国“建筑物防雷设计规范”（GB50057）规定，SPD 的最大持续工作电压 U_c 应满足以下要求：

- * TT 系统 L—PE 模式SPD： $U_c \geq 1.55U_o$ (U_o 为相电压标称值)；
- * TT 系统 L—N 模式SPD，TN 系统L—PE（PEN）模式SPD： $U_c \geq 1.15U_o$ ；
- * IT 系统L—PE 模式SPD： $U_c \geq 1.15U$ (U 为IT 系统线电压标称值)。

考虑到上述因素，SPD 技术规范GB18802.1 要求, SPD 应能经受表 2. 14-4 规定的暂时过电压 (TOV) 试验 5S。

表 2. 14-4， 考虑低压侧故障的TOV 试验电压（5S）

	TN 系统	TT 系统	IT 系统
L-N 间的SPD	1. 32 U_{cs}	1. 32 U_{cs}	1. 32 U_{cs}
L-PE 间的 SPD	1. 32 U_{cs}	1. 55 U_{cs}	—

注：表中 $U_{cs}=1. 1U_o$

3. 配电系统高压侧发生一相碰地故障所产生的过电压。

在 10KV 不接地系统中，当高压侧发生碰地故障时，出现在低压侧中性线（N 线）上的暂时过电压（故障电压 U_f ）一般不超过 80V。

在 10KV 经小电阻接地系统中，又分为两种情况：一种是10kV 变电所的保护接地，与低压侧中性点系统接地是分开的，在这种情况下，当 10/0. 4KV 变电所高压侧发生碰地故障时对低压侧没什么影响。另一种是 10kV 变电所的保护接地与低压侧中性点系统接地是合一的，且低压侧的接地是TT 系统和 IT

系统，在这种情况下，当高压侧发生碰地故障时，低压侧中性线（N 线）上会有 1200V，200 ms 的故障电压 U_f ，因此 N-PE 间的 SPD 应能承受有效值为 1200V，L-PE 间的 SPD 应能承受有效值为 1200V+ U_{cs} 持续时间 200 ms 的TOV 试验。

3.6.3 低压配电系统中SPD 的配置方式

低压配电系统中配置SPD的基本要求是要将每根带电导体的雷电流都导入大地，因此总是“多极SPD”（Multipole-SPD）。所谓多极 SPD，是指多于一个保护模式的SPD 组合，或在结构上是一个完整单元，在电气上互连的SPD 组合。该组合中的每一个SPD 称为一个“极”。低压配电系统中的多极SPD，依据各级的保护模式和规格参数的不同，有如表 2.14-5 所列的几种组合方式。它们的电路见图 2.14-21—图 2.14-27。

表 2.14-5 低压配电系统中多极 SPD 的配置方式

单相 2 线系统	单相 3 线系统 两相 3 线系统	三相 3 线系统	三相 4 线系统
2P 方式 L-PE，N-PE，	3P 方式 L1-PE，L2-PE，N-PE	3P 方式 L1-PE，L2-PE，L3-PE	4P 方式 L1-PE，L2-PE，L3-PE，N-PE
1+N 方式 L-PE，N-PE，	2+N 方式 L1-PE，L2-PE，N-PE		3+N 方式 L1-PE，L2-PE，L3-PE，N-PE
1+1 方式 L-N，N-PE，	2+1 方式 L1-N，L2-N，N-PE		3+1 方式 L1-N，L2-PE，L3-PE，N-PE
对称电路 对称复合电路	---	---	---

- 注：1，上表中的 2P, 3P, 4P 方式是指组合中的 2 极, 3 极, 4 极 SPD，都分别连接在带电导体与PE 线之间，即都是共模保护，且各极都是同一个型号规格的 SPD。
- 2，1+N, 2+N, 3+N 方式也都是共模保护，但 N-PE 间 SPD 的规格参数与 L-PE 间 SPD 的不同。一般来说，由于 N-PE 间 SPD 的导通频度高，因此放电电流额定值取得大一点，它的 U_c 值按中性线的对地 TOV 电压值来确定。
- 3，1+1 ， 2+1 ， 3+1 方式是指各相线上的SPD 接到中性线（差模保护），而不是接到 PE 线，再在 N-PE 之间接一只 SPD（通常是 GDT 或空气间隙型）。

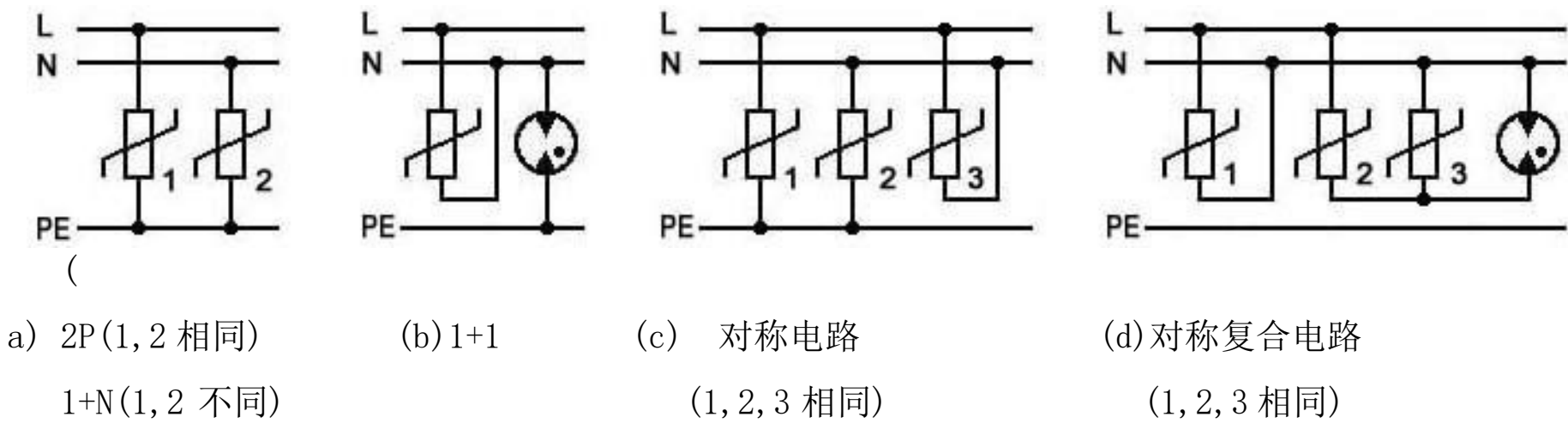


图 2.14-21， 单相 2 线系统SPD 的配置

单相 2 线系统中的 1+1 方式既有共模保护，又有差模保护，是一种较好的配置，但L, N 两根线不

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/087114063105006063>