

电涌保护器

第 2 部分：低压电气系统中的 选择和使用原则

1 范围

QX10 的本部分规定了在低压电气系统中用于防直击雷、雷击电磁脉冲和其他瞬态和暂时过电压的 SPD 的选择和使用原则。

本部分适用于交流（频率为 48Hz~62Hz）额定电压不超过 1000V (r.m.s) 或直流电压不超过 1500V 的低压电气系统。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 QX10 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修正版均不适用于本部分，然而，鼓励根据本部分达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本部分。

GB16895.4-1997 建筑物电气装置 第 5 部分：电气设备的选择和安装 第 53 章：开关设备和控制设备 (idt IEC60364-5-53: 1994)

GB16895.11-2001 建筑物电气装置 第 4 部分：安全防护 第 44 章：过电压保护 第 442 节：低压电气装置对暂时过电压和高压系统与地之间的故障的防护 (idt IEC60364-4-442: 1993)

GB16895.12-2001 建筑物电气装置 第 4 部分：安全防护 第 44 章：过电压保护 第 443 节：大气过电压或操作过电压保护 (idt IEC60364-4-443: 1995)

GB16895.16-2002 建筑物电气装置 第 4 部分：安全防护 第 44 章：过电压保护 第 444 节：建筑物的电气装置电磁干扰 (EMI) 防护 (idt IEC60364-4-444: 1996)

GB16895.21-2004 建筑物电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护 (idt IEC 60364-4-41: 2001)

GB16895.22-2004 建筑物电气装置 第 5-53 部分：电气设备的选择和安装 隔离、开关和控制设备 第 534 节 过电压保护电器 (idt IEC60364-5-534: 2002)

GB16916.1-2003 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器 (RCCB) 第 1 部分：一般规则 (MOD IEC61008-1: 1996)

GB16917.1-2003 家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器 (RCBO) 第 1 部分：一般规则 (MOD IEC61009.1: 1996)

GB/T16935.1-1997 低压系统内设备的绝缘配合 第 1 部分 原理、要求和试验 (idt IEC60664-1: 1992)

GB/T17626.5-1999 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验 (idt IEC61000-4-5: 1995)

GB18802.1-2002 低压配电系统的电涌保护器 (SPD) 第 1 部分 性能要求和试验方法 (idt IEC61643-1: 1998)

GB/T19271.1-2003 雷电电磁脉冲的防护 第 1 部分 通则 (idt IEC61312-1: 1995)

QX 10.1-2002 电涌保护器 第 1 部分：性能要求和试验方法

IEC60364-4-44: 2003 建筑物电气装置 第 4-44 部分：过电压和电磁干扰的防护（修正件 1）

IEC61643-12: 2002 低压配电系统的电涌保护器 (SPD) 第 12 部分: 选择和使用导
则

IEC 62305-2: 2005 雷电防护 第 2 部分: 风险评估

IEC 62305-3: 2005 雷电防护 第 3 部分: 建筑物的物理损害和生命危险

IEC 62305-4: 2005 雷电防护 第 4 部分: 建筑物内的电气系统和电子系统

3 术语和定义

本部分采用下列术语和定义。本部分未特别给出的通用性定义, 见 GB18802.1 和 QX10.1 的术语和定义。

3.1

电压开关型 SPD Voltage switching type SPD

无电涌出现时在线 SPD 呈高阻状态, 当线路上出现电涌且电压达到一定的值时, SPD 的阻抗突然下降变为低阻的 SPD。电压开关型 SPD 常用的元件有: 放电间隙、气体放电管、晶体闸流管和三端双向可控硅元件等。有时也称这类 SPD 为“短路型” SPD。

3.2

限压型 SPD Voltage limiting type SPD

无电涌出现时在线 SPD 呈高阻状态, 随着线路上的电涌电流及电压的增加, 达到一定值时 SPD 的阻抗跟着连续变小的 SPD。限压型 SPD 常用的元件有金属氧化物压敏电阻、雪崩二极管等。有时也称这类 SPD 为“箝压型” SPD。

3.3

混合型 SPD combination type SPD

由开关型元件和限压型元件组合而成的 SPD。随着施加的电压特性不同, SPD 时而呈现开关型 SPD 特性, 时而呈现限压型 SPD 特性, 时而同时呈现开关型和限压型特性。

3.4

冲击试验分类 Impulse test classification

3.4.1

I 级分类试验 class I tests

对试品进行标称放电电流 I_n , 1.2 / 50 μ s 冲击电压和冲击电流 I_{imp} 的试验。10/350 μ s 波形是可能实现 I_{imp} 波形三个参数要求的波形之一。

3.4.2

II 级分类试验 class II tests

对试品进行标称放电电流 I_n , 1.2 / 50 μ s 冲击电压和最大放电电流 I_{max} 试验。 I_n 和 I_{max} 的波形为 8 / 20 μ s。

3.4.3

III 级分类试验 class III tests

对试品进行混合波 (1.2 / 50 μ s, 8 / 20 μ s) 试验。

3.5

最大持续运行电压 maximum continuous operating voltage

U_C

可以持续加在 SPD 上而不导致 SPD 动作的最大交流电压有效值 (A.C r.m.s) 或直流电压, 等于 SPD 的额定电压。

3.6

电压保护水平 voltage protection level

U_P

一个表征 SPD 限制电压的性能参数, 它可从一系列的优选值的列表中选择, 该值应高于或等于实测限制电压的最大值。

3.7

暂时过电压耐受值 temporary overvoltage

U_T

SPD 能耐受的、持续短时间的直流过电压或最大工频过电压 (r.m.s)。在规定时间内, U_T 大于 U_C 。

注: 本定义根据 GB 18802.1 定义 3.18 改写, 并说明 U_T 值应由 SPD 生产厂提供。SPD 在经受 U_{TOV} 后可

能承受，如 SPD 的性能参数没有改变，或虽出故障但对人、装置和设备没有损坏。

3.8

暂时过电压 temporary overvoltage

U_{TOV}

低压电气系统中给定区域持续时间较长的工频过电压。 U_{TOV} 可能由低压 (LV) 或高压 (HV) 系统内部故障造成。

注： U_{TOV} 典型的持续时间最长为 5S。

3.9

设备耐冲击过电压额定值 rated impulse withstand voltage level

U_w

由低压电气设备生产厂给出的设备或设备主要部件耐受冲击过电压的最大值。其值主要与设备的绝缘水平有关。

3.10

系统最大连续工作电压 maximum continuous operating voltage of the power system

U_{cs}

SPD 安装位置上最大工频电压 (r.m.s) 或直流电压，它不是谐振也不是故障状态的电压，而是配电盘的电压变及由于负载和共振影响的电压值升 (降)，且直接与低压系统的标称电压 (U_0) 相关。

3.11

标称电压 nominal voltage

U_0

低压配电系统或设备标明的电压，某些特性与该电压值 (如 220V/380V) 有关。在正常的标称系统中，供电终端的电压可能与供电系统标称的电压不同，一般允许有 $\pm 10\%$ 的容差。

注：系统中相线对中性线的电压用 U_0 表示；相线对地线的电压用 U_n 表示。

3.12

标称放电电流 nominal discharge current

I_n

流过 SPD 的 8 / 20 μ s 电流波的峰值电流，用于 II 级分类试验，也用于对 SPD 做 I 级和 II 级分类的预试验。

3.13

冲击电流 impulse current

I_{imp}

由幅值电流 I_{peak} ，电荷量 Q 和比能量 W/R 三个参数来决定。用于低压电气系统的 SPD 的 I 级分类试验。冲击电流 I_{imp} 应在 50 μ s 内达到 I_{peak} ，应在 10ms 内输送电荷量 $Q(A_s)$ 和应在 10ms 内达到比能量 W/R 。10/350 μ s 波形是可能实现上述要求的波形之一。

3.14

多极 SPD multipole SPD

多于一种保护模式的 SPD，或者电气上相互连接的作为一个单元供货的 SPD 组件。

3.15

总放电电流 total current

I_{Total}

多极 SPD 生产厂在产品上标注的多极 SPD 放电电流之和。此值用于在型式试验中流过多极 (如 L_1 、 L_2 、 L_3 、 N) SPD 到 PE 线的电流之和的检验。

3.16

短路电流承受能力 short-circuit withstand

SPD 能承受的最大预期短路电流值。

3.17

持续工作电流 Continuous operating current

I_c

在最大持续运行电压 (U_c) 下，流过 SPD 的电流，其中流经接地端子 (如 PE) 的电流为残流 (I_{res})。

3.18

续流 follow current

I_f

冲击放电电流结束瞬间, 流过 SPD 的由供电电源提供的电流。在低压交流配电系统中, 一般将此电流称为工频续流。

3.19

额定负载电流 rated load current

I_L

流经连接至低压配电系统的双端口 SPD 输出端提供给负载允许的最大持续交流电流 (r.m.s) 或直流电流。

注: 本定义仅适用于双端口 SPD 或具有单独输入/输出端口的单端口 SPD。

3.20

劣化 degradation

任何设备的工作性能偏离其预定性能的非期望偏差。在 SPD 性能中指当 SPD 长时间工作或处于恶劣工作环境时, 或直接承受雷击电涌而引起其性能下降、原始性能参数的改变。也称退化或老化。

3.21

热崩溃 thermal runaway

当 SPD 承受的持续功率损耗超过 SPD 外壳和连接件的散热能力, 引起内部元件温度逐渐升高, 性能下降, 最终导致损坏的过程。

3.22

SPD 脱离器 SPD disconnecter

当 SPD 发生故障时, 一个能把 SPD 同电路脱开的装置。

注: 这种断开装置不需要具有隔离能力, 它应能防止低压电气系统持续故障并可用于显示 SPD 故障状态。除了具有脱离器功能外, 还可以具有过流保护或过热保护功能等。这些功能可由单一的或多个装置组合在一起实现。

3.23

剩余电流动作保护器 residual current device RCD

在规定的条件下, 当剩余电流或不平衡电流达到给定值时能使电路触头断开的一种机械开关电器或组合电器。

3.24

后备过电流保护装置 backup overcurrent protection

安装在 SPD 外部前端的一种防止当 SPD 不能阻断工频短路电流而引起发热和损坏的过电流保护装置 (如熔丝、断路器)。

3.25

双端口 SPD 的负载端电涌耐受能力 load-side surge withstand capability for a two-port SPD

双端口 SPD 对负载端输出接线端子产生的电涌的耐受能力。

注: 本定义仅适用于双端口 SPD 或具有单独输入/输出端口的单端口 SPD。

3.26

保护模式 modes of protection

SPD 的保护元件可以连接在低压配电系统线路的相线——相线、相线——中性线、相线——保护线、中性线——保护线之间及多种方式同时连接。这些连接方式称为保护模式。一般将相线——相线之间的保护称为横向 (差模) 保护, 相线 (或中性线) ——保护线之间的保护称为纵向 (共模) 保护。在直流配电系统中可分为正负极之间, 正极与保护线之间, 负极与保护线之间。

4 受保护的系统和设备

当需要采用 SPD 对低压电气系统和设备进行保护时, 必须充分了解受保护的低压交流配电系统型式、低压直流配电系统和受保护电气设备耐冲击过电压额定值 (U_w)。

4.1 低压配电系统

4.1.1 低压交流配电系统

4.1.1.1 按带电导体根数分类

带电导体是指工作时通过电流的导体，相线（L 线）和中性线（N 线）是带电导体，保护接地线（PE 线）不是带电导体。按带电导体根数可分为：单相两线系统，两相三线系统，三相三线系统，三相四线系统等。低压配电系统按带电导体根数分类见本部分附录 A（资料性附录）。

4.1.1.2 按接地系统分类

低压交流配电系统分为 TN（TN-C，TN-S，TN-C-S），TT，IT 三类，这些接地系统的文字符号的含义是：

第一个字母说明电源与大地的关系：

T：电源的一点（通常是中性点）与大地直接连接。

I：电源与大地隔离或电源的一点经高阻抗与大地直接连接。

第二个字母说明电气装置的外露导电部分与大地的关系：

T：外露导电部分直接接大地，它与电源的接地无联系。

N：外露导电部分通过与接地的电源中性点的连接而接地。

第三个字母说明 N 线与 PE 线的关系：（仅用于 TN 系统）

C：N 线和 PE 线共用一根导线（PEN）。

S：N 线和 PE 线分别设置。

TT 系统——电源的一点（通常是中性点）与大地直接连接，设备外露导电部分直接接大地，它与电源的接地无联系。

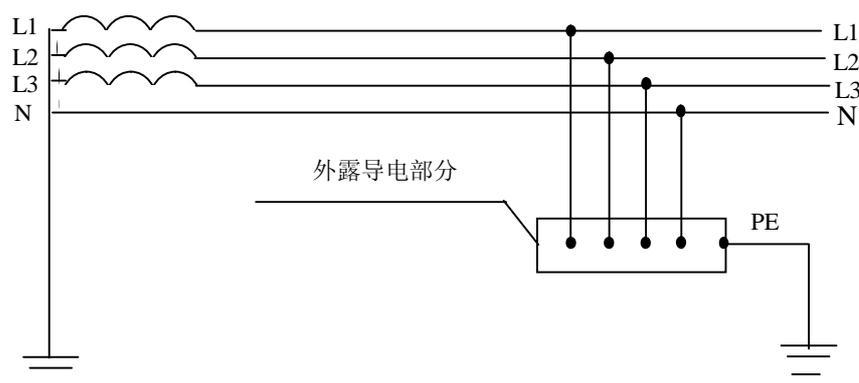


图 1 TT 系统

TN 系统——电源的一点（通常是中性点）与大地直接连接，设备外露导电部分通过与接地的电源中性点的连接而接地。TN 系统分为 TN-C，TN-S，TN-C-S 三类：

TN-C 系统——在全系统内 N 线和 PE 线是合一的。

TN-S 系统——在全系统内 N 线和 PE 线是分开的。

TN-C-S 系统——在全系统内，仅在电气装置电源进线点前 N 线和 PE 线是合一的，电源进线点后即为两根线（N 和 PE）。

注：外露导电部分包括电气设备日常使用中可能触及的导电部分。正常情况下外露导电部分不带电压，但在基本绝缘损坏发生接地故障时可能带电压，如用电器具的金属外壳、敷设线路用的金属管（梯架、托盘、槽盒）等。

诸导电物体包括外露导电部分，带电导体（L 和 N 线、电信及信号线）和装置外导电部分（非电气的其他装置的可导电部分，容易引入电位，通常是地电位，如金属水管气管道，建筑物钢结构等）。

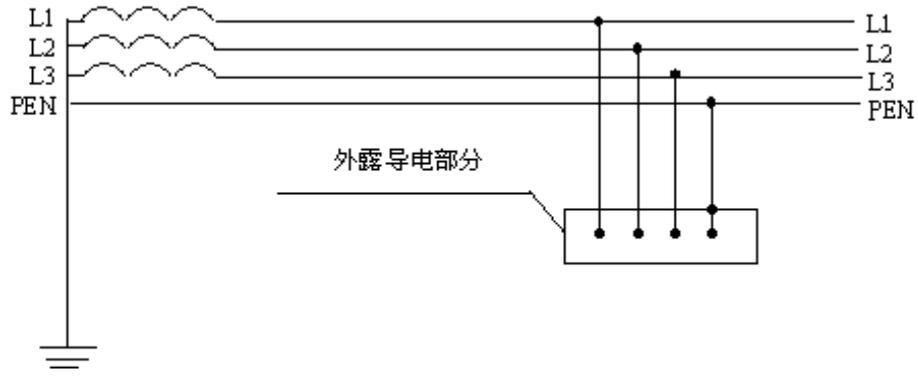


图 2 TN-C 系统

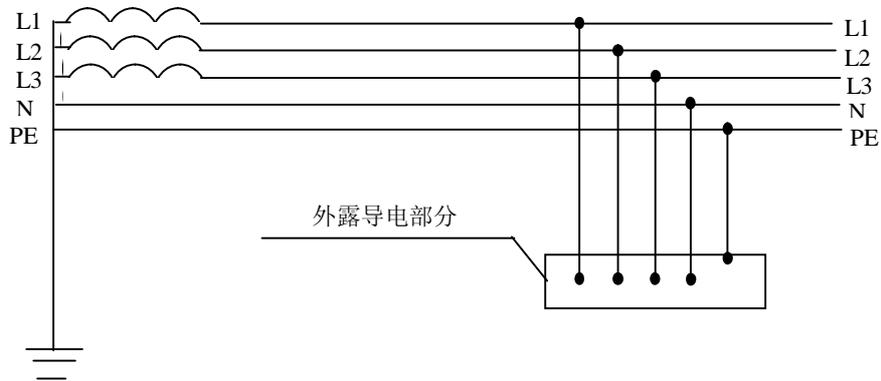


图 3 TN-S 系统

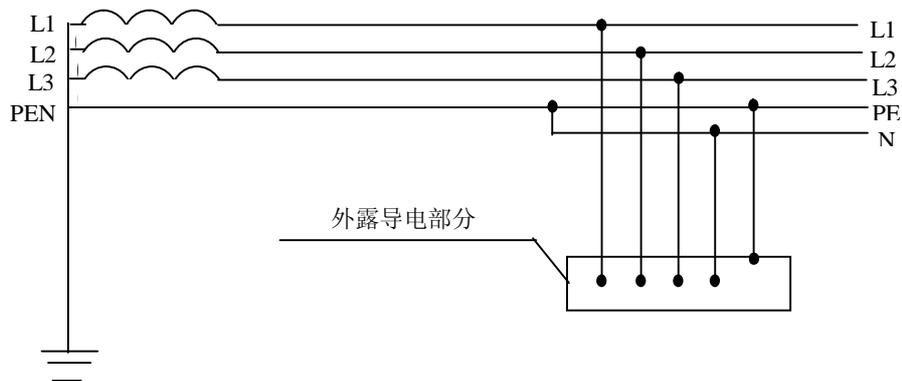


图 4 TN-C-S 系统

IT 系统——电源与大地隔离或电源的一点经高阻抗与大地直接连接，设备外露导电部分直接接大地，它与电源的接地无联系。

IT 系统分为两种情况：一种是不配出中性线，另一种是配出中性线，IEC 标准建议三相 IT 系统只配出三根相线而不配出中性线。为了降低或衰减可能出现的过电压或谐振，有时需将电源端带电导体经一高阻抗接地，一般情况下该阻抗值可取为电气装置标称相电压的 5 倍，例如装置标称相电压为 220V 时，阻抗值可取为 $1000\ \Omega$ 。IT 系统的两种型式见图 5 和图 6。

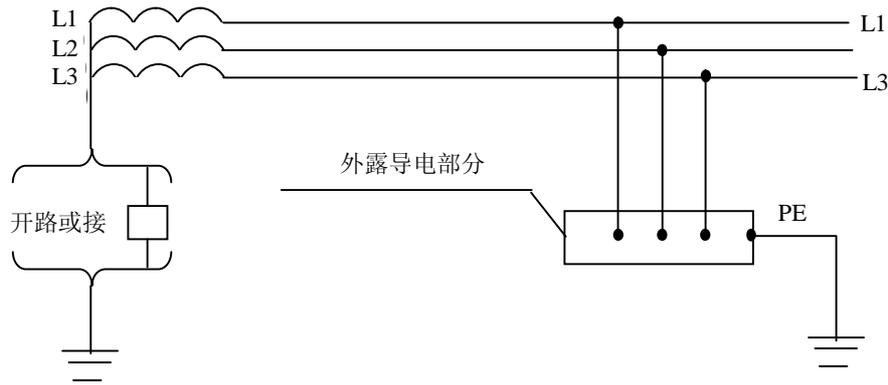


图 5 不配出中性线的 IT 系统

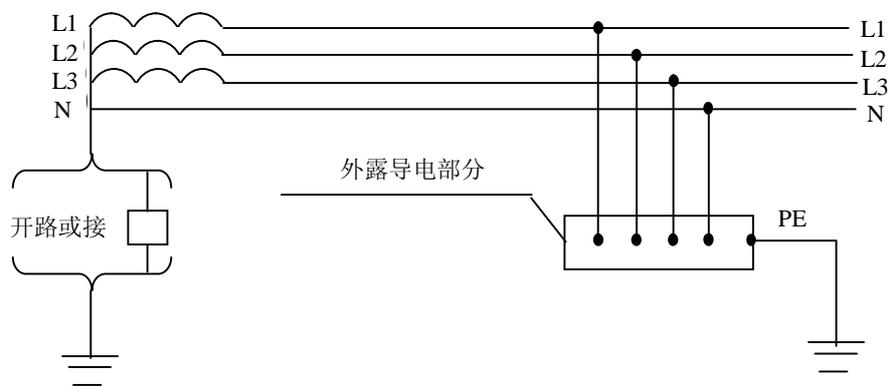


图 6 配出中性线的 IT 系统

4.1.2 低压直流配电系统

低压直流配电系统可分为接地系统和不接地系统（或非有效接地系统）。
直流电压的区段见表 1：

表 1 直流电压区段

区 段	接 地 系 统		不接地或非有效接地系统*
	极 对 地	极 间	极 间
I	$U \leq 120V$	$U \leq 120V$	$U \leq 120V$
II	$120V < U \leq 900V$	$120V < U \leq 1500V$	$120V < U \leq 1500V$

U——装置的标称电压（V）。
*如果系统配有中间导体，则由相导体和中间导体供电的电气设备选择，应使其绝缘适应其极间电压。

注
1 本表所列电压值为无纹波直流电压值。
2 本电压区段的划分，并不排除为某些专用规则规定中间值的可能

4.2 受保护设备的耐冲击特性

4.2.1 交流电气设备耐冲击类别

4.2.1.1 一般交流电气设备耐冲击类别

220/380V 三相系统电气设备耐冲击类别可分为 I、II、III、IV 类，见表 2 所示。表 2 不能涵盖所有的 220/380V 三相系统的电气设备，应从实际出发对受保护设备耐冲击过电压

额定值进行核实。

表 2 220/380V 三相系统电气设备绝缘耐冲击过电压额定值

设备位置	电源处的设备	配电线路和最后分支线路的设备	用电设备	特殊需要保护的設備
耐冲击过电压类别	IV类	III类	II类	I类
耐冲击电压额定值 (KV)	6	4	2.5	1.5
注: I类—需要将瞬态过电压限制到特定水平的设备,如含有电子电路的设备,计算机及含有计算机程序的用电设备; II类—如家用电器(不含计算机及含有计算机程序的家用电器)、手提工具、不间断电源设备(UPS)、整流器和类似负荷; III类—如配电盘,断路器,包括电缆、母线、分线盒、开关、插座等的布线系统,以及应用于工业的设备和永久接至固定装置的固定安装的电动机等的一些其它设备; IV类—如电气计量仪表,一次线过流保护设备、波纹控制设备。				

4.2.1.2 通信、信息网络交流电源设备耐冲击过电压额定值:

表 3 通信、信息网络交流电源设备耐冲击过电压额定值

设备名称	冲击电压额定值 (kV)	冲击电流额定值 (kA)	说明
电源设备机架交流电源入口 (由 UPS 供电)	0.5	0.25	
通信、信息网络中心设备交流电源端口	0.5	0.25	适用于相—相
	1.0	0.5	适用于相—地
非信息网络中心交流电源端口	1.0	0.5	适用于相—相
	2.0	1.0	适用于相—地
注: 1. 交流电源额定电压均为 220V/380V。 2. 使用混合波 (1.2/50 μs、8/20 μs) 进行试验。			

4.2.2 直流电气设备耐冲击特性

4.2.2.1 直流电源设备耐冲击过电压额定值见表 4:

表 4 直流电源设备耐冲击过电压额定值

设备名称	额定电压 Vd.c	混合冲击波	
		冲击电压(kV)	冲击电流 (kA)
DC/AC 逆变器 DC/DC 变换器 机架直流电源入口	-24 或-48 或-60	0.5	0.25
直流配电屏	-24、-48、-60	1.5	0.75
注: 混合波开路电压为 1.2/50 μs, 短路电流 8/20 μs。			

4.2.2.2 信息网络设备耐冲击过电压额定值见表 5:

表 5 信息网络设备耐冲击过电压额定值

设备名称	冲击电压额定值	试验波形	说明
信息网络中心 DC 电源端口	0.5 kV	1.2/50 μs (8/20 μs)	适用于相—相。
	1.0 kV		适用于相—地。
非信息网络中心 DC 电源端口	1.0 kV	1.2/50 μs (8/20 μs)	适用于相—相。
	2.0 kV		适用于相—地。

注：非信息网络中心的地点指设备不在信息网络中心内运行，如无保护措施的本地区远端站、商业区、办公室内，用户室内和街道等。

4.2.2.3 测量、控制和实验室内直流电源冲击抗扰度试验的最低要求见表 6：

表 6 冲击抗扰度试验的最低要求

端口	试验项目	试验值	说明
直流电源	冲击试验	0.5kV	适用于相—相。
		1.0 kV	适用于相—地。

注：仅适用于线路长度超过 3m 的情况。

5 电涌保护器的主要技术参数

5.1 SPD 的分类

SPD 的分类见 QX10.1 中 5，SPD 的设计拓扑见 QX10.1 中附录 D（资料性附录）。本部分主要选用了 I 级/II 级/III 级分类试验和开关型/限压型/混合型分类内容。

5.2 SPD 选择和使用时的主要参数

5.2.1 SPD 能承受预期通过的雷电流 ($I_{imp}/I_n/U_{oc}$)

I_{imp} （冲击电流）

通过 I 级分类试验的 SPD 上应标注 I_{imp} 值。冲击电流见本部分 3.13 条定义。

I_n （标称放电电流）

通过 II 级分类试验的 SPD 上应标注 I_n 值。标称放电电流见本部分 3.12 条定义。

U_{oc} （开路电压）

通过 III 级分类试验的 SPD 上应标注 U_{oc} 值。混合波中开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} 见 QX10.1 中 3.63 条定义。

注： U_{oc}/I_{sc} 数学值为 2/1。

5.2.2 最大持续运行电压 (U_c)

最大持续运行电压 U_c 见本部分 3.5 条定义。

5.2.3 电压保护水平 (U_p)

电压保护水平 U_p 见本部分 3.6 条定义。

关于 U_p 的进一步信息参见本部分附录 B（资料性附录）。

5.3 SPD 选择和使用时应考虑的其他技术参数

5.3.1 与使用条件有关的技术参数

SPD 的本体上，或因受标注面积限制而标志在小包装或说明书上的以下内容，应与使用条件（环境）相一致：

- 交流 (a.c) 或直流 (d.c)；
- 交流 (a.c) 的频率 ($48H_z \sim 62H_z$)；
- 交流 (a.c) 系统的标称电压 (如 220V/380V)，直流配电系统的直流电压 (如 24V、

48V 和 60V)；

——使用地点（室内或室外）；

注：室外用 SPD 的污染等级为 4。

——使用高度（是否超过海拔 2000m）；

——环境温度（是否在正常温度 $-5^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ 之间）；

——环境湿度（是否在正常情况下相对湿度不大于 50% 或 90%）；

注：在环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ 时为 50%，环境温度为 $+20^{\circ}\text{C}$ 时为 90%。

——外壳防护等级（IP 代码的要求）。

5.3.2 持续工作电流 (I_c)

I_c 是在 SPD 上施加的电涌电压达最大持续运行电压 U_c 时流经 SPD 的电流值。流经接地端子 (PE) 的电流为残流 I_{res} 。

5.3.3 暂时过电压耐受值 (U_T)

U_T 用以表征 SPD 耐受暂时过电压的特征。

U_T 在理想情况下用一条曲线描述。而实际上是用几对工频电压或直流过电压对于时间（最长不超过几秒）关系的值来表征。典型持续时间为 200ms 和 5s。图示见本部分附录 B（资料性附录）。

5.3.4 SPD 的失效模式

SPD 的失效模式决定了 SPD 与其他设备、与其应用的系统以及与 SPD 连接的电气装置之间的兼容性。

SPD 的失效模式取决于电涌电流和电压的幅值、数量和波形、供电系统的短路承受能力和故障时在 SPD 上施加电压值。SPD 失效时有两种主要模式：

——短路：由于 SPD 两端电气导通，工频电流由此产生接地故障，此时由 SPD 前端的过电流保护装置动作切断了工频短路电流，可能产生的后果是 SPD 被脱离或供电中断。

——开路：由于 SPD 开路，SPD 与供电线路脱离。

SPD 可能会在某一时段内处于不确定状态。该状态包括能量吸收和最终导致（自身或断路器或后备过电流保护装置）开路或短路情况。由于这一状态是暂时的过程，本部分不对其进行研究。

关于过电流或其他保护装置的运行效果如何取决于系统配置的进一步信息见本部分附录 C（规范性附录）。

5.3.5 短路电流承受能力

SPD 本身、SPD 的断路器或后备过电流保护装置均应能够承受生产厂标称的短路电流承受值。必须确保 SPD 不能被用于短路电流高于其标称值的位置。同样必须确保有适当的断路器或后备保护，并能正常工作。

5.3.6 额定负载电流 (I_L)

必须检查连接在双端口 SPD 输出端的负载电流或有单独输入和输出端的单端口 SPD 输出端负载电流与 SPD 上标称的额定负载电流相协调。

注 同样必须考虑负载的类型。例如，有些负载具有涌入电流，可能是有效值 (r.m.s) 的 3 倍。这些峰值电流能在双端口 SPD 的串连元件中产生额外的热量。

5.3.7 电压降

必须检查在安装了双端口 SPD 或具有单独输入和输出端的单端口 SPD 之后，不会导致其下游设备的电压降超过设备允许的极限值。

6 风险评估、雷击类型及损害和损失类型

6.1 风险评估

低压电气系统和电气设备是否需要安装 SPD 防直击雷和雷击电磁脉冲 (LEMP)，应在完成直接、间接损失评估和建设、维护投资预测后认真综合考虑，做到安全、适用、经济。

当采用防雷措施（含防直击雷的外部防雷及内部防雷的屏蔽、等电位连接、综合布线和安装 SPD）后仍可能发生的雷击损害和损失价值 C_{RL} 与采用防雷措施的成本（含建设和维护投资） C_{PM} 之和低于没有采取防雷措施可能出现的损失额 C_L 时，采用综合防雷措施是

有益的，即：

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L$$

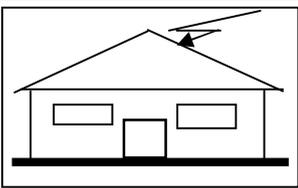
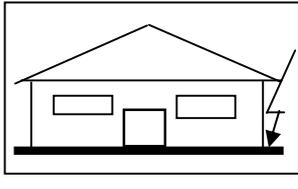
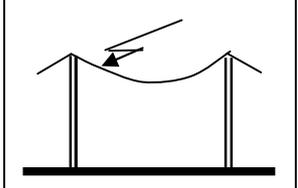
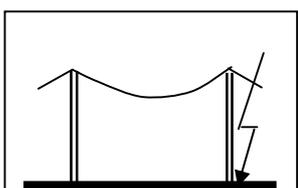
此时应采用含 SPD 安装在内的外部防雷和内部防雷。关于风险评估的进一步信息参见 IEC62305-2。

6.2 雷击类型及损害和损失类型

发生在雷雨云内部的闪电是云内闪，发生在雷雨云之间的闪电是云际闪，统称云闪。发生在雷雨云与大地及地面物体之间的闪电是云地闪，又称地闪或直击雷。本部分只对直击雷引发的 LEMP 进行分析和规定相应的防护措施，由于云闪的距离较远和只能通过空间磁场干扰，一般情况下不需要进行额外的防护。

对本部分规定的低压电气系统防雷保护，应根据电气系统和电气设备所在建筑物及其连接的电力和通信线路遭受雷击的类型来考虑损害和损失类型，见表 7 所示。

表 7：雷击类型和损害、损失类型

雷击点	建筑物		电力和通信线路		
	雷击类型	损害类型	损失类型	损害类型	损失类型
	S ₁	D ₁ D ₂ D ₃	L ₁ , L ₄ ** L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ L ₁ , L ₂ , L ₄	D ₂ , D ₃ D ₂ , D ₃	L ₂ L ₄
	S ₂	D ₃	L ₁ *, L ₂ , L ₄		
	S ₃	D ₁ D ₂ D ₃	L ₁ L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ L ₁ *, L ₂ , L ₄	D ₂ , D ₃ D ₂ , D ₃	L ₂ L ₄
	S ₄	D ₃	L ₁ *, L ₂ , L ₄	D ₂ , D ₃	L ₂ L ₄

表中：

根据雷击点位置划分的雷击类型（S）

- S₁：雷击建筑物；
- S₂：雷击建筑物的邻近区域；
- S₃：雷击在电力和通信线路上；
- S₄：雷击在电力和通信线路附近的地面。

损害类型：（D）

- D₁：接触和跨步电压导致的人员伤亡；

D₂: 建筑物或其他物体损害;
D₃: 电涌导致的电气和电子系统的失效。

损失类型: (L)

L₁: 生命损失;
L₂: 向公众服务的电力和通信设备的损失;
L₃: 文化遗产损失;
L₄: 经济损失。

*为医院和有爆炸风险的建筑物的情况;

**为农业财产情况(牲畜损失)。

7 SPD 的选择

7.1 SPD1 的选择

在低压电气系统中, SPD1 应安装在图 7 所示的 MB 处, 该处属 LPZO 区(含 LPZO_A 和 LPZO_B) 与 LPZ1 区的交界处。关于 LPZ(防雷区)的定义见 GB/T 19271.1。

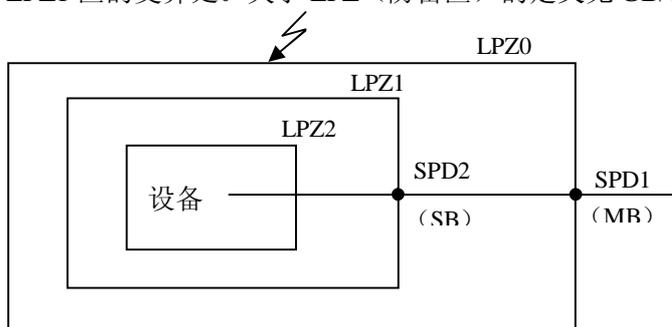


图 7 建筑物防雷区的划分和等电位连接位置示意图

7.1.1 雷击类型为 S₁型和 S₂型时的选择

当雷电可能直击到建筑物上, 在按 GB50057 划分的第一类防雷建筑物、第二类防雷建筑物和第三类防雷建筑物(含需防雷击电磁脉冲而该建筑物不属于第一、二、三类防雷建筑物且不处于其他建筑物或物体的保护范围内而宜按第三类防雷建筑物采取防直击雷措施的建筑物)安装外部防雷装置(接闪器、引下线和接地装置)时, 其雷击类型为表 7 的 S₁型。

当雷电可能击到邻近建筑物时, 如装有低压电气系统的建筑物本身无外部防雷装置, 但与之有电气联系的邻近建筑物有外部防雷装置时, 其雷击类型为表 7 的 S₂型。

雷击类型为 S₁或 S₂型时, 在建筑物入口处的配电柜(箱)上应选择 I 级分类试验的 SPD, 其主要技术参数应符合以下要求:

I_{imp}: 每一相线及中性线与 PE 线之间的 SPD 的冲击电流值, 可按 GB5007 中第 6.3.4 条“进入建筑物的各种设施之间雷电流分配”方法计算。在难于计算的情况下, 则每一保护模式的 I_{imp}值不应小于 12.5kA。按照“3+1”或“1+1”接线形式安装 SPD 时, 在三相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 I_{imp}值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 I_{imp}值的四倍, 即 I_{imp}值不应小于 50kA; 在单相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 I_{imp}值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 I_{imp}值的二倍, 即 I_{imp}值不应小于 25kA。

当使用一个多极 SPD 时, 如其中包括 L₁、L₂、L₃和 N 对 PE 的多个保护模式的 SPD 时, I_{Total}值应不小于 50kA(3+1 形式)。

U_C: 在低压交流配电系统中, U_C的选择应符合表 8 的要求

表 8 按低压交流配电系统接地型式确定 SPD 的最低 U_c 值

电涌保护器 连接于:	低压交流配电接地型式				
	TT 系统	TN-C 系统	TN-S 系统	引出中性线的 IT 系统	不引出中性线的 IT 系统
每一相线和中 性线间	1.15U ₀	不适用	1.15U ₀	1.15U ₀	不适用
每一相线和 PE 线间	1.55U ₀	不适用	1.15U ₀	1.15U ₀	1.15U ₀
中性线和 PE 线 间	1.15U ₀	不适用	1.15U ₀	1.15U ₀	不适用
每一相线和 PEN 线间	不适用	1.15U ₀	不适用	不适用	不适用

注 1: U_0 指低压系统相线对中性线的标称电压, U 为线间电压, $U = \sqrt{3}U_0$ 。
 2: 在 TT 系统中, SPD 在 RCD 的负荷侧安装时, 最低 U_c 值不应小于 1.55 U_0 , 此时安装形式为 L-PE 和 N-PE; 当 SPD 在 RCD 的电源侧安装时, 应采用“3+1”形式, 即 L-N 和 N-PE, U_c 值不应小于 1.15 U_0 。
 3: U_c 应大于 U_{cs} , 见附录 B (资料性附录)。

U_p : 在 220/380V 电气装置内 SPD1 的电压保护水平 U_p 不应超过 2.5kV。当使用一组 SPD1 达不到 $U_p < 2.5kV$ 时, 应采用配合协调的 SPD2, 以确保达到要求的电压保护水平。

注 1: 上述 SPD 的选择适用于低压交流配电系统, 对于直流电路, 本部分的原则要求在其适用范围内也可应用。

注 2: 选择 SPD 的 $U_r < 2.5kV$ 时, 尚应考虑 SPD 两端连接导线的感应电压。对开关型 SPD, 有效的电压保护水平 $U_{r(t)}$ 应取 SPD 上标注的 U_r 或引线感应电压 ΔU 中较高值; 对限压型 SPD, $U_{r(t)} = U_r + \Delta U$ 。设定 ΔU 值取每米 1kV。

注 3: $U_{r(t)}$ 尚与 SPD 与受保护设备间线缆长度有关, 见本部分 7.2 条的规定。

7.1.2 雷击类型为 S₃ 型和 S₄ 型时的选择

7.1.2.1 电力线路为架空线时的选择

本条款仅适用于雷击类型 S₃ 型或 S₄ 型, 当雷击类型可能同时出现 S₁ 型或 S₂ 型时, 应按本部分 7.1.1 条规定执行。

7.1.2.1.1 电杆为木杆时的选择

当架空电力线路使用木质电杆时, 建筑物入口处配电柜(箱)上 SPD1 选择的主要技术参数宜参照本部分 7.1.1 条的规定执行。

7.1.2.1.2 电杆为金属杆时的选择

架空线杆塔为金属材料杆(如单柱铁塔、双柱铁塔、钢筋混凝土耐张型杆、钢筋混凝土直线杆、预应力混凝土耐张杆、预应力混凝土直线杆和空心钢管混凝土直线杆等), 且按架空电力线路设计规范采取防雷和接地措施时, 建筑物入口处配电柜(箱)上 SPD1 的选择应根据建筑物所在地年平均雷暴日数分别采取以下措施:

a) 年平均雷暴日数小于 25d/a 时, 可以不安装 SPD。

注: 在要求可靠性较高或预期有较高危险性(如火灾)和根据电气装置用途, 其承受危险能力特别低的地方, 可安装 SPD, 具体参数指标同以下 b) 的规定。

b) 年平均雷暴日数大于或等于 25d/a 时, 建筑物入口处配电柜(箱)上应选择 II 级分类试验的 SPD, 其主要技术参数应符合如下要求:

I_n : 每一相线及中性线与 PE 线之间的 SPD 的标称放电电流值 I_n 不应小于 5kA (8/20 μs)。按照“3+1”或“1+1”接线形式安装 SPD 时, 对于三相系统而言, N—PE 间 SPD 的 I_n 不应小于 20kA; 对于单相系统则不应小于 10kA。

U_c : 同本部分表 8 的规定。

U_p : 同本部分 7.1.1 中 U_p 的规定。

7.1.2.2 电力线路埋地敷设时的选择

电力线路埋地敷设时, 如果埋地长度小于 $2\sqrt{\rho}$, 宜安装 SPD。

注: 具有接地金属屏蔽的悬挂绝缘导体电缆按架空电力线路设计规范采取防雷和接地措施时, 可视为埋地电缆。

7.2 SPD2 的选择

按本部分 7.1 条选择 SPD1 的 U_p 不超过 2.5kV, 能对配电线路下游和末端电气设备进行有效箝压保护时, 可在建筑物入口处配电柜(箱)上安装一组 SPD1。如果存在如下因素之一, 应考虑 SPD2 乃至 SPD3 的选择。

——SPD1 的 U_p (2.5kV) 大于下游和末端设备的 U_w , 及 $U_p > 0.8U_w$;

——SPD1 与受保护设备之间距离过长(一般指线缆长度大于 10m);

——建筑物内部存在雷击放电或内部干扰源产生的电磁场干扰。

SPD2 应安装在图 7 所示的 SB 处, 该处属 LPZ1 区与 LPZ2 区交界处。

在 SB 处安装的 SPD2 应选择 II 级或 III 级分类试验的产品, 其主要技术参数应符合以下要求:

I_n : 选用 II 级分类试验的 SPD 时, 每一相线及中性线与 PE 线间的 SPD 的标称放电电流值应符合表 9 的要求。当采用“3+1”或“1+1”接线形式安装 SPD 时, 在三相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 I_n 值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 I_n 值的四倍; 在单相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 I_n 值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 I_n 值的二倍。

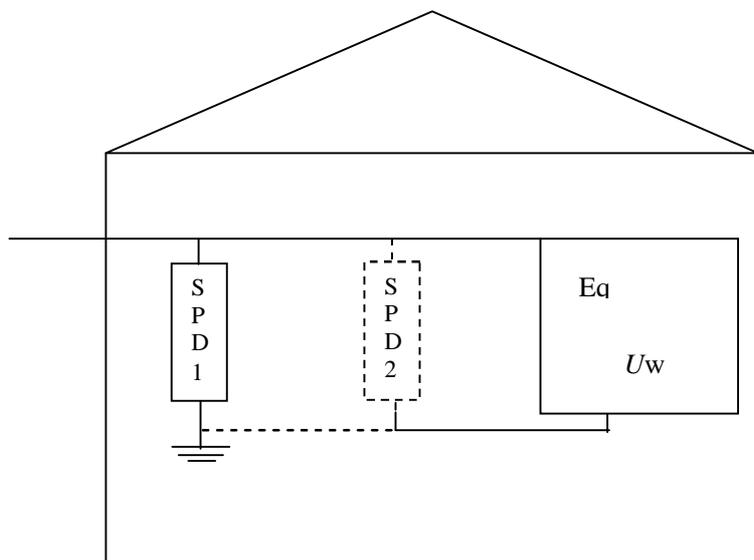
U_{oc} : 选用 III 级分类试验的 SPD 时, 每一相线及中性线与 PE 线间的 SPD 的开路电压值应符合表 9 的要求。当采用“3+1”或“1+1”接线形式安装 SPD 时, 在三相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 U_{oc} 值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 U_{oc} 值的四倍; 在单相系统中, 接在中性线与 PE 线间的 SPD 的 U_{oc} 值应为接在相线与中性线间的 SPD 的 U_{oc} 值的二倍。

U_c : 选用 II 级或 III 级分类试验的 SPD, 其最大持续运行电压值均不应低于表 8 中的要求。

U_p : SPD 的 U_p 必须低于受保护线路和设备的 U_w 值, 并应有 20% 的裕度, 即:

$$U_p < 0.8U_w$$

图 8 给出了需要增加 SPD 进行保护的示例。需要说明的是增加的 SPD2 的 U_{p2} 也应小于 $0.8U_w$ 。进一步的信息参见本部分附录 C (资料性附录)。



注:

1. 如果 $U_{p1} \times k < 0.8 \times U_w$, 仅需要 SPD1 (安装在建筑物入口处)。
2. 如果 $U_{p1} \times k > 0.8 \times U_w$, 除了 SPD1 还应该安装 SPD2 ($U_{p2} < 0.8U_w$)。
3. E_q 是耐冲击过电压额定值为 U_w 的设备。
4. k 是考虑到可能的振荡产生的系数 ($1 < k < 2$)。

图 8- 需要增加 SPD 进行保护的示例

注 GB17626.5 中所提到的设备的抗干扰性与 GB/T16935.1 中所定义 U_w 不同。原因是 GB17626.5 中的试验使用混合波发生器, 一部分电涌流可能流经设备 (尤其是当其具有低电阻时)。在这种情况下, 需要 SPD 间合适的配合。

表 9 SPD1 和 SPD2 选择的主要技术参数

雷击类型		SPD1		雷击类型	SPD2		
		I_{imp} 或 I_n	U_p		I_n	U_{oc}	U_p
S_1 和 S_2		12.5kA (10/350 μ s)	2.5kV	S_1	20kA (8/20 μ s)	—	$U_{p2} \leq 0.8U_w$
				S_2	15kA (8/20 μ s)	—	
S_3 和 S_4	木杆	12.5kA (10/350 μ s)		S_3	10kA (8/20 μ s)	20kV	
	金属杆	5kA (8/20 μ s)		S_4	5kA (8/20 μ s)	10kV	
注 1: I_{imp} 、 I_n 和 U_{oc} 值均指每一保护模式间的一个 SPD 参数值。 2: U_c 值要求见表 8。							

7.3 SPD 的其他技术参数的选择

7.3.1 与使用条件有关的技术参数要求

SPD 生产厂标注的使用条件应与实际使用条件 (环境) 相一致, 使用条件 (环境) 见本部分 5.3.1 条的说明。

7.3.2 持续工作电流 (I_c)

当 SPD 与过电流保护装置配合使用时, 为避免 SPD 的 I_c 值偏大而引起间接接触电击事故或出现过电流保护装置 (如 RCD) 的误动作, 选择 SPD 的 I_c 值应低于 RCD 的额定动作电流值 ($I_{\Delta n}$) 的 33%。

注: 当 SPD 安装在过电流保护装置 (如 RCD、熔丝或断路器) 的负荷侧时, SPD 对这些过电流保护装置在故障时断开、误动作和因电涌冲击产生的损坏无法提供相应的保护。

7.3.3 暂时过电压耐受值 (U_T)

SPD 的 U_T 值应高于可能出现的系统暂时过电压 (U_{TOV}) 值, 这样才能防止 SPD 因暂时过电压损坏。

SPD 的 U_T 值因在不同配电系统和不同的连接位置 (保护模式) 而有异, U_T 最小值要求见表 10。

表 10 在各种配电系统中各连接位置的 U_T 最小值

系统型式	连接位置	U_T 最小值	
		持续时间 5s	持续时间 200ms
TN	L-PEN	$1.45U_0$	$1200V+U_0$
	L-N	$\sqrt{3} U_0$	
	L-PE	$\sqrt{3} U_0$	
TT	L-PE	$250+U_0$	$1200V+ U_0$
	N-PE	$\sqrt{3} U_0$	$1200V+U_0$
	L-N	$\sqrt{3} U_0$	
IT	L-PE	$250V+U_0$	$1200V+U_0$
	N-PE	$250V$	$1200V$
	L-N	$1.45U_0$	

注 1: 表 10 包括了因高压 (HV) 和低压 (LV) 网络故障造成的暂时过电压的极值。
 注 2: TN 系统包括 TN-S 或 TN-C, IT 系统包括配出中性线和未配出中性线的两种形式。IEC 标准不提倡使用配出中性线的 IT 系统。

SPD 的生产商应提供 U_T 值, 如果生产商没有提供 U_T 值, 则使用者可以认为 $U_T = U_c$, 这意味着选择 U_c 时要考虑使 U_c 高于系统中可能出现的暂时过电压最大值。

选择一个 SPD 能同时具备较高的 U_T 值和较低的 U_p 值是很困难的。

用户可通过比较 SPD 的 U_T 和系统中预期产生的暂时过电压值 U_{TOV} , 同时考虑 U_T 和 U_{TOV} 随时间变化特性来选择 SPD 的 U_T 。

7.3.4 预期寿命和失效保护模式

SPD 的预期寿命和失效保护模式见本部分 8.5 条的规定。

7.3.5 短路电流承受能力

失效的 SPD 如处在短路状态下, 短路电流的导通使能量大量迅速释放可能引起火灾, 为保证 SPD 在短路电流状况下不起火, SPD 生产商应在产品标志 (或使用说明书) 上提供短路电流承受能力预期值, 该值应通过 GB 18802.1 中 7.7.3 条的试验。GB 16895.22 规定在 TT 或 TN 系统中连接于 N 与 PE 间的 SPD 额定阻断电流值不应小于 100A, 在配出中性线的 IT 系统中, N 与 PE 间的 SPD 应与连在 L-N 间的 SPD 额定阻断续流电流值相同。

7.3.6 额定负载电流 (I_L)

对双端口或具有单独输入和输出端口的单端口 SPD, 在某些负载类型时, 可能涌入 3 倍的最大持续额定交流电流 (r.m.s) 或直流电流, 致使 SPD 内串联的电感 (或电阻) 发热。因此生产商应在产品标志 (或使用说明书) 上提供双端口或具有单独输入和输出端口的单端口 SPD 的 I_L 值, 并应通过 GB 18802.1 中 7.8.2 条的试验。

7.3.7 电压降

对双端口或具有单独输入和输出端口的单端口 SPD, 在额定阻性负载条件下, 电压降 (用百分比表征) 为:

$$\Delta U = [(U_{in} - U_{out}) / U_{in}] \times 100\%$$

如果电压降超过受保护设备允许的极限值将对设备造成损坏或影响设备的正常运行。因此, 生产商应在产品标志 (或使用说明书) 上提供双端口或具有单独输入和输出端口的单端口 SPD 的电压降值, 并应通过 GB 18802.1 中 7.8.1 条的试验。

7.4 选择 SPD 流程图

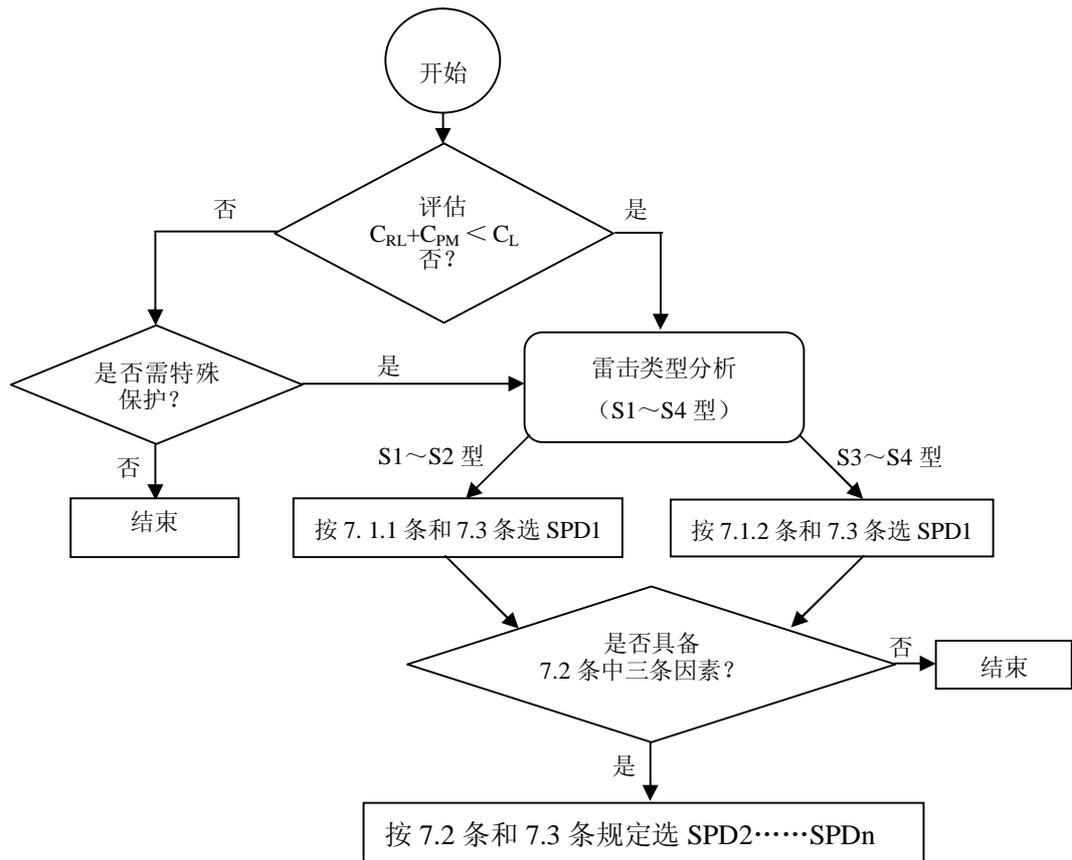


图 9 选择 SPD 的流程图

8 SPD 的使用安装

8.1 使用安装 SPD 的基本要求

SPD 的使用安装应对低压电气线路和设备起到电涌保护作用，同时不应因 SPD 的安装造成低压电气系统的故障和事故。因此，有如下三项基本要求：

- a. 安装 SPD 之后，在无电涌发生的情况下，SPD 不对低压电气系统正常运行产生影响。
- b. 安装 SPD 之后，在有电涌发生的情况下，SPD 应能承受预期通过它们的雷电流而不损坏并能箝制电涌电压和分走电涌电流。
- c. 在电涌电流通过后，SPD 应迅速恢复到高阻状态，切断可能经 SPD 流到 PE 线的工频续流。

注 1: 如果 SPD 的 U_c 值选低了，在某些地区因工频电压波动较大，可能出现 SPD 误动作并导致剩余电流动作保护器 (RCD) 误动作而造成断电事故。如将 U_c 值选高，相应的 U_p 值也会偏高，对设备保护不利。

注 2: SPD 如不能承受预期通过的雷电流 (即 I_{imp} 、 I_n 或 U_{OC} 选择偏低)，则可能发生热崩溃，不能起保护作用，还可能引发火灾事故。

注 3: SPD 两端连接导线过长时，导线感应电压将使有效的电压保护水平 $U_{p(f)}$ 提高，当 $U_{p(f)}$ 超过 $0.8U_w$ 时起不到保护作用。

注 4: 使用两组 (或以上) SPD 时，如达不到能量配合，其中一组 SPD 会产生盲点，致使另一组 SPD 承受大部分的雷电流而损坏，同样不能达到有效的保护目的。

注 5: 当电涌电流通过后，SPD 如不能迅速恢复高阻状态，热脱扣装置不能立即动作时，如 SPD 的前端没有后备过电流保护装置，可能会造成低压电气系统运行中断及电气火灾。

注 6: 在 TT 系统中 10kV 经小电阻接地供电网中，如不采用“3+1”的安装模式，SPD 可能因通过长

时间的暂时过电压而烧毁，也会引起间接接触电击危险。

8.2 SPD 的安装模式

8.2.1 交流系统中 SPD 安装模式

表 11 给出了 SPD 在低压交流配电系统中的安装（连接）模式。

表 11-按系统特征确定的电涌保护器（SPD）的连接

电涌保护器接于	电涌保护器安装点的系统型式							
	TT 系统		TN-C 系统	TN-S 系统		引出中性线的 IT 系统		不引出中性线的 IT 系统
	装设依据			装设依据		装设依据		
	接线形式 1	接线形式 2		接线形式 1	接线形式 2	接线形式 1	接线形式 2	
每一相线和中性线间	+	●	不适用	+	●	+	●	不适用
每一相线和 PE 线间	●	不适用	不适用	●	不适用	●	不适用	●
中性线和 PE 线间	●	●	不适用	●	●	●	●	不适用
每一相线和 PEN 线间	不适用	不适用	●	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用
相线间（L-L 间）	+	+	+	+	+	+	+	+

●：强制规定装设电涌保护器
+：需要时可增设电涌保护器

接线形式 1：接在每一相线（和中性线）与总接地端子或总保护线之间。

接线形式 2：接在每一相线与中性线之间和接在中性线与总保护端子或保护线之间，（对三相系统可称为“3+1”模式，对单相系统可称“1+1”模式。）

注：接线形式取决于受保护设备的类型，如果设备不接地则 L（或 N）线对 PE 线间就不需要安 SPD，而 L-N 之间的 SPD 则是需要的。

SPD 安装在 TN、TT 和 IT 系统中的安装示意图见图 10~图 14。

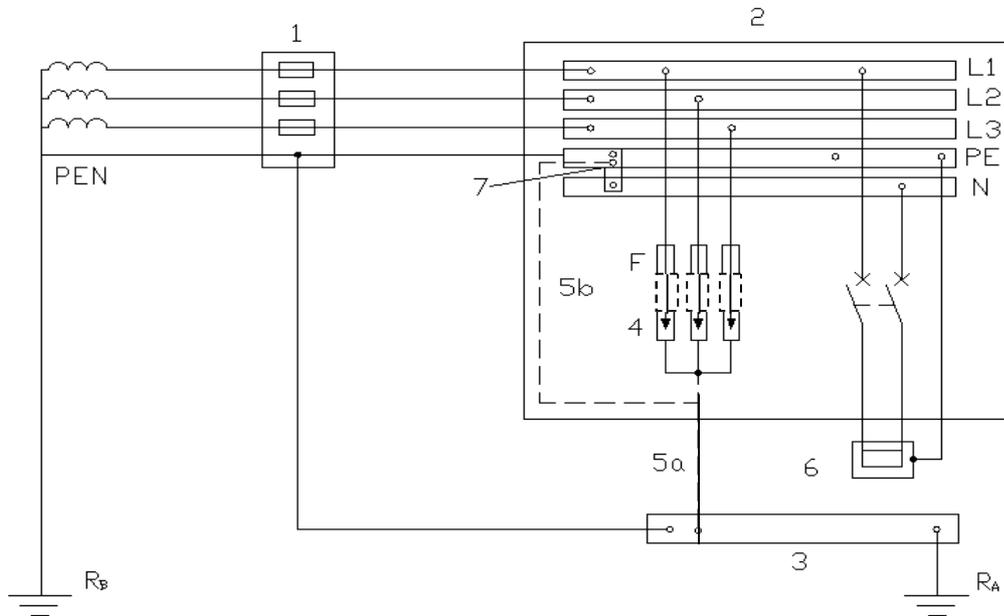


图 10 TN 系统中电涌保护器的安装

- 1 装置的电源
- 2 配电盘
- 3 总接地端或总接地连接带
- 4 电涌保护器(SPD)
- 5 电涌保护器的接地连接，5a 或 5b

- 6 需要保护的设备
- 7 PE 与 N 线的连接带
- F 保护电涌保护器推荐的熔丝、断路器或剩余电流保护器
- R_A 本装置的接地电阻
- R_B 供电系统的接地电阻

注：当采用 TN-C-S 或 TN-S 系统时，在 N 与 PE 线连接处电涌保护器用三个，在其以后 N 与 PE 线分开安装电涌保护器时用四个，即在 N 与 PE 线间增加一个，见图 14， $U_c \geq 1.15U_0$ 。

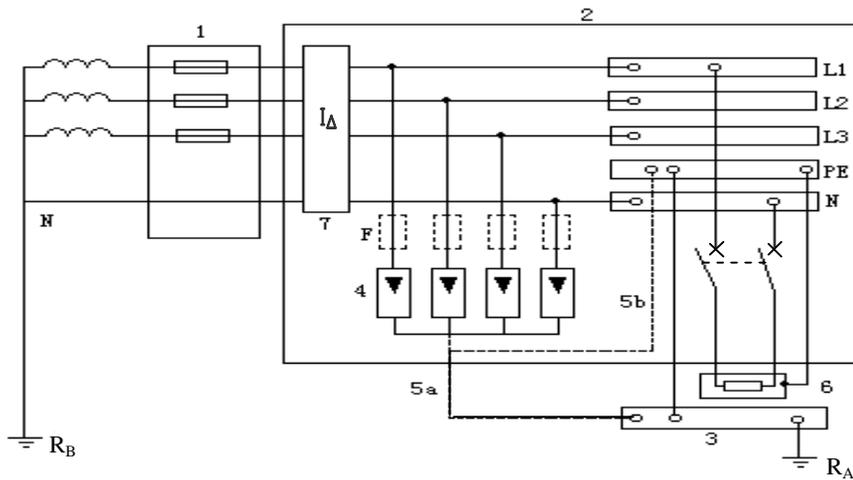


图 11 TT 系统中电涌保护器的安装 (SPD 在 RCD 负荷侧)

- 1 装置的电源
- 2 配电盘
- 3 总接地端或总接地连接带
- 4 电涌保护器 (SPD)
- 5 电涌保护器的接地连接，5a 或 5b
- 6 需要保护的设备
- 7 剩余电流保护器，应考虑通雷电流的能力
- F 保护电涌保护器推荐的熔丝、断路器或剩余电流保护器
- R_A 本装置的接地电阻
- R_B 供电系统的接地电阻

注：在 10KV 高压电网采用不接地系统以及采用经小电阻接地系统、但是供电变压器外壳与低压系统中性点为分开独立的接地装置时，应在三个相线、N 线与 PE 线之间安装四个 SPD，SPD 的 $U_c \geq 1.55U_0$ 。

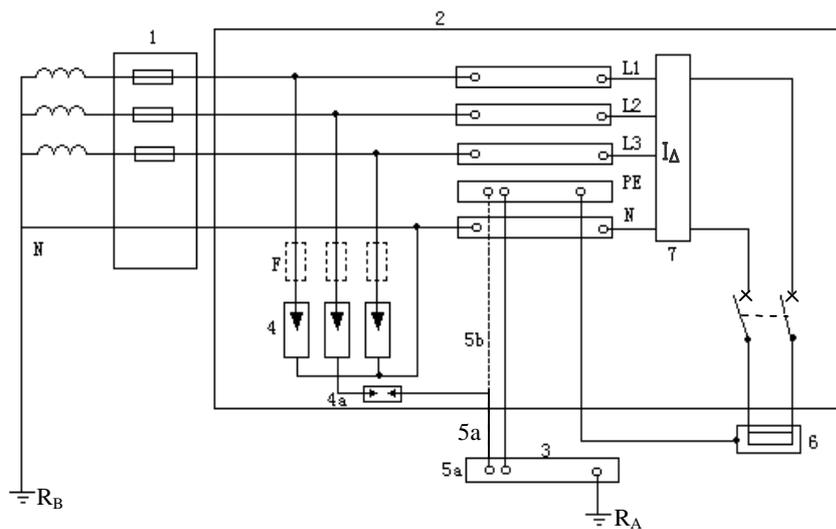


图 12 TT 系统中电涌保护器的安装 (SPD 在 RCD 电源侧)

- 1 装置的电源
- 2 配电盘
- 3 总接地端或总接地连接带
- 4 电涌保护器 (SPD); 4a 开关型电涌保护器 (如放电间隙)
- 5 电涌保护器的接地连接, 5a 或 5b
- 6 需要保护的的设备
- 7 剩余电流保护器
- F 保护电涌保护器推荐的熔丝、断路器或剩余电流保护器
- R_A 本装置的接地电阻
- R_B 供电系统的接地电阻

注: 在高压系统采用小电阻接地和供电变压器外壳、低压系统中性点合用同一接地装置以及切断短路的时间小于或等于 5s 时, 应将三个相线 SPD 先接于中性线上, 再经一放电间隙接于 PE 线上。放电间隙的作用是在 1200V 的高压接地故障过电压 (U_f) 情况下阻止 SPD 的导通, 放电间隙的泄放电流应不小于三个相线 SPD 额定泄放电流之和, 相线与中性线之间的 SPD 的 $U_c \geq 1.15U_0$ 。但是在此情况下由于雷电残压的增大, 很难保护其后的敏感电子设备, 不建议采用。

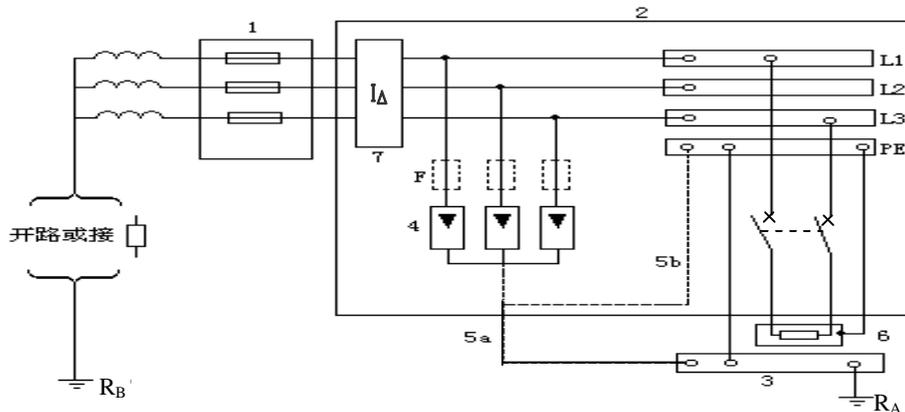


图 13 无中性线配出的 IT 系统中电涌保护器的安装

- 1 装置的电源
- 2 配电盘
- 3 总接地端或总接地连接带
- 4 电涌保护器 (SPD)
- 5 电涌保护器的接地连接, 5a 或 5b
- 6 需要保护的的设备
- 7 剩余电流保护器
- F 保护电涌保护器推荐的熔丝、断路器或剩余电流保护器
- R_A 本装置的接地电阻
- R_B 供电系统的接地电阻

注: 该 IT 系统中 $U_c \geq 1.15\sqrt{3}U_0$ (即 $1.15U$, U 为线间电压, 我国为 380V)。关于配出中性线的 IT 系统中 SPD 的安装可参见图 11 或图 12。

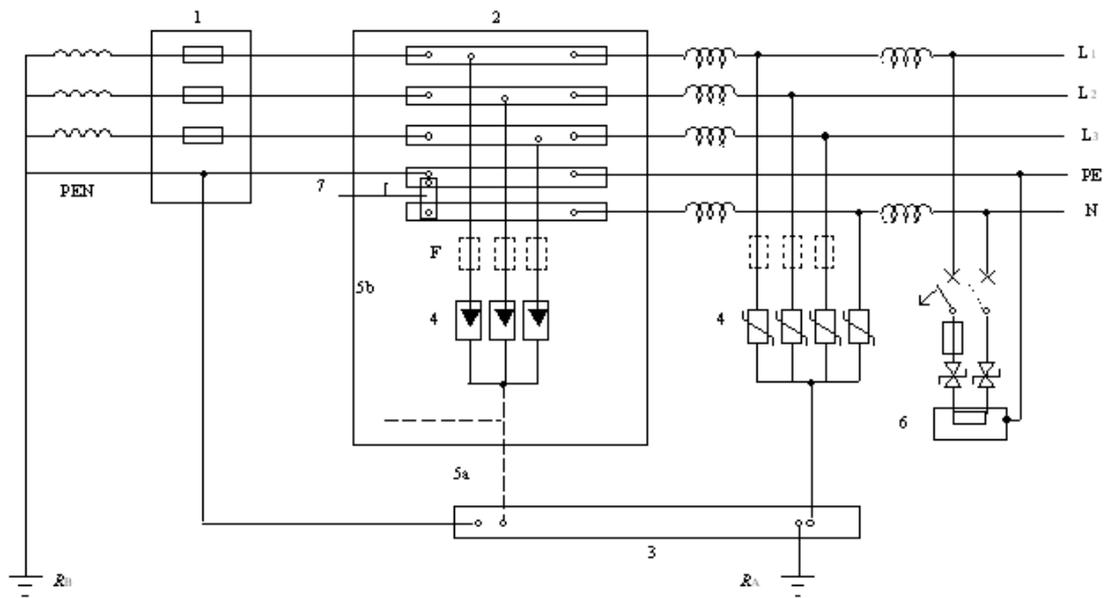


图 14 在 TN-C-S 系统中 SPD 的安装示例

8.2.2 直流系统中 SPD 安装模式

直流配电系统中 SPD 可安装在极间（在接地系统和非接地系统中）或极对地（在非接地系统中）之间。如系统配有中间导体，也可安装在极对中间导体和地对中间导体之间。关于直流系统中 SPD 的安装参见本部分附录 D（资料性附录）。

8.3 SPD 两端连接导线和连接要求

8.3.1 导线要求

各种分类试验的 SPD 的连接导线最小截面积要求见表 12。

表 12 各种 SPD 的连接导线最小截面 (mm²)

SPD 试验类型	铜导线的最小截面
I 级	16
II 级	10
III 级	4

注：如无相应规格的导线，最小截面应大于表内的尺寸。铜导线系列优选值见 QX10.1 的表 7。

8.3.2 连接要求

SPD 两端连接导线应短且直，避免因导线过长而感应出较高的感应电压。SPD 连接的进一步信息见本部分附录 C（资料性附录）。

8.4 两组（或以上）SPD 的配合

使用两组或以上的 SPD 对受保护设备进行保护时，必须考虑 SPD 间的配合问题。

对于全部电涌电流而言，某一位置安装的 SPD 如能承受预期通过它们的雷电流，则达到了能量配合的目的。

在开关型和限压型 SPD 之间，其连线长度不应小于 10m；在限压型与限压型 SPD 之间，其连线长度不应小于 5m。如不能达到 10m 或 5m 的要求，应在连线之间加电感以退耦。

注：对将放电间隙和压敏电阻并联组合在一起的新型触发式 SPD，若已有退耦元件，则不必另加电感退耦。

关于 SPD 组之间的配合的进一步信息参见本部分附录 E（资料性附录）。

8.5 SPD 的寿命和失效保护模式

8.5.1 SPD 的寿命

SPD 的寿命是一随机值。某个 SPD 安装在一少雷区，可能在数年内不会受到电涌的冲击，则寿命可达数年之久。另一 SPD 在安装后几秒钟内便遭到大于它的最大预期通过的电涌电流冲击，其 I_n （或 I_{imp} 、 U_{oc} ）值无法承受而使 SPD 损坏，其寿命仅为几秒钟。

因此，选择和安装 SPD 时需考虑的是：

- 在型式试验中，SPD 应通过老化试验或最大动作负载试验；
- 在雷击风险程度较大或受保护设备非常重要的情况下， I_{imp} （或 I_n 、 U_{oc} ）值应选择的偏大一些；
- 要充分考虑到 SPD 失效时的保护措施。

8.5.2 失效保护模式

SPD 的失效模式在 QX10.1 中第 3.71 条中定义，由于组成 SPD 的非线性元件特征和生产厂家工艺不同，主要可分为开路和短路两种形式。

- 开路：SPD 与并联的被保护线路脱离。如果不能及时发现 SPD 已失效并及时更换 SPD，则受保护线路和设备不能由其保护，因此 SPD 应带状态指示器。
- 短路：SPD 由高阻状态变为低阻。如果不能及时切断工频续流，工频电流会流入 PE 线，造成间接接触电击事故，同时也可能致使供电中断，因此需要有 RCD 或后备过电流保护装置（如熔丝、断路器等）进行保护。

8.6 SPD 与其他设备的配合

SPD 应与其他设备（含 SPD 本身的辅助装置）达到配合。

8.6.1 与 RCD 的配合

I_c 是在 SPD 上加上 U_c 电压时流过的电流，称持续工作电流。它不应导致人身安全事故（间接接触电击）以及对 RCD 正常工作的干扰。在安装 RCD 的时候， I_c 值应低于 RCD 上标注的额定动作电流值（ $I_{\Delta n}$ ）的 33%。

RCD 应能承受 3kA（8/20 μ s）的电涌而不动作。当 RCD 与 SPD 配合使用时，RCD 应能承受 SPD I_n 值的电涌而不动作。GB 16916.1 中不带过电流保护的剩余电流动作断路器（RCCB）的 S 型和 GB16917.1 中带有过电流保护的剩余电流动作断路器（RCBO）的 S 型能满足以上要求。

注：RCD 可根据出现剩余电流时延时分为一般用途型（没有延时）和具有选择性的 S 型（有延时）。

当 SPD 为开关型时（如放电间隙），其前端一般不需要安装 RCD，但除非是开关型 SPD 具有自动灭弧功能，其上游应有 RCD 或过电流保护装置配合。在 TT 系统中，RCD 的位置与 SPD 的安装方法见图 11 和图 12。

8.6.2 与过电流保护装置的配合

为防止 SPD 失效故障，SPD 前端应安装熔丝或断路器等过电流保护装置。其前端过电流保护装置的保险电流值与主电路上过电流保护装置的保险电流值不宜小于 1:1.6。为实现优先保证供电连续性或优先保证保护连续性以及兼顾供电连续性和保护连续性的图例见本部分附录 C（资料性附录）。

8.6.3 脱离器

一个单独的脱离器可以具备三种基本脱离功能（过热保护、短路保护和间接接触防护），或者有必要选择 1~3 个脱离器。

它们可以安装于 SPD 内部或外部。某些功能可以通过系统的后备过电流保护装置来实现，那么就可以位于与 SPD 有一定距离的地方。脱离器是安在 SPD 的内部还是与干线相连，取决于与过电流保护装置的配合，以及系统对保护的连续性或对供电连续性的需求，见本部分附录 C（资料性附录）。

可能需要另外一些脱离器功能，例如，在暂时过电压非常高的情况下。

脱离器可以是熔丝、断路器、RCD 或具有此功能的装置。

8.6.4 状态指示器

状态指示器与脱离器相连接，为用户提供有关 SPD 劣化的信息，显示其是否依照设计运行或失效。可以用它给出更换 SPD 的警报。有些状态指示器是固定的，有些是可临时安置的。它们可以提供遥测信号、光或声音警报。

附录 A
(资料性附录)
低压交流配电系统按带电导体根数分类

A.1 单相两线系统

供电给单相电器的一根相线 (L) 和一根中性线 (N) 的系统, 见图 A.1a 所示, 其中有单独引出一根保护接地线 (PE) 的也属单相两线系统, 见图 A.1b 所示。

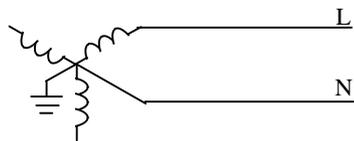


图 A.1a 单相两线系统

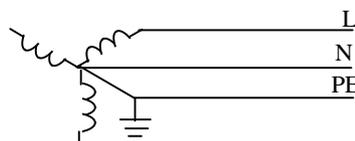


图 A.1b 带 PE 线的单相两线系统

A.2 单相三线系统

单相降压变压器二次绕组电压为 240V, 自绕组的中点抽出一接地的中线, 从而引出 240V 和 120V 两种电压, 其中 240V 电压供电热等大负荷用电, 120V 电压供照明和小家用电器用电。这一系统属单相系统, 但有三根带电导体, 在某些发达国家 (如美国) 应用较多, 在我国一些宾馆的卫生间中有 110V/220V 的电源插座, 属此系统。见图 A.2 所示。

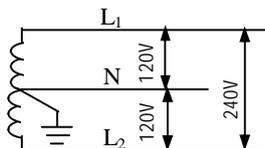


图 A.2 单相三线系统

A.3 两相三线系统

为减少线路电压降自三相变压器引出两根相线 (L_1 、 L_2) 和一根中性线 (N) 给厂区或庭园照明供电的配电系统。见图 A.3 所示。

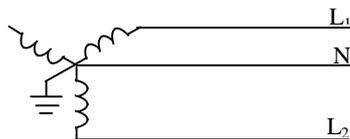


图 A.3 两相三线系统

A.4 两相五线系统

由两个相位差 90° , 中点相连的单相电源绕组的引出线构成, 它有四根相线 (L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4) 和一根中性线 (N) 共五根带电导体。这一系统国外曾经使用过, 现在很少应用, 见图 A.4 所示。

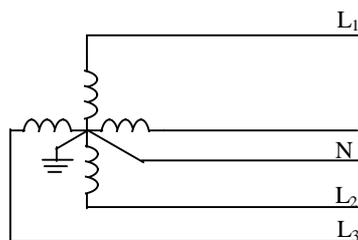


图 A.4 两相五线系统

A.5 三相三线系统

由变压器引出三根相线 (L_1 、 L_2 、 L_3)，主要用于为三相电动机供电的系统。这一系统除在变压器处直接接地外，形式上同不配出中性线的 IT 系统，见图 A.5 和本部分正文中图 5。

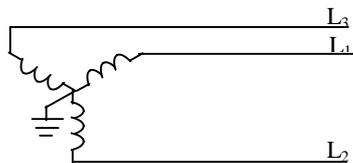


图 A.5 三相三线系统

A.6 三相四线系统

具有三根相线 (L_1 、 L_2 、 L_3) 和一根中性线 (N) 或一根中性保护线 (PEN) 的配电系统。这一系统可能有单独配出的 PE 线 (TN-S)，也可能 N 与 PE 共用一根导体 (TN-C)，是目前国际上和我国广泛应用的配电系统。见图 A.6 和本部分正文中图 1、2、3、4 及图 6。

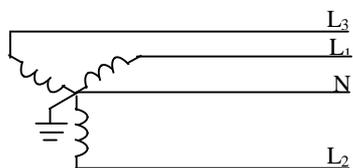


图 A.6 三相四线系统

附录 B
(资料性附录)
低压电气系统中的三种电涌过电压

B.1 雷电冲击过电压

B.1.1 直击雷

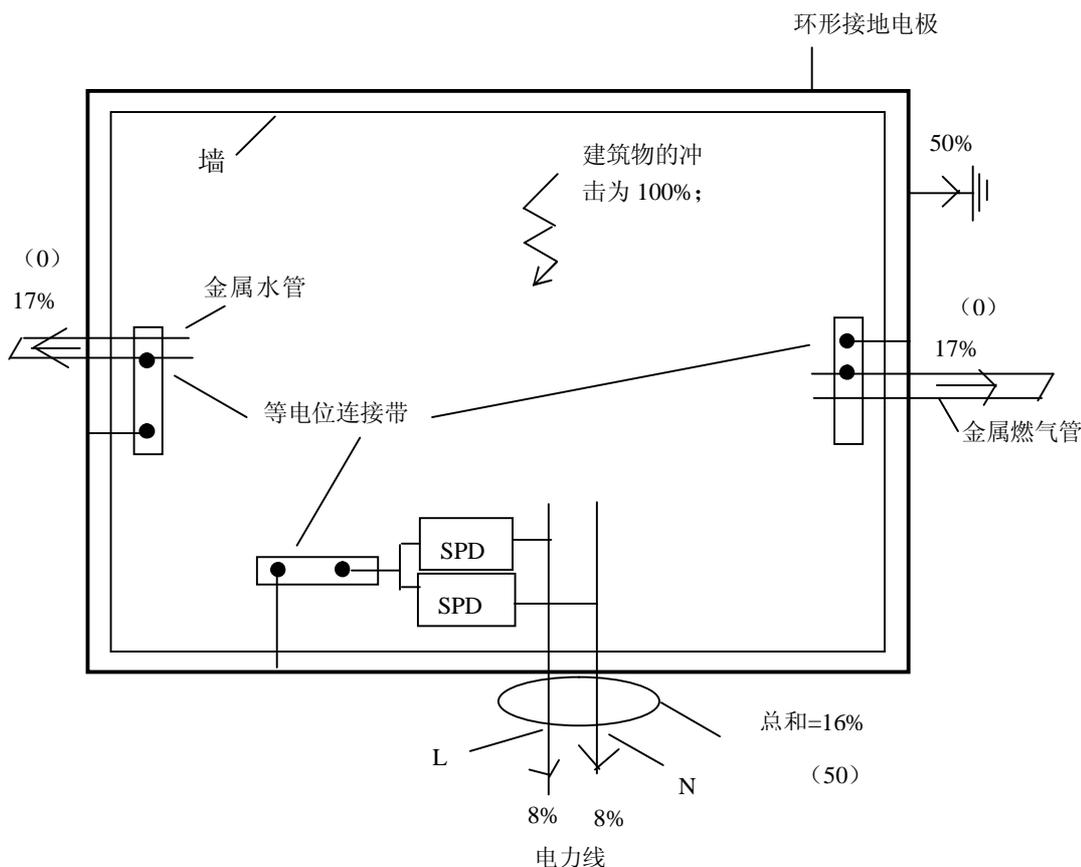
迄今为止尚无一种方法和设备能阻止雷电的产生，也无法阻止雷电闪击到建筑物或建筑物邻近的大地以及各种进入建筑物的公共设施（如电力和通信线缆，各种金属管线）。本部分 6.2 条对云闪和云地闪（直击雷）进行了定义说明，并仅对直击雷的损害来源及其对建筑物和电力及通信线路的损害类型和损失类型进行了归纳。

在雷电闪击中可能出现短时首次雷击、后续雷击和长时间雷击。对平原和低建筑物的典型向下闪击有四种组合，对高度为 100m 的高层建筑物的典型的向上闪击有五种组合。上述内容及雷电流参量和电荷量（Q）、单位能量（W/R）的近似计算公式见 GB 50057 中的附录六及条文说明。

决定雷击危险程度的最重要的数据是建筑物所在地雷击大地的年平均密度（ N_g ）， N_g 可由当地雷暴日水平（又称年平均雷暴日） N_k （在 GB 50057 中用 T_d 表示）得到大致的估计，我国标准 GB 50057 规定 $N_g=0.024T_d^{1.3}$ ，IEC 标准中使用 $N_g=0.04N_k^{1.25}$ 来估算（以 T_d 为 40 天计， N_g 分别为 2.9 和 4.0，GB 50057 方法偏低）。闪电定位仪可提供相当精确的 N_g 值。

B.1.2 建筑物遭受直击雷时雷电流的分配

GB 50057 中第 6.3.4 条规定了建筑物遭受直击雷时（ S_1 型）进入建筑物的各种设施之间的雷电流分配原则，图 B.1 对一有金属水管、金属燃气管和供电线（TT 系统，仅有 L 和 N 线）进入的建筑物的雷电流分配做了示例。



注：括号中的数值适用于无金属管时，此时电力线分配总和为 50%。

图 B.1— 雷电流分配到内部设备的示例（TT 系统）

B.1.3 雷电直击 LV 供配电网时引起的过电压

由于雷电流通道的有效阻抗很高，因此可以认为雷电流是一个理想的电流源。因此，所产生的过电压由雷电流的瞬态有效阻抗的大小决定。

LV 供配电线路遭受直击雷（S₃型），第一时间的电压（U）取决于导线的特性阻抗（电涌阻抗）和雷电流（I）。由于雷电流流向两个不同的方向，电涌电压 U 可用下式表达：

$$U=I \times 0.5I_{\text{peak}}$$

如 I_{peak} 为 10kA，I 为 400Ω 时，U 为 2000kV，在此高压状态下，通常会发生导线对地（通过铁横担和金属杆塔）的闪络，因此导线上过电压 U 会下降，下降的程度取决于接地电阻值的大小，在阻抗降至 10Ω 时，导线上的 U 为 100kV。这是本部分中 7.1.2.1 条规定的依据。

在架空线和电缆混组的配电网中，由于电缆的阻抗偏低，因而产生的过电压值也较低。U 值降低的幅度取决于电流持续的时间和供配电系统对地的电容大小。一般来说，U 值虽然有所下降，但仍可能超出设备的绝缘耐受水平，因此直击雷仍会造成损坏。

B.1.4 雷击在 LV 供配电网邻近区域时感应出的过电压

LV 供配电线路邻近区域遭受直击雷时（S₄型），雷电产生的磁场变化会使架空线上感应产生过电压，电涌电压 U 可用下式表达：

$$U=30k \cdot (h/d) \cdot I$$

式中：I——雷电流

h——导线距地面的高度

d——落雷点距导线的水平距离

k——修正系数，取决于雷电通道中回击的速度，k 值取 1.0~1.3。

如雷电流 I_{peak} 值为 30kA，h 为 5m，d 为 1km，U 值会超过 5kV。当 d 达 10km 时，100kA 的雷电流会产生 1.8kV 的感应电压。

B.1.5 对埋地电缆的雷击

埋地电缆（含采取了防雷和接地措施的具有接地金属屏蔽的悬挂绝缘导体电缆）一般不会受到雷电直击，但如有下列因素之一时，仍推荐选用 SPD 提供防护：

- 电缆附近有防直击雷的接闪器及接地装置时，有可能发生反击；
- 电缆的长度不足以提供网络的架空线到装置之间的距离（衰减）；
- 连接到装置的变压器的中压（MV）侧的架空线易出现高的雷电过电压；
- 在土壤电阻率较高的地区埋地电缆可能遭受直击雷；
- 由埋地电缆供电的建筑物的规模（长、宽、高）决定，该建筑物遭受直击雷的概率较大；入户线受直击雷的影响到埋地电缆；
- 同时存在着其他架空设备。

B.2 操作过电压

B.2.1 概述

在低压电气系统中任何开关动作、故障开始，中断等，经常会伴随着暂时过电压的产生。系统中发生的突变将会引起高频阻尼振荡（由网络的谐振频率决定），直到系统重新稳定到一个新的稳定状态。一般将这种过电压称为操作（投切、开关）过电压，它属于人为的故意行为产生的过电压。

从峰值电流、电压和持续时间方面来说，这些威胁通常低于雷电的威胁。但是，在某些情况下，尤其是在建筑物内部或靠近操作过电压源的地方，其威胁可能比雷电流所产生的威胁大。了解这些电涌的能量是必要的，目的是选择适当的 SPD。操作过电压的持续时间（包括故障和熔丝动作时间）要比雷电电涌的持续时间长得多。

操作过电压的大小取决于很多参数，例如回路类型，操作的种类（关、开、重燃）、负载、断路器或熔丝。

操作产生的振荡频率取决于系统的特性和谐振现象。在这种情况下，可能产生非常高的过电压。通常与系统的工频发生谐振的概率较低。但是，如果系统开关部分特有的频率接近系统中一个或多个谐振频率，可能会出现瞬时谐振。

操作过电压的典型波形取决于低压装置的响应。这在大多数情况下会导致鸣震波。正常情况下频率在每微秒数百千赫。通常最大上升速率为每微秒数千伏。电涌的持续时间范围很大。如果不包括熔断器动作导致的过电压，典型的持续时间（半峰值时间）从 $1\mu\text{s}$ 到 $50\mu\text{s}$ 。统计评估显示，持续时间较长（大于 $100\mu\text{s}$ ）和高幅值的电涌产生概率较小。

B.2.2 断路器和开关操作

断路器和开关在所有低压电气装置中广泛使用，以便在过载或短路的情况下切断电气设备或是通过开关控制设备的运行来实现对电气设备进行保护和控制。开关操作发生的频率取决于使用的场合，在工业环境中频率较高，在家庭情况下频率较低。

阻性负载情况下开关电流在电气设备的额定电流范围内。对于使用开关模式进行供电的设备，开关电流比额定电流高得多。例如，对于 100W 的电视机，额定电流是 0.4A ，而涌入的开关电流大约有 20A ，高达 50 倍。

手动或电动的机械开关设备在每次开关过程中都产生电弧。高频振荡产生自开关环境下自感和电容的相互作用使电压发生突变。该振荡叠加在线路导体之间以及线路导体与地之间的电压上，总的电压威胁电气设备的绝缘和暴露的导电部分以及其他回路。与通过公共配电网传输至用户设备的过电压相比，开关瞬态产生自用户设备内部，通过断路器和开关几乎无衰减的影响电气设备，因此这些暂态的振幅相对较大。

B.2.2.1 用户室内的断路器和开关操作

与合闸（投）相比，分闸（切）会产生更高幅值的过电压。在切断过程中，负载侧的开关电涌比电源侧的开关电涌具有较大振幅和能量。此类设备的设计是主要问题，尤其是其绝缘方面的设计。如果有与其并联的其他设备，这些设备也会受到威胁。对于整个系统以及连接于其上的设备来说电源侧的过电压比负载侧的过电压更为重要。

B.2.2.2 供电系统（低压和高压）中的断路器和开关操作

威胁电气设备的过电压在每一个供电系统中都能观测到。在埋地供电系统中，几乎所有的过电压都产生自人为操作。

在高压和低压装置中，与电源并联安装的自感型设备，例如变压器、自感线圈，接触器线圈和继电器，其操作能够导致振幅达数千伏的过电压。相同的现象存在于有纵向电感线圈中，例如导体线圈和纵向阻抗线圈，或者由于导线的自感，可导致供电系统自身被切断。

在电源侧，操作过电压同样产生开关操作，旋转电动机的电刷电弧，电机或变压器的负载突然降低以及用于功率因数补偿电容器组的动作。

在极少数情况下，这种过电压的频率和能量可能显著高于雷电过电压。

由于低压供电操作所导致的过电压能够达到数千伏，尽管在一定条件下，过电压值可以通过措施加以降低。在安装了通过保护装置控制过电压的供电系统中，通常在低压用户装置内预计最大幅值不会超过 6kV 。

与操作过电压相对应的另一个现象是高压供电系统中出现短路和接地故障。接地故障能导致在无故障线路导体中产生相线到地过电压，其值在线电压范围内。而且，在这种情况下过电压同样出现，这样的过电压将从高压供电系统被传输到低压供电系统。

B.2.3 熔断器（限流熔丝）

为了防护过电流并断开短路电流，在配电系统和电气装置中广泛使用熔断器。如果熔断器动作，例如，在配电系统中断开短路的回路，该动作产生了一个近似三角波的过电压，且具有相对较低的频率。由于存在接地中性线或在 IT 系统的情况下存在接地电容，过电压可能在系统的相线之间产生，也在相线和保护接地导体之间产生。这样，该过电压同样威胁暴露导电部分及其他回路的绝缘。当然，与运行电流的开关所导致的过电压相比，它并不经常出现。该过电压同样通过母线传输到同一配电系统供电的其他用电设备。

与操作所导致的其他电涌相比，熔断器动作所产生的电涌出现频率较低。但是，在切断短路回路的情况下，能产生非常强烈的电涌过电压。这主要受短路电流上升速率、熔断器的特性及其额定电流以及回路电感的影响。

通过安装在母线附近的熔断器切断配电系统馈线中的短路电流尤为重要，因为熔断器动

作所产生的过电压影响所有连接到同一母线上的用电设备。实际的统计情况表明在公共低压供电系统中，这样的故障可能极少发生。但是，在考虑到工业配电系统时，这种类型的故障的发生就并非那么少见了。

B.3 暂时过电压 U_{TOV}

B.3.1 概述

安装在低压电气系统中的 SPD 在选择时为实现有效的箱压， U_c 值会选择至最低值（如 $U_c \geq 1.15U_0$ 或 $U_c \geq 1.55U_0$ ），此值一般不会超过 350V (r.m.s)。在低压电气系统中的 SPD 常常因系统中出现的暂时过电压 U_{TOV} 超过 U_c 值而动作，并且常因不能承受较长时间的暂时过电压而损坏，因此要求 SPD 在各种不同的暂时过电压 U_{TOV} 状态下应具有不同的暂时过电压耐受值 U_T ，表 B.1 给出了最大 TOV 值，其中涉及到暂时过电压的持续时间和 U_{TOV} 的最大值（幅值）。

通常引发最严重的暂时过电压的原因有如下四种：

- 高压系统 (HV) 与地之间的故障；
- 低压 (LV) TN 和 TT 系统中的中性线 (N 线) 断开；
- 低压 (LV) IT 系统的意外接地；
- 低压 (LV) 电气系统中发生短路。

本部分中 7.3.3 条和表 10 对 SPD 的 U_T 最小值提出了总的要求，在不同的原因和配电网不同接地型式，SPD 安装不同的位置上 U_T 值分别有不同的要求。本附录以下内容提供了相关资料。

B.3.2 U_{TOV} 标准值

GB16895.11 给出了低压电网中预期的 U_{TOV} 的最大值，见表 B.1。

表 B.1 –GB16895.11 给出的最大 TOV 值

U_{TOV} 的发生位置	电网接地系统	$U_{TOV,HV}$ 的最大值
相线与地之间	TT, IT	持续时间 > 5s 时, $U_0 + 250V$
		持续时间 ≤ 5s 时, $U_0 + 1200V$
中性线与地之间	TT, IT	持续时间 > 5s 时, 250V
		持续时间 ≤ 5s 时, 1200V
注：以上值是与高压电网故障有关的极限值。		
U_{TOV} 的发生位置	电网接地系统	U_{TOV} 的最大值
相线与中性线之间	TT 和 TN	$\sqrt{3} \times U_0$
注：以上值与低压系统中中性线断线（断零）有关。		
相线与地之间	IT 系统（TT 系统见注 1）	$\sqrt{3} \times U_0$
注：以上值与低压系统中，相线意外的接地有关。		
相线与中性线之间	TT, IT 和 TN	持续时间 > 5s 时, $1.45 \times U_0$
注：以上值与相线和中性线之间的短路有关。		
注 1 已经证明了更高的 TOV 也可以在 TT 系统中出现，持续时间 ≤ 5s。		
注 2 在变压器处的最大 TOV 值可能与表中所列不同（或高或低）。		
注 3 选择 SPD 时不考虑中性线断线（断零）。		

B.3.3 LV 系统中 U_{TOV} 标称值的说明

低压系统中的故障产生的暂时过电压可以通过两个因素定义：

- K_1 是电力系统的最大持续电压 U_{CS} 与系统标称电压 U_0 的比值。 K_1 通常在 1.05 到 1.1 的范围内。这包括了电压水平的正常调节。

$$U_{cs} = K_1 \times U_0 \quad (K \text{ 多取 } 1.1)$$

- K_2 是系统最大过电压与 U_{cs} 之比。在三相低压系统中出现故障时，无故障的相上的电压

可从大约 1.25 倍升高到理论上的 $\sqrt{3}$ 倍。

注 1: 在单相三线(分相)系统中 k_2 可高达 2。

全部暂时过电压被表示为:

$$U_{TOV, LV} = k_1 \times k_2 \times U_0 = k_2 \times U_{cs}$$

注 2: 暂时过电压通常由事故造成例如低压配电系统的故障, 电容器动作和发电机停机及启动等事件造成。这些过电压持续时间很短。那些由三相供电系统故障造成的暂时过电压存在的时间从 0.05s 直至 5s。中性线连接不好的单相发电机启动能导致额外过电压, 通常持续时间达 5s。电容器开关和电压调整很少产生持续时间长于 5s 的过电压。因此, 本部分中选取的暂时过电压持续时间为 0.05s 到 5s。

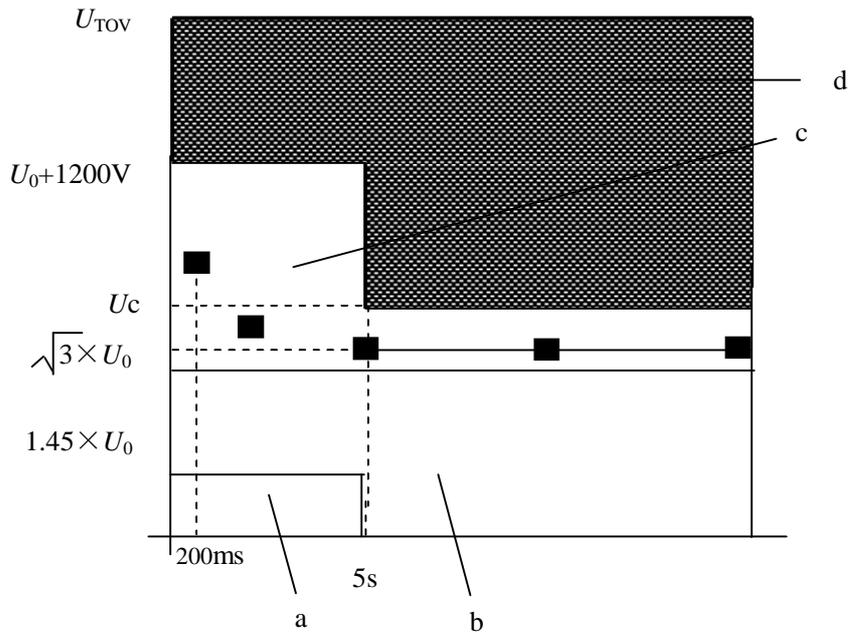
注 3: 在某些网络中, 需要考虑由高压系统故障所导致的 $U_0 + 1200V$ 的短时(小于 5s)暂时过电压 ($U_{TOV, HV}$) (见 GB16895.11)。如此高的电压值可能导致 SPD 故障。在这种情况下, 应进行适当的试验以确保该故障不会对人身、设备和装置造成任何灾难。 $U_0 + 1200V$ 是最大持续时间为 5s 的暂时过电压的最大值。根据低压装置和高压系统的接地系统类型, 该值可能存在, 也可能不存在。另外, 持续时间长于 5s 的暂时过电压在 GB16895.11 中被定义, 且由于持续时间长也可能导致故障。

在本部分中, 由低压系统中的故障产生的 TOV 被称为 $U_{TOV, LV}$, 由高压系统中的故障产生的 TOV 被称为 $U_{TOV, HV}$ 。

在以上公式的基础上, 理论上可以画出电网中电压和 U_{TOV} 持续时间的曲线。实际上电网中 U_{TOV} 的实际值, 尤其是在安装了 SPD 的地方, 不总是已知的。在这种情况下很难画出上述曲线, 因为仅知道很少的几个典型点。

通常仅知道标准化的最大值, 曲线可降低到某些点。对 SPD 选型具有特殊意义的时间值是 200ms 和 5s。

U_{TOV} 的最大标准化值见图 B.2。



注: a: 在 TT、IT 和 TN 系统中相线与中性线之间短路引起的 $\leq 5s$ 的 $U_{TOV, LV}$ 值域;

b: 在 IT 系统中相线意外接地故障时和在 TT、TN 系统中中性线断线故障时 $U_{TOV, LV}$ 的值域;

c: 在 HV 系统中的 TT 和 IT 系统的相线与地之间及中性线与地之间 $U_{TOV, HV}$ 的值域;

d: 未定义的区域。

■ SPD 的 U_r 值

图 B.2 U_{TOV} 最大标准化值示例

B.4 由高压系统和接地之间的故障所导致的低压系统中的暂时过电压 (TOV)

B.4.1 概述

我国 10kV 高压电网分为不接地系统和经小电阻接地系统, 在 10kV 不接地系统中, 当

高压系统发生接地故障时，由于故障电流 I_d 小，其在变电所接地电阻上产生的故障电压 U_f 甚小，对低压系统不会造成多少影响；在 10kV 经小电阻接地系统中，当高压系统发生接地故障时，由于故障电流 I_d 甚大，其在变电所接地电阻上产生的故障电压 U_f 很大，对低压系统会造成严重影响。

B.4.2 由于高压系统中接地故障而导致在低压装置中的设备所面临的可能威胁

B.4.2.1 10kV 不接地系统接地故障引起的过电压

由于历史上的原因我国建国以后 10kV 电网普遍采用不接地系统，即系统负荷端的外露导电部分作保护接地，而电源端带电导体是不接地的，当 10/0.38kV 变电所内发生 10kV 侧的接地故障时，故障电流 I_d 只能通过另两非故障相的对地电容返回电源。因架空线路对地电容很小，容抗很大，所以 I_d 值很小。如图 B.3 所示。按我国电力部门规范要求，此 I_d 值不得大于 20A，同时规定 10/0.38kV 变电所的接地电阻 R_B 不大于 4 Ω 。此 I_d 在 10/0.38kV 变电所的接地电阻 R_B 上产生故障压降 U_f 。为节约变电所建设投资，低压系统中性点的系统接地也接于 R_B 上，它将使低压系统对地电位升高而产生过电压，PE 对地电位也升高至 U_f 。当 I_d 和 R_B 都为最大值时 U_f 最大值不过 $20 \times 4 = 80V$ ，其实际值往往不大于接触电压限值 50V，因此出现如图 B.3 所示 10kV 侧接地故障时，加在低压系统（含相线、中性线）的故障电压甚小。

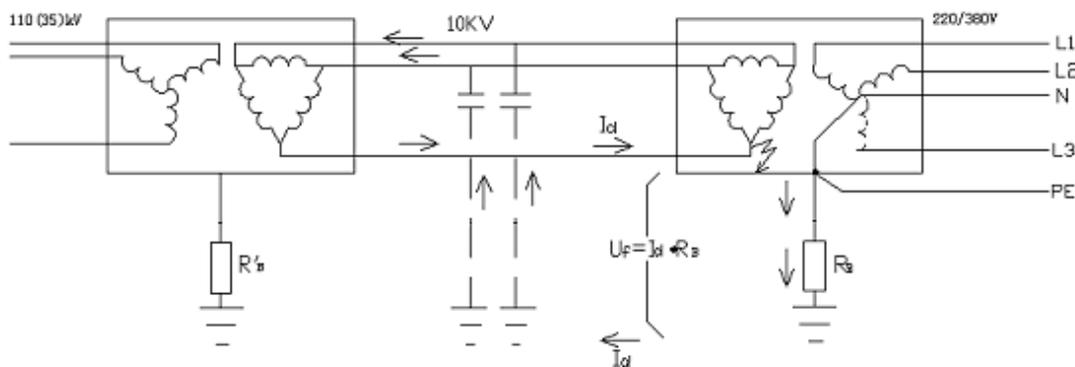


图 B.3 10KV 不接地系统内 I_d 值和 U_f 值均很小

B.4.2.2 10kV 经小电阻接地系统接地故障引起的过电压

随着我国城市用电负荷急剧增长，不得不在市区内用大量埋地电缆供电。由于埋地电缆对地电容电流的增大，城市 10kV 电网内接地故障电流因此大大超过 20A 的限值。单相接地故障电弧能量的增大使单相接地故障很快转化为相间短路，迫使 10kV 故障回路电源端断路器切断电源，不接地系统在发生一个接地故障后仍能保证供电不间断的优点不复存在，为此我国仿效发达国家的做法，将城市里这级电压的配电系统由不接地系统改为经小电阻接地系统。如图 B.4 所示。

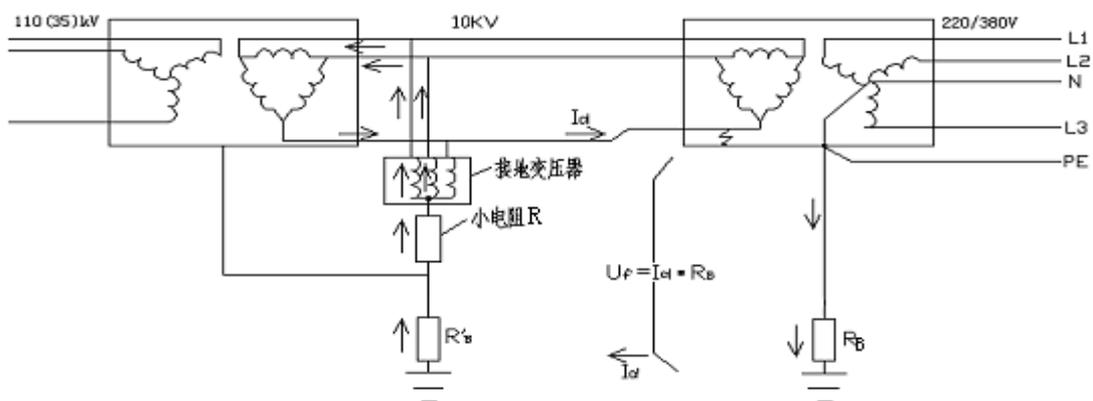


图 B.4 10KV 经小电阻接地系统内 I_d 值和 U_f 值均增大

从图 B.4 可以看出，采用小电阻接地系统后，在 10/0.38kV 变电所内高压侧发生接地故障时，接地故障电流 I_d 不再是微小的电容电流，它获得经图中 R_B 、 R'_B 和小电阻 R 返回电源的通路，这样 I_d 值可达数百安甚至千安。

10/0.38kV 变电所既是 10kV 系统的负荷端，同时也是低压系统的电源端，所以它是 10kV 系统和低压系统的转换点。变电所接地电阻 R_B 上的电压降 $U_f = I_d R_B$ 由于 I_d 的增大而增大，而低压系统中性点也通过 R_B 实现其系统接地，由于共用同一 R_B 接地极，此一上千伏的故障电压 U_f 将传导至低压系统（含相线、中性线、PE 线）引起对地暂时过电压。

B.4.2.3 由于高压系统接地故障导致的低压系统中的暂时过电压的值分析

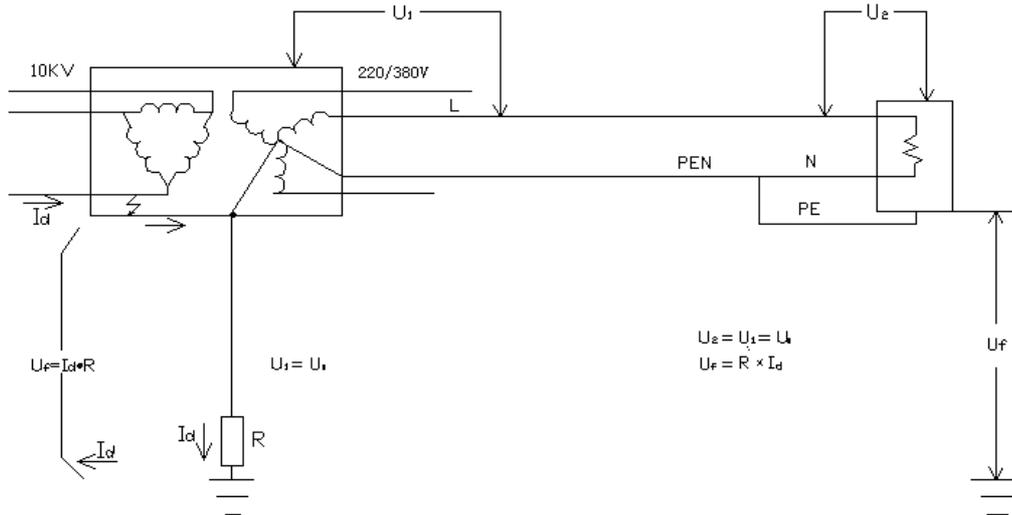


图 B.5 TN-C-S 系统

从图 B.5 中可见，高压接地故障造成的故障电压 U_f 加在低压系统的相线、中性线与 PE 线上，但它们之间的相对电压不变，由于该系统的 PE 线要在建筑物内参与等电位连接，所以建筑物内不会出现电位差。取 $U_c \geq 1.15U_0$ 。

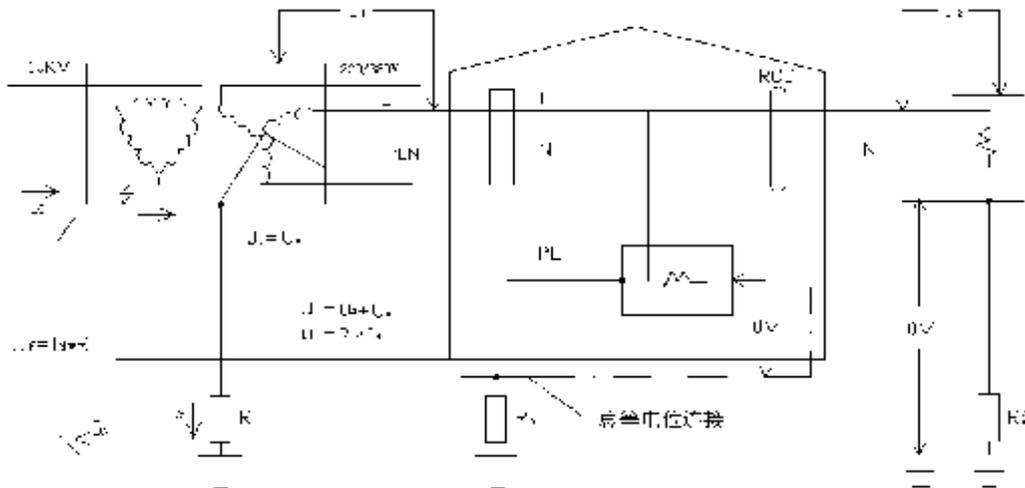


图 B.6 TN-C-S 系统（含户外部分的无总等电位连接设备）

从图 B.6 中无总等电位连接的户外部分（该部分实际是采用局部的 TT 系统） U_2 可以看出，配电系统的相线、中性线与用电设备外壳间的故障过电压为 U_f (1200V)，所以相线、中性线与用电设备外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应先在相线、中性线之间安装限压

型 SPD，取 $U_c \geq 1.15U_0$ ；中性线再经一开关型 SPD（如放电间隙）接于设备外壳上，开关型 SPD 的启动电压必须大于 1200V。或者相线与用电设备外壳、中性线与用电设备外壳之间安装限压型 SPD（ $U_c \geq 1.55U_0$ ），但必须使用适当的脱离装置。

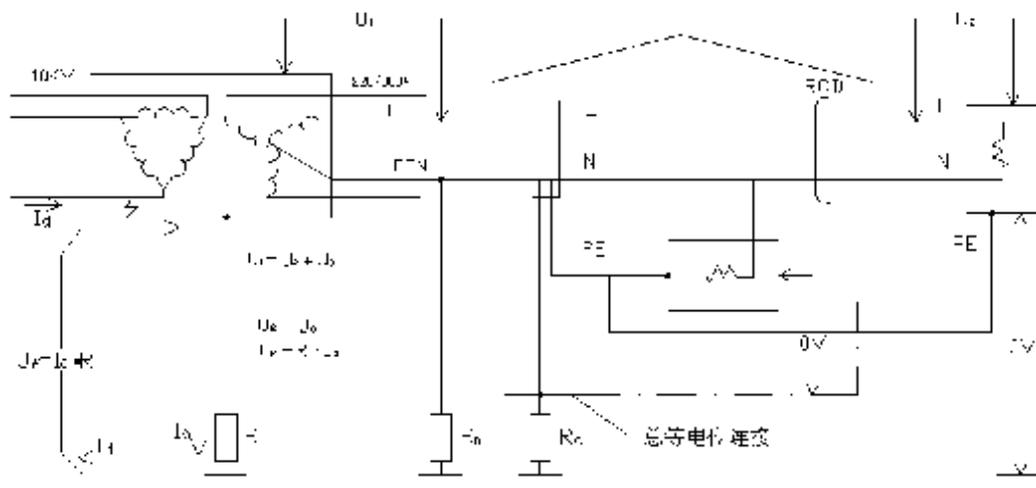


图 B.7 TN-C-S 系统（户外部分通过 PE 线实现与户内部分的连接）

从图 B.7 中变电所内低压系统端的 U_1 可以看出，低压配电系统的相线、中性线与配电柜外壳间的故障过电压为 U_f （1200V），所以相线、中性线与配电柜外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应先在相线、中性线之间安装限压型 SPD，取 $U_c \geq 1.15U_0$ ；中性线再经一开关型 SPD 接于配电柜设备外壳上，开关型 SPD 的启动电压必须大于 1200V。或者相线与配电柜外壳、中性线与配电柜外壳之间安装限压型 SPD（ $U_c \geq 1.15U_0$ ），但必须使用适当的脱离装置。由户外部分的 U_2 可以看出，变电所内设两个分开的接地装置后，高压系统接地故障电压无由传导至低压系统，可按正常情况安装 SPD，取 $U_c \geq 1.15U_0$ 。

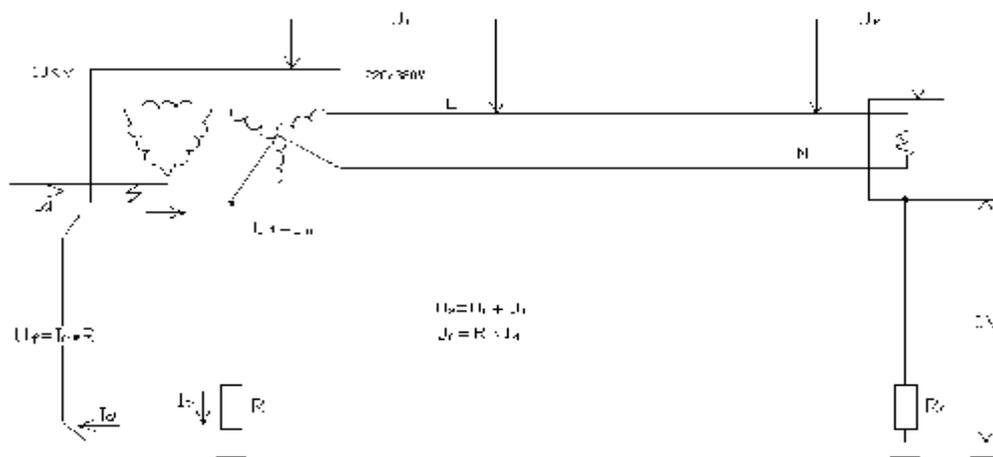


图 B.8 TT 系统（高压保护地与低压系统地共用一个接地极）

从图 B.8 中可见，高压接地故障造成的故障电压 U_f 加在低压系统的相线、中性线上，由图中 U_2 可以看出，低压配电系统的相线、中性线与用电设备外壳（PE 线）间的故障过电压为 U_f （1200V），所以相线、中性线与用电设备外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应先在相线、中性线之间安装限压型 SPD，取 $U_c \geq 1.15U_0$ ；中性线再经一开关型 SPD 接于用电设备外壳（PE 线）上，开关型 SPD 的启动电压必须大于 1200V。或者相线与设备外壳（PE 线）、中性线与设备外壳（PE 线）之间安装限压型 SPD（ $U_c \geq 1.55U_0$ ），但必须使用适当的脱离装置。

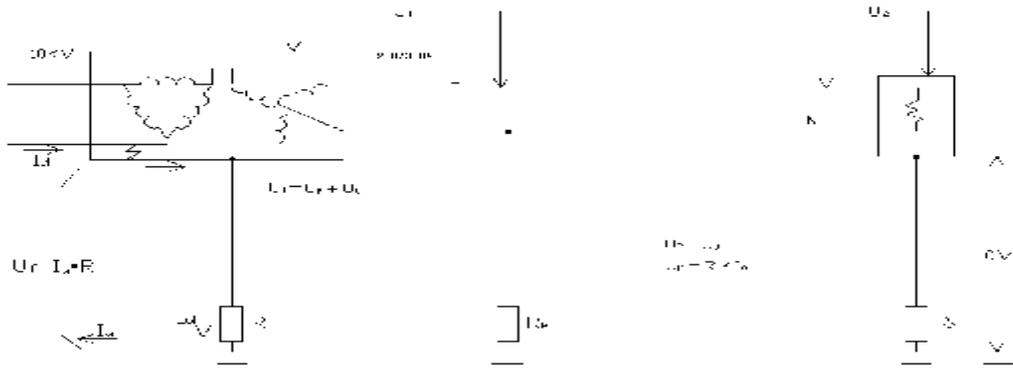


图 B.9 TT 系统（高压保护地与低压系统地为分开的接地极）

从图 B.9 中变电所内低压系统端的 U_1 可以看出，低压配电系统的相线、中性线与配电柜外壳间的故障过电压为 U_f (1200V)，所以相线、中性线与配电柜外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应先在相线、中性线之间安装限压型 SPD，取 $U_c \geq 1.15U_0$ ；中性线再经一开关型 SPD 接于配电柜设备外壳上，开关型 SPD 的启动电压必须大于 1200V。或者相线与配电柜外壳、中性线与配电柜外壳之间安装限压型 SPD ($U_c \geq 1.55U_0$)，但必须使用适当的脱离装置。由用电设备部分的 U_2 可以看出，变电所内设两个分开的接地装置后，高压系统接地故障电压无由传导至低压系统，可按正常情况安装 SPD，取 $U_c \geq 1.55U_0$ 。

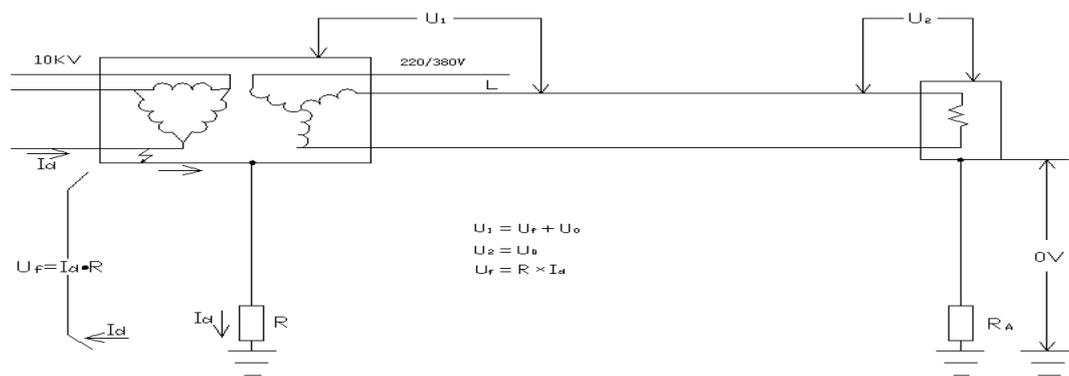


图 B.10 IT 系统（只有高压系统接地故障的情况）

从图 B.10 中变电所内低压系统端的 U_1 可以看出，低压配电系统的相线与配电柜外壳间的暂时过电压高于 U_f (1200V)，所以相线与配电柜设备外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应在相线与配电柜设备外壳之间安装开关型 SPD。或者相线与配电柜外壳之间安装限压型 SPD ($U_c \geq 1.15\sqrt{3}U_0$)，但必须使用适当的脱离装置。由用电设备部分的 U_2 可以看出，由于 IT 系统不接地，变电所内高压系统接地故障电压无由传导至低压系统，低压用电设备端可按正常情况安装 SPD，取 $U_c \geq 1.15\sqrt{3}U_0$ 。

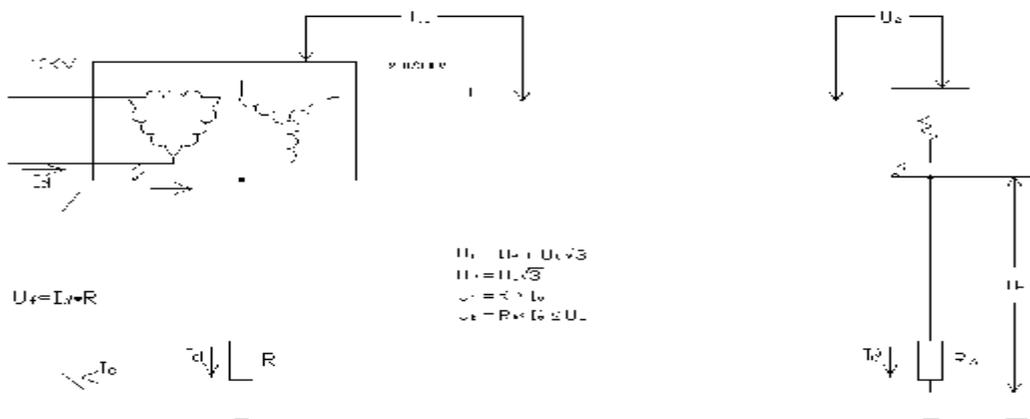


图 B.11 IT 系统（高压系统与低压系统均出现接地故障的情况）

从图 B.11 中变电所内低压系统端的 U_1 可以看出，低压配电系统的相线与配电柜外壳间的暂时过电压高于 U_f (1200V)，所以相线与配电柜设备外壳之间不能直接安装限压型 SPD，应在相线与配电柜设备外壳之间安装开关型 SPD。或者相线与配电柜外壳之间安装限压型 SPD ($U_c \geq 1.15\sqrt{3}U_0$)，但必须使用适当的脱离装置。由用电设备部分的 U_2 可以看出，由于 IT 系统不接地，变电所内高压系统接地故障电压无由传导至低压系统，低压用电设备端可按正常情况安装 SPD，取 $U_c \geq 1.15\sqrt{3}U_0$ 。

B.5 低压 (LV) TN 和 TT 系统中的中性线断开引起的应力电压

当三相 TN 或 TT 系统中的中性线断开（开路）时，承受相线对中性线间的额定电压的基本、双重和加强绝缘和元件能短暂地承受线间电压。这时应力电压能达到 $U = \sqrt{3}U_0$ 。

注：应力电压又称电应力，指由高压系统接地故障引起用户电气装置中低压设备上的工频应力电压，它的量值和持续时间不应超过表 B.1 中第一栏中规定的值。

B.6 低压 (LV) IT 系统意外接地引起的应力电压

当 IT 系统的某条相线意外的接地时，承受相线对中性线间额定电压、双重和加强绝缘和元件能短暂地承受线间电压。这时应力电压能达到 $U = \sqrt{3}U_0$ 。

B.7 低压 (LV) 电气系统中带电导体间短路引起的应力电压

当低压 (LV) 系统中的相线和中性线间短路时，在 5s 内应力电压能达到 $1.45U_0$ 。

B.8 U_p 、 U_0 、 U_c 和 U_{cs} 之间的关系

U_p 、 U_0 、 U_c 和 U_{cs} 之间的关系见图 B.12。

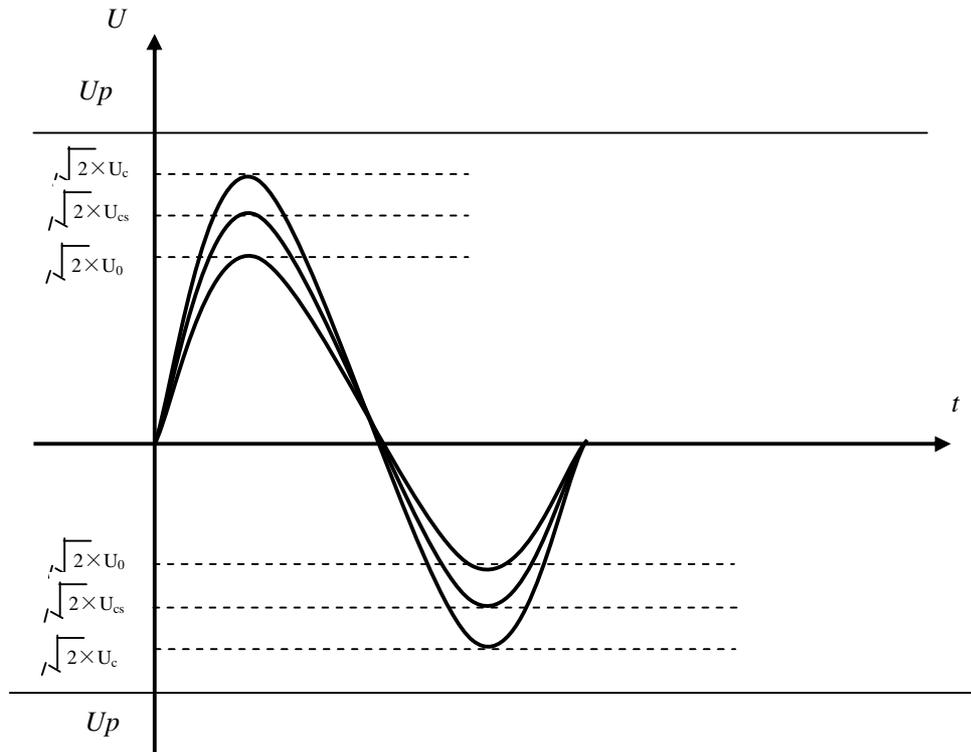


图 B.12 U_p 、 U_0 、 U_c 和 U_{cs} 之间的关系

附录 C
(资料性附录)
SPD 的安装示例

C.1 SPD 在 TN、TT 和 IT 系统中的安装

见本部分 8.2.1 条和图 10~图 14。

C.2 变电所内 LV 系统中 SPD 的安装

10kV 的 MV 系统的保护接地与 LV 系统的中性线接地共用（或分开）的变电所内，LV 侧 SPD 的安装见图 C.1 和图 C.2（适用于 TT 和 TN 系统）及图 C.3（适用于 IT 系统）。

在 10kV 的 MV 系统的保护接地与 LV 系统的中性线接地共用一个接地极的变电所内，TT 系统和 TN 系统应在三根相线和中性线（已接地）之间安装 3 个 SPD， $U_c \geq 1.15U_0$ 。

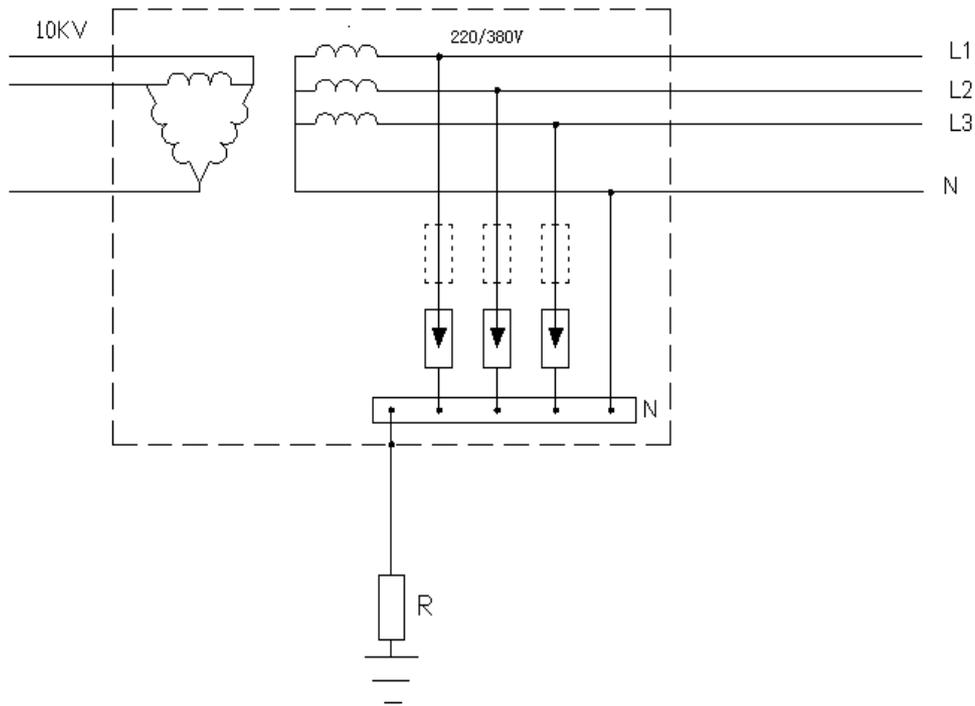


图 C.1 10kV 的保护接地与 LV 系统的中性线接地共用一个接地极的变电所内 TT 系统和 TN 系统 SPD 的安装

在 10kV 的 MV 系统的保护接地与 LV 系统的中性线接地为分开接地极的变电所内，TT 系统和 TN 系统应在三根相线和中性线之间安装 3 个 SPD， $U_c \geq 1.15U_0$ 。在 LV 系统的中性线与 MV 系统的保护地之间必须安装一开关型 SPD，其 U_c 值必须大于 1200V。

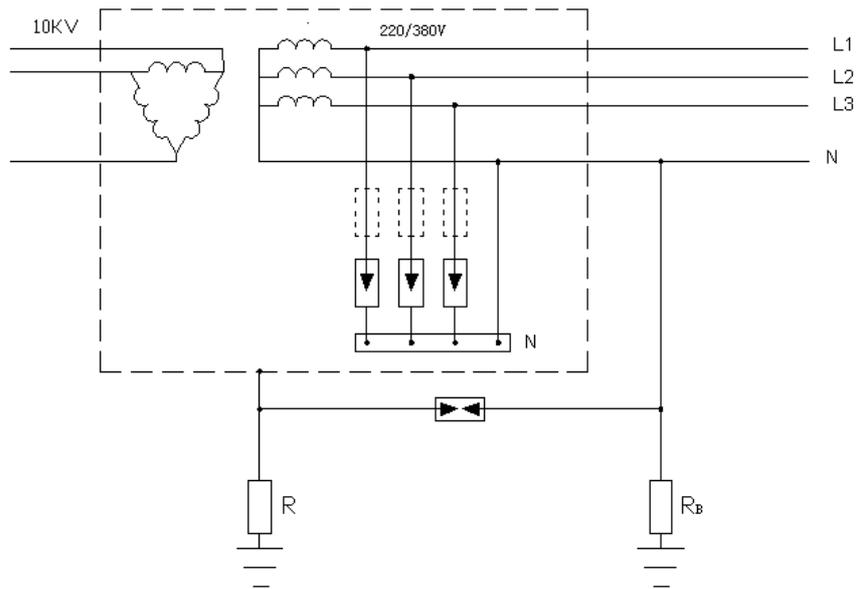


图 C.2 10kV 的保护接地与 LV 系统的中性线接地为分开接的变电所内 TT 系统和 TN 系统 SPD 的安装

IT 系统可分以下两种情况：

- 在采用 10kV 不接地系统的变电所内，由于高压接地故障过电压 U_f 甚小，很少超过 50V，配电柜外壳（已接地）和三根相线之间的暂时过电压也甚低。综合高、低压接地故障引起的所有暂时过电压因素，IT 系统只需在三根相线和配电柜外壳（已接地）之间安装 3 个 SPD， $U_c \geq 1.15U$ （ U 为线间电压， $U = \sqrt{3}U_0$ ）。

- 在采用 10kV 经小电阻接地系统的变电所内，由于高压接地故障过电压 U_f 甚大，配电柜外壳（已接地）和三根相线之间的暂时过电压也甚高。综合高、低压接地故障引起的所有暂时过电压因素，该情况下 IT 系统需在三根相线和配电柜外壳（已接地）之间安装 3 个开关型 SPD，开关型 SPD 的 U_c 值应大于 1200V。

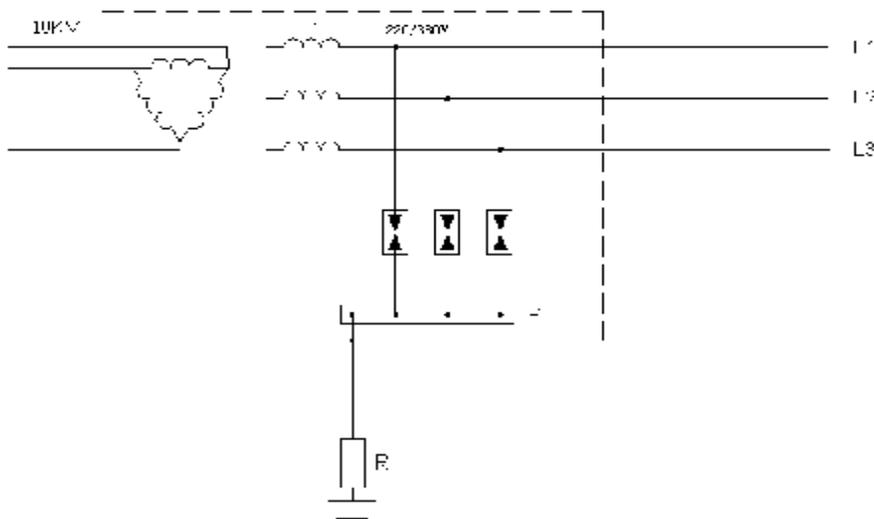


图 C.3 采用高压 10kV 经小电阻接地系统的变电所内，IT 系统 SPD 的安装

C.3 SPD 的两端连接要求

C.3.1 SPD 两端连接导线长度应短且直，图 C.4 中例示了单端口 SPD 常用连接方法，其中 a)、c) 和 d) 采用了凯文 (V 形) 接线方式。图 b) 则要求 U_{w1} 和 U_{w2} 足够低，当 SPD 两端连接线总长度不大于 0.5m， U_{w1} 和 U_{w2} 的值被认为是可以接受的。

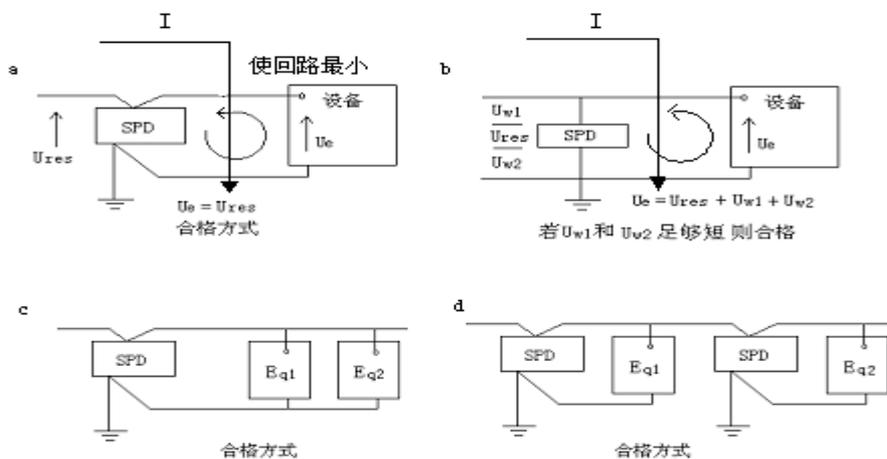
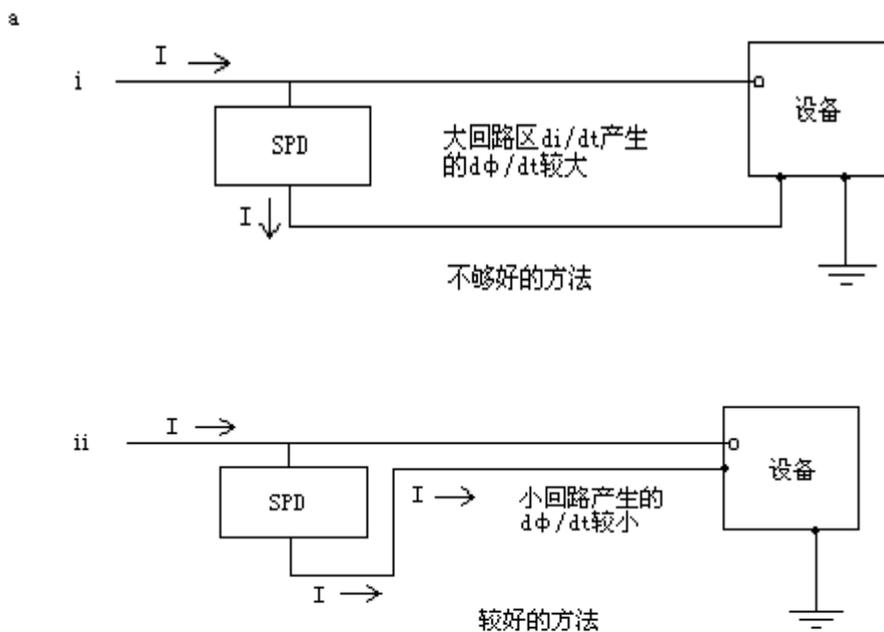


图 C.4 安装单端口 SPD 的常用方式

注：当电流 I 流经 SPD，由于电流进入导线和电极形成的回路产生磁场，它将会产生感应电压加到 SPD 上。这一综合电压将出现在设备终端两端上。

C.3.2 SPD 的连接导线应尽可能避免形成大的回路和避免重复感应耦合，图 C.5 中进行了示例。



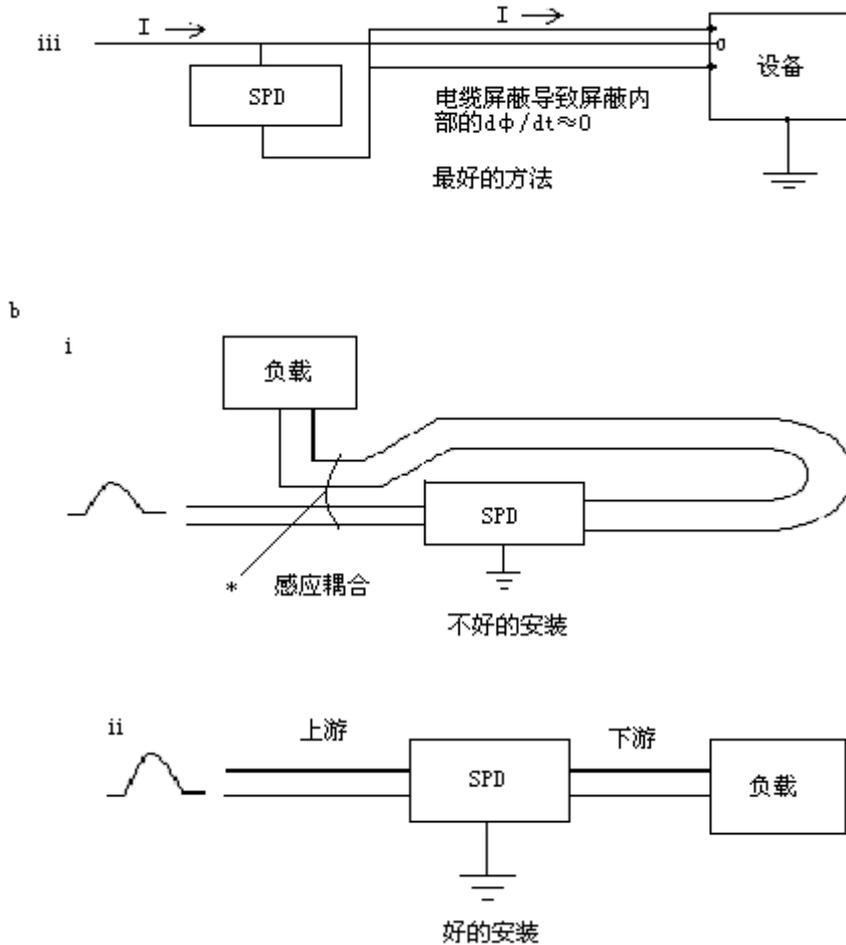


图 C.5 涉及到 EMC 方面可接受和不可接受的 SPD 安装示例

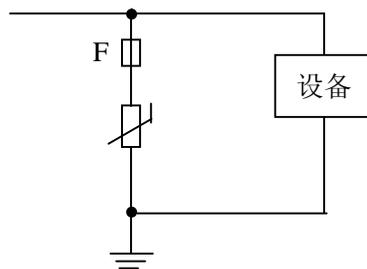
图例

- a 电磁耦合
 - i 不好的方法 – 大环路面积导致由 dI/dt 产生的 $d\phi/dt$ 高
 - ii 较好的方法 – 小环路面积导致低 $d\phi/dt$
 - iii 最好的方法 – 电缆屏蔽导致屏蔽内部的 $d\phi/dt \approx 0$
- b 感应耦合
 - i 不好的安装 – 在标有*的位置会出现感应耦合
 - ii 好的安装 – SPD 上游和下游的导线被很好的隔离开来

C.4 SPD 失效模式的保护

C.4.1 后备过电流保护装置的安装

SPD 失效模式为短路时，可能会影响受保护系统和设备的正常运行，图 C.6 提供了后备过电流保护装置的安装方法，分别为优先保证供电的连续性、优先保证保护的连续性兼顾供电连续性和保护的连续性。



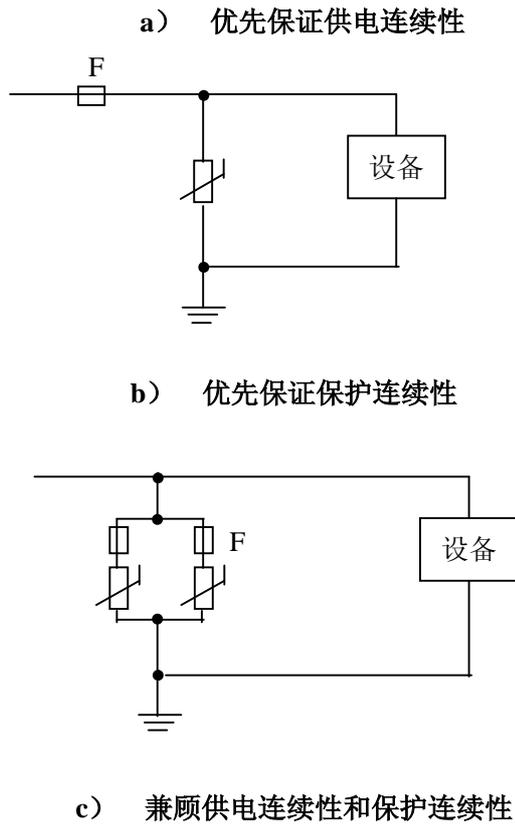
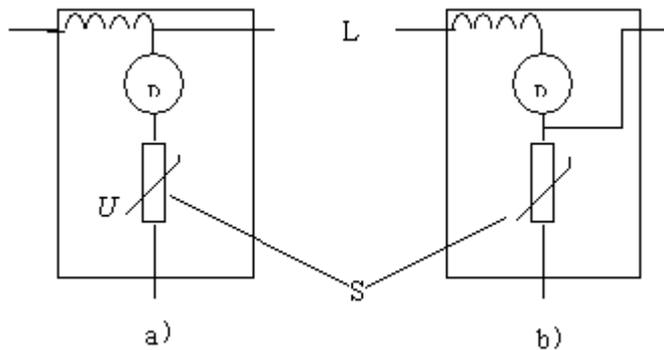


图 C.6 后备过电流保护装置在 SPD 前端的安装示例

C.4.2 双端口 SPD 内部脱离器

对于双端口 SPD，或与干线相连的单端口 SPD，内部脱离器可以提供优先保证供电的连续性（图 C.7.a），或优先保证保护的连续性（图 C.7.b）。



图例
 D 脱离器
 S SPD
 L 线路

图 C.7- 双端口 SPD 内部脱离器

附录 D
(资料性附录)
SPD 选择和安装应用示例

本附录中的示例, 尽可能提供与实际较一致的 SPD 的选择及安装方法。由于各种条件不一, 本示例不能代表所有的情况。

D.1 一幢民居

D.1.1 基本情况

一幢二层民居位于年平均雷暴日数为 30 天的平原地带, 雷击大地的年平均密度 (N_g) 约为 $2 \text{次}/\text{km}^2$ 。民居周围无高大建筑物。建筑物钢筋材料接地电阻值为 50Ω 。建筑物内需保护的电气设备有: 安防系统的报警器、自动洗衣机、计算机、电视机等。

供电系统由中压 (MV) 网络 (10km 架空线) 和低压 (LV) 网络 (220V/380V 由 1km 架空线和 200m 埋地电缆) 组成, 入户供电系统为 TT 系统, 单相二线 (L、N) 与建筑物地相连的保护线 (PE)。入户处总配电箱上安装了 S 型的 RCD, 安防系统报警器也装在总配电箱上。TV 天线单独架设在屋面。供配电系统见图 D.1。

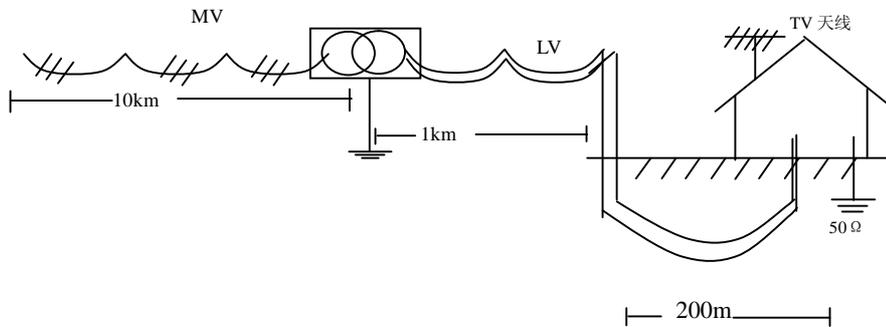


图 D.1 一幢民居的供配电系统示意图

D.1.2 风险评估

由于该地年雷暴日数为 30 天, 且建筑物位于平原, 可能不会划入第三类防雷建筑物, 所以不需要安装防直击雷的外部防雷装置。因此, 可按本部分第 7 章选择为雷击类型 S_3 或 S_4 型。

由于风险程度较低, 防雷装置的投资也较低, 按本部分 6.1 条的公式计算 $C_{RL}+C_{PM}<C_L$ 的可能性较大, 因此建议安装 SPD。

D.1.3 SPD1 的选择和安装

按本部分 7.1.2.2 条规定, 当电力线路埋地长度小于 $2\sqrt{\rho}$ 时, 宜安装 SPD。由于不了解该建筑物所在地的土壤电阻率 (ρ) 值, 同时考虑到 N_g 值较高、MV 和 LV 的架空线较长以及电气设备较多等因素, 建议按本部分 7.1.2.1.2 条中 b) 款选择 SPD1, 其主要技术参数如下:

选择 II 级分类试验的 SPD, $I_n > 5\text{kA}$ ($8/20 \mu\text{s}$);

U_C 值由于在 TT 系统中, SPD 在 RCD 的负荷侧, $U_C \geq 1.55U_0$;

U_P 值应低于 2.5kV , 由于安防系统报警器的 U_W 为 1.5kV , 选 $U_P < 1.5\text{kV}$;

由于 SPD 安装在 TT 系统中, 建议采用三种保护模式, L-N、L-PE 和 N-PE, 其中 N-PE 间的 SPD 的 I_n 值应大于 10kA 。安装位置在一层总配电箱处。

由于 TV 天线从室外屋顶引入, 应在 TV 天馈线和电视机上安装视频用 SPD, SPD 的选择应符合 QX/T10.3 中的要求。

SPD 的安装见图 D.2。

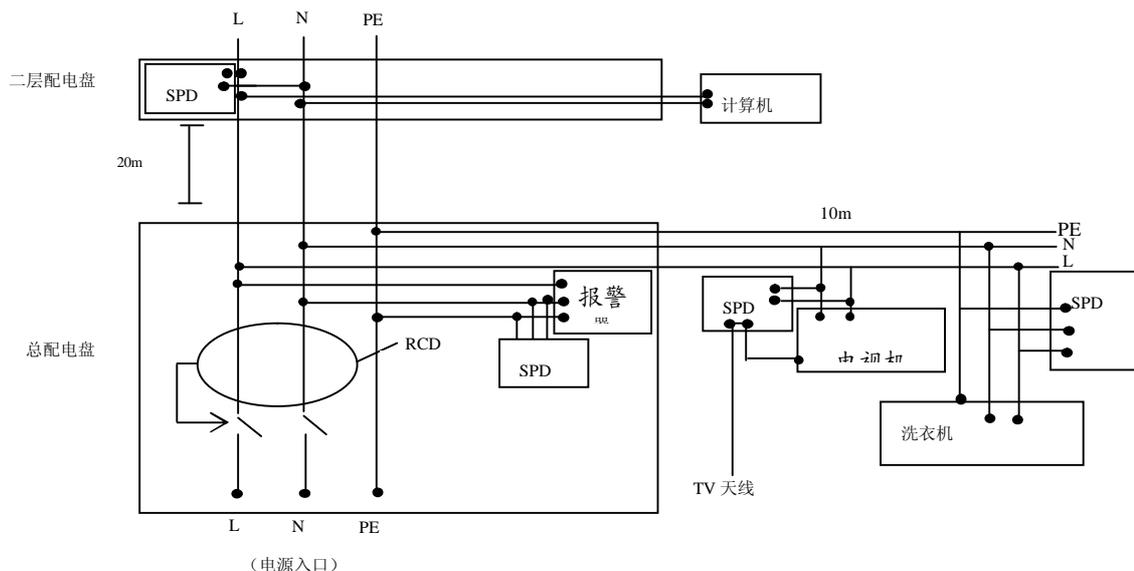


图 D.2 SPD 安装位置示意图

D.1.4 SPD 的选择和安装

由于总配电箱距二层的配电箱之间线路长度为 20m，总配电箱至电视机和洗衣机的线路长度均超过 10m，符合本部分中 7.2 条中的三项因素之一的条件，因此在二层分配电盘和电视机、洗衣机前的配电箱处应加装 SPD2，其主要技术参数如下：

$$I_n \geq 2\text{kA} \quad (8/20 \mu\text{s});$$

$$U_C \geq 1.55U_0;$$

$$U_p \leq 0.8\text{kV}.$$

SPD 的安装模式同 SPD1 的安装模式。

D.1.5 SPD 与其他设备的配合

RCD 为 S 型，安在总配电箱处。这一 S 型的 RCD 能承受 3kA (8/20 μs) 的电涌电流，但对超过 3kA 的电涌电流则无法实现保护的连续性，因此建议更换一个具有短路断开特性的 RCD。

SPD 的过电流保护建议选用的 SPD 中有热脱扣装置，如果没有则应在 SPD 的前端安装后备过电流保护装置（如熔丝、断路器）。

D.2 一座无线通线基站 (RBS)

D.2.1 基本情况

一座无线通信基站 (RBS) 由天线铁塔 (高 40m、距工作室 4m、呈三角形) 和工作室 (建筑物为砖混结构长 5m、宽和高均为 3m) 组成。RBS 位于山顶，雷击大地的年平均密度 (N_g) 为 6 次/km²。建筑物和铁塔共用接地的接地电阻值为 10Ω。从铁塔上引入室内有三条同轴电缆 (移动通信用，半径 r=12mm，转移阻抗 $Z_t=1 \Omega/\text{km}$) 和一条微波通讯同轴电缆 (r=8mm, $Z_t=2 \Omega/\text{km}$)，这些电缆通过屏蔽金属槽盒引入室内线槽架上，高度为 2.4m，长度为 4m。室内有三台需保护的电气设备。

供电系统由中压 (MV) 网络 (10km 架空线) 和低压 (LV) 网络 (500m 架空线) 组成。MV/LV 变压器接地电阻为 10Ω。入户供电系统为 TT 系统，三相四线 (L_1 、 L_2 、 L_3 、N) 和与共用接地相连的 PE 线。RBS 没有装设通信线缆，通信方式为微波通信。RBS 的组成见图 D.3 和图 D.4。

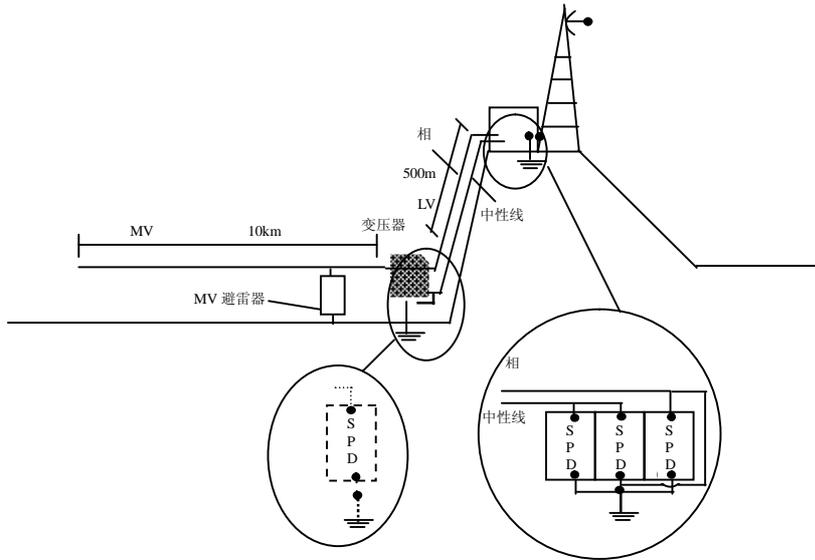


图 D.3 RBS 的系统组成

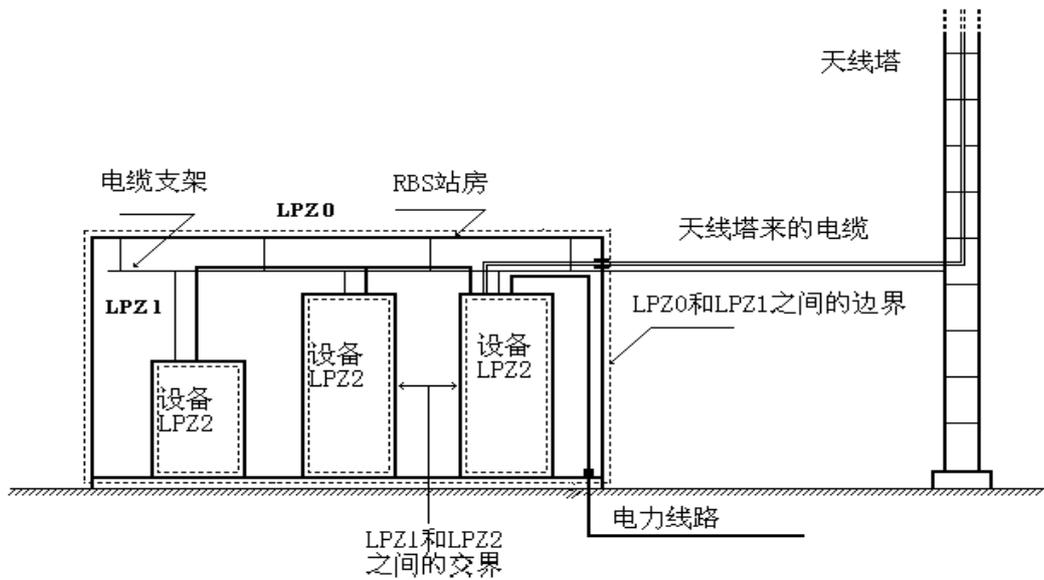


图 D.4 RBS 的防雷区（LPZ）划分

D.2.2 风险评估

RBS 的风险评估可参见 ITU.T-K56 “无线通信基站的雷电防护” 中的示例，该评估结论是工作室内的感应电压可达 38.4kV，在采用连接网（BN）后设备接口的电压仍高达 19.6kV。

本附录按雷击类型分类进行评估。由于通信铁塔高 40m，且位于雷击大地年平均密度较高的山顶，铁塔作为接闪器直接承受全部雷电流的概率很大，因此划为 S_1 型，同时也具有 S_2 型或 S_3 型、 S_4 型的特征。

RBS 的系统防雷应全面考虑到外部防雷（接闪、引下和接地）和内部防雷。在内部防

雷中要考虑线缆屏蔽（采用屏蔽线缆、线缆置于铁塔中心位置的金属线盒内，线缆和线盒应在顶部、中部和入户处等电位连接接地），建筑物的屏蔽和设备的屏蔽；考虑等电位连接；考虑合理布线。本附录只对低压电气系统中 SPD 的选择和安装进行示例。

D.2.3 SPD1 的选择和安装

在供配电线路（LV）进入工作室之前，应在 MV/LV 变压器处安装避雷器和 SPD，将从 MV 线路上传导过来的电涌电流分流和箝压，同时 SPD 可起到防止从铁塔传导的反向过电压损害变压器的作用。这一 SPD 的 U_p 不应大于 4kV。

出入工作室的配电线路上应分别安装两组 SPD，并应符合本部分 7.1.1 条的要求，其主要技术参数如下：

选择 I 级分类试验的 SPD， I_{imp} 值应大于 12.5kA（10/350 μ s），建议每一保护模式的 I_{imp} 值为 20kA（10/350 μ s）；

U_c 值由于在 TT 系统中，可选 $U_c \geq 1.15U_0$ （SPD 在 RCD 的电源侧）或 $U_c \geq 1.55U_0$ （SPD 在 RCD 的负荷侧）；

U_p 应低于 2.5kV，由于电源整流器输入端口的 U_w 为 2.0kV，建议 U_p 值取 1.5kV。

考虑到 TT 系统中暂时过电压（TOV）问题，建议采用“3+1”安装形式，即 L-N 和 N-PE 分别安装 SPD，其中 N-PE 间的 SPD 的 I_{imp} 值不应小于 80kA（10/350 μ s），此时 SPD 应安装在 RCD 的电源侧。

移动通信的同轴电缆和微波通信的同轴电缆上 SPD 的选择和安装应符合 QX/T10.3 中的要求。

D.2.4 SPD2 的选择和安装

本部分 7.2 条规定，当考虑三种因素存在时可选择安装 SPD2。在 RBS 中配电盘至终端设备线缆长度不超过 10m，在工作室通过建筑物格栅形大空间屏蔽层能屏蔽雷击产生的空间磁场后，只需考虑 SPD1 的 U_p 与设备耐冲击过电压额定值 U_w 的关系是否满足 $U_p \leq 0.8U_w$ ，如能满足则不需要加装 SPD2；如不能满足则应在靠近设备处（LPZ1 和 LPZ2 的交界处）选择安装 SPD2。SPD2 的主要技术参数如下：

选择 II 级或 III 级分类试验的 SPD，其每一保护模式的 I_n 应大于 10kA（8/20 μ s）或 U_{oc} 大于 20kV；

U_c 值同 SPD1；

U_p 应符合 $U_p < 0.8U_w$ 。

D.2.5 SPD 与其他设备的配合

在 RBS 中，SPD 与其他设备的配合同 D.1.5 条的要求。

D.3 太阳能发电系统（直流系统）

D.3.1 基本情况

太阳能发电系统又称太阳能电源，其基本组成为：太阳能电池方阵（太阳能模块）、直流输入配电柜、蓄电池组、控制器，交流配电柜和逆变器等。其中控制器负责遥信信号、本地声（光）报警和工作状态自动巡检。太阳能发电系统常与低压交流供配电或柴（汽）油发电机配合使用。

太阳能电源多采用 24V \pm 10% 的电压和 18A 的供电电流，一组 4kW 太阳能电池可由 100 块组件（电压为 17V、电流为 2.35A）组成。太阳能发电系统组成见图 D.5。

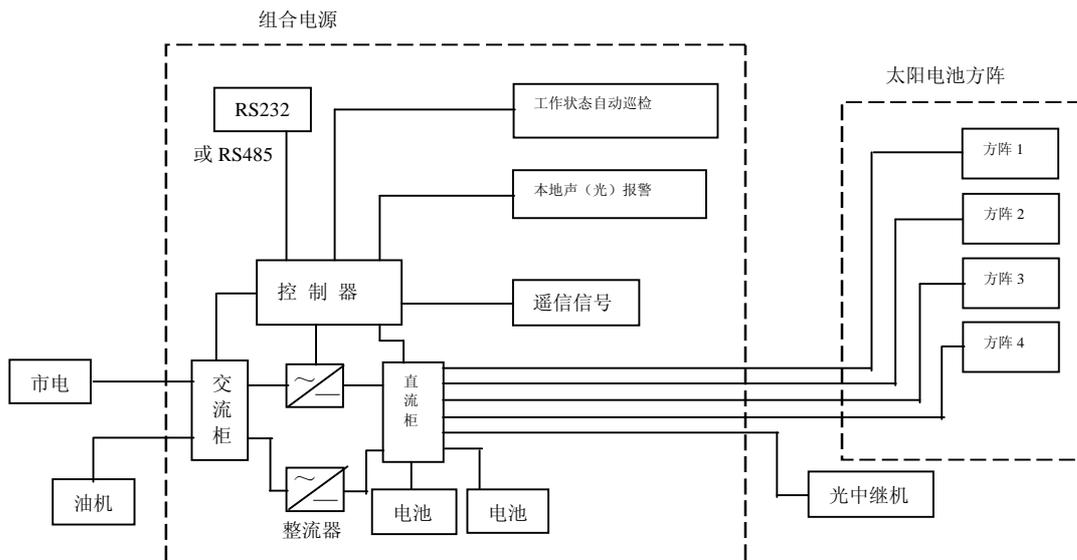


图 D.5 市电（油机）与太阳能发电系统组成示意图草药

D.3.2 风险评估

目前我国太阳能发电系统多应用于海拔较高，交通不便的山区，以解决架设供电线路不便和投资过大的问题。由于高山上易遭受雷击，除在少雷区（年平均雷暴日数少于 15 天）外，大多需防直击雷。太阳能发电系统是否需防直击雷应按 GB 50057 中“建筑物的防雷分类”确定，同时考虑本部分第 6 章风险评估中提供的 $C_{RL}+C_{PM}<C_L$ 否，如是则应在防直击雷的基础上采用内部防雷措施，其中含加装 SPD。

D.3.3 SPD1 的选择和安装

在太阳能电池方阵附近应架设接闪器，将太阳能电池方阵置于 LPZ_0B 区内，接闪器的引下线和接地装置应与太阳能电池方阵的外露导电部分多处电气连接。

在直流系统中分接地系统和不接地（或非有效接地）系统，在接地系统中直流电源 SPD 可装在极间；在不接地（或非有效接地）系统中，直流电源 SPD 应装在正（负）极与地之间，见图 D.6。

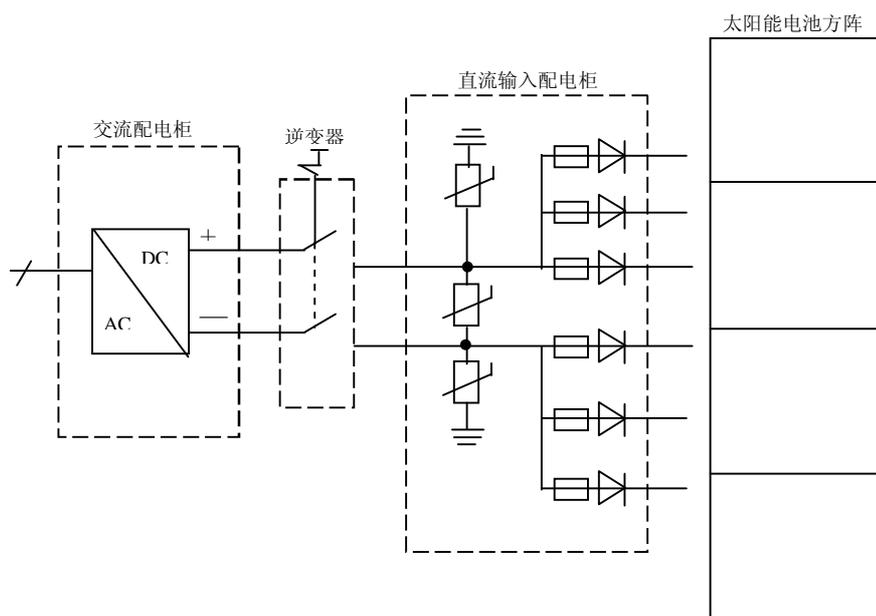


图 D.6 SPD 在太阳能发电系统中的安装示例

直流电源 SPD 可选用专门用于直流配电系统的 SPD，也可选用交流配电系统的 SPD，并按换算公式 $V_{d.c} = \sqrt{2}V_{a.c}$ 计算，表 D.1 为交直流换算表。

表 D.1 交直流电压换算表

AC→DC	DC→AC
12V _{a.c} →17V _{d.c}	5V _{d.c} →3.5V _{a.c}
24V _{a.c} →34V _{d.c}	12V _{d.c} →8.5V _{a.c}
48V _{a.c} →68V _{d.c}	24V _{d.c} →17V _{a.c}
60V _{a.c} →85V _{d.c}	48V _{d.c} →34V _{a.c}
110V _{a.c} →156V _{d.c}	60V _{d.c} →42V _{a.c}
220V _{a.c} →311V _{d.c}	110V _{d.c} →78V _{a.c}
380V _{a.c} →537V _{d.c}	220V _{d.c} →156V _{a.c}

直流 SPD1 的主要技术参数如下：

$$I_{imp} \geq 5\text{kA} \quad (10/350 \mu\text{s});$$

$$U_C \geq 1.15U_{d.c} \quad (U_{d.c} \text{ 为直流系统额定电压});$$

$$U_p \leq 0.8U_w。$$

D.3.4 SPD2 的选择和安装

由于在直流输入配电柜上安装了 SPD1，同时不具备本 7.2 条的三种因素，SPD2 一般可不安装。

附录 E
(资料性附录)
多级 SPD 间的配合

E.1 SPD 的保护距离

E.1.1 由于振荡现象对 SPD2 提出要求

本部分 7.2 条规定, SPD1 与受保护设备距离过长时需要在靠近受保护设备处安装 SPD2。

图 E.1 给出了电涌导致的振荡或行波可能造成在受保护设备处的预期电压翻倍的物理和电气设计的描述。

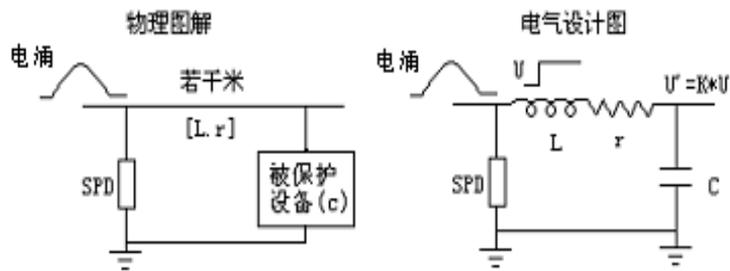


图 E.1 SPD 后端电压翻倍的图解

电压增高的幅值取决于电涌的频率和导体的长度。根据 r 大小值, L 值大小和 C 之间的振荡能将终端的电压 u' 提高到 ku 。 k 的值取决于多个参数。当设备为高阻抗负载时, k 值在 1~2 之间。

图 E.2 示出的回路相当用 $5kA (8/20 \mu s)$ 脉冲电压施加在 MOV 上, 它被一个 $5nF$ 负载电容从设备上分开, 该回路被模拟, 产生的振荡见图 E.3。图 E.3 说明了受保护设备终端处的电压是怎样达到两倍的。

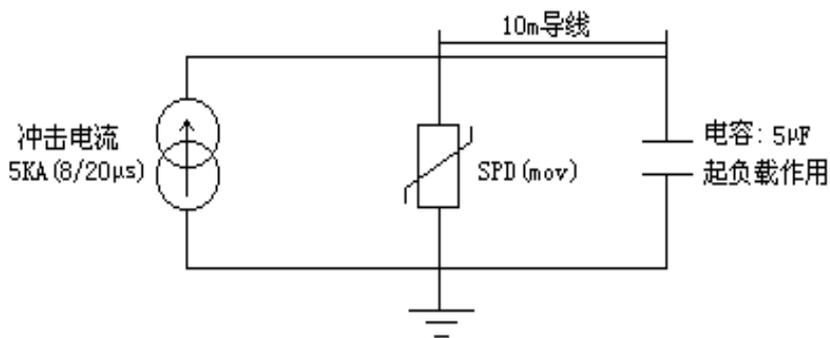
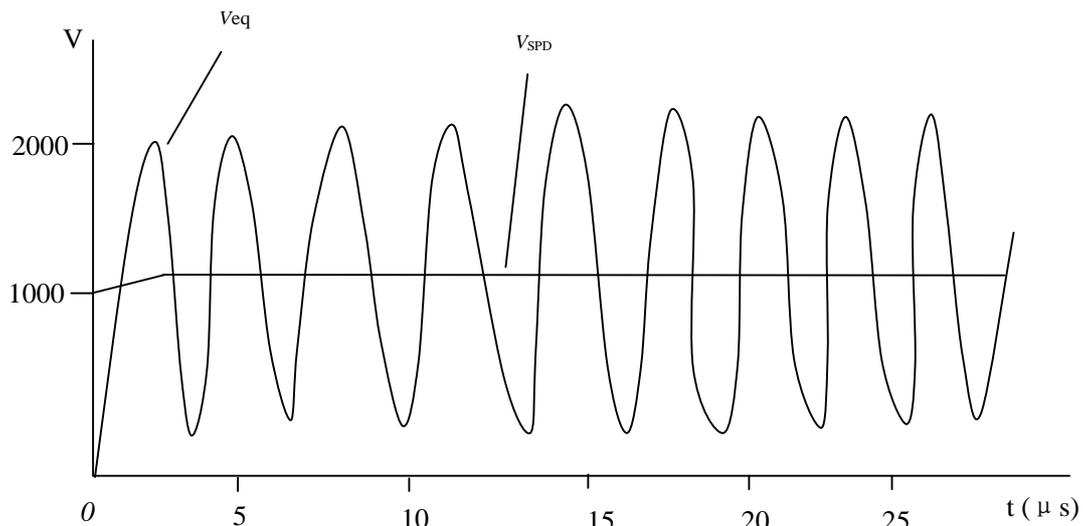


图 E.2 MOV 和受保护设备之间可能产生的振荡



图例

V_{SPD} SPD 处的电压
 V_{eq} 设备终端处的电压

图 E.3 电压翻倍的示例

在线路长度大于 10m 或 $U_p > 0.5U_w$ 时，估算振荡现象产生的保护距离 (l_{PO}) 可采用下式计算：

$$l_{PO} = (U_w - U_p) / k \quad (\text{m})$$

式中 k 取 25 (V/m)。

E.1.2 回路感应要求的 SPD 的保护距离

雷击在建筑物上 (S_1 型) 和雷击在建筑物附近时 (S_2 型) 会在 SPD 与被保护设备构成的回路上产生感应过电压，这个过电压与 SPD 的 U_p 相加，影响了 SPD 的箝压水平。

感应过电压的大小随回路 (含线路路径、长度，PE 线与 L 线的距离，电力线与通信线间的回路面积) 尺寸增加而增大；因空间屏蔽和线路屏蔽的效果而减小。因此，回路感应要求的 SPD 的保护距离 l_{pi} 可以采用下式计算：

$$l_{pi} = (U_w - U_p) / h \quad (\text{m})$$

式中： $h = 30000 \times K_{s1} \times K_{s2} \times K_{s3}$ (V/m)

K_{s1} : 建筑物提供的格栅形大空间屏蔽系数；

K_{s2} : 位于 LPZ1/2 区或更高防雷区交界处提供的屏蔽系数；

K_{s3} : 内部线缆提供的屏蔽系数。

$K_{s1} \sim K_{s3}$ 的选取见 IEC62305-2 附录 B.4。

E.2 SPD 之间的配合

E.2.1 配合的目的

图 E.4 所示为根据防雷区 (LPZ) 概念在低压电气系统中应用 SPD 的示例。SPD 依次安装，它们根据特定安装点的要求而选定。

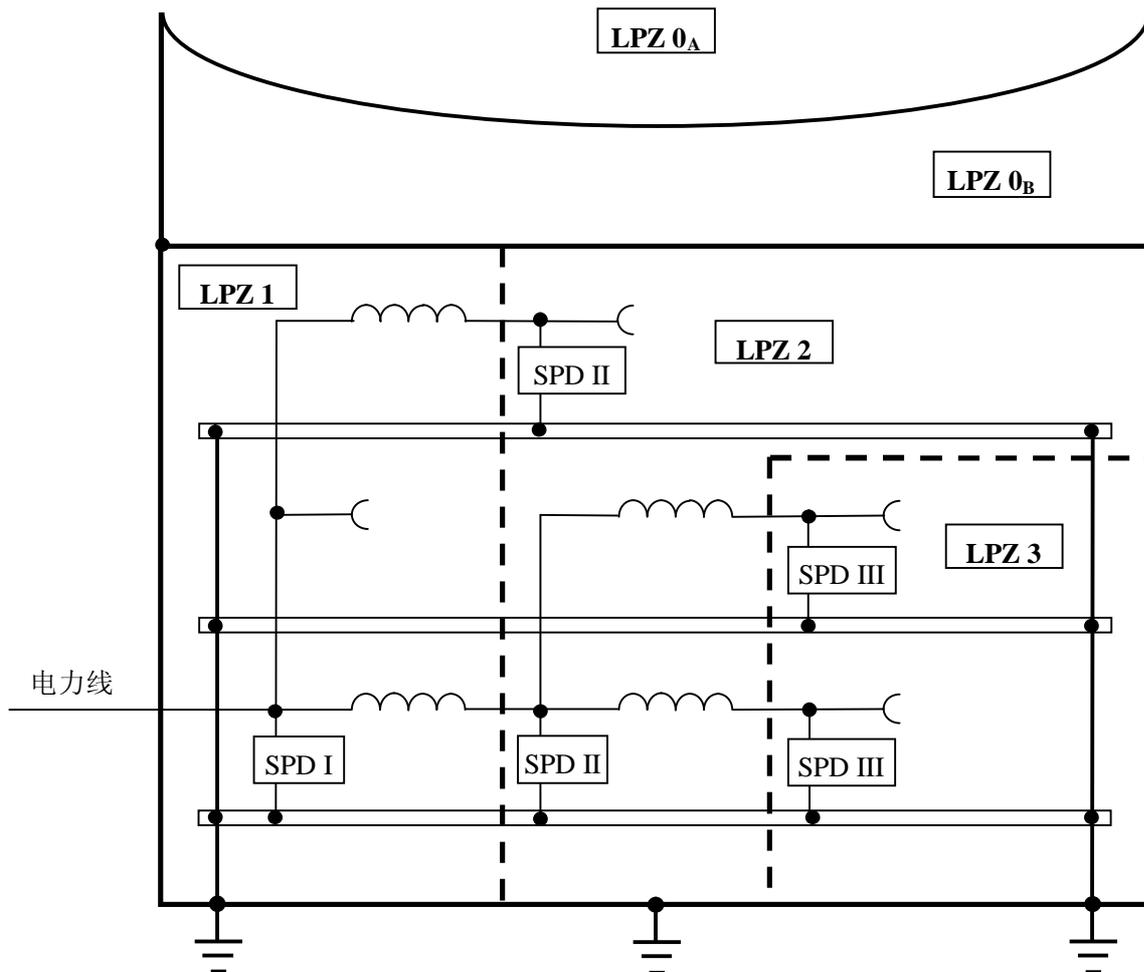


图 E.4 在电气系统中 SPD 的应用示例

能量配合应避免 SPD 过负荷。因此必须根据 SPD 各自的位置和性能确定每个 SPD 的负荷。

一旦顺序安装了两个或两个以上 SPD, 就需要进行 SPD 之间及与受保护设备的配合研究。

对于全部电涌电流而言, 任何一个 SPD 所承受的能量低于或等于该 SPD 所能承受的能量, 则达到了能量配合。

SPD 所能承受的能量可从以下途径获得:

Y 符合 IEC 61643-1 的电气测试

Y SPD 生产商的技术信息

图 E.5 说明了 SPD 能量配合的基本模型。该模型仅在当等电位连接网络的阻抗和等电位连接网络与由 SPD 1 和 SPD 2 连接形成的整套防护设备之间的互感均可忽略时有效。

注 - 如果通过其他适当的措施可以确保能量配合, 就不需要退耦元件 (例如伏安特性的配合或使用触发型 SPD)。

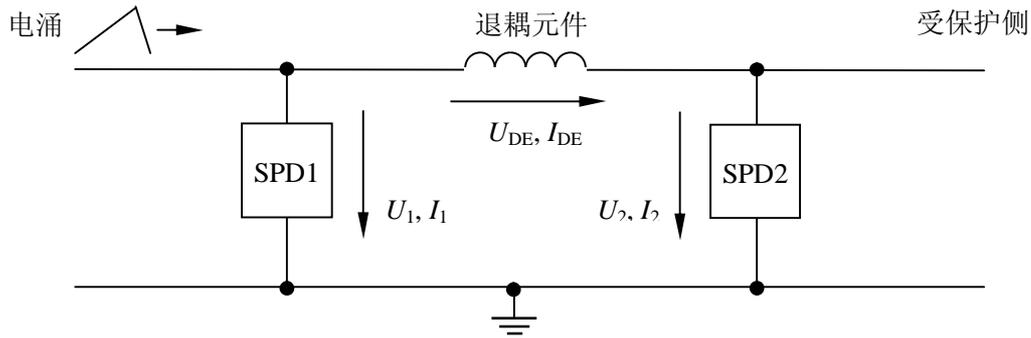


图 E.5 SPD 能量配合的基本模型

E.2.2 配合原则

SPD 间的配合使用以下原则之一：

Ⅰ 伏安特性配合（无退耦元件）

该方法基于静态伏安特性并应用于限压型 SPD（例如 MOV 或雪崩二极管）。该方法对电流波形不是很敏感。

注 - 该方法不需要退耦，线路的自然阻抗带有某些内在的退耦特性。

Ⅱ 使用专门的退耦元件作配合

为达到配合的目的，具有足够电涌耐受能力的阻抗可以被用作退耦元件。电阻主要用在信息系统中。电感主要用在供电系统中。对于电感的配合效果，电流陡度 di/dt 是决定性参数。

注 1 - 退耦元件可通过专用的器件，或通过 SPD 之间电缆的自然阻抗来实现。

注 2 - 线路的电感产生于两根并行线：如果两根电线（相线和地线）在同一根电缆中，电感大约是 0.5 到 $1 \mu\text{H}/\text{m}$ （取决于电线的横截面）。如果两根电线是独立的，应假定有较大的电感（取决于电线之间的间距）。

Ⅲ 使用触发型 SPD 作配合（无退耦元件）

使用触发型 SPD 同样可达到配合。这些 SPD 的触发电路应确保可靠，不应超过后续 SPD 的能量耐受能力。

注 - 该方法不需要退耦，即使线路的自然阻抗带有一些的退耦特性。

E.2.3 不同 SPD 的配合示例

E.2.3.1 两个限压型 SPD 的配合

图 E.6a 示出了两个限压型 SPD（MOV）配合的基本电路图。图 E.6b 说明了能量在电路中的分布。流入系统的总能量随电涌电流的增大而增加。只要在每一个 MOV 上分布的能量不超过它的耐受能量，就达到了能量配合。

限压型 SPD 的能量配合一般不需特殊的退耦元件，可以通过它们在相应电流范围中固定伏安特性来实现。该方法对电流波形不是很敏感。如果使用电感作为退耦元件，应考虑电涌电流的波形（例如 $10/350 \mu\text{s}$ 或 $8/20 \mu\text{s}$ ）。

对于电流陡度低的波形（例如 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ ），使用电感为限压型 SPD 退耦元件不是很有效。如果可能的话，电信和信号 SPD 应使用电阻（或电缆的自然电阻）作为退耦元件来达到配合。

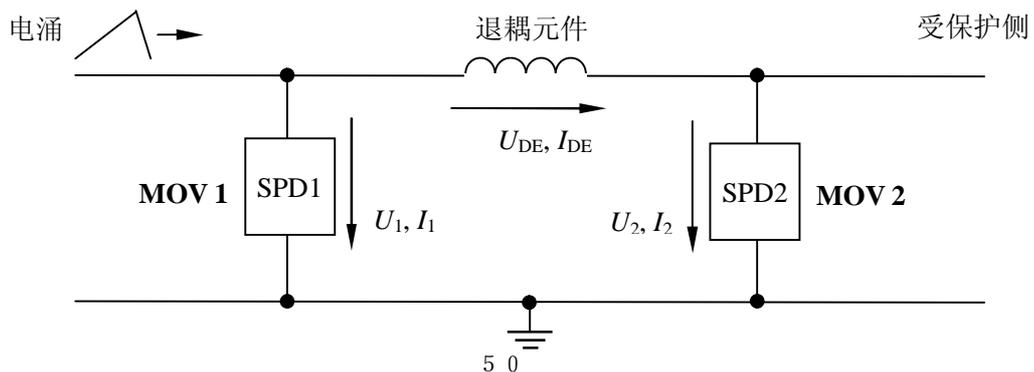


图 E. 6a 有 MOV 1 和 MOV 2 配合的电路

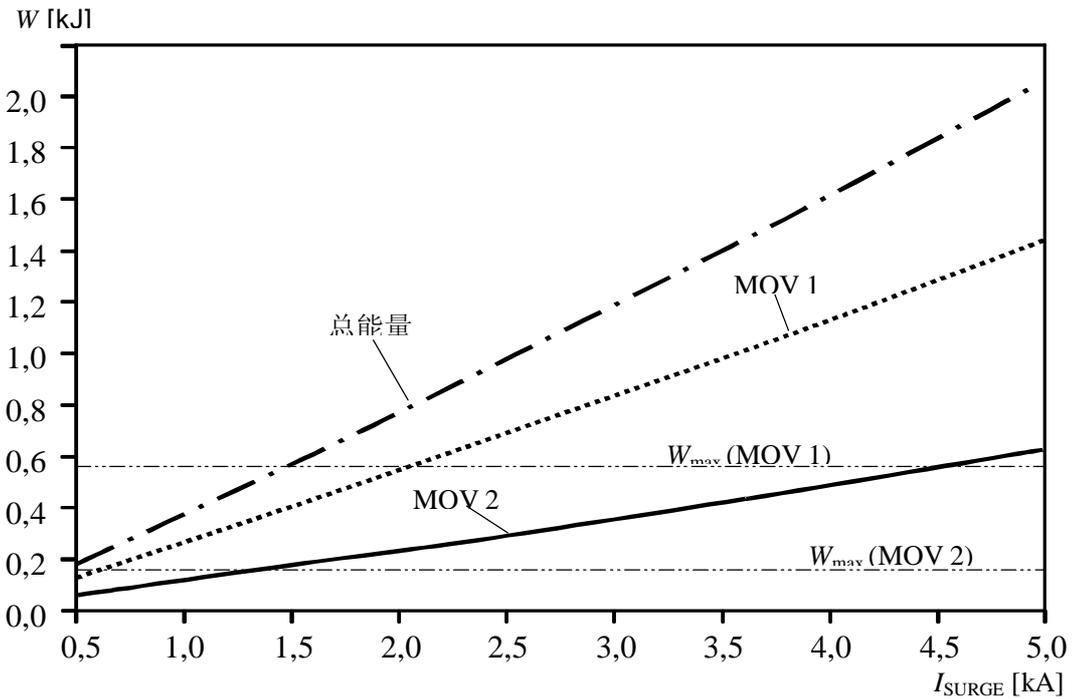
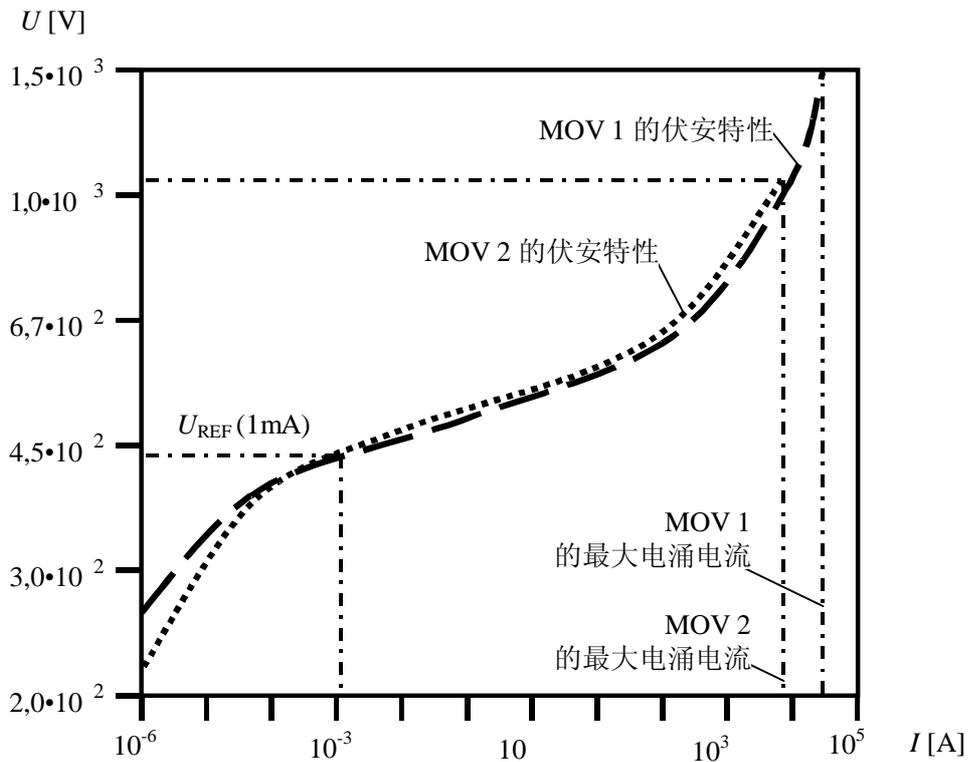


图 E. 6b MOV 1 和 MOV 2 的能量配合原理
图 E. 6 两个限压型 MOV 1 和 MOV 2 的组合

如果两个限压型 SPD 要达到配合，应分别选定各自的承受电流和能量，所选择的电流波持续时间应与预期涌入的冲击电流波持续时间一致。图 E. 7a 和 E. 7b 示出了波形为 10/350 μ s 的电涌下两个限压型 SPD 之间的能量配合的示例。



注 - 由此例可以看出, 仅了解 MOV 参考电压 U_{ref} 对实现能量配合的目标仍是不够的。

图 E. 7a MOV 1 和 MOV 2 的伏安特性

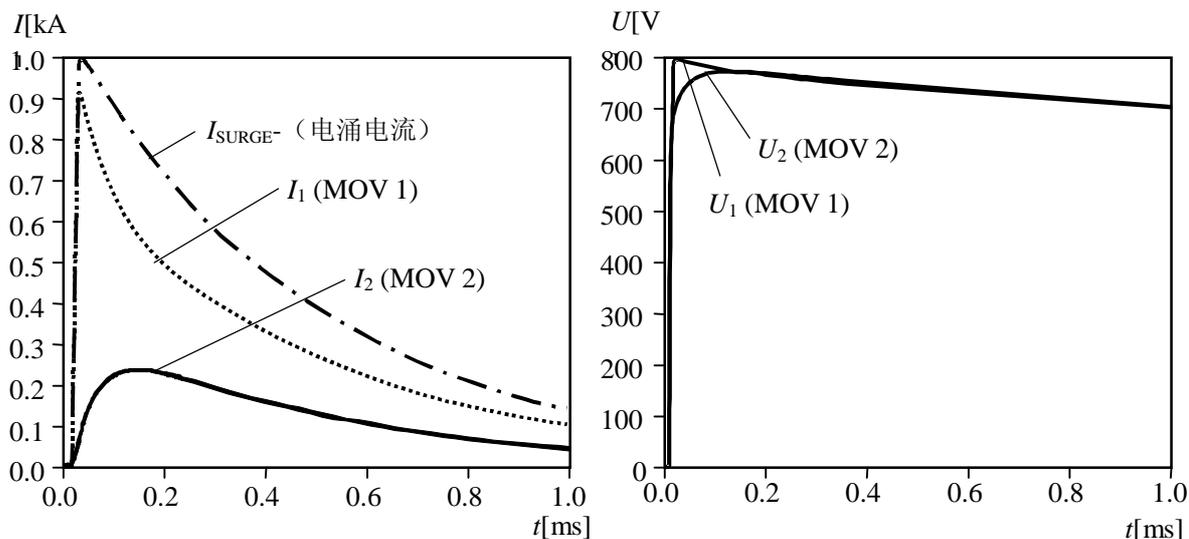


图 E. 7b 电涌波形为 10/350 μ s 时 MOV 1 和 MOV 2 的电流和电压

图 E. 7 使用两个限压型 MOV 1 和 MOV 2 的示例

E. 2. 3. 2 电压开关型和限压型 SPD 之间的配合

图 E. 8a 示出了该配合的基本电路图, 使用了放电间隙 (SG) 和 MOV 作为例。图 E. 8b 表明了电压开关型 SPD 1 和限压型 SPD 2 组合的能量配合基本原理。

SG (SPD 1) 的点火取决于 MOV (SPD 2) 两端残压 U_2 和退耦元件两端动态电压降 U_{DE} 的总合。一旦电压 U_1 超过了动态瞬间放电电压 U_{SPARK} , SG 会点火, 同时达到配合。这仅取决于:

- MOV 的特性
- 涌入电涌电流的陡度和幅值
- 退耦元件 (电感或电阻)。

当使用电感作为退耦元件时, 应考虑电涌电流的上升时间和峰值大小 (例如波形 10/350 μ s 或 8/20 μ s)。陡度 di/dt 越大, 退耦所需的电感越小。特别是在 SPD (经 I 级分类试验) 和 SPD (经 II 级分类试验) 之间的配合, 必须考虑最小电流陡度为 0.1kA/ μ s 的冲击电流。这些 SPD 间的配合必须确保两者在 10/350 μ s 的雷电流和 0.1kA/ μ s 的最小电流陡度下的情况时均能实现配合。

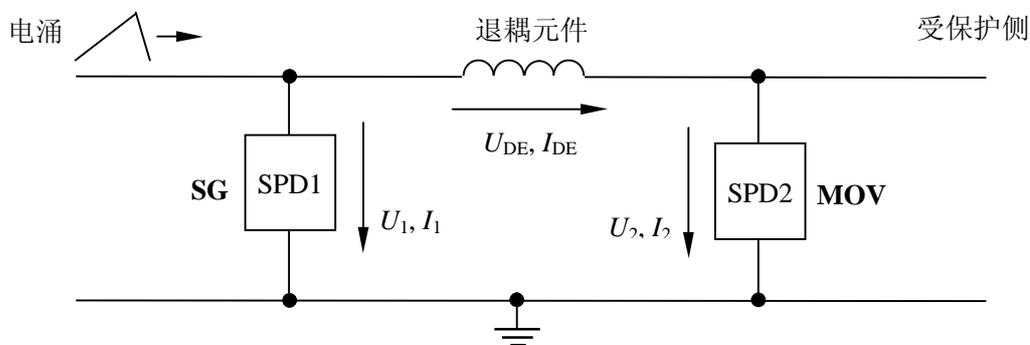


图 E. 8a 有 SG 和 MOV 的电路

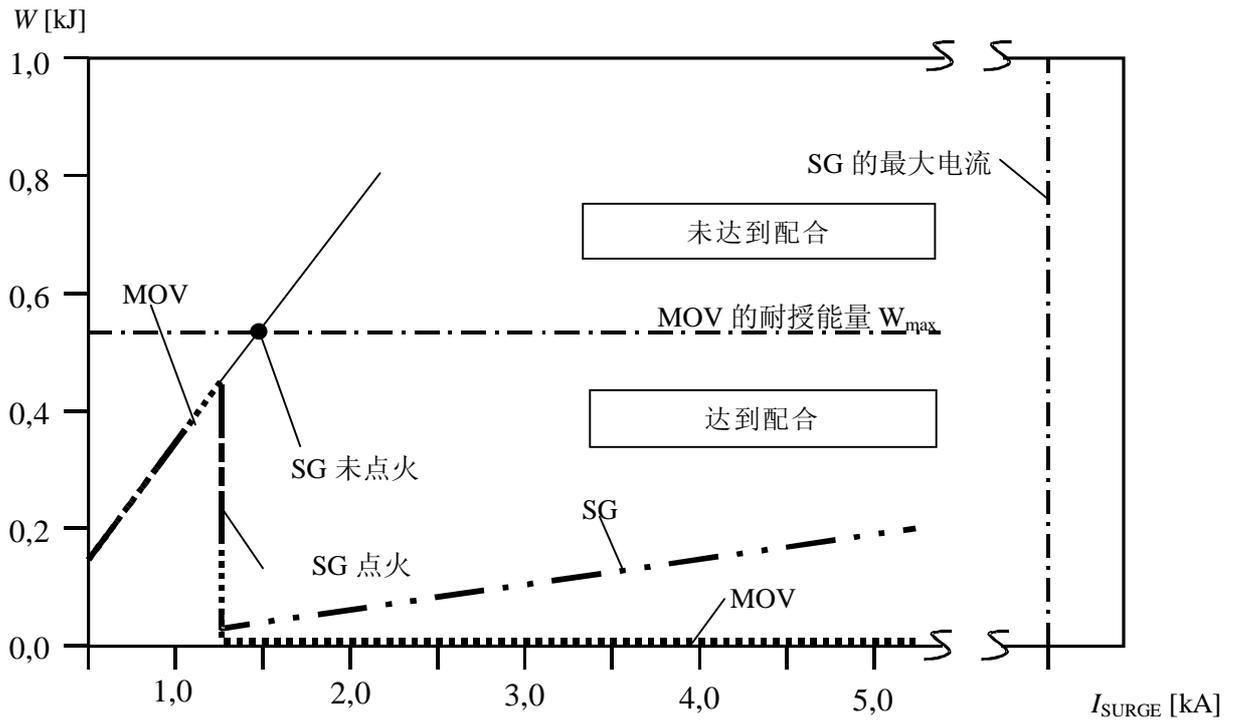


图 E.8b SG 和 MOV 的能量配合原理
图 E.8 电压开关型 SG 和限压型 MOV 的组合

要考虑以下两种基本情况：

Y 放电间隙不点火（图 E.9a）：

如果 SG 不点火，全部电涌电流流经 MOV，如图 E.8b 所示。如果该电涌的能量高于 MOV 的耐受能量，则未达到配合。如果采用电感作为退耦元件，最坏的情况为最小电流陡度是 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ 。

Y 放电间隙点火（图 E.9b）：

如果 SG 点燃了，流经 MOV 的电流持续时间大大降低，如图 E.9b 所示。当达到 MOV 的耐受能量之前 SG 点燃了，则达到了适当的配合。

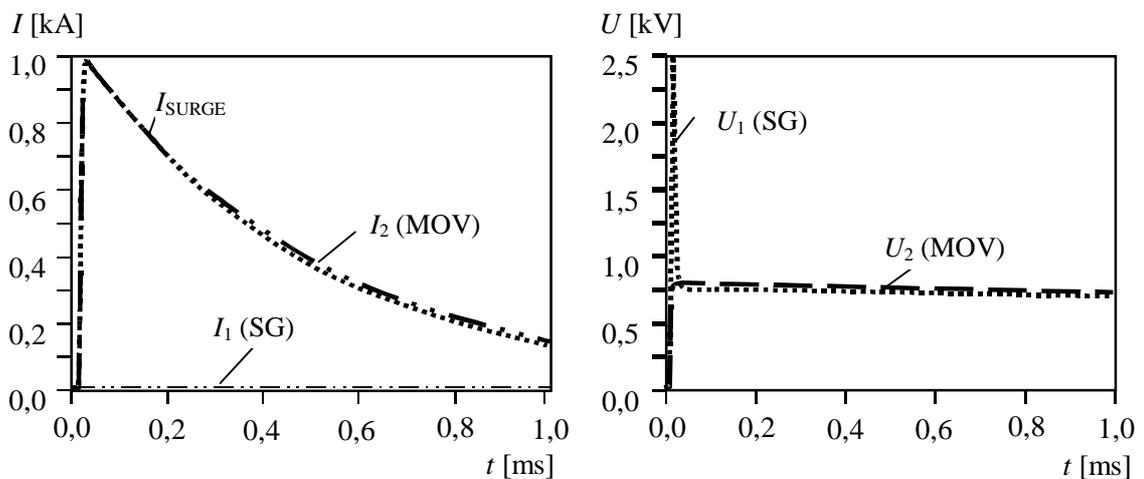


图 E.9a 电涌波形为 $10/350\mu\text{s}$ 时 SG 和 MOV 的电流和电压（SPD 1 未点火）

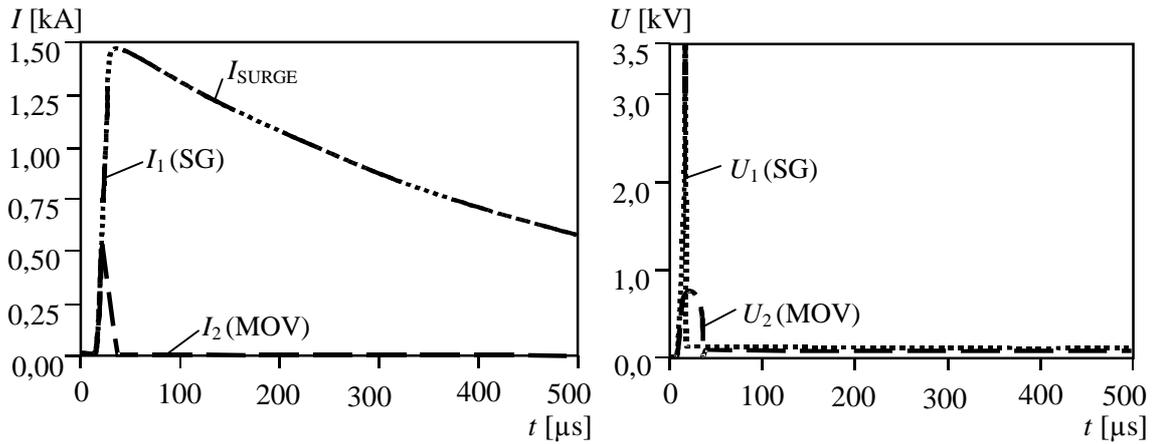


图 E.9b 电涌波形为 10/350 μs 时 SG 和 MOV 的电流和电压 (SPD 1 点火)
 图 E.9 使用电压开关型 SG 和限压型 MOV 的示例

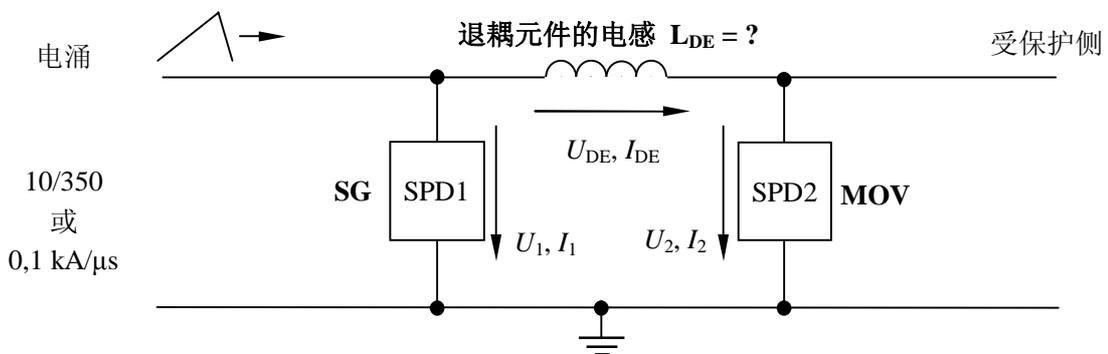
E.2.3.3 退耦电感的确定

图 E.10 示出了两种波形下确定所需的退耦电感的程序：10/350 μs 的雷电流和 0.1kA/μs 的最小电流陡度。两个 SPD 的动态伏安特性都应被考虑，以决定所需的退耦元件。成功配合的条件是，SG 应该在 MOV 达到耐受能量之前点燃。

SG 的点火取决于它的瞬间放电电压 U_{SPARK} 和 MOV (SPD 2) 残压 U_2 及退耦元件两端电压 U_{DE} 的总合。电压 U_2 取决于电流 I (参见 MOV 的伏安特性)，而电压 $U_{DE} = L_{DE} \cdot di/dt$ 取决于电流陡度。

对于 10/350 μs 的电涌，电流陡度 $di/dt \approx I_{max} / 10 \mu s$ 取决于 MOV 的最大放电电流 I_{max} (由它的耐受能量 W_{max} 决定)。因为电压 U_{DE} 和 U_2 都是 I_{max} 的函数，SG 两端的电压 U_1 同样取决于 I_{max} 。 I_{max} 越大，SG 两端电压 U_1 的陡度也越大。因此，SG 的瞬间放电电压 U_{SPARK} 通常被描述为“1kV/μs 的冲击瞬间放电电压”。

对于 0.1kA/μs 的斜角波，电流陡度 $di/dt = 0.1kA/\mu s$ 是一个常数。这样电压 U_{DE} 也是常数，而电压 U_2 仍是 I_{max} 的函数。因此 SG 两端电压 U_1 的陡度随 MOV 的伏安特性变化，并远低于第一种情况。由于 SG 的动态工作电压特性，它的瞬间放电电压随 SG 两端电压降持续时间增加而降低 (这个持续时间取决于由 MOV 的耐受能量 W_{max} 推导得出的 I_{max})。因此，可以假设当流经 MOV 的电流持续时间加长的時候，瞬间放电电压几乎降到“500V/s 的直流工作电压”。



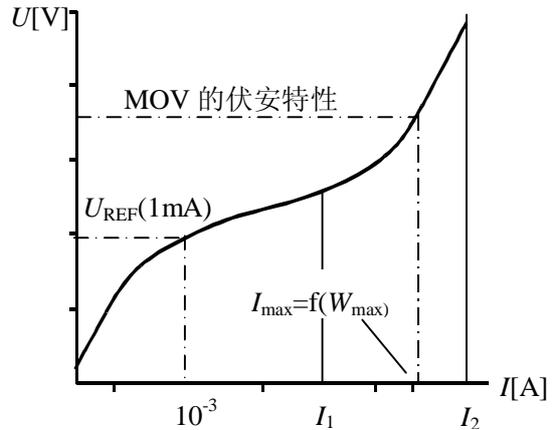
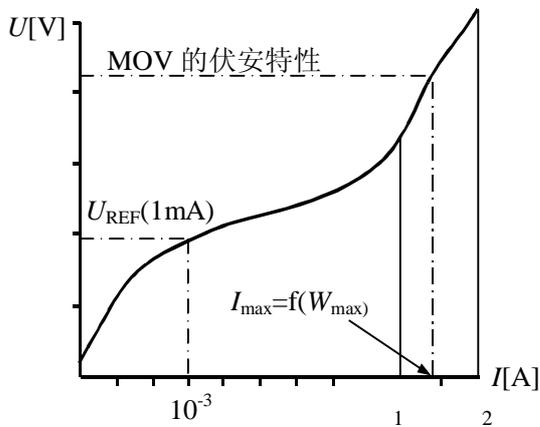
电压关系
 SG 点火
 达到配合

$$U_1 = U_2 + U_{DE} = U_2 + L \cdot di/dt$$

$$U_1 = U_{SPARK}$$

SG 点火早于 MOV 不能承受的能量 W_{max}

对 10/350 电涌的能量配合	按电流陡度 0,1kA/μs 下的能量配合
------------------	-----------------------

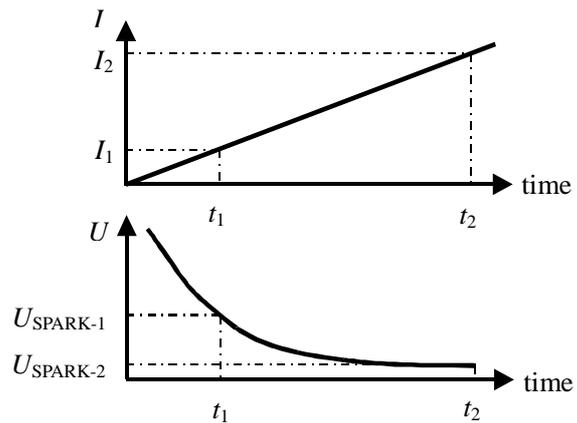


$(I_1 < I_{max} \text{ for } (L_{DE-1} \text{ } \mathfrak{L} L_{DE-10/350})$

$(I_2 > I_{max} \text{ for } (L_{DE-2} \text{ } \mathfrak{L} L_{DE-10/350})$

$(I_1 < I_{max} \text{ for } (L_{DE-1} \text{ } \mathfrak{L} L_{DE-0,1kA/\mu s})$

$(I_2 > I_{max} \text{ for } (L_{DE-2} \text{ } \mathfrak{L} L_{DE-0,1kA/\mu s})$



$L_{DE} = (U_{SPARK} - U_2) / (di/dt)$ 式中 $U_2 = f(I_{max})$	
$L_{DE-10/350\mu s} = (U_{SPARK} - U_2) / (I_{max} / 10 \mu s)$	$L_{DE-0,1kA/\mu s} = (U_{SPARK} - U_2) / (0,1kA/\mu s)$
所需 L_{DE} 是电感 $L_{DE-10/350}$ 和 $L_{DE-0,1kA/\mu s}$ 中较高值	

图 E. 10 为 10/350 μs 和 0.1kA/μs 的电涌确定去耦电感

电感 $L_{DE-10/350}$ 和 $L_{DE-0,1kA/\mu s}$ 中较高的值应被用于退耦电感 L_{DE} 。示例见图 E. 11 和 E. 12。

注 - 对于低压供电系统中退耦元件的确定，最坏的情况是 SPD 2 处短路 ($U_2 = 0$)，因此所需电压 U_{DE} 最大化。当 SPD 2 是限压型，它具有残压 $U_2 > 0$ ，这将大大降低所需电压 U_{DE} 。这个残压至少高于电力供应的峰值电压（例如交流标称电压 230V: 峰值 $\sqrt{2} \cdot 230V = 325V$ ）。考虑 SPD 2 的残余电压将导致适当选择退耦元件的大小。否则的话退耦元件会选的过大。

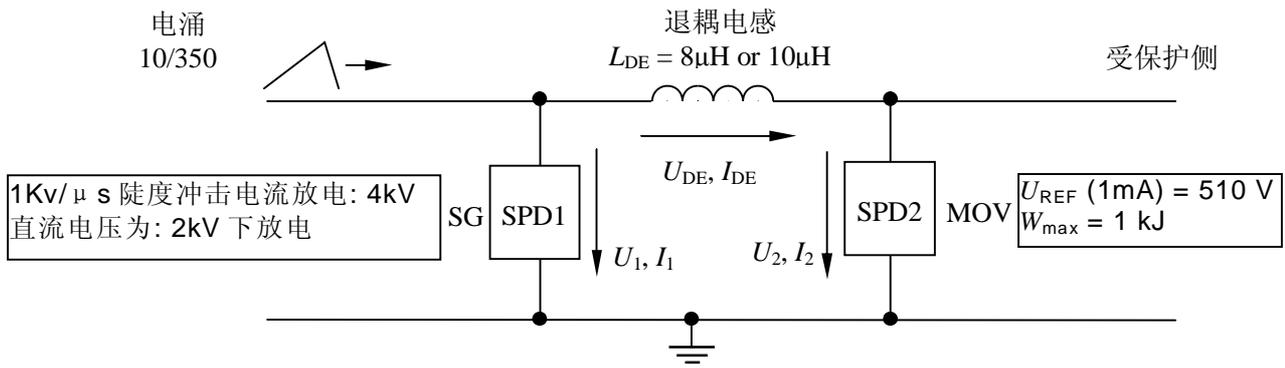


图 E. 11a 电涌波形为 10/350 μ s 时能量配合的电路图示例

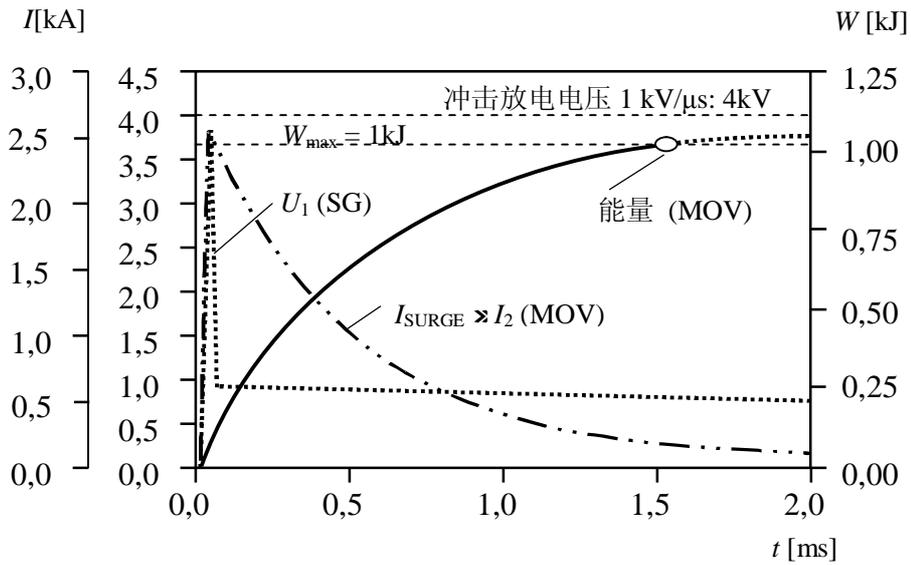


图 E. 11b $L_{DE} = 8 \mu H$ 时的电流/电压/能量特性：
电涌波形为 10/350 μ s 时未达到能量配合 (SG 未点火)

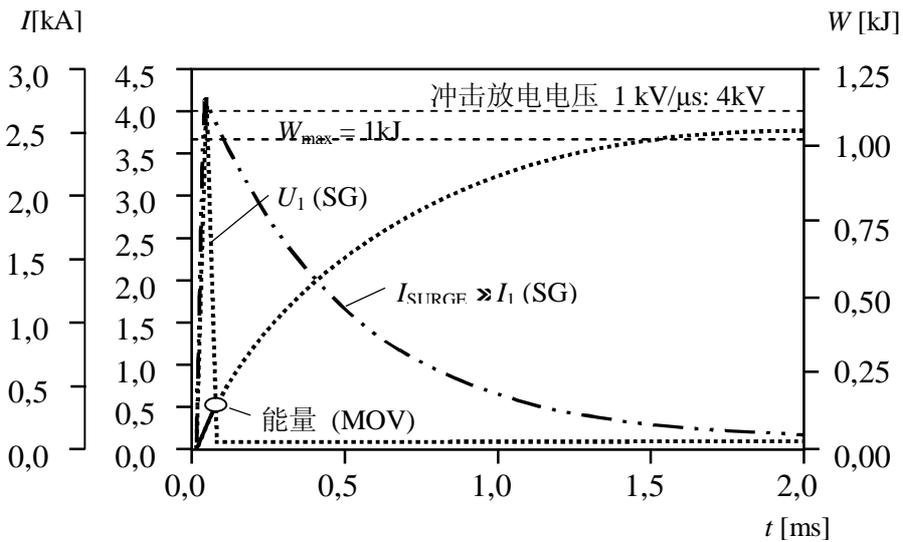


图 E. 11c $L_{DE} = 10 \mu H$ 时的电流/电压/能量特性：
电涌波形为 10/350 μ s 时达到能量配合 (SG 点火)
图 E. 11 电涌波形为 10/350 μ s 时使用 SG 和 MOV 的示例

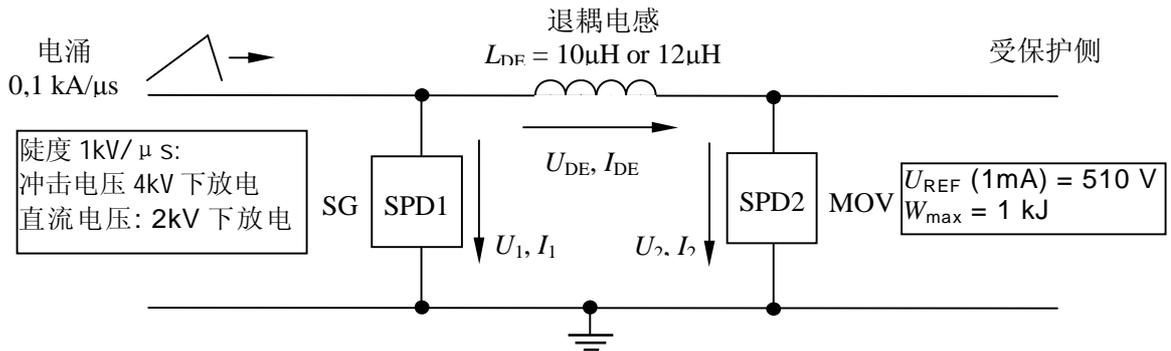


图 E. 12a 电涌为 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ 时能量配合的电路图

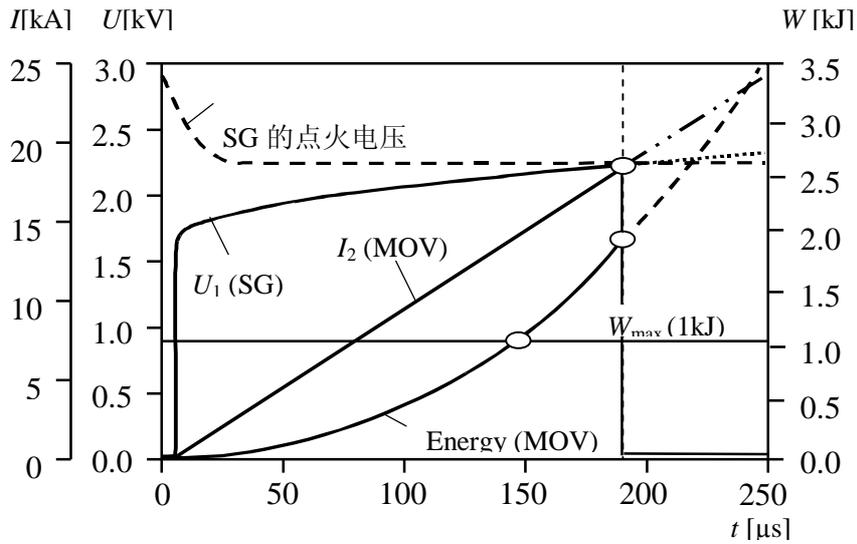


图 E. 12b $L_{DE} = 10\mu\text{H}$ 时的电流/电压/能量特性：
电涌为 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ 时未达到能量配合

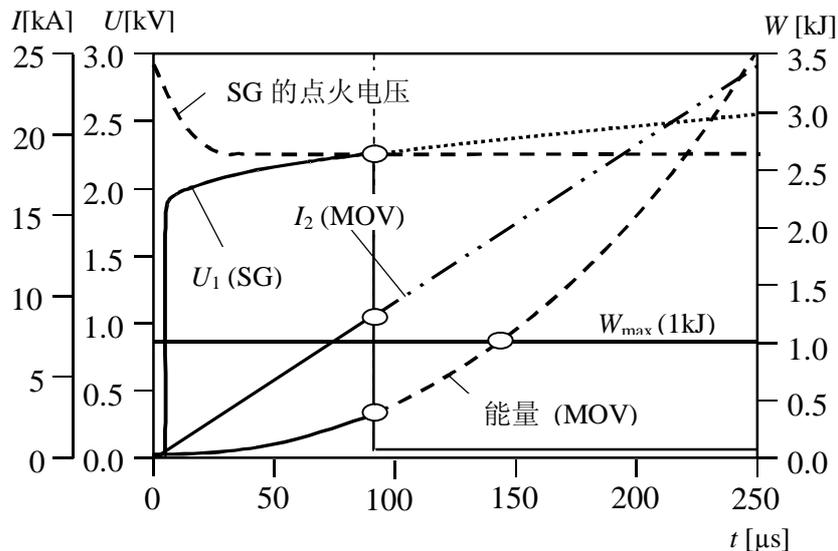


图 E. 12c $L_{DE} = 12\mu\text{H}$ 时的电流/电压/能量特性：
电涌为 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ 时达到能量配合

图 E.12 电涌为 $0.1\text{kA}/\mu\text{s}$ 时使用 SG 和 MOV 的示例

E. 2. 3. 4 两个电压开关型 SPD 的配合

使用放电间隙 (SG) 来说明配合技术。对于放电间隙之间的配合, 应利用其动态工

作特性。

在 SG 2 点火后，将通过退耦元件实现配合。为确定退耦元件的所需值，SG 2 可被一短路所取代。为点燃 SG 1，退耦元件两端的动态电压降应比 SG 1 的工作电压高。

使用电感作为退耦元件，所需的 U_{de} 主要取决于电涌电流的陡度。因此应考虑电涌的波形和陡度

使用电阻作为退耦元件，所需的 U_{de} 主要取决于电涌电流的峰值。当选择退耦元件的冲击电流参数时也应考虑该值。

在 SG 1 点火后，总能量将根据各元件的静态伏安特性来分配。

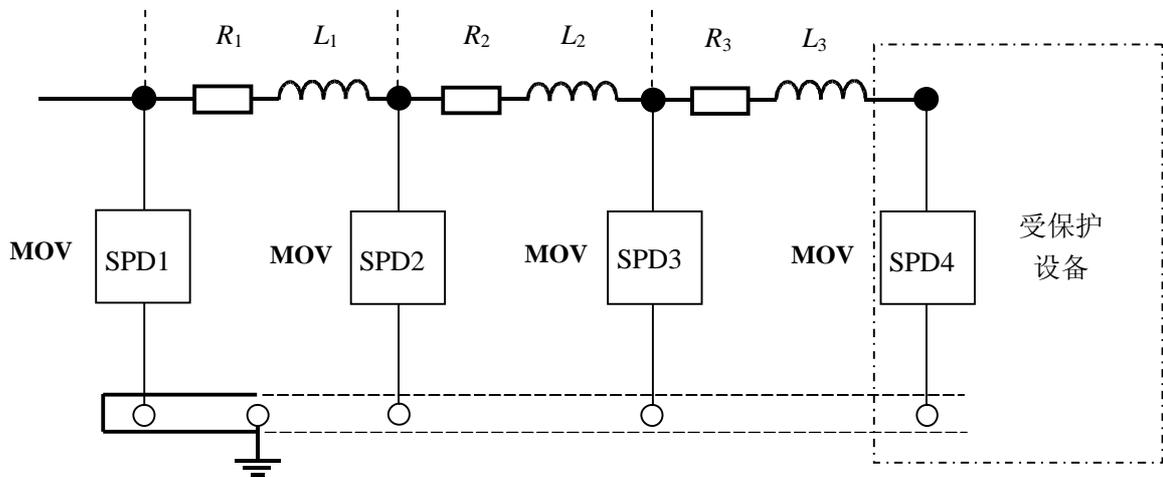
注 - 对于放电间隙和气体放电管，脉冲陡度是最重要的。

E. 2. 4 防护系统基本配合方案

防护系统有四种配合方案：前三个使用单口 SPD，而第四种使用整合了退耦元件的双口 SPD。考虑这些配合方案时，同时也应考虑可能整合在受保护设备内部的 SPD。

E. 2. 4. 1 方案 I

所有 SPD 都具有连续伏安特性（例如 MOV 或雪崩二极管）和同样的残压 U_{RES} 。SPD 的配合及其与受保护设备的配合通常通过他们之间线路的阻抗来实现（图 E. 13）。

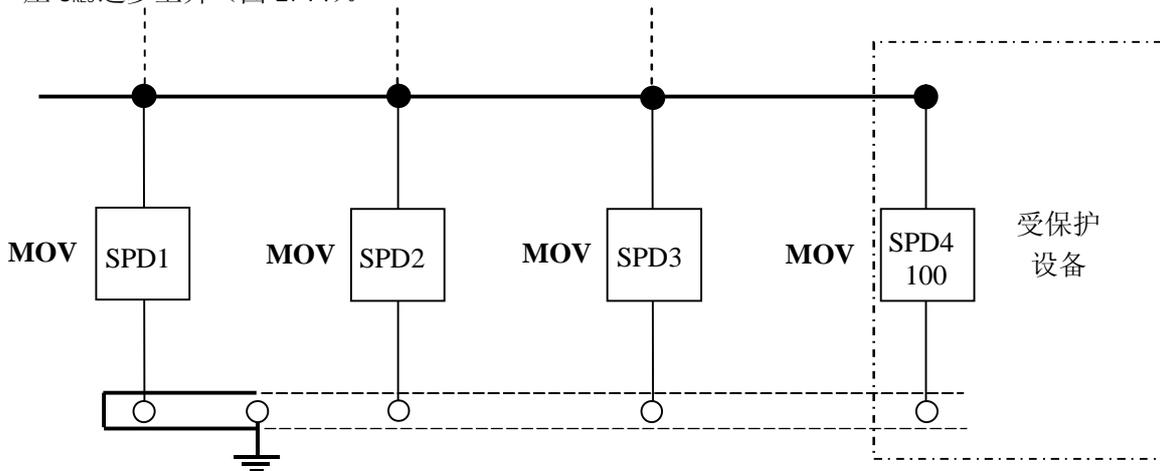


$$U_{RES} (SPD1) = U_{RES} (SPD2) = U_{RES} (SPD3) = U_{RES} (SPD4)$$

图 E. 13 配合方案 I（限压型 SPD）

E. 2. 4. 2 方案 II

所有 SPD 都具有连续伏安特性（例如 MOV 或雪崩二极管）。从 SPD 1 到 SPD 3 残余电压 U_{RES} 逐步上升（图 E. 14）。



$$U_{RES} (SPD1) < U_{RES} (SPD2) < U_{RES} (SPD3) < U_{RES} (SPD4)$$

图 E. 14 配合方案 II（限压型 SPD）

这是用于供电系统的配合方案。

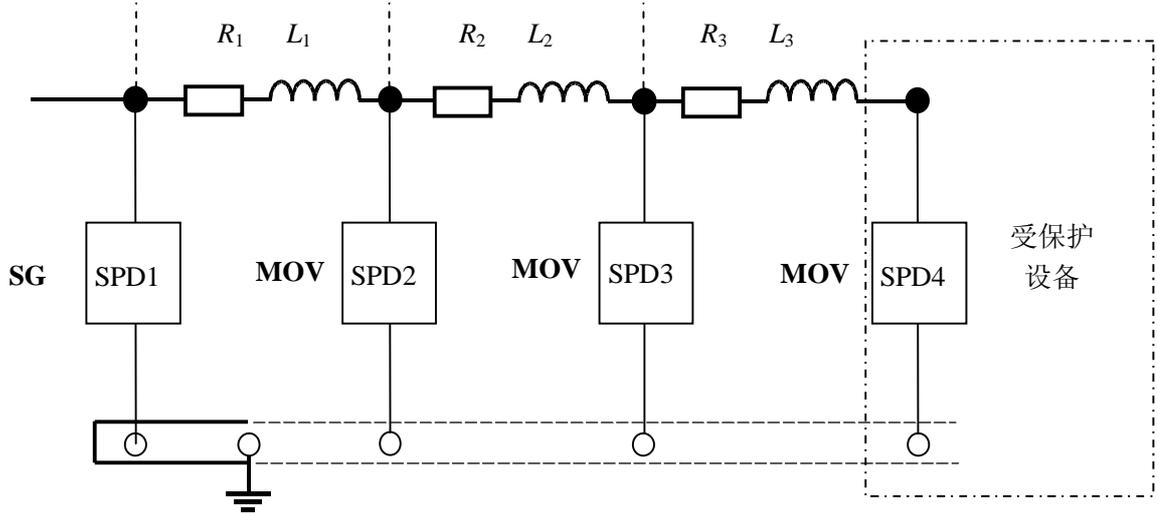
注 - 该方案要求受保护设备内部保护元件 (SPD 4) 的残压高于直接安装在其前面的 SPD (SPD 3) 的残压。

E. 2. 4. 3 方案 III

SPD 1 具有不连续的伏安特性 (例如放电间隙), 后续 SPD 具有连续伏安特性 (例如 MOV 或雪崩二极管)。所有 SPD 具有相同的残压 U_{RES} (图 E. 15)。

该方案的特点是, 通过 SPD 1 的开关动作, 达到减小原始电流脉冲 $10/350 \mu s$ 的半峰值的时间, 从而减缓对后续 SPD 的负荷量。

注 - 关于信息线路的额外信息在 ITU-TS 中给出。



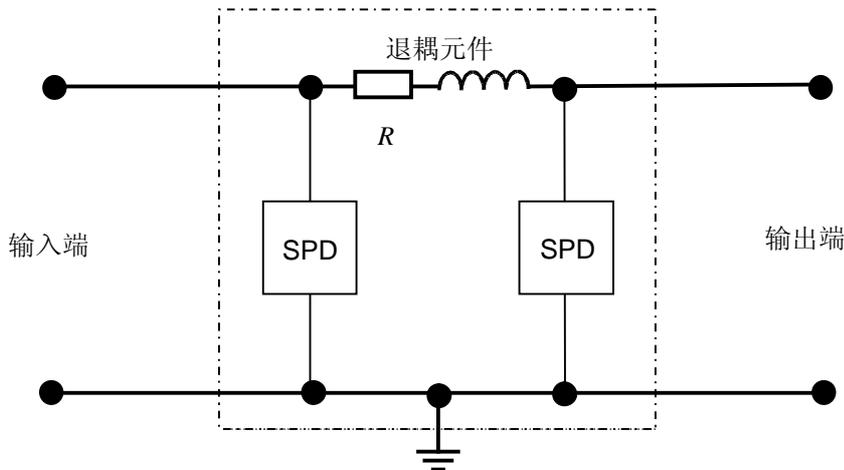
$$SPD1 = U_{RES} (SPD2) = U_{RES} (SPD3) = U_{RES} (SPD4)$$

图 E. 15 配合方案 II (电压开关型和限压型 SPD)

E. 2. 4. 4 方案 IV

用双口 SPD 串联阻抗或滤波器组合在一起 (图 E. 16)。成功的内部配合意味着最小的能量被传输到下游 SPD 或设备。这些 SPD 应在系统中和其他 SPD, 包括方案 I, II 或 III 中的 SPD 进行充分配合。

注 - 如果通过其他适当的方法可以确保能量配合, 串联阻抗或滤波器可以被省略 (例如伏安特性的配合或使用触发型 SPD)。



$$U_{RES} (SPD1) = U_{RES} (SPD2) = U_{RES} (SPD3)$$

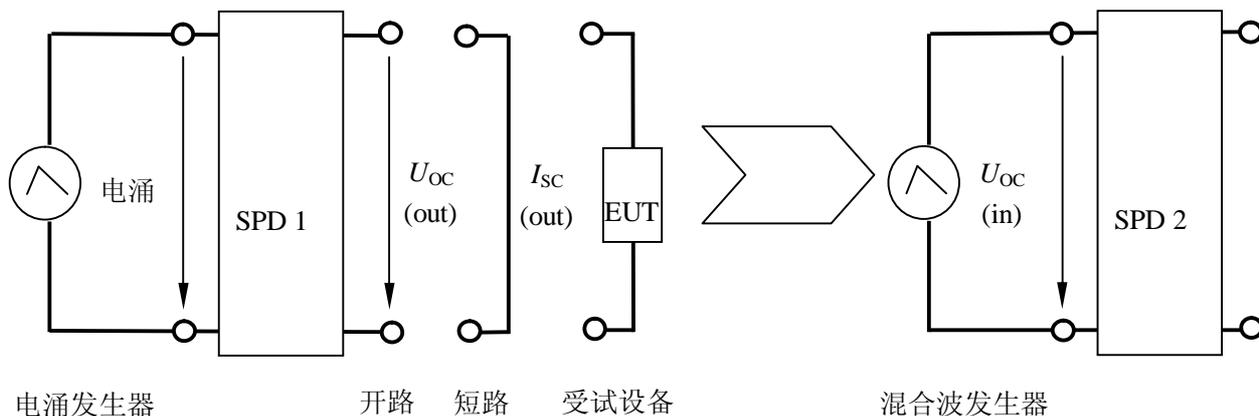
注 - 如果通过其他合适的措施可以确保能量配合, 可以省略串联的阻抗或滤波器 (例如伏安特性的配合)

或使用触发型 SPD)。

图 E.16 配合方案 IV (双口 SPD, 有若干限压元件组成)

E.2.5 符合“容通能量”法的配合

混合波发生器产生的脉冲可用于 SPD 的选择和配合。此方法的优点是能够将 SPD 视为一个黑盒子 (图 E.17)。对 SPD 1 输入给定电涌电流, 而开路电压和短路电流的输出可以被确定 (“容通能量”法)。这些输出特性被转换为等效的“ 2Ω 虚拟阻抗”(开路电压 $1.2/50$, 短路电流 $8/20$)。此方法的优点是不需要了解关于 SPD 内部设计情况。



将 U_{oc} (输出) 和 I_{sc} (输出) 转换为等效混合波:
 U_{oc} (波形 $1.2/50$) μs I_{sc} (波形 $8/20$) μs $Z_i = 2\Omega$

图 E.17 符合“容通能量”法的配合

注 - 当 SPD 2 对 SPD 1 无反馈时“容通能量”法可给出明显的结果, 这就意味着, SPD 2 输入端电涌的情况是准强制电流的状况。这是当 SPD 1 和 SPD 2 的伏安特性差异很大时的情况 (例如放电间隙与 MDV 的配合)。

适当配合下, 在 SPD1 的输出端的混合波值不会超过 SPD2 能承受的值 (不致损坏)。

在 SPD 1 输出端的等效混合波由承受能量 (I_{max} , U_{max} , 容通能量) 的最严酷情况来确定。

E.2.6 检验配合

配合可通过以下方法检验:

- Y 配合测试: 配合应按每个案例逐个进行测试。
- Y 计算: 简单案例可以估算, 复杂案例需要计算机模拟。
- Y 配合 SPD 组的应用: 在这种情况下 SPD 制造商应配合检验。