



SURGE ARRESTER

避雷器设计 工艺与试验



封面设计 玉林

编辑：西安高压电瓷厂

地址：西安西郊大庆路

印刷：兵器部二〇三所印刷厂

（内部资料）

73.2788

8602483

避雷器设计与试验

张运庭 李敏忠 何正林 等编
谭幼谦 欧阳昌宜 李启盛

13B602/01

西安高压电瓷厂

1985年·西安

前 言

本书由我厂组织编写，其内容涉及到避雷器的广泛方面。编写本书的目的有三个：

一、为本厂从事与避雷器有关工作的同志提供一份有实用价值的参考资料。对内容经过适当的选择，也可作为本专业的有关培训教材；

二、作为避雷器制造厂，有责任为电力系统从事过电压保护与实际运行工作的广大工人与技术人员提供有关避雷器结构、特性、制造工艺与试验等方面的技术咨询服务；

三、通过本书与国内避雷器制造厂及有关单位进行积极的技术交流，虚心学习兄弟单位的先进技术经验，为共同提高我国的避雷器技术水平尽一些微薄的力量。

本书由李敏忠同志主编。第一篇由张运庭同志编写、段庆成、罗济元同志校阅；第二篇由李敏忠同志编写，欧阳昌宜同志校阅；第三篇由何正林同志编写，谭幼谦同志校阅；第四篇由欧阳昌宜同志编写；第五篇由李启盛同志编写。参加本书部分编写工作的还有：吴翠屏、罗晋煌、陈锦良、韦玉清、丁柱平、胡文、张玉容等同志。

中国电瓷公司陈守誠总工程师为本书作序，水利电力部电力科学研究院李启盛同志在百忙中应约为本书撰稿，谨向他们表示由衷的敬意。

本书编写中得到唐振铭厂长及周慕玲总工程师的关怀和支持，我厂不少同志为本书提供插图并承担描图、誉写、复印等工作。兵器工业部 203 研究所印刷厂在承担本书印刷工作中多方配合，在此一并致谢。

由于我们水平很低，又是初次承担这样的工作、缺乏经验，加之时间仓促，疏漏和错误处在所难免，竭诚期望各方的批评指教。

一九八五年十月

序

避雷器(英文原为 Lightning arrester, 现为 Surge arrester)在电力系统绝缘配合和过电压保护方面占有重要地位,是现代电力系统安全运行的基础之一。一向为电力运行和电力设备制造部门所重视。现西安高压电瓷厂和水电部电力科学研究院几位有经验的工程技术人员,对西瓷厂生产的各种避雷器产品的结构设计、碳化硅非线性元件、避雷器的试验、使用、维护,以及近代新发展起来的氧化锌避雷器作了系统的总结和介绍,对制造部门和运行单位的工作人员很有参考价值。

最原始的避雷器基本是保护间隙,其形式有多种,由于动作时产生截波及放电分散性大、不易灭弧等缺点,使用不久便被淘汰了。随后,发现了具有非线性伏安特性的电阻材料,并用来制成阀式避雷器。由最初的 Alluminum cell 避雷器、oxide film 避雷器、丸式(Pellet)避雷器,逐步发展到碳化硅避雷器,并由散粒的碳化硅材料改进为目前采用不同结合剂烧结的、具有良好的非线性与通流能力的高性能阀片。七十年代又研制成功以 ZnO 为主要成分的新一代非线性电阻材料,它具有更为优异的特性。

随着电压等级的提高,避雷器的间隙结构也有了明显的进步。从简单的羊角间隙发展到各种形式的平板间隙,其后,又出现了驱使电弧旋转的磁吹间隙,为了满足超高压避雷器的需要,进而发展了使电弧移动、拉长的限流型间隙,以及为减小放电分散性的各种控制回路。在配电避雷器方面,则发展了各种形式的自吹间隙。

碳化硅避雷器发展到目前阶段,其保护性能较好地满足了电力系统不断提高的技术要求,但也随之出现了诸如产品结构复杂等矛盾。氧化锌非线性电阻由于其优异的非线性特性,可用以制成无间隙避雷器,使产品结构简化,将逐步取代碳化硅避雷器。

西安高压电瓷厂为我国第一个五年计划期间由苏联援建的工厂之一。早期生产普阀式避雷器。后来,此类产品扩散到国内许多避雷器制造厂。五十年代中后期,我国有关制造、研究和教学单位学习国外经验,研制成功了采用同心圆间隙的磁吹避雷器;六十年代初,西安高压电瓷厂和当时设在工厂的西安电瓷研究所,开发了致密性陶瓷限流间隙、高温阀片并研制成功新型的超高压避雷器,有力地配合了当时我国 330 kV 输电线路的建设。

本书用较多的篇幅介绍了西安高压电瓷厂生产的各种碳化硅避雷器及放电计数器产品。值得提出的是,书中首次介绍了保护性能较好的、带自吹式限流间隙的配电型避雷器,以及采用多孔陶瓷限流间隙、控制间隙、串级放电控制回路及高性能阀片组成的电站型避雷器,该产品具有优异的特性,其整体结构的许多方面完全适用于氧化锌避雷器。

本书较全面地介绍了碳化硅阀体材料,包括电工碳化硅的冶炼及加工技术、阀体制造工艺等,这些都是西安高压电瓷厂多年的经验总结。此外,对碳化硅半导体非线性电阻的基本概念,在理论上也作了很好的介绍。

本书较详尽地介绍了避雷器的试验技术,包括试验电压的产生、高压测量和避雷器的试

验方法等，具有较好的实际参考价值。

本书用一定的篇幅对目前广为关注的氧化锌避雷器进行了较全面的阐述，其内容包括氧化锌非线性电阻的基本理论、配方与工艺及氧化锌避雷器的结构设计与试验方法等。

本书最后用两章篇幅扼要地介绍了避雷器在发、变电所中的应用及运行、维护等内容，紧密地结合了系统过电压保护的运行实际，对电力运行部门正确选择与使用避雷器具有一定的参考价值。

我国现阶段仍然大量生产和使用碳化硅避雷器，本书的出版对普及和提高我国的避雷器制造技术，沟通制造与使用部门之间的技术交流，将产生有益的影响。

陈守誠

1985年9月11日

目 录

第一篇 避雷器设计与产品装配工艺

第 1 章 概述

- 1.1 避雷器的作用与工作原理..... (1)
- 1.2 避雷器的保护特性和绝缘配合..... (3)
- 1.3 避雷器的名词术语与主要特性参数..... (4)
- 1.4 避雷器产品的分类与型号..... (6)

第 2 章 过电压

- 2.1 大气过电压..... (8)
- 2.2 工频过电压..... (10)
- 2.3 暂时过电压..... (12)
- 2.4 操作过电压..... (14)

第 3 章 避雷器的间隙

- 3.1 间隙的作用与分类..... (18)
- 3.2 平板间隙..... (18)
- 3.3 电弧自吹式间隙..... (20)
- 3.4 磁吹限流间隙..... (22)
- 3.5 控制间隙简介..... (26)
- 3.6 灭弧盒制造过程简述..... (28)

第 4 章 普通阀式避雷器

- 4.1 FS4 及 FS8 系列配电用避雷器的结构与保护特性..... (31)
- 4.2 FS10 系列配电避雷器的结构与保护特性..... (35)
- 4.3 FS 系列配电避雷器的装配..... (37)
- 4.4 FZ 系列避雷器的结构与保护特性..... (39)
- 4.5 FZ 系列产品的装配..... (43)

第5章 磁吹阀式避雷器

5.1 电站用磁吹阀式避雷器	(44)
5.2 装配工艺	(62)
5.3 保护旋转电机用磁吹阀式避雷器	(66)

第6章 动作计数器

6.1 种类	(70)
6.2 JS-8 和 JS-8A 动作计数器	(73)

第二篇 碳化硅阀体材料

第7章 电工碳化硅的冶炼与加工

7.1 概述	(77)
7.2 碳化硅的性质与用途	(78)
7.3 碳化硅形成过程的物理化学原理	(87)
7.4 配合料	(93)
7.5 碳化硅冶炼炉及其供电系统	(104)
7.6 与冶炼炉有关的工艺过程	(119)
7.7 避雷器用碳化硅的特性与质量鉴别	(123)
7.8 碳化硅加工	(128)

第8章 碳化硅半导体非线性电阻的基本概念

8.1 概述	(139)
8.2 碳化硅阀片的基本特性	(139)
8.3 碳化硅阀片的非线性与破坏机理	(145)

第9章 碳化硅阀片制造工艺

9.1 低温阀片	(151)
9.2 高温阀片	(155)
9.3 喷铝	(181)
9.4 阀片的稳定处理与测试	(190)

第10章 非线性均压电阻

10.1 概述.....	(193)
10.2 非线性均压电阻的主要制造过程.....	(194)
10.3 非线性均压电阻的稳定处理与测量.....	(196)

第三篇 避雷器试验

第11章 试验电压的产生

11.1 交流高压的产生.....	(198)
11.2 直流高压的产生.....	(207)
11.3 冲击电压的产生.....	(212)
11.4 冲击电流的产生.....	(221)

第12章 高电压测量技术

12.1 交流(工频)高压测量.....	(233)
12.2 直流高压测量.....	(240)
12.3 冲击电压测量.....	(242)

第13章 避雷器试验

13.1 概述.....	(261)
13.2 避雷器的密封试验.....	(261)
13.3 避雷器在工频高压下的试验.....	(263)
13.4 避雷器冲击放电试验.....	(271)
13.5 冲击电流试验.....	(274)
13.6 避雷器动作负载试验.....	(278)
13.7 压力释放试验.....	(281)

第四篇 金属氧化物(ZnO)避雷器

第14章 氧化锌非线性电阻片的特性及其制造过程

14.1 氧化锌非线性电阻片的特性.....	(284)
------------------------	-------

14.2 氧化锌非线性电阻片的导电与劣化机理.....	(293)
14.3 氧化锌非线性电阻片的制造过程.....	(295)

第 15 章 氧化锌无间隙避雷器的特性与设计

15.1 氧化锌避雷器的特点.....	(304)
15.2 氧化锌避雷器的基本参数.....	(307)
15.3 氧化锌避雷器设计中若干问题的考虑.....	(310)

第 16 章 氧化锌避雷器试验

16.1 泄漏电流、工频参考电压及局部放电试验.....	(320)
16.2 动作负载试验.....	(322)

第五篇 避雷器的使用与维护

第 17 章 避雷器在发变电所中的应用

17.1 避雷器的选择.....	(331)
17.2 避雷器的安装位置及被保护设备上的过电压.....	(333)
17.3 被保护设备的绝缘水平与绝缘配合.....	(335)
17.4 用作特殊保护的避雷器.....	(337)
17.5 避雷器在配电系统中的应用.....	(339)
17.6 配电变压器的保护.....	(339)

第 18 章 避雷器的运行维护

18.1 阀式避雷器的运输保管.....	(341)
18.2 避雷器运行中的维护检查.....	(342)

第一篇 避雷器设计与 产品装配工艺

第1章 概述

1.1 避雷器的作用与工作原理

电气设备在运行中除承受工作电压外，还会遭受过电压的作用。由雷电引起的雷电过电压，或由开关操作等引起的操作过电压，其数值远超过工作电压，使设备绝缘损伤、寿命缩短；甚至直接导致损坏，造成停电事故。因此，必须采取各种措施来限制过电压。

避雷器是用来限制过电压的一种主要保护电器，通常联接于导线和地之间，与被保护设备并联。其保护作用见图 1-1。

当过电压沿导线传播侵入被保护设备，例如变压器时，若无避雷器保护，由于过电压峰值比较高，可能导致变压器绝缘受到损坏；如在变压器前装设避雷器，当过电压达到某一值时，避雷器间隙动作，过电压电荷通过避雷器泄入大地，其峰值将被限制在被保护设备绝缘所允许的水平下，从而使设备得到了保护。

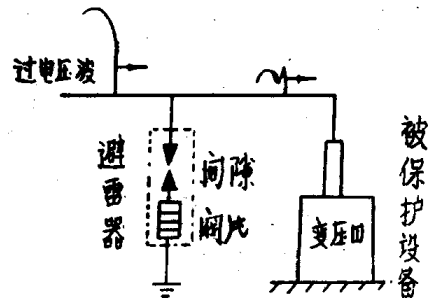


图 1-1 避雷器保护作用原理图

避雷器广泛用于交、直流电力系统中，保护发、变电设备，如变压器、旋转电机、电缆、电容器组、整流桥阀等设备的绝缘免受过电压侵害。

传统结构的阀式避雷器的主要元件是间隙和阀片，避雷器的保护作用就是通过间隙和阀片相互配合完成的。

简单间隙由两个电极组成，在其间形成空气隙。间隙距离可以调整，一定距离的间隙具有一定的放电电压。避雷器中使用的间隙还应具有一定的灭弧能力，灭弧能力的大小与间隙结构和所用材料有关。在系统正常运行状态下，间隙使带电导线与地隔离；一旦过电压出现并达到某一危及绝缘的电压值时，间隙放电，同时工频续流亦将通过游离了的通道流入大地，间隙必须在半周波内将续流熄灭，使系统恢复正常工作状态。

阀片是具有一定通流能力的非线性电阻，在过电压作用下，其阻值很小，使通过冲击电流时的残压不超过规定值；在工频续流下，其阻值变大，将续流限制在间隙的灭弧能力和阀片通流能力可以承受的水平。

阀片的非线性可以用伏安特性曲线来表示，图 1-2 为不同材料制成的阀片的伏安特性曲线。

以氧化锌为主要材料的金属氧化物阀片（以下简称： ZnO 阀片）的非线性优于 SiC 阀片。在标称放电电流下的残压相同的条件下，两种阀片在同一额定电压下通过的电流是不一样的： ZnO 阀片通过的电流是微安级，而 SiC 阀片则达到百安级。由于这个原因，氧化锌避雷器可以取消间隙，而碳化硅避雷器则无法做到这一点。因为，对后者来说，如果没有间隙，则在系统正常运行电压下，避雷器将通过很大的电流。这是阀片无法承受和系统本身不允许的。必须依靠串联间隙进行隔离并在避雷器动作过程中灭弧。

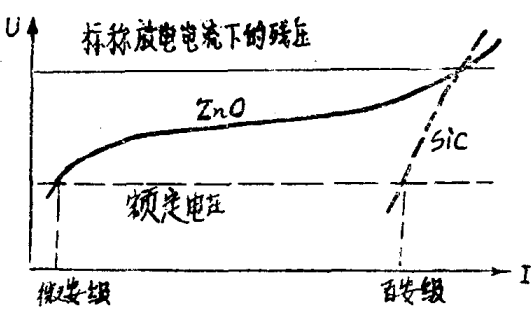


图 1-2 ZnO 和 SiC 阀片的伏安特性曲线

图 1-3 以磁吹阀式避雷器为例，说明碳化硅避雷器的动作过程和工作原理。为便于说明问题，将其工作过程分为四种状态：

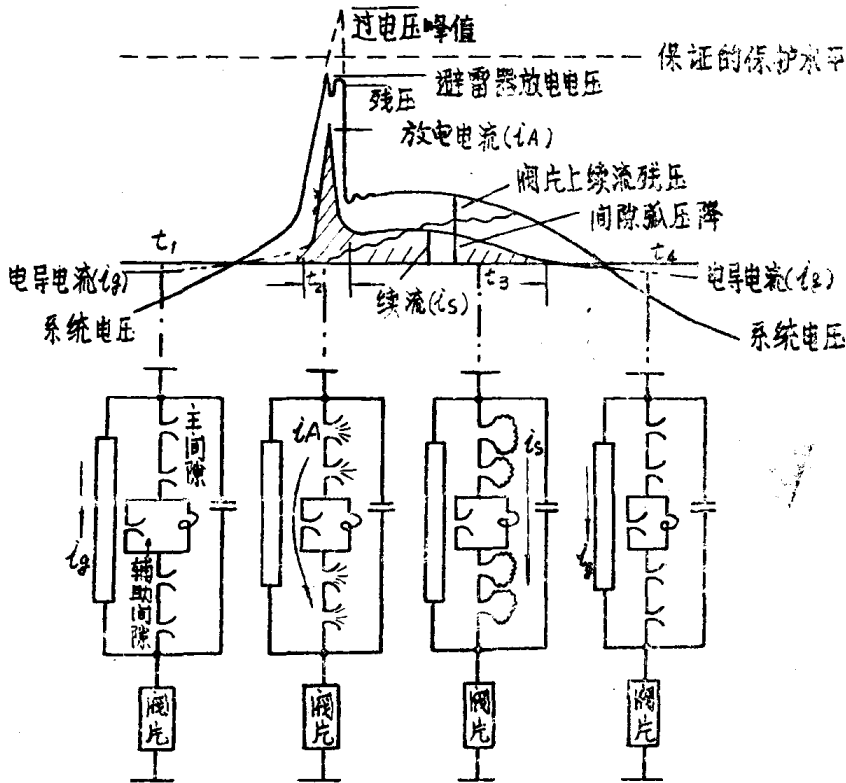


图 1-3 磁吹限流间隙的工作原理示意图

t_1 时刻 系统正常运行，避雷器处于通常工作状态。电导电流 I_G 通过均压电阻流入大地，系统电压通过均压电阻的作用均匀分配到每组间隙上，间隙将带电导线与地隔开；

t_2 时刻 过电压侵入，并叠加在系统相电压上，当过电压上升到避雷器放电电压时（虚

线表示过电压未被限制部分)，主间隙放电，放电电流 I_A 流过避雷器主、辅间隙和阀片。由于阀片的非线性，避雷器上的残压一般不超过其放电电压。在放电电流通过主、辅间隙时，由于羊角状电极的自吹作用，使电流离开起燃点成扇形吹开，避免电极烧损并产生一定的电弧压降，同时迫使电流由辅助间隙移向线圈。

t_3 时刻 续流 I_s 沿着已游离化了的通道通过主间隙和线圈，线圈产生的磁场垂直通过主间隙。此磁场使电弧吹开、拉长、挤压，强烈去游离，产生很高的电弧压降，电弧电阻与阀片电阻共同限制续流并使之熄灭。

t_4 时刻 续流熄灭以后，间隙将带电导线与地隔开，恢复通常对地绝缘的工作状态。

至此，避雷器完成了一次完整的保护动作过程。

图中上面的部分为作用于避雷器的电压、电流示波图，下面的部分为避雷器的主要电气元件工作状况的示意图。

1.2 避雷器的保护特性和绝缘配合

避雷器的保护特性是指避雷器在标称放电电流下的残压和冲击放电电压值。如避雷器的残压和冲击放电电压低，表示其保护特性好；反之，则保护特性差。

绝缘配合曲线用来表征避雷器的保护特性与被保护设备（例如变压器）绝缘的耐电强度之间的配合关系。若已知变压器绝缘的雷电耐受电压、冲击基准绝缘水平与操作冲击绝缘水平所组成的耐压特性曲线，如图 1-4 曲线 I，以及在同图中作出的避雷器的全伏秒特性曲线与残压值，如曲线 II。二者组成了绝缘配合曲线。避雷器的全伏秒特性曲线是指 $0.5 \sim 2000 \mu s$ 范围内避雷器的放电电压与预放电时间关系的曲线。

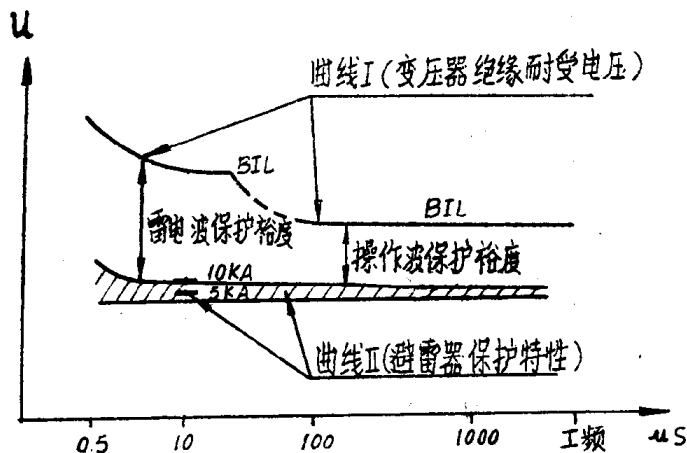


图 1-4 变压器和避雷器绝缘配合曲线

从图 1-4 看出，曲线 I、II 之间有一定间隔，称为保护裕度。它反映了避雷器限制过电压的水平和变压器绝缘所能承受的电压之间的关系。保护裕度愈大，对变压器保护愈可靠，

但裕度过大将增加设备的制造成本。保护裕度应根据长期的运行经验并考虑各方面因素，从经济技术角度进行综合分析、平衡后确定。一般在标准雷电波下的裕度取 40 % 左右，操作波下取 20 % 或更高些。

在维持保护裕度不变的情况下，通过避雷器保护特性的改善，即可降低设备的绝缘水平。高压设备的体积、重量、价格在很大程度上取决于设备的绝缘状况。变压器绝缘水平每降低一级，其造价可降低 6-7 %。随着电压等级的提高，变压器的造价急剧增加。因此，改善避雷器的保护特性将带来巨大的经济效益。图 1-5 反映了世界各国不同年代电压等级的发展情况，和避雷器保护特性改善与绝缘水平下降的趋势。

在较低电压等级下，绝缘水平主要由雷过电压决定；随着电压等级向高压、超高压发展，由于雷过电压并不随电压等级的提高而按比例增加，已逐渐变成非决定性因素，而操作过电压却逐渐成为决定绝缘水平的主要依据。限流型磁吹阀式避雷器就是在这种形势下发展起来的，它既能限制雷电过电压，也能限制操作过电压。

80 年代以来，世界各国广泛研究、发展了氧化锌避雷器，由于它具有优异的伏安特性和通流能力，且结构简单，已成为当前避雷器技术的发展方向。

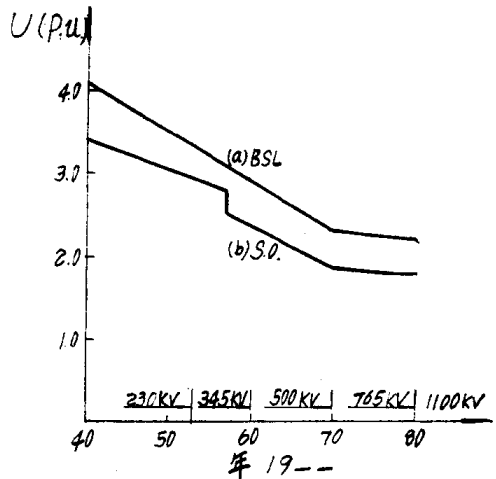


图 1-5 年代电压等级和绝缘水平变化情况

1.3 避雷器的名词术语与主要特性参数

1. 保护特性 表征避雷器保护作用的特性数值，由下列四方面构成：

- (1) 避雷器的雷电冲击放电伏秒特性；
- (2) 标称放电电流下避雷器的残压；
- (3) 避雷器的操作冲击放电伏秒特性；
- (4) 在操作冲击放电电流下避雷器的残压。

通常所说的保护水平，其含义是指避雷器的冲击放电电压和标称放电电流下的残压的总称，其值取它们之中最大者。

2. 残压 放电电流通过避雷器时，其端子间所呈现的电压。又分为：

- (1) 标称放电电流下的残压 其电流参数为：波形 8/20 μ s，峰值 5 kA、10 kA、15 kA 或 20 kA。
- (2) 操作冲击放电电流下的残压 其电流参数为：波形 30/60 μ s，峰值 1.5 kA、2 kA、3 kA。

3. 冲击放电电压 以给定波形和极性的冲击电压施加到避雷器上，在其放电之前所达到的最大电压值。又分为：

(1) **标准雷电冲击放电电压** 即用波形 $1.2/50\mu s$ ($1.5/40\mu s$) 冲击电压获得的避雷器的放电电压;

(2) **操作冲击放电电压** 分别用波前时间为 $30\sim 60\mu s$ 、 $150\sim 300\mu s$ 、 $1000\sim 2000\mu s$ 的冲击电压获得的避雷器的放电电压, 并取其中最高者;

(3) **波前冲击放电电压** 用波前陡度为 $1200\text{ kV}/\mu s$ 的冲击电压所获得的避雷器的放电电压。

4. **工频放电电压** 施加于避雷器端子间、使全部串联间隙发生放电的工频电压的峰值除以 $\sqrt{2}$ 所得的值。通过多次试验可获得其放电电压的上、下限。

5. **额定电压 (灭弧电压)** 避雷器能可靠灭弧的最大允许工频电压。一般由系统发生单相接地时, 非故障相上的工频电压升高决定, 并与系统接地情况有关。对中性点非直接接地系统, 其值应不低于系统最高运行线电压的 110% ; 对中性点直接接地系统, 其值为系统最高运行线电压的 80% 左右。

6. **保护比** 不同电压等级避雷器的残压是不同的。为了对不同电压等级的避雷器的保护性能进行比较, 采用保护比这个概念, 它是避雷器残压和灭弧电压之比, 即

$$K_{\text{保}} = \frac{5\text{ kA 或 } 10\text{ kA 下的残压 (峰值)}}{\text{灭弧电压} \times \sqrt{2}}$$

其值愈小, 说明避雷器的保护性能愈好。

7. **切断比** 表征避雷器灭弧能力的一个参数, 其定义为避雷器工频放电电压的下限与灭弧电压之比, 即

$$K_{\text{切}} = \frac{\text{工频放电电压下限}}{\text{灭弧电压}}$$

其值愈小, 说明间隙的灭弧能力愈好。当同一间隙通过的续流值不同时, 其切断比亦不同。

8. **通流容量** 阀片承受通过电流的能力, 在规定波形和通流次数下, 以电流的峰值来表示。试验后阀片参数的变动应不大于允许值。

(1) 大电流通流能力

波形 $4/10\mu s$, 峰值 65 kA 或 100 kA , 2 次。

(2) 方波通流容量

持续时间为 $2000\mu s$ 的近似方波, 通过 20 次, 其电流值依产品而异, 规定如下:

FS 系列	75 A
FZ 系列	150 A
FCZ 3——220 J 及以下等级	600 A
FCZ 1——330 J	800 A
FCZ——500 J	1000 A
FCZ10——444 等	1400 A

9. **输电长线能量释放** 高压或超高压避雷器要求具有保护操作过电压的能力，当避雷器在此过电压下动作时，需要释放储存在空载线路上的电场能量 $(\frac{1}{2} CU^2)$ 。为了考核避雷器的这种能力，用集中参数电路模拟线路特性，对避雷器比例元件进行试验。线路释放能量由线路电容 $(\mu F/km)$ 、波阻抗和充电电压（过电压倍数）等参数决定。FCZ 10——492型避雷器应能释放 420 km 长线路（波阻抗为 325 Ω ，线路充电电压为 2.4 倍灭弧电压）的能量。

10. **标称放电电流** 采用波形 8/20 μs ，峰值 5 kA、10 kA、15 kA 或 20 kA 的冲击电流来表征。

11. **续流** 避雷器动作时，通过它的电源电流。其值在产品的设计时决定，一般为：

FS 系列	50 A
FZ 系列	80 A
FCD 系列	300 A
FCZ 系列	450 A
FCZ 10 系列	1000 A

12. **非线性系数 (α)** 非线性电阻的伏安特性一般可用下式表示：

$$U = CI^\alpha$$

式中：U——非线性电阻上的电压降；

I——通过非线性电阻的电流；

C——材料常数；

α ——非线性系数。

1.4 避雷器产品的分类与型号

依避雷器的用途不同，可分以下类别：

用于保护配电变压器的称**配电用避雷器**；

用于保护变电站的称**电站用避雷器**；

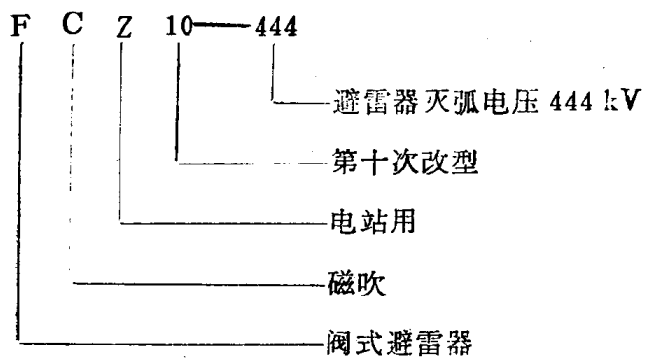
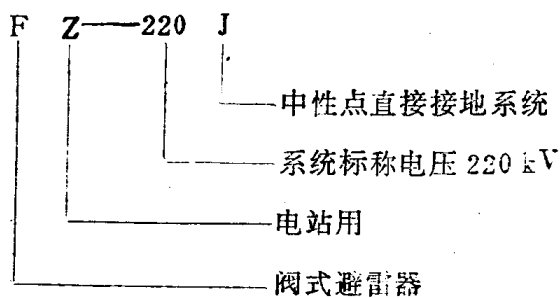
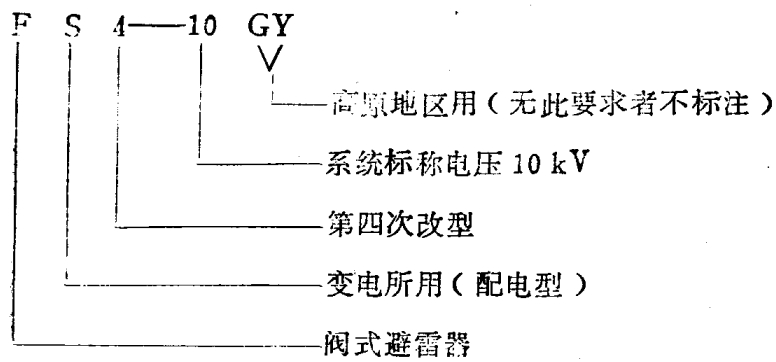
用于保护旋转电机的称**保护旋转电机避雷器**；

用于保护直流场合的称**直流避雷器**。

电站用避雷器由于保护特性及使用电压等级不同，又分为普通阀式电站避雷器与磁吹阀式电站避雷器。前者使用电压等级为 3 kV~220 kV，后者为 3 kV~750 kV 或更高。

直流避雷器由于在换流站中保护的對象不同又分为直流侧保护用避雷器、交流侧保护用避雷器、保护平波电抗器用避雷器、保护桥阀用避雷器、保护中性线用避雷器等。

避雷器产品的型号通常由两部分组成：前一部分表示避雷器的种类，用途和改型次序；后一部分表示使用避雷器的电力系统的标称电压或避雷器的灭弧电压。兹将几种常用避雷器系列产品型号标记及其意义介绍如下：



注：前两种型号是过去惯用的标注方法，后一种系84年开始采用的、改进的标注方法。考虑到使用于同一系统电压的避雷器其灭弧电压可能不同，如 500kV 电压等级就有四种灭弧电压的避雷器，分别为 420kV、444kV、468kV、492kV，如标注系统电压就无法区别，标灭弧电压则一目了然。