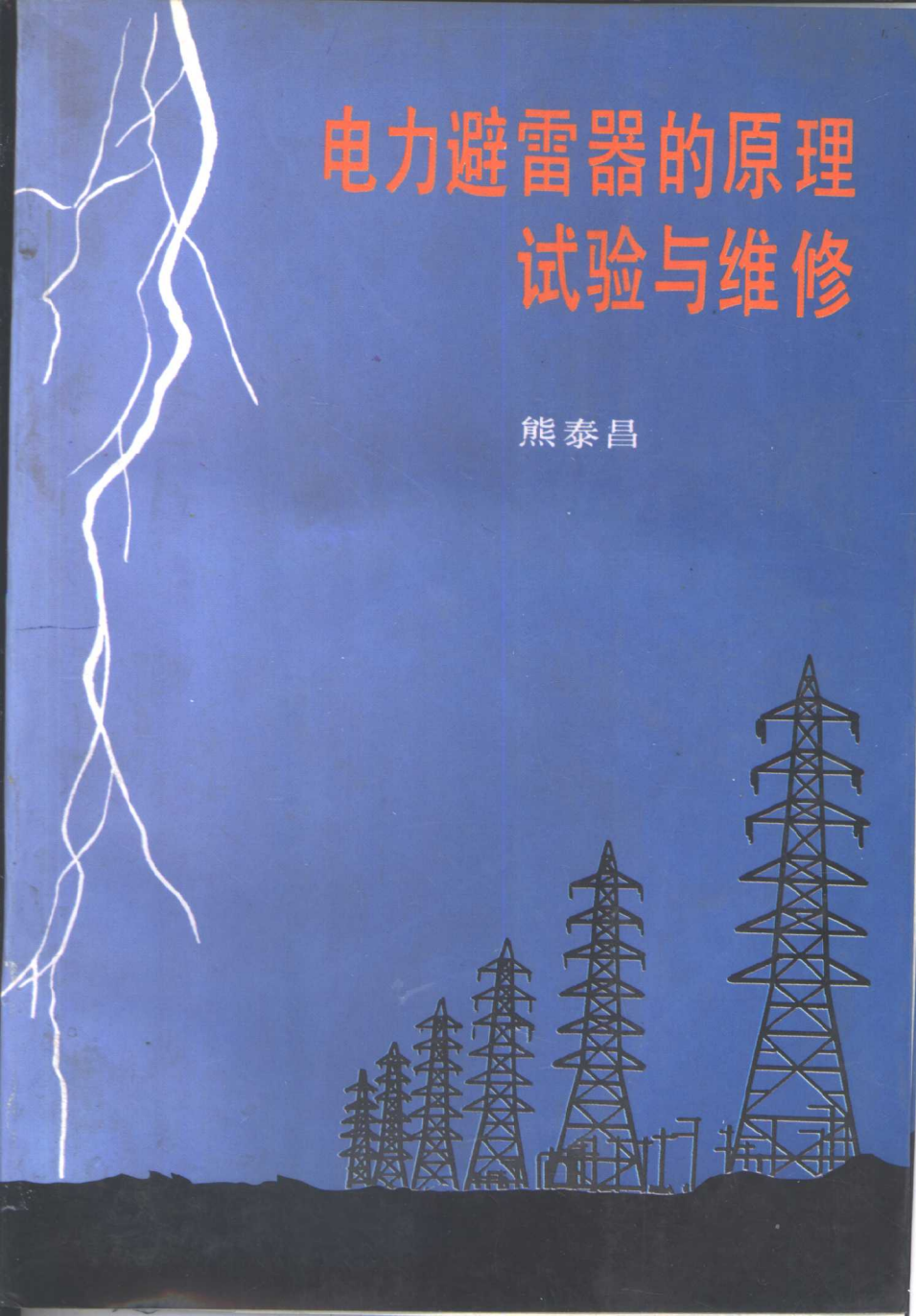


电力避雷器的原理 试验与维修

熊泰昌



电力避雷器的原理 试验与维修

熊泰昌

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书系统地介绍了交流系统中的各种电力避雷器。内容包括避雷器的理论基础,与避雷器有关的电气性能计算,各种类型避雷器的结构和特性,避雷器的试验技术和研究方法,以及避雷器的选择、运行与维修。

本书主要供从事过电压保护工作的读者阅读,也可供电力设计部门、避雷器制造厂的有关技术人员及有关专业的师生参考。

电力避雷器的原理、试验与维修

熊泰昌

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.625印张 168千字

1993年4月第一版 1993年4月北京第一次印刷

印数 0001—6350册

ISBN 7-120-01735-7/TM·457

定价 6.70元

前 言

近几十年来，国际上电力工业及高压电器制造业有了很大的发展，在有关技术的研究与产品开发方面取得了辉煌的成就。避雷器是电力系统绝缘配合的基础，它对系统的经济建设、安全运行以及电气设备的设计和制造，都有着非常重要的影响。我国的避雷器制造业基本上是在建国初期建立的，多年来，经过许多制造厂和研究部门的不断努力，逐渐积累了大量宝贵的设计经验和运行经验，与之相关的技术规范也日臻完善。近来，在自行研究和引进技术的基础上，我国的避雷器制造技术、试验技术与国际先进水平之间的差距正逐步缩小，取得了可喜的成果。

为给广大的使用者和制造业有关人员在避雷器的选择、运行与试验维修工作中提供一些参考，并促进各类避雷器产品的标准化工作，作者试图根据国内外的经验以及自己的体会编写一本较系统的参考书。但是，由于篇幅所限，既要详尽地介绍避雷器的原理、结构、试验研究方法和维修技术，又要概括地反映当前最新的研究成果，是具有一定困难的。再加之作者学识水平有限，本书距离各类读者的需求肯定存在很大的差距，其中难免夹杂不少错误和缺点，为此，非常欢迎提出宝贵意见，作者不胜感激。

在本书编写过程中，作者得到了赵安泰先生、孙林高级工程师热情的支持与指导；梁毓锦教授悉心地审阅了初稿全文，并提出了许多宝贵的建议；此外，在编写过程中，作者

1981/05

还得到了西安电瓷研究所、西安高压电器研究所、能源部电力科学研究所、华东电力试验研究所、西安高压电瓷厂、抚顺电瓷厂和上海电瓷厂许多同志的大力支持与帮助。在此一并致谢。

作者

1989年2月于上海

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 避雷器的分类及基本概念	3
第一节 避雷器的分类	3
第二节 避雷器的工作原理	5
第三节 通过避雷器的雷电流	7
第四节 电气性能的计算	15
第二章 交流阀式避雷器	26
第一节 避雷器的非线性电阻元件	26
第二节 熄弧原理和避雷器的火花间隙	32
第三节 电压分布与放电特性的调整	44
第四节 密封结构与压力释放装置	51
第五节 阀式避雷器的结构、用途与性能	56
第六节 特殊场所中使用的避雷器	74
第三章 交流氧化锌避雷器	80
第一节 概述	80
第二节 氧化锌电阻的微观结构和导电机理	83
第三节 氧化锌避雷器的电气特点	88
第四节 氧化锌避雷器的结构与性能	103
第四章 交流碳化硅避雷器与氧化锌避雷器的 试验技术	119
第一节 直流电压试验	119
第二节 工频放电电压试验	123
第三节 冲击电流残压的测量	127
第四节 冲击放电电压试验	135

第五节	通流容量试验.....	140
第六节	氧化锌避雷器交流电压试验.....	147
第七节	氧化锌避雷器预期寿命的测定和加速老化 试验.....	152
第八节	动作负载试验.....	157
第九节	密封试验和检漏方法.....	165
第十节	机械试验.....	170
第十一节	压力释放试验.....	173
第十二节	避雷器的其他试验.....	177
第五章	避雷器的选择、运行与维修.....	192
第一节	绝缘配合与避雷器的选择.....	192
第二节	预防性试验.....	198
第三节	避雷器的安装与运行中的监测.....	204
第四节	避雷器动作负载的分析.....	213
第五节	避雷器的检修.....	226
参考文献		235

绪 论

避雷器是一种重要的过电压保护电器，其性能的优劣不但对电气设备安全运行起着很大的作用，而且对电力系统的经济效益，特别对超高压输电系统建设的经济效益，具有显著的影响。

在电力工业发展的早期，系统的额定电压较低，电气设备的绝缘水平足以承受操作过电压的作用，而幅值在几十到几百千伏的雷电过电压构成的威胁比系统中的操作过电压大得多，因此顾名思义，避雷器最初的功能就是限制雷电过电压。随着超高压系统的出现，操作过电压可以达到几百千伏甚至更高的数值，又因其持续时间长，破坏能量大，所以变成电气设备的主要威胁。为了安全供电，并考虑系统建设的投资，经验和计算研究都表明，除了在运行方式和断路器设计方面采取一定的措施之外，还必须用避雷器来限制一些操作过电压。在这种形势下，具有吸收较大能量，并能够有效地限制切、合空载长线等引起的操作过电压的磁吹避雷器得到了发展。磁吹避雷器的出现还给中、高压电气设备增加了保护裕度，减少了系统中的过电压事故。

自70年代以来，各国对用氧化锌为主要成分制造的金属氧化物避雷器（又称氧化锌避雷器）进行了大量的研究工作。这种新型避雷器具有异常优良的非线性特性和良好的通流能力，给设备提供更低的保护水平和更大的保护裕度，对超高压系统意义尤为重大。

现代的避雷器在运行中实际担负着限制雷电过电压和操

作过电压的双重任务，所以有些国家改称之为限压器（Огранитель Перенапряжения）或波限制器（Surge Arrester），这些名称更符合它们的实际功用。我国现在仍称之为避雷器，这只是沿袭俗称而已。

我国的避雷器制造业基本上是在建国初期建立和发展起来的。多年来，一些主要制造厂和科研单位进行了大量的开发工作，同时还吸收引进了国外的先进技术，促进了国产避雷器的生产能力，科学研究水平也得到了不断提高。现在，我们不但能够制造各个高电压等级的避雷器，而且近年来还成功地研制了500kV超高压避雷器。同时，在氧化锌避雷器的研究方面也取得可喜的成果，某些产品已经接近了国际先进水平。可以预言，今后在我国四化建设事业中，避雷器制造水平将会有更大的进步，从而进一步促进蓬勃发展的电力工业。

第一章 避雷器的分类及基本概念

第一节 避雷器的分类

避雷器在自其问世以来的半个多世纪里，逐渐由早期的羊角型保护间隙、二氧化铅丸阀式避雷器和铝电解避雷器等发展成为现代的几种系列产品，保护性能也日臻完善。

现代避雷器按其所在电网的电压种类可分为交流避雷器与直流避雷器。按其用途可分为电站型避雷器、配电型避雷器和特殊用途避雷器（保护电动机、发电机、补偿电容器组和变压器中性点专用避雷器以及六氟化硫避雷器）。按其工作条件可分为正常型避雷器、高原型避雷器、耐污秽型避雷器、多雷地区用避雷器以及工作于GIS组合电器中的六氟化硫避雷器。按其工作原理则可分为以下型式：

- | | | |
|----------------------|---|---|
| 排气型避雷器 | { | 管型避雷器
无续流管型避雷器 |
| 阀式避雷器 | { | 普通阀式避雷器
磁吹阀式避雷器 |
| 金属氧化物避雷器
(氧化锌避雷器) | { | 无间隙金属氧化物避雷器
带并联间隙的金属氧化物避雷器
带串联间隙的金属氧化物避雷器 |

在交流避雷器中，排气型避雷器是依靠其内腔产生的高压气体来熄灭电弧的，避雷器动作时喷射出大量炽热的气体，因而称为排气型。这类避雷器的典型代表是管型避雷器，它能切断较大的电流，适合安装在变电站的进线段以及线路上

某些绝缘薄弱的地点。无续流管型避雷器是在前者的基础上设计的，它的内间隙由紧密压在一起的两块产气材料之间的细缝构成，因而产气材料可在雷电流通过避雷器的最初瞬间产生压力很大的气体，立即将幅值还很小的工频续流切断，形成所谓无续流开断。无续流管型避雷器主要用在农村配电网中，有时也可用于保护非重要的配电变压器。但是，由于排气型避雷器固有的结构特点，它的火花间隙暴露在大气中，电气性能不够稳定，所以这类避雷器使用得很少，本书就不详细叙述了。

阀式避雷器内部由火花间隙和碳化硅制造的非线性电阻片组成，具有较好的保护特性，因而广泛地应用于各种电压等级的线路和电气设备上。阀式避雷器又分为普通阀式避雷器和磁吹阀式避雷器两种，前者的火花间隙形状简单，电阻片采用约 320°C 的低温烧成工艺制做；后者则利用电磁力驱动电弧，借以提高其熄弧和通流能力的磁吹间隙，它的电阻片是在约 1320°C 的温度下高温焙烧而成的，释放过电压能量大，因此，这种避雷器的性能比普通阀式避雷器更加优越，尤其适于用做超高压电站的过电压保护装置。

金属氧化物避雷器，主要指由以 ZnO 为基体，掺加少量 Co_2O_3 、 Sb_2O_3 、 Bi_2O_3 等金属氧化物做为“掺杂剂”，用特定工艺制成的电阻片组成的避雷器，因此又称氧化锌避雷器。与碳化硅避雷器相比，氧化锌电阻片的非线性特性极其优异，而且通流能力增大 3 倍左右，可以制成无间隙避雷器，具有更优越的特性。氧化锌避雷器是 70 年代中、后期出现的产品，为与沿用几十年的阀式避雷器加以区别，习惯上后者又称为传统型避雷器或碳化硅避雷器。在这类避雷器中，无间隙结构占了很大的比例，带串联间隙或并联间隙的氧化锌避雷器

仅用于一些中性点绝缘运行的系统或要求具有超常规保护性能的场所。因此，凡不加特指时，氧化锌避雷器即是无间隙氧化锌避雷器。

与交流系统不同，直流电弧不像工频电流那样有一个自然过零点，这给熄弧造成了困难。有间隙的直流避雷器必须依靠磁场力的作用将电弧拉伸，使弧压降与非线性电阻上压降之和最终超过避雷器两端电压时，才能实现强制熄弧。用于0.6~1.5kV牵引系统中的直流避雷器一般采用限流间隙或有永久磁钢的电弧拉伸间隙，结构比较简单。高压电站型的直流避雷器则采用可控重燃弧型的限流间隙或复合型间隙等，用于限制系统的操作过电压，以及避雷器本身在电流幅值较大时遮断直流电弧伴随出现的、类似截流现象所产生的有害过电压。由于直流避雷器用量较少，有关技术仍在发展中，所以本书也不详细叙述了。

无间隙金属氧化物直流避雷器也是一种新型的产品，在结构外貌上，它与交流系统的金属氧化物避雷器基本相同，只是使用的电阻片特性及设计方法与后者有所不同而已。

第二节 避雷器的工作原理

沿线路侵入电气设备的过电压波能够对设备的绝缘造成极大的危害，因此，必须将它们限制在安全的、设备能够承受的范围内。这种过电压波可能是输电线附近雷电活动引起的感应过电压，也可能是由于系统中运行方式改变、设备投入或退出运行等操作引起的操作过电压，还可能是雷电击中进线段以外的导线引起的过电压。为便于阐明避雷器的工作原理，首先从管型避雷器和碳化硅避雷器限制雷电过电压的

过程加以分析。

为了释放过电压的能量，需要在导线与大地之间接上避雷器。避雷器的作用是：正常情况下，它处于截止状态；而在超过避雷器保护水平的过电压波到达时，避雷器立即导通，限制了过电压的幅值，雷电流泄入大地后，还要切断在雷电流通过火花间隙（简称间隙）时形成的通道中导线流向大地的工频电流（称续流），最后，避雷器又恢复了绝缘状态。因此，避雷器的工作过程可概括分为三个步骤：限压、熄弧和恢复。

避雷器的限压作用首先是靠间隙来实现的。图1-1是避雷器动作时两端电压的波形，由图可见，管型避雷器动作时电压是一个截波，然后持续几十毫秒（几个周波）存在着高频振荡电压。阀式避雷器在间隙击穿后，它的端电压不降为零，而是具有一定数值的电压降，该压降是雷电流流过非线性电阻时产生的，称为残压，它决定避雷器的保护水平。

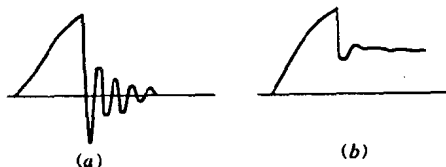


图 1-1 避雷器动作时两端的电压波形

(a) 管型避雷器；(b) 阀式避雷器

不同类型避雷器熄弧装置的构造是不同的。管型避雷器内部装有产气材料，能够在雷电流通过时产生大量的高压气体，借此将电弧吹断。阀式避雷器的间隙则必须依靠与其串联的非线性电阻片的配合把续流限制在一定的数值以下，才能将之遮断。普通阀式避雷器的 $\phi 52$ 和 $\phi 56$ 间隙都是由上、下

两片电极构成，在低温烧制的SiC电阻片限流作用下，相应可遮断50A和80A的工频峰值电流（设计值）。磁吹阀式避雷器的间隙有同心圆旋转电弧型和拉长电弧的限流型（因弧压降对续流有一定的限制作用）两种结构，配用高温烧制的SiC电阻片（早期设计的FCD型保护旋转电机磁吹避雷器曾使用 $\phi 250$ 低温电阻片），能够遮断300~800A甚至近千安的工频峰值电流。

避雷器的恢复过程就是指在它的间隙中去游离的过程。在这一过程中，充满在间隙气体中的离子和自由电子迅速消失，绝缘强度在几毫秒内得到恢复，这时间隙再度处于绝缘状态，保证了电网的正常运行。

图1-2以磁吹避雷器为例，示出了它在整个工作过程中的电压、电流变化情况。

无间隙氧化锌避雷器的限压作用是靠ZnO电阻片来实现的。ZnO电阻片的伏—安特性曲线非常优异，在工作电压下，泄漏电流只有毫安数量级，而且基本上是容性分量，接近绝缘状态。过电压发生时，电阻变得极小，便于释放能量。能量释放之后，电阻片又自行恢复到最初的高阻状态。由此可见，氧化锌避雷器在工作中是不产生电弧的，它工作的全过程只包括限压和恢复两个步骤。

第三节 通过避雷器的雷电流

流经避雷器的雷电流幅值、上升速度和持续时间是避雷器设计及运行监督工作的重要参考数据，其中，幅值大小是与线路绝缘水平、波阻抗和避雷器的阻抗有关的。在已知这些参数的前提下，可以估算出现于避雷器中的最大雷电流。

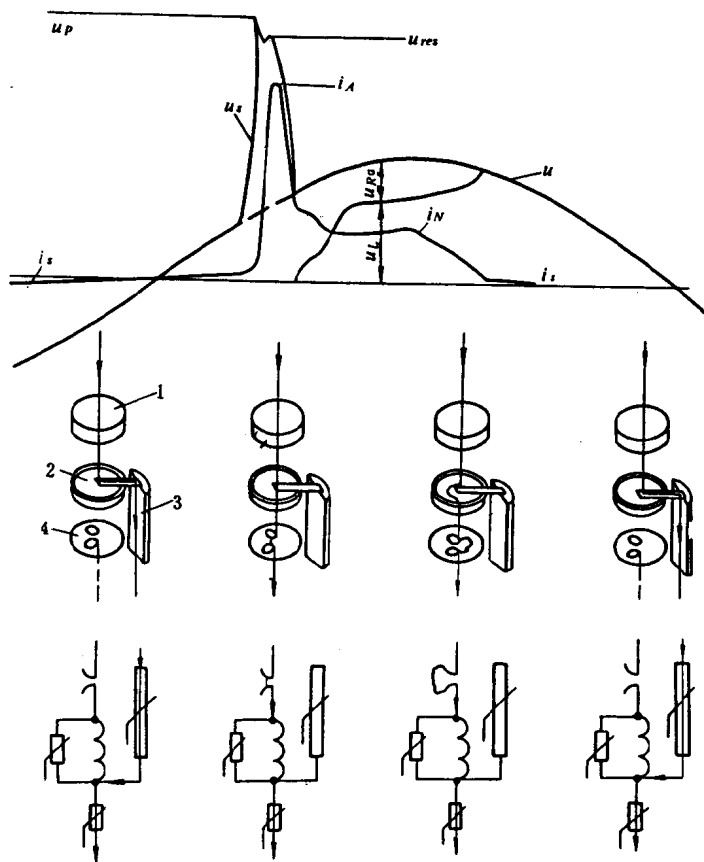


图 1-2 磁吹避雷器工作的全过程

1—高温SiC电阻片；2—吹弧线圈；3—分路电阻；4—熄弧间隙；
 u_p —冲击放电电压； u_{res} —残压； u_s —过电压； i_s —电导电流； i_A —冲击电流； u —电网电压； i_N —续流； u_{Ra} —电阻片上压降； u_L —弧压降

式 (1-1)是在有多路进线的变电站中，一组避雷器放电时雷电流幅值的计算式

$$I_m = \frac{2U_0 - U_{res} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)}{Z_1} \quad (1-1)$$

式中 U_0 ——线路的冲击绝缘强度，采用负极性50%冲击放电电压，kV；

Z_1 ——侵入侧线路波阻抗， Ω ；

Z_2 ——折射侧线路波阻抗，当折射侧有多路出线时取各路并联值， Ω ；

U_{res} ——避雷器通过 I_m 时对应的残压，kV。

对于单进线的终端变电站， $Z_2 \rightarrow \infty$ ，则上式为

$$I_m = \frac{2U_0 - U_{res}}{Z_1} \quad (1-2)$$

若用作图法进行计算，则如图1-3所示。

表1-1是根据式(1-2)计算得到的雷击进线段外时，各电压等级的单进线变电站中流经避雷器的最大雷电流幅值。实际上，由于雷击点的远近、避雷器安装的场所（线路上或变电站中）、进线段有无架空地线的保护以及波的多次反射等因素，流经避雷器的雷电流最大幅值是以一定的概率出现的。对于这一概率，各国在多年的观测和研究工作的基础上取得了大量的统计资料，图1-4示出了1961年以前苏联、美国和西德等国家公布的避雷器雷电流概率曲线。

苏联的数据中，出现的最大雷电流约为10kA，95%的避雷器雷电流都不超过2kA。

美国的数据表明，多数情况下，变电站有进线保护时，电站避雷器中出现幅值不小于5kA的雷电流概率仅为5%，

表 1-1

避雷器雷电流计算值 [1]

线路的额定电压 (kV)	35	60	110	220	330	500
绝缘子串数量和型号	$3 \times X - 4.5$	$5 \times X - 4.5$	$7 \times X - 4.5$	$\frac{13 \times X}{13 \times X} - 4.5 \sim -7$	$19 \times C P - 10$	$28 \times C P - 16$
线路的冲击绝缘强度 U_0 (kV)	400	600	800	1380~1620	1900	2860
I_m (kA)	1.8	2.5	3.5	5.0~6.4	9.9	15.7

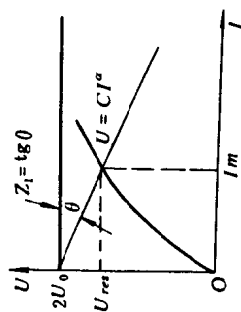


图 1-3 单进线变电站中避雷器雷电流计算图

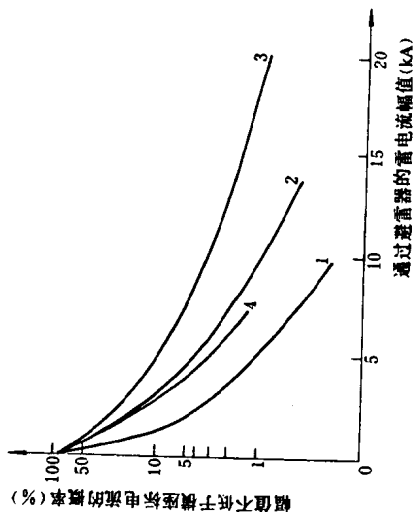


图 1-4 避雷器雷电流概率曲线

1—苏联1059次记录; 2—美国电站避雷器记录;
3—美国配电避雷器记录; 4—西德84次记录