

DIQU DIANWANG ZANTAI GUODIANYA
ZAI XIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG

地区电网暂态过电压 在线监测技术及应用

贵州电网有限责任公司 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

地区电网暂态过电压 在线监测技术及应用

贵州电网有限责任公司 编

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

地区电网过电压现象与线路及两端的变电站是密切相关的,对地区电网的暂态过电压监测尚未引起重视,当电网出现电气设备损坏的情况时,对事故原因的分析一直以来都是靠经验,往往造成事故分析不彻底、不明确。组成地区电网的过电压监测网络将有助于对过电压事件的分析与故障定位。

通过设计暂态过电压在线监测装置和建立宽频带过电压分压取样系统,开发地区电网过电压在线监测系统,并将其应用于贵阳“东部电网”的两个变电站,可实现对变电站及所连接线路的过电压实时监测。该系统既能够准确捕捉、记录从工频到雷电冲击的过电压数据,又能实现节省存储空间和记录快速波形的要求。

图书在版编目(CIP)数据

地区电网暂态过电压在线监测技术及应用 / 贵州电网有限责任公司编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-5170-7101-3

I. ①地… II. ①贵… III. ①地区电网—暂态过电压—在线监测系统—研究 IV. ①TM727.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第254635号

书 名	地区电网暂态过电压在线监测技术及应用 DIQU DIANWANG ZANTAI GUODIANYA ZAIXIAN JIANCE JISHU JI YINGYONG
作 者	贵州电网有限责任公司 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.75印张 231千字
版 次	2018年11月第1版 2018年11月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编 委 会

主 编：马春雷

副 主 编：谢荣斌 鞠登峰 李 冶

编写人员：马春雷 谢荣斌 鞠登峰 李 冶

马晓红 周 海 张 霖 薛 静

申 强 李诗勇 靳 斌 吴湘黔

陈 实 王瑞果 李忠晶 周 兴

张丽娟 仇一凡



电力系统过电压及绝缘配合水平的高低，决定了电力系统的技术经济性，也是影响电网可靠运行的重要因素之一。过去对过电压的观测没有好的技术手段，记录设备用过磁带机、录波仪和自制的分压器，现场测试需要克服各种条件限制。对于绝缘配合，主要采用过电压计算的方式，绝缘配合的数据也是沿用 IEC 国际标准的数据。国内除了在一些变电站验收时进行一段时间的操作过电压的测试外，很少能够进行过电压的连续在线监测，一方面，系统过电压包括的范围过宽，从雷电到操作到工频，变电站现场不具备长期监测的条件；另一方面，过电压的水平具有统计规律，只有进行长期观测统计，获得的数据才有实际意义。

本书作者团队长期从事过电压测试及监测技术研究，在总结近几年过电压监测研究成果的基础上，深入分析存在的问题，在解决高压宽频的记录技术方面提出了具有特色的解决方案，取得了明显的技术进步。在宽频的分压传感、电缆匹配和实时波形压缩、波形识别等方面都取得了不错的成果，也在电力生产实践中获得了一定程度的应用。

本书的第 1 章介绍过电压的基本知识，第 2 章到第 5 章介绍了区域过电压监测面对的问题、系统构成、采集记录技术、波形识别技术、区域电网内应用的布点原则等技术内容，对相关问题的技术解决方案与原理进行了详细的介绍；第 6 章是对现场实际波形的分析；第 7 章介绍了电力生产应用中发现的系统过电压问题，并对差异化防雷提出了解决方案。

本书提供了大量的图表、测试数据和技术框图，并给出了部分区域电网过电压波形实测数据，理论性、实践性强，无论是对于从事过电压在线监测

的技术人员还是从事过电压与绝缘配合的研究人员，都值得参考，也希望相关成果能够再进一步推广，为我国过电压监测技术的研究和电网安全运行提供有力的技术支持。

中国电力科学研究院有限公司副院长

高克利

2018年7月于北京



电力系统中出现的波形、幅值及持续时间各异的多种过电压对电气设备绝缘构成了严重威胁。电力系统过电压是引起电网供电中断、电气设备故障及损坏的重要原因。开展对电网过电压的分析及类型识别工作，对提高电力系统运行可靠性、合理确定设备绝缘水平、提高线路耐雷水平、降低雷击跳闸率具有重要的指导意义。

过电压是线路或电气设备装置电场能量大小的体现形式，由于不同过电压的能量获取方式及转换规律不同，过电压的特征差异较大。本书介绍了各类过电压发生和发展的过程，过电压幅值和特征的影响因素和过电压的抑制装置及限制措施，过电压与绝缘配合原则等内容。

电网过电压现象的研究需要过电压信号的准确获取及分析。从电网监测系统的角度上，监测与分析系统和监测系统的框架结构、过电压信号的获取方式、过电压数据的采集方式和分析方法密切相关。本书主要介绍了分布式过电压与集中式过电压监测框架，几种过电压信号的获取方法，对过电压信号采集的要求，过电压识别与分析的研究现状，影响过电压监测稳定性、完整性的关键技术及难点，以及过电压监测的抗干扰技术、监测系统的测试项目及方法。

本书结合贵州电力公司贵阳过电压监测与分析项目，详细分析了数据的实时压缩采集方法和两种过电压信号的获取方法。通过采用基于 FPGA 及 DSP 的实时数据压缩方法，研发了过电压数据采集系统，可实现所有过电压信号的完整获取，并避免数据的冗余；利用变电站现有的电容性电气设备和电容式电压互感器，结合过电压信号的取样装置，构成了宽频带的分压取样系统。本书详细分析了两种过电压取样系统的设计方法、参数计算方法和试验验证结果。

针对过电压信号的分析 and 识别，本书分析了过电压监测系统的架构，基于 S 变换提出了过电压信号的特征参量，结合现场实测数据，实现了过电压信号的分析 and 识别。

本书结合实际项目，针对区域电网实际变电站结构和设备参数，对典型过电压形式进行了仿真分析研究，基于过电压传播的基本特征规律，提出了地区电网暂态过电压的布点原则；对典型监测实测数据进行了分析，得到了不同过电压的特征规律。本书结合生产实际提出了地区电网暂态过电压的预防与治理措施，有利于指导现场过电压防护与治理工作。附录列出了过电压故障的典型 case 和过电压识别分析系统的程序代码，供读者参考。

由于作者对知识的理解有限，书中存在失误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2018 年 7 月



序
前言

第 1 章 电网过电压	1
1.1 概述	1
1.2 电力系统过电压成因与分类	1
1.3 电力系统过电压与绝缘配合	5
1.4 过电压抑制与保护措施	12
1.5 本章小结	17
第 2 章 过电压监测系统结构及测试方法	18
2.1 概述	18
2.2 暂态过电压的监测及分析技术综述	19
2.3 暂态过电压监测的关键技术及难点	27
2.4 暂态过电压在线监测中的抗干扰技术	29
2.5 过电压监测装置的型式试验项目	33
2.6 本章小结	36
第 3 章 过电压实时数据压缩及宽频分压测量装置设计	37
3.1 波形实时压缩的暂态过电压波形记录装置设计	37
3.2 实时波形压缩技术与波形断面启动技术	39
3.3 波形实时压缩性能测试	41
3.4 启动功能测试	45
3.5 暂态过电压的分压方式	49
3.6 电容暂态过电压分压取样系统的设计	53
3.7 测量电缆匹配方式对测量的影响	63
3.8 本章小结	65
第 4 章 地区电网过电压监测系统与波形的智能识别	66
4.1 概述	66
4.2 监测系统的架构	66

4.3	暂态过电压类型判断算法	67
4.4	本章小结	79
第5章	地区电网暂态过电压仿真分析及监测的布点原则	80
5.1	概述	80
5.2	典型暂态过电压仿真研究	80
5.3	暂态过电压监测的变电站选取原则	106
5.4	变电站内监测点的选点实施原则	106
5.5	本章小结	106
第6章	区域过电压实测数据分析	107
6.1	概述	107
6.2	暂态过电压实测波形	107
6.3	合闸操作过电压	113
6.4	雷电过电压	113
6.5	本章小结	115
第7章	地区电网的暂态过电压的防治与治理措施	116
7.1	概述	116
7.2	参考标准	116
7.3	暂态过电压的防治	117
7.4	差异化防雷措施	127
7.5	绝缘配合校验措施	128
7.6	本章小结	129
附录A	现场过电压故障案例分析	131
附录B	过电压识别步骤算法代码	141
	参考文献	145

第1章 电网过电压

1.1 概述

电力系统一次设备运行可靠性与设备的绝缘水平、运行状态及运行电压有关，系统电压影响电气设备内、外绝缘的电气强度，从而影响设备的安全性。随着高电压、大电网的迅速建设与发展，过电压对电网安全运行的影响越来越受到人们的重视。在电力系统各种事故中，绝缘事故占主导地位，而在绝缘事故中由于过电压引起的事故又占主导地位。电气设备绝缘事故时有发生，给电网和工农业生产带来了巨大的损失。统计资料表明，在雷雨季节，35~110kV电力系统运行中遭受过电压破坏的停电事件占有所有停电事件的40%~60%。

过电压是电网中出现对绝缘有危害的电压升高或电位差升高，它是造成电网绝缘损坏事故的主要原因，也是选择电气设备绝缘强度的决定因素。过电压幅值远大于电气设备的额定工作电压，可能导致电气设备的击穿或闪络，损坏电气设备并导致电网供电中断。电网的过电压水平也是电气设备及过电压保护设备绝缘配合的依据。因此，掌握电网过电压的特性及规律对于过电压的保护十分重要。

过电压是电气设备及线路电场能量的体现形式之一，它的幅值与波形和电磁能量来源、电气设备等值参数、电气设备连接关系及开关时序密切相关。目前对过电压的研究主要集中在模拟仿真和数值计算，通过仿真和计算，实现对过电压的特征参量及发展过程的分析，并取得了较多的成果。但过电压仿真或数值计算中的很多模型及模型参数难以准确描述，如杂散电感、电容及分布、电弧等值模型及电弧重燃条件、线路及电气设备等值模型及参数等。因此，获取现场实际过电压波形，总结分析过电压的特征及规律，也逐步成为研究过电压的主要手段。

1.2 电力系统过电压成因与分类

过电压可以分为雷电过电压（又称外部过电压、大气过电压）和内部过电压两大类，由于成因不同，其持续时间、幅值和造成的影响程度也差异很大。

1.2.1 雷电过电压

雷电是超长空气间隙放电现象。一般认为雷云是在适当的大气和大地条件下，由强大的潮湿的热气流不断上升进入稀薄的大气层冷凝的结果。强烈的上升气流穿过云层，水滴被撞分裂带电。轻微的水沫带负电，被风吹得较高，形成大块的带负电的雷云；大滴水珠

带正电，凝聚成雨下降，或悬浮在云中，形成一些局部带正电的区域。实测表明，在5~10km的高度主要是正电荷的云层，在1~5km的高度主要是负电荷的云层。

雷电的发展过程可分为先导放电、主放电和余晖放电三个阶段，如图1.1所示。通常雷云底部积聚的是负电荷，因此负极性雷电流的发生概率为75%~90%。根据雷电观测资料，雷云对地放电大多数要重复2~3次。主放电时间很短，只有50~100 μ s。第一次主放电结束后，经过0.03~0.05s间隔时间后，沿第一次放电通路出现第二次放电。

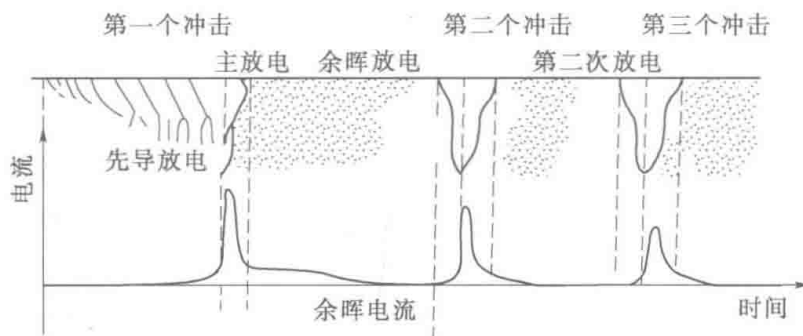


图 1.1 雷电的发展过程

雷电过电压的特点是持续时间短暂，幅值高，与雷电活动强度及线路结构参数有关，而与设备电压运行等级无关。根据雷击的位置不同分为感应雷过电压、直击雷过电压。通常用雷暴日表征不同地区雷电活动的频繁程度，我国把年平均雷暴日 $T > 90$ 的地区称为强雷区， $40 < T \leq 90$ 的地区称为多雷区， $25 < T \leq 40$ 的地区称为中雷区， $T \leq 25$ 的地区称为少雷区，雷暴日同时表明该区域的电网受到雷电威胁的程度。通常用线路耐雷水平和雷击跳闸率表示输电线路的防雷能力。线路耐雷水平表示雷击线路时，其绝缘尚不至于发生闪络的最大电流幅值或能引起绝缘闪络的最小雷电流幅值。雷击跳闸率表示折算到线路每百公里线路、40 雷电日，由于雷击引起的开断数（重合成功也算一次），称为该线路的雷击跳闸率。

1. 感应雷过电压

雷云对地放电过程中，放电通道周围空间电磁场的急剧变化，会在附近的输电线路的导线上产生感应过电压。

感应雷过电压包括静电感应分量和电磁感应分量两个分量。当雷云接近输电线路时，向下发展的先导放电，将在最靠近先导通道的线路上感应出与雷云极性相反的束缚电荷。随着先导放电发展到主放电的阶段，先导通道的电荷自下而上被很快中和，使导线上束缚电荷被迅速释放，这样沿着导线两侧就会形成与雷云极性相反的感应雷过电压波。虽然感应雷过电压包含两个分量，但由于主放电发展速度较光速低，且主放电通道和导线近似垂直，互感系数较小，电磁感应分量相对较弱，所以说，静电感应对感应过电压的贡献最大。Jankov 等人根据雷电流回击和耦合的 Agrawal 模型给出了架空线路的感应雷过电压幅值的粗略计算公式，即

$$U_{\max}(d) = k_u I_0 e^{k_0 + k_1 \ln d + k_2 \ln^5 d} \quad (1-1)$$

其中

$$k_u = k_3 h$$

式中 h ——导线距地面的高度；



d ——雷击点距离导线的距离；

$k_0 \sim k_3$ ——由雷电流特性决定的系数。

感应过电压对 35kV 及以下的送电线路和电气设备威胁很大，常因感应雷而引起事故。根据多年运行经验，变电所避雷针遭受直击雷时，附近三相母线将产生感应过电压，使 35kV 的和 10kV 的绝缘子闪络引起事故的情况偶有发生，特别是配电系统由于感应过电压引起的事故是较多的，因此，对感应过电压的危害也应引起足够的重视。

2. 直击雷过电压

雷云直接对电力设备或线路导线、杆塔、避雷线、避雷针放电，在雷电流流过路径的阻抗（包括接地电阻）上产生冲击电压，引起过电压，这种过电压称为直接雷过电压。如果雷电击中架空输电线路导线，称为绕击雷电过电压，由于有避雷线保护措施，一般发生的概率较低，绕击概率与保护角和线路高度有关。如果雷电击中处于接地状态的输电杆塔、避雷针、避雷线，使其电位升高以后又对带电的导体放电，称为反击雷过电压，反击雷过电压与雷电流幅值、杆塔接地电阻等因素有关。直击雷过电压幅值往往可达上百万伏，会破坏电工设施绝缘，引起短路、接地故障，对电力系统威胁较大。

因直接雷击或感应雷击在输电线路导线中形成迅速流动的雷电进行波。雷电进行波对变电站内的电气设备构成威胁，因此也称为雷电侵入波。变电站的架空进出线必须考虑对雷电侵入波的预防。雷电侵入波对电气设备的严重威胁还在于：当雷电侵入波前行时，例如遇到处于分闸状态的线路开关，或者来到变压器线圈尾端中性点处，则会产生进行波的全反射。这个反射与侵入波叠加，过电压幅值增高一倍，极易造成击穿事故。

《绝缘配合》(GB 311) 及《绝缘配合》(IEC 60071) 中，用快波前过电压 (fast-front overvoltage, FFO) 描述雷电过电压波形，通常是单向的，到达峰值时间为 $0.1\mu\text{s} < T_1 \leq 20\mu\text{s}$ ，波尾持续时间 $T_2 < 300\mu\text{s}$ 。选择 1.2/50 μs 的标准冲击电压波形作为测试电力设备雷电冲击电压耐受能力的标准波形。

1.2.2 内部过电压

在电力系统中存在各种电感、电容等电磁储能元件，当由于断路器操作、故障、运行方式转换或其他原因，使系统的参数变化，引起电磁振荡或转化而造成的暂时电压升高，称为内部过电压。过电压程度与电网结构、系统容量及参数、中性点接地方式、断路器的性能、母线上的出现回路数以及电网运行接线、操作方式等因素有关。内部过电压具有统计规律，研究各种内部过电压出现概率及其幅值的分布对于正确决定电力系统的绝缘水平具有非常重要的意义。内部过电压包括操作过电压及暂时过电压（含谐振过电压、工频过电压）。

内部过电压的幅值与系统额定运行电压密切相关，因此内部过电压程度常用过电压倍数表示，如用标幺值表示 ($1\text{p. u.} = U_s \sqrt{2}/\sqrt{3}$, U_s 为系统最高运行线电压)。过电压水平是影响设备绝缘设计的主要因素，也是影响系统安全可靠运行的主要因素。国内外做了大量的研究并形成了标准，《绝缘配合》(GB 311) 和《绝缘配合》(IEC 60071) 是进行电气设备过电压绝缘配合与设计的主要参考标准。

1. 操作过电压

电网中为了确保供电系统的正常运行，或当某些位置出现故障需要将其切除时，为保障当前的运行方式，系统经常会借助断路器来操作。当断路器运行时，电力系统将由一种电磁状态过渡到另一种电磁状态，在转变过程中，由于系统内部电磁能量的振荡、互换及重新分布，就可能在某些设备上，甚至在整个系统中出现很高的过电压，这种过电压就是操作过电压。操作过电压的持续时间较短，一般在数百微秒到 100ms 之间，并且衰减很快。其幅值在很大程度上受中性点接地方式的影响。

电力系统发生操作过电压的原因很多，一般有以下几种情况：

(1) 切断电感性负载，如切断空载变压器、消弧线圈、电抗器和电动机等引起的过电压。

(2) 切断电容性负载，如切断空载长线路、电缆线路或电容器组等引起的过电压。由于线路电压和电流近似呈 90° 夹角及断路器断口的电弧重燃，线路上会出现较高过电压。

(3) 合空载线路（包括重合闸）而引起的操作过电压。例如具有残余电压的系统在重合闸过程中，由于再次充电而引起的重合闸操作过电压。

此外，还有间歇性弧光接地、电力系统因负荷突变或系统解列、甩负荷而引起的操作过电压。在这种情况下，通常系统以操作过电压开始，接着还会出现持续时间较长的暂态过电压。

《绝缘配合》(GB 311) 及《绝缘配合》(IEC 60071) 中，用慢波前过电压 (slow-front overvoltage, SFO) 描述操作过电压波形，通常是单向的，到达峰值时间为 $20\mu\text{s} < T_1 \leq 5000\mu\text{s}$ ，波尾持续时间 $T_2 < 20\text{ms}$ 。选择 250/2500 μs 的标准冲击电压波形作为测试电力设备操作过电压耐受能力的标准波形。

2. 谐振过电压

电网中存在着大量储能电容（电缆等导线的对地电容，串、并联补偿电容器组，各种设备的杂散电容等）和电感（变压器、互感器、消弧线圈、电抗器以及各种杂散电感等）元件。在一定条件下受到激发，形成周期性振荡、电压幅值上升，形成谐振过电压。谐振过电压持续时间较长，甚至可以稳定存在，直到破坏谐振条件为止。

根据电感参数的变化规律，谐振过电压分为线性谐振过电压、铁磁谐振过电压及参数谐振过电压。

由于在绝缘配合时并未考虑对谐振过电压的防护，因此要尽量避免谐振过电压的发生。采用电磁式电压互感器时，因为铁芯的饱和现象，其电感量发生变化，某些故障情况下容易发生铁磁谐振，应采取必要措施，避免谐振的发生。

3. 工频过电压

系统中在操作或接地故障时发生的频率等于工频 (50Hz) 或接近工频的高于系统最高工作电压的过电压。产生工频过电压的主要原因是：空载长线路的电容效应，不对称接地引起的正序、负序和零序电压分量作用，系统突然甩负荷使发电机加速旋转等。

限制工频过电压应针对具体情况采取专门的措施，常用的方法有：采用并联电抗器补偿空载长线的电容效应，选择合理的系统中性点运行方式对发电机进行快速电压调整控制等。



过电压的类型和波形、标准电压波形以及标准耐受电压试验见表 1.1。

表 1.1 过电压的类型和波形、标准电压波形以及标准耐受电压试验

类别	低 频 电 压		瞬 态 电 压		
	持 续	暂 时	缓 波 前	快 波 前	特 快 波 前
电压波形					
电压波形范围	$f=50\text{Hz}$ $T_t \geq 3600\text{s}$	$10\text{Hz} < f < 500\text{Hz}$ $0.02\text{s} \leq T_t \leq 3600\text{s}$	$20\mu\text{s} < T_p \leq 5000\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20\text{ms}$	$0.1\mu\text{s} < T_1 \leq 20\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300\mu\text{s}$	$T_i \leq 100\text{ns}$ $0.3\text{MHz} < f_1 < 100\text{MHz}$ $30\text{kHz} < f_2 < 300\text{kHz}$
标准电压波形					a
标准耐压试验	①	短时工频试验	操作冲击试验	雷电冲击试验	a

① 由有关技术委员会规定。

1.3 电力系统过电压与绝缘配合

1.3.1 电力系统过电压水平

我国电力系统有多个运行电压等级。常见的交流输电电压等级有 380V、10kV、35kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000kV，直流输电电压等级有 ±500kV、±800kV。一般规定 10~220kV 为高压，330~750kV 为超高压，1000kV 交流、±800kV 直流以上为特高压。

由于电网过电压幅值与系统运行电压水平、中性点接地方式、过电压形式、电网及设备参数、雷电流大小及杆塔参数等有关，不同电压等级的过电压水平及主要影响绝缘配合的过电压类型也有较大的差异。不同电压等级考虑影响绝缘的主要过电压类型分别为：220kV 及以下电网为雷电过电压；330kV 及以上超高压电网为操作过电压；1000kV 及以

上特高压为工频过电压。

中性点接地方式影响对应电压等级电力系统的运行方式，从而影响过电压水平，电力系统非对称接地故障引起工频过电压，进而影响电力系统的操作过电压水平和绝缘水平。

对于 220kV 及以下高压电网，由于电气绝缘强度低，而雷电过电压幅值较高，将极大威胁配电网安全，是过电压防护的重点。感应雷电过电压幅值相对较低，只危及 10kV 及 35kV 线路及变电设备安全。弧光接地过电压影响是配电网系统及设备安全的主要内部过电压形式，避雷器的残压选择也与弧光接地过电压大小密切相关。

330kV 及以上超高压电网设备的绝对绝缘裕度增加，雷电过电压的威胁相对减小，影响系统运行安全的主要是操作过电压；1000kV 及以上特高压电网的相对绝缘裕度减小，影响系统运行安全的主要是工频过电压。

1.3.2 过电压保护装置

防雷保护装置是指能使被保护物体避免雷击，而引雷击本身，并顺利地进入大地的装置。电力系统中最基本的防雷保护装置有避雷针、避雷线（即架空地线）、避雷器和防雷接地等装置。避雷针和避雷线可以防止雷电直接击中被保护物体，因此也称作直击雷保护（措施）；避雷器可以防止沿输电线侵入变电所的雷电过电压波，因此也称作侵入波保护（措施）；防雷接地装置的作用是减少避雷针（线）或避雷器与大地（零地位）之间的电阻，以达到降低雷电过电压幅值的目的。

1.3.2.1 避雷针和避雷线

1. 避雷针

避雷针的保护原理是当雷云放电时使地面电场畸变，在避雷针的顶端形成局部场强集中的空间以影响雷电先导放电的发展方向，使雷电对避雷针放电，再经过接地装置将雷电流引入大地从而使被保护物体免遭雷击。

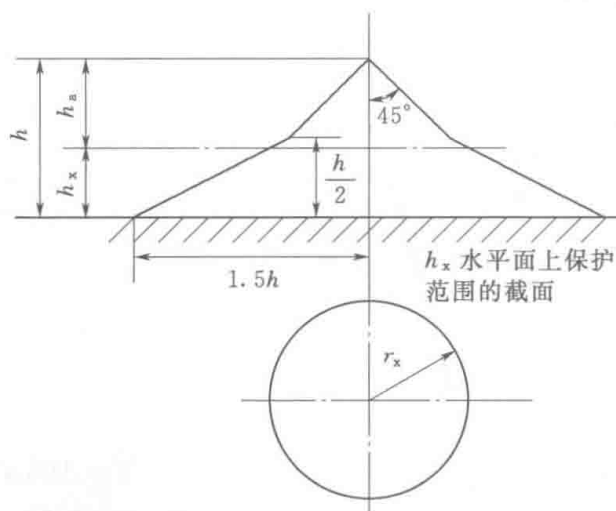


图 1.2 避雷针保护范围示意图

避雷针的保护范围如图 1.2 所示，在保护范围内有 0.1% 的绕击率。

2. 避雷线

避雷线的作用原理与避雷针相同，主要用于输电线路的保护，也可用于保护发电厂和变电所。避雷线保护范围的长度与线路等长，而且两端还有其保护的半个圆锥体空间。单根避雷线的保护范围如图 1.3 所示。

单根避雷线的保护范围为

$$\left. \begin{aligned} r_x &= 0.47(h - h_x) p \left(h_x \geq \frac{h}{2} \right) \\ r_x &= (h - 1.53h_x) p \left(h_x < \frac{h}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$



1.3.2.2 避雷器

避雷器是一种过电压限制器，它实质上是过电压能量的吸收器，它与被保护设备并联运行，当作用电压超过一定幅值以后避雷器总是先动作，泄放大量能量，限制过电压，保护电气设备。

避雷器放电时，强大的冲击电流泄入大地，大电流过压，工频电流将沿原冲击电流的通道继续流过，此电流称为工频续流。避雷器应能迅速切断续流，才能保护电力系统的安全运行。

因此，对避雷器基本技术要求有如下两条：

(1) 过电压作用时，避雷器先于被保护电力设备放电，这需要由两者的伏秒特性的配合来保证。

(2) 避雷器应具有一定的熄弧能力，以便可靠地切断在某一次过零时的工频续流，使系统恢复正常。

以上两条对有间隙的避雷器都是适宜的，这类避雷器主要有保护间隙、管式避雷器和带间隙的阀式避雷器。

对于 MOA（无间隙金属氧化物避雷器）的基本技术要求则不同，由于无间隙，它长期承受系统工作电压和（间或）承受各种过电压，即工频下流过很小泄漏电流，过电压下其残压应小于被保护设备冲击绝缘强度，它必须具有长时间的工频稳定性和过电压下的热稳定性，且没有灭弧问题，相应地却产生了独特的热稳定性问题。目前 MOA 是电网内主要的避雷器形式。

20 世纪 70 年代初期出现了氧化锌（ZnO）避雷器，它们是以 ZnO 为主要成分，添加三氧化二铋（ Bi_2O_3 ）、三氧化二钴（ CO_2O_3 ）、二氧化锰（ MnO_2 ）、三氧化二锑（ Sb_2O_3 ）等金属氧化物，经过粉碎混合后高温烧结而成。ZnO 阀片具有很理想的非线性伏安特性，图 1.4 所示是 ZnO 避雷器的伏安特性曲线，图 1.5 中假定 ZnO、SiC 电阻阀片在 10kA 电流下的残压相同，但在额定电压（或灭弧电压）下 ZnO 曲线所对应的电流一般在 10^{-5}A 以下，可近似认为续流为零，而 SiC 曲线所对应的续流都是 100A 左右。也就是说，在工作电压下 ZnO 阀片实际上相当于绝缘体。

ZnO 避雷器的主要优点有：①无间隙；②无续流；③电气设备所受过电压可降低；④通流量大；⑤ZnO 避雷器特别适用于直流保护和 SF₆ 电器保护。由于 MOA 具有上述重要优点，因而发展潜力很大，由 MOA 构成的新型避雷器将逐步取代普通阀式避雷器和磁吹避雷器。

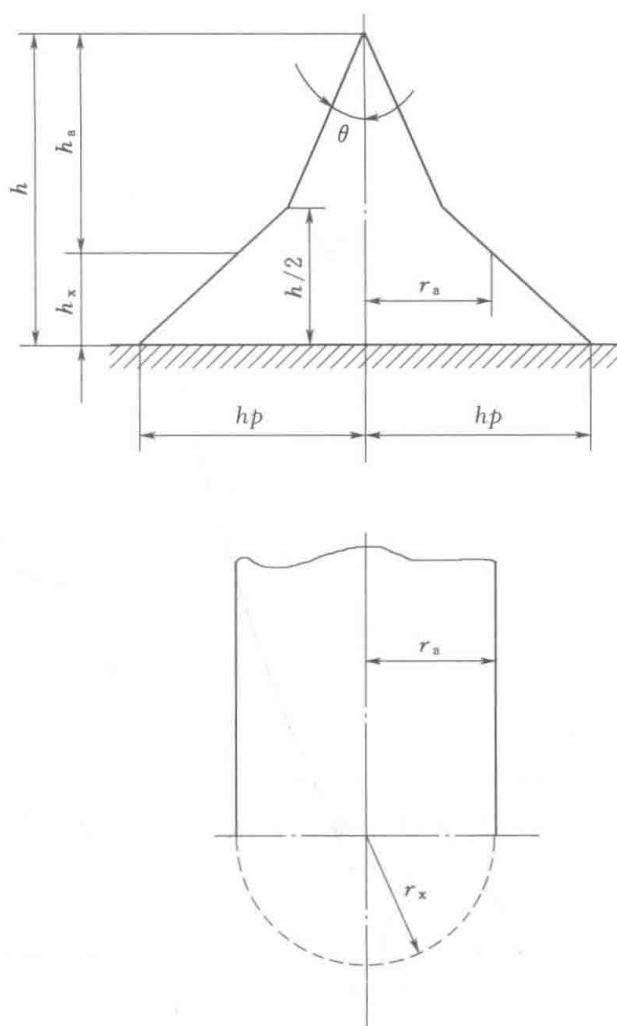


图 1.3 单根避雷线的保护范围
($h \leq 30\text{m}$, $\theta = 25^\circ$)