

ICS 29.240.01
F 20
备案号: 57226-2017

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1674 — 2016

35kV 及以下配网防雷技术导则

Technical guide for lightning protection of 35kV and below
power distribution network

2016-12-05 发布

2017-05-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 雷电放电特征及雷电参数	3
5 配网雷害机理	7
6 配网防雷性能	12
7 架空线路防雷保护	16
8 电缆线路防雷保护	24
9 其他设备防雷保护	25
10 配网避雷器的选择和使用	26
附录 A (资料性附录) 全国及典型地区雷电参数统计	32
附录 B (资料性附录) 架空配电线路耐雷水平计算方法	33
附录 C (资料性附录) 架空配电线路雷击跳闸率计算方法	41
附录 D (资料性附录) 配电线路防雷措施技术经济性及适用性	47
附录 E (资料性附录) 配网避雷器典型参数选型示例	48
附录 F (资料性附录) 配网避雷器预期运行寿命计算评估方法	51

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业过电压与绝缘配合标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：广东电网有限责任公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、武汉大学、国网电力科学研究院、广东电网有限责任公司。

本标准主要起草人：彭向阳、王保山、文习山、熊易、王羽、沈海滨、陈家宏、李鑫、王锐、赵淳、卢泽军、雷晓燕、时卫东、张翠霞、钟定珠、李谦、蓝磊、饶章权、余兆荣、彭发东、汪进锋、黄杨珏。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

35kV 及以下配网防雷技术导则

1 范围

本标准明确了雷电放电特征及雷电参数、配网雷害机理,规定了配网防雷应遵循的主要技术原则和方法,包括配网防雷性能、配网架空线路防雷保护、配网电缆线路防雷保护、配网其他设备防雷保护、配网避雷器的选择和使用等。

本标准适用于交流 35kV 及以下配网线路及设备的防雷保护,包括 6kV、10kV、20kV 和 35kV 等电压等级。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 2900.19 电工术语 高电压试验技术和绝缘配合
- GB/T 2900.57 电工术语 发电、输电及配电 运行
- GB 11032 交流无间隙金属氧化物避雷器
- GB/T 28547 交流金属氧化物避雷器选择和使用导则
- GB 50061 66kV 及以下架空电力线路设计规范
- GB/T 50064 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范
- GB 50217 电力工程电缆设计规范
- DL/T 601 架空绝缘配电线路设计技术规程
- DL/T 1292 配电网架空绝缘线路雷击断线防护导则
- DL/T 1293 交流架空输电线路绝缘子并联间隙使用导则
- DL/T 1294 交流电力系统金属氧化物避雷器用脱离器使用导则

3 术语和定义

GB/T 2900.19、GB/T 2900.57 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

地闪密度 **ground flash density**
每平方千米、每年地面的落雷次数。

3.2

雷暴日 **thunderstorm day**
某地区一年中有雷电放电的天数。

3.3

少雷区 **less thunderstorm region**
平均年雷暴日不超过 15d 的地区。

3.4

中雷区 **middle thunderstorm region**
平均年雷暴日超过 15d 但不超过 40d 的地区。

3.5

多雷区 more thunderstorm region

平均年雷暴日超过 40d 但不超过 90d 的地区。

3.6

强雷区 strong thunderstorm region

平均年雷暴日超过 90d 以及根据运行经验雷害特殊严重的地区。

3.7

引雷宽度 width of triggered lightning

架空线路吸引雷电直击线路的宽度。

3.8

耐雷水平 lightning withstand level

雷击线路或附近地面时，线路绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值。

3.9

雷击跳闸率 lightning trip rate

每年每百千米线路的雷击跳闸次数。

3.10

雷电定位监测系统 lightning location and detection system

对雷电发生时间、位置、极性、强度、回击次数等雷电参数进行实时、广域测量的系统。

3.11

中性点谐振接地系统 resonant neutral grounding system

系统中一个或多个中性点（通常是变压器或发电机的中性点）通过电感接地的系统，电感器件用于补偿系统单相对地故障电流的容性分量。

3.12

消弧线圈并联低电阻接地系统 neutral grounding system of an arc suppression coil and a parallel low resistance

系统中一个或多个中性点通过消弧线圈并联低电阻进行接地的系统，该系统继电保护对线路单相瞬时接地故障不跳闸，对单相永久接地故障实施跳闸。

3.13

保护角 shielding angle

不考虑风偏时，杆塔处地线对水平面的垂线，与地线及导线连线之间的夹角。

3.14

不平衡绝缘 unbalanced insulation

架空线路相间或回路间采用不同绝缘配置，用于减少雷击引起的相间闪络故障或多回同时故障。

3.15

带串联间隙避雷器 surge arrester with series gap

由避雷器本体非线性电阻片和放电间隙串联组成的避雷器。

3.16

带脱离器避雷器 surge arrester with disconnecter

避雷器故障时，能自动与系统脱离的避雷器，该功能一般由串联的脱离装置实现。

3.17

跌落式避雷器 surge arrester with drop device

可在带电运行状态下通过绝缘棒等带电作业工具，实现避雷器拆除及更换操作的避雷器。

3.18

重负载避雷器 heavy duty surge arrester

具有较强重复电荷转移能力和较大雷电冲击放电能力的避雷器，配网重负载避雷器的标称放电电流一般选用 10kA，相应的普通负载、轻负载避雷器标称放电电流选用 5kA。

3.19

配网避雷器预期寿命 life expectancy of surge arrester for distribution network

雷电过电压下，配网避雷器长期无故障运行的寿命。

3.20

堵塞式防雷措施 blocking type lightning protection measures

能够限制配电线路雷电过电压、降低雷击闪络概率或者阻止雷击闪络后工频续流建弧的防雷措施。堵塞式防雷措施可以降低雷击跳闸率和事故率，主要包括加强线路绝缘、架设架空地线、安装线路避雷器、降低接地电阻等。

3.21

疏导式防雷措施 leading type lightning protection measures

能够改变配电线路雷击闪络路径、并对后续工频电弧进行疏导、防止工频电弧烧损绝缘子及烧断导线的防雷措施。疏导式防雷措施不能降低雷击跳闸率，但可以降低雷击事故率，主要包括安装防弧金具、放电钳位绝缘子及绝缘子并联间隙等。

3.22

防弧金具 arc protection hardware

一种用于防止架空绝缘导线雷击断线的金具，主要由一组安装在导线上的高压电极和安装在被保护绝缘子接地端的接地电极组成，间隙尺寸与绝缘子干弧距离配合设计并经试验确定。

3.23

放电钳位绝缘子 discharge voltage clamp insulator

一种用于防止架空绝缘导线雷击断线的支柱绝缘子组合体，绝缘子高压端、接地端分别配置高压电极、接地电极，电极间距离与绝缘子干弧距离配合，以钳制绝缘子两端电位差，能够疏导工频电弧，使之在两个电极间燃烧，避免烧熔导线。

3.24

配电线路组合绝缘 combination series insulation of distribution line

配电线路带电部分对地的整体绝缘，通常由绝缘子、横担及杆塔等部分绝缘组合串联形成。

3.25

绝缘杆塔（绝缘塔头、绝缘横担）insulated tower（insulation tower head, insulation crossarm）

配电线路杆塔整体或部分部件采用绝缘材料制作，根据使用绝缘材料部位不同，一般分绝缘杆塔、绝缘塔头及绝缘横担等类型。

4 雷电放电特征及雷电参数

4.1 雷电放电特征

4.1.1 雷电放电过程

雷电放电由带电的雷云引起，包括雷云中或雷云间异性电荷引起的放电以及雷云对大地的放电。在防雷工程中，主要关心雷云对大地的放电。

雷云对大地放电（地闪）通常分为先导放电和主放电两个阶段：

a) 先导放电。以负极性雷电为例，雷云中的负电荷逐渐积聚，同时在附近地面感应出正电荷。当

雷云与大地之间局部电场强度超过大气游离放电临界电场强度时,开始有局部放电通道自雷云边缘向大地发展,并以逐级推进的方式向下发展。这一放电过程称为先导放电,该先导称为下行先导。先导放电通道具有导电性,雷云中的负电荷沿通道分布,并且继续向地面延伸,地面上的感应正电荷也逐渐增多。

- b) 主放电。当下行先导通道发展到临近地面附近时,先导与地面之间的电场强度就会增大。地面上一些突出物体因四周电场强度达到能使空气电离的程度,从而发展为向上的迎面先导(或上行先导)。当下行先导达到地面或与迎面先导相遇时,就出现了强烈的电荷中和过程,产生极大的电流,伴随着雷鸣和闪光,这一过程称为雷电主放电过程,又称回击过程。主放电过程极短,一般持续时间为 $20\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$,平均约 $50\mu\text{s}$,并且由下而上逆向发展,速度约为光速 c 的 $1/20\sim 1/2$,最大可达 $1.5\times 10^8\text{m/s}$ 。

4.1.2 多重雷击放电

多数雷云对地放电都是重复性的,包含多次先导放电—主放电的重复过程。多次放电之间的时间间隔约几毫秒至几百毫秒,平均为几十毫秒。重复放电次数一般为 2 次~3 次,最多可达几十次。一次地闪的持续时间约 $10\text{ms}\sim 2\text{s}$,平均持续时间约 200ms 。

第二次及以后的放电,先导放电都是自上而下连续发展(无停歇),主放电仍是由下向上发展。与首次雷击放电相比,后续雷击放电雷电流幅值变小、陡度增大。多重雷击放电持续时间长,对电网设备和防雷装置造成更大威胁。

4.1.3 雷击选择性

当雷电先导到达离地面物体上方一定高度时,雷电放电就会表现出对某地面物体放电的选择性。雷击地面物体(包括配电线路和设备)的选择性一般体现在以下方面:

- 在平原等空旷地区,由于尖端效应,突出地面或高耸的物体容易遭受雷击。
- 山顶的突出物体、山坡迎风面、山区盆地、山沟中处于风口的物体容易遭受雷击。
- 雷击与地质条件有关,地下有矿物质的地面物体容易遭受雷击。
- 在湖沼、低洼地区及地下水位高的地区,地面物体容易遭受雷击。

4.2 雷电参数

4.2.1 雷电流幅值

我国一般地区的雷电流幅值累积概率分布可按下式计算:

$$\lg P(i \geq I_m) = -\frac{I_m}{88} \quad (1)$$

陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区,平均年雷暴日在 20d 及以下,雷电流幅值累积概率分布可按下式计算:

$$\lg P(i \geq I_m) = -\frac{I_m}{44} \quad (2)$$

式中:

I_m ——雷电流幅值, kA;

P ——幅值不小于 I_m 的雷电流幅值概率。

具备雷电监测条件和多年雷电监测数据的地区,可采用下式计算雷电流幅值概率:

$$P(i \geq I_m) = \frac{1}{1 + (I_m/a)^b} \quad (3)$$

式中:

a ——中值电流, 超过该幅值的雷电流概率为 50%, kA;

b ——表征雷电流幅值分布集中程度的参数。

参数 a 、 b 表示不同地区雷电流幅值概率分布特征, 可通过本地区多年有效的雷电监测数据统计拟合确定。部分缺少雷电监测数据的地区, 对首次雷击放电, 可取 $a=31$ 、 $b=2.6$; 对多重雷击的后续雷击放电, 可取 $a=12$ 、 $b=2.7$ 。

考虑各地区雷电活动差别, 典型地区雷电流幅值概率计算公式见附录 A。

4.2.2 雷电流波形

雷电流是单极性的脉冲波, 根据实测统计, 绝大多数雷电流是负极性的, 各国实测雷电流波形基本一致。

雷电流波头大多在 $1\mu\text{s}\sim 5\mu\text{s}$, 平均约为 $2.6\mu\text{s}$; 雷电流波尾大多在 $20\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$, 平均约 $50\mu\text{s}$ 。我国电力行业防雷保护设计采用 $2.6/50\mu\text{s}$ 的雷电流波形。

防雷保护计算用雷电流波形, 一般采用双斜角波 (三角波) 或双指数波进行等效, 双斜角波或双指数波分别用式 (4)、式 (5) 表示:

$$i = \begin{cases} \bar{\alpha}t & (0 \leq t \leq \tau_f) \\ I_m(-at + b) & (t \geq \tau_f) \end{cases} \quad (4)$$

$$i = I_m(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (5)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{I_m}{\tau_f} \quad (6)$$

式中:

$\bar{\alpha}$ ——雷电流波头陡度, kA/ μs ;

I_m ——雷电流幅值, kA;

a 、 b 及 α 、 β ——波形常数, 由雷电流波头、波尾参数确定;

τ_f ——雷电流波头, μs 。

电力工程防雷计算中, 雷电流波头 τ_f 一般采用 $2.6\mu\text{s}$ 。

4.2.3 雷暴日及地闪密度

雷暴日表征地区雷电活动的频繁程度, 包括雷云之间的放电和雷云对地的放电, 其中云间放电远多于云地放电。地闪密度仅表征雷云对地放电的频繁程度, 对防雷保护具有更实际的意义。

防雷设计应采用多年平均值 (年平均雷暴日、年平均地闪密度)。

我国一般地区, 平均年雷暴日不超过 40d (即少雷区、中雷区), 地闪密度 N_g 与雷暴日 T_d 的关系可用下式表示:

$$N_g = 0.023T_d^{1.3} \quad (7)$$

根据雷电监测数据和运行经验, 平均年雷暴日超过 40d 的地区 (即多雷区、强雷区), 地闪密度 N_g 与雷暴日 T_d 的关系可用下式表示:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (8)$$

式中:

N_g ——地闪密度, 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$);

T_d ——雷暴日, d。

典型雷暴日对应的地闪密度列于表 1。

表1 典型雷暴日与地闪密度的对应关系

T_d d	15	30	40	65	90	115	计算公式
N_g 次/(km ² ·a)	0.78	1.91	2.78	—	—	—	$N_g = 0.023T_d^{1.3}$
N_g 次/(km ² ·a)	—	—	—	7.38	11.09	15.06	$N_g = 0.04T_d^{1.25}$

4.2.4 雷区分级

基于地区雷暴日 T_d 和地闪密度 N_g ，可将我国雷电活动频度从弱到强按 4 类雷区、7 个等级进行分区分级，雷区分级标准见表 2。

表2 基于雷暴日和地闪密度的雷区分级标准

雷区	雷区分级	年均雷暴日 T_d d	年均地闪密度 N_g 次/km ² ·a	
			$N_g = 0.023T_d^{1.3}$	$N_g = 0.04T_d^{1.25}$
少雷区	A	$T_d \leq 15$	$N_g \leq 0.78$	—
中雷区	B1	$15 < T_d \leq 30$	$0.78 < N_g \leq 1.91$	—
	B2	$30 < T_d \leq 40$	$1.91 < N_g \leq 2.78$	—
多雷区	C1	$40 < T_d \leq 65$	—	$4.02 < N_g \leq 7.38$
	C2	$65 < T_d \leq 90$	—	$7.38 < N_g \leq 11.09$
强雷区	D1	$90 < T_d \leq 115$	—	$11.09 < N_g \leq 15.06$
	D2	$T_d > 115$	—	$N_g > 15.06$

A 级为少雷区，雷暴日不超过 15d；B1、B2 级为中雷区，雷暴日超过 15d 但不超过 40d；C1、C2 级为多雷区，雷暴日超过 40d 但不超过 90d；D1、D2 级为强雷区，雷暴日超过 90d。

根据多年雷电监测数据和雷区分级标准，可绘制基于雷暴日或地闪密度的雷区分布图，作为配网差异化防雷设计依据。

全国和典型地区地闪密度分布图见附录 A。

4.3 雷电监测

建立雷电定位系统进行雷电监测，采用多个探测站同时测量雷电磁辐射场，剔除云闪信号，实现地闪定位，具有广域、实时、高精度、全自动监测的特点，在配网防雷的应用主要有：

- 指导配网雷击故障点的查找，提供地闪位置、时间和雷电流幅值等信息。
- 指导配网雷击故障或非雷击故障的定性分析，提供故障时刻有、无地闪放电等信息。
- 提供雷电过程预警，指导雷雨季或雷电过程中配网运行方式调整和事故预想。
- 提供雷电参数分析，指导配网防雷设计和运行维护。

为提高雷电定位系统在配网防雷中的应用水平，应做好中心站和探测站的维护工作，每年雷雨季前完成设备消缺，保证雷雨季系统正常运行；加强配网运行事件管理，准确记录雷击故障发生时间等信息，及时更新配电线路杆塔坐标，保证雷电定位信息的准确性和有效性。

5 配网雷害机理

5.1 配网典型雷害

5.1.1 配电线路雷害特点

雷电导致高压配电线路闪络的途径主要有：

- a) 雷电直击配电线路。
- b) 雷击线路附近地面及构筑物产生感应过电压。

配电线路雷击闪络的一般特点：

- a) 感应过电压是配电线路雷击闪络的主要原因。
- b) 雷电直击配电线路可产生远高于线路绝缘水平的过电压，通常会导致设备损坏。
- c) 在开阔地区，配电线路遭受直击雷概率增加；附近有高耸建筑物、构筑物或高大树木屏蔽，遭受直击雷的概率大幅下降，遭受感应过电压的概率增大。

因电压等级、结构高度及绝缘水平不同，配电线路与输电线路防雷存在差异比较，见表3。

表3 配电线路与输电线路防雷差异比较

分类	典型电压等级	杆塔高度 m	线路档距 m	杆塔典型 接地方式	架空地线	50%雷电放电电压 kV	雷害 主要原因
输电线路	110kV 及以上	>20	>200	人工接地	双地线	>700	雷电直击过电压
配电线路	35kV 及以下	<20	30~200	自然接地	无地线或单地线	<400	雷电感应过电压

5.1.2 配电线路雷击跳闸

对中性点不接地或谐振接地系统，配电线路通常不设零序保护，可带单相接地故障运行 2h，雷击闪络后电弧持续燃烧，使空气发生电离，降低绝缘强度，将导致单相接地故障发展为相间短路故障，引起线路跳闸，长时间的电弧燃烧还会破坏线路绝缘，造成永久故障。

对于同杆架设的多回配电线路，在雷电直击或较高感应过电压的作用下，容易发生多回线路同跳故障。此外，由于各回路间距离较小，若雷击闪络后工频续流较大，持续的接地电弧将使空气发生热游离和光游离，同样会导致多回短路故障和同时跳闸。

5.1.3 配电线路雷击断线

对于绝缘导线，雷击造成单相闪络或相间短路时，绝缘击穿最易发生在靠近绝缘子的位置，被击穿的绝缘层呈针孔状，并靠近绝缘子两侧特别是负荷侧。工频短路电流的电弧弧根受周围绝缘层阻隔，固定在击穿点燃烧，在较短时间内烧断导线。

对于裸导线，电弧在电磁力的作用下，高温弧根沿导线表面不断滑移，直至电弧熄灭，不会集中在某一点燃弧，因此不会严重烧伤导线，通常在工频续流烧断导线或损坏绝缘子之前，就会引起断路器动作切断电弧，因此，裸导线的雷击断线故障率明显低于绝缘导线。

5.1.4 配电变压器雷击损坏

配电变压器雷击损坏主要有以下原因：

- a) 配电变压器高压侧遭受雷电直击或感应过电压，导致高压侧绝缘损坏。
- b) 配电变压器高压侧遭受雷电直击或感应过电压，较高地电位通过低压绕组中性点施加在低压绕

组,再经电磁耦合按变比在高压绕组产生较高过电压(反变换过电压),导致配电变压器损坏。

c) 配电变压器低压侧遭受雷电直击或感应过电压,导致低压侧绝缘损坏。

d) 配电变压器低压侧遭受雷电直击或感应过电压,低压绕组过电压经绕组间电磁耦合,按变比在高压绕组产生较高过电压(正变换过电压),导致高压侧绝缘损坏。

5.2 雷电直击配电线路

5.2.1 雷电直击过电压

雷电直击配电线路包括雷击导线、雷击杆塔及雷击地线。

雷电直击配电线路极易造成绝缘子冲击闪络或导线断线,但直击雷故障占雷击故障的比例较低,一般低于20%。

a) 雷击导线过电压。

雷击配电线路导(地)线时过电压 U_c 可按式(9)计算:

$$U_c = \frac{1}{4} I Z_c \quad (9)$$

式中:

U_c ——雷击点过电压最大值, kV;

I ——雷电流幅值, kA;

Z_c ——导(地)线波阻抗, Ω 。

b) 雷击杆塔过电压。

雷击配电线路杆塔时塔顶过电压 U_t 可按式(10)计算:

$$U_t = \beta I \left(R_t + \frac{L_t}{\tau_f} \right) \quad (10)$$

式中:

U_t ——塔顶过电压最大值, kV;

β ——杆塔分流系数(对有地线杆塔),对无地线杆塔取 $\beta=1$;

I ——雷电流幅值, kA;

R_t ——杆塔冲击接地电阻, Ω ;

L_t ——杆塔电感, μH ;

τ_f ——雷电流波头, μs 。

c) 直击雷耐雷水平。

配电线路直击雷耐雷水平计算方法见附录B。

5.2.2 配电线路引雷特性

配电线路引雷特性与其结构高度、宽度以及雷电活动频度、地形地貌有关,在开阔地形(周围没有很高的树和建筑物),每年每百千米配电线路雷击次数 N_L 可用下式计算:

$$N_L = N_g \left(\frac{28h_t^{0.6} + b}{10} \right) \quad (11)$$

配电线路引雷宽度 w 为:

$$w = 28h_t^{0.6} + b \quad (12)$$

式中:

N_L ——开阔地形配电线路雷击次数,次/(100km·a);

N_g ——地闪密度, 次/ ($\text{km}^2 \cdot \text{a}$);
 h_t ——杆塔高度, m;
 b ——杆塔结构宽度, m (相比于配电线路引雷宽度, 计算时可取 $b \approx 0$);
 w ——配电线路引雷宽度, m。

雷击杆塔 (及其附近地线) 次数 N_1 占配电线路雷击总次数 N_L 的比例用击杆率 g 表示, 击杆率 g 与架空地线根数和地形有关, 配电线路击杆率列于表 4。

表 4 配电线路击杆率 g

地形	地线根数	
	0	1
平原	1/2	1/4
山丘	1/2	1/3

5.2.3 建筑物和树的屏蔽作用

考虑建筑物和树的屏蔽作用后, 配电线路雷电直击次数 N_s 可用下式计算:

$$N_s = N_L (1 - S_f) \tag{13}$$

式中:

N_s ——考虑屏蔽作用后的配电线路雷击次数, 次/ ($100\text{km} \cdot \text{a}$);
 S_f ——环境屏蔽系数, 取值范围 $0 \sim 1$ 。 $S_f=0$, 表示开阔地形, 周围没有高屏蔽物体; $S_f=1$, 表示完全被屏蔽, 不会遭受雷击, 适用于高层建筑物很多的城区架空配电线路。

图 1 给出了典型配电线路 (高度为 10m) 屏蔽系数与屏蔽物高度及距离的关系, 其中假设这些屏蔽物与线路平行, 且均匀分布于线路同一侧, 例如一排平行于线路的树或建筑物。

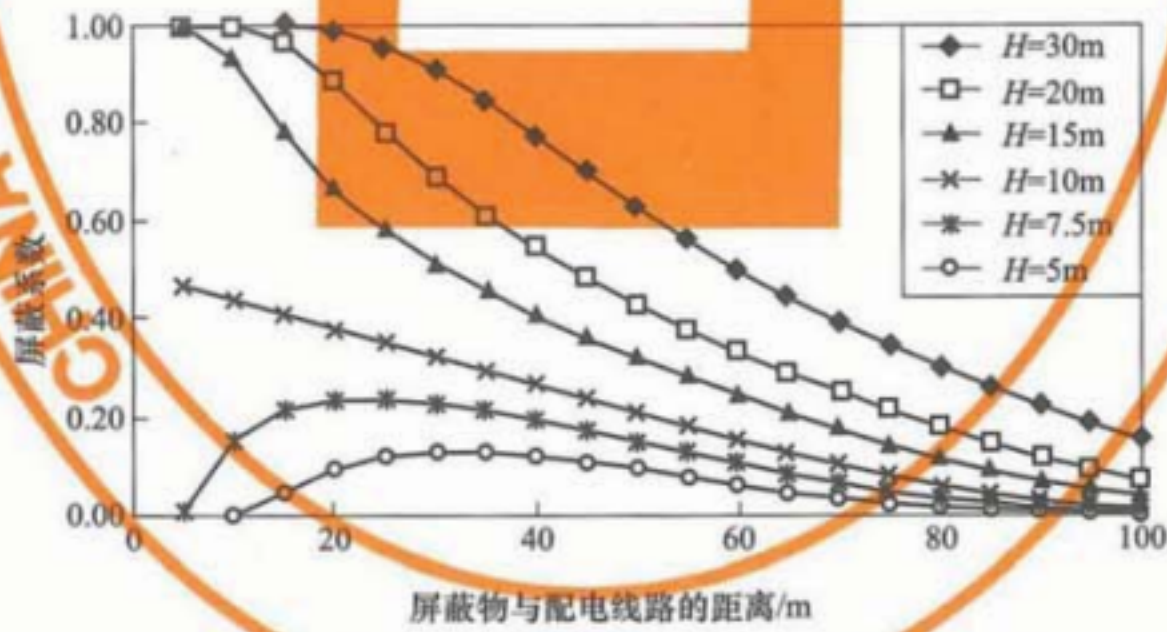


图 1 配电线路屏蔽系数与屏蔽物高度及距离的关系

对于配电线路两侧都有屏蔽物的, 应将左、右两侧屏蔽系数相加, 如果相加后屏蔽系数大于 1, 则总屏蔽系数取 1。总屏蔽系数 S_f 计算公式如下:

$$S_f = S_{fL} + S_{fR} \tag{14}$$

式中:

S_f ——总屏蔽系数, 取值范围 $0 \sim 1$;
 S_{fL} ——左侧屏蔽系数;
 S_{fR} ——右侧屏蔽系数。

5.3 雷电感应过电压

5.3.1 感应过电压的影响因素

雷击配电线路附近地面，在配电线路产生的感应过电压幅值超过线路绝缘水平时，将导致线路单相或多相对地绝缘击穿，进而导致相间故障。感应过电压故障一般占雷击故障的 80% 以上。配电线路雷电感应过电压与以下因素有关：

- a) 雷电流幅值及达到幅值的时间。
- b) 主放电速度。
- c) 线路高度。
- d) 线路与雷击点间的距离。
- e) 雷击点和线路之间遮蔽物的影响。
- f) 雷电通道到达地面的变形情况。

5.3.2 感应过电压的简化计算

一般情况下，架空配电线路雷电感应过电压可用下列公式计算：

$$U_i = k_1 I \ln \left[\frac{h_c}{S} + \sqrt{\left(\frac{h_c}{S} \right)^2 + 1} \right] \quad (15)$$

式中：

U_i ——雷击大地时感应过电压的最大值，kV；

k_1 ——感应过电压系数， Ω ；

I ——雷电流幅值，kA；

h_c ——导线平均对地高度，m；

S ——雷击点与线路的最远距离，m。

感应过电压系数 k_1 可根据实际测量、模拟试验或数值计算确定，一般情况下可取 $k_1=25\Omega$ 。

如果满足 $S \geq 65\text{m}$ ， $S \gg h_c$ ，式 (15) 可进一步简化为：

$$U_i = k_1 \frac{I h_c}{S} \quad (S \geq 65\text{m}, S \gg h_c) \quad (16)$$

实际上，当 $S < 65\text{m}$ 时，由于配电线路引雷效应，雷电直击线路的概率较大。

在需要分析主放电速度对感应过电压的直接影响时，可采用下列公式计算：

$$U_i = Z_0 \left(1 + \frac{v/c}{\sqrt{2 - (v/c)^2}} \right) \frac{I h_c}{S} = k_2 \frac{I h_c}{S} \quad (17)$$

式中：

Z_0 ——系数， $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} / 4\pi = 30\Omega$ ；

v ——主放电的回击速度，m/s，约为光速 c 的 $1/20 \sim 1/2$ ；

c ——光速，m/s，一般取 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ；

k_2 ——考虑主放电速度的感应过电压系数， Ω 。 v/c 取 $0.05 \sim 0.5$ 时， k_2 为 $31\Omega \sim 41\Omega$ 。

5.3.3 感应过电压的数值计算

根据场线耦合模型和时域有限差分法，可对配电线路附近雷击产生的电磁场和感应过电压进行数值计算。一般方法为：

- a) 根据主放电电流模型计算空间待求位置的雷电电磁场。该主放电电流模型给出电流沿通道关于高度和时间的函数。
- b) 根据线路和电磁场的耦合模型计算上述电磁场在线路上产生的感应过电压。该模型描述电磁场和线路导体间的相互作用。

据此可精确计算配电导线上任意点的最大感应过电压和电流，并分析雷电流幅值和波形参数、线路结构参数、雷击点的距离以及大地电导率、导线表面电晕等因素对感应过电压的影响。

感应过电压的数值计算结果一般需要通过实验室模拟实验或现场真型试验进行验证。

5.3.4 雷电感应过电压的特性

配电线路雷电感应过电压一般具有以下特性：

- a) 雷电感应过电压幅值随着雷击点与配电线路距离的减小而增大，并且距离越近，感应过电压幅值增加越多。
- b) 雷电感应过电压的幅值随着杆塔高度的增加而增大。
- c) 雷电感应过电压的幅值随着雷电流幅值的增加而增大，随着雷电流波头时间的减小而增大，雷电流主放电速度的影响相对较小。
- d) 一般情况下，雷电感应过电压的幅值随着大地电阻率的增加而增加，大地电阻率影响感应过电压的幅值、形状和极性。
- e) 雷电感应过电压下导线表面产生冲击电晕，考虑电晕影响，感应过电压幅值会增大。

5.4 中性点接地方式及影响

5.4.1 中性点接地方式

配网中性点接地方式一般采用不接地、低电阻接地、高电阻接地、谐振接地（消弧线圈接地）以及消弧线圈并联低电阻接地等方式。中性点接地方式选择应符合 GB/T 50064 的规定。

中性点接地方式涉及过电压水平与绝缘水平、防雷保护设备、电力系统接地故障电流、继电保护方式选择以及电网运行可靠性等多方面综合性技术问题。

配网中性点不同接地方式的运行特点比较见表 5。

表 5 配网中性点不同接地方式运行特点比较

接地方式	低电阻接地	高电阻接地	不接地	消弧线圈接地	消弧线圈并联低电阻接地
工频过电压	低	高	高	较高	较高
永久故障	直接跳闸	可带故障运行	可带故障运行	可带故障运行	跳闸
瞬时故障	直接跳闸	较易自动消除	较易自动消除	易自动消除	不跳闸
故障选线	好	差	差	较差	好
继电保护选择性	好	差	差	较差	好
跳闸次数	多	较少	较少	少	一般
供电连续性	差	较好	较好	好	一般

5.4.2 中性点不同接地方式下避雷器的选择

配网暂时过电压（工频过电压、谐振过电压）应限制在合理水平，6kV~20kV 和 35kV 中性点不

接地系统工频过电压一般分别不宜超过 1.1p.u.和 p.u.，中性点低电阻、高电阻接地系统及谐振接地系统工频过电压不宜超过 p.u.。

35kV 及以下配网采用非有效接地方式，接地故障清除时间大于 10s 时，用于配网防雷保护的避雷器额定电压 U_r 按不低于系统暂时过电压 U_t 的 1.25 倍选取。配网避雷器额定电压 U_r 和持续运行电压 U_c 应不低于表 6 的规定。

表 6 配网避雷器持续运行电压和额定电压

中性点接地方式		持续运行电压 U_c kV		额定电压 U_r kV	
		相对地	中性点	相对地	中性点
不接地	6kV~20kV	$1.1U_m$	$0.64U_m$	$1.38U_m$	$0.80U_m$
	35kV	$1.0U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
低电阻接地		$0.8U_m$	$0.46U_m$	$1.0U_m$	$U_m/\sqrt{3}$
高电阻接地		$1.0U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m/\sqrt{3}$	$U_m/\sqrt{3}$
谐振接地		$1.0U_m$	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$

注：工频过电压 $1.0p.u.=U_m/\sqrt{3}$ ，谐振过电压 $1.0p.u.=\sqrt{2} U_m/\sqrt{3}$ ， U_m 为系统最高电压有效值。

5.4.3 中性点接地方式对雷击跳闸率的影响

中性点接地方式对配电线路雷击跳闸率的影响体现在以下 4 个方面：

- a) 中性点不接地。当系统电容电流较小（不超过 10A），绝缘子雷击闪络后工频续流小于绝缘子自然熄弧临界值，可在电流过零时熄弧，不会建立稳定电弧；当系统电容电流较大，绝缘子闪络后工频续流大，可能形成持续电弧，甚至发展为相间或多回短路故障，雷击跳闸率升高。
- b) 中性点低电阻接地。配网低电阻接地系统一般配零序保护，在低电阻接地方式下，接地故障电流较大，绝缘子雷击闪络时一般都会造成线路跳闸，雷击跳闸率较高。
- c) 中性点谐振接地。一般采用自动消弧线圈接地方式，该装置能实时检测系统电容电流，实现自动补偿，使补偿后残流小于 5A，因此降低雷击建弧率，减小雷击跳闸率。
- d) 消弧线圈并联低电阻接地。兼具消弧线圈接地和低电阻接地的优点，对于雷击单相接地故障，瞬时故障不跳闸，永久故障跳闸，既提高了供电可靠性，又控制了雷击跳闸率。

6 配网防雷性能

6.1 架空线路防雷性能

6.1.1 绝缘配置

35kV 线路宜采用悬式绝缘子，耐张绝缘子串的片数应比同型号悬垂绝缘子串的片数多一片；6kV~20kV 线路直线杆塔宜采用柱式绝缘子或瓷横担绝缘子，耐张杆塔可采用悬式绝缘子与柱式绝缘子配合，或悬式绝缘子组成绝缘子串。考虑风偏后导线对杆塔空气间隙的雷电冲击放电电压 $U_{50\%}$ 按绝缘子串相应电压的 0.85 倍进行配合。

海拔 1000m 以下的清洁地区，线路悬垂绝缘子片数及考虑风偏后导线对杆塔构件最小雷电过电压空气间隙应满足表 7 的规定。高海拔地区及其他绝缘配置要求应满足 GB 50061 的规定。

表 7 悬垂绝缘子片数及最小雷电过电压空气间隙

系统标称电压 U kV	6	10	20	35
系统最高电压 U_m kV	7.2	12	24	40.5
悬垂绝缘子片数 片	2		2	3
最小雷电过电压空气间隙 cm	20		35	45

6.1.2 防雷性能的影响因素

防雷性能的影响因素如下：

- a) 环境因素，包括空气密度、湿度、降水和大气污染：
- 1) 空气密度越小，线路绝缘性能越差，影响空气密度的海拔、大气压等因素也会对配电线路绝缘特性产生影响。
 - 2) 湿度增大，绝缘性能下降，潮湿状态下绝缘部件的绝缘水平为干燥状态下的 70%~80%。
 - 3) 在雨、雾、露、雪等不利天气条件和工业污染，以及自然界盐碱、粉尘及鸟类污染条件下，绝缘子耐受冲击电压水平降低，污染成分不同导致绝缘水平变化不同。
- b) 电压的极性和上升率：
- 1) 负极性雷电闪络电压比正极性闪络电压高。
 - 2) 雷电过电压越陡，绝缘越容易闪络。
- c) 结构因素，如绝缘子、金属部件、杆塔的类型、形状和尺寸，线路结构和安装方式等对线路绝缘性能有重要影响，具体如下：
- 1) 绝缘子 50%雷电冲击放电电压 $U_{50\%}$ 越大，线路防雷性能越好。
 - 2) 杆塔高度增加，线路引雷效应增大，同时杆塔电感增大；单柱混凝土杆和单柱金属杆电感比门型杆或拉线杆大；单柱混凝土杆单位高度电感最大，但通常高度较低。
 - 3) 架空地线的屏蔽效应可降低杆塔电感和杆塔接地电阻上的电压；架空地线与导线间的垂直距离减小，架空地线的有效性增大。
 - 4) 杆塔接地电阻越小，线路防雷性能越好。

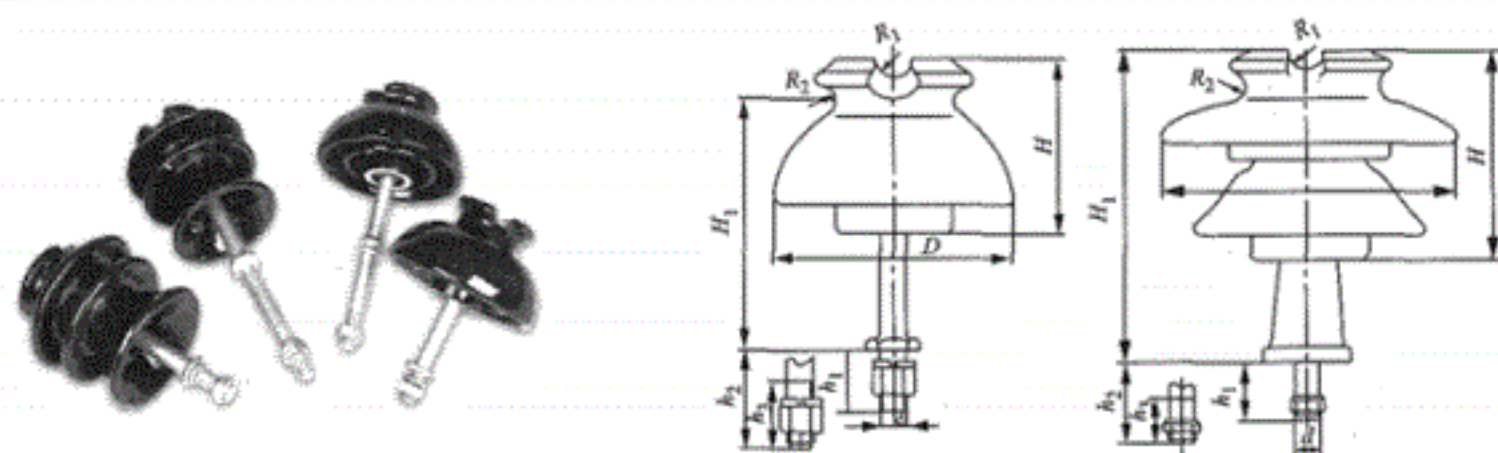
6.1.3 防雷性能的改善措施

防雷性能的改善措施如下：

- a) 绝缘子选型：
- 1) 配电线路绝缘子按材质分有瓷、玻璃及复合绝缘子，按型式分有针式绝缘子、柱式绝缘子、悬式绝缘子、棒式绝缘子等类型。配网典型瓷绝缘子性能比较见表 8，结构型式如图 2 所示。
 - 2) 可从绝缘子的击穿特性、耐弧特性、老化特性以及防污特性等方面提高其绝缘性能，配电线路绝缘子的机械、电气性能应满足相关标准规定。

表 8 配网典型瓷绝缘子性能比较

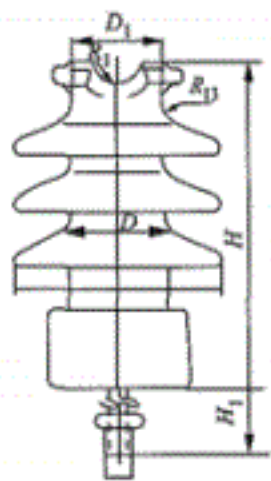
绝缘子性能比较	绝缘子类型	
	针式绝缘子	柱式绝缘子
耐击穿性能	一般	好
耐电弧性能	一般	一般
耐老化性能	一般	好
防污性能	好	一般



(a) 针式绝缘子



(b) 柱式绝缘子

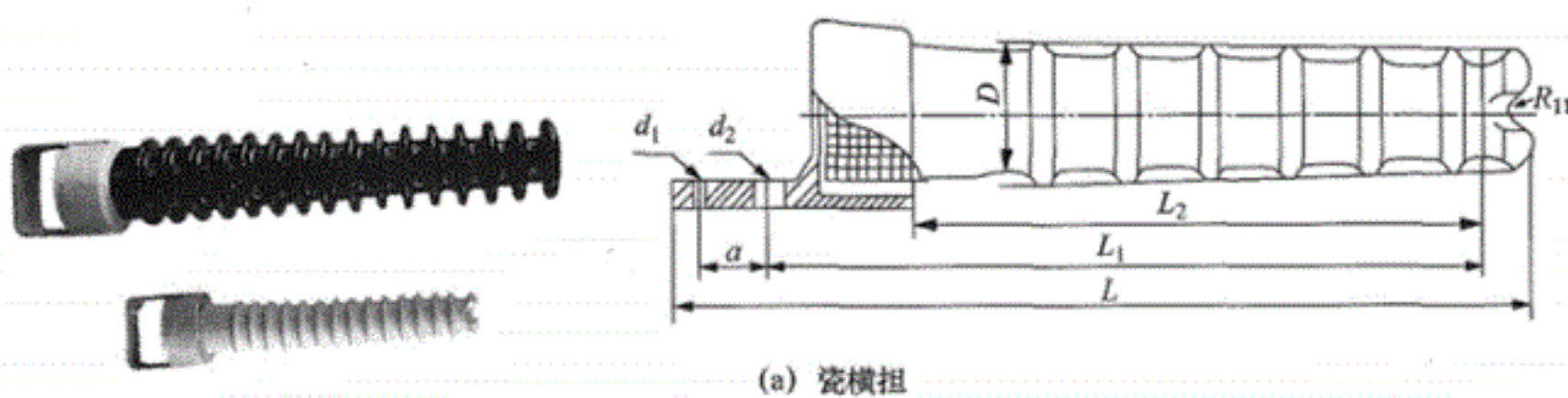


(c) 针柱式绝缘子

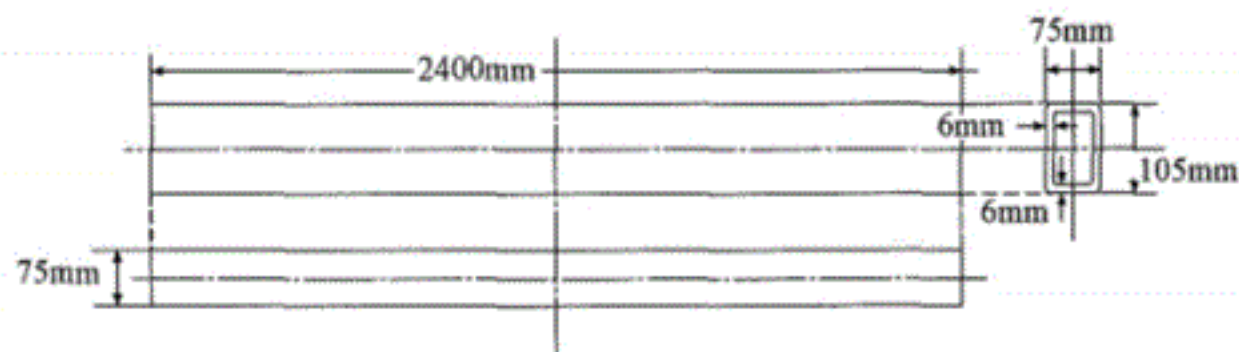
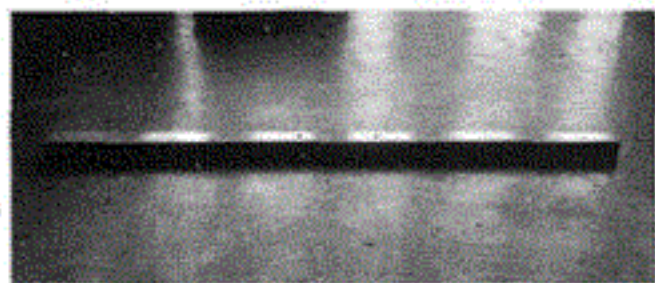
图2 配网典型瓷绝缘子

b) 采用绝缘杆塔（绝缘塔头、绝缘横担）：

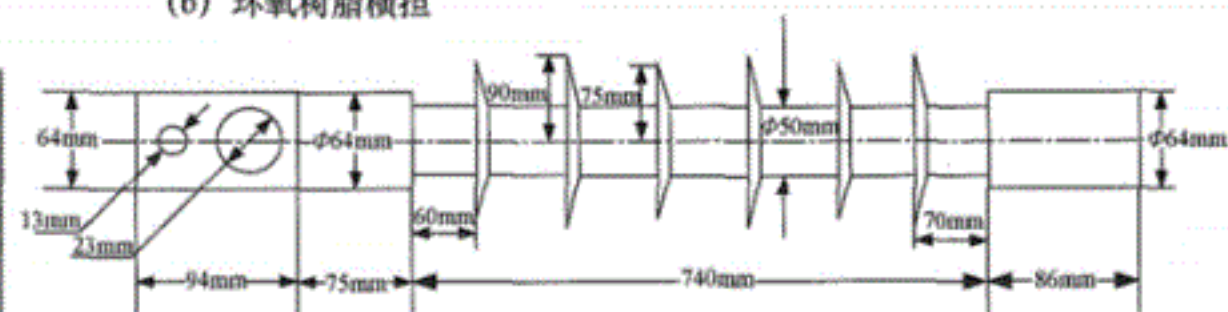
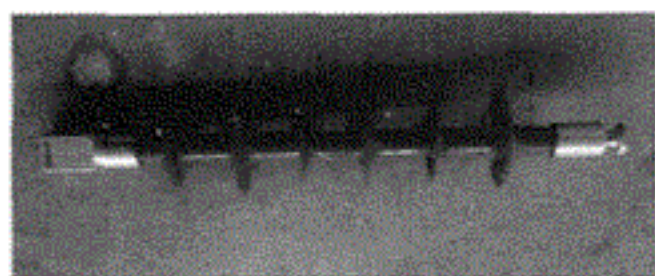
- 1) 瓷横担。绝缘距离及爬电距离较大，耐雷水平较高，自洁性好且不会击穿。采用转动结构，安装方便，可避免断线事故扩大。但瓷横担抗弯强度低，不适合导线截面和档距较大的线路。配网典型瓷横担如图3(a)所示。
- 2) 复合横担。具有瓷横担绝缘子的优点，同时体积小、质量轻、机械拉伸及抗弯强度高，适用于污秽地区及大跨距、紧凑型线路。配网典型复合横担如图3(b)和图3(c)所示。



(a) 瓷横担



(b) 环氧树脂横担



(c) 硅橡胶绝缘子横担

图3 配网典型绝缘横担

- 3) 绝缘杆塔。传统的木质杆、金属杆和钢筋混凝土杆存在质量大、易腐蚀、易开裂等缺陷，而复合材料绝缘杆塔具有质量轻、强度大、绝缘性能好、耐腐蚀、耐疲劳以及环境适应性好的优点，目前采用玻璃纤维增强塑料制造的绝缘杆塔性能较好。
- 4) 绝缘塔头。塔身仍采用传统钢质或木材结构，仅在塔头或横担部分采用绝缘材料结构。同塔双回或多回线路可采用绝缘子与绝缘横担组合的配置方式，单回线路可采用绝缘塔头、绝缘横担、绝缘子组合的配置方式。采用绝缘塔头可大幅提高配电线路绝缘水平。配网典型绝缘塔头如图 4 所示。

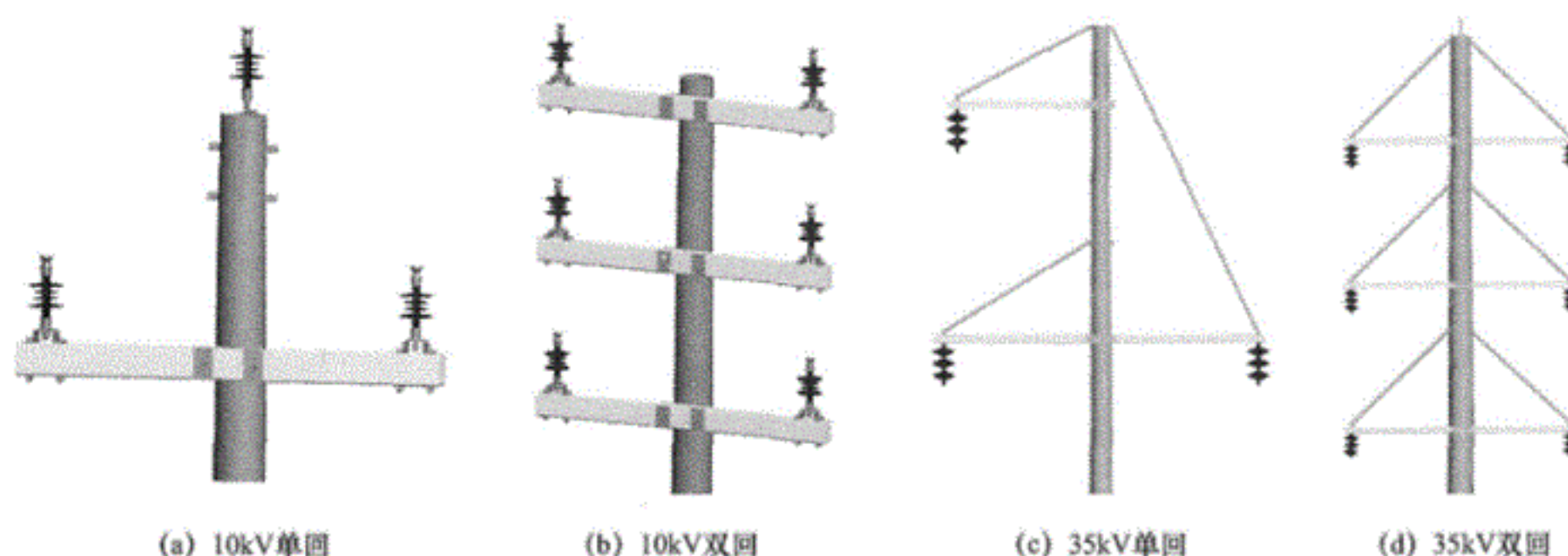


图 4 配网典型绝缘塔头

c) 采用绝缘支架:

- 1) 紧凑型线路采用三角形复合绝缘支架支撑，可以实现同塔多回线路共架，节省线路走廊。绝缘支架绝缘水平较高，且悬挂绝缘支架的钢绞线相当于架空地线，因此采用绝缘支架可大幅提高紧凑型线路的直击雷以及感应过电压防护水平。
- 2) 绝缘支架的结构尺寸以及相间距离、布置间距应满足 DL/T 601 的规定。

d) 导线绝缘化:

- 1) 架空裸导线绝缘水平低，要求有较大的相间距离和较宽的走廊，在空间狭窄、环境多变条件下易发生故障，安全性和供电可靠性不高。采用架空绝缘导线具有明显优点：绝缘水平提高，减少碰线和接地引起的短路故障；实现紧凑型设计，占用更少空间；与电缆线路比较，投资减少，施工简单，建设周期短。
- 2) 绝缘导线应通过标准规定的机械和电气性能试验。
- 3) 绝缘导线存在雷击断线问题，应采取防护措施。具体措施应按照本标准 7.12 的规定。

6.1.4 防雷性能计算及设计

配电线路防雷性能计算方法及设备选型设计要求如下：

- a) 架空配电线路耐雷水平计算方法见附录 B。
- b) 架空配电线路雷击跳闸率计算方法见附录 C。
- c) 架空配电线路杆塔、导地线、绝缘子、金具等部件的选型设计应满足 GB 50061 的规定。

6.2 电缆线路防雷性能

配网电缆的额定电压 $U_0/U(U_m)$ 应满足表 9 的规定，电缆主绝缘和护层雷电冲击耐受电压应不低于表 9 的要求。

电缆终端、接头等电缆附件的额定电压及绝缘水平，不得低于所连接电缆的额定电压及其要求的绝缘水平。电缆附件的其他绝缘要求应满足 GB 50217 的规定。

表9 配网电缆的额定电压和绝缘水平

单位: kV

系统额定电压	6		10		20		35	
U_m	7.2		12		24		40.5	
U_0/U	3.6/6	6/6	6/10	8.7/10	12/20	18/20	21/35	26/35
主绝缘雷电冲击耐受电压	60	70	75	95	125	170	200	250
外护层雷电冲击耐受电压	20	20	20	20	20	20	20	20

注: U_0 为电缆设计时采用的导体对地或金属屏蔽之间的额定工频电压有效值, U 为电缆设计时采用的导体之间的额定工频电压有效值, U_m 为电缆所在系统的最高系统电压有效值。

6.3 其他设备防雷性能

配电变压器、开关类设备的额定雷电冲击耐受电压、额定短时工频耐受电压应不低于表 10 的要求, 对强雷区, 宜选择绝缘水平较高的配电设备。

表10 配网电气设备的额定耐受电压

单位: kV

系统 额定 电压	设备 最高 电压	设备 分类	额定雷电冲击耐受电压 (峰值)				额定短时工频耐受电压 (有效值)			
			相对地	相间	断口		相对地	相间	断口	
					断路器	隔离开关			断路器	隔离开关
6	7.2	变压器	60 (40)	60 (40)	—	—	25 (20)	25 (20)	—	—
		开关	60 (40)	60 (40)	60	70	30 (20)	30 (20)	30	34
10	12	变压器	75 (60)	75 (60)	—	—	35 (28)	35 (28)	—	—
		开关	75 (60)	75 (60)	75 (60)	85 (70)	42 (28)	42 (28)	42 (28)	49 (35)
20	24	变压器	125 (95)	125 (95)	—	—	55 (50)	55 (50)	—	—
		开关	125	125	125	145	65	65	65	79
35	40.5	变压器	185/200	185/200	—	—	80/85	80/85	—	—
		开关	185	185	185	215	95	95	95	118

注 1: 分子和分母数据分别对应外绝缘和内绝缘。
注 2: 括号内和外数据分别对应低电阻和非低电阻接地系统。

7 架空线路防雷保护

7.1 一般规定

7.1.1 配网架空线路防雷保护应遵循简单可靠、技术经济的原则, 最大限度地减少线路雷击故障率, 避免永久故障, 提高供电可靠性。

7.1.2 配电线路防雷应尽力减少雷击断线、绝缘子雷击损坏、多相短路接地或共架线路多回同跳故障, 减少配电变压器等柱上设备雷击损坏故障。

7.1.3 配电线路通过采取合理的绝缘配置和适当的防雷保护措施, 应能耐受绝大多数雷电感应过电压和部分直击雷过电压。

7.1.4 中雷区及以上线路、重要用户供电线路或可靠性要求较高的线路, 应适当提高防雷设计标准, 宜采取堵塞式防雷措施; 其他一般线路可选用疏导式防雷措施。

7.1.5 不同线路的设计、运行条件不同, 宜根据实际情况和防雷经验, 采取疏堵结合、差异化的防雷

措施,提高防雷的针对性。配电线路防雷措施技术经济性及适用性见附录 D。

7.2 加强线路绝缘

7.2.1 加强线路绝缘只需一次性投资,无需维护,设计时应合理采用。

7.2.2 配电线路防雷设计时,应注意控制塔头空气间隙距离,防止塔头各结构部件对配电线路的整体防雷性能造成不利影响。

7.2.3 一般可采取以下措施加强线路绝缘,提高线路耐雷水平:

a) 绝缘子:

- 1) 为提高线路防雷性能,一般采用柱式绝缘子。
- 2) 新建线路宜采用柱式绝缘子或复合绝缘子。
- 3) 新建线路以及塔头间隙允许的运行线路,可通过增加绝缘子片数加强绝缘。

b) 绝缘导线:

- 1) 选择绝缘层较厚的绝缘导线。
- 2) 局部加强绝缘,将绝缘子附近(如两侧各 200mm 范围)导线的绝缘层适当加厚,减少雷电击穿和断线概率。

c) 绝缘杆塔(绝缘塔头、绝缘横担):

- 1) 一般地区,6kV~20kV 钢筋混凝土电杆配电线路宜采用瓷横担或其他绝缘横担。采用铁横担时,对供电可靠性要求高的线路宜采用高一绝缘等级的绝缘子,并尽量以较短时间切除故障,采用绝缘导线的铁横担线路可不提高绝缘子等级。
- 2) 污秽地区及大跨距、紧凑型线路可选用复合横担绝缘子。
- 3) 必要时,如强风区、强雷区或重污区,可选用绝缘塔头或绝缘杆塔。

7.2.4 对新建 10kV~20kV 绝缘线路及 35kV 线路,线路整体雷电冲击绝缘水平(含绝缘子、绝缘导线和塔头组合绝缘)不宜低于 300kV。

7.2.5 配电线路典型耐雷水平值见附录 B,发电厂、变电站进线保护段及重要线路的耐雷水平不应低于表 B.4 中较高的数值。

7.2.6 应注意加强线路绝缘措施对柱上设备防雷保护的影响。

7.3 设置架空地线

7.3.1 配电线路绝缘水平较低,雷击架空地线往往引起反击,一般不沿全线架设架空地线。

7.3.2 架空地线宜在新建线路设计时考虑,安装地线线路宜适当提高绝缘设计标准、适当降低杆塔接地电阻。运行线路加装地线需校核杆塔结构强度和空气间隙距离。

7.3.3 安装地线时,配电线路或安装区段的雷电冲击绝缘水平及杆塔接地电阻宜满足以下要求,确保架空地线取得良好的防雷效果:

- a) 绝缘子 50%雷电冲击放电电压 $U_{50\%}$ 一般不宜低于 200kV。
- b) $U_{50\%}$ 低于 200kV 时,杆塔接地电阻不宜高于 10Ω。
- c) $U_{50\%}$ 高于 300kV 时,杆塔接地电阻可放宽至 30Ω。

7.3.4 配电线路架空地线保护应满足以下要求:

- a) 35kV 线路在发电厂、变电站进线段宜架设地线,架设地线长度一般宜为 1.0km~1.5km。
- b) 6kV~20kV 线路在多雷区、强雷区可架设地线。
- c) 地线对边导线保护角宜采用 $20^\circ \sim 30^\circ$,单根地线保护角不宜大于 25° 。
- d) 重冰区地线保护角可适当加大。
- e) 多雷区和强雷区地线保护角可采用负保护角。
- f) 同塔多回线路、大跨越段线路宜减小地线保护角。

g) 双地线线路杆塔处两根地线间的距离不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

7.3.5 有地线的配电线路，应防止雷击地线档距中央时反击导线。在档距中央，气温+15℃及无风条件下，导线与地线间的垂直距离宜满足下式要求：

$$S \geq 0.012L + 1 \quad (18)$$

式中：

S ——导线与地线间的垂直距离，m；

L ——档距长度，m。

当地线保护角较小或采用负保护角时，导线与地线间的垂直距离宜适当增大。35kV 线路大跨越档导线与地线间的距离不得小于 3m。

7.3.6 架空地线的保护范围符合 GB/T 50064 的规定。

7.4 安装线路避雷器

7.4.1 采用线路避雷器时，宜根据技术经济原则，因地制宜制订安装方案。

7.4.2 多雷区、强雷区线路可安装线路避雷器，一般宜在以下情况采用：

- a) 历年雷击事故率、跳闸率较高的配电线路或易击段。
- b) 山区线路的易击段。
- c) 山区线路接地电阻过大、易发生闪络且改善接地电阻困难也不经济的杆塔。
- d) 杆塔接地电阻难以达到设计要求，且遭受雷击可能性较大的杆塔。
- e) 发电厂、变电站的进线段（含终端杆塔）接地电阻较大的杆塔。
- f) 同塔双回线路的易击段杆塔，可安装于其中一回，防止雷击双回同跳。
- g) 大跨越档或高杆塔。
- h) 配电线路分支处杆塔。
- i) 架空绝缘线路与裸导线线路、电缆线路连接处。
- j) 对供电可靠性要求特别高的配电线路。
- k) 距离大面积水域、金属矿体处一定范围内的杆塔。

7.4.3 基于技术经济原则，线路避雷器的采用应符合以下要求：

- a) 主要限制雷击导线过电压和感应过电压时，单回线路可在两个边相各装 1 支避雷器，双回线路可在最上层两相或最下层两相各装 1 支避雷器；主要限制雷电反击和感应过电压时，单回可在三相各装 1 支避雷器，双回可在最上层两相各装 1 支避雷器，必要时也可考虑多相或各相均安装。
- b) 有地线时，流经避雷器的雷电流较小，可选用标称电流 5kA 的避雷器，能承受 4/10μs、65kA 大电流冲击；无地线时，流经避雷器的雷电流较大，供电可靠性要求较高的 10kV~35kV 线路，可选用标称电流 10kA 的避雷器，能承受 4/10μs、100kA 大电流冲击。
- c) 以限制感应过电压为目标的线路或区段可选用标称电流 5kA 的避雷器，以限制直击雷过电压为目标的线路或区段可选用标称电流 10kA 的避雷器。
- d) 雷害特别严重的线路考虑全线安装避雷器，一般可采取每 4 基杆塔安装 1 组，易击段安装时宜连续几基杆塔均安装。安装杆塔宜三相均安装，否则未安装相反击闪络率增大，相邻未安装杆塔应尽量降低接地电阻。
- e) 避雷器的高压引线及接地线应尽可能缩短，以减小引线电感对避雷器保护效果的影响。

7.4.4 安装于配电线路终端杆塔的避雷器主要用于厂站侵入波保护，兼顾终端杆绝缘子保护，宜选择标称电流 5kA 的无间隙避雷器（可带脱离装置）；避雷器经常遭受直击雷损坏的，标称电流可选择 10kA 或更大。避雷器的选型和结构应满足本标准 10.3 的规定。

7.4.5 安装于线路中间杆塔的避雷器主要用于绝缘子保护，可选择带间隙避雷器，应满足以下要求：

- a) 带间隙避雷器宜采用外串联间隙结构, 可采用环形电极、穿刺电极及带支撑绝缘子的外串联间隙避雷器, 其选型和结构应满足本标准 10.4 的规定。
- b) 间隙距离应小于绝缘子干弧距离并留有裕度, 确保避雷器在一定幅值雷电过电压下动作, 在工频及操作过电压下不动作, 宜根据不同电极形状(环形、棒形、水平形)通过试验确定。环形电极间隙距离与绝缘子干弧距离之比不宜大于 70%。
- c) 安装穿刺电极外串联间隙避雷器时, 穿刺电极中心线与被保护绝缘子轴线距离宜控制在 200mm~400mm, 以确保雷电冲击放电均发生在串联间隙上。

7.5 安装绝缘子并联间隙

7.5.1 并联间隙本身不具备熄灭工频电弧能力, 需配合重合闸装置使用。

7.5.2 中雷区及以上地区可采取并联间隙保护绝缘子, 并应符合以下要求:

- a) 绝缘子与并联间隙雷电放电电压之间的配合应做到雷电过电压下并联间隙可靠动作, 同时又不宜过分降低线路耐雷水平。
- b) 绝缘子并联间隙应在冲击放电后有效引导工频短路电弧离开绝缘子本体, 以免使其灼伤。
- c) 绝缘子并联间隙应安装牢固, 具有足够的耐弧和防腐能力。

7.5.3 绝缘子并联间隙的适用范围如下:

- a) 易遭受雷击、绝缘子损坏率较高的 35kV 配电线路。
- b) 6kV~20kV 配电线路绝缘水平低, 雷击闪络率高, 一般不宜采用并联间隙保护。对绝缘子雷击损坏率较高、雷击断线较多的易击段, 充分论证后可考虑安装。
- c) 向重要用户供电线路、雷击跳闸特别频繁的线路, 不宜采取并联间隙保护。

7.5.4 并联间隙结构、参数应符合以下要求:

- a) 并联间隙的最小通流截面积可按下式校核选择:

$$\Delta T = \frac{1000 I^2 \rho_r t}{\pi^2 C \rho_d r^4} \quad (19)$$

式中:

ΔT ——并联间隙吸收热量后温度上升值, $^{\circ}\text{C}$;

I ——系统工频短路电流有效值, A;

ρ_r ——并联间隙材料电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$, 对碳钢材料按照图 5 取值;

t ——短路电流持续时间, s;

C ——并联间隙材料比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 对碳钢材料取 450;

ρ_d ——并联间隙材料密度, g/m^3 , 对碳钢材料取 7.85×10^6 ;

r ——并联间隙横截面半径, m。

- b) 并联间隙结构设计一般无需考虑绝缘子工频电场分布、可见电晕和无线电干扰问题, 可设计为简单的“羊角”形状, 如图 6 所示。

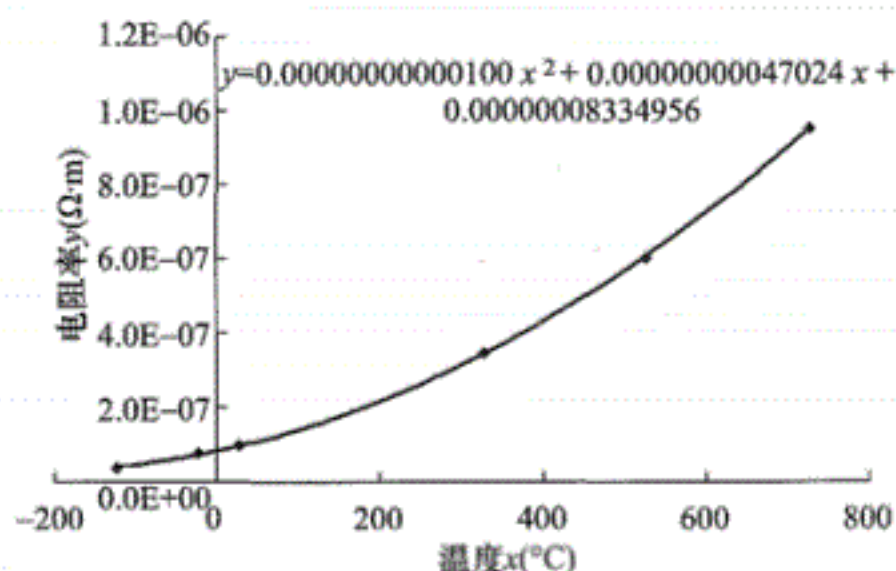


图 5 碳钢材料电阻率—温度特性曲线

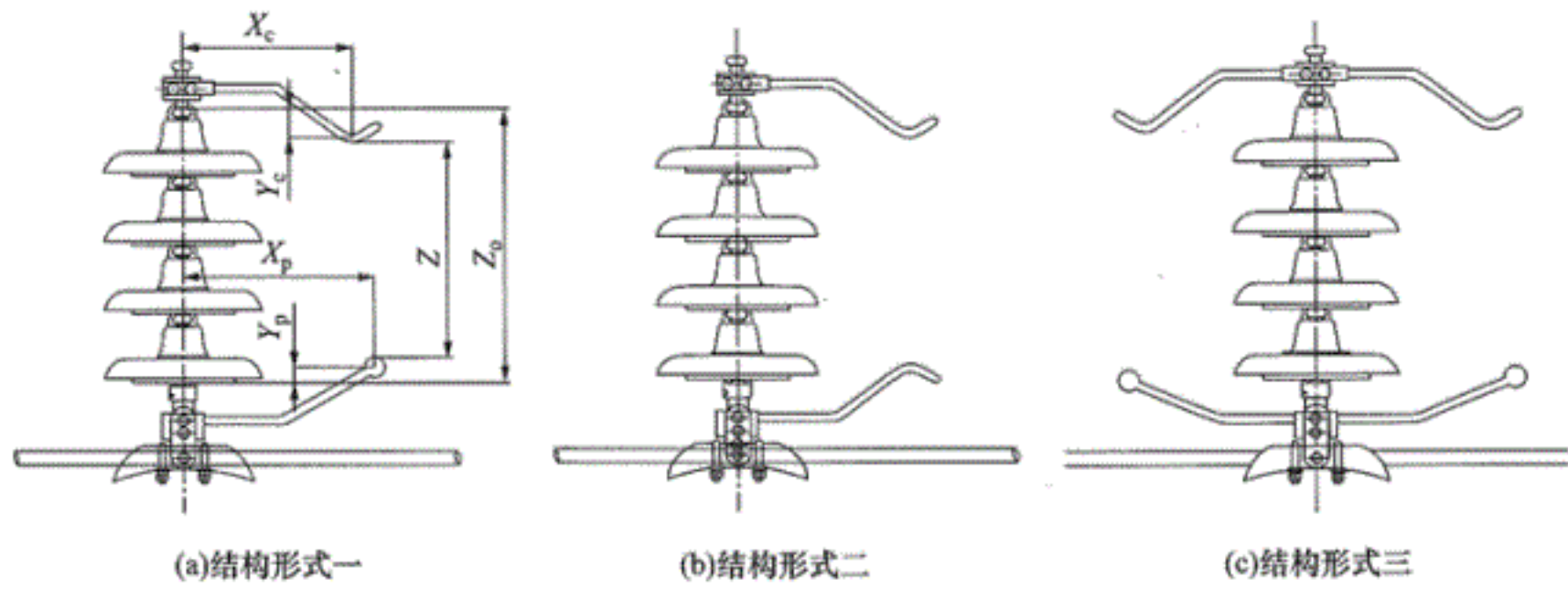


图 6 配电线路绝缘子并联间隙典型结构

- c) 并联间隙应满足雷电过电压下动作、工频及操作过电压下不动作，并联间隙距离可按间隙与绝缘子雷电冲击 50%放电电压之比约为 80%的原则选择。配电线路绝缘水平低，并联间隙很难深度短接绝缘子，小部分雷电闪络可能沿绝缘子表面发生，并联间隙也应能快速疏导起始于绝缘子的工频电弧，保护绝缘子不损坏。
- d) 并联间隙产品应能通过雷电冲击放电试验、热稳定试验和工频电弧试验检验，其中热稳定试验和工频电弧试验技术条件由系统三相短路电流值和继电保护时间决定，一般耐受电弧烧灼次数大于 5 次，具体试验方法可参考 DL/T 1293 执行。

7.5.5 典型 35kV 线路用并联间隙产品结构尺寸见表 11。可在现有线路绝缘基础上增加 1 片绝缘子后再安装并联间隙。

表 11 典型 35kV 线路用并联间隙结构尺寸

绝缘子 (串)	Z_0 mm	Z mm	X_c mm	X_p mm	Y_c mm	Y_p mm	Z/Z_0
悬垂串	438	365	330	350	73	0	0.833
耐张串	584	438	330	350	100	46	0.750

7.5.6 并联间隙安装应符合以下要求：

- a) 对于直线塔，若线路为辐射供电方式，潮流方向单一，并联间隙安装顺着导线方向，并朝向线路绝缘子 (串) 的负荷侧；若线路为环网供电方式，潮流方向双向变化，可选择使用双向型并联间隙，如图 6 (c) 所示。
- b) 对于耐张塔，在杆塔两侧绝缘子 (串) 上均安装并联间隙，方向朝上。

7.5.7 绝缘子并联间隙除主要用于绝缘子防雷保护外，还可用于形成配电线路相间或回路间不平衡绝缘配置。安装并联间隙相或回路宜增加 1 片绝缘子后再安装并联间隙，保持正常绝缘水平，其他相或回路应加强绝缘，具体按照本标准 7.8 的规定。

7.6 降低杆塔接地电阻

7.6.1 6kV 及以上配电线路钢筋混凝土杆宜接地，金属电杆应接地，有地线的杆塔应接地；带承力线的紧凑型架空绝缘线路的承力线两端应接地，接地电阻不应大于 30Ω 。

7.6.2 应充分利用铁塔、钢筋混凝土杆的自然接地作用，除多雷区、强雷区外，沥青路面上的架空线路钢筋混凝土杆和金属杆，以及有运行经验的地区，可不另设人工接地装置。

7.6.3 钢筋混凝土杆线路的地线支架、导线横担与绝缘子固定部分之间，宜有可靠的电气连接并与接地引下线相连。主杆的非预应力钢筋如已连接成电气通路，可兼作接地引下线；利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土杆，其钢筋与接地螺母和铁横担间应有可靠的电气连接。

7.6.4 有地线的配电线路，每基杆塔不连地线的工频接地电阻，雷雨季节干燥时不宜超过表 12 的数值；

变电站进线段杆塔接地电阻不宜高于 10Ω 。

表 12 杆塔工频接地电阻

土壤电阻率 $\Omega \cdot m$	≤ 100	100~500	500~1000	1000~2000	> 2000
接地电阻 Ω	10	15	20	25	30

7.7 设置独立避雷针

7.7.1 一般情况下，配电线路不宜采用避雷针防雷。

7.7.2 位于山顶或突出暴露地形，人迹罕至，直击雷事故频发的易击档、易击杆或线路台区，采用线路避雷器及其他防雷措施效果不明显的，可考虑联合采用独立避雷针保护。

7.7.3 配电线路采用独立避雷针保护应满足以下要求：

- a) 独立避雷针应设置独立接地装置，接地电阻不宜超过 10Ω ，其与线路杆塔接地极的地中距离应符合下式要求：

$$S_e \geq 0.3R_i \quad (20)$$

式中：

S_e ——地中距离，m；

R_i ——避雷针的冲击接地电阻， Ω 。

- b) 独立避雷针本体与配电线路及设备的空气中距离应符合下式要求：

$$S_a \geq 0.2R_i + 0.1h \quad (21)$$

式中：

S_a ——空气中距离，m；

R_i ——避雷针的冲击接地电阻， Ω ；

h ——避雷针校验点的高度，m。

- c) 独立避雷针不应设在道路两侧或人经常通行的地方，其保护范围满足 GB/T 50064 的规定。

7.8 设置不平衡绝缘

7.8.1 设置不平衡绝缘宜采取“正常绝缘+加强绝缘”的方式，一般不宜采取“正常绝缘+降低绝缘”的方式。其中，相间不平衡绝缘宜采取一相正常绝缘、另外两相加强绝缘的方式，回路间不平衡绝缘宜采取一回正常绝缘、其他回路加强绝缘的方式。

7.8.2 不平衡绝缘配置可通过增加绝缘子片数、安装线路避雷器及安装绝缘子并联间隙等措施实现。

7.8.3 不平衡绝缘可用于整条线路，也可仅用于线路易击段。

7.8.4 采用不平衡绝缘的单回或多回线路，宜尽量降低杆塔接地电阻，提高保护效果。

7.8.5 相间不平衡绝缘应满足以下要求：

- 三角排列或上字型杆塔在无地线情况下，可采用不平衡绝缘保护。一般顶相采用正常绝缘，两边相采用加强绝缘。
- 必要时水平排列线路也可采取不平衡绝缘保护，宜选择易受雷击侧边相作为弱绝缘相。
- 各相可采取不同类型的绝缘子以形成相间不平衡绝缘，如 6kV~20kV 线路采用柱式绝缘子和瓷横担绝缘子配置，35kV 线路采用瓷横担绝缘子和悬式绝缘子串配置等。
- 在配电变压器的前几基杆塔上，可采用三相不平衡绝缘配置。

7.8.6 回路间不平衡绝缘应满足以下要求：

- a) 多雷区无高压线路走廊或树木、建筑物屏蔽，处于平原、旷野的同塔多回线路，经常发生雷击

同时故障，或多回同时故障存在较大供电风险的，可采取回路间不平衡绝缘方式。

- b) 垂直排列线路宜选择易受雷击侧的最上层回路作为弱绝缘回路；水平排列线路宜选择易受雷击侧的最外层回路作为弱绝缘回路。

7.9 中性点经消弧线圈接地

7.9.1 采用中性点经消弧线圈接地的谐振接地系统，可减小雷击故障点容性电流，有利于电弧熄灭，快速消除单相瞬时接地故障；继电保护设定对单相接地故障不跳闸，允许持续运行 2h。可显著减小雷击单相接地故障导致的雷击跳闸。

7.9.2 中性点谐振接地宜采用自动跟踪补偿消弧系统，可配接地故障选线（跳闸）装置和故障录波装置。中性点谐振接地方式选择及装设地点应符合 GB/T 50064 的规定。

7.9.3 对于重要配电线路，宜配置接地故障自动选线装置，发生单相永久接地故障后，按整定时间自动跳开故障线路，避免事故扩大及造成人身事故。

7.9.4 对供电可靠性和安全性要求较高的配网系统，宜采用消弧线圈并联低电阻接地方式，对单相瞬时故障和永久故障分别采取不跳闸和及时跳闸的策略。

7.10 继电保护和自动重合闸

7.10.1 继电保护能快速切除雷击造成的相间（接地）短路故障或单相接地短路故障（对低电阻接地系统），避免故障扩大。对相间故障，应适当调整继电保护和断路器（熔断器）的动作时间，尽量缩短故障切除时间。

7.10.2 装设自动重合闸装置是防止线路因雷击跳闸造成永久停电的根本措施，对雷击瞬时性接地故障采用自动重合闸能快速恢复供电。

7.11 其他防雷保护措施

7.11.1 长闪络路径熄弧装置

该装置与线路绝缘子并联安装，雷电冲击放电电压低于绝缘子，雷电过电压下先于绝缘子放电，由于工作电压与闪络路径长度的比值（电场强度）足够小，工频续流无法有效建弧，达到有效保护绝缘子和降低雷击跳闸率的效果。

基于技术经济性，采用长闪络路径熄弧装置（或多腔串联熄弧装置）时，可在相邻 3 基杆塔的三相上分别安装，每基杆塔安装一相。

7.11.2 电缆化改造

架空配电线路频繁遭受雷击跳闸及设备损坏，且难以采取其他保护措施时，对重要线路或具备条件的线路，可考虑对线路进行电缆化改造。

7.11.3 环网供电

线路雷击故障高发地区，应尽量提高线路环网率，通过对非故障线路段合环转供电，减少雷击故障停电；对重要用户应采取环网供电或不同杆的双回路供电方式。

7.12 绝缘导线雷击断线保护

7.12.1 绝缘导线存在严重的雷击断线问题，宜采取雷击断线保护措施。

7.12.2 防止架空绝缘线路雷击断线可采取加强绝缘（如采用柱式绝缘子）、装设架空地线及安装线路避雷器（无间隙、带间隙）等堵塞式防雷措施，或安装防弧金具（剥线型、穿刺型）、放电钳位绝缘子

(剥线型、穿刺型)、长闪络路径熄弧装置等疏导式防雷措施。

7.12.3 防止绝缘线路雷击断线，需结合雷电情况和运行经验，合理采取防雷措施，应满足以下要求：

- 发电厂及变电站 1km 进线段、大跨越段、中雷区及以上线路或向重要用户供电线路，宜采用带外串联间隙的线路避雷器。外串联间隙避雷器的结构型式见本标准 10.4 的规定。
- 强雷区及多雷区的新建线路，可架设地线并安装带外串联间隙的线路避雷器，架空地线应逐基良好接地。
- 其他绝缘线路，考虑经济成本因素，可采取疏导式防雷措施，宜选用剥线型放电钳位绝缘子和穿刺型防弧金具。放电钳位绝缘子和防弧金具的结构型式如图 7 和图 8 所示。
- 对雷害频发线路段或中雷区及以上线路段，防护产品应逐基电杆逐相安装。
- 配电设备（变压器、电缆头、线路开关）附近采取雷击断线防护措施的，其相邻杆塔应采用带外串联间隙的线路避雷器并设置接地。
- 防护装置接地与否不影响对本基电杆的保护效果，但与不设置接地比较，设置接地会降低临近电杆闪络概率；新建线路每基电杆宜设置接地，运行线路除第 e) 条外可不设置接地。

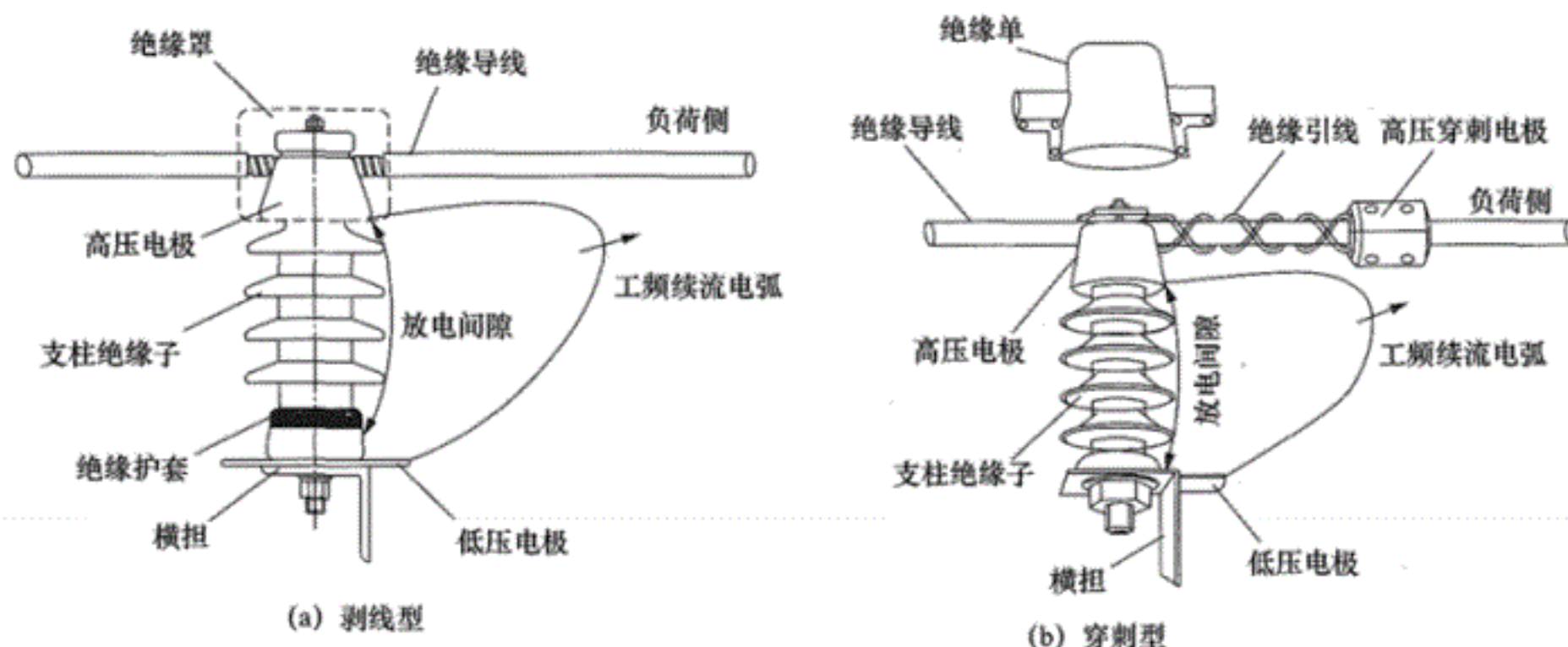


图 7 配电线路放电钳位绝缘子

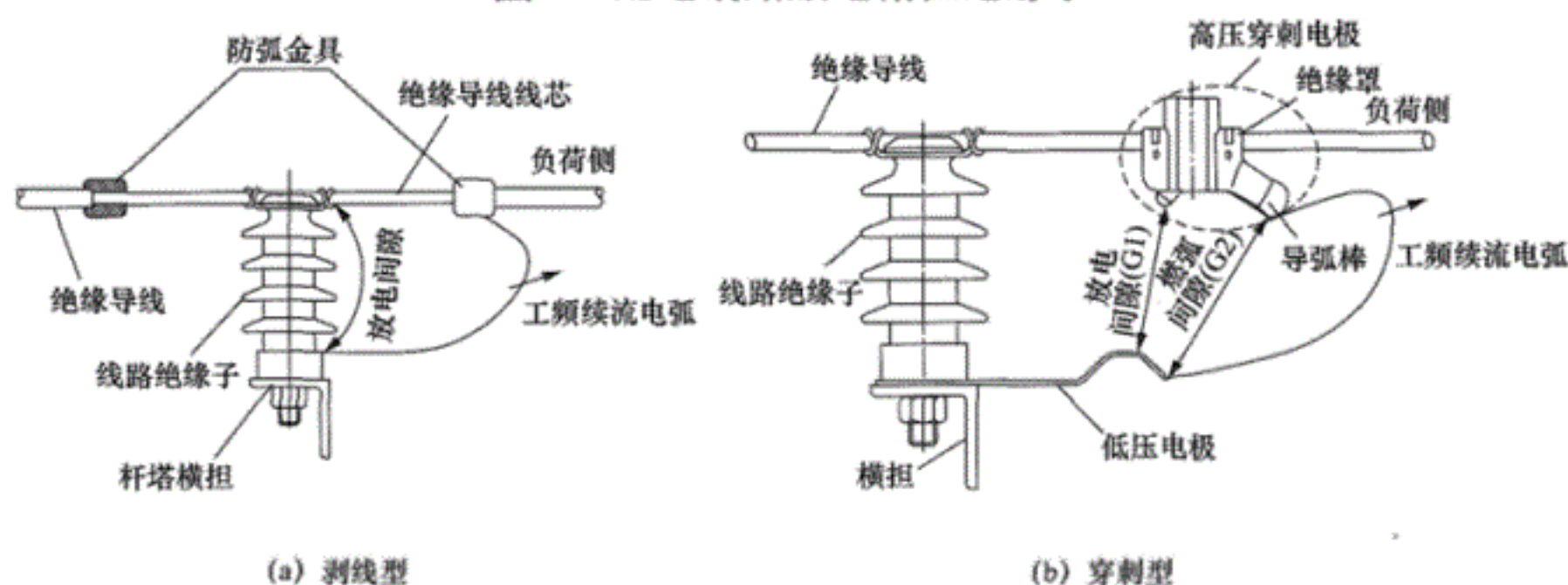


图 8 配电线路防弧金具

7.12.4 防弧金具、放电钳位绝缘子及外串联间隙避雷器的放电间隙，应在雷电过电压下可靠动作，工频过电压、操作过电压下不动作。典型防护装置的技术参数、试验检验方法、施工安装和运行维护要求应满足 DL/T 1292 的规定。

7.12.5 绝缘导线雷击断线后，断口较为整齐，绝缘层包住导体使线路继续运行，应采取适当防护措施，避免发生人身事故。

7.13 大跨越档及特殊区段防雷保护

7.13.1 配电线路大跨越档及特殊区段应加强防雷保护，减少线路雷击事故。

7.13.2 大跨越档和特殊区段线路宜采取加强绝缘措施，并尽量降低杆塔接地电阻，杆塔接地电阻应满足本标准 7.6 的规定。必要时可装设避雷器或保护间隙来提高防雷性能。

7.13.3 配电线路大跨越档防雷保护应满足以下要求：

- a) 大跨越档的绝缘水平不应低于同线路的其他杆塔。
- b) 新建 6kV~10kV 无地线线路的大跨越档宜装设线路避雷器，必要时可联合使用架空地线。
- c) 新建 35kV 线路大跨越档宜架设地线或安装线路避雷器，并比一般线路增加绝缘子片数，档中导线与地线间的距离及地线保护角应满足本标准 7.3 的规定。
- d) 靠近变电站进线段大跨越档的防雷保护应满足变电站雷电侵入波保护要求。

7.14 线路交叉处防雷保护

7.14.1 配电线路与其他线路或通信线路交叉时，应对架空配电线路交叉处进行保护。

7.14.2 设计时应考虑线路初伸长、覆冰及短路、过载温升等对交叉档弧垂的影响，配电线路与电气化铁路、高等级公路、通信线路、石化管道交叉时的防雷保护应满足空气间隙最小距离要求。

7.14.3 配电线路交叉处防雷保护应满足以下要求：

- a) 交叉点应尽量靠近上、下方线路两端杆塔，使其远离上方线路的档距中点，以增大交叉处的间隙距离；交叉处空气间隙雷电冲击绝缘水平不得低于两侧杆塔上导线对地的绝缘水平。
- b) 交叉档两端的混凝土电杆或铁塔（上、下方线路共 4 基），无论有无地线，均应人工接地。
- c) 同电压线路交叉或与低电压线路、通信线路交叉时，两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路地线间的垂直距离，在导线温度为 40℃ 时（导线温度按最大允许温度 80℃ 设计时为 50℃），对 6kV~10kV 线路不得小于 2m，对 20kV~35kV 线路不得小于 3m；对按允许载流量选择导线截面的线路，还应校验导线温度为最高允许温度时的交叉距离，且不得小于 0.8m。
- d) 6kV~10kV 线路交叉距离在 4m 及以上，20kV~35kV 线路交叉距离在 5m 及以上的，线路交叉档可不采取保护措施；交叉距离达不到此要求，交叉档无地线且两端为木电杆或木横担的钢筋混凝土电杆，应装设避雷器或保护间隙，其接地电阻应不大于 30Ω。
- e) 交叉点至最近杆塔的距离不超过 40m 时，可不在此线路交叉档的另一杆塔上装设交叉保护用防雷装置。

8 电缆线路防雷保护

8.1 电缆主绝缘保护

8.1.1 配电电缆的户外终端宜在厂站避雷针或避雷线的保护范围内，以防止直击雷。

8.1.2 配电电缆的进线段应装设避雷器保护，长度超过 50m 的电缆应在两端装设避雷器，长度不超过 50m 的电缆可只在其中一端装设避雷器。

8.1.3 配电电缆与架空线路连接处应装设避雷器保护。

8.1.4 用于保护电缆主绝缘的避雷器，其接地端应与电缆金属护层连接。配电电缆金属护层应按 8.2 的规定可靠接地。

8.2 电缆护层保护

8.2.1 三芯电缆金属护层应在线路两端直接接地。

8.2.2 单芯电缆金属层在线路上至少有一点直接接地，任一点非直接接地处正常感应电压应符合以下规定：采取能防止人员任意接触金属层的安全措施时不得大于 100V，否则不得大于 50V。

8.2.3 单芯电缆线路不长，且满足感应电压要求时，可采取一端单点接地而在另一端经护层电压限制器接地，或在中间部位单点接地而在两端经护层电压限制器接地。

8.2.4 单芯电缆线路较长，单点接地感应电压不满足要求时，可采取两端接地，也可将电缆均匀分割成3段或3的倍数段交叉互联接地。采用交叉互联接地时，电缆两端及中间直通接头处应直接接地，每个交叉互联点的绝缘接头处应经护层电压限制器接地。

8.2.5 电缆护层电压限制器配置方式如图9所示，其参数选择及连接方式应满足GB 50217的规定。

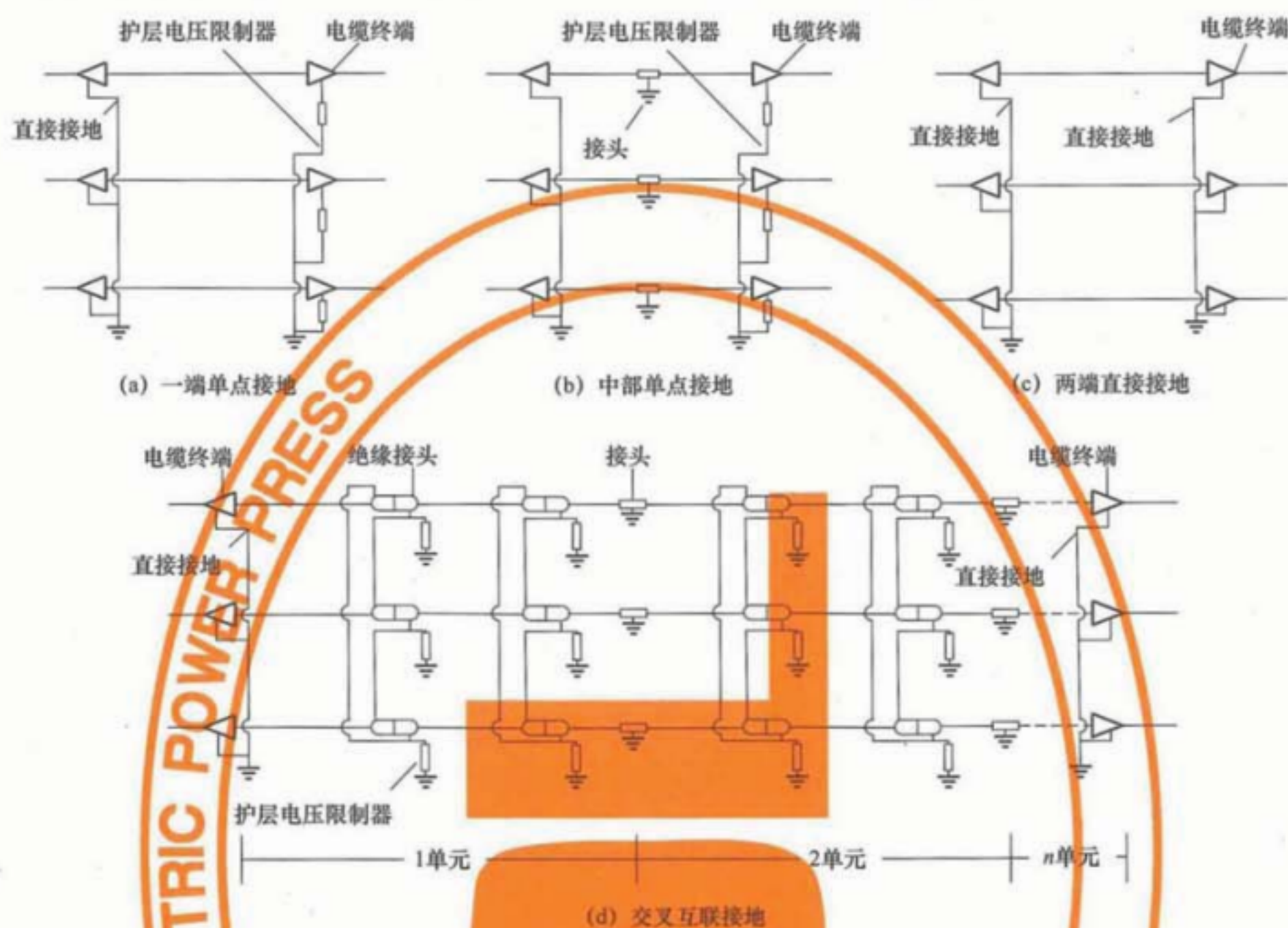


图9 电缆护层电压限制器配置方式

9 其他设备防雷保护

9.1 配电变压器

9.1.1 配电变压器的高、低压侧均应装设避雷器进行保护，避雷器应尽量靠近变压器安装，避雷器接地端、低压绕组中性点应接至配电变压器的外壳，采取三点联合接地方式，防止雷击造成配电变压器高、低压绕组绝缘损坏。

9.1.2 柱上变压器宜设置闭合环形的统一接地装置，高、低压侧不宜单独设置分离的接地装置。低压侧中性点直接接地的中性线除在电源点接地外，在干线和分支线终端处应重复接地。

9.1.3 容量100kVA及以上变压器接地电阻不应大于 4Ω ，每个重复接地装置的接地电阻不应大于 10Ω ；容量100kVA及以下变压器接地电阻不应大于 10Ω ，每个重复接地装置的接地电阻不应大于 30Ω 。

9.1.4 对易遭受雷击故障或位于线路末端的柱上变压器，宜在相邻的杆塔同时加装线路避雷器。

9.2 柱上开关设备

柱上开关设备应装设防雷装置，经常开路运行而又带电的断路器、负荷开关或隔离开关，应在两侧装设避雷器，其接地线应与柱上开关的金属外壳连接在一起接地，接地电阻不应大于 10Ω 。

9.3 柱上电容器

柱上电容器、无功补偿设备宜装设避雷器保护，避雷器应尽量靠近电容器安装，其接地线应与电

容器金属外壳连接在一起接地，接地电阻不应超过 10Ω 。

9.4 开关站、配电站、环网单元及箱式变电站

9.4.1 配网开关站、配电站、环网单元及箱式变电站应在配电母线和每回进、出线安装避雷器保护，避雷器接地线应与设备金属外壳连在一起接地，上述配电装置接地电阻不宜大于 4Ω 。

9.4.2 易受雷击又不在直击雷保护范围内的配电站，采用由避雷短针和避雷带组成的混合接闪器保护，避雷短针布置于屋檐及檐角等易受雷击部位，避雷带沿屋面墙体敷设。

9.4.3 配网开关站、配电站、环网单元及箱式变电站，其高、低压进出线宜采用电缆埋地敷设方式，户外电缆与架空线路连接处应装设避雷器。

9.4.4 电气设备的金属外壳、支架、电缆外皮、钢框架等较大金属构件和突出屋面的金属物件应可靠接地，且接地电阻不宜超过 4Ω 。

9.4.5 户外箱式变电站、环网柜等电气装置，宜敷设围绕箱式变电站、环网柜的闭合环形接地装置，所有电气装置外露导电部分连接的接地母线应与接地装置相连。

9.5 变电站内配电设备

9.5.1 变电站内 $6\text{kV}\sim 35\text{kV}$ 户外配电装置应在变电站直击雷保护范围内，变电站配电装置直击雷保护应满足 GB/T 50064 的规定。

9.5.2 变电站配电设备宜装设避雷器保护，避雷器应以最短接地线与变电站主接地网连接，避雷器附近应装设集中接地装置。

9.5.3 变电站 $6\text{kV}\sim 35\text{kV}$ 配电装置的雷电侵入波保护，应在每组母线装设电站型避雷器，在每组进出线装设配电型避雷器。对电缆进线，避雷器装设在电缆终端处，其接地线与电缆护层相连接地。

10 配网避雷器的选择和使用

10.1 配网避雷器分类

配网用金属氧化物避雷器可按以下几种方法分类：

- a) 按是否有串联间隙分为无间隙避雷器和带间隙避雷器。
- b) 按外绝缘材料分为瓷套式、复合外套式、金属外壳避雷器等。
- c) 按保护对象分为配电型、电站型、线路型、变压器中性点保护用、并联电容器保护用、发电机保护用避雷器等。
- d) 此外，可按标称电流、线路放电等级、能量/电荷吸收能力等对配网避雷器分类分级。

10.2 基本特性

配网中性点接地方式不同，系统过电压水平会不同，导致不同接地系统配网避雷器的工频电压耐受能力存在差异。配网避雷器的基本特性包括能量吸收能力、持续运行电压、额定电压、标称放电电流、标称放电电流下的残压、额定短路电流、污秽耐受能力以及机械性能等。

10.3 无间隙避雷器

10.3.1 无间隙避雷器分类

针对配网避雷器运行工况和应用需求，按标称放电电流、电荷转移能力将配网无间隙避雷器分为高、中、低三类，如表 13 所示。

表 13 配网无间隙避雷器的分类

设计类型	高	中	低
标称放电电流 kA	10	5	5
重复电荷转移能力 C^1	≥ 0.4	≥ 0.2	≥ 0.1
热电荷转移能力 C^2	≥ 1.1	≥ 0.7	≥ 0.45
4/10 μ s 大电流冲击电流 kA	100	65	40

注 1: 为避雷器设计能够承受的电荷转移能力, 对配网避雷器, 用 20 次 8/20 μ s 雷电冲击电流进行考核, 该试验可在电阻片上进行, 不必考虑热耗散性能, 表中的数据为单次 8/20 μ s 雷电冲击电流积分电荷值。以 10kA 标称电流最低要求单次 0.4C 为例, 需对该避雷器用电阻片进行 20 次约 25kA 雷电冲击电流试验, 其生命周期重复电荷转移能力应不低于 8C。

注 2: 为避雷器或热比例单元在热恢复试验中 3min 内能承受的热电荷转移能力, 对配网避雷器, 同样使用 8/20 μ s 雷电冲击电流注入热电荷。

10.3.2 瓷套和复合套避雷器

无间隙避雷器较多采用瓷套避雷器和复合套避雷器:

- a) 瓷套避雷器。瓷套避雷器的功能部分由避雷器电阻片叠加成柱构成, 并由不同结构做机械支撑。瓷套应满足机械、电气强度及密封、压力释放等性能。
- b) 复合套避雷器。复合套避雷器大多采用硅橡胶材料做外套, 具有重量轻、防污性能好的优点。一般有以下几种典型结构设计:
 - 1) 管型结构。外套通常由外部有硅橡胶伞裙的玻璃纤维增强塑料玻璃钢管构成, 有密封系统和压力释放系统, 避雷器内部通常充氮气或空气。
 - 2) 缠绕型结构。外套支撑部分是玻璃纤维增强塑料玻璃钢缠绕结构, 绕在电阻片柱上的套子可能是封闭的 (有时预留薄弱点), 也可能由预制的玻璃钢管挤压在电阻片柱上。
 - 3) 笼型结构。电阻片柱由玻璃钢网、棒或带以极高张力夹紧作为机械支持结构, 玻璃钢形成一个开放的笼子, 外面可用带子缠绕增加强度, 外部硅橡胶伞裙直接模压在模件。

10.3.3 无间隙避雷器选型

避雷器的保护特性和运行特性互相制约, 较低的额定电压或持续运行电压会降低避雷器运行的可靠性。提高避雷器的额定电压, 则避雷器持续运行电压、工频过电压的耐受能力及能量吸收能力提高, 但避雷器残压也高, 过电压下的保护裕度减小。因此, 避雷器选型是一个不断优化的过程, 需要考虑系统参数和设备参数。

配网无间隙避雷器的选择和使用应按照 GB/T 28547 的规定, 配网无间隙避雷器典型参数选型示例见附录 E。

10.3.4 配电线路无间隙避雷器

配电线路无间隙避雷器较多安装于线路终端杆塔 (线路终端避雷器), 用于变电站侵入波保护, 同时兼顾线路绝缘子保护, 可配置脱离器。与常规配电型避雷器比较, 一般需要更强的雷电冲击电流耐受能力、更高的标称放电电流等级 (如 10kA)、更强的动作负载能力 (宜按强雷动作负载选择) 和更低的保护水平。

图 10 为配电线路无间隙避雷器安装示意图, 其一端直接与导线连接, 另一端连接到电杆横担上,

即与绝缘子并联安装。避雷器与导线芯线的电气连接可采用剥线连接方式,也可采用穿刺连接方式,后者的优点在于不破坏绝缘导线的密封性能。

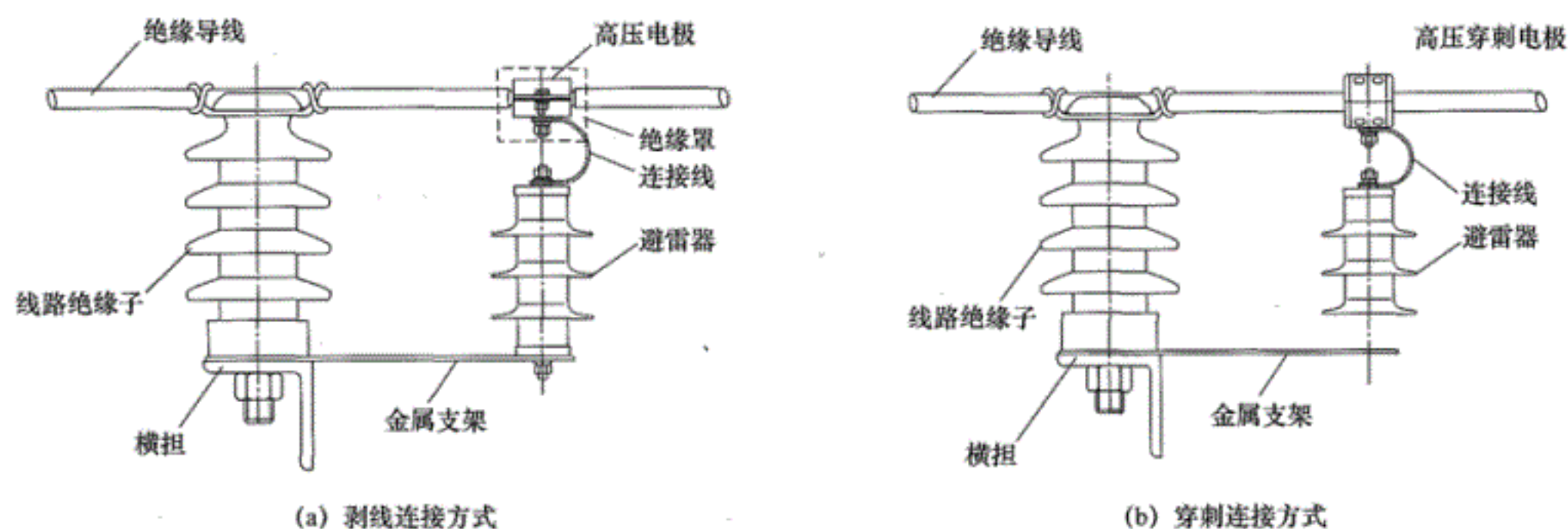


图 10 配电线路无间隙避雷器安装示意图

10.4 带间隙避雷器

10.4.1 带间隙避雷器分类

配网带间隙避雷器一般用于架空配电线路防雷和绝缘子保护,安装于配电线路中间杆塔,与绝缘子并联安装,其保护特性与线路绝缘子相配合。与无间隙避雷器比较,带间隙避雷器的本体仅承受很小的持续运行电压。

带间隙避雷器也可按标称放电电流、电荷吸收能力、保护水平、大电流冲击耐受能力等分类。其本体承受很小的持续运行电压,因此一般不宣称持续运行电压,但整只避雷器的额定电压不仅需考虑避雷器本体参数,还应通过工频续流遮断性能试验予以验证。根据间隙结构,可分为外串联间隙避雷器和内串联间隙避雷器。

10.4.2 带间隙避雷器选型

带间隙避雷器安装在线路上,其雷电冲击耐受电压与线路绝缘等级相配合。在线路没有屏蔽的情况下,带间隙避雷器的雷电放电电流和放电能量可能明显高于应用在变电站的避雷器。

带间隙避雷器与绝缘子直接并联安装,其保护水平应考虑连接导线的影响。降低额定电压可能降低带间隙避雷器的运行可靠性,应考虑带间隙线路避雷器雷电放电下过载的风险,并计入线路闪络率和跳闸率中。配网带间隙避雷器的选择和使用应满足 GB/T 28547 的规定。

10.4.3 带间隙避雷器典型结构

图 11 为配电线路带间隙避雷器安装示意图,其中:

图 11 (a) 为环形电极外串联间隙避雷器,在避雷器本体高压端设置一个环形金属电极,套在绝缘子伞裙的外围,绝缘导线电位不引出,与环形电极构成串联空气间隙。

图 11 (b) 为穿刺电极外串联间隙避雷器,用穿刺电极穿透导线绝缘层接触芯线,将导线电位引出,避雷器本体高压端设置一个半球电极,穿刺电极与半球电极构成串联空气间隙,穿刺电极外串联间隙避雷器应安装在线路主要潮流方式下绝缘子的负荷侧。

图 11 (c) 为带支撑绝缘子的外串联间隙避雷器,支撑件宜选用复合绝缘子。避雷器整体悬挂安装在横担上,棒形复合绝缘子两端设置棒形金属电极,二者构成串联间隙,并且间隙距离固定,适合在耐张杆塔安装。

图 11 (d) 为内串联间隙避雷器,将火花间隙放在避雷器外套内部,与避雷器电阻片串联叠装,高

压电极引出导线电位，通过连接线与内置间隙高压端电气连通。其优点为串联间隙放电分散性小，但结构较复杂，一般不宜在线路上使用。

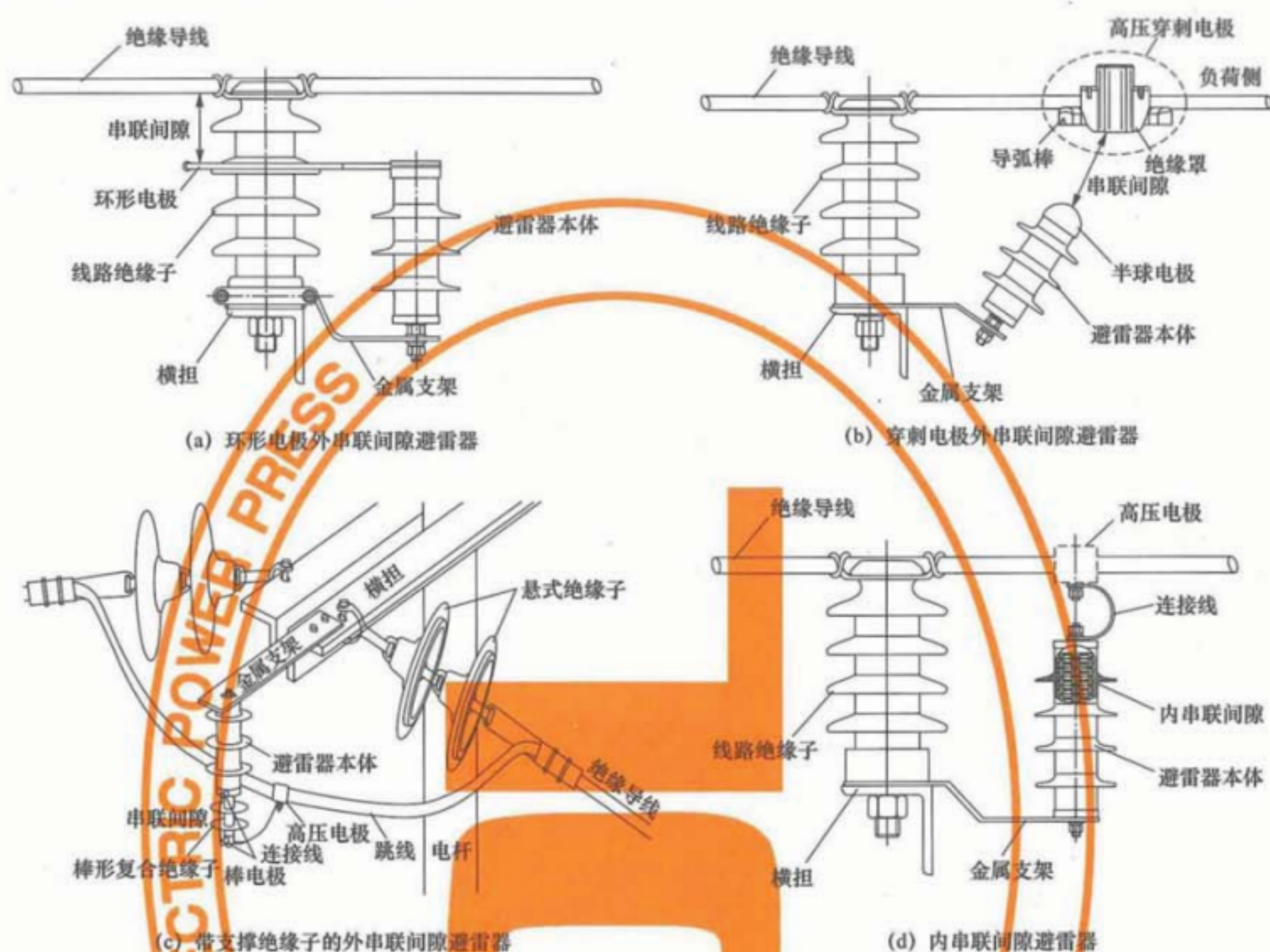


图 11 配电线路带间隙避雷器安装示意图

10.5 带脱离器避雷器

10.5.1 基本要求

配网带脱离器避雷器一般安装在配电线路终端杆塔或户外电缆终端，用于进线段保护，可避免避雷器故障造成系统持续故障。

避雷器正常运行时，脱离器不应动作，应保证与配套避雷器有相同的冲击电流耐受能力；避雷器过负荷或故障时，脱离器应能及时动作，将避雷器和系统分离，并给出可见标识，以便尽快更换故障避雷器。避雷器接地端与地之间应保证足够的绝缘距离，在脱离器动作后不引起放电。脱离器动作时应不影响人身及其他设备安全。

10.5.2 脱离器的选择

配网避雷器的脱离器应按照配套避雷器的性能要求、系统接地方式及安装使用环境条件进行选择。

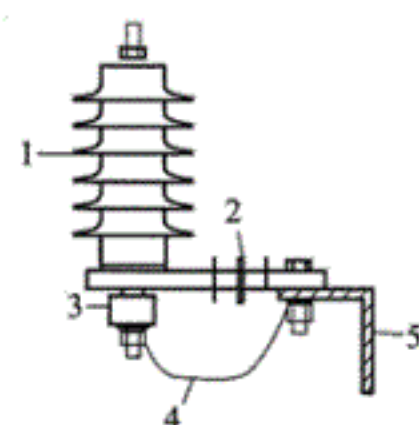
- a) 脱离器动作性能。应按照配套避雷器安装的系统接地方式、避雷器故障时的短路电流及断路器跳闸时间和断路器动作时间选择脱离器的动作性能，即安秒特性。安秒特性试验是验证脱离器动作性能的重要试验。通常脱离器的动作时间应早于断路器的动作时间。对于中性点非有效接地系统，脱离器动作特性应参考厂家给出的脱离器安秒特性，即 100mA、1A 和 20A 三种工频电流下对应的动作时间。避雷器外套在污秽情况下的泄漏电流可达几十毫安，脱离器不应因此

误动。

- b) 脱离器电气耐受性能。脱离器一般应具备长持续时间冲击电流耐受能力、大电流冲击耐受能力、雷电冲击放电耐受能力，应能承受配套避雷器的所有电气耐受性能试验，不同应用场所的脱离器耐受性能要求有所不同，脱离器的耐受特性会影响其使用寿命。
- c) 脱离器环境耐受性能。脱离器应能耐受规定的环境作用和气候老化试验，脱离器的环境耐受性能不应低于安装环境所要求的性能。
- d) 脱离器机械性能。脱离器应根据实际安装的机械性能要求选择。生产厂家应宣称脱离器的最大拉伸负荷、抗弯负荷和扭转负荷。

10.5.3 安装使用

配网用避雷器的脱离器与避雷器串联使用，一般安装在避雷器的接地侧，动作时可自由运动并形成足够的空气间隙，让故障避雷器与系统可靠隔离，确保不影响系统正常运行。脱离器应按生产厂家公布的推荐方式安装，带脱离器和绝缘支架的配网避雷器典型安装方式如图 12 所示。配网避雷器用脱离器的选择和使用还应满足 DL/T 1294 的规定。



1—避雷器；2—绝缘支架；
3—脱离器；4—柔软导线；
5—安装架

图 12 带脱离器和绝缘支架的配网避雷器典型安装方式

10.6 插拔式避雷器

10.6.1 基本要求

插拔式避雷器一般安装在箱体内部（如配电开关柜），也有户外应用。有两种结构型式——分离型和外壳不带电型，均不通过固定导体与系统永久连接，分别由滑动接触和插头安装拆卸。

10.6.2 分离型避雷器

分离型避雷器外套可能是绝缘的（复合材料）或屏蔽的（金属或导电的复合材料）。分离型避雷器都是不带电插拔式避雷器，该型避雷器在接入或者移去时，系统应处于不带电状态。

10.6.3 外壳不带电型避雷器

外壳不带电型避雷器有屏蔽（接地的）外套，大部分是带电插拔式避雷器，可在带电状态下进行安装或移除。

10.7 跌落式避雷器

10.7.1 避雷器结构

配网跌落式避雷器可带电维护、更换或检测，由熔断器复合基座和避雷器两部分组成，避雷器与

基座并联，上部是弹簧压紧式触头结构，下部有可转动的动触头架。避雷器底部用导线与动触头架相连锁紧，以保证元件顶部动触头与基座的上静触头紧密接触。

10.7.2 避雷器功能

跌落式避雷器在运行时发挥防雷功能，当对避雷器进行试验、检查或维护时，不需停电，只要操作绝缘棒将避雷器元件拉开及取下即可，动静触头分离时不会出现拉弧现象。

10.7.3 避雷器分类

跌落式避雷器主要分为带脱离器和不带脱离器等型式，典型型式如图 13 所示。

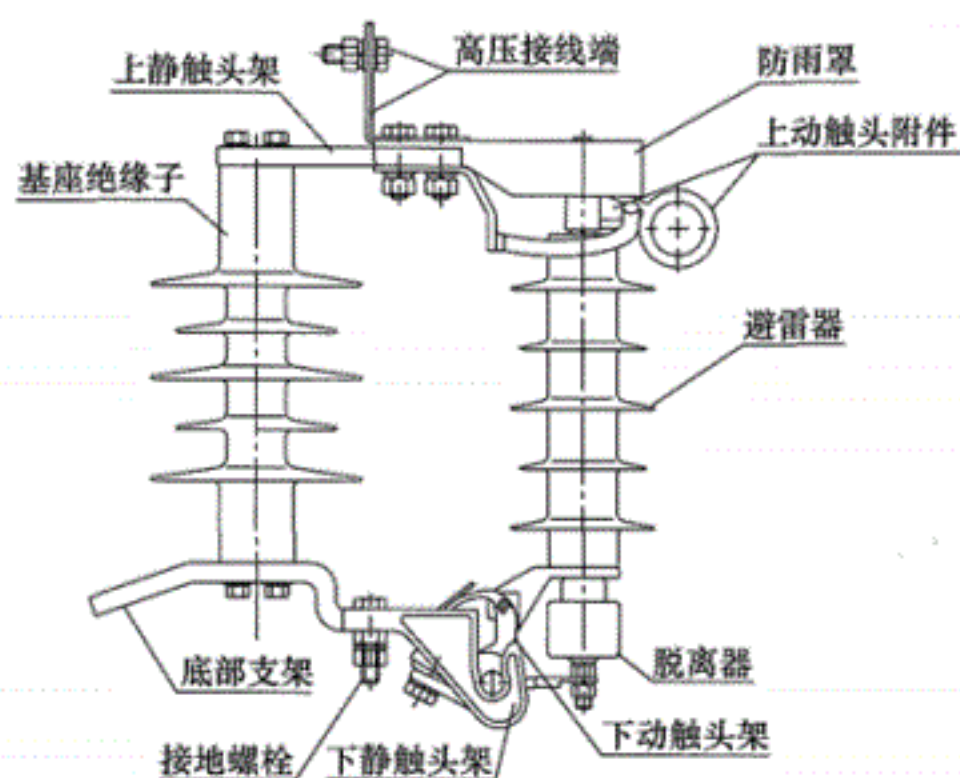


图 13 配网跌落式避雷器典型型式

10.8 配网避雷器预期寿命评估

配网避雷器在实际运行中存在功能失效风险，计算评估避雷器的预期运行寿命，通过在寿命末期采取更换等措施，可减少避雷器故障，避免其防雷保护功能失效。配网避雷器预期寿命主要取决于避雷器的设计条件和外部运行条件，其预期寿命计算评估方法及示例见附录 F。

附录 A
(资料性附录)
全国及典型地区雷电参数统计

A.1 雷电流幅值累积概率统计

通过全国雷电定位监测系统统计的 2001~2013 年全部雷电流幅值样本数据, 用最小二乘法拟合出正、负极性雷电流综合后的雷电流幅值累积概率计算公式。

全国典型地区雷电流幅值累积概率计算公式见表 A.1。

表 A.1 全国典型地区雷电流幅值概率公式

地区	雷电流幅值概率公式	地区	雷电流幅值概率公式	地区	雷电流幅值概率公式
北京	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/38.432)^{3.024}}$	山西	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/37.639)^{3.164}}$	山东	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/37.244)^{2.882}}$
浙江	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/29.376)^{2.433}}$	江苏	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/31.439)^{2.42}}$	福建	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/26.541)^{2.625}}$
黑龙江	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/33.943)^{3.022}}$	湖北	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/39.824)^{3.064}}$	蒙东	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/35.659)^{3.002}}$
青海	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/29.688)^{2.447}}$	新疆	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/30.335)^{2.732}}$	广东	$P(>I) = \frac{1}{1+(I/35.6)^{3.0}}$

注: $P(>I)$ ——雷电流幅值超过 I 的概率;

I ——雷电流幅值, kA。

A.2 全国典型地区多年地闪密度统计

全国典型地区多年地闪密度统计见表 A.2。

表 A.2 全国典型地区多年地闪密度统计 次/(km²·a)

年份	广东	福建	江苏	山东	湖北	黑龙江	陕西	甘肃	四川
2005	6.89	2.93	6.39	1.75	3.12	0.00	1.19	0.12	2.72
2006	4.60	4.66	5.31	2.47	3.47	0.04	1.98	0.29	3.13
2007	5.85	5.75	6.73	3.84	3.50	0.08	1.66	0.24	2.46
2008	7.14	5.93	9.25	3.34	3.25	0.05	1.09	0.20	2.37
2009	5.46	3.89	4.32	2.00	2.34	0.08	0.47	0.13	2.10
2010	7.67	4.63	4.15	2.13	2.34	0.14	0.61	0.14	2.01
2011	5.87	4.49	7.21	2.10	2.61	0.82	1.18	0.25	2.22
2012	9.03	3.60	5.13	1.88	2.29	0.57	0.09	0.31	2.42
2013	11.36	2.94	1.95	2.23	2.31	0.82	0.58	0.11	2.57
2014	14.38	7.23	1.44	0.59	1.46	0.86	0.43	0.14	1.28
平均	7.83	4.60	5.19	2.23	2.67	0.35	0.93	0.19	2.33

附录 B

(资料性附录)

架空配电线路耐雷水平计算方法

B.1 耐雷水平计算

B.1.1 直击雷耐雷水平

B.1.1.1 雷击杆塔

a) 无地线。

1) 单相闪络:

$$I = \frac{U_{50\%}}{R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6}} \quad (\text{B.1})$$

式中:

 I ——耐雷水平, kA; $U_{50\%}$ ——绝缘子 50%雷电放电电压, kV; h_d ——导线悬挂平均高度, m; L_{gt} ——杆塔电感, μH ; R_{ch} ——杆塔冲击接地电阻, Ω 。

2) 多相闪络:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6} \right)} \quad (\text{B.2})$$

式中:

 k ——导线间耦合系数, 两相闪络为两导线间耦合系数; 三相闪络为三导线间耦合系数。A 相导线对 B 相导线的耦合系数 k_{AB} 按下式计算:

$$Z_{AB} = 60 \ln \frac{d_{AB'}}{d_{AB}}, \quad Z_{AA} = 60 \ln \frac{2h_A}{r_A} \quad (\text{B.3})$$

$$k_{AB} = \frac{Z_{AB}}{Z_{AA}} = \frac{\ln \frac{d_{AB'}}{d_{AB}}}{\ln \frac{2h_A}{r_A}} \quad (\text{B.4})$$

A 相导线和 B 相导线对 C 相导线的耦合系数 k_{AB-C} 按下式计算:

$$k_{AB-C} = \frac{Z_{AC} + Z_{BC}}{Z_{AA} + Z_{AB}} = \frac{\ln \frac{d_{AC'}}{d_{AC}} + \ln \frac{d_{BC'}}{d_{BC}}}{\ln \frac{2h_A}{r_A} + \ln \frac{d_{AB'}}{d_{AB}}} \quad (\text{B.5})$$

式中:

 Z_{AB} ——A、B 相导线之间互波阻抗, Ω , Z_{AC} 、 Z_{BC} 含义类同; Z_{AA} ——A 相导线自波阻抗, Ω ;

$d_{AB'}$ ——A 相导线距 B 相导线的镜像之间的距离, m, d_{AC} 、 d_{BC} 含义类同;

d_{AB} ——A 相导线距 B 相导线之间的距离, m, d_{AC} 、 d_{BC} 含义类同;

h_A ——A 相导线的高度, m;

r_A ——A 相导线的半径, m;

k_{AB} ——A、B 两相导线间的耦合系数;

k_{AB-C} ——A 相导线、B 相导线对 C 相导线的耦合系数。

b) 有地线。

线路单相或多相闪络电流为:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k) \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6} \right)} \quad (B.6)$$

式中:

k ——单相闪络为地线与单相导线耦合系数, 多相闪络为地线与多相导线耦合系数。

计算表明, 雷击配电线路杆塔时感应分量对耐雷水平计算影响很小, 考虑感应分量将使计算更复杂。因此, 本部分雷击杆塔耐雷水平计算未考虑感应过电压的影响。

B.1.1.2 雷击导线

雷击相闪络时的雷电流为:

$$I = \frac{4U_{50\%}}{Z} \quad (B.7)$$

式中:

Z ——导线波阻抗, Ω 。

单相闪络后相当于雷击杆塔后的地线, 其余两相导线闪络电流算法参照 B.2.2.1 b) 中有地线时线路闪络雷电流计算方法。

B.1.2 感应雷耐雷水平

根据本标准 5.3.2 雷电感应过电压计算公式, 雷击配电线路附近地面时, 导致绝缘闪络的最小雷电流幅值可用下式简化计算:

$$I = \frac{U_{50\%} S}{k_1 h_c} \quad (S \geq 65\text{m}, S \gg h_c) \quad (B.8)$$

式中:

I ——雷电流幅值, kA;

$U_{50\%}$ ——绝缘子 50% 雷电放电电压, kV;

S ——雷击点与线路最近距离, m;

k_1 ——感应过电压系数, Ω ;

h_c ——导线平均对地高度, m。

B.2 10kV 线路耐雷水平计算示例

B.2.1 线路参数

采用无拉线混凝土电杆, 无地线, 杆塔波阻抗 250Ω , 电感取 $0.84\mu\text{H/m}$, 杆塔冲击接地电阻 10Ω 。线路绝缘子采用 P-15 针式绝缘子, $U_{50\%}=120\text{kV}$, 导线型号 LGJ-120, 导线半径 1.52cm , 档距 50m , 线路弧垂为 0.233m , 线路波阻抗 400Ω 。杆塔和导线模型如图 B.1 所示, A、B、C 表示相别。

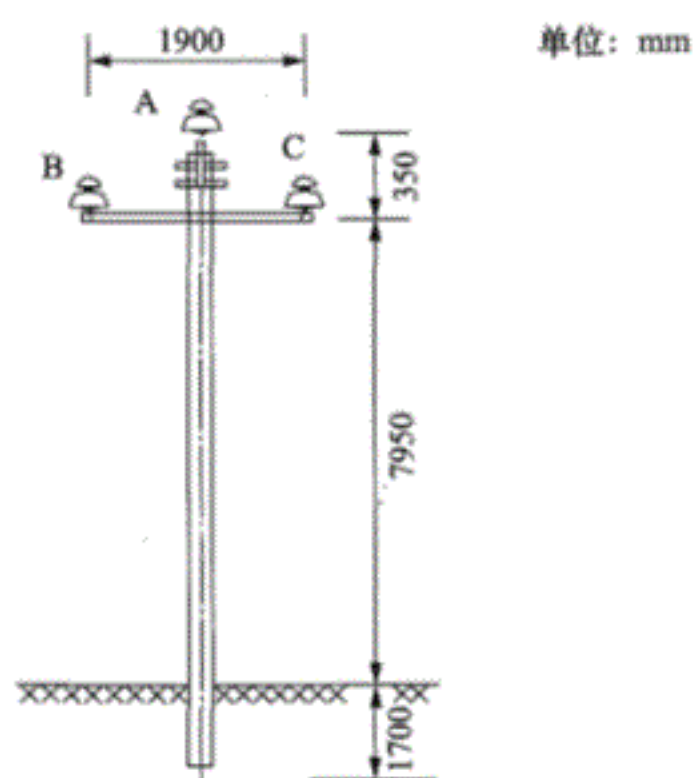


图 B.1 10kV 线路杆塔模型

B.2.2 直击雷耐雷水平

B.2.2.1 规程法

上相导线 A 平均高度 8.07m, 边相导线 B 和 C 的平均高度 7.72m, 杆塔电感 $8.4\mu\text{H}$, 耦合系数 $k_{AB}=k_{AC}=0.29$, $k_{AB-C}=0.51$, $Z_{AA}=418.07\Omega$, $Z_{eq}=146.12\Omega$ 。

a) 雷击杆塔顶。

单相 (A 相) 闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_A}{2.6}\right)} = \frac{120}{\left(10 + \frac{0.84 \times 10}{2.6} + \frac{8.07}{2.6}\right)} = 7.33 \text{ (kA)}$$

两相 (A、B 相) 闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{AB})\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_B}{2.6}\right)} = \frac{120}{(1-0.29)\left(10 + \frac{0.84 \times 10}{2.6} + \frac{7.72}{2.6}\right)} = 10.47 \text{ (kA)}$$

三相闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{AB-C})\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_C}{2.6}\right)} = \frac{120}{(1-0.51)\left(10 + \frac{0.84 \times 10}{2.6} + \frac{7.72}{2.6}\right)} = 15.12 \text{ (kA)}$$

b) 雷击导线。

单相 (A 相) 闪络电流:

$$I = \frac{4U_{50\%}}{Z} = \frac{4 \times 120}{400} = 1.2 \text{ (kA)}$$

两相 (A、B 相) 闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{AB})\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_B}{2.6}\right)} = \frac{120}{(1-0.29)\left(10 + \frac{0.84 \times 10}{2.6} + \frac{7.72}{2.6}\right)} = 10.47 \text{ (kA)}$$

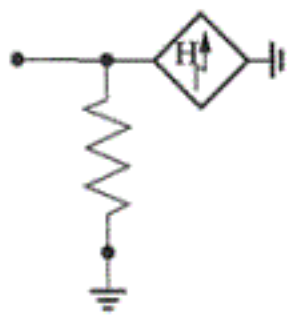
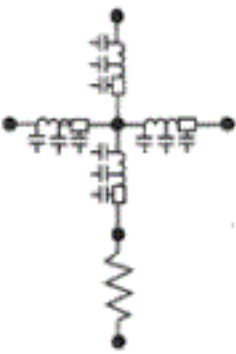
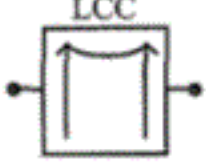
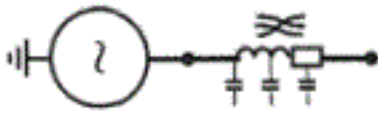
三相闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{AB-C})\left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_C}{2.6}\right)} = \frac{120}{(1-0.51)\left(10 + \frac{0.84 \times 10}{2.6} + \frac{7.72}{2.6}\right)} = 15.12 \text{ (kA)}$$

B.2.2.2 仿真法

10kV 线路仿真模型及参数见表 B.1。

表 B.1 10kV 线路仿真模型及参数

仿 真 模 型	仿 真 参 数		
	雷电流: Amplitude: 雷电流幅值 T-f: 2.6 Tau: 50 N: 5 Tstart: 0 Tstop: 2s	雷电流通道波阻: RES: 400	
	波阻抗: R/I: 0.1 Z: 250 V: 2.1E8	压控开关: T-cl: 0 T-de: 0.001 Imar: 0 V-fl: 120000	接地电阻: RES: 10
	线路参数: Rho: 500 Freg. Int: 0.01 Length: 0.05 Rout: 1.52/1.52/1.52	Resis: 0.45/0.45/0.45 Horiz: 0.95/-0.95/0 Vtower: 7.95/7.95/8.3 Vmid: 7.72/7.72/8.07	
	系统电压: Amplitude: 8165 F: 50 Pha: 0 A1: 0 Tstart: -1 Tstop: 1	系统侧阻抗: R/+: 0.002 R/0: 0.02 Z+: 400 Z0: 650 V+: 2.9E8 V0: 2.4E8	

- a) 雷击杆塔顶。
- 计算得到 10kV 线路单相或多相闪络电流分别为：
- 1) 单相（A 相）闪络电流 $I_1=6.64\text{kA}$ 。
 - 2) 两相（A、B 相）闪络电流 $I_2=11.32\text{kA}$ 。
 - 3) 三相闪络电流 $I_3=16.47\text{kA}$ 。
- b) 雷击导线。
- 计算得到 10kV 线路单相或多相闪络电流分别为：
- 1) 单相（A 相）闪络电流 $I_1=0.79\text{kA}$ 。
 - 2) 两相（A、B 相）闪络电流 $I_2=10.37\text{kA}$ 。
 - 3) 三相闪络电流 $I_3=18.81\text{kA}$ 。

B.2.3 感应雷耐雷水平（规程法）

线路 $U_{50\%}=120\text{kV}$ ，引雷宽度 $w=96\text{m}$ ，取雷击点 $S=w/2=48\text{m}$ ，根据式（B.8）可计算感应过电压下导致线路绝缘闪络的最小雷电流幅值 I ，计算取 $k_1=25$ 。因此，线路感应雷耐雷水平为：

$$I = \frac{U_{50\%} S}{25h} = \frac{120 \times 48}{25 \times 8.07} = 28.55 \text{ (kA)}$$

B.3 35kV 线路耐雷水平计算示例

B.3.1 线路参数

杆塔选用“上”字形有拉线带地线的 15m 直线钢筋混凝土杆，杆形如图 B.2 所示，杆塔波阻抗 125Ω ，电感 $0.42\mu\text{H}/\text{m}$ ，档距 200m ，杆塔冲击接地电阻 15Ω 。绝缘子选用 3 片 U70B5 绝缘子， $U_{50\%}$ 为 350kV 。导线型号 LGJ-120、半径 1.52cm 、波阻抗 400Ω 、弧垂 2.133m ；地线半径 0.39cm 、弧垂 1.102m 。

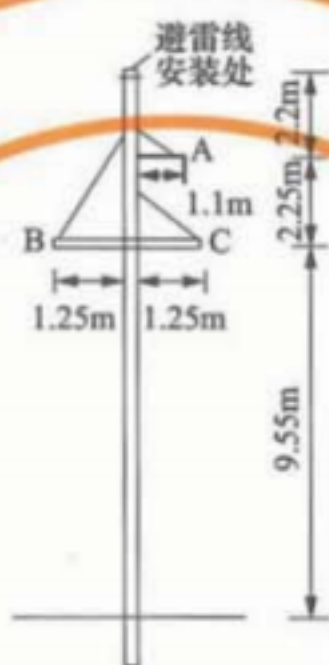


图 B.2 35kV 线路杆塔模型

B.3.2 直击雷耐雷水平

B.3.2.1 规程法

上相导线 A 平均高度 $h_A=9.67\text{m}$ ，下相导线 B 和 C 平均高度 $h_B=h_C=7.42\text{m}$ ，地线平均高度 12.90m ，杆塔电感 $6.30\mu\text{H}$ ，分流系数 $\beta=0.84$ ，电晕校正系数 $k_0=1.15$ 。

地线与导线 A 互波阻抗 $Z_{iA}=99.7\Omega$ ，导线 A 自波阻抗 $Z_{AA}=428.49\Omega$ ，地线与导线 A 耦合系数 $k_{iA}=0.268$ ；地线与导线 B、C 互波阻抗 $Z_{iB}=Z_{iC}=97.75\Omega$ ，导线 B、C 自波阻抗 $Z_{BB}=Z_{CC}=412.8\Omega$ ，地线和导线 A 对导线 B 耦合系数 $k_{iA-B}=0.442$ 。

导线 A、B、C 之间互波阻抗 $Z_{AB}=99.7\Omega$ ， $Z_{AC}=124.0\Omega$ ， $Z_{BC}=106.9\Omega$ ，地线和导线 A、B 对导线 C 的耦合系数 $k_{iAB-C}=0.507$ 。网络顺序为 A、B、C。

a) 雷击杆塔顶。

单相 (A 相) 闪络电流：

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{iA}) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{h_A}{2.6} \right]} = \frac{350}{(1-0.268) \left[0.84 \left(15 + \frac{6.3}{2.6} \right) + \frac{9.67}{2.6} \right]} = 26.11 (\text{kA})$$

两相 (A、B 相) 闪络电流：

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{iA-B}) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{h_B}{2.6} \right]} = \frac{350}{(1-0.442) \left[0.84 \left(15 + \frac{6.3}{2.6} \right) + \frac{7.42}{2.6} \right]} = 35.86 (\text{kA})$$

三相闪络电流：

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{iAB-C}) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{h_C}{2.6} \right]} = \frac{350}{(1-0.507) \left[0.84 \left(15 + \frac{6.3}{2.6} \right) + \frac{7.42}{2.6} \right]} = 40.59 (\text{kA})$$

b) 雷击导线。

单相 (A 相) 闪络电流:

$$I = \frac{4U_{50\%}}{Z} = \frac{4 \times 350}{100} = 3.5 \text{ (kA)}$$

A 相闪络后相当于地线, 此时线路相当于有两条地线。

两相 (A、B 相) 闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{IA-B}) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{h_B}{2.6} \right]} = \frac{350}{(1-0.442) \left[0.84 \left(15 + \frac{6.3}{2.6} \right) + \frac{7.42}{2.6} \right]} = 35.86 \text{ (kA)}$$

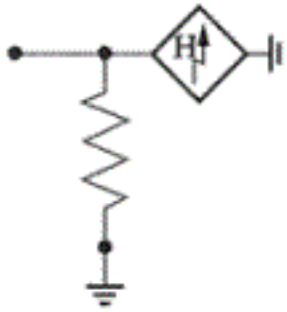
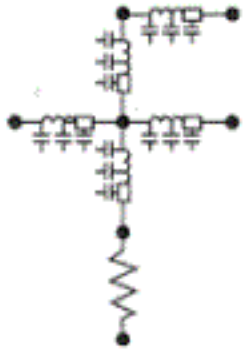
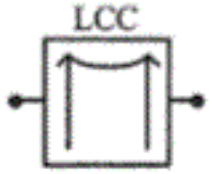
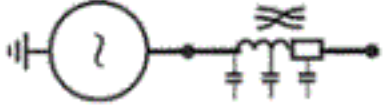
三相闪络电流:

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k_{IAB-C}) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{h_C}{2.6} \right]} = \frac{350}{(1-0.507) \left[0.84 \left(15 + \frac{6.3}{2.6} \right) + \frac{7.42}{2.6} \right]} = 40.59 \text{ (kA)}$$

B.3.2.2 仿真法

35kV 线路仿真模型及参数见表 B.2。

表 B.2 35kV 线路仿真模型及参数

仿 真 模 型	仿 真 参 数	
	Amplitude: 雷电流幅值 T-f: 2.6 Tau: 50 N: 5 Tstart: 0 Tstop: 2s	雷电流通道波阻: RES: 400
	波阻抗: R/I: 0.1 Z: 125 V: 2.1E8	压控开关: T-cl: 0 T-de: 0.001 Imar: 0 V-fl: 350000 接地电阻: RES: 15
	线路参数: Rho: 500 Freq. Int: 0.01 Length (km): 0.2 Rout: 1.52/1.52/1.52/0.39	Resis: 0.45/0.45/0.45/0.50 Horiz: 1.25/-1.25/1.1/0 Vtower: 9.55/9.55/11.80/14.00 Vmid: 7.42/7.42/9.67/12.90
	系统电压: Amplitude: 28577 F: 50 Pha: 0 A1: 0 Tstart: -1 Tstop: 1	系统侧阻抗: R/+: 0.002 R/0: 0.02 Z+: 400 Z0: 650 V+: 2.9E8 V0: 2.4E8

a) 雷击杆塔顶。

计算得到 35kV 线路单相或多相闪络电流分别为:

- 1) 单相 (A 相) 闪络电流 $I_1=29.50\text{kA}$ 。
- 2) 两相 (A、B 相) 闪络电流 $I_2=38.33\text{kA}$ 。

- 3) 三相闪络电流 $I_3=39.12\text{kA}$ 。
- b) 雷击导线。
- 计算得到 35kV 线路单相或多相闪络电流分别为：
- 1) 单相 (A 相) 闪络电流 $I_1=2.46\text{kA}$ 。
- 2) 两相 (A、B 相) 闪络电流 $I_2=38.54\text{kA}$ 。
- 3) 三相闪络电流 $I_3=40.60\text{kA}$ 。
- 将上述计算的典型 10kV、35kV 线路直击雷耐雷水平值列于表 B.3。

表 B.3 规程法与仿真法直击雷耐雷水平典型计算值

配电线路	闪络类型	计算方法	雷击塔顶耐雷水平 kA	雷击导线耐雷水平 kA
10kV 线路 (无地线)	单相 (A 相)	规程法	7.33	1.20
		仿真法	6.64	0.79
	两相 (A、B 相)	规程法	10.47	10.47
		仿真法	11.32	10.37
	三相	规程法	15.12	15.12
		仿真法	16.47	18.81
35kV 线路 (单地线)	单相 (A 相)	规程法	26.11	3.50
		仿真法	29.50	2.46
	两相 (A、B 相)	规程法	35.86	35.86
		仿真法	38.33	38.54
	三相	规程法	40.59	40.59
		仿真法	39.12	40.60

B.3.3 感应雷耐雷水平（规程法）

线路 $U_{50\%}=350\text{kV}$ ，引雷宽度 $w=114\text{m}$ ，取雷击点 $S=w/2=57\text{m}$ ，根据式 (B.8) 可计算感应过电压下导致线路绝缘闪络的最小雷电流幅值 I ，计算取 $k_1=25$ 。因此，线路感应雷耐雷水平为：

$$I = \frac{U_{50\%} S}{25h} = \frac{350 \times 57}{25 \times 9.67} = 82.50(\text{kA})$$

B.4 配电线路典型直击雷耐雷水平

用仿真法计算的 6kV~35kV 配电线路典型直击雷耐雷水平值列于表 B.4。

表 B.4 配电线路典型直击雷耐雷水平（仿真法）




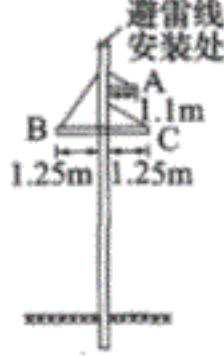
配电线路参数	系统额定电压 kV			
	6	10	20	35
杆塔型式				

表 B.4 (续)

配电线路参数			系统额定电压 kV			
			6	10	20	35
地线保护角 °			—	—	—	26.6
绝缘子型式和片数			1×P-10	1×P-15	1×PS-20	3×U70B5
雷电冲击放电电压（正极性） $U_{50\%}$ kV			120	150	215	350
雷击形式	架空地线	闪络相数	耐雷水平			
雷击塔顶 kA	单地线	单相闪络	1.83~4.16	4.31~8.75	5.36~12.13	7.19~32.59
		两相闪络	2.94~6.71	5.12~113.56	7.79~16.81	11.60~41.26
		三相闪络	5.53~12.61	9.62~21.47	14.64~31.51	21.80~46.65
	无地线	单相闪络	1.42~3.83	3.17~7.96	4.83~10.42	7.19~15.39
		两相闪络	2.57~5.86	4.47~12.13	6.80~14.68	10.13~21.68
		三相闪络	3.72~8.50	6.48~19.12	9.86~21.27	14.68~31.42
雷击导线 kA	单地线	单相闪络	0.65	1.15	1.80	3.50
		两相闪络	2.94~6.71	5.12~13.56	7.79~16.81	11.60~32.59
		三相闪络	5.53~12.61	9.62~21.47	14.64~31.51	21.80~46.65
	无地线	单相闪络	0.65	1.15	1.80	3.50
		两相闪络	2.57~5.86	4.47~12.13	6.80~14.68	10.13~21.68
		三相闪络	3.72~8.50	6.48~19.12	9.86~21.27	14.68~31.42
注：耐雷水平较高和较低值分别对应杆塔冲击接地电阻 10Ω和 30Ω；雷击时工作电压为峰值且与雷击电流反极性；发电厂、变电站进线保护段耐雷水平一般不宜低于表中耐雷水平较高值。						

附录 C

(资料性附录)

架空配电线路雷击跳闸率计算方法

配网架空线路雷击跳闸一般应具备以下条件：①雷击时雷电过电压超过线路绝缘水平引起绝缘冲击闪络；②雷击造成两相或三相绝缘闪络，或低电阻接地系统单相绝缘闪络等；③冲击闪络转为稳定的工频电弧。

C.1 配电线路雷击跳闸率

架空配电线路雷击跳闸包括雷击杆塔或导线引起的直击雷跳闸和雷击于附近地面在导线上产生感应过电压而造成的感应雷跳闸，因此：

$$n = n_d + n_{in} \quad (C.1)$$

式中：

- n ——架空配电线路总的雷击跳闸率，次/（100km·a）；
 n_d ——直击雷跳闸率，次/（100km·a）；
 n_{in} ——感应雷跳闸率，次/（100km·a）。

C.2 直击雷跳闸率

C.2.1 计算方法

直击雷跳闸率 n_d 为雷击杆塔引起的反击跳闸率 n_1 和雷击导线引起的直击跳闸率 n_2 之和。

$$n_d = n_1 + n_2 \quad (C.2)$$

式中：

- n_1 ——雷击杆塔引起的反击跳闸率，次/（100km·a）；
 n_2 ——雷击导线引起的直击跳闸率，次/（100km·a）。

C.2.2 雷击杆塔引起的反击跳闸率

计算雷击杆塔引起的反击跳闸率时，因线路绝缘水平低，一般雷击都会引起其中一相绝缘闪络，此后该相的功能可看作一根架空地线。第二相及第三相绝缘闪络概率可按有一根或两根地线保护的架空线路绝缘闪络概率的计算方法。

反击跳闸率可按式计算：

$$n_1 = N_1 [(P_{1,2} - P_{1,2,3}) + P_{1,2,3} (2 - \eta_{1,2})] \eta_{1,2} \quad (C.3)$$

式中：

- N_1 ——雷击杆塔次数，次/（100km·a）；
 $P_{1,2}$, $P_{1,2,3}$ ——分别对应于雷击杆塔时两相和三相闪络的雷电流幅值概率；
 $\eta_{1,2}$ ——两相闪络发生短路的概率。

无地线时，雷电可能击中杆塔和档中导线的概率几乎相同，即

$$N_1 = N_2 = 0.5 N_L \quad (C.4)$$

单地线时，雷电可能击中杆塔和档中导线的概率约为：

$$N_1 = 0.25 N_L, N_2 = 0.75 N_L \quad (C.5)$$

式中:

N_2 ——雷击档中导线次数, 次/(100km·a);

N_L ——雷击线路总次数, 次/(100km·a)。

每年每百千米线路雷击总次数 N_L 按下式计算:

$$N_L = N_g \left(\frac{28h_t^{0.6} + b}{10} \right) \quad (\text{C.6})$$

式中:

N_g ——地闪密度, 次/(km²·a);

h_t ——杆塔高度, m;

b ——杆塔结构宽度, m。相比于配电线路引雷宽度, 计算时可取 $b \approx 0$ 。

雷电流幅值概率可按下式计算:

$$P(i > I_m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_m}{31} \right)^{2.6}} \quad (\text{C.7})$$

当雷击杆塔引起的冲击电压 $U_{im}(t)$ 与导线上工作电压 $u_{op}(\varphi)$ 之和达到线路绝缘放电电压 $U_{50\%}$ 时, 即 $U_{im}(t) + u_{op}(\varphi) \geq U_{50\%}$ 时, 该相发生闪络。按附录 B 的方法可计算反击耐雷水平。

$\eta_{1,2}$ 指由冲击闪络过渡到两相工频电弧的概率, $\eta_{1,2}$ 取决于电弧通道的电离程度、长度和工作电压瞬时值。对绝缘子串和绝缘横担, 两相绝缘冲击闪络后发生短路的概率按下式计算:

$$\eta_{1,2} = \left(1.6 \times \frac{U_n}{I_{dis}} - 6 \right) / 100 \quad (\text{C.8})$$

式中:

U_n ——系统标称(线)电压, kV;

I_{dis} ——两相导线之间放电路径总长度, m。

对有金属横担的混凝土杆和金属杆, 其电弧总长度等于绝缘子或绝缘子串弧长的两倍, 绝缘子串弧长等于绝缘子串绝缘部分设计高度加上绝缘子直径; 针式绝缘子弧长可取从绝缘子针脚到伞裙边的距离和从绝缘子伞裙边到施加电压的带电部分距离的总和; 对组合绝缘杆塔, 电弧弧长会增大, 增大的弧长部分可认为等于发生放电电弧的木横担或复合横担长度。

对于三相闪络, 引起工频电流短路的概率为:

$$\eta_{1,2,3} = \eta_{1,2} (2 - \eta_{1,2}) \quad (\text{C.9})$$

C.2.3 雷击导线引起的直击跳闸率

雷击档中导线时, 过电压行波沿导线传播到杆塔, 绝缘子两端电位差超过 $U_{50\%}$ 时绝缘子闪络。当两相或三相绝缘子发生闪络, 形成稳定工频续流后, 有可能引发线路跳闸。当雷击导线造成第一相绝缘子闪络后, 此相导线相当于地线, 对其他两相导线具有耦合作用。第二相和第三相绝缘子闪络情形类似于雷击杆塔。因此, 雷击导线导致的直击跳闸率可按下式计算:

$$n_2 = N_2 [(P'_{1,2} - P'_{1,2,3}) + P'_{1,2,3} (2 - \eta_{1,2})] \eta_{1,2} \quad (\text{C.10})$$

式中:

$P'_{1,2}$, $P'_{1,2,3}$ ——分别对应于雷击导线时两相和三相闪络的雷电流幅值概率。

C.3 感应雷跳闸率

感应雷跳闸率 n_{in} 的计算方法及步骤如下:

- a) 雷电流幅值 I_m 的取值范围为 1kA~200kA, 以 1kA 为一个区间, 分为 200 个区间。
 b) 雷击是随机事件, 雷电流幅值 I_m 的概率分布采用下面两式进行计算:

$$P(I_m \geq I_i) = \frac{1}{1 + (I_i/31)^{2.6}} \quad (C.11)$$

$$P_i = P(I_m \in [i, i+1]) = P(I_m \geq I_i) - P(I_m \geq I_{i+1}) \quad (C.12)$$

- c) 对于任何一个区间 i , 有两个距离需要计算: $y_{\max,i}$ 和 $y_{\min,i}$ 。如图 C.1 所示, 最小距离 $y_{\min,i}$ 为雷击导线的临界距离, 小于该距离雷电将直击导线, 大于该距离雷电将击中大地在线路上产生感应过电压而可能导致绝缘闪络。

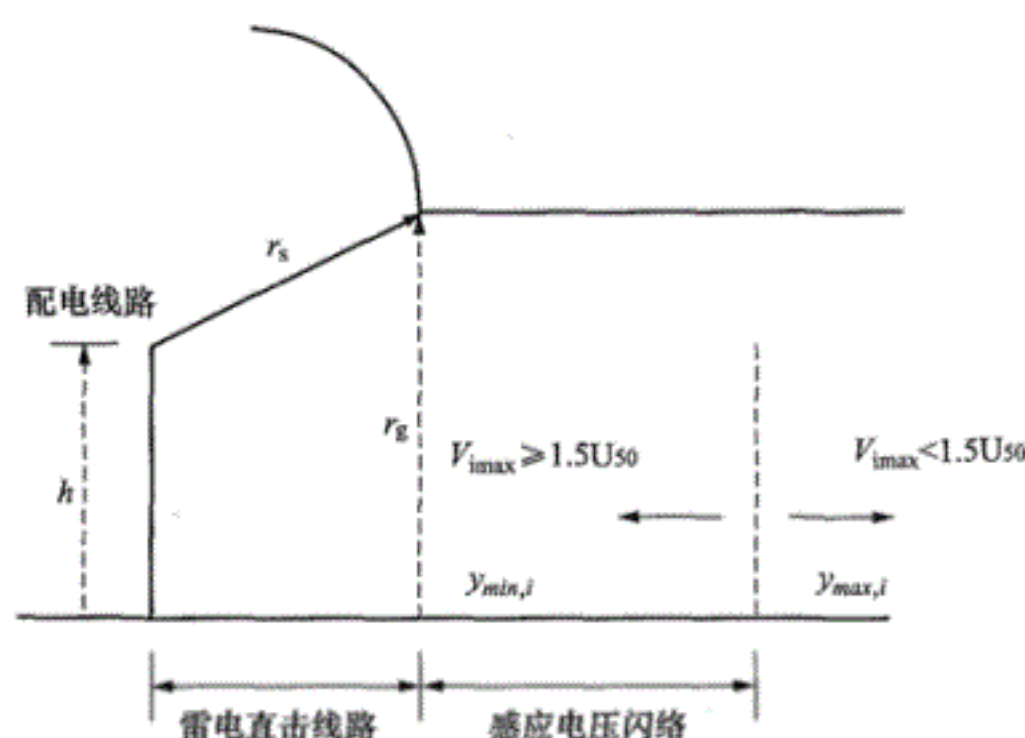


图 C.1 雷电感应过电压导致线路闪络的区域

$$y_{\min,i} = \sqrt{r_{s,i}^2 - (r_{g,i} - h)^2} \quad (C.13)$$

式中:

$r_{s,i}$ ——雷电对导线的击距, 采用 IEEE 标准推荐公式计算:

$$r_{s,i} = 10I_{m,i}^{0.65} \quad (C.14)$$

$r_{g,i}$ ——雷电对大地的击距, 采用 IEEE 标准推荐公式计算:

$$r_{g,i} = K_g r_{s,i}, \quad K_g = 0.36 + 0.17 \ln(43 - h) \quad (C.15)$$

当雷击点和导线距离小于最大距离 $y_{\max,i}$ 时绝缘闪络, 此时感应过电压超过绝缘子 50% 击穿电压的 1.5 倍, 考虑到绝缘子的伏秒特性, 取 1.5 为配合系数。感应过电压计算系数 k 值取 25, 即:

$$1.5U_{50\%} = 25 \frac{I_{m,i} h}{y_{\max,i}} \quad (C.16)$$

- d) 感应雷跳闸率 n_{in} 为:

$$n_{in} = 0.2 \sum_{i=1}^{200} (y_{\max,i} - y_{\min,i}) N_g P_i \quad (C.17)$$

C.4 配电线路雷击跳闸率计算示例

C.4.1 10kV 无地线线路雷击跳闸率计算

10kV 无地线配电线路参数见附录 B.2, 取地闪密度 $N_g = 5$ 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。

- a) 雷击杆塔引起的反击跳闸率。

附录 B.2.2.1 计算雷击杆塔时, 两相和三相绝缘子闪络电流分别为 10.47kA 和 15.12kA, 对应的雷电流幅值概率分别为:

$$P_{1,2,3} = \frac{1}{1 + \left(\frac{15.12}{31}\right)^{2.6}} = 0.87$$

塔高 8.3m, 每年每百千米线路雷击总次数 N_L 为:

$$N_L = N_g \times \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10}\right) = 5 \times \left(\frac{28 \times 8.3^{0.6} + 0}{10}\right) = 49.8$$

因此, 雷击杆塔和雷击导线次数分别为 24.9 次/(100km·a)。线路采用 P-15 绝缘子, 爬电距离 0.28m, 两相绝缘冲击闪络后发生短路的概率为:

$$\eta_{1,2} = \left(1.6 \times \frac{U_n}{l_{dis}} - 6\right) / 100 = \left(1.6 \times \frac{10}{0.28 \times 2} - 6\right) / 100 = 0.23$$

反击跳闸率为:

$$\begin{aligned} n_1 &= N_L [(P_{1,2} - P_{1,2,3}) + P_{1,2,3} (2 - \eta_{1,2})] \eta_{1,2} \\ &= 24.9 \times [(0.94 - 0.87) + 0.87 \times (2 - 0.23)] \times 0.23 \\ &= 9.22 \text{ [次/(100km·a)]} \end{aligned}$$

b) 雷击导线引起的直击跳闸率。

无地线时, 雷击杆塔和雷击导线概率几乎相同, 且通过 B.2 的计算可知, 反击和直击情况下, 导致绝缘子两相和三相闪络的雷电流幅值基本相同。因此, 直击跳闸率与反击跳闸率也近似相同, 即 $n_2 \approx n_1 = 9.22$ 次/(100km·a)。

c) 感应雷跳闸率。

根据 C.3 中感应雷跳闸率的计算方法, 取线路高度 $h=8.3\text{m}$, 绝缘子 $U_{50\%}$ 为 120kV, 地闪密度取 $N_g=5$ 次/(km²·a), 编写程序, 计算得到 10kV 无地线线路感应雷跳闸率 $n_{in}=24.84$ 次/(100km·a)。

C.4.2 35kV 单地线线路雷击跳闸率计算

35kV 单地线配电线路参数按附录 B.3, 取地闪密度 $N_g=5$ 次/(km²·a)。

a) 雷击杆塔引起的反击跳闸率。

附录 B.3.2.1 计算雷击杆塔时, 两相和三相绝缘子闪络电流分别为 35.86kA 和 40.59kA, 对应的雷电流幅值概率分别为:

$$P_{1,2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{35.86}{31}\right)^{2.6}} = 0.41$$

塔高 14m, 每年每百千米线路雷击总次数 N_L 为:

$$N_L = N_g \times \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10}\right) = 5 \times \left(\frac{28 \times 14^{0.6} + 1.1}{10}\right) = 68.8$$

单地线时, 雷电流可能击中杆塔和档中导线概率为: $N_1=0.25N_L$, $N_2=0.75N_L$ 。因此, 击中杆塔次数为 17.2 次/(100km·a), 击中导线次数为 51.6 次/(100km·a)。线路采用三片 X-45 绝缘子, 单片爬电距离 0.27m, 两相绝缘冲击闪络后发生短路的概率为:

$$\eta_{1,2} = \left(1.6 \times \frac{U_n}{I_{dis}} - 6 \right) / 100 = \left(1.6 \times \frac{35}{0.27 \times 6} - 6 \right) / 100 = 0.29$$

反击跳闸率为:

$$\begin{aligned} n_1 &= N_1 [(P_{1,2} - P_{1,2,3}) + P_{1,2,3} (2 - \eta_{1,2})] \eta_{1,2} \\ &= 17.2 \times [(0.41 - 0.33) + 0.33 \times (2 - 0.29)] \times 0.29 \\ &= 3.21 \text{ [(次/100km} \cdot \text{a)]} \end{aligned}$$

b) 雷击导线引起的直击跳闸率。

通过 B.3 的计算可知, 反击和直击情况下, 导致绝缘子两相和三相闪络的雷电流幅值相同, 而雷击导线概率是雷击杆塔的 3 倍。因此, 按照反击跳闸率同样方法计算直击跳闸率, 即:

$$n_2 \approx 3n_1 = 9.63 \text{ [(次/100km} \cdot \text{a)]}$$

c) 感应雷跳闸率。

根据 C.3 中感应雷跳闸率的计算方法, 取线路高度 $h=9.67\text{m}$, 绝缘子 $U_{50\%}$ 为 350kV, 地闪密度取 $N_g=5$ 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), 编写程序, 计算得到 35kV 单地线线路感应雷跳闸率 $n_{in}=0.362$ 次/(100km · a)。

C.5 感应雷跳闸率计算程序 (IEEE 推荐方法)

```
%定义参数
U50=350; %绝缘子 50%雷电放电电压
h=9.67; %线路高度
Ng=5; %地闪密度
n=200; %雷电流分区数
I=zeros(n,1); %雷电流分区每区
P=zeros(n,1); %I 大于 Ii 的概率
Pi=zeros(n,1); %处于区间 Ii 的概率
ymax=zeros(n,1); %雷击地面最大距离
ymin=zeros(n,1); %雷击地面最小距离
rs=zeros(n,1); %雷电对导线的击距
rg=zeros(n,1); %雷电对大地的击距
Kg=0.36+0.17*log(43-n); %rs 和 rg 之间的转换系数
Nin=0; %雷击跳闸率
S=0; %等效引雷宽度
for i=1:1:n
    if i~=n
        I(1)=1;
        I(i+1)=i+1;
    else
        I(i)=i;
    end
    if i~=n
        P(1)=1/(1+(I(1)/31)^2.6);
        P(i+1)=1/(1+(I(i+1)/31)^2.6);
        Pi(i)=P(i)-P(i+1);
    else
        Pi(i)=P(i);
    end
    end
    rs(i)=10*I(i)^0.65;
```



```
rg(i)=Kg*rs(i);  
ymin(i)=sqrt(rs(i)^2-(rg(i)-h)^2);  
S=S+ymin(i)*Pi(i);  
ymax(i)=39.657*I(i)*h/1.5/U50;  
if ymax(i)>ymin(i)  
    Nin = Nin+0.2*(ymax(i)-ymin(i))*Ng*Pi(i);  
end  
end
```


附录 D

(资料性附录)

配电线路防雷措施技术经济性及适用性

本附录列出了架空配电线路五种主要防雷措施：加强线路绝缘、降低杆塔接地电阻、设置架空地线、安装线路避雷器、安装绝缘子并联间隙（含防弧金具、放电钳位绝缘子等），并将它们的技术经济性和适用性比较，见表 D.1。

表 D.1 配电线路防雷措施技术经济性和适用性

防雷措施	设置架空地线	降低接地电阻	安装线路避雷器		安装并联间隙		加强线路绝缘
			无间隙避雷器	带间隙避雷器	剥线型防弧金具和放电钳位绝缘子	穿刺型防弧金具和放电钳位绝缘子	
保护原理	通过耦合降低导线感应过电压水平	降低反击闪络和多相闪络概率	抑制绝缘子两端雷电过电压，避免雷击闪络和断线；安装相对接地电阻无要求		疏导雷击闪络后的工频续流电弧离开绝缘导线和绝缘子		提高线路耐雷水平，降低雷击闪络概率
技术特点	对直击雷过电压抑制作用有限，宜配合采用降阻和加强绝缘措施	宜充分利用杆塔自然接地作用，必要时敷设人工接地装置	电阻片长期承受运行电压易老化，需定期检测	电阻片长期承受电压很低，基本免维护	安装时需要剥离导线绝缘层，存在局部裸露和密封问题	安装不破坏导线密封，基本不存在导线局部薄弱问题	提高绝缘子、导线、塔头等组合绝缘强度，维护少
综合效果	一定程度上降低雷击闪络和断线的概率	一定程度上改善线路的雷电防护性能	安装相可避免线路雷击闪络和断线，但可能增大未安装相及相邻未安装塔的雷击闪络率，配合降阻可减小影响		有效保护绝缘子雷击受损；保护绝缘导线免于雷击断线，提高重合闸成功率，但线路雷击跳闸率会增大		一定程度上降低线路雷击闪络和断线概率
安装要求	高，需校核杆塔强度和塔头的距离	较高，高土壤电阻率地区降阻困难	一般，安装较简单	较高，需控制好外串并联间隙的距离	一般，应尽量控制对绝缘导线整体密封破坏	较高，应防止高压穿刺电极损伤导线的线芯	一般，新建线路不增加工作量，运行改造稍难
经济成本	高，需配合采取降低接地电阻措施	较高，需要较大人力和材料成本	一般	较高	一般	较高	较高
适用范围	较小	大	较大	较大	较大	较大	一般

附录 E (资料性附录)

配网避雷器典型参数选型示例

本附录以 10kV 配网避雷器为例，介绍了根据不同线路配置条件、不同地闪密度确定避雷器放电发生概率并据此选择避雷器标称放电电流、额定电压等典型参数的方法，并列出了典型避雷器的性能参数。

E.1 标称放电电流的选择

配网避雷器发生放电的概率很大程度上取决于配网系统的暴露程度和地闪密度，配网避雷器放电发生的概率如图 E.1 所示，该图给出了配网避雷器在不同线路配置条件、不同地闪密度下，避雷器放电发生的概率。结合附录 A 地闪密度的数据，就可以选择配网避雷器的标称放电电流。

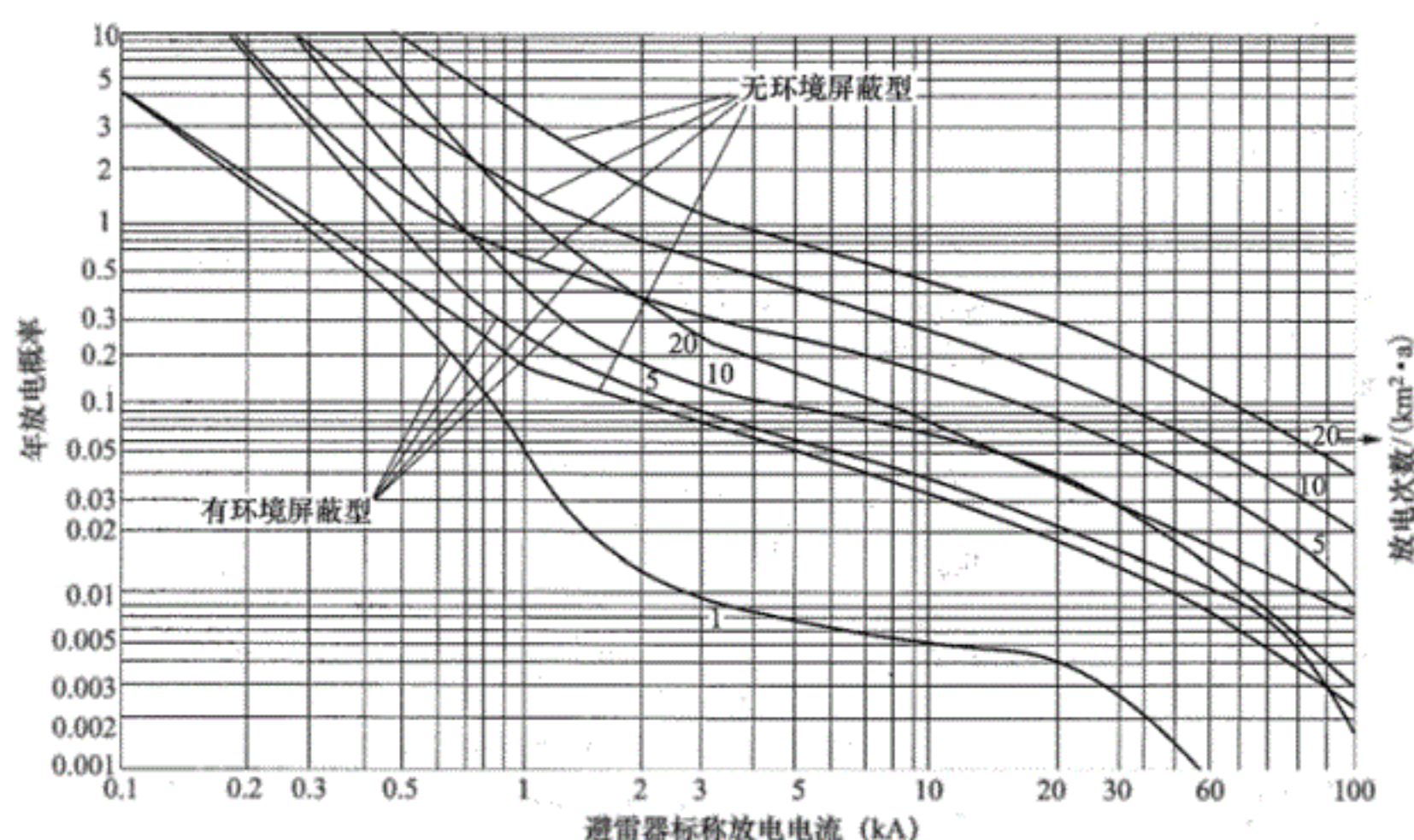


图 E.1 配网避雷器放电发生的概率

配网避雷器的标称放电电流一般是 5kA，但在高地闪密度地区且无屏蔽情况下，如地闪密度为 10 次/(km²·a) 且无屏蔽线时，根据图 E.1 所示，每 10 年会发生 1 次 30kA 及以上的避雷器放电。如果配网避雷器的预期运行寿命为 10 年以上，就应该选择标称放电电流 10kA 甚至更高标称放电电流的配网避雷器。同理，若配网避雷器使用场所的地闪密度很低，且周围有屏蔽时，避雷器可以选择较低的标称放电电流。

E.2 额定电压的选择

E.2.1 无间隙避雷器额定电压的选择

按本标准表 5.4 的推荐值，对于交流 10kV 中性点不接地系统，避雷器额定电压应不低于 $1.38U_m$ ($12kV \times 1.38 = 16.56kV$)，实际应用一般取 17kV；对于中性点经低电阻接地系统，避雷器额定电压应不低于 $1.0U_m$ ，实际应用一般取 12kV 或 13kV。

E.2.2 带间隙避雷器额定电压的选择

由于串联间隙的隔离作用，带串联间隙避雷器额定电压选择方法与无间隙避雷器不同。带间隙线

路避雷器本体仅在雷电冲击动作时的极短时间内（小于 1s）直接承受工频（过）电压；雷电冲击后将很快遮断工频续流，避雷器本体恢复正常运行状态，承受的工频电压很低。

对于中性点有效接地系统，带间隙线路避雷器的额定电压一般取系统最高允许运行电压的 1.2 倍；对于中性点非有效接地系统，由于接地故障的持续时间有时可达 2h，这时作用在健全相避雷器的电压就等于或高于系统的线电压，带间隙避雷器额定电压一般取系统线电压。配网带间隙避雷器额定电压 U_r 建议值见表 E.1。

表 E.1 带间隙避雷器额定电压 U_r 建议值

系统标称电压 kV	6	10	20	35
避雷器额定电压 kV	7.6	13	25	42

E.3 典型 10kV 无间隙避雷器性能参数

典型 10kV 无间隙避雷器的性能参数见表 E.2，实际不限于以下参数。

表 E.2 典型 10kV 无间隙避雷器性能参数表

序号	名 称	单 位	性 能 参 数			
1	额定电压	kV	17	17	17	12
2	持续运行电压	kV	13.6	13.6	13.6	9.6
3	标称放电电流	kA	5	5	10	5
4	直流 1mA 参考电压（不小于）	kV	24	25	25	17.4
5	0.75 倍直流 1mA 参考电压下的 泄漏电流	μA	≤50	≤50	≤50	≤50
6	工频参考电压	kV	≥17	≥17	≥17	≥12
7	250A 操作冲击电流下的最大残压 （峰值，不大于）	kV	38.3	42.5	42.5	27.6
8	5kA 雷电冲击电流下最大残压 （峰值，不大于）	kV	45	50	50	32.4
9	5kA 陡波冲击电流下最大残压 （峰值，不大于）	kV	51.8	57.5	57.5	37.2
10	大电流冲击耐受能力，4/10μs， 2 次	kA	65	65	100	65
11	系统接地方式	/	中性点 非有效接地	中性点 非有效接地	中性点 非有效接地	中性点 低电阻接地
12	用途	/	普通负载、 电站型	普通负载、 配电型	重负载、 配电型	普通负载、 电站型

E.4 避雷器保护水平的校核

除校核避雷器本身的保护水平外，避雷器引线电感产生的附加效应也不容忽视。以 5m 长引线为例，电感按 1μH/m 计，陡波电流上升时间取 1μs，幅值按 20kA 计算，则引线电压可能高于避雷器的残压，引线电感效应计算示例如图 E.2 所示。

因此，必须消除引线的电感效应，尽量减小避雷器高压引线和接地引线长度。

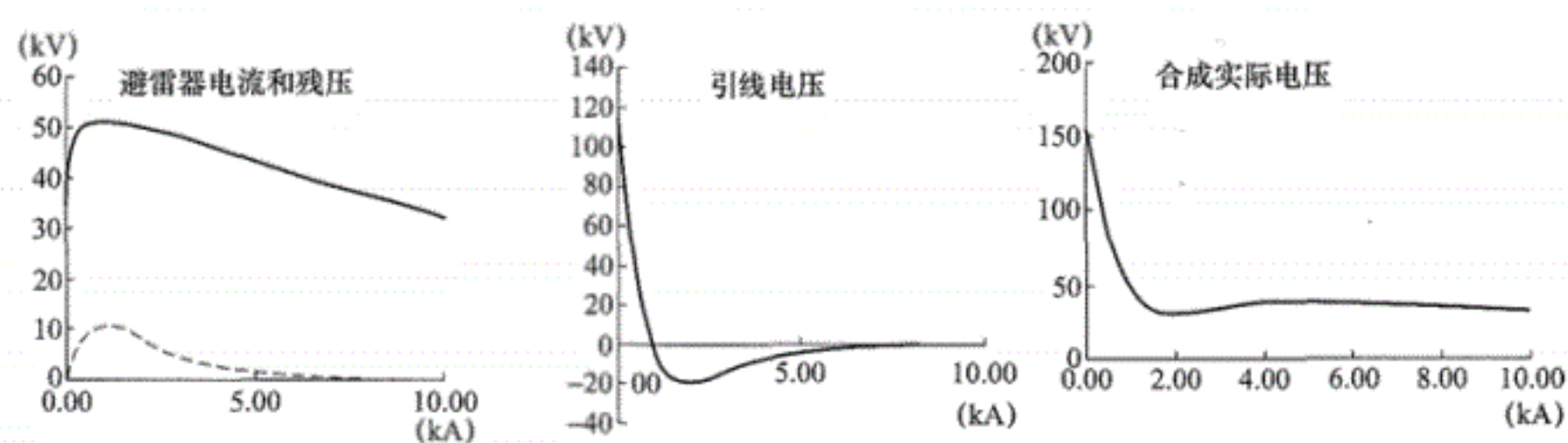


图 E.2 引线电感效应计算示例

附录 F (资料性附录)

配网避雷器预期运行寿命计算评估方法

判断电气设备的使用寿命是电力系统资产管理的重要部分，也是评估电力系统能否安全运行的判据之一。避雷器的功能是为了保护其他设备，如果保护失效，其应用则毫无意义。因此，避雷器的运行寿命应根据其功能和耐受能力，判断是否应更换新的避雷器。

为了评估避雷器的使用寿命，制造厂应根据相关规定，提供避雷器或避雷器元件报废和（或）循环利用的足够信息；应对避雷器因过电压而动作的统计规律有充分的认识。本附录提出了雷电过电压下配网避雷器预期运行寿命的计算评估方法。

F.1 影响配网避雷器故障的决定性因素

分析配网避雷器的故障模式，发现其功能失效或故障的可能原因包括：

- 避雷器功能元件失效。主要是避雷器电阻片失效，当避雷器规律性地承受雷电或操作过电压，金属氧化物电阻片可能会劣化。调查表明，雷电过电压下闪络或击穿是多雷地区配网避雷器故障的主要表现形式。
- 避雷器密封失效。避雷器密封件/垫片随着时间推移可能会失效，导致水分浸入，引起内部漏电起痕、介质击穿和短路故障，密封失效是避雷器运行中一直存在的问题。
- 运行条件和气候环境。运行条件和气候环境也是影响避雷器运行寿命的重要因素。

讨论配网避雷器的使用寿命，最重要的是总结影响其寿命的关键因素。基于上述对避雷器故障模式、功能部件和运行环境的分析，确认避雷器雷电过电压下闪络或击穿是决定性因素。

F.2 雷电过电压下配网避雷器预期寿命计算路线

通过计算避雷器长期无故障运行寿命，对其限制雷电过电压的可靠性进行评估。如果配网避雷器预期运行寿命为 N 年，一般认为 N 年期内避雷器的防雷保护是可靠的。配网避雷器预期运行寿命计算评估包括以下步骤：

- 统计配网避雷器平均每年雷电过电压预期有效作用次数 \bar{N}_s ；
- 统计配网避雷器平均每年雷电冲击放电能力资源消耗 \bar{T}_0 ；
- 确认配网避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源 T_R ；
- 确定配网避雷器雷电过电压下预期运行寿命 $\bar{N}(P)$ 。

F.3 配网避雷器平均每年雷电过电压预期有效作用次数

F.3.1 雷电流幅值概率分布统计

通过雷电定位系统，对避雷器安装地区多年雷电流幅值概率分布 $P(>I)$ 进行统计。简化计算时可采用式 (1) 计算。

F.3.2 雷电直击杆塔的雷电过电压事件统计

计算步骤如下：

- 按附录 B，计算雷击杆塔的耐雷水平 I_1 ，并计算雷电流超过 I_1 的雷电过电压概率 P_1 。
- 按附录 C，计算平均每年线路 2km 长度范围雷击杆塔（及其附近地线）次数 N_1 。

c) 计算配网避雷器每年有效作用次数 \overline{N}_1 , $\overline{N}_1 = N_1 \times P_1$ 。

F.3.3 雷电直击导线的雷电过电压事件统计

计算步骤如下:

- 按附录 B, 计算雷击导线的耐雷水平 I_2 , 并计算雷电流超过 I_2 的雷电过电压概率 P_2 。
- 按附录 C, 计算平均每年线路 2km 长度范围雷击导线次数 N_2 。
- 计算配网避雷器每年有效作用次数 \overline{N}_2 , $\overline{N}_2 = N_2 P_2$ 。

F.3.4 雷击附近地面的感应过电压事件统计

感应过电压下线路耐雷水平与雷击点距离有关, 计算感应过电压有效作用次数需采用积分算法, 分别按较小距离区间计算每年雷击次数 N_3 、耐雷水平 I_3 以及雷电流超过 I_3 的概率 P_3 :

$$\overline{N}_3 = \int dN_3 \cdot P_3(>I_3) = 2 \int_{w_1}^{w_2} N_g \cdot 10^{-3} l dw \cdot P_3(>I_3) = 2 N_g l \cdot 10^{-3} \int_{w_1}^{w_2} P_3(>I_3) dw \quad (\text{F.1})$$

感应过电压耐雷水平 I_3 采用式 (B.8) 计算; 为简化起见, 此处 P_3 采用式 (1) 计算, 得到:

$$\overline{N}_3 = 2 N_g l \cdot 10^{-3} \int_{w_1}^{w_2} 10^{-aw} dw = \frac{2 N_g l \cdot 10^{-3} (10^{-aw_2} - 10^{-aw_1})}{-a \ln 10} \quad (\text{F.2})$$

$$a = u_i / 88 k_1 h_c \quad (\text{F.3})$$

式中:

N_g ——地闪密度, 次/ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$;

l ——线路长度, km。计算时取 $l=2\text{km}$, 即只考虑 2km 范围内雷击对避雷器的影响;

w_1 ——线路一侧的引雷宽度 (一般认为在引雷宽度范围内雷电将直击线路), m;

w_2 ——线路一侧考虑感应过电压作用的临界宽度, m, 距离线路 w_2 处, 幅值为 300kA 的雷电流在线路产生的感应过电压将引起绝缘子闪络;

u_i ——绝缘子 50% 雷电冲击放电电压, kV;

k_1 ——感应过电压系数 (我国一般取 $k_1=25\Omega$), Ω ;

h_c ——导线平均对地高度, m。

F.3.5 避雷器雷电过电压预期有效作用次数

按下式计算配网避雷器平均每年雷电过电压预期有效作用次数 \overline{N}_s :

$$\overline{N}_s = \overline{N}_1 + \overline{N}_2 + \overline{N}_3 \quad (\text{F.4})$$

F.4 配网避雷器平均每年雷电冲击放电能力资源消耗

配网避雷器平均每年消耗的雷电冲击放电能力 (电荷量) 资源 \overline{T}_0 可用下式计算:

$$\overline{T}_0 = \overline{N}_s \cdot T \quad (\text{F.5})$$

式中:

T ——配网避雷器一次雷电过电压消耗的雷电冲击放电能力 (电荷量) 资源, C。

T 可通过计算流过避雷器的雷电流及其持续时间, 将雷电流按作用时间积分得到:

- 依据 GB 11032 对雷电冲击放电能力试验要求, 流过避雷器的电流冲击波形大致为正弦波, 冲击电流瞬时值大于电流冲击峰值 5% 的持续时间约 $200\mu\text{s} \sim 230\mu\text{s}$ 。
- 有地线的线路, 通过避雷器的雷电流持续时间约为几十微秒; 无地线的线路, 避雷器雷电流持续时间约为几百微秒。雷电流持续时间选择 $200\mu\text{s}$ 以兼顾避雷器典型应用和多重雷击效应。
- 按下式计算避雷器一次雷电过电压消耗的雷电冲击放电能力资源 T 。

$$T = \int_0^{200} I_{\text{MOA}} \sin \frac{\pi}{200} t \cdot dt = 0.127 I_{\text{MOA}} \quad (\text{F.6})$$

式中:

I_{MOA} ——通过避雷器的雷电流(一般可取避雷器标称放电电流的30%~50%), kA。

F.5 配网避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源

本标准 10.3.1 按标称放电电流和电荷吸收能力将配网避雷器分为高、中、低三档, 其设计承受的电荷转移能力, 用 20 次 8/20 μ s 雷电冲击电流考核, 该试验可在电阻片上进行, 不必考虑热耗散性能, 表 F.1 列出单次 8/20 μ s 雷电冲击电流积分的电荷值。

表 F.1 配网避雷器拥有的一次性雷电放电能力资源

设计类型	高	中	低
标称放电电流 kA	10	5	5
重复电荷转移能力 C	≥ 0.4	≥ 0.2	≥ 0.1
避雷器拥有的电荷量资源 C	≥ 8	≥ 4	≥ 2

以标称电流 10kA 为例, 对电阻片进行 20 次 8/20 μ s、25kA 雷电冲击电流试验, 其生命周期内重复电荷转移能力应不低于 8C, 即避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源 T_R 不低于 8C。

F.6 配网避雷器雷电过电压下的预期运行寿命

由下式确定配网避雷器预期运行寿命 $\bar{N}(P)$:

$$\bar{N}(P) = T_R / \bar{T}_0 \quad (\text{F.7})$$

式中:

T_R ——避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源, C;

\bar{T}_0 ——避雷器平均每年消耗的雷电冲击放电能力资源, C。

F.7 配网避雷器预期运行寿命计算示例

以附录 B、附录 C 的 10kV 无地线单回线路为例计算, 计算过程如下:

a) 避雷器平均每年雷电过电压预期有效作用次数 \bar{N}_s :

按附录 B 和式 (1), 雷击杆塔时 $I_1=7.3\text{kA}$ 、 $P_1=82.6\%$, 雷击导线时 $I_2=1.2\text{kA}$ 、 $P_2=96.9\%$;

按附录 C, 平均每年雷击杆塔和导线的次数 $N_1=N_2=24.9 \times 2/100=0.5$ 次;

按 F.3.4, $N_g=5$ 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$), $l=2\text{km}$, $w_1=50\text{m}$, $w_2=500\text{m}$, $a=0.0068$, $h_c \approx h_1 \approx 8\text{m}$, 计算 $\bar{N}_3=0.58$ 次;

因此, $\bar{N}_s = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{N}_3 = N_1 P_1 + N_2 P_2 + \bar{N}_3 = 0.5 \times 82.6\% + 0.5 \times 96.9\% + 0.58 = 1.48$ 次。

b) 避雷器平均每年雷电冲击放电能力资源消耗 \bar{T}_0 :

取平均每次流过避雷器的雷电流 $I_{\text{MOA}}=0.4I_n=2.0\text{kA}$, 则 $T=0.127 \times 2.0=0.254\text{C}$;

因此, $\bar{T}_0 = \bar{N}_s \cdot T = 1.48 \times 0.254 = 0.376\text{C}$ 。

c) 避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源 T_R :

按表 F.1, 标称电流 5kA 的配网避雷器拥有的一次性雷电冲击放电能力资源 $T_R=4\text{C}$ 。

d) 避雷器预期运行寿命 $\bar{N}(P)$:

避雷器预期运行寿命: $\bar{N}(P) = T_R / \bar{T}_0 = 4/0.376 = 10.6$ 年。