

ICS 29.240

**Q/GDW**

国 家 电 网 公 司 企 业 标 准

Q/GDW 11452—2015

---

## 架空输电线路防雷导则

Guide for lightning protection of overhead transmission lines

2016 - 07 - 29 发布

2016 - 07 - 29 实施

---

国家电网公司 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 雷电监测	3
5 雷电地闪参数	4
6 输电线路雷击风险评估	5
7 输电线路防雷设计	9
附录 A（资料性附录） 广域雷电地闪监测系统	18
附录 B（资料性附录） 输电线路雷击辨识与定位系统	20
附录 C（资料性附录） 输电线路雷击光学图像监测	24
附录 D（资料性附录） 雷电地闪参数统计	25
附录 E（资料性附录） 地形参数提取	33
附录 F（资料性附录） 线路参数和防雷装置参数表	35
附录 G（资料性附录） 输电线路雷击跳闸率相关计算方法	38
附录 H（规范性附录） 防雷措施选择流程	43
编制说明	45

## 前 言

为规范和有效开展架空输电线路防雷工作，参照相关标准规范制定本标准。

本标准由国家电网公司运维检修部提出并解释。

本标准由国家电网公司科技部归口。

本标准起草单位：南瑞集团有限公司、中国电力科学研究院、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、北京电力经济技术研究院、国网冀北电力有限公司、国网浙江省电力公司、国网安徽省电力公司、国网湖北省电力公司、国网江西省电力公司。

本标准主要起草人：陈维江、王剑、赵淳、沈海滨、边凯、陈家宏、谷山强、时卫东、陈秀娟、姜文东、李雨、张宇、程登峰、姚尧、马建国、冯万兴、王海涛、许衡、王佩、雷梦飞、李健、彭波、刘玄。

本标准首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至国家电网公司科技部。



# 架空输电线路防雷导则

## 1 范围

本标准规定了架空输电线路防雷设计原则、防护措施、雷击风险评估方法，以及防雷设计中相关参数的获取方法。

本标准适用于交流 110kV~1000kV、直流±400kV~±800kV 架空输电线路。

## 2 规范性引用文件

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

GB/Z 24842 1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合

GB/T 50064-2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范

GB 50545 110kV~750kV 架空输电线路设计规范

GB 50665 1000kV 架空输电线路设计规范

GB 50790 ±800kV 直流架空输电线路设计规范

DL/T 815-2012 交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器

DL/T 1293 交流架空输电线路绝缘子并联间隙使用导则

Q/GDW 1779.2-2013 国家电网公司电力安全工作规范 线路部分

Q/GDW 11007-2013 ±500kV 直流输电线路用复合外套带串联间隙金属氧化物避雷器技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**广域雷电地闪监测 wide-area ground flash detection**

对雷电地闪发生时间、位置、极性、强度等信息进行实时、大范围测量。

### 3.2

**地闪 ground flash**

云体与大地或地面物之间的大气放电现象。

### 3.3

**雷暴日 thunderstorm days**

某地区一年中的有雷天数。一天中只要听到一次以上的雷声或看到一次以上的闪电，就为一个雷暴日。

### 3.4

**地闪密度 ground flash density**

每平方公里、每年地面落雷次数。

### 3.5

**雷电流幅值 lightning current amplitude**

雷电流波形峰值的绝对值。

### 3.6

**雷电流幅值累积概率 cumulative probability of lightning current amplitude**

在全部雷电地闪中，雷电流幅值大于某一数值的雷电地闪累积出现的概率，即统计样本中雷电流幅

## Q/GDW 11452—2015

值大于某一数值的雷电地闪次数占雷电地闪总数的百分比。

### 3.7

#### 少雷区 **less thunderstorm region**

地闪密度不超过 0.78 次/ (km<sup>2</sup> · a) 或平均年雷暴日不超过 15d 的地区。

### 3.8

#### 中雷区 **middle thunderstorm region**

地闪密度超过 0.78 次/ (km<sup>2</sup> · a) 但不超过 2.78 次/ (km<sup>2</sup> · a) 或平均年雷暴日超过 15d 但不超过 40d 的地区。

### 3.9

#### 多雷区 **more thunderstorm region**

地闪密度超过 2.78 次/ (km<sup>2</sup> · a) 但不超过 7.98 次/ (km<sup>2</sup> · a) 或平均年雷暴日超过 40d 但不超过 90d 的地区。

### 3.10

#### 强雷区 **strong thunderstorm region**

地闪密度超过 7.98 次/ (km<sup>2</sup> · a) 或平均年雷暴日超过 90d 的地区。

### 3.11

#### 反击 **back flashover**

雷击架空地线或杆塔，雷电流经杆塔及其接地装置注入大地，引起塔顶和塔身电位升高，当电位升高至杆塔与导线间绝缘间隙（绝缘子（串））两端电位差大于绝缘冲击放电电压时，引起的绝缘闪络。

### 3.12

#### 绕击 **shielding failure**

雷电地闪绕过地线和杆塔的拦截直接击中导线，或者在无架空地线时直接击中导线的雷击现象。

### 3.13

#### 绕击闪络 **shielding failure flashover**

雷电绕击导线后，雷电流波沿导线向两侧传播，在绝缘子（串）两端，或导线-塔身空气间隙上，形成幅值较高的过电压，电压大于绝缘冲击放电电压时，引起的绝缘闪络。

### 3.14

#### 雷击跳闸 **lightning trip-out**

雷击交流输电线路引起绝缘闪络后，沿闪络通道建立稳定工频续流电弧造成的断路器开断；雷击直流输电线路引起绝缘闪络后，沿闪络通道建立稳定直流续流电弧造成的故障重启。

### 3.15

#### 耐雷水平 **lightning withstanding current**

雷击线路时，能引起绝缘闪络的最小雷电流幅值，单位为 kA，包括绕击耐雷水平和反击耐雷水平。

### 3.16

#### 反击跳闸率 **trip-out rate by back flashover**

每百公里输电线路每年由反击引起的跳闸（重启）次数，单位为次/ (100km · a)。

### 3.17

#### 绕击跳闸率 **trip-out rate by shielding failure**

每百公里输电线路每年由绕击引起的跳闸（重启）次数，单位为次/ (100km · a)。

### 3.18

#### 保护角 **shielding angle**

地线对导线的保护角指杆塔处、不考虑风偏，地线对水平面的垂线和地线与导线或分裂导线最外侧子导线连线之间的夹角。

## 4 雷电监测

### 4.1 广域雷电地闪监测

#### 4.1.1 监测原理

广域雷电地闪监测系统由站间距离100km~200km的多个雷电地闪探测站、中心站和应用终端组成。雷电地闪发生时会产生强烈的甚低频/低频电磁波辐射，在广域空间内主要沿地表传播。探测站接收1MHz的带宽，依据电磁波的波形特征辨识出雷电地闪信号，将地闪信号强度、极性、入射方向、到达探测站时刻等信息发送至中心站。中心站联合多个探测站的数据解算出雷电地闪发生的时刻、位置，并反演计算出雷电流幅值。监测结果通过应用终端展示。

#### 4.1.2 地闪时刻和位置的确定方法

雷电地闪发生的时刻和位置可利用定向法、时差法和综合法（定向与时差混合法）确定，广域雷电地闪监测系统采用综合法，监测方法参见附录A.1。

#### 4.1.3 雷电流幅值获取方法

雷电流幅值可通过雷电地闪探测站测量到的雷电地闪信号强度，结合传播路径衰减特性、雷电流回击数学模型反演计算得出。

#### 4.1.4 地闪密度值获取

广域雷电地闪监测系统可连续记录雷电地闪信息。根据雷电地闪信息统计一定时间和空间范围内发生的雷电地闪次数，即可获取该范围内的地闪密度值。

#### 4.1.5 探测站布置原则

应覆盖整个电网区域，满足雷电活动实时和长期不间断监测的功能要求。

#### 4.1.6 探测站选址原则

探测站选址原则参见附录A.2。

## 4.2 输电线路雷击监测

### 4.2.1 输电线路雷击辨识与定位

#### 4.2.1.1 监测原理

输电线路雷击辨识与定位系统由分布式监测终端、中心站及应用终端组成。在导线上分布安装的监测终端，直接测量输电线路雷击电流或故障电流行波，中心站对电流行波进行波形处理与特征分析，实现对雷击故障和雷击位置的辨识，辨识结果通过应用终端展示。

#### 4.2.1.2 雷击故障辨识

利用监测到的电流行波幅值、波形等特征，结合小波能量谱数学方法辨识是否为雷击故障及雷击闪络形式（绕击、反击）。雷击故障辨识原理参见附录B.1。

#### 4.2.1.3 雷击位置辨识

根据监测到的电流行波特征，辨识雷击线路部位（杆塔、地线、导线、大地），利用单端、双端行波定位法确定雷击点。雷击位置辨识原理参见附录 B.2。

#### 4.2.1.4 应用范围

宜在雷击故障多发线路或多雷区、强雷区线路安装（安装原则参见附录 B.3），用于积累线路雷击数据，提供实时监测信息，指导故障处置。

### 4.2.2 输电线路雷击光学图像监测

#### 4.2.2.1 监测原理

雷击时由光学器件触发相机（分辨率一般为 1600×1200 像素）记录雷击光学图像（典型监测结果参见附录 C）。

#### 4.2.2.2 雷击位置、形式确定

由雷击光学图像确定雷击位置（杆塔、地线、导线、大地）和雷击形式（绕击、反击）。

#### 4.2.2.3 应用范围

可在多雷区或雷击故障多发线路区段的杆塔上安装，用于雷击数据积累。

### 4.2.3 输电线路雷电流测量

#### 4.2.3.1 测量原理

雷电流测量传感器安装于杆塔上，雷击杆塔时，数据采集单元被触发，对传感器测得的电流信号进行波形数据高速采集（采样率一般为 10MHz）并记录。

#### 4.2.3.2 雷电流波形获取

记录下的波形数据绘制成连续曲线，即为雷电流波形，幅值和极性可从雷电流波形得出。

#### 4.2.3.3 应用范围

可在多雷区或雷击故障多发线路区段的杆塔上安装，用于雷电流参数积累。

## 5 雷电地闪参数

### 5.1 雷电流

雷电流是单极性的脉冲波，约 90%的雷电流为负极性。可用波头、波长、陡度等参数表征。

波头是指雷电流从零上升到幅值的时间。约 85%的波头长度在 1μs~5μs 内，平均约为 2.6μs。

波长是指雷电流从零到衰减至一半幅值时的持续时间。一般在 20μs~100μs 范围之内，平均约为 50μs，大于 50μs 的仅占 18%~30%。

陡度是指雷电流随时间上升的变化率。雷电流的平均陡度可按公式（1）计算：

$$\bar{a} = \frac{I}{t} \quad (1)$$



式中：

$\bar{a}$  ——雷电流的平均陡度，单位为千安每微秒（kA/ $\mu$ s）；

$I$  ——雷电流幅值，单位为千安（kA）；

$\tau$  ——波头，单位为微秒（ $\mu$ s）。

输电线路雷击瞬态过程计算时可采用雷电流波形为 2.6/50 $\mu$ s 的双斜角波。

雷电流幅值分布存在地域差异，一般采用累积概率分布来表征。

基于广域雷电地闪监测数据，可给出雷电流幅值累积概率分布，分布函数见公式（2）。

$$P = \frac{1}{1 + (I/\bar{a})^b} \quad (2)$$

式中：

$P$  ——幅值大于  $I$  的雷电流概率；

$I$  ——雷电流幅值，单位为千安（kA）；

$a$  ——中值电流（超过该幅值的雷电流出现概率为 50%），单位为千安（kA）；

$b$  ——雷电流幅值分布的集中程度参数。

参数  $a$ 、 $b$  的统计拟合方法参见附录 D.1。雷电流幅值概率分布需要有长期的数据积累。附录 D.1 还给出了 2013 年~2014 年国家电网公司各省级电力公司的平均雷电流幅值累积概率分布公式中的  $a$ 、 $b$  值。

雷电地闪监测数据不完善的地区，可采用标准 GB/T 50064-2014 给出的雷电流幅值累积概率分布公式。一般地区按公式（3）计算；陕南以外的西北地区、内蒙古自治区的部分地区按公式（4）计算。

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (3)$$

$$\lg P = -\frac{I}{44} \quad (4)$$

式中：

$P$  ——幅值大于  $I$  的雷电流概率；

$I$  ——雷电流幅值，单位为千安（kA）。

## 5.2 地闪密度

地闪密度有两种获取方法：

- 利用广域雷电地闪监测数据，采用网格统计法可获得线路走廊或区域地闪密度，进而可绘制地闪密度分布图；统计方法参见附录 D.2，绘制方法与分级原则参见附录 D.3；附录 D.2 给出了 2005 年~2014 年国家电网公司各省级电力公司地闪密度平均值、线路走廊地闪密度分布实例；附录 D.3 给出了 2013 年国家电网公司管辖区域地闪密度分布图；
- 通过雷暴日换算获得，见公式（5）。

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (5)$$

式中：

$N_g$  ——地闪密度，单位为次每平方公里年（次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ))；

$T_d$  ——雷暴日，单位为天（d）。

## 6 输电线路雷击风险评估

### 6.1 雷击风险水平控制参考值

输电线路雷击风险水平采用雷击跳闸率表征。

各电压等级单回线路雷击跳闸率折算至地闪密度 2.78 次/(km<sup>2</sup>·a) 下的控制参考值  $S'$  见表 1。1000kV 同塔双回线路的控制参考值  $S'$  为 0.14 次/(100km·a)。

表 1 各电压等级单回线路雷击跳闸率控制参考值

电压等级 kV	控制参考值 $S'$ 次/(100km·a)
110	0.525
220	0.315
330	0.2
500	0.14
750	0.1
1000	0.1
±400	0.15
±500	0.15
±660	0.1
±800	0.1

线路走廊实际地闪密度不同时，线路实际雷击跳闸率控制参考值  $S$  按公式 (6) 计算。

$$S = S' N_{gav} / 2.78 \quad (6)$$

式中：

$N_{gav}$ ——线路走廊实际平均地闪密度，单位为次每平方公里年（次/(km<sup>2</sup>·a)）。

## 6.2 基础参数获取

### 6.2.1 雷电地闪参数

雷电地闪密度与地形、气候相关。通常低纬度较高纬度地区、山区较平原、陆地较海平面地闪密度高。

雷电地闪参数应通过广域雷电地闪监测数据获取，统计方法参见附录 D。

### 6.2.2 地形参数

地形主要包括山区和平原，一般分为山谷、山顶、爬坡、沿坡和平地 5 种，如图 1 所示。地形参数可用地面倾角或多面体几何参数表征。杆塔地形参数提取方法参见附录 E。



图 1 地形分类示意图

### 6.2.3 线路参数

线路参数表格参见附录 F.1，一般包括：

- a) 杆塔参数，包括杆塔编号，杆塔几何尺寸，杆塔中心桩经纬度坐标、海拔高度和附近土壤电阻

率，接地装置电阻值；

- b) 导地线参数，包括导线型号、分裂数及分裂间距，地线型号；
- c) 导（地）线绝缘子（串）参数，包括型号、片数、悬挂方式；
- d) 档距参数，包括水平档距、雷电气象条件下的导/地线弧垂。

#### 6.2.4 防雷装置参数

防雷装置参数包括线路避雷器、并联间隙、杆塔避雷针等电气几何参数，安装杆塔编号、相别/极性。防雷装置参数的表格参见附录 F.2。

#### 6.3 雷击跳闸率计算方法

线路雷击跳闸受雷电流幅值、极性，雷电先导入射角，以及雷击线路部位和瞬时工作电压等随机变量的影响，为随机事件。雷击跳闸率计算本质是概率统计，计算时考虑的随机变量越多，计算结果的可信度越高，但计算量也随之增加。

考虑计算精度要求和计算量，计算中可只将雷电流幅值和雷电先导入射角作为随机变量考虑，雷电流极性，雷击线路瞬时工作电压和雷击线路部位作为确定量考虑，其中：

- a) 雷电流极性取负极性；
- b) 雷击线路瞬时工作电压，对交流线路取线路相电压有效值，直流线路取极线工作电压；
- c) 雷击线路部位，反击跳闸率计算中取雷击部位为杆塔顶部，绕击跳闸率计算中取雷击部位在导线绝缘子挂点处。

雷击跳闸率可采用区间组合法计算，将雷电流幅值和雷电先导入射角两个随机变量划分为多个区间，然后以典型量代表区间变量，分区间进行确定性计算，最后将各区间对应的雷击跳闸率按区间出现概率加权求和，获得线路雷击跳闸率。雷击跳闸率区间组合计算公式见公式（7）～公式（12）。

$$R_{ri} = 0.1h_i N_{gi} \sum_{k=1}^{(I_{\max i} - I_{\min ri})/DI} \sum_{n=1}^{D/D\Psi} \Delta\Psi [P(I_{\min ri} + kDI - DI) - P(I_{\min ri} + kDI)] \left[ f\left(-\frac{D}{2} + n\Delta\Psi - \Delta\Psi\right) + f\left(-\frac{D}{2} + n\Delta\Psi\right) \right] D_{ci}(I_{\min ri} + kDI, -\frac{D}{2} + n\Delta\Psi) \quad (7)$$

$$R_{fi} = 0.1h_i N_{gi} \sum_{k=1}^{(350 - I_{\min fi})/DI} \sum_{n=1}^{D/D\Psi} \Delta\Psi [P(I_{\min fi} + kDI - DI) - P(I_{\min fi} + kDI)] \left[ f\left(-\frac{D}{2} + n\Delta\Psi - \Delta\Psi\right) + f\left(-\frac{D}{2} + n\Delta\Psi\right) \right] D_{si}(I_{\min fi} + kDI, -\frac{D}{2} + n\Delta\Psi) \quad (8)$$

$$R_i = R_{ri} + R_{fi} \quad (9)$$

$$R_r = \sum_{i=1}^M \frac{L_i R_{ri}}{L} \quad (10)$$

$$R_f = \sum_{i=1}^M \frac{L_i R_{fi}}{L} \quad (11)$$

$$R = R_r + R_f \quad (12)$$

公式（7）～公式（12）中：

$R_{ri}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的绕击跳闸率（折算至 100km 长度），单位为次每百公里年（次/(100km·a)）；

$\eta_i$  ——第  $i$  基杆塔绝缘子（串）建弧率，可按照 GB/T50064-2014 第 D.1.8 条的要求计算；

$N_{gi}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的所在位置的地闪密度，单位为次每平方公里年（次/(km<sup>2</sup>·a)）；

$P(I)$  ——雷电流幅值累积概率分布函数，见 5.1 节；

$I_{maxi}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的最大绕击电流，单位为千安 (kA)，可采用电气几何模型计算（参见附录 G.1）；

$I_{minri}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的绕击耐雷水平，单位为千安 (kA)，宜通过雷电过电压数值仿真计算，建模方法参见附录 G.3；

$\Delta I$  ——雷电流幅值区间划分间隔，单位为千安 (kA)， $\Delta I$  可根据比较计算确定，宜小于等于 1kA；

$\Delta\Psi$  ——雷电先导入射角区间划分间隔，单位为度 ( $^{\circ}$ )， $\Delta\Psi$  可根据比较计算确定，宜小于等于  $1^{\circ}$ ；

$f(\Psi)$  ——雷电先导入射角概率密度函数，按照 GB/T50064-2014 式 D.1.5-4 的要求计算；

$D_{ci}(I, \Psi)$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的导线单侧引雷宽度，单位为米 (m)，可采用电气几何模型计算（参见附录 G.1）；

$R_{fi}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的反击跳闸率（折算至 100km 长度），单位为次每百公里年（次/(100km·a)）；

$I_{minfi}$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的反击耐雷水平，单位为千安 (kA)，宜通过雷电过电压数值仿真计算，建模方法参见附录 G.3；

$D_{si}(I, \Psi)$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的地线单侧引雷宽度，单位为米 (m)，可采用电气几何模型计算（参见附录 G.1）；

$R_i$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段的雷击跳闸率（折算至 100km 长度），单位为次每百公里年（次/(100km·a)）；

$L_i$  ——第  $i$  基杆塔对应水平档距段长度，单位为米 (m)；

$L$  ——线路的总长度，单位为米 (m)；

$M$  ——线路杆塔数量，单位为基；

$R_f$  ——线路平均反击跳闸率，单位为次每百公里年（次/(100km·a)）；

$R_r$  ——线路平均绕击跳闸率，单位为次每百公里年（次/(100km·a)）；

$R$  ——线路平均雷击跳闸率，单位为次每百公里年（次/(100km·a)）。

公式 (7) 和公式 (8) 中的  $I_{maxi}$ ， $D_{si}(I, \Psi)$  和  $D_{ci}(I, \Psi)$  除可采用电气几何模型计算外，还可采用先导发展模型计算（参见附录 G.2），当杆塔全高大于 60m 时，宜采用先导发展模型计算。当采用先导发展模型计算时，由于模型本身已考虑雷电下行先导入射角，公式 (7) 和公式 (8) 中可不必再考虑先导入射角，两式分别简化为公式 (13) 和公式 (14)。

$$R_{ri} = 0.2h_i N_{gi} \sum_{k=1}^{(I_{maxi} - I_{minri})/\Delta I} [P(I_{minri} + k\Delta I - \Delta I) - P(I_{minri} + k\Delta I)] D_{ci}(I_{minri} + k\Delta I) \quad (13)$$

$$R_{fi} = 0.2h_i N_{gi} \sum_{k=1}^{(350 - I_{minfi})/\Delta I} [P(I_{minfi} + k\Delta I - \Delta I) - P(I_{minfi} + k\Delta I)] D_{si}(I_{minfi} + k\Delta I) \quad (14)$$

公式 (13) 和公式 (14) 是在单回线路横截面中轴线两侧的雷击特性相同的基础上推导得出。

对单回线路杆塔，当地面具有倾角或两侧保护角不同等原因使两侧雷击特性不一致时，应采用公式 (7) 和公式 (8) 分别计算两侧的绕击或反击跳闸率，然后代数求和获得计及双侧的绕击或反击跳闸率。

对双回线路杆塔，应对每回线路分别进行计算，某一回的一相导线绕击或反击跳闸率计算采用公式 (7) 和公式 (8)，然后将某一回各相导线计算结果代数求和可获得一回线路的绕击或反击跳闸率。

#### 6.4 雷击风险等级划分

雷击风险划分标准见表 2，其中， $S$  为线路实际雷击跳闸率控制参考值，按公式 (6) 计算， $R_i$  为计算得到的线路某一杆塔对应水平档距段的雷击跳闸率， $R$  为计算得到的线路平均雷击跳闸率。

表 2 雷击风险等级划分标准

雷击风险等级	I	II	III	IV
杆塔雷击跳闸率	$R_i < S \times 0.5$	$S \times 0.5 \leq R_i < S \times 1.0$	$S \times 1.0 \leq R_i < S \times 1.5$	$R_i \geq S \times 1.5$
线路雷击跳闸率	$R < S \times 0.5$	$S \times 0.5 \leq R < S \times 1.0$	$S \times 1.0 \leq R < S \times 1.5$	$R \geq S \times 1.5$

## 7 输电线路防雷设计

### 7.1 防雷措施

#### 7.1.1 架空地线

架空地线设置在导线上方，起到拦截雷电下行先导的作用，对导线形成屏蔽。仍有少部分低幅值雷电绕过架空地线击中导线，减小架空地线保护角可降低线路绕击率。

架空地线（包括光纤复合架空地线）应满足电气和机械使用条件要求，可选用镀锌钢绞线或复合型绞线。

110kV 线路的光纤复合架空地线外层线股应选取单丝直径 2.8mm 及以上的铝包钢线，220kV 及以上线路的光纤复合架空地线外层线股应选取单丝直径 3.0mm 及以上的铝包钢线，并严格控制施工工艺。

架空地线可逐塔接地。考虑节能、融冰技术要求，也可采用全线单点接地或分段单点接地。此时应保证地线绝缘间隙可靠。

#### 7.1.2 杆塔接地装置

杆塔接地装置由接地体和接地引下线组成，其作用是将雷电流迅速泄放入地。减小接地装置电阻值可降低线路反击跳闸率。

杆塔接地装置的型式、尺寸，应综合考虑运行经验、杆塔类型、环境条件、土壤电阻率等因素确定，并满足接地电阻限值要求。在土壤电阻率较高地段的杆塔，可采用增加垂直接地体、加长接地带、改变接地形式、换土或采用接地模块等措施。钢筋混凝土杆的铁横担、地线支架、爬梯等铁附件与接地引下线应有可靠的电气连接。

通过耕地的输电线路，其接地体应埋设在耕作深度以下。位于居民区和水田的接地体应敷设成环形。

#### 7.1.3 线路避雷器

线路避雷器并联连接在线路绝缘子（串）两端，用于保护线路绝缘子（串）免受雷电引起的绝缘闪络，避免线路跳闸。受有效保护距离限制，线路避雷器只能为与之并联安装的线路绝缘子（串）提供可靠保护。

线路避雷器按标称电流分为 10kA、20kA 和 30kA 三种，按结构型式分为无间隙和带串联间隙两种。带串联间隙又分为纯空气间隙和带支撑件间隙，典型结构示意图见图 2。纯空气间隙由上下两个电极构成，一个电极固定在避雷器本体高压端，另一个电极固定在线路导线上或绝缘子串下端，间隙为空气绝缘。带支撑件间隙由上下两个电极及固定电极用的复合绝缘支撑件构成。应用带支撑件间隙线路避雷器时应保证支撑件与避雷器之间的机械连接安全可靠。

在对串联间隙距离进行选择时应对带间隙的整只避雷器进行雷电冲击 50%放电电压试验，其数值应与线路绝缘水平相配合，以保证避雷器在雷电过电压下放电。雷电冲击 50%放电电压试验用来确定串联间隙的最大距离。对带间隙的整只避雷器进行工频湿耐受电压试验，其数值应与线路绝缘水平相配合，以保证避雷器在操作及工频过电压下不放电。工频湿耐受电压试验用来确定间隙的最小距离。电压推荐

值按照 DL/T 815-2012 表 4 的要求执行。

线路避雷器标准额定电压推荐值见表 3。110kV~500kV 典型避雷器本体电气参数按照 DL/T 815-2012 表 2、表 3 的要求执行，1000kV 避雷器本体电气参数按照 Q/GDW 1779.2-2013 表 1 的要求执行，±500kV 避雷器本体电气参数按照 Q/GDW 11007-2013 表 1 的要求执行。

表 3 线路避雷器标准额定电压推荐值

单位为千伏（kV，有效值）

系统标称电压	额定电压		标准极差
	无间隙避雷器	带间隙避雷器	
110	108	90	6
220	216	180	6
330	312	288	12
500	444	396	12
1000	—	768	3
±500	—	571	—

注：也可按表 3 中规定的标准极差选用其他更高等级。

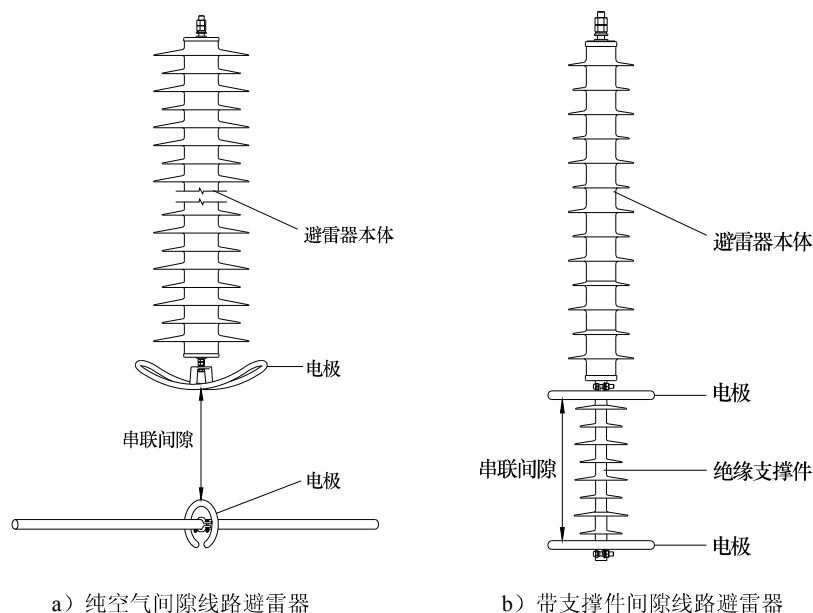


图 2 带串联间隙线路避雷器典型结构示意图

#### 7.1.4 并联间隙

并联间隙安装在线路绝缘子（串）两端，雷电过电压作用下，并联间隙击穿放电，释放雷电能量，疏导雷击闪络后工频续流电弧沿电极向离开绝缘子（串）方向移动，保护绝缘子（串）免于工频电弧烧伤。并联间隙自身没有熄灭工频电弧能力，需要配合变电站内重合闸装置使用。

并联间隙典型结构形状包括羊角形状、球拍形状、半跑道形状和开口圆环形状，示意图见图 3。对 220kV 及以下电压等级交流线路用并联间隙，可按照标准 DL/T 1293 附录 B.2、附录 B.4 的要求选用；

对 500kV 电压等级交流线路，并联间隙宜设计成半跑道形状或开口圆环形状，设计方法按照标准 DL/T 1293 的要求执行。110kV、220kV 和 500kV 绝缘子（串）并联间隙电极推荐几何尺寸见表 4。

表 4 110kV、220kV 和 500kV 绝缘子（串）并联间隙电极推荐几何尺寸列表

绝缘子（串）	Z <sub>0</sub> mm	Z mm	X <sub>c</sub> mm	X <sub>p</sub> mm	Y <sub>c</sub> mm	Y <sub>p</sub> mm	Z/Z <sub>0</sub>
500kV 悬垂串单联半跑道型并联间隙电极	—	—	700	700	—	—	0.85 (±2.5%)
220kV 悬垂串（间隙短接 2 片绝缘子）	146×17	146×15	490	570	219	73	0.882
	146×16	146×14	490	570	219	73	0.875
	146×15	146×13	490	570	219	73	0.867
	146×14	146×12	490	570	219	73	0.857
	146×13	146×11	490	570	219	73	0.846
220kV 耐张串（间隙短接 2 片绝缘子）	146×17	146×15	490	570	146	146	0.882
	146×16	146×14	490	570	146	146	0.875
	146×15	146×13	490	570	146	146	0.867
220kV 耐张串（间隙短接 2 片绝缘子）	146×14	146×12	490	570	146	146	0.857
	146×13	146×11	490	570	146	146	0.846
110kV 悬垂串（间隙短接 1.5 片绝缘子）	146×10	146×8.5	400	450	146	73	0.850
	146×9	146×7.5	400	450	146	73	0.833
	146×8	146×6.5	400	450	146	73	0.813
110kV 悬垂串（间隙短接 1 片绝缘子）	146×7	146×6	400	450	73	73	0.857
110kV 耐张串（间隙短接 1.5 片绝缘子）	146×10	146×8.5	400	450	146	73	0.850
	146×9	146×7.5	400	450	146	73	0.833
	146×8	146×6.5	400	450	146	73	0.813
110kV 耐张串（间隙短接 1 片绝缘子）	146×7	146×6	400	450	73	73	0.857

### 7.1.5 杆塔避雷针

杆塔避雷针可增强杆塔附近拦截雷电下行先导的作用，对杆塔附近的导线形成屏蔽，降低雷电绕击概率。

杆塔避雷针包括竖直安装在杆塔顶部的塔顶避雷针和水平安装在横担边沿的塔头侧针两种。受线路反击耐雷水平限制，对 110kV 交流线路，不应使用杆塔避雷针；220kV 及以上交流线路和±400kV 及以上直流线路，可将杆塔避雷针作为一种辅助防雷措施。

### 7.1.6 耦合地线

耦合地线一般设置在导线下方，增加导线与大地间的耦合作用，减小绝缘子（串）上的雷电过电压，并分流雷电流，抑制杆塔塔顶电位升，降低线路反击跳闸率。

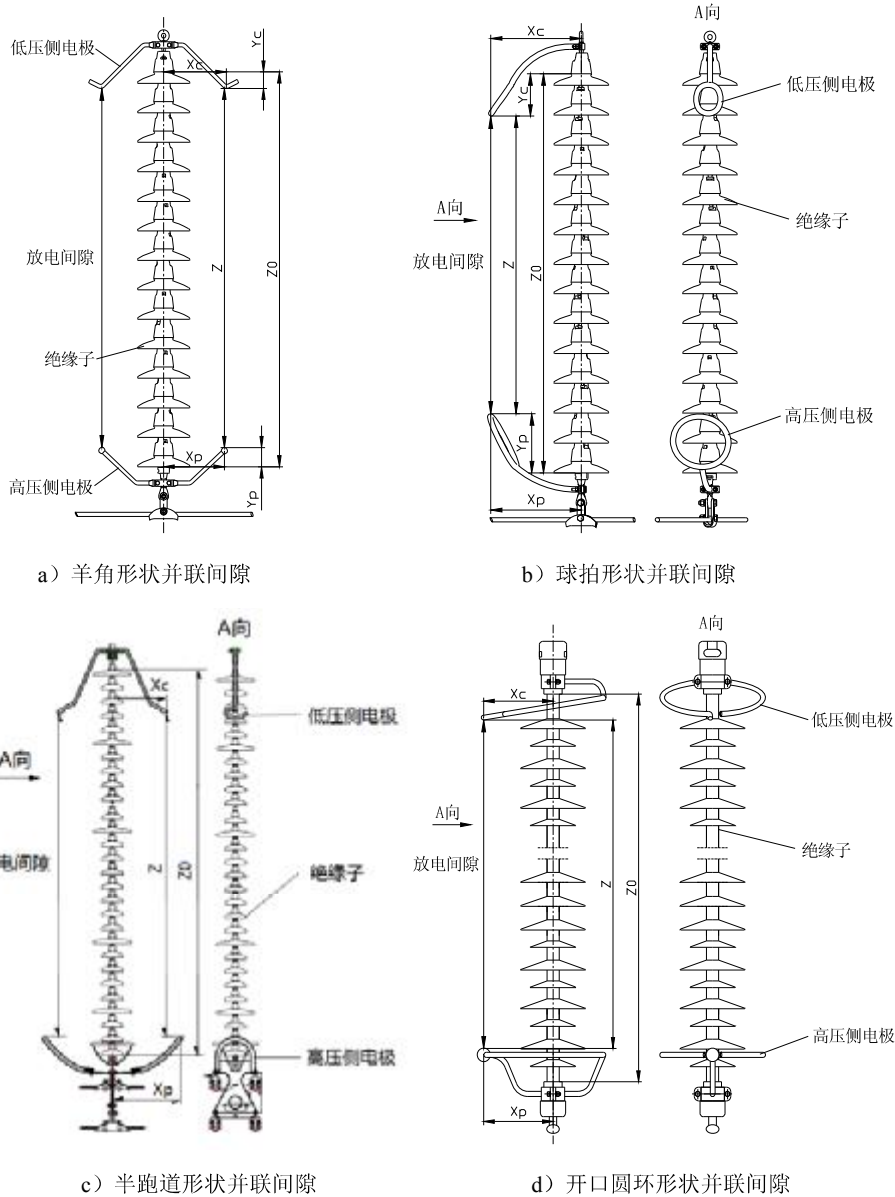


图3 并联间隙典型结构示意图

对 220kV 及以下交流线路，当降低杆塔接地电阻有困难或经济成本投入过大时，可辅助使用耦合地线措施。加装耦合地线时应考虑导线覆冰、舞动、风偏及地形地貌等因素对杆塔机械载荷、间隙绝缘配合及弧垂等进行校核。

## 7.2 新建输电线路防雷设计

### 7.2.1 防雷设计原则

对于新建的输电线路，按照现行标准规范（GB/Z 24842、GB/T 50064-2014、GB 50545、GB 50665、GB 50790、DL/T 436）的要求执行。一般线路强雷区的山区区段和特殊区段（如架空转电缆等）以及重要线路，应逐塔进行雷击风险评估，对高风险杆塔采取防雷优化措施。



## 7.2.2 一般线路

### 7.2.2.1 一般规定

强雷区的山区线路区段和特殊线路区段（如架空转电缆等）应逐塔进行雷击风险评估，对雷击风险等级为 I、II 的杆塔可保持设计方案不变，对雷击风险等级为 III、IV 的杆塔（简称雷击高风险杆塔）宜采取防雷优化措施。根据雷击高风险杆塔的绕、反击跳闸率比值  $k_{rf}$  选择防雷优化措施，优化措施包括加强线路绝缘、减小保护角、改善接地装置、安装线路避雷器，措施选择流程见附录 H。

其他线路区段的防雷设计按照 GB/T 50064-2014、GB 50545 的要求执行，在多雷区及以上或运维困难的线路区段可安装并联间隙。

### 7.2.2.2 加强线路绝缘

雷击高风险杆塔宜采用加强绝缘措施，220kV 及以下同塔双回杆塔可采用不平衡绝缘。在满足风偏和导线对地距离要求的前提下，绝缘子（串）长度增加值见表 5。

表 5 一般线路雷击高风险杆塔绝缘子（串）长度增加值

雷击风险等级	电压等级	回路形式	绝缘子（串）长度增加比例
III	220kV 以上	—	加长 10%~15%
	220kV 及以下	单回	加长 10%~15%
		同塔双回	一回加长 15%左右，另一回不变
IV	220kV 以上	—	加长 20%
	220kV 及以下	单回	加长 20%
		同塔双回	一回加长 15%左右，另一回不变

### 7.2.2.3 减小保护角

雷击高风险杆塔，绕、反击跳闸率比值  $k_{rf} \geq 0.8$  时，保护角宜按表 6 选取。减小保护角后杆塔上两根地线之间的距离不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

表 6 一般线路雷击高风险杆塔保护角

电压等级 kV	回路形式	保护角 °
110	单回	$\leq 10$
	同塔双（多）回	$\leq 5$
220~330	单回	$\leq 10$
	同塔双（多）回	$\leq 0$
500	单回	$\leq 5$
	同塔（多）双回	$\leq 0$

### 7.2.2.4 改善接地装置

雷击高风险杆塔， $k_{rf} \leq 1.2$  时，应降低接地装置的电阻值，每基杆塔不连地线的工频接地电阻，在

雷季干燥条件下不宜大于表 7 所列数值。宜采用增大水平/垂直接地体长度、增加接地体埋设深度的方式降低接地电阻，严禁使用化学降阻剂或含化学成分的接地模块。

表 7 雷击高风险杆塔工频接地电阻设计值

土壤电阻率 $\Omega\cdot\text{m}$	$\leq 100$	100~500	500~1000	1000~2000	>2000
接地电阻 $\Omega$	7	10	15	20	25

### 7.2.2.5 安装线路避雷器

下列雷击高风险杆塔宜安装线路避雷器：

- $k_{rf} \geq 0.8$  且减小保护角困难的杆塔；
- $k_{rf} \leq 1.2$  且降阻困难或降阻不经济的杆塔。

下列雷击高风险杆塔可安装线路避雷器：

- 保护角满足表 6 要求但  $k_{rf} \geq 1.2$  的杆塔；
- 接地电阻满足表 7 要求但  $k_{rf} \leq 0.8$  的杆塔。

线路避雷器在杆塔上的安装方式可参考下列要求：

- 220kV 及以下交流单回杆塔宜在三相安装，同塔双回杆塔可选择雷击跳闸率较高的一回安装；
- 330kV 及以上交流线路安装相别宜根据各相雷击跳闸率计算结果确定。

### 7.2.3 重要线路

#### 7.2.3.1 一般规定

线路应逐塔进行雷击风险评估，对雷击风险等级为 I、II 的杆塔可保持设计方案不变，对雷击风险等级为 III、IV 的杆塔宜采取防雷优化措施，包括加强线路绝缘、减小保护角、改善接地装置、安装线路避雷器，措施选择流程见附录 H。

#### 7.2.3.2 加强线路绝缘

雷击风险等级为 III 和 IV 的 500kV 及以下交流线路杆塔，在满足风偏和导线对地距离要求的前提下，绝缘子（串）长度宜分别加长 10%~15% 和 20%。

#### 7.2.3.3 减小保护角

雷击高风险杆塔，绕、反击跳闸率比值  $k_{rf} \geq 0.8$  时，保护角宜按表 8 选取。减小保护角后杆塔上两根地线之间的距离不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

表 8 重要线路雷击高风险杆塔保护角

电压等级 kV	回路形式	保护角 °
110~750	单回	$\leq 5$
	同塔双（多）回	$\leq 0$
1000	单回	$\leq -4$
	同塔双（多）回	$\leq -5$

表 8 (续)

电压等级 kV	回路形式	保护角 °
±400	—	≤5
±500	单回	≤5
	同塔双(多)回	≤0
±660	—	≤0
±800	—	≤-10

#### 7.2.3.4 改善接地装置

参照 7.2.2.4 条执行。

#### 7.2.3.5 安装线路避雷器

下列雷击高风险杆塔宜安装线路避雷器：

- $k_{rf} \geq 0.8$  且减小保护角困难的杆塔；
- $k_{rf} \leq 1.2$  且降阻困难或降阻不经济的杆塔；
- 保护角满足表 4 要求但  $k_{rf} \geq 1.2$  的杆塔；
- 接地电阻满足表 5 要求但  $k_{rf} \leq 0.8$  的杆塔。

线路避雷器在杆塔上的安装方式可参考下列要求：

- 220kV 及以下交流单回杆塔宜在三相安装，同塔双回杆塔可选择雷击跳闸率较高的一回安装；
- 330kV 及以上交流线路安装相别宜根据各相雷击跳闸率计算结果确定；
- 直流线路杆塔宜在正极安装。

### 7.3 运行输电线路防雷改造设计

#### 7.3.1 防雷设计原则

对于运行的输电线路，若一般线路的雷击跳闸率运行值高于控制值，应逐塔进行雷击风险评估，对高风险杆塔实施防雷改造；重要线路应逐塔进行雷击风险评估，对高风险杆塔实施防雷改造。

#### 7.3.2 一般线路

##### 7.3.2.1 一般规定

折算至地闪密度 2.78 次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ) 下的线路雷击跳闸率运行值，若超出第 6.1 条表 1 控制值，应根据线路参数、雷电地闪参数、地形参数、防雷装置参数，逐塔进行雷击风险评估，对雷击风险等级为 III、IV 的杆塔宜进行防雷改造。改造措施包括改善接地装置，安装线路避雷器、并联间隙和杆塔避雷针，措施选择流程见附录 H。

##### 7.3.2.2 改善接地装置

雷击高风险杆塔， $k_{rf} \leq 1.2$  时，应降低接地装置的电阻值，每基杆塔不连地线的工频接地电阻，在雷季干燥条件下不宜大于表 7 所列数值。宜采用增加水平接地体长度、在原接地体周边增设新接地体、

## Q/GDW 11452—2015

引外接地的方式降低接地电阻。

### 7.3.2.3 安装线路避雷器

线路避雷器安装的杆塔及方式如下：

- a) 雷击风险等级为 IV 的杆塔宜安装线路避雷器；
- b) 雷击风险等级为 III 的下列杆塔可安装线路避雷器：
  - 1)  $k_{rf} > 1.2$  且一侧档距 600m 以上的杆塔；
  - 2)  $k_{rf} > 1.2$  的耐张转角塔；
  - 3)  $k_{rf} < 0.8$  且降阻困难或降阻不经济的杆塔。
- c) 线路避雷器在杆塔上的安装方式参见 7.2.2.5 条。

### 7.3.2.4 安装并联间隙

未安装线路避雷器的雷击高风险杆塔，可安装并联间隙。对单回线路宜三相安装；对同塔双回线路可选择雷击跳闸率较高的一回线路安装，耐张塔仅在上相安装，直线塔宜三相安装。安装并联间隙后线路绝缘水平不宜降低。

### 7.3.2.5 安装杆塔避雷针

杆塔避雷针安装的杆塔及方式如下：

- a) 220kV 及以上线路的雷击高风险杆塔，若  $k_{rf} > 1.2$ 、接地电阻满足表 7 要求、两侧档距均小于 600m，可安装塔顶避雷针或塔头侧针；
- b) 塔头侧针安装方式一般为：
  - 1) 单回线路宜水平安装在边相导线横担上；
  - 2) 同塔双回线路宜水平安装在中相导线横担上，侧针伸出横担长度应大于 2m。

## 7.3.3 重要线路

### 7.3.3.1 一般规定

应根据线路参数、雷电地闪参数、地形参数、防雷装置参数，逐塔进行雷击风险评估，对雷击风险等级为 III、IV 的杆塔宜进行防雷改造。改造措施包括改善接地装置，安装线路避雷器、杆塔避雷针，措施选择流程见附录 H。

### 7.3.3.2 改善接地装置

参见 7.3.2.2 条。

### 7.3.3.3 安装线路避雷器

线路避雷器安装的杆塔及方式如下：

- a) 雷击风险等级为 D 的杆塔宜安装线路避雷器；
- b) 雷击风险等级为 C 的下列杆塔宜安装线路避雷器：
  - 1)  $k_{rf} > 1.2$  且一侧档距 600m 以上的杆塔；
  - 2)  $k_{rf} > 1.2$  的耐张转角塔；
  - 3)  $k_{rf} < 0.8$  且降阻困难或降阻不经济的杆塔。
- c) 线路避雷器在杆塔上的安装方式参见 7.2.3.5 条。

#### 7.3.3.4 安装杆塔避雷针

330kV 及以上线路的雷击高风险杆塔,若  $k_{rf} > 1.2$ 、接地电阻满足表 8 要求、两侧档距均小于 600m,可安装塔顶避雷针或塔头侧针。塔头侧针安装方式参见 7.3.2.5 条。

附录 A  
(资料性附录)  
广域雷电地闪监测系统

A.1 定位方法

A.1.1 定向法

定向法原理见图 A.1, 利用正交环 (图 A.1a)) 测量雷电辐射电磁波的磁场分量, 得出南北、东西磁场分量幅值, 计算出磁场方向角, 同时利用电场天线测出电场极性, 根据右手螺旋法则, 进一步得出雷电电磁波到达天线的入射角 (图 A.1b)), 即雷电发生的方位角。通常定义正北为  $0^\circ$ , 顺时针方向增加至  $360^\circ$ 。

根据两个及以上探测站测得的方向角, 并结合各个站点的位置坐标, 计算出雷电发生位置、时间等参数 (图 A.1c))。

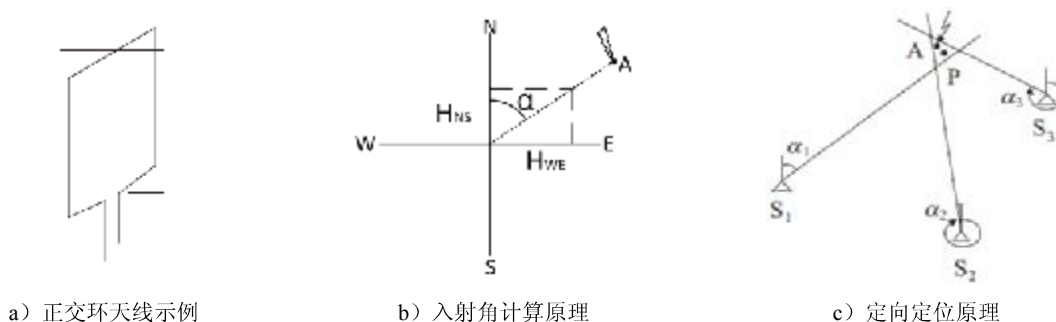


图 A.1 定向法定位原理

图 A.1b) 中, E、S、W、N 分别表示东、南、西、北 4 个方向, A 为雷电地闪实际位置,  $H_{NS}$ 、 $H_{WE}$  分别表示南北向、东西向磁感应强度,  $\alpha$  表示探测站测得的方向角; 图 A.1c) 中,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  代表 3 个探测站,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别表示 3 个探测站测得的方向角, P 为雷电地闪定位计算所得位置。

A.1.2 时差法

时差法是利用分布在不同位置的探测站探测每次雷电地闪时产生的电磁波, 并记录到达时间, 每两站之间可得到一个时间差, 由此确定一条用于雷电地闪定位的双曲线, 不同两站组合可得到另一个时间差及时差双曲线, 两条双曲线的交点即为雷电地闪位置。三站时差定位存在双解区, 利用四站以上时差定位可剔除假解。如图 A.2 所示, 图中 A、B、C 代表探测站, P 为真解, 即计算所得雷电地闪位置, P' 是假解。

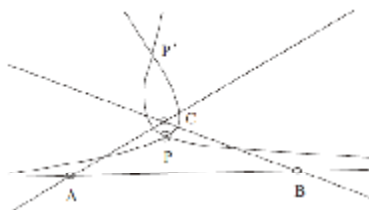


图 A.2 时差法定位原理

### A.1.3 综合法

综合法是利用定向法和时差法各自优点进行混合定位。每个探测站同时监测雷电辐射电磁波的入射角及到达时间。当仅两个探测站接收到数据时，利用一条时差双曲线和两个方位角进行位置计算；当有三个探测站收到数据时，在时差双解区利用方位角剔除假解；当有四个及以上探测站接收到数据时，利用优化时差算法（如最小二乘法等）进行定位计算。广域雷电地闪监测系统采用的是综合法。

### A.2 探测站选址原则

探测站选址应满足下述条件：

- 系统基本组网单元由三个探测站组成，站址分布形式宜采用等边三角形分布。平原地区的站址间距应小于 150km，其他地区的站址间距应小于 100km；
- 站址分布应能确保主要监测目标被有效覆盖，重点区域应在原有基础上增设 1~2 个探测站；
- 站址四周应平坦开阔。如存在遮蔽物，则遮蔽物与探测站净高差  $H$  与两者距离  $L$  之比应满足  $L:H \geq 30$ ，如图 A.3 所示。在遮蔽物不可避免的情况下，应增设站点数量，确保主要监测方向无遮挡；
- 站址电磁噪声的感应强度（mV）应小于探测站量程的 10%。

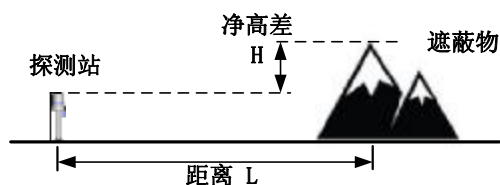


图 A.3 遮挡物与探测站最小距离示意图

**附录 B**  
(资料性附录)  
**输电线路雷击辨识与定位系统**

**B.1 雷击故障辨识原理**

**B.1.1 雷击与非雷击辨识**

雷击故障后，由于大地反射波的极性相反，两者叠加后使峰值衰减加快，波尾变短。因此，雷击闪络电流的行波波尾会较小，实测结果一般在  $20\mu\text{s}$  以内。相对于雷击故障，非雷击故障电流行波波尾时间较长，实测均大于  $20\mu\text{s}$ ，典型的雷击电流行波波尾波形如图 B.1 所示。

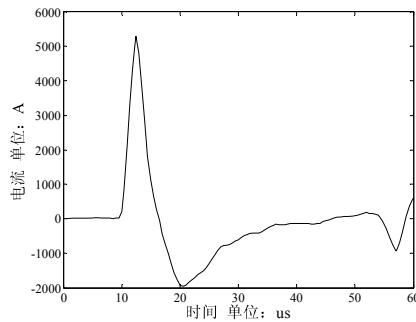
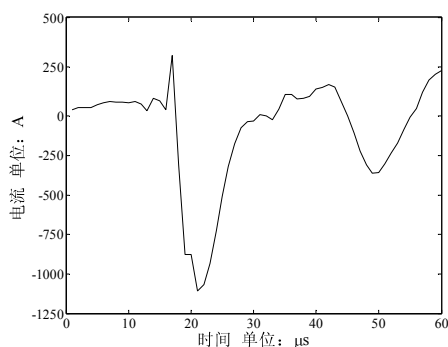


图 B.1 雷击典型电流行波波尾波形图

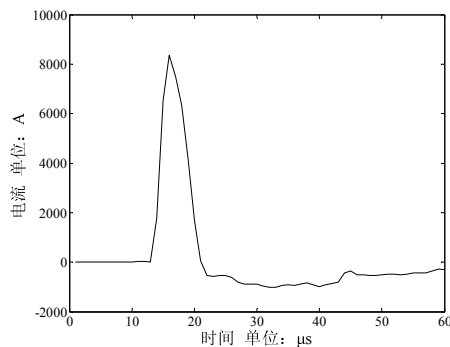
**B.1.2 雷击闪络形式辨识**

雷击杆塔/地线致绝缘闪络前，雷电流先流过地线，会在输电线路各相上感应出一个与雷电流极性相反的脉冲。闪络后，雷电流流过故障相/极。因此，故障相/极暂态电流波形包含闪络时刻前感应出的反极性脉冲、闪络时刻后的雷电流前行波。

绕击导线时故障相暂态电流包括：闪络前流过故障相的雷电流及闪络后流经故障点杆塔入地的雷电流的反射波，二者极性相同，叠加后不会出现反极性脉冲，如图 B.2 所示。



a) 反击典型电流行波波尾波形



b) 绕击闪络典型电流行波波尾波形

图 B.2 雷电反击与绕击典型波形图



## B.2 雷击位置辨识原理

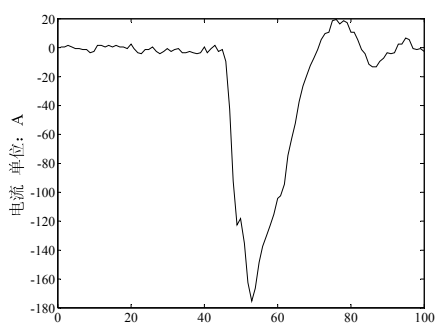
### B.2.1 雷击线路、雷击大地辨识

雷直击于输电线路而未造成闪络时，雷电流一部分通过杆塔接地装置入地，另一部分通过地线向两侧传播，传播过程中在导线上感应出的雷电流波尾较短，实测值小于  $15\mu\text{s}$ 。与直击雷相比，雷击大地时导线上感应出的雷电流波头平缓，波尾较长，实测在  $30\mu\text{s}$  以上，导线上感应出的雷电流典型波形见图 B.3a)。

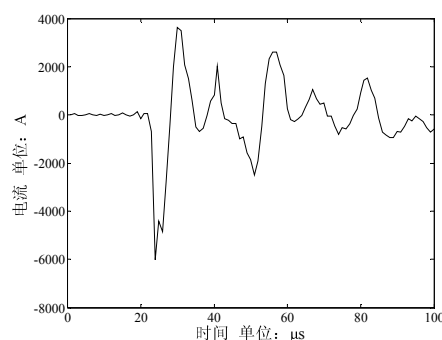
### B.2.2 雷击地线、雷击杆塔、雷击导线辨识

雷电绕击导线时，被击相行波电流幅值很大，经实测一般均在  $500\text{A}$  以上，典型波形见图 B.3b)；另外两相导线感应出的雷电流行波幅值较小，且与被击相电流行波极性相反。

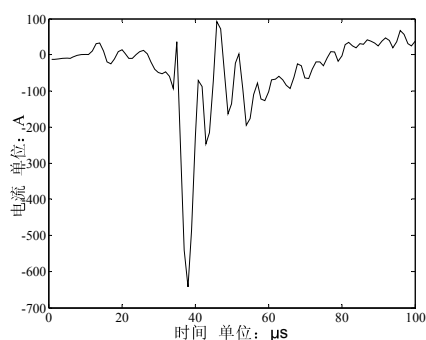
雷击杆塔或地线时，三相导线感应出幅值接近、极性相同的电流行波。雷击杆塔时三相导线感应出的电流行波具有单边震荡特征，典型波形见图 B.3c)；雷击地线时导线感应出的电流行波具有双边震荡特征，典型波形见图 B.3d)。



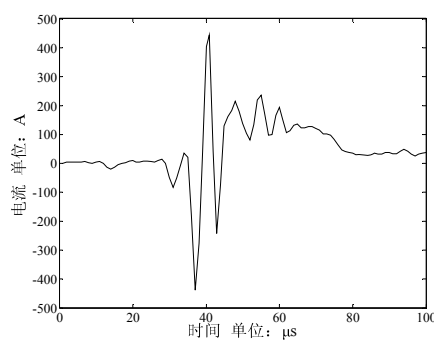
a) 雷击大地时导线感应电流行波典型波形



b) 雷击导线时被击相导线电流行波典型波形



c) 雷击杆塔时导线感应电流行波典型波形



d) 雷击地线时导线感应电流行波典型波形

图 B.3 不同雷击位置下导线电流行波典型波形图

### B.2.3 雷击点定位原理

#### B.2.3.1 双端定位

如图 B.4 所示，M 点和 N 点分别为装有监测终端的监测点，故障发生在 M 和 N 之间的 C 点处。

由故障点 C 产生的初始行波以速度  $v$  沿输电线路向两端变电站传播，到达两侧（M 端和 N 端）的时刻分别为  $t_M$ 、 $t_N$ ，则故障点到两端监测点的距离分别为：

$$L_M = (L + v(t_M - t_N)) / 2 \tag{B.1}$$

$$L_N = (L - v(t_M - t_N)) / 2 \tag{B.2}$$

式 (B.1) 和式 (B.2) 中：

$L_M$  ——故障点至 M 点的距离，单位为米 (m)；

$L_N$  ——故障点至 N 点的距离，单位为米 (m)；

$L$  ——M 点至 N 点的距离，单位为米 (m)；

$v$  ——行波传播速度，单位为米每秒 (m/s)；

$t_M$  ——行波传播至 M 点时刻，单位为秒 (s)；

$t_N$  ——行波传播至 N 点时刻，单位为秒 (s)。

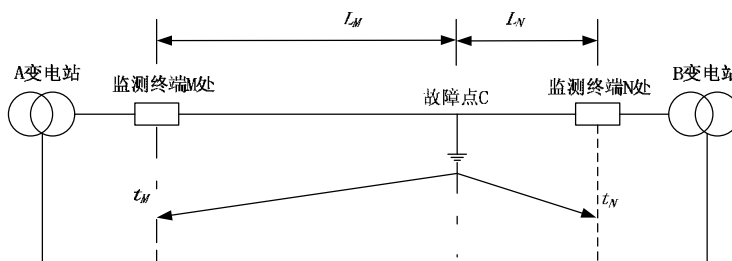


图 B.4 双端行波定位模型

### B.2.3.1 单端定位

线路某点发生故障后，产生的故障行波以速度  $v$  沿输电线路向两端变电站传播，定位原理如图 B.5、图 B.6 所示，故障发生在 C 点，监测终端在 M 点。

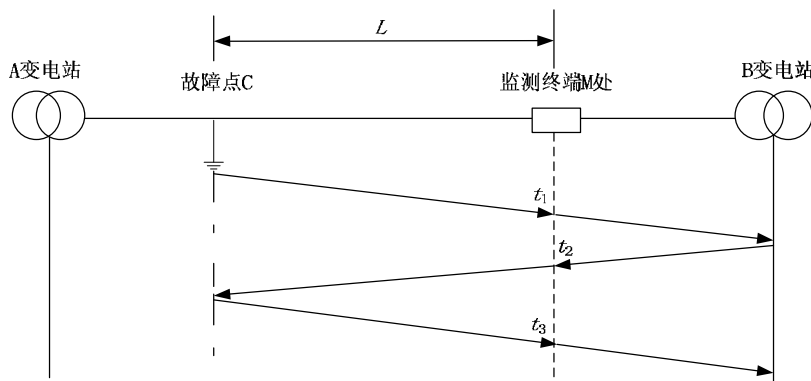


图 B.5 单端行波定位原理图 1

图 B.5 方式下，故障点 C 与监测终端 M 处的距离为：

$$L = \frac{(t_3 - t_2)}{2} v \tag{B.3}$$

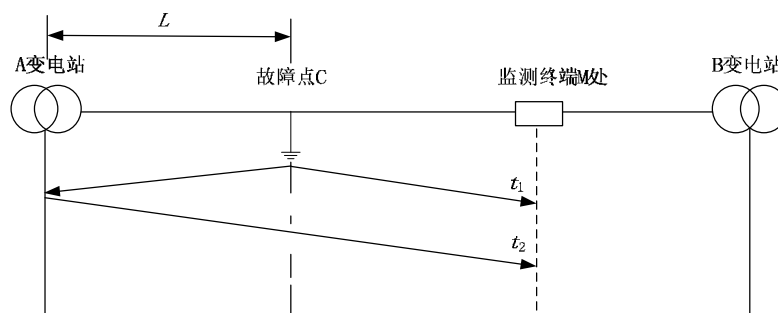


图 B.6 单端行波定位原理图 2

图 B.6 方式下，故障点 C 与 A 变电站的距离为：

$$L = \frac{(t_2 - t_1)}{2} v \quad (\text{B.4})$$

式 (B.3) 和式 (B.4) 中：

$L$  ——M 点至 N 点的距离，单位为米 (m)；

$v$  ——行波传播速度，单位为米每秒 (m/s)；

$t_1$  ——行波第 1 次到达 M 点时刻，单位为秒 (s)；

$t_2$  ——行波第 2 次到达 M 点时刻，单位为秒 (s)；

$t_3$  ——行波第 3 次到达 M 点时刻，单位为秒 (s)。

### B.3 安装原则

监测终端的布置安装应满足下述条件：

- 监测终端应布置在通信信号良好的杆塔；
- 交流线路每个安装点应配置一套（三台）监测终端，分别安装于三相导线（单根子导线）上；  
直流线路每个安装点应配置一套（两台）监测终端，分别安装于正负极导线（单根子导线）上；
- 应依照线路长度配置监测终端，数量宜按表 B.1 配置。

表 B.1 监测终端数量配置原则

线路长度	监测终端数量
0km~20km	1 套
20km~50km	2 套
50km~80km	3 套
80km 以上	每增加 30km 增加 1 套

附录 C  
(资料性附录)  
输电线路雷击光学图像监测

输电线路雷击光学图像监测结果见图 C.1。



图 C.1 输电线路雷击光学图像监测结果

**附录 D**  
(资料性附录)  
**雷电地闪参数统计**

**D.1 雷电流幅值分布统计****D.1.1 区域雷电流幅值分布统计****D.1.1.1 统计方法**

对区域内雷电地闪，统计计算得到总次数  $N_T$ ，按照雷电流幅值以  $\Delta I$  (kA) 为间隔统计  $(0, \Delta I]$ 、 $(\Delta I, 2\Delta I]$ 、 $\dots$ 、 $(I_m - \Delta I, I_m]$ 、 $(I_m, \infty)$  ( $I_m$  宜选择为  $\Delta I$  的整数倍) 各区间的地闪次数  $N_0, N_1, \dots, N_{n-1}, N_n$ ，按公式 (D.1) 计算出雷电流幅值  $I$  取  $0, \Delta I, \dots, I_m - \Delta I, I_m$  时  $P(>I)$  的值，得到离散点  $(0, P(>0))$ 、 $(\Delta I, P(>\Delta I))$ 、 $\dots$ 、 $(I_m - \Delta I, P(>I_m - \Delta I))$ 、 $(I_m, P(>I_m))$ ，以 5.1 条公式 (2) 为原型将离散点进行曲线拟合，得出参数  $a$ 、 $b$  的拟合值，拟合表达式即为该区域的雷电流幅值累积概率分布公式。 $N_T$  越大、 $I_m$  取值越大、 $\Delta I$  取值越小，拟合出的曲线误差越小，越能反映雷电流幅值分布的实际情况， $I_m$  取值宜根据该区域出现的最大雷电流幅值确定，一般可选择  $I_m=400$ 、 $\Delta I=2$ 。

$$P(>I) = \frac{\sum_{k=I/\Delta I}^n N_k}{N_T} \quad (\text{D.1})$$

式 (D.1) 中：

$P(>I)$  ——幅值大于  $I$  的雷电流幅值概率统计值；

$I$  ——雷电流幅值，单位为千安 (kA)；

$\Delta I$  ——雷电流幅值统计间隔，单位为千安 (kA)；

$N_k$  ——统计的雷电地闪中，雷电流幅值处于上述相应区间的地闪次数，单位为次；

$N_T$  ——统计的雷电地闪总次数，单位为次。

**D.1.1.2 区域雷电流幅值分布实例**

2013 年~2014 年国网各省级电力公司雷电流幅值累积概率公式  $a$ 、 $b$  值见表 D.1。

**表 D.1 2013 年~2014 年雷电流幅值累积概率分布公式  $a$ 、 $b$  值**

区域	省份	a	b
华北	冀北	35.962	2.816
	河北	39.488	2.939
	北京	34.855	2.506
	天津	37.738	2.801
	山西	36.217	3.141
	山东	35.977	2.839
华东	上海	18.727	1.722
	浙江	25.210	2.237

表 D.1 (续)

区域	省份	a	b
华东	江苏	28.140	2.251
	安徽	32.389	2.501
	福建	23.643	2.374
华中	湖北	36.127	2.840
	江西	34.118	2.667
	河南	35.546	2.744
	湖南	30.547	2.363
东北	蒙东	30.485	2.767
	辽宁	25.799	2.503
	吉林	27.708	2.717
	黑龙江	33.693	2.757
西北	陕西	39.422	2.944
	甘肃	35.202	2.557
	宁夏	45.277	2.961
	青海	24.298	2.253
	新疆	29.148	2.739
西南	四川	38.679	2.607
	重庆	39.798	3.115
	西藏	25.240	2.102

## D.1.2 线路走廊雷电流幅值分布统计

### D.1.2.1 统计方法

雷电流幅值分布随线路走廊所经区域呈现差异性，宜沿线路走廊分段统计拟合。但其分布规律的准确提取依赖于雷电地闪监测数据量，因此应根据雷电地闪监测数据量合理划分统计区段，其中每个区段包含多个网格（网格统计法见 D.2.2.1 条）。线路走廊的雷电流幅值分布按下述方法统计：

- 从未遍历的首个网格开始，按网格编号升序依次遍历网格，计算已遍历网格内地闪次数之和  $N_L$ ，直至  $N_L \geq 2000$  时，将已遍历网格作为一个统计区段；
- 对线路余下部分，重复 1) 依次划分得出余下的各统计区段，如遍历至最大编号网格仍不满足  $N_L \geq 2000$  时，则将本统计区段与上一统计区段合并为一个统计区段，区段划分结束；
- 统计拟合得出各统计区段内雷电流幅值累积概率分布，方法与区域的统计拟合方法相同，见 D.1.1.1 条；
- 如全线路所有网格内地闪次数之和  $N_L < 2000$ ，则以线路走廊所经各地级市区域的雷电流幅值累积概率分布作为线路走廊的分布，统计拟合方法见 D.1.1.1 条。

### D.1.2.2 线路走廊雷电流幅值分布实例

±500kV 葛南直流线路走廊分布见图 D.1，各统计区段 2005 年~2010 年的雷电流幅值累积概率分布公式的 a、b 值见表 D.2。



图 D.1 ±500kV 葛南直流线路走廊

表 D.2 2005 年~2010 年葛南直流各统计区段的雷电流幅值累积概率分布公式的 a、b 值

统计区段编号	a	b
1	35.8	2.9
2	24.2	2.2
3	17.2	1.8

## D.2 地闪密度统计

### D.2.1 区域地闪密度统计

#### D.2.1.1 统计方法

区域地闪密度统计一般采用网格法。将被统计区域划分为  $n$  个经纬度大小相等的网格。若网格中属于统计范围内的地域面积小于一个标准网格面积，仍记为一个标准网格，如图 D.2 所示。可按照表 D.3 推荐的网格面积进行地闪密度统计。

各网格面积记为  $S_1$ 、 $S_2$ 、...、 $S_n$ ，网格总面积  $S_a = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ ，相应各网格内的地闪次数分别记为  $N_1$ 、 $N_2$ 、...、 $N_n$ ，网格内总地闪次数  $N_a = N_1 + N_2 + \dots + N_n$ 。

第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 个网格内地闪密度值  $N_{gk}$  可按公式 (D.1) 计算：

$$N_{gk} = \frac{N_k}{TS_k} \quad (\text{D.1})$$

区域的地闪密度的平均值  $N_{gav}$  可按公式 (D.2) 计算：

$$N_{gav} = \frac{N_a}{TS_a} \quad (\text{D.2})$$

式 (D.1) 和 (D.2) 中：

$N_{gk}$  ——第  $k$  个网格地闪密度，单位为次每平方公里年 (次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ))；

$N_{gav}$  ——区域平均地闪密度，单位为次每平方公里年 (次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ))；

- $T$  ——统计时间，单位为年 (a)；
- $S_k$  ——第  $k$  个网格面积，单位为平方公里 ( $\text{km}^2$ )；
- $N_k$  ——统计时间  $T$  内第  $k$  个网格中发生的地闪次数，单位为次；
- $S_a$  ——统计区域的面积，单位为平方公里 ( $\text{km}^2$ )；
- $N_a$  ——统计时间  $T$  内统计区域中发生的地闪次数，单位为次。

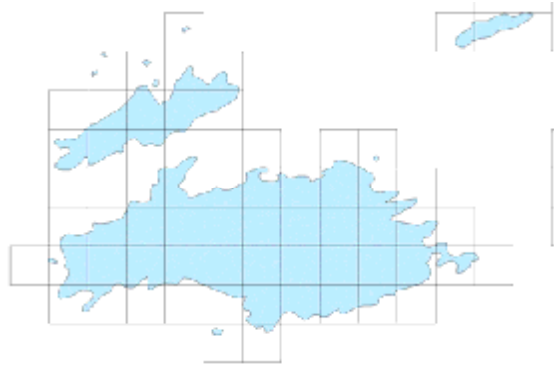


图 D.2 区域网格划分示意图

表 D.3 网格面积推荐值

统计范围	网格面积
国家电网管辖范围	$0.2^\circ \times 0.2^\circ$ (约 $20\text{km} \times 20\text{km}$ )
国家电网各分部管辖范围	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (约 $5\text{km} \times 5\text{km}$ )
省级电力公司管辖范围	$0.02^\circ \times 0.02^\circ$ (约 $2\text{km} \times 2\text{km}$ )
地市级电力公司管辖范围	$0.01^\circ \times 0.01^\circ$ (约 $1\text{km} \times 1\text{km}$ )

#### D.2.1.2 区域地闪密度实例

2005 年~2014 年国网各省电网范围内地闪密度平均值见表 D.4。

表 D.4 2005 年~2014 年各省电网范围内地闪密度平均值

区域	省份	地闪密度平均值 次/ ( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )
华北	冀北	1.81
	河北	1.82
	北京	2.56
	天津	2.75
	山西	2.12
	山东	2.23
华东	上海	7.06
	浙江	6.75
	江苏	5.19
	安徽	4.74
	福建	4.60



表 D.4 (续)

区域	省份	地闪密度平均值 次/ (km <sup>2</sup> ·a)
华中	湖北	2.67
	江西	4.51
	河南	2.19
	湖南	2.54
东北	蒙东	0.45
	辽宁	1.59
	吉林	0.75
	黑龙江	0.35
西北	陕西	1.08
	甘肃	0.19
	宁夏	0.23
	青海	0.16
	新疆	0.02
西南	四川	2.33
	重庆	3.36
	西藏	0.19

## D.2.2 线路走廊地闪密度统计

### D.2.2.1 统计方法

线路走廊地闪密度统计一般也采用网格法，如图 D.3 所示。可按照表 D.3 推荐的网格面积进行地闪密度统计。

各网格地闪密度与全线地闪密度平均值分别按公式 (D.1)、(D.2) 计算。



图 D.3 线路走廊网格法划分示意图

表 D.5 网格面积推荐值

统计范围	网格面积
直流线路	$0.06^{\circ} \times 0.06^{\circ}$ (约 $6\text{km} \times 6\text{km}$ )
500kV 及以上交流线路	$0.06^{\circ} \times 0.06^{\circ}$ (约 $6\text{km} \times 6\text{km}$ )
220kV~330kV 交流线路	$0.04^{\circ} \times 0.04^{\circ}$ (约 $4\text{km} \times 4\text{km}$ )
110kV 交流线路	$0.02^{\circ} \times 0.02^{\circ}$ (约 $2\text{km} \times 2\text{km}$ )

## D.2.2.2 线路走廊地闪密度分布实例

2014 年浙北-福州 1000kV 交流线路走廊的地闪密度分布见图 D.4 和表 D.6。

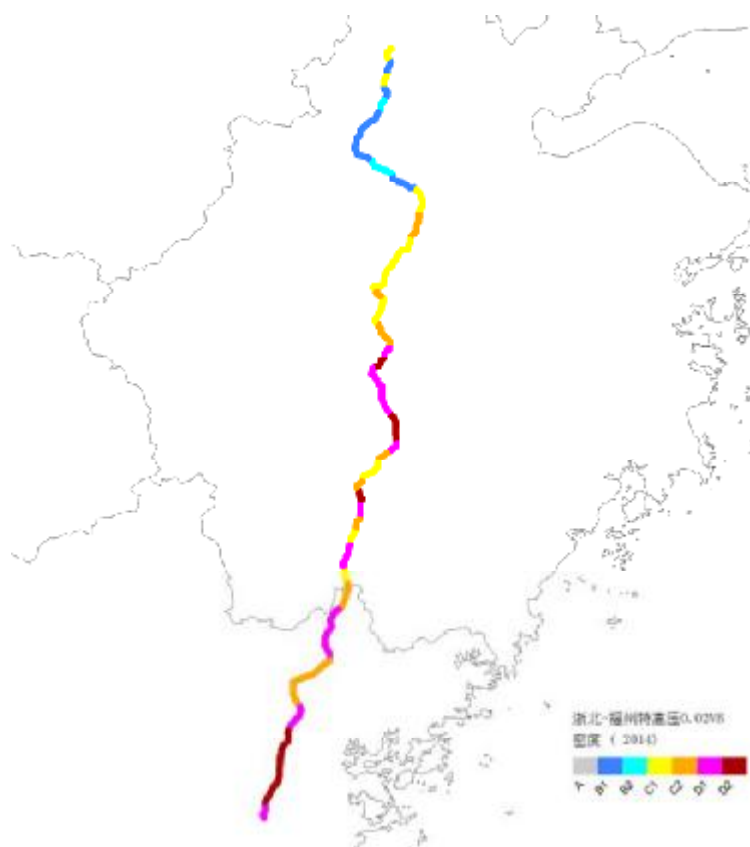


图 D.4 2014 年浙北 ■ 福州特高压线路走廊的地闪密度分布

表 D.6 2014 年浙北 ■ 福州特高压线路走廊各区段的地闪密度值

网格序号	杆塔区段	$N_g$ (次/ (km <sup>2</sup> ·a))	网格序号	杆塔区段	$N_g$ (次/ (km <sup>2</sup> ·a))
1	1#-5#	2.92	35	111#-113#	11.21
2	6#-7#	1.59	36	114#-119#	8.67
3	8#-10#	3.65	37	120#-121#	5.72
4	11#-15#	1.39	38	122#-124#	3.58
5	16#-20#	2.27	39	125#-127#	4.25

表 D.6 (续)

网格序号	杆塔区段	$N_g$ (次/ (km <sup>2</sup> ·a))	网格序号	杆塔区段	$N_g$ (次/ (km <sup>2</sup> ·a))
6	21#-23#	1.80	40	128#-132#	5.48
7	24#-28#	1.57	41	133#-135#	13.89
8	29#-31#	1.28	42	136#-139#	9.97
9	32#-33#	1.87	43	140#-141#	5.33
10	34#-37#	2.03	44	142#-146#	4.95
11	38#-40#	2.63	45	146#-150#	10.11
12	41#-42#	1.75	46	151#-155#	8.60
13	43#-45#	1.85	47	156#-160#	4.09
14	46#-46#	2.80	48	161#-163#	6.66
15	47#-49#	3.56	49	164#-165#	6.66
16	50#-51#	5.12	50	166#-166#	9.35
17	52#-54#	5.26	51	167#-168#	8.14
18	55#-56#	4.37	52	169#-169#	8.65
19	57#-58#	3.24	53	170#-171#	8.47
20	59#-60#	4.86	54	172#-173#	7.65
21	61#-62#	4.26	55	174#-175#	7.29
22	63#-70#	3.45	56	176#-176#	7.76
23	71#-73#	5.72	57	177#-177#	6.64
24	74#-76#	3.85	58	178#-179#	7.85
25	77#-79#	4.89	59	180#-181#	10.84
26	80#-86#	6.00	60	182#-183#	9.37
27	86#-90#	5.83	61	184#-185#	12.27
28	91#-92#	8.94	62	186#-188#	13.18
29	93#-96#	11.12	63	189#-189#	11.34
30	97#-101#	8.46	64	190#-190#	12.45
31	102#-104#	9.41	65	191#-192#	16.35
32	105#-106#	8.52	66	193#-193#	11.19
33	107#-107#	9.25	67	194#-198#	10.40
34	108#-110#	13.22	均值		6.67

### D.3 地闪密度分布图绘制

#### D.3.1 绘制方法与分级原则








地闪密度分布图是根据统计对象区域内各网格中的地闪密度值进行分级(分级原则见表 D.7),对不同等级采用不同颜色渲染,通过平滑处理、剔除网格棱角形成的图谱。

表 D.7 中, R、G、B 的数值范围从 0 到 255, 分别表示颜色中红色、绿色、蓝色的亮度大小, 0 为

Q/GDW 11452—2015

最小、255 为最大。

表 D.7 地闪密度等级划分及渲染颜色

雷区	层级	地闪密度值 (次/ (km <sup>2</sup> ·a))	渲染颜色
少雷区	A	<0.78	灰色 (R=204、G=204、B=204) 
中雷区	B1	0.78~2.0	蓝色 (R=60、G=130、B=255) 
	B2	2.0~2.78	青色 (R=0、G=255、B=255) 
多雷区	C1	2.78~5.0	黄色 (R=255、G=255、B=0) 
	C2	5.0~7.98	橙色 (R=255、G=170、B=0) 
强雷区	D1	7.98~11.0	紫红 (R=255、G=0、B=255) 
	D2	≥11.0	深红 (R=170、G=0、B=0) 

### D.3.2 2013 年国家电网覆盖区域地闪密度分布图

2013 年国家电网覆盖区域地闪密度分布图见图 D.5。

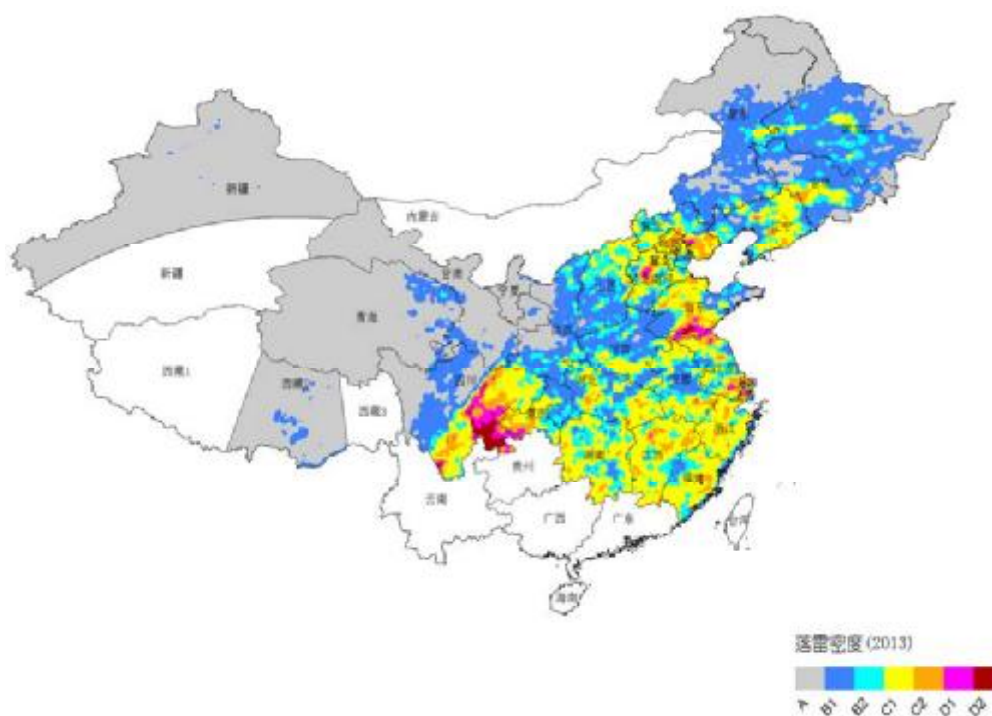


图 D.5 2013 年国家电网公司管辖区域地闪密度分布图

附录 E  
(资料性附录)  
地形参数提取

地形参数可由地面倾角、几何多面体等方式表征,在使用电气几何模型计算绕击闪络率时,采用地面倾角。本附录给出杆塔处地面倾角的提取方法和根据地面倾角确定地形类型的方法。

如图 E.1,过杆塔中心点  $O$  作垂直于线路走向的二维平面。在平面内以点  $O$  为中心左右各水平延伸 100m,如图 E.2 所示,每隔 25m 设置一个扫描点(点 1~8),结合点  $O$  共提取 9 个点海拔高度,依次计算出点 1~8 处的地面倾角  $\theta_i$  ( $i=1、2、3、4、5、6、7、8$ )。图 E.2 中,连接扫描点与点  $O$  的连线与水平面夹角即为该点处地面倾角。

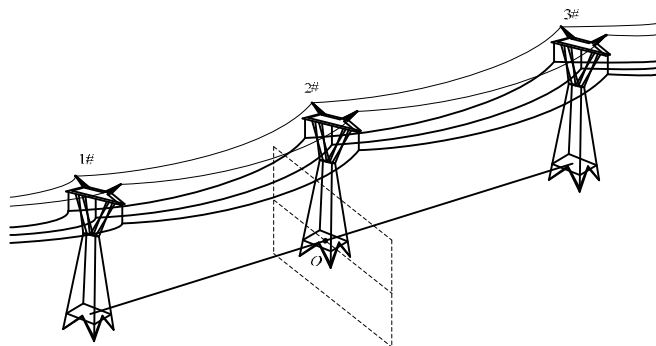


图 E.1 地形参数提取侧视图

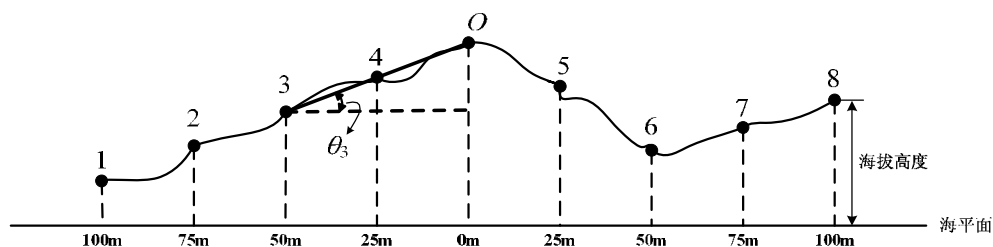


图 E.2 地形参数提取截面图

雷击闪络率计算时使用的地面倾角值  $|\theta|$  按公式 (E.1) 计算。

$$|\theta| = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 |\theta_i| \quad (\text{E.1})$$

获取地面倾角值后,还应分析其正负。地面倾角的符号定义如图 E.3 所示,其中  $h_1$ 、 $h_2$  均为海拔高度,  $\theta$  为  $h_2$  相对  $h_1$  处的地面倾角。

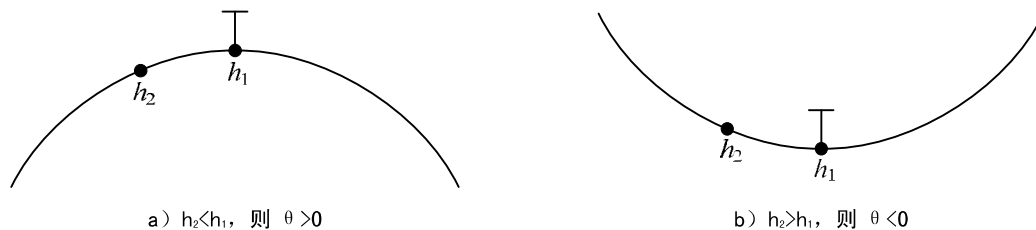


图 E.3 地面倾角正负号判断图

根据地面倾角符号，可划分地形。雷击闪络率计算中一般将地形分为山顶、沿坡、山谷和平地，本标准用杆塔左右各 50m 处获得的地面倾角（即  $\theta_3$  和  $\theta_6$ ）来确定地形类型，划分方法如图 E.4 所示。

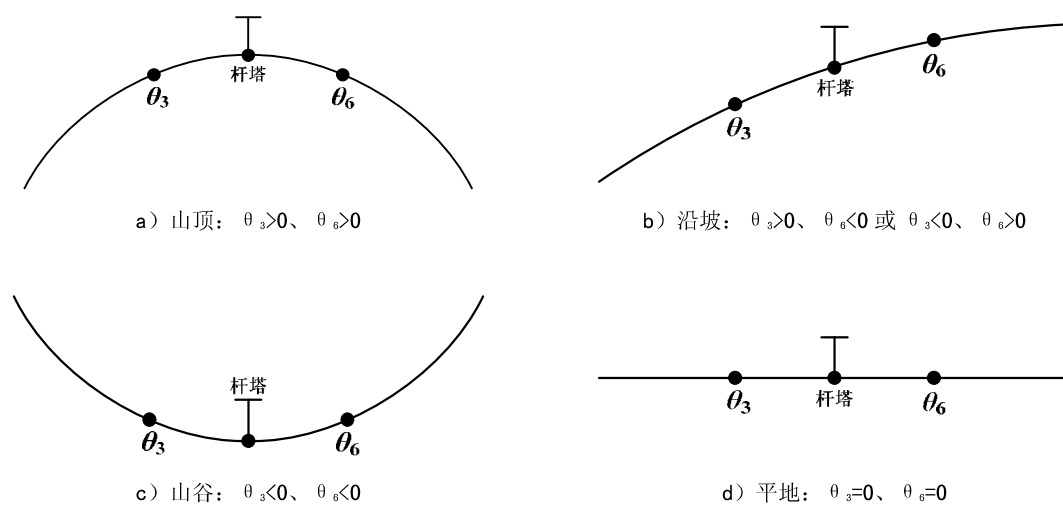


图 E.4 地形判断示意图

**附录 F**  
(资料性附录)  
**线路参数和防雷装置参数表**

**F.1 线路参数表****F.1.1 杆塔参数表**

顺线路面向杆塔编号大号侧，确定左右方向。单基杆塔参数表见表 F.1。

**表 F.1 单基杆塔参数表**

参数名	单位	填写说明	
杆塔编号	—	—	
杆塔中心桩经度	°	—	
杆塔中心桩纬度	°	—	
杆塔中心桩海拔高度	m	—	
呼高	m	—	
根开	m	—	
A 相高度	m	横担处导线外侧绝缘子（串）挂点高度	①直流线路按极 I、极 II 填写； ②多回线路，根据线路回数逐回填写。
B 相高度	m		
C 相高度	m		
A 相中距	m	横担处导线外侧绝缘子（串）挂点至塔身中轴线距离	
B 相中距	m		
C 相中距	m		
导线排列方式	—	对单回线路，根据实际相别从左至右依次填写相别符号，如“ABC”；对同塔双回线路，按照先左回再右回、从上至下的顺序，依次填写相别符号，如“ABCCBA”。	
地线高度	m	地线挂点高度	根据地线根数，逐根填写。
地线中距	m	地线挂点至塔身中轴线距离	
接地装置电阻值	Ω	—	
杆塔中心桩附近土壤电阻率	Ω·m	—	

**F.1.2 导地线参数表**

导地线参数表见表 F.2。

**表 F.2 导地线参数表**

参数名	单位
导线型号	—

表 F.2 (续)

参数名	单位
分裂数	—
分裂间距	mm
地线型号	—

## F.1.3 绝缘子（串）参数表

单基杆塔绝缘子（串）参数表见表 F.3，对于多回线路，根据线路回数逐回填写。

表 F.3 单基杆塔绝缘子（串）参数表

参数名	单位	填写说明
A 相导线绝缘子（串）	型号	—
	片数	片
	电弧距离	mm
	悬挂方式	—
B 相导线绝缘子（串）	型号	—
	片数	片
	电弧距离	mm
	悬挂方式	—
C 相导线绝缘子（串）	型号	—
	片数	片
	电弧距离	mm
	悬挂方式	—
地线绝缘子（串）	—	提供绝缘子（串）设计图

## F.1.4 档距参数表

单基杆塔档距参数表见表 F.4。

表 F.4 单基杆塔档距参数表

杆塔编号	参数名	单位
	小号侧档距	m
	大号侧档距	m
	雷电气象条件下的小号侧导线弧垂	m
	雷电气象条件下的大号侧导线弧垂	m
	雷电气象条件下的小号侧地线弧垂	m
	雷电气象条件下的大号侧地线弧垂	m



## F.2 防雷装置参数

防雷装置包括：线路避雷器、并联间隙、塔顶避雷针、塔头侧针、耦合地线。单基杆塔防雷装置参数表见表 F.5。

表 F.5 单基杆塔防雷装置参数表

杆塔编号及回路信息	安装位置	防雷装置	备注	填写说明
	A 相			①“防雷装置”根据安装情况填写“线路避雷器”、“并联间隙”、“塔头侧针”，并提供相应装置的设计图； ②直流线路按极 I、极 II 填写防雷装置安装情况；多回线路，根据线路回数逐回填写； ③多回线路，根据线路回数逐回填写； ④回路、相别/极性应与表 F.1 一致。
	B 相			
	C 相			
	其他			①“防雷装置”根据安装情况填写“塔顶避雷针”、“塔头侧针”、“耦合地线”； ②需在“备注”中填写确切的安装点及数量。

附录 G  
(资料性附录)  
输电线路雷击跳闸率相关计算方法

G.1 电气几何模型

EGM 利用击距几何作图对雷电击中目标物进行判断，其基本原理为：雷电下行先导通道头部到达目标物体的临界击穿距离（简称击距）以前，击中点是不确定的，先到达哪一物体的击距范围，则向这一物体放电。

图 G.1 是电气几何模型计算线路导、地线引雷宽度示意图，图中 ABCE 是利用地线击距  $r_s$ ，导线击距  $r_c$  和大地击距  $r_g$  作图绘制得到的连续曲线，当雷电先导头部落入 AB 弧面，放电将击向地线，使导线得到保护，称弧 AB 为保护弧。若先导头部落入 BC 弧面，则击中导线，称弧 BC 为暴露弧。若先导头部落入 CE 平面，则击中大地，故称 CE 平面为大地捕雷面。随着雷电流幅值增大，暴露弧 BC 逐渐缩小，当雷电流幅值增大到最大绕击导线电流  $I_{max}$  时暴露弧 BC 缩小为 0，即不再发生绕击。

利用电气几何模型计算线路导、地线的引雷宽度时，对应雷电先导垂直于大地入射，单侧地线的引雷宽度  $D_S$  为保护弧 AB 在大地上的垂直投影长度，即线段 A'B' 的长度；单侧导线的引雷宽度  $D_C$  为暴露弧 B'C' 在大地上的垂直投影长度，即线段 B'C' 的长度。更一般地，当雷电先导以角度  $\Psi$  入射时，应以角度为  $\Psi$  的射线做弧段在大地上的投影，单侧地线的引雷宽度  $D_S$  为线段 A''B'' 的长度，导线引雷宽度  $D_C$  为线段 B''C'' 的长度。

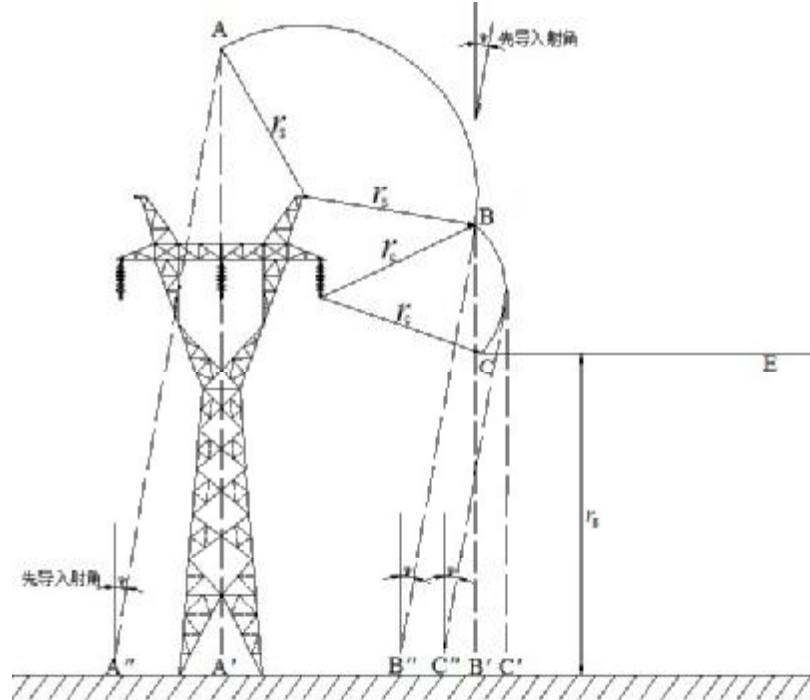


图 G.1 电气几何模型计算导、地线引雷宽度示意图

地线击距  $r_s$ ，导线击距  $r_c$  和大地击距  $r_g$  的计算公式见公式 (G.1) 或公式 (G.2)。

$$\begin{aligned}
 r_s &= 10I^{0.65} \\
 r_c &= 1.63(5.015I^{0.578} - 0.001U_{ph})^{1.125} \\
 r_g &= \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_{c.av})]I^{0.65} & (h_{c.av} < 40m) \\ 5.5I^{0.65} & (h_{c.av} \geq 40m) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{G.1}$$

$$\begin{aligned}
 r_s &= 10I^{0.65} \text{ 或 } r_s = 6.72I^{0.8} \\
 r_c &= r_s \\
 r_g &= \beta_g r_s, \beta_g = \begin{cases} 0.8 & \text{(单回线路)} \\ 0.8 & \text{(双回线路下相导线)} \\ 0.7 & \text{(双回线路上、中相导线)} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{G.2}$$

式中：

- $I$ ——雷电流幅值，单位为千安（kA）；
- $r_c$ ——雷电对导线的击距，单位为米（m）；
- $r_s$ ——雷电对地线的击距，单位为米（m）；
- $r_g$ ——雷电对大地的击距，单位为米（m）；
- $U_{ph}$ ——导线上工作电压瞬时值，单位为千伏（kV）；
- $h_{c.av}$ ——导线对地平均高度，单位为米（m）；
- $\beta_g$ ——击距系数。

**G.2 先导发展模型**

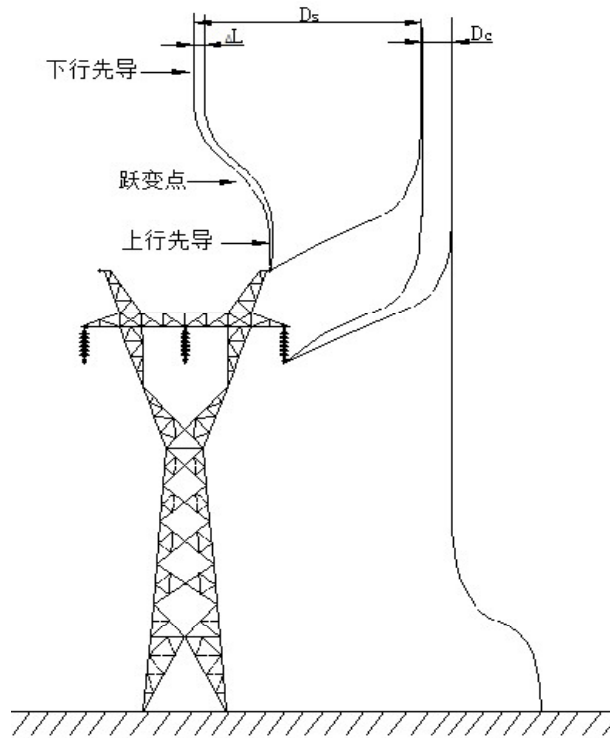


图 G.2 先导发展模型计算导、地线引雷宽度示意图

先导发展模型通过模拟雷电下行先导发展，上行先导起始、发展和先导末跃过程对雷电击中的目标物进行判断，利用该模型计算线路导、地线的引雷宽度时，可假设雷电下行先导起始位置在线路横截面中均匀分布，按照间隔  $\Delta L$ （宜小于等于 0.1m）循环模拟计算先导发展过程，判断雷电击中对象，利用扫描的方式划分导线单侧引雷宽度  $D_C$  和地线单侧引雷宽度  $D_S$ ，如图 G.2 所示。

雷电先导发展过程模拟的步骤如图 G.3 所示，计算过程如下：

- a) 参数初始化包括时间步长  $\Delta t$ ，地线空间坐标，雷云高度，下行先导初始长度和电荷分布，以及下行先导与线路的相对坐标，其中，时间步长  $\Delta t$  宜小于等于  $2\mu s$ ，雷云高度可取 2km，下行先导初始长度可取 10m，电荷分布可采用公式 (G.3) 计算；

$$\begin{aligned} r(l) &= a_0 \left( 1 - \frac{l}{H - z_0} \right) G(z_0) I_p + \frac{I_p (a + bl)}{1 + cl + dl^2} H(z_0) \\ G(z_0) &= 1 - (z_0 / H) \\ H(z_0) &= 0.3a + 0.7b \\ a &= e^{-(z_0 - 10)/75} \\ b &= G(z_0) = 1 - (z_0 / H) \end{aligned} \quad (G.3)$$

式中：

$\rho(l)$  ——先导通道中距离先导头部为  $l$ （单位 m）处的电荷密度，单位为库每米（C/m）；

$H$  ——雷云高度，单位为米（m）；

$z_0$  ——先导头部对地高度（ $z_0 > 10m$ ），单位为米（m）；

$I_p$  ——回击电流幅值，单位为千安（kA）；

系数可取  $a_0 = 1.476 \times 10^{-5}$ ， $\alpha = 4.857 \times 10^{-5}$ ， $b = 3.9097 \times 10^{-6}$ ， $c = 0.522$ ， $d = 3.73 \times 10^{-3}$ 。

- b) 下行先导发展速度取  $2 \times 10^5 m/s$ ，在上行先导起始前，垂直向下发展，导、地线上行先导起始后向最大电场强度方向发展，下行先导电荷分布可采用公式 (G.3) 表示；
- c) 当导、地线电位达到先导起始电压  $U_c$  时，上行先导产生，单导线和地线先导起始电压  $U_c$  计算公式见公式 (G.4)，分裂导线先导起始电压  $U_c$  计算公式见公式 (G.5)；

$$U_c = \frac{2247}{1 + \frac{5.15 - 5.49 \ln r_c}{h_e \ln 2 h_e / r_c}} \quad (G.4)$$

$$U_c = \frac{2247}{1 + \frac{5.15 - 5.49 \ln a_e}{h_e \ln 2 (h_e + a_e) / a_e}} \quad (G.5)$$

式中：

$U_c$  ——上行先导起始电压，单位为千伏（kV）；

$h_e$  ——导线高度，单位为米（m）；

$r_c$  ——导、地线半径，单位为米（m）；

$a_e$  ——分裂导线等效半径，单位为米（m）。

- d) 上行先导发展速度可取  $0.8 \times 10^5 m/s$ ，向最大电场强度方向发展；

- e) 当下行先导头部与导线（地线）或导线（地线）上行先导头部之间平均电场强度达 500kV/m，下行先导与导线（地线）或导线（地线）上行先导之间发生跃变，雷电击中导线（地线）；当下行先导头部与大地之间平均电场强度达 750kV/m，下行先导与大地之间发生跃变，雷电击中大地。

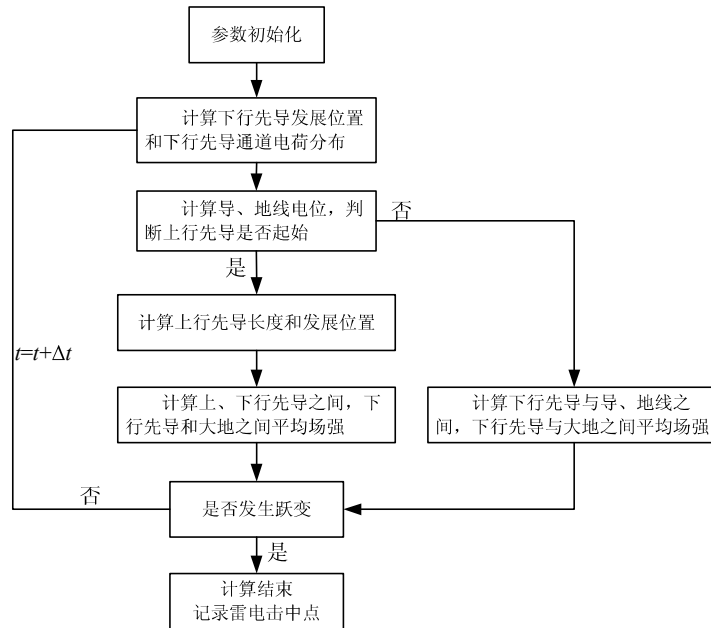


图 G.3 雷电先导发展过程模拟的步骤

### G.3 线路雷电过电压计算模型

#### G.3.1 雷击模型

雷击可采用模型采用波头时间为  $2.6\mu\text{s}$ ，半峰值时间为  $50\mu\text{s}$  的双斜角波冲击电流源模拟，雷电回击通道阻抗等值为冲击电流源并联电阻。

计算绕击耐雷水平时，冲击电流注入点为导线；计算反击耐雷水平时，偏严格取冲击电流注入点在杆塔顶部；精确计算反击耐雷水平时，可设冲击电流注入点位于地线在档距内的不同位置，反复计算反击耐雷水平后取平均值。

计算绕击耐雷水平时雷电通道等值电阻的阻值取  $800\Omega$ ，计算反击耐雷水平时取  $300\Omega$ 。精确计算时，雷电通道等值电阻的阻值可根据雷电流幅值，按照 GB/T 50064-2014 中图 D.1.4 的要求选取。

#### G.3.2 反击计算时导线感应分量

进行雷电反击过电压计算时，应考虑雷电放电通道在导线上产生的感应电压，即导线感应分量。导线感应分量可采用标准 GB/T 50064-2014 中式 D.1.6-1 计算。

#### G.3.3 线路模型

线路模型满足下述条件：

- 线路杆塔宜采用分段波阻抗等值；
- 导地线宜采用平行多导体传输线模型等值，计算时应考虑集肤效应造成的传输线参数频变；
- 杆塔接地装置宜采用集中参数电阻等值，阻值等于杆塔冲击接地电阻阻值。杆塔冲击电阻阻值，可根据 GB 50065-2014 中式 5.1.7 条之规定，由杆塔工频接地电阻阻值换算得出。

#### G.3.4 绝缘闪络判据

对于 110kV 和 220kV 交流线路，可采用绝缘间隙雷电冲击 50% 放电电压 ( $U_{50\%}$ ) 作为绝缘闪络判

## Q/GDW 11452—2015

据，当绝缘间隙两端电压超过其  $U_{50\%}$ ，即判定绝缘闪络。

对于 220kV 以上电压等级的交流线路和直流线路，可采用相交法或先导法判断绝缘闪络。

相交法通过比较绝缘间隙两端电压波形和绝缘间隙的雷电冲击伏秒特性曲线来判断闪络是否发生，如电压波形与秒特性曲线直接相交或电压波形峰值的水平延长线与伏秒特性曲线相交，均认为发生闪络。绝缘间隙的伏秒特性曲线可通过实测获得，当无实测数据时可根据公式 (G.6) 绘制。

$$U_{s-t} = 400l + 710 \frac{l}{t^{0.75}} \quad (\text{G.6})$$

式中：

$U_{s-t}$  ——放电电压，单位为千伏 (kV)；

$l$  ——绝缘间隙距离，单位为毫米 (mm)；

$t$  ——放电时间，单位为微秒 ( $\mu\text{s}$ )。

先导法是通过绝缘间隙中先导发展长度来判断绝缘是否发生闪络，如先导贯穿间隙，即先导长度  $\geq$  间隙长度时，即认为发生闪络，先导发展速度计算公式为公式 (G.7)。

$$\frac{dL}{dt} = ku(t) \left[ \frac{u(t)}{D - L} - E_0 \right] \quad (\text{G.7})$$

式中：

$L$  ——先导已发展长度，单位为米 (m)；

$k$  ——经验系数， $\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{kV}^2)$ ；在  $E_0$  取值为 500 时， $k$  取 1.1；

$u(t)$  ——绝缘间隙承受的电压，单位为千伏 (kV)；

$D$  ——绝缘间隙长度，单位为米 (m)；

$E_0$  ——先导起始场强，单位为千伏每米 (kV/m)，取 500kV/m。

附录 H  
 (规范性附录)  
 防雷措施选择流程

防雷措施选择流程见图 H.1。

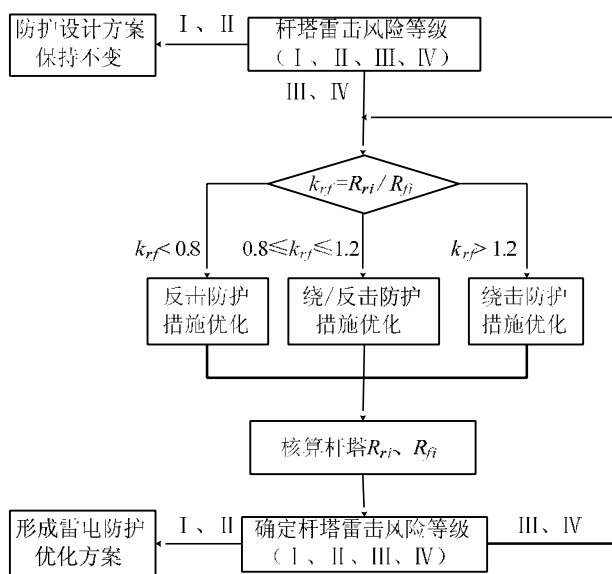


图 H.1 防雷措施选择流程





# 架空输电线路防雷导则

编 制 说 明

## 目 次

1 编制背景 .....	47
2 编制主要原则 .....	47
3 与其他标准文件的关系 .....	47
4 主要工作过程 .....	47
5 标准结构和内容 .....	48
6 条文说明 .....	48

## 1 编制背景

本标准依据《国家电网公司关于下达 2015 年度公司技术标准制修订计划的通知》（国家电网科[2015]4 号）的要求编写。

本标准的编制背景是由于架空输电线路防雷设计长期采用标准化方法，无法精细化考虑雷电地闪、地形、线路参数等雷击风险影响因素，防雷措施针对性和经济性有待提高。基于雷电地闪监测和雷击风险评估技术，采用标准化和差异化相结合的设计方法，可因地制宜实施雷电防护，实现优化配置。为明确广域雷电地闪监测和输电线路雷击监测方法，雷电地闪、地形、线路、防雷装置参数的获取方法，输电线路雷击风险评估方法，提出标准化和差异化相结合的防雷设计原则及防护措施选择方法，特制定本标准。

本标准编制主要目的是用于指导交流 110kV~1000kV、直流±400kV~±800kV 架空输电线路防雷设计、施工建设等工作。

## 2 编制主要原则

本标准主要根据以下原则编制：

- a) 遵守现有相关法律、条例、标准；
- b) 本标准结合输电线路防雷设计的相关标准和广域雷电地闪监测与差异化防雷技术的科研结论，兼顾电网运行和设备使用的实际情况；
- c) 在编制过程中参考了相关国标、行业标准和 IEC 标准的有关要求。

## 3 与其他标准文件的关系

本标准与相关技术领域的国家现行法律、法规和政策保持一致。

本标准在雷电参数表征方面与同类国家标准 GB/T 50064 《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》一致，并在雷电流幅值累积概率公式和地闪密度统计方面进行了细化，雷电参数更加突出时空差异性特点。

本标准在并联间隙典型结构和使用范围及原则方面与同类行业标准 DL/T 1293 《交流架空输电线路绝缘子并联间隙使用导则》一致，在 500kV 并联间隙的结构尺寸方面严于行标。

本标准在 110kV~750kV 线路保护角方面与同类国家标准 GB 50545 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》一致，在高风险杆塔的保护角方面严于国标，并在重要与一般线路、杆塔绕反击风险相对大小方面进行了细化。

本标准在 1000kV 线路保护角方面与同类国家标准 GB/Z 24842 《1000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合》一致，在±800kV 线路保护角方面与同类国家标准 GB 50790 《±800kV 直流架空输电线路设计规范》一致。

本标准在杆塔接地电阻方面与同类国家标准 GB 50545 《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》一致，在高风险杆塔的接地电阻方面严于国标。

本标准不涉及不专利、软件著作权等知识产权使用问题。

## 4 主要工作过程

2015 年 1 月，按照公司制修订计划，项目启动，制定工作进度计划，确定标准编写提纲、主要内容以及组织分工。

2015 年 2 月，成立编写组，收集国际、国内标准，总结多年来研究成果及应用经验，编写标准初稿。

2015 年 4 月，完成初稿编写，组织召开初稿讨论会，来自国网湖北、湖南、江西、陕西及冀北电力、中国电科院、南瑞集团公司、中南电力设计院等单位的有关专家和代表出席会议，专家对标准初稿存在

的问题及下一步需修改的内容进行讨论。

2015年6月，完成了标准征求意见稿编写，采用邮件形式广泛、多次在国网各省电力公司、电力设计院等有关单位范围内征求意见。

2015年9月，修改形成标准送审稿。

2015年11月，公司科技部标准化专业工作组组织召开送审会，TC04工作组专家、国网浙江、福建电力、中国电科院、中南电力设计院等单位专家及标准编写人员参加了会议，并对标准送审稿进行了逐条逐句讨论，审查结论为：修改后报批。

2015年11月，修改形成标准报批稿。

## 5 标准结构和内容

本标准主题章分为4章，由雷电监测、雷电地闪参数、输电线路雷击风险评估和输电线路防雷设计组成。

本标准阐述了广域雷电地闪监测和输电线路雷击监测方法，雷电地闪参数、地形参数、线路参数、防雷装置参数的获取方法，给出了输电线路雷击风险评估方法，最后提出了标准化和差异化相结合的防雷设计原则，以及防护措施选择方法。本标准作为指导输电线路防雷设计、施工建设、运维检修等工作的依据，具有较强的针对性和可操作性。

## 6 条文说明

本标准第3.14条中，本条款定义雷击引起的跳闸/重启统称为雷击跳闸。雷击交流输电线路引起绝缘闪络后，沿闪络通道建立稳定工频续流电弧造成断路器开断；雷击直流输电线路引起绝缘闪络后，沿闪络通道建立稳定直流续流电弧造成故障重启。

本标准第3.15条中，本条款除定义耐雷水平外，还补充了耐雷水平包括绕击耐雷水平和反击耐雷水平。

本标准第4.1.1条中，本条描述了雷电地闪发生时会产生强烈的甚低频/低频电磁波辐射，在广域空间内主要沿地表传播。依据地波传播的基本特征可知，地波是沿地球表面传播的，因为地球表面的电性能及地貌、地物等不会随时间很快的变化，所以在传播路径上，地波传播基本上可以视为不随时间变化，因此，接收点的场强较稳定；在无线信道通信中，频率较低的电磁波趋于沿弯曲的地球表面传播，有一定的绕射能力；在低频和甚低频段，地波能够传播超过数百千米或数千千米。

本标准第5.1条中，本条规定一般情况下基于广域雷电地闪监测数据获取雷电流幅值累积概率分布公式，雷电地闪监测数据不完善的地区也可采用标准GB/T 50064给出的雷电流幅值累积概率分布公式。

本标准第6.1条中，依据《国家电网公司110(66)kV~500kV架空输电线路运行规范》及各电压等级输电线路雷击跳闸率运行值，本条款规定了雷击风险水平控制参考值。

本标准第6.3条中，本条规定了雷击跳闸率计算方法。对单回线路杆塔，当地面具有倾角或两侧保护角不同等原因使两侧雷击特性不一致时，应采用公式(7)和公式(8)分别计算两侧的绕击或反击跳闸率，然后代数求和获得计及双侧的绕击或反击跳闸率。对双回线路杆塔，应对每回线路分别进行计算，某一回的一相导线绕击或反击跳闸率计算采用公式(7)和公式(8)，然后将某一回各相导线计算结果代数求和可获得一回线路的绕击或反击跳闸率。

本标准第7.1.3条中，本条强调应用带支撑件间隙线路避雷器时应保证支撑件与避雷器之间的机械连接安全可靠，以免机械磨损导致支撑件与避雷器本体间的连接断裂。

本标准第7.1.4条中，依据《关于印发国家电网公司架空输电线路并联间隙应用指导意见(试行)的通知》(国网运检二(2014)131号)和国网科技项目“输电线路并联间隙防雷应用研究”的试验研究成果，本条规定了500kV线路用并联间隙上下电极水平伸出长度 $X_C$ 、 $X_P$ 均定为700mm，且间隙结构宜设计成半跑道形状或开口圆环形状。因500kV用绝缘子型号、片数各异，所以罩入深度应根据绝缘子结

构高度而定，宜保持上下电极间的空气间隙距离与绝缘子结构高度比值为 0.85（±2.5%）。

本标准第 7.1.5 条中，考虑安装杆塔避雷针后会增加线路反击风险，因此对反击耐雷水平较低的 110kV 交流线路，要求不应使用杆塔避雷针；反击耐雷水平较高的 220kV 及以上交流线路和±400kV 及以上直流线路，可将杆塔避雷针作为一种辅助防雷措施。

本标准第 7.2.1 条中，本条规定一般线路强雷区的山区区段和特殊区段（如架空转电缆等）以及重要线路，除参照现行标准规范进行常规防雷设计外，还应逐塔进行雷击风险评估，对高风险杆塔采取防雷优化措施。

本标准第 7.2.2 条中， $k_{rf}$  为雷击高风险杆塔的绕、反击跳闸率比值，计算结果表征的是雷击风险的主要来源，当  $k_{rf}=1$  时，绕击与反击占比相等。考虑直接按 1 衡量过于绝对，本标准中定义：当  $k_{rf}<0.8$  时反击占主导；当  $k_{rf}>1.2$  时绕击占主导；当  $0.8\leq k_{rf}\leq 1.2$  时绕、反击比重相当。

本标准第 7.2.2.1 条中，本条规定 220kV 及以下同塔双回杆塔如采用不平衡绝缘时，应一回加长 15% 左右、另一回不变，这样既可保证雷击跳闸率不升高，同时还可降低同跳概率。

本标准第 7.2.2.2 条中，本条规定的 110kV 保护角与 GB 50545 相比，单、双回均减小 5°，分别为 10°和 5°；220kV~330kV 保护角与 GB 50545 相比，单回减小 5°至 10°，双回保持 0°不变；500kV 保护角与 GB 50545 相比，单回减小 5°至 5°，双回保持 0°不变。由于本条是针对雷击高风险杆塔给出的要求，因此相比设计规范要求略有提升是合理的。

本标准第 7.2.2.3 条中，本条规定的工频接地电阻设计值相比 GB 50545 要求有一定提高，土壤电阻率  $\leq 100\Omega\cdot m$  时，由规范的 10 $\Omega$  降至 7 $\Omega$ ；土壤电阻率  $100\Omega\cdot m\sim 500\Omega\cdot m$ 、 $500\Omega\cdot m\sim 1000\Omega\cdot m$ 、 $1000\Omega\cdot m\sim 2000\Omega\cdot m$ 、 $>2000\Omega\cdot m$  时分别由 15 $\Omega$ 、20 $\Omega$ 、25 $\Omega$ 、30 $\Omega$  降至 10 $\Omega$ 、15 $\Omega$ 、20 $\Omega$ 、25 $\Omega$ 。由于本条是针对雷击高风险杆塔给出的要求，因此相比设计规范要求略有提升是合理的。

本标准第 7.2.3.2 条中，本条规定的 110kV~750kV 单、双回保护角分别为 5°和 0°，这是考虑到重要线路特殊性，较一般线路强雷区的山区区段和特殊区段要求又有提升；1000kV 保护角参考 GB/Z 24842；±800kV 保护角参考 GB 50790；±500kV 保护角与交流 500kV 要求保持一致；±400kV 和±660kV 保护角根据宁东线和柴拉线典型塔形计算得到。

本标准附录 D.1.2 条中，雷电流幅值分布随线路走廊所经区域呈现差异性，宜沿线路走廊分段统计拟合。但其分布规律的准确提取依赖于雷电地闪监测数据量，因此本条给出了根据雷电地闪监测数据量合理划分统计区段，进行线路走廊雷电流幅值分布统计的方法。

本标准附录 D.2.1 条中，本条规定采用网格法统计区域地闪密度时，若网格中属于统计范围内的地域面积小于一个标准网格面积，仍记为一个标准网格。