

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.021

## 降雨条件下高压直流导线粗糙系数的表征方法

李晓云, 马爱清, 张成武, 徐进帅

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 导线表面的粗糙系数  $m$  是影响起晕场强预估的关键因素之一。在降雨条件下, 高压直流输电线路表面极易附着雨滴, 导线表面状况发生改变, 而导线表面状况的改变会直接影响 Peek 公式中粗糙系数  $m$  的大小, 导致预估的起晕场强与实际值误差较大。目前降雨条件下粗糙系数  $m$  的取值没有统一的标准, 文中通过引入形变系数  $W$  与分布系数  $f$  表征雨滴的大小以及分布密度对起晕场强的影响, 利用起晕场强与二者之间的变化规律, 建立了形变系数、分布系数与粗糙系数之间的关联关系, 得到不同降雨程度下粗糙系数  $m$  的表达式, 从而修正 Peek 公式, 通过建立附着雨滴的高压直流导线的计算模型, 与仿真得到的电晕笼体场强值相比较, 验证方案的可行性。结果表明: 电晕笼体电场强度计算值与基于有限元法获得的场强值误差小于 8%。确定了不同降雨条件下的粗糙系数后, 修正后的 Peek 公式可应用于降雨条件下高压直流导线起晕场强的预估, 简单准确、便于实现。

**关键词:** 粗糙系数; 起晕场强; Peek 公式; 雨滴; 高压直流输电

### Characterization Method for Roughness Coefficient of HVDC Conductors Under Rainfall Conditions

LI Xiaoyun, MA Aiqing, ZHANG Chengwu, XU Jinshuai

(School of Electric Power, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The roughness coefficient  $m$  of the conductor surface is one of the key factors affecting the estimation of corona inception field strength. Under the rainfall conditions, raindrops are easily attached to the surface of high-voltage direct current transmission lines, and the surface condition of the conductor has changed. The change in the surface condition of the conductors directly affects the roughness coefficient  $m$  in the Peek formula, resulting in a significant error between the estimated corona inception field strength and the actual value. Under present rainfall conditions, there is no unified standard for the value of roughness coefficient  $m$ . In this paper the deformation coefficient  $W$  and distribution coefficient  $f$  are introduced to characterize the influence of raindrop magnitude and distribution density on the corona inception field strength. The correlation relationship among the deformation coefficient, distribution coefficient and roughness coefficient is set up by utilizing the variation law between the corona inception field strength and those two factors. The expression of roughness coefficient  $m$  under different rainfall levels is obtained, and the Peek formula is thus modified. The feasibility of the scheme is verified by establishing a calculation model for the high-voltage DC conductor with attached raindrops and comparing it with the simulated field strength values of the corona cage. The results show that the error between the calculated electric field strength of the corona cage and the field strength obtained based on the finite element method is less than 8%. After determining the roughness coefficient under different rainfall conditions, the modified Peek formula can be applied to estimate the corona inception field strength of HVDC conductors under rainfall conditions, which is simple, accurate and easy to implement.

**Key words:** roughness coefficient; corona inception field strength; Peek formula; raindrop; HVDC transmission

收稿日期:2025-07-08; 修回日期:2025-10-21

基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1420600)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Shanghai(19ZR1420600).

## 0 引言

为了加快实现“碳达峰,碳中和”的目标<sup>[1]</sup>,加快建设特高压骨干网架,加强输电通道建设,实现全国范围的资源优化配置,直流输电在输送远距离、大容量电能方面具有显著优势,随着高压直流输电线路电压等级的提高,电晕放电问题<sup>[2]</sup>造成的影响日益显著。电晕放电会在超、特高压线路上形成强电场区域,伴随声、光、热等放电现象<sup>[3-5]</sup>,还会带来电磁干扰和噪声污染<sup>[6]</sup>,影响人们的正常生活,危害输电线路正常安全运行,因此电晕效应作为高压直流输电线路设计时的重要技术指标之一<sup>[7]</sup>,需要进行合理预估。

直流输电线路起晕场强与交流输电线路起晕场强峰值相同时,工程上通常采用 Peek 公式进行预估,高压输电线路的电晕放电程度,极大程度上受到表面电场的影响<sup>[8]</sup>。借助 Peek 经验公式可以看出,起晕电场强度值实际上是导线半径和导线表面状况的函数<sup>[9]</sup>,但 Peek 公式的计算结果常与工程实际相差较大,因其没有考虑外部大气环境的影响。中国特高压输电线路输送距离长,工程沿线气象条件复杂<sup>[10]</sup>,不可避免地受降雨影响<sup>[11-13]</sup>,中国南部地区湿度大,降雨多,极易在导线表面形成雨滴,雨滴附着在导线表面,导致导线的表面状况发生改变,而导线表面状况的改变会直接影响 Peek 公式中粗糙系数的大小,导致预估的起晕场强与实际值误差较大,同时雨滴在重力和电场力的作用下被拉长、曲率半径变小,进一步增大电场的畸变程度<sup>[14]</sup>,从而导致了一系列问题,例如导线表面的起晕电压降低、电晕效应加重、电晕损耗增加<sup>[15]</sup>等等,若长期发生电晕放电,输电线路会逐步老化直至击穿,造成更严重的电气事故。研究表明:电晕放电与导线表面状态密切相关,粗糙度越大,线路放电越剧烈<sup>[16]</sup>。因此,合理预估降雨条件下的起晕场强,对高压直流输电线路的设计起着重要作用。

目前,已有学者对降雨条件下输电线路的电晕放电问题开展了大量深入研究。华北电力大学和中国电力科学研究院对雨滴等级进行划分<sup>[17]</sup>,指出雨滴会导致起晕电压大幅降低为无雨滴情况的 50% 左右;宫林等证实了导线的起晕电压与导线表面附着的雨滴数量有关<sup>[18]</sup>;关志成等发现雨滴间距相同时,雨滴表面的最大电场随雨滴半径的增大而增强<sup>[19]</sup>。上述研究表明降雨条件下导线起晕场强明显降低,实际工程中粗糙系数通常根据经验取值<sup>[20-23]</sup>,未考虑不

同降雨条件下雨滴对导线形变的影响,具有很强的主观性,因此寻求一种不同降雨条件下较为准确并容易计算的高压直流导线粗糙系数的表征方法对于预估起晕电压十分重要。

文中选取钢芯铝绞线作为研究对象,首先基于有限元法,计算钢芯铝绞线干燥以及附着雨滴时的导线表面最大场强,依据电晕自持判据建立起始电晕预估模型。通过引入形变系数  $W$  与分布系数  $f$  两个参量表征雨滴的大小以及分布的密度对电晕放电的影响,建立与 Peek 公式中粗糙系数  $m$  的关联关系,从而得到不同降雨条件下导线粗糙系数的表征方法。获得粗糙系数后,进一步修正 Peek 公式,使其在工程上预估起晕场强更加简单准确、便于实现。最后通过计算模型得到电晕笼笼体的合成场强,与有限元法获得的场强值进行准确性验证,为高压直流线路设计提供理论依据。

## 1 降雨条件下导线三维电场分析及起晕场强计算

导线电晕放电的严重程度与导线周围空间电场强度的大小直接相关,特别是与导线表面最大电场强度有关,某些位置场强过大将导致局部电晕放电的发生,雨滴附着在导线表面使得导线表面发生形变,造成导线表面场强分布不均匀。

### 1.1 雨滴模型的选取

根据文[22]可知,试验所用雨滴直径在 0.5~4.5 mm 之间,按照降雨强度的大小,降雨分为小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个等级,利用体积等效直径的概念对不同降雨程度下雨滴尺寸进行统一的描述,见表 1。

表 1 降雨强度与雨滴平均直径

Table 1 Rain intensity and average diameter of raindrops

降雨等级	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	雨滴平均直径/mm
小雨	0.20~1.25	0.65~1.25
中雨	1.25~5.56	1.25~1.50
大雨	5.56~15.60	1.75~2.25
暴雨	15.60~50.60	2.25~3.00

雨滴落在导线上在电场力的作用下可能会引起导线振动<sup>[23]</sup>,雨滴的聚集会导致附着在导线上的雨滴破裂、变形等,不考虑以上因素的影响,选取小雨、中雨、大雨、暴雨条件下的典型雨滴模型,直径分别为  $d=1, 1.5, 2, 3$  mm 4 种情况进行分析。

### 1.2 附着雨滴的导线三维模型建立

基于有限元法,对钢芯铝绞线干燥以及不同降雨程度下典型位置的表面场强进行计算。计算模型选用文[24]中的试验模型,选取钢芯铝绞线 LGJ-

300/40为研究对象,结构见图1,建立三维计算模型见图2,导线长度为200 mm,横截面为4 cm<sup>2</sup> (r=11.284 mm)。构建电晕笼直径为25 cm,长度为1 m,采用一种常见的电场仿真模拟计算模型,同轴圆柱电极结构,电晕笼中心处放置试验导线,二者轴心重合。对导线上施加一定的电压U<sub>0</sub>,电晕笼电位为0,网格剖分采用自动剖分形式。

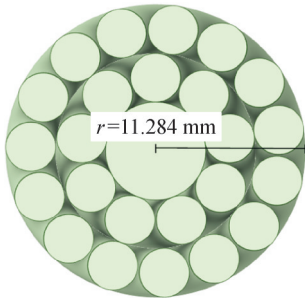


图1 钢芯铝绞线结构图

Fig. 1 Structural drawing of ACSR



图2 钢芯铝绞线计算模型

Fig. 2 Calculation model of ACSR

### 1.3 降雨条件下导线三维电场仿真分析

计算模型的边界条件为

$$\begin{cases} \Phi_{\text{sample}} = 60 \text{ kV} \\ \Phi_{\text{cage}} = 0 \text{ V} \end{cases} \quad (1)$$

干燥条件下钢芯铝绞线表面电场强度为17.68 kV/cm,为了更清晰地观察电场的变化情况,将电场强度变化趋势绘制见图3。

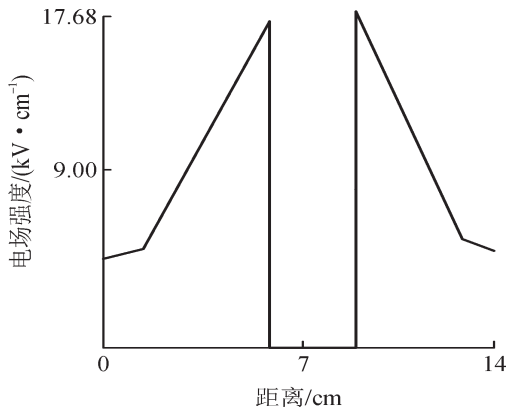


图3 干燥条件下导线场强分布

Fig. 3 Distribution of conductor field strength under dry condition

在降雨条件下,导线形变程度增大,表面场强最大值增大,选取典型雨滴模型,雨滴直径为1 mm,得到的表面场强分布图见图4,由图4中可以看出,

在施加相同电压的情况下,干燥环境中导线电场均匀分布,而降雨条件下导线周围电场发生严重畸变,分布极不均匀,依据尖端放电效应,由于雨滴尖端曲率半径较小,在电场作用下,尖端最先发生电离,出现电晕放电现象,最大场强值为37.79 kV/cm,其值约为干燥导线场强的2倍。

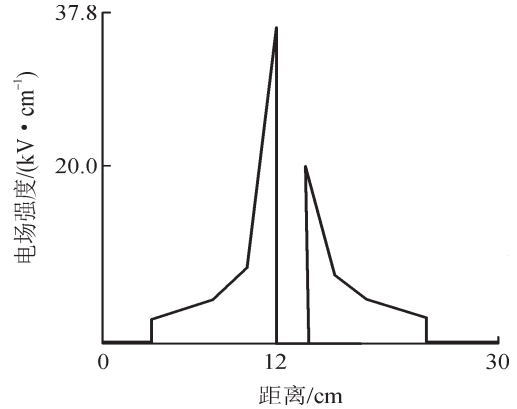


图4 淋雨条件下导线场强分布

Fig. 4 Distribution of conductor field strength under rainy conditions

### 1.4 降雨条件下导线起晕场强计算

电晕起始判据是反映电晕放电特征的重要参量,导线附着雨滴时,电场强度随外施电压的升高而增大,当电场足够强时,碰撞电离系数 $\alpha$ 大于附着系数 $\eta$ <sup>[24]</sup>,由于碰撞电离作用,电子数目呈指数增长,引发“电子崩”。到达电晕层边界后,不再发生碰撞电离,自由电子数量不再上涨,此处自由电子数量最多<sup>[25]</sup>。

假设在 $x=x_1$ 的雨滴尖端位置产生 $N(x_1)$ 个自由电子,根据电子电离系数 $\alpha$ 和附着系数 $\eta$ ,可以根据式(2)求出位置 $x=x_2$ (其中 $x_2 > x_1$ )处的自由电子数

$$N(x_2) = N(x_1) e^{\int_{x_1}^{x_2} (\alpha - \eta) dx} \quad (2)$$

由于雨滴尖端位置产生的 $N(x_1)$ 个自由电子的数量是未知的,为了简化计算,将其表示为电晕层边界自由电子数量与初始自由电子数量之比

$$K = N(x_2)/N(x_1) = e^{\int_{x_1}^{x_2} (\alpha - \eta) dx} \quad (3)$$

电晕判据式里的碰撞系数 $\alpha$ 和吸附系数 $\eta$ 的表达式为 Sarma 和 Janischewskyj<sup>[26]</sup>给出的表达式,均为电场强度和大气压的函数

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{\delta} = 36\ 326 e^{-168.0 \frac{\delta}{E}} & 1.9 \leq \frac{E}{\delta} \leq 45.6 \\ \frac{\alpha}{\delta} = 7\ 385 e^{-200.8 \frac{\delta}{E}} & 45.6 \leq \frac{E}{\delta} \leq 182.4 \\ \frac{\eta}{\delta} = 9.986\ 5 - 0.541 \times 10^3 \left(\frac{E}{\delta}\right) + 1.118 \times 10^{-8} \left(\frac{E}{\delta}\right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $E$ 为电场强度,kV/cm; $\delta$ 为大气相对密

度,  $\delta = \frac{P}{101.3 \times 10^3} \cdot \frac{293}{273 + T}$ ;  $P$  为大气压, Pa;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

电晕放电的起始判据是表征电晕放电特征的重要参量<sup>[22]</sup>, 可以利用电晕层边界处的自由电子数目作为计算电晕起始电压的判据, 通过改变  $K$  的取值, 使得导线的电晕起始特性与已有试验数据达到最佳拟合。确定  $K$  的取值, 判断  $U$  是否为起晕电压。实验中一般采用临界值  $K$  为 3 500 左右。起晕场强的计算流程图见图 5。

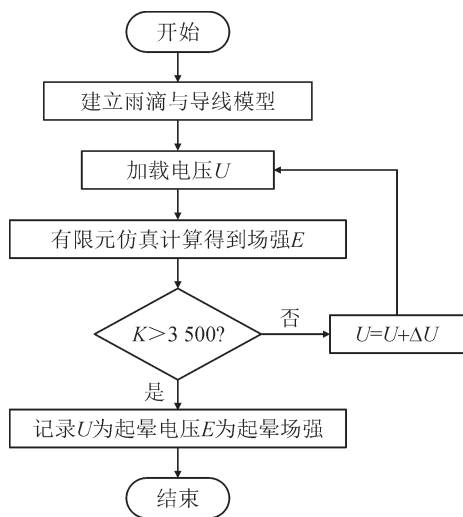


图 5 起晕场强判断流程图

Fig. 5 Flow chart of coronation field strength judgment

根据文[24]的电压范围, 施加电压为 60 kV 时, 计算不同降雨条件下的起晕场强见表 2。

表 2 不同降雨程度下起晕场强计算值

Table 2 Calculated value of corona field strength under different rainfall degrees

雨滴直径/mm	起晕场强/(kV·cm <sup>-1</sup> )
1.0	32.75
1.5	21.28
2.0	17.51
3.0	17.24

由表 2 可以看出, 随着降雨程度的增加, 起晕场强急剧下降, 当雨滴直径大于 2 mm 后, 下降速率明显减慢, 并最终趋于饱和, 分析可知, 起晕场强与降雨程度呈指数变化关系。

## 2 降雨程度与粗糙系数关联关系的建立

在高压直流导线的设计中最关注的物理量之一是导线的起晕场强, 晴好天气下通常使用 Peek 经验公式计算起晕场强, 计算公式为

$$E = mE_0\delta\left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (5)$$

式(5)中:  $m$  为导线粗糙系数;  $r$  为导线半径, cm;  $\delta$  为空气相对密度, 通常取 1。

该公式表明, 起晕场强与导线表面状况有关, Peek 公式通常应用于晴好天气下起晕场强的计算, 并未考虑恶劣天气条件的影响, 输电线路附着雨滴时会影响导线的粗糙系数, 导致导线起晕场强不同程度地降低。雨滴对电晕放电的影响主要体现在两方面: 雨滴形状的大小以及分布的密度, 因此文中引入形变系数  $W$  以及分布系数  $f$  来表征上述变化量, 通过对形变系数以及分布系数的定量分析, 得到形变系数和分布系数与粗糙系数  $m$  的关联关系。

### 2.1 形变系数对导线表面最大场强的影响

形变系数  $W$  表征不同降雨条件下最大场强  $E_{\max}$  与干燥条件下导线表面最大场强  $E_{\text{干燥}}$  相比的畸变情况

$$W = \frac{E_{\max}}{E_{\text{干燥}}} \quad (6)$$

仿真实验中, 建立附着雨滴的导线模型, 直径分别为  $d=1, 1.5, 2, 3$  mm, 雨滴纵向被拉长的长度也分别为 1、1.5、2、3 mm。由于雨滴受重力、表面张力、表面粘滞力以及电场力共同作用<sup>[23]</sup>, 当雨滴直径为 1 mm, 长度为 3 mm 时, 由于承受不住重力及电场力而下落, 因此去除雨滴直径为 1 mm, 长度为 3 mm 的模型<sup>[27-30]</sup>。

基于有限元法得到不同降雨程度下导线的表面最大场强, 见图 6。

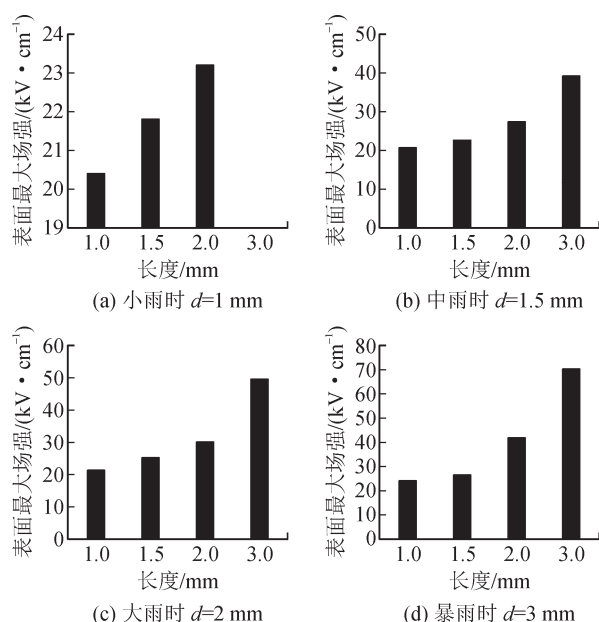


图 6 附着 4 种尺寸雨滴时导线的表面最大场强

Fig. 6 The maximum surface field strength of the conductor when four sizes of raindrops are attached

由图 6 可以看出, 当雨滴长度  $l$  不变时, 随着雨滴直径  $d$  的增大, 表面电场随之增大, 当雨滴直径  $d$

不变时,随着雨滴长度  $l$  的拉长,表面电场强度增加,即雨滴直径和纵向拉长的程度影响导线表面最大场强值,通过形变系数  $W$  反映雨滴直径  $d$  以及被拉长长度  $l$  对导线形变的影响程度

$$W = \frac{ad + bl}{D} \tag{7}$$

式(7)中: $d$ 为不同降雨程度下雨滴的直径; $l$ 为不同降雨程度下雨滴的长度; $D$ 为导线直径; $a$ 、 $b$ 取值由式(6)结合不同降雨程度下导线表面最大场强  $E_{\max}$ 、干燥条件下导线表面最大场强  $E_{\text{干燥}}$  拟合得到,在上述计算模型中  $a$  的取值为 2.40,  $b$  的取值为 0.179。

### 2.2 分布系数对导线起晕场强的影响

雨滴在导线上的数量及密度严重影响其粗糙系数,通过计算机对降雨时现场中拍摄的悬挂雨滴的导线图片进行处理,得到每米导线悬挂雨滴数量,通过引入雨滴分布系数  $f$  反映雨滴在导线上的分布对起晕场强的影响,

首先将附着雨滴的导线外观图片转换为一个由灰度值表示的矩阵,见图7,然后将灰度图像二值化,转化为边缘清晰的黑白图片,见图8。



图7 附着雨滴导线的灰度图片

Fig. 7 Grayscale image of attached raindrop wire



图8 附着雨滴导线的二值化图片

Fig. 8 Binary image of attached raindrop wire

将图8中雨滴及导线表面的轮廓曲线提取出来,该轮廓曲线可以表述导线表面的雨滴附着情况。其中纵坐标数值代表导线表面雨滴的凸起情况,假设相同降雨程度下导线上附着的雨滴大小相等,间距相同,修正导线表面轮廓曲线见图9。

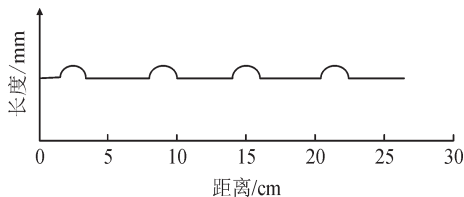


图9 修正后的轮廓曲线

Fig. 9 Corrected contour curve

降雨强度与导线上悬挂雨滴数量的关系见表3,根据表3可知,降雨强度不同时,雨滴的分布密度也不同,在计算分布系数时,通过修正后的轮廓曲线判断每米导线上的凸起数量,即可得到每米导线悬挂

雨滴数量,用  $A$  来表示,分布系数  $f$  为

$$f = \frac{A}{B} \tag{8}$$

式(8)中: $A$ 为每米导线实际悬挂雨滴数量; $B$ 为每米导线标准悬挂雨滴数量,即小雨时, $B=20$ ,中雨时, $B=27$ ,大雨时, $B=33$ ,暴雨时, $B=39$ 。

表3 降雨程度与雨滴直径、数量关系

Table 3 Relationship between rainfall intensity and raindrop diameter and quantity

降雨强度	雨滴平均直径/mm	每米悬挂雨滴数量/滴
小雨	1.0	20
中雨	1.5	27
大雨	2.0	33
暴雨	3.0	39

### 2.3 形变系数、分布系数与粗糙系数关联关系的建立

将形变系数以及分布系数分别定量分析后,可以看出随着形变系数、分布系数的增大,表面最大场强增大,起晕场强降低,结合1.4节计算得到的起晕场强值,可以得到不同降雨程度下导线起晕场强与形变系数  $W$  和分布系数  $f$  之间的关系,见图10。

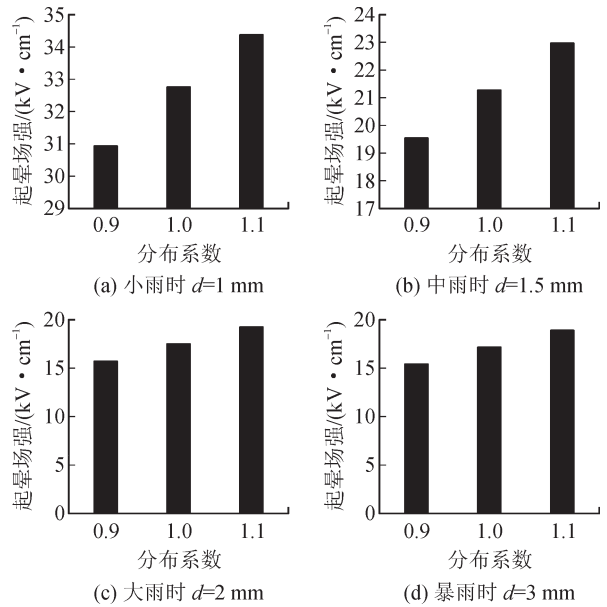


图10 形变系数、分布系数与起晕场强的关系

Fig. 10 Relationship between deformation coefficient, distribution coefficient and corona field strength

忽略其他外界因素,只考虑降雨条件下粗糙系数的变化,粗糙系数  $m$  可以通过式(9)表征,即粗糙系数为降雨条件下附着雨滴导线的起晕场强  $E_{\text{on}}$  与光滑导线在干燥条件下的起晕电压  $E_0$  的比值。

$$m = \frac{E_{\text{on}}}{E_0} \tag{9}$$

结合式(9)可以得到不同降雨程度导线的粗糙系数,通过对图10中的数据进行拟合,可得到粗糙

系数与形变系数、分布系数的关联关系, 拟合式为

$$m = A_0 e^{-\frac{W}{l_1}} + A_1 f \quad (10)$$

式(10)中,  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $l_1$ 取值由式(10)结合不同降雨程度下导线的起晕场强  $E_{on}$ 、干燥条件下光滑导线的起晕场强  $E_0$  拟合得到。在此计算模型中, 拟合得到参数  $A_0=0.607$ ,  $l_1=1.101$ ,  $A_1=0.542$ , 拟合度为 0.99, 满足要求。将式(10)代入 Peek 公式, 即可得到 Peek 修正公式

$$E = E_0 \times (A_0 e^{-\frac{W}{l_1}} + A_1 f) \delta \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (11)$$

通过式(11)可知, 引入导线形变系数  $W$  和雨滴分布系数  $f$  二者结合分析, 可以看出形变系数越大, 起晕场强越小; 分布系数越大, 起晕场强越大。通过式(11)所建立的降雨条件下 Peek 公式的修正计算式可以合理预估起晕场强, 并应用在实际工程中。

### 3 结果验证

为验证上述修正后的 Peek 公式预估起晕场强的准确性, 基于 Deutsch 假设, 认为起晕后导线的表面场强值等于起晕场强值, 电晕笼笼内合成场强与导线起晕电压值呈线性关系, 可以利用基于 Deutsch 假设的解析法求得电晕笼笼内电场强度。

计算模型选用文[24]中的试验模型, 导线半径  $r_a=11.284$  mm, 电晕笼半径  $r_b=12.5$  cm, 与模拟仿真实验模型保持一致, 导线施加电压  $U$ , 电晕笼接地处理, 即电晕笼体电压为 0。导线施加电压应大于其起晕电压, 因此分别施加 80、100 kV 的电压加以验证。

Deutsch 假设认为, 在发生电晕放电后, 空间电荷只影响合成场强的幅值, 空间的控制方程为:

$$\nabla \cdot E_s = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

$$J = k\rho E_{on} \quad (13)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (14)$$

将式(13)与式(14)相结合, 再将式(12)中的  $\rho$  代入, 得到的电场方程为

$$E \cdot \nabla (\nabla \cdot E) + (\nabla \cdot E)^2 = 0 \quad (15)$$

式(12)-(15)中:  $E$  为电场强度;  $E_{on}$  为起晕场强;  $\varepsilon_0$  为介电常数,  $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m;  $\rho$  为空气电荷密度, C/m<sup>3</sup>;  $k$  为离子迁移率,  $k=1.9$  cm<sup>2</sup>/(V·s);  $J$  为电流密度, A/m<sup>2</sup>。

式(15)可以简化为

$$E \frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{3E}{r} \frac{dE}{dr} + \left(\frac{dE}{dr}\right)^2 = 0 \quad (16)$$

式(16)中存在两个约束条件: ①导线施加电压

已知, 电晕笼体电压为 0; ②起晕场强已知, 由 2.3 节中修正的 Peek 公式预估得到。由此可知边界条件为

$$\begin{cases} \varphi = U & r = r_a \\ \varphi = 0 & r = r_b \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中,  $r$  为导线到电晕笼体间沿径向方向的位置,  $r_a \leq r \leq r_b$ 。根据  $r=r_a$  时导线起晕场强为  $E_{on}$ , 通过式(18)计算半径为  $r_b$  时电晕笼笼体场强

$$E = \frac{r_a}{r} \left[ E_{on}^2 - \frac{I}{2\pi k \varepsilon_0} \left(1 - \frac{r_a^2}{r^2}\right) \right]^{1/2} \quad (18)$$

式(18)中,  $I$  为单位长度上从导线表面流出的电流。

$$I = 2\pi r_b J \quad (19)$$

电压  $U$  与电晕笼内的合成场强的关系可以用式(20)表示

$$U = \int_{r_a}^{r_b} E dr \quad (20)$$

通过对  $I$  的步长为 0.01  $\mu$ A 的迭代找到与  $U$  值相对应的  $I$  值, 进而得到电场强度的分布, 计算流程见图 11。

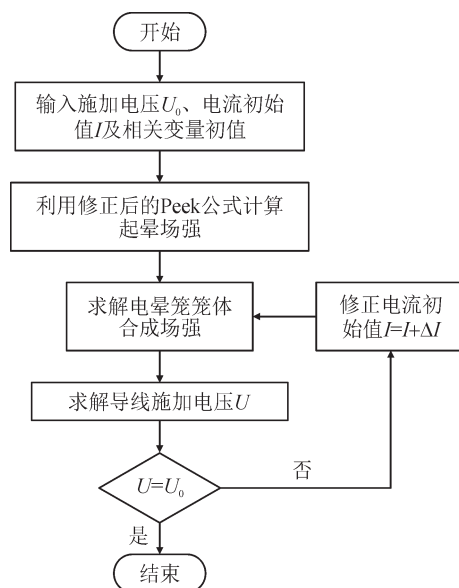


图 11 电晕笼笼体场强计算流程图

Fig. 11 Flow chart for calculating the field strength of the corona cage body

将计算得到的电晕笼笼体场强与有限元仿真得到的场强相比较, 见图 12, 由图 12 可以看出, 随着降雨程度的增加, 电晕笼笼体处的合成场强越大, 计算值与仿真得到的数值变化规律相同, 存在些许误差, 最大误差约为 8%, 验证了修正后的 Peek 公式预估起晕场强的准确性。

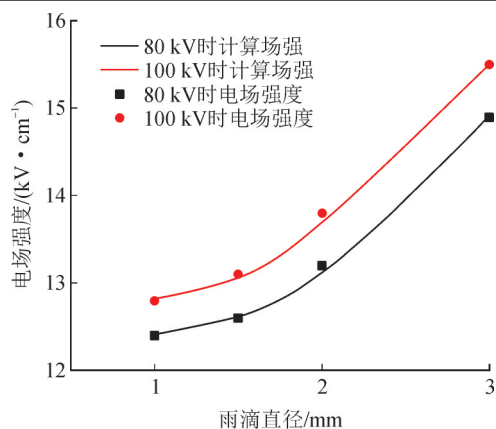


图12 不同降雨程度下电晕笼体电场强度

Fig. 12 Electric field intensity of corona cage under different rainfall

## 4 结论

1)施加相同电压,降雨条件比干燥环境下更易发生电晕放电,雨滴附着在导线表面会使周围电场发生畸变,在雨滴尖端率先出现电晕放电现象,导线表面最大场强值增大,起晕场强降低。

2)通过引入形变系数 $W$ 和分布系数 $f$ 表征雨滴大小与分布密度对起晕场强的影响,相同条件下雨滴直径越大,起晕场强越低;在一定的范围内,雨滴的间距越大,起晕场强越低。

3)建立形变系数 $W$ 和分布系数 $f$ 与粗糙系数 $m$ 之间的关联关系,从而修正了降雨条件下的Peek公式,更加准确的预估起晕场强,通过构建计算模型得到电晕笼笼体的合成场强,与仿真得到的数值相比较,验证了计算模型的准确性。

## 参考文献:

- [1] 王峰. 淋雨条件下表面材料对直流输电导线电晕放电特性的影响[D]. 北京:华北电力大学,2021.  
WANG Feng. Influence of surface materials on corona discharge characteristics of HVDC transmission line under rain condition[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [2] 陈迪,刘宸,李强,等. 考虑空气湿度的导线交流电晕起始场强特性[J]. 高压电器,2022,58(10):83-88.  
CHEN Di, LIU Chen, LI Qiang, et al. AC corona inception field strength characteristic of conductors considering air humidity[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10):83-88.
- [3] 易凡,杜志叶,黄从鹏,等. 负极性球板电晕放电下绝缘表面电荷分布特性研究[J]. 高压电器,2020,56(9):197-202.  
YI Fan, DU Zhiye, HUANG Congpeng, et al. Study on charge distribution characteristics of insulation surface under negative corona in sphere-plane gaps[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):197-202.
- [4] 李祥超,罗华,黎雪婷. 不同形状金属尖端电晕电流触发阈值的分析[J]. 电瓷避雷器,2020(3):13-20.

- LI Xiangchao, LUO Hua, LI Xueting. Analysis of corona current triggering threshold for different shaped metal tips[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3):13-20.
- [5] 许家焰,武芳璞,李瑞,等. 智能变电站继电保护二次虚回路失效风险动态识别技术[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(1):160-170.  
XU Jiayan, WU Fangying, LI Rui, et al. Dynamic identification technology for the failure risk of the secondary virtual circuit of relay protection in an intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1):160-170.
- [6] 陈澜,陈方东,赵雪松,等. 大雨环境下雨滴对线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术,2012,38(11):2863-2868.  
CHEN Lan, CHEN Fangdong, ZHAO Xuesong, et al. Influence of rain drops on corona discharge in AC transmission lines under high rainy condition[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11):2863-2868.
- [7] 段娜娜,王雪焕,徐伟杰,等. 不同电离系数和附着系数对导线起晕场强的影响综述[J]. 高压电器,2021,57(4):1-9.  
DUAN Nana, WANG Xuehuan, XU Weijie, et al. Summary of the influence of different ionization coefficients and attachment coefficients on the corona inception field strength[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4):1-9.
- [8] 安正洲,周羽生,刘让姣,等. 特高压交流输电线路电晕影响下地面电场的计算分析[J]. 绝缘材料,2014(4):70-73.  
AN Zhengzhou, ZHOU Yusheng, LIU Rangjiao, et al. Calculation analysis of ground electric field for UHV AC transmission lines under effect of corona discharge[J]. Insulating Materials, 2014(4):70-73.
- [9] 郝建红,王晖. 不同线型高压直流输电导线表面电场强度分布的计算[J]. 电工技术学报,2019,34(s1):14-21.  
HAO Jianhong, WANG Hui. Calculation of the surface electric field distribution of high-voltage direct current transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(s1):14-21.
- [10] 范建斌,谷琛,殷禹,等. 表面水滴对特高压直流输电线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术,2009,35(10):2340-2343.  
FAN Jianbin, GU Chen, YIN Yu, et al. Effect of water drop on UHV DC transmission corona performance in corona cage[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2340-2343.
- [11] 陈迪,苏春强,安海舰,等. 淋雨条件下220 kV绝缘子均压环电晕放电特性研究[J]. 高压电器,2021,57(12):170-176.  
CHEN Di, SU Chunqiang, AN Haijian, et al. Research on corona discharge characteristics of grading ring of 220 kV insulator under rainfall condition[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):170-176.
- [12] 刘蕾,申萌,郝宇亮,等. 强降雨下不同安装角度的空心复合绝缘子冲击闪络特性研究[J]. 电瓷避雷器,2021(4):184-190.  
LIU Lei, SHEN Meng, HAO Yuliang, et al. Impulse flashover characteristics of hollow composite insulators with different installation angles under heavy rainfall[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4):184-190.
- [13] 朱峻永,杨东赞,王昕,等. 面向智能变电站运维的连锁故障态势感知研究[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(16):136-146.  
ZHU Junyong, YANG Dongzan, WANG Xin, et al. Research on cascading failure situation awareness for smart substation operation

- and maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16):136-146.
- [14] 温开云, 赵洪山, 赵仕策. 面向变电站环境的无线传感网络分簇路由算法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(18):64-73.  
WEN Kaiyun, ZHAO Hongshan, ZHAO Shice. Clustering-based routing algorithm for wireless sensor networks in substation environments[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(18):64-73.
- [15] 张海兵, 吴海涛, 胡琴, 等. 直流电场强度对导线雨淞覆冰及其电晕损失的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(8):275-279.  
ZHANG Haibing, WU Haitao, HU Qin, et al. Influence of DC electric field intensity on conductor glaze icing and its corona loss [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):275-279.
- [16] 王东来, 卢铁兵, 林耀煜, 等. 高压直流导线表面粗糙度与电晕放电时粗糙系数的关系[J]. 高压电器, 2019, 55(6):192-197.  
WANG Donglai, LU Tiebing, LIN Yaoyu, et al. Relationship between the HVDC conductor surface roughness and the roughness coefficient of corona discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6):192-197.
- [17] 吴执. 水滴形态对输电线路导线电晕放电特性的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
WU Zhi. Influence of water droplets on corona discharge characteristics of transmission line[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [18] 舒立春, 宫林, 蒋兴良, 等. 水滴或污秽对导线电晕放电起始特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(4):633-637.  
SHU Lichun, GONG Lin, JIANG Xingliang, et al. Corona inception discharge characteristics of conductor adhered with water drops or pollution[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):633-637.
- [19] 关志成, 楚金伟, 赵宇明, 等. 污秽颗粒对直流输电导线表面电场影响的仿真[J]. 高电压技术, 2009, 35(9):2087-2090.  
GUAN Zhicheng, CHU Jinwei, ZHAO Yuming, et al. Simulation for the influence of contamination particulates on surface electric field of HVDC transmission conductor[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9):2087-2090.
- [20] 张振兴, 兰生. 附着水滴对高压输电导线电晕放电的影响[J]. 广东电力, 2012, 25(11):57-61.  
ZHANG Zhenxing, LAN Sheng. Impact on corona discharge of high voltage transmission conductor by attached water drop[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(11):57-61.
- [21] 马爱清, 陈健. 考虑雨天的直流±800 kV与交流500 kV并行输电线路3维混合电场及静电感应分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(7):2114-2121.  
MA Aiqing, CHEN Jian. Analysis on three-dimensional hybrid electric field and related electrostatic induction effect of ±800 kV DC and 500 kV AC parallel transmission line considering rainy days[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7):2114-2121.
- [22] 杨冬甫, 罗兰, 刘纲玲. GJB 150. 8A淋雨试验解读及淋雨试验探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7):22-28.  
YANG Dongfu, LUO Lan, LIU Gangling. Interpretation and discussion of GJB 150. 8A rain test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(7):22-28.
- [23] 马爱清, 鲁济星. 考虑环境因素时雨滴对直流输电导线电晕振动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23):6579-6585.  
MA Aiqing, LU Jixing. Effect of raindrops under DC power transmission lines on corona vibration considering of environmental factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6579-6585.
- [24] 马成廉, 姚新岳, 宋萌清, 等. 计及高频雷电流下变电站接地网对周边燃气管网系统及新建地网系统阻性耦合影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9):166-175.  
MA Chenglian, YAO Xinyue, SONG Mengqing, et al. Analysis of the impact of substation grounding network on the resistive coupling of the surrounding gas pipeline system and the newly built grounding system under high frequency lightning currents[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9):166-175.
- [25] 刘畅, 郑涛, 王志华, 等. 基于DBSCAN的智能变电站交流采样异常实时识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24):140-148.  
LIU Chang, ZHENG Tao, WANG Zhihua, et al. Algorithm for real-time identification of sampling abnormalities in smart substations based on DBSCAN[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24):140-148.
- [26] 刘云鹏, 朱雷, 律方成, 等. 特高压电晕笼直流分裂导线正极性电晕起始特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1):73-79.  
LIU Yunpeng, ZHU Lei, LYU Fangcheng, et al. Analysis of the positive corona onset characteristic of the bundle conductors in the UHV corona cage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1):73-79.
- [27] 卫银忠, 苏嘉彬, 陈斌, 等. 基于SVG动态损耗模型的变电站无功补偿设备协同经济运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12):177-187.  
WEI Yinzong, SU Jiabin, CHEN Bin, et al. Cooperative economic operational strategy of substation reactive power compensation equipment based on an SVG dynamic loss model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12):177-187.
- [28] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3):161-171.  
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3):161-171.
- [29] 俞伊丽, 张展耀, 接晓霞, 等. 基于知识图谱与SCD文件的智能变电站二次检修安全措施自动生成技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2):129-142.  
YU Yili, ZHANG Zhanyao, JIE Xiaoxia, et al. Automatic generation technology of secondary safety measures in an intelligent substation based on a knowledge graph and SCD files[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2):129-142.
- [30] 马成廉, 宋萌清, 尹波, 等. 结合IEEE std80—2000和CDEGS的变电站新建接地网优化设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24):131-139.  
MA Chenglian, SONG Mengqing, YIN Bo, et al. Optimizing the design of a new substation grounding network by combining IEEE std80—2000 and CDEGS[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24):131-139.
- 李晓云(1997—), 女, 硕士, 主要研究方向为高压输电线路的电晕特性(E-mail: 1148917200@qq.com)。  
马爱清(1975—), 女, 博士, 教授, 主要从事高压交/直流输电线路电晕特性、输变电工程电磁环境评估、高压设备电磁场计算及气体放电仿真等领域的研究(通信作者)(E-mail: aqmaq@126.com)。