

# 220 kV 输电线周围电场对 ADSS 光缆挂点位置的影响

李正权<sup>1</sup>, 张 禄<sup>1</sup>, 高子涵<sup>1</sup>, 尹锋雷<sup>2</sup>

(1. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏巨量光电科技有限公司, 江苏 无锡 214161)

**摘要:** 针对全介质自承(ADSS)光缆在杆塔上因挂点位置选取不当而受到电腐蚀影响的问题,本文基于模拟电荷法提出一种三维电场计算模型,建立了杆塔实体模型并利用空间变换改进电场计算表达式。通过计算校验点处的电位误差验证计算模型的准确性,利用上述模型计算 220 kV 三相单回路输电线周围的电场,并分析杆塔对于电场分布情况的影响。结果表明:校验点处的电位误差基本保持在 2% 左右;杆塔对于水平轴线上电场的分布几乎没有影响;在竖直平面内,杆塔的形状对于电场的分布有直接影响,越靠近杆塔,电场值越大。最后根据电场在杆塔所在垂直面内的分布情况和电腐蚀控制指标,得到满足使用条件的 ADSS 光缆挂点位置。

**关键词:** ADSS 光缆; 挂点; 三维模型; 模拟电荷法; 空间变换; 电场分布

**DOI:** 10.12067/ATEEE2106024      **文章编号:** 1003-3076(2021)12-0030-10      **中图分类号:** TM743

## 1 引言

全介质自承(All Dielectric Self Supporting, ADSS)光缆具有良好的绝缘性、耐高温性以及抗拉力强度高优点。在实际使用中,常利用现有的杆塔进行搭建安装,在电力系统中能够提供快速、经济的传输通道,备受电力通信青睐。然而,ADSS 光缆长期处于高压输电线附近,会受到电腐蚀的影响,干带电弧是产生电腐蚀的直接原因之一<sup>[1,2]</sup>。在强电场和污秽环境下,ADSS 光缆表面形成一个带有高电位的电阻层,在空间电场作用下,光缆表面与接地金具间产生漏电流,电流生热造成表面水分蒸发,最终形成一段干燥带,当电位累积到足够高时,放电产生电弧,在光缆护套上出现树枝状碳化通道形成腐蚀,最终造成光缆保护套破裂甚至断缆<sup>[3]</sup>。

针对此类问题,可以通过计算杆塔和输电线周围的三维电场,选择电场强度小的位置悬挂光缆,达到减小电腐蚀影响的目的。文献[4,5]分别使用三维有限元计算软件、三维频域电场方法计算 ADSS 光缆挂点周围的电场分布,分析了输电线相序、相位对于电场的影响。同时,模拟电荷法也被广泛应用于空间电场的计算<sup>[6-15]</sup>。文献[6]基于模拟电荷法

建立了二维电场计算模型,分析复杂地势对输电线下方工频电场的影响。文献[7]将模拟电荷法与分区域算法结合,用于计算大规模变压器内部电场,有效降低了计算的空间复杂度。文献[8-10]使用模拟电荷法研究变电站内部结构的电磁环境、户外区域电场的计算取得良好结果。文献[11,12]将模拟电荷法应用于人体周围电场的计算,分析了高压输电线以及变电站周围电磁环境对于人体安全的影响。文献[13-15]主要计算了输电线下方地面有建筑物情况下的电场分布,并分析了建筑物对于电场分布的影响。同时文献[16]利用表面电荷法的思想,建立了复杂地势三角坡和凸面三维模型,分析了其周围工频电场的分布。

查阅文献发现,现有关于输电线空间电场分布的研究主要集中于计算地面附近的电场,此处距离杆塔与输电线较远,因此整个模型都做了较大幅度的简化,经常忽略杆塔的存在并将输电线视为长直导线。针对杆塔附近的电场计算还少有研究,而 ADSS 光缆又常与输电线进行同塔搭建,因此研究杆塔附近处的电场分布是非常有意义的。

本文建立一种三维电场计算模型,构建了完整的杆塔-输电线实体模型。对模拟电荷法进行了一

**收稿日期:** 2021-06-16  
**基金项目:** 国家自然科学基金(61571108)、国家“111”创新引智计划(B12018)  
**作者简介:** 李正权(1976-),男,湖北籍,教授,博士,研究方向为高电压技术和电力通信;  
张 禄(1996-),男,蒙古族,内蒙古籍,硕士研究生,研究方向为电磁场数值计算及通信保护。

定的改进,针对现有模拟电荷法中出现大量积分运算而造成计算难度较大的问题<sup>[17]</sup>,利用对模型的非均匀划分处理和空间变换推导得到了简化的电场计算表达式。最后利用该模型计算了 2B7-ZMC2 塔型下 220 kV 三相单回路输电线周围的电场,对比分析杆塔对于电场分布情况的影响,根据电场在竖直截面上的分布找到了适合 ADSS 光缆悬挂的位置。

## 2 模拟电荷法

### 2.1 准静态场和唯一性定理

我国输变电工程在工频 50 Hz 的条件下运行,电磁波的波长  $\lambda = 6\ 000\text{ km}$ 。而本文中杆塔之间的档距  $L = 400\text{ m}$ ,显然  $L \ll \lambda$ 。所以,输电线产生的电场是满足准静态条件的,可以将产生的电场当作准静态场看待,电磁感应现象的影响较弱,电磁波传播的延迟作用可以忽略不计,满足模拟电荷法的应用条件。可以使用静态场的麦克斯韦方程建立电场计算模型:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为电场矢量。根据矢量微分法则,任意标量梯度的旋度方程等于 0。将电场矢量定义为如下表达式:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (2)$$

式中,  $\varphi$  为电位函数,仅与距离  $r$  有关,结合式(1)得等价位函数方程:

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\tau}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为电荷密度;  $\varepsilon$  为介电常数。唯一性定理表明,在准静态场中,只要满足给定的边界条件,电位微分方程的解是唯一的,这是模拟电荷法的应用前提。

### 2.2 模拟电荷法的基本原理

模拟电荷法的核心思想是静电场唯一性定理,将原本分布在电极表面上的连续自由电荷用一组虚拟的离散模拟电荷来代替,同时将非均匀媒介空间变换成均匀媒介,只要离散电荷产生的电位满足原本的边界条件即可利用叠加原理求出原本连续电荷所产生的空间电场。

### 2.3 模拟电荷法的应用步骤

(1)在具有边界的电极内部设置一组模拟电荷  $Q_j(j=1,2,\dots,n)$ 。

(2)在给定边界的电极表面设置一组匹配点  $K_i(i=1,2,\dots,k)$ ,各匹配点电位  $\varphi_i$  已知,其大小由实际的电压等级所决定。

(3)计算电位系数,任意匹配点的电位是由全部的模拟电荷叠加产生的,可逐次列出各匹配点的电位方程:

$$\begin{cases} P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 + \dots + P_{1n}Q_n = \varphi_1 \\ P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2 + \dots + P_{2n}Q_n = \varphi_2 \\ \vdots \\ P_{k1}Q_1 + P_{k2}Q_2 + \dots + P_{kn}Q_n = \varphi_k \end{cases} \quad (4)$$

由此构成矩阵方程:

$$\mathbf{PQ} = \boldsymbol{\varphi} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{P}$  为电位系数矩阵,其元素  $P_{ij}$  表示第  $j$  段模拟电荷在第  $i$  个匹配点处产生的电位系数。

(4)求解式(5)中矩阵方程即可获得全部模拟电荷值  $\mathbf{Q}$ 。

(5)基于叠加原理即可计算空间中任一点的电场值  $E$ 。

## 3 三维模型建立与电场计算式推导

### 3.1 建立输电线模型

本文同时考虑杆塔两侧输电线,输电线上的荷载沿水平方向均匀分布,使用平抛物线方程来建模。以杆塔轴心与大地的交点作为原点,以输电线方向为  $X$  轴,线路垂直方向为  $Y$  轴,垂直地面方向为  $Z$  轴,建立如下模型:

$$z = \begin{cases} \frac{g}{2\delta}(x+l_1)x + H & x \leq 0 \\ \frac{g}{2\delta}(x-l_2)x + H & x > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $g$  为比载,  $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$ ;  $\delta$  为输电线水平应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;  $l_1$  为左档距,  $\text{m}$ ;  $l_2$  为右档距,  $\text{m}$ ;  $H$  为输电线在杆塔上的悬挂高度,  $\text{m}$ ;  $z$  为悬链线上任一点的对地高度值,  $\text{m}$ 。

实际输电线由若干分裂子导线构成,将其等效成一根圆柱形导线<sup>[17]</sup>,如图 1 所示。

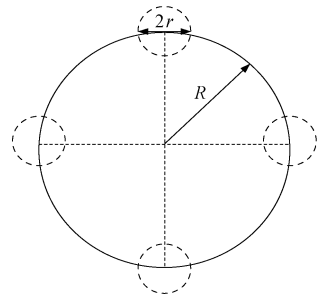


图 1 等效半径图

Fig.1 Diagram of equivalent radius

等效半径为:

$$R_{eq} = R \sqrt[n]{nr} \quad (7)$$

式中,  $R_{eq}$  为等效半径;  $R$  为分裂间距;  $r$  为子导线半径;  $n$  为子导线个数。

### 3.2 模拟电荷的设置与计算

#### 3.2.1 悬链线模型的非均匀划分

模拟电荷的设置依赖于输电线模型的划分结果。在实际环境下,悬链线的状态会受到应力、比载、弧垂的影响,不同环境下的悬链线方程也不同。本文对悬链线模型进行非均匀划分,首先将横坐标进行等间隔划分处理,如图2所示。 $f(x)$  表示区间  $[x_1, x_2]$  内平抛线方程,即式(6),  $g(x)$  表示节点连线。当两者的积分相对误差满足设定的拟合精度,便可用  $g(x)$  代替  $f(x)$ 。若不满足精度则继续在此区间内进行划分,直到满足精度。拟合精度为相对误差的阈值,本文设置为 0.05%。

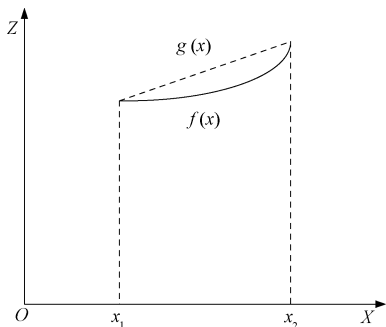


图2 模型离散化示意图

Fig.2 Schematic diagram of model discretization

非均匀划分不指定具体的划分段数,根据模型的变化和积分误差调整划分的间隔,目的是为了以更少的离散段去拟合实际的悬链线,降低后续的计算量。以本文中单相输电线为例,在满足拟合精度的情况下,均匀划分得到的离散段数为 50,而非均匀划分仅需 41 段。

#### 3.2.2 模拟电荷的设置

在离散后的每一段等效输电线轴心周围以  $2\pi/D$  为角度间隔均匀设置一组线电荷,  $D$  为线电荷的数量,其值等于分裂子导线的个数;设置线电荷距离轴心的距离为  $0.1R_{eq}^{[18]}$ ,结果如图3所示。

#### 3.2.3 模拟电荷的计算

在输电线表面设置一组匹配点,为线电荷建立独立二维坐标系<sup>[19]</sup>,如图4所示。

线电荷方向为纵轴  $z$ ,匹配点到线电荷的垂线方向为横轴  $\rho$ ,  $A(O, z'_0)$  和  $B(O, z'_1)$  为线电荷的起

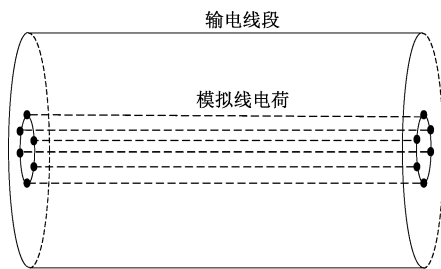


图3 设置模拟线电荷

Fig.3 Configuration of simulating line charge

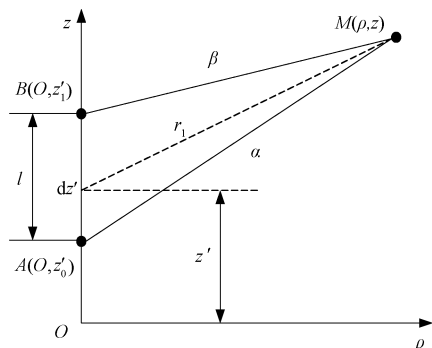


图4 线电荷单元

Fig.4 Unit of line charge

止点;  $l$  为线电荷的长度;匹配点  $M(\rho, z)$  处的电位  $\phi$  为:

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{z'_0}^{z'_1} \frac{\tau}{4\pi\epsilon r} dz' = \frac{\tau}{4\pi\epsilon} \int_{z'_0}^{z'_1} \frac{dz'}{\sqrt{\rho^2 + (z - z')^2}} \\ &= \frac{\tau}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(z - z'_0) + \alpha}{(z - z'_1) + \beta} \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\alpha, \beta$  分别为匹配点到线电荷两端的距离,  $\alpha = \sqrt{\rho^2 + (z - z'_0)^2}$ ,  $\beta = \sqrt{\rho^2 + (z - z'_1)^2}$ 。对模型采用了非均匀划分后,线电荷长度较小,认为电荷均匀分布,电荷密度  $\tau = Q/l$ ,匹配点处电位系数为:

$$P = \frac{1}{4\pi\epsilon l} \ln \frac{(z - z'_0) + \alpha}{(z - z'_1) + \beta} \quad (9)$$

根据第一类边界条件,匹配点的电位已知,用向量法表示为:

$$\varphi = \varphi_{Re} + j\varphi_{Im} \quad (10)$$

式中,  $\varphi_{Re} = |\varphi| \cos\theta$ ;  $\varphi_{Im} = |\varphi| \sin\theta$ ;  $\theta$  为各相线路的相位。最后通过求解模拟电荷矩阵方程,得到线电荷的实部与虚部为:

$$\begin{cases} P\mathbf{Q}_{Re} = \varphi_{Re} \\ P\mathbf{Q}_{Im} = \varphi_{Im} \end{cases} \quad (11)$$

### 3.3 三维电场计算式推导

将图4中的匹配点替换为实际场点,通过对式(9)沿坐标轴方向求导,得到两个方向的电场系数:

$$\begin{cases} f_\rho = -\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l} \left( \frac{z-z'_0}{\alpha} - \frac{z-z'_1}{\beta} \right) \\ f_{z'} = -\frac{\partial P}{\partial z'} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 l} \left( \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\alpha} \right) \end{cases} \quad (12)$$

应用到三维空间,电场系数分布情况如图 5 所示。

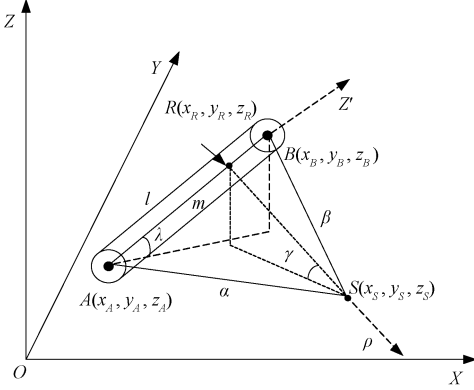


图 5 三维电场系数示意图

Fig.5 Diagram of three dimensional electric field coefficient

图 5 中, A 和 B 为线电荷的起止点, S 为计算场点, R 为场点 S 在线电荷段上的垂点, m 为 R 点和 A 点之间的距离,可正可负, m 为负数表示垂点 R 在线电荷的反向延长线上,利用向量计算  $m = (\mathbf{AS} \cdot \mathbf{AB}) / |\mathbf{AB}|$ , 可得 R 点坐标为:

$$\begin{cases} x_R = x_A + \frac{m(x_B - x_A)}{l} \\ y_R = y_A + \frac{m(y_B - y_A)}{l} \\ z_R = z_A + \frac{m(z_B - z_A)}{l} \end{cases} \quad (13)$$

利用空间变换,得到三维坐标系下的电场系数为:

$$f_x = f_{z'} \cos \lambda \frac{(x_B - x_A)}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} + f_\rho \cos \gamma \frac{(x_S - x_R)}{\sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2}} \quad (14)$$

$$f_y = f_{z'} \cos \lambda \frac{(y_B - y_A)}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} + f_\rho \cos \gamma \frac{(y_S - y_R)}{\sqrt{(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2}} \quad (15)$$

$$f_z = f_{z'} \sin \lambda + f_\rho \sin \gamma \quad (16)$$

式中,  $\lambda$  和  $\gamma$  分别为线电荷及其垂线段与水平面的空间夹角。利用图 5 中的空间几何关系可得:

$$\begin{cases} \lambda = \arcsin \left( \frac{z_B - z_A}{l} \right) \\ \gamma = \arcsin \frac{z_R - z_S}{\sqrt{(x_R - x_S)^2 + (y_R - y_S)^2 + (z_R - z_S)^2}} \end{cases} \quad (17)$$

根据上述推导可知,电场系数只与位置坐标有关而与电位无关,仅需利用求得的模拟电荷,即可得到任意场点 S 处三个方向的电场分量:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_x = f_x (Q_{Re} + jQ_{Im}) \\ \mathbf{E}_y = f_y (Q_{Re} + jQ_{Im}) \\ \mathbf{E}_z = f_z (Q_{Re} + jQ_{Im}) \end{cases} \quad (18)$$

进而得到最终场点的电场有效值 E:

$$E = \sqrt{\mathbf{E}_x^2 + \mathbf{E}_y^2 + \mathbf{E}_z^2} \quad (19)$$

## 4 算例与结果分析

在实际中,高压线周围产生的电场是一个随时间变化的交变电场,此处为方便计算,结合文献[20,21]在计算前作如下说明:

(1) 为给 ADSS 光缆寻找到合适的挂点位置,尽可能减少电腐蚀的影响,只有在最严峻的电场环境中寻找到的挂点位置才对实际工程有意义,因此本文后续的计算结果均为电场最大值(有效值)的分布情况。

(2) 输电线产生的交变电场视作准静态场。

(3) 忽略金具以及绝缘子串的影响。

(4) 用有效值向量表示对称三相输电线的正弦稳态电压:

$$\begin{cases} \varphi_A = \varphi_{ARe} + j\varphi_{AIm} \\ \varphi_B = \varphi_{BRe} + j\varphi_{BIm} \\ \varphi_C = \varphi_{CRe} + j\varphi_{CIm} \end{cases} \quad (20)$$

(5) 将各相导线的电位设置为额定电压有效值 U 的 1.05 倍用于计算。

$$|\varphi_A| = |\varphi_B| = |\varphi_C| = \frac{1.05U}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

现以 220 kV 三相单回路输电线路为例进行计算,过程如下。

### 4.1 建立三维模型

杆塔型号为 2B7-ZMC2 猫形塔,如图 6(a) 所示。输电线型号 LGJ-400/35,导线外径为 26.82 mm,分裂间距 400 mm,外相导线间距 12.4 m,在年平均气象条件的水平应力为 63.62 N/mm<sup>2</sup>,比载为 3.312×10<sup>-2</sup> N/(m·mm<sup>2</sup>)。对杆塔进行 1:1 实体



建模剖分,实体模型如图 6(b) 所示,模型部分坐标值见表 1。

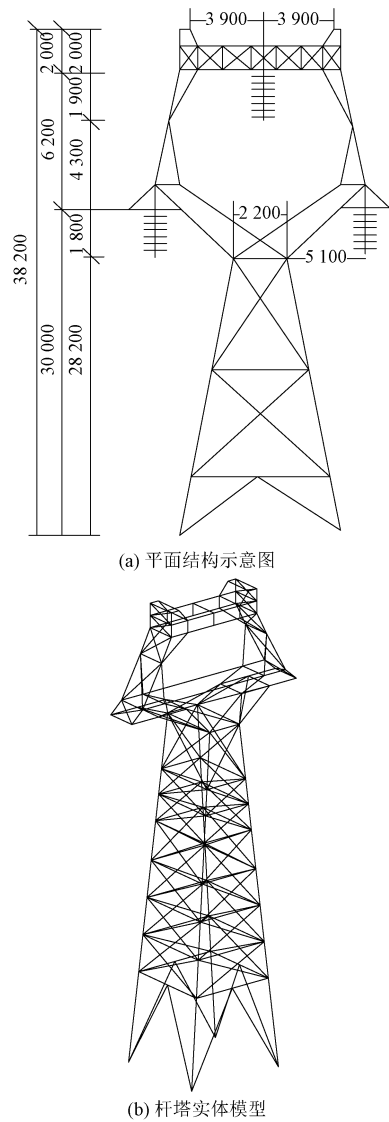


图 6 2B7-ZMC2 杆塔模型图

Fig.6 Diagram of 2B7-ZMC2 tower model

表 1 模型剖分坐标值

Tab.1 Model subdivision coordinates

节点标号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
1	-3	-3.22	0
2	-2.935	-3.083	1.825
3	-2.25	-3.083	1.825
4	-2.935	-2.415	1.825
5	-2.871	-2.945	3.65
⋮	⋮	⋮	⋮
307	-1	3.169	38.2
308	1	2.569	38.2
309	1	3.169	38.2

根据式 (6) 构建输电线模型,两侧档距均为

400 m,输电线等高悬挂,相序排列为 A 相、B 相、C 相,相位差 120°。挂点高度分别为 28.2 m、34.3 m、28.2 m,忽略金具和绝缘子串。得到两种计算模型,如图 7 所示。

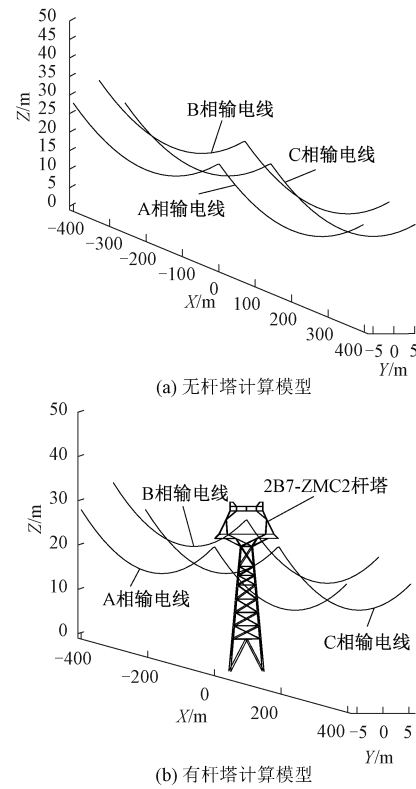


图 7 三维计算模型

Fig.7 Diagram of three-dimensional physical model

4.2 计算模型准确性及有效性检验

由于计算点处的电场测量难度较大,为校验本文所述方法的准确性与有效性,在 A 相输电线表面设置一组不同于匹配点的校验点(电位已知),以校验点电位相对误差作为比较依据,将本文所述方法与已有计算方法<sup>[17]</sup>进行对比。

4.2.1 准确性校验

校验点电位误差结果如图 8 所示。通过对比可知,在已有方法计算中,绝大部分校验点误差超过 5%,在输电线端部位置上的误差最大超过了 10%。相比之下,本文方法计算下的电位误差在 2% 以下,在端部位置处的误差要略大一些,需要进一步地处理,但是整体来看,本文方法的计算准确性明显更高。

4.2.2 有效性校验

效率方面,本文以电位系数计算的复杂性作为分析和比较的对象。表 2 统计了现有方法与本文方法在进行电位系数计算时所需的加法次数、乘法次

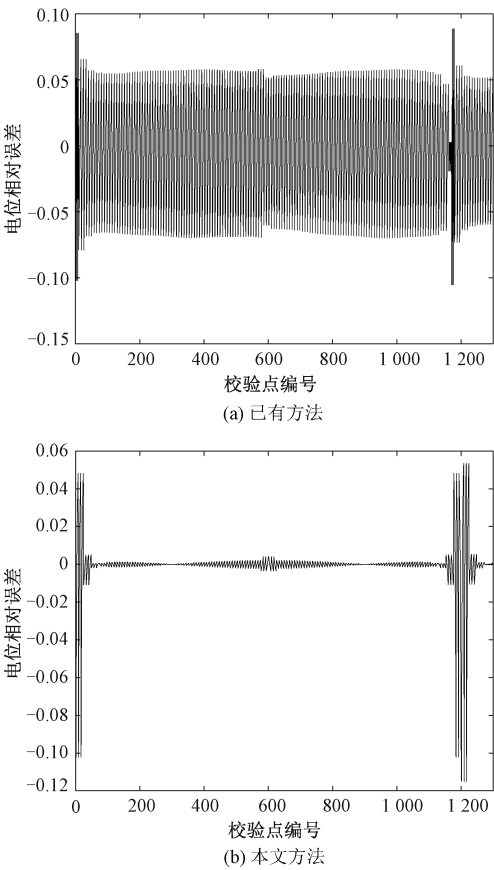


图 8 校验点电位相对误差图

Fig.8 Diagram of relative error of calibration point voltage

数以及计算电位相对误差仿真程序的运行时间。 $M$ 表示模拟电荷的个数, $N$ 表示计算点的个数, $MN$ 前面的数字表示计算一次所需的加法或者乘法次数。根据结果来看,本文方法计算的复杂性要低于现有方法,同时仿真时间更短,计算效率更高。

表 2 有效性比较

Tab.2 Effectiveness comparison

比较对象	已有方法	本文方法
加法次数	37MN	25MN
乘法次数	31MN	16MN
运行时间/s	40. 273 9	26. 120 4

由于存在导线端部效应,导致导线两端处的相对误差较高,为进一步减小误差,本文将模型分成两个部分。在输电线端部附近,模型的变化幅度较大,不宜设置太多匹配点,远离端部的位置,模型变化幅度相对平缓,可以按正常情况设置匹配点。本文将端部位置上的匹配点数量设置为其他位置处的 50%,得到校验点误差结果如图 9 所示。与图 8(b)的相比,端部位置的电位误差由最大接近 12%降低到了 5%左右,进一步提高了计算

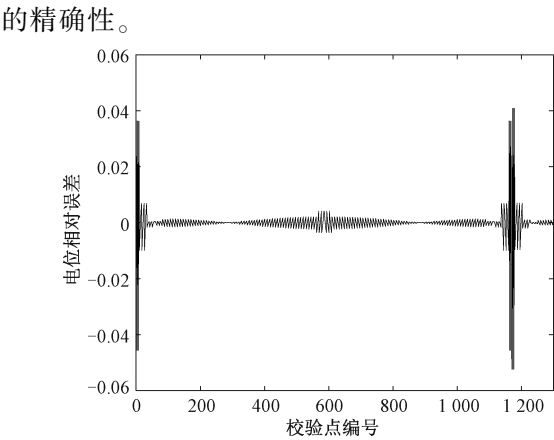


图 9 减弱端部效应后的电位相对误差图

Fig.9 Diagram of relative error of voltage after weakening end effect

4.3 三维电场的计算

4.3.1 电场沿轴线的分布情况

ADSS 光缆在实际环境下的走向与输电线走向一致,因此通过研究输电线轴线方向的电场分布可以反映出 ADSS 光缆所处的电场环境。

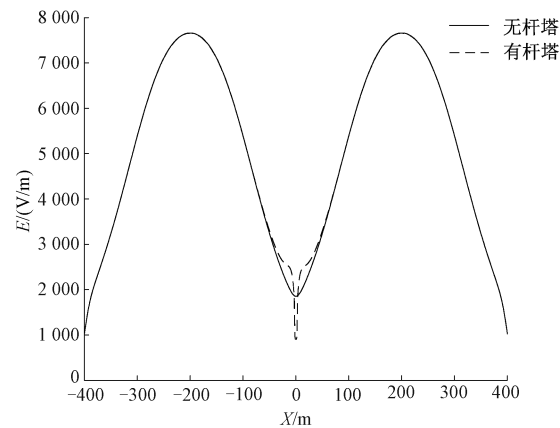
输电线在档距中央产生最大弧垂,在本算例中,最大弧垂处距离地面的高度为 18.35 m。选取最低点下 2 m(为计算方便,取整数 16 m)作为计算高度,得到 B 相导线下方电场强度值沿  $X$  轴的分布结果,以及  $x=0$  时电场强度值沿  $Y$  轴的分布结果。如图 10 所示,其中实线和虚线分别为无杆塔和有杆塔两种情况下的电场分布。

由图 10(a)可知,电场在杆塔两侧呈对称分布,最大值出现在档距中央处,为 7.656 kV/m。在  $x=0$  附近,由于杆塔的存在,导致电场产生了一定的畸变,畸变电场强度值为 0.904 kV/m,相比于没有杆塔下的电场减少了 0.95 kV/m。但是整体来看,杆塔对于电场沿  $X$  轴线方向的分布情况影响较小。

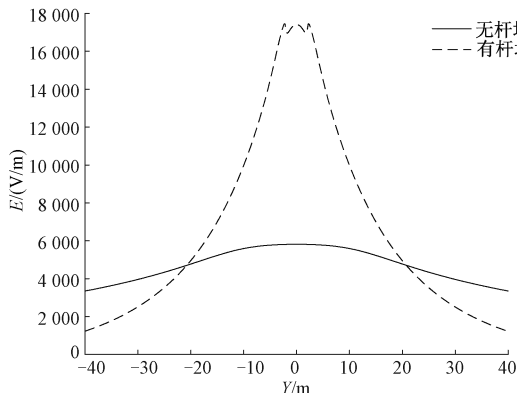
由图 10(b)知,电场也在  $Y$  轴上呈对称分布,无杆塔时  $x=0$  处的电场强度值最大,为 5.818 kV/m,本算例中的杆塔为猫形塔,有杆塔时的电场强度极值出现在“猫耳”附近,大小为 17.453 kV/m。这说明杆塔的存在对于附近的电场具有较大畸变作用,畸变幅度达 10 kV/m,同时杆塔的形状也在一定程度上影响着电场的分布,杆塔结构复杂的部分对电场的畸变影响更大。

4.3.2 电场在水平面上的分布

为更直观表示电场的分布情况,图 11 表示了电场强度值在距地 16 m 处水平面上的分布结果。



(a) B相导线距地16 m处电场分布



(b)  $x=0$ 处距地16 m电场分布

图 10 电场沿轴线分布图

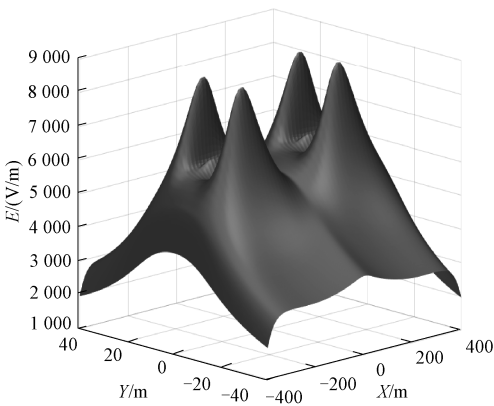
Fig.10 Diagram of electric field along axis

由图 11(a)可知,无杆塔影响时,电场沿中相输电线导线呈轴对称分布,极值出现在边相导线产生最大弧垂的位置附近,为 8.705 kV/m。而中相输电线受边相输电线的平衡作用导致其电场强度值相对较低。

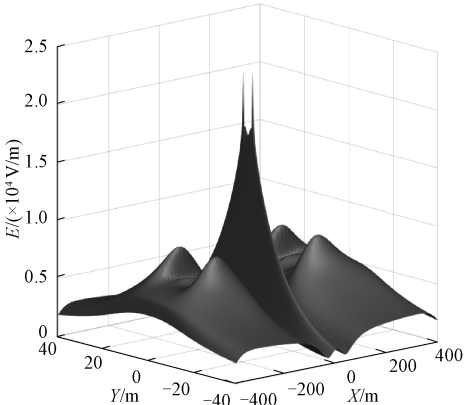
由图 11(b)可知,在考虑杆塔的影响之后,杆塔附近的电场产生畸变,电场强度极值达到了 23.192 kV/m。虽然杆塔的影响范围有限,但是杆塔所在的截面处,电场畸变程度最大,这对于 ADSS 光缆的稳定运行是十分不利的,为了选择合适的挂点位置,必须获取在杆塔截面处电场的详细分布图。

4.3.3 电场在竖直截面上的分布

计算  $x=0$  处竖直截面的电场强度值分布,结果如图 12 所示,图中线条表示电场强度值的等值线。由图 12(a)可知,没有杆塔影响情况下,电场线最密集的部分位于输电线挂点周围,空间电场强度值最高达到了 29.101 kV/m。整个电场以三个挂点为圆心呈现向外辐射的分布状态。由图 12(b)可知,杆塔的存在使电场分布更加复杂,杆塔的几何结构影响着电场的分布,不仅在输电线挂点周围,而且在杆



(a) 无杆塔电场水平分布图



(b) 有杆塔电场水平分布图

图 11 电场水平分布图

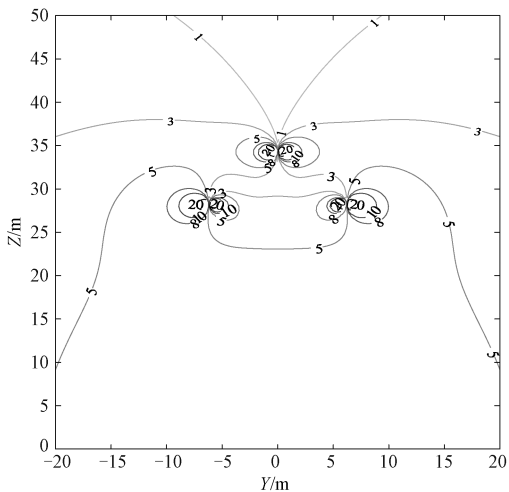
Fig.11 Diagram of electric field level distribution

塔几何架构交汇点附近,电场线都十分密集,空间电场强度极值可达到 40 kV/m 以上,杆塔边缘位置处的电场强度值达到了 10~20 kV/m,整体呈现以杆塔结构为中心向四周辐射的状态。这说明了在实际搭建过程中,ADSS 光缆的挂点应尽可能避免选择在杆塔几何架构交汇点的位置。

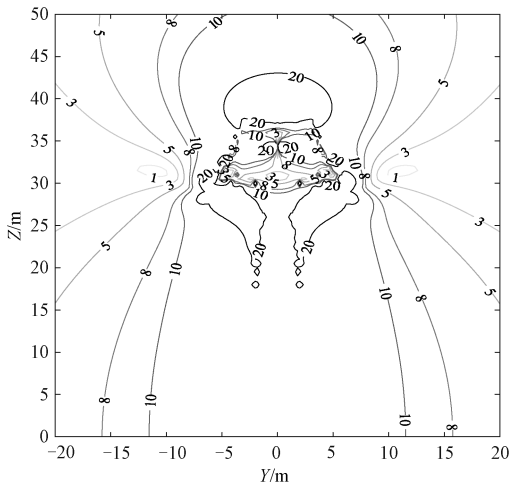
4.3.4 ADSS 光缆的挂点位置选取

ADSS 光缆的挂点位置直接决定了光缆表面所产生的感应电势的大小,为了削弱电腐蚀带来的破坏,理论上挂点处的空间电场越小越好。但在实际工程中,挂点位置的选取受限于线路状况、杆塔形状等因素。一般情况下,应在允许挂点中,选择电场较低的位置悬挂。

查阅相关资料<sup>[3,4]</sup>发现,220 kV 条件下,当 ADSS 光缆表面的泄露电流低于 1 mA 时,电腐蚀现象几乎不会出现,即当光缆表面的感应电势小于 10 kV时,光缆可以安全稳定地运行。同时,ADSS 光缆为全介质型光缆,其外部的保护套是产生感应电场的主要部件。因此,选择电势差较小的位置



(a) 无杆塔电场竖直平面等势图



(b) 有杆塔电场竖直平面等势图

图 12 电场等势图

Fig.12 Electric field contour map

(即电场强度低于 10 kV/m)作为挂点,光缆的保护套就不易形成干带电弧,造成断缆事故,影响远距离通信。

本例中,结合杆塔型号及电场分布结果,得到挂点选择示意图,如图 13 所示。结合 2B7-ZMC2 猫形塔下 220 kV 三相单回路输电线结构,图 13 中的 Q(0, 31)点附近电场大小在 3~5 kV/m 之间,符合前述的选择标准,因此可以作为 ADSS 光缆悬挂的参考点。

5 结论

本文以通过计算高压输电线周围的电场来寻找 ADSS 光缆挂点位置为研究目标,基于模拟电荷法建立了三维电场计算模型。并与现有方法进行对比,证明了本文方法的准确性与有效性。以此模型计算了 2B7-ZMC2 猫形塔下 220 kV 三相单回路输

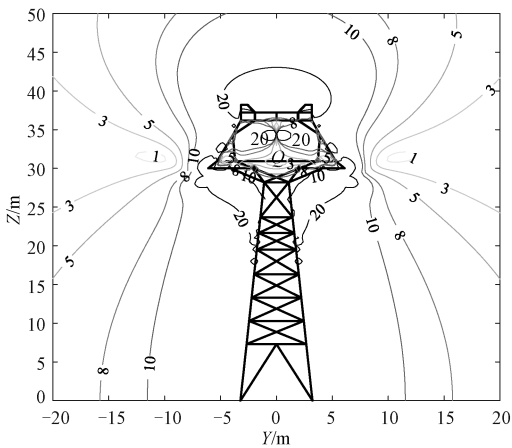


图 13 ADSS 光缆挂点图

Fig.13 Diagram of ADSS optical cable hanging point

电线下方距地 16 m 处的空间电场分布,研究了电场的分布特点,分析了杆塔对于电场分布的影响,并寻找到适合 ADSS 光缆运行的挂点位置,现得出以下结论:

(1)本文对物理模型采取非均匀划分策略,在传统模拟电荷法的基础上利用空间变化推导出简洁的三维电场数值解表达式,降低计算复杂性,通过计算校验点电位的相对误差(除端部点外,误差均小于 2%),并通过改进匹配点的设置,降低端部位置处的电位误差至 5%左右。验证了方法的准确性。该计算模型可应用于常见的高压输电线周围空间电场计算。

(2)电场在轴线以及水平面上的分布整体呈轴对称分布,电场强度最大值出现在弧垂最大处;杆塔对于电场沿 X 轴分布的影响不大,仅在 x=0 处产生小幅度的畸变;杆塔对于 Y 轴方向以及竖直截面上的电场分布有较大影响,越靠近杆塔,电场畸变程度越大,最大畸变幅度可达 10 kV/m。同时杆塔的几何结构影响着电场的分布,结构越复杂,电场畸变程度越大。ADSS 光缆在实际搭建中应尽可能避开这些位置。

(3)在实际工况中,必须针对不同的输电线路参数综合考虑 ADSS 光缆的合理挂点位置,减小电腐蚀带来的损害。本文提出的三维电场计算模型可以准确计算出空间中各位置处的电场分布,为工作人员选择合适的 ADSS 光缆挂点提拱了一种便捷有效的方法。

参考文献 (References):

[ 1 ] 傅宾兰 (Fu Binlan). 我国全介质自承式光缆的运行



- 状况及抗电腐蚀措施 (Operating situation of all-dielectric self-supporting optical cables in China and measures for its anti-electro-corrosion) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2005, 29 (24): 68-73.
- [2] 陈少磊, 罗洋, 邓平, 等 (Chen Shaolei, Luo Yang, Deng Ping, et al.). ADSS 光缆电腐蚀机理研究及防范措施应用 (Research on electro-corrosion mechanism of ADSS optical cable and application of preventive measures) [J]. 电力信息与通信技术 (Electric Power Information and Communication Technology), 2019, 17 (9): 67-73.
- [3] 常宗波 (Chang Zongbo). ADSS 光缆表面干带电弧的形成机制及控制 (The formation mechanism and control of dry band arc on the surface of ADSS optical cable) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2007, 33 (11): 242-244.
- [4] 杨承矩, 李瀚儒, 王学良, 等 (Yang Chengju, Li Hanru, Wang Xueliang, et al.). ADSS 光缆悬挂点选择的仿真研究 (The simulation study of the ADSS cable suspension point selection) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2015, 16 (5): 30-34.
- [5] 崔翔, 王福昌, 卢铁兵, 等 (Cui Xiang, Wang Fuchang, Lu Tiebing, et al.). 应用三维频域电场计算方法确定高压输电线路铁塔 ADSS 光缆的悬挂位置 (Applying three-dimensional electric field computational method to locate the ADSS optical fiber cable suspended on high voltage transmission line towers) [J]. 电力系统通信 (Telecommunications for Electric Power System), 2004, 25 (2): 12-16.
- [6] 俞集辉, 周超 (Yu Jihui, Zhou Chao). 复杂地势下超高压输电线路的工频电场 (Power-frequency electric field of EHV transmission lines under condition of complex landscape) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (1): 18-20, 44.
- [7] 周悦 (Zhou Yue). 输变电系统工频电场分布的模拟电荷分区域算法研究 (The calculation of power frequency electric field with charge simulation method based on domain decomposition method) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2018.
- [8] 罗鹏, 杨峰, 周君杰, 等 (Luo Peng, Yang Feng, Zhou Junjie, et al.). 500 kV 超高压变电站整体工频电场仿真计算与测量分析 (Analysis of power frequency electromagnetic field in 500 kV substation during fault status) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 67-73.
- [9] 徐禄文, 罗鹏, 邹岸新, 等 (Xu Luwen, Luo Peng, Zou Anxin, et al.). 基于模拟电荷法的变电站工频电场仿真分析 (Simulation and analysis of power frequency electric field in substation based on charge simulation method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (7): 27-31.
- [10] Shaalan E M, Ghanian S M, Ward S A. Analysis of electric field inside HV substations using charge simulation method in three dimensional [A]. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. West Lafayette, Indiana, USA, 2010. 1-5.
- [11] 李永明, 何胜鱼, 徐禄文, 等 (Li Yongming, He Shengyu, Xu Luwen, et al.). 500 kV 变电站中巡检机器人对人体的电场分布影响 (Effect of patrol robot on electric field distribution of human body in 500 kV substation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (9): 74-80.
- [12] Muhammad Waqas Khalid, Zakariya Al Hamouz. Transmission lines induced currents in human bodies using charge simulation method [A]. 2012 IEEE International Conference on Power and Energy [C]. Kota Kinabalu, Malaysia, 2012. 761-766.
- [13] 杨文翰, 吕英华 (Yang Wenhan, Lv Yinghua). 用模拟电荷法求解高压输电线附近电磁场 (Application of emulation charge method in calculation of electromagnetic environment near to HV transmission lines) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (2): 47-50, 55.
- [14] 汪泉弟, 罗扬, 杨帆, 等 (Wang Quandi, Luo Yang, Yang Fan, et al.). 超高压输电线下建筑物临近区域三维电场仿真 (Three-dimensional simulation of electric field around building under EHV transmission lines) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2013, 49 (10): 1-6.
- [15] 黄子璇, 席黎明, 樊梦旭, 等 (Huang Zixuan, Xi Liming, Fan Mengxu, et al.). 高压输电线下有建筑物时工频电场计算中模拟电荷设置方法的改进 (Improvement of simulation charge setting in calculation of power frequency electric field of high voltage transmission line above buildings) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (3): 788-793.
- [16] 邹岸新, 李永明, 王洋洋, 等 (Zou Anxin, Li Yongming, Wang Yangyang, et al.). 表面电荷法在复杂地势下超高压输电线路的工频电场计算 (Power-frequency electric field calculation of extra high voltage transmission line based on surface charge simulation method under complex landscape) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 51-57.
- [17] 彭迎, 阮江军 (Peng Ying, Ruan Jiangjun). 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场 (Calculation of

three-dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (12): 69-73, 77.

[18] 王珍雪, 马力, 叶会英, 等 (Wang Zhenxue, Ma Li, Ye Huiying, et al.). 模拟电荷法在 UHVDC 输电线路中的优化及应用 (Optimization and application of charge simulation method for UHVDC transmission lines) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2016, 52 (1): 15-20, 26.

[19] 倪光正, 杨仕友, 邱捷, 等 (Ni Guangzheng, Yang Shiyu, Qiu Jie, et al.). 工程电磁场数值计算 (Numerical calculation of engineering electromagnetic field) [M]. 2 版 (2nd ed). 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2010.

[20] 于龙梅, 怀新江, 徐宏久, 等 (Yu Longmei, Huai Xinjiang, Xu Hongjiu, et al.). 对三相水平布置高压线周围电场分布的研究 (Research on electric field distribution around three phase horizontal high voltage line) [J]. 东北林学院学报 (Journal of North-Eastern Forestry College), 1985, 13 (2): 107-111.

[21] 俞集辉, 王国辉 (Yu Jihui, Wang Guohui). 计及地电位升高的超高压交流输电线路工频电场计算 (Calculation of power frequency electric field strength caused by UHV-AC transmission line considering ground potentials rise) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2010, 46 (1): 22-26, 31.

## Effect of electric field around 220 kV transmission line on position of ADSS optical cable hanging point

LI Zheng-quan<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, GAO Zi-han<sup>1</sup>, YIN Feng-lei<sup>2</sup>

- (1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. Jiangsu Juliang Optoelectronics Technology Co., Ltd., Wuxi 214161, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem that ADSS cable is damaged by electric corrosion due to improper hanging point location on the tower, a three-dimensional electric field calculation model is proposed based on the theory of charge simulation method in this paper. A solid model of the tower is carried out, and the electric field calculation formula is improved by space transformation. The accuracy of the calculation model is verified by calculating the potential error at the calibration point. The electric field around the 220 kV three-phase single circuit transmission line is calculated by using the model, and the influence of the tower on electric field distribution is analyzed. The results show: the potential error at the calibration point is about 2%, which demonstrates accuracy of the calculation model; The tower has little effect on the distribution of electric field on the horizontal axis; In the vertical plane, the shape of the tower has a direct impact on the distribution of the electric field, and the electric field increases with the reduction of the distance to the tower. Finally, according to the distribution of electric field in the vertical plane where the tower is located and the control index of electric corrosion, the ADSS optical cable hanging point position that meets the use condition is obtained.

**Key words:** ADSS optical cable; hanging point; three-dimensional model; charge simulation method; space transformation; electric field distribution