

# 考虑复杂地势的交流超高压输电线路电场

吴小雁 薛毓强 黄云程

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350116)

**摘要** 为研究超高压输电线路穿越复杂地势的工频电场, 采用有限元法, 根据悬链线方程求杆塔等高的输电线弧垂, 构造不同地势的数学模型, 建立 500kV 超高压交流输电线的计算模型, 进行电场计算分析。500kV 交流输电线下电场可近似垂直于地面, 同相序双回路输电线的工频电场关于输电线路中心轴对称, 随着距中心距离增加而减小。同一位置的电场在不同地势情况下不同, 线路中心正下方距地 1.5m 处的电场在水平地面时最小, 凹形地面时最大。此种考虑地势的计算模型大大提高了工频电场计算的准确性, 对非平原地区输电线的电场研究具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 超高压输电线路; 工频电场; 模型; 有限元法; 复杂地势

## Electric Filed of EHV Transmission Lines under Condition of Complex Landscape

Wu Xiaoyan Xue Yuqiang Huang Yuncheng

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116)

**Abstract** To precise research of the power frequency electric field under the condition of complex landscapes, based on the finite element analysis method, got the wire's lowest sag part by catenaries' formula, a mathematical model of landscape and the calculation model of 500kV AC EHV transmission line were made respectively to analysis the distribution of electric field. The electric filed of EHV Transmission Lines approximately perpendicular to the ground and symmetric about the center of the transmission line when EHV Transmission Lines are double circuit and the same phase sequence, the electric filed decreases with the distance from the center increasing. The electric field in the same position is different under different landscape, the electric field in 1.5 meters from the ground is least when the ground is flat. Conversely, it's largest under concave ground. The calculation model considering complex landscape greatly improves the accuracy of the power frequency electric field and has a certain reference value for the electric study of non-plain transmission line.

**Keywords:** EHV transmission line; power frequency electric field; model; FEM; complex landscape

随着电网建设速度的加快, 人们对生活环境质量要求的提高, 超高压输变电工程的电磁环境已成为如今大家关注的热点。超高压输变电工程中所产生的工频电场、工频磁场、无线电干扰和噪声等问题是否会对居民、牲畜以及生态环境的造成影响是现今越来越多学者研究的问题<sup>[1-2]</sup>。人们最关心的问题是输电线路的电磁场是否会对人们的身体健康以及牲畜造成影响, 因此, 输电线路下方的电磁场的数值计算成为超高压输电环境影响分析的重要部分。文献[3]考虑输电线路的弧垂, 建立三维计算模型, 利用有限元法分析电磁场分布与相序排列方式

以及杆塔结构的关系; 文献[4]提出了基于电场逆运算求输电线路的弧垂的方法, 利用模拟电荷法求解电场的逆过程, 运用遗传算法求弧垂以实现对弧垂的实时监测; 文献[5]分析覆冰、风速等不同条件对高压输电线路电场的影响, 利用 Matlab 进行仿真分析; 文献[6]提出一种适用于特高压输电线电场计算的 OpenMP 多核并行方法, 提高电场计算速率以及计算精度。以上文献均能实现对输电线路电场的计算, 但都将大地看做一个无穷远的水平面, 实际中输电线路穿越的地势除平原地区外都是较复杂的地势情况, 因此以上分析在应用领域上具有一定的局

限性。文献[7]采用优化模拟电荷法建立考虑不同地势情况的数学模型,计算分析单回以及双回输电线的电场,但是其数学模型的优化目标函数随着匹配点增多优化困难加大,匹配数目较小又会影响优化精度。因此,本文为研究不同地势的电场分布情况,采用有限元法,根据悬链线方程求杆塔等高的输电线路弧垂,取弧垂最低点为线路距地高度,构造不同地势的数学模型,建立500kV特高压交流输电线路的计算模型,进行二维电场计算分析。

## 1 电场计算理论

电场理论由一套麦克斯韦方程组描述,由安培换路定律,法拉第电磁感应定律,高斯电通定律和高斯磁通定律组成,电场的微分形式如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot D &= \rho\end{aligned}\quad (1)$$

工频输电线路周边的感应电场远小于库仑电场,近似认为电准静态场,即

$$\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0 \quad (2)$$

可忽略不计,得到电准静态场的麦克斯韦方程式

$$\begin{aligned}E &= -\nabla \phi \\ \nabla^2 \phi &= -\frac{\rho}{\epsilon}\end{aligned}\quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  表示介质的介电常数,  $E$  表示电场强度,  $\phi$  表示电位。 $\nabla^2$  为拉普拉斯算子,即

$$\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

求解电场微分方程,还需要确定边界条件,分界面上无自由电荷,狄里赫利边界条件表示为

$$\begin{aligned}D_{1n} &= D_{2n} \\ E_{1t} &= E_{2t} \\ \phi|_{\Gamma} &= g(\Gamma)\end{aligned}\quad (5)$$

式中,  $D_{1n}$  和  $D_{2n}$  分别为边界两侧的法向电通量;  $E_{1t}$  和  $E_{2t}$  分别为边界两侧的切向电场强度;  $\Gamma$  为狄利克莱边界;  $g(\Gamma)$  是位置的函数,可以为常数和零,当为零时称为奇次边界条件。本文对输电线路电场研究,边界面为地面和无限远处,无限远边界和地面边界的电位均取零。

## 2 超高压输电线路电场仿真模型

### 2.1 线路基本参数

仿真计算选取福州笠里往洋中方向的交流超高压输电线路,额定电压525kV,运行最大电压值535kV,额定相电流4416A,输电导线型号4\*JL/G1A-800/55,采用4分裂。杆塔型号为5K1-SDC1,可知三相输电线路间的垂直和水平间距,采用双回路同相序排列方式。

实际上,由于输电线自重等因素,悬挂在两基杆塔间的输电线呈悬链线形状。当输电线悬挂两端点等高(离地高度均为H)时,最大弧垂出现在档距中央。根据文献[10],其以档距中央正下方地面上一点为原点,输电线方向为x轴,垂直地面方向为y轴的悬链线方程为

$$y = \frac{L}{a} \left( \cosh \frac{ax}{L} - \cosh \frac{a}{2} \right) + H \quad \left( -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \right) \quad (6)$$

计算电场时,取弧垂最低点为线路距地高度。其弧垂计算公式:

$$s = \frac{L}{a} \left( \cosh \frac{a}{2} - 1 \right) \quad (7)$$

式中,  $a = \gamma L / \sigma_0$  为导线水平应力系数,其中  $\sigma_0$  为导线水平应力(MPa);  $\gamma$  为导线比载;  $L$  为档距(m)。

为方便计算分析,采用等效的单根导线代替分裂导线,求相导线的等效半径。

$$R_{eq} = \sqrt[m]{mrR^{m-1}} \quad (8)$$

式中,  $m$  为分裂根数;  $r$  为子导线半径;  $R$  为分裂导线外接圆半径。

### 2.2 二维电场建模

为方便计算分析,将模型进行如下简化:①忽略线路端部效应和弧垂影响,将输电线视为无限长直平行导线,并取输电线弧垂最低点的对地距离为导线的离地高度;②视输电线路工频电场为准静态场;③大地的影响架设超高压输电线杆塔须接地良好,与大地等电位,计算中取大地为零电位;④输电导线为光滑圆柱体,导线表面等电位;⑤忽略输电线周围建筑物或树木的影响。

先假定地面为水平面时,建立模型,如图1所示,以档距中心为坐标原点,水平地面为x轴。

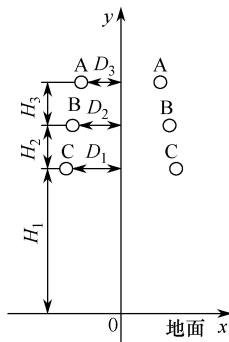


图 1 水平地面模型

图 1 中,  $H_1 = 35\text{m}$ ;  $H_2 = H_3 = 13\text{m}$ ;  $D_1 = 10\text{m}$ ;  $D_2 = 9.5\text{m}$ ;  $D_3 = 9\text{m}$ 。

凹形和凸形地面模型分别如图 2 (a)、(b) 所示。凸形地面以开口向下的抛物曲面逼近, 方程  $y = -ax^2$ , 凹形地面以开口向上的抛物曲面(线)  $y = ax^2$ ,  $a$  的取值决定地面凹凸程度, 计算中选取  $a = 0.0025$ 。

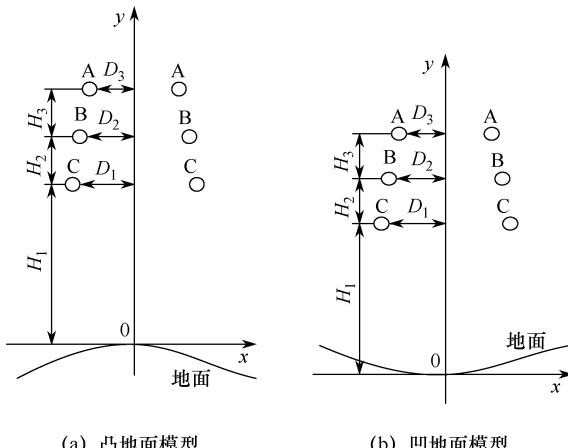


图 2 不同地面模型

交流超高压输电线路的电场计算选择运行的最高电压, 即 535kV, 三相导线电压的瞬时表达式如下:

$$\begin{aligned} u_a &= 308 \cos(\omega t) \\ u_b &= 308 \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_c &= 308 \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (9)$$

电场求解时, 按  $t = 0$  和  $t = T/4$  时, 由上式分别计算三相导线的瞬时电压, 在输电线表面施加电压, 分别进行两次求解, 再对两次的结果进行均方根计算, 得到电场的有效值。对电场大小及分布情况进行分析时, 选取距地面 1.5m 处的电场, 即人体心脏的高度。

利用 ANSYS 有限元仿真软件搭建如图 1 模型,

以原点为中心, 100m 为半径的圆弧和地面组成有限元的计算空间, 边界电位取零。

### 3 工频电场仿真结果与分析

采用水平地面的模型, 通过有限元仿真软件 ANSYS 仿真后, 将地面上方 1.5m 处的  $x$ 、 $y$  方向以及合成场强导入 Matlab 进行均方根计算, 并画出场强与距线路中心距离的曲线,  $x$  轴为距离线路中心距离,  $y$  轴为电场强度, 得到水平地面时, 地面 1.5m 处的纵向电场分布图, 如图 3 所示, 其中图 3 (a) 为  $x$ 、 $y$  方向的电场, 图 3 (b) 为合成电场。

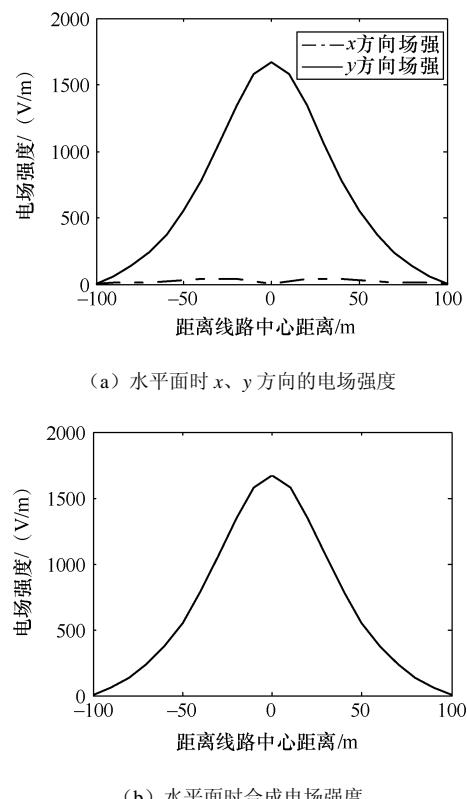


图 3 水平面时输电线下距地 1.5m 处的电场强度

由图 3 可看出, 500kV 同塔双回路下  $x$  方向的电场值趋近于零, 因此电场可近似于垂直地面。 $x$  方向的电场中心值为零, 是由双回路输电线路分布沿中心对称, 两回路产生的电场方向相反相互抵消造成的。 $y$  方向的电场关于中心轴对称, 随着距线路中心距离的增大而减小, 距线路中心 100m 处趋近于 0。

图 3 (b) 的合成电场分布规律同  $y$  轴方向电场一致, 最大值不超过 2000V/m, 符合《500kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》的

要求。凸形地面和凹形地面上超高压输电线路的电场分别如图 4、图 5 所示。

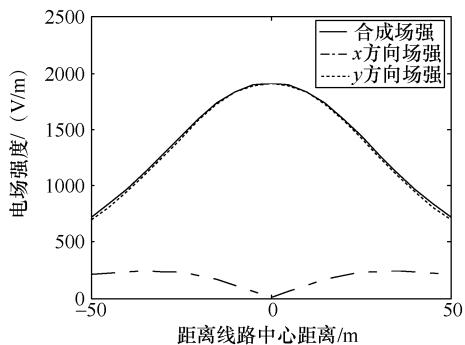


图 4 凸面时输电线下距地 1.5m 处的电场强度

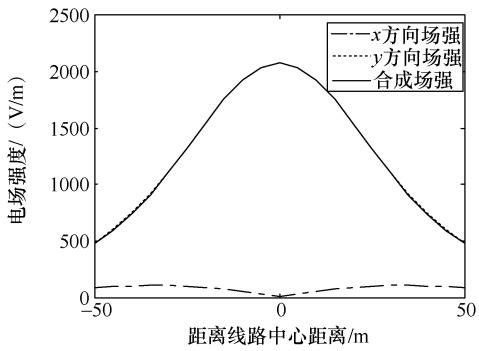


图 5 凹面时输电线下距地 1.5m 处的电场强度

从图 4 和图 5 可以看出, 凸形地面和凹形地面上超高压输电线路的电场分布规律同水平地面一致, 合成电场值近似等于  $y$  方向的电场值, 线路中心的最大电场值均不超过规范设定的限值 5 kV/m。但是不同地势条件在一定程度上会影响电场强度的大小和分布情况, 三种地势条件下的电场分布如图 6 所示。

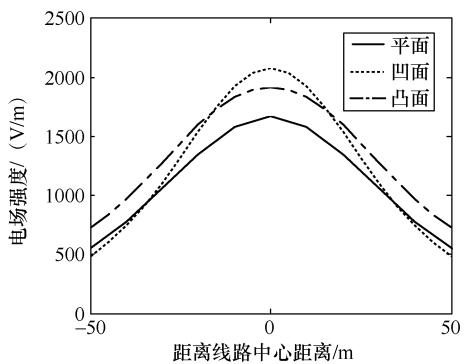


图 6 三种地势下输电线下距地 1.5m 处的电场强度

由图 6 对比三种不同地势的电场, 得到以下几点计算结果分析:

1) 不同地势条件下, 高压输电线路下方的电场

关于中心点对称, 沿  $x$  轴方向的值都很小, 对输电线路电场环境影响分析时, 可近似垂直于地面。

2) 地势不同, 电场分布规律相同, 线路中心的电场值最大, 电场随着距离线路中心距离的增大而减小。这三种地势情况的电场最大值不同, 随距离增大而减小的梯度也不一样; 相同位置, 不同地势下的电场值不同。

3) 地面近似为水平面的电场最大值小于凹面和凸面的电场最大值, 但是随着距离增加约至 40m 左右, 凹面电场值开始小于水平地面时的电场值, 且凹面电场值随着距离增大而下降的梯度最大。反之, 凸面电场随着距离增大而下降的梯度最小, 超过一定距离时, 凸面时的电场值在这三种地势情况下最大。

#### 4 结论

通过采用有限元法, 对输电线路进行一定的简化, 搭建仿真模型, 对不同地势情况的电场进行仿真分析, 计算得到的电场关于线路中心轴对称, 随距离增大方向而减小的梯度不一样, 相同位置, 不同地势下的电场值不同。因此需要根据不同的地势情况, 再结合规范对电场值的限制, 适当调整居民区距输电线路的距离。此外, 为尽可能减小输电线路居民区的电场值, 除了传统上增大居民区距输电线路的距离外, 也可以根据实地情况选择穿越不同的地势区域, 或者根据穿越的不同地势情况确定不同杆塔高度。

考虑地势的输电线路计算模型能更加准确地分析输电线路下方的电场分布, 更贴近实际情况, 对超高压输电线路穿越非平原地区的建设具有一定的指导意义及对非平原地区的输电线路电场分析具有一定的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 刘华麟, 汪泉弟, 俞集辉, 等. 500 kV 超高压输电线下方电磁环境测量与分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(5): 28-31.
- [2] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [3] 许丹, 马星河, 王晨辉, 等. 500kV 输电线路电场强度测量与计算分析[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 25-28, 34.
- [4] 陈楠, 文习山, 蓝磊, 等. 基于电场逆运算的输电导线弧垂计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011,

(下转第 15 页)