

特高压直流输电铁塔附近三维电场仿真计算

秦澔澔¹, 李阳阳², 彭 涛³

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉精测电子集团股份有限公司, 湖北 武汉 430072; 3. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 随着越来越多的输电线路穿越人口密集区, 人们对电磁环境的关注不断增强, 尽管国内外对输电线路电磁环境已有很多研究, 但对输电铁塔周边的电场分析计算却未曾见诸报道。为了实现输电线路电磁环境的准确评估, 基于 Deutsch 假设的解析方法, 结合线单元模拟电荷法及悬链线方程, 通过搭建三维铁塔计算模型, 提出了特高压直流输电铁塔周边的电场三维计算方法, 计算了 ± 800 kV 特高压直流输电线路铁塔附近的地面合成电场强度, 通过与现场实测数据的比较, 证明了模型和算法的有效性。通过与忽略铁塔影响时的计算结果进行对比, 分析了铁塔对地面电场的影响。研究结果表明: 铁塔对其下方的地面电场强度削弱近 30%, 在塔基部的电场强度有明显畸变, 铁塔对其附近电场的影响距离与塔基尺寸呈正相关, 近似于塔基边长的 1.5 倍。

关键词: 线单元模拟电荷法; 三维铁塔模型; Deutsch 假设; 地面合成电场; 铁塔影响距离

Simulation and calculation of the three dimensional electric field near UHVDC power transmission tower

QIN Haohao¹, LI Yangyang², PENG Tao³

(1. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Jingce Electronic Group Co.,Ltd., Wuhan 430072, China;

3.State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: In order to accurately calculate the ground electric field near the UHVDC power transmission tower, based on actual structure of tower and the equation of transmission lines, a three-dimensional model to compute the total electric field near tower is built. According to the charge simulation method and the assumption of Deutsch, the total ground electric field near ± 800 kV tower is calculated. By comparison with the measured data, the validity of the model and algorithm is proved. Research results show that there is a certain shielding effect of transmission tower on ground surface electric field, so the electric field intensity beneath the tower decreases obviously. The electric field has clear distortion at the positions where metal frameworks are erected.

Key words: charge simulation method; three-dimensional transmission tower model; the assumption of Deutsch; total ground electric field; tower impact distance

0 引言

由于特高压直流输电工程的大力发展, 其输

电线路产生的电场对生态环境的影响引起了广泛的关注^[1]。目前已经有很多学者对特高压直流输

电线路下电场的计算进行了研究,提出了很多种不同的方法来分析线路下方的电场强度,如采用反映电场横截面分布的二维线路模型^[2-4]和采用模拟电荷法计算大跨越输电线路三维电场的三维输电线路模型^[5-6]。这些方法能够很好地解决输电线路下方的电场强度计算及仿真问题,准确地获得实际的线路下方三维电场分布。但是在已有的研究中,尚未发现有针对直流输电线路铁塔附近电场的相关研究,而铁塔作为特高压直流输电的重要组成部分,必定会暴露在公共环境中,并对周边的电场产生影响。由于时常会有工作人员进行带电作业,其安全防护措施也需要考虑电场的影响。因此,需要对铁塔附近的地面电场分布进行计算,确定铁塔对线路下方地面电场分布影响的具体情况。

本文将基于Deutsch假设的解析方法与单元模拟电荷法及悬链线方程相结合,通过建立铁塔三维模型,提出铁塔附近地面的三维电场强度计算方法,对铁塔附近的地面电场进行计算,分析铁塔对附近电场的影响,为输电线路铁塔周围的电磁环境分析提供参考。

1 输电线路及铁塔模型

1.1 铁塔模型

本文以 ± 800 kV向上直流输电工程中最常见的支撑铁塔为例进行计算建模^[7]。由于铁塔包含的零部件很多,且不是所有的零部件都对地面电场产生影响,因此在建模过程中需要有选择地舍弃一些对电场影响较小的零部件。基于此,对铁塔进行了简化。

1) 考虑铁塔的主要金属构架,舍弃绝缘子串以及一些金具。

2) 在铁塔构架的中心轴线上设置模拟线电荷,其匹配点设置在金属构架的表面。

3) 由于铁塔接地,认为铁塔表面电位为地电位。

4) 对于较长的金属构架,可以分为多段,每段分别设置模拟电荷。

简化后的铁塔模型如图1所示。

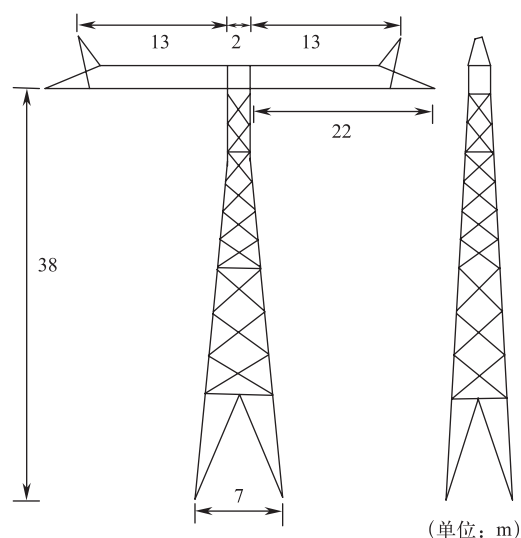


图1 铁塔计算模型图(正面及侧面)

Fig. 1 The views of the tower model

1.2 架空输电线路的悬链线方程

由于特高压直流输电线路在一个档距内两端悬挂点相距较远,因此可以忽略导线材料的影响,将架空导线视为一根柔软的链条^[8]。以输电线路纵向为 x 轴,横向为 y 轴,竖直方向为 z 轴建立直角坐标系,设铁塔正下方地面中心为坐标原点。做一个档距内的架空线路模型及铁塔附近的输电线路模型,如图2、图3所示。

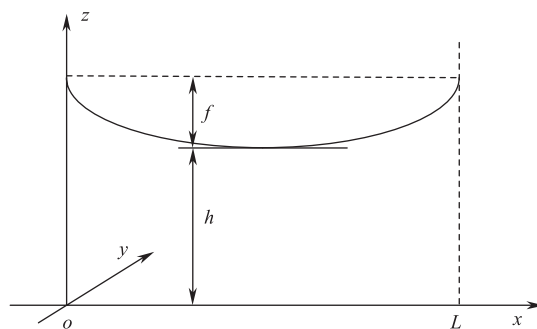


图2 架空输电线路模型图

Fig. 2 The model of overhead transmission line

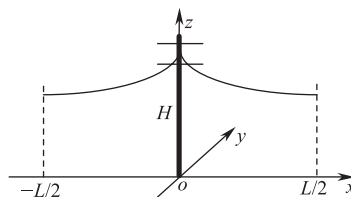


图3 含铁塔的架空输电线路纵向截面示意图

Fig. 3 Sketch map of longitude section around tower

图中, H 为导线悬挂点高度, m; L 为线路档距, m; h 为导线最低点对地高度, m; f 为最大弧垂, m。

根据受力平衡, 可求得该架空输电线的悬链线方程为

$$z = h + \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(ch \frac{\gamma(x-L/2)}{\sigma_0} - 1 \right) \quad (1)$$

最大弧垂为

$$f = \frac{\sigma_0}{\gamma} \left(ch \frac{\gamma L}{2\sigma_0} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, σ_0 为导线水平应力, MPa; γ 为导线比载, N/m·mm²。

由式 (1) 以及线路纵向坐标, 即可求得线路上任一点的空间位置, 同档距内输电线路均可采用这一方程。

2 计算方法

特高压直流输电线路下的合成电场主要由标称电场和空间离子流场组成。本文采用线单元模拟电荷法求解线下及铁塔附近的标称电场, 通过 Deutsch 假设的解析方法求得合成电场, 其基本原理如下。

2.1 线单元模拟电荷法

在如图 4 所示的坐标系中任意放置一有限长的直线电荷, 设 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 为该线电荷端点坐标, $P(x, y, z)$ 为线电荷外任意一点。

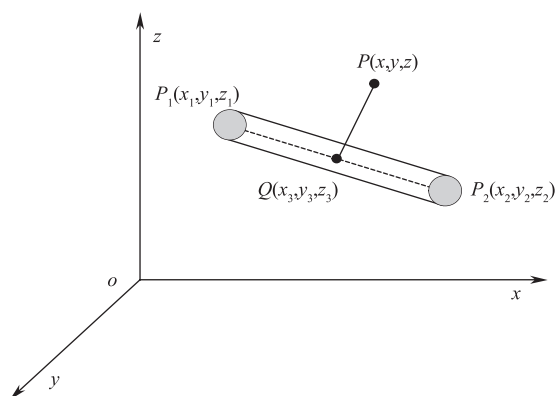


图 4 线单元模拟电荷模型

Fig. 4 The model of simulation charge of line unit

以 P_1 为起点, 沿 P_1P_2 方向建立局部坐标

u , 该线单元的长度为 L , 假设线电荷密度为 $\tau(u) = au + b$, a 、 b 为待定系数。计算可得该线单元电荷对场内任意一点 $P(x, y, z)$ 产生的电场强度为

$$\begin{aligned} E_{px} &= -\frac{\partial \varphi_p}{\partial x} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(x-x_1-lt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+ G})^3} dt \\ E_{py} &= -\frac{\partial \varphi_p}{\partial y} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(y-y_1-mt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+ G})^3} dt \\ E_{pz} &= -\frac{\partial \varphi_p}{\partial z} = \frac{L}{4\pi\epsilon_0} \int_0^1 \frac{(At+B)(z-z_1-nt)}{(\sqrt{Et^2+ Ft+ G})^3} dt \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $l = x_2 - x_1$; $m = y_2 - y_1$; $n = z_2 - z_1$; $u \in [0, L]$;

$E = l^2 + m^2 + n^2$; $F = -2[l(x-x_1) + m(y-y_1) + n(z-z_1)]$;

$G = (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2$; $A = aL$; $B = b$ 。

设置 $\tau(0) = \tau_1$, $\tau(u) = \tau_2$, 在本文中, 假设输电线上一个线单元的模拟电荷密度相同, 所以有 $A=0$, $\tau_1=b$ 。可得 P 点的电场强度值为

$$E_p = \sqrt{E_{px}^2 + E_{py}^2 + E_{pz}^2} \quad (4)$$

从而可以求得空间任意一点处的标称电场。

2.2 Deutsch 假设法

考虑空间电荷对电场的影响, 根据电磁场基本理论可以得到描述直流线路离子流场的控制方程为

$$\nabla \cdot E_s = \rho / \epsilon_0 \quad (5)$$

$$J = K\rho E_s \quad (6)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

式中, E_s 为空间合成电场; ρ 为空间电荷密度; J 为空间离子流密度; K 为离子迁移率; ϵ_0 为空气介电常数。

2.2.1 基本假设

基于 Deutsch 假设, 有

$$E_s = AE \quad (8)$$

式中, E 为标称电场; A 为该点处的一个标量函数。

设带电粒子从导线表面发出或终止于导线表面位置处的 A 值为 A_e , 则

$$A_e = |E_{0eq} / E_{max}| \quad (9)$$

式中, E_{max} 为带电粒子从导线表面发射或到达导

线表面时该位置的最大场强； E_{0eq} 为子导线表面起晕场强，本文采用皮克公式计算得到。

2.2.2 电力线的计算

假设带电粒子在空间内移动时的步长为 L ，空间中任意一点 P 在 x 、 y 方向的场强分量为 E_x 、 E_y ，则对于经过点 $P(x, y)$ 的电力线轨迹且与点 P 距离一个步长的点 $P_1(x_1, y_1)$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_1 = x + \lambda L(E_x / \sqrt{E_x^2 + E_y^2}) \\ y_1 = y + \lambda L(E_y / \sqrt{E_x^2 + E_y^2}) \end{cases} \quad (10)$$

式中， λ 为常数，取 ± 1 。若带电粒子由点 P 运动至点 P_1 ，则 λ 取1；若带电粒子由点 P_1 运动至点 P ，则 λ 取-1。根据式(10)可以获得经过点 P 的电力线轨迹。

2.2.3 合成电场的计算

通过对电力线的计算，可以获得电力线上任一点处的标称电场强度，并得到任意相邻两点之间的电位差，即

$$d\phi_i = \frac{1}{2}(E_{xi} + E_{x(i+1)})(x_{i+1} - x_i) + \frac{1}{2}(E_{yi} + E_{y(i+1)})(y_{i+1} - y_i) \quad (11)$$

式中， E_{xi} 、 E_{yi} 分别为第 i 个点 x 、 y 方向的电场分量。

由文献[9]可知

$$A^2 = A_e^2 + \frac{2A_e\rho_e}{\varepsilon_0} \int_{\phi_1}^U E^{-2} d\phi \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{1}{\rho_e^2} + \frac{2}{\varepsilon_0 A_e \rho_e} \int_{\phi_1}^U E^{-2} d\phi \quad (13)$$

$$\rho_m = \frac{\int_{\phi_1}^U d\phi_1 \int_{\phi_1}^U \frac{\rho}{E^2} d\eta}{\int_{\phi_1}^U \int_{\phi_1}^U \frac{1}{E^2} d\eta d\phi_1} \quad (14)$$

$$\rho_m = \frac{\varepsilon_0(U - U_0)}{\int_{\phi_1}^U \int_{\phi_1}^U E^{-2} d\eta} \quad (15)$$

式中， ρ_m 为该电力线的平均电荷密度； ϕ_1 为该电力线上任一点处的电位； U 为极导线的对地电压； U_0 为极导线的起晕电压。

设定导线表面电荷密度 ρ_e 的取值，由式

(13)和式(14)可以获得该电力线的平均电荷密度，该值若与式(15)计算得到的值相等，则认为设定的 ρ_e 正确，否则改变 ρ_e 的值，重新进行求解。

3 算法验证

本文通过将所编程序的计算结果与现场实测数据进行比较分析来验证算法的正确性。在四川某换流站外特高压直流输电线路弧垂最低点下方地面处进行实地测量。图5为计算结果与实测数据的对比图。

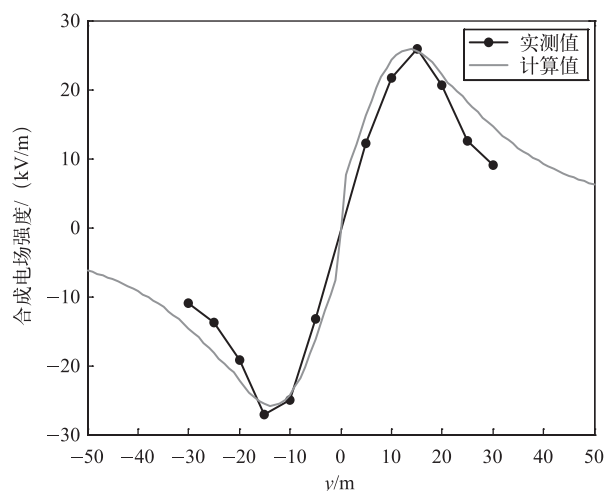


图5 测量值与计算值的对比

Fig. 5 Comparison of the measured values and calculated values

本文中所测得的合成电场最大值的平均值和最大值分别为27.1 kV/m和27.6 kV/m，本文所计算的合成电场最大值为26.84 kV/m，与最大值的相对误差为2.75%，与平均值的相对误差为0.96%。由于实测时受天气条件影响很大，风速、气压及导线的污秽程度难以确定，所以在测量时应该取测得的平均值作为参考，本文所建模型的合成电场最大值处的计算值与实测的平均值相对误差在可以接受的范围内，且计算值与实测值有较好的一致性，证明了所建模型和算法的正确性。

4 铁塔附近电场的计算与分析

4.1 铁塔附近地面电场的计算

用上述方法对图1、图2所建模型进行编程，

通过计算得到铁塔周围地面处的电场分布情况，如图6所示。

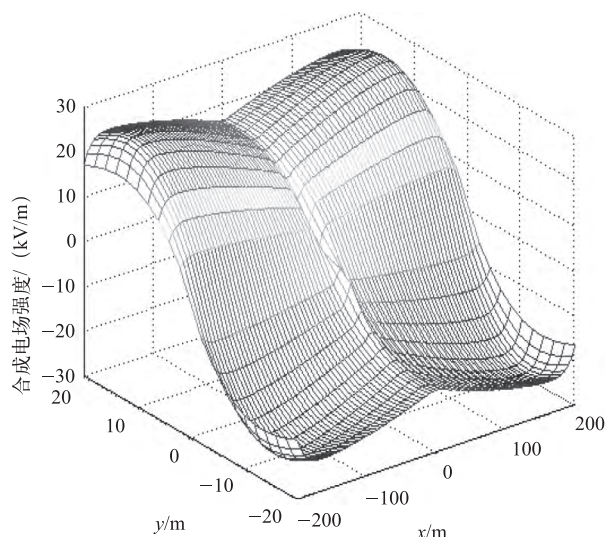


图6 考虑铁塔时地面附近的合成电场分布

Fig. 6 The distributions of total electric fields at ground with tower

图6为以铁塔为中心，沿x轴方向 ± 200 m、沿y轴方向 ± 20 m范围内的地面合成电场强度。为了更好地显示铁塔附近的地面电场，对铁塔附近50 m范围进行了细剖分，并重新计算，结果如图7所示。

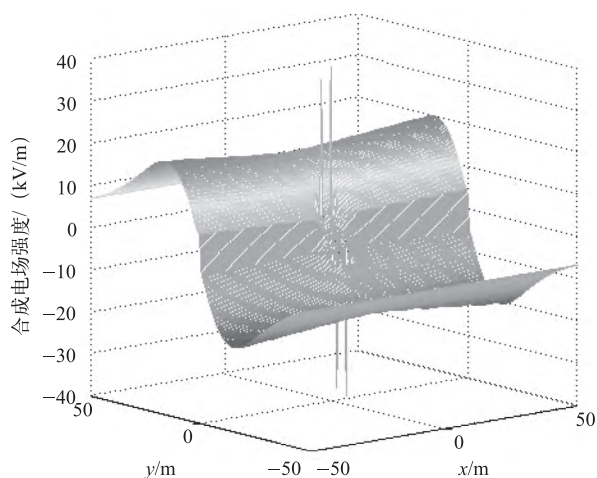


图7 铁塔附近50 m内的地面合成电场分布

Fig. 7 The ground electric field distribution within 50 m around the tower

为了更好地说明铁塔对其附近地面电场的影响，忽略铁塔的作用，重新计算铁塔附近的地面合成电场强度，如图8所示。

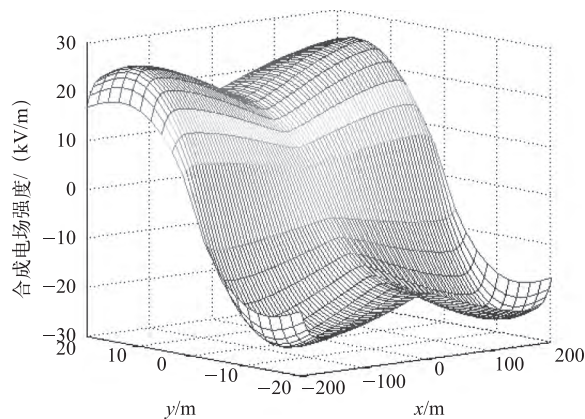


图8 不考虑铁塔时铁塔附近的地面合成电场分布

Fig. 8 The distributions of ground electric fields near the tower is not considered

4.2 铁塔的屏蔽作用和畸变作用分析

通过对比图6与图8，可得铁塔对其附近的地面合成电场有屏蔽和畸变作用。本文以铁塔中心处与输电线垂直的横截面($x=0$ m)以及塔基处横截面($x=3.5$ m)的电场分布为例，对比不考虑铁塔影响时的电场分布，结果如图9、图10所示。

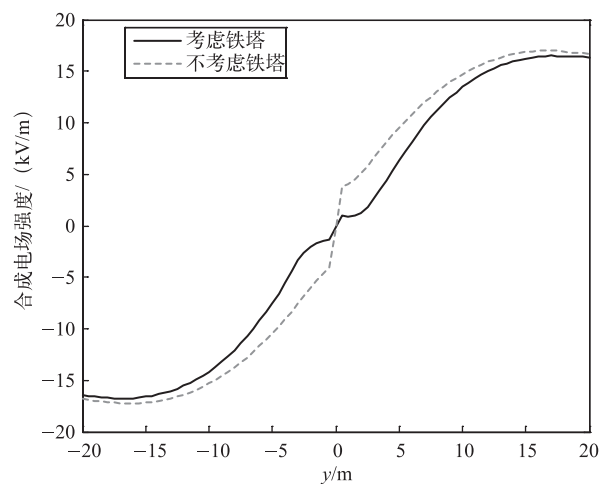


图9 $x=0$ m处的合成电场横向分布

Fig. 9 Transverse distribution of electric field at $x=0$ m

从图9中可以明显看出铁塔对附近电场有屏蔽作用。从图10中可以看出电场强度在此处发生了畸变，说明了铁塔的构架对电场有畸变作用。

通过对 $x=0$ m处的数据进行处理，获得了铁塔对 $x=0$ m处横截面的地面合成电场屏蔽参数，具体如图11所示。

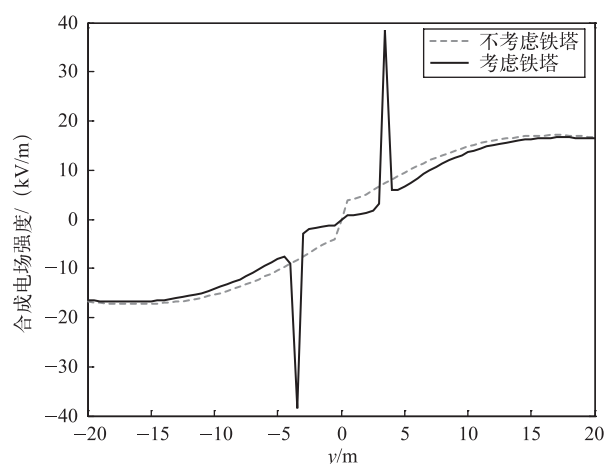
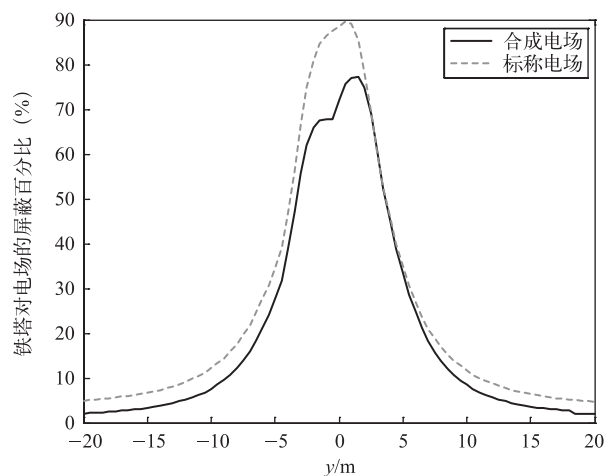
图 10 $x=3.5$ m 处的合成电场横向分布Fig. 10 Transverse distribution of electric field at $x=3.5$ m

图 11 铁塔对周边电场屏蔽的百分比

Fig. 11 The percentage of shield electric field with tower

从图11中可以看出,在铁塔的正下方,铁塔可以减弱30%以上的标称电场和合成电场;在正中心的位置,其屏蔽可以将电场强度减弱60%以上。对于该横截面处铁塔附近的电场,距离铁塔越远,其影响越小。

4.3 铁塔影响范围分析

根据文献[10-11]中所述,可以用影响距离来描述铁塔对其周围地面电场的影响。如果线路任一点处的电场强度与忽略铁塔影响时该点的电场强度值相对误差小于5%,则认为铁塔对该点处的电场强度没有影响。定义铁塔的影响距离为线路某一截面受铁塔影响情况下的地面电场强度与不考虑铁塔时此处的地面电场强度相对误差等

于 $\pm 5\%$ 时该处位置与铁塔正中心的水平距离。对图1所建铁塔模型进行计算分析,取 x 轴 $-50\sim 50$ m等距离的201个横截面,每一横截面在 $-50\sim 50$ m范围内的200个点,并进行计算分析,获得考虑铁塔与不考虑铁塔时电场的相对误差大于5%的点的个数,如图12所示。

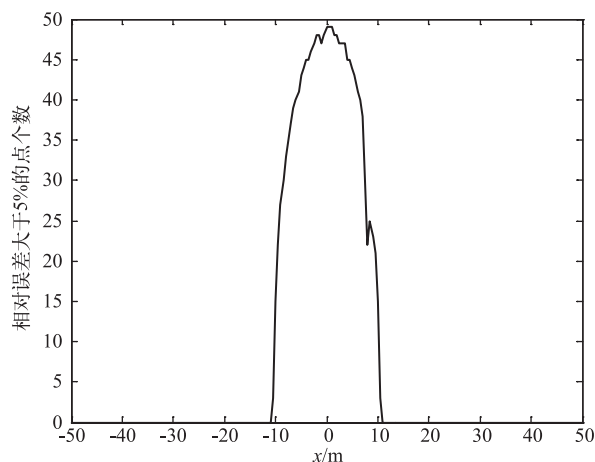


图 12 塔基为 7 m 时的影响距离

Fig. 12 The impacting distance of tower when tower foundation is 7 m

从图12可以看出,当塔基为7 m时,沿 x 轴方向铁塔周边10 m内,一横截面的地面电场均会受到铁塔的影响,使其包含有电场相对误差大于5%的点。故该铁塔的影响距离为10 m。

比较不同铁塔高度的铁塔影响距离,其结果见下表。

表 铁塔高度与影响距离的关系

Tab. The relationship between the height of the tower and the influence of the distance

(单位: m)		
铁塔高度	塔基边长	影响距离
32	6	9
38	7	10
44	8.8	13
51	11.5	17

由上表可得,铁塔的高度决定了塔基的边长,而铁塔的影响距离与塔基的边长成正比。从表中可以归纳如下结论:铁塔的影响距离近似为塔基边长的1.5倍。因此,在计算输电线下的电场强度或者进行测量时,应注意保持与铁塔中心

的距离,避免因铁塔的影响而导致测量或计算误差。

5 结束语

本文结合线单元模拟电荷法和Deutsch假设的方法,通过建立铁塔的计算模型,提出了直流输电铁塔的三维电场计算方法,实现了对铁塔附近地面的三维电场计算,获得了该区域精确的三维电场分布情况,对特高压直流输电线路下的三维合成电场以及铁塔附近的合成电场计算均适用,具有一般性。

1) 铁塔会对附近的地面合成电场产生一定的屏蔽和畸变作用。通过对比分析,得出铁塔使其正下方的地面电场降低60%以上,对周边的地面电场也有一定的削弱作用。合成电场在铁塔的构架处产生畸变。

2) 通过对不同铁塔高度时铁塔的影响距离进行比较,表明与铁塔中心点的距离大于1.5倍塔基边长时,可以认为铁塔对该处的地面电场无影响。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] MARUVADA P SARMA, DALLAIRE R D, Norris-Elye OC. Environmental effects of the nelson river HVDC transmission lines-RI, an, electric field, induced voltage and ion current distribution tests [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 98(6): 1924-1936.
- [3] TAKUMA T, KAWAMOTO T. A very stable calculation method for ion flow fields of HVDC transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 189-198.

- [4] AL-HAMOUZ Z, ABDEL-SALAM M. Finite-element solution of monopolar corona on bundle conductors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2): 380-385.
- [5] 文武, 彭磊, 张小武, 等. 特高压大跨越架空线路三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1821-1825.
- [6] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.
- [7] 李勇伟, 周康, 李力, 等. ± 800 kV直流特高压输电线路的设计[J]. 高电压技术, 2009 (7): 1518-1525.
- [8] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [9] 罗兆楠, 崔翔, 甄永赞, 等. 直流输电线路三维离子流场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 102-107.
- [10] 范与舟. 输电线铁塔附近和变电站三维电场计算[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [11] 李永明, 范与舟, 徐禄文. 超高压输电线路铁塔附近地面工频电场仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 782-787.

作者简介

秦瀚瀚(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统电磁兼容相关的研究工作。

李阳阳(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路在线监测相关的研究工作。

彭涛(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统电磁兼容相关的研究工作。

(收稿日期: 2015-11-18)