

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.030

500 kV同塔双回紧凑型输电线路电磁环境分析

潘茜雯, 罗日成, 唐祥盛, 潘俊文, 张 显

(长沙理工大学, 长沙 410114)

摘要: 为了有效分析500 kV同塔双回紧凑型输电线路周围电磁环境。文中将模拟电荷法与矩量法相结合进行电场计算,采用毕奥—萨瓦定律进行磁场数值,采用激发函数法及美国BPA推荐的预测法进行可听噪音、无线电干扰计算。研究了500 kV同塔双回紧凑型线路不同子导线类型、导线相间距、下相导线最低高度下的电磁场强度、可听噪音、无线电干扰。研究表明:为满足线路下方电磁环境要求,邻近民房下相导线最低点对地高度不低于16 m,通过公众容易接触和跨越公路的地区下相导线最低点不低于12 m,跨越农田下相导线最低点对地高度不低于10 m;导线相间距建议取6.7 m。研究结果为500 kV同塔双回紧凑型线路的设计提供参考。

关键词: 500 kV; 紧凑型输电线路; 电磁场强度; 无线电干扰; 可听噪音; 模拟电荷法; 矩量法

Analysis on Electromagnetic Environment of 500 kV Compact Transmission Line with Double Circuits on the Same Tower

PAN Qianwen, LUO Richeng, TANG Xiangsheng, PAN Junwen, ZHANG Xian

(Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To effectively analyze the electromagnetic environment of 500 kV compact transmission lines with double circuits on the same tower, the charge simulation method and the moment method are combined to calculate the electric field, Biot-Savart principle is employed to calculate the magnetic field, and the excitation function method as well as the BPA-recommended prediction method is adopted to calculate the audible noise and radio interference. As a result, the electric and magnetic field strength, audible noise and radio interference of the 500 kV compact transmission line with different sub-conductor types, phase spacing and the lowest height of lower phase conductor are obtained and analyzed. Results show that in order to meet the requirements for the electromagnetic environment under the transmission line, the smallest height of the lower phase conductor adjacent to houses ought to be not less than 16 m, in public area and across-road area the smallest height of the lower phase conductor ought to be not less than 12 m, the smallest height of the lower phase conductor across farmland ought to be not less than 10 m, and the spacing of phase conductors is recommended 6.7 m.

Key words: 500 kV; compact transmission line; electric and magnetic field strength; radio interference; audible noise; charge simulation method; moment method

0 引言

随着中国经济的飞速发展,对电力的需求越来越

越大,而土地资源日趋紧张,输电走廊的选取日益困难,在发展特高压输电技术的同时,进一步提高输送容量,节约线路走廊,成为当今输电技术领域的一个重要研究课题^[1-3]。500 kV 同塔双回紧凑型输

收稿日期:2017-06-18; 修回日期:2017-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助课题(50977003);电力与交通安全监控及节能技术教育部工程研究中心基金(2010#03)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50977003), Power and Traffic Safety Monitoring and Energy Saving Engineering Research Center of Ministry of Education Fund Code(2010#03).

电线路可较大幅度提高自然输送功率,减少线路走廊宽度,降低输电线路综合造价,有助于解决中国耕地少、传输容量需求大,一次能源分布不均衡的矛盾,对更好地实现“西电东送”和“全国联网”具有重要的社会意义和经济意义^[4-7]。

由于 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路的相间距离大大减少,导致线路下方的电磁环境恶化,在设计输电线路时应对其线路下方的电磁环境进行系统研究,确保线路的正常运行^[8]。文中采用模拟电荷法^[9]与矩量法^[10]相结合的方法计算同塔双回紧凑型输电线路导线下的三维工频电场^[11-12],计算考虑弧垂。采用激发函数法^[13]对无线电干扰进行计算^[14-15]。在晴好天气时的可听噪声计算方法运用美国 BPA 推荐的预测法^[16],雨天的可听噪声则运用 GE 公式^[16]计算。对不同导线型号、导线相间距、最低相距地面的距离对于 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁场环境中工频磁场、无线电干扰、可听噪音等参数的影响进行了系统的研究^[17-19]。研究结果为 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路的设计提供参考。

1 理论计算

1.1 模拟电荷法

电位控制方程为

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \\ \nabla^2 \varphi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

第 1 类边界条件为

$$\varphi|_{L_1} = f_1(P) \quad (2)$$

不同介质的分界面条件为

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在实际的工程问题中,模拟电荷法在保持边界条件不变的前提下,用等效替代和迭加原理的思想建立匹配点的电位方程组

$$P \cdot Q = \varphi \quad (4)$$

式(4)中: P 为电位系数矩阵; Q 为线电荷密度矩阵; φ 为电位矩阵,通过方程组(4)可以计算出离散线电荷密度,从而计算出场域中任意一点的电位和电场。

1.2 矩量法

对于线性结构系统,电位满足积分方程

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int_{l'} \frac{\tau(r')}{|r-r'|} dl' \quad (5)$$

式(5)中: ε 为介电常数; τ 为线电荷密度; r 为场

点矢量; r' 为源点矢量; l' 为所有电荷存在的区域。

对于实际的输电线路,应考虑大地的影响。根据镜像法,式(5)应修改为

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \left[\int_{l'_1} \frac{\tau(r')}{|r-r'_1|} dl' + \int_{l'_2} \frac{\tau(r')}{|r-r'_2|} dl' \right] \quad (6)$$

式(6)中: r'_1 为实际源点矢量; r'_2 为镜像源点矢量。

将所有积分区域 l' 分为 N 段,每段分别记为 $\Delta l'$,采用式(7)为分域基函数,则可将线电荷密度表示为式(8)

$$f_i(r) = \begin{cases} =1 & r \in \Delta l' \\ =0 & r \notin \Delta l' \end{cases}; \quad (7)$$

$$\tau(r') = \sum_{i=1}^N f(r') \tau_i \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),得

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{i=1}^N \tau_i \left[\int_{l'_1} \frac{\tau(r')}{|r-r'_1|} dl' + \int_{l'_2} \frac{\tau(r')}{|r-r'_2|} dl' \right] = \varphi(r) \quad (9)$$

选择狄拉克 δ 函数作为权函数 ω_j ,如式(10)

$$\omega_j = \delta_j = (r-r'_j) \quad j=1,2,\dots,N \quad (10)$$

在积分区域内 l' 对每个 ω_j 取式(9)的内积,则

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{i=1}^N \tau_i \int_{l'_1} \delta(r-r'_j) \left[\int_{l'_1} \frac{\tau(r')}{|r-r'_1|} dl' + \int_{l'_2} \frac{\tau(r')}{|r-r'_2|} dl' \right] dl' = \int_{l'_1} \delta(r-r'_j) \varphi(r) dl' \quad (11)$$

根据狄拉克 δ 函数的性质及式(7),式(11)可简化为

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{i=1}^N \tau_i \left(\int_{\Delta l'_1} \frac{1}{|r-r'_1|} dl' + \int_{\Delta l'_2} \frac{1}{|r-r'_2|} dl' \right) = \varphi(r'_j); \quad (12)$$

$$l_{ji} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \left(\int_{\Delta l'_1} \frac{1}{|r-r'_1|} dl' + \int_{\Delta l'_2} \frac{1}{|r-r'_2|} dl' \right) \quad (13)$$

则式(12)可化为

$$\sum_{i=1}^N l_{ji} \tau_i = \varphi(r'_j) \quad j=1,2,\dots,N \quad (14)$$

将式(14)写成矩阵形式,即

$$[l_{ji}][\tau_i] = [\varphi_i] \quad (15)$$

从而得到每一小段导体的线电荷密度 τ_i 的矩阵形式为

$$[\tau_i] = [l_{ji}]^{-1} [\varphi_i] \quad (16)$$

根据 Gauss-Seidel 迭代法可解出式(16)的矩阵,从而计算出电场强度

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \sum_{i=1}^N \tau_i \left(\int_{\Delta l'_1} \frac{r-r'_1}{|r-r'_1|^3} dl' + \int_{\Delta l'_2} \frac{r-r'_2}{|r-r'_2|^3} dl' \right) \quad (17)$$

磁感应强度 B 的计算式为

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_1} \frac{Idl \cdot (r-r')}{|r-r'|^3} \quad (18)$$

实际输电线路的导线形态并不是长直导体,而是存在一定弧垂的悬链线,引入式(19)所示的悬链线方程

$$Z = \frac{h}{l}x - \frac{\gamma xl - x}{2\sigma_0 \cos\beta} + H_1 \quad (19)$$

式(19)中: h 为架空线悬点间高差; l 为档距; γ 为架空线比载; σ_0 为架空线任意一点处张力的水平分量; β 为架空线悬点连线倾斜角; H_1 为档距一端杆塔悬点地对地高度。

若使用线路最大弧垂 f_m 作为输入参数,将式(20)代入式(19)可得式(21)。

$$f_m = \frac{l^2 \gamma}{8\sigma_0 \cos\beta}; \quad (20)$$

$$z = -\frac{4f_m}{l^2}x^2 + \frac{h-4f_m}{l}x + H_1 \quad (21)$$

式(21)表明,只要确定了线路最大弧垂 f_m ,架空线悬点间高度差 h ,线路档距 l ,档距一端杆塔高度 H_1 ,即可模拟出该段档距内线路的几何形态。根据式(21),便可将任意一段档距内的线路用任意段短直导体来模拟,进而运用矩量法计算线路全档距内所产生的电场。值得一提的是,对于任意线性结构的系统,均可用多段短直导体来模拟,因此该方法也适用于变电站等复杂结构输电系统的电磁场计算。

2 线路电磁场影响因素分析

2.1 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁场控制标准

根据国内外交流特高压输电线路下电磁场强度的限制值的研究成果^[20]可知,对于 500 kV 同塔双回紧凑型线路的控制标准如下所示:

1)工频电场。邻近民房时,房屋所在位置的未畸变电场限值为 4 kV/m;对于一般地区,如公众容易接近的地区、线路跨越公路处,场强限定在 7 kV/m 内;跨越农田时,场强限定在 10 kV/m 内;对于人烟稀少的偏远地区,非大众活动区域或偶尔有人经过的区域,场强限值可以放宽至 12 kV/m。

2)工频磁场。在线路下方的工频磁感应强度要控制在 0.1 mT(80 A/m)以内。

2.2 工程概况

文中以长沙新建的下岭坡到星城变段 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路作为研究对象,线路导线采用钢芯铝绞线,线路架设两条地线,其中一根采用

36 芯 OPGW-17-150-3 复合光缆,另一根采用 JLB40-150 铝包钢绞线,线路档距为 300 m,线路考虑弧垂为 10 m。导线参数见表 1,线路在杆塔上的分布情况见图 1,杆塔示意图见图 2。

表 1 导线参数

Table 1 Parameter for wire

导线型号	外径/cm	直流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	分裂间距/cm	分裂导线根数
6XJL/G1A-300/40	2.394	0.096 14	37.5	6
OPGW-17-150-3	1.660	0.330 00	0.0	0
JLB40-150	1.575	0.295 00	0.0	0

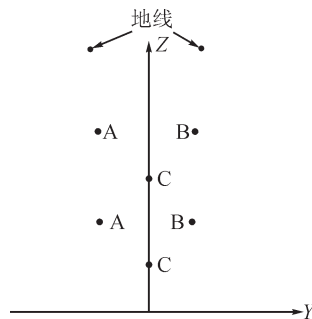


图 1 导线相序分布图

Fig. 1 Distribution of line phase

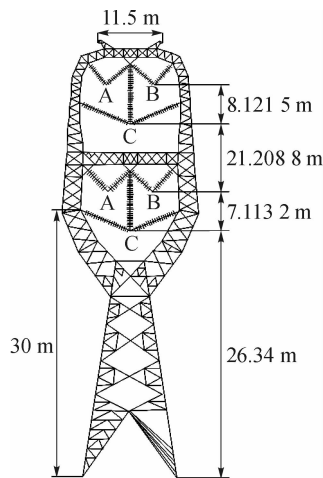


图 2 杆塔示意图

Fig. 2 Present of tower

2.3 线路下方电磁场分布情况

2.3.1 电场强度分布情况

计算以下相导线最低点投影到距地面 1.5 m 处的点为中心,长为 200 m,宽为 40 m 的长方形区域内的电场强度分布。仿真结果见图 3。由图 3 可以知,距线路水平距离越远,电场强度越低;距下相导线最低点越近,电场强度越大,约为 3.406 kV/m。

2.3.2 磁场强度分布情况

以下相导线最低点投影到距地面 1.5 m 处的点

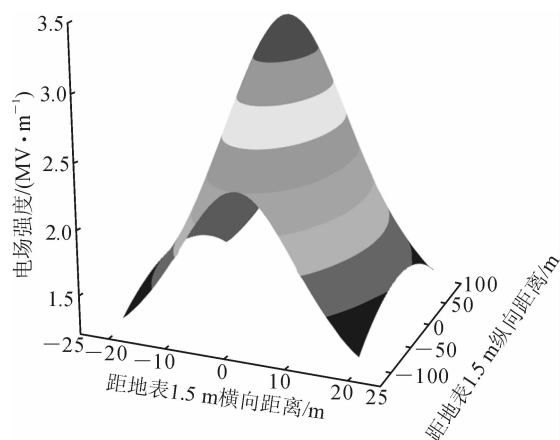


图 3 线路下方距地面 1.5 m 处电场强度三维分布图

Fig. 3 Three-dimensional of distribution of electric field intensity at the bottom of the line at 1.5 m

为中心,长为 200 m,宽为 40 m 的长方形区域内的磁场强度分布见图 4,从图 4 可以看出,距线路水平距离越远,磁场强度越低;距下相导线最低点越近,磁场强度越大,大致为 36.105 A/m。

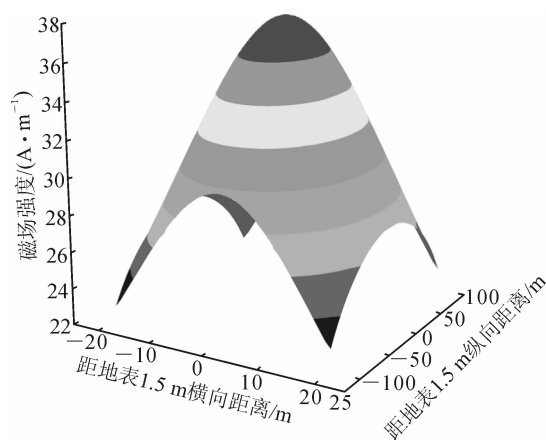


图 4 线路下方距地面 1.5 m 处磁场强度三维分布图

Fig. 4 Three-dimensional of distribution of magnetic field intensity at the bottom of the line at 1.5 m

2.4 子导线类型对线路下方电磁场的影响

文中研究的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路考虑了 LGJ-210/35、LGJ-240/30、LGJ-300/40、LGJ-400/50 4 种常见的导线型号在输电线路最低导线距地面距离不同的情况下对 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁环境的影响,见图 5、6。

由图 5 可知,当下相导线最低点距地高度越高,子导线型号对地面的最大电场强度影响越小,在下相导线最低点距地高度相同的情况下子导线的直径越大,地面的最大电场强度越小。下相导线最低点距地高度对地面的最大电场强度影响较大,下相导线最低点距地高度越高,地面的最大电场强度越小。当下相导线最低点距地高度 10 m 时,

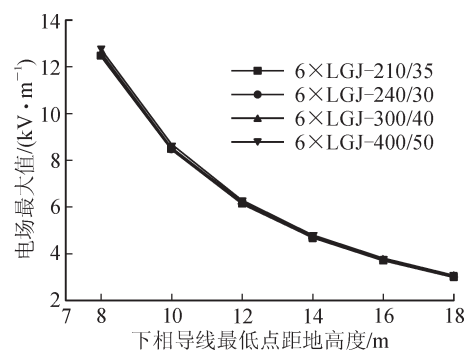


图 5 不同子导线类型在下相导线最低点距地不同高度下距地面 1.5 m 处的最大场强

Fig. 5 The maximum electric field intensity of different sub-conductor types and different height of lowest phase conductor at the bottom of the line at 1.5 m

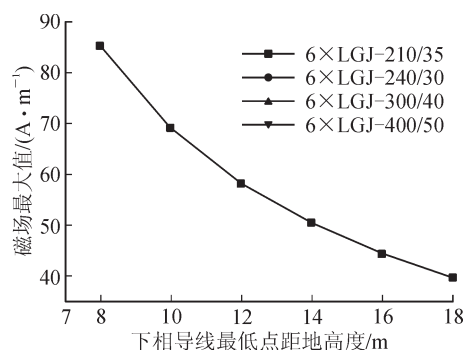


图 6 不同子导线类型在下相导线最低点距地不同高度下距地面 1.5 m 处的最大磁场强度

Fig. 6 The maximum magnetic field intensity of different sub-conductor types and different height of lowest phase conductor at the bottom of the line at 1.5 m

地面电场强度最大值一般 ≤ 10 kV/m; 当下相导线最低点距地高度 12 m 时, 地面电场强度最大值一般 ≤ 7 kV/m; 当下相导线弧垂最低点距地高度 16 m 时, 地面电场强度最大值一般 ≤ 4 kV/m。

由图 6 可知, 子导线型号对地面的最大磁场强度几乎没有影响。而下相导线最低点距地高度对地面的最大磁场强度影响较大, 下相导线最低点距地高度越高, 地面的最大磁场强度越小。当下相导线最低点距地高度 10 m 时, 地面磁场强度最大值一般 ≤ 80 A/m。

2.5 等边三角形布置的相线不同相间距离对输电线路电磁场的影响

文中在研究等边三角形布置的相线不同相间距离对 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路电磁场的影响中, 分别研究了 5.5、6、6.5、6.7、7.0、7.5 m 6 种不同相间距, 导线型号选取 6LGJ-240/30, 下相导线最低点距地高度选取 18 m。计算结果见图 7、8。

由图 7 可知, 等边三角形布置的相线等边相间

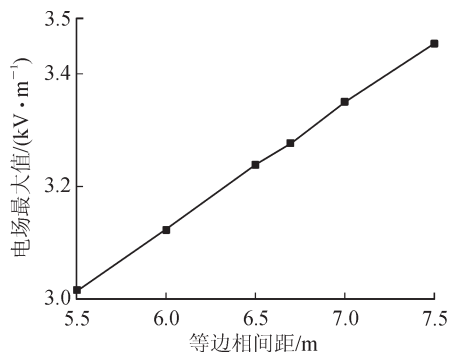


图7 不同相间距离下距地面 1.5 m 处的最大场强

Fig. 7 The maximum electric field intensity of different phase distance at the bottom of the line at 1.5 m

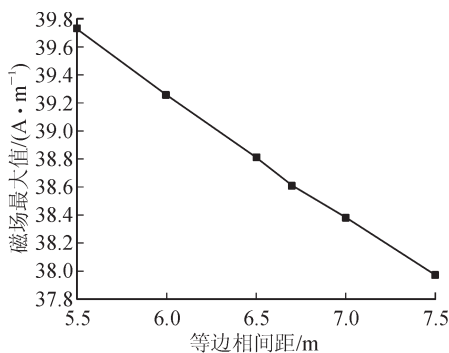


图8 不同相间距离下距地面 1.5 m 处的最大磁场强度

Fig. 8 The maximum magnetic field intensity of different phase distance at the bottom of the line at 1.5 m

距对最大地面场强的影响较大, 等边相间距越大, 最大地面场强越大, 等边相间距每增加 0.5 m, 电场最大值大致增加 100 V/m 左右。

由图 8 可知, 等边三角形布置的相线等边相间距对最大地面磁场的影响较之最大地面电场略小, 等边相间距越大, 最大地面磁场越大, 等边相间距每增加 0.5 m, 磁场最大值大致减小 0.7 A/m 左右。

3 线路无线电干扰与可听噪音影响因素分析

随着输电线路等级的逐渐升高, 线路周围无线电干扰和可听噪音也越发严重, 有时严重影响了居民的生活。根据规程要求可听噪音在雨天 L_{50} 的值要控制在 55 dB 以内。在距离边相导线投影 20 m 处, 频率为 0.5 MHz 的无线电干扰值要控制在 55 dB 内。该节对 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路在不同呼称高杆塔以及天气下的无线电干扰和可听噪音进行了计算研究, 研究结果为线路的设计提供参考。

3.1 不同呼称高杆塔下的无线电干扰

在计算的过程中, 天气选择大雨, 计算呼称高从 26~40 m 这个区域的输电线路下方无线电干扰值, 不同呼称高情况下距地面 1.5 m 高处无线电干

扰横向分布图见图 9。不同呼称高情况下距地面 1.5 m 高处无线电干扰的最大值 $RI_{\max}$ 及其取得位置以及边相导线外 20 m 处的无线电干扰强度见表 2。

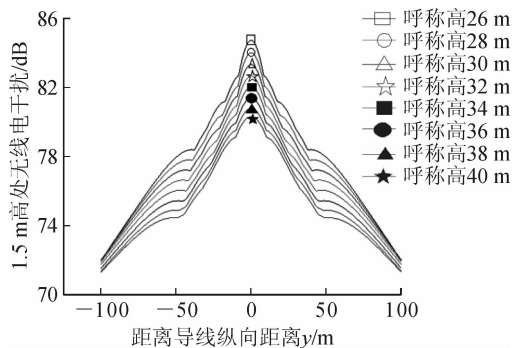


图9 不同呼称高下距地面 1.5 m 处的无线电干扰

Fig. 9 Radio interference of different tower's height at 1.5 m from ground

表2 呼称高对无线电干扰值的影响

Table 2 Effect of tower's height on radio interference

呼称高/m	$RI_{\max}$ /dB	$RI_{\max}$ 取得位置 y/m	$RI_{\pm 20m}$ /dB
26	84.74	0.250 1	79.89
28	84.02	0.249 0	79.43
30	83.34	0.248 0	78.95
32	82.68	0.250 2	78.45
34	82.04	0.250 1	77.95
36	81.39	0.253 0	77.44
38	80.80	0.248 0	77.07
40	80.32	0.249 0	76.79

由图 9 和表 2 可以看出, 在大雨情况下杆塔呼称高对杆塔下方的无线电干扰的影响较小。并且在大雨情况下杆塔下方的无线电干扰值在不同呼称高下均大于 55 dB。

由图 9 和表 2 可知: 杆塔呼称高对无线电干扰的影响较小。呼称高从 26~40 m, 每增加 2 m, 无线电干扰降低百分比分别为 0.852%、0.812%、0.79%、0.78%、0.79%、0.72% 和 0.59%, 平均降幅为 0.762%, 可见呼称高对无线电干扰的影响较小。

呼称高从 26~40 m, 边导线外 20 m 处无线电干扰数值分别为 79.89、79.43、78.95、78.45、77.95、77.44、77.07、76.79 dB, 占最大无线电干扰平均百分比分别为 94.27%、94.53%、94.73%、94.88%、95.01%、95.14%、95.38%、95.59%, 可知边相导线外 20 m 处的工频磁场强度大约为最大磁场强度的 94.94%。

3.2 不同天气情况下杆塔下的无线电干扰

在计算的过程中, 呼称高选择 40 m, 不同天气情况下距地面 1.5 m 高处无线电干扰横向分布图见图 10。不同天气情况下无线电干扰的最大值 $RI_{\max}$

及其取得位置,边相导线外 20 m 处的无线电干扰强度见表 3。

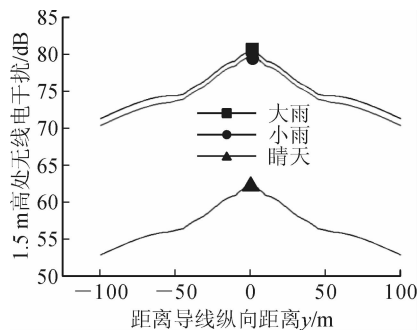


图 10 不同天气情况下距地面 1.5 m 处的无线电干扰
Fig. 10 Radio interference of different weather conditions at 1.5 m from ground

表 3 天气情况对无线电干扰值的影响

天气情况	大雨	小雨	晴天
$RI_{\max}/\text{dB}$	80.320	79.610	62.110
$RI_{\max}$ 取得位置 y/m	0.250	0.250	0.250
$RI_{\pm 20\text{m}}/\text{dB}$	76.790	76.110	58.610

由图 10 和表 3 可以看出,在呼称高一定的情况下天气情况对杆塔下方的无线电干扰的影响较大。天气情况从大雨、小雨、晴天无线电干扰的下降值分别为 0.893%、21.98%,由此可见,晴天相对于雨天无线电干扰的值小很多。

在大雨、小雨、晴天 3 种不同天气情况下边导线外 20 m 处无线电干扰数值分别为 76.79、76.11、58.61 dB、占最大无线电干扰平均百分比分别为 95.59%、95.6%、94.36%,可知边相导线外 20 m 处的工频磁场强度大约为最大磁场强度的 95.18%。

3.3 不同呼称高杆塔下的可听噪音

在计算的过程中,天气选择大雨,计算呼称高从 26~40 m 这个区域的输电线路下方可听噪音,不同呼称高情况下距地面 1.5 m 高处可听噪音横向分布图见图 11。不同呼称高情况下可听噪音的最大值其取得位置见表 4。

由图 11 和表 4 可以看出,在大雨情况下杆塔呼称高对杆塔下方的可听噪音的影响较小。并且在大雨情况下杆塔下方的可听噪音值在不同呼称高下均大于 55 dB。呼称高从 26~40 m,呼称高每增加 2 m,可听噪音降低百分比分别为 0.421%、0.408%、0.383%、0.371%、0.356%、0.345%和 0.333%,平均降幅为 0.374%。

3.4 不同天气情况下杆塔下的可听噪音

在计算的过程中,天气选择大雨,计算呼称高

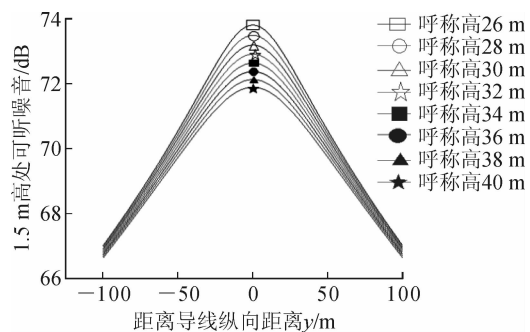


图 11 不同呼称高下距地面 1.5 m 处的可听噪音
Fig. 11 Audible noise of different tower's height at 1.5 m from ground

表 4 呼称高对可听噪音值的影响

呼称高/m	$AN_{\max}/\text{dB}$	$AN_{\max}$ 取得位置 y/m
26	73.80	0.251
28	73.49	0.249
30	73.19	0.250
32	72.91	0.252
34	72.64	0.250
36	72.38	0.248
38	72.13	0.250
40	71.89	0.250

从 26~40 m 这个区域的输电线路下方可听噪音,不同呼称高情况下距地面 1.5 m 高处可听噪音横向分布图见图 12。不同呼称高情况下可听噪音的最大值 $AN_{\max}$ 及其取得位置见表 5。

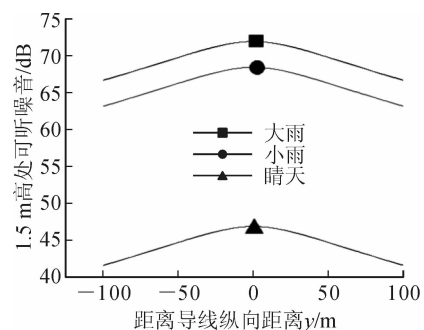


图 12 不同天气情况下距地面 1.5 m 处的可听噪音
Fig. 12 Audible noise of different weather conditions at 1.5 m from ground

表 5 天气情况对可听噪音值的影响

天气情况	大雨	小雨	晴天
$AN_{\max}/\text{dB}$	71.890	68.390	46.890
$AN_{\max}$ 取得位置 y/m	0.251	0.251	0.251

由图 12 和表 5 可以看出,在呼称高一定的情况下天气情况对杆塔下方的可听噪音的影响较大。

天气情况从大雨、小雨、晴天无线电干扰的下降值分别为 4.87%、31.43%, 由此可见, 晴天相对于雨天无线电干扰的值小很多, 在大雨或小雨情况下, 可听噪音的值都大于 55 dB, 只有在晴天时可听噪音的值在 55 dB 以内。

4 结论

文中分析了 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路下方距地面 1.5 m 处的电磁场分布、不同相间距对电磁场分布的影响、下相导线最低点距地距离不同对电磁场分布的影响、不同子导线类型对电磁场分布的影响、不同杆塔呼称高和不同天气情况对杆塔下方无线电干扰和可听噪音的影响。通过分析研究, 得到以下结论:

1) 不同子导线类型对地面电磁场的影响不大。等边三角形布置的相线等边相间距对最大地面场强的影响较大, 对最大地面磁场的影响较之最大地面电场略小。建议等边相间距取 6.5~7 m 之间。

2) 下相导线最低点距地距离对地面电磁场强度影响较大, 建议如果输电线路通过邻近民房时下相导线最低点距地高度 ≥ 16 m; 通过公众容易接近的地区、线路跨越公路处时下相导线最低点距地高度 ≥ 12 m; 跨越农田时下相导线弧垂最低点距地高度 ≥ 10 m。

3) 杆塔呼称高对可听噪声的影响较小, 天气情况对杆塔下方的无线电干扰的影响较大。如果在雨天输电线路会对民众的生活产生一定的影响, 如果在天气情况为晴天时, 无线电干扰和可听噪音可控制在 55 dB 内。

参考文献:

- [1] 舒印彪, 赵丞华. 研究实施中的 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 49-51.
SHU Yinbiao, ZHAO Chenghua. Study and implementation of 500 kV compact tower transmission line with double circuits on a same tower in China[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 49-51.
- [2] 汪泉弟, 褚旭, 杨帆, 等. 500 kV 同塔双回紧凑型输电线路输电能力分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 114-117.
WANG Quandi, CHU Xu, YANG Fan, et al. Analysis on transmission capability of 500 kV double circuits on the same tower compact transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 114-117.
- [3] 柴旭峥, 梁曦东, 曾嵘, 等. 我国紧凑型输电线路的电气参数特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 16-19.
CHAI Xuzheng, LIANG Xidong, ZENG Rong, et al. Analysis on electric parameter characteristics of compact transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 16-19.
- [4] 于幼文, 金永纯. 昌房 500 kV 紧凑型输电线路中的关键技术[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 75-77.
YU Youwen, JIN Yongchun. Key technologies for 500 kV compact transmission line from changping to fangshan[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 75-77.
- [5] 万保权, 邬雄, 张业茂, 等. 750 kV 单回紧凑型输电线路的电磁环境[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 597-600.
WAN Baoquan, WU Xiong, ZHANG Yemao, et al. Electromagnetic environment of 750 kV single-circuit compact transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 597-600.
- [6] 宋刚, 赵录兴, 陈稼苗. 500 kV 双回路垂直排列紧凑型输电线路电磁环境[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 45-50.
SONG Gang, ZHAO Luxing, CHEN Jiamiao. Electromagnetic environment of 500 kV double-circuit vertical arrangement compact power transmission line[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 45-50.
- [7] 杨迎建. 紧凑型输电线路及其优越性简介[J]. 高电压技术, 1993, 19(3): 95-96.
YANG Yingjian. Compact transmission line and its advantages[J]. High Voltage Engineering, 1993, 19(3): 95-96.
- [8] 李国勇, 彭继文. 500 kV 紧凑型输电线路工频电磁场分布特性[J]. 湖南电力, 2008, 28(6): 11-18.
LI Guoyong, PENG Jiwen. Distribution characteristics of power frequency electromagnetic field of 500 kV compact transmission line[J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(6): 11-18.
- [9] ADEL Z, DEIN E. Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 899-907.
- [10] 张家利, 姜震, 王德忠. 高压架空线下空间场强的数学模型[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 20-21.
ZHANG Jiali, JIANG Zhen, WANG Dezhong. Mathematical model of the power frequency electric field under high voltage overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 20-21.
- [11] 陈楠, 文习山, 刘波, 等. 高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 160-164.
CHEN Nan, WEN Xishan, LIU Bo, et al. Calculation and measurement of three-dimensional power frequency electrical and magnetic field under transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 160-164.
- [12] 陈楠, 文习山, 蓝磊, 等. 交叉跨越输电导线三维工频电磁场计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1752-1759.
CHEN Nan, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Accurate calculation of three-dimensional power frequency electromagnetic field for space crossed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1752-1759.

- [13] 庄池杰,曾 嵘,龚有军,等. 交流输电线路的无线电干扰计算方法[J]. 电网技术,2008,32(2):57-60.
ZHUANG Chijie,ZENG Rong,GONG Youjun,et al. Calculation methods of radio interference caused by AC transmission lines[J]. Power System Technology,2008,32(2):57-60.
- [14] 邓 军,肖 遥,楚金伟. 云南-广东特高压直流线路无线电干扰仿真计算与测试分析[J]. 高电压技术,2013,39(3):597-603.
DENG Jun,XIAO Yao,CHU Jinwei. Analysis of simulative calculation and measurement of radio interference from yunnan-guangdong ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2013,39(3):597-603.
- [15] 万保权,路 遥,邬 雄,等. 500 kV 同塔4回线路无线电干扰和工频电场[J]. 高电压技术,2007,33(3):113-116.
WAN Baoquan,LU Yao,WU Xiong,et al. Radio interference and electric field of 500 kV four circuit on one tower transmission line[J]. High Voltage Engineering,2007,33(3):113-116.
- [16] 俞集辉,杨 越,何 健,等. 对 AC UHV 输电线附近可听噪声预测公式的评估[J]. 高电压技术,2009,35(3):451-456.
YU Jihui,YANG Yue,HE Jian,et al. Evaluation of audible noise predicting formulas for AC UHV transmission lines [J]. High Voltage Engineering,2009,35(3):451-456.
- [17] 肖冬萍. 特高压交流输电线路电磁场三维计算模型[D]. 重庆:重庆大学,2009.
XIAO Dongping. Research on three dimension calculation models and shielding measures for electromagnetic field of ultra-high voltage AC transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University,2009.
- [18] 冯桂宏,张炳义,王晓晖,等. 500 kV 同塔四回路生态环境影响分析[J]. 电网技术,2007,31(23):52-56.
FENG Guihong,ZHANG Bingyi,WANG Xiaohui,et al. Analysis on impact of 500 kV transmission line adopting four circuit on the same tower on ecological environment[J]. Power System Technology,2007,31(23):52-56.
- [19] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
HU Baixue. Electromagnetic environment research for EHV and UHV transmission lines[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2006.
- [20] 惠建峰,关志成,刘瑛岩. 各国工频电磁场的限值及其确定的依据[J]. 高电压技术,2006,32(4):51-54.
XI Jianfeng,GUAN Zhicheng,LIU Yingyan. Values and rationales of limits of power frequency electric and magnetic fields in various countries[J]. High Voltage Engineering,2006,32(4):51-54.
- 潘茜雯(1992—),女,研究生,主要从事电力系统过电压及其防护。

(上接第182页)

- converter station[J]. High Voltage Engineering,2005,30(11):67-69.
- [18] 王永强,律方成,刘孝义. 新型 RTV 涂料防污闪性能的实验研究[J]. 高压电器,2004,40(6):457-461.
WANG Yongqiang,LYU Fangcheng,LIU Xiaoyi. Experimental study on new type RTV coating's capability to prevent contamination flashover[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(6):457-461.
- 刘 辉(1986—),男,硕士,工程师,研究方向为输电线路防污闪。