

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.018

基于三维有限元的交流输电线路电晕噪声分布研究

赵 国^{1,2}, 宋昊然^{1,2}, 祝和平^{1,2}, 李树林^{1,2}

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068; 2. 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 为了研究特高压输电线路电晕噪声的分布特性和影响因素,文中基于有限元法建立了三维模型。该模型充分考虑了导线弧垂特性和各相导线的分裂特性。首先,利用有限元法计算了输电线路表面最大电场强度。然后,使用CEPRI噪声预测公式计算了输电线路电晕噪声分布。通过对现场监测值和预测值进行比较,验证了文中预测模型的准确性。预测模型的结果表明,考虑分裂导线和弧垂能明显提高表面最大电场强度的计算精度。此外,电晕噪声在输电线路中最强的区域是导线弧垂处,而在以弧垂为中心、横向半径20 m、纵向半径240 m的范围内也较为集中。在杆塔辐射半径40 m范围内,电晕噪声的横向衰减为3.6%,纵向衰减为3.3%。通过对不同相序进行排列,发现同塔双回路正相序(ABC-ABC)排列所产生的电晕噪声相对其他相序排列最小。

关键词: 特高压交流输电线路; 电晕噪声; 有限元分析; 导线表面电场

Research on Corona Noise Distribution of AC Transmission Lines Based on Three-dimensional Finite Elements

ZHAO Guo^{1,2}, SONG Haoran^{1,2}, ZHU Heping^{1,2}, LI Shulin^{1,2}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Energy Storage Operation Control, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: For studying the distribution characteristics and influencing factors of corona noise of ultra-high voltage transmission lines, in this paper a three-dimensional model based on the finite element method is set up. The arc sag characteristics of the conductor and the splitting characteristics of each phase of the conductor are fully considered in the module. First, the maximum electric field intensity on the surface of the transmission line is calculated using the finite element method. Then, the corona noise distribution of the transmission line is calculated using the CEPRI noise prediction formula. The accuracy of the prediction model in this paper is verified by comparing the field monitoring values with the predicted values. The results of the prediction model show that the split conductors and arc sags can significantly improve the calculation accuracy of the maximum electric field intensity on the surface. In addition, the strongest area of corona noise in the transmission line is at the arc sag of the conductor, while it is also more concentrated in the range of 20 m lateral radius and 240 m longitudinal radius centered at the arc sag. Within the radius of 40 m of tower radiation, the lateral attenuation of corona noise is 3.6% and the longitudinal attenuation is 3.3%. It is found by arranging different phase sequences that the corona noise generated by the same tower double circuit positive phase sequence (ABC-ABC) arrangement is the smallest compared with other phase sequence arrangements.

Key words: UHV AC transmission lines; corona noise; finite element analysis; conductor surface electric field

0 引言

随着中国特高压输电网络的快速发展,特高压输电线路的建设逐渐靠近居民区,随之带来的输电线路电磁环境问题受到了民众的广泛关注^[1-5]。特高压输电线路所带来的电磁环境问题主要包括电场、磁场、无线电干扰以及所带来的可听噪声问题^[6-11]。其中可听噪声以输电线路自身产生的电晕噪声为主,因此处在输电线路附近的居民经常就输电线路电晕噪声问题进行投诉^[12-13]。而输电线路电晕噪声也成为限制特高压输电线路建设的重要原因之一^[14]。因此,研究输电线路电晕噪声三维分布可以为特高压输电线路选址及建设提供参考,具有重大意义。

目前研究特高压输电线路电晕噪声预测建模的主要方法在于获得输电线路表面电场强度,然后利用可听噪声预测公式进行研究^[15-19]。因此,三维电晕噪声计算模型的基础在于求解三维输电线路表面最大电场强度^[20]。

对于输电线路模型的建立,当前学者普遍假设线路为无限长直导线,不考虑线路弧垂仅对其导线截面进行二维建模求解,文[21-24]均对输电线路进行二维建模求解得出输电线路表面最大电场强度,最后采用噪声预测公式进行求解,以此来评估输电线路电磁环境。然而,随着各国输电线路的铺设越来越复杂,将输电线路简化为二维模型的做法,虽然简化了输电线路建模流程,但未能考虑到弧垂、分裂导线以及有限长特性的影响,对于目前的输电线路铺设场景来说,这种简化模型已经显得不足。近几年,随着部分学者开始对输电线路进行三维建模求解,文[25-26]为应对更加复杂的输电线路假设环境,均建立了三维输电线路分布模型,以此求解出相应的输电线路电场分布,最后利用预测公式得出输电线路可听噪声分布,结果表明三维建模相对于二维建模的结果更加精确。虽然上述学者利用三维模型对输电线路的可听噪声进行了建模求解,但在处理分裂导线时,上述学者将其等效为单个导线,未充分考虑到分裂导线对表面电场的影响。

文中在前人研究的基础上,采用有限元软件对1 000 kV特高压交流输电线路进行建模,该模型充分考虑了弧垂和分裂导线对输电线路表面三维电场分布的影响,并选择了中国电力科学研究院(CEPRI)预测公式来计算电晕噪声。通过将仿真结果与中国山东省现场监测的1 000 kV交流输电线路电晕噪声分布情况进行比较分析,得出了特高压交流输电线路电晕噪声的分布规律与线路相序分布

对电晕噪声分布的影响。

1 交流输电线路电晕噪声计算模型

1.1 输电线路三维杆塔结构

电晕噪声是指高压输电线路周围的空气中,由于电压梯度超过空气击穿场强而发生电晕放电现象产生的噪声。由于输电线路工频电磁场的频率通常在50 Hz左右,对应的波长很长,一般在数千km的数量级上。因此,在场点到导线的距离远小于相应的时谐电场在空气中波长的情况下,电场可以近似为准静态场。

文中利用有限元分析软件搭建了特高压交流输电线路三维电晕噪声计算模型。为简化模型的复杂度,在保证工程实际的前提下,做出如下假设:

- 1)对地面采用无穷大导体设计,其电位为0。
- 2)考虑到计算目标为1 000 kV交流输电线路电场分布,其中起主要作用的为输电线路,因此将绝缘子、输电杆塔构件进行简化处理,忽略其对导线的影响。
- 3)导线为光滑圆柱体,同一档距内的各分裂导线具有相同的导线半径,各分裂子导线相互平行且表面电位相等。

文中参考山东某地一条1 000 kV交流输电线路的结构参数。该线路采用同塔双回架设,导线为垂直排列,伞型布置,导线层间距为20 m,其规格为8×LGJ-500/45,分裂间距为400 mm,分裂导线外接圆直径为1 045.2 mm。为了减少算力,将钢芯铝绞线简化为见图1的导线截面,其中子导线的钢芯直径约为7.78 mm,铝导体直径约为23.43 mm。地线采用光纤复合铝包钢绞线(OPGW),直径约为12.6 mm,地线水平间距为36 m。

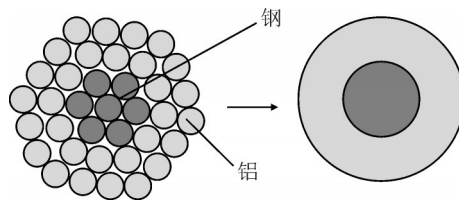


图1 绞线简化图

Fig. 1 Stranded wire simplified diagram

由于输电线路的杆塔和绝缘子的建模对导线电场的影响一般较小,因此文中采用简化模型减少计算量。具体为:将杆塔只保留主体结构,忽略内部的固定钢架等支撑结构;对于绝缘子采用圆柱长杆结构,其材料为陶瓷。

输电线路杆塔呼高68 m,从下至上三相导线水平相间距离分别为30、28、26 m。输电线路杆塔参数简

化示意图见图2,分裂导线截面参数示意图见图3。

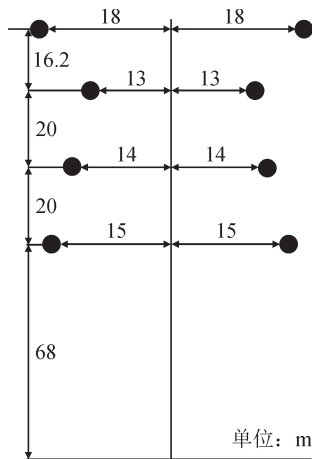


图2 输电线路杆塔参数简化参考图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of tower drawing parameters

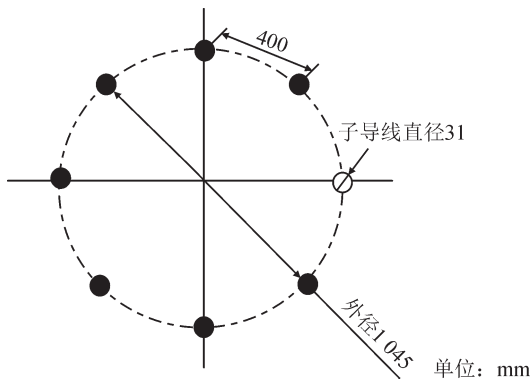


图3 八分裂导线截面示意图

Fig. 3 Section diagram of eight bundle conductor

绘制三维输电线路时,利用悬链线方程绘制导线弧垂

$$y_i = \frac{4h}{L^2} \left(x_i + \frac{L}{2} \right) \left(x_i - \frac{L}{2} \right) + H_i \quad (1)$$

式(1)中: x_i 、 y_i 分别为导线弧垂上任意一点横纵坐标; h 为导线弧垂,m; L 为输电线路长度,m; H_i 为挂点高度,m。

通过以上的参数调试及结构简化,得出三维输电线路杆塔以及线路结构见图4。

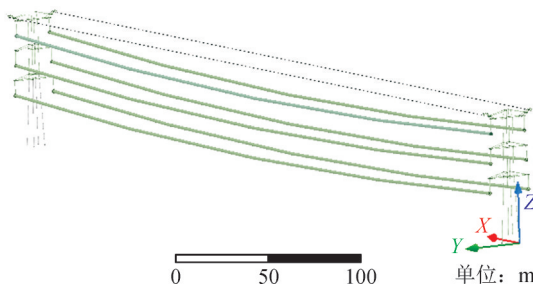


图4 1000 kV输电线路塔线三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of tower and line of 1000 kV transmission line

1.2 基于CEPRI预测公式的噪声计算

采用中国电科院^[27-28](CEPRI, China electric power research institute)总结出的输电线路噪声预测公式,该公式参考美国邦维尔电力局总结出的BPA (bonneville power administration)预测公式^[29],进一步总结出符合中国特高压交流输电线路的噪声产生的声功率计算方法。

CEPRI 预测公式所采用的统计分析数据为大雨条件下,六分裂以上的输电线路型号所产生的可听噪声,因此使用此公式进行分析可听噪声的现场天气条件应为下雨,导线分裂数应在六分裂以上。

在对特高压交流输电线路进行三维可听噪声计算时,首先需要先计算单相输电线路在测量点的声压水平,然后计算其他两相输电线路到达被测点后的声压水平,最终将三相输电线路在接收点处获得的声压水平进行叠加,得到特高压输电线路在测量点的总体声压级^[30-31]。

CEPRI 声功率预测公式为

$$SLA = 10 \lg \sum_{i=1}^Z \lg^{-1} \left[\frac{PWL(i) - 11.4 \lg R_i - 5.8}{10} \right] \quad (2)$$

式(2)中: SLA 为电晕噪声在测量点处的A计权声压级; R_i 为测点至被测*i*相导线的直线距离; Z 为相数; $PWL(i)$ 为*i*相导线的声功率级。

式(2)中的各相导线声源处产生的声功率级 $PWL(i)$ 求解方法为

$$\begin{cases} PWL(i) = -123.0 + 97.2 \lg E_{\max} + 41.7 \lg d_{eq} + 19.1 \lg n \\ d_{eq} = 0.58n^{0.48}d \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $E_{\max}$ 为导线表面电场强度最大值,kV/cm; d_{eq} 为导线等效半径,mm; n 为导线分裂数; d 为子导线直径,mm。

1.3 有限元激励参数设置

文中1000 kV交流输电线路三相电压表达式为

$$\begin{cases} U_a = 816.5 \cos(\omega t) \\ U_b = 816.5 \cos(\omega t + 120^\circ) \\ U_c = 816.5 \cos(\omega t - 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

在进行静电场有限元仿真时,文中取 $t=0$ 时刻的三相电压,该时刻导线的电荷分布和电势分布相对稳定,且可以避免复杂的时间依赖性问题,对各相导线添加的激励分别为 $U_a=816.5$ kV, $U_b=-408.25$ kV, $U_c=-408.25$ kV。在对三相输电线路激励设置时,考虑其电场限值,设置离地面最近的一相导线为A相,其余两相由下至上分别为B相、C相。

在对模型进行有限元计算时需要进行网格剖分,由于导线半径为毫米级,而整个导线模型的档距为618 m,两者数量级差距较大,因此文中采用

Smart Size 选项进行网格划分, 该选项可根据模型尺寸自动调整网格精度。经过软件统计, 本模型计算域(即空气域)划分的网格数为 737 509 个, 输电线路划分的网格数为 1 020 000 个。

1.4 输电线路电晕噪声三维有限元模型的分析流程

采用数值分析方法, 并结合 CEPRI 噪声预测公式, 对 1 000 kV 交流输电线路的电晕噪声进行了建模和分析。通过计算周围的电晕噪声, 并将计算结果与在中国山东省进行的实地测量数据进行误差分析, 验证了该模型的准确性。输电线路电晕噪声计算模型的设计流程见图 5。

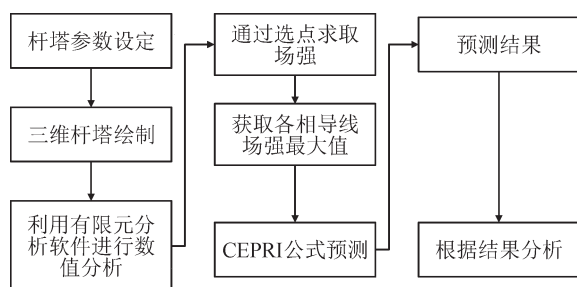


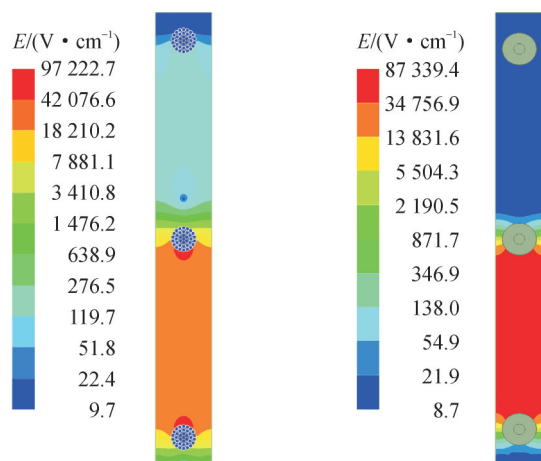
图 5 电晕噪声三维模型设计流程图

Fig. 5 Design flow chart of corona noise three-dimensional model

2 电晕噪声计算模型结果验证方法

2.1 导线简化可行性验证

为验证将输电线路绞合表面用光滑圆柱所替代的有效性, 文中分别对输电线绞线以及简化的光滑圆柱进行二维仿真建模, 将三相导线竖直等距排列, 各相导线施加上述相同激励, 所得结果见图 6。



(a) 绞合导线表面电场分布图

(b) 光滑圆柱表面电场分布图

图 6 绞合及简化导线表面电场分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of electric field distribution on twisted and simplified conductor surface

根据图 6, 绞合导线表面最大电场强度约

97.22 kV/cm, 光滑圆柱表面最大电场强度为 87.33 kV/cm。假设以导线弧垂正下方处为监测点, 将数值采用 CEPRI 预测公式进行转换可得出两者声压级相差 2 dB(A)。

通常情况下, 特高压输电线路上的导线表面会涂有抑制电晕放电涂料, 它可以降低导线表面电晕噪声的水平, 从而减小了采用光滑圆柱来代替绞合表面所引入的 2 dB(A) 的误差。此外, 根据文[16-18]的研究, 光滑圆柱代替绞合导线是目前主流的处理方法。最后由于设备的限制, 文中也采用了光滑圆柱来替代绞合表面进行输电线路的建模处理。

考虑到本节的仿真实验, 简化了导线排列, 同时为使导线表面场强分布在图中显示得更加清晰, 采用了缩减导线层间距的方法。此外根据文[32]的研究结果表明, 随着导线分裂数的增加, 导线表面的最大电场强度会降低。因此, 本节计算得到的输电线路表面最大电场强度将会比文中八分裂导线的计算结果高很多。

2.2 输电线路噪声结果现场监测方案

为了验证仿真模型计算结果的准确性, 选择山东省济南市 1 000 kV 特高压交流输电线路的 5 组连续档距进行电晕噪声监测。该线路周围环境开阔, 监测时间为夏季, 当地温度在 30~31 ℃ 之间, 湿度监测数值平均为 98%。为保证海拔对测量结果的影响最小化, 选择了农田等海拔较低的地区, 平均海拔约为 50 m, 海拔较低, 监测线路附近无其他特高压线路, 地势平坦, 因此无需进行海拔修正^[33-34]。测量时背景噪声平均在 30 dB(A) 左右。

监测所采用的设备为丹麦 B&K 2250 设备, 噪声探头距离地面 1.5 m。为符合 CEPRI 的测量条件, 选择了下雨天气进行监测, 对于雨声我们选择不做处理。原因为: 在晴天条件下输电线路产生的噪声数值很小, 因此在总结 CEPRI 预测公式时的源数据包含了下雨噪声^[19-20], 进而实地测量值雨声也会包含在其中。

实地测量选取两种不同的监测方式: ①为以边相导线弧垂地面投影点处为起点, 向外每隔 5 m 设定监测点, 终点为垂直导线向外 50 m 处; ②以边相导线弧垂地面投影点处为起点, 沿线路每隔 20 m 向另一侧输电杆塔布点测量。

经现场实测, 可以发现在线路弧垂下方感受电晕噪声时, 电晕噪声的大小较稳定, 在较长时间内不会发生较大的变化, 因此每个监测点选取测量时

间为20 s,该时间段可以获得较稳定的电晕噪声声压级^[35-37]。

监测数据统计的处理方法为对五组连续档距所测数据取平均值与标准差,将计算结果与实测结果进行对比,以验证模型计算结果的准确性。噪声定点监测分布示意图见图7,图7中黄圈表示纵向监测点,黑圈表示横向监测点。

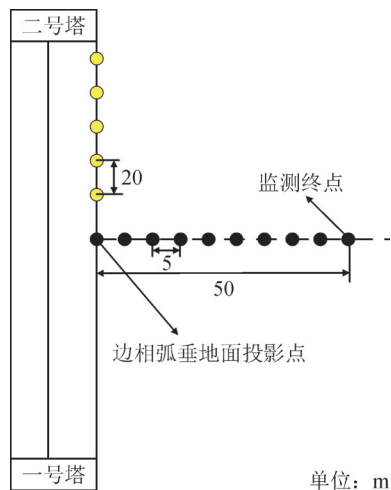


图7 噪声定点监测分布示意图

Fig. 7 Noise fixed-point monitoring distribution diagram

3 线路三维模型计算结果与分析

3.1 输电线路表面电场强度计算结果与分析

输电线路为对称结构,故本次分析取双回路输电线路的其中一回路进行分析。在三相交流输电线上间隔1 m取若干测量点计算导线表面电场强度最大值。三相输电导线表面最大电场强度沿线分布见图8,计算起点为一侧杆塔处。

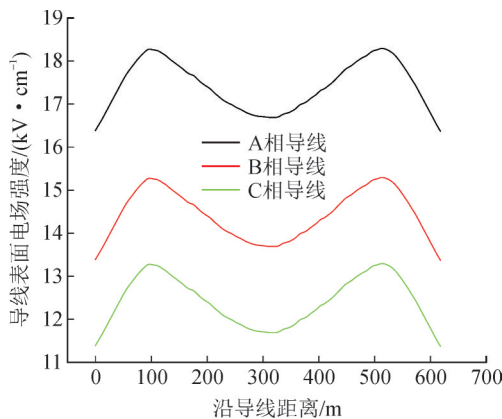


图8 输电导线表面最大电场强度沿线分布

Fig. 8 The distribution of the maximum electric field intensity along the surface of the transmission line

通过观察图8,可以看出导线表面电场强度分布总体呈现倒U型曲线。其原因为:杆塔周围由于

电荷的累积,电场强度会逐渐增加,而越接近档距中央,导线离地面越近,此时由于地面效应,地面作为导体吸引电荷,这时导线表面电场强度会随着距离的增加而降低。从电场分布数据来看,ABC三相导线的上升下降的幅值相似。根据模型计算结果显示,输电线表面电场强度最大的区域位于距计算起点520 m的范围,即图中520 m附近的位置。三相导线最大电场强度为A相:18.29 kV/cm, B相:15.29 kV/cm, C相:13.29 kV/cm。

文中另外采用模拟电荷法以及二维有限元的方法进行了对比。计算结果见表1。

表1 输电导线表面最大电场强度计算值

Table 1 Calculation value of maximum electric field intensity on the surface of transmission line

计算方法	A/B/C 导线表面最大场强/ (kV·cm ⁻¹)	相对误差/%
三维有限元分析	18.29/15.29/13.29	
模拟电荷法	17.71/14.25/12.55	3.1/6.8/5.5
二维等效导线	17.68/14.35/12.77	3.3/6.1/3.9
二维分裂导线	18.24/14.85/13.48	2.7/2.8/1.4

根据表1的结果可知,文中计算出的三相输电线路表面最大电场强度与其他方法相比,最大误差仅为6.8%。模拟电荷法以及二维有限元法将导线看作无限长直导线,忽略了导线的有限长特性以及弧垂特性。这导致所得结果整体偏小,与文中模型的相对误差均高于3%。比较二维等效导线与二维分裂导线的最大场强可以发现分裂导线相对于等效导线的相对误差明显缩小。

综合前文的分析,得出了以下结论:文中考虑弧垂以及分裂导线的因素能够明显提高表面最大场强的求解精度。同时表明采用文中模型计算出的导线表面最大电场强度的准确性。

3.2 输电线路电晕噪声分布

结合建立的输电线路三维电晕噪声计算模型以及现场实测结果,将导线弧垂处设为坐标零点。对输电线路电晕噪声功率采用了CEPRI预测公式进行了计算,将其与现场监测的数据进行对比。

根据对称原则,文中选取的计算点均为输电线路所在档距的一半。具体为:①在测量电晕噪声的横向分布时,仅计算导线一侧的数据;②而在计算纵向分布时,仅考虑从弧垂处开始向一侧杆塔的电晕噪声分布情况。输电线路电晕噪声横向和纵向分布曲线见图9、10。

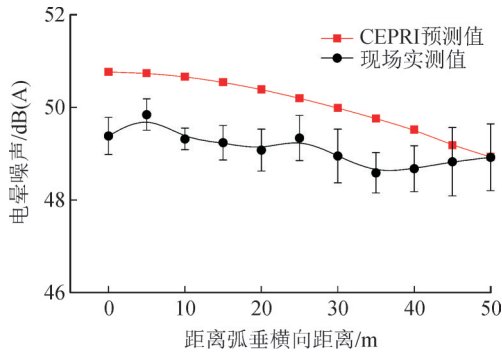


图9 输电线路电晕噪声横向分布对比图

Fig. 9 Comparison of transverse distribution of corona noise of transmission lines

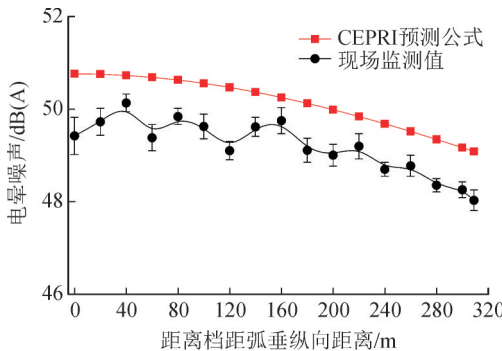


图10 输电线路电晕噪声纵向分布对比图

Fig. 10 Comparison of longitudinal distribution of corona noise of transmission lines

将预测值与现场监测值进行了比较,并在图中标注了5组连续档距实测值标准差同平均值的误差棒,得出预测值与监测值之间的最大、最小和平均误差大小见表2。

表2 线路电晕噪声预测相对误差表

监测方向	最大误差/%	最小误差/%	平均误差/%
横向	8.7	3.7	6.3
纵向	6.8	0.5	2.6

观察图9、10中的误差棒可以发现两图的误差棒长度均一,监测数据较稳定,离散性小。不过,在进行横向监测时,距离输电线路40 m后的误差棒略微增长,因为此时距离输电线路较远,测得的数据易受背景噪声的影响,因此40 m之后的距离,实测噪声平均值呈现上升趋势。

通过计算,电晕噪声横向衰减程度约为3.6%,纵向衰减程度约为3.3%。通过前文误差棒的分析,文中所述衰减程度由于声压传播的非线性而呈现不同的衰减速度,随着距离的增加,电晕噪声的衰减将会受到周围环境影响,因此本段衰减程度数值仅在距离导线弧垂横向距离40 m的位置内有效。

观察表2中的数据,可以发现电晕噪声最大误差出现在横向分布中。这是因为在开始远离导线时,横向分布所监测得的数据开始变得不稳定,从而导致误差较大。这一现象也可以从平均误差中得到体现,即纵向分布的预测误差比横向分布小了3.7%。但总体上看,最大误差仅为8.7%,表明文中的预测结果的准确性。

通过前文的分析,绘制了输电线路电晕噪声的三维分布图,见图11。通过图11可以直观地观察到电晕噪声的空间分布特征。从图11可以明显地看出,电晕噪声的幅值在输电线路档距弧垂处达到最大值。此外,通过对图11分析得出电晕噪声较强的区域,这些区域主要分布在以弧垂为中心,横向半径为20 m,纵向半径约为240 m的范围内,该范围可作为电晕噪声监测与治理的重点区域。虽然电晕噪声在该区域内较为集中,但在实际监测过程中,也要注意其空间随机性,以保证监测的全面性和准确性。

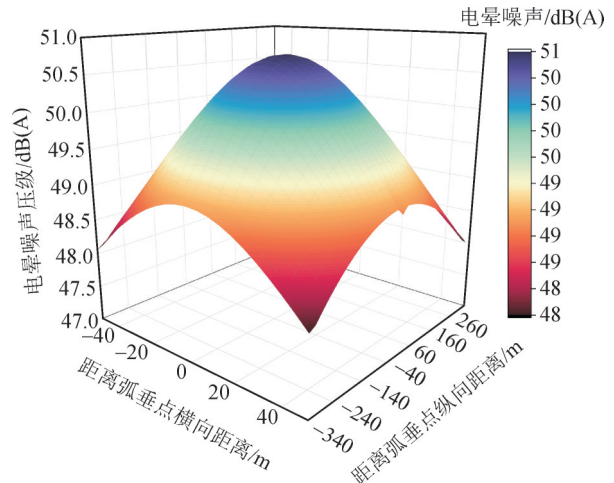


图11 线路电晕噪声3维分布

Fig. 11 Three-dimensional distribution of line corona noise

3.3 不同相序对电晕噪声分布的影响

在3.2节采用的ABC-ABC的相序进行计算,但理论上来说相导线有6种相序排列方式,见表3。为了确定不同相序对电晕噪声的影响,本节依照表3分别计算了不同相序下导线电晕噪声的横向分布。表中左边为第1回路,右边为第2回路。相序1、2分别为正相序、逆相序。

表3 同塔双回输电线路相序排列组合

导线位置	相序1	相序2	相序3	相序4	相序5	相序6
上	C/C	C/A	C/C	C/B	C/A	C/B
中	B/B	B/B	B/A	B/C	B/C	B/A
下	A/A	A/C	A/B	A/A	A/B	A/C

相序对输电线路电晕噪声分布的影响见图12。

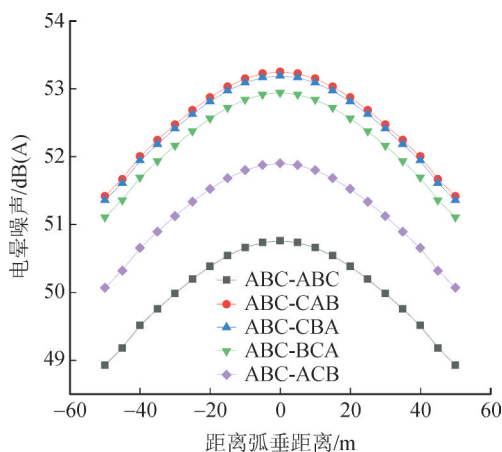


图12 相序对输电线路电晕噪声分布的影响

Fig. 12 Effect of phase sequence on corona noise distribution of transmission lines

从图12中可以观察到,在同塔双回输电线路中,不同相序的布置会导致电晕噪声的分布出现差异。以分析点为导线弧垂处为例,当相序为正相序(ABC-ABC)时,线下电晕噪声的值最小,为50.76 dB(A)。这是由于在正相序排列下,三相电压波形相位依次排列,使得各相的电晕噪声发生干涉,从而减少了总电晕噪声的幅值。其次大小为ABC-ACB相序,线下电晕噪声的值稍微大一些,为51.85 dB(A)。相比之下,ABC-CAB相序的电晕噪声最大,为53.25 dB(A)。

不同相序表现出不同噪声幅值的原因在于:回路之间的电压波形相位差为 90° 或 180° 时,两个回路的电晕放电产生的声波具有相同或相反的相位和方向,不会产生明显的相长干涉,因此电晕噪声的效应最小。

相反,当相位差为 0° 或 270° 时,电晕噪声的效应最大。其原因因为两个回路的电晕放电和声波的相位和方向的差异最大,会产生比较强的相长干涉,从而导致电晕噪声最大。

根据上述分析,当同塔双回路交流输电线路的相序为正相序(ABC-ABC)时,各回路的电压波形相位差为 120° ,该数值更接近 90° 。这使得各回路的电晕放电在相邻回路的峰值附近交替发生,从而降低了总电晕噪声的幅值。相比之下,当相序不为正相序时,回路之间的电压波形相位差会不同。例如,如果相序为ABC-CBA排列,则每个回路的电压波形相位差为 240° ,其电压波形相位更接近 270° ,会产生干涉效应,从而导致电晕噪声的幅值增加。

因此,针对同塔双回输电线路的电晕噪声分布特性,应该采用合适的相序布置,以减少电晕噪声的幅值,提高输电线路的可靠性和安全性。

4 结论

文中采用三维有限元分析法计算输电线路表面最大电场强度,并考虑了分裂导线及弧垂的影响,为研究输电线路电场分布提供了重要参考。同时,采用CEPRI噪声预测公式计算出输电线路电晕噪声的三维分布图。具体结论如下:

1)给出了一种考虑分裂导线及弧垂影响的1 000 kV输电线路电晕噪声计算模型。首先,采用有限元分析和相关计算方法,得出了输电线路表面最大电场强度沿线分布,并将计算结果与模拟电荷法等传统方法进行比较。结果表明,文中在考虑了分裂导线与弧垂因素后,模拟精度得到了明显提高。

2)采用CEPRI噪声预测公式,计算出输电线路电晕噪声的三维分布图,并将计算结果与现场监测的数据进行对比,验证了文中结果的准确性,其中电晕噪声声压级结果最大误差仅为8.7%。

3)通过对文中结果的分析,得出输电线路电晕噪声横向衰减程度约为3.6%,纵向衰减程度为3.3%,其中横向衰减程度数值仅在距离导线弧垂横向距离40 m的位置内有效。此外,为了更好地制定电晕噪声治理策略,文中绘制了输电线路电晕噪声的三维分布图,并对其进行分析。结果显示,电晕噪声在弧垂处最强,同时在以弧垂为中心,横向半径为20 m,纵向半径约为240 m的范围内呈现较强的分布。这可以为电晕噪声的监测与治理提供参考,并有望为输电线路的安全稳定运行提供可靠的技术支撑。

4)通过对不同相序进行仿真可以发现,相序的不同,其中产生的电晕噪声大小也不相同。其中,正相序(ABC-ABC)产生的电晕噪声相对于其他相序噪声幅值最小。这为选择合适的相序布置提供了参考和依据。

参考文献:

- [1] 孟长虹,孔祥敏,王亚臣,等.超、特高压交直流输电线路可听噪声研究综述[J].南方电网技术,2023,17(5):145-152.
Meng Changhong, Kong Xiangmin, Wang Yachen, et al. Review on the research of audible noise from extra high voltage and ultra high voltage AC/DC transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 145-152.
- [2] 吴健,赵亚林,耿明昕,等.750 kV变电站电晕噪声的影响与防治[J].应用声学,2022,41(1):52-59.
Wu Jian, Zhao Yalin, Geng Mingxin, et al. Influence and control of corona noise in 750 kV substation[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(1): 52-59.

- [3] 周 军, 曲振国, 战紫昂. 基于CPO-VMD的输电线路行波故障测距方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 30-41.
Zhou Jun, Qu Zhenguo, Zhan Ziang. Traveling wave fault location method of transmission line based on CPO-VMD[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(2): 30-41.
- [4] 李静正, 杜晓通, 李 猛. 海上柔性低频输电线路高频暂态量单端保护[J]. 电力建设, 2025, 46(8): 105-115.
Li Jingzheng, Du Xiaotong, Li Meng. Single-ended protection scheme for offshore flexible low-frequency transmission lines based on high-frequency transient quantities[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(8): 105-115.
- [5] 刘 青, 黄玉河, 王 宇, 等. 基于电磁时间反演P范数判据的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 74-82.
Liu Qing, Huang Yuhe, Wang Yu, et al. Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 74-82.
- [6] 张广洲, 方书博, 张振宇, 等. 基于振动传感的直流合成电场测量结构设计[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 151-159.
Zhang Guangzhou, Fang Shubo, Zhang Zhenyu, et al. Design of DC composite electric field measurement structure based on vibratory sensor[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 151-159.
- [7] 潘晓彤, 唐露甜, 韩 文, 等. 特高压直流输电线路下合成电场测量与分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 197-200.
Pan Xiaotong, Tang Lutian, Han Wen, et al. Measurement and analysis of total electric field of UHVDC transmission lines[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(12): 197-200.
- [8] 何国阳, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 117-127.
He Guoyang, Ji Shengchang, Zhu Lingyu, et al. Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 117-127.
- [9] 胡静竹, 周 兵, 倪 园, 等. 箱式变电站噪声特性及影响分析[J]. 变压器, 2025, 62(9): 31-36.
Hu Jingzhu, Zhou Bing, Ni Yuan, et al. Analysis of noise characteristics and impact of box-type substation[J]. Transformer, 2025, 62(9): 31-36.
- [10] 尚海昆, 张冉喆, 黄 涛, 等. 基于CEEMDAN-TQWT方法的变压器局部放电信号降噪[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 272-284.
Shang Haikun, Zhang Ranzhe, Huang Tao, et al. Partial discharge signal denoising based on CEEMDAN-TQWT method for power transformers[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 272-284.
- [11] 王玲桃, 任宏伟, 王紫瑜, 等. 基于ICEEMDAN和改进小波阈值的输电线路故障行波信号降噪[J]. 电子设计工程, 2025, 33(12): 56-61.
Wang Lingtao, Ren Hongwei, Wang Ziyu, et al. Transmission line fault travelling wave signal noise reduction based on ICEEMDAN and improved wavelet threshold[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(12): 56-61.
- [12] 杜志叶, 郝兆扬, 赵鹏飞, 等. 适用于声源定位的气体绝缘输电线路超声导波传播特性研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 852-862.
Du Zhiye, Hao Zhaoyang, Zhao Pengfei, et al. Research on propagation characteristics of gas-insulated transmission line ultrasonic guided wave for sound source localization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 852-862.
- [13] 姜雨泽, 刘士强, 谢连科, 等. 山东电网高压直流输电线路电磁环境测量分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 125-132.
Jiang Yuze, Liu Shiqiang, Xie Lianke, et al. Electromagnetic environment measurement and analysis of HVDC transmission lines in Shandong power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 125-132.
- [14] 张海兵, 吴海涛, 胡 琴, 等. 架空输电线路可听噪声问题综述[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 1-6.
Zhang Haibing, Wu Haitao, Hu Qin, et al. Review of audible noise of overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 1-6.
- [15] 江进波, 沈骏峰, 黄国良, 等. 220 kV输电线路工频电磁场计算与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13787-13793.
Jiang Jinbo, Shen Junfeng, Huang Guoliang, et al. Calculation and analysis of 220 kV transmission line power frequency electromagnetic field[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13787-13793.
- [16] 蓝 天, 刘永聪, 何旺龄, 等. 500 kV交流线路钻越±800 kV直流线路三维离子流场计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(2): 175-182.
Lan Tian, Liu Yongcong, He Wangling, et al. Calculation of three-dimensional ion current field of 500 kV AC line crossing ±800 kV DC line[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(2): 175-182.
- [17] Hedtke S, Bleuler P, Franck C M. Outdoor investigation of the corona characteristics and audible noise of a hybrid AC/DC overhead line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3309-3317.
- [18] 黄悦华, 张子豪, 陈 庆, 等. 基于多头注意力机制的CNN-BiLSTM高海拔多因素输电线路可听噪声预测[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 160-169.
Huang Yuehua, Zhang Zihao, Chen Qing, et al. Prediction of audible noise of CNN-BiLSTM high altitude multi-factor transmission line based on multi-head attention mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 160-169.
- [19] 刘颂凯, 党 喜, 陈 萍, 等. 结合噪声滤波的电力系统暂态稳定预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 32-39.
Liu Songkai, Dang Xi, Chen Ping, et al. Transient stability prediction of power system combined with noise filtering[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 32-39.
- [20] Varghese A C, Pal A, Dasarathy G. Transmission line parameter estimation under non-gaussian measurement noise[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3147-3162.
- [21] Bharti S, Dubey S P, Nagwanshi K K, et al. Analysis of electromagnetic environment in 1 200 kV single circuit UHVAC transmission line by using face software and semi-empirical formulae[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(3): 101642.

- [22] 马晓倩,何 堃,谢 莉,等. ± 500 kV 同塔三回柔性直流输电线路的电磁环境[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1978-1984.
Ma Xiaolian, He Kun, Xie Li, et al. Study on electromagnetic environment of ± 500 kV triple - circuit flexible DC transmission line on same tower[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1978-1984.
- [23] Zhang Yemao, Xu Jilai, Li Ni, et al. Audible noise analysis of 750 kV AC transmission line in high-altitude area under different weather[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(11): 2644-2654.
- [24] 陈湘鹏,陈昱冰,郭天伟,等. ± 660 kV 直流输电线路电磁环境研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 58-63.
Chen Xiangpeng, Chen Yubing, Guo Tianwei, et al. Research on electromagnetic environment of ± 660 kV DC power transmission line[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 58-63.
- [25] 谢龚浩,付万璋,何旺龄,等. 交流输电线路可听噪声计算分析(I)—三维分布[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2990-2998.
Xie Gonghao, Fu Wanzhang, He Wangling, et al. Calculation and research of audible noise of AC transmission lines(I)-three-dimensional distribution[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2990-2998.
- [26] 付万璋,何旺龄,谢龚浩,等. 交流输电线路可听噪声计算分析(II)—交叉跨越架设[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4070-4078.
Fu Wanzhang, He Wangling, Xie Gonghao, et al. Calculation and research of audible noise of AC transmission lines (II)-distribution under crossing erection[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4070-4078.
- [27] 陈豫朝,谢辉春,张业茂,等. 基于电晕笼的特高压交流输电线路可听噪声预测方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2189-2194.
Chen Yuchao, Xie Huichun, Zhang Yemao, et al. Audible noise prediction of UHVAC transmission lines based on corona cage[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2189-2194.
- [28] 万保权,武晓蕊,裴春明,等. 基于回归分析法的交流输电线路声功率计算方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1354-1361.
Wan Baoquan, Wu Xiaorui, Pei Chunming, et al. Calculation method for acoustic power based on multivariate regression method for AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1354-1361.
- [29] Li Yigui, Li Qi, Meng Wei, et al. Finite element method assisted audible noise detection for overhead line conductors using the cage experiment[J]. Energies, 2023, 16(12): 4564.
- [30] 李振华,程紫熠,陈兴新,等. 基于EMD-XGBoost模型的交流输电线路可听噪声有效数据预测方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 180-187.
Li Zhenhua, Cheng Ziyi, Chen Xingxin, et al. Study on predication method of audible noise valid data for AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 180-187.
- [31] 黄明祥,郭志彬,潘立志,等. 交流单点电晕放电可听噪声纯音分量空间传播特性研究[J]. 华北电力大学学报, 2022, 49(2): 63-71.
Huang Mingxiang, Guo Zhibin, Pan Lizhi, et al. Propagation characteristics of pure tones of audible noise generated by single AC corona discharge source[J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49(2): 63-71.
- [32] 马爱清,林鹏远,迟 杰,等. UHVAC 同塔双回输电线路表面场强分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 143-150.
Ma Aiqing, Lin Pengyuan, Chi Jie, et al. Analysis of surface electric field of UHVAC one - tower double - circuit transmission line[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2019, 31(6): 143-150.
- [33] 何高辉,胡 琴,杜茗茗,等. 自然覆冰导线直流电晕损失及其可听噪声特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4633-4640.
He Gaohui, Hu Qin, Du Mingming, et al. Experimental research on the DC corona loss and audible noise characteristics of natural icing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4633-4640.
- [34] 张建功,赵学成,路 遥,等. 750 kV/330 kV 混压同塔四回输电线路“100 Hz”纯声分布规律研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 108-115.
Zhang Jiangong, Zhao Xuecheng, Lu Yao, et al. Study on “100 Hz” pure tone distribution regularity of 750 kV/330 kV mixed voltage quadruple - circuit transmission lines on the same Tower[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 108-115.
- [35] 徐 贤,周晋航,王 颖,等. 基于类噪声的解耦测辨负荷模型机理分析及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 138-145.
Xu Xian, Zhou Jinhang, Wang Ying, et al. Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 138-145.
- [36] 吴海荣,李振华,程紫熠,等. 基于注意力机制和LSTM-LightGBM的特高压直流输电线路可听噪声无效数据清洗方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 115-123.
Wu Hairong, Li Zhenhua, Cheng Ziyi, et al. Invalid data cleaning method of audible noise for UHV HVDC transmission lines based on attention mechanism and LSTM-LightGBM[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 115-123.
- [37] 刘永聪,何旺龄,刘兴发,等. 不同海拔高度交流电晕电流脉冲特性实验研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 41-48.
Liu Yongcong, He Wangling, Liu Xingfa, et al. Experimental research on the characteristics of AC corona current pulse at different altitudes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 41-48.
- 赵 国(1985—),男,博士,副教授,从事新能源发电技术及微电网规划、系统辨识及其在电力系统中的应用(E-mail: zhaoguo@hbut.edu.cn)。
- 宋昊然(1999—)男,硕士研究生,研究方向为输电线路电磁环境分析与监测(通信作者)(E-mail: 2972805257@qq.com)。