[文章编号] 1003－4684(2026)02-0062-05

污秽对交流输电线路可听噪声的影响

赵　国[1,2]，宋昊然[1,2]，祝和平[1,2]

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 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，湖北 武汉 430068)

[摘　要] 研究了导线表面附着污秽对输电线路可听噪声的影响，以山东省 1000 kV 交流输电线路为研究对象。利用有限元软件分别对附着有硅藻土、高岭土、氯化钠、碳粉的导线进行建模分析，研究它们对输电线路可听噪声的影响。结果表明，杂质颗粒会使电场畸变，从而影响可听噪声的传播。其中，材料的电导率是影响可听噪声的主要因素之一。此外，不同的污秽颗粒对可听噪声的幅值和横向衰减也有不同的影响，其中硅藻土的影响最小，而氯化钠和碳粉的影响最大。

[关键词] 交流输电线路；污秽颗粒；BPA 预测公式；可听噪声
[中图分类号] TM721.2　　[文献标识码] A

土地资源稀缺使得输电线路与公众距离缩小，线路可听噪声扰民造成的环保投诉逐年增加，给工程建设和管理带来了诸多阻力[1-3]。以山东地区为例，山东地区特高压线路中有相当长的线路位于中等以上污秽区，可听噪声分布较为复杂。怡勇等学者[4-6]研究表明：导线表面状态对导线电晕发生和电晕引起的干扰(可听噪声、无线电干扰等)有着十分重要的影响；附着污秽后导线的起晕电压降低，可听噪声明显增大。现阶段对输电线路可听噪声的研究[7-12]主要集中在雨天或者高海拔等地区的环境条件对干净导线电晕噪声的影响，而对于导线表面污染对输电线路的影响研究很少涉及。本文以山东省电力污区分布图为基础，在山东中等及以上污区各选取若干输电线路档距，监测输电线路周围的可听噪声，分析得出污秽区对输电线路可听噪声的影响，同时利用有限元仿真软件结合输电线路预测公式进一步分析污秽粒子对特高压输电线路周围可听噪声分布的影响。

1　可听噪声现场监测方案

为了研究特高压输电线路可听噪声随污区变化的噪声分布，通过前期调研和现场考察，基于山东省电力污区分布图，在不同污区选取同一线路进行监测。线路选择中国锡盟-山东 1000 kV 特高压交流输电线路进行可听噪声监测。选取的档距位于山东省济南市附近的农田中，地势平坦，附近没有高大建筑或其他高压输电线路的影响。测量时间为夏季，人们站在线下可以明显感受到嘶嘶声。根据中国电力行业电晕噪声测量方法，监测示意图如图 1 所示，本次监测方案为噪声传感器位于离地 1.5 m 高度，为区分背景噪声所造成的影响，在距边相导线弧垂投影点外 50 m 处设立背景噪声监测点。以边相导线弧垂地面投影点为起点，向外间隔 5 m 设定监测点，终点为垂直导线向外 40 m 处。每个监测点测量 20 s，在向外 50 m 处设定背景噪声监测点。本次采用 B&K2250 声级计设备，测量结果采用 A 计权处理。

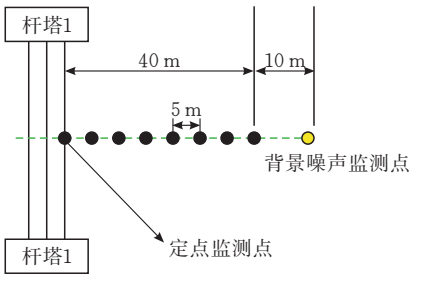

图 1　可听噪声定点监测

2　输电线路可听噪声预测模型

2.1　污秽交流输电线路表面电场计算方法

为了计算污秽对输电线路可听噪声的影响，本文首先利用 Ansys maxwell 软件计算不同污秽颗

[收稿日期] 2023－04－01
[第一作者] 赵　国(1985－)，男，江苏南京人，湖北工业大学副教授，研究方向为新能源发电技术。
[通信作者] 宋昊然(1999－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为电气工程。

粒附着的三相输电线路表面最大电场强度，为了简化计算模型，做出以下简化：

1）地面为无穷大导体，其电势为 0。

2）对输电杆塔及绝缘子串等除导线外的物体进行简化，仅计算输电线路表面电场强度。

3）将导线等效为无限长直导线，导线的高度为弧垂对地高度，导线水平间距相等。

为降低求解时间及仿真难度，本文在二维平面上对输电线路进行有限元分析。采用二维有限元方法求解输电线路表面电场是一种常见的数值计算方法，具有精度高、适用性强和可扩展性强等优点，因此被广泛应用于输电线路的研究和设计中。模型采用的导线以本次实地监测的输电线路为参考，采用导线规格为 LGJ-500/45 的八分裂导线，将钢芯铝绞线简化为如图 2 所示截面，地线为铝包钢绞线，导线外径约为 12 mm，水平层间距 18 m。选取的铝的电导率为 3.8×10^{7} S/m，钢的电导率为 2×10^{6} S/m。整个仿真域为空气域。

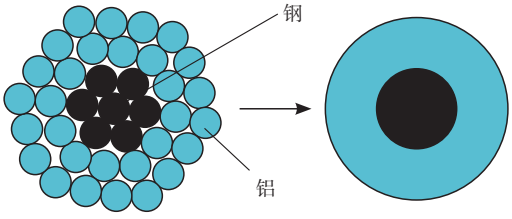

图 2　输电线路导线截面

整个输电线线路采用同塔双回路架设，导线垂直排列，伞型布置，导线层间距 20 m，最下层导线距地 48 m，从下至上水平层间距分别为 15.5 m、14.5 m、13.5 m。杆塔导线排列如图 3 所示。

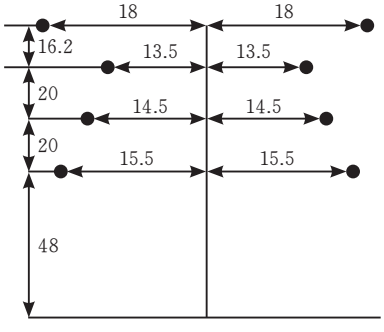

图 3　杆塔导线排列

对于导线表面污秽颗粒的仿真，主要采用在导线表面附着圆锥形状进行模拟。使用圆锥形进行模拟具有粒子形状真实、几何参数易于控制、模拟计算效率高以及研究应用广泛的优点。单根分裂导线仿真如图 4 所示，其中圆锥半径 0.2 mm，高0.4 mm。对于污秽颗粒的选取，主要采用硅藻土、高岭土、氯化钠及碳粉进行仿真求取，其材料的相关参数如表 1 所示。

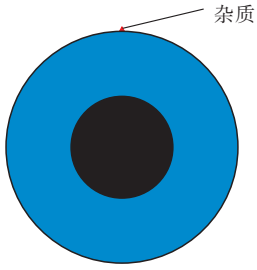

图 4　单根分裂导线附着杂质

表 1　污秽颗粒材料参数

材料物质	相对磁导率/(H·m^{-1})	电导率/(S·m^{-1})
硅藻土	1	4
高岭土	1.55	15
氯化钠	1.00088	5.9
碳粉	1	1

由于输电线路导线为 1000 kV，本次求解的电场强度为 $t=0$ 时的静电场，因此施加在三相输电线上的激励分别为由下至上 $U_A=816$ kV，$U_B=-408$ kV，$U_C=-408$ kV。A、B、C 的相角分别为 0°、120°、−120°。

2.2　输电线路可听噪声的求取

高压交流输电线路可听噪声的空间传播计算模型的建立，先计算单根输电线路在被测点的声压大小，然后计算其他两相传播到被测点后的声压大小，将三条输电线路在接收点获得的声压大小进行叠加，就获得了交流输电线路在被测点的总声压大小。目前美国邦维尔水电局（bonnieville power administration，BPA）推荐的预测公式是根据不同电压等级、分裂方式的实际试验线路上长期实测数据推导出来的，而且利用公式预测的结果与其他输电线路的实测结果做过比较，两者之间的绝对误差大多数在 1 dB 之内。因此，认为该公式具有较好的代表性和准确性。美国 BPA[13] 推荐的高压输电线路可听噪声预测公式如下：

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

式中：SLA 为 A 计权声级；R_i 为测点至被测 i 相导线的距离；Z 为相数；$M(i)$ 为 i 相导线的声功率级。其中 $M(i)$ 按下式计算：

$$M(i)=-164.6+120\lg E_{\max}+55\lg d_{eq}$$
$$d_{eq}=0.58n^{0.48}d \tag{2}$$

式中：$E_{\max}$ 为导线表面梯度，kV/cm；d_{eq} 为导线等效半径；n 为导线分裂数；d 为子导线直径。

根据上式，首先通过有限元电磁仿真计算各相输电线路表面最大电场强度；然后根据式(2)计算各相线路表面声功率级；最后利用式(1)，根据测点处距离、各相线路表面声功率级等参数，计算出测点处的声压级。对于各相输电线路与被测 i 相导线的距

离，直接选取测点至第 i 相导线弧垂处的直线距离，原因为经现场考察，发现输电线路弧垂处导线电晕噪声的数值较大。

3 仿真结果与分析

3.1 线路表面电场仿真结果

对干净导线及四种污染颗粒进行有限元电场分析，求解器类型选用交流稳态求解器，采用经典网格进行自适应网格剖分。表 2 为干净导线及受污染颗粒附着导线的三相导线最大表面电场数值。

表 2 输电线路导线表面最大电场强度 kV/cm

附着材料	电场强度		
	A 相	B 相	C 相
干净导线	6.7	8.8	7.1
高岭土	14.62	27.12	26.08
硅藻土	15.58	19.56	16.94
氯化钠	22.56	28.24	23.64
碳粉	22.55	28.23	23.63

通过对表中数据的分析可以直观地观察到附着杂质的导线表面最大电场强度明显提高，且最大提高程度比干净导线提高约 3.5 倍。

由于碳粉与硅藻土杂质的相对磁导率相等，而碳粉的三相输电线路表面电场强度比硅藻土的平均差值约 7.4 kV/cm，这说明影响输电线路表面电场强度的因素主要是杂质粒子的电导率。

为了直观区分干净导线与带污导线的电场分布，将干净导线的 B 相导线与带氯化钠颗粒的 B 相导线的八分裂导线总体截面及单根导线电场最强分布区域进行对比分析，如图 5—8 所示。

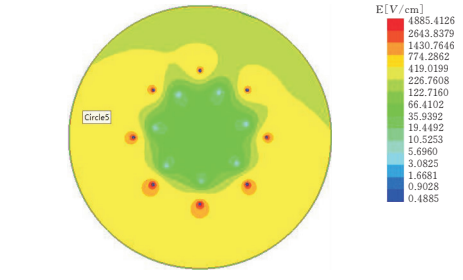

图 5 干净导线最大表面电场分布

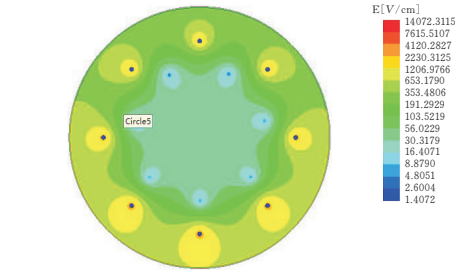

图 6 带氯化钠颗粒的最大表面电场分布

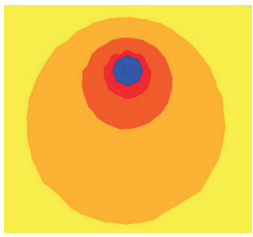

图 7 干净导线电场最大区域



图 8 带氯化钠颗粒电场最大区域

通过对比上图可以发现，干净导线的电场分布相对均匀，但带氯化钠颗粒的导线电场在有杂质部分发生了畸变。从图 8 可以明显观察到，导线表面电场强度最强的区域位于氯化钠杂质颗粒顶端。

3.2 线路可听噪声分析

通过采用美国邦维尔水电局(BPA)推荐的预测公式计算输电线路可听噪声分布，以导线弧垂处为坐标零点，结合现场实测数据分布示意图所示求取线路可听噪声。根据对称原则，本文在计算横向分布时仅计算导线一侧数据。

为了分析本模型结果的误差，本文选取了电场强度相对较小的带硅藻土颗粒导线的可听噪声计算仿真结果与各污区监测的线路数据进行对比，如图 9 所示。

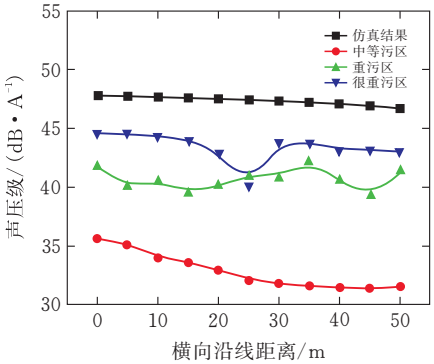

图 9 线路仿真数据误差对比

通过分析可发现，实际测量的可听噪声数据随着污区等级的增加，幅值随之增加。其中重污区与很重污区的数据受背景噪声的干扰呈现了扰动，但总体呈衰减趋势。对比图中各污区与带硅藻土颗粒的仿真结果，可知现场实际的测量结果略低于仿真结果，其原因为 BPA 预测公式计算的可听噪声的环境条件为大雨条件，而本次实地监测的结果为晴天。根据观察趋势可发现，中等污区衰减幅度为 11%，

重污区为 0.9%，很重污区为 3.5%，仿真结果的衰减幅度为 1.6%。对比上述数据可以发现，硅藻土的衰减幅度与重污区及很重污区的实测结果相差不超过 2%，因此可证明本模型的准确度。

根据以上分析，对四种杂质颗粒和干净导线的结果值进行对比，如图 10 所示。

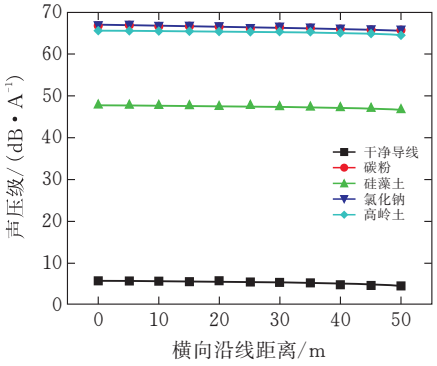

图 10　仿真结果对比

根据图 10 可以看出，干净导线的可听噪声声压级低于 10 dB(A)，而附着杂质颗粒的导线的声压级则跃升至 40 dB(A)以上。这说明随着杂质颗粒的覆盖，输电线路可听噪声的声压级幅值显著增加，其中碳粉和氯化钠颗粒的增长幅度最大，而硅藻土的增长幅度最小。

此外，通过计算各导线在沿线 50 米横向范围内的可听噪声衰减幅度，可以发现干净导线的衰减速度为 18.8%，碳粉为 1.6%，硅藻土为 2.2%，氯化钠为 1.6%，高岭土为 1.4%。与干净导线相比，附着杂质颗粒的导线衰减幅度明显减小，这表明杂质对线路可听噪声的横向衰减程度也会产生影响。

为了更加明确地描述杂质颗粒对干净输电线路可听噪声声压级的影响，本文利用各杂质颗粒横向分布对应的可听噪声声压级与干净导线的噪声声压级的比值，表征杂质颗粒对导线可听噪声幅值的影响程度。如图 11 所示为杂质颗粒对输电线路可听噪声影响的变化程度图。

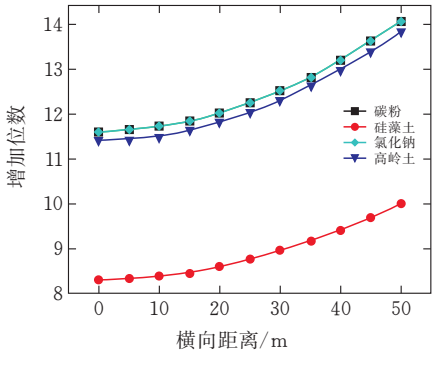

图 11　杂质颗粒对线路可听噪声的影响程度

如图 11 所示，通过观察各种单一杂质颗粒的增长倍数曲线，可以发现以下趋势：随着横向距离的增加，测点的增长倍数呈现非线性增长态势。需要注意的是，四种杂质颗粒(硅藻土、高岭土、氯化钠和碳粉)的增长趋势相似，这意味着杂质颗粒对干净输电线路可听噪声的影响程度逐渐增大。

通过对比各种杂质颗粒的增长倍数，可以得出它们对线路可听噪声影响程度的大小排序为：硅藻土＜ 高岭土＜氯化钠＜碳粉。其中，碳粉和氯化钠的曲线几乎重合，表明这两种杂质颗粒对输电线路可听噪声的影响相似。

综上所述，杂质颗粒的种类对输电线路可听噪声具有重要影响。在实际工程应用中，需要对杂质颗粒进行有效的监测和管理，以降低其对输电线路可听噪声的不良影响。

4　结论

本文对 1000 kV 特高压输电线路截面进行有限元建模，并通过现场实测数据进行验证，得出以下结论：

1) 附着杂质颗粒的导线表面电场分布会发生畸变，通过对硅藻土等四种杂质颗粒建模发现，其表面最大电场强度会增加 3.5 倍，因此研究输电线路可听噪声分布问题必须考虑线路表面附着污秽的影响。

2) 通过对比硅藻土与高岭土发现，影响输电线路可听噪声的最主要因素是材料电导率，因此在对输电线路可听噪声治理时，可以从材料电导率方向进行抑制策略研究。

3) 不同杂质颗粒覆盖不仅对可听噪声的幅值造成影响，也会对可听噪声横向衰减造成影响。对可听噪声的影响程度大小分别为：硅藻土最小，其次是高岭土，而氯化钠与碳粉的影响程度最大。这表明，在考虑输电线路可听噪声的治理策略时，需要根据实际情况综合考虑不同杂质颗粒的影响。

[参　考　文　献]

[1] 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(05)：1-6.

[2] 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.

[3] 赵录兴，小布穷，谢莉，等.海拔对直流输电线路可听噪声及其频谱特性影响的试验研究[J].中国电机工程学报，2020，40(21)：7132-7143.

[4] 怡勇，张楚岩，王元九，等.导线表面污秽对正极性单电晕点可听噪声频谱特性的影响[J].高电压技术，2016，42(06)：1990-1996.

[5] 应力. 基于三维模型的交流输电线路可听噪声计算方法及规律研究[D].北京:华北电力大学,2015.
[6] 张满,冉军德,田芝华,等.带电雾凇覆冰后分裂导线电场分布模型分析[J].电气工程学报,2018,13(08):43-48.
[7] 江进波,沈骏峰,黄国良,等.220kV 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.
[8] 赵录兴,小布穷,谢莉,等.海拔对直流输电线路可听噪声及其频谱特性影响的试验研究[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7132-7143.
[9] 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):3 维分布[J].高电压技术,2019,45(09):2990-2998.
[10] 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.
[11] 赵录兴,小布穷,王炳强,等.高海拔地区±500 kV 直流线路电磁环境试验研究及导线选型[J].电网技术,2021,45(02):794-801.
[12] EVANTHIA I. BOUSIOU, PANTELIS N. et al Corona inception field of typical overhead line conductors under variable atmospheric conditions [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178(01):106032.
[13] ZHANG R, ZHEN N, GUO G, et al. Effect of pollution severity class and service year on corona characteristics and electromagnetic environment degradation of aged conductors[J]. Journal of Electrostatics, 2015, 77(01):1-7.

Influence of Contamination on Audible Noise of AC Transmission Lines

ZHAO Guo[1,2], SONG Haoran[1,2], ZHU Heping[1,2]

(1 *School of Electrical and Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: This article investigates the effect of surface contamination on the audible noise of transmission lines and takes the 1000 kV AC transmission line in Shandong Province as the research object. Finite element software was used to model and analyze conductors with silica, kaolin, sodium chloride, and carbon powder attached. The study analyzed their impact on the audible noise of transmission lines. The results show that impurities cause electric field distortion, affecting the propagation of audible noise. The electrical conductivity of materials is one of the main factors affecting audible noise. In addition, different types of contamination particles have different effects on the amplitude and lateral attenuation of audible noise. Among them, silica has the smallest impact, while sodium chloride and carbon powder have the greatest impact. This study can be used to guide the development of treatment strategies for transmission lines in contaminated areas.

Keywords: AC transmission lines; filthy particles; BPA prediction formula; audible noise

[责任编校:赵 瞳]