

高压交流输电线路电晕可听噪声机理及理论模型

弟泽龙, 吴九汇

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为预估高压交流输电导线产生的电晕可听噪声,研究了电晕可听噪声的产生机理及其理论预估模型. 高压交流输电线路电晕产生正负离子,基于 Drude 模型研究了正负离子的运动规律,进而阐明了电晕可听噪声的产生机理. 在此基础上,进一步运用 Kirchhoff 公式得出电晕可听噪声的理论预估模型,并针对特定导线布置形式计算了典型的二倍工频分量的声压及声场分布. 数值计算结果表明,可听噪声中的二倍工频分量衰减缓慢,且在导线附近区域存在显著的干涉现象,计算的结果会随着离子浓度的变化而变化,但声压级分布曲线的形状不会变化. 该模型适合于电晕可听噪声的计算,有助于指导输电线路设计.

关键词: 电晕可听噪声; Drude 模型; 二倍工频分量

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0128-05

Mechanism and Theoretical Model for Corona Audible Noise from High Voltage AC Transmission Lines

DI Zelong, WU Jiuhui

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To predict the levels of corona audible noise resulting from high voltage AC power transmission lines, the mechanism of corona audible noise and its theoretical prediction model are investigated. On the basis of the Drude model, the motion of positive and negative ions produced by corona of high voltage AC power transmission lines is analyzed and the mechanism of corona audible noise is explained. In terms of Kirchhoff formula, the theoretical prediction model is established, and for a certain line configuration, the acoustic field distribution of the typical component with twice power frequency is computed. The numerical result shows that the audible noise component with twice power frequency attenuates slowly and leads to an obvious interference near the transmission lines. The magnitude of sound pressure level distribution curve undulates with the ion concentration, but the shape gets unchanged. The model is suitable for evaluating levels of corona audible noise to guide transmission line designs.

Keywords: corona audible noise; Drude model; twice power frequency component

随着高压输电工程输电电压等级的不断提高,线路电晕引发的可听噪声扰民现象受到普遍关注,成为输电线路规划设计中必须考虑的因素,这对于 500 kV 及以上电压等级的输电线路尤其重要^[1-2]. 关于可听噪声已有许多实验研究,通过对户外测试

结果或电晕笼实验结果的处理,得到了适宜于计算不同线路状况可听噪声的经验公式^[3-4]. 关于噪声机理的研究相对较少,这是由于电晕可听噪声受到环境因素和输电线的几何、电气参数等因素的共同影响,难以进行统一分析.

收稿日期: 2012-02-20. 作者简介: 弟泽龙(1988—),男,硕士生;吴九汇(通信作者),男,教授,博士生导师. 基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-09-0644);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目.

网络出版时间: 2012-04-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120420.0820.001.html>

交流输电线电晕可听噪声由宽频带噪声、二倍工频及其整数倍频率的纯音两部分组成^[5]. 文献[6]指出,二倍工频声波在导线附近形成驻波,并结合 Random Walk 模型进行了描述. 文献[7-8]联系声波在等离子体中的传播规律,解释了二倍工频分量的发声机理. 文献[9]基于点声源声波叠加方法,将单根导线视作点声源串列,选择合适的点声源强度且忽略点声源之间的相互影响,对二倍工频纯音的传播规律进行了理论研究,给出了数学描述.

本文针对理想线路状况,采用 Drude 模型研究了电晕可听噪声的物理机理,并对典型的二倍工频即 100 Hz 纯音分量的声压进行了计算,得出的声压分布规律与实际相符,分析结果有助于对噪声产生机理和影响因素的认识.

1 电晕可听噪声机理研究

输电线在运行中若导线表面电场强度超过临界强度,将电离其临近的空气,形成弱电离气体,即电离区. 电离区外,场强减弱,电子能量小,不足以电离空气分子,而是附着于其上形成负离子,且正负离子复合. 电离气体中的带电粒子处于无规则的热运动中,粒子间的电磁相互作用微弱,碰撞效应与空气分子相似,且带电粒子受到外加电场的作用.

电子质量小易加速,因而能量高于离子. 在弹性碰撞中,电子与电子碰撞不损失能量,在与离子或分子的碰撞中,若电子能量高于分子电离能,则假设发生碰撞电离,形成新的电子和正离子(仅考虑一次电离),若电子能量小于分子电离能则不发生电离,电子能量损失很小. 因此,电子自身处于热平衡状态.

由于电场的加速,离子比空气分子热能大,且受电场的支配附加有整体的定向运动. 可听噪声是空气分子层振动传播的结果,由离子施加的作用引起. 离子与分子的质量相当,在碰撞中离子损失能量可观,对空气起到加热作用,可以产生宽频噪声向外传播^[10]. 同时,大量离子的定向运动向空气分子层施加压力,形成声压. 在交变电场作用下,正极性区间正离子沿径向向外运动,对空气层施加压力,负极性区间由电子附着于分子而形成的负离子沿径向向外运动,对空气层施加压力,如图 1 所示,从而形成对空气层的周期性作用,产生向外传播的声波.

2 电晕可听噪声理论预估模型

在离子与分子的碰撞中,由于二者质量相当,离子损失的能量可观,因此离子的运动需要考虑碰撞

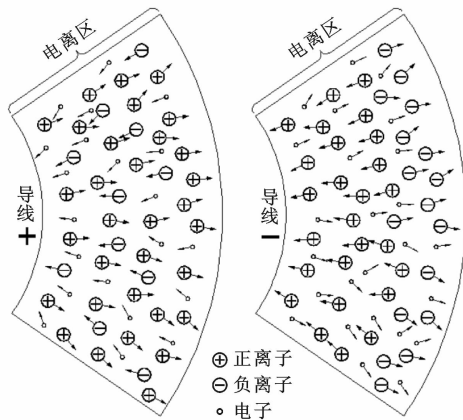


图 1 交流正、负极性区间带电粒子的运动

和外场加速双重作用. 在弱电离气体中,离子浓度与空气分子浓度相比很小,可以忽略离子间的电磁作用,采用 Drude 模型^[11]描述离子的运动规律. 以正离子为例,所受碰撞和电场的双重作用示于图 2.

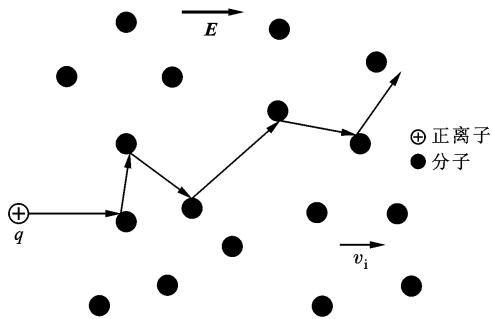


图 2 正离子运动模型

输电导线视作无限长平直且平行于地面的圆柱导体,表面电势即输电电压,地面视作无限延伸的水平面,电势为 0,不考虑其他因素,因此采用二维模型即可. 又由于电离仅发生在临近导线的小区域内,电场近似满足 $Er=C$ (C 为一常数),则可进一步简化为一维模型. 类比 Drude 模型^[11],在圆柱导线上采用柱坐标,得到离子的径向动量方程

$$dI_{ir}(r,t)/dt = qE_r(r,t) - I_{ir}(r,t)/\tau \quad (1)$$

式中: $I_{ir}(r,t)$ 表示 t 时刻距导线中心 r 处离子的径向平均动量; $E_r(r,t)$ 是电场的径向分量; τ 是离子的弛豫时间; q 为正离子电荷量,即元电荷.

单根导线距地高度 h ,导线半径 r_0 ,对地单位长度电容为^[12]

$$c = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln[h/r_0 + ((h/r_0)^2 - 1)^{1/2}]} \approx \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2h/r_0)} \quad (2)$$

式(2)中的简化处理是由于 $h/r_0 \gg 1$. 当导线上所加电压为 U 时,导线单位长度电荷量 $\lambda=cU$,则导线表

面的场强为

$$E_0 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_0} = \frac{U}{r_0 \ln(2h/r_0)} \quad (3)$$

在此假定导线表面场强沿周向均匀分布. 交流输电线产生的似稳电场可以按静电场处理, 因此若在导线上所施加的电压 $U = U_{\max} \sin(\omega t)$, 则产生的表面场强 $E_0 = E_{0\max} \sin(\omega t)$, $E_{0\max}$ 和 $U_{\max}$ 的关系由式(3)确定. 某时刻 t 径向场强满足 $E_r r = E_0 r_0$, 因此导线临近电场分布可表达为 $E_r(r, t) = \frac{E_{0\max} r_0}{r} \sin(\omega t)$.

将式(1)对 t 积分并整理, 可以得到离子的径向平均动量

$$I_{ir}(r, t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - q \frac{E_{0\max} r_0}{r} \tau^2 \omega \cos(\omega t) + q \frac{E_{0\max} r_0}{r} \tau \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: 弛豫时间 $\tau = l/\bar{v}_i$, l 是离子的平均自由程, 在此可取空气分子的相应量值, 即 $l = 7 \times 10^{-8}$ m, $\bar{v}_i$ 是离子的平均热运动速度, 离子的初始平均热运动速度和空气分子相当, $\bar{v}_i = (8kT_i/\pi m_i)^{1/2}$, T_i 是离子的温度, 取 $T_i = 293$ K, k 是玻尔兹曼常数, m_i 是离子的质量, 按空气中氧气与氮气含量的比例取平均值 $m_i = 4.74 \times 10^{-26}$ kg. 从而计算得到离子的弛豫时间为 1.50×10^{-10} s.

初始时刻, $t = 0$, $I_{ir}(r, 0) = 0$, 临界场强的数量级为 10^6 , 由此确定常数 A 的数量级为 10^{-30} , 所以式(4)右边第一项对离子动量的贡献忽略不计. 同时, 由于弛豫时间 τ 值很小, 式(4)右边第二项远小于第三项, 对离子平均动量的贡献主要来自于第三项, 即 $qE_r(r, t)\tau$, 则离子径向平均速度是

$$v_{ir}(r, t) = qE_r(r, t)\tau/m_i \quad (5)$$

经过一段时间达到稳定状态, 离子的温度升高, 可达 3 000 K 以上^[13], 在此取 3 000 K, 由此得到离子的平均热速度 $\bar{v}_i$, 进而得到弛豫时间 $\tau = 4.69 \times 10^{-11}$ s.

根据压强的微观定义, 得到离子对空气造成的压强为^[14]

$$P_i(r, t) = n_i(r, t)m_i v_{irms}^2 \quad (6)$$

式中: $n_i(r, t)$ 是离子浓度, 根据气体弱电离的一般情况, 取空气分子数密度 (2.69×10^{25} m⁻³) 的千万分之一^[13, 15] 视作不变量. 均方根速度 v_{irms} 和平均速度 v_{ir} 满足 $v_{irms} = (3\pi/8)^{1/2} v_{ir}$, 整理式(5)、式(6)得

$$P_i(r, t) = \frac{3\pi n_i q^2 \tau^2 E_{0\max}^2 r_0^2}{16m_i r^2} [1 - \cos(2\omega t)] \quad (7)$$

由式(7)易知影响声压的各个因素.

在式(7)中, 直流项对空气起到加热作用, 交流项则形成简谐变化的声压. 根据电荷守恒, 正离子浓度等于负离子和电子浓度之和, 则正极性区间的声压大于负极性区间的声压, 在此假定二者相等, 所得结果将比实际声压大. 在推导中, 假定导线上所加电压是理想工频正弦电压, 然而实际线路并非如此. 旋转电机、整流器和变压器等都会在输电线路中造成谐波分量, 这就是可听噪声频谱中倍频分量的来源.

在此仅考虑交流输电线电晕可听噪声的二倍工频, 即 100 Hz 分量, 它的幅值较大^[16]. 采用二维 Kirchhoff 公式求声场分布^[17], 需要确定声学虚源的分布表面, 在此声学虚源表面选取电离半径大小的圆周. 以单根导线为例, 如图 3 所示, 由于声波在传播中受到地面的反射, 而地面的声学特征参量比空气的声学特征参量大几个数量级, 故地面作为绝对硬边界条件处理, 应用镜像原理设置相应的镜像声源, 其发声情况与原导线相同, 因此声学虚源的全部表面就是导线及其镜像处电离半径大小的圆周.

电离过程的机理比较复杂, 采用有效电离系数 α' , 可以较好地确定与实际相符的电离半径, 即

$$\exp\left(\int \alpha' dx\right) = Q \quad (8)$$

式(8)沿径向积分, 积分区间即电离区间, 从而确定出电离范围^[18].

二维 Kirchhoff 公式

$$P(\mathbf{r}_0) = \frac{i}{4} \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial P(\mathbf{r})}{\partial n} H_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) - P(\mathbf{r}) \frac{\partial H_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)}{\partial n} \right] dl \quad (9)$$

式中: $P(\mathbf{r})$ 是声学虚源处的声压; $P(\mathbf{r}_0)$ 是待求点处的声压. 式(9)省略了声压时间变化因子 $\exp(i2\omega t)$. 积分沿声学虚源的全部表面进行, 微分则沿所要计算声场区域的外法线方向进行, 即图 3 中所示法线方向 $\mathbf{n}$. Kirchhoff 公式表明, 某待求点处的声压是由声学虚源表面处的声压(第二项)和该处振动速度(第一项)共同造成的.

对于多根导线的情况, 声学虚源表面是全部导线及其镜像处电离半径的圆周. 利用 Kirchhoff 公式计算声场分布时, 由于在空气中 100 Hz 声波的波长(约 3.4 m)远大于声学虚源表面的半径, 所以多根导线发出的 100 Hz 声波的相互辐射影响忽略不计, 可以直接叠加.

3 数值计算及理论模型的对比验证

根据上述模型, 利用 Matlab 编程计算二倍工

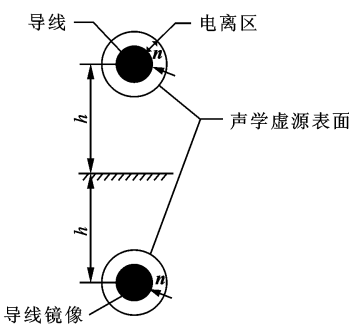


图 3 Kirchhoff 积分路径

频,即 100 Hz 纯音声压在人耳高度 1.6 m 的分布,并与采用点声源波叠加理论计算的结果作定性比较。线路结构如图 4 所示,参数见表 1,左相导线初相角为 -120° ,中相导线初相角为 0° ,右相导线初相角为 120° ,三相导线电压波形如图 5 所示。每相导线不分裂,这可以视作导线电晕严重时的情况。

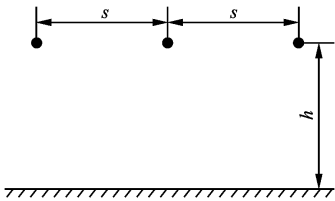


图 4 线路几何结构

表 1 线路参数

U/kV	h/m	s/m	单相导线数	r_0/cm
500	30	27	1	1

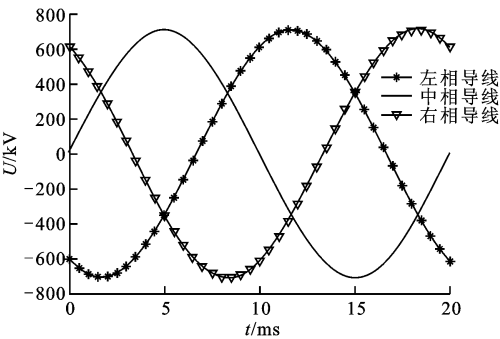


图 5 三相导线的电压波形

采用点声源波叠加方法计算声场时,针对选定的线路结构,考虑每相导线的相位,将每相导线视作沿导线等间隔排列的 500 个同相位、同强度、振动频率(均为 100 Hz)的点声源序列,导线长度取 100 m,点声源辐射声场 1 m 处声压选取 0.012 Pa。利用点声源波叠加方法^[9],计算三相导线跨距中点所在

竖直截面内 1.6 m 高度的声压分布。

三相导线 1.6 m 高度声压级分布如图 6 所示,声压级采用 A 计权方式,横坐标 0 对应中相导线投影位置。三相导线及其镜像均发出二倍工频声波,它们在空间干涉形成了明显的驻波,图 6 的声压级曲线反映了离地 1.6 m 高度的驻波形状。声压级在两侧随着距中相导线横向距离的增大呈缓慢衰减趋势,这是由于在单根导线的辐射声场中,距离声源较远处的声压幅值按观察点至该导线距离的 $(-1/2)$ 次幂规律衰减,3 根导线情况下的衰减更缓慢。左右两相导线关于中相导线几何对称,两者相位不同,不构成镜像关系,因此所得声压级曲线左右不对称。

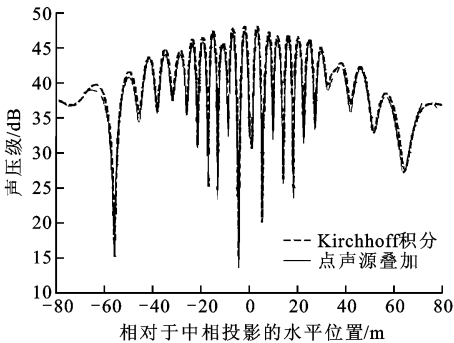


图 6 1.6 m 高度电晕可听噪声 100 Hz 声压级曲线

图 6 表明,采用 Kirchhoff 积分计算的结果与采用点声源波叠加方法得到的结果相符,声压的分布规律和变化趋势相同,对比结果证明本文提出的理论模型正确。该模型清楚地阐述了电晕可听噪声的产生机理,避免了过多人为假定,理论精度高,反映了电晕可听噪声的物理本质。

高压输电线采用分裂方式可以减小导线表面电场强度,使得子导线的电离区域与不分裂情况下单根导线的电离区域不同。每相各子导线的表面场强周向分布很不均匀,以该相导线分裂圆作为近似分界线,表面场强外部大内部小,电离发生在场强较大的子导线外围部分。利用 Kirchhoff 公式,计算空间声场时,积分路径沿电离区域轮廓对应的声学虚源表面,如图 7 所示,其中以单相导线四分裂为例。采用分裂导线后,各相导线辐射的声波不是沿各个方向均匀地向外传播,而是具有指向性,能量集中在某些方向,使得声压在整个空间相对减小,从而导线电晕辐射的可听噪声减弱。当导线表面附着微粒或水滴时,由于尖端效应这些局部位置的电场发生严重畸变,导线在较低的电压下就会起晕,且电离强度增加,造成电晕可听噪声加剧。

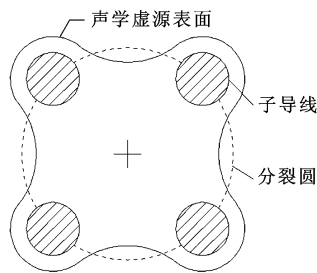


图7 单相四分裂导线 Kirchhoff 积分路径

4 结 论

本文阐明了高压交流输电导线产生电晕可听噪声的物理机理,并提出了电晕可听噪声的理论预估模型.所得模型机理清晰,人为影响因素少,运算结果精度高.根据该声压预估模型,导线的表面场强、电离产生的离子浓度和空气中离子运动的弛豫时间是声压的重要影响因素.数值计算结果表明,可听噪声中的二倍工频分量衰减缓慢,且在导线附近区域存在显著的干涉现象.本文的计算结果会随着离子浓度的变化而变化,但声压级分布曲线的形状不会变化.本文所得理论模型有助于指导实际输电线路的规划设计.

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 253-270.
- [2] 谭闻, 张小武. 输电线路可听噪声研究综述 [J]. 高压电器, 2009, 45(3): 109-112.
TAN Wen, ZHANG Xiaowu. Research review on audible noise control of transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 109-112.
- [3] COMBES M G, CARBERRY R E, CHARTIER V L, et al. A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 4090-4099.
- [4] 唐剑, 杨迎建, 李永双, 等. 特高压交流输电线路电晕效应的预测方法: I 可听噪声 [J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2679-2686.
TANG Jian, YANG Yingjian, LI Yongshuang, et al. Prediction of corona effects generated from UHVAC transmission lines: I Audible noise [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2679-2686.
- [5] PERRY D E. An analysis of transmission line audible noise levels based upon field and three-phase test line measurements [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, 91(3): 857-865.
- [6] TANABE K. Second harmonics of audible noise from AC transmission lines; random walk model on space distribution [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 216-222.
- [7] STRAUMANN U, FAN Jianbin. Audible noise from AC-UHV transmission lines; theoretical comparison of broadband and tonal components [EB/OL]. [2012-01-10]. http://www.eeh.ee.ethz.ch/en/no_cache/power/high-voltage-laboratory/publications/conference-papers.html
- [8] STRAUMANN U. Mechanism of the tonal emission from ac high voltage overhead transmission lines [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2011, 44(7): 075501.
- [9] 邱海宾, 杨坤德. 基于波叠加的高压输电线噪声场计算模型 [J]. 电声技术, 2009, 33(10): 81-85.
QIU Haibin, YANG Kunde. Calculating model of audible noise distribution of high voltage power line [J]. Audio Engineering, 2009, 33(10): 81-85.
- [10] MAZZOLA M S, MOLEN G M. Modeling of a dc glow plasma loudspeaker [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(6): 1972-1978.
- [11] ASHCROFT N W, MERMIN N D. Solid state physics [M]. Beijing: World Publishing Corp., 2004: 1-11.
- [12] 林璇英, 张之翔. 电动力学题解 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 202-207.
- [13] 叶超. 低气压低温等离子体诊断原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-3.
- [14] 常树人. 热学 [M]. 天津: 南开大学出版社, 2009: 61-66.
- [15] MORROW R, LOWKE J J. Streamer propagation in air [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1997, 30(4): 614-627.
- [16] SFORZINI M, CORTINA R, SACERDOTE G, et al. Acoustic noise caused by a. c. corona on conductors; results of an experimental investigation in the anechoic chamber [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 591-601.
- [17] 吴九汇. 噪声分析与控制 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2011: 72-84.
- [18] LOWKE J J, D' ALESSANDRO F. Onset corona fields and electrical breakdown criteria [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2003, 36(21): 2673-2682.

(编辑 杜秀杰)