第 50 卷 第 11 期：5192-5205 高电压技术 Vol.50, No.11: 5192-5205
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240407

海拔高度对导线负极性直流电晕特性的影响

张延泽[1,2]，刘　洋[3]，龙　涛[3]，廖正海[2,4]，徐吉来[2,4]，刘永聪[5]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；2. 电网环境与保护全国重点实验室，武汉 430072；3. 国家电网江苏省电力有限公司南京供电分公司，南京 210024；4. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；5. 国家电网江苏省电力有限公司苏州供电分公司，苏州 215000）

摘　要：直流线路电晕效应引发的电磁环境问题是线路结构设计和导线选型的关键制约因素，而目前针对海拔高度对负极性直流电晕效应影响的研究，大多未能将放电微观过程和宏观特性相联系，相关机理和规律尚不完善。基于流体动力学理论，文中分析了海拔对电晕放电参数及微观特性的影响；利用小电晕笼和高频电流测量系统，在 20~4 320 m 范围内 7 个不同海拔点进行试验，采集了不同海拔下包括电晕电流脉冲、无线电干扰和可听噪声水平等在内的放电宏观特性参数数据，并获得了考虑海拔影响的电晕效应拟合函数关系。结果表明：海拔升高，电晕电流脉冲幅值和重复频率均增大。电晕电流平均值与导线表面场强的幂函数成正比，比例系数为海拔高度的分段线性函数。无线电干扰和可听噪声也增大，与电晕电流平均值之间呈幂函数关系，且随海拔高度变化而变化。
关键词：海拔高度；直流电晕特性；流体动力学模型；无线电干扰；可听噪声

Effect of Altitude on Negative Polarity DC Corona Characteristics of Conductors

ZHANG Yanze[1,2], LIU Yang[3], LONG Tao[3], LIAO Zhenghai[2,4], XU Jilai[2,4], LIU Yongcong[5]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210024, China; 4. China Electric Power Research Institute , Wuhan 430074, China; 5. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: The electromagnetic environmental problems caused by corona effect of DC line is the key constraint factor for the design of line structure and wire selection. However, most of the current studies on the influence of altitude on the negative DC corona effect have failed to link the micro-processes of the discharge with the macroscopic characteristics, and the relevant mechanisms and laws are still incomplete. Based on the hydrodynamic model, the effects of altitude on the parameters and microscopic characteristics of corona discharge are analyzed. By using a small corona cage and a high frequency current measurement system, tests were conducted at 7 different altitude points in the range of 20 m~4 320 m, data on the macroscopic characteristic parameters of the discharge, including corona current pulse, radio interference and audible noise level were collected at different altitudes, and the fitted functional relationship of the corona effect which considers the effect of altitude was obtained. The results show that the amplitude and repetition frequency of corona current pulse increase with altitude. The average corona current is proportional to the power function of the wire surface field strength, and the scale coefficient is a piecewise linear function of altitude. Radio interference and audible noise also increase with the increase of altitude, and they both have a power function relationship with the mean corona current, and change with the altitude.
Key words: altitude; DC corona characteristics; hydrodynamic model; radio interference; audible noise

0　引言

我国地域辽阔，能源与负荷中心逆向分布，为实现能源优化配置，我国正加速建设以特高压线路为骨干网架的输电系统[1]。为保证线路运行的经济性，高压直流输电线路正常运行时允许表面存在一定的电晕放电现象，进而引发一系列电晕效应，并带来相应的电磁环境问题[2]。电磁环境指标逐渐成为线路结构设计和导线选型的重要控制因素[3]。在我国西北地区，特高压直流线路的建设必将经过高海拔地区，由于空气密度较低，电子平均自由程大，有效碰撞电离更易发生，电晕放电带来的电磁环境

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5500-202155496A-0-5-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202155496A-0-5-ZN).

问题也更加严重[4]。因此，有必要对高海拔条件下电晕效应的产生机理及影响因素展开研究。

对于负极性电晕放电的试验研究，早期学者通过试验测量电晕电流的平均值，并拟合电晕伏安特性公式的方法来研究电晕放电的特性。Lama 等人首次给出了负极性电晕脉冲的特征值与间隙距离、施加电压关系的经验公式[5]。Meng 等人基于实验提出 $K(V-V_0)^n$ 形式的电晕伏安特性，指数 n 取值在 1~2 之间[6]。李振基于针板电极实验，拟合得到电晕平均电流 I 与空间电场 E 之间的规律满足 $I=K(E-E_0)^{1.6}$ 的形式，E_0 为起晕场强[7]。近年来，学者们通常将小电晕笼当作实验对象，通过测量串入电晕放电回路中小电阻两端的电压值来计算电晕电流[8-9]。在气体放电等离子体数值仿真研究方面，流体模型和粒子模型是当前研究的热点[10]。Sattari 等人提出了空气中的二维三元素模型，计算结果与 Lama 实验结果的吻合度较高[11]。尹晗采用流体模型计算得到了负极性电晕放电脉冲序列，从介观尺度分析了电晕放电的物理过程[12]。陈小月建立了电晕放电的流体-化学反应混合模型，并基于等离子体化学反应模型，对流体方程中的粒子源项进行了修正[13]。李江涛等利用零维等离子体动力学模型和二维细胞内粒子/蒙特卡罗碰撞模型组成的联合仿真平台，研究了重复纳秒脉冲作用下剩余热量和空间电荷对放电动力学演化和放电体制转变的影响[14]。蒋兴良等采用流体模型，就湿度对大气压下针板气隙流注放电及击穿过程开展了仿真研究[15]。赵政等采取全局-粒子耦合模拟的方式，对大气压下连续脉冲流注放电的演变过程开展了仿真研究[16]。廖瑞金等融合流体模型、等离子体反应模型（粒子模型）和玻尔兹曼方程组，开展了基于混合数值仿真模型的负直流电压下电晕笼内导线周围气体空间电荷密度分布规律研究[17]。以上研究成果为负极性电晕放电特性的更深层次研究奠定了基础。

电晕放电的能量通过无线电干扰和可听噪声等电晕效应向空间中释放。国内外众多机构和学者基于实测数据，提出了适用于具体线路型式的无线电干扰激发函数拟合结果以及可听噪声预测公式[18-20]。王仕超等人基于户外大电晕笼试验得到了可听噪声与导线表面场强的关系[21]。陈小月基于混合模型仿真及电晕笼试验，对电晕放电微观物理特性及无线电干扰的传播特性进行了研究[13]。李学宝、崔翔等人对不同电压类型下的单点电晕可听噪声时域特性进行了系统性研究，提出了直流电晕可听噪声的时域随机计算方法[22]。黄曹炜等人利用缩尺电晕实验平台，研究了电晕放电特性与无线电干扰水平之间的关系，并提出了高压直流输电线路无线电干扰的预测方法[23]。以上研究成果为提出更加普适的无线电干扰和可听噪声预测方法指明了方向。

对于输电线路电磁环境的海拔校正，BPA 提出海拔每升高 300 m，无线电干扰及可听噪声等电晕效应计算数值增加 1 dB[24]。我国高压直流输电所采用的导线型式与面临的环境地理条件与国外差别较大。刘正响等人在 0~4 300 m 范围的 6 个海拔点进行了实测，提出了考虑湿度和相对空气密度影响的起晕电压计算式[25]。唐剑等人利用可移动式电晕笼在 4 个海拔高度点的电晕无线电干扰特性进行了研究，提出在海拔高度大于 3 000 m 时，建议采用非线性修正系数[26]。中国电科院利用电晕笼进行试验，给出了 750 kV 电压等级以下线路的可听噪声海拔修正方法[27]。武晓蕊利用可移动式电晕笼在 7 个海拔高度点进行实验，并提出了海拔 4 300 m 以下适用的声功率预测方法[28]。赵录兴等基于 3 处不同海拔点的直流模拟试验线段，获得了不同导线表面场强、不同海拔的可听噪声 A 声级和频谱特性规律[29]。刘鹏等提出了一种以数值计算和有限元仿真为主、电晕模拟试验为辅的变电站导线选型方法，给出了 4 000 m 海拔特高压变电站导线选型方案并通过了电晕试验验证[30]。

目前国内外电晕效应相关研究从宏观层面，基于特定线路型式，对输电线路无线电干扰、可听噪声的外特性进行统计分析，研究结果受试验导线结构和环境条件的影响很大，适用范围较小。有关海拔高度等外部因素对电晕放电效应影响的机理和规律尚不明确。针对导线电晕电流脉冲、无线电干扰及可听噪声等特性随海拔高度的变化规律和机理，本文首先基于负极性电晕放电流体力学仿真模型，从带电粒子微观过程的角度探究了海拔高度对负极性直流电晕放电的影响过程；其次在 20~4 320 m 范围内的 7 个海拔高度点开展导线负极性电晕放电实验研究，通过对不同海拔高度下电晕电流平均值与导线表面电场强度的拟合，得到电晕电流随海拔高度的变化规律；最后，以电流平均值为中间量，得到了电晕效应与海拔高度之间的拟合函数关系，以期为高海拔地区线路结构设计和导线选型提供一定的依据。

1 负极性直流电晕电流脉冲的仿真分析

1.1 电晕放电仿真模型

为讨论海拔高度对电晕放电过程及脉冲特性的影响，并对电晕电流脉冲的宏观统计特性进行研究，需要完成对多个脉冲的仿真求解。流体模型一方面可以解决电场自洽问题，另一方面可以较好地反映放电过程中电场及带电粒子的时空分布情况，因此，本文用其对负极性电晕放电过程进行描述：考虑电子、正离子和负离子，在外加电场下发生碰撞、电离、吸附和复合等物理过程。由于电晕脉冲放电的全过程一般为几十纳秒，在这个极短的时间内，可以不考虑粒子动量的变化及电子的平均能量分布，即忽略动量守恒方程和电子平均能量传输方程的约束。基于此，本文构建的流体模型控制方程包括泊松方程及粒子的连续性方程如下：

$$\nabla^2\varphi=-\frac{e(N_\mathrm{p}-N_\mathrm{n}-N_\mathrm{e})}{\varepsilon_0} \tag{1}$$

$$E=-\nabla\varphi \tag{2}$$

$$\frac{\partial N_\mathrm{e}}{\partial t}+\nabla\cdot(N_\mathrm{e}\boldsymbol{V}_\mathrm{e}-D_\mathrm{e}\nabla N_\mathrm{e})=(\alpha-\eta)N_\mathrm{e}|\boldsymbol{V}_\mathrm{e}|-N_\mathrm{e}N_\mathrm{p}\beta_\mathrm{pe} \tag{3}$$

$$\frac{\partial N_\mathrm{p}}{\partial t}+\nabla\cdot(N_\mathrm{p}\boldsymbol{V}_\mathrm{p})=\alpha N_\mathrm{e}|\boldsymbol{V}_\mathrm{e}|-N_\mathrm{e}N_\mathrm{p}\beta_\mathrm{pe}-N_\mathrm{p}N_\mathrm{n}\beta_\mathrm{pn} \tag{4}$$

$$\frac{\partial N_\mathrm{n}}{\partial t}+\nabla\cdot(N_\mathrm{n}\boldsymbol{V}_\mathrm{n})=\eta N_\mathrm{e}|\boldsymbol{V}_\mathrm{e}|-N_\mathrm{p}N_\mathrm{n}\beta_\mathrm{pn} \tag{5}$$

式中：φ 为电势，E 为电场强度；ε_0 为真空介电常数；N_p、N_n 和 N_e 分别为正、负离子密度及电子密度；D_e 为电子扩散系数；α、η、β_pe 和 β_pn 分别为电离系数、吸附系数、正离子-电子复合系数以及正负离子复合系数；V_p、V_n 和 $\boldsymbol{V}_\mathrm{e}$ 分别为正、负离子及电子运动速度向量。其中：

$$\boldsymbol{V}_\mathrm{e}=-\mu_\mathrm{e}\boldsymbol{E},\ \boldsymbol{V}_\mathrm{p}=\mu_\mathrm{p}\boldsymbol{E},\ \boldsymbol{V}_\mathrm{n}=-\mu_\mathrm{n}\boldsymbol{E} \tag{6}$$

式中：E 为电场强度向量；μ_e、μ_p 和 μ_n 分别为电子及正、负离子迁移率。

由于正、负离子的扩散速度远小于迁移速度，因此，离子连续性方程中忽略了其扩散运动带来的影响[31]。本文采用基于有限元方法的多物理场耦合仿真软件进行负极性直流电晕放电模型的求解。建立同轴电极结构，导线半径为 0.04 cm，外电极半径为 20 cm。同时考虑到导线表面电离层厚度远小于外电极半径，因此为提高计算效率，在导线与外电极间设置人工边界，其半径一般取导线半径的 10 倍以上[12]，本文设置人工边界半径为 1 cm，即导线半径的 25 倍。人工边界的电位根据静电场原理由下式计算得到：

$$\varphi'=\varphi\left(1-\ln\frac{R'}{r}\Big/\ln\frac{R}{r}\right) \tag{7}$$

式中：φ’和 φ 分别为人工边界电位及导线电位；R’为人工边界半径；r 为导线半径；R 为外电极半径。

在导线表面及电晕放电脉冲发展可能到达的区域内，空间电位及各带电粒子密度具有较大的数值和梯度，呈现出较高的非线性度。为保证计算的收敛性和精度，该区域网格剖分相对精细。导线表面附近 5 mm 半径区域内限制网格最大单元大小为 1×10^{-6} m，在剩余计算区域内网格最大单元大小设置为 1×10^{-4} m。此外，二次电子发射机制对电晕放电现象具有重要影响，对负极性电晕放电来说，正离子碰撞阴极导线表面所导致的表面电离是维持负极性电晕放电现象的主要原因。因此，本文对负极性直流电晕放电的仿真仅考虑正离子碰撞阴极所导致的表面电离，并用阴极表面电离系数 γ 来描述该物理过程。负极导线表面产生的二次电子密度按式(8)计算：

$$N'_\mathrm{e}=\gamma N'_\mathrm{p}\frac{|\boldsymbol{V}_\mathrm{p}|}{|\boldsymbol{V}_\mathrm{e}|} \tag{8}$$

式中：N'_e 为表面电离产生的二次电子密度，N'_p 为到达阴极导线表面的正离子密度；γ 为阴极表面电离系数，取值为 0.001。模型中相关参数的表达式或取值如表 1 所示。

其中：δ 为相对空气密度，标准大气压下取值为 1。

边界条件设定方面，导线边界处静电场电位为导线电压；由于表面电离作用，导线表面会产生电

表 1 主要参数的表达式或取值[12,19,32]

Table 1 Expression or value of main parameter[12,19,32]

参数	表达式或取值	单位
α	$\begin{cases}3.632\times10^5\delta\exp(-1.68\times10^7\delta/\lvert\boldsymbol{E}\rvert), & \lvert\boldsymbol{E}\rvert/\delta\le4.56\times10^6\ \mathrm{V/m}\\ 7.358\times10^5\delta\exp(-2.01\times10^7\delta/\lvert\boldsymbol{E}\rvert), & \lvert\boldsymbol{E}\rvert/\delta>4.56\times10^6\ \mathrm{V/m}\end{cases}$	$\mathrm{m^{-1}}$
η	$\eta=\delta(9.865\times10^2-5.41\times10^{-4}\lvert\boldsymbol{E}\rvert/\delta+1.145\times10^{-10}(\lvert\boldsymbol{E}\rvert/\delta)^2)$	$\mathrm{m^{-1}}$
μ_e	$\begin{cases}-3.237\,6E/\lvert\boldsymbol{E}\rvert^{0.285}, & \lvert\boldsymbol{E}\rvert\le7.6\times10^6\ \mathrm{V/m}\\ -14.595\,8E/\lvert\boldsymbol{E}\rvert^{0.285}, & \lvert\boldsymbol{E}\rvert>7.6\times10^6\ \mathrm{V/m}\end{cases}$	$\mathrm{m^2/(V\cdot s)}$
D_e	1.28×10^{-3}	1
μ_p	$1.2\times10^{-4}/\delta$	$\mathrm{m^2/(V\cdot s)}$
μ_n	$1.6\times10^{-4}/\delta$	$\mathrm{m^2/(V\cdot s)}$
β_pe	2.2×10^{-12}	1
β_pn	2.2×10^{-12}	1

子，因此电子在导线边界为流入通量，其密度由式(8)决定；正离子运动到导线表面会变为中性粒子，因此正离子在导线边界为流出；而负离子在电场作用下不会运动到导线表面，因此负离子在导线边界密度为 0。在人工边界，静电场电位根据式（7）计算得到；电子和负离子会在电场力的作用下向人工边界外运动，因此电子和负离子在人工边界处为流出；而正离子在电场力的作用下会从人工边界向导线运动，因此正离子在人工边界处的密度为 0。仿真的起始时刻，假设导线附近的种电子和正离子服从高斯分布，该初始分布不会影响电晕放电特性，且可加快首个电晕电流脉冲的形成以提高计算效率[33-34]。本文取高斯分布的幅值为 $N_{max}=1\times10^9/m^3$。

仿真计算过程中，根据设定的初始空间带电粒子分布与边界条件，计算空间电势及电场分布，再将电场带入放电参数函数中，通过粒子连续性方程求解更新空间中带电粒子分布。根据更新后的空间带电粒子分布重新计算空间电场分布，时间步进重复迭代上述过程直至仿真设定时间。

1.2　海拔对电晕电流脉冲的影响分析

1.2.1　海拔高度对放电参数的影响

联立静力学基本方程及理想气体状态方程，积分后可得气压 p(kPa)与海拔高度 h(m)之间的关系为：

$$p = p_0 \exp(-\frac{gh}{MR_0T}) \tag{9}$$

式中：p_0 为一个标准大气压，取值 101.325 kPa；g 为重力加速度，取值 9.81 m/s²；M 为空气的相对分子质量，取值 29 g/mol；R_0 为摩尔气体常数，取值 8.314 J/(mol·K)；T 为绝对温度，取值 293 K。在温度保持不变的条件下，相对空气密度仅与气压有关，即：$\delta=p/p_0$，由此可得 δ 随 h 的变化关系为：

$$\delta = \exp(-1.389\times10^{-4}h) \tag{10}$$

海拔高度的变化导致相对空气密度发生变化，从而影响微观粒子的运动状态及碰撞过程，引起电晕放电宏观特性的变化。为探究海拔高度对电离系数 α、吸附系数 η、正离子迁移率 μ_p 以及负离子迁移率 μ_n 的影响，将式(10)代入表 1，得到上述电晕放电参数随海拔高度的变化规律如图 1 所示。

对于碰撞电离，随着海拔高度的增大，相对空气密度减小，中性分子密度减小，电子与中性分子碰撞的概率减小，但同时电子平均自由程增大，电子与中性分子碰撞时的能量更高，中性分子更容易

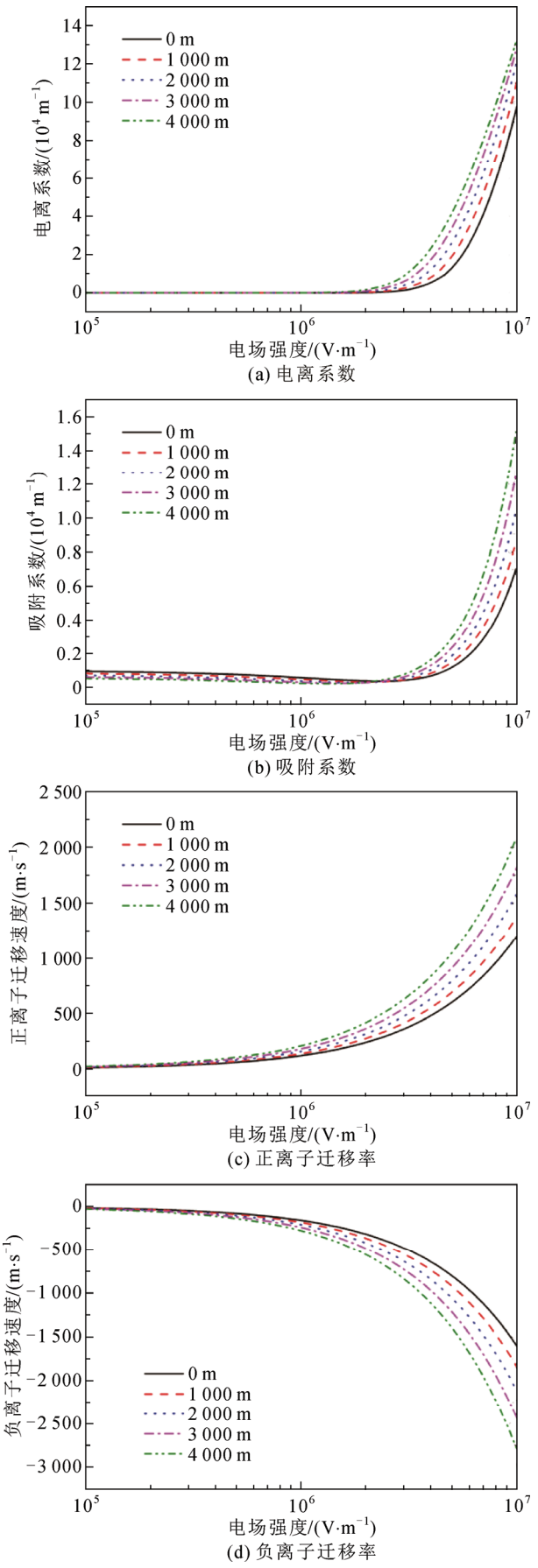


图 1　海拔高度对各放电参数的影响

Fig.1　Effect of altitude on discharge parameters

被碰撞电离，因此电离系数会随海拔高度的增大而增大。而在电场强度较小的区域，碰撞电离几乎无法发生，此时海拔高度对电离系数的影响较小。对于吸附效应，在电场强度较小的区域，随着海拔高度的增大，相对空气密度减小，电负性气体分子密度减小，电子被电负性气体吸附的概率减小，因此吸附系数减小。而在电场强度较大的区域，随着海拔高度的增大，电子在电场力作用下向阳极运动的过程中，与中性粒子和其它带电粒子发生碰撞而损失的能量更大，而后更容易被电负性气体分子所吸附，因此吸附系数反而增大。对于离子迁移率，海拔高度越大，中性分子密度越小，正离子与中性分子碰撞的概率越小，平均动能及平均迁移速度越大。因此，正离子迁移速度随海拔高度的升高而增大。电场强度较大的区域，海拔高度的影响更大。海拔高度对负离子迁移速度的影响与正离子类似，但其运动方向与电场方向相反，速度为负。

1.2.2 不同海拔高度电晕脉冲仿真结果

采用基于能量守恒的 Sato 公式对电晕电流进行计算[15]：

$$I=\frac{eS}{U_{\mathrm{a}}}\int_0^L(N_{\mathrm{p}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{p}}-N_{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{e}}-N_{\mathrm{n}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{n}}+D_{\mathrm{e}}\frac{\partial N_{\mathrm{e}}}{\partial r})\cdot\boldsymbol{E}_{\mathrm{L}}\mathrm{d}r \tag{11}$$

式中：S 为流注通道截面面积；E_{L} 为拉普拉斯电场；L 为空气间隙长度。仿真计算时长为 2×10^{-4} s，所采用的时间步长为 1×10^{-8} s。取 0.5×10^{-4} s 之后的重复性规律脉冲序列进行分析，控制导线施加电压 $U_{\mathrm{a}}=-20$ kV，海拔高度变化范围与本文后续试验选取的海拔高度范围一致，计算得到的电晕电流脉冲序列如图 2 所示。从图中可以看出，随着海拔高度的增加，负极性直流电晕电流脉冲发展速度明显加快，单位时间内的电流脉冲数量明显增多，电流脉冲的幅值在海拔高度较低时变化明显，在海拔高度较高时基本不变。

对上述仿真结果进行统计分析，得到电晕电流脉冲的幅值均值和重复频率如图 3 所示，对负极性电流脉冲幅值取绝对值。其中，脉冲重复频率按式(12)计算：

$$f=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}T_i} \tag{12}$$

式中：f 为脉冲重复频率；n 为统计的脉冲时间间隔数；T_i 为第 i 个脉冲时间间隔。

由于仿真模型与实际导线之间存在差异，因此仿真结果很难准确反应实际电晕放电过程中脉冲幅值与重复频率等放电特性的准确数值，但其可从微观角度揭示海拔高度变化对电晕放电的影响机理。由图 3 可知，在本文仿真条件下，海拔高度从 0 增大至 2 000 m 时，电晕电流的幅值迅速增大，在海拔高度 2 000 m 后，电晕电流脉冲幅值基本不变；对脉冲重复频率而言，海拔高度在 0~2 000 m 范围内，电晕电流脉冲重复频率基本不变，在海拔高度 2 000 m 之后，脉冲重复频率迅速增加。当海拔升高时，由于碰撞电离更为剧烈，导致放电脉冲峰值时刻导线表面附近电子、正离子密度增大，导线表面场强增大，电晕电流脉冲幅值增大。同时由于正、负离子迁移率增大，脉冲结束后离子消散速度增大，导线表面场强得以更快恢复，脉冲重复频率增大。

由图 4 可知，海拔高度增加，电晕电流平均值增大，电晕放电更剧烈。文献[35]通过建立直流电晕放电的化学-流体混合数值模型，发现随着大气压强降低，放电体系中平均电子能量升高，宏观电晕放电强度提高，表现为电晕电流增大。上述结论与本文仿真所得电晕电流平均值与海拔高度之间的关系一致。电晕电流脉冲的幅值和重复频率分别在不同海拔高度区间增大，综合导致电流平均值随海拔高度升高而近似均匀增大。上述现象可解释为当脉冲幅值增大时，单个脉冲将在空间中产生更多的电荷，在这些电荷的影响下，外加电场对带电粒子的驱散过程更加缓慢，因此需要更长的时间，导线表面的电场强度才能恢复至产生下一个脉冲的条件；而脉冲重复频率增大时，较短的时间间隔内空间中的带电粒子难以被驱散到距离电极更远的位置，因此放电更容易达到饱和，脉冲幅值更小。

2 不同海拔高度下负直流电晕放电试验

2.1 试验设计

为进一步明确海拔高度对导线负极性直流电晕特性的影响，本文基于可移动式小电晕笼及高频电流高电位采集系统，设计了导线负极性直流电晕特性实验平台。选择在 20~4 320 m 海拔高度范围内的 7 个海拔高度点，进行缩尺实验导线的负极性直流电晕电流脉冲的测量，试验电路图如图 5 所示。

图 5 中，电晕笼笼壁采用单层网状结构，长 1 m，横截面圆形半径 0.2 m。试验导线为直径 0.8 mm 的细铜丝，粗糙度约为 0.85。采集卡选用美国 Agilent 公司的 U2702A-USB 模块化示波器。电流传

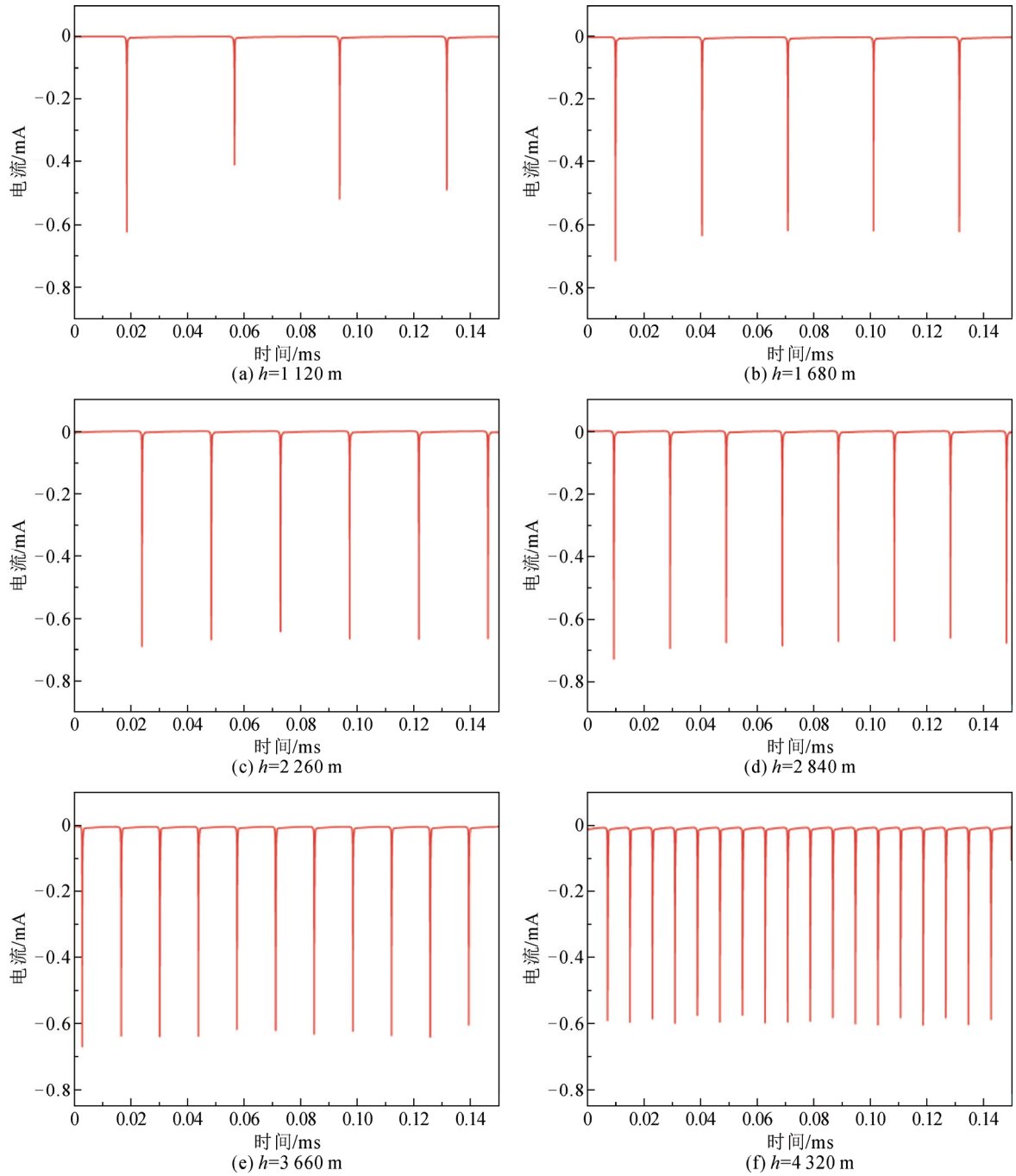


图 2　不同海拔高度下的仿真电晕电流脉冲序列

Fig.2　Simulated corona current pulse trains at different altitudes

感器总阻值为 400 Ω。阻波器提供 35 dB 以上的衰减，阻抗大于等于 20 kΩ。无线电干扰接收机采用德国 Schwarzbeck Mess 公司的 FCKL1528 接收机，输入阻抗 50 Ω。声压传感器灵敏度为 50 mV/Pa，有效频率范围 1 kHz~40 kHz。测量时将声音传感器指向导线放置，高度与导线对地高度相同，且距导线的水平距离约为 0.25 m。

为了进行不同海拔高度下的电晕特性研究，共选择了湖北武汉(20 m)，甘肃天水(1 120 m)，甘肃白银(1 680 m)，青海西宁(2 260 m)，青海共和(2 840 m)，西藏拉萨(3 660 m)以及西藏羊八井(4 320 m)共 7 个海拔高度点进行实验，试验现场照片见图 6。测量环境相对湿度维持在 40%~60%，环境温度基本维持在 20~30 ℃，研究表明该范围内的温湿度变化对负极性电晕放电特性的影响很小，可以忽略温湿度对试验结果的影响。

2.2　电晕电流脉冲测量结果及其与仿真值的对比

控制导线施加电压为 20 kV，不同海拔高度下

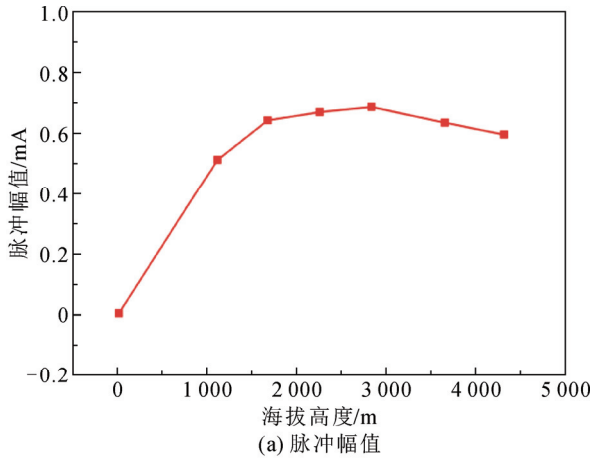


图 3 电晕电流脉冲特征值与海拔高度的关系

Fig.3 Corona current pulse characteristic value and altitude

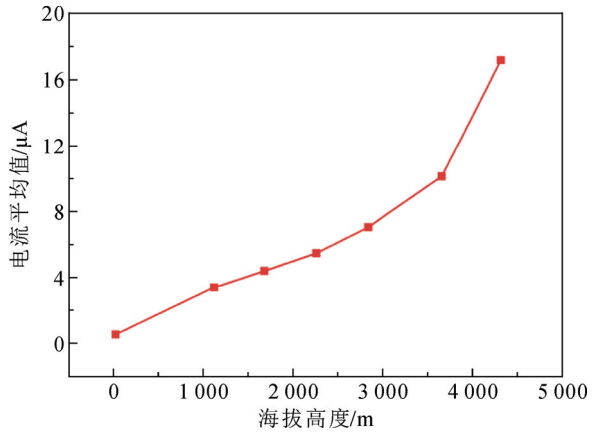


图 4 电晕电流平均值与海拔高度的关系

Fig.4 Relationship between average corona current and altitude

的典型电晕电流脉冲序列如图 7 所示。

由图 7 可知，随着海拔高度的增加，电晕电流脉冲数量和幅值都有明显的增大，脉冲重复频率的变化程度要大于脉冲幅值的变化。当海拔高度升高时，有效碰撞电离更容易发生，电晕放电现象也更为剧烈，因此海拔高度的变化会对电晕放电的脉冲

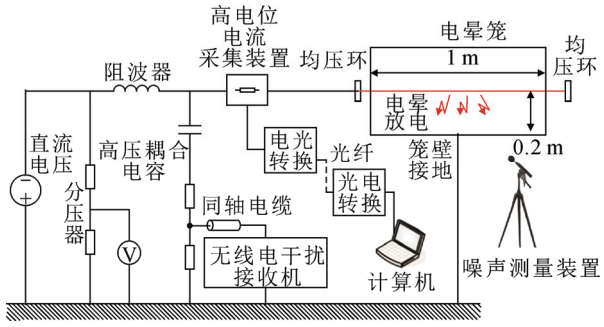
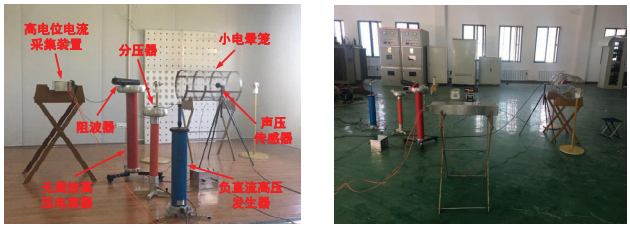


图 5 试验电路示意图

Fig.5 Schematic diagram of test circuit



(a) 武汉 (b) 羊八井

图 6 试验现场照片

Fig.6 Test site photos

特性产生较大影响。文献[8]通过对比不同海拔高度下负极性电压(20 kV)作用下的电晕电流，认为负极性导线电晕电流值的气压变化系数约为−7.9 μA/kPa。本文在不同海拔点实测电晕电流平均值及气压变化系数如表 2 所示。可以看出，实测所得负极性导线电晕电流气压变化系数与文献[8]结果相近。

由图 8—图 9 可知，电晕电流脉冲幅值和重复频率均随着海拔高度的增大而增大。导线施加电压为 20 kV 时，海拔高度从 20 m 升高至 4 320 m，电流脉冲幅值从 0.74 mA 增大至 1.47 mA，脉冲重复频率从 9.74 kHz 增大至 40.5 kHz。随着海拔高度的增加，脉冲发生时电极附近的电子和正离子密度增大，导致空间电场畸变更严重，导线表面电场强度更高，电晕脉冲幅值增大。同时，海拔高度的增加，使得脉冲结束后正负离子迁移速度更快，因此导线表面电场强度更容易恢复至电晕放电起始时的状态，电晕脉冲重复频率增大。将试验结果与仿真结果进行对比，可以发现：

1）试验测得的脉冲幅值均值大于仿真结果，是因为试验导线长度有限，且表面并非完全光滑，实际电晕放电点为导线表面电场强度较大的毛刺处。因此，在相同施加电压情况下，实际放电点的局部电场强度、空气电离程度、电子和正离子密度

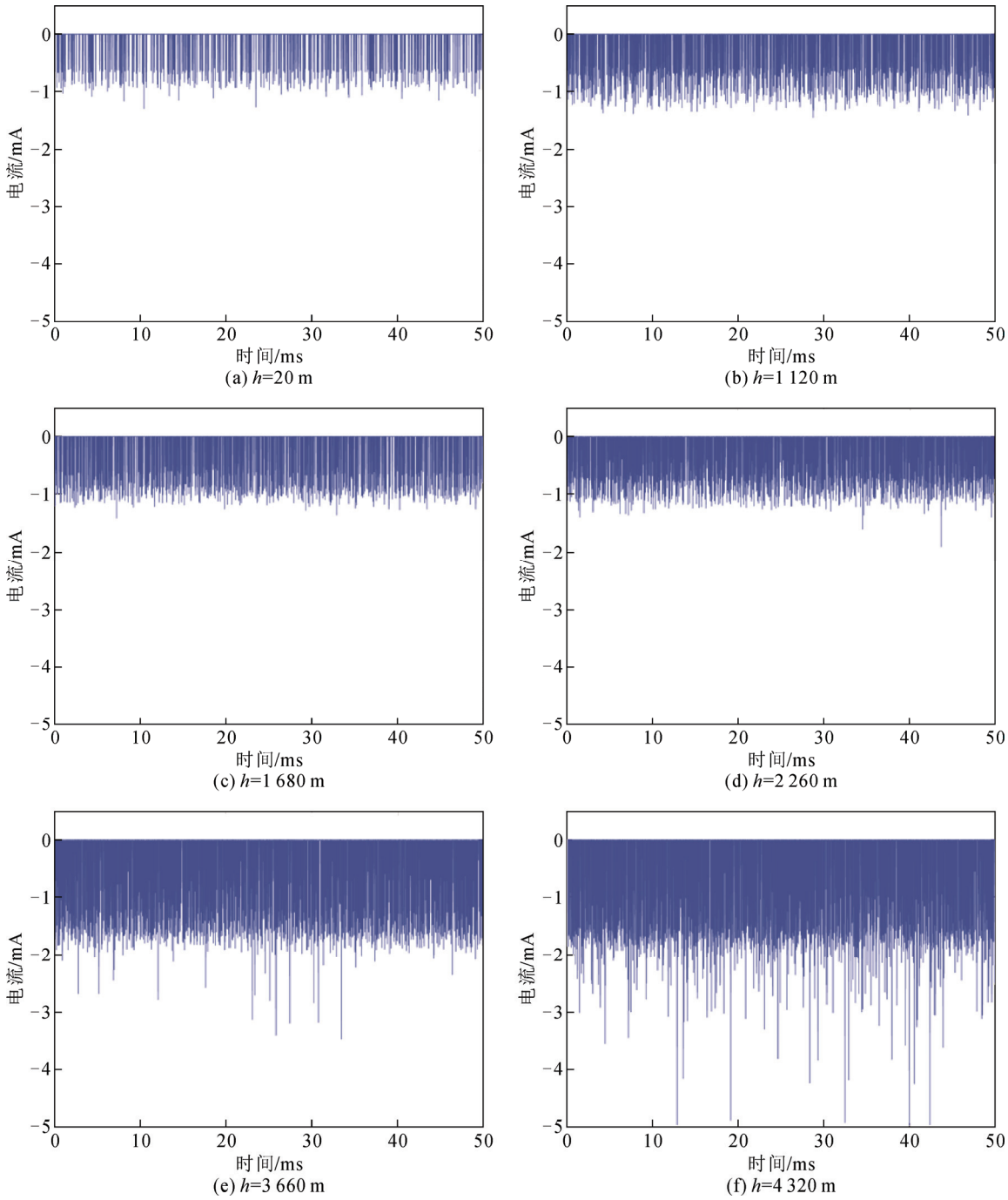


图 7　不同海拔高度下电晕电流脉冲序列实测结果

Fig.7　Experimental results of corona current pulse trains at different altitudes

均会高于仿真中二维轴对称模型的计算结果，脉冲幅值均值更大。

2）试验测得的脉冲重复频率小于仿真结果，一方面是因为高脉冲幅值与低重复频率的关联性，另一方面可能是因为，实际导线起晕后，导线表面多个放电点之间会相互作用，空间中各个放电点产生的离子会相互影响，导致放电点电场恢复的速度变慢，脉冲重复频率更小。

3）电晕电流平均值的试验与仿真结果整体变化趋势一致。随着海拔高度的升高，电晕电流脉冲的幅值增大、重复频率增加，最终导致电流的平均值增大。

2.3　电晕电流随海拔的变化规律

为获得电晕电流特性随海拔高度的变化规律，采用数据拟合方法，推导不同海拔高度下电晕电流特性的经验公式。以电场强度作为自变量进行研究，

表 2 不同海拔点下电晕电流平均值及气压变化系数

Table 2 Mean values of corona current and coefficient of variation of air pressure at different altitude points

h/m	P/kPa	I_{ave}/μA	气压变化系数/(μA·kPa^{-1})
20	101	0.88	—
1 120	87	2.06	−11.86
1 680	80	1.58	−30.00
2 260	74	3.21	−11.59
2 840	68	4.50	−9.12
3 660	61	5.58	−8.51
4 320	56	8.18	−6.16

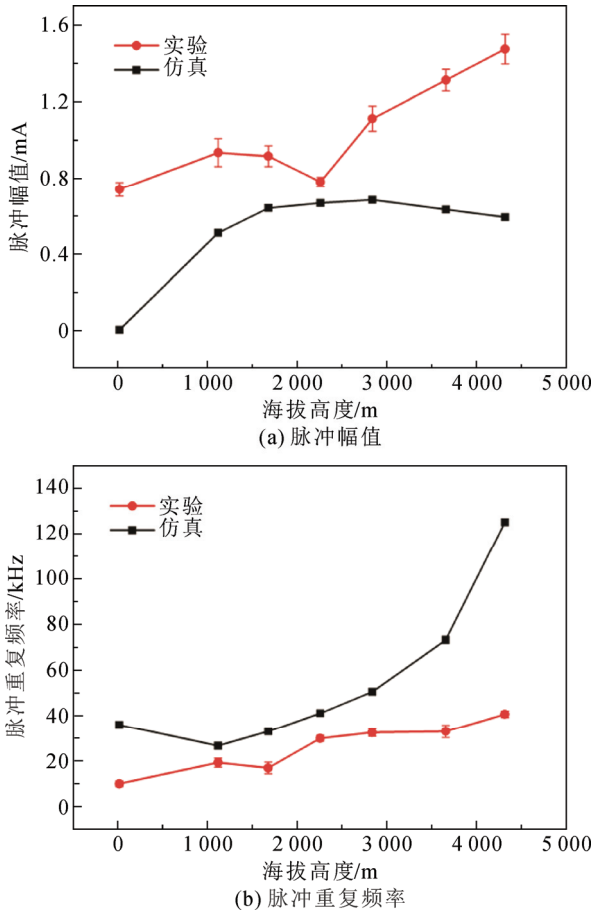


图 8 负极性电晕电流脉冲幅值/脉冲重复频率的试验与仿真结果对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulation results of pulse amplitude/pulse repetition frequency of negative corona current

可以实现缩尺模型对实际线路的等效与模拟。

基于静电场原理，根据式(13)将导线施加电压转换为导线表面场强。以导线表面场强为自变量，采用式(14)对电晕电流平均值与导线表面电场强度的关系进行拟合，结果如图 10 和表 3 所示。

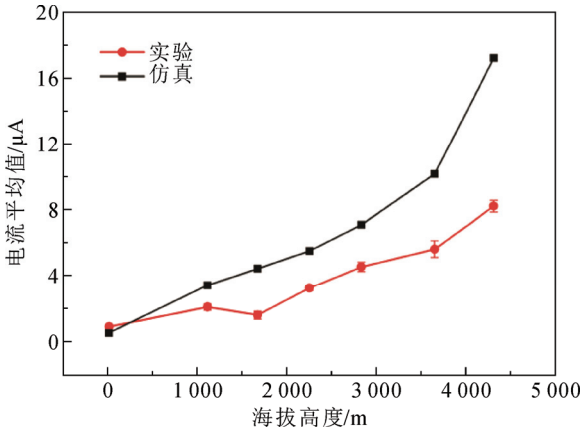


图 9 电晕电流平均值的试验与仿真结果对比

Fig.9 Comparison between experimental and simulation results of corona current average value

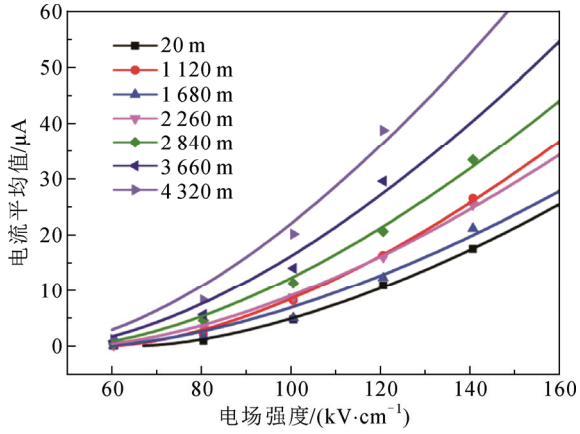


图 10 电晕电流平均值与导线表面场强的拟合曲线

Fig.10 Fitting curve between average corona current and surface field strength of conductors

表 3 电晕电流平均值与导线表面场强拟合系数

Table 3 Fitting coefficient between corona current average value and conductor surface field strength

海拔高度/m	K	E_0/(kV·cm^{-1})	U_0/kV
20	0.017 9	66.81	16.61
1 120	0.023 1	60.10	14.94
1 680	0.016 6	56.96	14.16
2 260	0.019 6	53.94	13.41
2 840	0.024 2	51.09	12.70
3 660	0.028 4	47.35	11.77
4 320	0.035 5	44.53	11.07

$$U = E \cdot r \ln(\frac{R}{r}) \tag{13}$$

$$I_{ave} = K(E - E_0)^{1.6} \tag{14}$$

式中：U 为导线电压；E 为导线表面电场强度。I_{ave} 为电晕电流平均值，μA；K 为线性比例系数；E_0

为起晕场强。当导线表面电场强度接近 E_0 时，电晕电流平均值趋向于 0，电晕放电趋于停止，根据 Peek 公式计算 E_0 时，考虑海拔高度和相对空气密度变化的影响，具体式如式(15)所示，其中，m 为导线导线表面粗糙系数。

$$E_0 = 31m\delta\left(1+\frac{0.308}{\sqrt{r\delta}}\right) \tag{15}$$

由表 3 可知，海拔高度增加，由于空气相对密度减小，因此导线起晕场强和起晕电压均减小。同时，在海拔高度 2 000 m 以下，K 随着海拔高度的升高缓慢增加，在海拔高度 2 000 m 以上，K 随着海拔高度的升高而迅速增大，因此采用分段线性函数对二者关系进行拟合，结果如式(16)和图 11 所示。

$$K(h)\times 10^5 = \begin{cases} 43.2h+1749, & 0 \le h < 2.12 \\ 737.5h+281, & h \ge 2.12 \end{cases} \tag{16}$$

式中：h 单位为 km。由此可得电晕电流平均值与海拔高度的关系：

$$I_{ave} = K(h)(E-E_0)^{1.6} \tag{17}$$

3　海拔高度对负直流电晕效应的影响

3.1　无线电干扰、可听噪声与海拔的关系

负极性导线电晕无线电干扰测量回路见图 12，通过高压耦合电容，将导线电晕电流的高频分量耦合至低压侧。耦合电容取 2 000 pF。此外，采用准峰值检波方式测量无线电干扰水平，可同时考虑脉冲的幅值、宽度和重复频率对测量结果的影响。

试验测量得到的不同海拔高度下 0.5 MHz 无线电干扰水平如图 13(a)所示。可以看出，无线电干扰水平随着海拔高度的增加而增大，与文献[8]所得结论一致。导线施加电压为 20 kV 时，海拔高度从 20 m 升高至 4 320 m，无线电干扰从 34.1 dB 增加至 48.2 dB。与电晕电流脉冲随海拔高度的变化关系一致，随着海拔高度的增加，无线电干扰水平的增幅也在增大。

试验中主要对可听噪声的 A 计权声级 L_A 测量结果进行处理分析。不同施加电压下可听噪声水平随海拔高度的变化关系如图 13(b)所示。分析可知，随着海拔高度增大，可听噪声水平总体呈上升趋势。导线施加电压为 20 kV 时，海拔高度从 20 m 升高至 4 320 m，可听噪声从 44.0 dB 增加至 50.5 dB。但与电晕电流脉冲特征和无线电干扰水平不同的是，海拔高度越高，可听噪声的增幅越小。这是因为，可听噪声不仅与导线的电晕状态有关，还与空气密度

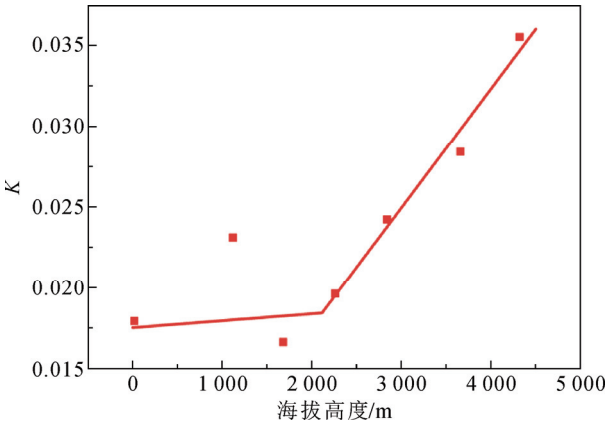


图 11　系数 K 与海拔高度的分段线性拟合关系

Fig.11　Piecewise linear fitting relationship between coefficient K and altitude

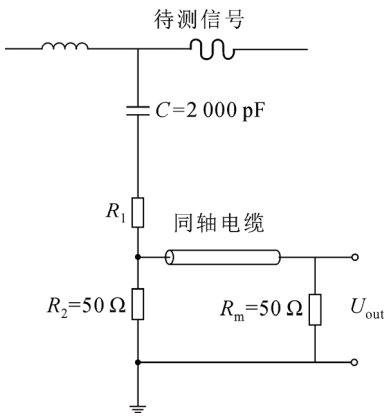


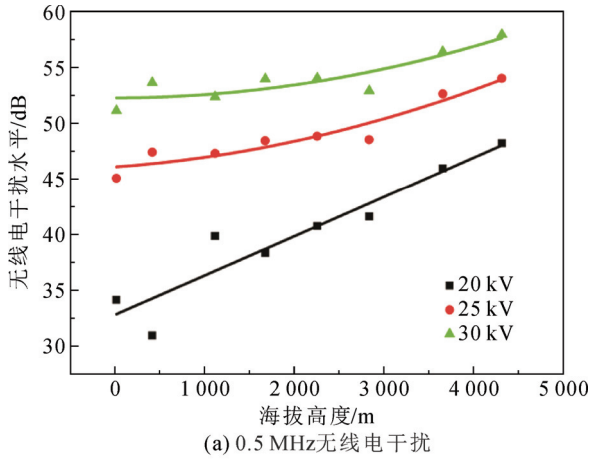
图 12　无线电干扰测量回路

Fig.12　Radio interference measurement loop

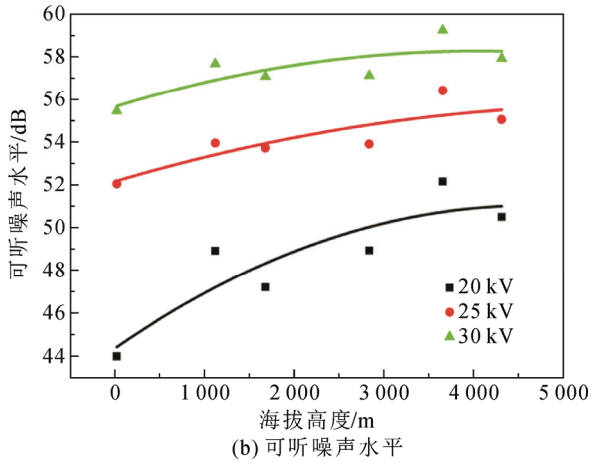
有直接关系。电晕放电噪声是由高能电子与空气分子发生碰撞，使空气发生挤压、膨胀所形成的。当海拔高度较高时，空气密度变低，空气分子间距增大，空气震动会减弱，同时介质密度的降低将导致声音传播性能降低。因此，海拔高度升高对电声转换的削弱作用，部分抵消了电晕放电能量增大带来的影响。此外，文献[29]也通过实测得到了相同的结论，并认为上述结果还可能存在的原因是随着海拔的持续增加，导线表面电晕放电增强致使离子聚集在导线周围，等效增大了导线半径，在一定程度上抑制了电晕放电作用，进而导致可听噪声增加速度趋缓。

3.2　无线电干扰、可听噪声与电晕电流平均值的拟合函数关系

电晕电流平均值涵盖了导线施加电压、脉冲幅值、重复频率等信息，可将其作为中间变量，进一步研究海拔高度对负极性电晕效应的影响。对不同



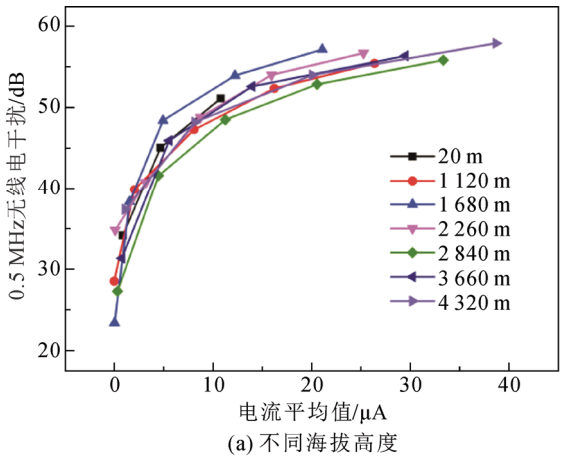
(a) 0.5 MHz无线电干扰



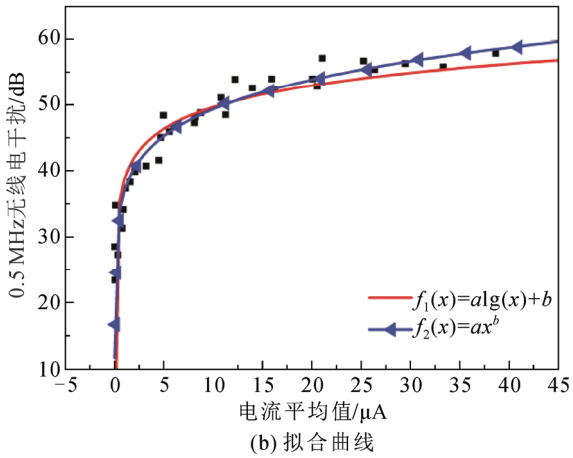
(b) 可听噪声水平

图 13 0.5 MHz 无线电干扰/可听噪声水平与海拔高度的关系

Fig.13 0.5 MHz radio interference/ Audible noise level vs. altitude



(a) 不同海拔高度



(b) 拟合曲线

图 14 无线电干扰与电晕电流平均值的关系

Fig.14 Relationship between radio interference and average corona current

海拔高度下，无线电干扰水平与电晕电流脉冲测量数据进行分析。如图 14(a)所示，在不同海拔高度下，无线电干扰水平均随电晕电流的增大而增大，且总体呈现对数增长关系。在各个海拔高度下，无线电干扰水平随电晕电流的增长趋势均一致，且不同海拔高度数据杂乱分布，连接线相互交叉，海拔高度对二者之间的关联关系并无显著影响。基于非线性最小二乘法，分别采用对数函数和幂函数对无线电干扰水平与电晕电流平均值的关系曲线进行拟合，结果如图 14(b)所示。表 4 给出了相应函数模型最优拟合曲线的参数值。通过对比不同拟合曲线的误差平方和(SSE)、确定系数(R^2)以及拟合标准差(RMSE)，可以看出幂函数模型整体拟合效果更优，由此可得：

$$R_{0.5}=36.98I_{\text{ave}}^{0.1256}\ (I_{\text{ave}}>0) \tag{18}$$

式中：$R_{0.5}$为 0.5 MHz 无线电干扰水平，dB。将式(17)代入上式，即可得到无线电干扰水平随海拔高度的变化关系为：

$$R_{0.5}=36.98\left(K(h)(E-E_0)^{1.6}\right)^{0.1256} \tag{19}$$

对不同海拔高度下，可听噪声水平与电晕电流脉冲测量数据进行分析。如图 15(a)所示，在不同海拔高度下，可听噪声水平均随电晕电流的增大而增大，且增长趋势均一致，可听噪声水平与电晕电流平均值大致呈对数关系。函数拟合结果如图 15(b)及表 5 所示，可以看出，幂函数模型整体拟合效果更优，由此可得：

$$L_{\text{A}}=45.84I_{\text{ave}}^{0.070\,09}\ (I_{\text{ave}}>0) \tag{20}$$

式中：L_{A}为 A 声级可听噪声水平，dB。将式(17)代入上式，即可得到可听噪声 L_{A}随海拔高度的变化关系为：

$$L_{\text{A}}=45.84\left(K(h)(E-E_0)^{1.6}\right)^{0.070\,09} \tag{21}$$

4 结论

本文结合基于流体动力学模型的仿真研究以及基于可移动式小电晕笼-导线的试验研究，分析了

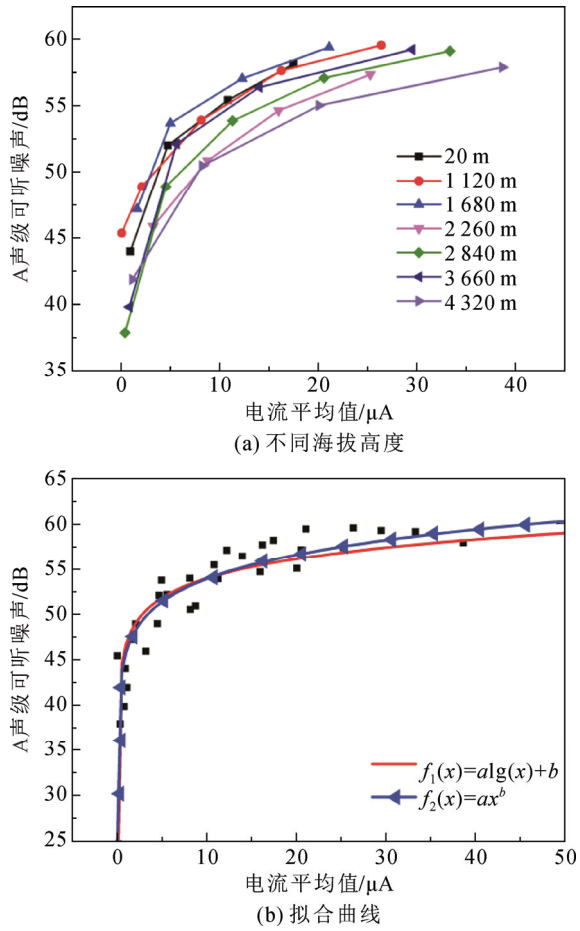


图 15　可听噪声与电晕电流平均值的关系

Fig.15　Relationship between audible noise and average corona current

表 4　无线电干扰与电流平均值的曲线拟合结果

Table 4　Curve-fitting results of radio interference vs. average current

函数类型	a	b	SSE	R^2	RMSE
$f_1(x)$	11	38.68	317.9	0.891 2	3.311
$f_2(x)$	36.98	0.125 6	192.6	0.934 1	2.577

表 5　可听噪声与电流平均值的曲线拟合结果

Table 5　Curve-fitting results of audible noise versus average current

函数类型	a	b	SSE	R^2	RMSE
$f_1(x)$	7.219	46.7	319.4	0.709	3.377
$f_2(x)$	45.84	0.070 09	261.2	0.761 9	3.055

海拔高度对导线负极性直流电晕特性的影响规律，主要结论如下：

1）海拔升高，空气密度降低，电离系数增大，电晕放电脉冲峰值时刻导线表面附近的电子密度和正离子密度峰值增大，导线表面场强增加，导致电晕电流脉冲幅值增大；同时正、负离子迁移率增大，脉冲结束后离子消散速度加快，导线表面电场更容易恢复，导致脉冲重复频率增大。

2）基于小电晕笼导线负极性电晕特性实验，发现随着海拔增加，电晕电流脉冲幅值和重复频率均增大，且重复频率的增幅大于幅值的增幅，与仿真结果一致；电流平均值 I_{ave} 与导线表面电场强度 $(E-E_0)^{1.6}$ 成正比，且二者的线性比例系数 K 为海拔高度 h 的分段线性函数。

3）试验采集的无线电干扰和可听噪声均随海拔升高而增大，且无线电干扰的增幅逐渐变大，而可听噪声的增幅逐渐减小。通过回归分析，获得了无线电干扰、可听噪声水平与电晕电流平均值之间的幂函数关系。结合电晕电流与海拔高度的函数关系，以电晕电流平均值为中间变量，得到了电晕效应随海拔高度的变化规律，有望为高海拔地区线路结构设计和导线选型提供依据。

参考文献　References

[1] 刘振亚. 特高压直流输电线路[M]. 北京：中国电力出版社，2009.
LIU Zhenya. UHVDC transmission line[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009.

[2] 邬　雄，万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京：中国电力出版社，2009.
WU Xiong, WAN Baoquan. Power transmission project electromagnetic environment[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009.

[3] 舒印彪，张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报，2007，27(31)：1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.

[4] BIAN X M, WANG L M, LIU Y P, et al. High altitude effect on corona inception voltages of DC power transmission conductors based on the mobile corona cage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1971-1973.

[5] LAMA W L, GALLO C F. Systematic study of the electrical characteristics of the ``Trichel" current pulses from negative needle-to-plane coronas[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(1): 103-113.

[6] MENG X B, ZHANG H, ZHU J X. A general empirical formula of current-voltage characteristics for point-to-plane geometry corona discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(6): 065209.

[7] 李　振. 直流电晕可听噪声与电晕过程关联特性[D]. 北京：清华大学，2014.
LI Zhen. Study on correlation behavior of audible noise and corona process of DC corona[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2014.

[8] 王益旭. 气压对电晕笼中导线直流电晕特性影响[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2009.
WANG Yixu. Influence of air pressure on DC corona characteristic of

conductor in corona cage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2009.

[9] 王会斌. 基于紫外成像的不同海拔下导线起晕特性的研究[D]. 保定：华北电力大学(河北)，2009.
WANG Huibin. Research on corona onset characteristics of conductors at different altitudes based on UV imaging technology[D]. Baoding, China: North China Electric Power University (Hebei), 2009.

[10] 文 韬，向念文，章 程，等. 高压放电等离子体研究现状及发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3226-3239.
WEN Tao, XIANG Nianwen, ZHANG Cheng, et al. Research status and development trend of high voltage discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3226-3239.

[11] SATTARI P, GALLO C F, CASTLE G F, et al. Trichel pulse characteristics—Negative corona discharge in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(15): 155502.

[12] 尹 晗. 直流输电线路高频电晕电流与无线电干扰的转换关系[D]. 北京：清华大学，2014.
YIN Han. Conversion relation between high frequency corona current and radio interference in DC transmission line[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2014.

[13] 陈小月. 电晕笼电晕放电脉冲微观物理特性及传播规律研究[D]. 武汉：武汉大学，2016.
CHEN Xiaoyue. Study on microcosmic physical properties and propagation law of corona discharge in corona cage[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2016.

[14] LI C J, WANG Y F, ZHENG X L, et al. Effects of surplus heat and space charges on dynamic evolution of nanosecond repetitively pulsed discharges[J]. Physics of Plasmas, 2022, 29(2): 023509.

[15] 蒋兴良，吴建国，任晓东，等. 大气压下湿度对气隙流注放电及击穿的影响[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1743-1752.
JIANG Xingliang, WU Jianguo, REN Xiaodong, et al. Influence of humidity on air gap streamer discharge and breakdown under atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1743-1752.

[16] 李晨颉，郑昕雷，赵 政，等. 大气压下连续脉冲流注放电演变过程的二维全局粒子模拟仿真研究[J]. 高电压技术，2022，48(2)：789-797.
LI Chenjie, ZHENG Xinlei, ZHAO Zheng, et al. Two-dimensional global-particle simulation of streamer evolution process under continuous pulses in nitrogen at atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 789-797.

[17] 史世林，郝 建，刘宏波，等. 基于混合数值模型的电晕笼内导线周围气体空间电荷密度分布规律仿真及验证[J]. 高电压技术，2022，48(6)：2434-2443.
SHI Shilin, HAO Jian, LIU Hongbo, et al. Simulation and verification of space charge density distribution of gas around wire in corona cage based on hybrid numerical model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2434-2443.

[18] TRINH N G, MARUVADA P S. A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(1): 312-325.

[19] 何旺龄. 超/特高压交流输电线路无线电干扰产生机理与激发函数研究[D]. 武汉：华中科技大学，2015.
HE Wangling. study on mechanism and excitation function of radio interference on EHV/UHV AC transmission lines[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[20] 邬 雄，万保权，路 遥. 1000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术，2006，32(12)：55-58.
WU Xiong, WAN Baoquan, LU Yao. Study on electromagnetic environment for 1000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58.

[21] 王仕超. 特高压直流线路可听噪声及电晕放电试验研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2016.
WANG Shichao. Research on UHV DC transmission line audible noise and corona discharge test[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2016.

[22] 程露莹，李学宝，马 浩，等. 直流单点电晕放电无线电干扰和可听噪声时域关联特性分析[J]. 高电压技术，2019，45(12)：4088-4095.
CHENG Luying, LI Xuebao, MA Hao, et al. Time-domain correlation between audible noise and radio interference caused by single positive corona source on the conductor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4088-4095.

[23] HUANG C W, YIN H, XU P F, et al. Prediction of radio interference from HVDC transmission lines based on corona discharge characteristics[J]. High Voltage, 2020, 5(6): 679-687.

[24] CHARTIER V L, LEE L Y, DICKSON L D, et al. Effect of high altitude on high voltage AC transmission line corona phenomena[J]. IEEE Power Engineering Review, 1987, PER-7(1): 54-55.

[25] 刘正响，陆宠惠. 海拔高度对导线起晕电压影响的研究[J]. 高电压技术，1988，14(3)：38-41.
LIU Zhengxiang, LU Chonghui. The influence of altitude on corona-starting voltages[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(3): 38-41.

[26] 唐 剑. 1 000 kV 特高压交流输电线路电晕放电的环境效应研究[D]. 北京：清华大学，2009.
TANG Jian. Environmental effects of corona discharge on 1000kV UHVAC transmission lines[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2009.

[27] TIAN F, YU Z Q, ZENG R. Radio interference and audible noise of the UHVDC test line under high altitude condition[C]//Proceedings of 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore: IEEE, 2012: 449-452.

[28] 武晓蕊. 高海拔地区交流输电线路可听噪声产生机理及预测方法研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2017.
WU Xiaorui. Study on the mechanism and the prediction of audible noise from AC transmission lines under high altitude condition[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2017.

[29] 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)：7132-7142.
ZHAO Luxing, XIAO Buqiong, XIE Li, et al. Experimental study of the influence of altitude on audible noise and its spectrum characteristics for DC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 7132-7142.

[30] 刘 鹏，张 军，谢 梁，等. 4000 m 高海拔地区特高压变电站导线电晕特性与选型研究[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2919-2928.
LIU Peng, ZHANG Jun, XIE Liang, et al. Study on corona characteristics and type selection of UHV substation conductor in 4000 m high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2919-2928.

[31] YIN H, ZHANG B, HE J L, et al. Modeling of trichel pulses in the negative corona on a line-to-plane geometry[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7011604.

[32] 惠建峰. 不同气压湿度条件下电晕及流注放电特性的研究[D]. 北京：清华大学，2007.

HUI Jianfeng. Study on corona and streamer discharge characteristics under different air pressure and humidity conditions[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2007.

[33] SATTARI P, CASTLE G S P, ADAMIAK K. Numerical simulation of trichel pulses in a negative corona discharge in air[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1935-1943.

[34] 伍飞飞，廖瑞金，杨丽君，等. 棒-板电极直流负电晕放电特里切尔脉冲的微观过程分析[J]. 物理学报，2013，62(11)：115201.
WU Feifei, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Numerical simulation of Trichel pulse characteristics in bar-plate DC negative corona discharge[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 115201.

[35] 伍飞飞. 直流输电线路电晕放电的微观物理过程及离子流场分析[D]. 重庆：重庆大学，2014.
WU Feifei. Numerical analysis on microscopic process of corona discharge and ionized field of HVDC transmission lines[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2014.



张延泽
1997—，男，博士生
主要从事气体放电和等离子体光学测量方面的研究工作
E-mail: zhangyanze@whu.edu.cn

ZHANG Yanze
Ph.D. candidate



刘永聪(通信作者)
1996—，男，硕士
主要从事电气设备电磁场仿真，高压电气试验及变电设备检修相关工作
E-mail: 973916246@qq.com

LIU Yongcong
Corresponding author

收稿日期　2024-03-19　修回日期　2024-07-12　　编辑　陈　蔓