



交流电场下导体表面接触角对水滴振动、放电特性的影响

刘 锐,熊港权,李伊洲

引用本文:

刘 锐,熊港权,李伊洲. 交流电场下导体表面接触角对水滴振动、放电特性的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(8): 255-264.

相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

多针板电极电晕老化装置仿真设计与硅橡胶老化特性研究

Simulation Design of Multi-needle-plate Electrode Corona Aging Device and Experimental Study on Aging Characteristics of Silicone Rubber

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(2): 177-184 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.02.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.02.023)

特定车速下长头重卡驾驶室异常振动分析

Analysis of Abnormal Vibration of Long-head Heavy Truck Cab at Specific Speed

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(6): 56-62 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.06.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.06.008)

电子连接器微动摩擦磨损问题研究综述

Review on Fretting Friction and Wear Problems of Electrical Connectors

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(10): 210-223 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.10.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.10.027)

湿式离合器对偶钢片力学响应特性分析

Analysis on Mechanical Response of Wet Clutch Steel Discs

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(6): 87-95 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.06.012)

轻型货车桥壳振动特性分析

Vibration Characteristics Analysis of Light Truck Axle Housing

重庆理工大学学报(自然科学). 2017, 31(12): 1-7 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2017.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2017.12.001)

交流电场下导体表面接触角 对水滴振动、放电特性的影响

刘锐¹, 熊港权², 李俨洲³, 赵莹¹, 余铁钊¹, 蒋兴良³

(1. 重庆电力高等专科学校, 重庆 400053;

2. 国网重庆市电力公司璧山供电分公司, 重庆 402760; 3. 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 现有电力系统中对不同接触角下线路导体表面水滴动态过程的研究并不全面, 特别是缺乏水滴动态过程与空间电场畸变关系的定量研究。为此, 通过有限元仿真模拟, 分析了“固-液”表面接触角对水滴振动规律和空间电场分布的影响, 推导出交流电场下导体表面振动水滴的频率、相位、场强分布与表面接触角的联系。仿真结果表明: 水滴的振动频率是交流电压频率的2倍, 振动相位滞后于交流激励相位, 且与接触角没有直接的关系; 表面接触角影响振动水滴的形态轮廓, 接触角越低, 附着水滴对空间电场强度的畸变程度越小。

关键词: 交流电场; 导体; 水滴振动; 电场畸变

中图分类号: TM85

文献标识码: A

文章编号: 1674-8425(2023)08-0255-10

0 引言

近年来, 随着我国经济的快速发展, 人民生活水平不断提高, 对于生活环境的舒适度有了更高的需求, 导致工业、农业生产以及人们生活用电量日益增长。然而, 电力需求的快速增长和可再生能源的快速整合给现有的输电线路带来了越来越大的压力。为了应对这种情况, 中国和印度等国家正在启用、推广以特高压 (ultra high voltage, UHV) 或超高压 (extra high voltage, EHV) 输电线路为骨干的坚强智能电网, 以增加电力传输的能力, 提高电力传输的经济性; 其他一些国家如英国和欧盟等, 由于地域范围有限, 土地许可难以获得,

只能专注于提高现有电力传输基础设施的电压等级。但无论是哪种处理方式, 都有潜在的风险, 输电线路电压等级的提高容易引起更为严重的电晕放电现象, 对居民的正常生活造成重大的影响, 引起居民频繁的抱怨和投诉。

研究发现, 输电线路导体表面附着水滴在电晕放电的产生和发展中起着关键的作用^[1]。目前, 大部分研究都集中在电晕放电机制或室外和室内笼式实验的测量技术上, 只有少数分析、讨论了水滴的动态变化过程及其对电晕放电的影响^[2-4]。这些研究考虑了表面接触角、降雨强度、湿润特性、雨滴的导电性和其他静态特性对起晕电压、无线电干扰水平、可听噪声水平和电晕损耗

收稿日期: 2023-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51637002)

作者简介: 刘锐, 男, 硕士, 主要从事电磁环境、电晕放电方面研究, E-mail: RuiLiu_gentle@163.com。

本文引用格式: 刘锐, 熊港权, 李俨洲, 等. 交流电场下导体表面接触角对水滴振动、放电特性的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(8): 255-264.

Citation format: LIU Rui, XIONG Gangquan, LI Yanzhou, et al. Effect of contact angle of conductor surface on the vibration and discharge characteristics of water drops under AC electric field[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(8): 255-264.

的影响,但缺乏对附着在输电线路导体表面雨滴的动态过程的全面研究,特别是对水滴动态过程与电晕放电水平联系的定量研究^[5-7]。

综上,本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件,从导体表面不同接触角出发,研究受潮湿环境影响后产生在输电线路表面上水滴的运动规律以及空间电场分布与水滴动态变化之间的机制,为解决超、特高压输电线路电能传输中的电磁环境问题提供参考。

1 研究现状

表面存在的凸起物会导致局部曲率半径变小,进而引起空间电场强度的畸变。宏观上,凸起物可以分为固体和液体,区别在于分子间的作用力强度不同。相比于固体引起的电场强度畸变,液体对电场强度的影响机制更为复杂,因为液体的形态轮廓更容易发生变化。在电场的作用下,水滴受到电场力、表面张力、重力等力的共同作用,存在振动、形变与破碎等现象^[8-9]。

Taylor^[10-11]首次发现了水滴在电场中的形变特征,提出了 Taylor Cone 放电模型,开启了对该领域的探索。Li 等^[1]发现电场下的水滴以两倍电源频率振动,水滴的形态在半球形、扁平形和圆锥形循环变化。液滴振动和施加电压之间的相位关系取决于液滴的大小,导体表面形成的液滴尺寸是电晕起始的主要因素。胡琴等^[12]发现,水滴数量、间距、表面接触角以及导线的类型对电场强度有着极大影响,且局部电场强度的畸变程度与曲率息息相关。

实验方面,亲、疏水涂层被广泛应用于控制表面接触角的大小。基于电晕笼试验平台,朱雷等^[13]发现,涂覆 RTV 疏水性涂料导线的起晕电压升高约 21.9% 和 39.2%,相同电压下导线电晕放电强度明显减弱。黎振宇等^[14]发现,相同电压下,水滴体积相同时,固体表面接触角越大,水滴对其空间电场的畸变就越严重,PRTV 疏水性涂料可以降低水滴的首次破裂电压并提高水滴的首次喷射微滴电压。与此相反,许菲菲^[15]研究涂覆二氧化钛亲水涂层导线发现,TiO₂ 质量分数的增加使得导线表面的接触角变小,引起电晕起始放电电压增加。Megala 等^[16-17]在钢芯铝绞线(ACSR)

表面涂覆聚酰亚胺/多壁碳纳米管(PI/MWCNTs),对比分析了 ACSR 裸导体及 PI/MWCNT 涂层导体的电场强度、起晕/消晕电压、无线电干扰水平以及电晕损耗。

Higashiyama 等^[18]研究了不同疏水性能绝缘材料上水滴的动态行为,发现液滴与交流电场同步变形,其共振频率与液滴体积大小相关,振动的振幅很大程度上取决于液滴的频率和体积。Takaki 等^[19]进行了类似研究,发现水滴形状交替重复伸展和收缩状态。魏远^[20]研究发现,超疏水涂层表面水滴临界稳定电场强度与外施电场强度、水滴粒径与自身表面张力相关,施加于“水滴-空气”界面上的库仑力对水滴电致运动具有决定性影响。

仿真方面,基于 ANSYS 的简单电极系统,Wang 等^[21]研究表面接触角对硅橡胶电场强度的影响发现,表面最大电场强度与接触角大小相关。黎振宇等^[14]通过 Comsol 仿真发现,导体表面水滴尖端处的最大电场强度随着接触角的增大而增大,导致的电场畸变越严重,因此受到电场作用的影响越大,容易发生脱落。魏远^[20]通过仿真发现,绝缘涂层表面的湿润性对水滴附近场强的畸变程度不同,当表面为亲水性时,“固-液-气”三相接触区域及周围出现高场强;当表面为疏水性时,高场强依旧出现在三相接触区域及其周围,但水滴周边场强严重畸变区域减少;当表面为超疏水性时,与疏水性表面相比,水滴周边场强严重畸变区域及场强幅值进一步减少。然而,上述仿真模拟均未考虑电场对水滴形态的影响,而是固定了水滴的形态为球冠型。基于有限元仿真分析方法,本文中系统研究了不同“固-液”表面接触角下导体表面水滴的振动特性以及振动水滴形态变化对空间电场分布的影响,研究结果有助于完善潮湿环境下导线表面的放电机理,为架空输电线路的电磁防护提供理论支撑,对于我国智能电网的安全可靠、绿色环保运行具有较为重要的工程价值。

2 研究方法

2.1 基本控制方程

2.1.1 静电场

麦克斯韦方程组是解决电动力学问题的基本定

律,由安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯定律以及高斯磁定律组成,其微分形式如下^[22]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

其中, \mathbf{H} 指磁场强度; \mathbf{E} 指电场强度; \mathbf{D} 为电位移矢量; \mathbf{B} 为磁感应强度; ρ 为体电荷密度。

国内的架空输电线路往往在 50 Hz 的工频下运行,因为外部施加电场的频率非常低,所以可忽略磁感应带来的影响。和光速相比,水滴形态变化的速度可以忽略不计,此时麦克斯韦方程式简化为准静电方程式(EQS):

$$-\nabla \left(\frac{\partial \varepsilon \cdot \nabla V}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V), \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V$$

其中: ε 为介电常数; σ 为电导率; V 为电势; \mathbf{E} 为电场强度。

在电力学中,相应的边值关系为:

$$e_n \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \sigma_1 \quad (6)$$

$$e_n \cdot (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$$

2.1.2 流体场

理想流体不需要考虑分子间的黏性力,而一般情况下,流体都有一定的黏性。本文的研究对象为环境温度下的雨水水滴,其流体特性表现为低黏度以及不可压缩。对于一般不可压缩的气体和液体,可使用 Navier-Stokes(N-S)方程表示其特性。N-S 方程表示的流体特征在三维直角坐标系内可表示为:

$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} + \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial u_y}{\partial t} + \rho \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} + \rho \left(u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

其中: u_x 、 u_y 、 u_z 为直角坐标系中不同方向上的流体速度; ρ 为密度; t 为时间; F_x 、 F_y 、 F_z 为流体在直角坐标系中不同方向上受到的质量力的系数; P 为压力; μ 为黏度。左式是水滴在不同方向上的惯性力,右式是外部作用力(质量力、压力和黏性力)。

根据动量守恒原理,水滴的振动、流动通常为不可压缩的定常流动^[23]。不可压缩黏性流体所产生的两相流依旧受到 N-S 方程的控制,其能够描述质量和动量的传递,两相流中的 N-S 方程为:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F}_{st} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_{st} = \sigma \delta \mathbf{k} \mathbf{n} \quad (12)$$

其中: \mathbf{u} 为流体速度; p 为流体压力; ρ 为流体质量密度; μ 为流体运动黏度; \mathbf{g} 为重力密度; \mathbf{F}_{st} 为表面张力; \mathbf{F} 为体积力。 $\mathbf{n} = (\phi / |\nabla \phi|)$ 为界面法向, σ 为表面张力系数, $k = -\nabla \cdot \mathbf{n}$ 为曲率, δ 为狄拉克函数,近似为 $\delta = 6|\phi(1-\phi)|/|\nabla \phi|$,仅在流体界面的值非零。

流体的每一相都由其所占的局部流体体积的分数 η 来描述。该方程式为相分数的时间演化,保证了模拟中的体积守恒:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\eta \mathbf{u}) = 0 \quad (13)$$

为了改善数值方案中界面表示的清晰度,通常在上述传输方程中添加一个反扩散项,产生的修正方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\eta \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\eta(1-\eta)\mathbf{u}_c) = 0 \quad (14)$$

其中: \mathbf{u}_c 为压缩速度。对于气体和水滴的运动模型,气相中 $\eta = 0$,液相中 $\eta = 1$,气液相交界面上 $\eta = 0.5$ 。

2.1.3 静电场与流体场的耦合

多物理场中静电场模块所产生的电场力促使水滴产生运动以及形变,而水滴在流体模块中产生的运动以及形变又会加剧电场力的畸变,静电场和流体场互相影响,属于电力学与流体动力学

的耦合问题。在不可压缩流体运动的 N-S 方程中, \mathbf{F} 为附加的体积力, 电场作用下即为电场力。根据麦克斯韦(Maxwell)应力张量求出电场力, 将电场力的式(20)代入 N-S 方程(10)中的体积力 \mathbf{F} , 就能够实现“气-液”两相流中, 流体动力学与电学的多物理场耦合。

在气液两相流中, 静电界面的电势 V 满足方程:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = 0 \quad (15)$$

其中: ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数。

对于电场力驱动的水滴振动, 体积力可由 Maxwell 应力张量的散度给出。Maxwell 应力张量可以归纳为:

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2) + \frac{1}{\mu_0} (B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2) \quad (16)$$

可以看出, Maxwell 应力张量是一个对称量, 因为外部施加电源频率较低, 可以忽略磁感应带来的影响, 所以麦克斯韦应力张量可简化为:

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \varepsilon_r (E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2) \quad (17)$$

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \begin{pmatrix} E_x^2 - \frac{E^2}{2} & E_x E_y & E_x E_z \\ E_x E_y & E_y^2 - \frac{E^2}{2} & E_y E_z \\ E_x E_z & E_y E_z & E_z^2 - \frac{E^2}{2} \end{pmatrix} \quad (18)$$

其中: i, j 取自笛卡尔坐标系中的 x, y, z ; T_{ij} 为 Maxwell 应力张量, 下标表示施加在面元矢量为 j 的单位面元上指向 i 方向的应力^[24]; δ_{ij} 为德罗克雷符号, 当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$, 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。

对水滴运动研究的模型建立在二维轴对称坐标中, 采用圆柱坐标系, 因此需要对麦克斯韦应力张量进行笛卡尔坐标系与柱坐标系之间的转换, 转换式为:

$$\begin{cases} E_x = E_r \cos(\varphi) - E_\varphi \sin(\varphi) \\ E_y = E_r \sin(\varphi) - E_\varphi \cos(\varphi) \\ E_z = E_z \end{cases} \quad (19)$$

综上, 在本文多相流的物理模型中, 最终体积力推导为:

$$\mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(T_{rr} - T_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} \\ 0 \\ \frac{\partial T_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r}T_{zr} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (20)$$

对于两相流中的每种流体而言, 相对介电常数是不同的, 两相分界面处的相对介电常数需要根据区域内部的流体体积分数 V_{f1} 和 V_{f2} 来定义:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} V_{f1} + \varepsilon_{r2} V_{f2} \quad (21)$$

其中: ε_{r1} 和 ε_{r2} 分别为空气和水滴的相对介电常数; V_{f1} 和 V_{f2} 分别为空气和水滴在分界面所占的流体体积分数。

2.2 仿真模型及参数设置

2.2.1 几何模型

主要对附着于导体表面单个水滴的多相流几何模型进行研究和分析。图 1 展示了仿真计算所采用的二维轴对称几何模型。几何模型的尺寸参数设置如下: 水滴的半径为 1.5 mm, 附着于半径为 25 mm 的金属球表面, 金属铝球距离上平板 40 mm, 整体高度为 200 mm, 宽度为 280 mm。模型的边界条件设置: 金属铝球为高压端, 施加工频交流电压, 上平板接地。诺伊曼条件 $\partial\varphi/\partial n=0$ 设置于下、右边界。对于流体场, 所有壁均设置为无滑移, 出口设置为恒压(1 个标准大气压)。

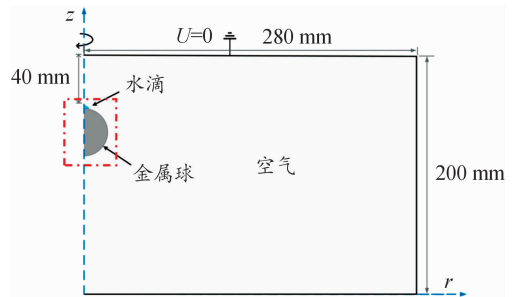


图 1 二维轴对称几何模型示意图

通过改变水滴与导体表面的接触角, 研究分析水滴在导体表面不同接触角下的动态变化过程以及放电特性。

2.2.2 材料属性

模型主要选择 3 种材料, 水、空气以及金属铝, 材料属性根据实际情况进行赋值, 以符合实际

应用。各种材料的属性参数如表 1 所示。

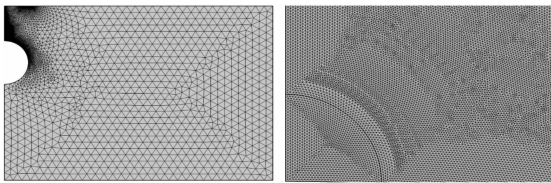
表 1 各种材料的属性参数

材料属性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动力黏度/ ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)	相对介电常数	表面张力系数/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
水滴	1 000	1.01×10^{-3}	80	0.07
空气	1.225	1.789×10^{-5}	1	/
铝	/	/	81	/

在表 1 中,密度和动力黏度是流体模块所需要的材料属性,在研究流体的动态过程时,金属铝球不会发生位移,因此不需要对铝材料的动力黏度和密度进行赋值。本文只考虑水滴的动态变化,因此也不需要空气和铝材料的表面张力系数进行赋值。

2.2.3 网格剖分

仿真模型建立在圆柱坐标系下的二维轴对称几何中,可以显著减小三维仿真计算量。为了准确得到空气与水滴的气液界面,使用自适应网格划分,同时在网格划分中为小水滴的网格尺寸做了更为细致的处理。水滴网格尺寸划分的大小也会影响前述气液界面厚度参数的设置情况。此外,考虑到金属铝球不是流体的研究对象,为减少计算量,网格划分时忽略金属球体区域。模型整体的网格划分如图 2 所示,网格划分的统计信息如表 2 所示。



(a) 整体区域的网格划分 (b) 水滴及附近区域的网格划分

图 2 二维轴对称几何模型的网格划分情况

表 2 模型的网格划分信息

单元类型	数量	网格参数	数值
三角形单元	98 456	单元数量	98 456
边单元	1 238	网格面积/ mm^2	55 020
顶点单元	13	最小单元质量	0.529 7
		最大单元质量	0.911 7

3 结果分析与讨论

3.1 水滴的振动特性

采用控制变量的方式,固定水滴体积为 $8 \mu\text{L}$,控制金属球导体上施加的交流电压幅值,使得外部电场强度为 $8 \text{ kV}/\text{cm}$,从而定量地研究不同典型接触角($50^\circ \sim 130^\circ$)下水滴的振动规律与表面润湿性的关系。

为便于与施加电压的变化趋势进行对比,更加清晰地观测到施加电压与水滴周期性运动之间的相位关系,将水滴的振幅数值作归一化处理,由此定义水滴振动的大小因子 $m(0 < m < 1)$:

$$m(t) = \frac{l(t) - l(t_0)}{l(t_1) - l(t_0)} \quad (22)$$

其中: t 为时间; $l(t)$ 为正弦交流电压 3 个周期内 t 时刻下水滴的振幅; $l(t_0)$ 为周期内振幅的最小值, $l(t_1)$ 为周期内振幅的最大值。水滴振动规律与表面接触角的关系如图 3 所示,图中结果取自交流电场下水滴振动相对稳定的 3 个电压周期,避免金属球体突然施加电压使得水滴受力变形的结果对水滴振动规律的影响。

由图 3 可知:外部施加电场强度为 $8 \text{ kV}/\text{cm}$,对于固定体积为 $8 \mu\text{L}$ 的水滴,当球体表面的接触角小于 120° 时,振动水滴振幅的变化规律基本相同,表明水滴的形态变化具有明显的周期性,水滴在交流电场下进行周期性的上下振动。当球体表面的接触角大于 120° 时,水滴依旧在球体表面作往复的上下振动,但此时振动水滴的振幅幅值却不相同,水滴形态的变化不再具有周期性,原因可能在于此时水滴发生了喷射现象。因此,对于表面条件达到了一定程度疏水性的导体,由于其表面自由能较低,在电场力的作用下,水滴产生形变且容易发生喷射现象。

尽管球体表面的亲疏水性程度不同,电场下导体表面水滴在交流电压的 3 个周期内都来回振动了 6 个周期,表明水滴振动频率是工频交流电压频率的 2 倍。因此,交流电场下水滴振动的频率与导体表面接触角没有直接联系。

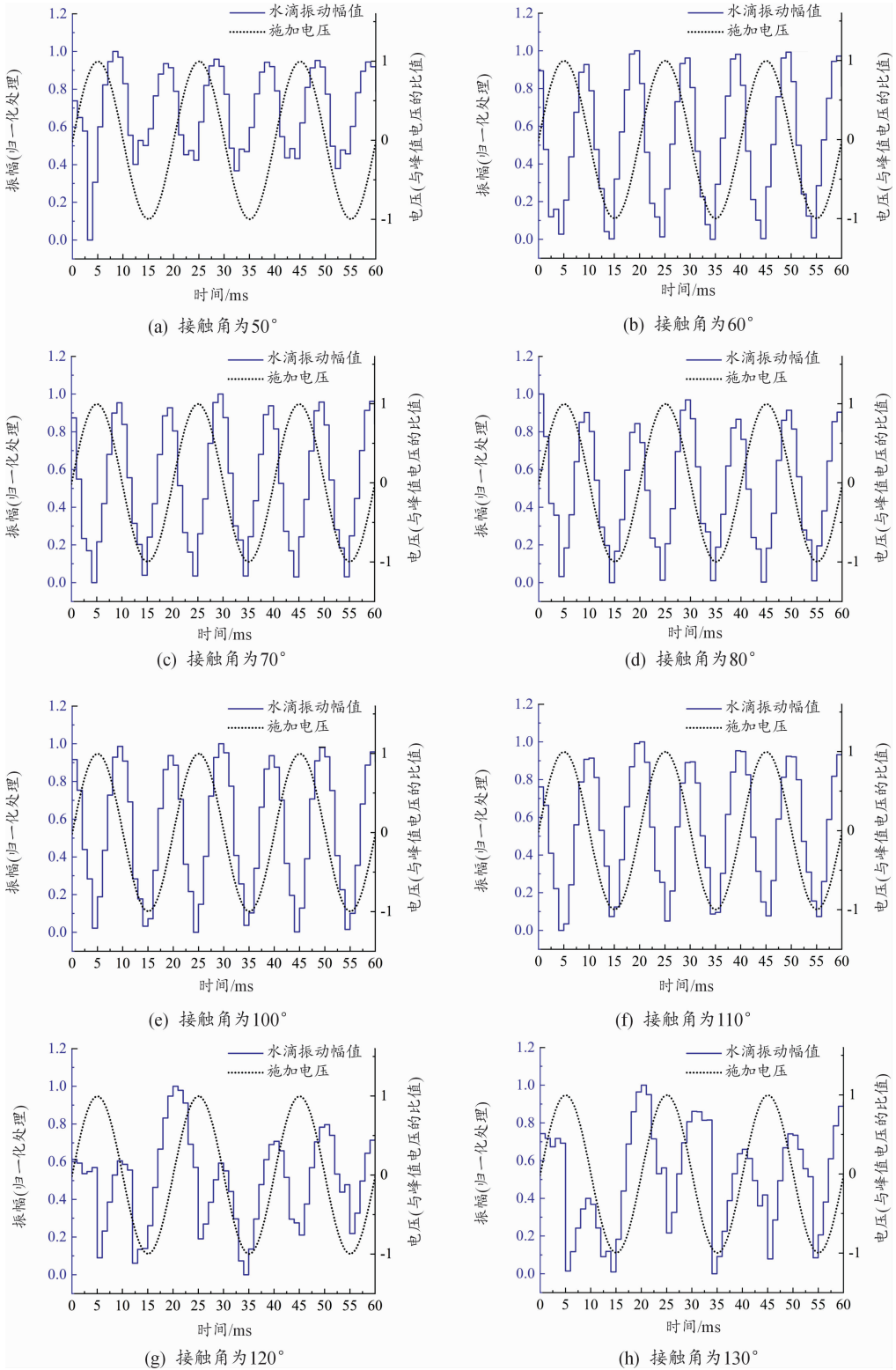


图3 水滴振动规律与球体表面接触角的关系

不同表面接触角下振动水滴的相位滞后于交流电压的相位,且振动水滴和交流电压之间的相位差不会随着表面接触的改变而改变。因此,交

流电场下振动水滴的相位与导体表面接触角没有直接联系。

未施加交流电场时,不同接触角表面的水滴

在稳定状态下的初始幅值如表 3 所示。可以发现,随着导体表面接触角的增加,固体表面的润湿性变差,水滴与导体表面的接触面积减小,由于水滴的体积保持一定,在自身表面张力的作用下,水滴的高度(即初始稳定幅值)会越来越大。

表 3 水滴初始幅值与导体表面接触角的关系

表面接触角/(°)	稳定水滴的初始幅值/mm	表面接触角/(°)	稳定水滴的初始幅值/mm
40	0.826 3	90	1.514 5
50	0.974 9	100	1.633 3
60	1.132 3	110	1.768 5
70	1.279 7	120	1.838 1
80	1.395 3	130	2.078 0

导体上施加交流电压以引入空间电场,水滴就会受到电场力的作用使得其形态发生变化,水滴在振动过程中的最大幅值及其最大拉长率与导体表面接触角的关系如图 4 所示。可以发现,电场下振动水滴的最大幅值随着导体表面接触角的增大而增大,一方面是因为不同表面接触角下水滴的初始幅值与接触角呈正相关,另一方面是因为电场力对水滴的拉长作用。但是,在振动水滴的 1 个振动周期内,其振幅最大拉长率是位于表面接触角最小的点(即图中的 40°),且随着接触角的增大而减小,直到减小到某个临界接触角(图中

为 80°),然后随着接触角的增加略微有所上升,最后趋于某个稳定的值。

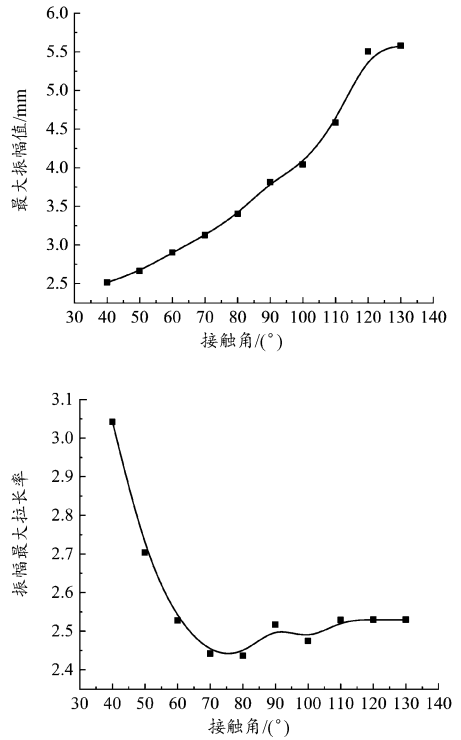


图 4 振动水滴最大振幅及其拉长率与接触角的关系

3.2 水滴表面电场仿真分析

图 5 为 10 个不同接触角下水滴周围的电场分布云图,时间取 0.115 s,位于正弦交流电压负半周期的峰值。红色箭头表示电场强度矢量的方向,图例表示此时空间场强以及电势的具体数值。

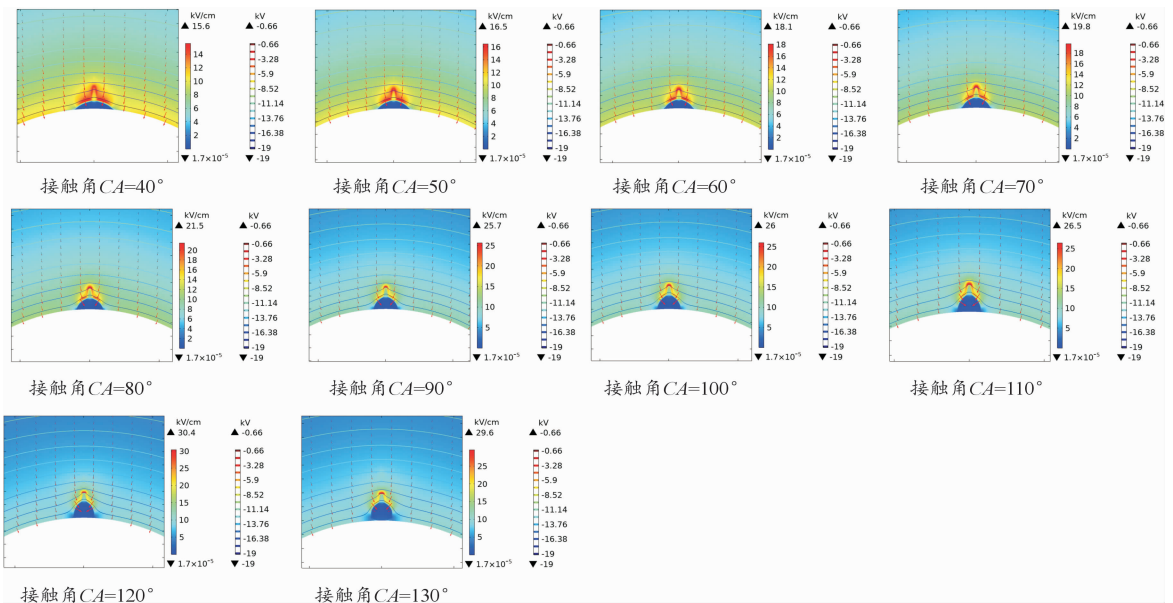


图 5 不同润湿性导体表面水滴电场分布云图

在外部施加场强为 8 kV/cm 、水滴体积为 $8 \mu\text{L}$ 时,不同接触下水滴的初始形态不同,在电场力的作用下水滴的形变大小也不一样,因此水滴周围的电场分布具有差异性。但是空间的场强都出现在水滴顶端的“气-液”分界面上,而不是出现在“水滴-表面-空气”的三相接触线区域。

此外,导体表面水滴的存在都使得空间电场强度发生了畸变,当导体表面接触角分别为 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° 、 100° 、 110° 、 120° 与 130° 时,水滴周围空间场强的最大值分别为 15.6 、 16.5 、 18.1 、 19.8 、 21.5 、 25.7 、 26 、 26.5 、 30.4 、 29.6 kV/cm 。所以当表面接触角小于 130° 时,水滴与导体表面的接触角越大,空间中的最大电场强度就越大,水滴对导体表面电场强度的畸变越严重;表面接触角为 130° 时,空间最大场强反而减小,可能是此时水滴与导体表面的接触面积较小,使得水滴形状逐渐趋于球体,受电场力作用下的形变变小。表面接触角对水滴附近场强的影响机制见图 6。

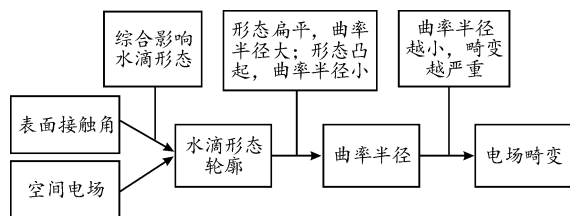


图 6 表面接触角对水滴附近场强的影响机制框图

为定量研究表面接触角与水滴周围电场强度的关系,选取纵坐标为 1.5 mm ,以水滴为中心且长度为 4 mm 的仿真路径。一维电场分布的仿真结果如图 7 所示,时间 $t=0.115 \text{ s}$ 。

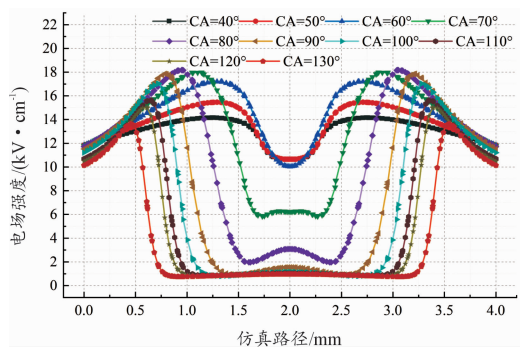


图 7 不同接触角下水滴周围的电场强度

根据图 7 可知,在水滴体积以及施加场强相

同时,仿真路径上不同接触角下的电场强度随着路径的变化具有相同的规律,都是在靠近“气-液”分界面区域时电场强度显著增大,在接近水滴边界时电场强度出现显著下降,处于水滴内部时的电场强度基本保持不变。

表面接触角不同时,仿真路径上的电场强度最小值所持续的范围不同。当接触角为 40° 、 50° 、 60° 时,路径上的最小场强及其持续范围相差不大,因为此时接触角较小,水滴高度低于所选路径的高度,最小场强出现在水滴顶部凸起的气液混合物中;当接触角为 $90^\circ \sim 130^\circ$ 时,仿真路径穿过水滴内部,但水滴内部路径的长度与接触角大小有关,所以此时路径上的最小场强非常低,持续范围存在差异。

仿真路径上的最大电场强度与接触角存在一定的关联。当表面接触角低于 80° 时,路径上的最大电场强度随接触角增加而增加;当表面接触角高于 80° 时,路径上的最大电场强度随接触角增加而降低。

4 结论

- 1) 高压正弦波下的水滴振动频率为电压频率的 2 倍,因为交流电压的正负半周在机械上对液滴的振动等效。
- 2) 交流电场下振动水滴的相位滞后于交流电压的相位,且相位差与表面接触角没有直接的联系;
- 3) 振动水滴的最大形变拉长率随着表面接触角的增加而降低。
- 4) 表面接触角影响导体表面振动水滴的形态轮廓,导体表面的接触角越低,附着水滴对空间电场强度的畸变程度越小。

基于有限元仿真方法分析多物理场耦合下导体表面水滴的振动、放电特性,本研究为工程上采用涂层改变导线表面接触角从而抑制输电线路的电晕放电现象提供依据,能为解决超、特高压输电线路电能传输中的电磁环境问题提供参考。

后续研究将进一步开展球形电极表面的水滴电致运动试验,利用涂层对球体表面进行处理,以定量改变其表面接触角,探讨导体表面接触角对水滴振动、放电特性的影响。

参考文献:

- [1] LI Q, ROWLAND S M, DUPERE I, et al. The impact of water droplet vibration on corona inception on conductors under 50 Hz AC fields[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2428–2436.
- [2] ZHU Y, LU T, BIAN X, et al. Corona characteristics of HVDC conductors with different surface conditions obtained in a controllable accelerating contamination depositing apparatus[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 382–390.
- [3] LIU Y, XV J, LIU Y, et al. A method for the indirect detection of audible noise from high-voltage direct current transmission lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(7): 4358–4369.
- [4] HUANG S, YE Z, LIU Y, et al. Effects of the rainfall rate on corona onset voltage gradient of bundled conductors in alternating current transmission lines in high-altitude areas[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 200: 1–7.
- [5] XU P, HEDTKE S, ZHANG B, et al. HVAC corona current characteristics and audible noise during rain[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 331–338.
- [6] LI Q, ROWLAND S M, DUPERE I, et al. Acoustic noise evaluation for overhead line conductors using an anechoic chamber[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1835–1843.
- [7] ZHOU C, LIU Y, LIU Y. Modeling and numerical analysis of corona-induced vibration on high-voltage transmission line with raindrops[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(11): 4575–4581.
- [8] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [9] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [10] TAYLOR G. Disintegration of pairs of water drops in an electric field[J]. Series A-Mathematical and Physical Sciences, 1964, 280(1382): 383–397.
- [11] TAYLOR G. Electrically driven jets[J]. Series A-Mathematical and Physical, 1969, 313(1515): 453–475.
- [12] 胡琴, 吴执, 舒立春, 等. 交流电场下水滴对导线电晕特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 237–245.
- [13] 朱雷, 刘云鹏, 贾伯岩, 等. 表面涂层在输电线路导线防电晕处理中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1994–1999.
- [14] 黎振宇, 蒋兴良, 李立涅, 等. 涂覆导线表面的淋雨电晕特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3740–3747.
- [15] 许菲菲. 导线表面涂覆 TiO₂ 光自洁薄膜后的直流电晕特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [16] MEGALA V, PUGAZHENDHI S C. Application of PI/MWCNT nanocomposite for AC corona discharge reduction[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 680–687.
- [17] MEGALA V, PUGAZHENDHI S C. Enhancement of corona onset voltage using PI/MWCNT nanocomposite on HV conductor[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 1122–1129.
- [18] HIGASHIYAMA Y, YAMADA T, SUGIMOTO T. Vibration of water droplet located on a hydrophobic sheet under the tangential AC field[C]//IAS Annual Meeting. Phoenix, USA: IEEE, 1999: 1825–1830.
- [19] OH-UCHI T, SUGIMOTO T, HIGASHIYAMA Y. Motion and mixing of a viscous droplet located on a super-hydrophobic surface using resonant vibration under the vertical and horizontal AC field[C]//IEEE Industry Application Society. Addison, TX: IEEE, 2015: 1–6.
- [20] 魏远. 纳米二氧化硅改性硅树脂超疏水涂层及其表面水滴电致运动特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [21] WANG H, PENG Z, ZHANG S, et al. Simulation study on E-field distribution and corona characteristics of composite insulator with water droplets[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen, China: IEEE, 2013: 422–425.
- [22] 鲍利华. 主动电场传感器定位特性仿真及实验设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [23] 余婧雯. 电场与外流场耦合作用下液滴动力学行为的数值研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [24] 贾江波, 马自伟, 查玮, 等. 稍不均匀电场中绝缘子附近导电微粒受力分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 141–145.

Effect of contact angle of conductor surface on the vibration and discharge characteristics of water drops under AC electric field

LIU Rui¹, XIONG Gangquan², LI Yanzhou³,
ZHAO Ying¹, YU Tiechao¹, JIANG Xingliang³

- (1. Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, China;
2. Bishan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402760, China;
3. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Under humid weather conditions, water droplets attached to the surface of overhead lines can cause distortions in the electric field near the conductors, resulting in more corona discharge events and bringing more serious electromagnetic environmental problems. The existing work lacks a comprehensive study of the dynamic process of water droplets on the surface of line conductors at different contact angles, especially a quantitative study of the relationship between the dynamic process of water droplets and the distortion of the electric field in space. To address this problem, we analyze the influence of the “solid-liquid” surface contact angle on the droplet vibration law and the spatial electric field distribution through finite element simulation, and derive the connection between the frequency, phase, field distribution and surface contact angle of the droplet vibrating on the conductor surface under the AC electric field. The simulation results show that the vibration frequency of water droplets is twice of the AC voltage frequency, the vibration phase lags behind the AC excitation phase, and there is no direct relationship with the contact angle; the surface contact angle affects the morphological profile of the vibrating water droplets, and the lower the contact angle, the smaller the distortion of the attached water droplets to the spatial electric field intensity.

Key words: AC electric field; conductors; water droplet vibration; electric field distortion

(责任编辑 杨黎丽)