

直流电力设备均压环表面雨滴的变形机理

孟维¹, 李奇², 李丽¹, 王子甲², 李林勇¹, 范圣平¹, 刘嘉文³, 李端姣³, 孙文星³

(1. 广东电网有限责任公司电网环保重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广州 510080; 2. 重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站, 重庆 400044; 3. 广东电网有限责任公司, 广州 510180)

摘要: 降雨和高湿度环境下绝缘子、套管等电力设备均压环表面附着的雨滴可能引发或加剧电晕放电现象, 已成为直流电力设备表面电晕效应的主要源头之一, 掌握金属导体表面雨滴的变形特性对于揭示雨滴激发电晕放电的机理、指导防晕设计至关重要。从固液气三者光透射性质的差异出发, 搭建了一套阴影法光学平台, 通过试验研究了直流电场下的电致雨滴变形现象。同时从流体体积力等效原理出发, 提出了一种三维电动流体模型的快速数值仿真方法, 从试验和仿真两个层面分析了雨滴的变形机理。研究结果表明搭建的光学平台能获得背景灰度均一、气液边界明显的雨滴图像, 提出的数值方法在保证准确性的同时大幅缩短计算时间。研究发现直流电场下雨滴存在与交流电场类似的往复变形现象, 其变形率在时域内存在一定周期性, 分析表明雨滴往复变形现象来自于雨滴表面垂直于电场方向的麦克斯韦应力。研究结果可为电致雨滴变形现象的研究提供参考, 为进一步研究雨滴变形后激发电晕放电的机理奠定基础。

关键词: 阴影法; 电动流体模型; 数值模拟; 电致运动; 雨滴变形

Mechanism of Raindrop Deformation on the Surface of Grading Ring on DC Power Equipment

MENG Wei¹, LI Qi², LI Li¹, WANG Zijia², LI Linyong¹, FAN Shengpin¹, LIU Jiawen³, LI Duanjiao³, SUN Wenxing³

(1. Key Laboratory of Environmental Protection of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station of Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510180, China)

Abstract: Raindrops attached to the surface of grading ring on the power equipments such as insulators and bushings under rainfall and high humidity environment may trigger or intensify corona discharge phenomelons, which have become one of the main sources of surface corona effects in DC power equipment. Mastering the deformation characteristics of raindrops on the conductor's surface is crucial to reveal the mechanism of corona discharge triggered by raindrops and to guide the anti-corona design of equipment. Starting from the difference in light transmission properties among solid, liquid, and gas, a shadow method optical platform is built to experimentally study the deformation phenomenon of the raindrops under a DC electric field. At the same time, based on the equivalence principle of fluid body force, a fast numerical simulation method of the three-dimensional electrohydrodynamic model is proposed. The deformation mechanism of raindrops is analyzed from experimental and simulation perspectives. The research results show that raindrop images with uniform background grayscale and clear gas-liquid boundaries can be obtained in the constructed optical platform. The proposed numerical method can significantly reduce computational time and ensure accuracy. Research has found that there is a reciprocating deformation phenomenon of raindrops in a DC electric field, similar to the AC electric field. And its deformation rate has a certain periodicity in the time domain. Analysis shows that the reciprocating deformation phenomenon of raindrops comes from the Maxwell stress on the surface of the raindrops perpendicular to the electric field direction. The research results can provide a reference for the study of the electroinduced deformation phenomenon of the raindrops and lay a foundation for further research on the corona discharge mechanism triggered by raindrop deformation.

Key words: shadow method; electrohydrodynamic model; numerical simulation; electroinduced motion; raindrop deformation

0 引言

均压环是直流电力设备最常用的电场分布控制装置之一,降雨后残留在均压环表面的雨滴在高压静电场作用下发生变形并畸变场强进而引发电晕放电,正逐渐成为变电站、换流站内电晕效应的主要源头^[1-5]。掌握雨滴在电场作用下的变形机理对于揭示降雨引发和加剧电晕效应的物理机制,指导电力设备均压环的防晕设计具有重要意义。

目前国内外主要关注降雨对输变电设备宏观电晕特性和电晕效应的影响。文献[6]提出了适用于降雨前后干湿过渡期间的输电导线起晕场强模型。文献[7]发现导线表面粗糙度对其电晕的影响会在小雨环境中增大。文献[8]发现导线淋雨后的可听噪声随着时间推移逐渐增大。文献[9-11]重点分析了降雨条件下的瓦型导线电晕特性、表面材料对电晕特性的影响及纯音噪声特性等。近年来国内外针对高湿度和降雨等湿润环境下的电晕放电抑制问题提出了亲水、疏水涂层两种技术路线,但是由于电致液滴变形以及由其引发的电晕放电机理尚不明确,对于防晕涂层亲疏水性的确定仍然存在较大争议。

针对液滴在电场作用下的变形和放电现象的研究最早可追溯至19世纪初,主要集中在静电喷涂、石油破乳和大气物理等领域:文献[12-13]研究发现液滴在电场作用下存在表面不稳定和放电现象。文献[14-15]进一步研究了液滴在直流电场中的拉伸变形现象,发现了液滴沿电场方向的“泰勒锥”现象,提出大气电场使得液滴变形导致的电场加强和放电是引发大气雷暴的重要因素。文献[16]验证了液滴在电场作用下可产生电晕放电,文献[17]从电场强度计算的角度出发提出液滴变形后头部场强的畸变引发了电晕放电。文献[18-19]通过试验发现液滴表面可产生与金属电极完全不同的簇状电晕脉冲。与之相比,电力工业领域中针对输变电设备表面雨滴的变形和由此引发的电晕放电的研究较少,且主要集中在交流工况。文献[20-22]试验研究了导线表面雨滴在交流电压下的变形特性,发现雨滴在交流电压下的典型外形有:圆锥形、半球形、扁平

型等。并且结合有限元仿真和试验结果,提出雨滴的变形和起晕特性取决于雨滴体积,同时在共振条件下雨滴激振力和响应之间有90°的相移,电晕起始时刻则取决于雨滴振动与交流电场之间的相位差。可见目前国内外研究人员针对降雨和高湿度下的电力设备电晕放电和电晕效应的研究已经取得了较大进展,对于雨滴的微观变形现象的研究则集中在交流工况,缺乏直流电压下的相关研究。同时静电破乳、喷涂等领域的研究对象为处于悬浮状态的液滴,相关成果无法直接应用在电力设备中,为解决直流设备在降雨或高湿度环境下的防晕问题带来了困难。

目前国内外在试验研究电场作用下雨滴的形态特性时最常用的是相机拍摄法,文献[14-15]采用强背光灯搭配均光纸,利用相机拍摄发现了雨滴射流现象和沿电场方向的“泰勒锥”现象。此后这一基本观测方法大量应用在电破乳和电聚结等领域的试验研究中^[23-25],并成功获得了悬浮状雨滴在电场中的形态。文献[20]在背光灯搭配均光纸这一基本试验布置的基础上,采用紫外镜头结合像增强仪和高速相机拍摄得到了导体表面雨滴在交流电压下的不同形态和雨滴头部电晕放电产生的光子,直接证明了雨滴变形后将激发电晕放电。但是现有拍摄技术难以满足精确定量分析雨滴变形特性的要求,其原因是:采用背光灯和均光纸时为了保证图像明亮程度,光源不能远离试品,因此难以避免背光灯本身存在的光强不均和雨滴自身光透射问题,进而导致图像背景灰度不均和雨滴轮廓不清晰。采用紫外镜头和像增强仪拍摄时所得图像本质上是由像增强仪处理后输出的数字图像,而非原始光学模拟图像,使得雨滴的轮廓和外形与实际相比存在较大失真。

为此,本文从固体、液体、气体三者的透射性质出发,搭建了一套用于定量观测雨滴形态的阴影法光学平台,结合高速相机将雨滴的实际三维形貌转变为二维投影实现快速高精度定量分析。同时从流体的体积力等效的角度出发提出了一种三维电动力学模型的快速数值仿真方法;从试验和仿真两个方面入手分析了直流电场下导体下表面的雨滴变形机理。研究成果可为进一步研究不同接触角下的雨

基金项目:中华人民共和国科学技术部高端外国专家引进计划“超、特高压输电线路电磁环境保护关键技术研究”(G20200022003)。

Foundation item: Supported by the High Level Foreign Expert

Introduction Program of the Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China.

滴电致变形特性和机制奠定技术基础，为防电晕涂层的开发设计提供了理论依据。

1 阴影法试验平台和电动流体快速数值仿真模型

1.1 阴影法拍摄雨滴变形过程的基本原理和雨滴最大变形度确定方法

图 1 所示是采用阴影法拍摄雨滴变形过程的原理示意图。

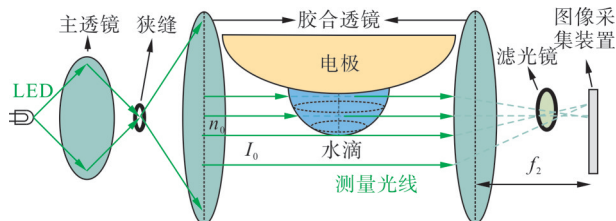


图 1 阴影法拍摄雨滴电致变形过程的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of raindrop electrically induced deformation process captured by shadow method

如图 2 所示是依据图 1 的原理搭建的阴影法观测平台实物图。

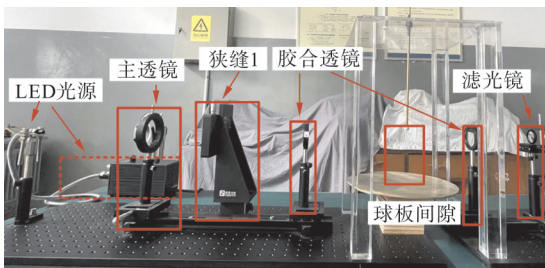


图 2 阴影法拍摄雨滴电致振动过程的光路照片

Fig. 2 Light path photo of electrically induced raindrop vibration process using shadow method

阴影法观测平台的详细透镜参数和光学部分原理详见文献[26]，利用图 2 中的阴影测量平台得到的球-板间隙中雨滴图像如图 3 所示。

图 3(a) 和 (b) 分别是采用打背光灯的传统方式拍摄得到的雨滴图像和采用阴影法拍摄得到的图像，对比两幅图像可以明显看出，传统拍摄方法得到的图像中具有背景灰度不均匀问题和雨滴自身光透射问题。这种现象将直接引起图像灰度分布不均匀，增加雨滴边缘轮廓定量分析的误差，甚至出现雨滴形态参数定量计算错误的问题，采用阴影法则具有背景灰度均一、雨滴与背景图像对比明显的优势。获得阴影图像后进一步采用图像边缘轮廓提取

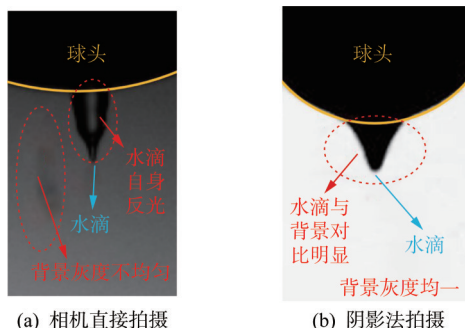


图 3 相机直接拍摄和阴影法拍摄的雨滴对比图

Fig. 3 Comparison of raindrop diagram captured by camera and shadow method

的方法获取雨滴的形态参数，具体步骤如下。

- 1) 应用边缘轮廓提取算法处理雨滴变形的原始灰度图像，得到雨滴和球头的边缘轮廓图像；
 - 2) 分析雨滴与球头接触的角点以及雨滴头部的顶点，效果如图 4 所示；
 - 3) 通过图像的像素矩阵读出球头直径的像素长数量，根据球头直径 13 mm 折算得到单个像素所代表的实际尺寸长度；
 - 4) 根据单个像素所代表的实际尺寸长度，结合两个角点和顶点之间的像素数得到雨滴尺寸信息。
- 采用试验拍摄得到的一组阴影图像，经过边缘轮廓提取处理后的效果如图 4 所示。

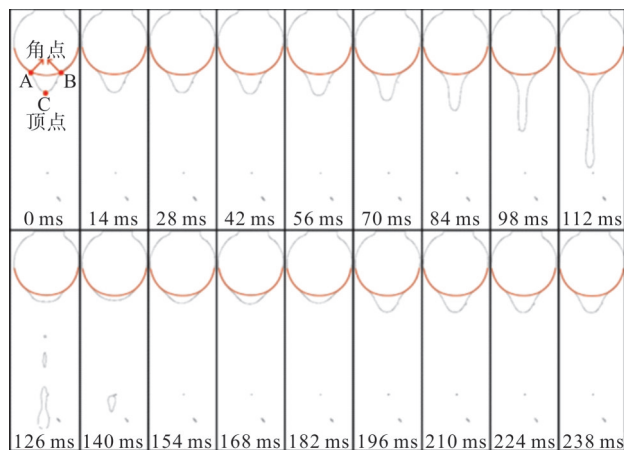


图 4 阴影图像边缘轮廓处理后的雨滴变形过程

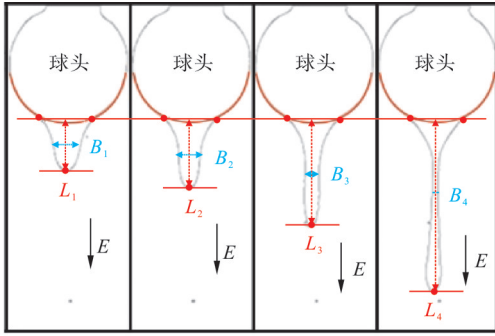
Fig. 4 Deformation process of raindrops after edge contour processing of shadow images

图 4 中 A、B 为雨滴与铝球的交点，C 为雨滴的顶部。雨滴附着于导体球表面时在雨滴表面张力的作用下会保持为近似球形，但是在电场中雨滴受静电力作用发生变形，本文依据 Konski 和 Taylor 理

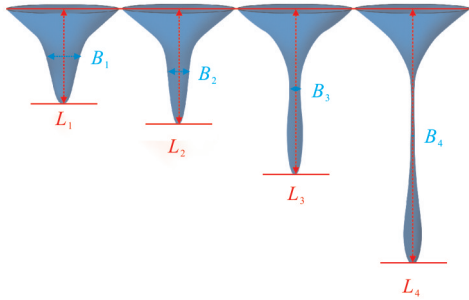
论,通过变形度 D 来定量描述雨滴的变形特性,如式(1)所示。

$$D = \frac{L - B}{L + B} \quad (1)$$

式中: L 为平行于电场方向的轴长; B 为垂直于电场方向的轴长。对于悬浮在的不相溶介质中的雨滴,雨滴在平行和垂直于电场的方向均为轴对称,但是附着于导体表面的雨滴仅在垂直于电场的方向呈轴对称。为此本文通过导体表面至雨滴头部的距离来定义参数 L ,试验和仿真中的变形率定义方法相同,如图5所示。



(a) 阴影图像经轮廓处理后的雨滴变形过程(直流电压30 kV)



(b) 仿真得到的雨滴变形过程(直流电压30 kV)

图5 雨滴变形过程中的变形度定义示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deformation degree definition during raindrop deformation process

图5中红色文字为雨滴平行于电场的参数 L_n ,其数值为球头顶部到雨滴顶部的距离;蓝色文字为垂直于电场的参数 B_n ,其数值为雨滴在距离为 $L/2$ 处的长度;下标 n 代表参数变化后的编号;黑色文字标注了电场的方向。可见雨滴在电场力作用下发生拉伸变形的过程中,参数 L 不断增加,参数 B 不断减小;对比图5(a)和(b)可见数值模型能够较好地模拟雨滴变形的形态(仿真建模方法见1.3节)。

1.2 多信号时域同步测量平台

如图6所示是本文搭建的多信号同步测量平台。

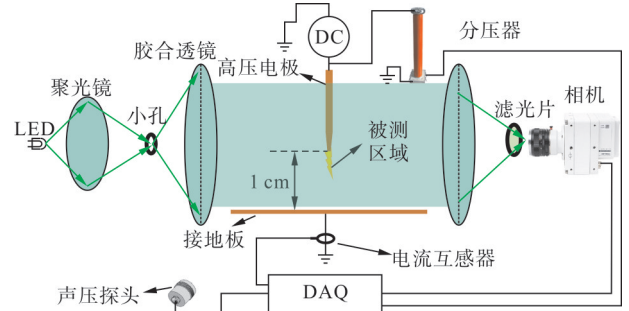


图6 雨滴变形的多信号同步测量平台

Fig. 6 Multi-signal synchronous measurement platform for raindrop deformation

测量平台的详细参数详见文献[26]。试验时将高速相机的拍摄触发脉冲和结束脉冲输入采集卡,实现电压电流、噪声和图像的时域同步采集,图7为测量得到的典型结果。

图7中红色、蓝色、黑色、黄色和绿色波形分别为电流、电压、声压信号(声压探头的电压/V)和高速相机的拍摄脉冲(I/O3/V、I/O5/V),通过图7即可直接得到各信号在时域上的对应关系。

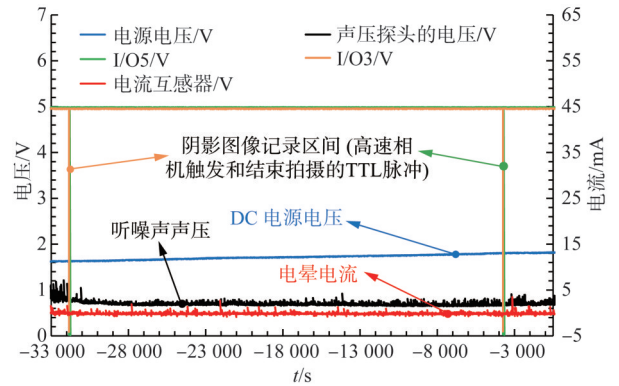


图7 多信号时域同步波形图

Fig. 7 Figure of the multi-signal time-domain synchronous waveforms

1.3 电动流体模型的快速数值仿真方法

图8是带电导体上雨滴物理模型和相界面示意图,其中深蓝色部分为雨滴,黄棕色部分为导体,灰色部分为空气,浅蓝色部分为雨滴与空气之间的界面,如图8所示,雨滴受到电场力和重力作用,气-液界面处受到张力的作用^[21-22],3种作用力服从Navier-Stokes方程^[27-29]。

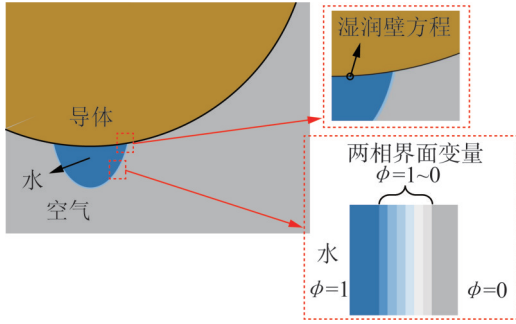


图 8 物理模型和相界面示意图

Fig. 8 Schematic diagram of physical model and phase interface

如图 8 所示, 在仿真过程中通过数值范围为 0~1 的变量 ϕ 描述雨滴、空气和雨滴-空气界面的运动速率、受力等物理量的相对大小。其中表示雨滴的液体部分的取值为 $\phi=0$, 表示空气的气体部分的取值为 $\phi=1$, 表示液体与空气之间的气-液界面的部分, 其取值为随着气-液界面厚度由 0 均匀增加至 1 (如图 8 中局部放大图所示)。雨滴、空气和气-液界面处的两相流平衡关系由式(2)表示。

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{u}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \\ \quad + \mathbf{F}_{st} + \rho_g + \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为时间; ρ 为密度; $\mathbf{I}$ 为无量纲的单位矩阵, 矩阵阶数与几何模型维度数相同; $\mathbf{F}$ 为体积力, 取值为 0; ρ_g 为雨滴所受重力; $\mathbf{F}_{st}$ 为气-液界面处的表面张力; p 为雨滴各处所受压力; $\mathbf{u}$ 为雨滴各处的运动速度。气-液界面的运动速度通过式(3)计算。

$$\frac{\partial V_f}{\partial t} + \nabla \cdot (V_f \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot (V_f(1 - V_f)\mathbf{u}_c) = 0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_c$ 为由于雨滴变形导致的局部压缩产生的流体运动速度; V_f 为气-液界面各处的液体体积分分数。式(4)为气-液界面的密度和动力粘度计算公式。

$$\begin{cases} \rho = \rho_{air} \cdot V_{fair} + \rho_{water} \cdot V_{fwater} \\ \mu = \mu_{air} \cdot V_{fair} + \mu_{water} \cdot V_{fwater} \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{fair} = \frac{1 - \phi}{2}, V_{fwater} = \frac{1 + \phi}{2}, V_{fair} + V_{fwater} = 1$$

式中: μ 为总的应力粘度; $\rho_{air}V_{fair}$ 为气-液界面中空气对气-液界面密度的贡献量; $\rho_{water}V_{fwater}$ 为气-液界面中水滴对气-液界面密度的贡献量, 在雨滴运动过程中其各处的界面密度随着气体和液体的体积分数的变化而实时改变; $\mu_{air}V_{fair}$ 为气-液界面中空气对

气-液界面动力粘度的贡献量, $\mu_{water}V_{fwater}$ 为气-液界面中水滴对气-液界面动力粘度的贡献量。在雨滴运动过程中, 其各处的界面动力粘度随着气体和液体的体积分数的变化而实时改变。可见气-液界面的密度和动力粘度取决于体积分分数, 同时受到空气、水的密度及动力粘度的影响, 仿真中该参数按照干燥空气和纯水进行取值。静电场中雨滴受到的静电力在宏观上表现为气-液界面处的麦克斯韦张力, 通过式(5)进行计算。

$$\mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(T_{rr} - T_{\theta\theta}) \\ 0 \\ \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{T_{rz}}{r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}$ 为麦克斯韦应力张量; 下标 r 、 z 和 θ 分别为麦克斯韦应力张量在圆柱坐标系的 3 个方向上的分量; T_{rr} 、 T_{rz} 、 $T_{\theta\theta}$ 、 T_{zz} 、 T_{rz} 分别为应力张量在 rr 、 zz 、 $\theta\theta$ 、 rz 方向上的分量。气-液界面的相对介电常数 ϵ_r 通过式(6)进行计算。

$$\epsilon_r = \epsilon_{air} \cdot V_{fair} + \epsilon_{water} \cdot V_{fwater} \quad (6)$$

式中: $\epsilon_{air}V_{fair}$ 为气-液界面中空气对气-液界面的相对介电常数的贡献量; $\epsilon_{water}V_{fwater}$ 为气-液界面中水滴对气-液界面的相对介电常数的贡献量。在雨滴运动过程中其各处的界面的相对介电常数随着气体和液体的体积分数的变化而实时改变。仿真中雨滴与导体之间的静态接触角, 通过式(7)进行计算。

$$(d_{pf})^2 \cdot \nabla \phi = (d_{pf})^2 \cdot \cos(\theta_w) \cdot |\nabla \phi| \quad (7)$$

式中相界面的厚度 d_{pf} 和静态接触角 θ_w 通过人为指定, 根据试品球头的实测结果取 θ_w 为 90° 。相界面厚度 d_{pf} 根据水滴直径进行取值, 一般取值为水滴直径的千分之一。仿真时导体球头设置为直流正极性电压, 板设置为 0 电势, 模型边界服从电荷守恒; 环境压力为标准大气压, 雨滴的初始运动速度为 0; 雨滴的电导率取值与试验相同, 均为 $40 \mu\text{S/cm}$; 仿真模型的三维示意图如图 9 所示。

为了提高数值模型的仿真速度, 本文提出了一种快速数值仿真方法(即场等效法), 该方法的核心思想是通过降低几何模型的尺寸来减少网格数量和计算时间, 每次降低几何模型尺寸时将大几何模型内部一部分区域的物理量分布规律作为小几何模型的边界条件, 并且将该区域的坐标和轮廓作为新的小几何模型使用。如图 9 所示是场等效法的计算区

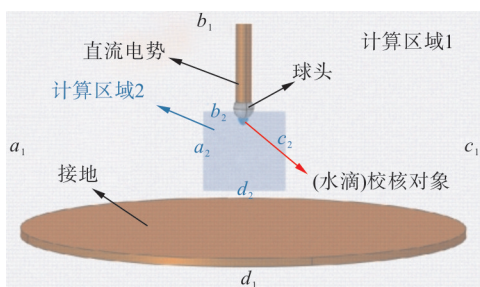


图9 快速数值仿真方法的计算区域示意图

Fig. 9 Schematic diagram of calculation area for fast numerical simulation method

域示意图。

图9中灰色区域为计算时的原始计算区域；蓝色为缩减后的计算区域，按照如下步骤进行计算。

1) 先以计算区域1进行求解，区域1的边界 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 的电场边界条件为零电荷；流场边界条件为零压力和速度；球头电极为直流电势，板电极为0电势；

2) 根据计算区域1的求解结果，导出和保存4条直线 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 的电势、压力和速度分布数据；

3) 以4条直线 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 为新几何边界，设定为计算区域2；

4) 将4条直线 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 的电势、压力和速度分布数据作为计算区域2的边界条件；

5) 求解计算区域2中的雨滴振动特性，达到缩短计算时间的目的。

6) 重复步骤2)—4)可达到不断缩减计算区域的大小的目的，其中计算区域的形状可随意选取，为方便起见本文取为四边形。

2 结果与讨论

2.1 直流电场下的雨滴变形特性

本文采用如图6所示的试验平台进行了直流电压下的雨滴变形特性试验，发现当直流电压维持不变时雨滴具有拉伸-恢复往复循环的变形特性，其典型过程如图10所示。

图10中黄色圆圈标注了球头，红色、蓝色和绿色虚线标注了雨滴头部在拉伸-恢复往复变形中的大致位置，红色、蓝色和绿色箭头标注了雨滴的运动方向，图中高速相机的曝光时间为14 ms，所加直流电压为5 kV。由图10可以看出，0 ms时雨滴头部位于红色虚线位置，在14 ms时拉伸至蓝色虚线位置，随后在28 ms恢复至绿色虚线处，最后

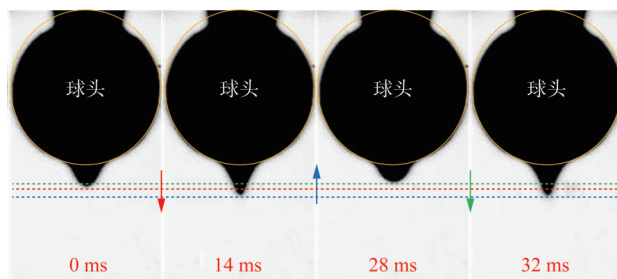


图10 雨滴变形特性典型阴影图像(5 kV直流)

Fig. 10 Typical shadow images of raindrop deformation characteristics (5 kV DC)

在32 ms时再次拉伸至蓝色虚线处。

为排除试验电源产生的直流电压的纹波对试验现象的影响，本文利用数值模型进行了直流电压下雨滴变形特性的研究，结果显示雨滴同样存在拉伸-恢复往复循环的变形特性。采用数值仿真模拟得到的雨滴电致变形的典型形态结果如图11所示。

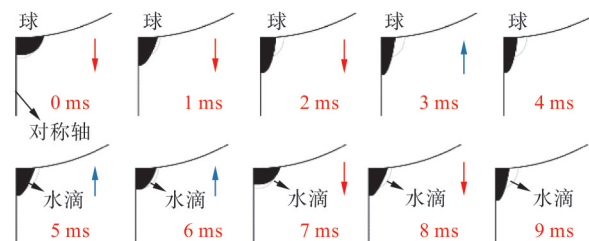


图11 雨滴变形特性仿真结果(5 kV直流, 二维轴对称)

Fig. 11 Simulation results of raindrop deformation characteristics (5 kV DC, two-dimensional axisymmetric)

图11中黑色部分为雨滴的切面图像(二维周对称)，红色和蓝色箭头分别标注了雨滴变形的趋势，可见0 ms—2 ms时间内雨滴逐渐拉伸，3 ms—6 ms时间内雨滴恢复，6 ms—9 ms内拉伸，呈现出与试验一致的拉伸-恢复往复循环的变形特性。

为定量分析雨滴在直流电压下的变形特性，本文通过试验得到了不同直流电压下的雨滴变形率结果，并且以20 kV直流电压下的较为典型的结果为例进行说明，如图12所示。

如图12是雨滴变形率的试验结果，可见：1) 雨滴变形率可小于0。图12显示雨滴变形率在0 ms、70 ms、140 ms和210 ms在-0.1附近，表明此时雨滴的 L 参数大于 B 参数，此时雨滴呈现扁平状。2) 雨滴具有以固定周期进行往复变形的特性。由图12中的数据可以看出，20 kV下雨滴往复变形的周期大致为70 ms。

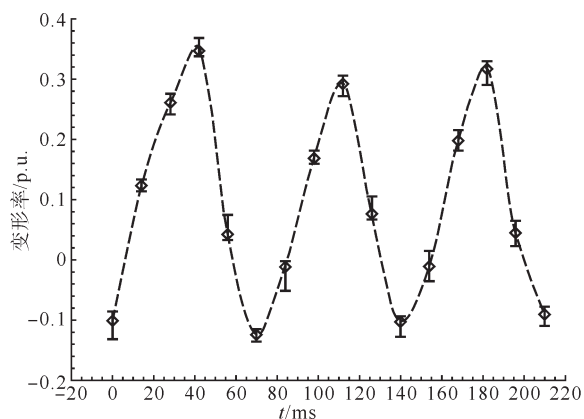


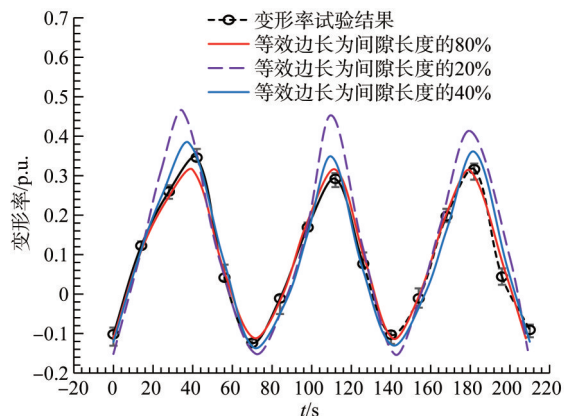
图 12 直流电压下雨滴变形率试验结果 (20 kV 直流)

Fig. 12 Test results of raindrop deformation rates under DC voltages (20 kV)

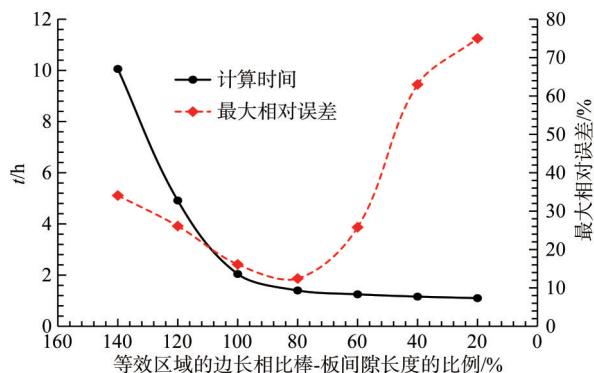
2.2 场等效法的模型边长对计算精度的影响

本文将雨滴作为校核对象,以雨滴的变形率为衡量标准,分析等效模型的边长不同时模型的计算效果,如图 13 所示。

图 13 中黑色圆点划线是试验得到的变形率,



(a) 雨滴时域变形率的计算和试验结果对比 (20 kV)



(b) 不同等效模型的边长下的最大误差和计算时间

图 13 不同等效模型的边长下的计算结果

Fig. 13 Calculation results under different equivalent models' side lengths

红色、蓝色实线分别是等效边长为间隙长度的 80% 和 40% 时的变形率计算结果,紫色虚线是等效边长为间隙长度的 20% 时的结果。图 13(b) 中黑色圆点是计算时间,红色菱形是变形率相比试验的最大相对误差,由图 13 可知以下结论。

1) 等效模型取不同边长时算得的变形率幅值不同但变形周期相同。图 13(a) 显示等效模型的边长不同时算得的变形率曲线的幅值以及每个变形周期中达到幅值的时间不同,但 3 条曲线显示的变形周期均在 70 ms 左右,与试验结果无明显差异。

2) 数值模型的计算误差随等效模型的边长的减小,呈现先减小后增大的规律。图 13(b) 显示等效模型的边长相比棒-板间隙长度的比例由 140 % 降低至 20 % 的过程中,最大相对误差先由 30 % 左右降低至 12 % 附近,然后迅速增加至 68 % 左右;出现该现象的原因是雨滴振动变形过程中其周围的流场参数并非固定不变,当等效模型的边长减小到一定程度时利用恒定的边界参数进行等效将带来较大误差。根据图 13(b) 结果,等效模型的边长的最佳取值约为间隙长度的 80 %。

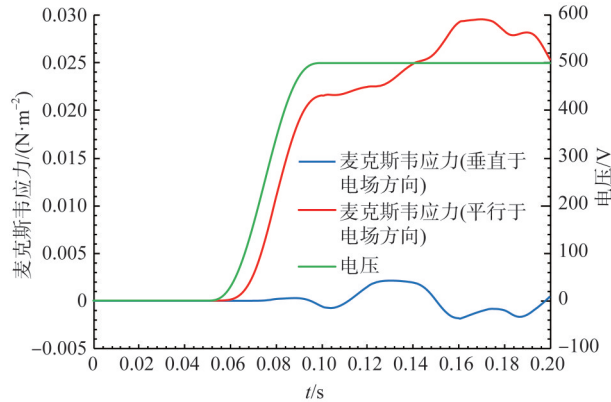
3) 计算时间随等效模型边长的减小而降低,且降低程度具有饱和趋势。图 13(b) 显示等效区域的边长相比棒-板间隙长度的比例由 140 % 降低至 20 % 的过程中,计算时间由 10 h 缩减至 1.1 h 左右,同时当比例小于 80 % 之后计算时间的降低程度出现了明显的饱和趋势。

2.3 直流电场下的雨滴变形机理

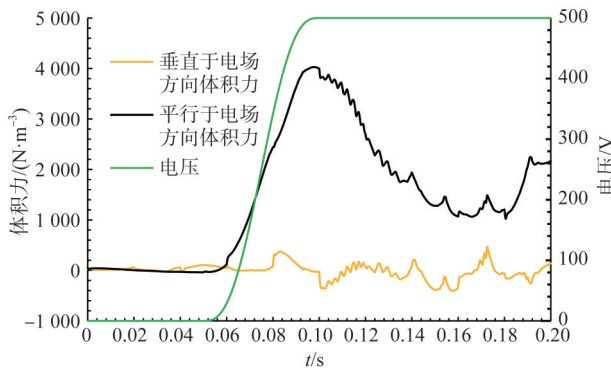
本文选取电压、麦克斯韦应力和体积力三者数量级较为接近 5 kV 时的仿真结果,分析直流电场下的雨滴变形机理,麦克斯韦应力和体积力随时间的变化规律如图 14 所示。

图 14 中绿色、红色、蓝色、黄色和黑色曲线分别为所加电压、平行于电场的麦克斯韦应力(与电场同向为正)、垂直于电场的麦克斯韦应力(从雨滴轴心指向边界为正)、垂直于电场的体积力和平行于电场的体积力(与电场同向为正),由图 14 可知:

1) 垂直于电场方向的麦克斯韦应力呈现在 0 附近波动的现象。图 14(a) 显示平行于电场的麦克斯韦应力始终与重力方向保持一致(麦克斯韦应力始终大于 0),垂直于电场的麦克斯韦应力呈现在 0 附近波动的特性。



(a) 麦克斯韦应力随时间的变化关系



(b) 体积力随时间的变化关系

图14 直流电压下雨滴的麦克斯韦应力和体积力(5 kV)

Fig. 14 Maxwell stresses and volumetric forces of raindrop under DC voltages (5 kV)

2) 平行于电场方向的体积力随电压的增加而增加,在电压稳定不变后呈现往复振荡现象。图14(b)显示电压在0.05 s至0.1 s逐渐由0 V增加至500 V(绿色曲线),平行于电场的体积力随之由 -21.85 N/m^3 增加至 4028.14 N/m^3 ,0.1 s后电压稳定在500 V后雨滴体积力呈现随时间增加先下降后增大的振荡变化规律。

3) 雨滴往复变形特性来自于垂直于电场方向的麦克斯韦应力。由图14可以看出平行于电场方向的麦克斯韦应力始终为正(红色曲线),垂直于电场的麦克斯韦应力存在正负波动(蓝色曲线),当垂直于电场的麦克斯韦应力大于0时该应力将雨滴往垂直于电场的方向拉伸,因此雨滴参数 L 将减小、 B 将增大;当垂直于电场的麦克斯韦应力小于0时该应力将雨滴往垂直于电场的方向压缩,此时雨滴参数 L 将增大、 B 将减小。从雨滴总体的体积力来看即呈现出平行于电场和垂直于电场方向的体积力均呈现往复波动的现象(如图14(b))。

3 结论

直流电场下均压环表面附着的雨滴可能存在变形现象,进而引发或加剧电晕放电。为揭示直流电场下电致雨滴变形的机理,本文采用数值仿真结合试验的方法进行了研究,得到以下主要结论。

1) 相比于传统拍摄方法,阴影法将图像中的三维物体压缩至二维,提升了雨滴变形过程中的雨滴轮廓清晰度,实现了雨滴变形特性的定量分析。

2) 本文提出的场等效方法能够较好地模拟雨滴变形的形态和周期,同时在缩短计算时间的前提下保证计算精度,计算精度则随等效模型边长的减小呈现出先减小后增大的规律;对于本文研究的间隙,等效模型边长取间隙长度的80%时计算误差达到最小;此外结果显示计算时间缩短的程度具有饱和趋势。

3) 试验和仿真结果表明直流电压作用下雨滴具有与交流相似的拉伸-恢复往复循环的变形特性;雨滴变形率可小于0且存在一定的变形周期;数值仿真结果表明雨滴往复变形的机理来自于垂直于电场方向的麦克斯韦应力对雨滴的挤压和拉伸作用。

4) 本文提出的数值模拟方法能够有效模拟导体表面的雨滴电致变形现象,可用于研究接触角对雨滴电致变形特性的影响规律,指导电力设备防电晕涂层的开发。

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. Summary of research on audible noise of ultra-high voltage AC/DC transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 145-152.
- [2] 张东东,万武艺,黄宵宁,等.屏蔽极板对劣化复合绝缘子电场检测的影响[J].广东电力,2022,35(5):93-100.
ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, HUANG Xiaoning, et al. The influence of shielding plates on the electric field detection of deteriorated composite insulators [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 93-100.
- [3] 李学宝,吴昊天,程璐莹,等.直流电晕放电无线电干扰随机时域计算模型研究[J].电工技术学报,2023,38(6):1531-1540,1583.
LI Xuebao, WU Haotian, CHENG Luying, et al. Study on the stochastic time domain calculation model of radio jamming caused by DC corona discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1531-1540, 1583.
- [4] 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. Overview of audible noise in overhead transmission lines [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2022, 58 (5): 1 – 6.
- [5] 付淦, 郑重. 负极性方波下介质阻挡对电晕放电重复率的影响[J]. 广东电力, 2022, 35(1): 93 – 100.
- FU Gan, ZHENG Zhong. The effect of dielectric barrier on corona discharge repetition rate under negative polarity square wave [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35 (1): 93 – 100.
- [6] HEDTKE S, XU P, PFEIFFER M, et al. HVDC corona current characteristics and audible noise during wet weather transitions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35 (2): 1038 – 47.
- [7] BIAN X, WANG Y, WANG L, et al. The effect of surface roughness on corona-generated electromagnetic interference for long-term operating conductors [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 879 – 887.
- [8] 刘元庆, 杨晓洪, 姜脉哲, 等. 淋雨后高压直流导线电晕产生的可听噪声特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 371 – 376.
- LIU Yuanqing, YANG Xiaohong, JIANG Maizhe, et al. Audible noise characteristics caused by corona in high-voltage DC conductors after rain exposure [J]. Journal of Electrical Technology, 2020, 35 (S2): 371 – 376.
- [9] 胡琴, 伍炜卫, 彭华东, 等. 淋雨条件下瓦型导线的电晕特性[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3447 – 3452.
- HU Qin, WU Weiwei, PENG Huadong, et al. Corona characteristics of tile shaped conductors under rainy conditions [J]. Power Grid Technology, 2019, 43 (9): 3447 – 3452.
- [10] 王峰. 淋雨条件下表面材料对直流输电导线电晕放电特性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [11] 谭恢林. 雾湿环境交流输电线路电晕噪声纯音分量传播特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [12] JOHN Zeleny. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces[J]. Physical review, 1914, 2(3): 69 – 91.
- [13] JOHN Zeleny. Instability of electrified liquid surfaces [J]. Physical Review, 1917, 1(5): 1 – 6.
- [14] MACKY W A. Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1931, 133(822): 565 – 587.
- [15] TAYLOR G. Disintegration of water drops in an electric field [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1964, 280 (1382): 383 – 397.
- [16] ENGLISH W N. Corona from a water drop [J]. Physical Review, 1948, 74(2): 179 – 189.
- [17] GRIGOR'EV A I. The mechanism of corona discharge from a raindrop[J]. Journal of Engineering Physics & Thermophysics, 1991, 20(3): 50 – 56.
- [18] HIGASHIYAMA Y, SAITO S. Negative corona discharge from a raindrop under the pulsating DC field [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(3): 499 – 503.
- [19] SUGIMOTO T, ASANO K, HIGASHIYAMA Y. Negative corona discharge at a tip of water cone deformed under DC field [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(1): 25 – 38.
- [20] LI Q, ROWLAND S M. Wet conductor surfaces and the onset of corona discharges [C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). October 18 – 21, 2015, Ann Arbor, MI, USA. New York: IEEE, 2015: 245 – 248.
- [21] LI Q, ROWLAND S M. The vibration characteristics of rain droplet on the surface of the overhead line conductors [C]//2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 04 – 06 November, 2018, Beijing, China. New York: IEEE, 2018: 633 – 636.
- [22] LI Q, ROWLAND S M, DUPERE I, et al. The impact of raindrop vibration on corona inception on conductors under 50 Hz AC fields [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 5(33): 2428 – 2436.
- [23] 刘洋. 不同类型电场下原油乳化液中液滴运动行为与聚结机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [24] 任博平. 双向脉冲电场中水包油乳液的破乳研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [25] 吕金壮, 廖毅, 石延辉, 等. 数字孪生技术在特高压直流系统中的应用实践[J/OL]. 南方电网技术: 1 – 10 [2024 – 07 – 02]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20231205004>.
- LÜ Jinzhuang, LIAO Yi, SHI Yanhui, et al. Application of digital twin technology in the ultra-high voltage DC system [J/OL]. Southern Power System Technology: 1 – 10 [2024 – 07 – 02]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20231205004>.
- [26] 李丽, 孟维, 李奇, 等. 直流电力设备表面电致水滴变形现象的数值模拟方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 5839 – 5845.
- LI Li, MENG Wei, LI Qi, et al. Numerical simulation method for surface electroinduced raindrop deformation in DC power equipment [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (14): 5839 – 5845.
- [27] 郑中原, 刘桂华, 姜玲, 等. 采用周期边界条件计算高压交流输电线路附近的空间电场[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 58 – 63.
- ZHENG Zhongyuan, LIU Guihua, JIANG Ling, et al. Calculation of spatial electric field near high-voltage AC transmission lines using periodic boundary conditions [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (1): 58 – 63.
- [28] 敖刚, 朱倩钰, 周引炫, 等. 交直流电场传感器的性能影响分析与优化设计[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 230 – 236.
- AO Gang, ZHU Qianyu, ZHOU Yinxuan, et al. Performance influence analysis and optimization design of AC/DC electric field sensor. [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61 (2): 230 – 236.
- [29] 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.

收稿日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2024-06-30

作者简介:

孟维(1994), 男, 通信作者, 高级工程师, 博士, 研究方向为高电压外绝缘、输电线路电磁环境和气体放电理论, 20161102063 t@alu.cqu.edu.cn;

李奇(1984), 男, 教授, 博士, 研究方向为超特高压输电线路电磁环境影响与防护、人工智能、机器学习在电网规划、电力系统运行和智能化检修中的应用, qi.li@cqu.edu.cn;

李丽(1971), 女, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电网电磁环境、电网环保。