

多物理场耦合仿真下声波对直流电弧的影响

罗逢时^{1,2,3}, 童昕^{1,2,3}, 杨长洲⁴, 李元冬^{1,2,3}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

3. 福建省数控装备产业技术创新研究院, 福建 福州 350118;

4. 北京星网锐捷网络技术有限公司, 北京 100036)

摘要: 断路器等开关设备是当前直流输电领域的研究重点与难点, 开关电弧是影响断路器等设备性能的重要因素。基于磁流体动力学(MHD)理论, 建立了声场影响下的直流电弧仿真模型。通过多物理场的耦合仿真, 研究了在声场影响下各物理场与直流电弧的特性及相关性, 通过实验对仿真结果进行检验。

关键词: 直流电弧; 磁流体动力学模型; 多物理场仿真; 仿真分析; 声场

中图分类号: TM501.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0277-07

Influence of acoustic wave on DC arc under multi-physical coupling simulation

LUO Fengshi^{1,2,3}, TONG Xin^{1,2,3}, YANG Changzhou⁴, LI Yuandong^{1,2,3}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Fujian Numerical Control Equipment Industry Technology Innovation Research Institute, Fuzhou 350118, China;

4. Star-net Ruijie Communication Company, Beijing 100036, China)

Abstract: Switching equipment such as circuit breakers constitutes the focus and difficulty of current research in the field of DC power transmission and distribution. Switching arc is an important factor affecting the performance of equipment such as circuit breakers. Based on the theory of magnetohydrodynamics (MHD), a simulation model of DC arc under the influence of sound field was established. Through the coupling simulation of multiple physical fields, the characteristics and correlation between each physical field and the DC arc under the influence of the sound field were studied, and the simulation results were verified by experiments.

Keywords: DC arc; magnetohydrodynamic model; multi-physical simulation; simulation analysis; sound field

近年来,随着大电网建设以及电力系统柔性直流输电技术的发展,直流配电技术也广受关注。国内外学者开展了诸多相关研究,如电网理论研究、设备开发研制、建设试点工程等^[1-2]。在直流开断的过程中,电弧作为一种非均匀、不稳定的物理现象,对电力系统稳定运行具有一定负面影响。如何提高直流开关设备的灭弧性能是直流输配电

领域的研究重点与难点,研究不同条件下直流电弧的特性及相关性具有重要意义^[3-4]。

由于计算机技术的发展,基于磁流体动力学(MHD)理论模拟开断过程已经成为了电弧特性研究的重要手段。文献[5]建立电弧的二维模型,通过在仿真中添加不同磁场,分析不同磁场作用下电弧燃烧的情况。文献[6]对直流电弧运动

过程中重击穿现象及机理进行了研究。文献[7]通过建立高压直流继电器电弧等离子体的三维数学模型,对不同磁场、气态金属浓度、绝缘栅片等条件下的电弧进行了计算。

由于电弧的产生与熄灭原理复杂,不同类型的电弧还具有不同的特征,导致对其仿真需要通过多物理场耦合。本研究将声场引入电弧仿真模型中,分析在声场影响下各物理场与直流电弧的特性及相关性,为直流电弧特性的研究和相关灭弧措施的改进提供了新思路,对于提高相关设备灭弧性能具有一定意义。

1 仿真模型

1.1 几何模型

由于电弧仿真涉及的物理场较多,仿真计算量大,为了减少计算量与复杂度,本研究采用简化后的电弧二维仿真模型,如图 1 所示,其中静触头为阴极,动触头为阳极,计算域其余部分为空气域。动静触头之间设置一个初始间隙,动触头向下移动。

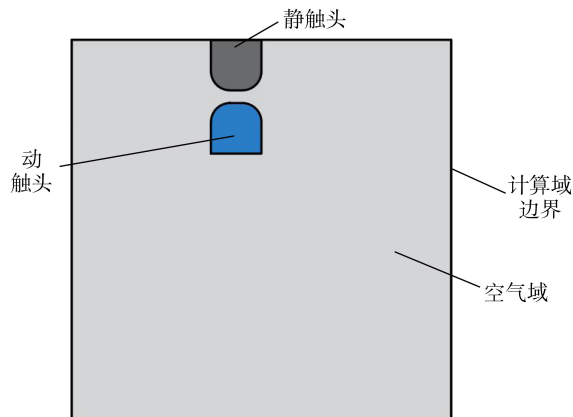


图 1 简化后的二维几何模型

Fig.1 Simplified two-dimensional geometric model

1.2 假设条件

等离子体电弧的产生是一个非常复杂的物理现象,本研究基于磁流体动力学(MHD)进行了一些假设,以便提高仿真过程中的收敛性、降低仿真的计算量^[8-9]:

- (1)从宏观角度对电弧等离子体进行模拟仿真,不直接求解等离子体的电子数密度;
- (2)假设电弧为平衡放电,满足局部热力学平衡;
- (3)电弧等离子为层流且为不可压缩气体(即密度仅受温度影响);

(4)模型仿真从稳定燃弧开始,不考虑击穿起弧的初始过程;

(5)不考虑电弧对触头的烧蚀作用、金属蒸汽的影响及电弧鞘层对传热、流场的影响。

1.3 控制方程

基于 1.2 的假设条件,由磁流体动力学建立电弧等离子体仿真模型。通过 Navier-Stokes 方程,实现质量守恒、动量守恒、能量守恒^[7,9-11]。

(1)质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为流体的密度, \mathbf{u} 为流体的速度矢量, t 为时间。

(2)动量守恒方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (3)$$

式中, μ 为等离子体的黏度系数; p 为流体的压强; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{j} 为电流密度, \mathbf{B} 为磁感应强度, $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 为电弧等离子体在磁场影响下产生的洛伦茨力。

(3)能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla H \right) + S_R \quad (4)$$

$$S_R = \sigma E^2 - S_{\text{rad}} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{k_B T}{2q} \left(\frac{k}{C_p} + 5 \right) \right) (\nabla T \cdot \mathbf{j}) \quad (5)$$

式中, H 为热焓; λ 为导热系数; σ 为电导率; $(1/\sigma)j^2$ 为电流经过等离子体产生的焦耳热; S_R 为总体积热辐射; C_p 为恒压热容; T 为流体的温度; σE^2 为电流通过电弧等离子体产生的焦耳热; S_{rad} 为总体积辐射; k_B 为玻尔兹曼常数; q 为电子电荷。

(4)电磁场方程

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad \frac{\partial A}{\partial t} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (7)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (9)$$

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \mathbf{j} \quad (10)$$

式中, φ 为电位; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{A} 为磁矢势; σ 为电导率。

(5)声学波动方程

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = Q \quad (11)$$

式中, ρ 为流体的密度; c 为介质中的声速; p 为流体压强; q_d 为偶极源, Q 为单极源。

1.4 边界条件

(1)流体传热边界条件:计算域动静触头(电极)为固体,空气设置为流体,温度初始值为 293.15 K;计算域边缘设置为热绝缘,热源为电流产生的焦耳热。

(2)电流边界条件:添加一个回路分别为 2 000 V电压源、20 Ω 负载电阻并将两触头接入,计算域外边界为电绝缘。

(3)声学边界条件:动静触头边缘设置为软声场边界,不考虑反射。计算域左侧边缘施加正弦波动边界压力,模拟声场影响下的空气震荡作为声源,其他边缘设置为硬声场边界。

(4)层流/流体边界条件:计算域左右两侧设置为开放边界,不额外施加压力;设置一个体积力,值为声场压力梯度,作为声场与流场的耦合。

(5)磁场边界条件:计算域外边界设置为电绝缘。

(6)动网格边界条件:对动触头网格施加 250 mm/s的速度向下平移,静触头网格固定,其他网格自由拉伸。

1.5 网格的划分

仿真模型使用三角形网格,如图 2 所示。其中,触头间隙温度、空气流速梯度最大,网格最密。动触头运动范围与触头间隙两侧也进行了加密,在其他范围内进行了粗化。动触头拉伸过程中网格会发生拉伸形变,故需要通过缩放对部分网格进行预处理,以避免网格畸变导致仿真不收敛。

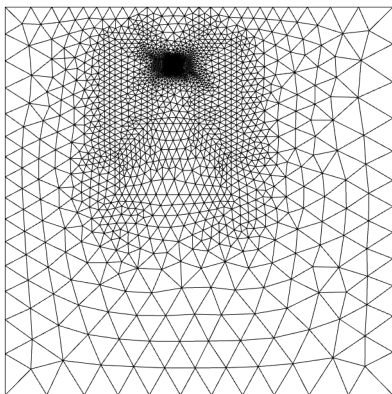


图 2 计算域的网格划分

考虑到声波的特性,网格过粗会导致计算失真,故计算域内网格最大单元大小应小于声波波

长的 1/5~1/6。

2 仿真结果与分析

本研究使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件。在仿真模型中,为简化起弧过程,动静触头初始间隙为 2 mm。动触头以 250 mm/s 的速度向下平移,静触头固定。电路电压为 2 000 V,电路负载电阻为 20 Ω 。声场的波形为正弦波,施加在计算域左侧。

2.1 不同声场声压强度下的电弧仿真结果

2.1.1 有声场影响下电流电压波形的对比

动触头以 250 mm/s 的速度向下平移,静触头固定。在无声场影响下,随着两触头间隙的增大,两触头间电压也会随之增大,电路电流会随之减小。而在声场影响下,两触头间电压、电路电流相比无声场条件下,会产生一个周期性的波动。

如图 3 所示,电流电压的波动具有同步性,电压升高时电流下降,电压下降时电流升高。电压、电流周期性升高、降低的过程中,始终会在某一段时间回归至无声场影响下的水平。

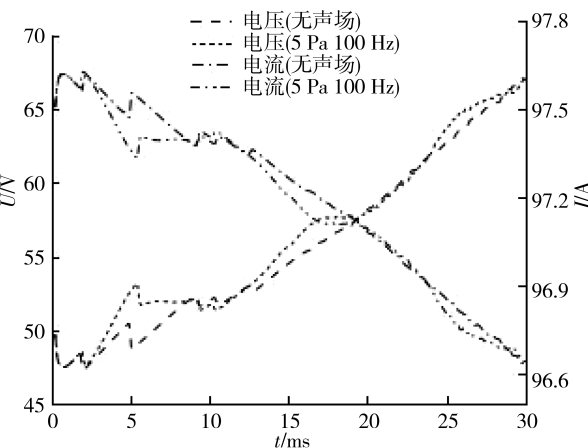


图 3 无声场与 5 Pa 100 Hz 声场下两触头间电压、电流波形图

Fig.3 Waveform diagram of voltage and current between two contacts in silent field and 5 Pa 100 Hz sound field

2.1.2 不同声场声压强度下的电压、电流波形

在声波频率为 100 Hz 的声场条件下,声场声压强度越高,电压、电流波形的波动幅度越大,波动的周期与声波频率周期相吻合。当声场声压强度大于 5 Pa 时,电压、电流波形的波动幅度更为明显,且波形波动幅度有下降的趋势,如图 4、5 所示。

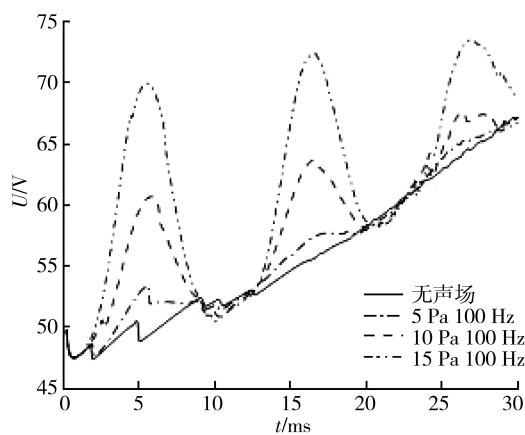


图 4 不同声场声压强度下的电压波形
Fig.4 Voltage waveforms under different sound field and sound pressure intensities

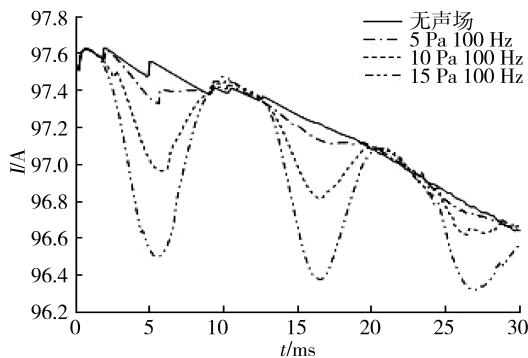


图 5 不同声场声压强度下的电流波形
Fig.5 Current waveforms under different sound field and sound pressure intensities

2.1.3 不同声场声压强度下的温度场变化

无声场、声压强度 2 Pa 声波频率 50 Hz 的声场与声压强度 5 Pa 声波频率 50 Hz 的声场的温度场变化如图 6 所示,时间分别为 0.2、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0 ms。电弧中心区域温度在 9 000~10 000 K,弧柱根部靠近触头的区域最高温度在 14 000~16 000 K,声场对弧柱温度无显著影响。与交流电弧等离子体弧柱温度相比,本研究的直流电弧由于没有过零点,电弧温度没有产生由电流造成的周期性的波动^[5]。

无声场影响时,电弧等离子弧柱被“笔直拉伸”,不会产生明显的偏转。当声波频率为 50 Hz,在一个周期(20 ms)内,电弧等离子体弧柱发生了明显的偏转,声场声压强度越高电弧等离子体弧柱的偏转越明显。

当声场声压强度为 5 Pa 时,电弧等离子体弧柱的偏转较为明显,偏转幅度较大时电弧等离子

体弧柱中段有扩散迹象。在 10 ms 与 30 ms 时电弧 x 轴方向偏转达到声波频率周期内最大,但偏转位移量相近。

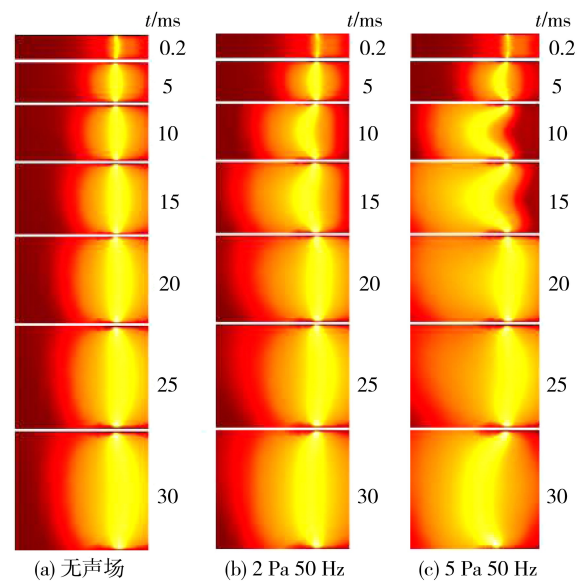


图 6 无声场、2 Pa 50 Hz 声场与 5 Pa 50 Hz 声场下的温度场变化
Fig.6 Temperature field changes in silent field, 2 Pa 50 Hz and 5 Pa 50 Hz sound fields

2.1.4 不同声场声压强度下的流场变化

声压强度 5 Pa 频率 100 Hz 声场下的触头间隙最大流速变化,触头间隙区域空气最大流速呈周期性波动。触头间隙区域空气最大流速波动的谷底接近无声场时的最大流速,即声场影响下两触头间隙区域空气最大流速周期性波动,且波动幅度呈下降趋势,如图 7 所示。

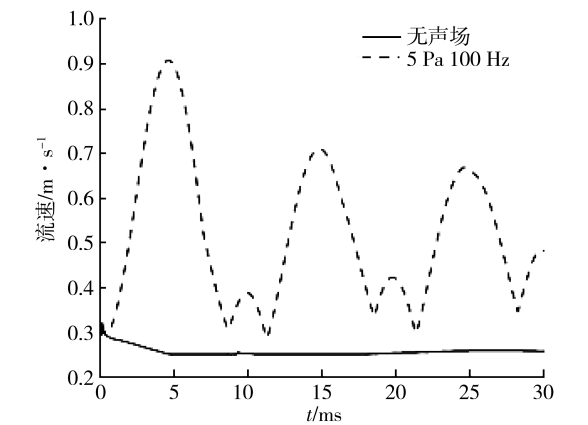


图 7 声场为 5 Pa、100 Hz 时的触头间隙最大流速变化
Fig.7 Maximum flow velocity change in the contact gap when the sound field is 5 Pa and 100 Hz

而在声场影响下,触头间隙中间一点空气 x

分量流速也呈周期性波动,两触头间隙空气产生周期性振荡,如图 8 所示。在声波频率为 100 Hz 的声场条件下,声场声压强度越高触头间隙中点 x 分量流速波形幅值越大。即随着声场声压强度的提高,两触头间隙空气的振荡幅度相应增大。

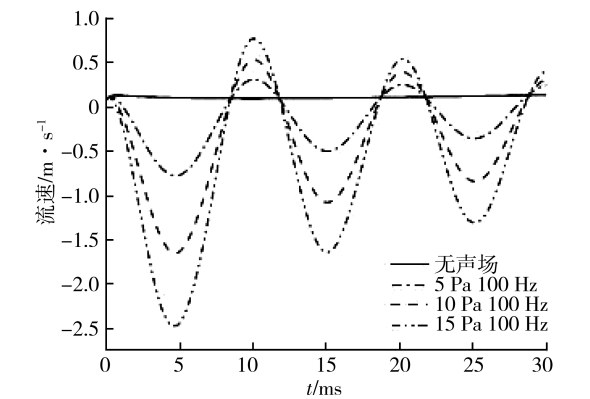


图 8 不同声场声压强度下的触头间隙中点 x 分量流速变化

Fig.8 Changes of x -component flow velocity at the middle point of the contact gap under different sound field and sound pressure intensities

观察电弧拉伸过程中的流场变化,可以得出电弧拉伸过程中,随着两触头间距的增加,间隙内声波震荡产生的空气流速也随之下降。

2.2 不同声场频率下的电弧仿真结果

2.2.1 不同声场频率下的电压、电流波形

在 5 Pa 的声场声压强度下,声场频率越高电压、电流波形的波动幅值越小。当声场频率在 100 Hz 或以下时,电压波形的波动较为明显,如图 9、10 所示。

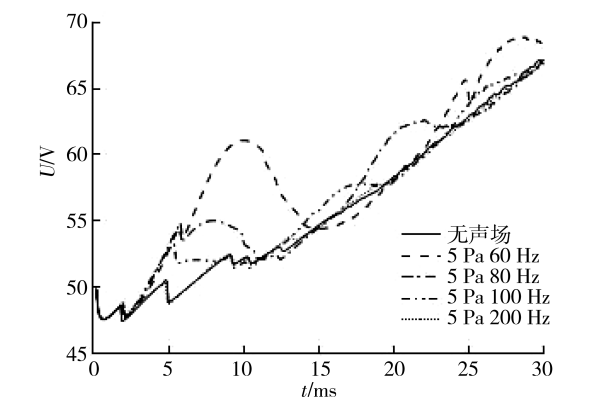


图 9 不同声场频率下的电压波形

Fig.9 Voltage waveforms at different sound field frequencies

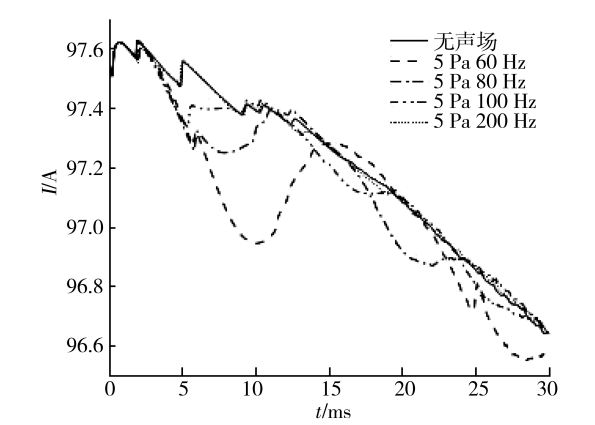


图 10 不同声场频率下的电流波形

Fig.10 Current waveforms at different sound field frequencies

2.2.2 不同声场频率下的温度场变化

无声场、声压强度 5 Pa 频率 50 Hz 的声场、声压强度 5 Pa 频率 100 Hz 的声场下的温度场变化如图 11 所示,声场频率越低电弧等离子体弧柱的偏转拉伸越明显。当声场频率在 100 Hz 及以下时,电弧等离子体弧柱的偏转拉伸较为明显。

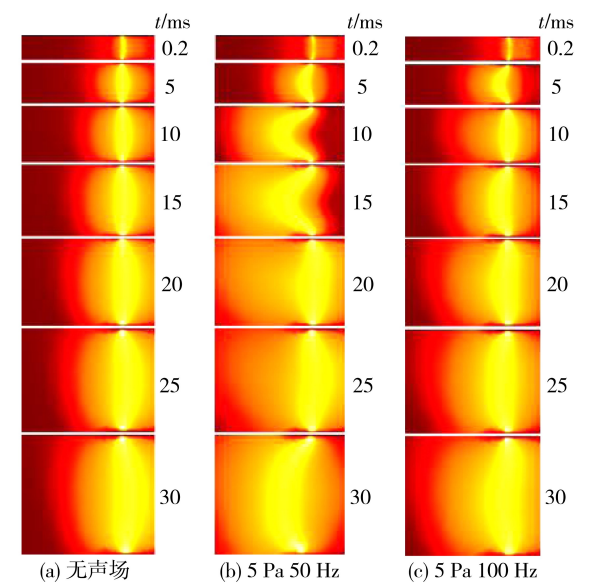


图 11 无声场、5 Pa 50 Hz 声场与 5 Pa 100 Hz 声场下的温度场变化

Fig.11 Changes in temperature field in silent field, 5 Pa 50 Hz sound field, and 5 Pa 100 Hz sound field

2.2.3 不同声场频率下的流场分布

如图 12 所示,不同声场频率下的触头间隙中点 x 分量流速变化,声场频率越高触头间隙空气的 x 分量流速越小,即随着声波频率的提高计算与空气的振荡幅度也越小。

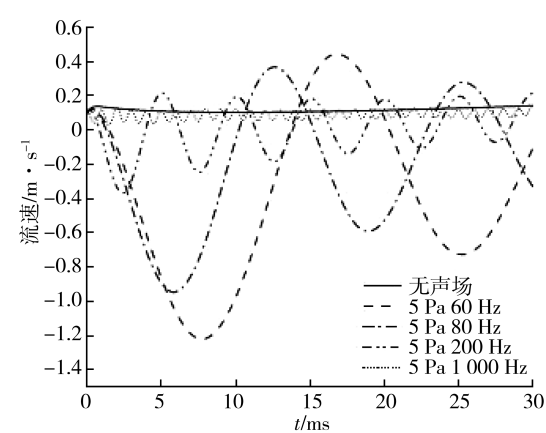


图 12 不同声场频率下的触头间隙中点 x 分量流速变化
Fig.12 Changes of x -component flow velocity at the middle point of the contact gap under different sound field frequencies

3 实验验证与分析

3.1 实验设备与环境

本研究使用声波电弧测试系统,对声波影响下的电弧弧柱形态进行了观察。声波电弧测试系统由升压驱动电路、电路供电控制装置、触头控制机构、声波发生装置、控制计算机、高速摄影机组成的图像采集设备等组成,如图 13 所示。

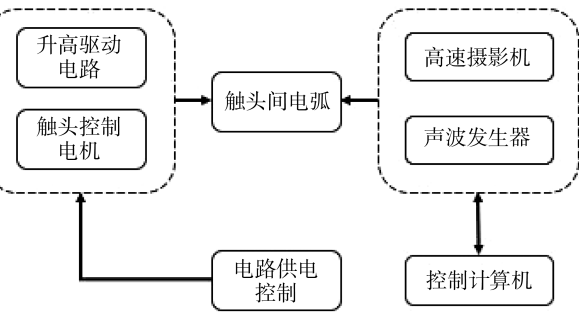


图 13 声波电弧实验台示意图
Fig.13 Schematic diagram of the sonic arc test bench

电弧发生装置由直流电源、升压电路板、脉冲直流高压包组装而成,试验过程中参数不做调整。声波发生装置可调节的参数为声波的波形、幅值/声压强度与频率,试验过程中使用正弦波形,通过声级计对声波强度进行测量与标定。

触头控制机构中,静触头为钢制圆球接钢制圆柱,圆球直径大于圆柱,以避免电场不均匀带来的干扰。动触头为圆头钢柱,通过低速电机控制与静触头的间隙距离。在引弧装置通电燃弧后,通过触头控制机构调节两触头距

离至 54 mm。在此距离下启动声波发生装置,并通过高速摄影机拍摄电弧形态。其中,高速摄影机拍摄速度为10 000 Hz,曝光时间为 100 μ s。

3.2 声波影响下电弧运动图

无声场和声场声压强度 110 dB 频率 100 Hz 下,一个周期即 10 ms 内电弧振荡过程的图像分别如图 14(a)(b)所示。

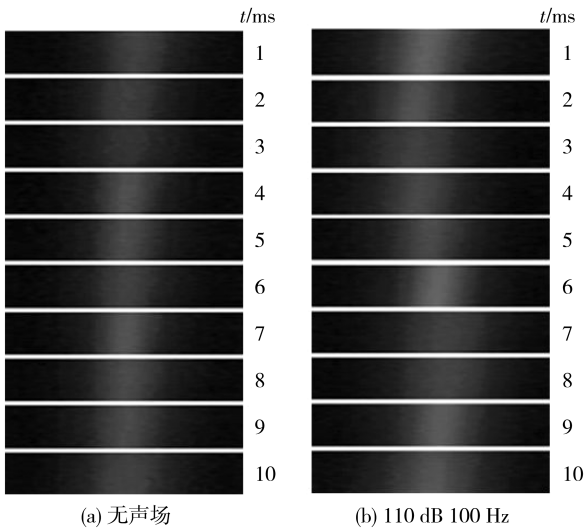


图 14 无声场与 110 dB 100 Hz 声场下电弧运动图像
Fig.14 Arc motion images in silent field and 110 dB 100 Hz sound field

如图 14 所示,在声场影响下电弧从相对稳定的状态开始明显的周期性振荡,电弧振荡周期与声波周期相对应。但声场声压强度 110 dB 频率 100 Hz 的声波下电弧振荡幅度约为 1 mm 左右,小于高速摄影机拍摄下电弧直径,远小于电弧长度。

不同频率声波下电弧振荡幅度对比并不直观,但总体观察结果为,随着声波频率的增大,电弧振荡幅度随之减少。当声波频率提升至 1 000 Hz时,电弧弧柱振荡幅度几乎不可见。主要是因为不同频率的声波波长不同,声波的频率越高波长越小,电弧弧柱受声波影响震荡幅度也越小。

4 结论

本研究基于磁流体动力学的多物理场耦合仿真研究了声波对直流电弧的影响,并通过实验验证了仿真的结果,主要结论如下:

1)根据温度场、流场的分布,可以判断在声场影响下触头间隙空气产生振荡,带动了触头间电弧等离子体弧柱的周期性拉伸,在弧柱偏转拉伸幅度较大时弧柱中段会有扩散的迹象。由于仿真模型模拟回路中施加了恒定的电压源,电弧等离子体弧柱被拉伸后电压电流波形产生了周期性波动。但与交流电弧相比,电弧等离子体弧柱的温度并不会产生明显的波动。

2)随着声波频率的降低,触头间隙空气流速较为明显提升。在频率 100 Hz 以下的声波影响下,电弧等离子体弧柱的周期性偏转拉伸较为显著。

3)随着声波声压强度的提高,触头间隙空气流速明显提升。在声压强度 5 Pa 以上的声波影响下,电弧等离子体弧柱的周期性偏转拉伸较为显著。

4)电弧等离子体弧柱在声场影响下产生偏转拉伸,可以实现在触头位移距离相同的条件下产生更长的电弧弧柱,弧柱两端的电压会提升且

在弧柱中段产生扩散现象。

5)随着两触头间隙的增大,声波影响下空气震荡流速会随之减小。从电流电压波形图中也可以观察到,波形的波动幅度随时间(即两触头间距增大)呈下降趋势。

6)通过电弧实验验证了电弧弧柱在声波影响下会产生偏转的现象。

直流电弧模拟是一个多物理综合作用下的过程,影响电弧燃弧的因素较多。如何构建出与实际情况更接近的模型仍需要继续研究,其结果也需要通过大量实验来验证。本研究将声场影响引入电弧仿真中,可以为直流开关设备的研究提供参考,对相关设备灭弧性能的改进具有一定意义。但由于电弧燃弧机理的复杂性,影响电弧形态的干扰因素较多以及当前实验设备的局限性,难免有所不足。今后需要对仿真模型进行进一步优化并改进实验设备,以提高验证实验的可靠性,进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 2021 年全国电力工业统计数据发布[N]. 国家电网报,2022-01-27(1).
- [2] 张思豪. 中国特高压的发展状况及前景[J]. 安徽科技,2021(8):42-45.
- [3] 王天霖,高崇,张俊潇,等. 直流配电网规划技术的新需求及其在一次规划的体现[J]. 电力建设,2020,41(9):102-114.
- [4] 宋述波,周登波,彭为,等. 高压直流断路器对比及应用前景分析[J]. 广东电力,2021,34(12):38-47.
- [5] 张建钢,姜志伟,吴建高. 高压直流继电器横向磁场对电弧燃烧特性的影响[J]. 机电设备,2022,39(5):9-12.
- [6] 翟国富,薄凯,李庆楠,等. 直流电弧运动过程中重击穿现象及机理研究[J]. 电工技术学报,2016,31(11):105-113.
- [7] 曹启纯,刘向军. 高压直流继电器电弧运动仿真分析与实验研究[J]. 电工技术学报,2019,34(22):4699-4707.
- [8] 史岩,陈平,田浩,等. 基于 Comsol Multiphysics 的新型高压直流继电器电弧仿真分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(1):90-97.
- [9] 付光晶,张峰,张士文. 基于 COMSOL Multiphysics 的交流故障电弧仿真研究[J]. 电器与能效管理技术,2018(6):23-29.
- [10] 邓晚军. 航空直流断路器分断电弧的仿真分析[D]. 天津:河北工业大学,2015.
- [11] 刘凯. 大功率直流接触器电弧仿真及实验研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.

(责任编辑:方素华)