

基于分形理论的尖-板电极短空气隙放电现象

郑殿春 丁宁 沈湘东 赵大伟 郑秋平 魏红庆

Discharge phenomena of short-air-gap in needle-plate electrode based on fractal theory

Zheng Dian-Chun Ding Ning Shen Xiang-Dong Zhao Da-Wei Zheng Qiu-Ping Wei Hong-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

间歇湍流的分数阶动力学

Fractional derivative dynamics of intermittent turbulence

物理学报.2014, 63(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074701>

随机粗糙微通道内流动特性研究

Investigation on characteristics of flow in microchannels with random surface roughness

物理学报.2013, 62(17): 174701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174701>

正极性纳秒脉冲电压下变压器油中流注放电仿真研究

Simulational study on streamer discharge in transformer oil under positive nanosecond pulse voltage

物理学报.2013, 62(12): 124703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124703>

涡旋轴对称化的分形维数表征

Vortex axial-symmetrization characterized by fractal dimension

物理学报.2012, 61(24): 244702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.244702>

基于分形理论的尖-板电极短空气隙放电现象*

郑殿春¹⁾ 丁宁¹⁾ 沈湘东¹⁾ 赵大伟^{1)†} 郑秋平²⁾ 魏红庆¹⁾

1) (哈尔滨理工大学, 工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (机械工业仪器仪表综合技术经济研究所, 北京 100055)

(2015年5月27日收到; 2015年7月16日收到修改稿)

气体放电的发展过程非常复杂, 实验观测结果表明非均匀场短空气隙放电过程中经常产生随机并伴有分岔现象的放电通道. 由于这些放电现象的整体结构表现出一定的自相似性, 因此, 结合经典流注放电与分形理论而建立的介质击穿模型成为描述气体中放电通道分岔现象的一种有效的分析方法, 而放电通道的复杂程度可以用分形维数表征. 为了明确此模型参数中发展概率指数的取值, 本文对直流高压作用下的10 mm针板电极空气隙放电通道图像进行了分析、处理和分形计算, 并与理论模型的仿真结果对比. 由于空气隙主放电通道的亮度明显高于其他弱分支, 导致各放电通道的宽度各异, 需要对所拍摄图像进行灰度变换和边界识别处理, 最后运用计盒维数法计算出分形维数. 研究表明, 在其他参数与实验条件相同的情况下, 调整理论模型中的发展概率指数, 使得仿真结果与实验结果相吻合, 依据本文实验条件下和理论模型分析, 发展概率指数 η 在0.04—0.05范围. 本文的研究印证了尖-板电极短空气隙放电复杂现象的可测性并提供了一种分析方法.

关键词: 分形维数, 图像处理, 概率指数, 分岔

PACS: 47.53.+n, 47.50.Cd, 47.20.Ky, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.65.024703

1 引言

客观自然界中许多事物与现象, 常常表现出部分与整体以某种方式相似, 即自相似性. 分形学作为对这种分形结构的研究在自然科学领域中已有广泛应用. 如重分形的方法应用到对表面形貌的分析中, 发现多重分形谱可以全面反映表面概率的分布特征^[1]; 分形维数作为分形定量表征和基本参数, 可用于闪电的智能分析与自动化处理^[2]. 根据分形理论, 使用电介质击穿模型模拟符合自然界雷电物理机理和几何特征的雷电先导分形发展过程, 得到飞机的雷击附着点分布^[3]. 气体放电过程中涵盖了如多稳、自振荡、分岔、混沌等大量典型的非线性现象, 所以除了Townsend理论、流注放电理论之外, 运用非线性科学中的分形方法构建描述气体放电规律的模型, 通过实验研究和数学分析来描述气体放电过程整体形貌、揭示气体的放电规律, 已成

为气体放电领域中具有重要意义的研究内容^[4].

强电场作用下, 电介质的放电轨迹演化呈曲折分支状, 具有一定的随机性和自相似性, 这是已经被实验印证的客观事实. 自Niemeyer, Pietronero和Wiesmann于1984年建立了分形电介质击穿(即NPW)模型之后, 开启了基于非线性理论的电介质放电规律探索先例^[5]. 1986年, 考虑到不同电介质放电发展过程中存在临界起始场强以及放电通道的电压降等影响因素, Wiesmann和Zeller在NPW模型基础上建立了WZ模型^[6]. 1995年, Noskov, Kukhta和Lopatin提出了不均匀电介质体系的放电轨迹生长(NKL)模型, 该模型考虑了空间电荷、电介质本征特性(相对介电常数、电导率)及界面效应等对放电轨迹的影响^[7]. 1999年, Veldhuizen等采用ICCD高速照相机采集了25 mm空气间隙下的电晕图像, 由此观察并获得了放电通道轨迹分岔现象以及外施电压的影响^[8]. 2001年, Kuperstokh等通过建立基于细胞自动机的放电数值模

* 国家自然科学基金(批准号: 51077032)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dawei8415@126.com

型, 对空气间隙击穿现象进行了数值模拟, 并得到了不同条件下的放电图像^[9]. 2005年, Hallac等应用有限元-通量校正传输法(FE-FCT)分析针-板电极空气间隙放电通道随时间的发展过程, 并指出光致电离是放电通道轨迹发展演化分岔现象的主要影响因素^[10]. 2011年, Xiong等通过实验观察大气压下氩气放电过程羽毛状分岔现象, 指出放电过程中总是先出现单一的流注, 继而才会在周围出现侧向分支, 并汇入主流注^[11]. 2012年, Luque等通过对网格的自适应加密来降低流注放电的计算量^[12]. 2014年, Dulan等使用了三种维数的计算方法对所拍摄的放电通道进行了分析^[13].

国内学者运用分形理论对电介质放电通道轨迹的研究相对较晚^[14,15], 但发展极其迅速, 其多数是研究气体放电单流注过程或长空气间隙放电发展历程^[16,17], 缺乏对短空气间隙放电通道轨迹分岔现象的理论研究以及实验佐证, 此外在对模型中的重要参数取值时, 阈值场强与电荷密度均是由实验方法获得的^[18-20], 但发展概率指数的取值较为模糊. 因此本文作者根据科研项目的内容, 构建针-板短空气隙模型并配置了以ICCD高速图像采集器为核心的实验线路, 采集记录了其放电通道轨迹演化分岔图像, 由此计算出分形维数, 并运用理论模型得到的仿真结果与实验比对确定出模型中发展概率指数的取值.

2 尖-板电极短空气隙放电实验

2.1 实验装置与信息采集

如图1所示, 实验装置主要由放电装置、增强型电荷耦合器件(ICCD)和配有WinSpec/32软件的计算机三部分构成.

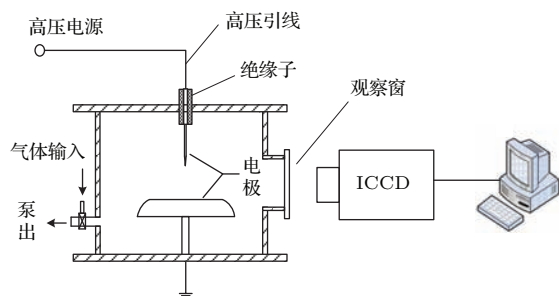


图1 图像信号采集线路示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

采用密封压力容器内的针-平板电极短间隙进行放电实验, 容器内充满空气, 间隙距离在整个实

验中均保持 $D = 10$ mm, 针长 10 mm, 平板电极半径为 20 mm. 压力容器内气体压强为标准大气压, 温度 $T = 300$ K, 针电极施加直流电压 $U = 9.2$ kV, 平板电极接地.

实验中, 采用了适合微光下工作的普林斯顿仪器(PI)公司生产的PI-MAX型ICCD器件对实验放电现象进行了拍摄, 其为 1024×256 的面阵, 最快曝光时间为 2 ns, 具有低噪声和高灵敏度等优良性能. PI-MAX主要由ICCD和ST-133控制器构成. 作为ICCD的控制器件, ST-133控制器主要负责为ICCD提供电源, 以及扫描控制、曝光时间控制和I/O口连接等. 在操作上, ICCD曝光采集一个输入信号时, 这个信号集合在阵列上. 曝光结束后, 电荷从阵列像素被读出并数字化, 然后传送到计算上进行数据的处理和显示. 计算机通过普林斯顿仪器的WinSpec/32软件控制模式和数据采集.

2.2 分形表征与图像处理

在研究气体电介质的击穿现象时, 一般是通过分析不同条件下整个放电通道分形维数的变化来对放电规律进行研究总结, 它是衡量放电通道曲直和分支密集程度的一个重要参数. 分形维数有多种计算方法, 由于计盒维数法(box counting dimension)适用性强且便于计算^[21], 所以本文采用该方法进行分形维数计算.

设集合 F 是由放电通道内的点构成的, 若 $|U_i|$ 为有限个直径不超过 δ 的集构成的覆盖 F 的集类, 即 $F \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} U_i$, 且对每一个 i 都有 $0 < |U_i| \leq \delta$. 则用 δ 集覆盖 F 所需的最少 U_i 的个数 $M_\delta(F)$ 可写为

$$M_\delta(F) = M_0 \delta^{-D}, \quad (1)$$

则分形维数表示为

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln M_\delta(F)}{-\ln \delta}. \quad (2)$$

采用二维小方格作为二维电介质分形模型中 δ 集的形状, 则上式可表示为

$$D = \frac{\ln M_L(F)}{\ln L}, \quad (3)$$

(3)式中, L 代表二维小方格的边长, $M_L(F)$ 代表覆盖整个放电通道所需的小方格个数. 通过逐渐增大 L , 分别计算出相应的 $M_L(F)$ 的值, 就可以得到一组 $(\ln L, M_L(F))$ 的数据, 对这组数据进行线性拟合, 直线部分斜率的绝对值即为所求的分形维数 D .

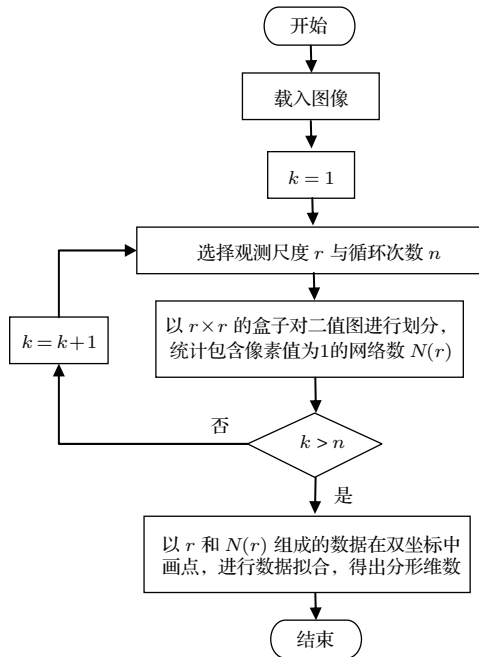


图2 计盒维数计算流程图

Fig. 2. Calculation flow chart of box-counting dimension.

为了利用计算机对图像进行处理, 计算分形维数, 需要对其进行二值化处理. 由于实验拍摄的图像其二值图可以使用一亮一暗两个灰度值恰好能对放电通道的轮廓进行很好的描述, 可以有质量地保证其几何特征不变形不失真. 但是, 图像二值化, 实际上是从一个多灰度级的图像经变换成为只有二个灰度级的图像过程. 从多灰度, 即多种程度的明暗变化, 到只有两个灰度, 其中的信息损失程度可能很大. 于是在压缩信息的同时, 必须保留原来多灰度级图像的主要特征. 对本实验所拍摄到的放

电图像而言, 不同树枝中的电流强度不同(主放电通道的亮度明显高于其他弱分支), 导致各放电通道的宽度各异, 将会影响分形维数的计算, 所以需要进行边缘检测. 运用 CANNY 算法进行图像边缘提取有如下优势: 尽量不丢失图像中的真实边缘, 同时虚伪边缘也尽量不产生; 标识出的边缘位置很靠近边缘的中心, 多像素宽的边缘现象得到明显解决; 每一条边缘, 只被标识一次, 即响应一次^[22,23]. 通过选取不同的测度 r 值对二值图进行划分, 统计不同 r 时图形矩阵中包含像素值为1的格子数, 记作 $N(r)$, 从而得到数据组 $(r, N(r))$. 之后在双对数坐标系下绘出数据点并进行线性拟合, 直线斜率的绝对值即为图像的分形维数. 对数字图像的计算流程图如图2所示.

2.3 实验结果

图3为 ICCD 拍摄的针-平板电极结构图像, 电极间隙距离为 10 mm, 针长 10 mm, 平板电极半径为 20 mm.

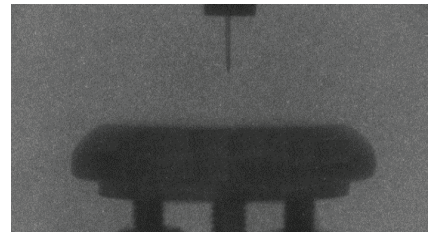


图3 针-平板电极结构

Fig. 3. Picture of electrode structure in experiment.

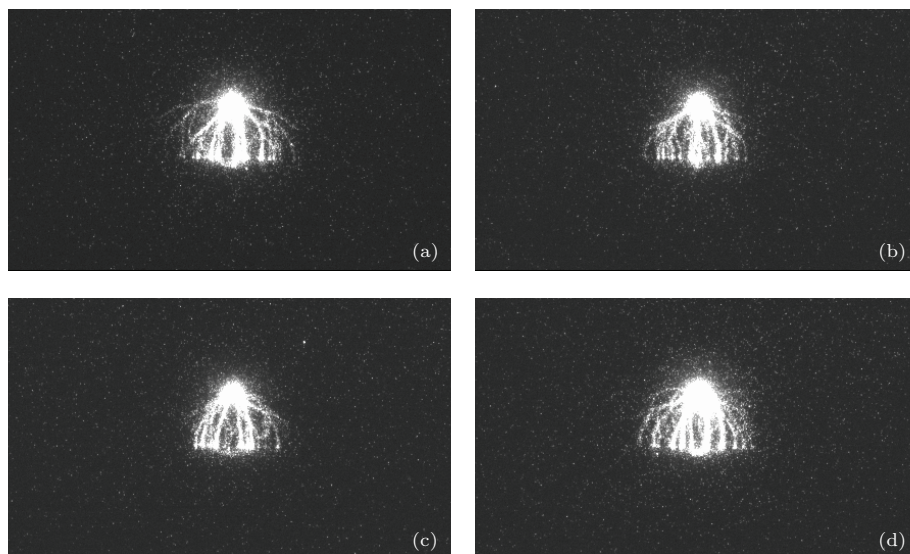


图4 实验拍摄的放电图像

Fig. 4. Discharge images captured in experiment.

图4为针电极施加9.2 kV直流电压, 平板电极接地, 电极间隙距离为10 mm, 由ICCD拍摄得到的空气隙放电图像. 从中可以明显观察到放电通道并不是一条沿轴向直线发展的通道, 而是明亮曲折不规则发展的, 并且有若干分支的丝带状导电

通道. 这种现象形成的主要原因是由于在放电过程中, 二次电子崩受到非均匀场中径向场分量的影响, 发展方向与原来的电子崩路径不一致, 这些二次崩从不同方向汇入流注头部, 从而导致了分支的形成和发展.

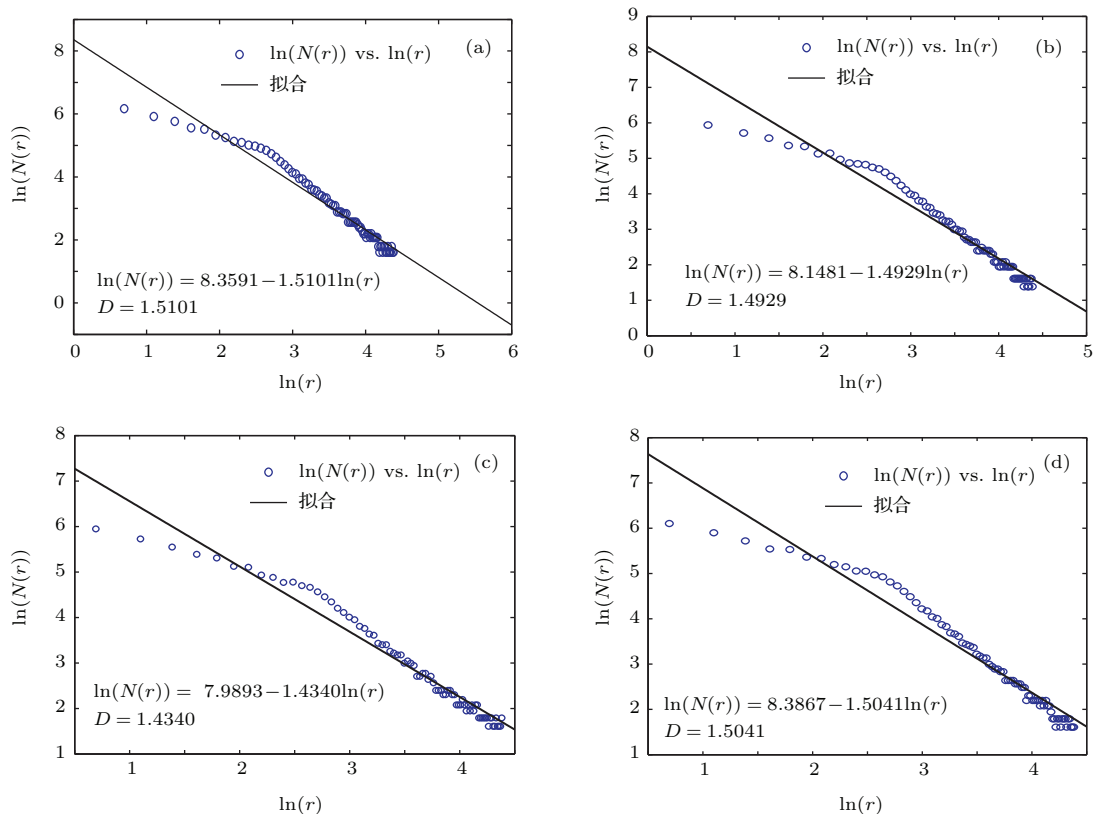


图5 放电图像的计盒维数分布曲线

Fig. 5. Distribution curve of box-counting fractal dimension of discharge image.

采用2.2节所述的数字图像处理方法, 并运用计盒维数法分别计算图4的分形维数得出结果如图5所示, 可得 D 在1.40—1.55范围内, 其值之所以有较大的范围波动是由于拍摄图片中出现噪点较多而导致的, 同时计算过程中存在一定的误差.

3 仿真分析与实验结果对比

3.1 仿真模型

模型中的放电概率与局部电场的幂函数关系式如下^[6]:

$$P = \begin{cases} \frac{|E_{i,j}|^\eta \cdot \text{rand}}{Z}, & |E_{i,j}| > E_c, \\ 0, & |E_{i,j}| \leq E_c, \end{cases} \quad (4)$$

式中, $|E_{i,j}|$ 是可能放电发展点 (i, j) 处的电场强度; E_c 代表放电阈值场强; $Z = \sum |E_{i,j}|^\eta$ 是归一化系数, 其求和包含 (i, j) 点周围所有可能的放电发展方向; rand 为可产生 $(0, 1)$ 之间的均匀分布的随机数函数, 表征了放电过程中随机因素的影响. η 是放电发展的概率指数, 表征了放电发展对电场强度依赖的程度, 随着 η 的增加, $|E_{i,j}|$ 对 P 的贡献差异逐渐加大, 即 P 对局域电场强度的选择性逐渐增强.

由于在本模型中考虑了空间电荷的影响, 采用泊松方程来对空间各点电位分布进行计算采用有限差分法迭代求解, 仿真模型的计算流程如图6所示. 本文着重分析放电通道的分形维数, 以下只对结果中的放电通道模拟图形进行分析.

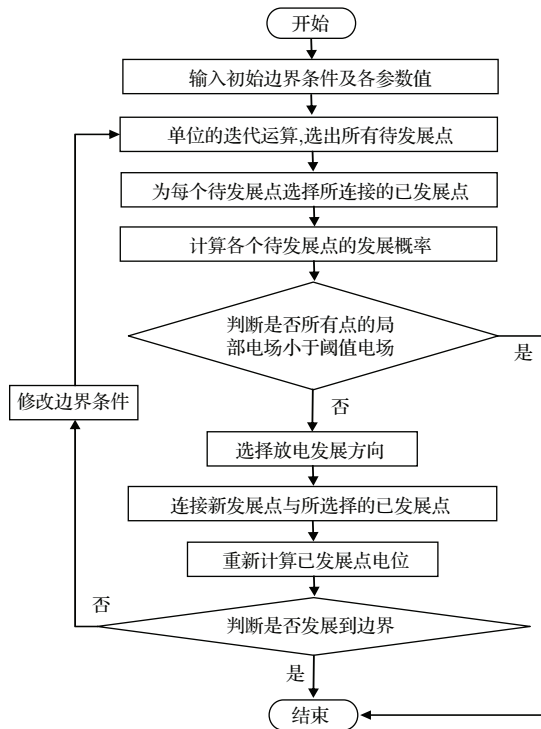


图6 计算流程图

Fig. 6. Calculation flow chart of the simulation model.

3.2 计算结果

选取充满空气的针-平板电极结构短间隙作为

计算对象, 针电极施加直流电压 $U = 9.2$ kV, 平板电极接地. 在模拟过程中, 采用等步长划分法对网格进行划分, 将整个二维空间离散为 200×200 的正方形网格. 设步长为 d , 则 d 应远远小于所求区域的尺寸, 本文中每个网格边长 d 代表距离为 $100 \mu\text{m}$. 针-板间距离 D 为 10 mm, 针电极长度为 10 mm, 针尖角约为 10° , 针杆直径为 0.2 mm, 平板电极半径为 20 mm. 发展概率指数分别 η 取 $0.02, 0.05, 0.1, 0.5$, 得到放电通道的仿真结果如图 7 所示, 采用 2.2 所述的计盒维数法得到的分形维数分别为 $1.549, 1.391, 1.312, 1.205$.

3.3 结果对比

考虑到实验结果与仿真中 η 取 0.1 及以上的分形维数已有较大差别, 所以分别取 η 为 $0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.1$ 进行仿真. 需要指出的是, 由于模型中随机因素的影响, 每一次的放电发展情况均不同. 所以对每种条件下进行 10 次模拟, 分形维数在一定误差范围内的结果如表 1 所列, 可以看出当 η 取值在 0.02 — 0.04 范围内时仿真与实验结果基本相符.

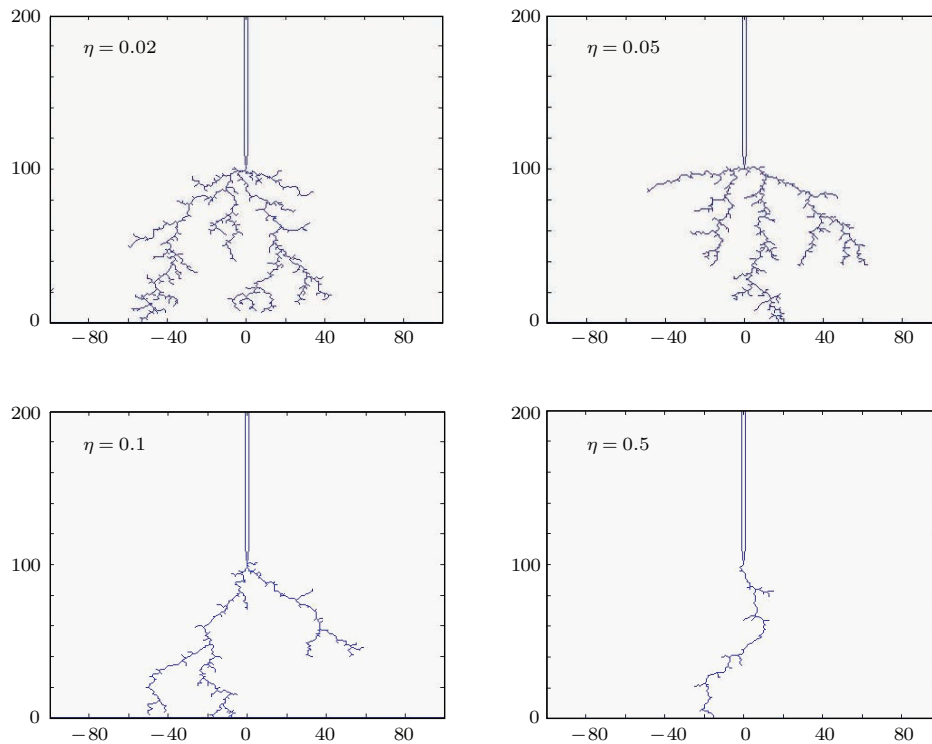
图7 η 分别取 $0.02, 0.05, 0.1, 0.5$ 时的仿真击穿结果

Fig. 7. Simulation image of discharge channel under different growth parameter.

表1 不同发展概率指数对应的分形维数
Table 1. Fractal dimensions in different growth parameter.

η	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.1
分形维数	1.672±0.07	1.540±0.005	1.443±0.011	1.392±0.005	1.370±0.003	1.312±0.003

4 结论与展望

通过实验得出 10 mm 非均匀场空气隙在直流电源的激励下产生随机放电过程并伴有分岔现象的放电通道. 实验放电图像进行处理与维数计算所得到的分形维数可以作为放电过程整体形貌的表征量. 根据考虑空间电荷与发展概率指数的流注生长模型模拟出与实验条件下的结果发现: 分形维数变化对发展概率指数 η 的大小有较强的依赖性. 针对此模型当 η 取值在 0.02—0.04 时与实验结果基本吻合.

后续可以进一步地完善仿真中所用的数学模型, 增加对放电过程中微观粒子的定量描述, 引入更多的参量, 提高模型的精细程度. 本文只采用计盒维数一种方法计算分形维数, 可以采用多种维数计算方法更全面地分析比对. 由于计算过程中的误差与拍摄图片中的噪点较多会影响到计算结果.

参考文献

- [1] Sun X, Wu Z Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2126 (in Chinese) [孙霞, 吴自勤 2001 物理学报 **50** 2126]
- [2] Huo Y L, Zhang G S, Lv S H, Yuan P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059201 (in Chinese) [火元莲, 张广庶, 吕世华, 袁萍 2013 物理学报 **62** 059201]
- [3] Sun K Y, Zhao X Y, Zhang G L, Zang H M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 029204 (in Chinese) [孙柯岩, 赵小莹, 张功磊, 臧洪明 2014 物理学报 **63** 029204]
- [4] Jia Z D, Le B, Jiang X W 1999 *High Voltage Engineering* **25** 1 (in Chinese) [贾志东, 乐波, 蒋雄伟 1999 高电压技术 **25** 1]
- [5] Niemeyer L, Pietronero L, Wiesmann H J 1984 *Phys. Rev. Lett.* **52** 12
- [6] Wiesmann H J, Zeller H R 1986 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **60** 1770
- [7] Noskov M D, Kukhta V R, Lopatin V V 1995 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **28** 1187
- [8] Veldhuizen E M, Kemps P C M, Rutgers W R 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 162
- [9] Kupershtokh A L, Charalambakos V, Agoris D 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 936
- [10] Hallac A, Georgiou G E, Metaxas A C 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 266
- [11] Qing X, Anton Y N, Xin P L 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 2094
- [12] Luque A, Ebert U 2012 *J. Comput. Phys.* **231** 904
- [13] Dulac A, Upul S A, Marcus B B, Vernon C 2015 *J. Electrostat.* **73** 33
- [14] Ren S P, Chi J P, Zhuang H C 1998 *Chinese Journal of Space Science* **18** 363 (in Chinese) [任顺平, 迟建平, 庄洪春 1998 空间科学学报 **18** 363]
- [15] Gu T, Yan P, Zhang S C 2006 *High Voltage Engineering* **32** 1 (in Chinese) [谷探, 严萍, 张适昌 2006 高电压技术 **32** 1]
- [16] Hong C 2007 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [洪川 2007 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [17] He H X, He J J, Qian G J 2008 *High Voltage Engineering* **34** 2047 [贺恒鑫, 何俊佳, 钱冠军 2008 高电压技术 **34** 2047]
- [18] Gallimberti I, Bacchiega G, Bondiou C A 2002 *C. R. Physique* **3** 1335
- [19] Dulac A, Upul S 2008 *J. Natl. Sci. Found. SR.* **36** 137
- [20] Niemeyer L, Ullrich L, Wiegart N 1989 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **24** 309
- [21] Wang J T, Yang J M 2013 *Complex Systems and Complexity Science* **0** 1 (in Chinese) [王江涛, 杨建梅 2013 复杂系统与复杂性科学 **0** 1]
- [22] Canny J 1986 *IEEE Trans. Pattern Anal.* **8** 679
- [23] Nobuyuki O 1979 *IEEE SMC Society* **9** 62

Discharge phenomena of short-air-gap in needle-plate electrode based on fractal theory^{*}

Zheng Dian-Chun¹⁾ Ding Ning¹⁾ Shen Xiang-Dong¹⁾ Zhao Da-Wei¹⁾[†]
Zheng Qiu-Ping²⁾ Wei Hong-Qing¹⁾

1) (Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

2) (Instrumentation Technology and Economy Institute, Beijing 100055, China)

(Received 27 May 2015; revised manuscript received 16 July 2015)

Abstract

The process of gas discharge is very complicated and experimental observations indicate that streamers in short gap under non-uniform electric fields always exhibit irregularity and self-similarity, so a dielectric breakdown model, which is the combination of the random fractal method and the traditional streamer theory, can simulate this phenomenon.

In this paper, a stochastic model with the growth probability index at any point proportional to the power of the electric field is utilized to quantify the channel tortuosity, and the space charge effect is taken into account as well. The potential distribution is solved by the Poisson's equation which is calculated iteratively by finite difference method; and the box counting method is used to characterize the channel tortuosity and estimate the fractal dimensions of the discharge channels. Based on this, an idea is proposed that the analysis of the experimental results, which in turn provide the appropriate parameters for the model, can better elucidate this phenomenon.

The growth probability index η can always get from the previous data, but the range of the η will change under different experimental condition and there will exist differences in simulation results on fractal dimensions for different η , so the limitation of the previous studies is its possible lack of generalizability. In order to define the range of the growth probability index in this model, the bifurcation phenomenon of plasma channels generated by the discharge, affected by HVDC (high-voltage direct current) of short-air-gap in a needle-plate electrode, is captured by ICCD. Before estimating the fractal dimensions of discharge channels, experimental images are saved as a binarized (black and white) image, and the gray-level transformation and boundary identification algorithm will be conducted to remove the apparent thickness of the discharge channel caused by the magnitude of the flowing currents through different branches. Experimental results show that the range of fractal dimensions in the box counting method for the discharge channel is 1.40–1.55. Under the same condition that other factors remain the same but the adjusted growth probability index η in this simulation model should accord with the experimental results, all the facts demonstrate that the value of η must lie between 0.04 and 0.05.

Keywords: fractal dimension, image processing, probability index, bifurcation

PACS: 47.53.+n, 47.50.Cd, 47.20.Ky, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.65.024703

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51077032).

[†] Corresponding author. E-mail: dawei8415@126.com