

# 介质阻挡放电灰度直方图的高斯混合概率模型研究

吴云飞, 叶齐政, 陈田, 谭丹

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

## Study on Gaussian Mixture Model of the Gray Level Histogram of Dielectric Barrier Discharge

WU Yunfei, YE Qizheng, CHEN Tian, TAN Dan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology),  
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The requirement of the uniformity of dielectric barrier discharge (DBD) used in the industry is much different from that in the laboratory, the uniform discharge in a long time-scale may meet the needs of some industrial applications. A gray probability model based on the Gaussian mixture model was proposed to identify the filamentary and uniform DBD accurately, the parameters of the model were estimated by a trust region algorithm, and its effectiveness and practicability were verified by validation of the model and application examples. The gray level histogram (GLH) obeys a double gaussian probability distribution in a filamentary discharge, while the GLH obeys a normal Gaussian probability distribution in a uniform discharge. With an increase of the exposure time, the mean gray level and the gray level standard deviation of the discharge and the background region in a filamentary discharge calculated by the double Gaussian probability model become larger, and the mean gray level calculated by the normal Gaussian probability model also become larger, while the gray level standard deviation remain almost constant in a uniform discharge. With a decrease of the air gap spacing, the GLH of the corresponding discharge image transits from a double Gaussian probability distribution with its mean gradually increasing into a normal Gaussian probability distribution with its mean gradually decreasing. It indicates that the transition of the filamentary discharge into the uniform discharge, the filamentary discharge becomes more intense, while the uniform discharge gets less intense. These results show that the model can quantitatively identify the filamentary and uniform discharge.

**KEY WORDS:** dielectric barrier discharge (DBD); gray level

histogram (GLH); Gaussian mixture model; modeling; classification

**摘要:** 工业生产中 对介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 均匀性的要求与实验室存在明显不同, 较大时间尺度上实现的均匀放电在实际应用中也具有重要价值。基于高斯混合模型, 提出一种能够较为准确地识别丝状和均匀 DBD 的灰度概率模型, 通过采用信赖域算法对模型参数进行估计, 并通过模型检验及应用实例对模型的有效性和实用性进行验证。研究结果表明: 丝状放电的灰度直方图 (gray level histogram, GLH) 服从双高斯概率分布, 而均匀放电的 GLH 则服从单高斯分布。随着曝光时间的逐渐增大, 由双高斯概率模型计算得到的丝状放电中放电区域和背景区域的灰度平均值和标准差均逐渐增大, 由单高斯概率模型计算得到的均匀放电的灰度平均值也逐渐增大, 但标准差基本保持不变。空气间隙间距的减小使 GLH 由均值逐渐变大的双高斯分布转化为均值逐渐变小的单高斯分布, 表明放电产生由丝状放电向均匀放电的转化, 丝状放电强度逐渐增大, 而均匀放电强度逐渐减小。以上结果表明, 所建模型可以有效地对丝状和均匀放电进行定量识别。

**关键词:** 介质阻挡放电; 灰度直方图; 高斯混合模型; 建模; 识别

## 0 引言

介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 能够在常温常压下产生大量高能量密度的低温等离子体, 目前在高功率激光器、臭氧制备、污染物治理及材料表面处理等领域已得到广泛应用<sup>[1-6]</sup>。通常情况下, DBD 表现为丝状放电模式, 即放电空间内存在大量随机分布的微放电细丝, 其高能量密度及非均匀分布的放电等离子体在一定程度上限制了其应用前景。而在一定条件下, DBD 也可表现为均匀放电模式<sup>[7-9]</sup>, 即放电空间内存在大量均匀、稳

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877033)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877033).

定及功率密度适中的低温等离子体,因此在材料表面改性、薄膜沉积及等离子杀菌消毒等领域具有更明显的应用潜力<sup>[10-13]</sup>。目前已成为低温等离子技术应用领域的研究热点。

由于丝状和均匀 DBD 具有明显不同的放电特性及形成机理<sup>[7-10]</sup>,因此在实际应用中,为提高 DBD 的应用效率及优化反应器设计,对 DBD 均匀性的诊断方法进行研究具有重要意义。目前国内外学者主要采用电气参数测量<sup>[8-10,14-19]</sup>、ICCD 高速摄影<sup>[8,10,15-16,19-20]</sup>、光发射光谱<sup>[15,19,21]</sup>及数值模拟<sup>[8,19,22]</sup>等方法对其开展较为详细的研究。Okazaki 等<sup>[14]</sup>最先提出用放电电流波形和电压-电荷 Lissajous 图形来区分丝状和均匀放电。之后,国内外大量研究者均采用该方法来识别丝状和均匀放电<sup>[8-10,15,17-18]</sup>、汤森和辉光放电<sup>[19]</sup>及多脉冲均匀放电模式<sup>[16,23]</sup>。文献[18]的研究表明,大气压空气中纳秒脉冲 DBD 均匀性的可能与电流波形中的脉冲和波动相关。文献[23]提出根据气隙电压和放电电流所构成的伏安特性曲线的微分电导来判断均匀放电的模式。Massines 等<sup>[8,10]</sup>通过拍摄 100ns 曝光时间的放电图像表明,大气压辉光放电存在类似于低气压辉光放电的空间结构。Gherardi 等<sup>[15]</sup>通过拍摄 10ns 曝光时间的放电图像明显区分了丝状和均匀放电,它们还通过该方法的区分了汤森和辉光放电<sup>[19]</sup>。Radu 等<sup>[16]</sup>通过拍摄 10ns 曝光时间的放电图像明显区分了丝状放电和柱状斑图放电。文献[20]的研究表明,只有通过拍摄曝光时间不大于 100ns 的放电图像,才能可靠地判断放电的均匀性。Gherardi 等<sup>[15]</sup>采用光发射光谱的方法明显区分了丝状和均匀放电,它们还通过该方法明显区分的汤森和辉光放电<sup>[19]</sup>。Kozlov 等<sup>[21]</sup>利用具有时间分辨功能的光谱测量诊断技术,特别是利用纳秒和微秒 2 个不同时间尺度的特定谱线,然后组成时间-时间的二维图象,也明显区别了丝状和均匀放电。Massines 等<sup>[8,19]</sup>通过数值模拟研究表明,辉光和汤森放电的气隙电场强度、离子密度及电子密度的空间分布存在明显差异。文献[22]提出一种评价放电径向均匀性的方法,微放电通道中间电流密度和周围电流密度的差异、中间电流密度和周围电流密度分别达到最大值的时间差异这两个均匀性指标。虽然电气参数测量方法已被广泛应用于 DBD 放电模式的识别,但它只能判断时间上的均匀性,而无法判断空间上均匀性<sup>[20]</sup>;ICCD 高速摄影及光发射光谱方法虽然较为科学和可靠,但存在操作不便及价格昂贵的缺点;

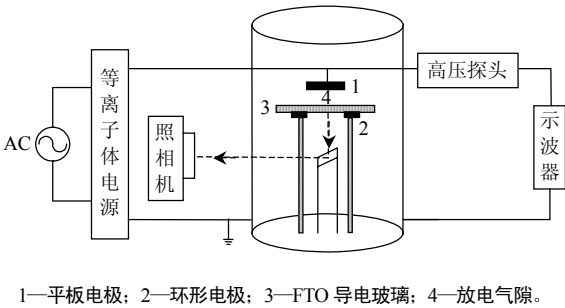
而数值模拟方法虽然能够准确区别汤森和辉光放电且物理意义明确,但过于复杂和繁琐。由于实际应用中,对 DBD 均匀性的要求不同于实验室,较大时间尺度上由大量微放电细丝构成的均匀 DBD 在工业生产中也具有重要价值,例如在不锈钢丝网构成的废水处理装置<sup>[4]</sup>,同轴电极构成的废气处理装置<sup>[5]</sup>及旋转电极<sup>[24-25]</sup>构成的臭氧发生器中所产生等离子体都并非严格意义上的均匀放电,但具有明显的应用效率。另外,在工业应用中不同的处理材料对均匀性的需求也存在明显不同。因此,在应用尺度上对 DBD 进行定量识别具有重要意义。

随着数字图像处理技术的发展,目前已经有较多将其应用于 DBD 放电特性研究的报道<sup>[26-28]</sup>。而高斯混合模型由于可以有效逼近任何复杂形式的分布,且具有结构简单、模型参数少、拟合性能高及适用范围广等显著优点,目前已经在图像分割、边缘检测、目标识别等数字图像处理领域得到广泛应用<sup>[29-31]</sup>。为此,在课题组前期研究中提出的一种运用数字图像处理技术中的灰度直方图(gray level histogram, GLH)来简单、有效地识别丝状和均匀 DBD 的新方法的基础上<sup>[32-33]</sup>,基于高斯混合模型,本文提出一种能够定量识别丝状和均匀放电的灰度概率模型以进一步量化和深入应用该方法,模型检验及应用实例表明该模型具有较强的适应性与实用性。

## 1 实验装置及方法

### 1.1 DBD 实验装置

本文所采用的 DBD 实验装置如图 1 所示,该装置主要由等离子体驱动电源、等离子体反应器及图像测量系统构成。图中等离子体驱动电源采用南京苏曼公司生产的 CTP-2000P 交流电源,频率在 5~25kHz 范围内连续可调,并通过 Tektronix P6015A 高压探头在 TDS1002B 示波器上记录电压幅值和频率。实验所采用的 DBD 电极结构如图 2 所示,上电极由直径为 10cm 的圆形不锈钢平板构成,下电极则由内径大于 10cm 的圆环形黄铜构成,并且在下电极的上表面覆盖一块厚度 3mm,面积 18cm×18cm 的 FTO (fluorine-doped tin oxide)导电玻璃作为阻挡介质。气隙间距通过高压电极上方的旋转螺杆进行调节。放电图像通过在接地电极的下方架设一块与垂直方向成 45°的反光镜获得,并采用最大分辨率为 3008×2000 像素的 Nikon D50 数码相机进行记录。



1—平板电极；2—环形电极；3—FTO 导电玻璃；4—放电气隙。

图 1 DBD 实验装置结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up for DBD

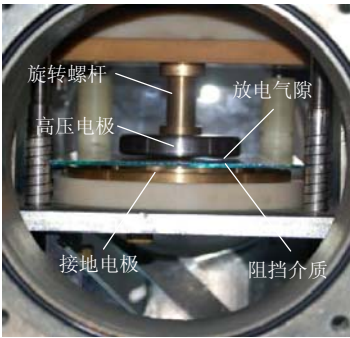
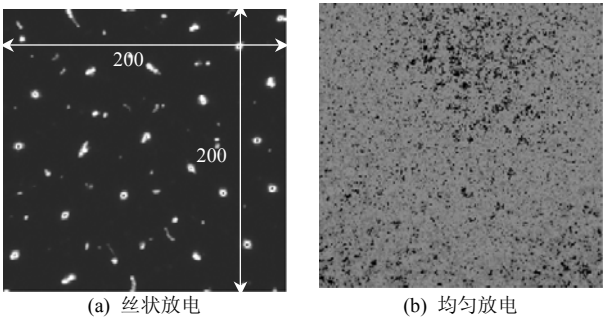


图 2 DBD 电极结构图

Fig. 2 Electrode structure used in the DBD reactor

1.2 丝状和均匀放电的 GLH

下面简要介绍 GLH 方法<sup>[32-33]</sup>。首先把放电得到的真彩图像转化为灰度图像；然后通过编写图像处理算法来分别提取灰度级为 0 到 255 的像素点个数；最后再把对应灰度级的像素点数除以总像素点数，就得到图像各灰度级出现概率(或频率)的一个分布曲线，即 GLH，其中横坐标为灰度级，纵坐标为各灰度级出现的概率。图 3(a)和(b)所示为典型的丝状和均匀 DBD 图像，图像大小均为 200×200 像素，图 4 所示为对应图 3 的 GLH。由图 4 可知，丝状和均匀放电图像对应的 GLH 存在明显差异，丝状放电表现为较大的上升速率和较小的下降速率，而均匀放电则表现为几乎相同的上升和下降速率。



(a) 丝状放电 (b) 均匀放电

图 3 典型的丝状和均匀 DBD 图像

Fig. 3 Typical images of the filamentary and homogeneous DBD

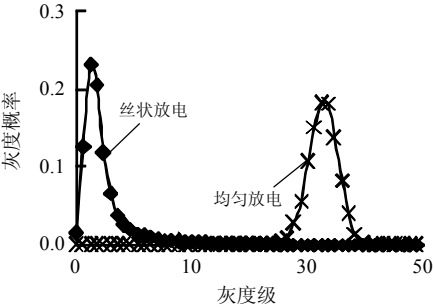


图 4 对应图 3 的 GLH

Fig. 4 GLH corresponding to Fig. 3

2 高斯混合模型及求解方法

2.1 高斯混合模型

高斯混合模型由多个高斯概率密度函数的加权和构成，它可以平滑地近似任意形状的概率密度分布，且其混合程度越高，对数据分布特征的描述就越精确<sup>[34]</sup>。高斯混合模型的概率密度函数可以用式(1)表示，即

$$F(x)=\sum_{i=1}^M\frac{p_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i}e^{-(x-u_i)/\sigma_i^2}\tag{1}$$

式中： $M$  为模型阶数， $p_i$  为高斯分量的加权系数，表示高斯混合模型中各成分出现的概率，满足(2)式所示关系； $\mu_i$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  个高斯分量的均值和标准差。

$$\sum_{i=1}^Mp_i=1\tag{2}$$

由式(1)所示的高斯混合模型的定义可知，它是由多个高斯分量按一定的概率分布组合而成的，故运用该模型能够较好地反映大量具有非高斯分布特征的物理机制。

2.2 模型的求解及检验

高斯混合模型的参数估计属于非线性最优化中的非线性最小二乘问题，而信赖域算法<sup>[35-36]</sup>是一种功能强大的解决此类问题的最优化算法，该算法的具体求解步骤为：

- 1) 设置待估计参数初始点的值、信赖域、迭代次数及迭代结束条件；
- 2) 将模型在初始点的位置进行二阶泰勒展开，并将其作为模型的近似函数；
- 3) 对近似函数在以展开点为中心的信赖域内求极值，得到近似函数的极值点；
- 4) 比较近似函数极值点和待估计参数初始点的值，并将二者之差作为迭代结束的条件判据；
- 5) 将近似函数极值点的值带入模型，并与模型初始点的值相比较，若得到改善，用极值点的值

作为初始点的值；若没有得到改善，则将信赖域进行收缩；

6) 开始下一次迭代，即用新的初始值或在新的信赖域内重复步骤 2) —4)，直到迭代次数达到设定的最大迭代次数或者迭代结束条件判据得到满足为止。

为较好地反映模型对实际分布的刻画效果，本文采用残差平方和  $R_{SE}$ 、均方根误差  $R_{MSE}$  及可决系数  $R^2$  这 3 个统计量对所用模型进行检验，其计算公式<sup>[36-37]</sup>分别为：

$$R_{SE} = \sum_{i=1}^n (r_i - \hat{r}_i)^2 \tag{3}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \hat{r}_i)^2}{n}} \tag{4}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{r}_i - \bar{r}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r}_i)^2} \tag{5}$$

式中： $i-1$  为灰度级， $i=1\sim n$ ， $n=256$ ， $r_i$  为灰度概率的实验计算值， $\hat{r}_i$  为灰度概率的模型计算值， $\bar{r}_i$  为灰度概率的平均值。由上述 3 式可知， $R_{SE}$  和  $R_{MSE}$  值越接近于 0， $R^2$  值越接近于 1，模型反映实际分布的效果就越好。

3 丝状和均匀 DBD 的灰度概率模型

3.1 丝状放电的灰度概率模型

假设丝状放电图像中仅包含两类主要的灰度值区域，即放电区域和背景区域，则它的 GLH 可以看成放电区域和背景区域的 2 个单峰高斯概率密度的加权和<sup>[38]</sup>，即丝状放电的 GLH 可以用双高斯概率模型来表示。由式(1)和(2)可知，其灰度概率密度函数的表达式为

$$f(x) = \frac{p_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-(x-\mu_1)^2/\sigma_1^2} + \frac{p_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-(x-\mu_2)^2/\sigma_2^2} \tag{6}$$

式中： $x$  为灰度级，且  $x=0\sim 255$ ， $p_1$  和  $p_2$  分别为 2 个高斯分量的加权系数， $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为放电区域和背景区域的灰度平均值， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  和分别为放电区域和背景区域的灰度标准差。

根据式(6)的双高斯概率模型可以计算出丝状放电图像的灰度平均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ ，分别如式(7)和(8)所示：

$$\mu = E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = p_1\mu_1 + p_2\mu_2 \tag{7}$$

$$\sigma^2 = E(x - E(x))^2 = E(x^2) - E(x)^2 = p_1(\mu_1^2 + \sigma_1^2) + p_2(\mu_2^2 + \sigma_2^2) - (p_1\mu_1 + p_2\mu_2)^2 \tag{8}$$

如图 5 所示为对应图 3(a)的丝状放电图像 GLH 的实验计算值和双高斯概率模型的计算值，以及根据模型计算得到的放电区域和背景区域的灰度概率分布曲线。从图 5 中可以看出，双高斯概率模型计算值和实验计算值能够较好吻合，且放电区域和背景区域在一定范围内均存在灰度分布。

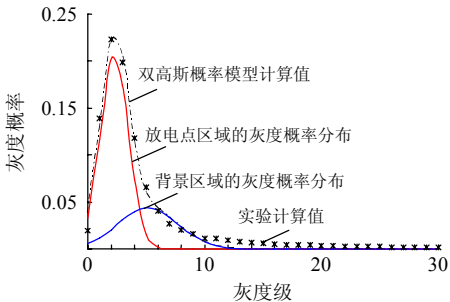


图 5 对应图 3(a)的 GLH 及双高斯概率模型计算值  
Fig. 5 GLH corresponding to Fig. 3(a) and calculated results of the double gaussian probability model

表 1 所示为丝状放电大气压空气不同曝光时间 GLH 的双高斯概率模型检验结果，其中，气隙间距  $d=1\text{ mm}$ ，外加电压峰峰值  $U_{pp}=14.2\text{ kV}$ ，外加电压频率  $f=8\text{ kHz}$ 。从表 1 中可以明显看出，不同曝光时间 2 个高斯分量的加权系数和  $p_1+p_2$  都约等于 1，且残差平方和  $R_{SE}$  和均方根误差  $R_{MSE}$  都约等于 0，可决系数  $R^2$  都约等于 1，故该模型能够较好地反映丝状放电的灰度分布。

如图 6(a)和(b)所示分别为由双高斯概率模型计算得到的不同曝光时间放电区域和背景区域的灰度概率分布。从图 6(a)和(b)可以明显看出，随着曝光时间的逐渐增大，由双高斯概率模型计算得到的对应放电区域和背景区域 GLH 的均值和标准差均逐渐增大，即由上述式(7)和(8)得到的对应放电图像灰度平均值和标准差逐渐增大，丝状放电强度逐渐增强，且放电区域的灰度概率要明显大于背景区

表 1 丝状放电不同曝光时间 GLH 的双高斯概率模型检验

Tab. 1 Validation of the double Gaussian probability model for the GLH under different exposure times in a filamentary discharge

$t/s$	$p_1$	$p_2$	$R_{SE}$	$R_{MSE}$	$R^2$
1/15	0.533 0	0.374	0.000 9	0.001 9	0.992 4
1/10	0.526 0	0.370	0.001 4	0.002 4	0.985 4
1/8	0.547 0	0.347	0.001 1	0.002 1	0.985 2
1/6	0.539 0	0.372	0.001 0	0.002 0	0.980 4
1/4	0.467 0	0.438	0.000 7	0.001 7	0.978 2



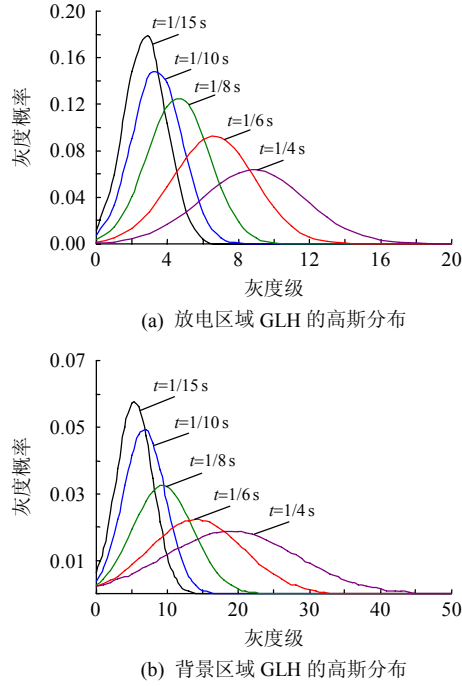


图 6 丝状放电不同曝光时间 GLH 的双高斯模型计算值  
Fig. 6 Calculated results of the double gaussian probability model for the GLH under different exposure times in a filamentary discharge

域,表明丝状放电中大量的微放电细丝之间仍存在少量的微放电细丝,而这些微放电细丝仅用肉眼几乎是无法观察的。因此,双高斯概率模型能够较为准确地反映丝状放电的灰度分布特性。

3.2 均匀放电的灰度概率模型

假设均匀放电中不存在微放电细丝,即均匀放电图像中放电区域和背景区域将结合在一起构成整体的放电区域,则它的 GLH 仅由单个高斯概率密度构成,由式(1)和(2)可知,其灰度概率密度函数的表达式为

$$f(x)=\frac{p}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-(x-\mu)^2/\sigma^2}\tag{9}$$

式中:  $x$  为灰度级,且  $x=0\sim255$ ;  $p$  为加权系数;  $\mu$  和  $\sigma$  分别为均匀放电图像的灰度平均值和标准差。

如图 7 所示为对应图 3(b)的均匀放电图像 GLH 的实验计算值和单高斯概率模型计算值。从图 7 中可以看出,单高斯概率模型计算值和实验计算值能够较好吻合。表 2 所示为均匀放电低气压空气不同曝光时间 GLH 的单高斯概率模型检验结果,其中,气隙间距  $d=1\text{ mm}$ ,气压  $P=0.02\text{ MPa}$ ,外加电压峰峰值  $U_{pp}=12.2\text{ kV}$ ,外加电压频率  $f=8\text{ kHz}$ 。从表 2 中可以明显看出,不同曝光时间单高斯分量的加权系数  $p$  都约等于 1,且残差平方和  $R_{SE}$  和均方根误差  $R_{MSE}$  都约等于 0,可决系数  $R^2$  都约等于 1,故该

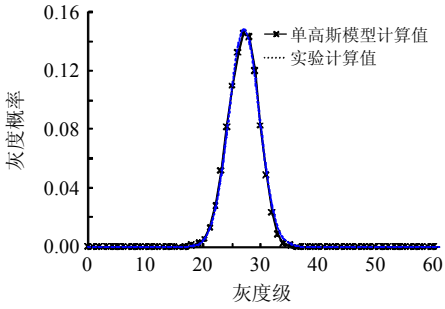


图 7 对应图 3(b)的 GLH 及单高斯概率模型计算值  
Fig. 7 GLH corresponding to Fig. 3(b) and calculated results of the normal gaussian probability model

表 2 均匀放电不同曝光时间 GLH 的单高斯分布检验  
Tab. 2 Validation of the normal gaussian probability model for the GLH under different exposure times in a homogeneous discharge

$t/\text{s}$	$p$	$R_{SE}$	$R_{MSE}$	$R^2$
1/15	0.998 7	0.000 02	0.000 29	0.999 8
1/10	0.998 1	0.000 09	0.000 58	0.999 3
1/8	0.998 2	0.000 07	0.000 54	0.999 4
1/6	0.997 9	0.000 07	0.000 53	0.999 5
1/4	1.003 6	0.000 04	0.000 38	0.999 7

模型能够较好地刻画均匀放电的灰度分布。

如图 8 所示为由单高斯概率模型计算得到的不同曝光时间放电图像的灰度概率分布。从图 8 可以明显看出,随着曝光时间的逐渐增大,单高斯分布的均值逐渐增大,标准差基本保持不变,即对应放电图像的灰度平均值逐渐增大,灰度标准差基本保持不变,均匀放电强度逐渐增强。因此,单高斯概率模型能够较为准确地反映均匀放电的灰度分布特性。

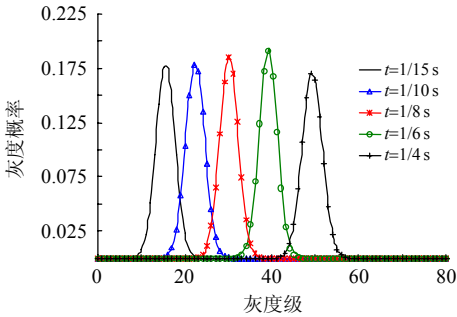


图 8 均匀放电不同曝光时间 GLH 的单高斯模型计算值  
Fig. 8 Calculated results of the normal gaussian probability model for the GLH under different exposure times in a homogeneous discharge

4 应用实例分析

图 9 和 10 所示分别为空气不同气隙间距的放电图像及对应的 GLH,其中外加电压峰峰值  $U_{pp}=17.6\text{ kV}$ ,外加电压频率  $f=5\text{ kHz}$ ,曝光时间

$t=1/10\text{ s}$ 。图 11 所示为对应的高斯混合概率模型计算值。从表 3 及图 9—11 中可以看出,随着气隙间距由 1.2 mm 下降到 1.0 mm,对应的 GLH 均服从双高斯概率分布,灰度平均值逐渐增大,丝状放电强度明显增强。当气隙间距由 1.0 mm 下降到 0.6 mm 时,此时残差平方和  $R_{SE}$  和均方根误差  $R_{MSE}$  已接近于 0,单高斯概率模型已具有较好的适应度( $R^2\approx 1$ ),对应的 GLH 已较为严格的服从单高斯概率分布,放电表现为的均匀放电,因此,气隙间距的逐渐减小使放电产生了由丝状放电向均匀放电的转化,当气隙间距较大时,表现为明显的丝状放电,而气隙间距较小时,则表现为均匀放电<sup>[39]</sup>。当气隙间距由 0.6 mm 再逐渐减小到 0.2 mm 时,对应的 GLH 均服从单高斯概率分布,灰度平均值逐渐减小,均匀放电强度明显减弱。在其他实验条件不变的情况下,气隙间距的逐渐减小应使气隙的击穿

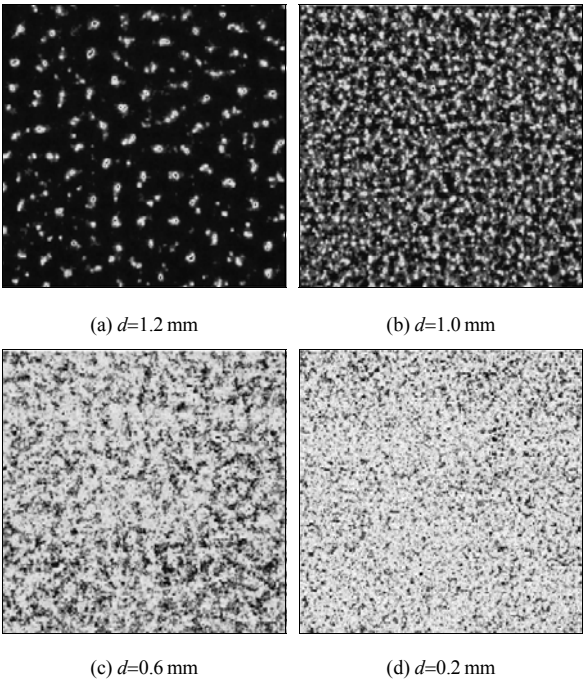


图 9 空气不同气隙间距的放电图像

Fig. 9 Discharge images under different air gap spacings

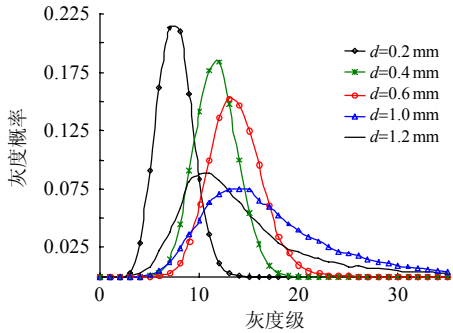


图 10 空气不同气隙间距的 GLH

Fig. 10 GLH under different air gap spacings

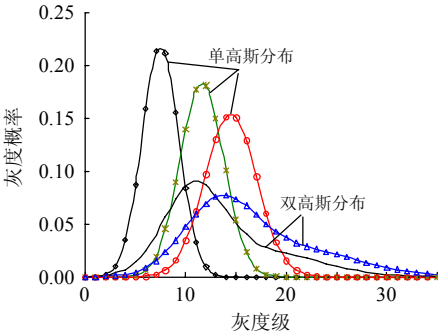


图 11 对应于图 10 的 GLH 高斯混合模型计算值  
Fig. 11 Calculated results of the gaussian mixture probability model for the GLH corresponding to Fig. 10

表 3 不同气隙间距 GLH 的高斯混合模型检验  
Tab. 3 Validation of the gaussian mixture probability model for the GLH under different air gap spacings

$d/\text{mm}$	$R_{SE}$	$R_{MSE}$	$R^2$
0.2	0.000 14	0.000 74	0.999 1
0.4	0.000 07	0.000 52	0.999 5
0.6	0.000 18	0.000 84	0.998 3
1.0	0.000 18	0.000 84	0.996 0
1.2	0.000 44	0.001 32	0.991 2

电压的逐渐降低,放电强度应逐渐增强,显然,这与我们的实验结果存在明显不同,其原因可能与放电的边缘效应有关<sup>[40]</sup>,因为这种容易在亚毫米( $d<1\text{ mm}$ )气隙间距时产生的边缘效应会使电极边缘处的放电明显增强,中心区域的放电由于受到抑制会明显变弱,且气隙间距越小,边缘效应越明显,结果使得放电强度随气隙间距的逐渐减小而减弱。

5 结论

- 1) 通过采用信赖域算法求解非线性最小二乘问题得到双高斯及单高斯概率模型的参数,建立了丝状和均匀 DBD 的灰度概率模型,结果表明,丝状放电的 GLH 服从双高斯概率分布,而均匀放电的 GLH 则服从单高斯概率分布;
- 2) 随着曝光时间的逐渐增大,由双高斯概率模型计算得到的丝状放电中放电区域和背景区域的灰度平均值和标准差均逐渐增大,而由单高斯概率模型计算得到的均匀放电的灰度平均值逐渐增大,而灰度标准差基本保持不变。因此,通过双高斯和单概率模型能够较为准确地反映丝状和均匀放电的灰度分布特性;
- 3) 空气气隙间距的减小会使 GLH 由均值逐渐变大的双高斯分布转化为均值逐渐变小的单高斯分布,表明放电发生了由丝状放电向均匀放电的转化,且丝状放电的强度逐渐增大,而均匀放电强度

的逐渐减小, 导致均匀放电强度逐渐减小的原因可能与放电的边缘效应有关;

4) 本文所建立高斯混合概率模型主要用于定量识别的丝状放电和较大时间尺度上的均匀放电, 后期研究可将其应用于 DBD 放电特性及反应器参数优化等研究, 本文所得的结论对建立一整套科学、可靠的 DBD 放电图像识别系统 also 具有重要的参考价值。

## 参考文献

- [1] Kogelschatz U. Dielectric barrier discharges: their history, discharge physics and industrial applications [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [2] Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987(20): 1421-1437.
- [3] 刘钟阳, 吴彦, 王会宁. DBD 型中高频臭氧发生器的动态负载特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 61-64.  
Liu Zhongyang, Wu Yan, Wang Huining. Dynamic load characteristic of a DBD medium/high frequency ozonizer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 61-64(in Chinese).
- [4] 李兴旺, 李纪文, 吴云飞, 等. 丝网辅助气液两相体介质阻挡放电及在水处理中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 752-756.  
Li Xingwang, Li Jiwen, Wu Yunfei, et al. Dielectric barrier discharge assisted by wire mesh in a gas-liquid two-phase mixture and its application to water treatment [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 752-756(in Chinese).
- [5] 高旭东, 孙保民, 肖海平, 等. 介质阻挡放电脱除  $\text{NO}_x$  反应器的评价方法及运行流量特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 27-32.  
Gao Xudong, Sun Baomin, Xiao Haiping, et al. An evaluation method of dielectric barrier discharge reactors for  $\text{NO}_x$  removal and characteristics analysis of gas flow rate[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 27-32(in Chinese).
- [6] 刘勇, 张琪, 何湘宁. 基于移相脉冲宽度调制控制的串联谐振式塑料薄膜表面处理电源的研制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 142-146.  
Liu Yong, Zhang Qi, He Xiangning. Design of phase-shifted pulse width modulated(PS-PWM) controlled series resonant inverter for plastic film surface treatment [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 142-146(in Chinese).
- [7] Kogelschatz U. Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(4): 1400-1408.
- [8] Massines F, Rabehi A, Decomps P, et al. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83(6): 2950-2957.
- [9] 方志, 解向前, 邱毓昌. 大气压空气中均匀介质阻挡放电的产生及放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 126-132.  
Fang Zhi, Xie Xiangqian, Qiu Yuchang. Generation and characteristics of the homogeneous dielectric barrier discharge in air under atmospheric pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 126-132(in Chinese).
- [10] Massines F, Gouda G. A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(24): 3411-3420.
- [11] Niu J H, Liu D P, Wu Y F. Large-area and uniform surface modification of polymers by barrier discharge plasmas [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(11): 3434 -3437.
- [12] Zhou L, Lu G H, Pang H, et al. Comparing deposition of organic and inorganic siloxane films by the atmospheric pressure glow discharge[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8/9): 2552-2557.
- [13] Roth J R, Sherman D M, Gadri R B, et al. A remote exposure reactor (RER) for plasma processing and sterilization by plasma active species at one atmosphere [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(1): 56-63.
- [14] Okazaki S, Kogoma M, Uehara M, et al. Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen atmospheric pressure using a 50 Hz source[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(5): 889-892.
- [15] Gherardi N, Gouda G, Gat E, et al. Transition from glow silent discharge to micro-discharges in nitrogen gas [J]. Plasma Sources Science Technology, 2000, 9(3): 340-346.
- [16] Radu I, Bartnikas R, Czeremuszkin G, et al. Diagnostics of dielectric barrier discharges in noble gases: atmospheric pressure glow and pseudoglow discharges and spatio-temporal patterns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(3): 411-421.

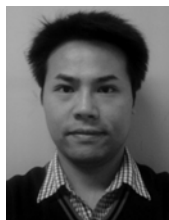
- [17] 李雪辰, 贾鹏英, 刘志辉, 等. 介质阻挡放电丝模式和均匀模式转化的特性[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 1001-1007.
- Li Xuechen, Jia Pengying, Liu Zhihui, et al. Study on the transition from filamentary to uniform discharge in dielectric barrier discharge[J]. Acta Physica sinica, 2008, 57(2): 1001-1007(in Chinese).
- [18] 章程, 邵涛, 龙凯华, 等. 大气压空气中纳秒脉冲介质阻挡放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 111-117.
- Zhang Cheng, Shao Tao, Long Kaihua, et al. Characteristics of nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 111-117(in Chinese).
- [19] Massines F, Segur P, Gherardi N, et al. Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: diagnostics and modeling [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174/175(9): 8-14.
- [20] 罗海云, 王新新, 毛婷, 等. 用 PET 薄膜覆盖金属丝网电极实现大气压空气中均匀放电[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4298-4303.
- Luo Haiyun, Wang Xinxin, Mao Ting, et al. Realization of homogenous discharge at atmospheric pressure in air using wire mesh covered by PET films[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4298-4303(in Chinese).
- [21] Kozlov K V, Brandenburg R, Wagner H E, et al. Investigation of the filamentary and diffuse mode of barrier discharges in  $N_2/O_2$  mixtures at atmospheric pressure by cross-correlation spectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(4): 518-529.
- [22] Zhang Yuantao, Wang Dezheng. Two-dimensional simulation of a low-current dielectric barrier discharge in atmospheric helium[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11): 113308. 1-113308. 6.
- [23] 张燕, 顾彪, 王文春, 等. 常压 He 气和  $N_2$  气均匀介质阻挡放电的伏安特性[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5532-5538.
- Zhang Yan, Gu Biao, Wang Wenchun, et al. Current-voltage relationship for homogeneous dielectric barrier discharge in helium and nitrogen at atmospheric pressure [J]. Acta Physica sinica, 2009, 58(8): 5532-5538(in Chinese).
- [24] Tomasz C, Chobei Y, Satoshi I, et al. Ozone generation using plate rotating electrode ozonizer-effect of electrode rotation and discharge analysis method[J]. Ozone: Science & Engineering, 2000, 22(6): 563-574.
- [25] Toshiyuki H, Takahisa H, Norio N. Ozone generator with cylindrical type of rotating electrode[J]. Ozone: Science & Engineering, 2005, 27(1): 53-57.
- [26] Dong Lifang, Song Qian, Li Yuanyuan, et al. Study on evolution of patterns in dielectric barrier discharge by image analysis[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2010: 2088-2091.
- [27] Yang Xiaohong, Liu Shuhua. Application of image processing on analyzing the structure of spatial-temporal pattern[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, China, 2008: 662505. 1-662505. 6.
- [28] Li Xuechen, Zhao Na, Yin Zengqian, et al. Image processing of discharge pattern by spatial Fourier transform method[C]//Congress on Image and Signal Processing, Sanya, China, 2008: 603-607.
- [29] 王勇, 谭毅华, 田金文. 基于阴影消除和混合高斯模型的视频分割算法[J]. 光电工程, 2008, 35(3): 21-25.
- Wang Yong, Tan Yihua, Tian Jinwen. Video segmentation algorithm with gaussian mixture model and shadow removal[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(3): 21-25(in Chinese).
- [30] Chow C K, Kaneko T. Automatic boundary detection of the left ventricle from cineangiograms[J]. Computers and Biomedical Research, 1972, 5(4): 388-410.
- [31] Thomas E M, Temko A, Lightbody G. Gaussian mixture models for classification of neonatal seizures using EEG[J]. Physiological Measurement, 2010, 31(7): 1047-1064.
- [32] Wu Yunfei, Ye Qizheng, Li Xingwang, et al. Classification of dielectric barrier discharges using digital image processing technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(5): 1371-1379.
- [33] 吴云飞, 叶齐政, 李兴旺, 等. 利用不同曝光时间放电图像的灰度直方图识别介质阻挡放电模式[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1120-1125.
- Wu Yunfei, Ye Qizheng, Li Xingwang, et al. Classification of the discharge modes of dielectric barrier discharge using gray level histogram of discharge images under different exposure times[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1120-1125(in Chinese).
- [34] 黄国宏, 刘刚. 一种新的基于高斯混合模型的线性判别分析[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(27): 72-77.
- Huang Guohong, Liu Gang. New linear discriminant analysis based on Gaussian mixture model[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(27): 72-77(in



- Chinese).
- [35] Fletcher R. 实用最优化方法[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1990: 289-292.
- Fletcher R. Practical methods of optimization [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Translation & Publishing Corp, 1990: 289-292(in Chinese).
- [36] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 系统边际电价概率分布检验及模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 72-77.
- Liu Xichui, Shen Jiong, Li Yiguo. Study on probability distribution and model of system marginal price [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 72-77(in Chinese).
- [37] 刘西陲, 沈炯, 李益国. 基于加权双高斯分布的广义自回归条件异方差边际电价预测模型[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 139-144.
- Liu Xichui, Shen Jiong, Li Yiguo. Study on probability distribution and model of system marginal price[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 139-144(in Chinese).
- [38] 章毓晋. 图像工程(中册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 93-96.
- Zhang Yujin. Image engineering[M]. 2nd

Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 93-96(in Chinese).

- [39] Raizer Y P. Gas discharge physics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 324-344.
- [40] Sergey N A, Tatsuru S, Kunihide T. Submillimeter dielectric barrier discharges at atmospheric pressure: edge effect[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 941-948.



吴云飞

收稿日期: 2012-06-13。

作者简介:

吴云飞(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高电压新技术及应用, 非平衡等离子体诊断技术, wuyunfei\_2008@sohu.com;

叶齐政(1965), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为放电等离子体技术与工程电磁场, yqzq@mail.hust.edu.cn。

(责任编辑 张媛媛)