

空气中火花放电三维路径的特征研究

Investigation of the Features of Three Dimensional Paths of Spark Breakdowns in Air

华中科技大学 (武汉 430074) 邱德红 李晓峰 李正瀛

香港理工大学 (香港) J. M. K. MacAlpine

摘要 介绍一种记录火花放电三维路径图像和图像处理的实验方法并运用该法记录了不同长度气隙棒—平板电极之间的三维放电路径。分析了三维火花放电路径的统计特征,与二维火花放电路径统计特征相比有很大差别。

Abstract A new method, which was used to record three-dimensional path of spark breakdowns across air gap, is introduced in this paper. The features of three dimensional spark breakdown paths are analyzed and compared with those obtained from the investigation of two dimensional spark breakdown paths.

关键词 火花放电 三维路径 图像处理

Key words spark breakdown three dimensional path image process

中图分类号 TM213 文献标识码 A

0 引言

火花放电摄像和图像处理技术是研究火花放电现象的有力工具,可据此重复观察放电特征。计算机图像处理技术的发展不仅提高了图像分辨率,且可大规模地处理图像数据,对比分析不同试验条件下的火花放电现象。Gallimberti和Watson曾经运用摄像技术^[1,2],在二维空间上研究了空气中火花放电路径形状特征的统计规律,但一直没把该项工作推广到三维空间。本文介绍一种运用高清晰摄像机同时记录空气中火花放电路径在两个侧面的图像的实验方法,通过计算机图像处理后可直观地显示三维放电路径并存储放电路径的三维空间坐标,并以此为基础分析了三维火花放电路径的特征。

1 实验方法

图1装置中,棒电极直径10 mm,顶端为45°的圆锥。平板电极直径为1000 mm。棒、板电极之间距 θ 500 mm可调。极间电压超过空气间距击穿电压时,发生火花放电,摄像机将同时拍摄到放电路径的正面图像,以及一个由三棱镜产生的垂直方向上的侧面图像,并输入计算机,以帧为单位存储起来。

放电路径图像需要经过进一步处理,才能得到易于分析的放电路径在三维空间中坐标数据。这些处理过程主要包括^[3]:①火花放电路径提取,即从一帧放电路径图像中分离出代表放电路径的像素点;②去噪,即删除上一步处理结果中的一些离散的小斑点或者补充放电路径图像上未连接的点;③细化,

即把臃肿的放电路径图像简化为一条曲线;④建立三维坐标,即从处理完毕后的放电路径的两个垂直方向上的像建立三维放电路径的空间坐标。图2为处理后的三维火花放电路径。

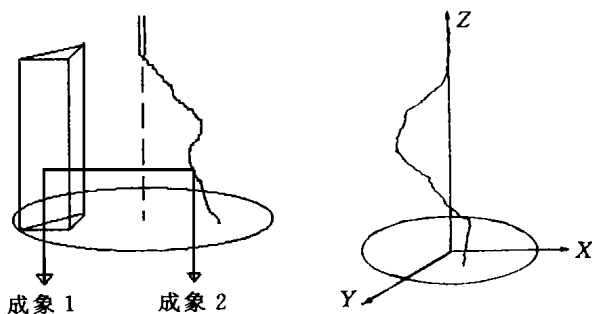


图1 实验装置 图2 计算机处理后的三维放电路径

2 三维放电路径的形状特征统计结果

2.1 形状特征参数

为分析三维放电路径的形状特征,将其简化为一系列长短不一的折线段。处理过程中选定适当的误差裕度,可较容易地找到正确反映三维火花放电路径曲折形状特征的简化版本,以利于分析放电路径的基本形状特征。图3中三维放电路径的形状特

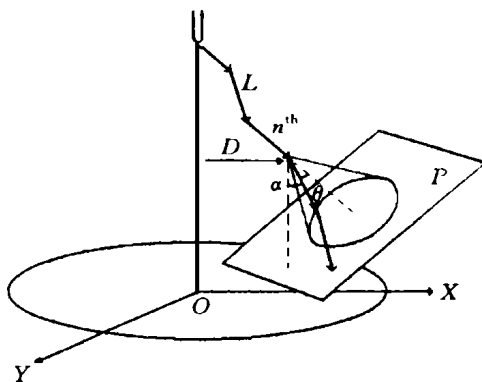


图3 描述放电路径的参数

征可由以下参数的统计描述:组成放电路径线段的长度 L 、相邻两条线段之间的夹角 θ 、线段与电极系统垂直轴线之间的夹角 Γ 和线段末端距离电极系统轴线之间的距离 D 。这些参数的统计分布规律反映了放电路径的基本形状特征。

2.2 形状特征参数统计结果

实验记录了空气间距分别为45、100、200、400

mm 时棒—平板电极间的放电路径,每一组放电路径的样本数为 50 图 4(a)~(d)分别为描述放电路径形状特征的 4 个参数的统计结果

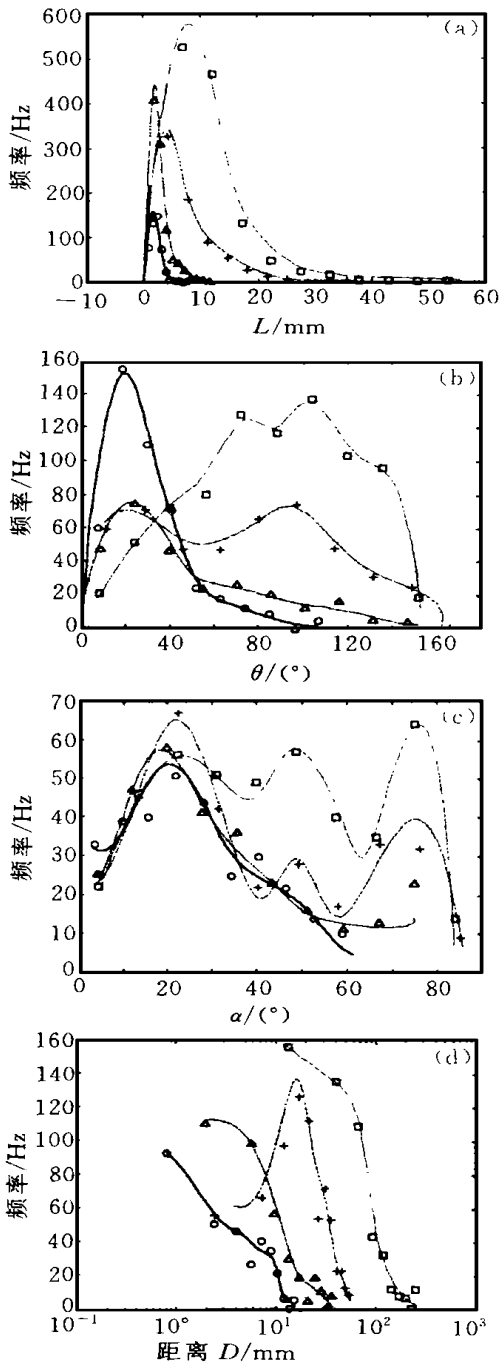


图 4 放电路径形状参数的分布

图 4(a)中,组成放电路径的折线段的长度 L 的概率分布基本上成单峰对称分布。出现特别短或者特别长的线段的频率都不高。随着放电路径经历的空气间距的增大,分布曲线峰值对应的线段长度逐渐增加。随着空气间距的增大,线段的长度以及长线段出现的频率逐渐增大。但是参数 L 的分布趋势并

没有明显改变

图 4(b)为相邻两折线段间交角 θ 的分布情况。对于短间距(通常 ≤ 100 mm)的火花放电路径, θ 均较小,主要集中在 20° 左右。随着火花放电路径经历的空气间距增加,该特征逐渐消失, θ 有逐渐增大的趋势;对 100 mm 间距的放电路径, $\theta > 50^\circ$ 的频率分布明显比 45 mm 的大;对 200 mm 间距的放电路径, θ 的分布在大、小角度区域各有一高度相当的峰值,且在较大角度范围内分布比较平缓。当空气间距增加到 400 mm 时,出现大 θ 的频率明显大于小 θ 的频率。 θ 随空气间距增大的特点,说明了放电路径在长距离空气间距中发展的时候,其方向变化的程度趋于激烈,容易形成曲折程度高的放电路径。

图 4(c)为组成放电路径的折线段与电极垂直轴线间夹角 Γ 的分布。空气间距较小时, Γ 均较小,分布曲线的峰值约为 20° ,随着空气间距的增大, Γ 趋于增大,说明放电路径偏离电极系统轴线的概率增加。图 4(d)为线段末端偏离电极系统轴线距离 D 的分布情况,随着空气间距的增大,平均偏离距离逐渐增大,但频率曲线分布的趋势基本一致

3 统计结果比较和讨论

以往火花放电路径统计特征的研究主要在二维空间展开,实验方法及数据处理能力使多数研究仅集中于某一特定的实验条件。图 5 为 Watson 统计的 60 mm 长空气间距的棒—平板电极二维放电路径的折线段长度的统计结果。比较图 4 5 可见,对于经历空气间距长度相近的放电路径,在二维空间内的折线段的统计结果的分布范围比在三维空间内大很多。如 60 mm 长度空气间距的二维放电路径统计结果中有长度约 35 mm 折线段,而图 4(a)中 100 mm 长度的空气间距,三维放电路径的统计结果中几乎没有出现 > 15 mm 的折线段,二维空间观察放

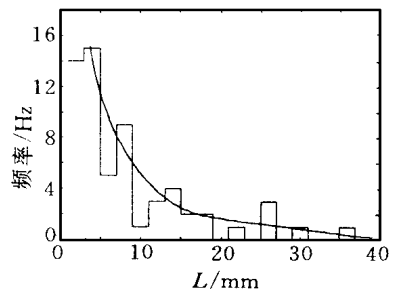


图 5 二维火花放电路径折线长度分布

(下转第 47 页)

3 试验结果

量对应的冲击电流和地电位升高波形,结果见表 1,对应的冲击电流—地电位波形见图 4

分别将电阻分压器放置于高压侧和低压侧,测

表 1 冲击入地电流、地电位升高波形及冲击接地电阻测量值

分压器 位 置	冲击入地电流		冲击地电位		冲击接地电阻 Ω	冲击 系数
	幅值 /A	波形 μs	幅值 /V	波形 μs		
高压侧 测 量	197.0	6.0/80	3948.2	6.25/82	17.76	0.804
	477.6	6.25/79	7725.3	6.25/80	16.18	0.732
	817.3	5.9/79.5	13118.4	6.25/80	16.05	0.726
	1024.1	6.25/77	15742.1	6.25/80	15.37	0.696
低压侧 测 量	152.6	5.63/80	2550.8	6.25/81	16.72	0.757
	571.2	5.63/81	9182.9	6.25/80	16.08	0.728
	896.1	6.25/78	13701.4	6.0/80	15.29	0.692
	1014.3	5.94/76	15742.1	6.25/78.5	15.52	0.702

从试验结果分析,有如下特点:

1) 冲击电流与对应的地电位波形基本相同,以高压侧测量数据为例,4次冲击电流波形平均为 $(6.1 \pm 0.2) / (78.9 \pm 1.9) \mu s$,对应的 4次冲击地电位波形平均为 $6.25 / (80.5 \pm 1.5) \mu s$

2) 测得的冲击系数均 < 1 ,且随着冲击电流幅值的增大而逐步变小,这与冲击接地及冲击系数的物理概念是吻合的。

3) 分压器高、低压侧测量结果对比分析,表明二者冲击接地电阻及冲击系数基本相同,说明分压器置于高、低压侧测量均可。

拟试验的实测结果一致性较好,测量的冲击接地电阻及冲击系数变化趋势与相关的物理概念一致

b. 冲击电流及冲击地电位升高试验中应注意测量中可能遇到的干扰,宜选择合适的测量方式并应经过实测或现场试验检验

参 考 文 献

1 华中理工大学,上海交通大学合编. 高电压试验技术. 北京:水利电力出版社,1983

(收稿日期 2000-07-20)

王建国 1968年生,博士生,从事高电压测试技术及防雷研究,电话:027-87423877

4 结 论

a. 垂直接地体冲击电流及冲击地电位升高模

(上接第 44页)

电路径要平直得多,而实际的放电路径并不如此。

图 6为数 m长空气间距的放电路径的 T 在二

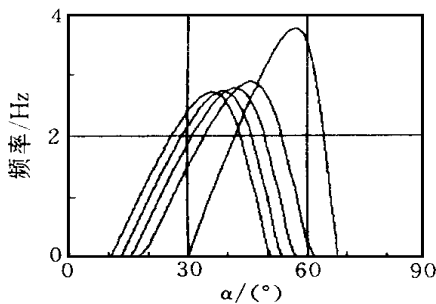


图 6 二维火花放电路径折线与电极轴线夹角分布

维空间内的统计结果,分布曲线最明显的特点是单峰性(峰值对应于 $30 \sim 40^\circ$),且在峰值左右基本对称。而从三维放电路径统计的结果图 4(c)可见,短间距三维放电路径的 θ 分布特征具有同样的单峰对称性。随着空气间距的增长,其分布范围更广,单峰性已不存在,分布曲线出现了多个峰值

由此可见,二维和三维放电路径特征统计结果

间存在较大差别,很有必要把二维研究发展到三维研究。本文介绍的实验方法在一定程度上满足了这种要求,其快速处理数据的优点使我们的大规模研究不同条件下的放电路径特征,必将丰富我们对放电路径特征及特征影响因素的了解

参 考 文 献

1 Gallimberti L. The mechanism of the long spark formation. Physique, 1979, Coll. C7, 193

2 Watson D B, Barber M, Samuels K A. Investigation of electrical breakdown in air using an image-processing technique. Int J of Elect Eng Educ, 1992, 29 313

3 Mac Alpine J M K, Qiu Dehong, Li Z Y. An analysis of spark paths in air using 3 - dimensional image processing. IEEE Trans D& EI, 1999, 6(3): 331

(收稿日期 2000-07-11)

邱德红 1971年生,华中科技大学博士后。

李晓峰 1970年生,华中科技大学博士生。

李正瀛 1938年生,华中科技大学博士生导师。