

中文摘要

绝缘子闪络严重危害电力系统及其输变电设备的安全运行,因此积极开展绝缘子运行状态的检测研究,对预防闪络事故,提高电网运行可靠性具有重要意义。本文基于泄漏电流检测绝缘子运行状态的研究现状,在人工污秽试验方法的基础上,将混沌理论的递归分析技术应用于泄漏电流的特征分析,结合绝缘子表面动态变化和闪络过程,旨在研究及时有效的绝缘子状态检测与闪络预测方法。

首先针对绝缘子在灾害性浓雾天气下容易发生的闪络事故,通过观察闪络现象与过程,对闪络发展各个阶段的泄漏电流进行时间序列的混沌特征判别,计算和分析了 Lyapunov 指数、分形维数、功率谱密度、吸引子相图以及 Poincare 截面,论证了泄漏电流具有混沌特征,阐明了泄漏电流递归分析方法应用于绝缘子泄漏电流非线性特征分析的可行性。

在建立浓雾环境下泄漏电流与绝缘子闪络过程对应关系的基础上,运用小波变换方法提取闪络发展各个阶段泄漏电流的频率分布与特征,通过相空间重构技术将频率分量的时间序列拓展至 m 维空间,根据递归分析技术得到各个频率分量发展变化的递归图及递归定量指标,提出了泄漏电流高频分量可以有效反映绝缘子表面放电的非线性特征,提高了检测与预测的准确性。

为了研究大气环境因素对绝缘子运行状态的影响,在人工污秽试验基础上开展了污秽程度、环境温度和相对湿度等诸多因素下绝缘子的状态检测研究,提取与绝缘子表面动态变化密切相关的泄漏电流特征量,在论证当前特征分析方法局限性的基础上,根据泄漏电流递归图拓扑结构及其定量指标有效揭示了环境参数对外绝缘状态的影响程度与机理,建立了基于泄漏电流递归分析的绝缘子运行状态检测方法。

最后,基于绝缘子雾凇闪络现象的观察与泄漏电流的递归分析,检测并研究了绝缘子在雾凇环境下的闪络过程与机理,提出泄漏电流递归图能够定性表征绝缘子雾凇闪络过程中表面放电特征,并且递归定量分析法进一步增强对闪络过程的监测分析。

泄漏电流递归分析法为绝缘子运行状态提供了一种可视化的检测方法,递归图拓扑结构及其定量指标有效反映了绝缘子表面状态,揭示了表面放电的非线性特征及发展过程,提高了绝缘子状态检测的有效性和准确性。

关键词: 绝缘子; 泄漏电流; 混沌特征; 递归图; 递归定量指标; 污秽试验; 浓雾; 雾凇; 闪络; 状态检测

ABSTRACT

Generally, the flashover accidents of outdoor insulators can cause serious influence on the operation stability of power system and its equipments. Therefore, it is significant to evaluate and monitor the insulator performance for the prevention of the flashover accidents and the improvement of the power system reliability. In this paper, based on the present investigation of leakage current for evaluating and monitoring outdoor insulators, the recurrent plot technique is proposed to analyze the characteristics of leakage current through the artificial contamination experiments. In accordance with dynamic behaviors and flashover process on the insulator surface, the results obtained aim to investigate the effective methods for performance evaluation and flashover protection of outdoor insulators.

In order to determine whether the leakage current during the flashover process has chaotic characteristics, the experiments simulating the insulator flashover in heavy fog were carried out and the chaotic analysis method of time series was selected to analyze the non-linear properties of leakage current in accordance with the flashover process. Lyapunov exponent, fractal dimension, power spectral density, chaos attractor, as well as Poincare map were calculated to reveal that the variation of leakage current during the flashover process has chaotic characteristics. The results demonstrate the feasibility of using the recurrent plot technique for the non-linear characteristic analysis of leakage current.

Based on the corresponding relationship between the leakage current and the flashover process in heavy-fog conditions, the wavelet transform technique was applied to decompose the leakage current into different frequency components. The temporal series of the extracted components are extended to m -dimensional phase space by using a phase-space reconstructed method. The recurrent plot is obtained to show that the topological structure of the high-frequency components is prominent to identify non-linear properties of discharge activities. The dynamic behaviors on the insulator surface are graphically illustrated on the rectangular block structures with higher density of points. Based on the analysis of the high-frequency components, the quantitative indicators of recurrent plot are obtained to reflect the underlying mechanism of flashover process. The results obtained indicate that the recurrent plot technique is helpful to improve the accuracy of insulator evaluation.

Considering the effect of wet-contaminated environment on the insulator performance, the artificial contamination experiments were conducted to investigate the performance evaluation in multi-environmental factors including contamination degree, ambient temperature and relative humidity. The characteristics of leakage current were extracted to reflect dynamic behaviors on the insulator surface. Based on the limitation of the present analysis method, the topological structure and quantitative indicator of recurrent plot of the leakage current were obtained to reflect the influence mechanism of environmental factors on the outdoor insulation. The recurrent plot method was established for the relationship between the leakage current and the insulator performance.

Finally, the phenomena of the rime flashover were observed and the non-linear characteristics of leakage current were analyzed. The experiments are helpful to monitor and reveal the process and mechanism of insulator flashover in rime conditions. The results show that the recurrent plot of leakage current can qualitatively reveal the discharge characteristics during the rime flashover process, and the further quantitative analysis enhances the monitoring and the understanding of the flashover mechanism.

In conclusion, the recurrent plot technique gives a visible monitoring method for outdoor insulators to monitor the flashover process and evaluate the operating performance. The topological structure of recurrent plot and its quantification indicators can effectively represent the surface performance and further reveal the characteristics and state transition of surface discharges during the flashover process. Therefore, the recurrent plot analysis of leakage current is an effective method for the insulator monitoring system.

KEY WORDS: outdoor insulator; leakage current; chaos characteristics; recurrent plot; recurrent quantification indicator; contamination experiment; heavy fog; rime condition; flashover; performance monitoring

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：刘尧 签字日期：2009 年 5 月 25 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：刘尧

导师签名：李海

签字日期：2009 年 5 月 25 日

签字日期：2009 年 5 月 25 日

第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

在电力系统及其输变电设备中,绝缘子能够同时满足机械负荷与电气绝缘双重性能的要求。伴随着超高压、特高压输电工程的开展,绝缘子在得到日益广泛应用的同时,也成为影响电网安全稳定运行的重要因素^[1-5]。在污秽物以及雾、雨、雪等大气环境的共同作用下,绝缘子的绝缘性能必然受到影响,甚至在正常运行电压下发生闪络事故,不仅严重威胁电力系统的安全可靠运行,而且给社会经济造成重大损失^[6-10]。例如:2001年2月下旬,东北、华北和河南电网相继发生了大面积、恶性的污闪跳闸事故,仅辽宁省损失电量就高达9370 MW·h^[7, 9]。2002年1月,湖南省常德、湘潭地区的220 kV和500 kV线路连续发生污闪跳闸事故^[11]。2005年1月,广东电网接连发生大面积污闪跳闸事故,导致4条500 kV线路停电^[12]。2006年1、2月份灾害性的浓雾天气引发天津电网由110 kV至500 kV线路接连发生闪络事故。为了防止闪络事故的发生,虽然耐污绝缘子、合成绝缘子、憎水性涂料以及调整爬距、定期清洗等措施在一定程度上起到了积极作用,但是污闪事故仍不断发生,其中一个主要原因就是无法全面掌握绝缘子运行状态的有效信息^[13]。因此,开展绝缘子运行状态的检测研究,不仅有助于预防闪络事故的发生,提高绝缘子使用的可靠性,而且能够加强对绝缘子的监管能力,减少维护费用,对保障电力系统安全运行具有重大的现实意义^[14-20]。

当前,国内外采用的绝缘子表面状态的检测方法主要有:等值附盐密度法、污层电导率测量法和泄漏电流测量法^[1, 14, 21-23]。在这些方法中,等值附盐密度法是当前电力生产运行部门广泛采用的检测绝缘子污秽程度的重要参数,该方法虽然简便易行,但是无法实时反映绝缘子表面状态,并且有些测量结果与真实情况存在一定的差异;污层电导率测量法包括整体表面电导率法和局部表面电导率法,能够有效反映绝缘子表面绝缘特性,但是该方法对试验设备与测试条件要求较为严格,通常用于抽样评估某一地区绝缘子的整体情况,而不能连续对绝缘子进行检测。上述两种方法均无法对绝缘子运行状态进行实时的连续检测,相比较而言,泄漏电流测量法可以连续对绝缘子进行检测,能够及时、准确地反映各种动态参数对绝缘子运行状态的影响。

泄漏电流贯穿于绝缘子运行过程始终,能够在运行中连续、直观、综合地反

映各种因素对绝缘子表面状态的影响,已经成为当前绝缘子运行状态检测的研究热点。绝缘子表面泄漏电流是指在运行电压下流过绝缘子表面的电流,它能够实时反映电压、大气环境(雾、温度、相对湿度等)与污秽等动态参数对绝缘子的影响。在干燥天气下,绝缘子表面即使受到工业污秽、自然盐碱等的污染形成污层,但是由于此时污层的电导率不高,泄漏电流仍然保持很小的数值。当环境因素造成污染物的电导率增大时,污层在绝缘子表面形成导电通路,在正常运行电压下泄漏电流显著增加。由于绝缘子结构、形状以及表面污层分布及其受潮程度不均等因素的影响,绝缘子表面泄漏电流密度存在很大差异,在泄漏电流焦耳热作用下,绝缘子表面局部被干燥,润湿区和干燥区交替出现,表面电压分布随之改变,并且干燥区所承受的电压逐渐增大。当干区电压超过空气的击穿电压时,该处就会出现放电现象,放电的伏安特性导致泄漏电流增大,波形也会发生相应的畸变;随着表面干燥区放电的逐渐增多、增强与延伸,绝缘子表面出现局部电弧;当污层电阻不断减小而泄漏电流不断增大时,局部电弧能够继续发展和延伸而超过临界状态的时候,电弧就会贯穿绝缘子两侧金具引发闪络。

综上所述,绝缘子表面的动态变化必然引起流过绝缘子表面的泄漏电流发生变化,通过检测泄漏电流可以随时反映绝缘子在各种因素影响下真实的运行状态,一方面可以为绝缘子管理维护工作提供可靠的数据支持,另一方面有助于建立绝缘子运行状态与运行环境参数的动态信息库,为绝缘子运行状态检测与闪络预测提供科学的依据。

然而,绝缘子表面泄漏电流的变化存在很大随机性,该特性除了与绝缘子自身材料、结构复杂性有关外,还与运行环境所引发的表面放电随机性和复杂性有关^[24-26]。绝缘子表面放电是一个复杂的随机现象。从宏观上来看,放电过程表现出一些看似杂乱无章的随机特性,即使在相同的环境下,绝缘子的表面放电和闪络过程仍然存在差别,这些都是混沌现象中系统内在结构复杂性的外在随机性体现。此外,随着表面放电的发展,绝缘子发生闪络的时刻也存在很大差异,这是表面放电内在确定性和外在随机性的集中表现。这些现象均属于混沌理论的研究对象。如果能够验证绝缘子表面放电具有混沌特性,可以考虑将混沌等非线性特征分析的理论引入绝缘子表面泄漏电流的分析,揭示不规则表面放电的规律性,并利用混沌的时间序列处理方法对放电信号进行分析,一方面可以有效促进对绝缘子运行状态的检测和表面放电特征的理解;另一方面可以增强对绝缘子闪络现象的分析和闪络机理的研究。

因此,将混沌理论应用于绝缘子状态检测领域不仅能够增强对绝缘子表面放电复杂程度的判定与预测,而且能够促进绝缘子运行状态检测与评估方法的不断进步和完善。

1.2 基于泄漏电流分析的绝缘子检测研究现状

基于泄漏电流的绝缘子运行状态检测研究开始于20世纪50年代,伴随着绝缘子闪络事故的逐渐增多,传统的检测方法已经无法满足绝缘子监测与维护工作的要求,迫切需要新的检测方法提高检测准确性,同时进一步增强对闪络现象与机理的深入理解。然而,由于当时测量与分析技术的限制,泄漏电流检测方法的研究进展相对缓慢。随着测量方法与检测技术的不断发展,特别是计算机技术与信号处理技术的迅猛发展,为泄漏电流检测绝缘子运行状态提供了强大的测量与分析方面的支持,推动了泄漏电流检测方法的飞速发展^[21]。

1.2.1 泄漏电流值检测法

泄漏电流值的大小是最直观的泄漏电流特征,它在一定程度上与绝缘子表面状态、放电现象乃至闪络过程具有一致性,因此成为早期泄漏电流检测绝缘子运行状态的研究热点。

由于绝缘子泄漏电流值的大小与运行电压、绝缘子自身材料和结构参数、大气湿度以及环境温度等因素有关,很难用精确的模型对泄漏电流值的变化进行模拟。当前,主要采用模拟试验和现场测量的方式检测不同条件下流过绝缘子表面泄漏电流的大小,通过分析泄漏电流的幅值、最大值、峰值、平均值和有效值,实现绝缘子运行状态的检测研究。

文献[26]对盘型悬式绝缘子在受潮至饱和过程的表面状态进行了检测研究,通过观察绝缘子表面典型的放电现象,建立了泄漏电流幅值与绝缘子表面状态的对应关系,为现场检测绝缘子染污状态提供了一种直观、初步的诊断方法。日本 Matsuoka 等研究人员通过泄漏电流幅值研究了复合绝缘子表面老化程度与绝缘子结构类型的关系,提出了泄漏电流幅值可以有效表征绝缘子表面的状态变化^[27]。为了确定绝缘子闪络的发生和发展,国内外研究人员根据泄漏电流幅值的变化将闪络过程分为不同阶段,在确定各个阶段泄漏电流报警值的基础上,提出了连续监测泄漏电流幅值以降低绝缘子闪络事故的检测方法^[18, 28-30]。同时,为了进一步提高泄漏电流值检测绝缘子运行状态的及时性和有效性,研究人员获取了泄漏电流的有效值以及单位时间内的峰值、最大值和平均值,在此基础上分析了绝缘子表面状态及其影响因素,进一步建立了泄漏电流与等值附盐密度、绝缘子结构特征、表面污秽状况、污闪电压以及雾的参数、大气湿度等气象条件的变化关系^[22, 31-35]。

上述传统的泄漏电流幅值检测法都是在工频电源下开展的研究,测量结果容易受到外界因素的干扰,并且所需要的设备和条件相对复杂。因此,文献[36]提

出了采用高频高压电源对绝缘子进行检测试验,建立了高频泄漏电流幅值与绝缘子表面状态的关系,降低了试验对绝缘子表面状态的破坏,同时提高了检测的准确性和抗干扰性。

但是,由于影响泄漏电流的因素很多,对于在不同环境下运行的不同类型绝缘子,泄漏电流值的变化存在较大的分散性,导致该检测法存在一定的局限性,需要进行大量试验研究,确定统一的幅值报警值。

1.2.2 泄漏电流脉冲检测法

当绝缘子表面电阻下降、导电能力增强时,在运行电压下泄漏电流逐渐增大,在泄漏电流焦耳热的作用下,润湿的污秽层出现局部干燥现象,表面电阻局部增大,绝缘子表面电压分布发生改变,当干燥区电压超过空气击穿电压时就会发生局部放电,产生泄漏电流脉冲。随着绝缘子表面干燥区逐渐被击穿,泄漏电流的脉冲也会逐渐增加,绝缘子在发生闪络之前会产生较大的局部电弧和放电脉冲,脉冲幅值的增大以及脉冲频率的增加是闪络的一个征兆,表面状态的不同导致出现泄漏电流脉冲的幅值和频率也不同^[26]。因此,单位时间内脉冲电流峰值和脉冲计数法成为泄漏电流的重要特征量,在一定程度上可以反映绝缘子的表面状态。单位时间内脉冲电流峰值是指在规定时间内测量的放电脉冲的最大值;脉冲计数法是在将泄漏电流幅值按照规定阈值划分为不同档次的基础上统计各个档次出现的脉冲个数。

泄漏电流脉冲测量法一方面能够反映绝缘子表面放电和闪络过程,另一方面便于实现在线检测,已经成为众多研究人员开展绝缘子状态研究以及研发检测装置的首选参数。文献[37]分析了不同老化程度下绝缘子表面放电脉冲发生的频率,明确了脉冲个数可以检测各种因素对绝缘子运行状态的影响。文献[38]基于泄漏电流脉冲幅值与数量统计,评估了不同雾的电导率下绝缘子的运行状态。虽然泄漏电流脉冲幅值与绝缘子污闪梯度之间存在负指数幂的关系^[39],但是文献[40]指出在利用泄漏电流脉冲幅值检测绝缘子表面状态时,需要考虑和校正各种参数的影响,如:绝缘子结构、运行电压波动、大气相对湿度、雾的浓雾、污秽程度、等。文献[41]采用非滤波方式将泄漏电流的工频分量与脉冲分量进行了分离,提出了脉冲个数统计以及脉冲放电量能够有效研究绝缘子污闪机理。文献[42]采用恒压洁净雾试验方法分析了潮湿条件下泄漏电流脉冲个数及脉冲放电量与污闪之间的关系,指出脉冲发生频率与污闪存在密切联系,在污闪发生之前脉冲个数与放电量均呈现较高的上升速度。文献[43]在高海拔地区进行了玻璃绝缘子直流污闪试验,总结了泄漏电流脉冲幅值、数量、电量等参数随污秽程度的变化规律,随着污秽程度的增加,泄漏电流脉冲特征量均出现一定比例的增长,

可以作为检测绝缘子表面状态的重要特征参数。文献[44]在定义泄漏电流脉冲的基础上,在不同的污秽条件下建立了脉冲个数与大气相对湿度的关系,对潮湿污秽环境下的绝缘子表面状态进行了表征。

综上所述,研究人员对泄漏电流脉冲幅值与脉冲个数进行了大量研究,建立了这两个脉冲特征量与绝缘子运行状态以及闪络过程的关系,推动了对绝缘子表面放电、闪络机理及其影响因素的理解,并且根据研究结果研制了绝缘子在线检测装置,有助于提高绝缘子状态检测的及时性与准确性。

但是,由于影响泄漏电流的因素很多且相互之间联系较为复杂,尚不能确定绝缘子结构特征、大气条件等许多因素对脉冲特征的影响,泄漏电流脉冲幅值也因此存在较大的随机性和分散性,导致当前的研究结果存在一定的差异。同时,由于泄漏电流脉冲计数是在脉冲幅值划分基础上进行的,目前尚未形成统一的脉冲定义及其幅值划分标准,脉冲计数法的研究结果及其检测装置都是基于各自的脉冲定义,限制了该检测方法的数据对比及应用。

1.2.3 泄漏电流频域检测法

泄漏电流值检测法与脉冲测量法均属于对泄漏电流时域特征进行的分析,无法有效反映泄漏电流波形各种畸变程度下所表征的绝缘子表面放电现象与放电机理。因此,国内外研究人员利用频域分析方法对泄漏电流频率特性进行分析,建立了频谱特征与绝缘子表面状态以及闪络过程之间的对应关系。

当前广泛采用快速傅立叶变换(FFT)和小波变换的方法对泄漏电流进行频域分析,将泄漏电流中的频率组分提取出来进行分析,建立这些分量与绝缘子运行状态的关系。Gubanski 通过分析泄漏电流频率特征将其分为容性电流、阻性电流和非线性电流:容性电流表明绝缘子表面具有较好的憎水性;阻性电流表明绝缘子表面憎水性逐渐丧失形成导电通路;非线性电流表明绝缘子表面形成干燥带进而引发了干燥带放电,此时泄漏电流中的3次和5次谐波分量显著增加^[45]。因此,泄漏电流的各个频率组分与绝缘子表面动态特征存在着一定的联系,并且能够反映各种因素对绝缘子的影响。

Suda 分别在实验室和现场运行条件下测量了不同污秽程度下流过绝缘子表面的泄漏电流,采用加有汉宁窗的FFT变换得到了泄漏电流的频率分布,提取其中的基波、3次、5次和7次谐波分别进行分析,提出了预防绝缘子发生闪络事故的谐波预警值^[18, 46, 47]。Kumagai 采用小波变换方法提取并计算了泄漏电流3次谐波与基波分量的比值,在分析泄漏电流波形畸变程度的基础上,将污秽绝缘子表面泄漏电流分为正弦分量、局部电弧以及过渡分量,通过建立各个分量下累积电量与污秽程度的关系,评估了绝缘子表面憎水性的变化特征^[19]。Cherney 等

研究人员指出泄漏电流峰值和脉冲等时域参数并不能有效反映绝缘子表面状态以及放电现象与特征,进而采集了不同污秽程度和电场强度下多种结构类型绝缘子表面的泄漏电流,利用FFT变换方法提取泄漏电流的基波、3次和5次谐波分量,通过分析各个分量的变化特征揭示了绝缘子表面的动态变化及其参数的影响,得出了泄漏电流基波和低频谐波分量能够有效评估绝缘子的表面状态^[48-51]。当前,国内研究人员也开展了一系列基于泄漏电流低频分量的绝缘子运行状态检测研究,分析相对湿度与污秽度对绝缘子表面动态特征的影响^[36, 52-54]。

从当前泄漏电流频率分布与特征的绝缘子运行状态检测研究可以看出,大多数研究人员认为泄漏电流低频组分含有较多的信息,也就将研究主要集中在泄漏电流的低频组分,即基波、3次和5次谐波分量,而忽略了对泄漏电流其它频率组分,特别是高频组分的分析。因此,韩国的研究人员提出采用泄漏电流高频分量检测绝缘子运行状态,在分析绝缘子闪络发展各个阶段泄漏电流及其频谱特征典型变化的基础上,建立了泄漏电流高频(1.25 kHz—2.5 kHz)分量随闪络过程的变化特征,进而预防闪络事故^[55]。

综上所述,当前采用泄漏电流频率分布与特征检测绝缘子运行状态的研究主要基于某一部分频率分量,同时也尚需考虑更多的影响因素,从而能够全面系统地研究绝缘子泄漏电流频率分布以及各个频率分量之间的关系,进一步探讨基于泄漏电流频率特征的绝缘子状态检测的可行性和可靠性。

1.2.4 人工神经网络检测法

人工神经网络通过计算机网络系统模拟人脑神经网络功能对各种领域进行认知的智能系统。神经网络的每个结点相当于神经元,可以记忆和处理一定的信息并与其它结点并行工作,以达到处理信息的目的。当前,神经网络广泛应用于模式识别、预测、控制、联想记忆等领域,实现了这些领域中从大量原始数据中定量获取内在、有效的规律。因此,国内外研究人员将人工神经网络应用于绝缘子状态检测,特别是预测泄漏电流值预防绝缘子发生闪络事故。

Chakravorti等研究人员以平板污秽绝缘子为模型,采用人工神经网络建立了闪络时间(t)与施加电压(V)、模型长度(L)和污层电阻(R_p)的函数关系,通过大量试验数据对该网络进行拟合与训练,得出人工神经网络能够准确评估函数 $t = f(V, L, R_p)$,有效揭示了各个参数之间的非线性关系,进而预测闪络发生的时间^[56, 57]。同时,神经网络也逐渐应用于诊断绝缘子电痕现象以及评估绝缘子表面污秽程度。Ugur等人研究了绝缘子表面放电、泄漏电流、干燥区情况、破坏程度以及起始电痕的关系,通过对神经网络进行训练能够实时监测绝缘子表面状态,建立绝缘子表面破坏情形的预警机制^[58]。Gubanski等研究人员采用人工神经

网络对泄漏电流进行模式识别,分别采用三种神经网络对泄漏电流的3次谐波、5次谐波进行评估,以及从表明放电中识别正弦、非线性和转换组分,建立了泄漏电流幅值、波形畸变程度和绝缘子闪络预测的关系^[45]。文献[59]在绝缘子人工污秽闪络试验基础上,通过闪络过程中超声波与泄漏电流的测量数据对神经网络进行训练,从而有效预测闪络的发生。Dixit等研究人员在Ayrton方程表征电弧电压的基础上,通过电流值和Ayrton常数对神经网络进行训练,建立了电弧发展三个阶段的识别模型^[60]。加拿大研究人员利用BP神经网络能够实现输入到输出的映射功能,通过学习带正确答案的实例集自动提取合理的求解规则,预测人工盐雾环境下硅橡胶绝缘子的表面泄漏电流,同时比较了单层前馈式、两层前馈式、串并联叠层BP神经网络和两层串并联叠层BP神经网络训练方法的预测错误比例,表明两层前馈式神经网络收敛性最好^[61, 62]。Kontargyri等研究人员通过绝缘子结构尺寸、泄漏距离、形状因子以及ESDD等参数训练神经网络,经过训练、评估和测试,提供了各个神经元、激励函数、学习率等参数下的最优训练算法,从而实现了对污秽绝缘子闪络电压的预测^[63, 64]。

目前,国内研究人员也逐渐基于神经网络的绝缘子运行状态监测与预测的研究工作。文献[65]采用小波神经网络对绝缘子泄漏电流进行了预测,在综合小波变换与传统神经网络优点的基础上,选择小波基函数通过伸缩、平移等运算功能对泄漏电流信号进行多尺度细化,然后采用BP算法对选取的三层神经网络进行训练确定各个参数,从而建立了小波神经网络的预测模型,该模型具有更为灵活有效的函数逼近能力和较强的容错能力。文献[66]建立了神经网络映射下的绝缘子闪络电压与覆冰厚度、气压、温度等环境条件的关系,利用实验室条件下获取的绝缘子污闪数据对该模型进行了训练和验证,分析单个以及多个环境因素对绝缘子闪络电压的影响,提出了基于人工神经网络的输电线路外绝缘的选取方法。文献[67]通过研究泄漏电流的BP神经网络预测方法,指出BP神经网络具有结构简单、可靠性强的优点,能够有效应用于复杂系统的建模。文献[68]采用BP神经网络建立了泄漏电流最大值与相对湿度的对应关系,通过人工污秽试验下绝缘子泄漏电流的试验样本对该网络进行训练和验证,提出了神经网络可以有效预测不同湿度下的泄漏电流最大值。文献[69]以泄漏电流最大值、泄漏电流脉冲、相对湿度和环境温度为输入参数,采用BP人工神经网络建立了绝缘子表面等值附盐密度的预测模型,有助于确定污秽等级和绘制电网污区分布图。

综上所述,针对绝缘子泄漏电流自身及其影响因素的复杂性,人工神经网络在一定程度上能够建立绝缘子状态预测模型,有助于分析各种因素对绝缘子的影响,预防闪络事故的发生。然而,训练和验证神经网络预测模型的数据大多来自人工污秽试验或者变电站和线路绝缘子泄漏电流的在线监测装置,所获得数据不

仅包括泄漏电流特征量,还有大量的环境变量,如运行电压、环境温度、大气湿度、风力和降雨等。因此,这种高维数、大数据量的数据必然导致预测模型是一个复杂的系统,其历史数据包含很多因素,进而容易导致数据提取规则长度变长,计算缓慢。同时,如果将与预测值不相关的变量引入预测模型,还可能增加预测误差,给全面、准确引入模型变量带来了困难。

1.2.5 基于回归分析的检测方法

泄漏电流回归分析法是在绝缘子人工试验或者现场监测获取的数据基础上,采用数理统计的方法建立泄漏电流特征值、闪络电压及其影响因素的函数表达式,从而对绝缘子运行状态进行预测。由于影响绝缘子运行的因素较多,回归分析常常涉及两个及以上自变量,称为多元回归分析法。

Gorur 等研究人员在实验室研究了染污绝缘子的统计特性,基于统计数据采用线性回归方法建立了绝缘子闪络概率与施加电压的关系,并根据此模型对现场运行的绝缘子进行了评估^[70]。文献[71]将多元回归分析法应用于绝缘子泄漏电流的预测,通过测量污秽试验下绝缘子泄漏电流及其运行参数,如:相对湿度、降雨量、太阳辐射、环境温度、风向以及表面污秽程度,根据泄漏电流随这些因素的变化规律建立自变量与变量之间的回归方程,从而实现绝缘子运行状态的预测。文献[72]基于绝缘子人工污秽试验数据建立了泄漏电流与试验时间、相对湿度和环境温度的回归方程,进而分析了泄漏电流的变化与各个因素的相关性,指出相对湿度及其持续时间对泄漏电流的影响较为严重。文献[73]采用人工试验与回归分析相结合的方法,以绝缘子表面电阻、污秽等级和泄漏距离为主要参数的绝缘子闪络电压回归方程,一方面评估绝缘子污秽闪络特征,另一方面有助于不同系统电压下选择合适的绝缘子。

1.2.6 基于模糊理论的检测方法

模糊理论是在 1965 年 L. A. Zadeh 教授创立的模糊集合理论的数学基础上发展起来的,主要包括模糊集合理论、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等内容。为了进一步分析和判断绝缘子运行状态及其污闪发展趋势,研究人员将模糊理论引入绝缘子状态检测与预警系统,根据测量的绝缘子泄漏电流幅值、脉冲个数、相对湿度、环境温度等参数,利用多级模糊综合评判方法对绝缘子进行系统地评价,从而做出科学的预测和判断。

文献[74]在模拟试验和现场测试绝缘子表面泄漏电流的基础上,重点分析了温度、湿度等环境因素对不同污秽程度下绝缘子运行状态的影响,提出了基于模糊逻辑推理的绝缘子表面污秽程度的评定方法,建立一套模糊推理规则以确定各

个因素之间的复杂非线性关系。文献[75]基于绝缘子电气绝缘特性的理论分析,选择电晕电流概率,泄漏电流有效值,泄漏电流峰值以及脉冲频度等变量作为模糊输入参数,通过模糊参数的模糊隶属度函数及模糊关系矩阵的建立,实现了模糊逻辑方法对绝缘子运行状态的综合评定。文献[76]采用模糊逻辑方法建立了不同时间下绝缘子表面泄漏电流峰值与环境湿度的模糊报警方式,在体现环境因素对污闪作用的同时,表明相同绝缘子泄漏电流在不同环境湿度下的危害性也存在一定差异,在更符合绝缘子实际运行状况的基础上以期实现对绝缘子闪络事故的预测。文献[77]采用模糊综合评判方法对绝缘子在线检测的数据进行处理,针对泄漏电流峰值、泄漏电流有效值、泄漏电流奇次谐波、脉冲频度和脉冲峰值建立隶属函数,构建第1级和第2级模糊关系矩阵,通过多级模糊综合评判可以直观给出绝缘子在线实时的绝缘性能和检修建议。文献[78]基于模糊逻辑方法的函数估计对绝缘子污闪时间进行了分析和预测,提高了绝缘子状态检测的准确性和有效性。

除了上述的泄漏电流分析检测绝缘子运行状态的方法之外,现代谱技术、灰关联分析、最小二乘支持向量机法等数据挖掘和处理方法也被应用于绝缘子运行状态的检测^[79-81]。

综上所述,随着绝缘子防污闪工作的日益加强,绝缘子运行状态检测技术不断发展和应用。泄漏电流检测方法能够综合考虑多种因素,如:相对湿度、环境温度、电压等级、污秽等级以及各种恶劣天气等,能够建立基于泄漏电流特征值的多参数检测方法,较为全面和准确地评估绝缘子表面状态,在一定程度上推动了对绝缘子进行监测、诊断、维护和替换工作,提高了绝缘子运行的安全性和可靠性。然而,由于影响绝缘子泄漏电流的因素很多,当前泄漏电流特征量的选取与研究结果存在较大的分散性,尚未形成统一的绝缘子运行状态预警系统,仍然需要进行大量的试验和分析,在总结当前研究方法的优点同时,进一步挖掘泄漏电流的内在变化机理,改善检测方法,明确检测机理,尽量将检测结果可视化。同时,基于泄漏电流的分析,建立绝缘子泄漏电流随各种环境因素变化的数据库,有效涵盖各种运行环境下绝缘子表面状态及其变化特征,从而能够及时反映绝缘子的绝缘性能,预防闪络事故的发生。这样不仅能够提高绝缘子状态检测的准确性和可靠性,而且为绝缘子从计划检修实现状态检修提供了科学依据。

1.3 研究内容与结构安排

从国内外泄漏电流检测绝缘子运行状态的总体研究情况上来看,虽然已经具备了一定的理论和实践基础,但是尚未形成统一的检测方法 with 标准,不同系统和

方法的检测结果之间存在一定的差异。因此,有必要继续开展绝缘子泄漏电流检测方法的研究工作,进一步挖掘泄漏电流内部特征与绝缘子外在状态的对应关系,减少各种参数:绝缘子形状、大气条件、污秽程度等对检测结果的影响。研究结果在理论上,有助于推动对绝缘子闪络现象与机理的研究,建立绝缘子闪络过程中泄漏电流的变化特征与污秽程度、大气相对湿度、环境温度等参数的关系;在工程上,能够进一步提高绝缘子状态检测的及时性与有效性,保障电力系统及其输变电设备的安全可靠运行。

第二章针对绝缘子在冬、春季节持续性浓雾天气下容易发生的闪络故障,在实验室条件下采用超声波盐雾发生装置开展绝缘子浓雾闪络实验,同时从介绍混沌理论的发展历程及其主要特征入手,基于闪络过程中泄漏电流的时间序列重构方法进行非线性特征分析,计算和分析了泄漏电流的 Lyapunov 指数、分形维数、功率谱密度、吸引子相图以及 Poincare 截面等混沌参数,进而判定了绝缘子闪络过程中泄漏电流的变化是否具有混沌特征。

第三章从泄漏电流谐波分量法检测绝缘子运行状态的研究现状入手,采用小波变化方法提取绝缘子浓雾闪络过程中泄漏电流的频率分布与特征,并将其分为低频、中频和高频分量三部分,进而采用相空间重构技术将这些频率分量的时间序列拓展至 m 维空间,运用递归图技术和递归定量分析法揭示闪络过程中各个频率分量的动态变化特征,将绝缘子表面放电的动态变化以及闪络过程与机理在二维递归图谱中表征出来,为绝缘子闪络监测提供了一种科学、有效的可视化监测方法。

第四章从污秽程度、环境温度和大气湿度对绝缘子的影响入手,在实验室大气环境模拟试验系统下开展各种典型环境下的绝缘子运行状态检测试验,建立了绝缘子泄漏电流随污秽等级、温度、湿度参数的变化特征。在应用当前广泛采用的泄漏电流特征分析方法的基础上,进一步采用递归图技术及其定量分析法对绝缘子运行状态进行检测与评估,有效反映了不用运行环境下绝缘子表面状态的变化特征与内在机理。

第五章从雾凇环境引发的绝缘子闪络事故入手,基于雾凇闪络现象的观察与泄漏电流的非线性特征分析,监测并揭示了绝缘子在雾凇环境下的闪络过程与机理,并且根据递归图及其定量指标的变化对绝缘子雾凇闪络发展各个阶段的表面放电特征进行了表征,增强了对闪络过程的监测以及对闪络机理的理解。

最后,通过对全文进行总结,提出泄漏电流递归分析法为监测绝缘子闪络过程以及检测绝缘子运行状态提供了一种及时、准确的可视化检测方法,根据泄漏电流递归图的拓扑结构及其定量指标可以有效表征绝缘子的表面状态,揭示放电特征及其发展、转换过程。

1.4 创新点

本文基于混沌理论的递归分析法,研究了绝缘子表面泄漏电流的非线性特征,采用递归图技术及递归定量分析法对绝缘子运行状态进行可视化检测,进一步揭示了典型运行环境下绝缘子表面的动态变化特征以及浓雾和雾凇环境下绝缘子的闪络过程与机理。

(1) 将混沌判别法引入绝缘子表面泄漏电流时间序列的分析之中,通过计算和分析泄漏电流的 Lyapunov 指数、分形维数、功率谱密度、吸引子相图以及 Poincare 截面,发现闪络过程中泄漏电流具有如下变化: 1) 最大 Lyapunov 指数均为正; 2) 随着嵌入维数的增加,分形维数趋于饱和; 3) 功率谱图具有很多特征频率; 4) 吸引子相图在空间从类似十字形结构发展到集中的团状结构; 5) Poincare 截面呈现出一些成片的、具有分形结构的密集点。因此,根据研究结果可以判定绝缘子表面泄漏电流的变化具有混沌特征,论证了采用泄漏电流递归分析法对绝缘子运行状态进行检测的可行性。

(2) 采用泄漏电流递归图及递归定量分析法系统检测与研究了绝缘子在浓雾和雾凇环境下的闪络过程与机理,揭示闪络过程中泄漏电流频率分量的动态变化特征,表明泄漏电流的高频分量能够有效反映绝缘子表面放电的非线性特征。通过分析泄漏电流递归图拓扑结构的突变以及纹理结构的交替变化,在二维图谱中直观表征了绝缘子表面放电的动力学特征及其在闪络过程中的发展变化,并且递归定量分析进一步反映了绝缘子闪络发展各个阶段的表面放电特征,为绝缘子闪络监测提供了一种有效的可视化检测方法。

(3) 在论证当前广泛采用的泄漏电流特征分析检测绝缘子运行状态的基础上,采用递归图技术及其定量分析对绝缘子在典型运行环境下的表面状态进行检测,建立泄漏电流非线性特征与污秽等级、环境温度、大气湿度等参数的关系,结果表明递归图拓扑结构的变化特征与绝缘子表面的动态变化具有很好的一致性,准确、直观地反映了绝缘子的运行状态。

第二章 绝缘子表面泄漏电流的混沌判断与分析

2.1 引言

混沌理论的出现与发展促进了人们对各种非线性现象的认识,已经成为非线性科学研究的主体之一^[79],并且逐渐渗透到自然与社会科学研究的各个领域,得到了广泛的应用与发展。

绝缘子表面放电及其特征直接影响绝缘子的安全可靠运行。随着表面放电的发展、减弱、继续发展与不断延伸,泄漏电流的随机性和不规则性逐渐增强,准确分析和掌握泄漏电流的变化规律对监测和检测绝缘子运行状态具有重大意义。由于放电现象具有高度的复杂性和非线性,传统的建模方法无法准确描述其变化规律。本章基于混沌理论的发展与特征,计算和分析了绝缘子浓雾闪络过程中泄漏电流时间序列的非线性参数: Lyapunov 指数; 分形维数; 功率谱指数; 吸引子相图以及庞加莱截面。结果表明绝缘子表面泄漏电流具有混沌状态和特征,采用混沌分析方法可以直接反映绝缘子表面状态以及放电现象与放电机理,以期提高绝缘子状态检测的准确性与可靠性。

2.2 混沌的发展与特征

2.2.1 混沌的发展历程

通常认为,混沌系统是一个确定性的非线性系统,含有貌似噪声的有界行为同时表现若干特性。该理论起源于 20 世纪初 Poincaré 在动力学与拓扑学基础上研究太阳系稳定性问题时发现的一种保守系统中的混沌现象^[80]。该现象于 1954 年被 Kolmogorov 在探索概率起源过程中从理论上得到了明确^[81],其学生 Arnold 进而给出了严格的数学证明^[82]。1963 年, Lorenz 在研究温度梯度下大气的自然对流系统时提出了一种简化模型,即著名的洛伦兹方程^[83],首次给出了一个确定方程在耗散系统中能够推导出混沌解的实例。从而, Kolmogorov 与 Lorenz 分别从不同角度证明了保守系统与耗散系统在动力学演化过程中均能出现混沌态。

20 世纪 70 年代初, Ruelle 与 Takens 通过严格的数学分析发现动力系统中存

在一种复杂吸引子（奇怪吸引子），并证明与这种吸引子相关的运动即为混沌，在学术界开辟了第一条通向混沌的道路^[84]。1975 年李天岩与 Yorke 发表并证明了一个关于混沌的数学定理，即著名的 Li-Yorke 定理^[85]。1976 年，May 系统分析了 Logistic 方程的动力学特征，在考察混沌精细结构的基础上绘制分叉轮廓图，提出了切分叉、基本动力学单元、敏感函数、周期窗口、树枝分叉等混沌学词汇，促进了混沌理论的发展。1978 年，Feigenbaum 发现了倍周期分叉过程中的收敛率是个常数，即 Feigenbaum 常数，同时把相变临界态理论引入混沌研究，建立了一维映射混沌现象的普适理论，成为混沌学从定性分析进入定量计算的重要里程碑。20 世纪 80 年代，混沌学的研究进入了对混沌特征和结构的系统研究与总结。1980 年 Mandelbrot 绘制了世界上首张混沌图形，Takens 等提出了相空间重构的时间延迟法，Grassberger 和 Procaccia 根据相空间重构法得到了奇怪吸引子的分数维、Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵等统计特征，混沌理论因此开始了实际应用。

2.2.2 混沌的主要特征

混沌学以其深刻数学内涵促进了非线性物理学的迅猛发展，基于系统讨论混沌初值敏感性、拓扑结构的传递性与随机性，以及 Lyapunov 指数、分数维和奇怪吸引子等参数，混沌已经在化学反应、天气预报、湍流、光学等许多领域得到了广泛应用，其主要特征如下：

2.2.2.1 初始条件的敏感性

混沌现象表明初始条件的微小变化能够导致最终现象发生根本性的改变，初始信息经过不断处理和迭代后已经与结果没有了关系。因此，混沌对初始条件具有强烈的敏感性，此特征的出现不是计算误差形成的，而是由非线性系统的固有特性所决定^[86]。

2.2.2.2 伸长性与折叠性

导致混沌对初始条件敏感的主要机制是混沌的伸长性和折叠性，经过特征点的多次伸长与折叠才能形成混沌。伸长性是指由于系统内部局部不稳定，混沌特征点之间的距离增大。折叠性是指由于系统整体稳定，混沌特征点之间的距离受到限制。

2.2.2.3 自相似性与层次性

伸长性与折叠性导致混沌具备各种尺寸且无特征的尺度，混沌结构中稳定的周期性与不稳定性结构重复交替，形成明显的层次性与自相关性。

2.2.2.4 独特的吸引子

混沌系统的整体稳定性与局部不稳定性导致吸引子具有正的 Lyapunov 指数，并且只能通过分数维表征。

2.3 泄漏电流序列的相空间重构

在当前绝缘子泄漏电流分析中，测量精度的差异性、计算统计的复杂性以及其它本质上可能存在的非确定性因素已经制约了基于泄漏电流的绝缘子运行状态监测与评估。然而，混沌理论的发展及其在科技上的应用，结合对拓扑学以及时间序列的背景和动力学机制的深入分析，有助于进一步研究泄漏电流时间序列的内在特征。

当前，广泛采用延迟坐标状态空间重构法，即相空间重构法，分析时间序列的动力学特征，通过在高维相空间中恢复混沌吸引子，体现系统的内在规律性。该规律性表现为混沌系统最终会进入某一特定轨迹之中，这种特定的轨迹即为混沌吸引子。系统内部任何一个分量的发展与演化取决于与之相互作用的其它分量的变化，这些相关分量的信息就隐含在任何一个分量的发展过程中^[87]。因此，系统原来的规律可以从某一分量的时间序列中提取和恢复出来，这种规律在高维空间下是一种轨迹。对于混沌系统来说，系统产生的轨迹经过一定时期的变化，最终出现一种有规律的运动，形成规则有形的轨迹，即混沌吸引子。同时，混沌系统的轨迹经过拉伸和折叠转化成相关的时间相关序列时，又会呈现混乱、复杂的特征。

大多数情况下，非线性系统的相空间维数不能确定。在实际问题中，通常将给定的时间序列扩展到 2 维或更高一些维数的空间中，这样就可以有效显露其内在的信息与特征^[88]。

根据泄漏电流的时域特征，本研究采用 Takens 嵌入定理对其时间序列进行重构。Takens 嵌入理论具有如下特点：（1）嵌入变换重构相空间得到的状态轨道保留了原空间轨道的最主要特征；（2）尽管轨道发生了变形，但两个空间存在等价关系；（3）嵌入变换是光滑的一对一映射，不改变轨道上点的次序，保留了原方向；（4）原空间轨道与嵌入空间具有一致的发散或闭合性；（5）保留了原空间固定点的稳定特征。

因此，在只考虑一个分量的基础上，将一些固定时间延迟点的观测值在新维空间进行处理，从而通过“嵌入”方法构造与原系统等价的相空间，并在这个空间中恢复原有的动力系统。然而，重构准确的相空间必须满足一个条件，即状态矢量的每个分量必须能够提供有关系统的新信息，其中各个分量的差别是由时间延

迟决定的, 时间延迟的选择直接影响重构相空间所包含的信息量^[89]。常用的时间延迟选择方法有自相关方法、复自相关方法、互信息方法和 C-C 算法。自相关和复相关方法算法简单, 计算量小, 但是计算精度较低; 互信息方法可以达到较高的精度, 但是算法实现较困难, 而且需要数据量很大; C-C 算法是一种计算时间延迟的新的有效的方法, 既能有效减少互信息方法的计算量, 又能得到较高的精度, 同时能计算出时间延迟和时间窗口^[90]。

设泄漏电流的一维时间序列为: $x(t_0), x(t_1), \dots, x(t_i) \dots \dots x(t_n)$, 然后将该时间序列在 m 维相空间中延拓成一个相形分布:

$$\begin{aligned} X(t_0) &= \{x(t_0), \quad x(t_0 + \tau), \quad \dots x(t_0 + (m-1)\tau)\} \\ X(t_1) &= \{x(t_1), \quad x(t_1 + \tau), \quad \dots x(t_1 + (m-1)\tau)\} \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ X(t_n) &= \{x(t_n), \quad x(t_n + \tau), \quad \dots x(t_n + (m-1)\tau)\} \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中, 延迟时间 $\tau = k \Delta t$ ($k=1,2,3,\dots$), Δt 为单位时间间隔。

式 (2-1) 中每一列构成点在相空间中的轨迹, 表示系统在某一瞬时的状态。将这些相点连接起来就会构成点在相空间中另一条轨迹, 表示系统状态随时间的演化。因此, 在 m 维相空间中就会形成一个相形, 可以从一个单变量时间序列中估计出系统的信息, 这些信息在理论上足够把系统的发展变化在多维相空间中动态展现出来, 重构后的相图就会有不同的变化趋势, 可以判断系统演化轨道是否收敛。

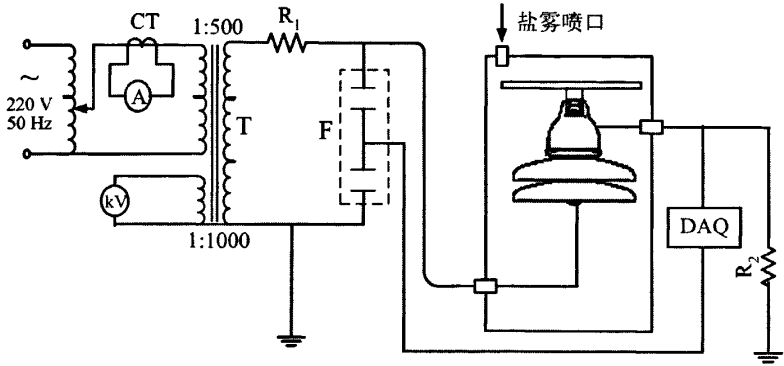
2.4 绝缘子浓雾闪络试验

2.4.1 试验系统与参数

图 2-1 和表 2-1 分别为试验系统及相应的试验参数。实验采用 YDGZ 工频高压试验电源。该装置主要由高压试验变压器 TDM-140/100 和控制台组成, 变压器的容量为 140 kV·A, 额定电压为 100 kV; 控制台是集调压器、测量、控制、保护及信号等部分组成的一体化装置, 高压试验变压器采用单框芯式铁芯, 初级绕组绕在铁芯上, 测量绕组和高压绕组采用绝缘筒绕制并套在初级绕组外, 系同轴布置结构, 通过调节控制台内的调压器输出电压, 接入高压试验变压器的初级绕组, 根据电磁感应原理产生所需要的高压实验电压。采用水电阻作为限流电阻, 管子长度按 150 kV/m 选取, 用蒸馏水加入适量硫酸铜配按照 1 Ω /V 制成各种不

同的阻值，整个系统的短路阻抗小于 6%。

试验采用 XWP 2-70 型盘形悬式瓷绝缘子为试样，该绝缘子为双伞群结构，结构高度为 146 mm，公称直径为 255 mm，泄漏距离为 400 mm。采用无水乙醇清洗绝缘子表面，并将试样置于干燥室中室温干燥 24 h。然后，将绝缘子垂直悬挂于人工雾室，利用温度控制系统控制雾室中制冷装置调整温度在 $0\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，采用超声波盐雾发生装置通过超声波高频震荡将电导率为 1.0 mS/cm 的 NaCl 盐溶液雾化化为 $1\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 的盐雾粒子，经过鼓风装置将盐雾以 $2.1\text{ cm}^3/\text{min}$ 的速率均匀地扩散到人工大气模拟系统中模拟浓雾环境。当雾室的相对湿度达到 100%并且维持饱和 10 h 后，施加 $66\text{ kV}_{\text{rms}}$ 工频交流电源至绝缘子发生闪络。如果绝缘子未发生闪络且施加电压超过 10 min，则终止试验。采用多功能数据采集卡(PCI-9111 HR)记录流过绝缘子表面的泄漏电流，采样率为 5.0 kHz ，分辨率为 16 bits。



T-升压变压器; R_1 -工频限流电阻($100\text{ k}\Omega$); R_2 -测量电阻($1\text{ }\Omega$);
F-阻抗分压器 (FRC-100kV); DAQ-数据采集系统

图 2-1 试验系统

表 2-1 试验参数

人工雾室		1000 mm× 480 mm × 1015 mm
试验电源		TDM 140 k·VA/100 kV
试验电压		66 kV _{rms} 工频交流电源
盐雾	发生装置	超声波盐雾发生器
	注入速率	2.1 cm ³ /min
	风速	2.0 m/s
	电导率	1.0 mS/cm
	环境温度	0±1 °C
大气压		760 mmHg
相对湿度		100% 饱和

2.4.2 绝缘子浓雾闪络过程及泄漏电流

根据绝缘子浓雾闪络现象与过程,并结合泄漏电流波形的典型变化,可以将闪络过程分阶段进行分析。图 2-2 为绝缘子浓雾闪络发展各个阶段泄漏电流的变化,每个阶段的分析如下:

(1) 起始阶段:如图 2-2(a)所示,在浓雾环境的润湿作用下,泄漏电流主要为阻性电流,波形近似呈现正弦状态。浓雾在绝缘子表面凝结形成离散的、大小不等的液滴,在外加电压产生电场力的作用下,部分液滴逐渐被拉长并与相邻的液滴形成较强的电场,导致空气发生电离,在绝缘子表面局部发生间歇式的电晕放电和微小火花放电,波形随之发生一些畸变。由于绝缘子表面的阻性作用以及放电较弱,泄漏电流的幅值变化不大,一般不超过 0.15 mA。

(2) 发展阶段:如图 2-2(b)所示,泄漏电流波形近似呈现三角形状,在每个周期的顶端出现很窄的脉冲放电。在浓雾凝结和电场力共同作用下,绝缘子表面液滴逐渐相互连接在一起形成导电水带,导致干燥区域逐渐减少,引发较为强烈的局部放电和较弱的电弧放电,泄漏电流幅值也随之增大。

(3) 临闪阶段:如图 2-2(c)所示,泄漏电流波形呈现脉冲形状,幅值显著增大。由于局部电弧具有下降的伏安特性,泄漏电流逐渐增大,其产生的焦耳热

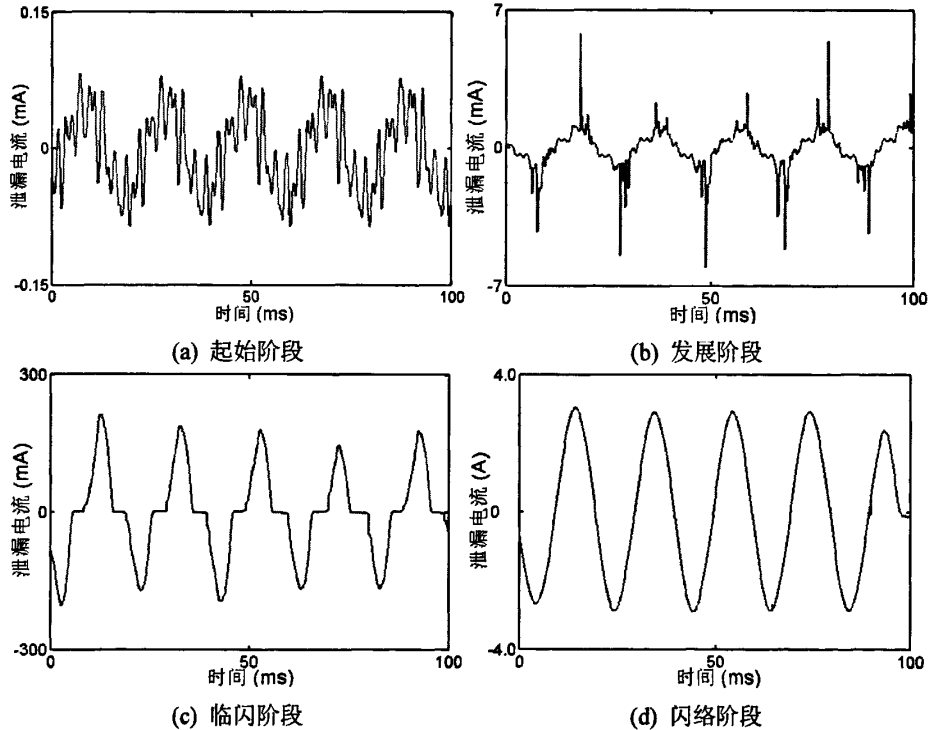


图 2-2 绝缘子浓雾闪络过程泄漏电流的变化

逐渐增多,导致表面水带的蒸发速度大于浓雾的凝结速度,形成较多的干燥带进而出现较为强烈的干燥带放电,随着干燥带长度不断扩大,局部电弧不断发生、发展,持续时间和强度明显增大。

(4) 闪络阶段:如图 2-2(d)所示,局部电弧的不断发展延伸形成了贯穿绝缘子两极的闪络通道,泄漏电流幅值达到最大,此时主要为保护电阻形成的阻性电流,电流波形与所施加的电压波形一致。

2.5 绝缘子表面泄漏电流的混沌特征

混沌将事物外在的无序性与内在的规律性巧妙地融为一体,称为“混沌序”。混沌体系具备整体稳定性和局部的不稳定性,其运动轨迹可以通过相空间中的几何形态和分形特征来描述。由于该系统是局限于有限相空间中的高度不稳定运动,必须对系统进行统计处理。当前,描述混沌现象常采用的特征量为: Lyapunov 指数、分形维数、功率谱指数、吸引子相图、Poincare 截面等。

2.5.1 Lyapunov 指数

对初值条件敏感是混沌系统的主要特征之一,相空间中相邻很近的初值所产生的轨迹随着时间呈现指数方式的发散。Lyapunov 指数可以刻画混沌系统的这个特征,是描述混沌系统状态演化的一个定量指标^[91, 92]。

以考察一个无穷小 n 维球面在 n 维相空间中长时间的演化为例,由于系统的局部不稳定性, n 维球面将变为椭球面,那么可以按照椭球主轴长度 $p_i(t)$ 定义第 i 个 Lyapunov 指数为

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{p_i(t)}{p_i(0)} \quad (2-2)$$

其大小表明相空间中相近轨道平均收敛或发散的指数率,它对每种类型的吸引子都有定义。因此, n 维相空间中就会有 n 个 Lyapunov 指数,通常假设按照 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_n$ 进行大小排列。Lyapunov 指数为正值或者零的方向对吸引子起支撑作用,而 Lyapunov 指数为负值的方向对吸引子起收缩作用,这两种方向对系统起着伸缩与折叠的共同作用,从而形成奇异吸引子的空间几何形状。因此,对于奇异吸引子,至少最大 Lyapunov 指数 λ_1 为正,同时至少有一个 Lyapunov 指数为负,并且 Lyapunov 指数 λ_i 越大,系统的混沌特征越显著。对于耗散系统, Lyapunov 指数不仅描述轨道形态,而且描述从一个吸引子吸引域出发的所有轨道的稳定性。在一维情况下,吸引子只可能是不动点,即稳定态,此时 Lyapunov 指数是负值。在二维情况下,吸引子可能是不动点也可能是极限环。若是不动点,

相空间中任意方向相近两点之间的距离都要收缩,两个 Lyapunov 指数都是负值。若是极限环,如果取相空间中相近两点之间的距离始终垂直于环线方向,它一定要收缩,此时 Lyapunov 指数为负值;如果取相空间中相近两点之间的距离沿轨道切线方向,它既不增大也不缩小,此时 Lyapunov 指数为零。同样可知,在三维情况下存在六种情形: $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(-, -, -)$ 不动点; $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(0, -, -)$ 极限环; $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(0, 0, -)$ 二维环面; $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(+, +, -)$ 不稳极限环; $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(+, 0, 0)$ 不稳二维环面; $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)=(+, 0, -)$ 奇异吸引子。

上述分析表明 Lyapunov 指数沿某一方向取值的大小和正负表征系统在吸引子中相邻轨道沿该方向平均发散或收敛的快慢程度,最大 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max}$ 决定轨道覆盖整个吸引子的快慢程度。因此,如果混沌系统至少存在一个 Lyapunov 指数为正值,就可以肯定它具有奇异性,该系统即为混沌运动。

针对动力学系统规律不详的高维系统或者相空间维数无法确知的实验系统,通常采用 Wolf 重构法从实验数据时间序列中计算该系统混沌吸引子的 Lyapunov 指数^[93],该方法已经广泛应用于混沌系统的判断以及混沌时间序列的预测^[94]。因此,本研究采用 Wolf 重构法计算泄漏电流时间序列的 Lyapunov 指数,从而判断绝缘子表面放电过程是否具有混沌特征,计算流程如图 2-3 所示。

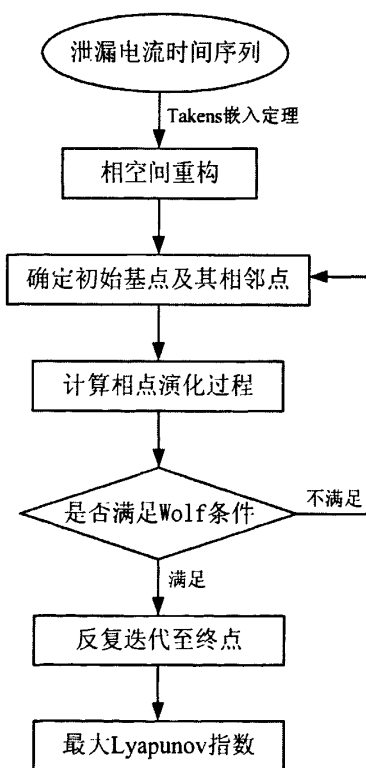


图 2-3 泄漏电流时间序列的最大 Lyapunov 指数计算流程图

假设泄漏电流时间序列 $x(t) = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_n\}$, 嵌入维数为 m , 时间延迟为 τ , 根据 Takens 的延迟坐标重构相空间技术, 对 $x(t)$ 以延迟坐标重构 m 维相空间中的一条轨迹为

$$X(t) = \{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)\} \quad (2-3)$$

选取初始基点 $X(t_0)$, 假设其最近邻点为 $X_0(t_0)$ 且距离为 L_0 , 计算这两个相点的时间演化至 t_l 时刻, 如果此刻两点距离 $L_0' = |X(t_l) - X_0(t_l)| > \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$), 则保留 $X(t_l)$ 并寻找其临近点 $X_l(t_l)$, 使两点距离 $L_l = |X(t_l) - X_l(t_l)| < \varepsilon$ 并且使之夹角尽可能小, 重复迭代至时间序列终点, 记总的迭代次数为 M , 则最大 Lyapunov 指数为^[95-97]:

$$\lambda = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{i=0}^M \ln \frac{L_i'}{L_i} \quad (2-4)$$

因此就可以根据该指数来判断系统是否是混沌的。只要放电过程中至少有一个 Lyapunov 指数是正值就可以确定是混沌过程^[91]。

基于上述 Lyapunov 指数的计算方法分别对绝缘子闪络过程中各个阶段的泄漏电流时间序列进行计算, 然后采用最小二乘法做出回归直线, 该直线的斜率即为最大 Lyapunov 指数, 如图 2-4 所示。从图中可以得出绝缘子闪络发展各个阶段的最大 Lyapunov 指数均为正值, 绝缘子表面放电是混沌的。

2.5.2 分形维数

随着混沌理论的广泛应用, 分形维数的定义和测量也得到了不断的发展。混沌系统的分形维数反映了混沌系统的几何构造, 已经成为系统复杂程度的定量标志之一^[91], 其数学表达式为

$$N(r) \sim r^{-D} \\ D = \lim_{r \rightarrow 0} \ln N(r) / \ln(1/r) \quad (2-5)$$

其中, r 为测量尺度, D 为分形维数。

式(2-5)是在假定宏观尺度保持不变而不断改变测量尺度下得到的。对于构成系统的小单元尺度不变而宏观尺度不断增大的情况, 分形维数就表征为:

$$N(L) \sim L^D \\ D = \lim_{L \rightarrow \infty} \ln N(L) / \ln(L) \quad (2-6)$$

根据各种分形集充满空间的程度以及复杂度的描述, 常见的分形维数主要有相似维数, 盒维数, 信息维数和关联维数。

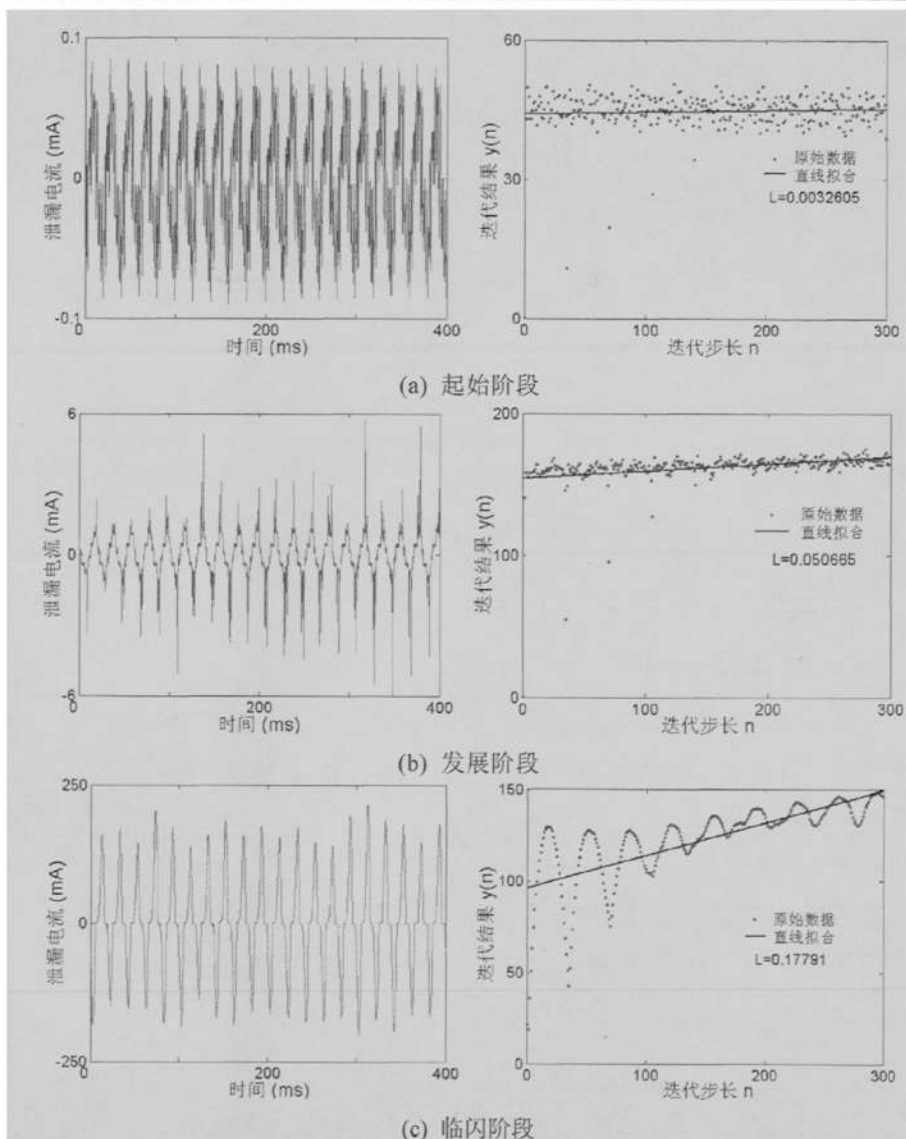


图 2-4 绝缘子闪络发展各个阶段泄漏电流的最大 Lyapunov 指数

2.5.2.1 相似维数

相似集是指那些局部特征与整体特征具有相似性的集合, 相似维数就是描述相似集分形维数的指标, 其定义如下:

$$d_s(F) = \frac{\ln m}{\ln(1/c)} \quad (2-7)$$

其中 m 是相似子集的个数, c 为相似比例系数。

2.5.2.2 盒维数

盒维数又称容量维数。设 F 是平面上的有界点集, 根据有界性, 总可以找到

一个矩形包含 F ，如果将这个矩形分割成若干个边长为 ε 的小方格，必有某些小方格内包含 F 中的点，将这些小方格的总数记为 $N(\varepsilon)$ ，则盒维数为：

$$d_c(F) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (2-8)$$

2.5.2.3 信息维数

根据盒子维数的定义可知，盒子维数只能表示几何尺度的信息，而不能反映分布疏密的信息。信息维数则能反映点集在分布上的信息，其定义如下：

$$d_i(F) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}$$

$$I(\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i \ln \frac{1}{P_i} \quad (2-9)$$

其中， P_i 是 F 中的点落在第 i 个方格中的概率

2.5.2.4 关联维数

关联维数是在嵌入理论和相空间重构基础上发展起来的。根据 Takens 嵌入定理，只要嵌入维数 d 足够大 ($d \geq 2D+1$)，就足以刻画该尺度层次上 D 维混沌吸引子。

嵌入变换重构相空间得到的状态轨迹保留了原空间轨迹的最主要特征，为了计算相空间奇异吸引子的维数，给定一个小尺寸 r ，然后计算相空间两点之间距离小于 r 的“点对”数，将这些点数在所有点中的比例记为：

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad (2-10)$$

其中， $H(Z)$ 为 Heaviside 函数。

$C(r)$ 描述了随 r 增加时“点对”数是如何增长的。显然， r 太大就无法反映系统的内在特性，适当缩小 r 就可能使 $C(r)$ 在一段区间满足与 r^D 成正比关系。在双对数坐标下， $\lg C(r)$ 对 $\lg r$ 线性部分的斜率即为关联维数 D ：

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg C(r)}{\lg r} \quad (2-11)$$

总之，分形维数是定量刻画系统分形特征的参数，既可以是整数也可以是分数。通常情况下，如果从系统分析中得到了分数维数，并且分形维数随着嵌入维数的增加逐渐达到饱和，那么就可以判断该系统是混沌的，并且奇怪吸引子的维数与分形维数的大小相同。

基于当前研究广泛采用分形维数中的关联维数^[91]，本研究采用 G-P 算法分别对绝缘子闪络过程中各个阶段的泄漏电流时间序列的关联维数进行计算，

从而判断绝缘子表面放电过程是否具有混沌特征，计算流程如图 2-5 所示。

首先，选取正确的时间延迟对泄漏电流时间序列的相空间重构至关重要。自相关函数法是计算时间延迟的一种有效方法^[98]，以互信息第一次达到零值的时间作为相空间重构的时间延迟。

假设泄漏电流时间序列 $x(t)=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_n\}$ ，嵌入维数为 m ，则重构相空间中一条轨迹的熵 H 为：

$$H(X)=-\sum_i P_x(x_i)\log P_x(x_i) \quad (2-12)$$

那么互信息即为：

$$I_n(X_0, X_1, \dots, X_n) = \sum_j [H(X_j) - H(X_0, X_1, \dots, X_n)] \quad (2-13)$$

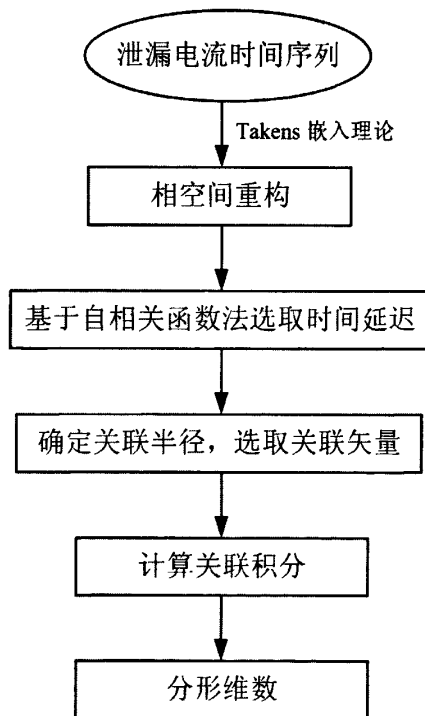


图 2-5 泄漏电流时间序列的分形维数计算流程图

绝缘子闪络发展过程不同阶段泄漏电流的互信息 $I_n(t)$ 的变化如图 2-6 所示。当 $I_n(t)$ 第一次达到最小值的时间即为相空间重构的时间延迟，从而得到在绝缘子闪络发展过程中，起始阶段、发展阶段与临闪阶段的泄漏电流时间序列进行相空间重构的时间延迟分别为 2，10 和 12。

然后采用 Takens 嵌入理论重构相空间，在相空间中构造随时间变化的相点矢量 $X(t)=\{x(t), x^{(1)}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)\}$ ，然后以两个矢量的最大分量差定义距离：

$$|X_i - X_j| = \max_{1 \leq k \leq n} |X_{ik} - X_{jk}| \quad (2-14)$$

因此,凡是距离小于给定关联半径 r 的矢量就称为关联矢量。假设重构相空间中有 N 个矢量,关联积分 $C_2(r)$ 即为关联矢量的对数在 N^2 配对中所占的比例:

$$C_2(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} H(r - |X_i - X_j|) \quad i,j=1,2,\dots,N \quad (2-15)$$

其中, $H(x)$ 为单位阶梯函数。当 $x > 0$ 时, $H(x)=1$; 否则 $H(x)=0$ 。

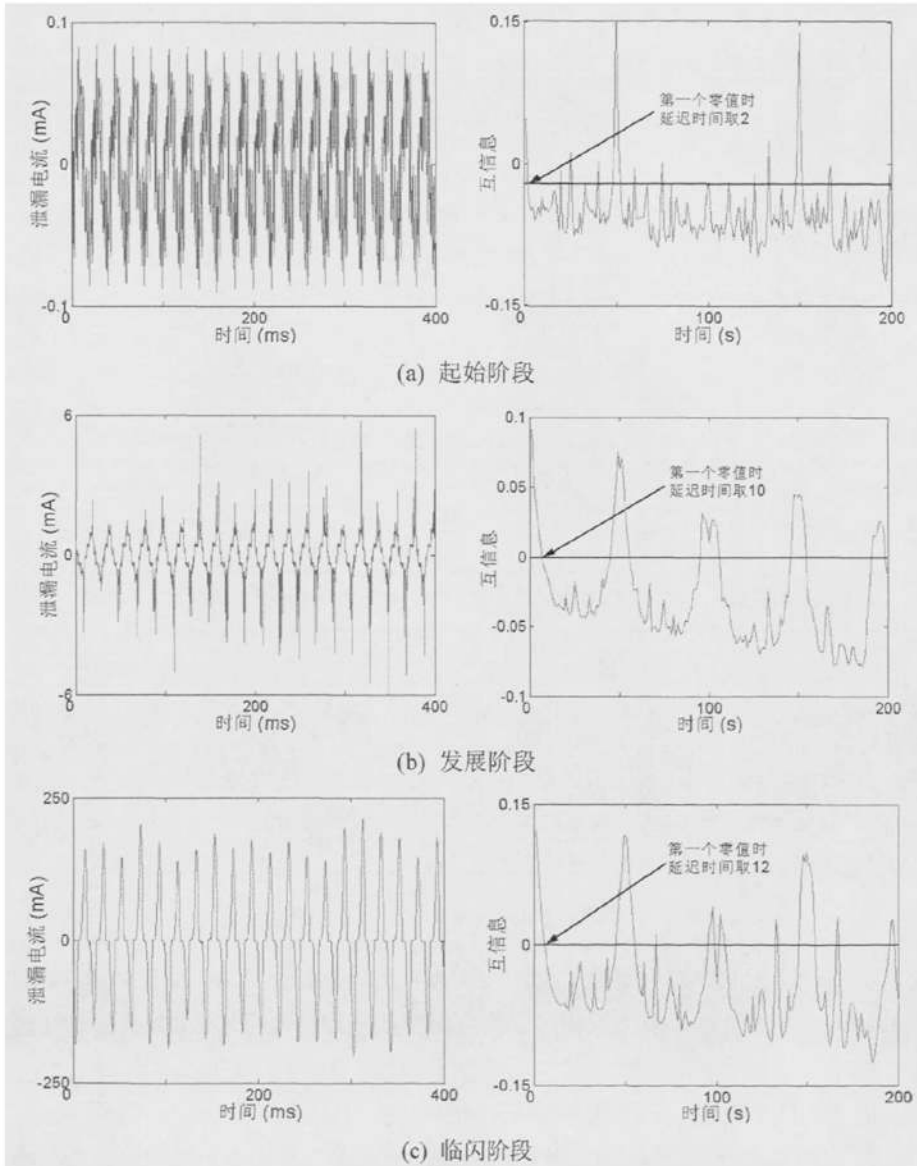


图 2-6 绝缘子闪络发展各个阶段泄漏电流互信息与延迟时间的关系

显然, 关联积分是一个累积分布函数, 刻画了相空间中相对参考点 X_i 在距离 r 内的相点聚集程度, 又称为吸引子的关联函数。若 r 太小以至距离 $\|X_i - X_j\|$ 都比 r 大, 则 $H(r - \|X_i - X_j\|) = 0$, $C_2(r) = 0$, 表示相点分布在 r 范围外; 若 r 太大以至所有距离都不会超过它, 则 $C_2(r) = 1$, 无法表征系统的内部性质。只有使 $0 \leq C_2(r) \leq 1$ 的 r 才有意义。通常, 关联积分与关联半径呈幂指数关系, 当 $r \rightarrow 0$ 时, $C_2(r) \propto r^{D_2}$, 其中 D_2 即为关联维数:

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(C_2(r))}{\ln(r)} \quad (2-16)$$

式(2-16)中 D_2 是嵌入空间维数 m 的函数, 不断提高嵌入维数直至关联维估计值 $D_2(m)$ 不再发生有意义的变化, 此时嵌入维记为 m_c , 在 $\ln(C_2(r, m)) - \ln(r)$ 关系图中表现为曲线直线部分的斜率不再随 m 的变化而变化, 此时

$$D_2(m_c) = D_2(m_c + 1) = D_2(m_c + 2) \cdots \quad (2-17)$$

$D_2(m_c)$ 即为吸引子的关联维, m_c 为饱和嵌入维数。如果 m_c 不存在, $D_2(m_c)$ 将随 m 的增大而趋于无穷大, 表示吸引子不存在, 泄漏电流即为随机系统; 如果 $D_2(m)$ 可以达到饱和, 则泄漏电流即为混沌系统。

采用公式(2-15)计算绝缘子闪络发展不同阶段泄漏电流的关联积分值, 然后在对数坐标系下得到的关联积分值 $C_n(r)$ 与关联半径 r 的关系如图 2-5 所示。从图中可以看到, 当嵌入维数 m 大于某个值时, $\ln C_n(r, m)$ 与 $\ln r$ 的关系曲线斜率不再发生变化, 也就达到了饱和状态, 从而又证明了绝缘子表面放电是一个混沌系统。

根据公式(2-16)的原理, 图 2-7 中直线段部分的斜率即为各个放电阶段下的关联维数, 如图 2-8 所示。可以看出, 闪络发展各个阶段下分形维数均为分数, 并且随着闪络过程的发展呈现先增大后减小的趋势。

根据分形维数的含义, 其大小对应影响泄漏电流时间序列变化量的多少, 可以表征事物的复杂程度^[99]。分形维数的变化对应于闪络发展不同阶段的放电特征: 在起始阶段, 绝缘子表面主要是细微水珠的振荡、形变以及水膜的形成, 在形成过程中出现局部电场集中增强时, 就会发生电晕放电和微小火花放电。由于水滴的动态变化在一定程度上抑制了放电的发展, 因此, 绝缘子表面放电的复杂程度较弱, 分形维数较小; 在发展阶段, 随着绝缘子表面憎水性的丧失以及水珠的进一步形变, 局部出现干燥带, 导致电场进一步加强, 绝缘子表面出现局部电弧和干燥带放电, 表面放电趋于激烈的复杂放电, 分形维数增大; 在临闪阶段, 随着干燥带放电的形成与发展, 在绝缘子表面出现放电通道, 表面放电主要以强烈的电弧形式存在, 复杂程度减小, 分形维数也随之减小。

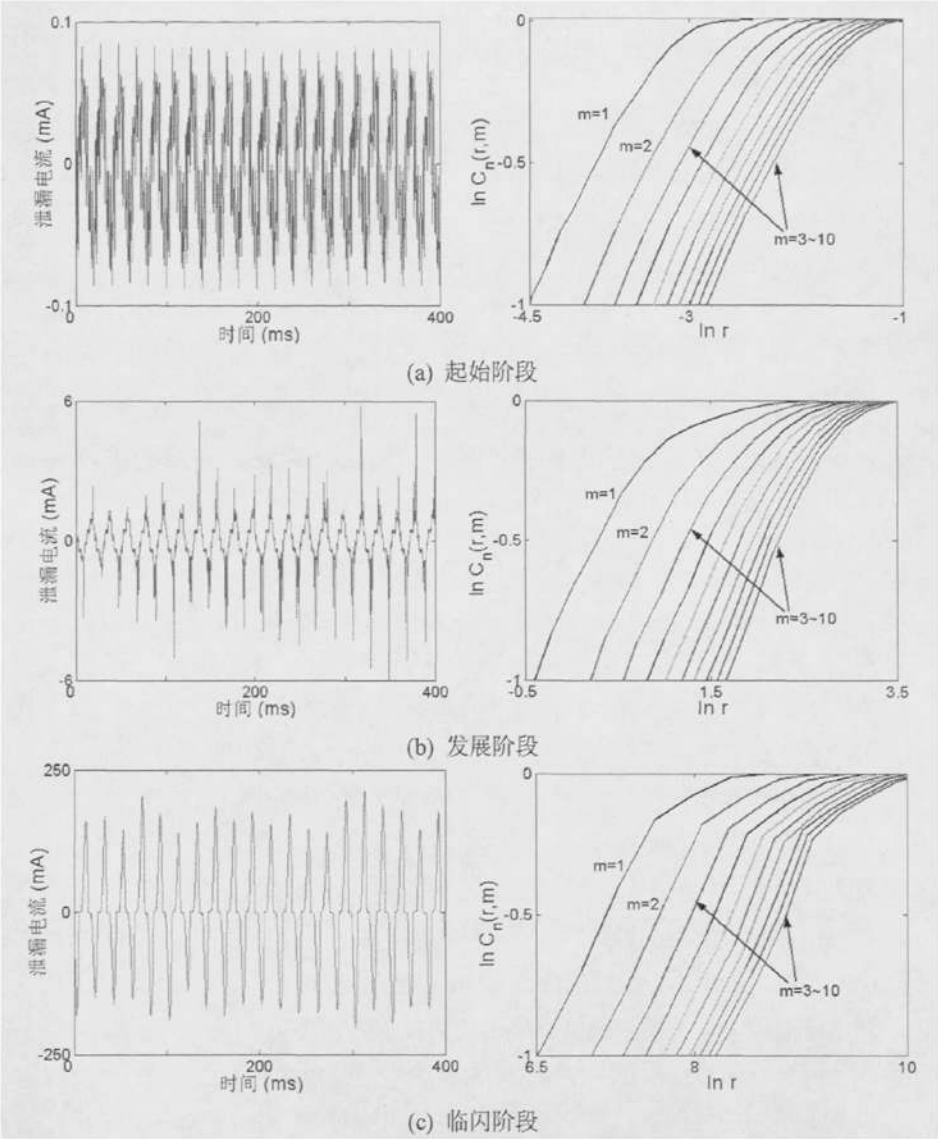


图 2-7 绝缘子闪络发展各个阶段泄漏电流关联积分与关联半径的关系

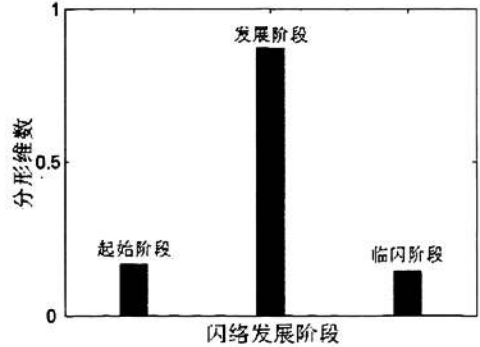


图 2-8 绝缘子闪络发展各个阶段泄漏电流的分形维数

2.5.3 功率谱密度

功率谱密度函数是从频域角度出发,采用单位频率范围内的均方值表征放电信号在某一频率范围内的随机过程强度,既描述了放电波形的频率组分,同时还反映了不同频率放电组分在整个信号中的比重^[100]。因此,功率谱密度可以对放电过程与特征进行表征,并且可以用来判别时间序列是否具有混沌特性^[98]。

本研究首先计算泄漏电流的自相关函数,然后对其进行傅立叶变换得到功率密度谱,进而判断时间序列的混沌特性。

根据自相关函数法,对于连续泄漏电流时间序列 $x(t)=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k, \dots, x_n\}$, 其自相关函数 $C(\tau)$ 的求解公式为:

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (2-18)$$

其中, τ 为时间步长。

然后按照维纳-辛钦定理对自相关函数进行傅立叶变换:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2-19)$$

$C(\tau)$ 的傅立叶变换 $S(\omega)$ 即表征运动的频谱特性,是频率 ω 的实偶函数。 $S(\omega)$ 曲线下的面积就等于运动变量 $x(t)$ 的均方值:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt = C(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)d\omega \quad (2-20)$$

式(2-20)左侧表示系统的平均功率,因此 $S(\omega)$ 即表征系统的功率谱密度。如果功率谱是典型的线谱并且各谱线频率为 $n\omega$ ($n=1,2,3\dots$),则运动是周期的;如果谱图是连续的,则运动是纯随机的;如果谱图是在连续基础上有一些线(或带),则运动可能是混沌的,也可能是有噪声干扰的周期运动。

通常,设 β 为功率谱指数,那么功率 $E(f)$ 与频率 f 具有相应的指数关系:

$$E(f) = |x(f)|^2 \propto f^{-\beta} \quad (2-21)$$

从而得到功率谱的幂函数形式:

$$E(\lambda f) = \lambda^{-\beta} E(f) \quad (2-22)$$

因此,即使时间序列是不规则的,其功率谱在频域中跨越很宽的尺度,却有可能呈现自相似结构,表现出一定的规则性:如果谱图具有明显的单峰或几个峰,则系统为周期或拟周期序列;如果谱图没有明显的峰值或峰连成一片,则系统为混沌的。周期运动对应功率谱中出现尖峰,混沌特征对应谱中出现噪声背景

和宽峰，从而功率谱分析成为观测混沌的重要方法。

绝缘子闪络发展过程不同阶段泄漏电流的功率谱密度如图 2-9 所示，从频域角度对放电的随机过程进行描述。因为数据采集卡的采样频率为 5.0 kHz，所以功率谱密度的最大频率为 2.5 kHz。各个阶段表面放电电流的功率谱密度曲线特征明显不同，其功率谱密度图表明：起始阶段的功率谱密度幅值大于发展和闪络阶段的功率谱密度值。

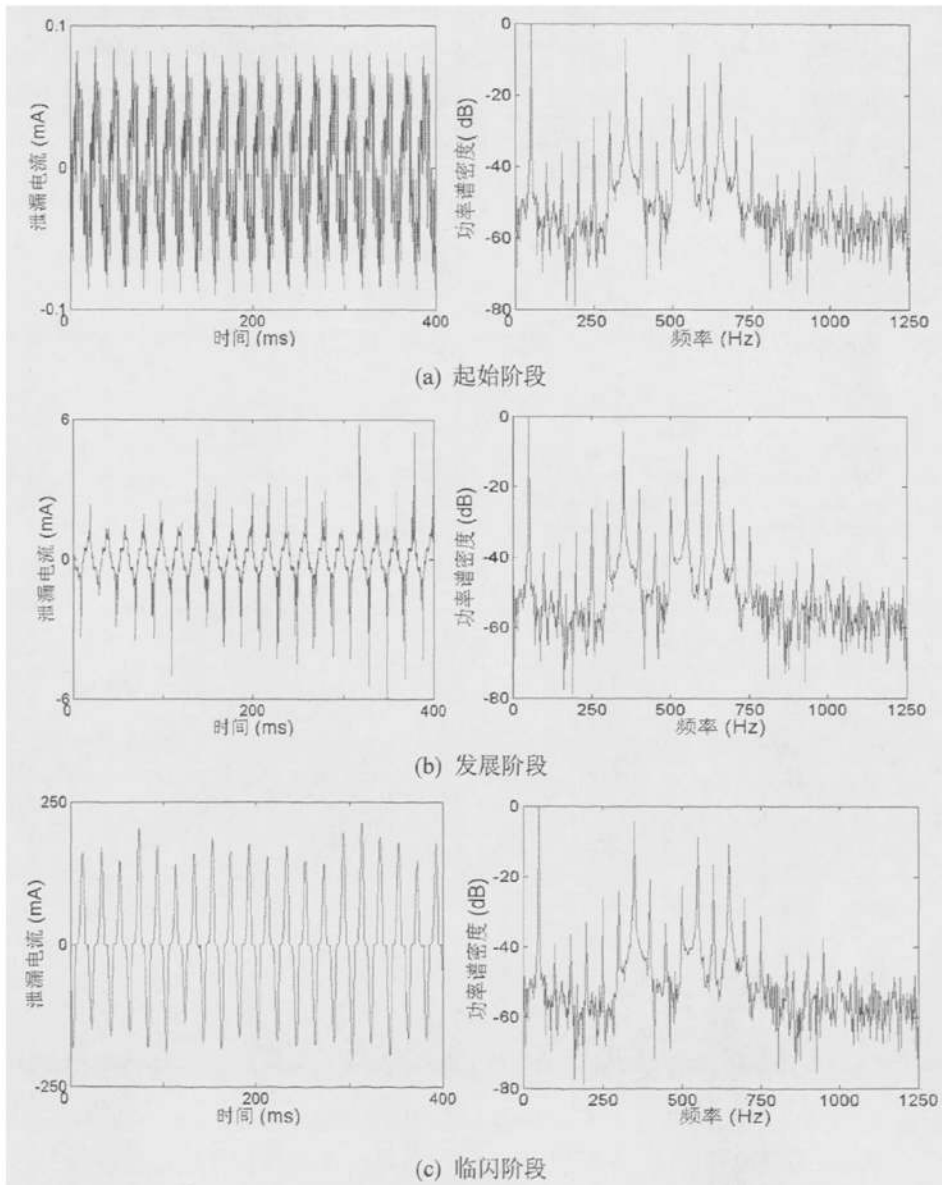


图 2-9 绝缘子闪络发展过程不同阶段泄漏电流的功率谱密度

在闪络起始阶段,绝缘子表面主要是导通电流,放电现象较少,因此放电特征相似,泄漏电流的频率范围相对集中,低频下的振幅较大,随后出现很快的衰减。放电进行到发展和临闪阶段时,绝缘子表面的局部电弧放电通路已经逐渐形成,因此放电特征主要受放电的影响,在较多的频率下的振幅较大,功率谱密度图在放电的各个频率成分表现的比较分散。这说明绝缘子闪络起始阶段在低频段功率谱密度较大,而经过一段时间发展后在其它频率较高时依然有较高的能量。这些都反映了放电频域结构的不同,并且发展和临闪阶段的表面放电功率谱幅值比起始阶段的幅值小,表明随着闪络过程的发展,绝缘子表面放电逐渐连接和发展到集中的干燥带放电。

通过对频率谱特征的分析,可以得出绝缘子闪络过程中放电的变化特征:表面出现集中、强烈的干燥带放电可以大幅度减小泄漏电流中低频分量的波动,使表面放电电流幅值分布范围缩小,复杂程度大幅度降低,表面放电电流波动平均间距减小,电流细密性提高,类似随机放电过程中的规律性增加,功率谱密度在各个频率段的功率谱密度变得均匀,泄漏电流所具有的频率特性增多。因此,根据混沌理论及其特征判断依据,可以初步判明绝缘子闪络过程中表面放电发生系统具有混沌特征。

2.5.4 吸引子相图

系统是指一些相互联系和相互作用的客体所组成的集合。这里的客体可以指自然界中任意确定的事物,也可以是一个抽象的事物。其中有一类系统在运动时,其相空间容积收缩到维数低于原来相空间维数的吸引子上,即运动特征是相空间容积收缩,这类系统就是耗散系统。在耗散系统中存在一些平衡点(不动点)或者子空间,随着时间的增加,轨道或运动都向它逼近,这就是吸引子。通常耗散系统的简单吸引子有不动点、极限环和环面。简单吸引子又受参数的影响,随着系统参数的变化,耗散系统也会出现混沌,这时的吸引子就变成为奇异吸引子^[101]。

耗散系统中常用的吸引子为:(1)不动点吸引子或定常吸引子,它是一个零维的吸引子,在相空间中是一个点,表示系统在做平衡运动。(2)极限环,它是一个一维的吸引子,在相空间中是环绕平衡点的一条闭合的曲线,它对应周期运动。极限环是系统的一个解,但不是定常解。随着时间的增加,它邻近的轨道渐进地趋向它或远离它,当极限环内有一个不稳定的平衡点时,该极限环被称为稳定的极限环;当极限环内有一个稳定的平衡点时,该极限环被称为不稳定的极限环。(3)准周期吸引子,它表现为相空间上的二维环面,类似于面包圈的表面,轨道在状态空间的环面上绕行。这种运动有两个频率,一是轨道沿较短方向绕环

面运动所决定的频率,一是轨道绕整个环面运动所决定的频率,这两个频率不可公约,是准周期运动。(4) 奇异吸引子,也称“随机吸引子”或“混沌吸引子”,它是相空间中无穷多个点的集合,这些点对应于系统的混沌状态,是一种抽象的数学对象,常常隐藏在混沌现象的背后,借助于计算机可描绘出它的图形。它是一类具有无限嵌套层次的自相似的几何结构,是一种分形。

因此,具有奇异吸引子的运动就可以断定该系统具有混沌特征。奇异吸引子映射首先应是均匀双曲线的,其次在任意领域中都应具有周期轨道。奇异吸引子是轨道不稳定和耗散系统容积收缩两种系统内在性质同时发生的现象,轨道不稳定性使轨道局部分离;而耗散性使相空间收缩到低维的曲面上,表现为结构“紊乱”的吸引子。奇异吸引子具有的重要特征如下:

(1) 对初始条件有非常敏感的依赖性。在初始时刻从这个奇异吸引子上任何两个非常接近的点出发的两条运动轨道,最终必然会以指数的形式互相分离。定量地讲,它必然存在有正的 Lyapunov 指数。

(2) 功率谱是一个宽谱,系统中已被激发出无穷多个特征频率,在运动过程中存在有拉伸和折叠的现象,存在双曲线不动点,意味着不稳定流形的存在。

(3) 具有非常奇特的拓扑结构和几何形式。系统是具有无穷多层次自相似结构的、几何维数是非整数的一个集合体,在某些维数方向上是连续的而在余下的维数方向上则是一种类似 Cantor 集的结构。

因此,根据 Takens 相空间重构理论,对于不同的非线性系统,其变量在重构相空间后得到的系统吸引子相图会有很大差异。从吸引子相图的变化可以看出不同系统各参数之间的关系。因此,可以根据相图的变化反映系统数据中隐含信息的变化。

图 2-10 对应绝缘子闪络发展不同阶段泄漏电流的吸引子相图。相图中的每一个点是由相空间重构以后得到的相点,相点之间的连线代表相空间中的轨道线。从吸引子相图中可以看出,随着绝缘子表面放电的发生与发展,泄漏电流的吸引子相图在 origin 附近的相点减少,且相点在空间中的分布变得集中,相空间中的轨道线在 origin 附近变得更加规则。相空间中的相点体现了系统本身的动力学特征,而轨道线体现了系统的变化过程。因此,通过相图的变化可以分析不同阶段的表面放电特征。随着闪络过程的发展,在放电所引发的累积作用下,绝缘子表面绝缘强度的变化显著影响放电特征,随着放电的集中,泄漏电流的相关性增强,相图上表现为相图中 origin 附近的相点减少,相点变得更加密集,泄漏电流的吸引子相图可以表现闪络发展过程中绝缘子表面的放电特征,进一步证明了其具有混沌特性。

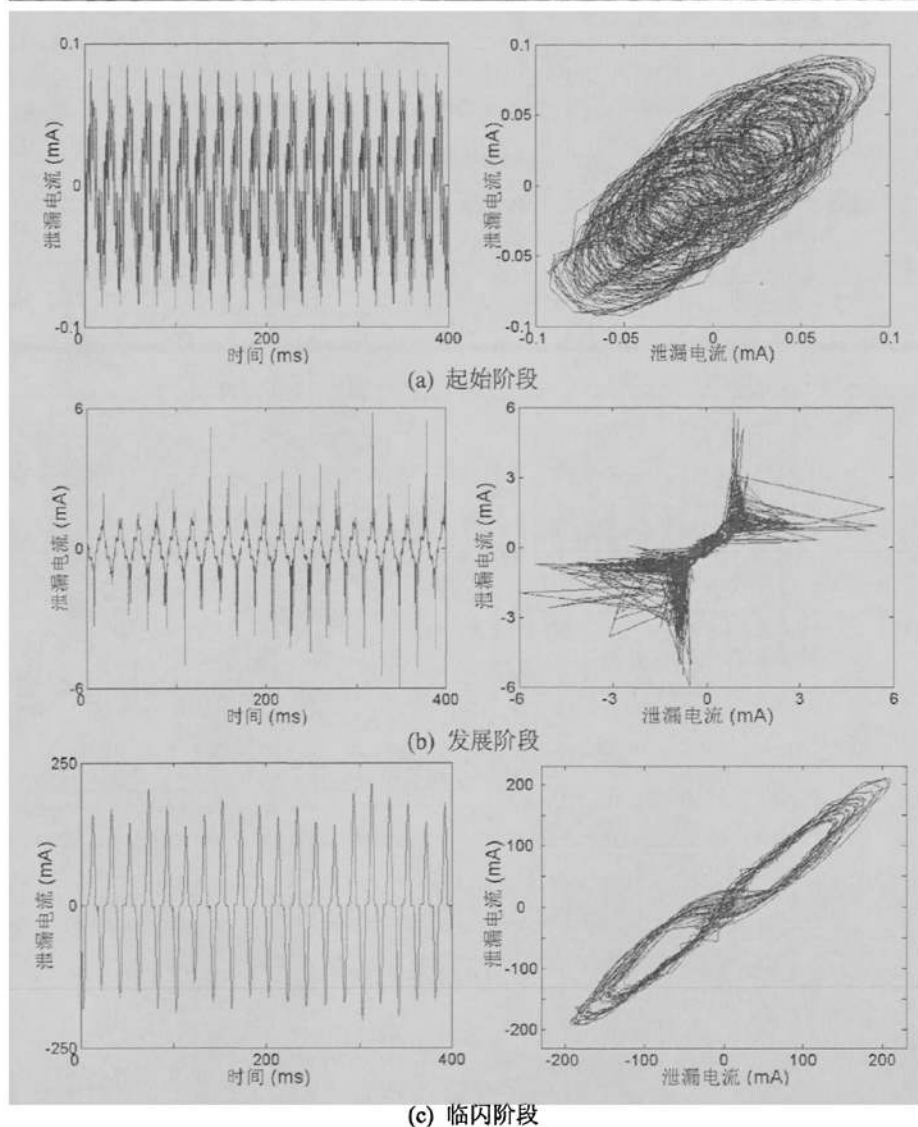


图 2-10 绝缘子闪络发展过程不同阶段泄漏电流的吸引子相图

2.5.5 Poincare 截面

在有利于观察系统运动特征和变换的前提下，从相空间中适当选取一个截面，该截面不能与轨线相切，更不能包含轨线，称此截面为 Poincare 截面，相空间的连续轨迹与 Poincare 截面的交点称为截点。设记录得到的庞加莱点为 $B_0, B_1, \dots, B_n, \dots$ ，在庞加莱截面上就可以把连续运动的系统降为较低维数下离散点之间的映射：

$$B_{n+1} = T \cdot B_n \quad (2-23)$$

其中， T 称为庞加莱映射。

通过观察 Poincare 截面上截点的情况可以判断是否发生混沌：当 Poincare 截面上有且仅有一个不动点或少数离散点时，运动是周期的；当 Poincare 截面上是一些闭曲线时，运动是准周期的；当 Poincare 截面上是一些成片的具有分形结构的密集点时，运动便是混沌的^[101,102]。

图 2-11 是绝缘子闪络发展过程不同阶段泄漏电流吸引子相图对应的 Poincare 截面，通过 Poincare 截面进一步的验证泄漏电流具有混沌特征。从图中可以看出，在绝缘子闪络发展各个阶段中，Poincare 截面呈现出一些成片的具有分形结构的密集点，从而可以得出表面放电过程具有混沌特征。

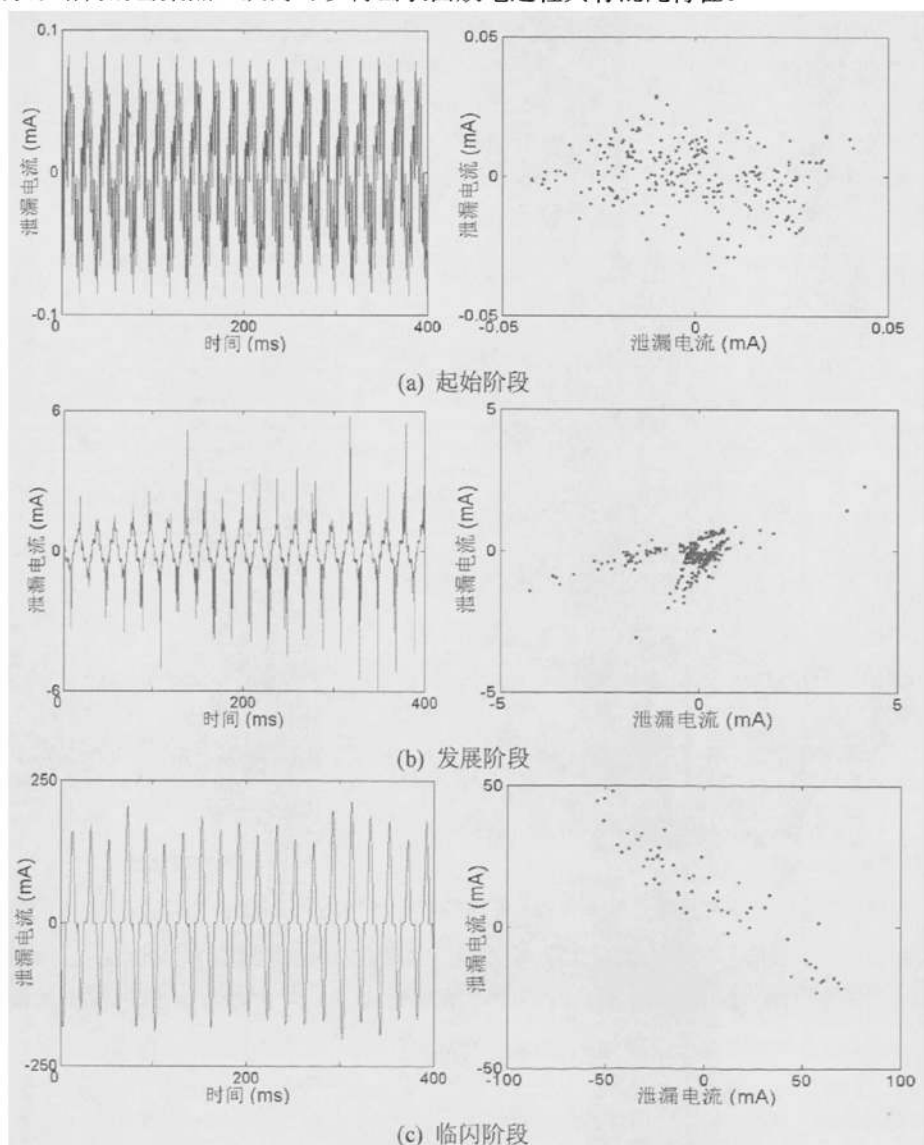


图 2-11 绝缘子闪络发展过程不同阶段的 Poincare 截面

2.6 本章小结

首先,介绍混沌理论发展历程及其在非线性分析中的应用,系统讨论混沌初值敏感性、拓扑结构的传递性与随机性、自相似性等主要特征,根据绝缘子闪络发展过程中表面放电呈现出的高度复杂性和非线性,将时间序列的混沌特征分析法引入泄漏电流随机性与不规则性的分析之中。

其次,采用时间序列的相空间重构技术分别计算和分析了泄漏电流时间序列的非线性特征参数: Lyapunov 指数; 分形维数; 功率谱指数; 吸引子相图以及庞加莱截面, 结果表明:

(1) 绝缘子闪络发展过程各个阶段泄漏电流的最大 Lyapunov 指数均为正值;

(2) 分形维数表征了影响绝缘子闪络发展的变化量, 揭示了泄漏电流变化过程的复杂程度, 其值为分数, 并且随着嵌入维数的增加而趋于饱和, 随着绝缘子闪络的发展呈现先增大后减小的趋势, 有效反映了闪络发展不同阶段表面放电的非线性特征;

(3) 功率谱图反映了泄漏电流的频率组分及其比例关系, 显示了很多特征频率, 揭示了闪络发展过程中集中、强烈的干燥带放电可以大幅度减小泄漏电流中低频分量的波动, 使表面放电电流幅值分布范围缩小, 复杂程度大幅度降低;

(4) 随着绝缘子表面放电的发生与发展, 吸引子相图在空间分布上从原点附近的相点减少, 且相点在空间中的分布变得集中, 相空间中的轨道线在点附近变得更加规则, 表明绝缘子表面放电的规律性增强;

(5) Poincare 截面呈现出一些成片的、具有分形结构的密集点。

最后, 综合时间序列混沌特征的判别方法, 随着绝缘子表面放电的发展、减弱、继续发展与不断延伸, 泄漏电流的变化是具有混沌特征的, 可以采用非线性特征分析法准确分析和掌握表面放电的变化特征与规律, 进而对绝缘子的运行状态进行监测与评估, 提高检测精度与可信度。

第三章 基于泄漏电流递归分析的绝缘子浓雾闪络监测

3.1 引言

基于对绝缘子闪络过程泄漏电流的 Lyapunov 指数、分形维数、功率谱指数、吸引子相图以及庞加莱截面的计算与分析,结果均表明绝缘子泄漏电流具有混沌特征,表面放电以及闪络是一个混沌过程。因此,本研究在实验室人工模拟浓雾环境下采用混沌理论递归分析方法研究绝缘子在浓雾环境下的闪络过程与机理,将采集到的泄漏电流经过小波变换后形成一个描述系统的时间序列,然后经过递归分析法得到泄漏电流时间序列的递归图,根据递归图的拓扑结构和纹理差异可以定性描述绝缘子闪络过程各个阶段的发展变化,同时递归定量指标又从定量的角度对闪络过程进行了表征,为绝缘子运行状态监测提供了一种可视化方法。

3.2 试验系统与方法

伴随着大气污染的危害性浓雾天气已经成为导致绝缘子闪络故障的主要原因,为保障电网安全运行,迫切需要有效监测绝缘子在浓雾环境下的运行状况^[1, 103, 104]。2001 年 1、2 月份持续的大雾天气导致东北、华北和河南电网相继发生大面积污闪事故。2006 年 1、2 月份灾害性浓雾天气引起天津电网接连发生闪络故障,严重威胁电网安全运行。根据此类污闪时气象条件的观测,灾害性浓雾天气大多为冬、春季节的冷雾环境,主要特征为:(1)浓度大,能见度低,相对湿度接近 100%的饱和度,充沛的水汽导致雾中漂浮大量水滴;(2)浓雾一般持续时间较长;(3)温度在 $-4^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 左右,伴有雾凇、雾加雨等多种天气;(4)大气逆温稳定,大气中污染物较重,湿沉降物较重^[6]。

因此,本文在实验室人工大气环境模拟试验条件下充分考虑了雾的参数对绝缘子闪络的影响,进而模拟浓雾环境开展绝缘子闪络试验,试验条件与参数如 2.4.1 中所述,然后基于闪络过程中泄漏电流的变化特征分析绝缘子浓雾闪络过程与机理。

3.3 泄漏电流的时频特征分析

3.3.1 泄漏电流值的变化特征

绝缘子浓雾闪络过程中泄漏电流波形及其幅值变化如图 3-1 所示。由于绝缘子闪络时的电流达到 3 A，而闪络之前的泄漏电流相对较小，如图 3-1(a)所示，从闪络全过程泄漏电流波形无法做出有效的分析。因此，提取泄漏电流幅值进行分析，如图 3-1(b)所示。在试验电压下，随着绝缘子表面逐渐被浓雾所润湿，其表面导电性物质逐渐增加，绝缘电阻下降，泄漏电流上升。在泄漏电流焦耳热的作用下，绝缘子表面局部被干燥，干燥区电阻增大导致绝缘子表面电压分布不均。由于干燥区电压显著增大，当其电压超过空气的击穿电压时就发生局部电弧放电，形成泄漏电流放电脉冲。随着发生击穿的干燥区域越来越多，放电脉冲也逐渐增多增大，一旦形成稳定的放电通道就容易引发闪络事故。因此，闪络过程可以分为三个阶段：起始阶段、发展阶段和临闪阶段。在起始阶段，绝缘子表面从干燥状态逐渐被浓雾润湿，仅仅在高压侧会发生一些电晕放电，放电声音较弱，绝缘子表面电阻相对较高，泄漏电流很小；在发展阶段，绝缘子表面受潮程度加深呈现干、湿区交替分布的状态，高压侧出现淡紫色的微小电弧，进而发展成较为强烈的刷状放电，绝缘子表面开始频繁出现杂散的黄色电弧，接地侧出现密集的短电弧；在临闪阶段，各处的放电频率减小但是放电强度增大，电弧不断延伸并且相互连接在一起，绝缘子出现多条明亮且较长的桔黄色电弧，随着电弧的不断加强和延伸，最终导致电弧通道形成贯穿绝缘子两极的闪络。

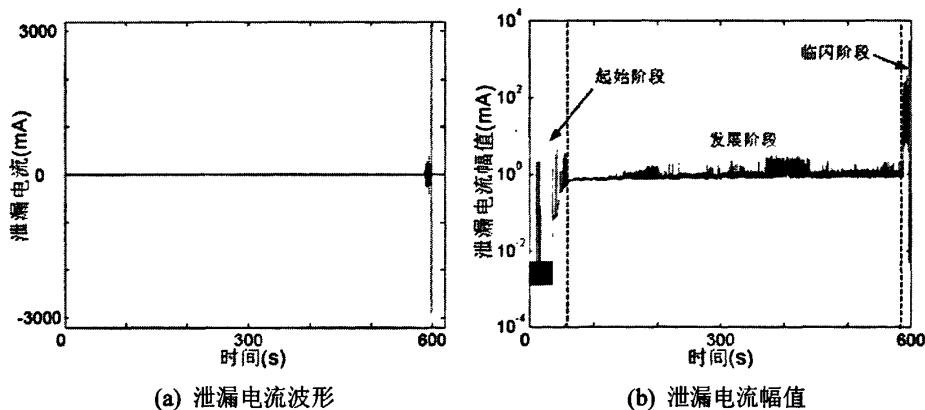


图 3-1 浓雾闪络过程中泄漏电流值的变化

3.3.2 泄漏电流频域特征分析

绝缘子浓雾闪络过程中泄漏电流典型频率分量及其变化特征如图 3-2 所示。

从图中可以看出,各个谐波分量在闪络发展不同阶段均呈现不同的变化特征:泄漏电流基波和三次谐波分量在发展阶段呈现上升的趋势;三次、五次和七次谐波分量均能反映绝缘子表面放电在临闪阶段之前较为密集,在临闪阶段则变化非常剧烈。因此,泄漏电流基波分量仅能反映绝缘子表面绝缘性能的变化,并不能有效反映表面放电的变化特征及其所能引发的闪络事故;泄漏电流的频率分量能够反映闪络过程中表面放电的变化趋势,引起了研究人员的广泛关注,成为监测绝缘子闪络过程的重要参数。

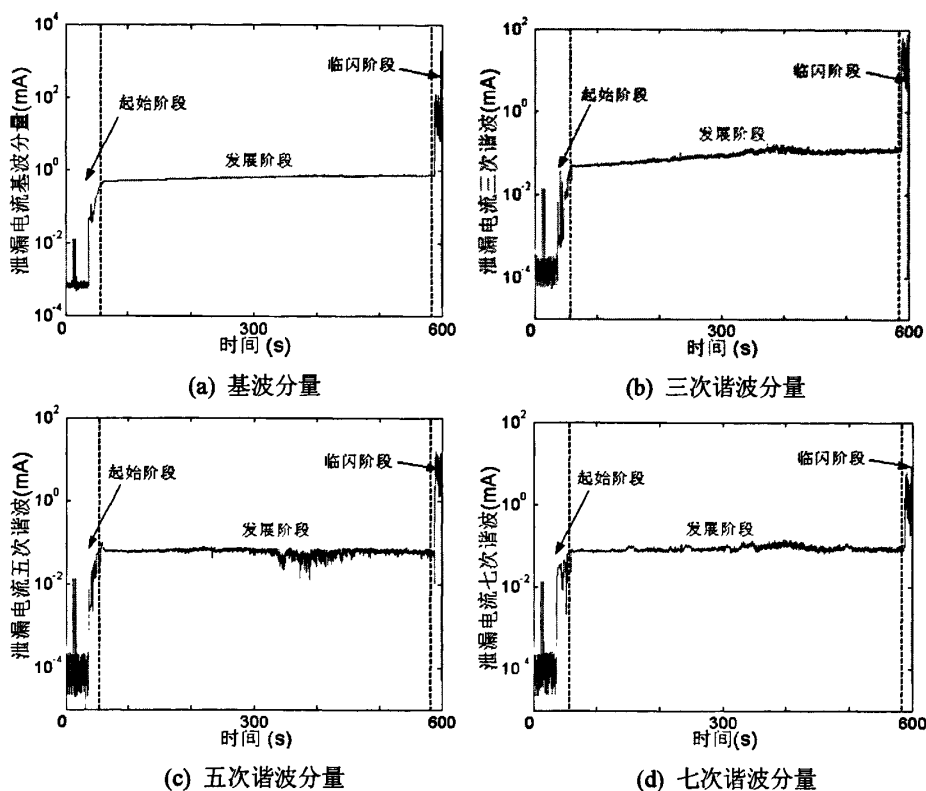


图 3-2 浓雾闪络过程泄漏电流频率分量的变化

3.4 泄漏电流的递归分析

3.4.1 递归图概念与算法

递归图是一种将相空间中递归状态可视化的方法^[105, 106]。所谓递归状态是指那些在特定时间具有相似特性的状态,是动力学系统最基本的特性之一,同时也是混沌系统的特点。高维相空间通常没有一个专门进行绘图的维,而采用投影到二维或者三维空间上进行观测。递归图方法的提出可以将 m 维相空间中的轨道在

二维空间进行观测研究,直观地表示高维相空间中轨迹的递归关系。在递归图中, i 时刻的状态和 j 时刻的状态通过二维方阵中的黑点或者白点表示其递归状态,其中黑点表示该坐标上横轴及纵轴对应的状态发生递归现象,白点则表示不发生递归现象,二者形成的拓扑和纹理结构能够很好地揭示系统的内在状态,从而可以对系统进行定性分析。

递归图的具体算法如下:

(1) 对于采集到的泄漏电流时间序列,运用Takens理论和C-C算法选取恰当的嵌入维数 m 和时间延迟 τ ,重构后的时间序列为:

$$x_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau}) \quad i = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau \quad (3-1)$$

(2) 计算重构时间序列中第 i 点 x_i 和第 j 点 x_j 的距离 S_{ij} :

$$S_{ij} = \|x_i - x_j\| \quad i = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau, j = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau \quad (3-2)$$

(3) 计算递归值:

$$R(i, j) = H(s_{ij} - \varepsilon_i) \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N \quad (3-3)$$

其中, ε_i 为截止距离,可选取固定值,使半径为 ε_i 的球中包含一定邻域数; $H(x)$ 为Heaviside函数。

(4) 在以 i 为横坐标, j 为纵坐标的坐标图中绘制 $R(i, j)$, i 与 j 分别称为时间序列标号,从而得到递归图。

根据递归图的概念与算法,递归图中总存在有一条主对角线,并且沿主对角线呈对称结构。单独的递归点不能够反映某一时刻状态的任何信息,而所有的递归点就能够揭示整个时间序列的状态特征。对于实际的动力学系统,递归状态是指状态 x_i 足够的接近于状态 x_j ,即状态 x_i 落在以 x_j 为中心,以为 ε_i 半径的 m 维球域的邻近点。因此,阈值的选取对递归图具有较大的影响:阈值较大会使递归图中包含更多的递归点;反之,阈值较小对应着较少的递归点。但是,目前尚未形成一个准则来规定如何选取阈值^[107-112]: (1) 阈值为原始信号标准差的25%左右; (2) 阈值为相空间直径的10%; (3) 按照噪声选择阈值为信号中可测噪声标准差的5倍。这些规则在实际应用中都取得了很好的效果,本研究采用选取泄漏电流时间序列标准差的25%作为计算递归图的阈值。

3.4.2 递归图的拓扑结构

递归图用二维图形直观表达高维相空间中轨迹随时间的演化情况,图中蕴含着相空间轨迹随时间发展变化的趋势和规律,不同性质的信号具有不同特征的递归图结构^[108, 111]。根据整体图形特征结构,泄漏电流的递归图结构主要有:均匀结构,周期结构,漂移结构和突变结构,如图3-3所示。

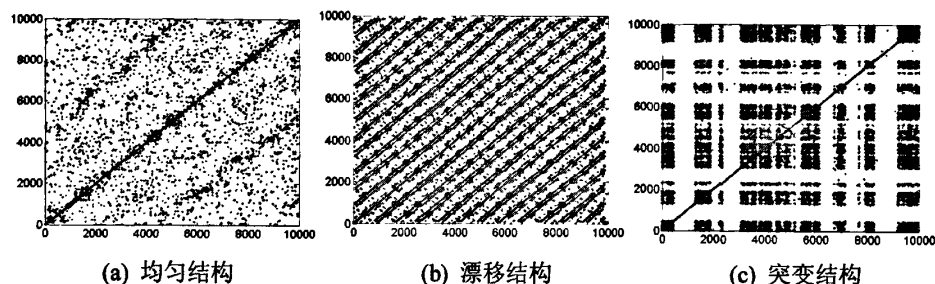


图3-3 泄漏电流递归图的不同结构

(1) 均匀结构: 如图3-3(a)所示。均匀结构通常是由随机系统形成的, 具有相对较短的松弛时间;

(2) 漂移结构: 如图3-3(b)所示。漂移结构是具有缓慢变化参数的系统形成的, 表现为以主对角线为中心向左上和右下角的渐变性;

(4) 突变结构: 如图3-3(c)所示。突变结构是由突然或者急剧变化的动力学系统形成的, 主要表现为较大的白色区域与较大的块状结构交替出现。

上述结构是从递归图的拓扑(整体)结构方面进行分析的, 从图3-3中还可以更进一步从纹理(局部)方面进行分析, 递归图的纹理特征主要表现为: 孤立点, 对角线方向线段以及垂直或水平方向线段。

(1) 孤立点: 当泄漏电流中某一状态在一段时间内没有重复出现, 或者当出现剧烈波动的状态时, 递归图中就会出现孤立点的纹理;

(2) 对角线方向线段: 当相空间轨迹中出现两段相平行时, 或者相空间轨迹在不同时间出现在相同区域时, 递归图就会出现沿对角线方向的线段, 其长度取决于在相同区域内相空间轨迹持续的时间。对角线方向线段的具体方向分为: 平行于主对角线的方向代表平行的相空间轨迹随时间的发展方向是相同的; 垂直于主对角线的方向代表平行的相空间轨迹随时间的发展方向是相反的。

(3) 垂直(水平)方向线段: 当泄漏电流某一状态在一段时间内保持不变或者变化非常缓慢时, 递归图就会出现垂直和水平方向的线段, 表示系统中存在间歇状态。

综上所述, 递归图能够提供一种直观可视的分析方法, 其整体结构特征和细节纹理结构可以定性描述系统在不同状态下的特征^[112, 113]。

3.4.3 递归定量分析

为了进一步完善递归图的分析方法和手段, 递归定量分析法可以将递归图的结构特征定量表征出来。根据递归图的递归点密度和对角线方向线段的特征, 可以采用以下特征量进行递归图的定量分析。

3.4.3.1 递归率 (Recurrent Rate, RR)

递归率是递归图平面中递归点占平面可容纳总点数的百分比, 表明 m 维相空间中邻近的相空间点所占的比例, 其表达式为:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j} \quad (3-4)$$

3.4.3.2 确定性 (Determinism, DET)

确定性是递归图中构成沿对角线方向线段的递归点占总递归点的百分比, 可以将递归图中孤立的递归点和有组织形成连续对角线方向线段的递归点进行区分, 其表达式为:

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} l \cdot p(l)}{\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}} \quad (3-5)$$

其中, $p(l)$ 为长度为 l 的线段数。

3.4.3.3 比率 (Ratio)

比率是确定性 (DET) 与递归率 (RR) 的比值, 表达系统的过渡特性, 在过渡过程中, 递归率会下降而确定性不变。其表达式为:

$$DET = \frac{DET}{RR} = N^2 \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} l \cdot p(l)}{(\sum_{l=1}^N l \cdot p(l))^2} \quad (3-6)$$

3.4.3.4 平均对角线长度 (Average diagonal line length, L)

平均对角线长度是递归图中对角线方向线段长度的加权平均值, 表示相空间轨迹中邻近的两段相轨迹的时间长度或者是系统的平均周期, 其表达式为:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} l \cdot p(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^{N-1} p(l)} \quad (3-7)$$

3.4.3.5 最大对角线长度 (Maximum length, $L_{\max}$)

最大对角线长度是除了主对角线外, 对角线方向线段长度的最大值, 其表达式为:

$$L_{\max} = \max(l_i) \quad i=1,2,\dots,N-1 \quad (3-8)$$

3.4.3.6 分叉性 (Divergence, DIV)

分叉性是用最大对角线长度的倒数来表征, 即:

$$DIV = \frac{1}{L_{\max}} \quad (3-9)$$

3.4.3.7 熵 (Entropy, $ENTR$)

熵反映了递归图中对角线方向线段的频次分布, 揭示了系统确定性结构的复杂性, 其表达式为:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} P(l) \cdot \ln P(l) \quad (3-10)$$

其中, $P(l) = p(l) / \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} p(l)$ 。

3.4.4 泄漏电流递归图的影响参数

根据递归图的概念与算法, 嵌入维数 (m)、时间延迟 (τ) 及阈值 (ε) 是影响递归分析的基本参数。传统的混沌时间序列分析通常采用伪最邻近法确定嵌入维数, 而时间延迟通常采用互信息第一零值法及C-C算法, 但是这些算法相对复杂且不具备普遍意义。此外, 阈值的选取大多是凭借经验进行选取。因此, 有必要通过分析这三个基本参数对递归分析的影响, 进而探求选择递归参数的简便方法。本文以图3-4所示的泄漏电流波形为研究对象, 分别分析了嵌入维数、时间延迟和阈值对泄漏电流递归图的影响。

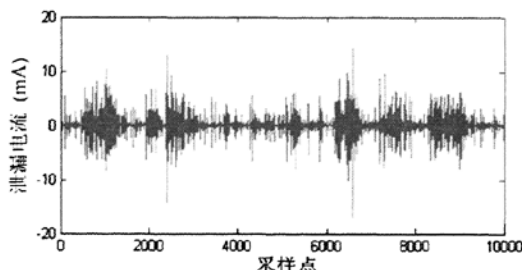


图3-4 泄漏电流波形

3.4.4.1 嵌入维数的影响

为了分析嵌入维数对泄漏电流递归图结构的影响, 将时间延迟和阈值分别固定为 $\tau=10$, $\varepsilon=0.25 \cdot \sigma$, 选取嵌入维数 $m=3, 5, 6, 8$, 得到的泄漏电流递归图如图3-5所示。

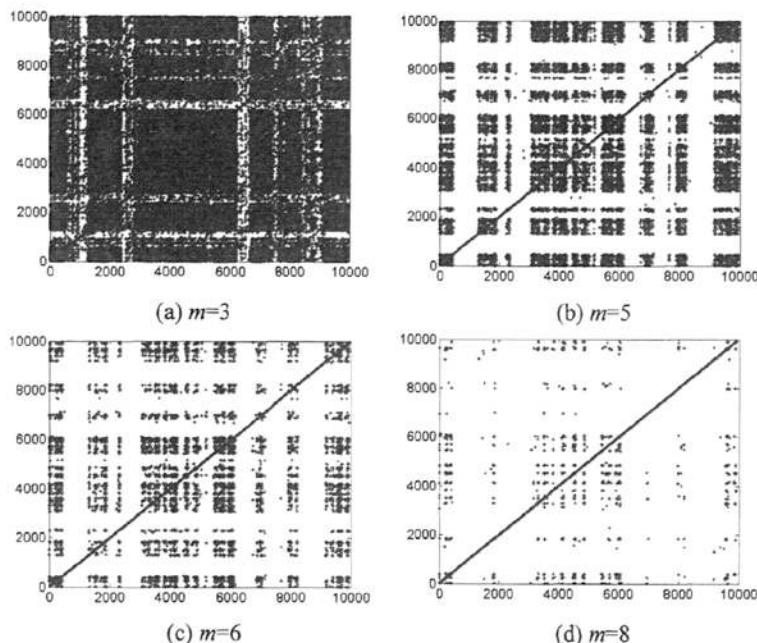


图3-5 嵌入维数对泄漏电流递归图的影响

从图中可以看出,随着嵌入维数的变化,各个递归图具有较好的相似性,递归图的结构变化仅表现在递归点的密度以及线条纹理的清晰程度,嵌入维数较小的递归图在图形结构上包含着嵌入维数较大的递归图,即较大嵌入维数递归图是较小嵌入维数递归图的子集。因此,在一定范围内,嵌入维数对递归图分析方法的影响不是很强,递归图的结构特征不随嵌入维数的变化而改变。

3.4.4.2 时间延迟的影响

当嵌入维数和阈值分别固定为 $m=5$, $\varepsilon=0.25\cdot\sigma$ 时,不同时间延迟下的泄漏电流递归图如图3-6所示。从图中可以看出,时间延迟变化并没有改变递归图的结构特征,没有影响泄漏电流时间序列重构相空间的几何结构,在相同相空间下虽然重构向量有所不同,但是它们之间的距离具有相同的物理意义。因此,递归分析法对时间延迟的依赖性不强。

3.4.4.3 阈值的影响

为了具体分析阈值对递归图结构的影响,将嵌入维数和时间延迟分别固定为 $m=5$, $\tau=10$,建立了递归图定量特征—递归率随阈值的变化关系,如图3-7所示。从图中可以看出,随着阈值的增大,递归率基本按照线性规律增长,阈值的变化只改变递归率数值的大小,没有改变递归图的结构特征。因此,阈值可以根据经验选取为原始泄漏电流时间序列标准差的25%左右。

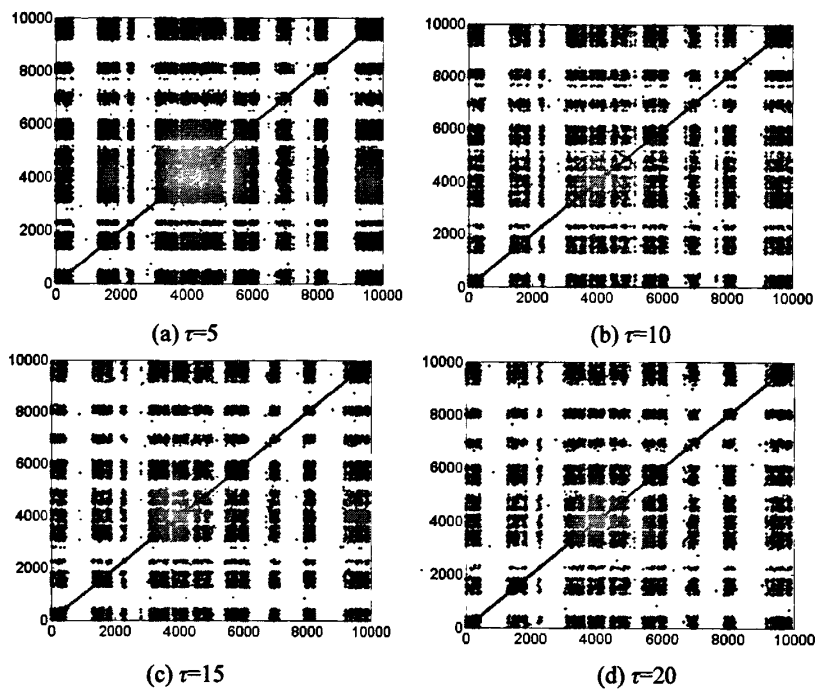


图3-6 时间延迟对泄漏电流递归图的影响

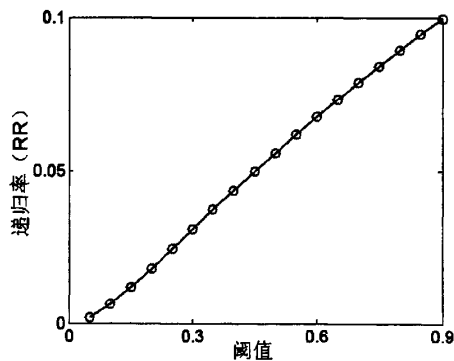


图 3-7 阈值对泄漏电流的递归图的影响

3.5 递归图法监测绝缘子表面状态及污闪过程

3.5.1 绝缘子污闪过程与机理

绝缘子污闪是由于绝缘子表面绝缘能力下降到运行电压以下而引发的，其独特的污闪放电机理与绝缘子表面积污程度、表面污层润湿程度以及绝缘子本身耐受电弧特性等诸多因素有关。目前，尚未形成统一的污闪放电机理，沿湿润污秽绝缘子表面的闪络现象不仅是一种单纯的空气间隙击穿放电，也是一种与电、热、

化学因素有关的污秽绝缘子表面空气电离以及局部电弧发展的热动力平衡过程，即泄漏电流、辉光放电、局部电弧和完全闪络的渐变过程。

在晴朗干燥天气下，绝缘子表面即使沉积大量污秽物，仍具有较高的绝缘水平，表面放电电压与绝缘子表面洁净、干燥状态时接近。当遇到雾、露、毛毛雨等潮湿天气时，绝缘子表面的污秽物将充分吸收水分，使污秽层中的电解质溶解、电离，绝缘子表面带电粒子增多，导致污层表面电导急剧增加。这时，绝缘子的表面泄漏电流就会逐渐增加，由于绝缘子本身的形状、结构尺寸的影响以及绝缘子表面污层分布不均和潮湿程度不相同等因素作用，使得绝缘子表面的电流密度分布不同，从而在电流密度较大的部位容易形成干燥带，干燥带的形成促使绝缘子表面电压分布更不均匀，干燥带将承担较高的电压。当电场强度足够大时，将产生辉光放电，从而产生局部电弧放电。绝缘子表面可以等效为表面局部干燥带电弧串联着一段污层电阻，此时局部干燥带电弧可能熄灭，也可能发展。当局部干燥带电弧不断发生和发展，达到或超过临界状态时，电弧将贯穿绝缘子的金具电极而发生闪络。由此可见，绝缘子污闪过程主要取决于四个不同阶段的发生和发展：绝缘子表面的染污；绝缘子表面污层的润湿；干燥带的形成以及局部干燥带电弧的形成；局部干燥带电弧发展至贯穿电极。因此，绝缘子污闪发生的必要条件为：(1)沿绝缘子表面流过的泄漏电流能够使润湿污秽层蒸发而形成干燥带，并且干燥带间空气间隙能够产生放电形成干燥带电弧；(2)干燥带电弧具备重燃和恢复特性；(3)干燥带电弧能够满足电弧维持条件，保证局部电弧能够沿污层表面扩展至闪络^[6]。当前，研究绝缘子污闪过程与机理主要采用建立电路模型和电场模型两种方式。应用最为广泛的是 Obenaus 电路模型^[1]，如图 3-8 所示。

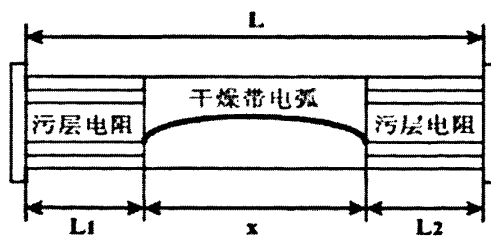


图 3-8 绝缘子污闪的 Obenaus 模型

从 Obenaus 模型可以看出，该物理模型包括一个跨越干燥带的局部电弧以及与之串联的剩余污层电阻，施加电压主要由两部分承担：一是局部干燥带电弧的压降，二是剩余污层电阻的压降，其表达式为：

$$U = Ax\Gamma^n + r_R(L-x)I \quad (3-11)$$

其中， x 为干燥带电弧长度； r_R 为单位长度的剩余污层电阻值； A 、 n 为电弧特性常数； L 为绝缘子的泄漏距离； U 为绝缘子两端的施加电压； I 为绝缘子表面的泄漏电流。

局部干燥带电弧发展为闪络的临界条件是：

$$dI/dx > 0 \quad (3-12)$$

假设 r_a 为电弧单位长度上的电阻，则临界条件为：

$$r_a < r_R \quad (3-13)$$

根据此判据，可以发生闪络的临界泄漏电流为：

$$I_c = (D_r/D_c)^{\frac{1}{n+1}} (A/r_R)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3-14)$$

3.5.2 污闪发展过程中泄漏电流的变化特征

绝缘子表面泄漏电流是在运行电压下，绝缘子污秽受潮时流过绝缘子表面的电流，是电压、气候和污秽程度的综合反映。天气干燥时，流过污秽绝缘子表面的泄漏电流非常小，这时绝缘子表面的干燥区大，单位长度上的电压比较低，电场强度不足以使空气电离产生放电，此时泄漏电流比较平稳。如果湿度增大或者产生过电压，干燥区的电场强度增大到使空气发生电离而放电，绝缘子表面电导层回路总电阻减小，泄漏电流增大。如果湿度和电压继续增大，局部放电电弧将具有下降的伏安特性，电弧强度和持续时间明显增大，电弧长度进一步延伸至闪络，泄漏电流达到最大。

因此，通过测量泄漏电流能够有效反映绝缘子表面状态，并实现绝缘子运行状态的自动检测和报警，已经被广泛应用于监测和评估绝缘子运行状况^[114, 115]。根据绝缘子闪络发展过程中表面放电现象和特征，提取各个阶段典型的泄漏电流波形及其频谱特征，如图 3-9 所示。

起始阶段：如图 3-9(a)所示。在加压起始阶段，流过绝缘子表面的泄漏电流主要是阻性电流，波形呈现正弦形态。随着一些微小火花放电的发生，波形发生一些畸变。由于绝缘子表面主导特征为阻性和弱放电，泄漏电流的幅值很小，并且其频谱主导特征为基波和 7 次谐波；

发展阶段：如图 3-9(b)所示。此阶段是绝缘子表面从起始阶段进入临闪阶段的发生和发展过程，伴随着干燥带的形成以及局部电弧的出现、熄灭和恢复，泄漏电流幅值增加，波形呈现三角波形状，频谱主导特征为基波和 3 次谐波；

临闪阶段：如图 3-9(c)所示。绝缘子表面主导特征为间歇性的强烈干燥带放电，泄漏电流幅值显著增大，波形呈现放电脉冲形态，频谱主导特征为基波和 3 次至 11 次谐波；

闪络阶段：如图 3-9(d)所示。绝缘子表面发生贯穿金具电极的电弧击穿，泄漏电流幅值达到最大，并且波形呈现正弦形态，频谱主导特征为基波。

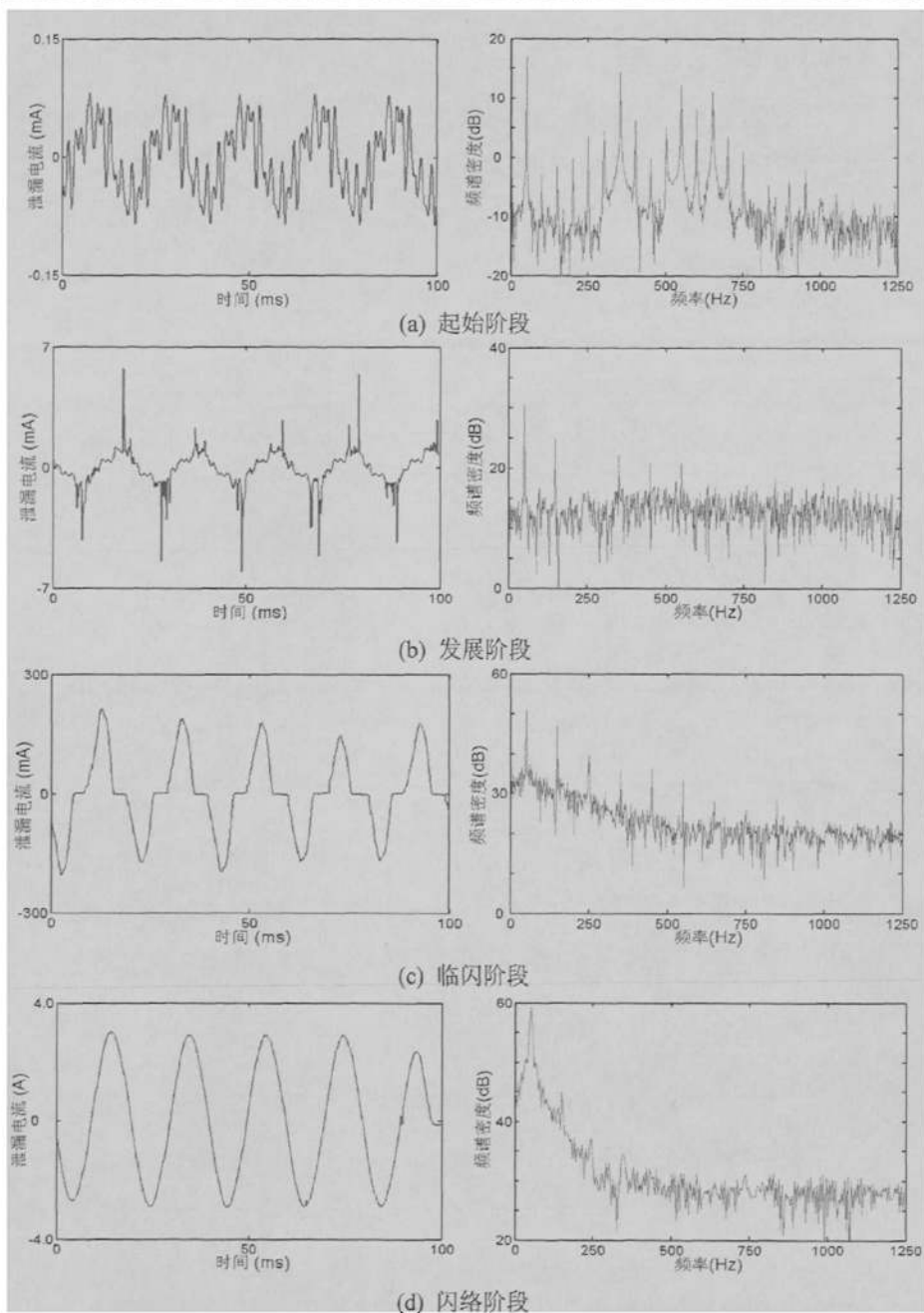


图 3-9 绝缘子闪络各个阶段的典型泄漏电流波形及其频谱特征

3.5.3 基于小波变换的泄漏电流频率特征提取

由于研究采用的工频 50 Hz 交流电源,采集到的泄漏电流时间序列包含大量工频信号,这样对进行递归图法分析闪络过程产生负面影响^[116]。由于绝缘子表面放电的频带高于工频,采用小波变换多分层理论对泄漏电流信号进行分解^[117]。

3.5.3.1 小波变换的概念与算法

小波变换是 Fourier 变换深入发展过程的一个里程碑, 已经在信号的时频特征分析中显示出巨大的潜力和广泛的应用前景。小波函数既能在整体上反映信号的主要特征, 又能在任一局部时间显示信号变换的剧烈程度, 具有时频局部化以及时频窗大小可变的特性, 对信号的突变点非常敏感, 其基本定义如下^[118, 119]:

对于函数 $\psi(x) \in L^2(R) \cap L^1(R)$, 若满足容许性条件

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (3-15)$$

那么 $\psi(x)$ 称为基小波, 而函数族 (3-16) 称为小波或子波:

$$\Psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad b \in R, a \in R - \{0\} \quad (3-16)$$

其中, a 为伸缩系数, b 为平移系数。

3.5.3.2 小波分析的特性

小波变换成功实现了时频局部化的性能。为了进一步说明该特性, 引入窗函数, 若函数 $W(x) \in L^2(R)$ 满足:

$$xW(x) \in L^2(R) \quad (3-17)$$

则函数 $W(x)$ 称为窗函数。若窗函数具有对称性, 则称为双窗函数。

一般情况, 小波基函数 $\psi(x)$ 具有紧支撑或者快速衰减的特性, 它的 Fourier 变换就可以作为窗函数, 设其中心为 t^* , 半径为 $\Delta\psi$, 则函数 $\psi_{a,b}(x)$ 的中心为 $b+at^*$, 半径为 $a\Delta\psi$, 其定义的时间窗为:

$$[b+at^*-a\Delta\psi, b+at^*+a\Delta\psi] \quad (3-18)$$

同时, 其定义的频率窗为:

$$\left[\frac{\omega^*}{a} - \frac{\Delta\hat{\psi}}{a}, \frac{\omega^*}{a} + \frac{\Delta\hat{\psi}}{a}\right] \quad (3-19)$$

将式 (3-18) 和 (3-19) 定义的时间窗和频率窗显示在同一时频平面内得到矩形的时间频率窗, 如图 3-10 所示。其中, 时间窗的宽度为 $2a\Delta\psi$, 频率窗的宽度为 $2\Delta\psi/a$, 整个时频窗的面积为 $\Delta = 4\Delta\psi \cdot \Delta\hat{\psi}$, 它不随伸缩系数 a 和平移系数 b 的变化而变化。从图中可以看出, 当伸缩系数变大时, 矩形窗变宽(时宽增大), 高度变窄(频宽变小), 适于检测比较大范围的低频信号变化; 当伸缩系数变小时, 矩形窗变窄(时宽变小), 高度变长(频宽增大), 适于检测小范围内的高频信号变化。这些变化特征表明: 小波变换所提供的局部化格式是变化的, 表现在高频处时间分辨率自动变高, 低频处的时间分辨率自动变低, 而且中心频率与带宽的比与中心频率的位置无关。小波变换的“变焦”功能正是其精华所在, 同时具有很强的自适应性并且计算复杂度低, 因此它在非平稳信号处理方面得到了广泛应用。

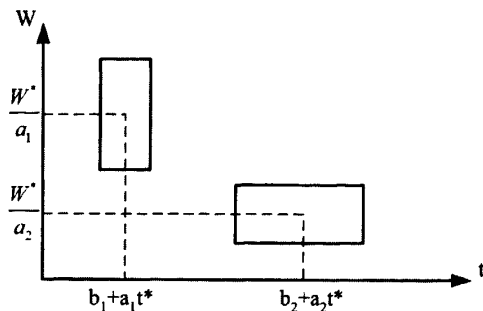


图 3-10 小波变换对应的时频分布

3.5.3.3 常见的小波函数及其特点

当前国内外研究人员主要采用的小波为：Morlet 复连续小波，Chaari 复连续小波，Mallat 样条小波，B 样条双正交紧支小波和 Daubechies 正交紧支小波。这几种小波的特点如下：

(1) Morlet 小波是 20 世纪 70 年代 J. Morlet 为分析石油勘探信号而设计的一种变换函数。Morlet 小波有多种形式，常用的最简单形式为：

$$\psi(t) = Ce^{-t^2/2} e^{i\omega_0 t}, \quad \hat{\psi}(\omega) = C\sqrt{2\pi} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (3-20)$$

Morlet 小波只是对高斯函数加以频移，不是严格意义上的小波，因为它不满足目前公认的小波应满足的容许性条件。但当 $\omega_0 \geq 5.336$ 时，就能基本满足容许性条件，可作为基小波使用。它的特点是复小波，能分析信号的相位信息，具有线性相位；缺点是连续小波，计算不方便^[120, 121]。

(2) Chaari 复小波是 O. Chaari 等人为判别通过谐振阻抗接地的配电系统短路故障而构造的一种复连续小波，该小波的时、频域表达式为：

$$\begin{aligned} \psi(t) &= (1 + \sigma|t| + (\sigma^2/2)t^2) \exp(-\sigma|t| + i\omega_0 t) \\ \hat{\psi}(\omega) &= \frac{6\sigma^5 - 2\sigma^3(\omega - \omega_0)^2}{[\sigma^2 + (\omega - \omega_0)^2]^3} \end{aligned} \quad (3-21)$$

Chaari 小波能提供相位信息，其波形大致为双边指数衰减振荡型，频带窄，选频性好。但是当分析信号的波形与频带不符合这些特点，以及被分析数据量很大时，使用 Chaari 小波的效果就不好^[120]。

(3) Mallat 样条小波的优点是滤波参数计算简单，使用方便，曾被大量采用。但是，该小波是为了检测边缘类的突变部分而设计的，时域波形单调，各阶小波基本上都是类似于周期的正弦波形，不易与分析信号匹配，不利于分析信号中李氏指数不同的局部奇异行为与突出分析信号的奇异部分。由于通带范围太宽，特别是频谱低端衰减太慢，不利于滤除干扰^[122]。

(4) B 样条双正交紧支小波的频带过宽，选频性能不好，要减小带宽将增加滤波器的长度，增加变换时的计算量，此外滤波器参数的计算也较麻烦^[123]。

(5) Daubechies 正交紧支小波是 Daubechies 根据自己建立的规范小波理论构造出来的时域紧支正交小波, 应用范围广泛。该小波常简称为 D 小波, 是典型的正交小波基^[124]。

3.5.4 基于递归分析的绝缘子污闪过程监测

3.5.4.1 泄漏电流频率分量的递归图分析

根据小波变换多分层理论对泄漏电流时间序列进行分解, 采用 db8 小波包, 选择 10 层小波分解, 将信号分解为 11 个尺度^[125]得到绝缘子闪络发展过程各个阶段泄漏电流及其频率分量, 如图 3-11 所示。其中, s 表示原始波形; $ch1$ 表示 50 Hz 频率分量; $ch2$ 为 150 Hz 频率分量; $ch3$ 为 250 Hz 频率分量; $ch4$ 为 350~650 Hz 频率分量; $ch5$ 为 650~1250 Hz 频率分量; $ch6$ 为 1250~2500 Hz 频率分量。根据当前泄漏电流频率分量的研究现状^[18, 23, 49, 55, 126], 这些频率可以分为三部分: 低频分量 ($ch1$, $ch2$ 和 $ch3$), 中频分量 ($ch4$ 和 $ch5$) 与高频分量 ($ch6$)。

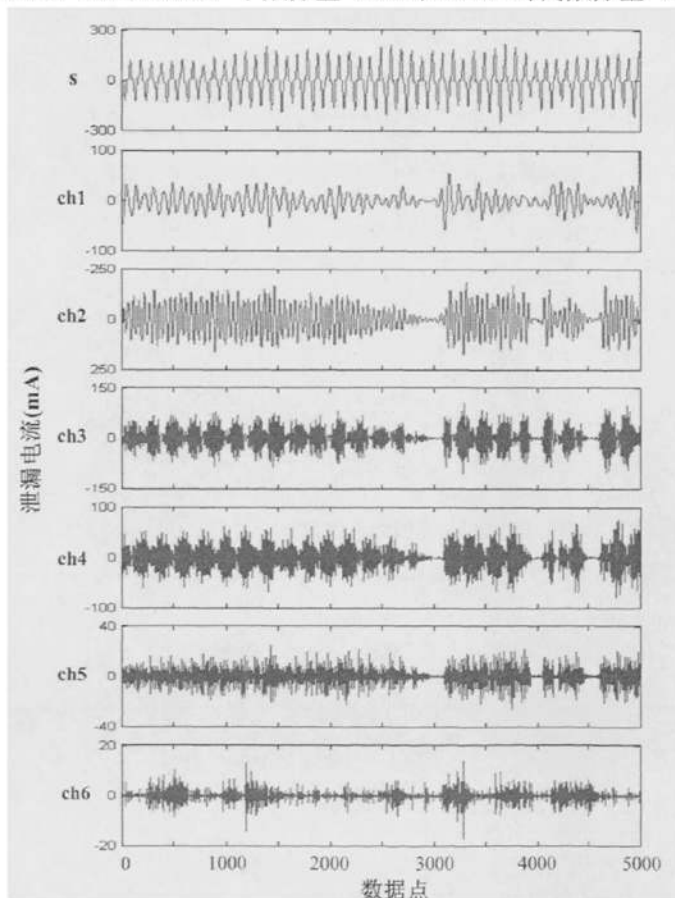


图 3-11 绝缘子表面泄漏电流波形及其频率特征

从图 3-11 中可以看出, 绝缘子表面放电包含的各个频率分量随着放电的进行呈现不同的特征。在低频分量下, 基波分量所占的比例较大, 表明绝缘子表面电导特性的变化; 在中频分量和高频分量下, 放电特征比较明显, 放电脉冲密集, 但是其变化规律无法有效进行表征。因此, 我们对这些频率分量分别采用时间序列相空间重构方法对泄漏电流各频率分量的时间序列进行重构, 然后基于递归分析方法得出各个频率分量的递归图, 如图 3-12 所示。

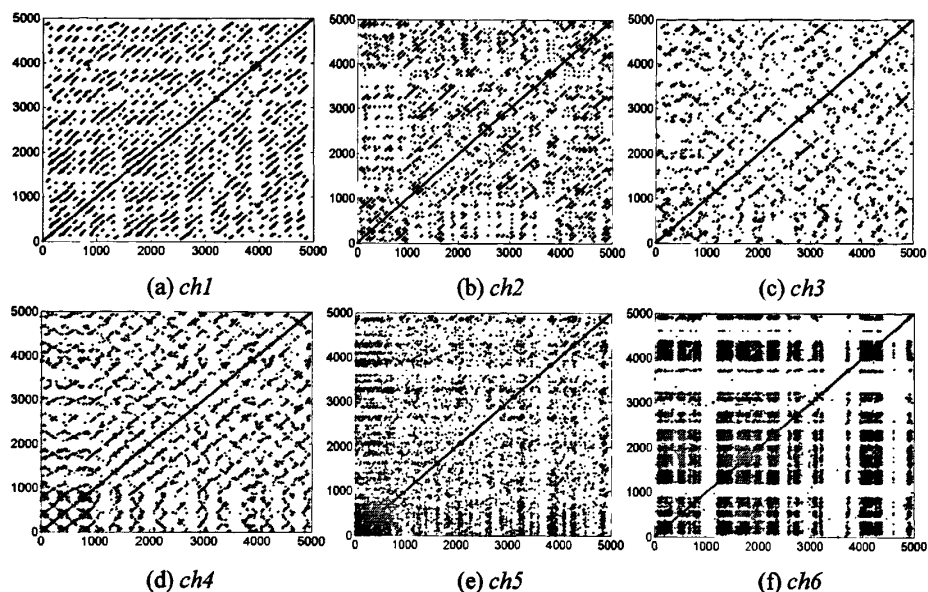


图 3-12 绝缘子表面泄漏电流频率分量的递归图分析

从图 3-12 中可以发现, 在泄漏电流的不同频率分量下, 递归图表现出三种典型的变化趋势, 所对应的是绝缘子表面的动态变化特征。图 3-12(a)至 3-12(c)都是泄漏电流低频分量的非线性特征, 从图中可以看出, 递归图中大多数递归点平行于主对角线, 只有少量递归点以杂散的形式存在, 这种递归图特征表明泄漏电流的低频分量具备一定的周期性变化, 放电电流的变化在这些频率中未能很好的得到体现, 泄漏电流的低频分量并不能有效反映绝缘子表面放电的剧烈变化, 因此也不能有效监测由于表面放电的发生与发展所引发的闪络过程。图 3-12(d)至 3-12(e)是泄漏电流中频分量的非线性特征, 其递归图的拓扑结构和细纹变化可以看出大部分递归点是均匀分布的, 这就表明泄漏电流的中频分量虽然在一定程度上揭示了绝缘子表面放电具备随机变化的特征, 放电电流之间的相关性较差, 但是并不能准确表征各种放电之间的交替变化, 从而也不能有效揭示闪络发展过程中放电的变化过程。图 3-12(f)是泄漏电流高频分量的非线性特征, 从图中可以看出, 高频分量的递归图与低频和中频分量的递归图具有完全不同的变化特征, 该拓扑结构中出现多个类似“十字”的空白地带, 递归点在各个空白地带之间

进行密集分布,这种拓扑结构中递归点分块的交替变化有效表征了绝缘子表面放电发生的阶段性突变,反映了电弧放电通道的形成、熄灭与再次形成的过程,正是由于表面放电的这种交替变化才能最终在某一个放电通道形成贯穿金具两端的闪络电弧。

3.5.4.2 递归图监测绝缘子闪络过程

图 3-13 为泄漏电流 150 Hz 频率分量的时间变化序列及其对应的递归图拓扑结构。随着闪络过程的发展,该时间序列虽然具有相似的波形但是幅值呈现逐渐增大的趋势,已经被一些学者作为预测绝缘子闪络或监测绝缘子运行状态的重要参数^[49, 114, 115]。但是,有研究表明泄漏电流的低频分量并不能有效反映绝缘子表面的放电发展及闪络过程^[118],该结果可以很好地从递归图结构中表征出来。如图 3-13 所示,随着闪络过程的发展,递归图中的主要结构仍然由密集的递归点及其形成的平行于主对角线的线条组成,表明该组分的泄漏电流在 m 维空间上具有很高的关联程度,揭示了绝缘子表面相对稳定的变化特征。该特征主要是由于浓雾润湿绝缘子表面形成的导电层降低了绝缘性能,引发绝缘子表面泄漏电流的增大以及与之相伴的稳定的放电现象。

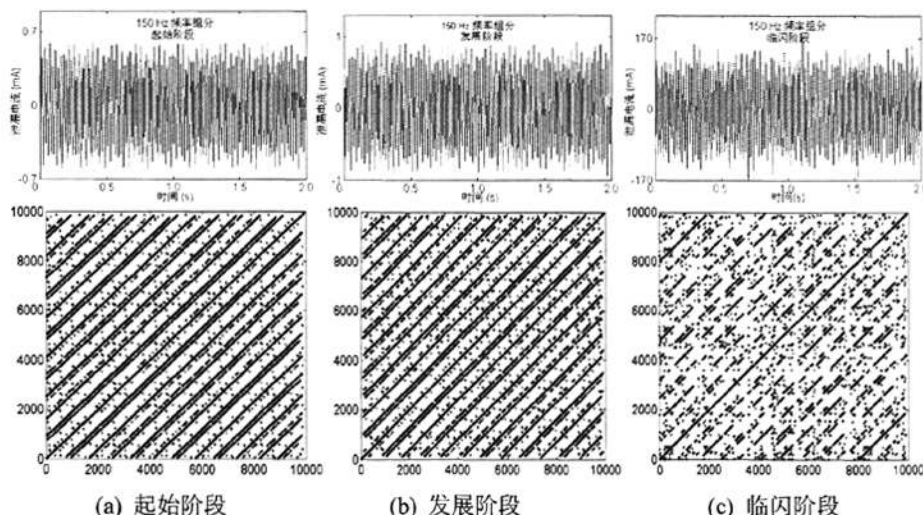


图 3-13 基于 150 Hz 频率分量递归图的绝缘子浓雾闪络监测

图 3-14 为泄漏电流 350~650 Hz 频率分量的时间变化序列及其对应的递归图拓扑结构。与泄漏电流低频分量一样,该分量时间序列也呈现幅值增大但波形相似的变化趋势。随着闪络过程的发展,在泄漏电流正、负半周均出现稳定的放电特征:当绝缘子表面仅仅出现一些微弱放电时,该组分的幅值相对较小;随着逐渐出现较小的局部电弧放电,幅值逐渐增大;当连续出现强烈的电弧放电至形成闪络时,幅值达到最大。

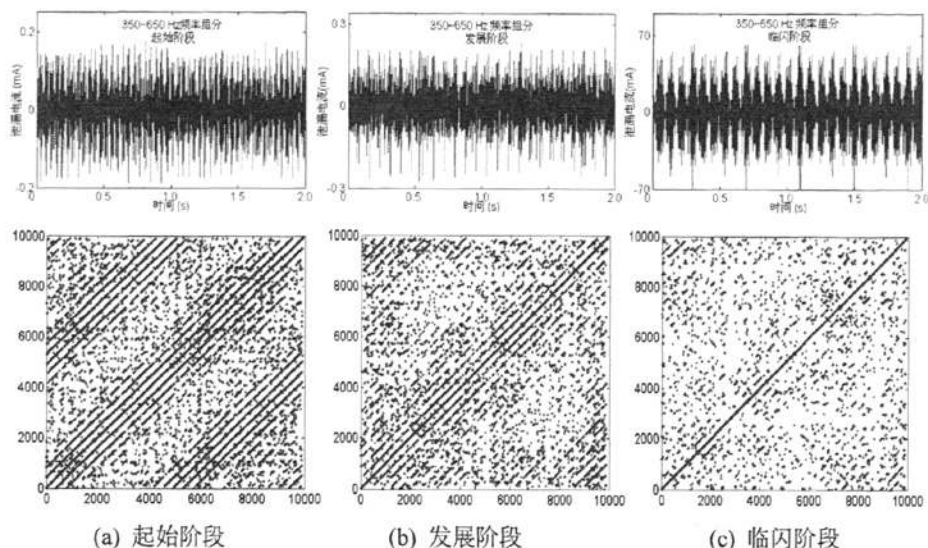


图 3-14 基于 350~650 Hz 频率分量递归图的绝缘子浓雾闪络监测

从图 3-14 的递归图结构中能够看出,在起始阶段,递归点形成了一些平行于主对角线的线条,表明该组分具有较多的相同或相似的特征量。在发展阶段,递归线逐渐减少,杂散分布的递归点逐渐增多,表明该组分中特征量的相关程度逐渐减弱。这主要是由于泄漏电流焦耳热加速了凝结在绝缘子表面浓雾的蒸发,在润湿和蒸发交替作用下绝缘子表面局部出现干燥带或者干燥区,该处电场达到击穿场强时就会引发放电现象,由于此时放电的发生比较随机且呈现较高的频率,因此放电之间彼此的关联程度较弱,在递归图上呈现不规则的递归点。

图 3-15 为泄漏电流 1250~2500 Hz 频率分量的时间变化序列及其对应的递归图拓扑结构。随着闪络的发展,该频率分量的时间序列在幅值和波形上均呈现较大的不同,从起始阶段进入发展阶段,绝缘子表面放电由微弱放电发展至强烈的电弧放电,在递归图中表现为密集递归点的随机分布。在临闪阶段,绝缘子表面连续出现的干燥带放电逐渐连接在一起形成稳定的放电通道,随着放电通道的交替出现,在某一时刻就会迅速形成贯穿绝缘子两极的闪络现象。此阶段的递归图特征与前两个阶段的递归图具有显著的区别,递归图中呈现密集递归点和空白区域交替出现的结构,密集点表征稳定且强烈的放电现象,空白区域表征放电现象的交替,这样的拓扑结构表明闪络即将发生。

基于上述分析,泄漏电流的高频分量更能有效反映绝缘子表面放电的发生与交替变化,进而揭示放电的非线性特征,能够成为监测绝缘子表面状态的可靠方法与手段。因此本文接下来采用小波变化方法提取绝缘子闪络发展过程各个阶段泄漏电流的高频分量(1250 Hz to 2500 Hz),然后基于递归分析方法得到其递归图,如图 3-16 所示,其中(a)是闪络起始阶段,(b)到(e)为闪络发展阶段,(f)为临

闪阶段。各个阶段递归图的拓扑结构和细纹理变化有效揭示了绝缘子表面放电的不同特征与变化,为绝缘子闪络过程的监测提供了一种可视化的监测手段。

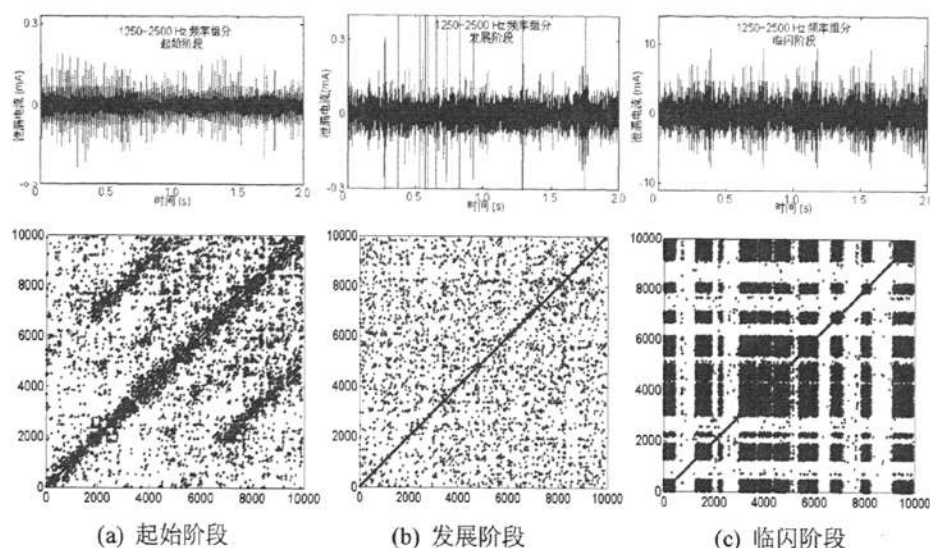


图 3-15 基于 1250~2500 Hz 频率分量递归图的绝缘子浓雾闪络监测

图 3-16(a)反映了阶段 I 时绝缘子的表面状态,多数递归点集中和平行于主对角线进行分布,表明绝缘子表面在起始加压时,由于浓雾在表面凝结形成连续导电的水膜,绝缘子表面主要是导电电流,在局部偶尔发生放电,但是放电能量较低,放电产生的热量也较少,对水带的蒸发作用较小。

图 3-16(b)反映了阶段 II 时绝缘子的表面状态,虽然此时的递归图拓扑结构与阶段 I 时的拓扑结构相似,但是在具备平行于主对角线的递归点时,大部分递归点呈现均匀杂散的分布特征,表明绝缘子表面导电电流的组分减少,微小火花放电逐渐增多,放电能量较多,产生的放电热量将会加速水带和雾滴的蒸发,但是绝缘子表面状态仍然相对比较稳定。

图 3-16(c)反映了阶段 III 时绝缘子的表面状态,此时递归图拓扑结构中没有了平行于主对角线的递归点,所有的递归点都杂散的分布在图中,表明较弱的电弧放电取代导电电流而占据了绝缘子表面,放电重复进行并且放电量逐渐增长。

图 3-16(d)反映了阶段 IV 时绝缘子的表面状态,此时递归图拓扑结构与阶段 III 的相似,但是递归点出现的更加密集,表明绝缘子表面电弧放电逐渐变得强烈,相互之间的关联性较大。

图 3-16(e)反映了阶段 V 时绝缘子的表面状态,此时递归图中递归点又变得比较稀疏,表明绝缘子表面电弧放电逐渐连接在一起,形成了较强且稳定的干燥带放电电弧。

随着干燥带电弧的发展与交替变化,就形成了临闪阶段(阶段 VI)独特的

递归图结构,如图 3-16(f)所示,表明电弧放电即将形成连接金具两端的导电通路,闪络即将发生。递归图中的空白区域表明泄漏电流时间序列中数据点与点之间的相关性极低,绝缘子表面的干燥带放电表现出突变的特征,预示闪络即将发生。

从上述递归图中可以得出,递归图可以有效地定性表征不同闪络发展阶段泄漏电流高频分量的内在特征和表面放电的发展与变化过程,揭示了绝缘子闪络过程的发生与发展机理。

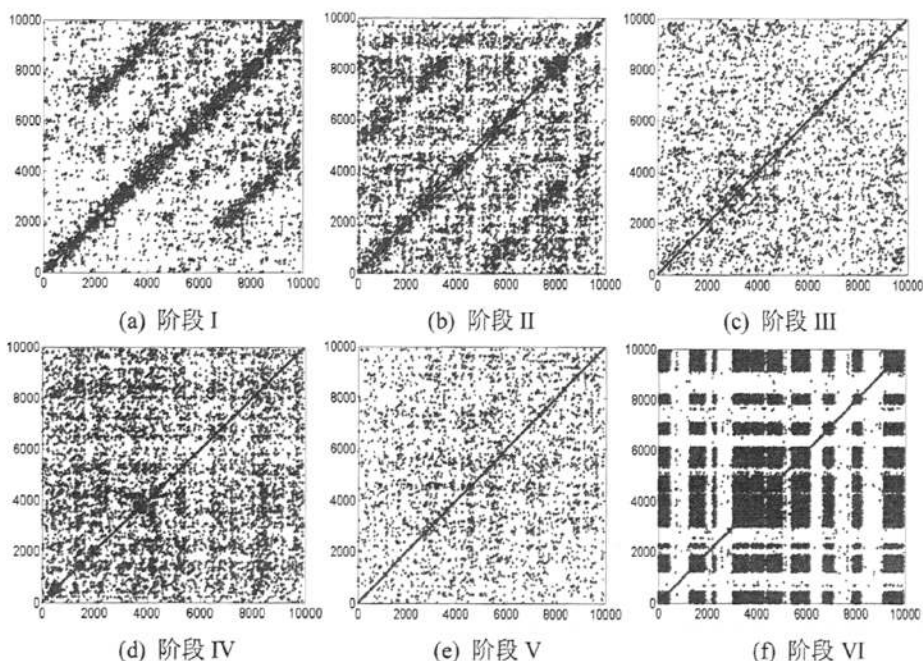


图 3-16 基于泄漏电流高频分量递归图的绝缘子浓雾闪络监测

为了进一步增强递归分析法对绝缘子表面放电动力学特征的描述,通过递归定量分析方法计算闪络发展各个阶段的递归定量指标,对其非线性特征进行定量表述,如图 3-17 所示。

图 3-17(a)是闪络发展各个阶段下递归率(RR)的变化特征,从图中可以看出,随着闪络各个阶段的发展,递归率呈现下降的趋势。该变化特征表明随着绝缘子表面放电的发展,泄漏电流高频分量中具有规律性的组分逐渐减少,强烈的放电通道逐渐形成。

图 3-17(b)是闪络发展各个阶段下确定性(DET)的变化特征,从图中可以看出,随着闪络各个阶段的发展,确定性也呈现下降的趋势。该变化特征表明泄漏电流高频分量中不确定性的组分逐渐增加,这主要是由于绝缘子表面放电从起始的随机发生的微小火花放电经过弱的电弧放电,最终发展至稳

定、强烈的干燥带电弧放电所引起的确定性组分减小。

可见，泄漏电流高频分量的定量指标（RR 与 DET）对闪络发展过程的定量描述与图 3-16 中递归图的定性描述具有很好的一致性，递归分析方法能够有效地揭示绝缘子闪络发展过程中表面放电的变化特征，为绝缘子状态监测提供了一种有效的、可视化方法。从而可以归纳得出绝缘子在浓雾环境下的闪络过程为：首先，当绝缘子置于雾室中，雾中的水滴会逐渐附着在绝缘子表面，随着时间的延长，凝结的水滴逐渐增多、增大；在外加电压产生的电场作用下，体积较大的水珠在电场力作用下逐渐拉长，部分相邻水珠的端部连接在一起，随连接的水珠越来越多，沿电场方向形成细长的水带，使电极之间干燥区域的距离减少；由于湿润区电场强度很小，大部分电压由距离很短的干区承担，因此，水珠或水带间干区的电场强度可达到很大的值，产生强烈局部放电，形成间歇式的局部小电弧；水珠或水带间的间歇式局部电弧将导致绝缘子表面憎水性的减弱，甚至丧失；憎水性的破坏将进一步增大湿润区的长度，使干燥区的电场强度再继续增大，部分干燥区甚至达到了空气的击穿场强，形成稳定的电弧放电；由于电弧具有下降的伏安特性，随着电弧的发展，干燥区的电场强度增大，剩余干燥区击穿产生电弧后并且不断延伸形成贯穿金具两端的电弧，闪络发生。

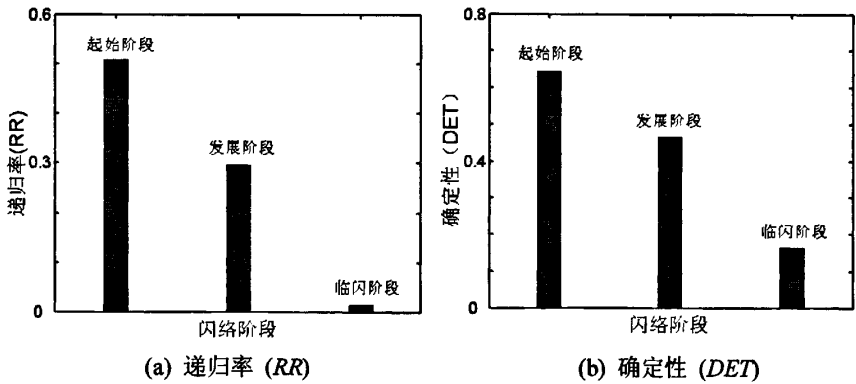


图3-17 绝缘子闪络过程的递归定量分析

综上所述，泄漏电流的低频和中频分量并不能有效反映闪络过程中表面放电的内在特征，相反，泄漏电流的高频分量能够通过其递归图及定量指标却能够揭示绝缘子表面放电的变化与特征，如图 3-12 至图 3-15 所示。对于低频分量（基波和三次谐波），虽然它们的幅值变化与当前的研究结果具有一致性^[18, 23, 49, 55, 126]，但是递归图的拓扑结构却表明此时绝缘子表面呈现相对稳定的运行状态，因此，泄漏电流的低频分量并不能有效反映绝缘子表面的放电现象。对于中频分量，这些分量由于其自身幅值想对较小并且所包含的信息想对较少，在大多数泄漏电流的分析中可以被忽略；对于高频分量，其

递归图的变化与绝缘子表面的放电过程具有很好的一致性,进一步证实了绝缘子运行状态监测的可行性。

3.6 本章小结

首先,基于分析当前引发绝缘子发生闪络的恶劣气候,在实验室条件下采用人工大气模拟实验方法对发生在浓雾环境下的绝缘子闪络过程进行了监测,并根据闪络过程将其分为不同的发展阶段进行研究和分析。

其次,介绍递归图的概念、算法及拓扑结构与递归定量分析,将递归分析方法引入对绝缘子闪络发展过程各个阶段泄漏电流的分析之中,系统讨论嵌入维数、时间延迟及阈值对递归分析的影响,结果表明:

(1) 嵌入维数对递归图分析方法的影响不是很强,随着嵌入维数的变化,递归图的结构变化仅表现在递归点的密度以及线条纹理的清晰程度,而其结构特征不随嵌入维数的变化而改变;

(2) 递归分析法对时间延迟的依赖性不强,时间延迟不会影响递归图的结构特征,也不会改变相同相空间下重构向量之间距离的物理意义;

(3) 阈值影响递归定量数值的大小,不会改变递归图的结构特征,通常可以根据经验选取为原始泄漏电流时间序列标准差的 25%左右。

最后,综合当前泄漏电流频率特征的研究现状,采用小波变换方法提取各个阶段泄漏电流的频率特征分量,将其分为低频、中频和高频分量三部分,采用递归图揭示了不同频率分量的内在变化特征及其与绝缘子表面状态的关系,并进一步采用递归定量分析法将这一关系定量化,所得的主要结论为:

(1) 递归图及其定量指标能够有效分析和准确揭示绝缘子闪络发展过程中表面放电的发生、发展与延伸的变化特征与规律,为绝缘子运行状态的监测提供了一种更为科学、有效的监测方法;

(2) 对于泄漏电流的低频分量,递归分析揭示了其表征绝缘子表面相对稳定的特性,并在闪络发展过程中具有一致的变化规律,因此不能有效揭示表面放电现象的内在变化及其对闪络发展的影响;

(3) 对于泄漏电流的中频分量,递归分析并不能有效反映绝缘子表面放电的非线性特征,并且其显示的动态变化特征较少,因此在绝缘子状态监测方面可以忽略对它的分析;

(4) 对于泄漏电流的高频分量,递归图及定量指标的变化与绝缘子表面的放电过程具有很好的一致性,能够揭示绝缘子表面放电的变化与特征,可以作为绝缘子运行状态的有效的、可视化的监测方法。

第四章 递归分析法检测污湿环境下绝缘子运行状态

4.1 引言

潮湿污秽环境是较易引发绝缘子在实际运行中出现问题的因素之一。为了提高这些绝缘子使用的安全性和可靠性,防止污湿环境引发的绝缘子事故给整个电力系统的运行造成危害,必须有效检测绝缘子在污湿环境下的运行状态。泄漏电流检测方法能够对绝缘子进行实时检测,同时能够避免主观因素对检测结果的影响,提高了绝缘子状态检测的准确性和有效性。

本文在对比分析当前泄漏电流检测方法的基础上,将非线性理论引入对泄漏电流的分析之中。在实验室人工模拟大气环境下分别将合成绝缘子处在各种温度、湿度和污秽环境下,然后分别施加电压并采集流过绝缘子表面的泄漏电流,经过递归分析法得到泄漏电流时间序列的递归图,根据递归图的拓扑结构和纹理差异以及相应的递归定量指标表征了绝缘子运行状态与各种环境因素的关系,为绝缘子运行状态提供了一种可视化的检测方法。

4.2 试验系统与方法

4.2.1 试样

实验采用硅橡胶合成绝缘子(FXBW4-35/70)作为试样,其分子结构及外形结构示意图如图4-1所示。在硅橡胶分子结构中,决定其宏观性能的四个主要特征为:甲基基团之间小的分子作用力;硅氧主链独一无二的柔顺性;硅氧键的高键能;硅氧主链的局部离子特性。围绕硅氧主链紧密排列的非极性甲基集团向表面取向,屏蔽了硅氧键的强极性作用,使得硅橡胶表现出优异的憎水性^[1]。硅橡胶中一般都不同程度的含有未交联的低分子量硅氧烷链段,硅氧主链的柔顺性及这些低分子链段的存在对合成绝缘子及涂料的憎水性具有至关重要的影响,同时导致各种污湿环境下绝缘子表面呈现不同的状态。一旦绝缘子表面形成连续的污湿导电通道,泄漏电流逐渐增大,在泄漏电流焦耳热的作用下表面局部导电层被干燥形成干燥区或者干燥带,导致绝

缘子表面电场分布发生改变，引发干燥带放电。如果不能及时对绝缘子运行状态进行检测，随着干燥带电弧放电的发展、延伸，就可能引发闪络事故，影响绝缘子的绝缘可靠性。

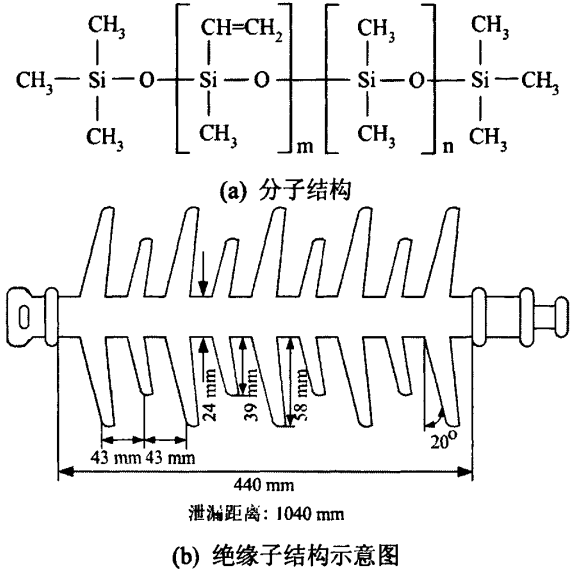


图 4-1 实验试样

4.2.2 试验系统与方法

图 4-2 为绝缘子老化试验系统。实验采用 YDGZ 工频高压试验系统，该装置主要由高压试验变压器 TDM-100/50 和控制台组成，变压器的容量为 100 kV·A，额定电压为 50 kV。采用超声波盐雾发生装置通过超声波高频震荡将盐水雾化，1~5 μm 的盐雾粒子，经过鼓风装置将盐雾均匀地扩散到人工气候模拟雾室中，并采用湿度传感器控制雾室的相对湿度，采用温度控制系统控制雾室温度，从而模拟各种污湿环境。

表 4-1 为试验进行所采用的参数。实验前采用无水乙醇清洗绝缘子表面后将试样置于干燥室中室温干燥 24 h，然后将绝缘子垂直悬挂于人工雾室，调整雾室温度分别为 0℃、25℃、30℃、35℃ 和 40℃，采用超声波盐雾发生装置将电导率分别为 1.0~5.0 mS/cm 的 NaCl 盐溶液雾化后以 2.1 cm³/min 的速率注入雾室中，控制雾室的相对湿度分别为 70%、80%、90% 和 100%。将绝缘子在雾室中某一实验条件下维持 2 h 后施加 35 kV_{rms} 工频交流电源，采用多功能数据采集卡记录流过绝缘子表面的泄漏电流，采样率为 5.0 kHz。

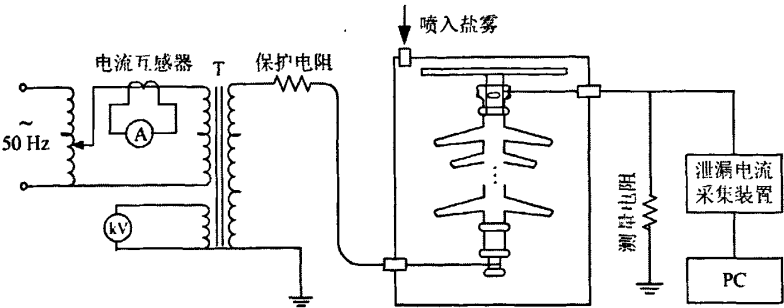


图 4-2 试验系统

表 4-1 试验参数

人工雾室		1000 mm× 480 mm × 1015 mm
试验电压		35 kV _{rms} 工频交流电源
盐雾	发生装置	超声波盐雾发生器
	注入速率	2.1 cm ³ /min
	电导率	1.0~5.0 mS/cm
	环境温度	0 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C
大气压		760 mmHg
相对湿度		70%, 80%, 90%, 100%

4.3 不同污湿环境下绝缘子表面状态与泄漏电流特征分析

4.3.1 表面状态分析

液滴在合成绝缘子表面的状态决定于硅橡胶材料的表面张力，而目前尚无直接准确测定固体表面张力的方法。在分析时，我们更为关心的是水分子在绝缘子表面的积聚状态或浸润行为，可以通过静态接触角来表征。

静态接触角法是通过测量固体表面平衡水珠的接触角来反映材料表面憎水性的方法，所用水珠体积 4~7 μl 左右，通过微注射器将水滴滴在材料表面，通过高速摄像机获取水滴在材料表面的形态图片，采用相应的图形处理软件测量水滴与材料表面的接触角。这种方法测量简单、定量准确，被广泛用于材料表面憎水性的评估。但在用于粗糙或污染表面憎水性的评价时，接触角会有明显的迟滞现象，一般取水滴滴在材料表面 20 s 时的状态作为待测量状态。

不同污秽液滴在硅橡胶试样表面接触角的测量原理及其相应的形态如

图 4-3 所示。随着液滴污秽程度的增大，硅橡胶材料与液滴之间的亲合力大于液滴本身的内聚力，液滴在绝缘子表面的静态接触角逐渐减小。

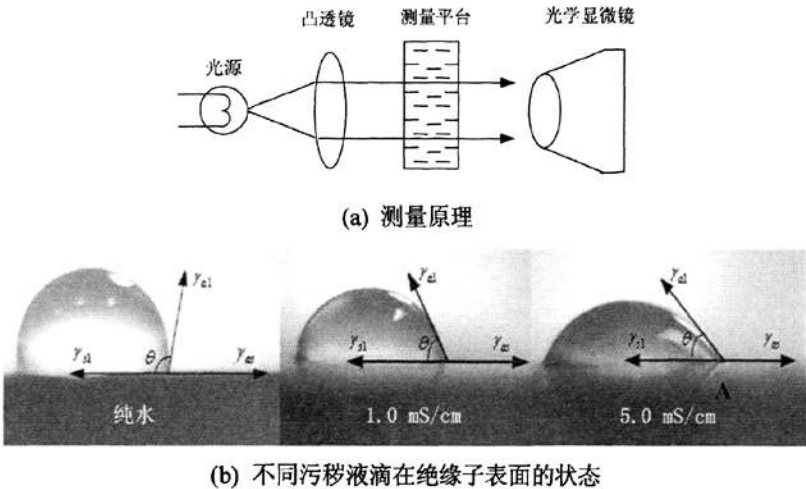


图 4-3 绝缘子表面污秽液滴状态及测量原理

4.3.2 泄漏电流特征分析

绝缘子在不同污湿程度下外在表现为表面绝缘强度的降低，与之对应的是流过表面的泄漏电流的变化。根据当前泄漏电流检测方法的研究现状，本文首先分析了在不同相对湿度、温度和污秽程度下泄漏电流的峰值、方差、频率分布以及放电量的变化特征。

4.3.2.1 泄漏电流峰值

图 4-4 为不同污秽程度下绝缘子表面泄漏电流峰值的变化特征。从图中可以看出，在不同的污秽等级下，随着试验时间的增长，泄漏电流峰值的变化特征基本一样，这主要是由于在相同的相对湿度下，盐雾在绝缘子表面的凝结程度基本相同，导致泄漏电流随时间的变化趋势一致。同时，随着污秽等级的增大，泄漏电流的峰值呈现先增大后减小的趋势。这主要取决于不同电导率的盐雾在绝缘子表面的凝结状态，在 3.0 mS/cm 情况下，绝缘子表面分布的水滴最多，因此其泄漏电流峰值最大。

图 4-5 为不同相对湿度下泄漏电流的峰值变化。从图中可以看出，泄漏电流随着相对湿度的增大而增大。在相对湿度小于 100% 的情况下，盐雾在绝缘子表面不易凝结，湿度对泄漏电流影响不大，泄漏电流的变化差别不明显。在相对湿度 100% 时，环境湿度达到饱和状态，绝缘子表面已经凝结了大量的水滴，施加电压的瞬间，泄漏电流迅速增大，这是由于在施加电压前，

绝缘子表面杂乱无章地分布大量带电离子，施加电压后，带电离子定向移动使电流增大。随后，绝缘子表面的带电粒子基本稳定，泄漏电流趋于稳定。

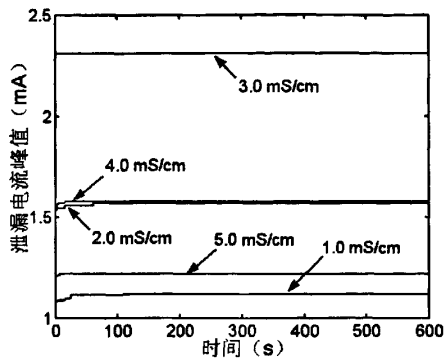


图 4-4 不同污秽程度下泄漏电流峰值变化

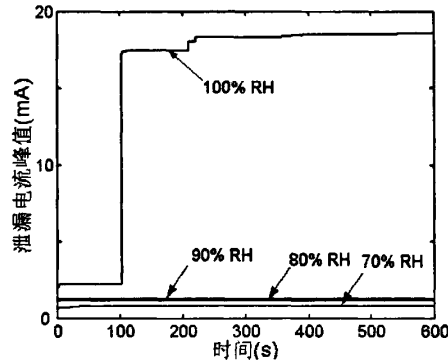


图 4-5 不同湿度下泄漏电流峰值变化

图 4-6 为不同环境温度下绝缘子表面泄漏电流峰值的变化。从图中可以看出，随着环境温度的升高，泄漏电流峰值逐渐增大。由于泄漏电流的大小主要取决于绝缘子表面的平均电导，环境温度升高，绝缘子表面对带电粒子的束缚作用下降，在相同的施加电压下，其运动加快，使得表面的平均电导增加，泄漏电流增大。

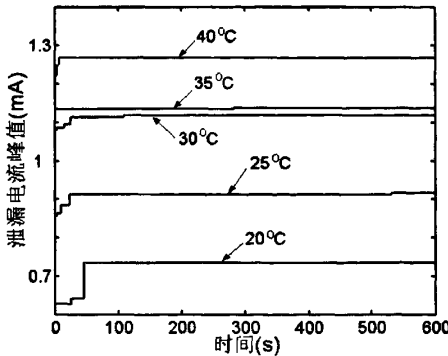


图 4-6 不同环境温度下泄漏电流峰值变化

4.3.2.2 泄漏电流均方差

泄漏电流的均方差是从统计学角度计算各个泄漏电流值与平均值相差的平方的算术平均数的平方根，从而表征泄漏电流的变化程度，描述概率分布与其数字期望的离散程度。均方差的值越小，表明泄漏电流的离散程度越小。图 4-7 至图 4-9 分别为不同污秽程度、相对湿度与环境温度下泄漏电流均方差的变化。

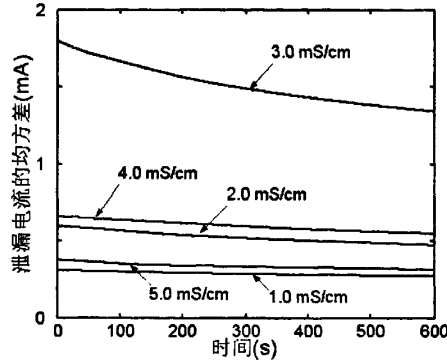


图 4-7 不同污秽程度下泄漏电流的均方差

这些图一方面反映了泄漏电流平均值的变化趋势，该趋势与图 4-4 至图 4-6 所示的泄漏电流峰值变化相一致；另一方面，反映了泄漏电流的分散程度。从图 4-7 中可以看出，盐雾电导率为 3.0 mS/cm 对绝缘子表面的影响较大，导致泄漏电流发生较多的突变，离散程度增大；其它污秽程度下，泄漏电流突变较少，并且逐渐趋于稳定的变化。从图 4-8 中可以看出，在相对湿度 100% 情况下泄漏电流离散程度最大，表明在饱和湿度情况下，绝缘子表面绝缘性能下降较快并且所发生的放电现象较为分散，而在其它相对湿度条件下，泄漏电流变化较为平缓并且也逐渐趋于稳定。从图 4-9 中可以看出，环境温度未能引发表面发生较大的突变，因此，相比污秽程度和相对湿度而言，温度不是引发污湿环境下绝缘子绝缘性能下降的主要原因。

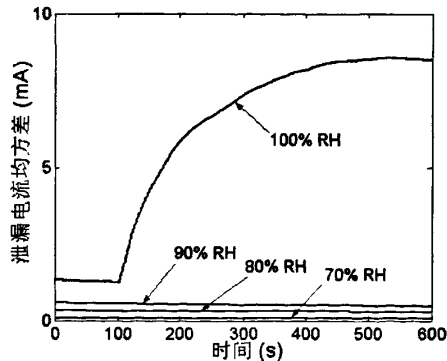


图 4-8 不同湿度下泄漏电流的均方差

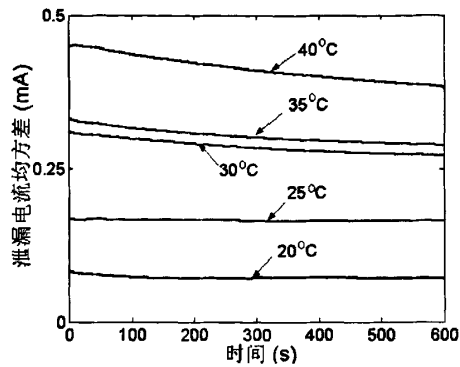


图 4-9 不同环境温度下绝缘子表面泄漏电流均方差

4.3.2.3 频谱特征

图 4-10 到 4-12 分别为不同污秽等级、相对湿度和环境温度下泄漏电流的频率分布特征与变化。从图中可以看出，泄漏电流的频谱特征在一定程度上反映了泄漏电流波形的畸变程度以及各频率分量的变化。

泄漏电流主要有三部分组成：（1）导电电流，主要是由于绝缘子表面污秽物受潮后在表面形成连续的导电通道；（2）微小火花放电和电晕放电，主要是水滴形变过程中的放电；（3）干燥带放电，主要是由于导电电流的热效应导致污湿层局部蒸发形成干燥带所引起的放电。

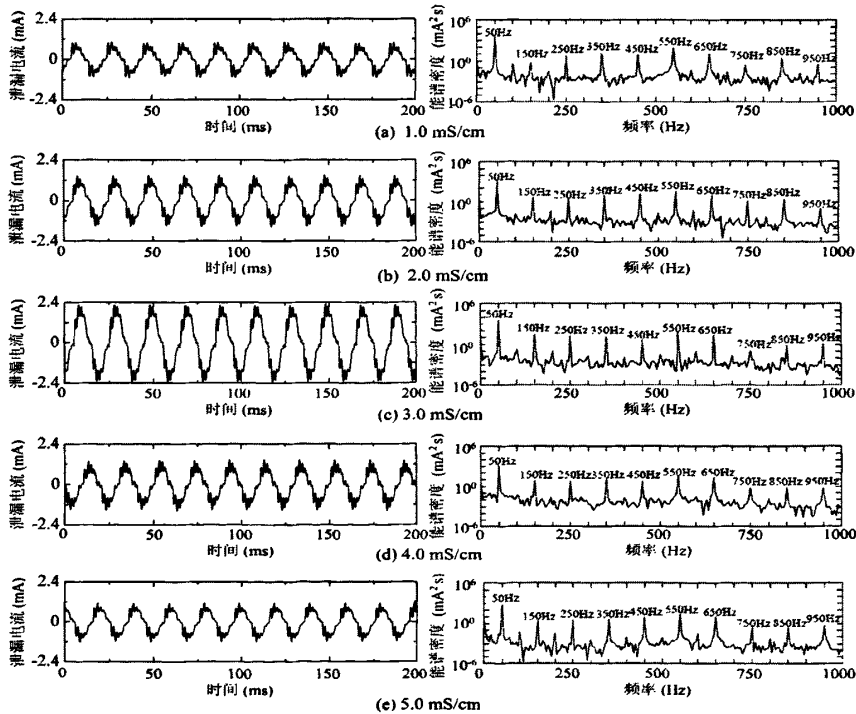


图 4-10 不同污秽程度下绝缘子表面泄漏电流的时频特征

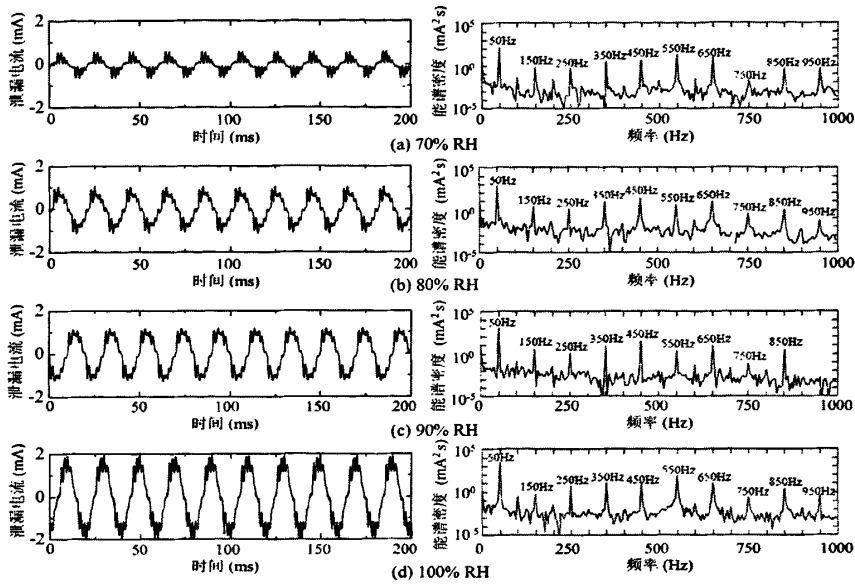


图 4-11 不同湿度下绝缘子表面的泄漏电流的时频特征

从图 4-10 中可以看出，随着盐雾电导率的增大，泄漏电流中较高频率的组分呈现先增多后减少的变化趋势，表明在 3.0 mS/cm 时绝缘子表面发生较多的放电现象。

从图 4-11 中可以看出，随着相对湿度的增加，绝缘子表面较易凝结形成较多的分散液滴甚至局部连续的水带，因此表面形成较多的微小火花放电和导电通道，导致泄漏电流的低频和较高频率分量均增加。

从图 4-12 中可以看出，不同环境温度下，泄漏电流各个频率组分的变化差别相对较小，表明温度对绝缘子表面的影响不大，只是导致导电电流以及放电均发生了较小的变化。

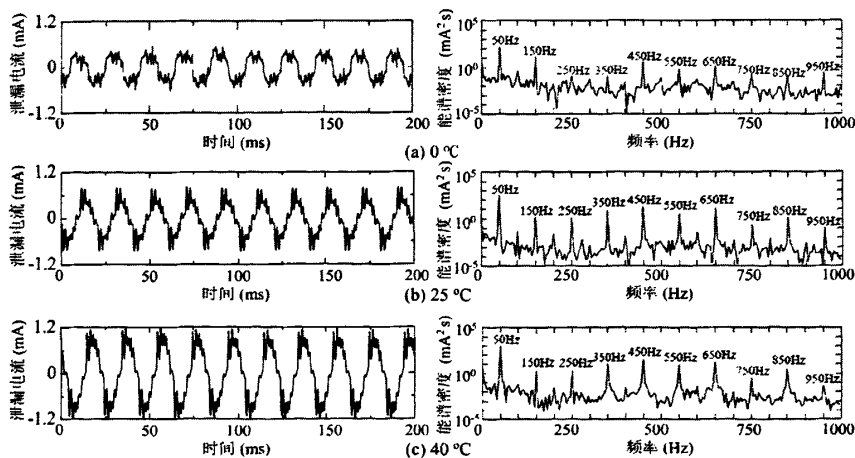


图 4-12 不同环境温度下绝缘子表面的泄漏电流的时频特征

泄漏电流的能谱密度能够反映各频率分量的强度与频率特征,图 4-13 和图 4-14 分别为不同相对湿度和环境温度下泄漏电流的能谱密度。从图中可以看出泄漏电流的频率分布主要集中在基波和奇次谐波,基波主要影响泄漏电流的幅值,奇次谐波影响波形的形变程度。

从图 4-13 中可以看出,大部分泄漏电流的频率分量随着相对湿度的增加而增大,因此,泄漏电流随相对湿度的增加而增大。特别是在 0°C 时,凝结在绝缘子表面的湿气主要以冰点、薄冰层和雾凇的形态存在,随着相对湿度的增加,绝缘子表面吸附的湿气增多,容易形成连续导电水膜,显著降低表面电阻,导致表面泄漏电流增大。泄漏电流产生的热效应加速局部水膜的蒸发而形成干燥带,进而引发干燥带放电,同时伴随着在冰点与薄冰层附近的电晕放电和微小火花放电。

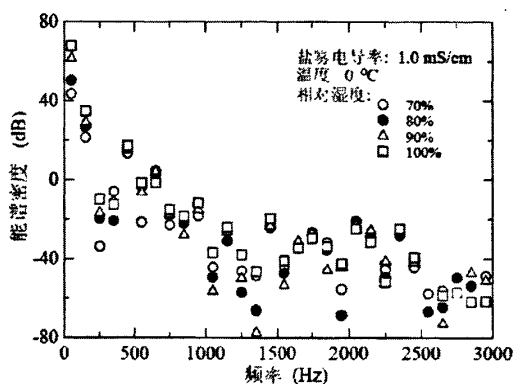


图 4-13 泄漏电流的能谱密度峰值与相对湿度的关系

从图 4-14 中可以看出,在 0°C 时泄漏电流较低的频率分量的能谱密度峰值低于 25°C 与 40°C 时的峰值; 0°C 时较高的频率分量的能谱密度峰值高于 25°C 与 40°C 时的峰值。这主要是由于温度不仅影响湿气在绝缘子表面的凝结和蒸发,而且影响湿气在绝缘子表面的凝结状态。在 0°C 时,湿气的凝结状态主要为离散的冰点,冰点附近与冰点之间容易发生电晕放电、微小火花放电以及电弧放电,泄漏电流主要为放电电流。在 25°C 和 40°C 时,湿气的凝结状态主要为离散水滴,随着凝结时间的增长和电场力的作用,离散水滴因逐渐被拉长而在绝缘子表面形成导电水层,泄漏电流主要为导电电流。

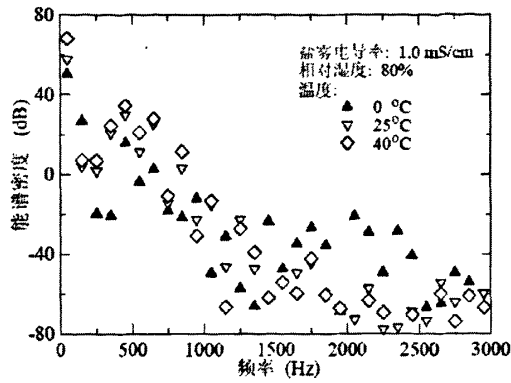


图4-14 泄漏电流的能谱密度峰值与温度的关系

4.3.2.4 累积电量

累积电量是指泄漏电流中电荷的总积分值,可以根据放电量值的大小来判别绝缘子表面放电的强弱。图 4-15 给出了截取的泄漏电流及其放电量的计算示例,其计算方法为:

$$Q = \int_0^{\tau} |i(t)| dt \quad (4-1)$$

其中, $|i(t)|$ 是放电电流的绝对值, $0 \sim \tau$ 为积分区间。

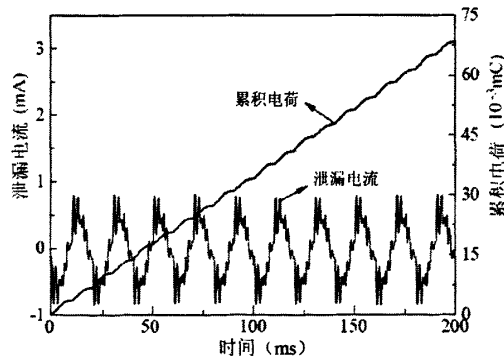


图4-15 泄漏电流累积电量的计算示例

为了进一步分析泄漏电流各个频率分量的变化,基于上述泄漏电流频率特征的分析,本文首先采用小波变换法提取泄漏电流的频率分布,然后分别得到各个频率分量的放电量随环境因素的变化,如图4-16到图4-18所示,其中ch1为50 Hz, ch2为150 Hz, ch3为250~350 Hz, ch4为450~750 Hz, ch5为750~1375 Hz, ch6为1375~2750 Hz。根据当前泄漏电流频率分布的研究主要集中在基波、3次和5次谐波分量,少数研究采用高频分量(1.25~2.5 kHz)监测绝缘子表面污秽状态,本文将泄漏电流依据频率提取结果分为三部分:ch1~ch3为低频分量;ch4和ch5为中频

分量；ch6为高频分量。

图4-16为泄漏电流各频率分量的累积电量与相对湿度的关系。随着相对湿度的增加，低频、中频和高频分量的累积电量均呈增大的趋势。根据Suda的研究表明^[18, 46, 47]：泄漏电流的低频分量（基波、3次和5次谐波分量）随着绝缘子表面润湿程度的增加而增大，可以评估绝缘子表面的润湿状态。因此，采用各个频率分量均能够有效检测湿度对绝缘状态的影响。

频率分布		累积电量 (10^{-3} mC)			
		70%RH	80%RH	90%RH	100%RH
低频分量	ch1	33.97	79.10	110.9	174.7
	ch2	3.711	8.256	9.921	12.38
	ch3	4.707	9.057	9.823	10.60
中频分量	ch4	16.88	22.69	24.39	32.66
	ch5	7.694	9.323	9.339	13.28
高频分量	ch6	1.101	1.186	1.238	2.261

图 4-16 不同频率分量累积电量与相对湿度的关系

图 4-17 为泄漏电流各频率分量的累积电量与环境温度的关系，从图中可以看出，随着环境温度的升高，泄漏电流低频和中频分量的累积电量呈增大的趋势，而 0℃ 时高频分量的累积电量高于 25℃ 和 40℃ 时高频分量的累积电量。根据绝缘子在冷雾环境下更容易发生闪络故障的结果，可以证明采用高频分量更能有效反映绝缘子运行状况。

频率分布		累积电量 (10^{-3} mC)		
		0℃	25℃	40℃
低频分量	ch1	41.04	57.91	94.16
	ch2	12.73	5.402	8.651
	ch3	6.999	7.759	9.007
中频分量	ch4	9.339	19.35	24.68
	ch5	4.133	9.289	11.28
高频分量	ch6	2.645	1.189	1.319

图 4-17 不同频率分量累积电量与温度的关系

图 4-18 为泄漏电流各频率分量的累积电量与污秽等级的关系，从图中可以看出，随着污秽程度从 1.0 mS/cm 增大至 3.0 mS/cm，泄漏电流的低频、中频和 高频分量的累积电量均呈增大的趋势，但当污秽等级高于 3.0 mS/cm 后，泄漏电 流的各个频率分量未呈现出规律性的变化。根据当前绝缘子状态检测的研究现

状,可以说明采用泄漏电流各个频率分量在一定程度上能有效反映污秽对绝缘子运行状况的影响,但仍存在局限性。

频率分布		累积电量 (10^{-3} mC)				
		1.0 mS/cm	2.0 mS/cm	3.0 mS/cm	4.0 mS/cm	5.0 mS/cm
低频分量	ch1	78.04	119.8	202.5	110.4	93.01
	ch2	7.091	9.794	20.36	11.40	7.387
	ch3	8.972	9.886	18.39	12.19	8.271
中频分量	ch4	22.49	26.43	30.69	25.46	19.93
	ch5	9.869	11.69	13.39	3.206	9.179
高频分量	ch6	1.262	1.436	1.942	1.739	1.955

图 4-18 不同频率分量累积电量与污秽等级的关系

4.4 污湿环境下绝缘子运行状态的递归检测

4.4.1 递归图定性表征

通过上述对泄漏电流的分析,可以看出泄漏电流峰值、均方差以及频谱特征在一定程度上能够反映环境因素对绝缘子绝缘特性的影响,但是对于在不同环境下绝缘子表面的运行状态却无法有效地进行反映。因此,本文采用递归分析方法得到不同污秽等级、相对湿度以及环境温度下流过绝缘子表面泄漏电流的递归图,根据递归图的拓扑结构和细纹理变化,揭示绝缘子表面状态的特征与变化,为绝缘子运行状态提供了一种可视化的检测手段。

图 4-19 为不同污秽等级下泄漏电流的递归图。从各个图谱中可以看出,多数递归点集中和平行于主对角线进行分布,表明在没有发生强烈放电和干燥带放电的情况下,流过绝缘子表面泄漏电流的主要组分为基波以及低频分量,绝缘子表面主要是导电电流。同时,对于杂散分布的递归点,随着污秽等级的增大,这些递归点的分布密度逐渐增加,表明绝缘子表面存在放电且放电能量较低,并且随着污秽加重而逐渐增多增强。因此,与泄漏电流宏观参数相比,递归图有效反映了逐渐加剧的污秽程度加速了绝缘子表面的老化,较易引发放电,进而在一定条件下能够发生闪络故障。

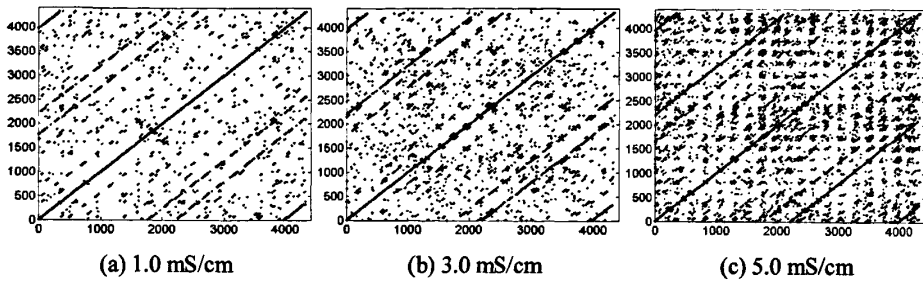


图 4-19 不同污秽等级下绝缘子表面泄漏电流的递归图

图 4-20 为不同相对湿度下绝缘子表面泄漏电流的递归图。随着环境湿度的增大,递归图的拓扑结构虽然具备平行于主对角线的递归点,但是大部分递归点呈现均匀杂散的分布特征,表明绝缘子表面虽然处在相对比较稳定的状态,但是泄漏电流中导电电流的组分较少,微小火花放电逐渐增多。这主要是由于湿度的增大导致绝缘子表面凝结较多的离散水滴,在泄漏电流以及放电产生的热量作用下,表面水带和雾滴的蒸发被加速,较易造成局部电场强度增大,引发较为稳定的微小放电。

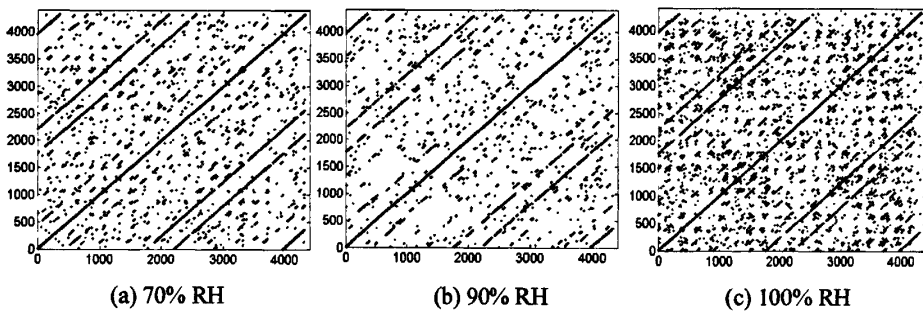


图 4-20 不同相对湿度下绝缘子表面泄漏电流的递归图

图 4-21 为不同环境温度下绝缘子表面泄漏电流的递归图。从图中可以看出,虽然递归图中均存在平行于主对角线的递归点和杂乱分布的递归点,但是,随着温度的变化,递归图的拓扑结构并没有发生明显的差异,表明虽然温度会影响绝缘子的运行状态,但是并不是引发表面放电和闪络的主要因素,其对绝缘子运行状态的影响也很有限。

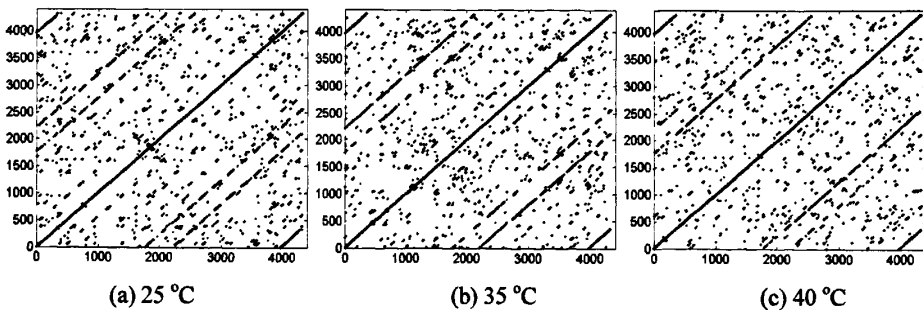


图 4-21 不同环境温度下绝缘子表面泄漏电流的递归图

4.4.2 递归定量指标

从上述递归图中可以得出，递归图可以有效地定性建立不同污湿环境下泄漏电流的内在变化特征和表面状态的关系，揭示了绝缘子表面放电现象与机理。为了进一步增强递归分析法对绝缘子运行状态的检测，采用递归定量分析方法计算各种环境下泄漏电流的递归定量指标，对其非线性特征进行定量表述。图 4-22 至图 4-24 分别为不同污秽等级、环境湿度和温度下泄漏电流的递归定量分析。从图中均可以看到随着污秽等级的增大，相对湿度的增加，环境温度的升高，泄漏电流的递归率（RR）和确定性（DET）特征均呈现下降的趋势。递归率的这种变化特征表明随着绝缘子表面泄漏电流中具有规律性的组分逐渐减少，表面放电逐渐增多。确定性的变化特征表明泄漏电流中不确定性的组分逐渐占据绝缘子表面，这主要是由于绝缘子表面发生放电引起的确定性组分减小。

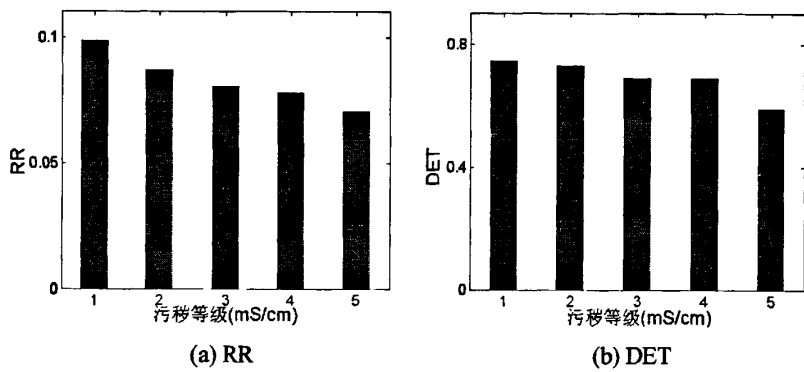


图 4-22 不同污秽程度下绝缘子表面泄漏电流的递归定量指标

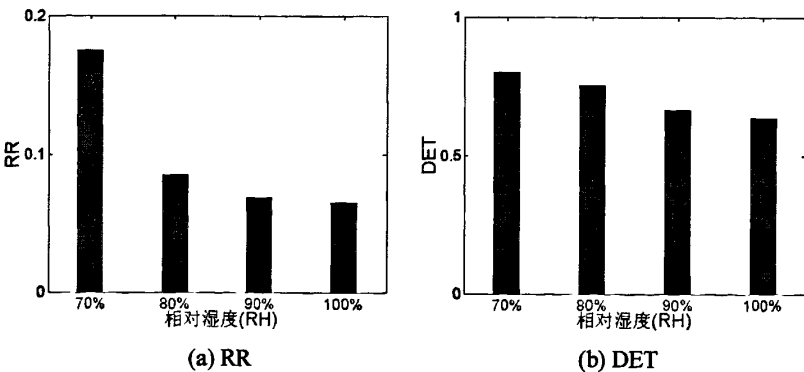


图 4-23 不同相对湿度下绝缘子表面泄漏电流的递归定量指标

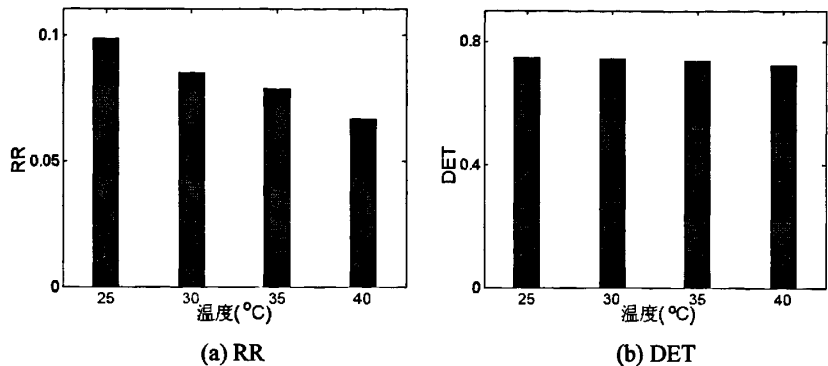


图 4-24 不同环境温度下绝缘子表面泄漏电流的递归定量指标

可见，泄漏电流的定量指标（RR 与 DET）对绝缘子老化程度的定量描述与图 4-19 至图 4-21 中递归图的定性描述具有很好的一致性，递归分析方法能够有效地揭示绝缘子闪络发展过程中表面放电的变化特征，为绝缘子状态检测提供了一种有效的、可视化方法。

4.5 本章小结

首先，基于分析当前影响绝缘子安全稳定运行的污湿环境，在实验室条件下采用人工大气模拟实验方法开展了不同污秽等级、相对湿度和环境温度下的绝缘子运行状态实验，对泄漏电流时间序列进行采集，采用非线性特征分析方法对泄漏电流进行研究，检测绝缘子表面状态。

其次，分别计算泄漏电流峰值、均方差以及频谱特征和放电量，系统分析污秽等级、相对湿度和温度对绝缘子表面运行状态的影响，结果表明：

- （1）随着污秽程度的加剧，泄漏电流的峰值和均方差值均呈现先增大后减小的趋势，在一定程度上揭示了绝缘子表面受到污秽影响后表面的导电电流与放电的变化；
- （2）随着相对湿度的增加，泄漏电流的峰值、均方差值以及高频和低频分量的放电量均呈现增大的趋势，揭示了绝缘子表面水滴凝结与蒸发的动态变化过程；
- （3）随着温度的升高，泄漏电流的峰值、均方差值以及低频分量的放电量均呈现增大的趋势，但是各个宏观参数的变化差异不大，表明温度对绝缘子表面运行状态的影响不大。同时，0 °C 时泄漏电流的高频分量高于 25 °C 和 40 °C 时的高频分量，表明了泄漏电流的高频分量更能有效评估绝缘子在冷雾环境下的运行状况。

最后，采用递归图拓扑结构揭示了不同污湿环境下泄漏电流的内在变化特征

及其与绝缘子表面运行状态的关系,并进一步采用递归定量分析法将这一关系定量化,所得的主要结论为:

(1) 递归图及其定量指标有效评估污秽等级、相对湿度和环境温度对绝缘子表面状态的影响,揭示了不同污湿环境下绝缘子表面导电电流和放电现象的变化特征与规律,为绝缘子运行状态提供了一种有效的检测方法;

(2) 对于污秽环境下绝缘子的运行状态,虽然泄漏电流的宏观参数随着污秽的加剧呈现先增大后减小的趋势,但是递归图及其定量指标更能有效揭示加剧的污秽程度能够加速绝缘子表面发生放电,进而引发闪络故障。

(3) 对于不同湿度和温度下绝缘子的运行状态,泄漏电流的递归分析与其宏观参数的变化相一致,同时能够进一步揭示湿度和温度对绝缘子表面导电电流和放电现象的动态变化特征。

第五章 递归分析法监测绝缘子雾凇闪络

5.1 引言

寒冷浓雾天气容易引发雾凇现象,绝缘子长时间在雾凇环境下运行时,表面将覆盖不同程度的雾凇层,加剧绝缘子表面电场分布的不均匀程度,进而导致局部放电的发生和泄漏电流的增大,最终降低绝缘子表面电气性能甚至引发闪络故障,给电力系统的安全运行造成威胁^[6, 127]。

针对雾凇的形成条件,本文在实验条件下模拟雾凇环境,以硅橡胶绝缘子为试样,将其悬挂于雾凇环境下不同时间,雾凇即在绝缘子表面凝结,然后分别施加电压至发生闪络。通过高速摄像机记录闪络现象和过程,采用递归分析法研究泄漏电流的非线性特征,将闪络发展过程中泄漏电流的内在变化在递归图及其定量指标中表征出来,结果表明泄漏电流的非线性特征变化与闪络过程中绝缘子表面放电现象具有很好的一致性,有效揭示了绝缘子雾凇闪络过程的发展以及闪络发生的机理。

5.2 试验系统与方法

图5-1和表5-1分别为雾凇闪络试验装置与试验参数。试验选用单片硅橡胶合成绝缘子为试样,采用无水乙醇清洗试样表面并置于干燥容器中室温干燥24 h,然后垂直悬挂于人工雾室中。采用循环冷凝系统将雾室温度控制为-15 °C,待试样温度与环境温度相一致时,采用超声波盐雾发生装置将NaCl盐溶液雾化并注入雾室,盐雾电导率分别为1.0 mS/cm、2.0 mS/cm、3.0 mS/cm、4.0 mS/cm和5.0 mS/cm,注入速率为2.1 cm³/min,雾室内的风速小于1.0 m/s。当雾室的相对湿度达到100%饱和时,将绝缘子在雾室中所设定的实验条件分别维持3 h, 5 h, 9 h和15 h,然后分别施加30 kV_{rms}工频交流电源,电源参数如2.3中所述。采用高速摄像机记录绝缘子表面的雾凇积聚情况及闪络过程中的放电现象。采用多功能数据采集卡(PCI-9111DG/HR)采集流过绝缘子表面的泄漏电流,采样率为5.0 kHz。

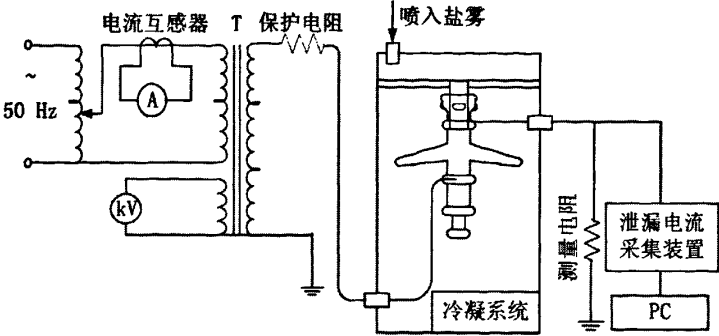


图 5-1 试验系统

表 5-1 试验参数

人工雾室	1000 mm× 480 mm × 1015 mm
试验电源	30 kV _{rms}
盐雾注入速率	2.1 cm ³ /min
风速	小于 1.0 m/s
盐雾电导率	1.0 mS/cm~5.0 mS/cm
环境温度	-15 °C ± 1 °C
大气压	760 mmHg
相对湿度	100%饱和

5.3 雾凇环境下绝缘子表面状态及闪络过程

5.3.1 绝缘子表面的雾凇状态

绝缘子伞群表面雾凇的形成状况如图 5-2 所示。盐雾中无数零摄氏度以下而尚未结冰的过冷雾滴在伞群表面不断积聚冻结形成雾凇沉积物和雾凇层。雾凇中雾滴与雾滴间的空气间隙很多,呈现典型的白色外表和粒状结构,其主要特征为:粒径很小,比重较轻,内聚力较差,结构蓬松,中间有大量气孔。从图中可知,由于伞群结构的不同,伞群上、下表面雾凇在形成过程、形态、覆盖量以及物理性质上存在较大的差别。随着盐雾的注入,伞群上表面从靠近护套部位开始逐渐形成微霜,雾滴不断冻结沉积,局部出现粒状雾凇并且逐渐增加,随着注入时间的增加,伞群上表面被雾凇包裹,雾凇变得松散柔软,厚度不断增大。伞群下表面开始形成离散的微小冰花,伴随雾滴的粘附,微小冰花的分布密度不断增大,当盐雾注入时间继续增加时,附着的冰花不断增大但仍为离散状态。所用 NaCl

溶液浓度越高,相同时间内在绝缘子表面形成的雾凇层越薄,但雾凇结构更加紧密。

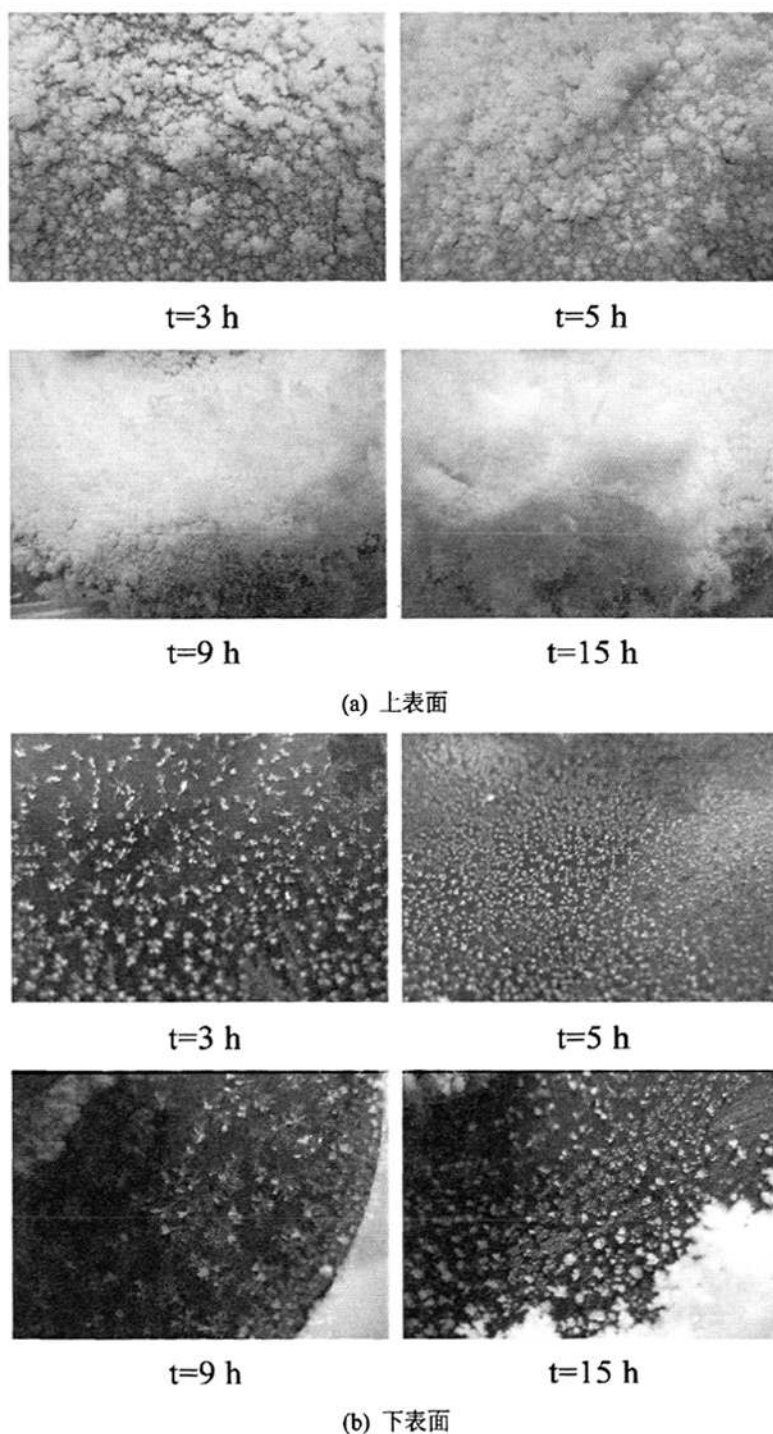


图 5-2 绝缘子表面雾凇状态

5.3.2 雾凇闪络现象与过程分析

雾凇环境下绝缘子的闪络放电现象与过程如图 5-3 所示。将开始施加电压的时刻记为 0 时刻, 则雾凇闪络放电可分为以下六个阶段。

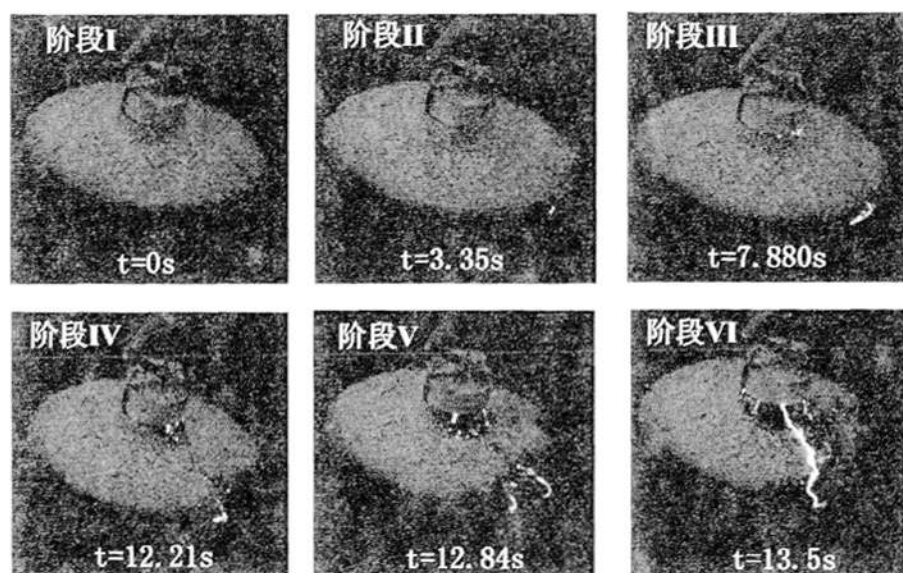


图 5-3 绝缘子表面污闪放电过程

阶段 I: 雾凇在交变电场作用下融化, 润湿绝缘子表面并形成导电层。由于雾凇粒径小且结构蓬松, 在外加交流电压作用下, 带电粒子发生振动而产生热效应, 导致绝缘子表面的雾凇融化并形成导电层, 引发泄漏电流流过绝缘子表面。随着润湿程度和外加电压的增加, 泄漏电流逐渐增大。在绝缘子表面完全湿润后, 在泄漏电流产生的焦耳热作用下, 雾凇的融化速度加快, 进一步降低表面电阻, 增大泄漏电流。

阶段 II: 随着电压的升高和表面泄漏电流的增大, 在绝缘子伞群边缘部位开始出现微弱的电晕放电点, 并伴随有间断可闻的放电声音。从图 5-3 中可知绝缘子结构导致表面雾凇分布状况存在差异, 因此泄漏电流形成的路径和电流密度不同, 使得绝缘子表面受到的泄漏电流热效应也存在差异。在绝缘子表面边缘, 雾凇层较薄, 导电层形蒸发速度较快, 容易形成干燥区, 进而改变绝缘子表面的电场分布, 同时边缘地带表面曲率半径较小, 局部电场强度较大, 容易最先形成微弱的电晕放电。

阶段 III: 电晕放电不断发展。由于电极附近电流密度较大, 泄漏电流流过产生较多的焦耳热, 导电层形蒸发速度较快, 在电极部位曲率半径较小的地带也出现多处可见放电点, 且亮度较前一阶段增强, 放电声音持续可闻。

阶段 IV: 随着绝缘子伞群表面干燥区的形成和外加电压的增加, 当局部电场强度达到空气的击穿场强时, 干燥区就会产生局部放电和电弧。绝缘子表面电弧瞬间产生的位置是随机的。绝缘子表面导电层及形成的干燥带可以近似等效为电阻串联组成, 由于表面雾凇分布的不均匀以及不断融化同时不断的蒸发现象的发生, 干燥带的形成位置不断变化, 因此绝缘子表面电弧瞬间产生的位置存在随机性。

阶段 V: 局部电弧产生后, 由于电弧的下降型伏安特性且电阻较干燥区小, 使绝缘子表面总电阻显著降低, 泄漏电流出现突然增加现象, 局部电弧的出现使绝缘子表面的电位重新分布, 当其他干燥区的电场强度足以使空气发生碰撞电离时, 产生新的局部电弧, 即局部电弧可能多处同时产生。随着外加电压的进一步增加, 由于绝缘子表面污层电解质的正温度系数影响和局部电弧的下降型伏安特性, 泄漏电流将增大, 使得提供给电流的能量增加, 电弧温度升高, 有利于电离过程的发展, 最终导致局部电弧伸长。

阶段 VI: 局部电弧向前延伸至另一处局部电弧时将汇集在一起形成更长的局部电弧并继续延伸, 当局部电弧长度发展至总放电路径长度的 60%~80%时, 局部电弧将快速向前发展至绝缘子闪络。

绝缘子下表面各处局部电弧向前伸长过程中最初都是贴着绝缘子下表面向前延伸, 但当局部电弧延伸至绝缘子边缘时, 局部电弧的发展出现两种情况: 一是沿着绝缘子上表面继续向前延伸, 另一种则是逐渐飘离绝缘子表面形成空气间隙电弧向上发展。局部电弧漂移成空气间隙电弧向上延伸并发生串接时, 被短接的绝缘子片爬电距离内的所产生的所有局部电弧都将瞬间熄灭。这主要是由于绝缘子爬电距离被短接瞬间, 被短接部位的电场强度急剧减小, 无法维持局部电弧的燃烧。

5.3.3 雾凇闪络过程泄漏电流分析

泄漏电流作为沿面放电和绝缘子绝缘性能的集中体现, 涵盖了丰富的有关污闪形成全过程的状态信息。从物理和导电介质的角度, 可以认为泄漏电流包括了两种状态, 一种是无电弧放电状态, 忽略电容影响, 可认为主要来自于表面导电层导电, 另一种是电弧放电状态, 泄漏电流大约等于电弧的放电电流。在表面绝缘较好或雾凇形成的导电层完全湿润绝缘子表面时, 无电弧放电存在, 电流为表面阻性污层电流, 幅值很小; 当表面绝缘性能下降, 有电弧产生, 在一个周波内, 既有其值较小的污层电流, 又有其值较大的电弧电流; 当电弧放电不断增强, 周波内无熄弧或者零休存在, 电弧持续燃烧, 电流变成电弧电流, 发生闪络。图 5-4 为雾凇闪络发展六个阶段的泄漏电流波形及其频谱特征。从图中可以看出:

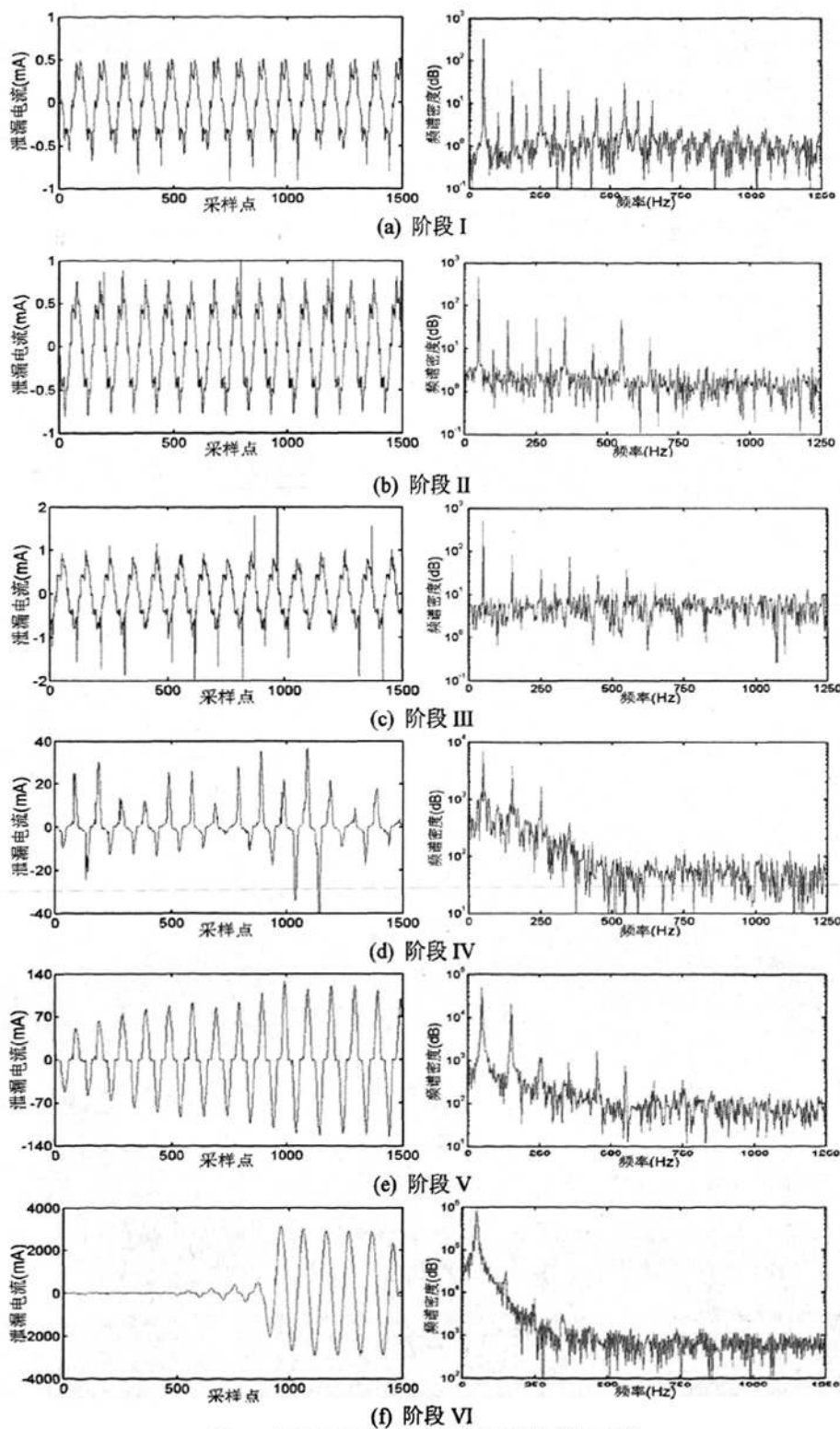


图 5-4 绝缘子雾凇闪络过程各阶段的泄漏电流

阶段 I: 泄漏电流主要为阻性电流, 波形呈现为发生了一定畸变的正弦波, 峰值在 0.5mA 左右。此时绝缘子表面层雾凇卡是融化, 表面形成导电通道, 但没有干燥带放电发生。

阶段 II: 电流波形为近似三角的锯齿波, 电流信号峰值达到 1mA 。此时绝缘子表面完全湿润, 形成良好的导电通道, 实验中可以听到微弱的放电声音, 表明有微弱的放电发生。

阶段 III: 此时在第二阶段电流信号的顶端开始出现叠加脉冲, 脉冲峰值可以达到 3mA 。在绝缘子片上表面可以看到一些点放电现象发生(电晕放电), 并伴随有持续的放电声音。此时的峰值叠加尖端脉冲即为电晕放电信号。

阶段 IV: 泄漏电流开始出现近 50mA 的脉冲峰值, 此时的电流基波也呈现尖端脉冲的形状。实验中可以观察到, 在这个阶段绝缘子表面开始出现干燥带放电现象, 放电位置不断移动变化但始终不曾间断, 其中不时出现较为强烈的电弧放电。

阶段 V: 此时为闪络前的放电阶段。在绝缘子上、下表面均可以观察到多处强烈的电弧放电, 且放电强度不断发展, 电弧不断连接拉长。此时泄漏电流峰值急剧增大, 达到 100mA 以上。由于此阶段放电相对稳定, 没有出现峰值突出的脉冲。

阶段 VI: 闪络阶段。局部电弧逐渐连接伸长, 最终跨接两电极, 绝缘子表面发生闪络。

由以上分析可得, 绝缘子在表面雾凇条件下进行闪络试验的过程中, 其表面泄漏电流在不同的阶段有着不同的波形特征, 电流幅值不断增大, 电流脉冲不断增强, 周波信号的峰度增大, 最终造成闪络。采用较高浓度的 NaCl 溶液($2\text{mS/cm}\sim 5\text{mS/cm}$)时, 泄漏电流信号具有相同的阶段特征。但由于雾凇层结构紧密, 需要更长的时间和更高的电压来使雾凇层融化形成导电通道, 泄漏电流的幅值表现的更高, 脉冲峰值和周波峰度也更高。

污闪实验中, 泄漏电流随时间总体上呈现不断增加的趋势, 在起始阶段, 电流值平稳, 少有冲击起伏, 在电弧产生发展阶段, 电流冲击起伏越来越明显, 到临闪阶段, 出现非常大的放电脉冲。每次的放电脉冲过后, 都会出现短期的小电流, 这是因为放电脉冲导致了绝缘子表面变干燥, 而后污层受湿和干带形成需要时间, 在此期间绝缘性能恢复, 泄漏电流比较小且平稳。

5.3.4 雾凇闪络过程中放电特征分析

不同位置上的局部电弧直径不同, 且电弧形状不规则, 存在弯曲或摇摆现象, 这主要是由于电弧是等离子体, 重量极轻, 因此当电弧区内气体因热传递发生流

动,包括自然对流以及外界甚至电弧电流本身产生的电磁场都会使电弧受力,从而改变形状。不同盐密、雾凇时间下电弧的粗细亮度有一定的差异,主要体现在:

(1) 相同雾凇时间条件下,盐密越小,则电弧直径越细且亮度越暗。其原因是在饱和湿润情况下,绝缘子表面盐密越小,其呈现才出的电阻率越大,在施加相同电压情况下,绝缘子表面通过的泄漏电流就较小,由电弧半径 r_a 与电弧电流 I 有如下关系^[47]:

$$r_a = K \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}} \quad (5-1)$$

其中 K 是与气压有关的系数。

(2) 相同盐密条件下,雾凇时间越长,则电弧直径越大,且亮度越强。由于本实验中雾凇在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下最先在绝缘子表面形成,后不断积累增加。雾凇时间越长,最靠近绝缘子表面一层的雾凇层冷冻时间越久,在施加电压后需要更长的时间和更高的电压来融化雾凇层以形成导电层。

5.4 递归图法监测绝缘子雾凇闪络

5.4.1 雾凇闪络过程中泄漏电流的工频滤波

由于集到的泄漏电流时间序列中包含大量工频信号,将对以后进行非线性分析产生负面的影响。由于放电电流频带一般高于工频,因此可以采用小波变换多分层理论对电流信号进行分解,滤去工频分量。

本文采用 db8 小波进行 10 层小波分解:

$$s = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8 + d_9 + d_{10} + a_{10} \quad (5-2)$$

由于工频分量蕴涵在 d_7 层上,滤去 d_7 层得到重构后的信号:

$$ss = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_8 + d_9 + d_{10} + a_{10} \quad (5-3)$$

采用上述的方法,对雾凇闪络发展各个阶段的泄漏电流数据进行小波变换,图 5-5 为小波变化后的泄漏电流对比图,从图中可以看出,工频信号得到了很好的过滤。

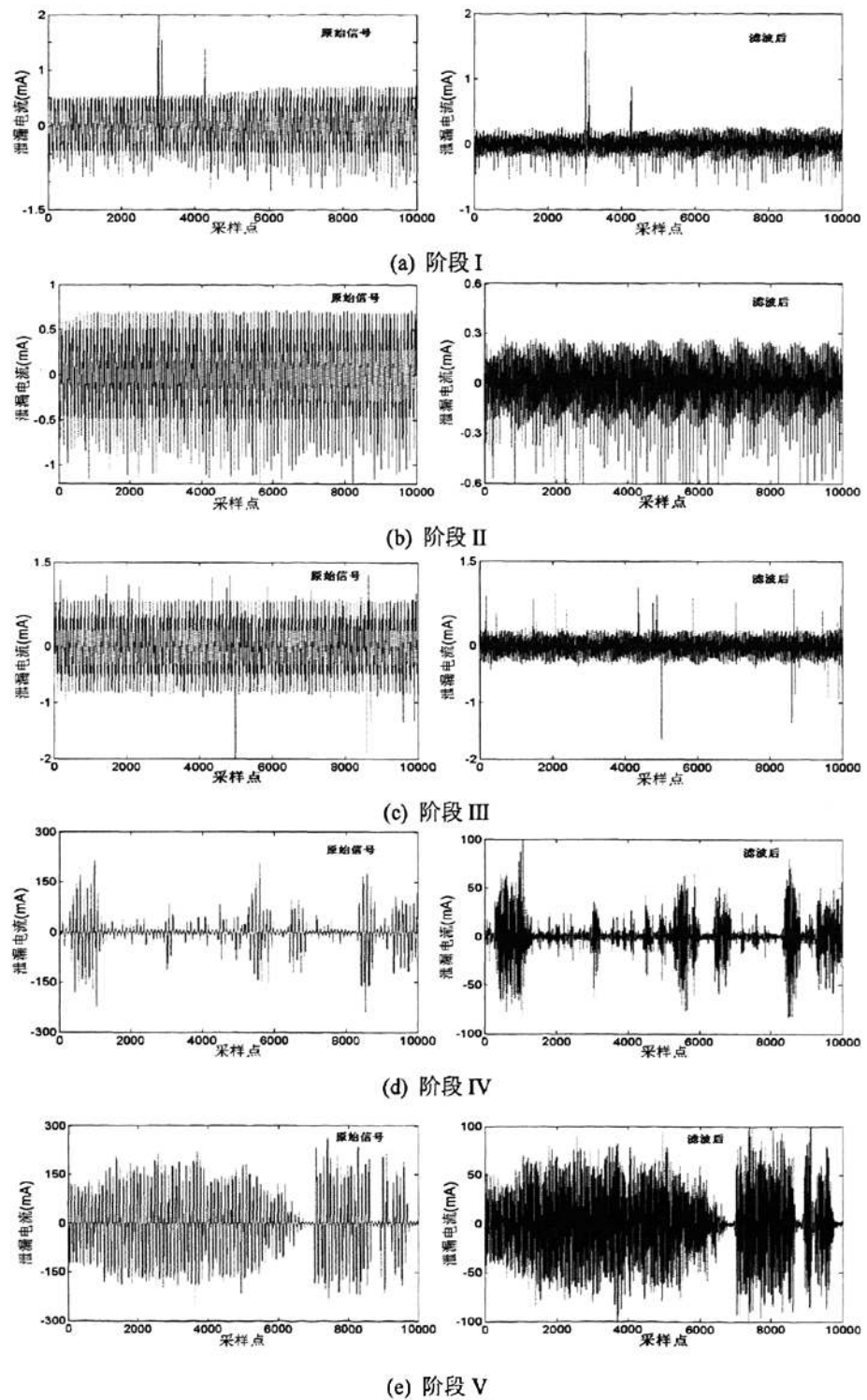


图 5-5 绝缘子雾凇闪络过程各个阶段泄漏电流的工频滤波

5.4.2 递归图定性表征闪络过程

采用时间序列相空间重构方法对重构后的泄漏电流时间序列进行递归分析, 得出雾凇闪络过程中递归图的变化, 如图 5-6 所示。从图中可以发现, 图 5-6(a) 至 5-6(c) 呈现相似的递归结构, 大多数递归点均匀、平行于主对角线分布, 只有少量递归点以杂散的形式存在, 表明在雾凇闪络起始的前三个阶段, 泄漏电流具备较强的周期性变化, 绝缘子表面放电主要是随机性的放电, 而没有发生剧烈变化, 并且放电之间的相关性较差。图 5-6(d) 和 5-6(e) 所示的递归图拓扑结构发生显著的变化, 出现多个类似“十字”的空白地带, 递归点在各个空白地带之间进行密集分布, 递归点分块的交替变化有效表征了绝缘子表面放电发生的阶段性突变, 反映了电弧放电通道的形成、熄灭与再次形成的过程, 正是由于表面放电的这种交替变化才能最终在某一个放电通道形成贯穿金具两端的闪络电弧。

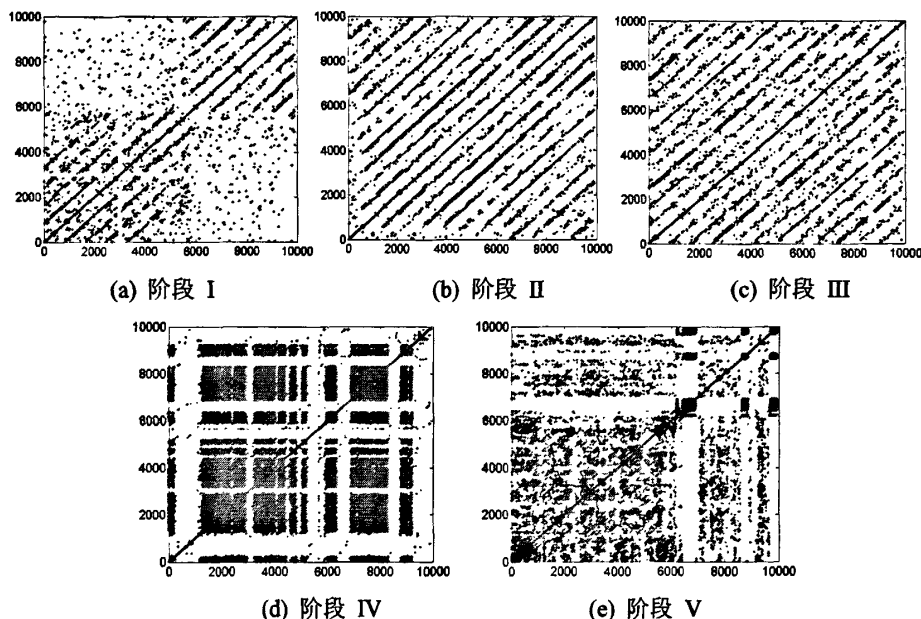


图5-6 雾凇闪络发展各个阶段泄漏电流的递归图

5.4.3 递归定量指标分析

图 5-7 为雾凇闪络发展各个阶段的递归定量指标。从图中可以看出, 随着闪络各个阶段的发展, 递归率 (RR) 和确定性 (DET) 均呈现下降的趋势。该变化特征表明随着绝缘子表面放电的发展, 泄漏电流中具有规律性的组分逐渐减少, 不确定性的组分逐渐增加, 表面放电从起始的随机发生的微小火花放电经过弱的电弧放电, 最终形成稳定、强烈的放电通道。

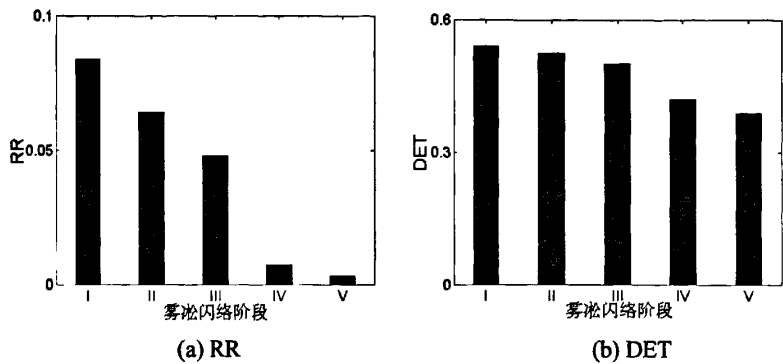


图5-7 雾凇闪络发展各个阶段泄漏电流的递归定量指标

5.5 本章小结

针对雾凇环境引发的绝缘子闪络事故，基于雾凇闪络现象的观察采用递归分析方法分析泄漏电流的非线性特征，监测并揭示了绝缘子在雾凇环境下的闪络过程与机理，结果表明：电导率较高的雾凇覆层容易引发绝缘子表面发生闪络，并且闪络电弧较亮且半径较大；在雾凇覆盖绝缘子表面初期较易引发绝缘子闪络；泄漏电流的递归图变化定性表征了绝缘子雾凇闪络发展各个阶段的表面放电特征，并且递归定量分析进一步增强了对闪络过程的监测以及对闪络机理的理解。

第六章 结论与展望

6.1 本文的主要结论

针对当前户外绝缘子出现的闪络事故,在分析各种绝缘子运行状态检测与闪络监测方法的基础上,提出了一种基于混沌理论的泄漏电流非线性特征分析方法,并将其应用于浓雾和雾凇环境下绝缘子闪络过程的监测与闪络机理的分析,同时结合典型污湿环境因素对绝缘子表面状态的影响,采用非线性分析方法对绝缘子运行状态进行了监测,为绝缘子提供了一种科学、有效的检测手段。本文的主要结论如下:

(1) 根据绝缘子闪络发展过程中表面放电呈现的随机性和非线性,将时间序列的混沌特征分析法引入泄漏电流分析之中,采用时间序列的相空间重构技术计算和分析了泄漏电流时间序列的非线性特征参数: Lyapunov 指数; 分形维数; 功率谱指数; 吸引子相图以及庞加莱截面。从而判断得出: 随着绝缘子表面放电的发展、减弱、继续发展与不断延伸,泄漏电流的变化具有混沌特征,研究证明采用非线性特征分析法可以准确分析和掌握表面放电的变化特征与规律。

(2) 绝缘子闪络发展过程各个阶段泄漏电流的最大 Lyapunov 指数均为正值; 分形维数表征了影响绝缘子闪络发展的变化量,揭示了泄漏电流变化过程的复杂程度,并且随着嵌入维数的增加而趋于饱和,随着绝缘子闪络的发展呈现先增大后减小的趋势,有效反映了闪络发展不同阶段表面放电的非线性特征; 功率谱图反映了泄漏电流的频率组分及其比例关系,显示了很多特征频率,揭示了闪络发展过程中集中、强烈的干燥带放电可以大幅度减小泄漏电流中低频分量的波动,使表面放电电流幅值分布范围缩小,复杂程度大幅度降低; 随着绝缘子表面放电的发生与发展,吸引子相图在空间分布上从原点附近的相点减少,且相点在空间中的分布变得集中,相空间中的轨道线在原点附近变得更加规则,表明绝缘子表面放电逐渐增强并且集中于强烈的干燥带放电; Poincare 截面呈现出一些成片的、具有分形结构的密集点。

(3) 嵌入维数对递归图分析方法的影响不是很强,随着嵌入维数的变化,递归图的结构变化仅表现在递归点的密度以及线条纹理的清晰程度,而其结构特征不随嵌入维数的变化而改变; 递归分析法对时间延迟的依赖性不强,时间延迟

不会影响递归图的结构特征,也不会改变相同相空间下虽然重构向量之间距离的物理意义;阈值影响递归定量数值的大小,不会改变递归图的结构特征,通常可以根据经验选取为原始泄漏电流时间序列标准差的 25%左右。

(4) 递归图及其定量指标能够有效分析和准确揭示绝缘子闪络发展过程中表面放电的发生、发展与延伸的变化特征与规律,为绝缘子运行状态的监测提供了一种更为科学、有效的监测方法;提出频率高于 1250 Hz 高频分量的递归图及定量指标变化与绝缘子表面放电过程具有很好的一致性,能够揭示绝缘子表面放电的变化与特征,可以作为绝缘子运行状态的有效的、可视化的监测方法。

(5) 采用递归图及其递归定量分析法揭示了不同污湿环境下泄漏电流的内在变化特征及其与绝缘子表面运行状态的关系,有效评估污秽等级、相对湿度和环境温度对绝缘子表面状态的影响,揭示了绝缘子表面导电电流和放电现象的变化特征与规律,为绝缘子运行状态提供了一种有效的可视化检测方法;对于污秽环境下绝缘子的运行状态,虽然泄漏电流的宏观参数随着污秽的加剧呈现先增大后减小的趋势,但是递归图及其定量指标有效揭示加剧的污秽程度较易引发绝缘子表面放电。对于不同湿度和温度下绝缘子的运行状态,泄漏电流的递归分析与其宏观参数的变化相一致,进一步揭示了湿度和温度对绝缘子表面导电电流和放电现象的动态变化特征。

(6) 在雾凇环境下,电导率较高的雾凇覆层容易引发绝缘子表面发生闪络,并且闪络电弧较亮且半径较大;雾凇覆盖绝缘子表面初期较易引发绝缘子闪络;泄漏电流的递归图定性表征了绝缘子雾凇闪络发展各个阶段的表面放电特征,并且递归定量分析进一步增强了对雾凇闪络过程的监测以及对闪络机理的理解。

6.2 研究展望

绝缘子老化与闪络现象是一个随机、复杂的过程,随着绝缘子广泛应用于不同的大气环境下,各种外界因素对绝缘子的影响日益复杂,特别是出现“绝缘子不明闪络事故”,因此,有效、准确检测绝缘子的运行状态需要在结合实际运行的同时开展大量的实验研究和机理分析。由于时间有限,本课题只针对浓雾和雾凇环境下进行了研究,为了更全面的开展绝缘子状态监测与评估,有必要进一步开展以下的工作:

(1) 绝缘子闪络过程中表面放电现象十分复杂,除了与绝缘子表面材料的结构与绝缘特性有关,还会受到各种运行环境的影响。因此,研究不同大气条件下绝缘子表面放电特征以及闪络发展过程是一项十分艰巨的工作,仍需对多种复

杂环境下绝缘子表面放电进行特征识别, 进一步提高绝缘子状态检测的科学性和可靠性。

(2) 混沌理论属于新兴学科, 随着人们对混沌现象认识的不断丰富, 对混沌理论研究的不断深入, 将会有越来越多的混沌方法运用到绝缘子表面泄漏电流的分析之中, 必然对绝缘子运行状态的检测产生巨大的推进作用。应用混沌理论监测绝缘子表面放电特征, 评估绝缘子老化程度具有非常广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 关志成, 刘瑛岩, 周远翔, 等. 绝缘子与输变电设备外绝缘. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景. 电网技术, 2006, 30(12): 1~7.
- [3] 李政敏, 胡琰峰. 输变电工程中的复合绝缘子综述. 西北电力技术, 2006, 34(2): 34~36.
- [4] 易辉. 我国输电线路用绝缘子运行现状. 电力设备, 2005, 6(3): 1~4.
- [5] 张文亮, 吴维宁, 吴光亚等. 我国绝缘子的发展现状与应用前景. 高电压技术, 2004, 30(1): 10~12.
- [6] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [7] 宿志一. 防止大面积污闪的根本出路是提高电网的基本外绝缘水平—对我国电网大面积污闪事故的反思. 中国电力, 2003, 36(12): 57~61.
- [8] 王绍武. 污秽地区有机外绝缘的特性的研究 [学位论文]. 北京: 清华大学, 2001.
- [9] 崔江流, 宿志一, 车文俊, 等. 2001 年初东北、华北和河南电网大面积污闪事故分析. 电力设备, 2001, 4: 6~20.
- [10] 胡毅. “2.22 电网大面积污闪”原因分析及防污闪对策探讨. 电瓷避雷器, 2001, 4: 3~6.
- [11] 周正. 常德及湘潭电网大面积污闪事故的分析. 电力安全技术, 2003, 5(4): 23,30.
- [12] 樊灵孟, 刘平原, 郑晓光, 何宏明. 广东电网污闪原因分析和防污对策. 电瓷避雷器, 2006, 2: 1~6.
- [13] D. Metal Leite. Registration instruments for measurements of leakage currents on polluted insulators. International Symposium on High Voltage Engineering, 1989: 1~4.
- [14] S. M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson, et al. Diagnostic methods for outdoor polymeric insulators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1065~1080.
- [15] 李璟延, 姚陈果, 胡建林, 等. 染污绝缘子放电发展区段与污闪预警的实验研究. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 8~14.

- [16] 赵林杰, 李成榕, 熊俊, 等. 基于带电检测的复合绝缘子憎水性评价. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 135~142.
- [17] 朱虎, 李卫国, 林冶. 绝缘子检测方法的现状与发展. 电瓷避雷器, 2006, 6: 13~17.
- [18] T. Suda. Frequency characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulator. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 481~487.
- [19] S. Kumagai and N. Yoshimura. Leakage current characterization for estimating the conditions of ceramic and polymeric insulating surfaces. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(4): 681~690.
- [20] 关志成, 王绍武, 梁曦东, 等. 我国电力系统污闪事故及其对策. 高电压技术, 2000, 26(2): 37~39.
- [21] 王黎明, 李治, 陈永明. 基于泄漏电流的绝缘子染污状态在线监测技术的发展. 电力设备, 2003, 4(6): 14~17.
- [22] 严玉婷, 文习山, 王建武, 等. 绝缘子表面泄漏电流在线监测的研究综述. 电瓷避雷器, 2005, 3: 8~11, 28.
- [23] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski. Leakage currents on non-ceramic insulators and materials. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 660~667.
- [24] 惠阿丽, 林辉. 高压绝缘子泄漏电流的分形特征. 高电压技术, 2008, 34(6): 1271~1276.
- [25] F. March, G. G. Karady and R. Sundararajan. Linear stochastic analysis of polluted insulator leakage current. IEEE Transactions on Power Delievery, 2002, 17(4): 1063~1069.
- [26] 李治, 王永江, 王黎明, 等. 绝缘子泄漏电流和放电现象的初步研究. 高电压技术, 2002, 28(B12): 1~2, 14.
- [27] B. Marungsri, H. Shinokubo and R. Matsuoka. Effect of specimen configuration on deterioration of silicone rubber for polymer insulators in salt fog ageing test. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 129~138.
- [28] G. Montoya, I. Ramirez and R. Hernandez. The leakage current as a diagnostic tool for outdoor insulation. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: 2008: 1~4.
- [29] 蒋兴良, 曹娟. 覆冰绝缘子闪络过程泄漏电流监测设计与实现. 高电压技术, 2003, 29(8): 17~19, 31.
- [30] S. Kumagai, B. Marungsri, H. Shinokubo and R. Matsuoka. Performances of silicone and ceramic materials used for outdoor insulation in field test. International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005: 336~339.

- [31] S. H. Kim, E. A. Cherney and R. Hackam. Suppression mechanism of leakage current on RTV coated porcelain and silicone rubber insulators. IEEE Transactions on Power Delievery, 1991, 6(4): 1549~1556.
- [32] A. E. Vlastbs and T. Orbeck. Outdoor leakage current monitoring of silicone composite insulators in coastal service conditions. IEEE Transactions on Power Delievery, 1996, 11(2): 1066~1070.
- [33] 赵子玉, 彭宗仁, 谢恒堃. 悬式绝缘子污层电导率与泄漏电流的现场测试技术研究. 电工技术学报, 1997, 12(2): 43~46.
- [34] Jeong-Ho Kim, Woo-Chang Song and Jae-Hyung Lee, et al. Leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1108~1115.
- [35] 关志成, 毛颖科, 王黎明. 污秽绝缘子泄漏电流特性研究. 高电压技术, 2008, 34(1): 1~6.
- [36] 乐波, 王黎明, 毛颖科. 污秽绝缘子高频泄漏电流特征的研究. 高压电器, 2005, 41(5): 401~407.
- [37] S. H. Kim and R. Hackam. Effects of saline-water flow rate and air speed on leakage current in RTV coatings. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1956~1964.
- [38] S. A. Sebo, J. D. Weh and Tiebin Zhao. Evaluation of leakage current pulse data of polymer insulator aging tests. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998: 426~429.
- [39] 杜欣慧, 戴云航, 王志刚, 宫改花. 饱和受潮条件下的绝缘子泄漏电流特性. 高电压技术, 2007, 33(9): 6~9.
- [40] 李治. 基于泄漏电流的绝缘子染污状态评价的研究 [学位论文]. 北京: 清华大学电机系, 2003.
- [41] 梅冰笑, 舒立春, 蒋兴良, 等. 污秽绝缘子交流试验泄漏电流分离研究. 高电压技术, 2005, 31(9): 18~20.
- [42] 熊俊, 李成榕, 赵林杰, 等. 恒压洁净雾环境中复合绝缘子表面泄漏电流特征参量分析. 电网技术, 2007, 31(15): 70~74.
- [43] 关志成, 王新, 张福增, 等. 高海拔地区玻璃绝缘子泄漏电流分析. 陕西电力, 2007, 35(9): 1~7.
- [44] Yingke Mao, Zhicheng Guan and Liming Wang. Analysis of the leakage current pulses of outdoor insulators in different relative humidity. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007: 400~403.
- [45] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski. Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1999, 6(5): 688~694.

- [46] T. Suda. Study on the frequency characteristics of leakage current waveforms of artificially polluted 12t suspension insulators by the clean fog method. International Symposium on High Voltage Engineering, 1999: 115~118.
- [47] T. Suda. Frequency characteristics of leakage current waveforms of an artificially polluted suspension insulator. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2001, 8(4): 705~709.
- [48] A. H. El-Hag, S. H. Jayaram and E. A. Cherney. Use of low frequency harmonic components as a signature to detect arcing with HTV silicone rubber in salt-fog. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002: 212~215.
- [49] A. H. El-Hag, S. H. Jayaram and E. A. Cherney. Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicone rubber in salt-fog. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 128~136.
- [50] A. H. El-Hag, S. H. Jayaram and E. A. Cherney. Influence of shed parameters on the aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 655~664.
- [51] A. H. El-Hag, S. H. Jayaram and E. A. Cherney. Effect of insulator profile on aging performance of silicone rubber insulators in salt-fog. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 352~359.
- [52] 张重远, 黄彬, 王娟, 律方成. 悬式瓷制绝缘子泄漏电流与表面污秽的关系. 高电压技术, 2008, 34(4): 655~659.
- [53] 姚陈果, 李璨延, 米彦, 孙才新, 等. 绝缘子安全区泄漏电流频谱特征提取及污秽状态预测. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 1~8.
- [54] 李璟延, 司马文霞, 孙才新, 等. 染污绝缘子放电中泄漏电流的频谱变化. 高电压技术, 2008, 34(3): 455~457.
- [55] Y. C. Song and D. H. Choi. High-frequency components of leakage current as diagnostic tool to study ageing of polymer insulators under salt fog. Electronics Letters, 2005, 41(12): 684~685.
- [56] P. S. Ghosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee. Estimation of time-to-flashover characteristics of contaminated electrolytic surfaces using a neural network. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(6): 1064~1074.
- [57] M. M. Lavalle and G. R. Ortiz. Flashover forecasting on HV insulators with a back prorogation neural net. Canada Journal Electric and Computer Engineering, 1996, 21(1): 29~32.
- [58] M. Ugur, W. Auckland, B. R. Varlaw and Z. Emin. Neural networks to analyze surface tracking on solid insulators. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1997, 4(6): 763~766.

- [59] P. Cline, W. Lannes and G. Richards. Use of pollution monitors with a neural network to predict insulator flashover. *Electric Power Systems Research*, 1997, 42(1): 27~33.
- [60] P. Dixit and H. G. Gopal. ANN based three stage classification of arc gradient of contaminated porcelain insulators. *International Conference on Solid Dielectrics*, 2004: 5~9.
- [61] A. N. Jahromi, A. H. El-Hag, S. H. Jayaram, E. A., et al. Prediction of leakage current of composite insulators in salt fog test using neural network. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2005:
- [62] A. N. Jahromi, A. H. El-Hag, S. H. Jayaram, E. A. Cherney, et al. A neural network based method for leakage current prediction of polymeric insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1): 506~507.
- [63] V. T. Kontargyri, A. A. Gialketsi, G. J. Tsekouras, et al. Design of an artificial neural network for the estimation of the flashover voltage on insulators. *Electric Power System Research*, 2007, 77(12): 1532~1540.
- [64] G. E. Asimakopoulou, V. T. Kontargyri and G. J. Tsekouras,; Artificial neural network optimisation methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators. *IET Transactions on Science, Measurement & Technology*, 2009, 3(1): 90~104.
- [65] 韩建民, 张长江, 王丽侠. 基于小波神经网络的绝缘子漏电量预测方法. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 74~75.
- [66] 杨庆, 司马文霞, 蒋兴良, 等. 复杂环境条件下绝缘子闪络电压预测神经网络模型的建立及应用. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 155~159.
- [67] 陈升, 王基一, 应伟国. 基于 BP 神经网络的绝缘子泄漏电流预测方法. *浙江电力*, 2007, 26(1): 18~22.
- [68] 毛颖科, 关志成, 王黎明, 乐波. 基于 BP 人工神经网络的绝缘子泄漏电流预测. *中国电机工程学报*, 2007, 27(27): 7~12.
- [69] 何相佑, 向凤红, 忽建蕊. 基于 BP 人工神经网络的绝缘子等值附盐密度预测. *绝缘材料*, 2008, 41(4): 58~61.
- [70] J. Montesinos, R. S. Gorur and J. Burnham. Estimation of flashover probability of aged nonceramic insulators in service. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(2): 820~826.
- [71] W. L. Vosloo and J. P. Holtzhausen. The prediction of insulator leakage currents from environmental data. *IEEE Africon Conference in Africa*, 2002: 603~608.
- [72] 贺博, 林辉. 人工污秽试验中绝缘子泄漏电流的统计特性. *高电压技术*, 2006, 32(8): 4~6.

- [73] S. Venkataraman and R. S. Gorur. Extending the applicability of insulator flashover models by regression analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(2): 368~374.
- [74] 聂一雄, 尹项根, 刘春, 等. 用模糊逻辑方法对绝缘子串在线检测结果的评定. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 131~136.
- [75] 焦尚彬, 刘丁, 郑岗, 等. 基于模糊逻辑方法的高压绝缘子污秽程度评定. *电力系统自动化*, 2005, 29(7): 84~87.
- [76] E. Natan, R. Munteanu and R. Rabinovici. Prediction of insulator flashover based on leakage current and humidity measurements. *IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers*, 2006: 260~264.
- [77] 李波, 刘念, 王秀婕. 高压电网绝缘子在线绝缘性能的多级模糊综合评判. *电网技术*, 2007, 31(5): 75~79.
- [78] M. Savaghebi, A. Gholami, A. Jalilian and H. Hooshyar. A neuro-fuzzy approach for estimation of time-to-flashover characteristic of polluted insulators. *IEEE International Conference on Power and Energy*, 2008: 1485~1487.
- [79] 卢侃, 孙建华. 混沌学传奇, 上海: 上海翻译出版公司, 1991.
- [80] I. M. Irurzun, P. Bergero, V. Mola, et al. Dielectric breakdown in solids modeled by DBM and DLA. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2002, 13(6):1333~1343.
- [81] A. N. Kolmogorov. On conservation of conditionally periodic motions for a small change in Hamilton's function. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1954, 98(4): 527~530.
- [82] V. I. Arnold. Proof of a theorem of A.N. Kolmogorov on the invariance of quasi-periodic motions under small perturbations. *Russian Mathematical Surveys*, 1963, 18(5): 9~36.
- [83] E. N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130~141.
- [84] D. Ruelle and F. Takens. On the nature of Turbulence. *Communications in Mathematical Physics*, 1971, 23(4): 343~344.
- [85] T. Y. Li and J. A. Yorke. Period three implies chaos. *American Mathematical Monthly*, 1975, 82: 985~992.
- [86] 王兴元. 复杂非线性系统中的混沌. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [87] 张济忠. 分形. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [88] 陈士华, 陆君安. 混沌动力学初步. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998.
- [89] L. Cao. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D*, 1997, 110(1): 43~50.
- [90] H. S. Kim, R. Eykholt and J. D. Salas. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows. *Physica D*, 1999, 127(1): 48~60.

- [91] 吕金虎, 陆君安, 陈士华. 混沌时间序列分析及其应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [92] 王兴元, 王明军. 超混沌 Lorenz 系统. 物理学报, 2003, 56(9): 5136~5141.
- [93] A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D*, 1985, 16(3): 285~317.
- [94] 梁志珊, 王丽敏. 基于 Lyapunov 指数的电力系统短期负荷预测. 中国电机工程学报, 1998, 18(5): 368~371.
- [95] 张军. 最大 Lyapunov 指数计算的几种方法. 地震, 1994, 8(4): 86~92.
- [96] 杨绍清, 章新华, 赵长安. 一种最大李雅普诺夫指数估计的稳健算法物理学报. 2000, 49(4): 636~640.
- [97] M. T. Rosenstein, J. J. Collins and C. J. De Luca. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D*, 1993, 65(1): 117~134.
- [98] A. M. Fraser and H. L. Swinney. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 1986, 33(2): 1134~1140.
- [99] 王文均, 叶敏, 陈显维. 长江径流时间序列混沌特征的定量分析. 水科学进展, 1994, 5(2): 87~94.
- [100] 徐宁, 张明, 邢彦峰. 概率统计函数在工件表面形貌分析中的应用. 现代制造工程, 2004, 3: 58~59.
- [101] 张筑生. 微分动力系统原理. 北京: 科学出版社, 1987.
- [102] 王靖岳, 王浩天. 飞轮调速器反馈控制系统的混沌及控制, 动力学与控制学报, 2008, 6(2): 134~137.
- [103] 周军, 关志成, 王黎明. 高海拔复合绝缘子污闪特性研究. 高电压技术, 2004, 30(4): 9~10.
- [104] S. M. Gubanski. Modern outdoor insulation—concerns and challenges. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2005, 21(6): 5~11.
- [105] J. P. Eckmann, S. O. Kamphorst and D. Ruelle. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhys Lett.*, 1987, 4(9): 973~977.
- [106] J. V. Maizel and R. P. Lenk. Enhanced graphic matrix analysis of nucleic acid and protein sequences. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 1981, 78(12): 7665~7669.
- [107] G. M. Mindlin and R. Gilmore. Topological analysis and synthesis of chaotic time series. *Physica D*, 1992, 58(1-4): 229~242.
- [108] J. P. Zbilut and C. L. Webber. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*, 1992, 171(3-4): 199~203.
- [109] M. Koebbe, G. Mayer-Kress. Use of recurrence plots in the analysis of time-series data. *Proceedings of SFI studies in the science of complexity*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992: 361~378.

- [110] M. Thiel, M. C. Romano, J. Kurths, etc. Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis. *Physica D*, 2002, 171(3): 138~152.
- [111] 金宁德, 陈万鹏. 混沌递归分析在油水两相流流型识别中的应用. *化工学报*, 2006, 57(2): 274~280.
- [112] 吕勇, 徐金梧, 李友荣. 递归图和近似熵在设备故障信号复杂度分析中的应用. *机械强度*, 2006, 28(3): 317~321.
- [113] 陈静, 李亚安, 王东海. 基于递归分析的水声信号处理. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, 27(5): 649~652.
- [114] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski. Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 1999, 6(5): 688~694.
- [115] S. Kumagai and N. Yoshimura. Leakage current characterization for estimating the conditions of ceramic and polymeric insulating surfaces. *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, 2004, 11(4): 681~690.
- [116] S. G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674~693.
- [117] 曾文曲, 文有为, 孙炜. 分形小波与图象压缩. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [118] 程正兴. 小波分析算法和应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [119] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理, 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [120] M. Holscheider. *Wavelets: an analysis tool*. Oxford: Clarendon Press, 1995.
- [121] O. Chaari, M. Meunier and F. Brouaye. Wavelets: a new tool for the resonant grounded poer distribution systems relaying. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1996, 11(3): 1301~1308.
- [122] S. Mallat and S. Zhong. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine intelligence*, 1992, 14(7): 710~732.
- [123] D. Chen. Spline wavelets of small support. *Society for Industial and Applied Mathematics*, 1995, 26(2): 500~517.
- [124] I. Daubechies. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pureand Applied Mathematics*, John Wiley & Sons.Inc, 1988: 909~996.
- [125] 欧阳明鉴, 杜伯学, 魏国忠. 小波变换在局部放电声信号提取中的应用. *电力系统及其自动化学报*, 2004, 16(4): 16~19.
- [126] S. Kumagai, B. Marungsri, H. Shinokubo, etc. Comparison of leakage current and aging of silicone rubbers and porcelain in both field and salt-fog tests. *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, 2006, 13(6): 1286~1302.
- [127] 谢述教, 蒋兴良, 王强, 等. 覆冰绝缘子直流闪络特性研究现状. *高电压技术*, 2004, 30(1): 16~18.

攻读博士学位期间的科研成果

在学期间发表的学术论文:

- [1] B. X. Du, Yong Liu, H. J. Liu and Y. J. Yang, "Recurrent Plot Analysis of Leakage Current for Monitoring Outdoor Insulator Performance", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 1, pp. 139-146, February 2009. (SCI: 405LC)
- [2] B. X. Du and Yong Liu, "Frequency Distribution of Leakage Current on Silicone Rubber Insulator in Salt-fog Environments", IEEE Transactions on Power Delivery. (已录用, SCI 收录)
- [3] B. X. Du, Yong Liu and H. J. Liu, "Effects of Low Pressure on Tracking Failure of Printed Circuit Boards", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 5, pp. 1379-1384, October 2008. (SCI: 359FV)
- [4] B. X. Du, H. J. Liu and Yong Liu, "Effects of Gamma-ray Irradiation on Dielectric Surface Breakdown of Polybutylene Polymers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 3, pp. 696-701, June 2007.(SCI: 174ZQ)
- [5] B. X. Du, Yong Liu and R. L. Wang, "Effects of Corona Discharge on Surface Deterioration of Silicone Rubber Insulator under Reduced Pressures", International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Yokkaichi, Japan, September 2008. (EI: 20090111831427)
- [6] B. X. Du, Yong Liu and Cheng Yang, "Harmonic Components of Leakage Current for Estimating Dynamic Behavior of Saline-Water Droplet on Silicone Rubber Insulator", IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), Vancouver, BC, Canada, June 2008. (EI 收录)
- [7] B. X. Du and Yong Liu, "High Frequency Harmonics of Leakage Current for Monitoring Ceramic Insulator in Cold Fog", IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exposition, Chicago , USA, April 2008, pp.21-24. (EI: 10024906)
- [8] B. X. Du, Yong Liu and Cheng Yang, "Frequency characteristics of leakage current for monitoring silicone rubber insulator in cold-fog conditions", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Vancouver, BC, Canada, October 2007, pp.342-345. (EI: 083711545124)

- [9] B. X. Du, Yong Liu and Li Wang, "Investigation on Leakage Current of Silicone Rubber Insulator in Salt-fog Chamber", IEEE International Conference of Solid Dielectrics (ICSD), Winchester, Hampshire, UK, July 2007, pp.277-280. (EI: 083011396946)
- [10] B. X. Du, Zhenhua Wang and Yong Liu, "Effect of Low Pressure on Insulation Failure of Silicone Rubber for Polymer Insulator", International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Matsue, Japan, September 2006, pp.124-127. (EI: 082811371699)
- [11] 杜伯学, 刘勇, 孟令飞, "紫外辐射下生物可降解聚乙烯的绝缘破坏特性", 高分子材料科学与工程. (EI 收录)
- [12] 杜伯学, 刘勇, 孟令飞, "污秽溶液对生物可降解聚乙烯绝缘破坏的影响", 材料工程. (EI 收录)
- [13] B. X. Du, Yong Liu and Y. S. Xia, "Breakdown Phenomenon Identification of Biodegradable Polyethylene Film under UV-Irradiation Environment", International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Yokkaichi, Japan, September 2008. (EI: 20090111831407)
- [14] B. X. Du, Yong Liu and Lingfei Meng, "DC Breakdown Characteristics of Biodegradable Polyethylene Films", IEEE International Conference of Solid Dielectrics (ICSD), Winchester, Hampshire, UK, July 2007, pp.658-661. (EI: 083011397039)
- [15] Boxue Du, Yong Liu and Hongjing Liu, "Pattern Analysis on DC Breakdown Phenomenon of Polyethylene Films", Transactions of Tianjin University, Vol. 12, No. 5, pp. 325-329, October 2006. (EI: 070510400098)
- [16] 杜伯学, 刘勇, "人工盐雾环境下环氧树脂的绝缘特性", 高电压技术, Vol. 32, No. 6, pp. 9-11, June 2006. (EI: 063310071009)
- [17] Yong Liu, B. X. Du, Xiangjin Zhang and Xin Jiang, "Critical Temperature to Dielectric Degradation of Printed Circuit Board", International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Bali, Indonesia, June 2006, pp.92-94. (EI: 082111269986)

在学期间参加的课题研究:

- [R-1] 天津市应用基础项目: 非热平衡等离子体汽车尾气净化机理及效率的研究。
(No.07JCYBJC07700)
- [R-2] 教育部博士点基金: 基于分形理论有机材料漏电痕迹劣化现象的研究。
(No.20040056037)
- [R-3] 国家自然科学基金: 高海拔环境下聚合物介质表面绝缘破坏研究。
(NO.50777048)

致 谢

在博士论文逐渐完成之际,回首硕士和博士期间在天津大学高电压与绝缘技术实验室的学习和生活,无疑,这六年的时光对我今后的学习和工作产生了重大影响,使我受益终身!

首先,我要万分感谢我的导师杜伯学教授。本论文的工作是在杜老师的悉心指导下完成的,自始至终杜老师一直认真负责地给予我深刻而细致的指导,帮助我开拓研究思路,正是杜老师严谨的治学态度、科学的研究方法、精益求精的工作作风,无私的帮助和热忱的鼓励,都给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢杜老师这些年对我无微不至的关心和指导。

杜伯学教授悉心指导我完成实验室的科研工作,从专业课学习、课题选择,到实验系统开发、论文写作,都倾注了大量的心血。同时,杜老师在日常学习和生活中也给予我很多帮助和意见,给了我很多宽容和理解。再次向我的导师杜伯学教授致以深深的敬意和感谢!

感谢实验室科研及学习期间所有的课题组成员。感谢欧阳明鉴、肖军、马力、陆宇航和董典帅等师兄对我的帮助,师兄们成熟的思想,对问题的独到见解,让我受益匪浅;感谢高宇同学,非常荣幸能够与君共度六年的美好时光;感谢刘弘景师弟,六年来,无论是生活还是科研工作,弘景师弟都给予了我很大的帮助,他的朴实、无私和热情令我非常感动;感谢古亮、夏岩松、王克峰、杨本星等师弟在程序编写和实验安排上给予的帮助;感谢已在外地工作的王振华、旬占龙、杨成等师弟对我的关心和问候。

我要非常感谢家人多年来对我的支持和理解,在物质上和精神上给予了我无限的支持和动力,使我能够在学校专心完成我的研究课题和论文。

最后,我要再一次向所有关心和支持我的老师、同学、朋友和亲人致以最诚挚的谢意。