

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105716

复合绝缘子脱粘相邻电容检测技术研究*

罗宏建¹ 赵洲峰¹ 焦敬品² 张璐³

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院 杭州 310014; 2. 北京工业大学材料制造学部 北京 100124;

3. 中国航天科技集团九院第16研究所 西安 710100)

摘要: 针对复合绝缘子安全运行需要,进行复合绝缘子脱粘缺陷相邻电容无损检测方法研究。通过数值仿真和实验,研究了相邻电容传感技术对多层介电结构脱粘缺陷检测的可行性及电极宽度和间距对相邻电容传感器检测能力的影响。结果表明,相邻电容传感技术可用于多层介电结构界面脱粘缺陷检测,且电极宽度和电极间距对其检测性能有影响,通过优选电极参数可以提高相邻电容检测技术的检测效率和分辨率。该研究工作为复合绝缘子芯棒脱粘检测提供了可行的技术方案。

关键词: 复合绝缘子;脱粘;相邻电容;无损检测

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Debonding detection in composite insulator using adjacent capacitance

Luo Hongjian¹ Zhao Zhoufeng¹ Jiao Jingpin² Zhang Lu³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. The 16th Research Institute of China Aerospace Science and Technology Group, Xi'an 710100, China)

Abstract: Towards the safety operation of composite insulators, research was conducted for the nondestructive detection of debonding defects in composite insulator using the method of the adjacent capacitance. The feasibility of adjacent capacitive sensing technique for the detection of debonding defects in multilayer dielectric structures and the effect of electrode width and spacing on the detection capability of adjacent capacitive sensors were investigated through numerical simulations and experiments. It is demonstrated that the adjacent capacitive sensing technique can be used for the detection of debonding defects at the interface of multilayer dielectric structures, and the electrode width and electrode spacing have an effect on its detection performance. The detection efficiency and resolution of the adjacent capacitance detection technique can be improved by optimizing the electrode parameters. The research provides a feasible technical solution for debonding detection in composite insulator.

Keywords: composite insulator; debonding; adjacent capacitive sensing technique; nondestructive testing

0 引 言

作为一种特殊的绝缘控件,复合绝缘子在高压输电线路中起着悬挂导线和隔离杆塔的作用,是高压输电系统中不可或缺的重要组成部分,其绝缘性能的优劣直接关系到电力系统的安全稳定运行^[1]。由于目前绝缘子加工工艺还不够完善,使得芯棒成型的脱模剂可能出现渗出,从而导致复合绝缘子的芯棒和护套之间的界面出现鼓包或凸起,降低其粘结性能。这样的绝缘子在运行过程中,受外界热、载荷、腐蚀等恶劣环境的作用,导致芯棒和护套的界面出现间

隙。而空气中水分和酸性介质会通过受损护套渗透到间隙中,从而在护套与芯棒边界处形成脱粘、气孔等内部缺陷,导致其界面处绝缘性能的下降,甚至发展成树枝状导电通道,严重威胁复合绝缘子的安全稳定运行^[2-3]。调研发现,芯棒和护套界面缺陷是复合绝缘子一种典型故障类型,约占复合绝缘子全部故障的40%~50%。因此,有必要开展复合绝缘子脱粘缺陷无损检测方法研究。

针对复合绝缘子内部缺陷检测问题,国内外学者开展了大量卓有成效的研究^[4-6]。例如,王芳红等^[7]利用BP神经网络和支持向量机两种方法对复合绝缘子超声检测信号

收稿日期:2021-01-19

* 基金项目:国家自然科学基金(11972053, 11772013)项目资助

进行了分类识别。陈海燕等^[8]将基于水囊柔性耦合的超声相控阵方法应用于复合绝缘子护套和芯棒的无损检测。邓红雷等^[9]将超声导波衰减系数分段复合绝缘子脱粘缺陷的检测。Montreal等^[10]利用红外热成像法对复合绝缘子绝缘子芯棒的烧蚀缺陷进行了检测。Macv等^[11]和 Oishi^[12]将超声显微技术应用于复合绝缘子玻璃纤维芯棒中的分层缺陷的检测。综上所述,现有检测手段对于复合绝缘子损伤检测尚存在一些不足,如检测效率低、存在盲区、所需检测设备复杂等,且大多仍处于实验室研究阶段,还不能满足实际工程检测需要。因此,针对绝缘子安全运行需要,迫切需要发展复合绝缘子损伤无损检测方法研究。

相邻电容传感器是一种基于电容边缘效应的新型传感技术。基于低电导率材料的介电性能变化,相邻电容检测技术可用于介电结构的性能检测及评价^[13-14]。由于具有非侵入、灵敏度高、适用于空间受限场合的检测等特点,相邻电容传感技术已广泛用于介电结构的多种参数测量,如材料特性、损伤、厚度、含水量等。前期,课题组已将相邻电容检测技术应用于复合绝缘子伞裙老化检测^[15]。而复合绝缘子的芯棒和护套所用材料也属于低电导率材料,因此,本文将相邻电容传感技术应用于复合绝缘子芯棒和护套的脱粘检测。

1 柱状结构脱粘相邻电容检测数值仿真

基于 COMSOL 有限元仿真平台,建立芯棒与护套脱粘相邻电容检测的有限元仿真模型,如图 1 所示。其中,芯棒为环氧玻璃纤维,其直径为 20 mm。护套为高温硫化硅橡胶,其厚度为 1 mm。在模型圆周 0°、90°、180°和 270°方向上分别布有缺陷,其宽度均 4 mm,深度分别为 1、2、3 和 4 mm。传感器电极宽度为护套外圆周长 1/12,电极间距为护套外圆周长的 1/18,激励电极电势为 5 V。

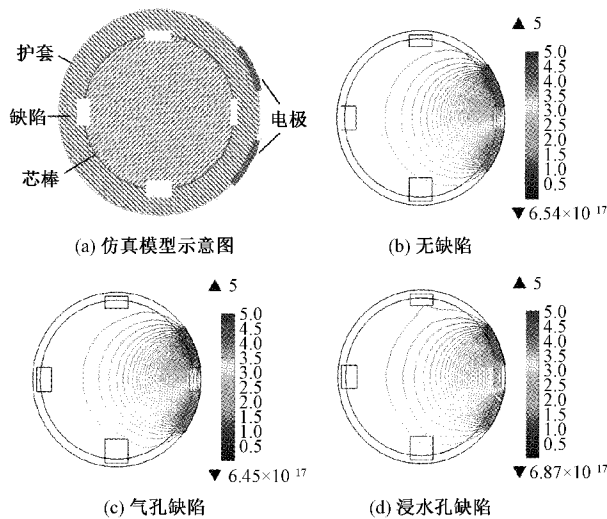


图 1 芯棒与护套界面脱粘缺陷仿真模型及有无损伤时电场线分布

由图 1(b)~(d)对比可以看出,由于缺陷的出现,使得结构的介电特性发生变化,从而导致电场分布的改变,表现为缺陷位置处电场线的畸变。对于气孔缺陷,在缺陷处其电场线分布相对于无缺陷时电场线分布变疏;对于浸水孔缺陷,由于水分子的强极化作用,在缺陷处其电场线分布相对于无缺陷时电场线分布变密。

将传感器沿着护套外圆周以 10°的步长逆时移动,在不同位置上进行数值仿真。图 2 所示为不同传感器位置下数值仿真得到的电容值分布。图中点画线显示无缺陷时的各位置的电容值为 1.75 pF。当在护套与芯棒界面存在气孔缺陷时,损伤位置的电容值小于正常粘结处电容值;当存在浸水孔缺陷时,损伤位置处的电容值明显大于正常粘结处。随着缺陷深度的增加,电容值变化量增大。当缺陷深度为 4 mm 时,气孔缺陷处的电容为 1.57 pF,相对变化率为 11.5%;浸水缺陷处的电容为 2.42 pF,相对变化率为 38.7%。因此,相邻电容检测方法可用于护套与伞裙界面粘结状态的评价。

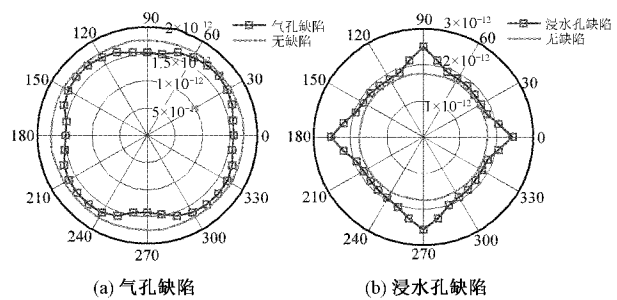


图 2 不同缺陷模型下相邻电容值的空间分布

2 电极结构参数对相邻电容传感器检测能力影响的数值仿真

在形状确定的情况下,相邻电容传感器的性能主要取决于电极宽度和间距。本节通过数值仿真,研究电极宽度和间距对相邻电容传感器检测能力的影响。

基于图 1 所示的仿真模型,保持电极宽度为护套外圆周长的 1/12,在电极间距分别为护套外圆周长的 1/6、1/12、1/18、1/30 情况下,进行数值仿真。图 3 所示为不同电极间距下相邻电容传感器数值仿真结果。可以看出,电极间距对相邻电容缺陷检测有较大的影响。随着电极间距的减小,缺陷处电容值增加,且电容值在缺陷处的指向性越强,缺陷出能力增强。具体而言,当电极间距为 1/6 周长时,缺陷与非缺陷处电容无明显差别,无法实现缺陷检出;当电极间距为 1/30 周长时,电容值在缺陷处具有明显的指向性,可以准确定位缺陷中心位置及边缘。

图 4 所示为间距分别为 1/6 和 1/30 周长时电场线分布示意图。可以看出,电极间距越大电极间电场线分布范围越广,传感器的检测范围越大。但当电极间距过大时,芯棒和护套界面处的电场线分布较为稀疏,不利于界面处的

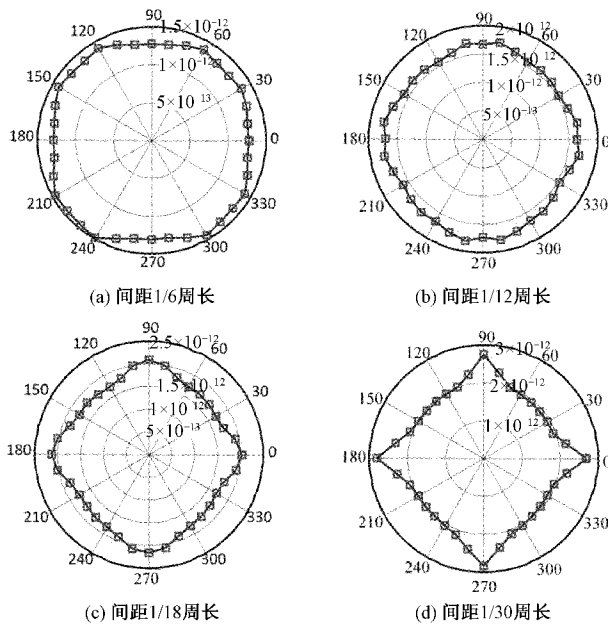


图 3 电极间距改变扫查得到电容值变化

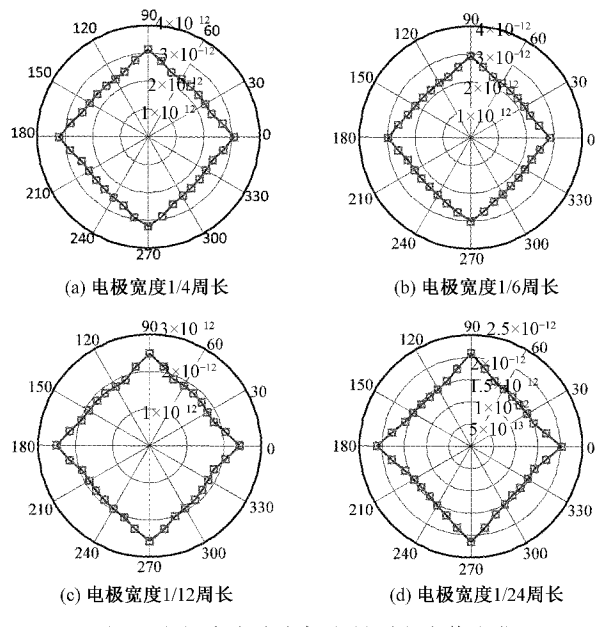


图 5 电极宽度改变扫查得到电容值变化

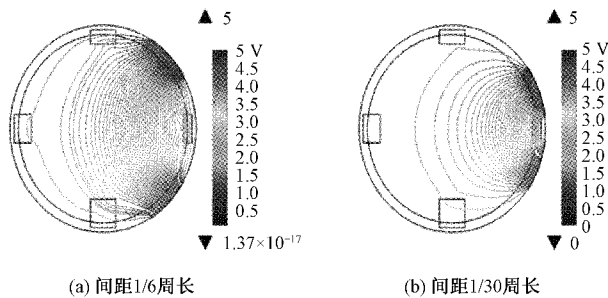


图 4 不同电极间距下电场线分布

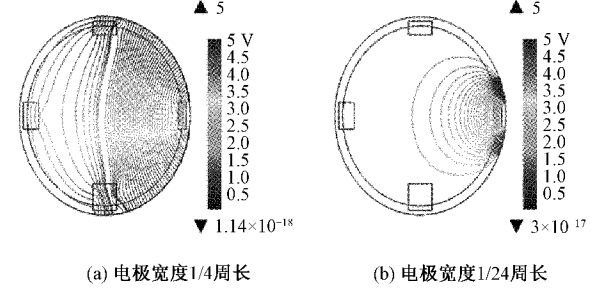


图 6 电极宽度不同电场线分布

缺陷检测。

基于图 1 所示模型,保持电极间距为护套外圆周长 1/18,在电极宽度分别为护套外圆周长的 1/4、1/6、1/12 和 1/24 条件下,进行相邻电容检测的数值仿真。图 5 所示为不同电极宽度下相邻电容传感器数值仿真结果。可以看出,不同电极宽度的传感器均能准确检测缺陷的中心位置,且随着电极宽度的增加,测得的电容值呈增大趋势。但随着电极宽度增加,电容值在缺陷处的指向性变差,缺陷的空间分辨率降低。

图 6 所示为电极宽度分别为 1/4 和 1/24 周长时,模型中电场线分布示意图。可以看出,电极宽度越大,电场线分布范围越广,检测范围增大,检测效率越高,但缺陷检测的空间分辨率降低,需要综合考虑。

3 柱状多层介电结构界面脱粘相邻电容检测实验

为了证明相邻电容传感技术对于复合绝缘子脱粘检测的有效性,在实验室进行了脱粘缺陷的相邻电容检测实验,实验系统如图 7(a)所示。实验系统主要由阻抗分析仪、相

邻电容传感器、计算机和待测试样组成。为模拟复合绝缘子脱粘检测,制作了柱状多层介电粘接试件。柱状粘接试件内层为环氧玻璃纤维芯棒,其直径为 30 mm(如图 7(b)所示),在芯棒外圆周 0°和 180°方向分别加工了两个槽形缺陷,其尺寸分别为 30 mm×4 mm×2 mm 和 40 mm×6 mm×3 mm。在芯棒外通过粘接剂裹绕一层厚度 1 mm 的高温硫化硅橡胶,如图 7(c)所示。相邻电容传感器电极宽度为试件外圆周长的 1/12(8.4 mm),为便于对试件进行圆周扫描,将单片电极进行塑封,以便于改变两电极间距及沿试件外圆周移动扫描。激励信号为 1 MHz 正弦信号,其幅值为 0.5 V。

在电极间距分别为 1/6、1/12、1/18 和 1/30 情况下,利用相邻电容传感器以 10°的步长对试件进行了圆周扫描测量,结果如图 8 所示。可以看出,当在结构中存在脱粘缺陷时,测得的电容值小于正常粘结处电容值。对比图 8(a)和 (d)可以发现,当电极间距为 1/6 外圆周长时,此时电极间距为 16.3 mm,大于缺陷的宽度 4 mm,此间距下受待测结构曲率的影响,并不能准确确定出缺陷的位置。当电极间距为 1/30 外圆周长时,此时电极间距为 3.27 mm,与缺陷宽

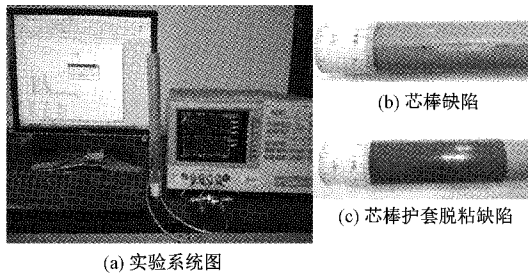


图7 实验装置及待测试样示意图

度接近,可以准确定位沿圆周 0° 和 180° 方向上的两处脱粘缺陷。当电极间距为 3.27 mm 时,传感器测得的无脱粘处电容值为 1.992 pF ,脱粘处电容值为 1.665 pF ,电容相对变化率为 16.4% ; 6 mm 宽脱粘处电容值为 1.534 pF ,电容相对变化率为 23% 。因此,相邻电容检测方法可用于柱状多层介电结构脱粘缺陷的检测。同时,检测实验结果表明,相邻电容传感器电极间距对缺陷检测有很大的影响,且电极间距小,缺陷的分辨能力越高。

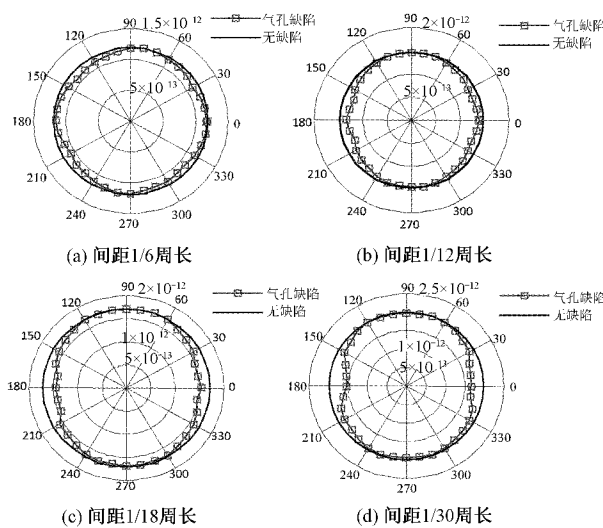


图8 不同电极间距传感器扫描测得的电容值

4 结 论

针对复合绝缘子安全运行问题,本文进行了复合绝缘子脱粘相邻电容检测方法研究,得出如下主要结论。

1) 相邻电容传感技术可用于多层介电结构界面脱粘缺陷检测;

2) 相邻电容传感器的电极宽度和间距对相邻电容传感器的检测能力有很大的影响。仿真和实验结果表明,增大电极宽度可以提高传感器的全局检测能力,提高检测效率,但影响缺陷的空间分辨能力;在宽度确定的情况下,减小电极间距,可以提高缺陷的检测能力。

参考文献

[1] FERNANDO M A R M, GUBANSKI S M. Ageing of silicone rubber insulators in coastal and inland tropical environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and

Electrical Insulation, 2010, 17(2):326-333.
 [2] 王伟贤,李钟. 10kV 配电线路防雷改造探索[J]. 国外电子测量技术,2019,38(12):107-110.
 [3] SHIMADA A, SUGIMOTO M, KUDOH H, et al. Degradation mechanisms of silicone rubber (SiR) by accelerated ageing for cables of nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1):16-23.
 [4] 徐鹏. 复合绝缘子损伤机理及微波无损检测方法研究[J]. 电网运维,2019:36-39.
 [5] 齐兴顺,王钊,邓璐,等. 复合绝缘子红外成像诊断技术研究[J]. 电子测量技术, 2019,42(22):111-113.
 [6] 徐天勇,董晓虎,李荣超,等. 复合绝缘子内部缺陷的超声相控阵检测研究[J]. 电力工程技术,2018,37(6):75-78.
 [7] 王芳红,张明达,孙益辉,等. 复合绝缘子超声波探伤信号识别分类方法研究[J]. 电力学报,2019,34(6):571-576.
 [8] 陈海燕,李亮,夏正武,等. 复合绝缘子内部缺陷超声相控阵柔性检测[J]. 高电压技术,2019,45(4):1274-1280.
 [9] 邓红雷,何站峰,陈力. 复合绝缘子脱粘缺陷的超声导波检测[J]. 高电压技术,2019,45(1):196-202.
 [10] MONTREAL Q, SPANGENBERG E, RIQUEL G. In service diagnostic of composite insulators EDF's test results[C]. In Pro. 10th Int. Symp. on HV Eng. Canada,1997,4(3):139-142.
 [11] MAEV R G, LEVIN V M, MAEVA E Y, et al. Comparison between scanning acoustic microscopy and submillimeter spectroscopy. A new opportunity to investigate dielectric behavior and structure of materials [C]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 1996, 2: 554-556.
 [12] OISHI M. Nodestructive evaluation of materials with the scanning laser acoustic microscope [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1991,7(3):25-30.
 [13] KIM J H, MOON B M, HONG S M. Capacitive humidity sensors based on a newly designed interdigitated electrode structure [J]. Microsystem technologies, 2012, 18(1): 31-35.
 [14] 李楠,郭宝龙,黄川. 一种绝缘体表液体自动测试系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1):31-38.
 [15] 焦敬品,李亮,何存富,等. 厚度渐变结构介电性能测试用变间距叉指型相邻电容传感器设计[J]. 机械工程学报,2017,53(18):1-9.

作者简介

罗宏建,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电网设备无损检测技术。

E-mail:42596649@qq.com

赵洲峰,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电网设备金属技术监督。

E-mail:358576048@qq.com

焦敬品,工学博士,教授,博导,主要研究方向为无损检测技术。

E-mail:jiaojp@bjut.edu.cn

张璐,工学学士,工程师,主要研究方向为电子信息、仪器测量与检测技术等。

E-mail:zhangxiaolu1984@163.com