

基于微波的瓷绝缘子缺陷检测仿真分析

范玉娜¹, 张文婷^{1*}, 黎 鹏¹, 黎子晋², 张博明³, 吴 田¹

(1. 三峡大学 a. 湖北省输电线路工程技术研究中心, b. 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网咸宁市咸安区供电公司, 湖北 咸宁 437000;

3. 国网冀北电力有限公司超高压分公司, 北京 102488)

摘 要:瓷绝缘子是输电线路中的关键部件,其缺陷问题将直接威胁电力系统的安全稳定运行。本文以 XP-160 型瓷绝缘子为研究对象,提出了瓷绝缘子缺陷微波检测数值模拟方法。对比分析了裂纹与金属夹杂物缺陷下反射系数和透射系数的变化规律,获得了最佳检测方式和检测频率,并对检测机理进行了分析。结果表明:在频率为 20 GHz 时,使用微波反射法且天线水平放置时对两类缺陷的检测效果最佳,且通过旋转检测可实现缺陷方向的识别。内部缺陷会导致附近电磁场分布发生变化,进而导致特征参数的变化。

关键词:微波;瓷绝缘子;缺陷;反射系数;透射系数

Simulation analysis of porcelain insulator defects detection based on microwave

Fan Yuna¹, Zhang Wenting^{1*}, Li Peng¹, Li Zijin², Zhang Boming³, Wu Tian¹

(1. a. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line,

b. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Xianning Xian'an District Power Supply Company, Xianning 437000, China;

3. Ultra High Voltage Branch, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 102488, China)

Abstract: Porcelain insulators are critical components of transmission lines, and their defects will directly threaten the safe and stable operation of power systems. Taking XP-160 porcelain insulators as the research object, we proposed a numerical simulation method for microwave detection of porcelain insulator defects. The variation patterns of the reflection coefficient and transmission coefficient under crack and metal inclusion defects were analyzed and compared, the optimal detection method and detection frequency were obtained, and the detection mechanism was analyzed. The results show that at a frequency of 20 GHz, the microwave reflection method with the antenna placed horizontally achieves the best detection performance for both types of defects, and defect orientation can be identified through rotational detection. Internal defects cause changes in the nearby electromagnetic field distribution, which in turn leads to variations in the characteristic parameters.

Key words: microwave; porcelain insulator; defect; reflection coefficient; transmission coefficient

0 引言

瓷绝缘子具有优异的绝缘性能以及良好的耐热性和机械强度,能够在恶劣的环境条件下保持稳定的绝缘性能^[1-4],广泛应用于高压输电线路。然而,由于陶瓷材料是典型的脆性材料,随着挂网年限的增加,其内部易出现裂纹等缺陷,导致绝缘性能下降。当正常运行的绝缘子串存在缺陷时,其发生闪络的概率将急剧增加^[5-7]。因此,有必要提出有

效的瓷绝缘子缺陷检测方法,提前预防其故障失效,提高电力系统运行的安全性和稳定性。

目前,常用的瓷绝缘子缺陷检测方法主要包括电量检测法和非电量检测法。其中,电量检测法通过测量电流、电压等参数来实现绝缘子的缺陷检测,主要包括绝缘电阻法^[8]、脉冲电流法^[9]等;非电量检测法则是通过测量光强、声波等非电学参数以达到检测目的,主要包括超声波检测法^[10]、红外热像法等^[11]。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807110)。

此外,近年来国内外针对瓷绝缘子缺陷检测开

展了大量研究,提出了太赫兹检测法、X射线检测法等新型无损检测方法。文献[12]针对绝缘子交界面的缺陷识别问题,提出了基于太赫兹波的无损检测方法,分析了不同情况下太赫兹反射波的传播规律,实现了蚀损缺陷位置的识别;文献[13]针对在役GIS盆式绝缘子缺陷检测问题,设计了一套基于X射线的智能定位装置,成功检出绝缘子划痕以及异物类缺陷。上述方法虽能检测绝缘子缺陷,但均存在一定的局限性:太赫兹检测法虽然能够对缺陷的位置和大小进行成像,但难以区分缺陷类别^[14];X射线检测法成像受背景噪声影响较大,且对人体会产生有害辐射。

微波检测技术具有能耗低、穿透性强、无需耦合剂、设备易于小型化等优点,具有广泛的应用前景,近年来得到了国内外诸多学者的关注^[15-17]。文献[18]设计了一种便携式金属表面裂纹微波无损检测系统,实现了裂纹缺陷检测的同时降低了总体成本。文献[19]为检测混凝土杆塔钢筋腐蚀状态,提出了基于微波传输特性的钢筋腐蚀检测方法,并结合仿真与试验,验证了该方法的有效性。文献[20]依据介质中均匀平面波传输理论,利用微波透射法对现场取回的瓷绝缘子样品进行试验,初步证明了该方法应用于瓷绝缘子劣化检测的可行性。

本文基于CST Studio Suite电磁仿真软件建立瓷绝缘子微波检测仿真模型,分析裂纹与金属夹杂物缺陷下微波特征量(S_{11} 、 S_{21})的变化规律,进而提出有效的瓷绝缘子缺陷微波检测方法,并从电磁场层面分析微波检测机理。

1 微波检测原理及天线选型

1.1 微波检测原理分析

由于不同材料的介电特性存在差异,微波在界面传播时会发生反射与透射等现象。现有的微波无损检测方法主要分为微波反射法与微波透射法,具体原理示意图如图1所示。

以二端口网络为例,如图2所示,端口1发射微波并接收反射信号,端口2接收透射信号。根据入射电压(U_1^+)与特征阻抗(Z_0),可得入射功率(P_1^+)如式(1)所示。

$$P_1^+ = |U_1^+|^2 / Z_0 = |a_1|^2 \quad (1)$$

则入射波 a_1 可表示为式(2)。

$$a_1 = U_1^+ / \sqrt{Z_0} \quad (2)$$

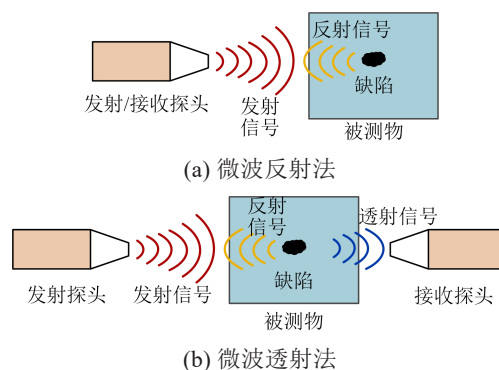


图1 微波无损检测方法

Fig.1 The methods of microwave non-destructive testing

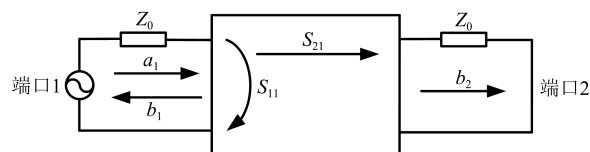


图2 二端口网络

Fig.2 Two-port network

同理可得,反射波 b_1 与透射波 b_2 可分别表示为式(3)和式(4)。

$$b_1 = U_1^- / \sqrt{Z_0} \quad (3)$$

$$b_2 = U_2^- / \sqrt{Z_0} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, U_1^- 与 U_2^- 分别为反射电压与透射电压,则以dB为单位的反射系数 S_{11} 与透射系数 S_{21} 分别如式(5)和式(6)所示。

$$S_{11} = 10 \lg (b_1 / a_1)^2 = 20 \lg (U_1^- / U_1^+) \quad (5)$$

$$S_{21} = 10 \lg (b_2 / a_1)^2 = 20 \lg (U_2^- / U_1^+) \quad (6)$$

由以上分析可得,利用微波进行缺陷检测时,入射电压、反射电压与透射电压的变化最终将映射为反射系数 S_{11} 与透射系数 S_{21} 的变化。通过分析不同情况下 S_{11} 及 S_{21} 的差异,即可表征微波反射或透射信号的变化情况,从而体现被测物的几何特征及电磁特性,如缺陷、结构参数变化等。

1.2 天线选型

角锥喇叭天线在矩形波导的基础上向外延伸形成喇叭形状,可使波导中的微波经喇叭口逐渐过渡到自由空间中,有利于提升辐射效率,且具有较宽的频带,相比于微带天线与矩形波导等具有更好的实用性。因此,本文选择使用角锥喇叭天线,具体参数如图3所示,波导段截面尺寸为5.40 mm×10.70 mm,喇叭段截面尺寸为15.68 mm×20.46 mm,扫描频率范围为18~26 GHz。

衡量天线能否满足实际使用,主要看驻波比

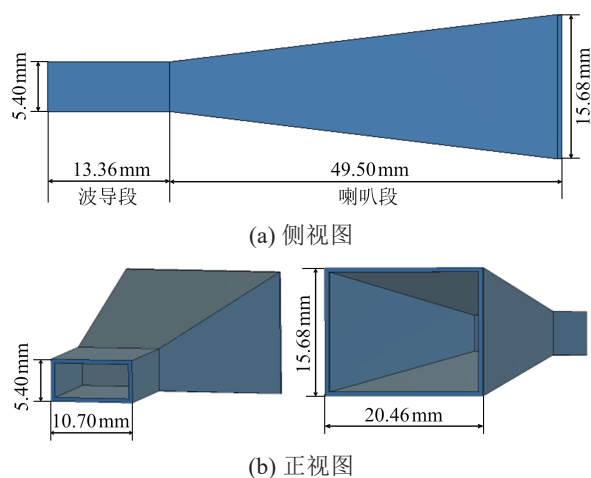


图3 天线模型

Fig.3 The model of antenna

(VSWR)、增益(Gain)以及方向图等关键参数,当驻波比小于2、增益大于8 dBi时,表明该天线满足设计要求^[21];此外,为分析天线在不同空间方向上的辐射效率,需借助方向图,即天线在各个方向上的辐射强度分布,分析天线主瓣、旁瓣和尾瓣的裂化程度。

对本文使用的喇叭天线进行仿真分析,图4为电压驻波比(VSWR)与天线增益(Gain)随频率的变化曲线。

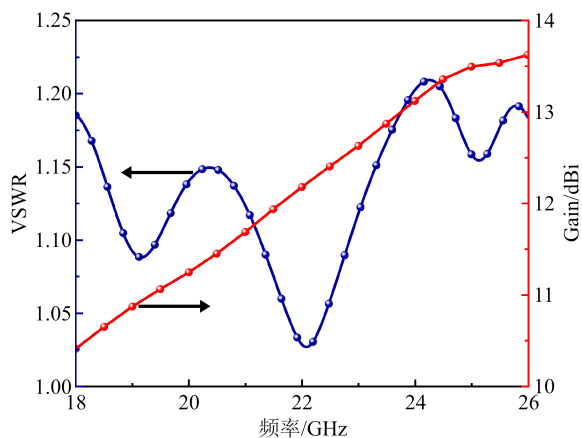


图4 电压驻波比与天线增益

Fig.4 Voltage standing wave ratio and antenna gain

从图4可以看出,在18~26 GHz频率范围内,VSWR数值基本在1.0~1.2;随着频率升高,天线增益从10.4 dBi递增到13.6 dBi,满足实际使用要求。

在18~26 GHz内,每间隔1 GHz对天线微波信号进行仿真,截取部分频点处的天线方向图,如图5所示。从图5可以看出,在不同频点下,各方向图的整体形态较相似,主瓣颜色相对集中,随着频率的

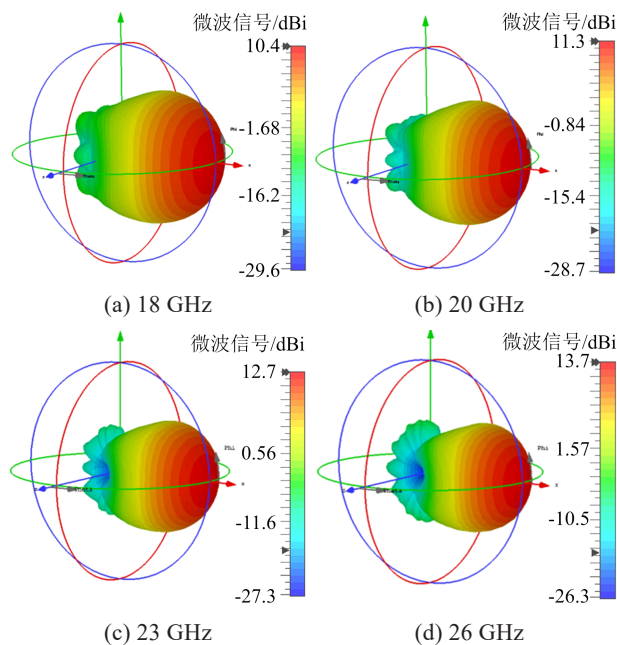


图5 天线方向图

Fig.5 The orientation diagram of antenna

升高,增益逐渐增大且主瓣变窄,证明天线的辐射特性较稳定且能量主要集中在主瓣方向辐射,信号传输效率较高。旁瓣与尾瓣辐射幅值显著低于其他方向瓣,证明在其他方向上微波能量损耗低。

综上所述,本文所使用的角锥喇叭天线具有良好的辐射特性,满足设计要求,可利用该天线检测瓷绝缘子缺陷。

2 瓷绝缘子微波检测模型的构建

2.1 瓷绝缘子结构及其主要缺陷类型

以XP-160型盘形悬式绝缘子为例,其结构如图6所示,由瓷件、铁帽、钢脚以及水泥胶合剂组成^[22]。根据现场经验,瓷绝缘子的主要缺陷类型包括裂纹、金属夹杂物等。裂纹或金属夹杂物的产生原因与绝缘子的加工工艺及工作特性有着直接关系^[23]。本文主要针对瓷绝缘子内部裂纹及金属夹杂物缺陷进行仿真,利用微波检测法探究不同缺陷类型的检测效果。

2.2 检测模型构建

本文采用CST建立无缺陷及含缺陷瓷绝缘子微波检测仿真模型。发射天线和接收天线对称放置于绝缘子两侧,天线端面与绝缘子边缘相距1 mm,仿真模型如图7所示。

设置的缺陷类型为裂纹和金属夹杂物缺陷。实际绝缘子内部缺陷形状较为复杂,无特定尺寸,

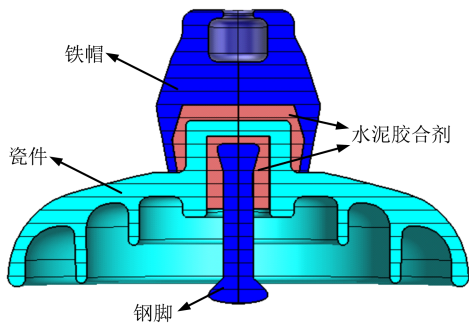


图6 盘形悬式绝缘子结构图

Fig.6 The structure diagram of disc suspension insulator

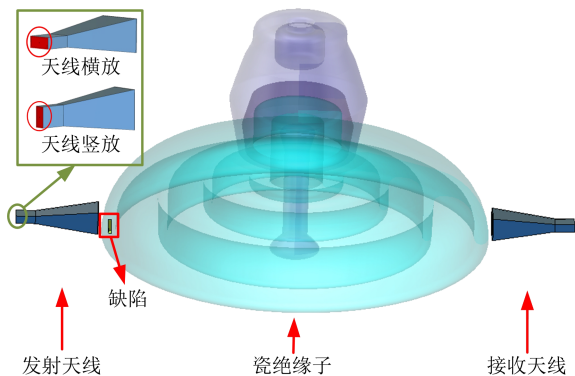


图7 微波检测仿真模型

Fig.7 Simulation model of microwave testing

考虑到本文主要目的在于验证微波法检测瓷绝缘子内部缺陷的可行性与有效性,提出如下缺陷简化模拟方法:将实际情况下形状复杂的缺陷简化为规则的长方体,尺寸为20 mm×2 mm×2 mm。将缺陷处介质设置为空气以模拟裂纹缺陷,设置为无损电导体(PEC)以模拟金属夹杂物缺陷。

微波检测法主要通过发射天线和接收天线的信号传输实现对绝缘子缺陷的无损检测,而缺陷与天线之间的相对位置关系也会影响微波检测的精度,因此有必要研究天线不同放置方式对检测效果的影响。针对天线不同的放置方式进行了三维建模,包括横放与竖放两种类型,如图7所示。将天线旋转90°进行检测,等效于使缺陷相对于固定极化方向旋转90°,即改变了缺陷方向与电场极化方向的相对关系,后续通过对比检测结果即可确定天线的最佳放置方式。

2.3 仿真模拟流程

通过分析反射系数 S_{11} 与透射系数 S_{21} 的变化规律以探究微波检测瓷绝缘子缺陷的有效性,具体仿真流程如图8所示。首先,开展固定位置的扫频检测以确定最佳检测参数,分析微波反射法与透射法

的检测效果,确定每种缺陷更适用的检测方法。在此基础上,分析不同天线放置方式对检测的影响,确定该缺陷类型下的最优天线放置方式,同时确定最佳检测频率。最后,在最佳检测条件下,使绝缘子顺时针旋转进行动态扫描,通过分析不同旋转角度下的特征参量结果,探究该方法在实际工程应用中

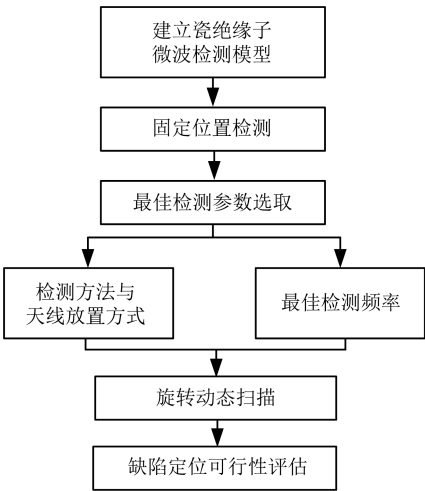


图8 仿真模拟流程图

Fig.8 Simulation flowchart

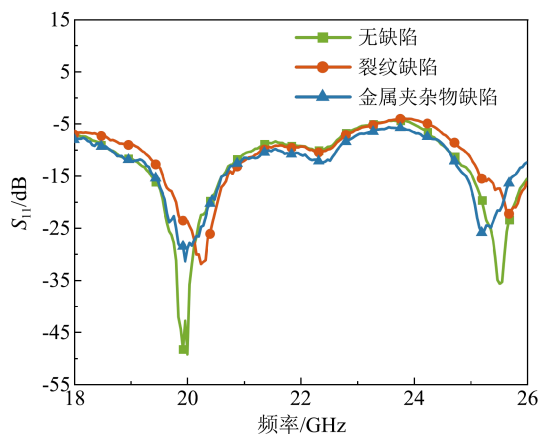
3 检测结果分析

3.1 检测方式与天线放置方式的影响

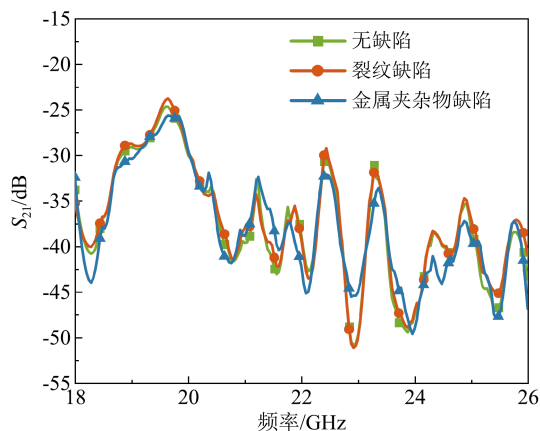
分别对存在裂纹缺陷、金属夹杂物缺陷的瓷绝缘子进行检测,并考虑天线横放与竖放两种放置方式,对比微波反射法与透射法的检测效果。

图9是天线水平放置时特征参量 S_{11} 与 S_{21} 的变化规律。从图9(a)可以看出,无缺陷情况下瓷绝缘子的反射系数 S_{11} 在频率20 GHz附近显著下降,这是因为在检测过程中,微波信号将由低介电常数介质传播至高介电常数介质,当微波的反射信号与激励信号的相位恰好相反时,会发生半波损耗,导致反射信号被抵消,所以在该频率下反射系数 S_{11} 减小。此外,含缺陷时的反射系数幅值较无缺陷情况明显增大,这是因为缺陷的存在使该位置的介质连续性被破坏,引发微波反射信号的突变,导致反射信号与激励信号的相位差较无缺陷情况下发生改变,进而使20 GHz频率下含缺陷时的反射系数增大。从图9(b)可以看出,含缺陷和无缺陷情况下透射系数曲线总体上差异较小。可见,当天线水平放置时,反射法对缺陷的检测效果优于透射法。

图10是天线竖直放置时特征参量 S_{11} 与 S_{21} 的结



(a) 反射法



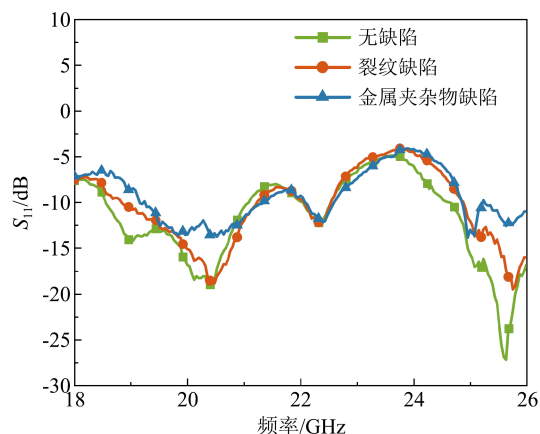
(b) 透射法

图9 天线水平放置时缺陷检测效果对比

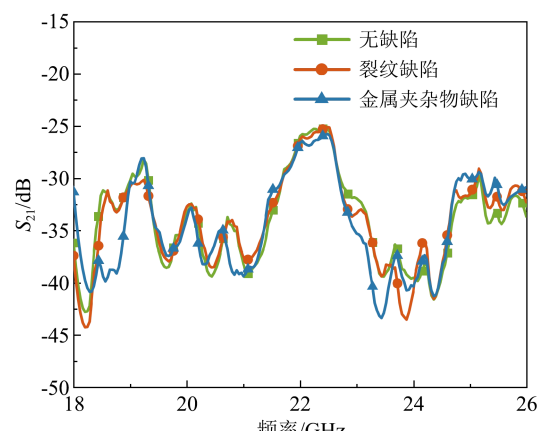
Fig.9 Comparison of defect detection effect with the antenna horizontally placed

果对比。从图10(a)可以看出,裂纹缺陷下 S_{11} 幅值曲线在18.0~20.5 GHz内整体呈下降趋势,而在20.5~26.0 GHz范围内变化趋势与无缺陷情况大致相同,在25.5 GHz附近两者的差值最大。从图10(b)可以看出, S_{21} 在有缺陷时的变化规律类似,相比之下使用反射法检测缺陷具有更高的灵敏度。因此,针对瓷绝缘子裂纹缺陷,使用微波反射法进行检测效果最佳。同理,对于金属夹杂物缺陷,反射法的效果也优于透射法。因此,本文后续采用微波反射法检测瓷绝缘子裂纹或金属夹杂物缺陷。

已有研究表明,含缺陷与无缺陷状态下反射系数幅值曲线的差异可以反映微波信号对缺陷的敏感程度,幅值的差异越大,则该频率下微波信号对缺陷检测的敏感性越好^[24-25]。因此,为确定本文瓷绝缘子缺陷检测时天线的放置方式和最佳检测频率,计算了有无缺陷时绝缘子反射系数 S_{11} 的差值 ΔS_{11} ,结果如图11所示。从图11可以看出,对于裂



(a) 反射法



(b) 透射法

图10 天线竖直放置时缺陷检测效果对比

Fig.10 Comparison of defect detection effect with the antenna vertically placed

纹缺陷,天线水平放置且频率为20 GHz时, ΔS_{11} 达到最大值25.6 dB;天线竖直放置且频率为25.6 GHz时, ΔS_{11} 达到最大值11.02 dB;对于金属夹杂物缺陷,天线水平放置且频率为20 GHz时, ΔS_{11} 达到最大值20.29 dB;天线竖直放置且频率为25.6 GHz时, ΔS_{11} 达到最大值14.77 dB。

综上所述,针对裂纹或金属夹杂物缺陷,使用微波反射法且天线水平放置时检测效果更佳,且在20 GHz处,微波信号对绝缘子的两类缺陷最为敏感,由此确定使用反射法、天线水平放置且频率为20 GHz为最佳检测条件。

针对裂纹缺陷,保持其长度和高度不变,将初始宽度2.0 mm分别修改为1.0 mm、0.5 mm,探究缺陷尺寸对检测结果的影响,结果如图12所示。从图12可以看出,不同缺陷宽度对应的 S_{11} 幅值总体上较为接近,且在20 GHz处各缺陷曲线与无缺陷曲线的差值仍为最大,表明在该特征频率下不同宽度的裂

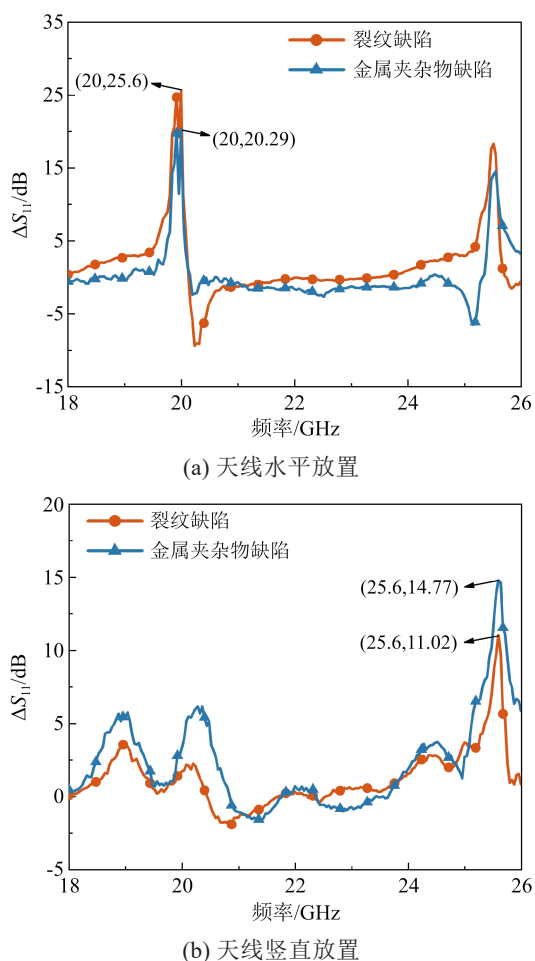


图11 反射系数差值

Fig.11 The difference in reflection coefficient

纹缺陷均能被有效检出。此外,在频率为25~26 GHz时,含缺陷与无缺陷模型的 S_{11} 幅值差异随缺陷宽度的减小而逐渐减小,表明通过该频段识别微裂纹缺陷的精度较低。

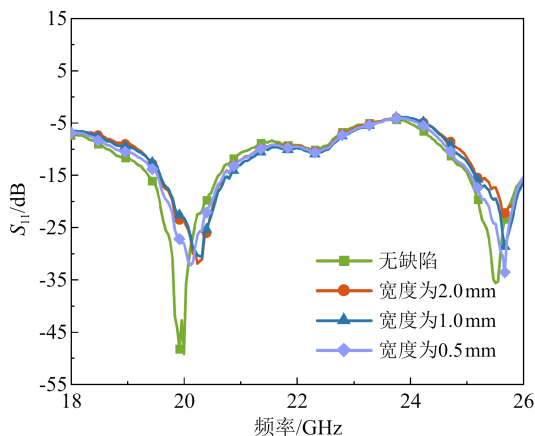
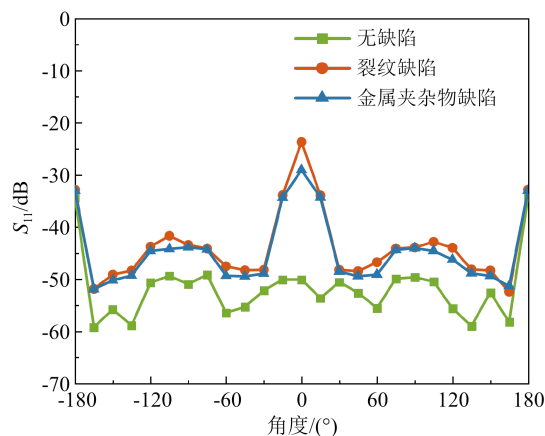


图12 裂纹缺陷宽度对检测效果的影响

Fig.12 Effect of crack defect width on detection effectiveness

3.2 旋转扫描检测

在最佳检测条件(使用微波反射法、天线水平放置且检测频率为20 GHz)下,针对宽度为2.0 mm的缺陷开展旋转扫描检测,使瓷绝缘子每间隔 15° 旋转一次进行定频旋转扫描,得到动态检测结果。图13是绝缘子存在裂纹或金属夹杂物缺陷时反射系数 S_{11} 与旋转角度的关系。

图13 S_{11} 与旋转角度的关系Fig.13 Relationship between S_{11} and rotation angle

从图13可以看出,存在缺陷时反射系数的数值整体较高,当旋转角度为 0° 即天线正对缺陷位置时,反射系数的值会出现明显上升,而其他位置曲线呈现平稳波动。为更直观地观察旋转扫描方式的检测效果,计算不同旋转角度下有无缺陷时的 ΔS_{11} ,结果如图14所示。从图14可以看出,在旋转角度为 0° 时反射系数差值达到20 dB以上,其他角度下差值均较小,而 0° 恰好对应缺陷存在的方向。因此,可用微波旋转扫描的检测方式来实现缺陷的定位。

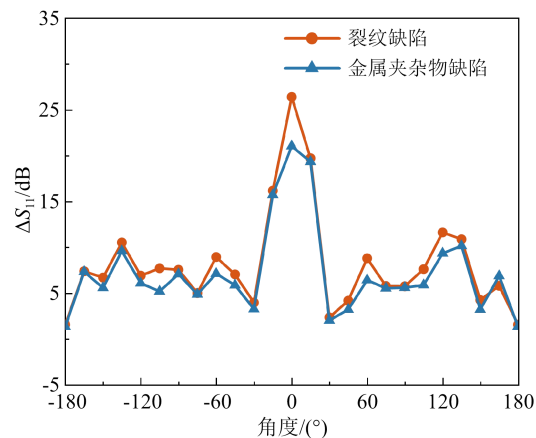


图14 不同旋转角度下的反射系数差值

Fig.14 The difference in reflection coefficient at different rotation angles

4 检测机理分析

为明晰瓷绝缘子内部缺陷对微波传播的影响机制,在上述研究的基础上,结合微波传播路径以及缺陷处的反射、散射效应,针对性地在缺陷内部及其周围设置3组探针,编号分别为①、②、③,以检测不同位置处的电磁场强度,探究缺陷对探针位置处电磁场强度的影响规律。探针具体布置位置如图15所示。

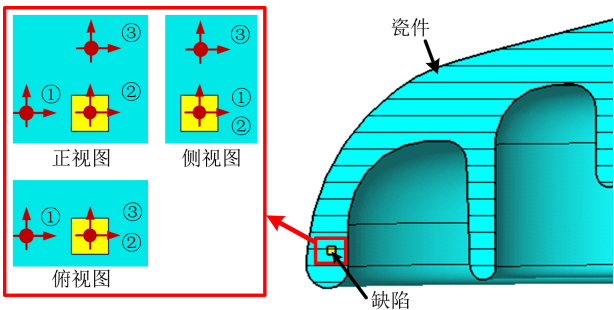


图15 探针仿真模型
Fig.15 Probe simulation model

探针②设置在缺陷内部,用于直接监测缺陷区域的电磁场响应。探针①位于探针②的正左侧,微波在传播的过程中将首先到达该位置,随后再传播至探针②处。同时,微波在缺陷的分界面处将发生反射现象,通过对比存在缺陷与无缺陷时探针①处的电磁场变化,可探究微波经缺陷界面反射后对缺陷左侧区域电磁场的影响。探针③位于探针②的正上方,微波几乎同时传播到探针②和③处,且探针③所在位置未设置缺陷,通过分析探针③位置的电磁场结果,可量化缺陷对无缺陷区域电磁场分布的影响。虽然实际情况下缺陷取向具有随机性,但微波与缺陷的相互作用主要在于微波在介质分界面上的反射、散射和透射,3组探针为基础的正交方向布置,能够较为清晰地量化微波反射、散射等现象。

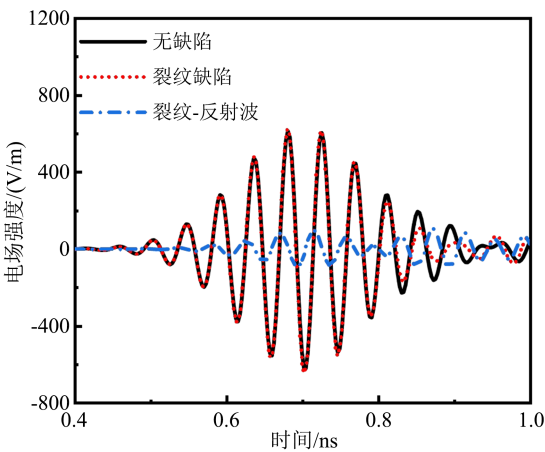
3组探针检测到的电场强度和磁场强度分别如表1和表2所示,其中探针①处电场强度和磁场强度随时间的变化如图16所示。

表1 3组探针检测到的电场强度
Table 1 Electric field strength tested by three probes
dB(V/m)

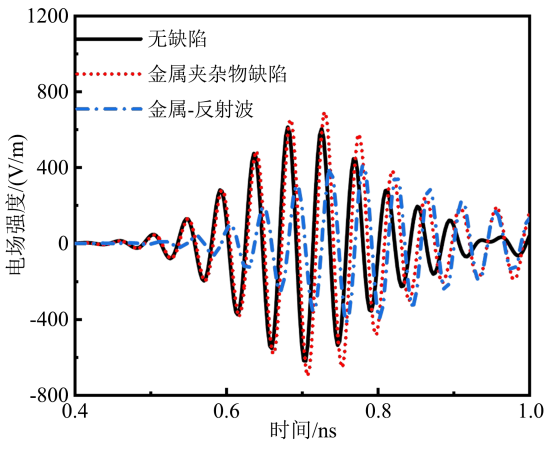
位置	无缺陷	裂纹缺陷	金属夹杂物缺陷
①	50.30	51.74	54.40
②	55.68	59.42	—
③	62.05	61.79	62.53

表2 3组探针检测到的磁场强度
Table 2 Magnetic field strength tested by three probes
dB(A/m)

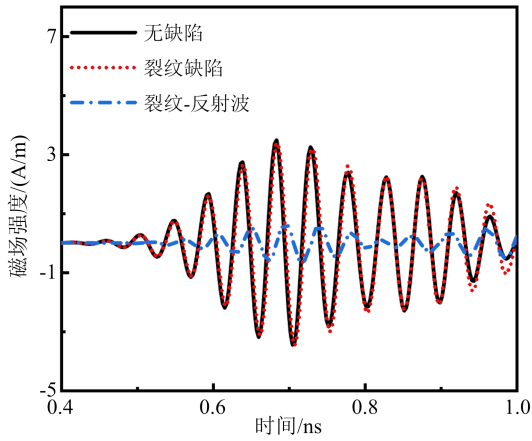
位置	无缺陷	裂纹缺陷	金属夹杂物缺陷
①	14.44	13.85	12.37
②	14.09	10.90	—
③	19.92	20.49	20.73



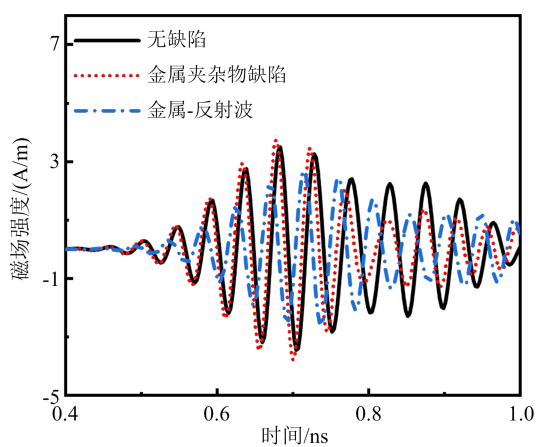
(a) 裂纹缺陷电场强度



(b) 金属夹杂物缺陷电场强度



(c) 裂纹缺陷磁场强度



(d) 金属夹杂物缺陷磁场强度

图 16 探针①处电磁场强度变化

Fig.16 Electromagnetic field strength variation at probe ①

从表 1 可以看出,探针①处存在缺陷时的电场强度大于无缺陷时的电场强度。从图 16(a)~(b)可以看出,含缺陷时探针①处的电场强度主要由入射波和缺陷引起的反射波共同作用形成。无缺陷时的电场强度与缺陷反射波的电场强度相位差小于 $\pi/2$,因此两者的电场强度相互叠加,导致含缺陷时探针①处电场强度增大。此外,含金属夹杂物缺陷时反射波的电场强度幅值明显大于裂纹缺陷,这是由于模型中使用无损电导体(PEC)模拟金属夹杂物缺陷,导致微波无法穿透金属导体而被完全反射。从表 1 还可以看出,缺陷内部的探针②处微波穿过裂纹缺陷分界面后电场强度增大,而金属夹杂物缺陷内部场强为 0。探针③位于探针②正上方,由发射天线发出的电磁波将同时传播到探针②与③处,而探针③处未设置缺陷,因此该处电场强度仅出现微小波动,受缺陷的影响较小。

从表 2 可以看出,绝缘子内部存在缺陷时,探针①的磁场强度相较于无缺陷时减小。从图 16(c)~(d)可以看出,无缺陷时的磁场强度与缺陷反射波的磁场强度相位差略大于 $\pi/2$,即两者存在相互抵消,导致含缺陷时探针①处的磁场强度略微减小。此外,含金属夹杂物缺陷时反射波的磁场强度明显大于含裂纹缺陷时的磁场强度值。从表 2 还可以看出,裂纹缺陷下,探针②处的磁场强度同样出现了减小;探针③处磁场强度出现微小的增幅,可能是由于缺陷的存在使微波发生散射。

图 17 为不同缺陷情况下电磁场的分布情况。从图 17 可以看出,由于无缺陷情况下绝缘子内部介

质均匀连续,微波在绝缘子中相对稳定地传播;含裂纹缺陷时,微波透过裂纹后电场强度明显增大,磁场强度减小,表现出与无缺陷时不同的场强分布状态。而含金属夹杂物缺陷时,由于微波无法直接穿过金属,缺陷内部电场很小,同一位置的磁场亦小于其他两种情况。

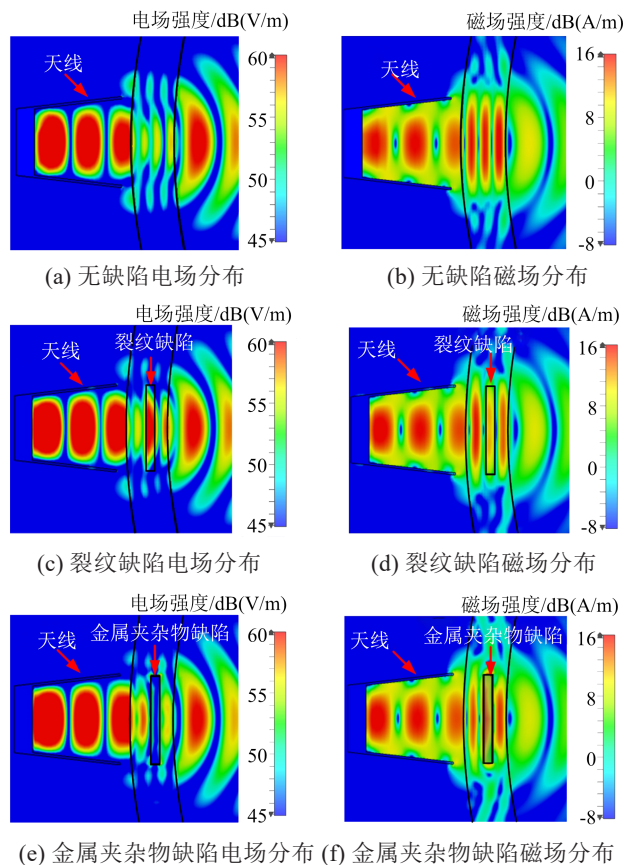


图 17 不同缺陷情况下电磁场分布情况

Fig.17 The distribution of electromagnetic field under different defects

在绝缘子与天线附近设计 4 个测点,如图 18 所示,测得电磁场强度值如表 3 所示。从表 3 可以看出,无缺陷情况下,绝缘子与天线中间区域(测点 1)的电场强度约为 58.91 dB(V/m),而绝缘子内部(测点 2)的电场强度明显降低,这是因为在 20 GHz 频率下绝缘子内部的入射波与反射波存在相互抵消;微波透过绝缘子后(测点 3)电场强度明显增大。当内部存在裂纹或金属夹杂物缺陷时,微波在缺陷界面发生反射,导致测点 1 处电场强度较无缺陷情况略微增大,而磁场强度略微降低。同时,缺陷的存在影响了反射波与入射波的相位差,导致含裂纹缺陷时测点 2 处电场强度较无缺陷情况明显升高。同时,测点 4 位于测点 1 正下方,靠近喇叭天线端面的

边缘区域,因此测点4处电磁场强度明显小于测点1处。

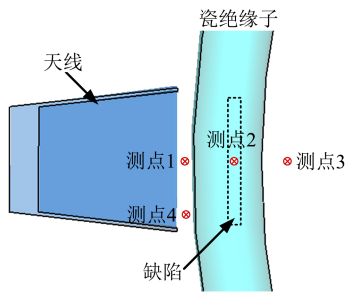


图 18 测点位置示意图

Fig.18 Diagram of measurement point locations

表 3 不同位置电磁场强度

Table 3 Electromagnetic field strength at different position

测点	电场强度/dB(V/m)			磁场强度/dB(A/m)		
	无缺陷	裂纹缺陷	金属夹杂物缺陷	无缺陷	裂纹缺陷	金属夹杂物缺陷
1	58.91	60.25	59.94	14.15	13.92	13.73
2	55.68	59.42	—	14.09	10.90	—
3	62.25	61.30	61.68	10.52	9.05	9.90
4	50.36	52.33	52.12	9.45	9.13	8.99

图 19 为不同缺陷情况下平均电磁场的分布情况。平均电磁场图像是通过针对不同激励信号相位下的电场强度、磁场强度数值进行平均计算得到,此过程平滑了由于相位变化带来的电磁场瞬时波动,展现出电磁场相对稳定的空间分布特性。不同缺陷情况下发射天线内部平均电磁场分布不同,是由于发射天线接收到的反射信号对原电磁场分布产生了影响。从图 19 可以看出,无缺陷时,材料均匀连续,没有因材料不同导致的电磁特性突变,电磁场分布有一定规律性;裂纹缺陷的存在破坏了瓷绝缘子材料的连续性,导致缺陷附近电磁场分布发生变化,电场强度增大,磁场强度降低;存在金属夹杂物缺陷时,缺陷内部平均电磁场均较小,无法透过金属夹杂物缺陷的微波将被反射,导致缺陷左侧电磁场强度大于含裂纹缺陷情况。

上述电磁场仿真结果表明:在微波作用下,存在缺陷时瓷绝缘子内部的电磁场分布将表现出明显差异,而特征参量 S_{11} 、 S_{21} 与电磁场强度的分布密切相关^[26]。因此,利用反射系数能较明显地反映绝缘子的缺陷情况。

5 结论

本文主要阐述了瓷绝缘子缺陷微波无损检测

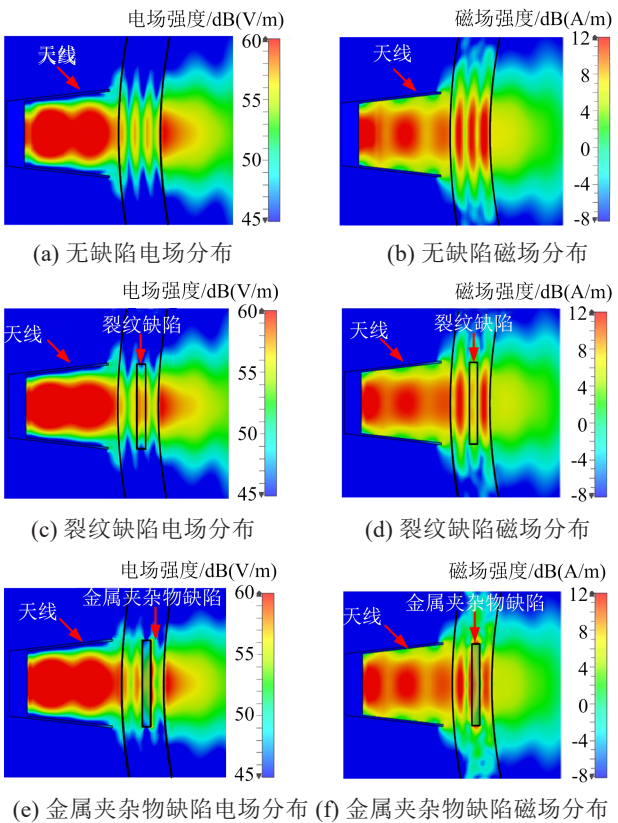


图 19 不同缺陷情况下平均电磁场分布情况

Fig.19 The distribution of average electromagnetic field under different defects

方法,建立了数值仿真模型,实现了对瓷绝缘子两种常见缺陷的检测,得出以下结论:

- (1)当检测频率为 20 GHz 时,采用微波反射法且天线水平放置时检测效果最佳。
- (2)在最佳检测条件下,定频旋转扫描可实现对瓷绝缘子内部缺陷的定位。
- (3)在微波作用下,缺陷将导致绝缘子内部电磁场分布发生变化,进而导致特征参量的变化。

目前,本文仅通过仿真从理论层面验证了微波检测瓷绝缘子内部缺陷的可行性和有效性,针对实际工程中绝缘子缺陷情况复杂多变的问题,下一步需搭建模拟试验平台,探究针对实际瓷绝缘子缺陷的检测效果。

参考文献 References

[1] Liu Guote, Wen Yonghua, Gu Yu, et al. Decision tree clusters: non-destructive detection of overheating defects in porcelain insulators using quantitative thermal imaging techniques[J]. Measurement,2025,241:115723.

[2] 王羽,黄星宇,陈碧芳,等. 盘形悬式混合瓷绝缘子关键技术研究与应用前景[J]. 绝缘材料,2025,58(9):1-8.

- Wang Yu, Huang Xingyu, Chen Bifang, et al. Pivotal technology research and application prospect of cap and pin suspension hybrid porcelain insulators[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(9):1-8.
- [3] 孙瑞筱, 胡玉耀, 蒋兴良, 等. 不同污秽影响下劣化瓷绝缘子发热规律与红外特征分析[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(11):3591-3603.
- Sun Ruixiao, Hu Yuyao, Jiang Xingliang, et al. Heat generation pattern and infrared characterisation of degraded ceramic insulators under the influence of different filth[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(11):3591-3603.
- [4] 武文华, 杨磊, 周日文, 等. 特高压交流混合瓷绝缘子的包覆层材料和界面性能研究[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(9):32-39.
- Wu Wenhua, Yang Lei, Zhou Riwen, et al. Research on coating layer material and interfacial properties of UHV AC hybrid porcelain insulators[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(9):32-39.
- [5] Birlasekaran S, LI H J. Detection of faulty insulators on power transmission line[C]//Power Engineering Society Winter Meeting on IEEE, 2000, 4:2817-2821.
- [6] 刘洪吉, 耿三平, 王军, 等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子劣化分析[J]. *电瓷避雷器*, 2022(6):159-164.
- Liu Hongji, Geng Sanping, Wang Jun, et al. Aging analysis of porcelain insulators used in UHV AC transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2022(6):159-164.
- [7] 刘嵘, 戴建强, 李珊, 等. 多种布设方式下交流 220 kV 线路瓷绝缘子劣化判别的仿真与实测研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(7):127-134.
- Liu Rong, Dai Jianqiang, Li Shan, et al. Simulation and measurement of deteriorated porcelain insulator discrimination for AC 220 kV transmission lines under[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(7):127-134.
- [8] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995: 37-41.
- Yan Zhang. On-line inspection technology of electrical insulation [M]. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1995: 37-41.
- [9] 李波, 黄嫒. 国内外绝缘子在线检测方法的研究[J]. *电气技术*, 2011(9):1-5.
- Li Bo, Huang Yuan. Study on the on-line monitoring method of insulator in the world[J]. *Electrical Engineering*, 2011(9):1-5.
- [10] 何彦良, 邢博文, 辛蕾, 等. 基于超声波法的 GIS 盆式绝缘子缺陷检测[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(4):126-133.
- He Yanliang, Xing Bowen, Xin Lei, et al. Defect detection of GIS basin insulator based on ultrasonic method[J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(4):126-133.
- [11] 程洋, 夏令志, 李志飞, 等. 基于红外成像法的零值瓷绝缘子检测[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(3):74-79.
- Cheng Yang, Xia Lingzhi, Li Zhifei, et al. Detection of faulty porcelain pnsulator based on infrared imaging method[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(3):74-79.
- [12] 张中浩, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于太赫兹波的复合绝缘子界面检测研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(3):989-998.
- Zhang Zhonghao, Mei Hongwei, Liu Jianjun, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(3):989-998.
- [13] 张国宝, 杨为, 赵恒阳, 等. 基于 X 射线三维成像技术的在役 GIS 盆式绝缘子缺陷检测[J]. *高压电器*, 2022, 58(10):230-236.
- Zhang Guobao, Yang Wei, Zhao Hengyang, et al. Defect detection on operating insulation spacer of GIS based on 3D X-ray digital imaging technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(10):230-236.
- [14] 李阳, 李凌, 张晓林, 等. 基于声、光、热特性的绝缘子新型无损检测方法综述[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(10):12-21.
- Li Yang, Li Ling, Zhang Xiaolin, et al. Review of new nondestructive testing methods based on acoustic, optical, and thermal characteristics for insulators[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(10):12-21.
- [15] 黎鹏, 黎子晋, 王申华, 等. 基于微波透射法的复合绝缘子硅橡胶老化状态检测方法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(23):6503-6513.
- Li Peng, Li Zijin, Wang Shenhua, et al. Aging state detection method of composite insulator silicone rubber based on microwave transmission method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(23):6503-6513.
- [16] Li Zhen, Haigh A, Soutis C, et al. Principles and applications of microwave testing for woven and non-woven carbon fibre-reinforced polymer composites: a topical review[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25:965-982.
- [17] 王旭杰, 王申华, 陈建斌, 等. 基于微波反射法的输变电钢筋混凝土腐蚀检测[J]. *浙江电力*, 2022, 41(4):62-67.
- Wang Xujie, Wang Shenhua, Chen Jianbin, et al. Corrosion detection of transmission and transformation reinforced concrete based on microwave reflection method[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(4):62-67.
- [18] 刘维红, 海楠, 石超. 便携式金属表面裂纹微波无损检测系统设计[J/OL]. *微波学报*, 1-7(2024-11-14) [2025-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1493.TN.20241114.1504.002.html>.
- Liu Weihong, Hai Nan, Shi Chao. Design of an omnidirectional spherical antenna array with extreme low directivity for conformal applications[J/OL]. *Journal of Microwaves*, 1-7(2024-11-14) [2025-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1493.TN.20241114.1504.002.html>.
- [19] 黎鹏, 张博明, 王申华, 等. 基于微波传输特性的混凝土杆塔钢筋腐蚀状态仿真分析[J]. *高电压技术*, 2025, 51(3):1158-1168.
- Li Peng, Zhang Boming, Wang Shenhua, et al. Simulation analysis on corrosion state of steel bar in concrete tower based on microwave transmission characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(3):1158-1168.
- [20] 万勋, 刘正庭, 龚政雄, 等. 基于微波透射法的瓷质绝缘子 XWP-70 劣化检测[J]. *电瓷避雷器*, 2020(4):207-214.
- Wan Xun, Liu Zhengting, Gong Zhengxiong, et al. Microwave transmission method for detecting deteriorated ceramic insulators[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(4):207-214.
- [21] 王彪, 王学田, 高洪民, 等. C 波段八木天线的仿真与设计[J]. *微波学报*, 2020, 36(S1):91-93.
- Wang Biao, Wang Xuettian, Gao Hongmin, et al. Design of

- UWB radar antenna[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(S1): 91-93.
- [22] 刘正庭. 基于微波透射法的绝缘子劣化检测[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 33.
- Liu Zhengting. Microwave transmission methodology on deteriorated insulators detection[D]. Changsha: Hunan University, 2019: 33.
- [23] 孙庆峰, 刘高明, 金江舟, 等. 低零值盘型悬式瓷绝缘子发热机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(6): 138-144.
- Sun Qingfeng, Liu Gaoming, Jin Jiangzhou, et al. Heating mechanism of disk suspension porcelain insulator with low (zero) value[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(6): 138-144.
- [24] 王雪儿, 叶鸣, 刘菲, 等. 微波显微镜检测金属/非金属裂缝的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 227-236.
- Wang Xueer, Ye Ming, Liu Fei, et al. Research on the detection of metal/non-metallic cracks by microwave microscope[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2024, 38(8): 227-236.
- [25] 王曦莹. 基于微波反射法的电缆终端缺陷检测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 38.
- Wang Xiying. Research on the defect detection of cable termination based on microwave reflection method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 38.
- [26] 李慧慧, 张博明, 黎子晋, 等. 基于微波透射法的硅橡胶老化检测试验分析[J]. 湖南电力, 2023, 43(2): 14-18.
- Li Huihui, Zhang Boming, Li Zijin, et al. Test analysis of silicone rubber aging detection based on microwave transmission method[J]. Hunan Electric Power, 2023, 43(2): 14-18.
-
- 收稿日期: 2025-08-03; 修回日期: 2025-09-21。
- 作者简介:
- 范玉娜(2002—), 女(汉族), 湖北十堰人, 硕士生, 主要从事高电压与绝缘技术的研究;
- 通信作者: 张文婷(1984—), 女(汉族), 湖北宜昌人, 讲师, 主要从事高电压技术的研究。