

文章编号: 2096-1618(2021)04-0380-05

一种基于微带天线的金属表面裂纹的检测

谢 意^{1,2}, 李 翔¹, 刘育成¹, 宿丕强²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610225)

摘要:金属材料广泛应用于航空航天、机械、交通运输等领域。长期工作在极端环境如高温高压下的金属材料极易产生裂纹而影响产品性能, 从而造成经济损失。金属材料表面缺陷往往掩盖在涂层下方, 肉眼无法识别, 而微波无损检测技术拥有较强的穿透能力, 可以穿透覆盖在金属表面的介电材料对金属表面的缺陷实现快速、有效地检测。设计了一种基于微带天线的传感器对金属表面的裂纹进行检测。研究发现 S_{11} 曲线与金属表面缺陷有紧密联系, 从 S_{11} 曲线的峰值之间的距离可以快速定量地判断缺陷的宽度信息。研究结果表明, 该微带天线传感器能精确、迅速地获取金属表面裂纹信息, 为实现对金属表面健康状况评估提供了一种简单有效的方法。

关键词:微波近场; 无损检测评估; 金属表面缺陷; 微带天线

中图分类号: TN822+.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.005

0 引言

检测因结构劣化而出现不同程度的裂纹已经成为全球关注的一个重大基础问题, 尤其是在工业设备生产、海洋工程、轨道交通工程等领域。其中, 检测金属裂纹是维护金属材料过程中的重要一环。金属裂纹的存在不仅导致由金属材料组成的设备报废, 而且对人们的生命财产都将造成极大的威胁。因此迅速准确地检测金属裂纹可极大减少生命财产的损失。

尽管目前有一些针对金属裂纹检测的传统无损检测技术, 如超声^[1-2]、涡流^[3-4]及磁检测技术^[5]等, 但都存在某些缺点, 如测量精度差、操作过程极其复杂, 测量需耗费大量时间, 使检测人员在检测金属裂纹时无法迅速有效地得出结果。而微波近场检测技术则能突破这些限制有效穿透非金属材料并能灵敏地对隐藏在涂层下的金属缺陷进行检测^[6-12]。

以微波技术为基础, 设计了一种微带天线传感器用于实现对金属表面缺陷的无损检测。该传感器不仅结构轻巧、制作简单、材料价格低廉并且准确度高、灵敏性好、可靠性高、操作环境要求低。与传统的金属裂纹无损检测技术相比存在着显著优势, 可以作为一种检测金属裂纹的有效方法。

1 传感器的设计

微带天线由一块贴片, 放置在一般接地面上组成^[13], 采用矩形贴片设计单模微带天线作为检测金属裂纹的传感器。所设计的传感器结构如图1所示。

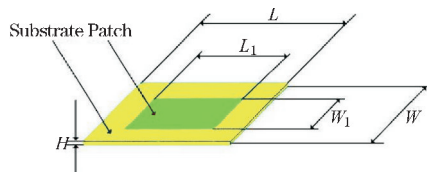


图1 矩形贴片微带天线传感器结构

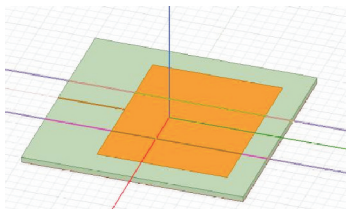
处于矩形贴片微带天线的传感器在两种模式下的谐振频率 f_{01} 和 f_{10} 与传感器辐射贴片的几何长度和宽度都构成反比例关系, 所以可以通过如下等式计算传感器的长度和宽度^[14]:

$$L = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta L_{oc}$$

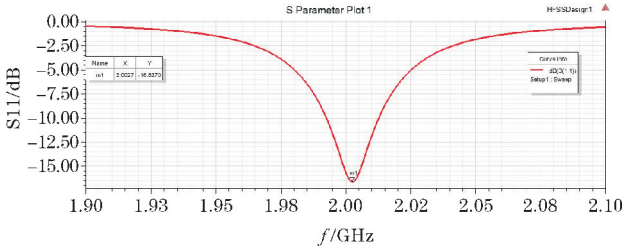
$$W = \frac{c}{2f_{10}\sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta W_{oc}$$

其中, c 表示的是光速, L 表示的是传感器的辐射贴片长度, W 表示的是辐射贴片的宽度, $2\Delta L_{oc}$ 是辐射贴片的较长边上的等效间隙的长度, $2\Delta W_{oc}$ 是辐射贴片的宽边上的等效间隙宽度, ϵ_{re} 是介电层的介电常数。为了获得传感器的合理设计模型, 在 HFSS 仿真软件中建立矩形贴片微带结构仿真模型, 并优化传感器的结构参数, 传感器的具体参数如下: $W = 30 \text{ mm}$, $W_1 = 20 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$, $L_1 = 22 \text{ mm}$, $H = 1 \text{ mm}$, 如图2(a)所示。从图2(b)能够看出1.96 GHz以下和2.03 GHz以上的频段传输特性曲线较平坦光滑, S_{11} 曲线接近0 dB, 而在2 GHz左右存在谐振点, 回波损耗小于-15 dB。

为探究该传感器的灵敏度, 在仿真模型中将传感器下方添加一个待测物, 设置待测物的介电常数由1变化到10, 记录每次传感器谐振频率的变化量, 绘制曲线图, 如图3所示。从该结果图可以看到, 谐振频率的变化随着相对介电常数的变化而变化, 说明该传感器具有很好的灵敏度。



(a) 微带天线模型



(b) 天线回波损耗

图 2 微带天线模型及仿真结果

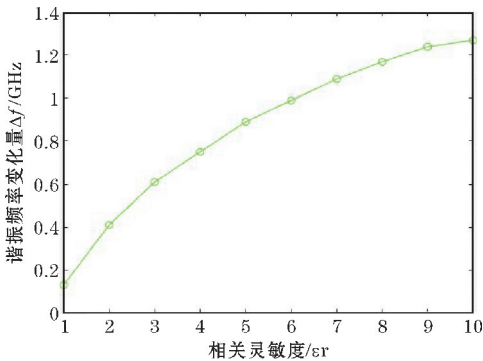
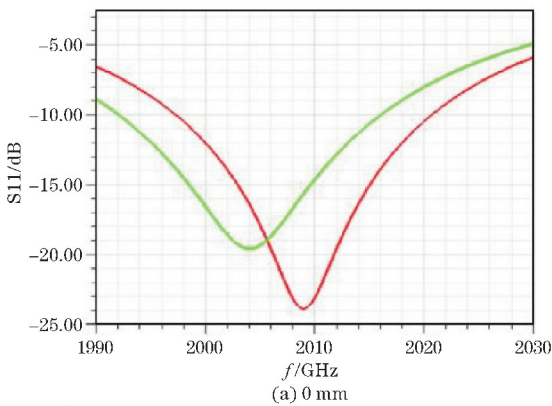


图 3 传感器灵敏度测试结果图

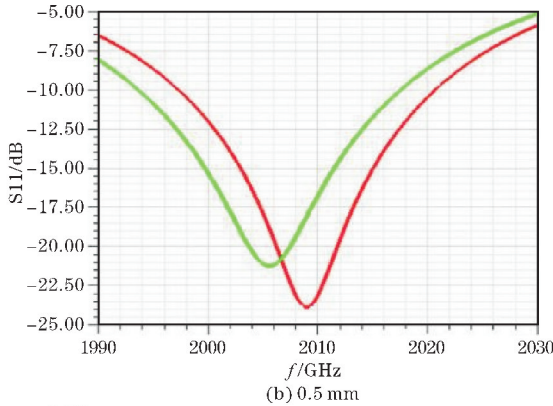
2 金属裂纹检测仿真分析

2.1 lift-off 距离分析

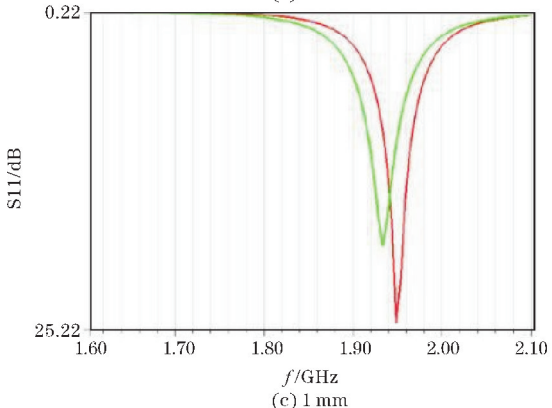
通过改变传感器与待测物表面之间的距离 (lift-off), 记录不同 lift-off 下传感器的谐振频率, 并将其与传感器空载情况下的谐振频率相比较, 进而可以分析 lift-off 与谐振频偏的关系, 结果如图 4 所示。通过观察该结果图能够判断不同的测量距离会影响传感器的测量准确度。图 4 红色曲线表示空载时传感器的谐振频率, 仿真选取了 4 种不同的 lift-off 距离: 0 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm。可以看出在 4 种不同的 lift-off 距离下, 传感器的谐振频率偏移程度也不相同, 当 lift-off 为 0.5 mm 时, 无裂缝待测物的谐振频率发生了明显偏移, 偏移量大约 4.5 MHz, 与传感器紧贴待测物体时偏移量大致相同。当 lift-off 为 1 mm 时, 谐振频率偏移程度减小, 约为 2 MHz, 对比传感器紧贴待测物的偏移量已经显著减小。当 lift-off 为 2 mm 时, 测量不同宽度的裂纹谐振频率几乎不发生偏移, 对比无裂缝待测物谐振频率的偏移量可以忽略不计。综上, 不同的测量距离能够影响传感器的灵敏度。考虑到金属表面不完全光滑, 后续分析选取 lift-off 为 0.5 mm。



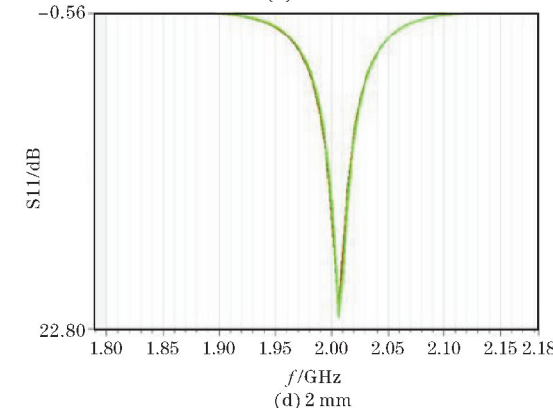
(a) 0 mm



(b) 0.5 mm



(c) 1 mm

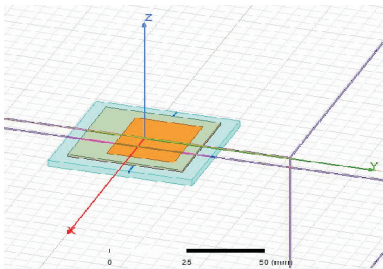


(d) 2 mm

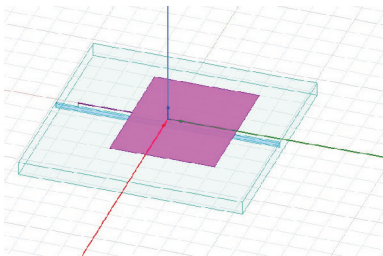
图 4 不同 lift-off 距离时的 S11 参数

2.2 金属裂纹检测结果

由于微带天线可以工作在两种不同的谐振辐射模式:一种是与微带天线传感器辐射贴片的几何长度平行的辐射模式(TM01 模式),另外一种则是与微带天线传感器辐射贴片的几何宽度平行的辐射模式(TM10)模式。在这两种谐振模式中,微带天线传感器的谐振频率(f_{01} 和 f_{10})与贴片的电长度构成反比关系。一般来说,微带天线传感器的体积越大,天线的谐振频率就会变得越低。此外,谐振频率还取决于接地层的特性。例如,在辐射贴片宽度方向上如果存在金属裂缝,那么沿着辐射贴片长度方向上的电流就会改变,但是沿着辐射贴片宽度方向上流动的电流却不会发生明显的变化。由此推出,沿辐射贴片长度方向上流动的电流大小增加,故而导致天线的谐振频率 f_{01} 减小,即发生偏移,而谐振频率 f_{10} 不会发生显著变化。同理可以得出,当沿着贴片的长度方向上遇到金属裂缝时,沿着贴片宽度方向的电流大小发生明显变化,而沿着贴片长度方向的电流基本无变化。所以谐振频率 f_{10} 减小,谐振频率 f_{01} 基本不变^[9]。利用 HFSS 分析了金属裂纹相对于传感器方向不同时谐振频率的变化。对于垂直裂纹,其垂直裂缝方向沿着传感器辐射贴片的长度方向,天线工作在 f_{10} 模式,如图 5(a)。对于水平裂纹,其方向沿着辐射贴片宽度方向,传感器工作在 f_{01} 模式,如图 5(b) 所示。



(a) 垂直裂纹检测模型



(b) 水平裂纹检测模型

图 5 金属裂纹检测模型

改变金属缺陷的宽度,使其为 0 ~ 1 mm,步长 0.1 mm,研究其对应 S11 参数的变化规律。对于垂直裂纹,分析其工作在 f_{10} 模式下谐振频率。从仿真结果图 6 可以看出,随着裂缝宽度的不断增加,传感器的谐振频率 f_{10} 整体呈变小的趋势。传感器谐振频率的偏移量与垂直裂缝宽度的改变成正比,宽度每增加

0.1 mm时谐振频率减小1 MHz。

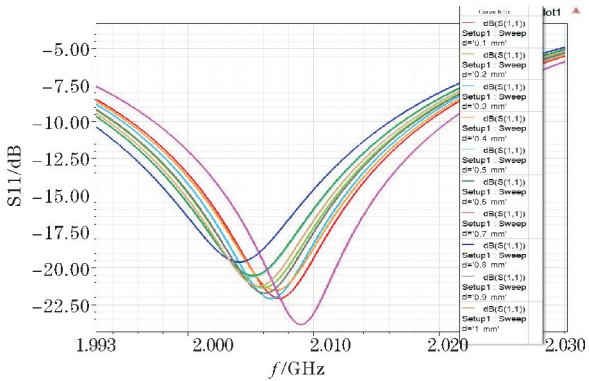


图 6 不同垂直裂纹下的 S11 参数

类似地,对水平裂纹,观察处于 f_{01} 工作模式下传感器的谐振频率的偏移。从仿真结果图 7 可以看出,随着裂缝宽度的增加,传感器在 f_{01} 工作模式下的谐振频率整体呈变小的趋势。同样的,传感器谐振频率的偏移量也与水平裂缝宽度的变化成正比,宽度每增加 0.1 mm时谐振频率减小0.5 MHz。

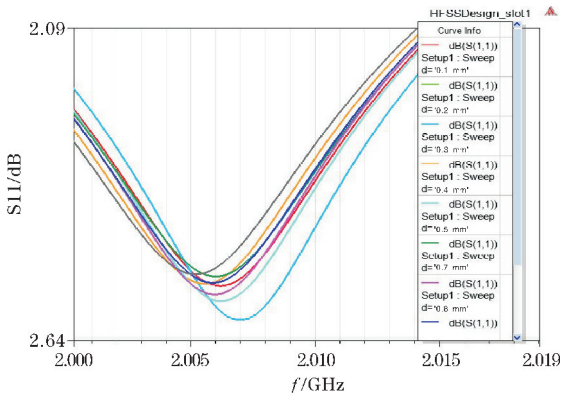


图 7 不同水平裂缝下的 S11 参数

随后,对检验传感器的测量精度进行分析,即该传感器可检测裂纹的最小宽度。在之前测量不同宽度的垂直裂纹的基础上,以0.01 mm为步进不断地缩小扫描的裂纹宽度范围,直到传感器的谐振频率不再发生偏移,观察引起谐振频率发生变化的最小裂纹宽度。图 8 为仿真结果。

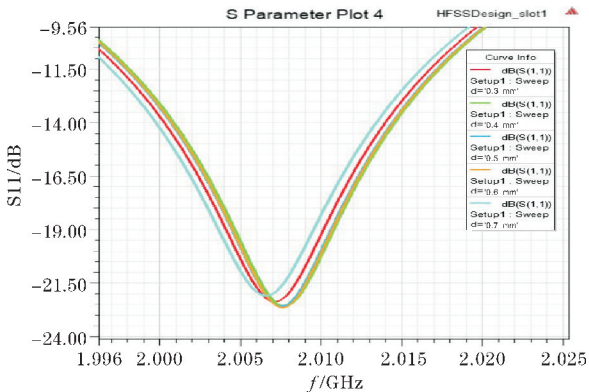
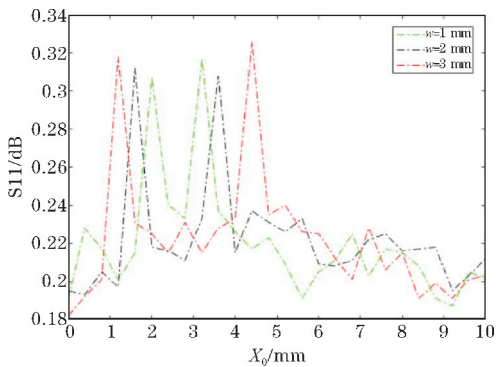
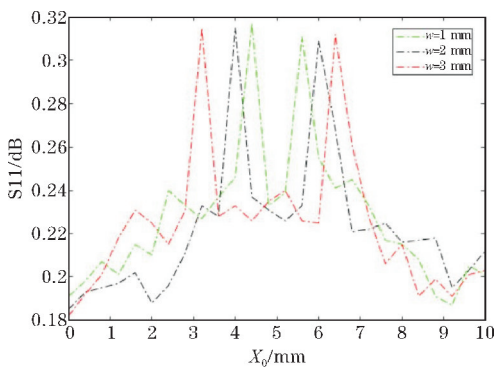


图 8 步进为 0.01 mm 时裂纹宽度 0.03 ~ 0.07 mm 检测结果图

图 8 中,浅蓝色曲线代表了传感器检测宽度为 0.07 mm 的裂纹时传感器谐振频率,红色曲线代表了传感器测量宽度为 0.06 mm 的裂纹时传感器谐振频率,其他 3 条曲线代表了测量宽度为 0.05 mm, 0.04 mm, 0.03 mm 的裂纹时传感器谐振频率。从图中发现,当裂纹宽度为 0.07 mm, 0.06 mm, 0.05 mm 时,传感器的谐振频率发生偏移。当传感器测量裂纹宽度小于 0.05 mm 时,传感器谐振频率不再发生偏移,即超出传感器最小测量精度。因此,该传感器的测量精度为 0.05 mm。理论上,只要发生频率偏移就能检测到裂纹,仿真软件可以显示 3 MHz 的频率偏移。然而,在实际的测量过程中受仪器精度限制,0.05 mm 宽度的裂纹对应的频偏是 5 M 无法用仪器检测到。另外,还存在着大量其他的干扰因素如传感器尺寸的误差,所以实际检测过程中需要更大的频偏才可实现对缺陷的检测。



(a) 裂纹深度 1 mm 时位移结果图



(b) 裂纹深度 3 mm 时位移结果图

图 9 两种深度裂纹对应不同宽度下 S11 曲线

最后,在 lift-off 为 0.5 mm 的情况下,利用 HFSS 仿真软件对缺陷在两种深度的情况下(1 mm 和 3 mm),不同宽度(1 mm, 2 mm, 3 mm)的金属表面缺陷的检测,让传感器相对待测物以步径 1 mm 相对运动,记录传感器每个位置的谐振频率,绘制谐振频率峰值与移动距离的关系曲线,其结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,裂纹的宽度与移动时天线谐振频率峰值的距离

有紧密联系,通过测量得到,天线移动时谐振频率峰值间的间隙约等于裂纹宽度。因此微带天线作为传感器量化测量金属裂纹具有实用性,对于微带无损检测技术具有重大价值。

3 结束语

从理论和仿真上分析并证实了将微带天线传感器用于金属裂纹检测的可行性。首先对所设计的传感器的灵敏度进行分析。让传感器负载一个无缺陷的介电常数由 1 变化到 10 的待测物,分析谐振频率的变化情况,发现该微带天线的谐振频率随着待测物材料介电常数的变化而变化。接着,对 lift-off 距离对检测结果的影响进行分析。发现谐振频率偏移量随着传感器与待测物之间的 lift-off 距离增大而减小,当该距离达到 2 mm 时,谐振频率几乎不发生偏移。因此,在实际测量金属裂纹的时候,为提高传感器的测量精确度同时考虑到金属表面并不是绝对光滑,将 lift-off 距离设定在 0.5 mm。随后,分析了金属裂纹相对于传感器方向不同时谐振频率的变化。根据传感器的工作模式可推断裂纹的方向,如果传感器在 f_{10} 模式下谐振频率发生偏移而 f_{01} 模式下无明显变化,则裂纹是垂直裂纹。如果传感器在 f_{01} 模式下谐振频率发生偏移而 f_{10} 模式下无明显变化,则裂纹是水平裂纹。通过对裂纹检测的仿真分析,可以得出传感器谐振频率的变化随裂纹宽度的变化而变化。对于垂直裂纹,宽度每增加 0.1 mm,传感器的谐振频率偏移减小约 1 MHz,对于水平裂纹,宽度每增加 0.1 mm,传感器的谐振频率偏移减小约 0.5 MHz。同时,对检验传感器的测量精度进行了分析,得出该传感器的最小理论测量精度为 0.05 mm。最后,通过让传感器相对于待测物做栅格式扫描可获取谐振频率峰值之间的距离以此来量化裂纹的宽度信息。

参考文献:

[1] Ludwig R, Roberti D. A Nondestructive Ultrasonic Imaging System for Detection of Flaws in Metal Blocks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(1): 113-118.

[2] Bechou L, Dallet D, Danto Y, et al. An Improved Method for Automatic Detection and Location of Defects in Electronic Components Using Scanning Ultrasonic Microscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Conference,

- 2003,52(1):65-70.
- [3] Tian G Y. Design and Implementation of Distributed Measurement Systems Using Fieldbus-Based Intelligent Sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1197-1202.
- [4] Bernieri A, Ferrigno L, Laracca M, Molinara M. Crack Shape Reconstruction in Eddy Current Testing using Machine Learning Systems for Regression [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(9): 1958-1968.
- [5] Betta G, Ferrigno L, Laracca M. GMR-based ECT Instrument for Detection and Characterization of Crack on a Planar Specimen: A Hand-Held Solution [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(2): 505-512.
- [6] Ali A, Hu B, Ramahi O M. Intelligent Detection of Cracks in Metallic Surfaces Using a Waveguide Sensor Loaded with Metamaterial Elements [J]. Sensors, 2015, 15: 11402-11416.
- [7] Albishi A M, Boybay M S, Ramahi O M. Complementary Split-Ring Resonator for Crack Detection in Metallic Surfaces [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(6): 330-332.
- [8] Yeh C Y, Zoughi R. A Novel Microwave Method for Detection of Long Surface Cracks in Metals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(5): 719-725.
- [9] McClanahan A, Kharkovsky S. Depth Evaluation of Shallow Surface Cracks in Metals Using Rectangular Waveguides at Millimeter-Wave Frequencies [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(6): 1693-1704.
- [10] Gao B, Zhang H, Bai L B, et al. Smooth Nonnegative Matrix Factorization for Defect Detection Using Microwave Nondestructive Testing and Evaluation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(4): 923-934.
- [11] Ahanian I, Sadeghi S H H, Moini R. An array waveguide probe for detection, location and sizing of surface cracks in metals [J]. NDT&E International, 2015, 70: 38-40.
- [12] Ghasr M T, Kharkovsky S, Zoughi R, et al. Comparison of Near-Field Millimeter-Wave Probes for Detecting Corrosion Precursor Pitting Under Paint [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(4): 1497-1504.
- [13] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [14] Dong H, Kang W, Liu L, et al. Wireless passive sensor based on microstrip antenna for metal crack detection and characterization [J]. Measurement Science & Technology, 2019(2).

A Kind of Detection of Cracks on Metal Surface based on Microstrip Antenna

XIE Yi^{1,2}, LI Xiang¹, LIU Yucheng¹, SU Piqiang²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Nowadays, metal materials are widely used in aerospace, machinery, transportation, and other fields. However, due to long-term exposure to air and harsh external environments, the integrity of the surface of the components will be affected and surface cracks and metal corrosion may occur leading to product performance and cause economic losses. Microwave nondestructive testing technology has strong penetration ability, which can penetrate the dielectric materials covering the metal surface to realize rapid and effective detection of metal surface defects. In this paper, we propose a microwave detection scheme for metal surface defects based on a microstrip antenna. It was found that S11 curve is closely related to the information of metal surface defects. The width information of defects can be determined quickly and quantitatively from the distance between the peak values of S11 curve. The results show that the microstrip antenna sensor can accurately and quickly obtain the information of metal surface cracks, which provides a simple and effective method for detecting of metal surface health.

Keywords: microwave near-field; nondestructive testing and evaluation, metallic surface defect, microstrip antenna