

波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器设计*

江正峰 高尚 江剑

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:针对飞行器机翼的大面积壁板等金属结构的多形态裂纹分布难以同时检测、检测精度低等问题,设计了一种互补开口波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器。该传感器群阵列中不同尺寸的互补开口波导谐振环微带传感器能够检测直裂纹、针孔、星型3种裂纹的特征参数。实验结果表明,传感器对3种裂纹的参数变化的最大检测灵敏度达到了150 MHz/mm,传感器可检测出的最小直裂纹尺寸为10 mm×1 mm×0.1 mm。该传感器结合了互补开口谐振环辐射能力强、易于表面共形和基片集成波导低损耗、品质因数高、尺寸小的特性,能够实现对金属材料上多形态裂纹的同时检测,具有灵敏度高、检测范围大等优点。

关键词:金属裂纹;互补开口谐振环;有限元分析;谐振频率;基片集成波导

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of resonant ring microstrip array multi-crack detection sensor

Jiang Zhengfeng Gao Shang Jiang Jian

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A sensor array for multi-crack detection, consisting of complementary open-ended waveguide resonator rings in a microstrip configuration, has been designed to address the challenges of simultaneous detection and low detection accuracy in the multi-form crack distribution of large metal structures, such as aircraft wings. The sensor array comprises complementary open-ended waveguide resonator rings of different sizes, which can detect characteristic parameters of straight cracks, pinholes, and star-shaped cracks. Experimental results demonstrate that the maximum detection sensitivity of the sensor array to parameter variations in the three types of cracks reached 150 MHz/mm, and the smallest detectable size of a straight crack is 10 mm×1 mm×0.1 mm. This sensor combines the advantages of strong radiation capability of complementary open-ended resonator rings, ease of surface conformability and substrate-integrated waveguide with low loss, high quality factor, and small size. It enables simultaneous detection of multi-form cracks on metallic materials, and offers advantages such as high sensitivity and wide detection range.

Keywords: metal crack; complementary open resonant ring; finite element analysis; resonant frequency; substrate integrated waveguide

0 引言

在航空飞机机翼壁板结构中,广布疲劳裂纹损伤是飞机结构主要的失效形式之一,严重威胁着飞机服役的安全性和可靠性。目前全球范围内的飞机壁板结构主要采用铝合金材料构建,占比达到60%以上^[1]。因此,针对铝合金等金属材料裂纹的检测具有重要的意义^[2-3]。

在对金属结构裂纹的检测方法中,微波检测技术由于其制作简单^[4-5]、低成本^[6-7]、尺寸小^[8-9]等优势而受到了广泛的关注。DONG H^[10]、康文芳等^[11]学者,提出了利用矩形微带贴片天线传感器识别金属结构的裂纹,这种方法检测的是传感器接地平面上的裂纹,不是针对实际工件检测。Zhai 等^[12]学者提出利用电磁场带隙结构(electromagnetic band gap, EBG)与微带传感器进行结合,用于检测金属裂纹。Rahman 等^[13]学者提出了一种

利用超高频探针 (ultra-high frequency, UHF) 传感器, 只能检测到金属裂纹宽度的变化。以上工作所采用的无线微波传感器大多采用单一的贴片天线和缝隙天线进行信号的传输, 存在传感器尺寸较大、集成度低等问题。近年来, 将 CSRR 结构引入传感器的设计实现无损的参数测试引起了广泛的研究。Albishi 等^[14] 学者提出了将单个互补开口谐振环 (complementary split-ring resonator, CSRR) 和基片集成波导 (substrate integrated waveguide, SIW) 耦合, 利用 CSRR 结构充当敏感元及传输天线, 实现了器件的小型化和集成化, 同时利用 CSRR 的集中电磁场分布有效地提高了传感器的灵敏度开展对小面积金属结构的单个裂纹检测。Pang 等^[15]、Norouzi 等^[16]、Suresh 等^[17] 学者陆续提出了利用三波段贴片结构, 梳状结构 (comb sensing, CS) 和螺旋结构 (spiral sensing, SS) 用于单个金属裂纹的检测。以上研究工作表明, 相关类 CSRR 贴片天线及 SIW 增强结构能够实现对金属单裂纹尺寸的量化检测, 相对于传统贴片天线具有较高的灵敏度等特点。基片集成波导结构不仅具有传统矩形波导低损耗和品质因数高等特性, 且尺寸相对较小, 易于集成其他平面结构。

然而, 以上工作中提出的裂纹传感器大多只具有单共振特性, 只能检测一种裂纹的单个参数, 无法实现大面积金属结构中多形态裂纹的准确检测问题。为解决飞机机翼壁板等大面积金属结构多裂纹高灵敏度检测, 本文提出一种互补开口波导谐振环微带阵列 (CSRR-SIW-ARRAY) 多裂纹检测传感器, 该传感器阵列结构嵌入在金属表面实现了小型化, 能产生集中的电磁场分布而提高传感器的灵敏度, 增大传感器的检测范围以及实现多参数检测, 有望解决现有研究中传感器灵敏度不高、检测范围小、无法检测多裂纹等问题。

1 CSRR-SIW-ARRAY 多裂纹检测传感器原理及设计

CSRR-SIW-ARRAY 多裂纹检测传感器由 CSRR-SIW 阵列、微带线、介质层、接地平面 3 个部分组成, 其中 3×4 CSRR-SIW 阵列蚀刻在 SIW 谐振器的金属表面并位于微带线阵列的正下方, 介质层由绝缘体材料构成, CSRR 微带线和接地平面由导电金属构成。当 SIW 谐振腔尺寸满足一定条件时, 从金属通孔缝隙中泄露的电磁波可忽略不计, 在不增加谐振器物理尺寸的情况下既可实现器件的小型化, 又可提高了被测参数的灵敏度。CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的基本结构如图 1 所示。

传感器是通过同轴电缆直接与网络分析仪相连, 所测的谐振频率与传感器的谐振频率建立一定的关系, 当网络分析仪所测的谐振频率发生变化时, 会按一定的关

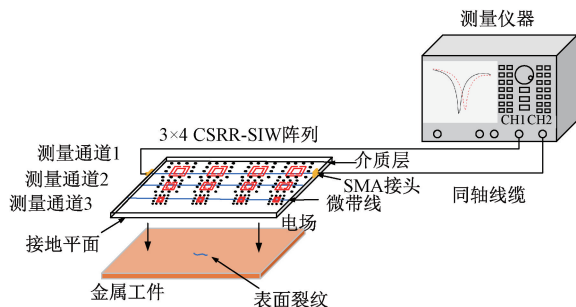


图 1 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CSRR-SIW-ARRAY microstrip array sensor

系影响传感器的谐振频率等参数, 然后通过观察传感器这些参数的变化来检测外部裂纹参数的变化。该传感器 3 个测量通道具有 3 个不同的工作频率以用于检测 3 种不同形态的裂纹。在单个测量通道上含 4 个 CSRR-SIW 阵元, 增大了传感器的对金属裂纹的检测范围。

方形单元 CSRR 与 SIW 的耦合结构如图 2 所示, 其结构参数包括金属通孔直径 (D)、相邻金属通孔间距 (x)、开口宽度 (s)、外径宽度 (C)、环间间隙 (g) 和外径长度 (L)。单元 CSRR-SIW 的电感电容 (LC) 储能电路可以通过考虑对偶定理来定义, 图 3 给出了它的等效电路。传感器的谐振频率 f_r 可以表示为:

$$f_r = \frac{c}{2(L + 2\Delta l) \sqrt{\epsilon_e}} \quad (1)$$

式中: c 表示真空中的光速, L 和 Δl 分别表示微带线的长度和等效电尺寸长度, ϵ_e 表示传感器的有效介电常数。当被测金属结构中存在裂纹时, 裂纹部分被空气代替金属的该部分, 改变有效介电常数 (在传感器和金属片之间)。根据式 (1) 可得, 传感器的谐振频率会变化为:

$$f_r = \frac{c}{2(L + 2\Delta l) \sqrt{\epsilon_e + \Delta\epsilon_0}} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为裂纹引起的介电常数变化量, 该参数与裂纹特征参数有关。当裂纹参数 (如长度、深度、深度等) 发生变化时, 谐振频率的偏移量也会发生相应的变化, 因此, 通过对传感器谐振频率进行检测即可在一定程度上对裂纹信息进行识别。

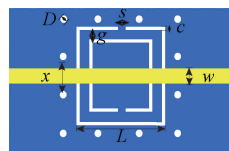


图 2 CSRR-SIW 结构图

Fig. 2 Structural diagram of the CSRR structure of square elements

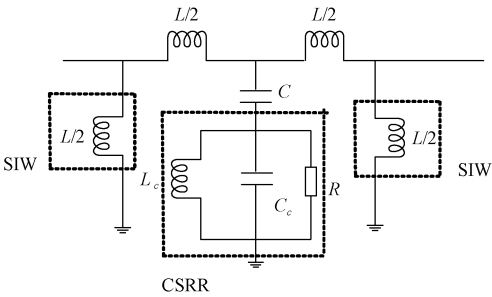


图3 CSRR-SIW 等效电路图

Fig. 3 CSRR-SIW equivalent circuit diagram

2 CSRR-SIW-ARRAY 多裂纹检测传感器仿真分析

CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器具体设计结构参数图如图4所示,将传感器在有限元仿真软件中建模,设定空载时CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的3个通道的谐振频率分别为1.5、3.6、5 GHz,利用仿真软件中的参数优化功能,分别对CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器各结构参数进行迭代优化。最终具体设计参数如表1所示,介质基板选用FR4_epoxy,基板厚0.6 mm,微带线和接地平面都选择0.018 mm的覆铜,为了实现50 Ω的阻抗匹配^[18],微带线的宽度 w 设定为3 mm。图5和6分别是传感器的仿真建模图和电场分布图。从图6电场仿真分布图中可以看出,在传感器的接地平面上,对于馈线的范围内,电磁波主要聚集在CSRR-SIW-ARRAY 结构中的缝隙中,这表明CSRR-SIW-ARRAY 结构有着良好的辐射性能,可以增大传感器的灵敏度。

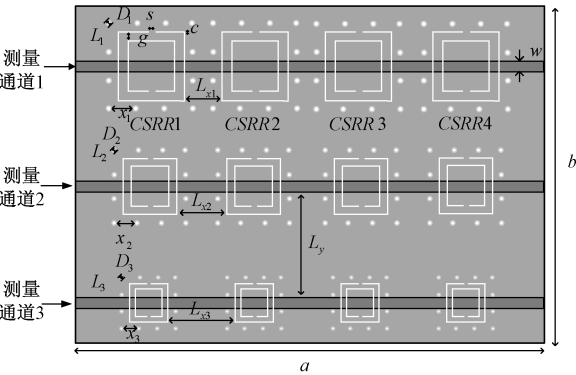


图4 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of CSRR-SIW-ARRAY microstrip sensor

2.1 直裂纹参数对谐振频率的影响

在本节中,研究CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器检测直裂纹长度和宽度的能力。设定被测金属材料为2A12

表1 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器设计参数表
Table 1 Design parameter table of CSRR-SIW-ARRAY microstrip sensor

参数	值/mm	参数	值/mm
a	130	L_1	12
b	110	L_2	9
C	0.5	L_3	7
g	0.6	L_{x_1}	25.34
s	0.8	L_{x_2}	26.84
h	0.6	L_{x_3}	27.84
w	3	x_1	4.5
L_y	32	x_2	3.5
h_{Al}	6	x_3	2
D_1	1	D_3	0.6
D_2	0.8		

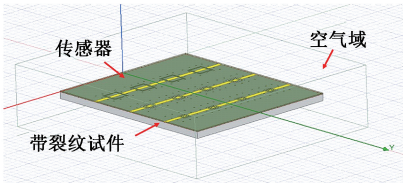


图5 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器仿真结构图

Fig. 5 Simulation structure diagram of CSRR-SIW-ARRAY microstrip sensor

铝,在HFSS仿真软件中在测量通道1中的CSRR1下模拟直裂纹,保持其他参数不变的情况下,分别改变裂纹长度、宽度。分别改变裂纹的长度、宽度和深度,分析CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的谐振频率变化情况。由图7(a)和(c)可知,随着直裂纹长度和深度的增大,传感器的谐振频率逐渐减小;由图7(b)可知,随着直裂纹宽度的增大,传感器的谐振频率逐渐增大。这可以表明CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器具有检测裂纹尺寸的能力。

2.2 针孔型裂纹参数对谐振频率的影响

在本节中,研究CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器检测针孔型裂纹孔径的能力。在测量通道2中的CSRR2下,模拟设置针孔型裂纹,在保持其他参数不变的情况下,改变针孔型裂纹的孔径,分析CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器谐振频率的变化情况。由图8所示,研究了针孔型裂纹孔径分别在0.6、0.8和1 mm时CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器 S_{11} 参数的变化情况,可以看出,随着针孔型裂纹孔径的增大,谐振频率也随之变大。

2.3 星型裂纹参数对谐振频率的影响

本节研究CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器检测星型裂纹宽度的能力。在测量通道3中的CSRR-3下,模拟星型裂纹,在保持其他参数不变的情况下,改变星型裂纹的

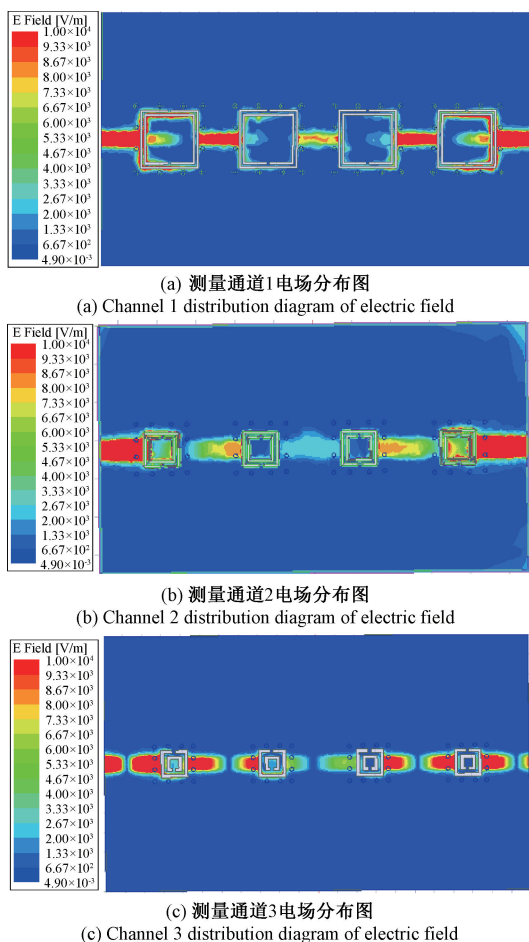


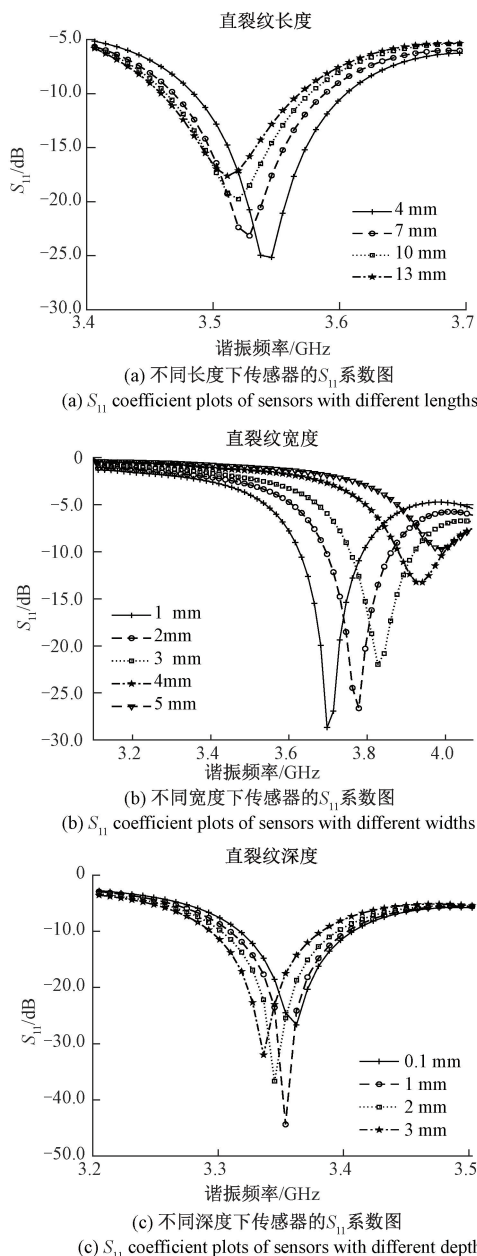
图 6 接地平面电场分布图

Fig. 6 Distribution diagram of electric field in the ground plane

宽度,分析 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器谐振频率的变化情况。由图 9 所示,研究了星型裂纹宽度分别在 1、2、3、4 和 5 mm 时 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器 S_{11} 参数的变化情况。可以看出,随着星型裂纹宽度的增大,谐振频率反而变小。

从图 7、8 和 9 中可以看出,CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的谐振频率与裂纹各参数成线性关系,这表明 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器具有量化裂纹参数的能力。同时,根据不同种类裂纹的 S_{11} 系数图横坐标的谐振频率范围可以看出,不同裂纹的谐振频率的频段不同,这表明 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器可以检测不同种类裂纹。

将图 7、8 和 9 中各谐振频率“波谷”点值与相应类型裂纹长度、宽度、深度以及孔径参数绘制对应的关系图,并采用最小二乘法线性拟合得到裂纹参数-谐振频率关系方程式,各裂纹参数与传感器谐振频率线性关系如图 10 所示。从图 10 中可以看出,传感器谐振频率与直裂纹宽度和针孔型裂纹孔径这两个参数呈正线性关系;而

图 7 不同直裂纹参数下传感器的 S_{11} 系数图Fig. 7 S_{11} coefficient plots of sensors with different straight crack parameters

传感器谐振频率与直裂纹长度、直裂纹深度和星型裂纹宽度这 3 个参数呈负线性关系。

3 实验测量及结果分析

3.1 测量系统设计

本文设计并制作的 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器如图 11 所示,实验测量系统如图 12 所示。从图 12 中可以看出,实验测量系统由 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感

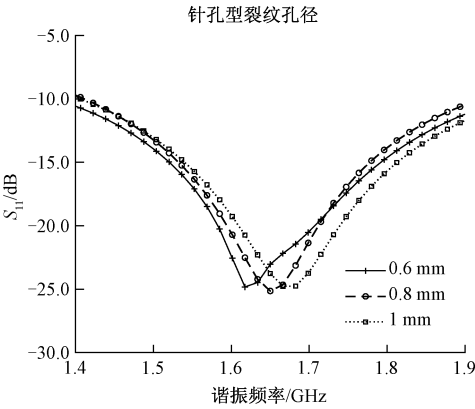


图 8 不同孔径针孔型裂纹下传感器的 S_{11} 系数图
Fig. 8 S_{11} coefficient diagram of sensor under pinhole crack with different apertures

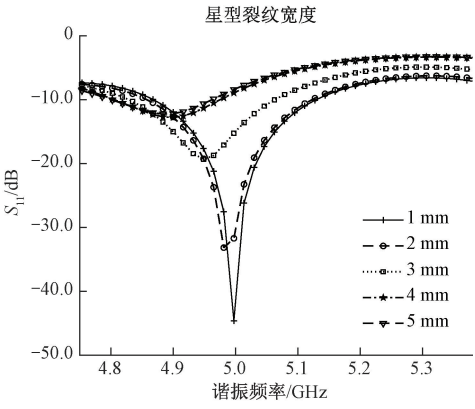


图 9 不同宽度星型裂纹下传感器的 S_{11} 系数图
Fig. 9 S_{11} coefficient diagram of sensor under star crack with different widths

器、微波线缆、试件、SP4T 开关和频谱分析仪组成,其中,频谱分析仪采用的是普源精电科技的 RSA5065 N,这款频谱分析仪的工作频率范围为 9 kHz~6 GHz,双端口频

谱仪,内置 VNA 模块,可用于测量传感器的 S 参数。由于传感器 3 个测量通道各有一组输出输入端口,在输入和输出端各放置一个单刀四掷(single pole four throw, SP4T)射频开关,通过 SP4T 开关可切换传感器的测量工作通道。

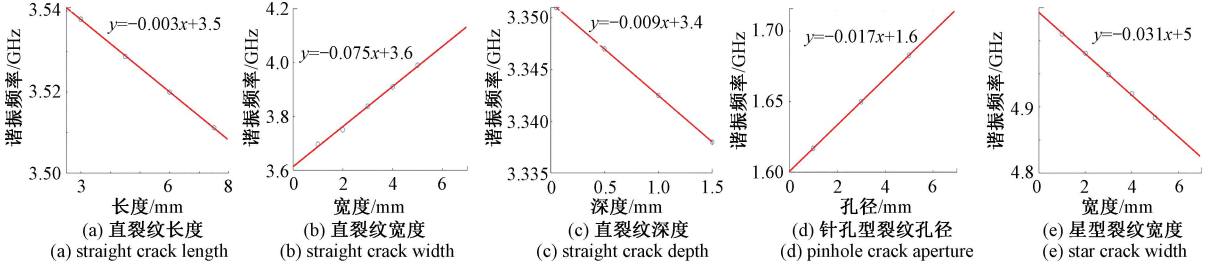


图 10 裂纹参数与谐振频率线性关系图
Fig. 10 Linear plot of crack parameters versus resonant frequency

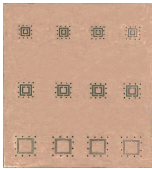


图 11 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器实物图
Fig. 11 Physical diagram of CSRR-SIW-ARRAY microstrip sensor

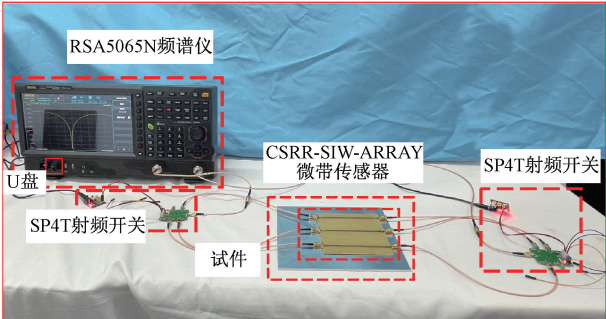


图 12 测量系统实物图
Fig. 12 Physical view of the measurement system

3.2 试件制作

试件的基本设计思路是:利用激光加工设备在试件板上加工出实验所需参数裂纹,试件为 2A12 铝板,由于待测裂纹参数和裂纹种类较多,试件数量为两块,尺寸为 200 mm×200 mm×4 mm,两块试件上裂纹参数不同,传感器的各尺寸参数如表 1 所示,裂纹位置如表 2 和图 13 所示,具体裂纹参数如表 3 所示。

表 2 试件裂纹位置表
Table 2 rack position table of specimen

试件/通道/ 裂纹种类	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
CH1	S1	S2	S3	S4
CH2	0	S5	S6	0
CH3	0	0	S7	S8
CH4	S9	S10	S11	
CH5	S12	0	0	0
CH6	0	S13	0	0

注:CH1-CH3 为试件 1,CH4-CH6 为试件 2,裂纹标记为 S1~S13,0 代表无裂纹。

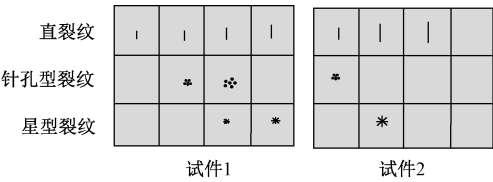


图 13 试件裂纹示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the crack of the specimen

表 3 试件 1 和试件 2 裂纹参数表

Table 3 Crack parameter table of specimen 1 and specimen 2

裂纹	尺寸/mm	裂纹	尺寸/mm
S1	10×1×0.1	S8	2×0.1
S2	10×2×0.1	S9	10×3×0.1
S3	4×3×0.1	S10	7×3×0.1
S4	4×3×1	S11	4×3×2
S5	0.6×2	S12	1×2
S6	0.8×2	S13	3×0.1
S7	1×0.1		

注: S1~S4, S9~S11 为直裂纹, 长×宽×深; S5~S6, S12 为针孔型裂纹, 孔径×深度; S7~S8, S13 为星型裂纹, 宽度×深度。

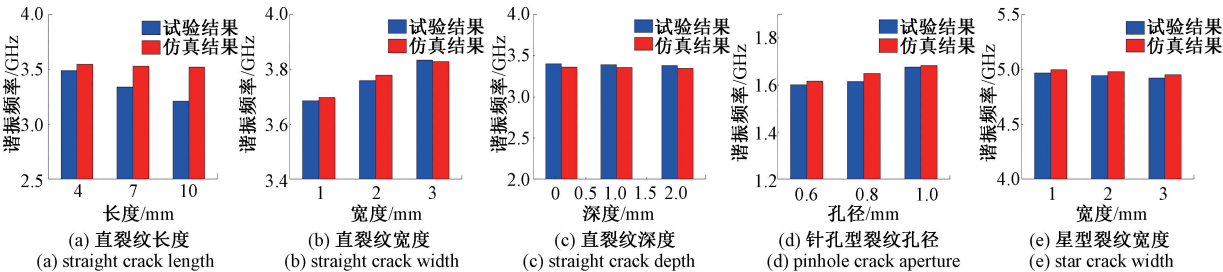


图 14 裂纹参数仿真结果与实验结果对比

Fig. 14 Comparison of simulation results of cracking parameters and experimental results

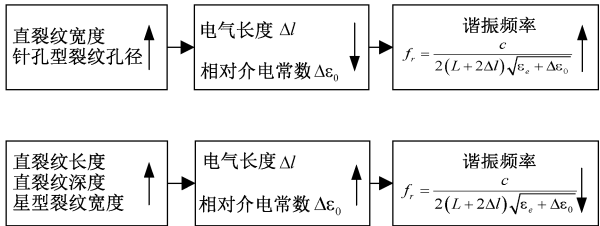


图 15 裂纹参数与传感器谐振频率对应关系

Fig. 15 Correlation between crack parameters and sensor resonance frequency

由仿真结果所得的裂纹参数与传感器谐振频率的线性关系式,再根据本节实验测量出的谐振频率可计算出实验所得裂纹参数。表 4 列出了裂纹参数的实验测量结果和理论值以及二者之间的误差率。利用加工制作好的

3.3 实验结果与分析

将射频分析仪校准后,开始实验,将试件 1 和试件 2 先后单独放置在 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器表面进行实验,按照从左至右的顺序平移传感器,依次测量,观察并记录各个通道测得的谐振频率。实验结果如图 14 所示。观察图 14 可以看出,传感器的谐振频率随直裂纹的长度、深度和星型裂纹的宽度这 3 个参数的增大而减小,呈负相关关系,而随直裂纹宽度和针孔型裂纹孔径这两个参数的增大而增大,呈正相关关系。这是由于传感器它以两个基本的谐振模式辐射:一个辐射模式(TM_{01})平行于传感器辐射贴片的几何长度,另一个辐射模式(TM_{10})平行于传感器微带线的几何宽度模式。当直裂纹的长度、深度和星型裂纹宽度参数增大时,由于这 3 个参数的扩展方向与传感器 TM_{01} 模的辐射方向平行,此时 TM_{10} 对应的电气长度增加,同时传感器的介电常数增大,由式(2)可知,传感器的谐振频率会减小。而当直裂纹宽度和针孔型裂纹孔径增大时,由于这两个参数的扩展方向与传感器 TM_{10} 模的辐射方向平行,此时 TM_{10} 对应的电气长度减小,进而传感器的谐振频率会增大,这与 HFSS 仿真软件中的仿真结果一致。裂纹参数与传感器谐振频率之间的对应关系可由图 15 表示。

CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器测得的裂纹参数如表 4 中第 3 列和第 8 列所示,测量误差如第 5 列和第 10 列所示。从以上数据中可以看出,CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的最小可测量裂纹尺寸为 10 mm×1 mm×0.1 mm (长×宽×深),直裂纹参数的测量误差在 5% 以内,长度、宽度和深度变化引起的传感器谐振频率的偏移量为 3、70 和 9 MHz/mm;针孔型裂纹参数的测量误差在 4% 左右,孔径变化引起的传感器谐振频率的偏移量为 150 MHz/mm;星型裂纹参数的测量误差在 2% 左右,宽度变化引起的谐振频率的偏移量为 30 MHz/mm。裂纹参数的实验误差主要是来源于加工误差、射频分析仪的随机误差、解析式的拟合误差以及实际值的测量误差。如何减小裂纹参数实际值的测量误差和增加实验裂纹样本量是下一步的工作内容。

近年来国内外学者利用微波检测技术对金属结构裂纹进行检测的各种方法对比如表 5 所示。对比本文所设计的 CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器与表 5 中其他学者所设计的传感器,可以发现,CSRR-SIW-ARRAY 微带传

感器在灵敏度、检测裂纹数量等方面具有独特的优势。另外,CSRR-SIW-ARRAY 微带传感器的基底材料是成本更低且更容易获取的 FR4 材料。

表 4 多裂纹参数实验测量结果

Table 4 Test results of multiple crack parameters

裂纹	谐振频率/ GHz	测量值/ mm	理论值/ mm	误差/%	裂纹	谐振频/ GHz	测量值/ mm	理论值/ mm	误差/%
S1	3.686	0.970	1.000	3.0	S8	4.941	1.954	2.000	2.3
S2	3.759	1.950	2.000	2.5	S9	3.211	9.59	10.000	4.1
S3	3.488	4.188	4.000	4.7	S10	3.341	7.274	7.000	3.9
S4	3.391	0.956	1.000	4.1	S11	3.381	2.098	2.000	4.9
S5	1.601	0.629	0.600	4.8	S12	1.676	1.020	1.000	2.0
S6	1.614	0.805	0.800	0.7	S13	4.920	2.901	3.000	3.3
S7	4.969	1.015	1.000	1.5					

注:表中谐振频率表示实验仪器测得的谐振频率,测量值表计算出的裂纹尺寸,理论值代表激光设备加工出的裂纹尺寸。

表 5 金属裂纹检测方法对比

Table 5 Comparison of metal crack detection methods

参考文献	方法	工作频率/ GHz	表征参数	灵敏度/ (MHz·mm ⁻¹)	基底材料	最小可检出裂纹 尺寸/mm	可检出裂纹数量
[13]	EBC 结构	2.5~2.8	Δf	D_c :4.09 W_c :60	Rogers 6002	$D_c=1$	1
[15]	三波段矩形贴片	2.8, 3.5	Δf	D_c :27, L_c :7 73°/mm (CS)	Rogers 4003	2×0.1×0.5	3
[16]	CS 结构和 SS 结构	2.45	$\Delta\varphi$	131°/mm (SS)	Rogers 3010	5×0.1×0.5	1
[14]	UHF 探针	0.7~0.9	Δf	560	FR4	$W_c=0.07$	1
[17]	RFID	0.915	Δf	20	Rogers 3010	$D_c=0.2$	1
本文	3×4 CSRR-SIW	1.5, 3.6, 5	Δf	W_{c1} :70, W_{c2} :30 L_c :3, D_c :9, R :150	FR4	10×1×0.1	12

注: Δf 表示频率偏移, $\Delta\varphi$ 表示相位偏移, L_c , W_c , D_c 分别表示裂纹的长度、宽度和深度。

4 结 论

本文基于 CSRR 和 SIW 结构提出了一种互补开口波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器,实现了大面积金属结构上表面多形态裂纹参数的量化表征。首先分析了传感器结构的等效电路,为直裂纹、针孔、星型 3 种裂纹分别设计了工作频率为 1.5、3.6 和 5 GHz 3 个频段的微带传感器,并对传感器阵列结构开展了参数仿真优化和布局设计,建立了传感器的谐振频率与裂纹参数的线性关系。最后实验结果表明,该阵列传感器的最小可测量直裂纹尺寸可达到 10 mm×1 mm×0.1 mm (长×宽×深),对裂纹参数的测量结果的误差率均在 5% 以内,检测裂纹时的最大灵敏度可达 150 MHz/mm。该传感器具有体积小、制作成本低、检测范围大、无损测量等优点。

参考文献

[1] 李崇,柴亚南,王彬文,等.大型机身壁板复杂应力场试验技术[J].航空学报,2022,43(6):474-483.
LI CH, CHAI Y N, WANG B W, et al. Complex stress

field test technology of large fuselage wall plate[J]. Journal of Aeronautics, 2022, 43(6):474-483.
[2] 杨延强,朱俊臻,冯辅周,等.涡流脉冲热像对钢轨滚动接触疲劳裂纹表面长度的量化评估研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(9):144-149.
YANG Y Q, ZHU J ZH, FENG F ZH, et al. Quantitative evaluation of surface length of rolling contact fatigue crack in rail by eddy current pulsed thermography[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9):144-149.
[3] 余丽婷,卢超,石文泽,等.基于同步挤压小波和脉冲压缩的钢轨踏面裂纹电磁超声表面波检测方法研究[J].仪器仪表学报,2022,43(11):229-241.
YU L T, LU CH, SHI W Z, et al. Research on electromagnetic ultrasonic surface wave detection method of rail tread crack-based on synchronous extrusion wavelet and pulse compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11):229-241.
[4] PEI T, CHENG F, JIA X D, et al. High-resolution detection of microwave fields on chip surfaces based on

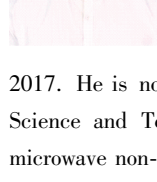
- scanning microwave microscopy [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-6.
- [5] JHA A K, LAMECKI A, MROZOKRSI M, et al. A highly sensitive planar microwave sensor for detecting direction and angle of rotation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(4): 1598-1609.
- [6] SHAO K, LIU S, GAO P, et al. All-polarization-maintained microwave photonic phase detector based on a DP-DMZM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(7): 385-388.
- [7] MIRALA A, FOUDAZI A, AL QASEER M T, et al. Active microwave thermography to detect and locate water ingress [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9774-9783.
- [8] ALSAEDI D, MELNIKOVI A, MUZAFFAR K, et al. A microwave-thermography hybrid technique for breast cancer detection [J]. IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 2021, 6(1): 153-163.
- [9] GHOSH C. Augmentation of sensitivity of FBG sensor using microwave photonics and nonlinear effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(13): 14108-14113.
- [10] DONG H, KANG W, LIU L, et al. Wireless passive sensor based on microstrip antenna for metal crack detection and characterization [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(4): 045103.
- [11] 康文芳,董和磊,刘龙飞,等. 用于金属裂缝检测和测量的微带天线传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2020(2): 20-23.
- KANG W F, DONG H L, LIU L F, et al. Microstrip antenna sensor for metal crack detection and measurement [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2020 (2): 20-23.
- [12] ZHAI H, JIANG D, XUAN X, et al. High-sensitivity internal crack detection antenna sensor based on metamaterial [C]. 2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2023: 1-3.
- [13] RAHMAN M S, GAYA S M, ABOU-KHOUSA M A. Non-destructive testing and evaluation of surface-breaking cracks using microwave planar resonator probe [C]. 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). IEEE, 2022: 552-556.
- [14] ALBISHI A M, RAMAHI O M. Microwaves-based high sensitivity sensors for crack detection in metallic materials [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5): 1864-1872.
- [15] PANG Q, DONG G, YANG X. Metal crack detection sensor based on microstrip antenna [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8375-8384.
- [16] NOROUZI M, MASOUMI N, JAHED H. Nondestructive phase variation-based chipless sensing methodology for metal crack monitoring [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [17] SURESH S, CHAKARAVARTHI G. Surface crack characterization of aluminum specimen using passive wireless RFID based tag antenna sensor [C]. 2022 URSI Regional Conference on Radio Science (USRI-RCRS). IEEE, 2022: 1-4.
- [18] 李焕,董和磊,卫凯龙. 微型谐振式天线的阻抗匹配设计与优化 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 349-354, 360.
- LI H, DONG H L, WEI K L. Impedance matching design and optimization of micro resonant antenna [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(4): 349-354, 360.

作者简介



江正峰, 2017 年于南昌航空大学取得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为微波无损检测。

E-mail: j13767462654@163.com

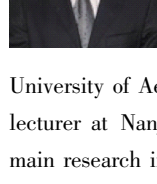


Jiang Zhengfeng received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2017. He is now a M. Sc. candidate at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes microwave non-destructive testing.



高尚 (通信作者), 2017 年于南京航空航天大学取得博士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: shang.gao@njust.edu.cn



Gao Shang (Corresponding author), received a Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2017. He is now a lecturer at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes structural health monitoring.



江剑, 分别于 1996 年和 1999 年获得南京理工大学学士和硕士学位, 现为南京理工大学副教授, 主要研究方向为测控技术与智能仪器。

E-mail: jiangji@njust.edu.cn

Jiang Jian received his B. Sc. and M. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1996 and 1999, respectively. He is now an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include measurement and control technology and intelligent instruments.