



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113465491 B

(45) 授权公告日 2022. 05. 20

(21) 申请号 202110748256.0

G06K 7/10 (2006.01)

(22) 申请日 2021.07.01

G06K 19/07 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113465491 A

(43) 申请公布日 2021.10.01

(73) 专利权人 四川大学

地址 610041 四川省成都市武侯区一环路
南一段24号

(56) 对比文件

周凯等.贴片天线传感器平面二维应变测量
方法研究.《仪器仪表学报》.2018,第39卷(第1
期),第136-143页.

审查员 郑俊

(72) 发明人 伍剑波 张目超 邱锦川 兰雅雯

(74) 专利代理机构 北京正华智诚专利代理事务
所(普通合伙) 11870

专利代理师 何凡

(51) Int.Cl.

G01B 7/16 (2006.01)

G01L 1/00 (2006.01)

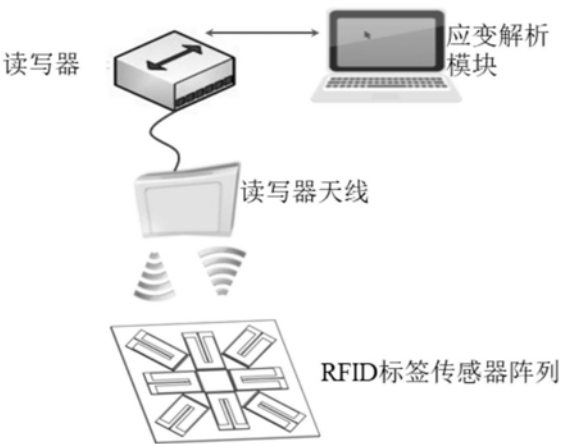
权利要求书4页 说明书10页 附图3页

(54) 发明名称

基于小型化标签传感器阵列的应变传感监
测系统和方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统和方法,属于结构健康监测和RFID无损检测技术领域,所述系统包括读写器、RFID标签传感器阵列以及应变解析模块;所述RFID标签传感器阵列的信号输出端通过读写器天线与读写器的信号输入端通过无线射频通信连接;所述读写器的信号输出端与应变解析模块的信号输入端通过RJ45网口或WIFI双向通信连接;所述RFID标签传感器阵列包括若干个标签传感器,用于实现被测金属结构表面承受应力大小、方向以及分布区域的无源、无线和大范围检测;本发明采用应变传感检测方法简便易测,通过小型化标签传感器阵列的方式解决了金属结构应变大小、方向和分布区域检测的问题。



1. 一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在于,包括读写器、RFID标签传感器阵列以及应变解析模块;

所述RFID标签传感器阵列的信号输出端通过读写器天线与读写器的信号输入端通过无线射频通信连接;所述读写器的信号输出端与应变解析模块的信号输入端通过RJ45网口或WIFI双向通信连接;

所述RFID标签传感器阵列包括若干个标签传感器,用于实现被测金属结构表面受应力大小、方向以及应力分布区域的无源、无线和大范围检测;

各所述标签传感器均包括贴片天线和超高频射频识别芯片(4);

所述贴片天线包括金属辐射贴片(1)、若干个短路过孔(2)、短路短截线(3)、介质基板(5)以及金属接地板(6);

所述金属辐射贴片(1)、短路短截线(3)以及射频识别芯片(4)均设于介质基板(5)上侧;所述金属接地板(6)设于介质基板(5)的下侧;所述若干个短路过孔(2)排成一行穿设于介质基板(5)一端,并分别连接金属辐射贴片(1)的一端以及金属接地板(6);所述金属辐射贴片(1)另一端的中部与超高频射频识别芯片(4)的一端焊接;所述超高频射频识别芯片(4)的另一端与短路短截线(3)的一端连接;所述短路短截线(3)的另一端与金属接地板(6)连接;

其具体过程为:

将方向分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 以及 90° 的应力分别施加至粘贴在与被测金属结构材料相同的金属平板上的标签传感器,并分别记录受到不同角度应力的强度及其对应的谐振频率;

根据不同角度应力的强度及其对应的谐振频率利用最小二乘法利用应变解析模块分别获取标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B;

根据灵敏度A大于灵敏度B,将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成RFID标签传感器阵列;

使用砂纸在被测金属结构表面呈圆弧状打磨,除去被测金属结构表面的油漆和锈斑;

将被测金属结构待粘贴标签传感器部位进行脱脂和清洗,并在清洗完成后对标签传感器粘贴处划线;

利用粘合剂将RFID标签传感器阵列粘贴至设定部位并按压确认;

利用读写器的频率扫描和功率扫描向各标签传感器提供射频能量场,并获取标签传感器工作频率内最小激活功率作为各标签传感器初始谐振频率,且记录各标签传感器识别码和其对应标签传感器粘贴位置;

对被测金属结构施加应力使标签传感器发生频率偏移,并利用读写器的频率扫描和功率扫描再次获取各标签传感器的谐振频率;

根据再次获取各标签传感器的谐振频率和各标签传感器初始谐振频率作差,得到各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量;

比较各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量,得到各RFID标签传感器阵列单元谐振频率偏移量最大处的第一标签传感器(7)与第二标签传感器(8)的谐振频率偏移量;

根据获取的标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B、各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量以及第一标签传感器(7)与第二标签传感器(8)的谐振频率偏移量,通

过应变解析模块得到被测金属结构所受主应力大小、方向以及位置分布区域。

2. 根据权利要求1所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述读写器通过无线射频通信获取标签传感器谐振频率的偏移量;

所述RFID标签传感器阵列采用无源、无线和非接触式的应变检测方式,且由所述读写器射频场提供能量。

3. 根据权利要求2所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述贴片天线的馈电方式为短路短截线馈电,若干个排成一列的短路过孔(2)作为短路墙,将贴片天线的尺寸由二分之一波长减小到四分之一波长。

4. 根据权利要求1所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述标签传感器尺寸为 $27\text{mm} \times 47.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$;

所述金属辐射贴片(1)、短路短截线(3)以及金属接地板(6)均采用厚度为 0.035mm 铜箔片;

所述短路过孔(2)均为 0.4mm 直径的金属过孔;

所述介质基板(5)采用FR-4耐燃材料等级且介电常数为4.6的基板。

5. 根据权利要求2所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述标签传感器采用粘接的方式与被测金属结构表面连接;

所述被测金属结构承受应力发生形变时,以效率 η 将形变传输至标签传感器,导致所述标签传感器中金属辐射贴片(1)、短路过孔(2)、短路短截线(3)以及介质基板(5)发生形变,且改变所述贴片天线阻抗参数,进而改变标签传感器的谐振频率。

6. 根据权利要求5所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述标签传感器的谐振频率 f_{res} 表达式如下:

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{\text{re}}}} \cdot \frac{1}{L_e + \Delta L_{\text{oc}}}$$

$$\epsilon_{\text{re}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 10h/W_e}}$$

$$\Delta L_{\text{oc}} = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{re}} + 0.3)(\frac{W_e}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{\text{re}} - 0.258)(\frac{W_e}{h} + 0.813)}$$

其中, c 表示光速, ϵ_{re} 表示有效介电常数, L_e 表示金属辐射贴片(1)的长度, ΔL_{oc} 表示补偿长度, ϵ_r 表示介电常数, h 表示介质基板(5)厚度, W_e 表示金属辐射贴片(1)的宽度。

7. 根据权利要求6所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,其特征在在于,所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后,由于泊松效应 ν 存在,当 $\nu_p = \nu_s = \nu$ 时, W'_e 与 h' 的比值 W'_e/h' 为常数,有效介电常数 ϵ_{re} 恒定不变,补偿长度 ΔL_{oc} 与 h 比例固定,则所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后的谐振频率 f_{resL} 表达式如下:

$$f_{\text{resL}} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{\text{re}}}} \cdot \frac{1}{L'_e + \Delta L_{\text{oc}}} = \frac{C_1}{L'_e + C_2 h'} = \frac{C_1}{L_e(1 + \epsilon_L) + C_2(1 - \nu_s \epsilon_L)h}$$

$$C_1 = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

$$C_2 = 0.412 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{W'_e}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{W'_e}{h} + 0.813 \right)}$$

$$L'_e = L_e (1 + \epsilon_L)$$

$$W'_e = (1 - \nu_p \epsilon_L) W_e$$

$$h' = (1 - \nu_s \epsilon_L) h$$

其中, L'_e 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片 (1) 的长度, W'_e 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片 (1) 的宽度, h' 表示沿长度方向的形变后介质基板 (5) 的厚度, ν_p 表示金属辐射贴片 (1) 的泊松比, ν_s 表示介质基板 (5) 的泊松比, ϵ_L 表示标签传感器沿长度方向的形变, C_1 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 的代数式, C_2 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 以及 W'_e 与 h' 的比值的代数式。

8. 根据权利要求7所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统, 其特征在于, 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ϵ_L 的谐振频率 $f_{resL}(\epsilon_L)$ 比值表达式如下:

$$\frac{\Delta f}{f_{resL}(\epsilon_L)} = \frac{f_{resL}(\epsilon_L) - f_{resL}(0)}{f_{resL}(\epsilon_L)} = -\frac{L_e - \nu C_2 h}{L_e + C_2 h} \epsilon_L$$

$$C_2 = 0.412 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{W'_e}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{W'_e}{h} + 0.813 \right)}$$

其中, C_2 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 以及 W'_e 与 h' 的比值的代数式, $f_{resL}(\epsilon_L)$ 表示关于 ϵ_L 的谐振频率, $f_{resL}(0)$ 表示无长度方向形变的谐振频率;

所述标签传感器沿宽度方向形变 ϵ_w 后, 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ϵ_w 的谐振频率 $f_{resW}(\epsilon_w)$ 比值表达式如下:

$$\frac{\Delta f}{f_{resW}(\epsilon_w)} = \frac{f_{resW}(\epsilon_w) - f_{resW}(0)}{f_{resW}(\epsilon_w)} = \nu \epsilon_w$$

其中, $f_{resW}(\epsilon_w)$ 表示关于 ϵ_w 的谐振频率, $f_{resW}(0)$ 表示无宽度方向形变的谐振频率。

9. 根据权利要求8所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统, 其特征在于, 所述标签传感器谐振频率偏移量分别与其长度方向的形变和其宽度方向的形变呈线性关系, 且其长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度; 根据所述标签传感器长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度, 将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成RFID标签传感器阵列。

10. 一种如权利要求1-9任一所述的基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统的监测方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

S1、将方向分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 以及 90° 的应力分别施加至粘贴在与被测

金属结构材料相同的金属平板上的标签传感器,并分别记录受到不同角度应力的强度及其对应的谐振频率;

S2、根据不同角度应力的强度及其对应的谐振频率利用最小二乘法利用应变解析模块分别获取标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B;

S3、根据灵敏度A大于灵敏度B,将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成RFID标签传感器阵列;

S4、使用砂纸在被测金属结构表面呈圆弧状打磨,除去被测金属结构表面的油漆和锈斑;

S5、将被测金属结构待粘贴标签传感器部位进行脱脂和清洗,并在清洗完成后对标签传感器粘贴处划线;

S6、利用粘合剂将RFID标签传感器阵列粘贴至设定部位并按压确认;

S7、利用读写器的频率扫描和功率扫描向各标签传感器提供射频能量场,并获取标签传感器工作频率内最小激活功率作为各标签传感器初始谐振频率,且记录各标签传感器识别码和其对应标签传感器粘贴位置;

S8、对被测金属结构施加应力使标签传感器发生频率偏移,并利用读写器的频率扫描和功率扫描再次获取各标签传感器的谐振频率;

S9、根据步骤S8中再次获取各标签传感器的谐振频率和步骤S7中各标签传感器初始谐振频率作差,得到各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量;

S10、比较各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量,得到各RFID标签传感器阵列单元谐振频率偏移量最大处的第一标签传感器(7)与第二标签传感器(8)的谐振频率偏移量;

S11、根据步骤S2中获取的标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B、各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量以及第一标签传感器(7)与第二标签传感器(8)的谐振频率偏移量,通过应变解析模块得到被测金属结构所受主应力大小、方向以及位置分布区域。

基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统和方法

技术领域

[0001] 本发明属于结构健康监测技术及RFID无损检测技术领域,尤其涉及一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统和方法。

背景技术

[0002] 应力和应力集中的存在会对结构或构件的机械性能、抗腐蚀以及抗疲劳特性等性能造成非常严重的影响。应力应变检测是预防重大设备或重要结构发生结构性损伤的重要技术手段,广泛应用于各类基础行业中,面对工业的快速发展,大型设备和重要结构的不断增多,其对检测的方式、时间、成本、范围以及精度等提出了一系列更为苛刻的要求。

[0003] 最常用的应变传感器为电阻应变片,这种测试方法采用导线将电阻应变片和应变仪连接,虽然这种方法具有高传输效率和高准确性的优点,但是测试现场需要花费大量精力完成导线的搬运、布置和连接等工作,最终导致测试耗时长、效率下降、灵活性不高等。

[0004] 基于光纤的应变传感器因其紧凑的尺寸、重量轻、可远程访问、多路复用以及抗电磁干扰能力也成为一种有效的应变监测手段。但光纤传感器需要使用昂贵的解析设备且应变测量范围有限和易损坏性等固有缺点仍未解决。

[0005] 具有嵌入式微处理器和无线通信功能的无线应变传感器节点的出现解决了复杂监测环境下的布线问题,提高了应变测试系统的适应性。但是这些监测节点大多需要电池才可以工作,使用寿命取决于电池电量,增加了系统的维护成本。

[0006] 现有的应力应变无损检测技术因其成本高、有源有线、结构复杂、过程繁琐以及维护困难等缺点,无法应用于飞机蒙皮和风机叶片等含有大平面金属结构的应力应变监测中,亟需开发一种解决大面积金属结构表面应力应变监测问题的技术手段。

发明内容

[0007] 针对现有技术中的上述不足,本发明提供一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统和方法,通过小型化RFID标签传感器阵列的方式解决了金属结构应变大小、方向和分布区域检测的问题。

[0008] 为了达到上述发明目的,本发明采用的技术方案为:

[0009] 本发明提供一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统,包括读写器、RFID标签传感器阵列以及应变解析模块;

[0010] 所述RFID标签传感器阵列的信号输出端通过读写器天线与读写器的信号输入端通过无线射频通信连接;所述读写器的信号输出端与应变解析模块的信号输入端通过RJ45网口或WIFI双向通信连接;

[0011] 所述RFID标签传感器阵列包括若干个标签传感器,用于实现被测金属结构表面受应力大小、方向以及应力分布区域的无源、无线和大范围检测;

[0012] 各所述标签传感器均包括贴片天线和超高频射频识别芯片;

[0013] 所述贴片天线包括金属辐射贴片、若干个短路过孔、短路短截线、介质基板以及金

属接地板；

[0014] 所述金属辐射贴片、短路短截线以及射频识别芯片均设于介质基板上侧；所述金属接地板设于介质基板的下侧；所述若干个短路过孔排成一行穿设于介质基板一端，并分别连接金属辐射贴片的一端以及金属接地板；所述金属辐射贴片另一端的中部与超高频射频识别芯片的一端焊接；所述超高频射频识别芯片的另一端与短路短截线的一端连接；所述短路短截线的另一端与金属接地板连接。

[0015] 本发明的有益效果为：本发明具备低成本、无源无线、维护方便以及集成度高等优势，提供了一种用于应力应变感测的短路短截线馈电微带贴片天线，将多个标签按照特定规律布置，本发明提供的读写器通过频率扫描和功率扫描就可获取金属结构所承受应变的大小、方向和分布区域，利用小型化RFID标签传感器阵列的应变传感监测系统可实时获取金属结构表面应力应变的分布情况，为设备或结构的维护、更换和使用提供重要的数据支撑，本发明提供的贴片天线工作于超高频频段，使用具备频率扫描、功率扫描的读写器即可完成应力的检测，相比于其它发明采用号角天线加网络分析仪测试和有线探针测试的手段，检测成本更低，更易于实现金属结构表面大范围应力检测。

[0016] 进一步地，所述读写器通过无线射频通信获取标签传感器谐振频率的偏移量；

[0017] 所述RFID标签传感器阵列采用无源、无线和非接触式的应变检测方式，且由所述读写器射频场提供能量。

[0018] 采用上述进一步方案的有益效果为：所述读写器通过无线的方式获取标签传感器谐振频率的改变量，又因标签传感器工作过程中无需外接其它电源，标签传感器和读写器之间的信息传递采用调制之后的数字信号，能够一定程度上消除环境等其它因素造成的噪声干扰。

[0019] 进一步地，所述贴片天线的馈电方式为短路短接线馈电，若干个排成一行的短路过孔作为短路墙，将贴片天线的尺寸由二分之一波长减小到四分之一波长。

[0020] 采用上述进一步方案的有益效果为：本发明提供的贴片天线利用短路短截线馈电技术、天线镜像、PIFA原理实现了天线的小型化，且天线的增益较高，相比较于常见天线，体积减小约45~50%，实现了贴片天线的小型化。

[0021] 进一步地，所述标签传感器尺寸为 $27\text{mm} \times 47.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ ；

[0022] 所述金属辐射贴片、短路短截线以及金属接地板均采用厚度为0.035mm铜箔片；

[0023] 所述短路过孔均为0.4mm直径的金属过孔；

[0024] 所述介质基板采用FR-4耐燃材料等级且介电常数为4.6的基板。

[0025] 采用上述进一步方案的有益效果为：本发明提供的标签传感器采用普通电路板使用的FR4介质基板，大大降低了标签天线的制作成本。

[0026] 进一步地，所述标签传感器采用粘接的方式与被测金属结构表面连接；

[0027] 所述被测金属结构承受应力发生形变时，以效率 η 将形变传输至标签传感器，导致所述标签传感器中金属辐射贴片、短路过孔、短路短截线以及介质基板发生形变，且改变所述贴片天线阻抗参数，进而改变标签传感器的谐振频率。

[0028] 采用上述进一步方案的有益效果为：通过标签传感器谐振频率的改变分析被测金属结构所受应力。

[0029] 进一步地，所述标签传感器的谐振频率 f_{res} 表达式如下：

$$[0030] \quad f_{res} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{re}}} \cdot \frac{1}{L_e + \Delta L_{oc}}$$

$$[0031] \quad \epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 10h/W_e}}$$

$$[0032] \quad \Delta L_{oc} = 0.412h \frac{(\epsilon_{re} + 0.3)(\frac{W_e}{h} + 0.264)}{(\epsilon_{re} - 0.258)(\frac{W_e}{h} + 0.813)}$$

[0033] 其中, c 表示光速, ϵ_{re} 表示有效介电常数, L_e 表示金属辐射贴片的长度, ΔL_{oc} 表示补偿长度, ϵ_r 表示介电常数, h 表示介质基板厚度, W_e 表示金属辐射贴片的宽度。

[0034] 采用上述进一步方案的有益效果为: 提供标签传感器谐振频率计算方式。

[0035] 进一步地, 所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后, 由于泊松效应 ν 存在, 当 $\nu_p = \nu_s = \nu$ 时, W_e' 与 h' 的比值 W_e'/h' 为常数, 有效介电常数 ϵ_{re} 恒定不变, 补偿长度 ΔL_{oc} 与 h 比例固定, 则所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后的谐振频率 f_{resL} 表达式如下:

$$[0036] \quad f_{resL} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{re}}} \cdot \frac{1}{L_e' + \Delta L_{oc}} = \frac{C_1}{L_e' + C_2 h'} = \frac{C_1}{L_e(1 + \epsilon_L) + C_2(1 - \nu_s \epsilon_L)h}$$

$$[0037] \quad C_1 = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

$$[0038] \quad C_2 = 0.412 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3)(\frac{W_e'}{h'} + 0.264)}{(\epsilon_{re} - 0.258)(\frac{W_e'}{h'} + 0.813)}$$

$$[0039] \quad L_e' = L_e(1 + \epsilon_L)$$

$$[0040] \quad W_e' = (1 - \nu_p \epsilon_L) W_e$$

$$[0041] \quad h' = (1 - \nu_s \epsilon_L) h$$

[0042] 其中, L_e' 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片的长度, W_e' 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片的宽度, h' 表示沿长度方向的形变后介质基板的厚度, ν_s 表示介质基板的泊松比, ν_p 表示金属辐射贴片的泊松比, ϵ_L 表示标签传感器沿长度方向的形变, C_1 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 的代数式, C_2 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 以及 W_e' 与 h' 的比值的代数式。

[0043] 采用上述进一步方案的有益效果为: 提供受到应力标签传感器谐振频率变化计算表达式。

[0044] 进一步地, 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ϵ_L 的谐振频率 $f_{resL}(\epsilon_L)$ 比值表达式如下:

$$[0045] \quad \frac{\Delta f}{f_{resL}(\epsilon_L)} = \frac{f_{resL}(\epsilon_L) - f_{resL}(0)}{f_{resL}(\epsilon_L)} = -\frac{L_e - \nu C_2 h}{L_e + C_2 h} \epsilon_L$$

$$[0046] \quad C_2 = 0.412 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3) \left(\frac{W_e'}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{re} - 0.258) \left(\frac{W_e'}{h} + 0.813 \right)}$$

[0047] 其中, C_2 表示关于有效介电常数 ϵ_{re} 以及 W_e' 与 h' 的比值的代数式, $f_{resL}(\epsilon_L)$ 表示关于 ϵ_L 的谐振频率, $f_{resL}(0)$ 表示无长度方向形变的谐振频率;

[0048] 所述标签传感器沿宽度方向形变 ϵ_w 后, 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ϵ_w 的谐振频率 $f_{resW}(\epsilon_w)$ 比值表达式如下:

$$[0049] \quad \frac{\Delta f}{f_{resW}(\epsilon_w)} = \frac{f_{resW}(\epsilon_w) - f_{resW}(0)}{f_{resW}(\epsilon_w)} = v\epsilon_w$$

[0050] 其中, $f_{resW}(\epsilon_w)$ 表示关于 ϵ_w 的谐振频率, $f_{resW}(0)$ 表示无宽度方向形变的谐振频率。

[0051] 采用上述进一步方案的有益效果为: 提供标签传感器频率偏移量与其长度方向形变与宽度方向受到应力形变的计算表达式。

[0052] 进一步地, 所述标签传感器谐振频率偏移量分别与其长度方向的形变和其宽度方向的形变呈线性关系, 且其长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度; 根据所述标签传感器长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度, 将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成 RFID 标签传感器阵列。

[0053] 采用上述进一步方案的有益效果为: 标签传感器谐振频率偏移量与其长度方向以及宽度方向受到应力产生形变灵敏度进行比较, 通过比较, 采用灵敏度更高的长度方向施加应力进行测量, 并采用夹角小于等于 45° 时, 测量结果更准确。

[0054] 本发明提供一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测方法, 包括如下步骤:

[0055] S1、将方向分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 以及 90° 的应力分别施加至粘贴在与被测金属结构材料相同的金属平板上的标签传感器, 并分别记录受到不同角度应力的强度及其对应的谐振频率;

[0056] S2、根据不同角度应力的强度及其对应的谐振频率利用最小二乘法利用应变解析模块分别获取标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度 A 和 B;

[0057] S3、根据灵敏度 A 大于灵敏度 B, 将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成 RFID 标签传感器阵列;

[0058] S4、使用砂纸在被测金属结构表面呈圆弧状打磨, 除去被测金属结构表面的油漆和锈斑;

[0059] S5、将被测金属结构待粘贴标签传感器部位进行脱脂和清洗, 并在清洗完成后对标签传感器粘贴处划线;

[0060] S6、利用粘合剂将 RFID 标签传感器阵列粘贴至设定部位并按压确认;

[0061] S7、利用读写器的频率扫描和功率扫描向各标签传感器提供射频能量场, 并获取标签传感器工作频率内最小激活功率作为各标签传感器初始谐振频率, 且记录各标签传感器识别码和其对应标签传感器粘贴位置;

[0062] S8、对被测金属结构施加应力使标签传感器发生频率偏移, 并利用读写器的频率

扫描和功率扫描再次获取各标签传感器的谐振频率；

[0063] S9、根据步骤S8中再次获取各标签传感器的谐振频率和步骤S7中各标签传感器初始谐振频率作差，得到各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量；

[0064] S10、比较各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量，得到各RFID标签传感器阵列单元谐振频率偏移量最大处的第一标签传感器与第二标签传感器的谐振频率偏移量；

[0065] S11、根据步骤S2中获取的标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B、各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量以及第一标签传感器与第二标签传感器的谐振频率偏移量，通过应变解析模块得到被测金属结构所受主应力大小、方向以及位置分布区域。

附图说明

[0066] 图1为本发明实施例中基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统和方法图。

[0067] 图2为本发明实施例中标签传感器结构图。

[0068] 图3为本发明实施例中RFID标签传感器阵列图。

[0069] 图4为本发明实施例中RFID标签传感器阵列单元图。

[0070] 图5为本发明实施例中RFID标签传感器阵列单元夹角与受应力频率偏移量关系图。

[0071] 图6为本发明实施例中提供标签传感器尺度标注图。

[0072] 其中：1、金属辐射贴片；2、短路过孔；3、短路短接线；4、超高频射频识别芯片；5、介质基板；6、金属接地板；7、第一标签传感器以及8、第二标签传感器。

具体实施方式

[0073] 下面对本发明的具体实施方式进行描述，以便于本技术领域的技术人员理解本发明，但应该清楚，本发明不限于具体实施方式的范围，对本技术领域的普通技术人员来讲，只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内，这些变化是显而易见的，一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

[0074] 如图1和图2所示，在本发明的一个实施例中，本发明提供一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感监测系统，包括读写器、RFID标签传感器阵列以及应变解析模块；

[0075] 所述RFID标签传感器阵列的信号输出端通过读写器天线与读写器的信号输入端通过无线射频通信连接；所述读写器的信号输出端与应变解析模块的信号输入端通过RJ45网口或WIFI双向通信连接；

[0076] 所述RFID标签传感器阵列包括若干个标签传感器，用于实现被测金属结构表面受应力大小、方向以及应力分布区域的无源、无线和大范围检测；

[0077] 各所述标签传感器均包括贴片天线和超高频射频识别芯片4；

[0078] 所述贴片天线包括金属辐射贴片1、若干个短路过孔2、短路短截线3、介质基板5以及金属接地板6；

[0079] 所述金属辐射贴片1、短路短截线3以及射频识别芯片4均设于介质基板5上侧；所述金属接地板6设于介质基板5的下侧；所述若干个短路过孔2排成一行穿设于介质基板5一端，并分别连接金属辐射贴片1的一端以及金属接地板6；所述金属辐射贴片1另一端的中部

与超高频射频识别芯片4的一端焊接;所述超高频射频识别芯片4的另一端与短路短截线3的一端连接;所述短路短截线3的另一端与金属接地板6连接。

[0080] 所述读写器通过无线射频通信获取标签传感器谐振频率的偏移量;

[0081] 所述RFID标签传感器阵列采用无源、无线和非接触式的应变检测方式,且由所述读写器射频场提供能量。

[0082] 所述贴片天线的馈电方式为短路短接线馈电,若干个排成一列的短路过孔2作为短路墙,将贴片天线的尺寸由二分之一波长减小到四分之一波长。

[0083] 所述标签传感器尺寸为 $27\text{mm} \times 47.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$;

[0084] 所述金属辐射贴片1、短路短截线3以及金属接地板6均采用厚度为 0.035mm 铜箔片;

[0085] 所述短路过孔2均为 0.4mm 直径的金属过孔;

[0086] 所述介质基板5采用FR-4耐燃材料等级且介电常数为4.6的基板。

[0087] 所述标签传感器采用粘接的方式与被测金属结构表面连接;

[0088] 所述被测金属结构承受应力发生形变时,以效率 η 将形变传输至标签传感器,导致所述标签传感器中金属辐射贴片1、短路过孔2、短路短截线3以及介质基板5发生形变,且改变所述贴片天线阻抗参数,进而改变标签传感器的谐振频率。

[0089] 所述标签传感器的谐振频率 f_{res} 表达式如下:

$$[0090] \quad f_{\text{res}} = \frac{c}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}} \cdot \frac{1}{L_e + \Delta L_{\text{oc}}}$$

$$[0091] \quad \varepsilon_{\text{re}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 10h/W_e}}$$

$$[0092] \quad \Delta L_{\text{oc}} = 0.412h \frac{(\varepsilon_{\text{re}} + 0.3)(\frac{W_e}{h} + 0.264)}{(\varepsilon_{\text{re}} - 0.258)(\frac{W_e}{h} + 0.813)}$$

[0093] 其中, c 表示光速, ε_{re} 表示有效介电常数, L_e 表示金属辐射贴片1的长度, ΔL_{oc} 表示补偿长度, ε_r 表示介电常数, h 表示介质基板5厚度, W_e 表示金属辐射贴片1的宽度。

[0094] 所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后,由于泊松效应 ν 存在,当 $\nu_p = \nu_s = \nu$ 时, W_e' 与 h' 的比值 W_e'/h' 为常数,有效介电常数 ε_{re} 恒定不变,补偿长度 ΔL_{oc} 与 h 比例固定,则所述标签传感器受到应力沿长度方向形变后的谐振频率 f_{resL} 表达式如下:

$$[0095] \quad f_{\text{resL}} = \frac{c}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}} \cdot \frac{1}{L_e' + \Delta L_{\text{oc}}} = \frac{C_1}{L_e' + C_2 h'} = \frac{C_1}{L_e(1 + \varepsilon_L) + C_2(1 - \nu_s \varepsilon_L)h}$$

$$[0096] \quad C_1 = \frac{c}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}}$$

$$[0097] \quad C_2 = 0.412 \frac{(\varepsilon_{re} + 0.3)(\frac{W_e'}{h} + 0.264)}{(\varepsilon_{re} - 0.258)(\frac{W_e'}{h} + 0.813)}$$

$$[0098] \quad L_e' = L_e (1 + \varepsilon_L)$$

$$[0099] \quad W_e' = (1 - \nu_p \varepsilon_L) W_e$$

$$[0100] \quad h' = (1 - \nu_s \varepsilon_L) h$$

[0101] 其中, L_e' 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片1的长度, W_e' 表示沿长度方向的形变后金属辐射贴片1的宽度, h' 表示沿长度方向的形变后介质基板5的厚度, ν_s 表示介质基板5的泊松比, ν_p 表示金属辐射贴片1的泊松比, ε_L 表示标签传感器沿长度方向的形变, C_1 表示关于有效介电常数 ε_{re} 的代数式, C_2 表示关于有效介电常数 ε_{re} 以及 W_e' 与 h' 的比值的代数式。

[0102] 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ε_L 的谐振频率 $f_{resL}(\varepsilon_L)$ 比值表达式如下:

$$[0103] \quad \frac{\Delta f}{f_{resL}(\varepsilon_L)} = \frac{f_{resL}(\varepsilon_L) - f_{resL}(0)}{f_{resL}(\varepsilon_L)} = -\frac{L_e - \nu C_2 h}{L_e + C_2 h} \varepsilon_L$$

$$[0104] \quad C_2 = 0.412 \frac{(\varepsilon_{re} + 0.3)(\frac{W_e'}{h} + 0.264)}{(\varepsilon_{re} - 0.258)(\frac{W_e'}{h} + 0.813)}$$

[0105] 其中, C_2 表示关于有效介电常数 ε_{re} 以及 W_e' 与 h' 的比值的代数式, $f_{resL}(\varepsilon_L)$ 表示关于 ε_L 的谐振频率, $f_{resL}(0)$ 表示无长度方向形变的谐振频率;

[0106] 所述标签传感器沿宽度方向形变 ε_w 后, 所述标签传感器谐振频率偏移量 Δf 与关于 ε_w 的谐振频率 $f_{resW}(\varepsilon_w)$ 比值表达式如下:

$$[0107] \quad \frac{\Delta f}{f_{resW}(\varepsilon_w)} = \frac{f_{resW}(\varepsilon_w) - f_{resW}(0)}{f_{resW}(\varepsilon_w)} = \nu \varepsilon_w$$

[0108] 其中, $f_{resW}(\varepsilon_w)$ 表示关于 ε_w 的谐振频率, $f_{resW}(0)$ 表示无宽度方向形变的谐振频率。

[0109] 如图3所示, 所述标签传感器谐振频率偏移量分别与其长度方向的形变和其宽度方向的形变呈线性关系, 且其长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度; 根据所述标签传感器长度方向形变灵敏度大于宽度方向形变灵敏度, 将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成RFID标签传感器阵列。

[0110] 在本发明的一个实施例中, 本发明提供一种基于小型化标签传感器阵列的应变传感器监测方法, 包括如下步骤:

[0111] S1、将方向分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 以及 90° 的应力分别施加至粘贴在与被测金属结构材料相同的金属平板上的标签传感器, 并分别记录受到不同角度应力的强度及其对应的谐振频率;

[0112] S2、根据不同角度应力的强度及其对应的谐振频率利用最小二乘法利用应变解析

模块分别获取标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B;

[0113] S3、根据灵敏度A大于灵敏度B,将若干个相邻标签传感器以长边夹角小于等于 45° 设成RFID标签传感器阵列;

[0114] S4、使用砂纸在被测金属结构表面呈圆弧状打磨,除去被测金属结构表面的油漆和锈斑;

[0115] S5、将被测金属结构待粘贴标签传感器部位进行脱脂和清洗,并在清洗完成后对标签传感器粘贴处划线;

[0116] S6、利用粘合剂将RFID标签传感器阵列粘贴至设定部位并按压确认;

[0117] S7、利用读写器的频率扫描和功率扫描向各标签传感器提供射频能量场,并获取标签传感器工作频率内最小激活功率作为各标签传感器初始谐振频率,且记录各标签传感器识别码和其对应标签传感器粘贴位置;

[0118] S8、对被测金属结构施加应力使标签传感器发生频率偏移,并利用读写器的频率扫描和功率扫描再次获取各标签传感器的谐振频率;

[0119] S9、根据步骤S8中再次获取各标签传感器的谐振频率和步骤S7中各标签传感器初始谐振频率作差,得到各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量;

[0120] S10、比较各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量,得到各RFID标签传感器阵列单元谐振频率偏移量最大处的第一标签传感器7与第二标签传感器8的谐振频率偏移量;

[0121] S11、根据步骤S2中获取的标签传感器长度方向以及宽度方向的灵敏度A和B、各标签传感器识别码对应的谐振频率偏移量以及第一标签传感器7与第二标签传感器8的谐振频率偏移量,通过应变解析模块得到被测金属结构所受主应力大小、方向以及位置分布区域。

[0122] 所述RFID标签传感器阵列单元谐振频率偏移量最大处可确定主要应力的方向和大小。

[0123] 所述各标签传感器识别码和其对应标签传感器粘贴位置一一对应,且标签识别码作为各标签传感器的区别特征,各标签传感器检测信号根据标签传感器识别码进行区别,根据各标签传感器识别码对应谐振频率偏移量可对应其标签传感器粘贴位置,且对应力进行监测。

[0124] 在本发明的另一个实施例中,相邻两个标签传感器长边夹角设为 45° 构成RFID标签传感器阵列,由于标签传感器长度方向形变灵敏度大于其宽度方向灵敏度,标签传感器与被测金属结构所受应力夹角越小,标签传感器的谐振频率偏移量越大,选取谐振频率偏移量最大的两相邻标签传感器可确定应力的方向和大小;

[0125] 设标签传感器长度方向灵敏度和宽度方向灵敏度分别为A和B,被测金属结构受到应力后总形变X,由于泊松效应存在,泊松效应在总形变垂直方向产生应变Y,且X和Y满足以下关系式:

[0126] $Y = -\mu X$

[0127] 其中, μ 表示被测金属结构的泊松比;

[0128] 如图4和图5所示,第一标签传感器7和第二标签传感器8构成RFID标签传感器阵列单元,设应力施加在第一标签传感器7和第二标签传感器8之间产生总形变X,第一标签传感器7长度方向和宽度方向受到应力的形变分别为 $T1_x$ 和 $T1_y$,第二标签传感器8长度方向和

宽度方向受到应力的形变分别为 $T2_x$ 和 $T2_y$,且其满足关系表达式如下:

$$[0129] \quad \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \\ \cos(45^\circ-\alpha) & \sin(45^\circ-\alpha) \\ \sin(45^\circ-\alpha) & \cos(45^\circ-\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T1_x \\ T1_y \\ T2_x \\ T2_y \end{bmatrix}$$

[0130] 其中, α 表示总形变 X 与第一标签传感器7长度方向的夹角,所述夹角 α 大于等于 0° 且小于等于 45° ;

[0131] 所述第一标签传感器7与第二标签传感器8的谐振频率偏移量分别设为 ΔF_1 和 ΔF_2 ,且其满足关系表达式如下:

$$[0132] \quad \begin{bmatrix} T1_x & T1_y \\ T2_x & T2_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \end{bmatrix}$$

[0133] 其中, $T1_x$ 表示第一标签传感器7长度方向受到应力的形变, $T2_x$ 表示第二标签传感器8长度方向受到应力的形变, $T1_y$ 表示第一标签传感器7宽度方向受到应力的形变, $T2_y$ 表示第二标签传感器8宽度方向受到应力的形变,A表示标签传感器长度方向灵敏度,B表示标签传感器宽度方向灵敏度。

[0134] 如图6所示,在本发明的一个实施实例中,按本发明提供方案的尺寸制作贴片天线,并将超高频射频识别芯片焊接至贴片天线上侧,构成标签传感器,且以RFID芯片识别码作为标签传感器编号;

[0135] 所述标签传感器工作频率为超高频段860-960MHz

[0136] 本发明提供方案中标签传感器的各尺度如表一所示:

[0137] 表1

[0138]

序号	尺寸	序号	尺寸(mm)
(1)	1mm	(6)	7mm
(3)	32.6mm	(7)	25mm
(3)	32mm	(8)	27mm
(4)	4.5mm	(9)	40.8mm
(5)	3mm	(10)	47.8mm

[0139] 本发明的有益效果为:

[0140] (1)、本发明提供的贴片天线工作于超高频频段,使用具备频率扫描、功率扫描的读写器即可完成应力的检测,相比于其它发明采用号角天线加网络分析仪测试和有线探针测试的手段,检测成本更低,更易于实现金属结构表面大范围应力检测。

[0141] (2)、本发明提供的贴片天线利用短路短截线馈电技术、天线镜像、PIFA原理实现了天线的小型化,且天线的增益较高,相比较于常见天线,体积减小约45~50%。

[0142] (3)、本发明提供的标签传感器在天线长度和宽度方向具有不同的应力检测灵敏度,且长度方向的归一化灵敏度大于宽度方向的灵敏度,利用标签传感器的这种特点,通过本发明的标签传感器的布置即可实现金属结构表面应力大小、方向和分布区域的大范围检测。

[0143] (4)、本发明提供的标签传感器采用普通电路板使用的FR4介质基板,大大降低了标签天线的制作成本。

[0144] (5)、本发明为分体式阵列传感器结构,不同的标签阵列形式可针对不同的结构,检测更具有灵活性和适应性。

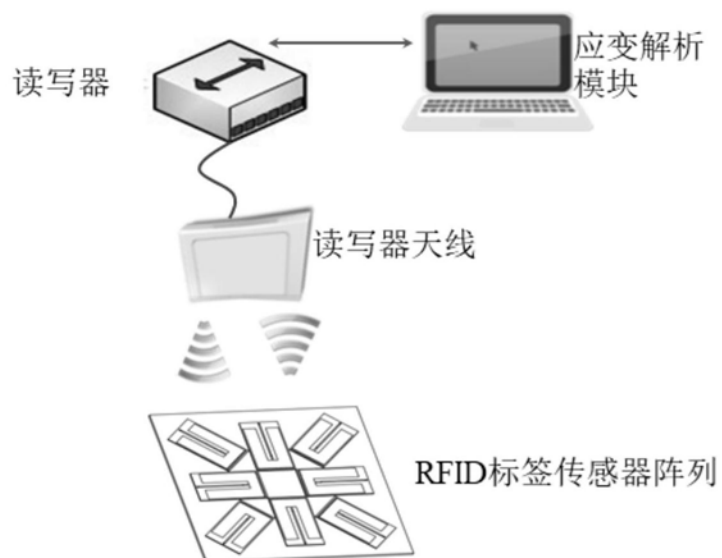


图1

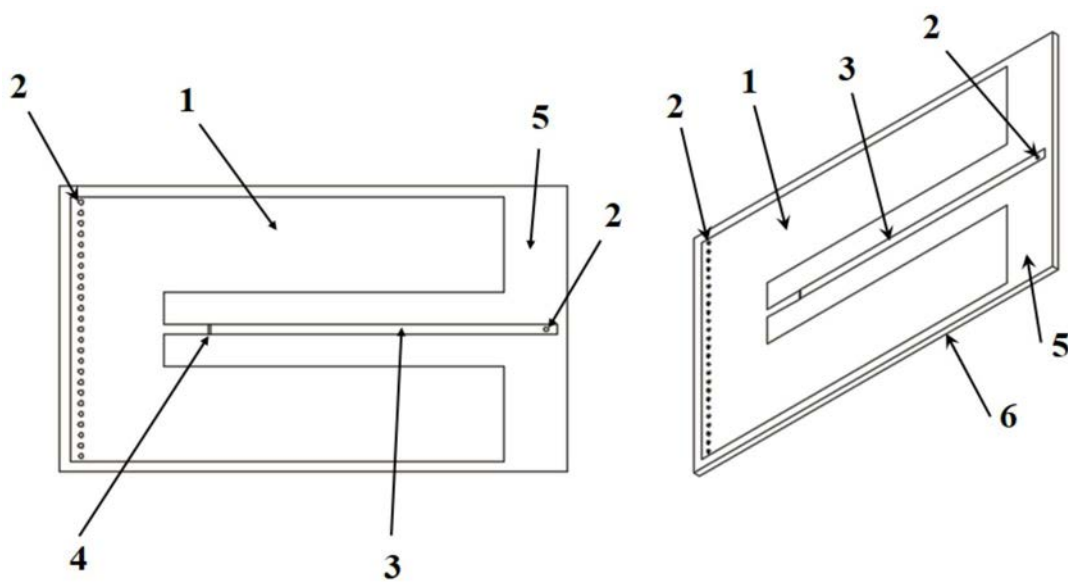


图2

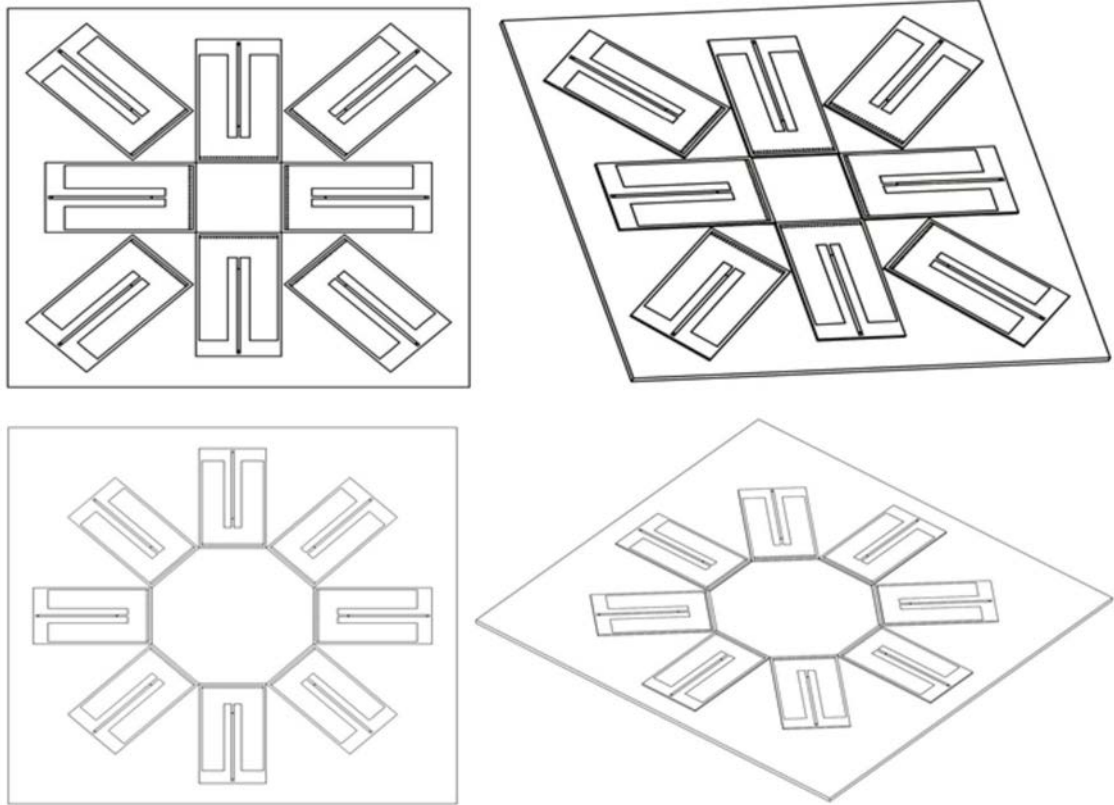


图3

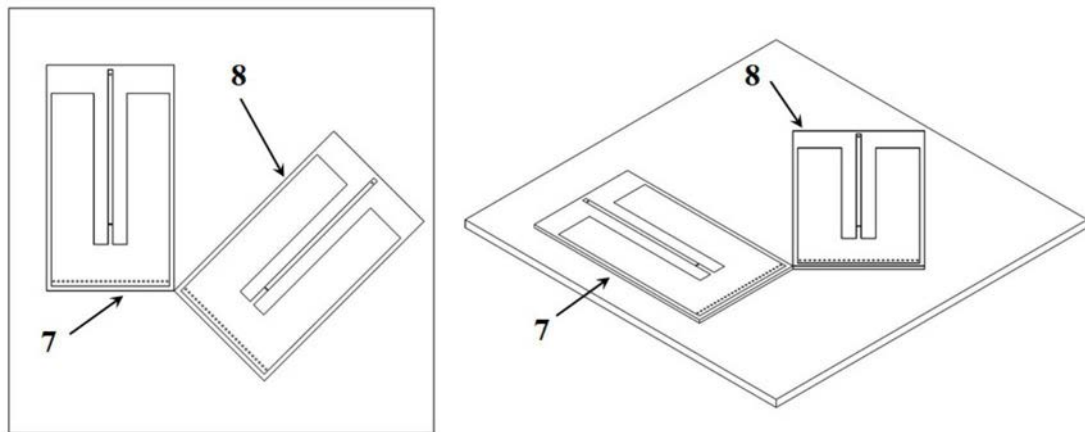


图4

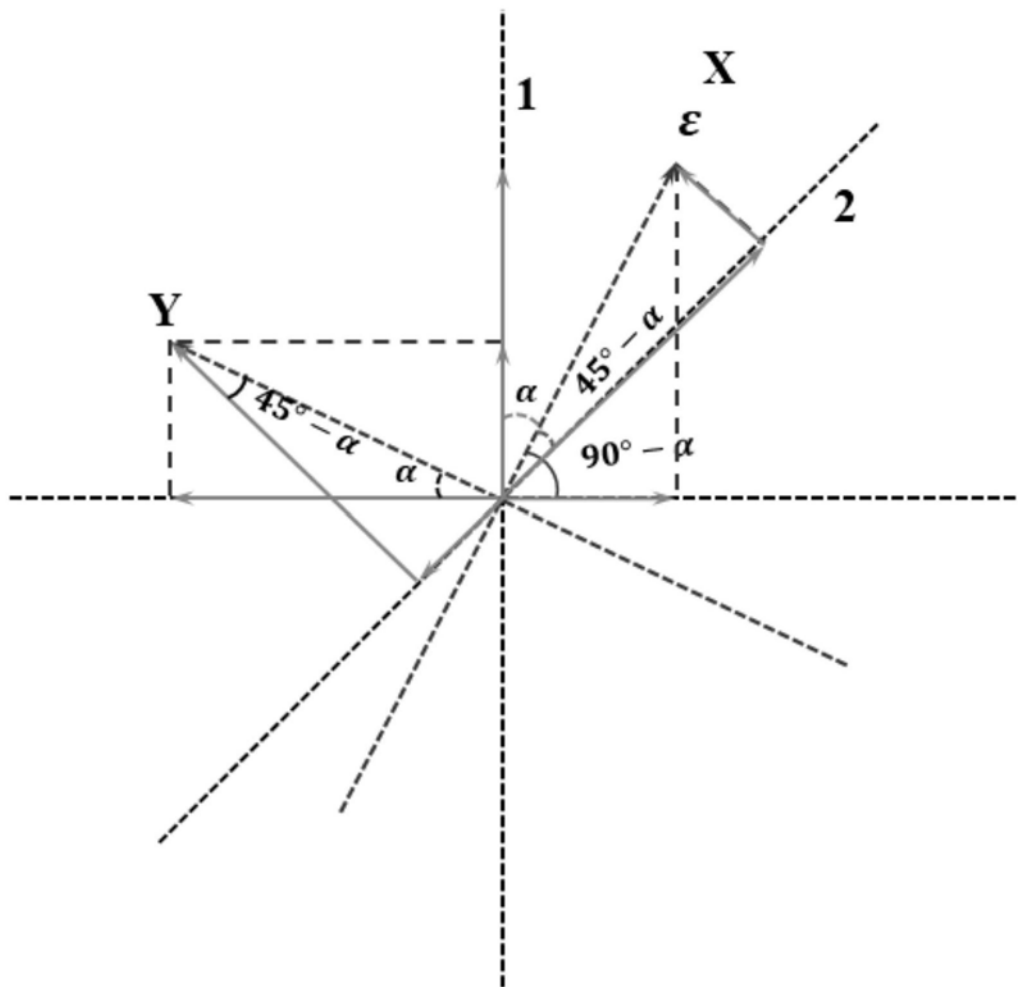


图5

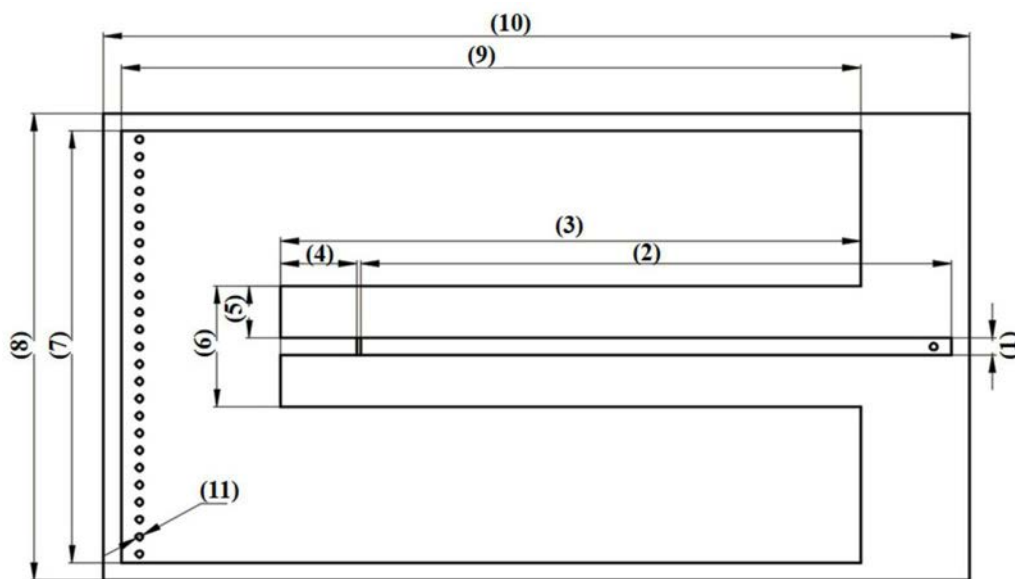


图6