

无源无线应变传感器的模拟与测试

薛松涛^{1,2} 徐康乾¹ 谢丽宇^{1,*} 薛科³ 万国春³

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学工学部建筑学科, 日本 仙台;
3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要 利用射频识别技术(RFID)设计了带芯片的贴片天线传感器以实现无源无线的结构应变监测。通过理论推导和数值模拟证实了贴片天线谐振频率与所受应变有着近似的线性关系,灵敏度系数为天线的初始谐振频率。实际应用中因剪力滞后效应导致天线与试件应变不一致,通过模拟和试验求解传递效率系数进而对传感器的灵敏度系数进行修正。设计拉伸试验,分别将贴片天线以纵向、横向方式粘贴在铝板上,采用无线测试方案测量天线在不同荷载作用下的谐振频率,试验表明,天线的谐振频率与天线长度方向上应变具有良好的线性关系,传感器灵敏度系数的实测值与理论计算值符合较好,可精确地用于应变检测。

关键词 应变传感器 贴片天线 谐振频率 传递效率 灵敏度

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2020.05.016

Passive and Wireless Strain Gauge Based on Patch Antenna: Simulation and Test

XUE Songtao^{1,2} XU Kangqian¹ XIE Liyu^{1,*} XUE Ke³ WAN Guochun³

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai, Japan;

3. Department of Electronic Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract Using radiofrequency identification (RFID) technology, passive and wireless strain gauge with IC chip is proposed based on patch antennas in this paper. Theoretically, the resonant frequency of patch antennas varies with strain of antennas approximately linearly, and the sensitivity coefficient is the initial resonance frequency of antennas bearing no strain. Due to shear lag effect, specimen cannot fully transfer the strain onto the top surface of antennas. Therefore, sensitivity coefficient of strain gauges should be modified by strain transfer efficiency coefficient, which is obtained by both simulation and tests. Finally, the specimen with patch antennas for tension experiments are designed. Using the RFID reader, the resonant frequencies of antennas are measured under different levels of loads. The results show that the resonant frequency of the antennas has linear relationship with its strain, and sensitivity coefficients of strain gauges obtained from experiments are consistent with the calculation. The proposed RFID strain gauge can detect the strain wirelessly with great accuracy.

Keywords strain sensor, folded patch antenna, resonant frequency, transfer efficiency, sensitivity

0 引言

在使用荷载以及环境作用下建筑结构的性能

会逐渐发生退化,因此结构健康监测在近几十年来得到了广泛的发展,用于监测和评估结构的状态^[1]。

在结构健康监测中,应变监测是一个重要的

收稿日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(52078375), 同济大学工程结构服役性能演化与控制教育部重点实验室开放基金(2018KF-4)

作者简介: 薛松涛,男,教授,博士生导师,主要从事结构健康监测与结构振动控制的研究。

* 联系作者: 谢丽宇(1978-),男,副教授,博士生导师,从事智能传感器与结构振动控制的研究。E-mail:liyuxie@tongji.edu.cn

内容,通过监测应变判断结构构件的受力状态,为结构评估提供合理的依据。应变监测中常用的传统应变传感器有电阻应变传感器^[2]、光纤光栅传感器^[3]和弦振式应变传感器^[4]等。这些传统的传感器性能可靠,使用方便,但是需导线为传感器提供电源以及进行数据传输。当大范围布置传感器时,大量的导线使传感系统变得冗杂,并且在灾害发生时容易损坏致使传感系统不能正常工作。

土木工程有其自身的特点,对传感器有着与其他领域的不同要求,需要针对土木工程的特有环境开发出满足需要的传感器^[5]。将健康监测系统应用在大规模的土木工程,为了监测局部的物理量,需要大量的传感器,形成具有分布式传感器的监测系统(distributed sensor-based SHM),要求传感器造价低、可靠性好,这样可以提高传感器空间分布的密度^[6](spatial granularity)。因此,需要寻找一种无须能源供应、可无线传输、耐久性好且价格低廉的传感器,用于结构局部损伤的监测。RFID(Radio Frequency Identification)即射频识别技术可满足这些要求^[7-8],为大规模分布式传感器监测系统的应用提供了可能^[9]。

在RFID系统中,天线起着重要的作用,它是接收和辐射电磁波的装置,必须具有合适的形状、结构和馈电方式。随着进一步的研究,学者们发现天线经历应变时,天线的电学性质(如谐振频率)发生改变,因此天线可同时作为应变传感单元和信息传输单元,实现传感的无源和无线。Yi等^[10,11]开发了一种矩形贴片天线传感器用以检测应变,贴片天线频带较窄,谐振频率易于提取。2017年,薛松涛等^[12]提出了一种不带芯片的矩形贴片天线应变传感器,天线的工作频段为2.45 GHz,通过数值模拟和试验证实了贴片天线可作为可靠的应变感应单元,具有良好的线性,精度可达万分之一个应变,但其传输方式仍采用了同轴线。本文在该研究的基础上,增加了芯片,重新设计了电路^[13],实现了贴片天线应变传感器的无源和无线。

本文设计了一种工作频率为920 MHz的四分之一矩形贴片天线应变传感器。相比于传统电阻应变传感器,天线传感器的厚度尺寸较大,这导致因剪力滞后效应引起的传递效率将不可忽略。本文将采用数值模拟和试验的方法验证该现象并确定传递效率系数,结合理论推导进而给出传感器灵敏度系数的计算公式。最后设计拉伸试验将传

感器灵敏度系数的计算值与实测值相对比,验证天线传感器检测应变性能的可靠性。

1 RFID应变传感系统

RFID是一种利用射频通信实现的非接触式自动识别技术,按照是否需要外部供电分为有源和无源(Passive)两种。如图1(a)所示,基于RFID技术的无源无线应变传感系统由RFID阅读器和RFID天线传感器组成。天线传感器(图1(b))包括贴片天线和IC芯片两部分。其中,贴片天线为应变感应和信息传输单元,由基板、上辐射贴片、下辐射贴片、过孔和匹配线构成;IC芯片为回路的负载,可存储位置等信息。

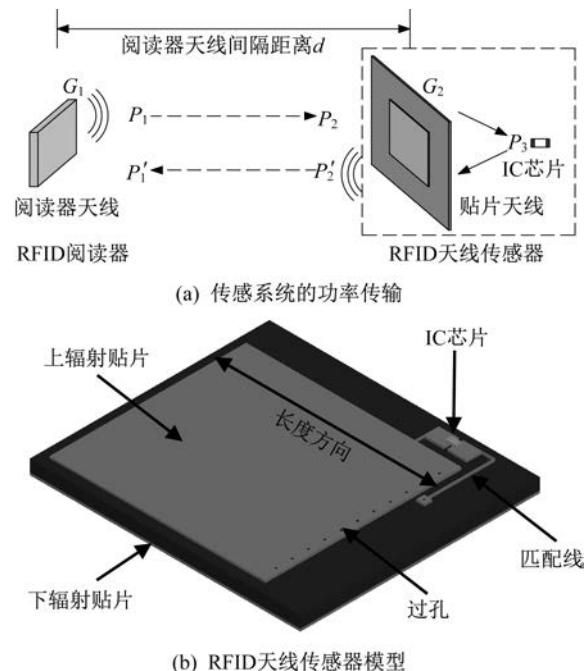


图1 RFID应变传感系统

Fig.1 RFID Strain sensing system

天线传感器与阅读器通过电磁波完成能量的传递以及信息的传输。天线传感器接受电磁波后贴片天线产生电流与负载形成回路,其中在贴片天线中电流的方向即为传感器的长度方向,如图1所示。

该应变传感器是根据贴片天线的谐振频率检测应变。谐振频率是天线的最佳工作频率,即在此频率下RFID系统的功率传输达到最大化。接下来,第1.1节将讨论如何进行贴片天线的设计;第1.2节将对天线的谐振频率与应变的关系进行理论推导;第1.3节将介绍试验中谐振频率测量的原理

与方法。

1.1 RFID 天线设计

对于四分之一波长的矩形贴片天线,其初始谐振频率由下式近似计算^[14]:

$$f_{R0} = \frac{c}{4(L_1 + 2\Delta L_1)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: f_{R0} 为初始谐振频率; c 为真空中光速; L_1 为上辐射贴片的长度; ϵ_r 为基板的相对介电常数; ΔL_1 为考虑介质板效应的补偿介电长度。

依据式(1)对贴片天线进行设计,基板材料选用 RT/duroid[®]5880,相对介电常数为 2.2,尺寸选为 69 mm×61 mm×0.5 mm,上辐射贴片和下辐射贴片均为镀铜层,上辐射贴片尺寸选为 54.9 mm×50 mm×0.1 mm,下辐射贴片尺寸为 69 mm×61 mm×0.1 mm,与基板平面尺寸相同。天线具体尺寸见图 2 与表 1,将尺寸参数带入式(1),计算得天线初始谐振频率为 918.10 MHz。

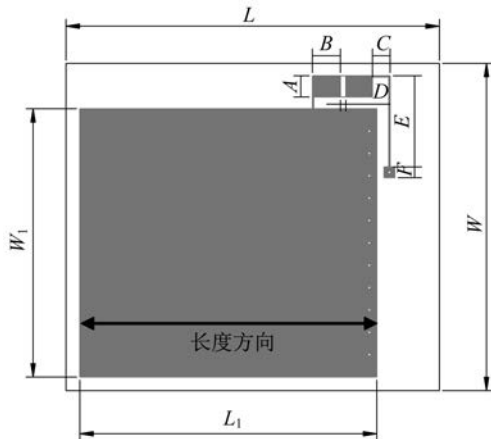


图 2 天线尺寸参数

Fig.2 Dimensions of antenna

表 1 天线具体尺寸

参数	L	W	L_1	W_1	A
尺寸	69	61	54.9	50	3.96
参数	B	C	D	E	F
尺寸	4.93	3	1.02	18	2.5

1.2 应变测量的原理

根据式(1)可知,天线谐振频率 f_R 受上辐射贴片的长度 L_1 和补偿介电长度 ΔL_1 的影响。一般 $L_1 \gg \Delta L_1$,若忽略 ΔL_1 的影响,当贴片天线在长度方向经

历应变 ϵ 时,上辐射贴片的长度将变为 $L_1(1+\epsilon)$,代入式(1)可得对应的谐振频率 f_R :

$$f_R \approx \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_r} L_1(1+\epsilon)} = \frac{f_{R0}}{1+\epsilon} \approx f_{R0}(1-\epsilon) \quad (2)$$

可发现贴片天线的谐振频率 f_R 与其长度方向的应变简化为近似的线性关系,斜率的绝对值为初始谐振频率 f_{R0} 。也即天线的长度方向为传感器的应变感应方向,而因泊松效应引起宽度方向的变形对谐振频率的影响可忽略。因此,通过测量天线的谐振频率变化可推算出天线长度方向所经历的应变变化。

1.3 天线谐振频率的测量

如图 1(a)所示,假阅读器与天线之间无障碍物,由 Friis 自由空间公式可得天线的接收功率 P_2 ^[15]:

$$P_2 = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 \quad (3)$$

式中: P_1 为阅读器发射功率; G_1 为阅读器天线增益; G_2 为贴片天线增益, λ 为阅读器所发射电磁波的波长; d 为阅读器与贴片天线之间的距离; f 为阅读器所发射电磁波的频率,即天线的工作频率。

天线接收来自于阅读器的功率并向负载传输,其中一部分功率被反射而不能被利用,定义反射系数 $\eta(f)$ 为

$$\eta(f) = \frac{P^-}{P^+} = \left| \frac{Z_L - Z_0^*}{Z_L + Z_0} \right|^2 \quad (4)$$

式中: P^- 为反射功率; P^+ 为输入功率; Z_L 为负载阻抗; Z_0 为贴片天线的特性阻抗; Z_0^* 为贴片天线特性阻抗的共轭,其均为天线工作频率的函数。当天线的工作频率等于谐振频率时,天线与芯片的阻抗最佳匹配, $\eta(f)$ 取得最小值,即谐振频率是天线的最佳工作频率。

通过反射系数可得芯片所接收的功率 P_3 为

$$P_3 = P_2 [1 - \eta(f)] = P_1 G_1 G_2 \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 [1 - \eta(f)] \quad (5)$$

功率由芯片再次返回贴片天线时,同样有一部分功率被反射,反射系数同式(4),所返回的功率 P_2' 为

$$P_2' = P_3 [1 - \eta(f)] \quad (6)$$

此时贴片天线作为一个功率为 P_2' 的发射源发射电磁波,类比式(3),阅读器天线接收到的功

率即反射功率 P_1' 为

$$P_1' = P_2' G_1 G_2 \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 = P_3 G_1 G_2 \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 [1 - \eta(f)] \quad (7)$$

芯片作为一个负载,正常工作所需的最小激活功率为 P_{IC} ,其不随天线工作频率 f 改变。在某一频率 f 下,当芯片恰好被激活时,芯片的接收功率为

$$P_3 = P_{IC} \quad (8)$$

将式(8)带入式(5),可得该频率 f 下的阈值发射功率 P_{IS} :

$$P_{IS} = P_{IC} \frac{(4\pi d)^2}{G_1 G_2 c^2} \frac{f^2}{1 - \eta(f)} = F(f) \quad (9)$$

将式(8)带入式(7),对应的阈值反射功率 P_{IS}' 为

$$P_{IS}' = P_{IC} \frac{G_1 G_2 c^2}{(4\pi d)^2} \frac{1 - \eta(f)}{f^2} = F'(f) \quad (10)$$

阅读器天线和贴片天线的增益 G_1 和 G_2 均为一常数,其间距固定时 d 也为定值。当阅读器所发射电磁波的频率 f 改变时,根据函数 $\eta(f)$ 的特性可知,函数 $F(f)$ 有最小值,函数 $F'(f)$ 有最大值,即在某一频率范围内阈值发射功率最小值点和阈值反射功率最大值点对应的频率为天线的谐振频率(图3)。因此,可根据采集的阈值发射功率曲线和阈值反射功率曲线确定天线的谐振频率。

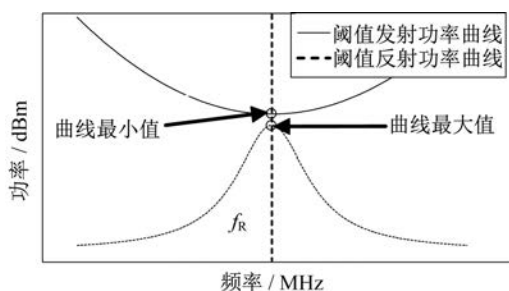


图3 阈值功率曲线示意图

Fig.3 Threshold power curves

2 应变传递效率验证

通过强力胶将RFID天线粘贴在试件表面,进行试件的拉伸试验,由于存在剪力滞后效应,天线上辐射贴片的应变不会达到试件表面应变的大小。本节通过数值模拟及拉伸试验对剪力滞后效

应进行验证,并根据试验结果计算应变的传递效率系数。试件单向拉伸时的拉伸方向定义为纵向,垂直于拉伸的方向为横向,在复杂应力状态下两个主应变方向分别定义为纵向和横向。则纵向传递效率系数 η 可按式(11)计算:

$$\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_s} \quad (11)$$

式中: ϵ_c 为上辐射贴片的纵向应变; ϵ_s 为试件的纵向应变。

横向传递效率系数 η' 的定义类比式(11),为上辐射贴片与试件横向应变的比值。但若天线的主要部件基板与试件的泊松比不同,则会引起纵向传递效率系数与横向传递效率系数的差异。

选用铝板作为拉伸试件,由于所用夹具(WDW-50,济南测试厂)的限制,端部尺寸不得超过3 cm,而粘贴天线的区域不得小于天线最大尺寸6.9 cm,故本试验所用试件模型如图4所示。其中区域I为加载区域,区域II为力传递区域,区域III为传感器粘贴区域。经过传递区域可保证中间传感器粘贴区域所受到的拉应力均匀分布。

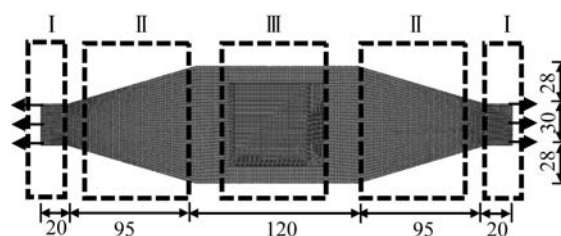


图4 有限元模型(单位:mm)

Fig.4 The finite element model (Unit:mm)

2.1 数值模拟

采用ABAQUS软件建立有限元模型,其中铝板和基板采用实体单元,上、下辐射贴片采用壳单元,各部件厚度及材料参数如表2所示。模型中不考虑胶水的影响,即假定天线与铝板之间界面的变形是连续的,没有应变的损失。

表2 材料参数

Table 2	Material parameters		
	加载试件	基板	上下辐射贴片
材料种类	6061 铝合金	RT-5880	黄铜
厚度 / mm	4	0.5	0.1
弹性模量 / GPa	68.4	1.3	110
泊松比	0.33	0.4	0.33

划分网格时,考虑到天线边缘应变变化可能较大,所以网格划分较细密,以保证计算精度;铝

板的力传递区域由于拐角的存在会产生应力集中,但不是本文所研究的重点,所以网格划分相对稀疏,以提高计算效率。划分网格之后的 ABAQUS 有限元模型平面图如图 4 所示。

在 3 kN 荷载作用下,粘贴天线的试件与未粘贴天线试件的纵向应变云图如图 5 所示。可见两试件应变云图基本一致,即粘贴天线后对铝板应变的影响可忽略,所以铝板的纵向平均应变可通过公式近似计算得到,此时平均应变为 $127.5 \mu\epsilon$ 。

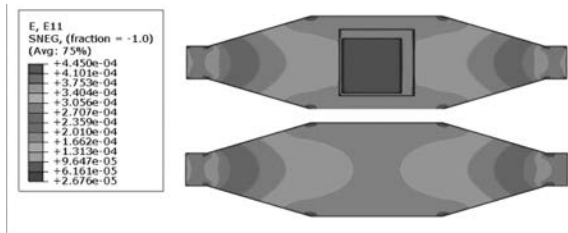
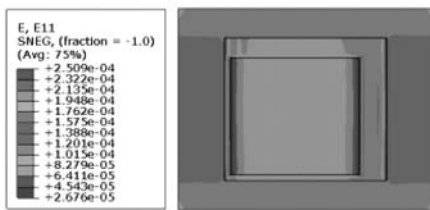


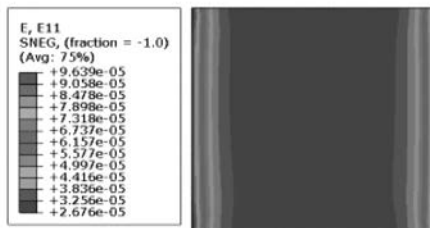
图 5 有无天线时的纵向应变云图

Fig.5 Strain contour with and without antenna

天线及附近铝板的应变云图与天线上贴片天线的应变云图如图 6 所示。在上辐射贴片的边界区域,应变值由铝板的平均应变 $127.5 \mu\epsilon$ 快速衰减至 $90.6\sim 96.4 \mu\epsilon$ 之间,如图 6(b)所示。提取上辐射贴片的平均应变为 $94.5 \mu\epsilon$,计算得纵向应变传递效率系数为 74.12%。



(a) 天线及附近铝板应变云图



(b) 上贴片天线应变云图

图 6 局部应变云图

Fig.6 Local strain contour

在此荷载作用下提取铝板横向平均应变为 $42.2 \mu\epsilon$,与铝板纵向平均应变比值为 0.331,接近铝材泊松比;提取上辐射贴片横向平均应变为 $37.5 \mu\epsilon$,与上辐射贴片纵向平均应变比值为

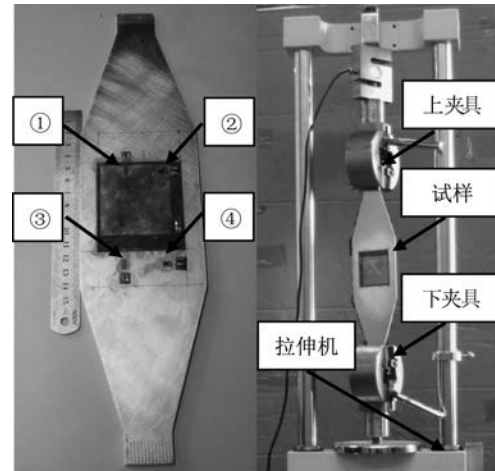
0.397,接近基板泊松比。因此,可知纵向传递效率系数与横向传递效率系数之比约为铝板与天线基板泊松比之比:

$$\eta = \eta' \frac{v_A}{v_S} \tag{12}$$

式中: v_A 为铝板泊松比; v_S 为基板泊松比。

2.2 传递效率试验

通过强力胶将 RFID 天线粘贴在试件表面,并在上辐射贴片表面和试件表面粘贴应变片,进行试件拉伸试验,验证应变的传递效率。试样如图 7(a)所示,应变片①和②粘贴在上辐射贴片表面,应变片③和④粘贴在铝板表面。其中应变片①和③的应变感应方向与拉伸方向平行,应变片②和④的应变感应方向与拉伸方向垂直。拉伸机型号为 SJV-30000,拉伸装置如图 7(b)所示,应变采集仪选用 LC1007。试验采用分级加载,以 3kN 为一级,加载至 24 kN 共八级,总共拉伸 3 个试样,所得荷载-应变图如图 8 所示。



(a) 拉伸试样 (b) 拉伸装置

图 7 传递效率试验

Fig.7 Transfer efficiency experiment

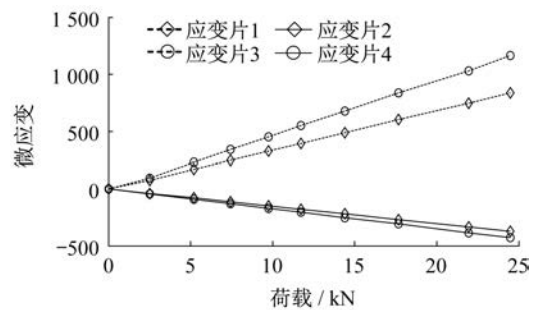


图 8 荷载-应变曲线图

Fig.8 Load-strain curve

应变片①与③的应变比值为纵向传递效率系数,应变片②与④的应变比值为横向传递效率系数,计算结果如表3所示。将横向传递效率系数平均值代入式(12)换算为纵向传递效率系数,其值为73.54%,与直接所得的纵向传递效率系数74.23%的相对误差仅为0.93%,非常接近。因此取二者平均值73.88%作为纵向传递效率系数的试验值,与数值模拟所得纵向传递效率系数74.12%的相对误差为0.3%,两者符合较好。

表3 传递效率试验结果

Table 3 Experimental results of transfer efficiency

试样	纵向传递效率系数	横向传递效率系数
试样1	71.74%	86.75%
试样2	76.19%	91.37%
试样3	74.77%	89.30%
平均值	74.23%	89.14%
方差	2.27%	2.31%

2.3 灵敏度系数

试件在传感器应变感应方向的单位应变所引起天线谐振频率的改变量为天线应变传感器的灵敏度,结合章节1.2推导可得灵敏度系数 R :

$$R = -\bar{\eta} f_{R0} \quad (13)$$

式中, $\bar{\eta}$ 为传递效率系数。

当天线传感器的应变感应方向与拉伸方向平行时, $\bar{\eta}$ 取为纵向传递效率系数 η ;当天线传感器的应变感应方向与拉伸方向垂直时, $\bar{\eta}$ 取为横向传递效率系数 η' ,传递效率系数存在差异是因天线基板与试样的泊松比不相同引起应变不协调所致。当应变感应方向与拉伸方向夹角为 α 时,类比于应变莫尔圆,传递效率系数可由下式求解:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta' + \eta}{2} - \frac{\eta' - \eta}{2} \cos 2\alpha \quad (14)$$

夹角 α 的取值介于 $0 \sim 90^\circ$ 之间。若为复杂应力状态,则 α 应为应变感应方向与主应变方向的夹角。

3 天线传感器的测试

当天线传感器的应变与谐振频率有着较好的线性关系时,灵敏度系数的精确性便直接决定了应变检测的准确性。因此,本节采用数值模拟和拉伸试验的方法,探究RFID天线传感器经历应变时谐振频率与应变的线性度以及传感器灵敏度系

数的精确度。

其中,数值模拟直接控制天线的应变,此时不需考虑传递效率,所拟合直线的斜率即为传感器的灵敏度系数,根据理论推导直接将其与天线的初始谐振频率进行比较,验证与理论值的符合程度。

设计拉伸试验时,考虑传感器的应变感应方向与拉伸方向平行和垂直的两种情况。试验所得应变-谐振频率拟合直线的斜率即为实测灵敏度系数,将其分别与经式(13)所得计算灵敏度系数相对比,验证传递效率对灵敏度系数的影响。

3.1 数值模拟

在HFSSTM中建立模型,假设天线发生均匀变形,通过改变天线尺寸 L 、 W 、 L_1 以及 W_1 等相关参数的方法模拟天线应变^[16],此时不需考虑应变传递效率的影响。由于软件求解精度的限制,若相邻两级的应变增量较小可能会出现较大误差。故在数值模拟中,天线应变以 $2000 \mu\epsilon$ 为一级,加载至 $10000 \mu\epsilon$,所得的回波损耗曲线如图9所示,其中回波损耗系数 S_{11} 定义为

$$S_{11} = 10 \lg \eta(f) \quad (15)$$

由1.3节中函数 $\eta(f)$ 的性质可知,当回波损耗曲线取得最小值时的工作频率为天线的谐振频率。依此提取各级应变下的谐振频率,绘制应变-谐振频率关系曲线,如图10所示。所得天线初始谐振频率的模拟值为917.88 MHz,与章节1.1中式(1)的计算值918.10 MHz的相对误差为0.02%,结果十分一致。拟合直线的相关系数为0.999 1,说明天线的谐振频率与应变具有较好的线性关系;拟合直线的斜率为 $-915.43 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$,表示每单位应变使谐振频率产生915.43 MHz的漂移量。其绝对值与初始谐振频率模拟值的相对误差为0.27%,符合式(2)的理论推导。在实际测量中当采样频率小于所测应变对应的谐振频率漂移量时,将不会对测试结果造成过大的影响。

3.2 拉伸试验

为减少环境干扰,拉伸试验在微波暗室里进行,试验装置如图11所示。阅读器固定在三脚架上,与贴片天线之间的距离为0.4 m。

试验中RFID阅读器选用Tagformance Pro,可检测工作在超高频段天线的阈值发射功率曲线和阈值反射功率曲线,其所采集的功率为对数功率

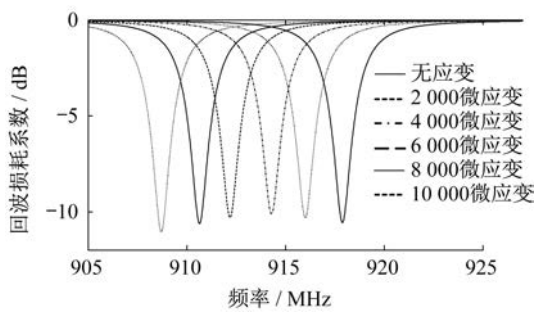


图9 谐振频率偏移曲线

Fig.9 Curves of resonant frequency shift

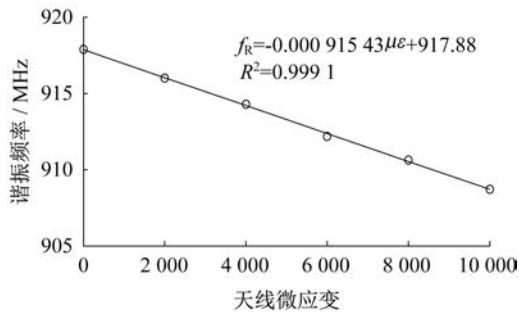


图10 应变-谐振频率拟合直线

Fig. 10 Fitted line of strain and resonant frequency

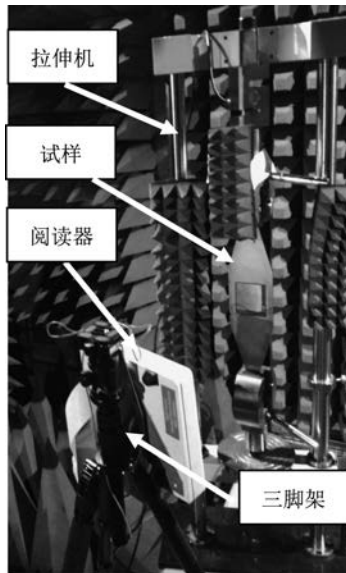


图11 试验装置

Fig.11 Experiment setup

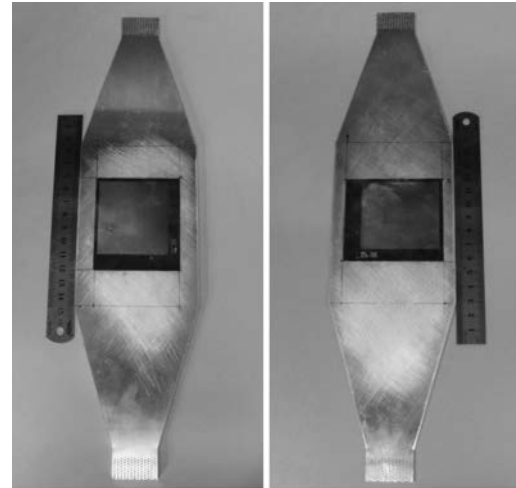
P (单位: dBm), 与式(9)和式(10)计算所得功率 P (单位: W)的换算关系为

$$P = 10 \lg P \quad (16)$$

试验所用铝板尺寸如图4所示, 采用拉伸机(SJV-30000)对试样分级加载, 3 kN 为一级共加载8级, 与传递效率试验相同。

为探究不同情况下经式(13)所得计算灵敏度系数与实测灵敏度系数的相符程度, 将RFID天线

传感器粘贴在铝板表面进行拉伸, 方案一使天线长度方向与拉伸方向平行, 即纵向粘贴, 试样如图12(a)所示; 方案二使天线长度方向与拉伸方向垂直, 即横向粘贴, 试样如图12(b)所示。



(a) 天线纵向粘贴

(b) 天线横向粘贴

图12 天线铝板试样

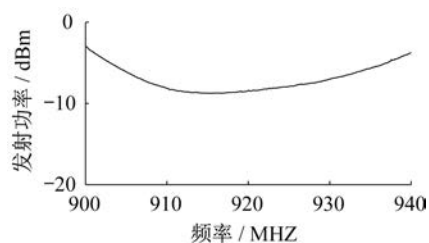
Fig.12 Experiment sample

3.3 结果分析

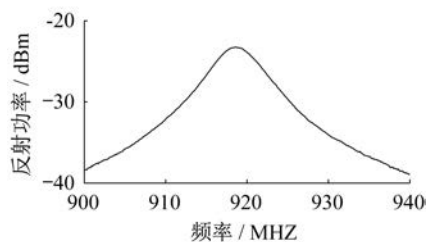
为减小试验误差, 每级荷载下分别记录五组数据, 其中每组数据包括频率-阈值发射功率曲线和频率-阈值反射功率曲线, 分别按式(17)取平均值, 所得曲线如图13所示。可见频率-发射功率曲线波谷相对较平缓, 提取最小值时容易引起较大的误差, 所以本文中采用频率-反射功率曲线提取谐振频率, 以提高精度。

$$P_{vf}(f) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 P_{vf,i}(f) \quad (17)$$

为进一步减小环境噪声的影响, 选取频率-反射功率曲线最大值附近的局部曲线, 采用四次多项式进行拟合, 取局部拟合曲线的最大值点作为天线在该级应变下的谐振频率点, 如图14(a)所示。某一试样在无荷载、12 kN 和 24 kN 荷载作用下的局部频率-反射功率拟合曲线如图14(b)所示, 可见曲线随荷载的增加向着谐振频率减小的方向漂移, 与数值模拟的规律一致。提取每级应变下贴片天线的谐振频率, 由于加工误差的存在, 不同贴片天线初始谐振频率的试验值不相同。为了方便对比, 选用谐振频率漂移量作为纵坐标, 分别进行应变-谐振频率漂移量的直线拟合, 结果如图15所示。



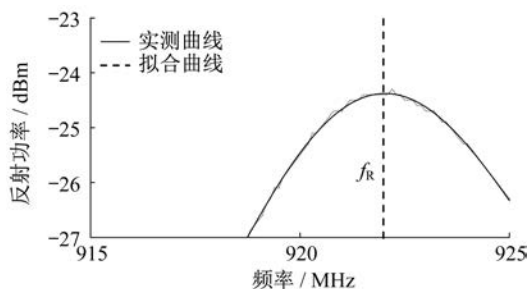
(a) 频率-发射功率-曲线



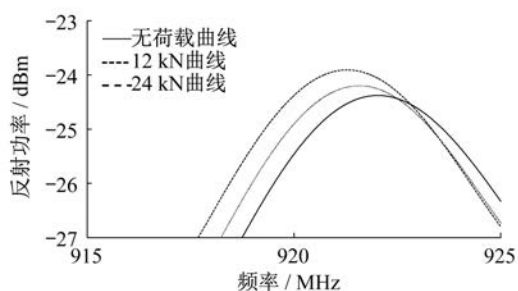
(b) 频率-反射功率曲线

图 13 采集数据曲线图

Fig.13 Collected data curves



(a) 实测与拟合曲线对比图



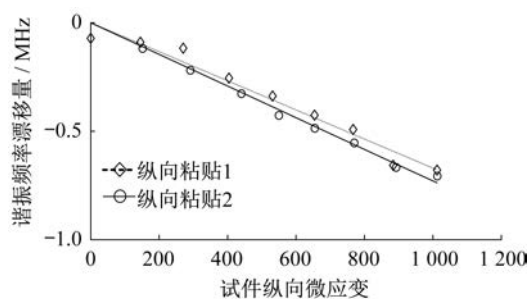
(b) 不同荷载下拟合曲线图

图 14 谐振频率的处理及对比

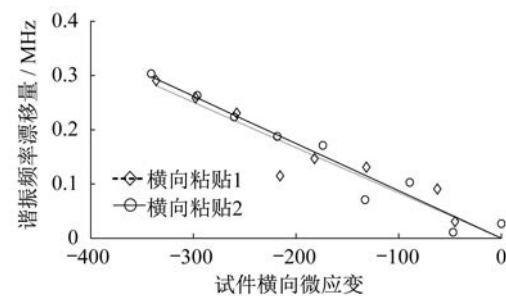
Fig.14 The processing and comparison of resonant frequency

对于纵向和横向粘贴的天线,其初始谐振频率与实测灵敏度系数如表 4 所示,并根据式(13)得出计算灵敏度系数,其中天线传感器纵向粘贴时传递效率系数取为第 2 章节试验结果的平均值 73.88%,天线横向粘贴时传递效率系数按式(12)取为 $73.88 \times 0.4 \div 0.33 = 89.55\%$ 。

由表 4 可见,两组试验所得灵敏度系数的计算值与实测值相对误差的偏差较大,主要是因为采用强力胶粘接天线和试件,而天线的粘接底面



(a) 传感器纵向粘贴



(b) 传感器横向粘贴

图 15 应变-谐振频率漂移量关系

Fig.15 Strain-resonant frequency shift curves

表 4 天线初始谐振频率与灵敏度

Table 4 The initial resonant frequency and sensitivity

试样	初始谐振频率	计算灵敏度系数	实测灵敏度系数	相对误差	相关系数
纵向 1	922.03	-681.20	-729.89	6.67%	0.9940
纵向 2	918.97	-678.93	-670.33	1.28%	0.9664
横向 1	918.66	-822.67	-872.82	5.75%	0.9453
横向 2	921.62	-825.32	-836.06	1.28%	0.9175

注:表中频率单位为 MHz,灵敏度系数单位为 $\text{MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ 。

积较大,涂胶不均匀会导致局部粘接不牢靠,引起传递效率的偏差。但纵向粘贴和横向粘贴时平均相对误差分别为 3.98% 和 3.52%,均小于 5%,满足工程需求。这表明当天线传感器的应变感应方向与拉伸方向平行或存在夹角时均可较准确地检测试件在该方向上的应变。

当天线纵向粘贴时所拟合直线的相关系数接近于 1,说明天线谐振频率与应变有着较好的线性关系,与理论推导和数值模拟结论一致。当天线横向粘贴时拟合直线的线性度稍差一些,主要是由于横向粘贴时应变步长以及对应的谐振频率漂移量仅为原先的 0.33 倍,在同样的谐振频率测量误差下也会引起拟合直线线性度的降低。因此减小谐振频率的测量误差以提高该传感器的测量精度也较为重要。

4 结 论

本文基于射频识别技术设计了带芯片的贴片天线传感器,实现了应变传感器的无源无线。通过数值模拟和拉伸试验对粘贴在试件上的天线所存在的剪力滞后现象进行了验证,且所得传递效率系数二者相符较好,并依此给出了天线传感器灵敏度系数的计算方法。然后通过模拟和试验对天线进行拉伸,验证了应变与谐振频率的线性关系,且在传感器的感应方向与拉伸方向平行和垂直的两种情况下,实测灵敏度系数与计算灵敏度系数的相对误差均小于 5%,试验结果表明该应变传感器可准确检测万分之一量级应变的传感器。

基于贴片天线的特性可知,当天线尺寸不发生变动时其谐振频率的漂移量可以忽略,但当温度改变时会对谐振频率产生影响,下一步将会对温度补偿展开研究。此外,由于该传感器较电阻应变传感器具有较大的尺寸,因此其适用于表面平坦且应力变化较小的结构构件处,未来也将会对此传感器进行小型化的研究。

参考文献

- [1] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M, et al. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996—2001 [J]. Data Acquisition, 2004, 1a-13976-m.
- [2] 尹福炎. 电阻应变计技术六十年(一)电阻应变计的由来、发展及展望[J]. 传感器世界, 1998(8): 27-32. Yin Fuyan. Sixty years of electric resistance strain gage technique (1) [J]. Sensor World, 1998(8): 27-32. (in Chinese)
- [3] Zhou Y, So R M C, Jin W, et al. Dynamic strain measurements of a circular cylinder in a cross flow using a fibre Bragg grating sensor [J]. Experiments in Fluids, 1999, 27(4): 359-367.
- [4] 陈常松, 颜东煌, 陈政清, 等. 混凝土振弦式应变计测试技术研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 29-33. Chen Changsong, Yan Donghuang, Chen Zhengqing, et al. Technique research of vibrational chord strain gauge to concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 29-33. (in Chinese)
- [5] Soga K, Schooling J. Infrastructure sensing. [J]. Interface Focus, 2016, 6(4): 20160023.
- [6] Zhang J, Tian G Y, Marindra A M, et al. A Review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications [J]. Sensors, 2017, 17(2): 265.
- [7] Deivasigamani A, Daliri A, Wang C H, et al. A review of passive wireless sensors for structural health monitoring [J]. Modern Applied Science, 2013, 7(2): 57.
- [8] Li S, Visich J K, Khumawala B M, et al. Radio frequency identification technology: applications, technical challenges and strategies [J]. Sensor Review, 2006, 26(3): 193-202.
- [9] Bhattacharyya R, Floerkemeier C, Sarma S. Low-cost, ubiquitous rfid-tag-antenna-based sensing [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(9): 1593-1600.
- [10] Yi X, Wu T, Yang W, et al. Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas [J]. International Journal of Smart & Nano Materials, 2011, 2(1): 22-38.
- [11] Yi X, Wu T, Wang Y, et al. Sensitivity modeling of an RFID-based strain-sensing antenna with dielectric constant change [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6147-6155.
- [12] 薛松涛, 蒋灿, 谢丽宇, 等. 基于矩形贴片天线的应变传感器的模拟与测试 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 1-7. Xue Songtao, Jiang Can, Xie Liyu, et al. Strain sensor based on rectangle patched antenna: simulation and test [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2018, 38(1): 1-7. (in Chinese)
- [13] Rao K V S, Nikitin P V, Lam S F. Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(12): 3870-3876.
- [14] 鲍尔. 微带天线 [M]. 成都: 电子工业出版社, 1984. Bauer. Microstrip antennas [M]. Publishing House of Electronics Industry, 1984. (in Chinese)
- [15] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design [M]. Harper & Row, 1982.
- [16] 蒋灿. 基于微波贴片天线的应变传感器研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017. Jiang Can. A research of strain sensor based on microwave folded patch antenna [D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)