

微带贴片天线应变传感器优化设计研究*

何存富, 闫天婷, 宋国荣, 吕炎, 吴斌

(北京工业大学机械工程及应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 承载部件作为高端装备中最常见的结构单元, 在役过程中受载荷和应力集中影响极易萌生裂纹, 导致结构失效, 实时监测结构关键部件的应变状态对保障结构健康至关重要。基于微波无损检测技术, 揭示了矩形微带贴片天线的辐射元尺寸对其固有谐振频率的影响规律, 探究了微带贴片天线谐振频率与应变的相互作用机理。矩形微带贴片天线可激发单频和双频谐振频率, 改变矩形辐射元的长度或宽度, 其谐振频率会发生频移。实验结果表明, 当对金属接地板施加一定拉应力时, 贴片天线几何尺寸会发生改变, 其谐振频率也随之发生偏移, 据此可推算出金属接地板的应变大小, 这对关键承载部件的应变和裂纹实时监测具有重要的研究意义。

关键词: 微带天线; 辐射元尺寸; 谐振频率; 应变测量; 微波无损检测

中图分类号: TP73 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.

Design and optimization of a strain sensor based on rectangular micro-strip patch antenna

He Cunfu, Yan Tianting, Song Guorong, Lv Yan, Wu Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Load-bearing structures are the most common structural components in high-end equipment. The loading and stress concentration easily initiates cracks, leading to structural failure. Meanwhile, the real-time monitoring of strain is essential for the health evaluation of structures. In this paper, the influence on the natural resonant frequency by the size of the Rectangular Micro-strip Patch Antennas (RMPA) is revealed, based on microwave nondestructive testing technology. Furthermore, the interaction mechanism between the resonant frequency of RMPA and the strains is explored. RMPA can radiate at one or two resonant frequencies. The resonant frequency shifts as the length or width of RMPA varies. Thus, when a tensile stress is applied on the grounded metal sheet of RMPA, the geometrical dimension changes, which induces the resonant frequency shift. This phenomenon can predict the strain of the grounded metal sheet inversely. This is of great importance to the strain and crack monitoring of key load-bearing structures.

Keywords: micro-strip antenna; radiation patch geometry; resonant frequency; strain measurement; microwave nondestructive testing

1 引言

承载部件作为高端装备(如航空、海洋工程、智能制造等装备)的关键承力部件,常处于高温高压或振动等恶劣环境,在服役过程中,受疲劳、腐蚀和材料老化等不利因素影响,不可避免地存在损伤积累或应变集中,萌生裂纹,即使很微小的裂纹在某些条件下也可能生长,形成开裂,最终导致结构完全失效,严重时甚至引起突发性

故障^[1-2]。由于裂纹主要产生在承载部件的应变集中处,所以可对结构特定区域的应变进行监测。传统的应变检测方法常利用应变片进行测量,测量结果受环境温度和湿度影响较大,测量数据可信度低,且存在费时费力、成本高和效率低等问题^[3-4],国内外学者通过对应变传感器的研究改进,已有传感器能克服上述不足,但价格昂贵,且多为有线传感器,使得其布设成本过高、结构复杂^[5-6]。因此,研制新型应变传感器对承载部件应变进行检测,对于评估结构应力应变分布和裂纹尺寸大小、确定结构健

康状态具有至关重要的意义。

本文提出了一种新型无源无线微带贴片天线应变传感器,其具有重量轻、体积小、能与载体共形、制造简单、成本低、便于集成等优点;构建了基于微带贴片天线应变传感器的微波无损检测系统;揭示了矩形微带贴片天线传感器的辐射元尺寸对其谐振频率的影响规律,并初步探究了传感器谐振频率与应变的相互作用机理。

2 矩形微带贴片天线传感器设计

微带贴片天线由辐射元、介质基板和金属接地板三部分组成^[7-8],如图1所示,辐射贴片与金属接地板之间将形成电磁谐振腔。微带天线分析方法主要有传输线法、模腔理论和积分方程法等,其中,传输线法是利用端缝辐射的概念说明辐射机理,最为简单直观,因此本文将利用传输线法对微带天线传感器进行分析。

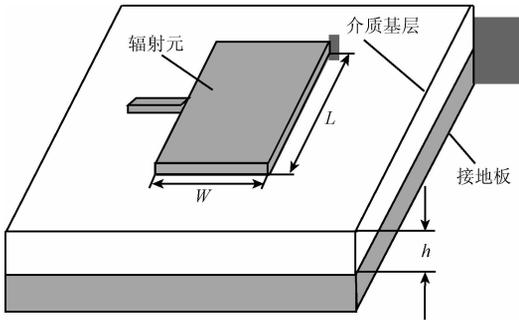


图1 矩形微带贴片天线组成结构

Fig. 1 Diagram of a rectangular micro-strip patch antenna

2.1 传感器辐射元尺寸与谐振频率的关系

假设天线传感器辐射元的长为 L ,宽为 W ,介质基板的厚度为 h ,传输线理论模型是将辐射元、介质基板和接地板视为一段长为 L 的微带传输线,且传输线的两端断开形成开路。贴片天线由空气和介质基板两个介电层构成。根据微带传输线理论,由于基板厚度 h 远小于传播波长 λ ,所以电场沿 h 方向均匀分布。在最简单的情况下,电场沿宽度 W 方向没有变化,仅在长度方向有变化^[9-10],宽度方向电场线如图2所示。

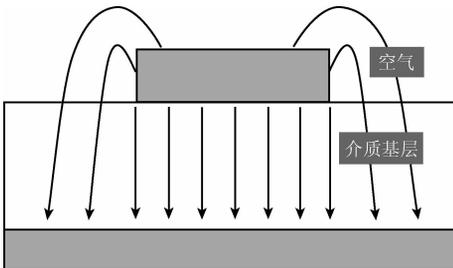


图2 电场线

Fig. 2 Electric field lines

由于贴片天线的边缘电场线不仅存在于介质基层中,还有少量暴露在空气里,因此引入有效介电常数 ϵ_{re} ,可知 ϵ_{re} 略小于介质基层的介电常数 ϵ_r 。有效介电常数可由介质基层相对介电常数计算得出:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{(1 + 10h/W)}} \quad (1)$$

式中: h 为介质基体厚度, W 为辐射元宽度。

微带天线可等效为由两个辐射缝隙所组成的二元阵列。由于天线传感器的电学尺寸大于几何尺寸,需做长度补偿^[11],故矩形辐射元有效长度 L_{eff} 可表示为几何长度 L 和补偿长度 ΔL_{oc} 之和,如式(3)所示。

$$\Delta L_{oc} = 0.412h \frac{(\epsilon_{re} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{re} - 0.258)(W/h + 0.813)} \quad (2)$$

$$L_{eff} = L + \Delta L_{oc} \quad (3)$$

则天线应变传感器的谐振频率 f_r 为^[12-13]:

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{L + 2\Delta L_{oc}} \quad (4)$$

式中: c 为光速。

2.2 传感器谐振偏移量与应变的关系

当天线传感器沿长度方向受到拉伸时,会发生应变 ϵ_L ,由泊松比可知,辐射元的宽度和介质基体的厚度也会改变^[14]。

$$W = (1 - \nu_p \epsilon_L) W_0, \quad h = (1 - \nu_s \epsilon_L) h_0 \quad (5)$$

如果辐射元的泊松比 ν_p 与介质基体的泊松比 ν_s 相同,则变化后的宽度 W 和厚度 h 的比值为常数,即有效介电常数 ϵ_{re} 不受应变 ϵ_L 的影响,且补偿长度 ΔL_{oc} 与介质基体的厚度 h 成线性比例关系。因此,式(4)中贴片天线传感器的谐振频率又可表示为:

$$f_r = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{L + 2\Delta L_{oc}} = \frac{C_1}{L + C_2 h} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \\ C_2 = 0.812 \frac{(\epsilon_{re} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{re} - 0.258)(W/h + 0.813)} \end{cases} \quad (7)$$

应变导致贴片天线传感器尺寸的变化,从而改变其固有谐振频率。当天线传感器未受到应力时,固有频率 f_{r0} 由辐射元的原始长度 L_0 和介质基体的厚度 h_0 等得到:

$$f_{r0} = \frac{C_1}{L_0 + C_2 h_0} \quad (8)$$

当受到应变 ϵ_L 时,天线传感器的谐振频率为:

$$f_r(\epsilon_L) = \frac{C_1}{L_0(1 + \epsilon_L) + C_2 h_0(1 - \nu \epsilon_L)} \quad (9)$$

可得应变 ϵ_L 和谐振频移量 Δf 的关系为:

$$\epsilon_L = - \frac{L_0 + \nu_s C_2 h_0}{L_0 + C_2 h_0} \frac{\Delta f}{f_r} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta f}{f_r} = K\varepsilon_L \quad (11)$$

式中: $\Delta f = f_r - f_{0}$ 。常数 K 表示天线传感器频移量受应变影响的灵敏度^[15]。综上可知,根据天线传感器的谐振频移量,可推算出金属地板的应变大小,因此研究天线传感器几何尺寸对谐振频率的影响,为探究不同谐振频率的天线传感器对应变测量的灵敏度有着至关重要的作用。

2.3 天线传感器的制作

贴片天线传感器的馈电方式为微带线馈电,如图3所示,馈电位置的不同会影响天线的谐振频率。假设天线传感器的馈电边为宽边,波传播方向与辐射园长边平行。馈线位置居中,即在宽边的1/2处,若长边尺寸大于宽边,将激发 TM_{10} 模态的谐振,对应的频率用 f_{10} 表示;若长边尺寸小于宽边,将激发 TM_{01} 模态的谐振,对应的谐振频率记为 f_{01} ;当馈线偏心馈电时,如在宽边的1/4处馈电,将同时激发 TM_{10} 和 TM_{01} 模态的谐振。 f_{10} 可由式(4)获得,将式(4)中 L 与 W 互换,即可得到 f_{01} ^[11]。

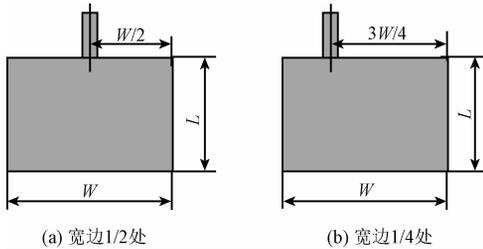


图3 微带贴片天线两种馈电位置

Fig.3 Two types of feeding location of micro-strip patch antenna

为探究微带贴片天线辐射元尺寸和馈电位置对谐振频率的影响,根据两种不同的馈电位置,设计4组不同尺寸的天线传感器。传感器的介质基层为聚酰亚胺薄膜,介电常数为3.4,厚度为 $52 \mu\text{m}$;介质基层的一面为矩形压延铜,视为天线传感器的辐射元,为减小插入损耗,将微带馈线与辐射元制为一体;介质基层的另外一面利用胶液使其粘附在铝板上。贴片天线传感器实物如图4所示。

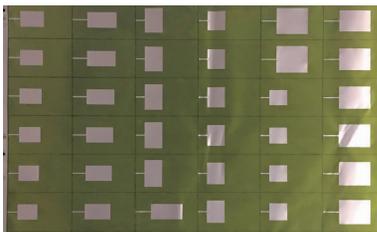


图4 不同尺寸传感器实物

Fig.4 The photo of sensors with different sizes

表1所示为4组天线传感器相关设计参数,A与B两组传感器为中心馈电,仅激励出单一频率的谐振,其

中,A组的9个传感器辐射元宽度均为12 mm,长度为13~21 mm,间隔1 mm;B组传感器辐射元长度均为12 mm,宽度为13~21 mm,间隔1 mm;C和D组传感器在宽边1/4处馈电,辐射元的尺寸分别与A组和B组的相同,谐振模式有 TM_{10} 和 TM_{01} 两种。通过式(4)计算可得 f_{10} 和 f_{01} 理论值如表2所示。

表1 天线传感器相关设计参数

Table 1 Design parameters of RMPA

组别	馈线位置	辐射元长度/mm	辐射元宽度/mm	激励频率
A	宽边1/2处	13,14,15,⋯,21	12	f_{10}
B		12	13,14,15,⋯,21	f_{01}
C	宽边1/4处	13,14,15,⋯,21	12	f_{10} 和 f_{01}
D		12	13,14,15,⋯,21	

表2 谐振频率理论计算值

Table 2 The calculated theoretical values of resonant frequency

辐射元长度/宽度/mm	f_{10} 理论值/GHz	f_{01} 理论值/GHz
13	6.25	6.77
14	5.81	6.77
15	5.42	6.77
16	5.08	6.77
17	4.79	6.77
18	4.52	6.76
19	4.28	6.76
20	4.07	6.76
21	3.88	6.76

3 天线传感器谐振频率的实验研究

利用安捷伦网络分析仪(N5225A, Agilent Inc. USA)对传感器谐振频率进行检测提取,检测参数为 S_{11} (dB),即网络分析仪1端口自激自收,结果表现形式为反射信号的对数幅值(回程损耗)。在传感器的谐振频率点处,激励的微波信号将被传感器的谐振腔吸收,故该频率点下,信号的回程损耗最大,因此,将 S_{11} 曲线中,回程损耗最大值对应的频率视为传感器的谐振频率。

3.1 传感器中心馈电检测结果

综上所述,辐射元长度对谐振频率的影响远大于宽度,且随着长度的增长,天线传感器谐振频率随之减小;随着辐射元宽度的增长,谐振频率变化量较小。表1中,中心馈电的A和B两组传感器谐振频率检测结果分别如图5(a)和(b)所示。

传感器中心馈电时,辐射元的长度和宽度对谐振频率的影响如图6所示,其中 f_{10} 与 f_{01} 两频率分别与 TM_{10} 和 TM_{01} 模态相对应。由图5和6可知,中心馈电时,天线传感器固定尺寸下的 S_{11} 曲线仅有一个最低点,即仅激发了单一模态的谐振频率;辐射元宽度不变时,随着长度增长, f_{10} 逐渐递减,理论与检测结果相一致;辐射元长度不变时,随着宽度的增长, f_{01} 几乎保持不变。

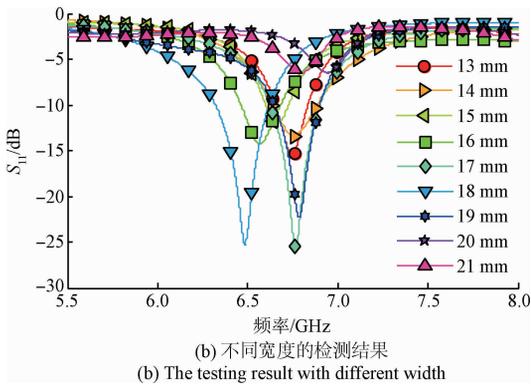
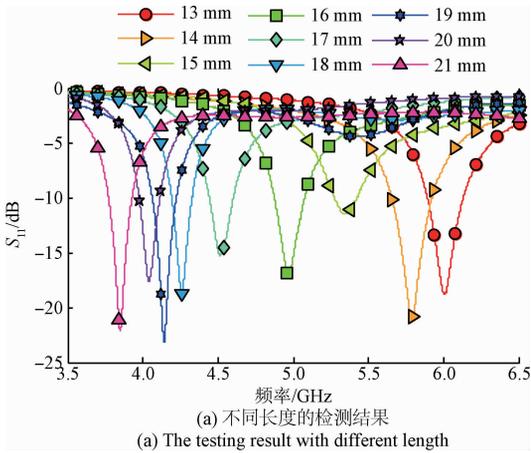


图5 中心馈电时天线传感器辐射元检测结果
Fig.5 The testing result of RMPA's radiate unit in center feed

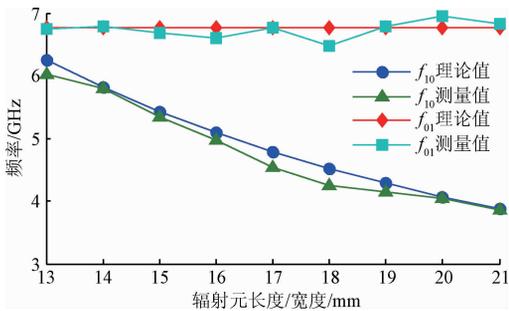


图6 中心馈电时传感器辐射元的长度和宽度对谐振频率的影响
Fig.6 Influence of length/width of sensor radiation element on resonant frequency on center feed

3.2 传感器偏心馈电检测结果

由于表1中的C组传感器长边尺寸大于宽边,因此 f_{10} 的回程损耗大于 f_{01} ;D组传感器宽边尺寸大于长边,则 f_{01} 的回程损耗大于 f_{10} 。在辐射元宽边1/4处馈电的C和D两组天线传感器检测结果如图7所示。由图7可知,传感器偏心馈电时,固定辐射元尺寸下的 S_{11} 曲线有两个波谷,两个最低点对应的频率值即为天线传感器的两个谐振频率。如图7(a)中,当辐射元长度为15 mm时, S_{11} 曲线在5.67和6.77 GHz处出现最小值,将其视为该尺寸天线传感器的两个谐振频率;图7(a)为C组传感器,即传感器辐射元长度不同时的检测结果, f_{10} 的回程损耗大于 f_{01} ;图7(b)为D组传感器,即传感器辐射元宽度不同时的检测结果, f_{01} 的回程损耗大于 f_{10} 。

传感器在辐射元宽边1/4处馈电时,辐射元的长度和宽度对谐振频率的影响如图8所示。传感器偏心馈电时,辐射元长度和宽度对两个谐振频率的影响与中心馈电时得到的结果一致; f_{10} 随着辐射元的长度增长而减小, f_{01} 随着辐射元宽度的增长几乎保持不变。

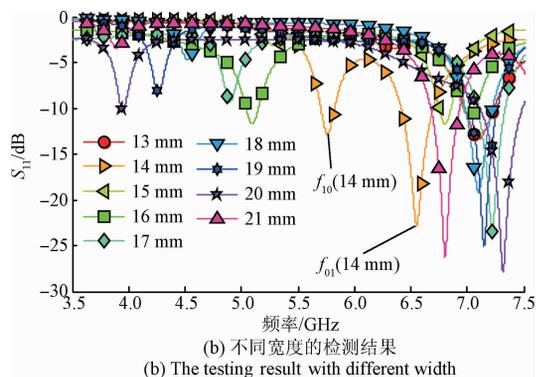
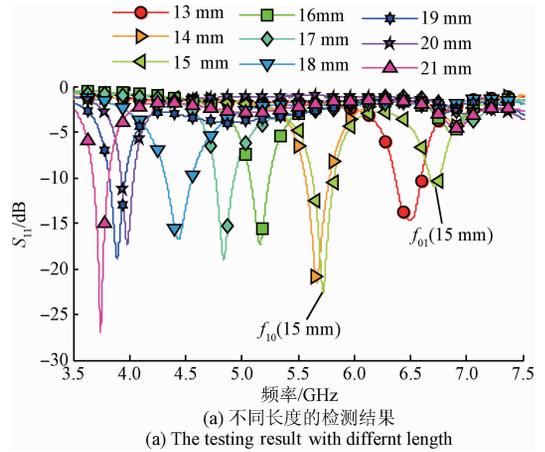


图7 宽边1/4处馈电时天线传感器辐射元检测结果
Fig.7 The testing result of RMPA's radiate unit in non-central feed

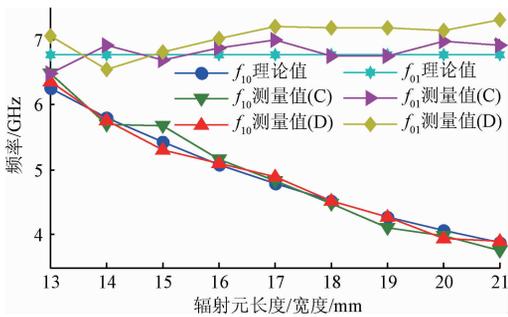


图8 宽边1/4处馈电时传感器辐射元的长度和宽度对谐振频率的影响

Fig.8 Influence of length & width of sensor radiation element of resonant frequency in 1/4 feed

4 悬臂板应变实验测量

当对天线传感器的金属接地板施加应力时,其几何参数会发生变化。传感器的谐振频率对其几何参数非常敏感,当其受到应力时,谐振频率将发生偏移。故通过测量谐振频移量,可推知基体应变大小。

4.1 实验条件

为探究基于微带贴片天线传感器的结构应变测量的可行性,搭建悬臂板系统。悬臂板的材料为1060号铝,尺寸如图9所示。悬臂板一端固定,通过在板的另一边自由端施加负载以产生应变。为增加实验可信度,选取3款不同尺寸的天线传感器进行测量,其辐射元宽度均为12 mm,长度分别为13、17和21 mm,馈电方式为中心馈电。将传感器粘结在悬臂板上时,令辐射元的长度方向与板的长度方向平行,即沿辐射元长度方向施加负载。由于悬臂板根部位置应变最大,因此将贴片传感器贴于靠近固定端的位置。若在自由端施加负载 P ,则天线传感器的接地板所受的应变如式(12)所示。

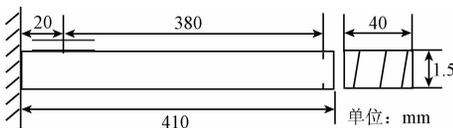


图9 悬臂板尺寸设计图

Fig.9 Diagram of cantilever

$$\epsilon_x = \frac{6P(L-x)}{Ebt^2} \quad (12)$$

式中: L 、 b 和 t 分别代表悬臂板的长度、宽度和高度, x 为贴片传感器中心距板固定端的距离, E 为弹性模量。

因为辐射元铜箔的泊松比 ν_p 与介质基体聚酰亚胺的泊松比 ν_s 相同,均为0.8,因此天线传感器谐振频移量与应变的关系可由式(11)得到。

4.2 测量结果

微波无损检测检测装置如图10所示。结合悬臂板尺寸及铝的力学性能,保证铝板在弹性变形阶段。在悬臂板自由端施加的负载范围为0~200 g,间隔20 g。辐射元长度为13 mm的天线传感器检测结果如图11(a)所示,绘制线性拟合曲线如图11(b)所示。

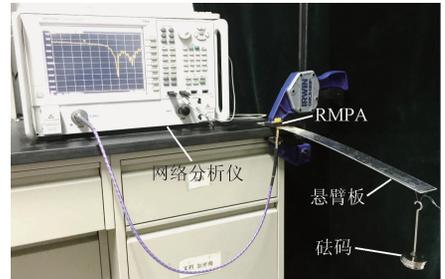
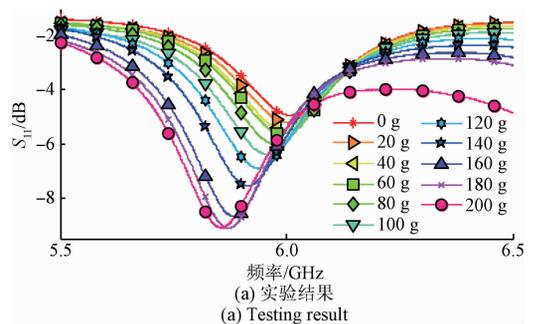
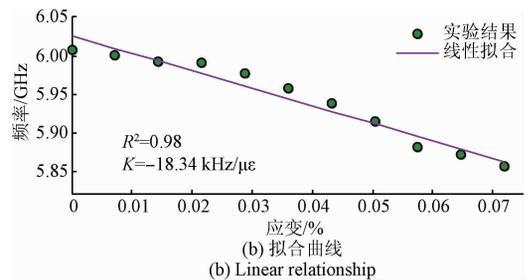


图10 悬臂板应变测量实验装置

Fig.10 Experiment system of strain measurement



(a) 实验结果
(a) Testing result



(b) 拟合曲线
(b) Linear relationship

图11 辐射元长度为13 mm时

Fig.11 When the length of radiating element is 13 mm

由图11可知,辐射元长度为13 mm的天线传感器可以对悬臂板的应变进行测量,且随着应变的增大,传感器谐振频率逐渐减小。辐射元长度为17和18 mm检测结果的拟合曲线如图12所示。

综上所述,3款传感器均实现了对悬臂板应变的检测。辐射元长度为13、17和21 mm的传感器检测灵敏度分别为18.34、22.63和10.69 kHz/ $\mu\epsilon$,拟合优度分别为0.98、0.95和0.97,拟合度较好。检测结果验证了利用微带贴片天线进行金属基体应变检测的可行性。

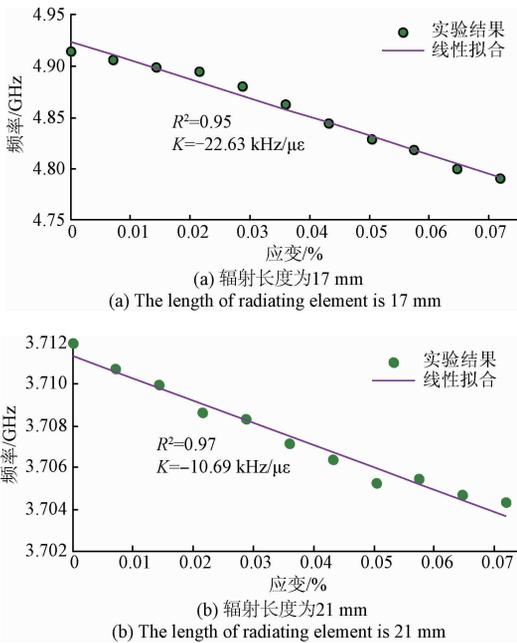


图12 辐射元长度为17和21 mm时, 传感器谐振频率与应变的关系

Fig. 12 Linear relationship between resonant frequency and strains when the length of radiating element is 17 and 21 mm

5 结 论

本文对新型微带贴片天线应变传感器辐射元尺寸和馈电位置对谐振频率的影响进行了实验研究,并利用网络分析仪对传感器谐振频率进行提取。通过悬臂板实验,验证了该传感器对于应变检测的可行性。

实验结果表明,天线传感器辐射元的尺寸对其谐振频率有着至关重要的影响。当矩形辐射元宽度一定时,长度越长,其谐振频率越小,检测结果与理论值有较好的一致性;当辐射元长度一定时,辐射元的宽度对谐振频率的影响较小。微带馈线的位置会影响传感器激发的谐振模式,中心馈电时,将激发纯净的单一模式的谐振频率,若矩形辐射元长边尺寸大于宽边时,获得的谐振频率为 f_{10} ;反之,获得的谐振频率为 f_{01} ;馈线位于宽边1/4处时,将激发双频的谐振模式,若矩形辐射元长边尺寸大于宽边时, f_{10} 的回程损耗大于 f_{01} ;宽边尺寸大于长边时, f_{01} 回程损耗大于 f_{10} 。

利用天线传感器对悬臂板应变检测结果表明,随着应变的增加,天线的谐振频率成线性减小的趋势,因此可根据测量传感器的谐振频率偏移量推算出基体所受应变大小。测量结果的拟合曲线拟合度较优,均达到0.95以上。

本文利用同轴电缆、SMA射频接头等实现了传感器

的接触式检测,该实验装置具有简单易行、拆卸方便、可重复性高等优点,同时也存在一定弊端,例如SMA接头的焊接状况对检测干扰较大等。此外,由于天线传感器的介质基层与被测试件(金属接地板)之间的结合方式为胶粘,因此,胶液的引入对天线谐振频率有一定的影响,故实验测得的谐振频率与理论谐振频率存在一定偏差。综上所述,本文为利用天线传感器实现高精度、快速的检测方法,及利用同轴波导探头或喇叭天线等,进行非接触检测提供了可能。

参考文献

- [1] MOHAMMAD I, HUANG H Y. Wireless interrogation of antenna sensor to detect hidden cracks [C]. IEEE Wireless and Microwave Technology Conference, 2012: 1-5.
- [2] 王红军, 汪亮. 基于多域空间状态特征的高端装备运行可靠性评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 804-810.
WANG H J, WANG L. High-end equipment operating reliability assessment based on multi-domain status space[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 804-810.
- [3] 王建华, 敬大德, 曹少飞. 基于双悬臂梁结构的应变测量传感器研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 589-592.
WANG J H, JIN D D, CAO S H F. Research of strain-measurement sensor based on double cantilever beam[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(3): 589-592.
- [4] THAI T T, AUBERT H, PONS P, et al. Novel design of a highly sensitive RF strain transducer for passive and remote sensing in two dimensions[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(3): 1385-1396.
- [5] 杨双龙, 徐科军, 舒张平, 等. 应变式多维力传感器的故障诊断方法与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1361-1371.
YANG S H L, XU K J, SHU Z H P, et al. Fault diagnosis method and realization for strain gauge multi-axis force sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(9): 1361-1371.
- [6] 孙圣和. 现代传感器发展方向[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(1): 1-10.
SUN S H H. Development trend of modern sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(1): 1-10.
- [7] DALIRI A, GALEHDAR A, JOHN S, et al. Wireless strain measurement using circular microstrip patch antennas[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012,

- 184(3): 86-92.
- [8] 张晓星,唐炬,彭文雄,等. GIS局部放电检测的微带贴片天线研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 27(12): 1595-1599.
- ZHANG X X, TANG J, PENG W X et al. Study on the outer UHF microstrip patch antenna for partial discharge detection in GIS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 27(12): 1595-1599.
- [9] HUANG H. Flexible wireless antenna sensor: A review[J]. Sensors Journal IEEE, 2013, 13(10): 3865-3872.
- [10] 陈永良. 矩形贴片微带天线直线阵优化的初步研究[D]. 成都:西南交通大学, 2005.
- CHEN Y L Optimization study on linear arrays with rectangular patch elements [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [11] MOHAMMAD I, HUANG H Y. Wireless interrogation of antenna sensor to detect hidden cracks[C]. Wireless and Microwave Technology Conference IEEE, 2012:1-5.
- [12] TATA U, HUANG H, CARTER R L, et al. Exploiting a patch antenna for strain measurements[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(1):1-7.
- [13] 车升余. 宽频带双极化微带贴片天线的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
- CHE SH Y. Research of the broadband dual-polarized microstrip patch antenna[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2011.
- [14] WANG W J, LIU T, GE H Y, et al. Strain measurement based on microstrip patch antennas[C]. IEEE Reliability

and Maintainability Symposium (RAMS), 2015:1-6.

- [15] TATA U S. Study of patch antennas for strain measurement[D]. Arlington University of Texas, 2008.

作者简介



何存富,1985年于太原工业大学获得学士学位,1990年于华中理工大学获得硕士学位,1996年于清华获得博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术、传感器测试技术。

E-mail:cunfuhe@gmail.com

He Cunfu received his B. Sc. degree in 1985 from Taiyuan University of Technology, and received his M. Sc. degree in 1990 from Huazhong University of Science and Technology, and received his Ph. D. degree in 1996 from Tsinghua University. Currently, he is a professor and doctoral supervisor in Beijing University of Technology. His main research interests include measurement theory and method and technology of mechanical, new ultrasonic nondestructive testing technologies and Sensors and Measurement Technology.



闫天婷,2014年于北京工业大学获学士学位,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为现代测控技术及仪器。

E-mail:yantianting@emails.bjut.edu.cn

Yan Tianting received her B. Sc. degree in 2014 from Beijing University of Technology, and she is currently a master student in Beijing University of Technology. Her main research interests include measurement and control technology and instrument.