一种基于微带天线的应变测量技术

葛航宇^①, 李浩^①, 陈跃良^②, 刘马宝^{①③*}, 王巧云^④

① 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049;

② 海军航空工程学院青岛分院飞机教研室, 青岛 266041;

③ 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049;

④ 西安航空学院, 西安 710077

* E-mail: mliu@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-20; 接受日期: 2014-05-14

国家自然科学基金(批准号: 51175404)和西安莲湖区产学研项目(批准号: K2013-026)资助

摘要 结构在长期使用中常常会产生裂纹, 裂纹萌生时的尺寸一般很小, 不容易被发现; 当裂纹被发现时, 往往已经扩展, 甚至接近临界尺寸, 危及结构安全. 由于裂纹主要产生在结构的应变集中处, 所以对“关键区域”的应变进行监测可以作为裂纹萌生的表征. 传统的应变测量技术很难满足长时间、低成本、快速检测等要求. 为克服传统应变传感器的缺点, 本文对基于微带天线的应变测量技术进行了可行性探究. 微带天线的中心频率与自身尺寸有关: 当其变形时, 中心频率也会发生相应的偏移. 因此, 可利用微带天线中心频率的变化来表征应变. 本文设计和制作了四种不同尺寸的微带天线, 以探究基于微带天线的应变测量技术, 同时研究其影响因素. 将天线黏附在悬臂梁上, 并在悬臂梁自由端处施加载荷, 进行应变测量实验. 通过矢量网络分析仪得到回波损耗 S_{11} 曲线, 并获得应变与微带天线频率偏移的关系. 分析结果显示, 应变与中心频率偏移之间存在近似线性关系, 可利用微带天线测量应变.

关键词

微带天线
中心频率
应变测量
结构健康

1 引言

结构, 包括桥梁、建筑、管道、飞机、车船、水坝等, 在长期使用过程中往往会出现由于疲劳引起的裂纹. 裂纹在使用中逐渐扩展, 最终引起结构失效, 造成巨大损失. 如果能及早检测出裂纹并进行修复, 那么将会避免很多事故的发生. 传统的检测裂纹的方法往往费时费力、效率低下. 例如, 美国联邦公路管理局进行的桥梁检查, 主要是靠人眼来观察结构表面是否有裂纹, 这样很容易忽略小尺寸或隐藏在涂层下的裂纹^[1]; 而未被检查出的裂纹很可能在下一

次检查之前扩展到超过临界尺寸, 危害结构安全^[1,2]. 人工检查的方法不仅耗时耗力而且不能实时监测结构的健康情况. 为解决这一问题, 人们提出了结构健康监测, 即 Structural Health Monitoring, 简称 SHM, 是一种自动监测结构健康状况的方法, 它是保障结构安全的关键性技术之一. 在结构健康监测中, 如何尽早发现裂缝一直是极重要的问题. 裂纹通常起始于应力集中处, 因此在关键位置布置传感器, 监视应变, 可以作为早期疲劳断裂的迹象. 已有的一些技术, 包括光纤传感, 金属箔应变计, 或者超声波探伤, 对裂纹检测有所帮助, 但现行的传感器, 有的需要在结

引用格式: 葛航宇, 李浩, 陈跃良, 等. 一种基于微带天线的应变测量技术. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 973–978

Ge H Y, Li H, Chen Y L, et al. A strain measurement method based on microstrip patch antennas (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 973–978, doi: 10.1360/N092014-00007

构上布设冗长的电缆以保证数据传输可靠性, 有的只能覆盖极小的区域, 这使得其布设成本过高, 并不适合大规模、大面积使用; 有的需要人工操作, 不利于长时间使用. 而且安装在高大建筑的检测系统, 其每条传感通路花费超过 5000 美元, 当系统规模进一步增大时, 其成本的增长远远超过线性比例^[1]. 例如, 香港的青马悬索大桥, 其上安装了 350 多个传感通道, 成本超过 800 万美元. 不仅在民用建筑中存在此类问题, 在飞机、车辆、舰船等结构中也存在电缆安装和维护费用过高的问题^[1].

近年来, 无线传感技术越来越受到人们的关注, 有着极大应用潜力, 能帮助提升结构工程的经济性. 相较于传统的电缆系统, 无线系统在成本上有着显著的优势, 它避免了在结构中大量的铺设电缆. 而且由于自身的低成本, 可以大量布设传感器, 提高节点密度, 保证更高的测量精度^[3-5]. 无线传感系统通常包含模数转换器、微处理器和无线收发器. 这些装置大多数靠电源运行, 并从传统的传感器上获得测量数据. 例如, 使用连接无线传输设备的金属箔应变计来实现无线应变测量. 总之, 无线技术主要是用来进行通信, 传输数字化后的测量数据, 而传感器本身并没有太大变化.

使用传统的应变传感器与无线系统组合成的无线传感系统依旧存在很多问题. 传统的应变测量方式基本上是利用电阻应变片组成测量电桥的形式, 通过连接相应的外部电路, 形成应变测量系统. 基于电阻应变片这一基本敏感元件的应变测量系统, 由于电阻应变片本身的机械滞后特性和外部电路设计方式等因素的影响, 使得应变测量的范围和精度受到限制. 并且, 测量得到的数据还需要通过数模转换处理后变成数字信号, 才能通过无线装置发送出去, 实现无线测量, 这使得系统复杂, 效率低下. 因此, 新型传感器的探究就显得很有必要. 随着学科领域交叉的兴起, 人们发现微带天线存在着很有趣的力学行为. 当微带天线的尺寸发生变化时, 它的中心频率会发生相应的偏移, 这使得利用微带天线测量应变成为可能^[6,7]. 本文就是探究这种基于微带天线的应变测量技术.

2 测量原理简述

基于微带天线的应变测量技术, 主要依靠微带

天线中心频率的应变依赖行为, 即当微带天线发生变形时, 相应的中心频率也会发生偏移, 这种偏移量与应变之间存在近似线性的关系, 如此便可通过测量天线中心频率来获得应变大小. 如图 1 所示, 基于微带天线的应变传感器由三部分组成: 导体贴片、介质基片和金属接地板^[8,9].

导体贴片和金属接地板由金属良导体制成, 二者形成一个特定频率的电磁谐振腔, 基于传输线模型, 矩形微带天线的中心频率计算公式如下^[10]:

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{\text{re}}}} \frac{1}{L + 2\Delta L_{\text{oc}}}, \quad (1)$$

式中 c 是真空光速, ϵ_{re} 是有效介电常数, L 是导体贴片长度, 定义为沿着导体贴片辐射模式方向上的长度. ΔL_{oc} 是补偿长度. 有效介电常数 ϵ_{re} 与介质基片的相对介电常数 ϵ_r , 厚度 h 以及导体贴片宽度 W 有关:

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

补偿长度 ΔL_{oc} 可以通过有效介电常数、介质基片厚度以及导体贴片宽度计算得出:

$$\Delta L_{\text{oc}} = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{re}} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_{\text{re}} - 0.258)(W/h + 0.813)}. \quad (3)$$

假设天线沿着它的长度方向发生一个正应变 ϵ_L , 导体贴片的宽度 W 和介质基片的厚度 h 会由于泊松效应发生改变:

$$\begin{aligned} W &= (1 - \nu_p \epsilon_L) W_0, \\ h &= (1 - \nu_s \epsilon_L) h_0. \end{aligned} \quad (4)$$

假设导体贴片与介质基片的泊松比相同或相近, 均为 ν , 则比值 W/h 将不会随着应变的变化而变化, 是一个常数. 这样, (2) 式的有效介电常数与应变无

图 1 矩形微带天线

关, (3)式的补偿长度与介质基片的厚度成正比关系. 因此, (1)式的中心频率计算公式可改写为

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}} \frac{1}{L + 2\Delta L_{\text{oc}}} = \frac{C_1}{L + C_2 h}, \quad (5)$$

其中,

$$C_1 = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}}, \quad C_2 = 0.824 \frac{(\varepsilon_{\text{re}} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_{\text{re}} - 0.258)(W/h + 0.813)}.$$

在产生正应变 ε_L 后, 中心频率如下:

$$f_{\text{res}}(\varepsilon_L) = \frac{C_1}{L(1 + \varepsilon_L) + C_2 h(1 - \nu \varepsilon_L)}. \quad (6)$$

联合求解(5)和(6)式, 得到应变 ε_L 和中心频率偏移 Δf_{res} 之间的关系式:

$$\varepsilon_L = -\frac{L + C_2 h}{L - \nu C_2 h} \frac{f_{\text{res}}(\varepsilon_L) - f_{\text{res}}}{f_{\text{res}}} = C \frac{\Delta f_{\text{res}}}{f_{\text{res}}}, \quad (7)$$

其中, $\Delta f_{\text{res}} = f_{\text{res}}(\varepsilon_L) - f_{\text{res}}$. (7)式也可改写成如下:

$$f_{\text{res}}(\varepsilon_L) = -\frac{C_1(L - \nu C_2 h)}{(L + C_2 h)^2} \varepsilon_L + \frac{C_1}{L + C_2 h} = K \varepsilon_L + f_{\text{res}}.$$

通过分析可知, 传感器应变灵敏度与微带天线工作的特定频率、介质基片材料的性质有关. 对于正应变来说, 天线的长度会增加, 这使得天线的中心频率降低. 然而如果将应变施加在宽度上, 由于泊松效应会使得天线的中心频率增大, 但这种改变明显低于前者, 故用长度方向测量应变, 其敏感度要远大于用宽度方向.

3 方案设计与仿真

图 1 的基于微带天线的应变传感器结构需要设计的尺寸参数包括: 导体贴片的长度 L , 宽度 W ; 介质基片的厚度 h , 边长 a . 当电场极化方向与导体贴片长度方向平行时, 辐射模式为 TM_{10} , 而将电场极化方向与导体贴片宽度方向平行的辐射模式指定为 TM_{01} . 对于确定了介质基片厚度和相对介电常数的天线来说, 其尺寸的计算也是来自于这两种辐射模式对应的中心频率. 将 TM_{10} 模式对应的中心频率标记为 f_{10} , 则导体贴片长度就可以由下式计算出来:

$$L = \frac{c}{2f_{10}\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}} - 2\Delta L_{\text{oc}}. \quad (9)$$

类似地, 将 TM_{01} 模式对应的谐振频率标记为 f_{01} ,

则导体贴片宽度就可以由下式计算出来:

$$W = \frac{c}{2f_{01}\sqrt{\varepsilon_{\text{re}}}} - 2\Delta W_{\text{oc}}, \quad (10)$$

其中, ΔW_{oc} 是通过(3)式, 将 W 和 L 互换计算得到.

微带天线可以采用接触式连接, 也可采用非接触式连接. 本文旨在探究微带天线作为应变传感器的可行性, 故采用简单的接触式连接: 微带线馈电. 通过综合考虑各个因素的影响, 最终确定介质基片材料选用聚酰亚胺, 导体贴片和金属接地板选用铜. 介质基片相对介电常数 $\varepsilon_r=3.4$, 介质基片厚度 $h=0.05$ mm. 尺寸参数如表 1 所示.

另一方面, 利用 HFSS(high frequency structure simulator)分析包中强大的电磁模型仿真计算功能, 根据表 1 的设计方案, 依据 HFSS 设计流程建立相应的仿真模型, 分析获得回波损耗 S_{11} 参数曲线. 通过比较仿真结果和理论值来验证设计方案的合理性. 四种方案的仿真流程相似, 这里只叙述方案 A. 仿真流程简介: 1) 新建 HFSS 工程, 设置求解类型: 模式驱动求解; 2) 建立微带天线模型, 如图 2 所示; 3) 设置边界条件: 理想导体边界、辐射边界; 设置端口激励: 集总端口激励; 4) 求解设置: 求解频率 20.26 GHz; 扫频设置, 快速扫频, 频率 15~22 GHz; 5) 后处理: S_{11} 参数曲线^[11-13]. 仿真结果数据见表 2.

从上面 4 个方案的仿真结果来看, TM_{10} 模式中心频率 f_{10} 的仿真结果与理论值相差较小, 并且 TM_{10} 模式中心频率 f_{10} 较高时, 相差仅有 0.5%~0.8%; 而

表 1 应变传感器尺寸参数

方案	边长 $a(\text{mm})$	长度 $L(\text{mm})$	宽度 $W(\text{mm})$	频率 $f_{10}(\text{GHz})$	频率 $f_{01}(\text{GHz})$
A	10	5	4	16.28	20.26
B	20	10	8	8.14	10.15
C	40	20	16	4.06	5.03
D	50	30	20	2.70	4.05

图 2 (网络版彩图)方案 A 仿真模型

表 2 各方案仿真结果

方案	理论	仿真	理论	仿真
	$f_{01}(\text{GHz})$	$f_{01}(\text{GHz})$	$f_{10}(\text{GHz})$	$f_{10}(\text{GHz})$
A	16.28	18.4	20.26	20.4
B	8.14	8.80	10.15	10.10
C	4.06	4.03	5.03	4.90
D	2.70	2.52	4.05	3.95

TM₀₁ 模式中心频率 f_{01} 在某些情况下相差较小, 大多数情况下相差较大. 这也是选择 TM₁₀ 模式中心频率作为传感器应变测量频率的原因之一.

4 实验

前两节对基于微带天线的应变传感器进行了理论计算和仿真. 但为了验证预期的设想, 即当微带天线应变传感器变形时, 其中心频率会发生偏移, 而且偏移量与应变成线性相关, 需要进行实验进一步验证. 实验平台主要由以下几部分组成: 微带天线应变传感器、激励耦合端口、矢量网络分析仪、悬臂梁及重物. 其中微带天线应变传感器是整个实验的核心部件, 也是本文所要探究的重点. 介质基片材料为聚酰亚胺, 其上附着压延铜, 铜层厚度为 0.01 mm. 成品表面光滑无划痕, 如图 3 所示.

将裁剪好的微带天线应变传感器黏附于铝合金悬臂梁表面上, 通过激励耦合端口与矢量网络分析仪相连, 在悬臂梁自由端施加载荷进行应变实验, 如图 4 所示. 矢量网络分析仪提供的微波信号通过激励耦合端口传递给传感器. 回波信号通过同一回路传给矢量网络分析仪. 应变可由下式计算得出:

$$\varepsilon = \frac{Mt}{2EI}. \quad (11)$$

图 3 (网络版彩图)传感器实物图

(11)式中 EI 为悬臂梁抗弯刚度, M 为传感器处弯矩, t 为悬臂梁截面高度. 依次加载, 每级载荷重复三次读取其中心频率, 将读取的 3 个中心频率的平均值作为该级载荷水平下的微带天线中心频率, 数据见表 3.

将表 3 中的实验数据进行处理, 用 Matlab 软件

图 4 (网络版彩图)实验平台

表 3 应变测量实验数据表

方案	加载重量 (kg)	应变 ($\mu\varepsilon$)	中心频率均值 $f(\text{GHz})$
A	0	0	18.819
	3	89	18.818
	6	152	18.817
	9	215	18.815
	12	278	18.813
	15	341	18.812
B	0	0	6.002
	3	84	6.001
	6	142	6.001
	9	203	6.000
	12	262	5.999
	15	321	5.999
C	0	0	4.157
	3	87	4.157
	6	149	4.156
	9	210	4.156
	12	272	4.155
	15	333	4.154
D	0	0	2.598
	3	95	2.595
	6	162	2.591
	9	229	2.588
	12	296	2.585
	15	363	2.581

图5 中心频率与应变直线图

绘制成频率-应变图, 并进行拟合得到拟合直线, 结果如图5所示。

通过对照相关系数临界值表, 方案A、B的置信度超过99%, 方案C的置信度超过98%, 方案D的置信度超过99.9%, 微带天线的中心频率偏移与应变存在强烈的线性关系, 与理论分析相符。方案A、B、C、D的灵敏度分别为20.5, 9.3, 9.0, 46.8 kHz/ $\mu\epsilon$ 。可见, 传感器的灵敏度受到几何尺寸与中心频率的双重影响: 中心频率越高, 灵敏度越好; 尺寸越大, 灵敏度越高。但另一方面, 第1节的理论分析表明微带天线的几何尺寸与其中心频率负相关, 即尺寸越大, 中心频率越低。因此在设计微带天线应变传感器时应综合考虑这两者的影响。

5 结论

本文对一种基于微带天线的应变测量技术进行了一些初步探索, 并对基于此技术的传感器进行了设计、制造和实验, 验证了利用这种新型的微带天线应变传感器进行应变测量的可行性。通过对四种不同尺寸的微带天线的应变测量实验结果, 得出如下结论: 微带天线的中心频率偏移与应变之间存在很强的线性关系; 微带天线应变传感器的初始中心频率与尺寸共同影响其灵敏度, 中心频率越高、尺寸越大, 灵敏度越好。不过中心频率与尺寸之间是负相关, 即尺寸越大, 中心频率越低。所以欲使传感器灵敏度最优需均衡考虑二者的影响。

参考文献

- 1 Lynch J P, Loh K J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. Shock Vib Digest, 2006, 38: 91-130

- 2 Yi X, Wu T, Wang Y, et al. Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas. *Int J Smart Nano Mater*, 2011, 2: 22–38
- 3 Lee H, Naishadham K, Tentzeris M M, et al. A novel highly-sensitive antenna-based “smart skin” gas sensor utilizing carbon nanotubes and inkjet printing. In: *Antennas and Propagation (APSURSI), 2011 IEEE International Symposium on*. Spokane: IEEE, 2011. 1593–1596
- 4 Mohammad I, Gowda V, Zhai H, et al. Detecting crack orientation using patch antenna sensors. *Meas Sci Technol*, 2012, 23: 015102, doi:10.1088/0957-0233/23/1/015102
- 5 Deshmukh S, Mohammad I, Xu X, et al. Unpowered antenna sensor for crack detection and measurement. In: *SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. San Diego, California, 2010. 764742-764742-9
- 6 Thai T T, DeJean G R, Tentzeris M M. A novel front-end radio frequency pressure transducer based on a dual-band resonator for wireless sensing. In: *Microwave Symposium Digest, 2009. MTT'09. IEEE MTT-S International*. Boston: IEEE, 2009. 1701–1704
- 7 Lee H, Shaker G, Lakafosis V, et al. Antenna-based “smart skin” sensors for sustainable, wireless sensor networks. In: *Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on*. Athens: IEEE, 2012. 189–193
- 8 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991
- 9 Pozar D M, 著. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 微波工程. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 10 Tata U, Huang H, Carter R L, et al. Exploiting a patch antenna for strain measurements. *Meas Sci Technol*, 2009, 20: 015201, doi:10.1088/0957-0233/20/1/015201
- 11 李艳, 戴亚文. 基于 HFSS 矩形微带贴片天线的仿真设计. *机电工程技术*, 2010, 010: 40–41
- 12 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解. 北京: 人民邮电出版社, 2010
- 13 谢拥军, 刘莹. HFSS 原理与工程应用. 江苏: 科技出版社, 2010

A strain measurement method based on microstrip patch antennas

GE HangYu¹, LI Hao¹, CHEN YueLiang², LIU MaBao^{1,3} & WANG QiaoYun⁴

¹ School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² Research Division of Aircraft, Institute of Naval Aeronautical Engineering at Qingdao, Qingdao 266041, China;

³ State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

⁴ Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China

Structure in service, will often crack. If not detected in time, the crack will eventually lead to structural failure. As the small size of the generated crack, it is not easy to detect it. When a crack is detected, it often has been extended to or even beyond the critical size, which is harmful to structural health. As cracks are usually initiated by stress concentration, excessive strain in key areas can be monitored for early signs of fatigue and fracture. Unfortunately, traditional strain measurement methods are difficult to meet the long-term, low-cost, rapid detection and other requirements for strain measurement in this field. To overcome the shortcomings of traditional strain sensors, a new kind of strain sensor based on the microstrip antenna has been explored, where the structural strain information can be collected by the change of antenna resonant frequencies. In this paper, four kinds of proposed antenna sensors with different dimensions were designed and manufactured to measure the strain applied to the cantilever beam. Based on the S_{11} curve of the microstrip antenna by the vector network analyzer, the relationship between strain and center frequency was revealed. The results showed that there is a strong linear relationship between the center frequency shift and the strain, and the microstrip antenna sensor can be used to measure strain.

microstrip antenna, center frequency, strain measurement, structural health

doi: 10.1360/N092014-00007