

# RFID 式应变传感器的研究进展与应用

蒋 灿<sup>1</sup> 谢丽宇<sup>1,\*</sup> 薛松涛<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 东北工业大学建筑系, 日本 仙台 982-8577)

**摘 要** 无线射频识别技术(RFID)具有非接触性,现已在国内外得到迅速发展,本世纪以来,许多学者尝试将该技术引入应变传感器的研发中,实现了无源无线应变测量。在应变测量中引入RFID技术有两种思路,可以以RFID标签中的天线作为测量单元,通过应变下天线电学性质的改变来测量应变;也可以把RFID标签与传统的应变计相连,在RFID标签中存储应变数据。首先介绍了RFID技术用于测量应变的原理,再列举了两种思路下学者们提出的RFID式应变传感器以及配套的阅读器,并总结RFID式应变传感器的应用现状,展望其发展前景。

**关键词** RFID, 应变传感器, 天线, 阅读器

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2017.03.026

## A Review of the Development and Application of the RFID Strain Sensor

JIANG Can<sup>1</sup> XIE Liyu<sup>1,\*</sup> XUE Songtao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan)

**Abstract** As an automatic and contactless identify technology, radio frequency identification (RFID) technology has been developing rapidly at home and abroad, since this century, many scholars try to use this technology to produce passive wireless strain sensors. There are two way to introduce RFID technology, regard the antenna on the RFID tag as measurement unit, through the changes of antenna electrical properties, the strain on the antenna can be measured; or connect RFID tags with traditional strain gauge, the strain data will be stored in the RFID tag. This paper firstly introduces the principle of using RFID technology for strain measurement, the list RFID strain sensors and the RFID readers supported by scholars under the guidance of the two ideas, finally summarize the present situation of the RFID strain sensor and prospects its future.

**Keywords** RFID, strain sensor, antenna, reader

## 0 引 言

目前常用的应变传感器有电阻式应变片、振弦式应变计和布拉格光栅传感器。电阻式应变片可以将应变变化转换为电阻变化,并通过电桥进一步转换为电压或电流变化<sup>[1]</sup>;振弦式应变计利用弦的共振频率与应变的关系来进行应变测量;布拉格光栅传感器的原理是是基于光纤光栅布拉格波长的漂移理论<sup>[2]</sup>。这些应变传感器具有自

身的优点,在实际工程应用中可根据现场情况选择合适的应变传感器,但它们也具有无法克服的缺点:传感器布置和信号采集采用有线的方式,作业复杂、引线众多、采集设备价格不菲,尽管目前采用一些如 Zigbee、Wifi 等无线通信方式进行了改善,但还不能从根本上克服这一缺点;在信号采集过程中需要实时的电源供电,而结构在经历灾害时可能发生供电失效的问题,导致信号采集系统无法获得灾害发生时的数据。

为突破应变传感器在实际应用中有源、有线

收稿日期: 2016-05-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助,自然科学基金项目(51478356)资助

\* 联系作者, Email: liyuxie@tongji.edu.cn

的限制,无线射频识别技术(Radio Frequency Identification,RFID技术)为应变传感器的设计提供了一种新思路,可以实现无须外部有线电源、非接触式的应变测量。RFID技术最早的应用可追溯到第二次世界大战中用于区分联军和纳粹飞机的“敌我辨识”系统。它是一种利用射频通信实现非接触式现代自动识别系统。它无须人工干预,与光学识别系统相比,不易受覆盖物的影响,可用于各种恶劣环境。随着技术的进步,RFID应用领域日益扩大,现已涉及人们日常生活的各个方面。在土木工程领域,RFID系统通常与建筑信息模型(BIM)系统集成,用于施工现场的安全监控,有利于实现实时可视化、信息自动化、多方协同参与的高效安全监控<sup>[3]</sup>。

基于RFID技术的应变传感器有两种形式,一种是利用RFID标签的天线部分进行应变传感,当RFID系统中的应答器上的天线经历应变时,天线的电学性质(如谐振频率)发生改变,通过RFID系统的读写器可以检测到此变化,将天线所经历的应变转变为电学性质的测量;第二种是利用RFID标签的信号发射功能,将RFID标签与其他应变传感器相连,传感器获得应变数据存储在RFID标签的芯片中,并通过天线将数据传输给读写器。相对于传统的应变传感器,无源RFID式应变传感器在记录和存储数据时不需要能量供应,仅需要在读取数据时利用阅读器向传感器提供能量。

利用上述两种形式研发出的无源、无线RFID应变传感器可实现低成本、易于维护的结构状态信息采集和存储终端,若针对在土木工程行业中应用的特点进行设计和开发,还可以发展出更多的应用场景,如无源应变计、无源裂缝计、内置于混凝土中的智能骨料等。RFID的低成本和可靠性可极大地降低构件应变信息的采集成本和布置作业量,可以预见到无源、无线RFID应变计在土木工程的应用还有更为广阔的前景。

## 1 工作原理

### 1.1 RFID原理

RFID系统由读写器与应答器(标签)组成<sup>[4]</sup>,如图1所示。如图2所示,应答器是该系统中存储电子数据的载体,由耦合元件(接收天线)和电子芯片组成,芯片和接收天线需满足阻抗匹

配才能共同工作。每个芯片都有唯一的识别码,一般存储约定的电子数据;接收天线用于接收阅读器发射的电磁波,为芯片读写数据、传输数据提供能量,同时也起到发送和接收数据的作用。读写器用于读取应答器中的电子数据,它通过自带的天线向应答器发射电磁信号,应答器接收到信号后给予读写器回复,读写器再将回复信号传入处理器中进行识别和处理,通过这种方法可以读取和更新应答器中的数据信号。

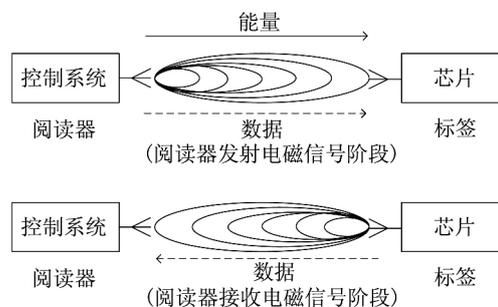


图1 RFID系统组成

Fig. 1 Constitute of RFID system

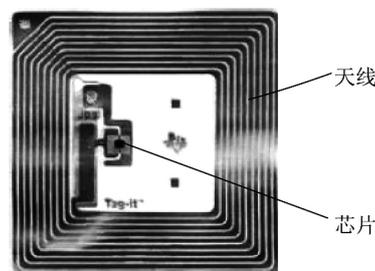


图2 一种RFID应答器<sup>[5]</sup>

Fig. 2 A RFID tag

在RFID系统中,天线起着重要的作用,它是辐射或接收电磁波的装置,必须具有合适的形状、结构和馈电方式。以天线的通信及能量感应方式可将天线分为两类:电感耦合及电磁反向散射耦合。电感耦合型天线依据电磁感应原理,通过高频交变磁场实现耦合,原理与发电机类似,一般这种天线工作频率较低;电磁反向散射耦合式天线与雷达类似,发射电磁波后碰到目标反射,同时携带目标信息,通常这种天线的工作频率较高。

工作频率是天线的基本特征,按照按天线的工作频段的不同,可将RFID系统划分为低频、高频、特高频和超高频<sup>[6]</sup>,如表1所示。RFID应用占据的频段或频点在国际上有公认的划分,即位于ISM波段。典型的工作频率有125 kHz、133 kHz、13.56 MHz、27.12 MHz、433 MHz、902 MHz

~928 MHz、2.45 GHz、5.8 GHz 等,在 RFID 式应变传感器中,常用的工作频率是特高频与超高频,

因为它们数据传输速度较快、传输距离较远且谐振频率漂移量较大。

表 1 RFID 系统的频段划分

Table 1 Division of RFID system by frequency

参数	低频率(LF)	高频率(HF)	特高频率(UHF)	超高频率(SHF)
	125 ~ 134 kHz	13.56 MHz	368 ~ 915 MHz	2.4 ~ 5.8 GHz
读取距离	1.2 m	1.2 m	4 m	15 m
速度	慢	中等	快	非常快
环境影响	无影响	无影响	影响较大	影响较大
主要应用	畜牧业和动物管理	智能卡、门禁和产品管理	物流和供应管理	ETC 系统和货盘标识的管理

### 1.2 应用于应变测量的 RFID 技术

在应变测量中引入 RFID 技术有两种方式,可选择把 RFID 标签与传统的应变计相连,也可以选择用 RFID 标签中的天线作为应变传感单元。

#### 1.2.1 RFID 作为应变传感器的信息存储介质和发送单元

此类 RFID 式应变传感器将应变测量单元与 RFID 标签通过导线相连,应变测量单元通常是电阻式应变片及惠斯通电桥。可以将应变测量部分与 RFID 标签集成为一个部件,也可将两者分别固定在结构上。

若应变测量单元为电阻式应变片时,固定在结构上的应变片在应变作用下,金属电阻丝的长度与直径发生变化,使得电阻丝的电阻值发生改变。测量结构应变时,RFID 系统的阅读器向 RFID 标签发送电磁波,为 RFID 标签停供能量,同时激活与标签相连的惠斯通电桥,通过惠斯通电桥测量出电阻丝的电阻变化量,并将该变化量以电压信号的形式传输到 RFID 标签中的芯片中储存,最后通过 RFID 标签中的天线将电阻变化信息以电磁波的形式传递给阅读器,阅读器利用已输入的算法将电阻变化信息转换为应变值。

#### 1.2.2 将 RFID 标签中的天线作为应变的传感元件

当 RFID 标签中的天线经历应变后,天线谐振频率、回波反射功率等参数会发生改变,通过测量这些参数的该变量,可以计算天线的应变。本节以矩形贴片天线为例,介绍天线形状的变化如何引起天线谐振频率的改变以及如何通过测量谐振频率的变化计算出天线的应变值。

贴片天线是一种常用的天线,它具有体积小、低剖面等优点,但与其他天线相比,频带较窄、损

耗较大且单个微带天线的功率容量小。如图 3 所示,常用的微带天线是在一个薄介质基片上,一面附上金属薄层作为接地板,另一面用光刻腐蚀等方法做出一定形状的金属贴片,利用微带线或同轴探针对贴片馈电。

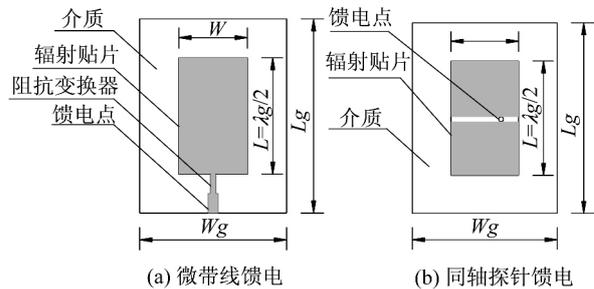


图 3 矩形贴片天线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rectangular patch antenna

谐振频率是天线的重要特征,它是天线的最佳工作频率,当天线以谐振频率工作时,被天线反向散射的能量最少,天线接收的能量最多。谐振频率与天线的形状有关,而对矩形贴片天线,谐振频率主要与其辐射贴片长度有关。常用的二分之一波长矩形贴片天线,其贴片长度约等于其谐振频率所对应的波长  $\lambda_g$  的二分之一<sup>[7]</sup>。矩形贴片天线的辐射贴片宽度等参数对天线的谐振频率影响很小。

矩形贴片天线馈电以后,天线辐射贴片两端形成宽度为 W,长度为介质板厚度 h 的两个方向相同的交变电场(又叫辐射缝隙),向外辐射出电磁波,两交变电场间的距离约为所辐射出电磁波波长的二分之一,如图 4 所示。

矩形贴片天线谐振频率受辐射贴片长度影响,公式为<sup>[7]</sup>:

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

式中 c 是真空中光速;  $\epsilon_e$  是有效介电常数;  $\epsilon_e$  是

与介质基片相对介电常数  $\epsilon_r$ 、介质板厚度  $h$  以及辐射贴片宽度  $W$  有关<sup>[7]</sup>:

$$\epsilon_e = \frac{1 + \epsilon_r}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$L$  是辐射贴片长度;  $\Delta L$  是补偿长度,它与有效介电常数  $\epsilon_e$ 、介质板厚度  $h$  以及辐射贴片宽度  $W$  有关<sup>[7]</sup>:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (3)$$

从式(1)中不难看出  $L$  与  $\Delta L$  相加即为介质板中电磁波长的一半。

$$L + \Delta L = \frac{\lambda_g}{2} \quad (4)$$

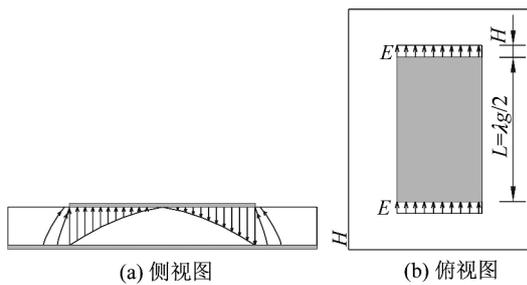


图4 矩形贴片天线工作时的电场

Fig. 4 The electric field distribution of rectangular patch antenna while working

由于  $\Delta L < L$ ,当矩形贴片天线长度方向发生  $\epsilon$  的小应变时,天线谐振频率与应变近似成线性关系,斜率约为天线的初始谐振频率。

$$f_R \approx \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_e}L(1+\epsilon)} = \frac{f_{R0}}{1+\epsilon} \approx f_{R0}(1-\epsilon) \quad (5)$$

因此,这类传感器的初始谐振频率越高,其灵敏度越高。

为确定天线所经历的应变,需要确定天线的谐振频率变化量,即需确定应变状态下天线的谐振频率。如上文所述,谐振频率是天线的最佳工作频率,天线以谐振频率工作时反向散射的能量最少,利用具有扫频功能的无线阅读器或者用同轴线将天线与网络分析仪相连,可以让天线以不同的频率工作,并测出天线在哪个工作频率下反向散射能量最少,即测量出天线的谐振频率。测试设备以不同频率向天线发送电磁信号,并接收天线反向散射回来的电磁信号,发送的信号功率与接收到的信号功率之比被称为  $S_{11}$  参数。当测试设备发送的电磁

信号的频率与天线的谐振频率最接近时,收到的天线的反向散射信号最小,即  $S_{11}$  参数最小,如图5所示。通过统计测试阶段,不同频率的电磁信号对应的  $S_{11}$  值,可以确定天线的谐振频率,然后根据谐振频率的漂移量可以确定天线所经历的应变变量。

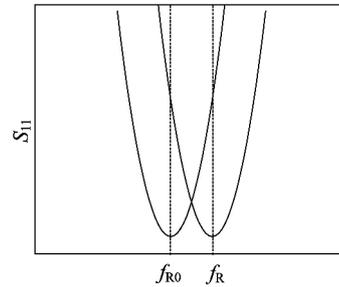


图5 确定谐振频率漂移量的方法

Fig. 5 Method for determining resonance frequency drift

综上所述,矩形贴片天线在应变下天线形状发生改变,引起谐振频率漂移,通过测量设备测出谐振频率漂移量,可确定天线所经历的应变。对于其他种类的天线,形状变化引起谐振频率变化的原理以及测量天线谐振频率的方法与矩形贴片天线类似。

## 2 基于 RFID 的应变传感技术的实现

### 2.1 应变传感器

#### 2.1.1 RFID 天线作传感单元的技术实现

在利用 RFID 系统制作应变计方面,早期学者利用 RFID 原理研发出一些立体式的应变计。Mita 等<sup>[8]</sup>开发了一种用于测量结构中最大应变的应变计,如图6所示。该应变计中包含由可变电容与恒定电感组成的天线,可变电容部分由两个内外两个铝套筒和绝缘层组成,两个铝套筒隔着绝缘层套在一起。将滑动式可变电容的外套筒固定在结构上,内套筒通过细杆与结构的另一部分相连,当结构上出现拉应变时,细杆拉着可变电容的内套筒移动,使两套筒重叠长度发生改变引起电容变化,引起天线谐振频率的漂移,利用磁倾角测量仪可测量该漂移。当结构上拉应变减小时,由于细杆的临界压力小于能使内套筒滑动的摩擦力,在细杆推动内套筒前细杆已经屈服,可变电容不会改变,因此,该传感器仅纪录结构的最大应变。

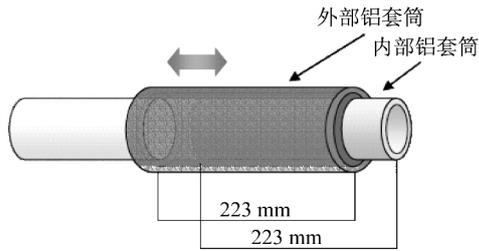


图 6 RFID 式应变传感器<sup>[8]</sup>  
Fig. 6 RFID strain sensor

该传感器已有了 RFID 式应变传感器的雏形,但与今后学者提出的 RFID 式应变传感器比,它主要存在两个问题。第一,它的初始谐振频率仅为 2.16 MHz 相对较低,使得其灵敏度也较低;第二,它的尺寸较大,总长为 400 mm。其中滑动式的可变电容部分长度为 223 mm,将内套筒与结构相连的细线长 100 mm。

Yi 等<sup>[9]</sup>开发了一种采用片状天线的 RFID 传感器,可监测材料表面的应变和开裂。将 RFID 无线应变计粘贴于待测材料上,当发生变形后天线的形状也相应引起电磁谐波频率发生相应的漂移,读写器可相应地判断出电磁谐波频率漂移量,进而换算为基材表面的应变值。该应变计尺寸为 6.9 cm × 6 cm,零应力状态时谐振频率为 913.623 MHz,如图 7 所示。

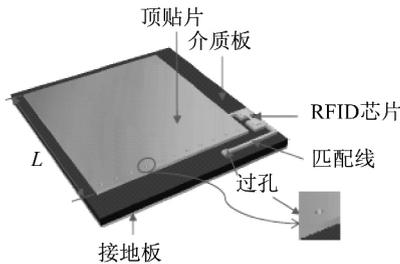


图 7 RFID 式应变传感器<sup>[9]</sup>  
Fig. 7 RFID strain sensor

Bai 等<sup>[10]</sup>研究了一种采用偶极子天线的 RFID 无线应变计,当传感器的超过某一预先设定阈值时线应变计,拉断了金属丝导致 RFID 中的电路发生变化,从而使原先处于短路状态的 RFID 应答器变为激活状态而能被阅读器读取,可用于记录结构发生最大应变的程度,还可以通过设计使其具有多重阈值,如图 8 所示。该应变计天线工作范围为 902 ~ 927 MHz,应变计尺寸为 3.7 cm × 3 cm。他们对该应变计设计了 0.66% 和 1.3% 两个阈值。

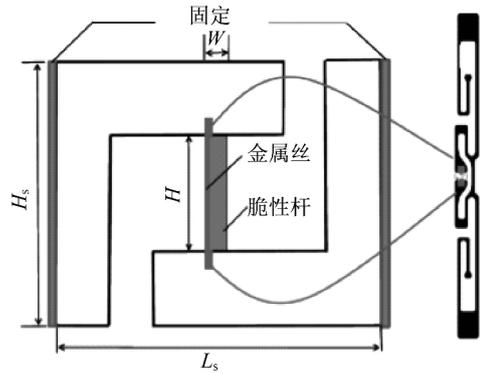


图 8 RFID 式应变传感器<sup>[10]</sup>  
Fig. 8 RFID strain sensor

Occhiuzzi 等<sup>[11]</sup>设计了一种采用折叠的偶极子天线的 RFID 传感器,当应变发生时,折叠的偶极子天线中各金属丝的夹角会发生变化,引起该天线的一些参数的改变。他比较了采用增益、天线阻抗、能量传递系数与回波反射功率这 4 个参数作为衡量应变的指标的优劣后,确定以回波反射功率作为参数来测量应变。

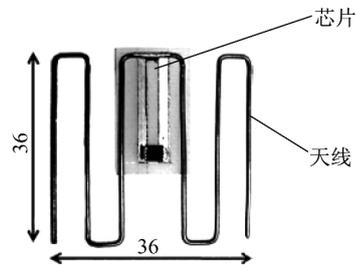


图 9 RFID 式应变传感器<sup>[11]</sup>  
Fig. 9 RFID strain sensor

Daliri 等<sup>[12]</sup>设计了一种 RFID 应变计,它由一个喇叭天线和一个带有 1.5 cm × 1.5 cm 圆形微带贴片的反射面组成,零应变时谐振频率为 1.53 GHz,通过研究发现,天线谐振频率漂移量与应变变化的比值关系与喇叭天线和反射面所成的角度有关。Qian 等<sup>[13]</sup>也设计了初始频率约为 4.924 GHz 的贴片天线式 RFID 应变计,利用谐振频率的漂移来获取应变。

综上所述,在测量应变时,学者们主要采用天线谐振频率作为应变测量指标,其主要原因是该参数稳定难以受环境影响,与应变值保持良好的单调关系,并在小应变状态下谐振频率与应变近似为线性。为了使应变传感灵敏度更高,学者们更多地选择特高频或超高频天线,相比与其他天线贴片天线结构简单,故被选用的案例更多。

也有学者设计出测量历史最大应变的传感器,该传感器在应变超过预定的阈值后天线的结构发生改变,天线从休眠状态切换到激活状态。

### 2.1.2 RFID 标签作为信号输出单元的技术实现

日本的 taiheyo 水泥公司<sup>[14]</sup>开发了一种用于测量钢混结构中纵筋应变的 RFID 式应变计,如图 10,该传感器由传感单元和 RFID 标签组成,传感单元由有线应变计组成,它被固定在待测的纵筋之上,并通过导线与 RFID 标签相连,RFID 标签则固定在另外一根纵筋上面。该系统与钢筋笼连接完毕后,再浇灌混凝土。测量进行时,RFID 阅读器可发射电磁信号穿透混凝土,为传感器提供能量驱动传感器工作,阅读器通过 RFID 标签可以读写数据。

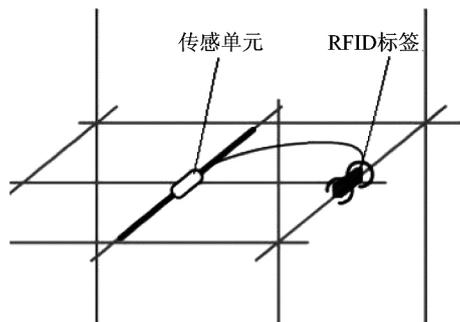


图 10 RFID 式应变传感器<sup>[14]</sup>  
Fig. 10 RFID strain sensor

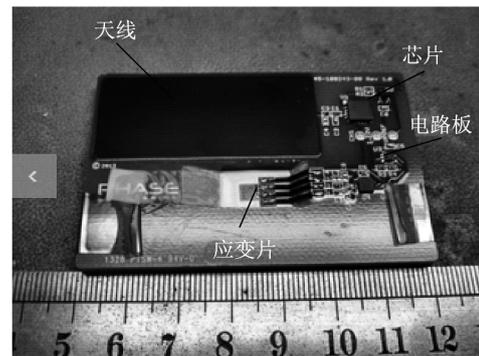
如图 11 所示,美国的 phase IV 工程公司<sup>[15]</sup>开发了一种特高频 RFID 式应变系统,该系统的标签部分尺寸约为 7cm × 4cm,由电阻式应变片、温度补偿片、天线、惠斯通电桥和电路板组成,应变和温度作用下,应变片的电阻值发生改变,通过惠世通电桥将电阻改变量转换为电压信号,通过该电路板将电压信号传递至 RFID 芯片中。该标签可贴在金属表面,也可放置于墙体与混凝土中。同时该公司制作与该标签配套的手持式阅读器,方便携带并且具有良好的界面,可在测试时为 RFID 标签提供稳定的电压输入并且读取数据。该系统能对 15 个以下的微应变敏感,并且能感知 1 °C 的温度变化,并能区分不同 ID 号的 RFID 标签。

Moss 等<sup>[16]</sup>研究了一种植入式 125 kHz 的低频 RFID 应变测量系统,它由若干贴片元件与全桥或四分之一桥电阻式应变计组成。如图 12 所示,将该系统安装在骨接合植入物金属锁定接骨板上,并植入骨缝接合者体内,用于监测骨缝接合

者的恢复情况。该应变传感器尺寸约为 5 cm × 7 cm,可测量应变与温度变化,并获得比 CT 扫描更高的精度,但读取范围较小,仅为 8 cm。



(a) 应变测量系统



(b) 应变传感器

图 11 RFID 式应变传感器<sup>[15]</sup>  
Fig. 11 RFID strain sensor

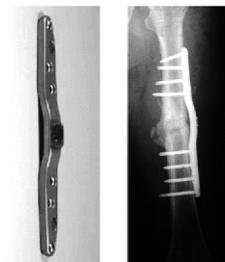


图 12 RFID 式应变传感器<sup>[16]</sup>  
Fig. 12 RFID strain sensor

李恒等<sup>[17]</sup>与 Hamel 等<sup>[18]</sup>采用相同的原理,把 RFID 标签与传统的应变计相连,设计出相应专利。

Thomson 等<sup>[19]</sup>没有选择传统的应变测量方式,而是把射频腔和天线通过探针相连制成应变计。如图 13 所示,射频腔为一铜制空心圆柱体,直径为 25.4 mm,壁厚 2.5 mm。该传感器可放在结构上或埋于结构中,当结构出现应变时,射频腔长度变化引起其谐振频率漂移,通过探针与天线,外界的阅读者可获取射频腔谐振频率变化。该系统的初始谐振频率为 2.41 GHz,可探测的有效距

离可达到 10 m,测量精度可以达到十万分之一,利用阅读器扫频获得谐振频率漂移量的时间为 7 s。

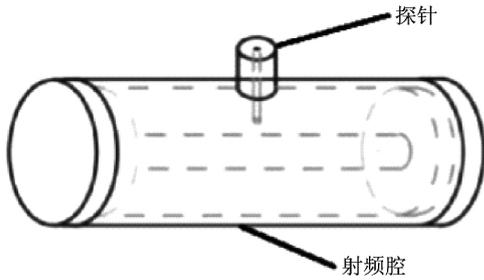


图 13 RFID 式应变传感器<sup>[19]</sup>  
Fig. 13 RFID strain sensor

综上所述,通常学者将 RFID 标签与传统的电阻式应变片相连,因为电阻式应变测量技术成熟而稳定,将电压信号形式的应变值储存在 RFID 芯片中也更容易。也有学者以射频腔为应变测量单元,以射频腔的谐振频率作为测量应变的参数,再将射频腔的谐振频率变化通过天线向外发射。

### 2.2 阅读器与测试技术

常用的 RFID 系统使用阅读器与 RFID 标签提供能量并读写芯片中存储的数据。阅读器包含两个关键模块:射频收发模块与控制系统模块。射频收发模块由发射机和天线组成,发射机产生高频电磁波可为启动应答器提供能量,并在标签与阅读器之间传输数据;发射机产生的电磁波通过天线向外发射,天线同时可以接收发射回来的电磁信号。控制系统模块用于执行应用系统软件发来的命令,并实现信号的编码和解码。

对于以天线作为传感单元的 RFID 式应变传感器,需要精确获取天线的频率漂移量,需要 RFID 标签测试技术。

传统的 RFID 标签测试技术采用矢量网络分析仪。在进行测量时,仪器发出扫频信号,信号通过输出口送至待测设备,待测设备会将输入的一部分信号反射,未被反射的信号会通过待测设备输出。如图 14 所示,网络分析仪对输出和输入信号进行比较,得出待测设备的传输指标,如增益、插入损失等;将输出信号与反射信号对比可以得出待测设备的反射指标,如回波损耗等<sup>[20]</sup>。

在使用网络分析仪测试 RFID 式应变传感器时,要将传感器与网络分析仪通过同轴线相连,同轴线的阻抗通常为 50 Ω 或 75 Ω,如图 15 所示,若传感器与同轴线阻抗不匹配,需设计阻抗匹配

网络。2014 年,葛宇航等<sup>[21]</sup>就采用了网络分析仪测试他们所设计的 RFID 式应变传感器。

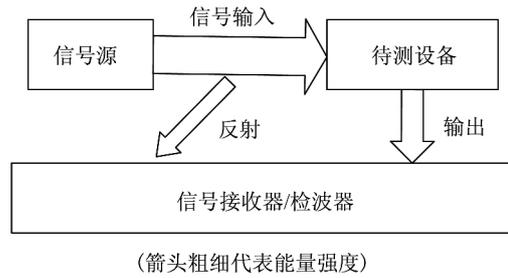


图 14 网络分析仪原理  
Fig. 14 Principle of network analyzer

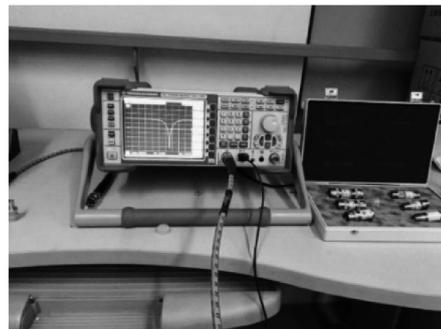


图 15 网络分析仪  
Fig. 15 A network analyzer

在 Yi<sup>[22]</sup>的论文中,他们采用了芬兰 Vayantic 公司生产的 tagformance 标签测试系统和美国 NI 公司的数据采集系统并配上收发电磁信号的平板天线,如图 16 所示。tagformance 标签测试系统适用于测试特高频频段的 RFID 标签的灵敏性以及读写范围。

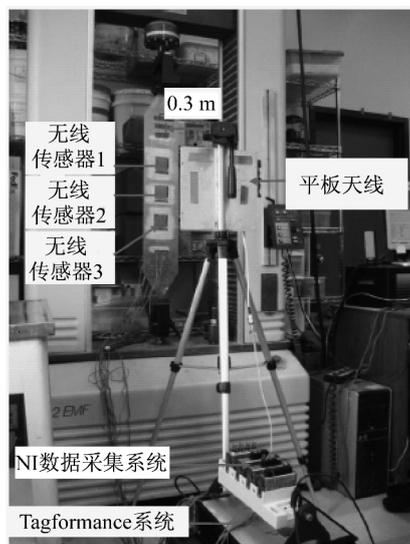


图 16 RFID 式应变传感器测试系统<sup>[22]</sup>  
Fig. 16 RFID strain sensor testing system

Mita 等<sup>[23]</sup>采用的是适合低频系统的磁倾角测量仪来检测 RFID 应变传感器的谐振频率漂移,Chuang 等<sup>[24]</sup>则自己开发了一套 2.4 GHz 的阅读器。

综上所述,对于将 RFID 标签与传统应变计相连组成的应变传感器,只需阅读器以固定的频率的电磁波向 RFID 标签传递数据与能量,阅读器需要有编码与解码的功能,以读取标签中芯片的编号及芯片中储存的数据,并且在阅读器中添加数据处理模块或将阅读器与后台相连,目前市场上常用的阅读器即可满足其要求。

对于将 RFID 标签中的天线作为应变测量单元的传感器,需要通过扫频精确确定其谐振频率,对应的阅读器必须具有扫频功能,并且为了排除环境干扰,准确获得天线的谐振频率,阅读器需要具有滤波、去噪等功能,同时为了识别 RFID 芯片的编码,阅读器也需要具备编码解码的功能。

### 3 结 论

如上文所述,将 RFID 技术引入应变传感器有两种思路,一种是将 RFID 标签的天线部分作为测量单元,通过天线谐振频率等电学参数的改变来获取应变信息;另一种是把 RFID 标签与其他形式的应变计相连,记录应变数据并通过读写器读取。许多学者按两种思路各自提出了自己的应变传感计,并且已有厂商按第二种思路制成了商业产品。

对于将 RFID 标签的天线部分作为测量单元的思路,不同学者提出了不同种类的天线来制作应变传感器,其中矩形贴片天线结构简单,制作方便;剖面低,适合粘贴与结构表面;频带较窄,方便寻找其谐振频率;并且宽度变化对天线谐振频率的影响不太,是目前最适合作应变测量单元的天线。

若以天线作为应变测量单元,需要精确测量天线的谐振频率或其他电学参数,要求阅读器必须具备扫频与对信号进行滤波去噪等功能,但目前能实现该功能的无线阅读器并不多,所以在这方面还很有研究价值。

此外,将 RFID 式应变传感器应用于土木工程领域,不论是将传感器埋入结构内部还是将传感器放置于结构表面(被粉刷层覆盖),传感器都会受到覆盖物的影响,目前关于覆盖物对 RFID

式应变传感器影响的文献较少,今后有开展该类研究的必要。

不论采用哪种思路,RFID 技术可以无源无线地测量应变,改进现有的有线应变测量系统在经济性和可移动性上的缺陷。

### 参考文献

- [1] 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.  
Yi Fuyan. Sixty years of electric resistance strain gage technique (1) [J]. Sensor World,1998(08): 27-32. (in Chinese)
- [2] 杨君琦. 应变传感器的应变传递理论及传感特性研究[D]. 中南大学,2013.  
Yang Junqi. Strain transfer theory and sensing property research of strain sensor [D]. Central South University,2013. (in Chinese)
- [3] 吴欢欢,周建平,许燕,等. RFID 发展及其应用综述[J]. 计算机应用与软件,2013(12):203-206.  
Wu Huanhuan, Zhou Jianping, Xu Yan, et al. A comprehensive review on RFID development and its application [J]. Computer Applications and Software, 2013 (12): 203-206. (in Chinese)
- [4] Finkenzeller Klaus. 射频识别技术原理和应用[M]. 北京:电子工业出版社,2012.  
Finkenzeller Klaus. The principle and application of radio frequency identification technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)
- [5] Canestri F, Matsuoka H. RFID application overview and testing requirements [R]. 2007.
- [6] 吴永祥. 射频识别(RFID)技术研究现状及发展展望[J]. 微计算机信息,2006(32):234-236.  
Wu Yongxiang. Status and prospects of RFID technique [J]. Control and Automation, 2006(32): 234-236. (in Chinese)
- [7] 张钧,刘克诚,张贤泽,等. 微带天线理论与工程[M]. 北京:国防工业出版社,1988.  
Zhang Jun, Liu Kecheng, Zhang Xianze, et al. Microstrip antenna theory and engineering [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [8] Mita A, Shinpei T. Damage index sensor for smart-structures [J]. Structure Engineering and Mechanics. 2004, 3-4(17): 1-23.
- [9] Yi X, Cho C, Cooper J, et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—electromagnetic,

- simulation and testing [J]. Smart Material and Structure. 2013( 22) .
- [10] Bai L. RFID sensor-driven structural condition monitoring in integrated building information modeling environment [D]. University of Maryland 2013.
- [11] Occhiuzzi C ,Paggi C ,Marrocco G. Passive RFID strain-sensor based on meander-line antennas [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation , 2011 ,12( 59) : 4836-4840.
- [12] Daliri A ,Galehdar A ,John S ,et al. Wireless strain measurement using circular microstrip patch antennas [J]. Sensors and Actuators A: Physical. 2012( 184) : 86-92.
- [13] Qian Z ,Tang Q ,Li J ,et al. Analysis and design of a strain sensor based on a microstrip patch antenna [Z]. 2012.
- [14] RFID strain measuring system: RFID diagnosis technology for concrete structure: Taiheiyu Cement Corporation [Z]: 2016.
- [15] Ching L ,Lektomiller J M. RFID sensor tag and system for small output transducer ,and related methods [P]. 14/485729.
- [16] Moss C ,Sass W ,Weinrich N ,et al. Low frequency RFID-strain measurement on passive implants [Z]. 2006.
- [17] 李恒. 无源无线 RFID 应力传感器 [P]. 103954385. Li Heng. Passive wireless RFID stress sensor [P]. 103954385. ( in Chinese)
- [18] Hamel M J ,Townsend C P ,Arms S W. Micropower peak strain detection system for remote interrogation [P]. 6622567B1.
- [19] Thomson D J ,Card D ,Bridges G E. RF cavity passive wireless sensors with time-domain gating-based interrogation for SHM of civil structures [J]. IEEE Sensors Journal 2009 ,11( 9) : 1430-1438.
- [20] 胡蔚星. 射频网络分析仪的原理和使用方法 [J]. 有线电视技术 2005( 3) : 67-71. Hu W. Principle and using method of RF network analyzer [J]. Cable Television Technology 2005( 3) : 67-71. ( in Chinese)
- [21] 葛航宇,李浩,陈跃良,等. 一种基于微带天线的应变测量技术 [J]. 中国科学: 技术科学 2014( 09) : 973-978. Ge Hangyu ,Li Hao ,Chen Yueliang ,et al. A strain measurement method based on microstrip patch antennas [J]. Scientia Sinica ( Technologica) 2014( 09) : 973-978. ( in Chinese)
- [22] Yi X ,Wu T ,Wang Y ,et al. Passive wireless smart-skin sensor using RFID-based folded patch antennas [J]. Smart and Nano Materials 2011 ,1( 2) : 22-38.
- [23] Mita A ,Shinpei T. A smart sensor using mechanical memory for structural health monitoring of a damage-controlled Building [J]. Smart Material and Structure. 2003 2( 12) : 204-209.
- [24] Chuang J ,Thomson D J ,Bridges G. Wireless strain sensor based on resonant RF cavities [J]. Smart Structures and Materials 2004( 5390) : 574-584.