

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.04.001

# 无源无线射频识别传感器及其在结构健康监测中的应用

田贵云<sup>1,2</sup> 张俊<sup>3</sup> 孟召宗<sup>4</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106; 2. 电子科技大学自动化工程学院, 成都, 611731;

3. 广东工业大学信息工程学院, 广州, 510006; 4. 英国南安普顿大学工程与环境学院, 南安普顿, SO17 1BJ)

**摘要:**针对无损检测与结构健康监测技术的发展趋势与挑战,介绍了一种无源无线射频识别(Radio frequency identification, RFID)监测传感器,并揭示了其在结构健康监测,特别是在航空航天领域的潜在应用。然后,从传感机制、信号测量、特征分析与提取等多角度对 RFID 传感技术在结构健康监测领域应用和存在的问题进行了全面阐述。最后,对 RFID 传感技术的发展前景和研究方向做了展望。本文为 RFID 传感技术在结构健康监测领域的研究和应用提供了理论指导和设计依据。

**关键词:**射频识别;无源无线传感器;无损检测;结构健康监测;裂纹

**中图分类号:** TP212.6; TP212.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2017)04-0453-08

## Passive Wireless RFID Sensors and Their Applications in Structural Health Monitoring

TIAN Guiyun<sup>1,2</sup>, ZHANG Jun<sup>3</sup>, MENG Zhaozong<sup>4</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,

Nanjing, 211106, China; 2. School of Automation Engineering, University of Electronic

Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China; 3. School of Information

Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China;

4. School of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, SO17 1BJ, UK)

**Abstract:** Aiming at the development trends, the problems, and challenges met for the current non-destructive testing (NDT) and structural health monitoring (SHM) technologies, we introduce a kind of passive wireless radio frequency identification (RFID) sensor, and uncover its potential application in SHM, especially in the area of aerospace. We categorize the problems in the applications of RFID sensing technique for SHM from multiple perspectives: sensing mechanism, signal measurement, feature analysis and extraction. Moreover, the future directions for RFID sensing technique are pointed out as well. This paper can provide guidance for the application of RFID sensing technique in the area of SHM.

**Key words:** radio frequency identification (RFID); passive wireless sensor; non-destructive testing (NDT); structural health monitoring (SHM); crack

**基金项目:** 英国工程与自然科学研究委员会(EP/J012343/1)资助项目; 国家重大科研仪器研制(61527803)资助项目。

**收稿日期:** 2017-06-15; **修订日期:** 2017-07-27

**作者简介:** 田贵云,男,1965年6月生,英国 Derby 大学博士学位,教授,博士生导师,“长江学者”讲座教授,中国“千人计划”入选者,英国纽卡斯尔大学传感器技术首席教授。主要研究方向为电磁传感器、无损检测与评估及结构健康监测等;发表论文 250 多篇,他引 6000 余次, H-index 46; 2 项研究成果入选《世界传感大百科全书》;获得英国无损检测学会 John Grimwade 奖章 2 枚。

**通信作者:** 田贵云, E-mail: g. y. tian@uestc. edu. cn.

**引用格式:** 田贵云,张俊,孟召宗. 无源无线射频识别传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 453-460. TIAN Guiyun, ZHANG Jun, MENG Zhaozong. Passive wireless RFID sensors and their applications in structural health monitoring[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 453-460.

在轨道交通、石油天然气管道、航空航天、核能和电力设备等重要领域,金属构件(钢、铁、铝及钛合金等)是重要组成部分。受极端环境影响及频繁的应力作用,腐蚀及裂纹具有极大危害性<sup>[1]</sup>。因此,对大规模设施生命周期内的长期监测是保证安全可靠运行的关键。人们利用分辨率、灵敏度及可靠性高的无损检测技术,如超声波、脉冲涡流和涡流脉冲热成像,来定期巡检以防止潜在的结构问题。传统无损检测技术由于设备笨重、检测速度慢、可检测范围小及自动化程度低,在检测大规模设施中的潜在损伤,特别是在复杂环境下的损伤时,往往可行性差且花费巨大<sup>[2]</sup>。因此,大规模设施生命周期内多缺陷的智能化检测问题对无损检测技术提出了新挑战:一方面促使无损检测技术向高速、多物理场及多技术融合等方向发展;另一方面,也促使无损检测技术与结构健康监测技术相融合<sup>[3]</sup>。

分布式无线传感网络将基于时间的维护变成节约成本的基于状况的维护,是保障大规模设施结构健康的有力选择。传感器节点的成本是限制无线传感网络分布于大规模设施、从而影响结构健康监测大数据收集的关键因素<sup>[4]</sup>。当前大多数无线传感器节点使用电池供电,而处置数十亿电池将对环境造成长期风险<sup>[5]</sup>。同时,有限的电池寿命限制了传感节点部署的粒度并增加了维护成本。具有无线能量获取(及存储)装置的传感节点虽然以牺牲部分性能为代价,如通信速率,但由于成本及维护等方面的优势,适合大规模结构的健康监测<sup>[6]</sup>。

射频识别(Radio frequency identification, RFID)传感技术是近年来兴起的一项新型传感技术。该技术在 RFID 标识和追踪的基础上被赋予感知功能<sup>[7]</sup>,可以利用传感装置检测被标识物体及其周围环境(如温度、湿度等)信息,具有低成本、低功耗、智能化及无线传输等特点;同时可以附着在被检测对象表面或植入被检测对象中,能够实时监测被检测对象及环境的状态变化<sup>[8]</sup>。RFID 传感技术在食品、药品、环境、结构和人员等健康监测领域的应用引起了人们的广泛关注。但是,目前带独立传感装置的 RFID 传感器存在一定的技术不足及发展瓶颈,如功耗大以及通信距离短等问题<sup>[9-10]</sup>。

本文介绍了一种无源无线 RFID 监测传感器,并从传感机制、信号测量、特征分析与提取等多角度对 RFID 传感技术在结构健康监测领域的应用和存在的问题进行了全面阐述。同时,对其发展前景和研究方向进行了展望。

## 1 RFID 传感器概述

根据工作原理,RFID 传感器可分为 RFID 电磁传感器,RFID 标签集成传感器,RFID 标签阵列和 RFID 传感器网络 4 大类<sup>[11]</sup>。前两种比较常用,后两种是前者的功能扩展。进一步,根据有无芯片,RFID 电磁传感器又可以分为有芯片传感器和无芯片传感器<sup>[12]</sup>。本文中 RFID 传感器表示使用天线(电磁)来“感知”事物的一种带芯片传感器。图 1 描述了基于 RFID 传感技术的大规模无源无线传感器网络在结构健康监测中的应用范例。RFID 传感网络也是未来低功耗广域网络(Low-power wide-area network, LPWAN)的重要组成部分,即可以通过窄带物联网(Narrow band-internet of things, NB-IoT)接入蜂窝网络。未来的物联网将包括异质连接设备、物理实体和虚拟组件的使用,从而进一步扩展世界的边界<sup>[13]</sup>。而中间件用于集成潜在的异构传感器网络,并通过边缘服务器与云计算系统无缝对接。

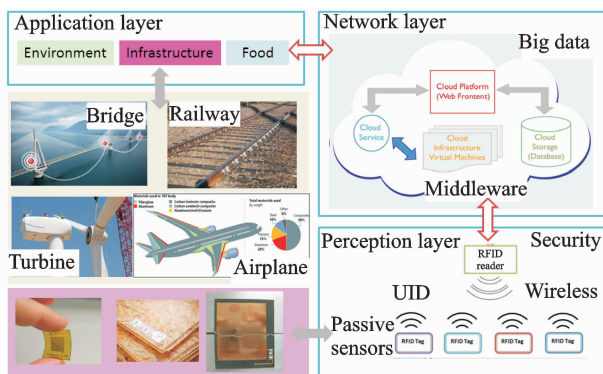


图 1 无源 RFID 传感器网络及在结构健康监测中的应用  
Fig. 1 Passive RFID sensor network and its application in structural health monitoring

RFID 传感技术基本工作过程为标签天线接收阅读器发送的连续电磁波,其在金属表面感应出涡流。当天线边界条件改变,如天线依附区域金属表面发生缺陷或周围环境发生变化时,天线电磁场分布、天线输入阻抗和增益等近远场参量亦相应发生变化,这一变化通过反向散射通信被阅读器以反向散射功率及相位等模拟量形式接收,进而可以根据接收到的信号提取特征信息并反演所标识物体的缺陷。由于不需要额外的电子或传感器件,该技术能进一步降低传感器节点的功耗及成本,并提高系统的通信距离,是节点成本或寿命受限健康监测的重要手段。相关研究已经证明了在天线中植入气敏、热敏等材料对环境条件(例如气体、温度、水分等)敏感的 RFID 传感器的可行性。同时,应力、

腐蚀和裂纹等缺陷也可以通过 RFID 传感器监测,从而能够对金属结构健康状态进行评估与早期预警。

目前,标签天线传感技术的研究主要集中在标签天线的设计,试图通过天线结构的优化达到传感与通信的权衡<sup>[14]</sup>。对结构健康监测的应用研究主要集中在裂纹的监测与评估上。Mohammad 等<sup>[15]</sup>提出了微带贴片 RFID 传感器结构,实现其对裂纹生长的监测,灵敏度可达 22 MHz/mm,证明了利用双谐振(TM<sub>01</sub>和 TM<sub>10</sub>模式)微带贴片天线结构能检测出裂纹方向<sup>[16]</sup>,并给出了检测灵敏度与天线有效介电常数近似线性相关的证明<sup>[17]</sup>。Yi 等<sup>[18]</sup>对微带天线裂纹传感器的机理和电磁模型做了仿真与实测研究,并提出了一种折叠式微带天线结构,可以检测 0.13~0.53 mm 宽度的裂纹。Caizzone 等<sup>[19]</sup>采用相位测量,将裂纹分辨率深入到亚微米级。Kalansuriya 等<sup>[20]</sup>采用返回信号强度(Received signal strength indicator, RSSI)监测裂纹,并证明其在室内 1 m 范围内可以有效工作。

在目前的航空领域,碳纤维增强复合材料等的使用可以极大地减轻飞行器重量并提高其燃料效率,是未来飞行器发展的方向<sup>[21]</sup>。结构健康监测是监控这些新结构部件完整性并实现按需维护的主要解决方案,而传统无损检测技术(包括超声、声发射、红外热成像和微波检测等)在新领域的应用中受到挑战<sup>[22]</sup>。无线传感器的设计及数据获取是无损检测与结构健康监测融合的关键技术。RFID 传感器因其节点相对轻巧、系统简单、方便安装且易于组网等应用方面的灵活性使其比传统传感技术具有更为广阔的应用前景。Gasco 等<sup>[23]</sup>采用应力计作为传感装置,设计了一种基于 RFID 技术并具有能量采集功能的标签平台。该平台被分布在碳纤维复合材料表面来检测应力变化,而如何有效获取能量是该类分布式传感器网络需要考虑的实际问题<sup>[24]</sup>。由于较大的趋肤深度及较小的天线尺寸<sup>[22]</sup>,低频和低频 RFID 无线能量传输技术被用来给植入到复合材料内部的 Lamb 波传感器供电<sup>[25]</sup>,并证明了在大尺度范围内检测分布式传感器之间发生冲击损伤的可能性<sup>[24, 26]</sup>。

## 2 RFID 传感技术的系统组成

RFID 传感技术实为模拟感知,其传感依赖于天线模式扰动及由此引起的阻抗失配,因此研究天线模式分布是提高传感精度及实现对不同类型、形态和尺寸缺陷可靠检测的关键。RFID 传感技术在通信过程中传输感知信息,通信与传感会相互影

响。实际环境中对信噪比产生影响的因素,如非视距传播<sup>[27]</sup>、收发器结构<sup>[28]</sup>等,会引起传感系统性能的降低。由于信道随环境变化,简单地测量幅度或相位信息来量化缺陷,而不对系统进行建模并将特征提取方法与天线的模式扰动在物理层面上统一起来,将很难提高系统的灵敏度及可靠性。本节从标签天线设计、参数测量与特征提取技术等角度阐述了 RFID 传感技术的系统组成及提高系统灵敏度和可靠性的难点和解决方法。

### 2.1 RFID 传感器检测原理与设计难点

根据 RFID 标签识别方法不同,RFID 传感技术原理分为基于磁感应耦合传感和使用天线驻波或消逝模式传感两种。图 2(a)描述了复镜像理论<sup>[29]</sup>,图 2(b)描述了基于磁感应耦合的传感机制。由图 2(b)可以看出,由 RFID 传感器天线产生的磁场在金属表面附近引出涡流,其又产生与初始磁场相反的次级磁场<sup>[30]</sup>,结果在传感器天线和目标之间出现磁耦合(由互感  $M$  表示)<sup>[31]</sup>,耦合强度随金属趋肤深度及缺陷的产生及传播变化。

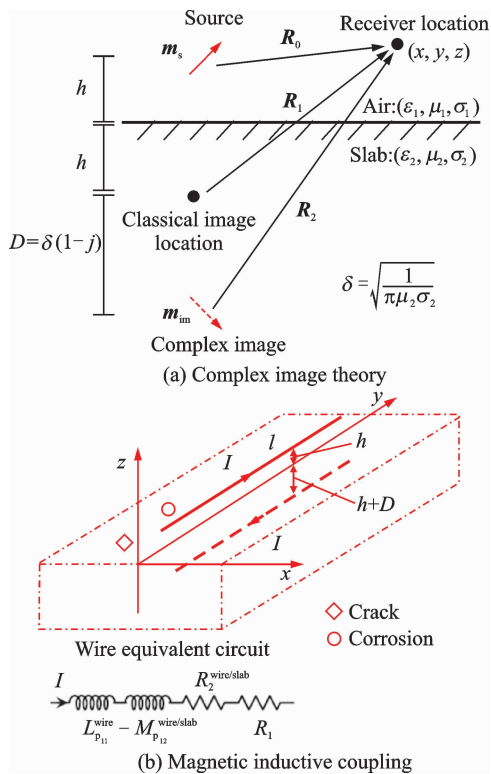


图 2 RFID 传感技术工作原理

Fig. 2 Operation mechanism for RFID sensing technique

与磁感应耦合传感类似,超高频 RFID 传感器使用天线驻波或消逝模式(近场)进行检测。天线输入阻抗的电抗部分对应于存储的非辐射净能量并受其下方金属缺陷的影响。与磁感应耦合不同的是,超高频 RFID 的传感信息通过传播模式(远场)以正向开启功率和 RSSI 等形式传送到阅读



器,但会受到附近物体的影响。为了提高 RFID 传感器的灵敏度,标签天线接收的功率应当被限制在小区域中并且被重新分布,以适当地与待检测样品上可能发生的缺陷相互作用。设计 RFID 传感器主要涉及的问题有<sup>[32-33]</sup>:

(1) 可安装在金属表面。用于金属安装的 RFID 标签天线的设计受到一些限制,如低成本、小轮廓和共形结构等。因此在设计时需考虑该传感器可以在各种尺寸和形状的导体表面良好工作。

(2) 传感导向。天线作为传感器,应能正确可靠地检测和表征金属表面缺陷,至少在大多数重要范围内保持单调和足够敏感。设计 RFID 传感器时需对多尺度、多物理的缺陷及其传播/演变行为进行合理建模,指导天线工作模式和拓扑结构的选择。

(3) 性能平衡或折衷。RFID 传感器兼具通信与传感能力,而通信和传感能力可能具有相反的需求:标签的天线通常设计为在健康状态下与标签芯片共轭匹配,而缺陷的产生及传播会引起标签天线与芯片的阻抗失配,这将导致通信距离的减小。也就是说,灵敏度或动态范围是受限的,因此设计 RFID 传感器时需考虑性能的平衡或折衷。

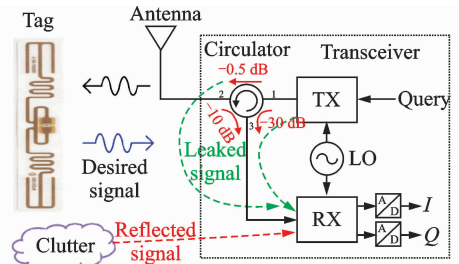
(4) RFID 传感器的稳定性。传感器的安装必然对样件的机械特性和缺陷的产生及传播产生影响,同时传感器长期处于恶劣环境下的可靠性也是该类传感器永久安装及在线监测面临的挑战。

## 2.2 射频收发机及无线测量原理

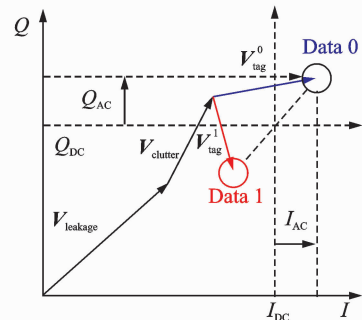
反向散射的目的是改变标签天线的雷达散射截面(Radar cross section, RCS),从而在阅读端解调返回信号以获取标签的唯一识别码(Unique identification, UID)等信息<sup>[34]</sup>。从散射理论出发,标签天线的反射场可以分解为结构散射项和天线散射项。其中,天线散射项表征的标签天线反射入射信号的能力受天线的负载控制<sup>[35]</sup>。由于阅读器到标签的距离通常先验未知,大多数阅读器采用同相/正交(In-phase/quadrature, I/Q)解调并旋转接收的星座图,直到它在解调之前落在实轴上,而不论标签芯片采用的是幅移键控(Amplitude shift keying, ASK)或相移键控(Phase shift keying, PSK)<sup>[36]</sup>。

在静态信道条件下,阅读器端反向散射调制载波经过下变频所得的基带信号可以分解为直流信号和包含来自标签 UID 等信息的时变信号<sup>[37]</sup>,其中直流部分又包含阅读器发射-接收泄漏、静态环境杂波和来自标签天线结构项的反向散射<sup>[38]</sup>。RFID 传感系统阅读器射频收发机及输出信号所受影响如图 3 所示。为了减少环境和收发机本振

泄露等因素的影响,接收基带信号的直流部分将被滤除<sup>[39]</sup>。去除直流信号后,I 路和 Q 路差分信号 I/Q 受标签和阅读器天线之间的距离、增益、有效高度和极化方式等影响。缺陷信息也一起在 I/Q 信号中以模拟形式给出<sup>[40]</sup>。此外,I/Q 信号还受信道慢衰落、快衰落及噪声等因素影响。



(a) Architecture of transceiver for quadrature demodulation



(b) Interference for in-phase and quadrature signals (I/Q)

图 3 正交解调收发机架构及正交解调信号受到的影响  
Fig. 3 Architecture of transceiver for quadrature demodulation and interference for in-phase and quadrature signals (I/Q)

对于双射线传播模型,接收机的信噪比按阅读器到标签距离的四次方比例递减<sup>[41]</sup>。为了解决在真实环境下的鲁棒测量问题,Marrocco 等<sup>[42]</sup>提出了多芯片阻抗测量技术,还利用正向开启功率与 RSSI 相结合的方法抵消天线距离和姿态引起的传播损耗<sup>[43]</sup>,从而得到只与标签阻抗相关的量纲为一的量 AID (Analog identifier)<sup>[44]</sup>。Saarinen 等<sup>[45]</sup>研究了带芯片标签绑定后的失效模型,证明了空气湿度变化及在使用过程中(化学或物理)引入的在各向异性导电胶绑定附近的表面微裂纹是导致阻抗失配的关键因素。Vera 等<sup>[46]</sup>分析了标签芯片由整流二极管引入的输入阻抗非线性特征,并指出其可用来提高传感灵敏度<sup>[47]</sup>。Hasani 等<sup>[48]</sup>利用文献[46]中的特征进行了进一步研究,通过测量差分雷达散射截面提取阻抗信息以增强系统的可靠性。

在 RFID 系统长期运行过程中,由于环境条件(水分、温度和电磁干扰等)的不断变化,模拟传感信息的重复性差,因而通常导致测量的不一致<sup>[23]</sup>。通过特定实验平台,RSSI 表现出 0.5~2 dB 的不

确定度,而这个不确定度依赖于测量仪器,这意味着只有具有大动态范围的传感器可用于实际场合<sup>[49]</sup>。在没有校准时,AID 有 1 dB 的不确定度<sup>[50]</sup>。在最坏情况下,正向开启功率的不确定度达到 3 dB,而 RSSI 的不确定度达到 6 dB<sup>[51]</sup>。因此,与正向开启功率和 RSSI 等功率参量相比,AID 在重复性和可靠性方面更优。

### 2.3 特征提取与反演

减轻或分离由信道、接收机等因素引起的多种干扰以从 RFID 传感系统获得鲁棒的传感信息是至关重要的。对于窄带超高频 RFID 系统,由缺陷导致的谐振频率偏移(Resonant frequency shift, RFS)不受信道衰落的影响,因而具备简单性和鲁棒性,所以被广泛提取成为特征以表征缺陷<sup>[17]</sup>。对比于易受环境影响的 RSSI 和相位测量<sup>[49]</sup>,通过测量标签正向开启功率并利用谐振偏移作为特征具有较好的抗干扰能力,但窄带系统中较小的可用带宽对天线的设计提出了严格要求。为了提高灵敏度,需要较高品质因数的天线,这将加剧传感与通信的折衷<sup>[14]</sup>并使安装复杂化。同时,RFS 仅利用整个频段内传感数据的局部结构,因而可能失去存在于给定数据全局结构中的重要信息<sup>[52]</sup>。为了可靠评估缺陷,一方面,需要选择鲁棒性能高的传感数据,如 AID;另一方面,也可利用特征提取方法来改善上述问题。

特征模式分析是在天线设计中广泛使用的方法。该方法通过发现和检查结构的固有模式来了解结构的潜在谐振特性<sup>[53]</sup>。这也是用来建立阻抗扰动和特征提取之间物理联系的桥梁。模式识别方法可以用于特征提取并分离干扰。特别地,作为典型的监督学习算法,主成分分析和独立分量分析被广泛地用作特征提取器,因为它们能够找到最大方差并且在统计意义上从期望信号分离干扰信号。进一步,不确定性和可实现的分辨率方面的实际限制表明,低成本 RFID 传感器能用于损伤的分类。也就是说,模拟 RFID 传感可以被视为分类问题。因此良好评估的分类算法也可以提高系统灵敏度或鲁棒性<sup>[51]</sup>。

## 3 总结与展望

在物联网、大数据时代,将无损检测技术衍生到泛在结构健康监测是新兴的研究方向。无源、无线及低成本 RFID 传感技术有着巨大的研究和应用价值。受标签天线增益、无线信道传播损耗及障碍物引起的大尺度和小尺度衰落影响,基于反向散射通信的超高频 RFID 传感器技术的设计难点在于系统灵敏度和鲁棒性等关键性能的提高。针对

结构健康监测的应用需求,本文对 RFID 传感技术在金属材料裂纹检测及复合材料的潜在应用作了综述分析。针对现有窄带模拟超高频 RFID 传感系统鲁棒性差等问题,从多学科交叉角度系统地阐述了 RFID 传感技术的传感机制、测量原理及特征提取,为 RFID 传感器及系统的设计和优化提供了理论指导和设计依据。然而,在 RFID 传感技术研究过程中新方向和新应用不断涌现,依然有一些突出问题亟待解决:

(1) 大规模标签的防碰撞问题。已经有几个标准组织,如 ISO 和 EPC Global,允许在各种环境和标签配置下以较低数据率同时读取多个标签<sup>[54]</sup>。泛在 RFID 传感网络具有更高的通信速率,因而 RFID 传感网络可能是上行链路受限。压缩感应(Compressive sensing, CS)可用于减少 ID 搜索空间,在更短的时间内读取更多的标签<sup>[55]</sup>。这项技术还可以降低标签端无处不在的计算所带来的数据速率要求<sup>[56]</sup>。随着越来越多的标签加入到 RFID 传感网络中,为了提高识别率和系统鲁棒性,需要在给定区域中部署更多的阅读器(或多天线),这意味着对于给定的频带或通道数,阅读器之间发生冲突的可能性将增加<sup>[57]</sup>。与此同时,功耗受限的 RFID 标签芯片只有有限的计算能力,RFID 传感网络的安全问题和隐私保护也需要解决<sup>[58]</sup>。

(2) 窄带模拟通信与特征提取在复杂环境下的限制及突破。兼容超高频 RFID 协议使得 RFID 传感系统的可用带宽非常窄,同时传感信号模拟特征的提取也加大了阅读器设计的难度或者相应地降低了 RFID 传感器的灵敏度。自动阻抗匹配能够部分补偿标签天线依附对象变化造成的影响,从而实现恒定的高读取性能<sup>[59]</sup>。将其应用于提高标签天线的匹配性能,则可以有效解决传感和通信之间的折衷问题。例如,由 RFMicron 提供的可在  $-40\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内工作的 Magnus S 传感器芯片,内置片上传感器及数字化 RSSI 存储器<sup>[60]</sup>。数字化信息可以在阅读器端重建标签天线的 RSSI 或输入阻抗,从而消除传播损耗或信道衰落在反向散射通信中的影响<sup>[61]</sup>。从模拟到数字特征的转变,可极大地降低测量的不确定性并提高 RFID 传感器和系统的精度和可靠性。

(3) 无芯片 RFID 标签和系统也是未来的发展方向<sup>[62]</sup>。无芯片 RFID 标签可以通过使用导电油墨印刷技术在多种基板上制造。由于它不包括任何芯片而仅利用金属图案作为天线,标签制造成本将进一步降低<sup>[63]</sup>。标签天线也可打印在可拉伸衬底上并共形于复杂表面<sup>[64]</sup>。无芯片阵列结构可

以作为智能表皮安装或植入到关键结构中。无芯片标签的主要挑战在于 UID 的生成和测量。可以使用频分、时分、空分甚至相位分割来生成 UID, 每种方法具有各自优缺点。基于此, 还可以开发 2D 结构图案, 例如, 元表面 (Meta-surface)<sup>[65]</sup>、频率选择性表面 (Frequency selective surface, FSS), 甚至基于吸收体 (Absorber) 编码的标签。虽然 UID 的部分比特用来传递感测参量<sup>[66]</sup>, 但无芯片标签 RCS 测量性能取决于多个因素, 例如环境、极化<sup>[67]</sup>及校准等, 这限制了系统的读取距离和可靠性<sup>[68]</sup>。此外, 金属安装和多标签防碰撞也面临挑战。由于其超低成本和极端环境中工作的能力, 这类传感器特别适合短距离多模感知和监测应用。

(4) 新材料: 如石墨烯、功能材料及柔性基板等; 新工艺: 如 3D 打印、喷墨印刷等; 新应用: 如智能包装、可穿戴设计和智能医疗等; 微型化: 如互补金属氧化物半导体 (Complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 工艺器件片上集成等, 也是 RFID 传感技术未来的发展方向和突破点。大面积电子印刷技术的快速发展增加了 RFID 传感技术在大规模结构中高密度部署的可能性。

(5) 标签之间的通信<sup>[69]</sup>或标签网格<sup>[70-71]</sup>, 例如空间粒度和串扰, 也可以用来提高标签之间缺陷检测的分辨力和覆盖范围。

#### 参考文献:

- [1] WINZER N, ATRENS A, SONG G L, et al. A critical review of the stress corrosion cracking (SCC) of magnesium alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2005, 7(8): 659-693.
- [2] COOK B S, SHAMIM A, TENTZERIS M M. Passive low-cost ink jet-printed smart skin sensor for structural health monitoring [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2012, 6(14): 1536-1541.
- [3] FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Life-cycle of structural systems: Recent achievements and future directions [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(1): 1-20.
- [4] LEE Y, BLAAUW D, SYLVESTER D. Ultralow power circuit design for wireless sensor nodes for structural health monitoring [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(8): 1529-1546.
- [5] TENTZERIS M M, GEORGIADIS A, ROSELLI L. Energy harvesting and scavenging [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(11): 1644-1648.
- [6] JANG S, JO H, CHO S, et al. Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: Deployment and evaluation [J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(5/6): 439-459.
- [7] SNCHEZLPEZ T, RANASINGHE D, HARRISON M, et al. Adding sense to the Internet of Things [J]. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2012, 16(3): 291-308.
- [8] BHATTACHARYYA R, FLOERKEMEIER C, SARMA S. Low-cost, ubiquitous RFID-tag-antenna-based sensing [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(9): 1593-1600.
- [9] ISLAM M M, RASILAINEN K, VIIKARI V. Implementation of sensor RFID: Carrying sensor information in the modulation frequency [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(8): 2672-2681.
- [10] CAPDEVILA S, JOFRE L, ROMEU J, et al. Enhancing RFID sensing capabilities: Multi-load backscattering [C]// *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. [S. l.]: IEEE, 2013: 2315-2316.
- [11] MENG Z Z, LI Z. RFID tag as a sensor—A review on the innovative designs and applications [J]. *Measurement Science Review*, 2016, 16(6): 305-315.
- [12] COOK B S, VYAS R, SANGKIL K, et al. RFID-based sensors for zero-power autonomous wireless sensor networks [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2419-2431.
- [13] LI S C, XU L D, ZHAO S S. The internet of things: A survey [J]. *Information Systems Frontiers*, 2015, 17(2): 243-259.
- [14] OCCHIUZZI C, MARROCCO G. Constrained-design of passive UHF RFID sensor antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(6): 2972-2980.
- [15] MOHAMMAD I, HUANG H Y. Monitoring fatigue crack growth and opening using antenna sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2010, 19: 1-8.
- [16] MOHAMMAD I, GOWDA V, ZHAI H, et al. Detecting crack orientation using patch antenna sensors [J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23: 1-9.
- [17] HUANG H. Antenna sensors in passive wireless sensing systems[C]// Chen Z N (ed). *Handbook of Antenna Technologies*. Singapore: Springer, 2015: 1-34.
- [18] YI X, CHO C, COOPER J, et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—electromagnetic modeling, simulation, and testing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22: 1-17.
- [19] CAIZZONE S, DIGIAMPAOLO E. Wireless passive RFID crack width sensor for structural health monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(12): 6767-6774.
- [20] KALANSURIYA P, BHATTACHARYYA R, SARMA S. RFID tag antenna-based sensing for per-

- vasive surface crack detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(5): 1564-1570.
- [21] di SANTE R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures; Recent advances and applications [J]. *Sensors*, 2015, 15(8): 18666-18713.
- [22] LI Z, MENG Z Z. A review of the radio frequency non-destructive testing for carbon-fibre composites [J]. *Measurement Science Review*, 2016, 16(2): 68-76.
- [23] GASCO F, FERABOLI P, BRAUN J, et al. Wireless strain measurement for structural testing and health monitoring of carbon fiber composites [J]. *Composites Part A—Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(9): 1263-1274.
- [24] BECKER T, KLUGE M, SCHALK J, et al. Autonomous sensor nodes for aircraft structural health monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(11): 1589-1595.
- [25] SALAS M, FOCKE O, HERRMANN A S, et al. Wireless power transmission for structural health monitoring of fiber-reinforced-composite materials [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(7): 2171-2176.
- [26] ZHONG C H, CROXFORD A J, WILCOX P D. Remote inspection system for impact damage in large composite structure [J]. *Proceedings of the Royal Society A—Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2014, 471(2173): 20140631.
- [27] BEKKALI A, ZOU S C, KADRI A, et al. Performance analysis of passive UHF RFID systems under cascaded fading channels and interference effects [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(3): 1421-1433.
- [28] FASARAKIS-HILLIARD N, ALEVIZOS P N, BLETSAS A. Coherent detection and channel coding for bistatic scatter radio sensor networking [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(5): 1798-1810.
- [29] BANNISTER P R. Utilization of image theory techniques in determining the mutual coupling between elevated long horizontal line sources [J]. *Radio Science*, 1970, 5(11): 1375-1381.
- [30] NABAVI M R, NIHTIANOV S N. Design strategies for eddy-current displacement sensor systems; Review and recommendations [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(12): 3346-3355.
- [31] HOWLING A A, GUITTIENNE P, JACQUIER R, et al. Complex image method for RF antenna-plasma inductive coupling calculation in planar geometry. Part I; Basic concepts [J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2015, 24: 1-8.
- [32] ZHANG J, LONG Y L. A novel metal-mountable electrically small antenna for RFID tag applications with practical guidelines for the antenna design [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 11(62): 5820-5829.
- [33] BJORNINEN T, SYDANHEIMO L, UKKONEN L, et al. Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014, 56(1): 79-103.
- [34] GRIFFIN J D, DURGIN G D. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2009, 51(2): 11-25.
- [35] BOYER C, ROY S. Space time coding for backscatter RFID [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 2272-2280.
- [36] THOMAS S J, WHEELER E, TEIZER J, et al. Quadrature amplitude modulated backscatter in passive and semipassive UHF RFID systems [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(4): 1175-1182.
- [37] GRIFFIN J D, DURGIN G D. Multipath fading measurements at 5.8 GHz for backscatter tags with multiple antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(11): 3693-3700.
- [38] NIKITIN P V, MARTINEZ R, RAMAMURTHY S, et al. Phase based spatial identification of UHF RFID tags [C]// *IEEE International Conference on RFID*. [S.l.]:IEEE, 2010: 102-109.
- [39] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D N, et al. In-band full-duplex wireless; Challenges and opportunities [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(9): 1637-1652.
- [40] ZHANG J, TIAN G Y, ZHAO A B. Passive RFID sensor systems for crack detection & characterization [J]. *NDT & E International*, 2016, 86: 90-99.
- [41] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [42] MARROCCO G, AMATO F. Self-sensing passive RFID; From theory to tag design and experimentation [C]// *39th European Microwave Conference (EuMC)*. [S.l.]:IEEE, 2009: 1-4.
- [43] OCCHIUZZI C, CAIZZONE S, MARROCCO G. Passive UHF RFID antennas for sensing applications; Principles, methods, and classifications [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, 55(6): 14-34.
- [44] MARROCCO G. Pervasive electromagnetics; Sensing paradigms by passive RFID technology [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(6): 10-17.
- [45] SAARINEN K, BJORNINEN T, UKKONEN L, et al. Reliability analysis of RFID tags in changing humid environment [J]. *IEEE Transactions on Com-*

- ponents, Packaging and Manufacturing Technology, 2014, 4(1): 77-85.
- [46] VERA G A, DUROC Y, TEDJINI S. RFID test platform: Nonlinear characterization [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(9): 2299-2305.
- [47] VERA G A, DUROC Y, TEDJINI S. Third harmonic exploitation in passive UHF RFID [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(9): 2991-3004.
- [48] HASANI M, VENA A, SYDANHEIMO L, et al. A novel enhanced-performance flexible RFID-enabled embroidered wireless integrated module for sensing applications [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(9): 1244-1252.
- [49] OCCHIUZZI C, MARROCCO G. Uncertainty and applicability of RFID power measurements for passive sensing [C]// 44th European Microwave Conference (EuMC). [S. l.]:IEEE, 2014: 255-258.
- [50] KUESTER D G, NOVOTNY D R, GUERRIERI J R, et al. Simple test and modeling of RFID tag backscatter [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(7): 2248-2258.
- [51] OCCHIUZZI C, MARROCCO G. Precision and accuracy in UHF-RFID power measurements for passive sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 3091-3098.
- [52] YU J. Local and global principal component analysis for process monitoring [J]. Journal of Process Control, 2012, 22(7): 1358-1373.
- [53] LI H, TAN Y, LAU B K, et al. Characteristic mode based trade off analysis of antenna-chassis interactions for multiple antenna terminals [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 490-502.
- [54] KIM S, MARIOTTI C, ALIMENTI F, et al. No battery required: Perpetual RFID-enabled wireless sensors for cognitive intelligence applications [J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(5): 66-77.
- [55] VIZZIELLO A, SAVAZZI P. Efficient RFID tag identification exploiting hybrid UHF-UWB tags and compressive sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12): 4932-4939.
- [56] GUBBI J, BUYYA R, MARUSIC S, et al. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions [J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [57] ROY S, JANDHYALA V, SMITH J R, et al. RFID: From supply chains to sensor nets [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(9): 1583-1592.
- [58] TAN C C, WU J. Security in RFID networks and communications [C]//Chen L, Ji J, Zhang Z (eds). Wireless Network Security: Theories and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013:247-267.
- [59] WEGLEITER H, SCHWEIGHOFER B, DEINHAMMER C, et al. Automatic antenna tuning unit to improve RFID system performance [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(8): 2797-2803.
- [60] DATASHEET. Magnus®S3 sensor IC [EB/OL]. <http://rfmicron.com/magnus-s3/>, 2015.
- [61] CACCAMI M C, MARROCCO G. Electromagnetic characterisation of self-tuning UHF RFID tags for sensing application [C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). [S. l.]:IEEE, 2016: 1273-1274.
- [62] HARMA S, ARTHUR W G, HARTMANN C S, et al. Inline SAW RFID tag using time position and phase encoding [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(8): 1840-1846.
- [63] JAVED N, HABIB A, AMIN Y, et al. Directly printable moisture sensor tag for intelligent packaging [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(16): 6147-6148.
- [64] KIM J, WANG Z, KIM W S. Stretchable RFID for wireless strain sensing with silver nano ink [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(12): 4395-4401.
- [65] WANG L B, LI L L, LI Y B, et al. Single-shot and single-sensor high/super-resolution microwave imaging based on metasurface [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 1-8.
- [66] VENA A, SYDANHEIMO L, TENTZERIS M M, et al. A fully inkjet-printed wireless and chipless sensor for CO<sub>2</sub> and temperature detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(1): 89-99.
- [67] VENA A, PERRET E, TEDJINI S. High-capacity chipless RFID tag insensitive to the polarization [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10): 4509-4515.
- [68] POLIVKA M, HAVLICEK J, SVANDA M, et al. Improvement in robustness and recognizability of RCS response of U shaped strip-based chipless RFID tags [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 2000-2003.
- [69] MARROCCO G, CAIZZONE S. Electromagnetic models for passive tag-to-tag communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(11): 5381-5389.
- [70] MARROCCO G. RFID grids: Part I—Electromagnetic theory [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(3): 1019-1026.
- [71] CAIZZONE S, MARROCCO G. RFID grids: Part II—Experimentations [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(8): 2896-2904.