



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

基于贴片天线的多参数感知
无源智能骨料

(国家自然科学基金面上项目 No. 52078375、
52178298)

姓 名：李宪之

学 号：1910331

所在院系：土木工程学院

学科门类：工学

学科专业：土木工程

指导教师：薛松涛教授

副指导教师：谢丽宇副教授

二〇二三年十月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

**Multi-parameter sensing passive smart
aggregate based on patch antenna**

(Supported by Natural Science Foundation of China
No. 52078375, 52178298)

Candidate: Xianzhi Li

Student Number: 1910331

School/Department: College of Civil Engineering

Discipline: Engineering

Major: Civil Engineering

Supervisor: Prof. Songtao Xue

Associate Supervisor: Prof. Liyu Xie

Oct, 2023

基于贴片天线的多参数感知无源智能骨料

李宪之

同济大学

摘要

土木工程结构在长期使用的过程中,受到外界环境及荷载等因素的作用,易发生变形及开裂等,从而影响结构的承载能力和耐久性,为结构的安全可靠运行埋下隐患。因此,在结构服役的整个周期内,采用有效的方式对结构的健康状态进行监测,以识别潜在的结构问题并采取必要措施,对于保障结构安全具有重要意义。但是当前用于结构健康监测的大部分传感技术通常需要持续的电源供应,且需要线缆进行信号传输,这会造成实际应用中的诸多问题,使传感系统的安装及维护较为困难。因此,需要一种更为经济、便利和低碳环保的技术,以满足现代土木工程监测与运维的需求。

基于贴片天线的无源传感技术为土木工程监测提供了一种新的技术手段。贴片天线传感技术主要是将天线本身作为用于结构变形和环境变量等参数感知的传感单元,无需持续的电源供应,而是通过电磁耦合或反向散射等方式实现问询和信息传递。此外,贴片天线还具有成本低、结构简单、可埋置等优点,可以避免传统传感器在实际使用中面临的诸多问题,更适合应用于现代土木工程的智能监测与运维。本文旨在将具有无源优势的贴片天线传感技术与智能骨料的形式相结合,形成一种可埋置于混凝土内部,兼具传感与受力双重功能的智能骨料,实现对混凝土内部形变等多参数的感知。为了实现这一目标,本文主要开展和完成了以下的工作:

(1) 为了实现贴片天线传感单元对多参数的同步感知,开发设计了一种用于结构变形和环境温度同步感知的偏心馈电组合式贴片天线传感器。该传感器将偏心馈电方式与组合式贴片天线相结合,以激发贴片天线两个方向的谐振模式,并将两个方向的谐振频率解耦分别用于环境温度和结构变形传感。该传感器可以实现单一传感器对多参数的同步感知,避免了额外的温度传感器对目标监测变量进行温度补偿。此外,该传感器的组合式设计也避免了单片式天线传感器变形传递不完整等问题。在研究中通过理论分析及多物理场仿真模拟等探究了天线传感器双向谐振频率与环境温度和结构形变关系之间的关系,以及传感器偏心馈电距离优化方法、温度自补偿方法等。并通过一系列试验验证了所提出传感器用于环境温度与结构变形同步传感的可行性。该基于贴片天线的多参数感知传感器设计是后续多参数感知智能骨料的基础。

(2) 为了拓展贴片天线传感器的应用范围,使贴片天线传感器可以埋置于混凝土内部等环境进行监测,探究了贴片天线的封装材料本身和外部电介质环境变化对贴片天线传感器电磁特征参数的影响。形成了屏蔽材料与非屏蔽材料两种封

装方案,当采用屏蔽材料封装贴片天线传感器时可以避免外部环境介电常数变化影响;当采用非屏蔽材料封装贴片天线传感器时可以实现对外部环境感知。进行了一系列仿真模拟以探究屏蔽材料与非屏蔽材料两种封装技术路线的特点,并设计了相应试验,分别采用碳纤维、铜、亚克力、聚乙烯等作为封装材料,验证了两种封装技术路线的可行性。贴片天线传感器封装材料及两种封装技术路线的研究为贴片天线传感器在埋置环境中的应用提供了技术支撑。

(3)为了使贴片天线传感器尺寸更小、更适合埋置于结构内部进行传感,对贴片天线传感器的小型化及无线问询方式进行了研究。在贴片天线小型化方面,根据贴片天线传感器的原理与谐振频率的计算公式,通过增加介质层的介电常数实现了贴片天线的小型化,设计了一种尺寸更小、灵敏度更高的组合式贴片天线传感器,并通过一系列仿真模拟和试验对其性能进行了验证。在贴片天线传感器无线问询方面,探究了采用宽带天线正对贴片天线的无线问询方式与贴片天线连接宽带天线作为负载的无线问询方式,仿真和试验均取得了较好的结果,验证了贴片天线传感器无线问询的可行性。贴片天线传感器的小型化与无线问询探究提高了贴片天线传感器的实用性。

(4)为了将贴片天线传感单元设计成为具备感知功能的无源智能骨料,选取了碳纤维板作为封装材料以对传感单元的进行防护,并确定了将贴片天线传感单元埋置于混凝土内部时合适的形变传递机制。将所设计的两种具有不同灵敏度的基于贴片天线的无源智能骨料与混凝土浇筑在一起制作了混凝土试件,进行了一系列试验以测试其埋置于混凝土中的实际传感性能,并对试验结果进行了讨论分析。试验结果表明了该基于贴片天线的无源智能骨料可以通过谐振频率的偏移实现对混凝土内部变形的感知,证明了该无源智能骨料的可行性。

最后,对该基于贴片天线的多参数感知无源智能骨料研究工作与面临的问题进行了简要的讨论,并对进一步的研究方向进行了展望。

关键词: 结构健康监测, 贴片天线, 无源, 智能骨料, 多参数感知

ABSTRACT

During the long-term use of civil engineering structures, they are susceptible to deformation and cracking due to factors such as external environment and loads, which can affect the load-bearing capacity and durability of the structure and lay hidden dangers for the safety of the structure. Therefore, it is of great significance to adopt effective methods to monitor the health status of the structure throughout its service life, in order to identify potential structural problems and take necessary measures. However, most sensing technologies currently used for structural health monitoring typically require continuous power supply and cables for signal transmission, which can cause many problems in practical applications and make the installation and maintenance of sensing systems difficult. Therefore, a more economical, convenient, and low-carbon technology is needed to meet the needs of modern civil engineering monitoring and maintenance.

The passive sensing technology based on patch antennas provides a new technical means for civil engineering monitoring. The patch antenna sensing technology mainly uses the antenna itself as a sensing unit to measure parameters such as structural deformation and environmental variables, without the need for continuous power supply. Instead, it achieves interrogation and information transmission through electromagnetic coupling or backscattering. In addition, patch antennas also have the advantages of low cost, simple structure, and embeddable, which can avoid many problems faced by traditional sensors in practical use and are more suitable for intelligent monitoring and maintenance in modern civil engineering. This article aims to combine the passive advantage of patch antenna sensing technology with the form of smart aggregates to form a smart aggregate that can be embedded inside concrete and has dual functions of sensing and stress, achieving the sensing of multiple parameters such as internal deformation of concrete. In order to achieve this goal, this article mainly conducts the following research work:

(1) In order to achieve simultaneous sensing of multiple parameters by the patch antenna, an off-center fed combined patch antenna sensor was developed for simultaneous sensing of structural deformation and environmental temperature. This sensor combines the off-center feeding method with a combined patch antenna to excite resonance modes in both longitudinal and transverse direction of the patch antenna, and

decouples the resonance frequencies in both directions for environmental temperature and structural deformation sensing, respectively. The proposed sensor can achieve simultaneous sensing of multiple parameters by a single sensor, avoiding additional temperature sensors for compensation. In addition, the combined design of the sensor also avoids problems such as incomplete deformation transfer ratio of the monolithic patch antenna sensor. In the research, the relationship between the resonant frequencies of antenna, the environmental temperature, and structural deformation was studied through theoretical analysis and simulation, as well as optimization methods for off-center feeding distance and temperature self-compensation methods. The feasibility of using the proposed sensor for simultaneous sensing of environmental temperature and structural deformation was verified through a series of experiments. The design of this multi-parameter sensing patch antenna sensor is the foundation for subsequent multi-parameter sensing of intelligent aggregates.

(2) In order to expand the application range of patch antenna sensors and enable them to be embedded inside materials such as concrete for monitoring, the effects of the packaging material itself and external environmental changes on the electromagnetic parameters of patch antenna sensors were investigated. There are two packaging schemes, shielding material and non-shielding material. When using shielding material to encapsulate the patch antenna sensor, it can avoid the influence of external environmental dielectric constant changes. When using non-shielding material to encapsulate the patch antenna sensor, it can achieve sensing of the external environment. A series of simulations were conducted to study the two packaging technologies of shielding material and non-shielding material, and corresponding experiments were conducted. Carbon fiber, copper, acrylic, and polyethylene were used as packaging materials to verify the feasibility of the two packaging technologies. The study of packaging materials for patch antenna sensors and the study of two packaging technology routes provide technical support for the application of patch antenna sensors in embedded environments.

(3) In order to make the size of patch antenna sensors smaller and more suitable for embedding inside the structure for sensing, the miniaturization and wireless interrogation methods of patch antenna sensors were studied. In terms of miniaturization of patch antennas, based on the principle of patch antenna sensors and the calculation formula of resonant frequency, the miniaturization of patch antennas was achieved by increasing the dielectric constant of the dielectric layer. A patch

antenna sensor with smaller size and higher sensitivity was designed, and its performance was verified through a series of simulations and experiments. In terms of wireless interrogation for patch antenna sensors, a wireless interrogation method using a broadband antenna facing the patch antenna and a wireless interrogation method using a patch antenna connected to a broadband antenna as a load were studied. Simulations and experiments have achieved good results, verifying the feasibility of wireless interrogation for patch antenna sensors. The miniaturization and wireless interrogation exploration of patch antenna sensors have improved the practicality of patch antenna sensors.

(4) In order to make the patch antenna sensing unit as a passive smart aggregate with sensing function, carbon fiber board was selected as the packaging material to protect the patch antenna sensing unit, and the suitable deformation transfer mechanism was determined when embedding the patch antenna sensing unit inside the concrete. Two types of passive smart aggregates based on patch antennas with different sensitivities were designed and embedded into concrete. A series of experiments were conducted to test the actual sensing performance of the smart aggregate embedded in concrete, and the experimental results were discussed. The experimental results indicate that the passive smart aggregate based on patch antennas can sensing the internal deformation of concrete through the shift of resonant frequency, proving the feasibility of the passive smart aggregate.

Finally, a brief discussion was conducted on the research work and challenges faced by the multi-parameters sensing passive smart aggregate based on patch antenna, and further research directions were prospected.

Key Words: Structural health monitoring, patch antenna, passive, smart aggregate, multi-parameter sensing

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	VI
第 1 章 绪论	9
1.1 引言	9
1.2 文献综述	10
1.2.1 混凝土埋置式传感器与智能骨料	10
1.2.2 射频识别技术与无源传感器研究进展	12
1.2.3 基于贴片天线的无源传感器研究进展	14
1.2.4 环境因素影响及贴片天线传感器的封装	18
1.3 本文研究目的及意义	21
1.4 先行研究及技术路线	22
1.5 本文主要研究内容	25
第 2 章 贴片天线传感器工作原理	27
2.1 电磁学基本理论和天线分析方法	27
2.1.1 麦克斯韦方程	27
2.1.2 传输线模型理论	28
2.1.3 谐振腔模型理论	31
2.2 贴片天线电磁特征参数及传感原理	33
2.2.1 天线电磁特征参数	33
2.2.2 贴片天线传感原理	34
2.3 贴片天线谐振频率计算及影响因素分析	36
2.3.1 单片式贴片天线传感器	36
2.3.2 组合式贴片天线传感器	37
2.3.3 温度对贴片天线谐振频率的影响	39
2.3.4 天线周围介质环境影响	40

2.4	本章小结.....	40
第3章	偏心馈电组合式贴片天线与多参数感知.....	42
3.1	引言.....	42
3.2	偏心馈电组合式贴片天线传感器传感原理.....	43
3.2.1	偏心馈电组合式贴片天线传感器设计.....	43
3.2.2	基于偏心馈电贴片天线传感器的温度与形变同步感知.....	45
3.3	偏心馈电组合式贴片天线传感器仿真模拟.....	50
3.3.1	偏心馈电距离优化.....	50
3.3.2	多物理场耦合仿真.....	56
3.4	偏心馈电组合式贴片天线传感器试验探究.....	60
3.4.1	温度感知试验.....	62
3.4.2	形变感知试验.....	65
3.4.3	温度与形变同步感知试验.....	67
3.4.4	实际工程环境测试.....	70
3.4.5	结果讨论分析.....	73
3.5	本章小结.....	74
第4章	贴片天线传感器封装材料及外部环境的影响.....	76
4.1	引言.....	76
4.2	贴片天线传感器封装原理.....	77
4.2.1	贴片天线传感器封装影响因素分析.....	77
4.2.2	基于屏蔽材料封装的贴片天线传感器.....	78
4.2.3	基于非屏蔽材料封装的贴片天线传感器.....	78
4.3	贴片天线传感器封装仿真模拟.....	79
4.3.1	基于屏蔽材料封装的天线传感器仿真.....	79
4.3.2	基于非屏蔽材料封装的天线传感器仿真.....	83
4.3	贴片天线传感器封装与外部介电环境变化试验.....	85
4.3.1	屏蔽材料封装的天线传感器避免外部介电环境干扰试验.....	85
4.3.2	非屏蔽材料封装的天线传感器用于外部介电环境感知试验.....	89
4.4	本章小结.....	93
第5章	贴片天线传感器无线问询方式及小型化设计.....	94
5.1	引言.....	94

5.2 贴片天线传感器小型化设计.....	95
5.2.1 理论分析.....	95
5.2.2 仿真模拟.....	97
5.3 贴片天线无线问询方式探究.....	100
5.3.1 宽带天线正对贴片天线无线问询.....	100
5.3.2 宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询.....	106
5.4 小型化贴片天线传感器有线及无线问询测试.....	108
5.4.1 小型化贴片天线传感器有线测试.....	108
5.4.2 宽带天线正对贴片天线无线问询测试.....	111
5.4.3 宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询测试.....	113
5.4.4 双宽带天线问询系统校准探究.....	116
5.5 本章小结.....	118
第6章 基于贴片天线传感器的无源智能骨料.....	120
6.1 引言.....	120
6.2 基于贴片天线的智能骨料封装设计探究.....	121
6.2.1 碳纤维材料封装外壳.....	121
6.2.2 智能骨料形变传递机制.....	122
6.3 基于贴片天线的智能骨料压缩试验.....	123
6.3.1 混凝土试件浇筑.....	123
6.3.2 试验设置与过程.....	125
6.3.3 试验结果分析.....	127
6.4 本章小结.....	134
第7章 结论与展望.....	135
7.1 结论.....	135
7.2 进一步工作的方向.....	136
参考文献.....	138
致谢.....	147
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果.....	149

第1章 绪论

1.1 引言

近年来,我国土木工程发展迅速,有大量的工程处于正在建设或建成服役阶段。但是,由于结构破坏或失效造成的安全事故时有发生。近三年来,仅伤亡人数超过10人的工程结构灾害事故就有多起,如2020年3月发生在福建泉州的“3.7”重大坍塌事故,2020年8月发生在山西临汾的“8.29”重大坍塌事故,2021年6月发生在河南汝城的“6.19”房屋坍塌事故,2021年7月发生在江苏吴江的“7.12”建筑坍塌事故等。因此,对土木工程结构进行相应的监测、评估和预警已成为保障我国经济与社会发展的迫切需求,具有重要的现实意义^{[1],[2]}。

在土木工程结构长期使用过程中,由于受到外界环境及荷载等因素的作用,结构往往会发生一定退化,从而可能导致应力变形及开裂等,为结构的安全可靠运行埋下隐患,严重时甚至造成结构的破坏和失效^{[3],[4]}。在结构的整个生命周期内,需要对一些关键参数如结构应变、裂缝、环境温湿度等进行监测^[5],以便及时了解结构的服役状态,发现结构的安全隐患,采取必要的措施以保证结构的安全可靠使用。

传统的结构监测及检测技术主要包括取芯法等有损检测方法及回弹法、声发射法、红外热成像等无损检测方法,此外还有一些智能传感器可以用于结构的健康监测^[6]。近些年来,随着结构健康监测技术的不断发展,越来越多的新型传感技术应用于土木工程结构的关键参数的监测,如基于电阻式的应变片^[7],基于振弦式的应变计^[8],基于光纤布拉格光栅的应变传感器^[9],基于压电材料的混凝土智能骨料^[10],基于电化学的钢筋腐蚀监测传感器^[11]以及用于裂缝、温度、湿度、PH值及氯离子含量等多种不同类型监测的传感器^{[12],[13]}。嵌入结构内部或粘贴于结构表面的各种传感器可用于采集从混凝土固化到其日常使用的各种数据,以便于我们及时了解结构状态,为结构的长期安全使用提供保障^[14]。但是,目前用于结构健康监测的大部分传感技术仍需要持续的电源供应,以及采用有线的方式进行信号采集和传输等^[15],这会导致监测系统布线复杂、具有高昂的成本和维护费用。

射频识别(RFID, Radio Frequency Identification)传感技术是近年来迅速发展起来的一项新型传感技术^{[16]-[18]}。射频识别最早用于识别和跟踪领域,其原理为阅读器与标签天线之间通过无线射频方式进行非接触双向数据通信,从而达到识别和数据交换的目的^[19]。此外,射频识别传感技术还可以通过将具有传感功能的

元件与标签天线集成或者将标签天线本身功能化,实现对标签天线及其周围环境的感知与监测^{[20],[21]}。射频识别的标签按照是否需要外部电源供应,可以分为有源和无源两种,标签既可以与电池等外部电源相连主动发射信号,也可以作为无源标签不与外部电源相连,而是依靠入射电磁波的能量来工作。射频识别传感技术不仅具有低成本、低功耗、智能化及无线传输等诸多优点^[22],并且由于电磁波可以穿透一定厚度的障碍物如塑料、木材、混凝土等^{[23],[24]},标签天线可埋置于混凝土内部,因此十分适用于土木工程结构的健康监测。

智能骨料(Smart aggregates)作为埋置式传感器的一种形式,近年来吸引了广泛关注^{[25]-[27]}。智能骨料是指将用于混凝土内部监测的传感单元进行封装,使其成为一种可以埋置于混凝土中的智能元件,既具有普通骨料的功能,又可以实现对混凝土结构内部的信息感知。当前的智能骨料已经应用于一些早期混凝土强度监测、混凝土应力应变监测、混凝土外部动荷载监测及混凝土冻融损伤监测等方面。智能骨料很好的解决了传感器与主体结构相结合时出现的各种问题,因此具有十分广阔的应用前景。但是,当前基于压电材料及光纤光栅等内置式传感器的智能骨料仍然需要持续的电源供应以及线缆进行信号传输等,这使其在实际工程中的应用受到一定限制^{[28]-[30]}。

本研究将具有无源优势的射频识别传感技术与智能骨料的传感器埋置形式相结合,提出了一种基于贴片天线的智能骨料设想,使其适用于混凝土内部变形及温度等参数的监测,并解决传统传感需要电源供应等问题。目前的贴片天线无法直接应用于混凝土内部埋置式传感,为了实现这一基于贴片天线的多参数感知智能骨料的设想,仍有许多待解决的问题,主要集中在贴片天线传感器的多参数感知机理,埋置式传感器的封装设计方法及外部环境影响,小型化高灵敏度传感单元及有效的无线问询方式等方面。以下将对相关领域当前的发展现状及目前存在的问题进行介绍。

1.2 文献综述

1.2.1 混凝土埋置式传感器与智能骨料

混凝土作为一种重要的建筑材料,已经广泛应用于土木工程领域。近年来,有学者对埋置于混凝土内部的埋置式传感器进行了广泛研究,并设计了多种用于混凝土内部参数监测的传感器。如用于混凝土内部氯离子浓度监测的传感器,用于定位的混凝土嵌入式传感器,用于混凝土内部湿度监测的传感器,用于混凝土内部温度监测传感器,以及用于混凝土内部氯离子浓度监测的传感器等^{[31]-[35]}。

这类传感器通常埋置于混凝土内部监测混凝土环境参数的变化,并由线缆或者通信单元与外界进行信号传输。一些混凝土埋置式的传感器如图 1.1 所示。



图 1.1 混凝土埋置式的温度传感器与湿度传感器^[34]

混凝土内部的埋置环境较为复杂,且通常具有强烈的碱性腐蚀环境。在混凝土埋置式传感器封装方面,通常采用一些高分子材料作为外壳,使其免受混凝土内侵蚀性环境影响。如 Quinn 等人设计的具有温度与湿度监测功能的混凝土埋置式传感器,采用了一种易于加工且耐化学腐蚀的聚甲醛塑料作为包装并将其埋入混凝土内^[36]。此外,还有一些混凝土埋置式传感器采用环氧树脂等对传感器进行封装,以起到防水和保护的作用。Strangfeld 等人也设计了可以保护传感器且不影响其感知能力的传感器外壳,并且证明了聚乙烯在混凝土碱性环境中有着良好的封装性能^[37]。

近年来,一些用于混凝土内部进行监测的同时具有承载能力及感知能力的智能构件逐渐被研发出来,如基于压电材料的智能骨料、基于光纤和钢绞线一体化的智能预应力筋等^{[38],[39]}。这些植入于混凝土内部的新型传感器可以更方便地采集混凝土内部各种参数,是新一代混凝土传感器的发展方向。目前,常用的混凝土智能骨料形式为基于压电材料的智能骨料,如图 1.2 所示。压电材料包括压电陶瓷与压电高分子材料等。压电材料具有正压电效应与逆压电效应,当压电材料受到应力或应变作用时,它会产生电荷;而当有电场作用于压电材料的极化方向时,压电材料也会产生应力或应变。因此压电材料既可以作为传感器对应力应变等进行监测,又可以作为一种驱动元件产生激励波。

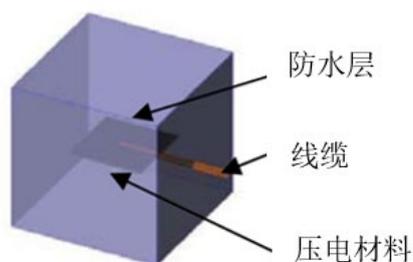


图 1.2 基于压电材料的智能骨料^[40]

Song 和 Kong 等人对基于压电材料的混凝土智能骨料进行了一系列研究^{[40]-[42]}, 将与线缆相连的压电片嵌入到小型的混凝土砌块中, 形成一个可浇筑于大型混凝土结构中的智能骨料。该压电智能骨料可以实现对混凝土内部的动态应力应变等的监测, 也可以分别作为主动监测的驱动器与传感器埋置于混凝土中, 如图 1.3 所示。采用压电智能骨料对混凝土结构进行主动监测时, 由驱动器产生激励波, 由分布式的传感器接收激励波。如果混凝土结构内部存在裂缝或损伤, 则会在波传播的过程中会起到应力消除的作用, 使波的振幅和透射能量减小, 因此可以通过压电智能骨料实现对混凝土损伤的主动监测。此外, 还有学者根据压电材料的阻抗变化对结构损伤进行识别^[43]。

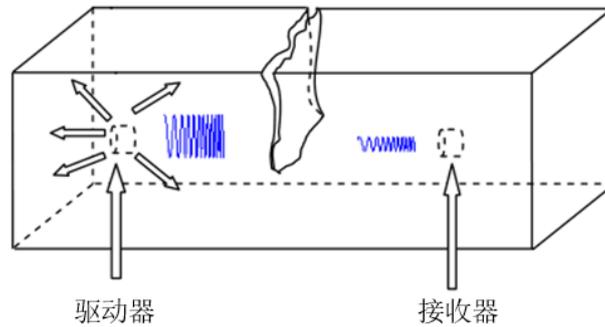


图 1.3 基于压电材料的智能骨料用于混凝土结构主动监测

基于压电材料的混凝土智能骨料研究虽然取得了一定进展, 并且已经应用于一些早期混凝土强度监测、混凝土应力应变监测及外部动荷载的监测等方面, 但是当前采用的压电智能骨料大多数仍然需要连接线缆进行信号传输及持续的电源供应, 这在实际工程中的应用仍受到一定限制。近年来, Yan 和 Ma 等将压电智能骨料与无线传感网络相结合, 对埋置于混凝土内部的无线智能骨料进行了一定研究^[44]。该无线智能骨料传统压电智能骨料的基础上实现了信号的无线传输功能, 并通过试验验证了其可行性。但是这种无线智能骨料仍然需要蓄电池等对其进行能源供应, 这限制了该方法在一些要求长期监测的实际工程中的应用。

综上, 目前大部分混凝土埋置式传感器或智能骨料通常需要持续的电源供应或电池供电, 但是当这些传感器被埋置于混凝土中之后, 它们的电池就不能再被更换, 因此电池与传感器的使用寿命也被限制在几年之内。而基于射频识别传感技术的无源传感器可以较好避免这个问题。射频识别传感器可以是完全无源的, 因此不需要像传统有源传感器节点那样频繁更换传感器的电池, 使其可以更好的适用于埋置在混凝土内部进行监测。

1.2.2 射频识别技术与无源传感器研究进展

相比于需要电源供应的有源传感器,无源传感器具有多方面的优势:无需电池等电源供应可以使传感器节点的体积大幅减小,且传感器的使用寿命不再受到电池容量的限制,因而可以适应更多的应用场景;此外,部分无源传感器还可以克服对线缆的依赖,在实际工程的监测中可以有效节省人工及线缆成本。

近年来,随着无源传感技术的发展,已经出现了基于声表面波(SAW)、基于电容电感(LC)谐振器、基于射频识别(RFID)传感技术等多种类型的无源传感器^[45]。声表面波传感器主要是将外部无线信号通过叉指换能器和压电基片转换为声信号,声信号被周期性栅条反射形成谐振,并反射回换能器转换为无线信号进行输出,从而实现对传感器周围环境的传感。声表面波传感器的设计仍然较为复杂,且传感精度还有待于进一步提高。电容电感谐振器主要是由信号收发线圈与电容元件组成,电容元件会随待测参数的变化而变化,从而影响传感器的谐振频率。该谐振频率可以由外界电感根据耦合效应无线读取,但是读取距离目前仍受到一定限制。

射频识别系统通常由阅读器与应答器(标签天线)组成,应答器存储电子数据,阅读器读取应答器中的电子数据^{[46]、[47]}。当将其用于传感时,通常是传感单元通过集成电路等与标签天线相连,由阅读器发射电磁波,标签天线接收电磁波并将调制的电磁波反射到阅读器,如图 1.4 所示,阅读器接收到的标签信息包括标签 ID 与传感器信息。由于射频识别传感技术的便利性,近年来吸引了相关学者进行了诸多研究,并设计了用于温湿度、应变、钢筋腐蚀、裂缝、位移等多种变量监测的传感器^{[48]-[55]}。

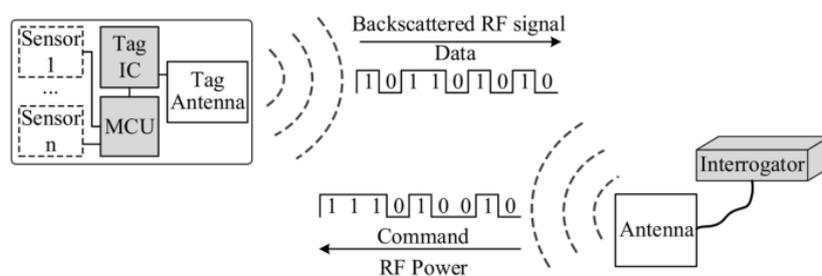


图 1.4 传感器与标签天线集成的 RFID 系统工作原理示意图^[46]

Lange 等人设计的 RFID 传感器就是采用了这种将传感器与标签天线集成的方式^[56],嵌入混凝土中的应变传感器如图 1.5 所示。在该监测系统中,传统的应变片与 RFID 标签天线通过集成电路相连并采用一定的封装嵌入混凝土中,阅读器可以对传感器的监测数据进行无线读取。此外 Lange 等人还研究了这种嵌入于混凝土中的 RFID 系统的电磁波衰减与混凝土的电磁特性之间的关系。由于混凝土本身作为电介质可以影响电磁波的传播,因此该嵌入式传感器的电磁波信号与传感器嵌入混凝土深度、混凝土含水量、混凝土密度等有一定关系,这些影响有

待于进一步的深入研究。

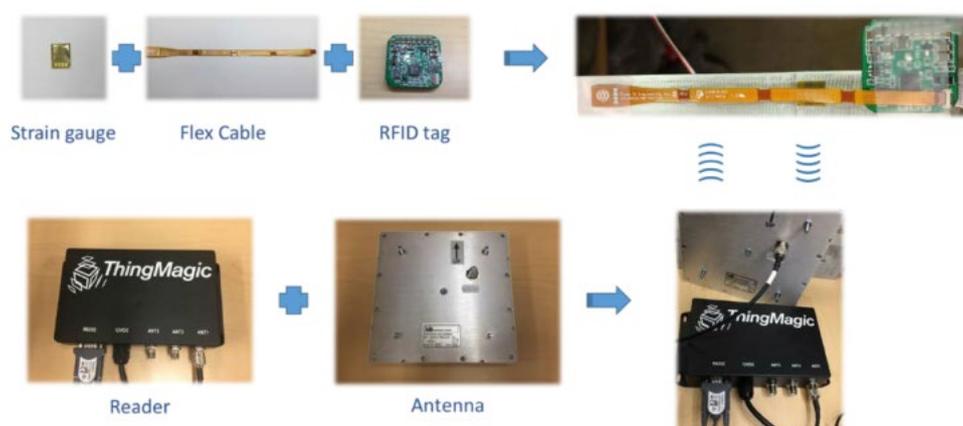


图 1.5 嵌入混凝土中进行应变监测的 RFID 监测系统^[56]

1.2.3 基于贴片天线的无源传感器研究进展

标签天线作为接收和辐射电磁波的装置，在射频传感系统中起着重要的作用。近年来，有学者发现天线不仅具有能量无线传输、数据无线通信的功能，天线本身也可以作为传感单元^{[57]-[60]}，对温度、湿度、应变与相对位移等环境变量进行测量。其原理为当射频识别传感系统中的天线经历应变、组件相对位移、环境温度湿度变化时，天线的一些特征参数如谐振频率、平均峰值电压、复阻抗、回波时差、阈值发射功率和阈值反射功率等也会发生相应的改变^{[61]-[63]}。这些特征参数的变化可以由矢量网络分析仪或 RFID 阅读器进行有限无线测量。一些常用的天线形式如偶极子天线^[64]、矩形贴片天线^{[65]、[66]}、圆形微带贴片天线^[67]、弯折线天线^[68]、倒 F 形天线等^[69]，如图 1.6 所示，这些天线形式都可以尝试进行传感器的制作，并已经有成功的先例。

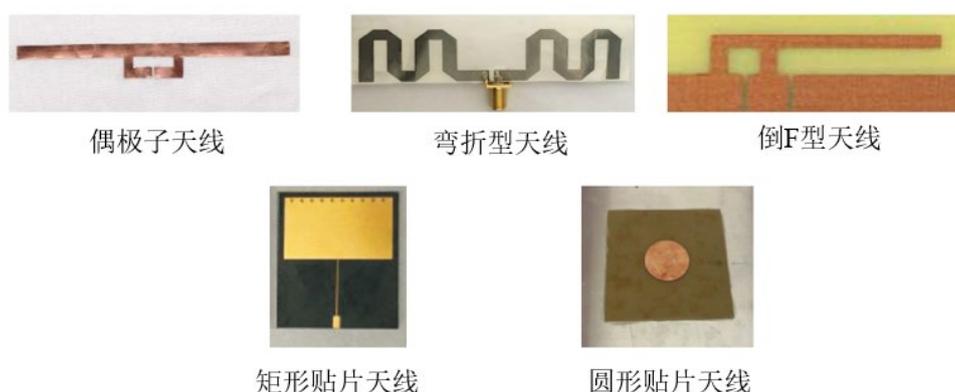


图 1.6 不同形式的标签天线^{[64]-[69]}

贴片天线是一种常用的天线，与其他天线形式相比，贴片天线具有结构简单、厚度较薄、易贴合结构表面等特点，近年来吸引了广泛的关注。Huang 等人较早

对基于贴片天线进行了一系列研究，并探究了将其用于结构应变传感的可行性^{[70]-[73]}。**Huang** 等人介绍了贴片天线的加工制作方法，并将贴片天线粘贴到铝制悬臂梁表面进行了一系列应变测量试验。试验结果表明了天线谐振频率的偏移与贴片天线所经历的应变相关。随后，**Huang** 等人研究了贴片天线传感器的询问方法，采用了一个阻抗开关在传感器节点处对天线后向散射进行信号调制，从而将天线背向散射信号与结构散射信号相区分，便于无线读取天线的谐振频率，但是该阻抗开关电路仍需要电源供应^[74]。此外，**Huang** 等人还研究了微带贴片天线传感器用于剪应力测量，其原理为当传感器受到剪应力作用时，天线介质板产生变形，辐射贴片相对于接地板位置变化，引起传感器谐振频率改变从而实现剪应力的测量^{[75]-[76]}。

Yi 和 **Wang** 等人根据贴片天线谐振频率的变化设计了一系列用于结构监测贴片天线传感器^{[77]-[80]}。其中，一种带芯片的贴片天线应变传感器如图 1.7 所示。当天线粘贴于结构表面并经历应变时，天线尺寸会发生变化，进而引起谐振频率偏移，从而可以通过测量天线的谐振频率得到其应变。在信号读取方面，采用阅读器向标签天线发射电磁波，根据 RFID 芯片被激活时的阈值功率确定标签天线的谐振频率。**Yi** 和 **Cho** 等人还在利用贴片天线对裂纹传感方面进行了研究，并设计了用于结构表面应变或裂纹监测的传感器^[81]。此外，**Yi** 和 **Wang** 等人还设计了可以使天线尺寸缩小的开槽式贴片天线传感器，通过增加贴片天线的电长度实现了相同频率情况下天线尺寸的小型化^[82]。

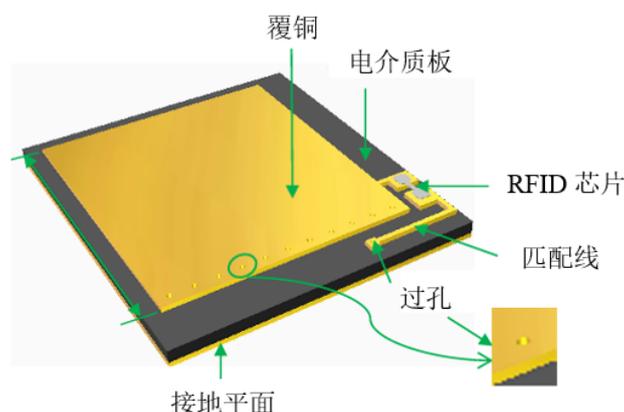


图 1.7 带芯片的贴片天线传感器^[77]

在平面应变和位移测量方面，**Ahbe** 和 **Liu** 等人对双频贴片天线进行了研究，根据双频天线两个方向谐振频率的偏移对平面二维应变进行监测^{[83]-[84]}。**Thai** 等人设计了一种带悬臂开环结构的微带天线传感器用于无线测量平面二维应变，并且其具有较高的应变测量灵敏度^[85]。此外 **Mandel** 等人也研究了用于二维位移测量的天线传感器^[86]。

Wan 和 Chen 等人也对贴片天线传感单元进行了一系列研究，设计了可调谐编码传感单元^{[87]-[89]}，如图 1.8 所示。该可调谐编码的传感单元集应变传感和编码功能于一体，具有高容量编码位，并且编码位的频段可以灵活调整，从而使传感单元便于与物联网集成，实现对传感单元的定位。此外，Wan 等人也设计了带编码位的基于圆形微带贴片天线的结构应变传感器^[90]。



图 1.8 可调谐编码的传感单元^{[87]-[89]}

Chung 和 Wang 等人也对基于贴片天线的传感器进行了一系列研究，提出了一系列用于结构表面多向应变测量的高灵敏度传感器，并对传感器的性能进行了测试^{[90]-[94]}。Chung 等人还根据混凝土材料的电导率等电磁参数变化实现了对混凝土抗压强度的初步预测^[95]。为了对混凝土表面的应变进行监测，Chung 和 Liu 等人研究了基于传输线传感单元的应变传感器，如图 1.9 所示，并根据传输线传感器的反射系数相位参数的变化实现了对混凝土表面应变的测量^[96]。

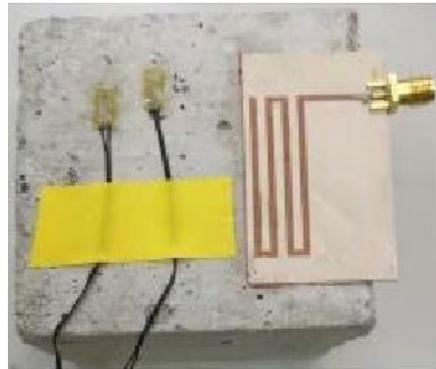


图 1.9 用于混凝土表面应变测量的传输线传感器^[96]

在贴片天线传感器用于结构表面应变或位移监测方面，当前大部分的天线传感器是基于单片式的贴片天线，将其粘贴于结构表面与结构发生协同变形。但是该天线传感器的形式会存在粘结强度不足和变形传递比不完全等问题，限制了其在实际工程中的使用。为了解决这一问题，Xue 和 Xie 等人对用于结构位移及裂缝监测的组合式天线传感器进行了研究，提出了一系列无应力的组合式天线传感器^{[97]-[100]}。该类型传感器主要由天线主体和天线组件构成，如图 1.10 所示，当天线组件位置发生移动时，会引起天线整体的谐振频率产生偏移，从而可以通过天

线谐振频率的变化监测天线主体与天线组件的相对位移,进而实现对结构变形及裂缝的监测。该类型传感器可以避免之前粘贴于结构表面的贴片天线传感器遇到的应变传递效率和粘贴强度的问题,提高了传感器的适用性。Li 和 Jiang 等人根据该组合式传感器的原理设计了用于螺栓松动等进行监测的天线传感器^{[101]-[103]}。此外,由于无应力组合式的贴片天线传感器更关注组件间的相对位移,不需要整体粘结于结构表面,因此可对其进行一定的封装设计作为埋置式传感器用于混凝土内部的应变及位移监测,这有待于进一步的研究工作。

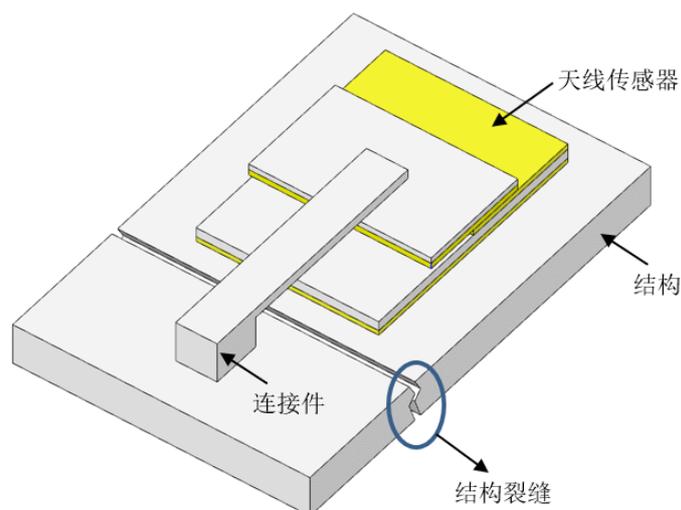


图 1.10 无应力的组合式贴片天线传感器示意图

在对贴片天线传感信号无线询问方面, Daliri 等人采用一种超宽带喇叭天线实现了对贴片天线传感器谐振频率的无线读取^[104], 以用于结构表面应变的无线测量, 示意图如图 1.11 所示, 但是该询问方法的工作距离仍受到限制, 当超过一定读取距离时会使读取稳定性降低。Cho 等人通过 RFID 芯片在不同频率下的询问阈值功率从中提取出天线的谐振频率^[105], 将天线背向散射信息与结构散射信息区分, 并通过谐振频率的偏移实现对结构应变的监测, 如图 1.12 所示。Yao 等人根据调频连续波(FMCW)雷达原理设计了一种无线读取系统, 实现了对传感信号的高频询问, 频率可达 320HZ, 这为采用天线传感器动态测量结构变形提供了可能^[106]。Yi 等人也在此基础上进行了进一步的研究, 基于调频连续波雷达实现了对贴片天线信号的动态询问^[107], 其动态询问频率可达到 500Hz, 并设计出了一种可用于结构加速度监测的传感器^[108]。此外, 还有学者采用引入倍频天线的方法及增加阻抗开关等方法对减轻环境反射电磁波的影响进行了研究^{[109],[110]}。当前的贴片天线无线询问虽然取得了一定进展, 但是对于无芯片的贴片天线电磁参数无线询问仍有待解决的问题, 包括询问距离的限制, 电磁环境的干扰, 以及多谐振模式下的贴片天线谐振频率读取等。

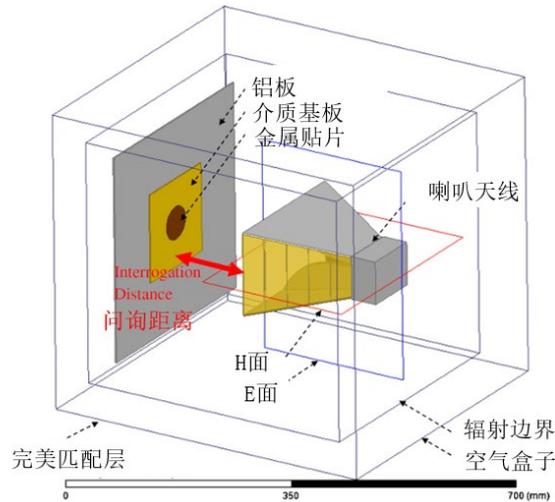


图 1.11 采用超宽带喇叭天线实现贴片天线谐振频率读取的示意图^[104]

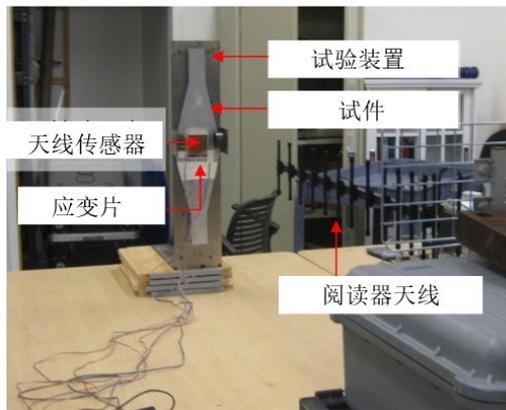


图 1.12 采用阅读器及 RFID 芯片实现贴片天线谐振频率读取的示意图^[105]

1.2.4 环境因素影响及贴片天线传感器的封装

除了结构应变及位移,环境影响如温湿度等也会对贴片天线传感器的电磁参数产生影响。近年来,相关学者对天线传感器的电磁参数影响因素进行了深入研究,并开发了用于各种不同物理量监测的天线传感器。Teng 等人根据混凝土内贴片天线的谐振频率与混凝土含水率变化的关系,提出了一种埋置于混凝土内部的含水率监测传感器^[111]。Sanders 和 Huang 等人研究了一种用于温度测量的天线传感器,该传感器采用了介电常数随温度线性变化的材料作为基板,试验验证了该传感器良好的性能并对其实现了无线询问^[112]。Liu 等人对用于结构裂纹及腐蚀监测的天线传感器进行了研究^{[113]-[115]}。Low 等人开发了一种用于空气压力监测的液体谐振天线传感器,将空气腔封闭在环形液体天线中,当空气压力发生改变时会引起空气腔及液体天线形状的变化,从而引起谐振频率的偏移,该特征的改变将用于有效监测空气压力^[116]。此外 Tan 等人也根据压力作用下传感器形状及谐

振频率的变化对基于谐振天线的压力传感器进行了一系列研究^{[117]·[118]}。Tchafa 等人研究了一种同时进行应变和温度传感的天线传感器,通过将单片式贴片天线传感器的纵向一阶谐振频率与横向一阶谐振频率解耦,由谐振频率的偏移反求出应变与温度的变化^[119]。这种由单一天线传感器实现多个变量监测的方式具有广阔的应用前景^[120]。此外,还有许多基于新材料的新型天线传感器被应用于可穿戴设备、流体监测、生物医学传感等领域^{[121]·[126]}。

用于结构监测尤其是埋置于混凝土监测的 RFID 传感器通常需要高效的天线,因此,混凝土对天线的影响应予以足够重视。此外,一些利用天线本身作为传感单元对混凝土进行监测的天线传感器更是与嵌入混凝土环境密切相关,混凝土的应变、温度、含水率等都会对埋置于其中的天线多维特征参数如谐振频率等产生一定影响^[127]。探究混凝土埋置环境与天线特征参数之间的关系有助于对天线多维特征参数进行解耦,使其可以表征混凝土内部环境的变化。

近年来,不少学者对于一些埋置于混凝土中进行监测的天线性能及封装方式进行了探究。混凝土作为一种高损耗的电磁波传输材料,对埋置于其中的天线性能具有一定影响。嵌入混凝土中的天线发射和接收电磁波时的损耗可分为两部分:一部分是由空气与混凝土界面引起的功率损耗,另一部分是电磁波在混凝土中传播产生的损耗^[128]。Abbadi 等人研究了嵌入混凝土的贴片天线性能,并在高频仿真模拟软件中进行了一系列的数值模拟以探究混凝土内的贴片天线回波损耗和传输损耗^[129]。研究表明电磁波在混凝土内的衰减随频率的增加而增加,并且水分和金属的存在也会增加电磁波的衰减,不同的钢筋直径与间距都会对天线的传输性能有不同的影响^[130]。Jin 等人研究了 2.45GHz 左右的偶极子天线、平面倒 F 天线、微带贴片天线和环形天线埋置于混凝土柱内的回波损耗和传输损耗,并研究了这些天线在空气中、干混凝土、饱和混凝土及有钢筋的饱和混凝土等不同埋置环境下的性能^[131]。Martinez 对天线上覆电介质时的有效介电常数及谐振频率变化进行了研究^[132]。Jeong 等人研究了混凝土对 RFID 标签天线性能的影响,并提出了一种新的适用于混凝土嵌入的标签天线^[133]。Ozbey 等人设计了一种固定于钢筋表面可用于无线应变监测的梳状开口环谐振器,并发现该传感器在 4cm 厚度的混凝土遮挡情况下仍可以无线读取信号,此外该传感器还可以采用电磁特性接近自由空间的材料填充混凝土芯和谐振器之间的间隙,使其可以埋置于混凝土内部^{[134]·[137]}。

Salama 等人对用于土木工程的混凝土嵌入式贴片天线模块设计与性能进行了一系列研究^{[138]·[141]},该模块由矩形微带贴片天线、微带馈源和保护壳等组成,如图 1.13 所示。为了减少周围材料对嵌入式天线性能的影响,天线被封装在一个由丙烯酸制成的介质外壳内。混凝土作为一种介电常数可变的材料,当混凝土

中的含水率等发生变化时，其介电常数也会发生变化，这些变化往往会导致埋置于其中的天线谐振频率产生偏移。研究表明，在贴片天线上部预留空气间隙可以有效的减少埋置环境（混凝土）对贴片天线谐振频率的影响，而天线下部的空气间隙对贴片天线的谐振频率影响可以忽略不计。此外 Salama 等人还采用一个双天线系统对嵌入混凝土中的天线模块传输性能进行了研究，如图 1.14 所示，混凝土中嵌入的天线模块与外部天线分别与网络分析仪的两个端口相连，测量了它们的 S_{11} 曲线及 S_{12} 曲线，结果表明了该混凝土嵌入式贴片天线模块用于混凝土内部无线传输的可行性。

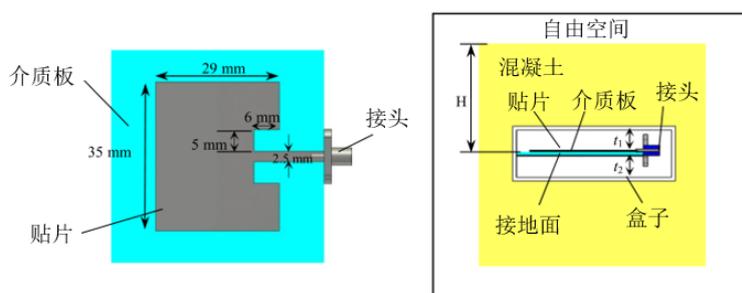


图 1.13 矩形贴片天线封装示意图^[138]

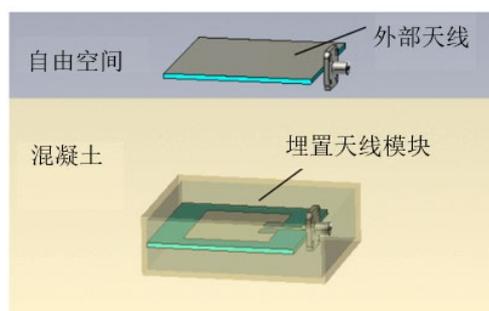


图 1.14 嵌入混凝土中的天线模块传输性能测试示意图^[138]

Shams 等人也对埋入混凝土中的微带贴片天线的特性进行了研究，并在干、湿两种不同类型的混凝土中测试了叠层微带贴片天线的回波损耗特性^{[142]-[144]}。Fallah 等人提出了一种覆盖泡沫层的贴片天线，该天线设计可以有效减小贴片天线上部的混凝土对天线谐振频率产生的影响^[145]。

除了混凝土本身介电常数等对嵌入式天线的影 响，混凝土中的钢筋分布对埋置于其中的天线影响也引起了一些学者的兴趣。如 Esmati 等人对埋置于混凝土中的贴片天线与混凝土外的 vivaldi 天线之间的传输特性进行了研究，并模拟了钢筋对传输性能的影响^{[146]-[148]}。研究表明当混凝土中钢筋网格的间距小于天线的半波长时，钢筋会对天线传输性能起到一定的屏蔽作用，而当埋置式天线位于钢筋网格的中心的空隙时，其与外部天线的传输效果相对较好。该研究对于埋置于钢筋混凝土中的埋置式传感器无线供电和信号传输具有一定的指导意义。此外，

Castorina 等人在一种用于混凝土结构监测的埋置式圆极化贴片天线的研究中发现天线下部的钢筋不会对天线性能产生显著影响,但是天线上部的钢筋会影响天线的信号传输^[149],这在 Jiang 等人的研究中也发现了相似的发现^[128]。混凝土中的钢筋分布除了对天线通信性能会产生影响,同样还会对嵌入式天线的谐振频率产生一定影响。但是这种影响在钢筋尺寸和位置确定且不发生变化的情况下是相对恒定的,而且几乎不会随着天线的微小变形而改变。因此混凝土中的钢筋等对嵌入式天线谐振频率的影响可以考虑采用标定及补偿的方式对其进行处理。

综上,在对混凝土结构进行埋置式监测的过程中,混凝土内部的环境参数如温度、含水率的变化是一个动态的过程,会对埋置于其中的天线谐振频率等特征参数产生一定的影响。这些环境因素对天线谐振频率的影响既可以采用标定补偿的办法对其进行处理^{[150],[151]},也可以根据其变化关系设计出针对这些特定环境变量进行监测的天线传感器。此外还可以根据混凝土内部环境变化对天线多维电磁特征参数的影响,设计可用于混凝土多种物理量同时监测的天线传感器,这涉及到对混凝土电磁特性的研究和天线多维特征参数的解耦,相关研究有待于进一步深入。

1.3 本文研究目的及意义

目前用于结构监测的各种类型的传感器,诸如电阻式、光纤式、压电式等等,虽然已经基本满足了结构健康监测的需要,但是需要有线进行信号传输及持续电源供应的特点使其在实际工程中应用仍面临一定困难,且会导致安装维护较为复杂。为了避免传统传感器的电源供应及信号传输问题,具有无源优势的射频识别传感技术和天线传感器应运而生。基于贴片天线的射频识别传感技术为土木工程监测开辟了新的技术途径,这种传感技术将天线本身作为用于感知结构变形和环境参数等关键监测量的传感单元,且无需持续的电源供应,在实际使用中具有更强的适用性。但是当前基于贴片天线的传感器的主要应用场景为粘贴于结构表面对应变等进行测量,且在实际使用中面临的粘结强度不足与应变传递比不完全等问题仍有待解决。此外,其在多参数感知等方面的研究也有待于进一步深入,在埋置环境中的外部介质干扰及温度补偿等问题也需要相关的解决方案。

为了使具有无源优势的贴片天线传感器可以更好的应用于结构内部埋置环境的监测,探究了贴片天线传感单元的多参数感知原理及封装材料、问询方式、小型化等问题,并将其与智能骨料的传感器埋置形式相结合,最终形成一种可埋置于混凝土内部,兼具传感与受力功能的多参数感知无源智能骨料。该智能骨料传感器可以与混凝土构件浇筑为一体,实现对混凝土内部形变等参数的感知。该

基于贴片天线的多参数感知智能骨料及相关研究旨在解决传统埋置式传感器的电源供应等问题，以期在未来大规模部署和应用的无源智能骨料传感器能够为构建分布式的结构安全与健康智能评估系统提供支撑。这一新兴传感技术与交叉学科领域的研究也符合当前基础设施智慧建造与运维的发展方向。

1.4 先行研究及技术路线

当传统的单片式贴片天线应用于结构变形和裂缝宽度扩展等方面的监测时，贴片天线传感器会粘贴于结构表面并与结构发生协同变形，从而导致应变传递效率和粘结强度不足等问题，并且随着变形的扩大天线本身极易发生破坏。在这一方面，无应力的组合式贴片天线可以有效的避免单片式贴片天线需要受力的缺点，并根据天线组件间的相对移动实现对目标变量的感知，因此更适合用于结构变形等的监测。为了解决单片式贴片天线传感器面临的诸多问题，在贴片天线传感单元设计方面，本研究组已经做了一些工作，主要是对单片式贴片天线传感器的改进，使之成为一种具有组合式结构的无应力传感单元，实现对结构变形的感知，具体包括：

Xue 和 Xu 等人提出了一种带有附加馈电线的组合式天线传感器^[97]，如图 1.15 所示。根据附加馈电线的不同形式，该组合式传感器类型可分为两种形式。一种形式是在两个矩形微带线之间填充介质板，另一种形式是将馈电线设计成“L”型梁，使其与下方的微带线保持一定间隙。这两种设计的共同目标是保持微带线之间的距离恒定，从而减少因距离变化而引起的电容变化所导致的误差。天线主体和附加微带线分别固定在裂缝的两侧，当结构表面发生变形时，会导致附加微带线之间正对的面积发生变化，从而改变它们之间所形成的电容，然后根据天线的谐振频率的偏移即可实现对结构表面变形的感知。

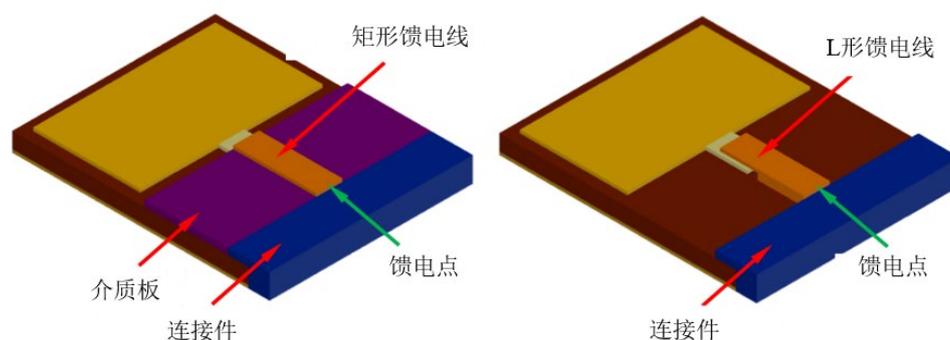


图 1.15 带有附加馈电线的组合式天线传感器示意图^[97]

Xue 和 Yi 等人还提出了一种适用于裂缝监测的带短接式附加贴片的的天线传感器^[99]。该天线传感器的主体辐射贴片与附加子贴片相互接触，使电流可以流经

整体辐射贴片表面。当结构变形等导致两个天线组件之间发生相互错动时，天线整体辐射贴片长度也会发生变化，进而导致天线谐振频率的偏移。通过该谐振频率偏移量及天线传感器的灵敏度，即可反推出结构变形量，实现对裂缝宽度变化的监测。该带短接式附加贴片的天线传感器也经改进后被应用于螺栓松动监测，并取得了良好的效果。

此外，Xue 和 Guan 等人还研发设计了一种基于倒 F 天线的组合式天线传感器^{[152],[153]}，用于结构表面位移的监测。该传感器的传感原理为倒 F 天线的主体与馈电线分别固定在待测位移结构的两个固定点，当两者之间位移发生变化时，馈电线与天线主体之间的距离发生改变，进而导致整体天线谐振频率的改变。该传感单元的设计也取得了良好的测试效果。

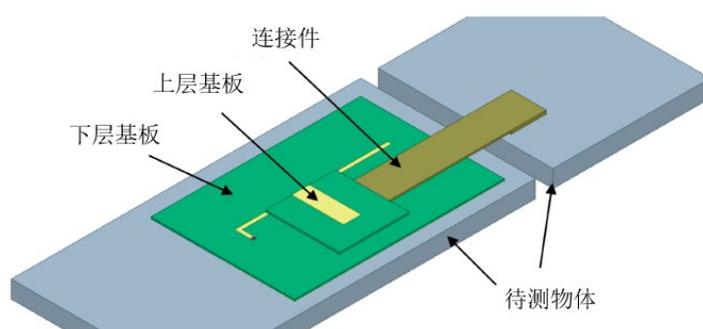


图 1.16 基于倒 F 天线的组合式天线传感器示意图^[153]

以上基于天线组件相对移动的传感器设计方式可以在天线本身不受力的情况下实现对结构变形的感知，为后续具有双向谐振模式的偏心馈电组合式贴片天线传感器的研究打下了坚实的基础。

天线传感本身在温度变化的作用下会发生热胀冷缩的温度效应，此外，天线的介质板介电常数也会随着温度变化而改变，这些都会导致天线传感器的测量结果出现波动。为了提高传感器的适用性，对温度变化情况下天线电磁参数课题组也进行了前期探究。根据相应的理论推导，温度会影响贴片天线基板介电常数和辐射单元长度，从而改变贴片天线谐振频率。项目组考虑了温度的热膨胀效应对谐振单元长度的影响以及介质基板的介电常数温度漂移系数，初步提出了天线传感器的温度补偿方案^[150]。相关研究为后续多参数感知单元打下了良好的基础，但是该温度补偿方案仍需要额外的温度传感器对环境温度进行测定，因此有待于后续进一步的改进。

在混凝土含水率对天线的影 响方面，项目组也进行了一定研究^[127]。主要采用单片式矩形贴片天线实现了混凝土含水率和凝结时间的检测，如图 1.17 所示。在混凝土的凝结过程中，含水率会随水化反应逐渐降低，进而导致整体试件介电常数的减小。同时，贴片天线的电磁参数会随着上覆介质介电常数的变化而变化，

基于此，项目组利用矩形贴片天线设计了一种混凝土含水率传感器，并通过检测含水率的变化来确定混凝土的初凝时间和终凝时间^[154]。该研究为后续将天线传感器埋置于混凝土内部进行监测提供了技术支持，但是也证实了混凝土内部含水率等环境因素会对贴片天线传感器的谐振频率产生巨大影响。在本文的研究中，为了解决这一问题，提出了两种不同的封装技术路线，并通过屏蔽材料封装的方式避免了混凝土内部含水率等因素对天线谐振频率的影响和干扰，从而使天线的谐振频率可以专注于结构变形等参数的表征。



图 1.17 贴片天线传感器用于混凝土含水率测试示意图^[154]

根据前期相关研究基础及探索，本文确定的基于贴片天线的多参数感知智能骨料技术路线为：

(1) 首先，通过理论研究(电磁耦合机理、谐振腔理论等)探究基于组合式贴片天线的形变感知机理，通过多物理场仿真软件(HFSS、COMSOL 等)对天线传感器及监测变量表征等进行仿真模拟，设计出新形式的具有双向谐振的偏心馈电组合式贴片天线传感器。

(2) 然后，探究环境因素如温度等对组合式贴片天线双向谐振模式的影响，探索传感器的温度自补偿机制，根据贴片天线宽度方向与长度方向谐振频率的偏移实现环境温度与结构变形的解耦表征，解决混凝土内部应变监测过程中温度干扰等问题。

(3) 进一步，探究封装材料对天线传感单元的影响，以及封装层外部介质变化对天线传感单元谐振频率的影响。通过屏蔽材料封装的方式避免混凝土内部含水率等因素变化对天线传感单元的干扰。

(4) 研究贴片天线传感器的小型化及无线问询等技术。通过小型化减小天线传感单元的尺寸，使其更适用于混凝土埋置环境；通过宽带天线正对访问等无线问询方式的探究使天线传感器的问询不完全依赖于线缆，从而具有更广阔的应用场景。

(5) 最后，研究组合式贴片天线作为传感单元的无源智能骨料封装关键技术问题，选取合适的封装形式，保护传感单元并有效传递混凝土内部变形等，使其

适用于植入混凝土内部进行监测，并设计相应的试验对其实际传感性能进行探究。

1.5 本文主要研究内容

根据本文研究目标及前期研究基础，本文所提出的基于组合式贴片天线的多参数感知智能骨料设想示意图如图 1.18 所示。首先对具有感知功能的无源贴片天线传感单元进行研究，并将其封装设计为具有结构形变、环境温度等不同感知功能的智能骨料，然后研究智能骨料的问询方式，从而可以通过阅读器和宽带天线等实现其电磁参数的无线问询，进而实现对结构内部变形和环境温度等监测变量的表征。

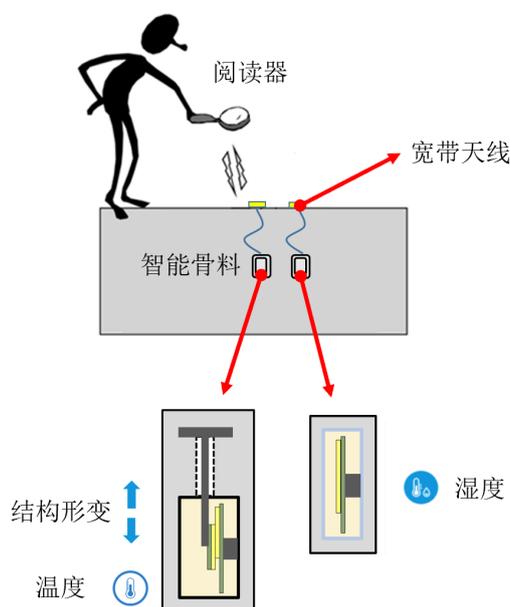


图 1.18 基于贴片天线的传多参数感知智能骨料示意图

本文的主要研究内容框架如图 1.19 所示，具体的章节安排如下：

第一章为绪论部分，介绍了天线传感器和混凝土智能骨料相关的研究进展，提出了基于贴片天线的智能骨料设想，并介绍了待解决的问题及拟采用的技术路线。

第二章为贴片天线传感器工作原理介绍，主要从电磁学的基本理论出发，介绍了贴片天线的电磁特征参数及传感原理，并推导了单片式及组合式贴片天线谐振频率的理论公式等。

第三章为基于偏心馈电组合式贴片天线传感单元的结构形变及环境温度同步感知探究。首先设计了具有双谐振特性的偏心馈电组合式传感单元，并对偏心馈电距离等进行了优化，然后通过多物理场耦合仿真模拟对该传感单元的传感性

能进行了分析，最后通过试验验证了所提出的多参数传感单元的有效性。

第四章为贴片天线传感器的封装材料研究，通过屏蔽材料（铜、碳纤维等）与非屏蔽材料（亚克力、聚乙烯等）两个封装技术路线对贴片天线传感器进行封装，并采用仿真模拟和试验对两种封装方式的特点和其对贴片天线传感单元的影响进行了探究。

第五章为贴片天线传感单元的小型化设计及无线问询方式研究，在第三章所提出的偏心馈电组合式贴片天线形式的基础上，通过增加介质基板介电常数的方法实现贴片天线传感器的小型化与高灵敏度，并通过一系列仿真和试验探究了对具有双向谐振模式的贴片天线的谐振频率无线问询的方法。

第六章为无源智能骨料的封装及实际工作性能测试，根据前文对组合式贴片天线传感单元及封装材料和小型化等方面的探究，封装设计形成了小型化高灵敏度的智能骨料，并将其埋置于混凝土中进行了相应测试，以探究其实际传感性能，并提出了相应的改进措施。

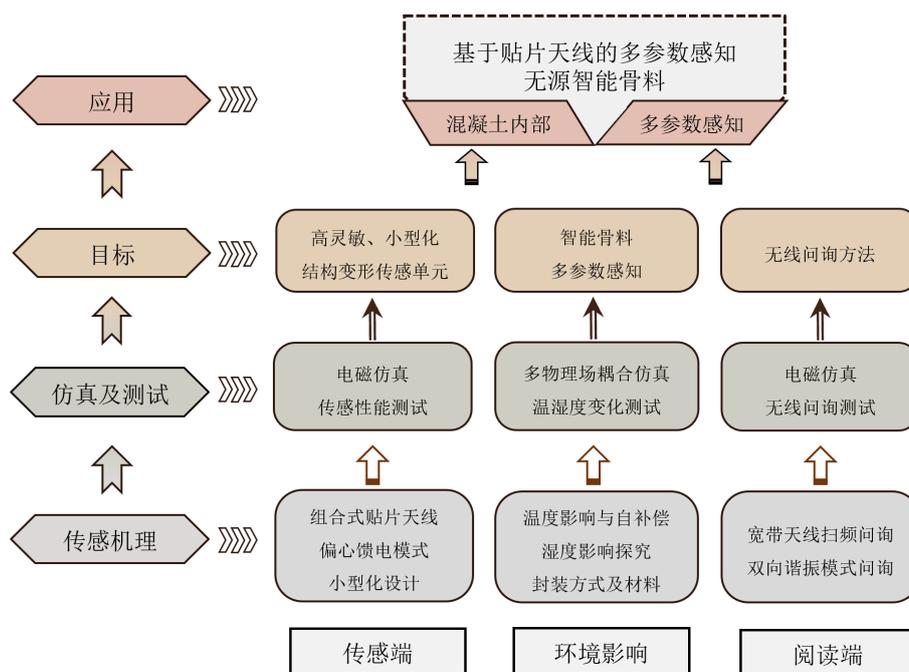


图 1.19 本文主要研究内容框架

第 2 章 贴片天线传感器工作原理

利用贴片天线作为传感单元,对结构应变和温湿度等变量进行传感与监测时,重点在于建立天线的电磁特征参数与被监测变量之间的对应关系,进而实现天线传感器对单一变量或多变量的表征。因此,根据电磁学和天线的基本理论,对天线的谐振频率等电磁特征参数进行研究具有重要的意义。

本章主要介绍了电磁学的基本理论及麦克斯韦方程组,并基于传输线理论和谐振腔理论对天线谐振频率计算公式进行了推导。此外,本章还对天线的多参数传感原理进行了介绍,并根据理论公式探究了天线谐振频率的影响因素。

在 2.1 节中,介绍了电磁学的基本理论和天线分析方法。

在 2.2 节中,介绍了贴片天线的电磁特征参数,以及贴片天线传感器的传感原理。

在 2.3 节中,对贴片天线的谐振频率进行了推导计算,并探讨了影响贴片天线谐振频率的因素。

2.1 电磁学基本理论和天线分析方法

2.1.1 麦克斯韦方程^{[155]-[159]}

天线和阅读器之间的通信是通过电磁波进行的,电磁波和电磁场是实现无线通信的基础。提到电磁波,首先要介绍麦克斯韦方程组。天线的辐射、信号传播和接收等都可以由麦克斯韦方程组的四个基础方程来解释。麦克斯韦方程组是在安培、法拉第、高斯等人的研究基础上,提出的统一的电磁场理论,深刻揭示了场源、电场和磁场之间的关系。麦克斯韦方程组有多种表达形式,其中微分形式较为简洁,描述如下:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

其中,公式 2.1 为法拉第电磁感应定律, E 表示电场强度矢量(V/m), B 表示产生电磁的磁通量矢量(W/m²), t 表示时间。该方程表示随时间变化的磁场可

以产生随时间变化的电场，并且该电场强度旋度与磁场强度的变化率相关。公式 2.2 为安培定律， H 表示磁场强度矢量(A/m)， D 为电通量密度矢量(C/m²)， J 为体积电流密度矢量(A/m²)。该方程表示，电流以及变化的电场周围会产生磁场，并且该磁场的强度旋度与电流密度和电通量的变化率相关。公式 2.3 和公式 2.4 为高斯定律， ρ 表示空间某一点的电荷密度，公式 2.3 表示穿过封闭曲面的电通量密度只与该封闭曲面内的电荷密度有关，公式 2.4 表示穿过封闭曲面的磁通量密度为 0。

在上述方程组的基础上，为了求解空间中任意一点的电场和磁场，还需要补充介质的本构关系式：

$$D = \varepsilon E \quad (2.5)$$

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

其中，公式 2.5 描述电通量和电场强度之间的关系，公式 2.6 描述磁通量和磁场强度之间的关系， ε 和 μ 分别为介质的介电常数和磁导率。

除了求解空间中的电磁场，麦克斯韦方程组还可以用来推导真空中电场和磁场传播的方程：

$$\nabla^2 E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\nabla^2 B = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

其中， μ_0 和 ε_0 分别表示自由空间的磁导率和介电常数。

由式 2.7 和 2.8 可知，电场和磁场都遵循波动方程，因此它们在空间中以波的形式传播，即电磁波。根据波动方程的特性，真空中电磁波的速度可以求出： $1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，等于真空中的光速。因此，麦克斯韦大胆地预测光也是一种电磁波。这表明麦克斯韦方程组不仅统一了电场和磁场，还预测了电磁波和光的性质，把我们带入了一个电磁的时代。

2.1.2 传输线模型理论^{[160]-[164]}

麦克斯韦方程组表明了电与磁在一定条件下可以相互转化，而天线就是一种能够实现电与磁之间相互转化的载体。当天线中的电流谐振时，会在其周围的空间中产生电磁波并向外辐射。同时，天线周围电磁场的变化也会在天线中激发出相应的感应电流。麦克斯韦方程组为我们研究电磁波和天线提供了基础理论，但是在实际进行天线谐振频率等理论计算时，使用麦克斯韦方程需要处理边界等问题，这使其应用变得较为困难。因此，通常会进行一些合理的假设，或者将天线简化为等效模型，以便于理论分析与计算。

目前，常用的天线理论分析方法主要有传输线模型、谐振腔模型以及全波分

析法等。以上几种天线分析方法各有优劣，其中，全波分析法又包括矩量法及有限元法等，通常所需计算量较大，在实际工程中并不适用。传输线模型和谐振腔模型相对简单，对算力需求较小，获得了广泛的实际应用。以下将以矩形贴片天线为例，对传输线和谐振腔两种模型进行简单介绍。

传输线模型是最为简单的天线模型，传输线模型将宽度为 W ，长度为 L ，高度为 h 的矩形贴片天线视为如图 2.1 所示的等效电路，其中辐射贴片边缘开口的两个辐射缝隙，分别等效为并联的导纳 $G_R + jB$ ，它们被低特性阻抗辐射贴片隔开，缝隙的电容也可由辐射贴片开路端边缘电容表示。

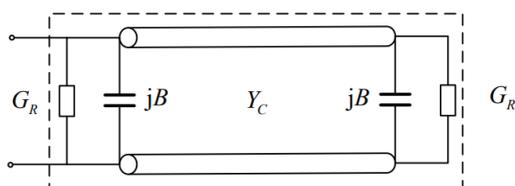


图 2.1 贴片线传输线模型等效电路

辐射缝隙的辐射电导，可以由公式 2.9 计算：

$$G_R = \frac{2P_R}{U^2} = \frac{1}{\pi\eta_0} \int_0^\pi \left[\frac{\sin(\pi W \cos \theta / \lambda_g)}{\cos \theta} \right]^2 \sin^3 \theta d\theta \approx \frac{1}{120} \left(\frac{W}{\lambda_g} \right)^2 \quad (2.9)$$

其中， η_0 为自由空间波阻抗，约为 $120\pi\Omega$ ， λ_g 为贴片天线中的导波波长。

辐射贴片的开路端边缘电容 C 和等效电路的导纳 B 表示为：

$$C \approx \frac{\Delta L_1 \sqrt{\epsilon_e}}{cZ_0} \quad (2.9)$$

$$B = \omega C \approx \frac{2\pi\Delta L_1 \sqrt{\epsilon_e}}{\lambda_0 Z_0} \quad (2.10)$$

其中， c 为真空中的光速， Z_0 为辐射贴片的特性阻抗， ϵ_e 为介质板有效介电常数， λ_0 为导波在真空中的波长，与贴片天线中导波波长的关系为 $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_e}$ ， ΔL_1 为考虑基板效应的补偿介电长度，该长度可由下式计算：

$$\Delta L_1 = 0.412h \frac{(\epsilon_e + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (2.11)$$

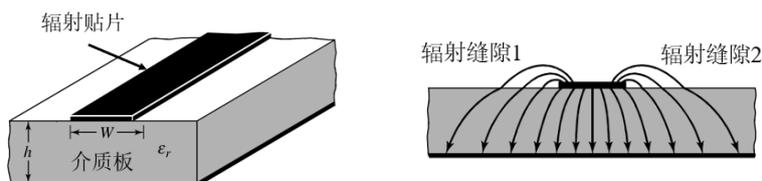


图 2.2 贴片天线电场示意图

贴片天线的电场大部分集中在介质板内，但是在辐射贴片的边缘由于电场线发生绕射，电场线不再局限于介质板内部而是向周围的空气中扩散，部分电场线从空气中进入介质板中并发生一定弯曲，这会引入电场线的区域比辐射贴片的物理尺寸大，即“边缘效应”，如图 2.2 所示。

由于边缘效应的存在，引入了有效介电常数的概念以对介质板的介电常数进行修正，并假定辐射贴片完全置于均匀单一介质板中，如图 2.3 所示。由于天线介质板本身的介电常数为 ϵ_r ，天线上部空气的介电常数为 1，有效介电常数 ϵ_e 描述等效均匀介质的介电常数，取值为 $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ 。有效介电常数更接近介质板的介电常数值，且其随频率的不同会产生一定的变化，但通常根据经验公式 2.12 进行计算。

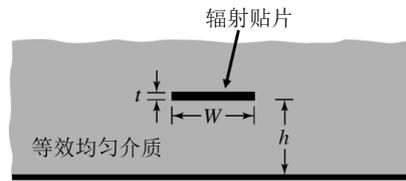


图 2.3 等效介电常数概念

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

基于以上公式，该矩形贴片天线的输入导纳可以表示为：

$$Y_m = G_R + jB + Y_C \frac{G_R + j(B + Y_C \tan \beta l)}{Y_C + j(G_R + jB) \tan \beta l} \quad (2.13)$$

其中， $\beta = 2\pi / \lambda_g = 2\pi \sqrt{\epsilon_e} / \lambda_0$ 。

当矩形贴片天线处于谐振状态时， Y_m 仅有实部，虚部为 0。此时有：

$$Y_m = 2G_R \quad (2.14)$$

输入导纳与阻抗之间存在着倒数关系，即：

$$Z_m = \frac{1}{Y_m} \quad (2.15)$$

因此上辐射贴片长度可以被表示为：

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L_1 \quad (2.16)$$

该矩形贴片在长度方向谐振状态下的频率可以表示为：

$$f = \frac{c}{2(L + 2\Delta L_1)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.17)$$

根据此公式所求得的谐振频率为贴片天线在长度方向的基频。在该频率下，

辐射贴片中感应电流的分布比较简单。但是，贴片天线还具有更高阶和更复杂的谐振模态，在这些情况下传输线方法将不再适用。而谐振腔模型理论更适用于计算天线的初阶和高阶谐振频率，且具有可靠的精度。因此，接下来将对谐振腔模型理论进行介绍，并主要采用该理论来分析贴片天线的谐振频率。

2.1.3 谐振腔模型理论^{[165][166]}

根据谐振腔理论，贴片天线可以被简化成一个上下两面为理想电壁，四个侧面为理想磁壁，中间填充介电材料（介质板）的腔体模型。由于贴片天线厚度方向尺寸通常很小且远小于波长，因此谐振腔理论忽略电磁场边缘效应的影响，假设介质中只存在垂直于贴片方向的电场，无磁场分布，且电场沿竖直方向保持不变。腔体的上下两面假设为理想的导电面，仅存在法向的电场分量，而切向电场分量为零。腔体四个侧面为理想导磁面，仅存在法向磁场分量，切向磁场分量为零。在直角坐标系中建立的腔体模型如图 2.4 所示，其长宽高分别为 L 、 W 、 h 。

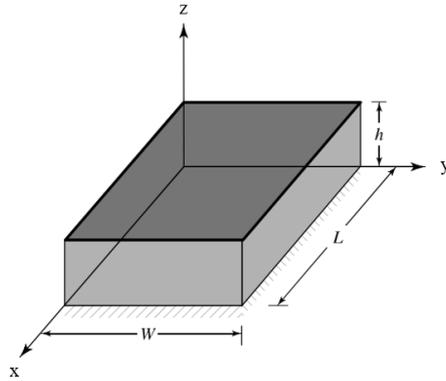


图 2.4 典型谐振腔示意图

引入矢量 A_z 描述谐振腔内部的电磁场分布， A_z 需要满足齐次波动方程：

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.18)$$

其中， $k^2 = \mu\omega^2\varepsilon$ ， μ 表示磁导率， ω 表示角频率， ε 表示介电常数。

运用分离变量法将 A_z 的表达式写为一般形式：

$$A_z = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)] \cdot [A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] \cdot [A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (2.19)$$

其中 k_x ， k_y ， k_z 分别代表 x ， y ， z 方向的波数， A_1 ， A_2 ， A_3 ， B_1 ， B_2 ， B_3 为相应的系数。谐振腔内部的电场分量与磁场分量分别表示为：

$$E_x = -j \frac{1}{\mu\omega\varepsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial z \partial x} \quad (2.20)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\mu\omega\epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial z \partial y} \quad (2.21)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\mu\omega\epsilon} (k^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) A_z \quad (2.22)$$

$$H_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.23)$$

$$H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$H_z = 0 \quad (2.25)$$

以上电磁场的分量需满足如下边界条件:

$$E_y(0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq W, z=0) = E_y(0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq W, z=h) = 0 \quad (2.26)$$

$$H_x(0 \leq x \leq L, y=0, 0 \leq z \leq h) = H_x(0 \leq x \leq L, y=W, 0 \leq z \leq h) = 0 \quad (2.27)$$

$$H_y(x=0, 0 \leq y \leq W, 0 \leq z \leq h) = H_y(x=L, 0 \leq y \leq W, 0 \leq z \leq h) = 0 \quad (2.28)$$

将边界条件代 2.26-2.28 入公式 2.19-2.25, 可得:

$$B_1 = B_2 = B_3 = 0 \quad (2.29)$$

$$k_x = \frac{m\pi}{L}, m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.30)$$

$$k_y = \frac{n\pi}{W}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.31)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.32)$$

其中, m , n , p 分别代表电磁场在不同方向上的半周期场数, k_x , k_y , k_z 代表波数。并满足以下方程:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2 = \omega^2 \mu\epsilon \quad (2.33)$$

腔体谐振频率的公式可以表示为:

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (2.34)$$

根据电磁波速度的表达式, 公式 2.34 可进一步化简为:

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad (2.35)$$

其中, c 为真空中的光速, ϵ_r 为介质的相对介电常数。贴片天线在长度方向

的一阶谐振模式与宽度方向的一阶谐振模式示意图分别如图 2.5 和 2.6 所示。

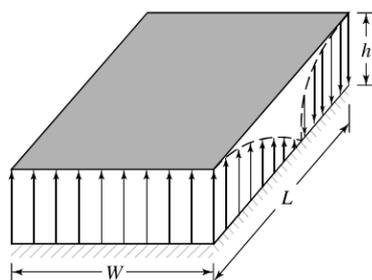


图 2.5 贴片天线在长度方向一阶谐振模式下的电场图

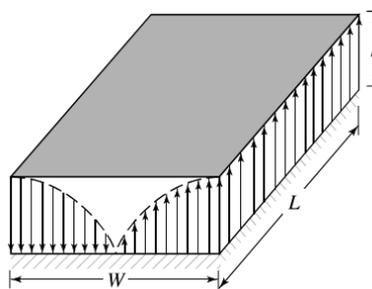


图 2.6 贴片天线在宽度方向一阶谐振模式下的电场图

2.2 贴片天线电磁特征参数及传感原理

2.2.1 天线电磁特征参数

描述天线性能和电磁特征，有着诸多的参数，如天线增益、方向性、波束宽度、输入阻抗等等。这些参数通常是与天线的通信性能相关，可以评估天线在不同应用场景下的性能。而将天线作为传感单元时，也可以用一些天线特征参数的变化来表征天线及其所处环境的变化，如天线谐振频率、平均峰值电压、阈值发射功率和接收功率、复阻抗、回波时差等，以下将分别对其进行简单介绍。

天线谐振频率既天线回波损耗曲线最小值处所对应的频率，在天线谐振时，天线会产生最大的辐射功率，因此天线的谐振频率是设计贴片天线时需要重点考虑的参数之一。天线谐振频率会随着天线本身的尺寸、介质板介电常数、环境温湿度的变化而发生相应的改变，因此，天线的谐振频率偏移可以用来表征天线本身及环境物理量的改变。

天线的平均峰值电压取决于多个因素，如天线的大小、形状、材质、工作频率、接收信号的功率和极化方式等。天线的平均峰值电压可以通过信号的解调和采样得到，它与天线所附着的环境也具有相关性，因为标签天线的附着环境可以

等效为与天线电路并联的电感。因此，标签天线的平均峰值电压变化也可以从一定程度上表征环境的变化。

阈值发射功率为能够激活标签天线的最小发射功率，接收功率为读取器接收到的天线背向散射功率，这两个特征参数适用于辐射型天线及其所处环境的感知。当天线的形状和尺寸发生变化时，阈值发射功率也会发生相应的变化。同时，结构变形等可能引起天线之间的距离和相对位置的改变，这会影响电磁波在天线间的传播特性，从而改变接收功率。通过监测阈值发射功率和接收功率的变化，可以对天线及其所处的环境等进行定量分析。

复阻抗是天线在特定频率下的输入阻抗，包括实部和虚部。复阻抗也是天线的重要特征参数，当天线发生变化或受到干扰时，其复阻抗也会发生变化，并可以通过一些直接或间接的方式测量得到。通过复阻抗的变化，也可获得天线形变及其周围环境变化等信息。

回波时差是指电磁波在天线间传播所需的时间差，它是无芯片标签天线的的一个特征参数。天线在接收到读取器的信号时会立即产生一个回波，另一个回波会因天线的物理特性和压电基板特性等产生反射延迟，从而影响回波时差。因此，可以通过回波时差作为特征参数表征天线及其环境的变化。

综上所述，利用天线的谐振频率、平均峰值电压、阈值发射功率和接收功率、复阻抗、回波时差等特征参数，可以实现对结构变形或温湿度等环境变化的感知与监测。值得注意的是，不同的特征参数适用于不同的监测场景，需要针对不同的监测目标和环境条件，选择合适的天线特征参数以及相应的信号处理和分析方法，并研究提高天线传感单元适用性和稳定性的方法，以满足相应的监测需求。

2.2.2 贴片天线传感原理

贴片天线是一种常用的天线类型，它通常由辐射贴片、接地平面、介质层和馈电点构成。辐射贴片通常是一个矩形金属片，与接地平面之间有一个介质层。馈电点是天线的输入端口，用于将电信号传输到天线中，它通过微带馈电线或者同轴探针等方式与辐射贴片相连。当电信号被馈入天线的辐射贴片时，天线会产生一个辐射场，辐射能量被发送到天线的近场和远场区域。

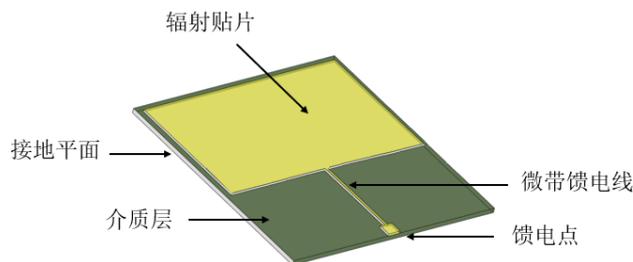


图 2.7 典型矩形贴片天线示意图

图 2.7 为典型的单片式矩形贴片天线的示意图。基于前文谐振腔模型理论，该贴片天线的谐振频率主要与天线尺寸、介质层介电常数等因素有关。当采用该天线作为传感单元附着于被测结构表面时，结构表面的变形等会引起天线尺寸的变化，进而引起谐振频率的改变。当天线的辐射贴片沿某一方向尺寸减小，天线在该方向的谐振频率会升高；当辐射贴片沿某一方向尺寸增大，天线在该方向的谐振频率会相应降低。因此，可以通过测量天线谐振频率的偏移，计算天线尺寸的变化进而实现对被测结构的变形测量。

当采用贴片天线作为传感单元对温度等环境参数进行感知时，主要根据温度等环境参数的改变会导致介质层介电常数发生相应的改变。对于罗杰斯 RT 5880 等常用的天线介质板，温度在一定范围内的升高通常会导致介电常数减小，进而导致贴片天线在各方向上谐振频率的升高。因此，根据贴片天线谐振频率的变化，也可以实现对环境温度等参数的传感。

当采用贴片天线作为传感单元对环境湿度进行感知时，主要原理为湿度的变化会导致贴片天线外部空间介电常数改变或上覆湿敏材料的介电常数发生改变。典型的矩形贴片天线的辐射方向图如图 2.8 所示。由图可知，在矩形贴片天线上部空间范围内的辐射更强。当天线上部空间的介电常数收到湿度等因素的影响发生变化时，天线谐振频率等电磁参数也会发生相应的变化。但天线谐振频率与湿度的变化关系通常不是线性的，这种变化规律主要取决于具体的湿敏材料性质或是贴片天线外部湿度影响空间范围等因素。

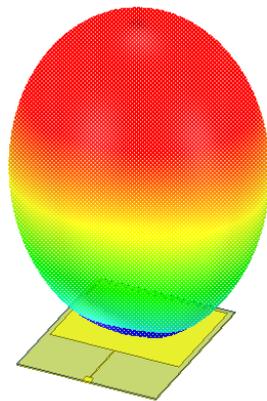


图 2.8 典型的贴片天线辐射方向示意图

由于单片式贴片天线传感器在用于结构变形等监测量的传感时，需要粘贴于结构表面并与结构发生协同变形，因而易导致应变传递效率不完全和粘结强度不足等问题。而采用非受力结构的组合式贴片天线传感单元可以有效地避免这些问题的产生。当采用组合式贴片天线作为传感单元对结构变形、裂缝扩展等进行监测时，主要根据天线组件间的变化反推天线及监测变量的变化。组合式贴片天线

通常由天线和组件(负载)等构成,天线本身并不受力,当结构表面发生变形或者相对位移时,天线组件之间的接触或者耦合形式发生变化,进而导致组合式贴片天线的谐振频率等特征参数发生相应的变化。因此,组合式贴片天线相比单片式贴片天线具有更多的优势,可以克服粘结强度不足和应变传递效率不足等问题,更适用于实际工程中结构变形和位移的传感。

2.3 贴片天线谐振频率计算及影响因素分析

上一节中介绍了贴片天线传感的基本原理,主要是将贴片天线作为传感单元,根据贴片天线的谐振频率变化等对监测变量进行表征。本节将根据谐振腔理论和组合贴片天线等理论,对贴片天线的谐振频率与监测变量之间的关系进行具体推导。

2.3.1 单片式贴片天线传感器

当采用单片式矩形贴片天线作为传感单元时,贴片天线粘贴于结构表面,如图 2.9 所示。

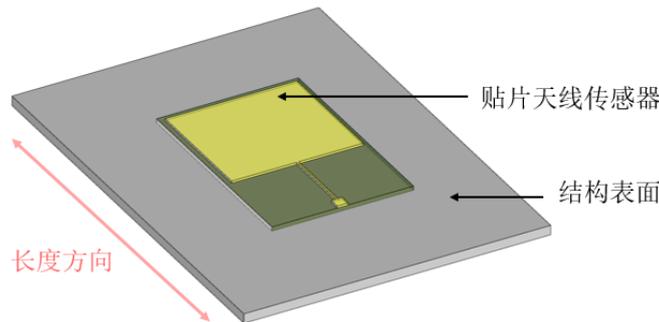


图 2.9 单片式矩形贴片天线安装示意图

根据谐振腔理论,贴片天线长度方向的一阶谐振频率可以表示为:

$$f_{100} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{L}\right)^2} \quad (2.36)$$

假设温度恒定,即介质板的相对介电常数 ϵ_r 保持不变。当贴片天线附着的结构表面发生沿长度方向的应变为 ϵ_L 时,如果该应变完全传递至贴片天线表面,会导致上辐射贴片的长度变为 $L(1+\epsilon_L)$ 。上辐射贴片的宽度也会由于泊松效应发生相应的改变,但是宽度方向的轻微改变对长度方向的谐振频率影响几乎可以忽略不计。因此,该贴片天线长度方向的一阶谐振频率可变为:

$$f'_{100} \approx \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1}{L(1+\varepsilon_L)}\right)^2} = \frac{1}{(1+\varepsilon_L)} f_{100} = \frac{1}{1-\varepsilon_L^2} (1-\varepsilon_L) f_{100} \approx (1-\varepsilon_L) f_{100} \quad (2.37)$$

因此,贴片天线长度方向的一阶谐振频率与贴片天线在该方向的应变之间可以建立近似线性的关系,当天线表面应变增大时,谐振频率相应降低,其斜率与贴片天线的初始谐振频率有关。

2.3.2 组合式贴片天线传感器

单片式贴片天线可以作为传感单元对结构表面应变等进行传感,但是将其粘贴于结构表面时会面临粘贴强度不足或粘贴不均匀等问题,进而影响到结构表面应变的传递效率及传感精度。组合式贴片天线的提出可以较好的解决这一问题。以带有附加子贴片的组合式贴片天线为例,其安装示意图如图 2.10 所示,主要由下部矩形贴片天线、附加子贴片、夹具以及连接杆等装置组成。

该组合式天线的下部辐射贴片的上表面与附加子贴片的下表面紧密贴合,形成一个组合辐射贴片,电流可在该组合辐射贴片上流动,如题 2.11 所示。下部贴片天线通过夹具固定端固定在结构表面上,而附加子贴片可以沿长度方向自由移动。连接杆一端与附加子贴片相连,另一端为固定在结构表面上的固定端。当结构表面发生变形时,夹具固定端与连接杆固定端之间的相对位移会导致下部贴片天线与附加子贴片之间的错动,从而改变组合式贴片天线的辐射贴片有效电长度。由于辐射贴片有效电长度的变化会导致天线谐振频率发生变化,因此通过推导结构变形与组合式贴片天线谐振频率之间的关系,可以实现对结构表面变形的表征。

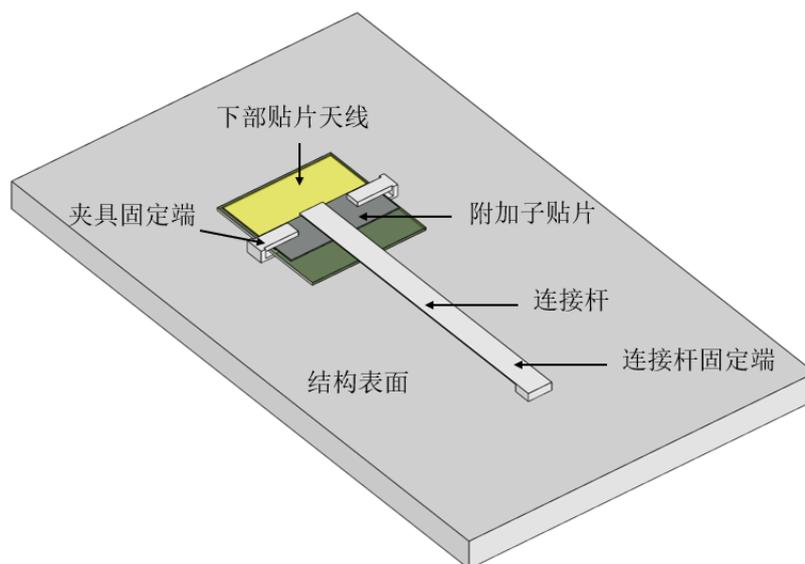


图 2.10 组合式矩形贴片天线安装示意图

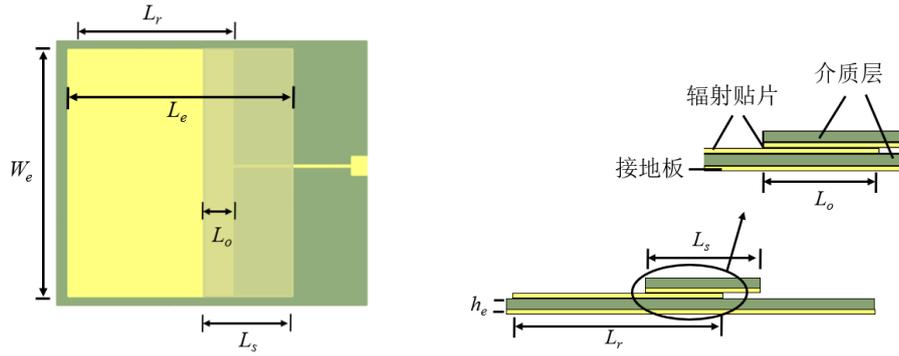


图 2.11 组合式矩形贴片天线的俯视图和侧视图

该组合式贴片天线的谐振频率主要与组合辐射贴片的尺寸相关。由于下部辐射贴片的上表面与附加子贴片的下表面紧密相连并导电，共同构成了一个组合式的辐射贴片，该组合式天线本质上仍然可以等效为一个矩形贴片天线。根据谐振腔理论，其谐振频率公式可以表示为：

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L_e}\right)^2 + \left(\frac{n}{W_e}\right)^2 + \left(\frac{p}{h_e}\right)^2} \quad (2.38)$$

若只考虑纵向一阶谐振模式，该公式可以简化为：

$$f_{100} = \frac{c}{2L_e\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.39)$$

其中， L_e 为组合式贴片天线长度方向的有效电长度。根据图 2.10 中的贴片天线尺寸，该有效电长度可以表示为：

$$L_e = L_r + L_s - L_o \quad (2.40)$$

其中， L_r 是下部贴片天线辐射贴片长度， L_s 是附加子贴片的长度， L_o 下部贴片天线辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度。

当组合式贴片天线安装的结构表面发生变形时，夹具固定端与连接杆固定端之间的相对位移会导致可移动的附加子补片位置发生变化。该变化会引起辐射贴片重叠长度的变化，进而影响天线的谐振频率，相关公式如下所示：

$$f'_{100} = \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o - \Delta L_o)\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.41)$$

其中， ΔL_o 为下部贴片天线与附加子贴片之间重叠长度的变化量。公式 2.41 可进一步改写为：

$$f'_{100} = \frac{c(L_r + L_s - L_o + \Delta L_o)}{2\left[(L_r + L_s - L_o)^2 - (\Delta L_o)^2\right]\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.41)$$

由于结构形变导致的重叠长度变化量与贴片天线的尺寸相比通常十分微小，因此可以忽略分母变化量 $(\Delta L_o)^2$ ，公式 2.41 可以改写为：

$$f'_{100} = \frac{c(L_r + L_s - L_o + \Delta L_o)}{2(L_r + L_s - L_o)^2 \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.42)$$

基于公式 2.42 和公式 2.39，该组合式贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率偏移可以通过以下方式确定：

$$\Delta f_{100} = \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o)^2 \sqrt{\varepsilon_r}} \Delta L_o \quad (2.43)$$

因此，贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率偏移 Δf_{100} 可以看作是随着组合天线重叠长度 ΔL_o 线性变化的函数。在实际应用中，通过测量组合式贴片天线的频移，即可反推天线组件间的相对移动进而实现对结构表面变形的传感。

2.3.3 温度对贴片天线谐振频率的影响

温度是影响贴片天线谐振频率的环境因素之一。根据贴片天线谐振频率的计算公式，贴片天线的谐振频率与辐射贴片的尺寸及介质板的介电常数等因素有关。温度的变化一方面会通过热胀冷缩效应影响辐射贴片尺寸，另一方面也会导致介质板介电常数的变化，进而改变天线的谐振频率。常用的介质板，如 RT5880、FR4 等的介电常数都会随温度变化，因此，温度对贴片天线谐振频率的影响是难以忽略的。

贴片天线的温度效应可以从两个方面量化：一是贴片天线的热膨胀，二是介质板的相对介电常数的变化。天线的热膨胀计算需要针对具体的天线形式和尺寸进行分析，而天线介电常数随温度的变化规律则受到介质板材质的影响而有所不同。一般而言，对于组合式贴片天线，其长度方向和宽度方向的一阶谐振频率受温度变化的影响如下所示：

$$\Delta \varepsilon_e = k \varepsilon_e \Delta T \quad (2.44)$$

$$f_{100}(\Delta T, \Delta L_o) = \frac{c}{2(L_e + \Delta L_T - \Delta L_o) \sqrt{\varepsilon_e + \Delta \varepsilon_e}} \approx f_{100} + \frac{\partial f_{100}}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial f_{100}}{\Delta L_o} \cdot \Delta L_o \quad (2.45)$$

$$f_{010}(\Delta T, \Delta L_o) = \frac{c}{2(W_e + \Delta W_T) \sqrt{\varepsilon_e + \Delta \varepsilon_e}} \approx f_{010} + \frac{\partial f_{010}}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (2.46)$$

其中， ΔT 是温度变化量； ΔL_o 是组合贴片重叠长度变化量； ΔL_T 和 ΔW_T 分别是由于温度变化引起的贴片尺寸在长度方向和宽度方向上的变化； $\Delta \varepsilon_e$ 是温度变化引起的介质板相对介电常数的变化； k 为不同介质板材料对应的温度系数。由公式可知，组合式贴片天线宽度方向的谐振频率只受到温度变化的影响，而长度

方向的谐振频率会同时受到温度变化和结构表面变形的影响。具体的公式推导及谐振频率计算将在后续章节中详细说明。

2.3.4 天线周围介质环境影响

天线周围的介质主要包括水（空气湿度）、天线封装材料、传感天线埋置环境（混凝土等）。虽然天线介质板本身的相对介电常数不会受到天线周围介质环境改变的影响，但是这些周围介质环境的改变仍然会导致天线谐振频率发生轻微的偏移。这主要是由于天线内部也存在一部分从上辐射贴片上部出发，经过周围环境到达天线下部接地平面的电场线，如图 2.12 所示。

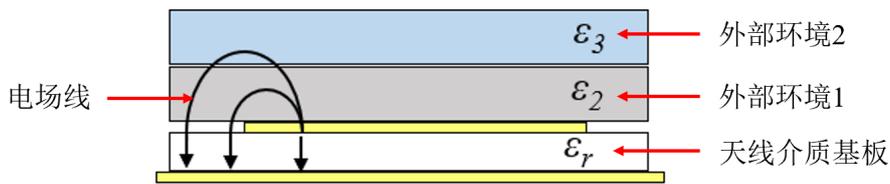


图 2.12 贴片天线周围介质环境影响

贴片天线周围介质环境的改变，如介电常数的变化、介质环境影响范围的改变等会影响天线的电磁特性，进而影响天线的谐振频率等。贴片天线周围介质环境对贴片天线的影响可以通过一些公式进行修正补偿，但是修正公式通常较为复杂，且更多适用于天线周围介质均匀改变的情况。在一些复杂使用场景如混凝土埋置环境中，天线周围介质环境变化对天线谐振频率的影响有待于进一步的深入研究。在本文后续章节中，也通过电磁仿真等手段对贴片天线周围介质环境影响进行了探究，并验证了通过贴片天线对周围介质的变化进行感知的可行性。

2.4 本章小结

本章主要介绍了电磁学的基本理论及贴片传感器的工作原理，并进行了矩形贴片天线及组合式贴片天线谐振频率公式的推导。具体包括：

(1) 介绍了组成电磁学的基本理论麦克斯韦方程组及每个公式的含义，并对天线分析的两种基本理论进行了介绍，即传输线理论和谐振腔理论，这是分析天线电磁性能和传感原理的基础。

(2) 介绍了天线的电磁特征参数如谐振频率等基本概念，以及使用天线作为传感单元的基本原理。基于谐振腔理论对单片式贴片天线传感器和组合式贴片天线传感器的谐振频率进行了推导，建立了结构表面变形和天线谐振频率之间的对应关系。

(3) 基于贴片天线的谐振频率公式，分析了环境温度和天线周围介质变化等因素对组合式贴片天线传感器谐振频率的影响，为后续用于多参数感知的组合式贴片天线设计提供了指导。

第3章 偏心馈电组合式贴片天线与多参数感知

3.1 引言

基于贴片天线的无源智能骨料研究关键是具备感知功能的传感单元。本章对具有多参数感知功能的贴片天线进行了研究，并开发设计了一种用于结构变形和环境温度同步感知的偏心馈电组合式贴片天线传感单元。

当前的单片式贴片天线作为传感单元对结构应变或变形等进行感知时，通常需要附着在结构表面受力，这可能导致变形传递不完整、粘结强度不足等问题，从而限制了天线传感器的实际应用。尽管组合式贴片天线传感器为这一问题提供了较好的解决思路，但是目前的组合式天线传感器往往只关注天线组件间的相对移动，而忽略了环境温度的影响。在实际工程中，环境温度并不是恒定的，传感器往往受到环境温度变化的影响，因此环境温度的波动会导致不准确的测量结果。为了提高天线传感器在变温度环境下的传感性能，需要研究温度对天线的影晌，并需要使用额外的温度传感器来测量环境温度以进行温度补偿。

为了解决上述问题，本章提出了一种用于结构变形（裂缝）和环境温度同步感知的偏心馈电组合式贴片天线传感单元。贴片天线的偏心馈电方式可以同时激发起天线在长度方向和宽度方向的谐振模式。将偏心馈电方式与组合式贴片天线相结合，可以构造出一种多参数同步感知的传感器，并解决单片式天线传感器变形传递不完整等问题。该天线传感器具有两个方向的谐振模式，两个方向的谐振频率可以分别用于环境温度传感和结构变形传感。该传感器可以实现单一传感器对多参数的感知，避免了额外的温度传感器对监测变量进行温度补偿，从而具有更强的实用性。

在3.2节中，介绍了该偏心馈电组合式贴片传感单元的多参数传感原理，包括天线传感器设计、用于温度与形变同步感知的方法、以及天线双向谐振频率与温度和形变关系的理论计算推导等。

在3.3节中，主要使用电磁仿真软件等对所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感单元进行了仿真模拟，基于仿真研究了天线馈电距离的优化方法、天线谐振频率与温度及结构变形之间的关系等，并对仿真结果进行了讨论分析。

在3.4节中，对所设计的偏心馈电组合式贴片天线传感器进行了一系列试验探究，分别进行了温箱试验和环境温度监测试验、形变（裂缝）感知试验、环境温度与形变（裂缝）同步监测试验等验证传感器的性能，此外还将该贴片天线传感器应用于实际工程中进行了测试，并将测试结果与理论和仿真结果进行了对比

分析。

3.2 偏心馈电组合式贴片天线传感器传感原理

3.2.1 偏心馈电组合式贴片天线传感器设计

用于结构变形（裂缝）和环境温度同步感知的偏心馈电组合式贴片天线传感器概念图如图 3.1 所示。该传感器由两部分组成：下部贴片天线和上部的附加子贴片。附加子贴片的辐射片与下部贴片天线的辐射片短接，并且可以在长度方向上自由移动。刚性连接杆将附加子贴片连接到固定端，下部贴片天线固定在结构裂缝一侧，而与子贴片相连的连接杆固定在裂缝另一侧。当结构发生变形或是裂缝宽度发生变化时，这种变化会引起天线传感器两个组件之间的相对移动。进而，通过测量天线长度方向的谐振频率偏移，可以感知结构变形或裂缝宽度的变化。

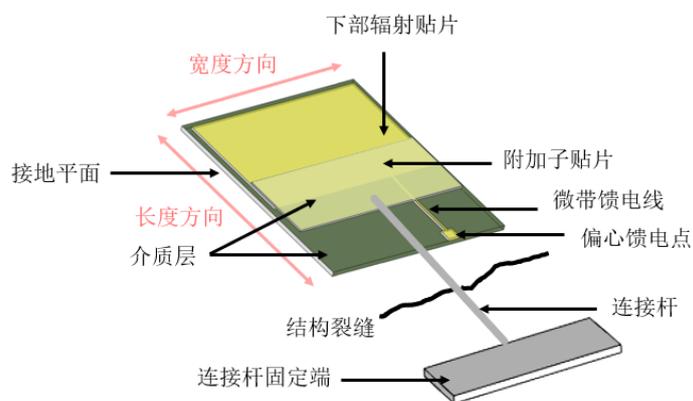


图 3.1 偏心馈电组合式贴片天线传感器概念图

该组合式贴片天线的辐射贴片、接地平面和附加子贴片的辐射片都采用铜质，而下部贴片天线介质层和子贴片的介质层均采用罗杰斯 RT/duroid 5880 材质。采用夹具等装置尽可能消除下部贴片天线与附加子贴片之间的空气缝隙，从而使两个辐射片紧密贴合和短接。在具体的应用中，该天线传感器两端固定安装在结构上，以便在传感天线本身不受力的情况下，测量结构变形或裂缝扩展，其侧视图如图 3.2 所示。

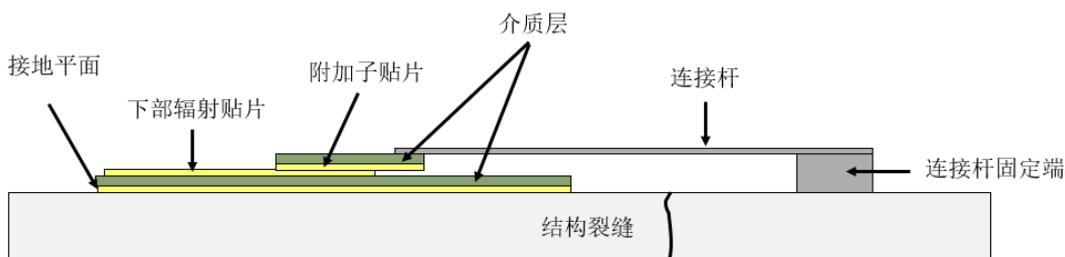


图 3.2 偏心馈电组合式贴片天线传感器安装示意图

该组合式贴片天线在长度方向上的有效电长度取决于上下部组合辐射贴片的总长度，而宽度方向上的有效电长度与上下部贴片天线的宽度相等。偏离中心的微带传输线可以向下部贴片天线馈送电磁波，进而激发组合式贴片天线长度方向和宽度方向的双向谐振模式。

根据谐振腔理论，组合辐射贴片尺寸和介质层的相对介电常数都会影响组合式贴片天线的谐振频率。此外，温度也是不能忽视的一个重要影响因素，因为温度变化一方面会通过天线本身的热胀冷缩改变辐射贴片尺寸，另一方面它还会改变介质层的相对介电常数。但是，结构形变导致的谐振频率变化和温度导致的谐振频率变化通常会耦合在一起，单一谐振频率的偏移难以同时表征结构变形和温度变化。在这方面，偏心馈电组合式贴片天线为温度和结构变形的解耦合提供了一种解决方案，因为它具有两个方向的谐振频率，可以解耦实现结构变形和环境温度变化的表征。

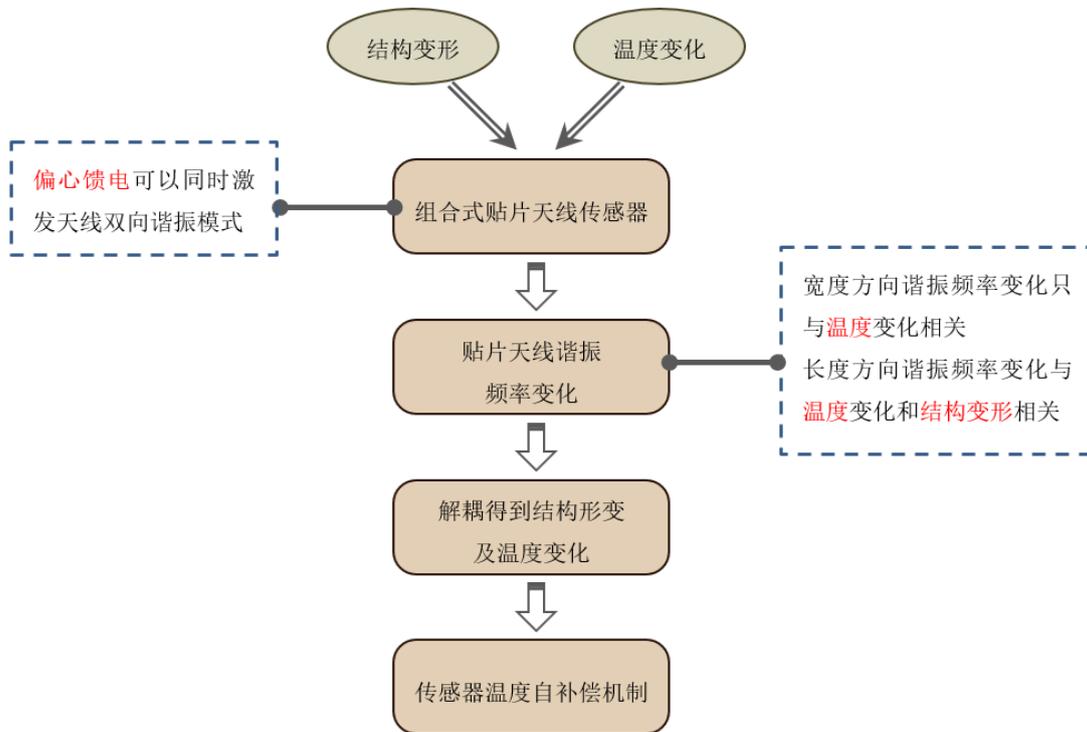


图 3.3 偏心馈电组合式贴片天线传感原理

对于该组合式贴片天线，其下层辐射贴片和附加子贴片的重叠长度随着结构裂缝宽度的变化而发生变化。当结构发生变形或裂缝宽度扩展时，组合贴片天线的有效电长度也会发生改变，导致天线谐振频率在长度方向上发生偏移。同时，当环境温度变化时，贴片天线的热膨胀会改变组合辐射贴片的长度和宽度，介质层的相对介电常数也会随着温度的变化而发生改变，这些因素会导致天线谐振频率同时在长度方向和宽度方向发生偏移。因此，可以利用组合式贴片天线宽度方

方向的谐振频率偏移来确定环境温度的变化,并计算出温度导致的长度方向谐振频率偏移。然后,补偿后的天线长度方向上的谐振频率偏移可以用于结构变形(裂缝)传感。其传感机理如图3.3所示。

3.2.2 基于偏心馈电贴片天线传感器的温度与形变同步感知

对于如图3.4所示的组合式贴片天线,偏心馈电可以同时激发天线在长度方向和宽度方向的谐振模式。根据谐振腔理论,可计算出组合贴片天线在长度方向和宽度方向的一阶谐振频率分别为:

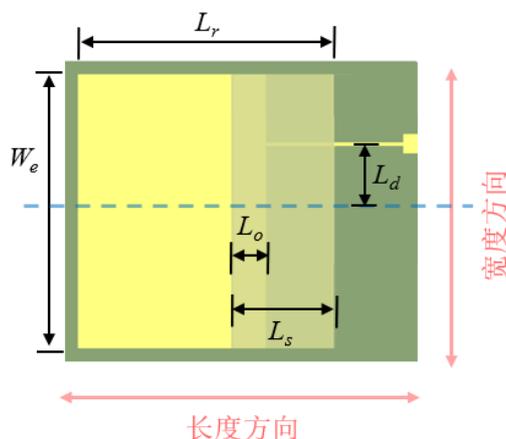


图 3.4 偏心馈电组合式贴片天线尺寸图

$$f_{100} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{L_e}\right)^2} = \frac{c}{2L_e\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.1)$$

$$f_{010} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{W_e}\right)^2} = \frac{c}{2W_e\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.2)$$

其中, f_{100} 表示组合式贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率, f_{010} 表示组合式贴片天线在宽度方向上的一阶谐振频率。 c 为真空中的电磁波传播速度, ε_r 为介质层的相对介电常数, L_e 和 W_e 分别为组合式辐射贴片在长度方向和宽度方向上的有效电长度。对于该组合式贴片天线, L_d 表示其微带馈电线偏离中点的距离,即该组合式贴片天线传感器偏心馈电的距离。

由于组合式贴片天线的下部辐射贴片和子贴片的辐射贴片紧密相连,共同形成一个整体的辐射贴片,因此可以根据公式 3.3 计算出组合辐射贴片在长度方向上的有效电长度:

$$L_e = L_r + L_s - L_o \quad (3.3)$$

其中, L_r 是下部贴片天线辐射贴片长度, L_s 是子贴片辐射片的长度, L_o 是两

个辐射贴片之间的重叠长度。

当组合式贴片天线传感器安装在结构表面时，若结构发生变形或裂缝宽度扩大，附加子贴片与连接杆固定端之间的刚性连接会使可移动子贴片的空间位置发生变化，从而导致底部贴片与子贴片之间的重叠长度发生变化。裂缝宽度的变化会对长度方向的天线谐振频率产生影响，公式如下：

$$L'_e = L_r + L_s - L_o - \Delta L_o \quad (3.4)$$

$$f_{100}(\Delta L_o) = \frac{c}{2L'_e \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c(L_r + L_s - L_o + \Delta L_o)}{2[(L_r + L_s - L_o)^2 - (\Delta L_o)^2] \sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{c(L_r + L_s - L_o + \Delta L_o)}{2(L_r + L_s - L_o)^2 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.5)$$

式中 ΔL_o 为贴片重叠长度变化量，它等于裂缝宽度的变化量。式 3.5 可进一步改写为：

$$f_{100}(\Delta L_o) \approx f_{100} + \frac{\partial f_{100}}{\partial \Delta L_o} \cdot \Delta L_o \approx f_{100} + \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o)^2 \sqrt{\epsilon_r}} \Delta L_o \quad (3.6)$$

由公式 3.6 可得，贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率偏移量随贴片重叠长度呈线性变化。因此，结构变形和裂缝宽度变化等可以通过谐振频率在长度上的偏移来确定。

环境温度的变化会影响贴片天线的组合辐射贴片尺寸和介质板的相对介电常数，从而改变偏心馈电组合式贴片天线在长度和宽度的两个方向的谐振频率。环境温度的影响可以从两个方面量化：一是贴片天线的热膨胀，二是介质板相对介电常数的变化。

组合式贴片天线的下部贴片和附加子贴片均为多层层合板，当环境温度变化时，由于层间热膨胀系数不同，各层层间会产生内力，导致层间协同变形。组合天线温度变形示意图如图 3.5 所示：

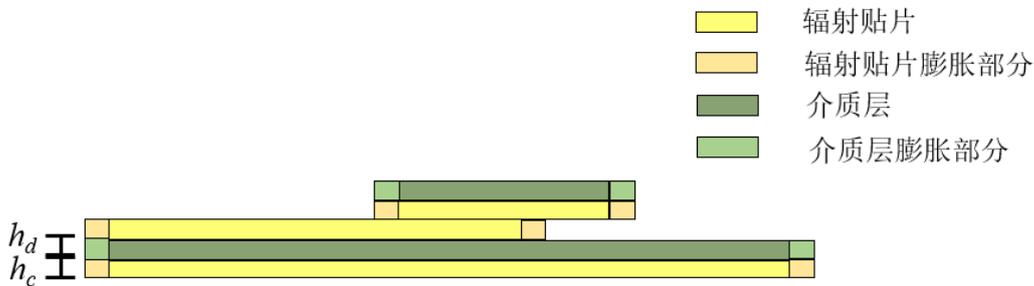


图 3.5 偏心馈电组合式贴片天线尺寸图

当温度变化 ΔT 时，组合式辐射贴片在长度和宽度方向的尺寸变化可以用以下公式计算：

$$\Delta L_T = \frac{\alpha_{d,l} \Delta T L_r E_{d,l} h_d + 2\alpha_c \Delta T L_r E_c h_c}{2(E_{d,l} h_d + 2E_c h_c)} + \frac{\alpha_{d,l} \Delta T L_s E_{d,l} h_d + \alpha_c \Delta T L_s E_c h_c}{2(E_{d,l} h_d + E_c h_c)} \quad (3.7)$$

$$\Delta W_T = \frac{\alpha_{d,w} \Delta T W_e E_{d,w} h_d + 2\alpha_c \Delta T W_e E_c h_c}{E_{d,w} h_d + 2E_c h_c} \quad (3.8)$$

其中, ΔL_T 为温度引起的组合辐射贴片长度方向尺寸变化, ΔW_T 为温度引起的组合辐射贴片宽度方向尺寸变化。它们与组成天线介质板和辐射片的材料参数有关, 如介质板在长度方向和宽度方向的温度线膨胀系数 $\alpha_{d,l}$ 和 $\alpha_{d,w}$, 介质板在长度方向和宽度方向上的弹性模量 $E_{d,l}$ 和 $E_{d,w}$, 介质板厚度 h_d 和铜辐射片厚度 h_c , 铜辐射片的温度线膨胀系数 α_c , 以及铜辐射贴片的弹性模量 E_c 。需要注意的是, 天线介质板通常不是各向同性的材料, 其在长度方向与宽度方向上的弹性模量与温度线膨胀系数可能是不一致的。

天线介质板的相对介电常数也会随着环境温度的变化而改变, 相关计算公式可以表示为:

$$\Delta \varepsilon_r = k \varepsilon_r \Delta T \quad (3.9)$$

式中 $\Delta \varepsilon_r$ 为天线介质板因为温度变化而引起的相对介电常数变化, k 为天线介质板材料所对应的温度系数。

根据公式 3.1-3.9, 当温度变化 ΔT , 贴片重叠长度变化 ΔL_o 时, 受温度和贴片长度的综合影响, 组合式贴片天线在长度方向和宽度方向的一阶谐振频率可表示为:

$$f_{100}(\Delta T, \Delta L_o) = \frac{c}{2(L_e + \Delta L_T - \Delta L_o) \sqrt{\varepsilon_r + \Delta \varepsilon_r}} \approx f_{100} + \frac{\partial f_{100}}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial f_{100}}{\Delta L_o} \cdot \Delta L_o \quad (3.10)$$

$$f_{010}(\Delta T, \Delta L_o) = \frac{c}{2(W_e + \Delta W_T) \sqrt{\varepsilon_r + \Delta \varepsilon_r}} \approx f_{010} + \frac{\partial f_{010}}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (3.11)$$

根据公式 3.10 和 3.11, 环境温度变化和贴片重叠长度变化都会影响天线长度方向的一阶谐振频率, 而只有温度会影响天线宽度方向的一阶谐振频率。因此, 可以利用天线宽度方向谐振频率偏移来确定环境温度变化, 并且可以同时计算出天线长度方向谐振频率的温度补偿量。然后, 温度补偿后的天线长度方向谐振频率偏移量可以用于表征结构变形(裂缝)。将灵敏度系数 k_1 和 k_2 定义为宽度方向和长度方向一阶谐振频率随温度变化的灵敏度, k_3 定义为长度方向一阶谐振频率随结构变形(裂缝)变化的灵敏度, 相应的方程式如下所示:

$$k_1 = \frac{\partial f_{010}}{\partial T} \quad k_2 = \frac{\partial f_{100}}{\partial T} \quad k_3 = \frac{\partial f_{100}}{\Delta L_o} \quad (3.12)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta f_{010}}{k_1} \quad (3.13)$$

$$\Delta L_o = \frac{\Delta f_{100}}{k_3} - \frac{\Delta f_{010}}{k_1 k_3} k_2 \quad (3.14)$$

根据公式 3.13 计算的是环境温度的变化值，根据公式 3.14 计算的是温度补偿后的结构变形值或是裂缝宽度变化值。为了说明所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器用于温度和结构变形感知的可行性，进行了理论计算和分析。假设天线传感器使用相对介电常数为 2.2 的罗杰斯 RT/duroid 5880 层压板作为贴片天线的介质板。辐射片的材料选择为铜。一些相关材料参数和电磁参数如表 3.1 所示。贴片天线的在宽度方向和长度方向上的一阶谐振频率设计为 1.95GHz 和 2.5GHz，该组合式贴片天线传感器的设计尺寸如表 3.2 所示。

表 3.1 天线材料参数和电磁参数

参数	$\alpha_{d,w}$	$\alpha_{d,l}$	α_c	ε
值	48 ppm/°C	31 ppm/°C	17 ppm/°C	2.2
参数	$E_{d,w}$	$E_{d,l}$	E_c	k
值	1.07×10^3 MPa	0.86×10^3 MPa	1.1×10^5 MPa	-125 ppm/°C

表 3.2 组合式贴片天线设计尺寸

参数	W_e (mm)	L_r (mm)	L_s (mm)	L_o (mm)	h_d (mm)	h_c (mm)
值	51	36	13	9.0	0.51	0.07

基于方程 3.1-3.10，可以计算环境温度变化、结构裂缝宽度变化和组合式贴片天线两个方向上的一阶谐振频率之间的关系。图 3.6 和 3.7 分别显示了温度由 0°C 至 50°C 变化时引起的组合天线宽度方向和长度方向一阶谐振频率偏移，图 3.8 显示了当结构裂纹宽度从 0 到 3mm 变化时引起的组合天线长度方向一阶谐振频率偏移。

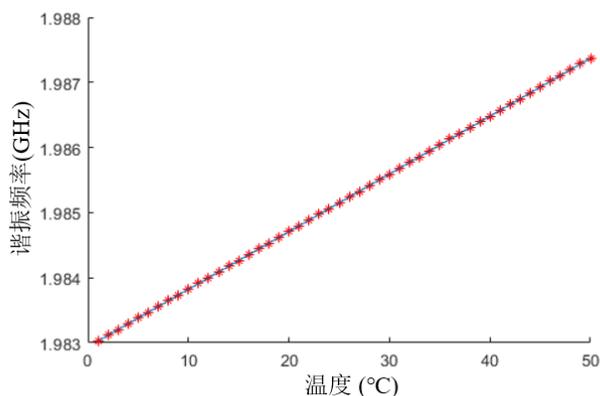


图 3.6 环境温度变化和天线宽度方向谐振频率偏移

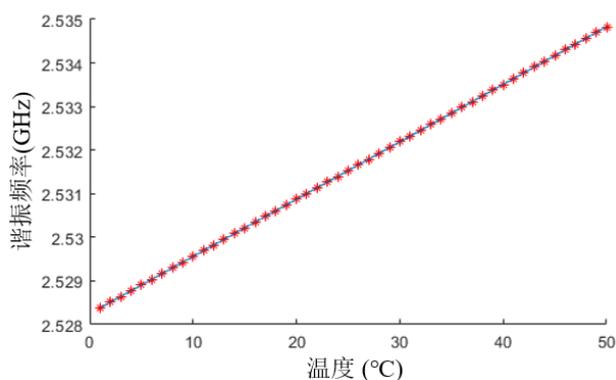


图 3.7 环境温度变化和天线长度方向谐振频率偏移

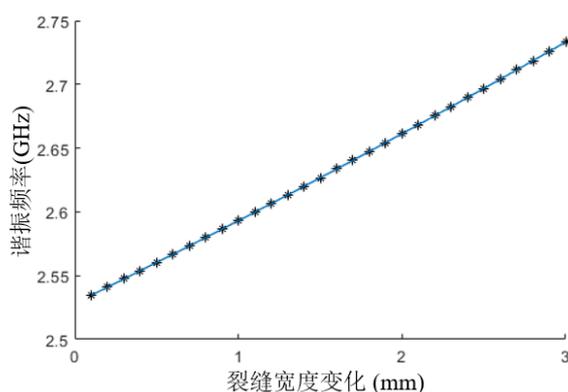


图 3.8 裂缝宽度变化(结构变形)和天线长度方向谐振频率偏移

根据理论计算,该组合式贴片天线传感器用于温度传感的宽度方向一阶谐振频率灵敏度为 $0.088\text{MHz}/^\circ\text{C}$,温度变化导致的天线长度方向一阶谐振频率偏移为 $0.131\text{MHz}/^\circ\text{C}$ 。该传感器用于结构变形传感的长度方向一阶谐振频率灵敏度为 $63.3\text{MHz}/\text{mm}$ 。理论计算表明,该传感器在长度和宽度两个方向上的一阶谐振频

率偏移都随着监测变量的变化呈现出良好的线性趋势，因此该偏心馈电组合式贴片天线传感器可以实现单一天线传感器对多参数的感知。

3.3 偏心馈电组合式贴片天线传感器仿真模拟

3.3.1 偏心馈电距离优化

根据之前一些贴片天线相关的研究，当天线由微带线从辐射贴片宽度方向中点处进行馈电时，只有天线长度方向的谐振模式可以被激发。而采用偏心馈电时，天线在长度方向和宽度方向的谐振模式都会被激发，即天线是双谐振的。本文所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器就是基于这一思路。为了进一步研究所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器的最佳偏心馈电距离，在高频电磁仿真软件 HFSS (High Frequency Structure Simulator) 中对该组合式天线传感器进行了建模，并进行了一系列仿真来研究偏心馈电距离和谐振模式之间的关系。

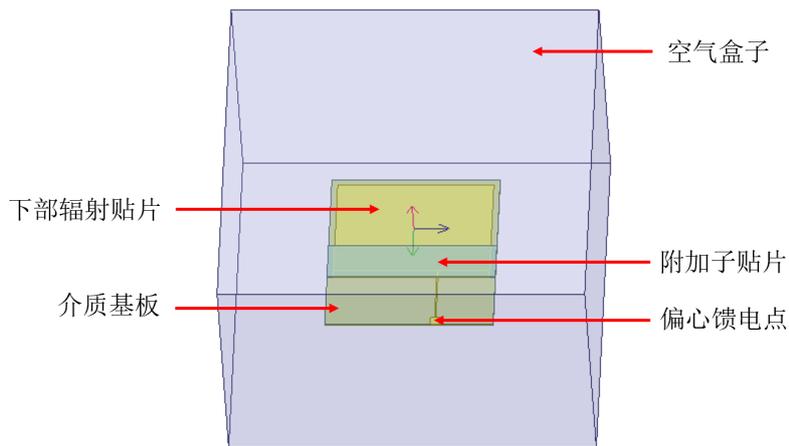


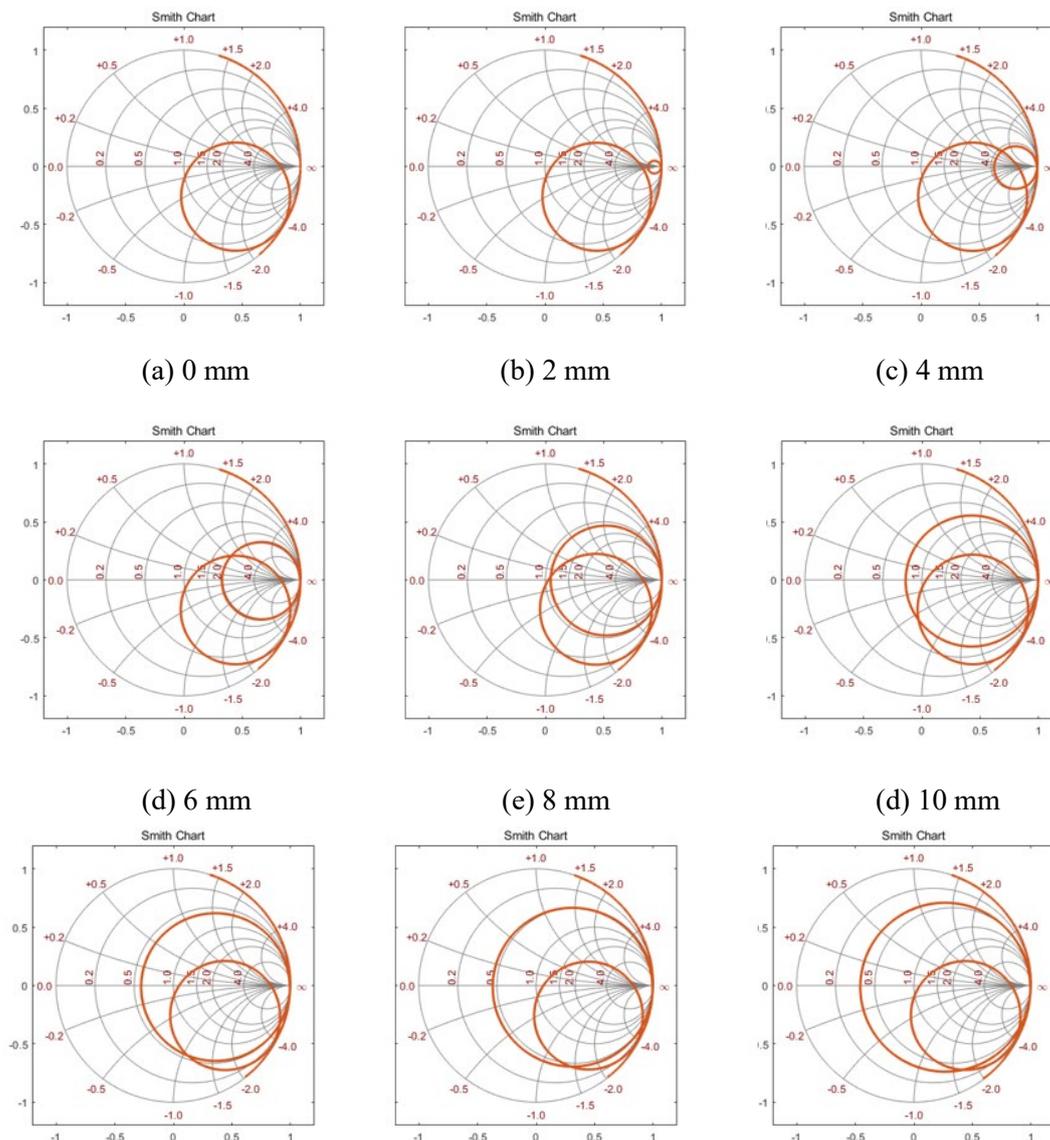
图 3.9 偏心馈电组合式贴片天线在 HFSS 中的模型

偏心馈电组合式贴片天线在 HFSS 中的模型如图 3.9 所示。该组合式贴片天线采用的材料参数和贴片尺寸如上一节中表 3.1 和 3.2 所示。在 HFSS 模型中，为了精确地计算天线的远场辐射并减少仿真计算的算力需求，该偏心组合式贴片天线被封闭在一个比天线尺寸大四分之一波长的空气盒 (Air Box) 中，空气盒子的边界设置为辐射吸收边界。该偏心馈电组合式贴片天线采用集总端口 (Lumped Port) 激励。在仿真模拟中，天线的扫描类型设置为插值扫频，并设置扫频点数为 4001，以保证扫频计算的精度。扫频范围设置为 1GHz 到 3GHz。

首先根据该偏心馈电组合式贴片天线的史密斯圆图 (Smith Chart) 对其进行初步分析。史密斯圆图是一种广泛应用于射频工程领域的图形工具，最早由美国工程师 Phillip H. Smith 在 1939 年发明，用于射频电路的复阻抗匹配可视化展示。

史密斯圆图主要由两个不同的圆系构成：1) 等电阻圆系、2) 等电抗圆系。采用归一化处理后，史密斯圆图上的点可以通过坐标变换处理得到输入阻抗的实部和虚部。其中，史密斯圆图上半圆内，其电抗为感抗；下半圆内，其电抗为容抗。在史密斯圆图的横坐标轴上，每一点对应的电抗为零，电阻与横坐标相关，这条线为纯电阻线。在史密斯圆的最外层圆圈，对应的电阻为零，电抗与电抗圆系上的坐标相关，这个圆称为纯电抗圆。在横轴的左端点，即纯电阻线与纯电抗圆的左交点，代表该射频电路的短路点；而横轴的右端点，即纯电阻线与纯电抗圆的右交点，代表该射频电路的开路点。在史密斯圆图的中心，为该射频电路的阻抗匹配点。

史密斯圆图可以用图形的方式说明天线的阻抗和谐振情况。当天线某一频率所对应的史密斯圆图上的坐标点接近圆心时，意味着与该频率所对应的谐振模式被较好地激发。图 3.10 展示了不同偏心馈电距离下该组合式贴片天线传感器的史密斯圆图。



(g) 12 mm (h) 14 mm (i) 16 mm

图 3.10 不同偏心馈电距离下组合贴片天线的史密斯圆图

史密斯圆图显示，当该组合式贴片天线的偏心馈电距离为 0mm 时，贴片天线只有一个谐振模式被激发，该谐振模式的谐振频率在 2.5-2.6GHz 附近，即为该组合式贴片天线的长度方向谐振模式。随着微带馈电线的移动，偏心馈电距离增加，该组合式贴片天线在长度方向上的另一个谐振模式（约 1.95GHz）逐渐被激发。根据史密斯圆图，当偏离中心的馈电距离为 6mm-10mm 时，天线的阻抗匹配较为良好，此时该组合式贴片天线在长度方向和宽度方向上的两个谐振模式均被很好地激发。当偏心馈电距离继续增加时，由于阻抗失配，天线在宽度方向上的谐振模式逐渐减弱。因此，微带传输线和天线辐射贴片边缘中点之间的偏心馈电距离选择为 6mm-10mm，以较好地激发天线的双向谐振模式。

为了进一步研究天线传感器的最优偏心馈电距离，对 HFSS 模型中的天线端口阻抗和偏心馈电距离之间的关系进行了分析。首先，基于天线和传输线的相关原理，可以根据公式 3.15-3.17 确定该组合式贴片天线的反射损耗曲线 S_{11} 。

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.15)$$

$$RL(\text{dB}) = 10 * \log\left(\frac{P_{in}}{P_{re}}\right) = 10 * \log\left(\frac{V_{in}}{V_{re}}\right)^2 = 10 * \log\left(\frac{1}{|\Gamma|}\right)^2 = -20 * (|\Gamma|) \quad (3.16)$$

$$S_{11}(\text{dB}) = -RL(\text{dB}) \quad (3.17)$$

其中， Γ 表示天线端口处的反射系数， Z_L 表示天线端口的输入阻抗，它是一个具有实部电阻和虚部电抗的复数。 Z_0 表示对天线端口进行馈电的传输线的阻抗，传输线的标准阻抗为 50Ω 。 RL 是天线的回波损耗系数，它与天线端口处的入射电压与反射电压之比有关。 P_{in} 和 P_{re} 分别表示天线端口处的入射功率和反射功率。根据公式 3.15-3.17，在对天线端口进行扫频分析时，如果天线的端口输入阻抗接近 50Ω ，天线阻抗匹配良好，入射功率与反射功率之比大，回波损耗系数大， S_{11} 曲线的最小值远离 0 dB，则天线在该频率下的谐振模式会被显著激发。相反，如果天线的端口输入阻抗远大于或者远小于 50Ω ，阻抗不匹配，入射功率与反射功率的比率接近 1，天线的回波损耗系数非常小， S_{11} 曲线接近 0dB，这表明天线在该频率下的谐振模式几乎没有被激发。

图 3.11 展示了从天线宽度方向的中心进行馈电时，即 $L_d=0$ 时，该组合式贴片天线的端口输入阻抗情况和回波损耗曲线 S_{11} 。可以看出，当天线偏心馈电距

离为0时,天线的端口输入阻抗在1.95GHz附近远大于 $50\ \Omega$,因此天线宽度方向的谐振模式无法被激发。该组合式贴片天线的 S_{11} 曲线还表明,天线在2.5-2.6GHz附近有一个谐振峰值,此时只有天线长度方向的谐振模式被激发。该组合式贴片天线在2.5-2.6GHz附近的 S_{11} 曲线的最小值点所对应的频率即为该组合式贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率。

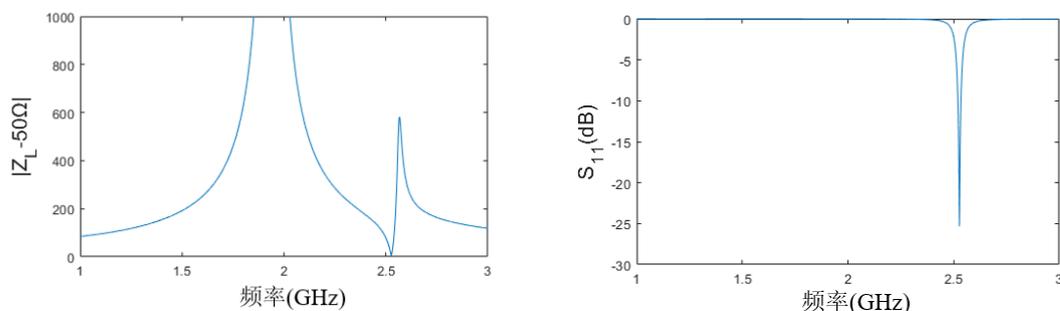


图 3.11 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 0\text{mm}$)

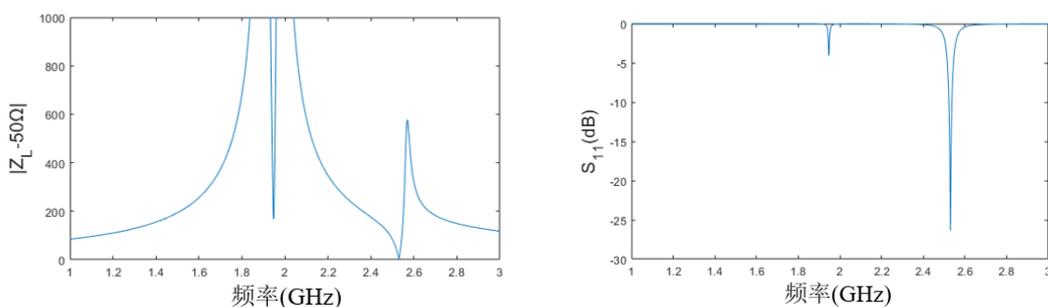


图 3.12 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 4\text{mm}$)

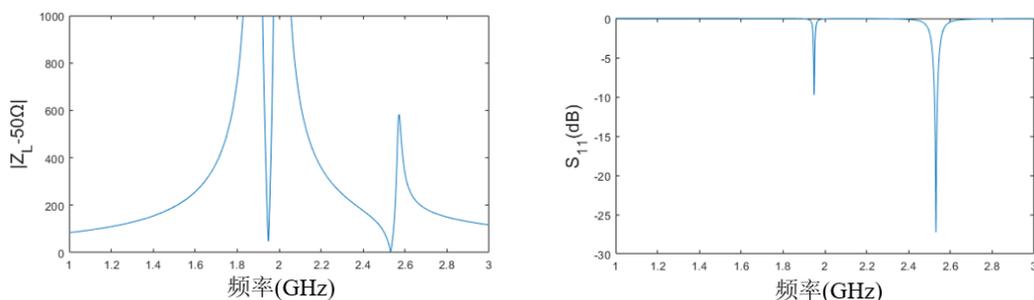


图 3.13 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 6\text{mm}$)

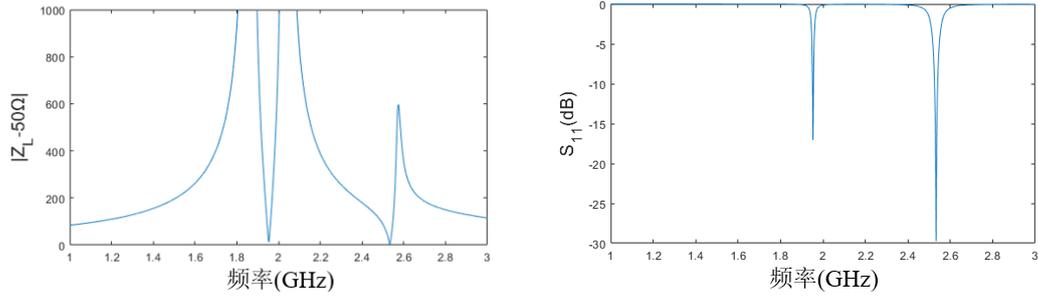


图 3.14 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 10\text{mm}$)

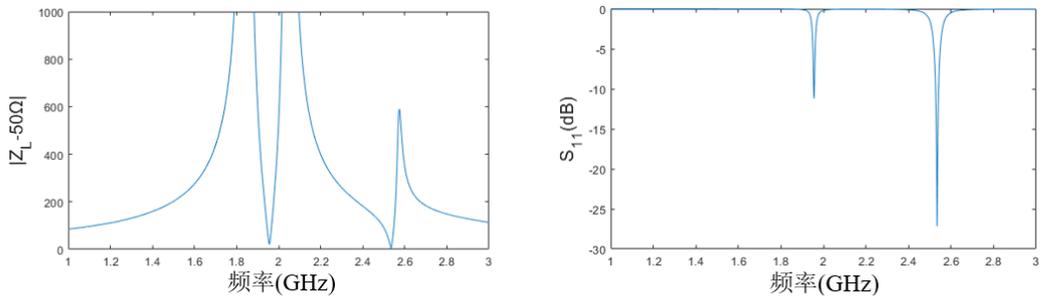


图 3.15 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 12\text{mm}$)

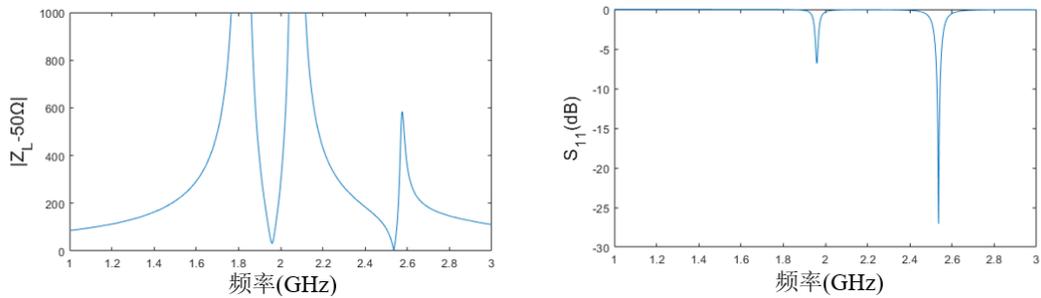


图 3.16 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 16\text{mm}$)

图 3.12-3.16 展示了该组合式贴片天线偏心馈电距离不断增加时，天线的端口输入阻抗情况和回波损耗曲线 S_{11} 。随着天线偏心馈电距离的不断增大，天线的端口输入阻抗在 1.95GHz 附近与传输线标准阻抗 50Ω 的差值先减小后增大。与之相对应的天线在 1.95GHz 附近的宽度方向谐振峰先增大后减小。而在 2.5-2.6GHz 附近的长度方向谐振峰保持不变。表明随着偏心馈电距离的增加，天线长度方向谐振模式几乎保持不变，而天线宽度方向的谐振模式会存在一个先增强后减弱的过程。

为了探究激发该组合式贴片天线 1.95GHz 附近宽度方向谐振模式的最优偏

心馈电距离，将偏心馈电距离设置为 0 - 24 mm，距离增量设置为 0.5mm，进行了一系列的仿真模拟。图 3.17 展示了不同的偏心馈电距离下，该组合式贴片天线在 1.95GHz 附近的 $|Z_L - 50 \Omega|$ 最小值。该值越小，则表明天线在该频率附近的回波损耗曲线峰值越明显，天线的谐振模式激发更显著。

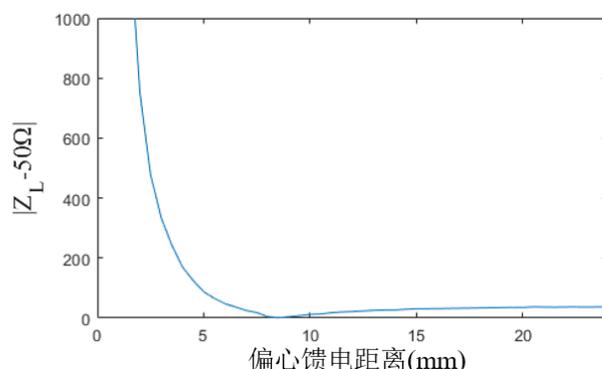


图 3.17 不同偏心馈电距离下组合式贴片天线的 $|Z_L - 50 \Omega|$ 值

根据图 3.17 可以看出， $|Z_L - 50 \Omega|$ 的值随着偏心馈电距离的变化而变化。随着偏心馈电距离从 0 增加到 24mm， $|Z_L - 50 \Omega|$ 的值先减小后增大。当偏心馈电距离为 8.5mm 时， $|Z_L - 50 \Omega|$ 在 1.95GHz 附近的最小值接近于零，表明此时天线阻抗匹配良好，天线宽度方向的谐振模式被很好地激发。因此，该组合式贴片天线传感器的最佳偏心馈电距离为 8.5mm。当 $L_d = 8.5\text{mm}$ 时，该组合式贴片天线的端口输入阻抗情况和反射损耗曲线 S_{11} 如图 3.18 所示。由图可知，该组合式贴片天线在 1.95GHz 和 2.5GHz 附近的两个谐振峰都较为明显，表明了天线宽度方向和长度方向的谐振模式都被很好地激发。

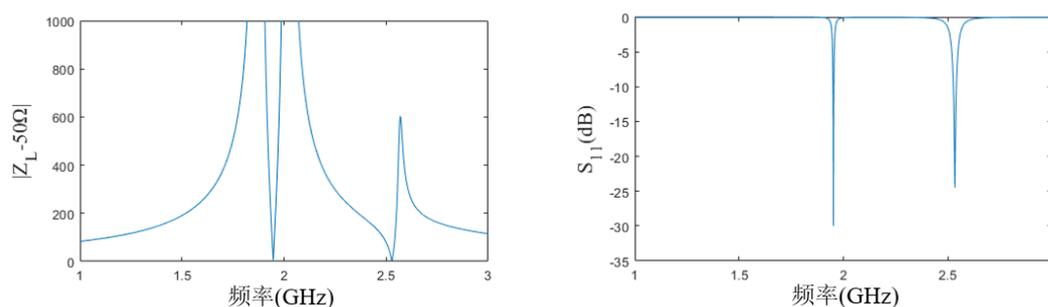


图 3.18 组合式贴片天线的端口输入阻抗和 S_{11} 曲线 ($L_d = 8.5\text{mm}$)

该偏心馈电组合式贴片天线在宽度方向和长度方向的一阶谐振模式下的感应电流如图 3.19 所示。当天线在长度方向谐振时，下部辐射贴片和附加子贴片的感应电流均沿长度方向流动；而当天线在宽度方向谐振时，下部辐射贴片和附

加子贴片的感应电流沿宽度方向流动。贴片天线在长度方向和宽度方向上通常还具有高阶谐振模式，但是对于本章所设计的贴片天线，其长度和宽度方向高阶谐振频率均大于 3GHz，这些高阶谐振频率在实际中难以采用 0-3GHz 的便携式矢量网络分析仪进行测量分析，因此，本研究没有对组合式贴片天线的高阶谐振频率进行讨论。

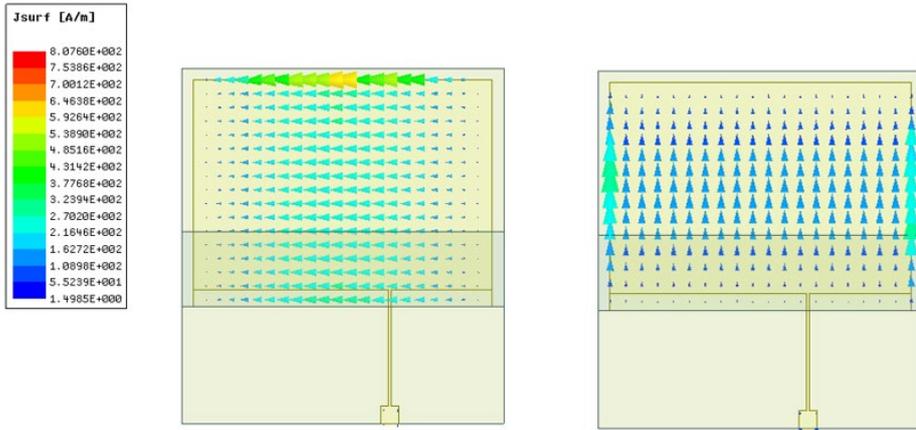


图 3.19 偏心馈电组合式贴片天线感应电流图

3.3.2 多物理场耦合仿真

在 3.2 节中，已经根据谐振腔理论推导了组合式贴片天线谐振频率、环境温度、结构变形（裂缝）之间的关系。在本节中，为了研究所提出的偏心馈电组合式贴片天线同时用于结构变形和温度同步感知的工作性能，使用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对具有附加子贴片的偏心馈电贴片天线进行了建模，通过一系列仿真模拟研究了天线谐振频率、温度以及组合式贴片组件重叠长度之间的关系。

COMSOL 是一种可以进行多物理场仿真的软件，相比于 HFSS，它可以综合考虑温度场与固体力学场的耦合作用。图 3.20 展示了多物理场仿真软件中建模的组合式贴片天线以及自适应网格划分。该偏心馈电组合式贴片天线按照前一节所述尺寸及材料参数进行建模。组合式贴片天线被放置在一个半径为天线最大尺寸两倍的真空球内，该真空球的边界被设置为完美匹配层（PML），使电磁波能够传播到无限自由空间。贴片天线通过偏心微带传输线连接到集总端口，以对贴片天线进行馈电并获得贴片天线的回波损耗曲线 S_{11} ，进而获得天线的谐振频率。

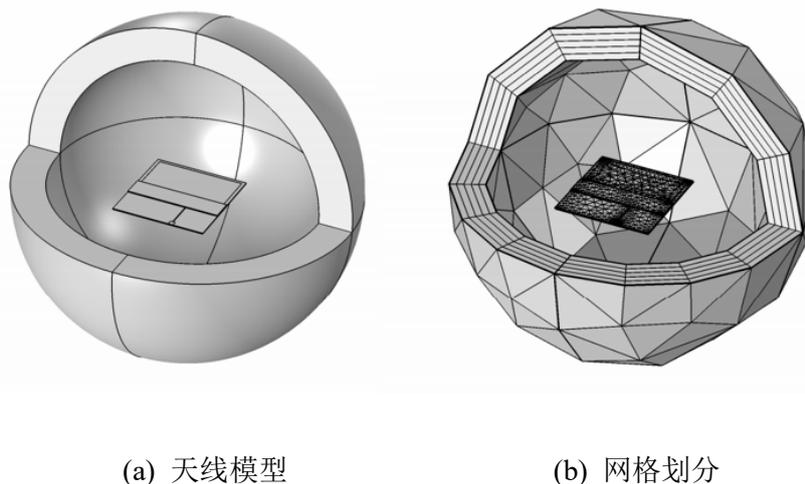
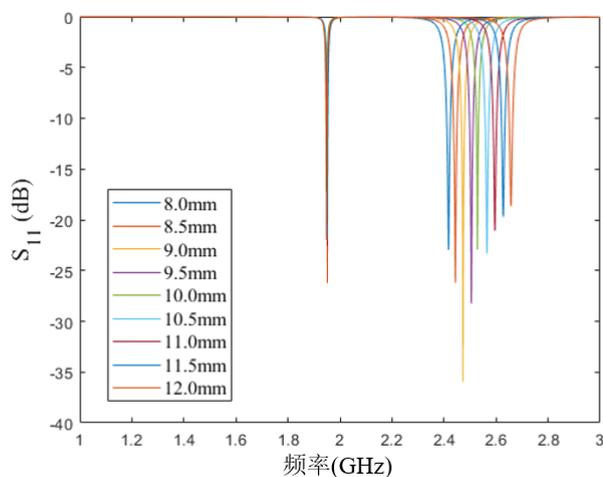


图 3.20 COMSOL 中的偏心馈电组合式贴片天线模型及网格划分

首先研究该偏心馈电组合式贴片天线传感器的谐振频率与结构变形（裂缝）之间的关系，对附加子贴片与下部贴片天线之间不同的重叠长度进行了一系列仿真模拟。在仿真中，设置附加子贴片与下部贴片天线之间的重叠长度 L_0 从 8.0 mm 变为 12.0 mm，步长为 0.5 mm。该设置可以模拟结构变形或裂纹宽度产生 4 mm 的变化。该仿真的频率扫描范围设置为从 1 GHz 到 3 GHz，扫频间隔设置为 0.0005 GHz。

图 3.21 不同子贴片重叠长度的组合式贴片天线 S_{11} 曲线

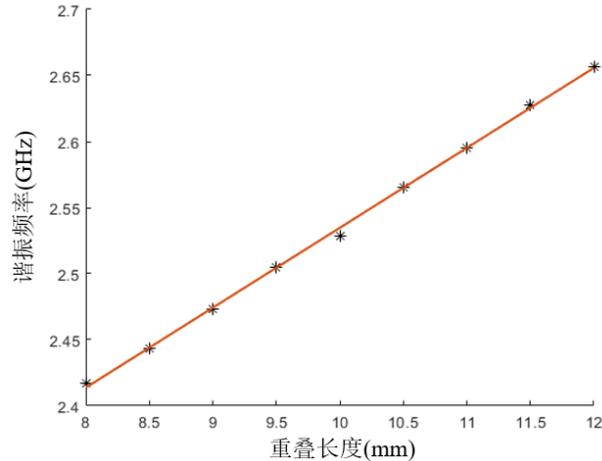


图 3.22 不同子贴片重叠长度的组合式贴片天线长度方向谐振频率

图 3.21 展示了具有不同子贴片重叠长度的组合式贴片天线的 S_{11} 曲线。与该曲线的局部最小值点相对应的频率即为贴片天线的谐振频率。图中每条 S_{11} 曲线均具有两个谐振峰，其中，1.95GHz 附近对应的谐振峰为天线宽度方向的一阶谐振频率，2.5GHz 附近对应的谐振峰为天线长度方向的一阶谐振频率。仿真结果表明，当下部辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度变化时，天线长度方向上的一阶谐振频率相应发生变化，而宽度方向上的一阶谐振频率保持不变。将组合式贴片天线长度方向上的一阶谐振频率提取出来，如图 5.22 所示，可以看出，天线在长度方向上的一阶谐振频率随着重叠长度的不同会发生线性偏移。当组合式贴片天线的重叠长度改变 0.1mm 时，贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率偏移约为 6.05MHz；因此，根据 5.2 节中传感原理，可以通过该组合式贴片天线在长度方向上的谐振频率偏移来精确表征天线组件的相对移动，进而获得结构变形或结构裂缝的变化量。

为了探究该组合式贴片天线用于温度传感的能力，在 COMSOL 中对其进行多物理场仿真。当温度变化时，贴片天线会存在热胀冷缩的温度效应，并且天线介质板的相对介电常数也会随温度变化。因此，在仿真中首先使用固体力学模块来求解该组合式贴片天线的温度变形；然后，利用电磁仿真模块求解天线在不同温度下的反射损耗曲线 S_{11} 。在温度变化仿真中，该天线模型所有实体构件的温度线膨胀系数均根据表 3.1 中的材料参数进行设定，其中介质板的介电常数温度系数为 -125ppm/°C。贴片天线由集总端口通过偏心微带传输线馈电，扫描频率的设置 1GHz 至 3GHz，间隔为 0.0005GHz。温度变化设置为从 0°C 至 50°C，仿真模拟结果如图 5.23-5.26 所示。

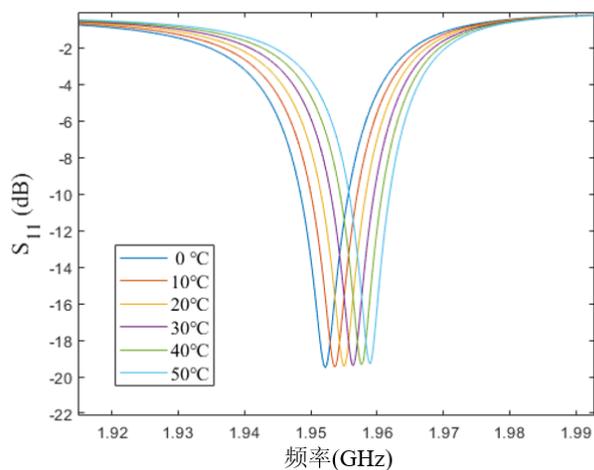


图 3.23 不同温度下天线宽度方向一阶谐振频率附近 S_{11} 曲线

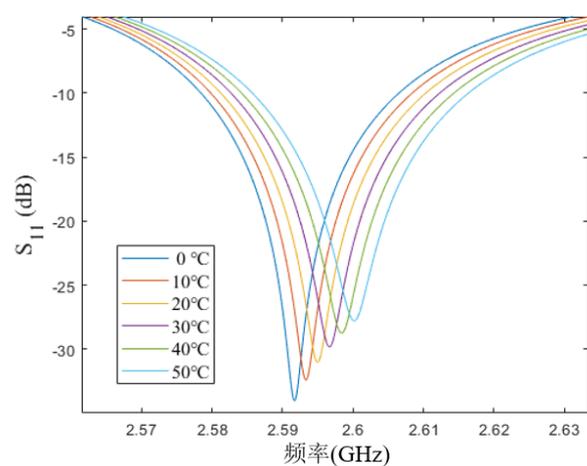


图 3.24 不同温度下天线长度方向一阶谐振频率附近 S_{11} 曲线

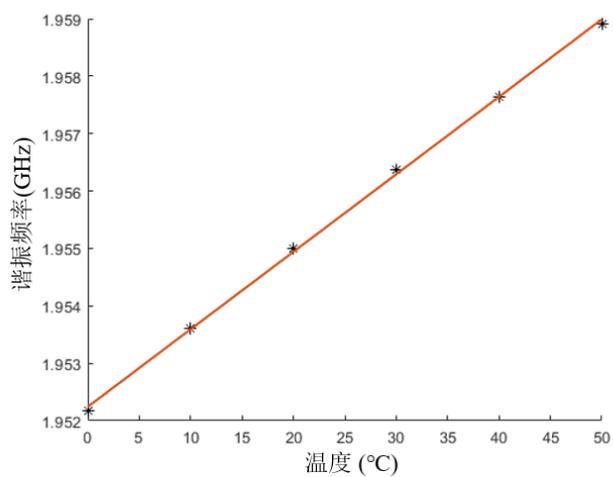


图 3.25 天线宽度方向一阶谐振频率随温度变化情况

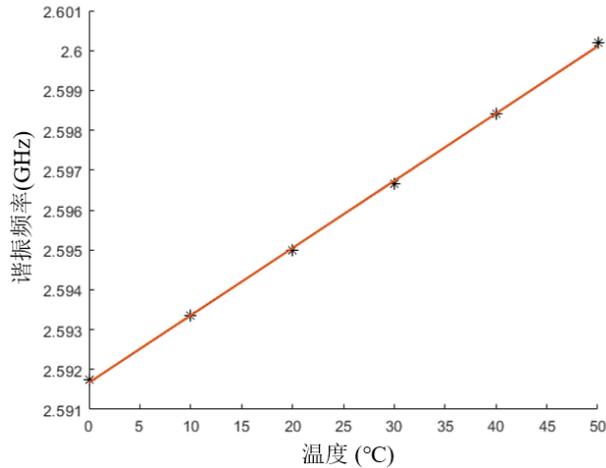


图 3.26 天线长度方向一阶谐振频率随温度变化情况

图 3.23 和 3.24 为不同温度下天线宽度方向和长度方向一阶谐振频率附近的 S_{11} 曲线，其局部最小值点所对应的频率即为天线的谐振频率。图 3.25 和 3.26 为天线在两个方向上的谐振频率信息。结果表明，该偏心馈电组合式贴片天线在宽度方向和长度向上的谐振频率都受到温度的影响，且随着温度的变化发生线性移动。当温度变化量为 1°C 时，贴片天线在宽度向上的一阶谐振频率偏移约为 0.134MHz ，在长度方向上的一阶谐振频率偏移约为 0.169MHz 。因此，可以通过该贴片天线在宽度方向上的一阶谐振频率偏移来实现环境温度感知，并且可以同时计算出在不同温度下天线长度方向上的谐振频率偏移量，对长度方向谐振频率偏移进行温度补偿，将补偿后的长度方向谐振频率偏移用于结构变形传感，从而实现单一贴片天线传感器对环境温度和结构变形的同步感知。

3.4 偏心馈电组合式贴片天线传感器试验探究

在理论分析和仿真模拟中已经对该组合式贴片天线的谐振频率与环境温度和结构变形之间的关系进行了讨论，在本节中将通过试验对该天线传感器的实际性能进行进一步的探究。

首先，通过化学蚀刻法进行了该偏心馈电组合式贴片天线传感器的试制，化学蚀刻法的具体工艺如下：将罗杰斯 RT/duroid 5880 覆铜介质板切割成所需尺寸，包括下部贴片天线和上部附加子贴片两部分，其设计尺寸如表 3.2 所示；然后，使用热转印打印机和墨粉将所设计的辐射贴片及微带线等形状打印到层压板上；将涂有墨粉的覆铜介质板放入腐蚀性液体中，以蚀刻不需要的铜；蚀刻完成后，应洗掉覆盖贴片的墨粉；最后，将 SMA 射频接口焊接到下部贴片天线的微带传输线上，并将上部附加子贴片和下部贴片天线通过夹具等固定，即可完成该

组合式贴片天线传感器的制作。该偏心馈电组合式贴片天线传感器实物图如图 3.27 和 3.28 所示。

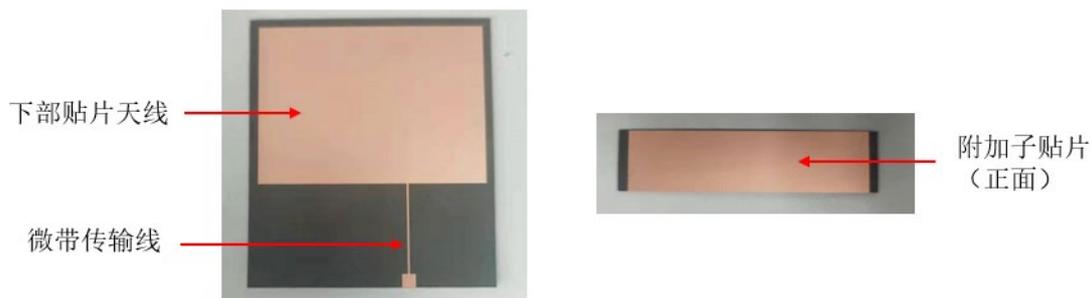


图 3.27 下部贴片天线与附加子贴片实物图

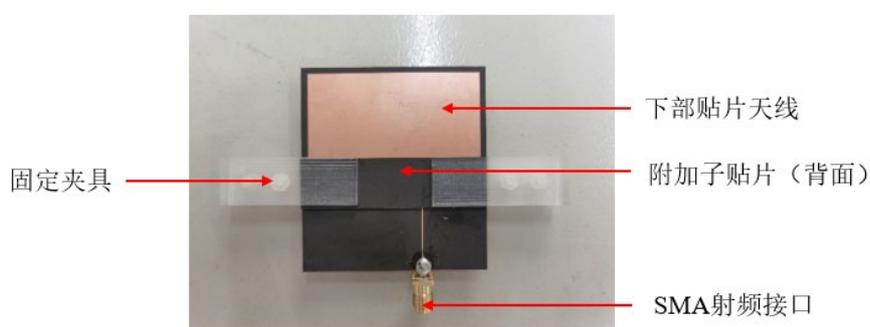


图 3.28 偏心馈电组合式贴片天线传感器实物图

将加工好后的偏心馈电组合式贴片天线传感器通过 SMA 射频接口和同轴线连接到矢量网络分析仪 VNA 上，如图 3.29 所示。VNA 能够分析天线的反射信号，并得到天线的回波损耗曲线 S_{11} 。图中可以明显看到天线传感器的两个谐振峰，证明该偏心馈电组合式贴片天线的两个方向谐振模式均激发良好。此外，由于同轴线的存在，天线的回波损耗曲线中会有一些杂波，同轴线长度越长，则该杂波越明显。可以对矢量网络分析仪进行校准来减小同轴线引入杂波的影响，按照校准流程，将同轴线端口分别连接开路元件、短路元件、标准负载元件与双端口直通元件，记录所需频段的扫频数据对 VNA 进行校准。校准后可以明显减小同轴线引入的杂波，以便于对天线传感器的回波损耗曲线进行分析。

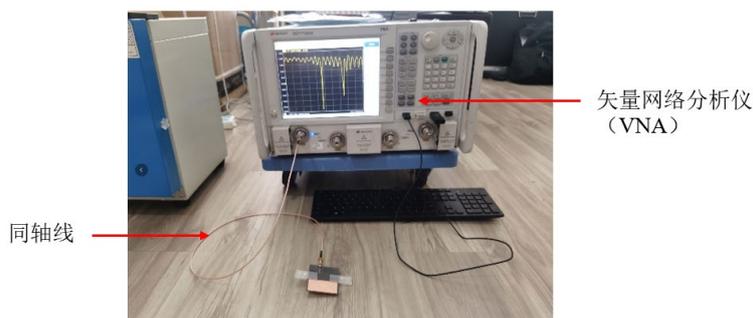


图 3.29 连接到矢量网络分析仪的偏心馈电组合式贴片天线传感器

为了探究该偏心馈电组合式贴片天线的实际传感性能,将其放置于温箱中及实际工程环境中进行了一系列试验测试,以下将对试验设计和测试结果进行具体介绍。

3.4.1 温度感知试验

首先通过试验验证所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器用于温度传感的可行性。将天线传感器放置于可以控制温度的温箱中,以测试在温度变化情况下谐振频率偏移情况,试验设置如图 3.30 所示。将同轴线在温箱的上部孔洞中引出,一端连接温箱内部的贴片天线传感器,一端连接温箱外部的矢量网络分析仪。该试验中使用的矢量网络分析仪为 Keysight N5227A 型号网络分析仪,将网络分析仪的扫描范围设置为 1GHz 至 3GHz,扫描点设置为 4001 点,扫频间隔为 0.0005GHz。

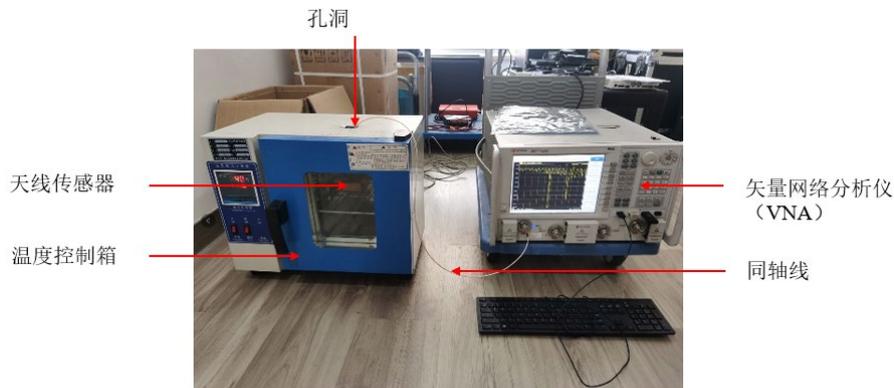


图 3.30 天线传感器温箱试验

由于温箱仅能从室温开始进行升温测试,因此将温箱的温度设置为从 20°C 均匀变化至 70°C,每次温度变化增量为设置为 2°C。当温度变化时,组合式贴片天线的尺寸和介质板的相对介电常数也会随之发生变化,进而引起组合式贴片天线宽度方向和长度方向谐振频率的变化。进行温度变化试验时,为了保证试验精度并减小误差,在测得 S_{11} 曲线局部最小值点周围的区域选取一系列数据点,通过二次函数拟合 S_{11} 曲线,并提取二次函数曲线的最小值作为贴片天线传感器的谐振频率。图 3.31 展示了该偏心馈电组合式贴片天线在 1.95GHz 附近的回波损耗曲线 S_{11} 及其不同温度下的变化情况,图 3.32 和 3.33 展示了该组合式贴片天线传感器在温度变化情况下的长度方向和宽度方向一阶谐振频率偏移情况。

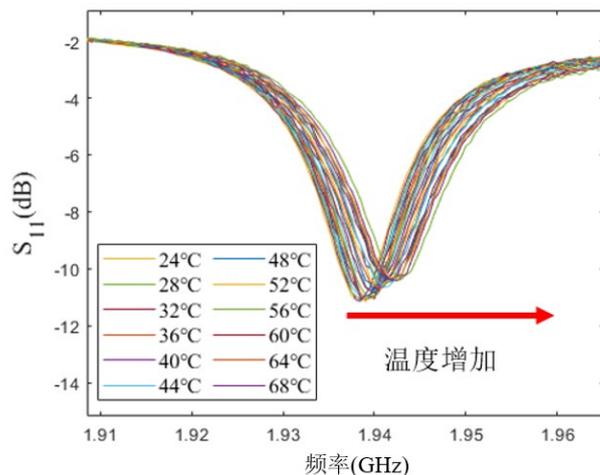


图 3.31 贴片天线传感器 1.95GHz 附近的 S_{11} 曲线随温度变化情况

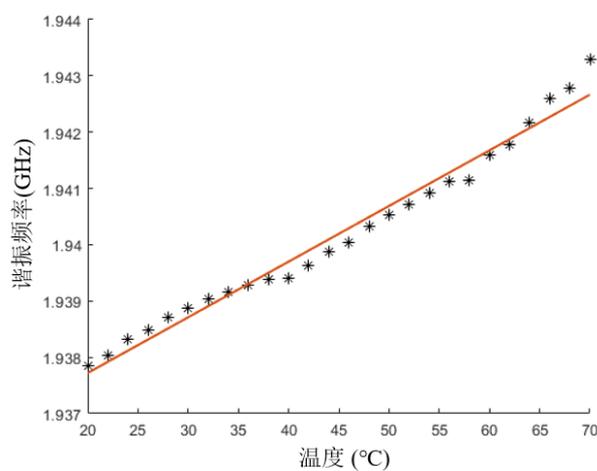


图 3.32 贴片天线传感器宽度方向一阶谐振频率随温度变化情况

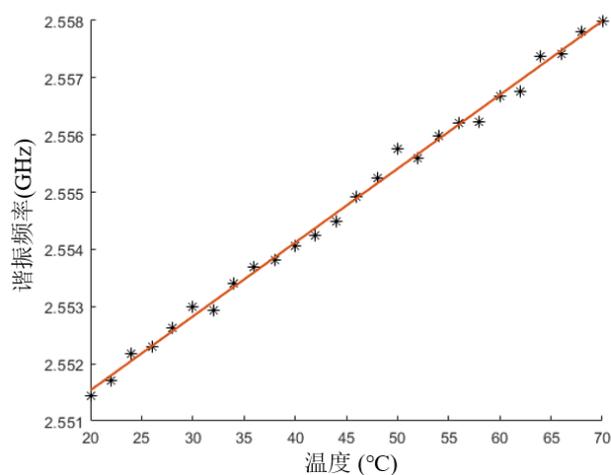


图 3.33 贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率随温度变化情况

该偏心馈电组合式贴片天线传感器在不同温度下的试验结果表明, 随着温度

的增加, 贴片天线 S_{11} 曲线的谐振峰会向右偏移, 其在长度方向和宽度方向上的谐振频率都会相应增加。试验测得贴片天线传感器的宽度方向一阶谐振频率的温度灵敏度为 $0.095\text{MHz}/^\circ\text{C}$, 长度方向一阶谐振频率的温度灵敏度为 $0.132\text{MHz}/^\circ\text{C}$ 。该偏心馈电组合式贴片天线传感器谐振频率随温度的变化关系近似线性, 因此, 可以通过矢量网络分析仪测量贴片天线传感器在宽度向方向上的一阶谐振频率偏移, 实现对温度的传感, 然后根据公式 3.12-3.14 计算出贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率在温度变化情况下的偏移量, 实现天线传感器的温度自补偿, 并将补偿后的长度方向一阶谐振频率偏移量用于结构变形传感。

贴片天线传感器的温箱试验可以用于对天线传感器温度传感性能的初步测试。为了进一步探究该偏心馈电组合式贴片天线传感器在实际环境中的温度传感性能及持续监测能力, 将该传感器安装于室内某一固定位置, 利用天线宽度方向的谐振频率偏移对一段时间内的环境温度变化进行了监测。图 3.34 展示了试验设置。贴片天线传感器由夹具进行固定, 并安装在有机玻璃制作的保护壳内, 以避免天线传感器在长期持续监测过程中受到灰尘或其他干扰因素的影响。精度为 0.1 摄氏度的电子温度计放置在贴片天线传感器附近, 以记录环境温度, 并与贴片天线传感器测得的温度值进行比较。

在该试验中, 为了便于信号的采集和分析, 采用了便携式的小型网络分析仪 Nano VNA (V2 型, 50kHz - 6.3GHz 扫频范围) 代替 Keysight 矢量网络分析仪对天线传感器谐振频率进行测量。该设备的关键参数如表 3.3 所示。有机玻璃保护壳内的贴片天线传感器使用同轴线连接到 Nano VNA, Nano VNA 可以与电脑端信号采集软件相连获得天线传感器的回波损耗曲线 S_{11} , 进行相应处理后可获得天线传感器的谐振频率信息。在该试验中, Nano VNA 的扫描范围被设置为 1GHz 至 3GHz , 由于该传感器的扫频点数只能设置为 101 的整倍数, 因此在该试验中将扫描点的数量设置为 5050 点。



图 3.34 贴片天线传感器环境温度监测试验

表 3.3 Nano VNA 关键参数

参数	扫频范围	S_{11} 本底噪声	扫描速度	频率稳定性
值	50kHz-6.3GHz	< -50 dB	800点/秒	0.5 ppm

对环境温度和天线传感器谐振频率偏移量进行了一段时间的持续测量,以验证所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器用于长期环境温度监测的传感能力。在监测过程中,阳光直射有时会导致天线周围的环境温度快速变化,从而影响温度传感的准确性。因此,在记录试验数据时,需要避免天线传感器突然暴露在阳光下。为了获得精确的谐振频率值,在贴片天线 S_{11} 曲线谐振峰附近的频段范围内使用二次函数对曲线进行拟合,并提取局部最小值点所对应的频率作为天线传感器的谐振频率。图 3.35 展示了天线传感器在一天 24 小时内的宽度方向谐振频率变化与电子温度计的读数。其中,散点图为 Nano VNA 测得的贴片天线传感器的宽度方向谐振频率,而红色曲线为电子温度计记录的环境温度。可以看出,贴片天线传感器与电子温度计记录的温度曲线具有良好的一致性,误差范围通常不超过 1°C 。因此,利用贴片天线的横向谐振频移进行环境温度传感是一种可行的方法,可以应用于连续温度监测。

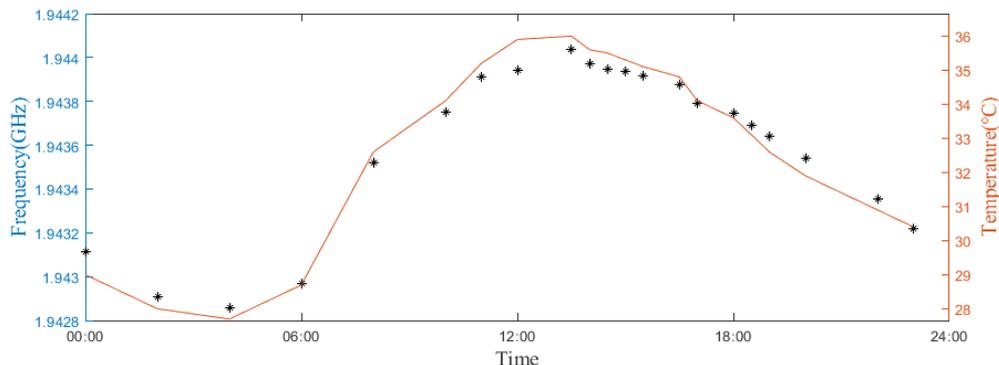


图 3.35 贴片天线传感器 24 小时环境温度监测结果

在环境温度长期监测试验中,该偏心馈电组合式贴片天线传感器的温度灵敏度与温箱试验存在一些差异,造成该差异的主要因素是温箱加热过程中天线的受热并不稳定,以及天线传感器辐射贴片尺寸变化和介电常数变化存在一定滞后性。此外温箱内部的金属结构也会对贴片天线传感器谐振频率造成一定的干扰。因此,在使用时仍需对要贴片天线传感器的温度灵敏度进行实测校正以保证传感精度。

3.4.2 形变感知试验

为了探究该偏心馈电组合式贴片天线传感器用于结构形变感知的能力,设计

了如图 3.36 所示的试验。该结构变形模拟装置可以模拟结构表面的变形位移或裂缝的宽度扩展，已用于一些相关研究中。结构变形模拟装置由固定平台、可移动微调平台和螺旋测微计等组成。可移动平台可由螺旋测微计推动，并相对于固定平台移动，该相对位移可以模拟结构表面的形变位移或是结构裂缝宽度的扩展。螺旋测微计的最小增量为 0.01mm；因此，该装置可以以 0.01mm 的精度模拟结构变形或是裂缝宽度的变化。所设计的偏心馈电组合式贴片天线传感器下部贴片天线通过夹具和胶水粘贴于固定平台，上部附加子贴片通过传动杆固定于可移动微调平台上。

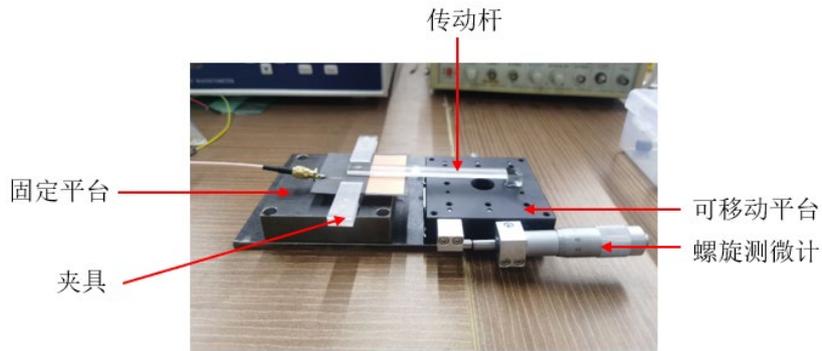


图 3.36 贴片天线传感器结构形变感知试验

在结构形变感知试验中，可移动微调平台可以相对固定平台移动，移动距离可以由螺旋测微计精确控制。当可移动平台朝向固定工作台移动时，两个工作台之间的位移减小；当可移动平台远离固定平台移动时，两个工作台之间的位移增加。试验在恒定温度下进行，通过结构变形模拟装置模拟两点之间的结构形变从 0 mm 扩展到 3 mm，增量步长为 0.1 mm。图 3.37 展示了不同结构形变量对应的偏心馈电组合式贴片天线的 S_{11} 曲线，图 3.38 展示了贴片天线在长度方向上的一阶谐振频率随着结构形变量增加发生偏移的情况。

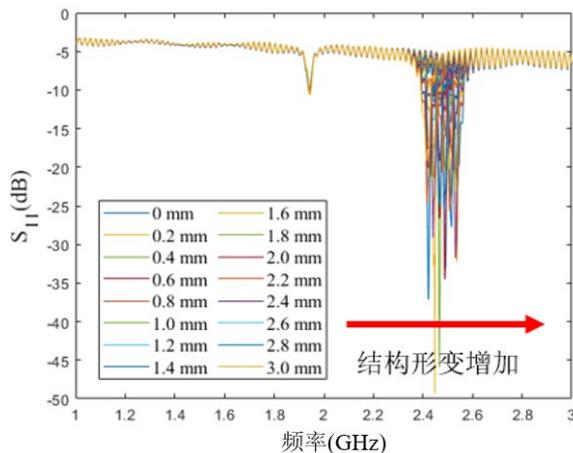


图 3.37 不同结构形变量对应的贴片天线传感器 S_{11} 曲线

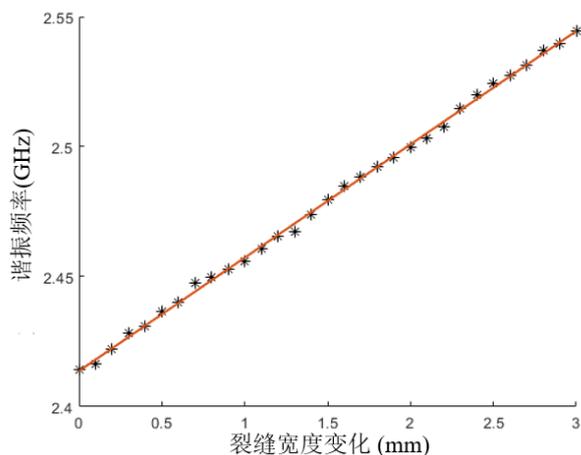


图 3.38 不同结构形变量（裂缝宽度）对应的贴片天线传感器长度方向谐振频率

试验结果表明，结构变形会改变附加子贴片和底部贴片天线的相对位置，这会改变该组合式贴片天线传感器的组合辐射贴片长度，进而引发该传感器在长度方向上的谐振频率偏移。当结构发生变形或裂纹宽度发生变化时，该偏心馈电组合式贴片天线传感器的长度方向谐振频率变化近似为线性，相应的灵敏度为 43.9MHz/mm。因此，可以通过该天线传感器的长度方向谐振频率偏移精确感知结构形变或裂纹宽度的变化。

3.4.3 温度与形变同步感知试验

在前面两个试验中已经分别验证了所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器宽度方向谐振频率用于温度感知与长度方向谐振频率用于形变感知的可行性，但是试验仍是在仅有单一变量的情况下进行的。在本节中，将该偏心馈电组合式贴片天线传感器安装于混凝土构件上，以验证其用于环境温度与结构形变（裂缝宽度）同步传感的能力。

试验设计如图 3.39 和 3.40 所示，两个混凝土构件分别通过固定连接和可移动微调平台连接到基座上。可移动微调平台上的混凝土构件可由精度为 0.01mm 的螺旋测微计杆推动；因此，两个混凝土构件可以相对移动，以模拟结构变形或裂缝宽度的变化。螺旋测微计可以精确测量两个混凝土构件之间的相对位置变化，即结构变形或裂缝宽度的变化。此外，试验中还使用了带刻度的具备 80 倍放大功能的裂缝观测仪来辅助测量裂纹宽度的变化。

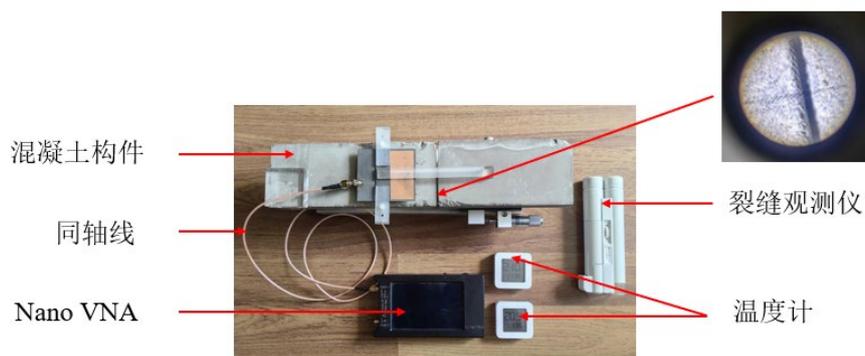


图 3.39 温度和结构变形同步感知试验

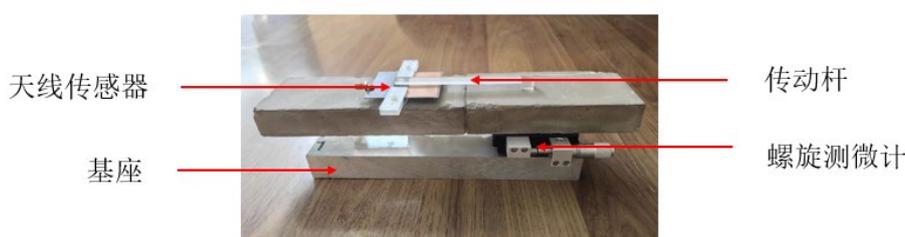


图 3.40 试验装置侧视图

使用夹具将天线传感器的下部贴片天线粘贴到固定的混凝土构件上，而附加子贴片通过传动杆固定到另一个可移动的混凝土构件。将该偏心馈电组合式贴片天线传感器通过同轴线连接到 Nano VNA，以获得贴片天线传感器的 S_{11} 曲线及谐振频率信息。

在环境温度与结构形变持续监测过程中，为了防止灰尘等因素的干扰，将贴片天线传感器和混凝土组件放置在有机玻璃构成的保护壳内，如图 3.41 所示。两个电子温度计被放置在盒子里，记录环境温度的变化。在试验中，将两个温度计读数的平均值作为记录的环境温度值，以减少测试误差。

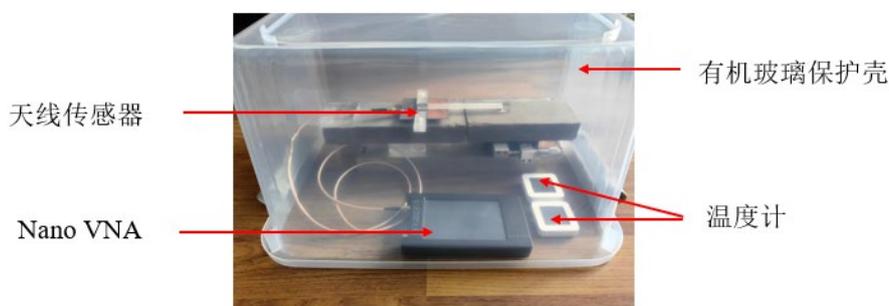


图 3.41 试验装置与保护壳

在试验时，使用螺旋测微计以 0.02mm 的增量推动可移动的混凝土构件移动，

两个混凝土组件之间的距离发生相应变化,进而导致裂缝宽度相应地改变。试验在 15°C、20°C 和 25°C 三种不同的环境温度下进行。偏心馈电组合式贴片天线传感器的长度方向一阶谐振频率随着裂缝宽度的变化而变化,如图 3.42 所示。可以看出,在恒定温度下,天线的长度方向一阶谐振频率与裂缝宽度具有线性相关性,平均灵敏度为 45.3MHz/mm。而环境温度的变化也会导致天线传感器长度方向一阶谐振频率的偏移。当环境温度升高时,长度方向一阶谐振频率相应增加。在该试验中测得温度变化时天线长度方向平均灵敏度为 0.187MHz/°C。因此,在通过贴片天线传感器宽度方向一阶谐振频率感知获得环境温度之后,可以计算出温度变化对长度方向一阶谐振频率的影响,从而实现传感器的温度自补偿和结构形变(裂缝宽度)的感知。用于结构形变(裂缝宽度)感知的温度补偿后的天线长度方向一阶谐振频率如图 3.43 所示。试验结果表明,温度补偿后的天线传感器长度方向一阶谐振频率与结构形变(裂缝宽度)呈现出良好的线性关系,因此,该传感器可以有效用于温度环境变化的情况,并可以实现对环境温度和结构形变的同步传感。

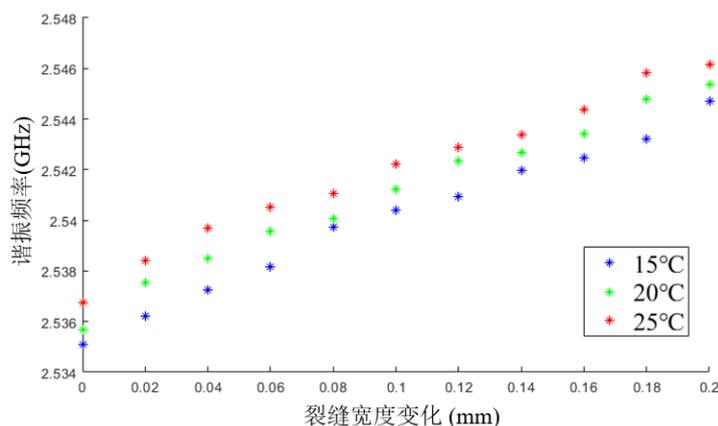


图 3.42 结构裂缝宽度和环境温度同时变化情况下的天线长度方向一阶谐振频率

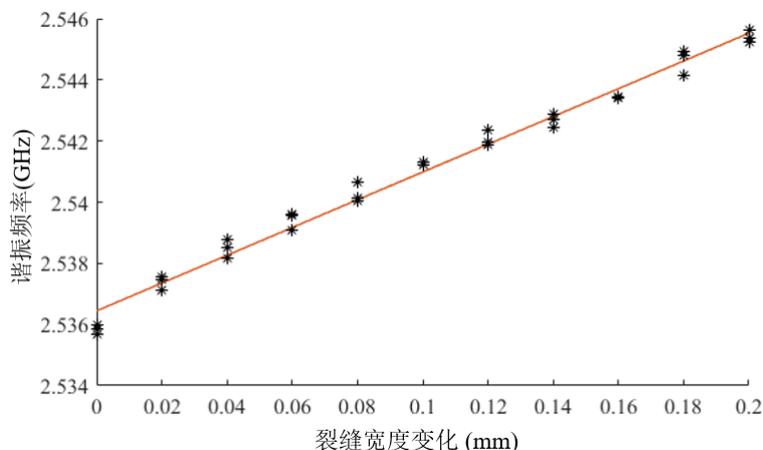


图 3.43 温度补偿后的天线长度方向一阶谐振频率

3.4.4 实际工程环境测试

为了验证所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器应用于实际工程中结构形变和环境温度传感的可行性,将该传感器安装在一栋实际建筑中测试了其传感性能。这是贴片天线传感器应用于实际工程的一次十分有意义的测试,并取得了良好的测试效果。

在本节中,所设计的偏心馈电组合式贴片天线传感器被安装在了华东医院南楼中进行试验测试^[167]。华东医院原名宏恩医院(Country Hospital),位于上海市延安西路221号,由匈牙利人拉斯洛爱德华·邬达克设计,于1926年竣工使用,现为上海市第一批优秀历史建筑。华东医院南楼平面布局呈工字型,占地面积约2300 m²,总建筑面积约10700 m²,包括六层建筑和局部一层地下室。华东医院南楼的外立面如图3.44所示。



图 3.44 华东医院南楼外立面

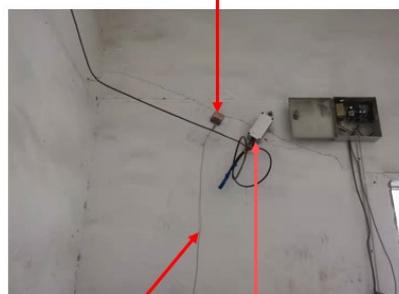
华东医院南楼在长期的使用过程中,产生了约1.0m左右的下沉,这给建筑的日常使用带来了极大不便。为了纠正建筑在长期使用过程中的下沉,在2021年8月对华东医院南楼进行了整体顶升,顶升高度约1.20m,同时增加了隔振支座等,以增加建筑的抗震能力和防汛能力。由于华东医院南楼占地面积大,顶升重量大,且平面呈工字形,刚度差异较大,为了保证建筑在顶升过程中的安全,在顶升过程中对建筑的顶升状态整体姿态、以及结构关键部位受力状态等进行了监测。主要监测项目主要包括:建筑顶升竖向位移监测、水平位移监测、倾斜监测、沉降监测、裂缝监测、应力应变监测、加速度监测等。

华东医院南楼顶升改造工程的现场施工照片如图3.45所示。在华东医院南楼改造过程中,本文所开发设计的偏心馈电组合式贴片天线传感器也安装于华东医院南楼中,用于监测结构裂缝和环境温度,并与传统传感器的监测数据进行了对比。



图 3.45 华东医院南楼顶升改造工程施工现场

偏心馈电组合式贴片天线传感器



同轴线 结构裂缝传感器

图 3.46 华东医院南楼安装的天线传感器与传统结构裂缝传感器

在顶升前对华东医院南楼的检视中,发现该建筑在经历近百年的长期使用后出现了一些结构裂缝,如墙壁裂缝、屋顶变形缝等。而在对该建筑进行整体顶升的过程中,由于千斤顶数量众多,布置于不同位置的数百个千斤顶可能会发生不均匀顶升的现象。虽然不均匀顶升通常会控制在安全范围内,但是这种不均匀的竖向位移有时会改变结构局部区域的受力状态,进而导致裂缝宽度发生变化。因此,本文所开发设计的偏心馈电组合式贴片天线传感器安装在墙壁裂缝和屋顶变形缝附近,以测量裂缝宽度的变化及环境温度的变化,如图 3.46 和 3.47 所示。传统的结构裂缝传感器和电子温度计也安装在同一位置,以监测结构裂缝宽度变化和环境温度的变化,并与贴片天线传感器测量的结果进行比较。

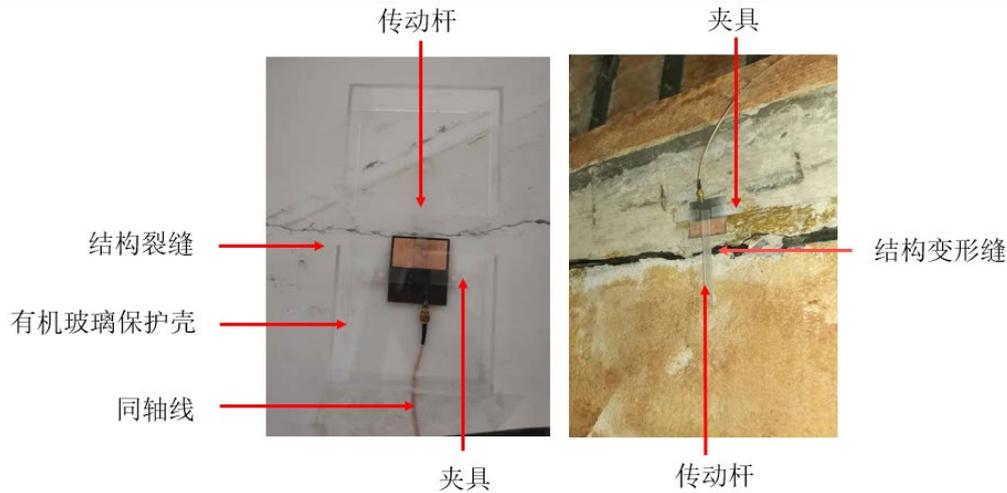


图 3.47 偏心馈电组合式贴片天线传感器安装示意图

华东医院南楼的顶升过程在 8 月 26 日至 9 月 4 日进行。在监测试验中，根据偏心馈电组合式贴片天线传感器宽度方向上的一阶谐振频率偏移来进行环境温度感知。首先，安装后应测量天线传感器长度方向和宽度方向的一阶谐振频率初始值，并记录环境温度值。然后根据监测过程中天线传感器宽度方向一阶谐振频率的偏移和贴片天线传感器的温度灵敏度系数可计算出环境温度变化量。

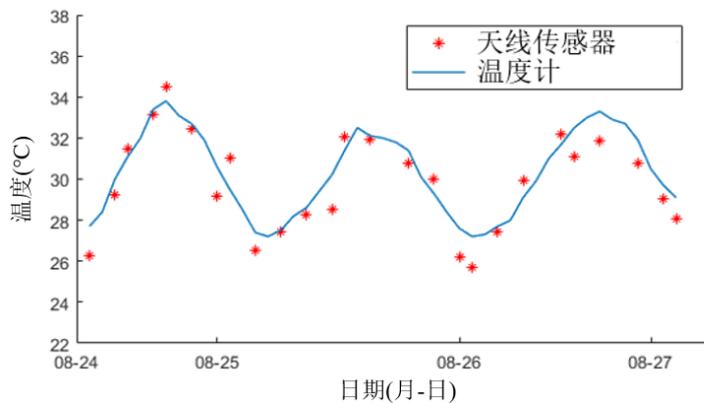


图 3.48 环境温度感知结果对比

偏心馈电组合式贴片天线传感器和电子温度计测得的环境温度数据如图 3.48 所示。在该试验中，贴片天线传感器测量得到的环境温度与电子温度计读数的平均误差约为 1.12°C 。造成该误差的原因主要是由于实际工程中施工环境等因素的干扰。由于贴片天线传感器是高度敏感的，这意味着即使天线传感器宽度方向一阶谐振频率的微小变化也会表征环境温度的显著变化。然而，在该工程中，由于现场在顶升过程中仍在持续施工，会造成振动和灰尘等外部干扰因素，这使贴片天线传感器的谐振频率受到了轻微干扰，并影响了贴片天线传感器温度传感精度。因此，贴片天线传感器在实际工程中使用，需要对其进行适当的封装和

保护，以避免灰尘等因素的干扰，从而获得更为准确的传感结果。

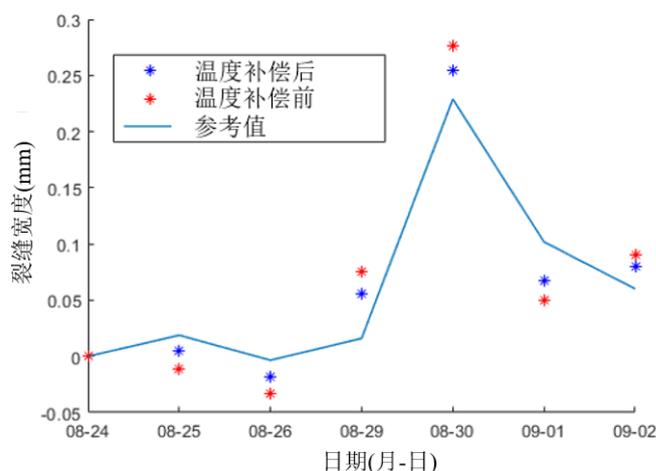


图 3.49 环境温度感知结果对比

结构裂缝宽度的测量原理是将传感器固定在裂缝两侧，根据固定点之间的相对位移测量裂纹宽度的变化。因此，假设安装传感器时的初始裂纹宽度为零。图 3.49 显示了安装于墙壁裂缝的传感器测量结果。蓝色线条是传统有线裂缝传感器的测量值，作为裂缝宽度的参考值。红色散点为通过该组合式贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率偏移直接计算得到的裂缝宽度值。该裂缝宽度值与裂缝宽度参考值仍有较大偏差。经过温度补偿后，该传感器测得的裂缝宽度如图 3.49 中蓝色散点所示。其与裂缝参考值的平均误差从 0.041mm 下降到了 0.025mm。经过温度补偿后的贴片天线传感器的测量结果与参考值显示出更好的一致性，从而说明了该偏心馈电组合式贴片天线用于结构裂缝（形变）感知和温度自补偿的可行性。该裂缝宽度测量结果还显示，8 月 30 日测得的结构裂缝宽度突然增加，在随后的测量中裂缝宽度逐渐减小。根据顶升施工情况，这是由于 8 月 30 日该建筑发生了不均匀顶升，从而导致了结构裂缝宽度的扩大。而在随后的顶升过程中，该建筑的不均匀的顶升得到了纠正，裂缝宽度也相应减小。传感器裂缝宽度的测量结果与建筑物顶升的实际情况非常吻合，也说明了该偏心馈电组合式贴片天线传感器的有效性。

3.4.5 结果讨论分析

该偏心馈电组合式贴片天线传感器在一系列的试验测试中展现了良好的传感能力，天线的谐振频率与监测变量之间呈现出良好的线性关系。但是在传感的灵敏度方面，试验测试结果与理论计算和仿真模拟仍有一些差异。根据试验结果与理论计算和仿真结果的对比，在贴片天线传感器长度方向谐振频率用于结构变形感知方面，理论计算的灵敏度约为 63.3MHz/mm，仿真模拟的灵敏度约为 60.5MHz/mm，二者较为接近。而根据试验测试，贴片天线传感器长度方向谐振

频率与结构变形之间的变化关系约为 45 MHz/mm。造成该差异的主要原因是组合式贴片天线传感器在实际制作及测试的过程中，辐射贴片表面不是理想平面，下部贴片天线与附加子贴片的接触面上仍会有一些气隙，这与仿真模拟和理论计算中的完全贴合的理想导电平面仍会有一些差别。而在温度传感和温度自补偿方面，该组合式贴片天线传感器用于温度传感的宽度方向一阶谐振频率仿真模拟灵敏度为 0.134MHz/°C，根据温箱试验测得的灵敏度为 0.095 MHz/°C，用于温度自补偿的天线传感器长度方向一阶谐振频率灵敏度仿真模拟和温箱试验测试结果分别为 0.169MHz/°C与 0.132MHz/°C。产生差异的主要原因是仿真模拟中的设置与实际环境仍有一些差别，此外环境电磁干扰和天线制造误差等都影响了试验测试的灵敏度。因此，建议在实际使用时，对偏心馈电组合式贴片天线传感器的灵敏度进行校准，以确保实际测量的准确性。

3.5 本章小结

本章主要提出了一种用于结构变形（裂缝）和环境温度同步感知的偏心馈电组合式贴片天线传感器。并进行了一系列仿真模拟和试验测试以验证其在环境温度和结构裂纹传感方面的性能。具体包括：

(1) 介绍了该偏心馈电组合式贴片传感器的传感原理，包括偏心馈电贴片天线传感器设计、用于温度与形变同步感知的原理以及温度变化自补偿的方法、天线双向谐振频率与温度和形变关系的理论计算推导等，这是该多参数同步传感器的基本理论部分。

(2) 进行了一系列电磁仿真模拟，探究了所提出的组合式天线传感器最佳偏心馈电距离及优化方法，并通过多物理场仿真研究了天线传感器双向谐振频率与环境温度及结构变形（裂缝宽度）之间的关系等，进一步说明了该传感器用于多参数同步传感的可行性。

(3) 通过一系列试验验证了所提出传感器用于环境温度与结构变形（裂缝宽度）同步传感和持续监测的可行性，并将该贴片天线传感器安装于实际工程中，在著名历史建筑华东医院南楼中安装该贴片天线传感器用于环境温度和裂缝宽度的监测，试验结果也说明了该传感器的有效性。

综上，本章所提出的偏心馈电组合式贴片天线传感器可以实现单一传感器对多参数的感知，避免了使用额外的温度传感器对监测变量进行温度补偿，具有更强的实用性。此外，该天线传感器还被安装于实际建筑中进行了一系列测试，尽管在实际建筑中的测量精度仍需提高，但这是对贴片天线传感器实际工程应用效

果的一次有意义的测试。在未来的工作中，偏心馈电组合式贴片天线传感器的无线问询技术和抗电磁干扰能力等问题仍需进一步研究，以进一步提高传感器在实际工程中的适用性。

第 4 章 贴片天线传感器封装材料及外部环境的影响

4.1 引言

在前面章节中,已经介绍了利用贴片天线作为传感单元实现对结构变形和温度等多参数感知的传感器。但是所开发设计的贴片天线传感器通常适用于结构表面等常规环境中,无法直接埋置于混凝土等材料中实现对埋置环境的监测。当天线传感器作为智能骨料的传感单元埋置与混凝土等环境中时,贴片天线传感器会面临诸多问题,如埋置环境的温度或含水率变化都会导致材料介电常数变化,进而影响内部贴片天线的电磁特征参数。埋置环境对贴片天线传感器的影响通常与监测变量产生的影响耦合在一起,这也使得贴片天线传感器难以直接埋置于混凝土等内部进行监测。

为了拓展贴片天线传感器的应用范围,使天线传感单元可以形成埋置于混凝土内部监测的智能骨料,本章主要研究了贴片天线传感器的封装问题,探究了适用于贴片天线的封装材料及其对内部传感天线电磁特征参数的影响。最终形成了屏蔽材料与非屏蔽材料两种封装方案,以应对不同的天线传感器应用场景。采用屏蔽材料进行封装时,贴片天线产生的电磁场被限制在封装尺寸内部,封装材料以外的埋置环境介电常数变化将不再对贴片天线电磁特征参数产生影响。而采用非屏蔽材料进行封装时,贴片天线产生的电磁场会影响到封装尺寸的外部空间,进而可以通过贴片天线电磁特征参数变化实现对外部环境介电常数的感知。采用两种不同的封装材料方案,可以有效解耦监测变量和外部环境对传感天线的的影响,使得贴片天线可以适用于混凝土埋置等传感天线外部环境较为复杂的监测场景中。

在 4.2 节中,首先介绍了贴片天线传感器封装原理,包括贴片天线传感器封装影响因素分析,并简述了基于屏蔽材料与非屏蔽材料封装的天线传感器特点及应用场景。

在 4.3 节中,进行了一系列仿真模拟探究屏蔽材料与非屏蔽材料两种封装技术路线的特点,通过仿真模拟研究了封装材料本身和外部环境变化对封装材料内部贴片天线传感器电磁特征参数的影响。

在 4.4 节中,针对屏蔽材料与非屏蔽材料两种技术路线,设计了一系列实验,分别采用碳纤维、铜、亚克力、聚乙烯等作为封装材料,研究了采用屏蔽材料封装天线传感器以避免外部环境介电常数变化影响的方法,以及采用非屏蔽材料封装天线传感器以实现对外部环境感知可行性。

4.2 贴片天线传感器封装原理

4.2.1 贴片天线传感器封装影响因素分析

贴片天线传感器的电磁特征参数会受到多种因素影响。对于贴片天线传感器本身而言，监测变量如结构形变等会引起天线尺寸或天线组件相对位置的变化，进而引起贴片天线电磁特征参数的变化；环境温度的变化会引起贴片天线尺寸和贴片天线介质板介电常数的变化，这也会引起贴片天线电磁特征参数的改变。对于外部环境而言，天线传感器的埋置环境如混凝土等，可以等效为天线传感器外部的电介质，其温度和湿度（含水率）等也是一个动态变化的过程，这些因素会综合起来影响天线传感器外部电介质的介电常数。当天线传感器外部环境介电常数发生改变时，天线的电磁特征参数也会发生变化。

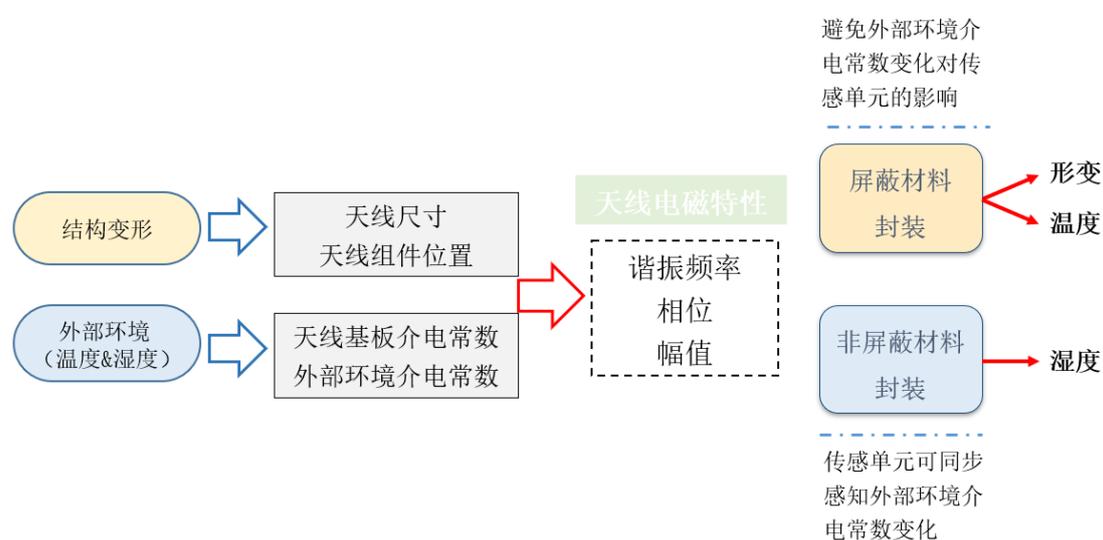


图 4.1 贴片天线传感器封装影响因素分析及技术路线

由于结构变形、温度、湿度等因素会耦合影响天线传感器的电磁特征参数，因此，需要研究一种合适的方法对其进行解耦或者避免其耦合影响，以实现贴片天线传感器对目标监测变量的精确表征。在本章中，通过对贴片天线传感器电磁特征参数的影响因素进行分析，形成了屏蔽材料封装与非屏蔽材料封装两种技术路线。贴片天线传感器封装影响因素分析及两种封装技术路线如图 4.1 所示。

当选用屏蔽材料封装技术路线时候，封装层外部介电常数的改变将不再对封装层内的贴片天线传感器电磁特征参数产生影响，影响天线传感器电磁特征参数的因素仅为结构变形与温度，因此贴片天线传感器可像前文中一样仅对目标监测变量如形变和温度进行传感。当选用非屏蔽材料进行封装时，封装层外部的介电常数变化仍会对封装层内部的贴片天线传感器电磁特征参数产生影响，因此非屏蔽材料封装的贴片天线传感器可以对外部环境介电常数变化进行感知，进而可以

根据外部材料介电常数与含水率之间的关系确定外部材料含水率（湿度）等。

4.2.2 基于屏蔽材料封装的贴片天线传感器

屏蔽材料是指能够阻挡电磁波辐射的材料，常见的屏蔽材料包括金属材料、碳材料、合金材料等。金属材料是较为常见的一种电磁屏蔽材料，常用的金属材料包括铁、铜、铝等。碳材料包括石墨、碳纤维等，具有轻质、高强度、高导电性等特点。合金材料则是由两种或两种以上的金属混合而成，可以根据需要调节其物理性质，比如磁导率、电导率等。一般认为，宏观电导率达到 1 西门子每米（S/m）的材料既可以作为电磁屏蔽材料。

电磁屏蔽材料通常选用良导体，因为导体具有较高的电导率，电流或自由电子可以在导体内部快速移动，并在材料表面产生电场。当电磁波辐射遇到导体材料时，会在材料表面引起电荷运动，并形成反向电场。这个反向电场会抵消电磁波的电场成分，使得电磁波在导体表面或近表面的区域内被吸收或反射，从而减弱了电磁波的能量，实现了电磁屏蔽的效果。

除了材料本身的导电特性等，屏蔽材料的厚度也会影响电磁波屏蔽的效果。趋肤深度可以用来描述良导体中电磁波的穿透深度，其含义是指电磁波从介质表面到介质内部幅值下降到 $1/e$ 时传播的距离。材料的趋肤深度计算公式如 4.1 所示。 δ 表示材料的趋肤深度， ρ 表示材料的电阻率， ω 为电磁波的角频率， μ 为材料的磁导率， σ 为材料的电导率。典型的材料如铜趋肤深度在 1GHz 时约为 0.002 mm，碳纤维材料的趋肤深度在 1GHz 时约为 0.06 mm。由于电磁波在良导体中衰减很快，较难进入导体内部，当屏蔽材料厚度达到趋肤深度的数倍时，穿透屏蔽材料的电磁波能量将可以忽略不计。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (4.1)$$

当采用电磁屏蔽材料作为贴片天线传感器的封装材料时，贴片天线传感器产生的电磁场会被限制在封装层尺寸范围内，贴片天线产生的电磁场不会影响到封装层以外的区域。因此，外部环境的电介质常数改变时，对贴片天线的电场路径也不会产生影响。当贴片天线传感器采用屏蔽材料进行封装后埋置于混凝土等环境中，混凝土的湿度（含水率）变化将不会影响封装层内部贴片天线的电磁特征参数。因此，贴片天线传感器可以专注于结构变形与温度感知，不再受到混凝土含水率变化的影响。

4.2.3 基于非屏蔽材料封装的贴片天线传感器

非屏蔽封装材料起到的主要作用是保护内部传感器以及防水等，同时不影响贴片天线传感器对封装层外部环境的感知。当采用非屏蔽材料对贴片天线传感器

进行封装时，贴片天线产生的电磁场会影响到封装层以外的空间区域，而封装层外部环境介电常数会受到温度湿度等环境的影响发生改变，进而影响到封装层内部贴片天线的电磁特征参数。

一些非屏蔽的封装材料如亚克力、聚乙烯塑料等，其电导率接近为零，电磁波可以轻易穿透这些材料，并没有太大衰减。因此，当采用非屏蔽材料对贴片天线传感器进行封装时，相当于在封装层内部形成了一个较为稳定的空气盒子。但是在封装层的外部区域，贴片天线产生的电磁波同样可以抵达，并且贴片天线的电磁特征参数会随着外部环境介电常数的改变发生一定的变化。通过对贴片天线电磁特征参数与封装层外部环境介电常数的关系进行探究，可以实现天线传感器对外部环境介电常数的表征，并可以进一步根据外部环境的电磁特性实现对湿度（含水率）等参数的感知。

4.3 贴片天线传感器封装仿真模拟

为了探究屏蔽材料与非屏蔽材料两种类型的封装方式的特点，本节将在高频电磁仿真软件 HFSS 中对贴片天线传感器、封装层、外部环境（以混凝土埋置环境为例）进行建模，并通过一系列的仿真模拟探究了封装材料本身和外部环境变化对封装材料内部贴片天线传感器电磁特征参数的影响，并对仿真结果进行了分析讨论。

4.3.1 基于屏蔽材料封装的天线传感器仿真

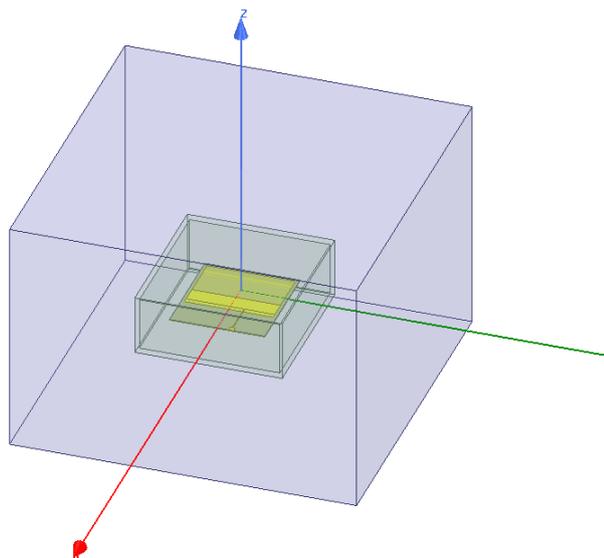


图 4.2 贴片天线传感器及封装外壳

首先探究了非埋置环境，即天线传感器封装层外不存在混凝土或其他电介质，

仅存在空气时，不同类型的封装材料对内部贴片天线传感器和外部电磁场的影响。图 4.2 为 HFSS 中的贴片天线传感器及封装外壳模型。其中，为了防止封装外壳与贴片天线传感器产生耦合作用，在贴片天线周围预留一定的空气层。封装外壳与贴片天线传感器前后左右及下方的间距均设置为 15 mm，封装外壳与贴片天线传感器上方的间距设置为 20 mm，封装层厚度设置为 2 mm。天线传感器和封装层均被放置在空气盒子中，并将空气盒子的边界设置为辐射吸收边界，天线传感器在馈电端口处采用集总端口进行馈电激励。

当天线传感器封装材料选取为屏蔽材料（高电导率）时，将频率设置为天线传感器在宽度方向一阶谐振时的频率 1.95GHz，在竖直方向增加一个无宽度的平面切面，在该平面上天线传感器及其周围的电场示意图如图 4.3 所示。可以看出，天线传感器所产生的电场完全被限制在封装层的尺寸范围内，封装层外部的空间并没有电场。因此，封装层外部环境的介电常数变化并不会引发封装层内部贴片天线传感器的电磁特征参数变化。采用屏蔽材料进行封装时，可以有效避免封装层外部环境如混凝土含水率变化对天线传感器的干扰，使天线传感器专注于结构变形和温度传感。

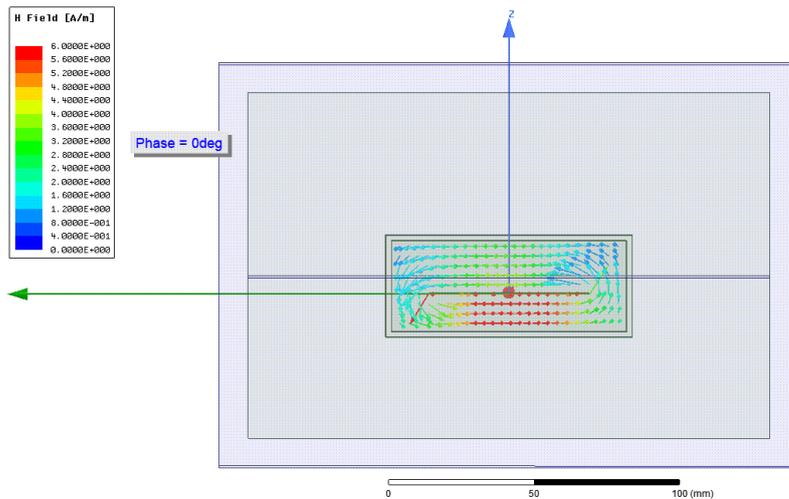


图 4.3 屏蔽材料封装的天线传感器电场示意图（1.95GHz）

为了进一步探究屏蔽材料封装的特点，将封装后的贴片天线传感器放置于介电常数改变的外部环境中，如图 4.4 所示，以模拟介电常数随温度和含水率等不断变化的混凝土等埋置环境。根据理论研究及一些实测表明，随着混凝土含水率的增加，其介电常数会相应增加。因此，在仿真中，通过改变封装层外部环境介电常数来模拟实际环境中的混凝土等埋置环境介电常数变化，以探究其对封装层内部贴片天线传感器的影响。

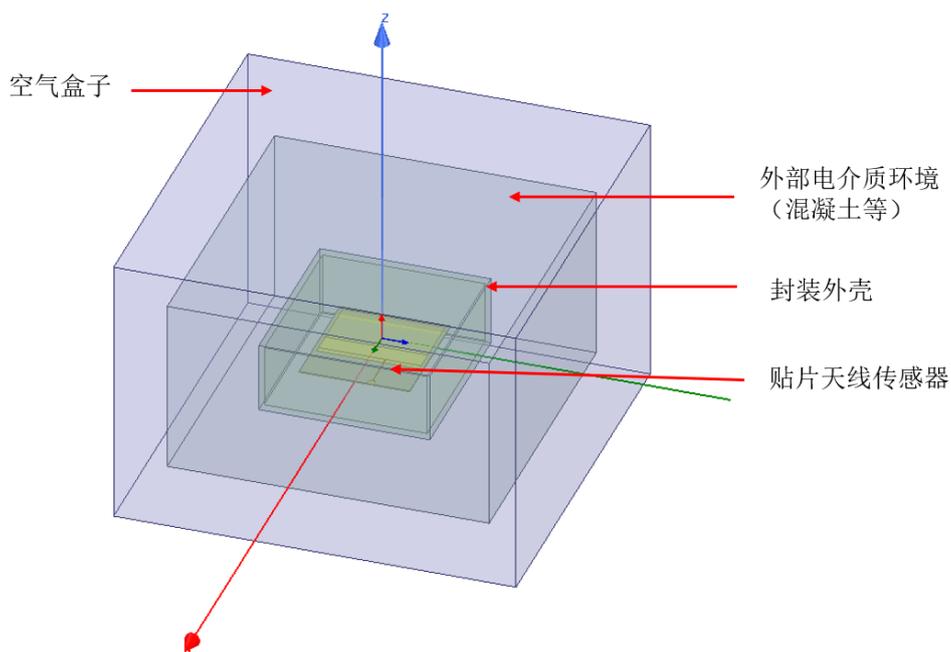


图 4.4 屏蔽材料封装天线传感器及外部电介质环境变化仿真模拟

在该仿真模拟中，分别将封装外壳的材料设置为高电导率的屏蔽材料（铜、碳纤维等），将外部包裹封装外壳的电介质环境相对介电常数设置为从 6 到 16 变化，变化步长为 2。图 4.5 展示了贴片天线传感器在宽度方向和长度方向上的一阶谐振频率。由图可知，当采用高电导率的屏蔽材料作为封装材料时，封装层以外的空间发生介电常数变化几乎不影响封装层内部天线传感器的谐振频率。将贴片天线传感器宽度方向一阶谐振频率附近的 S_{11} 曲线放大展示如图 4.6 所示，可以看出贴片天线传感器的谐振峰几乎没有发生任何偏移。在使用铜和碳纤维等几种不同的高电导率材料作为封装外壳的仿真模拟中，取得的仿真结果十分相近，封装层内部的贴片天线传感器谐振频率均未受到外部环境介电常数变化的影响发生偏移。

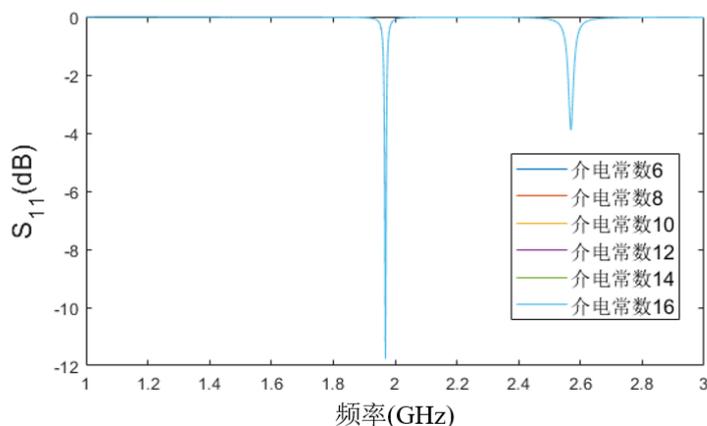


图 4.5 采用屏蔽材料封装时外部环境介电常数变化对天线谐振频率的影响

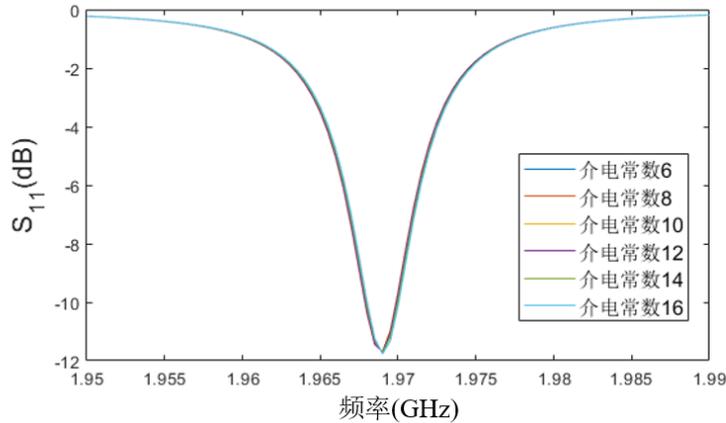


图 4.6 屏蔽材料封装的贴片天线宽度方向一阶谐振频率

该仿真模拟证明采用铜和碳纤维等具有较高电导率的封装材料可以有效避免天线传感器封装层以外的电介质环境变化对贴片天线谐振频率的影响，进而可以使该传感器适用于混凝土等埋置环境中。

虽然屏蔽材料可以有效避免外部电介质环境变化对天线传感器的影响，但是封装外壳作为一种高电导率的材料，其与贴片天线传感器距离过近时容易与贴片天线传感器产生耦合作用，进而影响天线传感器的电磁特征参数。因此，确定封装材料的尺寸时，应使封装层尺寸在不对天线传感器产生影响的情况下小型化。为了进一步探究采用屏蔽材料对天线传感器进行封装时封装外壳尺寸对天线传感器的影响，进行了一系列仿真模拟，通过改变天线传感器的四周及上部和下部与封装外壳的距离对封装尺寸进行优化。

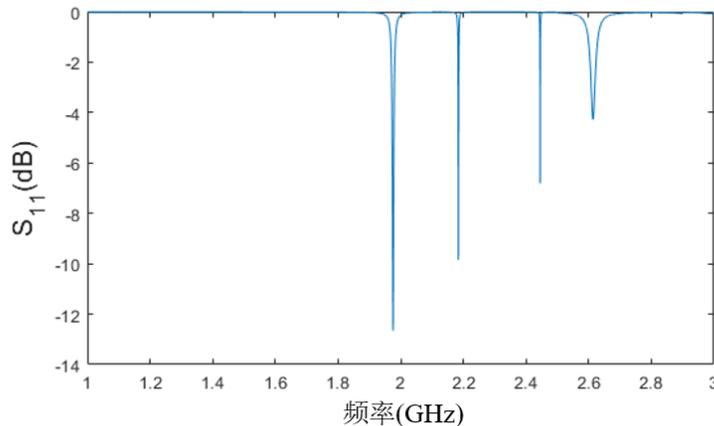


图 4.7 封装层与天线传感器距离较近时的耦合谐振峰

图 4.7 展示了当贴片天线传感器与屏蔽材料的封装层距离为 5mm 时，由于耦合作用而产生的谐振峰。这两个耦合谐振峰会随着天线上部预留空气层的增加而减弱。当贴片天线传感器上部预留空气层达到约 10 mm 时，耦合的谐振峰消失，贴片天线传感器仅具有天线长度方向与宽度方向谐振模式的谐振峰。因此，

在实际使用中采用屏蔽材料对贴片天线传感器进行封装时，一般应保证天线传感器的上部有 10 mm 的预留空气层。具体的封装尺寸将在后续通过试验对其进行进一步确定。

4.3.2 基于非屏蔽材料封装的天线传感器仿真

与 4.3.1 中屏蔽材料封装贴片天线传感器的仿真模拟设置相对应，当天线传感器改为非屏蔽材料（亚克力等电导率为零的材料）进行封装时，频率仍然设置为天线传感器在宽度方向一阶谐振时的频率 1.95GHz，在竖直方向平面上天线传感器及其周围的电场示意图如图 4.8 所示。可以看出，天线传感器产生的电场会穿过封装材料，进而影响到封装层的外部空间。如果封装层外部空间为混凝土等埋置环境时，其在温度和含水率变化情况下会发生介电常数的变化，进而影响电磁波的传播路径，并改变天线传感器的谐振频率等电磁特征参数。天线传感器谐振频率的偏移量与外部环境介电常数的变化量及天线传感器与外部环境的距离等相关。以下将通过仿真模拟来研究采用非屏蔽材料封装时天线谐振频率的偏移特性。

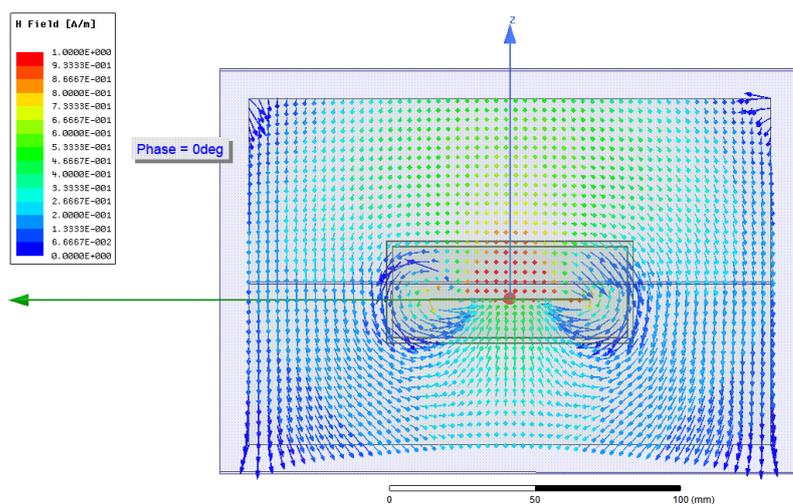


图 4.8 非屏蔽材料封装的天线传感器电场示意图（1.95GHz）

在非屏蔽材料封装后的贴片天线传感器外部设置一个介电常数变化的介质块，如图 4.9 所示，以探究封装后的贴片天线传感器在外部环境介电常数变化时的谐振频率偏移情况。将封装外壳的材料设置为电导率为零的非屏蔽材料亚克力，在贴片天线传感器上部和封装层之间预留一定厚度的空气层。将封装外壳上部的电介质块相对介电常数设置为从 1 到 10 变化，变化步长为 3。图 4.10-4.12 选取不同空气层厚度和不同上覆介质介电常数情况下贴片天线传感器在宽度方向上的一阶谐振频率进行了展示。

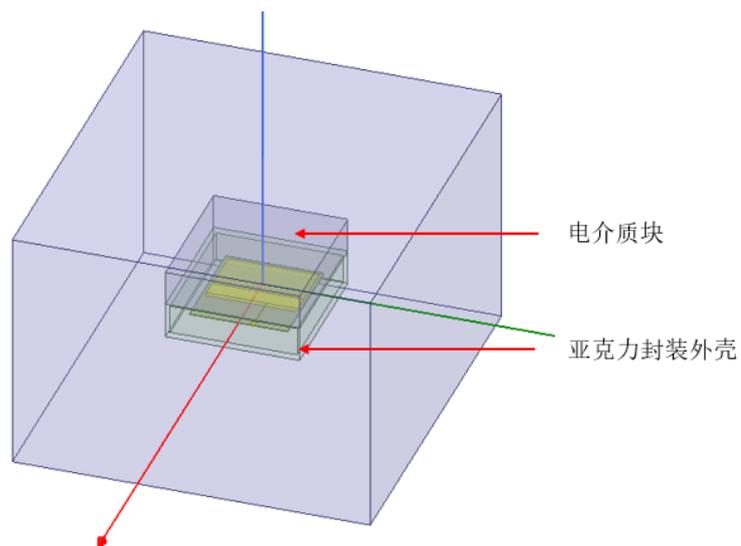


图 4.9 非屏蔽材料封装的天线传感器上覆介质块介电常数变化仿真

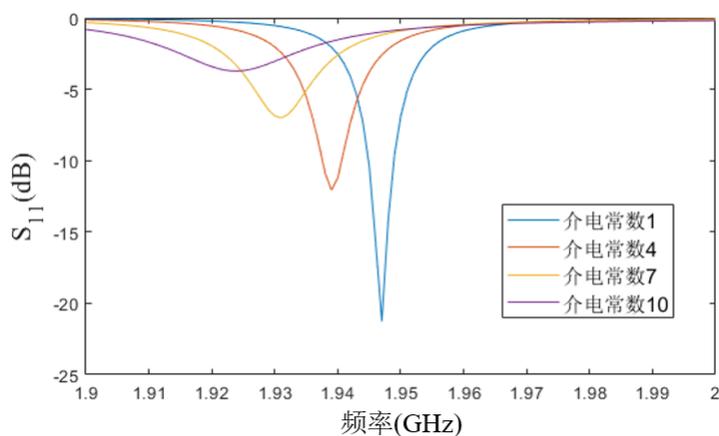


图 4.10 贴片天线宽度方向谐振频率随上覆介质块介电常数变化（空气层 2 mm）

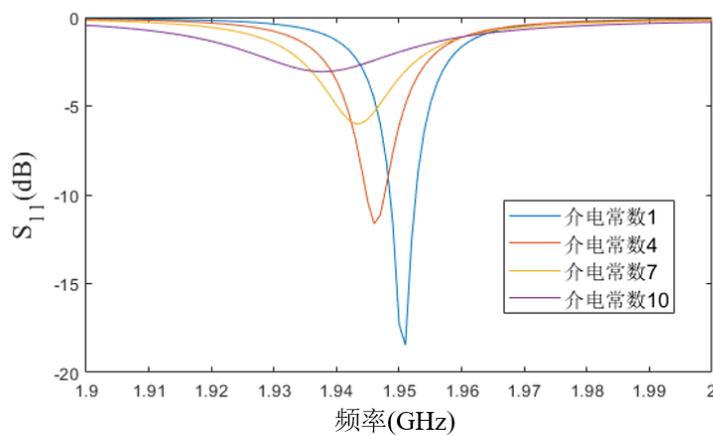


图 4.11 贴片天线宽度方向谐振频率随上覆介质块介电常数变化（空气层 5 mm）

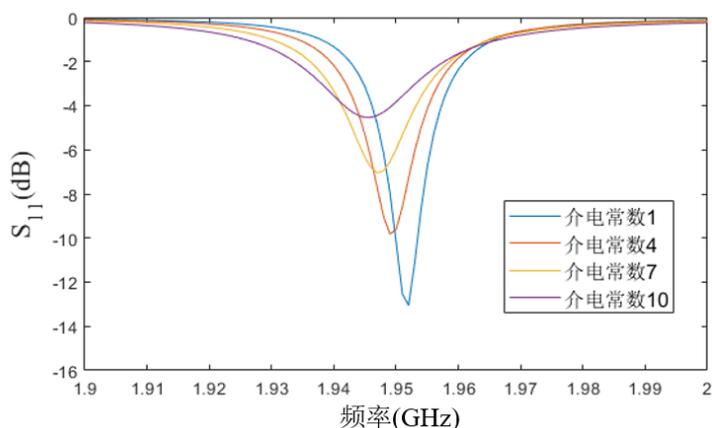


图 4.12 贴片天线宽度方向谐振频率随上覆介质块介电常数变化（空气层 10 mm）

由 4.10-4.12 仿真结果可知,采用非屏蔽材料对贴片天线传感器进行封装时,封装层外部环境介电常数的变化会对封装层内贴片天线传感器的谐振频率产生影响。随着上覆介质介电常数的增加,封装层内部天线传感器的谐振频率减小,谐振峰会向左偏移。然而,谐振频率的偏移量与介电常数并不是简单的线性关系,而是与外部电介质环境与贴片天线四周及上部和下部的距离、介电常数改变量等综合因素相关。当天线传感器上部预留空气层厚度增大时,外部电介质变化对天线传感器的谐振频率影响变小;当天线传感器上部预留空气层厚度减小时,外部电介质变化对天线传感器的谐振频率影响减小。本节仅对非屏蔽材料封装的贴片天线传感器用于外部环境感知的可行性及其谐振频率变化规律进行了初步探究和定性分析,并未对其进行定量分析。在后续非屏蔽材料对天线传感器进行封装的试验中,也仅验证了外部环境介电常数改变时贴片天线传感器谐振频率偏移情况,并将试验结果与仿真结果进行了对比。

4.3 贴片天线传感器封装与外部介电环境变化试验

为了验证采用屏蔽材料与非屏蔽材料两种技术路线对贴片天线传感器进行封装的实际效果,在本节中,设计了一系列实验,分别采用碳纤维、铜、亚克力、聚乙烯等作为封装材料,以验证屏蔽材料封装天线传感器可以避免外部环境介电常数变化影响,以及采用非屏蔽材料封装天线传感器可以实现对外部环境感知可行性。以下将对试验设计进行具体介绍。

4.3.1 屏蔽材料封装的天线传感器避免外部介电环境干扰试验

首先,探究了采用屏蔽材料对天线传感器进行封装时,封装层与天线传感器之间距离对天线传感器的谐振频率的影响。试验设置如图 4.13 所示。贴片天线

传感器被放置在矩形封装材料中,并通过同轴线缆与 Nano VNA 相连。Nano VNA 与电脑端信号采集软件相连,以采集贴片天线传感器的回波损耗曲线 S_{11} , 并对其进行分析从而获得贴片天线传感器的谐振频率信息。在贴片天线传感器的下部,通过不同厚度的亚克力块作为垫片,以调整其上部与封装层的距离。

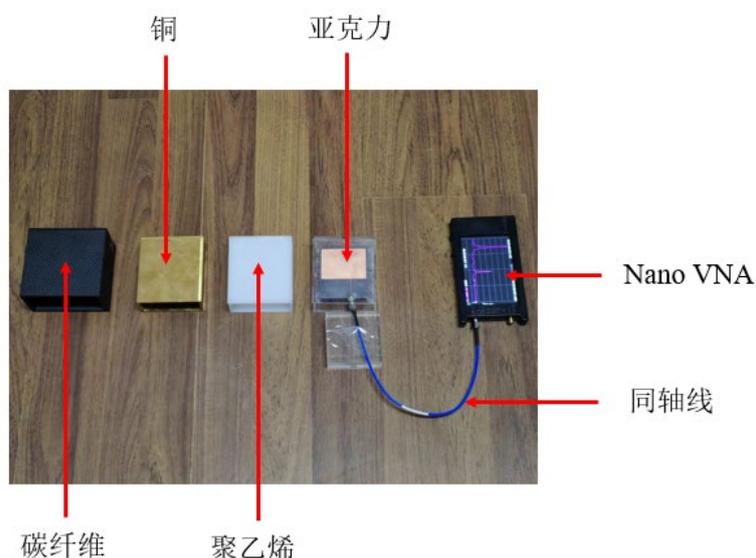


图 4.13 贴片天线传感器封装材料试验测试

将 Nano VNA 的扫频范围设置为 1GHz 到 3GHz, 扫频点数设置为 1010。当采用碳纤维作为封装材料,在无封装情况下及封装层与贴片天线传感器距离分别为 5 mm 和 10 mm 时,其回波损耗曲线 S_{11} 如图 4.14 所示。

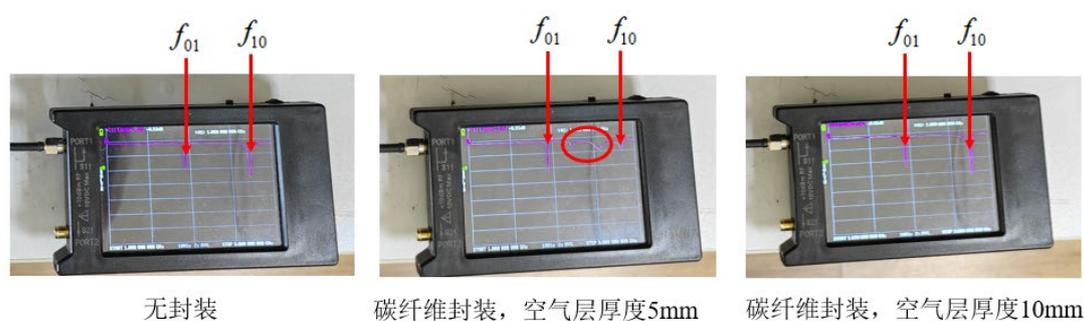


图 4.14 不同空气层厚度下的贴片天线传感器 S_{11} 曲线

由图可知,当天线传感器未进行封装时,其 S_{11} 曲线在扫频范围内仅有宽度方向一阶谐振频率与长度方向一阶谐振频率两个谐振峰。当采用屏蔽材料碳纤维进行封装,贴片天线传感器与封装层间距较小时,会由于天线与封装层腔体的耦合作用产生额外的耦合谐振峰,如图 4.14 中第二幅图所示。在预留空气层厚度为 5 mm 时,额外的耦合谐振峰仍较为明显。继续增加预留空气层的厚度,耦合谐振峰的幅度逐渐减小。当贴片天线传感器与封装层的距离为 10 mm 时,耦合谐振

峰几乎消失不见。这与仿真模拟中的结果较为一致。因此，在采用碳纤维和铜等屏蔽材料对贴片天线传感器进行封装时，一般应使贴片天线传感器与封装层隔开 10 mm 距离，以防止贴片天线与封装层发生耦合对贴片天线的谐振频率产生干扰。

为了验证屏蔽材料封装的贴片天线传感器可以避免外部介质介电常数变化的干扰，在封装层上部放置了一块矩形立方体海绵，通过改变海绵的含水率以改变其介电常数。水的相对介电常数约为 81，远高于空气。海绵本身介电常数与空气十分接近，当其含水率增加时，整体介质的相对介电常数会相应增加。其具体含水率与相对介电常数可由下式计算：

$$K^{\alpha} = f_1 K_w^{\alpha} + f_2 K_s^{\alpha} + f_3 K_a^{\alpha} \quad (4.2)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (4.3)$$

其中， K 为含水海绵的相对介电常数， K_w 为水的相对介电常数，取值为 81， K_s 为海绵的相对介电常数，其取值为 1， K_a 为空气的相对介电常数，其取值也为 1。 f_1 、 f_2 和 f_3 分别为几种材料的体积系数，其中，水的体积系数即为该海绵的含水率。 α 为基于试验获得的经验系数，取值为 0.5。根据计算公式，海绵的相对介电常数与海绵的体积含水率之间的关系如图 4.15 所示。因此，通过改变海绵的含水率，可以改变海绵的相对介电常数，进而在试验中模拟介电常数变化的外环境。

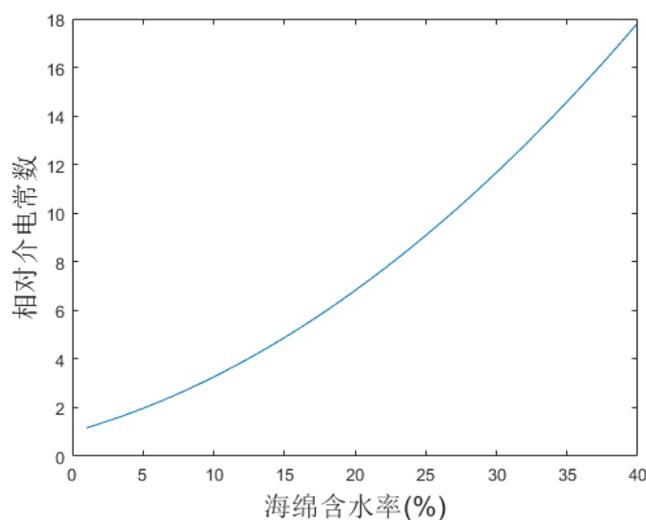


图 4.15 海绵的相对介电常数与海绵的体积含水率关系

通过试验探究了海绵含水率不同时屏蔽材料封装的贴片天线传感器谐振频率。图 4.16 和图 4.17 为采用铜进行封装，预留空气层厚度为 10 mm 时，在上覆

海绵含水率改变时贴片天线传感器在宽度单向和长度方向的谐振频率情况。上覆海绵 1 为完全干燥的海绵，其相对介电常数约为 1。上覆海绵 2 为体积含水率 10% 的海绵，其相对介电常数约为 4。上覆海绵 3 为体积含水率 25% 的海绵，其相对介电常数约为 9。由图可知，在采用屏蔽材料铜对天线传感器进行封装时，天线传感器的谐振频率几乎不受到封装层外部环境相对介电常数变化的影响。

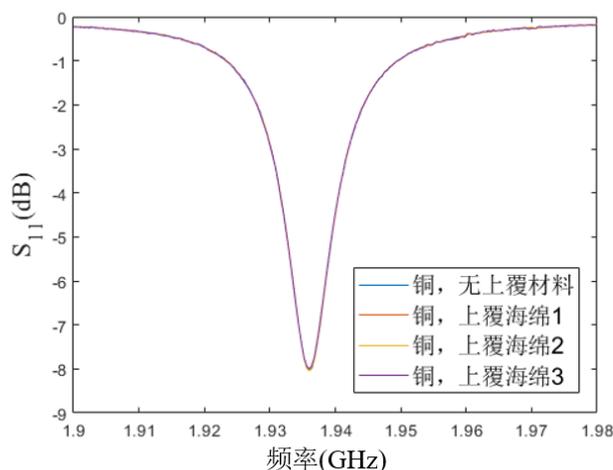


图 4.16 天线传感器宽度方向谐振频率与上覆介质关系（铜封装，空气层 10 mm）

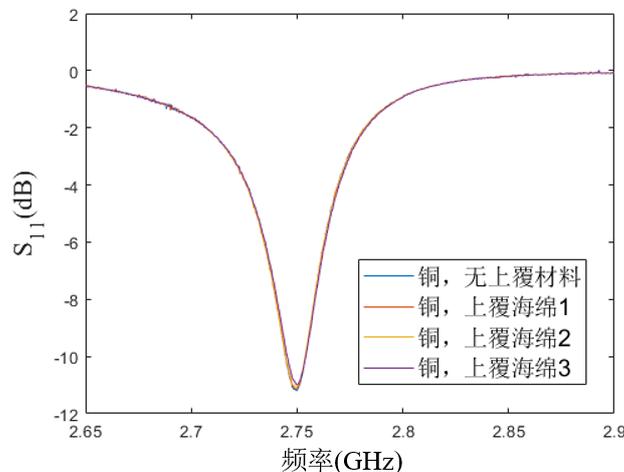


图 4.17 天线传感器长度方向谐振频率与上覆介质关系（铜封装，空气层 10 mm）

当采用碳纤维材料进行封装时，试验结果如图 4.18 和 4.19 所示，天线传感器的谐振频率与采用铜作为封装材料时呈现出了相似的规律，均未受到封装层外部电介质环境的影响而发生偏移。试验结果与仿真模拟也十分一致，均证实了外界环境介电常数发生变化时屏蔽封装层内部贴片天线谐振频率保持不变。因此，采用屏蔽材料封装时的天线传感器可以有效避免外界环境的干扰，从而使天线传感器谐振频率的偏移专注于结构变形等监测变量的表征。

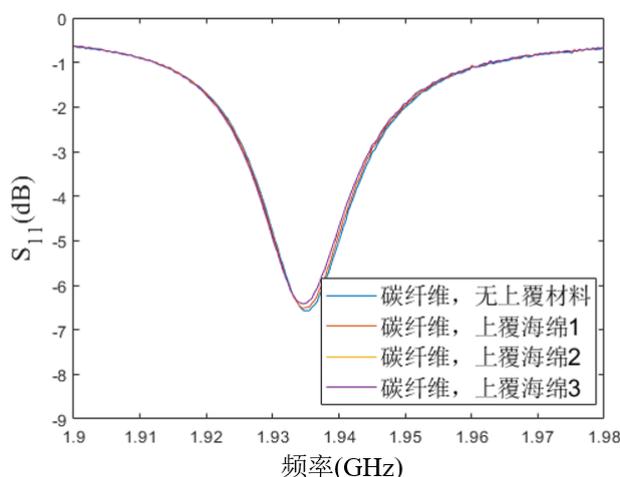


图 4.18 天线传感器宽度方向谐振频率与上覆介质关系（碳纤维封装，空气层 10 mm）

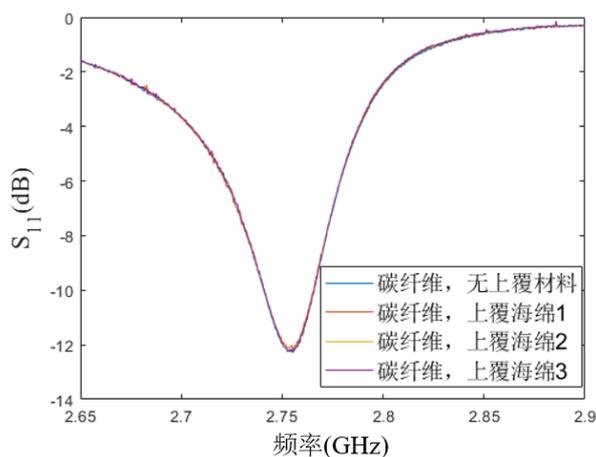


图 4.19 天线传感器长度方向谐振频率与上覆介质关系（碳纤维封装，空气层 10 mm）

4.3.2 非屏蔽材料封装的天线传感器用于外部介电环境感知试验

在采用非屏蔽材料（亚克力，聚乙烯等）对贴片天线传感器进行封装试验探究时，试验设置如图 4.20 和 4.21 所示。通过带刻度的喷雾瓶向海绵均匀喷水，并根据海绵体积和喷水容积计算出海绵块的含水率，进一步根据公式 4.2 和 4.3 计算出海绵块的相对介电常数值。封装层内的贴片天线传感器与 Nano VNA 通过同轴线相连，并将 Nano VNA 连接至电脑端信号采集软件。



图 4.20 非屏蔽材料封装天线传感器试验测试

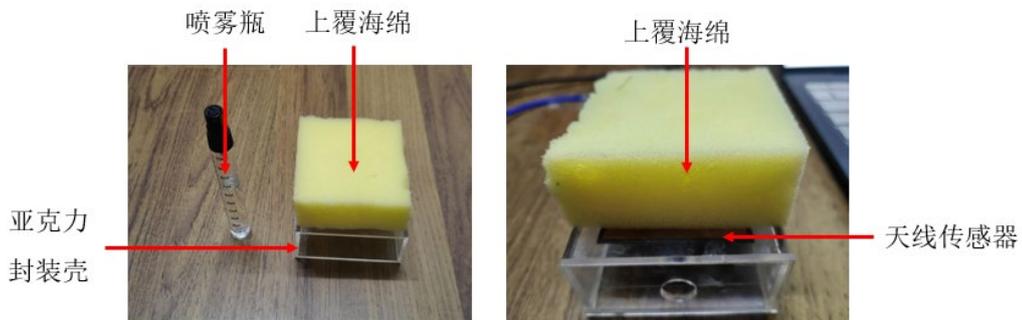


图 4.21 天线传感器封装材料与上覆介质

图 4.22 展示了采用亚克力作为封装材料，当贴片天线传感器上部预留空气层厚度为 5 mm 时，在上覆海绵含水率不同时贴片天线传感器的谐振频率情况。由试验结果可知，在采用亚克力作为封装材料时，封装层以外的环境介电常数改变仍会影响封装层内部的贴片天线谐振频率。其中，在封装层外部无上覆海绵情况和上覆干燥海绵情况，天线传感器的谐振频率几乎没有偏移，这是因为干燥海绵的相对介电常数十分接近空气。通过带刻度的喷雾瓶可以精确控制喷洒到海绵立方体块上的水的容积，并根据海绵立方体块的长宽高尺寸计算出其含水率。在上覆海绵的含水率分别变为 10%和 25%时，封装层内贴片天线传感器的谐振峰发生向左偏移。这与仿真模拟中天线上覆介质块介电常数增加时贴片天线传感器谐振频率左偏的结果趋势一致。因此，采用亚克力等非屏蔽材料作为天线的封装层，当封装层外部环境介电常数增加时，天线传感器的谐振频率会变小，天线谐振峰向左移动。

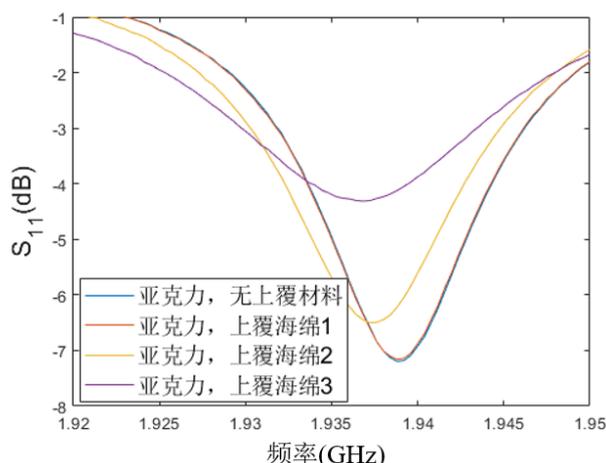


图 4.22 贴片天线谐振频率随上覆介质块含水率变化（亚克力封装，空气层 5 mm）

图 4.23 展示了贴片天线传感器上部预留空气层厚度为 10 mm 时，在上覆海绵含水率不同时贴片天线传感器的谐振频率情况。由试验结果可知，封装层无上覆材料与上覆干燥海绵时贴片天线传感器的 S_{11} 曲线几乎完全重合，表面贴片天线传感器的谐振频率几乎未发生改变。在上覆海绵的含水率逐渐增加的过程中，贴片天线传感器的谐振峰逐渐向左偏移，但是偏移幅度相比预留空气层为 5 mm 时有所减小，谐振频率偏移由空气层 5 mm 时的 2.7 MHz 变为空气层 10 mm 时的 1.1 MHz。这也与仿真模拟中的结论类似，即天线传感器外部环境介电常数变化对天线传感器谐振频率的影响与多种因素综合相关。当预留空气层厚度增加时，天线外部环境介电常数的改变对其谐振频率的影响减小。

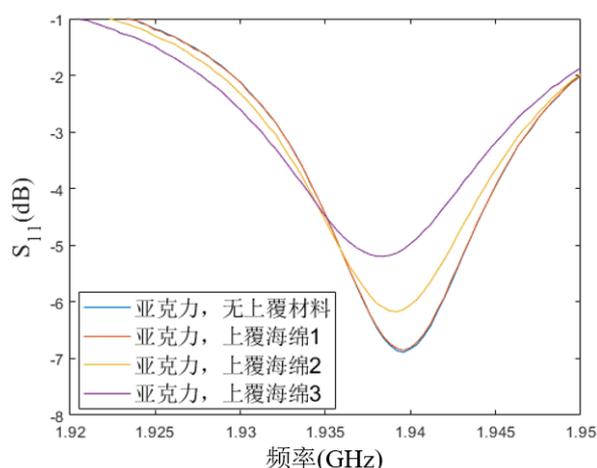


图 4.23 贴片天线谐振频率随上覆介质块含水率变化（亚克力封装，空气层 10 mm）

聚乙烯也是一种常用的传感器封装材料，可以有效防水并且能耐大多数酸碱的侵蚀，适用于混凝土埋置的环境中对传感器进行封装。聚乙烯同样也是一种非屏蔽材料，具有良好的电绝缘性。采用聚乙烯塑料作为封装材料时，在预留空气

层分别为 3 mm 和 10 mm 时，封装层内部天线传感器的谐振频率情况如图 4.24 和 4.25 所示。

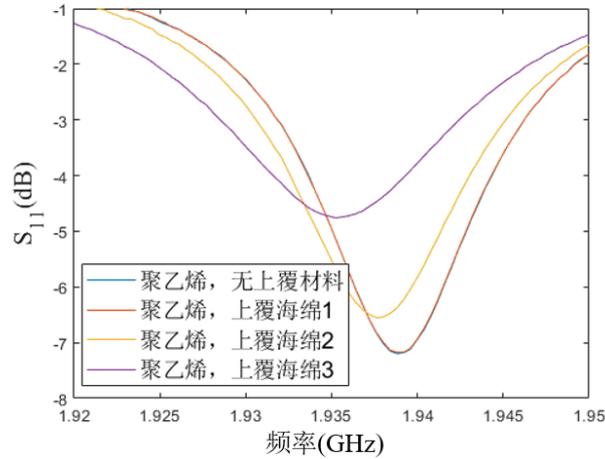


图 4.24 贴片天线谐振频率随上覆介质块含水率变化（聚乙烯封装，空气层 3 mm）

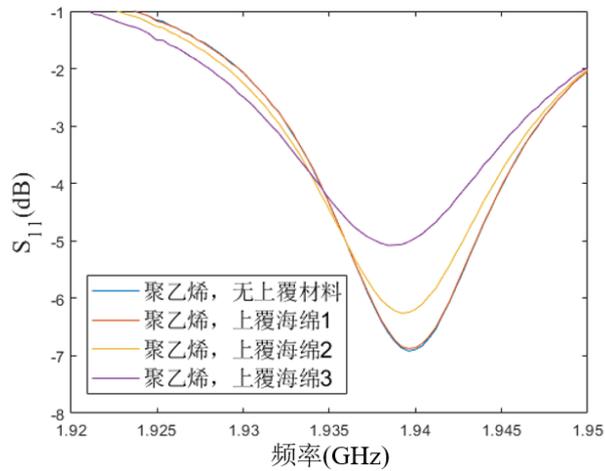


图 4.25 贴片天线谐振频率随上覆介质块含水率变化（聚乙烯封装，空气层 10 mm）

采用非屏蔽材料聚乙烯对天线传感器进行封装时，封装层外部电介质的变化对贴片天线传感器谐振频率的影响规律与前文相似。在上覆海绵的含水率逐渐增加的过程中，天线传感器的谐振峰也逐渐向左偏移，并且偏移程度与海绵含水率和预留空气层厚度等因素均相关。当上部预留空气层厚度设置为 10 mm 时，天线传感器宽度方向一阶谐振频率在上覆海绵含水率从 0 变为 10% 和 25% 的过程中，分别向左发生了 0.4 MHz 与 1.05 MHz 的偏移。与之相对应的，在采用亚克力作为封装材料且上部预留空气层厚度设置为 10 mm 时，天线传感器宽度方向一阶谐振频率在上覆海绵含水率从 0 变为 10% 和 25% 的过程中，分别向左发生了 0.45 MHz 和 1.1 MHz 的偏移，偏移方向与幅度基本一致。因此，采用非屏蔽

材料进行封装时,贴片天线传感器的谐振频率偏移可以对封装层外电介质相对介电常数的变化进行感知,进而实现对外部介质含水率等参数的表征。针对不同的监测需要,可对封装层内预留空气层的厚度、外部变化电介质的尺寸范围等参数进行优化,并将外部介质环境变化如含水率等引起的电介质相对介电常数变化进行标定,从而实现贴片天线传感器对外部环境变化的定量感知。

4.4 本章小结

本章主要探究了贴片天线传感器的封装问题,通过对屏蔽材料和非屏蔽材料封装传感器两种技术路线的特点进行探究,形成了用于两种不同监测场景的天线传感器封装方法。采用屏蔽材料对天线传感器进行封装时,可以避免封装层外电介质变化对封装层内天线传感器的影响,使天线传感器专注于对结构变形等监测变量的感知。在采用非屏蔽材料对天线传感器进行封装时,贴片天线传感器的电磁场可以抵达封装材料外部,因而可以实现对外部电介质变化的感知。具体包括:

(1) 介绍了屏蔽材料与非屏蔽材料对天线进行封装的技术路线,包括封装材料对天线电磁特征参数的影响,封装层外部电介质变化对天线传感器电磁特征参数的影响,以及两种不同的封装技术路线的适用场景等,这是天线传感器封装研究的理论部分。

(2) 进行了仿真模拟,以探究采用屏蔽材料和非屏蔽材料进行封装时封装材料本身和外部环境变化对贴片天线传感器电磁特征参数的影响,并探究了封装层内部空气层厚度等参数的影响,进一步说明了两种封装方法的可行性与特点,为后续试验提供了支撑。

(3) 进行了一系列实验,分别采用屏蔽材料碳纤维和铜,非屏蔽材料亚克力和聚乙烯等作为封装材料,验证了屏蔽材料封装天线传感器可以有效避免外部环境介电常数变化的干扰,非屏蔽材料封装天线可以实现对外部环境感知。

第 5 章 贴片天线传感器无线问询方式及小型化设计

5.1 引言

贴片天线传感器本身具有被无线问询的潜力,但是当前的对天线传感器的测试通常仍然采用有线测试的方式进行。为了实现贴片天线传感器的无线问询,本章对组合式贴片天线传感器的无线问询方式进行了探究。针对偏心馈电组合式贴片天线传感器双向谐振的特点,分别采用宽带天线正对贴片天线的问询方式和贴片天线连接宽带天线作为负载两种问询方式实现了对贴片天线谐振频率的无线读取。仿真和试验均取得了较好的结果,验证了所提出的组合式贴片天线无线问询的可行性,为后续智能骨料的无线问询方式提供了思路。

在实际工程中,对应用于结构监测的传感器进行选取时,传感器的尺寸也是一个重要的考虑因素。过大的传感器会造成安装困难,使其在实际工程中的应用受到一定限制。小型化的传感器更易于安装维护,因此具有更高的实用价值。在前文中,所提出的基于偏心馈电组合式贴片天线的传感器已经被证明了有效性,为了进一步拓展其应用范围,本章对贴片天线传感器的小型化进行了探究。根据贴片天线传感器的原理与谐振频率的计算公式,其谐振频率主要与介质层的介电常数和辐射贴片的电长度相关。其中,介质层介电常数越高,同样谐振频率所对应的天线尺寸越小;辐射贴片上的电流路径越长,同样谐振频率所对应的天线尺寸也越小。因此,可以通过增加辐射贴片上的电流路径长度和增加介质层的介电常数两个途径实现贴片天线的小型化。在本章天线传感器的小型化设计方面,选用了一种介电常数更高的电介质基板材料 Rogers RO3010 介质板,对偏心馈电组合式贴片天线传感单元进行设计,优化了贴片天线传感单元的尺寸,从而形成了一种尺寸更小、灵敏度更高的贴片天线传感器,以便对结构变形进行监测或将其进一步封装设计为小型化的智能骨料。

在 5.2 节中,首先介绍了贴片天线传感器小型化设计的思路,并基于理论公式对组合式贴片天线传感器的尺寸进行了设计,在高频电磁仿真软件 HFSS 中进行了一系列模拟以验证该小型化贴片天线传感器的性能。

在 5.3 节中,对组合式贴片天线传感器的无线问询方式进行了探究,分别采用宽带天线正对贴片天线进行无线扫频问询、贴片天线连接宽带天线作为负载无线问询两种方式实现天线传感器谐振频率的无线问询,并在高频电磁仿真软件 HFSS 中进行了仿真模拟以验证问询方法的可行性。

在 5.4 节中,进行了小型化贴片天线传感器有线与无线问询的一系列试验测

试,验证了该小型化贴片天线传感器的高灵敏传感性能,并证明了所提出的无线问询方式的有效性。

5.2 贴片天线传感器小型化设计

5.2.1 理论分析

在第三章中,所提出的基于偏心馈电组合式贴片天线传感器虽然可以用于多参数感知,但是组合式贴片天线的尺寸仍然较大,所设计的传感天线在长度方向和宽度方向的尺寸分别达到了 61mm 和 55mm。较大的传感器尺寸会造成安装的困难以及占用更大的空间,使其在实际应用中受到了一定限制。为了进一步缩小天线尺寸,首先根据组合式贴片天线传感器的谐振频率计算公式对天线传感器的小型化方法进行了探究。组合式贴片天线传感器在长度方向与宽度方向的一阶谐振频率分别可以表示为:

$$f_{100} = \frac{c}{2L_e\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.1)$$

$$f_{010} = \frac{c}{2W_e\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.2)$$

其中, L_e 为该组合式辐射贴片在长度方向的有效电长度,其与下部辐射贴片长度 L_r 、附加子贴片长度 L_s 、以及下部辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度 L_o 有关; W_e 为该组合式辐射贴片在宽度方向的有效电长度; ϵ_r 为天线介质层的相对介电常数。

根据公式可知,组合式贴片天线的谐振频率主要取决于两个因素:辐射贴片在长度和宽度方向上的有效电流路径长度,以及辐射贴片与接地平面之间介质层的等效相对介电常数。在前述基于罗杰斯 RT/duroid 5880 介质板的偏心馈电组合式贴片天线传感器进行设计时,组合式贴片天线传感器在长度方向和宽度方向的一阶谐振频率分别设置为 1.95GHz 和 2.5GHz。这是由于传统的用于天线问询的矢量网络分析仪扫描频率范围通常为 0-3GHz,因此对谐振频率大于 3GHz 的天线进行测试难度较大,且需要更高端设备。

在贴片天线传感器谐振频率保持不变的情况下,为了缩小天线传感器的尺寸,可以有两种方式:一种是通过在辐射表面开槽等方式增加组合式辐射贴片在长度和宽度方向上的有效电长度 L_e 和 W_e ,另一种是增加介质层的有效介电常数 ϵ_r 。在辐射贴片表面开槽有时会导致一些复杂谐振模式的产生,因此,本章采用提高介质层有效介电常数的方式实现贴片天线传感器的小型化。根据公式 5.1 及 5.2,

在贴片天线谐振频率不变的情况下,所设计的贴片天线有效电长度与介质板相对介电常数的关系可以表示为:

$$\frac{L_{e3010}}{L_{e5880}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r5880}}}{\sqrt{\varepsilon_{r3010}}} \quad (5.3)$$

$$\frac{W_{e3010}}{W_{e5880}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r5880}}}{\sqrt{\varepsilon_{r3010}}} \quad (5.4)$$

因此,采用更高相对介电常数的介质板可以减小所需的贴片辐射尺寸,从而实现天线传感器的小型化。经过对比分析,本章所设计的传感器采用的介质板选取为介电常数为 10.2 的 Rogers RO3010 介质板,该介质板比前述 RT/duroid 5880 介质板 2.2 的相对介电常数有显著提高。根据公式 5.3 和 5.4,该组合式贴片天线长度和宽度方向的辐射贴片尺寸可以减小为之前的 46.4%。在增加微带馈电线及偏心馈电点后,该组合式贴片天线最终设计的尺寸如图 5.1 所示,其在长度方向和宽度方向的整体尺寸分为 40mm 和 28mm。而在前述基于 RT/duroid 5880 介质板的偏心馈电组合式贴片天线传感器在长度方向和宽度方向的整体尺寸分别为 61mm 和 55mm,该小型化贴片天线传感器的面积减小为之前的 33.4%。

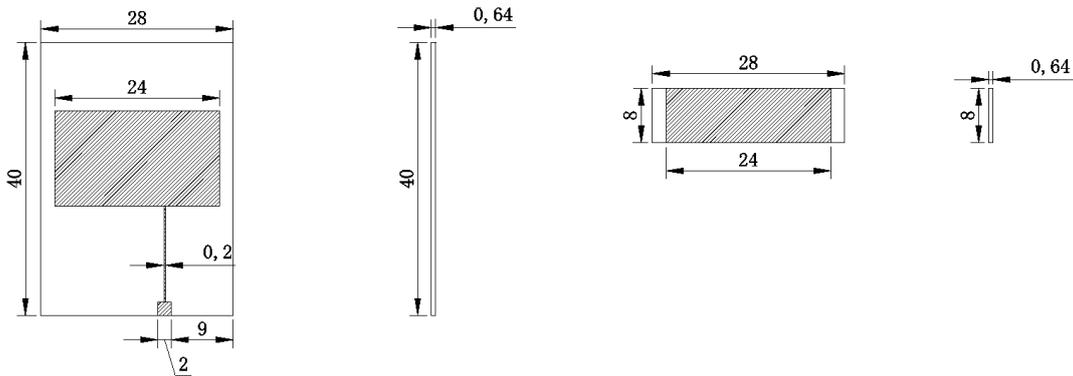


图 5.1 采用 3010 介质板的组合式贴片天线传感器尺寸

对于该小型化的组合式贴片天线传感器,除了贴片天线的尺寸有了显著减小,该贴片天线传感器的灵敏度也会有显著提高。该组合式贴片天线传感器用于结构变形(裂缝宽度变化)传感的灵敏度可以由公式 5.5 计算:

$$k = \frac{\Delta f_{100}}{\Delta L_o} = \frac{\frac{c}{2(L_r + L_s - L_o - \Delta L_o)}\sqrt{\varepsilon_r} - \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o)}\sqrt{\varepsilon_r}}{\Delta L_o} \approx \frac{c}{2(L_r + L_s - L_o)^2\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5.5)$$

因此,随着该传感器尺寸的缩小及介质板介电常数的提高,该小型化贴片天线传感器的传感灵敏度也会有显著提高。根据理论公式计算,图 5.2 显示了当结构形变(裂缝宽度)从 0 到 3mm 变化时引起的该小型化组合式贴片天线长度方向

一阶谐振频率偏移:

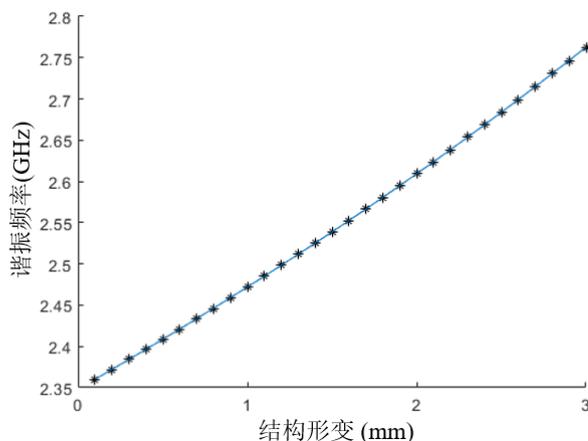


图 5.2 小型化贴片天线传感器长度方向谐振频率偏移与结构形变关系

根据理论计算,该小型化的贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率与结构形变之间有近似线性的关系。当下部辐射贴片与附加子贴片的重叠长度设置为 4mm 时,该传感器用于结构变形传感的长度方向一阶谐振频率灵敏度为 145.7 MHz/mm,远高于采用 RT/duroid 5880 作为介质板材料的组合式贴片天线传感器。因此,该基于 RO3010 介质板的组合式贴片天线传感器既可以实现天线传感器的小型化,同时该小型化的天线设计也使传感器具有更高的传感灵敏度,因此更适用于实际工程。

5.2.2 仿真模拟

为了验证该小型化组合式贴片天线传感器的传感性能,在高频电磁仿真软件 HFSS 中对该传感器进行了仿真模拟,并通过一系列仿真来验证该组合式贴片天线传感器的高灵敏传感性能。该基于 RO3010 介质板的小型化贴片天线传感器在 HFSS 中的模型如图 5.3 所示。

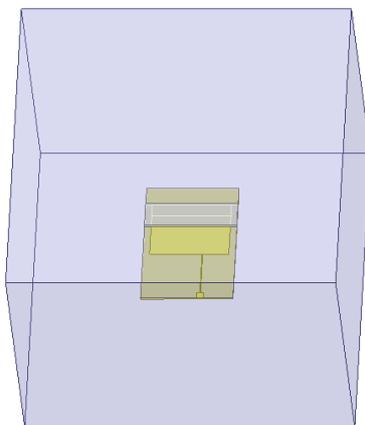


图 5.3 基于 RO3010 介质板的小型化贴片天线在 HFSS 中的模型

在该模型中，天线传感器的基板材料设置为介电常数为 10.2 的 RO3010 介质板，辐射贴片、微带馈电线及接地平面的材料均设置为铜，天线被放置于一个边界设置为辐射吸收边界的空气盒子中。该小型化的偏心馈电组合式贴片天线采用集总端口进行激励。在仿真模拟中，天线的扫描类型设置为插值扫频，扫频点数设置为 4001，扫频范围设置为 1GHz 到 3GHz。首先对偏心馈电点的位置选取进行了一系列仿真优化，优化过程与第三章类似，最终确定对于该传感器最优的偏心距离为 4mm，以较好地激发该小型化偏心馈电组合式贴片天线在长度方向和宽度方向两个方向上的谐振模式。

将下部辐射贴片与附加子贴片的初始重叠长度设置为 2mm，然后逐渐增加移动附加子贴片，使其与下部辐射贴片的重叠长度变为 6mm，单次移动的步长为 0.5mm，以模拟外界结构形变或裂缝宽度变化导致的组合式贴片天线组件相对位置变化。该设置可以模拟结构产生 0-4mm 的变形或裂缝宽度变化。

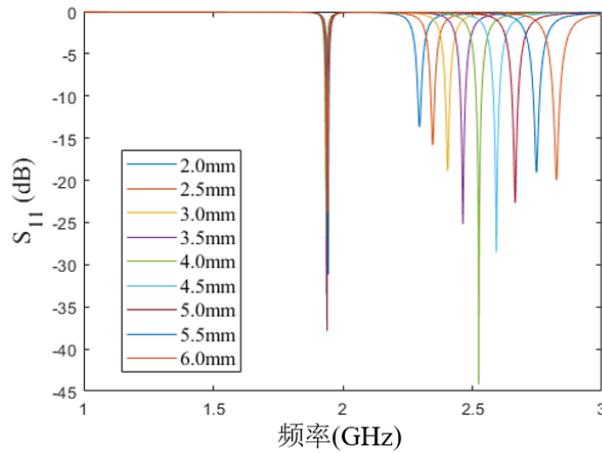


图 5.4 不同子贴片重叠长度所对应的组合式贴片天线 S_{11} 曲线

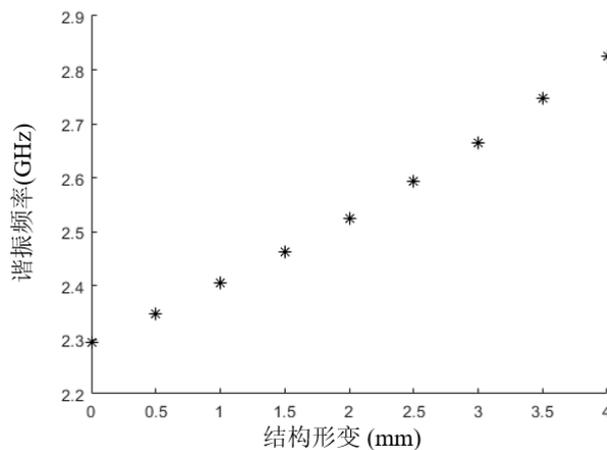


图 5.5 不同结构形变所对应的组合式贴片天线长度方向谐振频率

图 5.4 展示不同子贴片重叠长度所对应的组合式贴片天线的 S_{11} 曲线，图 5.5 展示了天线在长度方向上的一阶谐振频率随着子贴片重叠长度变化的情况。由图可知，该基于 RO3010 介质板的小型化贴片天线传感器在长度方向和宽度方向两个方向的谐振模式都被较好地激发。随着子贴片的移动，该组合式贴片天线下部辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度发生变化，天线在长度方向上的一阶谐振频率也随之发生变化，而宽度方向上的一阶谐振频率几乎保持不变。因此，该组合式贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率的偏移可用于表征天线组件的相对移动量，进而实现对结构变形或裂缝等监测变量的传感。

为了验证该基于 RO3010 介质板的小型化贴片天线传感器用于微小结构变形或裂缝传感的可行性，将附加子贴片与下部贴片天线之间的重叠长度设置为从 4mm 至 5mm 变化，并将变化步长进一步设置为 0.02mm。图 5.6 展示了子贴片重叠长度为 4mm-5mm 时，不同重叠长度所对应的组合式贴片天线的 S_{11} 曲线。可以看出，随着贴片天线下部辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度发生变化，天线在长度方向上的一阶谐振频率也随之发生偏移。

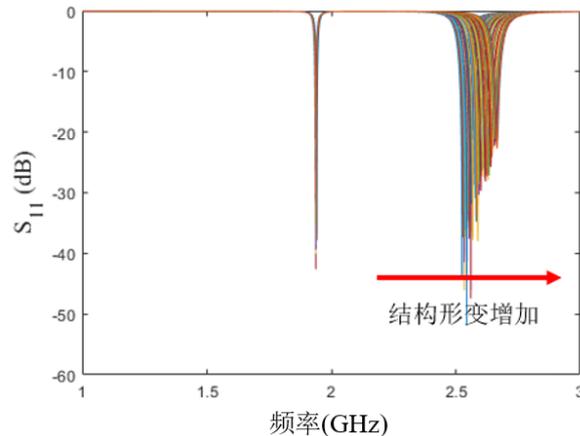


图 5.6 不同子贴片重叠长度（4-5mm）所对应的组合式贴片天线 S_{11} 曲线

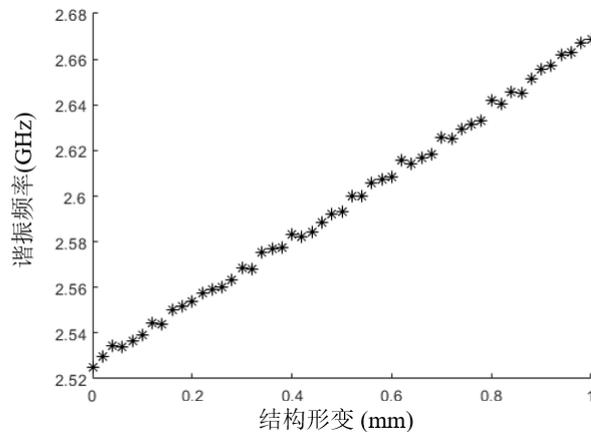


图 5.7 不同结构形变所对应的组合式贴片天线长度方向谐振频率

将该组合式贴片天线长度方向上的一阶谐振频率提取出来,其与结构形变之间的对应关系如图 5.7 所示。由图可知,随着结构发生变形,该贴片天线下部辐射贴片和附加子贴片之间的重叠长度发生变化,并进而导致天线长度方向谐振频率的改变。天线在长度方向上的一阶谐振频率与结构形变之间具有良好的线性关系,并且在变化步长为 0.02mm 的情况下仍具有良好的线性对应,证明了该组合式传感器可以感知微小的结构形变。在传感灵敏度方面,将天线长度方向一阶谐振频率随结构形变的偏移进行线性拟合,可得该传感器用于结构变形传感的灵敏度为 142.1 MHz/mm,这也远高于采用 RT/duroid 5880 作为介质板材料的组合式贴片天线传感器的仿真结果,证明了该小型化贴片天线传感器设计的可行性。

5.3 贴片天线无线问询方式探究

5.3.1 宽带天线正对贴片天线无线问询

天线传感器的一大优势是其可以将传感单元和信号传输单元合二为一,从而使其兼具传感与通信的双重功能。在前面的研究中,已经对基于天线的传感单元进行了诸多研究,但是大部分对天线传感单元的测试仍采用有线的方式进行。在本节中,主要对无线问询方法进行了探究,以实现天线传感器无源无线传感的功能。

采用宽带天线对贴片天线进行无线扫频,可以实现对传感天线谐振频率的无线问询。其原理为:采用在目标频带范围内增益较好的宽带天线作为问询天线,将其与矢量网络分析仪等相连,组成无线问询系统。矢量网络分析仪发出的扫频问询信号会经宽带天线以电磁波的形式在空间发出,放置于宽带天线正前方的传感天线(微带贴片天线)会在其本身的谐振频率下被激活发生谐振并产生背向散射信号,该信号进而被宽带天线接收。宽带天线的回波损耗曲线 S_{11} 会出现较为明显的谐振峰,此谐振峰即为通过宽带天线无线问询的贴片天线谐振频率。为了验证该方法的可行性,首先在高频电磁仿真软件 HFSS 中进行了仿真模拟,选用了线性极化的圆盘宽带天线作为问询天线对所提出的组合式贴片天线传感器进行了一系列无线问询测试。

首先对圆盘宽带天线进行了设计和优化,以使其在目标频段具有较好的工作性能。宽带天线的介质板材料采用较为常用的 FR4 介质基板,厚度选用 1.6 毫米。优化设计后的圆盘宽带天线如图 5.8 所示,相比传统的圆盘宽带天线,其在宽带天线背部增加了一系列开槽。开槽设计可以使圆盘宽带天线的回波损耗和带宽等产生一定改变,在针对不同的目标频带范围时可以对开槽位置和尺寸进行调整。

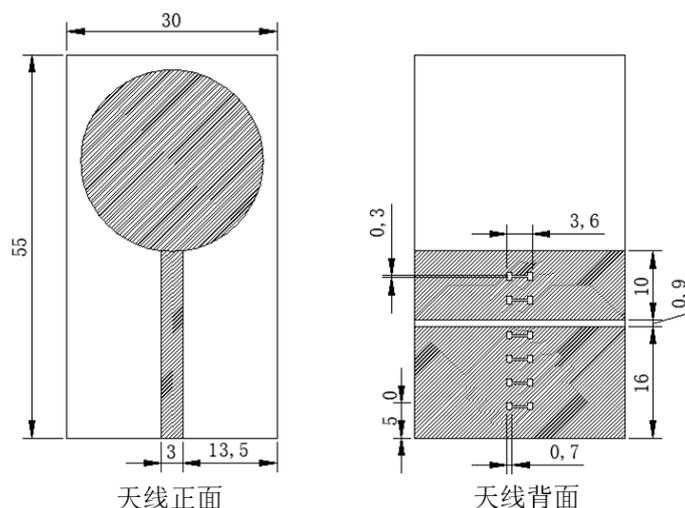


图 5.8 采用 FR4 介质板的圆盘宽带天线

在高频电磁仿真软件 HFSS 中建立的圆盘宽带天线模型如图 5.9 所示。对其进行 1.2 GHz-3.0 GHz 的扫频激励，其回波损耗曲线 S_{11} 如图 5.10 所示。在仿真中，激励方式采用集总端口进行激励，扫频类型设置为插值扫频，扫频点数设置为 3601，扫频间隔为 0.0005GHz。由仿真结果可知，该宽带天线在 1.8 GHz-3.0 GHz 的目标频段范围内回波损耗都低于 -10dB，证明宽带天线在该频段范围内具有良好的信号收发性能。而对于组合式贴片天线传感器，其需要的工作频带主要在集中在宽度方向一阶谐振频率 1.95 GHz 附近以及长度方向一阶谐振频率 2.3GHz-2.9 GHz 附近。因此，该圆盘宽带天线可以较好的用于组合式贴片天线传感器的无线问询。

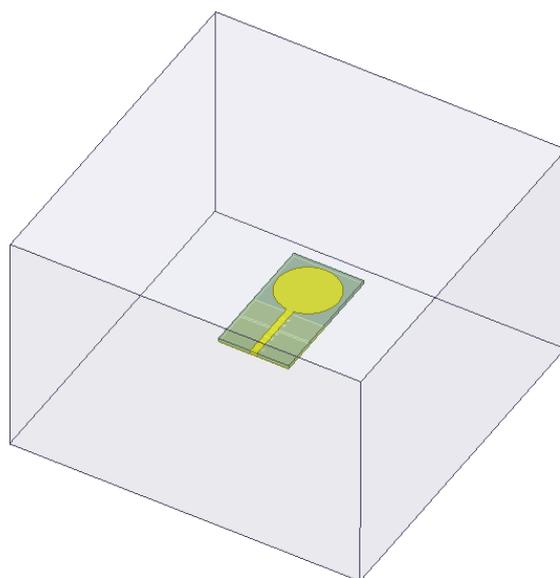


图 5.9 用于无线问询的圆盘宽带天线模型

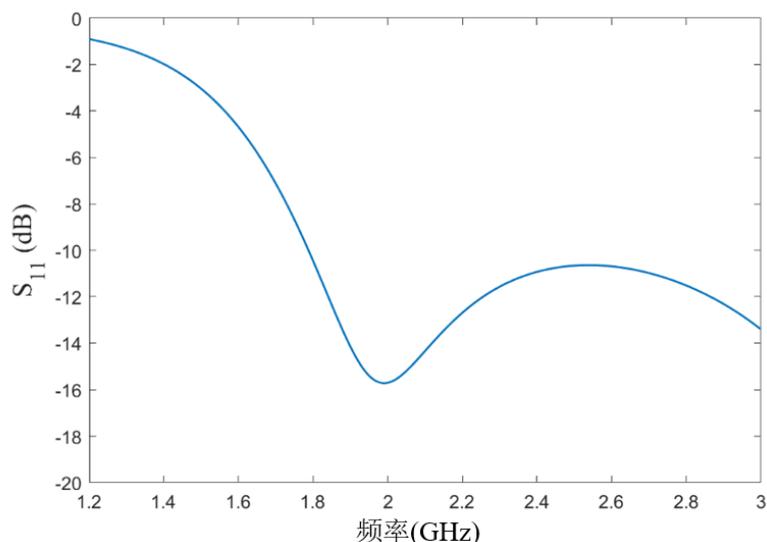


图 5.10 用于无线询问的圆盘宽带天线 S_{11} 曲线

在采用宽带天线正对组合式贴片天线传感器进行无线询问时，在高频电磁仿真软件 HFSS 中建立的模型如图 5.11 所示。将圆盘宽带天线与组合式贴片天线传感器之间的距离设置为 25mm，圆盘宽带天线的馈电方式设置为集中端口馈电，扫频范围设置为 1.2 GHz-3.0 GHz，扫频点数设置为 3601，扫频间隔为 0.0005GHz，以模拟矢量网络分析仪与宽带天线组成的无线询问系统。组合式贴片天线传感器附加子贴片与下部贴片天线之间的重叠长度设置为从 2mm 至 4mm 变化，变化步长设置为 0.2mm。图 5.12 展示了组合式贴片天线重叠长度发生变化时圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线。

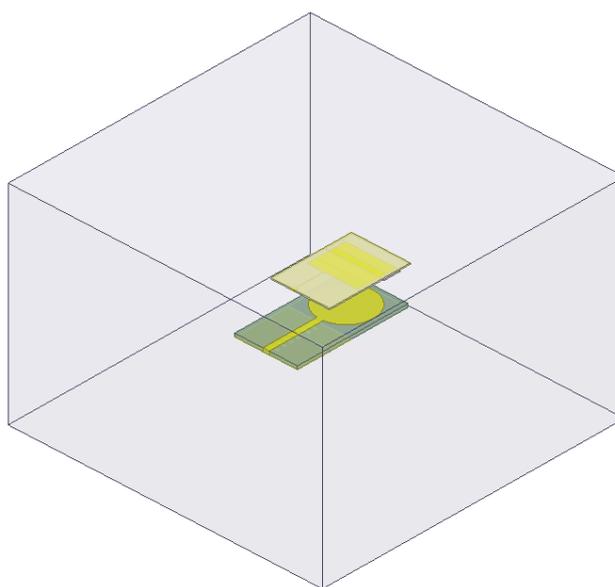
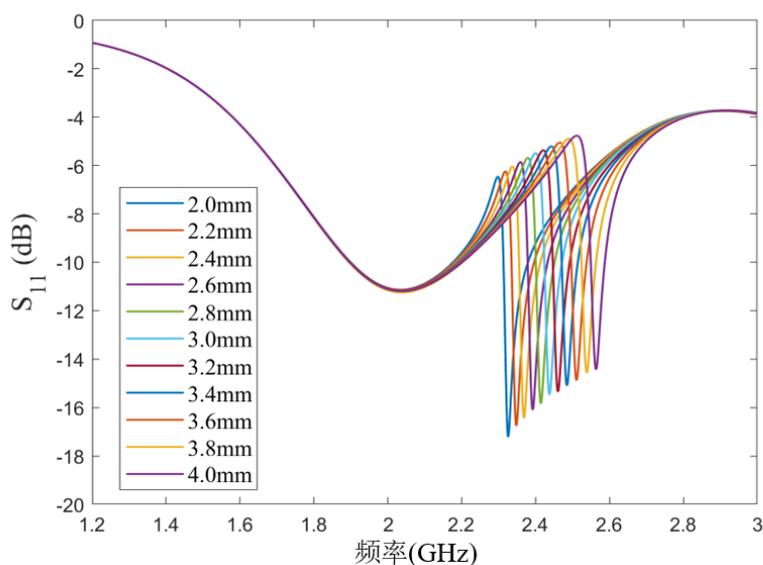


图 5.11 圆盘宽带天线正对组合式贴片天线传感器无线询问

图 5.12 组合式贴片天线重叠长度发生变化时圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线

当采用宽带天线正对组合式贴片天线传感器进行无线问询时,组合式贴片天线的谐振模式激发与宽带天线放置方向相关。由于圆盘宽带天线是线性极化的,意味着其仅可以在极化方向上发射扫频电磁波的。如图 5.11 所示的宽带天线放置方式,其极化方向与组合式贴片天线传感器长度方向相同,组合式贴片天线长度方向的谐振模式被激发,而贴片天线宽度方向的谐振模式没有被激发。因此,圆盘宽带天线的 S_{11} 回波损耗曲线仅在组合式贴片天线长度方向谐振频率附近出现较为明显的回波损耗峰值,如图 5.12 所示。随着组合式贴片天线重叠长度发生变化,圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线在 2.3GHz 到 2.6GHz 范围内能看到较为明显的回波损耗峰值偏移。

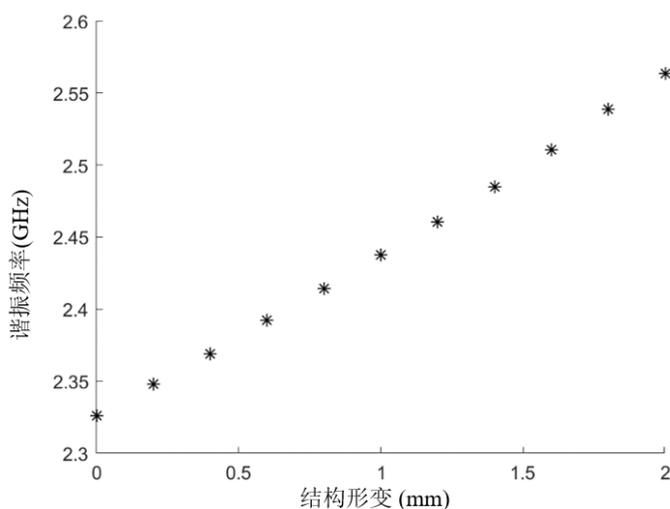


图 5.13 宽带天线无线测得的组合式贴片天线传感器谐振频率

将圆盘宽带天线测得的组合式贴片天线长度方向上的一阶谐振频率提取出来,如图 5.13 所示。可以看出,组合式贴片天线重叠长度与天线长度方向一阶谐振频率之间有较为良好的线性关系。当天线初始重叠长度为 4mm 时,灵敏度约为 131.8 MHz/mm。因此,采用该组合式贴片天线传感器可以通过一阶谐振频率偏移感知结构变形,并进一步通过圆盘宽带天线对其进行无线问询,以实现组合式贴片天线传感器长度方向一阶谐振频率的无线读取。

在采用线极化的圆盘宽带天线对组合式贴片天线宽度方向谐振频率进行无线问询时,需要将组合式贴片天线旋转 90°,使其宽度方向正对圆盘宽带天线的电磁波极化方向。圆盘宽带天线与组合式贴片天线传感器之间的距离设置为 25mm 保持不变,圆盘宽带天线的馈电方式仍设置为集中端口馈电,扫频范围设置为 1.2 GHz-3.0 GHz,扫频点数设置为 3601,扫频间隔为 0.0005GHz。图 5.14 展示了圆盘宽带天线正对组合式贴片天线传感器宽度方向无线问询的示意图,图 5.15 展示了组合式贴片天线重叠长度发生变化时圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线。由图可知,圆盘宽带天线的 S_{11} 回波损耗曲线仅在组合式贴片天线宽度方向谐振频率附近出现较为明显的回波损耗峰值,即组合式贴片天线仅有宽度方向的谐振模式被激发,而贴片天线长度方向的谐振模式不会被激发。由于组合式贴片天线的重叠长度改变对天线的宽度方向谐振频率并没有影响,因此,当组合式贴片天线重叠长度发生变化的过程中,圆盘宽带天线的 S_{11} 回波损耗曲线谐振峰值并未发生偏移,这也与前文的理论分析相符合。

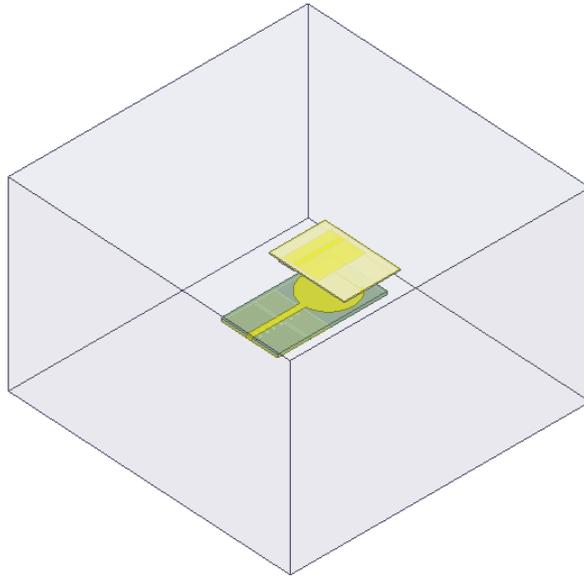


图 5.14 圆盘宽带天线正对组合式贴片天线传感器宽度方向无线问询

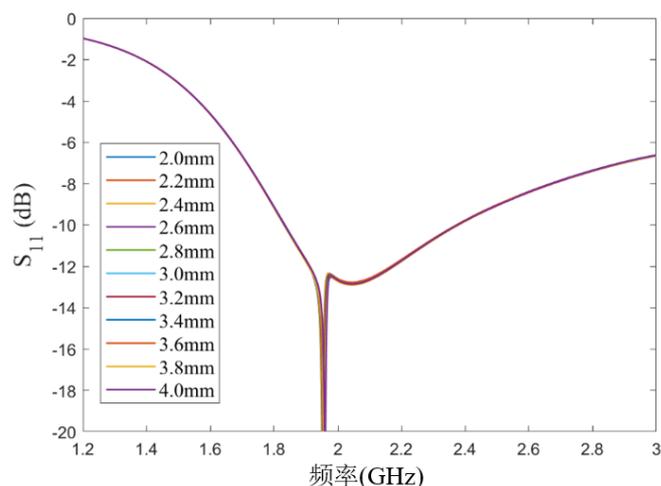
图 5.15 组合式贴片天线重叠长度发生变化时圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线

图 5.16 和 5.17 还展示了宽带天线正对与选择 90° 两种无线问询设置下组合式贴片天线贴片表面在 1.95GHz 与 2.55GHz 时的表面电场强度。该电场强度图也证明了线性极化宽带天线对组合式贴片天线进行无线问询时，组合式贴片天线仅有宽带天线极化方向的谐振模式会被激发。因此，采用该无线问询方式对组合式贴片天线的谐振频率进行问询时，需要根据要读取的谐振模式对圆盘宽带天线的方向进行调整，以使宽带天线发射的电磁波激活贴片天线相应的谐振模式，并进一步根据宽带天线的回波损耗曲线进行分析，以获得其无线读取的贴片天线的谐振频率。

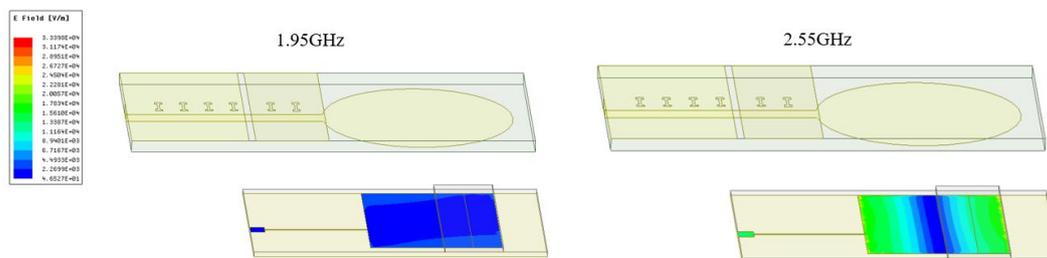
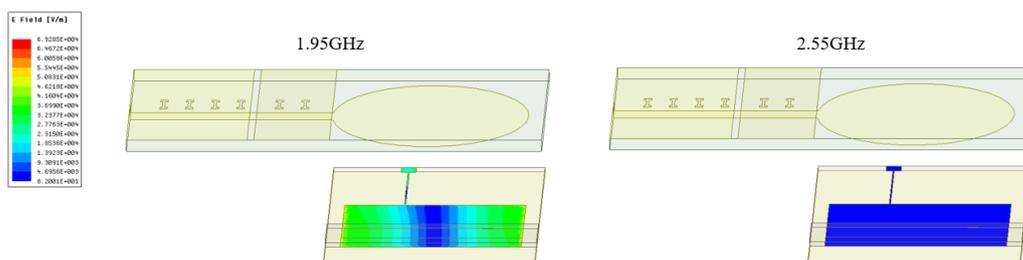


图 5.16 圆盘宽带天线正对组合式贴片天线无线问询时贴片天线表面电场强度

图 5.17 圆盘宽带天线旋转 90° 正对组合式贴片天线无线问询时贴片天线表面电场强度

5.3.2 宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询

前一节中通过仿真模拟验证了采用线性极化的圆盘宽带天线正对组合式贴片天线进行无线问询的可行性，但是该无线问询方式仍有一些限制。对于该偏心馈电组合式贴片天线传感器而言，在使用时需要同时获得其长度方向与宽度方向的一阶谐振频率，这就需要激发其两个方向的谐振模式；而采用宽带天线正对组合式贴片天线扫频的问询方式，每次问询仅能激发其单一方向的谐振模式。虽然可以通过将宽带问询天线转向的方式对贴片天线另一方向的谐振频率进行读取，但是该无线问询过程需要对宽带天线旋转 90° ，这在实际的操作过程中是较为繁琐的，会引入一定的误差。因此，更为便捷的无线问询方式应该避免对宽带天线的位置或方向进行移动，并需要实现对组合式贴片天线两个方向谐振频率的无线读取。

基于此，本节提出了一种将组合式贴片天线与宽带天线相连，作为负载进行无线问询的方式。该方式可以有效实现对双谐振的偏心馈电组合式贴片天线的无线问询，在不对宽带天线进行转向的情况下同时对组合式贴片天线两个方向的谐振频率进行无线读取。该无线问询方式示意图如图 5.18 所示。

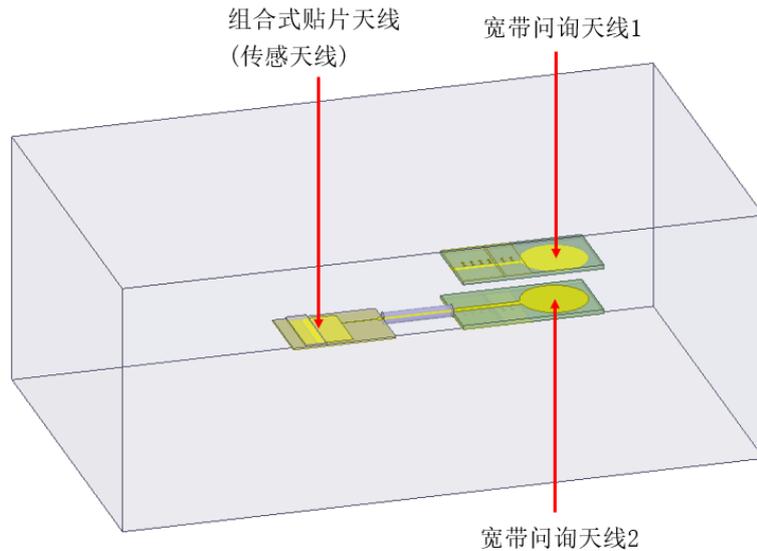


图 5.18 宽带天线连接组合式贴片天线传感器作为负载无线问询

在该无线问询系统中，宽带问询天线 1 与集总端口相连，发射扫频电磁波，作为无线问询的阅读端。组合式贴片天线作为传感端，通过同轴线与宽带问询天线 2 相连，其相当于宽带问询天线 2 的负载。宽带问询天线 1 与宽带问询天线 2 圆形辐射贴片正对，且两个宽带问询天线的线性极化方向保持一致。当宽带问询天线 1 发射扫频电磁波时，电磁波可以被宽带问询天线 2 接收，并在宽带问询天线 2 的辐射贴片表面形成感应电流，进而通过同轴线传递至组合式贴片天线，激发偏心馈电组合式贴片天线的双向谐振模式。此时，在宽带问询天线 1 的回波

损耗曲线 S_{11} 会出现较为明显的谐振峰，对回波损耗信息进行分析即可获得组合式贴片天线传感器的谐振信息。

为了验证该无线问询方法的可行性，在高频电磁仿真软件 HFSS 中对其进行仿真模拟。将两个宽带问询天线之间的距离设置为 25mm，宽带问询天线 1 的馈电方式设置为集中端口馈电，扫频范围设置为 1.2 GHz-3.0 GHz，扫频点数设置为 3601，扫频间隔为 0.0005GHz，以模拟矢量网络分析仪与宽带天线组成的无线问询系统阅读端。组合式贴片天线与宽带问询天线 2 之间通过 30mm 的同轴线相连，同轴线的内导体及外屏蔽层均设置为铜，介质层材料设置为介电常数为 2.25 的聚乙烯。组合式贴片天线传感器附加子贴片与下部贴片天线之间的重叠长度设置为从 2mm 至 4mm 变化，变化步长设置为 0.2mm。

图 5.19 展示了采用该双宽带天线的问询系统对组合式贴片天线进行无线问询时，宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线。由图可知，在宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线上出现了两个新的谐振峰，其中第一个谐振峰为组合式贴片天线宽度方向的谐振频率，其几乎不随组合式贴片天线重叠长度的变化而变化。第二个谐振峰为组合式贴片天线长度方向的谐振频率，其随贴片天线重叠长度的变化会发生偏移，且偏移较为线性。

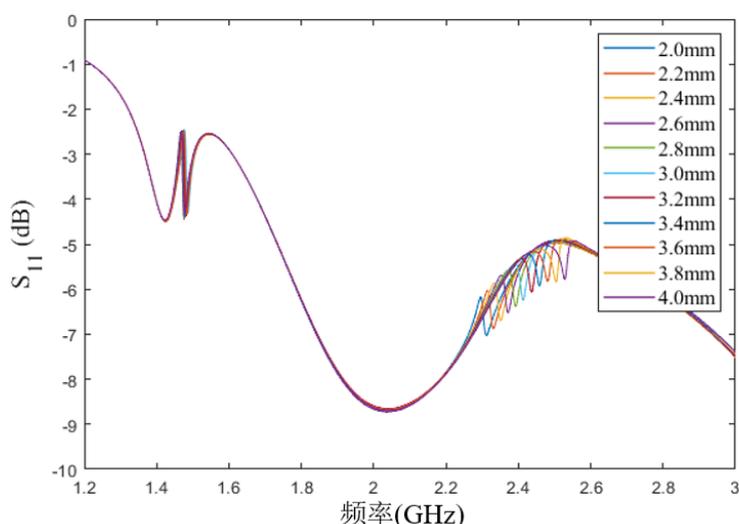


图 5.19 组合式贴片天线重叠长度发生变化时宽带问询天线 1 的 S_{11} 曲线

将双宽带天线无线问询系统测得的组合式贴片天线长度方向上的一阶谐振频率提取出来，如图 5.20 所示。可以看出，组合式贴片天线重叠长度与天线长度方向一阶谐振频率之间有着较为良好的线性关系。当天线初始重叠长度为 4mm 时，灵敏度约为 119.2 MHz/mm。这证明了采用宽带天线连接组合式贴片天线作为负载进行无线问询的可行性。

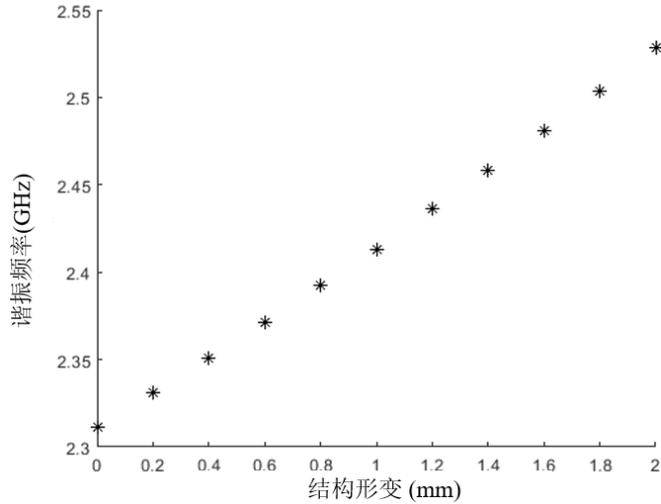


图 5.20 双宽带天线问询系统无线测得的组合式贴片天线传感器谐振频率

综上所述,该无线问询方式采用了两个宽带天线分别连接矢量网络分析仪和贴片天线,分别作为阅读端与传感端的收发宽带天线,并且组合式贴片天线连接传感端的宽带天线作为负载,使该无线问询系统可以同时实现对组合式贴片天线传感器长度方向和宽度方向谐振频率的无线读取,进而实现对监测变量的无线感知。该无线问询方式相比单宽带天线的正对贴片天线无线问询方式有较大优势,通过同轴线等作为引出线连接宽带天线作为负载,可以在贴片天线表面被遮蔽物覆盖等情况下实现对贴片天线的无线问询,并且宽带问询天线不再需要安装在距离贴片天线较近的位置。此外,该无线问询方式也避免了宽带天线在激发贴片天线不同方向谐振模式时需要转换方向的问题,因而具有更强的实用性。

5.4 小型化贴片天线传感器有线及无线问询测试

在前两节中,已经分别对贴片天线传感器的小型化设计与无线问询方式进行了探究,并进行了一系列仿真模拟的验证。在本节中,将通过一系列实验对该小型化贴片天线传感器的传感性能,以及无线问询方式的可行性进行验证。本节主要进行了四个实验,分别是小型化贴片天线传感器有线测试、宽带天线正对贴片天线无线问询测试、宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询测试、双宽带天线问询系统校准探究。以下将分别对其进行介绍。

5.4.1 小型化贴片天线传感器有线测试

通过化学蚀刻法制造的基于 Rogers RO3010 介质板的小型化组合式贴片天线传感器如图 5.21 所示,其长度方向和宽度方向的尺寸分别为 40 mm 和 28 mm。通过其与前述基于 RT/duroid 5880 介质板的偏心馈电组合式贴片天线传感器相

对比，可以看出整体尺寸有了明显减小。在几乎相同的谐振频率情况下，基于 RO3010 介质板的小型化贴片天线传感器尺寸缩小为之前的 33.4%。

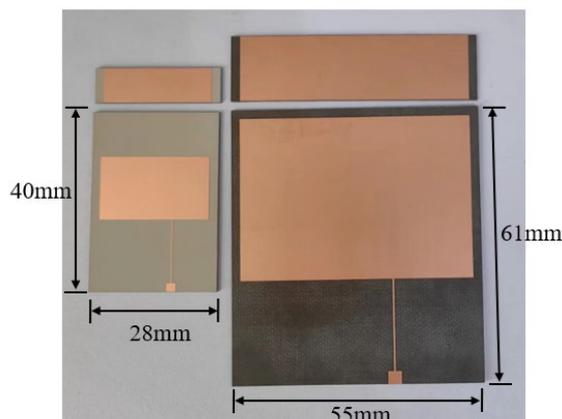


图 5.21 基于 RO3010 介质板的小型化组合式贴片天线传感器与原传感器尺寸对比

在理论分析与仿真模拟部分，已经证明了该小型化贴片天线传感器具有较高的结构变形感知灵敏度。在本实验中，对该传感器的传感灵敏度进行了实测，试验设置如图 5.22 所示。小型化的组合式贴片天线传感器被安装在结构变形模拟装置上。结构变形模拟装置由固定平台、可移动平台和螺旋测微计等组成。可移动平台可由螺旋测微计推动，并相对于固定平台移动，该装置可以以 0.01mm 的精度模拟结构表面形变位移或是裂缝宽度的变化。小型化组合式贴片天线传感器下部贴片天线通过夹具和胶水粘贴于固定平台，上部可移动贴片通过传动杆固定于可移动平台上，并可以相对于下部贴片天线移动。在该有线测试中，贴片天线的偏心微带馈电线通过同轴线与矢量网络分析仪相连，在该试验中，采用了便携式的小型网络分析仪 Nano VNA 对该小型化组合式贴片天线传感器进行测试。

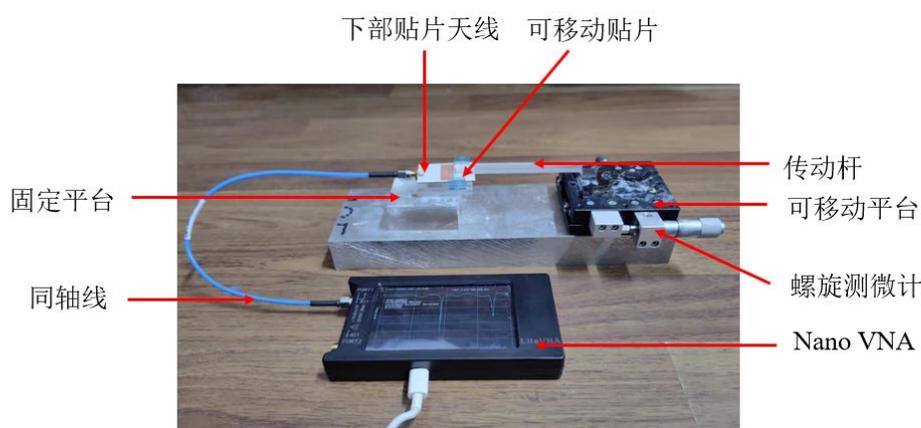


图 5.22 基于 RO3010 介质板的小型化组合式贴片天线传感器形变感知试验

将组合式贴片天线初始重叠长度设置为 2 mm，通过螺旋测微计和可移动平台带动传动杆和可移动子贴片，使组合式贴片天线的重叠长度发生变化。在该实

验中，使天线重叠长度从 2 mm 到 7 mm 变化，以模拟结构表面发生 0-5 mm 的形变位移，单次变化的步长设置为 0.5 mm。在该试验中，矢量网络分析仪的扫频范围设置为 1 GHz-3 GHz。

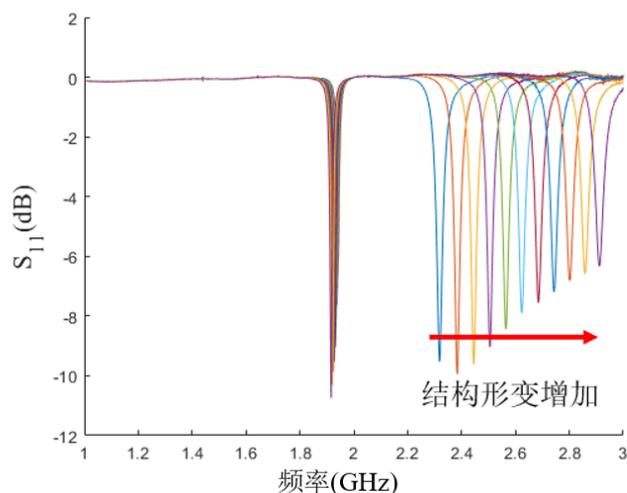


图 5.23 不同结构形变量对应的小型化组合式贴片天线传感器 S_{11} 曲线

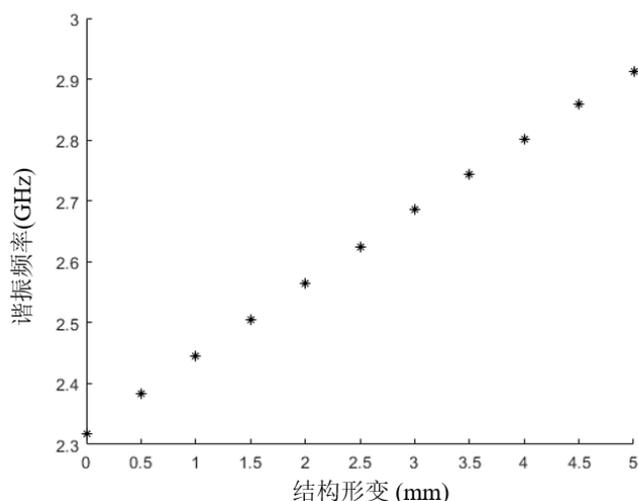


图 5.24 不同结构形变量对应的小型化组合式贴片天线传感器谐振频率

图 5.23 展示了不同结构形变量对应的小型化组合式贴片天线传感器的 S_{11} 曲线。由图可以，随着组合式贴片天线重叠长度的改变，该小型化组合式贴片天线传感器的宽度方向谐振频率几乎不发生变化，而长度方向谐振频率发生了较为明显的偏移。图 5.24 展示了该小型化组合式贴片天线传感器在长度方向上的一阶谐振频率随着结构形变量增加发生偏移的情况。该组合式贴片天线传感器的谐振频率与结构形变位移之间呈现出良好的线性关系，灵敏度约为 116.1MHz/mm，这也远高于采用 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器，其灵敏度约为 43.9MHz/mm。该小型化组合式贴片天线传感器的形变传感灵敏度为之前的 2.64

倍，其小尺寸和高灵敏度的优势使其在实际工程中具有更好的实用性。

5.4.2 宽带天线正对贴片天线无线问询测试

以上的有线测试验证了该小型化高灵敏度组合式贴片天线传感器用于结构形变感知的可行性，但是其有线测试的方式仍然具有一定的局限性。因此，本节采用宽带天线正对组合式贴片天线传感器进行无线问询的方式，对其谐振频率进行无线读取测试。



图 5.24 圆盘宽带天线正对贴片天线长度方向无线问询试验

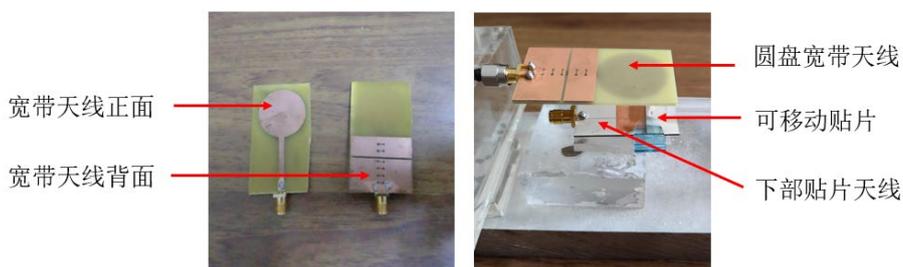


图 5.25 基于 FR4 介质板的圆盘宽带天线与试验设置

图 5.24 和 5.25 展示了圆盘宽带天线正对贴片天线长度方向进行无线问询试验的试验设置。圆盘宽带天线通过同轴线与矢量网络分析仪相连，作为无线问询的阅读端，向组合式贴片天线发射扫频电磁波信号，并对回波信号进行分析。圆盘宽带天线的正面与组合式贴片天线长度方向正对，无线问询距离设置为 25 mm。在该试验中，通过结构变形模拟装置模拟结构表面发生 0-5 mm 的形变位移，单次变化的步长设置为 0.5 mm。矢量网络分析仪的扫频范围设置为 1 GHz-3 GHz。

图 5.26 展示了圆盘宽带天线正对贴片天线长度方向问询时不同结构形变量对应的圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线。由图可知，当采用该种方式对组合式贴片天线进行无线问询时，组合式贴片天线仅有长度方向的谐振模式被激发，且其谐振峰会随贴片天线重叠长度的变化产生线性偏移。将谐振峰的最小值点提取出来，即

可获得其谐振频率，其与结构形变之间的对应关系如图 5.27 所示。试验结果表明，采用贴片天线正对的方式可以实现对贴片天线长度方向谐振频率的无线读取，其用于结构变形传感的灵敏度为 109.1MHz/mm。其灵敏度与有线测试结果之间存在了微小的误差，这主要是无线问询时环境电磁干扰等因素的影响。

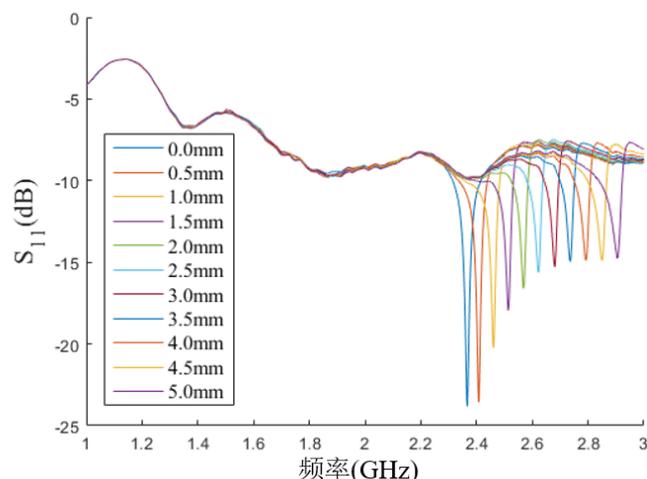


图 5.26 不同结构形变量对应的圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线

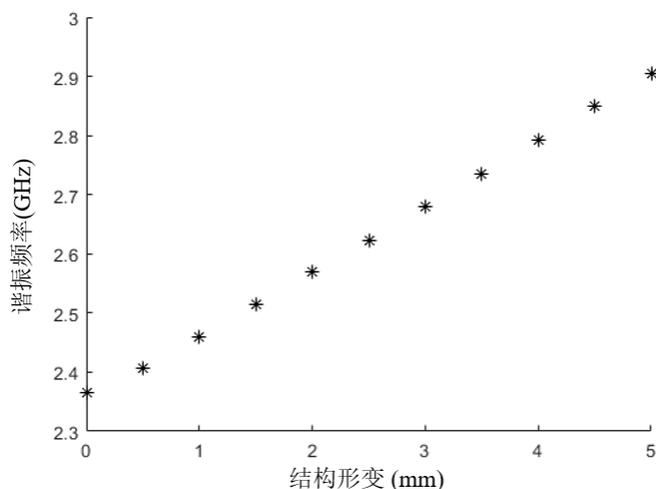


图 5.27 不同结构形变量对应的小型化组合式贴片天线传感器谐振频率

由于所提出的组合式贴片天线具有长度方向和宽度方向两个方向的谐振频率，因此，还需要对贴片天线传感器的宽度方向进行扫频问询。当采用线性极化的圆盘宽带天线正对贴片天线宽度方向进行无线问询时，需要将圆盘宽带天线旋转 90° ，具体试验设置如图 5.28 所示。

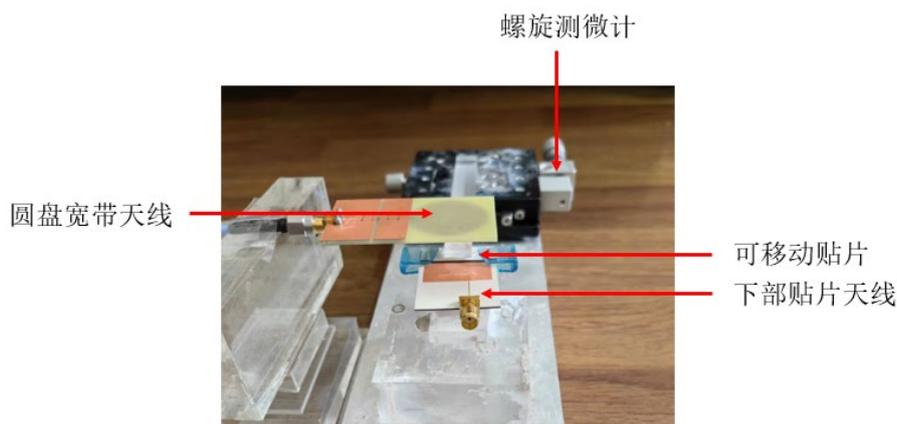


图 5.28 圆盘宽带天线正对贴片天线宽度方向无线问询试验

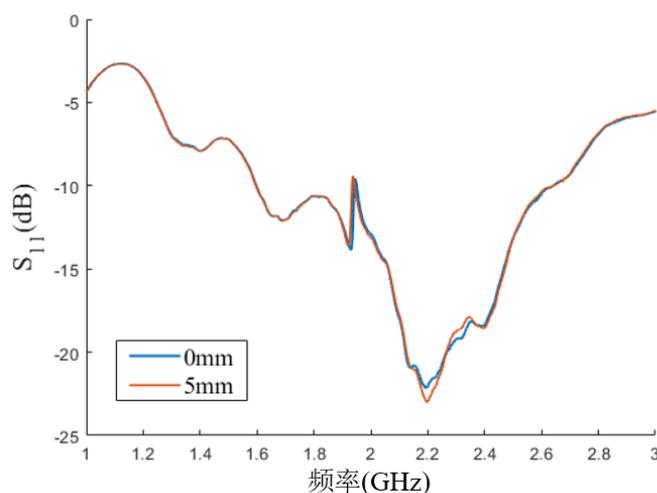
图 5.29 不同结构形变量对应的圆盘宽带天线的 S_{11} 曲线

图 5.29 展示了当贴片天线重叠长度发生变化时，圆盘宽带天线的 S_{11} 回波损耗曲线。由图可知，采用该方式对贴片天线进行问询时，仅有宽度方向的谐振模式被激发，其在 1.95GHz 附近出现了较为明显的谐振峰，而贴片天线长度方向的谐振频率没有被激发。此外，由于该组合式贴片天线在天线重叠长度发生改变时，仅有长度方向的谐振频率会发生改变，而宽度方向谐振频率保持不变，这也与图中圆盘宽带天线的 S_{11} 回波损耗曲线谐振峰未发生偏移的现象相符合，进而验证了前文理论分析与仿真模拟的结果。

综上，采用宽带天线正对贴片天线进行无线问询是一种可行的方式，但是该方式仍旧面临一些问题，主要是对贴片天线不同方向谐振频率进行读取时需要调整宽带天线的位置，另外该方法需要贴片天线和宽带天线之间不能存在覆盖物等。

5.4.3 宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询测试

在本节中，主要对宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询的方式进行了探

研究和试验验证, 以其使其成为一种适用于组合式贴片天线传感器的更为通用的无线问询方式。

宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询的试验设置如图 5.30 所示。该无线问询系统需要两个宽带天线, 宽带问询天线 1 通过同轴线与矢量网络分析仪相连, 作为无线问询的阅读端发射扫频电磁波信号, 并对回波信号进行分析。宽带问询天线 2 通过转接头连接组合式贴片天线, 组合式贴片天线作为宽带问询天线 2 的负载。宽带问询天线 2 可以接收扫频电磁波, 并进而激发组合式贴片天线的双向谐振模式。在该试验中, 无线问询距离设置为 25 mm, 通过结构变形模拟装置模拟结构表面发生 0-5 mm 的形变位移, 单次变化的步长设置为 0.5 mm。矢量网络分析仪的扫频范围设置为 1 GHz-3 GHz。

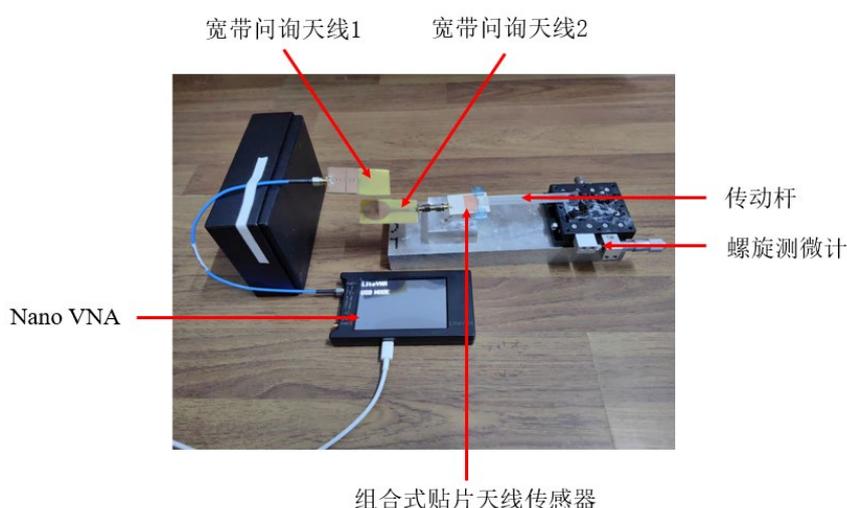


图 5.30 宽带天线连接贴片天线作为负载无线问询试验

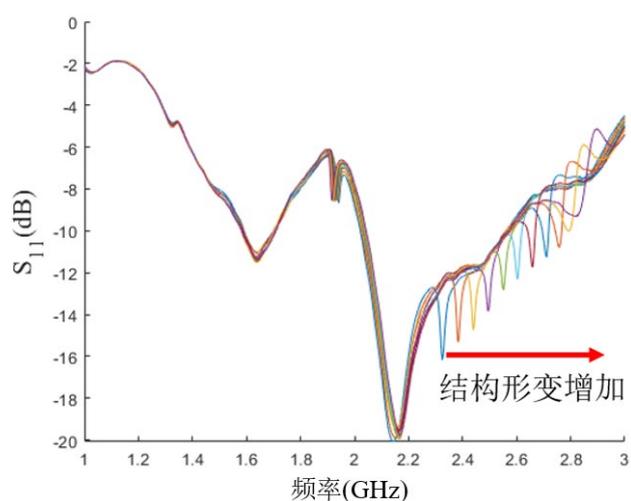


图 5.31 不同结构形变量对应的宽带问询天线 1 的 S_{11} 曲线

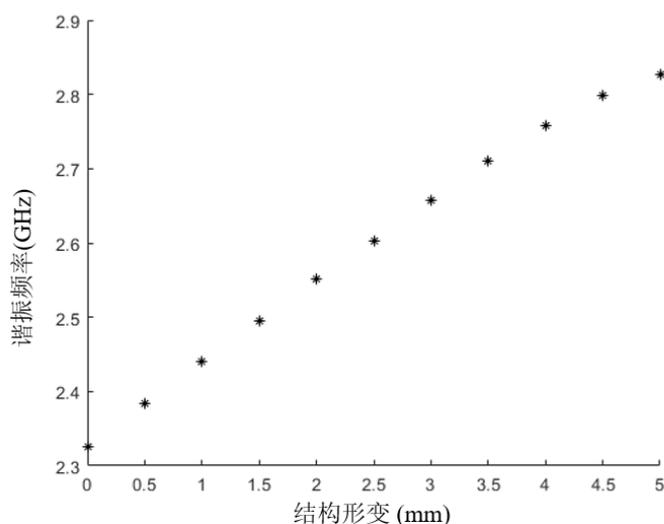


图 5.32 不同结构形变量对应的小型化组合式贴片天线传感器谐振频率

采用该双宽带天线无线问询系统对组合式贴片天线进行扫频问询,当贴片天线重叠长度发生变化时,宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线如图 5.31 所示。由图可知,采用该无线问询方式,可以同时激发起组合式贴片天线在长度方向与宽度方向的谐振模式。其中,在 1.95 GHz 附近的谐振峰对应组合式贴片天线在宽度方向的一阶谐振模式,在 2.3 GHz-2.9 GHz 附近的谐振峰对应组合式贴片天线在长度方向的一阶谐振模式。随着结构表面变形的增加,组合式贴片天线在宽度方向的一阶谐振频率并未发生偏移,而在长度方向的一阶谐振频率产生了偏移。组合式贴片天线在长度方向一阶谐振频率与结构变形之间的对应关系如图 5.32 所示,它们之间具有良好的线性对应关系,灵敏度约为 103.8 MHz/mm。

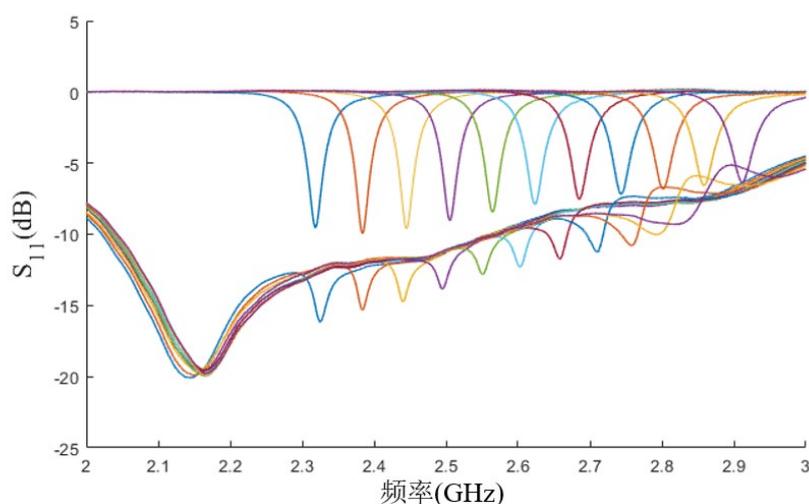


图 5.33 组合式贴片天线谐振频率有线与无线测试结果对比

为了更直观的展示该无线问询方式的测试结果,在 2 GHz-3 GHz 范围内将

宽带询问天线 1 测得的 S_{11} 回波损耗曲线与有线测试获得的组合式贴片天线 S_{11} 回波损耗曲线绘制在同一幅图上，如图 5.33 所示。可以看出由两种方式测得的组合式贴片天线谐振频率偏移趋势符合较好，这也证明了宽带天线连接贴片天线作为负载这种无线询问测试的有效性与可行性。但是需要注意的是，有线测试与无线测试的传感灵敏度之间有一些轻微差异。对于该组合式贴片天线传感器，采用有线方式测试获得的传感灵敏度为 116.1MHz/mm，采用宽带天线连接贴片天线作为负载无线询问测试获得的传感灵敏度为 103.8MHz/mm。这主要是因为无线测试较为敏感，易受到环境中电磁干扰以及宽带天线之间电磁耦合干扰等因素的影响。因此，传感器在不同环境中使用时，建议对其传感灵敏度进行标定，以获得更精确的测试结果。

5.4.4 双宽带天线询问系统校准探究

5.4.3 节中已经通过试验证明了宽带天线连接贴片天线作为负载无线询问方式的有效性。但是，宽带天线与贴片天线之间的连接方式仍值得进一步探究。在前述试验中，采用 SMA 接头与转接头直接将宽带天线与贴片天线相连，会避免杂波的引入，取得较好的测试效果。然而，转接头连接限制了宽带天线与组合式贴片天线之间的距离，当宽带天线与组合式贴片天线距离较远时，这种连接方式不再适用。此时通常需要采用同轴线连接宽带天线与组合式贴片天线，组合式贴片天线作为宽带天线的负载进行无线询问。

宽带天线与组合式贴片天线之间同轴线的使用通常会引入损耗和杂波，使无线询问的效果受到较大影响。这些杂波与多种因素相关，主要包括同轴线本身的反射特性、屏蔽特性、弯曲程度以及线缆的陈化程度等。为了避免这些杂波的影响，在使用时通常需要对网络分析仪和同轴线缆进行校准。

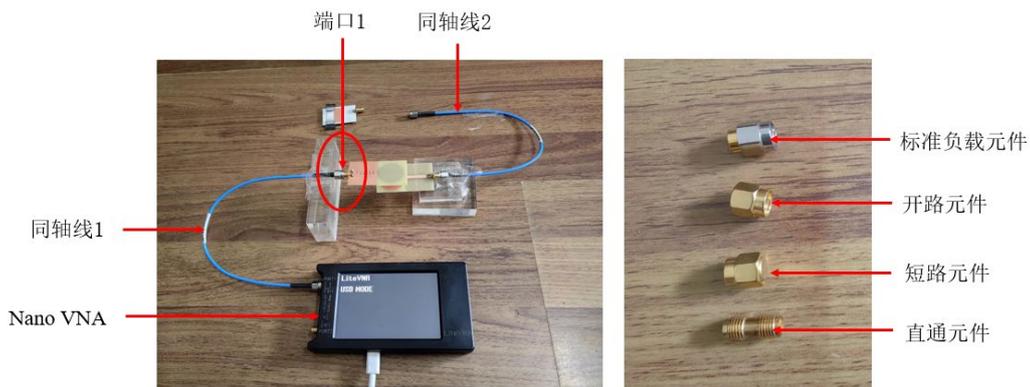


图 5.34 单条同轴线校准试验设置

首先，在图中所示的端口 1 处对同轴线缆进行校准，按照校准流程，将同轴线 1 的端口分别连接开路元件、短路元件、标准负载元件，记录所需频段的扫频

数据进行校准，即可消除同轴线缆 1 引入的杂波影响。但是，该校准方法并不能消除同轴线 2 引入的杂波影响。在采用该校准方法进行校准后，宽带问询天线 2 通过同轴线 2 连接贴片天线作为负载，此时矢量网络分析仪测得的宽带问询天线 1 的回波损耗曲线如图 5.35 所示。由图可知，试验结果中仍有较多杂波，组合式贴片天线的两个谐振峰并不能明显与杂波区分出来。因此，该校准方法对于双宽带天线的无线问询系统并不适用。

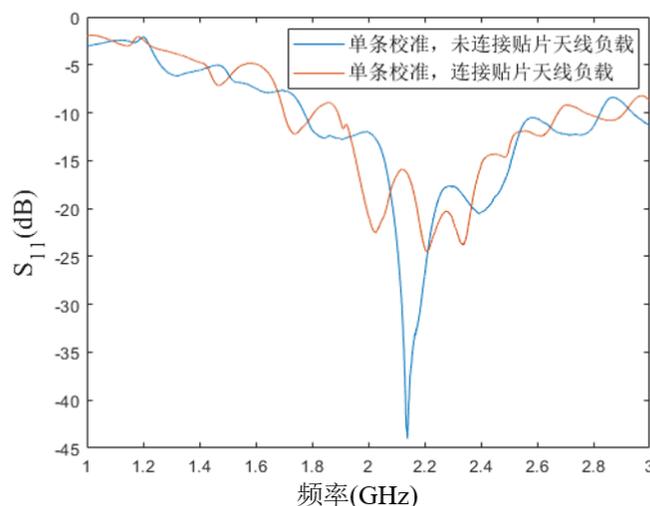


图 5.35 单条同轴线校准后宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线

为了能更好的实现该无线问询系统对组合式贴片天线谐振频率的读取，考虑将同轴线 1、宽带问询天线 1、宽带问询天线 2、同轴线 2 整体当做一个信号传输系统，在端口 2 对整体传输系统进行校准和杂波消除。该双宽带天线问询系统整体校准试验设置如图 5.36 所示，分别采用开路元件、短路元件、标准负载元件在所需频段对整体传输系统进行校准和杂波消除后，将组合式贴片天线传感器与端口 2 相连接。

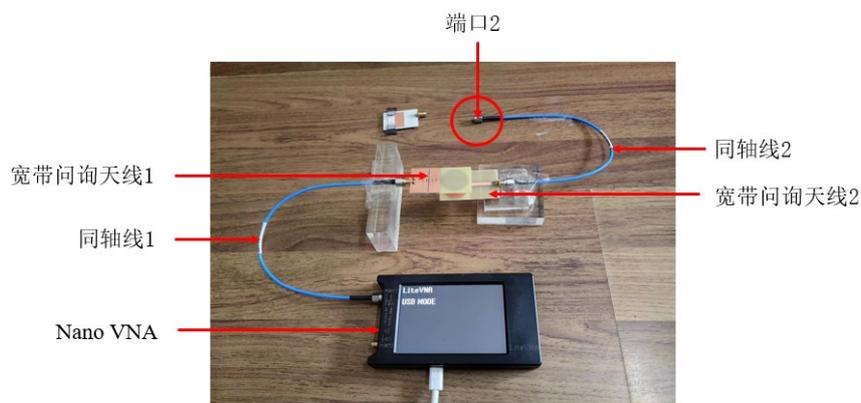


图 5.36 双宽带天线问询系统整体校准试验设置

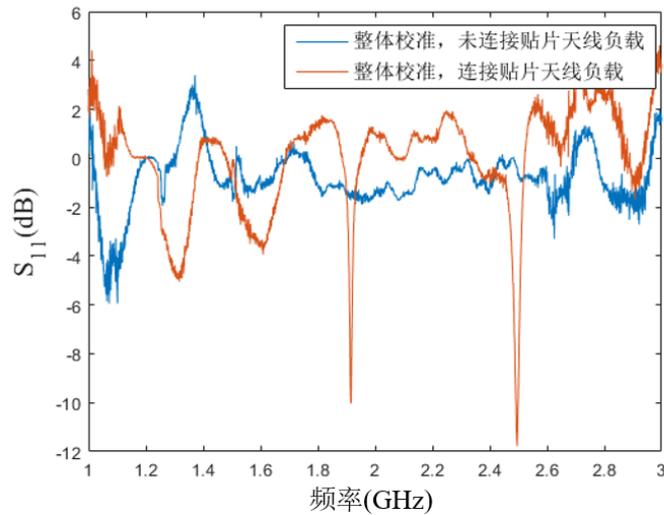


图 5.37 整体校准后宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线

图 5.37 展示了采用该方法校准后，矢量网络分析仪测得的宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线。由图可知，虽然仍然有一些杂波干扰，但是校准后未连接贴片天线作为负载时，宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线在整体频段内较为平稳。当宽带问询天线 2 连接组合式贴片天线作为负载后，通过矢量网络分析仪测得的宽带问询天线 1 的 S_{11} 回波损耗曲线出现了两个十分明显的谐振峰，分别占 1.95GHz 与 2.5GHz 附近，即为该组合式贴片天线宽度方向与长度方向的一阶谐振频率。试验证明了该校准方法的有效性，即在实际测量时，可将两条同轴线与两个宽带天线组成的信号传输系统作为一个整体进行校准和杂波消除，以更好的实现对组合式贴片天线传感器谐振频率的读取。

5.5 本章小结

本章主要提出了一种小型化高灵敏度的组合式贴片天线传感器，进行了一系列仿真模拟和试验验证该小型化传感器的传感性能，并对组合式贴片天线传感器的无线问询方法进行了探究。具体包括：

(1) 介绍了组合式贴片天线传感器小型化设计的思路和方法，采用了一种介电常数更高的电介质基板材料 Rogers RO3010 介质板对传感器进行设计，其整体尺寸更小，传感灵敏度更高。

(2) 探究了组合式贴片天线传感器的无线问询方式，分别采用宽带天线正对贴片天线进行无线扫频问询、贴片天线连接宽带天线作为负载无线问询两种方式实现天线传感器谐振频率的无线问询，并对比了其优缺点。

(3) 通过一系列仿真模拟和试验,验证了该小型化高灵敏度的组合式贴片天线传感器的性能,对比了有线及无线问询测试的效果,验证所提出无线问询方法的有效性,并对无线问询系统的校准方式进行了探究。

综上,该章节所提出的小型化高灵敏度传感器和无线问询方式,为后续将贴片天线埋置于混凝土中进行监测并最终形成一种具备感知功能的智能骨料传感单元提供了可靠的技术方案。

第 6 章 基于贴片天线传感器的无源智能骨料

6.1 引言

混凝土是一种重要的建筑材料，已经广泛应用于房屋、桥梁、隧道、大坝等各种土木工程结构中。混凝土本身具有良好的耐久性，但是在长期使用过程中，由于受到外界环境及荷载等因素的作用，混凝土结构易发生变形和裂缝等，从而影响结构的性能，为结构的安全可靠运行埋下隐患。因此，在混凝土结构的整个生命周期内，有必要对混凝土构件的变形状态和影响耐久性的环境因素等进行监测，从而及时发现结构安全隐患，采取必要措施保证结构的安全可靠使用。

近些年来，为了实现对混凝土内部环境的感知与监测，一些具有局部性、分布性优势的混凝土智能骨料逐渐应用于混凝土监测中。智能骨料是指将用于混凝土监测的传感单元进行封装，使其成为一种可以植入于混凝土中的智能元件，既具有普通骨料的功能，又可以实现对混凝土内部信息感知。当前的智能骨料已经应用于一些早期混凝土强度监测、混凝土应力应变监测、混凝土外部动荷载监测及混凝土冻融损伤监测等方面，但是大部分基于压电材料等内置式传感器的智能骨料仍然需要持续的电源供应或者内置式的电池对其进行供电，使其在实际工程中的应用仍受到一定限制。因此，有必要研究一种适用于混凝土内部监测的无源智能骨料，以克服其对电源的依赖，完成浇筑后可以与结构成为一体。

本章主要基于组合式贴片天线的技术路线，研发设计了一种适合埋置于混凝土内部进行传感的无源智能骨料。在前面章节中，已经对基于贴片天线传感器的感知机理和问询方式等进行了一系列研究，并且设计了小型化高灵敏度的组合式贴片天线传感器。但是，如何将其埋置于混凝土内部进行监测传感，仍是一个较为棘手的问题。本章主要探究了将贴片天线用于混凝土内部进行监测时面临的问题及解决方法，对基于贴片天线传感单元的智能骨料进行了封装设计，最终形成了一种基于贴片天线传感器的无源智能骨料使其成为一种可以植入于混凝土中的智能元件，从而实现对混凝土内部应变等信息的感知。本章还通过一系列的试验测试了该智能骨料传感元件埋置于混凝土内部的实际性能，并对试验结果进行了分析讨论。

在 6.2 节中，介绍了基于组合式贴片天线的混凝土智能骨料设计思路，选取了合适的封装材料以对传感单元进行防护，并确定了合适的形变传递机制，将前文所设计的基于 RO3010 介质板与基于 RT/duroid 5880 介质板的两种组合式贴片天线传感器封装设计成为两种不同尺寸与灵敏度智能骨料。

在 6.3 节中，将所设计的基于贴片天线传感器的无源智能骨料与混凝土浇筑在一起制作了混凝土试件。设计了混凝土压缩实验，以测试混凝土内部埋置的贴片天线传感器的传感性能，并对试验结果进行了分析讨论。

6.2 基于贴片天线的智能骨料封装设计探究

6.2.1 碳纤维材料封装外壳

本章采用了前述章节中设计的基于 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器与基于 RO3010 介质板小型化组合式贴片天线传感器作为智能骨料的传感单元，以实现混凝土内部的形变等参数进行感知。根据第四章的研究，将贴片天线传感器封装用于混凝土内部的内部进行监测时，有屏蔽材料与非屏蔽材料两种类型的封装方式，分别适用于不同的监测场景。本章主要针对混凝土内部形变进行监测，因此选取了屏蔽材料封装的技术路线，以避免封装层外混凝土介电常数变化对传感天线电磁参数的干扰，使其专注于混凝土形变量的表征。

贴片天线传感单元的封装保护层材料选取碳纤维材料，以保护传感单元使其免受混凝土内部侵蚀性介质的影响，并使智能骨料整体具有较高的强度。碳纤维材料具有诸多优点，其强度、刚度、抗冲击性及单位重量均优于常见金属材，并且耐酸、耐油、耐腐蚀，可用于混凝土内部的碱性侵蚀性环境。本章所使用碳纤维板强度为 3500 MPa，密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ，与普通钢材相比，具有高强度和质量轻的优点。此外，在第四章封装材料的电磁屏蔽性能测试中，也证明了该碳纤维材料可以有效避免封装层外部电介质环境变化对封装层内部贴片天线传感单元的影响，因此，碳纤维是一种理想的智能骨料封装外壳。

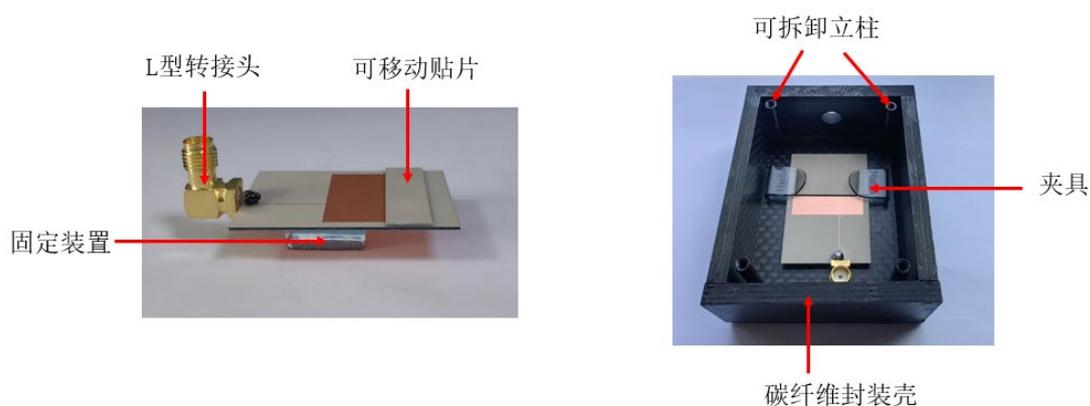


图 6.1 贴片天线传感器封装示意图

基于 RO3010 介质板的小型化组合式贴片天线传感器封装示意图如图 6.1 所示，组合式贴片天线传感器下部粘贴固定于亚克力材料做成的固定装置上，以预

留一定厚度的空气层，防止贴片天线与碳纤维封装外壳产生耦合作用。组合式贴片天线传感器的下部辐射贴片与可移动的附加子贴片通过夹具固定，使其只能沿贴片天线的长度方向移动。该组合式贴片天线的偏心馈电线连接 L 型转接头，该转接头引脚与贴片天线馈电线相接，转接头另一端可以与同轴线相连，通过同轴线连接混凝土外部的矢量网络分析仪或者宽带询问天线，以对其进行有线或者无线的扫频询问。

用于封装 3010 介质板小型化组合式贴片天线传感器的碳纤维外壳长宽高尺寸分别为 70mm，58mm 和 35mm。用于封装 5880 介质板组合式贴片天线传感器的碳纤维外壳长宽高尺寸分别为 90mm，90mm 和 35mm。碳纤维板材的厚度均为 5mm，封装层内部的贴片天线与四周及上下部预留的空气层厚度均达到 10mm 及以上，以避免封装层与贴片天线传感器距离过近时产生耦合作用，进而影响天线传感器的电磁特征参数。碳纤维封装外壳采用可拆卸设计，在封装外壳的四个角处通过可拆卸的内螺纹立柱和 2.5mm 的螺丝将封装壳的最上层碳纤维板进行固定，并增加侧向的支撑力。贴片天线传感器固定及封装完成后，在接缝处及螺丝固定处涂抹一层环氧树脂作为防水层，以防止混凝土浇筑及监测过程中水分对传感天线的影

6.2.2 智能骨料形变传递机制

组合式贴片天线可以通过下部辐射贴片与可移动贴片之间重叠长度的改变感知结构位移。为了使封装后的组合式贴片天线浇筑于混凝土后可以感知混凝土内部的形变，需要设计合适的形变传递方式，以将混凝土结构内部的变形转化为天线传感器组件之间的相对移动。

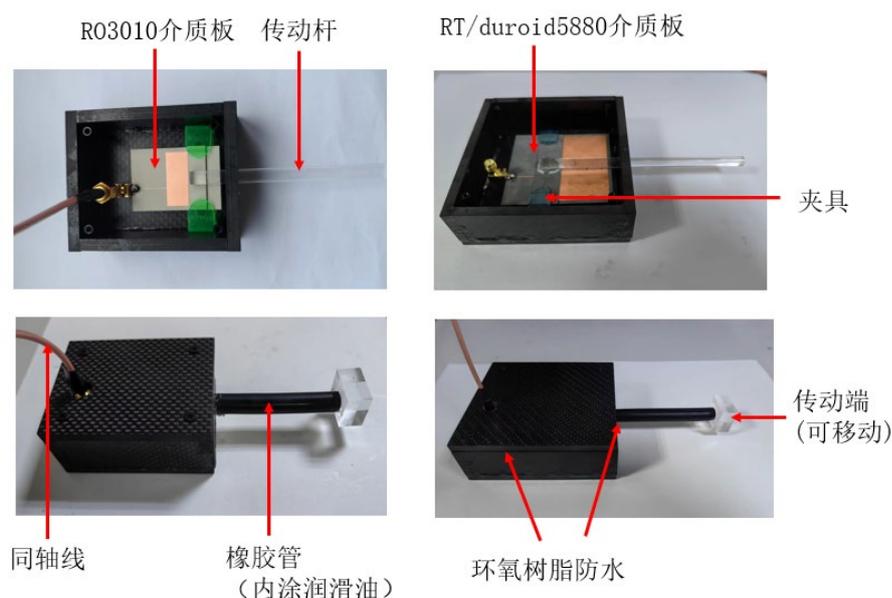


图 6.2 组合式贴片天线传感器封装外壳与传动端

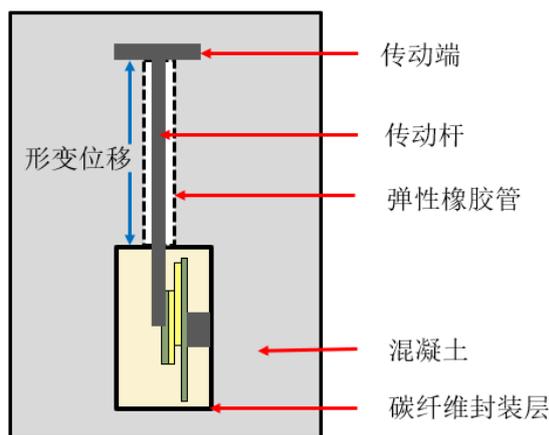


图 6.3 基于组合式贴片天线的智能骨料形变传递示意图

采用亚克力材料制作的圆柱形杆件作为传动杆，其一端连接组合式贴片天线的传动端，另一端连接亚克力立方体做成的传动端。传动杆的直径选取为 0.8 mm，传动杆通过碳纤维封装外壳的直径为 1.0 mm 的圆形开孔，并且传动杆可以沿着贴片天线的长度方向自由移动，进而将传动端与碳纤维封装外壳之间的相对位移传递至可移动贴片，使组合式贴片天线重叠长度发生改变。此外，为了使智能骨料的传动杆不与混凝土固结在一起，在传动端与混凝土外壳之间放置可压缩的具有一定弹性的橡胶管。橡胶管内径 1.0mm，外径 1.4mm。橡胶管两端分别与碳纤维外壳和智能骨料传动端固定，并由环氧树脂对接口处进行防水处理。橡胶管内部涂抹润滑油，以使传动杆可以沿橡胶管滑动。图 6.2 展示了封装前后的智能骨料传感器，其浇筑于混凝土后的形变传递示意图如图 6.3 所示。

6.3 基于贴片天线的智能骨料压缩试验

组合式贴片天线传感器封装设计完成后，需要将其浇筑于混凝土中，以测试其实际性能。因此，本节设计了相关试验，分别将基于 RO3010 介质板与基于 RT/duroid 5880 介质板的两种组合式贴片天线传感器封装形成的智能骨料浇筑于混凝土中，对其进行了压缩实验，并对试验结果与传统应变片等测量的结果进行了对比分析，以验证智能骨料传感器用于混凝土内部变形监测的可行性。

6.3.1 混凝土试件浇筑

首先需要对试验用的混凝土试件进行浇筑制备。在本实验中，采用的模具尺寸为 300mm×150mm×150mm。共计制备四个混凝土试件，其中两个内部埋置基于 RO3010 介质板的组合式贴片天线传感器制成的智能骨料，另外两个内部埋置基于 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器制成的智能骨料。

混凝土试件的校准首先需要选择合适的配合比。经过参考相关文献及综合考量，浇筑混凝土的配合比选用为水：水泥：砂子：石子=0.38：1：1.11：2.72。在本试验中，选用的水泥为 P.O 42.5 型号的普通硅酸盐水泥，砂子选用最大粒径 2mm 的普通硅砂，石子选用最大粒径为 10mm 的普通石子。此外，为了使混凝土试件保持较好的韧性和抗裂能力，在混凝土搅拌时掺入了一定量的聚乙烯醇（PVA）纤维。根据相关研究表明，聚乙烯醇纤维具有优异的抗拉强度以及分子粘合强度，在混凝土中掺入一定量的聚乙烯醇纤维可以有效地提高混凝土试件的抗拉强度及抗裂性能。本试验中混凝土搅拌时添加的聚乙烯醇纤维直径约为 15 μ m，长度为 9mm，密度约为 1.3g/cm³，添加量为浇筑混凝土体积的 0.3%。

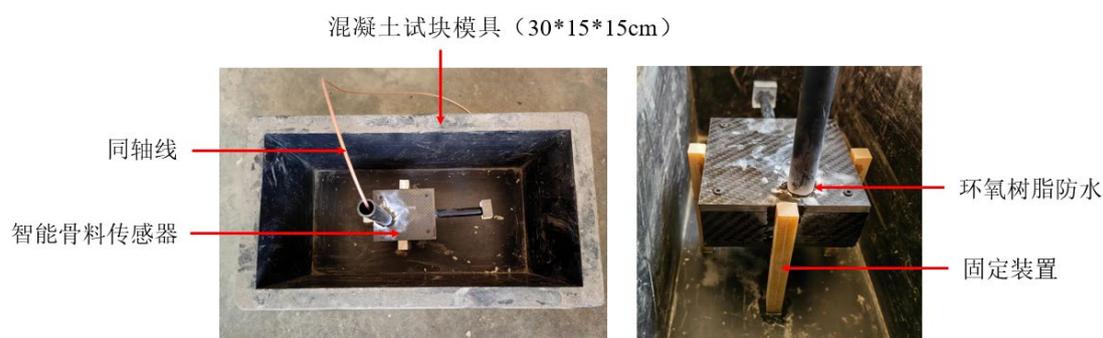


图 6.4 智能骨料传感器在混凝土模具中的固定方式



图 6.5 混凝土试件浇筑过程

图 6.4 和 6.5 展示了混凝土试件的浇筑过程。首先在混凝土试块模具的内部涂抹一层混凝土脱模剂，以使试块成型后较易取出。然后，通过硬木条作为固定装置固定智能骨料的位置，将其与智能骨料粘贴固定在模具中并处于试件的中心位置，并与混凝土浇筑为一体。

图 6.6 展示了浇筑前和浇筑完成后养护中的混凝土试件。本试验中共计浇筑 4 块混凝土试件，编号为 1-4，其中，1 号试件和 2 号试件内部为基于 RO3010 介质板的组合式贴片天线传感器制成的智能骨料，3 号和 4 号试件内部为基于 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器制成的智能骨料。

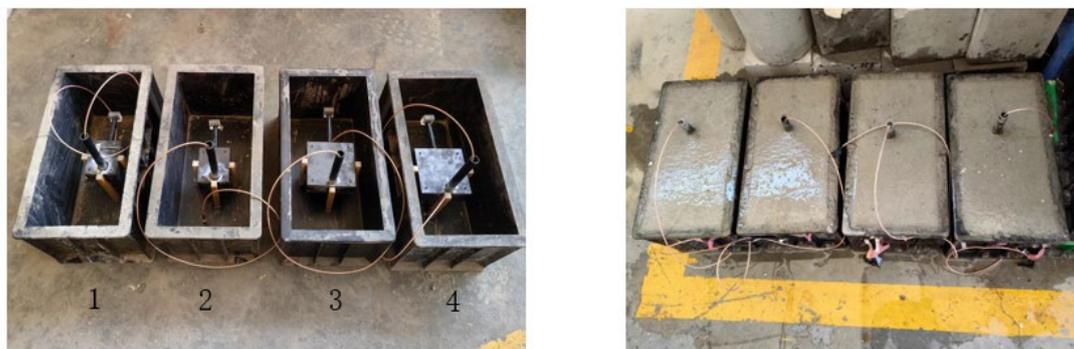


图 6.6 浇筑前和浇筑完成后养护中的混凝土试件

浇筑完成后，待混凝土初步凝结后，对混凝土进行浇水养护。其中，在前 7 天对混凝土表面进行每天 2 次的浇水养护，并在混凝土表面覆盖一层塑料薄膜以保持水分，防止混凝土开裂。7 天后采用混凝土脱模枪使混凝土试件与模具分离，并在后续每天继续对混凝土表面进行 1 次浇水养护，直至 28 天养护结束。养护结束后制成的混凝土试件如图 6.7 所示。

内置组合式贴片天线传感器（基于 5880 介质板）

内置小型化组合式贴片天线传感器（基于 3010 介质板）



图 6.7 养护结束后的混凝土试件

6.3.2 试验设置与过程

对养护完成后的试件进行压缩试验，使其产生压缩变形，以验证埋置于试件内部的智能骨料传感器对混凝土变形的感知能力。首先，在混凝土试件的表面进行了打磨并粘贴了长度为 5cm 的电阻式应变片，以记录在压缩试验过程中的混凝土竖向应变，与智能骨料传感器测得的数据进行对比。此外，由于电阻式应变片在混凝土开裂时易发生破坏导致数据缺失，在混凝土表面还安装了引伸计，以便对混凝土的变形进行测量并与电阻式应变片的数据相互校正。在该试验中，每个试件均安装了两个沿试件竖直方向的电阻式应变片及两个引伸计。安装电阻式应变片与引伸计后的试件如图 6.8 所示。

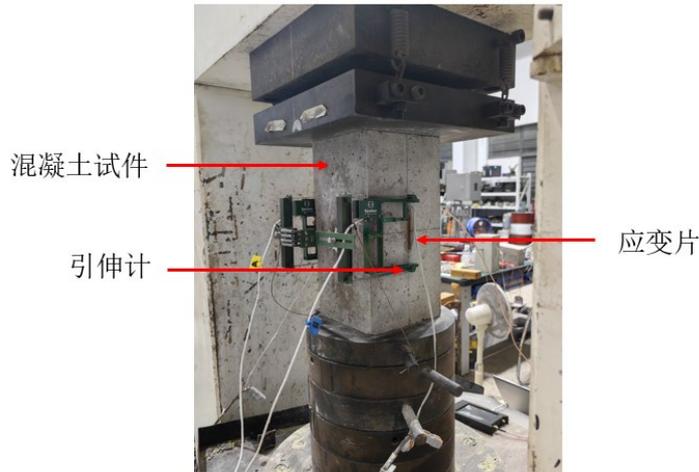


图 6.8 混凝土试件及表面安装的电阻式应变片和引伸计

图 6.9 展示了混凝土压缩试验现场设置图。本试验中，采用了邦威仪器生产的最大加载能力为 3000kN 量程的混凝土压力试验机作为对混凝土试件进行压缩的仪器。该仪器既可以采用载荷控制，也可以采用切换采用位移控制，精度范围在其设定值的 $\pm 1\%$ 以内。在混凝土形变测试中，为了保证传感精度，对智能骨料传感器仍采用有线问询的方式进行测试。智能骨料连接的同轴线从混凝土试件中引出，并与矢量网络分析仪相连，以对混凝土内部组合式贴片天线传感器的进行问询和回波信号分析，并进一步提取贴片天线传感器的谐振频率等信息。信号采集软件及相应设备如图 6.9 所示。在试验过程中，为了保证人员安全，通过远程控制的方式控制信号采集软件，进而控制矢量网络分析仪实现对混凝土内部信号的问询和分析。

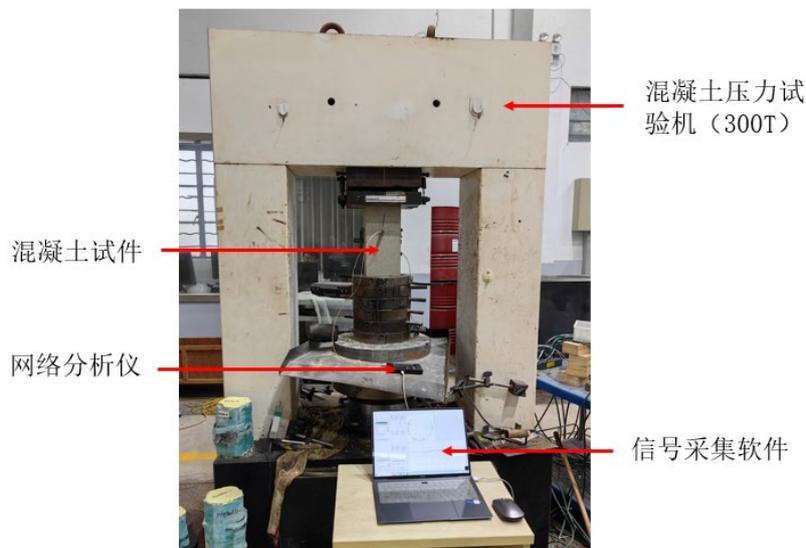


图 6.9 混凝土压缩试验现场设置图

根据所浇筑混凝土试件的尺寸 $300\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 及混凝土试件在较为线性阶段弹性模量约为 $3\times 10^4\text{ kN/mm}^2$ ，可初步计算得到当混凝土试件的载荷每增加约 67.5 kN 时，混凝土表面增加约为 $100\ \mu\epsilon$ 。考虑到混凝土内部埋置传感器形成的部分中空，混凝土的变形可能会比计算值有所增大。

在本实验中，首先将混凝土试件放在试验机上，通过位移控制，使加载平台与试件贴合，加载速度设定为 1 mm/min 。然后将试验机切换为载荷控制，继续施加载荷，载荷初值设定为 2 kN ，加载速度为 2 kN/min ，使混凝土压力试验机将混凝土试件初步夹紧压实。在正式加载中，将每级载荷设定为 40 kN ，加载速度设定为 $10\sim 20\text{ kN/min}$ 。每一级荷载加载完成后，保持荷载不变一到两分钟，待混凝土变形稳定后通过矢量网络分析仪获得混凝土内组合式贴片天线传感器的回波损耗曲线 S_{11} ，进而获得贴片天线的谐振频率等信息。记录完成后，继续进行下一级加载。对每个试件进行约十级加载，当试件应变出现较为明显的非线性变化时，加载结束。

6.3.3 试验结果分析

以基于 RT/duroid 5880 介质板组合式贴片天线智能骨料传感器浇筑而成的混凝土试件 3 为例，图 6.10-6.15 展示了其前 8 级加载的结果，分别是混凝土压力试验机荷载、混凝土表面两个电阻式应变片示数、混凝土表面两个引伸计示数、基于组合式贴片天线的智能骨料传感器回波损耗曲线 S_{11} ，以及基于组合式贴片天线的智能骨料传感器谐振频率。

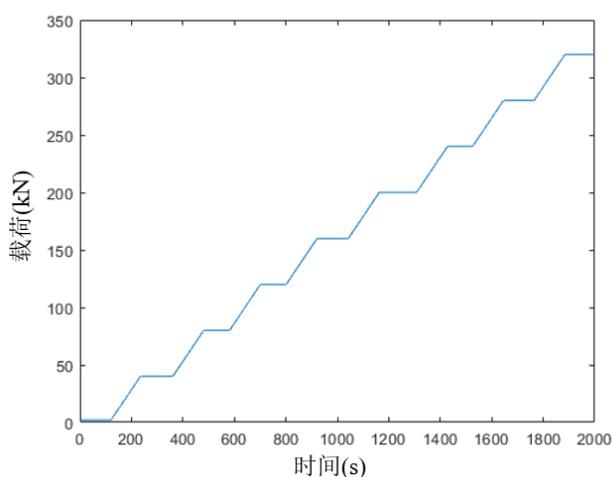


图 6.10 试件 3 混凝土压力试验机载荷

由图 6.10 可知，该试验机加载过程共分为 8 级，每级载荷为 40 kN ，加载至 320 kN 。加载过程中，混凝土表面两个电阻式应变片示数如图 6.11 所示。随着混凝土载荷的不断增大，混凝土表面两个电阻式应变片的示数会出现轻微的偏离，

这主要是由于混凝土试件在加载的过程,由于混凝土内部的不均匀或加载装置的不平整,有可能会出现混凝土试件轻微的偏心受力,导致混凝土试件左右两边出现表面应变不均匀的现象。

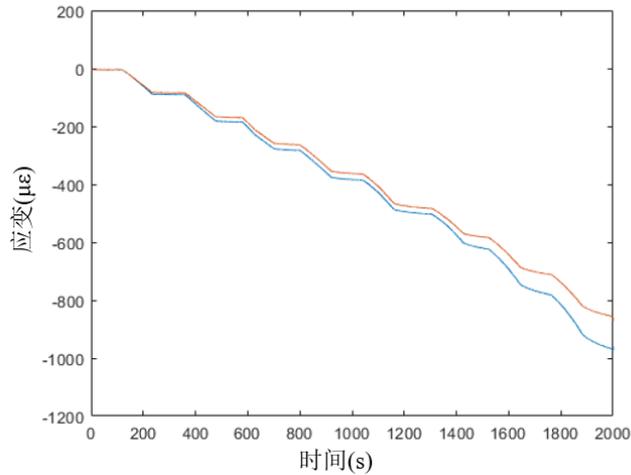


图 6.11 试件 3 混凝土表面两个电阻式应变片示数

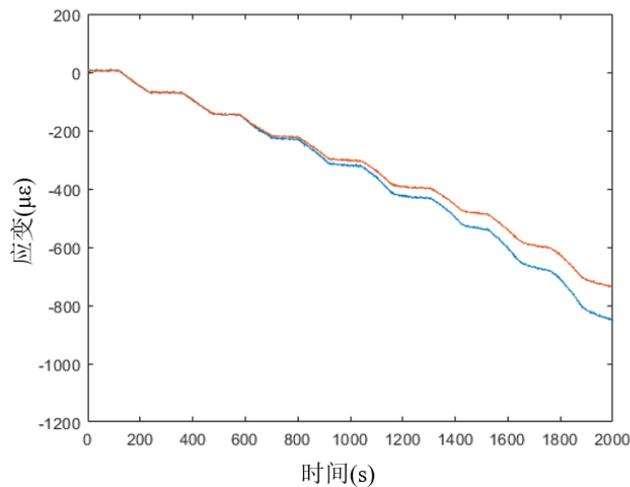


图 6.12 试件 3 混凝土表面两个引伸计示数

由图可知,在试验机加载的过程中,混凝土表面两个引伸计示数在开始阶段表现出了良好的一致性,且与混凝土表面电阻式应变片的示数较为接近。造成引伸计示数与电阻式应变片差异的一个原因是电阻式应变片的标距为 5 cm,而引伸计的标距为 10 cm。此外,虽然引伸计与应变片传感方向一致,但其安装位置并不完全相同,这会导致应变测量数据有一定的差异。

此外,在试验加载过程中发现,当前几级载荷相对较小时,停止加载后混凝土表面应变基本保持不变。而当载荷较大时,当停止加载使载荷保持不变后,混凝土表面的应变仍会有所增加。这主要是因为混凝土试件在加载结束后并不会立

即变形完成, 在较大的荷载下, 混凝土试件的变形仍会随着时间的推移而有一定程度的增大, 然后趋于稳定, 类似于混凝土产生的徐变。在本试验中, 每次加载完成后保持荷载两分钟, 待应变示数较为稳定后采用矢量网络分析仪获得基于组合式贴片天线的智能骨料传感器回波损耗曲线 S_{11} 。矢量网络分析仪的扫频范围设置为 1 GHz-3 GHz, 扫频点数为 2020。

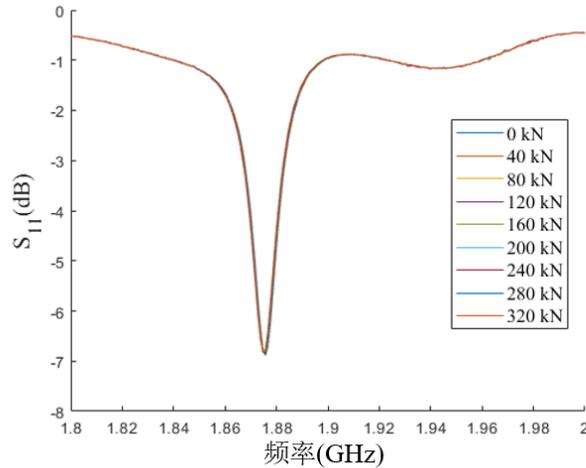


图 6.13 试件 3 智能骨料传感器在 1.8GHz -2.0GHz 的回波损耗曲线 S_{11}

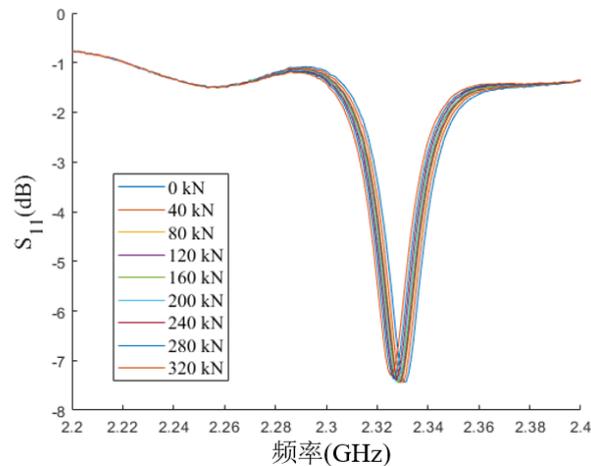


图 6.14 试件 3 智能骨料传感器在 2.2GHz -2.4GHz 的回波损耗曲线 S_{11}

图 6.13 和图 6.14 分别展示了在 1.8 GHz -2.0 GHz 频段范围内和 2.2 GHz -2.4 GHz 频段范围内的回波损耗曲线 S_{11} 。由图可知, 随着试验机载荷的不断增加, 智能骨料传感器在 1.8 GHz -2.0 GHz 频段范围内的回波损耗曲线 S_{11} 的谐振峰几乎保持不变, 而智能骨料传感器在 2.2 GHz -2.4 GHz 频段范围内的回波损耗曲线 S_{11} 的谐振峰出现了较为线性的偏移。这与理论分析相符合, 即智能骨料传感器内的组合式贴片天线宽度方向谐振频率不会随结构形变发生偏移, 而长度方向的谐振频率会随着结构形变发生相应的偏移。

为了进一步研究谐振频率的偏移规律，保证试验精度并减小误差，在测得的回波损耗曲线 S_{11} 的谐振峰附近的频率范围内选取一系列数据点，通过二次函数拟合 S_{11} 曲线，并提取二次函数曲线的局部最小值点所对应的频率作为智能骨料传感器的长度方向的谐振频率。图 6.15 展示了智能骨料传感器长度方向谐振频率与试验机载荷之间的对应关系。

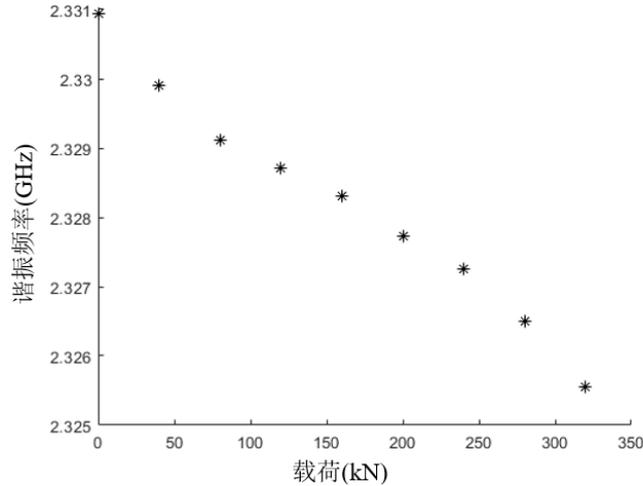


图 6.15 试件 3 智能骨料传感器长度方向谐振频率与试验机载荷之间的对应关系

由图 6.15 可知，随着试验机载荷的增加，智能骨料内部的组合式贴片天线传感器长度方向谐振频率逐渐减小，且其变化较为线性。对于该基于 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器封装形成的智能骨料，当载荷增加时，贴片天线重叠长度减小，整体辐射贴片长度方向的尺寸增加，进而导致组合式贴片天线谐振频率降低。在加载结束时，混凝土表面粘贴的四个应变片和引伸计的平均读数为 $-856.3 \mu\epsilon$ ，而此时智能骨料传感器长度方向谐振频率偏移量约为 5.39 MHz，其灵敏度约为 0.629 MHz/100 $\mu\epsilon$ 。

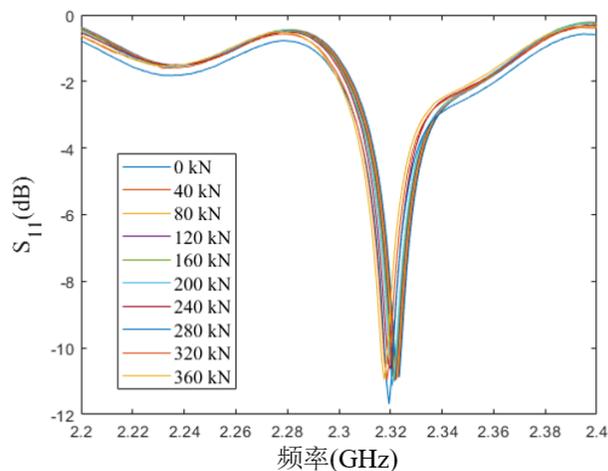


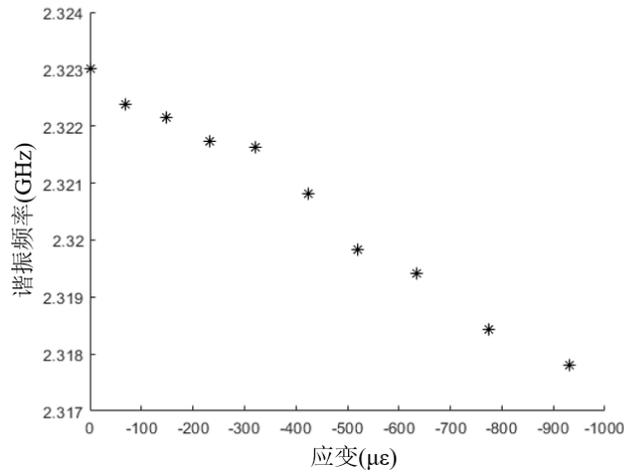
图 6.16 试件 4 智能骨料传感器在 2.2GHz -2.4GHz 的回波损耗曲线 S_{11} 

图 6.17 试件 4 智能骨料传感器长度方向谐振频率与混凝土应变之间的对应关系

试件 4 与试件 3 的试验结果较为相似, 智能骨料传感器长度方向谐振频率也展示出了良好的线性偏移, 如图 6.16 所示。将试件 4 每级加载后的各个电阻式应变片与引伸计测得的混凝土应变读数取平均值, 并将每级加载后矢量网络分析仪测得的智能骨料传感器谐振频率提取出来, 其对应关系如图 6.17 所示。由图可知, 智能骨料谐振频率与混凝土应变之间具有良好的线性关系, 随着混凝土压应变的增加, 智能骨料内组合式贴片天线传感器的谐振频率逐渐降低, 试件 4 测得的智能骨料传感器灵敏度约为 $0.568 \text{ MHz}/100 \mu\epsilon$ 。其与试件 3 的智能骨料灵敏度存在轻微的差异, 这主要是由于智能骨料制作及封装过程中的误差, 以及混凝土试件浇筑过程中的不均匀等原因导致的。

对于试件 1 和 2, 其内部浇筑了基于 RO3010 介质板的组合式贴片天线传感器封装形成的智能骨料。该组合式贴片天线传感器相比基于 RT/duroid 5880 介质板的传感器具有更高的灵敏度, 且其尺寸更小。以试件 1 为例, 对其进行了 12 级加载, 每级载荷为 40 kN。

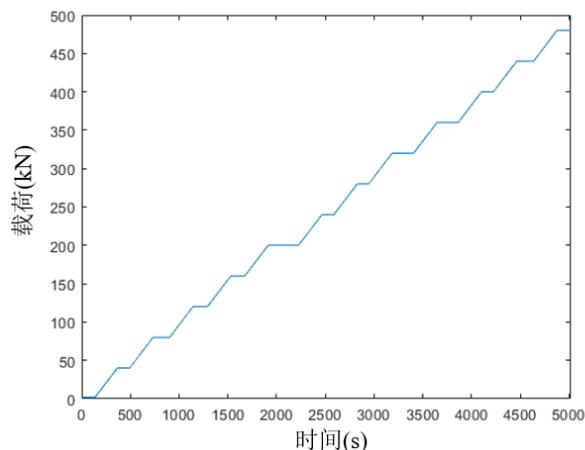


图 6.18 试件 1 混凝土压力试验机载荷

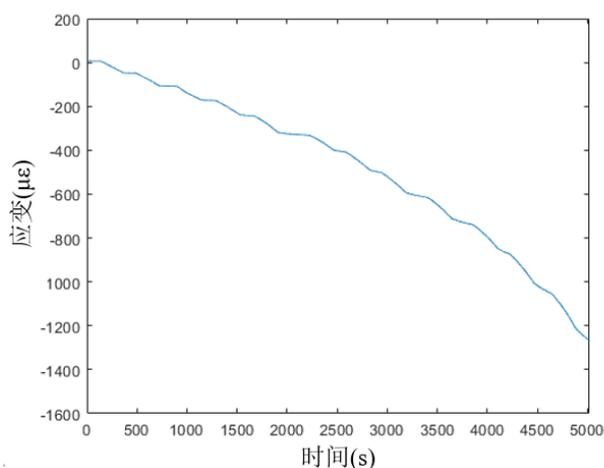


图 6.19 试件 1 混凝土应变读数平均值

图 6.18 和 6.19 分别展示了对试件 1 进行加载时混凝土压力试验机载荷的时程曲线。以及混凝土试件 1 的电阻式应变片与引伸计测得的混凝土应变读数取平均值的时程曲线。可以看出，对于该试件，在同样的混凝土载荷情况下，混凝土产生的压应变相较于试件 3 有所减小，这主要是因为该试件内部浇筑的智能骨料传感器相对于试件 3 体积更小，混凝土试件的中空区域更小，因此混凝土试件整体具有更高的抗压强度。这也为后续混凝土智能骨料的设计提供了参考，需要尽量使智能骨料传感器小型化和高强度，以避免其对混凝土构件的承载能力等产生影响。随着混凝土试验机载荷的不断增大，混凝土试件的应变也逐渐增大，并且应变与载荷的关系逐渐呈现出非线性。

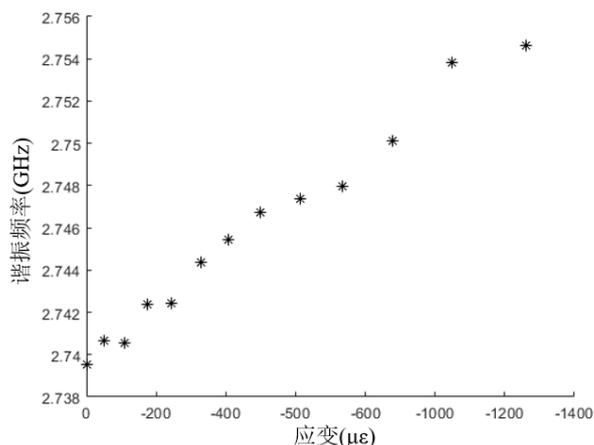


图 6.20 试件 1 智能骨料传感器长度方向谐振频率与混凝土应变之间的对应关系

将试件 1 每级加载后矢量网络分析仪测得的智能骨料传感器谐振频率提取出来,其与混凝土应变之间的对应关系如图 6.20 所示。对于该浇筑了基于 RO3010 介质板的智能骨料传感器的混凝土试件,随着混凝土载荷的增加,智能骨料内部组合式贴片天线重叠长度会增加,进而导致整体辐射贴片长度方向的尺寸减小,这与基于 RT/duroid 5880 介质板的智能骨料传感器有所不同。因此,对于试件 1 和试件 2,随着混凝土的不断压缩,其内部智能骨料传感器的谐振频率是不断增加的。试件 1 测得的智能骨料传感器灵敏度约为 $1.219 \text{ MHz}/100 \mu\epsilon$,该灵敏度显著高于基于 RT/duroid 5880 介质板的组合式贴片天线传感器封装形成的智能骨料,也进一步证明了基于 RO3010 介质板小型化组合式贴片天线传感单元的有效性。试件 2 也表现出与试件 1 类似的谐振频率偏移趋势,但是试件 2 在前几级加载过程中谐振频率的偏移并不明显,分析其原因可能是在智能骨料浇筑的过程中有部分混凝土渗入到橡胶管与碳纤维的接口处,进而导致传动杆移动不顺畅,影响了混凝土内部变形的感知。因此,在后续智能骨料传感器的设计开发中,应注意接口处的处理,避免混凝土浇筑时渗入从而对智能骨料的传感性能造成影响。



图 6.21 压缩破坏后的混凝土试件

在对各混凝土试件持续加载的过程中,当载荷加载至约 480 kN,试件 3 出现了破坏,最终破坏形态如图 6.21 所示。而试件 1、试件 2 和试件 4 在该级载荷下暂未发生破坏。此外,在该级荷载下,混凝土试件 4 的变形也大于试件 1 与试件 2。因此,在后续智能骨料传感器设计时,应注意尽量减小智能骨料传感器的尺寸,实现智能骨料传感器的小型化,以避免其对混凝土构件承载能力产生影响。在本章混凝土压缩相关试验中,由于贴片天线传感单元采用了屏蔽材料封装的技术路线,因而可以避免封装层外混凝土介电常数变化即混凝土湿度的干扰。此外,在混凝土压缩过程中,实验室环境温度也保持了相对恒定,试验主要针对智能骨料的形变感知能力进行了验证。

6.4 本章小结

本章主要基于前文研发的组合式贴片天线传感器,设计了一种适合埋置于混凝土内部进行形变感知的无源智能骨料,并将其浇筑于混凝土试件中,对其进行了一系列试验探究,具体包括:

(1) 对基于贴片天线传感单元进行了封装设计,并确定了合适的形变传递机制,从而形成了一种可以埋置于混凝土内部的智能元件,实现对混凝土内部应变等信息的感知。

(2) 设计了相应的试验,将基于 RO3010 介质板与基于 RT/duroid 5880 介质板的两种智能骨料传感器浇筑于混凝土中,待试件养护完成后进行了混凝土压缩试验,以测试所设计的智能骨料传感器的性能,并对试验结果进行了分析讨论。

(3) 所设计的无源智能骨料传感器将前文基于贴片天线的多参数传感单元与封装材料等探究的集成,并通过试验初步证明了该智能骨料传感器的有效性与可行性。相关探究仍有待于进一步深入,主要集中在新形式的智能骨料封装设计、智能骨料的增敏机制以及有效稳定的无线问询方式等方面,以期实现对混凝土内部形变等参数的精准感知。

第7章 结论与展望

7.1 结论

本文将具有无源优势的贴片天线传感单元与智能骨料的传感器埋置形式相结合,设计了一种用于混凝土内部变形等参数感知的无源智能骨料。本论文的研究工作主要包括基于偏心馈电组合式贴片天线的多参数传感机理、贴片天线传感器的封装材料及其对传感单元电磁参数的影响相关研究、贴片天线传感单元的小型化设计方法及无线问询方式等,并将以上研究成果集成最终设计出一种无源智能骨料,将其埋置于混凝土中进行了相应的测试。主要研究成果及结论如下:

(1) 提出了一种新型的基于偏心馈电组合式贴片天线的结构变形和温度同步感知传感器,其主体贴片长度方向和宽度方向尺寸分别为61mm和51mm,并通过仿真模拟获得其最佳偏心馈电距离为8.5mm。在该偏心馈电距离下,贴片天线传感器的长度方向和宽度方向谐振模式均被较好的激发,其宽度和长度方向的一阶谐振频率分别设计在1.95GHz和2.5GHz附近。进一步,根据理论分析、多物理场耦合模拟和一系列试验,证明了该传感器的双向谐振频率偏移可以实现单一天线传感器对多参数的同步传感,其宽度方向的一阶谐振频率用于环境温度变化的感知,灵敏度为0.095 MHz/°C,其长度方向的一阶谐振频率偏移用于结构变形(裂缝宽度)的感知,灵敏度约为45 MHz/mm。探究了贴片天线传感器的温度自补偿机制,通过天线传感器宽度方向谐振频率偏移测得的环境温度对长度方向谐振频率进行补偿,用于温度补偿的天线长度方向一阶谐振频率灵敏度为0.132MHz/°C,从而避免了使用额外的温度传感器对监测变量进行温度补偿。此外,该组合式传感器的无应力结构可以避免形变传递比不完全和粘结强度不足的问题,使其具有更强的适用性。

(2) 探究了屏蔽材料与非屏蔽材料对贴片天线进行封装的两种技术路线,以及这两种不同的封装技术路线的适用场景。通过仿真验证了当采用电磁屏蔽材料作为贴片天线传感器的封装材料时,贴片天线传感器产生的电磁场会被限制在封装层尺寸范围内,贴片天线产生的电磁场不会影响到封装层以外的区域,因而封装层以外介电常数的改变不会影响贴片天线谐振频率,从而使其可以专注于变形和温度传感,避免外部环境含水率等因素的干扰。当采用非屏蔽材料进行封装时,电磁波可以轻易穿透这些材料,并且贴片天线的谐振频率会随着外部环境介电常数的改变发生一定的变化,可根据该原理实现贴片天线传感器对外部环境(含水率)等变化的表征。设计了一系列试验,当封装层内部预留空气层厚度为

10mm 时, 分别采用碳纤维、铜等屏蔽材料进行封装, 发现贴片天线在封装层上覆完全干燥海绵、体积含水率 10%海绵、体积含水率 25%海绵的情况下, 天线长度方向谐振频率均不偏移; 采用聚乙烯、亚克力等非屏蔽材料对贴片天线进行封装贴片天线在封装层上覆完全干燥海绵、体积含水率 10%海绵、体积含水率 25%海绵的情况下, 天线长度方向谐振频率偏移分别 1.05MHz, 1.1MHz。试验结果证明, 采用屏蔽材料封装天线传感器可以有效避免外部环境介电常数变化的干扰, 采用非屏蔽材料封装天线可以实现对外部环境变化的感知。

(3) 探究了贴片天线传感器的无线问询方式及小型化设计。根据贴片天线理论, 其谐振频率与介质层的介电常数相关, 介质层介电常数越高, 同样谐振频率所对应的天线尺寸越小。设计了基于 RO3010 介质板的组合式贴片天线传感单元, 其整体尺寸更小, 长度方向和宽度方向的整体尺寸分为 40mm 和 28mm, 面积减小为之前的 33.4%。该小型化贴片天线传感器的传感灵敏度更高, 试验测得其变形传感的灵敏度约为 116.1MHz/mm, 达到之前的 2.6 倍。为了提高组合式贴片天线传感器的适用性, 还对其无线问询方式进行了探究。当采用宽带天线正对贴片天线的进行无线扫频问询, 为了获得其长度和宽度方向的谐振频率, 需要将圆盘宽带天线旋转 90°, 分别对其两个方向进行无线扫频问询。当采用贴片天线连接宽带天线作为负载进行无线问询时, 可以同时测得天线两个方向的谐振频率。此外, 对贴片天线连接宽带天线作为负载进行问询的双宽带问询系统校准方式进行了探究, 进行了试验证明了所提出方法的可行性。

(4) 对基于组合式贴片天线的传感单元进行了封装设计, 采用碳纤维板对其进行封装, 以保护传感单元并避免埋置环境内部介电常数变化等对传感天线电磁参数的影响。确定了合适的形变传递机制, 通过传动端和传动杆等传递变形, 从而形成了一种可以埋置于混凝土内部的智能元件, 实现对混凝土内部应变等信息的感知。设计了相应的试验, 将基于 RO3010 介质板与基于 RT/duroid 5880 介质板的两种智能骨料传感器浇筑于混凝土中进行了压缩试验, 以测试所设计的智能骨料传感器的性能, 并对试验结果进行了分析讨论。试验结果表明, 传统的 RT/duroid 5880 基板传感单元封装设计而成的智能骨料灵敏度约为 0.598 MHz/100 $\mu\epsilon$, 高灵敏度小型化的 RO3010 基板传感单元设计而成的智能骨料灵敏度约为 1.219 MHz/100 $\mu\epsilon$ 。试验结果较好的证明了该基于贴片天线的无源智能骨料的变形传感性能。

7.2 进一步工作的方向

本文基于贴片天线的多参数感知传感单元设计及封装技术研究为智能骨料

的设计提供了新的思路,并且关于贴片天线传感单元的小型化研究与无线问询方式探究也为该智能骨料的进一步应用提供了有力的技术支撑。基于贴片天线的多参数感知无源智能骨料的研究前景广阔,本文的研究虽然取得了一定的进展,但囿于自身水平与当前试验条件,仍有许多待改进的地方以及值得进一步深入进行的研究工作,这里简要讨论如下:

(1) 基于贴片天线传感单元的多重增敏机制有待于进一步探究。本文所设计的传感单元可以检测到 0.01mm 的微小变形,但是将其封装设计为混凝土内部的变形传感单元时,较小的混凝土应变通常难以被准确感知。因此,关于贴片天线传感单元的增敏机制仍需要相应的研究,比如基于分形天线、耦合传感单元、柔性铰链等方式的变形增敏放大机制研究,以进一步提高该智能骨料的适用性。

(2) 贴片天线的无线问询方式仍有待于进一步深入研究。本文提出的贴片天线无线问询方式虽然在一定程度上可以避免传感器对线缆的依赖,但是宽带天线无线扫频问询的距离仍然受到一定限制,无线问询的距离约为 3cm 。因此,稳定有效的无线问询方式仍需进一步研究。

(3) 智能骨料的小型化方式有待于进一步研究。本文中虽然采用了增加介质层介电常数的方式实现了天线传感单元的小型化,但是传感单元封装后的尺寸仍然不够小,因此埋置于混凝土内部时会对混凝土试件造成一定的影响。在未来,可以采用多重的贴片天线小型化方法,如开槽增加辐射贴片电长度,辐射贴片分形等方式实现天线传感单元的进一步小型化,从而设计出尺寸更小灵敏度更高的智能骨料。

参考文献

- [1]. 李惠,鲍跃全,李顺龙,张东昱. 结构健康监测数据科学与工程[J]. 工程力学,2015,32:1-7.
- [2]. 李宏男,高东伟,伊廷华. 土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J]. 力学进展, 2008,38:151-166.
- [3]. Hobbs D W. Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk[J]. International Materials Reviews, 2001, 46(3): 117-144.
- [4]. Gardner D, Lark R, Jefferson T, et al. A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials[J]. Case studies in construction materials, 2018, 8: 238-247.
- [5]. Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 492-509.
- [6]. 吴智深, 张建. 结构健康监测先进技术及理论[M]. 科学出版社, 2015.
- [7]. Zhao Y, Liu Y, Li Y, et al. Development and Application of Resistance Strain Force Sensors[J]. Sensors, 2020,20(20):5826.
- [8]. Lee M, Kim M, SHO K, et al. A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(5):055004.
- [9]. Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. Sensors, 2016, 16(1): 99.
- [10]. Song G, Gu H, Mo Y L. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review[J]. Smart materials and structures, 2008, 17(3): 033001.
- [11]. Duffó G S, Farina S B. Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8): 2746-2751
- [12]. Gkantou M, Muradov M, Kamaris G S, et al. Novel Electromagnetic Sensors Embedded in Reinforced Concrete Beams for Crack Detection[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5175.
- [13]. Sun M, Staszewski W J, Swamy R N. Smart sensing technologies for structural health monitoring of civil engineering structures[J]. Advances in civil engineering, 2010: 724962.
- [14]. Gu H, Mo Y, Song G. Recent progress in smart aggregate-based structural health monitoring of civil structures[M]. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. 2010: 2462-2476.
- [15]. Yun C B, Cho S, Park H J, et al. Smart wireless sensing and assessment for civil infrastructure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 10(4): 534-550.
- [16]. Zhang J, Tian G, Marindra A, et al. A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications[J]. Sensors, 2017, 17(2): 265.
- [17]. 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(4).
- [18]. Mc Gee K, Anandarajah P, Collins D. A review of chipless remote sensing solutions based on RFID technology[J]. Sensors, 2019, 19(22): 4829.
- [19]. 粟冬鸣. RFID 传感网络的设计及在结构健康监测中的应用[D]. 电子科技大学, 2019.
- [20]. Xu Y, Dong L, Wang H, et al. A review of passive self-sensing tag[J]. Sensor Review, 2017, 37(3): 338-345.

- [21].何依依. 基于无源 RFID 标签天线的应变传感器的设计与研究[D]. 吉林大学,2019.
- [22].Meng 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.
- [23].Forouzandeh M, Karmakar N C. Chipless RFID tags and sensors: A review on time-domain techniques[J]. Wireless Power Transfer, 2015, 2(2): 62-77.
- [24].Cho C, Park J W, Kim K. Energy loss in cement-based material for efficient sensor deployment at a site[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(7): 547-553.
- [25].Hou S, Zhang H, Ou J. A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105035.
- [26].Kong Q, Fan S, Bai X, et al. A novel embeddable spherical smart aggregate for structural health monitoring: Part I. Fabrication and electrical characterization[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 095050.
- [27].Kong Q, Fan S, Mo Y, et al. A novel embeddable spherical smart aggregate for structural health monitoring: Part II. Numerical and experimental verifications[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 095051.
- [28].Gu H, Mo Y L, Song G. Recent progress in smart aggregate-based structural health monitoring of civil structures[M]. Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. 2010: 2462-2476.
- [29].Zhang H, Hou S, Ou J. Smart aggregates for monitoring stress in structural lightweight concrete[J]. Measurement, 2018, 122: 257-263.
- [30].马浩焱. 无线智能骨料结构健康监测系統研发与应用[D]. 沈阳建筑大学,2015.
- [31].Watters D G, Jayaweera P, Bahr A J, et al. Smart Pebble: wireless sensors for structural health monitoring of bridge decks[C]. Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures. International Society for Optics and Photonics, 2003, 5057: 20-28.
- [32].Zhou S, Deng F, Yu L, et al. A novel passive wireless sensor for concrete humidity monitoring[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1535.
- [33].Liu Y, Deng F, He Y, et al. Novel concrete temperature monitoring method based on an embedded passive RFID sensor tag[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1463.
- [34].Chen H, Zhou S, Deng F, et al. Novel concrete-temperature monitoring method by using embedded passive wireless sensor[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(9): 452-458.
- [35].Manzari S, Musa T, Randazzo M, et al. A passive temperature radio-sensor for concrete maturation monitoring[C]. 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA). IEEE, 2014: 121-126.
- [36].Quinn B, Kelly G. Feasibility of embedded wireless sensors for monitoring of concrete curing and structural health[C]. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7647: 764704.
- [37].Strangfeld C, Johann S, Bartholmai M. Smart RFID Sensors Embedded in Building Structures for Early Damage Detection and Long-Term Monitoring[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5514.
- [38].孙威. 利用压电陶瓷的智能混凝土结构健康监测技术[D]. 大连理工大学, 2009.
- [39].Kim S, Park S, Kim S, et al. Analysis of Short-Term Prestress Losses in Post-tensioned Structures Using Smart Strands[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16(1).1.
- [40].Kong Q, Song G. A comparative study of the very early age cement hydration monitoring using

- compressive and shear mode smart aggregates[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 17(2): 256-260.
- [41].Wu J, Kong Q, Li W, et al. Interlayer Slide Detection Using Piezoceramic Smart Aggregates Based on Active Sensing Approach[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(19): 6160-6166.
- [42].Li W, Kong Q, Ho SCM, et al. Feasibility study of using smart aggregates as embedded acoustic emission sensors for health monitoring of concrete structures[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11): 115031.
- [43].Ai D, Zhu H, Luo, H, et al. Mechanical impedance based embedded piezoelectric transducer for reinforced concrete structural impact damage detection: A comparative study[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 165: 472-483.
- [44].Yan S, Ma H, Li P, et al. Development and application of a structural health monitoring system based on wireless smart aggregates[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1641.
- [45].Xu Y, Dong L, Wang H, et al. A review of passive self-sensing tag[J]. *Sensor Review*, 2017, 37(3):338-345.
- [46].Cui L, Zhang Z, Gao N, et al. Radio Frequency Identification and Sensing Techniques and Their Applications-A Review of the State-of-the-Art[J]. *Sensor*, 2019, 19(18): 4012.
- [47].Jayawardana D. *Wireless Sensor System for Infrastructure Health Monitoring*[D]. Western Sydney University (Australia), 2017.
- [48].Dong H, Kang W, Liu L, et al. Wireless passive sensor based on microstrip antenna for metal crack detection and characterization[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(4): 045103.
- [49].Oprea A, Bârsan N, Weimar U, et al. Capacitive humidity sensors on flexible RFID labels[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 132(2): 404-410.
- [50].Zhang J, Tian G, Zhao A. Passive RFID sensor systems for crack detection & characterization[J]. *Ndt & E International*, 2017, 86: 89-99.
- [51].Caizzzone S, DiGiampaolo E. Passive RFID deformation sensor for concrete structures[C]. 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA). IEEE, 2014: 127-130.
- [52].Fan S, Chang T, Liu X, et al. A depolarizing chipless RFID tag with humidity sensing capability[C]. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. IEEE, 2018: 2469-2470.
- [53].Deng F, He Y, Li B, et al. Design of a slotted chipless RFID humidity sensor tag[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 264: 255-262.
- [54].Borgese M, Dicandia F A, Costa F, et al. An inkjet printed chipless RFID sensor for wireless humidity monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(15): 4699-4707.
- [55].Dong H, Kang W, Liu L, et al. Wireless passive sensor based on microstrip antenna for metal crack detection and characterization[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(4): 045103.
- [56].Lange D. *Passive Wireless Sensors for Monitoring Behavior of Recycled Aggregate Concrete*[R]. Research on Concrete Applications for Sustainable Transportation (RE-CAST), 2018.
- [57].Kharkovsky S. Microwave sensor technologies for structural health monitoring of infrastructure[C]. Proceedings of the Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2013), 9-11 September 2013, Istanbul Technical University. 2013.
- [58].宋国荣,王学东,吕炎,等. 基于矩形贴片天线的应变测量技术[J].北京工业大学学

- 报,2019,45(01):8-14.
- [59].宋国荣,文硕,吕炎,等. 基于 RFID 的微带天线应变传感器的仿真分析[J].北京工业大学学报,2018,44(05):716-724.
- [60].薛松涛, 蒋灿,谢丽宇,等. 基于矩形贴片天线的应变传感器模拟与测试[J]. 振动,测试与诊断, 2018, 38(1):136-142.
- [61].Alamin M, Tian G Y, Andrews A, et al. Corrosion detection using low-frequency RFID technology. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2012, 54(2): 72-75.
- [62].Lisowski M, Uhl T. Rfid based sensing for structural health monitoring. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 569: 1178-1185.
- [63].Zhang H, Yang R, He Y, et al. Identification and characterisation of steel corrosion using passive high frequency RFID sensors. *Measurement*, 2016, 92: 421-427.
- [64].Moradi E, Björninen T, Ukkonen L, et al. Characterization of embroidered dipole-type RFID tag antennas[C]. 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA). IEEE, 2012: 248-253.
- [65].徐康乾, 谢丽宇, 薛松涛,等. 大应变下贴片天线应变传感器的性能研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(01):53-59.
- [66].何存富,闫天婷,宋国荣,等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J].仪器仪表学报,2017,38(02):361-367.
- [67].Lopato P, Herbko M. A circular microstrip antenna sensor for direction sensitive strain evaluation[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 310.
- [68].Leng T, Huang X, Chang K, et al. Graphene nanoflakes printed flexible meandered-line dipole antenna on paper substrate for low-cost RFID and sensing applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1565-1568.
- [69].El H, Person C, Wiart J. A novel investigation of a broadband integrated inverted-F antenna design; application for wearable antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3843-3846.
- [70].Huang H. Flexible Wireless Antenna Sensor: A Review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(10): 3865-3872.
- [71].Mohammad I and Huang H. An Antenna Sensor for Crack Detection and Monitoring[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2011, 14(1): 47-53.
- [72].Deshmukh S, Xu X, Mohammad I, et al. Antenna sensor skin for fatigue crack detection and monitoring[J]. *Smart Structures and Systems*, 2011, 8(1): 93-105.
- [73].Tata U, Huang H, Carter R, et al. Exploiting a patch antenna for strain measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(1): 015201.
- [74].Xu X, Huang H. Battery-less wireless interrogation of microstrip patch antenna for strain sensing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2012, 21(12): 125007.
- [75].Mohammad I, Huang H. Shear sensing based on a microstrip patch antenna[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 105705.
- [76].Huang H, Farahanipad F, Singh A. A Stacked Dual-Frequency Microstrip Patch Antenna for Simultaneous Shear and Pressure Displacement Sensing. [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(24): 8314-8323.
- [77].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(8): 085009.

- [78]. 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.
- [79]. Cho C, Yi X, Li D, et al. An eigenvalue perturbation solution for the multiphysics simulation of antenna strain sensors[J]. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 2017, 2: 49-57.
- [80]. Li D and Wang Y. Thermally Stable Wireless Patch Antenna Sensor for Strain and Crack Sensing[J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 3835.
- [81]. Cho C, Yi X, Li D, et al. Passive wireless frequency doubling antenna sensor for strain and crack sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(14): 5725-5733.
- [82]. Yi X, Cho C, Wang Y, et al. Battery-free slotted patch antenna sensor for wireless strain and crack monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 18(6): 1217-1231.
- [83]. Ahbe D, Beer S, Zwick T, et al. Dual-band antennas for frequency-doubler-based wireless strain sensing[J]. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2012, 11: 216-219.
- [84]. 周凯, 刘志平, 毛艳飞, 孔璞萍, 柯亮. 贴片天线传感器平面二维应变测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(01): 136-143.
- [85]. Thai 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 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(3): 1385-1396.
- [86]. Mandel C, Kubina B, Schüßler M, et al. Passive chipless wireless sensor for two-dimensional displacement measurement[C]. *2011 41st European Microwave Conference*. IEEE, 2011: 79-82.
- [87]. Wan G, Li M, Zhang M, et al. A Novel Information Fusion Method of RFID Strain Sensor Based on Microstrip Notch Circuit[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 8002610.
- [88]. Chen L, Liu L, Kang L, et al. A Multibranch U-Shaped Tunable Encoding Chipless RFID Strain Sensor for IoT Sensing System[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023;10(6):5304-5320.
- [89]. Chen L, Kang L, Liu L, et al. An encoded reconfigurable RFID strain sensor and its information fusion method[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022;31(10): 105011.
- [90]. Wan G, Kang W, Wang C, et al. Separating strain sensor based on dual-resonant circular patch antenna with chipless RFID tag[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(1): 15007.
- [91]. Wang L, Chung K, Zong W, et al. A Highly Sensitive Microwave Patch Sensor for Multidirectional Strain Sensing Based on Near Orthogonal Modes[J]. *IEEE Access*, 2021, 09: 24669-24681.
- [92]. Wang L, Chung K, Gao S, et al. A Novel Multidirectional Strain Sensor Realized by a 3D Microstrip-Line Fed Near-Circular Patch Antenna[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2021, 36(9): 1237-1243.
- [93]. Chung K, Wang L, Luo J, et al. Comparative study on directional sensitivity of patch-antenna-based strain sensors[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 08:22398-22407.
- [94]. 王玲玲. 简并正交模贴片天线应变传感器及其应变监测技术研究[D]. 青岛理工大学, 2021.
- [95]. Chung K, Wang L, Ghannam M, et al. Prediction of concrete compressive strength based on early-age effective conductivity measurement[J]. *Journal Of Building Engineering*, 2021, 35:

- 101998.
- [96].刘瑞琦. 基于平面传输线的水泥基材料应变传感器研究[D]. 青岛理工大学, 2019.
- [97].Xue S, Xu K, Xie L, et al. Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085012.
- [98].Xue S, Yi Z, Xie L, et al. A Displacement Sensor Based on a Normal Mode Helical Antenna[J]. *Sensors*, 2019, 19(17): 3767.
- [99].Xue S, Yi Z, Xie L, et al. A Passive Wireless Crack Sensor Based on Patch Antenna with Overlapping Sub-Patch[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4327.
- [100].Xue S, Yi Z, Xie L, et al. Double-Frequency Passive Deformation Sensor Based on Two-Layer Patch Antenna[J]. *Smart Structure and System*, 2020, 27(6):969-982.
- [101].Xue S, Li X, Xie L, et al. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch[J]. *Structural Health Monitoring*, 2022, 21(5): 2231-2243.
- [102].Jiang K, Xie L, Xue S, et al. Capacitively-coupled dual ring antennas for bolt loosening detection[J]. *Measurements*, 2022, 200: 111605.
- [103].Wan C, Zheng Z, Xue S, et al. An angle sensor based on a sector ring patch antenna for bolt loosening detection[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(4): 045009.
- [104].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.
- [105].Cho C, Yi X, Wang Y, et al. Compressive strain measurement using RFID patch antenna sensors[C]. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014*. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9061: 90610X.
- [106].Yao J, Tjuatja S, Huang H. Real-time vibratory strain sensing using passive wireless antenna sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4338–4345.
- [107].Yi Z, Xie L, Xue S, et al. A Passive Wireless Acceleration Sensing System Based on Patch Antenna and FMCW Radar[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(12): 10662-10674.
- [108].易卓然, 薛松涛, 谢丽宇,等. 无源无线加速度计的系统设计与仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(2): 211-218.
- [109].Girbau D, Ramos Á, Lazaro A, et al. Passive wireless temperature sensor based on time-coded UWB chipless RFID tags[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(11): 3623-3632.
- [110].Jeong S, Hester J, Su W, et al. Read/Interrogation Enhancement of Chipless RFIDs Using Machine Learning Techniques[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(11): 2272-2276.
- [111].Teng K H, Kot P, Muradov M, et al. Embedded smart antenna for non-destructive testing and evaluation (NDT&E) of moisture content and deterioration in concrete[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 547.
- [112].Sanders J W, Yao J, Huang H. Microstrip patch antenna temperature sensor[J]. *IEEE sensors journal*, 2015, 15(9): 5312-5319.
- [113].Liu Z, Chen K, Li Z, et al. Crack monitoring method for an FRP-strengthened steel structure based on an antenna sensor[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2394.
- [114].Ke L, Liu Z, Yu H. Characterization of a patch antenna sensor's resonant frequency response in identifying the notch-shaped cracks on metal structure[J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 110.
- [115].Liu Z, Yu H, Zhou K, et al. Influence of Volumetric Damage Parameters on Patch Antenna Sensor-Based Damage Detection of Metallic Structure[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3232.

- [116].Low J H, Chee P S, Lim E H, et al. Compact organic liquid dielectric resonator antenna for air pressure sensing using soft material[J]. Scientific reports, 2020, 10(1): 1-10.
- [117].Tan Q, Ji Y, Lv W, et al. Signal Readout of LC Pressure Sensor Operated in Multi-dimensional rotating Environment with Dual-inductance Resonator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 296: 178-185.
- [118].Kou H, Tan Q, Wang Y, et al. A microwave SIW sensor loaded with CSRR for wireless pressure detection in high-temperature environments[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 53(8): 085101.
- [119].Tchafa F, Huang H. Microstrip patch antenna for simultaneous strain and temperature sensing[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(6): 065019.
- [120].Tchafa F M, Huang H. Microstrip patch antenna for simultaneous temperature sensing and superstrate characterization[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(10): 105009.
- [121].Corchia L, Monti G, Tarricone L. A frequency signature RFID chipless tag for wearable applications[J]. Sensors, 2019, 19(3): 494.
- [122].Meng 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.
- [123].Luo C, Gil I, Fernández-García R. Wearable textile UHF-RFID sensors: A systematic review[J]. Materials, 2020, 13(15): 3292.
- [124].Min S H, Kim H J, Quan Y J, et al. Stretchable chipless RFID multi-strain sensors using direct printing of aerosolised nanocomposite[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 313: 112224.
- [125].Burton A, Sun P, Lynch J. Bio-compatible wireless inductive thin-film strain sensor for monitoring the growth and strain response of bone in osseointegrated prostheses[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 20(3): 749-767.
- [126].Park Y, Lee S, Park J. Recent progress in wireless sensors for wearable electronics[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4353.
- [127].Yi Z, Xue S, Xie L, et al. Detection of setting time in cement hydration using patch antenna sensor[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(1): e2855.
- [128].Jiang S, Georgakopoulos S. Optimum wireless power transmission through reinforced concrete structure[C]. 2011 IEEE International Conference on RFID. IEEE, 2011: 50-56.
- [129].Abadi A. Wireless Sensors Embedded in Concrete[C]. EWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring. 2014.
- [130].Dalke R A, Holloway C L, McKenna P, et al. Effects of reinforced concrete structures on RF communications[J]. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2000, 42(4): 486-496.
- [131].Jin X, Ali M. Embedded antennas in dry and saturated concrete for application in wireless sensors[J]. Progress in electromagnetics research, 2010, 102: 197-211.
- [132].Martinez M, van der Weide D. Chipless RFID temperature threshold sensor and detection method[C]. 2017 IEEE International Conference on RFID (RFID). IEEE, 2017: 61-66.
- [133].Jeong S, Son H. UHF RFID tag antenna for embedded use in a concrete floor[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10: 1158-1161.
- [134].Ozbey B, Demir H V, Kurc O, et al. Wireless measurement of elastic and plastic deformation by a metamaterial-based sensor[J]. Sensors, 2014, 14(10): 19609-19621.
- [135].Ozbey B, Demir H, Kurc O, et al. Wireless sensing in complex electromagnetic media:

- Construction materials and structural monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5545-5554.
- [136].Ozbey B, Erturk V, Demir H, et al. A wireless passive sensing system for displacement/strain measurement in reinforced concrete members[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 496.
- [137].Ozbey B, Unal E, Ertugrul H, et al. Wireless displacement sensing enabled by metamaterial probes for remote structural health monitoring[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 1691-1704.
- [138].Salama R, Kharkovsky S. An embeddable microwave patch antenna module for civil engineering applications[C]. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE, 2013: 27-30.
- [139].Salama R. Microwave wireless power transmission techniques with microstrip antennas in human tissue for biomedical applications[D]. University of Western Sydney (Australia), 2015.
- [140].Sabrin S, Kharkovsky S, Salama R. Dielectric resonator antenna integrated sensors for characterization of concrete[C]. Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST). IEEE, 2017: 1-6.
- [141].Salama R, Liyanapathirana R. Design of a Multi-Zone Dielectric Fresnel Lens for Microwave Wireless Power Transfer in Concrete Structures[C]. 2018 2nd International Conference On Electrical Engineering (EECon). IEEE, 2018: 171-176.
- [142].Shams K, Miah A, Ali M. Gain and transmission properties of an embedded microstrip patch antenna for structural health monitoring application[C]. 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2007: 908-911.
- [143].Shams K, Ali M, Miah A. Characteristics of an embedded microstrip patch antenna for wireless infrastructure health monitoring[C]. 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 2006: 3643-3646.
- [144].Shams K, Ali M. Wireless power transmission to a buried sensor in concrete[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(12): 1573-1577.
- [145].Fallah R, Shafai L. Embedded microstrip patch antenna with superstrate[C]. *Proceedings of ISAP*. 2007.
- [146].Esmati Z. Microwave Antennas for Infrastructure Health Monitoring[D]. Western Sydney University (Australia), 2017.
- [147].Esmati Z, Kharkovsky S, Samali B. Wireless power transmission inside reinforced concrete slab using a resonant antipodal Vivaldi antenna[C]. 2016 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). IEEE, 2016: 118-121.
- [148].Esmati Z, Moosazadeh M. Reflection and transmission of microwaves in reinforced concrete specimens irradiated by modified antipodal Vivaldi antenna[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, 60(9): 2113-2121.
- [149].Castorina G, Di Donato L, Morabito A F, et al. Analysis and design of a concrete embedded antenna for wireless monitoring applications [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, 58(6): 76-93.
- [150].薛松涛, 易卓然, 谢丽宇,等.无应力组合贴片天线传感器温度性能模拟测试[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(10): 1439-1445.
- [151].Yi X, Vyas R, Cho C, et al. Thermal effects on a passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing[C]. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012*. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8345: 83450F.

- [152].Guan S, Xie L, Xue S, et al. Displacement sensor based on separated inverted-F antenna[C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). IEEE, 2019: 1-3.
- [153].Xue S, Zheng Z, Guan S, et al. A Capacitively-Fed Inverted-F Antenna for Displacement Detection in Structural Health Monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5310.
- [154].Yi Z, Xue S, Xie L, et al. A Slotted-Patch Antenna Sensor With Higher Sensitivity for Detecting Setting Time of Cement Paste[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 6005513.
- [155].何厅厅. 麦克斯韦电路在天线及微带电路中的初步应用[D]. 东南大学, 2011.
- [156].高建平. 电磁波工程基础:电磁理论基础、微波技术、天线基础[M]. 西北工业大学出版社, 2008.
- [157].江贤祚. 天线原理[M]. 北京航空航天大学出版社, 1993.
- [158].康行健. 天线原理与设计[M]. 北京理工大学出版社, 1995.
- [159].Kraus John D, Marhefka Ronald J. 天线[J]. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [160].王新稳,李萍,李延平. 微波技术与天线(第二版)[M]. 电子工业出版社, 2006.
- [161].Robert J. Weber. 微波电路引论: 射频与应用设计[M]. 电子工业出版社, 2005.
- [162].White Joseph F. 射频与微波工程实践导论[M]. 电子工业出版社, 2009.
- [163].李泽民,黄卉. 微波技术基础及应用[M]. 北京大学出版社, 2013.
- [164].周希朗. 微波技术与天线[M]. 东南大学出版社, 2015.
- [165].张钧,刘克诚,张贤铎,等. 微带天线理论与工程[M]. 北京: 国防工业出, 1988.
- [166].Constantine A Balanis. Antenna Theory Analysis and Design[M]. Wiley-Interscience, 2005.
- [167].Li X, Xie L, Lu W, et al. Structural health monitoring of a historic building during uplifting process: system design and data analysis[J]. Structural Health Monitoring, 2023, 14759217221135351.

致谢

四年的读博时光倏忽而过，仿佛还是昨天初入同济，转眼便已是毕业的时节了。四年来，度过了许多难忘的日子，犹记得开学典礼上的新奇与兴奋，也有科研遇到瓶颈时的苦恼与惆怅；有教研室的欢声笑语，也有疫情封校时的艰苦岁月。谨以此文，纪念自己的博士生活，感恩求学路上诸多良师益友的指导与帮助。

首先要感谢我的导师薛松涛老师。在同济求学期间，有幸拜入薛老师的门下。薛老师学贯中西，高屋建瓴，有着渊博的学识和丰富的工程经验，对待学术研究精益求精，始终像灯塔一样指引着我们，鼓励着我们在学术的海洋里探索。薛老师不仅在专业知识与学术研究方面给了我们诸多指导，同时也在日常生活中给了我们诸多关心和帮助，为学生的成长发展尽心尽力。在此向薛老师致以深深的感谢！

感谢我的副导师谢丽宇老师。谢老师儒雅随和，认真负责，有着敏锐的学术洞察力，带领我们在无源传感器这一新兴的交叉学科领域深入探索，并在我们的研究道路上给出了很多具体细致的指导，使我们面临科研难题时总能够找到合适的解决方案。可以说我们在学术路上的每一步成长都离不开谢老师的指导与帮助。在日常生活中，谢老师也为教研室组织了丰富多彩的活动，使教研室成为一个其乐融融的大家庭。在此衷心感谢谢老师的指导与帮助！

感谢教研室的唐和生老师，唐老师兢兢业业，治学严谨，在科研与生活上也给我们提供了诸多帮助。感谢电信学院的万国春老师，万老师乐观开朗，平易近人，有着深厚的电磁学理论功底与传感器设计经验，在交叉课题研究上也给我们提供了极大的帮助。感谢钟国麟老师在电磁学方面帮忙解答了我的诸多困惑，也对我的课题提出了许多有益的指导。感谢硕士期间的导师雷鹰老师对我的指导帮助，鼓励我在科研的道路上不断砥砺前行。在此对几位老师表示感谢！

学贵得师，亦贵得友。感谢天线小组的徐康乾，管帅，易卓然，姜康，郑志泉，夏子涵，庞琳，吴通海，范永瑞琛，王郝丽，李泽宇等同门和师妹，大家相互帮助，共同进步，一起度过了许多难忘的时光。也希望大家未来还能时常相聚。

感谢黄金山，杨雄骏，张睿，史钦豪等师兄师弟在我小论文撰写和投稿过程中对我提供的诸多帮助。感谢电信学院的学弟学妹们在我进行传感器试验过程中提供的诸多帮助。

感谢已毕业的杨朋超、仝运佳等师兄师姐，在我科研入门之初给了许多建议与帮助。感谢郭雪媛、班鑫磊、张力、谢雅娟等同门，大家一起吃吃喝喝，一起努力科研，度过了许多快乐的日子。感谢康建飞、陈子暘、曹跃辉、杨虎、郭泰昆、车兴儒等师弟和吴雅琴、薛智奇等师妹，大家有缘相聚在 506，使教研室成为了一个充满了欢声笑语的大家庭。

感谢教研室在读的师弟师妹们在科研与生活上的诸多帮助。教研室就像一个大家庭，永远充满了温暖与关怀。师弟师妹们为教研室注入了新的活力，愿我们 506 大家庭继续共创辉煌。

感谢我的女朋友李晓迪的陪伴与鼓励，感谢我们一起走过的日子，愿未来我们诸事顺遂，所得皆所愿。

感谢我的父母家人，你们的爱与支持始终是我前进的动力，使我有勇气面对各种困难，不断成长为自己想要的样子。

二十余载漫漫求学路，至此已近尾声。自故乡，至大连，至厦门，再至上海，每到一处，总有诸多温暖与善意不期而遇。感恩多年来受到的所有的帮助与鼓励，愿我的老师们工作顺利，身体健康；愿我的小伙伴们前程远大，万事胜意。

2023 年 11 月

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

李宪之, 男, 1994 年 1 月生。

2016 年 6 月毕业于大连理工大学水利水电工程专业, 获学士学位。

2019 年 6 月毕业于厦门大学建筑与土木工程专业, 获硕士学位。

2019 年 8 月入同济大学攻读博士学位。

已发表论文:

- [1] **Li Xianzhi**, Xue Songtao, Xie Liyu*, Wan Guochun. Simultaneous Crack and Temperature Sensing with Passive Patch Antenna. *Structural Health Monitoring*. 2023. (JCR Q1, 影响因子 6.6)
DOI:10.1177/14759217231184115
- [2] **Li Xianzhi**, Xie Liyu*, Lu Wensheng, Xue Songtao, Hong Changdi, Lan Wuji, Shi, Qin hao. Structural health monitoring of a historic building during uplifting process: system design and data analysis. *Structural Health Monitoring*. 2023. (JCR Q1, 影响因子 6.6)
DOI:10.1177/14759217221135351
- [3] **Li Xianzhi**, Xue Songtao, Xie Liyu*, Wan Guochun, Wan Chunfeng. An off-center fed patch antenna with overlapping sub-patch for simultaneous crack and temperature sensing. *Smart Materials and Structures*. 2022, 31(9): 095036. (JCR Q2, 影响因子 4.1)
- [4] **Li Xianzhi**, Zhang Rui, Wan Chunfeng, Xue Songtao, Xie Liyu*, Tong Yunjia. Additional damping force identification of passively controlled structures based on a Gillijn De Moor filter. *Measurement*. 2023. (JCR Q1, 影响因子 5.6)
DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113883
- [5] Xue Songtao, **Li Xianzhi**, Xie Liyu*, Yi Zhuoran, Wan Guochun. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch. *Structural Health Monitoring*. 2022, 21(5): 2231-2243. (JCR Q1, 影响因子 6.6)
- [6] Huang Jinshan, **Li Xianzhi**, Zhang Fubo, Lei Ying*. Identification of joint structural state and earthquake input based on a generalized Kalman filter with unknown input. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021, 151: 107362. (JCR Q1, 影响因子 8.4)
- [7] Huang Jinshan, **Li Xianzhi**, Yang Xiongjun, Zheng zhupeng, Lei Ying*. Experimental validation of the proposed extended Kalman filter with unknown inputs algorithm based on data fusion. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. 2020, 39(4):835-849. (JCR Q2, 影响因子 2.3)
- [8] Lei Ying*, Huang Jinshan, Qi Chengkai, Zhang Xin, **Li Xianzhi**. Parallel Substructure Identification of Linear and Nonlinear Structures Using Only Partial Output Measurements. *Journal of Engineering Mechanics*. 2022, 148(7): 04022033. (JCR Q2, 影响因子 3.3)
- [9] 谢丽宇, 李宪之, 张睿, 薛松涛*. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的消能减震结构及附加阻尼力识别. *湖南大学学报(自然科学版)*. 2020, 47(11):66-73. (EI 检索)

在投论文:

- [1] **Li Xianzhi**, Xue Songtao, Xie Liyu*, Wan Guochun. A miniaturized passive wireless patch antenna sensor for structural crack sensing.
- [2] Xue Songtao, Wang Haoli, Xie Liyu, **Li Xianzhi***, Zheng Zhiquan, Wan Guochun. A double-layer circular patch antenna sensor for bolt loosening detection.
- [3] Huang Jinshan, Lei Ying, **Li Xianzhi***. An adaptive generalized extended Kalman filter for real-time identification of structural system, state and input based on sparse measurement.

获得奖励:

- [1] 海峡两岸高校师生土木工程监测与控制研讨会论文竞赛 二等奖. 2023.07 中国香港.

申请专利:

- [1] 谢丽宇, **李宪之**, 薛松涛. 基于组合贴片天线的结构形变温度同步监测传感器和系统(发明专利, 已授权, 专利号: 202110426847.6)
- [2] 谢丽宇, **李宪之**, 薛松涛. 基于贴片天线的单向应变智能骨料、监测传感系统及方法(发明专利, 实质审查阶段, 专利号: 202211340969.4)
- [3] 薛松涛, **李宪之**, 谢丽宇. 基于贴片天线的双向应变智能骨料、监测传感系统及方法(发明专利, 实质审查阶段, 专利号: 202211340981.5)