



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

基于贴片天线的混凝土高灵敏度
无源无线智能骨料

(国家自然科学基金面上项目 No. 52378311、52178298)

姓 名：吴通海

学 号：2132252

学 院：土木工程学院

学科门类：工学

专业学位类别：土木水利

专业领域：土木工程

研究方向：防灾减灾工程及防护工程

指导教师：谢丽宇

二〇二四年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A thesis submitted to

Tongji University in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Master of Engineering

High Sensitivity Passive Wireless Smart Aggregate for Concrete Based on Patch Antennas

(Supported by Natural Science Foundation of China

No. 52378311、52178298)

Candidate: Wu Tonghai

Student Number: 2132252

School/Department: School of Civil Engineering

Categories: Engineering

First-level Discipline: Civil and Hydraulic Engineering

Second-level Discipline: Civil Engineering

Research Fields: Disaster Mitigation for Structures

Supervisor: Xie Liyu

May 2024

基于贴片天线的混凝土高灵敏度无源无线智能骨料

吴通海

同济大学

摘要

混凝土作为重要的建筑材料，在土木工程领域被广泛应用。其具有良好的耐久性，但长期使用过程中会受到外界环境和荷载等因素的影响而发生劣化，从而可能影响构件和结构的性能，给结构的安全运行带来潜在风险。

混凝土结构的状态可以通过局部信息（变形、损伤等）和全局信息（动力响应等）得知。在混凝土结构的整个生命周期中，有必要对混凝土结构的两种信息进行监测，从而及时发现结构安全隐患并采取必要措施以保证结构的安全可靠使用。目前，应用于结构健康监测的大部分传感技术常常需要有线的电源供应和线缆信号的传输，使得传感系统的安装和维护变得更加困难。在这种情况下，需要寻找一种更为经济、方便和环保的技术，以满足现代混凝土结构的监测与维护需求。

基于贴片天线的无源无线传感技术为土木工程监测提供了一种成本低、结构简单、可埋置的新技术手段，将天线作为传感单元并同时实现信息传递，避免了传统传感器需要有线电源供应和信号传输的问题，更适合混凝土结构的智能监测与运维。本文旨在将具有无源无线优势的贴片天线传感器与混凝土智能骨料相结合，形成一种既能埋置于混凝土内部作为骨料受力，又能够高灵敏地监测混凝土局部信息（变形）和全局信息（动力响应）的智能骨料。本文的研究内容如下：

（1）为了实现对混凝土变形这一局部信息的监测，提出了一种用于混凝土微小形变监测的带有空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器作为智能骨料的传感单元。该传感器将贴片天线分离为馈电部分和辐射部分，两者之间引入空气间隙。当两部分发生相对移动时，空气间隙厚度发生变化，贴片天线的谐振频率随空气间隙厚度发生变化，从而可以通过天线谐振频率对变形进行监测。在高频仿真模拟器（High Frequency Structure Simulator, HFSS）中进行了仿真模拟，并进行了天线加工和测试。实验结果表明，所提出的天线传感器谐振频率因空气间隙厚度变化而偏移且灵敏度高，适用于混凝土结构局部的微小形变监测。

（2）为了进一步提高智能骨料的灵敏度，使智能骨料更加适用于混凝土微小形变监测，根据所提出的传感器的性能目标利用 COMSOL 仿真软件设计了智能骨料的增敏机构，并将其与智能骨料封装外壳一同加工打印，使其能够同时起到应变传递和变形增敏的效果。由于添加智能骨料后的混凝土应变与不添加智能骨料的真实应变有所不同，提出了协调变形差异系数以量化两者差异程度。

进行了一系列仿真模拟以探究封装外壳壁厚、高宽比等多种因素对协调变形差异系数的影响。建立了封装外壳与增敏机构联合模型，探究了外壳-增敏机构一体加工埋入混凝土后两者相互作用下的协调变形差异现象，验证了无智能骨料扰动的混凝土真实应变与天线空气间隙之间存在线性关系。

(3) 为了验证采用所提出的带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器作为传感单元、与增敏机构一体 3D 打印的外壳作为封装的智能骨料的可行性，制备了智能骨料实物模型。将智能骨料与混凝土浇筑在一起，养护后进行混凝土轴向压缩试验，以测试其埋置于混凝土中的实际工作性能，并对试验结果进行了分析和讨论。试验结果表明该智能骨料可以通过谐振频率偏移实现对混凝土内部局部变形的感知，证明了其可行性。

(4) 为了在监测变形局部信息的同时监测动力响应这一全局信息，提出了一种适用于调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 高频访问的组合式贴片天线传感器。FMCW 雷达这种询问天线的方式可以同时适用于静态、准静态物理量监测 (变形) 和动态物理量监测 (动力响应)。该加速度传感器通过惯性力来改变的总辐射长度变化，从而导致的天线传感器谐振频率的偏移，以此来表征加速度，并且传感单元本体不受惯性力影响，有效提高了其对结构监测的可用性和耐久性。通过基于 COMSOL 的仿真验证了加速度传感器感知节点的可行性。通过实验研究了加速度传感节点和无线询问系统的实际可行性。

最后，对无源无线智能骨料研究工作及其所面临的问题进行了简要探讨，并对未来研究方向做出了展望。

关键词：结构健康监测，贴片天线传感器，无源无线，智能骨料，柔性铰链，增敏机构，加速度传感器、FMCW 雷达

ABSTRACT

As an important building material, concrete is widely used in civil engineering. It has good durability, but it will be affected by external environment and load and other factors during long-term use and deteriorate, which may affect the performance of components and structures, and bring potential risks to the safe operation of structures.

The state of concrete structure can be known by local information (deformation, damage, etc.) and global information (dynamic response, etc.). In the whole life cycle of the concrete structure, it is necessary to monitor the two kinds of information of the concrete structure, find the structural safety risks in time and take necessary measures to ensure the safe and reliable use of the structure. At present, most of the sensing technologies commonly used in structural health monitoring often require wired power supply and cable signal transmission, which makes the installation and maintenance of the sensing system more difficult. In this case, it is necessary to find a more economical, convenient and environmentally friendly technology to meet the monitoring and maintenance needs of modern concrete structures.

Passive wireless sensor technology based on patch antenna provides a new technical means of low cost, simple structure and embedding for civil engineering monitoring. The antenna is used as a sensing unit to realize inquiry and information transmission, which avoids the problem that traditional sensors need wired power supply and signal transmission, and is more suitable for intelligent monitoring and operation of concrete structures. This paper aims to combine the patch antenna sensor with the advantage of passive wireless and form a smart aggregate of concrete that can not only be buried inside the concrete as an aggregate to be stressed, but also monitor the local information (deformation) and global information (dynamic response) of the concrete with high sensitivity. The research contents of this paper are as follows:

(1) In order to realize the monitoring of the local information of concrete deformation, an aperture coupling fed patch antenna sensor with air gap is proposed as the sensing unit of intelligent aggregate for the small deformation monitoring of concrete. The sensor separates the patch antenna into a feeding part and a radiating part, and an air gap is introduced between them. When the two parts move relative to each other, the air gap thickness changes, and the resonant frequency of the patch antenna changes with the air gap thickness, so that the deformation can be monitored by the

antenna resonant frequency. The simulation is carried out in the High Frequency Structure Simulator (HFSS), and the antenna is fabricated and tested. The experimental results show that the resonant frequency of the proposed antenna sensor is offset by the change of air gap thickness and the sensitivity is high, which is suitable for the monitoring of local small deformation of concrete structures.

(2) In order to further improve the sensitivity of intelligent aggregate and make intelligent aggregate more suitable for concrete micro-deformation monitoring, the sensitivity enhancement mechanism of intelligent aggregate is designed by COMSOL simulation software according to the performance target of the proposed sensor, and it is processed and printed together with the intelligent aggregate packaging shell, so that it can play the effect of strain transfer and deformation sensitization at the same time. Since the strain of concrete after adding intelligent aggregate is different from the real strain without adding intelligent aggregate, the coordinated deformation difference coefficient is proposed to quantify the degree of difference between them. A series of simulations were carried out to explore the influence of various factors such as shell wall thickness and aspect ratio on the coordinated deformation difference coefficient. The joint model of the encapsulation shell and the sensitization mechanism is established, and the coordinated deformation difference phenomenon under the interaction between the shell and the sensitization mechanism after the integrated processing of the embedded concrete is explored. It is verified that there is a linear relationship between the real strain of concrete without intelligent aggregate disturbance and the air gap of the antenna.

(3) In order to verify the feasibility of using the proposed aperture coupling fed patch antenna sensor with air gap as the sensing unit and the 3D printed shell integrated with the sensing mechanism as the packaged smart aggregate, a physical model of the smart aggregate was prepared. Two kinds of intelligent aggregates with different sensitifying mechanism and encapsulation materials were poured together with concrete, and axial compression test of concrete was carried out after curing to test the actual working performance of the embedded and concrete, and the test results were analyzed and discussed. The experimental results show that the intelligent aggregate can realize the perception of the internal local deformation of concrete through the resonant frequency offset, which proves its feasibility.

(4) In order to monitor both the local information of deformation and the global information of dynamic response, a combined patch antenna sensor is proposed, which

is suitable for high-frequency access of FMCW radar. FMCW radar can be applied to static, quasi-static physical quantity monitoring (deformation) and dynamic physical quantity monitoring (dynamic response) at the same time. The acceleration is characterized by the shift of the resonant frequency of the antenna sensor caused by the change of the total radiation length caused by the inertial force, and the sensing unit itself is not affected by the inertial force, which effectively improves its availability and durability for structural monitoring. The feasibility of the sensing node of the acceleration sensor is verified by COMSOL-based simulation. Experiments were conducted to investigate the practical feasibility of the sensing node and the wireless interrogation system.

Finally, the research work of passive smart aggregates using patch antennas for multi-parameter sensing and the problems it faces are briefly discussed, and the future research direction is prospected.

Key Words: Structural health monitoring, Patch antenna sensor, Passive wireless, Smart aggregate, Flexible hinge, Sensitization mechanism, Acceleration sensor, FMCW radar

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 文献综述.....	3
1.2.1 混凝土智能传感器及智能骨料.....	3
1.2.2 基于微带贴片天线的传感器.....	5
1.2.3 柔性铰链位移放大机构增敏.....	8
1.3 先行研究.....	10
1.4 本文技术路线.....	12
1.5 主要研究内容.....	13
第 2 章 智能骨料设计基本原理	15
2.1 电磁场和天线基本理论.....	15
2.1.1 麦克斯韦方程组.....	15
2.1.2 天线传输模型.....	16
2.2 贴片天线谐振频率.....	17
2.2.1 利用谐振腔模型贴片天线谐振频率计算.....	18
2.2.2 带空气间隙的贴片天线.....	21
2.2.3 孔径耦合馈电贴片天线.....	22
2.3 柔性铰链增敏机构.....	23
2.4 本章小结.....	29
第 3 章 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器	30
3.1 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线模型.....	30
3.1.1 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线设计图.....	30
3.1.2 理论设计.....	32
3.2 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线仿真.....	34
3.2.1 HFSS 建模	34
3.2.2 仿真结果.....	36
3.3 实验研究.....	37
3.4 本章小结.....	41
第 4 章 基于柔性铰链的智能骨料增敏机构与封装外壳	43
4.1 材料选择.....	43
4.1.1 封装外壳材料.....	43
4.1.2 增敏机构材料.....	46
4.2 增敏机构模型建立与优化.....	48
4.2.1 模型建立.....	48

4.2.2 参数分析与确定.....	49
4.3 封装外壳模型协调变形影响因素探究.....	52
4.5 本章小结.....	61
第 5 章 无源无线高灵敏度智能骨料实验	63
5.1 智能骨料及实验装置.....	63
5.1.1 智能骨料实物制作.....	63
5.1.2 混凝土试件浇筑.....	65
5.2.1 实验装置及过程.....	66
5.2.2 实验结果及分析.....	68
5.3 本章小结.....	72
第 6 章 适用于 FMCW 雷达高频访问的加速度传感器	74
6.1 短接组合式天线加速度传感器模型.....	74
6.2 FMCW 雷达高频访问机制.....	78
6.3 天线加速度传感器仿真.....	80
6.4 基于 FMCW 雷达的天线加速度传感器实验.....	83
6.4.1 天线加速度传感器的校准.....	83
6.4.2 天线加速度传感器的实验设置.....	84
6.4.3 实验结果.....	85
6.4 本章小结.....	88
第 7 章 结论与展望	89
7.1 结论.....	89
7.2 展望.....	90

第1章 绪论

1.1 引言

随着社会的快速发展和建筑物数量的不断增加，对建筑结构的安全性和稳定性提出了更高的要求。然而，由于诸如自然灾害、材料老化、结构设计缺陷等因素的存在，建筑物的结构安全往往面临挑战，导致安全事故频发。例如，2023年7月23日黑龙江齐齐哈尔市第三十四中学体育馆坍塌，2022年4月29日湖南长沙望城区自建房倒塌，2020年3月福建泉州酒店坍塌事故。因此实时监测建筑物的结构健康状况，及时发现潜在的结构问题变得至关重要^[1]。

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，如房屋、桥梁、隧道、大坝等结构中。混凝土结构的状态可以分为局部信息（变形、损伤等）和全局信息（动力响应等）。

对于局部状态，混凝土在长期使用过程中，由于受到外界环境及荷载等因素的作用，混凝土材料发生劣化，从材料层面开始影响构件、结构的性能，为结构的安全可靠运行埋下隐患^[2]。除了对混凝土结构的静态及准静态进行监测以外，结构动力响应这类全局信息的监测对于结构——特别是大跨度结构^[3]和高耸结构^[4]——的振动控制^[5]、舒适度控制^[6]和地震反应监测^[7]，具有十分重要的意义。因此，在混凝土结构的整个生命周期内，有必要对构件的状态进行感知，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^[8]。

基于土木工程的特殊需求，学者们一直在发展关于结构局部状态的感知方法，而其中同时具有承载能力及感知能力的智能材料及构件是新一代的传感器发展方向——如基于压电材料的智能骨料^[9]、基于光纤和钢绞线一体化的智能预应力筋^[10]、基于振弦的埋置式应变计^[11]这类埋置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如应变、温度、湿度等，进而反映结构局部状态和影响耐久性的环境参数^[12]。

其中，具有局部性、分布性优势的混凝土智能骨料近年来逐渐应用于混凝土内部损伤监测。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^[13,14]。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，但是基于压电材料及光纤光栅等上文提及的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，与混凝土结构的长期服役寿命不匹配，使其在实际工程中的应用仍受到一定限制^[15]。因此，有必要研究一种适用于无源无线监测的混凝土智能骨料，以克服其对线缆和电源的依赖，完成浇筑后可以与结构成为一体。

混凝土结构由于服役周期长、体量大等自身特点，为了在混凝土的全生命周期中持续监测，对具有感知能力的智能骨料提出了一些基本要求：无线感知、低成本、易维护、耐久性好、可埋置等。射频识别传感技术作为一项新兴传感技术，近年来取得了迅速发展，采用电磁反向散射的方式获得能量，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，从而实现对标签天线及其周围环境（应变、温度、湿度等）的感知与监测^[16,17]。射频识别传感技术作为无源感知技术，它不受电池寿命的影响，其具有成本廉价、结构简单易于安装等优点。此外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，传感器可埋置于混凝土内部，具有很好的可维护性和操作性，在其达到耐久性的要求后，非常适用于混凝土结构的健康监测^[18]。

在满足上述基本要求以外，由于混凝土服役寿命内发生的应变相对微小，为了实现更加高灵敏度的混凝土内部状态感知，可以从改变射频识别传感方式与加装增敏机构两方面提升。柔性铰链机构与传统的刚体机构不同，柔性机构通过其柔性部分的结构的变形来改变位移和力，这可以大大减少摩擦、润滑和装配，易于保证系统稳定性，降低制造成本^[19]。因此，柔性机构特别适合于微/纳米级别系统的应用。基于柔性的位移放大机构（Flexure-based Displacement Amplification Mechanisms, FDAMs）通常因这些优良特性而被用于增加压电驱动器的行程，为精密工程提供了另一种驱动方式^[20]。此外，为了获得较大的输出和较高的精度，也可相反使用，将输入应变/位移通过其放大后输出，实现增敏功能^[21]。

在得到局部信息的同时，也期望通过同样的天线传感器技术实现对混凝土结构的动力响应这一全局信息进行监测，并集成于智能骨料内部，从而更好地能够反映混凝土结构的状态。

本研究将具有无源无线优势的射频识别传感器通过 3D 打印外壳封装，形成可埋置于混凝土内部的、同时兼具力学性能和传感功能的智能骨料。提出用于应变监测的新型高灵敏度微带贴片天线传感器，并通过加装基于柔性铰链的增敏机构实现灵敏度提升。同时提出了一种适用于 FMCW 雷达高频访问的加速度传感器。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 混凝土智能传感器及智能骨料

混凝土是世界上使用量第二大的资源。世界上大多数基础设施都是用混凝土建造的。然而，由于混凝土材料的退化，混凝土材料与使用环境的复杂相互作用，缺乏先进的设计和状态评估工具，以及及时的维护，许多混凝土结构处于年久失修状态。因此，需要在混凝土生命周期内监测影响其安全性能的各项参数^[22]。为了能够及时监测到混凝土状态，各式各样的混凝土智能传感器应运而生。为了检测/监测混凝土在使用期间的性能和状态，自 20 世纪 30 年代以来，电阻应变片就被用于自感混凝土的应变测量。从那时起，光纤、压电材料、形状记忆合金和聚合物结构材料等由于具有感知结构健康状态相关的各种物理和化学参数能力，而被用于开发应用在混凝土结构健康监测的智能传感器^[23-25]。

电阻应变片（也称为应变片）是其电阻随施加的力或变形而变化的传感器。应变可以通过检测电阻的变化来测量电阻。应变片是混凝土结构测量技术中最成熟、应用最广泛的传感器，具有安装方便、成本较低、传感再现性好等优点。然而，传统的电阻应变片的灵敏度较低，并且容易受到电磁干扰的影响。此外，电阻应变片容易漂移，不适合长期监测^[26]。

光纤可以掺入混凝土中，通过测量光纤内部光的强度、相位、偏振、波长或传输时间的变化来测量应变、位移、湿度、腐蚀、裂缝和温度。Lau 等人将光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Gratings, FBG）传感器嵌入到混凝土结构中，其用于应变测量的光纤光栅系统的示意图如图 1.1 所示。光纤具有重量轻、尺寸小、固有强度、高灵敏度、灵活、可嵌入、多路、抗电磁干扰能力强和低传输损耗等优点^[27]。此外，它们可以在 1 米的距离内提供分布式传感。但是光纤传感器需要线缆连接，造成许多不便，并且连接到外部数据记录系统的连接部件也是薄弱环节^[12]。除此之外，由于光纤老化，其耐久性不足以进行长期监测。

压电材料可分为三类：压电陶瓷（Piezoelectric Lead Zirconate Titanate, PZT）、压电聚合物和压电复合材。压电材料表现出由压电效应产生的传感能力，即施加机械应力时产生表面电荷（正压电效应），反之，施加电场时产生机械应变（逆压电效应）^[28]。压电材料对混凝土的应力、温度和裂缝的检测非常敏感，具有高灵敏度、高谐振频率、高稳定性等优点。但是，压电材料表现出与混凝土结构相容性差、耐久性差的缺点。采用特定封装使其能够在混凝土环境长效工作是解决压电材料此缺点的关键。因此在目前常用的混凝土智能骨料通常基

于压电材料。智能骨料是指将用于混凝土监测的传感单元进行封装，使其成为一种可以埋置于混凝土内部进行的智能元件，实现对混凝土结构内部的健康监测。根据智能骨料所采用的是正压电效应还是逆压电效应，可将基于压电的智能骨料监测方法分为被动监测和主动监测^[29]。

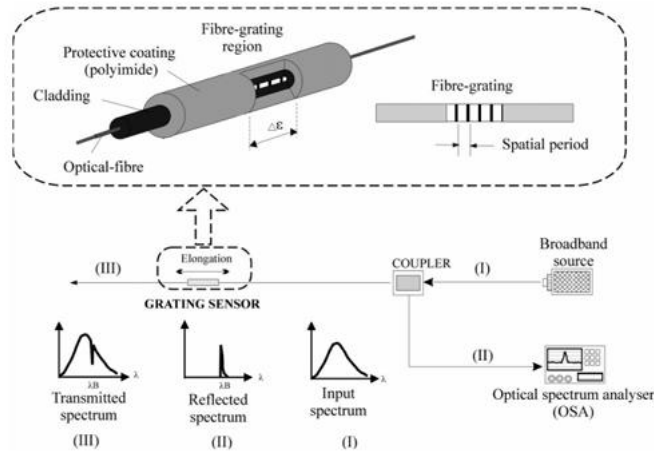


图 1.1 用于应变测量的光纤光栅系统示意图^[30]

被动监测法主要应用正压电效应，通过压电智能骨料因外力产生的电荷而获得结构应力应变等参数。Hou 等提出了一种基于压电的内置三向应力传感器，可以在三个相互正交的方向上监测内部正应力^[31]。Zhang 等采用智能骨料对轻质混凝土进行健康监测，并验证了智能骨料具有监测轻质混凝土结构损伤全过程应力的潜力^[32]。Hou 等提出了一种基于压电智能骨料的地震应力监测方式，利用商用的电荷放大器，通过扫频加载方案研究了传感系统的幅值和相移的频率响应^[14]。

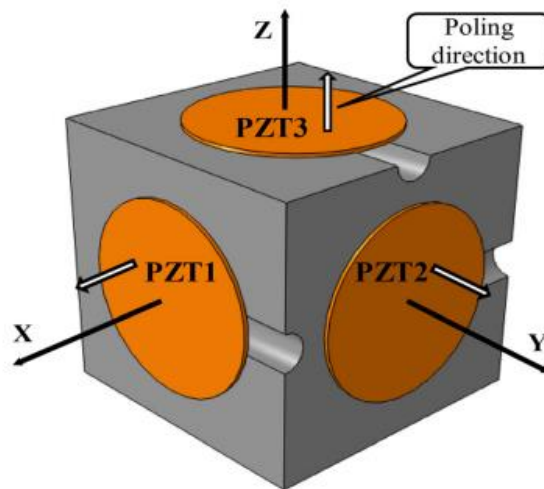


图 1.2 三向应力传感器示意图^[31]

主动压电智能骨料由一个驱动单元和分布传感器组成，由驱动器产生激励波，由分布式的传感器接收激励波。通过对接受波的振幅、相位、频率、到达时间进行分析，可以得到混凝土被测部位的健康状况，由此实现压电智能骨料对混凝土损伤的主动监测。Song 和 Kong 等对基于压电材料的混凝土智能骨料进行了一系列研究，将与线缆相连的压电片用环氧树脂包裹后用水泥封装后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混凝土骨料^[33]。Ya 等提出了一种基于智能骨料的混凝土剪力墙结构健康监测方法，在混凝土结构浇筑之前将智能骨料设置在预定位置，形成一个主动感知系统^[34]。Zhang 等采用主动监测方法，通过在混凝土中嵌入一对压电智能骨料，搭建了基于智能骨料的监测平台，实时观察混凝土湿度^[35]。Wu 等基于主动智能骨料评价层间滑动的发生和发展，并验证了智能骨料检测层间滑动损伤的可行性^[36]。

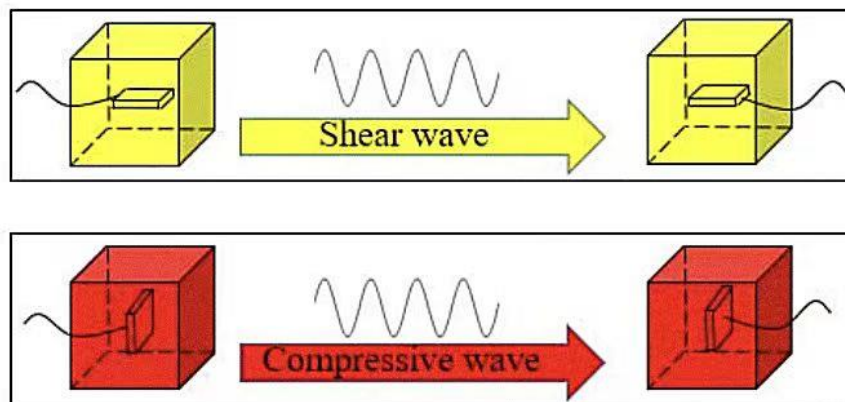


图 1.3 主动压电智能骨料示意图^[33]

为了解决压电智能骨料数据传输以及供电所需要的线缆带来的使用限制，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，实现了动态应力监测、结构冲击捕获和内部裂纹检测^[37]。该智能骨料采用 ZigBee 协议添加了无线传输系统，但仍需要蓄电池对各个模块进行供电，依然没有实现无源功能。此类无线智能骨料大多需要外部电源或是电池供电，在长期监测过程中需要频繁更换限制了未来在实际工程中的应用。因此，有必要研究一种适用于无源无线监测的混凝土智能骨料，以克服其对线缆和电源的依赖。

1.2.2 基于微带贴片天线的传感器

天线最早作为接受和发射电磁波的装置，是射频系统中关键的一环。微带贴片天线既可以实现能量无线传输与数据无线通信，同时还可以作为感知单元，根据环境中特定物理量的变化改变其特征参数，如天线谐振频率、平均峰值电

压、发射阈值功率和接收功率、复阻抗、回波时差等，实现对监测变量的传感^[38]。基于天线的方案因其结构简单、可用性好而逐渐受到研究人员的重视^[17]。当天线作为传感节点运行时，它同时执行两项功能：传感和通信。在天线的传感功能方面，一些电磁参数（谐振频率、回波损耗等）会随着外界环境的变化而变化，可以将其设计为用于表征目标监测物理量。就天线的通信功能而言，天线可以通过矢量网络分析仪进行有线测量，也可以通过问询信号引起的后向散射或 RFID 阅读器来传输变化的电磁参数。因此，通过读取接收端天线的后向散射信号，可以监测电磁参数的变化，从而识别被监测的物理量。

综上所述，基于天线的传感器理论上可以实现无源无线传感，同时降低传感节点的复杂性。目前，各种用途的天线传感器在土木工程中得到了广泛的研究，并实现了实验室条件下的监测。Huang 等将贴片天线黏贴到铝制悬臂梁并测量了随着悬臂梁弯曲天线谐振的变化，两者表现出较好的线性关系^[39]。Xu 提出了一种用于多地点裂缝监测的无源无线天线传感器的多路复用技术，基于分频和分空间两种复用原理，对 4 个天线传感器进行复用，形成传感器阵列^[40]。Mohammad 等研究了一种用于监测剪切力的微带贴片天线，实验表明该天线传感器对剪切变形具有较高的灵敏度，对剪切载荷的响应具有良好的线性度和重复性^[41]。上述以及目前研究中大部分贴片天线传感器都是采用谐振频率作为表征，这是因为贴片天线的谐振频率通常只与其尺寸及周围温湿度环境有关，而与访问空间位置无关，测量起来更加稳定与方便。

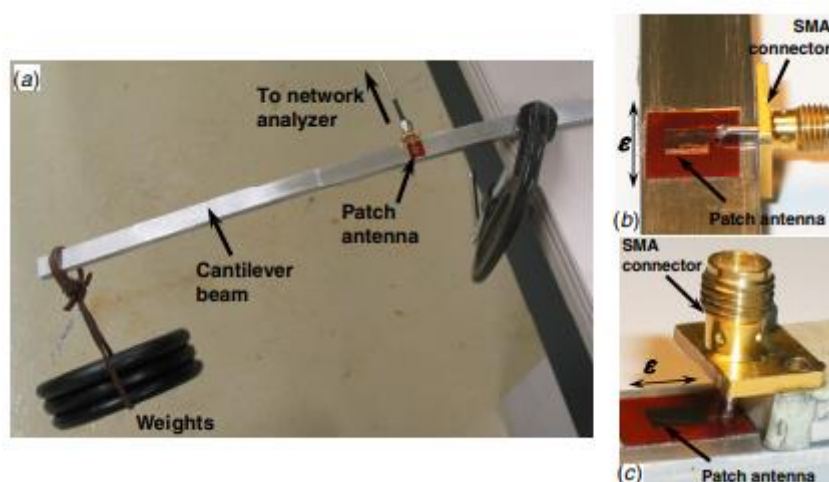


图 1.4 贴片天线应变传感器实验设置^[39]

基于谐振频率变化的贴片天线传感器特别适用于测量结构表面应变，除了上述提到的单向贴片天线应变传感器已有许多研究提出了多种形式多种功能的贴片天线传感器。为了实现对结构多向应变的监测，周等人对双频贴片天线进行了研究，提出了一种二维应变测量方案，由一片垂直布置的贴片天线和一片

倾斜 45° 的寄生贴片天线组成, 根据双频天线两个方向谐振频率的偏移实现了对平面二维应变的监测^[42]。此外, 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, 在测量中, 还讨论了基于所提出的应变传感器的被动遥感系统的实现实例, 作为概念验证的案例^[43]。但这些应变测量方案采用的传感天线尺寸仍然较大, 且均测量结构表面应变, 并不适应于混凝土内置式监测, 对于一般直接黏贴于结构表面的贴片天线传感器, 还存在应变传递机制不明确、粘结强度不足、剪力滞后效应等问题。

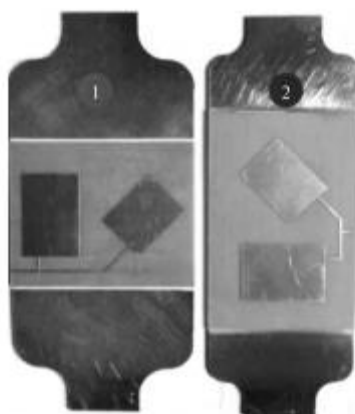


图 1.5 用于平面二维应变测量的贴片天线传感器

一些学者更进一步, 提出用附加部件的天线来解决直接拉伸引发的问题, 而不是关注天线本身的拉伸尺寸, 天线和附加部分之间的相对位移也可以作为传感单元。Xue 和 Xie 提出了一种基于双层贴片天线的结构健康监测无应力变形传感器。该传感器由单片贴片天线和堆叠贴片组成, 在 $3\sim 7\text{GHz}$ 频段内产生两个基本谐振频率。选取重叠贴片偏移引起的谐振频率偏移作为传感参数。通过此类组合式贴片天线传感器, 解决了直接黏贴于结构表面带来的问题^[44]。除了应变传感器, Xue 等提出了一种具有重叠附加贴片的贴片天线, 用于测量整个螺栓轴的纵向伸长, 以指示螺栓的松动状态, 螺栓紧固时, 螺栓在拉力作用下的伸长会改变下贴片和辐射附加贴片的总长度, 从而使天线的谐振频率增大或减小^[45]。Li 等提出了一种具有温度自补偿功能的新型无源贴片天线传感器可同时进行裂缝和温度传感。无源贴片天线传感器辐射贴片和重叠附加贴片组成, 通过偏心馈电激活了横向和纵向的谐振模式。其中横向谐振频率用于环境温度传感, 通过温度补偿后的纵向谐振频率可以检测结构裂缝宽度。

采用这种附加耦合单元的组合式设计, 在良好适用性的同时进一步提升了传感灵敏度和分辨率。但此类传感器在测量混凝土微小变形情况下灵敏度还需进一步提升, 同时为了减小传感器置于混凝土内部后对混凝土整体力学性能、

应力分布的不良影响，应继续小型化。同时，此类组合式传感器通常需要保持辐射贴片和附加贴片的良好接触才能正常工作，混凝土内部复杂情况很难有效保证此条件。无源无线智能骨料中的传感器应发展更为高灵敏度、小型化、结构简单的组合式贴片天线形式用于内置情况的应变感知。

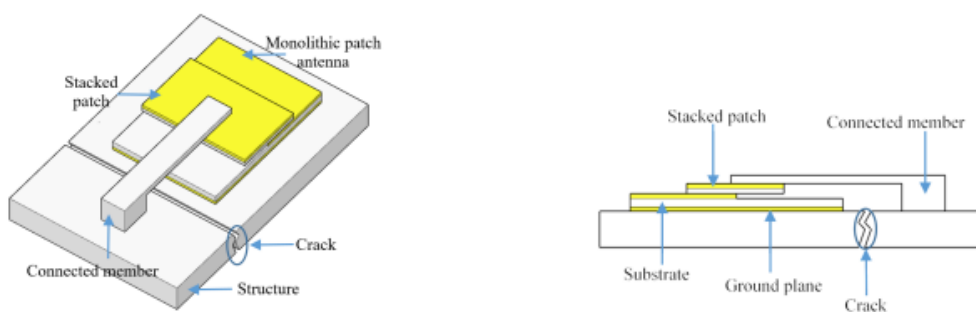


图 1.6 组合式双层贴片天线裂缝传感器^[44]

1.2.3 柔性铰链位移放大机构增敏

在土木工程领域，结构产生的变形与结构本身尺寸相差巨大，普通的应变传感器灵敏度不足，故对土木工程领域的传感器的灵敏度提出了较高的要求。针对应变传感器的应变监测灵敏度不足的问题，国内外已有许多学者展开了相关研究，其中主要集中在 FBG 光纤光栅传感器的增敏上。

相对于传统的刚性机构，柔顺机构具有独特的优势，如零间隙、零摩擦、无装配误差、高精度、无需润滑、小巧、可一体化加工等。因此，该技术已广泛渗透至机器人技术、精密工程和智能结构等多个领域，发挥着重要作用。柔顺机构多以缺口柔性铰链或柔性杆为柔性构建。

柔性杆构件方案具有转角大、大变形的优点，但运动精度较低。吕国辉等基于三角放大原理设计了一种具有位移放大结构的 FBG 光纤光栅传感器，实验测试得到 6.1pm/mm 的灵敏度，验证了其作为土木工程结构变形高精度监测手段的可行性^[46]。Li 提出了一种提高光纤布拉格光栅应变传感器应变灵敏度和同时实现温度补偿的新方法和相应的杠杆放大机构，实验验证得到灵敏度 $7.72\text{pm}/\mu\epsilon$ ，是裸 FBG 传感器灵敏度 6.43 倍，该种传感器采用多点布置，主要应用于薄壁结构的表面变形监测^[47]。

柔性铰链构件方案变形行程较小，但运动精度高，特别适用于小变形且精度要求高的情况下，更适合用于微小形变传感器的增敏。Liu 等为了提高光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏度，采用柔性铰桥式位移放大结构，设计了一种基于 FBG 的高灵敏度应变传感器。该传感器可用于精确测量机械结构表面的应变，

实验结果得到传感器应变灵敏度为 $10.84\text{pm}/\mu\epsilon$ ，是裸FBG传感器灵敏度的10倍左右^[48]。Tsao等提出一种新型接触型紧凑型亚微米精度微位移传感器的设计和开发，新传感器系统的基本原理是采用机械放大机实现亚微米级到微米级的位移放大，并使用低成本的霍尔传感器测量放大后的位移，制作此高灵敏度传感器仅花费100美元，价格远低于市售商用传感器^[49]。Shu等提出了一种基于FBG传感器的管道压力检测非侵入式高灵敏度增敏结构。在建立管壁应变与管道内压之间关系的基础上，设计了一种基于柔性铰链的新型应变放大结构，有效地传递和放大管道壁应变^[50]。

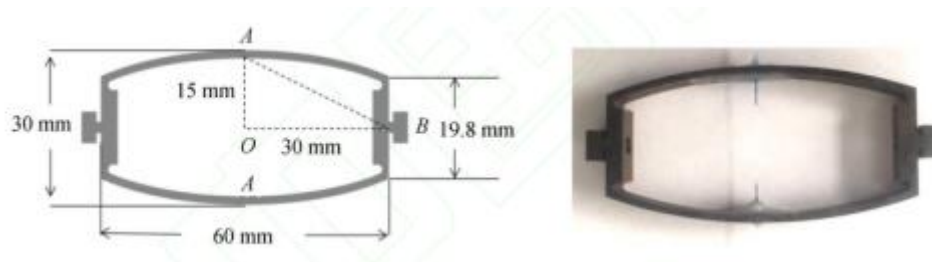


图 1.7 用于 FBG 传感器增敏的椭圆位移放大结构^[46]

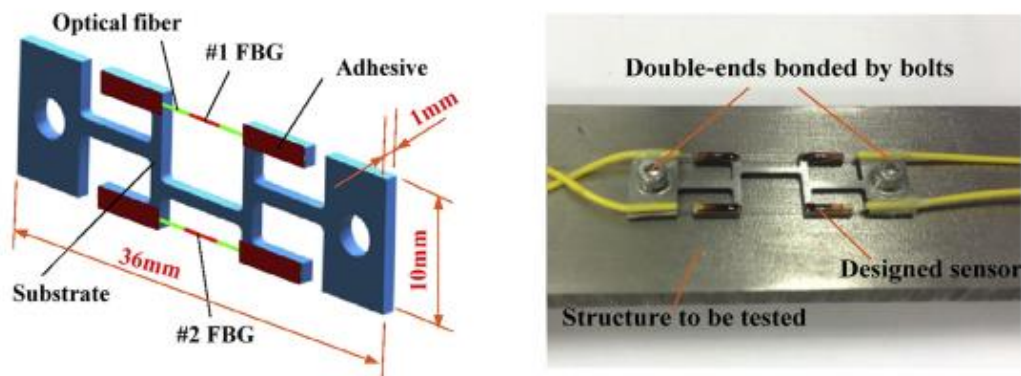


图 1.8 采用杠杆增敏机构的 FBG 传感器^[47]

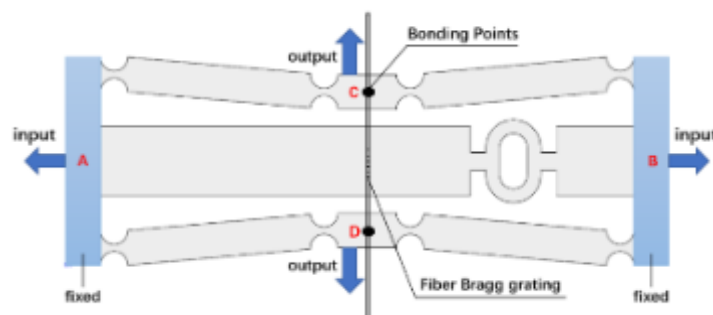


图 1.9 带有增敏机构的 FBG 应变传感器示意图^[48]

回顾目前应变传感器领域的增敏机构的研究现状来看，虽然增敏机构已经

充分运用至传感器领域，但多数增敏机构仅被 FBG 传感器应用，增敏机构尚未与无源无线传感技术相结合。特别是对于贴片天线传感器，其谐振频率作为表征参数在环境变化不大的情况下只与其整体或部分尺寸有关，这与柔性铰链位移放大机构相得益彰。

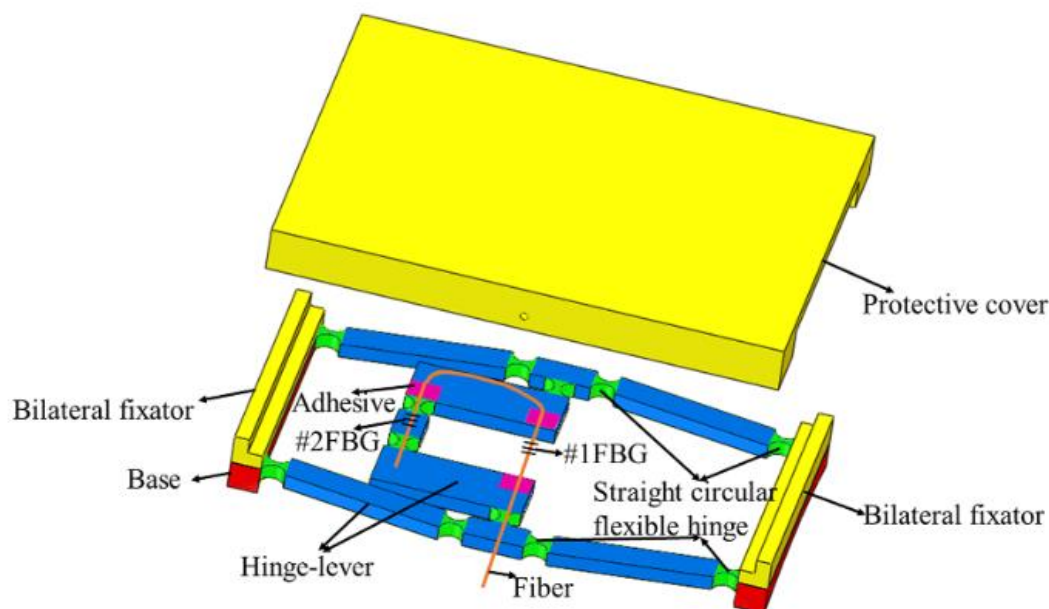


图 1.10 用于管壁应变的带有增敏机构的 FBG 应变传感器示意图^[50]

1.3 先行研究

对于贴片天线应变传感器，研究组已经进行了部分工作。

徐康乾等探究了大应变下贴片天线应变传感器的可行性^[51]。理论推导和多篇研究表明，在较小应变下天线的谐振频率偏移和变形量成较好的线性关系。该篇研究将天线黏贴在钢板上进行大应变拉伸并设置两组实验，一组用于测量应变传递效率，后分别获得两组的谐振频率，并探究电阻应变片的存在是否对天线的谐振频率产生影响。实验结果表明，大应变情况下谐振频率与应变仍有较好的线性关系。

相比于直接黏贴与结构表面的单片式贴片天线传感器，组合式贴片天线适用于更多场景，可以解决单片式的多种问题。研究组在组合式贴片天线变形传感器上已经做了一些工作，旨在改进组合贴片天线形式以达到更好的效果。

Xue 等人研究了带有附加馈电线的裂缝贴片天线传感器，分别提出两种不同馈电形式的传感器^[52]，如图 1.11 所示。一种是利用介质板填充在两个矩形微带线之间，而另一种则将馈电线设计成“L”型梁，与下层微带线之间留有一定的间隙。在实际应用中，这两种形式的馈电线连接的部件会被各自固定在裂缝

的两侧。裂缝宽度的变化会影响两个微带线之间的正对面积，从而改变二者之间的电容。因此，天线的谐振频率会相应地发生变化。

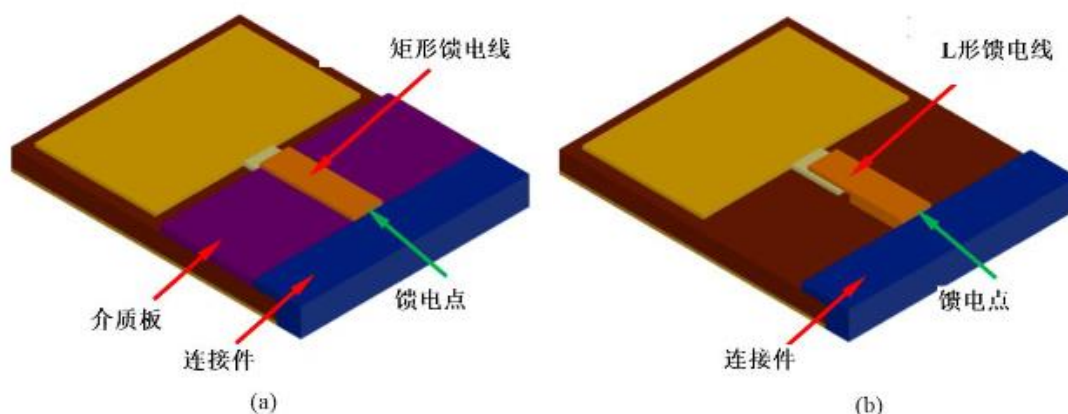


图 1.11 带有附加馈电线地贴片天线裂缝传感器

Xue 和 Yi 还提出了带短接组件的贴片天线形变传感器^[53]和带耦合组件的贴片天线传感器^[44]。这两个设计都是通过附加组件和辐射贴片的相对位置移动来反应结构变形。前者相当于通过短接改变辐射贴片长度从而改变谐振频率，后者相当于通过改变正对面积而改变电容大小，从而改变谐振频率。

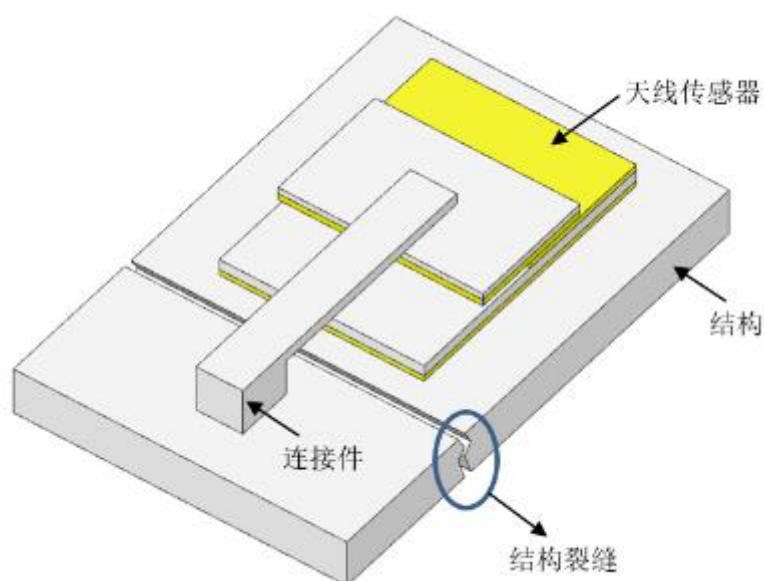


图 1.12 带短接组件的贴片天线裂缝传感器

Li 更进一步的，利用带短接组件的贴片天线结合偏心馈电方式，实现了温度自补偿能力，可同时进行裂纹和温度传感^[54]。偏心馈电激活了横向和纵向的谐振模式。横向谐振频率偏移用于环境温度传感。通过温度补偿后的纵向谐振频率偏移可以监测结构裂缝宽度。

在基于贴片天线的智能骨料方面，研究组也进行了初步尝试。李宪之^[55]将带有短接组件的贴片天线传感单元用碳纤维板进行封装，通过传动杆将混凝土变形传递进封装内的传感单元，短接组件和辐射贴片的错动导致了谐振频率的变化。将智能骨料与混凝土共同浇筑制成了混凝土试件，通过万用压力机对混凝土进行了抗压试验，结果表明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。

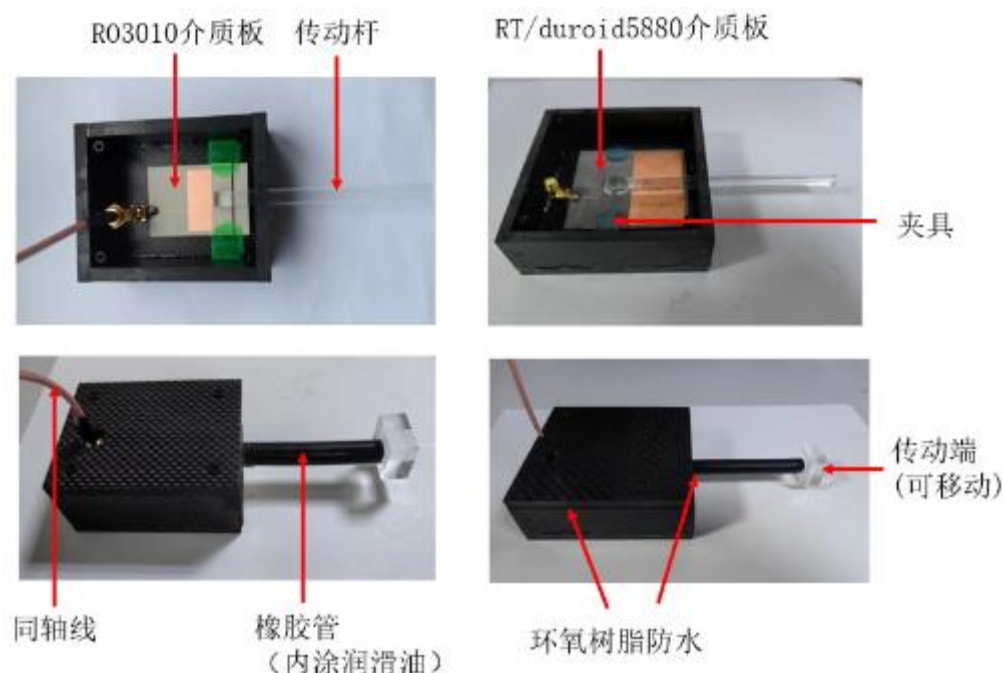


图 1.13 组合式贴片天线传感器封装外壳与传动机构

1.4 技术路线

目前用于混凝土结构应变监测的传感器——例如 FBG 传感器、振弦应变计、压电传感器、有线或无线传感器等虽能满足部分使用需求，但是仍存在各种问题限制了在混凝土结构内部复杂情况下的使用：用于电源供应和信号传输的线缆不便于施工与维护；需要使用电源或电池，不适合长期监测；大部分仅适用于混凝土结构表面监测，并不适用于混凝土内部环境；内置于混凝土后对混凝土本身工作性能存在较大影响；传感器灵敏度不能够胜任混凝土微小形变监测任务。

对于前两个问题，采用无源无线的微带贴片传感器能够得到解决。贴片天线传感器本身作为天线具有传输信号的功能，同时天线本身的物理特性可用于表征混凝土结构待测变形量，且无需电源供应。但是目前用于应变监测的贴片天线传感器多是单片式直接黏贴于结构表面，还存在应变传递机制不明晰、剪

力滞后效应、粘结不足等缺陷,进一步改变天线形式采用组合式贴片天线可以解决单片式直接黏贴于结构表面的问题。同时采用组合式贴片天线拓展了提高传感器灵敏度的可能性。提出了一种基于组合式的带有空气间隙耦合馈电的贴片天线传感器,大幅提高灵敏度;添加基于柔性铰链的位移放大机构作为传感器增敏机构进一步提高灵敏度,高灵敏度更适用于混凝土应变监测。为了能够在不影响混凝土性能的情况下埋置传感器进行应变监测,采用智能骨料的概念,将贴片天线传感单元封装,最终形成一种适用于混凝土内部微小应变监测的高灵敏度的无源无线智能骨料。

在获得了混凝土结构的局部信息后,仍然希望智能骨料进一步能够覆盖到混凝土结构的全局信息,例如动力响应。但是传统天线传感器的问询方式不能满足于对结构动力响应的实时监测,本文提出了一种同样基于组合式贴片天线的加速度传感器,并设计了 FMCW 雷达访问系统。此种问询方式既可以实现静态监测,也可以实现动态监测,未来可将加速度传感器与智能骨料集成。

未来可大规模部署和应用的无源智能骨料传感器,将为建立分布式结构安全与健康智能评估系统提供坚实支持。这项新兴传感技术的研究方向与当前基础设施智能建造与维护的发展趋势相符合,并且在跨学科领域展现出了广泛的前景。通过充分利用这种智能骨料传感器,未来将能够实现对建筑结构的全面监测和评估,从而提高结构的安全性和可靠性,为社会的可持续发展做出积极贡献。

1.5 主要研究内容

本文的研究框架如图 1.14,主要研究内容及章节安排如下:

第一章为绪论。主要对智能骨料、贴片天线传感器、柔性铰链增敏机构进行了介绍,表明了混凝土内部变形监测中将三者结合形成无源无线高灵敏度智能骨料的优势与必要性。

第二章为对智能骨料中所涉及的基本理论的介绍。本章从麦克斯韦方程组出发,对贴片天线的理论、电磁参数影响因素和计算方法进行了说明,并推导了柔性铰链增敏机构的相关计算公式。

第三章为带空气间隙的孔径耦合馈电微带贴片天线形变传感器的设计、仿真和试验。阐述对传感器的理论依据后通过 HFSS 进行设计及尺寸优化。通过矢量网络分析仪验证形变传感器的可行性。

第四章为柔性铰链增敏机构和封装外壳的设计及探究。根据智能骨料目标功能、尺寸及量程,选定了增敏机构和封装外壳的材料,在 COMSOL 中仿真进

行了仿真验证，并探究了添加智能骨料带来的协调变形影响。

第五章为智能骨料的制作、封装及实际性能测试。将前文中的新型微带贴片天线传感器和柔性铰链放大机构一同通过 3D 打印封装，并将其埋置与混凝土中进行了压缩试验，探究了该带增敏机构的高灵敏度智能骨料的实际性能。

第六章为适用于 FMCW 高频访问的无源无线天线加速度传感器的设计、仿真、制作与实验。在第 3~5 章中主要针对混凝土结构的局部信息（应变）的监测，本章提出了未来可以集成于前述智能骨料中的一种无源无线天线加速度传感器，以继续覆盖混凝土结构的全局信息监测。未来可通过 FMCW 雷达实现对智能骨料获得的局部信息和全局信息的同时问询。通过仿真与实验验证了 FMCW 雷达问询传感器和加速度传感单元的可行性。

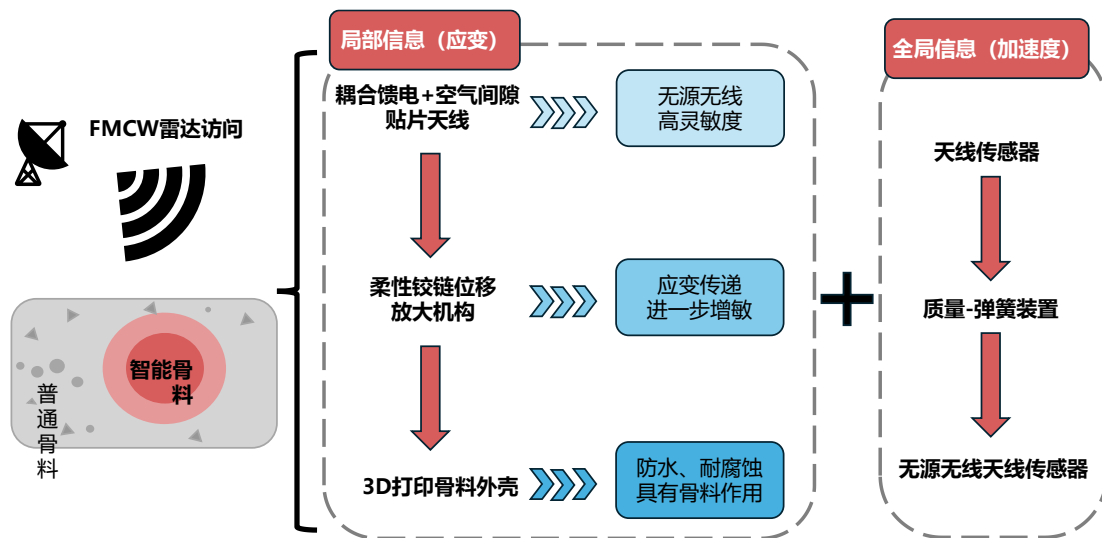


图 1.14 本文主要研究内容

第2章 智能骨料设计基本原理

通过贴片天线实现对混凝土应变的表征，关键在于探究混凝土应变与贴片天线尺寸变化导致的谐振频率变化的关系。为了提高天线传感器的灵敏度，采用了组合式贴片天线，此时还需要更进一步明确特殊形式的贴片天线的谐振频率计算与影响因素。因此，非常有必要对作为贴片天线传感器的底层理论的电磁场与天线传播基本理论进行讨论。同时本智能骨料还添加了柔性铰链增敏机构，明确柔性铰链的基本模型以及变形传递原理是后续根据智能骨料性能目标进行柔性铰链增敏机构设计及优化的基础。

本文提出的智能骨料主要以贴片天线的谐振频率作为传感参数，因此主要介绍了麦克斯韦方程组、谐振腔理论和基于谐振腔理论的天线谐振频率计算公式推导。同时，考虑到本文的天线传感单元采用的是带空气间隙的孔径耦合馈电微带贴片天线，故也对带空气间隙的贴片天线和孔径耦合馈电贴片天线原理进行了介绍。除此之外，本章也介绍了柔性铰链增敏机构的相关原理。

在2.1节中，对电磁场基本理论（麦克斯韦方程组）进行了简单介绍，并简述了天线的电与磁转换的原理。

在2.2节中，主要介绍了谐振腔原理，并基于谐振腔原理推导出了贴片天线谐振频率计算方法，并给出了带空气间隙及空腔耦合馈电贴片天线的基本理论。

在2.3节中，介绍了目前柔性铰链增敏机构的计算模型，确定了后续设计的基本方法。

2.1 电磁场和天线基本理论

2.1.1 麦克斯韦方程组^[56]

天线作为电磁波的重要交互介质，承担着辐射和接收信号的重要任务，而麦克斯韦方程组则提供了深入理解电磁波行为的关键工具。这组方程全面描述了电磁波的传播、场强、感应等性质，为解释和预测电磁现象提供了坚实的理论基础。通过对这些方程的深入研究，我们能够更好地设计、优化和理解各种天线系统。麦克斯韦方程组是描述电磁波的性质和行为的偏微分方程，由四个方程组成，两两成对。

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

电场高斯定律：这个方程描述了电场的发散性质，即电场通过一个闭合曲面的总通量等于该曲面内的电荷量除以真空介电常数 ϵ_0 。其中 $\mathbf{E}$ 是电场强度， $d\mathbf{A}$ 是曲面元素的微小面积矢量， Q_{enc} 是曲面内的电荷量，而 ϵ_0 是真空介电常数。

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2.2)$$

磁场高斯定律：这个方程表达了磁场的环量为零，即不存在磁荷，磁场线总是闭合的。其中， $\mathbf{B}$ 是磁感应强度， $d\mathbf{A}$ 是曲面元素的微小面积矢量。

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.3)$$

法拉第电磁感应定律：这个方程描述了磁场的变化会导致感生电场产生。它表明，当磁场通过一个闭合线圈时，线圈内的感应电动势等于磁场变化率对时间的负值。其中， $\mathbf{E}$ 是感生电场， $d\mathbf{l}$ 是回路线元素的微小长度矢量， $\mathbf{B}$ 是磁感应强度， $d\mathbf{A}$ 是回路面元素的微小面积矢量。

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \iint \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{A} \quad (2.4)$$

安培环路定律：这个方程表达了电流产生的磁场和通过曲面的磁通量之间的关系。它包含了两部分，一部分是由电流产生的磁场，另一部分是由变化的电场引起的磁场。其中， $\mathbf{B}$ 是磁感应强度， $d\mathbf{l}$ 是回路线元素的微小长度矢量， μ_0 是真空磁导率， $\mathbf{J}$ 是电流密度， ϵ_0 是真空介电常数， $\mathbf{E}$ 是电场强度， $d\mathbf{A}$ 是回路面元素的微小面积矢量。

2.1.2 天线传输模型

天线可视为一种实现电与磁之间相互转换的装置。当电流在天线中变化时，它会在周围空间中激发出电磁波并辐射出去。同时，天线周围的电磁场变化也会导致通过天线的磁通量变化，从而在天线中诱发出感应电流。因此，天线具备了将电流信号转化为电磁信号，以及将电磁信号转化为电流信号的能力。

以理想介质导体（不考虑传输损耗）的双导线天线为例，天线输入了横模电磁波，如图 2.1。

沿两根导线间的路线 AB 对电场进行积分得到两点之间的电压 U ：

$$U = U_{AB} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A^B E_x dx \quad (2.5)$$

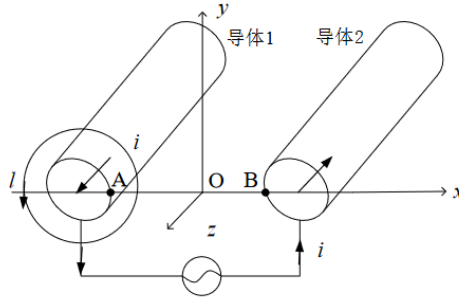


图 2.1 双导线天线模型示意图

将上式对路线 AB 的法向求导，并根据法拉第电磁感应定律式 2.4 可得：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} Li = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.6)$$

其中， L 为双导线天线单位长度上的电感分布， i 为路径的瞬时电流。该式描述了产生电场的瞬时电压与电磁场的瞬时电流间的关系。

运用全电流定律对围绕导线的环路 l 进行计算：

$$\oint_l H \cdot dl = \oint_l (H_x dx + H_y dy) = i + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} (CU) = -C \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.8)$$

在这个方程中， C 代表着双导线天线单位长度的天线电容。这个方程清晰地描述了产生电场的瞬时电压与电磁场的瞬时电流之间的联系。一旦天线的形状确定，我们便能够准确地计算出天线的电容和电感值，联立式 2.6~2.8 可以求得电场分布。

2.2 贴片天线谐振频率

求解微带贴片天线的性能特性有两种方法。一种是前文介绍的在边界条件下求解麦克斯韦方程组；二是根据一些简化的假设设计一个物理模型，例如传输线模型、全波方法、谐振腔模型。传输线假定计算误差较大，且计算繁琐。在偶极子的情况下，一种更普遍和严格的方法将把天线结构上的电流视为待解的未知数。通过要求电流产生的场满足边界条件和激励条件，得到了未知电流的积分方程，并用数值方法进行了求解，这种方法被称为全波方法。它的优点是能够处理较厚的衬底和复杂的结构，如含有介电覆盖层的多层结构、多个贴片和寄生元件。然而，它需要大量的计算时间，并且较为不直观。谐振腔模型计算精度较好，应用广泛，使得我们可以解析地确定许多不同形状的贴片天线的场，由此可以计算出微带贴片天线的各种特性。

2.2.1 利用谐振腔模型贴片天线谐振频率计算

微带天线类似于介质谐振腔，它们展现出更高阶的共振。如果能通过将电介质基板内（在贴片和接地面之间）的归一化场视为由上下两个电导体以及沿着贴片周长形成磁壁（模拟开路）所包围的空腔，那么就可以采用谐振腔模型更精确地确定该区域中的归一化场。

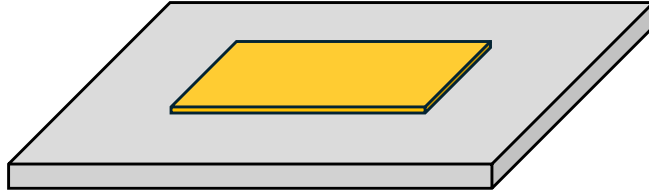


图 2.2 矩形微带贴片天线示意图

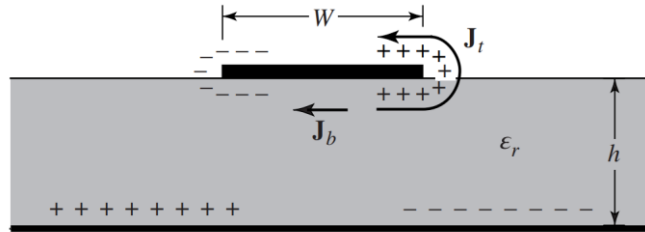


图 2.3 微带贴片天线电荷分布示意图

典型的矩形微带贴片天线如图 2.2 所示。微带贴片通电时，贴片表面和接地面形成电荷分布，受吸引和排斥机制控制，如图 2.3 所示。由于吸引机制主导，大部分电荷集中在底部，少量电流流向顶部。随着高宽比减小，顶部电流减小，极端情况下几乎为零，贴片边缘不产生切向磁场分量。因此，四个侧壁可视为完全导磁的磁性传导表面，在模态分布中产生良好的归一化电场-地磁场分布。再将矩形贴片天线的辐射贴片视为谐振腔的上壁，地平面视为下壁，矩形贴片天线就可等效为如图 2.4 的矩形谐振腔。

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

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (2.9)$$

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

式 (2.9) 可以通过分离变量法求出齐次方程通解：

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)][A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)] \\ [A_z \cos(k_z z) + B_z \sin(k_z z)] \quad (2.10)$$

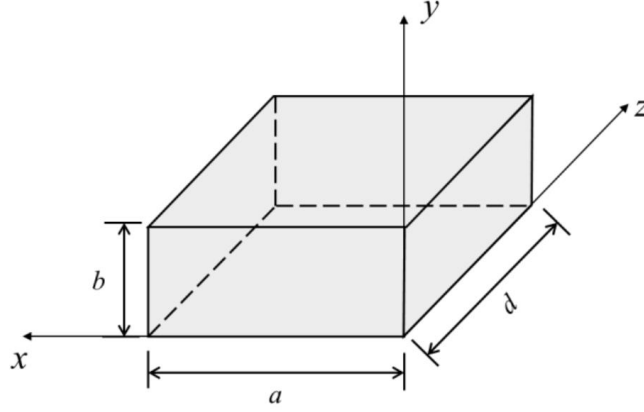


图 2.4 等效矩形谐振腔

其中， k_x 、 k_y 、 k_z 分别是沿 x 、 y 、 z 方向的波数，将根据边界条件确定。
腔内由矢量势 A_x 确定的电场与磁场分量为：

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x \quad (2.11)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \quad (2.12)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \quad (2.13)$$

$$H_x = 0 \quad (2.14)$$

$$H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \quad (2.15)$$

$$H_z = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (2.16)$$

边界条件为：

$$\begin{aligned} & E_y(x'=0, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) \\ & = E_y(x'=h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} & H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=0) \\ & = H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, z'=W) = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} & H_z(0 \leq x' \leq h, y'=0, 0 \leq z' \leq W) \\ & = H_z(0 \leq x' \leq h, y'=L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

其中, x' 、 y' 、 z' 为用来表示腔内各个场的坐标。

将边界条件 2.17~2.19 带入式 2.10-2.16, 可得:

$$k_x = \frac{m\pi}{h}, m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.20)$$

$$k_y = \frac{n\pi}{L}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.21)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{W}, p = 0, 1, 2, \dots \quad (2.22)$$

$$B_1 = B_2 = B_3 = 0 \quad (2.23)$$

其中, m , n , p 分别代表电磁场在不同方向上的半周期场数。将 2.23 带入 2.10 得到矢量势的最终形式:

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (2.24)$$

因为波数 k_x 、 k_y 、 k_z 满足约束方程:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu \varepsilon \quad (2.25)$$

将式 2.24 带入 2.11-2.16 可以得到各个电场与磁场分量。联立式 2.20-23 与式 2.25 可以得到腔体谐振频率:

$$\begin{aligned} f_{map} &= \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \\ &= \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

其中, c 为真空中的光速, ε_r 为介质的相对介电常数。

具有最低阶谐振频率的模式称为主模。将谐振频率按升序排列决定了工作模式的顺序。对于我们常讨论的微带贴片天线都有 $h \ll L$ 且 $h \ll W$, 即贴片天线的长和宽一般远大于贴片天线的高。如果贴片天线 $L > W > h$, 则主模是 TM_{010}^x , 其谐振频率为:

$$(f_r)_{010} = 1/(2L\sqrt{\mu\varepsilon}) = c/(2L\sqrt{\varepsilon_r}) \quad (2.27)$$

采用式 (2.27) 计算的主模谐振频率存在一定误差, 主要因为采用谐振腔模型将四周视为完美磁壁而没有考虑贴片边缘的边缘场。当贴片天线长宽高满足经验公式 2.28 时, 式 2.27 的计算结果的误差可以忽略。

$$10h < \min(L, W) \quad (2.28)$$

通常贴片天线作为应变传感器时, 其通常只利用主模的谐振频率, 因为主

模谐振频率在通常情况下只与贴片天线的辐射贴片的长度及贴片天线的基板的介电常数有关，便于实现对物理量的表征。

2.2.2 带空气间隙的贴片天线

可以将空气间隙插入到贴片天线辐射贴片和地平面之间，通过调整气隙的厚度来调整贴片天线工作频率。反之，贴片天线谐振频率的变化可以反映出气隙厚度变化，利用设计好的应变传递装置，气隙厚度与应变存在关系，由此可以通过谐振频率表征应变。带空气间隙的微带贴片天线如图 2.5 所示。

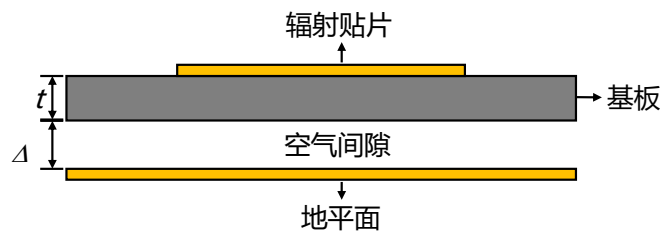


图 2.5 带有空气间隙的贴片天线示意图

考虑辐射贴片下的空腔。它由厚度为 t 的衬底和厚度为 Δ 的气隙两层组成，与没有气隙的情况相比，空腔的有效介电常数明显减小，从而使各模态的共振振幅增大。由于有效介电常数随 Δ 的增大而减小，趋于自由空间的介电常数，因此可以通过调节气隙宽度 Δ 来调谐谐振频率。作为副产物，天线的带宽也会增加，一部分原因是介质高度的增加，另一部分原因是有效介电常数的减小。

考虑两层介电层的电容，可推导出两层腔体的近似有效介电常数和近似谐振频率，如图 2.6 所示。

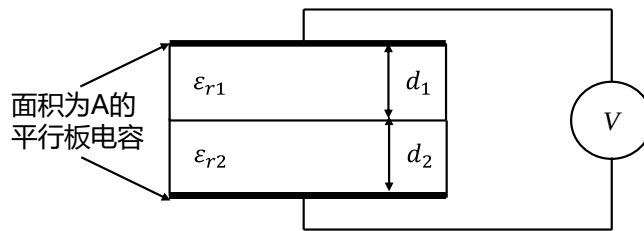


图 2.6 两层电介质电容模型

上层电容为：

$$c_1 = \frac{\varepsilon_1 A}{d_1} \quad (2.29)$$

下层电容为：

$$c_2 = \frac{\varepsilon_2 A}{d_2} \quad (2.30)$$

设 C 为总电容：

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right) \frac{1}{A} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 A}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} = \frac{\varepsilon_{eff} A}{d_1 + d_2} \quad (2.31)$$

其中，等效介电常数：

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1} \quad (2.32)$$

将上层视为相对介电常数为 ε_r 的基板，下层为空气间隙，则有：

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_r \varepsilon_0 = \varepsilon \quad (2.34)$$

$$d_1 = t \quad (2.35)$$

$$d_2 = \Delta \quad (2.36)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (t + \Delta)}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \Delta + \varepsilon_0 t} = \frac{\varepsilon (t + \Delta)}{(t + \Delta \varepsilon_r)} \quad (2.37)$$

将有效介电常数用于谐振频率的公式中，对于 TM_{nm} 模式，可以得到：

$$f_{nm}(\Delta) = f(0) \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{eff}}} \quad (2.38)$$

式中， $f(0)$ 为无气隙时的谐振频率。可以看出，随着气隙厚度增加， ε_{eff} 小，谐振频率增大。这个公式适用于辐射贴片为任何形状的贴片天线。

通过谐振腔模型计算也可推导出带空气间隙的微带贴片天线的谐振频率。但相比原始贴片天线的谐振腔模型，需要补充一个假设：在介质-空气界面上，切向电 E 和法向电通量密 D 是连续的。最后得到的结果与式 2.38 相同。

2.2.3 孔径耦合馈电贴片天线

微带天线通常采用以下三种方式之一馈电：(a)同轴探头、(b)微带线直接连接到贴片边缘、(c)微带线通过孔径耦合到贴片。三种方式如图 2.7 所示。直接将微带线连接到贴片边缘的优点是易于制作。采用微带线直接连接时阻抗匹配不像探针馈电情况那样方便，并且会引入来自馈电网络的不必要辐射。孔径耦合

馈电是将来自微带线的能量通过接地面的孔径（槽）进行耦合。这种方最早由 Pozar 于 1985 年提出^[57]。所述开口微带线位于地平面下方的基板下侧，而所述贴片天线位于地平面上方的单独基板上。这两种结构通过它们之间地平面上的孔径进行电磁耦合。这种馈电方法的一个优点是馈电网络与辐射元件被地平面隔离，防止了两者辐射的耦合而影响天线的方向图；此外，两者分离也有利于分别对两者进行优化。

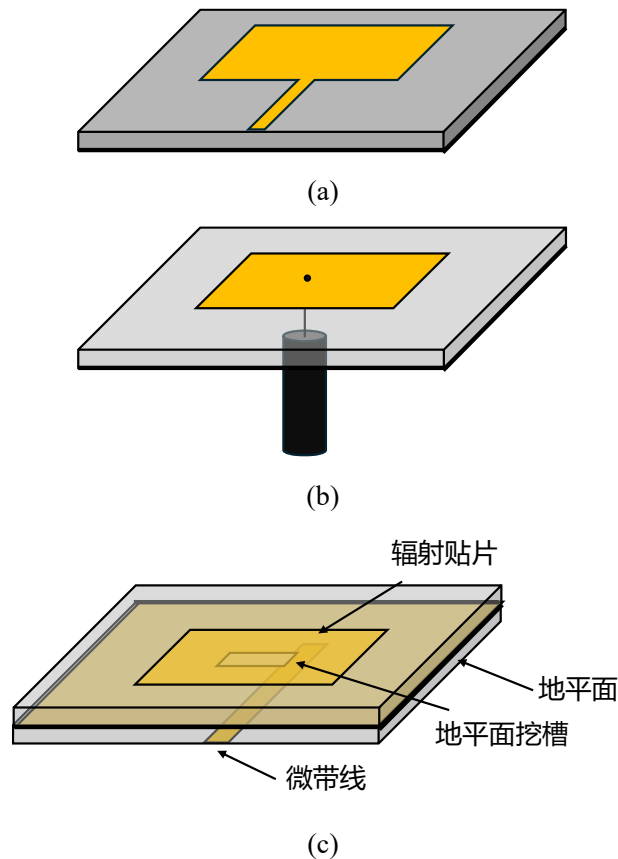


图 2.7 微带贴片天线馈电方式：(a)微带线馈电；(b)同轴线探针馈电；(c)孔径耦合馈电

采用孔径耦合馈电的微带贴片天线由于其本身地平面与辐射贴片分离，空气间隙更容易添加在辐射贴片和地平面之间。其他两种馈电方式相比之下加工方式更加复杂，不易操作。可以将特制的增敏机构加入到辐射贴片与地平面之间，既可以作为机械结构支撑起空气间隙，又可以将应变的变化反映在空气间隙厚度变化上。

2.3 柔性铰链增敏机构

本文传感器采用的增敏机构为带有柔性铰链的桥式位移放大机构。一个带有柔性铰链的桥式位移放大器如图 2.8 所示，其 A、B 两端为位移输入端，C、

D 两端为位移输出端。天线传感器安装在 CD 两端，具体的安装成品将会展示在第五章。通过柔性铰链与刚性杆件的组合，实现对输入位移的放大。增敏机构的作用方式是：将混凝土变形从输入端输入，放大后输出端的变形带动天线传感器的变化。由于柔性铰链与刚性杆件的刚度相差较大，通常我们假定输入端、输出端及刚性杆为刚体，不发生变形，只在柔性铰链处发生变形。

采用带柔性铰链的桥式位移放大机构能够从两个方面放大物体的位移形变：首先是桥式位移放大机构本身沿输入端方向几何尺寸较大可以将混凝土应变放大。当混凝土结构产生了应变 ε ，此时在桥式位移放大机构长度为 x 的范围内产生了沿输入端方向大小为 εx 的变形，使得两个输入端发生了的大小为 Δx 相对位移：

$$\Delta x = \varepsilon x \quad (2.39)$$

其后，由于柔性铰链的存在，贴片天线传感器感知到的输出应变 ε_y 相比输入端感知到的输入应变 ε 是经过放大的了：

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} \quad (2.40)$$

其中， y 为柔性铰链增敏机构沿输出端方向的几何尺寸， Δy 为输出端产生的相对位移。将式 2.39 带入 2.40，可以得到：

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{x}{y} \cdot \varepsilon \quad (2.41)$$

可以进一步将 2.41 改写为：

$$\varepsilon_y = k_1 \cdot k_2 \cdot \varepsilon \quad (2.42)$$

其中 $k_1 = \Delta y / \Delta x$ ，代表的是增敏机构输出端与输入端的变形比值，即增敏机构（带柔性铰链的桥式位移放大机构）放大倍数； $k_2 = x / y$ ，代表的是增敏机构输入端方向几何尺寸与输出端方向几何尺寸的比值，即增敏机构的长宽比。根据式 2.42，如果想提高增敏效果可以从两方面入手：一是通过改进柔性铰链以提高增敏机构放大比，二是通过增大增敏机构总体的长宽比。

在柔性铰链增敏机构中，柔性铰链的特性决定了增敏机构的增敏性能，所以柔性铰链设计原理中，最为关键的就是对柔性铰链的简化模型材料力学分析和计算。在明确了柔性铰链的特性后，再分析增敏机构的具体结构形式，便可计算得到增敏机构的理论增敏效果。

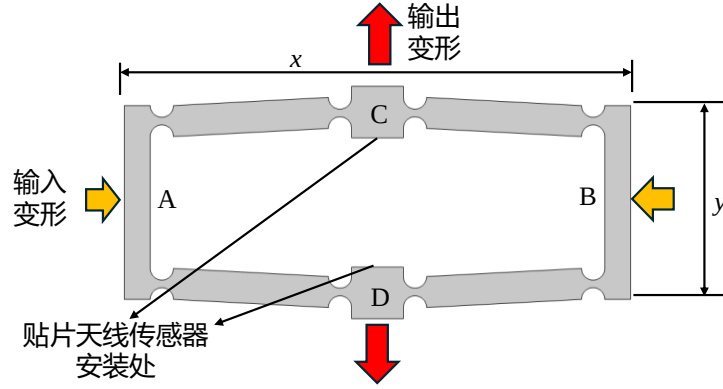


图 2.8 带有柔性铰链的桥式位移放大器示意图

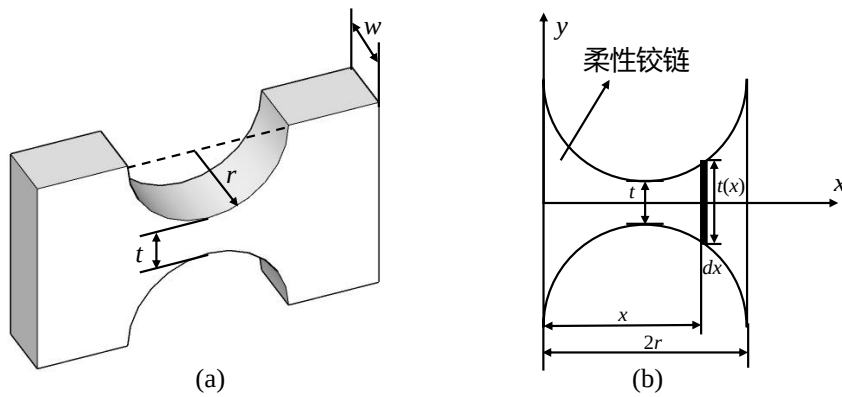


图 2.9 直圆形柔性铰链的(a)三维示意图与(b)平面示意图

计算柔性铰链常用的方法有伪刚体建模和柔性矩阵法。伪刚体法将柔性铰链等效为与其力—变形关系式相同的刚体进行分析，采用这种方法能够简化计算，但是实际上对结构分析不够充分^[58]。柔度矩阵法通过将铰链分块构建出空间柔度矩阵，以该矩阵来研究铰链的特性。采用柔度矩阵法可以更加准确地对柔性铰链进行分析。自 1965 年 Paros 和 Weisbord 首次发表关于圆弧型柔性铰链的经典论文以来，学者们已经提出并研究了多种不同类型的柔性铰链，包括椭圆型、抛物线型和双曲线型等。本文接下来以直圆形柔性铰链为例，采用柔度矩阵法分析其特性。

直圆形柔性铰链主要的尺寸参数有：铰链半径 r ，最窄间距 t 和厚度 w ，如图 2.9(a)。在计算过程中，通常假定柔性铰链的变形只发生在铰链总长 $2r$ 之内。并且因为铰链厚度 w 不随 x 的变化而变化，可以将直圆形铰链投影至二维平面进行分析，如图 2.9(b)所示。对于图 2.9(b)所示的二维模型，存在平面内的三个自由度：沿 x 轴的位移 u_x 、沿 y 轴方向的位移 u_y 及转角 θ_z ，三者分别对应的外力是轴向力 F_x 、竖直方向的剪力 F_y 以及平面内力矩 M 。对于柔性铰链，可以写出位移 $[u_x u_y \theta_z]$ 和外力 $[F_x F_y M]$ 的关系：

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_b \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_b \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

式中 $\mathbf{C}$ 即为平面柔性铰链的柔度矩阵。可以用欧拉-伯努利梁型构件去分析柔性铰链，得到柔度矩阵各个分量：

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11} = \frac{1}{E_{np}} \int_0^l \frac{dx}{t(x)} \\ C_{21} = 0 \\ C_{31} = 0 \\ C_{12} = 0 \\ C_{22} = \frac{1}{EW} \int_0^1 \frac{x^2 dx}{t(x)^2} \\ C_{\frac{12}{32}} = \frac{1}{EW} \int_0^1 \frac{xdx}{I(x)^{\frac{3}{2}}} \\ C_{\frac{12}{3}} = 0 \\ C_{\frac{23}{23}} = \frac{12}{EW} \int_0^1 \frac{xdx}{f(x)^{\frac{4}{3}}} \\ C_{\frac{13}{33}} = \frac{12}{EW} \int_0^1 \frac{dx}{f(x)^{\frac{2}{3}}} \\ C_{\frac{13}{33}} = \frac{12}{EW} \int_0^1 \frac{dx}{f(x)^{\frac{3}{2}}} \end{array} \right. \quad (2.40)$$

其中 $l = 2r$ 为柔性部分总长， $t(x)$ 为柔性铰链在不同处的教练宽度。对于采用欧拉-伯努利模型，在施加外部弯曲后，平面截面仍然垂直于中性轴。该模型忽略了剪切应力和相关变形。然而，对于相对较短的梁，需要考虑剪切效应及其相应的附加变形。考虑到这种附加剪切效应的模型是铁木辛柯模型，该模型还包含了旋转惯性效应，以更好地描述这种效应。采用铁木辛柯模型考虑剪切效应的柔度分量为：

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{11} = \frac{1}{Ew} \int_0^l \frac{dx}{t(x)} \\ c_{21} = 0 \\ c_{41} = 0 \\ c_{42} = 0 \\ c_{22} = \frac{12}{EW} \int_0^l \frac{x^2 dx}{t(x)^3} + \frac{\alpha E}{G} \frac{1}{Ew} \int_0^l \frac{dx}{t(x)} \\ c_{a2} = \frac{12}{Bw} \int_0^l \frac{xdx}{t(x)^3} \\ c_{13} = 0 \\ c_{23} = \frac{12}{Bw} \int_0^l \frac{xdx}{t(x)^3} \\ c_{33} = \frac{12}{Ew} \int_0^l \frac{dx}{t(x)^3} \end{array} \right. \quad (2.41)$$

并且，对于直圆型柔性铰链，其铰链宽度、截面积和惯性矩可以写为：

$$\left\{ \begin{array}{l} t(x) = t + 2(r - \sqrt{2rx - x^2}) \\ A(x) = wt(x) \\ I(x) = wt\left(\frac{x^3}{12}\right) \end{array} \right. \quad (2.42)$$

由于如图所示的桥式位移放大器属于全对称结构，在运用柔度矩阵法时可以选取结构 1/4 来简化分析，本例中增敏机构各个柔性铰链完全相同。化简如图 2.10 所示。

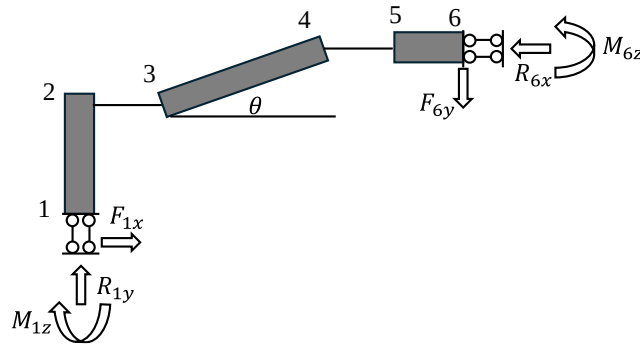


图 2.10 1/4 放大机构受力示意图

图中， R_{1y} 、 M_{1z} 、 R_{6y} 、 M_{6z} 为两端滑动支座的支座反力受力， F_{1x} 为使增敏机构变形的荷载，对应位移 u_{1x} ； F_{6y} 外荷载作用下 6 端产生的位移 u_{6y} 对应的虚拟力。分析易知在外力作用下两个铰链内力与外力的关系：

$$\begin{cases} N_{23} = N_{45} = F_{1x} \\ S_{23} = S_{45} = 0 \\ M_{23} = M_{1z} - F_{1x}l \\ M_{34} = M_{1z} - F_{1x}l - F_{1x}l \sin \theta \end{cases} \quad (2.43)$$

其中, N_{12} 、 N_{34} 分别为柔性铰链 12、34 的轴向力, S_{12} 、 S_{34} 为柔性铰链的剪切力, M_{12} 、 M_{34} 为柔性铰链的弯矩。为了通过卡式定理求出位移与外力的关系, 首先求出两个柔性铰链储存的应变能:

$$U = \sum_{i=1}^2 \left(\int_0^l \frac{N_i^2}{2EA(x)} dx + \int_0^l \frac{S_i^2}{2GA(x)} dx + \int_0^l \frac{M_i^2}{2EI(x)} dx \right) \quad (2.44)$$

由于显然 $R_{1y} = 0$, 根据卡氏第二位移定理等于总应变能对节点 1 各方向外力求偏导时可省略 u_{1y} :

$$\begin{cases} u_{1x} = \frac{\partial U}{\partial F_x} \\ \theta_{1z} = \frac{\partial U}{\partial M} = 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

将式 2.41~2.44 带入 2.45, 可以解得:

$$\begin{cases} F_{1x} = a_1 u_{1x} \\ M_{1z} = a_2 u_{1x} \end{cases} \quad (2.46)$$

其中, 系数 a_{ij} 为:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2}{2C_{11} + l^2 C_{33} + l^2 C_{33} (1 + \sin \theta)^2} \\ a_2 = \frac{l(2 + \sin \theta)}{2C_{11} + l^2 C_{33} + l^2 C_{33} (1 + \sin \theta)^2} \end{cases} \quad (2.47)$$

采用同样方法 6 端进行分析。首先改写式 2.42, 使式中含有 6 端的各个力:

$$\begin{cases} N_{32} = N_{54} = F_{1x} \\ S_{32} = S_{54} = F_{6y} \\ M_{3z} = M_{6z} - F_{1x}l \sin \theta + F_{6y}l \cos \theta + F_{6y}l + F_{6y}x \\ M_{54} = M_{6z} + F_{6y}l + F_{6y} \sin \theta x \end{cases} \quad (2.48)$$

同样对节点 6 采用卡氏第二位移定理:

$$\begin{cases} u_{6y} = \frac{\partial U}{\partial F_{6y}} \\ \theta_{6z} = \frac{\partial U}{\partial M_{6z}} = 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

化简得到：

$$\begin{cases} b_{11}F_{1x} + b_{12}M_{6x} = u_{6y} \\ b_{21}F_{1x} + b_{22}M_{6x} = 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} b_{11} = -l \sin \theta C_{23} - l \sin \theta (l \cos \theta + l) C_{33} \\ b_{12} = b_{21} = 2C_{23} + (l \cos \theta + 3l) C_{33} \\ b_{22} = -(l \cos \theta + l) C_{33} \end{cases} \quad (2.51)$$

由此可以得到唯一放大比：

$$k = \frac{u_{6y}}{u_{1x}} = \frac{b_{11}}{b_{22}} (b_{11}b_{22} - b_{12}^2) \quad (2.52)$$

2.4 本章小结

本章主要对本文设计的智能骨科所涉及的部分基础理论进行了介绍，包括：

（1）详细论述了麦克斯韦方程，这是电磁学分析的基础，并通过推导传输线的基本方程，阐述了天线工作时的功能转化关系。

（2）介绍了通过谐振腔模型假设计算常规矩形贴片天线谐振频率的方法，并进一步延伸到带有空气间隙的贴片天线谐振频率计算，阐明了孔径耦合馈电方式的形式特点及优势。

（3）介绍了基于柔性铰链的桥式位移放大机构作为传感器增敏机构的原理，采用铁木辛柯梁模型推导了柔性铰链的柔度矩阵，并通过卡氏第二定律进一步推导了采用了柔性铰链的桥式位移放大机构的放大比。

第3章 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器

基于贴片天线谐振频率公式，贴片天线的谐振频率主要由贴片天线尺寸和贴片天线基板介电常数决定。可以在贴片天线中引入空气间隙，其厚度的变化会带来介电常数的变化，进而改变其谐振频率。基于这样的性质，可以设计一种带有空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器，用于置于混凝土结构内部监测结构内部的变形。本章提出了一种用于结构变形监测的带有空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器。需要注意的是，本节主要讨论传感单元单独作用的性能，只在尺寸设计时考虑外壳与增敏机构的影响，以便于后续运用在智能骨料中。

在3.1节中，提出了天线的基本模型，并根据后续实验目标确定了天线传感器的基本尺寸。

在3.2节中，利用 HFSS 仿真软件对带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线的贴片天线进行了仿真。优化了天线的尺寸，同时仿真了不同空气厚度情况下，谐振频率的变化情况。

在3.3节中，采用矢量网络分析仪在实验室环境中对该天线传感器进行了测试。采用位移平台控制空气厚度，探究了空气厚度变化时，贴片天线传感器的实际工作效果，将实际效果与仿真结果进行对比，讨论了导致差异的可能原因。

3.1 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线模型

在本节中，先对带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线进行模型设计，随后给出了该贴片天线的谐振频率近似公式。根据所选工作频段以及未来组合成智能骨料的尺寸、量程需求对天线的尺寸进行了设计。

3.1.1 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线设计图

带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线主要由两部分组成，一部分是馈电结构，另一部分是辐射结构，如图3.1所示。

图3.1中，下半部分为馈电结构，下表面有一条覆铜的微带线用于馈电；其上表面覆铜作为地平面，并在地平面上开孔，故传输到下表面微带线的电磁波可以通过孔径泄露到上半部分。上半部分为辐射结构，上表面覆铜用于向空间辐射电磁波。上下部分的基板均采用 Rogers RO3010。图3.2是置于混凝土内部

的天线传感器工作示意图。具体的封装外壳与增敏机构的结构与特性将在后续章节进行讨论。并且本节中主要讨论天线传感器作为单独的传感单元的性能，暂不考虑外壳与增敏机构对传感单元性能的影响。

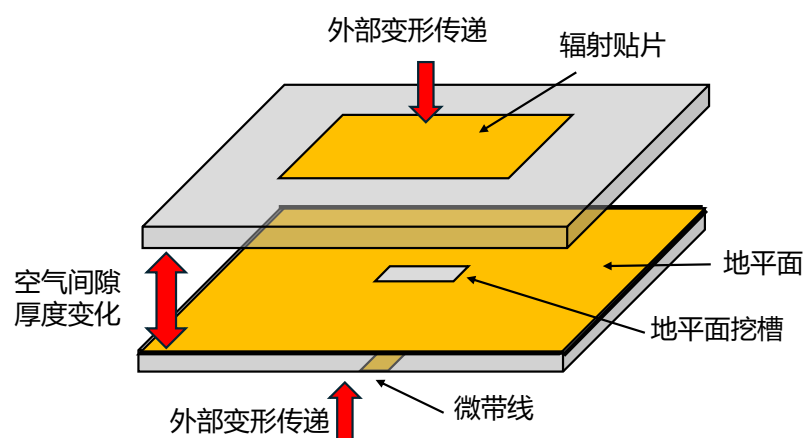


图 3.1 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线示意图

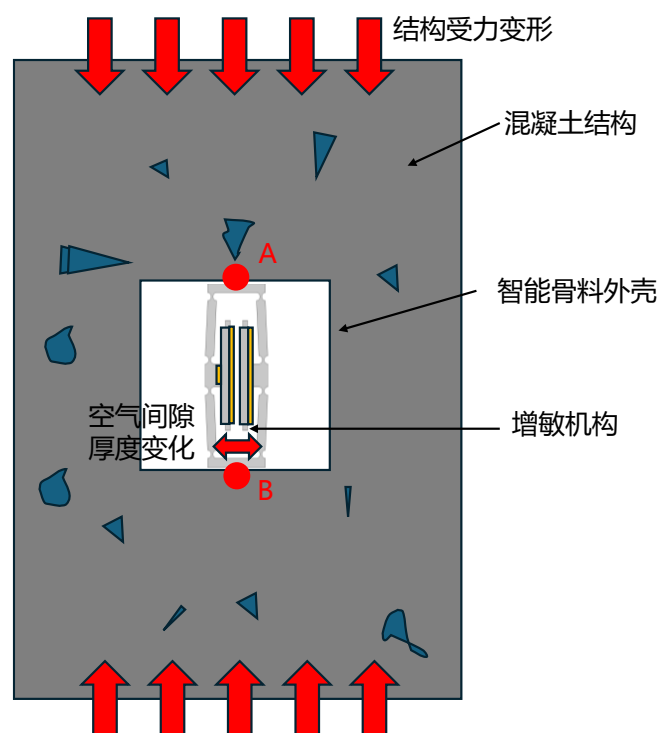


图 3.2 置于混凝土内部的智能骨料

在具体使用时，该天线传感器作为智能骨料的传感单元置于结构内部，结构变形通过封装外壳和增敏机构传递到天线传感器的上下部分，造成天线馈电结构和辐射结构的相对移动，空气间隙厚度发生变化。进而引起谐振频率的变化。因此，谐振频率的改变可以表征结构变形。

3.1.2 理论设计

带空气间隙的孔径耦合馈电天线的影响谐振频率的主要几何参数如图 3.3 所示。

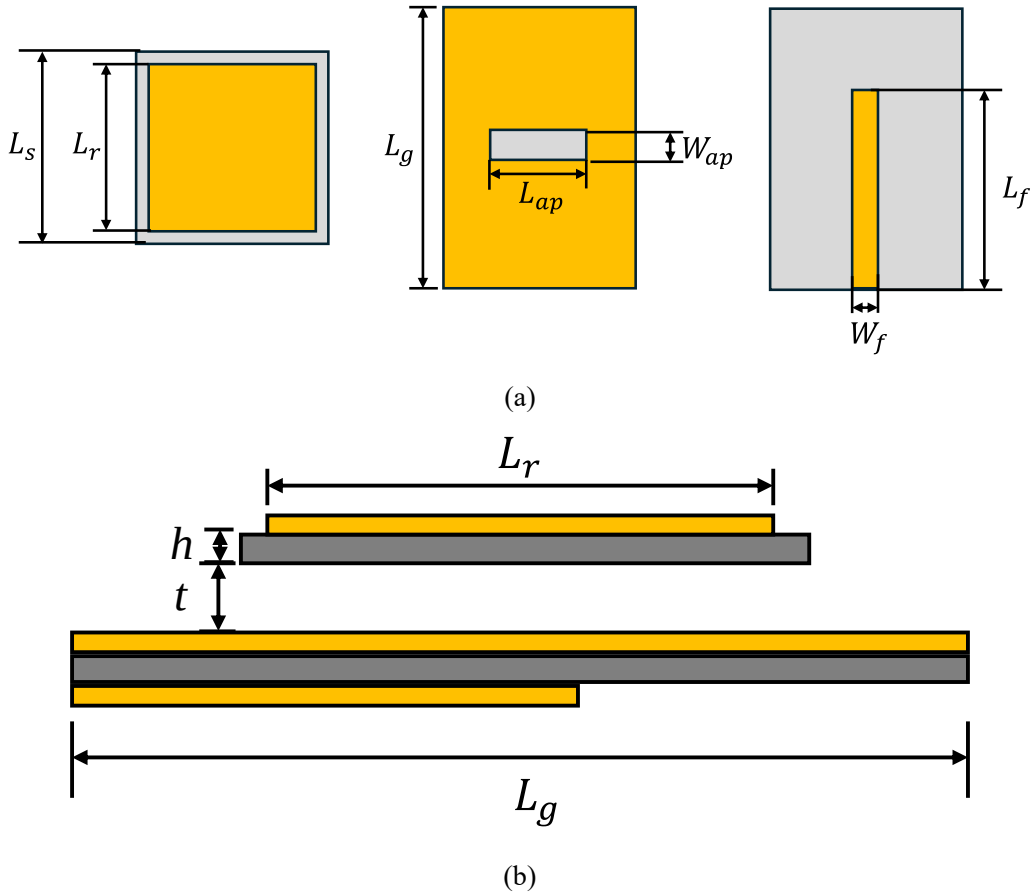


图 3.3 带空气间隙的孔径耦合馈电天线的影响谐振频率的主要几何参数

其谐振频率主要与辐射贴片长度、基板厚度以及空气间隙厚度有关。根据式 2.32，可以得到天线的等效介电常数：

$$\epsilon_{sff} = \frac{\epsilon_r(t+h)}{\epsilon_r t + h} \quad (3.1)$$

其中， ϵ_r 是辐射贴片基板材料的相对介电常数， t 是空气间隙厚度， h 是辐射贴片基板厚度。将式 3.1 代入式 2.38 可以得到天线在长度方向的谐振频率计算公式：

$$f = \frac{c}{2L_r \sqrt{\frac{\epsilon_r(t+h)}{\epsilon_r t + h}}} \quad (3.2)$$

其中， L_r 为辐射贴片谐振方向上的长度， c 为真空中光速。该式决定了谐

振频率与空气间隙的关系，是利用带空气间隙的耦合馈电天线对结构变形的监测的核心。接下来针对天线传感器未来制作成为混凝土智能骨料的需求进行尺寸设计。

观察式 3.2 可以发现，谐振频率 f 与空气间隙 t 的关系并非线性。因此，为了获得更大的灵敏度范围，首先探究天线传感器何时可以取到天线传感器本身最大灵敏度（即式 3.2 的斜率），以此首先初步确定空气厚度变化范围。将式 3.2 对空气间隙 t 求导：

$$f' = \frac{ch(\varepsilon_r - 1)}{4L_r} (\varepsilon_r t + h)^{-2} \left[1 + \frac{h(\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon_r t + h} \right]^{-\frac{2}{3}} \quad (3.3)$$

上式可以看出，灵敏度（即导数、斜率）随空气间隙 t 的增长下降，故初始空气间隙越小时天线传感器拥有越大灵敏度，应尽可能利用传感器灵敏度较大的阶段。考虑到天线铜箔数量 $1 \times 10^{-2} \text{mm}$ 级的厚度，若空气间隙厚度过小，馈电部分和辐射部分铜箔区域易相互接触行程导电通路，导致馈电部分和辐射部分短接。为避免天线短接影响工作性能，确定空气间隙最小厚度和空气间隙初始厚度：

$$t_0 = t_{\min} = 0.2 \text{mm} \quad (3.4)$$

表 3.1 初步设计的贴片天线传感器

天线参数	数值
L_r	40mm
W_r	30mm
t_0	0.2mm
$t_{\min}$	0.2mm
h	1.27mm
L_s	32mm
W_s	32mm
L_g	42mm
W_g	32mm
L_{ap}	8mm
W_{ap}	5mm
L_f	20mm
W_f	3mm

在确定完空气间隙参数后，可以继续设计贴片天线尺寸。基板采用 RO3010，其相对介电常数 $\varepsilon_r = 10.2$ ，默认板厚 $h = 1.27 \text{mm}$ 。考虑贴片天线整体谐振频率工作约在 2.4GHz ，则贴片天线谐振方向上辐射贴片长度 L_r 为：

$$L_r = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\varepsilon_r(t_0 + h)}{\varepsilon_r t_0 + h}}} = 0.040(\text{m}) \quad (3.5)$$

同时，为保证匹配，贴片天线宽度 W_r 根据式 3.8 设计^[59]：

$$W_r \leq \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{\epsilon_{eff} + 1}{2}} \quad (3.6)$$

天线馈电部分的尺寸先设定一个初始值，后续利用 HFSS 软件进行遍历优化。经过设计的贴片天线传感器参数如表 3.1 所示。

3.2 带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线仿真

第 3.1 节中，对天线传感器的谐振频率进行了理论计算，并初步设定了天线传感器量程、标距以及具体尺寸。但是采用谐振腔的理论公式计算谐振频率，忽略了贴片天线边缘效应，并且采用电容串联等效介电常数的计算也较为粗糙，最终的结果会产生一定偏差。同时采用理论进行孔径耦合馈电天线的馈电部分设计较为繁琐和困难。因此需要通过仿真软件对上节所涉及的天线传感器进行进一步的分析与优化。

在本节中，首先对初始空气间隙厚度情况下天线进行了仿真建模，通过参数优化确定最终天线的各个尺寸。随后，逐步改变空气间隙厚度，对天线谐振频率与厚度之间的关系进行探究。最后探究了在不同介质环境中的效果。

3.2.1 HFSS 建模

按照表 3.1 的天线尺寸在 HFSS 中建立了带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线，如图 3.4 所示。

天线基板采用 HFSS 内置材料库中的 RO3010，并设定为介电常数与温度无关。天线在微带线边缘设置了集总端口进行馈电。贴片天线的辐射贴片、地平面、微带线均采用无厚度平面，并将平面边界设置为 perfect E 完美电壁，模拟实际工作中天线覆铜部分在外壳外部设置了 $350 \times 280 \times 280$ 的空气盒子，传感器与空气盒子的距离大于天线工作时的 $1/4$ 波长，保证仿真精度；其六面设置为 the perfect match layer 完美匹配层边界，模拟无限远的天线散射效应。扫频方式设置为 Interpolating 插值法，扫频起始为 1.5GHz，终止为 3.5GHz，扫频步长为 0.001GHz。

基于表 3.1，对各个参数进行 0.1mm 步长的遍历参数优化，得到了表 3.2 中最终的天线参数。此时在空气间隙厚度为 0.7mm 的初始状态的 S11 曲线如图 3.5 所示。提取 S11 曲线的最低点所对应的频率作为此时天线的谐振频率，初始状态谐振频率为 2.627GHz，并且最低点 S11 约为 -10dB，表明此时天线的阻抗匹配程度较好。由于后续调节空气间隙厚度时，谐振频率会发生相应改变，设计好

的微带线无法做到对每个谐振频率都完美匹配，后续小节中也可以看到不同谐振频率下的 S_{11} 曲线深度不同。

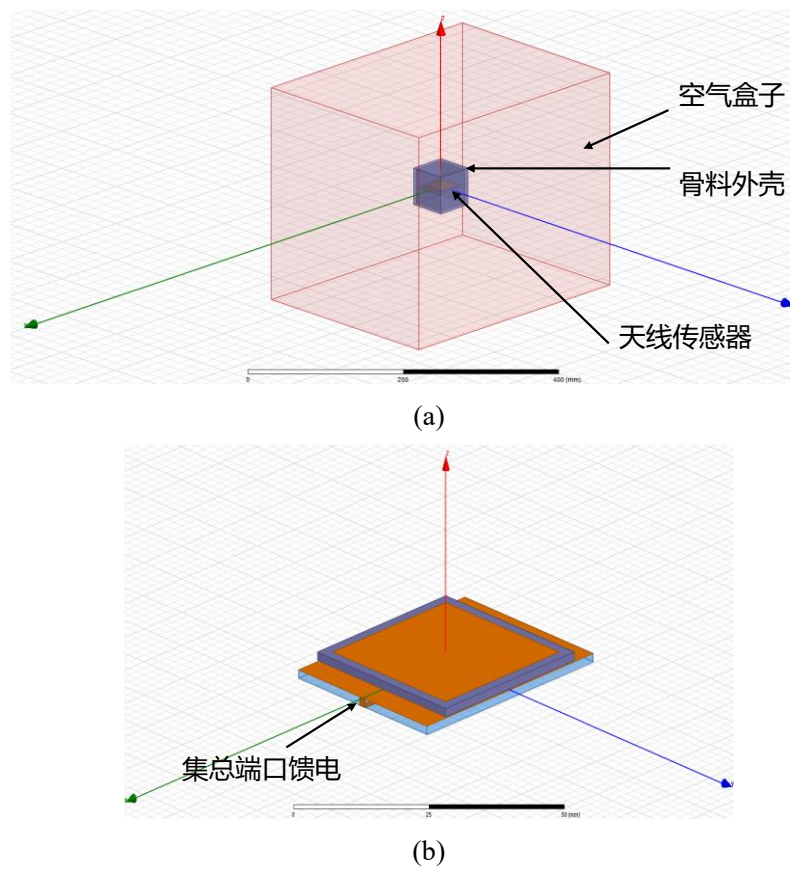


图 3.4 在 HFSS 中的天线传感器模型

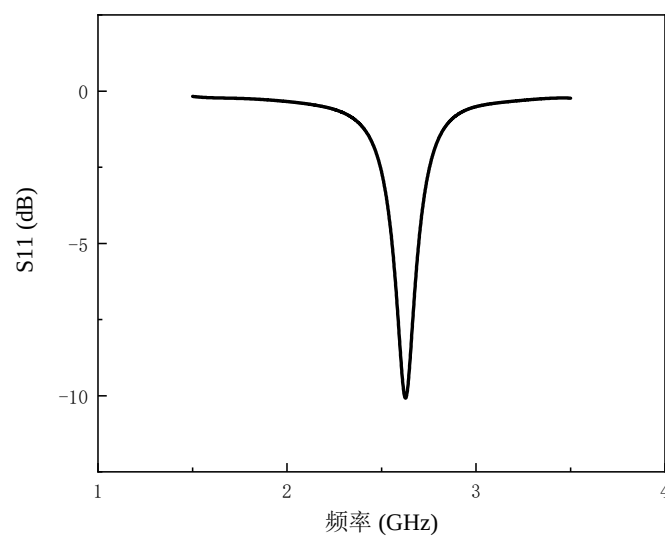


图 3.5 天线传感器初始状态下的 S_{11} 曲线

表 3.2 HFSS 优化后的天线参数

天线参数	数值
L_r	30mm
W_r	30mm
t_0	0.2mm
t_{min}	0.2mm
h	1.27mm
L_s	33mm
W_s	33mm
L_g	43mm
W_g	33mm
L_{ap}	12.7mm
W_{ap}	1.6mm
L_f	34mm
W_f	1.6mm

3.2.2 仿真结果

通过在 HFSS 中改变空气间隙厚度，可以模拟天线传感的效果。根据表 3.2，设置空气间隙 t 从 0.2 变化至 1.2mm，步长为 0.1mm。由此得到了不同空气间隙后的 S11 曲线，如图 3.6 所示。

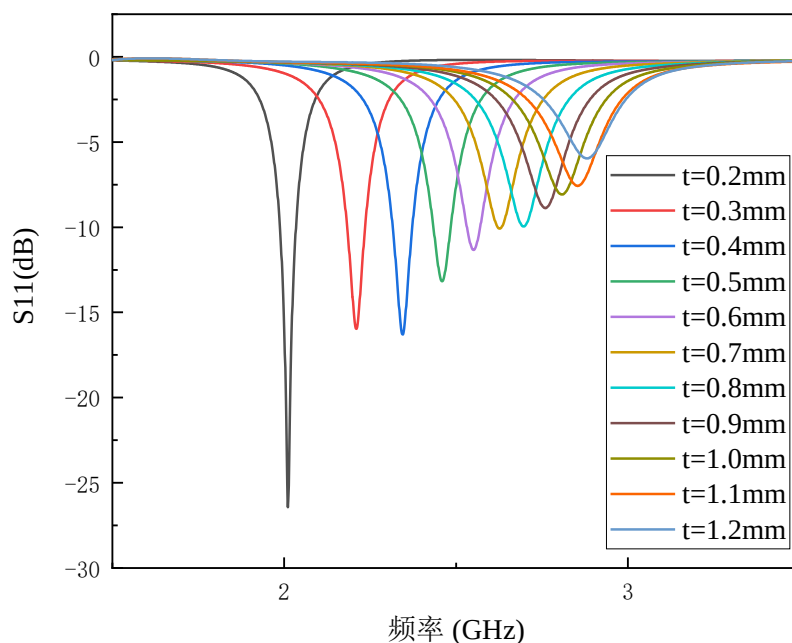


图 3.6 不同空气间隙下的贴片天线谐振频率

观察图 3.6 的各条 S11 曲线，可以发现随着空气间隙厚度的增加，S11 曲线随之向频率轴右侧移动，最低点对应的谐振频率也随之增大。这符合前述的传感原理——随着空气间隙厚度的变化，等效介电常数改变，谐振频率相应发生偏移。可以观察到如式 3.3 所讨论现象， t 越大时，相同空气厚度变化量所对应

的谐振频率偏移量越小，这表明传感器灵敏度并非常数，而是空气间隙厚度 t 的函数， t 越大，传感器灵敏度越小。同时可以发现 t 越大时，S11 最小值越大，这是由于不同频率下阻抗匹配程度不同导致的。

提取出各个空气厚度情况下的谐振频率，绘制天线谐振频率与空气间隙厚度的关系图，如图 3.7。

由图 3.7 可知，谐振频率仿真结果与本章开头的理论计算有所差异，其原因可能是理论计算公式不完备。采用二次曲线拟合时 R^2 为 0.99，表明天线谐振频率与空气间隙厚度近似二次关系，拟合效果好，也符合式 3.2 的推导结果，式 3.7 为二次拟合关系式；采用线性拟合时 R^2 为 0.94，在实际工作中为了简化传感器设计，可以将其线谐振频率与空气间隙厚度近似于线性关系。后续工作中也会基于线性关系假设和二次曲线关系假设进行传感器效果分析，式 3.8 为线性拟合关系式。根据式 3.7、3.8，采用二次曲线拟合得到的灵敏度最大值为 1552MHz/mm，采用线性拟合得到得灵敏度为 820 MHz/mm，仿真结果显示带空气间隙的孔径耦合馈电的天线传感器本身具有很高的灵敏度，传感性能好。

$$f(\text{GHz}) = -0.72t^2 + 1.84t + 1.71(\text{mm}) \quad (3.7)$$

$$f(\text{GHz}) = 0.82t + 1.99(\text{mm}) \quad (3.8)$$

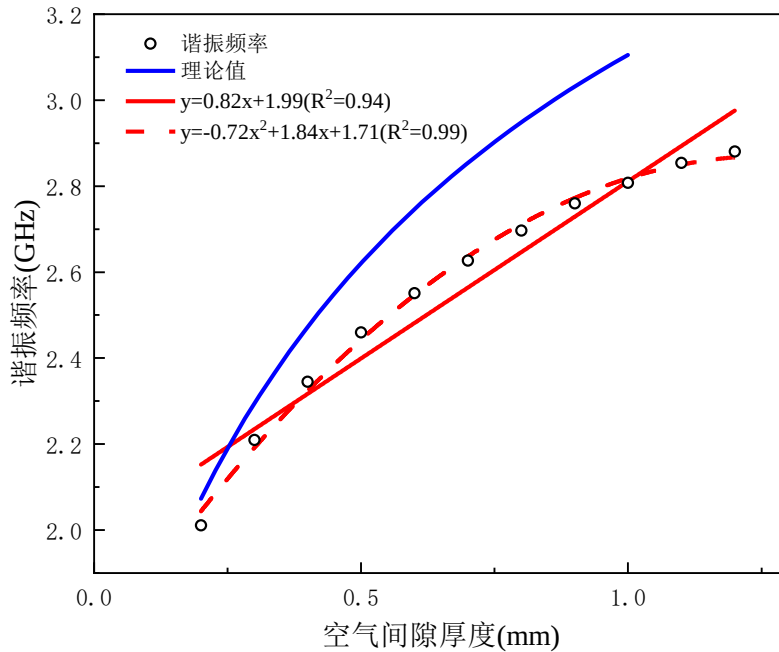


图 3.7 谐振频率与空气间隙厚度之间的关系

3.3 实验研究

根据表 3.2 的天线尺寸参数，委托厂家进行加工制作了天线传感器，成品如

图 3.8，黄色部分为表面覆铜，并做了抗氧化处理，防止空气中天线氧化，影响使用性能。成品天线还需要焊接端口，将 SMA 接头焊脚焊接在地平面和微带线上。

为探究空气间隙厚度与天线谐振频率的关系，搭建了如图 3.9 的实验装置，其中包含天线实验测试平台及数据收集平台。天线实验测试平台由微位移平台、亚克力支架、天线传感器组成，如图 3.10(b)。微位移平台行程为 $\pm 12.5\text{mm}$ ，精度 0.01mm ，平行度 0.01mm ，当转动左侧的螺旋测微杆时，位移平台的上下两个平面会发生相对位移。由于微位移平台的材质为铝合金，为了避免铝合金对天线性能的影响，将天线的馈电部分和辐射部分通过电导率近似为 0 的亚克力材料支架分别固定在微位移平台的上下两个平面。由此，当螺旋测微杆转动时，天线的馈电部分和辐射部分之间的垂直距离发生变化，天线谐振频率从而发生改变。

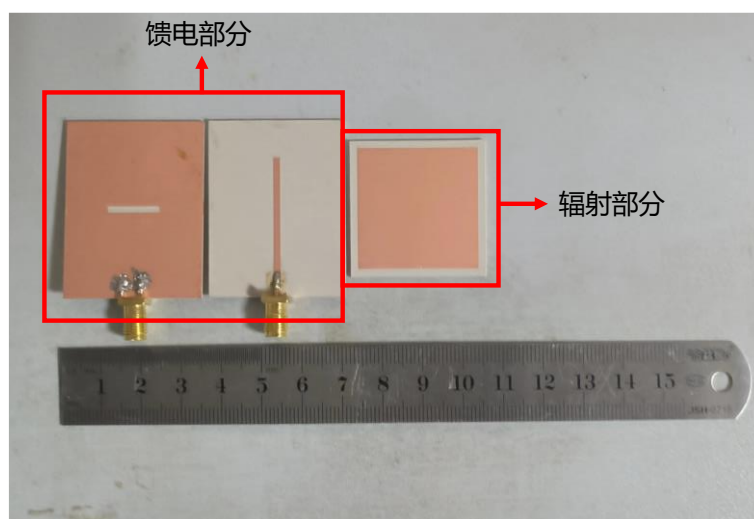


图 3.8 天线传感器实物图

通过数据收集平台采集实验测试平台得到的数据，数据收集平台由工作频段 50kHz - 6.3GHz 的便携矢量网络分析仪 (LiteVNA) 和数据采集软件组成。数据采集软件中 设置扫频起始为 1500MHz ，终止为 3500MHz ，扫频点数为 1024。将天线通过同轴线连接到的矢量网络分析仪，网络分析仪连接至数据收集平台。实验中，从空气间隙厚度为 1.2mm 开始测试，位移平台控制厚度变化，每减小 0.1mm ，记录一次 S_{11} 数据，直至空气间隙厚度为 0.2mm 。

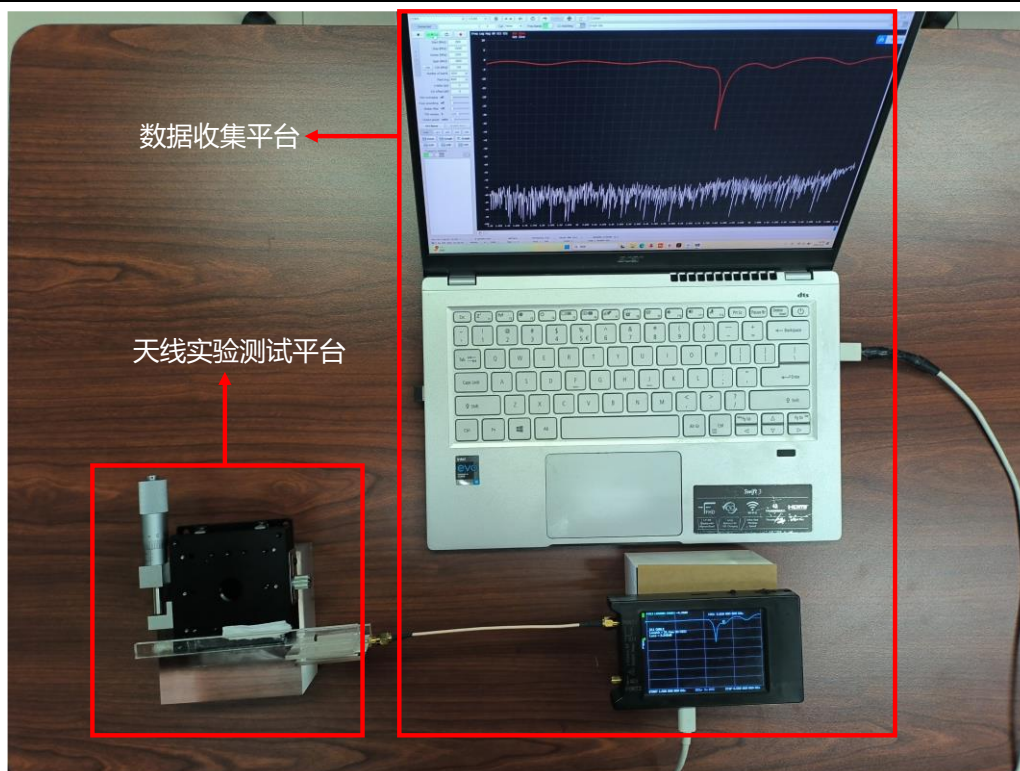


图 3.9 实验装置搭建

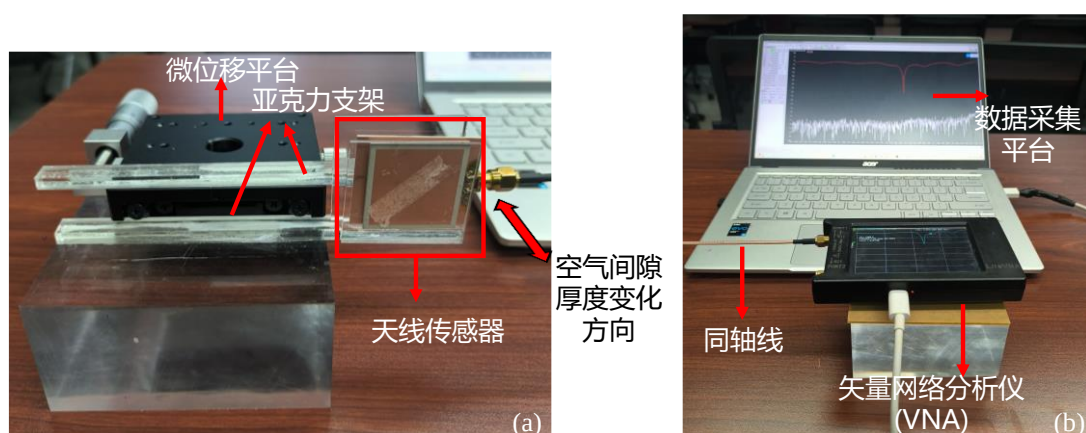


图 3.10 (a)天线实验测试平台；(b)数据采集平台

图 3.11 为实验测试得到的 S_{11} 曲线，与仿真结果具有相似的趋势，随着空气间隙厚度增大， S_{11} 曲线向右偏移。从中提取谐振频率，得到实验测试的谐振频率与空气间隙厚度的关系，如图 3.12。实验结果与仿真结果有所不同，主要原因有：1、仿真中没有考虑铜箔的厚度，铜箔厚度尺寸在 $20\text{-}40\mu\text{m}$ ，实际工作中此数量级的尺寸对空气层厚度的计算有影响，这也导致实验中空气间隙厚度小于实验设计，又因式 3.3 得到的“空气间隙厚度越小，对变化越敏感”结论，故而实验灵敏度大于仿真灵敏度；2、无法保证天线的两部分在空气间隙变化时

完全正对平行；3、实验中外部扰动，使得空气间隙厚度变化；4、微位移平台误差。

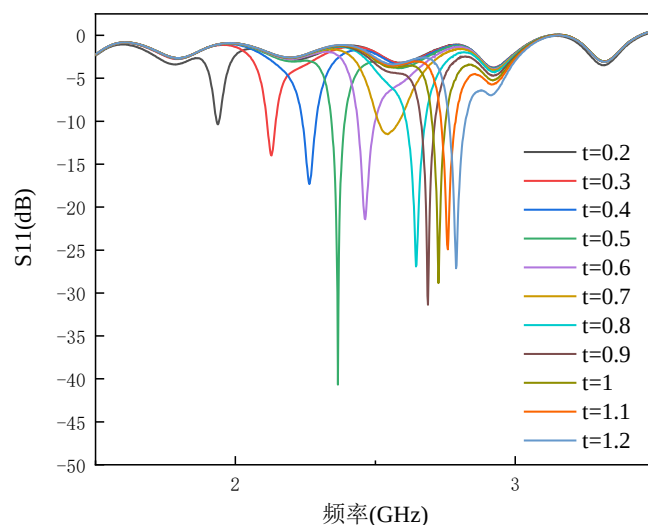


图 3.11 实验测试得到的不同空气间隙厚度下的 S11 曲线

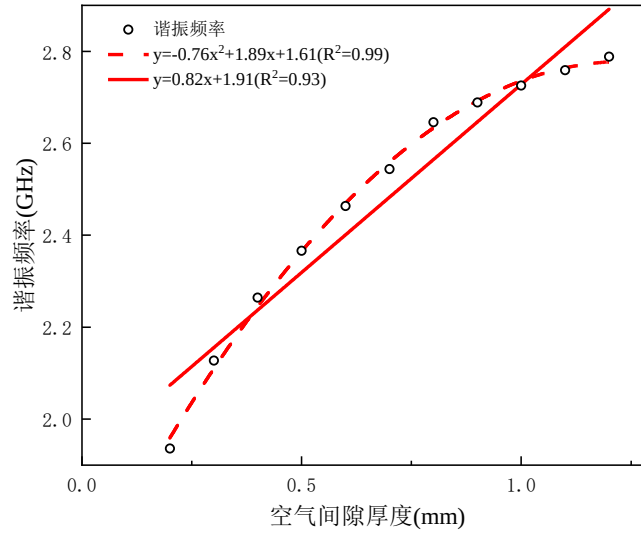
表 3.3 为仿真灵敏度与实际灵敏度的结果对比。从图 3.12 和表 3.3 可以看出：空气间隙厚度 0.2~1.2mm 时，实验与仿真中得到的谐振频率采用线性、二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.9，其中二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.99，表明天线传感器工作性能良好，既可以采用线性拟合以简化传感器设计，也可以采用二次曲线拟合，以获得更高的精度。

传感器在本身的灵敏度方面已经远远超过了当前已被提出的变形监测天线传感器。后续封装成智能骨料后，通过增敏机构的进一步提高，传感器能实现高灵敏度的应变监测。

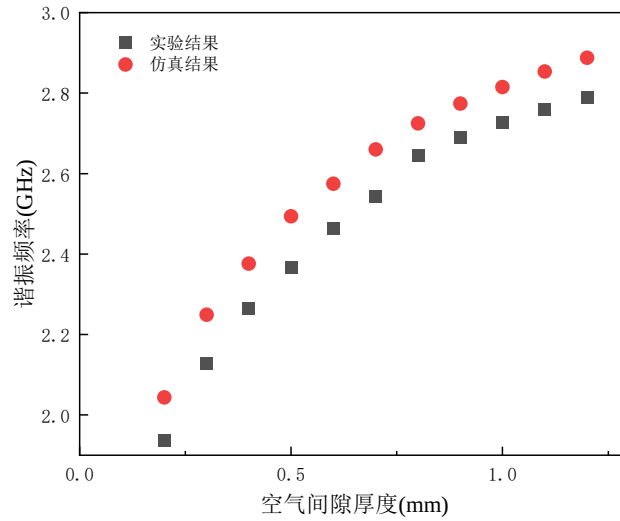
通过改变初始空气间隙厚度，以及空气厚度最大变化值可以对传感器的量程、灵敏度进行重构。针对当前传感器普遍存在的不灵敏、量程窄等问题，这一方法可以有效提升传感器的灵敏度和量程，从而改善其测量精度和稳定性。此外，该重构方式具有简单、易操作、成本低等优点。

表 3.3 仿真灵敏度与实际灵敏度对比

灵敏度 (MHz/mm)	线性拟合	二次曲线拟合
本文仿真	820	30~1546
本文实验	818	70~1583
文献[61]	116	-
文献[62]	60	-
文献[54]	120	-



(a)



(b)

图 3.12 (a)实验得到的谐振频率与空气间隙关系；(b)仿真结果与实验结果对比

3.4 本章小结

本章主要介绍了带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线作为形变传感器的工作方式、模拟仿真和试验测试，总结如下：

(1) 设计了带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线传感器的基本工作方式，根据传感器目标，设置空气间隙初始值、变化范围，进一步根据第二章所推导的公式初步设计了传感器重要参数，后续通过 HFSS 优化确定了天线传感器最终参数。

(2) 在 HFSS 中对最终确定的天线传感器模型进行空气间隙厚度参数扫描，

以模拟实际工作中传感器空气间隙厚度变化。模拟结果表明,该传感器效果良好,采用二次曲线拟合得到的灵敏度范围为 112MHz/mm~1552MHz/mm,采用线性拟合得到得灵敏度为 820 MHz/mm,采用两种拟合方式 R^2 皆大于 0.9。

(3) 加工了设计的天线传感器实物,并设计了试验装置,通过便携式矢量网络分析仪进行测试。测试结果表明,采用二次曲线拟合得到的灵敏度范围为 70~1583MHz/mm,采用线性拟合得到得灵敏度为 818MHz/mm,实验得到的谐振频率采用线性、二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.9,其中二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.99,表明天线传感器工作性能良好。

第4章 基于柔性铰链的智能骨料增敏机构与封装外壳

柔性铰链因其零间隙、零摩擦、无装配误差、高精度、无需润滑等优势被广泛应用于机械等领域。结合三角放大及杠杆放大原理，采用柔性铰链的位移放大机构也因此拥有更好的效果和精度。上一章节提出的变形传感器采用谐振频率偏移来表征空气间隙厚度变化。在所提出天线传感器上整合柔性铰链位移放大机构作为增敏机构，既可以将混凝土应变传递到天线的空气间隙厚度变化，同时又能将混凝土应变放大，提高传感器灵敏度且不缩小量程。其中，智能骨料的封装外壳设计也会很大程度影响增敏机构和智能骨料性能。本章主要设计了一种基于柔性铰链的传感器增敏机构，通过应用在第三章所提出的天线传感器中以检验了基本增敏性能，并探究了外壳骨料对智能骨料性能的影响。

在4.1节中，首先根据非屏蔽材料与屏蔽材料对天线传感器的影响确定了封装外壳的材料；再根据材料特性比选了多种材料，最终确定柔性铰链增敏机构的材料。

在4.2节中，根据增敏倍数要求给出了初步设计的增敏机构尺寸，并在COMSOL软件中进行建模仿真。根据仿真结果对增敏机构核心参数进行优化，以使增敏机构能兼顾最优目标放大比和合理的应力分布，最后得到优化后的增敏机构。

在4.3节中，分析了由于封装外壳导致的协调变形差异现象，通过量化的方式分析了外壳形状、外壳厚度、高宽比、模量比对协调变形差异的影响。

在4.4节中，分析了考虑外壳-增敏机构相互作用下的增敏倍数和变形协调差异，并分析了考虑与不考虑相互作用之间结果差异的原因。

4.1 材料选择

4.1.1 封装外壳材料

常见的商用传感器多采用金属材料对传感器进行封装，这主要是由于多数传感器采用线缆进行数据传输。但对于天线传感器，金属材料作为良导体进行封装会形成电磁屏蔽腔。良导体通常都为电磁屏蔽材料，因其高电导率，导体内电流或自由电子会快速移动，在材料表面产生电场，电磁波辐射遇到导体材料时会形成反向电场，抵消电磁波电场成分，从而减弱电磁波的能量，产生电

磁屏蔽效果。此时，由于电磁波受限于一定空间内，当此空间局限于天线辐射近场时，将会引起严重的天线的电磁特征参数变化。

相反，亚克力和聚乙烯等材料电导率较低，电磁波能轻松穿透，并且衰减较小。因此，可以对传感器进行非屏蔽封装。由于封装层内部实际上形成了一个较为稳定的空气盒子，贴片天线辐射的电磁波仍可传播到封装层的外部区域，因此天线的电磁参数不会因为封装外壳而改变。但也正是因为其非屏蔽，若封装外壳外部环境不是空气，天线的电磁特征参数也会随着外部环境介电常数的变化而发生一定的变化。对比两种材料，为了天线传感器的正常工作，本文选用非屏蔽材料作为天线传感器封装外壳。

上一章节的仿真针对于非埋入环境，但考虑到未来天线传感器使用，需要进行封装，并埋入混凝土中。有必要在仿真中体现两者，并在不同环境下测试的性能进行对比，探究其对天线传感器效果的影响，防止3.3节中测得的天线传感器性能与第5章中制成智能骨料埋入混凝土的性能有较大差异，导致智能骨料校正误差。由于外部环境对天线工作的影响机理较为复杂，如果在两种环境中传感器性能存在较大差异，则需要重新在HFSS中对天线尺寸进行优化。

如图4.1所示，改进后的模型设置了厚度为5mm，边长为50mm（智能骨料标距）的树脂材料层。树脂材料电导率接近为0，趋肤深度相对壁厚较大，可以认为电磁波全部穿过材料没有衰减。混凝土的含水率和温度等因素都会影响混凝土自身的介电常数，进而影响天线的电磁参数。通常在养护28天后，混凝土介电常数约为4~7。在尼龙封装外、空气盒子内增加了 $150\times 150\times 150\text{mm}$ 的材料，并将介电常数设置为4以模拟混凝土环境。

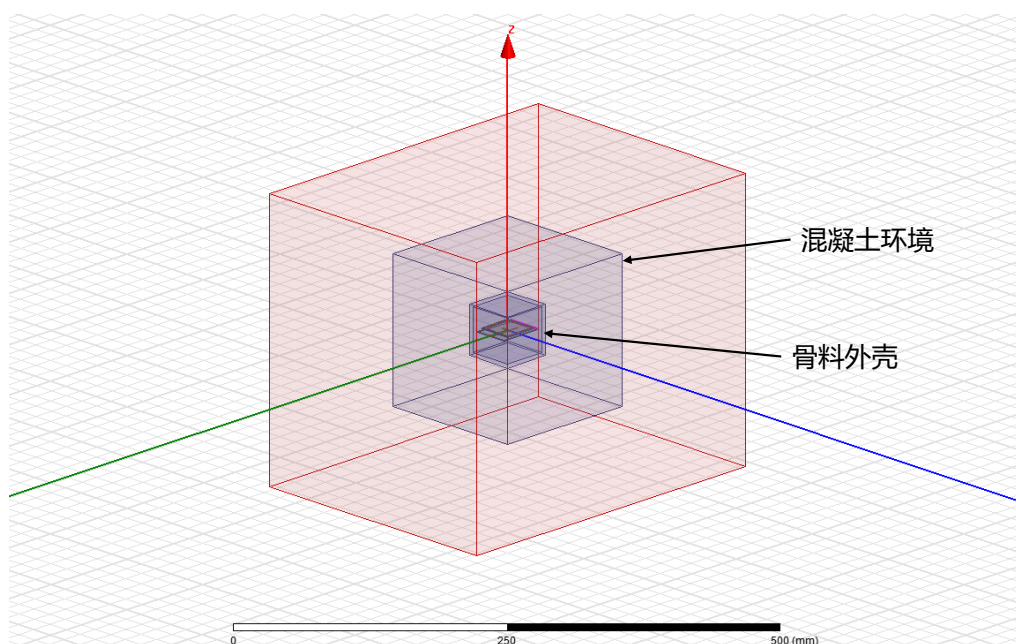


图4.1 添加了混凝土环境的天线传感器模型

对改进后的模型采用同样的求解设置求解不同空气间隙厚度下的 S_{11} 曲线, 如图 4.2。由于环境中介电常数发生了变化, 天线的阻抗匹配程度也发生了变化, 具体表现在图 4.2 的 S_{11} 曲线幅度与形状与图 3.6 不同。类似的, 空气间隙厚度 t 越大, 天线传感器的灵敏度越小。提取图 4.2 中各个 S_{11} 曲线的最低点作为谐振频率, 绘制天线谐振频率与空气间隙厚度的关系图 4.3。

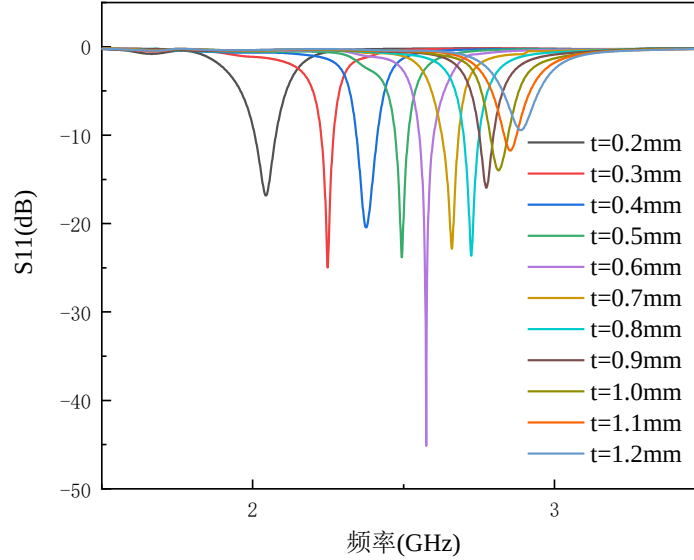
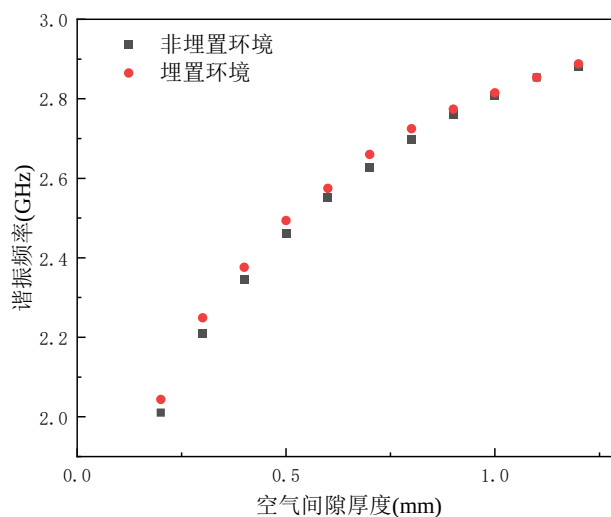


图 4.2 添加混凝土环境后不同空气间隙下的 S_{11} 曲线

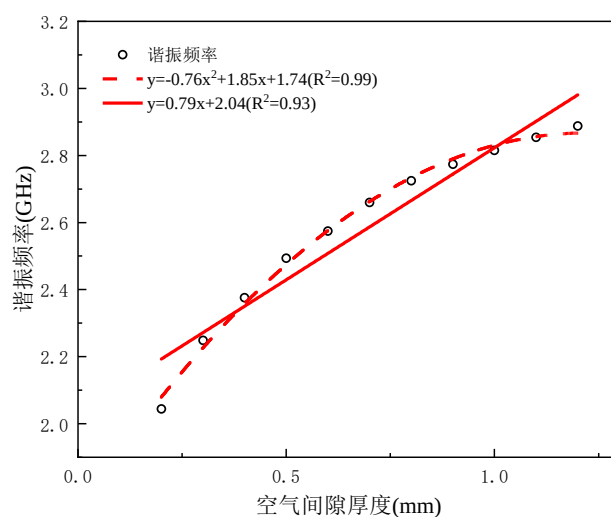
由图 4.3(a), 在非埋置环境和埋置环境中, 谐振频率随空气间隙厚度的变化都呈现出同样的趋势, 但在谐振频率数值上有一定的偏差, 空气间隙厚度越大, 两种情况差距越小。这主要是因为空气间隙厚度越大, 谐振频率越大, 天线波长越小, 其辐射近场范围越小, 因此受到智能骨料外壳非空气介质的影响便相对减少。埋置环境中采用二次曲线拟合时 R^2 为 0.99, 表明天线谐振频率与空气间隙厚度仍可近似二次关系, 式 4.1 为二次拟合关系式; 采用线性拟合时 R^2 为 0.93, 式 3.13 为线性拟合关系式。根据式 4.1、4.2, 采用二次曲线拟合得到的灵敏度范围为 26MHz/mm~1546MHz/mm, 采用线性拟合得到得灵敏度为 790 MHz/mm, 相比式 3.7、3.8, 仿真结果十分相近, 可以认为非埋入与埋入环境中的天线传感器性能一致, 故后续可以采用非屏蔽材料作为封装外壳材料。

$$f(\text{GHz}) = -0.76t^2 + 1.85t + 1.74(\text{mm}) \quad (4.1)$$

$$f(\text{GHz}) = 0.79t + 2.04(\text{mm}) \quad (4.2)$$



(a)



(b)

图 4.3 (a)埋置环境与非埋置环境的谐振频率对比；(b)添加混凝土环境后谐振频率与空气间隙厚度的关系

4.1.2 增敏机构材料

从第 2 章的柔性铰链位移放大机构放大比的推导中可以看出，除了机构尺寸以外，机构本身的材料也会对增敏倍数产生影响，所以在确定尺寸之前还需要确定材料种类。材料的弹性模量是影响增敏机构增敏倍数关键因素之一，弹性模量在材料抵抗变形方面发挥着重要作用，其基本原理是弹性变形情况下，外力对材料所做的工作与材料的变形能相等，它反映了材料抵抗形变的弹性特性，是材料刚性的数值化表现，弹性模量越大，表示材料对弹性变形的抵抗能力越强，在一定相同的应力载荷下，材料的变形越小，变形后恢复的能力越强。

除了关注增敏倍数，还需要关注增敏机构在发挥作用时的应力状态，保证处于工作状态时应力不超过材料的屈服强度或抗拉强度。屈服强度 σ_y 是用于描述塑性材料抵抗变形的能力，塑性材料在受拉时经历屈服、颈缩和断裂，当材料到达屈服强度时，一般就可以认为材料已经失效。对于屈服前的塑性材料，其静态失效前所能达到的最大应变为 σ_y/E 。

而脆性材料与塑性材料不同，其没有屈服、颈缩和断裂等阶段而是直接断裂，抗拉强度 σ_b 是描述脆性材料在受拉作用下抵抗破坏的能力，是材料在拉伸断裂前所能承受的最大拉应力。对于脆性材料，其静态失效的最大应变为 σ_b/E 。

表 4.1 选取了多种常见的工程材料，列举了其弹性模量、屈服强度和抗拉强度以及最大应变值。

表 4.1 常见材料力学性能

材料	弹性模量(Gpa)	屈服强度/抗拉强度(Mpa)	静态应变 $\times 10^{-4} / (\mu\epsilon)$
不锈钢 301	211	205	9.7
铝合金 7075	71.7	455	63.5
紫铜 T1	107.9	65	6.0
钛合金 TA1	106	165	15.6
低碳钢 20Cr	211	540	25.6
弹簧钢 65s	206	784	38.1
锌合金 ZA-27	77.9	255	32.7
尼龙 66	1.5	65	433.3
VERO 高韧树脂	2.2	46	209.1

静态应变值定义为材料静态失效之前的变形，此值越大，柔性铰链的最大变形也越大，增敏机构的行程也随之增大。因此，应着重关注材料的静态应变。可以从表 4.1 中看出：有机材料尼龙 66 与 VERO 高韧树脂的静态应变值较大，超过 0.01，金属材料的静态应变值均在 0.0001~0.01 范围之内。同时考虑到金属材料对天线传感器的耦合作用带来影响谐振频率的可能性，使得智能骨料测量可能存在误差，应优先考虑非金属材料。

经过综合比选，最后确定采用 VERO 高韧树脂作为柔性铰链增敏机构的材料。这种材料导电率接近于 0，对天线工作性能的影响很小；同时拥有较高的静态应变，适合用于柔性铰链增敏机构使其有足够大的变形；同时此种材料可以适用于高精度 3D 打印制作，加工方便，精度高。后续为了避免装配误差，将采用柔性铰链和外壳一体化 3D 打印方案。

4.2 增敏机构模型建立与优化

4.2.1 模型建立

在确定增敏机构增敏倍数前首先要明确智能骨料的传感性能，例如标距、量程、与量程相对应的空气间隙厚度变化范围。在第三章中得知，智能骨料中的天线传感器空气厚度在 0.2~1.2mm 之间时可以得到良好的传感器工作性能，故首先确定空气间隙厚度变化最大值 $\Delta_{t,max} = 1\text{mm}$ 。参考市面常见混凝土埋置式传感器，设定智能骨料标距为 50mm，量程为 $3000\mu\varepsilon$ ，由此可以确定智能骨料敏感轴方向的最大变形为 $\Delta_{max} = 0.15\text{mm}$ 。可以进一步根据式 4.3 计算得到增敏倍数上限 $R_{a,max}$ 为 3.3，故本文确定增敏倍数为 3。下面将根据目标增敏倍数对增敏机构进行设计。

$$R_{a,max} = \frac{\Delta_{t,max}}{2\Delta_{max}} = \frac{1\text{mm}}{2 \times 0.15\text{mm}} = 3.3 \quad (4.3)$$

图 4.1 为增敏机构的关键尺寸参数 l 、 t 、 r 、 w 示意图，表 4.2 为具体的尺寸参数。输入端与输出端尺寸不影响增敏倍数，且后续为了测试需求和智能骨料安装需求会对输入端与输出端尺寸与形状做出调整，故此部分参数不标注在图 4.1 和表 4.2 中。

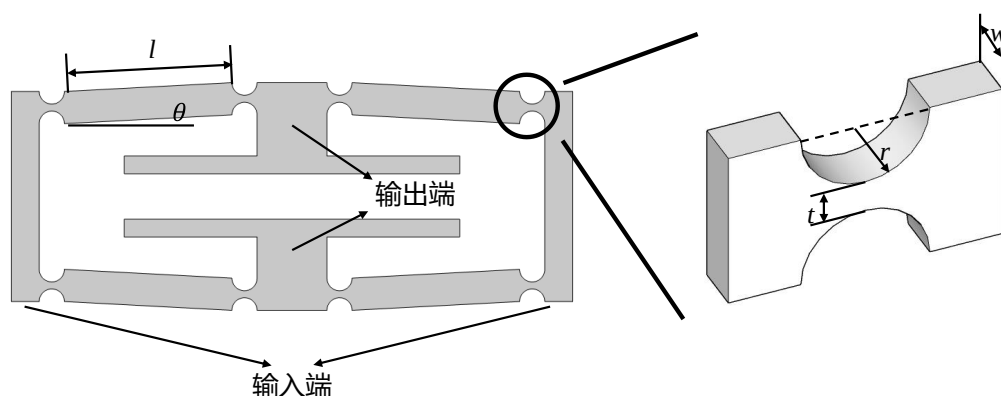


图 4.4 增敏机构关键尺寸参数示意图

表 4.2 初步设计的增敏机构关键尺寸

$l(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$w(\text{mm})$	$\theta(\text{degree})$
15	1	0.9	20	10

由于柔性铰链机构在厚度方向上不存在几何变化，在建模时可出于节省算力的目的建立平面二维模型。在多物理场仿真软件 COMSOL 中根据已经确定的尺寸参数建立模型。设置材料属性为树脂，弹性模量为 2.2GPa，泊松比为 0.41，

密度为 1122Kg/m^3 ，网格根据固体力学物理场自动进行超细化划分。对增敏机构的两端输入端中的一端施加辊支承，限制了沿增敏机构长度方向的移动，另一端设置了指定位移，模拟智能骨科变形输入。对指定位移进行参数化扫描，扫描范围为 $-0.15\sim 0\text{mm}$ ，扫描步长为 0.01 ，可以得到输入位移与输出位移的关系：

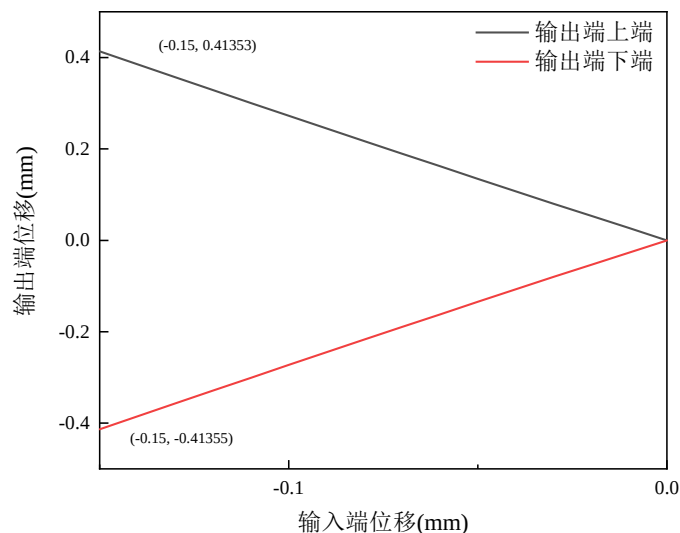


图 4.4 增敏机构输入输出曲线

由图可以看出，输出端上端、输出端下端位移和输入位移的曲线成线性关系，这代表增敏机构在此输入范围内能够实现线性放大，工作性能良好。斜率为 2.77 ，代表当输入端位移为 -0.15mm （增敏机构输入端受到压缩）时，增敏机构将输入位移放大 2.757 倍，输出端输出 0.41355mm 位移。目前所提出的增敏机构增敏倍数为 2.757 ，为了将增敏倍数提升到 3.0 ，需要对目前所提出的增敏机构重要参数进行调整。

4.2.2 参数分析与确定

首先对铰链最窄处 t 、铰链半径 r 、刚性段初始倾角 θ 及刚性段长度 l 进行变单一参数分析——当考察其中一个参数对增敏倍数的影响时，便不再改变其他参数。同样将输入端左端设置为辊支承，右端输入位移为 -0.15mm 时，输出位移与考察参数之间的变化。

对于柔性铰链最窄处 t ，参数化分析从 0.1mm 开始，步长 0.1mm ，至 2mm 结束。从图 4.5(a)中可以看出，在相同输入位移的情况下，随着 t 逐渐变大，输出位移逐渐减小，代表了增敏机构的增敏倍数逐渐减小。这是因为当 t 越小时，柔性铰链的柔度越大，所以增敏机构的放大倍数相应增加，这也符合第二章中所推导的公式。对于铰链半径 r ，参数化分析从 0.4mm 开始，步长 0.1mm ，至 3mm ，从图 4.5(b)中可以看到，随着 r 的增大，因其导致柔性铰链柔度增大，故

增敏倍数也因此增大。

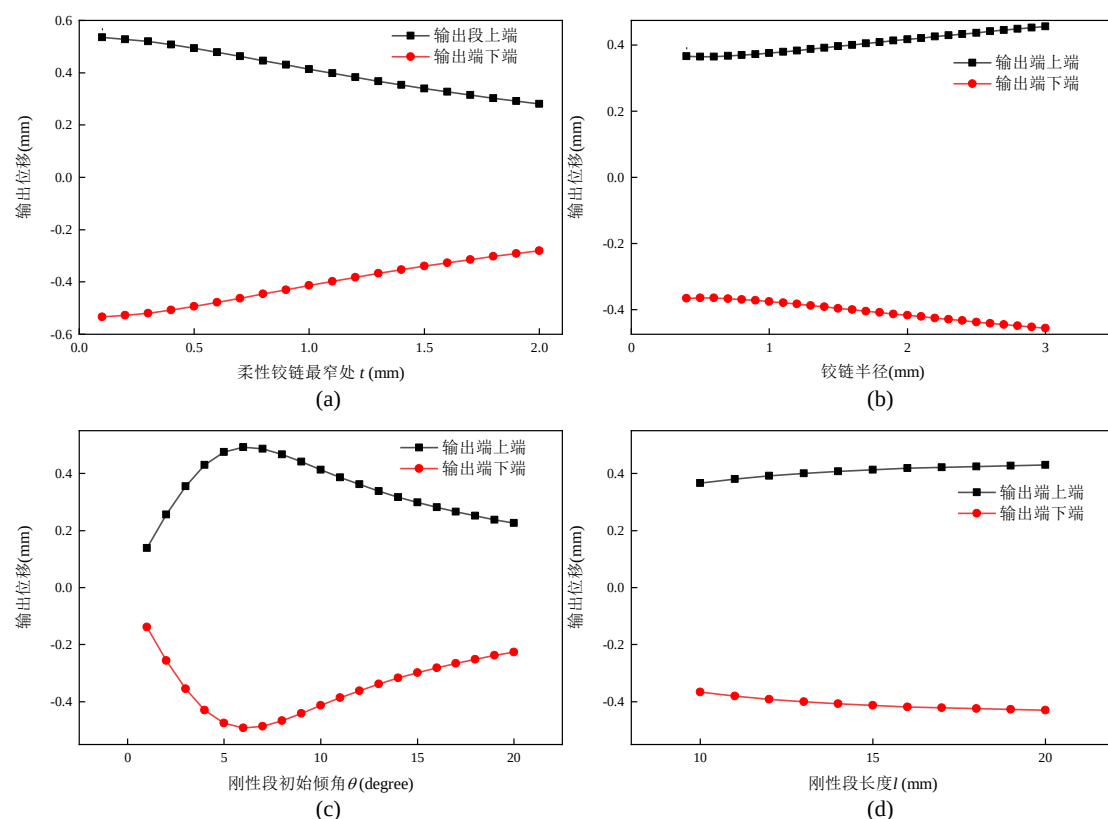


图 4.5 输出位移与(a)柔性铰链最窄处、(b)铰链半径、(c)刚性段初始倾角及(d)刚性段长度的关系

对于刚性段初始倾角，参数化分析从 1° 开始，步长 1° ，至 20° 结束。从图 4.5(c)中可以看出，在 $0\sim 6^\circ$ 范围内，随着 θ 逐渐增大，增敏倍数也随之逐渐增大，而在 $7\sim 20^\circ$ 范围内，随着 θ 逐渐增大，增敏倍数逐渐减小。如果为了取得更大的放大比，应该要控制 θ 在曲线顶点附近范围。对于刚性段长度，参数化分析从 10mm 开始，步长 1mm，至 20mm 结束。从图 4.5(d)中可以看出，随着 l 的增大，输出位移随之增大，但是变化较为平缓。

根据上述变单一参数分析结果可以看出：刚性段初始倾角 θ 对增敏倍数影响最大，刚性段长度 l 对增敏倍数的影响最小。同时考虑到改变增敏机构整体尺寸大小会影响到传感器的应用范围。因此，在优化确定最终的增敏机构尺寸时，需同时保证增敏机构长度方向尺寸变化较小。

在 COMSOL 中可以通过添加优化模块中的参数估计，根据目标放大比来逆向建模确定增敏机构关键参数。首先手动绘制增敏倍数为 3.0 的输入输出曲线作为实验数据导入参数估计模块；添加铰链最窄处 t 、铰链半径 r 、刚性段初始倾角 θ 三个目标参数。并添加一个增敏机构总长度参数用于控制增敏机构总体尺寸，设置总体尺寸下界 38mm，上界 42mm。设置采用 COBYLA 求解器，对目

标函数和约束变量进行抽样，构建和控制移动置信区间内目标的线性近似；求解器优化容差 0.01，模型最大计算次数为 1000。通过参数估计求解可以得到最终的增敏机构重要参数：

表 4.3 通过 COMSOL 优化得到的增敏机构关键尺寸

$l(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$w(\text{mm})$	$\theta(\text{degree})$
12	1	1	20	3

优化确定的增敏机构的输入输出曲线如图 4.6：

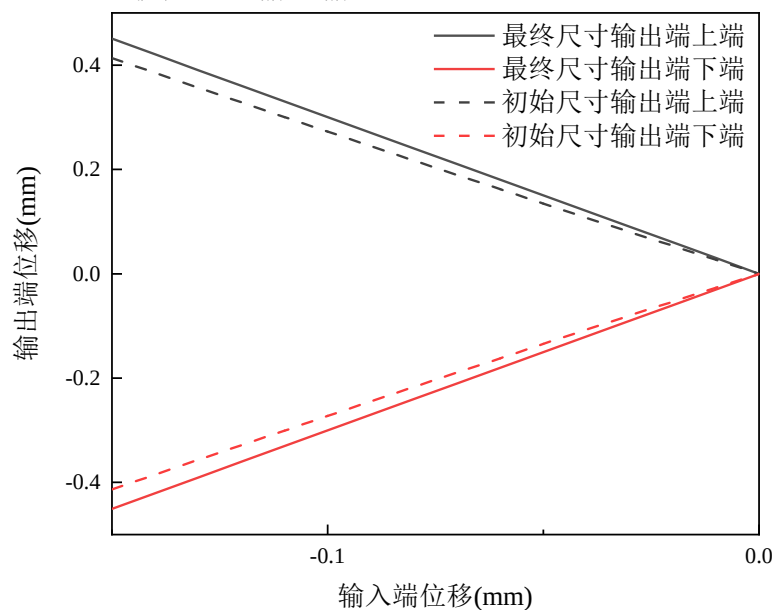


图 4.6 确定最终参数的增敏机构输入输出曲线

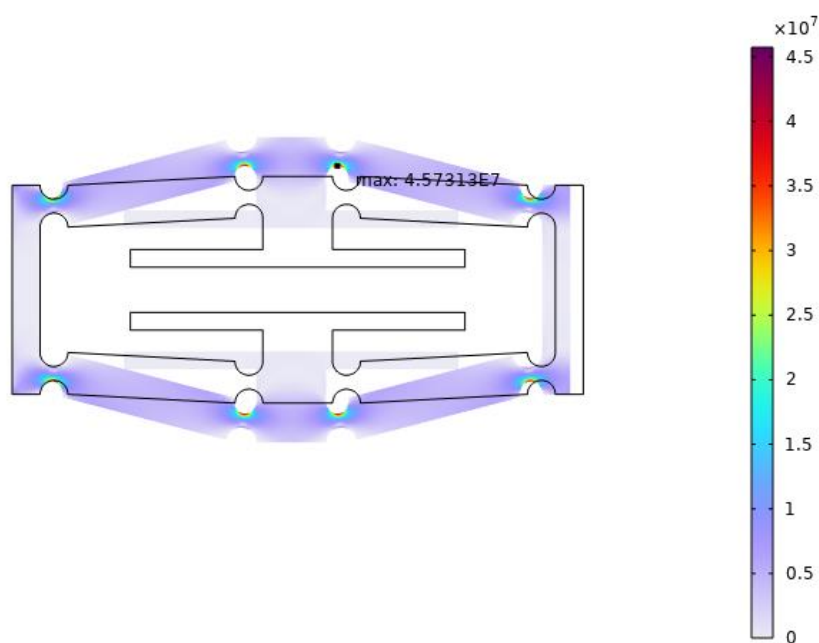


图 4.7 增敏机构冯-米塞斯应力云图（单位：Pa）

图 4.6 中的斜率为 3.00，代表当输入端位移为 -0.15mm （负号代表增敏机构输入端受到压缩）时，增敏机构将输入位移放大 3.00 倍，优化后的增敏机构增敏倍数为 3.00，符合设计预期。

在放大比达到要求的同时，还需要检查增敏机构的柔性铰链是否发生塑性变形，即按照塑性材料屈服判定指标——冯·米塞斯应力判断柔性铰链是否发生屈服。优化后的增敏机构在输入位移 0.15mm 时的应力云图如图 4.7 所示。此时增敏机构最大应力发生在柔性铰链处，最大应力为 45.7Mpa ，未超过高性能树脂材料屈服应力 46Mpa ，表明增敏机构在智能骨料工作范围内未发生屈服，能够正常工作。后续设计皆采用优化后的设计。

4.3 封装外壳模型协调变形影响因素探究

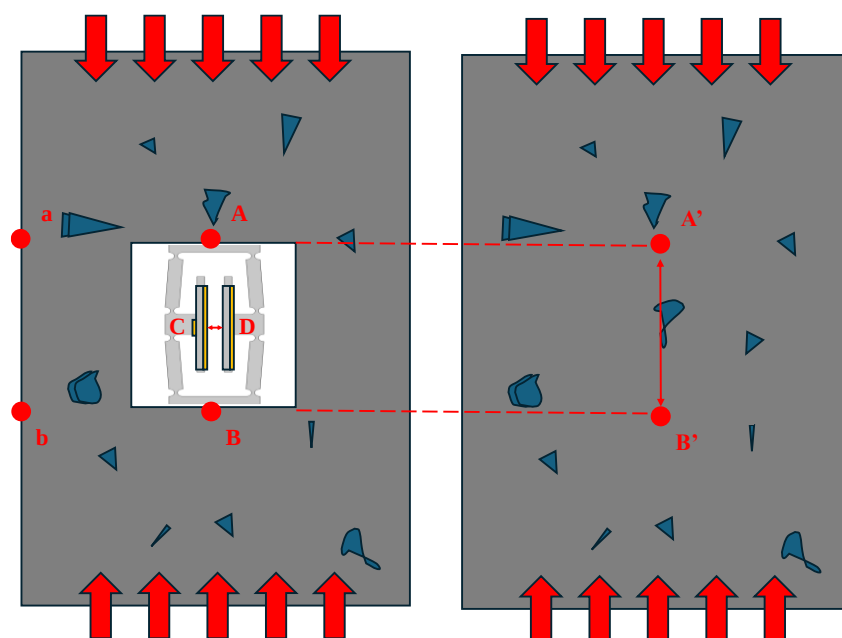


图 4.8 测量位移、真实位移与增敏机构输出端位移

智能骨料传感机制如图 4.8 所示。当混凝土轴向受力时，骨料外壳的 A、B 两点发生相对位移，增敏机构将此相对位移放大、传递至天线传感器的空气间隙，从而导致天线谐振频率的变化。故智能骨料所测得的应变实际为 A、B 两点之间的平均应变，即智能骨料标距范围的混凝土应变（后续简称测量应变，对应图 4.8 中 AB 两点之间的平均应变）。对智能骨料的要求是期望既能够反映出测量应变，又能够反映出无智能骨料时对应位置的真实应变（后续简称真实应变，对应图 4.8 中 A'B'两点之间的平均应变）。然而测量应变和真实应变应变存在一定差距，这一方面是由于智能骨料在混凝土内形成空腔，导致外壳变形

不均匀；另一方面是由于骨料外壳弹性模量与混凝土不一致，导致智能骨料附近的混凝土的应变场发生了变化。可以将这两方面共同导致的测量应变与真实应变的差异称为协调变形差异。因此，在建立智能骨料封装外壳的同时需要探究合适的封装外壳设计以尽可能降低协调变形差异，以尽可能反映无智能骨料时的真实应变。

首先探究外壳形状对协调变形差异的影响。常见埋置式传感器通常为圆柱体，故本节将除了对棱柱体外壳进行仿真以外，还会利用棱柱体及胶囊体两种外壳形状进行对比探究。

在 COMSOL 中建立 $150 \times 150 \times 300\text{mm}$ 的混凝土试块，材料按照 C30 混凝土设置，弹性模量为 30Gpa，泊松比为 0.2。分别在混凝土试块中心位置建棱柱体、圆柱体、胶囊体形状的智能骨料封装外壳，三者材料皆设置为 4.2 节中的高性能树脂，弹性模量为 2.2Gpa，泊松比为 0.41，初始屈服应力 46Mpa。三种外壳厚度相同，高宽比相同，高度（智能骨料标距）相同其中胶囊体是通过三点确定具体三次插值曲线，绘制平面轮廓后绕中轴回转建立的。表 4.3 为三种形状外壳的尺寸参数。考虑到混凝土试块和骨料外壳均为中心对称，可将模型简化为 1/4 模型以节省算例、减少求解所需时间，图 4.9 为三者在混凝土试样中的 1/4 模型。将混凝土试块底端平面设置为辊支承，限制了混凝土底端在轴向的位移，仅存在切向位移。封装外壳部分的网格设置为极细化的自由四面体网格，最大单元大小为 10.5mm，最小单元大小 0.45mm；剩余部分采用细化的自由四面体网格，最大单元大小 24mm，最小单元大小 3mm。在试块顶端设置边界荷载，边界荷载从 0 逐级增加到 350kN，以模拟试验中逐级增加的荷载。同时建立无智能骨料的混凝土试块模型，尺寸及加载条件等皆相同，此模型较为简单，故此处不展示模型示意图。

表 4.4 三种外壳关键尺寸参数（单位：mm）

棱柱体			圆柱体			胶囊体			
h	a	t	h	r	t	h	r	h_r	t
50	25	5	50	25	5	50	25	20	5

图 4.10~4.11 为三种混凝土试块在荷载 200kN 时的应力应变云图及变形示意图。从应力应变云图中可以看出，添加了智能骨料的混凝土应变场发生了明显的应变重分布。混凝土试块应力主要集中在智能骨料端面和侧面的转角处；紧邻智能骨料端面中心部分的混凝土应变相对无智能骨料混凝土明显增大。观察智能骨料的变形可以发现，智能骨料外壳上端发生了较为明显的挠曲现象，这主要是由于外壳材料弹性模量小于混凝土，且骨料外壳端面边缘刚度大，中点部分范围内刚度小，使得智能骨料外壳变形主要发生在端面中部。若智能骨料外壳弹性模量远大于混凝土，则可将智能骨料视为刚体，端面中部的挠曲相对

较小，近似于端面各点在荷载作用下的位移相同。

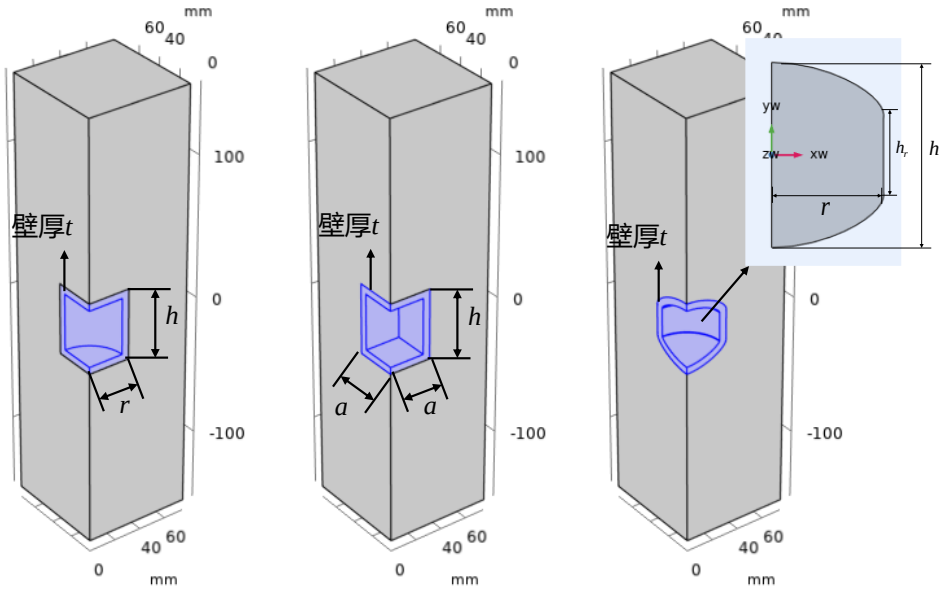


图 4.9 埋入不同形状智能骨料的混凝土试件 COMSOL 模型示意图

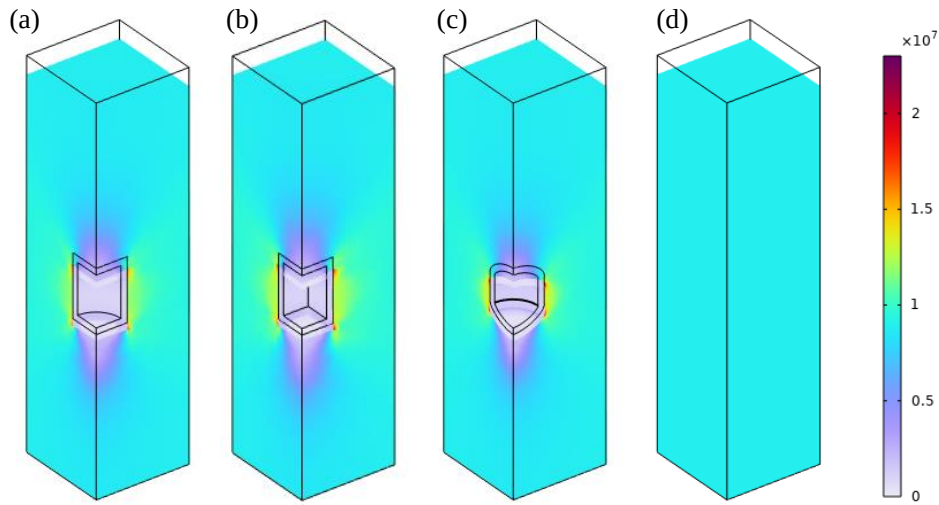


图 4.10 应力云图(a)圆柱体外壳(b)棱柱体(c)胶囊体(d)纯混凝土（单位：Pa）

为了能够量化协调变形差异的大小，需要比较有无智能骨料的混凝土试件的仿真结果。在 COMSOL 中输出外壳上下端面中心点的竖向位移，进而求出智能骨料两点之间的相对位移 Δ_1 ；并输出不含智能骨料的混凝土试块相同位置两点之间的相对位移 Δ_2 。定义协调变形差异系数来评价协调变形程度，反应智能骨料测得应变与无智能骨料混凝土试件真实应变之间的差距：

$$v = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\Delta_1 / h}{\Delta_2 / h} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (4.4)$$

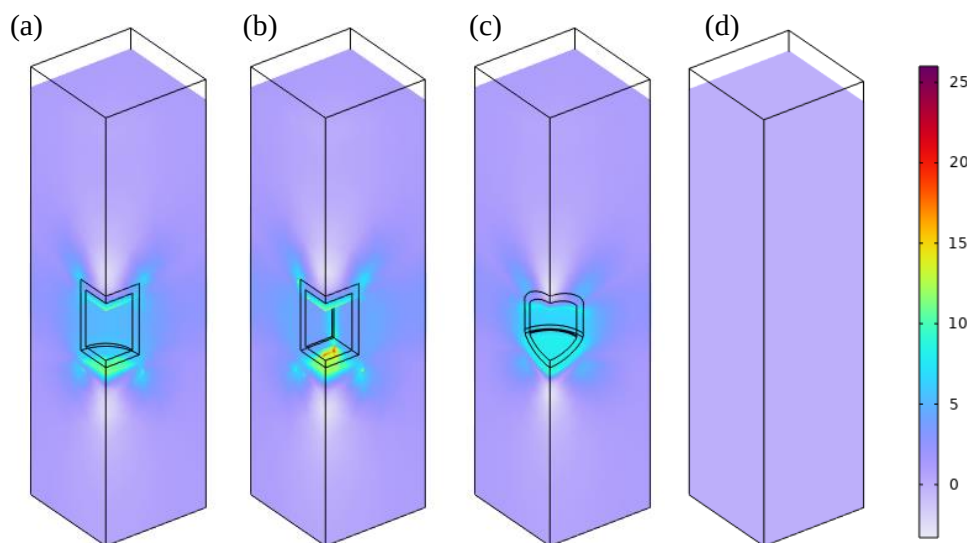


图 4.11 应变云图(a)圆柱体外壳(b)棱柱体(c)胶囊体(d)纯混凝土

其中, ε_1 为智能骨料埋入试块后上下端面中点之间的应变均值, 即测量应变; ε_2 为无智能骨料时试块对应位置的应变均值, 即真实应变, h 为智能骨料敏感轴方向尺寸, 即标距。从式 4.4 可以看出, 当协调变形差异系数越接近于 1, 智能骨料埋入前后的混凝土应变差异越小。

图 4.12 为三组试件智能骨料上下端中点之间平均位移及协调变形差异系数随荷载的变化曲线。从图 4.12 中可以看出, 三组试件的协调变形差异系数均随荷载发生变化, 荷载越大, 协调变形差异系数越大。在荷载作用下, 协调变形差异会被放大。这表明协调变形差异系数不止与智能骨料外壳材料特性及外形尺寸有关。除此之外, 图 4.12 可以看出, 三种形状的智能骨料协调变形差异系数均大于 1, 表明相对于无智能骨料扰动的混凝土, 智能骨料实际感知到的应变要更大。其中, 胶囊体外壳的协调变形差异系数最小, 棱柱体外壳协调变形差异系数最大, 这表明三者中胶囊体形状最适合作为骨料外壳应用。同时, 可以发现长方体外壳的协调变形差异系数对荷载相对更加敏感, 圆柱体次之, 胶囊体最不敏感; 当荷载从 50kN 增长到 350kN 时, 三者的协调变形差异系数分别增长了 4.89%、4.27%、1.63%。由于希望智能骨料可以运用在各种荷载情况下, 所以胶囊体外壳对荷载不敏感是更优的。分析原因, 这主要是由于棱柱体较为“突出”的边缘更加容易形成应力应变的集中, 不利于外壳均匀变形, 使得端面中点的挠曲更大, 而胶囊体更多的弧面减少了应力应变的集中。进而可以推知, 在外壳弹性模量小于混凝土时, 更少“棱角”的外壳将会拥有更接近 1 的协调变形差异系数并且其对荷载变化更不敏感。

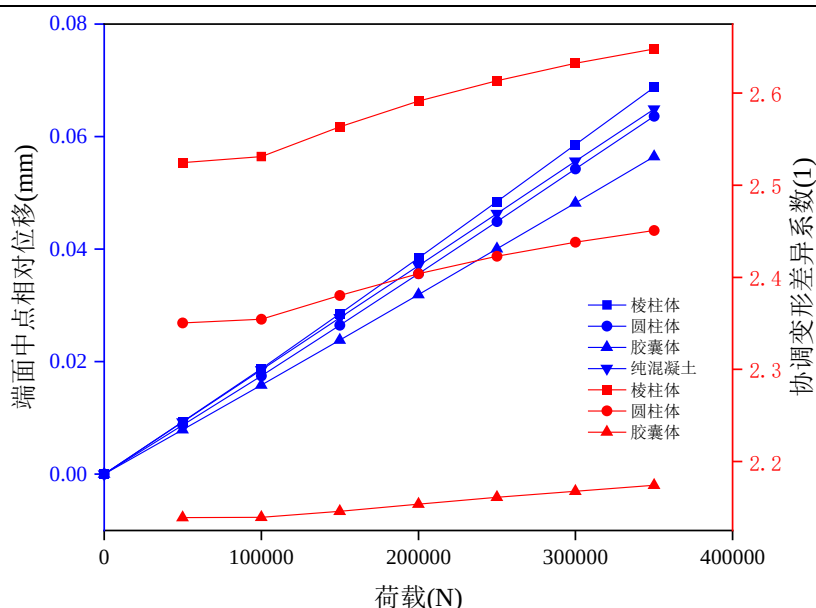


图 4.12 端面中点位移、协调变形差异系数与荷载的曲线

下面继续探究高宽比、壁厚、外壳-混凝土模量比对协调变形差异系数的影响。在改变外壳高宽比与壁厚时，考虑到期望尽可能不改变标距，使得传感器适用范围发生变化，故将在参数化分析时始终保持智能骨料外壳高度不变。壁厚从 2mm 变化至 8mm，步长 1mm；高宽比从 0.5 变化至 1.5，步长 0.1；模量比从 0.1 变化至 3。图 4.13~4.15 分别为协调变形差异系数随厚度、高宽比、模量比变化的曲线。

图 4.13 表明，相同荷载情况下，外壳壁厚越厚，端面中点相对位移越大，协调变形差异系数越大，与真实混凝土应变的差距越大，两者几乎呈线性关系。这主要是由于厚度越大，相当于引入了更多弹性模量小于混凝土的区域，进一步加强了应力应变集中的现象。

图 4.14 表明，相同荷载情况下，外壳高宽比越大，端面中点相对位移越小，协调变形差异系数越小，与真实混凝土应变的差距越小。这主要是由于高宽比越大，端面中点离端面与侧面交界处的“约束”更近，端面刚度相对加强，端面中点处的挠曲就会相对减小，削弱了协调变形差异。

图 4.15 表明，相同荷载情况下，外壳-混凝土模量比越大，端面中点相对位移越小，协调变形差异系数越小，与真实混凝土应变的差距越小。这主要是由于模量比大时，可以将智能骨料外壳视为刚体，端面中点处的挠曲就会相对减小，智能骨料端面各点位移相同，协调变形差异减小。同时，外壳形状依然是影响协调变形差异系数的主要因素。

通过上述分析可以知道，如果期望智能骨料的协调变形差异尽可能小，可以通过：选择更接近球体的外壳形状、设置更小的壁厚和更大的高宽比及选择

弹性模量更大的外壳材料等措施来实现。

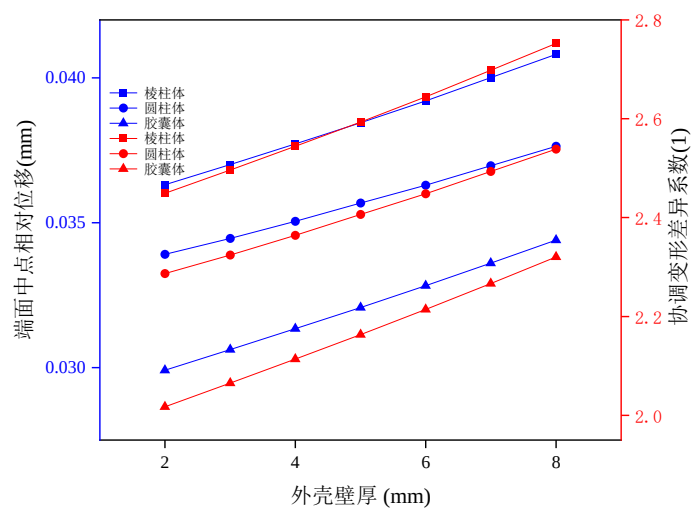


图 4.13 端面中点位移、协调变形差异系数与外壳壁厚的曲线

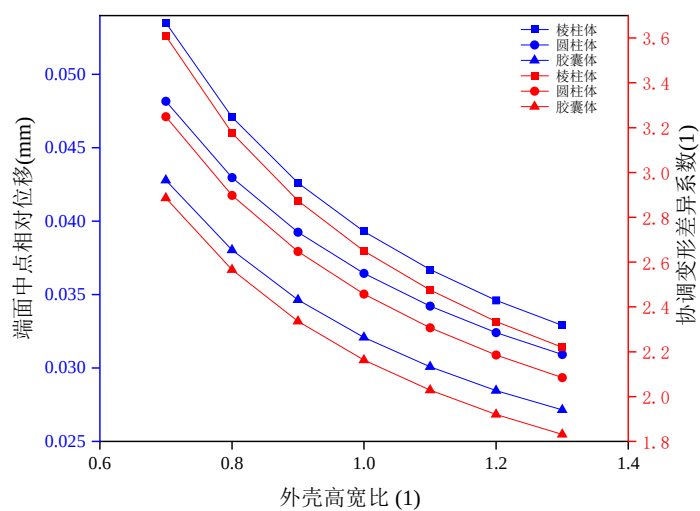


图 4.14 端面中点位移、协调变形差异系数与外壳高宽比的曲线

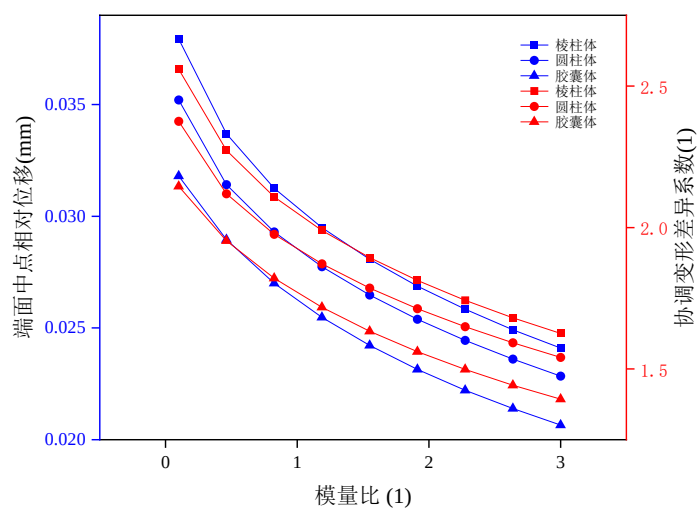


图 4.15 端面中点位移、协调变形差异系数与模量比的曲线

4.4 考虑外壳协调变形的增敏机构模型

后续形成智能骨料成品时，增敏机构是与封装外壳一体加工的，以减少装配误差。此时，两者之间又会产生相互作用，这主要是由于增敏机构本身沿输入方向存在刚度，增敏机构的结合使得智能骨料敏感轴方向的刚度相对增加。后续智能骨料工作中，期望天线谐振频率能够表征测量应变和真实应变。显然，天线谐振频率能够正确反应出测量应变和真实应变的前提条件是：混凝土真实应变、测量应变与天线空气间隙之间存在线性关系。即真实应变对应的相对位移（A'B'）、测量应变对应的相对位移（AB）与增敏机构输出端位移（CD）存在线性关系。本节中以4.3节中棱柱体外壳为例，探究三者之间的关系。

增敏机构尺寸采用4.2节中优化后的尺寸，厚度20mm；外壳采用4.3节中的棱柱体外壳形状及尺寸。图4.16为智能骨料外壳及增敏机构1/4模型。试块顶端仍设置边界荷载，边界荷载从0逐级增加到350kN。

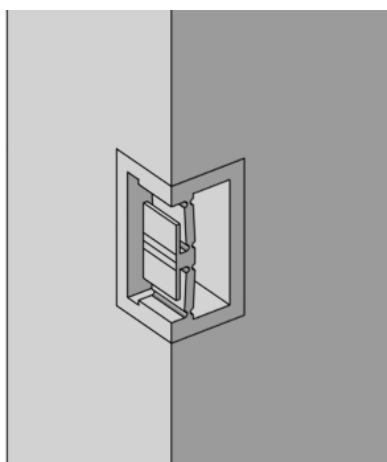


图 4.16 带有增敏机构的骨料外壳模型

表 4.5 测量位移、输出端位移、真实位移比较

	测量位移 Δ_1 $\times 10^{-2} / (\text{mm})$	输出端位移 Δ_{output} $\times 10^{-2} / (\text{mm})$	真实位移 Δ_2 $\times 10^{-2} / (\text{mm})$
50kN	0.93	2.15	0.37
100kN	1.85	4.30	0.74
150kN	2.81	6.48	1.11
200kN	3.79	8.69	1.48
250kN	4.78	10.92	1.85
300kN	5.77	13.17	2.22
350kN	6.77	15.44	2.60

采用物理探针去探测不同荷载作用下增敏机构输出端、封装外壳上下端面中点相对位移作为测量位移，将其4.3节中与无智能骨料扰动的混凝土真实位移比较，三者数值列于表4.5。图4.17绘制了外壳与增敏机构共同作用情况下的测量位移与输出端位移、输出端位移与真实位移、测试位移与输出端位移的拟合

曲线。

根据拟合关系可以得到：

$$\Delta_{\text{output}} = R_a' \cdot \Delta_1 = 2.29 \cdot \Delta_1 \quad (4.5)$$

$$\Delta_1 = v' \cdot \Delta_2 = 2.59 \cdot \Delta_2 \quad (4.6)$$

$$\Delta_{\text{output}} = R_{\text{real}} \cdot \Delta_1 = 5.91 \cdot \Delta_1 \quad (4.7)$$

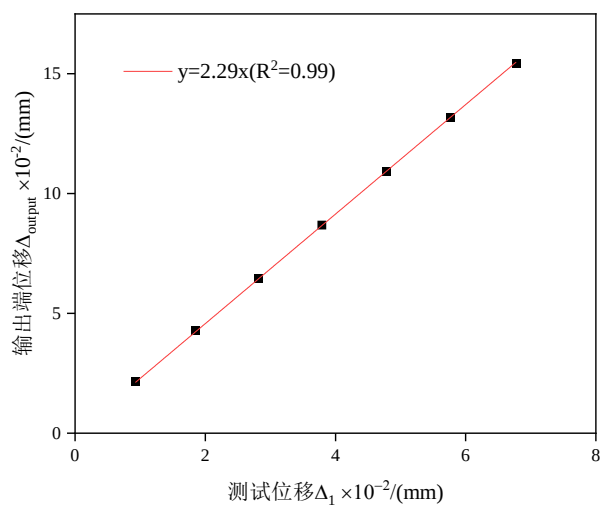
其中， R_a' 为考虑外壳-增敏机构相互作用下的增敏机构增敏倍数； v' 为考虑外壳-增敏机构相互作用下的协调变形系数； R_{real} 为考虑外壳-增敏机构相互作用下的真实放大倍数。 R_a' 相对 R_a 有所减小，这主要是由于封装外壳存在厚度，外壳内外存在位移差； v' 相对 v 减小，主要是由于增敏机构的存在增大了外壳的刚度所致。从式4.5~4.7中可以得到：

$$R_{\text{real}} = R_a' \cdot v' \quad (4.8)$$

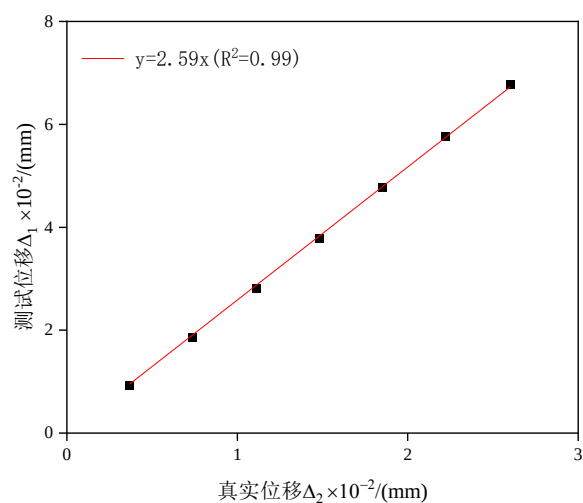
式4.8表示，真实放大倍数为增敏机构增敏倍数与协调变形差异系数的乘积，当协调变形系数为1时，真实放大系数就等于增敏机构增敏倍数。同时可以从式4.5~4.7中看出，混凝土真实应变、测量应变与天线空气间隙之间存在线性关系，并且其斜率（真实放大倍数）可以通过传感器标定获得，故可以利用天线谐振频率表征混凝土真实应变。

需要注意的是，对于不同的埋置混凝土环境，其协调变形差异系数也有所不同。若将同样的智能骨料运用在不同的混凝土环境，每次都需要单独进行标定以确定智能骨料的协调变形差异系数。故虽然可通过标定确定智能骨料的协调变形差异系数，然而为了实际使用方便，应通过外壳设计使协调变形差异系数在不同混凝土环境中都恒为1，例如可以通过增大外壳弹性模量，使其远大于各种混凝土弹性模量，此时外壳在各种混凝土环境中的协调变形系数都接近于1。

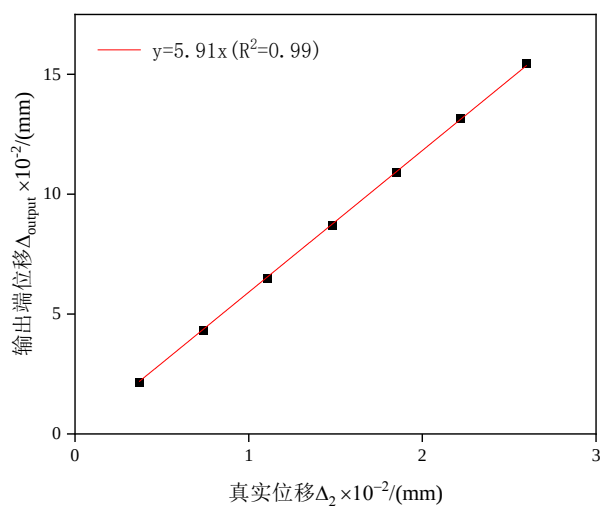
在确定真实应变、测量应变与天线空气间隙之间存在线性关系后，需要考虑未来实物测试中如何获取真实应变与测量应变以进行智能骨料标定。纯混凝土的真实应变可以通过胡克定律理论计算和在试件两侧黏贴应变片或引伸计得到，而添加了智能骨料的混凝土的测量应变显然很难通过理论计算得到，并且试件两侧应变片或引伸计的结果也无法直接反映测量应变。需要探究应变片或引伸计得到的应变与智能骨料测量应变之间的关系。



(a)



(b)



(c)

图 4.17 (a)输出位移与测量位移关系曲线；(b)测量位移与真实位移关系曲线；(c)输出端位移与真实位移关系曲线

在本节所建立的 COMSOL 模型中的混凝土试件侧壁设置两个 Z 轴方向相距 50mm 的位移探针点以模拟应变片得到的应变所对应的位移（图 4.15 中 ab），将其与仿真模型得到测量位移（图 4.15 中 AB）比较。图 4.18 绘制了不同荷载作用下两者之间的拟合关系。

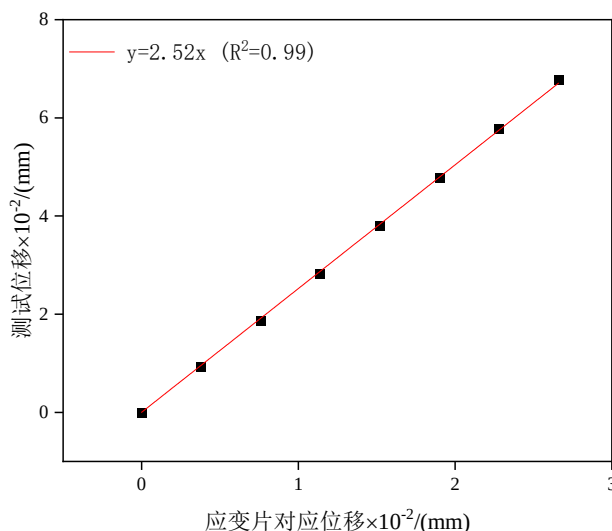


图 4.18 应变片对应位移与测量位移的拟合关系

从图 4.18 中可知应变片对应位移与测量位移之间存在线性关系，根据线性拟合公式，线性拟合一次项系数为 2.52，即当应变片对应的位移或应变变化单位 1 时，测量位移或应变变化为 2.52，说明由于智能骨料的存在，致使应变片得到的应变相对于智能骨料两端的测量应变偏小； R^2 为 0.99 说明两者具有较高的线性相关性，因此可以利用线性拟合公式将应变片得到的应变转换为测量位应变，此时可将线性拟合一次项系数定义为转化系数 t ，本模型中 $t = 2.52$ 。

4.5 本章小结

本章主要对于智能骨料外壳及增敏机构的材料选择、尺寸设计、模拟仿真，总结如下：

（1）为了避免外壳电磁屏蔽效应对内部的天线传感器工作的影响，首先确定外壳材质为非屏蔽材料，并通过 HFSS 仿真验证了采用非屏蔽材料的可行性。随后，根据材料静态应变值确定了增敏机构的外壳材料。确定了两者的材料将采用树脂材料 3D 打印一体化制作。

（2）确定了智能骨料的性能目标，明确了增敏机构放大比，据此确定了增敏机构的关键参数。并通过 COMSOL 优化了参数。

（3）针对有无智能骨料扰动的混凝土试块应力应变不同的协调变形差异现

象进行了仿真探究。仿真结果表明,采用树脂材料情况下,骨料外壳形状对协调变形差异影响最为显著,三种外壳中,棱柱体外壳的协调变形差异最大,胶囊体最小;外壳厚度越大、高宽比越小、弹性模量越小,协调变形差异越大。

(4) 探究了外壳-增敏机构一体加工埋入混凝土后两者相互作用下的协调变形差异现象,提出了测量应变与真实应变的概念,验证了无智能骨料扰动的混凝土真实应变与天线空气间隙之间存在线性关系。并通过仿真探究了测量应变与应变片结果的关系。

第5章 无源无线高灵敏度智能骨料实验

本章针对添加增敏机构的天线传感器技术路线，设计了实际运用与埋置混凝土环境的无源无线智能骨料。此前已研究带空气间隙的馈电耦合贴片天线的高灵敏度传感机理，并设计了3D打印一体化封装外壳和增敏机构，但混凝土内部监测可行性及使用效果仍需通过实验验证。本章从贴片天线在混凝土内监测的应用入手，研究了贴片天线用于混凝土内监测的问题及解决方法，并设计了一种基于天线传感单元的智能骨料。该智能骨料作为无源无线传感器，能够进行混凝土内部信息感知，将其埋置与混凝土中后对其进行实验测试以及性能分析讨论。

在5.1节中，介绍了智能骨料的实物设计及实验前的智能骨料制作方案，将天线传感器与3D打印增敏机构及外壳装配在一起，并介绍了实验方案及实验所使用的设备。

在5.2节中，将所设计的带有空气间隙的孔径耦合馈电贴片和增敏机构的智能骨料与混凝土浇筑在一起制作了混凝土试件。进行了混凝土轴向压缩试验，以测试埋置于混凝土内部的智能骨料传感性能，即测试谐振频率与真实应变之间的关系，并对试验结果进行了分析与讨论。

5.1 智能骨料及实验装置

5.1.1 智能骨料实物制作

本章将制作所提出的智能骨料的实物原型，并埋入至混凝土中，对混凝土进行压缩试验的同时测试智能骨料谐振频率参数。故主要验证高灵敏度应变智能骨料的可行性及效果，考虑到测试的准确性及便利性，本章中暂先采用有线直连矢量分析仪的测试方案，并根据有线测试方案确定智能骨料实物原型具体参数。后续可通过外接宽带天线以接受问询信号实现无源无线。

本章中的智能骨料实物采用了第三章中的带空气间隙的孔径耦合馈电贴片天线作为智能骨料的传感单元，以实现混凝土内部应变的感知；传感单元的具体尺寸设计采用第三章中表3.2优化后的天线传感器尺寸。

智能骨料的封装外壳及增敏机构采用3D打印特种树脂材料——VERO高韧树脂，弹性模量约为2.5Gpa，屈服强度为55Mpa，后者为46Mpa。该树脂强度

相对较高，且具有耐高温耐腐蚀的优点，以保护传感单元免受混凝土内部侵蚀、潮湿环境的影响。树脂材料作为一种非屏蔽材料，外壳外部的环境介电常数与外壳内部介电常数不同，将会一定程度影响天线工作性能。但是在第四章中已经通过 HFSS 仿真验证混凝土环境对天线谐振频率偏移的影响有限。

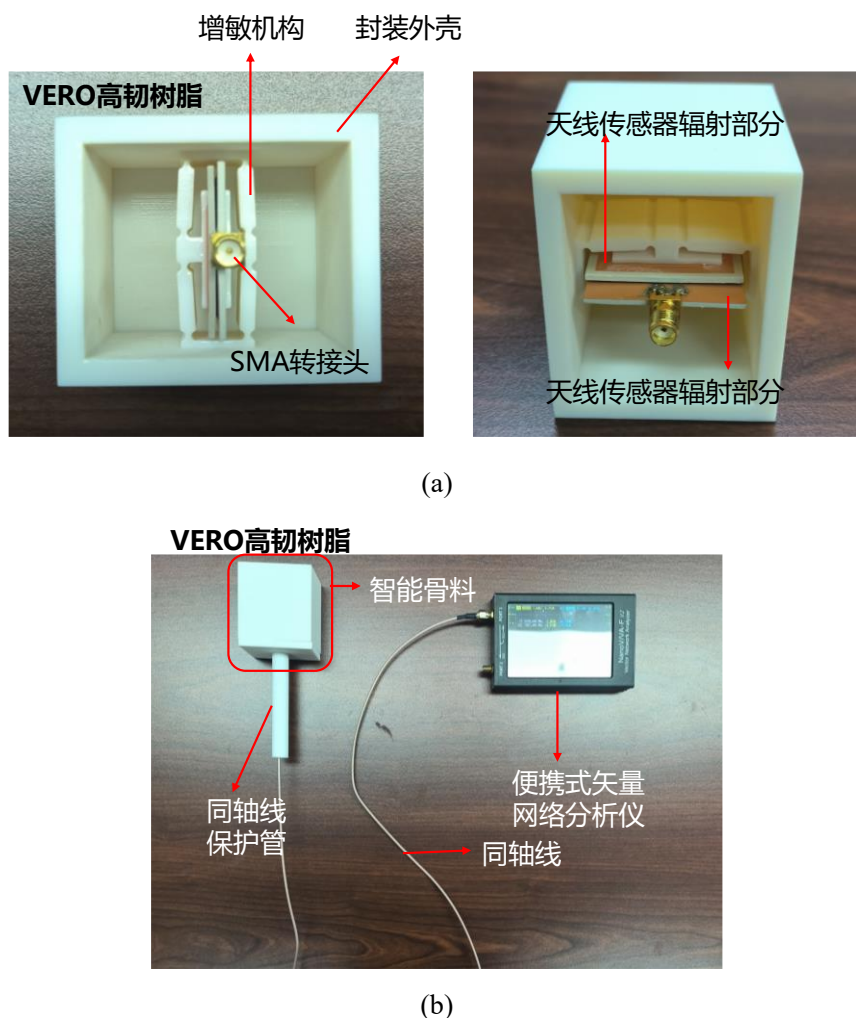


图 5.1 VERO 高韧树脂(a)内部构造与(b)测试方法示意图

将先采用考虑到智能骨料内部传感器装配、安装转接口等的实用需求，采用棱柱体形状外壳，未来工作将会进一步采用协调变形差异更小的封装外壳。棱柱体外壳与增敏机构具体尺寸列于表 5.1。采用光敏固化 3D 打印机一体打印封装外壳和增敏机构。打印出的带有增敏机构的外壳留有一面开口用于天线传感器的装配，带空气间隙的耦合馈电贴片天线的馈电部分和辐射部分分别正对粘接在增敏机构两个输出端，由此，增敏机构受到输入位移的作用时输出端带动馈电部分和辐射部分发生相对位移，并且保持两者正对。智能骨料未受力时，天线传感器的空气间隙厚度为 0.2mm。带天线传感器焊接 SMA 转接头，与同轴线相连，同轴线另一端为便携式矢量分析仪。将传感器单元和带有增敏机构的

外壳装配完成后，对智能骨料进行封闭，加装同轴线保护管，并通过环氧树脂防水胶对封闭接口处进行防水处理，防止浇筑过程中混凝土流入智能骨料内部影响传感器工。智能骨料实物如图 5.1 所示。

表 5.1 带增敏机构的封装外壳尺寸参数（单位：mm）

外壳尺寸				增敏机构尺寸			
h	a	t	l	t	r	w	θ
50	30	5	12	1	1	20	3

5.1.2 混凝土试件浇筑

天线传感器的封装设计完成后制成了智能骨料实物原型，为了验证其实际性能及其在混凝土中的应用，需要将其浇筑于混凝土中进行实验测试。因此，本节针对天线传感器的封装形成的智能骨料进行了混凝土浇筑实验。通过这一实验，可以更加深入地了解智能骨料在混凝土中的表现及其对于混凝土性能的影响，为进一步优化智能骨料的设计提供科学数据支持。

在后续实验中将采用 $150 \times 150 \times 300$ 的混凝土棱柱体试件进行轴向压缩试件，故采用同尺寸混凝土模具进行试件制备。共制备了四个混凝土试件，其中两个内部埋置 3D 打印材料为 VERO 高韧树脂的智能骨料，两个纯混凝土试件。

针对混凝土试件的浇筑工作，首先需要优选合适的配合比。在综合考量多方面因素后，确定水泥为 P.O42.5 型号的普通硅酸盐水泥，砂子选用最大粒径为 2mm 的普通硅砂，石子选用最大粒径为 10mm 的普通石子。配合比选用为水：水泥：砂子：石子=0.45：1：1.11：2.72，这样配比下所制得的混凝土试件才能够满足所需的强度、均匀性等指标要求。此外，为了确保混凝土试件具有更好的韧性和抗裂性能，一种名为聚乙烯醇（PVA）纤维的添加剂被引入到混凝土的搅拌过程中。这种添加剂已被研究证实具有卓越的抗拉强度和分子粘合强度。通过在混凝土中掺入适量的聚乙烯醇纤维，可以有效地提升混凝土试件的抗拉强度和抗裂性能，从而增强其在实际应用中的耐久性和稳定性。并且有研究显示，长度越短的聚乙烯醇纤维对提高抗裂性能的效果越好。本试验中混凝土搅拌时添加的聚乙烯醇纤维直径约为 $12\mu\text{m}$ ，长度为 6mm，添加量为浇筑混凝土体积的 0.3%。此外，还在混凝土中添加了 1% 的氯盐类早强剂，使混凝土在 7 天时拥有 80~90% 的强度。

完成浇筑后，待混凝土初凝结束后，对混凝土进行养护。在混凝土养护的七天内，每天对混凝土表面进行两次浇水，并通过在混凝土表面覆盖一层塑料膜防止混凝土水分流失过快，导致混凝土开裂。七天后采用混凝土专用脱模枪使混凝土试块与模具分离，准备进行混凝土轴向压缩试验。

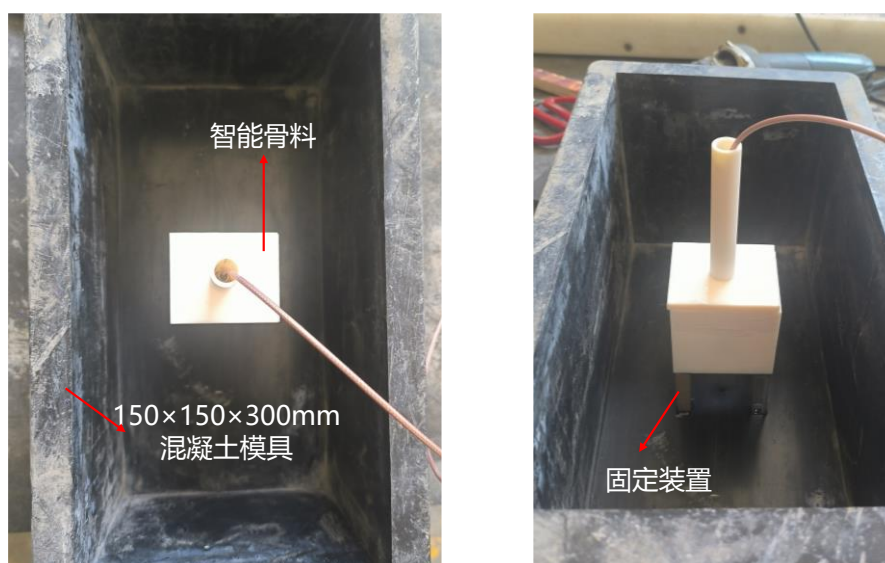


图 5.2 智能骨料在混凝土模具中的固定

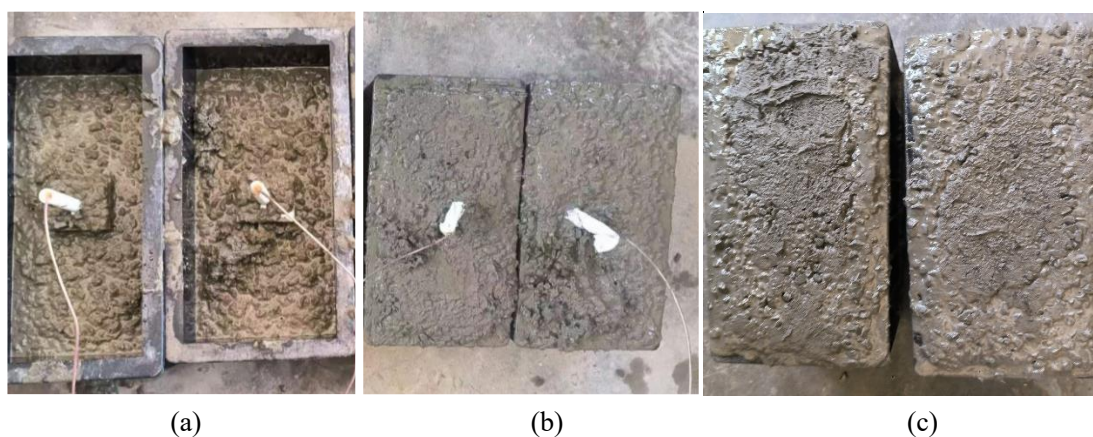


图 5.3 (a)含有智能骨料的混凝土试件第一次浇筑与(b)第二次浇筑；(c)纯混凝土浇筑

5.2 带有智能骨料的混凝土试件压缩试验

5.2.1 实验装置及过程

为了验证智能骨料的可行性，在将其与混凝土一起浇筑成型后，对试块进行压缩试验。实验开始前在每块含有智能骨料的混凝土的相对面黏贴两片长度为5cm的电阻式应变片，以得到应变片应变，后续可以通过4.4节中的方法利用转换系数得到智能骨料测量应变。纯混凝土试块表面也黏贴同样的电阻式应变片，对于纯混凝土，电阻应变片的应变结果可以认为是混凝土的真实应变。黏贴了电阻应变片的试块如图5.4所示。

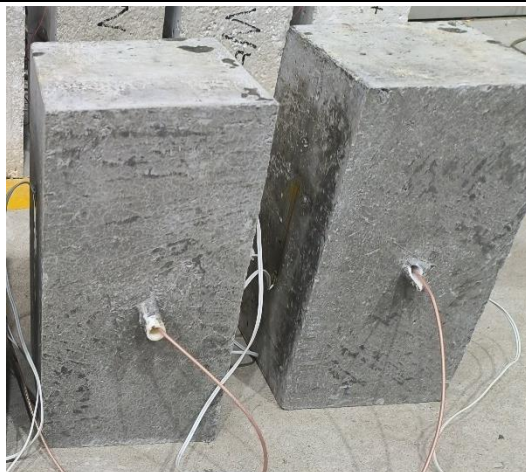


图 5.4 黏贴了应变片的含有智能骨料的混凝土

图 5.5 为混凝土压缩试验现场图。该实验中，选取了邦威仪器公司生产的最大加载能力为 3000kN 的混凝土压力试验机，作为对混凝土试件进行压缩实验的仪器设备。该试验机具备载荷控制和位移控制两种模式，其控制精度在所设定值的 $\pm 1\%$ 范围内。连接线从保护管中引出连接至便携式矢量网络分析仪，矢量网络分析仪通过数据线连接至电脑，通过信号采集软件记录天线回波信号。为确保人员的安全，在试验过程中采用了远程控制的方式对信号采集软件进行控制，进而实现了对混凝土内信号的询问和分析，同时控制着矢量网络分析仪。

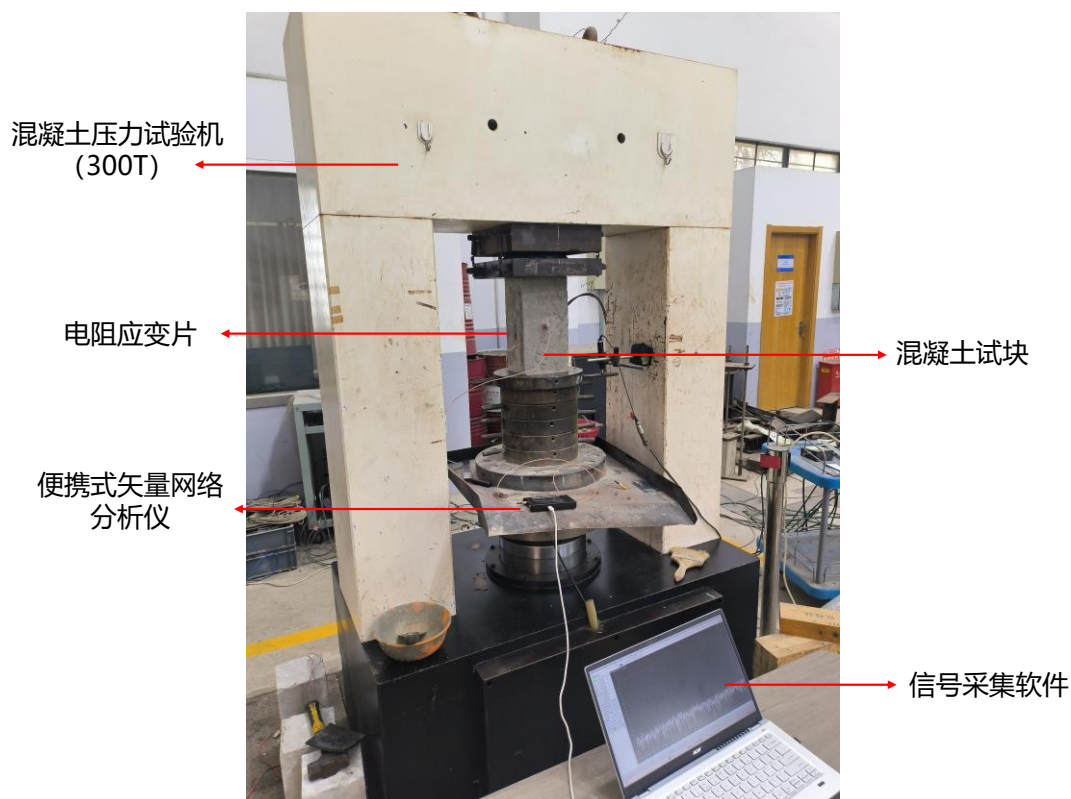


图 5.5 混凝土压缩试验现场设置

混凝土试件尺寸为 $150 \times 150 \times 300 \text{mm}$ ，考虑所设计配合比的混凝土试件弹性模量为 $3 \times 10^4 \text{kN/mm}^2$ ，故可计算得到混凝土上表面每增加 33.5kN 时，混凝土应变增加 $50 \mu\epsilon$ 。按照第四章讨论的结果，由于协调变形差异，添加了智能骨料的混凝土试件在相同荷载下将会有更大的变形。

实验开始时，混凝土试件被放置于试验机上，采用位移控制方法，使试件与加载平台紧密贴合，加载速度被设定为每分钟 1mm 。随后，试验机被切换为载荷控制模式，继续施加荷载，使荷载初始值设定为 2kN ，并且加载速度为每分钟 2kN ，以使混凝土在试验机的压力下初步夹紧并压实。开始正式加载试验中，每级施加 20kN ，加载速度为每分钟 10kN 。每一级荷载加载完后保持荷载不变 $0.5 \sim 1 \text{min}$ ，以使得混凝土内部变形稳定。随后通过便携式矢量网络分析仪读取智能骨料回波损耗曲线 S_{11} ，记录完毕后再进行下一级加载。

5.2.2 实验结果及分析

以含有智能骨料的混凝土试块为例，图 5.6 展示了压力试验机的荷载曲线，图 5.7 展示了试块表面两个电阻值应变片示数。由图 5.6 可知，该试验机加载过程共分为 25 级，每级荷载 20kN ，加载至 500kN 。由图 5.7 可知，随着混凝土荷载的不断增大，混凝土表面两个电阻应变片的示数会出现偏离，这是因为混凝土试件在加载过程中，由于混凝土内部结构的不均匀性或加载设备的不平整性，可能出现试件受力不均导致表面应变不均匀的情况。另外，在试验加载过程中观察到，当加载荷载较低时，停止加载后混凝土表面的应变基本保持不变。而当加载荷载较大时，停止加载后混凝土表面的应变仍然会有所增加，这主要是由于混凝土试件在结束加载后并不会立即完成变形，在高荷载情况下，混凝土试件的变形会随着时间的推移而逐渐增加，并最终趋于稳定，这类似于混凝土的徐变现象。后续可根据 4.4 节的方法，将图 5.7 数据转化为智能骨料测量应变。根据图 5.6 的加载记录，对纯混凝土试块进行了同样的加载，图 5.8 为其中一块纯混凝土的应变片结果，该结果可以认为是不含智能骨料的混凝土真实应变。

本试验中，每次加载完成后等待 1min 后再记录矢量网络分析仪的 S_{11} 曲线。某一级荷载下记录的 S_{11} 曲线与下一级加载开始前 5s 的智能骨料测量应变或真实应变相对应。在实际测量前已对矢量网络分析仪进行了校准，矢量网络分析仪的扫频范围为 $2 \text{GHz} \sim 3.5 \text{GHz}$ ，扫频点数为 1024。

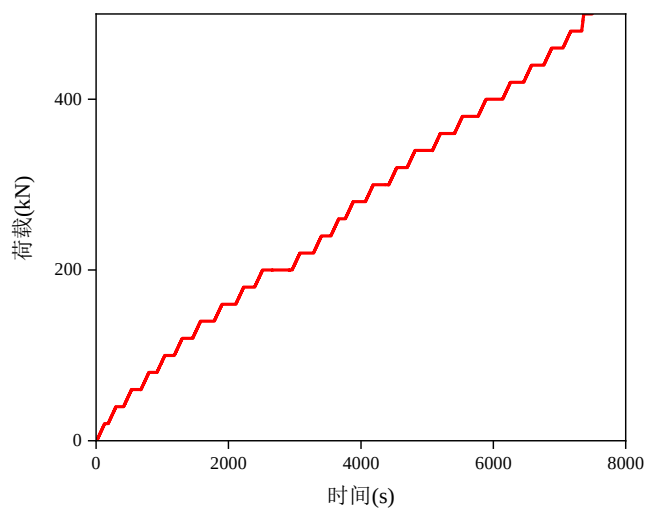


图 5.6 压缩含有智能骨料的混凝土试块时的压力试验机荷载

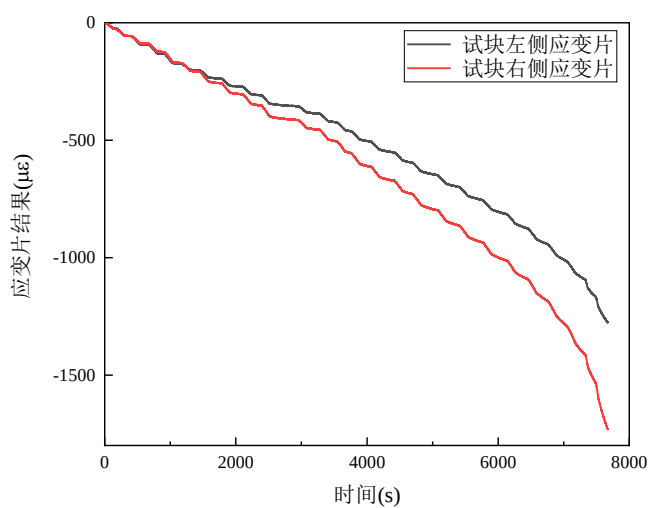


图 5.7 压缩含有智能骨料的混凝土试块时的应变片结果

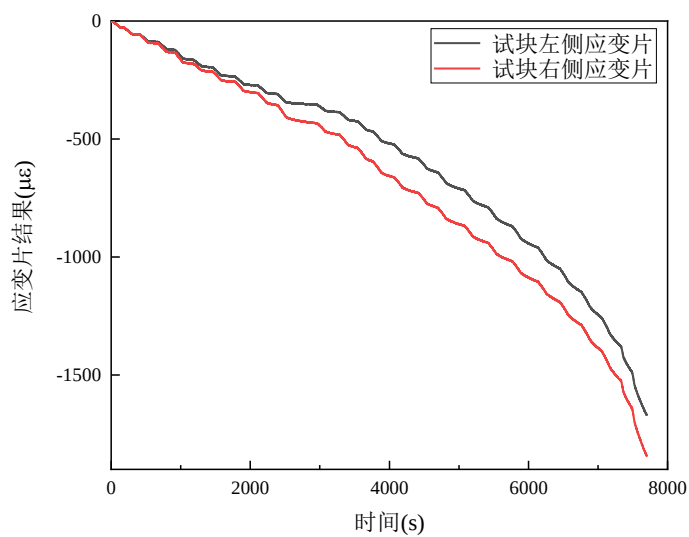


图 5.8 压缩纯混凝土试块时的应变片结果

图 5.9 为各级荷载状态下的智能骨料回波损耗曲线 S11。提取每条 S11 曲线的最小值对应的频率为谐振频率，绘制智能骨料谐振频率与荷载的关系于图 5.10。荷载在 140kN 时的 S11 曲线记录因文件损坏而丢失。除此之外，观察图 5.9 其余荷载下的 S11 曲线和图 5.10，发现随着试验机荷载的不断增大，对应荷载下的 S11 曲线的谐振峰逐渐向右偏移、谐振频率逐渐增大，这与理论分析相符合，即随着荷载作用，混凝土发生形变，智能骨料感知到混凝土形变并通过外壳和增敏机构传递、放大至空气间隙厚度变化，从而导致谐振频率的偏移。

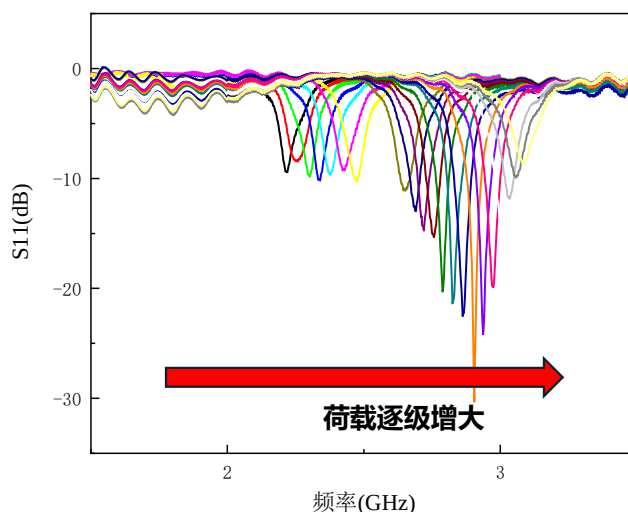


图 5.9 智能骨料传感器的回波损耗曲线 S11

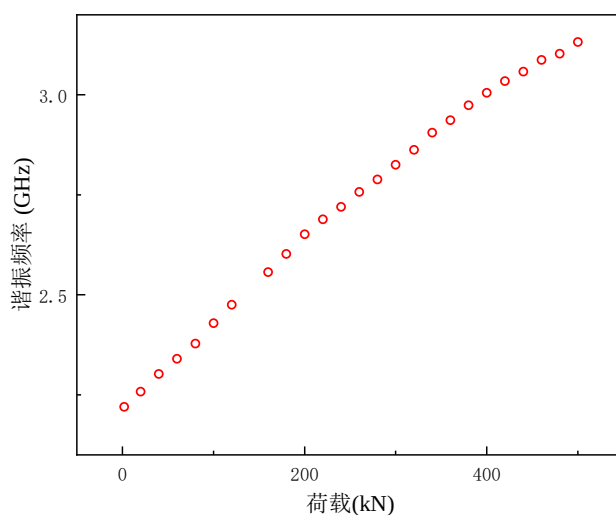


图 5.10 智能骨料谐振频率与试验机荷载关系

为了验证所提出的智能骨料能够表征混凝土应变，绘制谐振频率与测量应变和真实应变的关系。某一级荷载下记录的 S11 曲线与其下一级加载开始前 5s 的应变片数值相对应。其中，为了获得测量应变，首先将含有智能骨料的混凝土试块的两个应变片数据读取平均数，并取绝对值；再采用 4.4 节中方法通过仿

真得到转换系数 $t = 2.89$ ，从而获得测量应变。具体做法此处不再赘述。真实应变直接采用纯混凝土试块的两个应变片数据读取平均数，并取绝对值。对于真实应变，含有智能骨料的混凝土试块在某一级荷载下记录的 S11 曲线，与纯混凝土下一级加载开始前 5s 的应变片数值相对应。

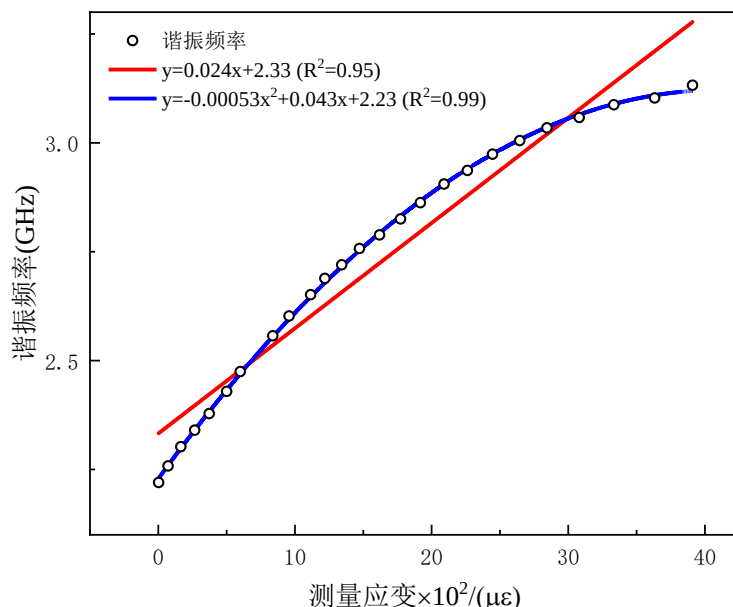


图 5.11 智能骨料谐振频率与测量应变的关系

图 5.11 为智能骨料谐振频率与测量应变的关系，观察图 5.11，发现趋势与形状与第 3 章中图 3.12 相似。由图 5.11 可知，对于该含有智能骨料的混凝土试块，采用二次曲线拟合时 R^2 为 0.99，表明天线谐振频率与测量应变近似二次关系，拟合效果好，也符合 3.3 节的实验结果，式 5.1 为二次拟合关系式；采用线性拟合时 R^2 为 0.95，表明在实际工作中可以为了简化传感器设计而将其线谐振频率与测量应变近似于线性关系，式 5.2 为线性拟合关系式。根据式 5.1、5.2，采用二次曲线拟合得到的灵敏度最大值为 $43\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ，采用线性拟合得到得灵敏度为 $24\text{MHz}/100\mu\epsilon$ 。两种拟合方式得到的灵敏度均远高于前述工作中的智能骨料灵敏度 $1.22\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ^[55]，试验验证了所提出的智能骨料具有非常高的灵敏度，传感性能良好。

$$y = 0.00053x^2 + 0.043x + 2.23 \quad (5.1)$$

$$y = 0.024x + 2.33 \quad (5.2)$$

图 5.12 为智能骨料谐振频率与真实应变的关系，采用二次拟合时 R^2 为 0.99，符合 3.3 节的实验结果，式 5.3 为二次拟合关系式；采用线性拟合时 R^2 为 0.93，式 5.4 为线性拟合关系式。根据式 5.3、5.4，采用二次曲线拟合得到的灵敏度最大值 $110\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ，采用线性拟合得到得灵敏度为 $59\text{MHz}/100\mu\epsilon$ 。可以发现测

量应变所对应的灵敏度小于真实应变所对应的灵敏度，这也符合 4.4 节中的讨论结果——如图 4.17(c)中所示，由于智能骨料引起的应力应变集中导致测量应变大于真实应变。

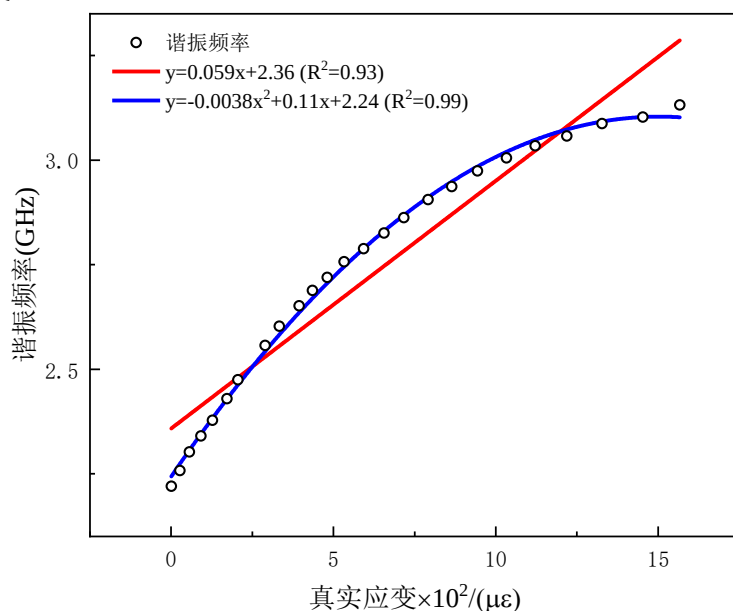


图 5.12 智能骨料谐振频率与真实应变的关系

$$y = 0.0038x^2 + 0.11x + 2.24 \quad (5.3)$$

$$y = 0.059x + 2.36 \quad (5.4)$$

对于另一块含有智能骨料的混凝土，在测试中发现无法测量，破坏混凝土后将无法测试的智能骨料取出后打开发现，智能骨料内部已经进水，故无法通过矢量分析仪测量天线的回波损耗曲线 S11。在未来的智能骨料制作生产中应该进一步加强外壳的防水性能，避免出现此类无法测试情况。

5.3 本章小结

本章主要对智能骨料进行实物试验，总结如下：

(1) 进行了实验设计，并将新型智能骨料传感器应用于混凝土中，随后对试验样品进行了适当的养护，并进行了混凝土压缩试验，以验证智能骨料传感器的性能。

(2) 所提出的新型智能骨料通过二次曲线拟合得到的测试应变灵敏度最大值为 43MHz/100με，线性拟合得到的为 24MHz/100με，远大于前述工作提出的智能骨料的灵敏度；通过二次曲线拟合得到的真实应变灵敏最大值为 110 MHz/100με，线性拟合得到的为 59MHz/100με。试验验证了所提出的智能骨料

可行性和良好性能。

第 6 章 适用于 FMCW 雷达高频访问的加速度传感器

第 3~5 章针对混凝土变形提出了一种高灵敏度的智能骨料。但是在获得混凝土局部信息（变形）的同时，也期望能够获得混凝土结构的全局信息（动力响应）。但是目前访问天线传感器获取电磁参数以表征监测量通常采用矢量网络分析仪和 RFID 阅读器，两种方式均只能适用于读取静态或准静态信息。采用 FMCW 雷达访问天线传感器可以实现高频信息的读取。本章设计并制作了一个适用于 FMCW 雷达高频访问的天线加速度传感器。未来可将天线加速度传感器集成至智能骨料内部，并使用 FMCW 雷达问询局部信息和全局信息，实现对混凝土结构点面结合的全方位监测。

在 6.1 节中，提出了基于贴片天线短接的传感器的基本模型，并根据后续实验目标确定了天线传感器的基本尺寸。

在 6.2 节中，介绍了雷达高频访问机制及后续小节中采用的 FMCW 雷达系统。

再 6.3 节中，利用 HFSS 仿真软件对天线传感器进行了仿真，仿真了不同重叠长度情况下，谐振频率的变化情况。

在 6.4 节中，采用 FMCW 雷达在实验室环境中对该天线传感器进行了测试，探究了贴片天线传感器的实际工作效果，将实际测试结果与真实结果进行对比，讨论了导致差异的可能原因。

6.1 短接组合式天线加速度传感器模型

根据谐振腔模型理论，由辐射贴片和地平面组成的贴片天线可以视为谐振腔。腔体的谐振频率与辐射贴片的尺寸成正比。传感单元感知加速度并将其转换为天线的谐振频率的变化。作为加速度传感单元，设计中采用了组合贴片天线。组合贴片天线由矩形贴片天线和重叠的附加贴片组成。矩形贴片天线包括辐射贴片、基板和地平面。重叠的附加贴片包括重叠的基板和短接贴片，如图 6.1 所示。重叠的附加贴片放置在矩形贴片天线上方，由于雷达问询波激发的电流可以在组合辐射贴片内流动，所以当这两者紧密结合时共同形成了辐射单元，等效电长度相应地进行了相加。

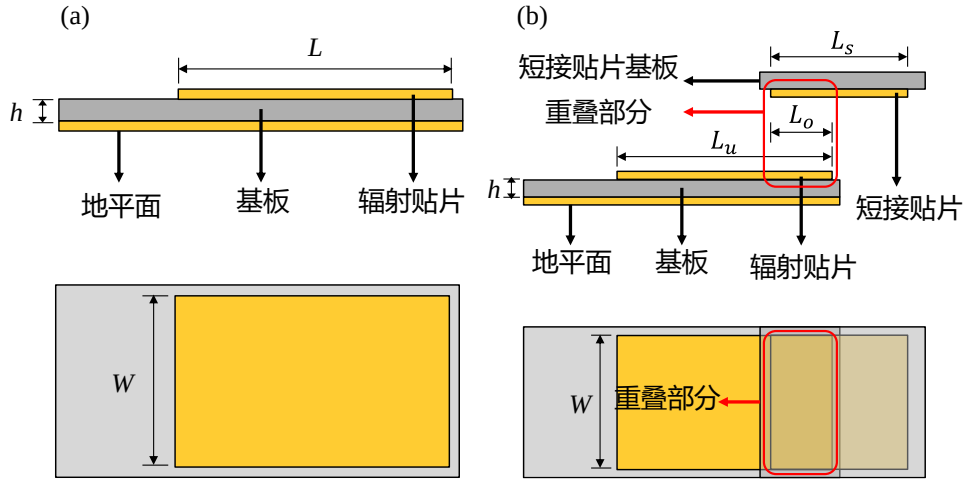


图 6.1 两种贴片天线的俯视图与侧视图。(a)矩形贴片天线；(b)组合式贴片天线。

根据第 2 章的理论公式，此时图 6.1 中描绘的具有组合式辐射贴片的传感单元的谐振频率可以使用式 6.1~6.2 计算。

$$L_{com} = L_u + L_s - L_o \quad (6.1)$$

$$f = \frac{c}{2L_{com}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.2)$$

其中， L_{com} 是谐振方向上的组合辐射贴片的长度； L_u 是辐射贴片的长度； L_s 是短接贴片的长度； L_o 是辐射贴片与短接贴片之间的紧密贴合部分的长度。当重叠附加贴片的位置相对于矩形贴片天线发生变化时，两者的重叠长度相应地移动，式 6.1 可以重写为：

$$L_{com}' = L_u + L_s - L_o' + \Delta L \quad (6.3)$$

其中， L_o' 是重叠的初始长度， L_{com}' 是发生重叠长度变化时谐振方向上组合辐射贴片的长度。根据式 6.1~6.3，当重叠附加贴片相对于矩形贴片天线发生位移时，谐振频率会发生变化。基于上述原理，当重叠附加贴片的位移与加速度相关时，谐振频率可用于表征结构的加速度。因此，提出了一种基于质量-弹簧-阻尼器模型的传感单元原型，以实现加速度的监测。图 6.2 是传感单元设计的示意图。

对于图 6.2(a)中描绘的传感节点模型，重叠附加贴片附着在悬挂于滑轨下方的滑块下表面，弹簧用于提供质量块与固定端之间的弹性连接，可以将传感单元近似看作质量-弹簧-阻尼器模型。假设质量块质量为 m ，弹簧的刚度为 k ，滑块的摩擦阻尼为 c ，振动台振动的瞬时位移 x ，加速度计内部的相对位移为 z ，则重叠附加贴片的运动方程可用式 6.4 表示。

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{x} \quad (6.4)$$

假设目标结构振动为简谐振动，其振动方程为式 6.5：

$$x(t) = \text{Im}(x_0 e^{i\Omega t}) \quad (6.5)$$

其中， x_0 是目标结构的振动幅值， Ω 是目标结构的固有频率。将式 6.5 代入式 6.4 中，然后可以计算出相对位移为：

$$z = \frac{m}{k} D_s \ddot{x}_0 \sin(\Omega t - \alpha) + e^{-\zeta \omega_n t} (A_1 \cos \omega_d t + A_2 \sin \omega_d t) \quad (6.6)$$

其中， $\ddot{x}_0$ 是加速度振幅； ζ 是阻尼系数； α 是由 $\tan \alpha = 2\zeta r / (1 - r^2)$ 得到的响应滞后激励相位角； r 是频率比，定义为 $r = \Omega / \omega_n$ ； ω_n 是传感节点的固有频率； ω_d 是阻尼固有频率，定义为 $\omega_d = \omega_n (1 - \zeta^2)^{1/2}$ ； A_1 和 A_2 是由初始条件确定的常数； D_s 是频率响应函数，其表达式如下：

$$D_s = \frac{1}{\left[(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2 \right]^{1/2}} \quad (6.7)$$

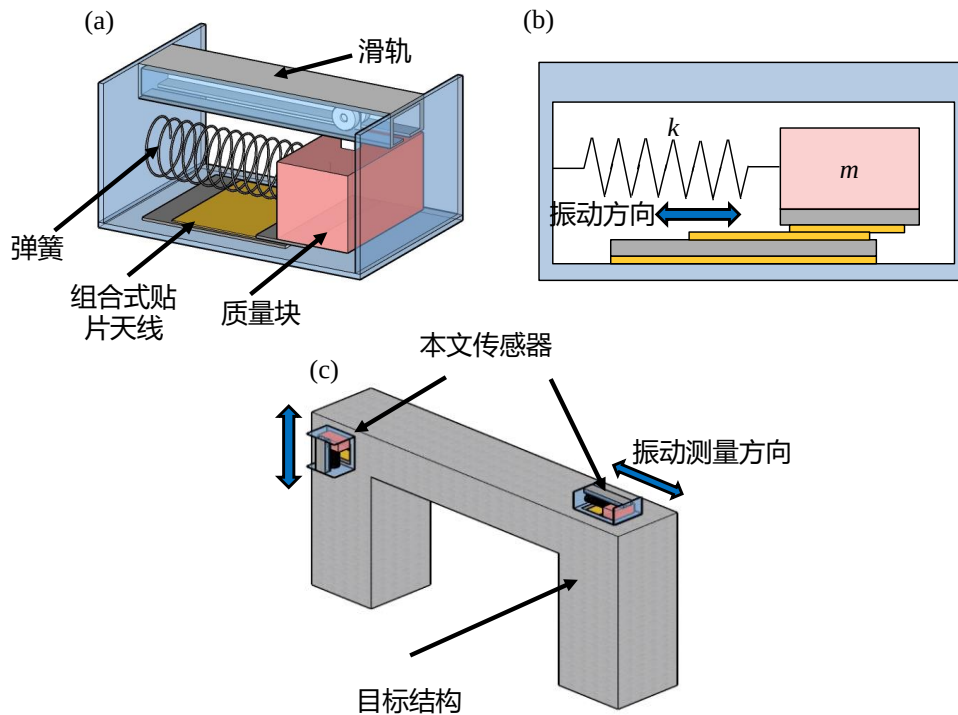
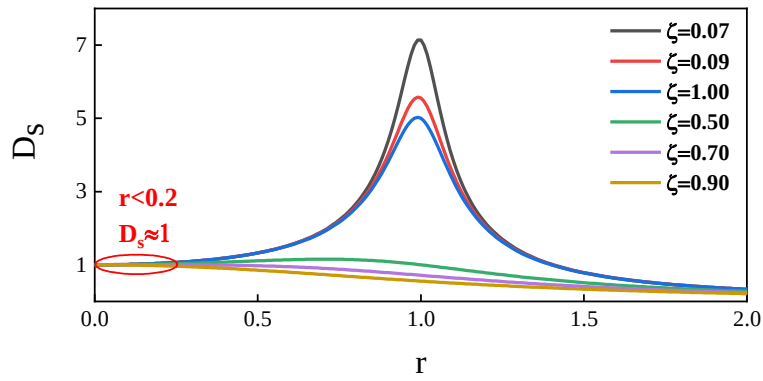


图 6.2 所设计的天线加速度传感器示意图

根据式 6.7， D_s 、 r 、 ζ 的关系如图 6.3 所示。对于式 6.6，方程的第一项代表了总响应的强迫振动部分；而第二项代表了自由振动，由于阻尼作用，自由振动会在一段时间后衰减至零。因此，方程 6.6 可以简化为：

$$z = \frac{m}{k} D_s \ddot{x}_0 \sin(\Omega t - \alpha) \quad (6.8)$$

图 6.3 D_s 、 r 、 ζ 之间关系

由于传感器连接到结构上，传感器重叠长度的变化等于质量块的相对位移。而谐振频率与重叠长度存在理论关系，因此，进一步地可以得到 f 和 $\ddot{x}$ 之间的关系。

$$\Delta L = \frac{m}{k} D_s \ddot{x}_0 \sin(\Omega t - \alpha) \quad (6.9)$$

本传感器的贴片天线在实验室可用的测试环境中同智能骨料中的应变传感单元一样工作在约 2.4 GHz 的频率。短接贴片的长度被设定为大于重叠长度变化的最大范围，以确保天线重叠长度的变化不会影响其收发性能。由于后续实验中 VCO 模块的限制，重叠长度被设置为 3 毫米，以保持组合贴片的频率变化在 VCO 扫描范围内。这种限制可以通过将 VCO 替换为不同扫频范围的 VCO 来解决。

对于传递动力响应的传感节点力学结构，传感器工作频率范围是力学结构参数设置的关键。在土木工程中，如框架结构和框架剪力结构等建筑结构和桥梁的振动通常是低频振动，其一阶固有频率通常仅为个位数 Hz^[60]。因此，可以确定传感器的理想上限工作频率 f_{up} ；即，传感器工作频率范围可以覆盖大型土木工程结构的振动频率范围。在未来所提出的传感器用于实际工程时，需根据实际工程需求确定适当的工作频率范围。

图 6.3 显示，当频率比低于 0.2 时，频响函数 D_s 的值近似恒定为 1，这意味着加速度测量的幅度失真可以近似忽略不计^[61]。通过这种方式，传感器的上限工作频率可以确定为大于系统的无阻尼固有频率 ω_n ：

$$0.2\omega_n > 2\pi f_{up} \quad (6.10)$$

确定了固有频率 ω_n 之后，可以计算出质量 m 和弹簧刚度 k 之间的关系。根据式 6.9，可以确定待设计的加速度计的最大量程为：

$$\ddot{x}_0 = \frac{k\Delta L_{\max}}{mD_s} \quad (6.11)$$

因此，传感节点的参数已确定，并列在表 6.1 中。

表 6.1 天线加速度传感器基本参数

参数	L (mm)	W (mm)	L_u (mm)	L_s (mm)	L_o' (mm)
值	52.5	49	26.6	18	6
参数	$\Delta L_{\max}$ (mm)	ε_r	$\ddot{x}_0$ (g)	m (g)	k (N/m)
值	3	2.2	7.5	10	250

必须根据式 6.10 评估加速度传感器工作频率与激励频率的比值，以确保频率响应函数收敛到约为 1。根据上述设置的参数，传感节点的固有频率如方程 6.12 所示：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = 158(\text{rad/s}) \quad (6.12)$$

6.2 FMCW 雷达高频访问机制

FMCW 是一种调制连续波，其主要特征是频率随时间变化。线性 FMCW 信号是最常见的 FMCW 信号之一，它可以看作是一种在时域中反复重复的 chirp 扫频信号，在速度和距离测量中有许多应用。在每个周期内，FMCW 信号的频率从扫频下界线性移动到扫频上界。图 6.4 显示了典型锯齿 FMCW 的时域波形和时频关系。在图中典型的 FMCW 波中，扫频下界频率和上界频率分别为 5 和 20 Hz，每个扫频周期为 1 s。同样可以设计拥有千赫兹级别扫频频率的 FMCW，并且显然，增加 FMCW 扫频频率相当于增加所提出的传感器的采样率。

通过向传感单元的天线发射 FMCW 信号，实现无线询问。入射 FMCW 波的功率流可以由式 6.13 和图 6.5 表示。

$$P_{in} = P_b + P_l + P_r \quad (6.13)$$

其中 P_{in} 为入射波的功率； P_b 是后向散射的功率； P_l 为功率损耗， P_r 为接收天线接收到的功率。FMCW 信号中频率与天线传感器谐振频率相匹配的部分将被天线传感器接收并再辐射。这个过程称为模式背向散射，对应于图 2.9 中红色箭头所示的过程。天线的背向散射信号指的是经过 FMCW 波信号访问并转化为天线内部电路功率后，在谐振频率附近激发得到的再散射信号。在这个“频率匹配”时刻，入射阻抗与 FMCW 波达到最佳匹配，从而实现入射功率的最高转

化效率，进而使得天线再散射信号功率达到最大值。凭借极化隔离设计的实施，能够将再散射信号与本振以及环境中其他结构的本振二次散射区分开来，从而便利地获得谐振频率信息。因此，在宽带天线接收到的信号的每个周期中都有原始信号中所没有的一个波峰，这对应于该天线的谐振频率。随着附加贴片位置的变化，每个周期中波峰对应的频率也发生变化。

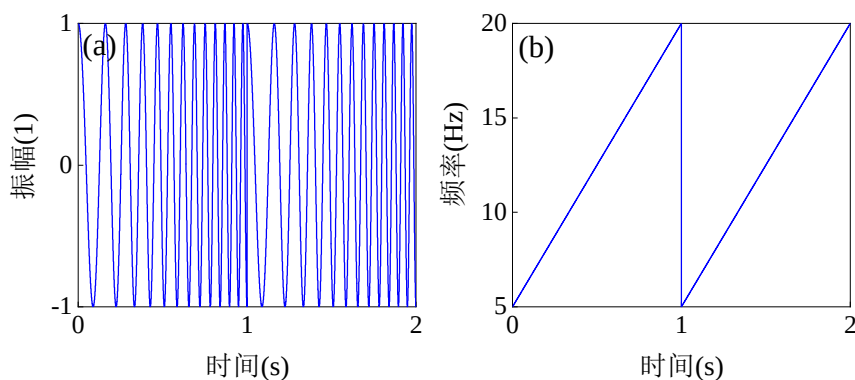


图 6.4 典型 FMCW 的(a)时域信号和(b)时频关系

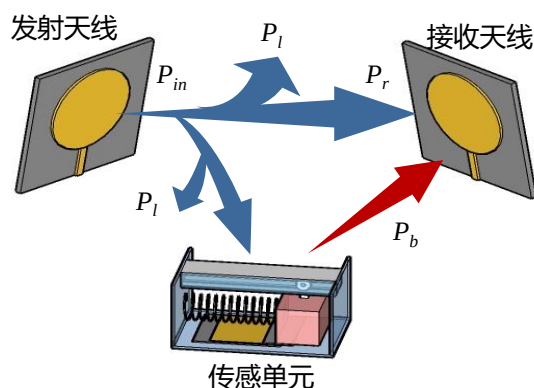


图 6.5 FMCW 信号的传播过程

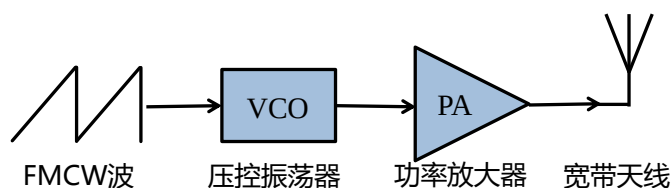


图 6.6 FMCW 雷达发射端框图

FMCW 的信号产生一般包括信号发生、频率调制和放大模块。通常，信号发生模块使用振荡器通过内部电路调节电源直流电压来产生交流电压信号。电压调节振荡器(VCO)通常用于将低频交流电压信号重新调频以达到 GHz 级别。电压控制振荡器是一种输出射频信号的频率受输入交流电压信号频率控制的振荡电路，当施加低频电压时，压控振荡器产生高频射频信号。由于压控振荡器

的输出功率在一个周期内逐渐损失，因此必须在最后一个周期由放大器提升输出功率。

6.3 天线加速度传感器仿真

图 6.7 为通过 COMSOL 建立的模型。基板材料和重叠附加贴片均设置为 Rogers RO3003，其介电常数已列于上文。辐射贴片和重叠附加贴片的边界假设为完全电导。为了考虑远场效应，整个传感器被放置在作为辐射边界的空气球内。在模拟中，使用了馈电线末端的集总端口来激发天线传感器，而不是使用平面波激励，以简化模拟过程。重叠附加贴片通过弹簧加载阻尼器连接到支撑物上，但在模态图中没有显示。为了模拟传感器连接到结构时的状态，假定该传感器的下表面和弹簧的固定端整体振动。重叠附加贴片仅在 y 方向上进行刚体平移。为了在减少建模难度的同时模拟目标结构的振动，为附加贴片增加了额外的质量作为质量块的质量，但不加以建模。矩形贴片天线和重叠附加贴片设置为无摩擦接触，以模拟紧密贴合的状态。

首先，分析了位移与加速度之间的关系。在模拟过程中，对传感器施加了不同加速度。图 6.8 代表了质量块的位移，即与加速度相关的重叠长度变化量。

基于模拟的传感结构分析结果与传感质量块的机械模型分析的结论一致，即传感质量块的位移与加速度之间存在线性关系，如式 6.14 所示。

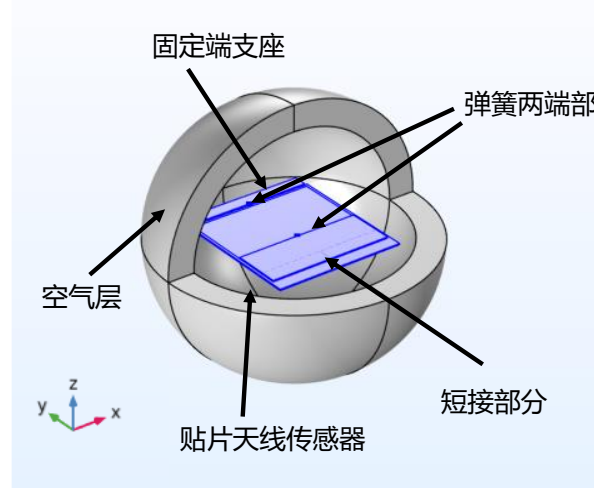


图 6.7 COMSOL 中建立的天线加速度传感器模型

$$\Delta L(\text{mm}) = -0.4014a(g) \quad (6.14)$$

在确认了位移与加速度之间的线性关系之后，通过图 6.9 获取了在不同重叠长度变化（-3、-2、-1、0、1、2、3 毫米）下天线的谐振频率，以检验线性拟合加速度的可行性。图 6.9(a)中描绘了各种位移下的天线 S11 曲线，而图 6.9(b)

提取了每条曲线的谐振频率，并将其拟合到位移上。

根据图 6.9(b)，天线传感器的谐振频率与附加贴片的位移之间的关系可以拟合为：

$$f(\text{GHz}) = -0.06679\Delta L(\text{mm}) + 2.50057 \quad (6.15)$$

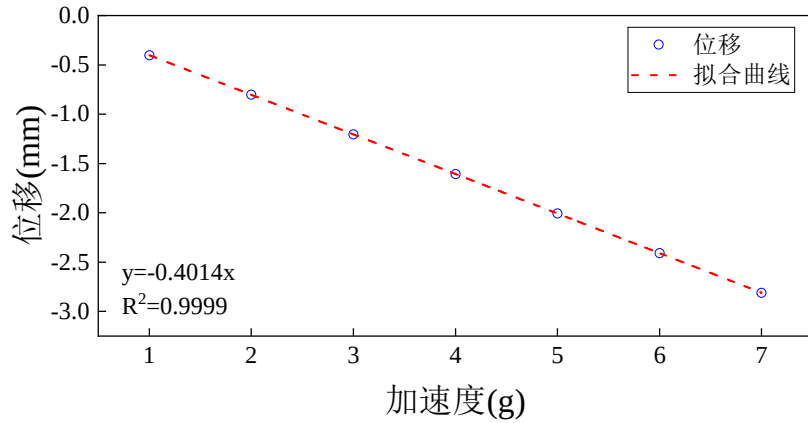


图 6.8 位移和加速度之间的关系

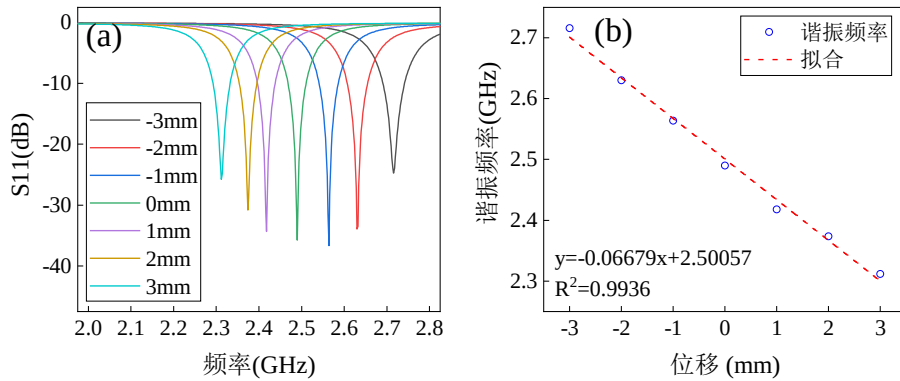


图 6.9 (a)不同重叠长度下的 S11 曲线；(b)谐振频率和相对位移的拟合曲线。

图 6.9(b)描述了重叠长度和谐振频率之间的近似线性关系。拟合线的相关系数为 0.9936，表明随着重叠长度的增加，谐振频率线性移动。将方程 6.14 和 6.15 结合起来，可以得到谐振频率和加速度的变换方程，如式 6.16 所示。正式 6.16 所示，所提出的传感器是线性的；因此，代表天线传感器理论灵敏度系数的拟合线的斜率为 26.8 MHz/g。

$$f(\text{GHz}) = 0.0268a(\text{g}) + 2.5054 \quad (6.16)$$

传感器模型的关键指标，如幅频特性，也可以通过 COMSOL 固体力学研究模块得到。系统的幅频曲线会随着结构阻尼的变化而变化，这可以通过对阻尼单自由度系统的动态响应进行分析来说明。幅频曲线的平坦区域对于确定加速度计的实用性有着重要意义。在 COMSOL 中对传感器的固定端施加不同频率的

简谐波激励，在频域中研究了质量块的振动幅度，如图 6.10 所示。振动的峰值出现在 24.3 Hz。因此，谐振频率为 24.3 Hz，与计算得到的理论值接近。图 6.10 显示了 0.5-10 Hz 是振幅变化的平坦区域，10-24 Hz 是振幅变化的快速上升段。故仿真表明传感器的工作频率范围为 0.5-10 Hz。

然后，在 COMSOL 中对瞬态和频率域中对模型进行了分析，以确定每个时刻的谐振频率，以模拟使用 FMCW 在每个周期中确定谐振频率的过程。在模拟中，瞬态分析的时间间隔设置为 0.025 秒，对应于 FMCW 的重复频率为 40 Hz，持续时间设置为 4 秒。提取了每个时刻的 S11 的最小值，并获得了每个时刻天线贴片的谐振频率之间的关系。

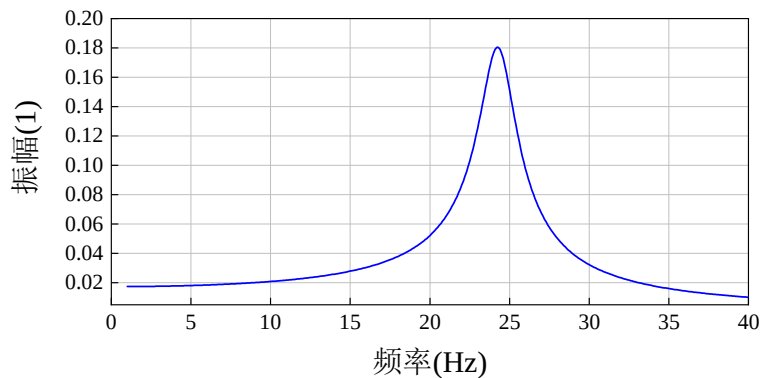


图 6.10 加速度传感器的幅频曲线

如上所述，近似认为谐振频率与加速度呈线性关系。通过将每个时刻的谐振频率代入式 6.15 中，可以得到目标结构下部的加速度响应，如图 6.11 所示。

图 6.11 和图 6.12 显示，该传感器模型对加速度激励具有敏感性和可靠性，输入和输出波形之间的振幅差异和相位差异相对较小，因此具有良好的结构振动监测能力。

从上述模拟可以清楚地看出，可以通过实时测量谐振频率来计算加速度。然而，由于在仿真中使用了馈线和集总端口进行馈电，而不是 FMCW 雷达，仿真未考虑自由空间中的传输和耗散效应。它只能展示所提出的加速度计的简化工作情况。因此，需要进行更多的实际测试来确认其可行性，特别是对于无线询问。

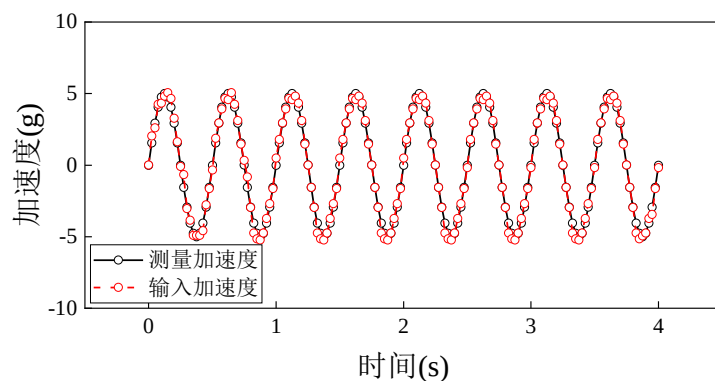


图 6.11 仿真得到的加速度测量结果

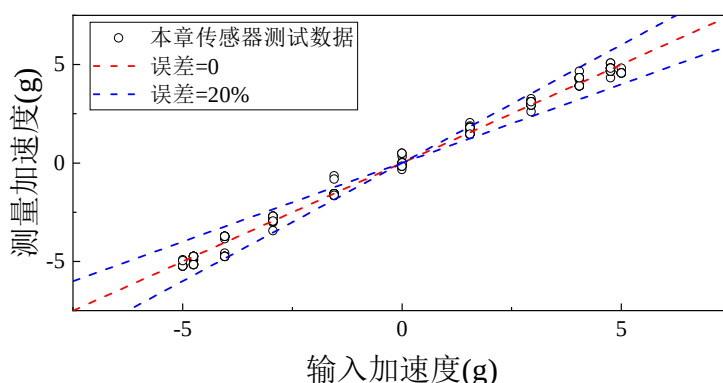


图 6.12 加速度测量误差

6.4 基于 FMCW 雷达的天线加速度传感器实验

在本节中，通过监测加速度传感器质量块的自由振动位移，测试了监测节点和通过 FMCW 进行的无源无线监测系统的性能。根据式 6.9，当质量块自由振动时，振动频率保持不变，并且其频率响应函数的值保持不变，使得位移和加速度在每个时刻保持相同的比例。因此，位移测试可以更容易地表征加速度测试的结果。

6.4.1 天线加速度传感器的校准

由于模拟中的理想设置与实际实验环境不同，因此在开始实验之前，必须按照上节的流程对传感器进行校准，即在实际条件下获得转换方程。首先，通过获得 7 个不同重叠长度的谐振频率来进行传感器校准，这与先前描述的仿真过程相同。在校准，通过矢量网络分析仪（VNA）测试了 S11 曲线，其中最大和最小重叠长度设置为 3mm。

由于天线制造的尺寸误差和组合贴片的不完全短接接触，VNA 测试获得的

谐振频率与模拟结果不同，因此需要根据实际测量结果重新校准转换方程。

图 6.13(a)描述了 S11 曲线，6.13(b)描述了位移-谐振频率关系。式 6.17 为谐振频率和位移的拟合方程。与模拟中的情况类似，谐振频率将随着位移的减小而线性增大，其线性拟合系数大于 0.99，表明了所提出的传感节点的可行性。

$$f(\text{GHz}) = -0.05964\Delta L(\text{mm}) + 2.5343 \quad (6.17)$$

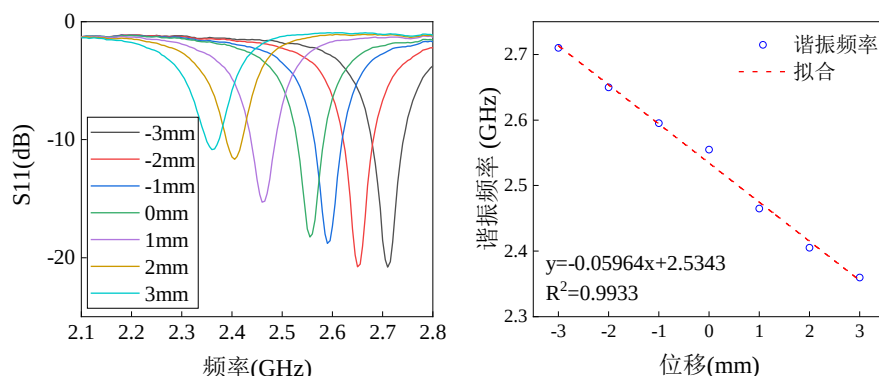


图 6.13 天线加速度传感器的校准。(a)S11 曲线；(b)校准过程中位移和谐振频率的关系

6.4.2 天线加速度传感器的实验设置

无源无线天线加速度传感系统由感知节点、FMCW 询问系统和数据后处理部分三部分组成，如图 6.14 所示。本系统的工作流程如下。问询系统产生 FMCW 并通过宽带天线将其传输到自由空间。然后，FMCW 信号被传感节点中的与目标监测结构相连的天线接收，然后通过接收天线捕获天线反射信号，从而感知节点中的天线。最后，对携带天线谐振频率和回波损耗信息的信号进行后处理并计算加速度。

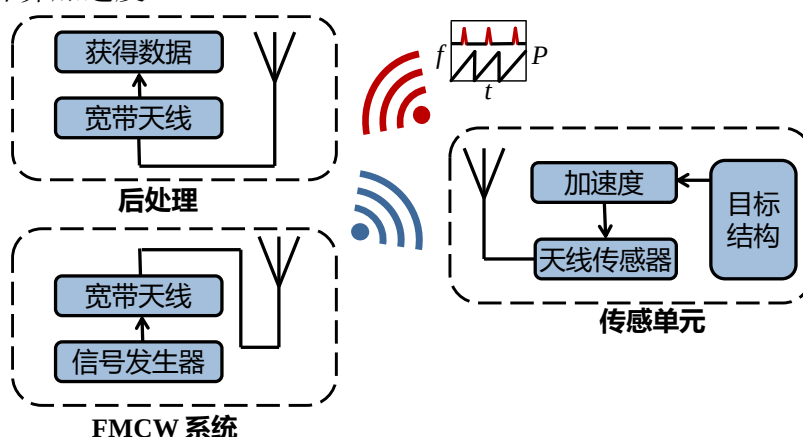


图 6.14 加速度传感系统示意图

试验装置搭建完毕，如图 6.15、图 6.16 所示。在所制造的天线加速度传感器上，选择铜作为辐射贴片的成分。矩形贴片天线的基片和附加贴片的基板都

为 ROGERS RO3003。信号发生器产生的 0-4.5V 锯齿波信号，FMCW 中压控振荡器输出的频率范围为 2.3-2.72 GHz，与之相连的放大器额定工作在 1 M-3 GHz 的频率范围内，该频率范围内的最大增益为 20 dB。FMCW 由发射天线发送到天线传感器，然后散射天线信号由接收天线捕获。RTO1044 示波器直接用作数据采集器，以简化实验设置。在实际应用中，模数转换器（ADC）可以用来代替示波器。在本实验中，由于信号的功率不足以在自由空间中进行远距离传输，因此将天线传感器、发射天线和接收天线之间的距离限制在 3cm。后续可以通过改进或增加系统的功率放大器来直接增加询问距离。

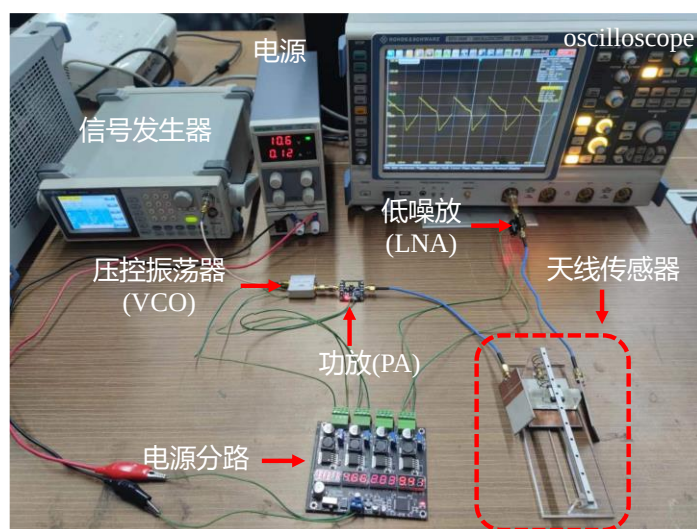


图 6.15 实验测试系统

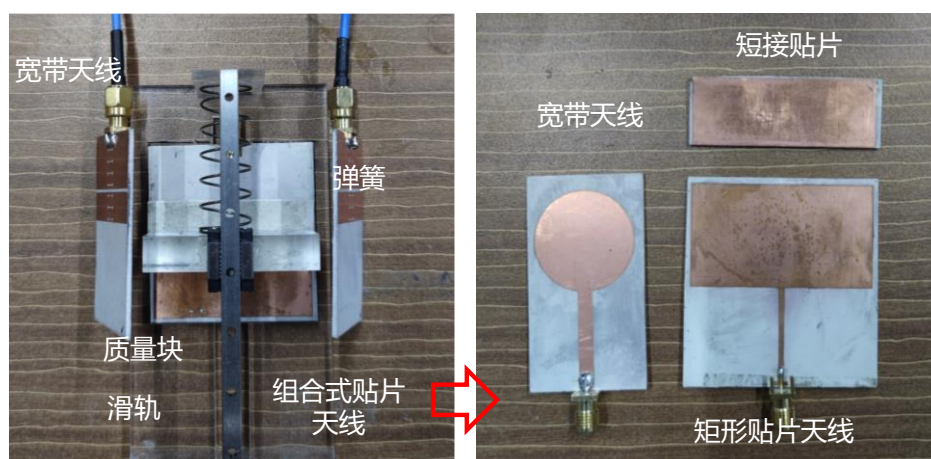


图 6.16 天线加速度传感器

6.4.3 实验结果

由于加速度与位移成正比，因此对质量块的振动进行了测试，以确保所提

出的传感节点和无线问询系统的可行性。对质量块施加初始位移引起振动，将初始位移设置为重叠长度变化的最大值。如上所述，传感节点可以看作是一个质量-弹簧-阻尼器模型。采用慢速摄影来记录质量块的近似简谐自由运动。质量块在 0.1 s 内振荡两次，一个周期后振幅由 3.0 mm 减小到 1.2 mm。然后根据式 6.18~6.19 计算周期、阻尼率和频率：

$$T_d = 2\pi / \omega_d = 0.1 / 2 = 50(\text{ms}) \quad (6.18)$$

$$e^{\zeta\omega_n T_d} = 3/1.2 \quad (6.19)$$

求解可以得到自由振动的参数，结果列于表 6.2。

表 6.2 自由振动参数

参数	$T(\text{ms})$	$\xi(1)$	$A(\text{mm})$
值	50	0.15	3.0

得到自由振动参数后，通过式 6.20 可以得到质量块的简谐振动方程：

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_f t) \quad (6.20)$$

FMCW 雷达的基本参数如表 6.2 所示，其中为 T_s 雷达的采样时间； f_s 为 FMCW 的重复频率，对应于系统的采样频率。 f_{up} 和 f_{low} 分别为 FMCW 的上限和下限频率，对应于 FMCW 雷达问询的频率范围。

表 6.3 FMCW 雷达的基本参数

参数	$T_s(\text{s})$	$f_s(\text{Hz})$	$f_{low}(\text{GHz})$	$f_{up}(\text{GHz})$
值	1	500	2.30	2.72

通过接收天线获得接入贴片天线的背向散射信号，从示波器获得的回波信号原始波形如图 6.17 所示，其波形信号的电压幅值可以用来表征信号的功率。

每个回波信号根据周期被截断并叠加以产生单独的时域信号。因为频率与输入控制电压近似成线性关系，而输入控制电压与时间成线性关系，故可以将频率与时间之间的关系视为线性对应的。因此，所得到的被截断的时域信号的 x 坐标直接转换为范围为 f_{up} 、 f_{low} 的频率坐标，并将经过叠加和平滑处理的回波信号绘制在图 6.18 中。

图 6.18 中各时刻回波信号曲线最低点对应的频率为该时刻组合天线的谐振频率，提取上述谐振频率，根据式 6.17 计算位移。结果如图 6.19 所示，并与使用表 6.2 中所述参数的理论自由振动进行了比较。误差如图 6.20 所示。

图 6.20 的结果表明，自由振动前三个周期的测量数据与理论数据吻合良好。前三个周期数据误差的原因可能是：(a)环境干扰；(b)组合贴片接触不紧密；(c) VCO 调谐灵敏度不均匀。第三次周期后，实测位移趋于恒定，这与理论加速度

不一致。这种差异的原因很可能是由于摩擦导致质量过早停止振动。试验总体平均位移误差为 0.1273 mm，位移变化的测量范围为 ± 3.0 mm。

该测量误差与加速度误差相等，与测量范围相比约 4.3%，证明了所提出的传感方法的可行性。

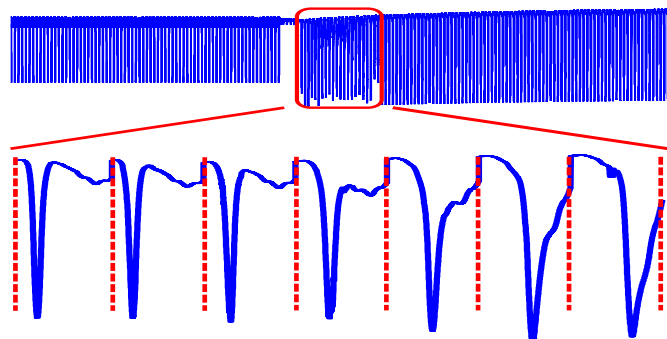


图 6.17 通过示波器获得的原始信号

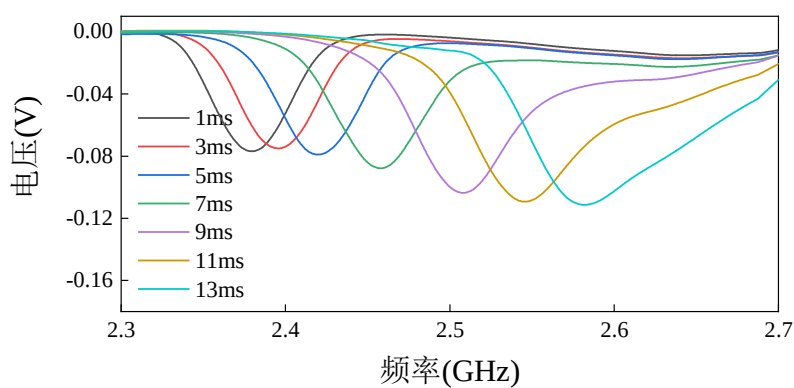


图 6.18 不同时刻时电压和频率之间的关系

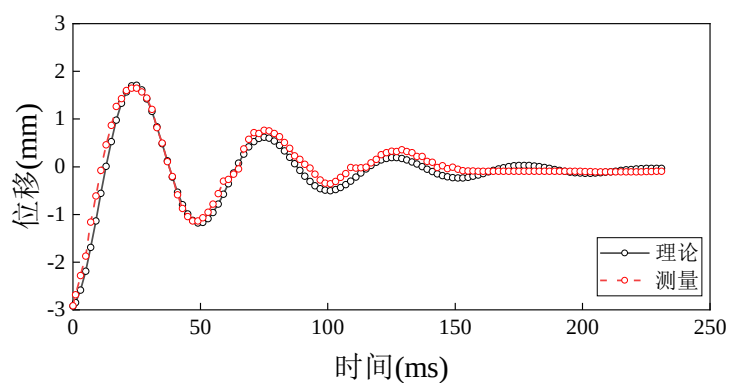


图 6.19 通过谐振频率得到的测量位移

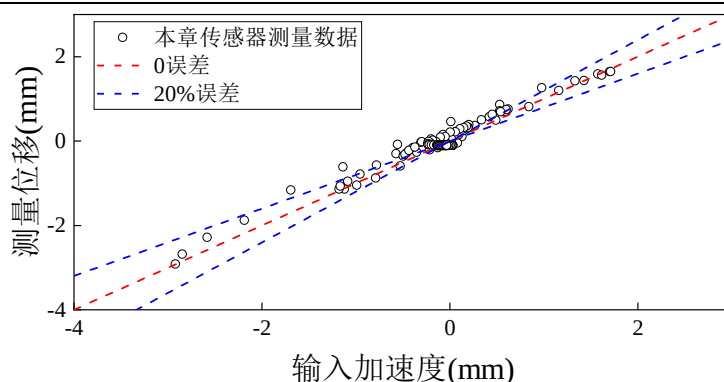


图 6.20 采用天线加速度传感器测量的误差

6.5 本章小结

本章主要对适用于 FMCW 高频访问的天线加速度传感器的材料的尺寸设计、模拟仿真与实验，总结如下：

(1) 设计了一种无源贴片天线传感装置，用于测量结构的加速度。加速度敏感单元设计为与天线分离，以防止长时间使用带来疲劳、长期应力的问题。因此，天线在感知时不易受到外力的影响。利用构建的贴片天线感知节点的谐振频率偏移可以感知节点内证明质量的位移，进而反映附加结构的加速度。

(2) 采用基于结构动力学的等效模型和 COMSOL 仿真模型验证设计的有效性，仿真估计了谐振频率与结构加速度之间存在线性关系，并且在所需频率区域的灵敏度具有失真小、平整度好等特点。

(3) 通过实验测量了质量块在传感节点内的位移，进一步验证了该方案的无线可行性。利用传感器节点的基本属性设置 FMCW 雷达的参数，并将其用于无线测量。使用天线传感器谐振频率的测量数据显示，加速度监测的平均误差率在 4.3% 以内，表明所提出的传感系统具有很大的可行性。

第7章 结论与展望

7.1 结论

本文设计了一种用于混凝土结构局部变形与结构整体加速度的智能骨料，目标是实现对混凝土结构局部与全局信息的监测。采用具有无源无线优势的贴片天线传感技术作为传感单元的基础，利用贴片天线的谐振频率来表征变形，设计了适用于混凝土内部的变形传感器。同时，设计了适用于混凝土内部变形传感器智能骨料封装外壳与增敏机构，并探究了两者的尺寸、形状等因素对智能骨料工作效果的影响。随后制备了所设计的智能骨料，并埋入混凝土试件，进行了混凝土轴向压缩试验，验证了所提出的适用于混凝土内部应变监测的智能骨料的可行性。最后，为了同时实现对混凝土结构全局信息（动力响应）的监测，提出了一种适用于 FMCW 雷达高频访问的加速度传感器。

本文的主要研究内容及结论如下：

（1）本文首先对电磁场的基本原理进行了详细阐述，接着引入了谐振腔假设，以用于分析贴片天线。在此基础上，通过应用谐振腔假设，推导出了普适的矩形贴片天线的谐振频率计算公式，并进一步探讨了带空气间隙的贴片天线的谐振频率计算公式以及采用孔径耦合馈电方式的优点，为后续研究中贴片天线传感器的设计奠定了基础。

（2）提出了一种带空气间隙的孔径耦合馈电的微带贴片的高灵敏度天线传感器，谐振频率与空气间隙厚度有关，若将待测量与空气间隙厚度联系起来，可以实现通过谐振频率表征待测量。根据前述章节初步确定参数并通过 HFSS 软件对参数进行了遍历优化，得到了天线传感器的最终参数。随后在 HFSS 软件中，对空气间隙厚度参数进行参数化扫描，模拟在实际工作中空气间隙不断变化。模拟结果表明，该传感器采用二次曲线拟合得到的灵敏度范围为 112MHz/mm~1552MHz/mm，采用线性拟合得到得灵敏度为 820 MHz/mm，采用两种拟合方式 R^2 皆大于 0.9。实物天线传感器测试结果表明，采用二次曲线拟合得到的灵敏度范围为 70~1583MHz/mm，采用线性拟合得到得灵敏度为 818MHz/m，实验得到的谐振频率采用线性、二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.9，其中二次曲线拟合得到的拟合系数都大于 0.99，表明天线传感器工作性能良好，且灵敏度高于其他研究所提出的传感器。

（3）首先分别根据材料屏蔽性能、静态应变值确定了封装外壳与增敏机构

的材料，确定了将采用 3D 打印技术一体化打印封装外壳与增敏机构，以减少装配误差对天线传感器感知微小形变能力的影响。确定了智能骨料的性能目标，明确了增敏机构放大比，据此确定了增敏机构的关键参数，并通过 COMSOL 优化了参数。对具有与无智能骨料扰动的混凝土试块在应力应变下的协调变形差异进行仿真研究，结果表明，在使用树脂材料时，骨料外壳形状对协调变形差异影响最为显著。在三种外壳中，棱柱体外壳的协调变形差异最大，胶囊体最小。外壳厚度越大、高宽比越小、弹性模量越小，协调变形差异越大。探究了外壳-增敏机构一体加工埋入混凝土后两者相互作用下的协调变形差异现象，验证了无智能骨料扰动的混凝土真实应变与天线空气间隙厚度之间存在线性关系。最后，探究了测试应变与应变片结果之间的关系，提出了一种利用试块表面应变片得到智能骨料测量应变的方法。

(4) 制备了用于混凝土内部形变监测的智能骨料。设计了相关的试验，将采用树脂材料——VERO 高韧树脂，以验证所设计的智能骨料的可行性、测试其性能，并对试验结果进行了分析讨论。试验结果表明，通过二次曲线拟合得到的测试应变灵敏度最大值为 $43\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ，线性拟合得到的为 $24\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ，远大于前述工作提出的智能骨料的灵敏度；通过二次曲线拟合得到的真实应变灵敏度最大值为 $110\text{MHz}/100\mu\epsilon$ ，线性拟合得到的为 $59\text{MHz}/100\mu\epsilon$ 。且所有拟合曲线 $R^2 > 0.9$ 。实验结果表明该智能骨料拥有良好的变形传感能力和较高的应变灵敏度。

(5) 为了实现对混凝土结构全局信息的监测，提出了一种适用于 FMCW 高频访问的加速度传感器。设置了 FMCW 雷达的参数，其扫频频率为 500Hz ，相当于传感器采样率为 500Hz ，并将其用于无线测量。使用天线传感器谐振频率的测量数据显示，加速度监测的平均误差率在 4.3% 以内，表明所提出的传感器及访问方式具有很大的可行性。

7.2 展望

本论文以贴片天线为基础，新的天线传感器形式进行研究，为智能骨料的设计提供了新的思路。同时，对骨料外壳和增敏机构进行了探究，为进一步应用该智能骨料提供了有力的技术支持。基于贴片天线的无源无线智能骨料的研究具有广阔的前景。尽管本研究取得了一定的进展，但由于研究水平和试验条件的限制，仍然存在许多需要改进和深入研究的方面。下面简要讨论如下：

(1) 基于带空气间隙的孔径耦合馈电天线传感器仍有改进空间。本文所设计的天线传感器空气间隙变化范围为 $0.2\sim 1.2\text{mm}$ ，此范围相比于混凝土微小形

变来说已经相对较大,但对于传感器的加工与装配来说仍然较小。本文中虽采用外壳与增敏机构一体化打印一定程度上减小装配误差,但考虑到胶水粘接天线时的厚度不均匀等因素,加工时仍可能会产生一定的误差。

(2) 适用于监测动力响应等全局信息的传感单元尚未集成进所提出的智能骨料。本文最后提出了一种适用于 FMCW 雷达高频访问的加速度传感器,以期在收集到混凝土结构局部信息的同时收集全局信息。这部分传感单元尚未封装进所提出的智能骨料。并且,本文在测试智能骨料时仍采用的是有线测试方式。未来将采用 FMCW 雷达同时无线问询静态与动态、局部与全局信息。

(3) 智能骨料仍有进一步小型化的空间。本文中的智能骨料实物尺寸为 $50 \times 60 \times 60\text{mm}$, 相对于混凝土结构来说仍然相对较大,埋置在混凝土结构中导致的协调变形差异也相对较大,未来可以通过贴片天线开槽、辐射贴片分型等小型化方式实现更小尺寸的智能骨料。

参考文献

- [1] 李惠, 鲍跃全, 李顺龙, 等. 结构健康监测数据科学与工程[J]. 工程力学, 2015, 32(8): 1-7.
- [2] 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.
- [3] Zhang Y H, Li Q S, Lin J H, et al. Random vibration analysis of long-span structures subjected to spatially varying ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(4): 620-629.
- [4] Ni Y Q, Xia Y, Liao W Y, et al. Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(1): 73-98.
- [5] Li T, Guo J, Tan Y, et al. Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [6] Živanović S, Pavić A, Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1-2): 1-74.
- [7] Cochran E, Lawrence J, Christensen C, et al. A novel strong-motion seismic network for community participation in earthquake monitoring[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2009, 12(6): 8-15.
- [8] Zhang J, Peng L, Wen S, et al. A Review on Concrete Structural Properties and Damage Evolution Monitoring Techniques[J]. Sensors, 2024, 24(2): 620.
- [9] 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.
- [10] Kim S H, Park S Y, Kim S T, 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.
- [11] Lee H M, Kim J 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.
- [12] 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, 2010: 1-13.
- [13] 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.
- [14] Hou S, Zhang H B, Ou J P. A PZT-based smart aggregate for compressive seismic stress monitoring[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105035.
- [15] Zhang H, Hou S, Ou J. Smart aggregates for monitoring stress in structural lightweight concrete[J]. Measurement, 2018, 122: 257-263.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Cho C, Park J, 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.
- [19] Zhu B, Zhang X, Zhang H, et al. Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 143: 103622.
- [20] Chen F, Zhang Q, Gao Y, et al. A Review on the Flexure-Based Displacement Amplification Mechanisms[J]. IEEE Access, 2020, 8: 205919-205937.
- [21] Wen S, Xu Q, Zi B. Design of a New Piezoelectric Energy Harvester Based on Compound Two-Stage Force Amplification Frame[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(10): 3989-4000.
- [22] Ou J. Some recent advances of intelligent health monitoring systems for civil infrastructures in HIT[C]//KULCHIN Y N, VITRIK O B, STROGANOV V I. Khabrovsk, Russia. Khabrovsk, 2005: 147-162.

- [23] Li H, Liu Z Q, Li Z W, et al. Study on Damage Emergency Repair Performance of a Simple Beam Embedded with Shape Memory Alloys[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(6): 495-502.
- [24] Park S, Ahmad S, Yun C B, et al. Multiple Crack Detection of Concrete Structures Using Impedance-based Structural Health Monitoring Techniques[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(5): 609-618.
- [25] Inada H, Okuhara Y, Kumagai H. Experimental study on structural health monitoring of RC columns using self-diagnosis materials[C]//LIU S C. *Smart Structures and Materials*. San Diego, CA, 2004: 609.
- [26] 张伟刚, 梁龙彬, 赵启大, 等. 光纤光栅与电阻应变片应变测量的对比分析[J]. *传感技术学报*, 2001(3): 200-205.
- [27] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(4): 871-906.
- [28] Shin S W, Qureshi A R, Lee J Y, 等. Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete[J]. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(5): 055002.
- [29] 郑合营. 基于压电智能骨料的混凝土结构损伤主动监测研究[D]. 大连理工大学, 2017.
- [30] Lau K tak, Chan C chiu, Zhou L min, et al. Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32(1): 33-45.
- [31] Hou S, Cui L, Xu X. A piezoelectric-based three-direction normal stress sensor for concrete structures[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, 30(12): 1858-1867.
- [32] Zhang H, Hou S, Ou J. Smart aggregates for monitoring stress in structural lightweight concrete[J]. *Measurement*, 2018, 122: 257-263.
- [33] 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*, 2017, 17(2): 256-260.
- [34] Yan S, Sun W, Song G, et al. Health monitoring of reinforced concrete shear walls using smart aggregates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(4): 047001.
- [35] Zhang H, Li J, Kang F. Real-time monitoring of humidity inside concrete structures utilizing embedded smart aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 331: 127317.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Jang S D, Kang B W, Kim J. Frequency selective surface based passive wireless sensor for structural health monitoring[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 025002.
- [39] Tata U, Huang H, Carter R L, et al. Exploiting a patch antenna for strain measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(1): 015201.
- [40] Xu X, Huang H. Multiplexing wireless antenna sensors for crack growth monitoring[C]//TOMIZUKA M. *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. San Diego, California, USA, 2011: 798144.
- [41] Mohammad I, Huang H. Shear sensing based on a microstrip patch antenna[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 105705.
- [42] 周凯, 刘志平, 毛艳飞, 等. 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(1): 136-143.
- [43] Ban-Leong Ooi, Shen Qin, Mook-Seng Leong. Novel design of broad-band stacked patch antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(10): 1391-1395.
- [44] Xue S, Yi Z, Xie L, et al. Double-frequency passive deformation sensor based on two-layer patch antenna[J].
- [45] 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*, 2021: 147592172110556.
- [46] 吕国辉, 周泊宁, 王朝钲, 等. 基于椭圆位移放大结构的光纤光栅位移传感器[J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 15-20.
- [47] Li R, Tan Y, Chen Y, et al. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 199-206.
- [48] Liu M, Wang W, Song H, et al. A High Sensitivity FBG Strain Sensor Based on Flexible Hinge[J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1931.

-
- [49] Tsao C C, Tseng Y C, Chen Y S, et al. Precision Low-Cost Compact Micro-Displacement Sensors Based on a New Arrangement of Cascaded Levers with Flexural Joints[J]. *Sensors*, 2022, 23(1): 326.
- [50] Shu Q, Wu L, Lu S, et al. High-sensitivity structure based on fiber Bragg grating sensor and its application in nonintrusive detection of pipeline pressure change[J]. *Measurement*, 2022, 189: 110444.
- [51] 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(1): 49-55.
- [52] Xue S, Xu K, Xie L, 等. Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085012.
- [53] 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.
- [54] Li X, Xue S, Xie L, et al. Simultaneous crack and temperature sensing with passive patch antenna[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023: 14759217231184115.
- [55] 李宪之. 基于贴片天线的多参数感知无源智能骨料[D]. 同济大学, 2023.
- [56] 吕文俊;何华斌. 简明天线理论与设计应用[M]. 人民邮电出版社, 201406.
- [57] Pozar D M. Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(2): 49.
- [58] Lobontiu N. *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*[M]. 2nd ed. Second edition. | Boca Raton : CRC Press, 2021.: CRC Press, 2020.
- [59] Balanis C A. *Antenna theory: analysis and design*[M]. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [60] Qiusheng L, Hong C, Guiqing L, et al. Analysis of Free Vibrations of Tall Buildings[J].
- [61] Tedesco J W, Krauthammer T. *STRUCTURAL DYNAMICS*[M].

致谢

在写完论文初稿后的五月，每次午后骑车经过篮球场前的林荫道时，阳光透过新长出的绿叶照在我身上，共享单车发出吱呀吱呀的声音，我才有了一种“在同济不知不觉已经呆了七年了，马上就要离开了”的感觉。

时常感叹硕士三年如此之短暂而平淡，可能是因为疫情，可能是因为每一年在已经活过的年岁中所占的比例越来越小。但总体而言，不管是在科研上还是生活上，我必须说这三年是幸运而又快乐、充满感激的。

感谢我的导师谢丽宇老师。谢老师治学严谨，才思敏捷，兢兢业业，平易近人，风趣幽默。在我大四进入课题组时，谢老师就给予了我许多指导与帮助，带我逐步进入到了交叉学科课题的研究。在三年里，谢老师在我课题遇到困难的时候，谢老师总是鼎力相助：在实验上遇到困难，谢老师会帮我协调实验设备与资源；课题进展不顺，谢老师总能以敏锐的直觉为我指点迷津。不管是在学术上还是生活上，谢老师都是我学习的榜样。再次真诚感谢谢老师这三年的帮助！

感谢教研室薛松涛老师和唐老师以及电信学院的万老师。薛松涛老师是和泉教研室的发起人，有着极高的学术造诣，对我们关爱有加，犹记疫情时薛老师对我们的各种关心与疏导。唐老师知识渊博，对前沿的计算机技术有着独到的见解，我要向唐老师学习这种不断学习的精神。万老师在天线领域造诣颇深，乐于助人，在我进行小论文实验期间，万老师直接将我的人脸加入实验室的门禁，由此才有了实验的顺利进行。

感谢我的师兄易卓然。很难用语言表达我对易卓然师兄的感激之情。研一时，易卓然师兄深入浅出地让我理解了天线传感器，还积极为我规划小论文的撰写计划；研二实验遇到瓶颈时，易卓然师兄在日本远程用视频指导我进行实验，在小论文的撰写中也提出了非常宝贵的建议。真心感谢易卓然师兄对我的帮助，衷心祝愿易卓然师兄能够事业顺利，在科研的道路上越走越远。

感谢姜康师兄、夏子涵师兄、廖洋洋师兄，三位博士师兄在我的科研上的帮助数不胜数，小到论文撰写，大到思路创新，三位博士师兄总是用最切身的经验给予我指导。实在不好意思总是麻烦三位博士师兄一些浅显易懂的问题，希望大家都能顺利快乐地毕业。

感谢 506 的同门史钦豪、庞琳、杜宇坤、范永瑞琛、张文静、赵锦桐、龙盼、丁宁、纳米、马利特。如果以后回想起在和泉实验室里和你们一起的时光，那一定是会开心地笑出来的。光是能和你们做同门这件事，想想就觉得赚到啊。

祝福大家未来都能够顺顺利利。

感谢教研室的陈千禧师妹、陈雪岩师弟、李度师弟、李泽宇师弟、宋梦贤师弟、王郝丽师妹、杨梓健师弟、张嘉慧师妹。没有你们，就没有欢乐的506，有你们在的506相信会越来越热闹，越来越好。

感谢我的师弟王梓旭。十分感谢师弟在我的毕业课题实验中倾力相助，没有师弟的帮助，实验可能真的没法进行得这么顺利，希望师弟能够早日投中IOT。

感谢电信学院的胡靖雯、姜子呈。感谢两位同学对我实验上的帮助，教会了我如何手搓天线。希望两位在工作中一切都好。

再感谢一下小范。希望未来你能继续保持对音乐、足球的热爱，组到能够发挥你的天分的乐队。可惜了今年没有机会参加校园音乐节了，希望我们未来还有机会一起演出。

感谢我的女朋友林旖。在一起的快四年，异地也快四年。和你一起走过的日子总是这么的幸福，祝愿我们未来一切顺利，所得皆所愿。

感谢我的父母和姐姐。你们是我求学路上最坚实的后盾，养育之恩难以言说。

在同济呆了七年，也该离开进入人生的下一阶段了。我不是一个很擅长表达的人，但我发自内心地希望大家都能成为自己想成为的人。

个人简历、在读期间发表的学术成果

个人简历:

吴通海, 男, 1999 年 8 月生。

2021 年 7 月毕业于同济大学土木工程专业获学士学位。

2021 年 9 月入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] Xie L, Wu T, Yi Z, 等. Passive Accelerometer Using Unstressed Patch Antenna Interrogated by FMCW Radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(15): 16672 – 16682.

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《基于贴片天线的混凝土高灵敏度无源无线智能骨料》，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

同济大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；允许论文被查阅和借阅。学校有权将本学位论文的全部或部分内容授权编入有关数据库出版传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于（在以下方框内打“√”）：

☐ 保密，在_____年解密后适用本授权书。

☐ 不保密。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日