同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

**硕士学位论文**

**(专业学位)**

# 温湿度环境对贴片天线及周围介质的影响规律研究

(国家自然科学基金面上项目
No. 52078375,52178298, 52378311)

姓　　名：庞琳

学　　号：2132258

学　　院：土木工程学院

学科门类：工学

一级学科：土木工程

二级学科：结构工程

研究方向：结构健康检测

指导教师：薛松涛

副指导教师：谢丽宇

二〇二四年五月

同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

# Multi-Parameter Influence Study on Patch Antennas and Surrounding Media in Temperature and moisture environments

(Supported by Natural Science Foundation of China
No. 52078375, 52178298, 52378311)

Candidate: Lin Pang

Student Number: 2132258

School/Department: College of Civil Engineering

Categories: Engineering

First-level Discipline/Degree: Civil Engineering

Second-level Discipline/Degree's Field: Structural Engineering

Research Fields: Structural Health Monitoring

Supervisor: Songtao Xue

Associate Supervisor：Liyu Xie

May, 2024

温湿度环境对贴片天线及周围介质的影响规律研究

庞　琳

同济大学

# 摘要

本研究针对混凝土环境中嵌入式传感器的电磁性能表现进行了深入探究，特别关注环境温度与湿度变化对传感器有效介电常数和谐振频率的影响。在智能建筑和基础设施的监测系统中，准确掌握嵌入式传感器的性能对于确保结构健康监测的可靠性至关重要。混凝土作为一种多孔介质，其内部的传感器会受到环境温度和湿度的直接影响，进而影响传感器的谐振特性和信号传输效率。

微带矩形贴片天线传感器可以结合 RFID 技术等应用在混凝土内部实现无源无线传感的目标，其多参数传感原理主要是在不同的温度或者湿度以及变形时，会产生较为线性的谐振频率偏移。贴片天线的谐振频率主要有等效电长度和等效介电常数来决定，这两个等效参数都是前人在理论结合试验数据进行拟合的经验公式。一方面，等效电长度的理论公式是贴片天线在空气层中的电场线映射理论及实验得到，并没有现成的贴片天线嵌入混凝土类似介质的理论公式和实验数据；另一方面，等效介电常数的理论公式也应该考虑矩形贴片上覆混凝土材料的多层介质结构，因此准确测量混凝土在不同环境下的有效介电常数也变得不可或缺。

研究首先基于波导传输理论，通过矩形波导腔实验在多个环境参数下，分别测试了水泥砂浆试块和混凝土试块的介电特性。通过精确测量不同温度和湿度条件下的介电常数与介质损耗，建立了混凝土介电特性与环境因素的数学模型。这些材料的电磁模型进一步输入到高频电磁场仿真软件 ANSYS HFSS 19 中，以模拟和评估环境因素变化对混凝土中嵌入式传感器谐振特性的影响。仿真结果揭示了温度和湿度对介电常数和贴片天线谐振频率的线性规律，并通过实验对仿真模型进行了验证。

进一步地，设计了两个体系的有限元仿真模拟和对应试验，一个是上覆水泥试块的贴片天线在不同温度、不同湿度和温湿度同时变化的条件下，探究谐振频率随温湿度的规律；另一个是将贴片天线埋置于养护期间、不同水灰比、不同温度、不同湿度以及不同温湿度的混凝土标准试块中，探究谐振频率与养护时间、力学性能以及温湿度等环境参数之间的关系。

接下来，基于波导的实验数据，将不同温湿度下的混凝土介电常数以及温度对贴片天线本身的影响结果，利用基于保角映射理论的三层介电结构的等效介电常数理论计算出理论上等效介电常数的精确值，再将受温湿度影响的五组变量 32 个水泥试块数据和 75 个混凝土试块数据，分别在 HFSS 软件的脚本中自动化运行这 107 组数据，得到这 107 个基于实验数据样本的回拨损耗曲线，通过提取谐振频率，可以对嵌入式矩形贴片天线的谐振频率经验公式进行参数修正。

另外，将贴片天线的在不同的温湿度下的环境中的实验测量结果与仿真模拟软件的结果进行对比分析，分析基于波导实验数据的模拟仿真实验与真实的同条件实验结果之间的误差原因。并进一步结合谐振频率的理论结果、模拟仿真结果以及实验结果，总结谐振频率与温湿度环境变量的理论关系。

最后，研究成果不仅提供了混凝土中埋置天线性能对环境变化的响应特性，还为传感器设计和结构健康监测系统的优化提供了理论依据和实践指导。通过本研究建立的基准和模型，工程师和研究人员可以更有效地进行温度和湿度的实时监测与补偿，从而实现对建筑和基础设施健康状况的精确判断，保障其长期的稳定运行与安全。

**关键词：**温湿度，贴片天线传感器，混凝土，波导，介电常数，谐振频率

# ABSTRACT

This study delves into the electromagnetic performance of embedded sensors in concrete environments, focusing particularly on how changes in ambient temperature and humidity affect the sensors' effective dielectric constant and resonance frequency. Accurately understanding the performance of embedded sensors is crucial for ensuring the reliability of structural health monitoring systems in smart buildings and infrastructure. As concrete is a porous medium, the embedded sensors within are directly influenced by environmental temperature and humidity, affecting their resonant characteristics and signal transmission efficiency.

The study utilizes microstrip rectangular patch antenna sensors combined with RFID technology for passive wireless sensing within concrete. The principle of multi-parameter sensing is primarily based on relatively linear shifts in resonant frequency in response to variations in temperature, humidity, and deformation. The resonant frequency of the patch antenna is determined by the equivalent electrical length and effective dielectric constant, both parameters previously derived through empirical formulas from theoretical and experimental data. On one hand, the theoretical formula for equivalent electrical length, based on field line mapping theories and experiments in air layers, lacks corresponding theoretical formulas and experimental data for patch antennas embedded in concrete-like media. On the other hand, the theoretical formula for the effective dielectric constant should consider the multilayer medium structure of the concrete material covering the rectangular patch, making it essential to measure the effective dielectric constant of concrete under various conditions accurately.

Initially, the research is based on waveguide transmission theory, where the dielectric properties of cement mortar and concrete blocks are tested under various environmental parameters using a rectangular waveguide cavity experiment. By measuring the dielectric constant and medium loss under different temperatures and humidity conditions, a mathematical model correlating concrete dielectric properties with environmental factors is established. These electromagnetic models of the materials are further input into the high-frequency electromagnetic field simulation software ANSYS HFSS 19 to simulate and evaluate the impact of environmental factor variations on the resonant characteristics of sensors embedded in concrete. Simulation results reveal the linear rules of temperature and humidity impacts on the dielectric

constant and patch antenna resonant frequency, with experimental validation of the simulation models.

Further, two systems of finite element simulations and corresponding experiments are designed. One investigates the resonant frequency patterns with temperature, humidity, and their simultaneous changes in patch antennas covered with cement blocks. The other explores the relationships between resonant frequency, curing time, mechanical properties, and environmental parameters such as temperature and humidity in concrete standard blocks embedding patch antennas.

Subsequently, based on waveguide experimental data, the effective dielectric constants under different temperatures and humidity conditions and the impact of temperature on the patch antenna itself are calculated using the conformal mapping theory for a three-layer dielectric structure. These calculations precisely determine the theoretical effective dielectric constants. Then, using HFSS software's scripting capabilities, these 105 experimental data samples, including 31 cement block datasets and 74 concrete block datasets affected by temperature and humidity, are run to generate return loss curves. By extracting the resonant frequency, the empirical formula for the embedded rectangular patch antenna's resonant frequency is revised.

Moreover, the experimental measurement results of the patch antenna under various temperature and humidity conditions are compared with the simulation results from the software. The study analyzes the discrepancies between waveguide-based simulation experiments and real experiments under the same conditions. It further integrates the theoretical results, simulation outcomes, and experimental findings to summarize the theoretical relationships between resonant frequency and environmental variables.

In conclusion, the research not only provides insights into the response characteristics of antennas embedded in concrete to environmental changes but also offers theoretical foundations and practical guidance for sensor design and optimization of structural health monitoring systems. With the benchmarks and models established through this research, engineers and researchers can more effectively monitor and compensate for temperature and humidity in real-time, thus accurately assessing the health status of buildings and infrastructure to ensure their long-term stability and safety.

**Keywords:** Temperature and Moisture, Patch Antenna Sensor, Concrete, Waveguide, Dielectric Constant, Resonance Frequency

# 目录

摘要.....I
ABSTRACT.....III
第 1 章 引言.....1
1.1 概述.....1
1.2 文献综述.....3
1.2.1 环境对贴片天线传感器的影响规律研究进展.....3
1.2.2 混凝土微波无损监测电磁性能研究进展.....5
1.2.3 矩形贴片天线多层介电材料的等效介电常数理论发展.....6
1.2.4 贴片天线在混凝土中的封装形式.....8
1.3 本文研究目的及意义.....9
1.4 研究内容及技术路线.....10
1.5 本文主要研究内容.....12
第 2 章 介质覆盖贴片天线传感器工作原理.....13
2.1 电磁学基本理论和天线分析方法.....14
2.1.1 麦克斯韦方程.....14
2.1.2 传输线理论.....16
2.1.3 谐振腔模型理论.....18
2.2 微带天线电磁特征参数及传感原理.....21
2.2.1 天线电磁特征参数.....21
2.2.2 矩形贴片天线传感原理.....23
2.2.3 传输散射参数.....25
2.3 贴片天线谐振频率计算及影响因素分析.....26
2.3.1 单片式贴片天线传感器.....26
2.3.2 偏心馈电贴片天线传感器.....27
2.3.3 温度对贴片天线谐振频率的影响.....28

2.3.4 周围介质环境对微带天线电磁波的影响.....31
2.4 多层介质覆盖矩形贴片传感器的谐振频率.....32
2.4.1 多层介质材料有效介电常数理论研究.....32
2.4.2 考虑温湿度对贴片天线上覆介电材料的多层介电模型探究.....34
2.4.3 考虑温湿度对多层介电结构谐振频率的理论公式.....35
2.5 本章小结.....36
第 3 章 微波测量混凝土材料介电常数方法.....37
3.1 波导法测量介电常数.....37
3.1.1 混凝土介电常数的概念.....37
3.1.2 矩形波导试验原理.....38
3.1.3 矢量网络分析仪及硬件校准.....39
3.1.4 样品安装.....41
3.1.5 S 参数测量并计算相对介电常数.....42
3.1.6 波导有限元模拟.....43
3.2 测量水泥试块介电常数的波导实验.....44
3.2.1 不同温度对水泥电磁性能的影响.....44
3.2.2 不同含水率对水泥电磁性能的影响.....45
3.3 测量混凝土试块介电常数的波导试验.....48
3.3.1 混凝土养护期的电磁参数监测.....48
3.3.2 不同水灰比对混凝土电磁性能的影响.....49
3.3.3 不同温度对混凝土电磁性能的影响.....50
3.3.4 不同含水率对混凝土电磁性能的影响.....53
3.3.4 混凝土电磁性能和力学性能相关性分析.....55
3.4 本章小结.....56
第 4 章 上覆水泥的贴片天线的环境参数感知.....57
4.1 引言.....57
4.2 天线设计.....58
4.2.1 基板厚度对天线探测层的敏感性优化.....59

4.2.2 矩形贴片横向和纵向尺寸的优化.....60
4.2.3 综合考虑对温度的敏感性对介电基板材料的优化.....61
4.2.4 考虑天线上覆水泥层厚度时的参数优化.....62
4.3 上覆水泥试块的贴片天线有限元模拟.....65
4.3.1 有机玻璃盒及不同空气层厚度对贴片天线电磁参数的影响.....65
4.3.2 不同上覆水泥材料介电常数对贴片天线电磁参数的影响.....67
4.3.3 温度对基板和上覆水泥对贴片天线电磁参数的综合影响.....70
4.3.4 不同湿度水泥对贴片天线电磁参数的影响.....73
4.3.5 探究温湿度同时变化时贴片天线的电磁参数变化.....74
4.4 实验探究.....76
4.4.1 温度对基板和上覆水泥对贴片天线电磁参数的综合影响.....77
4.4.2 不同湿度水泥对贴片天线电磁参数的影响.....78
4.4.3 贴片天线对温湿度同时变化的水泥试块的电磁参数感知.....78
4.5 本章小结.....81
第 5 章 埋置于混凝土中贴片天线的多参数感知.....83
5.1 引言.....83
5.2 埋置于混凝土的贴片天线有限元模拟.....84
5.2.1 亚克力封装和空气层厚度的分析.....84
5.2.2 温度对基板和混凝土对贴片天线电磁参数的综合影响.....85
5.2.3 不同湿度的混凝土对埋置贴片天线电磁参数的影响.....88
5.3 养护期间对混凝土的状态检测.....89
5.3.1 固定天线传感器与浇筑混凝土试块.....89
5.3.2 贴片天线对养护期间混凝土的电磁参数监测.....90
5.4 温度对埋置于混凝土的贴片天线的影响分析.....92
5.4.1 贴片天线对不同温度的空气环境的电磁参数实测.....92
5.4.2 贴片天线对不同温度的混凝土环境的电磁参数实测.....92
5.4.3 温度仿真和实验数据对比分析以及误差分析.....94
5.5 湿度对埋置于混凝土的贴片天线的影响分析.....96

5.5.1 贴片天线对不同湿度的混凝土环境的电磁参数实测.....96
5.5.2 湿度仿真和实验数据对比分析以及误差分析.....99
5.6 温湿度变化时对贴片天线及埋置于混凝土贴片天线的影响.....100
5.6.1 试验探究温湿度同时变化时对贴片天线的影响.....100
5.6.2 试验探究温湿度同时变化时对埋置于混凝土的贴片天线的影响.....102
5.7 本章小结.....105
第 6 章 基于实验修正等效介电常数与谐振频率公式.....107
6.1 基于实验数据计算三层介电结构的等效介电常数.....107
6.2 结合等效介电常数与仿真模拟结果修正谐振频率.....110
6.2.1 协方差矩阵自适应策略算法.....110
6.2.2 修正谐振频率的参数.....111
6.3 基于实验数据拟合温湿度影响规律.....116
6.4 本章小结.....120
第 7 章 结论与展望.....123
7.1 结论.....123
7.2 实现温湿度解耦的智能骨料展望.....124
参考文献.....126
致谢.....131
个人简历、在读期间发表的学术成果.....133

# 第1章 引言

## 1.1 概述

混凝土是仅次于水的地球上第二广泛使用的材料，其应用涵盖了从公路、桥梁到高速铁路等多种交通基础设施。随着时间的推移，混凝土结构可能会出现各种结构性缺陷，如空洞、分层或排水不良等，这些都会对结构的完整性和耐久性构成威胁[1]。因此，为了维护和提高结构的安全性与可靠性，监测诸如温度、湿度和应变等关键参数[2, 3]，成为了理解结构当前状态、及时发现潜在安全问题并采取相应保护措施的关键。

为了确保混凝土的耐久性和强度，研究者开发了多种测试技术。其中，快速氯离子渗透测试、冲击测试、吸水测试和抗压强度测试等破坏性方法[4]，特别适合于建筑施工期间的质量控制。这些测试更多地关注材料的供应质量而非已建成的结构。相比之下，现场非破坏性测试（NDT）如超声波[5]、脉冲热成像[6, 7]、探地雷达[8-13]和冲击回声法等，不仅操作简便、节省时间和材料，而且能够在同一位置对同一材料进行重复测试，有效监测随时间的变化[14]。微波非破坏性检测（MNDT）可以被归类为一种独特的技术，与 NDT 方法相比，它具有即时测量、结果简洁快速、能耗低且具有对于非金属材料良好的穿透能力[15]。混凝土的微波非破坏性检测是混凝土检测领域的一个创新分支，专注于利用微波技术探测混凝土中的缺陷、水分和不均匀性[16, 17]。MNDT 方法中，可以通过测量介电常数、损耗因子、反射系数和透射系数等参数，并结合适当的建模和校准技术，准确地评估混凝土结构的状况[18]。

随着结构健康监测技术的不断发展，越来越多的新型传感技术应用于土木工程结构的关键参数的监测，如光纤传感器[19]，基于光纤布拉格光栅的应变传感器[20]，基于压电材料的混凝土智能骨料[21]，基于电化学的钢筋腐蚀监测传感器[22]。但传统的大规模传感器网络部署通常涉及铺设长电缆，为每个传感器供电并收集数据，这种方法的高昂成本、安装难度和维护需求很难证明其相对于手动数据收集的优势。通过消除传统传感器中的电线，无线传感器网络（WSN）[23]不仅降低了成本，而且安装更为简便，这使得我们能够收集大量数据，极大地增强了对周围环境的了解[24]。

这些植入于混凝土内部的新型传感器可以更方便地采集混凝土内部各种参数，是新一代混凝土传感器的发展方向。目前，常用的混凝土智能骨料形式为基

于压电材料的智能骨料[25]，压电材料包括压电陶瓷与压电高分子材料等。压电材料具有正压电效应与逆压电效应，当压电材料受到应力或应变作用时，它会产生电荷；而当有电场作用于压电材料的极化方向时，压电材料也会产生应力或应变。因此压电材料既可以作为传感器对应力应变等进行监测，又可以作为一种驱动元件产生激励波。

射频识别(RFID，Radio Frequency Identification)传感技术是近年来迅速发展起来的一项新型传感技术[26, 27]，由于其低成本、无线和“传感友好”的能力[28]，基于 RFID 技术的大规模无线传感器被广泛应用于土木工程结构的健康监测[29]。微带天线作为一种传输线技术，其体积小巧、重量轻、易于制造且成本效益高，因此微带天线适合埋置于混凝土内部，以实现基于对混凝土内部变量进行感知的 RFID 传感器。

微带贴片天线的谐振频率取决于有效介电常数和辐射贴片的物理尺寸。这两个参数都与周围环境如温湿度和应变有关。如结构应变会影响贴片天线的尺寸，温度会改变基板材料介电常数和天线的热膨胀变形，而湿度和氯离子浓度等会影响周围混凝土环境的介电常数和电导率等，这些因素会导致温湿度变化时耦合影响传感天线的电磁特性，进而使其谐振频率等特征参数发生改变。因此，需要对混凝土内部的温湿度等环境参数进行同步感知，通过温湿度补偿机制对应变等监测量进行修正，从而实现混凝土内部多参数的准确感知。

在本研究中，通过波导法精确测量混凝土的介电常数，并系统地研究了温度和含水率单独变化时，以及两者同时变化时对水泥基材料以及混凝土材料介电常数的影响，旨在实现对外部环境因素的精确感知及其解耦。利用温湿度敏感材料作为感知单元，设计了一种无源无线的偏心馈电天线传感器，专门用于独立监测环境的温度和湿度。通过理论推导、HFSS 仿真模拟与实验验证相结合的方法，确认了该传感器在环境监测方面的准确性和可靠性。这项研究对于提高土木工程结构健康监测系统的智能化和精确性提供了新的视角和工具。

## 1.2 文献综述

### 1.2.1 环境对贴片天线传感器的影响规律研究进展

结构健康监测（SHM）是指于对于航空、土木和机械工程基础设施实施损伤诊断和识别策略的过程，结合当前的传感器技术、无线通讯、数据处理技术以及人工智能的进步，导致更加智能化、更低成本以及更强预见性的结构健康监测技术不断发展。微带贴片天线传感器成为一项重要技术，它具有制造成本低、体积小巧、实时无线功能等优点[30]。

近年来，有学者对埋置于混凝土内部的传感器进行了广泛研究，并设计了多种用于混凝土内部参数监测的传感器。主要针对以下几个环境变量：温湿度、氯离子浓度以及结构应变等。气候相关因素，如温度和湿度，长期以来一直被认为是土木工程中的关键因素，在设计和构建新的混凝土结构以及不同地区现有结构的健康监测中发挥作用。温度和湿度的强度随时间变化，并且对包括设计载荷、混凝土养护时间以及结构的寿命和性能在内的多个结构参数有着重要影响[31]。应力和应变在结构设计方面是两个重要的力学属性，混凝土结构在其使用寿命期间可能会经历极端的荷载及气候条件，会导致结构开裂或者产生变形，最终导致混凝土锈蚀、劣化甚至结构破坏[1]。

在混凝土内部的应变以及裂缝监测方面，由于天线谐振频率与天线尺寸直接相关，当结构表面发生应变时天线尺寸会变形，因此变形或应变可以与 RFID 读取器测量的天线谐振频移相关联，Yi 等人[32]设计了一种用于无线应变和裂纹传感的开槽贴片天线传感器。Xue 等人[33]提出了一种无应力贴片天线的裂纹传感器，通过改变矩形辐射贴片和被辐射子贴片的重叠长度作为裂缝宽度，进而形成谐振频率的偏移。Wan 等人[34]通过测试，发现矩形贴片宽度方向的变形对灵敏度的影响可忽略，而天线长度方向的应变与谐振频率的偏移之间有良好的线性关系。

在温度监测方面，David[35]等人提出了一种由时码无芯片标签构成的传感器，它结合了超宽带天线和一个连接有电阻式温度传感器的延迟线。该传感器能够根据温度变化调整反射信号的幅度，实现了高温度传感精度，其中，利用矢量网络分析仪（VNA）达到了 97%的精确度，而使用雷达读取器则实现了 85%的精确度。Yan [36] 提出基于氮化铝的贴片天线式高温无源无线传感器，能同时作为传感器和天线使用，实现了现场测量/感应与远程无线通信的集成，但是灵敏度只有 104.77 KHz/℃。Cheng[37]提出了基于反射贴片的无源无线温度传感器，传感机制是利用氧化铝作为衬底材料，高频段超高温条件下其介电常数随着温度单调增加[38]，从而降低贴片天线的谐振频率来传感温度。1050℃时灵敏度达到 0.58

MHz/℃，但未考虑传感器在高温下热膨胀进而产生的误差。Fu 和 Yang[39]提出了基于 RFID 芯片并集成温度热开关的带缝隙贴片天线，通过周围环境的温度改变天线的谐振频率。但热敏开关造成的频率偏差仅为 34MHz,可监测的温度敏感性较差。Sanders 等人[40]研究了温度对微带天线谐振频率偏移的影响，分为基板材料的介电常数和衬底材料的热膨胀系数，然而由于假设金属衬底和基板相同的热膨胀，忽略了不同材料之间的变形差导致了理论预测与实测值之间差异较大。Tchafa 和 Huang[41]开发了一种能够同时进行温度感应和基板介质厚度测量的双频微带贴片天线，实现对上覆层材料的温度和厚度进行测量。Li 等人[42]为实现天线传感器对裂纹和环境温度的同步感知，提出了一种偏心馈电复合式贴片天线。利用横向谐振频移识别温度，并对纵向识别裂纹宽度实现温度补偿。该天线传感器适用于进行多参数感知，但复杂的结构难以埋入混凝土结构内部感知裂缝。

在湿度传感方面，Cheng 等人[43]开发了矩形、圆和方形三种贴片微带天线通过频率偏移来感知水中盐和糖的含量。Borgese 和 Francesco[44]提出基于有限人工阻抗表面的无芯片 RFID 湿度传感器，在相对湿度从 50％变化到 90％的过程中，频率偏移 270 MHz。Teng 等[45]介绍了一种用于非破坏性评估混凝土块中的水分含量的智能天线的新型传感技术，利用含水率降低时信号频谱分贝绝对值增加作为混凝土含水率传感的机理。Guerra 等人[46]提出了一种新的非破坏性微波系统，用于测量空心混凝土块的水分含量，该系统使用频率选择性表面（FSS）作为传感器元件，传输系数同样是通过谐振频移与相对湿度的比值来确定。Dhingra 等人[47]设计了多阶谐振频率微带天线用于土壤中的含水率测量。

由于温度-时间以及湿度-时间演化是监测混凝土凝结过程的众所周知的指标，因此出现了通过对温度和湿度的感知来监测混凝土凝结过程的研究。Giselle 等人[48]提出了一种基于 RFID 技术的水泥材料凝固过程的无线测量系统，主要由嵌入混凝土中的无线 RFID 温度传感器和外部 RFID 读取器组成。Z. Yi 等人[49]首次开发了一种专门用于监测水泥凝固时间的贴片天线，填补了实时监测的空白，但该天线仍易受温度等环境因素的影响。随后，通过引入带有多个矩形开口的开槽贴片天线，他们显著提高了传感器的灵敏度和频率变化范围[50]。

当微带天线传感器被部署用于监测混凝土状态时，即将其嵌入另一种介电材料中，这与微带天线放置在空气中的情况完全不同，混凝土环境会改变传感器电场线的传播路径，并导致等效介电常数的变化。因此，想要利用微带天线的电磁参数来表征温湿度变量，必须先探究温湿度与混凝土自身介电常数的关系，进而通过有效介电常数的多层介电模型计算方法，从理论上确定温湿度与微带天线的谐振频率之间的线性或非线性关系，再与试验结果进行对比评估结果的可行度，进一步利用数据处理方法来解耦温湿度的影响。

### 1.2.2 混凝土微波无损监测电磁性能研究进展

混凝土的性能主要由其强度、耐久性、耐热性等决定，而这些性能受各种参数的影响，例如水灰比、骨料尺寸、水泥种类、温度、孔隙率以及相对湿度和养护条件等[51-53]。近年来，采用不同的 MNDT 方法，以混凝土或水泥作为测试材料（MUT）探究其电磁性能，进而建立与混凝土力学性能和耐久性之间的关系，实现对混凝土的状态评估与预测。

微波技术可以对混凝土材料养护状态进行精确评估和监测。Bois 等人[16]使用 5 GHz（Q 波段）和 10 GHz（X 波段）向波特兰水泥基材料辐射的开放式矩形波导探头的反射特性，确定波特兰水泥基材料的固化状态和水泥比。Nawarat 等人[54]用平面同轴探针探究含稻壳灰混凝土的介电性能，用于水化状态监测、含水量测定以及抗压强度与龄期的关系探究。Shen 等人[55]出了一种利用探地雷达和非接触式电阻率仪监测水泥基材料水化过程并预测其强度发展的无损检测方法。

混凝土的电磁特性还被用于做材料组分、含水率以及抗压强度的预测。Soutsos 等人[56]分析了具有不同强度的混凝土、含有粉煤灰（PFA）和粒状高炉矿渣（GGBS）的混凝土，以及加入钢纤维的混凝土的介电特性；此外，还分析了环境因素（如湿润和干燥循环及温度变化）以及混凝土的潜在缺陷（如蜂窝状结构和高盐分区域）对介电特性的影响。Yu[57]研究水化水泥浆的介电性质（介电常数和损耗因子）如何受到水泥比（w/c 比）的影响。Guihard 等人[58]开发了一个电磁模型，用于改进从水泥浆介电常数到水分含量的转换。通过合成水泥粘结剂，使用开放式同轴探针测量其介电常数，并通过特定均质化程序确定内在介电常数。研究结果表明，模拟和实测的介电常数实部在不同水分含量下表现出良好的一致性。Liu 等人[59]同轴电缆法测试水泥的主要水化产物 C-S-H 的电磁特性，研究结果表明，水泥的介电常数和复杂磁导率在 2-18 GHz 频率范围内随着 C/S 比的增加相应减小。CHUNG 等人[60]使用开放式同轴探头，在 0.1 GHz 到 10 GHz 的频率范围内对具有四种水灰比混凝土进行了最初七天的损耗因子测量，结果表明可以通过有效电导率准确预测抗压强度。除此以外，微波无损检测方法也大量应用于钢筋混凝土内部做钢筋腐蚀、氯离子浓度、酸碱度等损伤识别[61-65]。

基本上，MNDT 方法分为远场的自由空间法和近场的波导法。前者通过使用聚焦喇叭透镜天线适用于远场区域[66]，并且是一种非接触式技术，可以通过测量电磁参数(如复磁导率和介电常数)来实现温度、水灰比和频率的函数。第二种方法是波导法，该方法采用开放式同轴线[67, 68]、微带线[45]、矩形波导[69]和腔谐振器[56]作为探头，适用于近场区域。这些方法可以评估各种各样的材料特性，以检测和测量混凝土中的间隙、水分泄漏、复合介电常数。

同轴探针法具有测量过程稳定，精度较高等特点。 Yu[57]应用了开放式同轴探针系统来确定水泥比例对介电常数和损耗因子的影响。Guihard 等人[58, 67]对水泥膏体进行了电磁特性分析，并开发了一个比传统的三相 Bruggeman 或 Maxwell-Garnett 模型更精确的电磁模型，预计将这一模型扩展应用于砂浆和混凝土的研究中，考虑到材料配方中骨料的影响。然而探针法在测量介电常数的范围上有限制，不适用于大面积的测量对象。而且同轴探针测试复杂且成本高昂，更适合于液体和气体介质而非像混凝土这样的固体材料。

波导法也在测量混凝土介电常数的试验中运用广泛，可以实现高精度测量、频率可选择性以及低损耗传输等优点，对比其他的 MNDT 检测方法，波导法的另一显著优势在于适用于固体测量，因此被应用于混凝土材料的电磁特性的测量。例如 Villain 等人[70]采用了同轴圆柱波导方法，显著地评估了钢筋混凝土结构的耐久性和机械性能。Gonzalez-Lopez 等人[71]利用矩形波导以及 Debye 模型拓展频率范围，研究了混凝土中的介电常数以及在碳纤维混凝土的除冰效果。尽管取得了这些进展，但在测量不同温度和湿度条件下混凝土的介电常数方面，波导技术的应用潜力仍有待充分挖掘。

本研究主要应用贴片天线进行温度和湿度来监测，但其中产生的耦合因素主要由混凝土的环境带来。为了执行准确的模拟和实证分析，深入理解温度和湿度如何影响混凝土的电磁属性至关重要。介电常数承担了中介角色，成为连接环境变量和贴片天线的响应变量的角色。拟采用矩形波导准确测量混凝土的介电常数，使得理论探索和实证验证多层结构中的有效介电常数成为可能，为贴片天线传感温湿度变量的监测和补偿机制做进一步的发展。

### 1.2.3 矩形贴片天线多层介电材料的等效介电常数理论发展

许多研究已经探讨了多层覆层或基板对贴片天线特性的影响，尤其是谐振频率。这其中，可以将问题按照介质材料的层数进行分类，分为贴片天线置于空气中(两层)和天线上覆特定介质材料（三层）以及上覆多层介质材料（多层），具体如下图 1.1 多层介质覆盖矩形贴片结构分类所示。

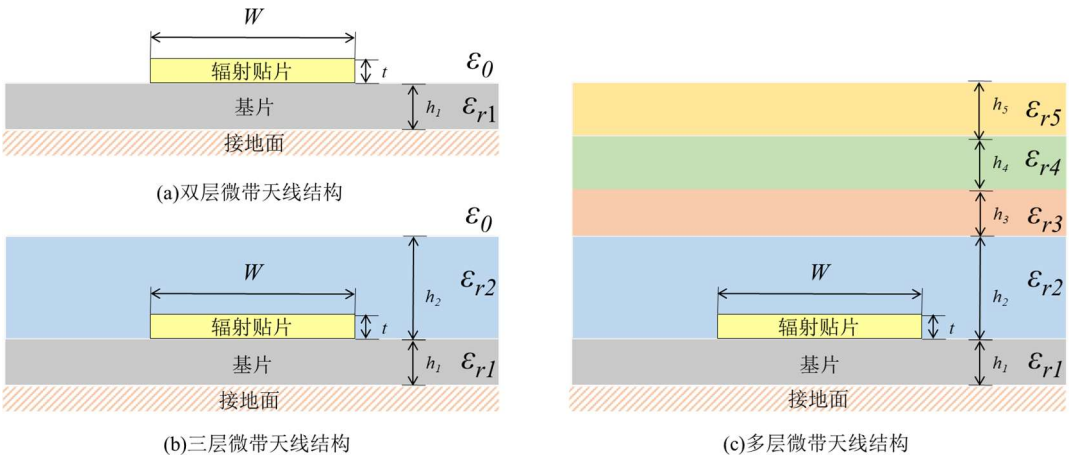



图 1.1 多层介质覆盖矩形贴片结构分类

在微波工程和天线设计的研究史上，不同的分析方法已被广泛研究和应用于解决多层介质覆盖的微带天线（MPA）问题。自 1960 年以来，众多研究人员通过各种理论框架对此类结构进行了深入探讨。在 1964 年和 1965 年，Wheeler[72, 73]通过保角映射对介质片上的对称条带导体或单条带与接地平面组成的传输线的特性进行了研究，这些导体和接地平面位于介质片的相对面。在他的近似方法中，Wheeler 讨论了介质常数、介质片和空间的有效介电常数、形状比以及全范围可能值的波阻抗之间的关系。此方法适用于导体是薄带并且介质插入件具有平面界面的情况。

利用傅立叶变换和变分技术，Yamashita 和 Mittra[74]在 1968 年为微带线的电容计算提出了一种方法。随后在 1971 年，Yamashita 和 Atsuki[75]进一步发展了厚微带线的分析方法，这涉及解决带电密度分布的积分方程以及应用格林函数来处理由于电介质和导体边界多重影像电荷问题而引发的边界条件。

到了 20 世纪 80 年代和 90 年代，其他方法如傅立叶变换法、频域方法以及边界元素方法被引入，提供了新的途径来处理微带天线设计的挑战。例如 Bahl 和 Stuchly[76]于 1980 年[77]利用傅立叶变换法研究了覆盖有损耗介电层的微带天线，探讨了介电覆盖层对天线特性的影响。

随着计算技术的发展，更为先进的有限元方法（FEM）被广泛应用于微波传输线的分析。Pozar[78]介绍了一种用于矩形微带天线元素的元素法解决方案，包括输入阻抗和相互耦合的计算，适用于多层电路板。这种方法严格应用了介电板的精确格林函数，从而准确考虑了表面波和相邻天线元素的耦合效应。Zorica[79]利用这一方法处理具有任意形状导体和非均匀介质区域的复杂传输线结构。FEM 的灵活性和通用性使其成为研究现代微波传输线的强大工具。

综合这些研究，看到微波传输线分析的演变历程，从早期的解析方法如保角映射，到变分法、傅立叶相关技术，再到边界元素法和有限元法，每种方法都为微波传输线设计的进步做出了贡献，同时也推动了微波传输线在通信系统中应用

的扩展。

Svacina[80, 81]运用保角映射法，简化了填充因子和多层微带线有效介电常数的分析关系，为微带传输线提供了新的解析方法。Shavit[82]则提出了一个理论模型来分析覆盖有任意介电常数基底的矩形天线，并通过模拟辐射边缘处磁偶极子的辐射，进一步推进了仿真技术。

Zhong[83]结合了广义传输线模型和保角映射法，预测了具有多层介电材料的矩形贴片天线的谐振频率，其工作成果充实了计算机辅助设计程序的应用。Bernhard[84]通过提出一个新颖的预测模型，使得在设计便携式无线设备时，可以更精确地集成具有多层介电基板的矩形微带天线。

Soliman[85]利用径向基函数神经网络提高了方法矩阵的填充效率，其创新的神经网络-方法矩阵（NN-MoM）为微带天线阵列的快速准确分析开辟了新途径。Makarov[86]提出的基于体积积分方程的建模方法，提升了贴片或槽天线建模的精确性和效率。

Yang[87]所展示的简单分析模型，成功验证了在多层介电结构的矩形贴片传感器谐振频率计算上的准确性。而 Lee[88]的工作通过非侵入式微波方法，利用互补分裂环谐振器，为多层介电结构的厚度和介电常数测量提供了新的视角。Dinesh[89]针对多层超层的微带天线开发了经验模型，通过保角映射提供了更精确的谐振频率预测方法。

### 1.2.4 贴片天线在混凝土中的封装形式

近年来，许多学者对混凝土中埋置天线的性能及其封装技术进行了深入研究。混凝土，作为一种电磁波传输的高损耗材料，对埋置其中的天线性能有显著影响。混凝土的电磁性能对嵌入式传感器的性能至关重要，主要原因是由于混凝土的高损耗和来自空气到混凝土界面的反射导致了射频波的大幅衰减[90]。研究表明电磁波在混凝土内的衰减随频率的增加而增加，并且水分和金属的存在也会增加电磁波的衰减，不同的钢筋直径与间距都会对天线的传输性能有不同的影响[91]。

为了探索混凝土环境中嵌入式天线和传感器的性能，Shams 等人[92]提出了由矩形微带贴片天线、微带馈源和保护壳等组成的混凝土嵌入式贴片天线模块。为了减少周围材料对嵌入式天线性能的影响，天线被封装在一个由丙烯酸制成的介质外壳内。混凝土作为一种介电常数可变的材料，当混凝土中的含水率等发生变化时，其介电常数也会发生变化，这些变化往往会导致埋置于其中的天线谐振频率产生偏移。研究表明，在贴片天线上部预留空气间隙可以有效地减少埋置环境（混凝土）对贴片天线谐振频率的影响，而天线下部的空气间隙对贴片天线的谐振频率影响可以忽略不计。Fallah[93]在混凝土环境中提出了一种新型的嵌入式

无线传感器，通过使用泡沫覆盖层，实现了天线增益的提高。Quinn[90]通过埋置具备温度和相对湿度测量功能的无线传感器，并使用 433 MHz 频段进行通信，将其嵌入混凝土中。通过模拟现场条件的测试，评估了混凝土本身、钢筋增强和钢背面模板对数据传输的影响。

基于此类技术的进步，Ramos 等人[94]开发了一种基于超宽带射频识别技术的无芯片混凝土成分传感器，通过探索混凝土的介电常数与其材料组成之间的关系，实验结果证实了使用 UWB 技术远程检测混凝土块中的混凝土和砂的混合物是可行的。Castorina 等人[95]设计了一种适用于混凝土结构无线监测的紧凑型贴片天线，引入一个保护的中间区域，通过构造具有适当介电常数的合适覆盖物，天线将对嵌入介质的介电常数变化表现出强大的性能稳定性。Zhou 等人[96]提出了一种基于超宽带射频识别技术的无线湿度传感器，在浇筑过程进行了预埋进混凝土中，但传感器的保护和耐用性并没有得到保证。Johann 等人[97]介绍了一种可以嵌入混凝土建筑构件的传感器系统概念，旨在测量混凝土中的温度和湿度，并监测钢筋的早期腐化迹象。Bhuiyan 等人[98]研究了在不同情景下，例如干燥的混凝土、新制的混凝土，以及在金属棒附近，向混凝土中嵌入式传感器进行近场无线电能传输的情况，研究显示，借助超薄（总厚度 1.2 毫米）高透磁率（相对透磁率=350）磁性材料的薄片，可以显著增加混凝土下围绕钢筋的传感器的无线电力传输。

## 1.3 本文研究目的及意义

本研究的目的是深入探究温湿度变量对贴片天线及其周围介质的影响规律，通过这些影响规律来指导无源无线混凝土智能骨料的设计和应用。研究聚焦于准确测量不同环境变量下影响谐振频率的各个中间变量，为内嵌于混凝土结构的贴片天线谐振频率理论提出参数修正。此外，混凝土的温度和湿度等对贴片天线的影响通过与高频仿真模拟以及实验测量，提出了线性拟合公式为贴片天线多参数的监测和规律探究提供了完整的数据基础。

此外，研究还旨在通过贴片天线和矩形波导的同步测量，来了解混凝土的电磁性能与其组成成分间的关系，并建立电磁性能与力学性能之间的联系。通过探究混凝土在不同环境变量下的电磁性能变化规律，研究为无损检测提供基础数据，并修正谐振频率理论公式。最终，本研究也将探索空气间隙与封装形式对于贴片天线监测环境变量的影响规律，促进理论与实验数据之间的互验证，以及电磁波在多层介质传播理论的验证。

本研究的意义在于其为混凝土结构健康监测提供了一种新型的智能监测方

法，能够实时反映结构的内部变化，并在维护和安全评估中起到关键作用。通过优化贴片天线传感器的设计和信号处理，提高监测系统的灵敏度和准确性，有助于推动无损检测技术的发展，特别是在早期损伤检测和环境影响评估方面。此外，这项研究通过揭示材料性能和环境条件变化间的关系，为智能建材的开发和实际应用提供了重要的科学依据和技术支持。

## 1.4 研究内容及技术路线

环境因素例如温度和湿度等对天线传感器的有效介电常数产生不确定的影响，导致其谐振频率发生变化。本研究探讨了这些环境变化如何改变混凝土的介电特性，以及进而如何影响水泥砂浆、混凝土中贴片天线的谐振频率。首先，使用波导方法评估在不同温度和湿度条件下混凝土标准试块的介电特性。将实验测得的不同环境下的电磁特性用于高频仿真模拟软件 ANSYS HFSS 19 建立的模型中，精确化温度和湿度对混凝土电磁性能的影响。如下图 1.2 所示，混凝土介电常数承担了中介角色，连接起了环境变量和贴片天线的响应变量。准确测量混凝土的介电常数，使得理论探索和实证验证多层结构中的有效介电常数成为可能，将贴片天线传感温湿度变量的监测和补偿机制做进一步的发展。

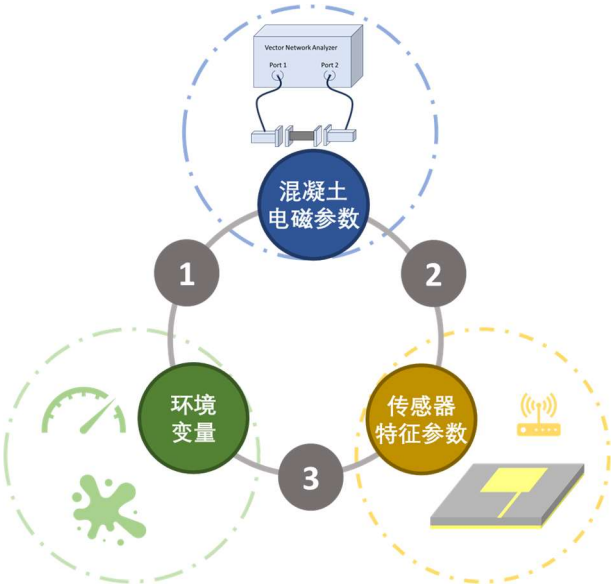



图 1.2 天线传感器性能测试环境变量流程图

通过模拟模型定量评估混凝土环境对埋置其中的贴片天线谐振频率的影响，随后基于波导测量的混凝土介电常数，以及基于保角映射理论的多层介质结构的等效节点常数，利用同样环境条件下仿真模拟结果得到的谐振频率，对谐振频率的理论公式进行参数的修正。本研究一方面建立了温湿度对混凝土和贴片天线电

磁性能的影响规律，用于定量评估混凝土嵌入式传感器中的温度和湿度波动，从而在使用传感器时实现更精确的监测和补偿。另一方面，将空气中贴片天线谐振频率理论公式升级成为上覆混凝土材料的谐振频率理论公式。主要研究的内容和技术手段如下图 1.3 所示。

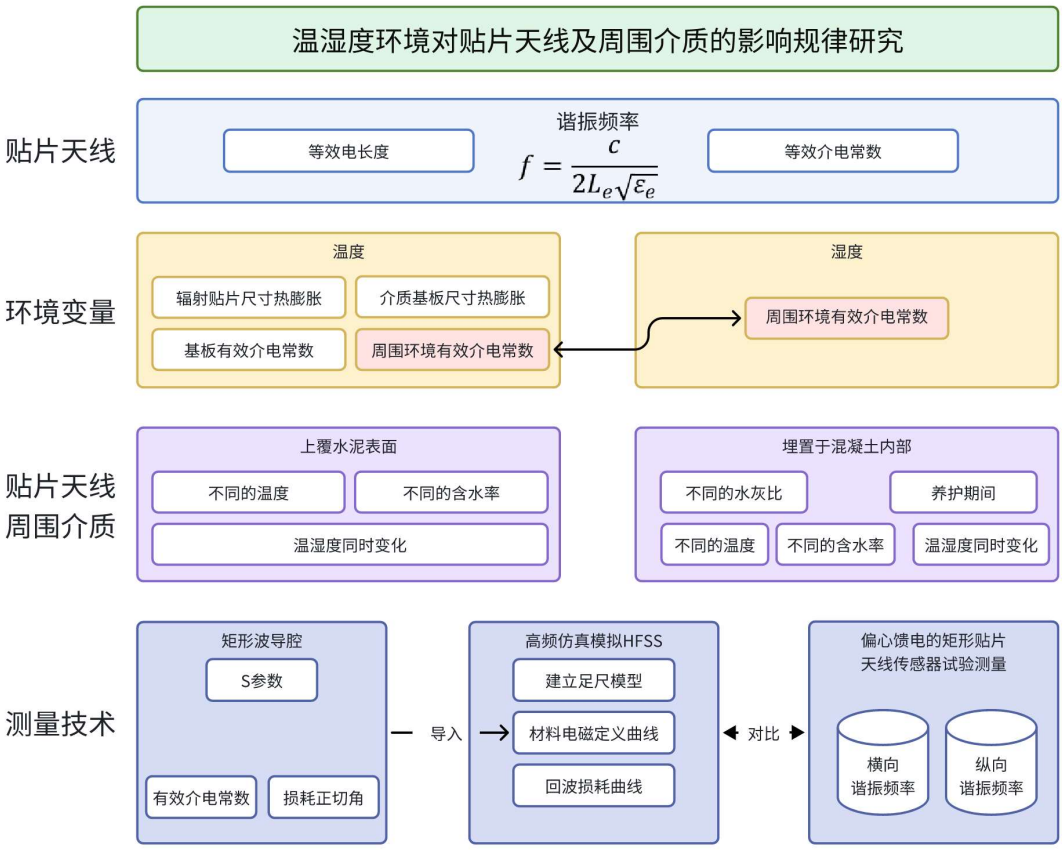



图 1.3 研究内容及技术路线

## 1.5 本文主要研究内容

本文着重研究了利用贴片天线作为传感单元，监测结构应变和温湿度等变量。研究的核心在于建立天线的电磁特征参数与监测变量之间的对应关系。

第一章为绪论部分，介绍了天线传感器和微波无损监测相关的研究进展，提出了基于贴片天线和矩形波导的组合方式，并介绍了待解决的问题及拟采用的技术路线。

第二章详细介绍了微带天线电磁特性和传感原理的基础理论。首先梳理了麦克斯韦方程，传输线模型理论、谐振腔模型理论，并基于这些理论探讨了微带天线的电磁特性参数和作为传感器的原理。随后，本章聚焦于贴片天线谐振频率的计算和影响因素分析，特别是温湿度和介质环境对其的影响，并采用傅里叶变换、变分技术、有限元法等进一步深化理解 。

第三章探讨了使用波导法测量混凝土材料介电常数的方法。涵盖了混凝土介电常数的概念、矩形波导试验原理、矢量网络分析仪校准，以及样品安装和 S 参数的测量过程。本章还包括波导有限元模拟，并对不同环境变量如温度和含水率对混凝土电磁性能影响的实验探究 。

第四章从天线设计入手，研究了不同环境因素对贴片天线电磁参数的影响。涉及基板厚度、贴片尺寸优化、介电基板材料选择以及上覆水泥层厚度的参数优化。同时，本章还通过有限元模拟和实验探究了温湿度变化对贴片天线电磁性能的影响，并对传感器进行了性能优化 。

第五章对埋置于混凝土中的贴片天线有限元模拟进行了深入研究。包括亚克力封装和空气层厚度的影响分析、温度和湿度对天线电磁参数的综合影响探究。此外，本章还提供了埋置天线的养护期间对混凝土状态的检测、以及温湿度对天线的影响分析。

第六章首先基于第三章波导在不同环境条件下测量的混凝土介电常数，以及对应的 HFSS 模拟计算的谐振频率，对谐振频率的理论公式进行多层结构贴片天线模型的参数修正；其次，基于第四章和第五章分别测量的上覆水泥与嵌入混凝土的两组谐振频率测量值与仿真模拟结构，总结出温湿度环境对谐振频率的影响因素。

# 第2章 介质覆盖贴片天线传感器工作原理

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

本章深入探讨了电磁学的基础理论和天线分析方法，特别是针对微带天线的电磁特性和传感原理。首先，详细介绍了麦克斯韦方程，传输线模型理论、谐振腔模型理论，这些是分析和计算天线性能的关键理论基础。随后，探讨了微带天线电磁特性参数和作为传感器的原理。接下来，聚焦于贴片天线的谐振频率计算及不同因素的影响，包括温湿度和周围介质环境。最后，通过傅里叶变换和变分技术、有限元法和保角映射理论等方法，进一步深化了对多层介质结构覆盖矩形贴片传感器谐振频率的理解。

在 2.1 节中，重点介绍了电磁学的基本理论，尤其是麦克斯韦方程的详细解析，为理解天线的工作原理奠定了坚实的理论基础。此外，传输线模型理论和谐振腔模型理论的介绍为分析和设计天线系统提供了重要的理论工具。

在 2.2 节中，着重介绍了微带天线的电磁特性参数，这些参数对于理解和优化天线设计至关重要。此外，贴片天线作为传感单元的原理被详细阐述，展示了如何利用天线在感知结构变形和环境变化中的应用。

在 2.3 节中，深入探讨了贴片天线的谐振频率计算，包括单片式和偏心馈电贴片天线传感器的具体案例。同时，讨论了温度和周围介质环境对贴片天线谐振频率的影响，为天线设计和应用中的频率调控提供了理论依据。

最后，在第 2.4 节中，应用了保角映射理论，深入研究了覆盖在矩形贴片传感器上的多层介质结构对谐振频率的影响。此外，本节还探讨了温湿度对覆盖在贴片天线上的多层介电材料——主要是等效介电常数的影响，并据此提出了关于温湿度如何影响谐振频率的理论公式定义。

## 2.1 电磁学基本理论和天线分析方法

### 2.1.1 麦克斯韦方程

通信中，无线信号的传输是通过电磁波完成的，而电磁波的存在和行为都可以通过麦克斯韦方程组来解释。简单地说，麦克斯韦方程是电磁场的基础理论，这些方程揭示了电场和磁场如何相互作用以及它们是如何由电荷和电流产生的。麦克斯韦方程不仅帮助我们理解天线如何发射和接收信号，还让我们洞悉信号的传播过程。

麦克斯韦方程组是在安培、法拉第、高斯等前辈的研究基础上，总结创新，提出了统一的电磁场理论，深刻揭示了场源、电场和磁场之间的关系。麦克斯韦方程组有多种表达形式，其中微分形式较为简洁，描述如下：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2.1}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{2.2}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2.4}$$

其中，公式 2.1 为法拉第电磁感应定律，描述了如何通过变化的磁场来产生电场。这个原理是无线充电和发电机工作的基础。$E$ 表示电场强度矢量(V/m)，$B$ 表示表示产生电磁的磁通量矢量(W/m$^2$)，$t$ 表示时间。该方程表示随时间变化的磁场可以产生随时间变化的电场，并且该电场强度旋度与磁场强度的变化率相关。

公式 2.2 为安培定律，说明了电流和变化的电场是如何产生磁场的。这对理解电机和变压器等设备的工作至关重要。$H$ 表示磁场强度矢量(A/m)，$D$ 为电通量密度矢量(C/m$^2$)，$J$ 为体积电流密度矢量(A/m$^2$)。该方程表示，电流以及变化的电场周围会产生磁场，并且该磁场的强度旋度与电流密度和电通量的变化率相关。

公式 2.3 和公式 2.4 为高斯定律，公式 2.3 表示穿过封闭曲面的电通量密度只与该封闭曲面内的电荷密度有关，表明电场的强度是由电荷产生的。这是静电和各种电力设备设计的基础。公式 2.4 表示穿过封闭曲面的磁通量密度为 0，也就是磁场线始终是闭合的原因。

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

$$D = \varepsilon E \tag{2.5}$$

$$B = \mu H \tag{2.6}$$

其中，$\varepsilon$和$\mu$分别为介质的介电常数和磁导率。公式 2.5 描述电通量和电场强度之间的关系，说明了在给定的介质中，电场如何影响电通量密度。这是由介质的电容率决定的，电容率是一个度量介质对电场响应能力的参数。公式 2.6 描述了磁场如何在特定介质中产生磁通量密度。介质的磁导率是关键参数，它衡量了介质对磁场的响应。

考虑在具有特定电磁属性的均匀介质中传播平面波时——即介电常数（ε）、磁导率（μ），并假设没有电导率（σ＝0）和没有电荷（ρ＝0）——麦克斯韦方程会显著简化。这些条件通常适用于理想化或理论情况，其中介质是完美的（无损耗），允许在没有材料缺陷或外部电荷的复杂性影响下，更清晰地理解电磁波行为：

$$\nabla \times E = 0 \tag{2.7}$$

$$\nabla \times H = 0 \tag{2.8}$$

$$\nabla \times E = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \tag{2.9}$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \tag{2.10}$$

方程组 2.7 到 2.10 比 2.1 到 2.4 要简单得多。区别仅在于现在 ρ（电荷密度）为零。方程 2.9 表明变化的磁场将产生电场，而 2.10 表明变化的电场将产生磁场。

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

微带天线的分析方法有很多种。最流行的模型包括传输线模型、腔体模型，以及全波模型（主要包括积分方程/矩量法）。传输线模型是所有模型中最简单的，它提供了良好的物理洞察力，但准确性较低，且更难以模拟耦合。与传输线模型相比，腔体模型更精确，但同时也更复杂。然而，它也提供了良好的物理洞察力，模拟耦合也相当困难，尽管它已经被成功使用。全波模型非常准确、非常灵活，并且可以处理单个元件、有限和无限阵列、堆叠元件、任意形状的元件以及耦合。然而，它们是最复杂的模型，并且通常提供较少的物理洞察力，在实际工程中并不适用。矩形天线几乎是最常用的微带天线，下面分别用传输线模型和空腔模型

对矩形天线进行分析。

### 2.1.2 传输线理论

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

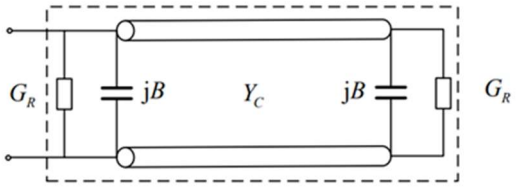



图 2.1 贴片线传输线模型等效电路

辐射缝隙的辐射电导，可以由公式 2.12 计算：

$$G_R = \frac{2P_R}{U^2} = \frac{1}{\pi\eta_0}\int_0^{\pi}\left[\frac{\sin(\pi W\cos\theta/\lambda_g)}{\cos\theta}\right]\sin^3\theta d\theta \approx \frac{1}{120}\left(\frac{W}{\lambda_g}\right)^2 \tag{2.11}$$

其中， 为自由空间波阻抗，约为 120πΩ， 为贴片天线中的导波波长。

辐射贴片的开路端边缘电容 C 和等效电路的导纳 B 表示为：

$$C \approx \frac{\Delta L_1\sqrt{\varepsilon_e}}{cZ_0} \tag{2.12}$$

$$B = \omega C \approx \frac{2\pi\Delta L_1\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda_0 Z_0} \tag{2.13}$$

其中，c 为真空中的光速，$Z_0$ 为辐射贴片的特性阻抗，$\varepsilon_e$ 为介质板有效介电常数，$\lambda_0$ 为导波在真空中的波长，与贴片天线中导波波长的关系为 $\lambda_g = \lambda_0/\sqrt{\varepsilon_e}$ 。

由于边缘效应的影响，在电学上微带天线的贴片看起来比其物理尺寸要大。对于主 E 平面（xy 平面）来说，如图 2.2 所示，贴片沿其长度方向在每个端部都扩展了一个距离 $\Delta L$，这个距离是有效介电常数和宽高比（$W/h$）的函数。一个非常流行且实用的长度归一化扩展近似关系是：

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_e+0.3)(W/h+0.264)}{(\varepsilon_e-0.258)(W/h+0.8)} \tag{2.14}$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \tag{2.15}$$

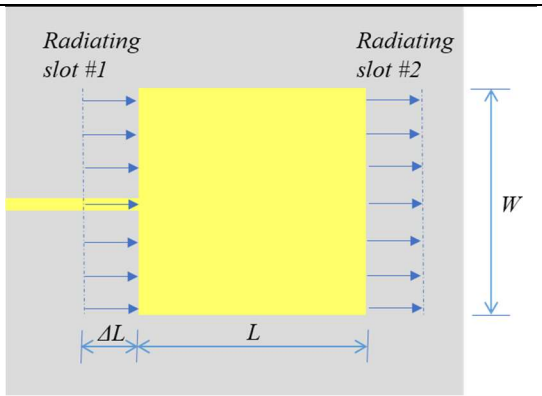



图 2.2 矩形微带贴片的物理长度和有效长度

贴片天线的电场大部分集中在介质板内，但是在辐射贴片的边缘由于电场线发生绕射，电场线不再局限于介质板内部而是向周围的空气中扩散，部分电场线从空气中进入介质板中并发生一定弯曲，这会引起电场线的区域比辐射贴片的物理尺寸大，即“边缘效应”，如图 2.3 所示。

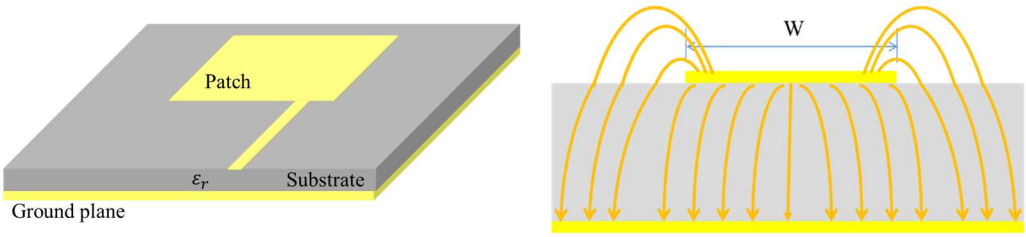



图 2.3 贴片天线电场示意图

由于边缘效应的存在，引入了有效介电常数的概念以对介质板的介电常数进行修正，并假定辐射贴片完全置于均匀单一介质板中，如图 2.4 所示。由于天线介质板本身的介电常数为$\varepsilon_r$，天线上部空气的介电常数为 1，有效介电常数$\varepsilon_e$描述等效均匀介质的介电常数，取值为$1<\varepsilon_e<\varepsilon_r$。有效介电常数更接近介质板的介电常数值，且其随频率的不同会产生变化，但通常根据经验公式(2.16)进行计算。

$$\varepsilon_e=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[1+\frac{12h}{W}\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{2.16}$$

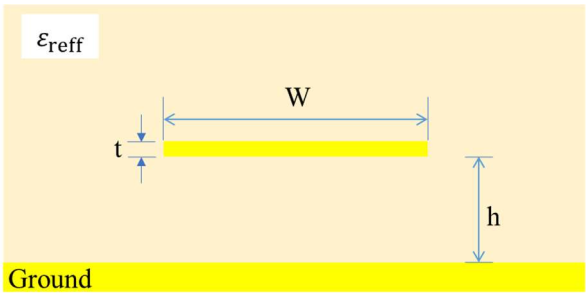



图 2.4 等效介电常数概念

因此上辐射贴片长度可以被表示为：

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta L_1 \tag{2.17}$$

该矩形贴片在长度方向谐振状态下的频率可以表示为：

$$f = \frac{c}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r},eff}}} \tag{2.18}$$

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

### 2.1.3 谐振腔模型理论

根据谐振腔理论，贴片天线可以被简化成一个上下两面为理想电壁，四个侧面为理想磁壁，中间填充介电材料（介质板）的腔体模型。由于贴片天线厚度方向尺寸通常很小且远小于波长，因此谐振腔理论忽略电磁场边缘效应的影响，假设介质中只存在垂直于贴片方向的电场，无磁场分布，且电场沿竖直方向保持不变。腔体的上下两面为理想导电面，仅存在法向电场分量，而切向电场分量为零。腔体四个侧面为理想导磁面，仅存在法向磁场分量，切向磁场分量为零。在直角坐标系中建立的腔体模型如图 2.5 所示，其长宽高分别为 $L$、$W$、$h$。

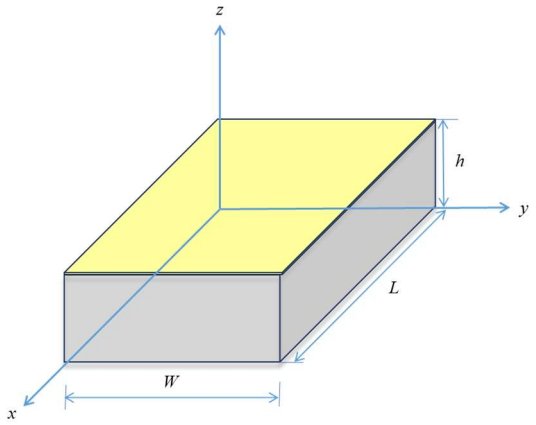



图 2.5 典型谐振腔示意图

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

$$\nabla^2 \underline{A_z} + k^2 \underline{A_z} = 0 \tag{2.19}$$

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

运用分离变量法将$A_z$的表达式写为一般形式：

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

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

$$E_z=-j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}(k^2+\frac{\partial^2}{\partial z^2})A_Z \tag{2.20}$$

$$E_x=-j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}\frac{\partial^2 A_Z}{\partial z\partial x} \tag{2.21}$$

$$E_y=-j\frac{1}{\mu\omega\varepsilon}\frac{\partial^2 A_Z}{\partial z\partial y} \tag{2.22}$$

$$H_z=0 \tag{2.23}$$

$$H_x=-\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_Z}{\partial y} \tag{2.24}$$

$$H_y=\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_Z}{\partial x} \tag{2.25}$$

以上电磁场的分量需满足如下边界条件：

$$E_y(0\le x\le L,0\le y\le W,z=0)=E_y(0\le x\le L,0\le y\le W,z=h)=0 \tag{2.26}$$

$$H_x(0\le x\le L,y=0,0\le z\le h)=H_x(0\le x\le L,y=W,0\le z\le h)=0 \tag{2.27}$$

$$H_y(x=0,0\le y\le W,0\le z\le h)=H_y(x=L,0\le y\le W,0\le z\le h)=0 \tag{2.28}$$

将边界条件(2.29-2.31)代入公式(2.23-2.28)，可得：

$$B_1=B_2=B_3=0 \tag{2.29}$$

$$k_x=\frac{m\pi}{L},\ m=0,1,2, \tag{2.30}$$

$$k_y=\frac{n\pi}{W},\ n=0,1,2, \tag{2.31}$$

$$k_z=\frac{p\pi}{h},\ p=0,1,2, \tag{2.32}$$

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

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

腔体谐振频率的公式可以表示为：

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

根据电磁波速度的表达式，公式 2.34 可进一步化简为：

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

其中，$c$ 为真空中的光速，$\varepsilon_r$ 为介质的相对介电常数。贴片天线在长度方向的一阶谐振模式与宽度方向的一阶谐振模式示意图如下图 2.6 所示。

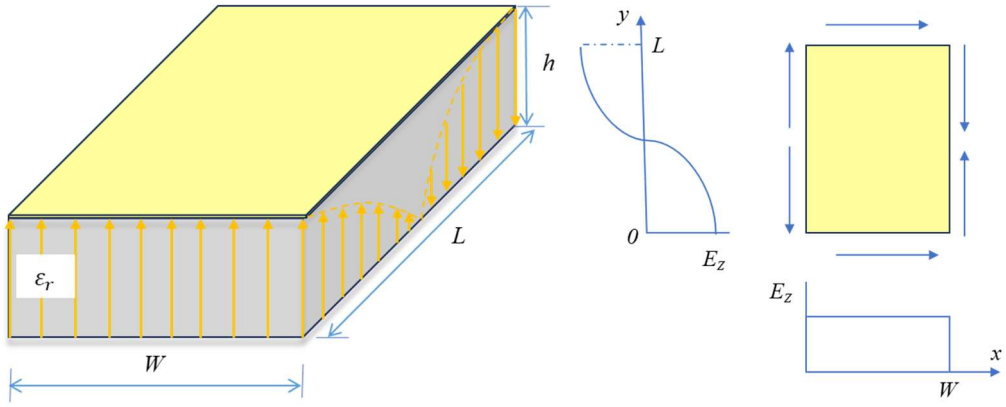



图 2.6 模式 $TM_{010}$ 的电场线三维示意图及俯视图

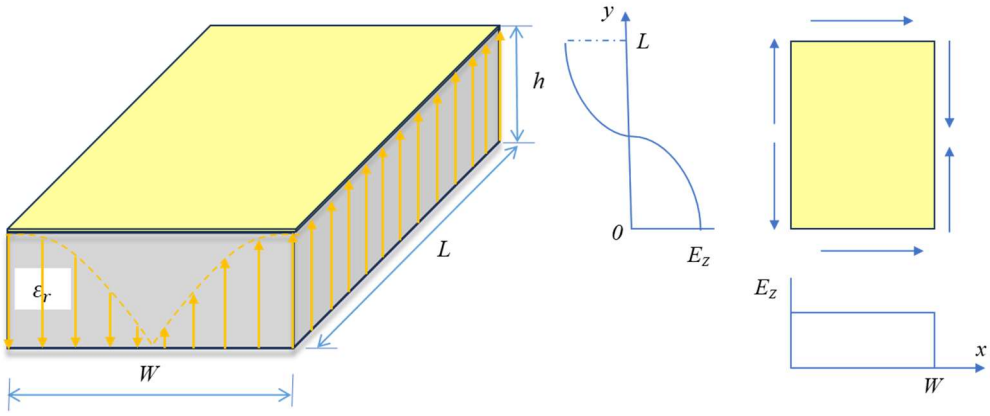



图 2.7 模式 $TM_{001}$ 电场线三维示意图及俯视图

微带天线作为一个具有固有损耗的腔体，由于基底高度小，只考虑腔体内的横向磁（TM）模式。因此，模式和谐振频率取决于天线的尺寸：

(1)当 $L>W>h$ 时，主导模式为 $TM_{010}$，其谐振频率由下面的公式指出：

$$(f_r)_{010}=\frac{v_0}{2L_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \tag{2.36}$$

(2)当 $L>W>L/2>h$ 时，$TM_{001}$ 模式的谐振频率为：

$$(f_r)_{001}=\frac{v_0}{2W_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \tag{2.37}$$

其中 $v_0$ 表示光速。图 2.6 和图 2.7 分别展示了 $TM_{010}$ 和 $TM_{001}$ 模式下沿腔体侧壁切向电场的分布情况。

## 2.2 微带天线电磁特征参数及传感原理

### 2.2.1 天线电磁特征参数

天线作为辐射单元和传感单元的功能说明了天线的多功能性，它可以同时用于发送和接收信号，并且可以检测或感知其周围环境的变化。

当天线作为辐射单元时，其主要功能是将电信号转换为电磁波并将其有效地传播到空间中。这是天线最基本和最常见的用途，涵盖了从无线通信（如移动电话、无线网络等）到广播（如无线电、电视）和雷达系统等多种应用。在这些应用中，天线的设计旨在优化特定方向的辐射模式、增益、带宽和其他电磁特性，以提高信号的传输效率和质量。

天线作为传感单元的概念相对较新，指的是利用天线感知其周围环境中的物理或化学变化。天线在这种情况下不仅仅是信号的传输媒介，还能作为检测环境变化的工具。例如，天线的一些参数如谐振频率、阻抗、回波损耗等，都可以因周围介质（如温度、湿度、化学物质的存在等）的变化而变化。通过监测这些参数的变化，天线可以用来：1.环境监测；2.结构健康检测；3.生物医学应用；4.安全监控。将描述天线性能和电磁特征的参数归纳如下，下面分别对各个参数进行介绍。

表 2.1 天线性能参数总结

| 功能 | 性能参数 | 描述 |
|---|---|---|
| 通信性能 | 天线增益 | 衡量天线集中能量的能力，以 dB 为单位 |
| | 方向性 | 描述天线辐射能量集中程度 |
| | 波束宽度 | 天线主波束的角宽度，描述天线覆盖区域的大小 |
| | 输入阻抗 | 天线与传输线连接处的阻抗，匹配阻抗可最小化能量损失 |
| 传感性能 | 谐振频率 | 反映环境中介质变化的天线自然振荡频率 |
| | 平均峰值电压 | 在天线端口测得的最大电压平均值，敏感于周围环境 |
| | 阈值发射功率 | 保证信号可靠传输所需的最低功率 |
| | 接收功率 | 天线能接收到的信号功率，反映环境中信号强度的变化 |
| | 复阻抗 | 包括阻抗的实部和虚部，反映天线与电磁波的相互作用 |
| | 回波时差 | 信号从发射到接收的时间差，可以用来推断信号路径的变化 |

天线的质量因数、带宽和效率是评价天线性能的重要指标，它们相互关联，无法完全独立地优化每一个指标。因此，在达到最佳天线性能的过程中，总是需

要在这些指标之间进行权衡。虽然常常希望优化其中一个指标，但这可能会降低其他指标的性能。

质量因数是一个表示天线损耗的性能指标。通常包括辐射损耗、传导（欧姆）损耗、介质损耗和表面波损耗。因此，总质量因数 $Q_t$ 受到所有这些损耗的影响，一般表示为：

$$\frac{1}{Q_t}=\frac{1}{Q_{\mathrm{rad}}}+\frac{1}{Q_c}+\frac{1}{Q_d}+\frac{1}{Q_{\mathrm{sw}}} \tag{2.38}$$

其中，$Q_t$ 是总质量因数，$Q_{rad}$ 是由于辐射（空间波）损耗的质量因数，$Q_c$ 是由于传导（欧姆）损耗的质量因数，$Q_d$ 是由于介质损耗的质量因数，$Q_{sw}$ 是由于表面波的质量因数。对于非常薄的基底，表面波损耗非常小，可以忽略。然而，对于较厚的基底，需要考虑这些损耗。

天线的分数带宽与天线的总质量因数 $Q_t$ 成反比，定义为：

$$\frac{\Delta f}{f_0}=\frac{1}{Q_t} \tag{2.39}$$

其中，$\Delta f$ 是带宽，$f_0$ 是设计频率。然而，这个定义可能不够实用，因为它没有考虑到天线输入端的阻抗匹配。一个更有意义的带宽定义是在输入端的电压驻波比（VSWR）等于或小于期望的最大值的频率范围内。

$$\frac{\Delta f}{f_0}=\frac{VSWR-1}{Q_t\sqrt{VSWR}} \tag{2.40}$$

天线的辐射效率定义为输入功率与辐射功率的比值。它也可以用质量因数来表达，对于微带天线，可以写为：

$$\mathrm{ecdsw}=\frac{Q_t}{Q_{\mathrm{rad}}} \tag{2.41}$$

总体来说，随着基底高度的增加，带宽和效率都会增加。这些变化在不同基底高度和恒定共振频率下的微带天线的效率和带宽的图表中可以清楚地看到。

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

天线的平均峰值电压取决于多个因素，如天线的大小、形状、材质、工作频率、接收信号的功率和极化方式等。天线的平均峰值电压可以通过信号的解调和采样得到，它与天线所附着的环境也具有相关性，因为标签天线的附着环境可以等效为与天线电路并联的电感。因此，标签天线的平均峰值电压变化也可以从一定程度上表征环境的变化。

阈值发射功率为能够激活标签天线的最小发射功率，接收功率为读取器接收

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

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

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

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

### 2.2.2 矩形贴片天线传感原理

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

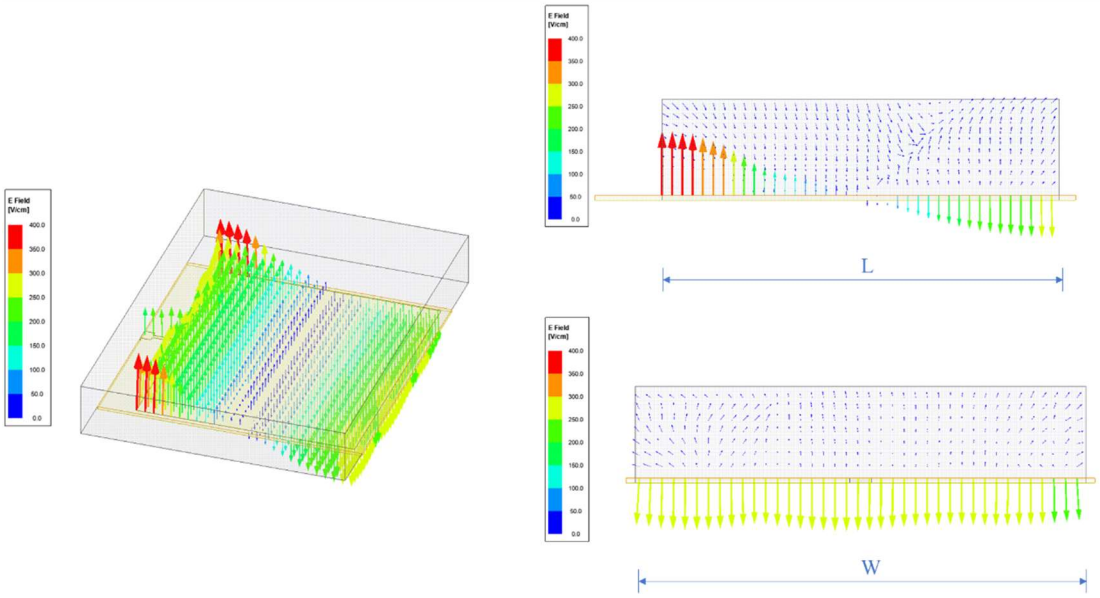



图 2.8 矩形贴片天线采用微带馈电辐射电场线模拟图

图 2.8 为典型的单片式矩形贴片天线的辐射电场线示意图。基于谐振腔模型理论，矩形贴片天线的谐振频率主要取决于天线的尺寸、介质层的介电常数等因素。当天线被用作传感单元并附着于被测结构表面时，结构表面的物理变形可能会导致天线尺寸的改变，进而引起谐振频率的变化。具体来说，当天线的辐射贴片沿某一方向尺寸减小时，天线在该方向的谐振频率会升高；相反，当辐射贴片沿某一方向尺寸增大时，谐振频率会降低。通过监测天线谐振频率的变化，可以计算天线尺寸的变化，从而实现对被测结构变形的测量。

此外，温度的变化会影响介质板的介电常数和天线周围环境的介电常数，并可能通过热膨胀引起尺寸的变化，从而改变天线的有效长度。这一现象表明，贴片天线的谐振频率不仅受到物理尺寸变化的影响，还受到温度影响。例如，温度升高通常会导致常用天线介质板的介电常数降低，这反过来会导致贴片天线各方向上的谐振频率升高。因此，天线谐振频率的观测可以用来感知环境温度的变化。

在利用贴片天线作为传感单元监测环境湿度时，原理类似。环境湿度的变化会导致天线外部空间的介电常数改变或覆盖在天线上的湿敏材料的介电常数发生变化。这些变化会影响天线的谐振频率，尽管与湿度的关系可能不是线性的。这种非线性关系依赖于所使用的湿敏材料的性质或天线外部湿度影响空间的特定条件。因此，通过测量天线谐振频率的变化，也能够对环境湿度进行传感，为环境监控和预警提供数据支持。

除了周围环境的温湿度，包括氯离子浓度、酸碱度以及各种腐蚀都会影响贴片天线周围环境的介电常数，改变天线传感器的有效介电常数进而影响谐振频率等电磁参数。通过测量谐振频率的频移，可实现对所研究的某一环境变量进行监

测。

### 2.2.3 传输散射参数

在电气工程的网络分析中，通常基于阻抗或导纳参数来研究，这些参数关联了一个 N 端网络在独立电压和电流变量下的性能。网络本身表示为一个 N×N 阻抗或导纳矩阵。在电磁学中，一个有用的网络表现形式是散射(S)参数，其中用入射和反射波的电压波和电流波代替了独立的电压和电流变量，如图 2.9 所示。这里的 a 和 b 是复数归一化的入射和反射电压波，在网络的端口处定义为：

$$a_i = \frac{V_i^+}{\sqrt{Z_{0i}}},\quad i = 1,2,...,N \tag{2.42}$$

$$b_i = \frac{V_i^-}{\sqrt{Z_{0i}}},\quad i = 1,2,...,N \tag{2.43}$$

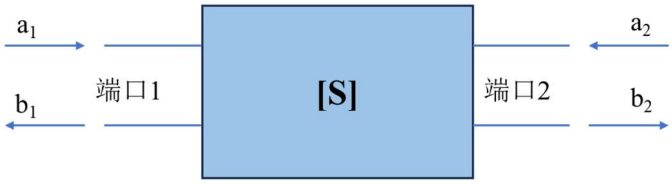



图 2.9 两端口网络和 S 参数

其中 i 代表 N 端网络的端口编号。两端口网络的 S 参数定义为

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \tag{2.44}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \tag{2.45}$$

这里：

$S_{11}$ 是端口 1 处的反射系数;

$S_{22}$ 是端口 2 处的反射系数;

$S_{21}$ 是从端口 1 到端口 2 的前向传输系数;

$S_{12}$ 是从端口 2 到端口 1 的后向传输系数;

在匹配终止条件下，端口 1 处的反射系数 $S_{11}$ 可以得到为：

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}\Big|_{a2=0} \tag{2.46}$$

这里 $a_2$=0 表示端口 2 没有入射电压波，所有功率都传输到了该端口所连接的负载。同样地，前向传输系数 $S_{21}$ 定义为：

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}\Big|_{a2=0} \tag{2.47}$$

如图 2.10 所示，*S* 参数是直观的，这一点对于高频下的阻抗或导纳参数不一定成立。$S_{21}$ 简单地表示了二端口设备的前向增益或损失，以线性形式表示。*S* 参数是复数参数，即存在相位角的组成部分，这在实际测量和数值仿真中很重要。

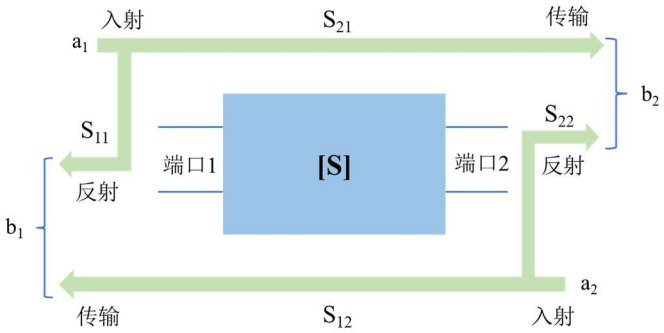



图 2.10 两端口网络的 S 参数

## 2.3 贴片天线谐振频率计算及影响因素分析

### 2.3.1 单片式贴片天线传感器

当采用单片式矩形贴片天线作为传感单元时，贴片天线粘贴于结构表面，如图 2.11 所示。

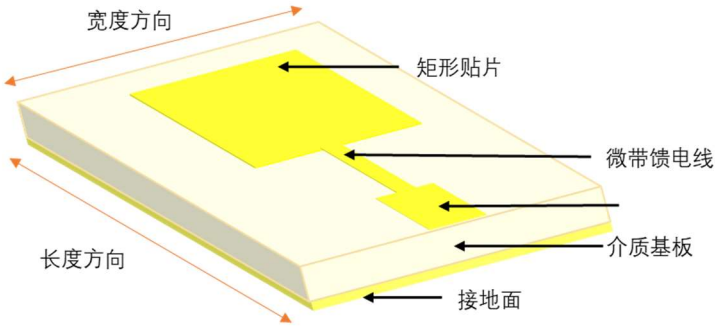



图 2.11 单片式矩形贴片天线安装示意图

根据谐振腔理论，贴片天线长度方向的一阶谐振频率可以表示为：

$$f_{100} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\left(\frac{1}{L}\right)^2} \tag{2.48}$$

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

$$f'_{100} \approx \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}}\sqrt{\left(\frac{1}{L(1+\varepsilon_L)}\right)^2} = \frac{1}{(1+\varepsilon_L)}f_{100} = \frac{1}{1-\varepsilon_L{}^2}(1-\varepsilon_L)f_{100} \approx (1-\varepsilon_L)f_{100} \tag{2.49}$$

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

贴片天线的初始谐振频率有关。

### 2.3.2 偏心馈电贴片天线传感器

通过采用偏心馈电方法，贴片天线能够同时在长度和宽度方向激发谐振模式，从而使两个谐振频率成为可观测变量，使天线多变量监测成为可能。

图 2.12 中展示的是一款微带贴片天线的简化模型，该模型包括了一个辐射贴片和一条馈线。在微带贴片天线的横磁模式（TM 模式）下，磁电流分布决定了天线的辐射特性。例如，在 $TM_{01}$ 模式中，沿着宽度方向的磁电流是恒定且同相的，这使得宽度边成为主要的辐射边缘。相比之下，沿着长度方向的磁电流呈正弦变化并反相，表明这一边的电流强度随位置变化而改变，但不贡献于主要辐射，因而被称为非辐射边缘。不同模式的电流分布与天线辐射贴片的尺寸和介质层的介电常数密切相关，这影响了天线的谐振频率和辐射模式。而在特定的 TM 模式，如 $TM_{01}$ 和 $TM_{10}$ 下，天线表现出正面辐射模式，并且这些模式可以被用于设计双频率天线，这些模式的辐射特性对贴片长宽比（$L/W$）或厚度（$h$）变化不敏感，但会随着介电常数（$\varepsilon_{reff}$）的变化而显著改变。

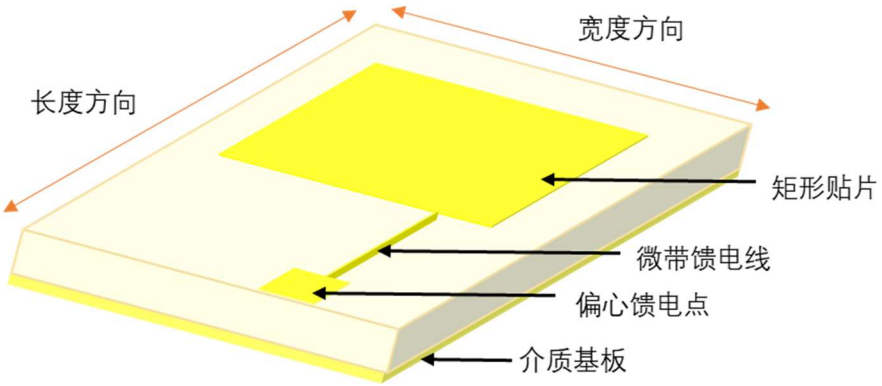



图 2.12 偏心馈电矩形贴片天线传感器概念图

图 2.13 所提供的 $S_{11}$ 参数图表显示了天线在特定频率范围内的反射系数，这通常用于描述天线在各个频率点的阻抗匹配情况。图表中的两个低点对应于天线的两个谐振频率，表明在这两个频率点上，天线与传输线的匹配达到最佳。这样的阻抗特性分析对于理解天线如何响应不同的电磁环境至关重要。通过监测 $S_{11}$ 参数的变化，可以洞察天线在实际应用中的性能，比如在传感器应用中，天线尺寸的微小变化或介质层介电常数的改变都可能导致谐振频率的移动，从而实现对环境变化的敏感检测。这种特性使得微带贴片天线不仅在无线通信领域，也在传感技术中发挥着重要作用。

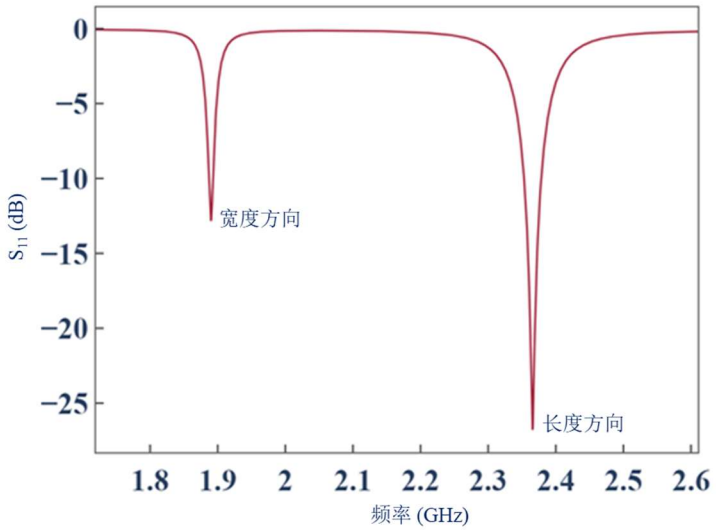



图 2.13 矩形天线在特定频率范围内的回波损耗图

### 2.3.3 温度对贴片天线谐振频率的影响

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

空气中贴片天线的温度效应可以从两个方面量化：一是贴片天线的热膨胀，二是基板的相对介电常数的变化。天线的热膨胀计算需要针对具体的天线形式和尺寸进行分析，而天线介电常数随温度的变化规律则因基板材质的不同而有所不同。

如下所示，埋置在特定材料中的贴片天线除了要考虑贴片天线的热膨胀与基板的介电常数，还需要考虑温度对外部环境的介电常数影响。例如将贴片天线埋置在混凝土中，温度的变化导致混凝土的介电常数变化，进一步影响贴片天线的有效介电常数造成谐振频率的偏移。接下来分别对温度的影响因素做介绍。

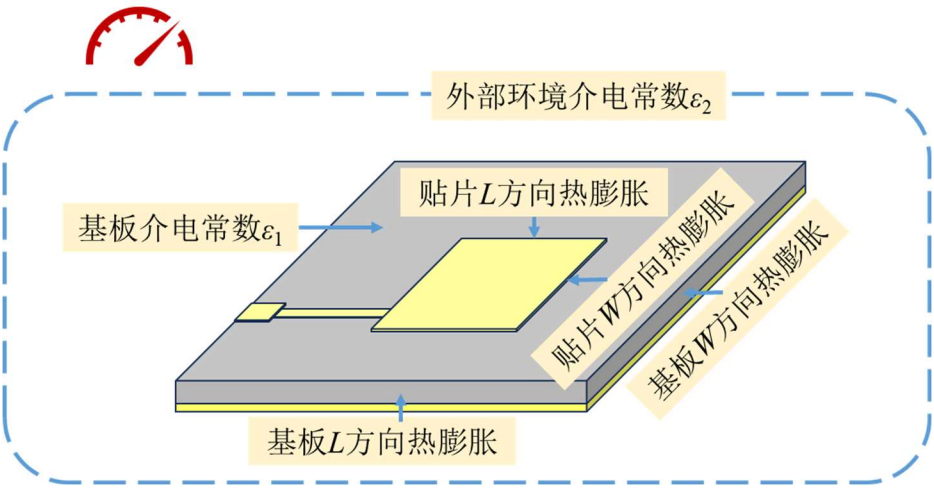



图 2.14 温度对埋置在特定材料中贴片天线的影响因素

首先，微带天线的尺寸受温度的影响。可以分基板和辐射贴片的热膨胀，如果两层间热膨胀系数不同，则层间会产生内力，导致层间协同变形。当温度变化 $\Delta T$ 时，在宽度和长度方向的尺寸变化可以用以下公式计算:

$$\Delta W_T=\frac{\alpha_{\mathrm{d,w}}\Delta TW_eE_{\mathrm{d,w}}h_{\mathrm{d}}+2\alpha_{\mathrm{c}}\Delta TW_eE_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{c}}}{E_{\mathrm{d,w}}h_{\mathrm{d}}+2E_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{c}}} \tag{2.50}$$

$$\Delta L_T=\frac{\alpha_{\mathrm{d,l}}\Delta TL_rE_{\mathrm{d,l}}h_{\mathrm{d}}+2\alpha_{\mathrm{c}}\Delta TL_rE_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{c}}}{2(E_{\mathrm{d,l}}h_{\mathrm{d}}+2E_{\mathrm{c}}h_{\mathrm{c}})} \tag{2.51}$$

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

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

$$\Delta\varepsilon_s=\varepsilon_r(T_0)\times(1+\Delta T) \tag{2.52}$$

其中 $\varepsilon_r(T)$ 表示在特定温度下的介电常数，而 $\varepsilon_r(T_0)$ 代表在参考温度下的介电常数。介电常数的温度系数，通常表示为 $T_{CDk}$，其单位为 ppm/°C。选择几种基底材料，并绘制了其介电常数随温度变化的规律，如表 2.1 所示。

表 2.1 介质基板材料性能参数表

| 性能指标 | RO3003 | RO3035 | RO3006 | RO3010 |
|---|---|---|---|---|
| 介电常数 ($\varepsilon_r$) | 3.00 ± 0.04 | 3.50 ± 0.05 | 6.15 ± 0.15 | 10.2 ± 0.30 |
| 损耗因子 (tan δ) | 0.0010 | 0.0015 | 0.0020 | 0.0022 |
| $\varepsilon_r$ 热稳定系数 ($T_{CDk}$) | -3 | -45 | -262 | -395 |
| 吸水率 (%) | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.05 |
| 热膨胀系数 (ppm/°C) | 25 | 24 | 24 | 16 |

以上四种基板材料，在温度从 20℃升高到 100℃的情况下，其介电常数与温度的线性关系如下图 2.15 所示。

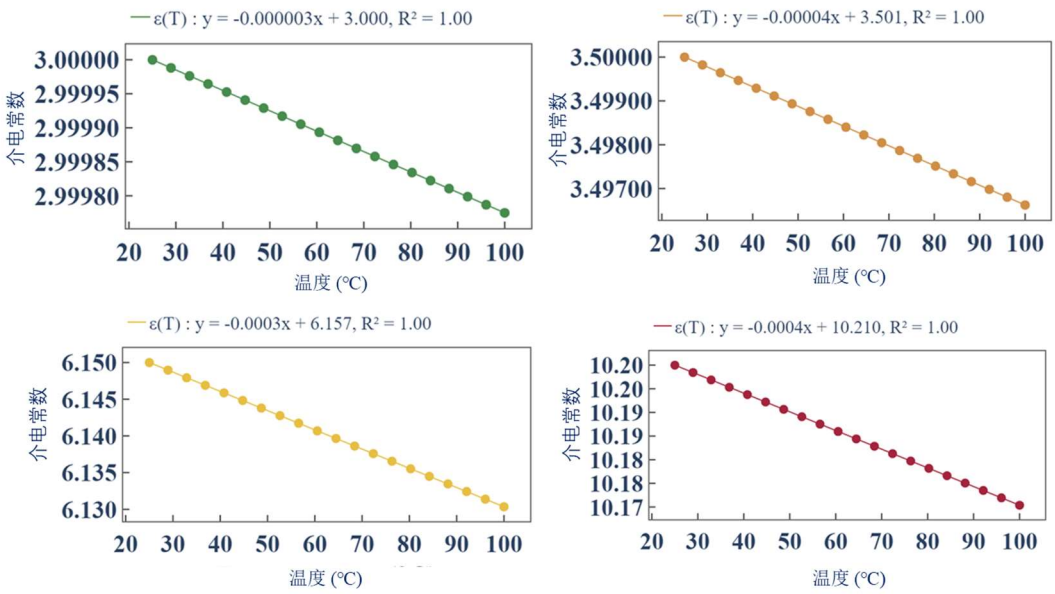



图 2.15 温度与基板材料的介电常数的线性关系

而特定材料如混凝土等水泥基材料，其介电常数随温度变化的趋势需要通过其他的方法来测定，假设外界环境介电常数变化为 $\Delta\varepsilon_e$,此处先不对天线外界环境的介电常数进行分析。根据公式（2.53）- (2.54)，当温度变化 $\Delta T$，受温度和贴片长度的综合影响，贴片天线在长度方向和宽度方向的一阶谐振频率可表示为:

$$f_{010}(\Delta T,\Delta L_o)=\frac{c}{2(W_e+\Delta W_T)\sqrt{\varepsilon_r+\Delta\varepsilon_s+\Delta\varepsilon_e}}\approx f_{010}+\frac{\partial f_{010}}{\partial T}\cdot\Delta T \tag{2.53}$$

$$f_{100}(\Delta T,\Delta L_o)=\frac{c}{2(L_e+\Delta L_T)\sqrt{\varepsilon_r+\Delta\varepsilon_s+\Delta\varepsilon_e}}\approx f_{100}+\frac{\partial f_{100}}{\partial T}\cdot\Delta T \tag{2.54}$$

上面的公式中，采用了简单的线性模型来定义有效介电常数，将其视为基板介电常数与周围环境介电常数的矢量和。然而，实际情况远比这种简化模型复杂。在随后的分析中，尤其是针对多层介电结构覆盖的矩形贴片天线，我们将探讨如何精确确定其有效介电常数。这涉及到对介电常数在复杂介电环境中行为的深入理解，是确保天线设计优化的关键因素。

### 2.3.4 周围介质环境对微带天线电磁波的影响

天线周围的空间通常分为三个不同的区域：(a)感应近场区域，(b)辐射近场（也称作 Fresnel）区域和(c)远场（或称作 Fraunhofer）区域，如展示的那样。这样的分区有助于明确不同区域内电磁场的结构特征。尽管电磁场在跨越这些区域的边界时不会出现突变，但每个区域间的电磁场属性还是存在明显的区别。虽然已经有了多种准则来识别这些区域，且这些准则被广泛应用于区域的判定，但是这些区域划分的具体边界并不是固定不变的。

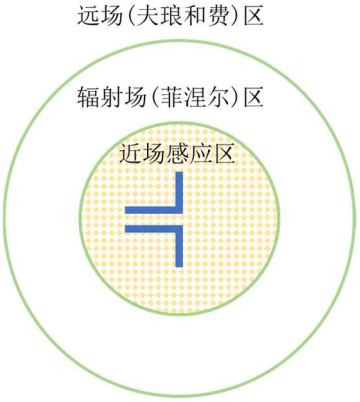



图 2.16 天线的场的区域

微带天线的性能受其周围介质环境的显著影响。常见的周围介质包括水分（反映在空气湿度中）、天线封装材料以及天线所处的埋置环境（如混凝土）。虽然天线介质板的相对介电常数对于周遭环境变化保持不变，周边介质环境的演变却可能导致天线的谐振频率发生细微偏移。这是因为存在一部分电场线从天线辐射贴片上部发出，穿越周围介质，最终达到天线下部的接地平面，如图 2.17 所示。

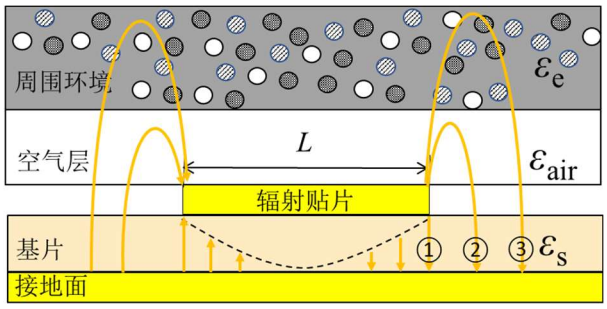



图 2.17 贴片天线周围介质环境影响

上图展示了一个典型的微带天线构造，其中包括天线的辐射贴片、介质板、以及接地平面。辐射贴片与接地平面之间的基板材料 $\varepsilon_s$ 和天线周围的介电环境 $\varepsilon_e$ 共同影响着电场线的路径。电场线在不同介质中的传播速度会因介电常数的差异

而有所不同，从而影响天线的谐振特性。

当周围介质环境变化时，天线的特性如特性阻抗、相速度、损耗、Q 因子等随周围材料的介电常数、损耗正切和厚度而变化。例如，当天线被嵌入用于监测混凝土状态的混合介质中，如图 2.17 所述，环境的湿度、氯离子浓度、酸碱度等因素都可能改变电场线的传播路径，进而影响谐振频率。虽然存在公式对周围介质的变化进行修正补偿，但这些公式往往在介质均匀变化时最为适用，且计算相对复杂。

在混凝土等复杂介质中，天线周围介质环境的变化对谐振频率的影响尤为复杂，需进一步的研究以获得准确的理解。本研究后续章节将通过微波试验、电磁仿真等手段深入探究这些影响，并验证了通过微带天线对周围介质变化进行感知的可行性。

## 2.4 多层介质覆盖矩形贴片传感器的谐振频率

### 2.4.1 多层介质材料有效介电常数理论研究

在微波工程和高频电路设计中，准确计算多层介质材料的有效介电常数是非常重要的。这种计算通常涉及复杂的电磁场分布和边界条件，为了简化计算并提供实用的设计公式，采用保角映射方法来处理这类问题。

保角映射是一种数学方法，可以将复杂的几何形状转化为更简单的形状，同时保持角度的不变性。在电磁理论中，这种方法特别适用于分析带状导体和地面之间或两个面对面带状导体之间的电场分布。通过映射，原本复杂的边界问题可以转换为简单的形状，如使用指数函数和双曲函数来近似，而不是依赖难以处理的椭圆函数。

在实际应用中，尤其是带宽与间隔相等的过渡情况，保角映射提供了一种近似解法，这种近似在计算波阻抗或形状比时，相对误差大约在 10 的 4 次方级别。这种近似方法虽然存在误差，但便于工程师使用滑尺级别的精度进行快速计算。

在电磁波传输线的设计与分析中，多层介质材料的有效介电常数对于预测和控制传输线的性能至关重要。通过利用保角映射，可以有效地计算介质层之间复杂的电磁场分布，尤其是在不同介质的边界交界处。这种映射不仅简化了计算过程，还提高了解决方案的可靠性和精确性。

电磁波传输线通常由带状导体和地面构成，介于它们之间的是一层或多层的介质材料。在这种结构中，保角映射用于分析导体和地面之间的电磁场分布。通过转换为更易于处理的坐标系统，映射可以近似地表示介质中的电场分布，使用

指数和双曲函数来描述电场，而非复杂的椭圆函数。

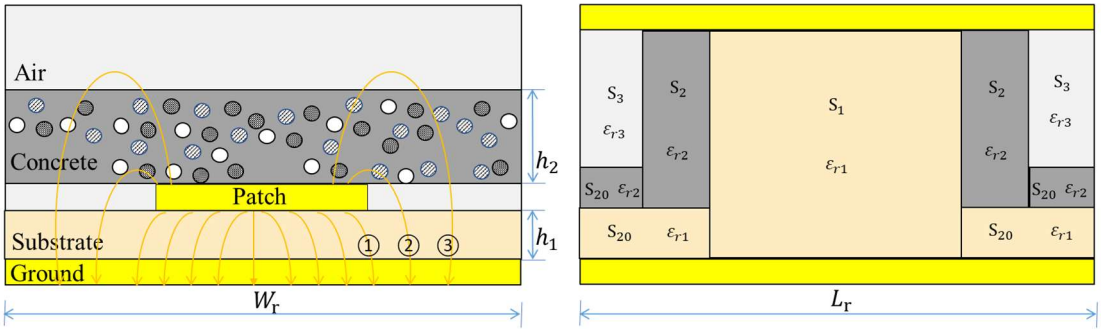



图 2.18 贴片天线埋置于混凝土结构中所示多层结构的电通量路径示意图

特别值得注意的是介质的有效填充分数，这一参数主要取决于带状导体的形状比，而对介质的实际介电常数的依赖较小。用于推导有效介电常数的填充分数配置，考虑了图 2.18 中描绘的电通量路径。电通量路径①的电容效应由包含 $S_1$ 和 $\varepsilon_{r1}$ 的块表示。电通量路径②的电容效应由包含 $S_2$ 和 $\varepsilon_{r2}$ 的块以及部分 $S_{20}$ 与 $\varepsilon_{r1}$ 表示。电通量路径③的电容效应由包含 $S_3$ 和 $\varepsilon_{r3}$ 的块以及部分 $S_{20}$ 与 $\varepsilon_{r2}$ 和 $\varepsilon_{r1}$ 表示。

有效填充分数是评估介质材料在传输线中占据电磁场的比例的重要因素，直接影响传输线的有效介电常数和波传播特性。填充分数定义为每个介电材料面积于 g 平面中横截面积 $S_C$ 的比值，填充分数在图示的五层结构中分别为：

$$q_1 = 1 - \frac{h_1 \log\left(\frac{\pi W_{\text{eff}}}{h_1} - 1\right)}{2W_{\text{eff}}} \tag{2.55}$$

$$v_i = \frac{2}{\pi}\arctan\left(\frac{\pi}{\pi\frac{W_{\text{eff}}}{2h_1} - 2\left(\frac{h_i}{h_1} - 1\right)}\right) \tag{2.56}$$

$$q_i = \frac{h_1}{2W_{\text{eff}}}\left(\log\left(\frac{\pi W_{\text{eff}}}{h_1} - 1\right) - (1+v_i)\log\left(\frac{2W_{\text{eff}}}{h_1}\frac{\cos(\frac{\pi v_i}{2})}{2\frac{h_i}{h_1} - 1 + v_i} + \sin\left(\frac{\pi v_i}{2}\right)\right)\right), i = 2,3,4 \tag{2.57}$$

$$q_5 = 1 - \sum_{i=1}^{4} q_i \tag{2.58}$$

Bernhard 和 Tousignant 指出，前面的公式忽略了三层结构中没有表层介质的情况，也就是说都没有考虑顶层介电常数不存在的配置。为了纠正这种不一致，引入了以下校准填充分数，通过在公式(2.57)的右侧将 $i$ 设置为 $i-1$ 来实现。

$$q_{i0} = \frac{h_1}{2w_{\text{eff}}}\left\{\ln\left(\frac{\pi w_{\text{eff}}}{h_1} - 1\right) - (1+v_{i-1}) \times \ln\left[\frac{2w_{\text{eff}}\cos\left(\frac{\pi}{2}v_{i-1}\right)}{2h_{i-1}/h_1 - 1 + v_{i-1}} + \sin\left(\frac{\pi}{2}v_{i-1}\right)\right]\right\}, \quad i = 2,3,4. \tag{2.59}$$

$$q_1' = q_1 - 2q_{20} - q_{40} \tag{2.60}$$

$$q_i' = [1 - q_1' - q_5 - 2q_{20} - q_{30} - q_{40}] \times (q_i - q_{i0}) \times \left[ \sum_{j=2}^{4} (q_j - q_{j0}) \right]^{-1}, \quad i = 2,3,4. \tag{2.61}$$

$$\begin{aligned} a = {} & \varepsilon_{r3} \left[ \varepsilon_{r4} q_4' + \varepsilon_{r4} \varepsilon_{r5} \left( q_5' + q_{20} \right)^2 \times \left( \varepsilon_{r4} q_5' + \varepsilon_{r5} q_{20} \right)^{-1} \right] \times \left( q_4' + q_5' + 2q_{20} \right)^2 \\ & \times \left[ \varepsilon_{r3} \left( q_4' + q_5' + q_{20} \right)^2 + q_{20} \right] \times \left[ \varepsilon_{r4} q_4' + \varepsilon_{r4} \varepsilon_{r5} \left( q_5' + q_{20} \right)^2 \times \left( \varepsilon_{r4} q_5' + \varepsilon_{r5} q_{20} \right)^{-1} \right]^{-1} \end{aligned} \tag{2.62}$$

$$b = \varepsilon_{r2} q_2 + \varepsilon_{r2} \left( \varepsilon_{r3} q_3' + a \right) (q_3' + q_4' + q_5' + 2q_{20})^2 \times \left[ \varepsilon_{r2} (q_3' + q_4' + q_5' + 2q_{20})^2 + (\varepsilon_{r3} + a) q_{20} \right]^{-1} \tag{2.63}$$

$$\varepsilon_{r,\mathrm{eff}} = \varepsilon_{r1} q_1 + \varepsilon_{r1} b \left( q_2' + q_3' + q_4' + q_5' + 4q_{20} \right) \times \left[ \varepsilon_{r1} (q_2' + q_3' + q_4' + q_5' + 3q_{20})^2 + b q_{20} \right]^{-1} \tag{2.64}$$

从多层介电结构有效介电常数的公式中可见，填充分数主要由每一层介电材料本身的介电常数$\varepsilon_{ri}$和高度 $h_i$ 来决定。

### 2.4.2 考虑温湿度对贴片天线上覆介电材料的多层介电模型探究

对于埋置于混凝土的贴片天线，可以将温湿度的影响分为内部影响和外部影响。内部影响也就是温度对贴片天线的物理影响，具体分为温度带来的热膨胀会影响贴片天线的尺寸，温度会改变贴片天线的基板介电常数；而外部影响则是温湿度对外部环境也就是混凝土或者水泥带来的介电常数的改变。

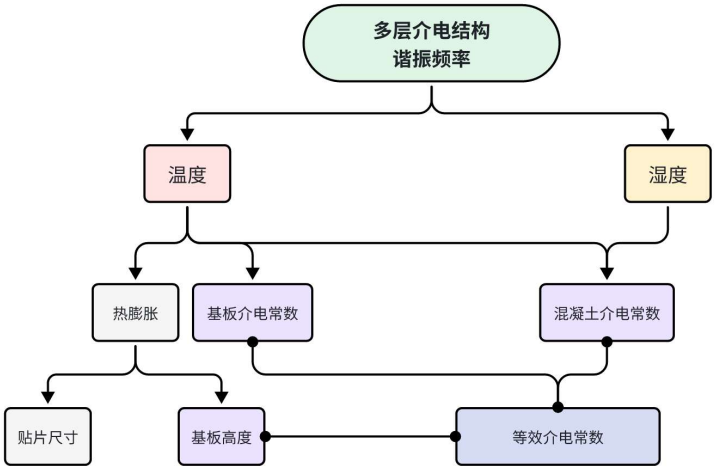



图 2.19 温湿度对混凝土贴片天线多层介电结构的影响

温度对等效介电常数的影响可以分为三个方面:首先，温度直接影响基板的介电常数 $\varepsilon_{r1}$(T)，其变化的斜率为 $K_1$，初始值为$\varepsilon_{r1}$；其次，温度影响基板的热膨胀，导致高度 $h_1$(T)，斜率为 $K_2$，初始高度为 $h_1$；最后，温度还影响外界混凝土层的介电常数 $\varepsilon_{r2}$(T,ϕ)，假设其变化斜率为 $K_3$。同时，湿度对混凝土的介电常数

$\varepsilon_{r2}$(T,ϕ)的影响也需要考虑，其斜率是 $K_4$，初始值为 $\varepsilon_{r2}$。

$$\varepsilon_{r1}(T)=K_1\times T+\varepsilon_{r1} \tag{2.65}$$

$$h_1(T)=K_2\cdot T+h_1 \tag{2.66}$$

$$\varepsilon_{r2}(T,\phi)=\frac{\partial\varepsilon_{r2}}{\partial T}T+\frac{\partial\varepsilon_{r2}}{\partial\phi}\phi+\varepsilon_{r2}=K_3T+K_4\phi+\varepsilon_{r2} \tag{2.67}$$

$$a=\varepsilon_{r3}\left(\varepsilon_{r4}q_3+\varepsilon_{r4}\varepsilon_{r5}\frac{q_5}{\varepsilon_{r4}q_5+\varepsilon_{r5}q_5}\right)\left(\frac{(q_3+q_5+2q_{20})^2}{\varepsilon_{r3}(q_3+q_5+q_{20})^2+q_{20}(\varepsilon_{r4}q_3+\varepsilon_{r4}\varepsilon_{r5}\frac{(q_5+q_{20})^2}{\varepsilon_{r4}q_5+\varepsilon_{r5}q_{20}})}\right) \tag{2.68}$$

$$b=\varepsilon_{r2}(T,\phi)q_1+\varepsilon_{r2}(T,\phi)\left(\varepsilon_{r3}q_2+a\right)\left(\frac{(q_2+q_3+q_3+q_5+3q_{20})^2}{\varepsilon_{r2}(T,\phi)(q_3+q_3+q_5+2q_{20})^2+(\varepsilon_{r3}q_2+a)q_{20}}\right) \tag{2.69}$$

$$\varepsilon_{r,\mathrm{eff}}(T,\phi)=\varepsilon_{r1}(T)\cdot q_1+\varepsilon_{r1}(T)\cdot b\cdot\left(\frac{(q_1+q_2+q_3+q_5+4q_{20})^2}{(\varepsilon_{r1}(T)\cdot(q_1+q_2+q_3+q_5+3q_{20})^2+b\cdot q_{20})}\right) \tag{2.70}$$

a 和 $b$ 是通过多层介质模型计算的参数，取决于混凝土介电常数$\varepsilon_{r2}(T,\phi)$和$\varepsilon_{r3}$ 即空气层介电常数;$q_i$是每层的填充因子，计算时考虑了各层的介电特性和厚度;$q_{20}$ 和$q_{30}$ 等是特定层的填充分数的调整值。

### 2.4.3 考虑温湿度对多层介电结构谐振频率的理论公式

根据先前研究者的经验公式，对于一个微带天线在空气中的模型，可以认为是一个双层介质结构，第一层主要由传感器的基板介电常数和高度决定，第二层则是无限高的空气层；因此空气中矩形贴片天线的谐振频率计算公式如下：

$$f_{r1}=\frac{v_0}{2\times\left(W+2\times0.412h\left(\frac{\varepsilon_{r,eff}+0.3}{\varepsilon_{r,eff}-0.258}\right)\left(\frac{L/h+0.264}{L/h+0.8}\right)\right)\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \tag{2.71}$$

$$f_{r2}=\frac{v_0}{2\times\left(L+2\times0.412h_1\left(\frac{\varepsilon_{r,eff}+0.3}{\varepsilon_{r,eff}-0.258}\right)\left(\frac{W/h_1+0.264}{W/h_1+0.8}\right)\right)\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \tag{2.72}$$

在上一小节中已经将温湿度对应用于混凝土中的贴片天线三层结构的等效介电常数探究明确，那么对于偏心馈电的矩形贴片天线而言，横向和纵向的谐振频率理论公式可以分别做以下考虑(矩形贴片的尺寸 $W>L>W/2$)，其中等效电长度 $W_{eff}$ 和 $L_{eff}$ 也会受到温度的影响产生膨胀效应，故两阶的谐振频率的温湿度影响因素如下公式所示:

$$\left(f_r\right)_{010}=\frac{v_0}{2W_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}}=f_{r1}(T,\phi)=\frac{v_0}{2W_{eff}(T)\sqrt{\varepsilon_{reff}(T,\phi)}} \tag{2.73}$$

$$\left(f_r\right)_{001}=\frac{v_0}{2L_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}}=f_{r2}(T,\phi)=\frac{v_0}{2L_{eff}(T)\sqrt{\varepsilon_{reff}(T,\phi)}} \tag{2.74}$$

对于偏心馈电的矩形贴片天线，横向一阶与纵向一阶（二阶）的电场线在三层结构中的传播可以通过图 2.20 清晰展示。在此基础上，公式中的等效电长度与温度的关系可以被精确表述，而温度和湿度对等效介电常数的影响则需通过模拟或仿真数据进行进一步验证和修正。

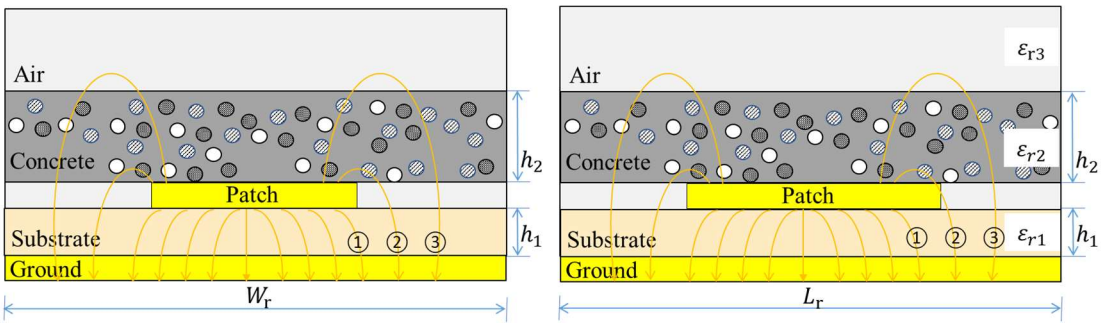



图 2.20 矩形微带贴片天线横向与纵向的电场线传播示意图

## 2.5 本章小结

2.1 节主要介绍电磁学的基本理论，包括麦克斯韦方程的详细解析，为理解天线的工作原理奠定了理论基础。此外，传输线模型理论和谐振腔模型理论为分析和设计天线系统提供了重要工具。

2.2 节着重于微带天线的电磁特性参数和作为传感单元的原理。这部分内容是理解和优化天线设计的关键，同时展示了天线在感知结构和环境变化中的应用。

2.3 节深入探讨贴片天线的谐振频率计算，包括单片式和偏心馈电贴片天线传感器的案例分析。探讨了温度和周围介质环境对谐振频率的影响，为天线设计和应用中的频率调控提供了理论依据。

2.4 节通过傅里叶变换和变分技术、有限元法和保角映射理论等方法，深入研究多层介质结构覆盖矩形贴片传感器的谐振频率问题。此外，对多层介质材料的有效介电常数进行了理论研究，为理解和设计复杂介质结构的天线系统提供了新视角。

# 第3章 微波测量混凝土材料介电常数方法

## 3.1 波导法测量介电常数

### 3.1.1 混凝土介电常数的概念

一种介电材料（非完美导体）暴露在电磁场下会导致其微观电偶极子排列的改变，这些电偶极子由正负电荷组成，其中心并不完全重合。由于不是自由电荷，它们不能参与导电过程。相反，它们被原子和分子力束缚在一个位置，只能在外部场的作用下轻微地改变位置。另一方面，自由电荷是决定导电性的因素。在电磁场的作用下，内部束缚的正负电荷相对位置的偏移抵抗正常的分子和原子力，结果在所谓的极化中储存了电能。实部（介电常数）反映了材料的极化量，而虚部（或损耗因子）反映了由导电性（由自由电荷控制）和水偶极子的弛豫所造成的损失。这就是为什么一个完美的干燥介电材料（没有自由电荷）会有一个虚部为零的原因。

介电材料可以通过两个独立的电磁特性参数来表征，即复介电常数 $\varepsilon^*$和复磁导率 $\mu^*$。然而，大多数介电材料包括木材和混凝土都是非磁性的，使得磁导率非常接近自由空间的磁导率。因此讨论限于复介电常数 $\varepsilon^*$，其定义为：

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{3.1}$$

其中 $\varepsilon'$是复介电常数的实部，$\varepsilon''$是复介电常数的虚部。将(3.1)除以自由空间的介电常数，属性变为无量纲并相对于自由空间：

$$\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{3.2}$$

其中 $\varepsilon_r'$ 是相对介电常数的实部，被称为介电常数，而 $\varepsilon_r''$ 是相对介电常数的虚部，被称为损耗因子。介电常数是一个度量，表示外部电场中有多少能量储存在材料中。

损耗因子是一个衡量材料由于电流传导而对外部电场多么耗散或有损的指标。能量损失与储存能量的比率被称为损耗正切：

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{3.3}$$

混凝土被视为一种介电材料，当暴露在电磁信号下时能够储存能量。因此，可以使用电磁（EM）方法来表征混凝土的介电特性。多相材料的介电特性，如

混凝土，可以准确地通过 Lichtenecker-Rother（L-R）模型来描述[69, 99, 100]，这一模型通过理论分析得到了广泛的认可：

$$\left(\varepsilon_{eff}\right)^{\alpha}=\sum_{i=1}^{n} f_i\left(\varepsilon_i\right)^{\alpha} \tag{3.4}$$

在 L-R 模型中，参数 $a$ 用于表征介电常数的几何依赖性，其取值在-1 到 1 之间变化。$\varepsilon_i$ 表示介质的总体介电常数，$f_i$ 代表介质中相的介电常数。在特定情况下，当 $a$ 取特定值（$a=1$，$a=1/2$，$a=1/3$）时，L-R 模型被简化为建立如 Brown 模型、Birchak 提出的复折射率模型（CRIM）[101]或 Looyenga 模型[102]等框架。其中，CRIM 模型因其用于估算材料等效介电常数的便捷性而被广泛应用。

表 3.1 常见的混凝土组成材料介电常数

| 材料 | 空气 | 水 | 砂 | 石 | 水泥 |
|---|---|---|---|---|---|
| 介电常数 | 1.0 | 81 | 3.0-6.0 | 5.8-6.5 | 3.6-4.0 |

对于像混凝土这样由空气、水、砂、砾石和水泥组成的复合材料，每个组分的介电常数在表 3.1 常见的混凝土组成材料介电常数中进行了概述。除了水之外，其他材料的介电特性在工程环境中相对稳定。因此，该模型给出如下：

$$\sqrt{\varepsilon_m}=f_w\sqrt{\varepsilon_w}+\left(1-f_w\right)\sqrt{\varepsilon_s} \tag{3.5}$$

其中 $\varepsilon_m$ 是像混凝土这样的混合材料的介电常数。$f_w$ 是衡量混合物中水分含量的指标。$\varepsilon_i$ 和 $\varepsilon_{others}$ 分别是水和其余混凝土成分的介电常数。$f_w$ 是被测物体的自由水含量。描述了混凝土的介电常数如何受到其水分和其他固体成分的影响。

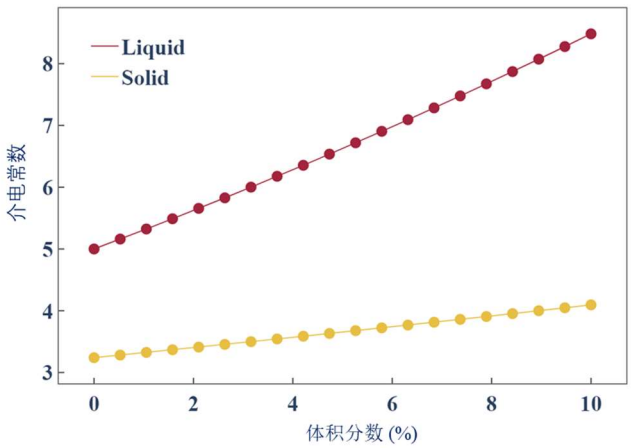



图 3.1 混凝土的介电常数与水分和其他固体体积比的关系

### 3.1.2 矩形波导试验原理

矩形波导是用于传输微波信号的最早类型之一的传输线，并且常用于精密测试应用。矩形波导的 TM 和 TE 模式具有截止频率，低于此频率无法传播。每个

模式（每种 m 和 n 的组合）都有一个截止频率（$f_{cmn}$），如(3.6)所示:

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \tag{3.6}$$

具有最低截止频率的模式被称为主导模式。假设 a > b（分别表示波导的宽度和高度），因此最低截止频率发生在 $TE_{10}$（m = 1, n = 0）模式，如(3.7)所示:

$$f_{c_{10}} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{3.7}$$

本研究使用的是 R 波段矩形波导 BJ22（根据中国波导标准），也称为 WR-430（根据 EIA 波导标准），其宽度为 109.22mm，高度为 54.61mm， 频率范围为 1.72~2.61 GHz。

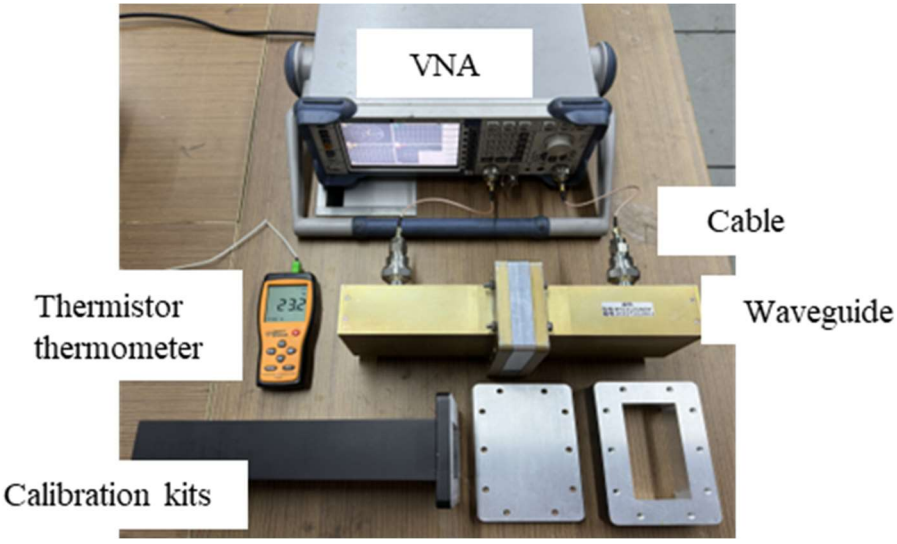



图 3.2 矩形波导测试系统

### 3.1.3 矢量网络分析仪及硬件校准

测量设置包括 R&S®ZVL 矢量网络分析仪，其测量频率范围为 9kHz~3GHz。考虑到网分仪的测量频段，考虑使用 BJ22 波导，以及相应的波导至同轴转换器和带同轴电缆的波导校准套件。测试材料（MUT）完全嵌入波导中，波导的两端连接到校准后的波导至同轴适配器，随后通过同轴电缆连接到 VNA。通过计算机设备获得了参数 $S_{11}$、$S_{21}$、$S_{12}$ 和 $S_{22}$，使用 Nicolson-Ross[103]-Weir[104] (NRW)传输/反射方法来计算相对介电常数和磁导率。

为了校准，采用了短路-开路-负载-通路（SOLT）技术。在校准平面 A 和 B，依次连接短路、开路和标准负载，最终完成整体的 SOLT 校准，波导设备连接的示意图和设置如图 3.3 所示。

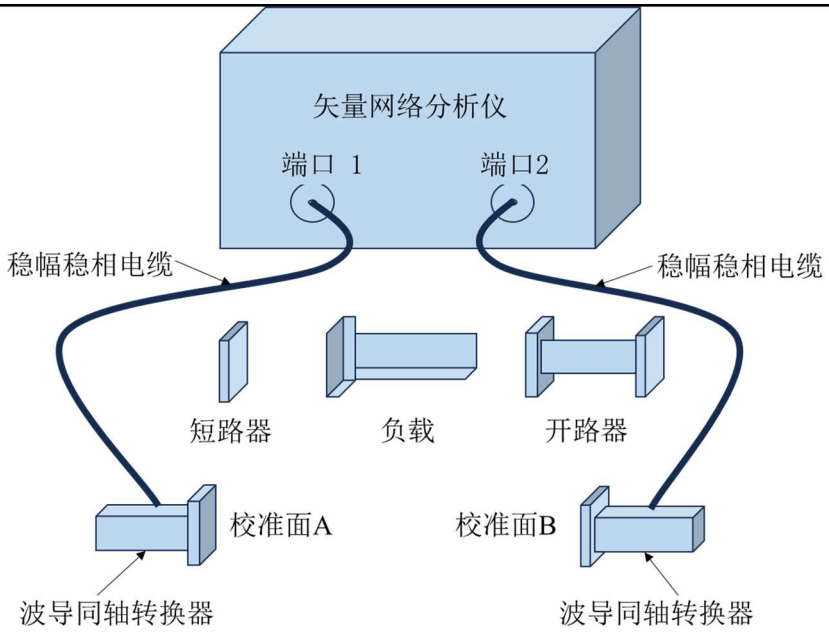



图 3.3 网络分析仪校准过程示意图

校准后，使用具有已知稳定属性的聚四氟乙烯（polytef）作为验证的被测物体。聚四氟乙烯的介电常数（名义值 2.08）和磁导率（名义值 1）表现出最小的频率依赖性变化，网络分析仪测量的 S 参数如图 3.4 所示，可见校准后的波导系统可以较为准确的表征出被测物体的介电特性。

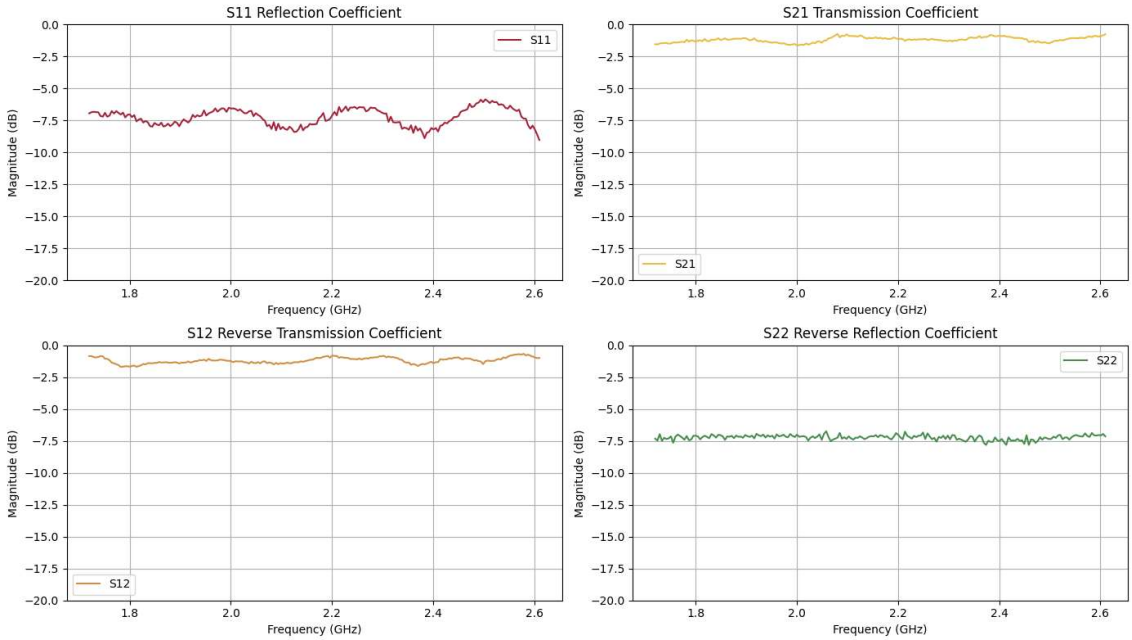



图 3.4 S 参数幅度测量曲线

根据图 3.4 中的数据，按 NRW 法计算得到的介电常数和磁导率曲线如下图 3.5 所示，可见校准后的波导系统可以较为准确的表征出被测物体的介电特性。这一频段对应样品较薄，测量结果与标称值一致性好，数值差异可能原因：标

称值为低频时的值，与微波频段值有差异。

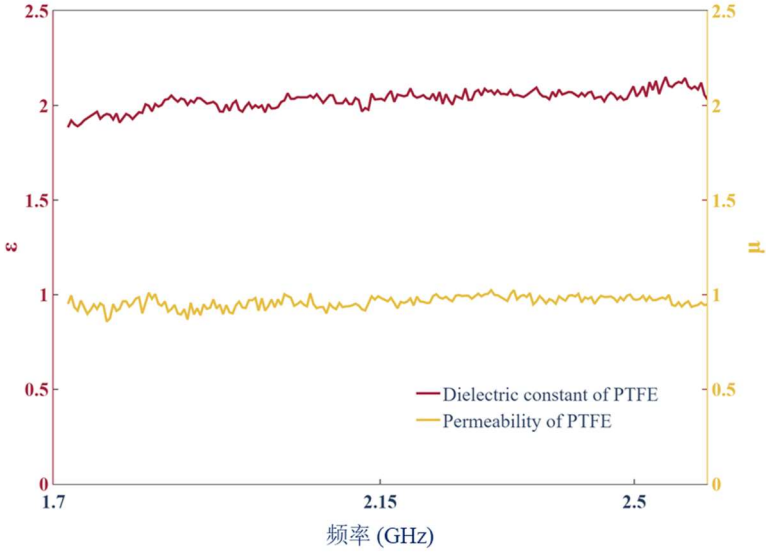



图 3.5 聚四氟乙烯的电磁参数测试数据

### 3.1.4 样品安装

用螺旋测微仪或游标卡尺测量波导内壁高度 *b*,样品高度 *b*1 和样品长度 *L*;按照将样品从波导端口装人波导中,装入样品时应小心,避免样品损坏,装入后样品一侧,表面应与波导法兰平面齐平。

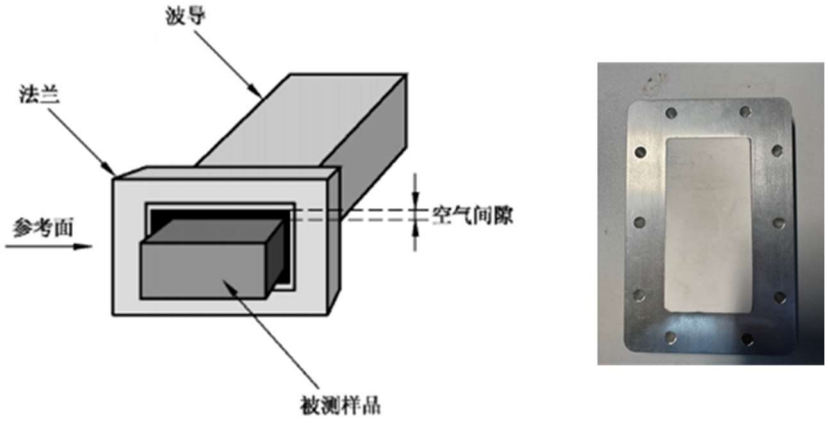



图 3.6 样品安装示意图

装有被测样品的波导与波导同轴转换器连接，示意图和试验中连接如下所示。

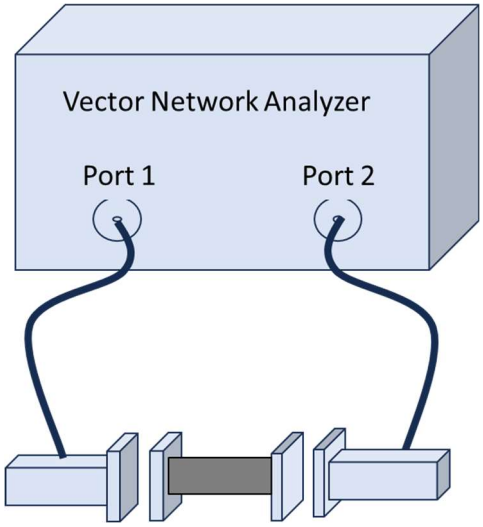



图 3.7 备连接示意图

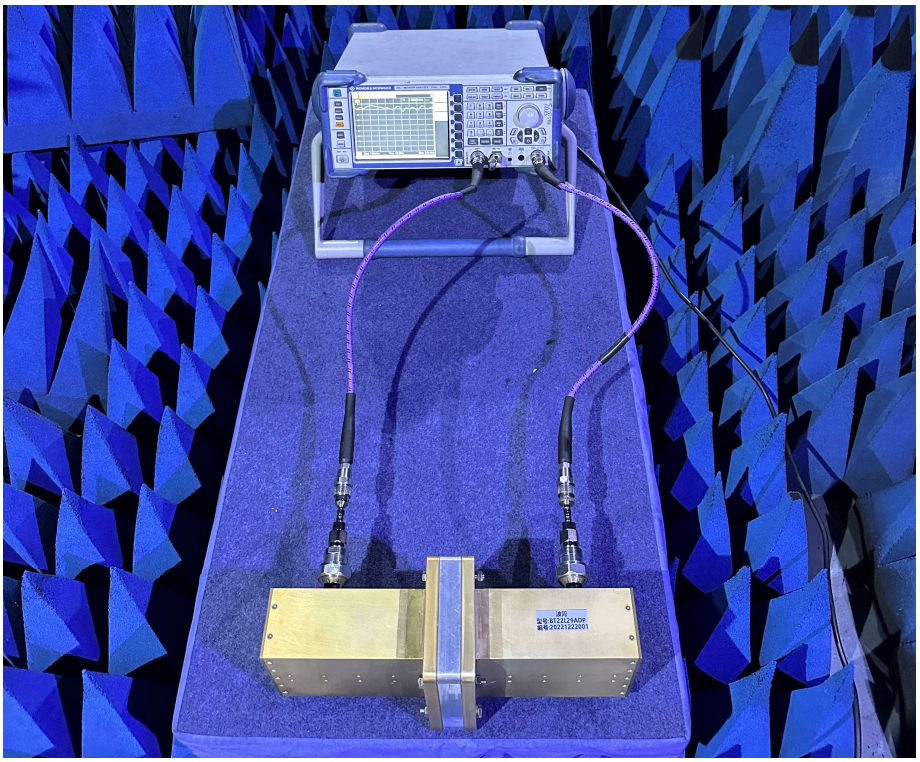


图 3.8 微波暗室中设备连接图

### 3.1.5 S 参数测量并计算相对介电常数

根据被测样品 S 参数测试到的 $S_{11}$、$S_{21}$ ，计算复相对介电常数和相对复磁导率的步骤如下：先计算出中间变量中 X、Γ，再计算出中间变量 T、Λ，最终计算出介电常数和磁导率。

本算法采用了 Nicolson 和 Ross 在 1970 年提出的，以及 William 在 1974 年进一步发展的 NRW 传输反射法理论。基于这一理论，Jarvis 于 1990 年改良了该

算法，解决了在样品的整数倍半波长频率处进行介电常数测量时常见的问题。本文还展示了一种误差分析方法，该方法可以估计由于散射参数、测量长度以及参考平面位置的不确定性而引入的误差。此外，还推导了新的方程，这些方程能够在不依赖于参考平面位置和样本长度的情况下，独立确定材料的复杂介电常数。

本文分别利用可以测得四个 S 参数的网络分析仪和只能测得两个 S 参数的 NanoVNA 进行测试，因此在 S 参数转化为介电常数和磁导率的过程中，前者对 1 端口的传输和反射与 2 端口的传输与反射去了平均值，而后者只考虑了 1 端口的传输和反射。对于混凝土这样的非均质材料，要想保证 NanoVNA 数据的可靠性，需要保持样品插入方向的一致性。

图 3.9 器材实物图(a)网络分析仪 VNA (b) NanoVNA 前面板

### 3.1.6 波导有限元模拟

研究使用的是 R 波段矩形波导 BJ22（根据中国波导标准），也称为 WR-430（根据 EIA 波导标准），其宽度 a 为 109.22mm，高度 b 为 54.61mm，频率范围为 1.72~2.61 GHz，长度 L 根据规范 GB/T35679，应该在 8mm-35mm 范围内，最终选择 L=20mm。

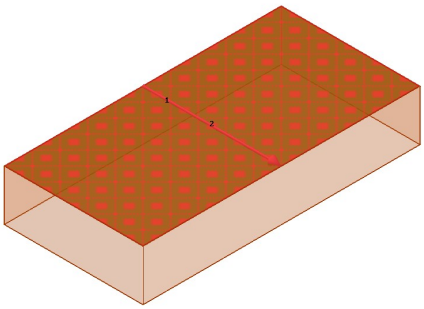


图 3.10 矩形波导的建模与波端口馈电的模拟仿真图

在有限元模拟软件在建立波导的模型，包括创建模型几何体、定义边界和激励条件、进行离散频率扫描并分析数据。

通过图 3.11 矩形波导中的 TE10 模式的电场线，可以看到在不同切面上的电场分布和电场线，这些图像表示了矩形波导中的 TE10 模式。电场线的方向和

密度反映了电场的变化和传播特性。这些详细的电场分布图提供了对波导传播模式深刻的洞察。

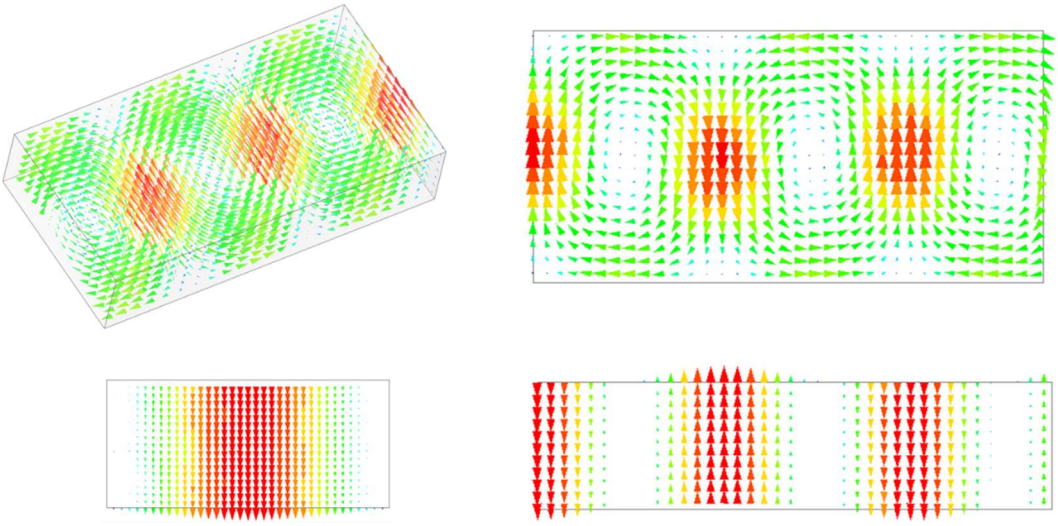


图 3.11 矩形波导中的 TE10 模式的电场线

## 3.2 测量水泥试块介电常数的波导实验

### 3.2.1 不同温度对水泥电磁性能的影响

为确定温度对水泥试块的影响，一个样品被预先干燥并在受控烤箱中从 25°C 加热到 60°C，每次增加 5°C。为了在转移到波导过程中降低不准确性，将烤箱设定在目标温度以上 3°C 并保持 20 分钟。随后，将样品从烤箱转移到波导中。当热敏电阻温度计确认目标温度后，VNA 立即记录 S 参数。试验图如下图 3.12 所示。

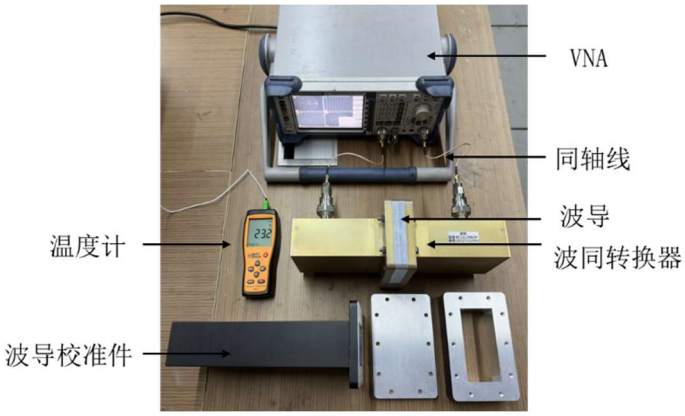



图 3.12 矩形波导测试温度变化

在对水泥样品进行介电常数的测量时，使用 Nicolson-Ross-Weir（NRW）算

法来处理数据，以准确地评估介电特性如何随温度变化。**错误!未找到引用源。**(a)显示，在 1.72 至 2.61 GHz 的频率范围内，水泥样品的介电常数随温度升高而增加。从 25℃到 60℃，介电常数值从大约 3.60 增加到 3.83。随着温度的升高，样品展示出更高的储能能力。不同温度下的曲线在整个频率范围内波动，表明频率对介电特性的影响也随着温度的变化而变化。在高温下，介电常数的峰值稍微向高频方向移动，这可能是由于材料内部极化过程随温度变化导致的。

图 3.13(b)通过一个线性拟合曲线清晰地展示了介电常数随温度上升的增加趋势。拟合方程 $y=0.0068x+3.445$ 与高度的决定系数 $R^2$=0.97 表明，介电常数与温度之间存在很强的正相关性。这种变化可能是由于温度上升导致水泥内部分子运动加快，从而增加了材料的极化，使得介电常数随之增加。此外，高决定系数也意味着温度是影响介电常数变化的一个主要因素。

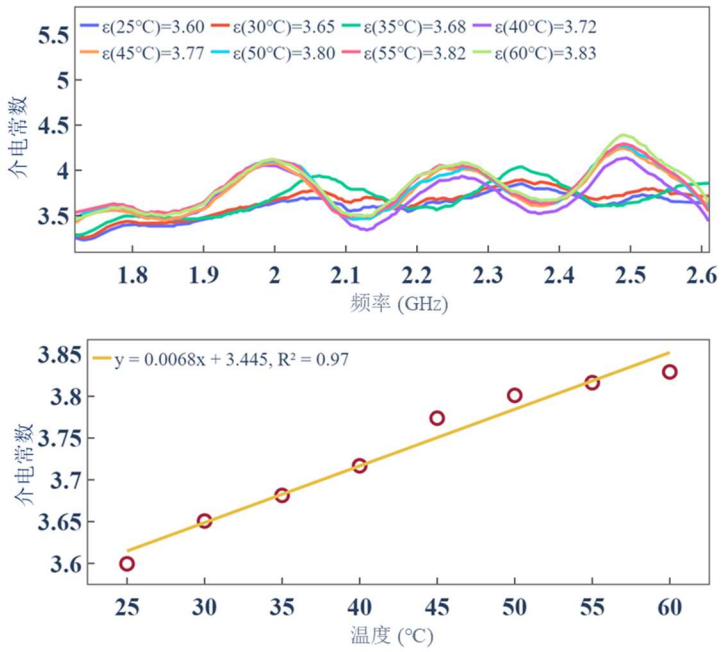



图 3.13 不同温度下混凝土试块的介电常数：(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为温度函数的拟合曲线

### 3.2.2 不同含水率对水泥电磁性能的影响

在常温下，水的介电常数为 81。由于混凝土样品是含水复合材料，预计在湿度变化下其介电特性会发生显著变化。为了进行研究，三个水泥砂浆试件在不同温度（35℃、45℃和 55℃）的水中浸泡 24 小时以获得完全水合作用，随后去除表面水分。然后将它们烤箱干燥，冷却至室温并称重。

湿度含量通过重量来量化，如方程式(3.8)所描述，$W_i$ 是不同时间下水泥砂浆

块的重量，$W_d$ 是烤箱干燥后块体的重量。

$$\varphi(\%)=\frac{W_i-W_d}{W_d}\times 100\% \tag{3.8}$$

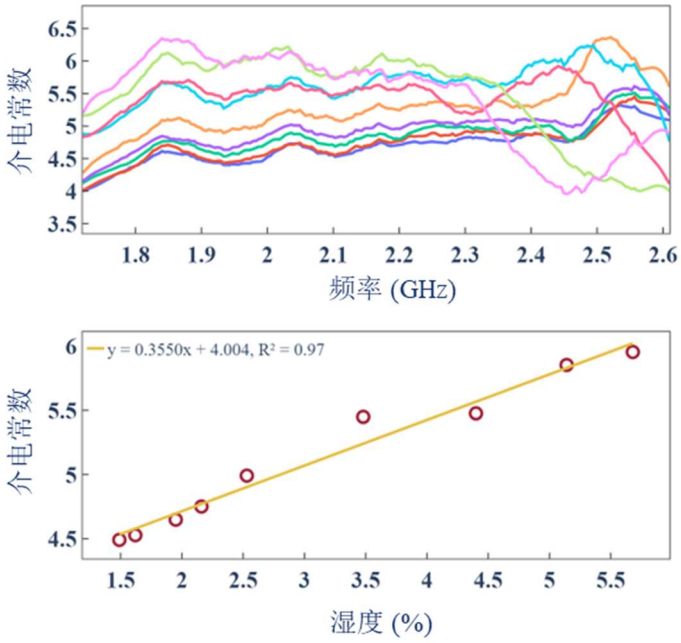



图 3.14 水泥试块 35℃在不同含水率的介电常数：(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

由图 3.14 (a)展示了在 35℃恒温条件下，1.72 至 2.61GHz 频率范围内水泥砂浆样品的介电常数如何随着湿度变化而波动。不同的曲线代表了不同的湿度条件下材料的介电响应，显示了一定的频率依赖性。

图 3.14 (b)则通过一条具有很高相关性的线性拟合曲线($R^2$=0.97)清晰地展现了介电常数随湿度增加而增加的趋势。拟合方程 $y=0.35x+4.004$ 揭示了湿度与介电常数之间的正比关系。由于水分子本身具有较高的介电常数，当水分含量上升时，水分子在水泥砂浆的孔隙结构中增多，导致整个复合材料的介电常数升高。

图 3.15 和图 3.16 分别展示了 45℃和 55℃恒温条件下，随着水泥砂浆试块含水量的增加，介电常数线性增加的规律。这些结果进一步证实了湿度是影响水泥砂浆介电性能的一个关键因素。

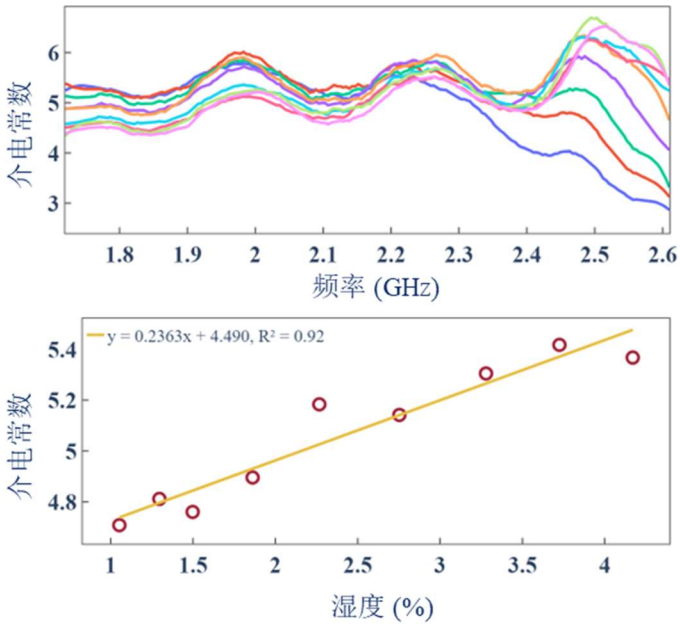



图 3.15 水泥试块 45℃在不同含水率的介电常数：(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

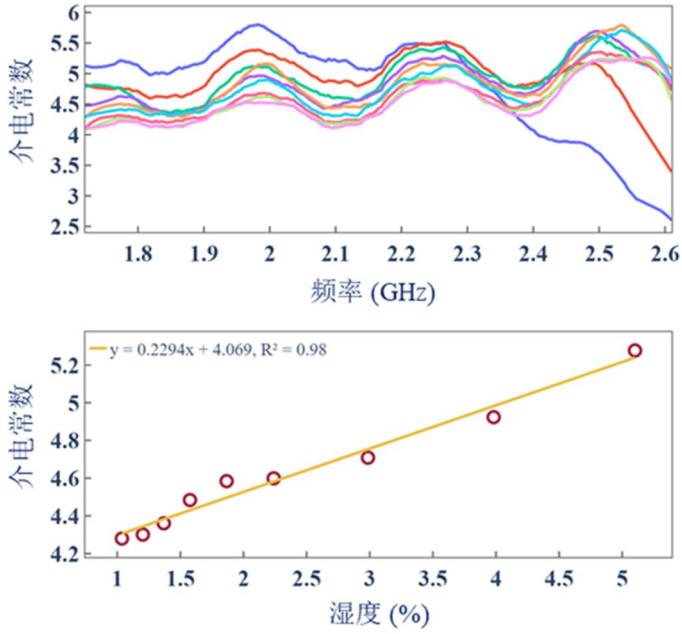



图 3.16 水泥试块 55℃在不同含水率的介电常数：(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

图 3.15 的线性拟合方程 $y=0.263x+4.490$ 与 $R^2=0.92$ 表明，在 45℃时，介电常数随湿度增加而显著上升。图 3.16 的拟合方程 $y=0.229x+4.069$ 与 $R^2=0.98$ 揭示，在 55℃下，虽然增长趋势依旧，但斜率较 45℃有所降低。这些差异可能归

因于温度对水分子极化和水泥基材料中水分分布的影响。较高的温度可能促进了水的蒸发，导致了样品内部湿度与表面湿度之间的差异，从而影响了介电常数的测量值。此外，不同温度下材料的热膨胀也可能对介电特性有所影响，因为这可能改变了孔隙结构和水分子在材料中的分布。

## 3.3 测量混凝土试块介电常数的波导试验

为了研究混凝土试块在不同温度和湿度条件下的介电常数变化，首步是制备多种级配的混凝土试块。我们根据波导尺寸标准 BJ22 设计了专用模具，并浇筑出标准尺寸为 100mm×100mm×100mm 的立方体试块。基于经验，我们初步设定了各种材料的配比，如下表 3.2 所示，并制作了相应的试块。经过三天的高温养护（95℃的养护箱中），这些试块进行了抗压强度测试。测试结果证实，所采用的材料配比能够达到预期的混凝土强度等级要求。

表 3.2 高强度混凝土材料的配比

| 混凝土 | 水泥(g) | 微珠(g) | 砂子(g) | 石子(g) | 水(g) |
|---|---|---|---|---|---|
| C50 | 172.9 | 70 | 525 | 770 | 140 |
| C40 | 172.9 | 70 | 525 | 770 | 147 |
| C30 | 172.9 | 70 | 525 | 770 | 164.5 |

下面，分别对混凝土试块养护期间的电磁参数变化，以及不同水灰比、温度和含水率对介电常数的影响进行分析，最后还补充了混凝土电磁参数和力学性能之间的相关性。

### 3.3.1 混凝土养护期的电磁参数监测

在 28 天的养护周期内，我们使用如图 3.17 所示的测试装置，对湿润的混凝土样本进行了介电常数的测量。尽管设备故障等因素限制了我们对样本进行全周期测量的能力，我们依然成功记录了第 1 天、第 7 天和第 30 天的数据。

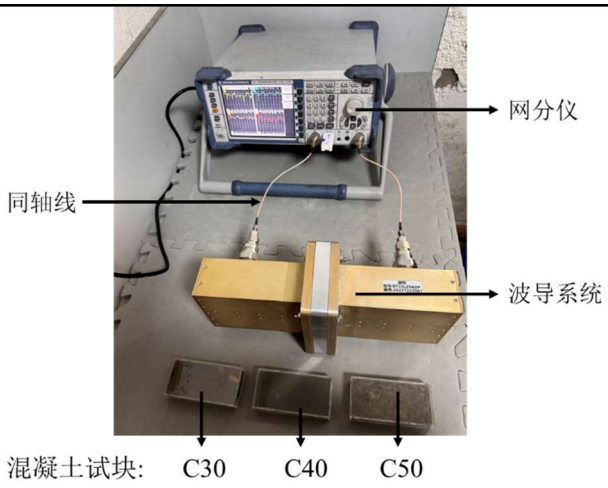



图 3.17 养护期内混凝土介电常数测量实验装置

如图 3.18 所示，介电常数在三个不同的混凝土级别（C30、C40、C50）中随时间呈现下降趋势。这表明养护过程中，混凝土的水分逐渐减少，因为水分的蒸发和混凝土内部的水化反应导致水分被消耗。此外，强度等级越高的混凝土样本初始时刻水分含量最低，因此介电常数最小，后期从养护箱取出，所有样本水分都消耗完毕时，各等级的混凝土介电常数较为接近。

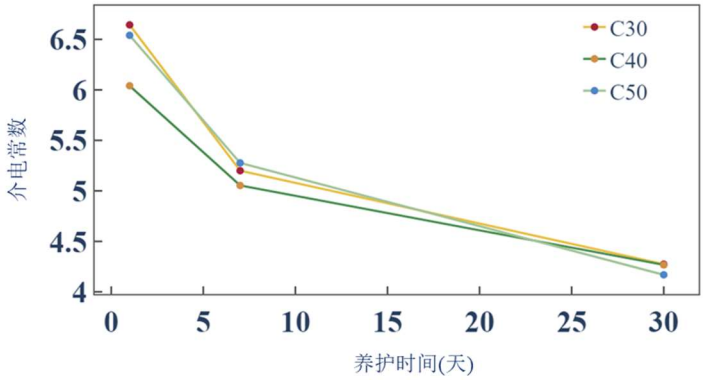



图 3.18 混凝土介电常数随养护时间的变化曲线

### 3.3.2 不同水灰比对混凝土电磁性能的影响

如下所示，在混凝土样本养护完成后，我们按强度等级（C30、C40、C50）对其进行了分类，并测量了它们从养护箱取出至室内干燥 3 天后的介电常数。

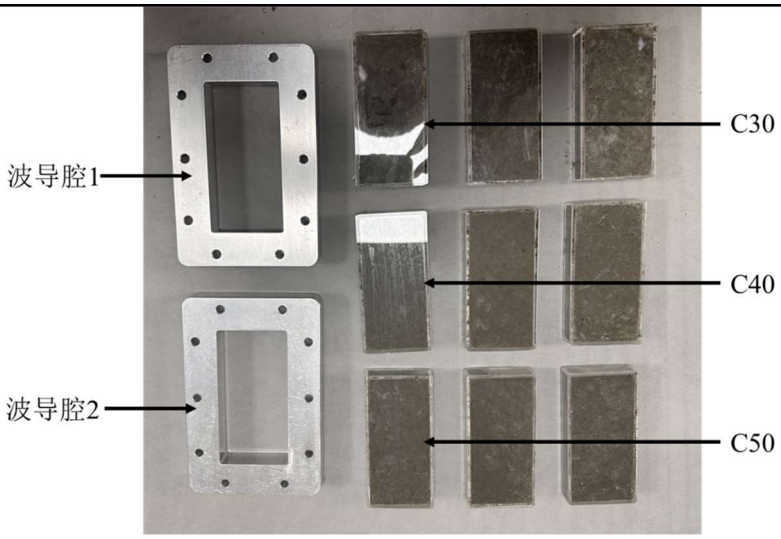



图 3.19 养护时期的混凝土试块

我们观察到水灰比较高的混凝土试块（C30: w/c=0.95），其孔隙率较大，但在干燥后介电常数却相对较低。这可能是因为高水灰比导致了更多的孔隙和较低的物质密度，从而在干燥过程中水分较快地蒸发，使得介电常数降低。反观低水灰比的混凝土（C50: w/c=0.81），因其更紧密的结构和较少的孔隙，水分蒸发较慢，导致干燥后介电常数相对较高。这些发现突显了水灰比对混凝土介电特性影响的重要性。

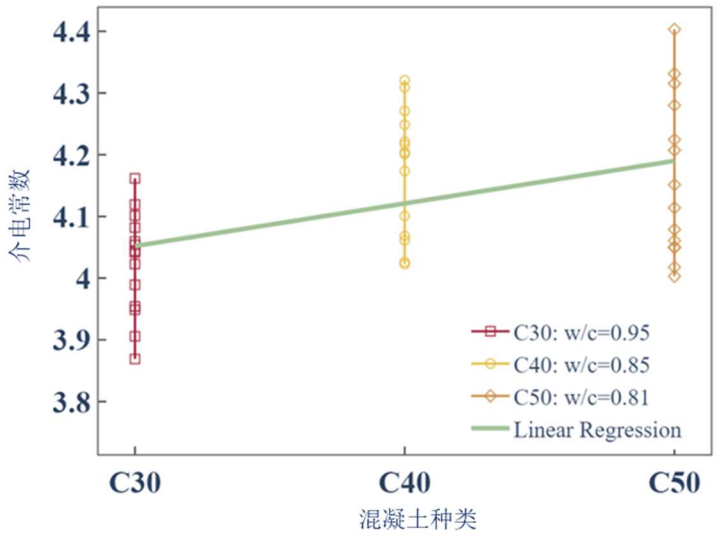



图 3.20 不同强度等级混凝土介电常数与水灰比的关系

### 3.3.3 不同温度对混凝土电磁性能的影响

在研究不同温度对混凝土电磁性能的影响时，三种不同强度等级的混凝土试块被逐个放入烤箱中。如图 3.21 所示，这些试块在标准化的环境中预先干燥处

理，随后在精确控温的烤箱里从 25°C 逐渐升温至 60°C，每次升温 5°C。为了尽可能减少温度转移造成的误差，烤箱被设定为目标温度加 3°C，并维持此状态 20 分钟以稳定温度。实验过程中，一旦烤箱内温度稳定，混凝土试块便被迅速且小心地转移到波导装置中。波导装置已连接向量网络分析仪（VNA），准备记录试块的 S 参数。

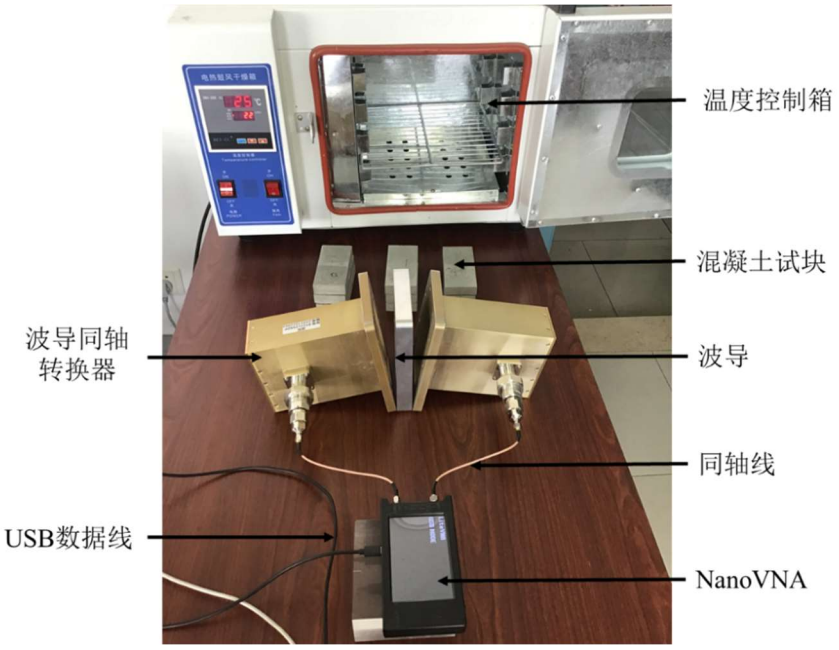



图 3.21 混凝土试块温度效应测试装置

由下图 3.23-3.25，介电常数在频率 1.72 至 2.61GHz 的范围内对温度变化表现出一致的趋势：随着温度的升高，每种混凝土样本的介电常数也相应增加。观察三种不同强度等级混凝土（C30、C40、C50）的差异，可以发现，尽管介电常数随温度增加而上升的趋势是一致的，但 C50 混凝土的斜率（0.0138）较 C30（0.0102）和 C40（0.0096）的斜率要高。这表明 C50 混凝土的介电常数对温度变化的敏感性更高。一个可能的解释是 C50 混凝土的密度和结构可能更加紧密，因此其内部的水分和孔隙结构对温度变化的响应更为显著。

所有混凝土样本的介电常数随频率的变化显示了相似的模式，特别是在 2.3 GHz 附近的一个明显的峰值，可能与混凝土材料内部特定结构的共振频率有关。

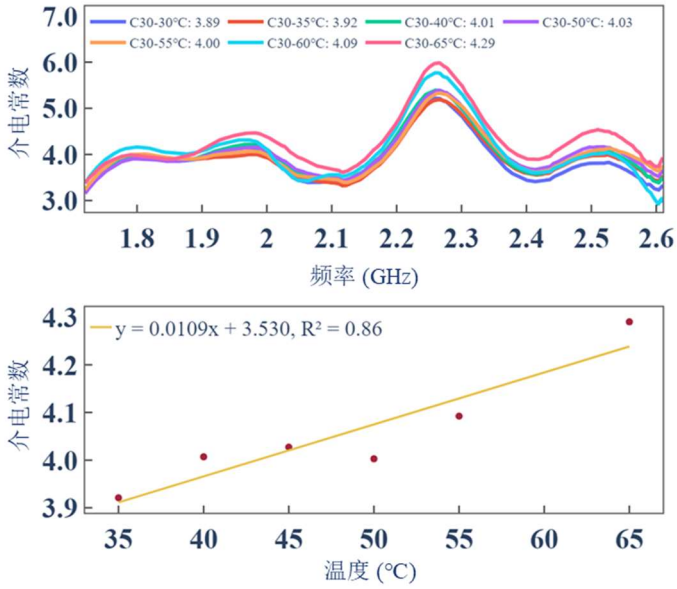



图 3.22 混凝土试块 C30 介电常数随温度和频率的变化

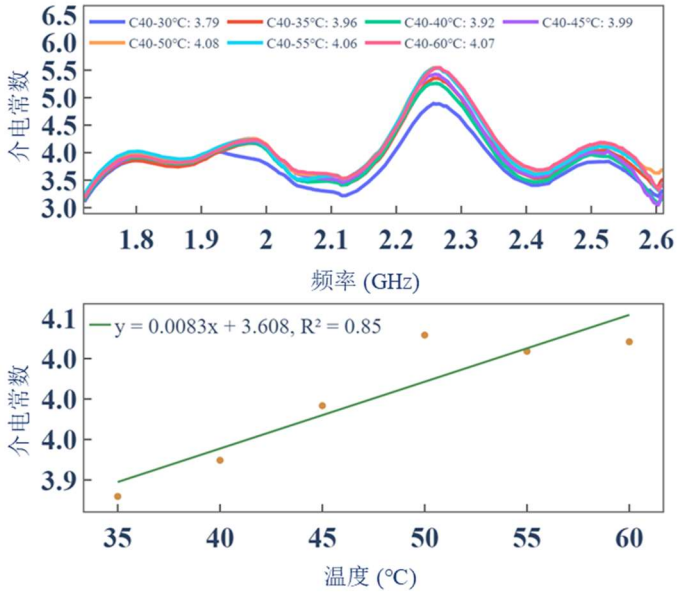



图 3.23 混凝土试块 C40 介电常数随温度和频率的变化

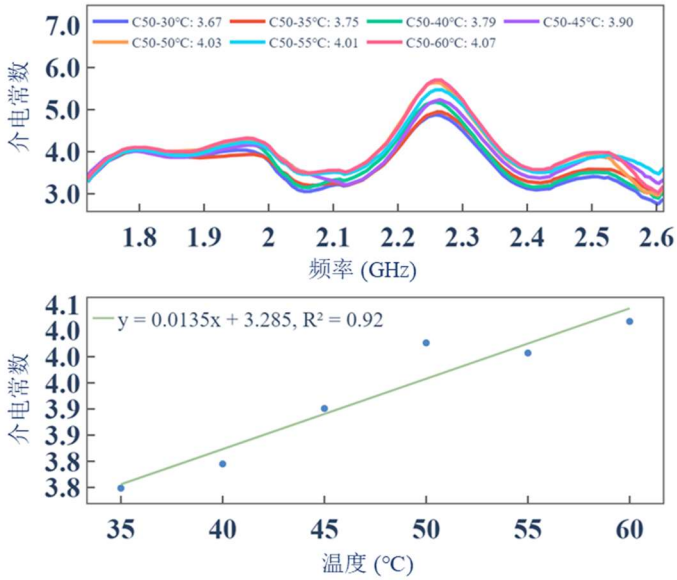



图 3.24 混凝土试块 C50 介电常数随温度和频率的变化

### 3.3.4 不同含水率对混凝土电磁性能的影响

混凝土是一种含水复合材料，其介电特性预期会随着含水率的变化而发生显著的变动。为了验证这一假设并深入研究其电磁性能，我们采取了一系列精确的实验步骤。首先，将三个不同强度等级的混凝土试件（C30、C40、C50）浸泡在水中 24 小时，以确保它们达到充分的水合状态。浸泡后，除去试件表面水分，让它们在室温下冷却并进行称重，以重量变化表征其含水率。

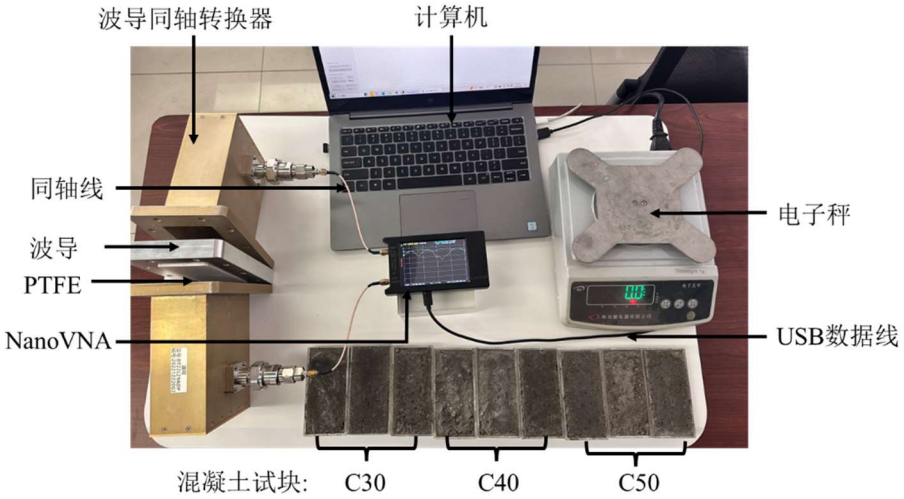



图 3.25 不同含水率混凝土介电常数测试装置

如图 3.25 实验装置所示，试件随后被放置在波导中，通过连接的向量网络分析仪（NanoVNA）精确地测量它们的 S 参数。随后通过算法能够获得不同含

水率下的介电常数，从而进一步理解水分对混凝土电磁性能的具体影响。

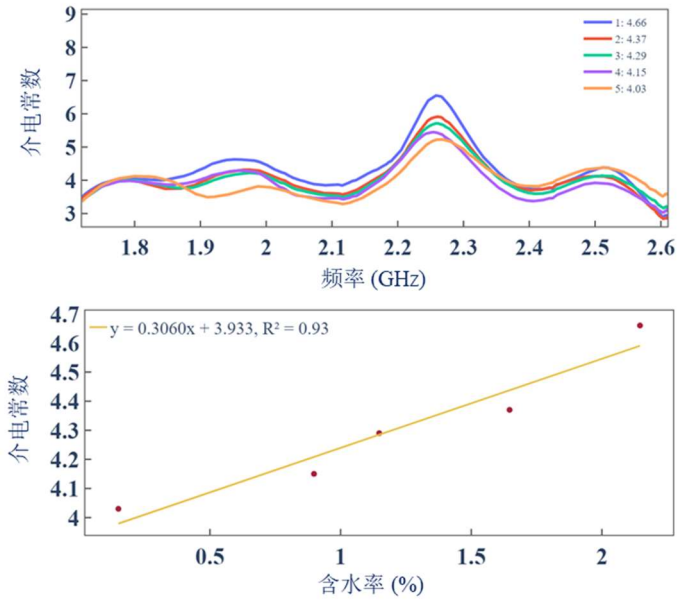



图 3.26 C30 混凝土试块在不同含水率的介电常数：
(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

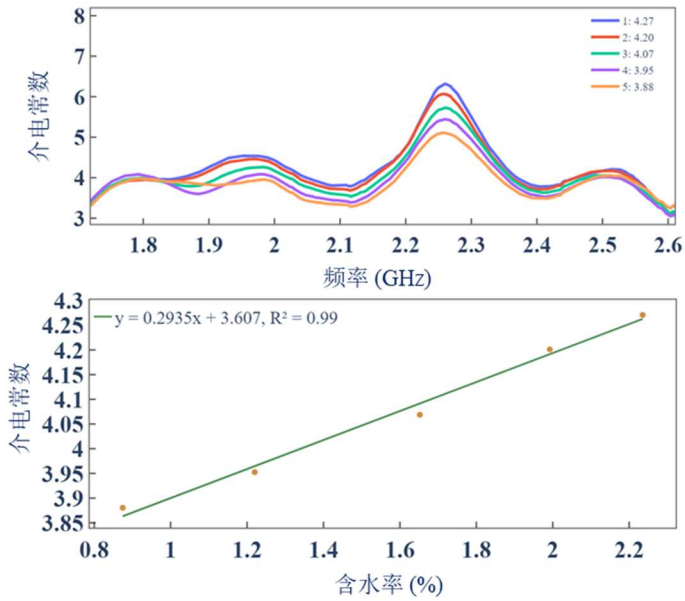



图 3.27 C40 混凝土试块在不同含水率的介电常数：(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

随着含水率的增加，介电常数相应地增加。这一现象在所有样本中都一致地反映了水分含量对于介电特性的重要性，因为水具有很高的介电常数。每幅图中上半部分的频率响应曲线表明，在 1.72 至 2.61 GHz 的范围内，所有试件的介电

常数随频率变化的行为相似，均显示了特定频率下的峰值。这些峰值可能与材料内部的微观结构特性有关，如界面极化或材料的共振效应。

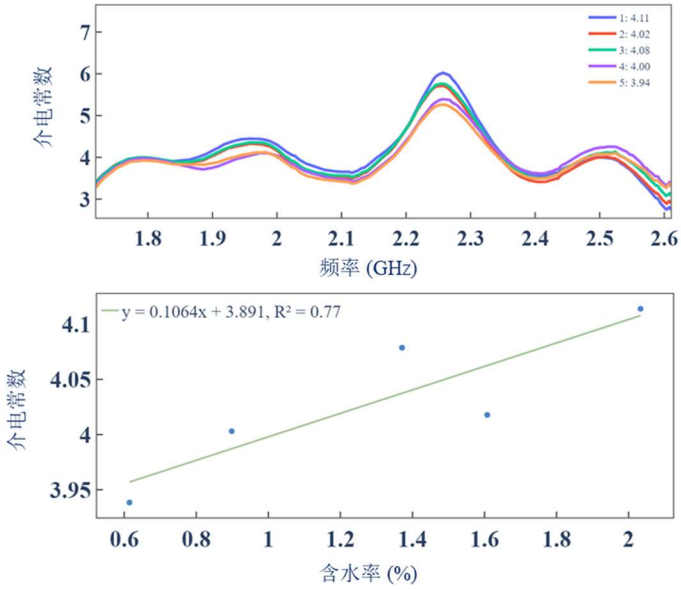



图 3.28 C50 混凝土试块在不同含水率的介电常数：
(a)反演算法得到的介电常数曲线 (b) 介电常数作为含水率函数的拟合曲线

差异主要体现在各图的下半部分的线性拟合曲线的斜率和决定系数上。第一幅图表的斜率是 0.306，决定系数为 0.93，这表明介电常数与含水率之间有较强的正相关性。第二幅图表的斜率稍低，为 0.2935，但决定系数更高，为 0.99，表明含水率对介电常数影响的模型拟合非常准确。第三幅图的斜率为 0.1064，决定系数为 0.77，显示出相对较弱的正相关性，这可能意味着其他因素也在影响着这一组混凝土试块的介电特性。

### 3.3.4 混凝土电磁性能和力学性能相关性分析

经过 28 天养护成熟后的混凝土标准试块，进行抗压强度破坏性试验。从表 3.3 不同等级混凝土样品的抗压强度结果中，我们看到随着混凝土等级从 C30 到 C50 的提高，最大破坏载荷和平均抗压强度均显著增加。

表 3.3 不同等级混凝土样品的抗压强度结果

| 混凝土 | 样品 1 | 样品 2 | 样品 3 | 最大破坏载荷 | 平均抗压强度 |
|---|---|---|---|---|---|
| C30 | 332.85kN | 344.85kN | 369.70kN | 349.13kN | 34.91MPa |
| C40 | 449.70kN | 425.90kN | 413.20kN | 429.6kN | 42.96 MPa |
| C50 | 564.15kN | 579.15kN | 567.55kN | 570.28kN | 57.03 MPa |

从图 3.29 可以观察到，不同等级的混凝土样品在 1.72 至 2.61GHz 频率范围

内的介电常数。C30、C40 和 C50 的介电常数在整个频率范围内有细微的差异，但整体趋势相似。特别是在频率的某些点，如 2.3 GHz 附近，各自的峰值位置大体一致。不过，C30 的介电常数（4.12）略高于 C40（4.02）和 C50（3.94），这表明介电常数可能随着混凝土强度等级的提高而减少。

尽管高等级的混凝土具有更高的力学强度，它们的介电常数却略低。这可能表明，随着混凝土密度的增加和孔隙率的减少（通常更高等级的混凝土具有更紧密的结构），材料对电磁波的极化能力减少，从而导致介电常数的降低。这种关系可能由混凝土内部结构和水泥基质的差异引起，例如更高强度的混凝土可能具有更多的无机矿物质，这些物质对电磁波的反应可能与普通混凝土不同。

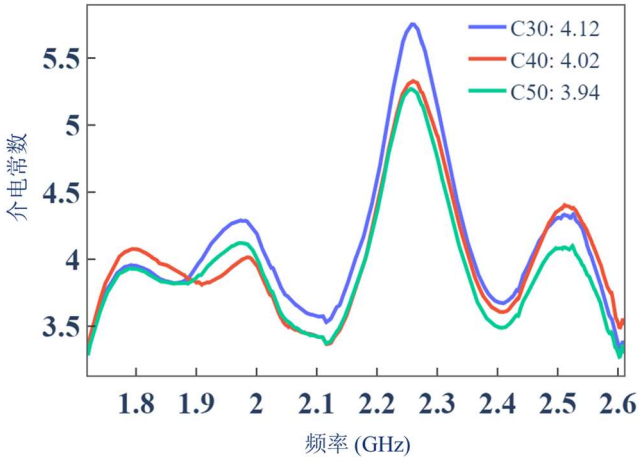



图 3.29 不同等级混凝土样品的介电常数频率响应

## 3.4 本章小结

3.1 节聚焦于波导法测量介电常数的基本概念和方法，详细阐述了混凝土介电常数的重要性、矩形波导试验原理以及矢量网络分析仪和硬件校准的应用，旨在为读者提供混凝土介电常数测量的基础知识和技术方法。

3.2 节通过波导实验探究了不同温度和含水率对水泥电磁性能的影响，这部分研究对理解环境变量如何影响水泥的电磁性质具有重要意义。

3.3 节延续了波导实验的内容，将焦点转向了测量混凝土试块介电常数，研究了养护期内的电磁参数变化和不同水灰比对混凝土电磁性能的影响，这对于理解混凝土硬化和成熟过程中电磁性质的演变至关重要。

3.4 节则从更宏观的角度分析了混凝土的电磁性能与其力学性能的相关性，这对于将电磁参数变化与结构健康监测相结合的研究具有潜在价值。

# 第4章 上覆水泥的贴片天线的环境参数感知

## 4.1 引言

在前面章节中，已经介绍了利用贴片天线作为传感单元实现对周围温度和湿度等环境参数感知的传感器。但是所开发设计的传感器通常只是通过实验，将贴片天线的测量参数与单一研究变量（温度或者湿度）建立线性或者非线性的联系，进而证明所开发的天线形式在实现某一变量传感的有效性。在理论公式方面，并未建立关于温湿度变量与矩形贴片天线电磁参数之间的关系；在高频模拟仿真中，也并未将温湿度对矩形贴片天线周围水泥或水泥材料的实际影响考虑其中，无法得到可以与实验结果相对比的模拟仿真条件，为理论公式的发展做出数据支撑和参数修正。

温度和湿度通过改变水泥的介电常数，进而改变有效介电常数，从而影响天线的谐振频率。因此，深入研究温度和湿度如何影响水泥的介电常数至关重要，采用前面章节提到的波导来测定不同环境中水泥的电磁参数。在此基础上，将实验测得的数据集导入高频模拟仿真软件（HFSS）中，进一步探索上覆的水泥试块温度和湿度对贴片天线电磁性能的影响机理，以及这些变化如何影响天线的传输特性和辐射模式。通过这些综合分析，可以更准确地预测和调节天线在不同环境条件下的性能，为实际应用中的环境监测提供更强的理论和实验支持。

在 4.2 节中，主要介绍矩形贴片天线传感器性能的优化。包括基板厚度的调整、天线矩形贴片尺寸的优化、介电基板材料的选择以及天线上覆水泥层厚度的考量。这些因素共同影响传感器的敏感性和稳定性，对提高其在各种环境下的表现至关重要。

在 4.3 节中，探讨了覆盖在贴片天线上的水泥试块的有限元模拟。首先，分析了不同空气层厚度对传感器电磁参数的影响；其次，研究了不同温度条件下基板和上覆的水泥试块对天线电磁参数的综合影响；最后，探讨了不同湿度下水泥对天线电磁参数的影响。

在第 4.4 节中，通过实验方法探究了环境因素对贴片天线电磁参数的影响。首先，研究了不同温度条件下基板和上覆的水泥试块对天线电磁参数的综合影响；接着，探讨了不同湿度水泥对天线电磁参数的影响；最后，进行了温度和湿度同时变化条件下对天线电磁参数的综合探究。这些实验旨在验证理论分析的准确性，并多层介电结构的贴片天线理论公式提供实验数据集依据。

## 4.2 天线设计

在微波无损检测检测中，为了设计一种有效的微带传感器来监测周围环境的温湿度变化，观察传感器不同电磁参数的变化对其测量性能的影响是有指导意义的。利用前面章节提及的偏心馈电贴片天线的谐振频率公式，结合所进一步基础的基板厚度、基板介电常数、贴片长度和宽度，分析了这些参数对传感器谐振频率的影响。该矩形贴片天线的辐射贴片、接地平面都采用铜质，基板选用 Rogers RO3010 材质，厚度为 0.64mm，常温下试验室测定相对介电常数为 10.2。由于该贴片传感器旨在通过测量传感器谐振频率的变化来检测第二层即水泥层（见图 4.1）的温湿度等参数，因此在下面的分析中特别考虑了第二层的参数影响。此外根据贴片天线传感器敏感度的定义，即测试层相对介电常数变化对最小可测频率变化的相应，对传感器的各个参数进行优化。

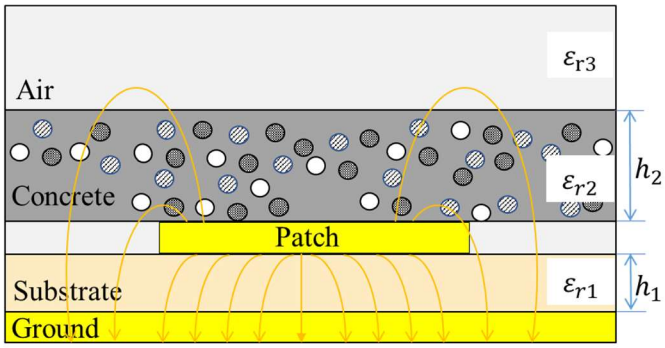



图 4.1 上覆水泥试块时贴片天线的多层介质结构示意图

在使用的 R&S®ZVL 网络分析仪器的实验中，最小可测的频率变化为 10kHz，频率范围为 10kHz 到 3GHz。HFSS 中的建模图和俯视图如图 4.2 所示，其中上覆在矩形贴片传感器上方的水泥试块尺寸与 3 章波导腔内被测物体的尺寸一致。

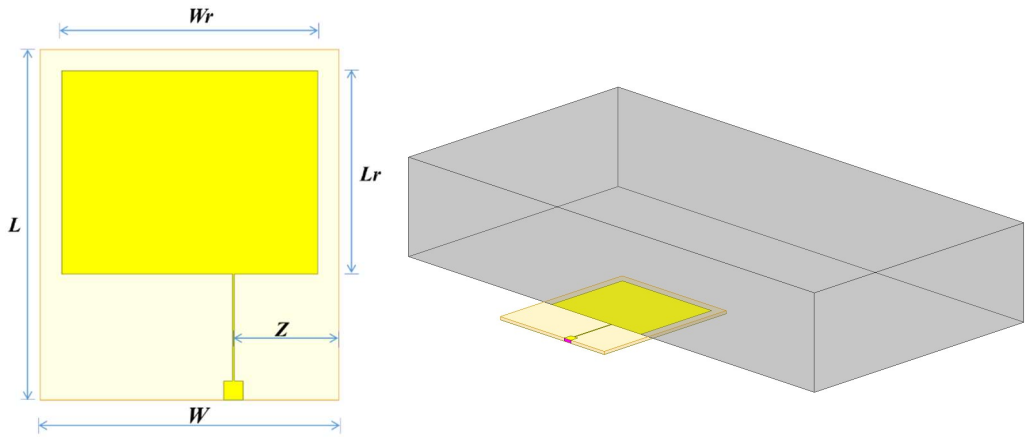



图 4.2 HFSS 建模：(a)贴片天线俯视图;(b)上覆水泥试块的贴片天线立体图

### 4.2.1 基板厚度对天线探测层的敏感性优化

为了观察传感器衬底厚度 $h_1$ 对谐振频率的影响，在 HFSS 中将基板材料的厚度分成两个范围进行分析。在 $h_1$ 在 0.1~0.8mm 之间，回波损耗曲线如下图 4.3 所示，由图可见，传感器呈现两阶谐振频率，第一阶谐振频率在 1.9GHz~2GHz 之间，第二阶谐振频率在 2.4GHz~2.5GHz 之间，回波损耗的值在-20dB~-10dB 之间，回波损耗的绝对值越大意味着反射的信号越小，传输效率越高，进而代表着更优越的性能。

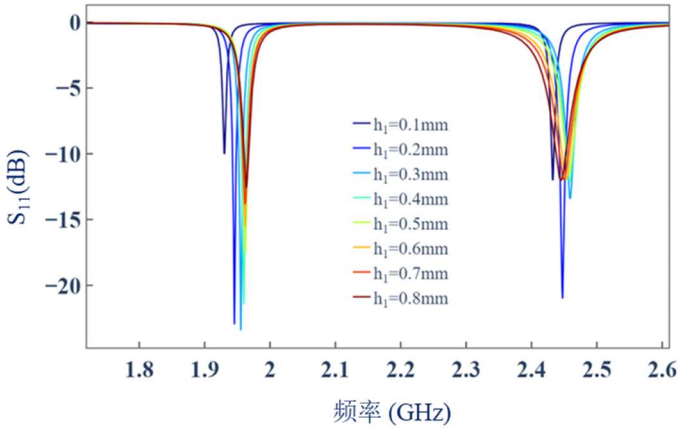



图 4.3 不同基板厚度的偏心馈电矩形贴片天线 $S_{11}$ 曲线

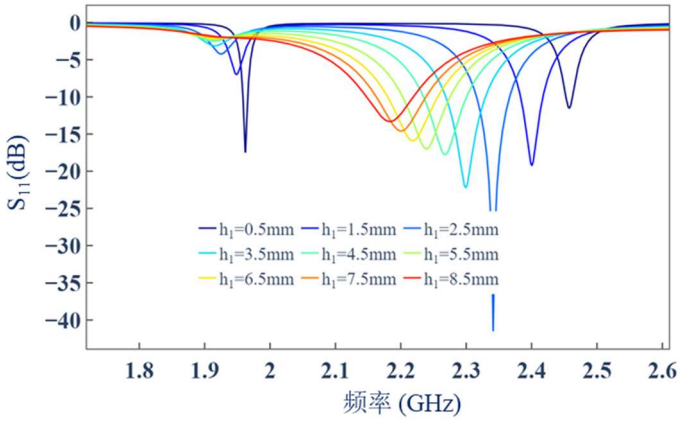



图 4.4 不同基板厚度的偏心馈电矩形贴片天线 $S_{11}$ 曲线

在 $h_1$ 在 0.5~8.5mm 之间，回波损耗曲线如图 4.4 所示，可以观察到随着基板厚度的不断增加，一阶谐振频率附近的回波损耗逐渐接近于 0 dB，意味着几乎所有的能量都被反射而没有被传输，分析原因是在电磁波在更厚的介质中传播时更多的被反射和折射。二阶谐振频率的回波损耗绝对值在 $h_1$=1.5mm 达到最大值，这表明在特定的基板厚度下，电路在二阶谐振频率处匹配最佳。当介质的厚度增

加时，有效介电常数会发生变化，导致谐振频率下降。通过比较两幅图，需要在测试频段有两阶谐振频率，且保证相对较优的性能，基板厚度 $h_1$ 应该在 0.2~1.5mm 之间。

### 4.2.2 矩形贴片横向和纵向尺寸的优化

由前面章节中关于偏心馈电的模式可知：一阶谐振频率的电流路径是沿着宽度 $W$ 方向，二阶谐振频率的电流路径是沿着长度 $L$ 方向，从下方的电流图 4.5 中观察到。因此，分别改变 $L_r$ 和 $W_r$ 的长度，对两个谐振频率带来不同的影响。

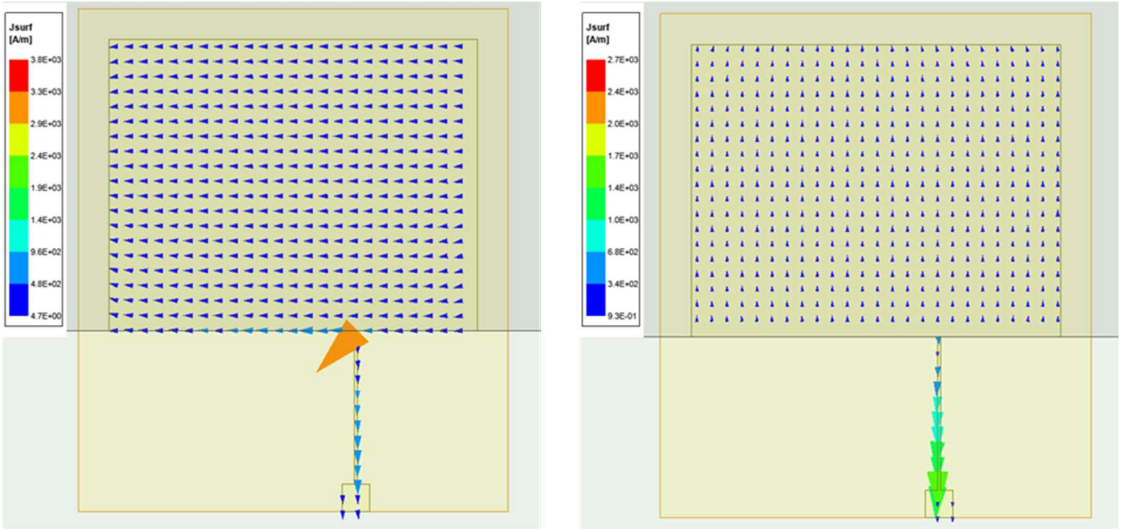



图 4.5 贴片天线传感器的感应电流图：(a)横向一阶谐振频率 (b)纵向一阶谐振频率

为了观察贴片尺寸对谐振频率的影响，图 4.6 绘制了不同贴片长度 $L_r$ 和宽度 $W_r$ 下的回波损耗曲线。观察回波损耗图表提供了对天线性能与其尺寸调整间关系的深刻洞察。首先，回波损耗 $S_{11}$ 的绝对值大小直接反映了天线对输入信号的匹配程度，低于-10dB 通常视为良好匹配，表明天线至少吸收了 90%的输入功率。因此，天线尺寸优化的首要目标是实现足够的回波损耗最小化，以确保最大程度的功率传输和信号的有效辐射。

进一步，可以得到 $L_r$ 和 $W_r$ 分别变化时与谐振频率之间的关系，如图 4.9 可见：在贴片宽度 $W_r$ 变大时，谐振频率向左偏移，一阶谐振频率显著下降，其变化率为 0.061GHz/mm，而二阶谐振频率的移动较为微弱。在贴片长度 $L_r$ 变大时，谐振频率向左偏移，二阶谐振频率的下降更为显著，变化率达到了 0.133GHz/mm，而一阶谐振频率的变化较小。另外，宽度 $W_r$ 的大小大约是 $L_r$ 的二倍，因此两阶谐振频率的变化率也大约是二倍的关系，表明宽度方向的尺寸对谐振频率的敏感性更强。这些图揭示了调整贴片尺寸以达到目标工作频率的可能性。例如，对于宽度增加带来的一阶谐振频率的显著下降，可以通过减小贴片长度来补偿，以便

在优化过程中保持二阶谐振频率的稳定。

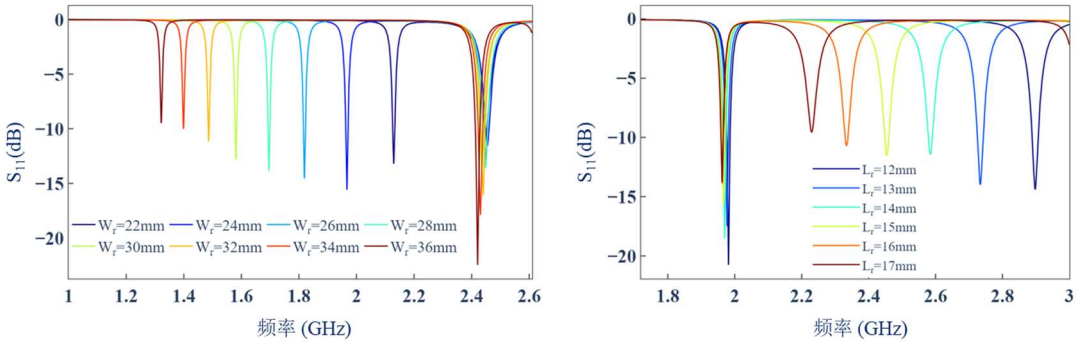



图 4.6 不同贴片宽度 $W_r$ 和长度 $L_r$ 的回波损耗曲线：(a)$L_r$=15mm (b)$W_r$=15mm

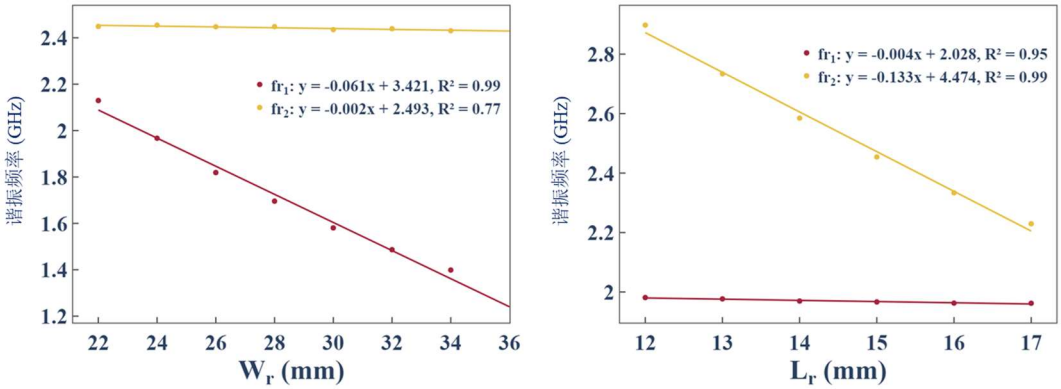



图 4.7 不同贴片宽度 $W_r$ 和长度 $L_r$ 与谐振频率之间的关系

### 4.2.3 综合考虑对温度的敏感性对介电基板材料的优化

除了贴片尺寸的相关参数以外，有效介电常数是谐振频率的另一个影响因素。在大多数应用中，当基板的介电常数远大于 1（空气的介电常数），随着操作频率的增加，大部分电场线集中在基板中，因此微带传感器更像是只有一个介质（仅基板）的均匀线路，有效介电常数趋近于基板介电常数的值。表 4.1 展示了 Rogers RO3000 系列高频层压板的性能指标。

表 4.1 Rogers RO3000 系列高频层压板性能指标

| 性能指标 | RO3003 | RO3006 | RO3010 |
|---|---|---|---|
| 介电常数$\varepsilon_r$ | 3.00 | 6.50 | 11.2 |
| 损耗因子tanδ | 0.0010 | 0.0020 | 0.0022 |
| $\varepsilon_r$热稳定系数(ppm/°C) | -3 | -262 | -395 |

图 4.8 中展示了 Rogers 系列不同介电常数的基板材料，即 RO3003、RO3006 和 RO3010，在 1.72~2.61GHz 频率范围内的 S 参数 S11 回波损耗曲线。这些曲线清晰地揭示了介电常数对天线谐振频率的影响：较低的介电常数使得天线具

有更宽的谐振峰，电磁波相对于空气传播得更快，支持较高频率的谐振模式，在所研究的频段几乎没有谐振峰。而高介电常数则使谐振峰更窄，降低了传播速度，因此天线的谐振频率会更低，RO3006 在频段中只有主谐振模式，而介电常数为 10.2 的 RO3010 则在研究频段中呈现了两个谐振峰。

材料的温度敏感性指的是其电气特性（如介电常数）随温度变化的程度。对于温度监测应用，温度敏感性高的基板材料有利于提高传感器的监测灵敏度。因此，理论上认为 RO3006 基板更适合进行贴片天线传感器对温度进行监测，但还需要实验数据进行进一步的验证。

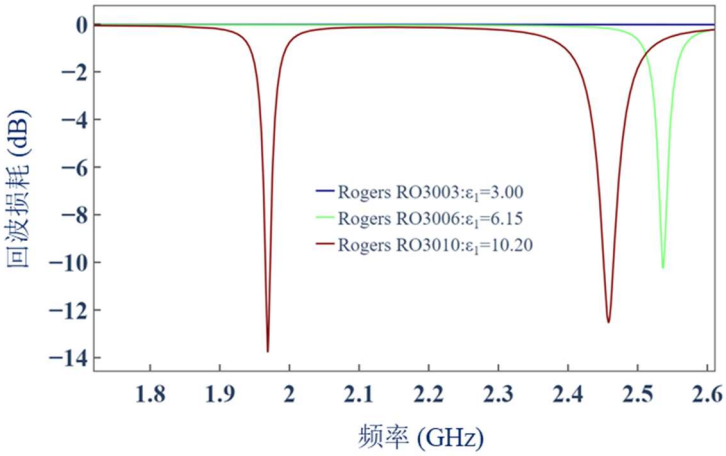



图 4.8 不同基板材料的回波损耗曲线

### 4.2.4 考虑天线上覆水泥层厚度时的参数优化

为了确定以上分析的各个参数的变化对测试层即水泥厚度变化的敏感度影响，分别改变基板厚度 $h_1$、贴片尺寸 $L_r$ 和 $W_r$ 以及基板材料，观察不同的水泥厚度 $h_2$ 对两阶谐振频率的影响规律。

由于贴片传感器的主要目的是对水泥层进行参数的感知，因此在优化尺寸时应该考虑当水泥层的厚度 $h_2$ 变化时，仿真中传感器的谐振频率在不同基板厚度下的性能表现与关系。基板厚度 $h_1$ 从 0.2mm 到 0.5 mm 分别变化，上覆水泥厚度 $h_2$ 从 10mm 到 80mm 变化情况下回波损耗的曲线如下图 4.11 所示。在不同的基板厚度 $h_1$ 下，谐振频率在测试频段内，天线的回波损耗都在-10dB 以下，保持着两个谐振峰，都显示出较好的电磁传输性能。进一步分析两阶谐振频率与水泥厚度的关系，需要提取回波损耗绝对值最大的点作为谐振频率点。为了节约分析时间和确保相对准确性，模拟软件的扫频是采用插值分析（Interpolating Sweep），在非计算点处的结果依赖于插值算法，如果频率点间距过大，可能导致插值结果不够精确，无法捕捉细微变化。因此，提取谐振频率是通过在最低点左右采取 20 个数据点进行二次拟合，最终谐振频率在不同衬底厚度下的函数绘制在图 4.9 中。

从关系图中可见，水泥层的厚度变化导致了谐振频率的波动性变化，特别是当基板厚度 $h_1$ 较薄（如 0.2 毫米）时，这种波动更为明显。随着 $h_2$ 的增加，谐振频率经历了显著的上升和下降，最终趋于降低。这些波动可能反映了微带天线在多层介电环境中的复杂电磁行为，尤其是基板与覆盖层之间的耦合效应。基板厚度 $h_1$ 对谐振频率波动的影响强度随其值的增加而减小，这表明在设计天线时，应综合考虑基板和覆盖层的厚度，以实现预期的电磁性能。

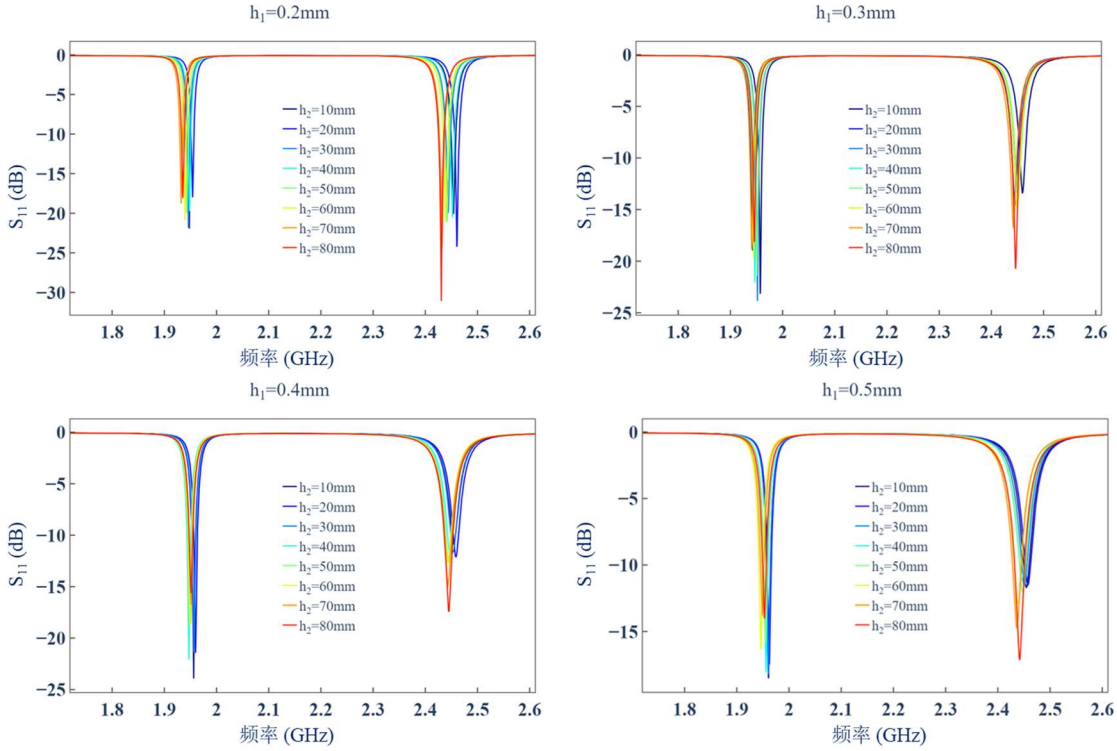
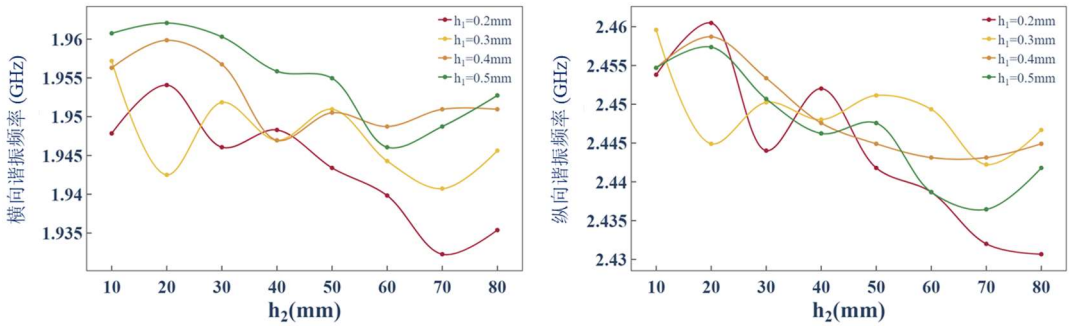



图 4.9 在不同基板厚度条件下，观测水泥层厚度对回波损耗的影响




(a)一阶谐振频率　　(b)二阶谐振频率

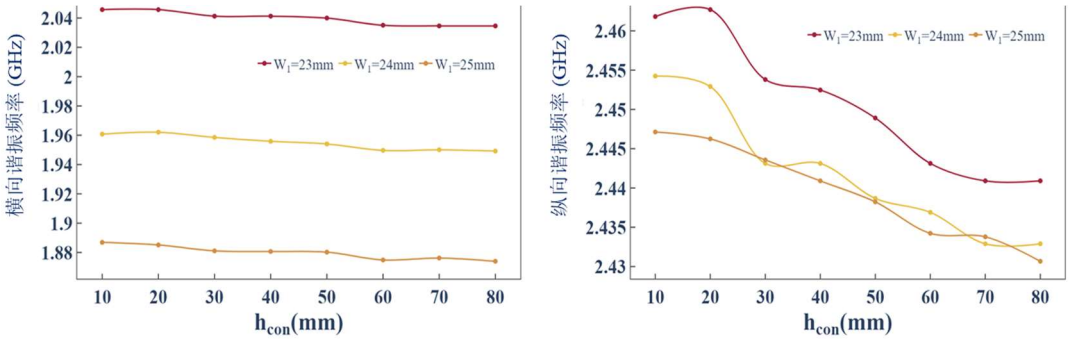
图 4.10 不同基板厚度下，水泥厚度与谐振频率之间的关系图

分析微带天线性能时，一阶和二阶谐振频率的变化展现了特定的尺寸依赖性，见图 4.11。具体来说，第一谐振频率随贴片宽度 W 的不同而显著分离，每个宽度值都对应了一个唯一的频率变化路径，反映了宽度对一阶模式的强烈影响。然

而，图 4.12 中，观察基于贴片长度 L 的一阶谐振频率，各曲线交织在一起，显示出长度变化对一阶模式的影响相对较小，或者这种影响可能被其他如水泥的厚度等设计参数的作用所抵消。

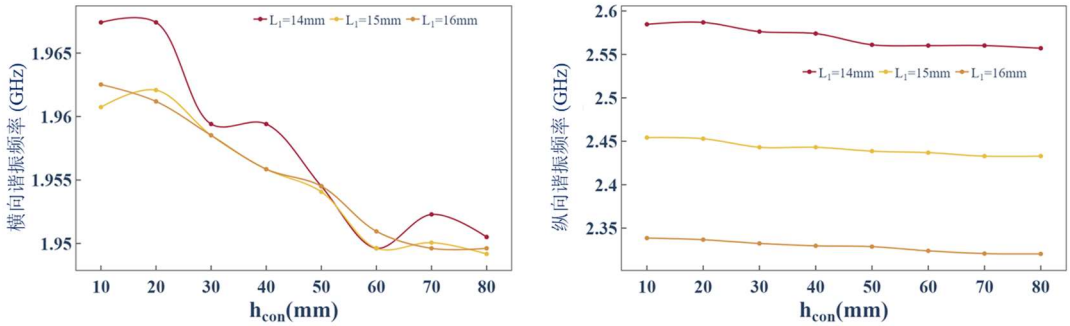
对于第二谐振频率，情况则恰好相反。不同的贴片长度 L 导致了清晰分离的频率响应曲线，表明第二谐振模式对长度非常敏感，与电流路径的长度变化直接相关。而不同宽度 W 下的第二谐振频率变化相互缠绕，这表明在高阶模式中，贴片宽度的变化并不会引起显著的频率移动，其影响不如贴片长度显著。

另一方面，观察水泥厚度对谐振频率的影响。第一谐振频率随着水泥层厚度的增加而普遍降低，这种趋势伴随贴片长度 $L_r$ 的增加而变得更加显著。而对于贴片宽度的变化，尽管第一谐振频率也表现出下降趋势，但这一效应相对较小。这反映了贴片长度在调节基频谐振方面的主导作用。相较之下，第二谐振频率对贴片长度变化的敏感度较低，而宽度 Wr 的增加导致的变化更为复杂，可能涉及到更高阶模式的电磁相互作用。这表明，在设计微带天线时，需要精细调整贴片尺寸与覆盖层厚度的匹配，以确保天线在所需的频率范围内达到最佳性能。




(a)一阶谐振频率　　(b)二阶谐振频率

图 4.11 谐振频率随水泥层厚度变化的关系（$W_r$ 不同尺寸）




(a)一阶谐振频率　　(b)二阶谐振频率

图 4.12 谐振频率随水泥层厚度变化的关系（$L_r$ 不同尺寸）

## 4.3 上覆水泥试块的贴片天线有限元模拟

综合上文分析，将 Rogers 3010®高频电路材料作为基底，其介电常数为 10.2，$T_{CDk}$ 是-395 ppm/℃。通过调整辐射贴片尺寸，确保谐振频率在 1.72 GHz~2.61GHz 之间，并对传感器的各个设计参数进行优化，如表 4.2 所示。在 HFSS 中，定义一个与波导方法中的 MUT 尺寸一致的水泥块，覆盖在贴片传感器上方。

表 4.2 偏心馈电矩形贴片天线的优化设计参数（mm）

| $W$ | $L$ | $W_r$ | $L_r$ | $Z$ |
|---|---|---|---|---|
| 28 | 32.8 | 24 | 19 | 9.9 |

为了保护贴片表面，使其不受被测物体的磨损，拟将其放置在有机塑料玻璃盒中，并在 HFSS 中研究贴片上方的空气层厚度对谐振频率的影响，以及有机玻璃盒子的厚度对传感器性能的影响。带有空气盒子并上覆水泥块的模型如图 4.13 所示。

温度以两种方式影响贴片天线及其周围水泥环境：其一是温度变化对基底材料介电常数的影响，利用基板材料的介电常数热稳定系数设置全局温度变量因子进行分析；其二是温度引起的覆盖材料介电常数的变化，将第三章节中波导测量的水泥石块的电磁参数导入到模拟软件中。

在湿度方面，主要考虑上覆水泥试块的含水率的影响。波导测试定义了水泥的频率-介电常数曲线，将这些数据被导入到 HFSS 中，以描述不同湿度水平下的水泥材料。

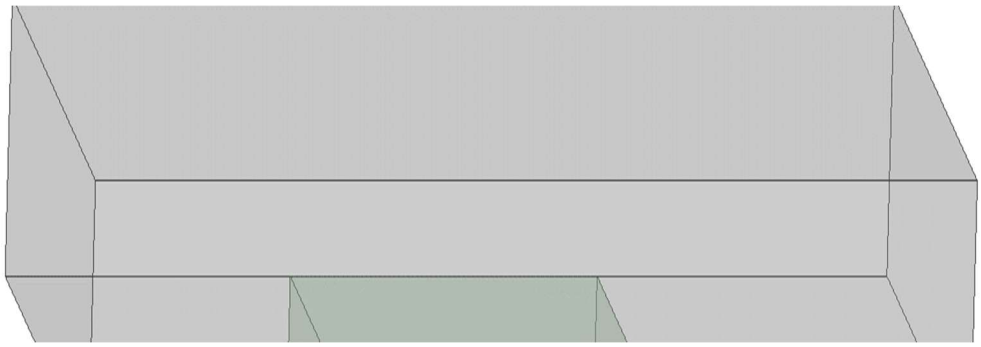


图 4.13 传感器嵌入有机玻璃盒内并覆盖水泥层的 HFSS 模型

### 4.3.1 有机玻璃盒及不同空气层厚度对贴片天线电磁参数的影响

传感器紧贴着外部的有机玻璃盒子，即空气层厚度为 0 时，分别定义上覆的水泥材料介电常数为 15 和 5，有机玻璃的介电常数使用 HFSS 材料库中的定义，介电常数为 3.6，观察有机玻璃盒的厚度对谐振频率的影响。如图 4.14 所示，当水泥材料介电常数为 15 时，$S_{11}$ 参数的谐振峰值随着厚度的增加向高频方向移动，

因为有机玻璃的介电常数较小，随着其厚度增加，导致有效介电常数的减小，两阶谐振频率均有较大的增幅，一阶谐振频率变化率为 0.018GHz/mm,二阶谐振频率变化率为 0.022GHz/mm。而当上覆的水泥介电常数定义为 5 时，有机玻璃盒的厚度同样增加，但对整体有效介电常数的影响不大，因此两阶谐振频率均没有明显的涨幅，一阶谐振频率变化率为 0.002GHz/mm,二阶谐振频率变化率为 0.004GHz/mm。

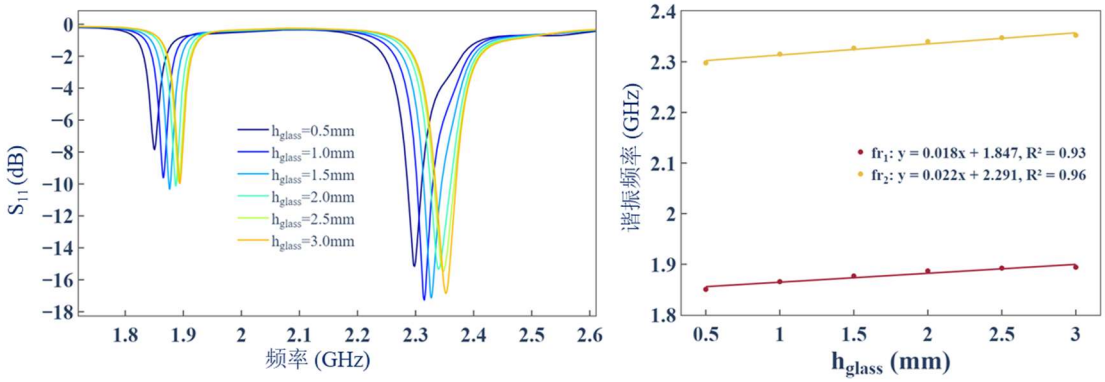



图 4.14 水泥介电常数为 15 时：(a)有机玻璃盒厚度对回波损耗影响的图示(b)有机玻璃盒厚度与谐振频率图

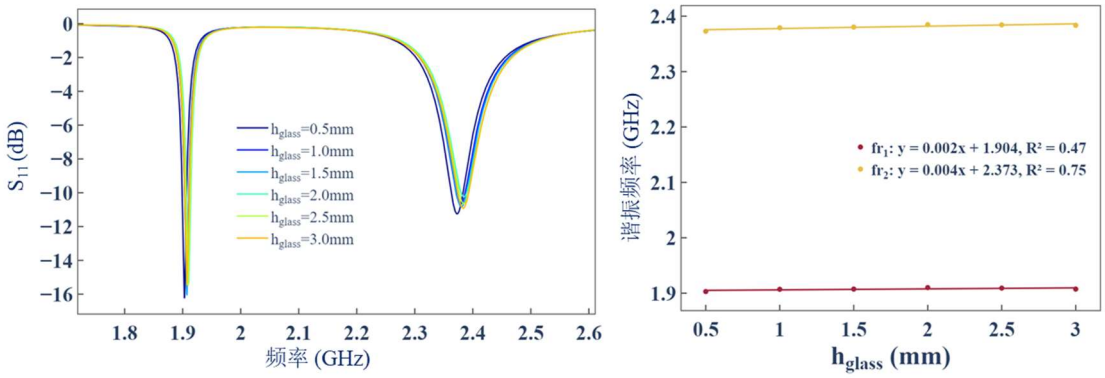



图 4.15 水泥介电常数为 5 时：(a)有机玻璃盒厚度对回波损耗影响的图示(b)有机玻璃盒厚度与谐振频率关系图

另一方面，可以探讨贴片天线上方预留的空气层厚度对其传感参数的影响。在水泥材料的介电常数为 15 时，在有机玻璃盒厚度分别为 0（即贴片天线没有被放置在盒子中）和 1mm 的情况下，空气层厚度由 0（即贴片天线与上覆水泥直接接触）到 3mm 变化时贴片天线的回波损耗和谐振频率偏移情况分别如下图 4.16 和图 4.17 所示。

当有机玻璃盒厚度为 0 时，也就是贴片天线与水泥之间只有空气层的情况下，随着空气层厚度的增加，有效介电常数减小，两阶的谐振频率均向右偏移，

变化率达到了 0.008GHz/mm，线性拟合规律较为明显。当有机玻璃盒厚度为 1mm 时，空气层厚度同样增加，谐振频率出现了先增加再减小的非线性规律。值得注意的是，当空气层厚度为零时，两阶谐振频率与有空气层的谐振频率相差非常明显。可见，空气层厚度是否需要预留对贴片天线的性能有较大的影响。另外，当没有预留空气层时，有机玻璃的厚度也会很大程度带来谐振频率的偏移。

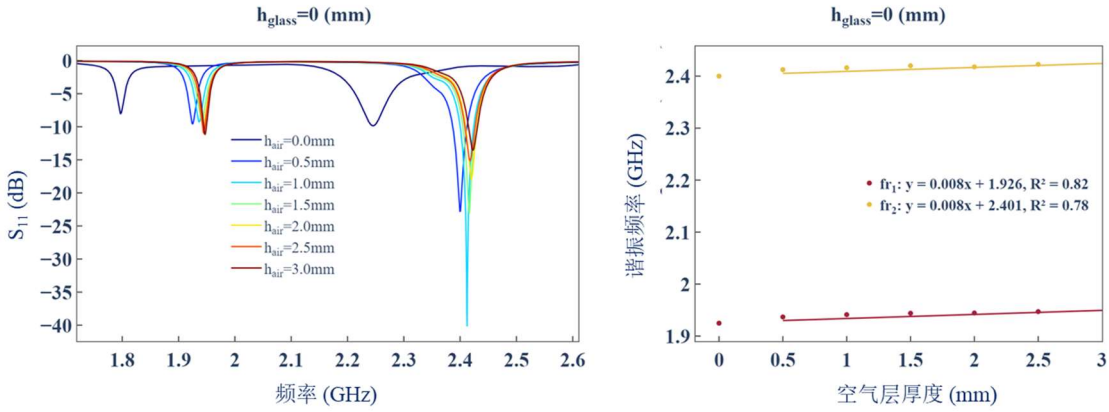



图 4.16 有机玻璃盒厚度为 0 时：(a)空气层厚度对回波损耗影响的图示(b) 空气层厚度与谐振频率关系图

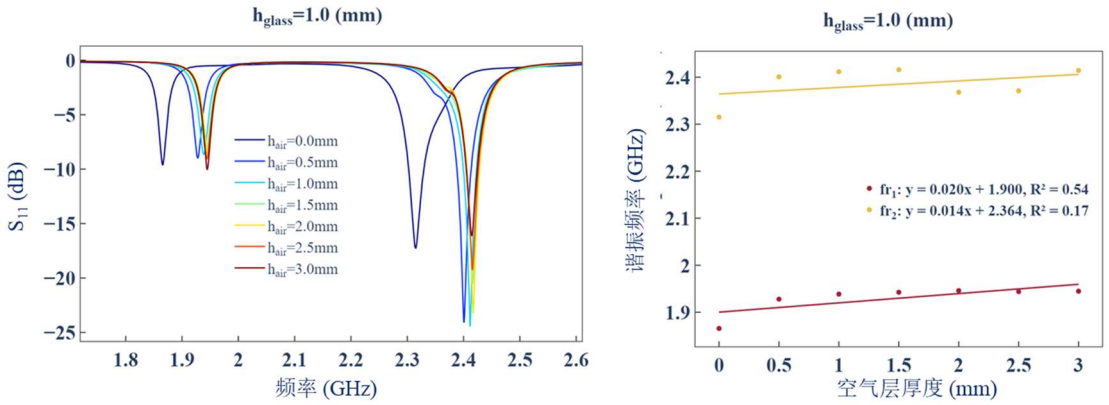



图 4.17 有机玻璃盒厚度为 1mm 时：(a)空气层厚度对回波损耗的影响(b) 空气层厚度与谐振频率关系图

### 4.3.2 不同上覆水泥材料介电常数对贴片天线电磁参数的影响

在实际环境中，温度的上升可能会减少材料的介电常数，而湿度的增加通常会增加大多数材料的介电常数。因此，温度升高可能导致谐振频率的增加，而湿度升高可能导致谐振频率的降低。这意味着通过监测谐振频率的变化，我们可以间接测量温度和湿度的变化。在图 4.18 中通过 HFSS（高频结构仿真软件）进行的模拟清晰地展示了这种效应，它为开发基于天线传感器的温湿度测量设备提供了基础。

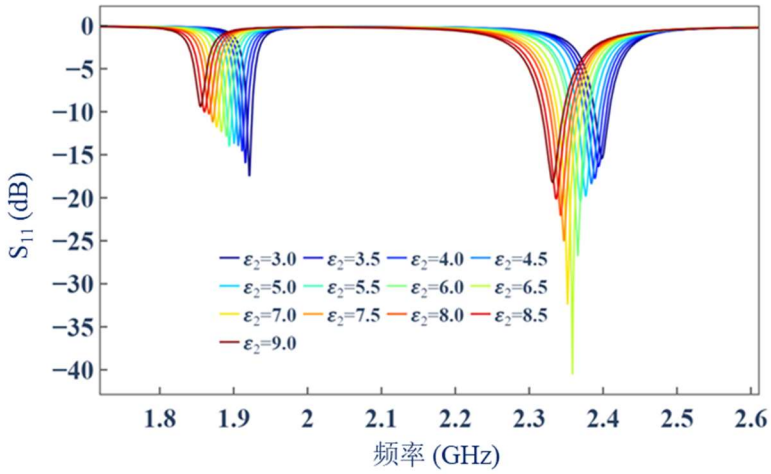



图 4.18 HFSS 中不同上覆材料介电常数的回波损耗曲线

在贴片传感器和外界的水泥材料之间可以包含空气层和有机玻璃盒，探讨空气层厚度和有机玻璃盒厚度变化对天线传感器性能的具体影响，可以见图 4.19 和图 4.20，分别为无空气层与无有机玻璃盒（$h_{glass}$=0mm, $h_{air}$=0mm）、无空气层有有机玻璃盒（$h_{glass}$=1mm, $h_{air}$=0mm）、有空气层无有机玻璃盒（$h_{glass}$=0mm, $h_{air}$=1mm）以及有空气层和有机玻璃盒（$h_{glass}$=1mm, $h_{air}$=1mm）。整体上，当覆盖材料水泥的介电常数增加时，通常会出现谐振频率的变化。由于电磁波在介质中传播速度减慢，较高的介电常数通常会降低谐振频率。

当没有空气层和有机玻璃盒时，天线直接暴露在外界环境中。天线的谐振特性主要由天线本身的设计参数和外部环境即水泥材料的电磁特性决定。线性回归方程和决定系数接近于 1.0 表明了谐振频率随介电常数的变化有着明确的线性关系。在贴片天线上方没有空气但有一定厚度的有机玻璃盒的情况下，有机玻璃的物理属性会对天线的电磁波传输路径进而对谐振特性产生影响。

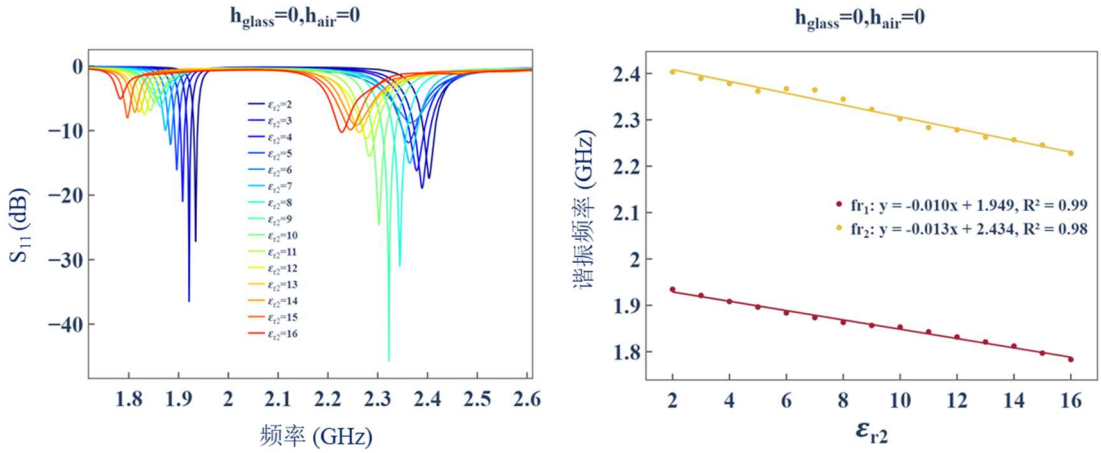



图 4.19 空气层和有机玻璃盒均为 0mm 时：(a)水泥介电常数对回波损耗的影响 (b)水泥介电常数对谐振频率的影响

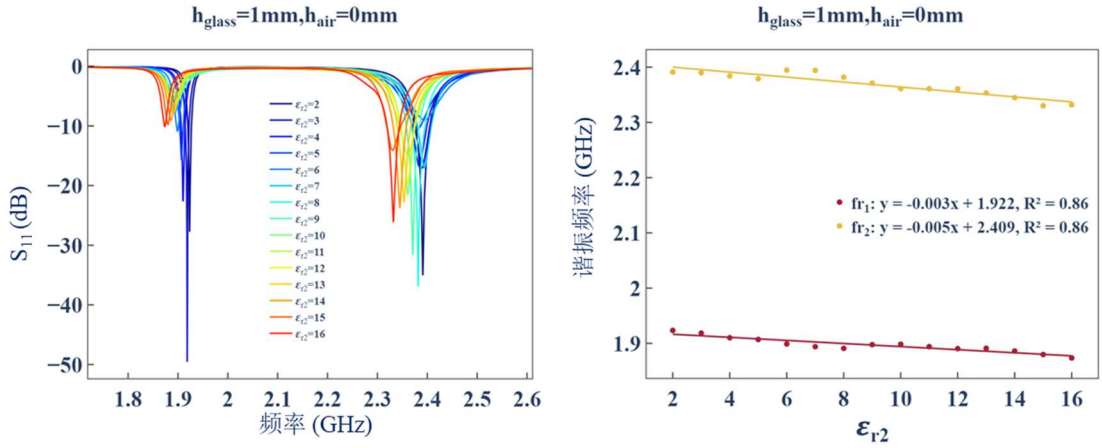



图 4.20 空气层为 0mm、有机玻璃盒为 1mm 时：(a)水泥介电常数对回波损耗的影响(b) 水泥介电常数对谐振频率的影响

两组图进行比较，在没有玻璃盒的情况下，水泥介电常数的每一个单位变化导致谐振频率的变化率约为 0.01GHz 和 0.013GHz，这表明天线直接与水泥相接触，使得天线的谐振特性非常敏感于水泥的介电特性。当有 1mm 厚的有机玻璃盒时，谐振频率的变化率降低到了 0.003GHz 和 0.005GHz。这种变化率的降低可以归因于有机玻璃盒作为电磁波传播路径中的一部分，改变了天线和覆盖材料之间的电磁耦合。有机玻璃的介电常数为 3.6，相对于基板的介电常数 10.2 以及水泥的介电常数变化范围 2~16 来说较低。因此，有机玻璃提供了一种介电性能的中间值，导致电磁波传播发生改变，减少了水泥介电常数对谐振频率的直接影响。

下面探讨贴片天线上方保留 1mm 空气层的情况。天线上方有 1mm 的空气层而无有机玻璃盒，这意味着天线表面与水泥之间存在一定的空气间隔。由于空气的介电常数远低于水泥，它对电磁波的影响较小。线性拟合显示谐振频率变化率为-0.0004GHz，决定系数 $R^2$值较低，说明水泥的介电常数变化对谐振频率的影响相对有限。这可能是因为空气层的存在减弱了水泥对天线谐振特性的直接影响。

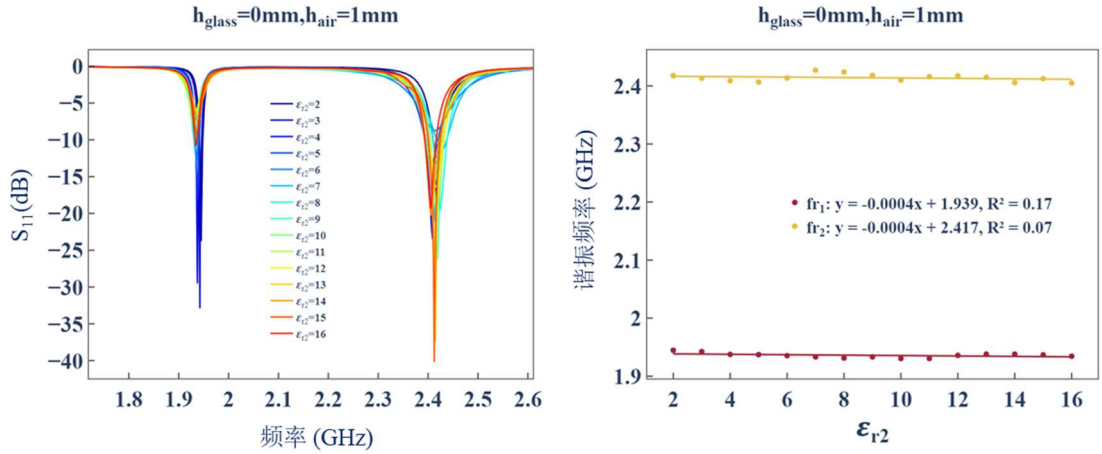



图 4.21 空气层为 1mm 有机玻璃盒为 0mm 时：(a)水泥介电常数对回波损耗的影响(b) 水泥介电常数对谐振频率的影响

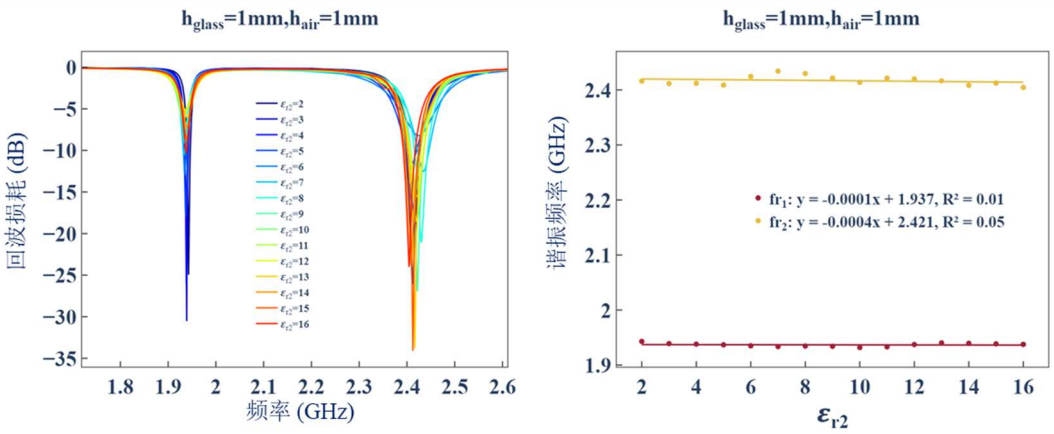



图 4.22 空气和玻璃盒均为 1mm 时：(a)水泥介电常数对回波损耗的影响(b)水泥介电常数对谐振频率的影响

当空气层和有机玻璃盒都存在时，两者可能一起影响天线的谐振特性。空气层的低介电常数与有机玻璃盒的相对中等介电常数共同作用，会在一定程度上抵消水泥介电常数变化的影响。线性拟合方程的斜率接近于 0，决定系数接近于 0，这表明在这种配置下，水泥的介电常数变化对谐振频率的影响非常小。尽管存在物理隔离层，但由于空气层和有机玻璃层的综合影响，谐振频率的变化几乎可以忽略不计，说明这样的设计不利于利用传感器感知上覆水泥温湿度的应用场景，但对于想要隔绝温湿度等外部环境影响的传感器封装设计，模拟结果表明：空气层可以作为一个有效的介电隔离层，减少覆盖材料的介电特性对天线性能的影响。

### 4.3.3 温度对基板和上覆水泥对贴片天线电磁参数的综合影响

关于基底部分，使用 $T_{CDk}$ 来量化温度对基底材料介电常数的影响。通过在 HFSS 中建立全局温度因子，通过影响基板材料的介电常数的温度敏感系数，温度从 20℃到 60℃，设置 Rogers RO3010 的介电常数公式，可以获得在不同温度下的回波损耗曲线。仿真结果和线性拟合结果如图 4.23 所示。从图中可见，温度越高，谐振频率向右偏移。这是因为有效介电常数随着温度升高而降低，谐振频率因此稍微变大。温度每升高 1℃，一阶谐振频率上升约 0.31 MHz，二阶谐振频率上升约 0.39 MHz，决定系数接近于 1，说明其线性拟合很完美。

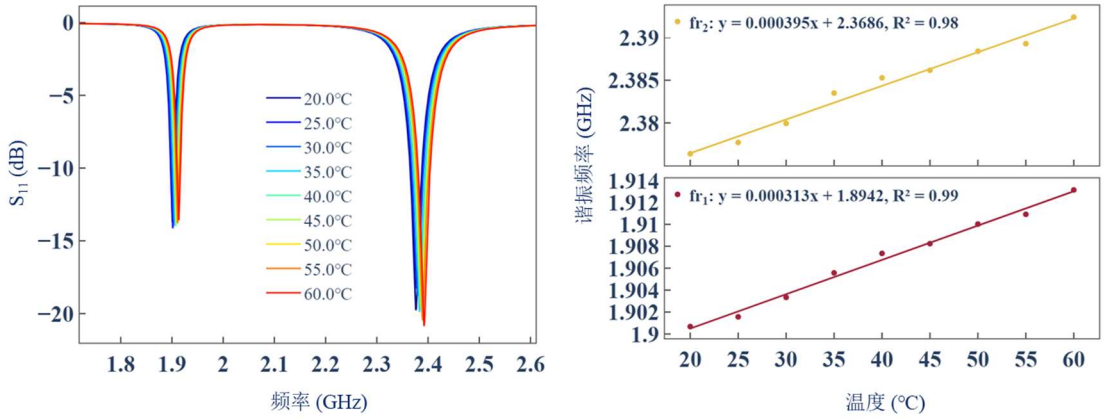



图 4.23 基板温度变化对天线回波损耗以及谐振频率的影响

前面章节介绍的波导法测试了不同温度下水泥试块的电磁参数，具体是指在测试频率范围内的四个散射参数，并利用算法将其转化为介电常数和损耗正切以及磁导率等电磁参数。将这样的实验数据集导入到 HFSS 中对水泥材料的定义，在模拟仿真软件中测试贴片天线对真实的水泥材料的传感性能。得到了不同温度的水泥材料下贴片天线的回波损耗曲线和两者之间的关系如下图 4.24 所示。整体而言，随着上覆材料的温度变化，贴片天线的传感性能和信号相对稳定，变化较小，谐振频率的变化率在-0.057MHz 和-0.047MHz 左右，决定系数分别是 0.61 和 0.31，可见水泥温度变化对下方的贴片天线的传感参数的影响不是可以用线性关系准确拟合的。

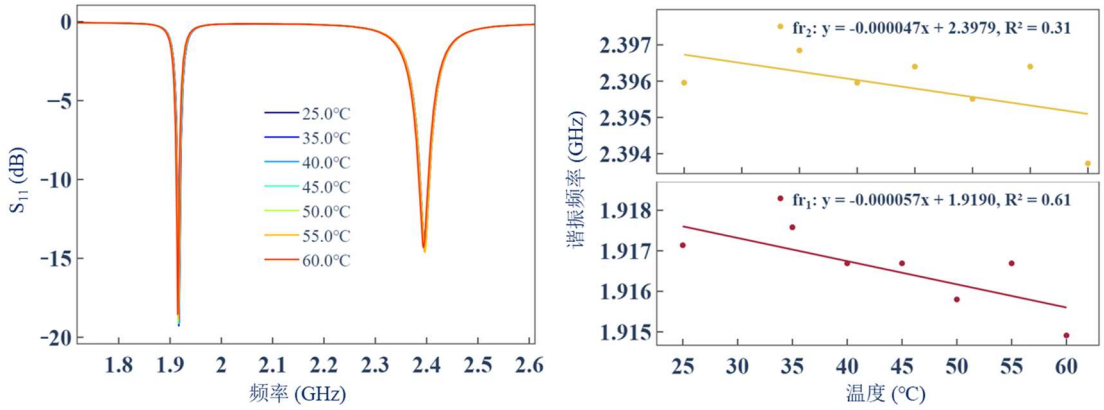



图 4.24 水泥温度变化对天线回波损耗以及谐振频率的影响

在后续模拟仿真中，考虑基板和上覆材料两个变量的综合影响效应。具体的做法是，在确定覆盖材料的电磁特性时，从波导实验数据导入了 25℃时的介电常数和介电损耗角。同时，将全局温度变量设定为 25℃，以获得此温度下的贴片天线回波损耗曲线，并重复此过程以获取其他温度的数据。图 4.25 展示了各种温度下的回波损耗曲线，并利用线性拟合线描述谐振频率的偏移趋势，结果显示

谐振频率随着温度的升高而上升。综合温度效应呈现较为完美的线性相关性，一阶与二阶谐振频率的温度变化率分别为 0.295 MHz/℃和 0.364 MHz/℃。

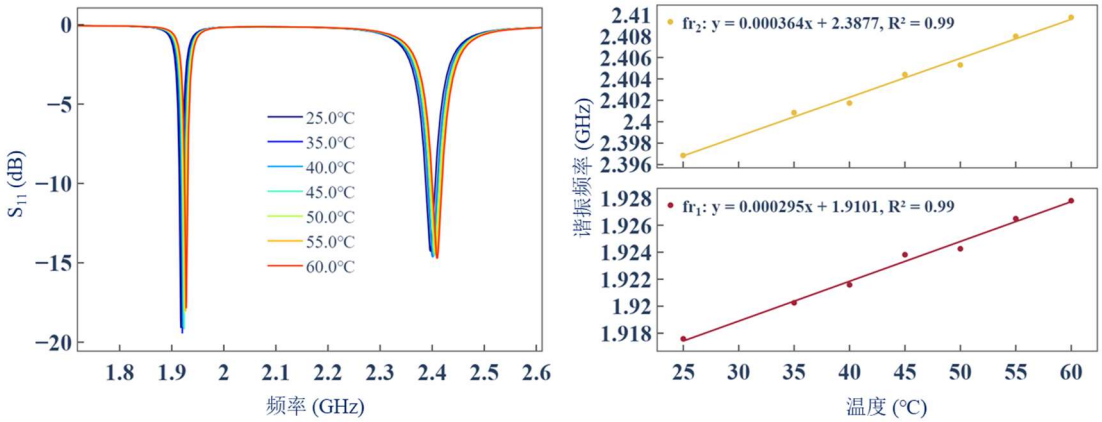



图 4.25 综合两者探究温度变化对天线回波损耗以及谐振频率的影响

以上利用仿真模拟，对上覆水泥天线谐振频率的温度影响进行了定量分析。接下来，将温度部分的模拟仿真结果进行整合，结果如图 4.26 所示。

对于第一阶谐振频率，基底材料的谐振频率变化率为 0.317MHz/℃，这表示随着温度的升高，谐振频率也随之增加，显示出基底材料可能对温度的变化极为敏感。而覆盖材料—水泥的谐振频率变化率为-0.057MHz/℃，这意味着它的谐振频率随温度上升而轻微下降，这可能是因为水泥的介电特性在温度升高时会发生减小。综合效应的变化率是 0.295MHz/℃，这基本上接近于基底材料的变化率，这暗示在综合温度效应中，基底材料的作用是占主导地位的。

在第二阶谐振频率方面，基底材料的变化率为 0.393MHz/℃，比第一阶更高，这再次证实了基底材料的谐振频率对温度极为敏感。相比之下，覆盖材料的变化率降低为-0.037MHz/℃，表明水泥的温度效应在第二阶谐振频率时相对较弱。综合效应的变化率上升至 0.364MHz/℃，表明在更高阶的谐振模式下，电磁波对材料介电特性变化的敏感度增加。

这些模拟结果揭示了在设计高温度稳定性的天线系统时，基底和覆盖材料的选择是多么关键。特别是在需要高精度温度控制的应用中，如精密制造或环境监测，了解并利用这些温度变化率可以显著优化天线的性能。通过仔细调整基底和覆盖材料的属性，天线可以被设计来适应和维持在特定温度范围内的性能，即使在遭受较大温度波动的环境中也能保持信号的质量和传输效率。

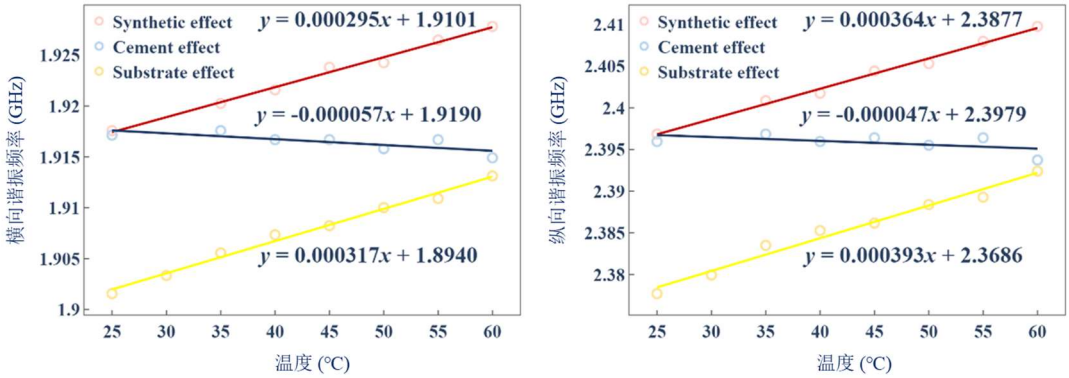



图 4.26 不同温度下(a) 一阶谐振频率：(b) 二阶谐振频率（其中黄色代表温度对基板材料的影响，蓝色代表温度对上覆水泥的影响，红色代表两者同时考虑带来的影响）

### 4.3.4 不同湿度水泥对贴片天线电磁参数的影响

为了探究湿度变化对水泥样本介电特性的影响，首先将样本烘干并称重以获得干燥重量 $W_d$。接下来，在试验前一天，样本被浸泡 24 小时以完成水合作用，去除表面水分并记录重量 $W_i$。然后，将水泥样本置于波导中，利用矢量网络分析仪记录其 S 参数数据。这些数据用于后续通过 NRW 方法计算样本的介电常数和磁导率。测量完毕后，样本被放回烘箱烘干并冷却至室温，确保数据的准确性。湿度的计算基于 $W_i$ 与 $W_d$ 的差值，通过此方法可以量化样本的湿度并分析其对电磁参数的影响。

波导测试定义了水泥样本的介电常数曲线，将数据被导入到 HFSS 中，以描述不同湿度水平下的水泥材料。仿真模拟结果如图 4.27 显示，自由水含量的增加相应地增加了上覆材料的介电常数，导致回波损耗曲线整体向左偏移。

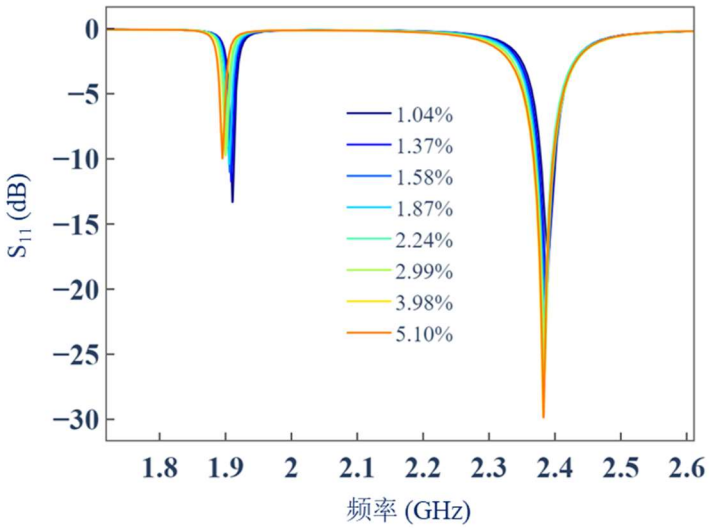



图 4.27 贴片天线上覆不同湿度的水泥试块的回波损耗曲线

提取出不同含水率水泥试块下贴片天线的谐振频率点，将数据点和拟合直线绘制如下图 4.28，展示了两个不同的谐振频率（$f_{r1}$ 和 $f_{r2}$）随着水分含量的变化。$f_{r1}$ 的谐振频率（以红色标记）随着湿度的增加而明显降低，其线性拟合方程为拟合优度 $R_2$ 为 0.97，这表示该拟合模型非常好地解释了数据变化。相反，$f_{r2}$ 的谐振频率（以黄色标记）似乎随湿度的增加变化不大，其线性拟合方程为，拟合优度 $R_2$ 为 0.83，这表明拟合模型对数据变化的解释程度较好，但不如 $f_{r1}$ 的拟合。可见，湿度对不同谐振频率的影响程度不同，一阶在湿度变化时更敏感，而二阶谐振频率较为稳定。

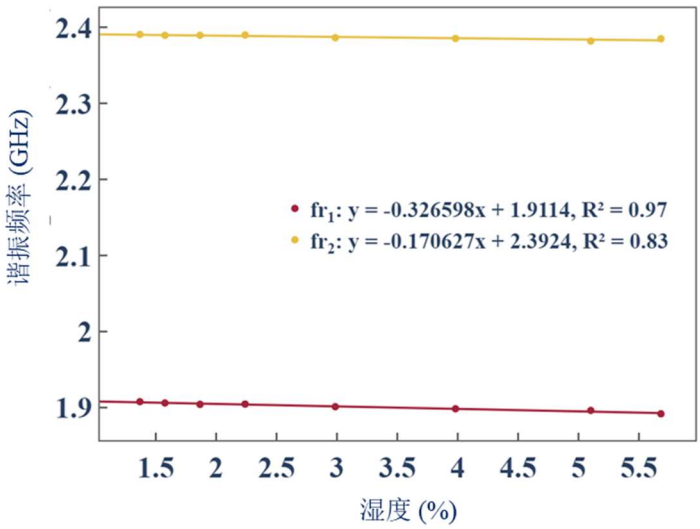



图 4.28 贴片天线上覆不同湿度的水泥试块的谐振频率

### 4.3.5 探究温湿度同时变化时贴片天线的电磁参数变化

为了探索温度和湿度对贴片天线电磁参数的联合影响，我们进行了一系列实验，通过分别独立变化这两个因素来分析其对电磁特性的影响。鉴于实验上难以同时精确控制样本的温湿度，我们采取了分步实验方法，以湿度为先导变量。

实验的第一步是将水泥试块分别置于 45 和 55℃的恒温环境中浸泡，直至水分达到饱和。随后，从水中取出试块，记录其饱和后的重量，此时试块的含水率处于最高点。

接着，将试块放入与浸泡温度相同的恒温烘箱中进行干燥处理。在干燥过程中，定时取出试块进行称重，记录其重量的变化以反映不同时间点的湿度水平。这一步骤对于捕捉湿度对电磁参数的影响至关重要。

每次称重后，立即将试块放回波导腔内，利用矢量网络分析仪（VNA）快速记录 S 参数，确保所得数据能准确对应于当时的湿度条件。

同样的测量程序也被用于 55℃下的试块，这样我们就能够在相同湿度水平下，对比不同温度环境中的水泥试块的电磁特性变化。45℃和 55℃的回波损耗曲线分别如下 4.29 所示。

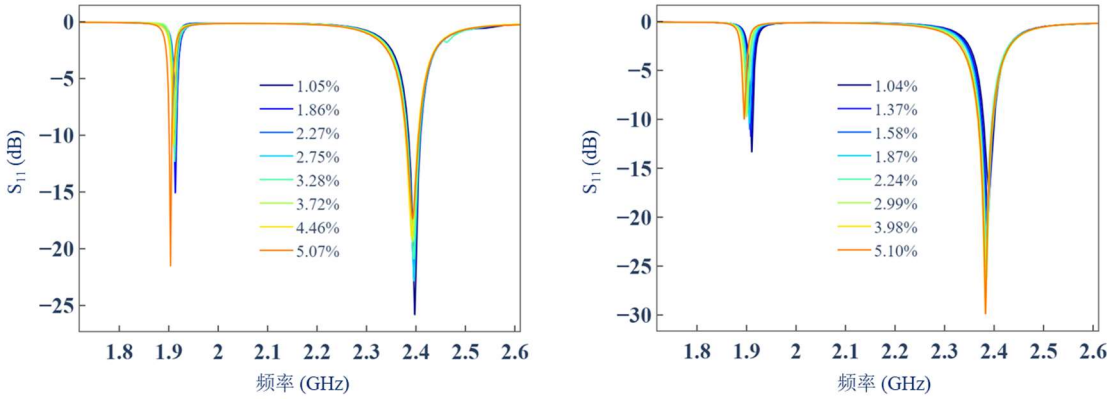



图 4.29 水泥含水率变化时贴片天线的回波损耗曲线：(a)45℃恒温(b) 55℃恒温

将 45℃和 55℃的试块的含水率与两阶谐振频率分别绘制在图 4.30 和图 4.31 所示。在图 4.30 和图 4.31 中，我们展示了 45℃和 55℃环境下的水泥试块含水率与天线的一阶和二阶谐振频率之间的关系。分析表明，一阶谐振频率随着含水率的增加呈现下降趋势。在 45℃条件下，其灵敏度为 0.3088GHz/%，决定系数（$R^2$）达到了 0.99，这意味着含水率与一阶谐振频率之间有着极高的相关性，表明天线对于水泥的湿度变化非常敏感。而在 55℃条件下，灵敏度稍低，为 0.2818 GHz/%，$R^2$ 为 0.97，仍显示出很高的相关性。

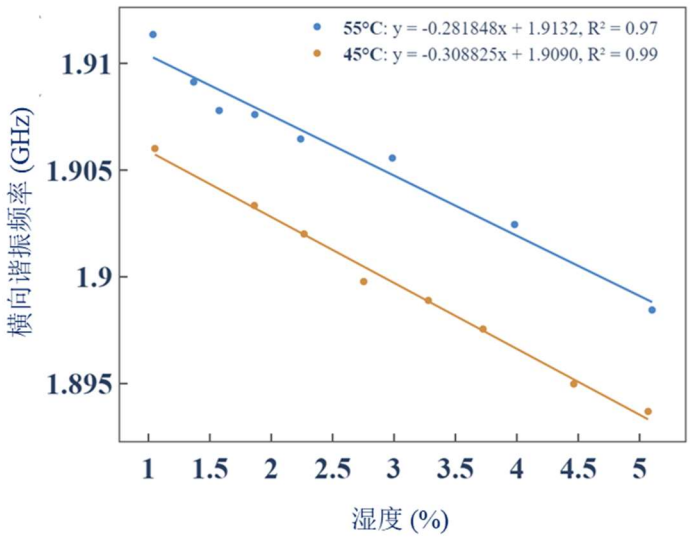



图 4.30 不同温湿度的水泥试块与贴片天线一阶谐振频率的关系

另一方面，55℃的谐振频率总体上高于 45℃，这可能是因为温度升高导致

的介电常数下降。高温促进了水分的蒸发，减少了试块的介电常数，而谐振频率与介电常数成反比，因此随着介电常数的减小，谐振频率上升。这些发现强调了在进行天线设计时，需要充分考虑材料在不同环境条件下的介电特性，以确保传感器的准确性和可靠性。此外，这些数据提供了宝贵的参考，以优化天线设计，使其更好地适应温度和湿度的变化。

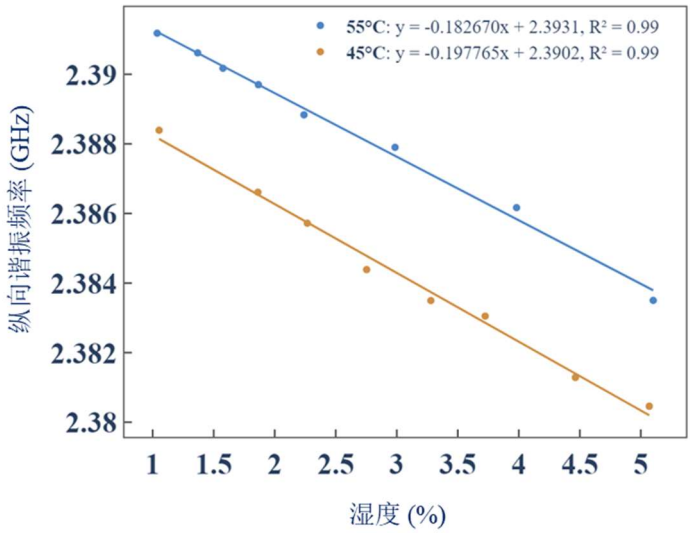



图 4.31 不同温湿度的水泥试块与贴片天线二阶谐振频率的关系

在 45°C 和 55°C 的条件下，水泥试块的湿度变化对贴片天线的二阶谐振频率影响的研究结果通过线性回归呈现。45°C 条件下的分析结果显示，随着湿度的增加，二阶谐振频率显著下降，线性方程 $y = -0.197765x + 2.3902$ 和决定系数 $R^2 = 0.99$ 揭示了湿度和谐振频率之间的强相关性。在 55°C 条件下，虽然谐振频率同样表现出随湿度增加而下降的趋势，线性方程 $y = -0.182670x + 2.3931$ 和同样的决定系数 $R^2 = 0.99$ 同样证实了二阶谐振频率对湿度变化的敏感性。同时与一阶谐振频率相比较，不论是在 45°C 还是 55°C 条件下，一阶谐振频率的变化率都大于二阶谐振频率的变化率，说明在这两个温度条件下，一阶谐振频率都比二阶谐振频率对湿度的变化更加敏感。

## 4.4 实验探究

基于对贴在水泥试块上的天线传感器的模拟，需要进实验以验证温度和湿度对谐振频率影响的定量分析。图 4.32 明确显示，在进行水泥介电常数的波导测量和涉及贴片天线的传感器试验期间，保持统一的环境条件是必要的，目的是维护波导试验与模拟仿真的数据结果与贴片天线的实测结果具有一定的可比较性。

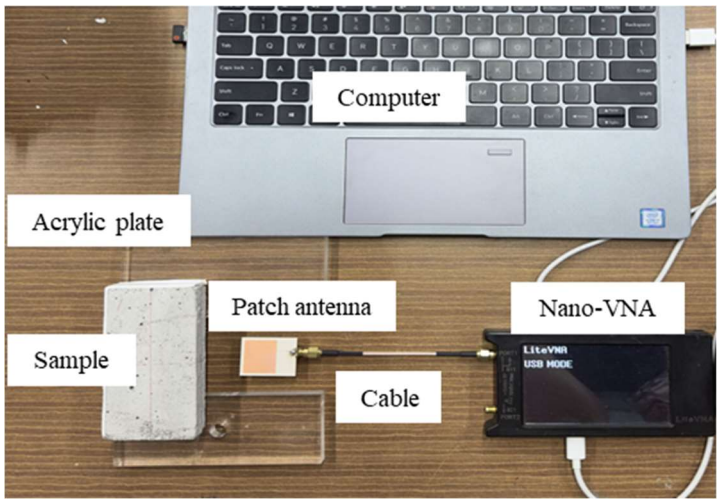



图 4.32 加工的传感器和搭建的测量系统

### 4.4.1 温度对基板和上覆水泥对贴片天线电磁参数的综合影响

水泥样品加热至 60℃保持 20 分钟，然后将样品放置在贴片天线上。使用探针温度计持续监测冷却，并记录由 VNA 记录的传感器数据，每下降 1-2℃记录一次，并随后传输到计算机。

如图 4.33 所示，一阶和二阶谐振频率与温度之间存在线性关系。实验中设定的频率变化率分别为 0.310 MHz/℃和 0.438 MHz/℃，与先前仿真模拟相比，这些结果分别显示了 4.8%和 16.8%的差异。这表明在工程中使用该传感器时，考虑到模拟和实际条件之间可能存在的差异，需要进行校准。

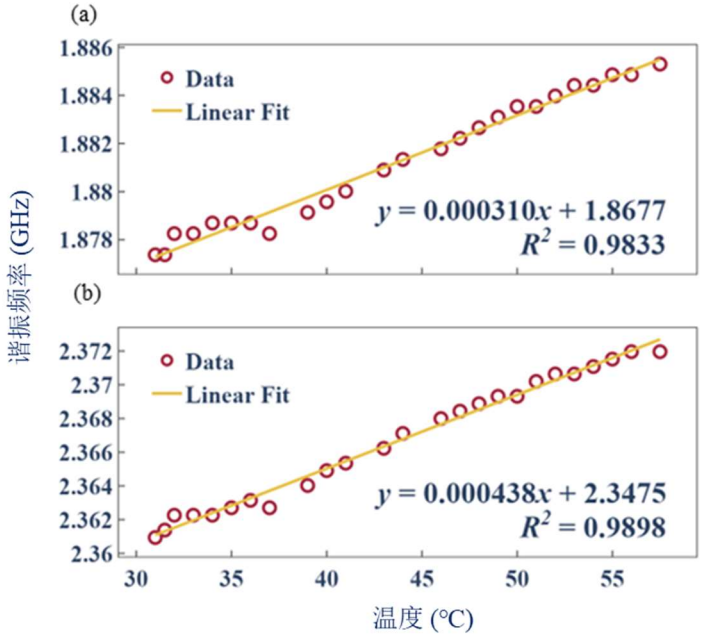



图 4.33 不同温度下：(a)一阶谐振频率 (b)二阶谐振频率

### 4.4.2 不同湿度水泥对贴片天线电磁参数的影响

在初步设置之后，湿度传感在常温下使用偏心馈电的贴片天线进行。为了避免湿度与贴片接触，在传感器顶部粘贴了一层薄膜。由于样品在室温下逐渐蒸发水分，且蒸发速率逐渐减慢，因此每当估计重量减少约 0.5 克时，进行一次电磁参数测量。

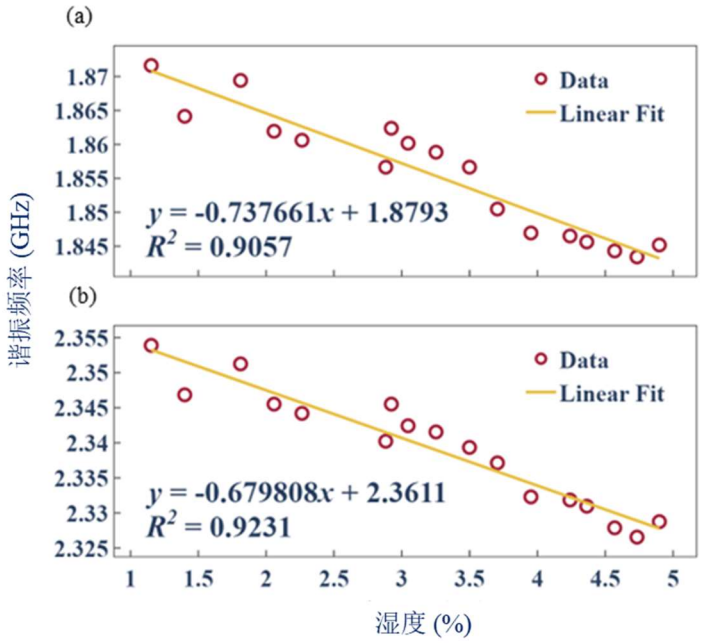



图 4.34 不同湿度百分比下：(a)一阶谐振频率 (b)二阶谐振频率

图 4.33 显示了谐振频率随着水泥湿度增加而向左偏移的线性相关性。其中，一阶频率的斜率为-0.7377，表示每增加 1%的湿度，频率偏移 0.7377 GHz。可见贴片天线传感器对湿度的敏感性超过了对温度的敏感性。$R^2$ 值为 0.9057，意味着大约 90.57%的频率波动可以归因于湿度。第二阶频率的斜率为-0.6798，$R^2$ 为 0.9231，突出了这种线性关系。与模拟数据相比较，实验数据显示出对湿度的更高敏感性，这表明在实际应用中需要进行校准。

这些数据验证了偏心馈电贴片天线在监测环境条件方面的有效性。此外，它为后续研究奠定了基础，包括在实际工程监测中的进一步应用，以巩固天线在准确感测温度和湿度波动方面的可靠性。

### 4.4.3 贴片天线对温湿度同时变化的水泥试块的电磁参数感知

矩形贴片天线传感器被用来感测水泥砂浆试块内部的温度和湿度变化。温度变化同样是通过电热鼓风干燥箱来控制，湿度则是通过与传感器贴片侧、紧密接

触的水泥砂浆试块的水分耗散量来表征。将 DHT11 温湿度传感器也放置在干燥箱中，通过 ESP8266 开发板连接到计算机，观察干燥箱中的温度变化。

实验前，首先记录下完全干燥的水泥砂浆试块的重量 $W_{dry}$。随后，将试块浸泡于恒温水中至饱和状态，并测定其重量 $W_{full}$。这一差值代表试块的最大水分吸收能力。接着，干燥箱分别设定至 45℃、55℃和 65℃，浸泡后的水泥试块与传感器一同置入预热环境中。随时间推移，定期称量试块重量 $W_i$，进而计算相对水分耗散率。每个重量测定点的 $W_i$ 值将用来计算相对水分耗散率，考虑了从完全饱和到完全干燥状态的整个水分范围，从而能更真实地反映出水泥砂浆试块水分耗散的实际情况。可以通过以下公式得出：

$$\mathrm{RMD}=\frac{W_i-W_{\mathrm{dry}}}{W_{\mathrm{full}}-W_{\mathrm{dry}}} \tag{4.1}$$

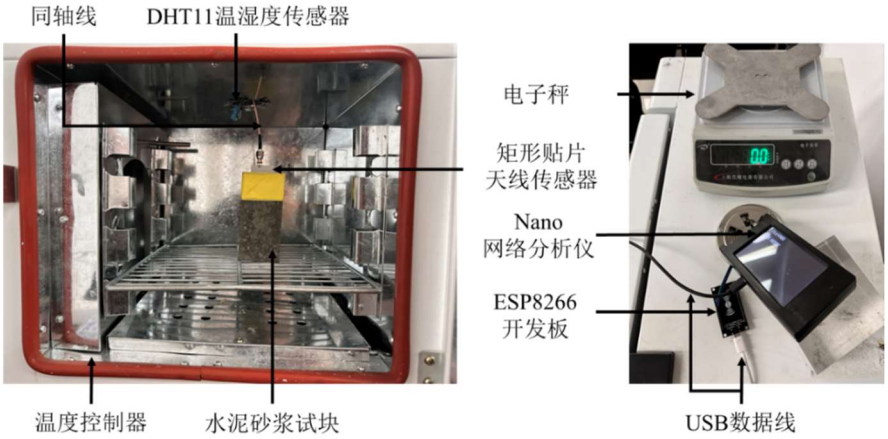



图 4.35 贴片传感器同步传感水泥砂浆试块温湿度实验系统图

由图 4.36 可见，温度控制在 45℃时，在不同相对湿度（42%至 100%）条件下，$S_{11}$(dB)对频率（GHz）的响应有显著的变化。当湿度增加时，S11(dB)的曲线向左移动，表明谐振频率随着湿度的增加而降低。第一谐振频率与相对湿度耗散百分比之间存在着线性下降趋势，线性拟合公式为 $y=-0.0342x+1.881$，$R^2=0.96$。这说明了在湿度耗散百分比从 40%至 100%的范围内，每增加 1%的湿度，第一谐振频率平均下降约 0.0342GHz。右下图展示了第二谐振频率与相对湿度耗散百分比之间的关系。其线性拟合公式为 $y=-0.0558x+2.384$，$R^2=0.86$，表明第二谐振频率随着湿度耗散百分比的增加同样呈线性下降。在此情况下，每增加 1%的湿度，第二谐振频率平均下降约 0.0558 GHz。总体而言，这两张图表明了谐振频率随着空气中湿度的增加而减小，并且第二谐振频率对湿度变化的敏感性高于第一谐振频率。

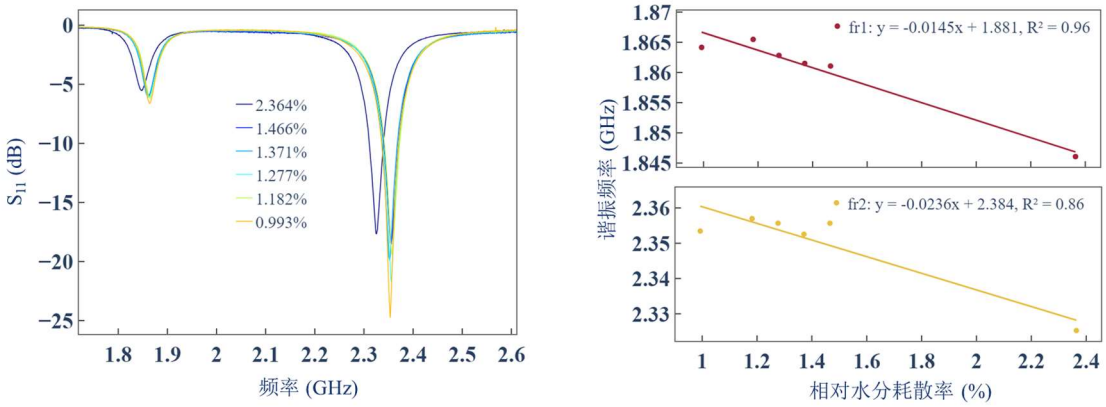



图 4.36 45℃水泥试块水分变化时(a)回波损耗曲线(b)相对水分耗散率与谐振频率的关系

如下图 4.37 所示，控制天线传感器周围环境为 55℃时，回波损耗曲线显示了贴片天线传感器不同相对湿度条件下的电磁特性。随着相对湿度从 42%增加到 100%，曲线整体向左平移，指出横向与纵向谐振频率均随湿度升高而降低。右图的分析进一步阐明了这种依赖性。第一谐振频率（图中上方）随相对湿度耗散百分比的增加显示出较为温和的线性下降关系，拟合线的斜率为-0.0008 GHz/%，$R^2$值为 0.76，表明其变化不太敏感。相较之下，第二谐振频率（图中下方）对湿度变化的反应更为显著，线性拟合斜率达到了-0.0012 GHz/%，$R^2$值高达 0.97，说明了在相对湿度耗散百分比从 60%到 100%变化范围内，每增加 1%的湿度，第二谐振频率平均减少 0.0012 GHz。第二谐振频率（纵向）对湿度变化的敏感度依然高于第一谐振频率（横向）。

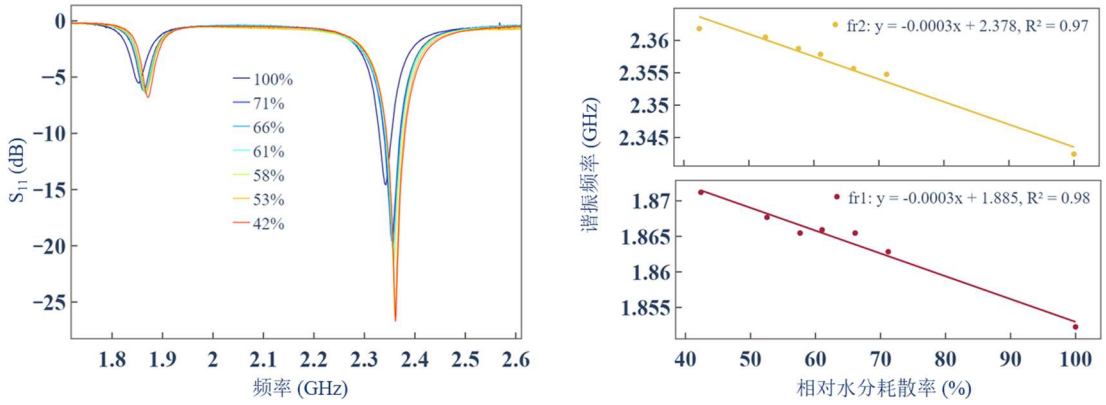



图 4.37 55℃水泥试块水分变化时(a)回波损耗曲线(b)相对水分耗散率与谐振频率的关系

温度控制在 65℃的情况，回波损耗曲线结果显示，当相对湿度从 61%升至 100%时，观察到谐振频率发生下降，即随着湿度的升高，谐振频率整体向左移动。右图进一步揭示了谐振频率随相对湿度耗散百分比变化的趋势。对于第一谐

振频率（上图），随着相对湿度耗散百分比的增加，呈现出轻微的线性下降，斜率为-0.0008 GHz/%，$R^2$ 为 0.76，表现出相对平稳的变化。而第二谐振频率（下图）对湿度变化的响应更加敏感，线性下降斜率达到-0.0012 GHz/%，$R^2$ 高达 0.97，表明其对湿度的变化更为敏感。

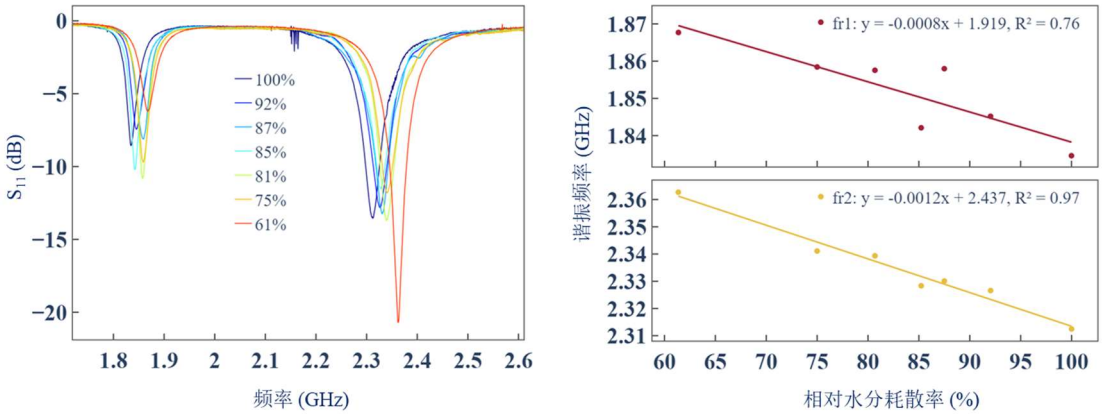



图 4.38 65℃水泥试块水分变化时(a)回波损耗曲线(b)相对水分耗散率与谐振频率的关系

在不同温度下监测环境湿度时，可以看出谐振频率随相对湿度耗散百分比变化的斜率，也就是湿度敏感度，与温度之间存在关系。随着温度的升高，从 45℃到 65℃，谐振频率的斜率（即湿度敏感度）减小。这意味着，在更高的温度下，谐振频率对湿度的变化反应不那么敏感。这种趋势可能是由于高温环境影响了材料的介电特性。

## 4.5 本章小结

本章系统地探究了环境因素对天线传感器性能的影响。通过详尽的仿真和实验分析，确定了环境变量如湿度和温度如何影响天线传感器覆盖的水泥介电特性及其谐振频率。

首先，通过有限元模拟，研究了基板厚度、矩形贴片尺寸以及不同介电基板材料如何影响天线传感器对环境敏感性的优化。特别地，探讨了有机玻璃盒以及不同空气层厚度对天线电磁参数的影响，并对上覆水泥材料的介电常数变化进行了分析。结果表明，在一定的空气层厚度和有机玻璃盒存在下，天线传感器能对介电常数的变化做出敏感反应。

进一步，分别考虑了不同温度和湿度对天线传感器电磁参数的综合影响。通过分析谐振频率对环境变量的响应，我们发现湿度对天线传感器的影响明显大于温度。湿度的每 1%变化可导致谐振频率显著变化，例如增加约 0.7377GHz/%。

在实验探究部分，我们通过对不同温度和湿度下水泥试块的测试，进一步证实了仿真结果的有效性。同时验证了天线传感器监测环境变量的潜力，为实时监测水泥结构中的环境变化提供了实验基础。

最后，本研究的结论支持了根据温度和湿度效应特别校准天线传感器的可能性。此外，本研究为未来研究提供了三个明确的方向：1) 定义水泥介电常数与环境温湿度之间的理论关系；2) 分析嵌入水泥中的天线的等效介电常数与电场轨迹之间的关系；3) 开发等效介电常数作为连接环境变量与传感器电磁参数的中介。

综上所述，本研究深化了对贴片天线传感器在不同环境下性能变化的理解，为其在工程应用中的优化与设计提供了重要的参考。

# 第5章 埋置于混凝土中贴片天线的多参数感知

## 5.1 引言

在本文的前四章中，我们深入研究了温湿度对于天线传感器性能的影响，特别是在水泥介质覆盖下的微带贴片天线。我们评估了环境参数，如温度和湿度，如何通过改变水泥的介电常数进而影响天线的谐振频率，为实际工程应用中的环境监测提供了理论和实验基础。随着研究的深入，我们意识到有必要探讨天线埋置于混凝土材料内部的电磁特征。

第五章着重于埋置于混凝土中的贴片天线的多参数感知。在此，我们将延续前一章的研究，5.2 节中对埋置于混凝土内部的矩形贴片传感器进行高频仿真模拟，分别探究亚克力封装和空气层厚度的影响，并结合第三章的温度介电常数与湿度介电常数定义的混凝土材料导入模拟软件，探究温度变化及混凝土湿度变化带来的天线谐振频率的偏移。

5.3 节监测了固化过程中混凝土状态的变化，并评估了这些变化对贴片天线传感器电磁参数的影响。通过将传感器浇筑于混凝土试块中，本节提供了对于养护期间混凝土电磁参数变化的直接观察，为混凝土内部变化的实时监测提供了可靠的传感方法。

第 5.4 节深入探讨了不同温度环境下埋置于混凝土中的贴片天线的电磁特性。本节通过实验手段验证了天线在模拟和实际不同温度条件下的电磁响应，包括空气环境和混凝土环境中的表现。温度对贴片天线谐振频率有明显的影响，这一发现强化了仿真模型的有效性，并为温度变化对于埋置天线传感性能影响的理解提供了实验支撑。

5.5 节聚焦于湿度变化对埋置于混凝土的贴片天线传感器电磁参数的影响。实验结果表明，湿度的增减显著改变了混凝土的介电特性，进而影响了天线的谐振频率。本节通过湿度仿真与实验数据的对比分析，揭示了湿度作为一个关键环境参数，如何影响埋置天线的性能，为湿度感知技术的进一步开发奠定了基础。

在 5.6 节，研究综合考察了温度和湿度同时变化对贴片天线性能的影响。实验探索了这两个变量的联合效应，显示出在温湿度共同变化时，天线传感器的电磁特性受到的影响比单一变量时更为复杂。这些发现对于在实际工程环境中设计和部署埋置于混凝土中的天线传感器具有重要意义，提供了宝贵的数据支持温湿度联合监测系统的开发。

## 5.2 埋置于混凝土的贴片天线有限元模拟

天线传感器的设计维持第四章的规格和材料选择，已经经过精确的参数优化以实现最佳性能。如图 5.1 所示，传感器封装在亚克力盒内并置于模拟混凝土结构的正方体中。亚克力的封装设计既保护了天线，又可能影响其电磁特性，而包含的空气层则用于研究其对谐振频率的影响。

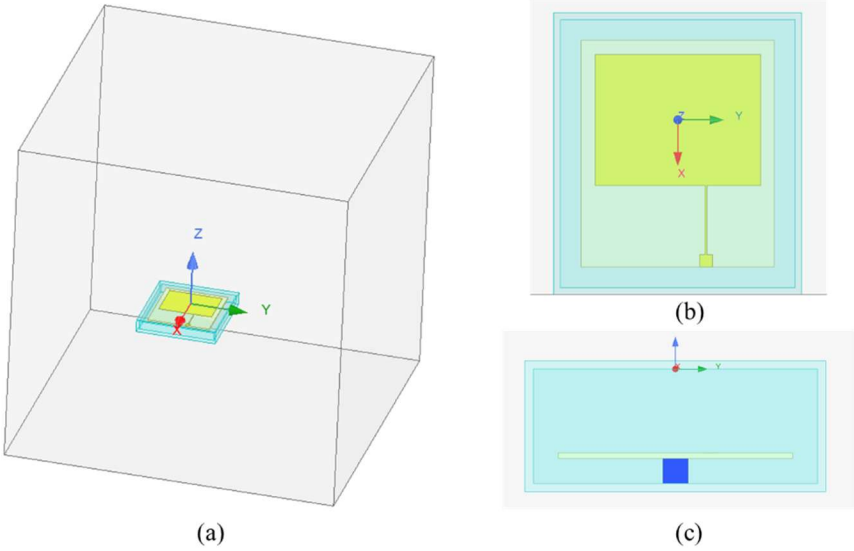



图 5.1 有限元模拟中埋置于混凝土的封装贴片天线设计:(a)三维图(b)俯视图(c)侧视图

仿真模拟精确考察空气层及封装材料厚度，保障设计考虑了这些对传感器性能关键的因素。其次，模拟评估了温度变化对基板和混凝土环境的潜在影响。最终，探究了混凝土的介电特性如何影响埋置天线传感器的谐振频率。

### 5.2.1 亚克力封装和空气层厚度的分析

随着天线上方空气层厚度从 0mm 增加到 10mm，S11 参数（反映了贴片天线的反射损耗）在 1.8 GHz 到 2.6 GHz 频率范围内展示了变化趋势，如图 5.2 所示。一方面，随着空气层厚度的增加，谐振峰变得更加尖锐，这可能表明天线的品质因子（Q 因子）在增加，即天线在谐振频率处的选择性变得更高，品质因子的增加可能与谐振腔的电磁能量更多地被限制在空气层内有关。另一方面，空气层的介电常数为 1，外部混凝土的介电常数定义为 5，空气层作为介电材料层的高度增加，导致整体的有效介电常数减小，谐振频率因此向右偏移。

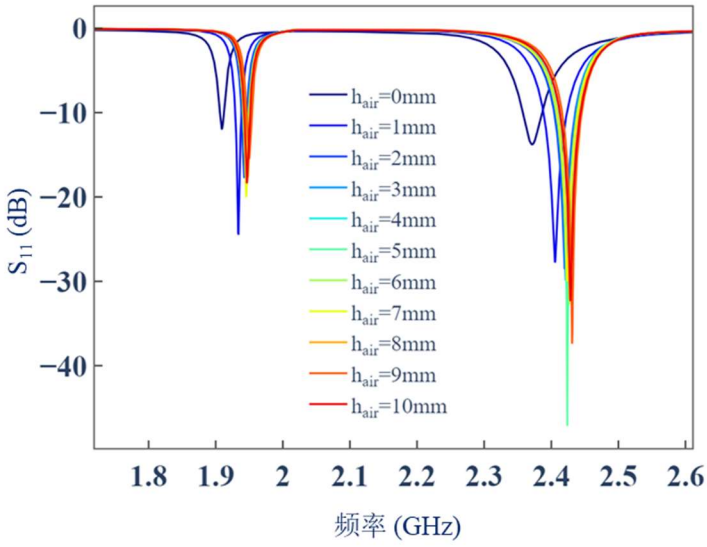



图 5.2 不同空气层厚度下贴片天线的 S11 参数频率响应

图 5.3 展示了空气层厚度对横向和纵向谐振频率的影响，随着空气层厚度的增加，谐振频率均稍有上升，但相关性并不强。特别地，在没有空气层的情况下，谐振频率出现显著偏移，这可能表明电磁波传输方式经历了本质上的改变。

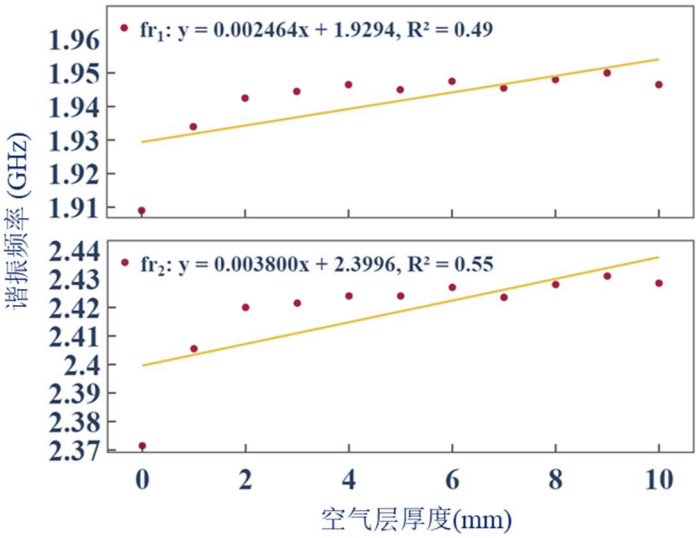



图 5.3 天线传感器谐振频率与空气层厚度关系

### 5.2.2 温度对基板和混凝土对贴片天线电磁参数的综合影响

在 HFSS 建立模型如下图 5.4，并引入全局温度变量因子，温度通过改变基板的介电常数来影响天线的谐振频率。随着温度的升高，基板材料的介电特性发

生变化，导致谐振频率发生向右偏移，图 5.5 表明这种影响是线性的。

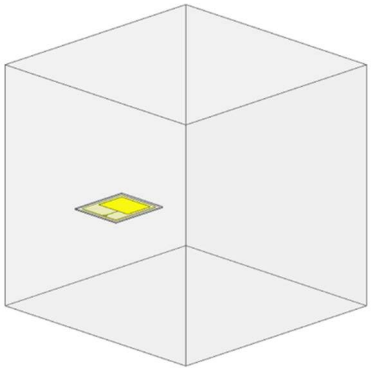


图 5.4 高频仿真软件 HFSS 中温度建模

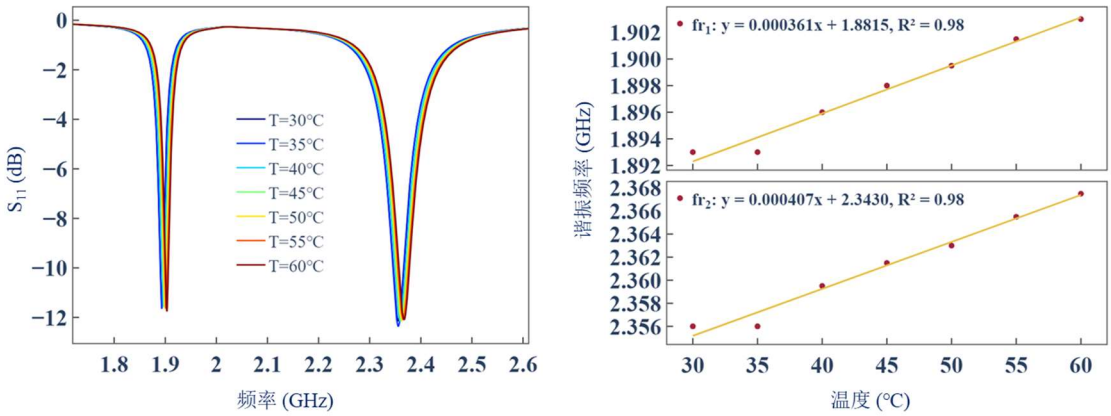



图 5.5 温度对基板：(a)天线回波损耗与频率关系图(b) 天线谐振频率随温度变化趋势图

在 HFSS 中导入图 3.24 波导测量的不同温度下的 C50 混凝土的介电常数频率曲线，以及损耗正切角频率曲线，作为混凝土的电磁材料定义。即可展现温度通过影响外部环境对天线谐振频率的影响。图 5.6 可见随着温度的升高，谐振频点有轻微的偏移，这意味着介电常数和损耗正切的变化对天线性能有一定影响，但回波损耗的变化不显著。混凝土的电磁属性随温度的变化而变化，随着温度升高，介电常数的增加会导致电磁波的相速度减慢，进而导致天线的谐振频率降低。

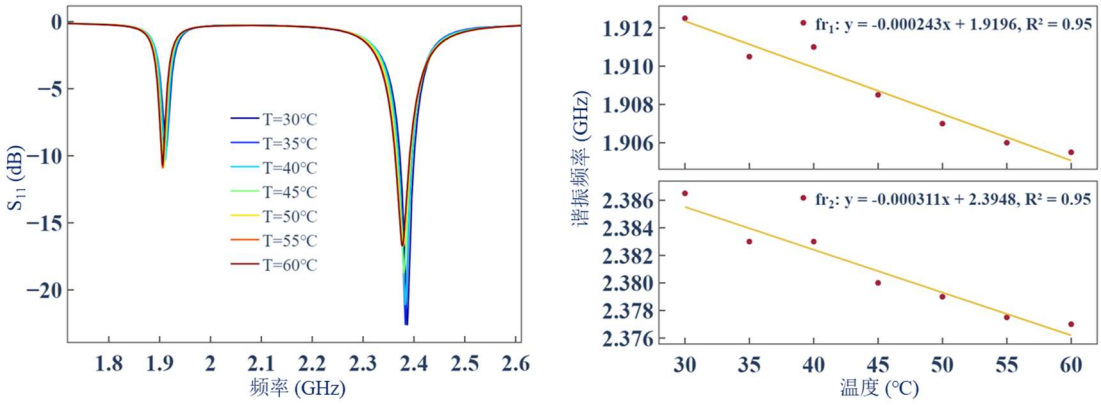



图 5.6 温度对混凝土：(a)天线回波损耗与频率关系 (b) 天线谐振频率随温度变化趋势图

在 HFSS 中，引入有温度升高引起的辐射贴片和基板的热膨胀，影响有效电长度进而改变谐振频率。由于辐射贴片（通常是铜制的）和基板材料（如 Rogers RO3010）的热膨胀系数相似，接近 16，我们可以假设整个天线在热膨胀时是均匀膨胀的。这种膨胀会导致天线的物理尺寸增加，从而导致有效电长度的变化。计算得温度与横向纵向尺寸的关系如下公式，在仿真模拟软件中，改变贴片天线的尺寸，进而得到温度对热膨胀的影响，结果如下所示。

$$\Delta W_T=\frac{\alpha_{\mathrm{d,w}}\Delta T W_e E_{\mathrm{d,w}} h_{\mathrm{d}}+2\alpha_{\mathrm{c}}\Delta T W_e E_{\mathrm{c}} h_{\mathrm{c}}}{E_{\mathrm{d,w}} h_{\mathrm{d}}+2E_{\mathrm{c}} h_{\mathrm{c}}} \tag{5.1}$$

$$\Delta L_T=\frac{\alpha_{\mathrm{d,l}}\Delta T L_r E_{\mathrm{d,l}} h_{\mathrm{d}}+2\alpha_{\mathrm{c}}\Delta T L_r E_{\mathrm{c}} h_{\mathrm{c}}}{2(E_{\mathrm{d,l}} h_{\mathrm{d}}+2E_{\mathrm{c}} h_{\mathrm{c}})} \tag{5.2}$$

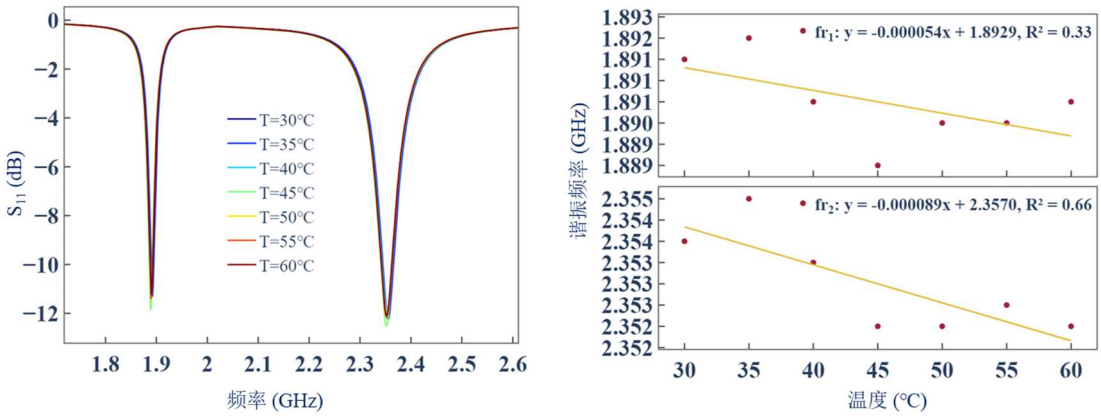



图 5.7 温度对贴片天线尺寸：(a)回波损耗与频率关系图 (b)谐振频率随温度变化趋势图

以上分别考虑了基板材料 Rogers RO3010 的介电常数随温度变化，辐射贴片的热膨胀效应，以及混凝土基底的介电特性如何分别影响横向和纵向谐振频率。仿真结果汇总如图 5.8 所示，展现了温度对横向（图 a）和纵向（图 b）谐振频率的影响。

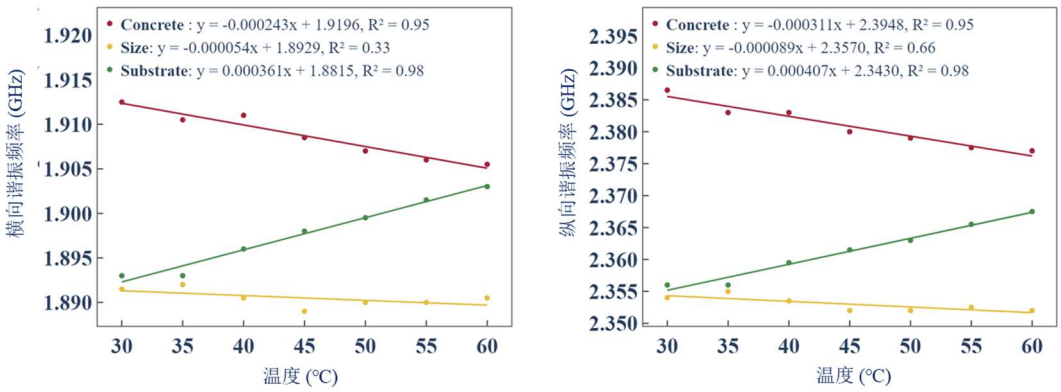



图 5.8 温度对谐振频率影响的综合分析图：(a) 横向谐振频率随温度变化趋势图(b) 纵向谐振频率随温度变化趋势图

基板介电特性的变化对两种谐振频率的影响最为显著（绿色线条，斜率为 0.000361 GHz/°C 和 0.000407 GHz/°C，$R^2$ 均为 0.98），说明天线的谐振特性对基板介电常数的敏感度较高。尺寸的热膨胀对横向谐振频率的影响较小（黄色线条，斜率为-0.000054 GHz/°C，为 0.11），而对纵向的影响略高（斜率为-0.000089 GHz/°C，$R^2$ 为 0.33）。混凝土基底的影响虽然在两个方向上都存在（红色线条，斜率分别为-0.000243 GHz/°C 和-0.000311 GHz/°C），$R^2$ 值均为 0.95。混凝土介电特性的变化对谐振频率的影响反映出了材料内部结构对温度的敏感性。

### 5.2.3 不同湿度的混凝土对埋置贴片天线电磁参数的影响

将第三章对不同含水率的混凝土试块的电磁特性的测量结果，选取 C40 混凝土图 3.27 的介电常数-频率曲线，以及损耗正切角-频率曲线导入 HFSS 软件中作为不同湿度的混凝土材料定义，下图 5.9 分别展示了在不同湿度混凝土条件下的回波损耗 $S_{11}$ 随频率的变化；右侧图表显示了天线的谐振频率随混凝土含水率的下降趋势。

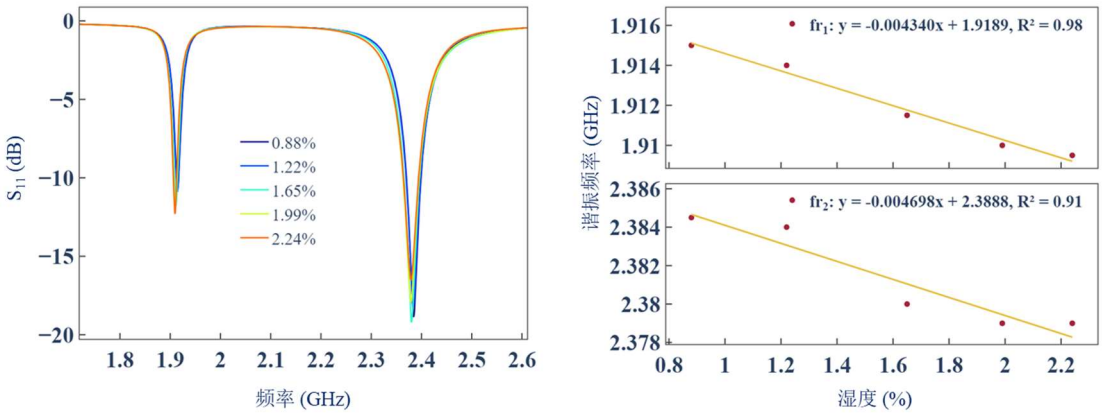



图 5.9 混凝土湿度对贴片天线：(a)回波损耗与频率关系图 (b)谐振频率随湿度变化趋势图

含水量的增加改变了混凝土的介电特性，尤其是介电常数和损耗正切。介电常数的增加导致电磁波在介质中的相速度降低，这自然会导致谐振频率的下降。此外，含水量增加也可能导致损耗正切增加，这会增加材料对电磁波能量的吸收，进而影响天线传感器的品质因子和损耗。

## 5.3 养护期间对混凝土的状态检测

### 5.3.1 固定天线传感器与浇筑混凝土试块

在探究混凝土试块中埋置的贴片天线传感器随环境变化响应电磁信号的实验中，传感器的稳定安装至关重要。它不仅需确保传感器在混凝土的浇筑、振捣过程中保持不动，而且还要保证其位置的固定性与有限元模拟的设定保持一致。

如图 5.10 所示，埋置方式分为两种：首先，如图一，传感器被置于一个 1mm 厚、底边距离模具底部 10mm 的透明亚克力盒子中，此盒子由支撑块固定于模具顶部，保证了传感器在混凝土浇注和硬化过程中的稳定性；其次，如图二，传感器表面被保鲜膜紧密包裹，以隔离混凝土介质，然后通过塑料条直接固定在模具上方，这种方法简化了固定装置，同时也模拟了传感器在实际应用中的直接埋置环境。

两种方法各有特点：亚克力盒子提供了更加稳定且可控的传感器环境，而保鲜膜包裹方法则更接近实际应用中传感器可能面临的条件。

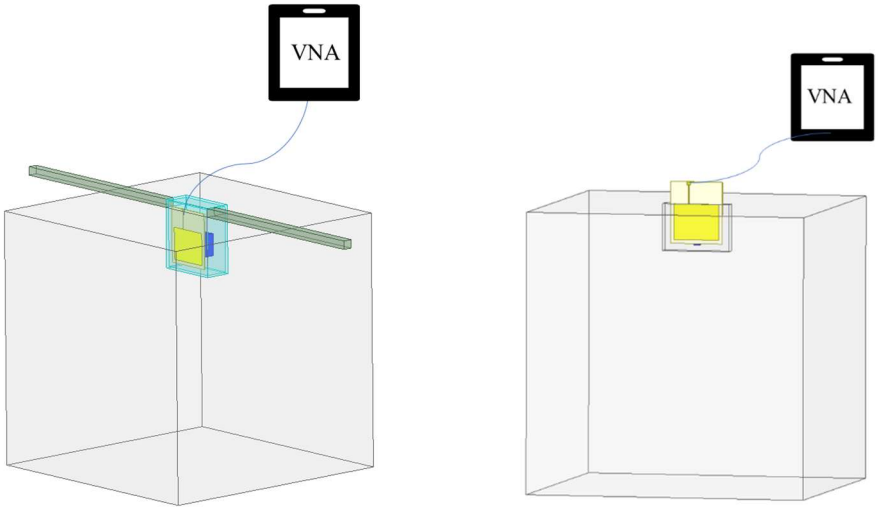



图 5.10 埋置天线传感器的安装示意图：(a) 亚克力盒子固定方式(b) 保鲜膜包裹方式

混凝土模具固定传感器的实验情况，如图 5.11 所示。天线传感器，通过先前讨论的两种不同方法安装，现已嵌入混凝土内。

图 5.11 混凝土试块的模具准备与浇筑和振捣

### 5.3.2 贴片天线对养护期间混凝土的电磁参数监测

本节探讨了养护期间混凝土的电磁参数监测。通过在混凝土试块中埋置的贴片天线传感器，我们可以实时跟踪混凝土的硬化过程。如图 5.12 所示，监测设置包括一个网络分析仪和多个混凝土试块，每个试块中均嵌入有贴片天线传感器。这些传感器通过电线连接到网络分析仪，使得可以在混凝土硬化期间连续监测其电磁参数变化。

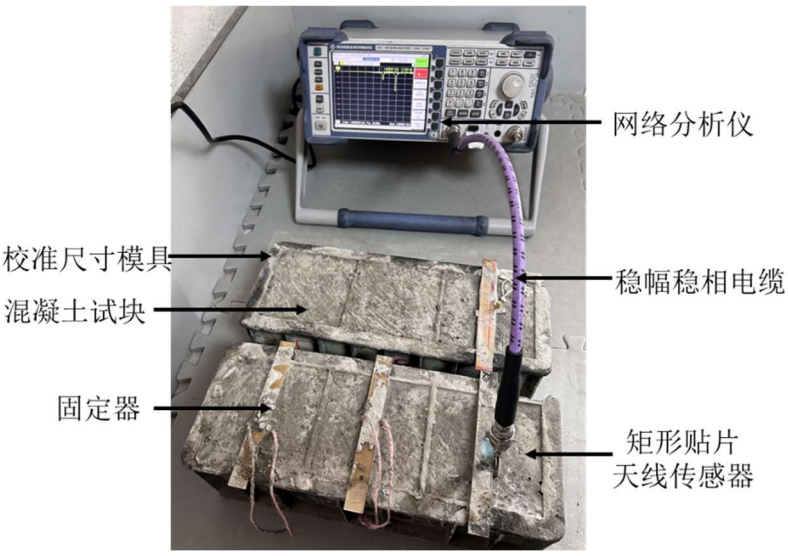
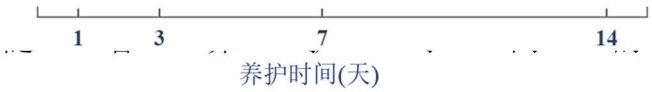



图 5.12 混凝土养护期间电磁参数监测设备布置图




增加，如图 5.13、图 5.14 所示的数据记录了横向和纵向谐振频率的变化。这些频率随时间的增长表现出上升趋势，这是由于混凝土内水分的逐步流失和硬化程度的

增加。具体而言，纵向和横向谐振频率的变化反映了不同强度等级（C30、C40 和 C50）混凝土在养护过程中的电磁特性差异。

混凝土中的水分含量越高，其介电常数通常越大，因为水是一种高介电常数材料。当水分含量降低时，混凝土的总介电常数也会降低，导致整体的谐振频率升高。C50 的混凝土初始含水量最低，因此谐振频率最低，谐振频率最大；但其内部的孔隙率较小，因此在养护箱中恒温恒湿的养护条件并干燥后，其整体的有效介电常数最高（由于水泥砂石等介电常数均高于空气），谐振频率的值反而降低。因此，可以推断随着混凝土强度等级的增加（C30 到 C40 再到 C50），如果水分流失的速度增加或者养护过程中的水分含量降低，这将导致更高强度等级的混凝土试块具有更低的介电常数和相应地更高的谐振频率。这种变化在监测数据中可能表现为：随着养护时间的增加，C50 试块的谐振频率上升幅度可能大于 C40 和 C30 试块，因为它可能更快地失去水分或达到更低的最终水分含量。

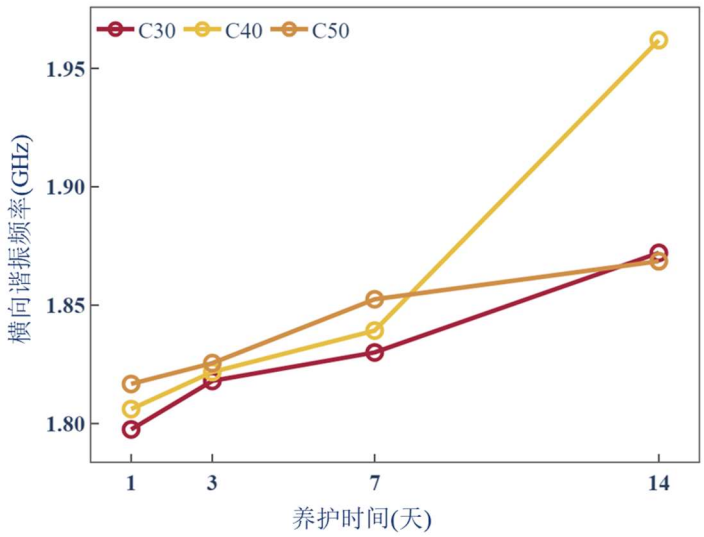



图 5.13 混凝土养护周期内天线横向（一阶）谐振频率变化趋势图

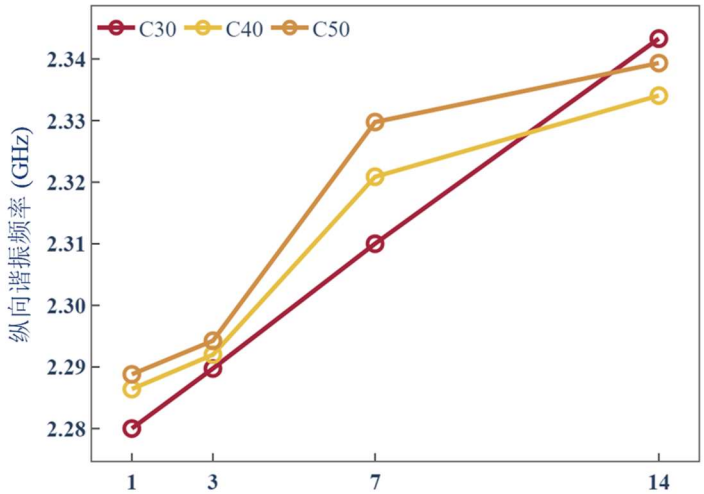


图 5.14 混凝土养护周期内天线纵向（二阶）谐振频率变化趋势图

## 5.4 温度对埋置于混凝土的贴片天线的影响分析

### 5.4.1 贴片天线对不同温度的空气环境的电磁参数实测

贴片天线本身随着温度的升高，横向谐振频率和纵向谐振频率均呈线性增加趋势，如下图 5.15 所示，其中横向谐振频率的斜率为 0.0004 GHz/℃，误差为 $R^2$=0.99；纵向谐振频率的斜率为 0.0006 GHz/℃，误差为 $R^2$=0.98。这一现象表明，天线的谐振频率与温度之间存在明显的线性关系，其斜率大小可能与材料的热膨胀特性以及温度对基板介电特性的影响有关。

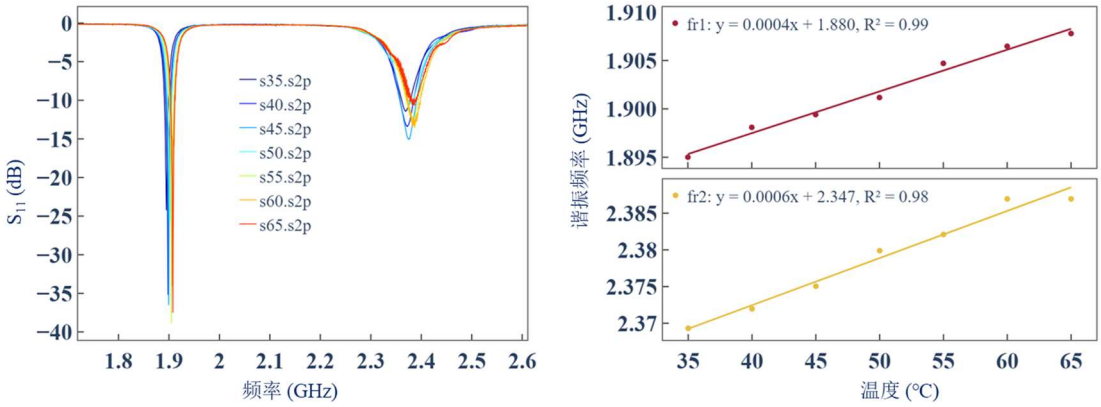



图 5.15 贴片天线横向和纵向谐振频率随温度变化的试验结果与拟合图

### 5.4.2 贴片天线对不同温度的混凝土环境的电磁参数实测

为准确控制温度，将混凝土试块置于温度控制箱中，实验情况如下图 5.16 所示，并在试块内部某一平面埋置贴片天线传感器，以确保传感器与混凝土试块温度一致。该天线传感器通过同轴电缆连接至外部网络分析仪。每当温度达到预设条件时，便记录当前传感器的 S 参数数据。同时，在温度控制箱内部安置了 DHT11 温湿度传感器，用以实时监控箱内环境的温湿度。

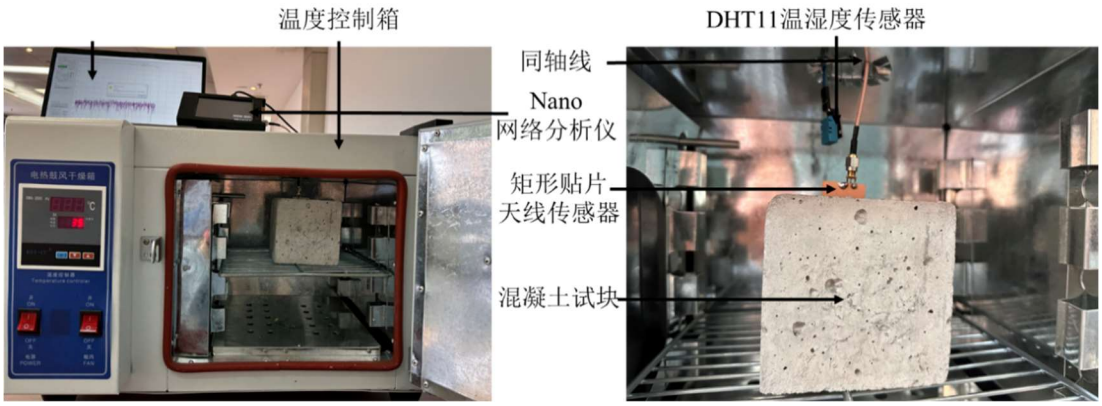



图 5.16 温度控制与天线传感器在混凝土试块中的嵌入监测

贴片天线埋置于混凝土内部同时感受自身的温度变化和混凝土环境的温度变化结果图如下所示，分为不同强度等级的混凝土分别展示，最后将其结果整合在一起。图中显示所有三种不同等级的混凝土内部的天线谐振频率均出现了细微的向高频方向（向右）的移动。这一共同的变化趋势表明，尽管混凝土的不同强度等级可能会影响热传递的性质，但天线在各种混凝土中的响应对温度敏感度具有一致性。

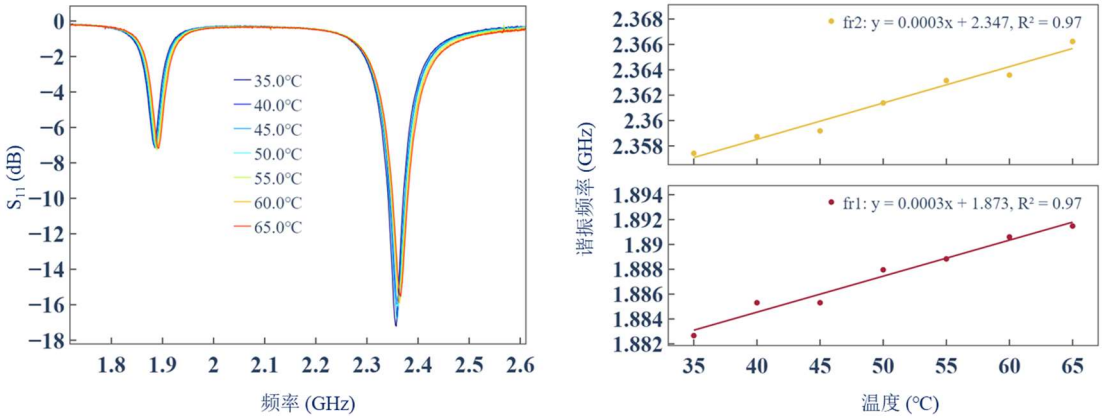



图 5.17 反射系数与温度关系图：C30 混凝土内部天线

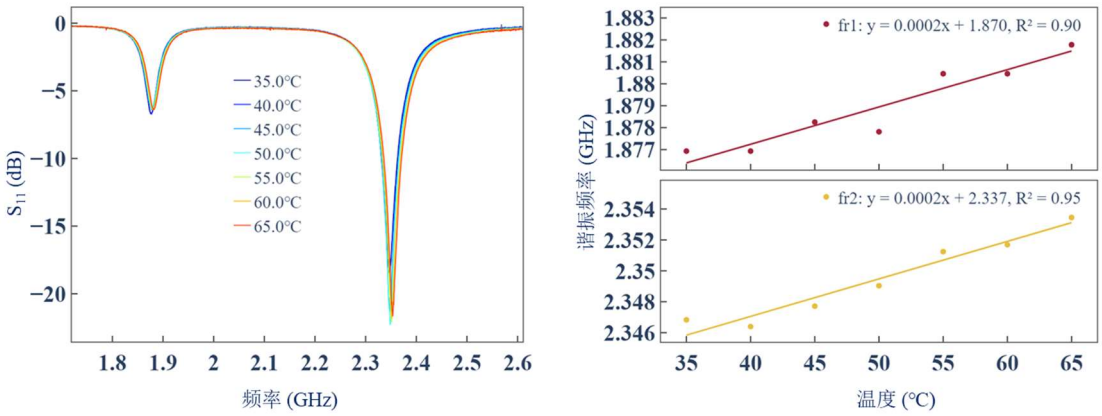



图 5.18 反射系数与温度关系图：C40 混凝土内部天线

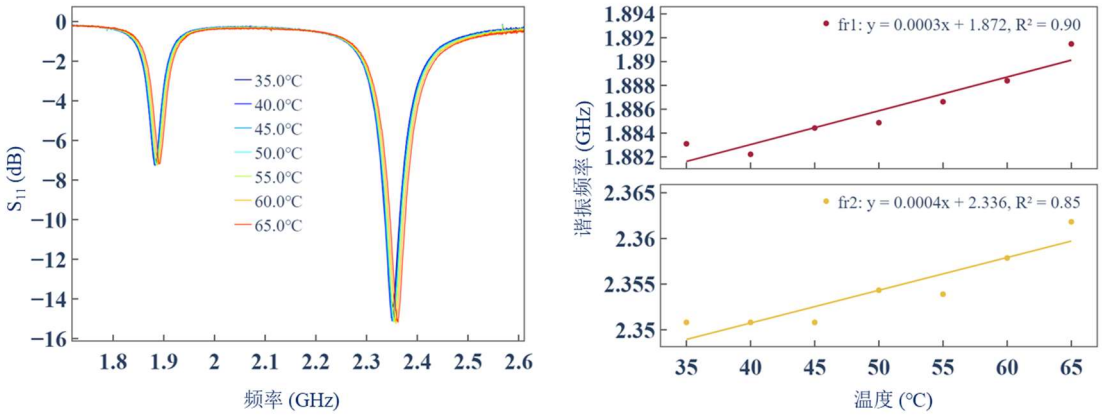



图 5.19 反射系数与温度关系图：C50 混凝土内部天线

值得注意的是，三种强度等级的混凝土中的频率移动幅度均低于直接裸露传感器的频移，这表明天线由于温度升高而产生的谐振频率提高效应被混凝土的降频效应所部分抵消。这种降频效应可能来源于混凝土在加热时的物理性质变化，如热膨胀。尽管天线本身受温度影响的谐振频率提升作用大于混凝土的降频作用，导致整体谐振频率还是呈现增加的趋势，但是由于混凝土的影响，增加的斜率相比裸传感器有所减小。

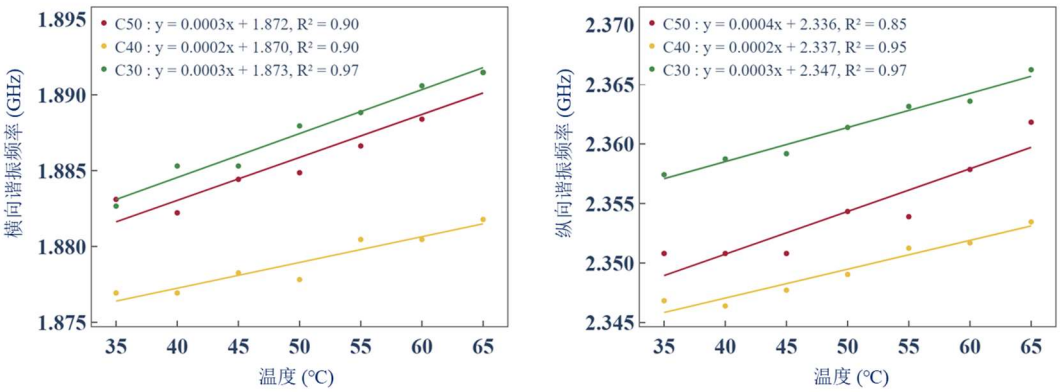



图 5.20 不同温度的天线传感器谐振频率整合对比图：C30, C40, C50 混凝土

### 5.4.3 温度仿真和实验数据对比分析以及误差分析

温度从 35℃到 60℃变化，对贴片天线传感器的 HFSS 模拟结果（考虑热膨胀造成的尺寸变化和基板介电常数的改变）和试验结果进行对比分析，下图是横向和纵向谐振频率的对比结果展示。随着温度从 35℃升至 60℃，一阶和二阶谐振频率都随温度的升高而增加，显示了温度对贴片天线传感器谐振频率的明显影响。具体而言，在第一阶谐振频率的对比中，HFSS 模拟结果与实验结果均表现出频率随温度的增加而线性上升的趋势，其中模拟的斜率为 0.0002 GHz/℃，实

验的斜率为 0.0005 GHz/℃，两者的决定系数（$R^2$）分别为 0.97 和 0.98，说明模拟和实验结果都有很高的线性相关性。

在第二阶谐振频率的对比中，同样观察到频率随温度上升而增加的现象。HFSS 模拟结果的斜率为 0.0002 GHz/℃，实验结果的斜率为 0.0007 GHz/℃，决定系数分别为 0.97 和 0.99，也显示了很好的线性相关性。这些数据表明，HFSS 模拟在考虑了热膨胀效应和基板介电常数变化的情况下，能够有效预测实际的谐振频率变化趋势，尽管实验数据的斜率略高，这可能是由于模型中未包含的其他实验条件变化，如环境或者材料特性的非理想因素。

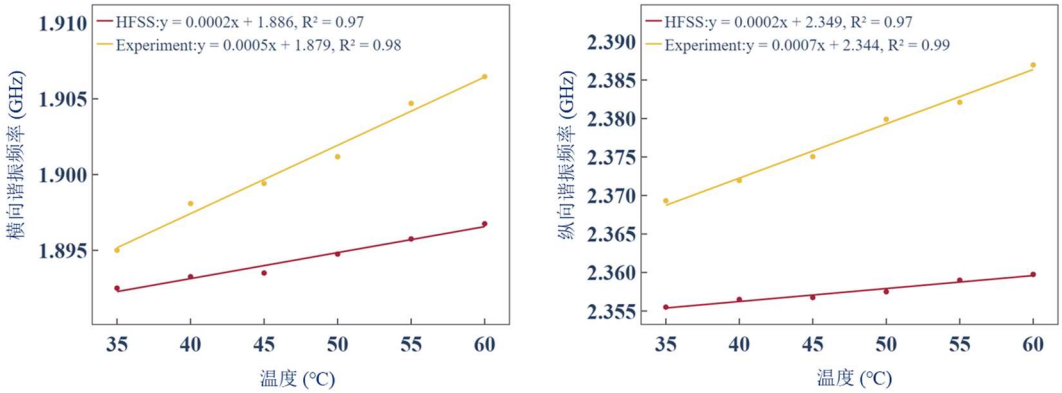



图 5.21 贴片天线谐振频率随温度变化的 HFSS 模拟与实验对比

温度从 35℃到 60℃变化，对埋置在混凝土中的贴片天线传感器的 HFSS 模拟结果（考虑热膨胀造成的尺寸变化、基板介电常数的改变以及外部混凝土电磁曲线）和试验结果进行对比分析，其中混凝土材料的电磁参数采用图 3.24 所示 C50 混凝土的介电常数-频率曲线和损耗正切角-频率曲线导入 HFSS 进行定义。对比结果如下，在温度从 35℃到 60℃变化的条件下，埋置在混凝土中的贴片天线传感器的谐振频率随温度的增加而线性上升。这些变化反映了温度对传感器性能的重要影响。在第一阶谐振频率中，HFSS 模拟结果和实验结果均显示了相似的线性增长趋势，其中 HFSS 模拟的斜率为 0.0002，实验结果的斜率为 0.0005，决定系数 $R^2$ 分别为 0.97 和 0.98，这表明了模拟和实验数据在这一温度范围内具有很好的一致性。

在第二阶谐振频率的比较中，模拟和实验结果也显示了温度上升时频率增加的趋势，HFSS 模拟的斜率为 0.0002，实验结果的斜率为 0.0007，决定系数 $R^2$ 分别为 0.97 和 0.99。这些结果指出模拟和实验之间具有非常好的线性关系，进一步验证了 HFSS 模拟的准确性。

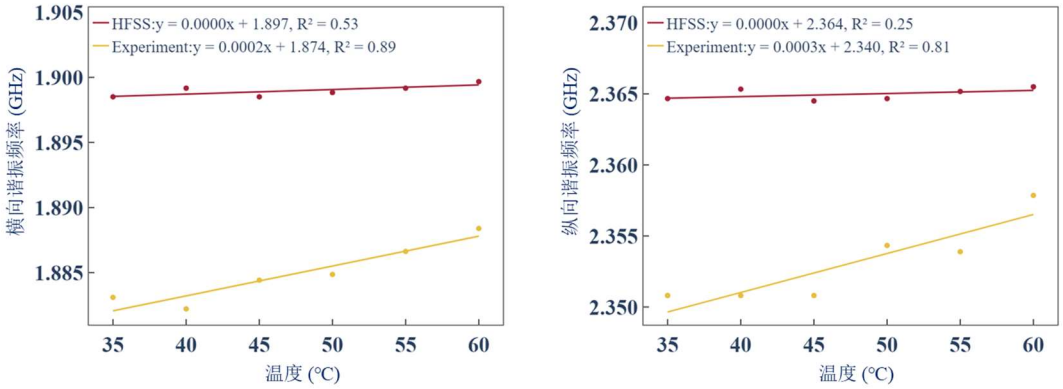



图 5.22 埋置在混凝土中的贴片天线谐振频率随温度变化的 HFSS 模拟与实验对比

## 5.5 湿度对埋置于混凝土的贴片天线的影响分析

### 5.5.1 贴片天线对不同湿度的混凝土环境的电磁参数实测

与前面仿真模拟一致，对混凝土内部湿度的感知分为两种：一是贴片天线传感器与混凝土直接接触，二是放入将贴片天线传感器放入内置于混凝土中的亚克力盒中。

第一种直接与混凝土材料接触的实验装置如下所示，用电子称记录混凝土的水分流失，网分仪每隔一段时间记录传感器的回波损耗曲线。实验前，首先记录下完全干燥的混凝土试块的重量 $W_{dry}$。随后，将试块浸泡于恒温水中至饱和状态，并测定其重量 $W_{full}$。这一差值代表试块的最大水分吸收能力。随时间推移，定期称量试块重量 $W_i$，进而计算相对水分耗散率。每个重量测定点的 $W_i$ 值将用来计算相对水分耗散率，考虑了从完全饱和到完全干燥状态的整个水分范围，从而能更真实地反映出水泥砂浆试块水分耗散的实际情况。可以通过以下公式得出：

$$\mathrm{RMD} = \frac{W_i - W_{\mathrm{dry}}}{W_{\mathrm{full}} - W_{\mathrm{dry}}} \tag{5.3}$$

图 5.23 混凝土含水率测试实验装置

从图像中我们可以观察到，随着相对湿度的下降，三种不同强度等级的混凝土内部天线传感器的谐振频率均表现出向低频方向的偏移，且变化趋势较为线性。一阶和二阶的湿度灵敏度保持一致，为-0.002GHz/%。然而，C50 强度混凝土的天线传感器表现出略低的灵敏度，这可能是因为 C50 混凝土的密度和结构比其他强度等级的混凝土更为紧密，这导致了水分蒸发和传感器频率变化的相对抑制。

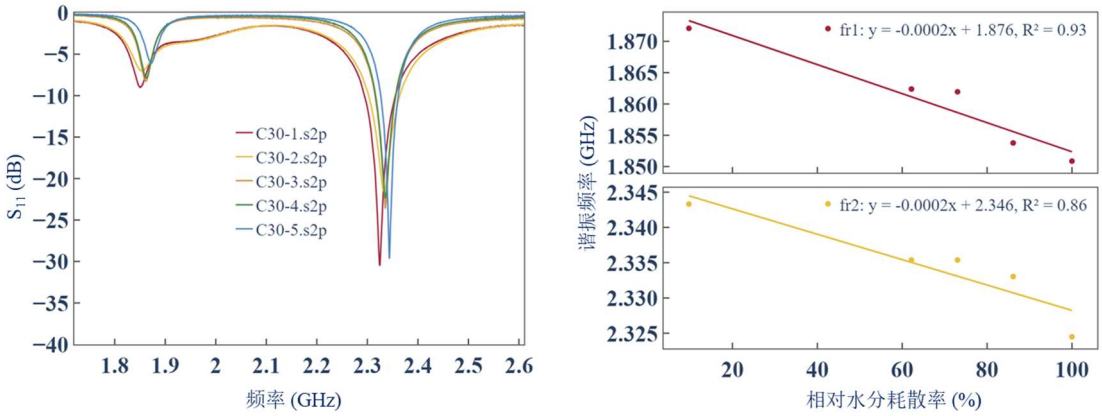



图 5.24 C30 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

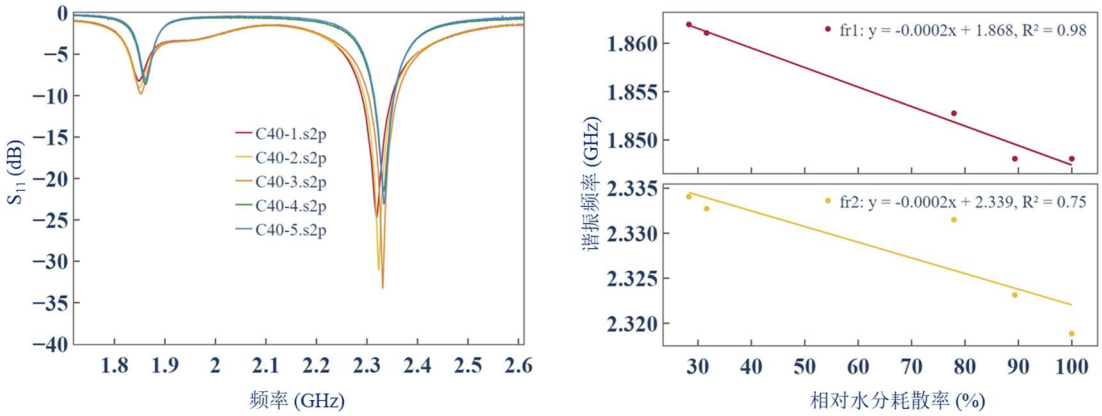



图 5.25 C40 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

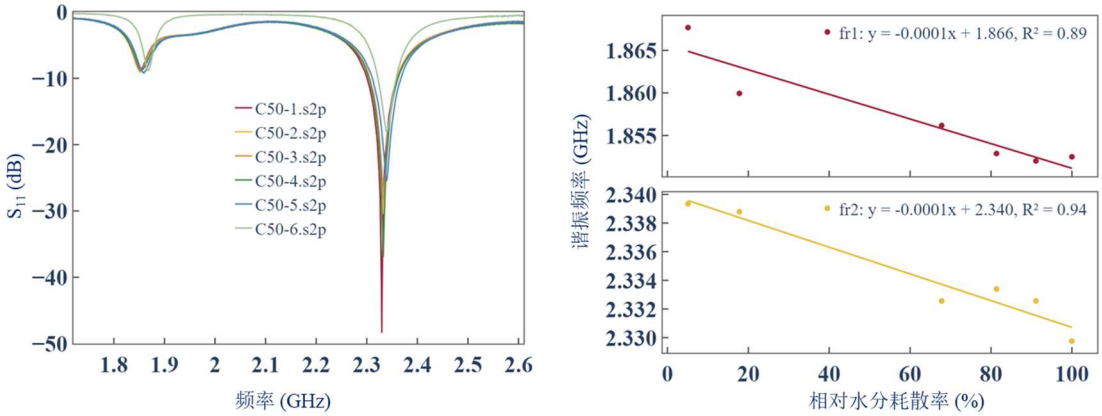



图 5.26 C50 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

另一种将贴片天线传感器放置在埋置在混凝土内部的亚克力盒子里，测量实验装置细节如下图 5.27 所示。

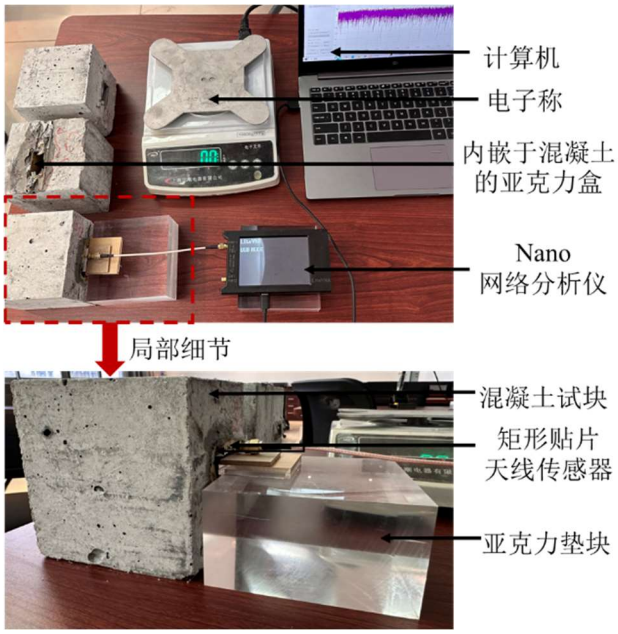



图 5.27 埋置于亚克力的混凝土含水率测试实验装置

当混凝土内部的天线传感器湿度降低时，一阶与二阶谐振频率均向左发生偏移，且变化呈现出一定的线性规律。这三种不同强度等级的混凝土(C30, C40, C50)的天线传感器显示出类似的湿度灵敏度，为-0.002GHz/%。在 C50 混凝土中，天线传感器的湿度灵敏度较低可能是因为 C50 更高强度与致密性导致水分的耗散率较低，这影响了谐振频率变化的幅度。

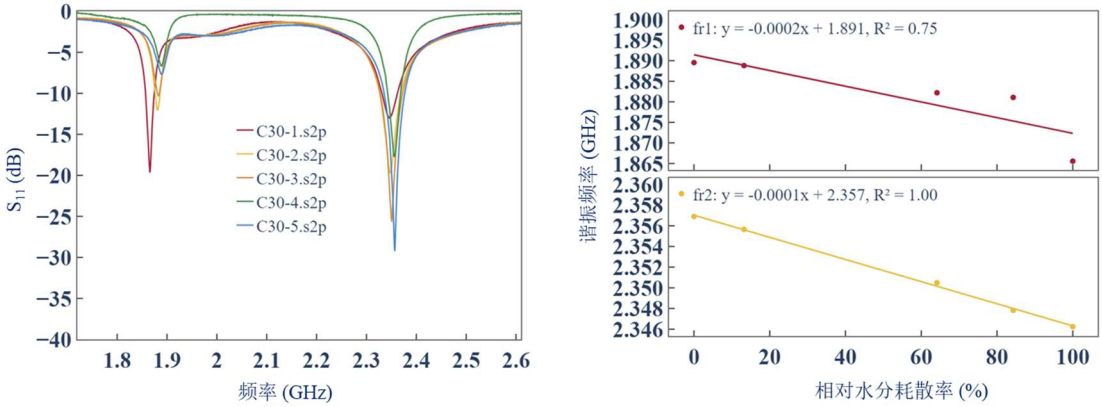



图 5.28 C30 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

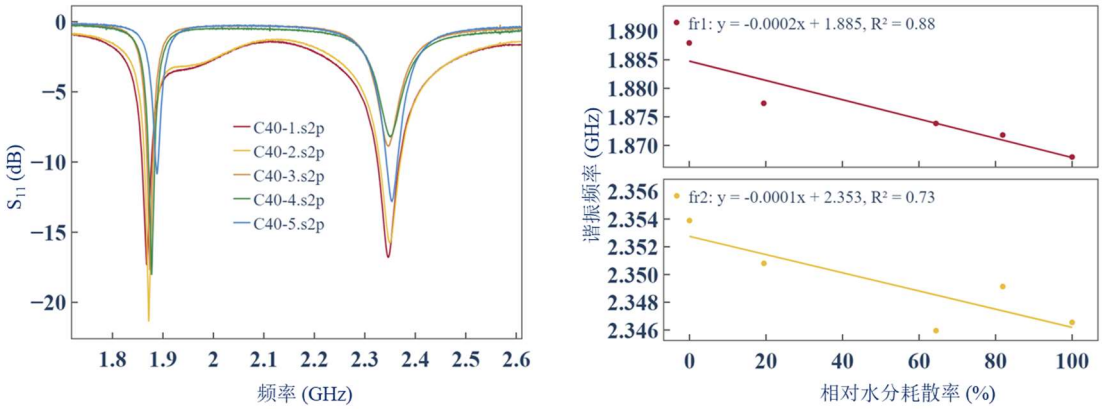



图 5.29 C40 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

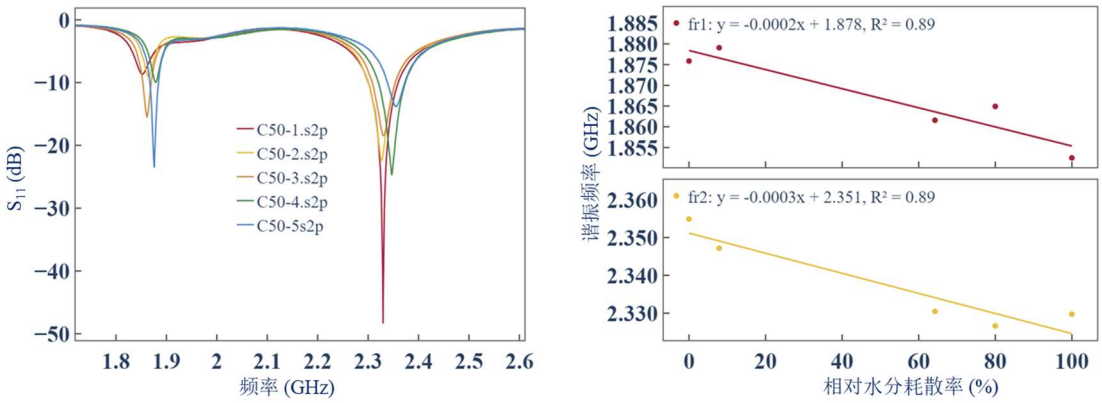



图 5.30 C50 混凝土随着湿度变化时：(a)回波损耗曲线 (b)湿度与谐振频率拟合图

### 5.5.2 湿度仿真和实验数据对比分析以及误差分析

HFSS 模拟和实验数据，随着相对湿度的耗散，第一阶与第二阶谐振频率均呈现下降趋势。第一阶谐振频率的模拟和实验斜率几乎一致，均为-0.0002 GHz/%，

而第二阶频率的模拟斜率为-0.0001 GHz/%，略低于实验斜率-0.0002 GHz/%。

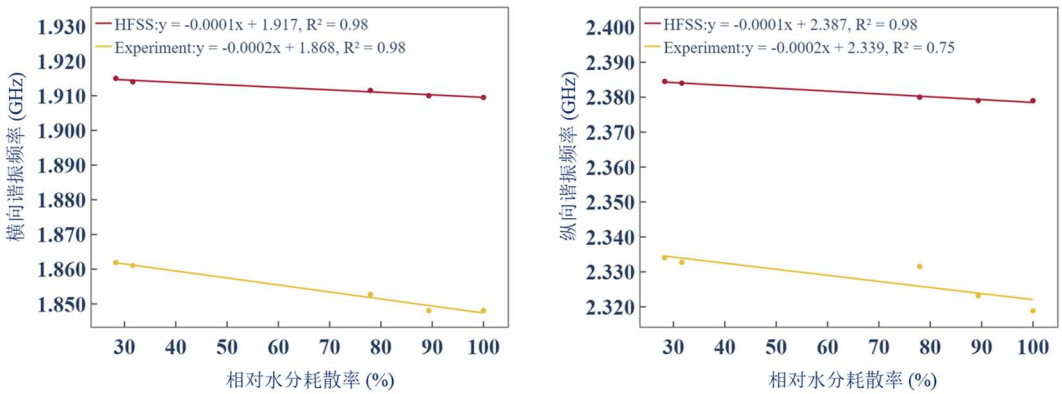



图 5.31 不同的含水率的混凝土埋置贴片天线 HFSS 与实验的谐振频率对比结果

误差分析可能包括考虑环境因素、传感器放置、实验操作的一致性等因素的影响。模拟中较低的二阶频率响应灵敏度可能反映了模型参数的不精确，或是实验条件下某些动态效应（如温度波动或材料的非均质性）的影响。

## 5.6 温湿度变化时对贴片天线及埋置于混凝土贴片天线的影响

### 5.6.1 试验探究温湿度同时变化时对贴片天线的影响

研究同时变化的温度和湿度对矩形贴片天线传感器性能的影响，实验装置如下，温度控制由电热鼓风干燥箱负责，而湿度由加湿器的开关来控制。同时，DHT11 温湿度传感器被放置于干燥箱内，并通过 ESP8266 开发板连接至计算机，以实时监控干燥箱内部的温度和湿度。

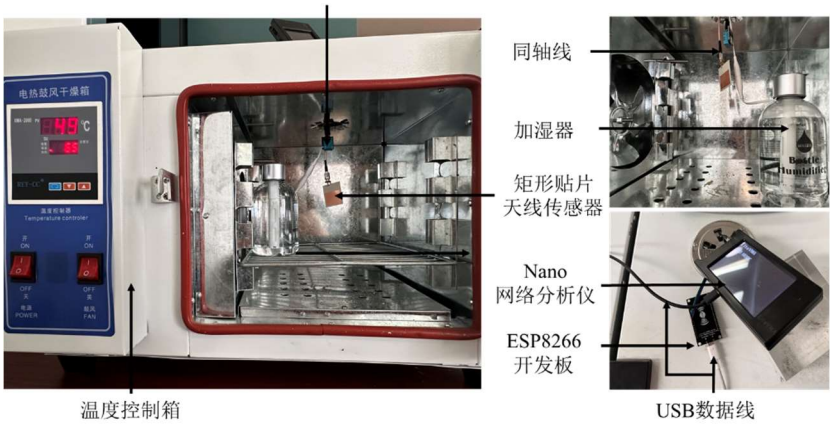



图 5.32 温湿度控制环境下的天线传感器实验装置

接下来分别展示了 20℃、30℃、40℃、50℃、65℃恒温条件下空气湿度逐渐升高情况下的回波损耗曲线，并提取了每个曲线的两个谐振频率最低点，拟合了空气湿度与横向纵向谐振频率的线性关系。

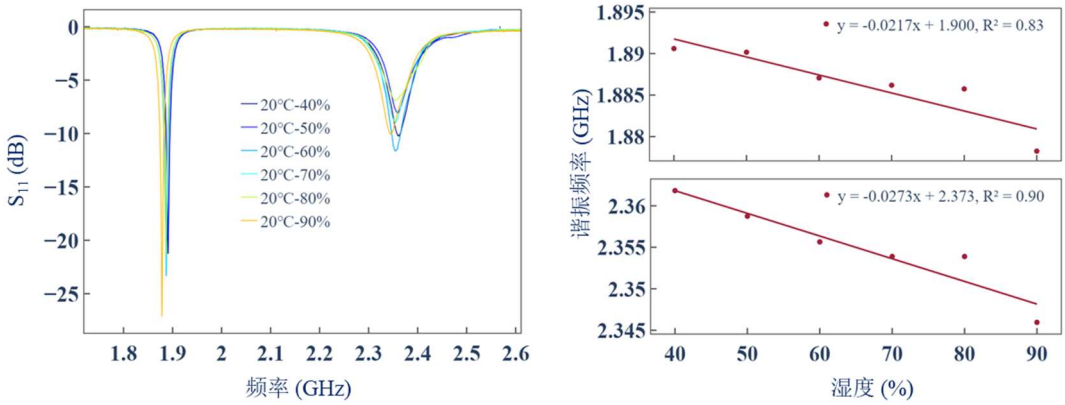



图 5.33 20℃下矩形贴片天线传感器的湿度响应特性

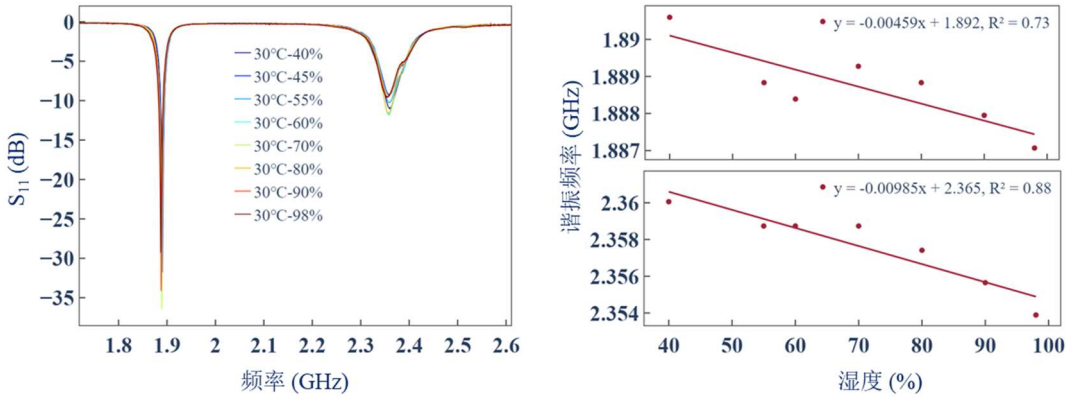



图 5.34 30℃下矩形贴片天线传感器的湿度响应特性

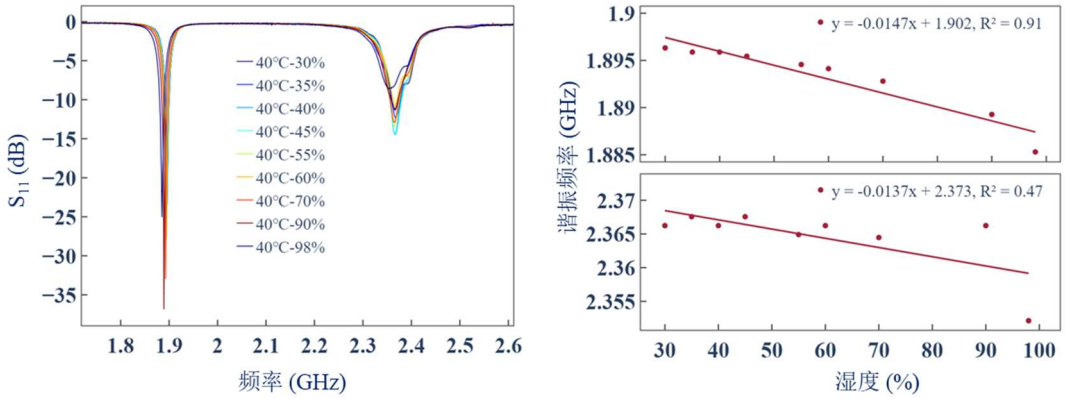



图 5.35 40℃下矩形贴片天线传感器的湿度响应特性

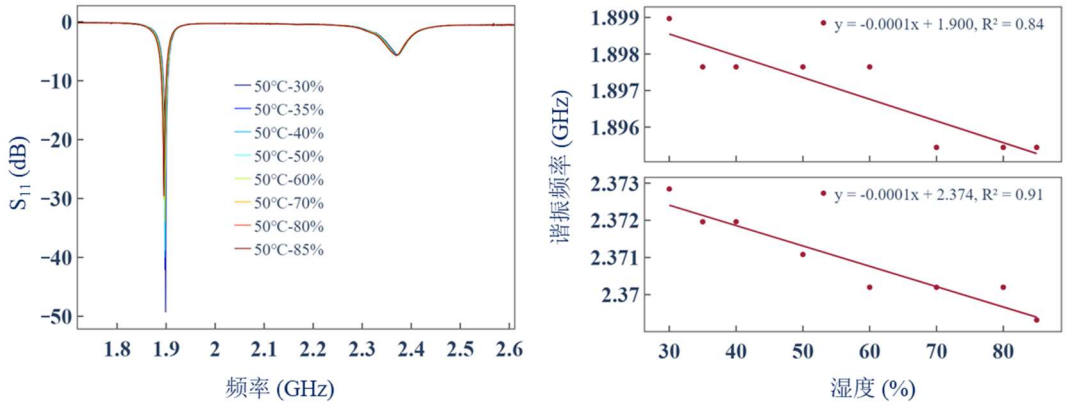



图 5.36 50℃下矩形贴片天线传感器的湿度响应特性

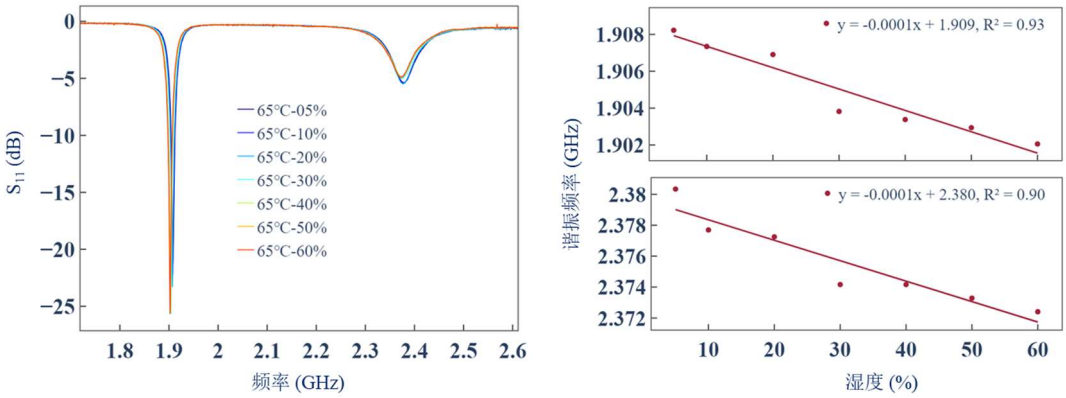



图 5.37 65℃下矩形贴片天线传感器的湿度响应特性

由图可知，在 20℃至 65℃的不同恒温条件下，随着空气湿度的升高，矩形贴片天线传感器的回波损耗曲线表现出湿度依赖性的变化。从两个谐振频率最低点的提取数据来看，随着湿度的增加，这谐振频率均表现出下降趋势，且斜率随温度的升高而逐渐降低。这可能意味着在更高的温度下，天线对湿度变化的敏感度有所减弱。这种变化可能是由于高温下水分更快地蒸发，从而影响了天线传感器表面的水膜厚度，进一步影响到传感器的谐振特性。此外，各温度下的决定系数 $R^2$也显示出数据的线性关系良好，尤其是在低湿度范围内。

### 5.6.2 试验探究温湿度同时变化时对埋置于混凝土的贴片天线的影响

在 45℃和 55℃下，将 C30、C40、C50 等不同强度等级的混凝土试块与贴片天线传感器相结合，对其谐振频率的偏移进行了观测。实验中，温度的稳定由控制箱保持，而湿度的变化则通过混凝土试块表面水分的蒸发量来调整，这一过程通过电子称的记录数据来监控。实验的目的在于评估环境因素，如湿度和温度，

对于贴片天线传感器性能的影响。

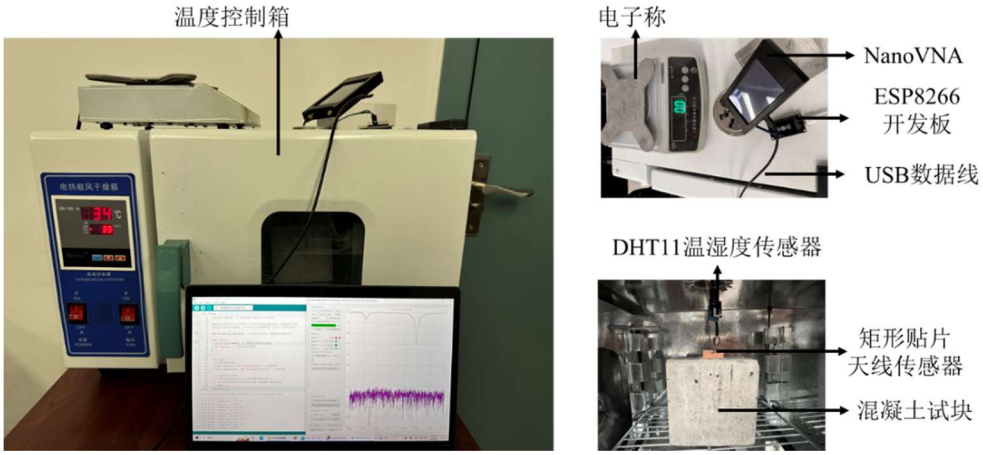



图 5.38 温湿度控制环境下的天线传感器监测混凝土实验装置

实验结果显示，在 45℃和 55℃的恒定温度下，随着湿度的增加，所有混凝土强度等级的试块所示传感器的谐振频率均出现了偏移。具体来说，随着相对湿度的升高，横向和纵向谐振频率均表现出下降的趋势。这些频率偏移的量化结果反映在相应的图表中，其中线性回归分析显示了频率偏移与湿度之间的关系，并以 $R^2$值来表示这一关系的强度。例如，对于 C30 混凝土试块，45℃条件下的一阶频率偏移与湿度之间的关系的 $R^2$值为 0.84，而二阶谐振频率偏移的 $R^2$值则高达 0.96，表明湿度变化对谐振频率有较强的影响。

此外，不同强度等级的混凝土试块对于频率偏移的敏感度似乎存在差异。C50 混凝土试块在相同的环境条件下显示出比 C30 和 C40 更大的频率偏移量，这可能与其微观结构和孔隙率有关，这些因素影响了水分在材料内部的传输和蒸发过程。

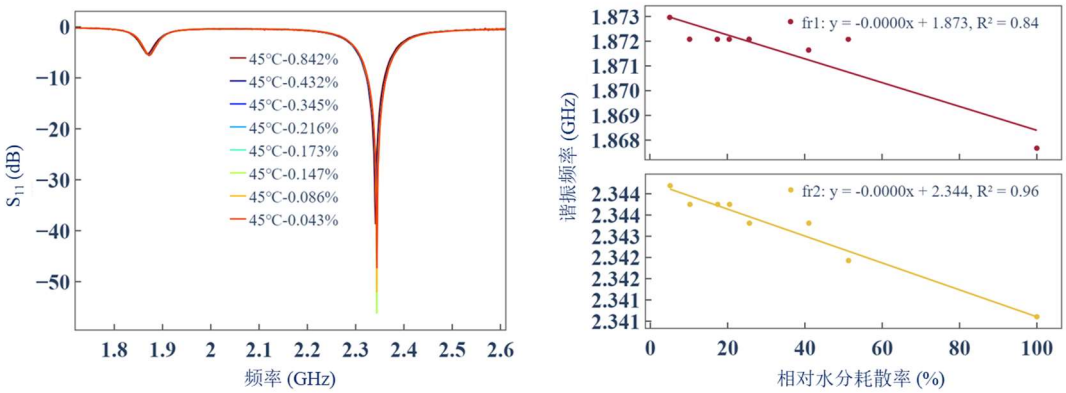



图 5.39 45℃下 C30 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

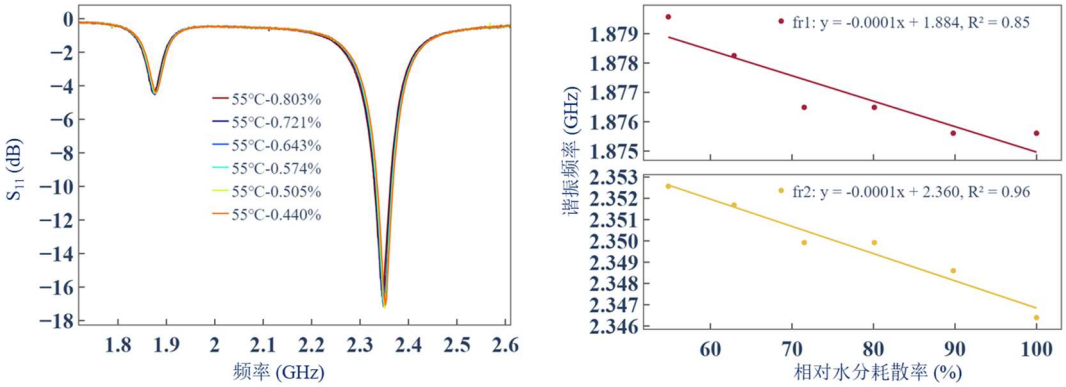



图 5.40 55℃下 C30 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

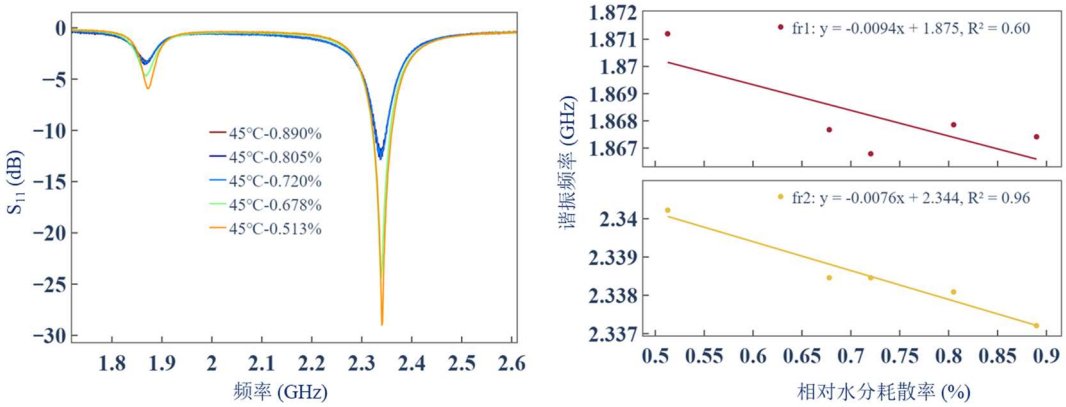



图 5.41 45℃下 C40 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

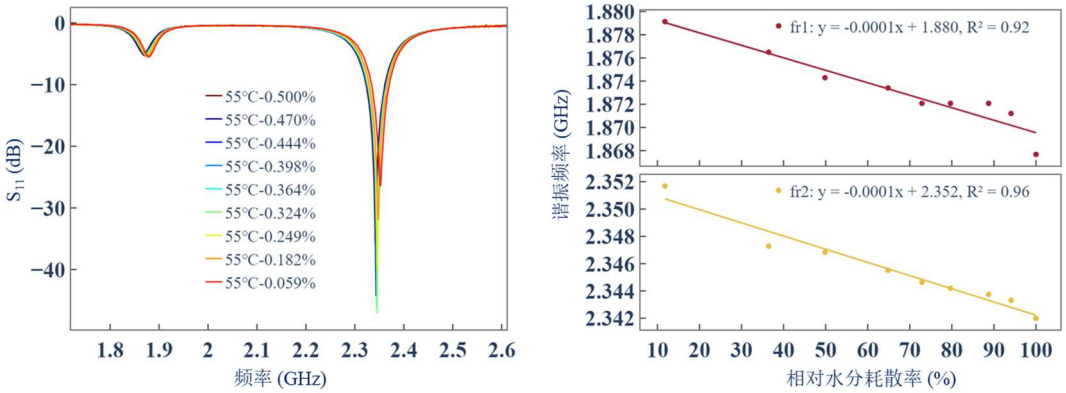



图 5.42 55℃下 C40 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

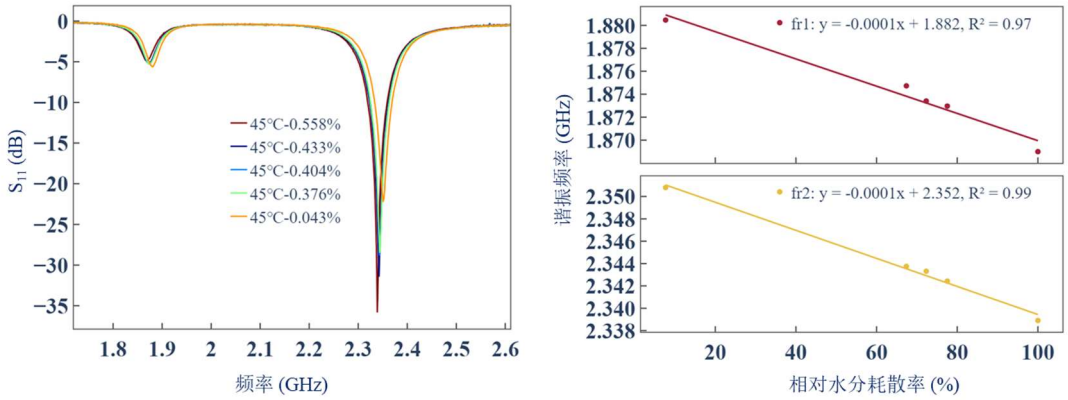



图 5.43 45℃下 C50 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

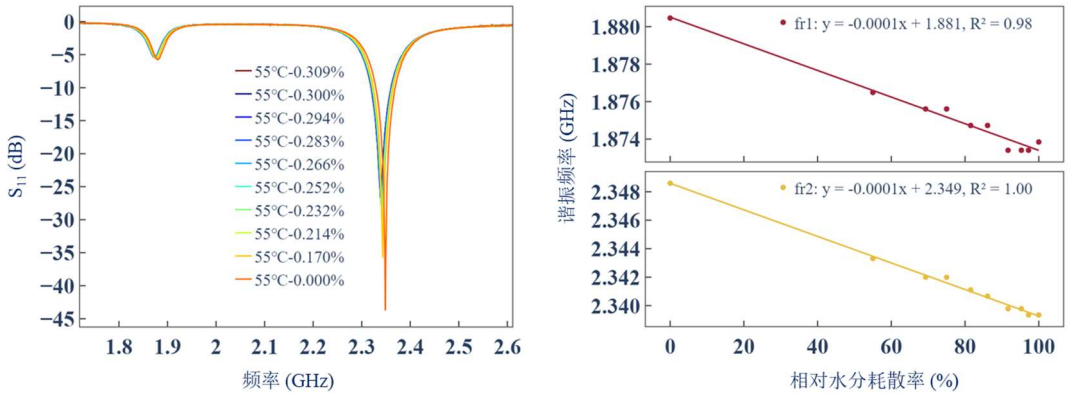



图 5.44 55℃下 C50 混凝土的湿度变化对矩形贴片天线传感器性能的影响

## 5.7 本章小结

第五章深入分析了贴片天线传感器在混凝土环境中监测多个关键环境参数的能力，扩展了我们对于天线传感器在工程应用中性能的认识。通过高频仿真模拟，实验验证，以及综合的性能分析，本章强化了对天线传感器如何感知和反映混凝土中的温湿度变化的理解。

在 5.2 节中，利用仿真模拟，我们成功地探讨了亚克力封装和空气层厚度对埋置在混凝土中的天线传感器谐振频率的影响，揭示了温湿度变化如何通过改变水泥的介电常数进而影响传感器的谐振频率。这为后续的实验设计提供了指导，同时为理论模型的发展奠定了坚实的数据基础。

5.3 节监测养护过程中混凝土的电磁参数变化，为养护期混凝土的实时监测提供了一种新的可靠手段。本节的实验研究验证了天线传感器能够准确地反映混凝土养护期间的微小变化，为混凝土结构健康监测领域提供了实用的传感工具。

在 5.4 节中，我们通过实验验证了天线传感器在不同温度条件下的电磁响应。温度变化对天线谐振频率的影响得到了明确的实证，这强化了仿真模型的有效性，并为混凝土中天线的温度监测提供了准确的实验依据。

5.5 节集中于湿度对天线传感器性能的影响。通过仿真与实验的对比分析，本节明确了湿度变化对混凝土介电特性和天线谐振频率的显著影响，为天线传感器在湿度监测技术中的应用提供了坚实的科学基础。

最终，在 5.6 节中，我们对温度和湿度同时变化时天线性能的影响进行了综合考察。这些综合效应的发现为设计适应复杂环境条件的贴片天线传感器提供了重要的洞见，并为温湿度联合监测系统的实际部署提供了数据支持。

综上所述，本章的研究不仅为天线传感器在混凝土中的应用提供了深刻的理论洞察和实验验证，也为未来混凝土结构健康监测技术的发展奠定了基础。天线传感器的多参数感知能力为实时监测混凝土结构提供了强大的支撑，展现了其在建筑健康监测领域的巨大潜力。

# 第6章 基于实验修正等效介电常数与谐振频率公式

## 6.1 基于实验数据计算三层介电结构的等效介电常数

等效介电常数的影响因素主要有基板介电常数、基板的高度热膨胀与混凝土介电常数来决定，那么分别将其设定为$\varepsilon_{r1}$(T)、$h_1$(T)和$\varepsilon_{r2}$(T,φ)，其中 T 代表温度，φ 代表湿度。设置如下图 6.1 所示的三层介电结构。第一层为基板 Rogers RO3010，第二层为混凝土材料，第三层为空气层。

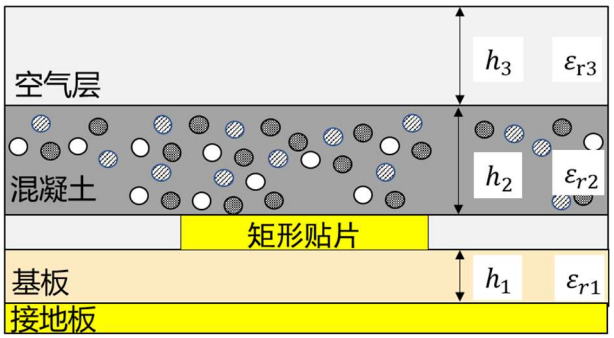



图 6.1 上覆混凝土的贴片天线三层介电结构主要参数

表 6.1 混凝土多层介电结构的介电参数及尺寸

| 层数 | 材料名称 | 介电常数（$\varepsilon_{ri}$） | 高度（$h_i$） |
|---|---|---|---|
| 1 | Rogers RO3010 | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) |
| 2 | 混凝土 | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | 20.0mm |
| 3 | 空气 | 1.0 | 0mm |

如果只考虑温度变量对等效介电常数的影响，基板的介电常数随温度变化，$\varepsilon_{r1}(T)$=10.300725−0.004029×T；基板的高度随温度变化，其关系式可以表达为$h_1(T)$=0.64×10$^{-3}$+16×10$^{-6}$×T，混凝土的介电常数随温度和湿度变化，表示为$\varepsilon_{r2}(T,\phi)$，这部分的数据采用第三章中波导测量的数据，即水泥试块和混凝土试块在不同温湿度下的介电常数。上覆水泥砂浆试块和混凝土层矩形贴片天线的多层介电结构的等效介电常数利用保角映射理论的公式，计算结果如下表 6.2 和 6.3 所示。

表 6.2 上覆水泥矩形贴片天线的等效介电常数结果汇总表

| 样本 | T (℃) | φ (%) | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | $h_2$ | $\varepsilon_{r3}$ | $\varepsilon_{r,eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 25 | 1.00 | 10.200 | 0.64000 | 3.5995 | 20 | 1 | 9.952 |
| 2 | 35 | 1.00 | 10.160 | 0.64010 | 3.6814 | 20 | 1 | 9.919 |

| 样本 | T (℃) | φ (%) | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | $h_2$ | $\varepsilon_{r3}$ | $\varepsilon_{r,eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 40 | 1.00 | 10.140 | 0.64015 | 3.7168 | 20 | 1 | 9.902 |
| 4 | 45 | 1.00 | 10.119 | 0.64020 | 3.7738 | 20 | 1 | 9.886 |
| 5 | 50 | 1.00 | 10.099 | 0.64026 | 3.8011 | 20 | 1 | 9.869 |
| 6 | 55 | 1.00 | 10.079 | 0.64031 | 3.8162 | 20 | 1 | 9.850 |
| 7 | 60 | 1.00 | 10.059 | 0.64036 | 3.8291 | 20 | 1 | 9.832 |
| 8 | 45 | 4.17 | 10.119 | 0.64020 | 5.3684 | 20 | 1 | 9.993 |
| 9 | 45 | 3.73 | 10.119 | 0.64020 | 5.4183 | 20 | 1 | 9.996 |
| 10 | 45 | 3.28 | 10.119 | 0.64020 | 5.3040 | 20 | 1 | 9.988 |
| 11 | 45 | 2.75 | 10.119 | 0.64020 | 5.1381 | 20 | 1 | 9.977 |
| 12 | 45 | 2.27 | 10.119 | 0.64020 | 5.1830 | 20 | 1 | 9.980 |
| 13 | 45 | 1.86 | 10.119 | 0.64020 | 4.8929 | 20 | 1 | 9.961 |
| 14 | 45 | 1.50 | 10.119 | 0.64020 | 4.7546 | 20 | 1 | 9.952 |
| 15 | 45 | 1.05 | 10.119 | 0.64020 | 4.7062 | 20 | 1 | 9.949 |
| 16 | 55 | 5.10 | 10.079 | 0.64031 | 5.2766 | 20 | 1 | 9.948 |
| 17 | 55 | 3.98 | 10.079 | 0.64031 | 4.9232 | 20 | 1 | 9.924 |
| 18 | 55 | 2.99 | 10.079 | 0.64031 | 4.7086 | 20 | 1 | 9.910 |
| 19 | 55 | 2.24 | 10.079 | 0.64031 | 4.5990 | 20 | 1 | 9.903 |
| 20 | 55 | 1.87 | 10.079 | 0.64031 | 4.5840 | 20 | 1 | 9.902 |
| 21 | 55 | 1.58 | 10.079 | 0.64031 | 4.4842 | 20 | 1 | 9.895 |
| 22 | 55 | 1.37 | 10.079 | 0.64031 | 4.3607 | 20 | 1 | 9.887 |
| 23 | 55 | 1.04 | 10.079 | 0.64031 | 4.2800 | 20 | 1 | 9.881 |
| 24 | 45 | 1.49 | 10.119 | 0.64020 | 4.4917 | 20 | 1 | 9.934 |
| 25 | 45 | 1.62 | 10.119 | 0.64020 | 4.5280 | 20 | 1 | 9.937 |
| 26 | 45 | 1.95 | 10.119 | 0.64020 | 4.6489 | 20 | 1 | 9.945 |
| 27 | 45 | 2.16 | 10.119 | 0.64020 | 4.7512 | 20 | 1 | 9.952 |
| 28 | 45 | 2.53 | 10.119 | 0.64020 | 4.9910 | 20 | 1 | 9.968 |
| 29 | 45 | 3.48 | 10.119 | 0.64020 | 5.4486 | 20 | 1 | 9.998 |
| 30 | 45 | 4.40 | 10.119 | 0.64020 | 5.4759 | 20 | 1 | 10.000 |
| 31 | 45 | 5.14 | 10.119 | 0.64020 | 5.8523 | 20 | 1 | 10.025 |
| 32 | 45 | 5.68 | 10.119 | 0.64020 | 5.9530 | 20 | 1 | 10.032 |

表 6.3 上覆混凝土矩形贴片天线的等效介电常数结果汇总表

| 样本 | T (℃) | φ (%) | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | $h_2$ | $\varepsilon_{r3}$ | $\varepsilon_{r,eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 30 | 1.00 | 10.180 | 0.64005 | 3.8935 | 50 | 1 | 9.981 |
| 2 | 35 | 1.00 | 10.160 | 0.64010 | 3.9210 | 50 | 1 | 9.964 |
| 3 | 40 | 1.00 | 10.140 | 0.64015 | 4.0069 | 50 | 1 | 9.951 |
| 4 | 45 | 1.00 | 10.119 | 0.64020 | 4.0274 | 50 | 1 | 9.934 |
| 5 | 50 | 1.00 | 10.099 | 0.64026 | 4.0027 | 50 | 1 | 9.912 |
| 6 | 55 | 1.00 | 10.079 | 0.64031 | 4.0924 | 50 | 1 | 9.900 |
| 7 | 65 | 1.00 | 10.039 | 0.64041 | 4.2901 | 50 | 1 | 9.877 |

| 样本 | T (℃) | φ (%) | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | $h_2$ | $\varepsilon_{r3}$ | $\varepsilon_{r,eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 30 | 1.00 | 10.180 | 0.64005 | 3.7932 | 50 | 1 | 9.973 |
| 9 | 35 | 1.00 | 10.160 | 0.64010 | 3.8797 | 50 | 1 | 9.961 |
| 10 | 40 | 1.00 | 10.140 | 0.64015 | 3.9243 | 50 | 1 | 9.945 |
| 11 | 45 | 1.00 | 10.119 | 0.64020 | 3.9918 | 50 | 1 | 9.931 |
| 12 | 50 | 1.00 | 10.099 | 0.64026 | 4.0789 | 50 | 1 | 9.918 |
| 13 | 55 | 1.00 | 10.079 | 0.64031 | 4.0590 | 50 | 1 | 9.898 |
| 14 | 60 | 1.00 | 10.059 | 0.64036 | 4.0706 | 50 | 1 | 9.879 |
| 15 | 30 | 1.00 | 10.180 | 0.64005 | 3.6709 | 50 | 1 | 9.964 |
| 16 | 35 | 1.00 | 10.160 | 0.64010 | 3.7485 | 50 | 1 | 9.950 |
| 17 | 40 | 1.00 | 10.140 | 0.64015 | 3.7948 | 50 | 1 | 9.935 |
| 18 | 45 | 1.00 | 10.119 | 0.64020 | 3.9008 | 50 | 1 | 9.924 |
| 19 | 50 | 1.00 | 10.099 | 0.64026 | 4.0265 | 50 | 1 | 9.914 |
| 20 | 55 | 1.00 | 10.079 | 0.64031 | 4.0071 | 50 | 1 | 9.893 |
| 21 | 60 | 1.00 | 10.059 | 0.64036 | 4.0673 | 50 | 1 | 9.879 |
| 22 | 25 | 2.03 | 10.200 | 0.64000 | 4.2111 | 50 | 1 | 10.025 |
| 23 | 25 | 1.49 | 10.200 | 0.64000 | 4.0415 | 50 | 1 | 10.012 |
| 24 | 25 | 1.34 | 10.200 | 0.64000 | 4.0542 | 50 | 1 | 10.013 |
| 25 | 25 | 1.19 | 10.200 | 0.64000 | 4.1616 | 50 | 1 | 10.022 |
| 26 | 25 | 0.94 | 10.200 | 0.64000 | 4.1194 | 50 | 1 | 10.018 |
| 27 | 25 | 0.45 | 10.200 | 0.64000 | 4.2135 | 50 | 1 | 10.026 |
| 28 | 25 | 2.91 | 10.200 | 0.64000 | 3.9487 | 50 | 1 | 10.005 |
| 29 | 25 | 2.33 | 10.200 | 0.64000 | 3.9057 | 50 | 1 | 10.001 |
| 30 | 25 | 1.89 | 10.200 | 0.64000 | 4.0225 | 50 | 1 | 10.011 |
| 31 | 25 | 2.04 | 10.200 | 0.64000 | 4.0819 | 50 | 1 | 10.015 |
| 32 | 25 | 1.60 | 10.200 | 0.64000 | 4.0439 | 50 | 1 | 10.012 |
| 33 | 25 | 1.02 | 10.200 | 0.64000 | 3.8691 | 50 | 1 | 9.998 |
| 34 | 25 | 2.15 | 10.200 | 0.64000 | 4.3211 | 50 | 1 | 10.034 |
| 35 | 25 | 1.65 | 10.200 | 0.64000 | 4.1012 | 50 | 1 | 10.017 |
| 36 | 25 | 1.35 | 10.200 | 0.64000 | 4.3104 | 50 | 1 | 10.033 |
| 37 | 25 | 1.15 | 10.200 | 0.64000 | 4.0593 | 50 | 1 | 10.013 |
| 38 | 25 | 0.90 | 10.200 | 0.64000 | 3.9541 | 50 | 1 | 10.005 |
| 39 | 25 | 0.15 | 10.200 | 0.64000 | 3.9894 | 50 | 1 | 10.008 |
| 40 | 25 | 2.34 | 10.200 | 0.64000 | 4.3090 | 50 | 1 | 10.033 |
| 41 | 25 | 2.02 | 10.200 | 0.64000 | 4.3206 | 50 | 1 | 10.034 |
| 42 | 25 | 1.71 | 10.200 | 0.64000 | 4.2038 | 50 | 1 | 10.025 |
| 43 | 25 | 1.61 | 10.200 | 0.64000 | 4.2486 | 50 | 1 | 10.028 |
| 44 | 25 | 1.25 | 10.200 | 0.64000 | 4.0209 | 50 | 1 | 10.010 |
| 45 | 25 | 0.57 | 10.200 | 0.64000 | 4.2164 | 50 | 1 | 10.026 |
| 46 | 25 | 2.24 | 10.200 | 0.64000 | 4.2708 | 50 | 1 | 10.030 |
| 47 | 25 | 1.99 | 10.200 | 0.64000 | 4.2011 | 50 | 1 | 10.025 |

| 样本 | T (℃) | φ (%) | $\varepsilon_{r1}$(T) | $h_1$(T) | $\varepsilon_{r2}$(T, φ) | $h_2$ | $\varepsilon_{r3}$ | $\varepsilon_{r,eff}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 48 | 25 | 1.65 | 10.200 | 0.64000 | 4.0686 | 50 | 1 | 10.014 |
| 49 | 25 | 1.55 | 10.200 | 0.64000 | 3.9525 | 50 | 1 | 10.005 |
| 50 | 25 | 1.21 | 10.200 | 0.64000 | 4.1735 | 50 | 1 | 10.022 |
| 51 | 25 | 0.87 | 10.200 | 0.64000 | 3.8804 | 50 | 1 | 9.999 |
| 52 | 25 | 2.47 | 10.200 | 0.64000 | 4.2214 | 50 | 1 | 10.026 |
| 53 | 25 | 2.09 | 10.200 | 0.64000 | 4.0227 | 50 | 1 | 10.011 |
| 54 | 25 | 1.71 | 10.200 | 0.64000 | 4.0260 | 50 | 1 | 10.011 |
| 55 | 25 | 1.38 | 10.200 | 0.64000 | 3.9456 | 50 | 1 | 10.004 |
| 56 | 25 | 1.09 | 10.200 | 0.64000 | 4.1004 | 50 | 1 | 10.017 |
| 57 | 25 | 0.62 | 10.200 | 0.64000 | 4.0612 | 50 | 1 | 10.014 |
| 58 | 25 | 2.03 | 10.200 | 0.64000 | 4.1140 | 50 | 1 | 10.018 |
| 59 | 25 | 1.61 | 10.200 | 0.64000 | 4.0178 | 50 | 1 | 10.010 |
| 60 | 25 | 1.37 | 10.200 | 0.64000 | 4.0787 | 50 | 1 | 10.015 |
| 61 | 25 | 1.23 | 10.200 | 0.64000 | 4.3154 | 50 | 1 | 10.034 |
| 62 | 25 | 0.90 | 10.200 | 0.64000 | 4.0030 | 50 | 1 | 10.009 |
| 63 | 25 | 0.61 | 10.200 | 0.64000 | 3.9383 | 50 | 1 | 10.004 |
| 64 | 25 | 2.19 | 10.200 | 0.64000 | 4.0605 | 50 | 1 | 10.014 |
| 65 | 25 | 1.86 | 10.200 | 0.64000 | 3.9191 | 50 | 1 | 10.002 |
| 66 | 25 | 1.57 | 10.200 | 0.64000 | 4.0498 | 50 | 1 | 10.013 |
| 67 | 25 | 1.34 | 10.200 | 0.64000 | 3.8442 | 50 | 1 | 9.996 |
| 68 | 25 | 1.10 | 10.200 | 0.64000 | 3.9541 | 50 | 1 | 10.005 |
| 69 | 25 | 0.81 | 10.200 | 0.64000 | 3.8132 | 50 | 1 | 9.994 |
| 70 | 25 | 1.76 | 10.200 | 0.64000 | 4.3312 | 50 | 1 | 10.035 |
| 71 | 25 | 1.42 | 10.200 | 0.64000 | 4.4032 | 50 | 1 | 10.041 |
| 72 | 25 | 1.12 | 10.200 | 0.64000 | 4.0498 | 50 | 1 | 10.013 |
| 73 | 25 | 0.98 | 10.200 | 0.64000 | 4.2072 | 50 | 1 | 10.025 |
| 74 | 25 | 0.78 | 10.200 | 0.64000 | 4.1513 | 50 | 1 | 10.021 |
| 75 | 25 | 0.49 | 10.200 | 0.64000 | 4.2245 | 50 | 1 | 10.026 |

## 6.2 结合等效介电常数与仿真模拟结果修正谐振频率

### 6.2.1 协方差矩阵自适应策略算法

CMA-ES（协方差矩阵自适应进化策略）是一种进化算法，专门设计来解决连续域的优化问题。算法通过维护一个代表潜在解决方案的种群，利用自适应的协方差矩阵和步长控制，智能地调整搜索策略，以适应特定问题的复杂性和多样性。此外，它不依赖于目标函数的梯度信息，使其能够有效处理不可导或导数难以计算的场景。

CMA-ES（协方差矩阵自适应进化策略）是一种高度适应性的随机优化算法，专门用于处理复杂和高维的优化问题。算法的核心在于通过自适应地调整搜索分布——即协方差矩阵和步长——来有效地探索潜在解决方案的空间。CMA-ES 初始化一个种群，每个种群成员代表一个潜在的解决方案，这些解通过多元正态分布产生。算法评估每个候选解的适应度，并选择表现最好的解进行下一代的繁衍。

在算法的迭代过程中，选定的解用于更新分布的均值向量（$m$）和协方差矩阵（$C$），并通过特定的学习率参数调整步长（$\sigma$），这些参数包括矩阵的更新（$c_1$）、排名 $\mu$ 的更新（$c_\mu$）、步长适应（$c_\sigma$）和进化路径更新（$c_c$）。这些更新遵循如下公式：

$$m^{(t+1)} = m^{(t)} + \sigma^{(t)} p^{(t)} \tag{6.1}$$

$$C^{(t+1)} = (1-c_1)C^{(t)} + c_1 p^{(t)} p^{(t)\mathrm{T}} \tag{6.2}$$

$$C^{(t+1)} = (1-c_\mu)C^{(t)} + c_\mu \sum_{i=1}^{\mu} w_i z_i z_i^{\mathrm{T}} \tag{6.3}$$

$$\sigma^{(t+1)} = \sigma^{(t)} \exp\left(\frac{c_\sigma}{d_\sigma}\left(\frac{|p_{\mathrm{efc}}|}{E[\|N(0,C^{(t)})\|]} - 1\right)\right) \tag{6.4}$$

$$p_c^{(t+1)} = (1-c_c)p_c^{(t)} + \sqrt{c_c(2-c_c)\mu_{\mathrm{eff}}}\,\frac{m^{(t)}}{\sigma} \tag{6.5}$$

$$C^{(t+1)} = (1-c_1-c_\mu)C^{(t)} + c_1 p_c^{(t+1)} p_c^{(t+1)\mathrm{T}} + c_\mu \sum_{i=1}^{\mu} w_i z_i z_i^{\mathrm{T}} \tag{6.6}$$

这些更新机制保证了算法不仅可以适应复杂的目标函数形状，还能有效地避免局部最优，推动搜索向全局最优解前进。CMA-ES 的这种自适应能力尤其适用于参数优化、机器学习、工程设计等领域中的应用，能够处理那些传统优化算法难以应对的非凸、多峰问题。

### 6.2.2 修正谐振频率的参数

上一小节得到了上覆水泥及混凝土的贴片天线的等效介电常数，综合温度和湿度对等效介电常数的影响。众所周知，谐振频率的另一决定因素是有效电长度，一般为辐射贴片的尺寸 L 和考虑电场线边缘效应带来的扩张距离 ΔL。关于 ΔL 的理论公式，一方面是针对在空气中的矩形微带天线提出来的，另一方面，公式本身也是通过实验数据拟合出来的经验公式。对于嵌入混凝土材料中的矩形微带贴片天线，其电场线的传播路径和电磁损耗与空气中有明显的不同。

因此，基于上覆水泥及混凝土的贴片天线的等效介电常数，在 HFSS 中利用自动化功能记录一个建模分析的全过程脚本，每一条回波损耗的曲线都基于以下

五个变量，分别是：受温度影响的基板介电常数，受温度热膨胀影响基板的厚度，波导法得到的不同温湿度下的水泥或者混凝土的有效介电常数，受温度影响的辐射贴片宽度，受温度影响的辐射贴片长度；基于这五个变量，遍历 6.1 节中的 107 组工况，通过编写代码实现 HFSS 模型的自动化运行，得到了这 107 个回波损耗曲线，每一条曲线可以得到两阶谐振频率的数值 $f_{r1}$ 和 $f_{r2}$,具体数值如下所示。

在 Hammerstad 的理论经验公式中[105]，空气中的贴片天线的 $f_{r1}$ 和 $f_{r2}$ 是基板介电常数 $\varepsilon_{r1}$、基板厚度 $h_1$ 与贴片尺寸(W 和 L)的函数,如下所示：

$$f_{r1} = \frac{v_0}{2\times\left(W+2\times0.412h\left(\frac{\varepsilon_{r,eff}+0.3}{\varepsilon_{r,eff}-0.258}\right)\left(\frac{L/h+0.262}{L/h+0.813}\right)\right)\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \tag{6.7}$$

$$f_{r2} = \frac{v_0}{2\times\left(L+2\times0.412h_1\left(\frac{\varepsilon_{r,eff}+0.3}{\varepsilon_{r,eff}-0.258}\right)\left(\frac{W/h_1+0.262}{W/h_1+0.813}\right)\right)\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \tag{6.8}$$

而本研究所提出的 $f_{r1}$ 和 $f_{r2}$ 是三层结构的等效介电常数 $\varepsilon_{r,eff}$、基板的厚度 $h_1$ 和贴片尺寸(W 和 L)的函数。这其中的尺寸变化也考虑到不同样本的环境因素而导致的变化，修正的参数分别为下面公式中的五个常数量 0.412、0.3、-0.258、0.262 和 0.813。将其分别设为 a、b、c、d、e。

算法训练的原始数据如表 6.4 所示，对于上覆水泥的条件下，贴片天线的尺寸是针对不同温湿度条件下的精确数值；等效介电常数是通过波导实验和多层介电结构公式的精确计算获得的；而两个谐振频率则是在相同温湿度条件下，通过 HFSS 模拟得到的精确数值。

表 6.4 上覆水泥矩形贴片天线参数与谐振频率的数据表

| 样本 | $W_t$(m) | $L_t$(m) | $h_1$(m) | $\varepsilon_{r,eff}$ | $f_{r1}$(GHz） | $f_{r2}$(GHz） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 9.951881 | 1.913822 | 2.384533 |
| 2 | 0.024004 | 0.019003 | 0.00064 | 9.918719 | 1.913822 | 2.384533 |
| 3 | 0.024006 | 0.019005 | 0.00064 | 9.901771 | 1.9158 | 2.388489 |
| 4 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.886266 | 1.917778 | 2.390467 |
| 5 | 0.02401 | 0.019008 | 0.00064 | 9.868778 | 1.919756 | 2.390467 |
| 6 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.850479 | 1.919756 | 2.392444 |
| 7 | 0.024014 | 0.019011 | 0.00064 | 9.832031 | 1.921733 | 2.394422 |
| 8 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.992706 | 1.894044 | 2.358822 |
| 9 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.996037 | 1.894044 | 2.3608 |
| 10 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.988408 | 1.894044 | 2.3608 |
| 11 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.97733 | 1.898 | 2.362778 |
| 12 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.980332 | 1.898 | 2.362778 |
| 13 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.960962 | 1.901956 | 2.366733 |
| 14 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.951736 | 1.903933 | 2.368711 |

| 样本 | $W_t$(m) | $L_t$(m) | $h_1$(m) | $\varepsilon_{r,eff}$ | $f_{r1}$(GHz） | $f_{r2}$(GHz） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.948506 | 1.903933 | 2.368711 |
| 16 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.947965 | 1.899978 | 2.366733 |
| 17 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.924376 | 1.899978 | 2.366733 |
| 18 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.910051 | 1.905911 | 2.374644 |
| 19 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.902737 | 1.907889 | 2.376622 |
| 20 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.901732 | 1.905911 | 2.374644 |
| 21 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.895071 | 1.911844 | 2.380578 |
| 22 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.886825 | 1.911844 | 2.380578 |
| 23 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.881438 | 1.913822 | 2.384533 |
| 24 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.934188 | 1.907889 | 2.376622 |
| 25 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.936609 | 1.905911 | 2.372667 |
| 26 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.944681 | 1.903933 | 2.372667 |
| 27 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.951508 | 1.901956 | 2.368711 |
| 28 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.967511 | 1.899978 | 2.366733 |
| 29 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.998057 | 1.894044 | 2.3608 |
| 30 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.999878 | 1.894044 | 2.362778 |
| 31 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 10.025 | 1.890089 | 2.370689 |
| 32 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 10.03173 | 1.886133 | 2.370689 |

基于水泥实验的 32 组数据，利用 CMA-ES 算法进行五个参数优化，应用与谐振频率的预测。参数优化过程采用了 CMA-ES 算法，包括初始化阶段，其中定义初始参数估计并设置 CMA-ES 配置选项，以及优化循环阶段，包括生成新的参数集合、评估目标函数、更新解集、记录优化过程和展示优化信息。优化循环中设定终止条件，结果被保存并用于结果展示和分析，展示真实值和预测值的比较，以及分析优化结果，包括损失函数的计算和性能评估。优化出来的五个参数结果如下所示。

表 6.5 上覆水泥试块贴片天线谐振频率的参数修正

| a | b | c | d | e |
|---|---|---|---|---|
| 1.102425 | 1.173062 | -2.50224 | -2.26997 | 5.843161 |
| 1.022325 | -0.04425 | -0.49399 | -3.25259 | 3.983651 |
| 1.294858 | 0.545313 | -3.54004 | -1.00614 | 8.440202 |
| 1.020403 | 1.159459 | -1.34669 | 0.28363 | 9.860971 |
| 1.071383 | -0.58193 | -0.15983 | -2.9108 | 5.399834 |
| 0.921146 | 0.027824 | 0.29812 | -5.21716 | 0.895533 |
| 0.809222 | 3.153046 | -0.68488 | 0.441281 | 9.732148 |
| 0.831217 | 0.185093 | 1.201488 | -3.65577 | 3.194081 |
| 1.107293 | -1.037 | -0.23266 | -3.77141 | 3.345768 |
| 1.295553 | -2.2371 | -0.29939 | -2.6107 | 4.999003 |

下一步是针对混凝土试块中嵌入的数据进行算法的优化。首先，需要整理以下数据表格数据：其中贴片天线的尺寸是在不同温湿度条件下的准确值；等效介电常数是通过波导实验和多层介电结构公式准确计算得出的；两个谐振频率是通过 HFSS 模拟在相同温湿度条件下的工况得到的精准值。

表 6.6 埋置混凝土内部矩形贴片天线参数与谐振频率的数据表

| 样本 | $W_t$(m) | $L_t$(m) | $h_1$(m) | $\varepsilon_{r,eff}$ | $f_{r1}$(GHz） | $f_{r2}$(GHz） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.024002 | 0.019002 | 0.00064 | 9.981065 | 1.911844 | 2.384533 |
| 2 | 0.024004 | 0.019003 | 0.00064 | 9.963927 | 1.911844 | 2.384533 |
| 3 | 0.024006 | 0.019005 | 0.00064 | 9.951388 | 1.913822 | 2.386511 |
| 4 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.933695 | 1.913822 | 2.390467 |
| 5 | 0.02401 | 0.019008 | 0.00064 | 9.912447 | 1.913822 | 2.390467 |
| 6 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.900207 | 1.917778 | 2.394422 |
| 7 | 0.024016 | 0.019013 | 0.00064 | 9.877185 | 1.917778 | 2.394422 |
| 8 | 0.024002 | 0.019002 | 0.00064 | 9.973162 | 1.911844 | 2.382556 |
| 9 | 0.024004 | 0.019003 | 0.00064 | 9.96067 | 1.911844 | 2.384533 |
| 10 | 0.024006 | 0.019005 | 0.00064 | 9.944882 | 1.913822 | 2.388489 |
| 11 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.930892 | 1.909867 | 2.386511 |
| 12 | 0.02401 | 0.019008 | 0.00064 | 9.918453 | 1.913822 | 2.390467 |
| 13 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.897573 | 1.9158 | 2.392444 |
| 14 | 0.024014 | 0.019011 | 0.00064 | 9.879187 | 1.919756 | 2.3964 |
| 15 | 0.024002 | 0.019002 | 0.00064 | 9.963528 | 1.913822 | 2.384533 |
| 16 | 0.024004 | 0.019003 | 0.00064 | 9.950337 | 1.909867 | 2.380578 |
| 17 | 0.024006 | 0.019005 | 0.00064 | 9.934673 | 1.917778 | 2.390467 |
| 18 | 0.024008 | 0.019006 | 0.00064 | 9.923724 | 1.913822 | 2.388489 |
| 19 | 0.02401 | 0.019008 | 0.00064 | 9.91432 | 1.9158 | 2.392444 |
| 20 | 0.024012 | 0.019009 | 0.00064 | 9.893483 | 1.9158 | 2.392444 |
| 21 | 0.024014 | 0.019011 | 0.00064 | 9.878922 | 1.9158 | 2.392444 |
| 22 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.0254 | 1.903933 | 2.376622 |
| 23 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01204 | 1.905911 | 2.3786 |
| 24 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01304 | 1.905911 | 2.380578 |
| 25 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.0215 | 1.903933 | 2.376622 |
| 26 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01818 | 1.905911 | 2.3786 |
| 27 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02559 | 1.903933 | 2.376622 |
| 28 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00473 | 1.907889 | 2.380578 |
| 29 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00133 | 1.905911 | 2.3786 |
| 30 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01054 | 1.903933 | 2.3786 |
| 31 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01522 | 1.905911 | 2.380578 |
| 32 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01223 | 1.905911 | 2.3786 |
| 33 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 9.998452 | 1.909867 | 2.382556 |

| 样本 | $W_t$(m) | $L_t$(m) | $h_1$(m) | $\varepsilon_{r,eff}$ | $f_{r1}$(GHz） | $f_{r2}$(GHz） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 34 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03407 | 1.901956 | 2.374644 |
| 35 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01674 | 1.903933 | 2.3786 |
| 36 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03323 | 1.899978 | 2.372667 |
| 37 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01344 | 1.903933 | 2.376622 |
| 38 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00515 | 1.903933 | 2.376622 |
| 39 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00794 | 1.905911 | 2.3786 |
| 40 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03311 | 1.901956 | 2.376622 |
| 41 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03403 | 1.901956 | 2.374644 |
| 42 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02482 | 1.903933 | 2.3786 |
| 43 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02836 | 1.899978 | 2.374644 |
| 44 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01041 | 1.903933 | 2.3786 |
| 45 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02582 | 1.903933 | 2.376622 |
| 46 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.0301 | 1.899978 | 2.374644 |
| 47 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02461 | 1.903933 | 2.3786 |
| 48 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01417 | 1.905911 | 2.3786 |
| 49 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00503 | 1.907889 | 2.382556 |
| 50 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02244 | 1.903933 | 2.3786 |
| 51 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 9.999342 | 1.907889 | 2.3786 |
| 52 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02621 | 1.903933 | 2.376622 |
| 53 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01056 | 1.903933 | 2.376622 |
| 54 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01082 | 1.903933 | 2.3786 |
| 55 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00448 | 1.905911 | 2.3786 |
| 56 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01668 | 1.903933 | 2.3786 |
| 57 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01359 | 1.901956 | 2.374644 |
| 58 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01775 | 1.905911 | 2.3786 |
| 59 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01017 | 1.903933 | 2.3786 |
| 60 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01497 | 1.905911 | 2.380578 |
| 61 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03362 | 1.901956 | 2.376622 |
| 62 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.009 | 1.905911 | 2.3786 |
| 63 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00391 | 1.907889 | 2.3786 |
| 64 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01353 | 1.903933 | 2.376622 |
| 65 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.0024 | 1.905911 | 2.3786 |
| 66 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01269 | 1.903933 | 2.376622 |
| 67 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 9.996495 | 1.909867 | 2.382556 |
| 68 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.00515 | 1.903933 | 2.376622 |
| 69 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 9.994049 | 1.909867 | 2.382556 |
| 70 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.03486 | 1.901956 | 2.374644 |
| 71 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.04054 | 1.899978 | 2.372667 |
| 72 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.01269 | 1.903933 | 2.376622 |
| 73 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.0251 | 1.903933 | 2.376622 |

| 样本 | $W_t$(m) | $L_t$(m) | $h_1$(m) | $\varepsilon_{r,eff}$ | $f_{r1}$(GHz) | $f_{r2}$(GHz) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 74 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02069 | 1.903933 | 2.3786 |
| 75 | 0.024 | 0.019 | 0.00064 | 10.02646 | 1.903933 | 2.376622 |

基于 CMA-ES（协方差矩阵自适应进化策略）算法进行参数优化的过程如前文所介绍，混凝土组的结果如下表 6.7 所示。

表 6.7 贴片天线谐振频率的参数修正

| a | b | c | d | e |
|---|---|---|---|---|
| 0.957774 | 0.876144 | -1.08283 | -7.34178 | 1.235147 |
| 0.920719 | 0.173528 | 0.441954 | -3.27062 | 8.434186 |
| 0.850171 | 0.423715 | 0.646404 | -5.70292 | 3.776765 |
| 0.921992 | 1.263365 | -0.65427 | -3.16874 | 8.37307 |
| 0.77384 | 2.035025 | 0.298021 | -5.22934 | 4.893234 |
| 0.814129 | 0.440651 | 1.104425 | -4.98277 | 5.079897 |
| 0.776018 | 1.697066 | 0.901427 | -1.80069 | 11.29357 |
| 0.941052 | 1.587247 | -0.91229 | -1.08556 | 12.39738 |
| 0.97999 | 0.610838 | -1.18226 | -7.45225 | 0.753124 |
| 0.782678 | 1.725665 | 0.246334 | -5.85715 | 3.336761 |

## 6.3 基于实验数据拟合温湿度影响规律

本章节列出了四五章节的两组试验，涉及不同温湿度条件下的水泥试块和混凝土标准试块。第一组试验考察了覆盖在水泥试块表面的不同温湿度条件下的表现，而第二组试验则针对置于不同温湿度环境中的混凝土标准试块进行了分析。本文记录了这些试验的数据集，包括通过仿真模拟验证了实验结果，具体数据见下表 6.8。

表 6.8 第四章与第五章中模拟仿真与实验的温湿度试验数据集

| 温度 (℃) | 湿度 (%) | 一阶谐振频率 (GHz) | 二阶谐振频率 (GHz) |
|---|---|---|---|
| 35 | 1.0222 | 1.9155000 | 2.3992000 |
| 35 | 1.3998 | 1.9150000 | 2.3983700 |
| 35 | 1.7773 | 1.9144650 | 2.3972900 |
| 35 | 2.0585 | 1.9131300 | 2.3970000 |
| 35 | 2.2643 | 1.9126125 | 2.3967000 |

| 温度 (℃) | 湿度 (%) | 一阶谐振频率 (GHz) | 二阶谐振频率 (GHz) |
|---|---|---|---|
| 35 | 2.8818 | 1.9122400 | 2.3959550 |
| 35 | 3.9522 | 1.9095700 | 2.3950650 |
| 35 | 4.8991 | 1.9080000 | 2.3928500 |
| 45 | 1.0526 | 1.9060100 | 2.3883900 |
| 45 | 1.8623 | 1.9033400 | 2.3866100 |
| 45 | 2.2672 | 1.9020050 | 2.3857200 |
| 45 | 2.7530 | 1.8997800 | 2.3843850 |
| 45 | 3.2794 | 1.8988900 | 2.3834950 |
| 45 | 3.7247 | 1.8975550 | 2.3830500 |
| 45 | 4.4638 | 1.8949839 | 2.3812859 |
| 45 | 5.0692 | 1.8936934 | 2.3804595 |
| 55 | 1.0369 | 1.9113500 | 2.3911800 |
| 55 | 1.3687 | 1.9091250 | 2.3906150 |
| 55 | 1.5761 | 1.9077900 | 2.3901700 |
| 55 | 1.8664 | 1.9076000 | 2.3897000 |
| 55 | 2.2397 | 1.9064550 | 2.3888350 |
| 55 | 2.9863 | 1.9055650 | 2.3879000 |
| 55 | 3.9818 | 1.9024500 | 2.3861650 |
| 55 | 5.1016 | 1.8984450 | 2.3835000 |
| 45 | 0.9929 | 1.8654680 | 2.3569733 |
| 45 | 1.1820 | 1.8641455 | 2.3556509 |
| 45 | 1.2766 | 1.8628231 | 2.3556509 |
| 45 | 1.3712 | 1.8615007 | 2.3534468 |
| 45 | 1.4657 | 1.8610598 | 2.3525652 |
| 45 | 2.3641 | 1.8460722 | 2.3252349 |
| 55 | 1.1888 | 1.8711985 | 2.3618223 |
| 55 | 1.4741 | 1.8676720 | 2.3604998 |
| 55 | 1.6167 | 1.8659088 | 2.3587366 |
| 55 | 1.7118 | 1.8654680 | 2.3578550 |
| 55 | 1.8545 | 1.8654680 | 2.3556509 |
| 55 | 1.9971 | 1.8628231 | 2.3547693 |

| 温度 (℃) | 湿度 (%) | 一阶谐振频率 (GHz) | 二阶谐振频率 (GHz) |
|---|---|---|---|
| 55 | 2.8055 | 1.8522436 | 2.3424265 |
| 65 | 2.6214 | 1.8676720 | 2.3627039 |
| 65 | 3.2039 | 1.8584150 | 2.3411041 |
| 65 | 3.4466 | 1.8579742 | 2.3300838 |
| 65 | 3.6408 | 1.8575333 | 2.3393409 |
| 65 | 3.7379 | 1.8451906 | 2.3265573 |
| 65 | 3.9320 | 1.8421049 | 2.3283206 |
| 65 | 4.2718 | 1.8346111 | 2.3124513 |
| 35 | 1.000 | 1.882660 | 2.357414 |
| 40 | 1.000 | 1.885305 | 2.358737 |
| 45 | 1.000 | 1.885305 | 2.359177 |
| 50 | 1.000 | 1.887949 | 2.361381 |
| 55 | 1.000 | 1.888831 | 2.363145 |
| 60 | 1.000 | 1.890594 | 2.363586 |
| 65 | 1.000 | 1.891476 | 2.366230 |
| 35 | 1.000 | 1.876929 | 2.346835 |
| 40 | 1.000 | 1.876929 | 2.346394 |
| 45 | 1.000 | 1.878252 | 2.347716 |
| 50 | 1.000 | 1.877811 | 2.349039 |
| 55 | 1.000 | 1.880456 | 2.351243 |
| 60 | 1.000 | 1.880456 | 2.351684 |
| 65 | 1.000 | 1.881778 | 2.353447 |
| 35 | 1.000 | 1.883100 | 2.350802 |
| 40 | 1.000 | 1.882219 | 2.350802 |
| 45 | 1.000 | 1.884423 | 2.350802 |
| 50 | 1.000 | 1.884864 | 2.354328 |
| 55 | 1.000 | 1.886627 | 2.353888 |
| 60 | 1.000 | 1.888390 | 2.357855 |
| 65 | 1.000 | 1.891476 | 2.361822 |
| 45 | 0.842 | 1.867672 | 2.341104 |
| 45 | 0.432 | 1.872080 | 2.342427 |

| 温度 (℃) | 湿度 (%) | 一阶谐振频率 (GHz) | 二阶谐振频率 (GHz) |
|---|---|---|---|
| 45 | 0.345 | 1.871639 | 2.343308 |
| 45 | 0.216 | 1.872080 | 2.343308 |
| 45 | 0.173 | 1.872080 | 2.343749 |
| 45 | 0.147 | 1.872080 | 2.343749 |
| 45 | 0.086 | 1.872080 | 2.343749 |
| 45 | 0.043 | 1.872962 | 2.344190 |
| 55 | 0.803 | 1.875607 | 2.346394 |
| 55 | 0.721 | 1.875607 | 2.348598 |
| 55 | 0.643 | 1.876488 | 2.349920 |
| 55 | 0.574 | 1.876488 | 2.349920 |
| 55 | 0.505 | 1.878252 | 2.351684 |
| 55 | 0.440 | 1.879574 | 2.352565 |
| 45 | 0.890 | 1.867415 | 2.337206 |
| 45 | 0.805 | 1.867856 | 2.338087 |
| 45 | 0.720 | 1.866790 | 2.338459 |
| 45 | 0.678 | 1.867672 | 2.338459 |
| 45 | 0.513 | 1.871199 | 2.340222 |
| 55 | 0.500 | 1.867672 | 2.341986 |
| 55 | 0.470 | 1.871199 | 2.343308 |
| 55 | 0.444 | 1.872080 | 2.343749 |
| 55 | 0.398 | 1.872080 | 2.344190 |
| 55 | 0.364 | 1.872080 | 2.344631 |
| 55 | 0.324 | 1.873403 | 2.345512 |
| 55 | 0.249 | 1.874284 | 2.346835 |
| 55 | 0.182 | 1.876488 | 2.347275 |
| 55 | 0.059 | 1.879133 | 2.351684 |
| 45 | 0.433 | 1.868994 | 2.338900 |
| 45 | 0.403 | 1.872962 | 2.342427 |
| 45 | 0.376 | 1.873403 | 2.343308 |
| 45 | 0.043 | 1.874725 | 2.343749 |
| 45 | 0.043 | 1.880456 | 2.350802 |

| 温度 (℃) | 湿度 (%) | 一阶谐振频率 (GHz) | 二阶谐振频率 (GHz) |
|---|---|---|---|
| 55 | 0.500 | 1.873843 | 2.339341 |
| 55 | 0.470 | 1.873403 | 2.339341 |
| 55 | 0.444 | 1.873403 | 2.339782 |
| 55 | 0.398 | 1.873403 | 2.339782 |
| 55 | 0.364 | 1.874725 | 2.340663 |
| 55 | 0.324 | 1.874725 | 2.341104 |
| 55 | 0.249 | 1.875607 | 2.341986 |
| 55 | 0.182 | 1.875607 | 2.341986 |
| 55 | 0.059 | 1.876488 | 2.343308 |
| 55 | 0.000 | 1.880456 | 2.348598 |

为了探究温度和湿度对于一阶和二阶谐振频率的影响，本研究采用线性回归模型进行分析。使用温度和湿度作为自变量，分别建立对一阶和二阶谐振频率的预测模型。模型的具体形式为：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \tag{6.9}$$

其中，$y$表示谐振频率，$x_1$ 和 $x_2$ 分别代表温度和湿度，$\beta 0,\beta 1,\beta 2$ 是回归系数，$\epsilon$是误差项。使用最小二乘法估计模型参数，在 python 中通过 Linear Regression 模块计算得到系数和截距。具体结果如下：

$$f_{r1}(\mathrm{GHz}) = 1.92586 - 0.00070 \times x_1 + 0.00224 \times x_2 \tag{6.10}$$

$$f_{r2}(\mathrm{GHz}) = 2.39275 - 0.00055 \times x_1 + 0.00618 \times x_2 \tag{6.11}$$

模型结果显示，随着温度的升高，一阶和二阶谐振频率均轻微下降。而湿度的增加则导致谐振频率上升，尤其是二阶谐振频率对湿度的响应更为敏感。这说明湿度对谐振频率的影响机制更为复杂，可能涉及到混凝土材料电磁性能的变化。

## 6.4 本章小结

本章主要是对第三、四、五章的仿真和实验数据进行处理，6.1 节基于波导测量结果，以及保角映射理论的一系列多层介电覆盖的矩形贴片等效介电常数的公式，计算得到不同温湿度下上覆混凝土的贴片天线的等效介电常数精确值。6.2 节基于等效介电常数精确值，利用 HFSS 自动化脚本对相同环境下的矩形贴片天线传感器进行建模与运行，得到基于有限元方法的谐振频率精确值。利用现存的

经验公式的形式，对其中的常数量参数进行修正，创立了嵌入混凝土中的矩形贴片天线谐振频率的理论公式。6.3 节基于 HFSS 模拟和实验中在不同温湿度变量的条件下产生的谐振频率结果，试图建立温湿度与谐振频率的拟合关系，为埋置混凝土中的传感器实现多参数传感提供了数据支持和初步的理论公式。

# 第7章 结论与展望

## 7.1 结论

本文将具有无源优势的贴片天线传感单元与混凝土的微波无损监测技术相结合，设计了一种用于混凝土内部温湿度等参数感知的无源贴片天线传感器。本论文的研究工作主要包括提出多层介质覆盖的矩形贴片天线的等效介电常数和谐振频率理论公式、基于波导法探究不同温湿度下水泥试块和混凝土试块的介电常数、对上覆水泥试块的贴片天线进行不同环境下的有限元模拟与试验探究、对埋置于混凝土内部的微带天线进行温湿度的有限元模拟和试验探究，并将以上研究成果集成最终对矩形贴片天线的谐振频率理论公式进行修正，实验大量的线性拟合结果和数据集为埋置于混凝土中的微带天线传感器提供了温湿度的影响规律和补偿机制设计。主要研究成果和结论如下：

（1）使用矩形波导精确测量,温度和湿度变化时的水泥砂浆试块和混凝土试块介电常数的变化。通过使用 Nicolson-Ross-Weir（NRW）算法处理 S 数据，结果表明介电特性随温度和湿度的增加而提高，并显示出强线性相关性。此外，水灰比对混凝土的孔隙性和介电特性有显著影响，混凝土的电磁性能与力学性能之间的相关性也为混凝土的微波无损检测潜力提供了视角。波导测量的材料电磁参数曲线导入高频仿真模拟中，有利于定义更加符合实际情况的贴片天线周围环境。

（2）对上覆水泥试块的矩形贴片传感器，从模拟和实验结果的定量分析了针对温度和湿度效应校准贴片天线传感器的可行性。此外，温湿度同时变化时的定量实验为解耦这两个变量提供了可行性支持。

（3）对埋置于混凝土试块内部的矩形贴片传感器，同样从模拟和实验两个方面，对不同水灰比的混凝土试块，进行混凝土环境温度、湿度及温湿度同时变化的贴片天线传感器进行谐振频率的测量。定量分析了温度与谐振频率的递增关系，混凝土试块湿度与谐振频率的递减关系，并提供温湿度变化时的谐振频率趋势。

（4）基于保角映射理论对等效介电常数的计算，以及波导实验数据与模拟仿真计算结果，对上覆混凝土材料的矩形贴片天线的谐振频率理论公式进行了初步的修正。另一方面基于贴片天线的实验数据和仿真模拟结果，拟合出谐振频率与温湿度的关系。

## 7.2 实现温湿度解耦的智能骨料展望

对于埋置进混凝土中的传感器，温度会对传感器本身和外界环境产生影响，而湿度只对外界环境产生影响。当传感器采用屏蔽材料进行封装时，贴片天线产生的电磁场被限制在封装尺寸内部，封装材料以外的埋置环境介电常数变化将不再对贴片天线电磁特征参数产生影响。而采用非屏蔽材料进行封装时，贴片天线产生的电磁场会影响到封装尺寸的外部空间，进而可以通过贴片天线电磁特征参数变化实现对外部环境介电常数的感知。采用两种不同的封装材料方案，可以有效解耦监测变量和外部环境对传感天线的影响，使得贴片天线可以适用于混凝土埋置等外部环境较为复杂的监测场景中，有望成为温湿度的解耦机制。

基于全文温湿度的影响导致的贴片天线本身和外界环境的电磁参数的变化，进而产生对谐振频率的影响，如下图 7.1 温湿度耦合影响理论因素所示。如果可以实现封装形式实现对温度的感知，同时采用非屏蔽封装形式实现对温湿度的同时感知，那么前者的数据导入到后者，即可实现温度和湿度变量的分别感知。

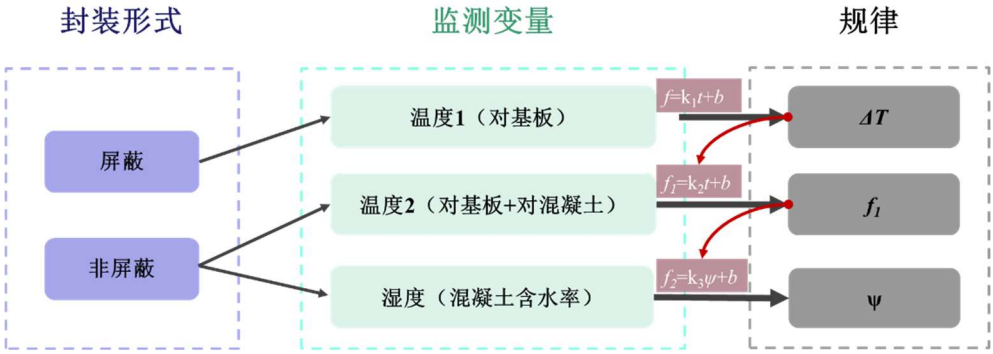



图 7.1 温湿度耦合影响理论因素

电磁屏蔽材料通常选用良导体，因为导体具有较高的电导率，电流或自由电子可以在导体内部快速移动，并在材料表面产生电场。当电磁波辐射遇到导体材料时，会在材料表面引起电荷运动，并形成一个反向电场。这个反向电场会抵消电磁波的电场成分，使得电磁波在导体表面或近表面的区域内被吸收或反射，从而减弱了电磁波的能量，实现了电磁屏蔽的效果。

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

非屏蔽封装材料起到的主要作用是保护内部传感器以及防水等，同时不影响贴片天线传感器对封装层外部环境的感知。当采用非屏蔽材料对贴片天线传感器进行封装时，贴片天线产生的电磁场会影响到封装层以外的空间区域，而封装层外部环境介电常数会受到温度湿度等环境的影响发生改变，进而影响到封装层内部贴片天线的电磁特征参数。

如下图 7.2 实现温湿度解耦的智能骨料封装形式设想所示，课题组使用碳纤维作为屏蔽封装材料，内置的传感器实现对变形和温度两个变量的监测。在碳钎维盒上方覆盖一个亚克力封装盒，其内置的传感器可以实现对外界温湿度的感知，并起到保护传感器的目的。由于碳钎维盒子的屏蔽作用，两个传感器之间不会产生耦合的电磁效应。将屏蔽封装传感器测量的温度补偿到非屏蔽封装的传感器中，即可得到对应的湿度。

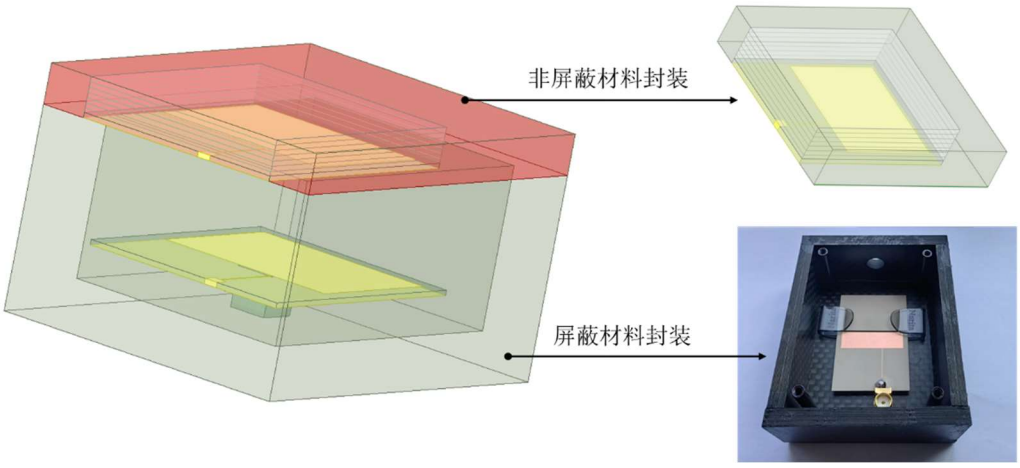



图 7.2 实现温湿度解耦的智能骨料封装形式设想

# 参考文献


[1] Hobbs D W. Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk [J]. International Materials Reviews, 2001, 46(3): 117-44.

[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: 238-47.

[3] Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2019.

[4] Shi X, Xie N, Fortune K, et al. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 125-38.

[5] Hernandez-Valle F, Clough A R, Edwards R S. Stress corrosion cracking detection using non-contact ultrasonic techniques [J]. Corrosion Science, 2014, 78: 335-42.

[6] Tian G Y, He Y, Adewale I, et al. Research on spectral response of pulsed eddy current and NDE applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 189: 313-20.

[7] Maierhofer C, Arndt R, Rollig M, et al. Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures [J]. Cement & Concrete Composites, 2006.

[8] Joshaghani A, Shokrabadi M. Ground penetrating radar (GPR) applications in concrete pavements [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 23(13): 4504-31.

[9] Tesic K, Baricevic A, Serdar M. Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Using Ground-Penetrating Radar: A Review [J]. Materials (Basel), 2021, 14(4).

[10] Tasker L, Karrech A, Shragge J, et al. Time-lapse monitoring of internal alteration of a concrete structure using ground penetrating radar [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 300-10.

[11] Jazayeri S, Kruse S, Hasan I, et al. Reinforced concrete mapping using full-waveform inversion of GPR data [J]. Construction and Building Materials, 2019, 229.

[12] Kaplanvural İ, Özkap K, Pekşen E. Influence of water content investigation on GPR wave attenuation for early age concrete in natural air-drying condition [J]. Construction and Building Materials, 2021, 297.

[13] Kravitz B, Mooney M, Karlovsek J, et al. Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 381-92.

[14] Rui Miguel Ferreira S J. NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength [J]. NDT&E International, 2010.

[15] Jamil M, Hassan M K, Al-Mattarneh H M A, et al. Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques [J]. Materials and Structures, 2013, 46(1-2): 77-87.

[16] Bois K J, Benally A D, Nowak P S, et al. Cure-state monitoring and water-to-cement ratio determination of fresh Portland cement-based materials using near-field microwave techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(3): 628-37.

[17] Bois K J, Benally A D, Zoughi R. Microwave near-field reflection property analysis of concrete for material content determination [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(1): 49-55.

[18] Wahab A, Aziz M M A, Sam A R M, et al. Review on microwave nondestructive testing techniques and its applications in concrete technology [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 135-46.

[19] Jin Y, M Granville A. Polymer Fiber Optic Sensors – A Mini Review of their Synthesis and Applications [J]. Journal of Biosensors & Bioelectronics, 2016, 07(01).

[20] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, et al. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials [J]. Sensors, 2016, 16(1): 99.

[21] Duan W H, Wang Q, Quek S T. Applications of Piezoelectric Materials in Structural Health Monitoring and Repair: Selected Research Examples [J]. Materials, 2010, 3(12): 5169-94.

[22] Duffó G S, Farina S B. Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process

of new and existing reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8): 2746-51.
[23] Noel A B, Abdaoui A, Elfouly T, et al. Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1403-23.
[24] Pradeep K G M D R P S, Dr.Soundara Rajan K. A Survey on Wireless Sensor Networks Based Structural Health Monitoring [J]. International Journal for Modern Trends in Science and Technology, 2020, (8): 254-60.
[25] Han B, Zhang L, Ou J. Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures [J]. 2017.
[26] Mc G, Anandarajah, Collins. A Review of Chipless Remote Sensing Solutions Based on RFID Technology [J]. Sensors, 2019, 19(22).
[27] 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).
[28] Bhattacharyya R, Floerkemeier C, Sarma S. Low-Cost, Ubiquitous RFID-Tag-Antenna-Based Sensing [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(9): 1593-600.
[29] Cook B S, Vyas R, Kim S, et al. RFID-Based Sensors for Zero-Power Autonomous Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2419-31.
[30] Balanis C A. Advanced Engineering Electromagnetics [M]. New York: John Wiley & Sons, 1989.
[31] Stewart M G, Wang X, Nguyen M N. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration [J]. Engineering Structures, 2011, 33(4): 1326-37.
[32] Yi X, Cho C, Wang Y, et al. Battery-free slotted patch antenna sensor for wireless strain and crack monitoring [J]. Smart Struct Syst, 2016, 18(6): 1217-31.
[33] 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.
[34] Chunfeng Wan1 L, Kangqian Xu2 Can Jiang2, GuochunWan4 and Tao Ding5,6, S X, 3,. Transverse deformation effect on sensitivity of strain-sensing patch antenna [J]. 2020.
[35] Girbau D, Ramos A, Lazaro A, et al. Passive Wireless Temperature Sensor Based on Time-Coded UWB Chipless RFID Tags [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(11): 3623-32.
[36] Yan D, Yang Y, Hong Y, et al. AlN-Based Ceramic Patch Antenna-Type Wireless Passive High-Temperature Sensor [J]. Micromachines (Basel), 2017, 8(10).
[37] Cheng H, Ebadi S, Ren X, et al. Wireless passive high-temperature sensor based on multifunctional reflective patch antenna up to 1050 degrees centigrade [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 222: 204-11.
[38] Hunter2 L-Y C a G W. Temperature Dependent Dielectric Properties of Polycrystalline 96%Al2O3 [J].
[39] Fu Z, Yang F. A Slotted Patch Antenna Integrated with Thermal Switch for High-Sensitivity Temperature Monitoring [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 998-1001.
[40] Sanders J W, Yao J, Huang H. Microstrip Patch Antenna Temperature Sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 5312-9.
[41] Tchafa F M, Huang H. Microstrip patch antenna for simultaneous temperature sensing and superstrate characterization [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(10).
[42] Li X, Xue S, Xie L, et al. An off-center fed patch antenna with overlapping sub-patch for simultaneous crack and temperature sensing [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(9): 095036.
[43] Meng C, AbdulMalek,MohamedFareq. Development of Microstrip Patch Antenna Sensing System for Salinity and Sugar Detection in Water [J]. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2014, 14: 31-6.
[44] Borgese M, Dicandia F A, Costa F, et al. An Inkjet Printed Chipless RFID Sensor for Wireless Humidity Monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(15): 4699-707.
[45] Teng K H, Kot P, Muradov M, et al. Embedded Smart Antenna for Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E) of Moisture Content and Deterioration in Concrete [J]. Sensors (Basel), 2019, 19(3).
[46] Guerra J R F, Campos A L P d S, de Andrade H D. A microwave system for measuring moisture of hollow concrete blocks [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 323.

[47] Dhingra N, Saluja N, Kanwar V, et al. Moisture sensitive electrical property measurement in concrete slab with step graded antenna [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 5172-6.
[48] Gonzalez-Lopez G, Romeu J, Cairo I, et al. Wireless Sensing of Concrete Setting Process [J]. Sensors (Basel), 2020, 20(20).
[49] Yi Z, Xue S, Xie L, et al. Detection of setting time in cement hydration using patch antenna sensor [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(1).
[50] Yi Z, Xue S, Xie L, et al. A Slotted-Patch Antenna Sensor With Higher Sensitivity for Detecting Setting Time of Cement Paste [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-13.
[51] Wu T, Wei H, Liu X, et al. Factors influencing the mechanical properties of lightweight aggregate concrete [J]. 2017.
[52] Ismail S, Kwan W H, Ramli M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 296-306.
[53] Reza Abaeian H P B, Shahram Jalali Moslem. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres [J]. 2018.
[54] Piladaeng N, Angkawisittpan N, Homwuttiwong S. Determination of Relationship between Dielectric Properties, Compressive Strength, and Age of Concrete with Rice Husk Ash Using Planar Coaxial Probe [J]. Measurement Science Review, 2016, 16(1): 14-20.
[55] Peiliang Shen a.b, Linnu Lu a.b.*, Yongjia He [a], Fazhou Wang[a], Shuguang Hu. Hydration monitoring and strength prediction of cement-basedmaterials based on the dielectric properties [J]. 2016.
[56] M.N. Soutsos* J H B, S.G. Millard, M.R. Shaw, A. Patterson. Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing [J]. 2001.
[57] Yu T-Y. Dielectric deamplification of multiphase cementitious composites in the frequency range of 0.5GHz to 4.5GHz; proceedings of the Electrical Insulation Conference, F 2011, 2011 [C]. IEEE.
[58] Guihard V, Patapy C, Sanahuja J, et al. Effective medium theories in electromagnetism for the prediction of water content in cement pastes [J]. International Journal of Engineering Science, 2020, 150.
[59] Jianglin Liu[a] Y L, *, Caiyun Jin b, Hui Lin[a], Hongwen Li[a], Yinuo Lic, Yunze Liu'. Multi-scale quantitative study on dielectric properties of C-S-H synthesizedby different molar ratio of Ca/Si [J]. 2022.
[60] Chung K L, Wang L, Ghannam M, et al. Prediction of concrete compressive strength based on early-age effective conductivity measurement [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 35.
[61] Hoshi Y, Koike T, Tokieda H, et al. Non-Contact Measurement to Detect Steel Rebar Corrosion in Reinforced Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(11): C3316-C9.
[62] Stojanović G, Radovanović M, Krstić D, et al. Determination of pH in Powdered Concrete Samples or in Suspension [J]. Applied Sciences, 2019, 9(16).
[63] Hegler S, Seiler P, Dinkelaker M, et al. Electrical Material Properties of Carbon Reinforced Concrete [J]. Electronics, 2020, 9(5).
[64] Alzeyadi A, Yu T. Remote characterization of chloride content in oven-dried concrete specimens by using synthetic aperture radar image models [J]. Construction and Building Materials, 2021, 302.
[65] Singh S K, Narang N, Singh D. Development of a novel approach to detect damage in concrete structures with millimeter wave radar assessment system [J]. Rev Sci Instrum, 2021, 92(4): 044710.
[66] Deepak Kumar Ghodgaonkar N A A. Microwave Nondestructive Testing of Composite Materials using Free-Space Microwave Measurement Techniques [J]. 2000.
[67] Guihard V, Taillade F, Balayssac J-P, et al. Permittivity measurement of cementitious materials with an open-ended coaxial probe [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230.
[68] Liu K L C a R. Monitoring of Mix-Proportions of Concrete ByUsing Microwave Permittivity Measurement [J]. 2018.
[69] Dobson M, Ulaby F, Hallikainen M, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1): 35-46.

[70] Villain G, Garnier V, Sbartaï Z M, et al. Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators [J]. Materials and Structures, 2018, 51(2).
[71] Gonzalez-Lopez G, Blanch S, Romeu J, et al. Debye Frequency-Extended Waveguide Permittivity Extraction for High Complex Permittivity Materials: Concrete Setting Process Characterization [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(8): 5604-13.
[72] Wheeler H A. Transmission-Line Properties of Parallel Wide Strips by a Conformal-Mapping Approximation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1964, 12(3): 280-9.
[73] Wheeler H A. Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1965, 13(2): 172-85.
[74] Yamashita E, Mittra R. Variational Method for the Analysis of Microstrip Lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1968.
[75] E. Yamashita, Atsuki K. Analysis of Thick-Strip Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1971, 19: 120-2,.
[76] Bahl I J, Stuchly S S. Analysis of a Microstrip Covered with a Lossy Dielectric [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1980.
[77] Bahl I, Bhartia P, Stuchly S. Design of microstrip antennas covered with a dielectric layer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(2): 314-8.
[78] Pozar D. Input impedance and mutual coupling of rectangular microstrip antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(6): 1191-6.
[79] Mittra Z P R. Quasi-tem analysis of microwave transmission lines by the finite element method [J]. 1986.
[80] Svacina J. Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(4): 769-72.
[81] Svacina J. A simple quasi-static determination of basic parameters of multilayer microstrip and coplanar waveguide [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1992, 2(10): 385-7.
[82] Shavit R. Dielectric cover effect on rectangular microstrip antenna array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(8): 1180-4.
[83] Shun-Shi Z, Gang L, Ghulam Q. Closed form expressions for resonant frequency of rectangular patch antennas with multidielectric layers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(9): 1360-3.
[84] Bernhard J T, Tousignant C J. Resonant frequencies of rectangular microstrip antennas with flush and spaced dielectric superstrates [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(2): 302-8.
[85] Soliman E A, Bakr M H, Nikolova N K. Neural Networks-Method of Moments (NN-MoM) for the Efficient Filling of the Coupling Matrix [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(6): 1521-9.
[86] Makarov S N, Kulkarni S D, Marut A G, et al. Method of Moments Solution for a Printed Patch/Slot Antenna on a Thin Finite Dielectric Substrate Using the Volume Integral Equation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1174-84.
[87] Yang L, Bowler N. Resonant Frequency of a Rectangular Patch Sensor Covered With Multilayered Dielectric Structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(6): 1883-9.
[88] Lee C-S, Yang C-L. Thickness and Permittivity Measurement in Multi-Layered Dielectric Structures Using Complementary Split-Ring Resonators [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 695-700.
[89] Rano D, Hashmi M S. Determination of Effective Dielectric Constant and Resonant Frequency of Microstrip Patch Antenna with Multilayered Superstrate Structures, F 2019, 2019 [C]. IEEE.
[90] Jiang S. Optimum Wireless Power Transmission for Sensors Embedded in Concrete [D], 2011.
[91] Dalke R A H C L, McKenna P, et al. Effects of reinforced concrete structures on RF communications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(4): 486-496.
[92] Shams K M Z, Ali M. Wireless Power Transmission to a Buried Sensor in Concrete [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(12): 1573-7.
[93] M.Fallah Rad L S. A Wireless Embedded Sensor for Structural Health Monitoring Applications [Z]. 13th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and

the Canadian Radio Sciences Meeting. ©2009 IEEE. 2009.
[94] Ramos A, Girbau D, Lazaro A, et al. Wireless Concrete Mixture Composition Sensor Based on Time-Coded UWB RFID [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(10): 681-3.
[95] Castorina G, Di Donato L, Morabito A F, et al. Analysis and Design of a Concrete Embedded Antenna for Wireless Monitoring Applications [Antenna Applications Corner] [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016, 58(6): 76-93.
[96] Zhou S, Deng F, Yu L, et al. A Novel Passive Wireless Sensor for Concrete Humidity Monitoring [J]. Sensors (Basel), 2016, 16(9).
[97] Johann S, Strangfeld C, Müller M, et al. RFID sensor systems embedded in concrete – requirements for long–term operation [J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(5): 5827-32.
[98] Bhuiyan R H, Islam M R, Caicedo J M, et al. A Study of 13.5-MHz Coupled-Loop Wireless Power Transfer Under Concrete and Near Metal [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(23): 9848-56.
[99] KURT ROTH R S, HANNES FLOHLER, AND WERNER ATTINGER Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach [J]. WATER RESOURCES RESEARCH, 1990.
[100] Zakri T, Laurent J-P, Vauclin M. Theoretical evidence for `Lichtenecker's mixture formulae' based on the effective medium theory [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(13): 1589-94.
[101] Birchak J R, Gardner C G, Hipp J E, et al. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(1): 93-8.
[102] Looyenga H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures [J]. Physica, 1965, 31(3): 401-6.
[103] A. M. NICOLSON, ROSS G F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 1970, 19(4): 377-82.
[104] WEIR W B. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies [J]. PROCEEDINGS OF THE IEEE, 1974, 62.
[105] Hammerstad E. Equations_for_Microstrip_Circuit_Design [Z]. 1975: 268–72.

# 致谢

在同济大学土木工程学院求学的三年时光匆匆而过，似乎还能在脑海中重现那天初见宛若书本堆砌的图书馆时的憧憬与渴望。有幸成为“和泉研究室”大家庭的一员，我深感荣幸与感激，师长与同侪的陪伴，使这段学习之旅更加充实与美好。

特别感谢我的导师薛松涛教授，薛老师学贯中西、洞察学术之精深，如灯塔般照亮了我们探索学术海洋的方向。您对学术研究的精益求精，对学生的关心和指引，无不显示出您作为学者的卓越和教育者的情怀。迷惘时薛老师的鼓励支持犹如定心丸，让我在未来道路的选择上有勇气大步向前。在此，我向薛老师表达最诚挚的谢意。

对我的副导师谢丽宇教授，亦感激不尽。谢老师您的儒雅和责任心，以及在科研探索中的敏锐洞察，为我们的学术旅程指点迷津，为我们科研中的困惑找到了方向。对我们生活中的关怀和举办各种精彩的团建活动，让我们感受到了研究室这个大家庭的温馨与和谐。谢老师充分尊重每一位学生的发展规划和人生道路，在此衷心感谢谢老师的指导与帮助！

感谢唐和生教授对我们科研与生活上的无微不至的关照，以及电信学院万国春教授的悉心指导，您的乐观情怀和丰富知识，对我们研究上的帮助无价。感谢母校苏州科技大学的孙国华教授，在我申请海外博士时经常为我推荐相关的信息。

学贵得师，亦贵得友。同样，对于与我同行的天线小组的师兄和同门们，李宪之、易卓然、徐康乾、姜康、郑志泉、夏子涵、吴通海、范永瑞琛、王郝丽、李泽宇、王梓旭、刘福田、瞿炜、张正钊等，我由衷感谢你们的支持与陪伴。电信学院的刘路易师兄和胡靖雯在试验过程中的协助，帮助我能够顺利完成学业。

感谢同一个教研室的伙伴们，大家有缘相聚在 506，使教研室成为了一个充满了欢声笑语的大家庭。康建飞、廖洋洋、张力、Amrit 马利特在学习和生活中指导我，张文静、史钦豪、丁宁、龙盼、纳米、杜宇坤、赵锦桐陪伴彼此，共同成长。陈千禧、张嘉慧、宋梦贤、陈雪岩、杨梓健、李度等师弟师妹们为教研室注入了新的活力，愿我们 506 大家庭继续共创辉煌。

感谢我的男朋友田杰的陪伴、帮助与鼓励，感谢我们一起走过的 1800 多天，愿未来我们诸事顺遂，所得皆所愿。

感谢我的父母家人，你们的爱与支持始终是我前进最强大的动力，是我最

坚强的后盾和最温暖的港湾。

路漫漫其修远兮，求学之路未完待续。从故乡淮安到苏州，再到上海，在每一个地方我都遇到了无尽的温暖与善良。感谢在我成长道路上每一位帮助过我的人，愿所有师长工作顺利，身体健康，愿所有朋友前程似锦，幸福安康。

希望我们都能充分体验人生，实现完整的自我。Attention is all you need.

# 个人简历、在读期间发表的学术成果

**个人简历：**

庞琳，女，1998 年 11 月生。

2020 年 6 月毕业于苏州科技大学。土木工程专业，获学士学位。

2021 年 9 月入同济大学攻读硕士学位。

**已发表论文：**

[1] 本人第一作者，探究环境因素对混凝土介电特性及埋置贴片天线谐振频率的影响,同济大学土木工程学院院报，2024.4.

**待发表论文：**

[1] Lin Pang, Songtao Xue, Liyu Xie*, Guochun Wan, Chunfeng Wan. Environmental Effects on Dielectric Properties of Cement Mortar and Resonant Frequencies of Underlying Patch Antenna. Construction and Building Materials (under review).

# 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《温湿度环境对贴片天线及周围介质的影响规律研究》，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本；学校有权保存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