

学校代号 10532

分类号 TU317+.5

学 号 S2101W0009

密 级 公 开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于射频识别技术的无线应变传感器 及位移传感器设计

学位申请人姓名 赵贺俊

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 仇一颗副教授、谈忠坤教授级高工

学 科 专 业 土木水利

研 究 方 向 结构健康监测

论文提交日期 2024年5月20日

学校代号：10532
学 号：S2101W0009
密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于射频识别技术的无线应变传感器 及位移传感器设计

国家自然科学基金(52278306)
湖南省交通厅科技进步与创新项目(201912)
湖南省重点研发计划项目(2022SK2096)
湖南省自然科学基金(2023JJ70003)
湖南省水利厅水利科技项目(XSKJ2023059-31)

学位申请人姓名：赵贺俊
导师姓名及职称：仇一颗副教授、谈忠坤教授级高工
培 养 单 位：土木工程学院
专 业 名 称：土木水利
论文提交日期：2024年5月20日
论文答辩日期：2024年5月23日
答辩委员会主席：易伟建教授

**Design of wireless strain sensors and displacement sensors based
on radio frequency identification technology**

by

ZHAO Hejun

B.E. (Hefei University of Technology)2021

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil and Hydraulic

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisors

Associate Professor QIU Yike

Senior Engineer TAN Zhongkun

May, 2024

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，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

1、保密，在____年解密后适用本授权书。

2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

近年来,随着大型土木结构设施的不断兴建和城市化进程的加速推进,对结构健康监测系统的性能和成本提出了新的要求。当前作为结构健康监测系统核心的传感器系统,存在大量布线、不易维护和安装复杂等问题。RFID 技术由于结构简单、通讯可靠、功耗及成本较低,成为新型应变传感器研究的重要方向之一。本文基于 RFID 技术的通信功能和感知功能,设计了两种应变传感器,同时采用组合式贴片天线的形式设计了两种位移传感器,并通过变形仿真和实验验证来评估其性能和可行性。以下是研究的主要内容:

(1) 基于 RFID 技术的通信功能,将电阻应变片与搭载模数转换器芯片的有源 RFID 标签相连,形成了 RFID 应变传感器。针对灵敏度不高的问题,引入了运算放大器 AD620 对 RFID 应变传感器进行改进,并将温湿度电子标签与改进后的 RFID 应变传感器进行了集成,实现了温湿度与应变的同步测量。使用集成后的 RFID 传感器在 UHPC 梁和铝合金板进行了应变和温湿度测试实验,通过对比 RMSE 值和 R^2 ,证明所设计的传感器在应变和温湿度测量结果上与有线采集的应变数据和实测的温湿度数据具有较好的一致性和可靠性。

(2) 基于 RFID 标签本身具有集感知与通讯一体的特性,利用标签天线的应变与其谐振频率频移量存在线性关系,设计了无线无源应变传感器。最初,基于天线设计理论对天线进行抗金属设计和小型化设计。随后,通过 HFSS 软件优化天线尺寸参数使得天线在 915MHz 与 RFID 芯片阻抗实现共轭匹配。接着,利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对设计的 RFID 应变传感器进行力-磁耦合仿真。通过将力学场计算后的结果利用变形构型模块重新剖分网格后模型导出并重新导入 COMSOL 中进行电磁场计算天线的谐振频率的方法,提高了计算效率。最后,针对不同材料构件和加载条件,测试了设计的无线无源 RFID 应变传感器的性能。在试验中,利用阅读器无线采集阈值反射功率来间接测量谐振频率,并与应变采集箱有线采集的应变数据进行线性拟合,得到线性相关系数均大于 0.95,结果表明 RFID 应变传感器在不同加载条件下具有较好的线性度。

(3) 采用组合式贴片天线形式,基于单片多模法和多枝节法设计了两种位移传感器。天线传感器具有具有两个谐振频率,当外接贴片移动时只影响其中一个谐振频率,从而实现对结构变形的双向监测或者结构温度与变形的同时监测。利用 HFSS 软件通过移动附加贴片改变其与主贴片天线的重合长度来对所设计的组合式贴片天线位移传感器进行结构变形仿真模拟研究。并制作天线传感器实物进行试验,通过转动水平滑动平台带动附加贴片移动来模拟结构变形,使用矢量网

络分析仪有线测量天线传感器谐振频率的变化，得到的基于单片多模法组合式贴片天线位移传感器和基于多枝节法组合式贴片天线位移传感器的灵敏度分别为 92.5MHz/mm 和 56.6MHz/mm，线性相关系数分别为 0.993 和 0.987。试验结果表明，所设计的位移传感器具有良好的线性度，且相较于单片多模法组合式贴片天线位移传感器，基于多枝节法组合式贴片天线位移传感器具有更小的尺寸和更高的灵敏度。

关键词：结构健康监测；RFID 技术；天线多频化；位移传感器；应变传感器；谐振频率

Abstract

In recent years, with the continuous construction of large-scale civil structures and the acceleration of urbanization, new requirements have been put forward for the performance and cost of structural health monitoring system. At present, as the core of structural health monitoring system, the sensor system has many problems such as a large amount of wiring, difficult maintenance and complex installation. RFID technology has become one of the important directions in the research of new strain sensors because of its simple structure, reliable communication, low power consumption and low cost. Based on the communication function and sensing function of RFID technology, two strain sensors are designed in this paper, and two displacement sensors are designed in the form of a combined patch antenna, and their performance and feasibility are evaluated through deformation simulation and experimental verification. The following are the main contents of the study:

(1) Based on the communication function of RFID technology, the resistance strain gauge is connected to the active RFID tag equipped with an analog-to-digital converter chip to form an RFID strain sensor. To solve the problem of low sensitivity, the operational amplifier AD620 is introduced to improve the RFID strain sensor, and the temperature and humidity electronic label is integrated with the improved RFID strain sensor, and the synchronous measurement of temperature and humidity and strain is realized. The integrated RFID sensor is used to test the strain and temperature and humidity of UHPC beam and aluminum alloy plate. By comparing the RMSE value and R^2 , it is proved that the designed sensor has good consistency and reliability in the strain and temperature and humidity measurement results with the wired strain data and the measured temperature and humidity data.

(2) Based on the integrated sensing and communication characteristics of RFID tags, Designed a wireless passive strain sensor by leveraging the linear correlation between strain on the tag antenna and its resonance frequency shift. At first, based on the antenna design theory, the metal resistance design and miniaturization design of the antenna are carried out. Subsequently, HFSS software is used to optimize the antenna size parameters to achieve conjugate matching between the antenna and the RFID chip impedance at 915MHz. Then, COMSOL Multiphysics software was used to simulate the force-magnetic coupling of the RFID strain sensor. By using the results of the mechanical field calculation after the deformation configuration module to re-dissect the

mesh, the model is exported and re-imported into COMSOL for electromagnetic field calculation of the antenna resonance frequency, improving the efficiency of the calculation. Finally, according to different material components and loading conditions, the performance of the wireless passive RFID strain sensor is tested. In the test, the resonant frequency is measured indirectly by using the reader's wirelessly collected threshold reflection power, and the linear correlation coefficients obtained are all greater than 0.95, and the results show that the RFID strain sensor has good linearity under different loading conditions.

(3) Two kinds of displacement sensors are designed based on single-chip multi-mode method and multi-branch method, using the form of combined patch antenna. The antenna sensor has two resonant frequencies, and only one resonant frequency is affected when the external patch moves, so as to realize bidirectional monitoring of structural deformation or simultaneous monitoring of structural temperature and deformation. By using HFSS software to change the overlap length between the attached patch and the main patch antenna, the structural deformation simulation of the displacement sensor designed by the combined patch antenna is carried out. A physical antenna sensor was made for testing. The structure deformation was simulated by rotating the horizontal sliding platform to drive the attached patch to move. Wired measurement of antenna sensor resonant frequency changes using a vector network analyzer. The sensitivity of the displacement sensor based on single-chip multi-mode method and the displacement sensor based on multi-branch method are 92.5MHz/mm and 56.6MHz/mm respectively, and the linear correlation coefficients are 0.993 and 0.987, respectively. The experimental results show that the displacement sensor has good linearity, and compared with the single-chip and multi-mode combined patch antenna displacement sensor, the multi-branch combined patch antenna displacement sensor has smaller size and higher sensitivity.

Key Words: Structural health monitoring; Antenna multifrequency; RFID technology; Displacement sensor; Strain sensor; Resonant frequency

目 录

学位论文原创性声明和学位论文版权使用授权书	I
摘要	II
Abstract	IV
插图索引	IX
附表索引	XII
第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 结构应变和位移监测技术研究现状	3
1.2.2 基于 RFID 技术的传感器研究现状	7
1.3 本文研究依据与研究内容	10
1.3.1 研究依据	10
1.3.2 研究内容	10
1.3.3 技术路线	12
第 2 章 基于 RFID 技术的应变及位移传感原理	13
2.1 引言	13
2.2 RFID 技术原理及分类	13
2.2.1 RFID 系统组成	13
2.2.2 RFID 标签分类	14
2.3 有源无线应变传感器工作原理	16
2.3.1 全桥应变片工作原理	16
2.3.2 有源无线应变传感器测量原理	17
2.4 无源无线应变传感器工作原理	19
2.4.1 贴片天线应变-频移理论	19
2.4.2 无源无线应变传感器测量原理	20
2.5 组合式贴片天线位移传感器工作原理	23
2.5.1 组合式贴片天线传感原理	23
2.5.2 贴片天线多频化理论	25
2.6 本章小结	26
第 3 章 有源无线 RFID 应变传感器设计与研究	28
3.1 引言	28
3.2 RFID 应变传感器组件设计	28

3.2.1 RFID 标签.....	28
3.2.2 全桥应变片.....	29
3.2.3 阅读器与应用软件系统.....	30
3.3 RFID 应变传感器的改进.....	32
3.3.1 RFID 应变传感器试探实验.....	32
3.3.2 RFID 应变传感器改进措施.....	33
3.4 RFID 应变传感器测试实验.....	36
3.4.1 UHPC 梁应变测试实验.....	36
3.4.2 铝合金板应变测试实验.....	40
3.5 本章小结.....	43
第 4 章 无源无线 RFID 应变传感器设计与研究.....	45
4.1 引言.....	45
4.2 微带天线设计理论.....	45
4.2.1 天线分析理论.....	45
4.2.2 微带天线馈电方式.....	46
4.2.3 天线抗金属设计方法.....	47
4.2.4 阻抗匹配理论.....	47
4.3 无源无线应变传感器设计.....	49
4.3.1 RFID 应变传感器的设计.....	49
4.3.2 RFID 应变传感器仿真与优化.....	51
4.3.3 RFID 应变传感器力-磁耦合仿真.....	55
4.4 无源无线应变传感器实验.....	58
4.4.1 铝合金板拉伸试验.....	59
4.4.2 铝合金板简支试验.....	60
4.4.3 铝合金板悬臂试验.....	62
4.5 本章小结.....	63
第 5 章 RFID 组合式贴片天线位移传感器设计与研究.....	65
5.1 引言.....	65
5.2 单片多模法组合式贴片天线位移传感器设计.....	65
5.2.1 单片多模法组合式贴片天线位移传感器仿真.....	65
5.2.2 单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验.....	70
5.3 多枝节法组合式贴片天线位移传感器设计.....	71
5.3.1 多枝节法组合式贴片天线位移传感器仿真.....	71
5.3.2 多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验.....	75
5.4 本章小结.....	77

结论与展望	78
参考文献	80
附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）	87
致谢	88

插图索引

图 1.1	结构健康监测系统	1
图 1.2	机器人及无人机非接触式结构信息采集设想图	2
图 1.3	机械式应变仪	3
图 1.4	电阻应变计(片)构造示意图	3
图 1.5	振弦式应变传感器结构示意图	5
图 1.6	断裂传感器构成	8
图 1.7	基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究	10
图 1.8	研究技术路线图	12
图 2.1	RFID 系统工作原理示意图	14
图 2.2	惠斯登电桥	16
图 2.3	T 形电阻应变片安装方式	17
图 2.4	数模转换流程图	18
图 2.5	有源无线应变传感器传感示意图	19
图 2.6	微带贴片天线	19
图 2.7	阈值功率曲线示意图	21
图 2.8	RFID 系统通信链路	21
图 2.9	无源无线应变传感器传感示意图	23
图 2.10	组合式贴片天线传感器示意图	24
图 2.11	多频贴片天线位移温度同步监测示意	25
图 3.1	电子标签模块评估版 DST-M80	29
图 3.2	全桥应变片桥路示意图	29
图 3.3	接线示意图	30
图 3.4	读卡模块 DSR-M01/2	31
图 3.5	应用软件系统	31
图 3.6	钢板简支梁试探性加载实验	32
图 3.7	RFID 应变传感器试探性加载实验结果	33
图 3.8	AD620 运算放大器	33
图 3.9	AD620 运算放大器差分输入接线图	34
图 3.10	应变片粘贴位置	34
图 3.11	改进实验结果	35
图 3.12	温湿度电子标签 DST-96	36
图 3.13	UHPC 梁应变测试实验布置图	37

图 3.14	应变片粘贴位置	37
图 3.15	应变采集箱有线采集数据	38
图 3.16	LZ2 与 LZ3 中间处应变测试结果	38
图 3.17	LC1 应变测试结果	39
图 3.18	UHPC 梁温湿度测试结果	40
图 3.19	铝合金板应变测试实验布置图	40
图 3.20	铝合金板应变测试结果曲线	42
图 3.21	铝合金板温湿度测试结果	43
图 4.1	基于负载的传输线电路	48
图 4.2	Alien Higgs-3 芯片	49
图 4.3	RFID 应变传感器结构示意图	51
图 4.4	天线阻抗与 H 槽宽度 W_i 的关系	52
图 4.5	天线阻抗与 H 槽长度 L_1 的关系	52
图 4.6	天线阻抗与芯片空槽距中心的距离 L_d 的关系	52
图 4.7	天线阻抗与蝶形边缘宽度 W_1 的关系	53
图 4.8	天线阻抗与矩形槽宽度 W_2 的关系	53
图 4.9	天线阻抗与矩形槽长度 L_2 的关系	53
图 4.10	天线阻抗与矩形槽长度 L_3 的关系	53
图 4.11	优化后天线在 915MHz 的阻抗	54
图 4.12	优化后天线的谐振频率与回波损耗 S_{11} 的关系	54
图 4.13	COMSOL 力学场仿真	55
图 4.14	COMSOL 电磁场仿真	56
图 4.15	RFID 应变传感器不同应变等级下的 S_{11} 曲线	57
图 4.16	RFID 应变传感器谐振频率与应变拟合结果	57
图 4.17	RFID 应变传感器天线实物图	58
图 4.18	Tagformance Pro 标签性能测试系统	58
图 4.19	Tagformance 软件界面	58
图 4.20	RFID 应变传感器和应变片粘贴方式	59
图 4.21	铝合金板拉伸实验布置图	59
图 4.22	拉伸实验阅读器采集的阈值反射功率曲线	60
图 4.23	拉伸实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果	60
图 4.24	铝合金板简支实验布置图	61
图 4.25	简支实验阅读器采集的阈值反射功率曲线	61
图 4.26	简支实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果	61
图 4.27	铝合金板悬臂实验布置图	62

图 4.28	悬臂实验阅读器采集的阈值反射功率曲线	62
图 4.29	悬臂实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果	63
图 5.1	中心馈电矩形微带天线模型	66
图 5.2	不同宽度下中心馈电矩形微带天线 S11 曲线	66
图 5.3	单片多模法组合式贴片天线位移传感器结构示意图	67
图 5.4	组合式贴片天线主要参数对天线阻抗实部的影响	67
图 5.5	单片多模法组合式贴片天线位移传感器 S11 曲线	68
图 5.6	中心馈电式组合式贴片天线传感器表面电流方向图	68
图 5.7	中心馈电式组合式贴片天线传感器结构变形仿真示意图	69
图 5.8	不同位移的中心馈电式组合式贴片天线传感器 S11 曲线	69
图 5.9	中心馈电式组合式贴片天线传感器谐振频率与位移拟合曲线	69
图 5.10	单片多模法组合式贴片天线位移传感器实物图	70
图 5.11	单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验布置图	70
图 5.12	单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验 S11 曲线	71
图 5.13	单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验位移频移拟合曲线	71
图 5.14	多枝节法组合式贴片天线位移传感器结构示意图	72
图 5.15	天线传感器仿真过程	73
图 5.16	仿真过程 S11 曲线	73
图 5.17	多枝节法组合式贴片天线传感器表面电流分布图	73
图 5.18	多枝节法组合式贴片天线传感器结构变形仿真示意图	73
图 5.19	不同位移下的多枝节法组合式贴片天线传感器 S11 曲线	74
图 5.20	多枝节组合式贴片天线传感器谐振频率与位移拟合曲线	74
图 5.21	多枝节法组合式贴片天线位移传感器实物图	75
图 5.22	多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验布置图	75
图 5.23	多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验 S11 曲线	76
图 5.24	多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验位移频移拟合曲线	76

附表索引

表 1.1	无线通信技术分类及特征	6
表 3.1	铝合金板悬臂实验结果汇总	42
表 4.1	优化后的天线各尺寸参数	54
表 4.2	材料力学参数	56
表 4.3	RFID 应变传感器不同应变等级下的谐振频率	57
表 5.1	单片多模法组合式贴片天线位移传感器尺寸参数	68
表 5.2	多枝节法组合式贴片天线位移传感器尺寸参数	73

第1章 绪 论

1.1 背景及意义

随着我国社会经济的发展，各地兴建了大量土木工程结构，其中大多处于建成服役阶段。截至 2022 年 9 月，我国初判存在安全隐患的自建房有 60 多万栋，采取管控措施的有 21.9 万栋^[1]。然而，土木工程结构具有服役周期长，服役环境复杂的特点，越来越多土木工程结构不可避免地会出现损伤积累，进一步导致正常使用性能劣化、耐久性降低、承载力下降等情况，从而形成巨大的安全隐患。近几年来，由此导致工程结构灾害事故时有发生，如 2021 年 6 月 19 日发生在河南汝城的房屋坍塌事故，2021 年 7 月 16 日发生在福建永安的屋面坍塌事故，2022 年 4 月 29 日发生在湖南长沙的重大居民自建房倒塌事故，2023 年 7 月 23 日发生在黑龙江齐齐哈尔的屋顶坍塌事故等。这些事故对社会、经济及人民生命财产的安全造成巨大威胁，因此，确保土木工程结构在使用过程中以及在面临灾害条件下的安全性已成为一项亟需解决的科学问题。

土木工程结构健康监测技术是基于在结构体系中部署密集传感器网络，实时监测荷载作用及结构响应等数据，以揭示结构的实际性能波动、损伤演化过程和抗力衰减特征。进而，利用这些信息进行状态评估、可靠度预测和安全预警，为结构的全寿命周期设计提供了重要的技术支持与基础。通常情况下，结构健康监测系统由五个核心组成部分构成（图 1.1），分别是传感器子系统、数据采集子系统、数据传输子系统、数据存储与管理子系统以及结构预警与评估子系统^[2]。



图 1.1 结构健康监测系统^[2]

结构健康监测系统为土木工程结构提供了必要的保障和支持，传感器是结构健康监测系统的核心组成部分之一，承担着数据采集和监测的任务。传感器通过感知结构的物理变化，如振动、应变、位移等，将这些信息转化为数字信号，提

供给监测系统进行分析 and 评估。自 20 世纪 80 年代土木工程界明确提出了结构健康监测的理念后，土木工程专家积极在这一领域展开了大规模的研究工作。为了有效地监测结构在施工和运行过程中的健康状况，开发了各种类型的传感器，包括位移、应变、应力、加速度、湿度、温度、倾斜、动态称重、探伤传感器等。

最早的监测及检测技术主要依赖人工通过机械设备进行手动测量，这种方法操作简单但误差较大，且不利于实时监测。随着电学、光学等领域的发展和科技进步，涌现出了一系列基于电阻式、振弦式、光纤式等利用电学特性或光学原理来监测结构性能参数的新型传感器，具有高精度、实时性和长期稳定性的特点^[3]。然而，这些传感器通常需要有有线连接，在应用时存在大量布线的问题，导致了大量人力物力和使用维护成本的投入^[4-5]。例如，香港青马大桥上安装布置了超过 3000 个传感器，结构健康监测系统投入超过 2.2 亿港币；在江苏润扬大桥上安装布置了超过 1300 个传感器，结构健康监测系统投入超过 1.36 亿人民币等。为了克服有线传感器布线复杂的问题，基于 Zig-Bee、Wifi、5G、蓝牙等无线通讯技术的无线传感器被研发，但目前用于结构健康检测领域的无线传感器仍然需要持续的电源供应，存在更换电池的问题，无法实现长期无源监测。

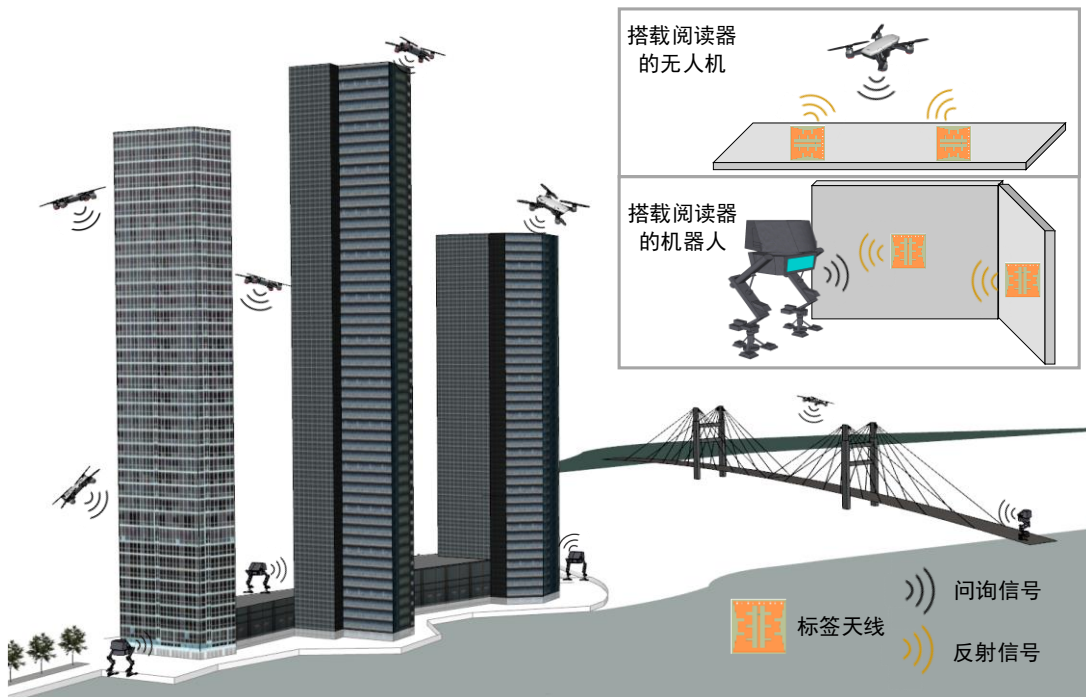


图 1.2 机器人及无人机非接触式结构信息采集设想图

近年来，射频识别技术（Radio Frequency Identification, RFID）的迅速发展为新型传感器的研发提供了全新的方向。该技术基于射频信号的电磁或电感耦合原理，无需物理接触，通过射频通信实现自动识别，具备低成本、较强的抗干扰能力、远距离读取能力、快速识别、以及大容量数据存储等优势^[6]。射频识别技术利用标签作为传感载体，其中有源标签可以主动发射包含标签天线结构信息的射频信号，而无源标签通过从外部射频信号中获取能量，通过信号调制将结构信

息包含在反射信号中。利用标签天线具备通信和应变感知的双重功能这个特性，可以将 RFID 技术与传感器技术相融合，不仅可以实现标签的识别和数据传输功能，还能够实现结构的应变或变形感知^[7]。此外，射频信号能穿透大多数非金属材料，如混凝土、木材等^[8-9]。未来，可以通过机器人或者无人机搭载阅读器，提前规划路线对其周围环境的数据采集，实现更为高效、便捷且安全的数据获取方式，为结构健康监测领域带来了新的可能性和发展方向，设想图见图 1.2。

1.2 国内外研究现状

应变和位移是在结构健康监测领域最常用的监测指标，通过对结构应变和位移的准确监测和分析，可以更精细地评估结构的状态，从而采取相应的预防措施。近几十年来许多研究学者致力于探索各种监测手段和技术，推动了传统应变传感器和位移传感器的发展和应用，也催生了新型应变和位移传感器的出现，使得传感器在精确测量所需结构参数外，更加智能化、集成化、协同化和自适应化，这将进一步提升监测的效率和可持续性，为结构安全提供更可靠的保障。

1.2.1 结构应变和位移监测技术研究现状

对位移和应力分布及其变化的准确监测和分析是结构健康监测领域的重要研究内容。在实践中，直接获取应力很难，通常通过材料的应力-应变关系推导应力。因此，应变能够直接反映结构内部的损伤演变以及应力集中的程度，是结构健康监测（Structural Health Monitoring, SHM）的广泛监测指标中最为关键的指标之一。应变和位移的本质都是长度的变化，其中应变是单位长度的变形量。常用测试方法包括机测法、电测法和光测法^[3,10-11]。

机测法的原理是利用量测设备，将被测对象的变化转换为机械位移，通过分析处理得到应变值。机测法具有操作简单，数据可靠，不受电磁等因素干扰的优点，但也存在安装复杂、不能实现温度补偿、不适合大规模和大应变测量的缺点，从而限制了机测法的应用。图 1.3 为机械式应变仪的示意图。

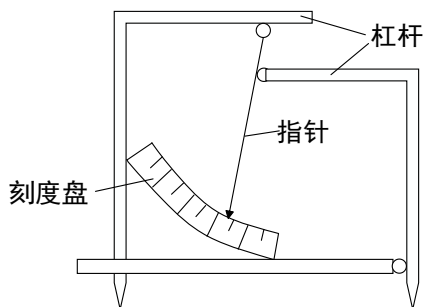


图 1.3 机械式应变仪

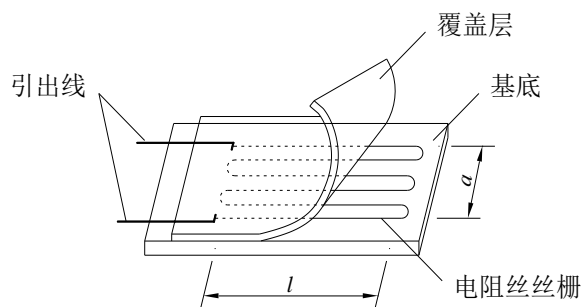


图 1.4 电阻应变计(片)构造示意图

电测法是指通过电子传感器或设备间接测量结构的应变，原理主要通过材料的电学特性发生变化来测量应变。通常使用电阻式应变片和振弦式应变传感器等

进行测量。电阻式应变片作为应用最广泛的电测方法，通过电阻丝丝栅受到外力作用时会发生形变，导致电阻值发生变化，从而实现对应变的测量。图 1.4 为电阻应变片构造示意图。对于电阻应变计，其电阻丝丝栅的材料直接关系到其性能。Tan^[12]等通过在聚氨酯热塑性弹性体纤维膜表面形成了石墨烯纳米的导电纳米网络，制备了一种具有良好热管理能力的高性能应变传感器。该传感器具有超过 100% 的良好拉伸性以及长期耐用性和可重复性。Enser^[13-14]等提出了一种新的方法，通过消除粘合过程并将传感器集成到基板上的覆盖层中，消除胶水和基材等材料由于弹性模量不同造成的力耦合对其测量精度造成的影响，进而降低测量误差。Aygun^[15]等提出了一种可扩展的电阻式应变传感片设计，利用低成本、大规模的柔性 PCB 制造技术进行制造。传感片的应变增益约为 2.1，且该传感计对热引起的机械应变变化非常敏感，可用于追踪人行桥上的热应变，足以满足损伤检测的目的。Daniel^[16]等将两个应变计以嵌套形式放置，这两个应变计由不同材料制成。由于两种材料的应变灵敏度和热电阻系数（TCR）的差异，从而可以区分由温度和应变引起的电阻变化。Liu^[17]等制备了一种具有鱼鳞状石墨烯传感层的高性能应变传感器。该传感制造简单、成本低廉且易于扩展。具有高达 82% 的应变感应范围及超过 5000 次循环的优异可靠性和稳定性。尤其适用于全范围的人体运动检测。电阻式应变片具有低成本、简易操作以及高精度等优点，且可通过桥路补偿和应变片自补偿两种方法来消除温度影响，但应变采集箱设备较为昂贵且需要电源供电。

对于振弦式应变传感器，其传感组件由两端夹紧的预张拉钢弦组成。当外部力的作用时导致钢弦的振动频率发生变化，通过监测钢弦振动频率的变化来推断出应变信息。图 1.5 为振弦应变传感器结构示意图。Tao^[18]提出了一种相位补偿自适应激励方法和基于加窗 FFT 的三谱线插值算法，减少了激励时间，大大提高了谐振频率的计算精度。然后，用振动丝传感器进行动态测量的实验验证了该方法的有效性。Cieplik^[19]等通过控制输出激励信号的频率和幅度，使钢丝保持在稳定的振动状态而不衰减，从而有效缩短了激励时间。Cellatog^[20]等人使用了基本的快速傅里叶变换(FFT)、Santos^[21]等人使用三参数和四参数正弦拟合算法来估计刚弦的振动频率，有效提高了频率监测的稳定性和准确性。毛索颖^[22]等对激励波形、步长、次数等因素对激励效果的影响进行了分析和实验研究，并结合基于 FFT 的频谱反馈式测频方法，构建了激励输入与测量结果输出的闭环反馈和评价机制，从而实现了振弦传感器的自适应激励。王文刚^[23]提出了一种改进型的区间扫频方法，其基于低压扫频方法，通过缩小扫频范围以快速寻找共振点。此外，还设计了温度补偿程序，周期性地采集数据，从而提高了振弦式传感器采集系统的鲁棒性。振弦式应变传感器具有高灵敏度、宽频率响应和高精度等优点，但也存在频率依赖性高、安装要求高及设备费用高的缺点^[24]。

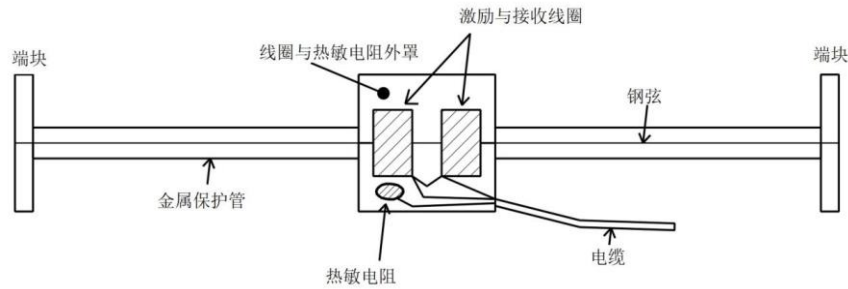


图 1.5 振弦式应变传感器结构示意图

光测法是利用光学原理来测量结构应变的技术手段。常见的光学测量方法包括光栅应变传感器、全场光学应变测量系统^[25-26]（如数字图像相关法 DIC 和全场激光测量系统）等。这些方法基于光学原理，通过记录光学图像的形变或干涉条纹的变化来间接获取结构的应变信息。光纤传感器的构造中，光纤不仅是传递光波的传输介质，同时也作为感知外界环境的敏感元件。Jacek^[27]等提出了一种采用双光纤布拉格光栅拓扑结构的光学应变传感器。该传感器利用其中一个光纤布拉格光栅用于提供参考输入信号，从而避免了使用插入式光纤光谱仪，有效降低了成本，同时具备较宽的测量范围和良好的环境适应性。Xu^[28]等将两个相位偏移的 FBG 引入到双频光电振荡器 OEO 环路中，从而产生两个微波信号，当其中一个 PBG 受到应变时，可以获得两个微波信号之间的拍频，通过使用数字信号处理器监测拍频来实现应变的测量。该方法具有 0.83 微应变分辨率的高分辨率传感性能，同时对温度不敏感。Li^[29]等提出了一种基于圆形光纤中高阶模式干涉的增敏光纤应变传感器。其原理是利用在多模光纤（MMF）段中激发的高阶模式的干涉，其应变灵敏度几乎是常用的光纤布拉格光栅应变传感器的两倍。且具有简单结构、易于制造和低成本的优点。Zhang^[30]等提出一种基于螺旋结构（HSs）的全固态非均质多芯光纤的高灵敏度应变传感器，得益于螺旋结构的存在，传感器具有 $-61.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 的应变灵敏度，且具有区分轴向应变和温度的能力。周珍伟^[31]等将长标距应变传感器和加速度传感器集成，通过数据融合构建了一个区域监测系统。并将损伤识别分为两个关键步骤：损伤定位和损伤定量。此外，针对结构损伤识别问题，引入了一种基于 D-S 证据理论的新方法。通过多指标信息融合确定损伤位置，提高了识别结果的可靠性和准确性。通过光栅应变传感器这种方式进行应变测量的优点包括高灵敏度、高精度、传输损耗小和抗电磁干扰等^[32-33]。然而，光栅应变传感器的制造和安装成本相对较高，性能受温度影响较大，且对光学系统的精准校准要求较高等。全场光学应变测量系统属于非接触测量的一种，其精度较高，对图像拍摄要求和计算机性能要求很高，应用场景范围有限。

机测法、电测法及光测法中的应变测量方式多是有线测量，有线连接通常具有较高的稳定性和可靠性。但有线传感器需要进行布线连接，布线工作比较复杂，成本较高，安装过程较为繁琐，容易受到环境因素的影响。此外有线连接限制了

传感器和数据采集设备的移动性。为了克服这些传感器在使用时的需要大规模布线的弊端，近几十年来，无线传感器网络已在结构健康监测领域得到广泛应用。

表 1.1 无线通信技术分类及特征

分类类别	主要技术	主要特征
短距离无线传输技术	Zig-Bee、蓝牙 (Bluetooth)、WiFi、超宽带 (UWB) 和近场通信 (NFC)、红外数据传输 (IrDA)、射频识别 (RFID)	低功耗、低成本、简单易用、稳定性好；但通信范围和传输速率有限
远距离无线传输技术	GPRS、CDMA、LoRa、TPUNB、NB-IoT、Sigfox、4G、5G、数传电台、扩频微波、无线网桥、卫星通信和短波通信技术	通信范围广、传输速度快、但功耗和成本较高，干扰源多需采取抗干扰措施

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 在结构健康监测 (SHM) 领域扮演着关键角色。WSN 利用分布在结构中的传感器节点来实时监测结构的各种参数，将数据传输到中央处理节点进行分析和处理^[34]。无线传输技术通常分为短距离和远距离两种。短距离无线通信技术如 Zig-Bee、蓝牙 (Bluetooth)、WiFi 及超宽带 (UWB) 等；远距离无线传输技术包括 GPRS、CDMA、5G、数传电台、扩频微波和短波通信技术等^[2]，其分类及特征见表 1.1。越来越多的趋势是将有线传感器替换为无线传感器网络 (WSSN)^[35]。几种最先进的无线传感器包括 Martlet^[36]、Xnode^[37]等。Dong^[38]等人开发了 Martlet 无线传感系统，其设计具有可扩展性，可以容纳多个传感器板，同时从一组异构传感器收集结构响应数据。此外，Xnode 传感平台支持五个外部传感通道，可实现更广泛的功能，如基于电容的裂纹监测^[39]和风险监测^[40]。Fu^[41]等提出了一种将超低功耗触发加速度计与高保真度的无线智能传感器 (WSS) 平台相结合的方法，该方法能够在最小功耗预算内运行，并地震发生时快速启动 WSS，并平稳切换到高保真度的数据采集。确保不会丢失触发事件的任何关键数据。相较于传统有线传感器系统，无线传感器网络无需部署复杂的电缆，也不需要进行电缆保护工作。此外，板载数据调节器能够消除高成本的单机解调器，简化了安装流程，且由于无线传感器节点不受布线的限制，可以更加灵活地布置在需要监测的区域内，也使得传感器的更新、添加、移动和替换变得轻松便捷，显著降低了整体成本^[42-43]。

目前市面上的无线应变传感器主要采用了应变传感单元与无线通信模块相结合的设计方案，通常采用 Zigbee 技术或 WiFi 技术来实现无线通信。其通信模块电路板构成较为复杂，限制传感器的小型化的同时也需要较高的成本。RFID 技术通信时可无需电源供电，成本低廉且具备小型化和柔性化潜力，为新一代无线传感器和可穿戴设备的发展提供了新的选择，成为学术界关注的热点^[44-45]。

1.2.2 基于 RFID 技术的传感器研究现状

RFID 技术最早源自二战时期的军事领域，经过数十年的发展，逐渐进入商业应用阶段，广泛应用于仓储物流、制造业、零售业、交通管理等领域^[46-47]。在土木工程领域，RFID 技术多与建筑信息模型(BIM)系统结合，可用于施工现场的安全监控，为实现高效安全监控提供了有力支持。这一应用主要是依托 RFID 技术的通信功能，近年来有研究表明，RFID 标签在处理射频信号时不仅传输数据，也包含其本身的物理信息，从而具备应变感知功能，基于这一特性，学术界开展了新型无线传感器的研发工作。

基于 RFID 技术的传感器研发主要涉及两种技术路线^[48]：一是整合 RFID 标签与监测传感单元的传感技术；二是依赖 RFID 标签天线本身电学特性的传感技术。在第一种技术路线中，监测单元所感知的外界变化响应被储存在 RFID 标签芯片中，通过射频天线进行无线传输至阅读器，并最终通过数据处理获取变化信号。而第二种技术路线则基于 RFID 标签天线本身的电学特性，如谐振频率和信号强度 (RSSI) 等。当外界条件发生变化时，RFID 标签天线的物理或电学参数也随之改变，从而引起射频信号的调制变化。这些调制信号被 RFID 阅读器捕获并进一步解析，反演出外界环境的变化参数。

对于第一种，主要利用 RFID 技术的通信功能，将包含外界变化的信息，如应变、温度及湿度等通过射频信号进行传输，以此来实现数据的无线传输和通信。Jayawardana^[49]开发了一种基于射频识别 (RFID) 的无线多传感器基础设施健康监测系统。该系统采用一种新型的多传感器集成半被动式超高频 (UHF) 标签天线，可安装在土木基础设施元件甚至是金属制品上。该系统能够同时测量动态加速度和应变，且具有 40Hz 和 26.5Hz 的频谱带宽。粟冬鸣^[50]基于 RFID 传感技术设计了 RFID 应力监测系统。该系统由阻抗传感器以及相应的监测软件构成，其中阻抗传感器由 RFID 标签和弯曲传感器组成。该监测系统能够实时读取和保存阻抗传感器监测的信息，便于准确评估被监测件的弯曲程度。贺垚瑒^[51]将 RFID 阻抗标签与电阻应变片结合设计了无线应变传感器。并开发了可在手机端查看应变的监测系统，用于实时监测结构的应力状况。Dowling^[52]等通过喷墨打印方法，在全打印的 UHF RFID 模块上沉积了 SWCNT 薄膜，设计了一种绿色、柔性、超低成本的无线气体传感器节点。并首次对 SWCNT 薄膜的电阻特性进行了高达 1GHz 的表征。Wang^[53]等提出了一种新的双询问模式射频识别 (RFID) 应变传感器，以实现无线应变传感的更长询问传输距离，其可以在具有低功耗的无源模式和具有超高频 (UHF) 的有源模式之间自动切换。You^[54]等提出了一种基于无线射频识别 (RFID) 的变形传感器。当支撑所经历的最大伸长率超过预置的变形阈值之一时，RFID 标签的阻抗也会随之改变，即 RFID 标签可以通过被动地改变支架的电状态

来记录支架的拉伸变形峰值。Zhang^[55]等将 RFID 标签通过导电丝连接在结构两端，当脆性杆超过预设应变阈值断裂时会触发应变传感器，从而突出显示 BIM 模型中的相应结构元素并发送警报信号，实现了对结构变形的非接触式快速识别。日本 Taiheiyo 水泥公司^[56]利用 RFID 的通信功能，将 RFID 标签与传统应变传感单元相结合，研发出一种全新的 RFID 应变传感器，旨在测量钢筋混凝土结构的纵向应变。该传感器利用 RFID 的电磁信号能够穿透混凝土材料的特性，实现对结构应变的无线测量。

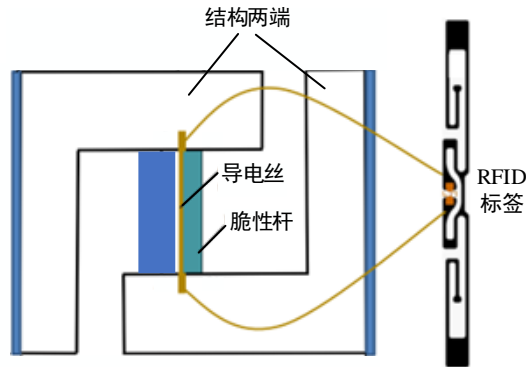


图 1.6 断裂传感器构成^[44]

对于第二种，不仅利用了 RFID 标签的通信功能，还利用了其本身具有的感知功能，即当外界发生变化时，RFID 本身形状或参数也发生变化，从而导致谐振频率、介电常数、相位等电学特性改变，通过 RFID 阅读器收集并分析这些信号，可以推断出外部环境参数的变化情况。Strangfeld^[57]等提出了一种利用嵌入式无源 RFID 传感器在混凝土结构中进行水分监测的方法。传感器利用 RFID 发射器的电磁场实现无线通信和供电，并被嵌入到混凝土中。通过监测感应到的射频信号的变化来识别水分的存在和变化情况。Yi^[58]等通过研究用于无线应变和裂纹感知的天线传感器在热环境中的热效应。发现传感器的谐振频率由于介电常数在温度波动下大幅变化导致变化相对较大。设计了一种新的天线传感器，采用了 Rogers 6202 基板，其介电常数在温度波动时更加稳定，以此提高传感器在温度波动中的性能。Meltem^[59]等利用导电墨水通过印刷的方法制备了用于纺织品的传感器，并研究了印刷后烧结过程对可穿戴传感器射频天线性能的影响。得出通过调整烧结时间和温度可以生产具有较好的可穿戴性和柔韧性的天线，并且经过烧结处理后，样品的天线性能适用于 UHF RFID 频段。Deng^[60]等设计了一种被动 RFID 传感器来监测金属氧化物避雷器。所提出的 RFID 传感器能够准确测量泄漏电流和工作电压。在 2 瓦的读写器功率下，传感器标签的最大工作距离可以达到 11 米，实现了 MOA 的生命周期管理。Kuhn^[61]等基于倒 F 天线研究了一种新的无线变形传感器，并通过静态加载测试验证了其性能。在实际应用中，将天线与芯片的阻抗进行共轭匹配至关重要。这主要是这样的匹配方式能使得应变与谐振频率之间能够保持良好的线性关系，并获得更高的信噪比。邹艳玲^[45]通过嵌入应变敏感纱来避

免在机械作用下芯片与天线之间的连接失效。此外，通过对 S11 参数进行对比分析，确定了应用于可穿戴领域，针对纺织 RFID 应变传感器的最佳制备方案。程西蒙^[62]设计了无芯片 RFID 传感标签，结构由 7 个 C 型谐振器构成，通过识别不同的响应来实现应变大小和方向的监测。文豪^[63]基于微带天线结构设计了具有良好抗金属性能的标签天线利用其反向散射信号强度大小信息能够检测到金属结构表面毫米级的缺陷变化情况。余汉锦^[64]通过设计延时线将 RFID 传感器信号进行频段分离，实现了对裂纹的无线无源监测，并将传感器进行阵列化设计，有效增大了天线的无线问询距离。黄程^[65]设计了一款无源应变传感器，并嵌入芯片实现无线通讯，通过优化结构参数将其读取距离增加至 18 米以上。通过仿真模拟和性能试验，对 RFID 传感器的理论可行性和实际应用性能进行验证。最后对结构应变与传感器辐射贴片的应变之间应变传递损耗对传感器测量结果的影响进行了参数标定。何依依^[66]设计了两种无源无线应变传感器，分别采用短路短截线和蝶形结构。并通过进行小型化设计，使得优化后的传感器整体尺寸缩小了 74.35%和 71.65%。张诚^[67]基于微带贴片天线形式，设计了 RFID 标签天线应变传感器，内置被动式芯片实现无线通信，并通过开槽法实现天线小型化设计，最后通过试验表明传感器的应变-谐振频移存在良好的线性关系，线性相关系数 $R^2=0.97$ 。

上述描述主要涉及以单片式微带贴片天线作为主要感知元件的传感器设计，但单片式微带贴片天线进行变形测量时，存在应变传递效率损耗和粘贴强度不足的问题，从而导致应用时出现应变测量不准确，易脱落和开裂的现象。为解决这一问题，Xue^[68-69]团队提出了组合式贴片天线来进行结构变形监测，通过附加贴片的辐射贴片与主贴片天线的辐射贴片紧密接触，形成等效辐射贴片，当结构变形导致附加贴片移动时，使得两辐射贴片重合长度减少，从而改变了等效辐射贴片的尺寸，以此导致组合式贴片天线的谐振频率发生改变来实现结构变形监测。徐康乾^[70]在矩形贴片天线馈电线上部添加了附加贴片天线，当附加贴片天线位置发生改变时，天线谐振频率随之线性改变，并通过观测两个谐振频率的变化来及进行变形监测，提高了天线传感器的精度。Xue 和 Guan^[71-72]将倒 F 天线主体与馈电线分离，通过移动馈电线来改变倒 F 天线的耦合状态，从而影响其谐振频率，以实现结构位移的监测。并通过试验验证了天线频移与结构位移之间存在着良好的正相关关系。Xue^[73-76]对多种贴片天线形状（如圆形、弧形、螺旋形等）的组合式贴片天线传感器进行了研究，旨在满足不同的结构健康监测应用场景需求，以提高其在结构监测领域的适用性和灵活性。其基本原理都是通过调整附加贴片位置，改变天线传感器的谐振频率来实现结构变形或状态的监测。天线传感器在实际应用时主贴片天线和附加贴片固定在结构两侧，当结构发生变形时，天线两贴片之间产生位移来影响谐振频率，通过测量谐振频率的改变实现了无应力测量结构变形，提高了传感器的适用性，为 RFID 技术与结构健康监测技术的融合提

供了一种新的途径。

目前，基于 RFID 技术的传感器研究已取得一定进展。相比于仅利用其通讯功能，利用 RFID 标签集成感知与通信功能的传感器具有一系列优势。这类传感器无需复杂的电路设计，因而成本更低、结构更为简单，且更容易进行批量生产。然而，现有研究大多仅针对单一参数进行测量，而未能实现多参数的同时测量。同时，设计出的传感器多体积较大，需要进行小型化设计以满足实际应用的需求。因此，仍有待进一步的研究和改进空间。

1.3 本文研究依据与研究内容

1.3.1 研究依据

本研究基于湖南省自然科学基金—基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究的第四部分：基于芯片与天线阻抗共轭匹配原理的 RFID 应变测量方法研究。基于芯片与天线阻抗共轭匹配原理对标签天线进行模型设计和参数分析，使 RFID 标签传感器兼具通讯和感应性能，通过阅读器对标签传感器电学性能的变化进行识别，从而推断出结构应变的变化。这一方法实现了应变的无线监测，为基础设施结构的长期健康监测和安全运营方面，提供了一种低成本、高效率的无线传感器系统解决方案。

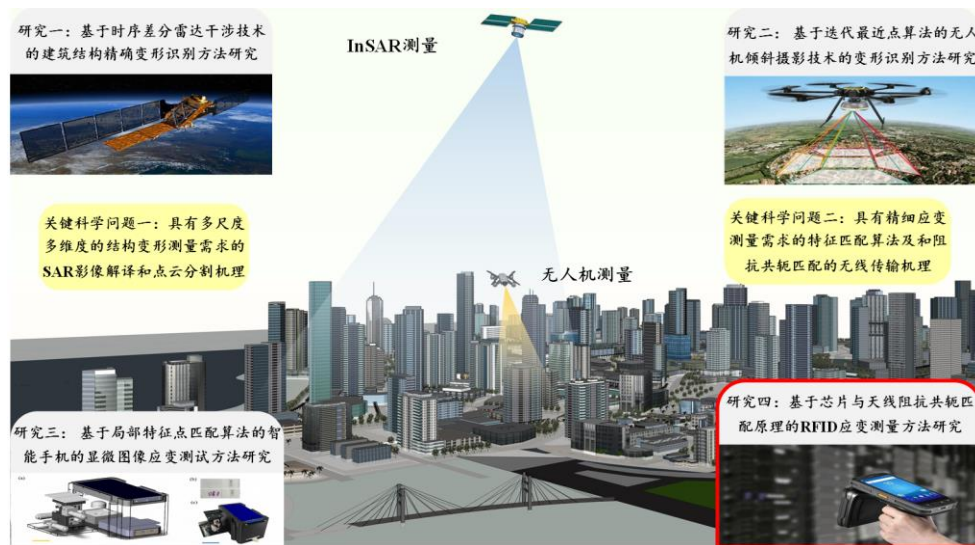


图 1.7 基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究

1.3.2 研究内容

为了确保土木结构的长期稳定性和安全运行，结构健康监测的重要性日益凸显。作为结构健康监测系统核心的传感器，其发展和应用水平直接影响着结构健康监测技术的发展水平。RFID 技术由于结构简单、通信可靠、功耗及成本较低，成为新型应变传感器研究的重要方向之一。本文基于前述 RFID 技术的传感器研发的两种方案，设计了基于 RFID 技术的无线应变传感器，并基于 RFID 中的微带

天线基本理论设计了 RFID 组合式贴片天线位移传感器，并通过试验验证其性能。本文的主要研究内容如下：

第一章，绪论，首先介绍了该论文研究的背景，分析了当前结构健康监测技术优缺点及 RFID 技术的原理和优势，总结了当前国内外结构健康监测技术的研究现状及基于 RFID 技术的传感器研发的 2 种技术方案的研究现状，最后概述了本论文的主要工作内容和思路。

第二章，基于 RFID 技术的应变及位移传感原理。首先对 RFID 系统的构成和技术分类进行了阐述，随后针对基于 RFID 技术的传感器研发路线，设计了三种不同类型的传感器，包括有源无线应变传感器、无源无线应变传感器以及基于贴片天线形式的 RFID 组合式贴片天线位移传感器。并详细介绍了这三种传感器的工作机制及相关理论知识。

第三章，有源无线 RFID 应变传感器设计与研究。采用具有模数转化器的 RFID 标签与全桥电阻应变片通过信号放大器相连接，设计了有源无线应变传感器，并将温湿度传感器与 RFID 应变传感器集成，以便同时传输温湿度和应变数据。介绍了系统各构件的功能，并设计了多组试验与传统应变采集箱采集的方式进行对比，以评估所设计有源无线传感器的性能。

第四章，无源无线 RFID 应变传感器设计与研究。基于 RFID 标签天线自身物理特性的传感技术路线，设计了一种集感知与通讯一体的 RFID 应变传感器，同时为实现无线通讯，嵌入了被动式 RFID 芯片。首先通过电磁仿真软件 HFSS 建立微带贴片天线模型，并通过参数分析对传感器尺寸进行改进，实现其小型化设计，接着在多物理场耦合软件 COMSOL 进行力-磁耦合仿真，分析传感器谐振频率频移与应变的关系。最后加工制作实物并设计试验测试其谐振频率频移与应变的线性度。

第五章，RFID 组合式贴片天线位移传感器设计与研究。对于第四章所设计的传感器存在应变传输损耗的问题，在微带贴片天线的理论上设计了组合式贴片天线位移传感器。该传感器具有多频的特点，通过将外接贴片和主贴片天线固定连接在结构两端，当结构发生形变时，外接贴片与主贴片天线之间接触长度的改变而影响天线其中一个谐振频率的改变，通过分析多个谐振点的频移从而实现结构位移与温度的同步测量。

最后，结论与展望。对本文所提出的基于 RFID 技术的三种传感器的性能和应用进行归纳总结，并对下一步的研究工作进行展望。

1.3.3 技术路线

本文的技术路线图如图 1.8 所示。

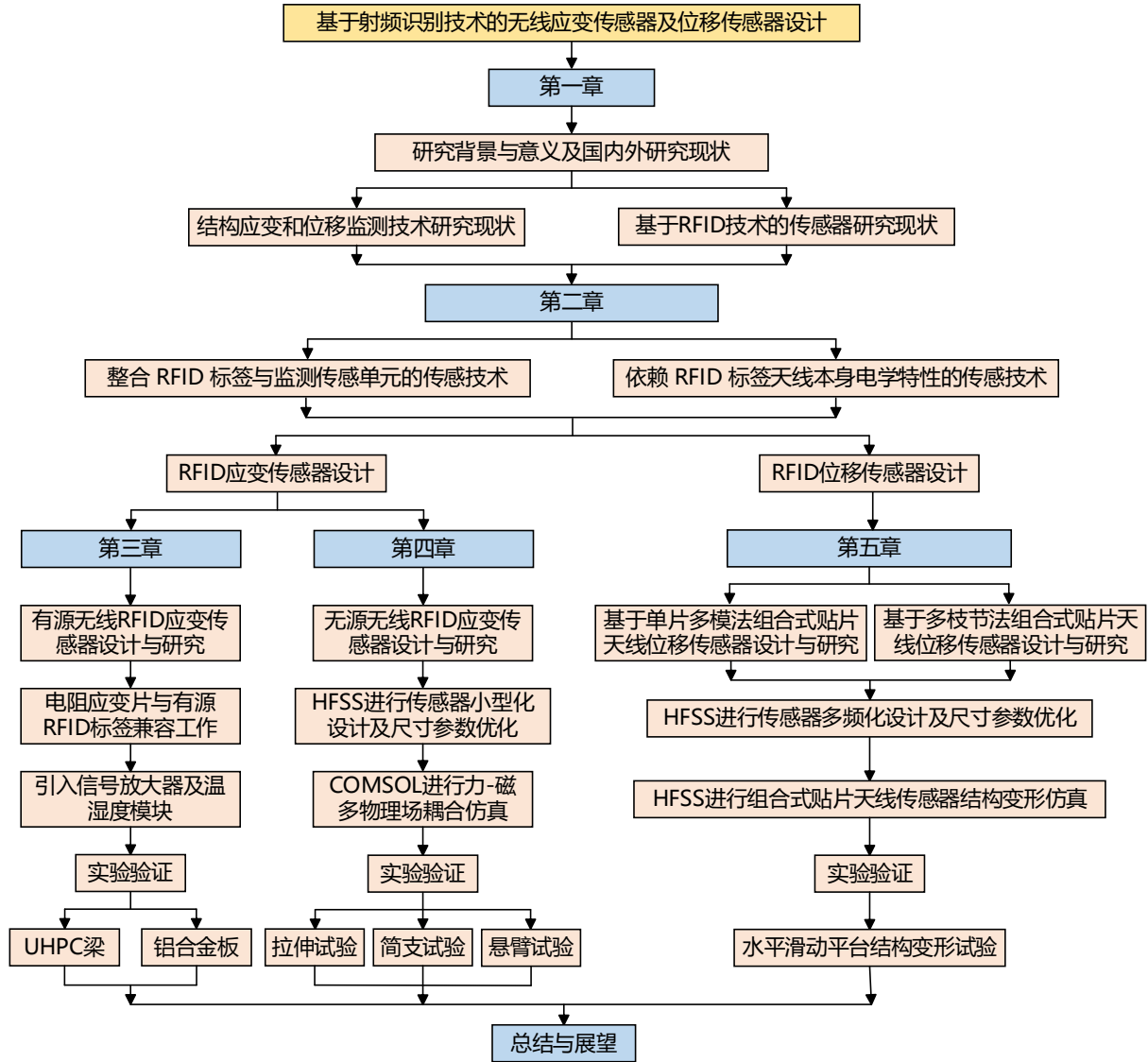


图 1.8 研究技术路线图

第2章 基于 RFID 技术的应变及位移传感原理

2.1 引言

基于当前学术界对于 RFID 技术的传感器研发的 2 种技术方案设计了三种传感器，分别是有源无线应变传感器、无源无线应变传感器及组合式贴片天线位移传感器。有源无线应变传感器主要运用了第一种技术方案，即将传统的电阻式应变片与 RFID 通信模块相结合，将包含应变的信息通过射频信号进行传输，以此来实现应变数据无线传输。无源无线应变传感器主要运用了第二种技术方案，即将 RFID 天线设计为集感知与通讯一体的应变传感器，天线发生的应变会导致天线电学性质的改变，通过识别对应通讯信号参数的改变，间接测量应变情况。组合式贴片天线位移传感器同样运用了第二种技术方案。该传感器具有两个及以上谐振频率，当与结构连接的外接贴片与主贴片天线之间接触长度的改变进而影响天线其中一个谐振频率的改变，而另一个谐振频率则只与温度有关，通过分析多个谐振点的频移从而实现结构位移与温度的同步测量。本章介绍了 RFID 系统的组成部分与工作原理，概述了 RFID 技术的分类，并详细阐述了三种传感器的工作原理以及相关的理论知识。

2.2 RFID 技术原理及分类

2.2.1 RFID 系统组成

射频识别技术（Radio Frequency Identification, RFID）利用射频信号空间的电磁或电感耦合来识别跟踪特定目标并读写相关数据，实现非接触式自动识别。RFID 技术最早应用于第二次世界大战中的“敌我辨识”系统，用于识别联军和德军飞机。它是一种基于射频通信的非接触式自动识别技术，无需人工干预。相较于光学识别系统，其受覆盖物影响较小，因而在各种恶劣环境下表现出较高的适用性。随着科技的发展，RFID 技术已运用于无人零售、航空、建筑和能源等物联网工程中的方方面面，是构建物联网体系中最为基础和核心的技术之一^[7, 77]。

一个 RFID 系统通常由阅读器（Reader）、标签（Tag）以及应用软件系统（Application system）三部分组成，如图 2.1 所示为系统工作原理示意图。读写器发射射频信号向标签发送询问命令，标签从射频信号中获取能量并被激活，从而将芯片存储的信息通过调制信号，发送回读写器。读写器接收到调制信号后，会将其通过电缆线传输给应用系统。应用系统对接收到的包含标签信息的调制信号进行数据处理、存储和管理。管理人员可以通过应用系统进行实时监控或分析，

结合标签具体的应用场景并做出相应的决策。

读写器是 RFID 系统中的核心设备之一，其功能主要是向周围环境发送电磁波信号，以激活 RFID 标签，并接收从标签发送的信息。读写器可以根据需求进行设置，如读取、写入、擦除标签的数据，以及控制标签的工作模式。

标签是 RFID 系统中的被动设备，用于存储识别信息和其他相关数据。标签内部包含一个芯片和一个天线，当接收到来自读写器的电磁波信号时，芯片会接收并解码信号，并将存储在其中的信息发送回读写器。

应用软件系统是 RFID 系统中负责管理和处理数据的上机位。它负责与读写器和标签之间的数据交互，将读取的信息进行解析和分析，并根据需求进行处理和管理。应用软件系统还可以与其他信息系统进行集成，实现对 RFID 技术的全面应用，如物流跟踪、库存管理、生产控制等。

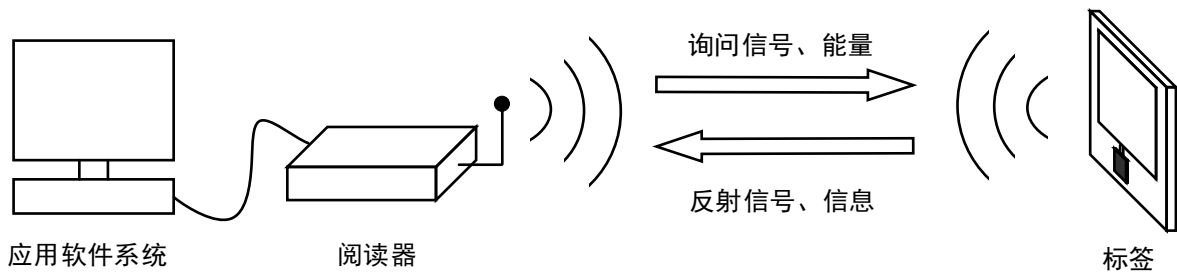


图 2.1 RFID 系统工作原理示意图

2.2.2 RFID 标签分类

根据不同的分类方式，RFID 标签可从有无电源、工作频率和有无芯片三个方面进行细分，如表 2.1 所示。

表 2.1 RFID 标签分类

分类类别		主要特征
有无电源	无源	无需电源、无寿命限制、读取距离较近
	有源	内置电源、寿命有限、读取距离较远、成本高
	半有源	内置薄膜电池、寿命有限、读取距离近
工作频率	低频 (LH)	125kHz-134KHz; 传输距离 < 10cm; 多为无源
	高频 (HF)	13.56MHz; 传输距离 < 1m; 多为无源
	超高频 (UHF)	860MHz-960MHz; 传输距离 < 20m; 多为有源
有无芯片	微波频段	2.4GHz 和 5.8GHz; 传输距离 < 100m; 多为有源
	有芯片	区分信号、抗环境干扰强、测量精度高、鲁棒性较好
	无芯片	无需电子设备、成本低、印刷性及可打印性强

RFID 标签根据能量供给方式不同，可以分为有源标签、半有源标签和无源标签。其中有源标签也称为主动式标签，内置电源提供能量来源，传输信息容量较

大且稳定，这种标签在传输信号时能够主动发射信号，具有较长的阅读距离。但同时由于其内置电源的限制，标签体积比较大且成本相对较高，使用时存在需要更换电源的问题。因此，主动式标签通常被应用于需要远距离识别和定位的场景，如车辆追踪、设备监测等领域。无源标签也称为被动式标签，与主动式标签相比，不需要内置电源提供能量来源。故依赖外部射频信号来激活和响应。被动式标签的设计更为简单，体积更小，成本更低，易于批量制造。被动式标签需要处于读写器的射频信号覆盖范围内才能正常工作，因此其读取距离相对较短。尽管如此，在物流追踪、库存管理、门禁系统等领域，被动式标签仍然得到了广泛的应用。半有源标签也称为半主动式标签或半被动式标签，其工作形式介于有源标签与无源标签之间，半有源标签内置电源，不工作时电源处于休眠状态，当阅读器向标签发送询问命令时，电源变为激活状态，辅助标签向读写器发送射频信号。半有源标签相较于有源标签其电源寿命更久，相较于无源标签其通讯距离更长，但仍存在更换电池的缺点。

RFID 标签根据其通信工作频段，从低到高可以分为低频 (LF)、高频 (HF)、超高频 (UHF) 和微波 (MW) 等不同类型。低频标签通常工作在 125kHz 至 134kHz 的频段，高频标签一般在 13.56MHz 频段。在低频和高频频段，读写器与标签之间主要通过调制载波信号的方式进行通信，即通过磁感应耦合方式传递信息和能量。磁感应耦合方式通讯距离较短，故低频和高频适用于近距离读写，广泛应用于图书管理、门禁系统和支付系统。超高频标签工作在 860MHz 至 960MHz 频段，微波标签通常在 2.45GHz 或 5.8GHz 频段。在超高频和微波频段，标签与读写器之间通过反向散射调制方式进行通信，即通过电磁波的传播耦合实现数据传输。由于反向散射调制方式具有较长的读取距离和较高的数据传输速率，超高频被广泛应用于物流追踪、库存管理和供应链管理等领域。而微波频段则常用于高速公路收费系统和工业自动化等需要高速数据传输和大规模数据处理的场景中。

RFID 标签根据其是否携带芯片可以分为有芯片和无芯片两大类^[78]。有芯片的标签通常包含一个集成电路芯片，该芯片负责接收和处理从读写器发送过来的射频信号，并将存储在其中的数据信息传输回读写器。由于芯片的存在，阅读器能够有效的区分标签信号和干扰信号，因此在面对环境反射信号时具有较好的鲁棒性，在工程场景中表现出更高的适用性。但实现标签中芯片与天线的阻抗匹配是一个挑战，且在标签中嵌入芯片工艺也相对复杂。无芯片的标签则不包含集成电路芯片，主要由天线和感应元件组成，并基于雷达通信原理进行通讯。基于此设计的标签传感器将信息嵌入到电磁信号中，通过对读写器接收的电磁信号进行解析和处理，可以提取出被监测结构应变参数，实现对结构变形的监测和识别。

在本文的所研究的三个传感器中，第三章为有源微波应变传感器，通过电源供电且标签含芯片；第四章为有芯片无源超高频应变传感器，通过从射频信号中

获取能量；第五章为 RFID 组合式贴片天线位移传感器，传感器不含芯片，通过电缆线进行传感器电学性质测量。

2.3 有源无线应变传感器工作原理

基于 RFID 技术的传感器研发的第一种技术方案，采用了 RFID 通讯模块与全桥应变片连接的设计。在这种设计中，结构的变形会导致全桥应变片中的敏感栅丝发生变形，从而引起电阻的改变。RFID 标签能够感知到电信号的变化，并将这些信息通过二进制信号传输至阅读器，阅读器将二进制信号传输至应用软件系统，通过模数转换的方式进行进一步处理得到应变数据。

2.3.1 全桥应变片工作原理

应变片是一种用于测量物体应变的传感器，其原理基于惠斯登电桥的工作原理。应变片的电阻随着被测物体的应变而变化，通过电桥电路将这种变化转换成电压差，从而实现对物体应变的准确测量。应变片传感器常用的桥接方式有 1/4 桥、半桥和全桥。

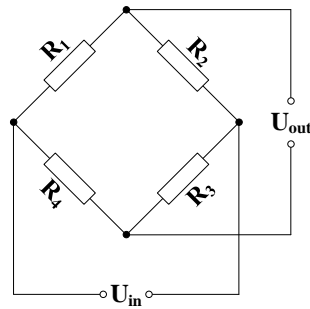


图 2.2 惠斯登电桥

如图 2.2 所示，惠斯登电桥是一种常用于测量电阻变化的电路结构，由四个电阻组成的四个桥臂构成。这四个电阻相互连接，形成一个闭合电路，其中两个电阻串联，两个电阻并联。电桥输出电压 U_{Out} 的计算公式可由电桥输入电压 U_{In} 和四个电阻的阻值得到：

$$U_{Out} = U_{In} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.1)$$

当初始条件四个电阻满足 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 时，被称为电桥的平衡状态，此时输出电压 U_{Out} 为 0。当电路桥臂上四个电阻都因受力发生变形而导致电阻发生变化 ΔR ，则输出电压变为：

$$\Delta U_{Out} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} U_{In} \quad (2.2)$$

由于 R 比 ΔR 大很多，去除高次项可得：

$$\Delta U_{\text{Out}} = \frac{U_{\text{In}}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.3)$$

根据电阻式应变片的灵敏度 K 的计算公式为：

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (2.4)$$

根据式 (2.4) 可得输出电压变化和应变的关系为：

$$\Delta U_{\text{Out}} = \frac{U_{\text{In}}}{4} K (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4) \quad (2.5)$$

上述四个电阻都发生改变的桥臂连接方式为全桥连接。当桥臂中只有一个电阻发生改变，其他三个电阻不因试验对象变形而改变，称为 1/4 桥连接；当有两个电阻发生改变，其他两个电阻不因试验对象变形而改变的测量方式称为半桥连接。全桥连接使用了四个应变片，因此能够提供更大的输出信号，其输出信号受到的影响更为均衡，相比 1/4 桥连接和半桥连接具有更高的灵敏度和稳定性。这使得全桥在测量微小应变时更为精准。

如图 2.3 所示，当采用“T”形电阻应变片安装方式时，考虑单向应力状态，在材料泊松比已知的情况下，根据材料的泊松比进行适当的校准，可以确保在应变发生时获得准确可靠的测量结果。此时的输出电压为：

$$\Delta U_{\text{Out}} = \frac{U_{\text{In}}}{4} K\varepsilon(1+\nu) \quad (2.6)$$

式中， ν 为被测试结构材料的泊松比。

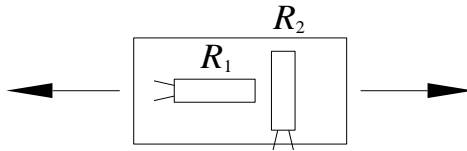


图 2.3 T 形电阻应变片安装方式

2.3.2 有源无线应变传感器测量原理

电阻式应变片通过输出连续变化的模拟量来反映受力情况，而 RFID 系统则是通过数字信号进行标签与阅读器之间的通信。数字信号采用二进制编码表示信息，其中 0 和 1 分别代表不同的逻辑状态，利用这种离散的表达方式传输和解析信息。故在传感器应变测量中，需要使用模数转换器将应变传感器的模拟电压信号转换为数字信号，以便于应用软件系统进行进一步的处理和分析，从而获取被测结构的应变状态。

模数转换系统主要由采样、量化和编码三个基本环节组成。在这个系统中，首先进行采样，即是指在连续的时间间隔内对连续的模拟信号进行离散化处理，

获取离散时间点上的信号值。接着，将采样后的离散信号进行量化，得到信号的数值表达。最后，通过编码模块将经过量化的数字信号转换为二进制形式，便于 RFID 系统识别和处理。这三个环节共同构成了模数转换系统，是实现模拟信号到数字信号转换的关键步骤。

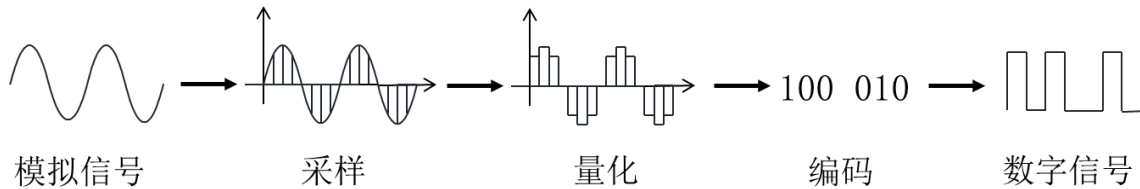


图 2.4 数模转换流程图

采样电压的最小分辨率是指模数转换器能够区分的最小电压变化量，决定了对输入电压的精度和分辨率。最小分辨率通常由模数转换器的比特数（即模数转换器的位数）决定，比特数越高，分辨率越高。

$$V_{\min} = \frac{V_{ref}}{2^N} \quad (2.7)$$

式中， V_{\min} 为模数转换器采样电压的最小分辨率， V_{ref} 为模数转换器参考电压， N 为模数转换器的比特数。

负载调制是 RFID 技术中一种常见的通信方式。当阅读器向 RFID 标签发射信号时，标签的天线会与接收到的信号进行耦合。标签内部的芯片会根据需要调整天线的阻抗匹配状态，从而有效地控制反射信号的强度和相位，实现对信号的调制。当阅读器接收并解析调制后的反射信号时，便能够实现标签与阅读器之间的无线通讯。

本节中所讨论的有源无线应变传感器，全桥电阻应变片由于结构变形而导致电阻发生变化，进而引起输出电压差的改变。这一输出电压差是一个模拟量，在模数转换器的作用下，被转换为二进制的数字信号。接着，RFID 标签通过负载调制的方式将这一数字信号调制到反射信号中。当阅读器接收到反射信号后，将其传输给应用软件系统进行进一步处理。通过解析反射信号，可以获取到具体的应变数据。其应变传感示意图如图 2.5 所示。

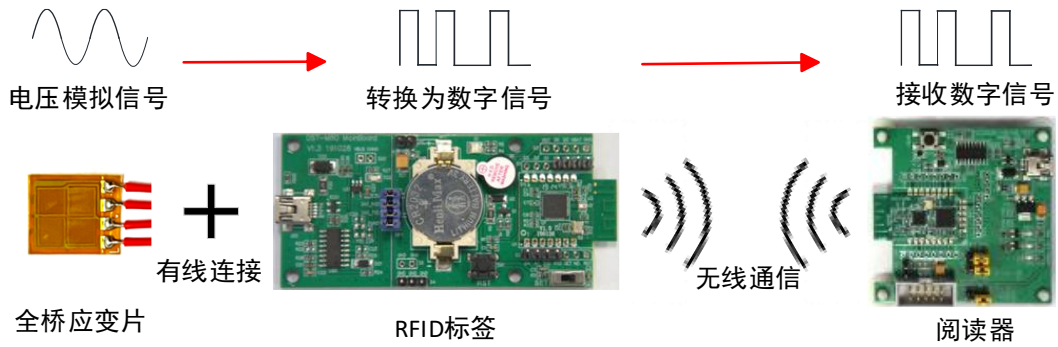


图 2.5 有源无线应变传感器传感示意图

2.4 无源无线应变传感器工作原理

基于 RFID 技术的传感器研发的第二种技术方案，将 RFID 标签设计为集感知与通讯一体，当测试结构变形导致 RFID 标签天线发生变形时，标签的谐振频率、信号强度 RSSI 值、反射功率等参数发生改变，通过阅读器识别这些参数的变化，实现对结构应变的无线监测。在 RFID 天线中，微带贴片天线是常用的一种形式，具有较低的成本和较小的尺寸，利用微带贴片天线的应变-频移理论，将其应用于制作应变传感器。

2.4.1 贴片天线应变-频移理论

微带贴片天线通常由介质基板、辐射贴片和接地板三部分构成^[79]。介质基板是天线的主体支撑结构，通常由介电常数较高的材料制成，辐射贴片是介质基板上的一块金属片，用于辐射和接收电磁波信号。接地板则位于辐射贴片的下方，用于提供天线的接地支撑，通常也是金属材料制成。辐射贴片的形状、尺寸和布局决定了天线的频率特性（如谐振频率）和辐射性能（如反射功率），利用应变引起的辐射贴片尺寸变化与谐振频率的频移之间存在着线性关系，因此可以通过测量谐振频率的变化来间接检测应变的程度^[80]。

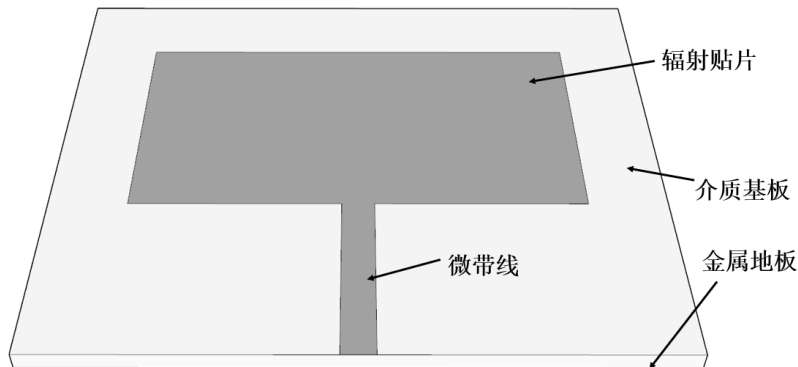


图 2.6 微带贴片天线

以矩形微带贴片天线为例（图 2.6），设计微带贴片天线的首要步骤是选定适当的介质基板。假设天线的工作频率为 f ，介质基板的介电常数为 ϵ_r ，可以用以

下经验公式^[81]计算出辐射贴片的宽度：

$$W = \frac{c}{2f} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

式中， c 为光速。

辐射贴片长度一般取二分之一工作波长，工作波长 λ_e 用下列公式计算：

$$\lambda_e = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_e}} \quad (2.9)$$

考虑到边缘缩短效应后，实际上辐射贴片的长度 L 应为：

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta L \quad (2.10)$$

式中， ε_e 为介质基板有效介电常数， ΔL 为考虑辐射贴片和接地板之间的电磁耦合效应的等效辐射缝隙长度。其中：

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.12)$$

利用上述经验公式（2.8）至（2.12）可以在设计微带贴片天线时快速估算所需的尺寸和工作频率。天线工作频率可由式（2.10）换算，即：

$$f_0 = \frac{c}{2(L + 2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_e}} \quad (2.13)$$

当天线长度方向发生应变 ε 时，则发生应变后天线的谐振频率 f_a 为：

$$f_a = \frac{c}{2(L + 2\Delta L)(1 + \varepsilon)\sqrt{\varepsilon_e}} = \frac{f_0}{(1 + \varepsilon)} \approx f_0(1 - \varepsilon) \quad (2.14)$$

用式（2.14）减去式（2.13），可得天线应变与谐振频率偏移量之间的关系，即应变-频移理论：

$$\Delta f = f_a - f_0 = f_0(1 - \varepsilon) - f_0 = -f_0\varepsilon \quad (2.15)$$

由上式可知，微带贴片天线的应变-频移存在负线性关系，即发生天线拉伸时，微带贴片天线的谐振频率会降低，降低比例为天线的初始谐振频率，故天线的初始谐振频率越高，所设计的微带贴片天线灵敏度越高。

2.4.2 无源无线应变传感器测量原理

天线的谐振频率是指在特定条件下，天线所产生的电磁场能量达到最大的频率，表征了天线在最佳工作状态下的频率。在谐振频率下，天线的反射损耗最小，

天线吸收和发射电磁能量的效率最高。在实际应用中，阅读器不能直接读取天线谐振频率，故基于此原理，可以通过测量谐振点附近某一特定的频率范围内寻找应变传感器能量利用率最高的点。这一点通常对应着阈值功率曲线的极值点，该极值点对应的频率为天线的谐振频率。因此，可以通过分析采集的天线的阈值发射功率曲线或阈值反射功率曲线来确定其谐振频率^[82]。

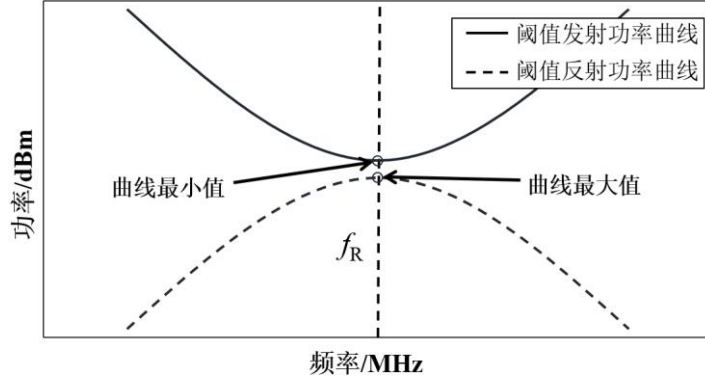


图 2.7 阈值功率曲线示意图

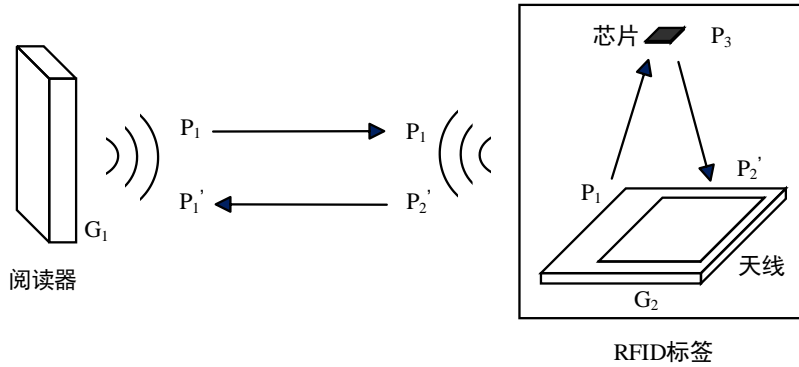


图 2.8 RFID 系统通信链路

如图 2.8 为 RFID 系统通信链路，假设没有障碍物在天线传感器与阅读器之间，根据 Friis 自由空间传输公式^[79]，可以得到天线传感器接收到的功率 P_2 为

$$P_2 = P_1 G_1 G_2 K \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = P_1 G_1 G_2 K \left(\frac{c}{4\pi d f} \right)^2 \quad (2.16)$$

式中， P_1 为阅读器天线发射的功率， G_1 、 G_2 为阅读器天线的增益和天线传感器的增益， K 为信号在通过信道时的衰减系数， λ 为阅读器所发射信号的波长， d 为阅读器天线与天线传感器之间的距离， c 为光速， f 为阅读器天线所发射信号的频率。

在接收阅读器的信号时，其中大部分则被天线传感器负载（即芯片）吸收，另一部分信号被反射，为了表示反射情况，将反射系数 Γ 定义反射波和入射波的幅度比值，即：

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.17)$$

式中， Z_L 、 Z_0 分别为天线传感器芯片的特征阻抗和贴片天线的特征阻抗。

从反射系数的公式(2.17)中可以看到,当负载阻抗和输入阻抗完全匹配时,即芯片与天线完全阻抗匹配时,此时天线的工作频率等于谐振频率,反射系数达到最小值。在这种完全匹配的情况下,天线传感器的效率和性能最佳,能够实现最高的能量传输和数据传输质量。

由上面的反射系数可知传输功率系数为入射功率 P_I 与传输功率 P_T 之比,即:

$$T = \frac{P_I}{P_T} = 1 - \Gamma^2 = 1 - \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|^2 \quad (2.18)$$

故可得天线传感器芯片接收的功率为:

$$P_3 = P_2 T = P_1 G_1 G_2 K \left(\frac{c}{4\pi df} \right)^2 \left(1 - \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|^2 \right) \quad (2.19)$$

同样,当芯片将信号传输给贴片天线时,也有一部分信号被反射,此时:

$$P'_2 = P_3 T \quad (2.20)$$

阅读器天线在接收到天线传感器信号 P'_2 时,等效自由空间传输,由 Friis 自由空间传输公式,可得阅读器接收的功率 P'_1 为:

$$P'_1 = P'_2 G_1 G_2 \left(\frac{c}{4\pi df} \right)^2 = P_1 G_1^2 G_2^2 K^2 \left(\frac{c}{4\pi df} \right)^4 \left(1 - \left| \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right|^2 \right)^2 \quad (2.21)$$

由上述公式可知,当天线传感器中芯片与天线完全阻抗匹配时,此时天线的谐振频率为其最佳工作频率,RFID 系统能量传输效率最大,此时激活天线传感器芯片的阅读器发射功率 P_3 最小,该频率下对应的 P_3 称为阈值发射功率。同样,当天线处于谐振频率时,芯片返还至阅读器的能量最大,即阅读器接收到的反射功率 P'_1 最大,此时称该功率为阈值反射功率。因此,使用阅读器进行无线读取,获取谐振点附近的阈值发射功率或阈值反射功率曲线,再分析所得数据曲线,寻找曲线的极值点对应的频率,即为天线的谐振频率。由上可知,无源无线应变传感器传感示意图如图 2.9 所示。

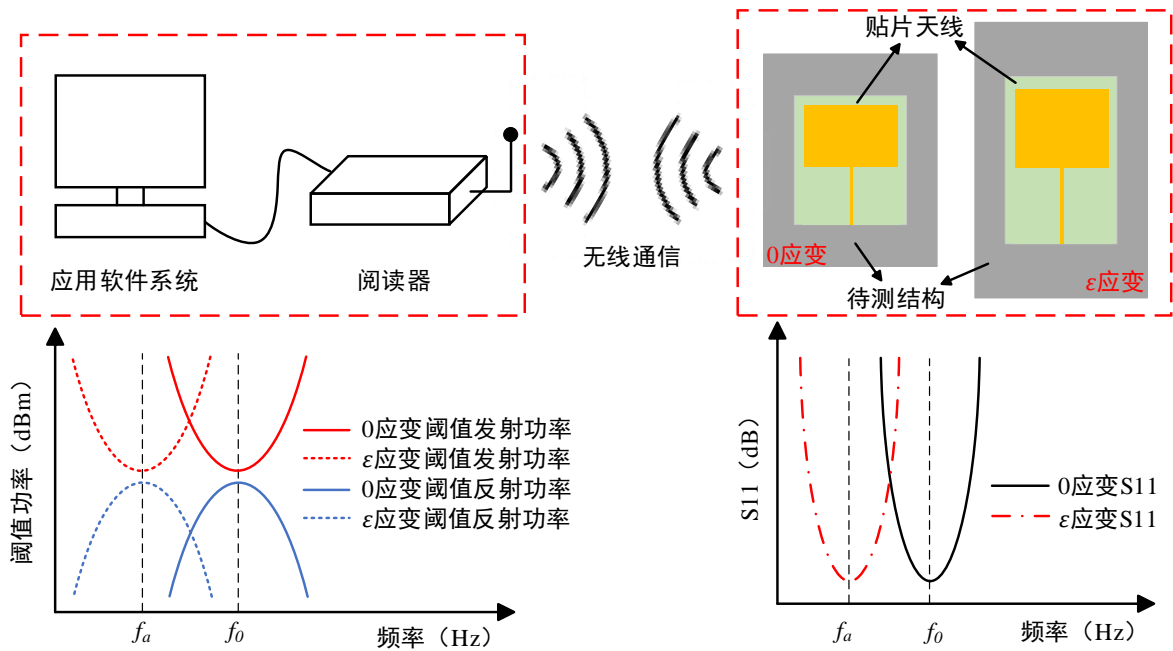


图 2.9 无源无线应变传感器传感示意图

2.5 组合式贴片天线位移传感器工作原理

利用辐射贴片尺寸的变化引起谐振频率的变化，从而通过测量天线谐振频率的偏移，可以推导出天线尺寸的变化，进而实现对被测结构的变形测量。2.4 节中的天线传感器为单片式，在应用于结构变形监测时，需要与结构表面紧密粘合，并随着结构的变形而变形。然而，这可能会导致应变传递到辐射贴片表面时存在效率损耗和粘贴强度不足而出现脱粘等问题。采用组合式贴片天线传感器，利用天线组件之间发生变化导致谐振频率发生变化来反推结构变形情况，由于天线本身不受力，从而可以有效避免上述问题。

2.5.1 组合式贴片天线传感原理

组合式贴片天线位移传感器由两部分组成^[83]：主贴片天线和外接贴片。主贴片天线采用微带贴片天线结构，包括介质基板、辐射贴片和接地板三个部分。外接贴片由介质基板和一面辐射贴片构成。通过将主贴片天线的辐射贴片和外接贴片的辐射贴片紧密贴合，形成组合式辐射贴片。将主贴片天线和外接贴片固定在结构表面，当结构发生变形时，导致主贴片天线和外接贴片发生相对位移，进而改变组合式辐射贴片的有效电长度。这种变化导致天线的谐振频率发生变化，通过监测谐振频率的变化，可以实现对结构表面变形的表征。

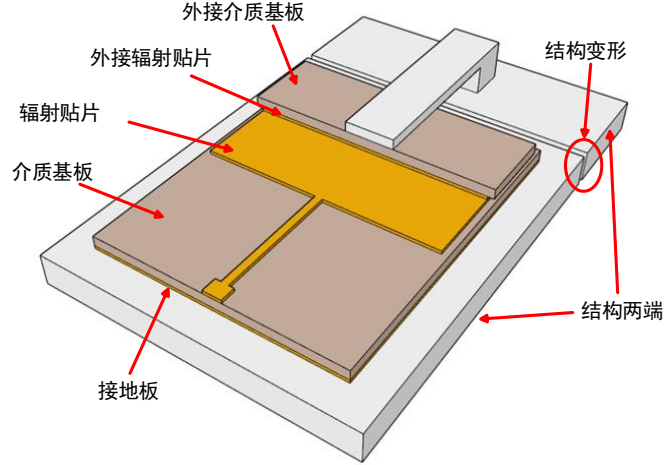


图 2.10 组合式贴片天线传感器示意图

对于组合式贴片天线传感器，主贴片天线的辐射贴片和外接贴片的辐射贴片紧密贴合形成的组合式辐射贴片，可以等效为主贴片天线的辐射贴片^[84]。因此，该组合式贴片天线传感器可以等效为一个矩形贴片天线。通过外接贴片改变其辐射贴片的尺寸，从而改变其谐振频率。

根据以上原理，组合式贴片天线传感器的贴片长度可以被定义为组合式辐射贴片的有效长度。这有效长度是由主贴片天线的辐射贴片和外接贴片的辐射贴片长度之和减去它们重叠部分的长度所得，即 $L = L_0 + L_1 - L_a$ 。而等效辐射缝隙长度 ΔL 是指微带贴片天线中辐射贴片与接地板之间的间隙或缝隙在电磁波传输中所起的作用长度。一般 ΔL 远小于 L ，故式 (2.13) 可以改为：

$$f_0 \approx \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c}{2(L_0 + L_1 - L_a)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.22)$$

式中， L_0 为主贴片天线的辐射贴片长度， L_1 为外接贴片的辐射贴片长度， L_a 为主贴片和外界贴片重叠的长度。

当结构表面发生变形时，固定在结构表面两端的主贴片天线和附加贴片的辐射贴片发生相对位移 ΔL_a （假设重叠部分增加），此时频率 f_a 变为：

$$f_a \approx \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c}{2(L_0 + L_1 - L_a - \Delta L_a)\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c(L_0 + L_1 - L_a + \Delta L_a)}{2((L_0 + L_1 - L_a)^2 - \Delta L_a^2)\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.23)$$

由结构变形导致的相对位移 ΔL_a 与天线传感器的尺寸相比很小，因此可以忽略 ΔL_a^2 的变化量，则频率的偏移量可表示为：

$$\Delta f = f_a - f_0 \approx \frac{c(L_0 + L_1 - L_a + \Delta L_a)}{2(L_0 + L_1 - L_a)^2\sqrt{\epsilon_e}} - \frac{c}{2(L_0 + L_1 - L_a)\sqrt{\epsilon_e}} = \frac{c\Delta L_a}{2(L_0 + L_1 - L_a)^2\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.24)$$

通过上述公式可推导出，在结构表面两端固定的主贴片天线和附加贴片的辐射贴片发生相对位移时，位移与谐振频移量之间存在线性关系。在实际应用中，可以通过测量组合式贴片天线传感器的谐振频率来反映结构位移的变化。

2.5.2 贴片天线多频化理论

在组合式贴片天线传感器设计中，可以通过设计多频微带贴片天线来实现位移和温度的同步监测，即天线传感器具有多个频率，其中一个频率会随着外接贴片的移动而改变，导致组合式辐射贴片的有效电长度发生变化，进而引起该频率的变化。然而，另一个频率则保持不变，不受外接贴片移动的影响。因此，可以利用这个保持不变的频率来监测温度的影响，从而实现温度的监测和补偿。

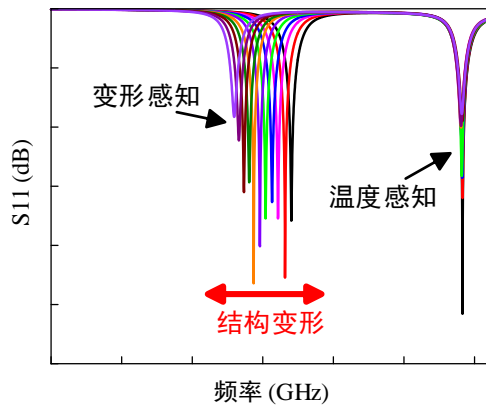


图 2.11 多频贴片天线位移温度同步监测示意

目前贴片天线多频化的设计方法主要有以下几种^[85-86]：

(1) 单片多模法：单片多模法是一种将多个天线模式整合到单个天线结构中的设计方法。通过在单个天线上设计多个不同频率的谐振模式，可以在不同频段下的工作。这种方法的主要是通过调整天线的几何结构和参数，使其在不同频率下具有不同的谐振模式，从而实现多频段的覆盖。例如通过改变矩形微带贴片天线辐射贴片的边长或者改变矩形贴片馈电点的位置来使得天线同时在 TM_{01} 和 TM_{10} 模式下工作，从而实现双频。

(2) 单片加载法：对于单个辐射贴片，通过在贴片天线的辐射贴片或介质基板上开槽或加入加载缝隙，改变天线的电场分布和辐射模式以生成新的谐振模式。具体来说，通过加载缝隙调整贴片的电流路径，引入额外的电感或电容效应，从而影响天线的谐振频率和阻抗匹配，进而产生多个频段。

(3) 多枝节法：多枝节法的原理是在同一天线结构中引入多个辐射枝节，这些枝节的位置、形状和尺寸的变化会直接影响天线的电流分布和辐射特性。这样产生的电流分布会在不同的谐振频点引起振荡，形成不同的频段。多枝节法的关键在于合理的设计和调整这些辐射枝节的参数，实现天线在多个目标频段上具有优良的辐射性能。

(4) 寄生贴片法：通过在天线的辐射贴片附近放置多个寄生辐射贴片，这些贴片不直接与馈电点连接，而是依靠电磁感应和耦合效应来影响天线的电磁场分布。利用这种方式使得天线产生新的谐振频率，从而实现多频带特性。另一种方

法是将多个贴片天线同时馈电，这样也可以在同一结构中获得多个频段。

单片多模法能够在单个天线结构中实现多种工作模式，简化系统设计，减少成本和空间占用，但设计复杂性较高，需要精确调节参数，且容易受到频率之间的相互影响。单片加载法通过开槽或加载缝隙改变天线的电场分布，可以实现天线在不同频率下的谐振，具有简单易实现的特点，然而，与其他方法相比，其频率范围有限，通常只能实现双频特性不适用于需要更广泛频率覆盖的应用。多枝节法能够在单个天线结构中实现多个频段的覆盖，具有较广泛的频率范围和稳定的性能，但设计复杂，需要精确调节每个枝节的参数，且对于高频段的贴片，枝节之间的相互干扰问题需要注意。寄生贴片法通过在贴片附近放置多个寄生辐射贴片来扩展天线的工作频段和频率范围，具有设计简单、实现成本较低的优点。然而，其性能容易受到周围环境和材料的影响，需要仔细考虑贴片的位置、数量以及与主贴片的耦合方式，以避免影响天线的性能。

在后续研究中，采用了单片多模法和多枝节法，设计了两种新型的组合式贴片天线位移传感器，旨在实现温度和位移的同步监测。通过单片多模法，我们能够在单个天线结构中实现多种工作模式，从而在相同的贴片上实现温度和位移的双重监测功能。同时，多枝节法为我们提供了一种在单个贴片结构中实现多个频段覆盖的方法，使得贴片能够在不同频率下稳定工作，从而更加准确地获取温度和位移信息。

2.6 本章小结

本章首先介绍了射频识别（RFID）系统的运作原理、组成结构及对 RFID 标签进行了分类和归纳。随后，基于第一章中介绍的两种基于 RFID 技术的传感器技术方案，对三种传感器的工作原理和通讯原理进行了公式推导和理论阐述，为后续设计研究奠定了理论基础。

(1) 有源无线应变传感器基于第一种技术方案，将 RFID 标签和全桥应变片相连接，使其兼容工作，全桥应变片由于结构变形而引起输出电压差的变化，并由 RFID 标签通过采样、量化和编码将模拟信号转为数字信号，并将其调制到反射信号中进行无线传输。这些反射信号被阅读器接收，从而实现了对结构应变的无线测量。

(2) 无源无线应变传感器基于第二种技术方案，将 RFID 标签设计为集感知与通讯一体，当测试结构变形导致 RFID 标签天线发生变形时，标签的应变与其谐振频移存在负线性关系。当天线传感器中芯片与天线完全阻抗匹配时，此时天线的工作频率等于谐振频率，通过阅读器无线读取的阈值发射功率或阈值反射功率曲线，可以确定天线的谐振频率，从而推断结构的变形情况。

(3) 组合式贴片天线位移传感器同样采用了第二种技术方案，它利用了结构

表面两端固定的主贴片天线和附加贴片的辐射贴片在发生相对位移时，其谐振频率的偏移量与位移之间存在线性关系的特性。通过测量组合式贴片天线传感器的谐振频率变化，可以反映出结构位移的变化情况。同时，天线在设计时具有多频特性，其中一个频率会随着外接贴片的移动而发生变化，而另一个频率则保持不变。通过这种方式，实现位移和应变的同步监测。

第3章 有源无线 RFID 应变传感器设计与研究

3.1 引言

作为物联网核心技术之一，RFID 技术以其低成本和可靠的通信性能而备受关注。基于 RFID 通信原理设计的无线传感器相较于传统的有线测量系统，能有效降低成本并提高系统的灵活性。本章基于第一种技术方案，将电阻应变片与搭载模数转换器芯片的有源 RFID 标签相连，使其兼容工作，将应变片采集到的模拟信号转换为数字信号，并利用天线进行无线射频传输至阅读器，阅读器通过一系列数据处理步骤，获取并分析变化信号。为提高传感器的灵敏度和适用范围，引入了信号放大器和温湿度测量模块，有效改进了有源无线传感器的采集灵敏度并实现了温湿度和应变的同步采集。并设计多组试验，测试所设计的有源无线 RFID 应变传感器的传感性能。

3.2 RFID 应变传感器组件设计

3.2.1 RFID 标签

本研究采用的电子标签模块评估版为 DST-M80，如图 3.1 所示，评估板包括 USB 转串口电路和电子标签电路两部分组成。两部分电路之间通过“串口设置连接器”连接。该连接器具有四个搭接帽，分别为“3.3V、RXD、TXD、GND”。当搭接帽被拔下时，两部分电路完全隔离。而当搭接帽被插上时，则可以通过连接“USB 转串口电路”来设置电子标签的参数，并为电子标签供电。

其中，USB 转串口电路可与应用软件系统连接，应用软件系统通过串口可以设置标签的采集频率、标签 ID 以及欠压阈值等工作参数。电子标签电路主要包括纽扣电池电源模块和以 CC2530 芯片为核心的 RFID 标签模块。纽扣电池电源模块为 RFID 标签模块评估版提供电力支持。RFID 标签模块则是评估板的主要控制和处理单元，它能够采集 1 路模拟量和 4 路开关量信号，并包含模数转换器，其模数转换器位数 N 为 12 位，可识别的最小单元总数为 $2^{12} = 4096$ 。RFID 标签模块需要将模拟信号转换为数字信号才能进行传输，模拟量端口传输电压介于 0-1.15V，故根据式 (2.7) 可得 RFID 标签可识别的最小电压为：

$$V_{\min} = \frac{V_{ref}}{2^N} = \frac{1.15(\text{V})}{2^{12}} = 0.281(\text{mV}) \quad (3.1)$$

此外，RFID 标签模块还搭载了板载 PCB 天线，集成了 RFID 通信功能，能够与读写器进行通信，并接收、处理和发送数据。

CC2530 芯片为半有源微波芯片，通常该标签处于休眠状态，功耗极低。仅当收到阅读器的询问信号时，标签才会激活，将应变片采集到的模拟信号转换为二进制数字信号，并通过无线方式传输至阅读器。RFID 标签模块内部集成了发送天线单元、低噪声信号放大单元、电量测试单元等组件，发射的射频信号工作频率为 2.4GHz，属于微波频段，无线最远发送距离可达 100 米。

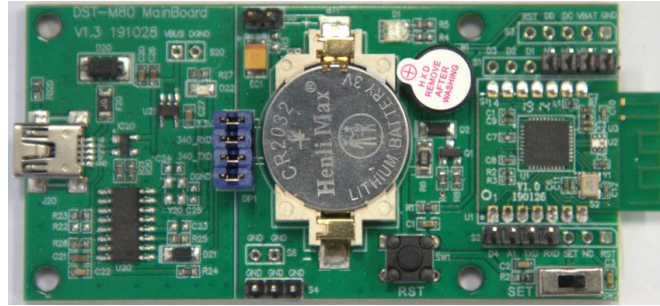


图 3.1 电子标签模块评估版 DST-M80

3.2.2 全桥应变片

本文采用的电阻式应变片型号为 BFH1K-3EB-D150，其电阻值为 1000Ω ，灵敏度系数为 2，室温下极限应变为 20000 个微应变。该应变片为全桥应变片，由四个完全相同的电阻按照 T 形电阻应变片安装方式进行布置。即两个电阻横向布置，另外两个电阻纵向布置。通过惠斯通电桥的方式引出四根引线，其中引线 1 和引线 3 接电源正负，引线 2 和引线 4 接信号负正。如图 3.2 为全桥应变片桥路示意图。

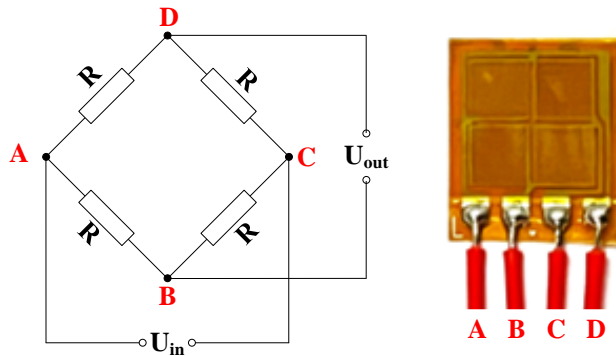


图 3.2 全桥应变片桥路示意图

根据第二章中全桥应变片的工作原理公式 (2.5) 和公式 (2.6)，可得电阻应变片的输出电压和应变的关系为：

$$\Delta U_{\text{out}} = \frac{U_{\text{in}}}{2} K \varepsilon (1 + \nu) \quad (3.2)$$

式中， U_{in} 为纽扣电池电源电压，约 3V； K 为电阻应变片灵敏度系数，为 2； ε 为单个电阻的纵向应变， ν 为测试材料的泊松比。

相较于单个电阻应变片测量而言，即 1/4 桥，全桥应变片在输出电压上提高

了 $2(1+\nu)$ 倍，在后续试验中，使用的材料包括钢板和铝合金 6061，其泊松比大约为 0.33，故相较于 1/4 桥，输出电压可以放大 2.66 倍。且全桥应变片可以用电阻作为温度补偿元件，从而有效地抵消温度变化对测量结果的影响，使其在温度变化下的性能更加稳定。

根据 RFID 标签模块的应变测量原理，标签电路的模拟信号采集分辨率与应变之间的关系可由下式进行计算：

$$V_{\min} = KV_E \epsilon_{\min} \quad (3.3)$$

式中， V_E 为纽扣电池实际电源电压，通过万用电表测量，约为 2.9V。

故根据公式 (3.1) 和公式 (3.3)，可得理论最小应变分辨率 ϵ_{\min} 为：

$$\epsilon_{\min} = \frac{V_{\min}}{KV_E} = \frac{0.281}{2 \times 2.9} = 48.41 \mu\epsilon \quad (3.4)$$

全桥应变片与 RFID 标签电子模块评估版通过信号线连接，其中引线 1 接电源正极，即电子标签电路中的 V_{BAT} 引脚；引线 2 接信号负极，即 GND 引脚；引线 3 接电源负极，即 GND 引脚；引线 4 接信号正极，即模拟信号 A_1 引脚。通过这种连接方式，可以将应变片采集到的信号通过 RFID 标签电子模块评估版进行处理和传输，实现信号的无线传输功能。接线示意图如图 3.3 所示。

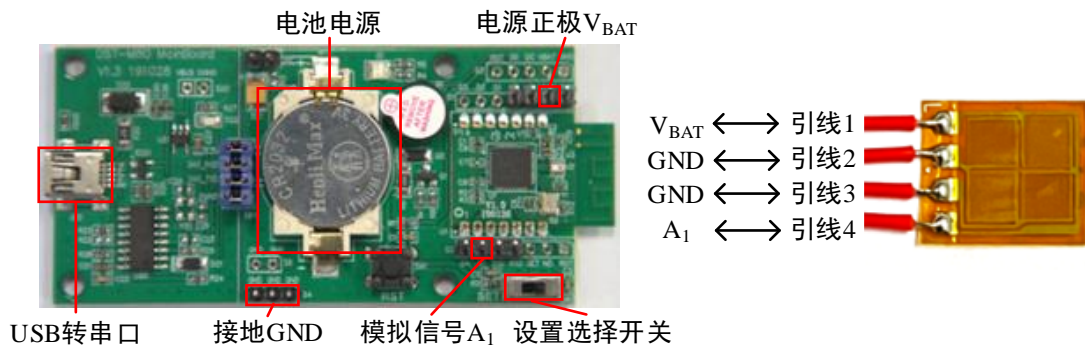


图 3.3 接线示意图

3.2.3 阅读器与应用软件系统

本文采用的阅读器为读卡模块 DSR-M01/2，读写模块也采用以 CC2530 芯片为核心，包含信号放大、信号接收、USB 转串口、电源等多种功能模块。阅读器通过 USB 转串口模块与应用软件系统连接，由应用软件系统供电，实现与标签无线通信，收集数字信号，并将数据传输至应用软件系统。此外，阅读器具备同时探测多个电子标签的能力，并可根据测量到的电子标签无线信号场强，计算标签的实际距离。

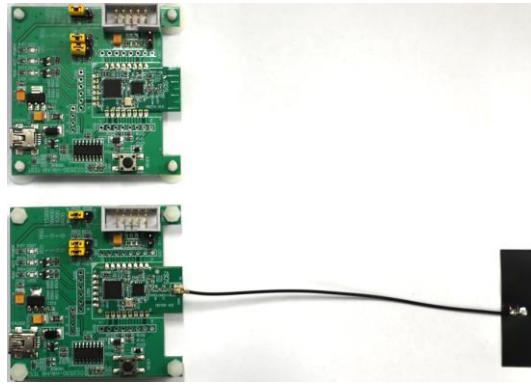
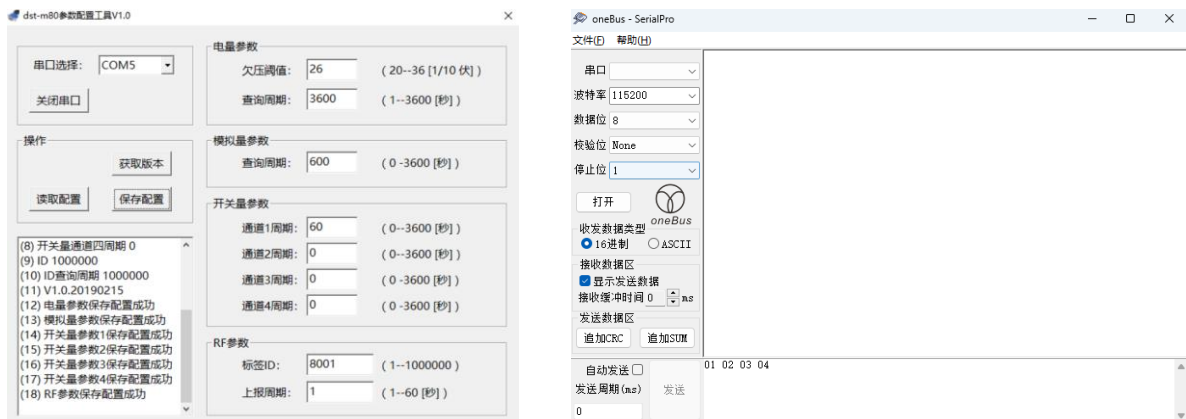


图 3.4 读卡模块 DSR-M01/2

读写模块 DSR-M01 与 DSR-M02 的区别主要在于天线，M01 为外接天线，M02 则为板载天线，通过户外测试，以连续 10 次读不到数据定义为最大通讯距离。在室内测试时，DSR-M02 采用板载天线，最大通讯距离为 80m；外接天线的 M02 最大通讯距离为 65m。而在户外通讯时，DSR-M02 板载天线的最大通讯距离为 50m，而外接天线的 M02 最大通讯距离为 21m。由于户外环境中可能存在更多的电磁干扰源，致使信号衰减效应增加，因此相对于室内通讯，通讯距离较短。外接天线具有方向性，21m 为天线朝下放置时的通讯最大距离，背向测试时最大通讯距离仅有 10m。

当应用软件系统通过 USB 转串口模块与 RFID 标签连接时，可以通过参数配置工具调节 RFID 标签的工作参数，实现对标签的管理和配置，从而满足不同的应用场景需求。应用软件系统通过 USB 转串口模块与阅读器连接时，可以利用 TTL 串行接口向控制器上报标签数据。上报的数据内容包括卡号、数据属性、扩展数据、RSSI 值和 CRC 校验值等。在这些数据中，卡号和扩展数据是最重要的内容。卡号用于唯一标识标签的位置信息，而扩展数据则包含了采集到的应变数据，是进行应变测量的关键指标。此外，通过监测 RSSI 值，可以对标签与阅读器之间的距离进行估计，从而实现定位或距离测量功能。而 CRC 校验值则用于数据的完整性校验，确保数据传输的准确性和可靠性。



a) 参数配置工具

b) 数据采集工具

图 3.5 应用软件系统

3.3 RFID 应变传感器的改进

3.3.1 RFID 应变传感器试探实验

为了测试 RFID 应变传感器的性能，进行了 RFID 应变传感器试探实验，将全桥应变片通过 3.2.2 节中的方式与 RFID 电子标签模块评估版相连接。实验在两个铁架上支撑一块尺寸为 1000mm×120mm×2mm 的钢板，将全桥应变片粘贴在钢板的中心位置。如图 3.6 为钢板简支梁试探性加载实验图。实验过程分为五个阶段，每个阶段都在钢板中心逐步增加重物。具体而言，第一至第四阶段依次增加 10kg 的重物，最后一阶段增加 25kg 的重物。RFID 应变传感器的采集频率为 1Hz。将阅读器与电脑通过 USB 接口进行有线连接，阅读器可以无线地读取 RFID 标签发射的射频信号，并将读取到的数据通过 USB 转串口模块传输到电脑上进一步的处理和分析。



图 3.6 钢板简支梁试探性加载实验

图 3.7 展示了 RFID 应变传感器试探性加载实验的结果。从图中可以观察到，在加载过程中，阅读器采集的输出电压差随着逐级加载呈现出阶梯状的变化。然而，这种变化幅度较小，导致测试结果存在较大的误差。通过电压表测试发现，由于信号负极接地，导致采集到的输出电压差实际为电阻应变片信号正极的差值而非信号正负极之间的差值。同时，在 3.2.2 节的计算中，理论最小应变分辨率 ε_{\min} 为 48.41 个微应变，这个数值过大，需要采取措施提高传感器的灵敏度。此外，上报的数据内容包含了多种信息，但在应变测量中，卡号和扩展数据是应变测量的关键指标。在同时读取多个标签时，需要进行长时间的数据处理以提取所需信息。因此，需要采用适当的方法进行数据处理。

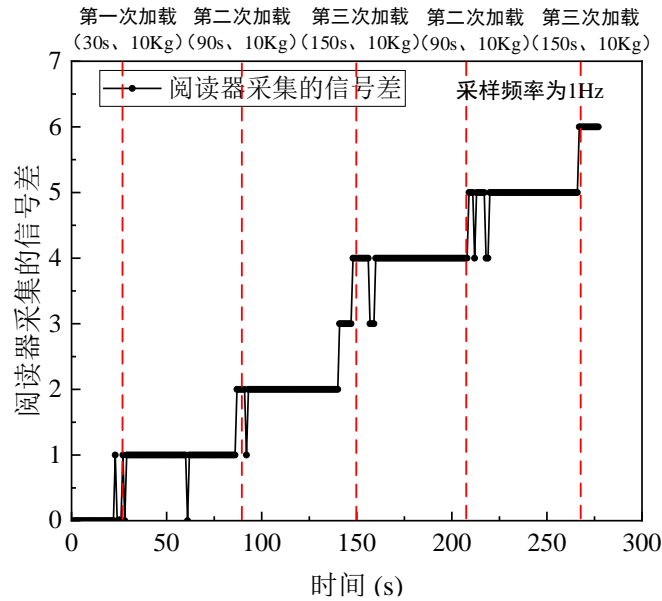


图 3.7 RFID 应变传感器试探性加载实验结果

3.3.2 RFID 应变传感器改进措施

针对上节中 RFID 应变传感器试探性实验中反映的问题，采取了相应的措施。鉴于传感器灵敏度较低的情况，引入了运算放大器 AD620。AD620 能够有效放大微伏和毫伏级别的电压信号，放大倍数为 1.5 倍到 1000 倍，具有高精度、低失调和优异的线性特性。

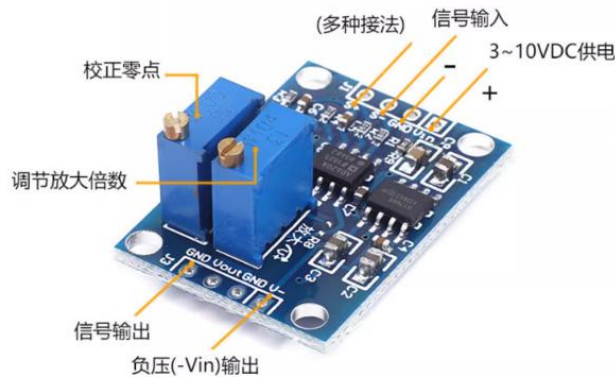


图 3.8 AD620 运算放大器

AD620 运算放大器具有八个引脚，包括正极信号输入端 (+S)、负极信号输入端 (-S, 可接地 GND)、信号输出端 (Vout)、电源输入端 (Vin)、输出负电压端 (V-)、接地端 (GND)。该运算放大器可实现信号差分输入，根据运算放大器的工作原理，可将全桥应变片的引线 1 接电源输入端 (Vin)，引线 2 接负极信号输入端，引线 3 接接地端 (GND)，引线 4 接正极信号输入端 (+S)，将放大的信号输出端 (Vout) 接在 RFID 标签模块评估版的模拟信号引脚 A₁，GND 则接 RFID 标签模块评估版的 GND。



图 3.9 AD620 运算放大器差分输入接线图

将全桥应变片信号差分输入并通过运算放大器放大，可以大幅提高 RFID 应变传感器的灵敏度。接着，设计改进实验将改进后的 RFID 应变传感器与传统应变采集箱连接的应变片进行对比，标定运算放大器的放大倍数。

改进实验开始前，需对运算放大器进行接线调零操作。将正极性信号输入端（+S）和负极性信号输入端（-S）相连，并调节调零旋钮，直至输出端（Vout）电压为 0V，完成调零过程。改进实验设置与试探实验相似，在 1000mm×120mm×2mm 的钢板中心对称粘贴两个全桥电阻应变片 BFH1K-3EB-D150，分别连接加了运算放大器的 RFID 标签模块评估版和 TMR-211 应变采集箱，其中与 TMR-211 应变采集箱的连接方式为桥式连接，以确保数据采集的准确性。改进试验共分五次加载，将钢板粘贴应变片的一面朝下，每次在钢板上部中间位置加 5kg 砝码，共加载 25kg，每次加载持荷约 60s，以充分采集数据并确保稳定性。改进实验分为两个阶段：首先进行标定试验，以确定标定参数；随后进行第二轮试验，在第一轮标定的基础上，利用标定系数进行修正，验证标定后 RFID 应变传感器的准确性和可靠性。改进实验的两个阶段，改进后的 RFID 标签模块评估版和 TMR-211 应变采集箱的采集频率均为 1Hz。

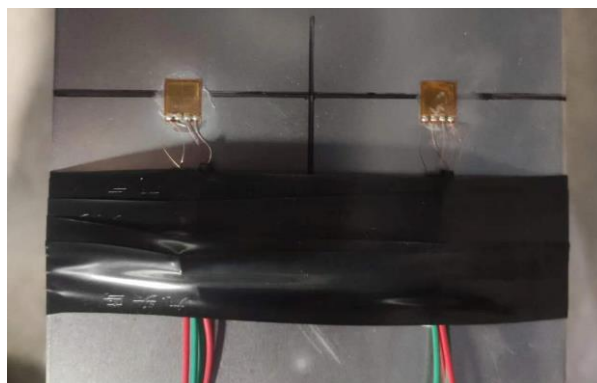


图 3.10 应变片粘贴位置

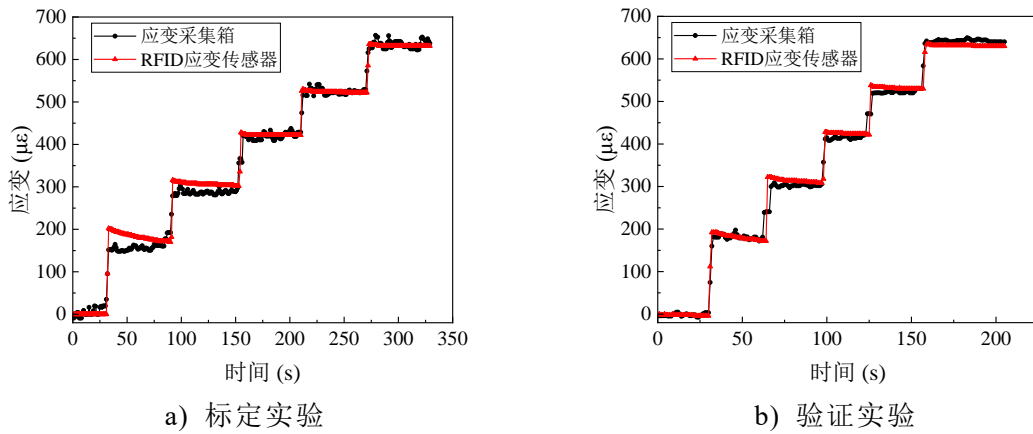


图 3.11 改进实验结果

根据图 3.11 所示的改进实验结果可得知，随着荷载的增加，结构所产生的拉应变呈现阶梯状递增的趋势。实验过程皆保持在钢板的弹性范围内，所达到的最大微应变约为 $630\mu\epsilon$ ，实验过程共 325s。根据标定实验，将阅读器无线接收并处理改进后的 RFID 应变传感器数据与应变采集箱有线采集的应变数据进行标定，得到 RFID 应变传感器输出的应变与真实应变的关系系数。将标定实验中的数据进行线性回归，如图 3.11 (a) 所示为进行钢板加载实验后的标定结果，标定系数为 0.815，线性回归模型的拟合度量 R^2 为 0.992，均方根误差 RMSE 值为 $18.72\mu\epsilon$ 。将标定系数的应变传感器进行验证实验来验证标定系数的准确性，验证实验过程与标定实验相同，每级荷载持续时间约 30s。图 (b) 展示了验证实验的测量结果，可以看到进行标定系数修正的 RFID 应变传感器测量数据与有线采集箱采集的数据表现出基本一致的趋势和规律。将有线采集的数据作为基准，计算得到测试结果的均方根误差 (RMSE) 值为 $16.73\mu\epsilon$ 。这一结果表明，通过标定系数修正后，RFID 应变传感器在测量应变数据时能够有效地反映结构的变形情况，并且具有与传统有线采集方法相似的测量性能。

为解决阅读器接收数据内容繁多且数据结构复杂的问题，利用 Python 编写了相关代码进行数据处理，以提升处理效率和数据分析的准确性。通过编程实现了识别卡号、数据分类、应变数据提取等功能，以实现数据的自动化处理和分析。首先，通过识别卡号，将数据按照不同的卡号进行分类，接着提取包含应变数据的拓展数据，并将其转换为十进制格式，得到更直观和可靠的数据，最后，对处理后的数据进行分析，评估 RFID 应变传感器的性能。通过利用 Python 编程实现数据提取的自动化，不需要手动处理繁琐的数据，节省了大量的时间和精力，这种自动化处理方式不仅显著提升了数据处理的效率和速度，同时也保证了数据处理的准确性和可靠性。

在结构健康监测领域，除监测应变外，对环境温度和湿度的监测也至关重要。温湿度数据能够提供关于结构所处环境条件的重要信息，对结构的长期性能和健康状况进行评估和预测具有重要意义。引入温湿度电子标签 DST-96，该标签能够

实时采集环境的温度和湿度值，并通过无线方式将这些数据传送至远端的阅读器。标签温度测量范围为 -40°C 至 85°C ，湿度测量范围为 $10\%\text{RH}$ 至 $90\%\text{RH}$ （相对湿度）。无线通信采用 2.4GHz 微波频段，与RFID应变传感器同一频段。

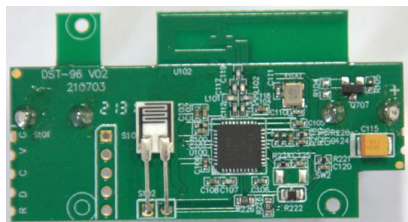


图 3.12 温湿度电子标签 DST-96

将温湿度电子标签 DST-96 与改进后的 RFID 应变传感器进行集成，实现了温湿度与应变同步测量。通过这种集成，可以在同一 RFID 系统中获取环境的温湿度信息和结构的变形数据，从而更全面地了解所监测对象的状态。该标签以每 3 秒一次的频率发送温湿度数据，其中数据包含标签 ID、欠压提醒、扩展数据等内容。使用 Python 编程来处理采集到的数据，从分类后的数据中提取扩展数据，对拓展数据经过适当的处理，将其转换为十进制格式的温度和湿度数据。通过有线连接，将温湿度电子标签 DST-96 的电源输入端 Vin 引脚与电子标签模块评估版 DST-M80 的 VBAT 引脚相连。同时，确保温湿度电子标签与电子标签模块评估版共地连接，以便信号传输的稳定和可靠。通过这种连接方式，能够实现温湿度与应变数据的同步传输，拓展了传感器的功能，提升结构健康监测系统的综合性能和应用范围。

3.4 RFID 应变传感器测试实验

为了扩大传感器的应用范围，将 RFID 应变传感器与运算放大器以及温湿度电子标签进行了集成，形成了全新的温湿度应变传感器。实现了温湿度和应变数据的同时监测。通过实验测试改进后的 RFID 应变传感器，采用超高性能混凝土（UHPC）梁和铝合金悬臂梁实验对传感器性能进行评估，以验证传感器在不同材料构件表面及不同加载条件实际工作时的可靠性、灵敏度和稳定性。

3.4.1 UHPC 梁应变测试实验

为了评估在超高强性能混凝土（UHPC）表面，所设计的 RFID 温湿度应变传感器的传感性能，进行了 UHPC 梁应变测试实验。图 3.13 为 UHPC 梁应变测试实验布置图，实验设计的梁截面尺寸为 $140\text{mm}\times 400\text{mm}$ ，梁长为 1700mm ，简支支座跨度为 1200mm ，在梁靠右侧支座 450mm 处通过液压千斤顶施加竖向力，混凝土内部配有受力钢筋，钢筋等级为 HRB600。图 3.14 为应变片的粘贴位置，应变片粘贴位置位于梁背面靠近右侧制作上方，其中一个 RFID 应变传感器粘贴位置位于 LC1 下方（距离顶部 50mm ），另一个 RFID 应变传感器粘贴在 LZ2（距离顶部

100mm) 与 LZ3 (距离顶部 150mm) 之间。这两个位置均为梁的受压区, RFID 应变传感器通过阅读器无线读取应变和温湿度数据, 而 LC1、LZ2 和 LZ3 通过应变采集箱进行有线采集。实验中 RFID 应变传感器采用的电阻式应变片型号为 BFH1K-3EB-D150, LC1、LZ2 和 LZ3 所用的应变片型号为 BQ120-60AA, 应变采集箱为 TMR-311。

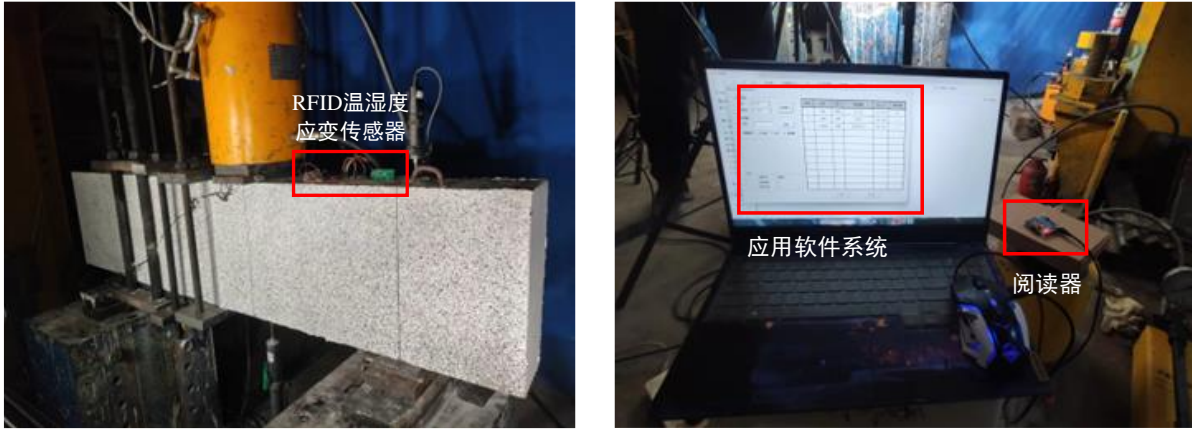


图 3.13 UHPC 梁应变测试实验布置图

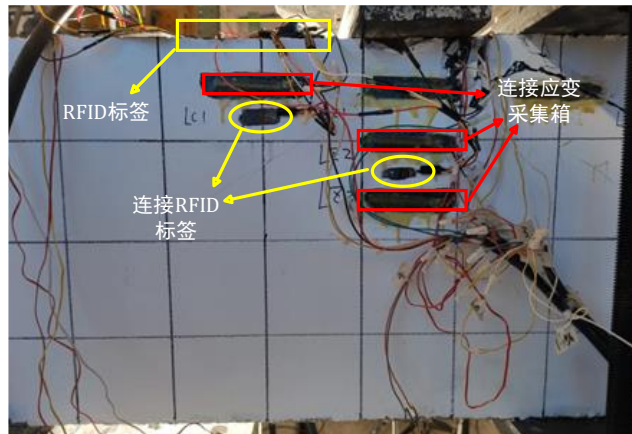
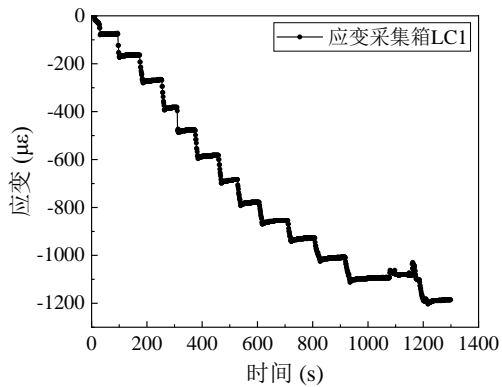
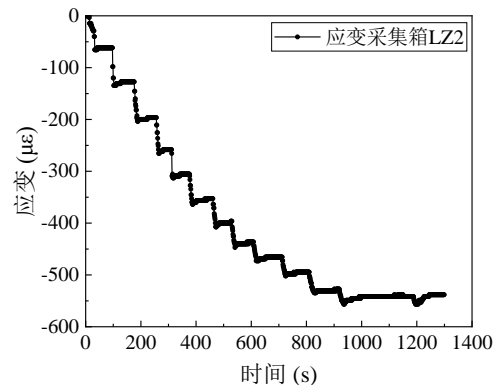


图 3.14 应变片粘贴位置



a) LC1 实验结果



b) LZ2 实验结果

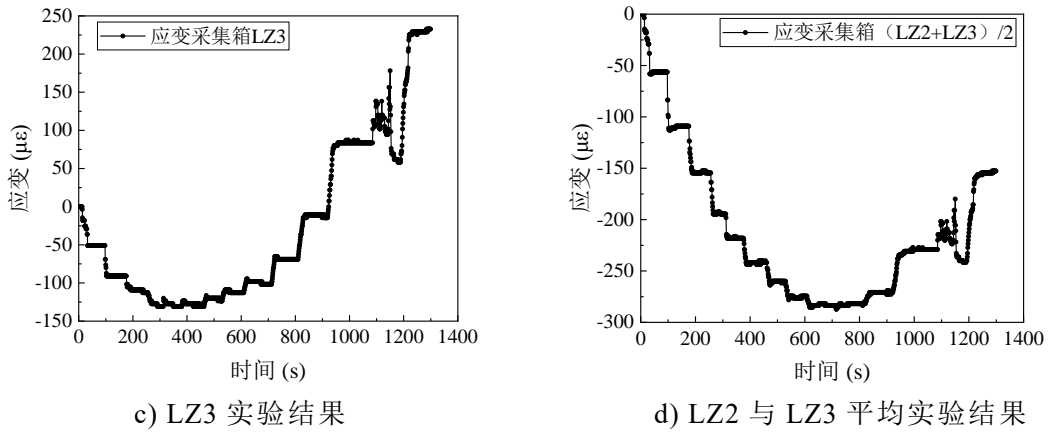


图 3.15 应变采集箱有线采集数据

图 3.15 为应变采集箱有线采集的数据，可以看到，随着荷载的增大，LC1 和 LZ2 受压区受力增加，LC1 离梁顶部更近，故受压的应力较 LZ2 大。LZ3 在开始阶段也表现为受压状态，且在 450 秒左右时达到了受压应变的最大值。随着荷载的持续增加，LZ3 的受压应力逐渐减小，并在约 920 秒时转变为受拉状态。RFID 应变传感器粘贴在 LZ2 与 LZ3 之间，故应取 LZ2 与 LZ3 平均测量结果（图 d）进行对比。

实验过程中，阅读器摆放在离实验梁约 4m 的位置，无线读取两个 RFID 传感器的应变数据和温湿度数据，传感器的应变采样频率和应变采集箱的采样频率均为 1s/次，温湿度采样频率为 3s/次。对采集到的数据通过 Python 进行分类，并提取应变和温湿度数据。其中粘贴在 LZ2 与 LZ3 之间的传感器在实验过程中发生接触不稳的情况，导致实验数据波动较大且存在数据缺失，故只将测量到的数据进行标定并验证，即将 0s-260s 之间的应变数据进行线性回归得到标定系数，再将 795s-1085s 的数据通过标定系数修正并验证。

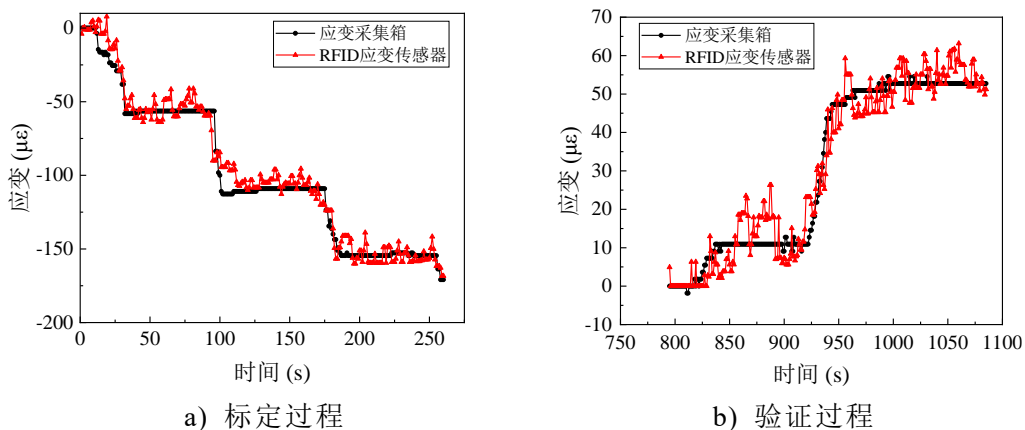


图 3.16 LZ2 与 LZ3 中间处应变测试结果

图 3.16 中图（a）为标定过程，将 0s-260s 通过阅读器无线测量的应变数据与应变采集箱有线采集的应变数据进行线性回归，得到标定系数为 0.551，此时标定过程的 RMSE 值为 $8.428\mu\epsilon$ ， R^2 为 0.975。接着利用标定系数对 795s-1085s 的数据曲线进行修正，修正后的无线应变数据与有线应变数据对比结果为图（b），其

RMSE 值为 $5.302\mu\epsilon$, R^2 为 0.942, 结果证明 LZ2 与 LZ3 之间的 RFID 应变传感器与有线采集箱采集的应变数据有一致的规律性, 能较好的反映应变的变化。

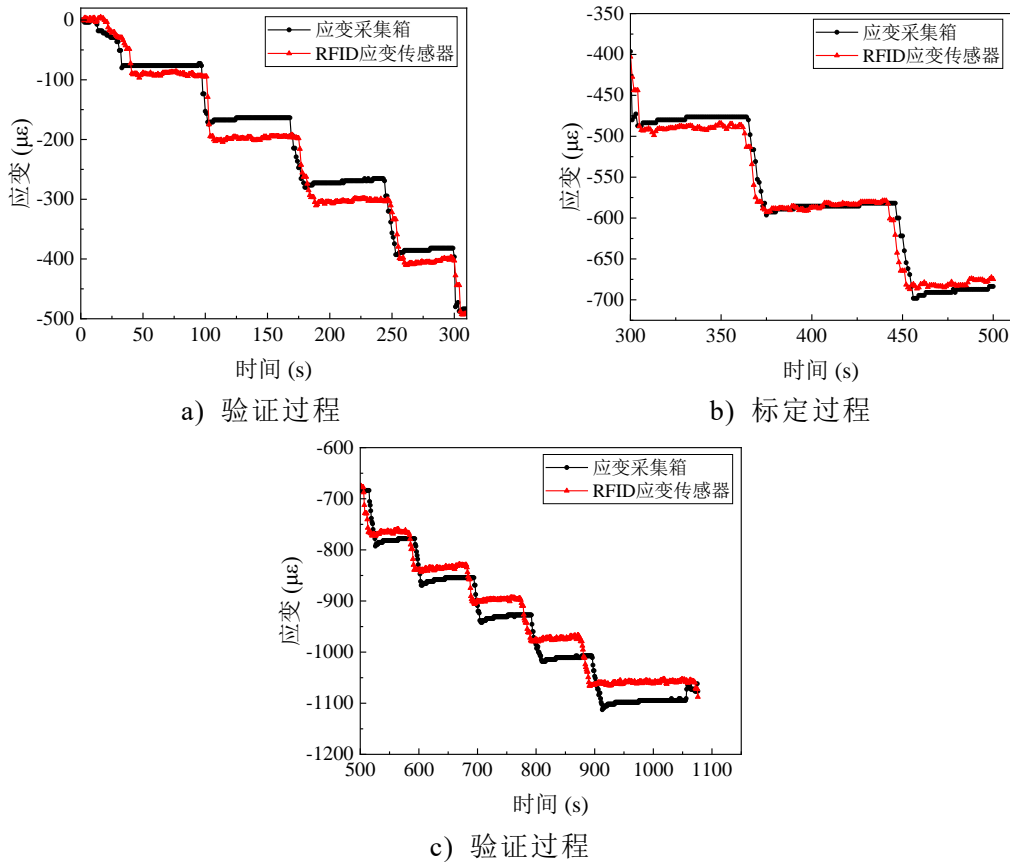


图 3.17 LC1 应变测试结果

为了提高 LC1 的曲线拟合效果, 选择了中间段进行标定系数的标定, 如图 3.17 中图 (b) 所示, 将时间段 200s-500s 通过阅读器无线测量的应变数据与应变采集箱有线采集的应变数据进行线性回归, 得到标定系数为 0.685, 此时标定过程的 RMSE 值为 $14.259\mu\epsilon$, R^2 为 0.973. 接着利用标定系数对时间段 0s-300s 和 500s-1076s 的数据曲线进行修正, 修正后的无线应变数据与有线应变数据的对比结果分别如图 (a) 和图 (c) 所示。其中, 时间段 0s-300s 的 RMSE 值为 $26.215\mu\epsilon$, R^2 为 0.972; 时间段 500s-1076s 的 RMSE 值为 $32.612\mu\epsilon$, R^2 为 0.960。可以看到, 在 UHPC 表面, RFID 应变传感器无线采集结果与应变采集箱有线测量结果较为接近, 误差在可接受范围内。实验是在已开裂的 UHPC 梁上进行, 并用对拉螺栓进行固定。LC1 与 RFID 传感器的应变片粘贴位置不一致, 且现场测试实验周边金属较多, 对信号的传输造成干扰, 这两个因素是误差的主要来源。

图 3.18 展示了在 UHPC 梁实验中获取的温湿度测量数据。在实验过程中, 使用了温湿度计进行间断性的数据采集, 每隔一段时间记录一次温湿度数据。根据记录数据显示, 实验开始时温度为 16.4°C , 而实验结束时降至 16°C , 湿度维持在约 62%RH 至 63%RH 左右。值得注意的是, 实验进行时处于黄昏时段, 环境温度有所下降, 然而温湿度模块仍然能够反映出这一变化趋势。这表明 RFID 传感器

的温湿度模块具有较高的准确性和灵敏度。

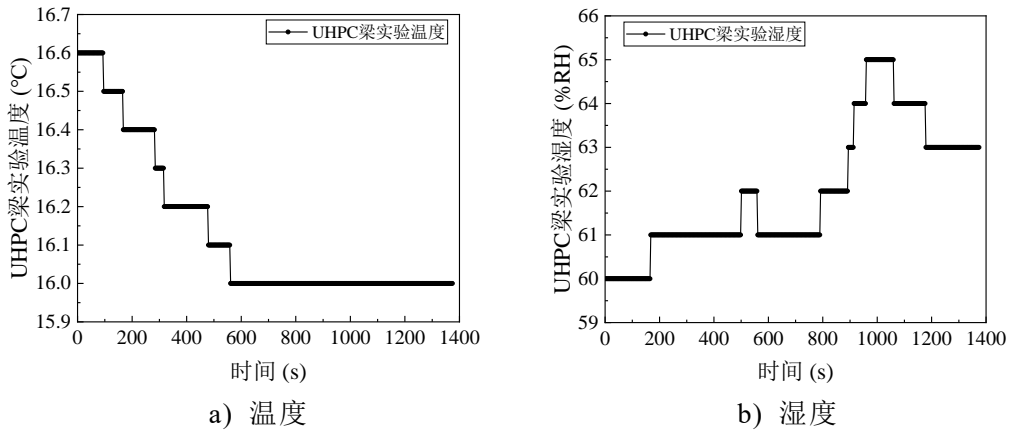


图 3.18 UHPC 梁温湿度测试结果

3.4.2 铝合金板应变测试实验

本节主要验证 RFID 应变传感器在铝合金板表面上的传感性能。铝合金板的长和宽为 1000mm×100mm，厚度为 3mm，材料为铝合金 6061。铝 6061 是一种常用的铝合金，具有良好的弹性和刚度特性，其弹性模量为 70GPa。实验采用悬臂结构，即将铝合金板的一端通过两个 C 型夹夹紧固定，夹紧位置距板端 25mm。在距板端 40mm 的位置粘贴了两个应变片，应变片型号为 BFH1K-3EB-D150，这两个应变片沿铝合金板的中轴对称粘贴。其中，一个应变片连接了设计的 RFID 温湿度应变传感器，通过阅读器无线读取应变和温湿度数据，并将数据传输给相连的应用软件系统。而另一个应变片连接了应变采集箱 TMR-311，通过有线方式采集应变片的应变数据，并传输给相连的应用软件系统。实验中，铝合金板的另一端粘贴了一个角钢，以便于加载配重。在加载配重时，尽量将其靠近板的中轴对称放置，以确保两个应变片粘贴处的应变相同。



图 3.19 铝合金板应变测试实验布置图

实验过程中，阅读器摆放在离铝合金板约 2m 的位置，无线读取 RFID 传感器的应变数据和温湿度数据，传感器的应变采样频率和应变采集箱 TMR-311 的采样频率均为 1s/次，温湿度采样频率为 3s/次。对采集到的数据通过 Python 进行分类，并提取应变和温湿度数据。实验共分为三组，即悬臂加载实验、悬臂加载卸载实验和悬臂随机加载卸载实验。在悬臂加载实验中，每次加载约 480 克的重物，持续一分钟。在悬臂加载卸载实验中，每次加载约 950 克的重物，持续一分钟。而在悬臂随机加载卸载实验中，每次加载不同质量的重物，持续半分钟。这些实验旨在对铝合金板在不同加载条件下的应变测量情况进行评估，以验证传感器的性能和稳定性。由悬臂结构受力条件可得，当末端加载重物时，应变片粘贴处的应变可通过下式计算得到：

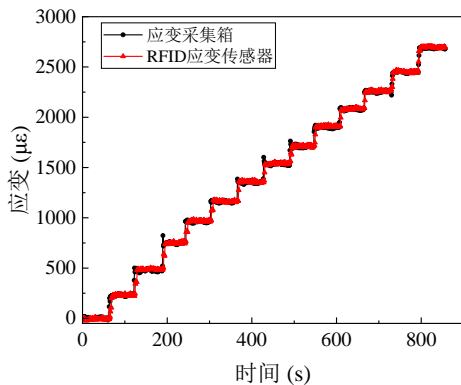
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{My}{EI} = \frac{6F(l-l_1)}{Ewt^2} \quad (3.5)$$

式中， ε 为应变片粘贴处的应变； σ 为应变片粘贴处的应力； y 为截面距离中性轴的距离，为 $t/2$ ； E 为铝合金弹性模量，为 71GPa； I 为矩形截面惯性矩，为 $wt^3/12$ ， F 为末端施加的力，即加载的重物重力； l 为悬臂段长度，为 75cm； l_1 为应变片距离固定端的距离，为 15cm； w 为截面宽度，为 100mm； t 为截面厚度，为 3mm。

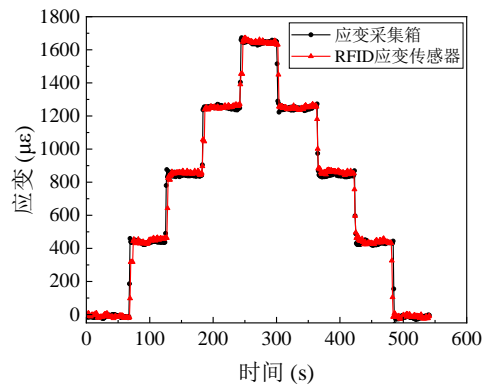
将实验中的悬臂条件代入，当加载 480g 重物时，可得加载的应变量为：

$$\varepsilon = \frac{6F(l-l_1)}{Ewt^2} = \frac{6 \times 0.48 \times 9.8 \times (0.75 - 0.15)}{71 \times 10^9 \times 0.003^2 \times 0.1} \approx 265 \mu\varepsilon \quad (3.6)$$

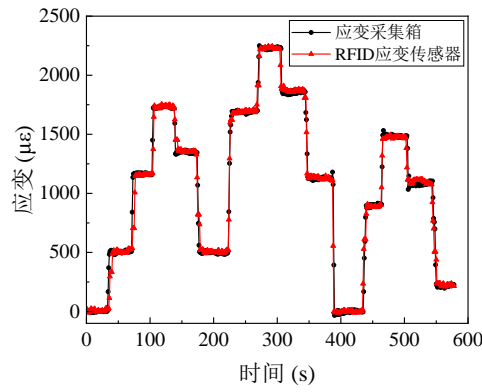
实验结束后，分别将三组实验通过阅读器无线测量的应变数据与应变采集箱有线采集的应变数据整体进行回归，得到标定系数及相应的 RMSE 和 R^2 值。图 3.20 为铝合金板应变测试结果曲线。表 3.1 为铝合金板悬臂实验结果汇总。可以看到三组实验的标定系数十分接近，由此可以证明所设计的 RFID 应变传感器具有良好的稳定性。然而，在随机加载卸载实验中，RMSE 值偏大。这可能是由于实验环境复杂，存在大量金属结构和噪音干扰，且加载过程中存在晃动，导致数据波动。此外，过长的加载时间也可能导致数据漂移。这些因素均可能对测量结果产生影响。



a) 加载实验应变



b) 加载卸载实验应变

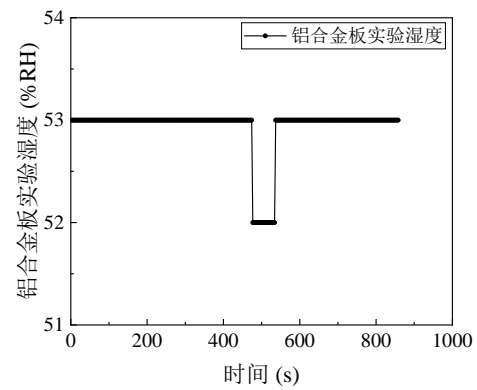
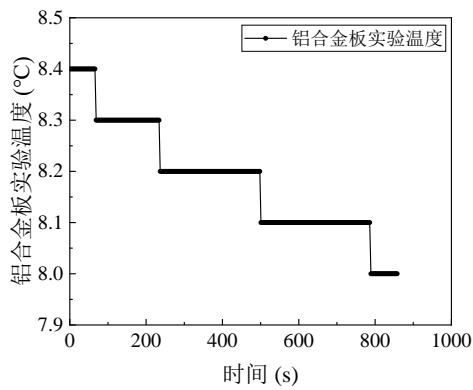


c) 随机加载卸载实验应变

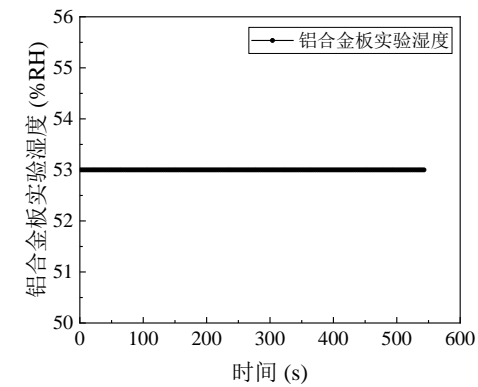
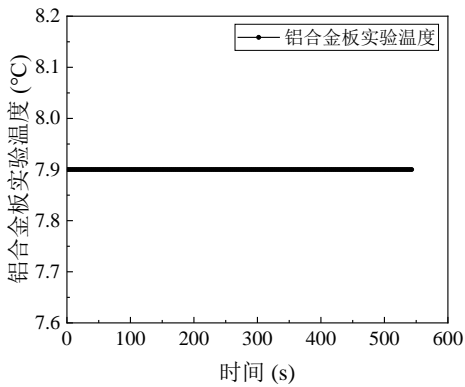
图 3.20 铝合金板应变测试结果曲线

表 3.1 铝合金板悬臂实验结果汇总

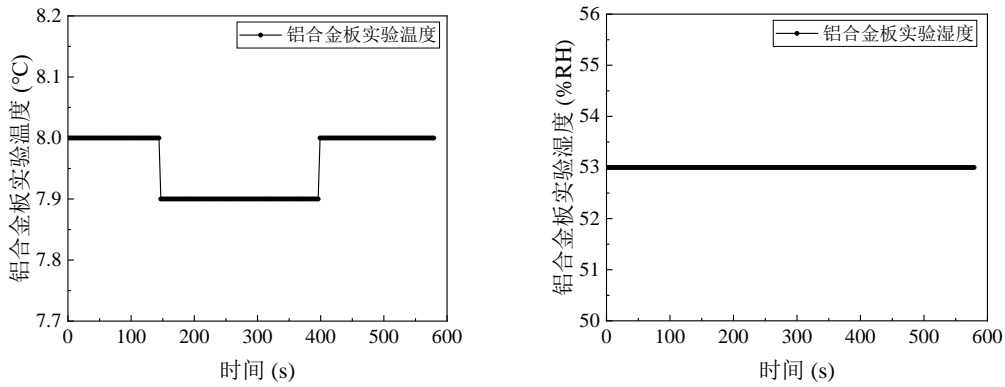
实验加载方式	标定系数	RMSE	R ²
加载	1.636	40.404	0.997
加载卸载	1.636	51.232	0.991
随机加载卸载	1.684	74.361	0.987



a) 加载实验温湿度



b) 加载卸载实验温湿度



c) 随机加载卸载实验温湿度

图 3.21 铝合金板温湿度测试结果

在实验开始时，使用温湿度计对实验过程进行实测并记录。实测结果显示，在悬臂加载实验开始时的温度为 8.5°C ，实验结束时降至 8.1°C 。而在悬臂加载卸载试验和悬臂随机加载卸载试验期间，温度保持在 8°C 。此外，三个实验中的湿度一直保持在 $53\%RH$ 的水平。由图 3-21 可得铝合金板应变测试实验时的温湿度结果，将这些数据与现场温湿度计实测值进行对比。可以看到 RFID 传感器的温湿度模块与实测值有较高的一致性和可靠性。

相较于 UHPC 梁应变测试实验，铝合金板应变测试实验的波动性更小。这一差异主要源自以下几个方面：首先，在铝合金板应变测试实验中，针对信号线接口进行了电工胶固定，增强了接触的稳定性。而 UHPC 梁应变测试实验中存在信号线接触不良的情况，导致信号缺失和波动。其次，铝合金板应变测试实验周边金属较少，对信号的干扰相对较少，进一步提高了信号传输的稳定性。因此，在实际应用中，应尽量避免金属较多和噪声较大的环境，以减少对信号的干扰和误差。同时，对于信号线的连接，应该进行有效的加固，确保接触稳定可靠。这些措施能够有效提升传感器系统的性能和可靠性，确保数据采集的准确性和可信度。

3.5 本章小结

本章基于 RFID 技术的通信功能，将搭载 CC2530 芯片的电子标签模块评估版 DST-M80 与全桥应变片 BFH1K-3EB-D150 相连接，实现了两者的兼容工作，形成了 RFID 应变传感器。

(1) 标签芯片为半有源芯片，具备了休眠状态下的低能耗特性，有效减少了能量消耗。仅当接收到阅读器的问询信号时，芯片会进入激活状态进行数据传输。同时引入了运算放大器 AD620 对 RFID 应变传感器进行改进，通过将全桥应变片信号差分输入并进行放大处理，显著提高 RFID 应变传感器的灵敏度。

(2) 针对接收到的数据内容多样且结构复杂的问题，编写了 Python 代码实现了识别卡号、数据分类、应变数据提取等功能。大幅提高了数据处理效率和分析准确性。另外，将温湿度电子标签 DST-96 与改进后的 RFID 应变传感器进行了

集成，实现了温湿度与应变的同步测量。

(3)使用改进后的 RFID 传感器对 UHPC 梁和铝合金板进行了应变和温湿度测试实验。实验结果显示，针对不同材料构件和加载条件，所设计的传感器在应变和温湿度测量结果上与有线采集的应变数据和实测的温湿度数据具有较好的一致性和可靠性。

第4章 无源无线 RFID 应变传感器设计与研究

4.1 引言

利用 RFID 标签本身集感知与通讯一体, 当外界环境发生变化时, 导致 RFID 标签系统的标签天线本身电学信号发生改变, 通过阅读器识别到与谐振频率变化相对应的阈值反射功率最大值的变化, 从而实现对应变的无线测量。基于此技术方案所设计的 RFID 标签无源无线, 为结构健康监测提供了一种简便高效、成本较低的无线监测手段, 具有广阔的应用前景。本章基于第二种技术方案, 利用 HFSS 软件, 基于天线设计理论, 对天线参数进行仿真分析, 探究其性能特性。并通过对天线关键参数进行优化, 实现对天线的小型化设计与与芯片之间阻抗共轭匹配。接着, 通过 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对设计的 RFID 应变传感器进行力-磁多物理场耦合仿真。最后, 通过铝合金板拉伸试验、简支实验和悬臂实验, 测试了在不同加载条件下 RFID 应变传感器的性能。

4.2 微带天线设计理论

微带天线以其体积小、质量轻、易于制造和集成等优势, 而广泛应用在无线通信领域。其辐射贴片可以根据具体需求设计成各种形状, 本节介绍了微带天线设计的相关理论, 为后续 RFID 应变传感器的仿真和优化提供理论基础。

4.2.1 天线分析理论

常用的微带天线的分析理论主要有三种: 传输线模型^[87]、空腔模型^[88]以及积分方程法^[89]。

传输线模型将天线视为一个电磁波传输的导线系统, 利用电路元件如电阻、电感和电容等描述电磁波在导线中的传输过程。这种模型基于电磁场理论和电路理论, 将天线的结构简化为电路模型, 用于分析其阻抗、辐射特性和驻波比等参数。传输线模型特别适用于分析各种传输线型天线, 如垂直天线、水平天线和微带天线等。空腔模型将天线简化为一个特定结构的腔体模型, 腔体的上下两面被假设为理想的电壁, 表示只存在垂直于贴片方向的电场, 而磁场分布被忽略。同样地, 腔体的四个侧面被假设为理想的磁壁, 只存在法向磁场分量, 电场分布被忽略。这种简化模型的假设是贴片天线的厚度远小于波长, 因此不考虑电磁场边缘效应的影响。积分方程法基于麦克斯韦方程组和边界条件, 在整个天线结构上建立电流分布与辐射场之间的积分关系。该方法将天线结构分解为许多小电流元,

并通过对每个电流元产生的电场的积分来求解整个辐射场的分布。通过对电流分布的积分求解，可以得到天线的辐射特性，如辐射模式、增益和阻抗等。

传输线模型通常用于分析细长天线，如微带天线和柱形天线等，具有简单易懂、计算效率高的优点，适合基本的天线结构设计和分析。然而，对于复杂的天线结构，该方法精度较低。空腔模型适用于各种规则形状的天线，其精度较高，能够考虑天线内部的电磁场分布和辐射特性，多用于一些中等复杂度的天线结构分析。然而，空腔模型需要求解复杂的数学模型，因此耗时较长。积分方程法适用于分析各种形状和尺寸的天线，包括复杂的三维天线结构、高频和宽频段的情况。其优势在于可以准确地描述复杂天线结构的辐射特性，但需要处理复杂的数值计算和数学求解，计算量大，耗时长，且需要较强的数值分析能力和计算资源。传输线模型因其简单和高效的计算而得到广泛应用。在第 2.4 节中，贴片天线的应变-频移理论的推导采用了传输线模型。在后续多频天线的设计过程中，则需要使用空腔模型。

4.2.2 微带天线馈电方式

天线的馈电是确保天线正常工作的关键。它提供了所需的电能，使天线能够将电信号转换为无线电波并进行辐射。馈电的稳定性和有效性直接影响着天线的性能和信号传输质量。微带天线常用的馈电方式主要有以下三种^[90]。

微带线馈电是一种通过微带线将信号从馈源传输到微带天线的辐射元件上的方法。这一馈电方式利用微带线作为信号传输介质，将信号从馈源传输至天线。微带线与辐射元件位于介质基板的同一面，需要调节微带线的宽度、长度及馈电位置来实现阻抗匹配，以确保信号传输的稳定性和效率。微带线馈电具有易于实现与馈源的阻抗匹配、结构简单、易于集成和制造成本低等优点。然而，由于需要在天线结构上占用一定的空间且本身会产生辐射，在一定程度上会影响天线的性能。

同轴线馈电采用同轴电缆将信号从馈源传输到天线的辐射元件上。同轴电缆由内导体、绝缘层和外导体构成。在同轴线馈电中，首先将信号源连接到同轴电缆的内导体上，然后信号通过内导体传输到天线的辐射元件，到达辐射元件后，信号被转换成电磁波并进行辐射。外导体则充当屏蔽层，起到屏蔽干扰和保护内部信号的作用。同轴线馈电以调整馈电点实现阻抗匹配，具有抗干扰性强和传输损耗低等优点。但其结构复杂，制造成本较高。

电磁耦合馈电是一种非接触式的方式，它利用电磁场的耦合效应将信号从馈源传输到天线的辐射元件上。当馈源发出信号时，部分能量被天线的辐射元件接收并转换成电信号。与传统的直接连接方式不同，电磁耦合馈电方式下馈源和天线之间无需直接的物理连接，减少了线缆布线的复杂性。然而，这种方式容易受

到环境电磁干扰的影响，传输效率较低，对天线结构和布局有较高的要求，同时制造成本也较高。

应用在结构健康监测领域时，同轴线馈电存在一个明显的限制，即需要在接地板上开口并通过电缆线连接来实现，这限制了传感器与结构的直接接触。而电磁耦合馈电的设计较为复杂，并且通讯距离较近，同时对结构的应变反应不够敏感。因此，选择采用微带线馈电在这一领域中具有优势。微带线馈电能够确保接地板的完整性，可以直接与结构接触，同时也便于实现阻抗匹配。

4.2.3 天线抗金属设计方法

由于电磁信号容易受到金属结构影响，从而增加信号的传输损耗，因此在设计天线时，特别是在需要与金属接触的情况下，抗金属设计变得至关重要。需要采取一定措施来减少或抑制这种影响。目前大部分的抗金属标签天线都是通过以下四种方式设计^[91-92]：

(1) 调整天线与金属表面的距离：将标签天线贴在金属表面会导致性能下降的主要原因是金属边界条件引起的反射波与入射波相位相反，使能量相互抵消，难以激活标签芯片。天线与金属表面距离为 0 处电场最弱，距离为 0.25λ 处最强。即天线贴合金属表面时，能量几乎为零，但当距离为 0.25λ 时，能量最大。然而，这种距离的增加导致了天线体积的增加，不便于固定在物体表面上。此外，增加天线与结构的距离也会降低应变传递的效率，因此不适合用作应变传感器。

(2) 采用吸波材料：电磁吸波材料能够创造特殊的边界条件，使得入射电磁波在材料介质表面的反射系数最小化。从而吸收金属反射的电磁波并转化为热量进行消耗。然而，大多数电磁吸波材料价格昂贵，不适用于结构健康监测领域中大型结构的传感器布置。

(3) 采用电磁波带隙 (EBG) 结构：EBG 结构可通过其独特的周期性排列和电磁特性，能够在特定频率范围内形成高阻抗区域，从而有选择性的对电磁波进行吸收和反射，减少金属表面对信号的干扰。尽管使用 EBG 基板可以有效解决金属表面的问题，并且无需重新设计天线结构，但是该基板的复杂结构和较高成本限制了其在传感器大规模布置方面的应用。(4) 利用微带天线结构：微带天线的接地面通常采用金属全覆盖，从而达到抗金属的效果。这种设计方法在于将金属表面视为其天线的一部分，有效消除了天线与金属表面之间的干扰。这种方式简单实用，成本较低，且不会影响应变传感器的效率，因此采用这种方法设计应变传感器具有可行性和研究价值。

4.2.4 阻抗匹配理论^[93]

图 4.1 给出了源阻抗为 Z_g 和负载阻抗 Z_l 的传输线电路，假定传输线无损耗，

长度为 l ，特征阻抗为 Z_0 。该电路可代表大多数的天线的阻抗匹配网络。

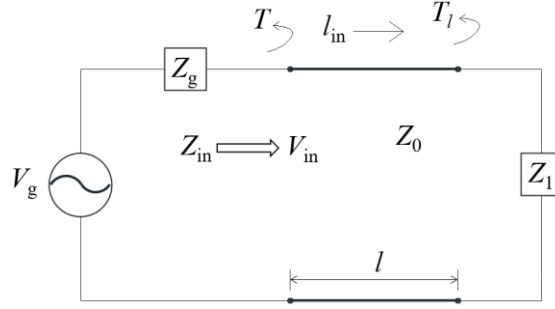


图 4.1 基于负载的传输线电路

根据传输线公式，可得输入阻抗：

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_1 + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_1 \tan \beta l} = R_{in} + jX_{in} \quad (4.1)$$

由于假定传输线是无损耗的，令 $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ ， $Z_g = R_g + jX_g$ ，因此传给负载的功率：

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{R_{in}}{(R_{in} + R_g)^2 + (X_{in} + X_g)^2} \quad (4.2)$$

当负载与传输线匹配时，即 $Z_1 = Z_0$ ，由式 4.1 可知此时 $Z_{in} = Z_0$ ，故由式 (4.2) 可知传到负载的功率为：

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{Z_0}{(Z_0 + R_g)^2 + X_g^2} \quad (4.3)$$

当源阻抗与负载阻抗匹配时，即 $Z_g = Z_{in}$ ，由式 (4.2) 可知传到负载的功率为：

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{R_g}{4(R_g^2 + X_g^2)} \quad (4.4)$$

而当阻抗共轭匹配时，即假定源阻抗 Z_g 恒定，改变输入阻抗 Z_{in} 直到实现传到负载的最大功率，根据高等数学理论，对式 (4.2) 中的输入阻抗的实部和虚部进行微分，可得：

$$\frac{\partial P}{\partial R_{in}} = 0 \Rightarrow R_g^2 - R_{in}^2 + (X_{in} + X_g)^2 = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X_{in}} = 0 \Rightarrow X_{in} (X_{in} + X_g) = 0 \quad (4.6)$$

联立式 (4.5) 和式 (4.6)，可得 $X_{in} = -X_g$ ，即

$$Z_{in} = Z_g^* \quad (4.7)$$

式 (4.7) 称为共轭匹配，此时得到传到负载的最大功率为：

$$P = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{1}{4R_g} \quad (4.8)$$

对于复阻抗而言，阻抗匹配的原理是通过调节电路的参数，使得电路的输入

阻抗与输出阻抗的共轭相等。这样做可以最大程度地将能量从信号源传输到负载，同时最小化信号的反射。此时，电路的传输效率最高，能量传输的损耗最小。

4.3 无源无线应变传感器设计

基于 4.2 节中的天线设计理论，采用微带天线结构实现抗金属设计，并采用微带线馈电方案设计标签天线。同时，应用传输线模型推导的 2.4 节中的贴片天线应变-频移理论来实现应变测量。

4.3.1 RFID 应变传感器的设计

微带贴片天线通常由介质基板、上部辐射贴片和下部接地板三部分构成，其中接地板和辐射贴片多选用导电性能优异且稳定的铜片，抗金属设计时接地板完整，故影响微带贴片天线的主要因素为辐射贴片的形状和尺寸参数及介质基板的尺寸和材料参数。

本章选用玻璃纤维增强环氧树脂复合材料（FR4）作为微带贴片天线的介质基板材料，其相对介电常数为 4.4，损耗正切为 0.02。FR4 以其优异的介电性能、机械强度和化学稳定性著称，在超高频和微波频段内展现出相对稳定的介电常数和低介电损耗。FR4 出色的机械强度和稳定性，能够满足微带天线设计中的复杂形状和结构要求，并具有高表面平整度，使得加工和制造过程更加容易，保证了微带天线的制造精度和可靠性，也有助于实现微带天线的集成化生产。FR4 作为一种常见的介质基板材料，具有相对较低的成本，适用于大规模生产，也是其在应变传感器领域成本优势的体现。

基于应变天线传感器的设计频段为超高频频段，选用 Alien 公司的超高频芯片 Higgs-3 作为天线的激励芯片，芯片的存在可以使阅读器能够较好的区分标签信号和环境反射信号，具有较好的抗环境干扰能力和鲁棒性，同时阅读器可以识别芯片的最小激活功率或最大反射功率来识别天线的谐振频率，从而反推结构的变形情况。Higgs-3 芯片具备预先编程且不可更改的 64 位序列号，工作频段为 860MHz-960MHz，读取的灵敏度为-18dBm。芯片可在非常低的 RF 功率下进行正常写入，且采用了低成本的 CMOS 工艺和 EEPROM 技术，从而降低了制造成本。

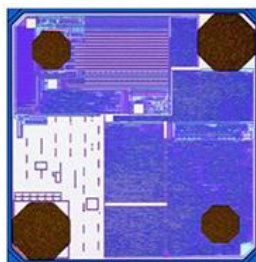


图 4.2 Alien Higgs-3 芯片

天线应变传感器的设计中心频点为 915MHz，通过查阅 Higgs-3 芯片的技术

手册，芯片在 915MHz 的阻抗为 $27.4\Omega-200.9i\Omega$ ，通过上节 4.2 中阻抗匹配原理可知，当天线设计阻抗为 $27.4\Omega+200.9i\Omega$ 时，此时芯片阻抗和天线阻抗共轭匹配，天线获得最佳工作性能。根据 2.4 节中式 (2.8) 至式 (2.12) 可计算微带天线的辐射贴片长度 L 和宽度 W 约为 78mm 和 100mm，考虑到尺寸较大，可能会限制其在某些应变测量应用中的实际使用。因此，需要对天线进行小型化处理。

微带天线小型化使得所设计的传感器在空间受限或需要精细定位的特定的应用场景下，提高了传感器的灵活性和多样性，同时小型化通常意味着使用更少的材料和资源，因此可以降低传感器的生产成本。目前，对天线进行小型化的常见方法主要有^[94-95]：

(1) 高介电常数的介质基板：以矩形贴片天线为例，由式 (2.8)、式 (2.10)、式 (2.13) 可知，天线的谐振频率与介电常数、天线长度和宽度之间存在负相关关系。简言之，当天线的谐振频率固定时，采用介电常数较高的介质基板有助于减小天线的尺寸。故可以通过选择合适的介质基板，可以实现天线尺寸的优化，但高介电常数的介质基板可能会导致信号传输过程中的能量损失增加，降低系统的整体效率，且一些高介电常数的介质基板通常价格较高，增加了制造成本。

(2) 曲流法：由公式 (2.13) 可知，天线的谐振频率与天线电流路径有效长度负相关，通过在辐射贴片表面或者接地板上开槽，改变电流流动路径，从而增加天线电流路径有效长度，进而减少天线的尺寸来保持谐振频率不变，进而实现天线小型化。这种方法利用了天线结构中的电流分布特性，通过合理设计和优化电流路径，实现了天线的小型化而不损害其谐振性能，但对优化过程比较繁琐且会影响天线的增益。接地板上开槽可能导致天线的 Q 值下降，从而影响天线的性能，此外，对于需要进行抗金属设计的天线应用场景，需要保持接地板的完整性，以确保天线在金属结构上的有效性。因此，在这种情况下，接地板上的开槽不适用于应变传感器在金属结构上的应用。

(3) 分形技术：分形技术是一种基于分形几何理论，用来创建具有特定几何形状的结构或图案的设计方法。其核心思想源于分形几何理论中的“自相似性”和“尺度不变性”原理，通过反复嵌套、递归放大或缩小等方式，构建出需要的天线结构。分形结构的自相似性和自填充特性赋予了天线设计更高的灵活性和多样性，使得天线可以更容易地实现小型化要求。但设计和制造分形天线需要深入理解分形几何理论，增加了天线设计的难度和制造的成本。

(4) 加载技术：通过在天线的适当位置加载阻抗元件，调控天线有效电流路径分布，从而改变了原本的电磁场分布和电流流动模式，实现对天线性能的优化和尺寸的小型化。常用的加载技术有加载短路过孔、短路片或短路面。其原理是通过将微带天线介质基板的辐射贴片与接地板连接，从而产生镜像效应，有效地改变辐射贴片的有效长度，使其近似等效为四分之一波长。因此，通过这种方法，可

以将半个工作波长长度的辐射贴片缩减至四分之一波长，从而实现天线小型化，但需要精确控制加载短路过孔的尺寸和位置。

除去上述四种常用的小型化技术外，还有附加有源网络、采用特殊形状和使用左手材料的贴片形状等方式来实现天线的小型化。但在对天线进行小型化的过程中，普遍存在天线带宽减小和辐射增益降低等问题。因此需要综合考虑天线的结构特征、工作频段、材料特性以及应用场景等因素，以寻找最佳的小型化方案。

4.3.2 RFID 应变传感器仿真与优化

据标签设计理论，采用 H 槽馈电结构作为基础，将表面辐射贴片设计为蝶形结构，并结合加载技术和曲流法等小型化设计技术。利用 HFSS 软件对天线进行仿真分析，HFSS 软件是由 Ansys 公司开发的一款专业的三维电磁场仿真软件，针对微波、毫米波和射频频段的电磁场问题提供了强大的解决方案。其先进的数值求解技术和高效的仿真算法能够准确地模拟复杂的电磁场分布和各种天线、微波器件的性能特性。

如图 4.3 为 RFID 应变传感器结构示意图，在基于蝶形 H 槽馈电结构的基础上，对贴片天线进行小型化的设计。具体措施包括在天线上开矩形槽和短路过孔。天线结构中间预留了一个空槽，用于安置芯片，其尺寸为 $1.5\text{mm}\times 1\text{mm}$ 。此外，在天线上沿中轴对称布置了 9 个短路过孔，每个过孔的尺寸半径为 0.5mm ，间距为 3mm ，孔中心距离辐射贴片边缘为 1mm 。另外，在贴片天线的 H 槽边缘和蝶形贴片的边缘分别开有矩形槽，以进一步实现天线的小型化。天线的基板初始尺寸为 $30\text{mm}\times 30\text{mm}\times 1\text{mm}$ ，利用 HFSS 软件对辐射贴片的关键参数进行调节，以研究其对天线阻抗和谐振频率的影响，使得天线在谐振点 915MHz 实现共轭匹配。

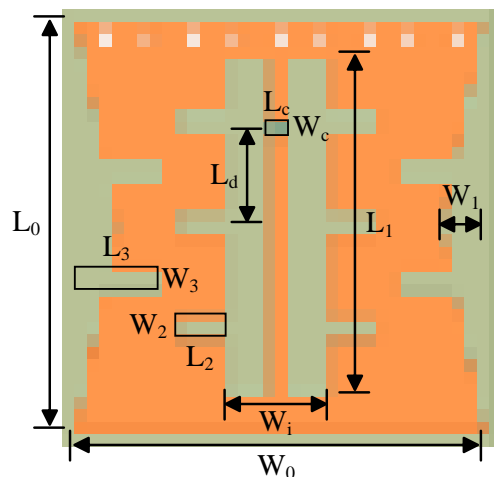


图 4.3 RFID 应变传感器结构示意图

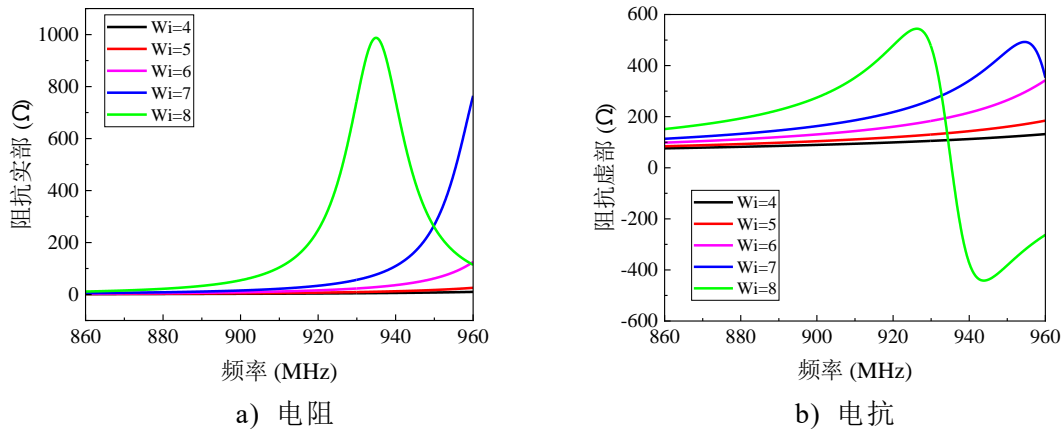


图 4.4 天线阻抗与 H 槽宽度 W_i 的关系

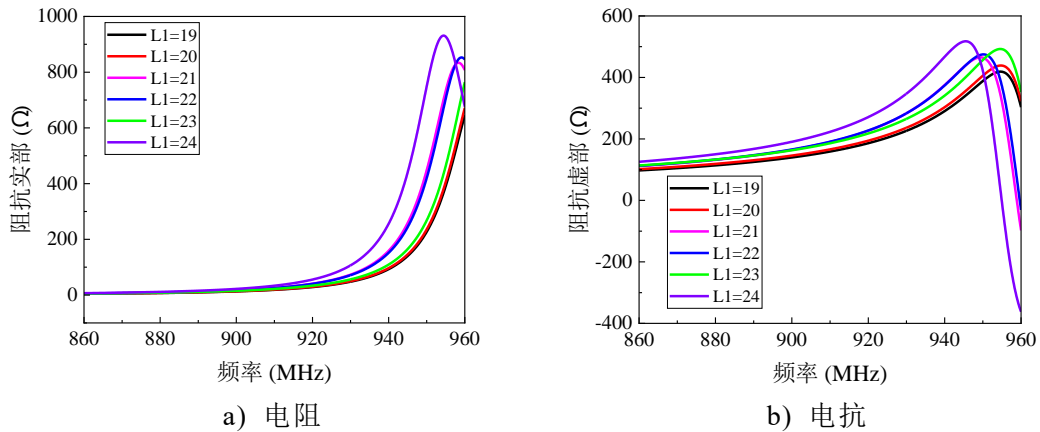


图 4.5 天线阻抗与 H 槽长度 L_1 的关系

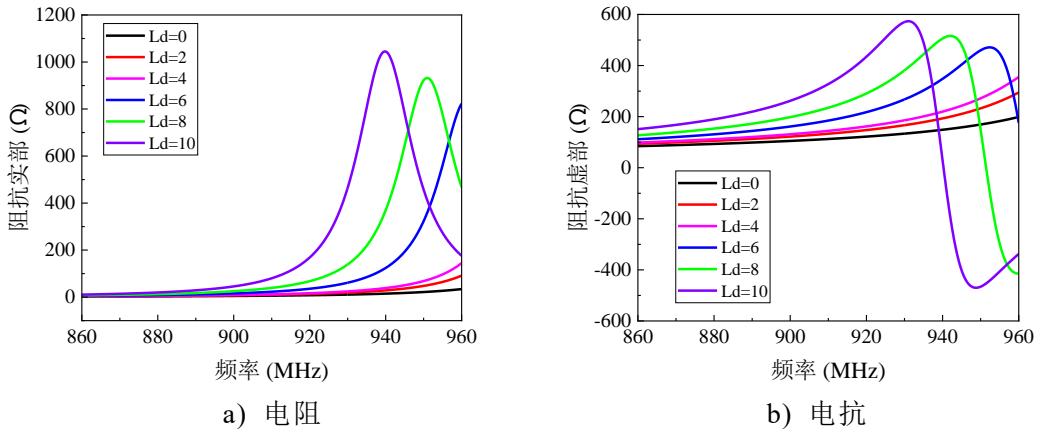


图 4.6 天线阻抗与芯片空槽距中心的距离 L_d 的关系

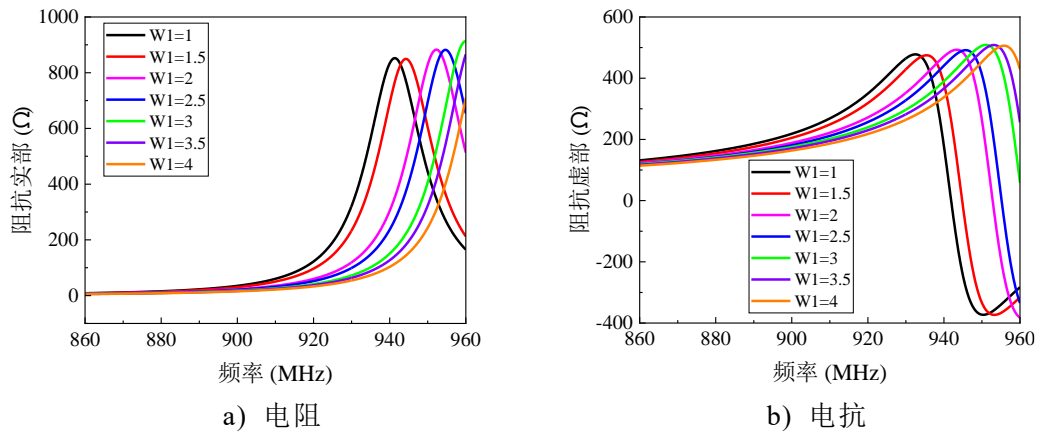


图 4.7 天线阻抗与蝶形边缘宽度 $W1$ 的关系

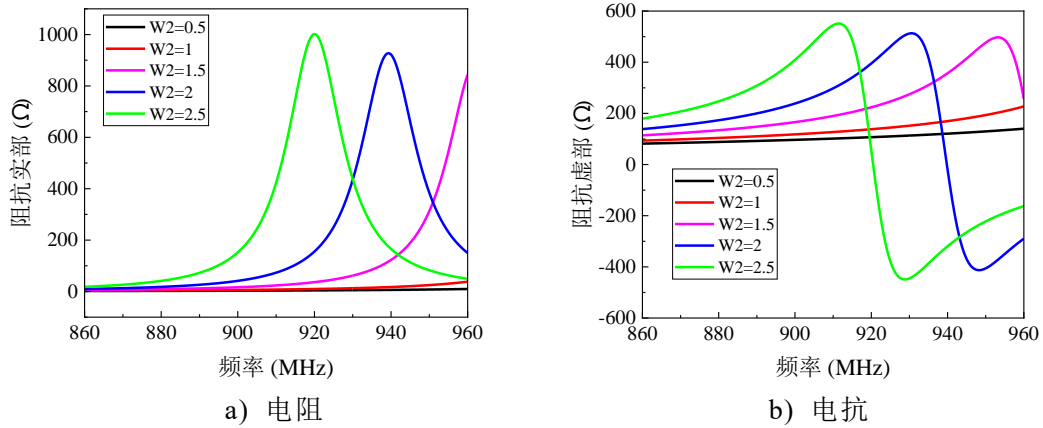


图 4.8 天线阻抗与矩形槽宽度 $W2$ 的关系

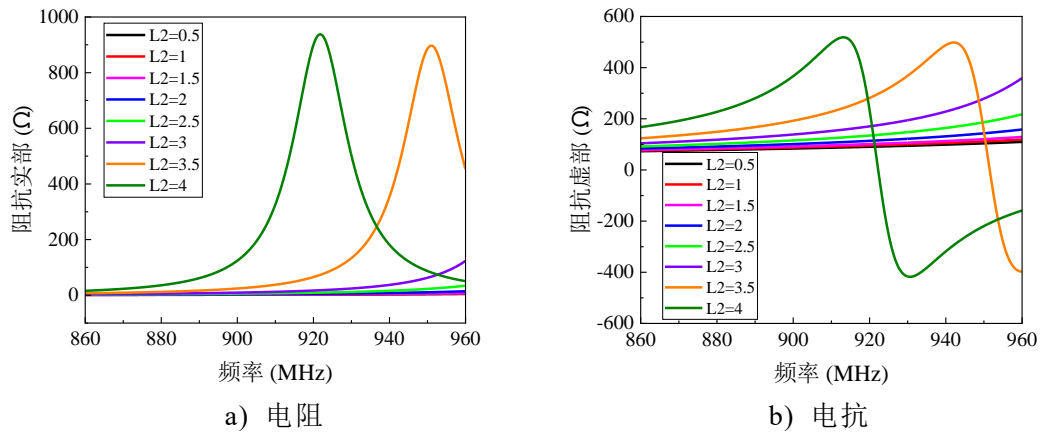


图 4.9 天线阻抗与矩形槽长度 $L2$ 的关系

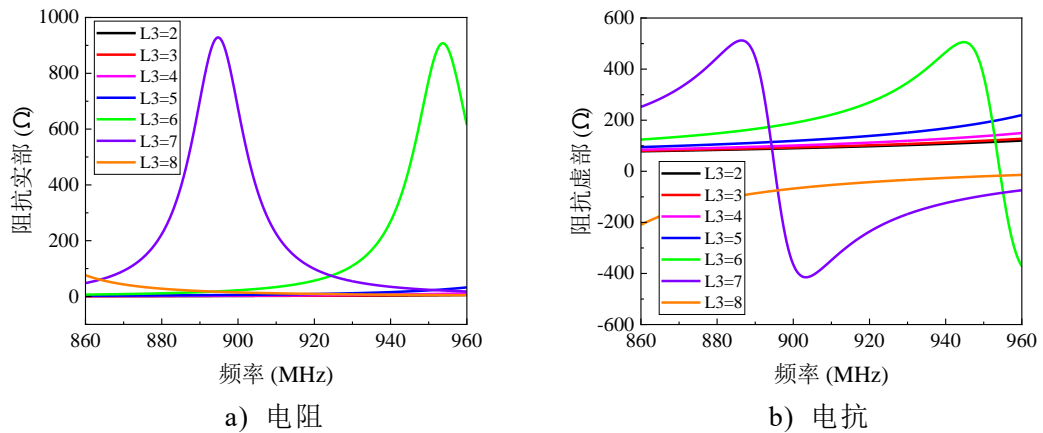


图 4.10 天线阻抗与矩形槽长度 $L3$ 的关系

图 4.4-图 4.10 为利用 HFSS 仿真的天线传感器关键参数与阻抗之间的关系曲线。对上述参数进行仿真分析后发现，整体而言，天线的电阻和电抗在一定范围内随着关键参数的增大而呈现下降趋势。其中矩形槽宽度 $W2$ 、矩形槽长度 $L2$ 、以及矩形槽长度 $L3$ 对天线的阻抗影响显著，同时这些参数也对天线的谐振频率产生较大的偏移影响。而芯片空槽距中心的距离 Ld 和 H 槽宽度 Wi 对天线的阻抗影响较大，但对天线的谐振频率影响相对较小。因此，我们可以通过调整 $W2$ 、 $L2$ 和 $L3$ 来使天线的阻抗和谐振频率达到合适的位置，然后再通过调整 Ld 和 Wi

来微调阻抗，使天线在谐振点附近达到最佳匹配。最后，由于 H 槽长度 L_1 和蝶形边缘宽度 W_1 对天线的阻抗和谐振频率的影响较小，我们可以对它们进行微调，以确保天线的复阻抗实部（电阻）和虚部（电抗）与芯片的复阻抗实部和虚部实现共轭匹配。

经过对天线的各关键指标进行调节和优化，所设计的天线的各尺寸参数如下图所示：

表 4.1 优化后的天线各尺寸参数（单位：mm）

参数	L_0	L_1	L_2	L_3	L_c	L_d
值	28	23	3.4	5.9	1.5	7
参数	W_0	W_1	W_2	W_3	W_c	W_i
值	28	2.9	1.6	1.6	1	7

在优化后的尺寸参数下，对天线进行 HFSS 建模仿真，根据图 4.11 的结果显示，天线在 915MHz 时的电阻为 27.02Ω ，电抗为 $+200.32j\Omega$ ，这与芯片阻抗 $27.4\Omega-200.9i\Omega$ 基本实现了共轭匹配。一般认为天线回波损耗 $S_{11} < -10\text{dB}$ 时具有较好的性能，由图 4.12 看到天线在 915.2MHz 时回波损耗 S_{11} 值最低，达到了 -60dB 以下，此时天线处于最佳工作状态，具有较高的能量传输效率和较低的反射损耗。

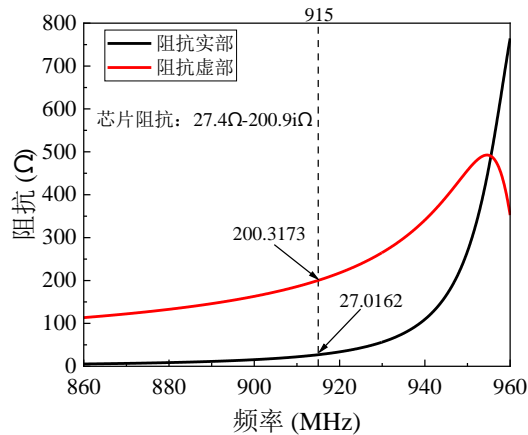


图 4.11 优化后天线在 915MHz 的阻抗

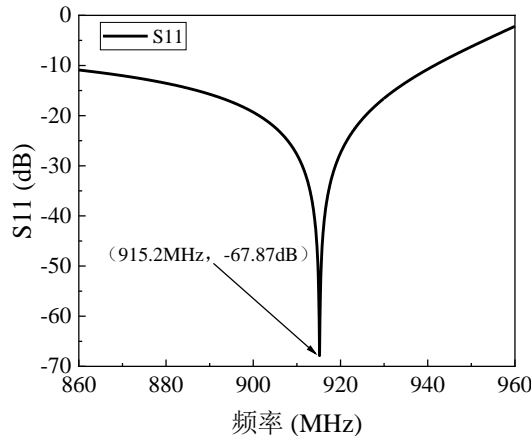


图 4.12 优化后天线的谐振频率与回波损耗 S_{11} 的关系

4.3.3 RFID 应变传感器力-磁耦合仿真

为了模拟天线在力作用下天线应变和谐振频率频移之间的关系，需要进行力磁耦合仿真。HFSS 作为专业的三维电磁场仿真软件，主要用于解决电磁学问题，其仿真算法和技术在电磁场领域表现出色。然而，HFSS 在处理力学和电磁学等其他物理场的耦合方面存在一定的局限性。COMSOL Multiphysics 作为一款多物理场仿真软件，具备处理多个物理场耦合问题的能力，包括力学、电磁学、热学和流体力学等。COMSOL 的仿真环境提供了广泛的物理建模工具和高级仿真功能，使用户能够在一个统一的平台上进行复杂系统的多物理场仿真分析。因此，对于需要综合考虑力学和电磁学耦合效应的问题，COMSOL Multiphysics 提供了更为全面和灵活的解决方案。

COMSOL Multiphysics 提供了与 HFSS 软件兼容的接口，使用户可以将 HFSS 中的模型导入到 COMSOL 中进行进一步的仿真分析。模型导入后，由于 HFSS 在计算时一般不考虑贴片天线表面辐射贴片厚度，故导入后需要对天线辐射贴片进行三维拉伸处理，以模拟它们的实际厚度。通常，可以将辐射贴片的厚度设置为 0.07mm。并在天线传感器底部创建一个长宽高为 400mm×70mm×6mm 的长方体作为受力结构。

COMSOL 中力-磁耦合属于弱耦合，即没有对应的多物理场接口，故需要通过变形网格中的动网格模块来实现力-磁耦合，使得天线在力学场的计算后可以重新划分有限元网格，并在此基础上进一步进行电磁场计算得到谐振频率的频移。但动网格的使用使得网格单元数成倍增加，从而导致计算缓慢且耗时较长。为了避免这一问题，本文采取另一种方式实现力-磁耦合，首先将天线进行力学场计算，将计算后的模型利用变形构型模块进行手动重新剖分网格，并将重新剖分网格后模型导出并重新导入 COMSOL 中进行电磁场计算，从而得到天线的谐振频率。通过这种方法，能够避免网格导致的网格单元数量激增，从而提高了计算效率。

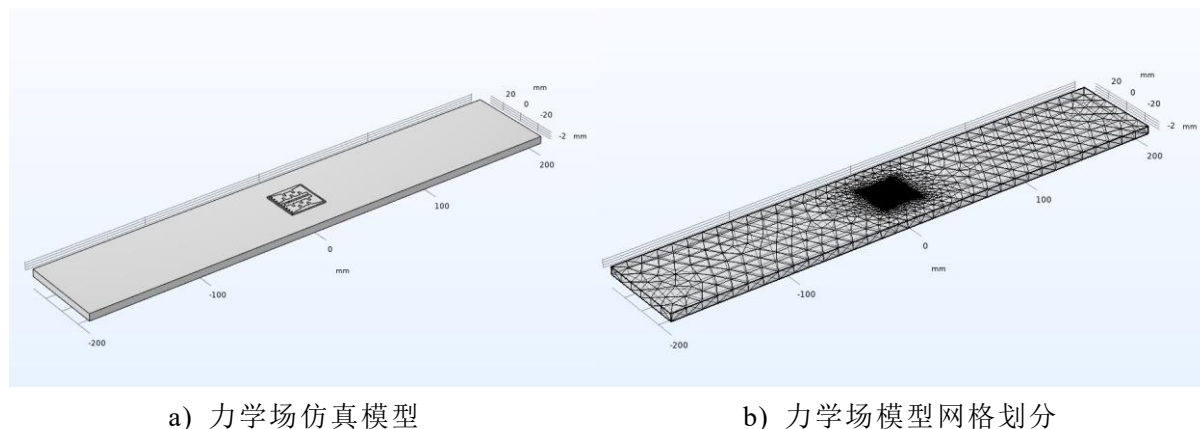


图 4.13 COMSOL 力学场仿真

基于上述方法，首先通过 COMSOL 材料库将辐射贴片和接地板的材料设为

Copper，介质基板材料设为 FR4，受力结构材料设为 Aluminum，力学场计算时主要考虑材料的密度、泊松比和杨氏模量，材料的力学参数如表 4.2 所示。随后，添加固体力学模块，并将材料设置为线弹性材料。将铝板的一端设定为固定约束，另一端施加指定位移，共施加 $4000\mu\epsilon$ ，每次施加 $500\mu\epsilon$ ，以实现天线传感器的应变分级模拟。接着对模型进行网格划分，为提高计算速度并减少畸形单元，针对较薄的辐射贴片进行较细化网格划分，对天线剩余部分和铝板采用常规自由四面体网格划分。最后添加稳态研究进行力学场计算。

表 4.2 材料力学参数

材料	密度 (kg/m^3)	泊松比	杨氏模量 (Pa)
Copper	8960	0.35	110E9
FR4	1900	0.15	22E9
Aluminum	2700	0.33	70E9

力学场计算完成后，利用变形构型模块手动进行网格重新剖分，并将网格导出并重新导入 COMSOL 中，进行电磁场计算天线的谐振频率。首先在重新导入的模型中删除铝板的三维模型。然后，创建一个内部半径为两倍天线长度、厚度为 $1/2$ 波长的空心球体。内部球体作为空气域，用于模拟空气或真空环境，外部球壳体设置为完美匹配层 (PML)，PML 是一种吸收边界条件，用于模拟无限远处的边界，从而有效地防止仿真中的反射波。同时在芯片空槽处施加集总端口激励，特征阻抗为 $27.4\Omega + 200.9i\Omega$ 。随后，使用 COMSOL 材料库为模型赋予材料的电磁参数，主要包括介电常数、磁导率和电导率等，材料的电学参数如下表所示。接着，添加电磁场频域模块，将空气域设为远场域，将贴片天线和接地板设为理想电导体，并对模型网格进行划分。最后，添加频域研究进行电磁场计算，谐振频率扫频范围为 $905\text{MHz} - 915\text{MHz}$ ，扫频步长为 0.01MHz 。

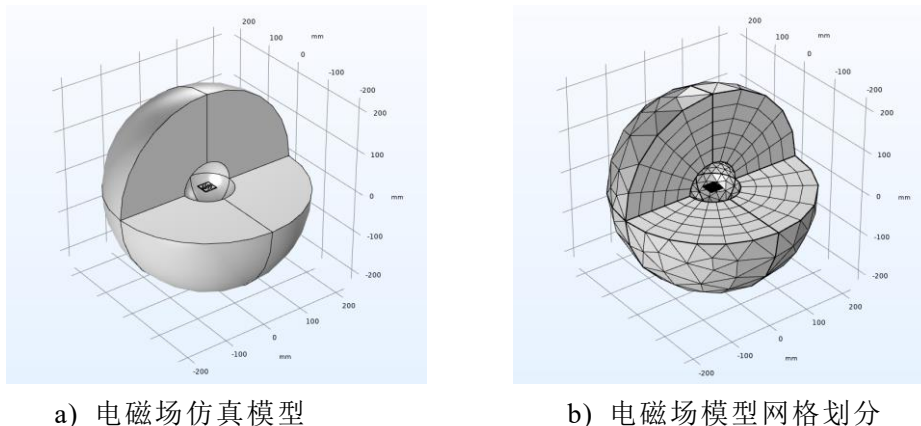


图 4.14 COMSOL 电磁场仿真

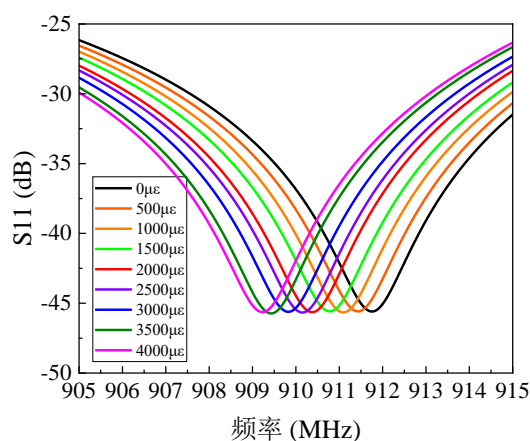


图 4.15 RFID 应变传感器不同应变等级下的 S11 曲线

如图 4.15 为电磁场计算后得到的天线 S11 回波损耗曲线，可以看到，随着应变的增加，S11 曲线呈现向左偏移的规律，由于扫频步长足够小，故将 S11 曲线最低点作为天线的谐振频率点，得到的 RFID 应变传感器不同应变等级下的谐振频率如表 4.3 所示。

表 4.3 RFID 应变传感器不同应变等级下的谐振频率

应变 ($\mu\epsilon$)	0	500	1000	1500	2000
谐振频率 (MHz)	911.76	911.44	911.1	910.78	910.38
应变 ($\mu\epsilon$)	2500	3000	3500	4000	-
谐振频率 (MHz)	910.15	909.83	909.43	909.23	-

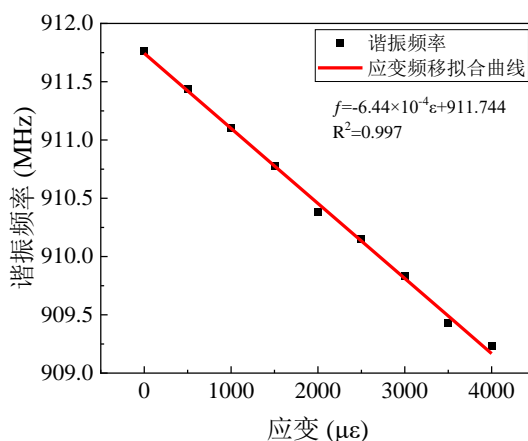


图 4.16 RFID 应变传感器谐振频率与应变拟合结果

图 4.16 为 RFID 应变传感器谐振频率 f 与应变 ϵ 的拟合结果，得到的拟合曲线表达式为： $f = -6.44 \times 10^{-4} \epsilon + 911.744$ ， R^2 为 0.997，由此可以看到天线的谐振频移量能较为线性的表征应变的变化。拟合直线的斜率为传感器的应变灵敏度，灵敏度为 $644\text{Hz}/\epsilon$ 。

4.4 无源无线应变传感器实验

本节对尺寸参数优化后的 RFID 应变传感器进行实物制作，并设计不同的加载实验来评估 RFID 应变传感器的实际工作性能，如图 4.17 为 RFID 应变传感器天线实物图。

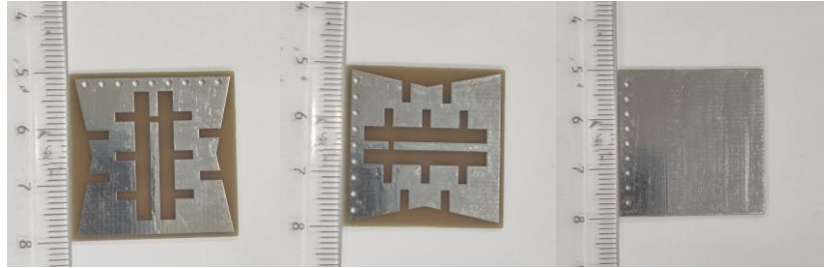


图 4.17 RFID 应变传感器天线实物图

基于 2.4 节中无源无线应变传感器测量原理，可以通过采集 RFID 应变传感器的阈值发射功率曲线或阈值反射功率曲线来确定天线的谐振频率。为了实现阈值功率曲线的采集，采用 Voyantic 公司的 Tagformance Pro 标签性能测试系统来进行读取。Tagformance Pro 标签性能测试系统集成了 UHF 和 HF 两个频段的标签性能测试。其中阈值测试功能可以测量标签在不同工作频率下的激活灵敏度、激活电场强度和反向散射功率等特性。图 4.19 为配套的 Tagformance 软件界面，用户可根据测试需求选择所需的协议及命令，设置测试所需的起止频率、频率步进及功率步进参数等功能。



图 4.18 Tagformance Pro 标签性能测试系统

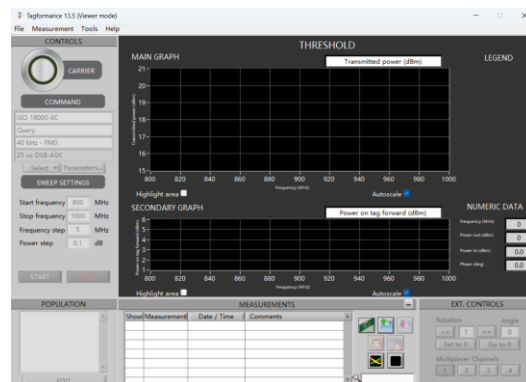


图 4.19 Tagformance 软件界面

4.4.1 铝合金板拉伸试验

本章通过铝合金板不同的加载试验对所设计的无线无源 RFID 应变传感器性能进行验证，铝合金板的长和宽为 1000mm×100mm，厚度为 3mm，材料为铝合金 6061。分别进行拉伸试验、简支试验和悬臂梁实验评估传感器在铝合金表面的传感性能。



图 4.20 RFID 应变传感器和应变片粘贴方式

实验开始前，如图 4.20 所示，将 RFID 应变传感器和电阻应变片 BFH120-3AA-R-P500 沿铝合金板中轴对称粘贴，以确保两者应变一致。如图 4.21 为铝合金板拉伸实验布置图，在拉伸实验中，RFID 应变传感器和电阻应变片粘贴在铝合金板中间，其中电阻应变片与 TDS-530 应变采集箱有线连接，并将采集到的数据传输给与应变采集箱相连的应用软件系统。阅读器天线放置在 RFID 应变传感器侧面约 15cm 的位置，天线末端通过电缆线连接阅读器主机，将测试信号传输至应用软件系统，通过 Tagformance 软件对数据进行储存和处理。

实验采用的拉伸机是济南方领生产的 GHAW-1000D 拉压试验机，通过移动夹具使得铝合金板发生变形产生应变。实验采用力控制加载方式，每次加载 10kN，共进行 7 次加载，每次加载持荷 3 分钟，待加载稳定后记录应变采集箱采集的应变数据，同时使用阅读器对 RFID 应变传感器进行扫频，读取每个频点对应的阈值反射功率。

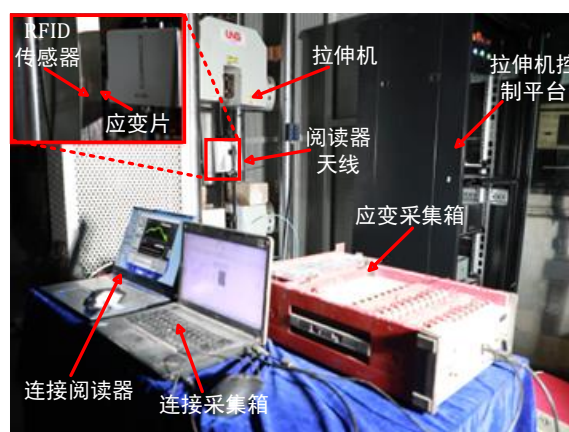


图 4.21 铝合金板拉伸实验布置图

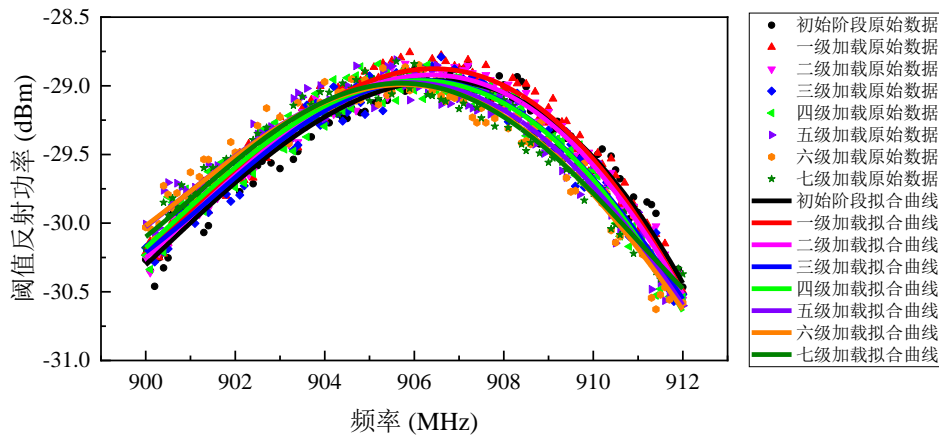


图 4.22 拉伸实验阅读器采集的阈值反射功率曲线

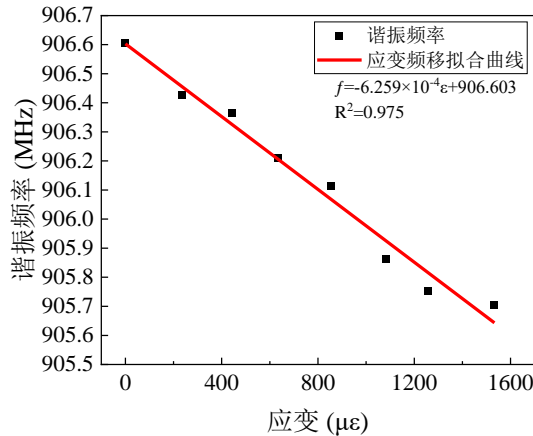


图 4.23 拉伸实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果

不同加载等级下采集到的阈值反射功率点如图 4.22 所示，由无源无线应变传感器测量原理可知天线的谐振频率为阈值反射功率曲线的最大值。故对采集到 900MHz-912MHz 范围内的阈值反射功率点进行四次多项式拟合，通过拟合曲线的最大值确定天线的谐振频率。

将不同加载等级下拟合得到的谐振频率与记录的应变采集箱采集的应变数据进行线性拟合。图 4.23 为拉伸实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果，线性拟合得到的拟合曲线为 $f = -6.259 \times 10^{-4} \epsilon + 906.603$ ， R^2 为 0.975，传感器应变灵敏度为 626Hz/ ϵ ，由此可以看到 RFID 应变传感器的谐振频率偏移量与应变具有良好的线性关系。

4.4.2 铝合金板简支试验

本节通过铝合金板简支实验来验证无线无源 RFID 应变传感器性能。如图 4.24 为铝合金板简支实验布置图。实验所用的 6061 铝合金板的长 1000mm、宽 100mm，厚 3mm。在实验中，铝合金板两边距离板端 15cm 用重物压住固定，在铝合金板中间位置每次加载 5kg 砝码，共加载 30kg，每次持荷 3 分钟，待加载稳定后记录应变采集箱对应应变数据，同时使用阅读器对 RFID 应变传感器进行扫频。

在简支实验中，RFID 应变传感器和电阻应变片在铝合金板中间两侧对称粘

贴，其中电阻应变片与 TMR-311 应变采集箱有线连接，并将采集到的数据传输给与应变采集箱相连的应用软件系统。阅读器天线放置在 RFID 应变传感器侧面约 10cm 的位置，通过电缆线将测试信号传输至应用软件系统。



图 4.24 铝合金板简支实验布置图

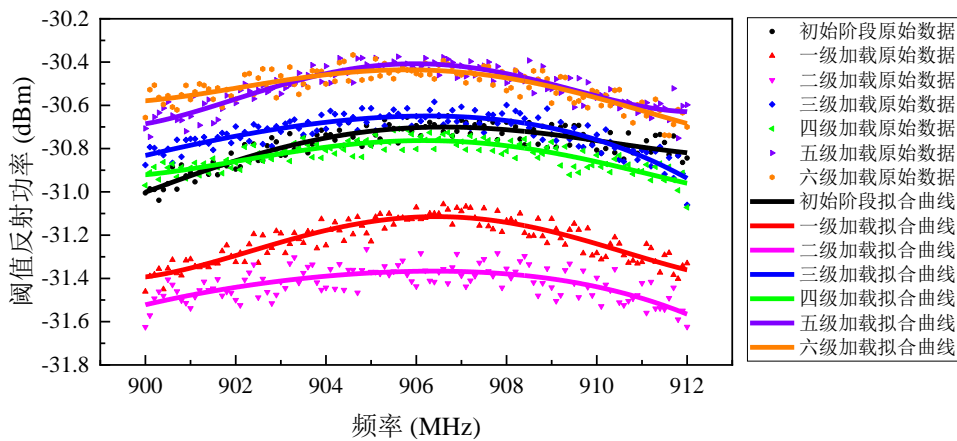


图 4.25 简支实验阅读器采集的阈值反射功率曲线

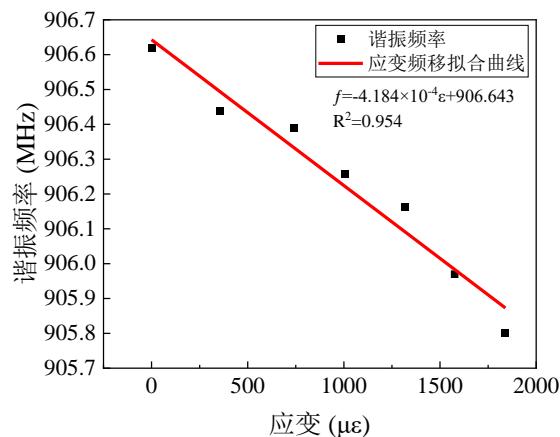


图 4.26 简支实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果

不同加载等级下采集到的阈值反射功率点如图 4.25 所示，对采集到 900MHz-912MHz 范围内的阈值反射功率点进行四次多项式拟合，通过拟合曲线的最大值确定天线的谐振频率。可以看到随着砝码的加载，阈值反射功率曲线出现偏移，这一现象主要是由于天线向下移动所导致的。而加载的砝码是金属，对信号造成的干扰，从而导致测量的信号强度降低。

将不同加载等级下拟合得到的谐振频率与记录的应变采集箱采集的应变数据进行线性拟合。图 4.26 为简支实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果，线性拟合得到的拟合曲线为 $f=-4.184\times 10^{-4}\varepsilon+906.643$ ， R^2 为 0.954，传感器应变灵敏度为 418Hz/ ε ，二者线性度较好。由此可以看到 RFID 应变传感器在简支实验中具有良好的传感性能。

4.4.3 铝合金板悬臂试验

本节通过铝合金板悬臂实验来验证无线无源 RFID 应变传感器性能。实验所用的 6061 铝合金板与之前一致。在实验中，将铝合金板板端 25cm 用两个 C 型夹夹紧固定，在距板端 5mm 的位置沿中轴对称粘贴了 RFID 应变传感器和电阻应变片，其中电阻应变片与 TMR-311 应变采集箱有线连接，阅读器天线放置在 RFID 应变传感器侧面约 10cm 的位置，应变采集箱和阅读器分别连接对应的应用软件系统，以传输和记录采集到的数据。

在悬臂实验中，每次加载约 480 克的重物，每次持荷 3 分钟，待每次加载稳定后记录应变采集箱对应应变数据，同时使用阅读器对 RFID 应变传感器进行扫描，读取频点对应的阈值反射功率，整个实验共进行 6 次加载。

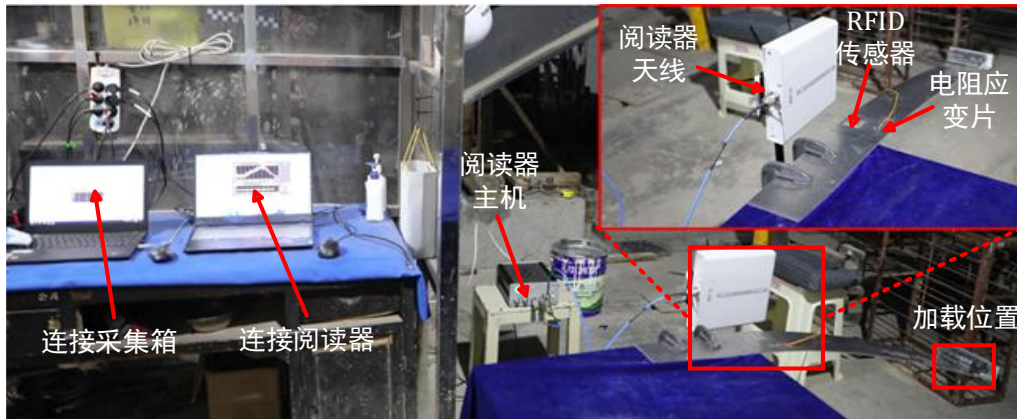


图 4.27 铝合金板悬臂实验布置图

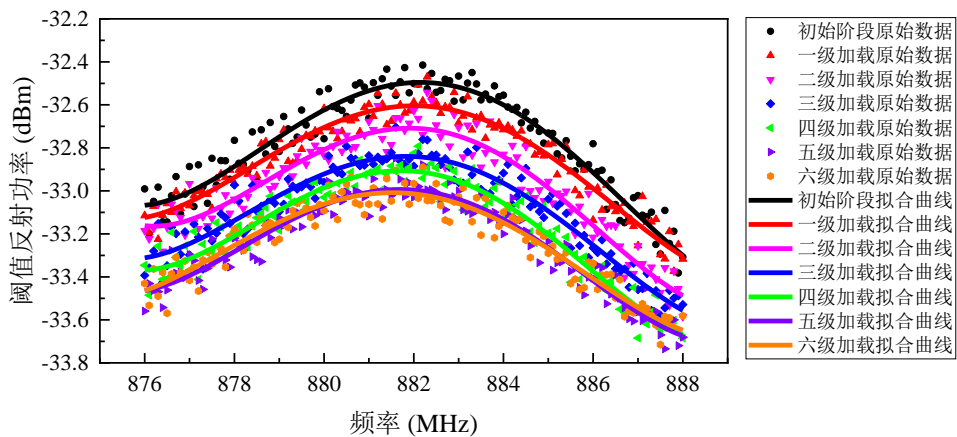


图 4.28 悬臂实验阅读器采集的阈值反射功率曲线

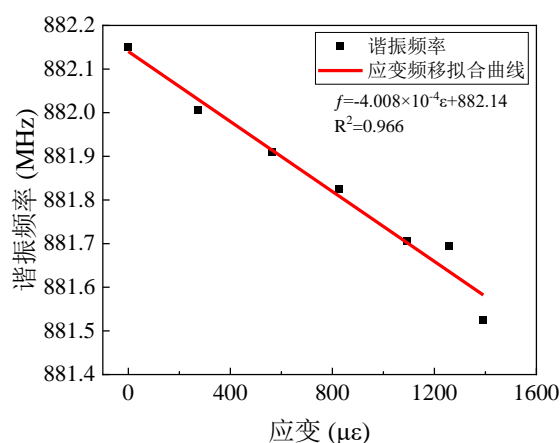


图 4.29 悬臂实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果

不同加载等级下采集到的阈值反射功率点如图 4.28 所示,对采集到 876MHz-88MHz 范围内的阈值反射功率点进行四次多项式拟合,并用最大值确定谐振频率。可以看到随着砝码的加载,阈值反射功率曲线出现向下偏移,这一现象主要是由于天线向下移动所导致的。而加载砝码端较远,故对信号干扰小。

将不同加载等级下拟合得到的谐振频率与记录的应变采集箱采集的应变数据进行线性拟合。图 4.29 为悬臂实验 RFID 应变传感器谐振频率-应变关系拟合结果,线性拟合得到的拟合曲线为 $f=-4.008 \times 10^{-4}\epsilon+882.14$, R^2 为 0.966,传感器应变灵敏度为 401Hz/ ϵ 。可以看到 RFID 应变传感器在悬臂实验中具有较好的线性度,表明 RFID 应变传感器在悬臂条件下仍然具有良好的传感性能。

通过铝合金板拉伸实验、简支实验和悬臂实验,对设计的无线无源 RFID 应变传感器在不同加载条件下的性能进行了测试,实验结果均表明传感器的谐振频率频移与应变之间存在良好的线性关系,从而可以通过无线测量谐振频率来反推应变的情况。然而,实验中测量得到的拟合曲线并不完全一致,这主要由于多种因素导致。首先天线的制造存在工艺的误差,芯片的焊接采用人工手焊导致误差较大,其次应变片的粘贴和重物加载也存在人为误差,导致无线无源 RFID 应变传感器和电阻应变片粘贴处的应变不一致。故在未来应用中时,需要优化生产流程,采用机器制造和自动化焊接技术来减少人为手工制造过程和焊接过程中的误差,同时对不同批次的 RFID 应变传感器的应变-谐振频移灵敏度进行标定,并在粘贴时采用专业的金属胶水进行粘贴,以确保其在实际应用中性能的稳定性和可靠性。

4.5 本章小结

本章基于 RFID 标签本身具有集感知与通讯一体的特性,利用标签天线的应变与其谐振频率频移量存在线性关系,而谐振频率与阈值反射功率存在对应关系,因此可以通过阅读器无线采集阈值反射功率来间接测量谐振频率,从而推断结构的应变状态。

(1) 基于微带天线设计理论, 将天线设计为微带天线结构, 来实现抗金属设计; 通过开短路过孔、蝶形结构和开矩形槽等小型化方法来对天线进行小型化设计。利用 HFSS 软件对天线关键参数进行仿真分析, 优化天线尺寸参数使得天线在谐振点 915MHz 实现与芯片阻抗 $27.4\Omega-200.9i\Omega$ 的共轭匹配。

(2) 利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对设计的 RFID 应变传感器进行力-磁耦合仿真。通过将力学场计算后的模型利用变形构型模块进行手动重新剖分网格, 并重新导入 COMSOL 中进行电磁场计算的方法, 有效提高了计算效率。仿真结果得到的 RFID 应变传感器谐振频率 f 与应变 ε 的线性相关系数 R^2 为 0.997, 表明天线的谐振频率偏移量与应变具有良好的线性关系。

(3) 通过铝合金板拉伸实验、简支实验和悬臂实验, 对设计的无线无源 RFID 应变传感器在不同加载条件下的性能进行了测试。通过 Tagformance Pro 标签性能测试系统无线读取天线阈值反射功率, 并进行四次多项式拟合, 通过拟合曲线的最大值确定天线的谐振频率。得到的线性相关系数 R^2 分别为 0.975、0.954 和 0.966, 结果表明 RFID 应变传感器在不同加载条件下具有较好的线性度。

第5章 RFID 组合式贴片天线位移传感器设计与研究

5.1 引言

第四章中研究设计的传感器采用了单片式微带贴片天线作为主要感知元件，其特点在于通过天线自身的形变引起辐射贴片尺寸的变化，从而导致谐振频率的变化，以实现对接结构变形的监测。但单片式微带贴片天线进行变形测量时，存在应变传递效率损耗和粘贴强度不足的问题。采用组合式贴片天线，通过附加贴片的移动改变辐射贴片的有效电长度从而改变谐振频率，来实现对接结构变形的测量，由于天线本身不受力，从而有效解决了单片式微带贴片天线存在的问题。本章从第二种技术方案出发，基于 2.5 节中提出的组合式贴片天线传感原理，对微带贴片天线进行多频化设计，使得组合式贴片天线传感器具有两个谐振频率。当外接贴片移动时只影响其中一个谐振频率，从而实现对接结构变形的两个方向或者结构温度与变形的同时监测。为结构健康监测提供了更多的信息源，更具有实用性。通过 Ansys HFSS 电磁仿真软件对 RFID 组合式贴片天线位移传感器进行建模设计研究，优化传感器尺寸参数并对传感器传感性能进行模拟，最后进行实验测试，评估 RFID 组合式贴片天线位移传感器的传感性能。

5.2 单片多模法组合式贴片天线位移传感器设计

5.2.1 单片多模法组合式贴片天线位移传感器仿真

组合式贴片天线传感器概念的提出，最初旨在用于结构位移和裂缝监测^[68-69]。组合式贴片天线传感器通常由主贴片天线和外接贴片构成，并分别固定在结构两端，结构变形导致两贴片重合长度发生变化，从而导致等效辐射贴片长度发生变化导致谐振频率变化。在此基础上，Li^[96-97]提出新型基于偏心馈电组合式贴片天线，使得天线结构具有多频特征，利用外接贴片的移动只改变单个谐振频率来实现结构形变和温度同步感知。

单片多模法是将多个天线模式整合到单个天线结构中的多频设计方法，偏心馈电属于单片多模法的一种，在矩形微带贴片天线中，通过调整馈电的位置，可以激发天线 TM_{01} 和 TM_{10} 谐振模式，从而得到双频特征^[98]。对于矩形贴片天线来说，其谐振频率通常与其长度和宽度有关，近似公式如 (5.1) 所示：

$$f_{mn} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_e}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2} \quad (5.1)$$

式中， f_{mn} 为天线谐振频率， ϵ_r 为介质基板相对介电常数， m 和 n 为矩形天线长度和宽度方向上的谐振模式阶数， L 为贴片天线长度， W 为贴片天线宽度。

根据公式 (5.1) 可以得到，当仅改变矩形贴片天线的长度时可以只影响长度方向上对应的谐振频率。然而，天线谐振频率除了贴片尺寸的影响外，还受到温度等因素的影响，温度变化可以影响介质基板的相对介电常数，从而影响天线的两个谐振频率。因此，可以通过对温度对天线两个谐振频率的影响进行标定，利用宽度方向上谐振频率的漂移量来测量温度，并对长度方向的谐振频率进行温度修正得到准确的谐振频率漂移量，从而实现了对结构变形和温度的同步测量。

除改变天线馈电点位置外，通过改变天线的尺寸、形状或结构，激发天线不同的谐振模式，也可以在单贴片上实现多频的工作特征。基于此原理，设计了一种新型基于单片多模法组合式贴片天线位移传感器。天线采用中心馈电方式，采用常见廉价的 FR4 作为介质基板，基板厚度为 1mm，天线长度方向一阶谐振频率为 2.4G，根据矩形微带贴片天线经验公式 (2.8) 至公式 (2.12)，可以计算得到天线辐射贴片初始尺寸 $W=38\text{mm}$ ， $L=30\text{mm}$ 。

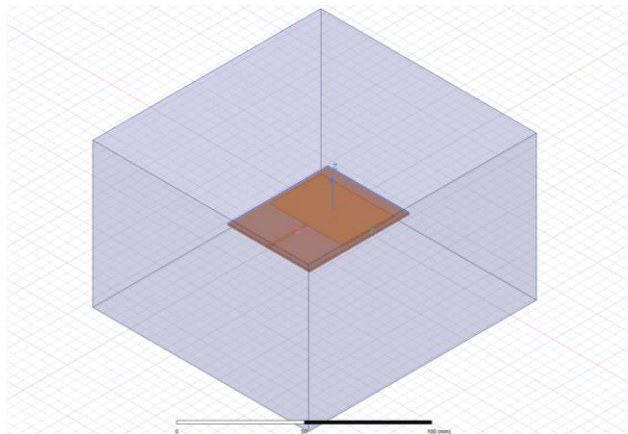


图 5.1 中心馈电矩形微带天线模型

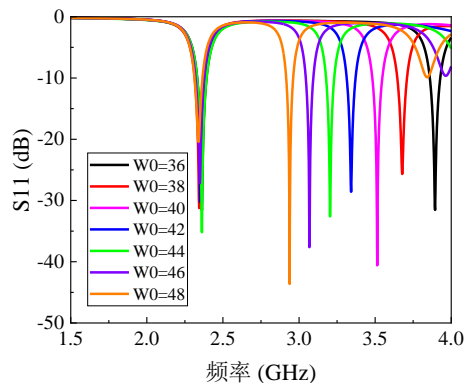


图 5.2 不同宽度下中心馈电矩形微带天线 S11 曲线

在 Ansys HFSS 软件中对中心馈电矩形微带天线进行建模，模型如图 5.1 所示。微带天线被包含在一个比天线尺寸大四分之一波长的空气盒子中，其中空气盒子设置为辐射边界条件，辐射贴片和接地板设置为理想电导体边界条件，采用集总端口 50Ω 馈电。当天线宽度从 36mm 增加至 48mm 时，不同宽度下中心馈电

矩形微带天线 S11 曲线如图 5.2 所示，可以发现天线在宽度方向上激发了二阶谐振模式，且随着天线宽度的增加，第一个谐振频率基本不变，第二个谐振频率向低频移动，且当天线宽度进一步增加时，会出现第三个谐振点，第三个谐振点会对第二个谐振点的测量造成干扰，故需要控制天线宽度的范围。

在此模型上建立组合式贴片天线位移传感器模型，组合式贴片天线位移传感器结构示意图如图 5.3 所示，其中 L_0 为主贴片天线上辐射贴片的长度， W_0 为主贴片天线上辐射贴片的宽度， L_1 为馈电线长度， L_2 为上辐射贴片距边缘的长度，附加贴片辐射贴片宽度与主贴片天线上辐射贴片的宽度一致， L_B 为附加贴片辐射贴片长度。

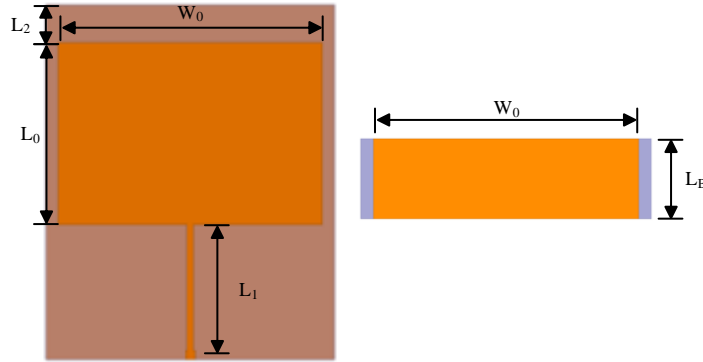


图 5.3 单片多模态组合式贴片天线位移传感器结构示意图

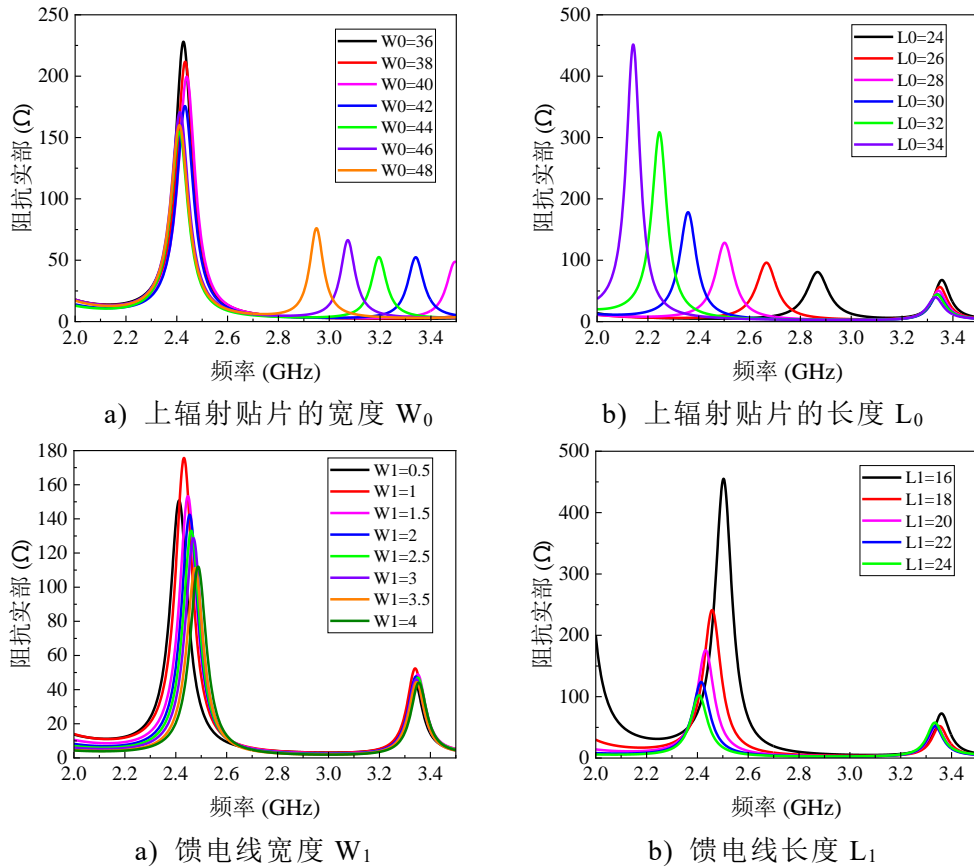


图 5.4 组合式贴片天线主要参数对天线阻抗实部的影响

图 5.4 为组合式贴片天线主要参数对天线阻抗实部的影响，通过调节 W_0 和

L_0 使得天线阻抗实部 50Ω 附近, 再调节 W_1 和 L_1 使得天线在 2.4G 和 3.3G 左右处达到阻抗匹配。优化后的天线尺寸参数如表 5.1 所示, 此时得到的贴片天线位移传感器的 S11 曲线如图 5.5 所示。

表 5.1 单片多模法组合式贴片天线位移传感器尺寸参数 (单位: mm)

参数	W_0	L_0	L_1	L_2	L_B	W_1
值	42	29	20	6	15	1

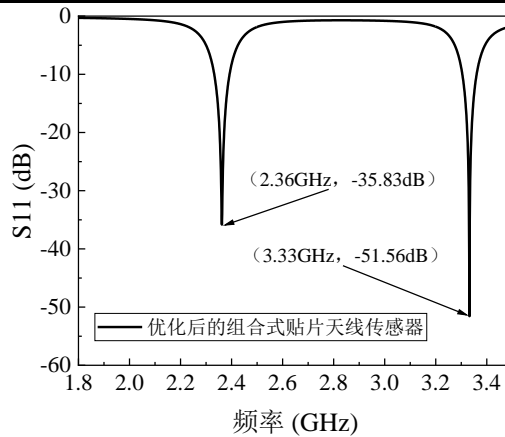


图 5.5 单片多模法组合式贴片天线位移传感器 S11 曲线

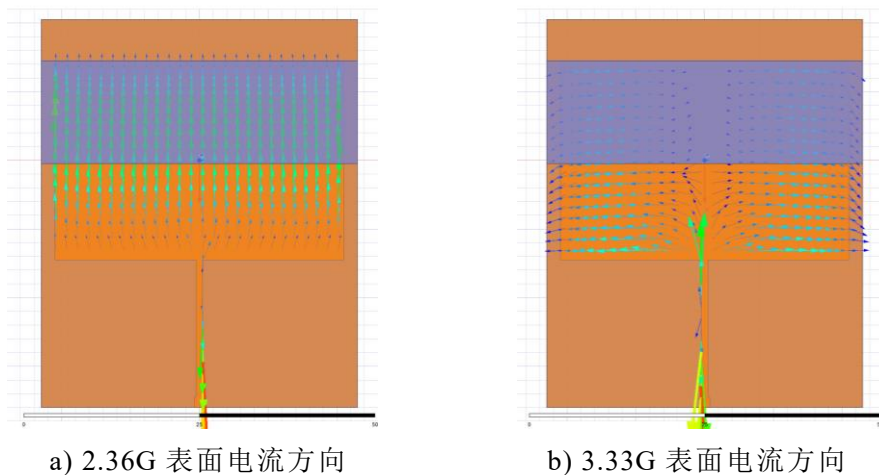


图 5.6 中心馈电式组合式贴片天线传感器表面电流方向图

图 5.6 为中心馈电式组合式贴片天线传感器表面电流方向图, 可以看到在 2.36G 时, 天线传感器辐射天线上的电流均沿长度方向流动, 这是因为在 2.36G 时激发了一阶长度方向的谐振频率。3.33GHz 时, 天线传感器辐射天线上的电流沿着宽度方向流动, 这是由于此时激发了二阶宽度方向的谐振频率。

利用 HFSS 软件对单片多模法组合式贴片天线位移传感器进行结构变形研究, 通过移动附加贴片改变附加贴片与上辐射贴片的重合长度来进行仿真模拟。变形仿真示意图如图 5.7 所示。在仿真中, 辐射贴片的初始位置与上辐射贴片的边缘重合, 移动附加贴片天线从 0mm 至 5mm, 移动步长为 0.5mm, 天线扫频范围为 1.8G-3.5G, 扫频步长为 0.001GHz。

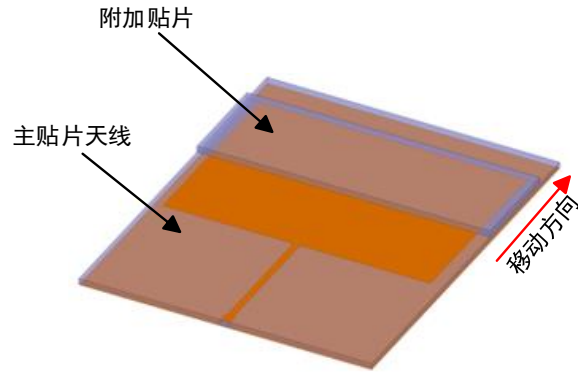


图 5.7 中心馈电式组合式贴片天线传感器结构变形仿真示意图

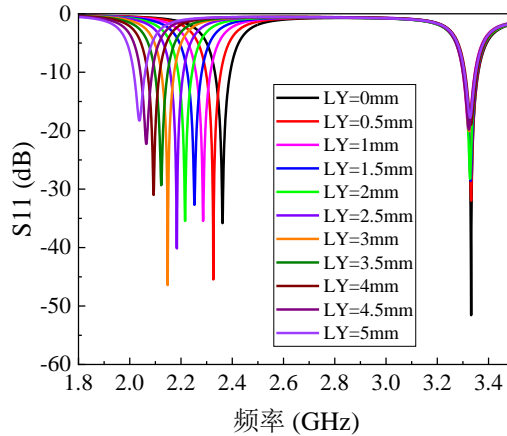


图 5.8 不同位移的中心馈电式组合式贴片天线传感器 S11 曲线

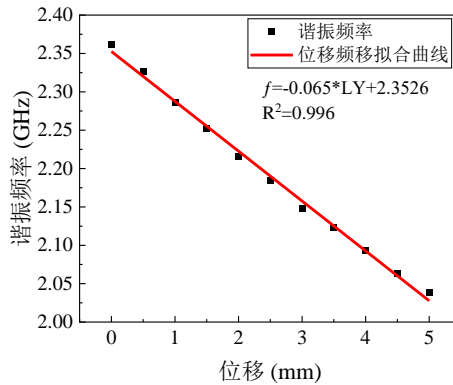


图 5.9 中心馈电式组合式贴片天线传感器谐振频率与位移拟合曲线

图 5.8 展示了不同位移的中心馈电式组合式贴片天线传感器 S11 曲线。天线最低点对应的频率点为天线的谐振频率，可以看到，天线传感器具有两个谐振频率，随着附加贴片的不断移动，天线传感器对应的长度方向的一阶谐振频率向左偏移，而对应的宽度方向上的二阶频率保持不变。将组合式贴片天线的一阶谐振频率与位移进行线性拟合，如图 5.9 所示，得到的拟合曲线为 $f = -0.065 \times LY + 2.3526$ ， $R^2 = 0.996$ ，位移传感器的一阶谐振频率频移量与位移具有良好的线性关系，且附加贴片位移 0.1mm 时，天线的一阶谐振频率向左偏移 6.5MHz。利用位移时宽度方向上的二阶频率保持不变，可以用其来监测温度变化，并修正温度对长度方向的一阶谐振频率的影响，从而实现温度与变形的同步监测。

5.2.2 单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验

将优化后的单片多模法组合式贴片天线位移传感器进行加工制作，得到主贴片天线和附加贴片实物如图 5.10 所示。本节将对天线实物进行试验研究，探究天线传感器的实际传感性能。

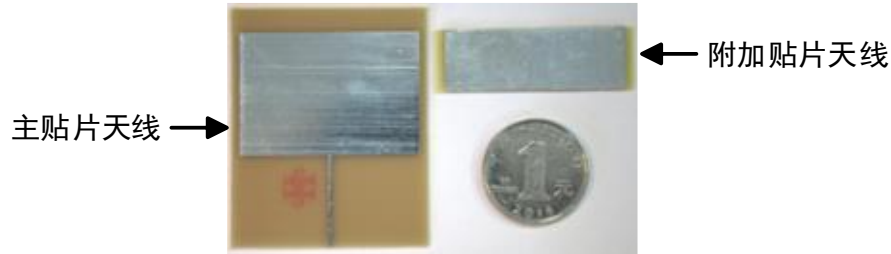


图 5.10 单片多模法组合式贴片天线位移传感器实物图

如图 5.11 为单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验布置图，天线传感器焊接 SMA 接口，并通过同轴线与 Keysight E5063A 台式矢量网络分析仪相连。该矢量网络分析仪的扫频范围为 100KHz-18GHz，最多可扫频 1601 个频点。主贴片天线与附加贴片分别与水平位移滑台（固定）和水平位移滑台（可移动）连接，并用夹具将主贴片天线与附加贴片夹紧，以确保两者的辐射贴片保持良好接触。

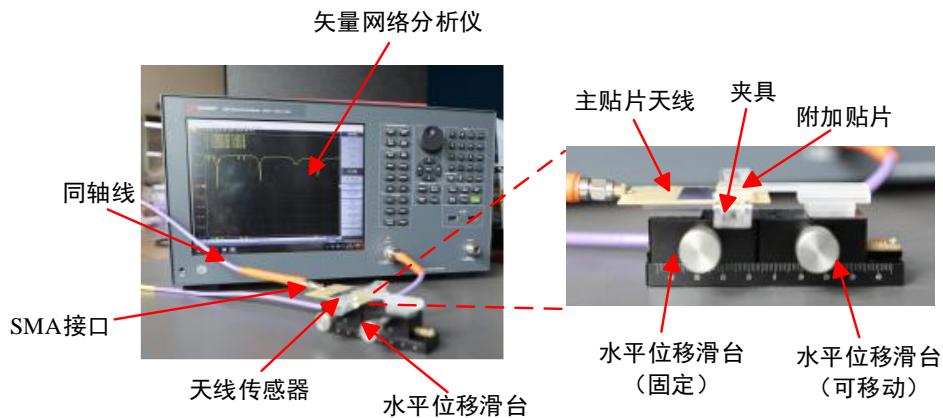


图 5.11 单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验布置图

试验中，通过转动手轮使水平位移滑台向右移动，从而带动附加贴片向右移动来模拟结构发生变形。矢量网络分析仪的扫频范围为 1.8G-3.5G，共扫描 1601 个频点。试验在恒定温度下进行，每次转动手轮使滑台移动 0.2mm，共移动 5mm。并读取每次移动后天线传感器的 S11 曲线。

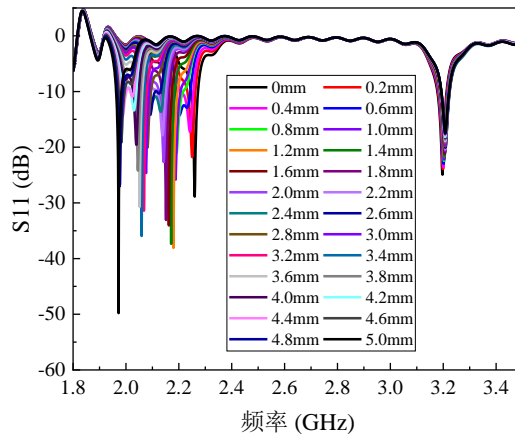


图 5.12 单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验 S11 曲线

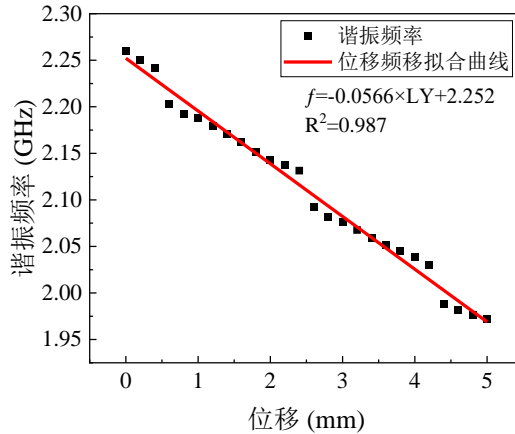


图 5.13 单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验位移频移拟合曲线

图 5.12 展示了单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验中的 S11 曲线。观察到随着附加贴片的移动，天线传感器的重叠长度减少，导致天线的有效辐射长度增加。进而导致了天线传感器长度方向上的一阶谐振频率向左偏移，而宽度方向则没有变化，因此对应的宽度方向上的二阶频率保持不变。图 5.13 呈现了单片多模法组合式贴片天线位移传感器试验中长度方向上的一阶谐振频率偏移量与位移增加之间的对应关系。观察到两者之间的关系可由线性拟合直线 $f = -0.0566 \times LY + 2.252$ 表示，其中 $R^2 = 0.987$ ，表明具有良好的线性关系。此外，当结构每发生 0.1mm 变形时，天线传感器长度方向上的一阶谐振频率偏移 5.66MHz，具有较高的灵敏度。

5.3 多枝节法组合式贴片天线位移传感器设计

5.3.1 多枝节法组合式贴片天线位移传感器仿真

单片多模天线通常采用单一的贴片构成，其结构相对简洁，易于进行理论分析和优化，从而减少了设计和调试的复杂性。然而，由于天线结构的简化，单片多模天线的设计灵活性相对较低，无法应对复杂的设计需求。相比之下，多枝节天线采用分支结构，可以根据需要对枝节的尺寸和位置进行灵活调整，从而实现

对多个频段的覆盖。这种设计灵活性使得多枝节天线在应对多样化和复杂化的设计需求时更具优势。

本节基于多枝节法组合式贴片天线位移传感器结构示意图如图 5.14 所示，天线介质基板采用廉价常见的 FR4 材料，其相对介电常数为 4.4，采用 1/4 波长单极子天线设计理念，使得天线工作在 3GHz 和 4GHz 频点附近，可根据公式 (5.2) 确定枝节长度范围。

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon}} \quad (5.2)$$

当对应频率的电磁波在自由空间中传播时，此时介电常数 $\varepsilon=1$ ，可计算得到天线在 3GHz 和 4GHz 对应的波长分别为 100mm 和 75mm，对应 1/4 波长为 25mm 和 18.75mm，而当电磁波在全部填充 FR4 介质中传播时，3GHz 和 4GHz 对应的波长分别为 47.67mm 和 35.75mm，对应 1/4 波长为 11.92mm 和 8.94mm。而实际电磁波是在介于自由空间和 FR4 介质之间传播，故 3GHz 和 4GHz 对应的枝节长度也介于两者之间。考虑到天线小型化及需要外加附加贴片，对低频枝节进行弯折设计，及 3GHz 对应的枝节长度为 $L_1+L_2+L_3$ ，4GHz 对应的枝节长度为 L_4 。

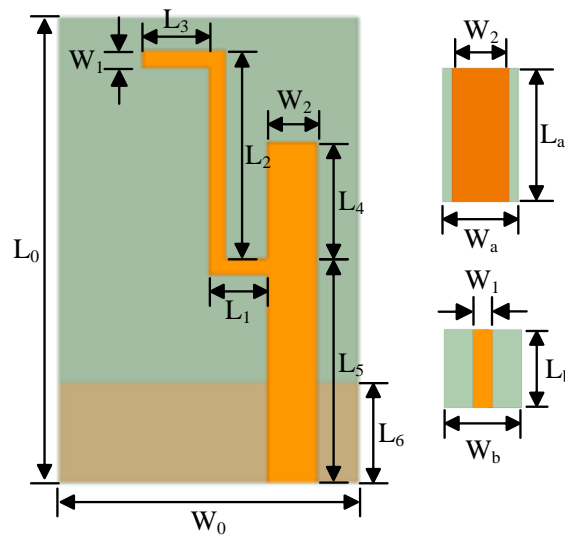


图 5.14 多枝节法组合式贴片天线位移传感器结构示意图

在 Ansys HFSS 软件中对天线传感器进行建模，天线采用 50Ω 集总端口馈电，辐射贴片和接地板设置为理想电导体边界条件。天线的仿真过程及仿真过程的 S11 曲线如图 5.15 和图 5.16 所示，高频枝节的加入使得天线在 4.25G 处产生了新的谐振点，且附加贴片也会对天线阻抗产生影响。在仿真时发现过大的附加介质基板边缘宽度对天线传感器性能会产生较大影响，故应控制边缘宽度在合理范围内。通过调节枝节的尺寸和位置参数，得到天线的最终尺寸参数如表 5.2 所示。

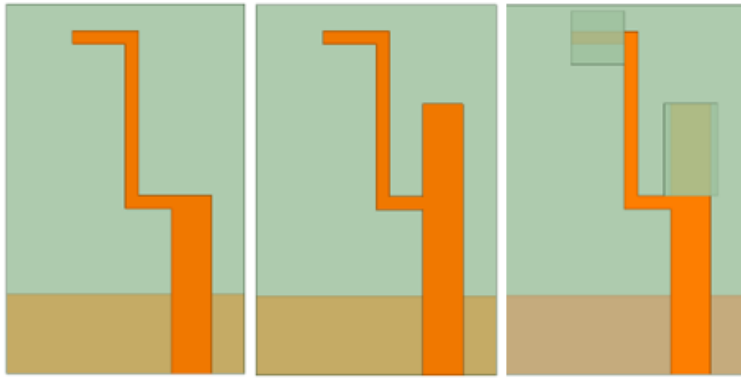


图 5.15 天线传感器仿真过程

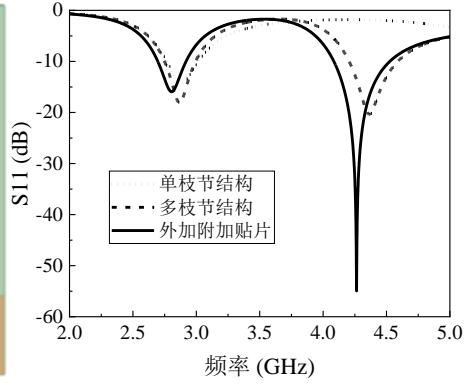
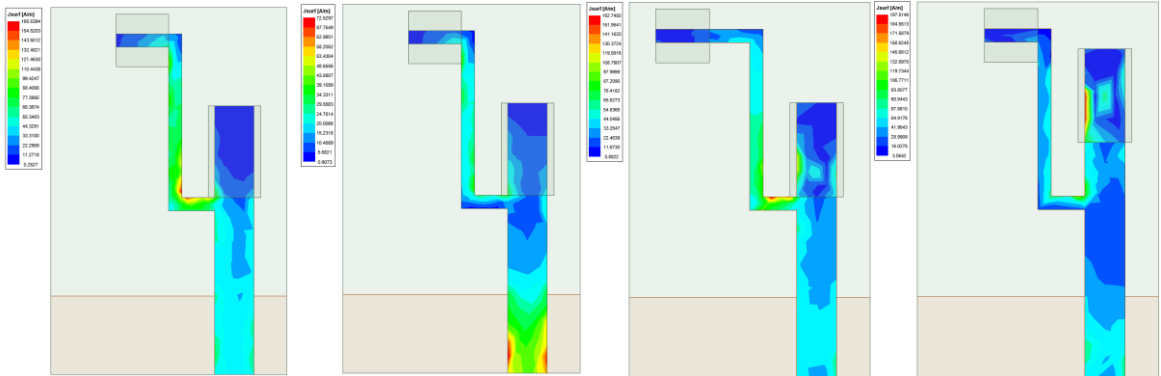


图 5.16 仿真过程 S11 曲线

表 5.2 多枝节法组合式贴片天线位移传感器尺寸参数 (单位: mm)

参数	L_0	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
值	28	3.5	12.5	7	7	13.5	6
参数	L_a	L_b	W_0	W_1	W_2	W_a	W_b
值	7	4	18	1	3	4	4



a) 2.8G 表面电流分布 b) 4.25G 表面电流分布 c) 低频附加贴片移动 d) 高频附加贴片移动

图 5.17 多枝节法组合式贴片天线传感器表面电流分布图

图 5.17 为多枝节法组合式贴片天线传感器表面电流分布图,其可以直观的反映天线的谐振模式。在 2.8G 及低频附加贴片移动时,天线传感器的表面电流集中在左边低频枝节处,且最大电流强度位于低频枝节弯折处;在 4.25G 及高频附加贴片移动时,天线传感器的表面电流集中在馈线前半部分及高频枝节处。符合低频谐振频率发生在较长的枝节处,高频谐振频率发生在短枝节处。

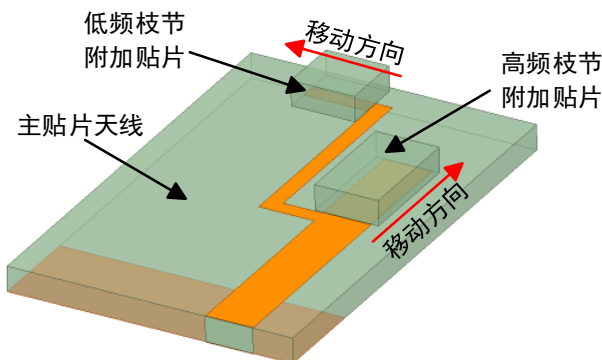
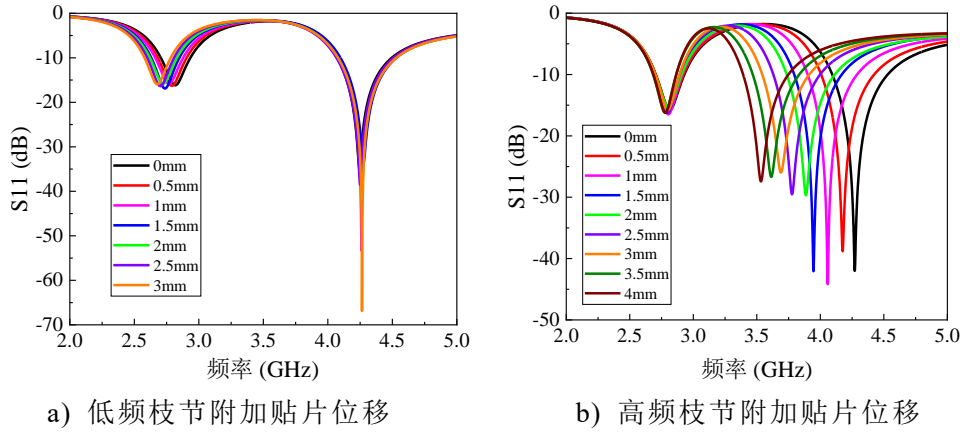


图 5.18 多枝节法组合式贴片天线传感器结构变形仿真示意图

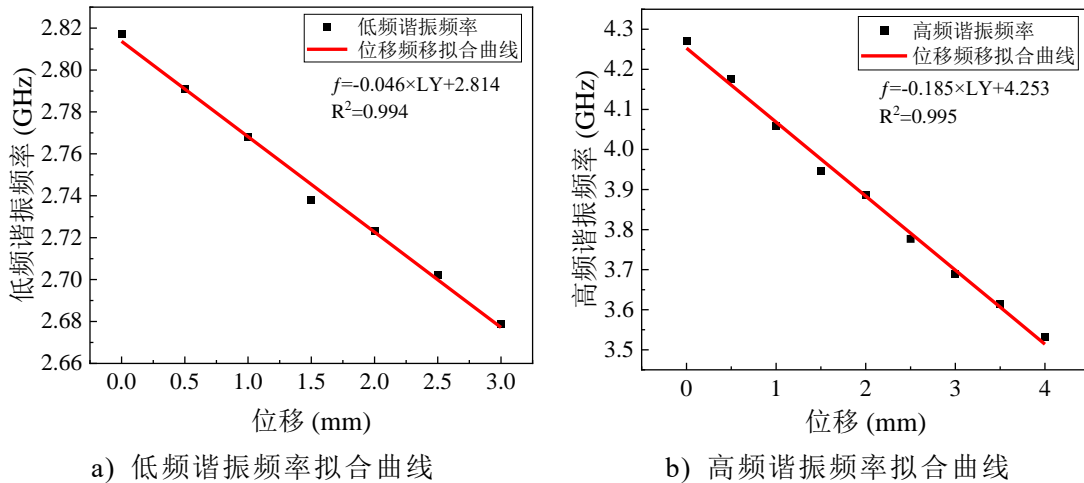
利用 HFSS 软件对多枝节法组合式贴片天线位移传感器进行结构变形研究，通过移动附加贴片改变其与枝节辐射贴片的重合长度来进行仿真模拟。在仿真中，附加辐射贴片的初始位置与对应枝节辐射贴片的边缘重合。移动高频枝节附加贴片从 0mm 至 4mm，移动步长为 0.5mm，移动低频枝节附加贴片从 0mm 至 3mm，移动步长为 0.5mm，扫频范围为 2G-5G，扫频步长为 0.001GHz。



a) 低频枝节附加贴片位移

b) 高频枝节附加贴片位移

图 5.19 不同位移下的多枝节法组合式贴片天线传感器 S11 曲线



a) 低频谐振频率拟合曲线

b) 高频谐振频率拟合曲线

图 5.20 多枝节组合式贴片天线传感器谐振频率与位移拟合曲线

图 5.19 展示了不同位移下的多枝节法组合式贴片天线传感器 S11 曲线。天线最低点对应的频率点为天线的谐振频率，可以看到，天线传感器具有两个谐振频率，随着附加贴片的不断移动，天线传感器对应枝节的谐振频率向左偏移，而另一个则不受影响。如图 5.20 所示，仿真得到的低频谐振频率拟合曲线为 $f = -0.046 \times LY + 2.814$, $R^2 = 0.994$; 得到的高频谐振频率拟合曲线为 $f = -0.185 \times LY + 4.253$, $R^2 = 0.995$, 两者的谐振频率偏移量均和位移之间有良好的线性关系，附加贴片每移动 0.1mm，对应的低频偏移量和高频偏移量分别为 4.6MHz 和 18.5MHz，表明了天线传感器的灵敏度和初始谐振频率有关。利用移动单个枝节对应的附加贴片只影响对应的谐振频率，可以实现单个方向的结构变形和温度的监测，也可以实现两个方向结构变形的监测，进一步拓展了其在结构健康监测领域的应用范围。

5.3.2 多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验

本节重点研究高频枝节处附加贴片的移动对天线谐振频率的影响。将多枝节法组合式贴片天线位移传感器进行加工制作，得到主贴片天线和附加贴片实物如图 5.21 所示。通过对天线传感器实物进行试验研究，探究天线传感器的实际传感性能。

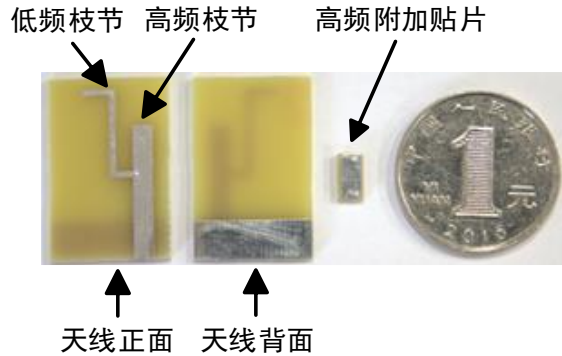


图 5.21 多枝节法组合式贴片天线位移传感器实物图

如图 5.22 为多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验布置图，天线传感器焊接 SMA 接口，并通过同轴线与 Keysight E5063A 台式矢量网络分析仪相连。由于多枝节法组合式贴片天线位移传感器的接地板不完整，天线传感器不具有抗金属特性。而水平位移滑台是由铝合金材质制成，因此，天线传感器与水平位移滑台在连接时，采用垫高层增加与金属之间的距离，减少金属对天线性能的影响。且由于天线传感器尺寸太小，不利于夹具使用，故通过在天线传感器背部粘贴塑料长条，并用皮筋箍紧长条两端，以确保两者的辐射贴片保持良好接触。

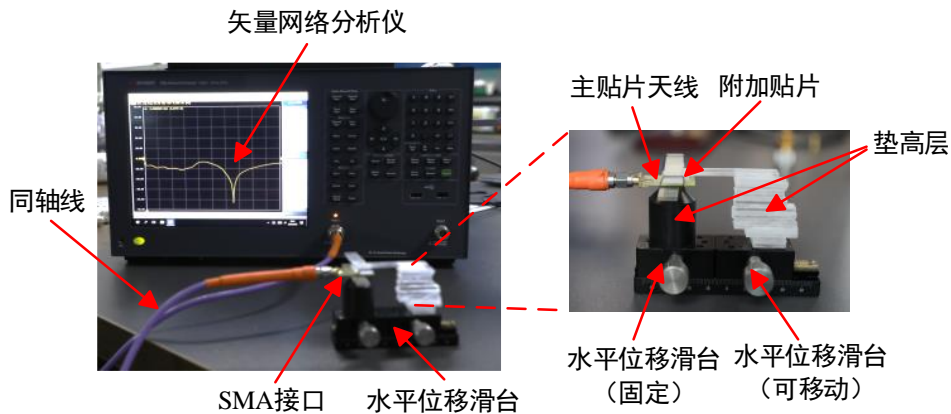


图 5.22 多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验布置图

试验中，转动水平位移滑台（可移动）的手轮使其向右移动，从而带动附加贴片向右移动来模拟结构发生变形。矢量网络分析仪的扫频范围为 2G-5G，共扫描 1601 个频点。试验在恒定温度下进行，每次转动手轮使滑台移动 0.2mm，共移动 4mm。并记录每次移动后天线传感器的 S11 曲线。

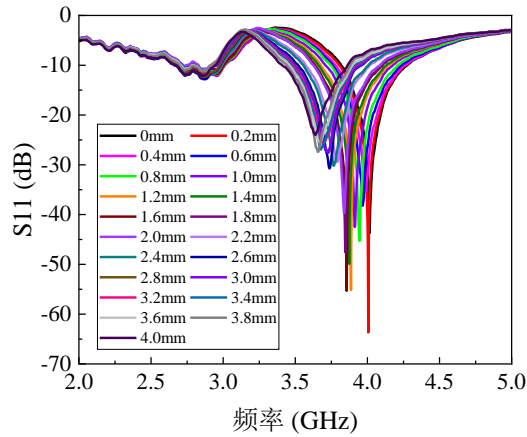


图 5.23 多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验 S11 曲线

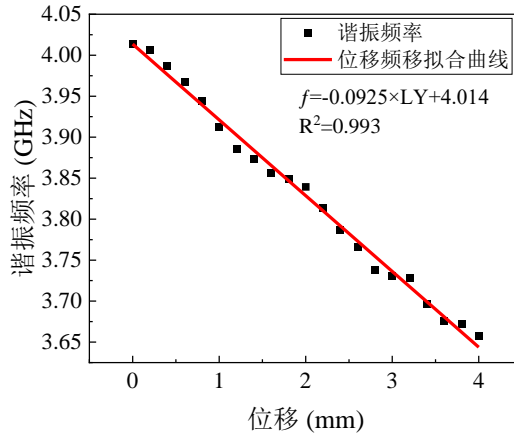


图 5.24 多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验位移频移拟合曲线

图 5.23 为多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验中的 S11 曲线。随着附加贴片的移动，天线传感器的高频枝节处辐射贴片有效辐射长度增加，进而导致了天线传感器高频枝节处的谐振频率向左偏移，而低频枝节处的谐振频率不受影响。图 5.24 呈现了多枝节法组合式贴片天线位移传感器试验中高频枝节对应的谐振频率偏移量与位移增加之间的对应关系。观察到两者之间的关系可由线性拟合直线 $f=-0.0925 \times LY+4.014$ 表示，其中 $R^2=0.993$ ，表明具有较好的线性关系。此外，结构每发生 0.1mm 变形，天线传感器高频枝节对应的谐振频率偏移 9.25MHz，相较于单片多模法组合式贴片天线位移传感器具有更小的尺寸和更高的灵敏度，能够更精确地感知结构的微小变化。

考虑到天线在加工过程中存在一定的制造误差，且附加贴片尺寸较小，与枝节对准时存在人工误差。此外，在试验过程中，人工转动手轮时也存在人为误差，同时，附加贴片移动时可能出现偏移情况，进一步增加了试验结果的不确定性。因此，这些因素的综合影响使得试验结果与仿真结果之间存在一定的偏差。在未来应用中，需要对位移传感器进行机械加工和封装使用，以确保其性能的稳定性和可靠性。

5.4 本章小结

本章针对单片式微带贴片天线存在应变传递效率损耗和粘贴强度不足的问题。从第二种技术方案出发，采用组合式贴片天线形式，利用附加贴片移动改变天线传感器的有效辐射长度来影响谐振频率设计了两种位移传感器。

(1) 采用中心馈电式结构，通过增加天线宽度激发矩形贴片天线的二阶谐振频率。利用移动附加贴片仅改变天线传感器长度的一阶谐振频率，而宽度方向的二阶谐振频率不受影响来实现对结构变形和温度的同步感知。利用 HFSS 软件对单片多模法位移传感器进行结构变形研究，得到天线的灵敏度为 65MHz/mm，线性相关系数 R^2 为 0.996。

(2) 多枝节天线采用分支结构，通过调整枝节的尺寸和位置实现多频特性。通过移动附加贴片改变其与对应枝节辐射贴片的重合长度来影响枝节对应的谐振频率，其他枝节所对应的谐振频率则不受影响，利用这种特性可以实现单个方向的结构变形和温度的监测，也可以实现两个方向结构变形的监测。利用 HFSS 软件对多枝节法位移传感器进行结构变形研究，仿真结果表明，天线传感器具有良好的线性度，移动高频枝节和低频枝节附加贴片的灵敏度分别为 185MHz/mm 和 46MHz/mm，且其灵敏度与初始谐振频率有关。

(3) 制作天线传感器实物进行试验，通过转动水平滑动平台带动附加贴片移动来模拟结构变形，使用矢量网络分析仪有线测量天线传感器谐振频率的变化。试验得到的单片多模法天线位移传感器及多枝节法位移传感器中高频枝节方向的灵敏度分别为 56.6MHz/mm 和 92.5MHz/mm，线性相关系数 R^2 分别为 0.987 和 0.993，实验结果表明两种位移传感器均有较好的线性度，且相较于单片多模法位移传感器，多枝节法位移传感器具有更小的尺寸和更高的灵敏度。

结论与展望

结论

RFID 技术由于结构简单、通讯可靠、功耗及成本较低，已成为新型应变传感器研究的重要方向之一。本文研究基于 RFID 技术的传感器研发提出了两种方案，利用 RFID 技术的通信功能以及贴片天线集成感知与通讯的特性，分别设计了两种无线应变传感器，并通过实验验证了其传感性能。同时，基于 RFID 中微带天线的基本理论，采用组合式贴片天线形式，利用单片多模法和多枝节法分别设计了两种 RFID 组合式贴片天线位移传感器，并通过试验对其传感性能进行评估。本文得出的主要研究结论如下：

(1) 基于 RFID 技术的通信功能，将电子标签模块评估版 DST-M80 与全桥应变片 BFH1K-3EB-D150 相连接，实现了两者的兼容工作，形成了 RFID 应变传感器。引入了运算放大器 AD620 对 RFID 应变传感器进行改进，显著提高了传感器的灵敏度，并将温湿度电子标签 DST-96 与改进后的 RFID 应变传感器进行了集成，实现了温湿度与应变的同步测量。使用改进后的 RFID 传感器在 UHPC 梁和铝合金板进行了应变和温湿度测试实验，通过阅读器无线读取测量结果，与实测数据进行对比分析。通过对比 RMSE 值和 R^2 表明，所设计的传感器在应变和温湿度测量结果上与有线采集的应变数据和实测的温湿度数据具有较好的一致性和可靠性。

(2) 基于 RFID 标签本身具有集感知与通讯一体的特性，利用标签天线的应变与其谐振频率频移量存在线性关系，而谐振频率与阈值反射功率存在对应关系，因此可以通过阅读器无线采集阈值反射功率来推断结构的应变状态。首先，将天线设计为微带天线结构，并进行小型化设计。随后，通过 HFSS 软件优化天线尺寸参数使得天线在 915MHz 与 RFID 芯片阻抗实现共轭匹配。接着，利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对设计的 RFID 应变传感器进行力-磁耦合仿真。将力学场计算后的结果利用变形构型模块重新剖分网格后模型导出并重新导入 COMSOL 中进行电磁场计算天线的谐振频率，提高了计算效率。仿真结果得到的 RFID 应变传感器谐振频率 f 与应变 ε 的拟合曲线的线性相关系数 R^2 为 0.997。最后，通过铝合金板拉伸实验、简支实验和悬臂实验，对设计的无线无源 RFID 应变传感器在不同加载条件下的性能进行了测试。得到的拟合曲线相关系数 R^2 分别为 0.975、0.954 和 0.966，结果表明 RFID 应变传感器在不同加载条件下具有较好的线性度。

(3)针对单片式微带贴片天线存在应变传递效率损耗和粘贴强度不足的问题。采用组合式贴片天线形式,设计了两种位移传感器。第一种基于单片多模法,利用移动附加贴片仅改变天线传感器长度的一阶谐振频率,而宽度方向的二阶谐振频率不受影响来实现对结构变形和温度的同步感知。第二种基于多枝节法,通过移动附加贴片改变其与对应枝节辐射贴片的重合长度来影响枝节对应的谐振频率,其他枝节所对应的谐振频率则不受影响,实现两个方向结构变形的监测。利用 HFSS 软件对传感器进行结构变形研究,仿真得到的单片多模法天线位移传感器及多枝节法位移传感器高频枝节方向的灵敏度分别为 65MHz/mm 和 185MHz/mm,线性相关系数 R^2 分别为 0.996 和 0.995。最后,制作天线传感器实物进行试验,通过转动水平滑动平台带动附加贴片移动来模拟结构变形,试验得到的灵敏度分别为 56.6MHz/mm 和 92.5MHz/mm,线性相关系数 R^2 分别为 0.987 和 0.993。通过结果可以看到两种传感器均具有较好的线性度,且相较于单片多模法组合式贴片天线位移传感器,基于多枝节法组合式贴片天线位移传感器具有更小的尺寸、更高的灵敏度和更大的结构健康监测应用范围。

本文所设计的四种传感器,其中无线应变传感器可以消除布线的复杂性,有效降低安装和维护成本,适合应用于大规模应变监测中,但通信过程受环境中电磁因素的影响,因此应用时需减少环境中金属的干扰,且无线无源应变传感器由于不需更换电源,更适合长期监测;位移传感器相较于传统位移传感器尺寸小、结构简单,大规模布置时可有效降低成本,其中多枝节法组合式贴片天线传感器由于接地板不完整,不能直接布置在金属结构上,需用非金属材料进行垫高,但其尺寸相对单片多模法更小,应用时具有更强的适应性。

展望

本文针对 RFID 技术对应用于结构健康监测领域的应变传感器和位移传感器开展了一系列设计与研究工作,限于作者水平及试验条件等方面的原因,还存在一些局限性和待改进的地方。具体内容如下:

(1)本文中设计的无线无源应变传感器由于追求小型化,减少了天线传感器的体积,这对天线的通讯性能产生了一定影响,导致传感器的通讯距离较为有限。因此,需要对天线进行进一步深入的研究,以综合考虑其传感性能和通讯性能,从而在实现小尺寸的前提下,兼顾通讯新能和传感能力的最佳平衡。

(2)在位移传感器的研究中,未对低频枝节附加贴片的移动进行试验研究,需要进一步的实验研究来验证其效果和性能。且多枝节法理论上可以实现三频甚至更多频的特征,从而满足更广泛的应用需求,需要进行更深入的研究和探索。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 全国已排查经营性自建房 726 万栋. https://www.gov.cn/xinwen/2022-07/10/content_5700244.htm, 2022-07-10
- [2] 伊廷华. 结构健康监测教程. 北京: 高等教育出版社, 2021
- [3] 易伟建. 建筑结构试验. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
- [4] 赵翔, 李爱群, 缪长青等. 润扬大桥结构健康监测系统传感器测点布置. 工业建筑, 2005, (01): 82-5
- [5] 樊健生, 刘宇飞. 在役桥梁检测、健康监测技术现状与时空融合诊断体系研究. 市政技术, 2022, 40(08): 1-11+40
- [6] 周程, 李辉. RFID 技术简介与发展综述. 中国西部科技, 2015, 14(03): 4-5+25
- [7] 成程, 雷雨. 射频识别技术在土木工程中的应用研究. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(04): 611-6
- [8] Forouzandeh M, Karmakar N C. Chip-less RFID tags and sensors: A review on time-domain techniques. *Wireless Power Transfer*, 2015, 2(2): 62-77
- [9] Cho C, Park J W, Kim K. Energy loss in cement-based material for efficient sensor deployment at a site. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2018, 45(7): 547-553
- [10] 吴智深, 张建. 结构健康监测先进技术及理论. 北京: 科学出版社, 2015
- [11] 赵宪忠, 李秋云. 土木工程结构试验量测技术研究进展与现状. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(01): 48-55
- [12] Tan C X, Dong Z G, Li Y H, et al. A high performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring. *Nature communications*, 2020, 11(1): 3530
- [13] Enser H, Kulha P, Sell J K, et al. Printed Strain Gauges Embedded in Organic Coatings. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 822-5
- [14] Enser H, Kulha P, Sell J K, et al. Printed strain gauges embedded in organic coatings - Analysis of gauge factor and temperature dependence. *Sensors and Actuators A Physical*, 2018: S0924424717300924
- [15] Aygun L E, Kumar V, Weaver C, et al. Large-Area Resistive Strain Sensing Sheet for Structural Health Monitoring. *Sensors*, 2020, 20(5): 1386-
- [16] Gräbner D, Dumstorff G, Lang W. Simultaneous Measurement of Strain and Temperature with two Resistive Strain Gauges made from Different Materials.

- Procedia Manufacturing, 2018, 24: 258-63
- [17] Liu Q, Chen J, Li Y R, et al. High-Performance Strain Sensors with Fish-Scale-Like Gra-phene-Sensing Layers for Full-Range Detection of Human Motions. ACS nano, 2016, 10(8): 7901-6
- [18] Tao W, Wenqian Z. A study on dynamic measurement methods based on vibrating wire sensors. Measurement Science and Technology, 2019, 30(2): 025105-025105
- [19] Cieplak G, Łukasz B, Sieńko R. The use of self-excited vibrations for dynamic strain measurements carried out by vibrating wire tensometers. Mechanics and Control. 2015, 34(1): 1-8
- [20] Cellatoglu A, Balasubramanian K. Increasing the Sensitivity of Vibrating Wire Pres-sure Sensor. IEEE Access, 2013, 1252-257
- [21] Santos J, Janeiro M F, Ramos M P. Development, implementation, and character-iza-tion of a standalone embedded viscosity measurement system based on the impedance spec-troscopy of a vibrating wire sensor. Measurement Science and Technolo-gy, 2015, 26(10): 105903-1-105903-14
- [22] 毛索颖, 黄跃文, 李云友. 基于频谱反馈的振弦传感器自适应激励策略研究. 传感技术学报, 2023, 36(04): 522-528
- [23] 王文刚. 振弦式传感器信号采集系统设计与研究[长安大学硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023
- [24] 张永芳, 王霞, 邢志国等. 面向机械装备健康监测的振动传感器研究现状. 材料导报, 2020, 34(13): 13121-30
- [25] Fras T, Roth C C, Mohr D. Dynamic perforation of ultra-hard high-strength armor steel: Impact experiments and modeling. International Journal of Impact Engi-neering, 2019, 131: 256-71
- [26] 潘兵, 吴大方, 高镇同等. 1200°C高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究. 强度与环境, 2011, 38(01): 52-9
- [27] Jacek P, Kamil B, Natalia K, et al. Optical strain sensor with dual fibre Bragg grating to-pology. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(5)
- [28] Xu O, Zhang J J, Deng H, et al. Dual-frequency Optoelectronic Oscillator for Ther-mal-Insensitive Interrogation of a FBG Strain Sensor. IEEE Photonics Tech-nology Letters, 2017, 29(4): 357-60
- [29] Li E. Sensitivity-Enhanced Fiber-Optic Strain Sensor Based on Interference of Higher Order Modes in Circular Fibers. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1266-8
- [30] Zhang H L, Wu Z F, Shum P P, et al. Highly sensitive strain sensor based on helical

- structure combined with Mach-Zehnder interferometer in multicore fiber. Scientific reports, 2017, 7(1-4): 46633
- [31] 周珍伟. 基于分布式长标距应变传感的结构损伤识别及模型修正[东南大学博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022
- [32] 廖光萌, 何建新, 朱玉琴等. 光纤光栅传感器及其应用. 装备环境工程, 2022, 19(11): 142-9
- [33] Viveiros D, Amorim V A, Maia J M, et al. Femtosecond laser direct written off-axis fiber Bragg gratings for sensing applications. Optics and Laser Technology, 2020, 128
- [34] Lynch J P. A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. Shock & Vibration Digest, 2006, 38(2): 91-128
- [35] Zhou G D, Yi T H. Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 947867.1-.33
- [36] Kane M, Zhu D P, Hirose M, et al. Development of an extensible dual-core wireless sensing node for cyber-physical systems. Sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems 2014, part 1: Conference on sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems, United States: SPIE, 2014: 90611U. 1-90611U. 19
- [37] Spencer B F, Park J W, Mechitov K A, et al. Next Generation Wireless Smart Sensors Toward Sustainable Civil Infrastructure. Procedia Engineering, 2017, 171: 5-13
- [38] Dong X J, Zhu D P, Wang Y, et al. Design and Validation of Acceleration Measurement Using the Martlet Wireless Sensing System. American Society of Mechanical Engineers, 2014
- [39] Taher S A, Li J, Jeong J H, et al. Structural Health Monitoring of Fatigue Cracks for Steel Bridges with Wireless Large-Area Strain Sensors. Sensors, 2022, 22(14): 5076-
- [40] Shaheen M, Li J, Taher S A, et al. Wind-induced vibration monitoring of high mast illumination poles; proceedings of the Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2022, F, 2022. SPIE2
- [41] Fu Y, Zhu L, Hoang T, et al. Demand-based Wireless Smart Sensors for Earthquake Monitoring of Civil Infrastructure; proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation And Health Monitoring Conference, F, 2018

- [42] Sofi A, Jane R J, Bhagyesh R, et al. Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 163
- [43] Yu X, Fu Y G, Li J, et al. Recent advances in wireless sensor networks for structural health monitoring of civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2024, 3(1): 100066-
- [44] 蒋灿, 谢丽宇, 薛松涛. RFID 式应变传感器的研究进展与应用. *结构工程师*, 2017, 33(03): 199-207
- [45] 邹艳玲. 基于 RFID 技术的无线无源纺织应变传感器[东华大学硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2022
- [46] Shao B T, Chen Q, Liu R, et al. Design of fully printable and configurable chipless RFID tag on flexible substrate. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 54(1): 226-30
- [47] Setti S, Geetha C. RFID technology and its diverse applications: A brief exposition with a proposed Machine Learning approach. *Measurement*, 2022, 195
- [48] 王长保. 基于超高频射频识别技术的无源无线应变传感及变分贝叶斯数据建模研究[中国矿业大学硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023
- [49] Jayawardana D, Liyanapathirana R, Zhu X. RFID-Based Wireless Multi-Sensory System for Simultaneous Dynamic Acceleration and Strain Measurements of Civil Infrastructure. *IEEE Sensors Journal*, 2019, PP(99): 1-
- [50] 栗冬鸣. RFID 传感网络的设计及结构健康监测中的应用[电子科技大学硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019
- [51] 贺垟瑒. 基于 RFID 传感技术的开口谐振环应力检测和结构健康监测系统研究[电子科技大学硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021
- [52] Dowling J, Tentzeris M M. "smart house" and "smart-energy" applications of low-power RFID-based wireless sensors; proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, F, 2009
- [53] Wang Q A, Zhang C, Ma Z G, et al. Towards long-transmission-distance and semi-active wireless strain sensing enabled by dual-interrogation-mode RFID technology. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(11)
- [54] You T, Wang W, Zhang Y, et al. Multi-level breakage-triggered radio frequency identification-based deformation sensor for rapid post-earthquake loss assessment of buildings: Concept, development, and application. *Structural control and health monitoring*, 2022, (7): 29
- [55] Zhang Y F, Bai L J. Rapid structural condition assessment using radio frequency

- identification (RFID) based wireless strain sensor. *Automation in Construction*, 2015, 54(jun): 1-11
- [56] Corporation T C. RFID strain measuring system: RFID diagnosis technology for concrete structure, 2016
- [57] Strangfeld C, Johann S, Muller M, et al. Embedded passive RFID-based sensors for moisture monitoring in concrete. *IEEE*, 2017
- [58] Yi X H, Vyas R, Cho C, et al. Thermal effects on a passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing. Georgia Institute of Technology (United States); Virginia Poly-technic Institute and State Univ (United States), 2012, 8345: 83450F-F-11
- [59] Meltem T, Selcuk P, Kursun B S. UHF-RFID enabled wearable flexible printed sensor with antenna performance. *AEUE - International Journal of Electronics and Communications*, 2022, 157
- [60] Deng F M, Wen K Y, Zeng H, et al. Novel metal-oxide arrester monitoring technology based on RFID sensor and mind evolutionary computation. *Electric Power Systems Re-search*, 2020: 106859
- [61] Kuhn M F, Breier G P, Dias A R P, et al. A Novel RFID-Based Strain Sensor for Wireless Structural Health Monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 37(2): 1-10
- [62] 程西蒙. 金属构件表面应变 RFID 传感标签设计及检测方法研究[电子科技大学硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022
- [63] 文豪. 基于无源超高频 RFID 反向散射信号的结构健康检测研究[西南科技大学硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2022
- [64] 余汉锦. 无源被动式微带天线传感器的裂纹多参数无线监测研究[武汉理工大学硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021
- [65] 黄程. 基于 RFID 系统的无源被动应变传感器开发研究[浙江大学硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020
- [66] 何依依. 基于无源 RFID 标签天线的应变传感器的设计与研究[吉林大学硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019
- [67] 张诚. 基于 RFID 技术的结构无线应变传感及应变数据建模分析[中国矿业大学硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2022
- [68] Xue S T, Xu K Q, Xie L Y, et al. Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085012 (13pp)
- [69] Xue S T, Yi Z R, Xie L Y, et al. A Passive Wireless Crack Sensor Based on Patch

- Antenna with Overlapping Sub-Patch. *Sensors*, 2019, 19(19): 4327-
- [70] 徐康乾. 基于贴片天线形变传感器的感应原理及传感特性研究[同济大学硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2019
- [71] Guan S, Xie L, Xue S, et al. Displacement sensor based on separated inverted-F antenna; proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), F, 2019. IEEE
- [72] Xue S T, Zheng Z Q, Guan S, et al. A Capacitively-Fed Inverted-F Antenna for Dis-placement Detection in Structural Health Monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(18): 5310-
- [73] 谢丽宇, 李宪之, 薛松涛. 基于贴片天线的单向应变智能骨料、监测传感系统及方法. 中国专利: CN115683001A, 2023
- [74] 谢丽宇, 李宪之, 薛松涛. 基于组合贴片天线的结构形变温度同步监测传感器和系统. 中国专利: CN113252080B, 2023
- [75] 谢丽宇, 郑志泉, 薛松涛. 基于重叠扇环形贴片天线的螺栓松动传感器及监测系统. 中国专利: CN112697336A, 2021
- [76] 谢丽宇, 徐康乾, 薛松涛. 基于 RFID 的分离式裂缝传感器及分离式裂缝传感系统. 中国专利: CN109780984B, 2024
- [77] 叶里莎. RFID 技术的应用. *通信技术*, 2007, (12): 267-268+271
- [78] 种玉配, 王其昂, 张诚等. 基于 RFID 技术的结构应变传感器研究综述. *自然灾害学报*, 2021, 30(06): 13-20
- [79] 李明洋, 刘敏. HFSS 天线设计. 北京: 电子工业出版社, 2014
- [80] 柯亮. 基于微带天线传感器的金属结构应变测量与裂纹识别方法[武汉理工大学硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2018
- [81] 张钧. 微带天线理论与工程. 北京: 国防工业出版社, 1988
- [82] 薛松涛, 徐康乾, 谢丽宇等. 无源无线应变传感器的模拟与测试. *结构工程师*, 2020, 36(05): 113-21
- [83] 易卓然. 基于无应力贴片天线的无源形变传感器[同济大学硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2021
- [84] 薛松涛, 易卓然, 谢丽宇等. 无应力组合贴片天线传感器温度性能模拟测试. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(10): 1439-45
- [85] 杨耀辉. 无线通信终端天线多频及小型化技术研究[电子科技大学博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2019
- [86] Manimegalai B, Raju S, Abhaikumar V. A Multifractal Cantor Antenna for Multi-band Wireless Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 359-62

- [87] Carver K, Mink J. Microstrip antenna technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 29(1): 2-24
- [88] Richards W, Lo Y, Harrison D. An improved theory for microstrip antennas and applications. *IEEE Trans Antennas & Propag*, 1981, 29(1): 38-46
- [89] Rana I, Alexopoulos N. Current distribution and input impedance of printed dipoles. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 1981, 29(1): 99-105
- [90] 姜铭鑫. 基于开槽技术的小型多频微带天线的研究与设计[南京邮电大学硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2018
- [91] 章国庆, 蒋开明, 特木尔朝鲁. 无源超高频抗金属标签天线设计方法综述. *电讯技术*, 2015, 55(06): 704-12
- [92] 黎亮. 柔性抗金属 RFID 传感标签的设计及制备工艺研究[西安理工大学硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023
- [93] 章伟, 甘泉. UHF RFID 标签天线设计、仿真及实践. 北京: 电子工业出版社, 2012
- [94] 张杰. 小型化三频天线的研究与设计[大连海事大学硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2020
- [95] 史凡萍. 小型化多频带微带天线的研究与设计[哈尔滨工程大学硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018
- [96] Li X Z, Xue S T, Xie L Y, et al. Simultaneous crack and temperature sensing with passive patch antenna. *Structural Health Monitoring*, 2023: 14759217231184115
- [97] Li X Z, Xue S T, Xie L Y, et al. An off-center fed patch antenna with overlapping sub-patch for simultaneous crack and temperature sensing. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(9): 095036
- [98] 梁长凤. 基于多模理论的宽带圆极化贴片天线研究[南京邮电大学博士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022

附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 李剑, 周云, 潘恒, 杜宗, 廖鑫, 吴昊, 赵贺俊, 罗先明. 螺母防松无线监测报警装置和铁塔. CN116758709A. 2023. (实质审查阶段)

致 谢

行文至此，百感交集，回望过去，读书十数载，从一无所知到硕士毕业，一路上学到许多知识，也遇见了许多良师益友。转眼三年的硕士生活即将结束，我的学生生涯也要画上句号，谨以此文感谢帮助和支持我的所有人。

桃李不言，下自成蹊。感谢我的恩师仇一颗副教授和周云教授。自加入课题组开始，老师们严谨求实、诲人不倦的学术态度便深深吸引了我，从平时科研的敦促，到研究方向的选择，再到试验研究的进展和论文的撰写，每一步都凝聚了老师们的耐心指导和帮助。老师们博学笃行、授人以渔的治学态度影响着课题组每一个人，不仅是学术上的导师，更是人生的引路人。师恩浩荡，没齿难忘，唯有铭记于心。

感谢课题组的各位兄弟姐妹对我科研路上的支持。感谢师兄郝官旺、罗先明、聂晶鑫、张保证、周易、李自强、危俊杰、周晓枫、刘鹏，师姐郑佳缘、朱诗琪，师弟冷建波、陈建炜、汪柏煊、刘迎澳、陈祎林、魏子青、邹少豪、张阳、杨晨焯，师妹徐晓婉、李婷及同届叶鹏、陈嘉豪、张文杰、张鑫、张路遥在我硕士期间给予的无私帮助。感谢郝博和张鑫对我科研和试验上的帮助；感谢师弟刘迎澳帮我处理数据，感谢张文杰、叶鹏、张阳、汪柏煊、陈祎林、冷建波帮我做实验。此外，感谢土木院张望喜老师、信科院刘璇老师、电气院李高升老师提供的场地和仪器设备；感谢丁雅博、易帆、胡晟、王桢、王文路在我试验期间给予的帮助；感谢室友陈本政、林炜、李晨焯、郎建志的陪伴与包容。人生路漫漫，幸有各位同行。

父母之恩，云何可报。感谢父母二十几年的无私付出，含辛茹苦将我养大成人，尽其所能让我接受最好的教育，你们永远是最坚强的后盾和永远的港湾。感谢哥嫂对我生活上的关心和照顾，感谢悦宇对我的无限包容与支持，正是你们的付出与关怀，给了我不断前进的力量和勇气。

感谢各位评审老师能够在百忙之中参与本论文的评审和答辩，祝各位老师身体健康，诸事顺利。

麓山巍巍，湘水泱泱，千年学府仍屹立在此，而我将要奔赴下一段旅程，在这里，再次向各位表达由衷的谢意，惟愿诸君在未来的日子里不忘初心，一帆风顺，前程似锦！

赵贺俊

2024年5月

于岳麓山下