



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

基于无源无线传感器的螺栓松动监测研究

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

姓 名：郑志泉

学 号：1932510

所在院系：土木工程学院

专业学位名称：建筑与土木工程

专业领域：工程

指导教师：薛松涛教授

副指导教师：谢丽宇副教授

二〇二二年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Postgraduate of Architecture and Civil Engineering

Bolt Loosening Monitoring Based on Passive Wireless Sensors

(National Natural Science Foundation of China No.2078375,
No. 52178298)

Candidate: Zhiquan Zheng

Student Number: 1932510

School/Department: Civil Engineering

Major: Architecture and Civil Engineering

Discipline: Engineering

Supervisor: Xue Songtao

Deputy Supervisor: Xie Liyu

May, 2022

基于无源无线传感器的螺栓松动监测研究

郑志泉

同济大学

摘要

螺栓连接是土木工程领域常见的一种节点连接形式，特别是在钢结构中，螺栓连接凭借其易安装、低成本、实用性强的特点，被广泛用于钢结构构件之间的连接。螺栓是一种自螺旋结构，这种结构形式赋予螺栓许多优异性能的同时，也给螺栓带来可能发生螺栓松动的风险。节点连接处的螺栓一旦发生松动，就会对整个结构的使用和安全带来隐患，甚至导致严重的生命财产损失，因此，对螺栓进行监测，以及时发现螺栓松动，排除安全隐患，是十分必要的。而目前常用的螺栓松动监测方法都存在着一些限制，或安装困难，或准确性差，或设备昂贵、实用性不强，或在一些场景中应用受限，亟需一些新的方法来弥补不足，拓展适用场景。本文基于无源无线贴片天线传感器，提出了两种新的螺栓监测方法，弥补了目前常用的螺栓松动监测方法的一些不足，主要研究内容如下：

(1) 天线的谐振频率与天线辐射贴片的有效电流路径长度呈负相关。针对既有结构的螺栓松动监测问题，本文将普通矩形贴片天线的谐振频率计算公式拓展到扇环形贴片天线，设计了基于扇环形贴片天线的角度传感器，用于识别螺母的旋转，以达到监测螺栓松动的目的。扇环形贴片天线有两部分组成，一部分与螺栓节点的连接件连接，一部分与螺母相连。螺母的旋转会引起扇环形贴片天线两部分的相对旋转，引起天线辐射贴片有效电流路径长度的变化，进而改变天线的谐振频率。

(2) 在高频仿真模拟器 (High Frequency Structure Simulator, HFSS) 中建立了扇环形贴片天线的模型，以高灵敏度和良好的阻抗匹配为主要目标，优化天线的尺寸。根据模拟得到的尺寸，制作天线实物，在实验中用矢量网络分析仪有线测试了天线的实际工作性能。模拟结果、实验结果均与理论分析相符。在较大的量程内 (0° - 40°)，扇环形贴片天线的环向第三阶谐振频率与角度之间的关系是非线性的；在较小的量程内 (0° - 5°)，该天线的环向第三阶谐振频率与角度之间呈线性关系。

(3) 天线谐振频率受天线辐射贴片与地平面之间介质的等效相对介电常数的影响。依据此原理，针对待建结构的螺栓松动监测网络的建立问题，本文提出了双层基板开槽圆形贴片天线，方便与螺栓集成，实现批量生产。将普通圆形贴片的基板分成两部分，在辐射贴片与地平面之间引入空气间隙。空气间隙厚度的变化会引辐射贴片与地平面之间介质的等效介电常数的变化，进而引起天线谐振频率变化。天线谐振频率与空气间隙厚度之间呈正相关。进一步，通过在圆形贴片上开槽增加电流在天线辐射贴片中流过的有效长度，可以在保持天线尺寸与一

元硬币相当的前提下，使天线工作频率降低到 3GHz 以下，以降低对测试设备的要求，增加该传感器的实用性，实现了天线的小型化。

(4) 在 HFSS 中进行天线的尺寸优化，优化后天线拥有较好的灵敏度与阻抗匹配，其尺寸与一枚一元硬币大小相当，满足了与螺栓集成的要求。在螺栓中径向开孔，通过连接杆与一些附件可以将双层基板开槽圆形贴片天线与螺栓集成，将螺杆长度的微小变化转变为天线基板间空气间隙厚度的变化，实现监测螺栓松动的目的。模拟结果显示，该天线的灵敏度可以满足识别螺栓松动过程中螺杆长度变化的要求，每 0.01mm 的螺杆长度变化对应 11.34MHz 的天线的二阶谐振频率变化，而工程结构的连接节点中常用螺栓的螺杆长度变化一般在 0.01mm 的数量级。

关键词：螺栓松动监测、无源无线传感器、扇环形贴片天线、双层基板开槽圆形贴片天线

ABSTRACT

Bolted connection is a common form of node connection in the field of civil engineering. Especially in steel structures, bolted connections are widely used for the connection between steel structural members due to their easy installation, low cost, and good practicability. The bolt is a self-helix structure, which gives the bolt many excellent properties, but also brings the risk of bolt loosening to the bolt. Once the bolts at the node connection are loose, it will endanger the use and safety of the entire structure, and even lead to serious loss of life and property. Therefore, it is very necessary to monitor the bolts to detect the loose bolts in time and eliminate potential safety hazards. However, the currently commonly used bolt loosening monitoring methods have some limitations, such as difficult installation, poor accuracy, expensive equipment, poor practicability, and limited application in some scenarios. New methods are urgently needed to make up for the shortcomings and expand applicable scenarios. Based on the passive wireless patch antenna sensor, this paper proposes two new bolt monitoring methods, which make up for some of the shortcomings of the commonly used bolt loosening monitoring methods. The main research contents are as follows:

(1) The resonant frequency of the antenna is inversely related to the effective current path length of the antenna radiating patch. In this paper, the calculation formula of the resonant frequency of the ordinary rectangular patch antenna is extended to the sector ring patch antenna, and an angle sensor based on the sector ring patch antenna is designed to identify the rotation of the nut to achieve the purpose of monitoring the looseness of the bolt. The sector ring patch antenna consists of two parts: one part is connected with the connector of the bolt node, and the other part is connected with the nut. The rotation of the nut will cause the relative rotation of the two parts of the sector ring patch antenna, which will cause the change of the effective current path length of the antenna radiation patch, and then change the resonant frequency of the antenna.

(2) The model of the sector ring patch antenna is established in the High Frequency Structure Simulator (HFSS), and the size of the antenna is optimized with high sensitivity and good impedance matching as the main goals. According to the size obtained by the simulation, the actual antenna is made, and the actual working performance of the antenna is tested with a network analyzer in the experiment. The simulation and experimental results are consistent with the theoretical analysis. In the

range of 0 degree to 40 degree, the relationship between the resonant frequency of the sector ring antenna and the rotation angle of the nut is nonlinear. In the range of 0 degree to 5 degree, a linear relationship is found between the resonant frequency and the rotation angle of nut.

(3) The antenna's resonant frequency is affected by the position of the coupling element within its near field. According to this principle, in order to facilitate the establishment of bolt loosening monitoring network of the structure to be built, a slotted circular patch antenna with double substrate is proposed in this paper, which is convenient to integrate with bolts and achieve mass production. The base plate of the ordinary circular patch is divided into two parts, and an air gap is introduced between the radiation patch and the ground plane. The change in thickness of air gap causes the change of equivalent permittivity of medium between the radiation patch and the ground plane, which in turn causes the change of the resonant frequency of the antenna. There is positive correlation between the antenna's resonant frequency and the air gap's thickness. In addition, by grooving the circular patch to increase the effective length of current flowing in the antenna radiation patch, the working frequency of the antenna can be reduced to below 3 GHz on the promise of maintaining the small size of the antenna, so as to reduce the requirements of the test equipment and increase the practicality of the antenna sensor.

(4) The size of antenna is optimized in HFSS. After optimization, the antenna has better sensitivity and impedance matching. Its size is equivalent to the size of a 1RMB coin, which meets the requirements for integration with bolts. Holes are radially opened in the bolt, and the double-layer substrate slotted circular patch antenna can be integrated with the bolt through the connecting rod and some accessories, and the slight change of the length of the screw is converted into the change of the thickness of the air gap between the antenna substrates, so as to realize the monitoring of the bolt loosening. The simulation results shows that the sensitivity of the antenna can meet the requirements of identifying the change of screw length in the process of bolt loosening. Every 0.01mm change of screw length corresponds to the resonant frequency change of 11.34MHz, while the screw length change of commonly bolts used in engineering structures is generally on the order of 0.01mm.

Key Words: bolt loosening monitoring, passive wireless sensor, sector ring patch antenna, double substrates slotted circular patch antenna

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 文献综述	3
1.2.1 螺栓松动原理	3
1.2.2 螺栓松动检测识别方法	7
1.2.3 基于贴片天线的无源无线传感器发展综述	12
1.3 本文的研究目的、意义和内容	16
1.3.1 研究目的和意义	16
1.3.2 先行研究路线	17
1.3.3 研究内容	18
第 2 章 基于贴片天线的传感器原理	20
2.1 电磁场和天线基本理论	20
2.1.1 麦克斯韦方程	20
2.1.2 天线收发电磁波能力	21
2.2 基于谐振腔假定的贴片天线谐振频率计算	23
2.2.1 谐振腔原理	23
2.2.2 基于谐振腔理论的天线谐振频率计算	25
2.2.3 组合贴片天线理论	26
2.3 贴片天线小型化原理与方法	28
2.3 本章小结	32
第 3 章 基于扇环形贴片天线的螺栓松动传感器设计与模拟	33
3.1 扇环形贴片天线设计	33
3.2 扇环形贴片天线理论	34
3.3 扇环形贴片天线模拟	35
3.3.1 扇环形贴片天线的 HFSS 建模	35
3.3.2 理论验证	38
3.3.3 扇环形天线传感器的性能	39
3.4 温湿度变化对谐振频率的影响	42
3.5 本章小结	43
第 4 章 基于扇环形贴片天线的螺栓松动传感器的实验	44
4.1 实验设计及准备	44

4.2 实验装置及过程.....	45
4.3 实验结果.....	47
4.4 模拟结果与实验结果对比及讨论.....	50
4.5 本章小结.....	52
第 5 章 基于双层基板开槽圆形贴片天线的螺栓松动传感器.....	53
5.1 螺栓松动数值模拟.....	53
5.2 双层基板开槽圆形天线概念设计.....	55
5.3 双层基板开槽圆形贴片天线小型化.....	56
5.4 双层基板开槽圆形贴片天线理论.....	59
5.5 双层基板开槽圆形贴片天线模拟.....	60
5.5.1 天线优化.....	61
5.5.2 天线性能.....	62
5.6 可行性验证.....	66
5.6.1 径向开孔对螺栓承载性能的影响.....	67
5.6.2 温湿度影响.....	68
5.7 天线灵敏度调节.....	68
5.8 本章小结.....	70
第 6 章 结论与展望	72
6.1 结论.....	72
6.2 展望.....	74
参考文献.....	75
致谢.....	79
个人简历、在读期间发表的学术成果	81

第1章 绪论

1.1 引言

在土木工程领域，钢结构是一种应用广泛的结构形式，具有均质、高强、施工速度快、回收利用率高等优点。国内外有许多著名的钢结构建筑，例如法国的埃菲尔铁塔、美国旧金山金门大桥，国内的国家体育馆鸟巢、上海环球金融中心、香港中银大厦等等。在钢结构中，节点连接是非常重要的的一环，关乎到整个结构的承载能力和安全性能。常见的钢结构连接有焊接、铆钉连接、螺栓连接等。其中，螺栓连接结构简单、拆装方便、实用性强且成本较低，具有许多突出的优点^[1]，是钢结构中非常重要的一种连接形式。除此之外，螺栓连接的优异性能使其在航空航天、汽车制造、轨道交通等领域也广受欢迎。



(a)法国埃菲尔铁塔



(b)美国旧金山金门大桥



(c)国家体育馆鸟巢



(d)香港中银大厦

图 1.1 一些著名的钢结构建筑

任何硬币都有两面。与螺栓连接的优异性能相伴的是其难以避免的一些缺点。螺栓是一种自螺旋结构，为了使螺栓能牢固可靠得将不同构件连接到一起，最重

要的就是给螺栓施加合适的预紧力，使螺栓与构件之间、螺杆与螺母的螺纹之间以及被连接构件之间产生合适的摩擦力，不会相互滑移导致螺栓疲劳、松动，又不至于螺杆内力过大，导致螺杆在荷载作用下断裂。但事实是，在螺栓安装过程中，施加在螺栓上的预紧力往往是难以控制的。



图 1.2 钢结构节点处的螺栓连接

通常，我们通过给螺栓施加一定大小的扭矩来控制螺栓的预紧力。如果将螺栓节点看成一个完整的系统，施加扭矩的过程就是给螺栓内部输入能量的过程。在这个过程中，一部分输入能量以热能等形式耗散，一部分能量转化为螺栓内部存储的能量，存储的能量越多，螺栓提供的紧固力也就越大。但由于螺杆与螺母的内外螺纹之间以及螺栓与被连接构件的接触面之间摩擦的存在，大部分输入能量都以热能的形式耗散，只有 10%左右的能量转化为螺栓节点存储的能量^[2]。另外，连接件接触面的不平整、螺栓孔未对齐等因素也会增加螺栓拧紧过程中能量的耗散，导致螺栓内存储能量减小。当然，除了上述提到的使螺栓连接存储能量减小的因素外，通过增加扭矩、使用润滑液减小摩擦等方法也可以增加螺栓连接内部存储的能量。但总体来讲，使螺栓连接中存储能量减小的因素要远多于使其增大的因素，所以，螺栓内部的紧固力通常小于预期。



图 1.3 美国康涅狄格州-米勒斯大桥坍塌

由于螺栓的自螺旋特性，且其内部的预紧力通常小于预期，在受到振动、冲击、温度变化等因素影响时，可能出现螺栓的松动、分离甚至脱落，影响结构的安全性能和使用性能，甚至导致结构失效而引起巨大的生命财产损失。1983年，美国康涅狄格州的米勒斯大桥发生坍塌，其起因就是铁桥的一颗螺栓发生了松动。为了最大程度地减少由螺栓松动引起的灾难性事故发生，有必要对螺栓松动进行监测，以及时了解螺栓状态，尽早发现松动螺栓并进行再次紧固，防患于未然。

而目前的螺栓松动检测方法在实际应用中都存在一些限制，需要一些更实用可靠的方法来识别和监测螺栓松动。本文基于贴片天线提出两种新型的螺栓松动监测传感器，其安装简单、布置灵活、成本较低，结合无源无线传感技术，可以实现长时间、大范围、远距离、周期性的螺栓松动监测。两种形式的传感器分别适用于两个不同的场景：扇环形贴片天线传感器适用于既有结构的螺栓松动监测；双层基板开槽圆形贴片天线传感器则可以与螺栓集成为一体，批量生产，方便待建结构建立螺栓松动监测网络。

1.2 文献综述

本节对螺栓松动原理、目前常见的螺栓松动检测识别方法和贴片天线的发展历程做了概述。明晰螺栓松动原理，有助于了解螺栓松动的原因和过程，针对性地设计传感器进行监测。梳理现存的螺栓松动检测识别方法，有助于理清现存方法的一些不足，有针对性地进行改进。梳理贴片天线的发展历程和可以了解常见的贴片天线设计方法，指导后续贴片天线传感器的设计。

1.2.1 螺栓松动原理

本小节主要介绍了两种螺栓松动理论：Junker 的理论以及 Nassar 和 Housari 的理论。Junker 的理论最为经典，而 Nassar 和 Housari 的理论对 Junker 的理论做出了重要补充

A. Junker 的理论

螺栓松动问题作为螺栓连接中广泛存在的问题，受到了许多学者的关注，目前针对螺栓松动原理的研究意见不一，其中最经典的是 Junker 的理论^[3]。

1969年，Junker 发表了其对螺栓松动原理的研究。Junker 的理论基于其提出的扭矩-预紧力方程，将施加在紧固件上的扭矩与该扭矩引起的摩擦和弹性反应联系起来。对于一个基本的螺栓，经 Nabil Motosh 简化的扭矩-预紧力方程如下^[4]：

$$T_{in} = F_p \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1.1)$$

其中, T_{in} 为施加在螺母上的扭矩, F_p 为螺栓中的预紧力, P 是螺距, μ_t 、 μ_n 分别是螺纹的摩擦系数和螺母表面的摩擦系数, r_t 、 r_n 分别是螺纹和螺母表面的有效接触半径, β 是螺纹齿角度的一半。

上述扭矩-预紧力方程清晰的给出了螺栓节点中输入扭矩与反作用扭矩之间的基本关系。虽然在实际应用中, 该方程中的一些参数难以确定, 不能准确计算施加在螺母的扭矩与螺栓内部预紧力的关系, 但其可以用于解释螺栓松动行为。

在螺栓拧紧, 外部施加扭矩的力撤去之后, 螺栓处于自平衡状态, 由于螺杆伸长, 螺栓内部会产生一个使螺栓有松动趋势的扭矩, 而摩擦力的存在抵消了这个趋势, 螺栓才得以平衡。此时, 螺栓内部的受力情况可以表示为:

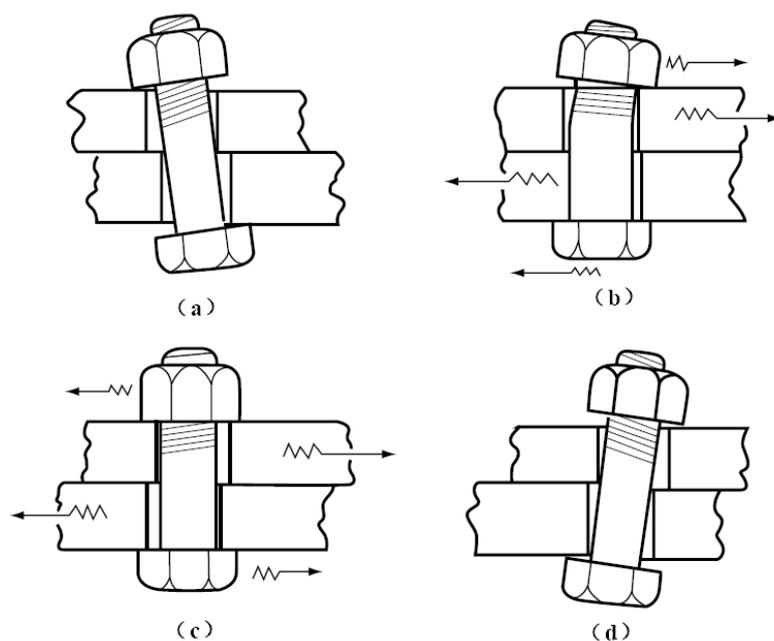
$$T_{off} = F_p \left(\frac{P}{2\pi} - \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} - \mu_n r_n \right) \quad (1.2)$$

其中 T_{off} 为使螺栓有松动趋势的净扭矩。

根据式 1.2, 我们可以发现, 随着摩擦系数的减小, 直至 T_{off} 等于 0 时, 螺栓就会发生松动。但在螺栓服役期间, 摩擦系数一般不会明显减小, 螺栓发生松动必然会有其他因素的影响, 对此, Junker 给出了他的假设:

1. 螺杆的弹性伸长会产生一个使螺栓有松动趋势的扭矩;
2. 如果振动足够剧烈, 螺栓的内外螺纹之间以及螺栓与连接件的接触面之间会发生相对滑动;
3. 这种相对滑动的瞬间克服了所有组件之间的摩擦约束, 释放了螺栓两端, 使得一部分存储在螺栓节点中的能量随着螺栓在这个瞬间的旋转而释放;
4. 螺栓内部的能量是否会损失取决于振动是否能够提供克服组件之间摩擦约束的力;
5. 每个循环中损失的能量取决于螺栓与螺栓孔壁之间的间隙大小, 间隙越大, 螺栓滑动的的时间就越长, 损失的能量就越多;
6. 每个循环中损失的能量还与滑动期间使螺栓有松动趋势的净扭矩的大小有关, 由于滑动使得各组件之间的摩擦被克服, 滑动期间使螺栓有松动趋势的净扭矩为:

$$T_{off} = \frac{F_p P}{2\pi} \quad (1.3)$$

图 1.4 Junker 理论的螺栓松动过程示意图^[2]

除了上述方程和假设, Junker 还发现由于横向振动荷载下连接件的滑动距离要大于螺栓径向循环荷载引起的位移, 螺栓在横向振动荷载的作用下更容易发生松动, 并且给出了螺栓松动的具体过程:

1. 上一个循环结束后, 螺栓处于图 1.4 (a) 所示的位置。
2. 上部连接件开始向右移动, 下部连接件向左移动。
3. 螺栓起初处于图 1.4 (a) 所示的位置, 由于摩擦力的存在, 螺栓处于自锁状态。然而, 随着连接件的相对滑动, 螺栓发生弯曲。如图 1.4 (b) 所示。
4. 螺杆弯曲使得螺母的一侧接触连接件, 产生使螺母松动的偏离扭矩。此时, 如果振动足够剧烈, 螺栓头与连接件接触面之间以及螺母与连接件的接触面之间同时发生相对滑动, 螺栓两端被释放, 螺母就会产生轻微旋转, 损失一部分存储的能量。
5. 一段时间过后, 螺杆的弯曲力使得螺栓回正, 如图 1.4 (c) 所示。
6. 随着连接件的继续滑动, 螺栓向右翘起, 在此期间, 由于螺栓两端有摩擦力的存在, 不会发生进一步预紧力的损失, 如图 1.4 (d)。
7. 随后整个过程反转, 过程中损失更多的能量。

Junker 给出的上述螺栓松动过程被其所发明的用于模拟螺栓松动的“Junker 机”证实。如图 1.5 所示, “Junker 机”的原理是通过可调节电机模拟螺栓所受到的横向振动荷载的作用。在用“Junker 机”进行螺栓松动实验的过程中, 通过仔细地测量发现了螺栓在横向振动荷载作用下两端发生滑动的短暂瞬间。

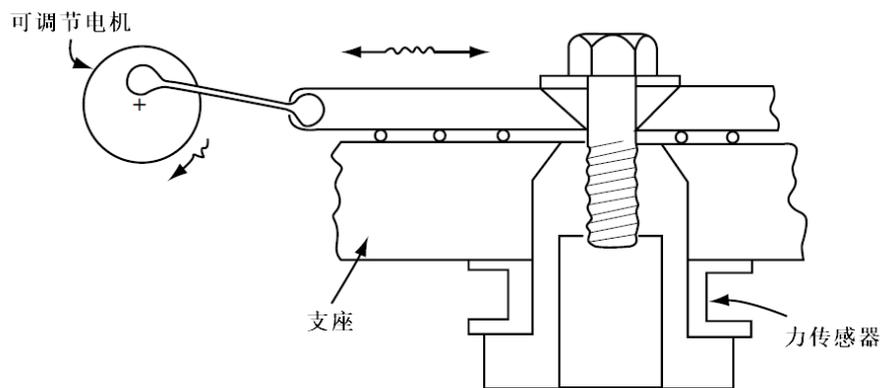


图 1.5 Junker 机示意图^[2]

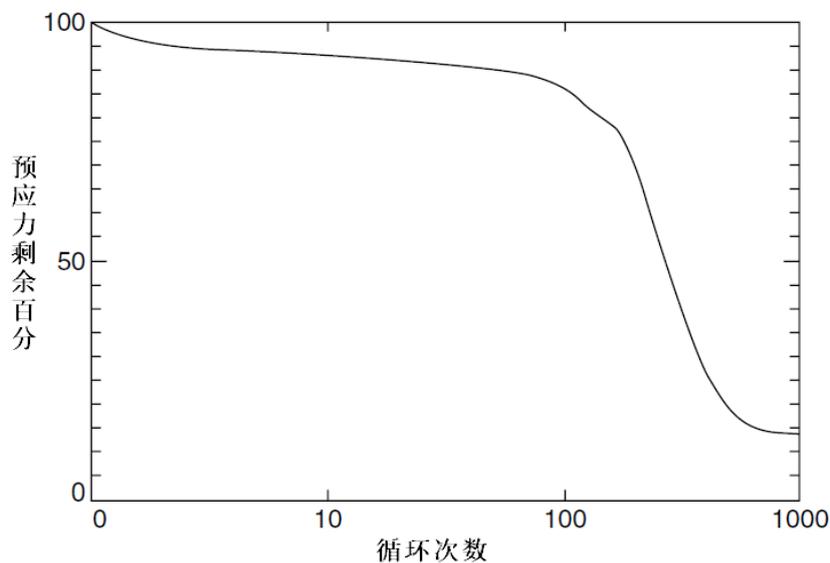


图 1.6 螺栓松动过程

另外，通过实验研究，Junker 还给出了螺栓松动过程中振动荷载循环次数与预紧力剩余的关系，如图 1.6 所示。循环开始后，螺栓预紧力要经历一个缓慢减小的阶段，随后才会快速下降。Junker 的理论给出了横向振动荷载下螺栓松动的详细过程，但却不能解释为什么螺栓预紧力要经历一个缓慢的下降过程之后才会快速下降，而 Nassar 和 Housari 的理论弥补了这一不足。

B. Nassar 和 Housari 的理论

2005 年，Nassar 和 Housari 提出关于螺栓松动过程的新理论。Nassar 和 Housari 的理论^[5]将螺栓松动过程分为两个阶段：第一个阶段是螺栓在振动荷载、温度应变等作用下，螺杆根部发生塑性变形，预紧力缓慢下降，此过程中螺母不会发生旋转；第二个阶段是螺栓预紧力下降到一定程度之后，在振动荷载和螺栓反向弯

曲的作用下，螺母发生旋转，螺栓预紧力快速下降。这一理论是使用有限元分析发展起来的，但随后被实验所证实。该理论完美符合了螺栓松动过程预紧力剩余与荷载循环次数的关系。

同时，Nassar 和 Housari 还研究了螺杆与螺栓孔壁间隙、螺纹摩擦、螺栓头与连接件接触面的摩擦和振动荷载频率对螺栓松动的影响，得到如下结论：

1. 在相同的循环次数下，螺杆与螺栓孔壁间隙越大，螺栓松动越严重；
2. 螺纹摩擦对螺栓松动影响较大，螺纹摩擦系数越小，螺栓松动越快；
3. 螺栓头与连接件的接触面的摩擦对螺栓松动影响较小；
4. 荷载频率越低，每个循环的时间越久，发生相对滑动时间越长，因此在相同循环次数下，荷载频率越低，螺栓松动越严重。

在研究螺栓松动原理的基础上，学者们也提出了许多阻止螺栓松动的方法，比如，利用双螺母、有效扭矩螺母、防振垫圈、焊接、化学试剂等防止螺母旋转，或者设计合适的节点形式防止连接件之间发生相对滑动等，但这些方法都无法保证可以完美防止螺栓松动，因此为了及时发现隐患，对螺栓节点进行螺栓松动的监测还是十分必要的。

目前没有关于螺栓预紧力降低多少算松动的统一定义，一般来讲，只要螺栓的预紧力减小，螺栓便已经发生松动，越早发现预紧力的减小，就能越早预防螺栓松动。而预紧力减小往往反映到一些指标中，分析螺栓松动过程可以发现两个与螺栓预紧力紧密相关的重要指标：其一是螺栓松动过程中螺杆长度减小导致的预紧力的下降，这是最直观的指标；其二是所有的螺栓松动必将经历螺母旋转的阶段，螺母旋转是第二个指标。针对这两个指标，本文提出了两种不同形式的传感器，分别对其进行监测，以达到识别螺栓松动的目的。

1.2.2 螺栓松动检测识别方法

目前常见的螺栓松动检测识别方法有扭矩扳手法、声弹性法、基于接触动力学的的方法以及一些近几年兴起的新方法。

A. 扭矩扳手法

螺栓拧紧过程中常用扭矩扳手来确定螺栓预紧力。已有的研究证明，施加在螺栓的扭矩和螺栓的预紧力之间的关系是线性的，可以用下式表示^[4]：

$$T = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2}{\cos \alpha} \mu_s + \frac{P}{\pi} + d_w \mu_w \right) \quad (1.4)$$

其中， T 是所施加的扭矩， F 是螺栓预紧力， d_2 是螺纹中径， α 是螺纹夹角的一半， μ_s 是螺纹的摩擦系数， P 是螺距， d_w 是螺母支撑面的等效摩擦直径， μ_w 是支撑面和螺母接触面的摩擦系数。

通过扭矩扳手来确定螺栓预紧力的方法依赖于螺栓拧紧过程中扭矩与预紧力的线性关系。但是螺栓预紧力与所施加的扭矩之间的关系受很多因素的影响，如摩擦系数、螺纹公差以及润滑涂层的种类等。这些影响因素的存在导致采用扭矩扳手评估螺栓预紧力时有可能产生高达 50% 的误差^[6]。对测量精度要求较高的场景中，扭矩扳手方法是不适用的。目前对于螺栓预紧力与施加扭矩之间关系的研究主要集中在施加扭矩的分配问题上，主要采用理论模型^{[7][8]}和有限元模型^[9]解释扭矩分配的机制。



图 1.7 扭矩扳手

一般情况下，扭矩扳手用于螺栓紧固，而不用于日常监控。该方法的可靠性和准确性不足的问题促进了基于声弹性法和基于接触动力学的螺栓松动检测方法产生和发展。

B. 声弹性法

基于声弹性原理的方法在入射波时间和反射波时间都能清晰识别的情况下，能够计算出锚杆轴向应力值。在各向同性和均质材料中，沿着待测应力方向传播的纵波和横波的波速可以用下式近似表示^[10]：

$$\begin{aligned} V_{\sigma}^L &= V_0^L (1 + A_L \sigma) \\ V_{\sigma}^T &= V_0^T (1 + A_T \sigma) \end{aligned} \quad (1.5)$$

其中， V_0^L 和 V_0^T 分别是无应力状态下纵波和横波的波速， A_L 和 A_T 分别是纵波和横波的声弹性常数， σ 是螺栓的轴向应力， V_{σ}^L 和 V_{σ}^T 分别是应力为 σ 时纵波和横波的波速。

由于 A_L 和 A_T 的值都为负值，式 1.5 表明，螺栓应力的增加可以通过螺栓中声波的传播速度的降低来估算，这就是声弹性原理。具体的测量方法根据所用波的类型可以分为两种，一种是单波法^{[11][12][13]}，另一种是多波法^[6]。

单波法利用声波的纵波或横波在物体中传播时间的变化来识别螺栓荷载。由

于需要了解螺栓紧固前的初始长度和螺栓的弹性模量等参数,单波法在检测建成多年结构的螺栓连接的状态时往往受到限制。

多波法则应用纵波、横波和表面波中的两个,通过记录其在螺栓中传播时间的差值达到识别螺栓荷载的目的,不需要提前了解螺栓的弹性模量参数。但螺栓中的拉伸应力也会影响超声波在螺栓中的传播速度,要想得到波速与螺栓伸长量之间的精确关系,需要对拉伸应力引起的超声波传播速度的变化进行补偿,这对于已经安装的结构来讲是非常困难的^[14]。为了弥补此不足,一些学者提出了多波法的改进方法,例如速度比法^[15]和双折射法^[16]等。这些改进的多波法可以在实际工程中实现螺栓荷载的判断,但仍然存在着一些问题,例如对检测条件要求苛刻、灵敏度受限等。

C. 基于接触动力学的方法

基于接触动力学的方法利用波能量耗散、高阶谐波、边频带和阻抗等接触动力学现象,将接触界面刚度和螺栓连接的夹紧力与各自的动态指标关联起来,能够检测或者量化螺栓的紧固性。

从微观角度来说,固体表面是粗糙的、不平整的,真正的接触发生在表面的突起部分,如图 1.8 所示。两物体接触面的动力学特征受实际接触面积和接触刚度的影响,这些因素又与螺栓的夹紧力密切相关^{[17][18][19]}。应用压电传感器可以检测和量化螺栓连接的紧固性。压电传感器既可以作为激励器激发接触面之间的振动,也可以作为传感器感知接触面之间的动力响应。根据接触的动力响应可以得到螺栓连接的紧固性。根据此原理的螺栓检测方法可以分成线性与非线性两种。

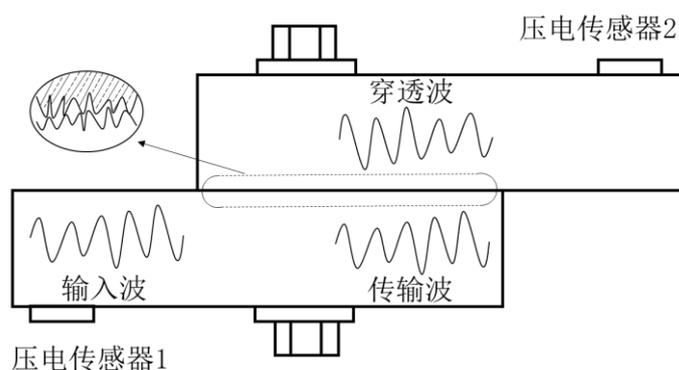


图 1.8 弹性波能量在螺栓连接接触面的衰减示意图

线性方法主要是能量耗散法^{[20][21][22]},该方法假设螺栓连接系统的连接刚度为线性的^[23]。图 1.8 为弹性波在螺栓连接中的传播示意图。一个连接件上的入射波在传播的接触面时,一部分透过接触面传播到另一连接件上,一部分在原始连接件上继续传播。能量耗散法假设透过接触面的波与接触面的真实接触面积 S 成

成正比。根据经典的赫兹接触理论，接触面的真实接触面积 S 正比于接触压力 P 的 $2/3$ 次方 ($S \propto P^{2/3}$)。因此，通过检测透射波的能量，可间接获得接触面之间的接触压力。

非线性的方法主要有高次谐波法和边频带法。线性系统的频率响应与输入的随机激励相同，而非线性系统则会产生与输入激励不同的频率响应。结构中存在潜在的缺陷，如微裂纹、分层等，会导致结构具有某种程度的非线性。螺栓松动作为一种特殊的缺陷，也会导致系统非线性，而紧固良好的螺栓结构主要表现为线性系统^[24]。利用这一原理，基于接触声学非线性 (CAN) 的振动特性被广泛应用于检测和量化螺栓松动。其高次谐波和边频带是最常用的两个振动特性。

对于高次谐波法，只需要输入一个探测信号作为激励，当螺栓松动时，系统会产生明显的频率响应，其频率超过输入的最大频率^[25]。而边频带是振动调制的产物。为了进行调制，需要两个不同频带的激励来同时激励螺栓节点上的两个点。低频的作用是产生调制信号，高频的作用是作为探测波（即载波信号）。低频振动迫使接触面（由于螺栓连接的松动）周期性地打开和闭合，这会扰动高频探测波，在靠近探测波的左右两侧产生两个频率响应峰值，即左频带和右频带^{[26][27]}。

基于接触动力学的螺栓松动检测方法还有基于阻抗特征的方法。将 PZT 传感器粘贴到螺栓连接表面，激励器向螺栓连接输入交流电压扫描信号，信号频率通常从几千赫兹到几十万赫兹，然后记录电阻抗进行分析。通常电阻抗特征由主结构的机械阻抗和粘贴在主结构上的 PZT 传感器的机械阻抗决定^[28]。一般情况下，螺栓松动会降低连接节点的接触刚度，增加连接节点的阻尼，进而导致共振峰向低频方向移动，峰值降低。除了上述方法之外，在振动输入和输出数据的基础上，结合机器学习的模式识别方法也被用来检测螺栓松动^{[29][30]}。

通过对上述螺栓松动检测方法的介绍，我们可以发现，除了扭矩扳手法之外的其他方法都需要电源的供应，需要有线的方式来进行采集信号的传输，且大多需要专门人员到现场去实施检测。对于大型结构，其螺栓数量是非常庞大的，采用上述方法费时费力。因此，传统的螺栓松动检测技术只能实现螺栓松动的检测，难以适用于测点众多的大型结构的长期监测和维护。

D. 一些螺栓松动检测识别新方法

近些年，为了克服传统螺栓松动检测技术的弊端，学者们提出了一些新的螺栓松动监测方法，主要有基于嵌入式传感器的方法、图像识别法和 RFID 标签检测法。

基于嵌入式传感器的螺栓松动监测方法将传感器嵌入到螺栓内部来获得螺栓的纵向伸长信息，然后利用这些信息来计算螺栓连接处的应力状态变化。例如，在螺栓内部安装应变传感器^[31]，来检测螺杆应力变化，或者采用埋入式光纤布拉

格光栅传感器来检测螺栓的轴向力和剪切力^[32]。这些方法的有效性均通过实验被证明，但是这些传感器多需要电源线来提供能量，且数据采集多采用有线的方式。虽然这些方法在安装完成后，不需要专门人员再去现场操作，相比于传统方法节省人力资源，但这些方法仍然没有摆脱有线的限制。大量电源线和数据传输线的存在导致布线困难，安装复杂，限制了这些方法的实际应用。

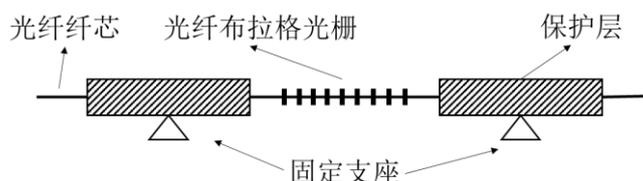


图 1.9 埋入式光纤布拉格光栅传感器示意图

图像识别法通过数码相机获得螺栓节点的图像，利用深度学习和图像处理技术对螺栓节点的图像进行分析，提取螺栓的特征信息。螺栓松动前后，在图像中呈现出不同的特征，通过对比可以获得螺母旋转、螺杆长度变化等信息，进而判断螺栓状态。2018年，Ramana 等人^[33]提出了一种基于视觉、Viola Jones 算法和支持向量机的民用结构螺栓松动检测方法，对螺栓节点的图像进行分析后可以有效获得螺栓头尺寸和螺杆长度变化，实现螺栓松动识别。2019年，Huynh 等人^[35]利用无人机捕捉螺栓连接的图像，并将其传输到计算机上，对图像进行技术处理后可以估计出螺栓旋转角度，实现螺栓松动的准自主监测。图像识别技术与无人机技术结合，可以实现螺栓松动的自主监测，摆脱了有源有线传感器布线困难、安装复杂的缺点。但在光线昏暗、浓雾遮挡、螺栓外有覆盖物等情况下，数码相机获得螺栓节点图像困难，该方法应用受限。

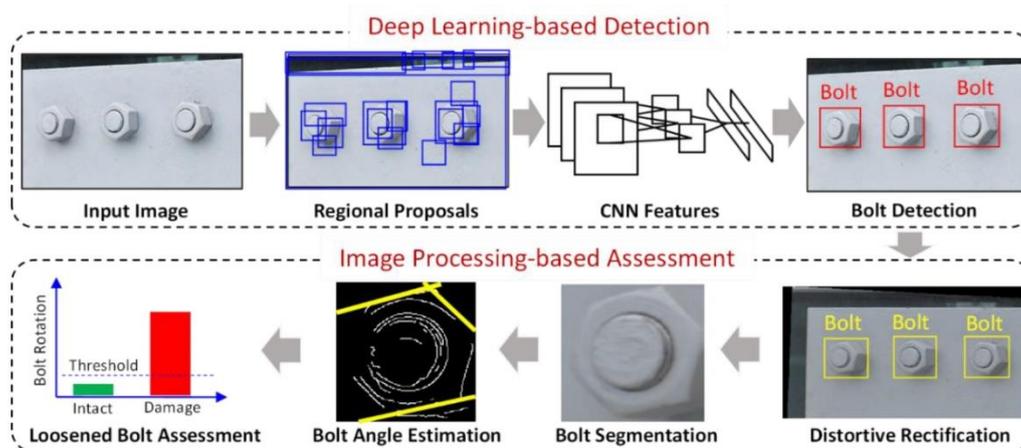


图 1.10 基于图像识别的螺栓松动监测示意^[34]

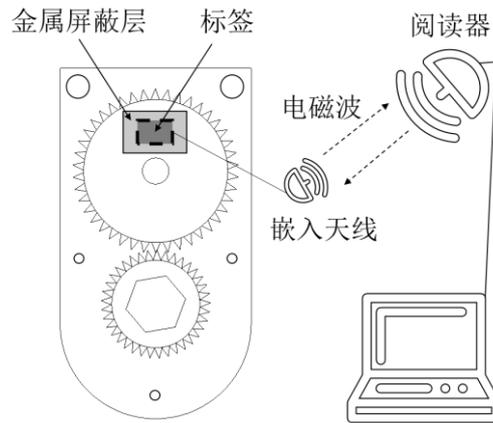


图 1.11 一种基于 RFID 技术的严苛环境下的螺栓状态监测系统示意图

2016 年, Wu 等人^[36]提出了一种基于 RFID 技术的严苛环境下的螺栓状态监测系统。该系统由螺栓转动系统、无源超高频 RFID 标签、阅读器和监控软件组成,如图 1.11 所示。一个锡箔金属薄膜固定在固定板上,一个 RFID 标签粘在一个大齿轮上,检测螺栓固定在一个小齿轮的中心。如果标签完全被锡纸遮盖,阅读器无法接收到射频信号;如果螺栓松动,齿轮旋转时,标签天线暴露在外。一个携带相应螺栓信息的射频信号通过 RFID 标签以线圈耦合的方式传输给 RFID 阅读器,监控软件根据此信号识别发生松动的螺栓的位置。该方法可以在光线昏暗的煤矿中工作,不受光线条件的影响。但由于设计的限制,只有当螺栓的旋转角度超过 20 度时,该方法才能监测到螺栓松动,这导致该方法难以发现螺栓的早期松动。

虽然 Wu 等人的设计未能很好地发现螺栓的早期松动,但让我们看到了以 RFID 技术为代表的无源无线传感技术的优势。无源无线传感系统可以通过电磁波实现阅读器与传感器之间的信息交换,不受光线条件影响,可以穿透浓雾和障碍物,很好得弥补了基于图像识别的螺栓松动监测方法的缺陷。

1.2.3 基于贴片天线的无源无线传感器发展综述

在结构健康监测领域,需要大量的传感器监测结构的形变、位移、裂缝、加速度等参数,以评估结构的健康状况。在发展初期,常用的传感器有电容式传感器、电感式传感器、光栅光纤传感器等,这些传感器都需要电源线进行能量供应,需要数据传输线进行数据传输,存在着诸多限制:

(1) 可靠性堪忧。在严重的自然灾害发生时,如地震、海啸、台风等,如果电源线或数据线损害,则无法进行数据传输,影响对结构健康状况的及时评定;

(2) 成本较高。传统传感器的单价相对较高，大量布设时花费高昂。

(3) 狭小空间中使用不便。传统传感器内部结构复杂，所需空间大，功耗高。

为了摆脱有源有线的限制，一些有源无线的传感器发展起来，这些传感器通常需要附加电池为数据传输提供能量，或集成了能量采集技术，利用环境振动能量、太阳能等为传感器供电。虽然一定程度上摆脱了有线传输的限制，但这种有源无线的传感器仍然面临着电池电量不足、没有足够能量进行数据传输时的失效问题。

经过一段时间，成功突破有源有线限制的无源无线传感器逐步发展起来。现阶段典型的无源无线传感器主要有基于声表面波的传感器、LC 谐振式传感器和电磁波反射式传感器^[37]。其工作原理分别如下：

(1) 无源无线的声表面波传感器

无源无线声表面波传感器由信号收发天线、匹配网络和声表面波谐振器组成，如图 1.12 所示。阅读器向传感器发射电磁波信号，信号收发天线接收到电磁波信号后通过匹配网络将电磁波传递到声表面波谐振器端口，谐振器将电磁波信号转换为声表面波。声表面波在声表面波传感器表面流过后，又经转换器转化为电磁波信号发射，发射出去的信号再被阅读器接收，实现一次完整的无源无线信号交流。在声表面波传感器的表面覆盖有一层对环境变化非常敏感的薄膜，当传感器所处环境发生变化时，在其中传播的声表面波的波速、声阻抗等参数会发生变化，这一变化会反映到经由传感器发射的电磁波信号中，这就是类型传感器的传感原理。

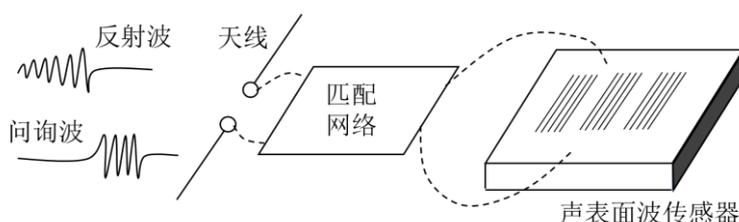


图 1.12 一种无源无线声表面波传感器

(2) LC 谐振式传感器

一个典型的 LC 谐振式传感器由一个电容和一个电感组成，以 LC 谐振电路和电感耦合为基础，实现无源无线传输。一般 RLC 谐振电路的谐振频率计算公式为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.6)$$

其中 L 和 C 分别为谐振电路的电感和电容。LC 谐振电路中的一些原件的组成材料的电磁参数随着环境的变化而变化, 导致电路中的电感值或者电容值发生改变, 进而引起 RLC 谐振电路的谐振频率变化。

(3) 电磁波反射式传感器

电磁波反射式传感系统主要以电磁波为媒介, 实现阅读器与传感器标签之间的信息交流, 如图 1.13 所示。在所有形式的传感器标签中, 贴片天线是一种重要的形式。下面以贴片天线作为传感器标签为例, 说明该类型传感系统的工作原理。阅读器天线向贴片天线传感器标签发射询问电磁波, 贴片天线传感器标签接收到电磁波后会被激活, 在内部产生感应电流, 随后贴片天线传感器标签会向空间中辐射反射电磁波, 反射电磁波被阅读器天线接收, 完成一次信号交流。贴片天线传感器标签反射的电磁波中含有天线的谐振频率、带宽等参数, 通过合适的设计将这些参数与待检测的环境参数相联系, 即可实现环境变化的监测。

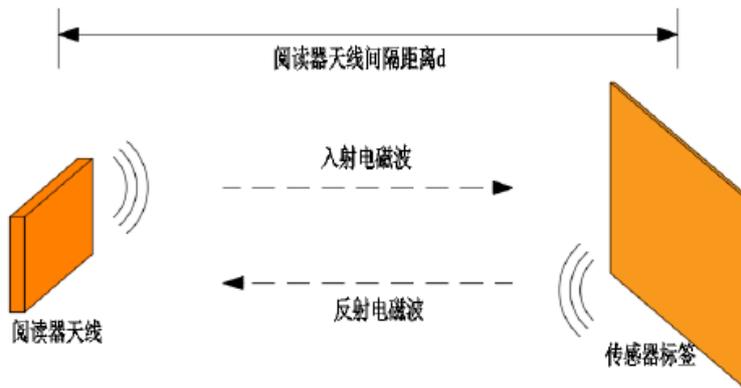


图 1.13 电磁波反射式传感器

上述三种方案均能实现传感参数的无源无线传输, 且各有利弊。声表面波传感器体积小、设计灵活、灵敏度高、具有储存功能, 但设计复杂; LC 谐振式传感器结构简单、易于加工、可靠性强, 但易受磁场干扰; 基于贴片天线的电磁波反射式传感器则具有结构简单、共形性好、成本低等优点:

- (1) 结构简单。贴片天线兼具传感与通讯功能, 无需其他附件, 构造简单, 可靠性强;
- (2) 共形性好。贴片天线一般厚度较小, 占用空间小, 易与待测结构表面粘结;
- (3) 成本低。贴片天线传感器的制造成本低, 部分产品生产成本可低至 1 美元;
- (4) 传输距离远。贴片天线传感器的无线传输距离可达 10m, 使其可以适应更多的应用场景。

正是由于这些优点,基于贴片天线的传感器目前在结构健康监测领域受到广泛关注。起初,基于贴片天线的传感器多是单片式,贴在结构表面用来监测结构的应变、位移、裂缝、温度等。Daliri 等人^[38]设计了一种基于圆形贴片天线的应变传感器,这种传感器的谐振频率与结构应变之间存在良好的线性关系,如图 1.9 所示。通过引入弯曲技术, Daliri 等人^[38]又提出了一种弯曲圆形微带贴片天线传感器,该传感器比简单的圆形贴片天线传感器的灵敏度高 3 倍,体积小 5 倍,拥有全方位应变传感能力。Yi 等人^{[39][40]}提出了一种基于集成了 RFID 标签的折叠矩形贴片天线的应变和裂纹传感器,并指出通过提高初始谐振频率可以设计出更小的折叠贴片天线,同时提高其传感灵敏度。2015 年, Sanders 等人^[41]研究了温度对单片式贴片天线谐振频率的影响。他们基于传输线模型推导出天线谐振频率与温度变化的关系,并进行了实验验证,给出了单片式贴片天线可以作为温度传感器的结论。2017 年,何存富等人^{错误!未找到引用源。}利用单片式矩形贴片天线实现了金属材料的无损监测。2018 年,周凯等人^[42]利用组合式贴片天线实现了平面结构的二维应变监测。2021 年, Yi 等人^[43]将单片式矩形贴片天线应用于监测水泥净浆的凝结时间,取得良好的效果。

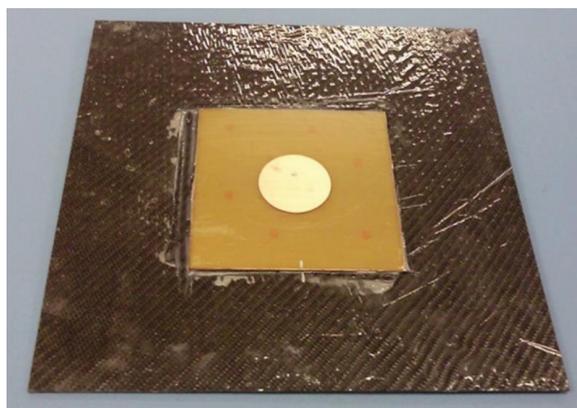


图 1.14 圆形贴片天线应变传感器

单片式贴片天线虽然目前在结构健康监测领域有广泛应用,但其仍有许多难以克服问题。贴在结构表面之后,单片式贴片天线会随着结构的变形而变形,当变形超过临界值,天线就会损坏。而单片式贴片天线所用基板的变形能力通常较差,这导致基于单片式贴片天线的传感器大多量程较小。此外,基于单片式贴片天线的传感器还面临着应变传递比不完全的问题^[28]。为了弥补单片式贴片天线存在的不足,分离式贴片天线应运而生。

2019 年, Xue 等人^[45]提出了一种基于矩形贴片天线的裂纹检测传感器,该天线由一对微带线馈电,构成平行板电容作为裂纹检测单元。该类型传感器的谐振频率漂移与裂缝宽度成线性关系,可以检测到物体上小至百分之一毫米的裂缝

变化。Xue 等人^[46]还提出了一种带有重叠子贴片的矩形贴片天线，并将其用于结构裂缝监测。其监测原理是裂缝宽度变化会改变子母贴片的重叠长度，进而改变天线的电长度，引起天线谐振频率变化。随后，薛松涛等人^[47]将这种带有重叠子贴片的矩形贴片天线用于监测螺栓松动，取得良好的效果。2020 年，薛松涛等人^[48]提出了一种电容馈电的分离式倒 F 天线，用来监测结构位移，其量程可达 30mm。

分离式贴片天线除了上述提到类型之外，还可以设计成在天线的辐射贴片和地平面之间引入空气间隙来改变天线谐振频率的形式。1982 年，Lee 和 Dahele^[49]已经证明，微带天线的谐振频率可以通过在辐射贴片和地平面之间引入可调节的空气间隙来改变。除了提供一种调节谐振频率的方法外，气隙还具有增加天线带宽的效果。1985 年，Dahele 等人^[50]对带有气隙的微带天线的研究工作做了总结。他们研究发现，微带天线的谐振频率会随着空气间隙厚度的提高而提高，并给出带有气隙的单片式圆形贴片天线和环形天线的理论分析和计算公式。2001 年，Guha^[52]提出了一种改进的带有气隙的圆形微带贴片天线谐振频率的分析模型，其适用范围更广。2022 年，卢必伟^[51]等人提出了一种带有空气层的复合基质矩形贴片天线，获得了比普通矩形贴片天线更高的灵敏度。

1.3 本文的研究目的、意义和内容

1.3.1 研究目的和意义

螺栓松动监测技术发展至今，已经有许多监测方法。如基于人工的方法、基于振动的方法、基于压电传感器的方法、基于超声波的方法、基于嵌入式传感器的方法和基于图形识别的方法等。这些方法在前文中给出了详细的介绍，他们或多或少有一些缺点，或者有不适用的应用场景。而基于贴片天线传感器的结构健康监测方法目前已经在结构健康监测领域得到广泛应用，其许多优点可以弥补现有螺栓松动监测方法的不足，比如成本低、结构简单、无线传输数据、智能化等。特别是分离式贴片天线的提出，其结构形式更多样，设计更灵活，可以与螺栓结构的特点相结合。通过设计合适形式的分离式贴片天线，可以有效监测到螺栓的螺母旋转、螺杆长度变化等，从而准确判定螺栓状态。该监测方法与无人机技术相结合，可以实现螺栓松动的长时间、大范围、远距离、周期性监测，有助于及时发现螺栓的松动问题，采取措施进行弥补，对提高结构运营效率，保障人民生命财产安全具有重大意义。

本文在分析螺栓松动过程的基础上，发现螺栓松动都会有螺杆长度变化和螺帽旋转这两个指标。基于分离式贴片天线，我们根据这两个指标设计了两种螺栓

松动监测传感器，以期为螺栓松动监测提供一些新的解决方案。两种形式的传感器分别适用于不同场景：直接监测螺母旋转的传感器适用于既有建筑的螺栓松动监测，其可以直接与已安装螺栓连接，监测其螺帽的旋转；监测螺杆长度变化的传感器则可以与螺栓集成为一体，实现带有螺栓松动监测功能的螺栓的批量生产，为新建结构组建螺栓监测网络提供新选择。

1.3.2 先行研究路线

目前对于分离式的贴片天线，研究室已经做了许多工作。

2019年，Xue 等人^[45]提出了带有附加馈电线的裂缝传感器，如图 1.15 所示。根据馈电线的形式不同，该类型的传感器又分为两种形式，一种是在两矩形微带线之间用介质板填充，另一种是将馈电线设计成“L”型梁，“L”型梁馈电线与下层微带线之间留有间隙。两种设计的目的都是为使微带线之间的距离保持恒定，尽量避免由于两微带线之间距离的变化引起的电容变化，进而减小误差。在实际应用中，将两个矩形微带线所附属的部件分别固定在裂缝的两边，裂缝宽度的变化就会引起两微带线之间正对面积的改变，进而改变二者之间形成的电容，天线的谐振频率随之改变。

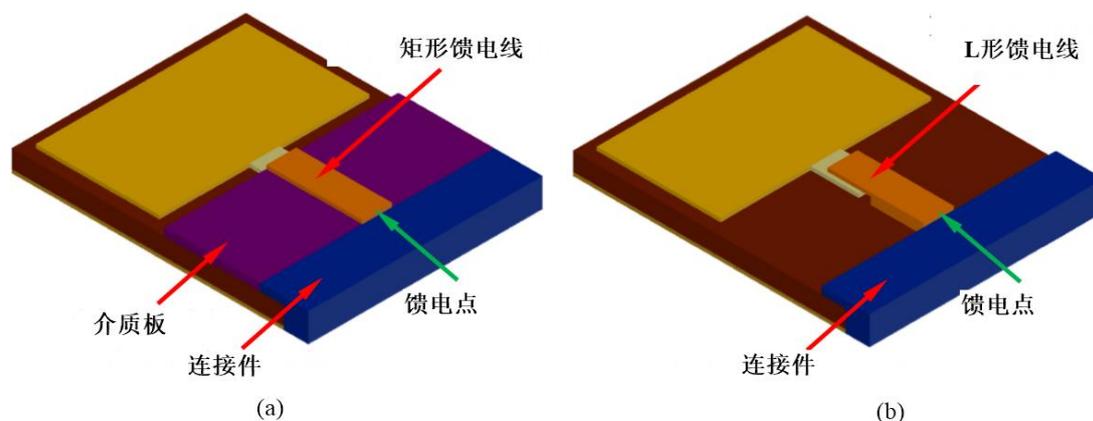


图 1.15 带有附加馈电线的裂缝传感器

同年，Xue 等人^[46]还提出了一种带有重叠子贴片的矩形贴片天线，用于裂缝监测，如图 1.16 所示。该传感器由一个矩形贴片天线和一个带有矩形子贴片的介质板组成，矩形子贴片与矩形贴片天线的贴片相接触，共同构成带有重叠子贴片的矩形贴片天线的等效辐射贴片。在安装时，矩形贴片天线和带有矩形子贴片的介质板分别与裂缝的两边固定。裂缝宽度的变化会引起两贴片之间重合长度的变化，进而导致天线等效辐射贴片的贴片长度发生变化，而天线谐振频率与等效辐射贴片的长度相关，这就是该类型贴片天线传感器的传感原理。

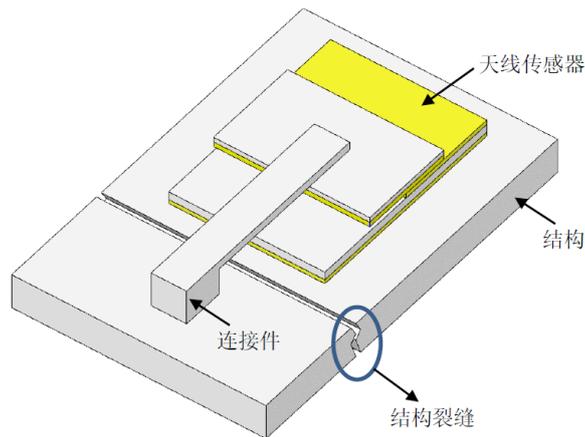


图 1.16 带有重叠子贴片的矩形贴片天线

2020 年, Guan 等人^{[48][53]}设计了一种电容馈电的倒 F 天线, 用于结构位移的监测, 最大量程可达 30mm, 如图 1.17 所示。“L”型贴片与地平面通过接地孔相连, 矩形馈电线与“L”型贴片之间形成电容, 通过给矩形馈电线的末端馈电可以通过电容间接激活“L”型贴片。上下两贴片的相对移动会改变“L”型贴片馈电点的位置, 引起“L”型贴片的谐振长度的改变, 进而改变天线的谐振频率。

以上传感器都是基于分离式贴片天线, 实现了在传感器本身不受力的情况下监测结构的裂缝或者位移。这些给后续基于分离式贴片天线的传感器的设计打下了坚实的基础。

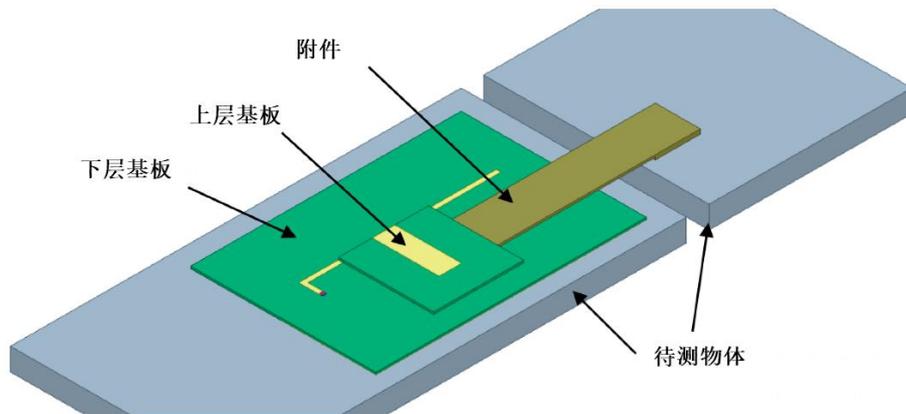


图 1.17 电容馈电的倒 F 天线示意图

1.3.3 研究内容

本文的主要研究内容及章节安排如下:

第一章为绪论, 主要阐述了经典的螺栓松动原理、常见的螺栓松动检测方法、无源无线传感技术和贴片天线传感器的研究现状, 最后对本文的研究目的、意义

和主要研究内容进行了介绍。

第二章主要阐述了电磁场基础理论、贴片天线传感器的基本理论和贴片天线的小型化方法。电磁场基本理论主要包括麦克斯韦方程组和天线转换电流和电磁波的能力概述。天线传感器基本理论部分主要阐述了电磁场的理论，对天线的谐振腔模型、天线的谐振频率计算等进行了研究，并将其用于解释本文中提出的天线传感器的工作原理。天线小型化部分总结了常见的贴片天线小型化方法，并对比分析确定了本文所采用的小型化方法。

第三章为扇环形贴片天线的设计与模拟。主要阐述了扇环形贴片天线的传感原理、天线性能的数值模拟以及天线的尺寸优化，给出具体的扇环形天线的尺寸参数。通过模拟结果对天线的传感性能进行了初步分析。最后，分析了温湿度对天线性能的影响。

第四章为扇环形贴片天线传感器实验。在有线测试环境中，用矢量网络分析仪测试并记录扇环形天线的 S_{11} 曲线，以进一步评估该天线的实用性及其在实际工作中的表现。

第五章为双层基板圆形贴片天线的设计、小型化、模拟和可行性分析。介绍了双层基板开槽圆形贴片天线的设计图及其与螺栓的组装方法。随后，通过曲流技术，在天线适当位置处开槽，并结合 HFSS 高频仿真软件对天线进行优化，实现了天线的小型化。随后，对该天线的可行性进行了分析。最后探索了改变天线灵敏度的方法。

第六章为结论和展望。总结了前文的研究成果，对扇环形贴片天线和双层基板开槽圆形贴片天线的理论、设计、模拟及实验进行归纳总结和比较，并对两个传感器的可行性与实用性进行了评估。最后对无源无线传感器监测螺栓松动的未来进行了展望。

第 2 章 基于贴片天线的传感器原理

利用贴片天线作为无源无线传感器的传感单元来监测螺栓松动时,需要将螺栓的性能参数与螺栓松动过程中的指标相联系,以实现用贴片天线传感器监测螺栓松动的目的。为了降低传感器的使用成本,需要简化天线传感器的谐振频率、带宽等电磁参数与待测量的关系,因此对天线电磁参数进行基本的研究是必要的。

本文主要以贴片天线的谐振频率作为传感参数,因此主要介绍了麦克斯韦方程组、谐振腔理论和基于谐振腔理论的天线谐振频率计算公式推导。同时,考虑到本文的天线设计中应用到了天线小型化的内容,故也对天线小型化的常见方法做了介绍。

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

在 2.2 节中,主要介绍了谐振腔原理,并基于谐振腔原理推导出了贴片天线谐振频率计算方法,并给出了常见组合式贴片天线的基本理论。

在 2.3 节中,介绍了目前贴片天线常用的小型化方法,并通过分析比较,确定了本文中将会采用的小型化设计方法。

2.1 电磁场和天线基本理论

2.1.1 麦克斯韦方程

天线传感器与阅读器之间是通过电磁波通讯的,谈到电磁波就绕不开麦克斯韦方程组。1865 年,英国物理学家麦克斯韦在库仑、安培、法拉第等前人研究的基础上,总结创新,提出了麦克斯韦方程组,深刻揭示了电磁场中场源、电场与磁场三者之间的关系。麦克斯韦方程组有多种表达形式,其中微分表达形式简洁易懂,故在此选用该形式。其微分形式如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

其中, \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 分别为电感应强度、磁感应强度、电场强度和磁场强度, ρ 为空间中某一点的电荷密度, \mathbf{J} 为电流密度, t 表示时间。

式 2.1 和式 2.2 描述的分别是电场和磁场，空间中某一点电感应强度的散度等于该点的电荷密度，磁感应强度的散度等于零。式 2.3 为法拉第电磁感应定律，指的是变化的磁场周围会产生电场。式 2.4 为安培-麦克斯韦定律，指的是电流和变化的电场周围会产生磁场，也正是在这个式子包含了麦克斯韦提出的“位移电流”假说，补齐了麦克斯韦方程组的最后一块拼图。

在上述方程的基础上，为了求解空间中某一点的电场和磁场，还需要补充媒介的本构关系式：

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中， ε 、 μ 和 σ 分别为媒介的介电常数、磁导率和电导率。

除了用于求解空间中的电磁场，麦克斯韦方程组还预言了电磁波的存在。通过麦克斯韦方程，可以推导出真空中电场和磁场的传播方程：

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \mathbf{B} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

其中， μ_0 和 ε_0 分别代表真空的磁导率和介电常数。

从式 2.6 可以看出，电场和磁场都满足波动方程，也就是说电场和磁场在空间中都以波动的形式传播，这自然就是电磁波。同时根据波动方程的特点，可以求出电磁波的波速为： $1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，等于真空中的光速，因此，麦克斯韦还大胆地预测光也是一种电磁波。从这个角度来讲，麦克斯韦方程组不仅统一了电场和磁场，还预测了电磁波的存在和光的性质，带领我们走进了全新的电磁时代。

2.1.2 天线收发电磁波能力

麦克斯韦方程中的法拉第电磁感应定律和全电流定律表明电与磁在一定条件下可以相互转化。天线就是一种可以实现电与磁之间相互转化的载体。天线中变化的电流在天线周围的空中产生电磁波并向外辐射，天线周围电磁场的变化也会导致穿过天线的磁通量发生变化，进而在天线中激发出感应电流。因此，天线可以实现电流信号和电磁信号之间的转换。

下面以简单的双导线天线为例，对天线的收发能力进行评估。假定真空中存在两根理想导体，其内部传输的电流不会产生损耗，其中接入了横向模的电磁波，如图 2.1 所示。

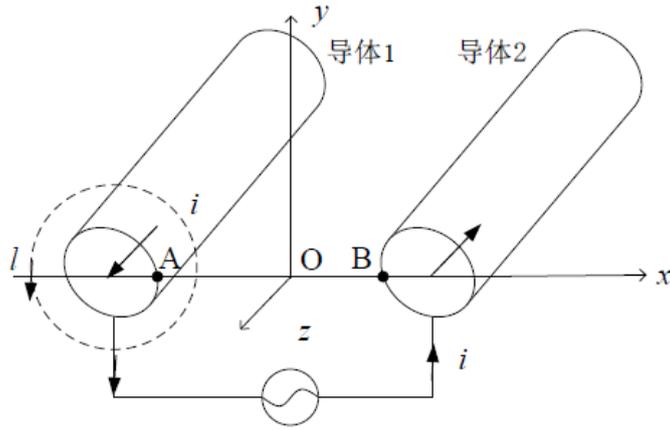


图 2.1 双导线天线示意图

假设在两根导线之间取路径 A-B，并对路径 A-B 进行电场积分，可以得到 A、B 两点之间的电压差 U ，也即两导线之间的电压差 U ：

$$U = U_{AB} = \int_A^B E \cdot dl = \int_A^B E_x \cdot dx \quad (2.7)$$

将 A、B 两点之间的电压对路径的法向求偏导，并使用法拉第电磁感应定律分析可以得到下式：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \int_A^B \left(-\frac{\partial B_y}{\partial t}\right) dx = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A^B B_y dx = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.8)$$

其中， $\int_A^B B_y dx$ 为路径 A-B 的磁通量。将式 2.8 做进一步简化，可以得到式 2.9：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} Li = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.9)$$

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

基于法拉第电磁感应定律与全电流定律的相互对应关系，也可以运用全电流定律对围绕导线的环路 l 进行计算，得到式 2.10 和式 2.11：

$$\oint_l H \cdot dl = \oint_l (H_x dx + H_y dy) = i + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial t} (CU) = -C \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2.11)$$

其中， C 为双导线天线单位长度的天线电容。该式同样表征了产生电场的瞬时电压与电磁场的瞬时电流间的关系。当天线形式固定时，天线的电容和电感可以求出，联立式 2.9 和式 2.11 即可求解该电场电压^[55]。

2.2 基于谐振腔假定的贴片天线谐振频率计算

2.2.1 谐振腔原理

麦克斯韦方程组带领我们走进了电磁波时代,但直接运用麦克斯韦方程组计算天线的实际工作频率并不现实。实际中,为了计算天线的谐振频率,往往会进行一些合理的假定。目前,天线谐振频率计算的常见假定有传输线假定、谐振腔模假定以及矩量法等。其中,谐振腔模假定在计算天线的初阶和高阶谐振频率时都具有可靠的精度,且计算也相对简单,对算力需求较小,相对传输线假定和矩量法有一些突出的优点,故本节采用谐振腔模假定分析贴片天线的谐振频率。

一般来讲,一个封闭或者半封闭的金属空腔即为谐振腔,在谐振腔内的电磁波会以工作频率(谐振频率)来回振荡。假设有如图 2.2 所示的一般封闭矩形谐振腔,其长宽高分别为 a 、 b 、 d 。

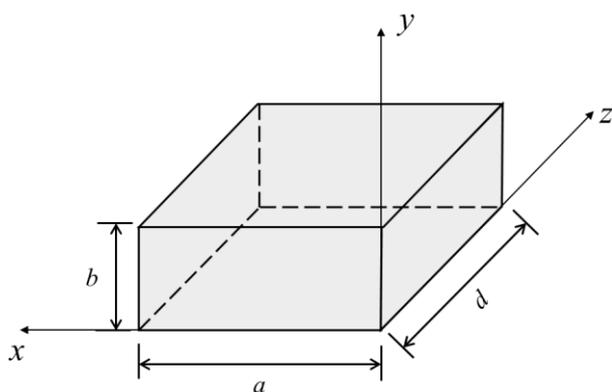


图 2.2 典型谐振腔示意图

谐振腔的一个特性是可以筛选在其内部振荡的电磁波,谐振腔的尺寸、形状、内部填充介质的不同都会有不同的筛选结果。筛选过后,留在谐振腔内的电磁波一般具有特定的频率,这就是该谐振腔的谐振频率。下面将对在谐振腔内的电磁波在传播方向的电场分量和谐振频率分别进行分析^[55]。

为了简化计算,假设电磁波沿着高度 d 的方向传播且谐振腔四周的边界为理想磁壁,考虑谐振腔与波导的相似性,则在如图 2.2 所示的谐振腔内沿着高度 d 的方向传播的电磁波的电场分布 $E_h(x, y, z)$ 可以直接写为^[55]:

$$E_h(x, y, z) = \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right)(C_1e^{-jk_zz} + C_2e^{+jk_zz}) \quad (2.12)$$

其中, m 、 n 分别表示电磁波在谐振腔的长度方向和宽度方向的谐振阶数,其值为整数; C_1 、 C_2 表示前向行波和反向行波的任意振幅。 k_z 为 m 、 n 阶谐振对应的

电磁波传播方向的传播常数，可以用下式计算：

$$k_z = \frac{p\pi}{d} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.13)$$

其中， p 为电磁波在高度方向的谐振阶数，其值为整数。 k 可以采用下式计算：

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (2.14)$$

其中， ω 是该在谐振腔内谐振的电磁波的角频率， μ 、 ε 分别为谐振腔内填充介质的磁导率和介电常数。考虑该谐振腔为封闭谐振腔，在传播方向上下两个平面的边界条件可用式 2.15 和式 2.16 确定。

$$E_z(x, y, 0) = E_y(x, y, 0) = 0 \quad (2.15)$$

$$E_z(x, y, d) = E_y(x, y, d) = 0 \quad (2.16)$$

将式 2.15 和式 2.16 中的边界条件带入式 2.12，可得：

$$-C_1 + C_2 = 0 \quad (2.17)$$

$$-C_1 e^{-jk_z d} + C_2 e^{+jk_z d} = 0 \quad (2.18)$$

联立式 2.17 和式 2.18 可得：

$$C_1 = C_2 \quad (2.19)$$

$$2jC_1 \sin(k_z d) = 0 \quad (2.20)$$

将式 2.19、式 2.20 带回式 2.12，得到封闭矩形谐振腔在电磁波传播方向的电场分量：

$$E_z(x, y, z) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{d}z\right) \quad (2.21)$$

其中， E_0 为常数，其值为 $2C_1$ 。由式 2.21 可知，为了保证谐振腔内电磁波的电场分量不为 0， m 、 n 不能为 0，否则，式 2.21 将无意义。因此，当电磁波沿着谐振腔的高度方向传播时，在长度方向和宽度方向上，主模的谐振阶数均不能为零，而在高度方向上主模的谐振阶数可以为 0。

考虑矩形谐振腔的谐振频率 f 与角频率 ω 的关系：

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.22)$$

联立式 2.13、2.14 和 2.22，得到谐振腔谐振频率的计算公式 2.23：

$$f = \frac{k}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2.23)$$

考虑电磁波速度的定义如式 2.24，式 2.23 可以进一步化简为：

$$c = \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{\omega\varepsilon}} \quad (2.24)$$

$$f = \frac{k}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (2.25)$$

其中， ε_r 为谐振腔内部介质的相对介电常数。

2.2.2 基于谐振腔理论的贴片谐振频率计算

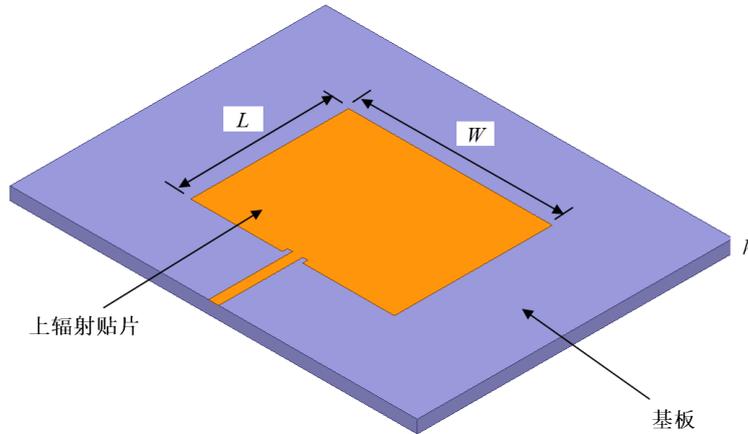


图 2.3 典型矩形贴片天线示意图

图 2.3 给出了典型的矩形贴片天线的示意图，如果将矩形贴片天线的辐射贴片看作矩形谐振腔的上壁，将地平面看作矩形谐振腔的下壁，那么，只要再证明矩形贴片天线的四个侧壁可以等效为理想磁壁，矩形贴片天线即可等效为图 2.2 所示的矩形谐振腔。自然就可以应用矩形谐振腔的理论分析矩形贴片天线^[55]。

向贴片天线输入电压后，输入电压的作用将电荷分配到上辐射贴片和地平面的上下表面。由于同种电荷之间产生排斥力，异种电荷之间产生吸引力，天线上辐射贴片和地平面的相对表面分布着异种电荷，上辐射贴片和地平面中的电荷分别分布在其上下表面。在输入电压的作用下，电荷会有流动的趋势。在这种趋势下，电荷发生流动，天线的上辐射贴片和地平面内就会产生感应电流，伴随感应电流会产生切向磁场。在施加电压相同的情况下，如果贴片天线的高度降低或贴片尺寸变大，则传输电荷密度减小，距离缩短，感应电流的幅度就会减小。如果贴片天线的高度相对于贴片的长度和宽度足够小，则感应电流几乎可以忽略不计，随感应电流产生的切向磁场自然也就可以忽略，贴片天线的四个侧壁可以认为是理想磁壁^[55]。因而可以用式 2.25 计算矩形贴片天线的谐振频率。

$$f = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad (2.26)$$

其中， L 、 W 、 h 分别为贴片天线的上辐射贴片的长度、宽度和与地平面的距离， m 、 n 、 p 为在长度、宽度和高度三个方向的谐振阶数， ϵ_r 为贴片天线基板的相对介电常数。考虑到贴片天线的高一般远小于贴片天线的长和宽，高度方向的谐振一般也极其微弱，略去不计，此时，矩形贴片天线的谐振频率可以采用式 2.27 计算：

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad (2.27)$$

其中, f_{mn} 表示对应于贴片天线 TM_{mn} 阶谐振模式的谐振频率。另外, 由于在推导过程中将贴片天线的侧壁边界进行了等效, 用式 2.27 计算的贴片天线谐振频率会有近似。据 Balanis 的研究, 当贴片天线的长宽高满足式 2.28 时, 式 2.27 的计算结果是可靠的。

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

根据矩形贴片天线谐振频率的计算公式 2.27, 贴片天线的谐振频率主要与天线谐振方向电流流过的路径长度和天线基板的相对介电常数有关。因此, 影响矩形贴片天线中电流流过路径长度的因素和改变天线基板的相对介电常数的因素均能够以天线的谐振频率为“桥梁”来监测。

2.2.3 组合贴片天线理论

本文中提出的贴片天线都是以单片式的贴片天线为基础演变而组合式贴片天线, 主要应用到两个原理: 其一是天线的谐振频率与天线辐射贴片的有效电流路径长度呈负相关; 其二是天线谐振频率受天线辐射贴片与地平面之间介质的等效相对介电常数的影响。下面对这两个原理所设计到的基本理论做基本的阐释。

其一, 天线的谐振频率与天线辐射贴片的有效电流路径长度呈负相关。

以图 2.4 中所示的带有重叠子贴片的矩形贴片天线裂缝传感器为例。其上层基板下表面的子贴片与下层基板上表面的矩形贴片相接触, 共同构成该天线的等效辐射贴片。该贴片天线的本质还是矩形贴片天线, 故其谐振频率仍然可以用一般矩形贴片天线的计算公式来计算, 即:

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2} \quad (2.27)$$

当该天线的上层子贴片沿着天线长边 L 方向移动时, 天线两个矩形贴片之间的重叠长度会发生变化, 进而引起整个天线的等效辐射贴片的长度发生变化。只考虑天线辐射贴片在长度 L 方向的变化, 该天线的谐振频率计算公式可以简化为:

$$f_{m0} = \frac{mc}{2L_e\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.29)$$

其中, f_{m0} 为天线在长度方向的 m 阶谐振, L_e 为该天线等效辐射贴片的长度, 可以表示为:

$$L_e = L_n + L_b - L_o \quad (2.30)$$

其中, L_n 、 L_b 和 L_o 分别代表上层基板下表面的子贴片的长度、下层基板上表面的矩形贴片的长度和二者之间的重叠长度。

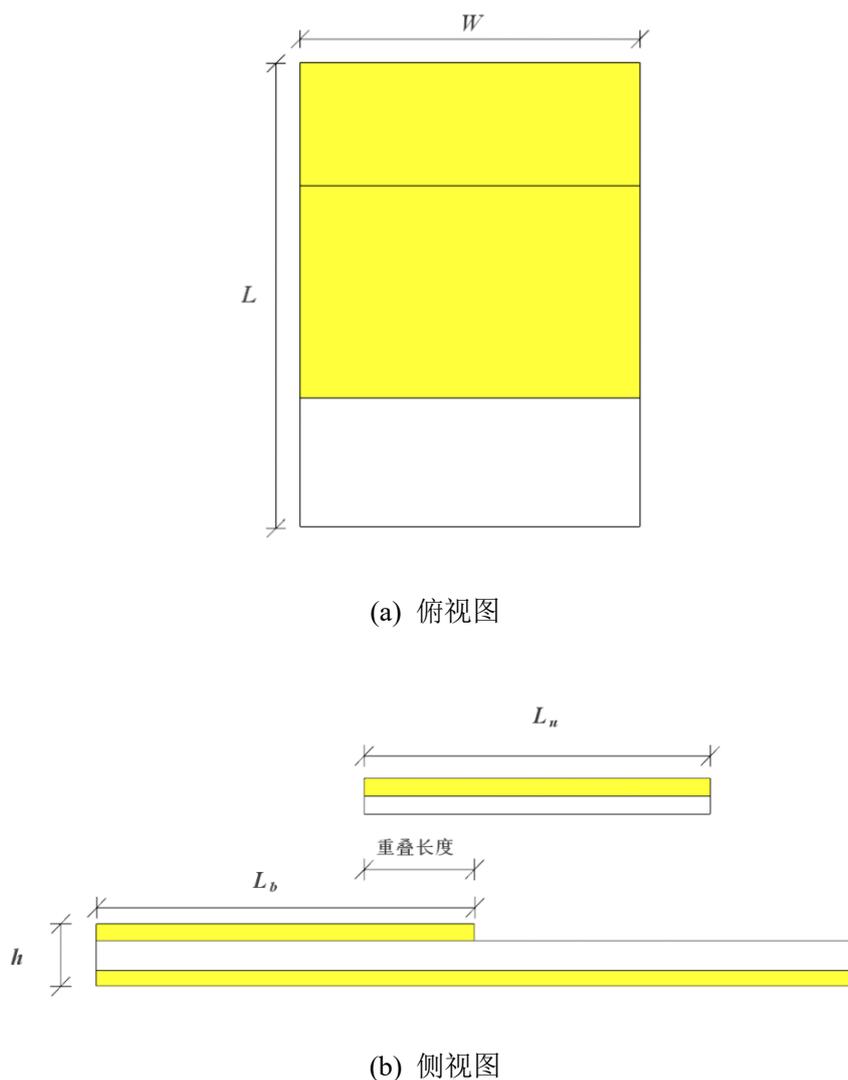


图 2.4 带有重叠子贴片的矩形贴片天线裂缝传感器

其二, 天线谐振频率受天线辐射贴片与地平面之间介质的等效相对介电常数的影响。

Lee 和 Dahele^[49]已经证明, 微带天线的谐振频率可以通过在辐射贴片和地平面之间引入可调节的空气间隙来改变, 并据此设计了工作频率可调的贴片天线。对于如图 2.5 所示的带有空气间隙的矩形贴片天线, 其谐振频率的计算公式可表示为^[54]:

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \sqrt{\left(\frac{m}{L_e}\right)^2 + \left(\frac{n}{W_e}\right)^2} \quad (2.31)$$

其中, f_{mn} 为贴片天线 TM_{mn} 阶谐振模式, m 、 n 为谐振阶数, c 为真空中的光速。 L_e 和 W_e 分别贴片的等效长度和等效宽度, 与天线辐射贴片到地平面的距离、空气间隙厚度等因素有关。 $\varepsilon_{r,eff}$ 为考虑空气间隙影响的等效介电常数, 主要受空气间隙厚度的影响, 空气间隙厚度越大, 其值一般越小, 天线谐振频率越高。

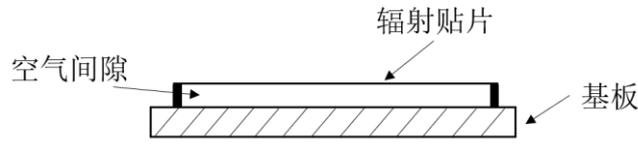


图 2.5 带有空气间隙的矩形贴片天线

2.3 贴片天线小型化原理与方法

本文中的第二种通过监测螺杆长度变化来监测螺栓松动的方法，需要与螺栓集成。由于建筑中常用螺栓的尺寸是有限的，为了满足与螺栓集成的要求，天线的尺寸必须足够小，小型化设计就显得尤为重要。这里对目前常见的贴片天线小型化原理、方法以及本文所采用的方法做简单概述。

根据一般矩形贴片天线的谐振频率计算公式 2.27，天线的谐振频率与天线中电流流过路径的长度和基板的节点常数呈负相关，可以采用增加介质基板介电常数、曲流技术、短路加载技术来实现天线的小型化设计。但这些方法会有降低天线的带宽、方向图变差或引起天线效率下降等问题，附加有源网络、采用电磁带隙结构可以改善这些问题。除了上述提到的方法，采用左手介质也是一种行之有效的天线小型化方法。下面将分别进行简单概述。

A. 增加介质基板的介电常数

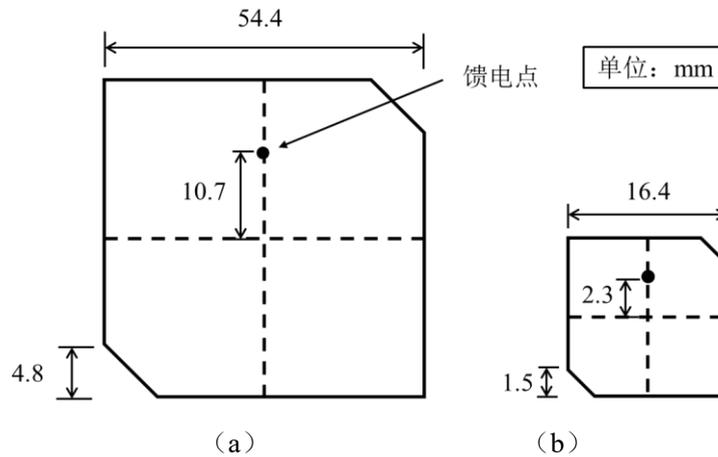


图 2.6 两种不同介电常数基板的贴片天线

根据式 2.27，对于一般的微带贴片天线，其谐振频率与介质基板的介电常数呈负相关。相同尺寸的天线，基板的介电常数越高，天线的谐振频率就越低，因此，采用高介电常数的材料作基板可以有效减小贴片天线的物理尺寸。Wong 等人^[56]设计了两组圆极化切角微带天线，采用两种不同介电常数的材料作为基板，在

工作频率同为 1575MHz 的情况下，两组天线的尺寸如图 2.6 所示。

图 2.6 (a) 中天线的相对介电常数为 3.0，厚度为 1.524mm；图 2.6 (b) 中天线的换成了相对介电常数为 28.2 的基板，厚度为 4.75mm。从图中可以看出 (b) 天线的面积大约只有 (a) 天线的十分之一。而图 2.6 (b) 中的天线的基板厚度增加是为了弥补由于介电常数的增加而引起的天线带宽减小，(b) 天线通过增加基板高度的方式获得了与 (a) 天线相同的带宽。

B. 曲流技术

根据式 2.27，天线中电流流过的路径越长，天线的谐振频率就越小。因此，通过采用特殊形状的辐射贴片或者在贴片的适当位置开槽的方式，增加微带天线中电流有效路径的长度，可以达到降低天线谐振频率的目的，这就是曲流技术^[57]。

图 2.7 所示为一种采用天线表面开槽技术的辐射贴片。从图中可以看出，在外围尺寸不变的情况下，矩形贴片中的开槽使得流过贴片的电流的路径发生了弯曲，电流流过的路径变长，引起天线谐振频率的降低，进而实现了天线小型化。

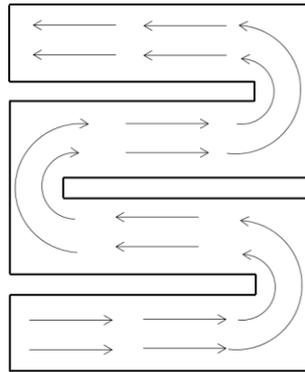


图 2.7 表面开槽辐射贴片的电流路径

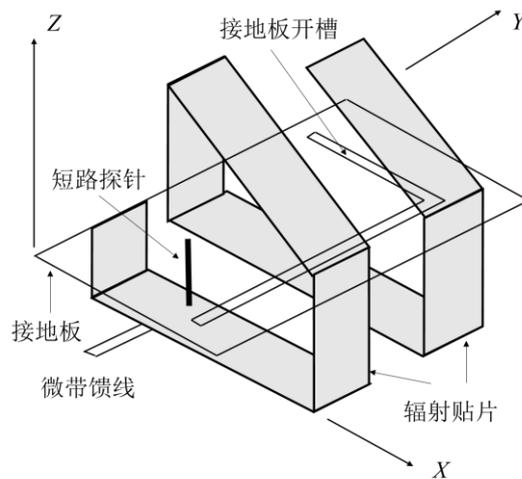


图 2.8 W 型超小型化微带天线

除了在辐射贴片上开槽可以实现天线的小型化外,在地平面上开槽也可以实现弯曲贴片中电流,增加电流路径有效长度的目的,从而降低天线的谐振频率,实现天线小型化^[58]。

通过采取特殊形状的辐射贴片也可以实现天线的小型化,邓曦等人^[59]提出过一种W型超小型化微带天线,如图2.8所示。其尺寸为 $16.5\text{mm} \times 14\text{mm} \times 6\text{mm}$,可以工作在 1.217GHz 频率上,而相同尺寸的矩形贴片天线的工作频率则在 9GHz 左右。

C. 短路加载

在半波结构的矩形微带天线的零电位线处短接,天线的电流分布将不会受到影响,但可以将天线的尺寸至少减小一半。

主要的微带天线加载方法有短路加载和电阻加载两种,短路加载又分短路面加载、短路片加载和短路销钉加载三种方式。图2.9(a)是一种常见的短路片加载的平面倒F天线,与开槽技术结合还可以得到图2.9(b)中的双频平面倒F天线^[60]。

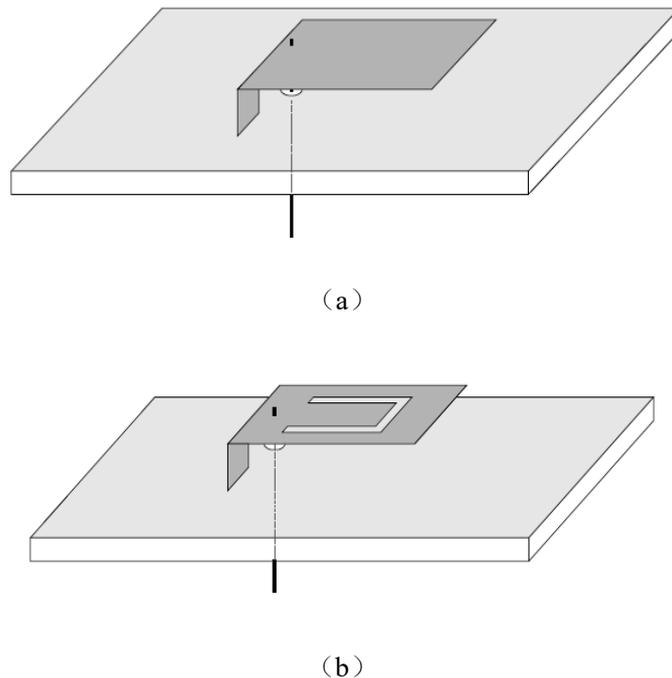


图 2.9 短路片加载的平面倒 F 天线

D. 附加有源网络

在采用增加基板介电常数、曲流技术等方法缩小天线的尺寸后,往往也会带来一些问题,比如天线的辐射电阻减小、天线效率降低、天线带宽变窄等。利用有源网络可以在一定程度上弥补上述问题,提高天线的工作频带宽度与增益

等,也有助于实现天线的阻抗匹配和调整天线的方向图,可以在尽量减小天线性能损失的情况下缩小天线的尺寸^[58]。

E. 采用电磁带隙结构

电磁带隙结构是周期性结构的统称。周期结构与电磁波相互作用会出现一些如频率禁带、通带、频率间隙等特性^[61]。电磁带隙 EBG 结构是一种人造周期性结构,将这种结构附加在天线辐射贴片背面,可以抑制表面波,改善由于贴片尺寸减小而导致的方向图变差等问题,达到小型化目的,图 2.10 给出了一个电子带隙 EBG 结构的应用实例^[62]。

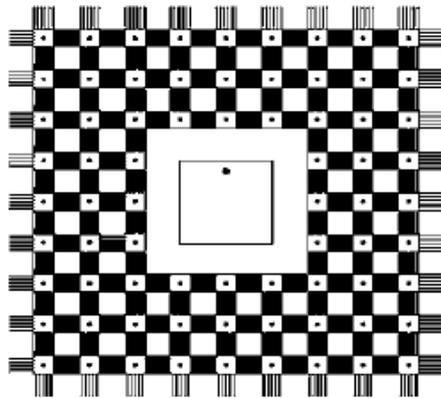


图 2.10 一种带 EBG 的短路微带天线

F. 采用左手介质

左手介质材料是一种具有负介电常数和负磁导率的材料,因在波矢量、电场方向和磁场方向满足左手螺旋关系而得名。在常见的右手介质中引入左手介质材料,可以对右手介质相位补偿,对微带天线小型化有重要理论意义。Sanada 等人^[63]设计了一种组合左右手材料的微带贴片天线,与常规微带贴片天线相比,采用组合左右手材料作为基板的贴片天线的辐射贴片的尺寸减小了 75%。

根据以上描述,可以发现,目前常用的贴片天线小型化方法有许多,其中增加基板介电常数、曲流技术与短路加载三种方法相对简单易用。考虑需要与螺栓集成,所设计的天线结构形式越简单,与螺栓集成时越容易,在实际使用中也能更可靠。曲流技术仅需在贴片的适当位置开槽,即可实现增加天线电流路径长度,降低天线谐振频率的目的,简单实用。因此本文主要采用曲流技术作为后续贴片天线的小型化方法。

2.3 本章小结

本章介绍了螺栓松动的原理和天线谐振频率的分析方法，主要完成了以下部分的工作：

（1）介绍了电磁学的麦克斯韦方程组的组成和每个公式的含义，这是天线电磁性能分析的基础；

（2）介绍了广泛应用于天线分析的谐振腔原理，根据谐振腔原理推导出了矩形贴片天线传感器的谐振频率计算公式，并进一步给出了组合式贴片天线的相关理论，本文中提出的两种贴片天线传感器的谐振频率计算均可以此为基础推导出。

（3）介绍了目前常用的贴片天线的小型化方法，对其特点进行了分析，并最终选用更加简单、实用、可靠的曲流技术作为本文中所提出的天线的小型化方法。

第3章 基于扇环形贴片天线的螺栓松动传感器设计与模拟

根据第2章的分析,螺栓螺母的旋转是螺栓松动的重要指标之一。本章基于扇环形贴片天线提出了一种角度传感器,可以用来识别螺栓螺母的旋转,以达到监测螺栓松动的目的。

该传感器的应用场景是既有钢结构的螺栓连接的松动监测。针对目前已完成建设的采用螺栓连接的钢结构,该传感器可以直接安装这些结构的螺栓节点上,简单易用。

在3.1节中,介绍了介于扇环形贴片天线的螺栓松动传感器的组成、传感原理以及安装方法。

在3.2节中,基于谐振腔原理,给出了扇环形贴片天线的谐振频率计算公式,并推导出螺母旋转角度变化较小的情况下,扇环形贴片天线的谐振频率与角度变化之间存在近似线性关系。

在3.3节中,运用HFSS对扇环形贴片天线的传感性能进行了模拟,并以实现尽可能高的传感灵敏度和良好的阻抗匹配为目标,优化了天线的尺寸。并且,通过数值模拟结果与理论分析结果的对比,初步验证了所提出理论的正确性。

在3.4节中,探究了环境中温度和湿度变化对扇环形贴片天线传感器的传感性能的影响。

3.1 扇环形贴片天线设计

根据公式2.27,贴片天线的谐振频率与其辐射贴片中电流流过路径的长度有关。Xue等人^[47]已经根据此原理设计过一种带有重叠子贴片的矩形贴片天线,用于结构位移的监测,证明了其可行性与实用性。

基于此原理,采用分离式贴片天线的形式,改变贴片天线的形状,将矩形基板改为环形基板,将矩形贴片改为扇环形贴片,将螺栓的旋转转变为天线贴片长度的变化,而天线贴片长度的变化可以使天线谐振频率发生变化,这就将螺母的旋转与天线谐振的变化联系到了一起。以天线的谐振频率为传感参数。即可实现对螺栓松动过程中螺母旋转的监测。据此设计出的扇环形贴片天线如图3.1所示。

扇环形天线由环形基板和扇环形基板两部分组成,如图3.1所示。环形基板下表面全部覆铜作为接地面,上表面打印有扇环形贴片1和馈电线,扇环形基板下表面打印有与扇环形贴片1宽度相同且圆心角较小的扇环形贴片2。使用时将扇环形基板放在环形基板上,并保证扇环形贴片1和扇环形贴片2相接触,二者

共同组成天线的等效辐射贴片，该等效辐射贴片的圆心角等于两个扇环形贴片的圆心角之和减去二者重合部分的圆心角。当两贴片绕圆心发生相对旋转时，二者共同形成的等效辐射贴片的圆心角就会发生改变，既天线环向的辐射长度发生改变，进而改变环向谐振的谐振频率。

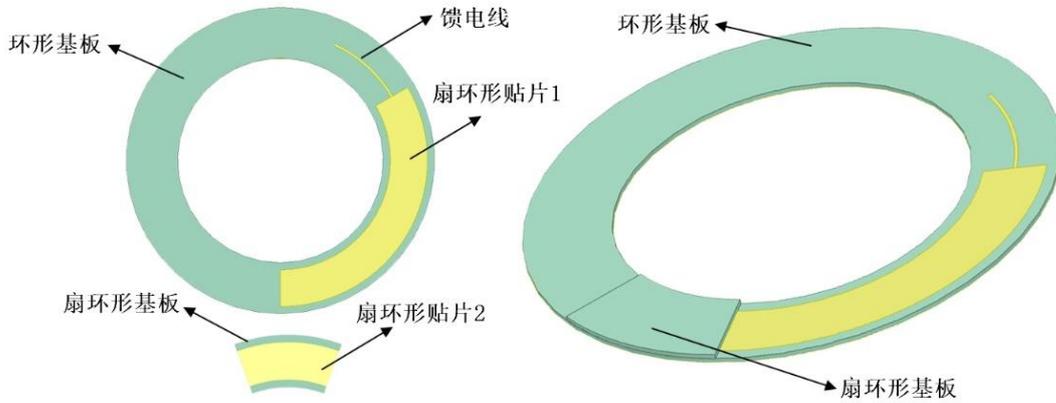


图 3.1 扇环形天线示意图

在实际应用中，扇环形天线传感器的安装示意图如图 3.2 所示。环形基板粘贴在连接件上，扇环形基板通过六边形开孔的附件与螺母相连。当螺母旋转发生螺栓松动时，会引起扇环形基板相对环形基板发生相对旋转，进而改变天线等效辐射贴片的圆心角度，天线谐振频率发生变化。

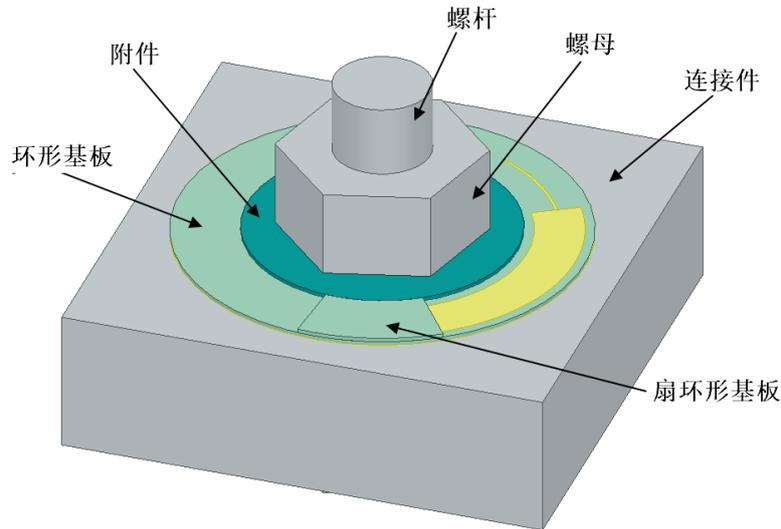


图 3.2 扇环形天线传感器的安装示意图

3.2 扇环形贴片天线理论

对于本章中的扇环形天线传感器，可以看作由 2.2.3 小节中的组合式矩形贴

片演变而来。扇环形基板与环形基板之间绕圆心发生相对旋转只会改变二者共同组成的等效辐射贴片的环向长度，而对径向宽度没有影响，因此我们只需要关注其环向谐振的谐振频率。根据 2.2.3 小节中的分析，该扇环形天线的谐振频率同样可以由公式 2.29 计算：

$$f_{m0} = \frac{mc}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

其中， f_{m0} 代表扇环形天线环向 m 阶谐振的谐振频率， L 代表等效辐射贴片的环形长度，可以用下式表示：

$$L = 2\pi R \frac{\alpha_e}{360} \quad (3.2)$$

其中， R 代表等效辐射贴片的等效半径， α_e 代表等效辐射贴片的圆心角。假设扇环形贴片 1 和扇环形贴片 2 的圆心角度之和为 α_t ，二者重合部分的圆心角度为 α_{ol} ，则：

$$\alpha_e = \alpha_t - \alpha_{ol} \quad (3.3)$$

根据上述公式，当两个扇环形贴片的重合角度减小时，该扇环形贴片天线传感器的环形谐振的谐振频率将减小，反之，当重合角度增大时，传感器的环形谐振频率增大。假设重合角度的变化足够小，则传感器的环向谐振频率与其等效辐射贴片的环形长度 L 之间呈线性关系：

$$\Delta f_{m0} = -\frac{mc}{2L^2\sqrt{\epsilon_r}} \Delta L \quad (3.4)$$

其中， Δf_{m0} 为环形谐振频率的变化量， ΔL 为等效辐射贴片环向长度的变化量。

3.3 扇环形贴片天线模拟

在这一部分中，用 Ansoft 高频结构模拟器（HFSS）对扇环形天线传感器的电磁特性进行了有限元模拟和分析。

3.3.1 扇环形贴片天线的 HFSS 建模

在 HFSS 中，该扇环形天线的有限元模型由两部分组成：1) 带有扇环形辐射贴片和环形接地板的环形基板部分，馈电线连在该扇环形贴片的一端，2) 带有扇环形辐射贴片的扇环形基板部分。两基板和辐射贴片的径向宽度相同，扇环形基板带有辐射贴片的一面向下放在环形基板上，并确保两扇环形辐射贴片相接

触，如图 3.3 所示。天线的两个基板之间紧密接触。

天线基板材料为 FR4，其相对介电常数为 4.4。辐射贴片和接地面的材料为铜。整个模型放在半径为 200mm，高度为 200mm 的圆柱形真空腔中，传感器与真空腔边界的距离大于 1/4 波长，以保证数值模拟的计算精度。

在天线的上辐射贴片末端设置馈电线，在馈电线的末端，由一个集总端口对天线馈电，阻抗设置为 $50\ \Omega$ 。将地平面和辐射贴片设置为 perfect E 边界，以确保电场完全垂直于地平面和辐射贴片。

为了获得良好的阻抗匹配和较高的传感灵敏度，在 HFSS 中通过调节基板的厚度、内外径大小、扇环形贴片的圆心角和宽度、馈电线的圆心角和宽度等参数，对天线的尺寸进行了一系列优化，并最终选定如表 3.1 所示的天线尺寸。表中各参数的实际意义见图 3.4。

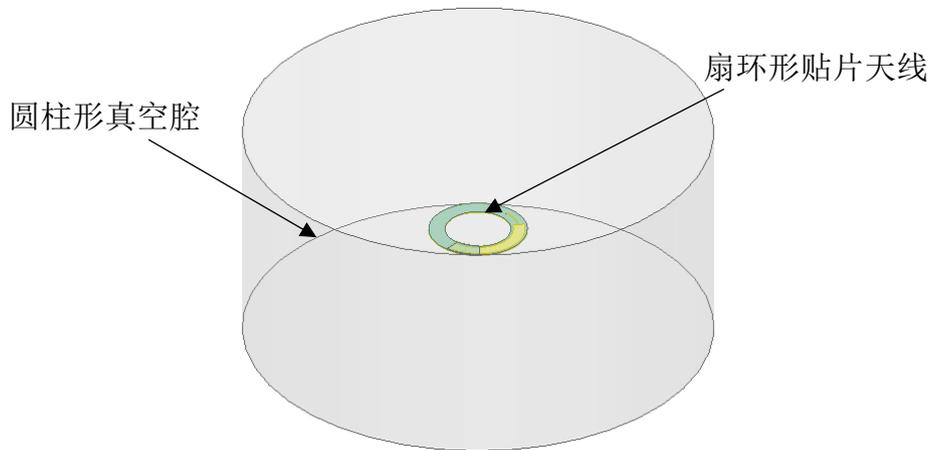


图 3.3 扇环形贴片天线模拟示意图

表 3.1 天线尺寸表

R_{s1}	R_{s2}	R_{p1}	R_{p2}	R_{fl1}	R_{fl2}	α_{p1}	α_{fl}	α_{p2}	t
28 mm	42 mm	30 mm	40 mm	35.25 mm	34.75 mm	120°	35°	40°	0.8 mm

注：其中 t 表示两基板的厚度

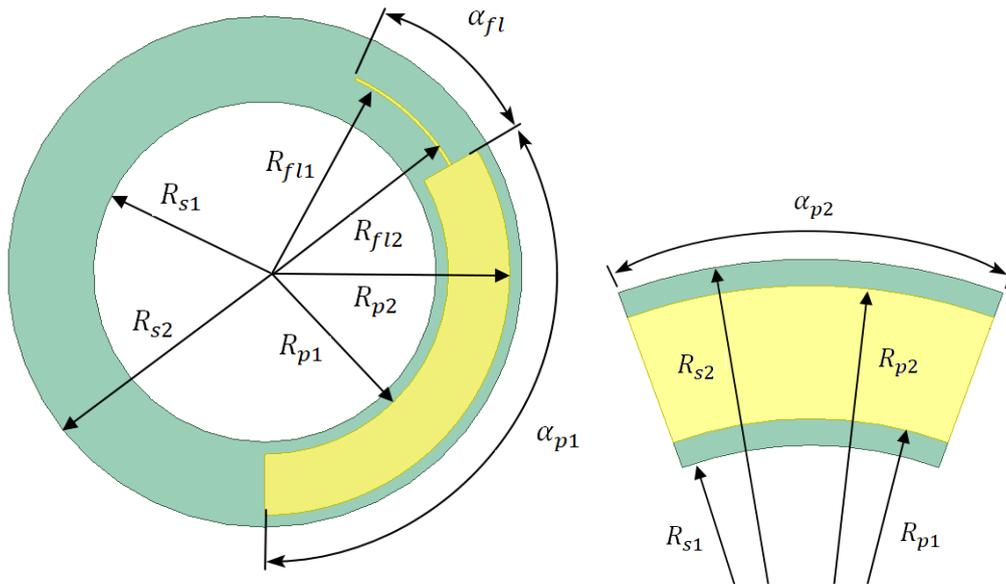


图 3.4 天线尺寸参数示意图

在天线上下两个扇环形贴片的重合角度为 20 度时，优化后的扇环形贴片天线的 S_{11} 曲线如图 3.5 所示。图 3.5 包含了天线的前三阶谐振，对比发现，第三阶谐振的阻抗匹配最好。同时，根据公式 3.4，天线的谐振阶数越高，相应的灵敏度就越高。综合以上因素，选用天线的第三阶谐振频率作为天线的传感参数。

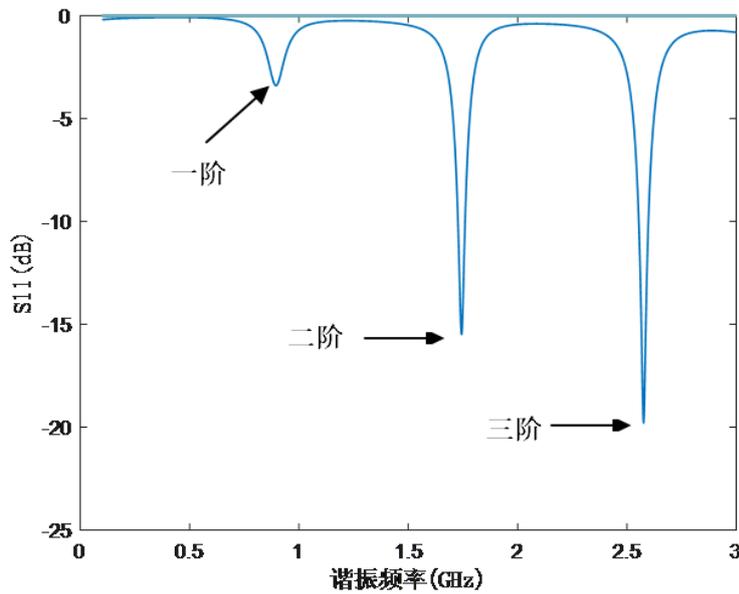


图 3.5 包含前三阶谐振的扇环形天线 S_{11} 曲线

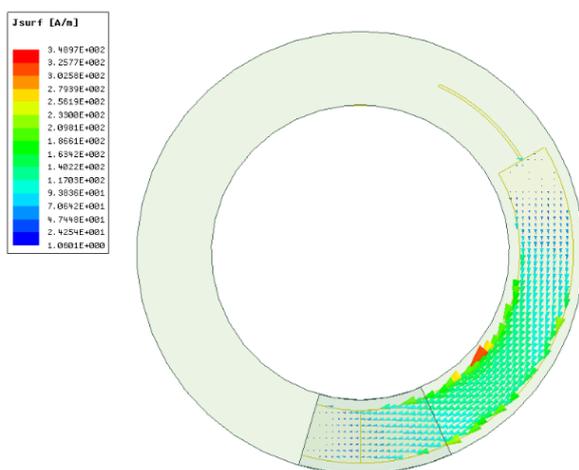
3.3.2 理论验证

在理论分析部分，直接将矩形贴片天线的公式套用到扇环形贴片天线上进行计算。在本部分中给出了扇环形天线的前三阶谐振的电流分布图，如图 3.6 所示，以佐证理论部分的分析。

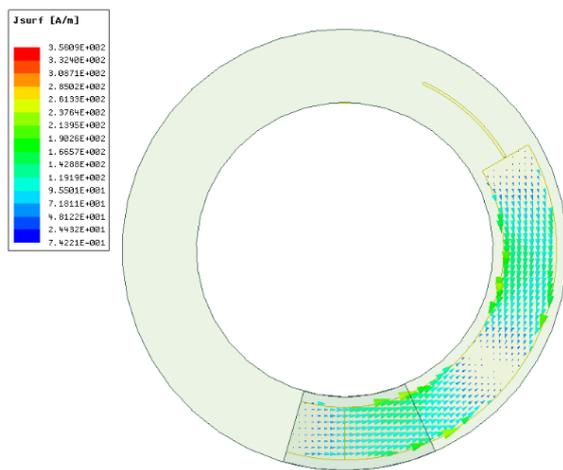
从贴片中的电流分布有无突变来看，在模拟中，无论是一阶谐振、二阶谐振，还是三阶谐振，电流在扇环形天线两部分贴片之间都没有发生突变，可以认为两块贴片是紧密接触的。因此，在两块辐射贴片相接触时，把两块辐射贴片等效为一整块辐射贴片是合理的。

从流动模式来看，在一阶谐振时，电流从等效辐射贴片的馈电端一直流到末端，中间没有出现电流方向的拐点，整个辐射贴片的环向长度为一阶谐振的电流的谐振长度；在二阶谐振时，电流在从等效辐射贴片的馈电端流到末端的过程中，在中间部分出现了一个电流的拐点，拐点两边的电流流向相反，分别谐振，二阶谐振的电流的谐振长度为等效辐射贴片环向长度的一半左右；在三阶谐振时，则出现两个拐点，三阶谐振的电流的谐振长度为等效辐射贴片环向长度的三分之一左右。谐振长度越短，电流流过所需的时间越短，谐振就越快，谐振频率就越高。

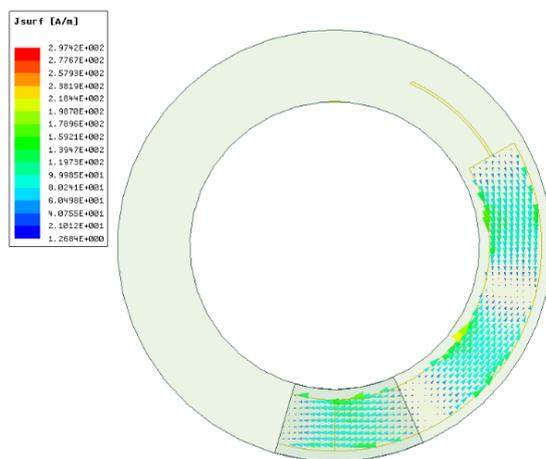
从电流的方向来看，扇环形天线辐射贴片的前三阶谐振的电流分布都是环向的，其电流分布与矩形贴片天线的电流分布非常相似，因此贴片天线的计算公式是适用于扇环形天线的。



(a) 第一阶谐振



(b) 第二阶谐振



(c) 第三阶谐振

图 3.6 扇环形天线的前三阶谐振的电流分布图。

3.3.3 扇环形天线传感器的性能

在 HFSS 中模拟了天线的环向第三阶谐振频率随着扇环形基板相对于环形基板绕圆心旋转而产生的变化。图 3.7 是扇环形贴片天线传感器的 S_{11} 曲线，每条曲线对应一个不同的重合角度 α_{ol} 。每条 S_{11} 曲线的最低点对应的频率就是天线在该重合角度下的环向第三阶谐振频率。可以发现，随着重合角度的增加，天线的环向第三阶谐振频率相应增加。

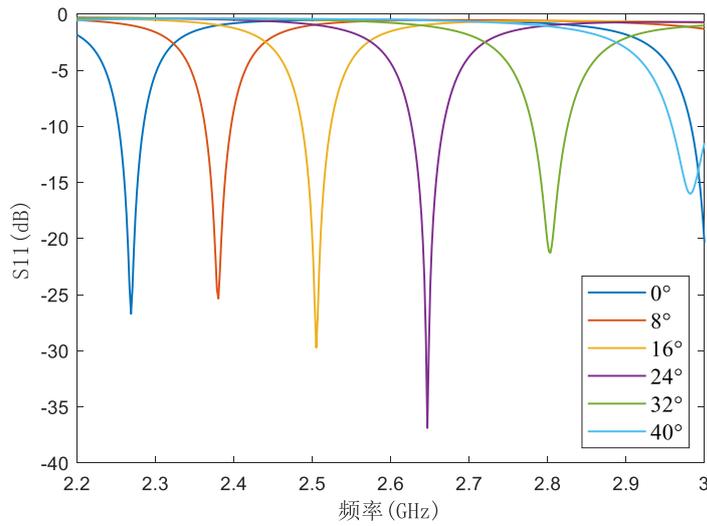


图 3.7 天线的 S_{11} 曲线

从图 3.7 中还可以看出，在工作频率范围内，天线的谐振频率处对应的 S_{11} 曲线的值都在 -15dB 以下，这说明传感器的阻抗匹配良好，天线对输入能量的利用率较高。

从 S_{11} 曲线中提取出不同重合角度 α_{oi} 对应的天线环向第三阶谐振频率，画在图 3.8 中，并用公式 3.1 对二者之间的关系进行拟合，拟合结果如图中的绿色曲线。从图 3.8 中可以看出，重合角度从 0° 到 40° 的变化过程中，天线的谐振频率不断增加，与公式 3.1 到公式 3.3 的结果相符。根据拟合结果，该扇环形贴片天线传感器的等效辐射贴片的等效半径为 34.14mm 。拟合的相关系数为 0.9970 ，拟合曲线与模拟结果相关性很好。

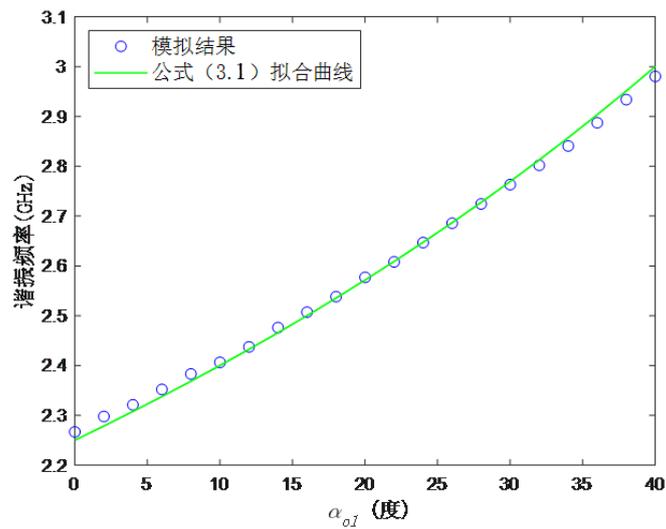


图 3.7 重合角度 α_{oi} 与谐振频率关系

根据公式 3.4，在重合角度 α_{ol} 变化较小的情况下，天线的环向第三阶谐振频率与重合角度 α_{ol} 之间呈线性关系。在 HFSS 中对这种情况进行了模拟，模拟时分天线附近无钢块和天线附近有钢块两种情况。因为钢结构为该传感器的主要应用场景，引入第二种情况的目的是探究天线附近有钢结构时对天线传感性能的影响。两种情况的模拟结果分别见图 3.9 和图 3.10。

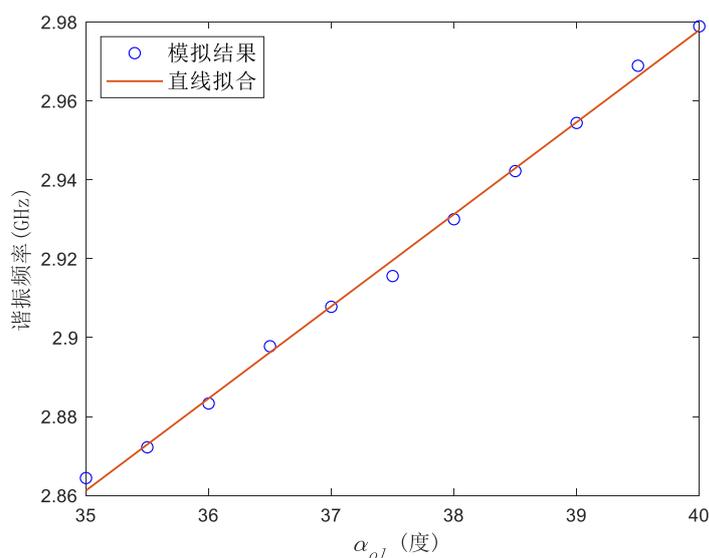


图 3.9 天线附近无钢块时谐振频率与重合角度关系

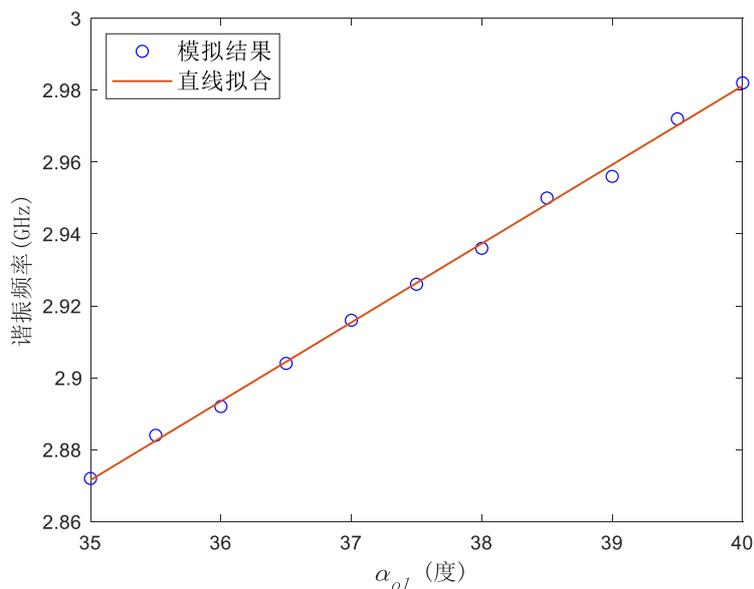


图 3.10 天线附近有钢块时谐振频率与重合角度关系

根据模拟结果，扇环形天线附件无钢块时，其灵敏度（重合角度变化 1 度所

引起的天线环向第三阶谐振频率的变化)为 23.3MHz/度, 拟合直线的相关系数为 0.9973。在扇环形天线附近有钢块时, 其灵敏度为 21.9MHz/度, 拟合直线的相关系数为 0.9982。两种情况下, 天线的环向第三阶谐振频率与重合角度之间都呈良好的线性关系。天线附近的钢块的存在导致其灵敏度轻微降低, 对天线的传感性能影响并不大。

虽然模拟结果显示, 天线具有很好的传感性能, 但在实际应用中, 天线所处的环境与模拟的理想环境差别很大, 天线传感器所处环境中的温度变化、湿度变化等都会在一定程度上影响天线的谐振频率, 需要做进一步讨论。

3.4 温湿度变化对谐振频率的影响

根据 Jain 等人^[64]的研究, 湿度变化对天线的反射系数有显著影响, 而对天线的谐振频率影响不大。另外, Hertleer 等人^[65]的研究发现, 当天线基板材料的吸湿率小于 3%时, 天线的性能比较稳定, 而本文中所采用的 FR4 基板材料的吸湿率仅 0.2%。

温度主要通过影响基板的相对介电常数来影响天线的谐振频率。基板的介电常数与周围温度的关系可以用介电常数温度系数 (TCdk) 来表示, TCdk 一般为定值。因此可以通过建立谐振频率与温度变化之间的关系来实现温度补偿。一般来讲, FR4 材料的 TCdk 为-200ppm/°C, 根据公式 3.2, 假设天线的工作频率为 3GHz, 温度每变化 1°C 会引起以 FR4 为基板的天线的谐振频率产生 0.6MHz 的变化。另外, ITEQ 公司开发出了一种新型的基于 FR4 的基板材料 IT-8338A 和 IT-8350A, 其 TCdk 为-35ppm/°C。在实际应用中, 为了减小温度对天线谐振频率的影响, 可以用 IT-8338A 或 IT-8350A 作为制作扇环形天线的基板材料。土木工程领域, 实际环境温度的变化范围约为 70°C。当基板材料为 IT-8338A 或 IT-8350A, 天线工作在 3GHz 时, 经过理论计算, 70°C 的温度变化会使扇环形天线谐振频率产生约 3.00MHz 的变化。仿真结果显示, 螺母每旋转 1 度就会引起扇环形天线 21.9MHz 的变化。此时, 温度变化对扇环形天线的谐振频率的影响可以忽略不计。

综上所述, 湿度对扇环形天线的谐振频率影响不大, 而温度对谐振频率的影响可以通过温度补偿或采用温度不敏感材料作为基板材料来解决。因此, 在实际的实验中并没有考虑这两个因素, 而是聚焦于探究扇环形贴片天线的传感原理能否在现实中实现, 及其传感性能是否能满足实际应用的需要。

3.5 本章小结

本章介绍了基于扇环形贴片天线螺栓松动传感器的设计、理论与模拟仿真，主要工作及成果总结如下：

(1) 介绍了扇环形贴片天线的组成部分、传感原理和安装方式，根据谐振腔假定，对该天线传感器进行了理论设计和谐振频率公式推导；

(2) 对天线进行了尺寸优化。在 HFSS 电磁仿真软件中建立了扇环形贴片天线的模型图，模拟该天线的传感性能，并进行了尺寸优化，得到了一组兼具较高灵敏度和较好阻抗匹配的天线尺寸；

(3) 模拟了天线的传感性能。模拟结果显示，在角度变化较大时，天线的谐振频率与螺母旋转角度之间关系是非线性的，其等效半径为 34.14mm；当角度变化较小时，天线谐振频率与螺母旋转角度之间呈线性关系，进行线性拟合得到天线的灵敏度为 23.30MHz/degree。并且，模拟结果与理论分析基本相符，这初步验证了所提出理论的正确性；

(4) 阐述了温湿度对天线传感性能的影响。根据已有研究，论证了温湿度对扇环形贴片天线工作性能的影响：湿度对扇环形天线的谐振频率影响不大，而温度对谐振频率的影响可以通过温度补偿或采用温度不敏感材料作为基板材料来解决。

第 4 章 基于扇环形贴片天线的螺栓松动传感器的实验

为了研究扇环形贴片天线螺栓松动传感器在实际应用中的性能，本章制作了两套与仿真部分的尺寸完全相同的扇环形贴片天线实物，并在实验室中用矢量网络分析仪进行了相关测试。天线实物的辐射贴片、馈电线和接地面的材料为铜，基板材料为 FR4。

在 4.1 节中，介绍了实验的设计思路以及实验中所需的天线实物模型、实验装置、实验仪器等的准备工作。

在 4.2 节中，介绍了测试扇环形贴片天线的实验装置。在 0° - 40° 的较大量程内，搭建了更接近实际应用场景的实验装置；在 0° - 5° 的小量程内搭建能够更精确地控制旋转的实验装置。

在 4.3 节中，呈现了扇环形天线传感器在两个不同量程内的实验结果。

在 4.4 节中，对模拟结果和实验结果进行了对比，并对二者之间产生差异的原因做了进一步探讨。

4.1 实验设计及准备

为保证实验顺利进行，在实验开始之前，需要做好实验设计及实验所需的的天线实物模型、仪器、装置等的准备工作。

本实验的设计思路如图 4.1 所示。首先根据第三章中经过尺寸优化后得到的天线尺寸，绘制天线模型的 CAD 图纸，并委托厂家加工。

随后根据天线在大小量程内的测量重点不同，准备了两套实验装置：“螺栓+钢块”的组合用于测量扇环形贴片天线在较大量程内的性能表现，亦可模拟天线的实际工作环境；“亚克力盒+量角仪”的组合可以更加精确地控制角度的旋转，最小步长可达 $1/6$ 度，用于测量天线在较小量程内的表现。



图 4.1 实验流程

将天线实物模型与实验装置组装后，需要通过同轴线将天线与矢量网络分析

仪相连。同轴线是常见的信号传输线，内部主要以 TEM 模为主要工作方式，其基本结构如图 4.2 所示，从内到外由内芯、绝缘层、外导体、保护层构成。天线设计时的特性阻抗为 $50\ \Omega$ ，故实验中选择特性阻抗为 $50\ \Omega$ 的同轴线。在实验开始前，为了减小焊接对实验结果的影响，尽量通过饱满、小巧、圆润的焊点将同轴线的内芯和外导体分别与扇环形贴片天线的馈电线末端和地平面连接。

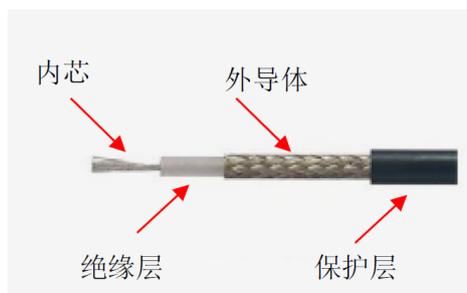


图 4.2 同轴线构成

实验中，主要用矢量网络分析仪测量并记录扇环形贴片天线在量程范围内的回波损耗曲线。在测量前，需要将矢量网络分析仪调零。本实验所用矢量网络分析仪的型号为 Rohde & Schwarz ZNLE，其自带的信号发生器可以对最小 1MHz 到最大 3GHz 的频段进行频率扫描。

实验完成后进行数据分析。在回波损耗曲线中提取出天线的谐振频率点，可以得到扇环形贴片天线角度传感器的灵敏度、线性拟合系数等传感性能参数。

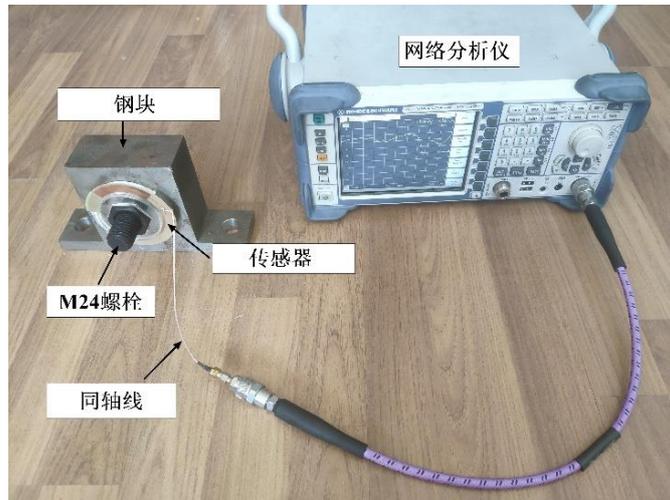
4.2 实验装置及过程

为探究扇环形贴片天线传感器在实际应用中的传感性能，搭建如图 4.3 的实验装置，对两组相同尺寸的扇环形贴片天线进行了测试。

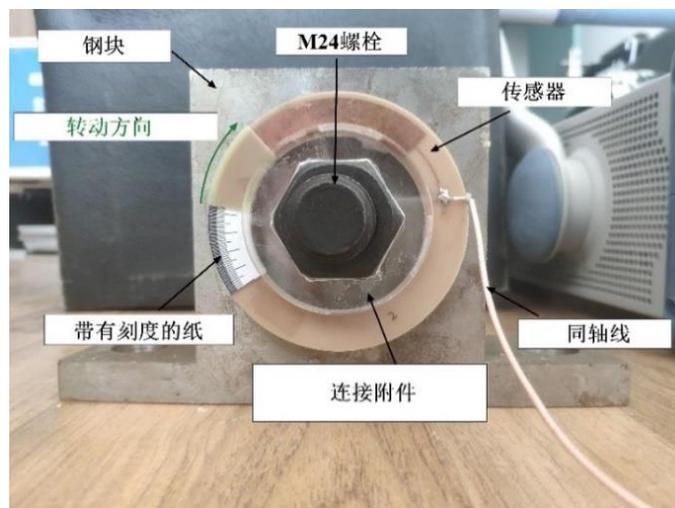
为了模拟扇环形贴片天线传感器的实际工作环境，制作了一个中间开孔的钢块，将 M24 螺栓穿过开孔，拧紧螺母固定在钢块上。将带有刻度的纸贴在扇环形贴片天线的环形基板上，随后将环形基板粘贴在钢块表面，并通过带有六边形开孔的连接附件将扇环形基板安装到螺母上，螺母的旋转会带动扇环形基板一起旋转。在实验中，扇环形基板的具体旋转角度可以通过带有刻度的纸来控制。最后通过一个同轴线将扇环形贴片天线与矢量网络分析仪（VNA）相连，同轴线的一端锡焊到天线的馈电点末端，另一端与 SMA 接头锡焊到一起连接在矢量网络分析仪上。

实验开始时，扇环形贴片 1 和扇环形贴片 2 刚好接触，此时两贴片间的重合角度 α_{ol} 为 0 度。随后，扇环形基板相对环形基板顺时针旋转，每次旋转 2 度，

直到两个贴片完全重合，此时两贴片间的重合角度为 40 度。矢量网络分析仪向天线发送 2 GHz 到 3 GHz 扫频信号，并监测记录天线的反射信号以获得不同重合角度的天线的 S_{11} 曲线。为了提高获得数据的质量，在矢量网络分析仪显示的曲线稳定 30 秒后记录数据。通过提取不同重合角度下天线的 S_{11} 曲线的最低点，可以获得天线谐振频率与重合角度的关系。



(a) 扇环形贴片天线与网分仪相连



(b) 安装在螺栓上的扇环形贴片天线

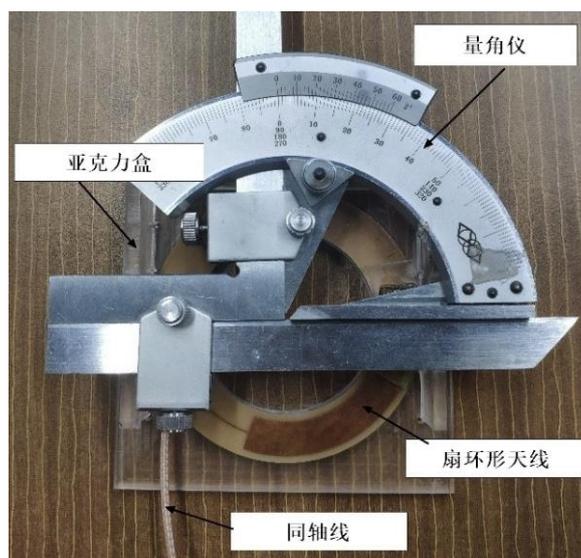
图 4.3 实验装置

另外，为了验证重合角度变化较小时，天线的谐振频率与重合角度之间是否有线性关系，我们设计了一套新的实验装置，这套实验装置可以更精确得控制天线扇环形基板相对环形基板的转动。如图 4.4 所示，图中的亚克力盒用来固定量角仪和扇环形天线的相对位置。扇环形天线的扇环形基板与量角仪的可旋转部分

相连,通过控制量角仪的可旋转部分即可精确控制扇环形基板相对环形基板旋转。在天线的重合角度从 35 度到 40 度以每步 1/6 度变化的过程中,记录每一步变化的天线的 S_{11} 曲线,以验证天线谐振频率与重合角度之间是否有线性关系。



(a) 与矢量网络分析仪相连的扇环形天线



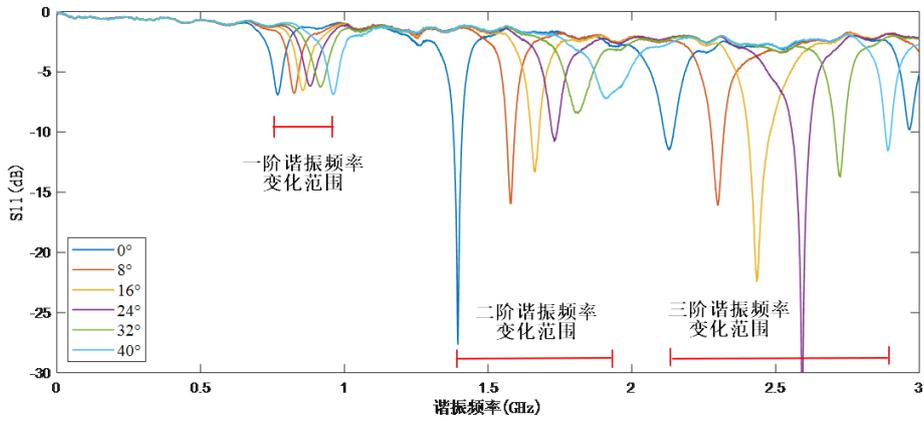
(b) 通过量角仪控制的扇环形天线

图 4.4 可精准控制相对旋转的实验装置

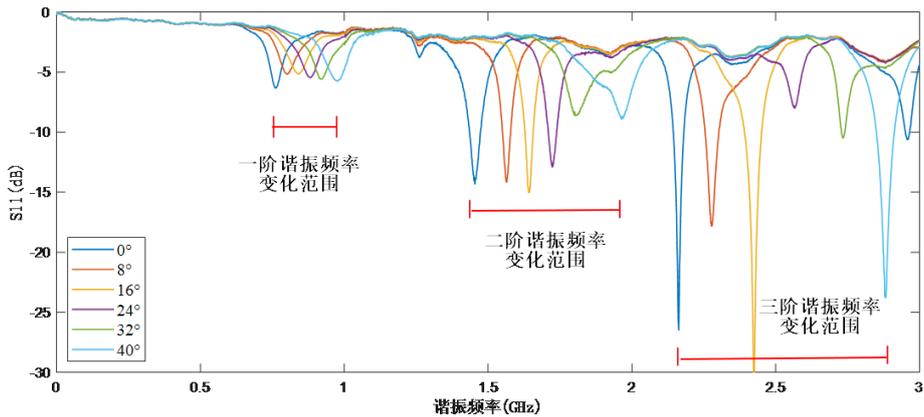
4.3 实验结果

在天线的重合角度从 0 度变化到 40 度的过程中,记录两组天线的 S_{11} 曲线,如图 4.5 所示。图 4.5 中包含了重合角度变化过程中,天线前三阶谐振频率的变化情况。从图中可以看出,在重合角度变化范围相同的情况下,天线第三阶谐振

频率的变化范围相应更大,这说明扇环形天线的第三阶谐振频率对重合角度变化更加灵敏。



(a) 第一组天线

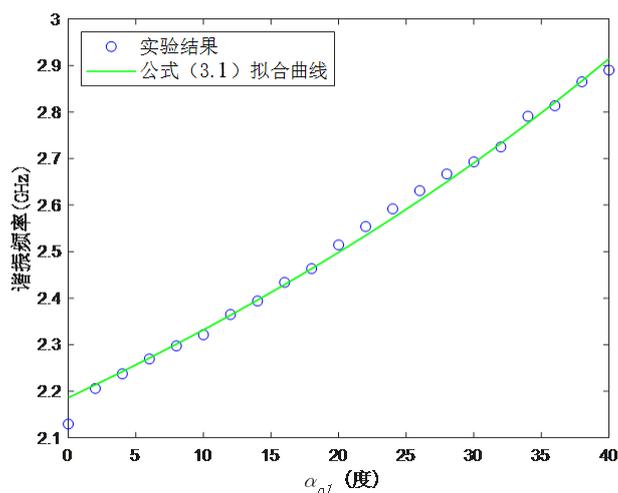


(b) 第二组天线

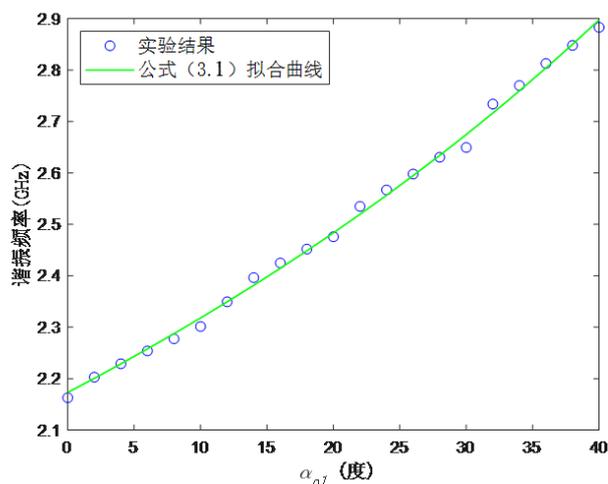
图 4.5 实验得到的扇环形天线的 S_{11} 曲线

从 S_{11} 曲线中获得的天线的第三阶谐振频率与重合角度的关系如图 4.6 所示。根据实验结果,第一组天线和第二组天线的等效辐射贴片的等效半径分别是 35.14 mm 和 35.35 mm。通过公式 3.1 对实验结果进行拟合,两组天线的拟合曲线的相关系数分别为 0.9942 和 0.9974,拟合结果与实验结果符合良好。

由于模拟和实际实验环境的不同,仿真和实验得到的传感器的等效半径 R 也有所不同。此外,两组传感器的等效半径之间也有微小差异,这可能是由于制造误差或实验操作过程中的误差导致的。



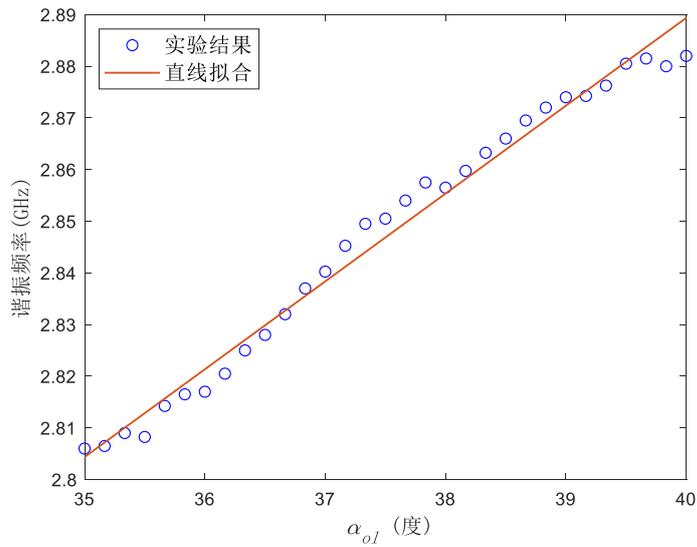
(a) 第一组天线



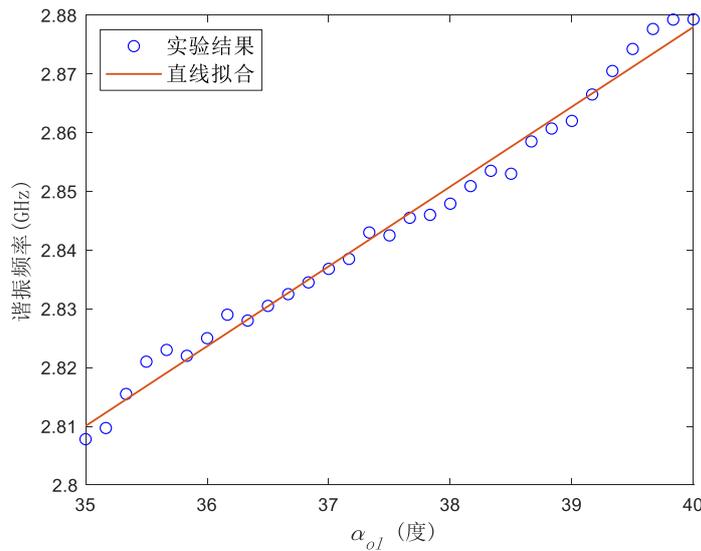
(b) 第二组天线

图 4.6 天线的环向第三阶谐振频率与重合角度间的关系

当天线的重合角度从 35 度变化到 40 度, 天线的谐振频率与重合角度之间的关系如图 4.7 所示。通过 MATLAB 对实验数据进行线性拟合, 可以得到两组天线的灵敏度分别是 17.3MHz/度和 14.3MHz/度, 线性拟合的相关系数分别是 0.9986 和 0.9897, 天线谐振频率与重合角度之间有很好的线性关系。



(a) 第一组天线



(b) 第二组天线

图 4.7 天线环向第三阶谐振频率与重合角度之间的关系

4.4 模拟结果与实验结果对比及讨论

本部分将模拟结果与实验结果进行了对比,分析了两者之间存在差异的原因,并对扇环形天线的潜在应用场景做了一些讨论。

扇环形天线传感器的模拟结果和实验结果呈现在表 4.1 中。在扇环形天线的重合角度从 0 度变化到 40 度的过程中,根据天线谐振频率和重合角度之间的关

系,通过公式 3.1 进行拟合得到扇环形天线的等效辐射贴片的等效半径和相应的相关系数。在重合角度从 35 度到 40 度之间变化时,根据天线环向第三阶谐振频率和重合角度之间的关系,通过线性拟合得到重合角度在此范围内变化时的天线灵敏度和对应相关系数。

表 4.1 模拟结果与实验结果

		等效半径 (mm)	灵敏度 (MHz/度)	相关系数 (公式拟合/线性拟合)
模拟结果		34.14	23.30	0.9970/0.9973
实验结果	第一组	35.14	17.3	0.9942/0.9886
	第二组	35.35	14.3	0.9974/0.9897

根据模拟结果和实验结果,重合角度在 0 度到 40 度之间变化时,天线环向第三阶谐振频率与重合角度之间的关系与公式 3.1 相符。而当天线重合角度在 35 度到 40 度这个较小范围内变化时,天线环向第三阶谐振频率与重合角度之间呈线性关系,与公式 3.4 的一致。但是模拟结果和实验结果的等效半径、灵敏度和相关系数都有所不同,这可能是由于以下原因:

1. 外界环境的干扰。实验环境内不可避免地会存在温度变化的影响以及电磁波的干扰,而在 HFSS 模拟中,天线周围是理想的恒温真空环境,环境的不同导致天线表现的差异。
2. 在模拟中,扇环形贴片 1 和扇环形贴片 2 之间紧密相连,中间没有缝隙的存在。而在实验中,两个贴片之间不可避免地会存在空气膜,紧密连接很难实现。
3. 天线制作误差。由于扇环形贴片天线非批量加工,存在一定的尺寸误差。加工完成后,也未对天线表面进行细致打磨,天线的基板和贴片不是完全平整的,实物与模拟的模型也存在一定的误差。
4. 在模拟中,两个基板的圆心是完全重合的。而在实验中,两基板的圆心很难完全重合,这就导致在两基板相对旋转的过程中会产生径向错位,影响天线性能。
5. 同轴线与天线之间的焊接接头质量误差。使用 HFSS 模拟天线性能时,没有考虑同轴线与天线的连接处的焊接的影响。而在实验中,同轴线与天线的连接采用了焊接。

在使用扇环形天线监测螺栓松动时,由于螺母产生较小旋转时即可认定为螺栓已经松动,所以选择天线重合角度在 35 度到 40 度之间变化的情况已经足够了。在这种情况下,天线谐振频率和重合角度之间的关系可以看作是线性的,这让传感器在实际应用中更容易校准。并且,根据实验,该扇环形天线传感器最小可以识别 1/6 度的角度变化,使得使用者能够及时监测到螺栓的早期松动。

除用于螺栓监测外，该扇环形天线角度传感器还适用于大范围的角度监测。本文中，该传感器的最大量程是 40 度，通过尺寸优化，这种形式的传感器可以实现更大的量程。

4.5 本章小结

本章介绍了基于扇环形贴片天线螺栓松动传感器的实验工作，总结如下：

(1) 制作了扇环形贴片天线实物模型，搭建了针对较大量程（0-40 度）的接近实际应用场景的实验装置和针对较小量程（0-5 度）的能够更精确控制旋转的实验装置。

(2) 在实验中，通过矢量网络分析仪有线测试了该天线的实际工作性能。实验结果与模拟结果基本相符，但在天线等效半径和灵敏度方面有一些差异。实验中，两组天线的等效半径分别为 35.14mm 和 35.35mm，灵敏度平均值为 15.8MHz/degree。

(3) 分析了实验结果与模拟结果产生差异的原因。对模拟结果与实验结果进行了对比，并分析了二者之间存在不同的原因，例如制造误差、环境影响、天线平整度、焊接影响等。

第5章 基于双层基板开槽圆形贴片天线的螺栓松动传感器

螺栓预紧力的变化是螺栓松动过程中另一个重要的指标,也可以说是根本指标。螺栓预紧力与螺杆的长度有关,随着螺栓预紧力减小,螺杆长度会轻微缩短。因此,通过螺杆长度变化可以直接推测出螺栓预紧力的变化情况,更直接,更有效地识别出螺栓松动。本章提出了一种基于双层基板开槽圆形贴片天线的螺栓松动传感器,可以监测到螺杆长度变化,进而识别螺栓松动。

该传感器尺寸较小,可以与工程结构中常用的螺栓集成为一体,实现批量生产。对于新建结构,可以采用这种新型螺栓进行节点连接,建立起螺栓松动监测网络。

在5.1节中,在Abaqus中进行螺栓松动的数值模拟,以了解工程中常用螺栓的螺杆长度在施加预紧力前后的变化情况,指导后续传感器的设计。

在5.2节中,介绍了双层基板开槽圆形贴片天线概念设计以及与螺栓集成的方法。

在5.3节中,介绍了利用曲流技术实现双层基板开槽圆形贴片天线小型化的过程。

在5.4节中,根据谐振腔理论、天线有效介电常数等效等给出了双层基板开槽圆形贴片天线的分析方法和理论公式。

在5.5节中,通过HFSS对天线进行了尺寸优化和传感性能模拟,通过模拟结果与理论分析的对比,相互验证了合理性。

在5.6节中,考虑双层基板开槽圆形贴片天线灵敏度能否满足螺杆长度监测的需求、螺栓开孔对螺栓承载力的影响和温湿度对该天线传感性能的影响三个问题,论证了该天线的可行性。

在5.7节中,为了使天线满足更加多样化的监测需求,拓展天线的应用前景,探索了改变天线灵敏度的方法。

5.1 螺栓松动数值模拟

本章所设计的传感器主要目的是监测螺栓螺杆的轴向长度变化,在设计传感器之前,需要了解工程结构中常见螺栓的螺杆长度在施加预紧力前后的变化情况,以对传感器需要达到的灵敏度有初步估计。本节以8.8级M24螺栓为例,在Abaqus中模拟其在实际应用中达到规定预紧力时的受力与变形情况。8.8级M24螺栓的直径为24mm,规定的标准预紧力为146.4kN,屈服强度取640MPa。假设

连接件的总厚度为 50mm，材料为 Q345 钢，则在 Abaqus 中计算模型如图 5.1(a) 所示。模型各组件之间的接触面设置为摩擦约束，切向摩擦系数取钢材的常用摩擦系数 0.15，法向设置为刚性接触。荷载施加方式采用 Abaqus 自带的“螺栓载荷”，螺杆受力为 146.4kN，荷载施加面见图 5.1(b)。

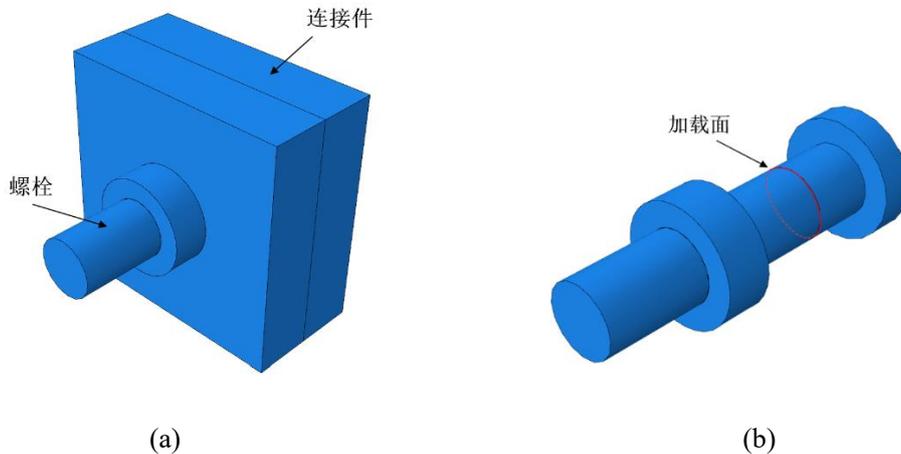


图 5.1 Abaqus 中的螺栓模型

计算结果如图 5.2 所示，对 8.8 级 M24 螺栓施加 146.4kN 的预紧力后，计算结果显示螺杆伸长长度为 0.065mm。相同条件下，不考虑连接件的变形，理论计算结果为 0.080mm。模拟结果稍小于理论计算结果，其原因就是 Abaqus 计算时考虑了连接件受压时的变形。这也说明了 Abaqus 计算结果的准确性。

螺栓松动的过程与螺栓施加预紧力的过程正好相反。对于 8.8 级 M24 螺栓来讲，从完全紧固状态（紧固力为 146.4kN）到完全松动状态（紧固力为 0），螺杆长度缩短 0.065mm。基于此分析可以确定，从完全紧固状态到完全松动状态，工程结构中常见螺栓的螺杆长度在 0.01mm 的数量级。因此，在后续传感器设计中，以传感器的灵敏度能够满足 0.01mm 的螺杆长度变化的监测需求为主要目标。

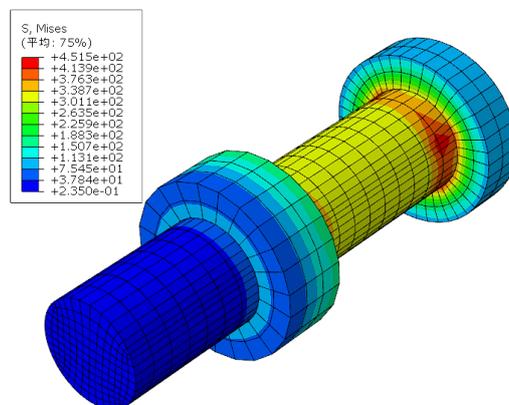


图 5.2 螺栓模型计算结果

5.2 双层基板开槽圆形天线概念设计

1982年，Lee 和 Dahele^[49]已经证明，微带天线的谐振频率可以通过在辐射贴片和地平面之间引入空气间隙。基于此研究，可以将普通的圆形贴片天线的基板一分为二，在两片基板之间引入空气间隙，并按照图 5.3 的方式与螺栓集成即可实现螺杆菌长度的监测。

此方法的具体工作原理为：天线通过环形附件安装在螺栓头上，天线上层基板与环形附件连接，不能上下移动。螺栓中间开孔，连接杆穿过开孔，一端与螺杆菌末端相连，另一端与天线的下层基板相连。螺栓施加预紧力后，螺杆菌伸长，该伸长通过连接杆传递到天线下层基板上，带动下层基板移动，改变空气间隙厚度，进而引起天线谐振频率变化。

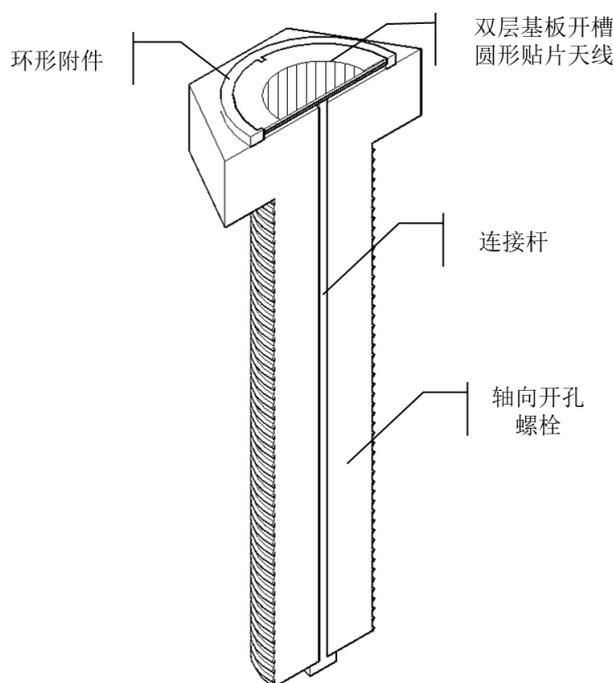


图 5.3 双层基板圆形贴片天线安装示意

Xue 等人^[47]也提出过一种基于无源无线传感器的螺栓松动监测方法，如图 5.4 所示。该方法采用的是带有重叠子贴片的矩形贴片天线传感器，传感原理通过连接件将螺杆菌的长度变化转化为天线等效辐射贴片的长度变化，进而改变天线谐振频率。此方法被证明可以有效识别螺栓松动，但与螺栓集成所需附件较多，安装不便。从安装图中还可以看出，该方法所使用的天线尺寸较大，与螺栓集成后，会极大地增加螺栓安装所需的空问。

而本文中提出的这种方法，与螺栓集成时，仅需两个额外附件，更加方便。而且，其所用的天线传感器尺寸较小，与螺栓集成后对螺栓影响较小，无需非常

多的额外安装空间。此外，该方法采用改变空气腔厚度来改变天线谐振频率的传感方式，也使该方法拥有更高的灵敏度。

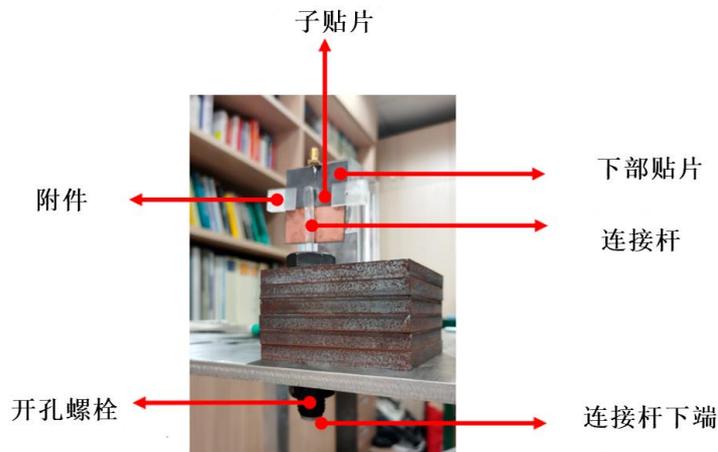


图 5.4 基于带有重叠子贴片的矩形贴片传感器的螺栓松动监测方法

5.3 双层基板开槽圆形贴片天线小型化

根据 Lee 和 Dahele^[49]的研究，将一般的圆形基板贴片天线的基板一分为二，在基板间引入空气间隙，通过空气间隙厚度的改变来改变天线谐振频率。由于需要与螺栓集成，双层基板圆形贴片天线的直径应小于土木工程结构中常见螺栓的螺栓头的尺寸。以常见的 M24 螺栓的螺栓头的尺寸为参考，初步确定双层基板圆形贴片天线的直径为 30mm，并在 HFSS 中建立模型，如图 5.5 所示，模型中空气间隙的厚度为 0.08mm。该天线主要由两个圆形基板组成，上层基板上覆圆形辐射贴片和馈电线，下层基板下覆接地面，两基板之间有缝隙，形成空气间隙。空气间隙厚度的变化会引起天线谐振频率的变化。

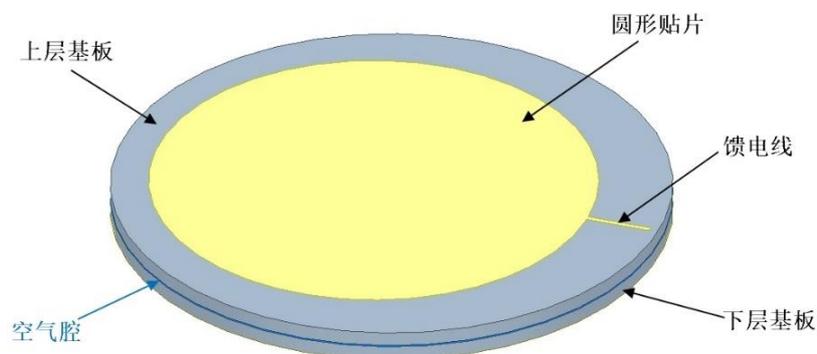


图 5.5 双层基板圆形贴片天线示意图

在 HFSS 中计算了双层基板圆形贴片天线的 S_{11} 曲线，如图 5.6 所示。从图中可以看出，该双层基板圆形贴片天线的第一阶谐振频率在 3.7GHz 左右，第二阶谐振频率在 6.0GHz 左右。在第 4 章中所用的 Rohde & Schwarz ZNLE 矢量网络分析仪支持的最大扫频频率为 3GHz，而该双层基板圆形贴片天线的谐振频率均大于 3GHz，对测试设备要求较高，应用受限。

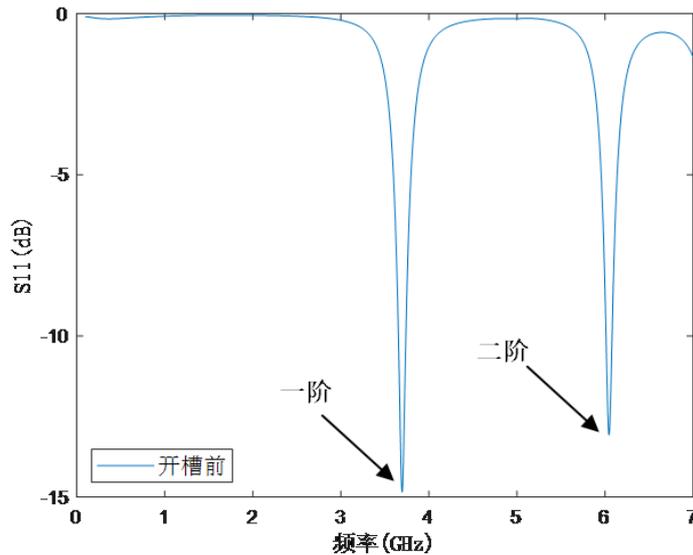


图 5.6 双层基板圆形贴片天线的 S_{11} 曲线

根据 1.2.6 小节对曲流技术的分析，在天线适当的位置开槽即可增加天线中电流流过路径的长度，降低天线谐振频率，达到天线小型化的目的，简单实用。因此，拟在上述双层基板圆形贴片天线的圆形辐射贴片上开槽，使其谐振频率降到 3GHz 以下。

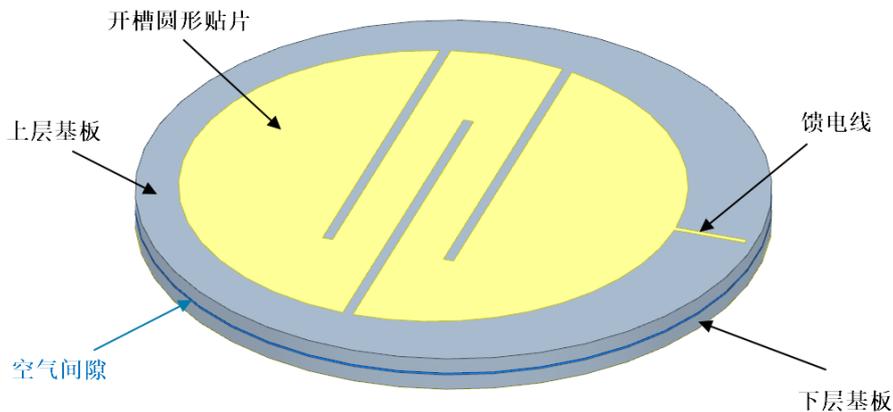


图 5.7 双层基板开槽圆形贴片天线结构

在 HFSS 中，对于开槽的数量、位置、尺寸进行了多次模拟和优化，最终得

到图 5.7 中的双层基板开槽圆形贴片天线。开槽后，天线的 S_{11} 曲线见图 5.8。从图 5.8 中可以看出，开槽使天线谐振频率下降明显，一阶谐振频率从 3.7GHz 左右降低到 1.3GHz 左右，二阶谐振频率从 6.0GHz 左右降低到 2.3GHz 左右，均小于 3GHz。同时，开槽改变了天线的特性阻抗，导致开槽之后天线的一阶谐振的阻抗匹配变差，而二阶谐振的阻抗匹配变得更好，其对应的 S_{11} 值达到 -35dB 以下。另外，考虑到天线的谐振阶数越高，对变量越敏感。在综合考虑阻抗匹配和灵敏度的基础上，初步确定采用二阶谐振频率作为传感指标。

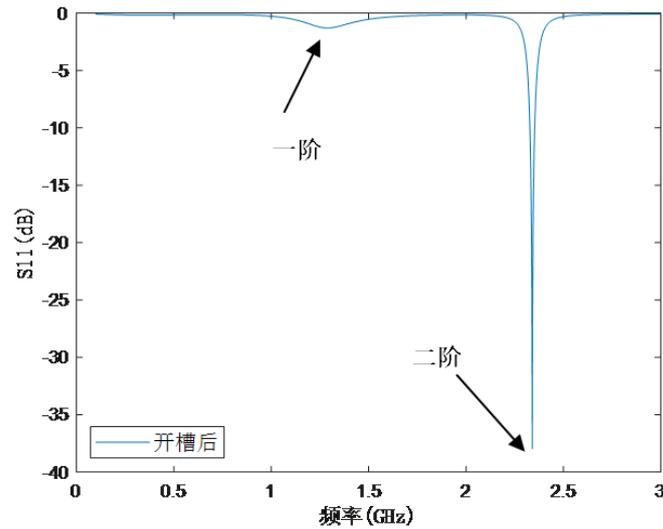
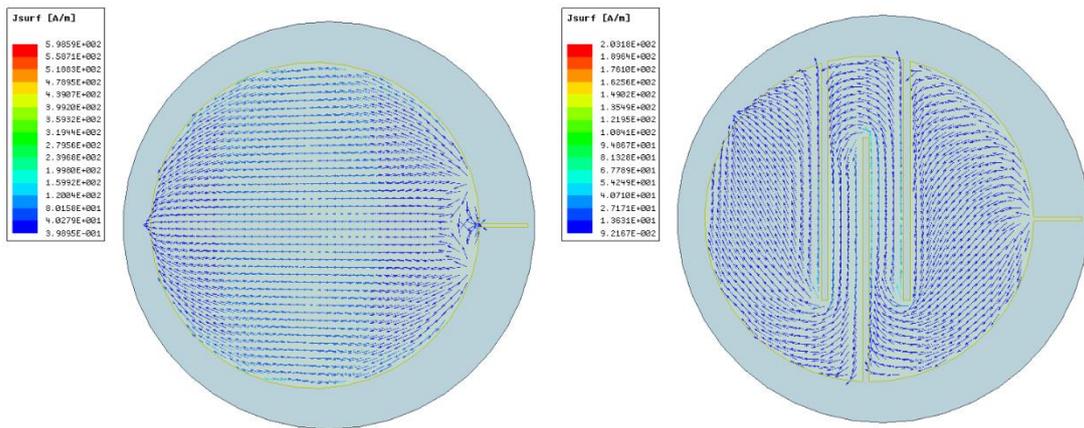


图 5.8 双层基板开槽圆形贴片天线的 S_{11} 曲线



(a) 开槽前一阶谐振电流分布

(b) 开槽后一阶谐振电流分布

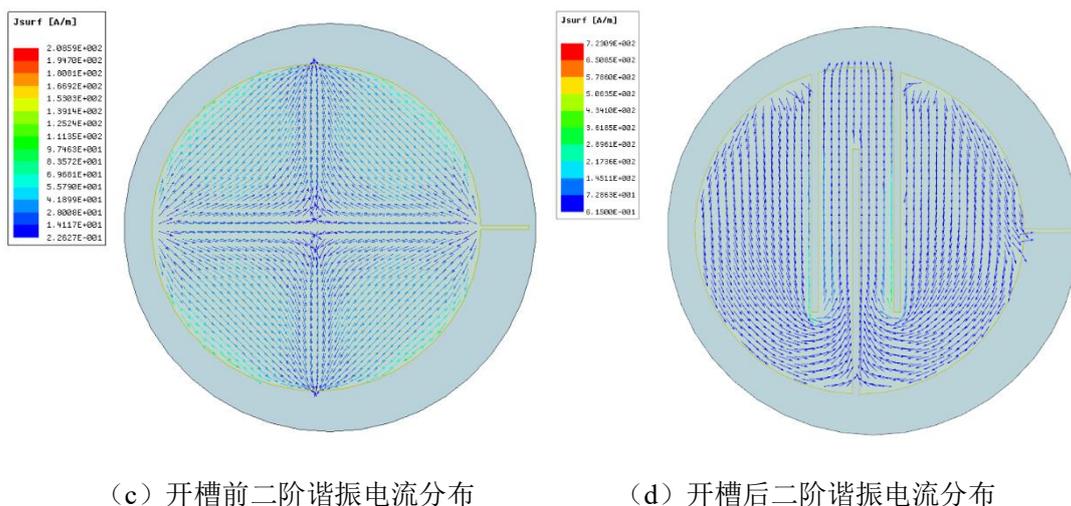


图 5.9 电流分布图

图 5.9 给出了双层基板圆形贴片天线开槽前后一阶谐振和二阶谐振的上辐射贴片电流分布情况。对比开槽前后上辐射贴片的电流分布，可以发现，开槽之后上辐射贴片中电流流过路径的长度增加明显，开槽的作用显著，是实现天线小型化设计的有效方法。

5.4 双层基板开槽圆形贴片天线理论

根据图 5.9 (b) 和图 5.9 (d) 中的电流分布，双层基板开槽圆形贴片天线的辐射贴片虽然呈圆形，但由于开槽的存在和侧边馈电的馈电方式，天线上辐射贴片中的电流路径为图 5.10 中的黑色曲线。此时，该贴片天线的谐振模式与矩形贴片天线相似，因此，可以用矩形贴片天线谐振频率的计算理论来计算该双层基板开槽圆形贴片天线的谐振频率，但要考虑到基板间空气间隙的存在对谐振频率的影响。

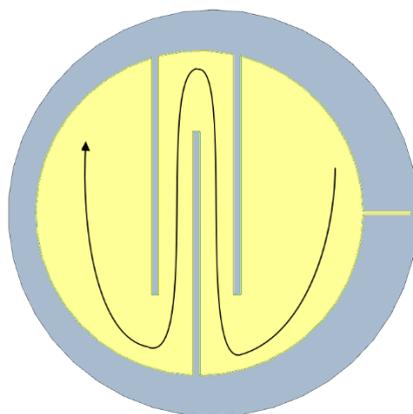


图 5.10 电流路径

根据谐振腔理论和矩形贴片天线的计算公式,同时考虑基板之间空气间隙的影响,该双层基板开槽圆形贴片天线谐振频率的计算公式可表示为:

$$f_{m0} = \frac{mc}{2L_e \sqrt{\varepsilon_{r,eff}}} \quad (5.1)$$

其中, f_{m0} 为天线在图 5.10 所示电流方向的 m 阶谐振的谐振频率, m 为谐振阶数, c 为真空中的光速。 L_e 为电流流过的路径的等效长度,与贴片到地平面的距离、开槽的位置、数量和长宽比等因素有关^[66]。 $\varepsilon_{r,eff}$ 为考虑空气间隙影响的等效介电常数,可以表示为^[54]:

$$\varepsilon_{r,eff} = \frac{4\varepsilon_{r,equ}\varepsilon_{r,dyn}}{(\sqrt{\varepsilon_{r,equ}} + \sqrt{\varepsilon_{r,dyn}})^2} \quad (5.2)$$

其中, $\varepsilon_{r,equ}$ 为辐射贴片与地平面之间介质的等效介电常数, $\varepsilon_{r,dyn}$ 为考虑静态主电容、静态边缘电容和谐振模式的动态介电常数,其表达式如下:

$$\varepsilon_{r,equ} = \frac{\varepsilon_r(2h_1 + h_0)}{(2h_1 + \varepsilon_r \cdot h_0)} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{r,dyn} = \frac{C_{dyn}(\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_{re})}{C_{dyn}(\varepsilon = \varepsilon_0)} \quad (5.4)$$

$$C_{dyn} = C_{0,dyn} + C_{e,dyn} \quad (5.5)$$

其中, h_1 和 h_0 分别是天线基板的厚度和空气间隙厚度, ε_r 是基板的相对介电常数, C_{dyn} 为总动态电容, $C_{0,dyn}$ 和 $C_{e,dyn}$ 分别为不同模式的动态主电容和动态边缘电容。

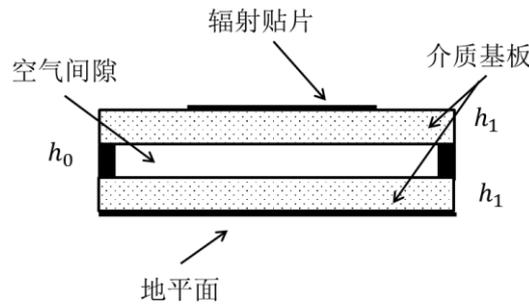


图 5.11 天线尺寸示意

随着空气间隙厚度的增加,天线辐射贴片与地平面之间介质的等效介电常数会减小,导致天线谐振频率相应增加。

5.5 双层基板开槽圆形贴片天线模拟

在 HFSS 中,建立了双层基板开槽圆形贴片天线模型。通过模拟结果对理论

分析进行了验证，并在模拟中不断优化天线尺寸，以获得更好的天线性能。

5.5.1 天线优化

HFSS 中的双层基板开槽圆形贴片天线如图 5.12 所示。双层基板开槽圆形贴片天线的模型由两个半径、厚度和材料都相同的基板组成，上层基板上表面附有开槽圆形辐射贴片和馈电线，下层基板下表面覆有接地面。两基板之间设置一定缝隙，用与基板半径相同的圆柱形空气间隙填满，通过改变空气间隙的厚度来模拟天线上下基板的相对移动。基板材料选用 FR4，辐射贴片、馈电线和接地面的材料为铜。在馈电线末端设有集总端口激励，给天线提供模拟馈电。整个天线模型放置在一个圆柱形真空腔中，该圆柱形真空腔的边界距离天线的距离大于 $1/4$ 波长，以确保天线远场辐射计算的准确性。天线辐射贴片、馈电线和接地面设置为 Perfect E 边界，圆柱形空气间隙边界设置为辐射边界。

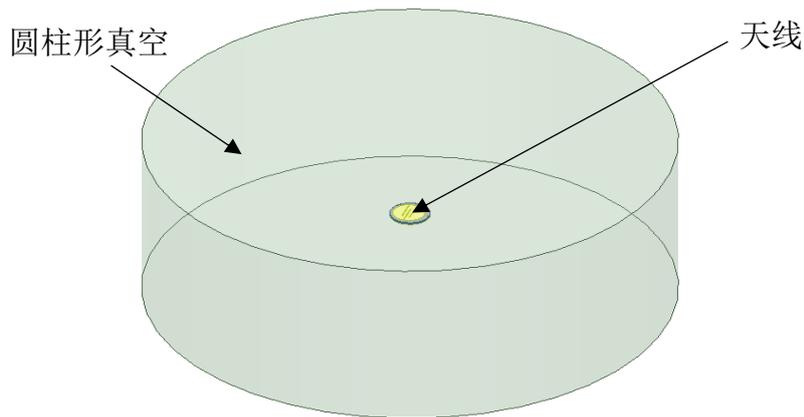


图 5.12 HFSS 中的双层基板开槽圆形贴片天线模型

以天线的第二阶谐振频率作为传感参数，在兼顾天线的回波损耗值和传感灵敏度的基础上，对天线尺寸，开槽的数量、位置和长宽比进行了优化，并最终选择了一组性能良好的天线，其具体尺寸如表 5.1 所示。表中各个参数的具体含义见图 5.13。

表 5.1 双层基板开槽圆形贴片天线尺寸 (mm)

R_1	R_2	c	d_1	d_2	d_3	d_4	l	w	h_r
15	12	0.5	3	6	12	2	3.5	0.25	0.8

注： h_r 为基板厚度，两层基板厚度相同。

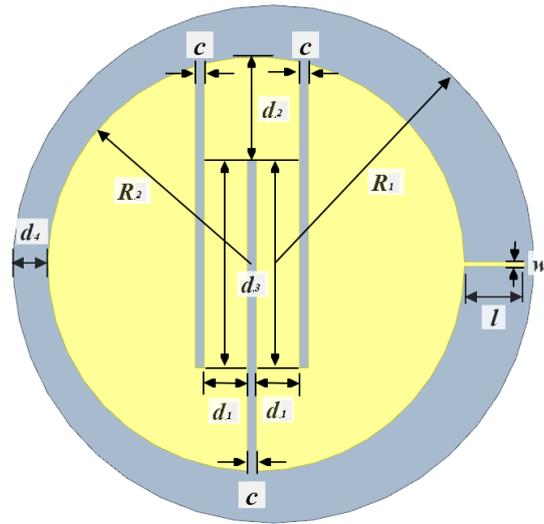


图 5.13 双层基板开槽圆形贴片天线尺寸参数示意

5.5.2 天线性能

在 HFSS 中，模拟空气间隙从 0mm 变化到 0.5mm 的过程中，天线第二阶谐振频率随空气间隙厚度变化的情况，所得到的 S_{11} 曲线如图 5.14。从图中可以看出自左到右，天线 S_{11} 曲线越来越密集，这说明空气间隙越厚，天线的灵敏度相应越小。这是因为，该天线的传感原理是空气间隙厚度的变化导致辐射贴片与地平面之间的介质的等效介电常数变化，进而引起天线的谐振频率变化，而空气间隙厚度对辐射贴片与地平面之间介质的等效介电常数的影响与空气间隙厚度占天线总厚度的比例有关。随着空气层厚度增加，天线的总厚度也在增加，单位空气间隙厚度的改变对等效介电常数的影响相应就会减小。

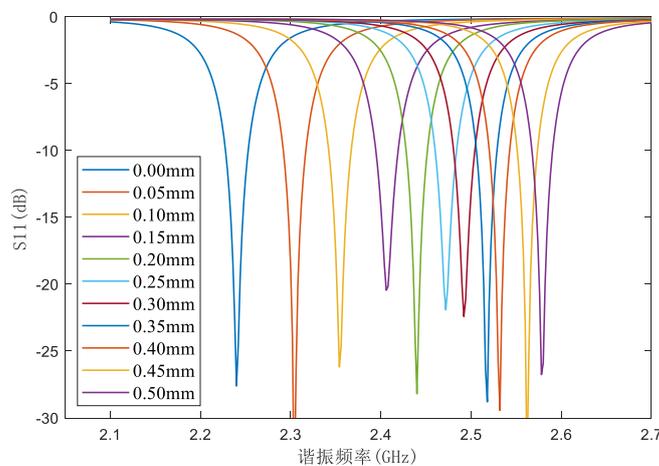


图 5.14 天线的 S_{11} 曲线

从 S_{11} 曲线中提取出不同空气间隙厚度对应的天线第二阶谐振频率，得到如图 5.15 所示的天线第二阶谐振频率与空气间隙厚度的关系，并用二次曲线对其进行了拟合。从图中也可以看出，随着空气间隙厚度的增加，拟合曲线的斜率逐渐减小，天线的灵敏度相应下降。

结合 Abaqus 中螺栓松动过程的模拟，螺栓松动过程中，螺杆长度变化在 0.01mm 这个数量级，因此选择 0-0.1mm 这个区间作为天线的主要量程，即可满足大部分工程中螺栓的监测需求，也能让天线有较高的灵敏度。下面主要讨论双层基板开槽圆形贴片天线传感器在 0-0.1mm 量程内的性能。

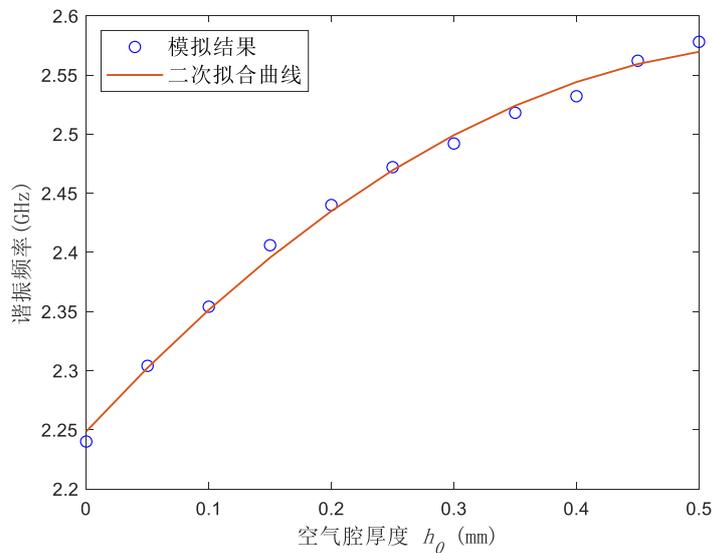
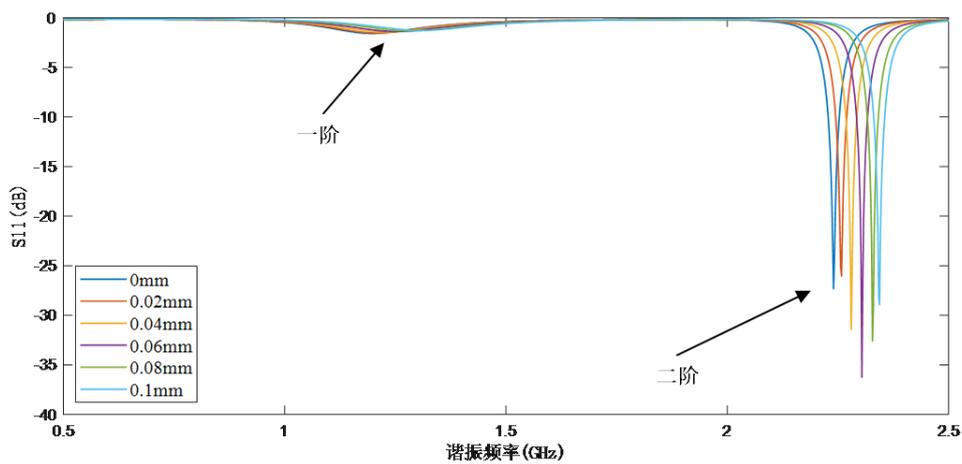


图 5.15 天线第二阶谐振频率与空气间隙厚度的关系

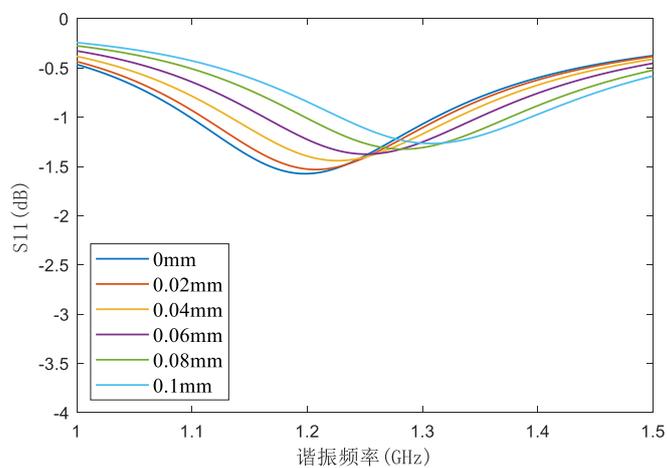
双层基板开槽圆形贴片天线两基板之间的空气间隙从 0 mm 逐渐扩大到 0.1 mm，天线的 S_{11} 曲线如图 5.16 所示，每条曲线对应一个不同的缝隙厚度。图 5.16

(a) 中包含了天线的一阶和二阶谐振，通过对比可以发现，随着基板间空气间隙厚度的增加，天线二阶谐振频率的变化比一阶更明显，灵敏度更高。另外，天线的二阶谐振频率对应的 S_{11} 值小于 -20dB，阻抗匹配明显好于一阶谐振。图 5.16

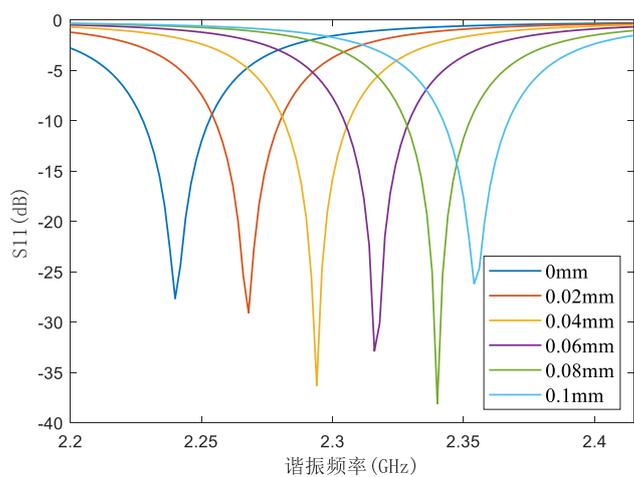
(b) 和图 5.16 (c) 分别为天线一阶谐振的 S_{11} 曲线和二阶谐振的 S_{11} 曲线随基板间空气间隙厚度的变化情况，随着两基板之间缝隙的扩大，天线的一阶谐振频率和二阶谐振频率都相应提高。



(a)



(b)



(c)

图 5.16 天线的 S₁₁ 曲线

从天线的 S_{11} 曲线中提取出天线的二阶谐振频率，可以得到天线的二阶谐振频率与天线两基板之间空气间隙厚度的关系，如图 5.17 所示。采用直线拟合的方式对模拟结果进行拟合，可以发现，在 0-0.1mm 的量程内，天线二阶谐振频率与基板间空气间隙厚度之间呈良好的线性关系。拟合结果显示，在空气间隙厚度为 0-0.1mm 的范围内，该天线的灵敏度为 1134.5MHz/mm，拟合的相关系数为 0.9922。根据 5.1 节的螺栓松动数值模拟，天线的灵敏度需能够监测到小至 0.01mm 的螺杆长度变化，而该天线的灵敏度可达 1134.5MHz/mm，即每 0.01mm 的变化导致天线二阶谐振频率发生 11.35MHz 的变化，满足监测需求。与 Xue 等人^[47]提出的基于带有重叠子贴片的矩形贴片天线传感器的螺栓松动监测方法相比，灵敏度高出约 900MHz/mm。

从模拟结果也可以看出，随着天线两基板之间空气间隙厚度的增加，天线谐振频率也相应增加，这与理论分析是相吻合的。

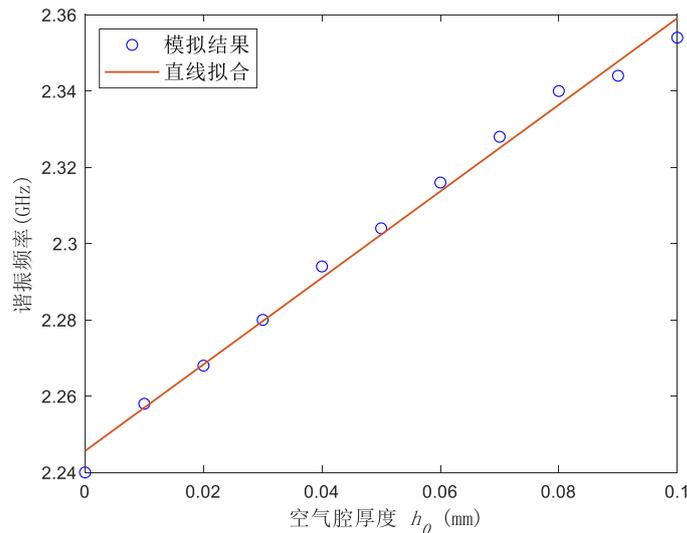


图 5.17 基板间空气间隙厚度与天线二阶谐振频率的关系

同时，由于双层基板开槽圆形贴片天线在实际应用中需要与螺栓集成，为了模拟天线附近有钢材存在时对天线谐振频率的影响，在 HFSS 中建立相关模型，在距天线底面 2mm 处附加一块钢材，探究钢材的存在对天线性能的影响，如图 5.18 所示。

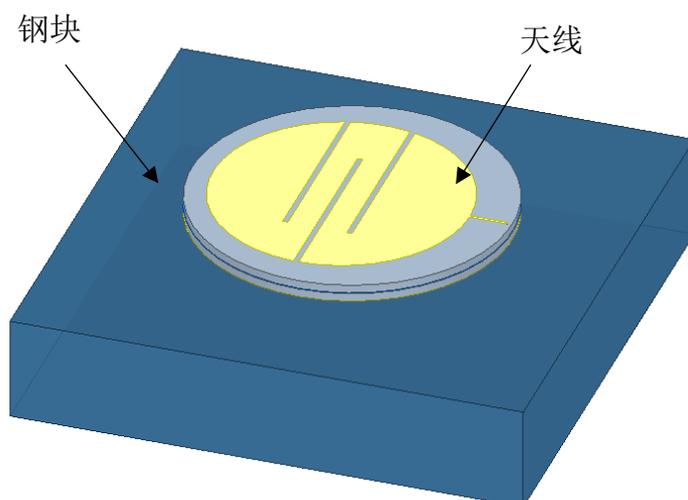


图 5.18 附近带有钢块的天线模型

附近存在钢材时，双层基板开槽圆形贴片天线的基板间空气间隙厚度与天线二阶谐振频率的关系如图 5.19 所示。对数据进行线性拟合后，得到附近有钢块时天线的灵敏度为 1116.4MHz/mm，拟合的相关系数为 0.9943。钢块的存在仅使天线的灵敏有轻微降低，考虑到计算误差，可以认为钢块的存在对于天线灵敏度无影响。

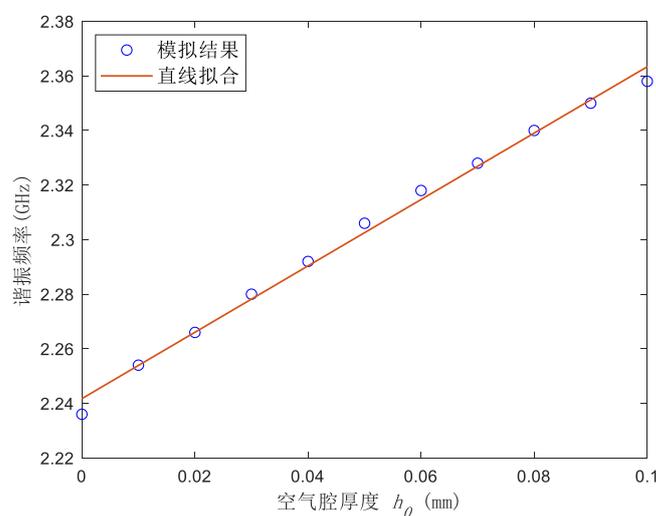


图 5.19 附近有钢块时的天线二阶谐振频率与空气间隙厚度的关系

5.6 可行性验证

本节主要探究了螺栓开孔对螺栓承载力的影响和温湿度对该天线传感性能的影响两个问题，以证明双层基板开槽圆形贴片天线的可行性。

5.6.1 径向开孔对螺栓承载性能的影响

评估双层基板开槽圆形贴片天线的可行性，除了考虑灵敏度能否满足监测需求之外，还需要考虑另一个因素。由于将该天线与螺栓集成需要螺栓径向开孔，确定该监测方法的可行性还需要确定螺栓开孔不会使螺栓承载力有过大的下降，因此，还使用 Abaqus 模拟了开孔螺栓的受力情况。如图 5.20 所示，开孔直径为 3mm，其他条件与未开孔的模型相同。

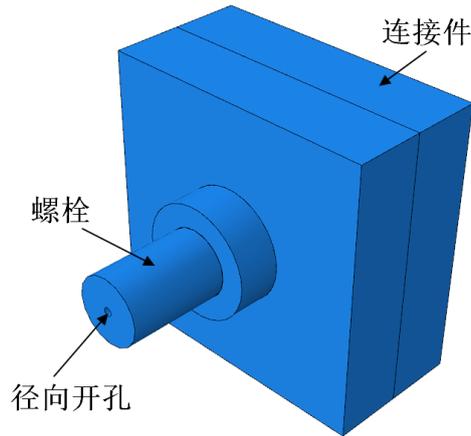


图 5.20 径向开孔螺栓模型

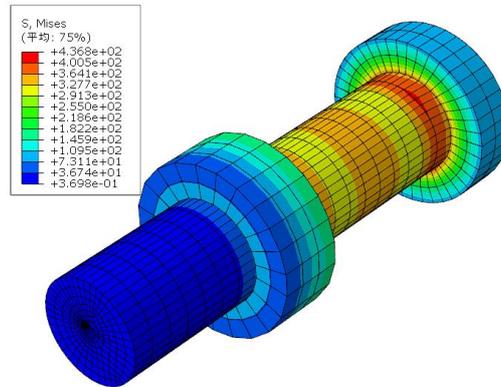


图 5.21 开孔螺栓计算结果

计算结果显示，在施加相同的预紧力的条件下，螺栓径向开孔对螺栓受力分布影响不大，甚至还使螺杆的最大应力降低，如图 5.21。因此可以得出结论，只要螺栓径向开孔的尺寸合适，螺栓承载力并不会出现显著下降。

5.6.2 温湿度影响

温湿度主要通过影响天线的基板材料性质间接影响天线的谐振频率。双层基板开槽圆形贴片天线的基板材料与扇环形贴片天线的基板材料相同，都为 FR4。根据第 3.4 小节的分析，湿度对该天线的谐振频率同样影响不大，而温度对谐振频率的影响依然可以通过温度补偿或采用温度不敏感材料作为基板材料来解决。

综上所述，径向开孔对螺栓承载力的影响可以忽略；温湿度对天线传感参数（天线谐振频率）的影响问题可以针对性解决。因此，可以初步认定该监测方法是可行的。

5.7 天线灵敏度调节

为了让天线满足更多应用场景和更多样化的监测需求，探索了双层基板开槽圆形贴片天线传感器的灵敏度调节方法。此天线的传感原理为基板之间空气间隙厚度的变化会改变天线的有效相对介电常数，进而引起天线谐振频率的变化。天线的有效介电常数由天线基板本身和空气间隙厚度共同决定，天线基板厚度越小，空气间隙厚度的变化对天线有效介电常数的影响就越大。基于此设想，在 HFSS 中建立了不同基板厚度的双层基板开槽圆形贴片天线模型，并模拟了空气间隙厚度变化对天线谐振频率的影响。

在模拟中，分别建立了单层基板厚度为 0.4mm、0.8mm 和 1.2mm 的双层基板开槽圆形贴片天线模型，并分别模拟并激励了基板间空气间隙以 0.01mm 的步长从 0mm 变化到 0.1mm 的过程中天线的 S_{11} 曲线，并从 S_{11} 曲线中提取每个步长的天线二阶谐振频率点，获得空气间隙厚度与天线二阶谐振频率的关系。

单层基板厚度为 0.4mm、0.8mm 和 1.2mm 的双层基板开槽圆形贴片天线对应的 S_{11} 曲线分别如图 5.22、图 5.16 (c) 和图 5.23 所示。三幅图对比可以发现随着天线的单层基板厚度的增加，基板间空气间隙厚度从 0mm 变化到 0.1mm 的过程中，天线的 S_{11} 曲线的变化范围逐渐减小。

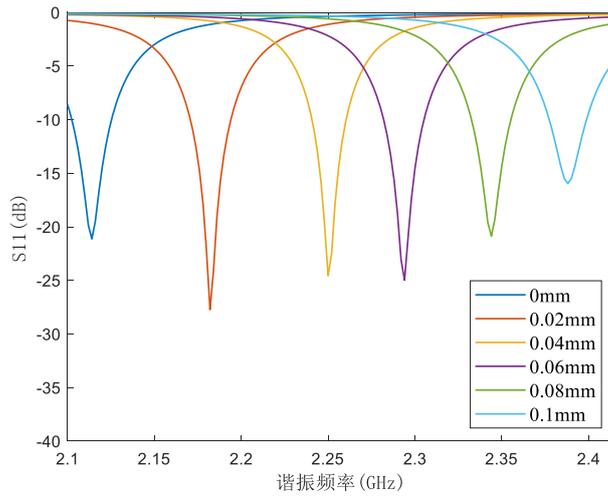


图 5.22 单层基板厚度 0.4mm 的天线 S_{11} 曲线

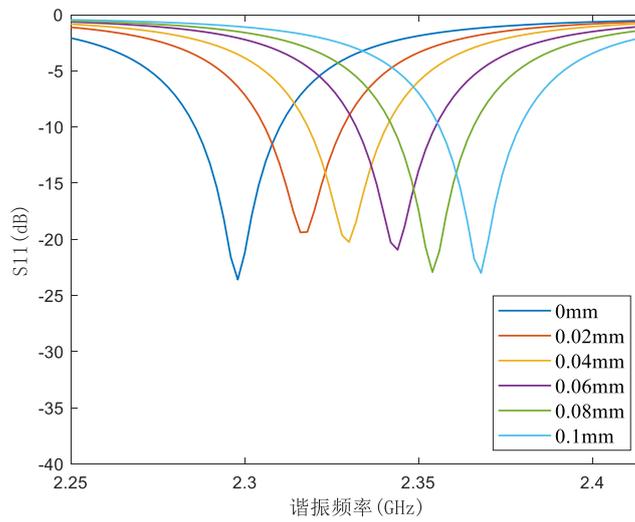


图 5.23 单层基板厚度 1.2mm 的天线 S_{11} 曲线

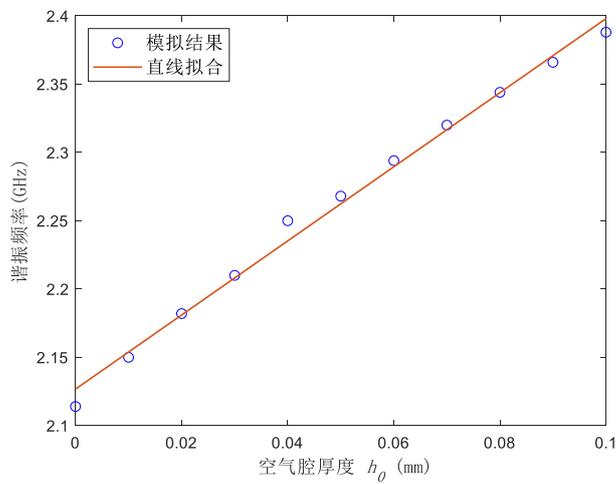


图 5.24 单层基板厚度 0.4mm 的天线谐振频率与空气间隙厚度关系

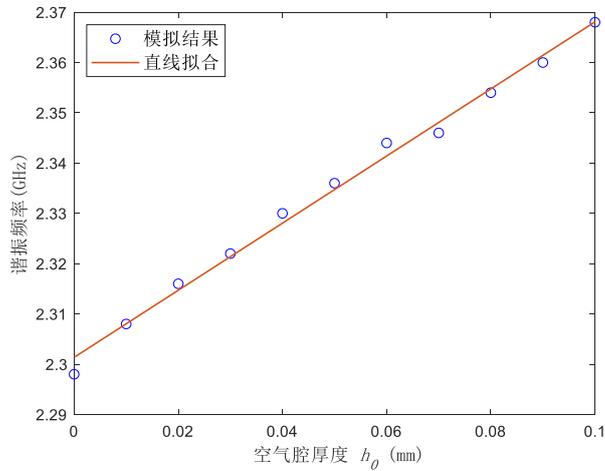


图 5.25 单层基板厚度 1.2mm 的天线谐振频率与空气间隙厚度关系

从 S_{11} 曲线中提取出不同单层基板厚度、不同空气间隙厚度对应的天线二阶谐振频率，得到图 5.24、图 5.17 和图 5.25 所示的不同单层基板厚度的天线的二阶谐振频率与基板间空气间隙厚度的关系。分别进行线性拟合，可以得到如表 5.2 所示的不同单层基板厚度的天线的灵敏度。

表 5.2 天线单层基板厚度与灵敏度

单层基板厚度 (mm)	0.4	0.8	1.2
灵敏度 (MHz/mm)	2712.7	1134.5	667.3
拟合相关系数	0.9928	0.9922	0.9934

从表 5.2 可以看出，天线的单层基板厚度越小，天线灵敏度越高，在单层基板厚度为 0.4mm 时，可达 2712.7MHz。值得注意的是，并非一定要追求高灵敏度，天线的基板厚度越小，对天线加工技术的要求就越高，天线的加工成本也会提高。最好的策略是，针对不同监测需求，选择合适灵敏度和单层基板厚度的天线，以达到监测效果和成本的平衡。双层基板开槽圆形贴片天线灵敏度的可调节性可以让其满足更加多样化的监测需求，因而拥有更广阔的应用前景。

5.8 本章小结

本章主要介绍了基于双层基板开槽圆形贴片天线的螺栓松动传感器，总结如下：

(1) 在 Abaqus 中进行螺栓松动数值模拟，确定了施加预紧力前后，工程结构中常用螺栓的螺杆长度变化在 0.01mm 的量级，进一步确定了传感线需满足能

够监测到小至 0.01mm 的螺杆长度变化的监测需求。

(2)介绍了双层基板开槽圆形贴片天线的组成部分、传感原理和安装方式，并给出了双层基板开槽圆形贴片天线的分析方法和谐振频率计算方式；

(3)利用曲流技术，在天线表面适当位置开槽，增加天线中电流流过路径的长度，实现了天线的小型化；

(4)对传感器进行了优化。在 HFSS 中模拟了双层基板开槽圆形贴片天线的传感性能，选定二阶谐振频率作为传感参数，并以使得该天线传感器取得尽可能高的灵敏度和良好的阻抗匹配为目标，对双层基板开槽圆形贴片天线进行了尺寸、开槽数量、开槽位置的优化；

(5)模拟了天线传感性能。模拟结果显示，在 0-0.1mm 的量程内，天线的二阶谐振频率与基板间空气间隙厚度之间呈良好的线性关系，线性拟合得到该天线传感器的灵敏度为 1134.5MHz/mm，拟合的相关系数为 0.9922。

(6)论证了天线的可行性。螺栓开孔对螺栓承载力的影响可以忽略；温湿度对该天线传感性能的影响问题可以针对性有效解决。

(7)实现天线灵敏度的可调节。通过改变双层基板开槽圆形贴片天线的单层基板的厚度，调整天线的灵敏，让天线有更广阔的应用前景。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文针对螺栓松动过程中两个重要指标：螺母旋转和螺栓预紧力，设计了两种贴片天线来识别螺栓松动。扇环形贴片天线通过在扇环形辐射贴片上短接辐射单元改变天线电流路径长度来改变天线谐振频率，实现对螺母旋转的监测。双层基板开槽圆形贴片天线将天线基板一分为二，在两基板中间引入空气间隙，通过两基板相对位置的变化来改变空气间隙厚度，进而引起天线谐振频率变化，实现对螺栓预紧力的监测。

两种天线分别适用两种不同的场景。对于已建成的结构，更换螺栓显然时不方便的。扇环形贴片天线可以直接安装在已建成结构的螺栓连接上，简单易用。而对于待建结构，可以采用集成了双层基板开槽圆形贴片天线的螺栓进行节点连接，结构建成的同时即可建立起螺栓松动监测网络，高效便捷。

本文的主要研究内容及结论如下：

(1) 介绍了电磁场基本理论、用于分析贴片天线的谐振腔假定，基于谐振腔假定推导出一般矩形贴片天线的谐振频率计算公式，并进一步给出了组合式贴片天线的基本理论，为本文中贴片天线传感器的设计奠定基础。

(2) 提出了用于监测螺母旋转的扇环形贴片天线角度传感器，基于组合式贴片天线的基本理论得到了扇环形贴片天线的谐振频率计算公式。在 HFSS 中建立了扇环形贴片天线模型，通过参数优化，得到阻抗匹配良好与灵敏度较高的最优化的天线尺寸数据。随后在试验时中对天线实物模型进行了测试，并将测试结果与理论分析、数值模拟结果对比。结果显示，三者之间相互吻合：在 0° - 40° 的较大量程内，扇环形贴片天线的谐振频率与角度变化之间呈非线性关系；在 0° - 5° 的较小量程内，天线谐振频率与角度变化呈线性相关，该设计适合作为传感器使用。实验得到的该天线的灵敏度平均值为 15.8MHz/degree 。

(3) 分析了温湿度对扇环形贴片天线谐振频率的影响。温湿度对扇环形贴片天线的谐振频率影响不大，而温度对谐振频率的影响可以通过温度补偿或采用温度不敏感材料作为基板材料来解决。

(4) 提出了用于监测螺杆长度的双层基板开槽圆形贴片天线传感器，介绍了其理论分析方法和谐振频率计算公式，并通过 HFSS 高频仿真软件对天线尺寸、开槽位置、开槽数量和开槽尺寸进行了遍历优化，得到兼具良好阻抗匹配与较灵敏度的最优化数据。将模拟结果与理论分析相对比，发现理论分析与模拟结果相

符。模拟结果显示,在 0-0.1mm 的量程内,天线的谐振频率与基板间空气间隙厚度之间呈良好的线性关系,线性拟合得到该天线传感器的灵敏度为 1134.5MHz/mm,拟合的相关系数为 0.9922。

(5) 实现了天线的小型化设计。利用曲流技术,在天线表面适当位置开槽,增加天线中电流流过路径的长度,在维持天线尺寸与一元硬币大小相当的情况下降低了天线谐振频率,实现了双层基板开槽圆形天线的小型化。既满足了与螺栓集成的要求,又降低了对测试设备的要求,增加了天线的实用性。

(6) 论证了双层基板开槽圆形贴片天线传感器的可行性。通过 Abaqus 中对螺栓力学模型的模拟得到螺栓预紧力施加过程中螺杆长度变化情况,与双层基板开槽圆形贴片天线的灵敏度对比,发现天线的灵敏度能够满足螺杆长度监测的需求;探究了螺栓径向开孔对螺栓承载性能的影响,发现直径 3mm 的螺栓径向开孔对螺栓承载力的影响可以忽略;分析了温湿度对天线传感性能的影响,发现温湿度的影响可以针对性有效解决。

(7) 实现了双层基板开槽圆形贴片天线灵敏度的可调节。通过改变双层基板开槽圆形贴片天线的单层基板的厚度,可以调整天线的灵敏度,让天线有更广阔的应用前景。

根据以上工作与结论,可总结以下几点:

(1) 天线的谐振频率与天线辐射贴片的有效电流路径长度呈负相关。据此设计的扇环形贴片天线角度传感器既能实现 0-40 度的较大量程内的大范围角度监测,也能满足 0-5 度的较小量程内的精确角度监测:在 0-40 度的大量程内,天线的谐振频率与螺母旋转角度之间关系是非线性的,但仍可以通过标定得到天线谐振频率与角度变化之间的关系;在 0-5 度的小量程内,天线谐振频率与螺母旋转角度之间则呈线性关系,根据实验,该量程内可识别的最小角度变化为 1/6 度,可以有效识别螺栓松动早期的螺帽旋转。

(2) 天线的谐振频率与天线辐射贴片与地平面之间介质的等效介电常数有关。根据此规律设计的双层基板开槽圆形贴片天线的二阶谐振频率与天线基板间的空气间隙厚度呈线性关系,且线性度良好。该天线还具有较高的灵敏度,根据模拟,可以识别小至 0.01mm 的空气间隙厚度变化,满足监测螺杆长度变化的要求。

(3) 曲流技术是实现天线小型化的有效方法。通过在天线表面适当位置处开槽,增加天线中电流流过路径的长度,可以在保持天线外围尺寸不变的情况下,降低天线谐振频率。

6.2 展望

基于无源无线传感器的螺栓松动监测方法为螺栓松动的监测提供了一个新的思路，应用前景广阔。本文针对两个螺栓松动过程中会发生变化的指标，分别设计了两种无源无线贴片天线传感器，并通过理论分析、数值模拟和实验验证等证明了两种天线传感器的可行性和实用性。但受限于自身水平、实验条件，以及新冠疫情的影响，本文仍有一些工作有待改进：

(1) 双层基板开槽圆形贴片天线的可行性已经过初步论证，但仍需要实验进一步验证其实际工作性能。

(2) 本文通过网络分析仪采用有线的方式测试了天线的传感性能，未完成天线的无线访问测试。在实际应用中对天线进行无线访问将更方便快捷，后续增加对天线的无线访问测试，验证文中天线的无线访问性能将是十分有意义的。

(3) 本文尝试在 HFSS 中使用平面波馈电和宽带天线访问的方法模拟所提出的两种天线的无源无线访问，所取得模拟结果较差，要实现可靠的无源无线访问，后续还需进行优化。在此对模拟过程进行总结，给出相应的优化建议。天线形式越简单，天线中电流的路径越简单，越容易实现无线访问。与高阶谐振相比，天线的低阶谐振更容易被无线激活。

(4) 未在实际工程中验证天线的实用性，后续如有相关工程项目需要监测螺栓松动，可酌情应用文中提出的天线传感器进行监测，在实践中检验其实际工作性能。

参考文献

- [1] Nikraves S M Y, Goudarzi M. A review paper on looseness detection methods in bolted structures[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2017, 14: 2153-2176.
- [2] Bickford J H. Introduction to the design and behavior of bolted joints: non-gasketed joints[M]. CRC press, 2007.
- [3] Junker G H. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration[J]. Sae Transactions, 1969: 314-335.
- [4] Motosh, N. Development of Design Charts for Bolts Preloaded up to the Plastic Range[J]. ASME. J. Eng. Ind. 1976; 98(3): 849-851.
- [5] Nassar S A, Housari B A. Self-loosening of threaded fasteners due to cyclic transverse loads[C]. ASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2005, 41871: 169-187.
- [6] Kim N, Hong M. Measurement of axial stress using mode-converted ultrasound[J]. Ndt & E International, 2009, 42(3): 164-169.
- [7] Nassar S A, Barber G C, Zuo D. Bearing friction torque in bolted joints[J]. Tribology Transactions, 2005, 48(1): 69-75.
- [8] Nassar, S. A., Matin, P. H., and Barber, G. C. Thread Friction Torque in Bolted Joints[J]. ASME. J. Pressure Vessel Technol. November 2005; 127(4): 387-393.
- [9] Huang J, Guo L S. The research on the torque-tension relationship for bolted joints[C]. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 486: 242-245.
- [10] Wang T, Song G, Liu S, et al. Review of bolted connection monitoring[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 9(12): 871213.
- [11] 张俊, 顾临怡, 钱筱林, et al. 钢结构工程中高强度螺栓轴向应力的超声测量技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(002): 216-220.
- [12] Jhang K Y, Quan H H, Ha J, et al. Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement[J]. Ultrasonics, 2006, 44: e1339-e1342.
- [13] 孙国峰. 基于超声波技术的螺栓紧固轴力测量应用研究[D]. 浙江工业大学, 2012.
- [14] Crecraft D I. The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves[J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 5(1): 173-192.
- [15] Yasui H, Tanaka H, Fujii I, et al. Ultrasonic measurement of axial stress in short bolts with consideration of nonlinear deformation[J]. JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, 1999, 42(1): 111-118.
- [16] Kim N Y, Chang Y C. Study on ultrasonic birefringence by uniaxial stress in axisymmetric solids[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 2006, 26(5): 336-342.
- [17] Wang T, Song G, Wang Z, et al. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 087001.
- [18] Song Y, Hartwigsen C J, McFarland D M, et al. Simulation of dynamics of beam structures with bolted joints using adjusted Iwan beam elements[J]. Journal of sound and vibration, 2004, 273(1-2): 249-276.
- [19] Reynolds W D, Doyle D, Arritt B. Active loose bolt detection in a complex satellite structure[C].

Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7650: 76500E.

[20] Xu J, Wang C, Li H, et al. Health monitoring of bolted spherical joint connection based on active sensing technique using piezoceramic transducers[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1727.

[21] Wang F, Huo L, Song G. A piezoelectric active sensing method for quantitative monitoring of bolt loosening using energy dissipation caused by tangential damping based on the fractal contact theory[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 27(1): 015023.

[22] Jiang T, Wu Q, Wang L, et al. Monitoring of bolt looseness-induced damage in steel truss arch structure using piezoceramic transducers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(16): 6677-6685.

[23] Zhang Z, Liu M, Su Z, et al. Quantitative evaluation of residual torque of a loose bolt based on wave energy dissipation and vibro-acoustic modulation: A comparative study[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 383: 156-170.

[24] Adams D E, Farrar C R. Classifying linear and nonlinear structural damage using frequency domain arx models[J]. *Structural Health Monitoring*, 2002, 1(2): 185-201.

[25] Fukuda M, Nishihira M, Imano K. Real time detection of second-harmonic components generated from plastic-deformed metal rod using double-layered piezoelectric transducer[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(7S): 4529.

[26] Donskoy D M, Sutin A M. Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique[J]. *Journal of intelligent material systems and structures*, 1998, 9(9): 765-771.

[27] Frouin J, Matikas T E, Na J K, et al. In-situ monitoring of acoustic linear and nonlinear behavior of titanium alloys during cycling loading[C]. *Nondestructive Evaluation of Aging Materials and Composites III*. International Society for Optics and Photonics, 1999, 3585: 107-116.

[28] Park G, Sohn H, Farrar C R, et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward[J]. *Shock and vibration digest*, 2003, 35(6): 451-464.

[29] Bellino A, Fasana A, Garibaldi L, et al. PCA-based detection of damage in time-varying systems[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(7): 2250-2260.

[30] Li Y G, Kong X N, Gao Y Y. Method for detecting bolt looseness based on probability density of vibration signals of two connected parts and principal component analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(1): 63-67.

[31] Mekid S, Bouhraoua A, Baroudi U. Battery-less wireless remote bolt tension monitoring system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 128: 572-587.

[32] Ren L, Feng T, Ho M, et al. A smart “shear sensing” bolt based on FBG sensors[J]. *Measurement*, 2018, 122: 240-246.

[33] Ramana L, Choi W, Cha Y J. Fully automated vision-based loosened bolt detection using the Viola–Jones algorithm[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(2): 422-434.

[34] Pham H C, Ta Q B, Kim J T, et al. Bolt-loosening monitoring framework using an image-based deep learning and graphical model[J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3382.

[35] Huynh T C, Park J H, Jung H J, et al. Quasi-autonomous bolt-loosening detection method using vision-based deep learning and image processing[J]. *Automation in Construction*, 2019, 105: 102844.

[36] Wu J, Cui X, Xu Y. A novel RFID-based sensing method for low-cost bolt loosening monitoring[J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 168.

[37] 闫丹. 无线无源贴片反射式高温温度传感器研究[D]. 中北大学, 2018.

- [38] Daliri A, Galehdar A, Rowe W S T, et al. Utilising microstrip patch antenna strain sensors for structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(2): 169-182.
- [39] Yi X, Cho C, Cooper J, et al. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—Electromagnetic modeling, simulation, and testing[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(8): 085009.
- [40] Yi X, Wu T, Wang Y, et al. Sensitivity modeling of an RFID-based strain-sensing antenna with dielectric constant change[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11): 6147-6155.
- [41] Sanders J W, Yao J, Huang H. Microstrip patch antenna temperature sensor[J]. *IEEE sensors journal*, 2015, 15(9): 5312-5319.
- [42] 何存富, 闫天婷, 宋国荣, 等. 微带贴片天线应变传感器优化设计研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 361-367.
- [43] 周凯, 刘志平, 毛艳飞, 等. 贴片天线传感器平面二维应变测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018 (1): 136-143.
- [44] Yi Z, Xue S, Xie L, et al. Detection of setting time in cement hydration using patch antenna sensor[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(1): e2855.
- [45] Xue S, Xu K, Xie L, et al. Crack sensor based on patch antenna fed by capacitive microstrip lines[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085012.
- [46] Xue S, Yi Z, Xie L, et al. A passive wireless crack sensor based on patch antenna with overlapping sub-patch[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4327.
- [47] Xue S, Li X, Xie L, et al. A bolt loosening detection method based on patch antenna with overlapping sub-patch[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021: 14759217211055613.
- [48] Xue S, Zheng Z, Guan S, et al. A Capacitively-Fed Inverted-F Antenna for Displacement Detection in Structural Health Monitoring[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5310.
- [49] Lee K F, Dahele J S, Ho K Y. Annular-Ring and Circular-Disc Microstrip Antennas with & without Air Gaps[C]. 1983 13th European Microwave Conference. IEEE, 1983: 389-394.
- [50] Dahele J S, Lee K F. Theory and experiment on microstrip antennas with airgaps[C]. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*. IET Digital Library, 1985, 132(7): 455-460.
- [51] 卢必伟, 刘志平, 郭谦, 李丽. 复合基质结构优化设计下的应变测量灵敏度提高研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2022, (01): 114-120.
- [52] Guha D. Resonant frequency of circular microstrip antennas with and without air gaps[J]. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 2001, 49(1): 55-59.
- [53] Guan S, Xie L, Xue S, et al. Displacement sensor based on separated inverted-F antenna[C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). IEEE, 2019: 1-3.
- [54] Qiu J, Huang Y, Wang A. An improved model for the resonant frequency of tunable rectangular microstrip antenna[C]. 2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2002. Proceedings. ICMMT 2002. IEEE, 2002: 524-527.
- [55] 易卓然. 基于无应力贴片天线的无源形变传感器[D]. 同济大学, 2021.
- [56] Wong K L. Compact and broadband microstrip antennas[M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [57] 柳青. 小型化宽带化微带天线[D]. 电子科技大学, 2008.
- [58] 邓曦. 微带天线的小型化研究[D]. 西南交通大学, 2010.

- [59] 邓曦,刘运林,史志玮,陈锋.一种新型超小型化天线[J].通信技术,2010,43(07):77-79.
- [60] Salonen P, Sydanheimo L, Keskilampi M, et al. A small planar inverted-F antenna for wearable applications[C]. Digest of papers. Third international symposium on wearable computers. IEEE, 1999: 95-100.
- [61] Rahmat-Samii Y, Mosallaei H. Electromagnetic band-gap structures: classification, characterization, and applications[J]. 11th International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 2001), 2001: 560-564.
- [62] 郑秋容,袁乃昌,付云起.紧凑型电磁带隙结构在短路微带天线中的应用[J].电子与信息学报,2007(06):1500-1502.
- [63] Sanada A, Kimura M, Awai I, et al. A planar zeroth-order resonator antenna using a left-handed transmission line[C]. 34th European Microwave Conference, 2004. IEEE, 2004, 3: 1341-1344.
- [64] Jain S, Mishra P K, Thakare V V, et al. Microstrip moisture sensor based on microstrip patch antenna[J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2018, 76: 177-185.
- [65] Hertleer C, Van Laere A, Rogier H, et al. Influence of relative humidity on textile antenna performance[J]. Textile Research Journal, 2010, 80(2): 177-183.
- [66] Deshmukh A A, Kumar G. Formulation of resonant frequency for compact rectangular microstrip antennas[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(2): 498-501.

致谢

时光荏苒，转眼间，三年的研究生生活已经来到终章。回首过去，深感求学之不易，此间良师益友的帮助便愈显珍贵，无以为报，唯有一一道谢。

感谢教研室的三位导师，传道授业解惑，在研究生期间给予我许多指导与帮助。感谢导师薛松涛，学高为师，身正为范，如深夜中的灯塔，指引我的学术之路；感谢谢丽宇导师，勤恳负责，教诲谆谆，给我非常多学术与生活上的有益帮助；感谢唐和生老师，兢兢业业，治学严谨，是我学习的榜样。

感谢田田老师、刘曰宝老师、马明欣老师等我求学之路上的每一位老师，我深知自己并非聪明的学生，一路走来有诸多坎坷，是你们在我数个想要放弃的时刻，给予我鼓励与帮助，帮我跨过坎坷，一路行走至此。

感谢教研室的各位同门，大家共同营造了一个轻松愉快、互帮互助的教研室氛围，非常高兴能与大家一起度过三年的教研室时光。

感谢管帅师兄、易卓然师兄，是两位师兄带领我走进了天线的领域，在我提出许多略显稚嫩的问题时给予耐心的解答，指导我 HFSS 的使用、天线的设计等，帮助我打下了坚实的科研基础。

感谢宪哥、姜康、子涵，师弟吴通海、范永瑞琛，师妹庞琳，感谢大家共同创建了一个快乐的天线小组，每次与大家交流都能让我开拓眼界，打开思路，让我受益匪浅。在我生活中的一些艰难时刻，也是各位出谋划策，帮我解开心结。

感谢曹跃辉、郭泰昆、龚玲、黎思维、杨虎，作为一起进入教研室的兄弟姐妹，我们一起交流生活、工作、科研中的问题，互相帮助、共同进步。愿在今年毕业的大家顺心如意。

感谢杨朋超、谢雅娟、张力、廖洋洋、仝运佳、班鑫磊、郭雪媛、陈子暘、薛智奇、康建飞、吴雅琴、曾璟琳、濮昱等师兄师姐，同窗之谊、帮助之情铭记在心，希望各位师兄师姐未来一切顺利。

感谢何展朋、王泽宇、车兴儒、以及 2021 级的师弟师妹们，你们代表了教研室朝气蓬勃的未来，祝大家能多出成果、多发 paper，未来的科研之路平坦通畅。

快乐的日子总是短暂，特别疫情之下，又少了许多与教研室大家一起羽毛球、游泳、玩耍、吃水果的日子，更是遗憾。惟愿日后常相聚，把酒言欢抚寸心。

感谢室友宋雷、钱淦宇，一起元旦跨年、一起苏州自驾、一起聊天到深夜

两点，在我艰难困苦的时刻给我支持与帮助。室友之情，无需多言，希望将来还能常常一起约最爱的“妙婷涮羊肉”。

感谢好友家瑞、承杰、道义、辰涛、如何、小寒、德波、辉、一民、尚志，如今大家散落天南海北，愿大家都能有美好的未来，常相聚。

感谢某人，人间四月芳菲尽，山寺桃花始盛开。愿你未来一切都好。

感谢爸妈和家人，永远是最坚强的后盾，让我有直面前路的勇气。

行路难，行路难，多歧路，今安在？长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。

个人简历、在读期间发表的学术成果

个人简历:

郑志泉, 男, 1997 年 05 月生。

2019 年 6 月毕业于中国海洋大学 土木工程专业 获学士学位。

2019 年 9 月入同济大学攻读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] Xue S, **Zheng Z**, Guan S, et al. A Capacitively-Fed Inverted-F Antenna for Displacement Detection in Structural Health Monitoring[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5310.
- [2] Wan C, **Zheng Z**, Xue S, et al. An angle sensor based on a sector ring patch antenna for bolt loosening detection[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(4): 045009.

发表专利:

- [1] 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[P]. CN112697336B, 2021-09-14.
- [2] 谢丽宇, 郑志泉, 薛松涛. 基于双层基板贴片天线的螺栓松动传感装置、系统和方法[P]. CN113125132B, 2021-12-31.

同济大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：郑志泉

日期：2022年6月14日

同济大学学位论文版权使用授权书

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

本学位论文属于（在以下方框内打“√”）：

保密，在_____年解密后适用本授权书。

不保密。

学位论文作者签名：郑志泉

指导教师签名：薛永涛

日期：2022年6月14日

日期：2022年6月14日