

# 微波谐振式传感器研究进展

赵文生, 方宇浩, 王大伟, 刘 军

(杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江省大规模集成电路设计重点实验室, 浙江杭州 310018)

**摘 要:** 微波谐振式传感器具有低成本、高灵敏度、实时、无损检测等特点, 在生物、医疗、环境等领域都有着广阔的应用前景. 一般来说, 微波谐振式传感器通过传输线激励谐振单元, 通过谐振频率偏移等特征变化获得待测量. 本文对微波谐振式传感器现有研究成果进行了详细的综述. 首先简要介绍了微波谐振式传感器分类、基本工作原理及关键性能指标, 其次以位移传感器、介质传感器及液体传感器这 3 种类型总结当前微波谐振式传感器国内外研究进展, 之后着重探讨了群智能算法、机器学习等优化算法在微波谐振式传感器优化设计方面的应用, 最后展望了微波谐振式传感器的发展前景以及存在的挑战.

**关键词:** 微波谐振式传感器; 传感机理; 材料表征; 群智能算法; 超材料谐振器

**中图分类号:** TN61

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2022)10-2530-12

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20220124

## A Review on Microwave Resonant Sensors

ZHAO Wen-sheng, FANG Yu-hao, WANG Da-wei, LIU Jun

(Zhejiang Provincial Key Laboratory of Large-Scale Integrated Circuit Design, School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** Microwave resonant sensors have the characteristics of low-cost, high-sensitivity, real-time and non-destructive detection. They have broad application prospects in various fields including biological, medical, and environmental. Generally speaking, microwave resonant sensor is composed of a resonant unit excited by transmission line. The quantity to be measured is obtained by the characteristic changes such as shift in resonant frequency. In this paper, the existing research of microwave resonant sensors are reviewed in detail. Firstly, the classification, basic operating principle, and key performance indicators of microwave resonant sensors are briefly introduced. Secondly, the current domestic and abroad research progresses of microwave resonant sensors are summarized in three types of sensors, i.e., displacement sensors, dielectric sensors, and liquid sensors. Then, the applications of optimization algorithms such as swarm intelligence algorithms and machine learning on the optimal design of microwave resonant sensors are emphatically explored. Finally, the future development prospects and existing challenges of microwave resonant sensors are discussed.

**Key words:** microwave resonant sensor; sensing mechanism; material characterization; swarm intelligence algorithm; metamaterial resonator

### 1 引言

随着信息化时代的到来, 从日常生活到现代化生产, 我们所处的环境中存在大量的信息. 信息与物质、能源一样, 都是人类生存发展必不可少的资源. 作为电子系统获取外界信息唯一的窗口, 传感器大量应用于国防、工业生产、个人消费等领域, 推动着生产和科技的进步<sup>[1,2]</sup>. 近年来, 微波技术发展迅速, 微带线、共面波导等平面结构广泛用于集成化微波电路设计. 基于

平面结构的微波谐振式传感器可实现介质材料电磁参数的无损检测, 同时制造工艺简单、成本低、稳定性高, 因此成为近年来研究的热点.

一般来说, 微波谐振式传感器利用微带线、共面波导等传输线结构激励谐振单元, 常见的谐振单元包括开口环谐振器 (Split-Ring Resonator, SRR) 及其互补 (Complementary SRR, CSRR)、电 LC (Electric-LC, ELC) 谐振器、磁 LC (Magnetic-LC, MLC) 谐振器等<sup>[3,4]</sup>. 通过

谐振建立待测量与电信号间的映射关系,从而实现检测.微波谐振式传感器可实现非接触式、实时、高精度检测,在医疗卫生、物联网等领域具有巨大的应用前景.例如,加拿大学者基于3D打印技术设计流体通道,设计一款可重复使用、环境友好的平面谐振式液体传感器<sup>[5]</sup>;CSRR具有结构紧凑、品质因数高等优势,被用于多款微波传感器设计,实现了(磁)介质材料、微流液体等材料参数的检测<sup>[6,7]</sup>;有研究者通过在基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)引入嵌入式气孔,令潮湿空气分布在传感区域,从而实现谐振频率随环境湿度的映射关系,设计了一款微波温度传感器<sup>[8]</sup>;微波谐振式传感器也被用于检测细菌生长状况、人体健康实时监测以及管道涂层缺陷检测<sup>[9-11]</sup>.

微波元件设计由于其不连续性,在参数优化上往往需要耗费大量人力成本和时间成本,且该过程极度依赖设计经验.随着计算机算力的不断提升,以及机器学习等智能算法的逐渐成熟,微波传感器结构设计过程可望得到简化,从而在缩短优化时间的基础上实现更高自由度的探索<sup>[12,13]</sup>.

本文首先介绍微波谐振式传感器的工作原理及其评估指标;之后从工作原理出发,重点综述常见的微波谐振式传感器及其在位移、介质材料、液体检测等领域的研究进展;最后总结微波谐振式传感器的技术难点及挑战,并展望其发展前景.

## 2 工作原理

微波谐振式传感器主要通过传输线激励SRR, CSRR等谐振单元,从而建立待测量与谐振特性间的映射关系.从响应参数特征来说,微波谐振式传感器可分为以下4类<sup>[14]</sup>.

(1)变频传感.待测材料样品的电磁参数直接影响谐振单元等效参数,从而导致谐振频率出现偏移,通过谐振频率偏移量回归得到材料特性参数.这种传感器易受环境因素干扰而受到交叉敏感性的影响,因此在使用前应进行校准.

(2)耦合调制传感.通常基于对称式结构设计,因此对环境因素有一定鲁棒性.在保持对称性条件下谐振单元不会被激励,当对称性被破坏后将激励谐振单元,从而在频率响应曲线出现陷波,其幅值与不对称程度密切相关.

(3)分频传感.通常由单根传感器耦合一对相同结构的谐振单元,此时在频率响应曲线上只有1个谐振点.但当待测材料样品加载在其中1个谐振单元后,对称性被破坏而出现2个谐振,通过2个谐振频率点的差值回归材料参数.但2个谐振之间存在一定耦合,带来了测量误差.

(4)差分传感.通常由2个独立的传感器各自激励对称结构的谐振单元组成,此时其中1个谐振单元加载待测材料后,将导致对应传输线谐振频率点出现偏移,而另1条参考传输线结构谐振频率点保持不变.通过2个谐振频率点差值可以得到材料特性参数,同时抑制环境因素干扰.但该类型传感器为四端口元件,导致外围读取电路设计困难、成本上升.

以变频传感型为例,图1给出一种常见的微带线激励SRR谐振单元传感器.在谐振频率点,感应电流产生的磁场可等效为电感 $L$ ,SRR谐振单元可等效为电阻 $R_s$ 、电感 $L_s$ 和电容 $C_s$ 的串联组合,微带线与SRR谐振单元间存在互感 $M$ <sup>[15]</sup>.为便于分析,此处省略SRR等效电阻,从而可将谐振频率点写为 $f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{L_s C_s})$ .当介质材料加载到SRR谐振单元后,其电磁参数将直接干扰SRR等效电容 $C_s$ ,从而导致谐振频率出现偏移,此时可定义传感器灵敏度为相对频偏与介电常数的比值,即 $S = (f_0 - f_{e_r}) / [f_0(\epsilon_r - 1)]$ ,其中 $\epsilon_r$ 为待测材料介电常数, $f_{e_r}$ 为待测材料样品加载后的谐振频率.

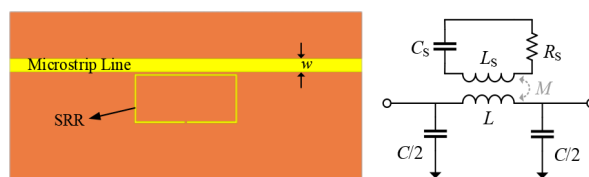


图1 SRR耦合微波谐振式传感器示意图及其等效电路模型

## 3 应用研究进展

微波谐振式传感器具有高集成度、高灵敏度、非侵入式、实时响应、低成本等特点,能够直观地将材料特性参数转化为电信号,辅以外围射频电路实现收发功能,因而在工业物联网等领域具有广阔应用前景.本节根据应用场景及检测对象的不同,简要介绍微波谐振式传感器在位移、(磁)介质材料以及液体检测方面的研究进展.

### 3.1 位移传感器

近年来,研究人员致力于位移传感器的设计及应用,设计实现多种具有实用价值的微波位移传感器.微波位移传感器主要有3种设计思路:第一种是基于传输线激励谐振单元,由目标物体的移动或旋转打破对称性而引起电路响应的变化;第二种是根据传感器单元电学特性的改变而引起电路响应的变化,例如待测物体位移后导致部分阻抗改变;第三种则类似于射频识别(Radio-Frequency Identification, RFID)技术,通过读取位移或旋转物体上编码的变化来测量位移线速度或旋转角速度,但这种类型的设计在部分应用场景下可能面临分辨率不足的缺陷<sup>[16]</sup>.

以第一种位移传感器为例,西班牙学者基于 SRR 对称特性,应用共面波导(CoPlanar Waveguide, CPW)平面结构设计了一款紧凑型一维位移传感器<sup>[17]</sup>;进一步地,应用折叠 CPW 结构耦合多个工作于不同谐振频率的 SRR 单元,实现了二维线性位移量的检测<sup>[18]</sup>;此外,他们基于开路阶梯阻抗谐振结构,设计了一款通过相位变化实现微小位移变量检测的微波传感器<sup>[19]</sup>,灵敏度可达 95.24°/mm. 除灵敏度以外,动态范围也是位移传感器的重要指标之一<sup>[20,21]</sup>. 图 2(a) 给出了一款 H 型微波位移传感器及其测量响应曲线,该传感器由 1 个定子和 1 个动子构成,定子即为刻蚀金属的条带的 PCB 板,当其放置在定子表面将左右开路微带线连接起来,此时多余微带线可看作四分之一波长( $\lambda/4$ )谐振结构. 动子移动过程中将导致谐振结构长度增大,对应谐振频率不断减小<sup>[22]</sup>. 进一步地,如图 2(b) 所示,将位移传感器中微带线替换为耦合线,同时引入接地孔使其短路. 随着动子移动,该传感器响应曲线将产生两个向高频和低频移动的谐振点,分别对应奇、偶模式,实验表明该传感器动态范围可达 12 mm,灵敏度达 147.7 MHz/mm.

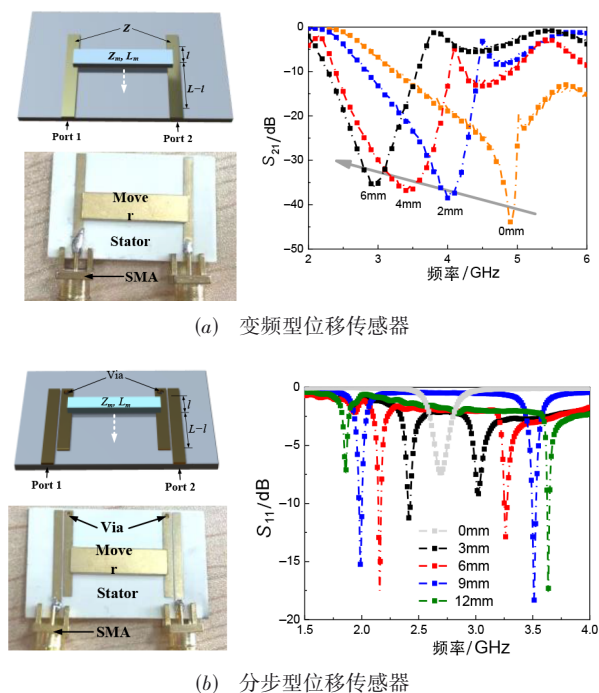


图 2 微波位移传感器及其测试曲线<sup>[22]</sup>

角度传感器的基本工作原理与位移传感器类似,但具体实施手段上有所不同. 此外,角度传感器测量范围最大为  $360^\circ$ ,但实际应用中易出现对称结构导致动态范围受限的情形. 通过两端口相位变化、多模谐振等方式可望进一步增大角度传感器动态范围,如 Teng 等

人<sup>[23]</sup>提出的旋转十字形谐振器,转子旋转时导致多个传输零点发生漂移,基于多个零点变化实现了全范围的角度测量,其灵敏度为 1.22 MHz/( $^\circ$ ),未来可望通过结构优化、理论创新等方式进一步提升其检测灵敏度与线性度.

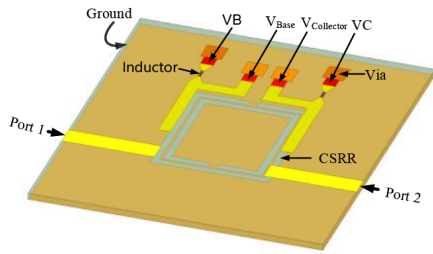
### 3.2 介质传感器

微波手段可实现材料特性参数无损检测,因此在航空航天、农业、国防工业、生物医学等领域有着广泛应用前景. 微波介质传感器中,通过谐振单元诱导的电磁场与介质材料极化作用,从而通过谐振特性的变化获得材料特性参数. 需要注意到,材料电磁参数通常随频率变化,但相比液体,固体材料参数变化幅度较小.

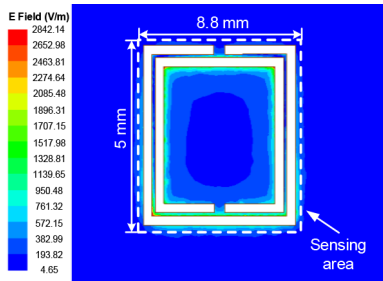
一般来说,微波介质传感器需要尽可能将电场聚集起来,以便与介质材料相互作用. 图 3 给出了一款基于微带 CSRR 结构的介质传感器,可以看到,电场主要聚集在地平面 CSRR 结构周围,因此待测材料样品也放置在 CSRR 表面<sup>[24]</sup>. 在该传感器中引入了放大电路,即传感器处于谐振状态下,电磁能量会通过顶部 L 形微带线耦合进入放大电路,放大后的能量通过另一侧的 L 形微带线馈回微带 CSRR 中. 实际测量过程中应用电源提供 0.8 V 偏置电压,通过 Keysight N5257A 矢量网络分析仪记录响应曲线. 可以看到不同待测材料样品加载后,谐振频率点出现明显频偏,即可通过频偏获得材料介电常数参数.

相较于电介质材料,磁介质材料除具有一定介电常数外,同时具有非零磁导率,可用于缩小微波电路尺寸,因而受到广泛关注<sup>[25]</sup>. 一般而言,介质传感器一般无法直接用于磁介质材料的检测,这是由于介质传感器中谐振单元无法将电场和磁场有效分开,即无法分辨谐振频率的偏移是由介电常数还是磁导率引起的. 针对这一问题, Muhammed Shafi 等人<sup>[26]</sup>通过在 SRR 中引入交指结构和弯折结构,分别提升电场和磁场的聚集程度,实现磁介质材料介电常数和磁导率的检测; Saadat-Safa 等人<sup>[27]</sup>通过改进 CSRR 结构,解决了前人无法提取磁介质材料损耗参数的问题,从而实现磁介质材料完全表征. 在测量过程中,需要分别将待测材料样品放置在 2 个区域,按先后顺序分别提取复磁导率和复介电常数. 为了减少测试次数,通过折叠微带线使其分别激励 2 个工作于不同谐振频率的 CSRR 单元,实现了单次检测即可完全表征磁介质材料<sup>[28]</sup>;进一步地,通过双端口激励 2 个 CSRR 单元,分别通过两端口反射系数获取材料介电常数和磁导率,实现了单个样品、单次检测下磁介质材料的检测功能,从而降低了测试成本<sup>[7]</sup>.

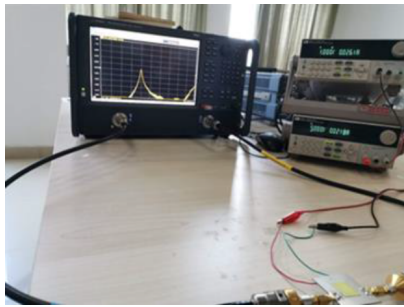
SIW 具有金属波导高品质因数、高功率容量等特性,且易于与各种有源无源器件集成而不需要其他接



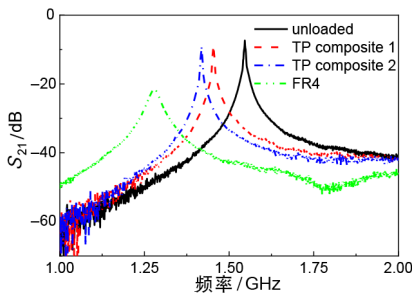
(a) 结构示意图



(b) 电场分布图



(c) 实验装置图

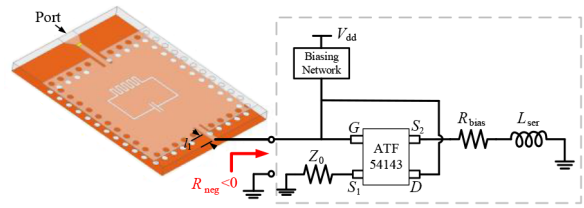


(d) 测试曲线

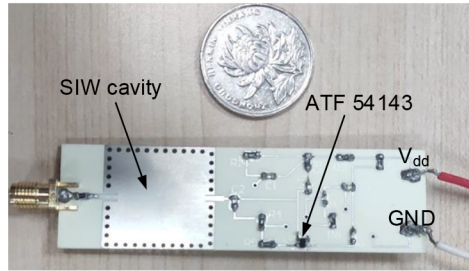
图3 介质传感器及其测试曲线<sup>[24]</sup>

头转化<sup>[29]</sup>。图4给出在SIW结构刻蚀改进型CSRR结构的磁介质传感器,CSRR结构中弯折槽线区域为电场聚集区,另一侧为磁场聚焦区,从而实现磁介质材料复介电常数和复磁导率检测<sup>[30]</sup>。为进一步提高传感器灵敏度,在传感器中引入负阻电路,采用Avago公司E-PHEMT ATF54143有源器件设计实现,实验证明品质因数从183增大至13 399,损耗参数检测灵敏度提升了2~3个数量级。

进一步地,基于耦合谐振器奇、偶模式不同特性,



(a) 磁介质传感器示意图



(b) 传感器加工图

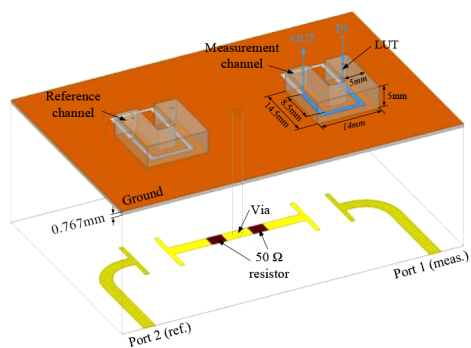
图4 磁介质传感器<sup>[30]</sup>

Moraless-Lovera 等人设计实现了可检测各向异性介质的微波传感器<sup>[31]</sup>;Su 等人<sup>[32]</sup>基于人工表面等离子体设计微波传感器,实现了非金属复合材料缺陷检测。随着应用需求多样化,通过加载与有害气体、温度、湿度等变量关联的敏感材料,可望实现多种新型微波传感器<sup>[33,34]</sup>。例如,Vivaldi 等人<sup>[35]</sup>应用掺铜离子液体修饰的RFID标签实现了冷链质量监测,一旦运输过程中温度超过设定阈值,就会发生不可逆变化而导致标签失效。此外, Lee 等人<sup>[36]</sup>通过串联多个CSRR结构,基于多谐振模式实现了眼球追踪,有望应用于虚拟现实设备,降低成本。

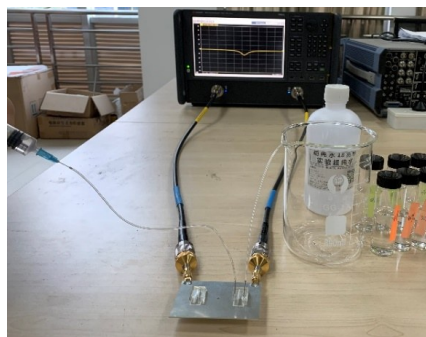
### 3.3 液体传感器

通过微波谐振式传感器,可以检测液体介电常数的变化,可望应用于液体质量监测、血糖检测等领域。相较于传统检测方式,微波谐振式传感器具有无损检测等优势,可以通过检测介电常数的变化来分析二元液体比例或血糖浓度<sup>[37,38]</sup>。一方面,与介质传感器类似,液体传感器可通过增强电场聚集来提升液滴检测灵敏度<sup>[39]</sup>;另一方面,液体可沿着给定区域流动,因此结合微流控技术可望进一步提升检测灵敏度,例如在CSRR,MLC等谐振结构中引入弯折槽线,结合聚二甲基硅氧烷(PDMS)微流芯片使液体沿着槽线流动,增强激励电场与液体极化的相互作用<sup>[40,41]</sup>。此外,国内学者也充分利用SIW技术实现液体检测,如Chen 等人<sup>[42]</sup>基于重入式消逝模谐振腔检测液体复介电常数,Rocco 等人<sup>[43]</sup>应用3D打印实现了SIW微流传感器。

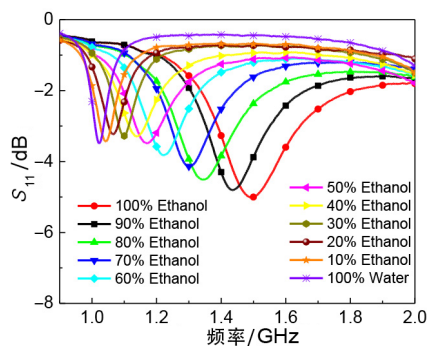
图5给出了一款基于微带CSRR结构的差分微波微流传感器,该传感器由两个相同的传感单元组成,分别用作测试端和参考端<sup>[44]</sup>。为隔离两个传感单元相互



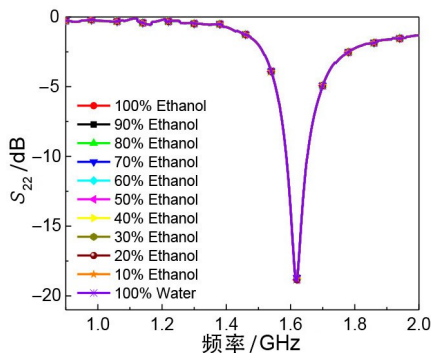
(a) 结构示意图



(b) 实验装置图



(c) 测试端口响应曲线



(d) 参考端口测试曲线

图5 差分微流液体传感器及其测试曲线<sup>[44]</sup>

耦合,在中间引入接地孔进行屏蔽,同时尽可能增大间距.基于等效电路建模及参数拟合后,结合理论推导证

明两个传感单元间距需要保持在一定范围内才能保持陷波幅值单调性,从而实现损耗参数检测功能.基于仿真分析后,将PDMS微流通道覆盖在CSRR结构下半部分,即电场聚集区域.实验测试过程中将水-乙醇混合液缓慢注入到测试端,可以看到,谐振频率及幅值随液体中乙醇比例变化而变化,而参考端响应曲线保持不变.通过谐振频率变化即可得到液体介电常数实部数值,同时引入神经网络模型建立幅值与损耗参数间的映射关系,最终实现液体复介电常数的提取.需要注意到,液体复介电常数极易受温度等环境因素影响而出现测量误差<sup>[45]</sup>.为解决这一难题,Kazemi等人<sup>[46]</sup>应用神经网络模型建立环境温度与待测液体间的映射关系,从而实现软件形式温度补偿功能.但这一方式仅对已知的、用于数据训练的液体有效,普适性较差,因此引入温度检测电路,同时叠加差分功能设计了一款硬件形式温度补偿的微波微流传感器<sup>[47]</sup>.

近年来,微波微流传感器实现形式呈现多样化.如Jun等人<sup>[48]</sup>应用高阻表面中单元结构间刻槽以注入待测液体,实现谐振频率与液体介电常数的映射关系,并在高阻表面上方放置宽带天线实现了液体实时、无损监测;Cai等人<sup>[49]</sup>应用人工等离子体设计可检测极性液体的微波传感器,并结合放大芯片提升品质因数;Luo等人<sup>[50]</sup>基于人工超材料结构设计可编程微波传感器,可通过二极管驱动实现不同量程的葡萄糖溶液传感器.

## 4 智能优化设计

由于微波元件设计不连续性,为提升传感器检测灵敏度,通常需要反复对结构参数进行调试<sup>[51]</sup>.调参过程需要依据设计经验,且往往难以满足多目标组合优化问题需求,无法充分发挥技术潜力.近年来,随着机器学习等智能算法的快速发展,基于智能算法的微波传感器设计已成为可能并逐渐成为研究热点.

### 4.1 液体传感器

群智能理论研究领域主要有2种算法:蚁群算法和粒子群算法.这2种算法都是通过模拟自然环境中群集行为实现的优化工具<sup>[52]</sup>.其中,粒子群优化算法简单易实现,是目前应用最为广泛的群智能优化算法.Saadat-Safa等人<sup>[53]</sup>将谐振单元结构像素化,引入粒子群算法实现了谐振结构的优化设计,从而提升了液滴检测灵敏度.为进一步提升微波微流传感器性能,引入粒子群-蚁群优化方法实现微流通道路径的自动优化设计(图6)<sup>[54]</sup>.该算法主要基于粒子群算法框架,采用蚁群算法更新机制实现,通过数值计算软件Matlab中生成模型脚本,调用全波电磁仿真软件HFSS求解后返回传感器灵敏度数值以进行更新迭代.这种方法具有短时

记忆特性,可有效防止陷入局部最优解.该方法具有较好的适用性,可实现多种微波微流传感器的优化设计,包括微带线激励 CSRR 结构以及级联 LC 结构的微波传感器.

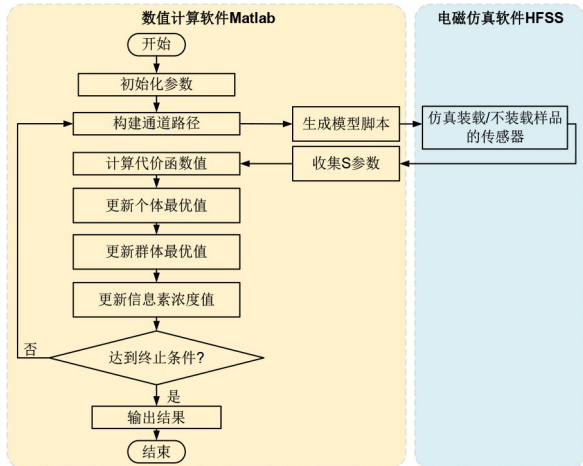


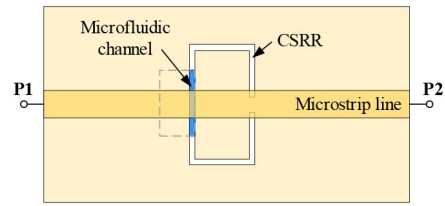
图6 基于群智能优化算法的微流通道自动优化设计方案

图7给出了微带线激励 CSRR 结构的微波微流传感器示意图,其中蓝色区域为原始微流通道区,规划的优化区域为虚线框内范围<sup>[55]</sup>.应用粒子群-蚁群优化算法后,传感器相对频偏不断增大,并且当迭代次数超过50以后达到稳定.实验制备测试后证明优化后的传感器与仿真数据吻合,在纯水注入下可实现约0.424的相对频偏,相较于原始传感器,灵敏度提升了80%.类似地,将该算法应用于级联 LC 微波微流传感器,灵敏度提升了55%.此外,群智能优化算法也可用于高阻表面结构优化设计中,结合宽带天线来实现高灵敏度、宽动态范围液体传感器<sup>[56]</sup>.

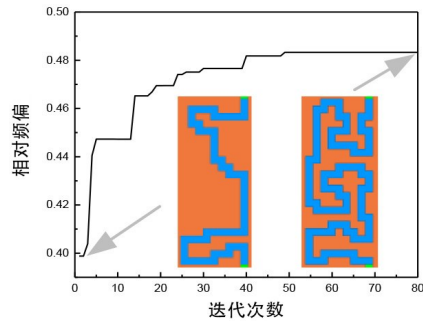
#### 4.2 机器学习算法

群智能算法虽然能够有效实现微流通道路径自动优化,但当优化区域扩展至整个谐振结构时,求解维度过大将导致寻优能力和收敛能力大幅下降.得益于深度强化学习的快速发展,神经网络能够有效学习输入的高维度特征信息,可望用于谐振结构自动优化设计<sup>[57]</sup>.类似地,围绕微带线激励 CSRR 结构的微波微流传感器,考虑到对称性而对 CSRR 谐振结构的一半进行优化设计.深度强化学习中神经网络作为值函数或参数化调整策略,并使用梯度下降算法优化损失函数<sup>[58]</sup>.

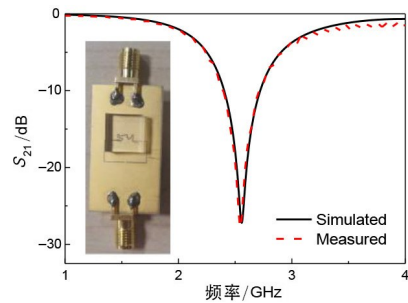
图8给出优化过程中采用的深度确定性策略梯度(Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG)框架,该框架是一个能够处理连续动作空间问题的 Actor-Critic 框架,Actor 网络的行动策略添加了随机噪声以确保多样化的探索能力,Critic 网络使用确定性策略,采用函数逼近法对价值函数进行估计. DDPG 框架优化过程中,当



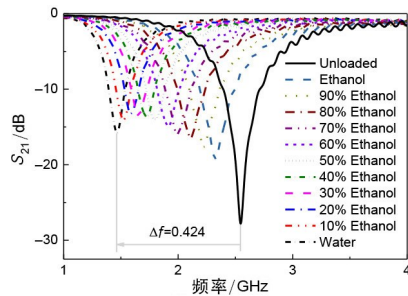
(a) 结构示意图



(b) 优化结果图



(c) 空载测试曲线



(d) 加载测试曲线

图7 群智能算法优化后的微波微流传感器及其测试曲线<sup>[55]</sup>

前谐振结构记录为当前状态  $S_t$ , Actor 网络根据当前状态  $S_t$  和动作策略  $\beta$  选择调整动作  $A_t$ ; 调整动作后,原有谐振结构状态  $S_t$  更新为状态  $S_{t+1}$ ,并对新结构进行仿真,根据性能计算奖励值;将转换元组存储在经验池,作为 Online 网络训练数据集,同时通过 Q\_online 网络计算奖励数学期望值,对 policy\_online 网络进行评分;同时, Q\_target 网络计算相应 Q 值以更新 Q\_online 网络参数,并将标签变量转移到 Q\_online 网络,构建损失函数并进行相应训练;根据经验池采样的 Q\_online 网络和转

换元组,应用策略梯度训练 policy\_online 网络,最后采用软更新方法对 Target 网络参数进行更新. 利用深度强化学习中的 DDPG 框架对微波微流传感器进行优化设计后,制作并进行了相应测试,如图 9 所示. 优化过程中,液体体积保持为 2.4  $\mu\text{L}$ ,此时注入纯水样品时传感器相对频偏达 0.632,相应灵敏度为 0.805%.

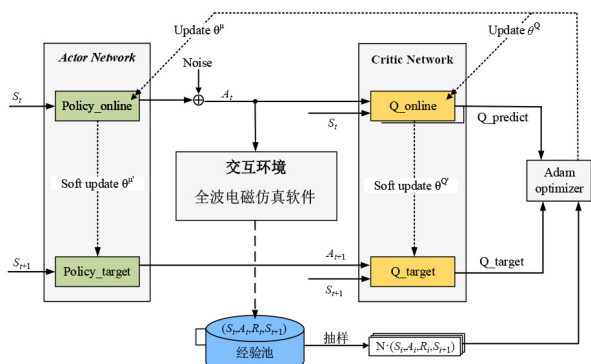
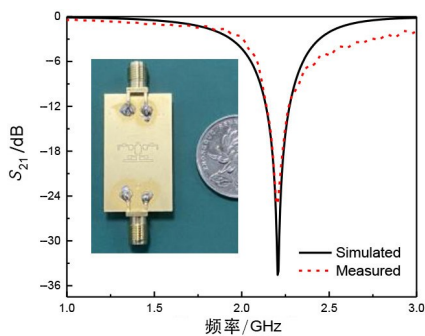
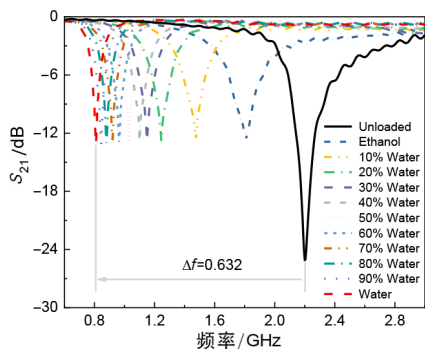


图 8 DDPG 框架图



(a) 空载测试曲线



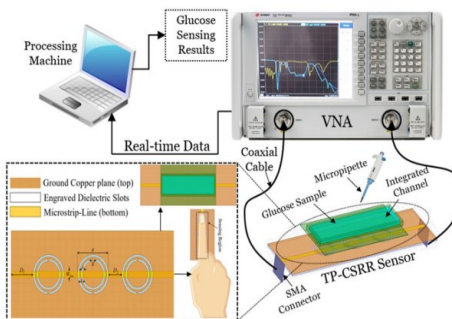
(b) 加载测试曲线

图 9 强化学习优化后的微波微流传感器及其测试曲线<sup>[58]</sup>

### 5 工程应用

近年来,随着加工工艺和微波集成电路的快速发展,微波传感器搭配外围电路制成的微波芯片成本不断降低,微波传感系统在工程应用领域有着巨大的应用前景. 传统工业领域,微波谐振单元与数字系统结

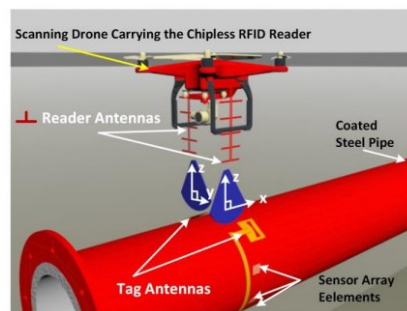
合,实现了多种商用高精度传感系统. 如英国 Hydronix 公司研制了微波数字温度/湿度传感器,可用于环境监测 (<https://www.hydronix.com/>); 德国 hf sensor GmbH 公司研制了手持式微波湿度测试系统 (<http://hf-sensor.de/>),也被国内研究人员用于古建筑湿度检测<sup>[59]</sup>. 此外,微波谐振传感器的非接触、无损等特性使其在生物健康检测方面具有巨大应用前景<sup>[60]</sup>. 如图 10(a) 所示,将微波谐振式传感器与后端设备结合可实现血糖实时、非侵入式检测,当手指按压在谐振结构上,通过检测设备上读取到谐振频率的偏移量可以得到血糖变化<sup>[61]</sup>,这种方案降低了血糖检测门槛,同时克服了传统侵入式方案时效性差的问题. 如图 10(b) 所示,基于柔性材料设计微波谐振式传感可穿戴设备,通过集成化设备提供更为便捷的实时健康监测服务<sup>[62]</sup>,类似方



(a) 实时血糖检测系统方案<sup>[61]</sup>



(b) 可穿戴式人体健康检测设备<sup>[62]</sup>



(c) 基于 Chipless RFID 的管道缺陷检测<sup>[67]</sup>

图 10 微波谐振式实时非侵入式检测应用方案

案也被应用到生物组织厚度、组织含水量分析等<sup>[63,64]</sup>,并在物联网技术支持下通过无线体域网构建医疗健康监测系统<sup>[65,66]</sup>。如图 10(c)所示,微波谐振式传感器可用于管道涂层缺陷和腐蚀检测,即与无芯片 RFID 结合后贴在管道表面,当无人机携带读取系统经过管道上方时,发射信号激励无芯片 RFID,通过多个谐振单元产生的反馈变化即可得到管道涂层情况<sup>[67]</sup>。类似方案也可用于食品运输过程冷链监测、菜籽油含水率检测、快速成形领域旋转检测以及火电煤厂煤粉流量检测等<sup>[68-71]</sup>。微波谐振式传感器具有低成本、实时检测等优势,可望成为工业物联网的重要一环,进一步提升生产效率。

## 6 总结与展望

基于微波谐振机理设计位移、介质、液体等传感器,均可在保证稳定性的情况下实现较高灵敏度的测量,并充分利用微波传感器无损、实时检测特性,在相应的工业应用领域有出色表现。在智能优化层面上,基于群智能算法、机器学习等智能优化算法进行辅助设计,可在原有基础上实现性能提升,且极大节省人工调参的时间成本。然而,在实际应用过程中还是存在着一些亟待解决的问题:

(1)目前微波谐振式传感器多集中在前端传感器结构设计层面,需要进一步结合后端射频电路进行系统搭建,从而实现应用层面上完整的测量通信系统,提升核心竞争力;

(2)生物医疗领域如何在保证设备低辐射的前提下,尽可能提高传感器灵敏度,是微波谐振式传感器走向产业化重要一步;

(3)群智能优化算法在具体器件结构设计过程中,易陷入局部最小值而难以收敛到最佳结果,对智能算法进行改良使其适应当前复杂目标环境是提升优化效率的重点;

(4)神经网络训练过程中数据集数量直接影响训练效果,而微波元件数据集构建需调用大量全波电磁仿真,极为耗费时间和计算资源,如何快速、准确获取数据集,或在不影响精度的前提下尽可能压缩数据集,是机器学习辅助传感器设计的关键;

(5)目前通过深度强化学习实现微波传感器设计的潜力尚未被充分挖掘,有待进一步深入研究。

综上所述,微波谐振式传感器具有低成本、高灵敏度优势,且支持无损、实时检测,因而在物联网时代具有得天独厚的优势。未来微波传感器可望与射频通信系统集成实现信号的实时采集和收发,通过无线局域网接入移动端并实现存储、分析并实时反馈。在智能优

化层面,随着计算机算力不断提升,电磁仿真速度越来越快,可望在一定程度上缓解数据集搜集难题。此外,目前神经网络应用主要集中在图像处理层面,未来通过图像像素化方式获取微波传感器拓扑结构数据集,或直接通过等效电路模型获取数据集,可能是解决神经网络训练的一个可行方案。

## 参考文献

- [1] 张明, 王景璟, 马骏, 等. 从智能支架看植入式医疗电子的发展[J]. 电子学报, 2021, 49(7): 1406-1416.  
ZHANG M, WANG J J, MA J, et al. Discussion on the new generation of vascular stent from the development of implantable medical devices[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(7): 1406-1416. (in Chinese)
- [2] 李杜娟, 陈慧旖, 刘超然, 等. 基于微纳加工技术的生物传感器研究进展[J]. 电子学报, 2021, 49(6): 1228-1236.  
LI D J, CHEN H Y, LIU C R, et al. A review on MEMS/NEMS-based biosensor[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(6): 1228-1236. (in Chinese)
- [3] KAZEMI N, ABDOLRAZZAGHI M, MUSILEK P, et al. A temperature-compensated high-resolution microwave sensor using artificial neural network[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(9): 919-922.
- [4] NAQUI J, MARTÍN F. Angular displacement and velocity sensors based on electric-LC(ELC) loaded microstrip lines [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4): 939-940.
- [5] WILTSHIRE B D, ZARIFI M H. 3-D printing microfluidic channels with embedded planar microwave resonators for RFID and liquid detection[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(1): 65-67.
- [6] JAVED A, ARIF A, ZUBAIR M, et al. A low-cost multiple complementary split-ring resonator-based microwave sensor for contactless dielectric characterization of liquids [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11326-11334.
- [7] GAN H Y, ZHAO W S, HE L, et al. A CSRR-loaded planar sensor for simultaneously measuring permittivity and permeability[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(2): 219-221.
- [8] NGUYEN T K, TSENG C H. A new microwave humidity sensor with near-field self-injection-locked technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21520-21528.
- [9] MOHAMMADI S, NADARAJA A V, LUCKASAVITCH K, et al. A label-free, non-intrusive, and rapid monitoring of bacterial growth on solid medium using microwave biosensor[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and

- Systems, 2020, 14(1): 2-11.
- [10] GOVIND G, AKHTAR M J. Metamaterial-inspired microwave microfluidic sensor for glucose monitoring in aqueous solutions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(24): 11900-11907.
- [11] ZARIFI M H, DEIF S, ABDOLRAZZAGHI M, et al. A microwave ring resonator sensor for early detection of breaches in pipeline coatings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(2): 1626-1635.
- [12] RIZZOLI V, COSTANZO A, MASOTTI D, et al. Computer-aided optimization of nonlinear microwave circuits with the aid of electromagnetic simulation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(1): 362-377.
- [13] ZHU H R, WANG J B, SUN Y F, et al. A novel automatically designed EBG structure by improved GA for ultra-wideband SSN mitigation of system in package[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2020, 10(1): 123-133.
- [14] MUÑOZ-ENANO J, VÉLEZ P, GIL M, et al. Planar microwave resonant sensors: A review and recent developments[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2615.
- [15] BAENA J D, BONACHE J, MARTIN F, et al. Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(4): 1451-1461.
- [16] HERROJO C, PAREDES F, BONACHE J, et al. 3-D-printed high data-density electromagnetic encoders based on permittivity contrast for motion control and chipless-RFID[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(5): 1839-1850.
- [17] NAQUI J, DURÁN-SINDREU M, MARTÍN F. Novel sensors based on the symmetry properties of split ring resonators(SRRs) [J]. *Sensors(Basel, Switzerland)*, 2011, 11(8): 7545-7553.
- [18] NAQUI J, DURÁN-SINDREU M, MARTÍN F. Alignment and position sensors based on split ring resonators [J]. *Sensors(Basel)*, 2012, 12(9): 11790-11797.
- [19] MUÑOZ-ENANO J, VÉLEZ P, SU L J, et al. A reflective-mode phase-variation displacement sensor[J]. *IEEE Access*, 8: 189565-189575.
- [20] MATA-CONTRERAS J, HERROJO C, MARTÍN F. Detecting the rotation direction in contactless angular velocity sensors implemented with rotors loaded with multiple chains of resonators[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(17): 7055-7065.
- [21] TENG C, CHIO C H, TAM K W, et al. An angular displacement microwave sensor with 360° dynamic range using multi-mode resonator[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2899-2907.
- [22] ZHU P W, WANG X, ZHAO W S, et al. Design of H-shaped planar displacement microwave sensors with wide dynamic range[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 333: 113311.
- [23] TENG C, CHIO C H, TAM K W, et al. An angular displacement microwave sensor with 360° dynamic range using multi-mode resonator[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2899-2907.
- [24] GAN H Y, ZHAO W S, WANG D W, et al. High-Q active microwave sensor based on microstrip complementary split-ring resonator(MCSR) structure for dielectric characterization[J]. *Applied Computational Electromagnetics Society*, 2021, 36(7): 922-927.
- [25] MOSALLAEI H, SARABANDI K. Magneto-dielectrics in electromagnetics: Concept and applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(6): 1558-1567.
- [26] MUHAMMED SHAFI K T, JHA A K, AKHTAR M J. Improved planar resonant RF sensor for retrieval of permittivity and permeability of materials[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(17): 5479-5486.
- [27] SAADAT-SAFA M, NAYYERI V, KHANJARIAN M, et al. A CSRR-based sensor for full characterization of magneto-dielectric materials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(2): 806-814.
- [28] ZHAO W S, GAN H Y, HE L, et al. Microwave planar sensors for fully characterizing magneto-dielectric materials[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 41985-41999.
- [29] 王树兴, 张德伟, 吴瑛, 等. 基于不同边界条件的SIW谐振腔导模场分析及应用[J]. *电子学报*, 2017, 45(10): 2540-2548.
- WANG S X, ZHANG D W, WU Y, et al. Guided-mode field analysis of SIW resonator with different boundary conditions and its applications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(10): 2540-2548. (in Chinese)
- [30] FAN L C, ZHAO W S, GAN H Y, et al. A high-Q active

- substrate integrated waveguide based sensor for fully characterizing magneto-dielectric(MD) materials[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 301: 111778.
- [31] MORALES-LOVERA H N, OLVERA-CERVANTES J L, CORONA-CHAVEZ A, et al. Dielectric anisotropy sensor using coupled resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(4): 1610-1616.
- [32] SU P Q, YANG X Q, WANG J, et al. Method of defects detection in non-metallic composites based on liquid flow controlled spoof surface plasmon polaritons[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(12): 13239-13246.
- [33] CHEN W T S, MANSOUR R R. Miniature gas sensor and sensor array with single- and dual-mode RF dielectric resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(8): 3697-3704.
- [34] EYEBE G A, BIDEAU B, LORANGER É, et al. Printed microwave frequency humidity sensor operating with phase shifting scheme[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2854-2863.
- [35] VIVALDI F, MELAI B, BONINI A, et al. A temperature-sensitive RFID tag for the identification of cold chain failures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112182.
- [36] LEE C S, BAI B, SONG Q R, et al. Microwave resonator for eye tracking[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, 67(12): 5417-5428.
- [37] KIANI S, REZAEI P, FAKHR M. Dual-frequency microwave resonant sensor to detect noninvasive glucose-level changes through the fingertip[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-8.
- [38] MAO Y J, ZHANG Y J, CHEN Z R, et al. A noncontact microwave sensor based on cylindrical resonator for detecting concentration of liquid solutions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1208-1214.
- [39] MAYANI M G, HERRAIZ-MARTÍNEZ F J, DOMINGO J M, et al. A novel dielectric resonator-based passive sensor for drop-volume binary mixtures classification[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(18): 20156-20164.
- [40] FAN L C, ZHAO W S, WANG D W, et al. An ultrahigh sensitivity microwave sensor for microfluidic applications [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(12): 1201-1204.
- [41] WU W J, ZHAO W S, WANG D W, et al. Ultrahigh-sensitivity microwave microfluidic sensors based on modified complementary electric-LC and split-ring resonator structures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18756-18763.
- [42] CHEN Y K, HUANG J, XIANG Y H, et al. A modified SIW re-entrant microfluidic microwave sensor for characterizing complex permittivity of liquids[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 14838-14846.
- [43] ROCCO G M, BOZZI M, SCHREURS D, et al. 3-D printed microfluidic sensor in SIW technology for liquids' characterization[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(3): 1175-1184.
- [44] GAN H Y, ZHAO W S, LIU Q, et al. Differential microwave microfluidic sensor based on microstrip complementary split-ring resonator(MCSRR) structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11): 5876-5884.
- [45] LIU Q, YU Y F, ZHAO W S, et al. Microfluidic temperature sensor based on temperature-dependent dielectric property of liquid[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(1): 215-219.
- [46] KAZEMI N, ABDOLRAZZAGHI M, MUSILEK P. Comparative analysis of machine learning techniques for temperature compensation in microwave sensors[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(9): 4223-4236.
- [47] WU W J, ZHAO W S, WANG D W, et al. A temperature-compensated differential microstrip sensor for microfluidic applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24075-24083.
- [48] JUN S Y, SANZ IZQUIERDO B, PARKER E A. Liquid sensor/detector using an EBG structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3366-3373.
- [49] CAI J, ZHOU Y J, ZHANG Y, et al. Gain-assisted ultrahigh-Q spoof plasmonic resonator for the sensing of polar liquids[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25460-25470.
- [50] LUO Y, DONG N, PEI Y, et al. A sensitive glucose sensor based on active metamaterial with programmable states[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(21): 24038-24047.
- [51] 段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究[J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 2051-2060.
- DUAN B Y, WANG M. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimiza-

- tion design on microwave antennas[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(10): 2051-2060. (in Chinese)
- [52] 彭喜元, 彭宇, 戴毓丰. 群智能理论及应用[J]. *电子学报*, 2003, 31(S1): 1982-1988.  
PENG X Y, PENG Y, DAI Y F. Swarm intelligence theory and applications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(S1): 1982-1988. (in Chinese)
- [53] SAADAT-SAFA M, NAYYERI V, GHADIMI A, et al. A pixelated microwave near-field sensor for precise characterization of dielectric materials[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 13310.
- [54] WANG B X, ZHAO W S, WANG D W, et al. Sensitivity optimization of differential microwave sensors for microfluidic applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 330: 112866.
- [55] ZHAO W S, WANG B X, WANG D W, et al. Swarm intelligence algorithm-based optimal design of microwave microfluidic sensors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 2077-2087.
- [56] FANG Y H, ZHAO W S, LIN F K, et al. An AMC-based liquid sensor optimized by particle-ant colony optimization algorithms[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 2083-2090.
- [57] 韩冲, 王俊丽, 吴雨茜, 等. 基于神经进化的深度学习模型研究综述[J]. *电子学报*, 2021, 49(2): 372-379.  
HAN C, WANG J L, WU Y X, et al. A review of deep learning models based on neuroevolution[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(2): 372-379. (in Chinese)
- [58] WANG B X, ZHAO W S, WANG D W, et al. Optimal design of planar microwave microfluidic sensors based on deep reinforcement learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(24): 27441-27449.
- [59] 李明, 周颖. 微波湿度仪在历史建筑避潮层修复效果检测中的应用[J]. *建筑结构*, 2021, 51(S2): 1429-1433.  
LI M, ZHOU Y. Application of microwave humidity meter in detection of the moisture-proof layer in historic buildings[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S2): 1429-1433. (in Chinese)
- [60] CEBEDIO M C, RABIOGLIO L A, GELOSI I E, et al. Analysis and design of a microwave coplanar sensor for non-invasive blood glucose measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10572-10581.
- [61] OMER A E, SHAKER G, SAFAVI-NAEINI S, et al. Non-invasive real-time monitoring of glucose level using novel microwave biosensor based on triple-pole CSRR [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2020, 14(6): 1407-1420.
- [62] ASHYAP A Y I, DAHLAN S H B, ABIDIN Z Z, et al. Robust and efficient integrated antenna with EBG-DGS enabled wide bandwidth for wearable medical device applications[J]. *IEEE Access*, 8: 56346-56358.
- [63] MOHD SHAH S R, ASAN N B, VELANDER J, et al. Analysis of thickness variation in biological tissues using microwave sensors for health monitoring applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 156033-156043.
- [64] GARRETT D C, FEAR E C. Feasibility study of hydration monitoring using microwaves—part 1: A model of microwave property changes with dehydration[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2019, 3(4): 292-299.
- [65] YUAN X M, TIAN H S, WANG H Y, et al. Edge-enabled WBANs for efficient QoS provisioning healthcare monitoring: A two-stage potential game-based computation offloading strategy[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 92718-92730.
- [66] ATRASH M EL, ABDALGALIL O F, MAHMOUD I S, et al. Wearable high gain low SAR antenna loaded with backed all-textile EBG for WBAN applications[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2020, 14(8): 791-799.
- [67] DEIF S, DANESHMAND M. Multiresonant chipless RFID array system for coating defect detection and corrosion prediction[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(10): 8868-8877.
- [68] VIVALDI F, MELAI B, BONINI A, et al. A temperature-sensitive RFID tag for the identification of cold chain failures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112182.
- [69] JHA A K, LAMECKI A, MROZOWSKI M, et al. A microwave sensor with operating band selection to detect rotation and proximity in the rapid prototyping industry[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 683-693.
- [70] 王康, 徐雷钧, 项厚友, 等. 基于微波技术的谷物特性分析与检测装置设计[J]. *自动化仪表*, 2021, 42(10): 17-21, 26.  
WANG K, XU L J, XIANG H Y, et al. Design of grain characteristic analysis and detection device based on mi-

crowave technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(10): 17-21, 26. (in Chinese)

- [71] 宋海, 严磊, 胡鑫. 微波煤粉流量检测系统在长春一热的应用[J]. 机电信息, 2021(25): 7-8.

#### 作者简介



**赵文生** 男, 1986 年出生, 黑龙江铁力人. 2008 年在哈尔滨工业大学获学士学位, 2013 年在浙江大学获博士学位. 现为杭州电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为集成电路互连、三维集成、多物理场仿真、电子设计自动化、微波无源器件等.

E-mail: wshzhao@hdu.edu.cn



**方宇浩** 男, 2001 年出生, 浙江舟山人. 杭州电子科技大学电子信息学院本科生. 主要研究方向为微波传感器智能优化设计.

E-mail: 19041507@hdu.edu.cn



**王大伟** 男, 1988 年出生, 山东潍坊人. 2010 年在吉林大学获学士学位, 2013 年在中国电信技术研究院获硕士学位, 2019 年在浙江大学获博士学位. 现为杭州电子科技大学副研究员、硕士生导师. 主要研究方向为计算电磁学、多物理场模拟、微波器件设计等.

E-mail: davidw.zoeq@hdu.edu.cn



**刘 军** 男, 1977 年出生, 浙江建德人. 现为杭州电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为集成电路EDA技术.

E-mail: ljun77@hdu.edu.cn