

基于 AGA 的含水率检测传感器结构优化方法

符雪梅¹ 杨晓庆¹ 徐 宇¹
FU Xuemei YANG Xiaoqing XU Yu

摘 要

随着现代工业技术的快速发展, 航空航天、石油化工等多个领域对材料含水率的精确、快速、无损检测的需求更为迫切。材料水分含量的精准检测不仅是保障产品质量的重要基础, 更是决定产品最终性能的关键技术环节。针对现有的传感器对材料含水率测量精度有待提升的问题, 文章将自适应遗传算法 (AGA) 引入传感器结构优化中, 通过编码优化平面谐振式微波传感器的缺陷地结构 (DGS), 算法以传感器的 Q 值和加载 / 不加载样本的谐振频率偏移作为适应度函数, 通过多次迭代优化, 选取适应度函数最大值时的结构为传感器最终结构。与基础结构相比, 编码优化后的传感器 Q 值显著增大, 检测灵敏度有较大提升。

关键词

自适应遗传算法; 编码缺陷地结构; 高 Q 值; 含水率检测; 平面谐振式微波传感器

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.12.028

0 引言

含水率是影响材料物理性质的关键参数, 如力学性能、耐久性、热学和电学性能等, 在航空航天^[1]、农业^[2]、食品科学^[3]和能源领域 (如生物质燃料、石油^[4]) 中, 对其进行精确测量有利于提高材料的质量控制和生产效率。传统含水率测量方法如烘干法^[5]、卡尔费休法^[6]等虽然测量精度较高, 但普遍存在破坏样品、测量周期长、无法实现在线检测等固有缺陷。近年来, 微波传感技术因其非接触、快速响应、可实现在线测量等优势, 在含水率检测领域展现出良好的应用前景。

微波传感器通过检测材料介电特性的变化来反映含水率信息, 是由于待测物与传感器相互作用, 待测物的介电变化引起传感器的谐振频率、品质因数等参数变化, 进而推算出材料的含水率。Zhang 等^[7]提出一种微流控葡萄糖微波传感器, 通过微流控器件增强葡萄糖浓度与电磁参数的关联性, 实现了快速检测并降低了误差。然而, 微波传感器测量材料含水率的准确性和高灵敏度仍然面临着挑战。Abduljabar 等^[8]提出检测灵敏度可以由传感器的 Q 因子乘以填充因子来方便估计。因此, 提高传感器的 Q 值能有效提高其检测灵敏度。

在平面谐振式传感器中, 提高 Q 值可以通过优化传感器结构的长度、宽度以及缝隙等来实现。同时, 通过在接地金属板上刻蚀周期性或非周期性的缺陷地结构 (DGS), 可以

调控表面电流的分布路径与方向, 从而有效改变传输线的等效容抗与感抗特性, 由此实现品质因数 (Q 值) 的显著提升。但普通的优化方法只能通过结构的连续变化得到相对较好的结果, 最优结构可以借助群体优化算法来找寻。近年来, 遗传算法被越来越多地应用于传感器结构优化中^[9]。遗传算法具有随机而有方向性地全局搜索能力, 首先生成一组随机的染色体编码, 每条染色体都可以进行遗传、交叉和变异, 根据“适者生存”的原理设置适应度函数与染色体一一对应的映射关系。因此, 通过评估每条染色体对应的适应度值来确定其是否进行繁殖, 适应度值高的个体更容易将自己的基因序列遗传下去, 适应度值低的个体更容易被淘汰, 从而进行交叉和变异。通过多次迭代, 随着模型的收敛, 最优解逐渐出现并作为最终模型进行建模和测量。

本文设计了一个基础平面谐振式传感器, 为进一步提高传感器的 Q 值, 将自适应遗传算法 (AGA) 引入传感器结构优化中, 通过编码优化传感器的缺陷地结构, 多次迭代优化得到一个 Q 值明显增大的传感器, 在检测材料含水率时, 优化后的传感器比基础传感器的灵敏度更高。这种引入算法进行传感器结构优化的方法对于材料含水率高精度检测具有重大意义。

1 基础传感器优化

本文首先在 CST Studio Suite 中设计一个基础传感器, 如图 1 所示, 采用 FR4_epoxy 为介质基板, 其相对介电常数 ϵ_r 为 4.4, 损耗正切为 0.2。传感器正面是两个开口谐振环

1. 四川大学 四川成都 610065

SRR, 将其放在两个微带线之间, 不需要间接耦合, 由此可以增大传感器的灵敏度。通过优化传感器结构中 SRR 的宽度、长度和间隙, 并且在接地金属板上蚀刻矩形的缺陷地结构, 可以适当提高 Q 值。此时优化后的传感器 Q 值为 100.9, 具体的尺寸参数如表 1 所示。

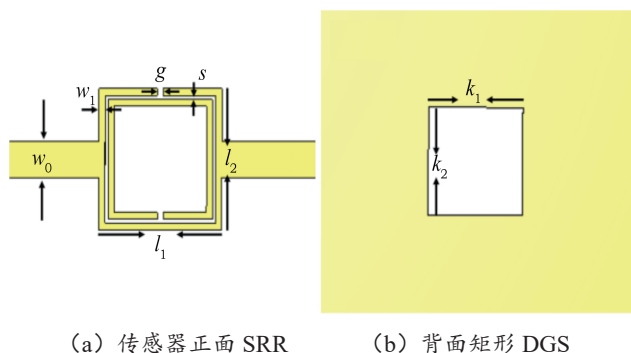


图 1 基础传感器

表 1 基础传感器设计尺寸具体参数

单位: mm							
W_0	W_1	L_1	L_2	g	s	K_1	K_2
2.6	0.5	10	10	0.5	0.25	10	10

2 算法优化过程

为了优化结构, 以获得更高的灵敏度, 本文将结合自适应遗传算法 (AGA) 进行传感器结构优化。遗传算法以达尔文进化论为基础, 将自然界中的基因和环境适应度的概念引入到计算机中, 其分别对应于函数中的自变量和因变量, 自变量对应单个基因, 因变量代表自适应函数。通过交叉、遗传和变异的过程, 个体的基因进化。随着自变量多样性的逐渐收敛, 适应度函数逐渐趋于最优值。然而, 传统遗传算法存在过度收敛的倾向, 其变异概率 (P_m) 和交叉概率 (P_c) 均由经验选择, 可能导致产生局部最优解。而 AGA 在每次迭代中动态地调整变异概率 (P_m) 和交叉概率 (P_c), 用公式表示为:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_3, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_2(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}}, k_1 = k_3 = 1.0 \\ k_4, & f' < f_{\text{avg}}, k_2 = k_4 = 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f_{\max}$ 表示最大适应值; f_{avg} 表示平均适应值; f' 表示个体适应度值。以此可以更快收敛, 更容易找到一个全局最优

解, 提供最佳的传感器性能。

CST Studio Suite 支持通过 VBA (visual basic for application) 脚本实现自动化控制, 其脚本功能与软件的数学仿真模块深度兼容。基于这一特性, 用户可将 CST 的全部操作指令集成到 Matlab 的 .m 脚本文件中, 从而在 Matlab 环境中实现对 CST 的远程控制。通过调用 Matlab 中 invoke() 函数即可访问所有 CST 命令。AGA 的适应度函数是由每个种群建模仿真后的品质因数 f_1 以及加载 / 不加载样本的谐振频率偏移 f_2 来获得, 用公式表示为:

$$\text{fitness} = w_1 \times f_1 + w_2 \times f_2 \quad (3)$$

$$f_1 = \frac{f_0}{B_{-3\text{dB}} \text{带宽}}, f_2 = |f_{\text{加载}} - f_{\text{不加载}}| \quad (4)$$

式中: w_1 和 w_2 表示两个子函数的权重。

具体的优化流程图如图 2 所示。

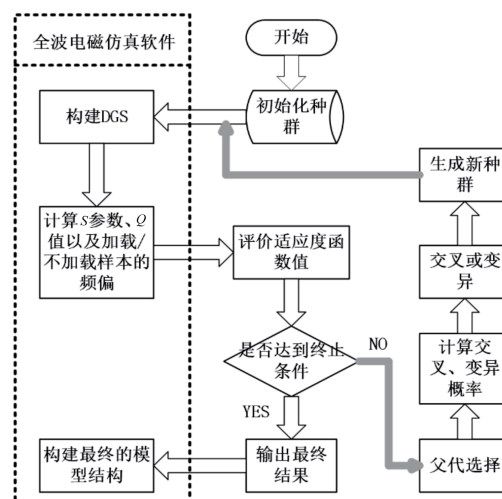


图 2 算法优化流程图

待优化区域为 10 mm×10 mm 的矩形, 为将其表示为自变量的基因序列, 把矩形划分为 20×20 的方块矩阵, 每个贴片的大小为 0.2 mm×0.2mm, 得到染色体长度为 400, 设置初始种群为 30 个, 迭代次数为 80 次。初始种群矩阵为:

$$\mathbf{X}_{\text{initial}} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,20} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,20} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{20,1} & x_{20,2} & \cdots & x_{20,20} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{initial}}$ 表示 DGS 上每一个方块 $x_{i,j}$, 用 1 位编码来展示。其中 0 表示在该方块处不存在铜; 1 表示该方块处有铜。

最终的优化结构如图 3 所示, 在图 3 (b) 中展示了具体的细节。图 4 展示了优化前后两个传感器的 S 参数, 计算得到优化后的传感器 Q 值为 700。

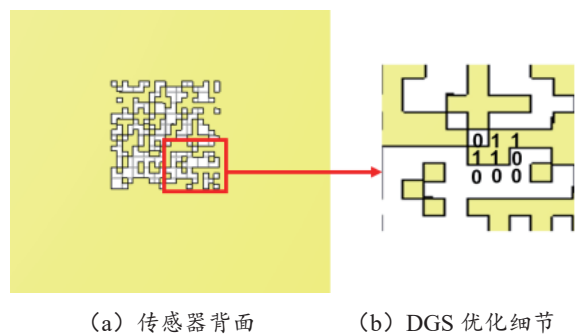


图3 传感器最终结构

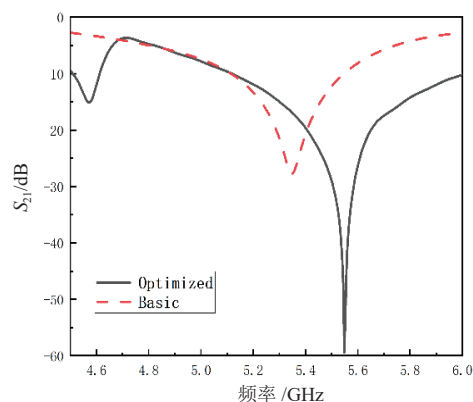


图4 优化前后传感器的 S_{21} 对比图

3 仿真计算

乙醇-水混合物的介电特性已经得到了充分研究，并且其与水的体积分数大致呈线性关系^[10-11]，因此选择不同浓度的乙醇-水混合物作为测试材料，以评估传感器的检测性能。聚二甲基硅氧烷（PDMS）由于其成本低、生物相容性和易于加工，已被用于制造流体通道。将PDMS微流控通道放置在传感器的SRR裂缝处的顶部，电磁能量集中在该区域，即传感器最敏感的区域。当通道内装载不同浓度的液体时，SRR结构的电场受到干扰，从而导致谐振频率的偏移。为了便于数值模拟，选择乙醇溶液与水以20%为间隔比例混合制作了乙醇浓度在10%~90%的水溶液。表2为乙醇-水混合溶液不同浓度时的介电常数值，是Bao等^[12]在1995年测量的参考值。

表2 参考水-乙醇混合溶液的介电常数值

水占比/%	乙醇占比/%	介电常数
100%	0%	79.0
90%	10%	73.0
70%	30%	58.5
50%	50%	43.0
30%	70%	29.0
10%	90%	15.5
0%	100%	9.0

利用CST进行仿真，将PDMS通道中的介质设置为不同的相对介电常数，即为不同比例水-乙醇二元混合溶液时，可以看到其 S_{21} 结果图及其谐振频率如图5所示。由图5可知，当乙醇浓度为0%、10%、30%、50%、70%、90%、100%的混合水溶液与SRR相互作用时，传感器的谐振频率分别为4.421、4.448、4.50、4.576、4.672、4.768、4.84 GHz，乙醇浓度为0%即微流通道内是纯水情况，则通道内是100%浓度的乙醇与纯水的相对频率偏移 $\Delta f=419$ MHz。

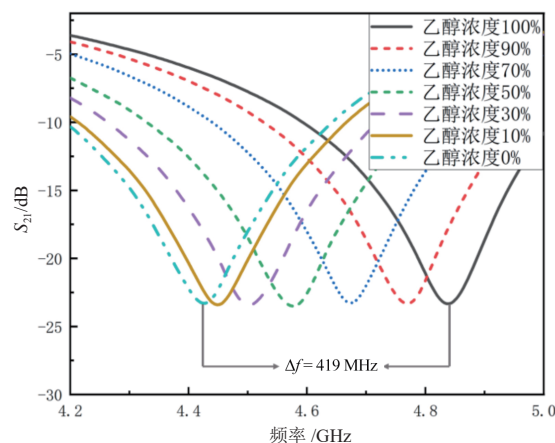


图5 优化后传感器对不同浓度的乙醇-水溶液 S_{21} 结果图

图6展示了未优化的传感器在测量不同浓度的乙醇-水混合溶液时的 S_{21} 曲线图，可以看到，未优化的传感器的 $\Delta f=340$ MHz。同时，根据图5和图6可知，优化后的传感器在乙醇浓度以20%步进变化时其频率偏移曲线更明显，检测效果更好。

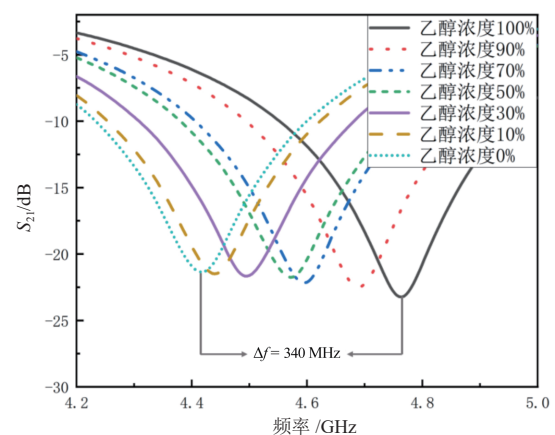


图6 未优化传感器对不同浓度的乙醇-水溶液 S_{21} 结果图

前面可知，随着乙醇浓度的增加，谐振频率向高频移动，即在乙醇-水混合溶液中，水的含量增加会使谐振频率往低频移动。对其进行拟合，得到拟合曲线如图7所示，展示了乙醇-水混合溶液中不同含水率与谐振频率的拟合曲线，其拟合函数为：

$$f = 0.000\ 021\ 16x^2 - 0.006\ 248x + 4.836 \quad (6)$$

式中: x 表示含水率; f 表示谐振频率; R^2 表示拟合误差, 值为 0.999 3, 通过观察谐振频率即可代入计算得到含水率。

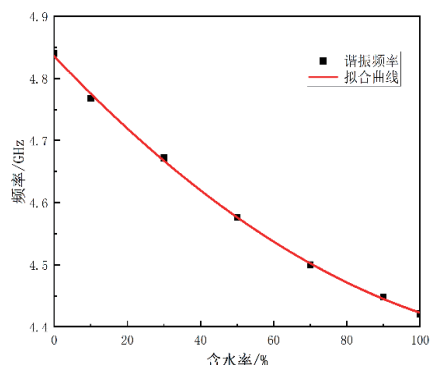


图7 谐振频率与含水率的拟合曲线图

4 结论

本文将自适应遗传算法引入传感器结构优化中, 通过对平面谐振式传感器的金属接地面蚀刻的缺陷地结构进行编码优化, 以 Q 值和加载/不加载样本的谐振频率偏移作为适应度函数, 多次迭代优化后得到一个高 Q 值的传感器, Q 值从 100.9 提高到 700。通过测试乙醇-水混合溶液的水含量来检测传感器性能, 当乙醇浓度由 100% 变化到 0% 时, 优化后的传感器的谐振频率偏移 $\Delta f = 419$ MHz 比基础传感器的谐振频率偏移 $\Delta f = 340$ MHz 更大, 检测灵敏度更高。综上所述, 将算法优化引入传感器结构优化对于检测材料含水率具有重要的研究意义和广泛的应用前景。

参考文献:

- [1]ALTAKHAINAH A T, ALIA'AFREH S S. Machine learning-enhanced microfluidic SIW sensor for water-in-fuel detection applications[C]//2023 14th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS). Piscataway: IEEE, 2023: 1-5.
- [2]KON S, HORIBE M, KATO Y. Dynamic measurement of moisture content using microwaves for moisture evaluation of agricultural products[J]. IEEE transactions on electrical and electronic engineering, 2020, 15(2): 166-171.
- [3]TRABELSI S, MCKEOWN M S, NELSON S O. Dielectric properties-based method for rapid and nondestructive moisture sensing in almonds[J]. Journal of microwave power and electromagnetic energy, 2016, 50(2): 94-105.
- [4]SU Q, TAN C, DONG F. Measurement of oil-water two-phase flow phase fraction with ultrasound attenuation[J]. IEEE sensors journal, 2018(3), 1150-1159.

- [5]NIRMAAN A M C, ROHITHA PRASANTHA B D, PEIRIS B L. Comparison of microwave drying and oven-drying techniques for moisture determination of three paddy (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. Food science and technology, 2019, 20(3): 472-479.
- [6]MACLEOD S K. Moisture determination using Karl Fischer titrations[J]. Analytical chemistry, 1991, 63(10): 557-566.
- [7]ZHANG M Q, YANG X J, REN M N, et al. Microfluidic microwave biosensor based on biomimetic materials for the quantitative detection of glucose[J].Scientific reports , 2022, 12: 15961.
- [8]ABDULJABAR A A, ROWE D J, PORCH A, et al. Novel microwave microfluidic sensor using a microstrip split-ring resonator[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2014, 62(3): 679-688.
- [9]ZHOU Z L, WANG C, KUMAR A, et al. Coding DGS resonator sensor for ultra-high Q-factor dielectric thickness detection[J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2021, 35(11):1464-1476.
- [10]KHANNA Y, AWASTHI Y K. Dual-band microwave sensor for investigation of liquid impurity concentration using a metamaterial complementary split-ring resonator[J]. Journal of electronic materials, 2020, 49:385-394.
- [11]LIU W N, ZHANG J J, HUANG K M. Dual-band microwave sensor based on planar rectangular cavity loaded with pairs of improved resonator for differential sensing applications[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement , 2021, 70:1-8.
- [12]BAO J Z, SWICORD M L, DAVIS C C. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol[J].The journal of chemical physics, 1998, 104(12):4441-4450.

【作者简介】

符雪梅 (2001—), 女, 四川达州人, 硕士, 研究方向: 微波传感器。

杨晓庆 (1978—), 男, 四川成都人, 博士, 教授, 研究方向: 电磁超材料、微波无损检测和多物理场分析。

徐宇 (1999—), 男, 四川攀枝花人, 硕士, 研究方向: 微波传感器。

(收稿日期: 2025-07-02 修回日期: 2025-12-11)