

基于微波功分器的粉尘检测系统

王未来 宿芯菱 高佳莹

成都工业学院, 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 本文提出了一种基于微波功分器的粉尘传感稳定性增强方法。首先, 本文设计出一种叉指互补开口环谐振器, 将其加载至基片集成波导, 构建出高 Q 值、小型化的谐振腔。通过引入差分检测机制, 传感器可以有效抑制环境共模干扰。然后, 将所提出的谐振腔通过梯形微带过渡结构与微带端口连接, 设计出基于差分形式的微波粉尘传感器。最后, 仿真结果表明, 当粉尘浓度增大时 (即介电常数从 1.0 增加至 3.0), 两输出端口之间的工作频率偏移量约为 1020 MHz。所以, 该传感器具有结构紧凑、灵敏度高、抗干扰能力强等优点, 适用于采矿、水泥等复杂工业现场及洁净车间的高精度粉尘浓度监测。

关键词: 粉尘检测; 微波功分器; 叉指互补开环谐振器; 基片集成波导

Design of a Dust Sensor Based on Microwave Power Divider

Wang Weilai, Su Xinling, Gao Jiaying

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu Technological University, China Sichuan Chengdu 611730

Abstract: This paper proposes a method to enhance the stability of dust sensing based on a microwave power divider. First, an interdigital complementary split-ring resonator (ICSRR) is designed as the core sensing unit and loaded onto a substrate integrated waveguide (SIW) to form a high-Q, miniaturized resonant cavity. By incorporating a differential detection mechanism, the sensor effectively suppresses common-mode environmental interference. Then, a microwave dust sensor based on the differential form is developed by connecting the proposed resonant cavity to microstrip ports via tapered microstrip transition structures. Finally, simulation results indicate that when the dust concentration increases, the frequency offset between the two output ports is approximately 1020 MHz. Therefore, the sensor offers advantages such as a compact structure, high sensitivity, and strong anti-interference capability, making it suitable for high-precision dust concentration monitoring in complex industrial settings like mining and cement production, as well as in cleanrooms.

Keywords: Detection of dust; Microwave power divider; Interdigital complementary split-ring resonator; Substrate integrated waveguide

0 引言

粉尘检测是工业安全与环境监测的核心环节, 其准确性、实时性与可靠性直接关系到生产安全、职业健康和污染防治防控成效。工业生产中的悬浮粉尘积聚会降低设备效率、影响产品质量, 达到一定浓度还可能引发爆炸, 尤其在采矿、水泥、冶金、化工等行业, 严重威胁人身与财产安全。此外, 建筑扬尘、道路粉尘等开放源污染也持续影响城市空气质量与公众健康。因此, 发展一种高精度、高稳定性且能适应复杂工业环境的粉尘浓度检测技术, 对于实现早期预警、智能防控和保障安全运行具有重要意义。

根据检测原理, 粉尘浓度传感器主要分为接触式与非接触式两类。非接触式中, 光电传感器基于光散射原理, 具有响应快、结构简单的优点。徐培富等研究表明其测量易受粉尘粒径、颜色与成分影响而产生非线性误差^[1]。赵

政等提出的光散射多源耦合技术优化了低浓度场景的适用性, 但仍在高温、高湿及高粉尘环境中存在易污染、老化问题^[2]。王梦娇等设计的压电式传感器, 对动态信号响应灵敏, 但对颗粒特性敏感, 易受机械振动与温度漂移干扰^[3]。接触式传感器 (如电阻式、电容式) 虽可直接测量, 但普遍存在易污染、需定期校准、环境适应性弱等问题。对此, 国内外团队已通过优化实现了微波传感器在湿度与水分的高精度检测^[4]。S Kiani 等设计了带阻滤波传感器, 实现了灵敏度与品质因数的提升^[5], 但仍普遍存在对低浓度粉尘灵敏度不足、信号易受温湿度与电磁干扰影响导致漂移, 或存在成本高、尺寸大等局限。因此, 研究一种兼具高灵敏度与强环境适应性的新型微波传感方案具有明确必要性。

本文提出一种基于差分形式的微波粉尘传感器。该传

传感器在 ICSRR-SIW 谐振结构基础上引入差分机制,可以有效提升传感稳定性,为复杂工环境粉尘检测提供可靠技术支撑。

1 谐振单元设计与传感原理分析

为实现更高灵敏度与小型化,本文设计了一种叉指互补开口环谐振器单元,该结构在传统互补开口环谐振器的基础上,引入叉指电容以有效扩展敏感区域,同时融合内旋槽线来压缩体积并增强等效电感与电容,从而构成了性能优化的 ICSRR 单元^[6]。将此 ICSRR 单元加载于半模基片集成波导^[7],形成 HMSIW-ICSRR 谐振结构。其等效电路如图 1 所示:

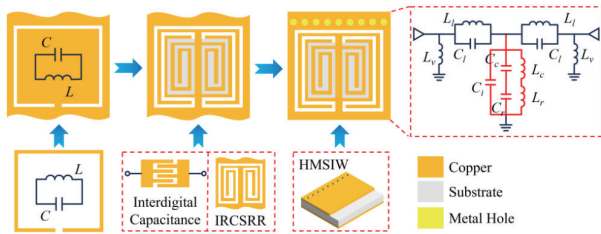


图1 从SRR到HMSIW-ICSRR谐振单元演化及等效电路图

其中 L_v 代表 HMSIW 金属化孔的电感, L_1 和 C_1 表示 HMSIW 与 ICSRR 间的耦合电感与电容, L_r 和 C_r 源于内旋槽线, C_i 则是由叉指结构引入的电容。根据耦合谐振理论,该结构的谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_v + \sum L_r)(C_i + \sum C_r + C_1)}} \quad (1)$$

由于内旋槽线和叉指结构的引入,根据公式(1)可知,谐振单元的频率相较于传统 HMSIW-CSRR 将显著减小,进而实现小型化。

微波传感器基于电磁波与物质的相互作用,将待测物理参数(如粉尘浓度)的变化转换为可测量的电磁特性变化。图2描绘了通过测量频率偏移来实现传感功能的流程图。

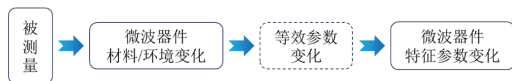


图2 微波器件实现传感功能的流程图

具体来说,当外部物理量导致传感器敏感区域的等效电磁参数(如电容、电感)发生改变时,滤波器的中心谐振频率会产生相应的偏移(Δf)。该偏移量与待测物理量的变化量(Δx)成正比,即:

$$\Delta f = K \cdot \Delta x \quad (2)$$

其中, k 为灵敏度系数。根据现有研究,环境中粉尘浓度对应的相对介电常数大致在 1.0 至 3.0 之间。灰尘介电常数与主模谐振频率的关系如图 3 所示:

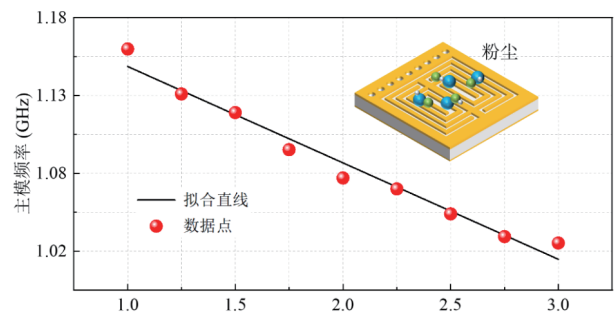


图3 本征模下的介电常数与单元主模谐振频率关系曲线

仿真结果显示,所提出的谐振单元的主模频率随粉尘介电常数变化呈现出线性关系,正面可通过监测微波器件参数的变化,以达到粉尘浓度检测的目的。

2 传感器设计与分析

为验证功分式传感器的可行性,将所提出的 HMSIW-ICSRR 谐振结构的两端分别与微带线连接以实现输入和输出,并且采用一个梯形过渡结构来实现阻抗匹配。功分式传感器的结构如图 4(a) 所示,介质基板采用 RT/Duroid 5870 材质(介电常数 $\epsilon_r = 2.33$, 正切损耗 $\tan\delta = 0.0012$, 厚度 $h = 0.787$ mm), 金属铜层厚度 $t = 0.035$ mm。传感器的其他主要参数分别为: $a = 16$ mm, $b = 8$ mm, $wa = 1$ mm, $wb = 3.19$ mm, $w_t = 3.5$ mm, $w_1 = 2.25$ mm, $q_1 = q_2 = 4$ mm, $G_1 = G_2 = G_3 = 0.2$ mm。

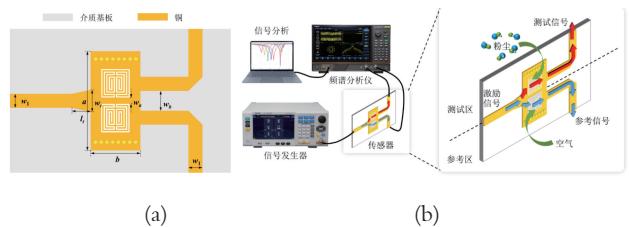


图4(a)所提出微波功分器结构;(b)传感器工作原理与环境

对此,为验证差分稳定性增强的可行性,构建了如图 4(b) 的粉尘检测环境。将所提出功分器分为两个通道,通道 I 设置为参考(即对照组),通道 II 置于粉尘环境之下(即测试组),两通道均处于相同温度、湿度及压力等条件下进行检测,以此满足传感器对稳定性的需求。如图 5 所示,当两个通道均接触空气时,传感器空载参考点工作频率为 5.68 GHz。当待测粉尘浓度对应的介电常数 $\epsilon_d = 1.5$ 时,两通道频率偏移 $\Delta f = 614$ MHz;粉尘浓度 $\epsilon_d = 2.0$ 时,频率偏移 $\Delta f = 744$ MHz;粉尘浓度 $\epsilon_d = 2.5$ 时,频率偏移 $\Delta f = 876$ MHz;粉尘浓度 $\epsilon_d = 3.0$ 时,频率偏移 $\Delta f = 1014$ MHz。可见粉尘浓度与频率偏移呈现出一种线性关系。

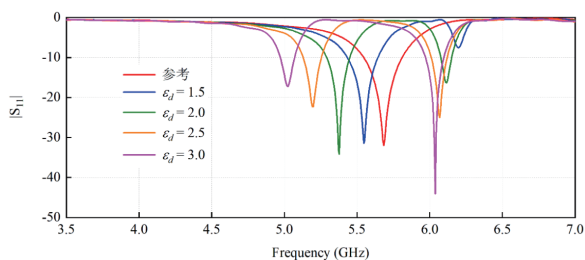


图5 粉尘浓度检测结果

3 结语

本文提出了一种基于差分形式的微波粉尘传感器，并从理论分析、单元设计与仿真验证了其可行性与性能优势。传感器以优化的叉指互补开口环谐振器为核心，结合基片集成波导，构建出高灵敏度的谐振单元。通过差分形式的引入，能够抑制温度、湿度等环境干扰。该传感器具有结构紧凑、灵敏度高、抗干扰能力强等特点。其避免了传统光学传感器易污染、易老化的问题，适用于火电、水泥、矿山等高粉尘、高湿度、高压的复杂工业现场，也为电子制造、生物制药等洁净环境的高精度微尘监测提供了可靠方案。后续研究将致力于该传感器的工艺实现与工程化测试，并探索其在城市扬尘在线监测、仓储物流粉尘安全预警等更广阔场景中的应用，进一步推动其在工业安全与智能环保领域的实际落地。

参考文献：

[1] 徐培富，张成挺. 微型光电传感器控制的节能机房

设计[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33 (05): 83-86.

[2] 赵政. 基于光散射多源耦合的粉尘浓度检测技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54 (08): 195-201.

[3] 王梦娇, 彭奕菲, 刘明娇等. 基于压电传感器进行土木工程结构损伤检测的研究与探讨[J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (36): 83-85.

[4] 喻星源. 用于测量圆柱腔内表面水膜厚度的微波谐振腔传感器设计[D]. 华北电力大学, 2020.

[5] Kiani S, et al. Microwave sensor for detection of solid material permittivity in single/multilayer samples with high quality factor[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(24): 9971-9977.

[6] 孙景芳, 李永倩, 胡佩佩等. 互补开口谐振环微带传感器介电常数的测量[J]. 传感技术学报, 2019, 32 (04): 532-536.

[7] 罗晓. 基片集成波导技术在微波滤波器中的应用研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.

基金项目：成都工业学院省级大学生创新创业训练计划，“基于叉指互补开口谐振环的 SIW 粉尘传感器增感研究”（202540116096）。

作者简介：王未来（1998.09-），男，汉族，硕士，助教，研究方向：主要从事微波器件方向的研究工作。