

基于 SSPPs 传感器的金属凹槽填充工件检测<sup>\*</sup>

宿丕强 赖小皇 张耕 董静 钟明

(中国航发四川燃气涡轮研究院 绵阳 621010)

**摘要:**提出了一种基于液体开关控制的人工表面等离激元传感器,用于检测金属凹槽填充密度。该传感器由液体开关控制器和功分结构组成。液体开关由塑料管和带水的注射器组成,固定在 SSPPs 传感器的分支结构上。塑料管内充满水时,支路不能传输信号,这称为“OFF”状态。相反,塑料管内无水时称为“ON”状态。通过切换传感器支路的“ON”或“OFF”状态,可以控制 SSPPs 传感器的传感区域。该检测方法是基于凹槽填充质量变化引起的 SSPPs 传感器反射系数的变化,通过切换支路状态,可以检测各支路下方是否存在填充质量问题。实验结果表明,SSPPs 传感器可以有效检测 10 mg 填充变化,可用于实现批量生产工件的快速筛选。

**关键词:**人工表面等离激元;功分结构;液体开关控制;金属材料;凹槽填充;微波无损检测

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Detection of metal groove filling workpiece based on SSPPs sensor

Su Piqiang Lai Xiaohuang Zhang Geng Dong Jing Zhong Ming

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** A spoof surface plasmon polaritons (SSPPs) sensor based on liquid switch control is proposed to detect metal groove filling density. The sensor consists of liquid switch controllers and power division structure. The liquid switch consists of a plastic pipe and syringe with water, which is fixed on the branch structure of SSPPs sensor. By filling the plastic pipe with water, the branch cannot transmit signal, which is called “OFF” state. In contrast, when there is no water in the plastic tube, it is called “ON” state. By switching the “ON” or “OFF” state of sensor’s branches, it can control the sensing area of SSPPs sensor. The detection method is based on the change of reflection coefficient of SSPPs sensor caused by the change of groove filling quality. By switching the states of branches in turn, it can detect whether there are filling quality problems at each branch. The experimental results show that the SSPPs sensor can effectively detect the filling changes of 10 mg, which can be used for rapid detection of workpiece with mass production.

**Keywords:** spoof surface plasmon polaritons; power division structure; liquid switch control; metallic material; groove filling; microwave non-destructive testing

## 0 引言

金属凹槽填充工件主要在金属基板上加工多条具有一定形状、尺寸的沟槽,并在沟槽中装填一些填充材料粉末或熔融物质后制作而成,其在航空航天、电路设备等方面有着广泛应用<sup>[1-2]</sup>。这类工件在加工、存储、运输及使用过程中,沟槽内的填充物质可能因振荡、消耗等因素而出现填充质量变化、密度不均、填充缺陷等问题,需要及时检出,以提高工件的使用寿命。有些填充问题能通过填充表面的变化直接观察到,而有些填充问题却不能直接观察,如填充质量和密度,虽然发生了变化,但填充表面依旧是平整的,很难看

出填充问题,因此有必要采用其他无损检测方法对其进行检测。由于超声检测是接触式检测且需要耦合剂,射线检测需要有防辐射措施,热成像检测精度低、检测时间长,光纤传感成本高等<sup>[3-4]</sup>。相比之下,微波无损检测法是一种比较适用于材料检测的新兴技术<sup>[5-8]</sup>,因此本文采用微波无损检测法对凹槽填充工件进行检测。

在微波无损检测方面,Gao 等<sup>[9]</sup>提出一种由微带线与开口谐振环(split-ring resonator, SRR)结构组成的微波近场传感器,用于凹槽填充材料检测,在传感器的 SRR 结构开口处增加一段引出结构,将 SRR 缺口处的电场引导到引

出结构尖端,从而提高电场集中能力。由于电磁场分布主要集中在引出结构尖端,因此采用侧边检测法,传感器的引出结构与待测填充材料接触,通过将待测样件沿着填充轨迹移动实现凹槽轨迹扫描,并用探头的谐振频移变化来表征填充疏松度,以实现填充密度检测。然而在检测过程中传感器与待测物是接触的,这使得其在相对移动过程中可能会磨损填充材料表面,且填充沟槽不一定是直线型,可能是折线型、曲线型等,这增加了移动轨迹复杂性。此外,对于批量生产的填充工件,若对每个工件都采取机械式移动来检测,会增加检测时间,不利于问题工件的快速初步筛选。由于人工表面等离激元 (spoof surface plasmon polaritons, SSPPs) 传输线结构具有场高束性,可设计成不同弯曲形状<sup>[10-15]</sup>,因此可根据凹槽轨迹形状与尺寸来设计弯曲形状的 SSPPs 结构,用于特定轨迹形状的凹槽检测。此外,SSPPs 传输线可由单一梳状结构扩展为一输入多输出的功分梳状结构<sup>[16]</sup>,这在垂直于梳状结构方向上扩展了检测面积,可减小甚至不需要对传感器或待测物进行机械移动,在检测中,只需通过更换工件获得测试数据,并将数据与参考值对比,就能快速筛选出存在填充问题的工件。

为了实现批量生产的金属凹槽填充工件的快速检测,本文提出了一种基于液体开关控制的 SSPPs 传感器。考虑设计的复杂性和实验加工成本,本文设计了一分四功分 SSPPs 传感器,每条支路上固定 1 个含水塑料管,以水作为传输开关。当塑料管充满水时,电磁波在支路上终止,开关处于“OFF”状态。当管道中无水时,电磁波沿支路传播,开关处于“ON”状态。在检测过程中,其中一个支路始终处于“ON”状态,其他三个支路始终处于“OFF”状态。依次打开各支路,当 SSPPs 传感器的 S 参数发生变化时(与参考待测件的 S 参数相比),说明该支路下方凹槽存在填充质量问题。通过实验结果表明,本文提出的 SSPPs 传感器能够有效实现金属凹槽填充工件的检测。

## 1 基于液体开关的功分 SSPPs 传感器设计

### 1.1 功分 SSPPs 传感器设计

为便于实验操作,本文设计的功分 SSPPs 传感器由一分四功分结构和液体控制开关组成。一分四功分结构包含 3 部分,如图 1 所示。第 1 部分是共面波导结构,用于实现与传统微波器件或者微波信号源的阻抗匹配,其尺寸为  $w=15\text{ mm}$ 、 $L_1=3\text{ mm}$ 、 $e=2\text{ mm}$  和  $g=0.18\text{ mm}$ ;第 2 部分由渐变梯度凹槽结构、单输入转多分支传输结构和接地结构组成,其中渐变梯度凹槽结构和接地结构用于实现共面波导和 SSPPs 结构之间的阻抗匹配,使得微波能高效转换成 SSPPs 波,渐变梯度凹槽结构尺寸为  $b_1\sim b_5=0.6\text{ mm}\sim 3.0\text{ mm}$ (间隔  $0.6\text{ mm}$ ),接地结构采用函数曲线  $y=C_1e^{ax}+C_2$  设计,其中  $x_1 < x < x_2$ ,  $C_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{ax_2} - e^{ax_1}}$ ,  $C_2 =$

$$\frac{y_1 e^{ax_2} - y_2 e^{ax_1}}{e^{ax_2} - e^{ax_1}}, \alpha = 0.1, P_1(x_1, y_1) \text{ 和 } P_2(x_2, y_2) \text{ 为曲}$$

线的起止坐标,其长度为  $L_2=40\text{ mm}$ 。单输入转多分支传输结构用于实现单端口输入到多支路传输之间的低损耗传输过渡,使得 SSPPs 波能在分支结构上传输。各分支的弯曲半径为  $R=28.7\text{ mm}$ ,弯曲角度为  $\theta=20^\circ$ ,分支尺寸为  $a_1=8\text{ mm}$ 、 $a_2=13\text{ mm}$ ;第 3 部分是相互平行的 4 支路传输结构,每条支路都由周期性梳状凹槽结构组成,用于支持 SSPPs 波传输,也是传感器的检测区域,其总体尺寸为  $L_3=65\text{ mm}$ ,每条支路的单元结构尺寸相同,为  $a=1\text{ mm}$ 、 $b=1\text{ mm}$ 、 $h=3\text{ mm}$  和  $d=2\text{ mm}$ 。传感器的介质板为  $0.05\text{ mm}$  厚的聚酰亚胺,金属部分为  $0.035\text{ mm}$  的铜。在实际应用中可根据待测金属材料的尺寸适当调整分支单元结构数量,即调整器件的整体长度。

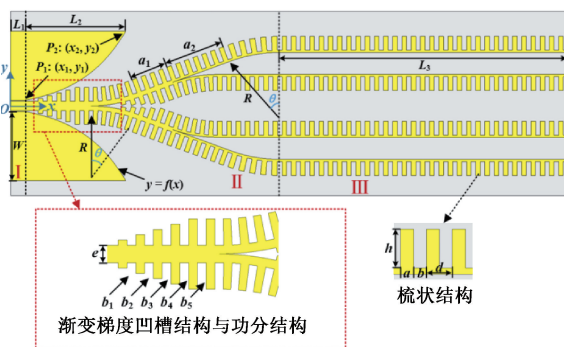


图 1 SSPPs 器件结构

### 1.2 液体开关设计

液体控制开关由塑料管和注射器组成,如图 2 所示。由于功分 SSPPs 结构有 4 条分支,因此液体控制开关也有 4 组,每一组用胶带分别固定在 SSPPs 的梳状分支结构上,命名为开关 1~4,对应的控制支路也命名为支路 1~4。塑料管的内外半径分别为  $R=2\text{ mm}$  和  $r=1.6\text{ mm}$ ,材质为聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC)。由于水具有介电常数高、无污染、易获取等特点,当塑料管充满水时,能阻断电磁波的传输,因此本设计采用水作为液体开关的主要部分来控制支路信号传输。本文将充满水的塑料管下的支路称为 OFF 状态支路,不含水的塑料管下的支路称为 ON 状态支路。为实现液体开关可切换状态,将含水注射器与 PVC 塑料管一端紧密连接,缓慢推注射器,使得水注入到塑料管中。为了防止水从塑料管另一端溢出,这里塑料管不完全注满水,水流经弯曲梳状结构时,即到达  $L=70\text{ mm}$  处时停止注水,这样既可使得水完全覆盖支路区域,又可防止在检测过程中水溢出。通过控制注射器给管中注水或抽水,可使得 SSPPs 传感器各支路处于 OFF 状态或 ON 状态。

### 1.3 液体开关控制效果分析

为了说明不同开关状态对 SSPPs 传感器的影响,通过 CST Microwave Studio 模拟传感器工作在同一频率时,其不同状态下的电磁场分布。控制注射器给其中任意 3 根

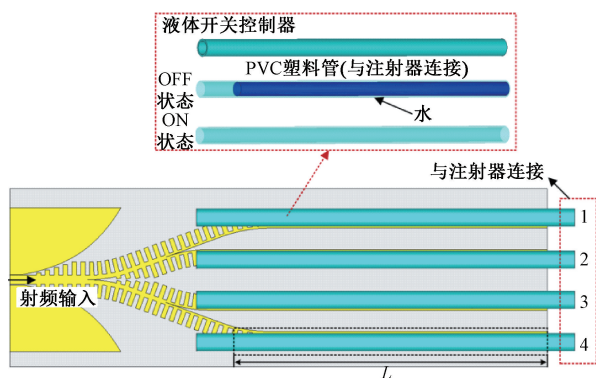


图 2 含液体控制开关的功分 SSPPs 传感器模型图

PVC 塑料管注水, 剩余一根 PVC 塑料管不注水, 即 SSPPs 传感器的四条支路中的其中一条处于 ON 状态, 另外 3 条支路处于 OFF 状态。图 3 为不同开关状态下 SSPPs 传感器的电磁场分布。可以看出, 在相同的工作频率下, 当 PVC 塑料管内没有水时, 相应的支路处于 ON 状态, 电磁场均匀地分布在 ON 状态的支路上, 而当 PVC 塑料管内充满水时, 相应的支路处于 OFF 状态, 电磁场在该支路处截止, 此外, 当所有 PVC 塑料管充满水时, 所有支路均处于 OFF 状态, 电磁波不会在 SSPPs 支路上传输。因此, 根据图 3 的特性, 通过注射器将塑料管 1~4 内的水依次注入或者抽出, 可以在 SSPPs 传感器的各支路上切换电磁波的传输路径。

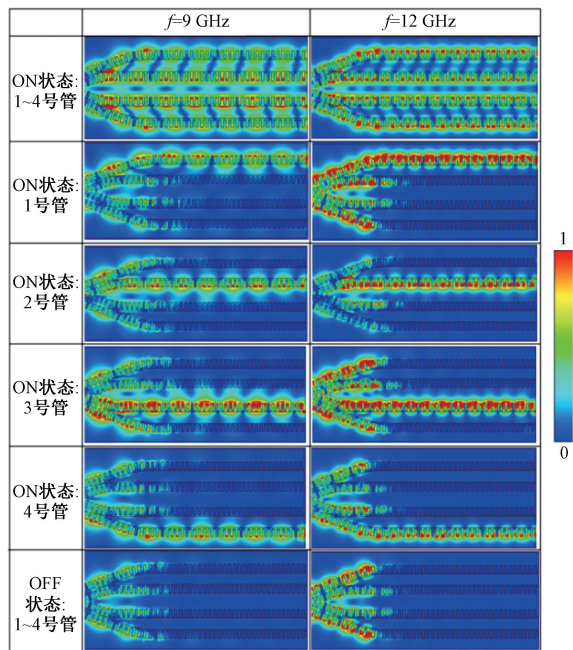


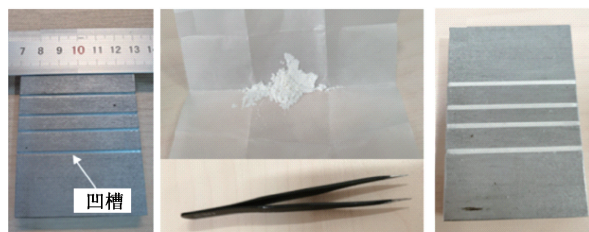
图 3 不同 ON 或 OFF 状态下 SSPPs 传感器的电场分布图

## 2 凹槽填充密度检测实验

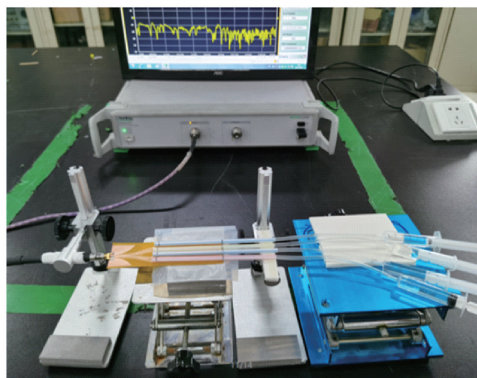
### 2.1 实验装置设计与检测过程

根据上一节设计的传感器, 设计加工的金属凹槽填充

的待测件如图 4 所示。首先加工一块平整的长方体金属板, 其尺寸为  $60\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 表面加工 4 条尺寸相同且相互平行的凹槽结构, 每条凹槽长度为  $60\text{ mm}$ , 宽度为  $2\text{ mm}$ , 深度为  $2\text{ mm}$ , 凹槽之间的间距与传感器各支路之间的间距相当, 这样加工完成的凹槽工件如图 4(a) 所示, 传感器的功分结构部分正好能完全覆盖在凹槽位置处。接下来对各个凹槽进行材料填充, 为便于实验, 选用糯米粉作为填充材料, 每次用镊子缓慢地将糯米粉填入到凹槽中并轻轻挤压, 使得凹槽中填入的粉末是近似均匀分布的。由于凹槽尺寸已知且相等, 因此可通过填入不同质量的粉末来等效不同的填充密度, 每次填充之前先称取不同质量的粉末, 然后再用镊子将粉末填入凹槽中, 称取好的糯米粉与填充工具如图 4(b) 所示, 填充完成后的工件如图 4(c) 所示。最后将加工好的工件表面覆一层  $0.1\text{ mm}$  厚的特氟龙薄膜并搭建检测实验装置, 如图 4(d) 所示。



(a) 基底结构 (b) 填充粉末与工具 (c) 检测工件



(d) 检测实验装置

图 4 凹槽填充检测实验设计

实验装置主要包含矢量网络分析仪(型号: Anritsu Shockline MS46322A)、探头固定架、同轴电缆、金属待测物(含特氟龙薄膜)、升降平台、功分 SSPPs 传感器等。检测过程如下:

1) 打开矢量网络分析仪, 按照图 4 所示搭建检测平台, 缓慢推注射器使得所有 PVC 塑料管充满水, 传感器的各个支路都处于 OFF 状态。

2) 将待测件放置在升降平台上并反复调整升降平台高度, 使得传感器靠近待测件表面, 用刻度尺记下升降平台的高度。

3) 通过控制注射器将 1 号塑料管中的水抽出, 使支路 1



处于 ON 状态,而支路 2、3、4 处于 OFF 状态,记录此时  $S_{11}$  参数;接着控制注射器让支路 2 处于 ON 状态,支路 1、3、4 处于 OFF 状态,记录此时  $S_{11}$  参数,如此循环,总共记录 4 组  $S_{11}$  参数,分别对应 4 条分支,该参数作为检测参考值。

4) 更换有裂纹的金属待测物,并调节升降平台至步骤 2) 所示的刻度尺高度,然后重复步骤 3) 的检测过程,得到 4 组检测数据。

5) 若需检测其他批量生产的金属待测物,只需重复步骤 4) 则可。

6) 将实验中的各组测试  $S_{11}$  数据与参考  $S_{11}$  数据作对比,若存在明显差异,说明该组数据对应的 ON 状态支路下方存在填充质量问题。

## 2.2 检测结果与分析

当金属板凹槽内的材料填充存在疏松时,等效于凹槽填充区材料介电常数的变化,这会对传感器的电磁场分布造成干扰,影响传感器的工作频率。通过比较各支路处于 ON 状态时 SSPPs 传感器的  $S_{11}$  参数与相应参考值之间的差别,传感器可以快速判断位于支路下方的凹槽是否存在填充疏松的问题。为说明这一点以及液体控制开关的有效性,首先对比两种不同质量填充工件的检测效果。第 1 种填充工件的 4 个凹槽中,每个凹槽填充的粉末质量都为 70 mg (作为参考工件),第 2 种填充工件的 4 个凹槽中,第一个凹槽填充的粉末质量为 130 mg,其余 3 个凹槽填充的粉末质量都为 70 mg。图 5 为不同开关状态的传感器测试两种不同工件的  $S_{11}$  参数响应情况,其中红色曲线为参考情况,可以看出当支路 1 处于 ON 状态,支路 2、3、4 处于 OFF 状态时,与参考工件相比,传感器的  $S_{11}$  参数发生了明显变化,其工作频率向着低频方向偏移,这是因为支路 1 下方的填充质量增加,填充密度增加,影响 SSPPs 传感器支路 1 的电磁场分布。当支路 1 处于 OFF 状态时,与参考工件相比,传感器的  $S_{11}$  参数几乎没有变化,如图 5(b)~(d) 所示,这是因为支路 1 处于 OFF 状态后,传感器支路 1 表面几乎没有电磁场分布,填充材料不会对传感器的响应造成干扰。实验结果表明,通过液体控制开关轮流改变各支路状态,可以从传感器反射系数的变化来判断凹槽工件结构是否存在材料填充疏松问题,也可以快速确定哪些凹槽存在填充问题。

为了确定功分 SSPPs 传感器的疏松检测能力,批量加工了整体尺寸相同的金属工件,每个工件的凹槽位置与尺寸相同。称取质量在 70~130 mg (间隔 10 mg) 范围内的糯米粉进行凹槽填充,在实验过程中,每次只改变一个凹槽的填充质量,其余 3 个凹槽的填充质量仍为 70 mg。金属工件表面覆盖 0.1 mm 厚的特氟龙薄膜,SSPPs 传感器靠近薄膜,等效于传感器与待测工件的间距为 0.1 mm。图 6 为传感器处于不同开关状态下时检测不同凹槽填充质量的实验结果,其中 SSPPs 传感器区域的白色部分为不同质量粉末填充的凹槽位置。每张图分别显示了各支路依次处于

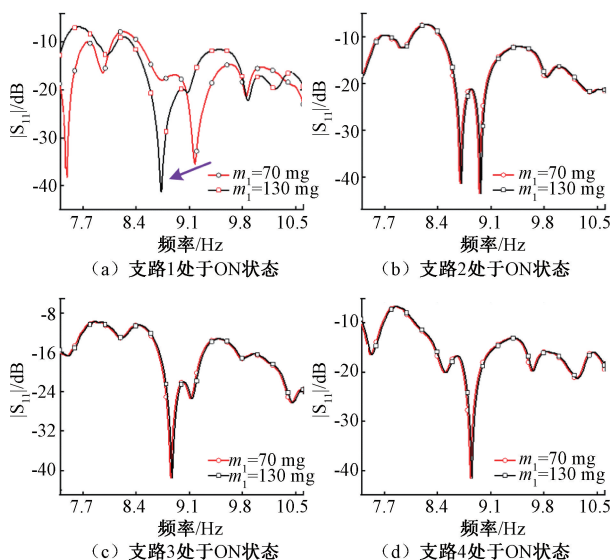


图 5 传感器对凹槽填充质量的响应曲线对比图

ON 状态时,SSPPs 传感器反射系数随粉末填充质量不同时的频移情况。由于填充质量增加时传感器的工作频率降低,这里以频率的变化来分析检测效果,其中红色虚线是金属凹槽工件填充的粉末质量为 70 mg 时 SSPPs 传感器的工作频率(作为检测参考值)。显然,不同开关状态下对于不同位置的凹槽填充,传感器的频率响应是不同的。以图 6(a) 为例,改变填充质量的凹槽位于传感器的支路 1 下方,当支路 1 处于 ON 状态,支路 2~4 处于 OFF 状态时,传感器的工作频率随着填充质量的增加而减小,这是因为随着填充质量增加,填充密度增加,等效于凹槽填充材料的相对介电常数的实部增加,其会降低传感器的工作频率。而当支路 2、支路 3 或支路 4 分别处于 ON 状态,其他 3 条支路处于 OFF 状态时,传感器的工作频率几乎与参考红色虚线相同,没有明显变化,这说明当支路 1 处于 OFF 状态时,支路 1 下方的凹槽填充密度不能检测出来。与图 6(a) 类似,图 6(b) 的改变填充质量的凹槽位于传感器的支路 2 下方,只有当支路 2 处于 ON 状态,支路 1、3、4 处于 OFF 状态时,传感器的工作频率随着填充质量的增加而减小,其他状态时,传感器的工作频率几乎不变。图 6(c)、(d) 也可观察到类似响应。这说明当凹槽位于 ON 状态的支路下方时,其填充密度发生改变后,传感器的工作频率才会发生变化,才能检测出填充问题。

接下来对多个凹槽填充质量改变时传感器的响应情况进行分析,如图 7 所示,金属工件表面覆盖 0.1 mm 厚的特氟龙薄膜,SSPPs 传感器靠近薄膜。这里改变第 1 个凹槽和第 3 个凹槽的填充质量,第 2 个凹槽和第 4 个凹槽的填充质量依旧为 70 mg,凹槽与传感器的相对位置如图 7(a) 所示。为便于分析,第 1 个凹槽和第 3 个凹槽的填充质量在 70~130 mg (间隔 10 mg) 范围内变化,且两个凹槽的填充质量相等。然后依次改变传感器各支路的开关状态,得



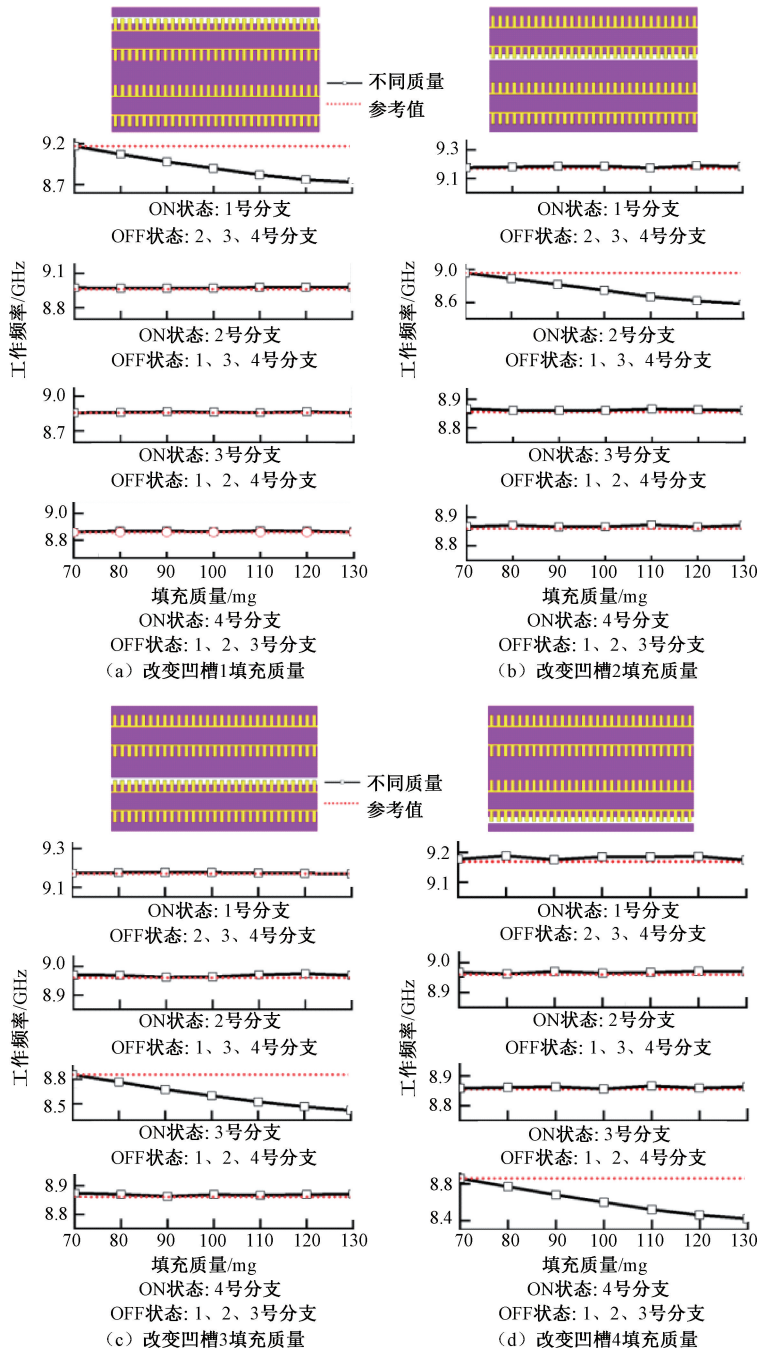


图 6 传感器对凹槽填充质量的响应曲线变化图

到传感器在不同开关状态、检测不同填充质量时的频率响应曲线如图 7(b)所示,红色虚线是金属凹槽工件填充的粉末质量为 70 mg 时 SSPPs 传感器的工作频率(作为检测参考值)。可以看出,当支路 1 或支路 3 处于 ON 状态,其他 3 条支路处于 OFF 状态时,传感器的工作频率随着填充质量的增加而减小,当支路 2 或支路 4 处于 ON 状态,其他 3 条支路处于 OFF 状态时,传感器的工作频率几乎与参考红色虚线相同,没有明显变化。从图 6 和 7 可以看出,只有当凹槽位于 ON 状态的分支区域时,其填充密度发生改变

后,传感器的工作频率才会发生变化,才能检测出填充问题。

### 3 检测应用

由于传感器与待测物之间的距离变化对 SSPPs 传感器的频率或幅值响应很敏感,因此,在机械扫描过程中,移动待测物或传感器时,传感器与待测物之间的距离应随时保持恒定,否则会影响检测结果。此外,在传感器与待测物的相对移动过程中,可能会对凹槽填充结构表面造成一

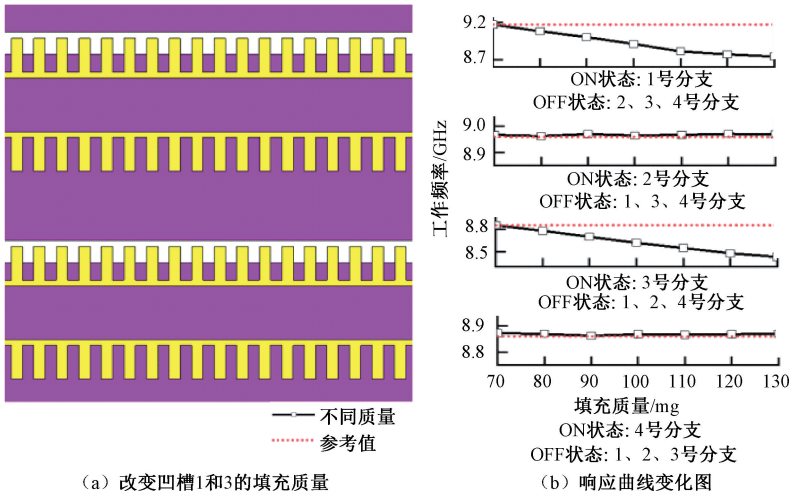


图 7 传感器对凹槽填充质量的响应曲线变化图

定的磨损,影响工件使用,且填充沟槽形状不规则会增加机械移动复杂性。为了避免上述问题,针对工业中批量生产的金属凹槽填充工件,提出一种检测方式,如图 8 所示,传感器始终放置在填充工件的同一位置处,通过对比参考值可一次性检出金属凹槽工件是否有填充问题。该检测方式适用于工件的初步筛选。

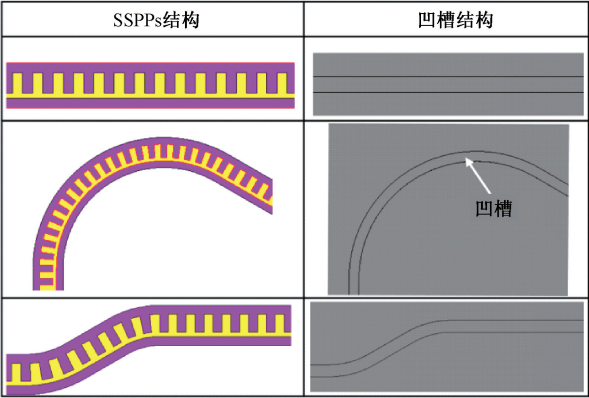


图 8 凹槽结构与对应的 SSPPs 传感器支路结构

对于凹槽填充检测,首先根据工件表面凹槽轨迹与尺寸设计相应的传感器支路结构,如图 8 所示,直线型凹槽对应直线型支路结构,曲线型凹槽对应曲线型支路结构,然后调整传感器支路的单元尺寸,使其能完全覆盖在凹槽上方。根据工件上凹槽的位置分布将相应的支路进行组合,形成单输入、多输出结构,每条输出支路上方安装液体控制开关。对于批量生产的金属凹槽填充工件,疏松程度检测步骤如下:

- 1) 安装传感器和金属凹槽填充工件;
- 2) 通过液体控制开关依次切换传感器各支路状态,记录各状态下的传感器  $S_{11}$  参数;
- 3) 更换待测物,重复步骤 1) 和 2);
- 4) 根据步骤 2) 和 3) 中  $S_{11}$  参数的差异,可以快速判断

传感器的哪条支路下方存在凹槽填充问题。

4 结 论

本文提出了一种基于液体开关控制的 SSPPs 传感器,用于金属凹槽填充工件检测。SSPPs 传感器由功分结构和液体开关控制器组成,功分结构上安装有液体开关控制器,用于控制 SSPPs 传感器的传输路径,即控制传感区域。依次切换支路状态,根据传感器反射系数的变化,可以知道处于“ON”状态的支路下是否存在填充问题。实验结果表明,当填充质量有着 10 mg 变化时,该传感器可以检测到该质量变化。在工业场景中,凹槽填充工件一般是批量生产的,因此可以根据凹槽的形状和分布设计出适用于检测此类填充工件的 SSPPs 传感器,以实现问题工件的快速筛选。

参考文献

[1] 沈慧铭,李伟兵,王晓鸣. 多点起爆网络结构参数设计及其同步误差分析[J]. 含能材料, 2016, 24: 238-243.

[2] LI R, LI W, GUO X, et al. Groove charge of a rigid multi-point initiation explosive network [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2018, 43(9): 929-938.

[3] 李云吉. 介质材料的微波毫米波无损检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023.

[4] 于昊言,李勤勤,金淇,等. 非金属管道的微波无损检测技术综述[J]. 测控技术, 2023, 42(5):12-27.

[5] 袁勤文,袁国华,田珊珊,等. 中长距离压力管道裂缝缺陷微波检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9):41-50.

[6] 李旭东,杨晓庆,田姗. 基于电磁时间反演算法的复合材料无损检测成像[J]. 信息技术与信息化, 2023(11): 69-72.

- [7] 安康, 李长侑, 丁君. 基于微波时间反演算法的复合材料内部损伤检测[J]. 无损检测, 2023, 45(9):43-48,80.
- [8] ABOU-KHOUSA M, RAHMAN M, DONNELL K M, et al. Detection of surface cracks in metals using microwave and millimeter-wave nondestructive testing Techniques-A review [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:8000918.
- [9] GAO X, ZHANG W, YANG X, et al. Detection of defects in groove composite structure using a split ring resonator probe [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32:125120.
- [10] 张浩驰, 何沛航, 牛凌云, 等. 人工表面等离激元超材料[J]. 光学学报, 2021, 41(1):372-391.
- [11] TANG W, ZHANG H, MA H, et al. Concept, theory, design, and applications of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(1): 1800421.
- [12] SU P, YANG X, WANG J, et al. Detection of impurities in nonmetallic materials based on tilted spoof surface plasmon polaritons [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:8005009.
- [13] XIE Y, YANG X, SU P, et al. A microwave time domain reflectometry technique combining the wavelet decomposition analysis and artificial neural network for detection of defects in dielectric structures[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:8001211.
- [14] ZHOU X, YANG X, SU P, et al. Detection and location of defects in non-metallic composites pipeline based on multi-resonant spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3):2091-2098.
- [15] ZOU J, YANG X, LI H, et al. A wireless non-metallic pipeline liquid level sensor based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(6):7761-7769.
- [16] ZHOU S, WONG S, LIN J, et al. Four-way spoof surface plasmon polaritons splitter/combiner [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(2): 98-100.

### 作者简介

宿丕强, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为传感器设计与发动机旋转部件信号传输技术。

E-mail:1289330215@qq.com

赖小皇, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机旋转部件信号传输技术与发动机测试技术。

E-mail:laixhuang@126.com