

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108156

# 基于平面电容传感器的复合材料缺陷检测研究

于正慧<sup>1</sup> 张志杰<sup>1,2</sup> 陈昊泽<sup>1</sup> 刘玉珊<sup>1</sup>

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

**摘要:**为实现利用平面电容传感器直接测得的电容值对碳纤维增强复合材料(CFRP)缺陷的表征,本文基于电容边缘效应,在有限元仿真软件 COMSOL 中构建平面电容传感器,分析电极参数对其性能的影响并进行优化,灵敏度提高 2%~52%,穿透深度可达到 4.13 mm。当传感器的面积一定时,研究感应电极的最优长宽比,并拟合得出传感器电极长度与面积之间的线性关系。在单电极直流激励的情况下,改变缺陷大小,检测感应电极的电容值变化。结果表明随着缺陷大小的增加,感应电极的电容值会随之减小,利用拟合曲线可以实现对 CFRP 缺陷的量化评估,其相关系数达到 0.996 以上。

**关键词:** 平面电容传感器;电极结构;碳纤维增强复合材料;缺陷检测

**中图分类号:** TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

## Research on composite defect detection based on planar capacitance sensor

Yu Zhenghui<sup>1</sup> Zhang Zhijie<sup>1,2</sup> Chen Haoze<sup>1</sup> Liu Yushan<sup>1</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science &amp; Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to characterize the defects of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by using the capacitance directly measured by planar capacitance sensor, a planar capacitance sensor is constructed in COMSOL based on the capacitance edge effect, and the influence of electrode parameters on its performance was analyzed and optimized, The sensitivity has been improved by 2%~52%, and the penetration depth can reach 4.13 mm. When the sensor area is constant, we can find the optimal length to width ratio of the sensing electrode, and then we can fit the linear relationship between the electrode length and area. The change in the capacitance value of the sensing electrode is detected when the defect size is varied with a single electrode DC excitation. The results show that the capacitance value of the sensing electrode decreases as the defect size increases, and the quantitative evaluation of CFRP defects can be achieved using the fitted curve with a correlation coefficient of 0.996 or more.

**Keywords:** planar capacitance sensor; electrode structure; carbon fiber reinforced plastics; defect detection

## 0 引言

目前,复合材料由于其诸多优良性能如抗疲劳、耐腐蚀、耐高温、重量轻,在航空航天、军事工业等领域中应用越来越广。在众多复合材料中,碳纤维复合材料(carbon fiber composite plastics, CFRP)是使用最多,应用最广的一种纤维增强型树脂基复合材料,具有高比强度、高比刚度、良好的导热性、导电性、热稳定性及耐腐蚀性等优点<sup>[1]</sup>。现已发展成为继铝、钢、钛之后的第四大航空航天结构材料<sup>[2]</sup>。对于航空航天等安全性要求很高的领域,即使微小的损伤都会对人员安全产生威胁<sup>[3]</sup>。因此为了保证 CFRP 材料的使用安全,针对其的损伤检测显得非常重要。

平面电容传感器可以实现无接触、单边穿透、且能检测

介电材料的介电特性,相较于目前针对 CFRP 材料缺陷检测的方法如超声波检测、红外检测、涡流检测等<sup>[4]</sup>,平面电容传感器具有非侵入、无辐射、便携、成本低等优点,受到国内外专家学者的关注<sup>[5]</sup>。2003年,王化祥等<sup>[6]</sup>采用有限元法,分析了阵列电极结构参数对测量的影响,证明经优化参数所构建的敏感场具有较均匀的场分布。2007年,张雪辉等<sup>[7]</sup>采用 ANSYS 分析了敏感场分布均匀性,被测电容变化范围等指标,进行进一步的优化。2014年,汪蓓蓓等<sup>[8]</sup>研究了不同电极结构的平面电容传感器,实验验证了平面电容传感器用于材料探伤的有效性,并且证实矩形叉指电极传感器测量效果优于圆形电极。Peng 等<sup>[9]</sup>讨论了电极数量的问题,用有限元法计算了几种典型介电常数分布下

不同电极对间的电容。然后利用基于线性和半线性 ECT 模型的投影 Landweber 迭代算法重建图像,结论得出:当电极数量超过 12 时,图像质量改善有限。

以上研究通过以不同的传感器指标为参考,对平面电容传感器结构参数进行了优化,且均是使用交流激励,通过敏感场分析,达到金属结构缺陷位置检测或可视化。场域内各处灵敏度的变化不仅与场域内介质的分布有关,还与该点在敏感场中所处的位置有关。由于灵敏度分布的不均匀性,往往存在着较大误差。谢宁宁等<sup>[10]</sup>通过设计三电极平面电容传感器探头探测采用电容查法定位了非金属材料表面的缺陷,可实现非金属材料损伤区的初步定位。Liang 等<sup>[11]</sup>使用平面电容传感器研究了归一化电容值与被测物体以及电极参数之间的关系,实验表明了用归一化电容值代替成像算法直接测量被测物体尺寸的可能性,但仅适用于检测物或缺陷大于等于两极板间隙的情况,无法对小于极板间距的缺陷进行检测。

本文与上述论文的不同之处主要在于:未使用敏感场计算,仅需考虑在测量中影响感应电容值的主要条件:被测物相对介电常数的变化来减少误差,利用测量电容值反映真实情况;提出了优化传感器性能电极参数的设计方法;通过电容值检测不仅可以达到缺陷定位的目的,还可以实现对细小缺陷的量化检测。

## 1 传感器原理与性能

### 1.1 传感器检测原理

传感器由激励电极、感测电极、基板构成,对激励电极施加一定的电压,激励电极与感应电极之间形成空间电场。平面电容传感器的检测原理是利用电容的边缘效应,如图 1 所示,在平行板电容当中,两电极相对放置,电场在极板中部均匀分布,在边缘处,电场线从极板间扩散到外部空间。因此,当电容极板位于同一侧时,电场线便扩展到更大的空间,形成一个边缘场,当置于两极板之间的待检测复合材料缺陷被空气填充,这部分介电常数的改变将导致感应电场的变化,从而导致感测极板的电容值发生变化,通过检测电势以及电容值的变化,可以对探测区域发生的变化进行表征。

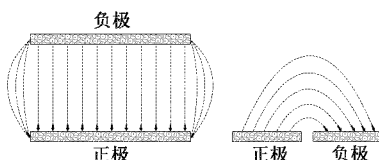


图 1 电容的边缘效应

### 1.2 传感器性能指标

平面电容传感器采用双电极设计,其主要结构参数包括电极面积、电极长宽比、电极间距、电极厚度、基板厚度以及基板相对介电常数。平面电容传感器的性能指标主要由上述参数所决定。传感器的性能指标主要有信号强度、灵

敏度、穿透深度等<sup>[12]</sup>。通过对参数进行设计观察不同参数情况下对传感器性能指标的影响,对参数优化可以使传感器的性能得到提升。信号强度主要是指传感器空场时所输出的电容大小。信号强度越好说明采集到的电容值越高,传感器聚合电荷能力越强。灵敏度是指传感器检测到电容的变化量与传感器空场时的比值,用式(1)定义。灵敏度越高表明传感器的敏感性越好。

$$S = \frac{C_s - C_0}{C_0} \quad (1)$$

式中: $C_s$  指传感器有物场时输出的电容值, $C_0$  是指传感器空场时的电容值。

穿透深度是指传感器可以检测到被测物体位于其上方时的最大距离。其有效穿透深度用式(2)定义,即该被测物位于该位置的电容值与位于无穷远时电容差值等于被测物与传感器距离为 0 与无穷大时电容差值的 3%<sup>[13]</sup>。

$$\frac{C(z = \gamma_{3\%}) - C(z = \infty)}{C(z = 0) - C(z = \infty)} \times 100\% = 3\% \quad (2)$$

## 2 平面电容传感器有限元模型

### 2.1 仿真模型的建立

利用有限元仿真软件 COMSOL 5.4 建立双电极平面电容传感器模型<sup>[14]</sup>,在 AC/DC 模块下选择物理场为静电场并在稳态研究下进行求解分析。其中激励极板施加 3 V 直流电压,被测极板接地(0 V)。电极板的厚度为 0.017 mm,形状为长方形,极板间距固定为 5 mm,电极板材料为铜,置于厚度 1.5 mm 的 FR4 基板之上,基板相对介电常数为 4.5。由于电极厚度与其他参数量级相差较大,在进行网格划分时会生成低质量单元导致计算缓慢且收敛性较差,因此,电极结构在单层材料中进行设计。传感器整体结构如图 2 所示。

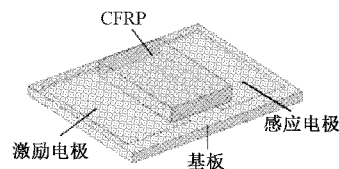


图 2 仿真模型建立

由于 CFRP 单向层合板每层纤维方向一致,使其承力方向的机械强度非常高,是航空构件中最为常见的成型结构形式,其以单向预浸布料进行逐层铺叠,以树脂基体作为中间黏合剂,因此碳纤维复合材料具有很强的各向异性。考虑到该因素,将  $0^\circ$  纤维的相对介电常数设为  $\{5\ 000\ 0\ 0, 0\ 10\ 0, 0\ 0\ 35\}$ <sup>[15]</sup>。本文使用的碳纤维增强复合材料采用单向层压法(0 度 14 层),它主要用于航空发动机的承重结构,以取代重金属。CFRP 实体为  $100\text{ mm} \times 167\text{ mm} \times 2.4\text{ mm}$ ,其中有人为切割损伤以模拟实际生产过程中可能出现的常规缺陷。如不同尺寸和深度的圆盘状损伤。

而在仿真当中,不同缺陷大小可以通过参数化扫描设计,无需同时设置多处缺陷,因此将CFRP仿真模型大小设计为 $10\text{ mm}\times 16\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$ 。

## 2.2 传感器参数设计

针对传感器电极板的参数设计,首先考虑其电极板的长宽比,这对于传感器的信号强度与灵敏度尤为重要。本文通过保持电极板的面积不变,对电极板长度进行参数化扫描来确定较为合适的电极长宽比。而在扫描过程当中求解物场电容值时,被测物体始终位于两极板间正上方。电极板面积在 $100\text{ mm}^2\sim 200\text{ mm}^2$ 内,电极长度根据不同的面积选择合适的范围以步长 $1\text{ mm}$ 进行改变扫描,在空场条件下,由图3(a)可以看出在面积保持一定时,随之电极板长度的增加即长宽比的增加,平面电容传感器的信号强度在降低;在电极长度相同的情况下,电极板的面积越大,平面电容传感器的信号强度越高。

除此之外,还应考虑长宽比对于传感器灵敏度的影响,因此,设定了不同面积的传感器,同样电极长度以步长为 $1\text{ mm}$ 进行扫描,对传感器在空场和物场条件下电容的变化量进行检测,面积选取变化范围为 $50\text{ mm}^2\sim 250\text{ mm}^2$ ,为保证传感器位于设定的空间域当中,电极长度与电极宽度均不超过 $25\text{ mm}$ 。不同电极面积情况下改变电极长度的仿真结果如图3(b)所示。

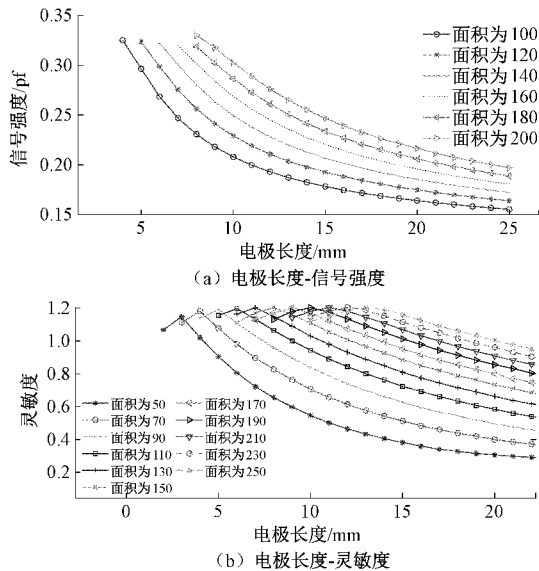


图3 电极长度与传感器性能的关系

选取在不同面积情况下灵敏度最优的电极长度,构建长宽与面积的拟合函数,其结果如图4所示。可看出电极面积与灵敏度最优时的长度呈线性关系。拟合函数为:

$$a = 0.05 \times s + 0.5 \quad (3)$$

式中: $a$ 为电极长度, $s$ 为电极面积。通过该拟合函数,即可确定在一定范围内,当电极面积确定时其为使灵敏度达到较高所选用的电极长度。因此确定电极板参数,电极面积为 $200\text{ mm}^2$ ,电极长度为 $10.5\text{ mm}$ ,电极间距为 $5\text{ mm}$ 。利

用该传感器对缺陷样品进行检测。

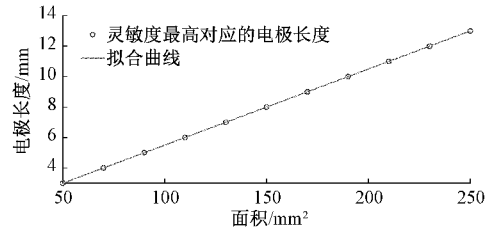


图4 不同面积应选取的最优电极长度

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 缺陷检测

在对被测物体进行缺陷量化分析之前,首先在水平以及垂直方向选取一个合适的位置,首先在水平方向进行检测,仿真结果如图5(a)所示根据仿真结果可以看出,当被测物体置于两电极板中间位置时,所接收到的信号强度最大,选定水平位置后,在垂直方向进行扫描检测。

首先被测物与传感器距离无限接近于 $0$ 时记录感应电极的电容值,接下来通过空场模拟被测物距离传感器无穷远的情况,最后计算被测物与传感器的距离从 $0.5\text{ mm}$ 增加至 $8.5\text{ mm}$ ,由图5(b)可看出,随着提高高度的增加,感应电极的信号强度会逐渐降低并且趋近于空场时的电容值。

通过曲线拟合得出距离与电容值的关系如图5(b)所示,结合式(2),可以得出,该传感器的穿透深度为 $4.13\text{ mm}$ ,因此选定提高高度为 $0.5\text{ mm}$ 。

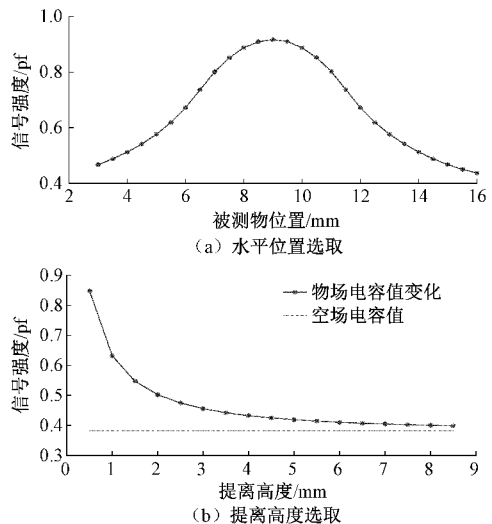


图5 被测物位置选取

### 3.2 缺陷深度改变

缺陷板材缺陷设计为圆盘形状,初始设置为半径为 $1\text{ mm}$ ,深度为 $0.5\text{ mm}$ ,位于CFRP板材表面。板材距离传感器 $0.5\text{ mm}$ 。改变板材缺陷的深度,缺陷深度改变范围在 $0.1\sim 1.5\text{ mm}$ 之间,以步长为 $0.1\text{ mm}$ 进行计算,结果如图6

所示,由图 6 不同提高高度下缺陷深度和电容值的关系可以看出,随着缺陷深度的增加,感应电极电容值也会逐步降低,

且在提高高度不高于 0.5 mm 时,其信号强度较高且量化效果较好,当提高高度高于 0.5 mm 时,其规律性较差。

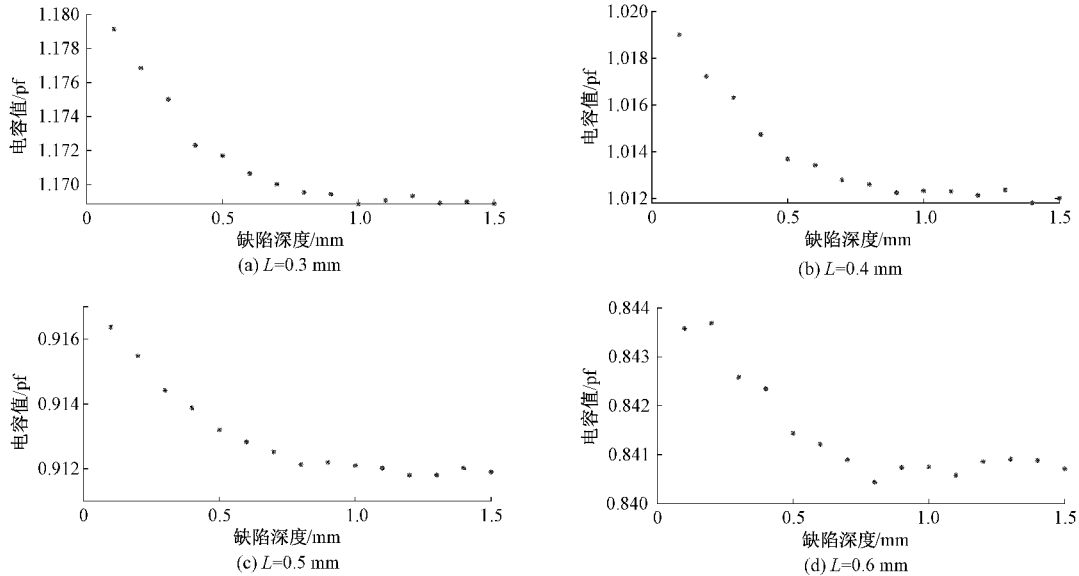


图 6 不同提高高度下缺陷深度和电容值的关系

为提高利用该方法的检测精度,使用不同拟合关系对提高高度为 0.5 mm 时缺陷深度和感应极板电容值进行拟合,拟合曲线如图 7 所示。并使用和方差 (SSE) 和相关系数 (R-square) 对不同的拟合函数进行评价,各项参数如表 1 所示。

对表 1 中和方差和相关系数进行分析可知,有理函数为最优拟合函数,即:

$$C_1 = \frac{1\ 482d^2 - 220.4d + 838.7}{d^3 + 1\ 619d^2 - 231.9d + 914.4} \quad (4)$$

式中:  $d$  为缺陷深度,  $C_1$  为感应极板所测得的电容值。

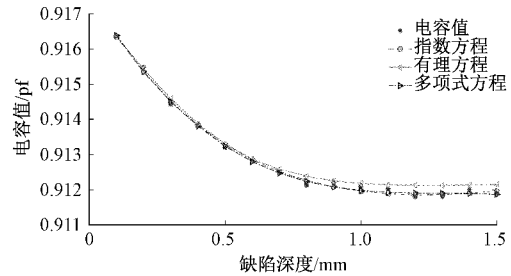


图 7  $L=0.5$  mm, 电容值与缺陷深度拟合曲线

表 1 不同拟合函数的各项参数 (缺陷深度)

拟合曲线	拟合方程	和方差	相关系数
指数方程	$C_1 = 0.009\ 696e^{1.618d} + 0.907\ 9e^{0.002\ 352d}$	$1.263\ 1 \times 10^{-7}$	0.995 6
有理方程	$C_1 = \frac{1\ 482d^2 - 220.4d + 838.7}{d^3 + 1\ 619d^2 - 231.9d + 914.4}$	$1.094\ 3 \times 10^{-7}$	0.996 2
多项式方程	$C_1 = -0.002\ 597d^3 + 0.010\ 09d^2 - 0.013\ 11d + 0.917\ 6$	$1.267\ 0 \times 10^{-7}$	0.995 6

### 3.3 缺陷半径改变

改变板材缺陷的半径,缺陷半径改变范围在 0.1 mm~1.5 mm 之间,步长同样以 0.1 mm 进行计算,检测感应电极电容值随着缺陷半径的增加所发生的变化,由图 8 可以看出,随着缺陷半径的增加,感应电极电容值也是会呈下降趋势。

同样的,当提高高度不高于 0.5 mm 时,量化效果较好,因此,选取提高高度为 0.5 mm 时缺陷半径及电容值进行拟合,各项拟合参数如表 2 所示。

对表 2 中和方差和相关系数分析可知,多项式函数为最优拟合函数,即:

$$C_2 = -0.003\ 977R^2 - 0.002\ 241R + 0.917\ 5 \quad (5)$$

式中:  $R$  为缺陷半径,  $C_2$  为感应极板所测得的电容值。

### 3.4 结果分析

平面电容传感器电极参数在经过优化设计之后,在传感器电极面积一定的情况下,传感器灵敏度可提高 2%~52%。表 3 给出文献[9]利用敏感场分布实现图像重建的相关系数的比较。

由表 3 可以看出,利用敏感场分布信息导致的误差较大,且当电极数目增加到 12 时,相关系数才可达到 0.9 以上,但是利用该方法对缺陷进行量化时,其相关系数可以达到 0.996 以上。文献[12]在经过结构参数优化设计之

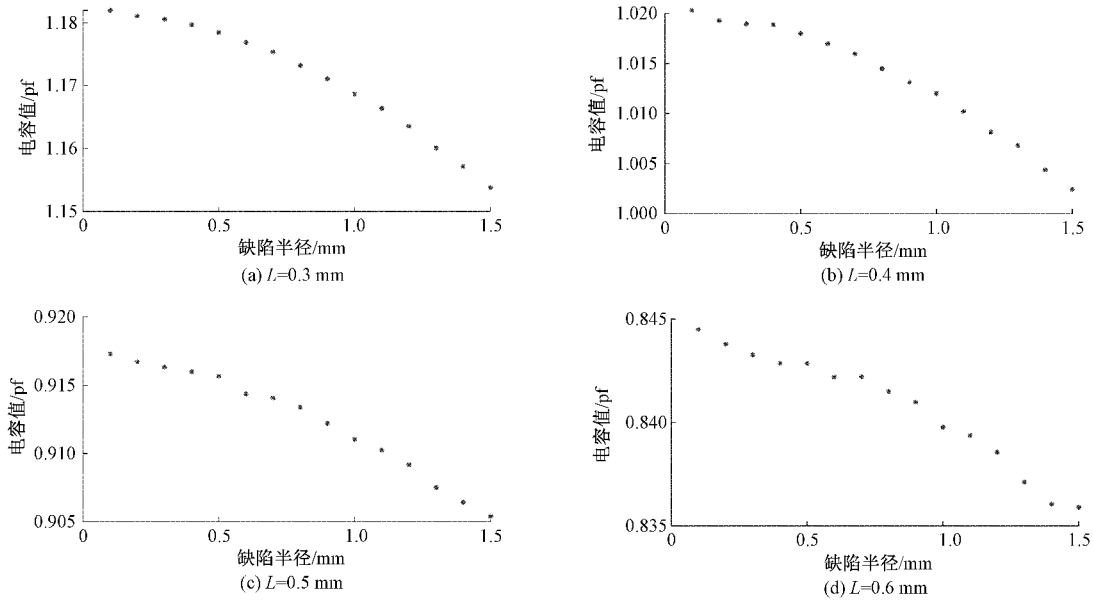


图8 不同提高高度下缺陷半径和电容值的关系

表2 不同拟合函数的各项参数(缺陷半径)

拟合曲线	拟合方程	和方差	相关系数
指数方程	$C_2 = -0.003785e^{0.9581d} + 0.9216e^{-0.0004289d}$	$7.6 \times 10^{-7}$	0.9965
有理方程	$C_2 = \frac{202.1}{d^2 + 0.5077d + 220.2}$	$5.831 \times 10^{-7}$	0.9973
多项式方程	$C_2 = -0.003977d^2 - 0.002241d + 0.9175$	$5.718 \times 10^{-7}$	0.9973

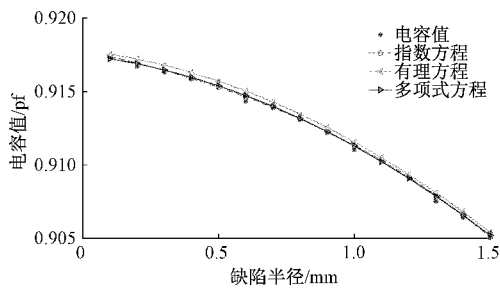


图9 L=0.5 mm,电容值与缺陷半径拟合曲线

后,其可实现的穿透深度如表4所示,其最大穿透深度为1.25 mm,而本文优化设计后传感器穿透深度可达到4.13 mm。

表3 不同电极数目的相关系数比较

电极数目	4	8	12	16
相关系数	0.5277	0.8971	0.9122	0.9146

表4 不同电极对数的穿透深度

电极数目	5	10	20
穿透深度/mm	1.25	0.65	0.35

传感器经过优化设计之后其性能明显提升,且利用该

传感器直接测得的电容值可实现对微小缺陷尺寸的量化分析。所得结果可为今后的研究提供理论指导。

### 4 结 论

本文通过有限元软件 Comsol 静电场稳态研究,设计了双电极平面电容传感器,并对其结构参数进行优化,使性能得到提升。通过实验设计得出平面电容传感器使灵敏度最优时电极长度与电极面积的线性关系。通过该式的应用可实现在利用平面电容传感器双电极检测实验中,可以直接确定出可使灵敏度最高的电极长宽比。并证实通过平面电容传感器直接测得的电容值信息可实现对CFRP 板材缺陷检测,即使缺陷尺寸小于极板间距仍可实现量化检测,此结论为CFRP 表面微小缺陷定量分析提供了有价值的参考。在接下来的工作当中,将搭建实验平台对仿真结论进行进一步的验证分析,同时由于缺陷尺寸较小,利用该方法检测需要进一步提高传感器的灵敏度,可通过增加屏蔽电极来进行进一步优化。

### 参考文献

[1] LI Y, ZHANG W, YANG Z, et al. Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology,

- 2016, 76: 91-102.
- [2] 陈明,徐锦洪,安庆龙. 碳纤维复合材料与叠层结构切削加工理论及应用技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2019.
- [3] ZHANG D, WANG H, BURKS A R, et al. Delamination in rotary ultrasonic machining of CFRP composites: Finite element analysis and experimental implementation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(9): 3847-3858.
- [4] CHENG J, QIU J, JI H, et al. Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 110: 141-152.
- [5] 季庆庸,刘亚楠,邓晨肖,等. 基于 ECT 的航空复合材料缺陷检测研究[J]. 计量学报, 2019, 40(6): 952-957.
- [6] 王化祥,张立峰,朱学明. 电容层析成像系统阵列电极的优化设计[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2003, 36(3): 307-310.
- [7] 张雪辉,王化祥,问雪宁. 电容层析成像系统三维电场分析及阵列电极优化[J]. 天津大学学报, 2007, 40(9): 1041-1047.
- [8] 汪蓓蓓,黄云志,刘永洪. 平面电容传感器设计及在材料探伤中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 997-1001.
- [9] PENG L, YE J, LU G, et al. Evaluation of effect of number of electrodes in ECT sensors on image quality[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12(5): 1554-1565.
- [10] 谢宁宇,陈向东,李晓钰. 三电极平面电容传感器对材料损伤的探测[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 57-59.
- [11] LIANG P, HAN Y, ZHANG Y, et al. Novel non-destructive testing method using a two-electrode planar capacitive sensor based on measured normalized capacitance values[J]. Measurement, 2021, 167: 108455.
- [12] 詹争,黄云志,李柯. 平面电容传感器参数优化设计及实验[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(12): 95-97,101.
- [13] LI X B, LARSON S D, ZYUZIN A S, et al. Design principles for multichannel fringing electric field sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(2): 434-440.
- [14] 陈德运,高明,宋蕾,等. 一种新型的三维 ECT 传感器及三维图像重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 961-968.
- [15] 范文茹,董永智. 面向 CFRP 板材的平面式电容传感器设计优化[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 63-71.

#### 作者简介

于正慧,硕士研究生,主要研究方向为复合材料缺陷检测,数字信号处理。

E-mail: yuzhenghuiya@163.com

张志杰,教授,博士生导师,主要研究方向为动态测试、数字信号处理等。

E-mail: zhangzhijie@nuc.edu.cn

陈昊泽,博士研究生,主要研究方向为无损检测、信号处理和机器学习。

E-mail: 15930663972@163.com

刘玉珊,硕士研究生,主要研究方向为涡流测试、电导率分类和数字信号处理。

E-mail: liuyushan\_nuc@163.com