

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205861

柔性叉指电容式焊条湿度无损检测方法^{*}

王俊琴¹ 张爱华^{1,2} 祁 靖¹ 朱 亮³

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室 兰州 730050;
3. 兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050)

摘 要:焊条湿度过高会导致焊接中产生气泡、气孔等明显的质量问题。为满足焊条湿度的现场无损检测,提出一种柔性叉指电容式焊条湿度检测方法。首先,以新型柔性叉指电容式传感器为基础,建立有限元模型,研究叉指电极结构参数对传感器性能的影响;然后,利用BP神经网络和遗传算法对叉指电容式焊条湿度传感器的结构进行参数优化,得到湿度传感器最优的设计方案;最后,设计U型弹性机构起到完全包裹焊条的作用,完成J507和J607焊条湿度检测实验和标定实验。仿真与实验结果表明,叉指电极结构参数为最优时,传感器检测深度约为1.4 mm(小于焊条药皮厚度),焊条湿度值与电容值拟合优度达到0.98。本方法对湿度值在0.117%~2.5%的焊条具有良好的检测能力,为实现焊条湿度的现场、无损检测技术提供了新思路,有助于避免焊接过程中产生焊接缺陷。

关键词:叉指电容;焊条湿度;介电常数;有限元仿真;遗传算法

中图分类号: TN98;TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Non-destructive testing method for humidity of flexible interdigital capacitive electrode

Wang Junqin¹ Zhang Aihua^{1,2} Qi Jing¹ Zhu Liang³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Experiment of Gansu Advanced Control for Industrial Process, Lanzhou 730050, China;
3. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: High humidity in the welding rod can lead to obvious quality problems such as bubbles and porosity in the weld. In order to meet the non-destructive detection of welding rod humidity in the field, a flexible interdigital capacitive rod humidity detection method is proposed. Firstly, a finite element model was established based on the new flexible interdigital capacitive sensor to study the influence of the structural parameters of the interdigital electrode on the sensor performance. Then, the parameters of the structure of the interdigital capacitive welding rod humidity sensor were optimized using BP neural network and genetic algorithm, and the optimal design of the humidity sensor was obtained. Finally, the U-shaped elastic mechanism was designed to completely wrap the welding rod and complete the humidity testing and calibration experiments for J507 and J607 welding rods. The simulation and experimental results show that the sensor detection depth is about 1.4 mm (less than the thickness of the electrode flux) when the structural parameters of the interdigital electrode are optimal, and the goodness of fit of the electrode humidity value to the capacitance value reaches 0.98. This method has good detection capability for welding rods with humidity values in the range of 0.117% to 2.5%, which provides a new idea for realizing on-site, nondestructive detection technology of welding rod humidity and helps to avoid welding defects during the welding process.

Keywords: interdigital capacitive; welding rod humidity; dielectric constant; finite element simulation; genetic algorithm

0 引言

焊条电弧焊设备简单,便于操作,适用于室内外焊接。为确保焊接结构的可靠性和安全性,研究影响焊接质量因素的重要性不言而喻。其中焊条湿度过高直接影响焊接后效果,因此需要在焊接前检测。焊条是焊接技术的关键材料,极易受潮,存储不当会导致焊接过程中产生气泡、夹渣等问题^[1],有必要在焊接前检测其湿度,以保证焊接质量。焊缝中氢大部分以 H 、 H^+ 、 H^- 的形式存在^[1-2],焊条含有的水分是焊接过程中氢的主要来源之一,各种大气参数都会对焊条湿度有着显著的影响,通常组成焊条药皮化合物介质的相对介电常数在 3~7 左右,水的相对介电常为 78.5;焊条中水分增加,焊条药皮的等效介电常数会相应增加。

目前,适用于焊条湿度检测方法主要有电容法和干燥法;早期检测焊条湿度是采用剥下的焊条药皮作为试样,放入 $980\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热炉中,通氧气并保持 30 min,水分被装有无水高氯酸镁的吸收管吸收,称吸收管的增重即为试样的湿度;然而用此方法测量焊条湿度存在检测周期长、焊条损失率高的问题。为此 Bunnell 等^[3]提出了电容法检测焊条湿度。基于上述原理,国外学者 Marcin L. Peterson、Charles F. Col 等发明焊条湿度检测仪,该湿度仪适用于室外环境检测,其缺点是不能兼容多种类型焊条的测量,对不同直径的焊条,需要更换不同的测量圆桶。由此,国内学者朱亮等^[4]研制了电容法焊条湿度检测仪,该仪器电极材料为金属铁,暴露于空气中,极易生锈,降低了焊条湿度检测仪的使用寿命。基于此,学者张爱华等^[5]研制了筒状焊条含水量检测系统,其中电极材料外表面附有一层保护膜,避免电极生锈和磨损,但是该方法中金属电极与焊条焊芯形成一个单独的并联电容,增加了因焊芯偏心对检测结果的影响;同时在测量时两电极保持弧形结构,不可舒展,测量不同型号焊条时,会因焊条直径不同,弯曲程度不同而形成空气间隙,导致检测结果不准确。

本文基于平面电容传感器原理^[6]提出了一种柔性叉指电容式焊条湿度无损检测方法。为保证测量湿度时电容传感器和焊条紧密包裹(避免产生空气间隙),电极基底选用柔性材质。其中叉指电极附着于柔性基底材料上,有助于实现柔性化电子器件更高的集成度^[7-9]。通过 COMSOL 有限元仿真软件优化叉指电容式传感器的结构,围绕其性能评价等,确定适用于本实验的电极最佳尺寸,然后利用 BP 神经网络的非线性拟合能力和遗传算法的单目标优化技术,优化叉指电容式焊条湿度传感器的结构参数,最后完成实验。

1 焊条湿度检测方法

1.1 叉指电容传感器结构与原理

常用的平行板电容器由两块相互平行的金属极板构成,中间被电介质材料隔开。给两极板施加电压,两极板之间的部分存在着均匀电场。本文为避免焊芯和平行板电容器产生并联电容,提出采用叉指电容式传感器测量焊条湿度。

叉指电容式传感器是一种平面电容式传感器^[9],其结构简单,适用性广,基本单元由两块尺寸相同的矩形金属材料构成。图 1 为平面电容式传感器。

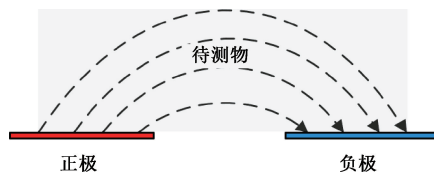


图 1 平面电容式传感器

Fig. 1 Planar capacitor transducer

给传感器两电极施加电压,当传感器敏感区有待测物时,会影响传感器电极上的电荷分布,导致两电极之间的电容值发生改变^[10]。

叉指电容式传感器的电容值大小不仅取决于电极的几何结构,还依赖于敏感层介质、基底材料的介电性能和敏感层介质厚度等。叉指电容的所有电极均位于同一平面,基本单元由两个叉指结构的电极相互交叉放置形成,电极形状为矩形,电极相互交叉部分定义为叉指长度,记为 l 。图 2 为叉指电容式传感器。

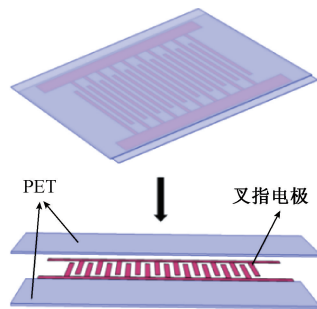


图 2 叉指电容式传感器

Fig. 2 Interfingered capacitance sensor

柔性叉指电容式传感器可以在不产生任何机械约束的情况下附着在待测物体上,克服了平行板电容器设计的局限性,解决了电极和待测物的接触间隙问题。目前可通过求解一个叉指电极周期内的拉普拉斯方程计算叉指电容值,解决方法有有限元法、共形映射法、部分电容法等,成功将叉指电容与电极几何尺寸以及介质介电常

数联系起来。

一对叉指电容式的总电容由薄膜介质产生的固定电容和两侧待测材料介质产生的电容3部分并联组成,因此叉指总电容 C_n 值为^[11]:

$$C_n = C_0 + C_1 + C_2 \quad (1)$$

式中: C_0 为给定薄膜介质下一对叉指节之间所产生的平板电容, C_1 为薄膜覆盖待测材料侧产生的电容, C_2 为薄膜覆盖基底侧产生的电容。其中 C_1 和 C_2 的计算采用共形映射和部分电容法计算:

$$C_1 + C_2 = L\varepsilon_0((\varepsilon_1 - 1) \frac{k(K_i)}{k(K'_i)} + \varepsilon_2 \frac{k(K_j)}{k(K'_j)}) \quad (2)$$

式中: L 为叉指电极总长, ε_0 为给定金属化率下介电常数, ε_1 和 ε_2 为待测物质介电常数。 $k(\cdot)$ 为第一类完全椭圆积分函数, K_i, K'_i, K_j, K'_j 分别为椭圆积分的模,具体计算方法参考文献[11-12]。

图3为叉指电容式传感器示意图,其中 d 为相邻叉指间的间距, w 为叉指电极宽度, l 为叉指长度。

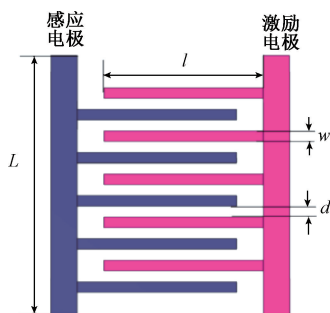


图3 叉指电容式传感器示意图

Fig.3 Schematic of interdigital capacitance sensor

图4为叉指电极电场分布图,分别对两个叉指结构的电极施加电压,则电场线将会以图4的规律由正极指向到负极。叉指电极表面的电场绝大部分存在于距电极一定高度 h 内的区域,此区域可称为信号检测区, h 为信号检测的深度满足式(3), b 为电极厚度。

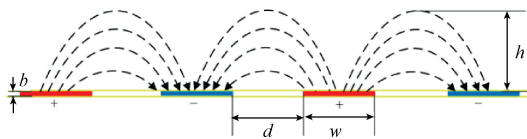


图4 叉指电极电场分布图

Fig.4 Electric field distribution diagram of cross finger electrode

$$h = w + d \quad (3)$$

位于电场敏感区材料的材料属性将会影响叉指电容的电容值。此外,叉指电容的检测电容值与叉指电极的金属化率 λ 密切相关,金属化率的定义式为:

$$\lambda = \frac{w}{w + d} \quad (4)$$

1.2 叉指电容式焊条湿度无损检测方法

如图5所示,柔性叉指电容式传感器包括U型弹性机构、支架、焊条放置柱、空心阶梯轴、绕线轮、支撑柱、导向柱等。本文通过将叉指电极连接在U型弹性机构的两端悬空放置,利用叉指电极柔性材料的特性使得电极能够紧密贴合焊条,实现测量;再配合旋钮、绕线轮和立柱可实现不同型号焊条湿度的测量;此外,叉指电极外表面包裹有聚酯PET薄膜^[13],将叉指电极全部覆盖不与空气接触,减少测量过程中对叉指电极的磨损、提高使用寿命。

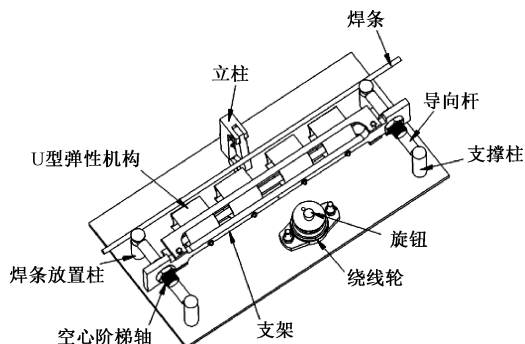


图5 叉指电容式焊条湿度检测方法示意图

Fig.5 Diagram of humidity detection method for interdigital capacitive electrode

本文利用叉指电极柔性材料的特性,紧密贴合焊条进行测量,提高检测精度;另外,由于叉指电极的结构特点,避免了以往电容式传感器因焊条焊芯偏心产生的并联电容带来的误差对检测结果的影响;此外,相较于常规传感器电极借助填充物来固定支撑,本方法通过将叉指电极连接在U型弹性机构的两端悬空放置,避免了测量过程中其他填充物的相对介电常数对传感器检测结果的影响。

湿度测量部分通过转动收线旋钮,带动叉指电极紧紧包裹焊条,有效解决了空气间隙造成串联电容的问题。叉指电容式传感器的焊条湿度测量方法可适用于不同型号的焊条,具有携带方便、使用寿命长的优点,实现焊条湿度的无损检测。

1.3 传感器性能评价标准

目前,评价传感器性能指标的参数有传感器灵敏度、使用频率范围、信号检测深度以及信号检测范围等。传感器灵敏度反映的是传感器测量参数变化引起传感器输出值的变化;使用频率范围指灵敏度随频率而变化的量值不超出给定误差的频率区间;信号检测深度指传感器电场强度的最远检测点与电极的距离,通常定义为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%;信

号检测范围即可测量的量程。一般根据传感器实际应用领域和特定参数要求制作合适的传感器。

对于等间距叉指电容传感器来说,各相邻叉指单元间的电场线有效检测深度近似相等。一般定义传感器响应灵敏度为传感器输出的电容变化量与系统自变量的比值。在本文为输出电容值随自变量相对介电常数变化的程度,因此传感器灵敏度 S 定义为:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \varepsilon}$$

(5)

由此可知,在灵敏度曲线线性度较好的情况下,可用曲线斜率来表示,在灵敏度曲线不是很好的条件下,可考虑分段计算。

2 叉指电容传感器有限元仿真及参数优化

2.1 有限元仿真

本文使用 COMSOL Multiphysics 5.6 软件对所涉及的传感器结构进行了有限元仿真分析与设计^[14-15]。叉指电容式传感器的结构参数主要包括:电极金属化率 λ 、叉指宽度 w 、叉指对数 N 、叉指长度 l 、叉指间距 d 。

在有限元中,若传感器测量区域内无自由电荷,则可用式(6)来表示测量区域的电场^[16-18]:

$$\nabla \cdot [\varepsilon_0 \varepsilon_r(x, y) \nabla \Phi(x, y)] = 0$$

(6)

式中: ε_0 为真空中介电常数, $\varepsilon_r(x, y)$ 为介质的相对介电常数分布函数; $\Phi(x, y)$ 为电势分布函数; $\nabla \cdot$ 和 ∇ 为梯度和梯度算子。给定边界条件后,即可求出待测区域的电容值:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1}{U} \int_{\Omega} D d\Omega = \frac{1}{U} \int_{\Omega} \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \Phi d\Omega$$

(7)

式中: Q 为极板电荷量, U 为激励电极所施加的电压; Ω 为积分区域; D 为电位移矢量。

2.2 金属化率对传感器性能的影响

在叉指电容式传感器中,电极金属化率为传感器性能的一个重要的评价指标。由于传感器的总面积受限于检测装置的结构和尺寸,本文在保证传感器总面积不变的前提下,改变叉指电极的金属化率 λ ,取值为 0.1 ~ 0.9,仿真结果如图 6 和表 1 所示。

表 1 不同金属化率下的信号检测深度

Table 1 Signal detection depth under different metallization rates

金属化率	0.2	0.5	0.8
检测深度/mm	1.4	1.4	1.3

通过仿真实验,由图 6 可知,在同一介电常数下,传感器电容值、灵敏度随着金属化率的增大而增大。由

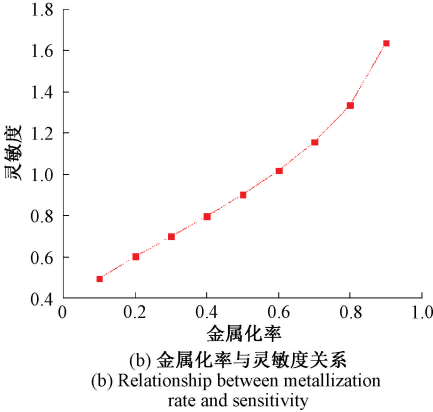
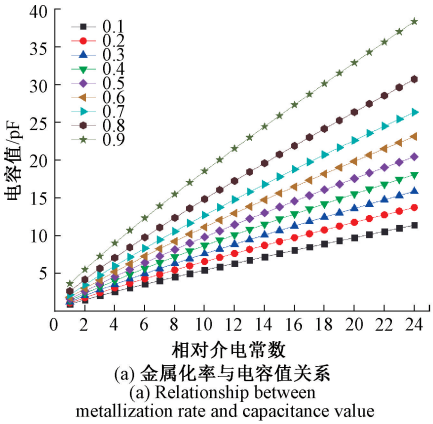


图 6 金属化率对传感器性能影响
Fig. 6 Influence of metallization rate on sensor performance

表 1 可知,传感器的信号检测深度不随金属化率的改变有大幅度的增加,与式(3)一致。

2.3 叉指对数对传感器性能的影响

在叉指电容式传感器中,叉指对数越多,电场敏感区面积就越大。本文研究电极金属化率 $\lambda=0.5$,叉指长度 $l=6\text{ mm}$,叉指宽度 $w=0.5\text{ mm}$,叉指对数 N 分别为 5、8、10、12、15 对传感器性能的影响。仿真结果如图 7 和表 2 所示。

表 2 不同叉指对数下的信号检测深度
Table 2 Signal detection depth without interdigital logarithm

叉指对数	5	10	15
检测深度/mm	1.1	1.2	1.5

由图 7 可知,当叉指对数从 5 增到 15 时,传感器电容值、灵敏度依次增大。由表 2 可知,叉指对数越多,传感器的信号检测深度越大,即叉指对数越多,传感器性能越好。但在本实验中由于传感器为柔性材质,为保证在测量中叉指电极可以均匀的包裹于焊条表面,叉指电极总长不宜过长(叉指对数过多)。

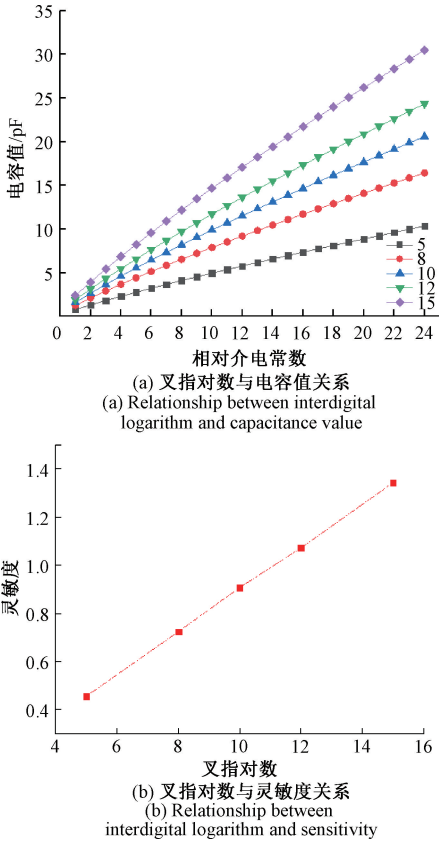


图 7 叉指数对传感器性能影响

Fig. 7 Influence of interdigital logarithm on sensor performance

2.4 叉指长度对传感器性能的影响

同样,叉指长度的增加也会增加传感器电场敏感区面积,因此传感器电容值也会增加。在传感器总长度 L 不变的情况下,设计叉指电容式传感器金属化率为 $\lambda = 0.5$,叉指宽度为 $w = 0.5$ mm,叉指数 $N = 10$ 对,选取叉指长度 l 分别为 4、5、6、7、8 mm,改变待测材料相对介电常数,传感器的输出随相对介电常数的变化如图 8 和表 3 所示。

表 3 不同叉指长度下的信号检测深度
Table 3 Signal detection depth under different interdigital lengths

叉指长度/mm	4	6	8
检测深度/mm	1.2	1.5	1.6

由图 8 可知,当待测材料介电常数一定时,叉指长度越长,传感器的电容值、灵敏度越大。由表 3 可知,叉指长度越长,传感器的信号检测深度越大。在本实验中,因为焊条的周长有限,同时为了保证传感器具有相对好的检测深度,所以设计的传感器叉指长度不宜过大。

2.5 叉指间距对传感器性能的影响

在叉指电容式传感器中,叉指间距的大小对传感器

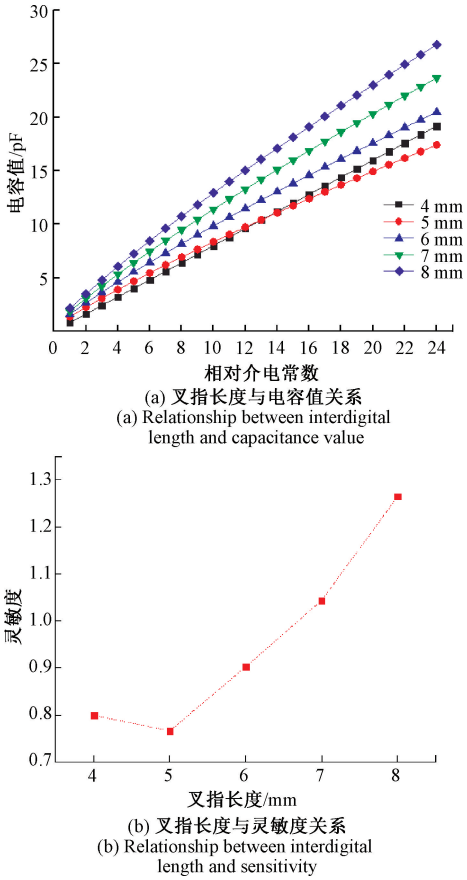


图 8 叉指长度对传感器性能影响

Fig. 8 Influence of interdigital length on sensor performance

的性能也有影响。增大叉指间距,则传感器的总面积会减小,由此可改变传感器的初始电容值。设计在传感器总面积不变的条件下(即传感器叉指宽度一定),叉指长度 l 为 6 mm,叉指数 N 为 10 对,选取叉指间距 d 分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mm,改变待测材料相对介电常数,传感器的输出随相对介电常数的变化如图 9 和表 4 所示。

表 4 不同叉指间距下的信号检测深度
Table 4 Signal detection depth under different interdigital lengths

叉指间距/mm	0.1	0.5	0.9
检测深度/mm	0.8	1.4	1.9

由图 9 可知,当叉指电容传感器的金属化率、叉指长度、叉指数一定的条件下,叉指间距越宽,叉指电容式传感器的电容值、灵敏度越小;由表 4 可知,叉指间距越大,传感器信号检测深度越大。因此为保证传感器的信号检测范围,应尽量选择叉指间距较小的传感器;在本文中,小的叉指间距,可避免叉指电极和焊条金属芯形成并联电容(减少焊芯偏心产生的误差)。

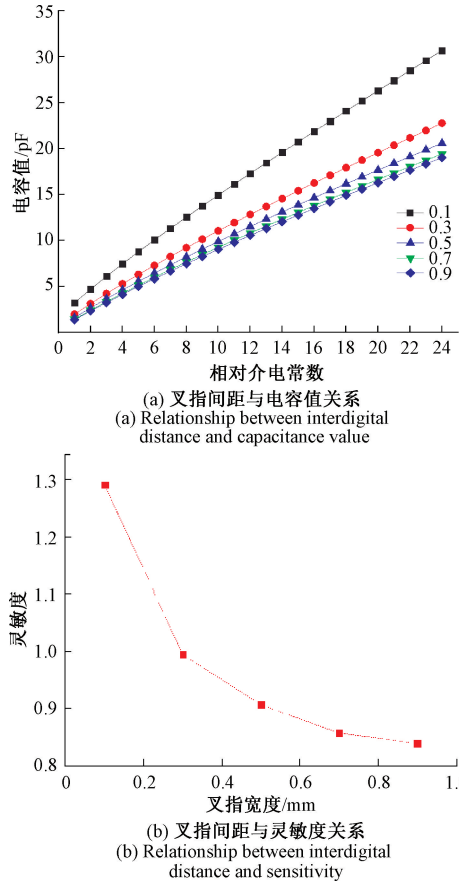


图 9 叉指间距对传感器性能影响

Fig. 9 Influence of interdigital distance on sensor performance

2.6 优化结果分析与验证

通过 BP 神经网络的非线性拟合方法和遗传算法^[19-20]的集成智能优化方法对叉指电极的结构参数进行优化,其中 BP 神经网络方法拥有较强的非线性处理能力,适合于信息复杂、知识背景不清楚和推理规则不明确问题的建模;遗传算法可以解决复杂系统中的多/单目标优化的问题^[21-23]。本文采用遗传算法作为单目标优化方法时,直接利用 BP 神经网络确定的最优效能预测模型作为遗传算法的适应度函数,无需再为遗传算法建立一个新的适应度函数,从而可以解决黑盒目标优化问题中适应度函数难以建立的问题。控制参数集成优化流程如图 10 所示。

本文取叉指电容式传感器的金属化率、叉指间距、叉指长度、叉指对数作为优化变量,使用传感器电容值作为输出,通过遗传算法极值寻优得到传感器最佳结构参数。

在叉指电容式焊条湿度检测方法中传感器结构参数需要设置合理的范围,以获得更理想的传感器电容值。所有选定工艺参数的工作范围都是通过焊条湿度平台和实验确定的。由于叉指电容式传感器的叉指电极金属化率、叉指间距、叉指长度、叉指对数等影响传感器性能的

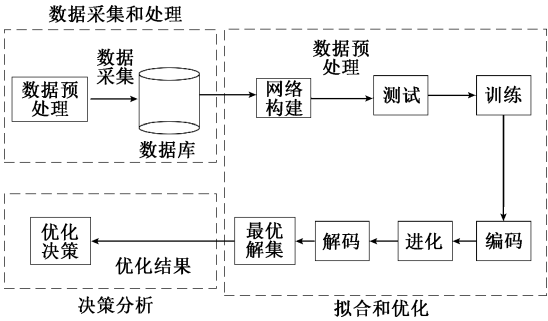


图 10 集成优化流程

Fig. 10 Integration optimization process

关键,因此对 η 、 d 、 l 、 N 有式(8)的约束:

$$\begin{aligned} 0 < \eta < 1 \\ 0 < d < 1 \\ 0 < l \leq 8 \\ 0 < N \leq 15 \end{aligned} \tag{8}$$

将叉指电极金属化率、叉指间距、叉指长度、叉指对数等数据作为神经网络的输入,传感器的电容值作为神经网络的输出,建立基于神经网络的电容值预测模型。将数据集中 70% 的数据作为训练集,30% 的数据作为测试集,对传感器电容值预测模型进行训练。

本方法使用均方误差作为模型的评估方法对模型的预测结果进行评估,均方误差用来还原平方失真程度,是预测误差平方之和的平均值,避免了正负误差不能相加的问题。图 11 为最优解遗传优化迭代曲线。

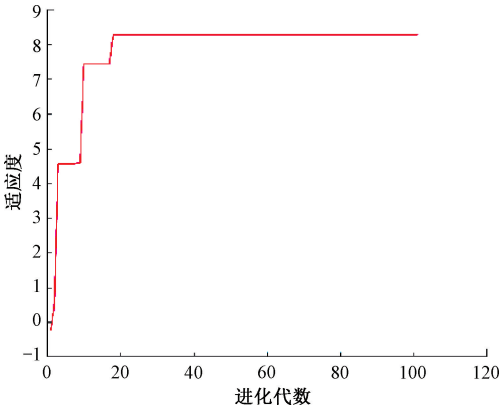


图 11 适应度函数曲线

Fig. 11 Fitness function curve

根据遗传算法得到的参数最优解,如表 5 所示。

因为有 4 个待优化的变量,不可避免每一次的优化结果都有误差,会产生多个近似最优解,实现最优解的变量组合不只一种,但基本相同。表 5 数据取平均值,得到叉指电容式焊条湿度传感器的叉指电极结构尺寸,如表 6 所示。

表 5 叉指电容式传感器电极参数优化值

Table 5 Optimization of electrode parameters of interdigital capacitive sensor

	I	II	III	IV	V
η	0.476 0	0.439 6	0.449 2	0.632 3	0.598 8
d	0.476 0	0.439 6	0.449 2	0.632 3	0.598 8
l	6.196 6	6.013 3	6.909 5	5.509 5	5.616 4
N	9.325 2	11.670 0	7.879 5	8.330 0	9.348 6
C	8.466 1	9.266 1	9.123 1	8.766 1	8.486 3

表 6 优化后电极参数取值

Table 6 Values of electrode parameters after optimization

变量	η	d	l	N
取值/mm	0.5	0.5	6	10

根据图 6(b) 和表 1 可知,当选取叉指电极结构尺寸
为表 6 中的尺寸时,传感器灵敏度约为 0.91 pF,检测深度
约为 1.4 mm。

2.7 叉指电容传感器的制备

在焊条湿度检测中叉指电容式传感器的结构设计和
电极材料的选取至关重要。其结构参数和材料决定了传
感器性能的好坏。通过有限元模拟仿真分析,本文在设
计传感器结构时,选取的电极材料为金属 Cu,叉指电极
的金属化率 $\lambda=0.5$,叉指对数 $N=10$,叉指长度 $l=6$ mm,
叉指间距 d 等于叉指宽度 w 为 0.5 mm;为实现电极紧贴
于焊条药皮,本方法中叉指电极具有高弯力性,因此选取
叉指电极的厚度应尽量小,选取电极厚度 b 为 0.06 mm。

为防止在检测过程中焊条对电极材料的磨损和避免
空气中水分对传感器初始值的影响,本文采用力学性能
好,耐折损的 PET 薄膜作为保护膜将铜电极包裹固定。

3 实验结果与分析

3.1 焊条湿度检测实验平台

根据仿真优化得到的叉指电极的结构,设计焊条湿
度检测方法。利用焊条自身细、长的物理特点,采用四个
叉指型电极并联结构,增加传感器信号检测范围,搭建叉
指电容式传感器检测平台,如图 12 所示。

该系统主要由焊条检测装置和 LCR-6300 数字电桥
组成;LCR-6300 提供测试频率从 10~300 kHz,测试精度
达到 0.000 01 pF,基本准确度达到 0.05%。焊条检测系
统包含传感器组件、支架及定位组件。传感器组件包括叉
指电极和 U 型弹性机构。焊条湿度电容值由本平台检测,
焊条湿度值则用国标 GB 5117-1995 所提供的方法测定。

3.2 焊条湿度检测标定实验

本文所设计的检测平台通过焊条电容值来反映此焊



图 12 焊条湿度检测平台

Fig. 12 Electrode humidity detection platform

条湿度情况,因此需要对焊条湿度进行标定实验,得到电
容值—湿度值关系。所用的标定实验如图 13 所示。



图 13 标定实验

Fig. 13 Calibration experiment

焊条湿度值的标定实验采用实验仪器有:管式加热
炉 GSL-1100X-Sq25 mm、数字电子秤(精度为 0.001 g)、
若干陶瓷舟等。实验中将直径为 $\Phi 3.2$ mm、 $\Phi 4.0$ mm 的
J507 和 J607 焊条使用本方法检测其电容值后,研磨焊条
药皮至粉末状,放置于 4 个大小、形状相同的陶瓷舟中,
并分别记录各个陶瓷舟空舟质量为 m_1 和放入焊条粉末
后的质量为 m_2 ,将 4 个标记好的陶瓷舟放置于管式加热
炉中,加热固定时间、固定温度后取出,称量干燥后的陶
瓷舟质量为 m_3 ,此时该焊条的湿度为:

$$M\% = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \tag{9}$$

式中: $M\%$ 为焊条湿度, m_1 为空陶瓷舟质量, m_2 为加入焊
条粉末后的陶瓷舟质量; m_3 为干燥后的陶瓷舟和焊条
质量。

3.3 实验方法与结果

将焊条放置于恒温恒湿箱中存放不同时间,制备不
同湿度的焊条。

在环境温度为 30 ℃、湿度为 31%的条件下,根据图
12 搭建的实验平台和国标失重法,对焊条直径为
 $\Phi 3.2$ mm、 $\Phi 4.0$ mm 的 J507 和 J607 焊条进行实验。

开始时传感器内不放置焊条,记录传感器初始电容值为 4.8 pF。其次在传感器内放置备用焊条,得到对应焊条的实际电容值 C 。测量得到的实际电容值和仿真电容值不一致,主要由于仿真和实验的激励电压频率设置不一样,当进行有限元分析时,在静电场中创建传感器模型,理论电容可看作与电压频率无关。实际环境下,LCR 电桥需要设定激励频率,导致实际电容值改变,本次测量设置的激励电压为 5 V,频率为 100 kHz。

采用本系统检测不同湿度焊条的电容值并记录,通过国标失重法标定该焊条的湿度值,分析两组实验数据,得到不同型号焊条电容值—湿度值的对应关系,如图 14 所示。

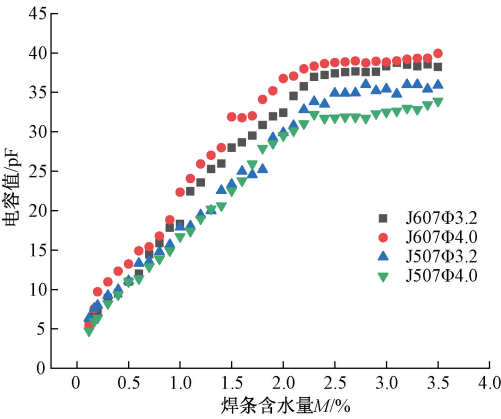


图 14 焊条湿度与传感器电容值对应关系

Fig. 14 Relation between electrode humidity and sensor capacitance

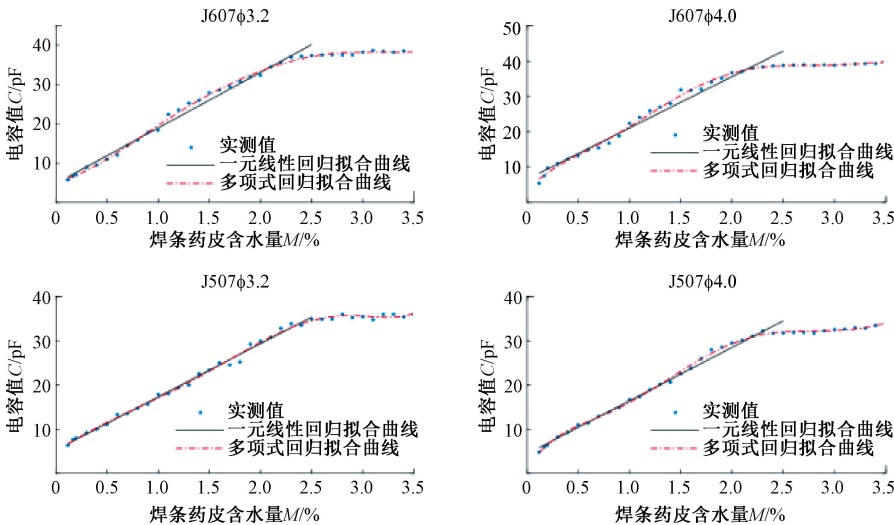


图 15 电容值和湿度的线性回归

Fig. 15 Linear regression of capacitance value and humidity

4 结 论

仿真结果显示,叉指电极的金属化率、叉指长度、叉

不同型号焊条电容值和湿度的线性回归方程如图 15 所示。

在实际应用中,用手、眼等能感触到焊条湿度过大的情况,该焊条已经不具备焊接条件,直接舍弃。由上述实验数据可知,焊条湿度与对应电容值在可用范围内为是一次函数关系:

$$C_i = PM_i + H \tag{10}$$

式中: C_i 为焊条电容值,单位为 pF; M_i 为焊条湿度,单位为%; P 与 H 为常数,电容值与湿度值的拟合函数及各项参数如表 7 所示。

表 7 拟合函数的各项参数

焊条型号	拟合方程	RMSE	拟合优度
J607Φ3.2	$C = 14.175M + 4.8198$	1.218	0.9876
J607Φ4.0	$C = 14.5341M + 6.5393$	1.769	0.9756
J507Φ3.2	$C = 12.0283M + 5.2852$	0.6951	0.9942
J507Φ4.0	$C = 12.0504M + 4.3805$	0.9108	0.9904

从实验结果中发现,纵坐标的截距为焊条湿度趋近于 0% 时所测得的焊条电容值。当焊条湿度在 0.117%~2.5% 范围内,焊条电容值和焊条湿度值基本呈线性关系,当焊条湿度高于 2.5% 时,焊条电容值仍会随着湿度值增大,但增加速率逐渐变小,这表明焊条湿度增加到一定值后,焊条湿度趋于稳定,即焊条吸水达到饱和。

焊条药皮厚度为 2 mm 左右,检测深度小于焊条药皮厚度,避免了叉指电极和焊条焊芯之间产生并联电容,有效降低了传统电容式传感器在检测焊条湿度中因焊条焊芯偏心产生的并联电容的影响。

本文使用的柔性叉指电容式传感器电极外表面包裹 PET 薄膜,将叉指电极全部覆盖不与空气接触,减少测量过程中对电极的磨损、提高了传感器使用寿命。由实验可知,叉指电容式传感器电容值与焊条湿度有良好的线性关系,焊条湿度在 0%~2.5% 时传感器对焊条湿度具有灵敏性。

参考文献

- [1] PADHY G, KOMIZO Y I. Diffusible hydrogen in steel weldments-a status review [J]. Transactions of JWRI, 2015,42(1): 39-62.
- [2] HARWIG D D, LONGENECKER D P, CRUZ J H. Effects of welding parameters and electrode atmospheric exposure on the diffusible hydrogen content of gas shielded flux cored arc welds [J]. Welding Journal, 1999, 78(9): 314s-321s.
- [3] BUNNELL D, LIU S, OLSON D. Low hydrogen SMAW electrode water content determination using electrical capacitance [J]. Journal of Materials Engineering, 1990, 12(2): 159-165.
- [4] 朱亮,张爱华. 电容法测定焊剂含水量 [J]. 焊接学报, 2001(1): 69-71.
- ZHU L, ZHANG AI H. Determination of moisture content in flux using electrical capacitance [J]. Journal of Welding, 2001(1): 69-71.
- [5] 张爱华,何文山,贾彬彬. 测量低氢型焊条药皮含水量的电容传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2018(2): 7-12.
- ZHANG AI H, HE W SH, JIA B B. Electrical capacitance sensor for water content measurement of low hydrogen type electrode coating [J]. Instrument Technology and Sensors, 2018(2): 7-12.
- [6] 瞿惠琴,谷永先,吴孔培,等. 平面电容传感器液位检测系统设计 [J]. 激光技术, 2021, 45(1): 48-52.
- QU H Y, GU Y X, WU K P, et al. Design of liquid level detection system based on planar capacitive sensor [J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 48-52.
- [7] REN Y, QING L M, LI L, et al. Facile synthesis of highly conductive polymer fiber for application in flexible fringing field capacitive sensor [J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2022, 342.
- [8] WANG F F, TAN Y H, PENG H Y, et al. Investigations on the preparation and properties of high-sensitive BaTiO₃/MwCNTs/PDMS flexible capacitive pressure sensor [J]. Materials Letters, 2021, 303.
- [9] 孙英,刘非,翁玲,等. 同面多叉指电极结构的电容式三维力触觉传感器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2020(2): 6-10.
- SUN Y, LIU F, WENG L, et al. Design of capacitive tri-axial force tactile sensor with coplanar multi-interdigital electrode [J]. Instrument Technology and Sensors, 2020(2): 6-10.
- [10] 于正慧,张志杰,陈昊泽,等. 基于平面电容传感器的复合材料缺陷检测研究 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 7-12.
- YU ZH H, ZHANG ZH J, CHEN H Z, et al. Research on composite material defect detection based on planar capacitance sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(2): 7-12.
- [11] 唐忠林,杨建华. 新型叉指电容设计建模与实验研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(10): 16-22.
- TANG ZH L, YANG J H. Designing modeling and experimental research on novel interdigital capacitor [J]. Instrument Technology and Sensors, 2021(10): 16-22.
- [12] THAO N. Capacitive sensing: Water level application [D]. Helsinki, Finland: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2016: 9-21.
- [13] 崔云先,薛帅毅,周通,等. 薄膜瞬态温度传感器的制备及性能研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3028-3035.
- CUI Y X, XUE SH Y, ZHOU T, et al. Fabrication and performance analysis of thin film transient temperature sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3028-3035.
- [14] WANG C, ALI L, MENG F Y, et al. High-accuracy complex permittivity characterization of solid materials using parallel interdigital capacitor-based planar microwave sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(5): 6083-6093.
- [15] 刘小康,李佳豪,彭凯,等. 平面二维时栅位移传感器的理论模型与误差分析 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 111-121.
- LIU X K, LI J H, PENG K, et al. Theoretical model and error analysis of two-dimensional time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 111-121.
- [16] 焦敬品,李亮,何存富,等. 厚度渐变结构介电性能测试用变间距叉指型相邻电容传感器设计 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 1-9.
- JIAO J P, LI L, HE C F, et al. Design of improved interdigital capacitive proximity sensor used for dielectric property detection of thickness gradual changed structure [J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 1-9.
- [17] 温银堂, 尹申辉, 王震宇, 等. 阵列式电容传感器优化设计及灵敏特性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 229-234.
- WEN Y T, YIN SH H, WANG ZH Y, et al. Optimization design and sensitivity analysis of array capacitance sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 229-234.
- [18] 张西良, 胡国强, 徐云峰. 固相浓度电容传感器特性分析与结构参数优选[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(6): 589-595.
- ZHANG X L, HU G Q, XU Y F. Characteristic analysis and structural parameter optimization of solid-phase concentration capacitance sensor[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2021, 39(6): 589-595.
- [19] 何葵东, 薄宇, 闫孟达. 基于神经网络的继电保护设备健康状况分析模型[J]. 通信电源技术, 2019, 36(9): 58-59.
- HE K D, BO Y, YAN M D. Health analysis model of relay protection equipment based on neural network[J]. Communication Power Technology, 2019, 36(9): 58-59.
- [20] 乔文超, 王红雨, 王鸿东. 基于 BP 神经网络的无人机 IMU 多传感器冗余的补偿算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 19-28.
- QIAO W CH, WANG H Y, WANG H D. Compensation algorithm for UAV IMU multi-sensor redundancy based on BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 19-28.
- [21] 王挨荣, 陈汉章, 郭微, 等. 基于 BP 神经网络和遗传算法的综采面工艺参数优化研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 62-67.
- WANG AI R, CHEN H ZH, HUO W, et al. Study on optimization of process parameters of fully mechanized coal face based on BP neural network and genetic algorithm[J]. Coal Engineering, 2022, 54(4): 62-67.
- [22] 刘伟, 李有红, 王赞, 等. 无线电能传输系统多目标遗传算法参数优化[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 86-90.
- LIU W, LI Y H, WANG Y, et al. Multi-objective genetic algorithm parameter optimization for radio energy transmission system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 86-90.
- [23] DEVANATHAN C, SURESHBABU A. Multi objective optimization of process parameters by firefly algorithm during the friction stir welding of metal matrix composites [J].

Transactions of FAMENA, 2021, 45(1): 117-128.

作者简介



王俊琴, 2019 年于西北师范大学获得学士学位, 现就读于兰州理工大学, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: wangjunqin315@163.com

Wang Junqin received B. Sc. from Northwest Normal University in 2019. Now she is a M. Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. Her main research interest include detection technology and automation devices.



张爱华 (通信作者), 1991 年于兰州理工大学获硕士学位; 2005 年于西安交通大学获博士学位, 现为兰州理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、模式识别与智能系统、电路与控制系统。

E-mail: zhangaihua@lut.edu.cn

Zhang Aihua (Corresponding author) received her M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 1991 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2005. Now she is a professor at Lanzhou University of Technology. Her main research interests include detection technology and automation devices, pattern recognition and intelligent systems, Circuits and control systems.



祁靖, 2017 年于江苏大学获得学士学位, 现就读于兰州理工大学, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: 1064053598@qq.com

Qi Jing received her B. Sc. from Jiangsu University in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at Lanzhou University of Technology. Her main research interests include detection technology and automation devices.



朱亮, 1989 年于兰州理工大学获硕士学位, 2005 年在兰州理工大学获博士学位, 现为兰州理工大学教授。主要研究方向为材料强度及韧性、变形及断裂、焊接工艺及焊接设备控制。

E-mail: zhul@lut.cn

Zhu Liang received his M. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 1991, and Ph. D. degree from Lanzhou University of Technology in 2005. Now he is a professor at Lanzhou University of Technology. His main research interests include material strength and toughness, deformation and fracture, welding process and control of welding equipment.