

引用格式:王 丽. 应力腐蚀裂纹涡流定量检测的多目标评价方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 105—108

Wang Li. Quantitative detection of stress corrosion cracking based on a multi-objective optimization from eddy current testing signals[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(7): 105—108

矿冶工程

应力腐蚀裂纹涡流定量检测的多目标评价方法

王 丽

(西安邮电大学理学院,西安 710121)

摘 要 足够精度的应力腐蚀裂纹无损定量方法研究,对确保核电站等大型结构的安全、高效运行具有重要应用价值。但是,由于微观结构复杂,应力腐蚀裂纹涡流定量检测常出现欠评估和多个极值的问题。为了充分利用多频涡流检测信号信息,提高重构精度,提出了应力腐蚀裂纹定量的多目标评价策略和求解多目标优化的 ε -约束法。几个模拟的应力腐蚀裂纹重构结果表明,所提策略在提高应力腐蚀裂纹深度的定量精度上是有效的。

关键词 涡流检测 应力腐蚀裂纹 定量检测 多目标优化

中图分类号 TG115.28; **文献标志码** A

应力腐蚀裂纹(stress corrosion cracking, SCC)是金属材料在某些特定介质环境和拉伸应力作用下发生的延迟破裂现象。其扩展是渐进缓慢的,但这种亚临界状况达到某一临界尺寸后,剩余断面不能承受外载,就会突然出现泄漏甚至断裂,故其隐蔽性强、危害性大。随着石油、化工、冶金、核电等高安全性工业部门的发展,应力腐蚀裂纹的危害性已成为突出问题^[1]。裂纹定量无损检测在确保安全性的基础上可提高设备利用率,因此有着重要的经济价值。

应力腐蚀裂纹定量无损检测方法主要有超声检测、涡流检测(eddy current testing, ECT)等。由于焊接部位柱状晶各向异性对超声信号的影响,超声方法对核电结构中应力腐蚀裂纹的检测存在精度问题,且难以探出表面浅裂纹。而涡流检测方法由于具有速度快、非接触、不需要耦合剂、对材料的各向异性不敏感等优点,在实际应力腐蚀裂纹定量问题上被寄予厚望,有望成为超声检测的一个有效补充^[2]。涡流检测在裂纹定量,尤其是裂纹长度和横截面特征的识别上,已取得一些成果^[3-7]。然而,由于SCC本身复杂的形态和逆问题的不适定性,对于一些深度较大的裂纹常出现对深度的欠评估

现象^[8,9]。

SCC深度的欠评估问题,其中的一个原因是裂纹深度方向的电导率变化被忽略,而裂纹电导率与裂纹深度对涡流信号有相似的影响。因此,为了减少裂纹定量中电导率对涡流信号的影响,本文提出了基于多频ECT信号的多目标评价方法,逐步精确裂纹深度方向的电导率分布。事实上,利用不同频率的ECT信号特征,逐步得到裂纹电导率信息,相当于逐步缩减了逆问题的解空间范围,因此所提策略有望提高SCC深度的定量精度。

1 SCC 定量的多目标评价方法

裂纹定量可归结为一个均方误差极小的最优化问题

$$\min \varepsilon(c, \sigma) = \sum_{i=1}^N |Z_i^{\text{mea}} - Z_i^{\text{sim}}(c, \sigma)|^2 \quad (1)$$

式(1)中, Z_i^{mea} 和 $Z_i^{\text{sim}}(c, \sigma)$ 分别是检测信号和计算信号, c 是裂纹形状参数, σ 是裂纹区域电导率分布, N 是扫描点个数。基于模型的数值方法常用来求解此优化问题。然而,利用单频ECT信号,在SCC深度定量上,常出现多个极值点,即逆问题的不适定性。

在裂纹定量中,测量信息的充分利用在提高重构精度上有着重要作用。数值结果表明,不同频率的ECT信号对不同深度的裂纹参数具有不同的敏感度。一般地,高频激励信号对裂纹表层信息比较敏感,而低频ECT信号中则包含了裂纹的

2017年7月30日收到 陕西省教育厅专项科研计划项目(15JK1677)和陕西省自然科学基金研究计划面上项目(2017JM1015)资助

作者简介:王 丽(1976—),副教授。研究方向:电磁场及其逆问题数值计算、电磁无损检测。E-mail: wl_3691@163.com。

深层信息。由此,为了充分利用多频 ECT 信号信息,提出了 SCC 重构的多目标评价方法,其目标函数定义为

$$\varepsilon(c,\sigma) = \{f_1(c,\sigma), f_2(c,\sigma), \cdots, f_n(c,\sigma)\} \tag{2}$$

式(2)中,第*i*个目标函数 $f_i(c,\sigma)$ 是(1)式中第*i*个激励频率的检测信号与预测信号的均方误差,并且按频率大小依次排列。 ε -约束法将此多目标优化问题转化为单目标约束优化问题,主要步骤:首先,求解单目标优化问题 $\min f_1(c,\sigma)$,得到最优解 (c^1,σ^1) 。第二步,添加约束条件 $f_2(c,\sigma) \leq f_2(c^1,\sigma^1) - \varepsilon_{11}$ 到第二个目标函数 $\min f_2(c,\sigma)$,得到最优解 (c^2,σ^2) ,其中 (c^1,σ^1) 是对应于第一个目标的最优解, ε_{11} 是给定的误差界。第三步,添加约束条件 $f_3(c,\sigma) \leq f_3(c^1,\sigma^1) - \varepsilon_{21}$, $f_3(c,\sigma) \leq f_3(c^2,\sigma^2) - \varepsilon_{22}$ 到目标函数 $\min f_3(c,\sigma)$,求得最优解,其中 ε_{21} 和 ε_{22} 是误差界。最后,重复上述过程,直到满足终止条件。

2 数值实验与结果

利用上述策略以及基于有限元-边界元混合法的数据库型快速算法^[10],开发了裂纹定量的数值计算程序。首先,采用带有电导率变化的平面裂纹模型,即裂纹参数仅包括裂纹长度方向的边界点位置,深度和裂纹电导率分布,而裂纹宽度采用一个固定值,这是因为数值模拟和实验结果均表明^[7,11],裂纹宽度可以近似为裂纹电导率。为了验证程序正确性,首先取一个长度为 14 mm、深度为 5 mm、电导率分布为 2%、5% 和 7% 的 SCC 平面数值模型作为例子,其多频 ECT 信号作为目标信号。为了简化问题,如上所示,从裂纹表层到底部,设裂纹深度方向的电导率用 3 个参数来描述。从高频到低频,包括 714 kHz、182 kHz、80 kHz、45 kHz 和 30 kHz 的多频 ECT 信号依次用来优化目标函数 $f_i(c,\sigma)$ ($i = 1, 2, \cdots, 5$)。为了评估 ECT 计算信号和测量信号之间的关系,定义相对误差

$$\varepsilon_r = \sum_m |Z_m^{mea} - Z_m^{sim}(c,\sigma)|^2 / \sum_m |Z_m^{mea}|^2 \tag{3}$$

基于 ε -约束法的多目标评价策略的实施步骤如下:

首先,对于单目标优化问题 $\min f_1(c,\sigma)$ (对应于 714 kHz 激励频率的 ECT 信号),利用基于粒子群优化算法和共轭梯度法的混合算法^[11],预测裂纹的形状参数和电导率分布。相对均方误差不超过 0.004 时,在 5 次重复的重构过程中,预测的裂纹深度是 3.48 ~ 4.05 mm,与 5 mm 的真实裂纹深度相比较,存在明显的欠评估现象。

其次,对应于 182 kHz 激励频率的 ECT 信号,优化问题的目标函数是 $\min f_2(c,\sigma)$,约束条件是 $f_2(c,\sigma) \leq f_2(c^1,\sigma^1) - \varepsilon_{11}$,其中 (c^1,σ^1) 是第一个目标函数的最优解, ε_{11} 是给定的误差界,本文取为 $5\%f_2(c^1,\sigma^1)$ 。罚函数法将此约束优化问题转化为无约束优化问题。类似地,利用基于粒子群优化算法和共轭梯度法的混合算法来预测裂纹的形状参数和电导率分布,得到最优解 (c^2,σ^2) 。如表 1 和图 1 所示,在 5 次的重复实验过程中,预测的裂纹深度是 5.02 ~ 5.50 mm,逆问题的不适应性比较明显。

表 1 深度 5.0 mm 的应力腐蚀裂纹重构结果对比
(重复实验中,相对均方误差 < 0.004 时)

Table 1 Reconstruction results for a SCC model of 5.0 mm depth (repeated experiments, relative error < 0.004)

目标数	深度/mm	电导率/%		
		参数 1	参数 2	参数 3
1	3.48 ~ 4.05	2.28 ~ 2.46	3.50 ~ 5.00	6.57 ~ 6.87
2	5.02 ~ 5.50	2.22 ~ 2.29	4.89 ~ 5.09	6.34 ~ 6.95
3	5.02 ~ 5.22	2.11 ~ 2.23	4.90 ~ 5.07	6.23 ~ 6.89
4	4.99 ~ 5.24	1.89 ~ 2.12	5.04 ~ 5.59	6.68 ~ 6.96
5	5.08 ~ 5.10	2.03 ~ 2.10	5.02 ~ 5.12	6.95 ~ 7.03

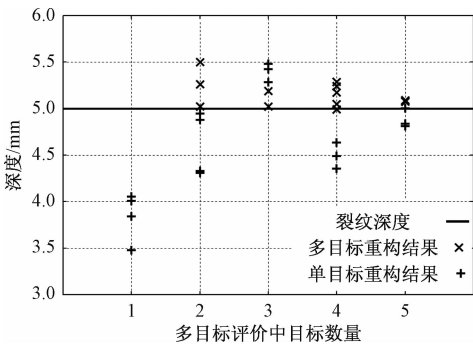


图 1 裂纹深度与模拟结果的对比(重复实验中,相对均方误差 < 0.004 时)

Fig. 1 Comparison of simulation and the crack depth (repeated experiments, relative error < 0.004)

对于第三个目标函数 $\min f_3(c,\sigma)$,ECT 信号的激励频率是 80 kHz。类似地,其约束条件是 $f_3(c,\sigma) \leq f_3(c^1,\sigma^1) - \varepsilon_{21}$ 和 $f_3(c,\sigma) \leq f_3(c^2,\sigma^2) - \varepsilon_{22}$,其中 (c^2,σ^2) 是第二个目标的最优解, ε_{21} [取为 $5\%f_3(c^1,\sigma^1)$] 和 ε_{22} [取为 $5\%f_3(c^2,\sigma^2)$] 是给定的误差界。在 5 次重复的实验过程中,预测的裂纹深度是 5.02 ~ 5.22 mm,而同样在 5 次重复重构过程中,单频 80 kHz 的激励信号重构的裂纹深度是 5.28 ~ 5.48 mm。由此可见,利用多频 ECT 信号的多目标评价方法,可以逐步缩小逆问题的解空间范围,也即是减缓了裂纹定量中逆问题的不适应性。

重复上述过程,直至得到 30 kHz 激励信号对应的优化问题的最优解。在 5 次重复的实验过程中,使用多目标评价方法重构的裂纹深度是 5.08 ~ 5.10 mm,而单频 30 kHz 的 ECT 信号重构的裂纹深度是 4.81 ~ 5.13 mm(如图 1)。如图 2、图 3 所示,尽管检测信号与预测信号均相符很好,但是多目标评价方法重构的裂纹深度相对于常规单频 ECT 方法更接近于真值。

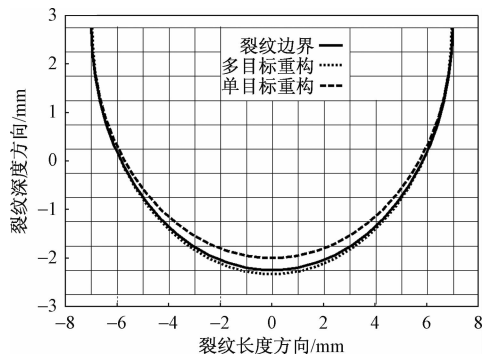


图2 重复实验中,多目标重构最优结果与单目标重构最优结果的对比

Fig. 2 Comparison of the optimal results of the multi-objective and single-objective optimization

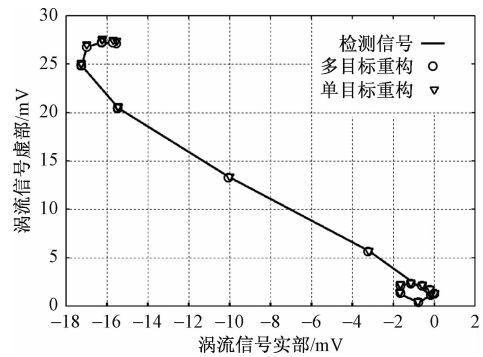


图3 涡流信号的检测与模拟结果对比
(重复实验中,相对均方误差 < 0.004 时)

Fig. 3 Comparison of eddy current signals from the simulation and true (repeated experiments, relative error < 0.004)

另一个例子是裂纹长 14 mm、深 4.5 mm 的椭圆形裂纹模型。裂纹区域变化的电导率分布是 2%、5% 和 12%。模拟的多频 ECT 信号(包括 714 kHz、182 kHz、45 kHz 和 30 kHz)作为重构的目标信号。在相对均方误差不超过 0.004 时,本文所提新策略重构的裂纹深度是 4.46 ~ 4.47 mm,而单频 30 kHz ECT 信号的重构结果是 4.43 ~ 4.82 mm。如表 2 所示,随着优化问题目标数的增加,也即是检测信息的增加,裂纹定量中逆问题的不适定性在降低。因此,本文所提出的新策略在提高应力腐蚀裂纹深度的定量精度上是有效的。

表2 深度 4.5 mm 的应力腐蚀裂纹重构结果对比
(重复实验中,相对均方误差 < 0.004 时)

Table 2 Reconstruction results for a SCC model of 4.5 mm depth (repeated experiments, relative error < 0.004)

目标数	深度/mm	电导率/%		
		参数 1	参数 2	参数 3
1	3.58 ~ 4.06	2.03 ~ 2.13	4.50 ~ 5.25	8.25 ~ 13.6
2	4.23 ~ 4.44	2.10 ~ 2.13	4.29 ~ 4.45	8.12 ~ 8.46
3	4.46 ~ 4.58	2.04 ~ 2.05	4.42 ~ 4.44	8.44 ~ 8.47
4	4.46 ~ 4.47	2.23 ~ 2.27	4.33 ~ 4.37	11.2 ~ 11.5

3 结论

提出了基于 ECT 信号的应力腐蚀裂纹定量的多目标评价方法。为了充分利用多频 ECT 信号信息,利用 ε -约束法将多目标优化问题转化为单目标约束优化问题,然后利用罚函数法将此约束目标优化问题转化为无约束优化问题,最后利用粒子群优化算法和共轭梯度法的混合方法,分别重构裂纹的形状参数和电导率分布。几个模拟的 SCC 裂纹模型被重构,结果表明,本文所提出的策略可以降低逆问题的不适定性,进而提高 SCC 深度的重构精度。

参 考 文 献

1 丁训慎. 核电站蒸汽发生器传热管的腐蚀与防护. 腐蚀与防护, 2000; 21(1): 15—37
Ding Xunshen. Corrosion and protection of nuclear power plant steam generator tubes. Corrosion & Protection, 2000; 21(1): 15—37

2 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测. 北京: 科学出版社, 2008
Ren Jilin, Lin Junming. Electromagnetic nondestructive testing. Beijing: Science Press, 2008

3 Yusa N, Chen Z, Miya K, *et al.* Large-scale parallel computation for the reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals. NDT & E International, 2003; 36(7): 449—459

4 Cheng W, Kanemoto S, Komura I, *et al.* Depth sizing of partial contact SCC from ECT signals. NDT & E International, 2006; 39(5): 374—383

5 Yusa N, Cheng W, Chen Z, *et al.* Generalized neural network approach to eddy current inversion to the analysis of real cracks. NDT & E International, 2002; 35(8): 609—614

6 Kojima F, Kubota N, Kobayashi F, *et al.* Shape recovery of natural crack using evolutionary programming related to eddy current testing. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2002; 12(15): 243—247

7 Yusa N, Hashizume H. Evaluation of stress corrosion cracking as a function of its resistance to eddy currents. Nuclear Engineering and Design, 2009; 239(12): 2713—2718

8 Yusa N, Huang H, Miya K. Numerical evaluation of the ill-posedness of eddy current problems to size cracks. NDT & E International, 2007; 40(3): 185—191

9 Yusa N, Miya K. Discussion on the equivalent conductivity and resistance of stress corrosion cracks in eddy current simulations. NDT &

E International, 2009; 42(1): 9—15

10 Chen Z, Miya K. ECT inversion using knowledge based forward solver. Journal of Nondestructive Evaluation, 1998; 17(3): 167—175

11 Wang L, Chen Z. Reconstruction of stress corrosion cracks using

high-dimension hybrid optimization algorithm from eddy current signals. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016; 52(4):1511—1517

Quantitative Detection of Stress Corrosion Cracking Based on a Multi-objective Optimization from Eddy Current Testing Signals

WANG Li

(College of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121,China)

[**Abstract**] Enhancement of the quantitative nondestructive testing technology for stress corrosion cracking inspection is very important in order to guarantee both the safety and the high efficient operation for large mechanical systems. However, reconstruction of crack profiles with eddy current testing signals often underestimates the depth of stress corrosion cracking because of its complicated geometry and conductivity property. A multi-objective optimization strategy is proposed for the multi-frequency eddy current testing inversion to improve the reconstruction accuracy of stress corrosion cracking depth. A ε -constraint method is applied to solve the multi-objective optimization in order to fully utilize the information from the measured eddy current testing signals of different frequencies. Reconstruction with simulated eddy current testing signals of stress corrosion cracking is conducted and the results reveal that the proposed strategy is effective to improve the sizing precision of a deep stress corrosion cracking.

[**Key words**] eddy current testing stress corrosion cracking quantitative detection multi-objective optimization