

基于神经网络的锅炉压力容器压力管道裂纹检测方法

■ 孙博

(淄博市特种设备检验研究院)

摘要：受到锅炉压力容器结构及压力管道裂纹位置不确定性的制约，管道裂纹检测精度偏差过大。为了解决这一问题，从

检测压力管道结构应力与裂纹位置结构应力分布特征入手，引入神经网络处理思路，通过对锅炉压力容器压力管道裂纹神经网络有限元分析，获得待处理信息的神经网络构建关联参量；然后基于神经网络对锅炉压力容器压力管道裂纹进行应力分析，获得裂纹位置上的应力特征及其周边应力差异；接着对所得参量进行裂纹数据神经网络处理，获得裂纹所在区域；最后完成压力容器压力管道裂纹定位。实验结果表明，提出方法切实有效，并且能够在最短时间内完成裂纹检测过程，具有较高的可实现性，适合大范围推广。

0引言

锅炉压力容器在石油、化工、冶金等行业中被广泛应用，在工业生产中发挥着重要作用。但由于其结构复杂、运行环境恶劣[1-2]，如果不能及时发现存在的安全隐患，容易导致严重的事故。因此，对锅炉压力容器状态检测对于保障设备安全运行十分重要。

由于锅炉压力管道自身结构特点，传统的无损检测方法存在局限性。例如，利用X射线对锅炉压力管道进行检测时[3-4]，容易受到操作人员主观因素的影响；而在利用超声波检测时[5-6]，由于缺陷的产生时间和位置具有随机性，受外界因素影响较大；利用磁粉检测时，缺陷的分布通常呈非均匀状态[7-8]，并且检测面较小、干扰因素多、难以定量等。受上述诸多因素的影响，造成压力管道检测方法整体检测误差偏大，亟需一种检测方法解决上述问题。随着人们对神经网络研究的深入，发现神经网络可以有效解决压力容器压力管道裂纹检测过程中扰动因素的分离问题，进而提升裂纹检测精准度，基于此特点，研究基于神经网络的锅炉压力容器压力管道裂纹检测方法。

1方法的具体实现

1.1 锅炉压力容器压力管道裂纹神经网络有限元分析

提出方法首先对锅炉压力容器内气压参量进行神经网络构建,通过神经网络分布结构上的神经元,对其裂纹位置上的气压参量进行精细化感知,将压力动态检测问题转化为裂纹变化有限元问题。根据裂纹表面神经网络分布满足的麦克斯韦方程组^[9]可得:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times D = \rho \quad (4)$$

式中: H 代表活跃系数; J 代表压力分布密度; D 代表异常压力系数值; t 代表神经网络分布时间; E 代表神经网络分布尺度; B 代表压力感知系数; ρ 代表锅炉压力容器自身的压力分布; ∇ 代表哈密顿算子。

根据神经网络空间下压力分布对应神经元特征引入库伦规范, 可得到神经网络空间与压力分布之间的关系:

$$B = \nabla \times A \quad (5)$$

考虑到过滤压力容器结构材料性质对其影响, 在构建的神经网络激励下, 当管道压力分布系数为 μ 时, 活跃系数 H 与感知系数 B 之间的关系为:

$$B = \mu H \quad (6)$$

根据哈密顿算子公式: $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \Delta A$ 对式(1)、式(5)联立计算, 可以得到管道表面压力分布的神经元微分方程:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot A = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (7)$$

由于激励强度系数值小于临界系数8, 可以忽略偏差压力系数对其感知效果的影响, 经过整理得到式(7)的简化式为:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \cdot A = J \quad (8)$$

神经网络的神经结构为轴对称神经结构场^[10], 如图1所示。利用坐标系对式(8)进行分析, 压力系数对应神经元的入角感知系数为 ω 时, 锅炉压力容器压力管道表面的裂纹神经元感知分布微分方程为:

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right) = J_s - j\omega \sigma A \quad (9)$$

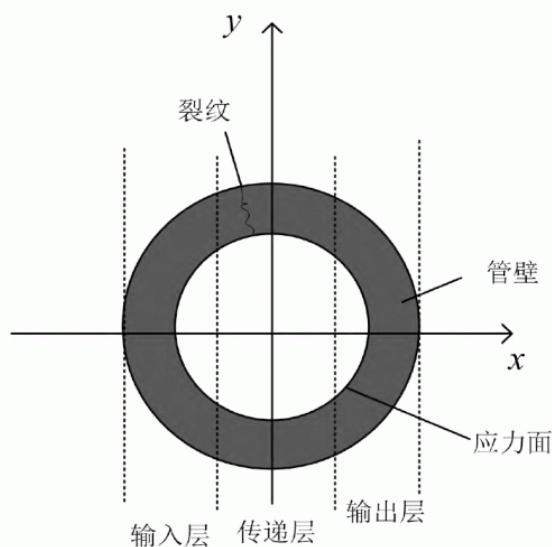


图1 轴对称神经结构场

式中: σ 代表目标压力管道的裂纹压力分布密度; J_s 代表激励神经元的分布密度; A 代表分布在各个不同位置上的神经元压力关联矢量。

1.2 基于神经网络的锅炉压力容器压力管道裂纹应力分析

基于上述分析结果, 根据应力线性分布特征^[11], 网络神经结构下压力管道裂纹应力情况分析如下。

假设压力管道裂纹位置上对应神经网络一次表面应力与二次表面应力分别为 P_m 、 Q_m , 裂纹位置上管道结构面一次弯曲应力与二次弯曲应力分别为 P_b 、 Q_b , 则对应压力管道裂纹表面应力的神经网络线性应力分布与纵向结构应力线性分布为:

$$P_m, Q_m = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} \quad (10)$$

$$P_b, Q_b = \sqrt{\frac{\sigma_1}{\sigma_2}} \quad (11)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别代表神经网络下不同应力系数对应裂纹所在位置的分量。

若在裂纹应变条件下存在两种应力分布情况, 则两种应力分布对应的分量分别为 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$, 则裂纹位置上的表面应力 $\Delta\sigma_m$ 与弯曲应力 $\Delta\sigma_b$ 为:

$$\Delta\sigma_m = \Delta\sigma_1 \Delta\sigma_2 \quad (12)$$

$$\Delta\sigma_b = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} \quad (13)$$

考虑应力连续作用情况, 则压力管道裂纹应力的累积分布形式可以表达为:

$$P_z = k_m P_m + k_b P_b (Q_m + Q_b) \quad (14)$$

式中: k_m 、 k_b 分别代表神经网络下锅炉压力容器压力管道裂纹表面应力与弯曲应力的分布算子。

1.3 裂纹数据神经网络处理

基于上述分析, 对其裂纹位置特征进行进一步神经网络处理。一般情况下, 神经网络下裂纹信息分布位置参量 Δt 具有差异性, 根据此特征可通过神经网络信号对管道表面进行覆盖^[12], 通过记录信号分布参量与反馈参量之间的特征差异, 确定压力管道裂纹准确位置。在这个过程中, 神经网络层中的隐

藏层数据分布会根据全局压力状态生成神经元激励信号, 其中包含部分扰动信息。因此, 需要通过小波变换将其滤除^[13-14]。根据神经网络层级结构, 变换参量将通过信号多模特征分解为多个压力信号反馈分量, 其公式表示如下:

$$\varphi = \sqrt{2} \sum WQ \quad (15)$$

式中: φ 代表压力信号小波分解函数; W 代表信号反馈尺度函数; Q 代表裂纹位置信息对应的信号差异系数。通过对所得压力信号特征的差异值计算, 可以得到小波数据包, 在神经网络结构作用下, 实现数据处理。

1.4 压力容器压力管道裂纹定位

为了保证裂纹位置精度的情况下减少计算量, 将区域信息划分为具有相同特征的两组分量, 将分量信息长度设定为神经网络该层神经元总量的2倍^[15], 即 $2t$, 假设前半部分位置信息特征弱信号为 a , 后半部分信号为 b , 则全局完整裂纹位置信号回波特征的神经网络映射为:

$$r_{ab} = \frac{1}{n} \sum a(i)b(j) \quad (16)$$

式中: n 代表裂纹位置反馈信号的总量; i 代表前半部分位置信息特征弱信号数量; j 代表后半部分位置信息特征弱信号数量。若反馈信号总量对应系数值小于0, 说明检测区域内压力管道表面存在裂纹, 结合该区域范围内神经网络神经元分布位置的唯一性, 其裂纹位置计算公式如下:

$$d = \frac{1}{2}(D - v\Delta t) \quad (17)$$

式中: D 代表锅炉压力容器压力管道检测面的总长度; v 代表检测信号传输速率; Δt 代表裂纹信息分布位置参量。

2应用测试

对提出检测方法进行实例数据的测试，通过实例数据构建测试场景，在搭建的场景中，与引入的3种不同检测方法的性能对比。其中引入的3种检测方法作为参照方法参与测试，分别基于平衡电磁的压力管道检测方法，标记为参照方法A；基于图像边缘特征的压力管道裂纹检测方法，标记为参照方法B；基于图像差异特征的管道裂纹识别方法，标记为参照方法C；提出方法标记为验证方法。根据实例数据配置及测试要求动态生成测试样本，完成相关指标数据量的测试、对比、分析，并得出解释结论。

2.1设置测试条件

测试数据采用某一供热企业锅炉数据作为基础数据，其中用于测试数据采集传感器偏差参量根据锅炉管道内介质温度不同有所不同，具体参量如表1所示。另外，管道内介质涡流对裂纹压力的动态影响系数，如表2所示。

表1 测试数据采集传感器偏差参量

介质温度/℃	传感器信号强度/mV	激励电流值/mA
87	91.73	55.33
81	91.06	55.15
75	92.38	55.28
69	92.70	55.30
63	92.10	55.21
58	93.38	55.43
51	93.60	55.23
45	93.95	54.06
39	94.38	55.28
37	94.48	54.09

表2 管道内介质涡流对裂纹压力的动态影响系数

介质温度/℃	传感器信号强度/mV
88	86.11
86	86.07
82	86.03
80	85.06
78	85.03
76	84.98
74	84.94
72	84.92
70	84.86
68	84.81

2.2裂纹检测误差测试

根据上述设定的测试参量，由测试工具随机生成一组压力管道裂纹数据，并由四种方法对其进行裂纹检测，检测结果分别对应图2-5。

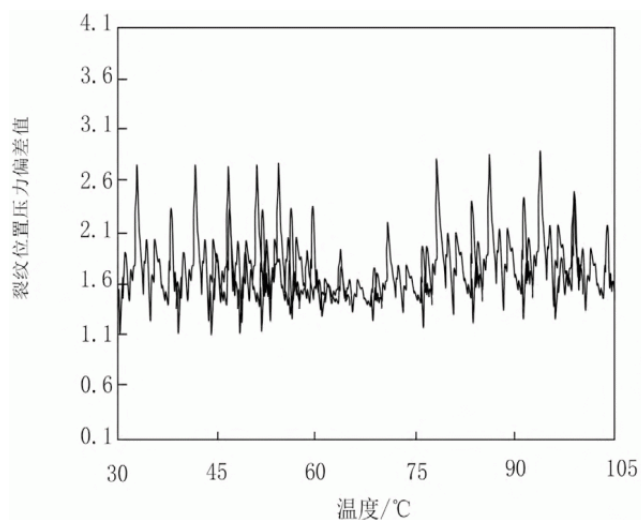


图2 参照方法A压力管道裂纹检测误差曲线分布

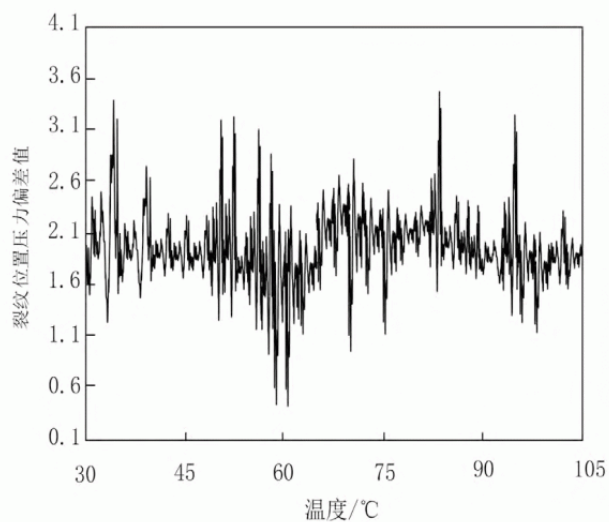


图3 参照方法B压力管道裂纹检测误差曲线分布

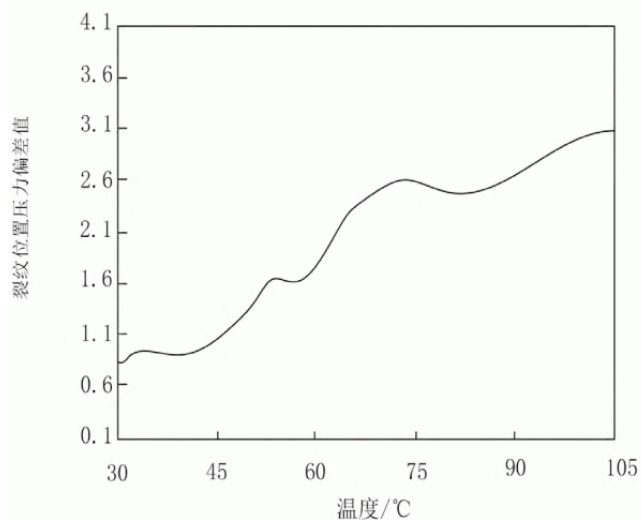


图4 参照方法C压力管道裂纹检测误差曲线分布

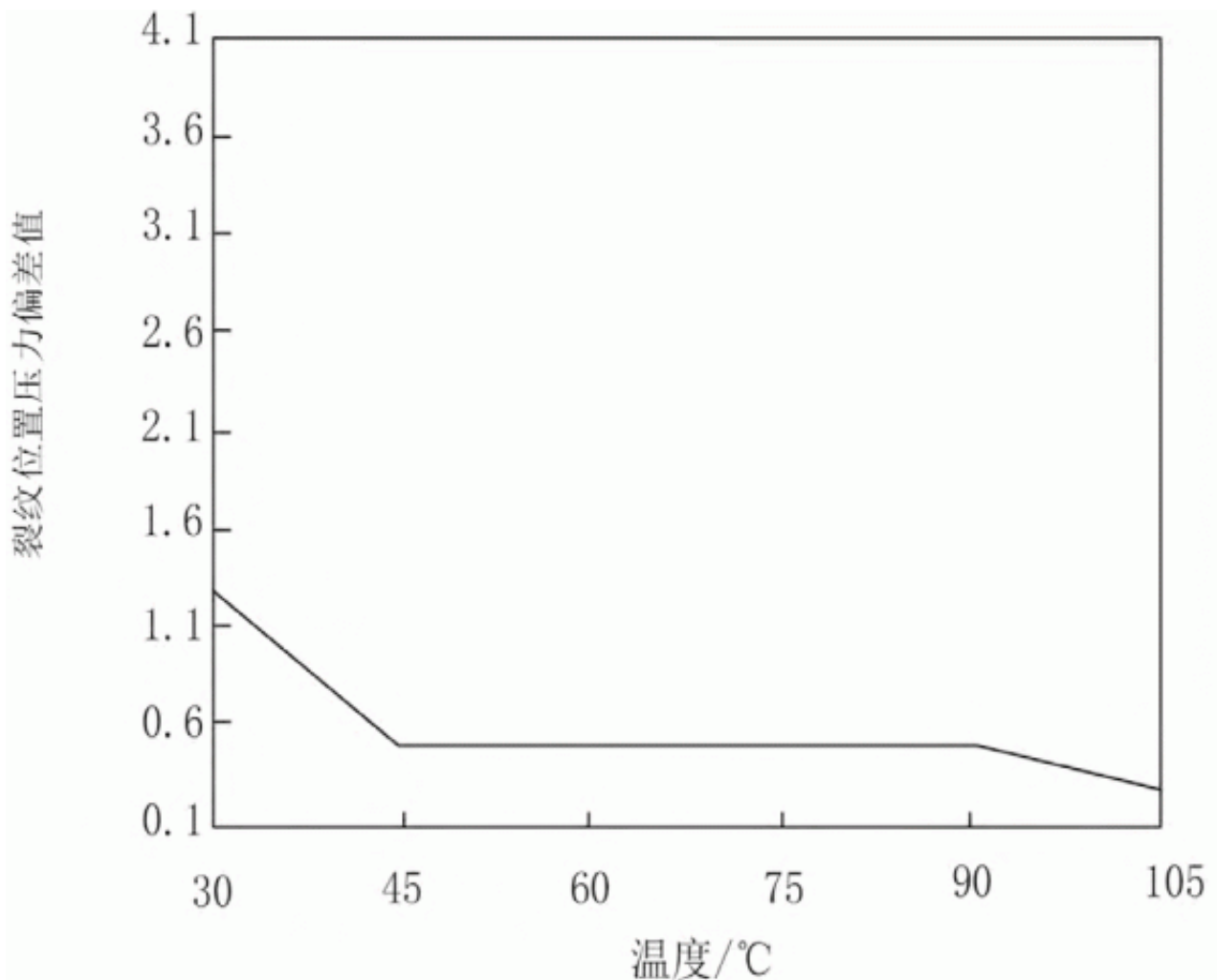


图5 验证方法压力管道裂纹检测误差曲线分布

通过观察对比发现，参照方法A与参照方法B所得曲线特征相似度较高，说明两种检测方法在裂纹感知层面属于同一属性。因此分析两种检测方法测试结果，经过观察指标变化发现，参照方法B的波动频率大于参照方法A，说明裂纹识别过程中存在大量扰动信息，从数值分布上看，两种检测方法的效果十分相近，参照方法A略好于参照方法B；与图2图3不同，图4与图5可以明显看出两种方法的检测属相具有线性特征，其区别在于图4曲线对应的参照方法C属于递增曲线，其过程中可以看到扰动因素；因此对应误差值随着管道温度上升，压力不断增大，相应裂纹位置上的结构应力随之增大，在扰动因素作用下检测可信度降低，误差不断增大；与之相反，图5中曲线属于递减线性特征，且看不到扰动因素，说明该方法所得参量经过滤波处理，因此所得参量的可信度较高，误差值随温度的增长，会达到临界值，从而所得参量将一直保持最优值状态，直至压力管道温度打破管道裂纹位置能够承受的峰值温度。综上所述，根据测试所得误差值由小到大排列，参测方法的检测性能排序为验证方法、参照方法C、参照方法A、参照方法B。

2.3检测方法可信度测试

按照上述测试样本参量配置标准，循环释放40组相同数据，重复时间间隔为15s，获得40组测试误差统计数据，每两组误差数据作为1组进行差值对比，误差值为0，标记为√；误差值不为0，标记为×；以此获得20组可信度统计表，如表3所示。最后统计√数量，数量越多，说明可信度越高。

表3 压力管道裂纹检测方法可信度测试结果

组	验证方法	参照方法A	参照方法B	参照方法C
1	√	√	√	√
2	×	×	√	√
3	×	×	√	×
4	√	×	√	√
5	√	×	×	√
6	√	×	√	√
7	√	×	√	×
8	√	×	√	√
9	√	√	√	√
10	√	√	√	×
11	√	√	√	×
12	√	√	√	×
13	√	√	×	×
14	√	√	×	×
15	√	√	×	×
16	√	√	×	×
17	×	×	√	√
18	×	×	√	×
19	√	×	×	√
20	×	×	√	√

根据表3所示的数据来看，验证方法√标记总数为15组；参照方法A√标记总数为9组；参照方法B√标记总数为14组；参照方法C√标记总数为10组。经过统计参与测试的4种压力管道裂纹检测方法的可信度排序按照由高到低的顺序为：验证方法、参照方法B、参照方法C、参照方法A。

3结语

基于锅炉压力容器压力管道应力分布特征对裂纹的影响，引入神经网络算法对其裂纹位置应力及其相关参量进行神经网络构建，在神经网络空间下完成裂纹位置检测准确性的优化。提出检测方法虽然能够解决现阶段锅炉高压容器高压管道裂纹检测误差大的问题。但是，从方法识别范围及其约束宽容度角度来说，该方法并不完善。这是因为神经网络中每一个神经元均受到自身生命周期的限制，导致对应局部神经网络对裂纹位置上应力变化的感知灵敏度降低，进而存在二次误差风险。为了避免这一问题的发生，在未来的研究中，可以基于压力管道材质特征，引入电磁信号作为

神经网络数据载体，进而减轻对神经网络的依赖程度，提升裂纹数据精准度，完善检测方法。

参考文献

- [1]赵建政,宋伟斌.基于小波域的锅炉压力容器压力管道裂纹X射线检测方法[J].自动化与仪表,2023,38(1):86-89,104.
- [2]强敏娜,张良,王永乐,等.在用压力管道裂纹检验中无损检测技术分析[J].山西化工,2023,43(1):160-161+166.
- [3]姚俊峰.锅炉和压力容器及压力管道检验中裂纹问题探讨[J].设备管理与维修,2023(2):94-95.
- [4]王明庭.压力管道施工监检常见问题分析及改进措施[J].中国特种设备安全,2022,38(12):58-62.
- [5]王冲,王彦军,周顺,等.基于有限元研究某站场天然气压力管道应力分析及缺陷评估[J].当代化工研究,2022(24):116-118.
- [6]林寅.某食品车间蒸汽锅炉压力管道开裂原因分析[J].化工装备技术,2022,43(6):13-15.
- [7]林三福.管道焊口熔铜裂纹PAUT检测图谱特性和磨开验证分析[J].运输经理世界,2022(34):152-154.
- [8]高聪.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题分析[J].中国设备工程,2022(19):158-160.
- [9]郑于贤.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题[J].化学工程与装备,2022(9):270+269.
- [10]王长新,陈金忠,辛佳兴,等.基于SSA-BP神经网络的管道裂纹涡流识别研究[J].石油机械,2022,50(8):118-125.
- [11]郭素琴.锅炉压力容器压力管道检验中的裂纹问题研究[J].中国新技术新产品,2022(14):79-81.
- [12]冉蓉,徐兴华,邱少华,等.基于深度卷积神经网络的裂纹检测方法综述[J].计算机工程与应用,2021,57(9):23-35.
- [13]蔡勤,李继承,戚政武,等.基于脉冲涡流(瞬变电磁)技术的带包覆层压力管道壁厚检测研究[J].热加工工艺,2023,52(2):21-26.
- [14]关静,楼飞.基于边缘轮廓的管道裂纹缺陷检测算法研究[J].计算机与数字工程,2022,50(5):1103-1108.
- [15]苏林,马雪莉,崔德荣,等.基于周向励磁的管道缺陷漏磁信号仿真分析[J].电焊机,2022,52(3):20-28.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/208938.html>