

DOI: 10.3901/JME.2013.18.078

# 基于信息熵的轧辊裂纹声发射三维定位方法\*

路俏俏<sup>1,2</sup> 黎敏<sup>1</sup> 王晓景<sup>1</sup> 徐金梧<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083;

2. 鞍钢股份有限公司 鞍山 114021)

**摘要:** 在平整机的轧制过程中, 轧辊表面承受巨大的接触应力、交变应力和摩擦力作用, 易产生裂纹。在复杂载荷的作用下, 裂纹会成为疲劳核心, 其尖端的应力急剧增加并导致裂纹扩展, 严重时会造成断辊事故发生。同时, 裂纹的不断扩展伴随着应力波的释放, 产生声发射(Acoustic emission, AE)现象。利用声发射技术对平整机轧辊裂纹进行定位, 不需要全辊身进行逐点扫描, 检测效率高, 实时性好。针对平整机轧辊的声发射三维定位中存在的定位“多源性”干扰问题, 提出基于信息熵的轧辊裂纹声发射三维定位方法。利用信息熵对声发射参数进行权重的量化, 进而获得评价轧辊状态的综合指标; 根据正常辊综合指标的分布, 确定干扰源的指标范围; 利用此范围将裂纹辊中的干扰源有效剔除, 进而提高裂纹辊的定位精度。利用该方法对某钢厂冷轧平整机的正常辊和裂纹辊的试验数据进行分析, 处理前后的结果验证了方法的有效性, 为准确及时地检测出裂纹的位置信息、保证轧辊的安全生产提供有力的数据支持。

**关键词:** 轧辊裂纹 声发射 三维定位 信息熵

**中图分类号:** TG333 TH17

## 3D Location of Acoustic Emission to Roll Cracks Based on Information Entropy

LU Qiaoqiao<sup>1,2</sup> LI Min<sup>1</sup> WANG Xiaojing<sup>1</sup> XU Jinwu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021)

**Abstract:** In the rolling process of the temper mill, the roll surface is always subjected to the huge contact stress, alternating stress and friction. It results in some cracks easily. Under the impact of the complex force, the cracks turn into the core of fatigue. In this way, the stress of the cracks tip increases sharply and leads to crack-propagation. It even results in the roll breakage and brings about production accident in severe cases. Meanwhile, the cracks grow with the rapid releasing of strain wave, which causes the phenomena of acoustic emission(AE). So the acoustic emission technology is adopted to locate the cracks in the roll of temper mill. The advantage of the technology is that cracks are located without point by point scanning and this technology is a high efficiency test and has good real-time performance. According to the “multi-sources” in 3D location of the roll, the information entropy is proposed to calculate the score according to the acoustic emission parameters. Then the composite indicator is obtained to evaluate the normal state of the roll and the range of the interference sources’ composite indicator is confirmed. Interference sources of the roll with cracks are efficiently rejected using this range, therefore the location accuracy of the roll cracks is improved. The experimental data of the normal roll and the roll with cracks in the temper mill of cold rolling in a steel factory is analyzed. The location result is compared with the original result, which shows that the method is effective to detect the location information of the cracks accurately and timely and provide strong support for the safety in production of the roll.

**Key words:** Crack in the roll Acoustic emission 3D location Information entropy

## 0 前言

平整机轧制是对成品带材进行的小伸长率加

工, 可提高带材板形质量和改善其力学性能。在轧制过程中, 平整机轧辊表面承受巨大的接触应力、交变应力和摩擦力的作用, 使得轧辊表面及次表面易诱发裂纹的产生<sup>[1]</sup>。如果未能准确检测裂纹的存在并及时进行磨削处理, 则在下一次轧制过程中, 这些裂纹将成为疲劳核心, 即在复杂载荷的共同作

\* 国家自然科学基金(51004013, 50905013)和中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-AS-12-003)资助项目。20130124 收到初稿, 20130522 收到修改稿

用下, 裂纹尖端的应力急剧增加并超过材料的允许应力而向轧辊内部扩展, 严重时会出现断辊等现象, 造成生产事故。因此, 准确及时检测出裂纹的信息对保证轧辊的安全生产起到重要作用。

通常, 对轧辊的检测都是其工作下线后在磨辊车间内离线进行的。早期主要是依靠磨床操作人员和轧辊管理人员用肉眼或简单的磁粉探伤、着色探伤<sup>[2]</sup>来检测轧辊裂纹的存在, 但漏检率和误检率较高, 由此引发的轧制事故也时有发生。目前多是采用自动涡流探伤与超声波检测<sup>[3]</sup>相结合的方式对轧辊裂纹检测, 降低了人为因素的影响。但基于表面波原理的超声波探伤仪的有效深度一般在 1~2 mm, 所以每次磨削量的设定值通常为 1.5 mm, 对全辊身进行磨削后, 需要利用超声波再次进行探测, 若发现裂纹, 则需要按照 1.5 mm 的设定值再次进行磨削, 直到满足轧辊许用上线轧制的标准为止。由此可以看出, 现有的检测手段耗时长, 效率仍有待进一步提高。

声发射(Acoustic emission, AE)技术作为一种动态无损检测方法, 对材料和结构的裂纹非常敏感, 已被广泛应用于设备的在线监测及疲劳裂纹扩展特性的研究中<sup>[4-6]</sup>。材料中因裂纹扩展、塑性变形或相变等引起应变能快速释放而产生的应力波现象称为声发射。具体来说, 轧辊表面受到交变载荷的作用, 易产生疲劳裂纹。当带有裂纹的材料在受到力的作用时, “围绕”在裂纹的边界区附近就会产生应力场的聚集。这种应力的集中作用将使裂纹尖端处的材料产生变形, 甚至破坏。随着裂纹的不断扩展, 伴随着应力波的释放过程, 则会产生声发射现象。利用高精度声发射传感器拾取该应力波信号, 可以确定裂纹声发射源的位置, 不需要全辊身进行逐点扫描, 检测效率高, 实时性好。

本文以平整机工作辊的辊身裂纹缺陷为研究对象, 通过静止压靠的方式使裂纹扩展, 产生声发射信号, 并进行缺陷定位。但是, 由于工作辊存在凸度, 使得上下两个轧辊在压靠过程中会产生局部应力集中, 由此而产生声发射信号。此外, 在弯辊力的作用下会使得辊间产生摩擦, 这也是典型的声发射源。因此, 所采集到的声发射信号具有“多源性”, 至少包含了由裂纹扩展、局部应力集中、摩擦而产生的三类声发射信号。本文重点解决的是定位数据的预处理问题: 即利用信息熵剔除后两种干扰信号的影响, 尽可能多地只保留由裂纹扩展而产生的声发射信号, 并在此基础上进行三维定位计算, 进而提高裂纹定位的精度。

## 1 声发射三维定位原理

固体材料内部缺陷的产生和扩展, 通常会以应力波的形式释放出能量, 并向四周传播, 这是典型由缺陷产生的声发射源。为了在固体材料表面某一范围测量出缺陷的位置, 可以将几个声发射传感器按一定的几何关系放置在固定点上, 组成传感器阵列, 然后在检测过程中根据各个传感器检测到的声发射信号的特征参数来计算出声发射源的位置。

根据传感器阵列布局方式的不同, 可以分为一维线定位(多用于焊缝缺陷的定位)、二维平面定位(多用于薄板类缺陷定位)、三维空间定位(多用于气罐、岩石等复杂结构的缺陷定位)<sup>[7]</sup>。针对轧辊的结构特点, 采用三维空间定位的方法来检测轧辊裂纹的存在。利用声发射技术对裂纹进行三维定位的原理具体描述如下。

(1) 建立一个三维坐标系, 4 个传感器  $S_0 \sim S_3$  的位置如图 1 所示。其中,  $S(x, y, z)$  为声发射源。设 4 个传感器的空间坐标分别为:  $S_0(0, 0, 0)$ ,  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $S_3(x_3, y_3, z_3)$ 。

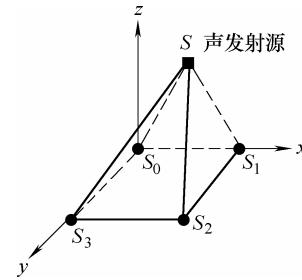


图 1 三维定位原理图

(2) 选择其中 1 个传感器为基准, 测量其他 3 个传感器与该基准传感器的时间差。

(3) 假设声发射信号在该三维空间的传播速度为恒定值, 根据时差原理<sup>[8]</sup>: 声发射源到各个传感器的距离差等于时差  $\Delta t$  和波速  $v$  的乘积, 列出如下空间几何关系方程式(1)~(3)

$$|SS_1 - SS_0| = \left| \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right| = v\Delta t_{01} \quad (1)$$

$$|SS_2 - SS_0| = \left| \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} - \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right| = v\Delta t_{02} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} |SS_3 - SS_0| = & \left| \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \right. \\ & \left. \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \right| = v\Delta t_{03} \quad (3) \end{aligned}$$

式中,  $\Delta t_{01}$  为声发射源到达传感器  $S_0$  和  $S_1$  的时间差;  $\Delta t_{02}$  为声发射源到达传感器  $S_0$  和  $S_2$  的时间差;  $\Delta t_{03}$  为声发射源到达传感器  $S_0$  和  $S_3$  的时间差。

(4) 联立求解式(1)~(3), 则可以得出声发射源的空间坐标  $S(x, y, z)$ 。

从求解过程中可以看出, 至少需要有 4 个传感器能采集到声发射事件才可以求解出一个定位点坐标  $S(x, y, z)$ 。波速和时间差的准确性, 直接影响了定位结果的准确性。其中, 波速可以通过在已知距离的两个传感器间进行断铅实验而测量得到, 而时间差则可以根据各传感器所接收到的声发射波形信号来进行计算<sup>[9-10]</sup>。此外, 在实测过程中, 不可避免地受到噪声干扰, 也会有多类声发射源的存在。因此, 需要研究新的方法对参与定位计算的声发射事件进行预处理, 剔除其他干扰因素所产生的声发射事件, 增强声发射事件与裂纹的对应性, 进而提高裂纹的定位精度。

## 2 基于信息熵的 AE 干扰源剔除方法

### 2.1 信息熵的基本原理

熵在信息论中又称为平均信息量, 它是信息无序度的度量, 信息熵越大, 信息的无序度越高, 其信息的效用值越小; 反之, 信息熵越小, 信息的无序度越小, 信息的效用值则越大。因此, 可以利用信息熵来评估信息的效用值大小<sup>[11]</sup>。

根据信息论的定义, 在一个信息通道中传输的第  $i$  个信号的信息量

$$I_i = -\ln P_i \quad (4)$$

式中,  $P_i$  为信号  $i$  出现的概率。

如果有  $n$  个信号, 其出现的概率分别为  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , 这  $n$  个信号的平均信息量, 即熵  $e$  可以用式(5)来表示

$$e = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (5)$$

### 2.2 基于信息熵的参数权重计算

设  $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$  为第  $i$  次观察评价中的第  $j$  项参数的观察数据。对于给定的参数  $j$ ,  $x_{ij}$  的差异越大, 那么该项参数对被评价对象的作用就比较大, 即该项参数包含的信息越多。信息的增加意味着熵的减少, 因此熵可以作为一个权重指标来度量这种信息量的大小。用信息熵确定权重的步

骤如下。

(1) 计算第  $j$  项参数下第  $i$  个被评价对象的特征比重  $P_{ij}$ , 如式(6)所示

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (6)$$

(2) 计算第  $j$  项参数的熵值  $e_j$ , 如式(7)所示

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (7)$$

式中,  $k>0, e_j>0$ 。

(3) 计算参数  $x_j$  的差异性系数

$$g_j = 1 - e_j = 1 + k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (8)$$

$g_j$  越大, 则说明该参数的作用越大。在式(8)中, 需要确定常数项  $k$ 。设对于给定的参数  $j$ , 在其观测数据  $x_{ij}$  都相等的情况下, 按式(6)可以计算得到特征比重  $P_{ij}=1/n$ , 且其对应的熵值为

$$e_j = k \ln n \quad (9)$$

此时, 参数  $j$  对于被评价对象起到的作用最小, 则  $g_j=0$ , 可由(8)推算出

$$k = 1/\ln n \quad (10)$$

因此, 差异性系数  $g_j$  可以表示为

$$g_j = 1 + \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (11)$$

(4) 对差异性系数进行归一化处理, 获得权重值

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \quad j=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

权重  $w_j$  越大, 则说明该项参数  $j$  越能反映信号的信息特征; 反之, 权重越小, 则说明该参数刻画信号特征的能力越弱。

### 2.3 声发射干扰源的剔除

由声发射的原理可知, 声发射源的快速能量释放会产生声发射事件, 每个声发射事件可以用少数几个特征参数来表示, 主要包括上升时间、计数、能量、持续时间、幅值、方均根(Root mean square, RMS)、平均信号电平(Average signal level, ASL)、信号强度、绝对能量等。通过式(12)可以获得衡量这 9 个特征参数能力大小的权重。权重越大, 则说明这个特征参数越能有效反映声发射事件的物理过程; 反之, 若权重越小, 则说明该特征参数刻画声发射事件的能力越弱。通过信息熵的方法对上述特征值进行权重评价后, 由式(13)可以得到一个综合指标

$$\xi_0 = \sum_{j=1}^9 E_j w_j \quad (13)$$

式中,  $E_j$  表示声发射事件的第  $j$  个特征参数的测量值。利用信息熵方法进行轧辊数据分析的流程如图 2 所示。

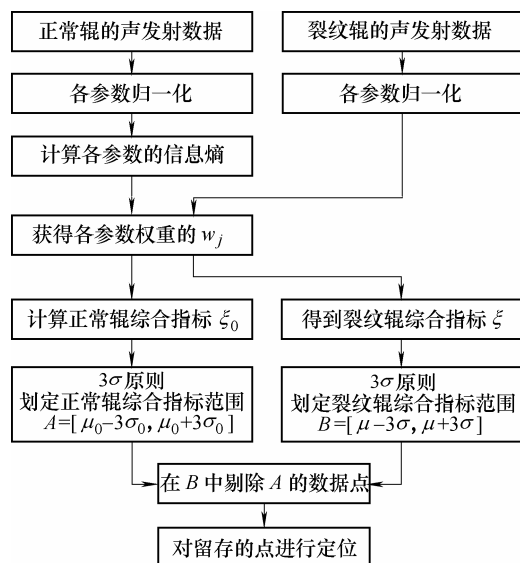


图2 利用信息熵方法进行轧辊数据分析的流程

当轧辊处于不同的状态时, 声发射事件所对应的特征参数值也会随之发生改变。可以通过计算正常辊的综合指标来确定无缺陷状态下的声发射特征参数值的综合范围  $A$ 。按照相同的计算流程, 可以获得裂纹辊综合指标范围  $B$ , 在  $B$  中剔除  $A$  的数据点后完成裂纹位置的定位。

需要说明的是,  $3\sigma$  原则是由统计学原理而来的, 其中  $\sigma$  表示待分析数据的标准偏差,  $\mu$  表示数据的平均值。当数据落在  $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$  的区间内时, 则说明有 99.73% 的数据满足正态分布, 而落在区间外的数据则为小概率事件, 即在一次试验中不易发生, 一旦发生则认为是数据出现了异常。因此, 利用  $3\sigma$  原则可以获得综合指标的有效分布范围。

### 3 轧辊裂纹的声发射定位试验

#### 3.1 试验对象介绍

对某钢厂冷轧平整机的正常辊和裂纹辊进行分析, 相关参数如表 1 所示。裂纹轧辊的材质为 Mc5, 表示含 5%Cr 锻钢冷轧辊, 有效淬硬层深度在半径方向上已达到 40 mm。对于裂纹辊而言, 在距离操作侧 0.15 m 处有多条裂纹, 长度为 5~30 mm 不等。试验前的辊径为 491.38 mm, 磨削后的辊径为 483.98 mm, 间接说明裂纹的深度为 7.4 mm。

通过静止压靠的方式来对轧辊施加外部载荷, 由下支撑辊按照 0.1 MN/20 s 的速率对工作辊施加 0~6 MN 的压靠力, 然后再加载 135 kN 的弯辊力,

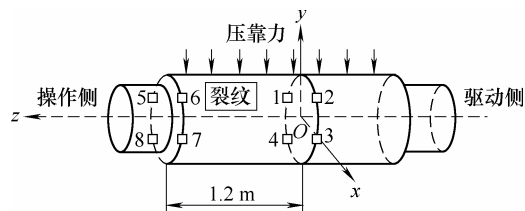
模拟实际工况中在轧制力的影响下裂纹扩展的过程。内部带有裂纹的材料在受到应力作用时, 应力场必定要“围绕着”裂纹的边界而集中起来。应力的集中作用将使裂纹尖端的材料产生变形, 甚至破坏, 而这时材料的其他部位还处于弹性范围以内。因此, 压靠力的作用下会使得裂纹扩展, 而且裂纹是强的声发射源。

表 1 轧辊的相关信息

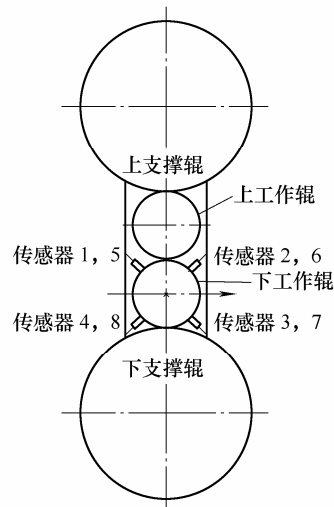
类型	正常辊	裂纹辊
厂家	常冶轧辊	BGH
材质	Mc5	Mc5
直径/mm	487.54	491.38
长度/mm	3 883/1 550	3 883/1 550
裂纹位置	—	距离操作侧 150
裂纹长度/mm	—	多条 5~30
下线磨完后的辊径/mm	—	483.98

#### 3.2 检测系统及参数

利用美国 PAC 公司的多通道声发射采集系统进行数据采集, 通过磁座将 8 个 DP15I 传感器固定在轧辊的指定位置, 如图 3 所示。在轧辊两侧分别布置一圈传感器, 两圈传感器的间距为 1.2 m, 每圈上的 4 个传感器间互成 90°。传感器布置位置的相关参数如表 2 所示, 其中  $R$  表示轧辊的半径。采集与定位参数分别如表 3、4 所示。



(a) 沿辊身长度方向的视图



(b) 沿轧辊轴向的视图

图3 传感器布置示意图

表2 传感器坐标设置

传感器编号	x 坐标/m	y 坐标/m	z 坐标/m
传感器 1	-0.707R	0.707R	0
传感器 2	0.707R	0.707R	0
传感器 3	0.707R	-0.707R	0
传感器 4	-0.707R	-0.707R	0
传感器 5	-0.707R	0.707R	1.2
传感器 6	0.707R	0.707R	1.2
传感器 7	0.707R	-0.707R	1.2
传感器 8	-0.707R	-0.707R	1.2

表3 采集参数

模拟滤波器 门檻	频率/kHz		波形设置		定时参数/ $\mu$ s			
	下限	上限	采样率	采样 长度	峰值定 义时间	撞击定 义时间	撞击闭 锁时间	
/dB	30	100	400	1 MHz	1 000	200	800	1 000

表4 定位参数

定位类型	波速/ (m/s)	事件定义值/m	事件闭锁值/m	过定位值/m
三维定位	5 300	1.2	2.4	0.12

按照上述设定的参数,首先对正常辊进行测试,然后按照相同的步骤,再对裂纹辊完成数据采集。

### 3.3 结果分析

利用信息熵对正常辊测得的数据进行声发射特征参数的评价,结果如表5所示。

表5 声发射特征参数的评价

特征	上升时间	计数	能量	持续时间	幅值
权重	0.273 2	0.074 7	0.103 0	0.050 1	0.084 5
参数重要性	1	7	4	9	6

特征	RMS	ASL	信号强度	绝对能量
权重	0.096 8	0.066 8	0.103 4	0.147 0
参数重要性	5	8	3	2

从表5可以看出,上升时间、绝对能量、信号强度和能量等4个参数所占的比例较大。由于不同的参数表征声发射事件的能力不同,即权重大小的不同,则可以利用式(13)计算得到综合指标及其上下限,结果如图4所示。从图4中可以看出,正常辊综合指标划定范围为[0.21 0.70]。按照图2的计算步骤,计算得到裂纹辊综合指标的范围为[0.44 1.18],如图5所示。

从图5中可以看出,在裂纹辊的上下限范围内包含了正常辊范围内的数据点,而这部分数据点代表的是由于局部应力集中和摩擦而产生的声发射事件,需要对这部分数据点进行剔除,尽可能多地保

留由裂纹扩展而产生的声发射信号。对保留下的数据点按照式(1)~(3)完成裂纹位置的定位。结果如图6所示。

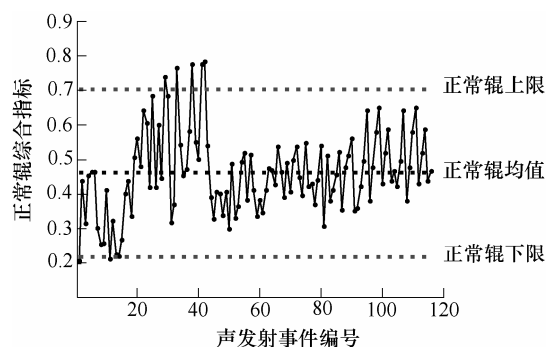


图4 正常辊的综合指标范围

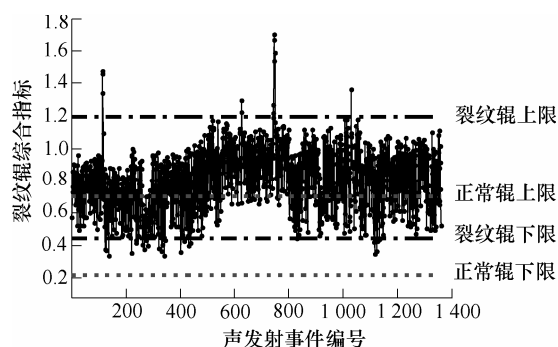
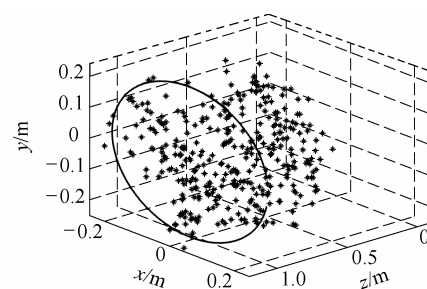
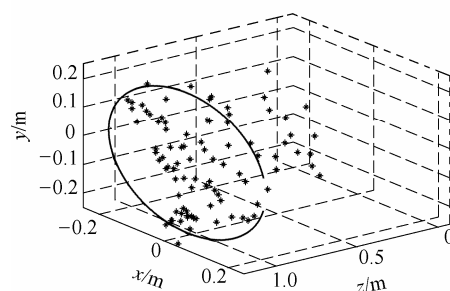


图5 裂纹辊的综合指标范围



(a) 信息熵处理前裂纹辊的定位结果



(b) 信息熵处理后裂纹辊的定位结果

图6 信息熵处理前后裂纹辊的定位结果比较

在图6中,椭圆表示裂纹在z轴方向的位置。在未剔除干扰点之前,数据点都离散地分布在空间区域中,当剔除干扰点后,数据点的分布向椭圆方向集中。将裂纹辊的原始定位及剔除干扰点后的坐标点以概率分布图的形式表现出来,如图7所示。

概率分布图表示各定位点的坐标值落在某个小区间内的次数  $N$ 。 $N$  值越大, 则说明在此位置的声发射源越集中。从图 7 可以看出, 利用信息熵方法剔除干扰点后, 改变最大的是在  $z$  方向上的定位值, 从原来 0.60 m 变化为现在的 1.07 m 的位置, 因为两圈传感器的间距是 1.2 m, 即相当于定位出的裂纹位置距离操作侧为 0.13 m, 这与实际的裂纹位置能够很好地吻合。但在裂纹的深度方向上相差较大, 主要是原因是表面波沿着  $z$  轴方向, 并基本是在相同介质中传播, 且传播路径短, 衰减小, 所以绝大部分能量可以直接被传感器所接收; 而在径向方向则主要是以纵波的形式来传播, 只有被反射回来的能量才能被传感器所接收, 传播路径远, 衰减大; 此外, 纵波在传播过程中, 因轧辊淬硬层与内部材质的不同, 导致波的传播特性发生变化, 所以裂纹的深度方向上定位效果较差, 这是未来需要重点研究的方向。

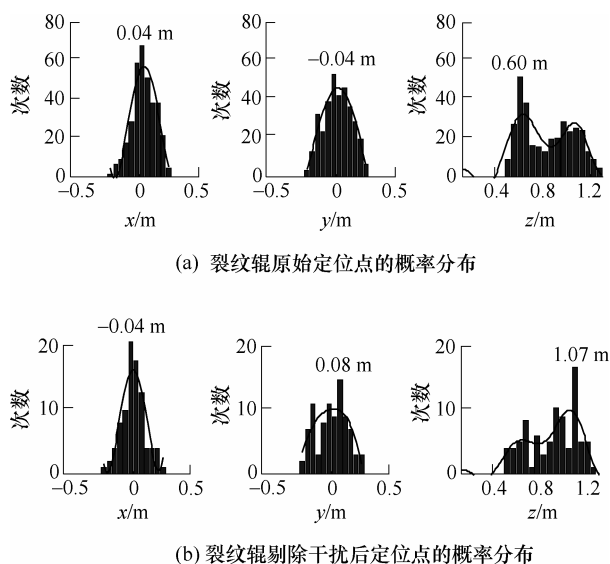


图 7 裂纹剔除干扰前后的定位点的概率分布图

## 4 结论

(1) 针对声发射定位中的“多源性”问题, 提出了基于信息熵的定位方法。利用信息熵对声发射参数实现权重的量化, 并在此基础上获得了评价轧辊状态的综合指标范围, 利用此划定的范围可以有效剔除干扰点, 为实现裂纹辊的准确定位奠定基础。基于信息熵的声发射定位方法可以有效判断出是否存在裂纹, 且在轴向的定位精度较高。

(2) 利用声发射检测技术对轧辊裂纹进行三维定位不需要全辊身进行逐点扫描, 仅需要布置一次传感器即可检测出裂纹位置信息, 检测效率高。可以为目前现场所采用的超声波和涡流探伤等检测方法缩小检测的区域, 在获知裂纹轴向位置的基础上,

进一步提高裂纹深度方向的检测精度。

## 参 考 文 献

- [1] AZEVEDO C R F, NETO J B. Failure analysis of forged and induction hardened steel cold work rolls[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(6): 951-966.
- [2] FUJII Y, MAEDA K. Flaking failure in rolling contact fatigue caused by indentations on mating surface (I): Reproduction of flaking failure accompanied by cracks extending bi-directionally relative to the load-movement[J]. Wear, 2002, 252(9-10): 787-798.
- [3] D'ORAZIO T, LEO M, DISTANTE A, et al. Automatic ultrasonic inspection for internal defect detection in composite materials[J]. NDT & E International, 2008, 41(2): 145-154.
- [4] ROBERTS T M, TALEBZADEH M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(6): 695-712.
- [5] JAYAKUMAR T, MUKHOPADHYAY C K, VENUGOPAL S, et al. A review of the application of acoustic emission techniques for monitoring forming and grinding processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(1): 48-61.
- [6] 郝如江, 卢文秀, 褚福磊. 声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 75-79.  
HAO Rujiang, LU Wenxiu, CHU Fulei. Review of diagnosis of rolling element bearings defaults by means of acoustic emission technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(3): 75-79.
- [7] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(3): 114-117, 125.  
SHEN Gongtian, GENG Rongsheng, LIU Shifeng. Acoustic emission source location[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(3): 114-117, 125.
- [8] MICHLMAYR G, COHEN D, OR D. Sources and characteristics of acoustic emissions from mechanically stressed geologic granular media-A review[J]. Earth Science Reviews, 2012, 112(3-4): 97-114.
- [9] 刘卫东, 张薇, 窦林名. 声发射定位中时差计算研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(4): 127-129.  
LIU Weidong, ZHANG Wei, DOU Linming. Research of the time difference computation in acoustic emission location[J]. Computer Engineering & Science, 2009,

31(4): 127-129.

- [10] 胡昌洋, 杨钢锋, 黄振峰, 等. 声发射技术及其在检测中的应用[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(6): 1-3, 6.

HU Changyang, YANG Gangfeng, HUANG Zhenfeng, et al. AE technology and application in the test[J]. Metrology & Measurement Technique, 2008, 35(6): 1-3, 6.

- [11] 谢平, 杜义浩. 基于信息熵的裂纹转子动力特征分析与诊断方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 195-199.

XIE Ping, DU Yihao. Crack rotor dynamic feature

analysis and diagnosis method based on information entropy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(1): 195-199.

---

作者简介: 路俏俏, 女, 1970 年出生, 高级工程师。主要研究方向为机械/电气设备故障诊断。

E-mail: ansteel.lilylu@gmail.com

黎敏(通信作者), 女, 1980 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为先进检测技术、机械设备故障诊断。

E-mail: limin@ustb.edu.cn



(上接第 77 页)

YI Xianzhong, LIU Haohong, XU Tiegang, et al. 5-axis CNC whirlwind milling method of large-type helix surfaces[J]. Machinery & Electronics, 2010(1): 21-24.

- [13] DONG Yude, LIU Daxin, ZHAO Han, et al. CAD model-based intelligent inspection planning for coordinate measuring machines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(4): 567-583.

- [14] 田世杰, 郭俊杰, 蒋庄德, 等. 一种通用二次旋转曲面轮廓度算法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 62-65.

TIAN Shijie, GUO Junjie, JIANG Zhuangde, et al. General method of determination of rotational conicoid profile error[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 62-65.

---

作者简介: 杨天龙, 男, 1987 年出生。主要研究方向为精密计量测试。  
E-mail: eastlife0108@163.com

赵前程(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为精密计量测试、在线检测和图像处理等。

E-mail: qczhao@163.com