

# 基于全聚焦相控阵超声的叶根槽裂纹检测\*

王 鹏, 王志强, 蔡 晖, 李东江

(西安热工研究院有限公司 西安, 710054)

**摘要** 汽轮机转子受复杂应力和高温的多重作用,常在反 T 型叶根槽部位产生疲劳裂纹,导致断裂事故。针对此问题,提出全聚焦相控阵超声的检测方法。推导了全聚焦相控阵超声的采集及成像公式,制备了专用试件,在端壁上倒圆( $F_1$ 区)采用线切割方法预制人工缺陷,采用全聚焦相控阵超声检测,并与常规超声进行了对比。结果表明,全聚焦相控阵超声检测精度高,适应性强,具有较好的工程应用价值。

**关键词** 汽轮机转子;反 T 型叶根槽;裂纹;相控阵超声;全聚焦成像算法

**中图分类号** TK263.6<sup>+</sup>1; TH878; TG115

## 引 言

汽轮机转子是发电机组的关键部件之一,受复杂应力和高温的多重作用,常在反 T 型叶根槽部位产生疲劳裂纹,导致断裂事故<sup>[1-3]</sup>。针对汽轮机转子反 T 型叶根槽的裂纹检测,通常采用常规超声检测技术,需要更换多种不同参数的常规探头,对检测人员的波形分析能力要求非常高,并且缺陷显示不直观,检测存在盲区,检测效率低<sup>[4-5]</sup>。相控阵超声检测技术是一种先进的超声无损检测方法,通过对超声阵列换能器中各阵元激励时间的控制,实现了波束合成和任意控制焦点位置,具有动态聚焦、电子扫查及扇形扫描等优点,已经快速发展为超声无损检测领域的热点之一<sup>[6-7]</sup>。然而,常规的相控阵超声检测技术的扫描声束有限,使聚焦效果受限。其在焦点附近成像效果良好,而在远离焦点位置的成像分辨率会降低,难以获得准确的成像效果。为此,提出全聚焦相控阵超声检测方法<sup>[8]</sup>。

全聚焦相控阵超声检测方法(total focusing phased array ultrasonic,简称 TFPAU)利用全聚焦成像算法处理相控阵超声阵列的数据,将全矩阵数据集有效地聚焦到成像平面的每一像素点,极大地提高了成像的分辨率和效果。该方法在接收信号后进行二次处理,对检测回波进行再次分析,因而获得更好的缺陷成像效果,能够准确识别缺陷的类型、大

小和位置。国内不少学者对相控阵超声全聚焦成像技术展开研究,并取得了显著成果。周进节等<sup>[9]</sup>研究缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响,结果表明,尽量多地获取缺陷散射的主要能量是改善全聚焦、实现缺陷准确定性定量分析的关键。彭华<sup>[10]</sup>提出利用超声相控阵全矩阵检测技术检查动车车轮缺陷,在一定检测范围内实现了动态实时检测。章东等<sup>[11]</sup>对超声相控阵聚焦无损检测技术进行综述,指出“缺陷散射对全聚焦成像影响”、“全聚焦三维成像技术”及“实时化成像技术”是目前相控阵超声聚焦成像技术的热点和发展趋势。

笔者介绍了全聚焦采集的原理,推导了其成像算法,并将其应用于汽轮机转子反 T 型叶根槽的裂纹检测中。

## 1 全聚焦相控阵超声

全聚焦相控阵超声是在全矩阵数据采集的技术上,采用全聚焦成像技术将检测信号聚焦于检测区域的每一个点上,利用每一个检测点的幅值信息重构检测图像,从而获得更高的分辨率,进而识别缺陷的位置和大小<sup>[9-11]</sup>。因此,在全聚焦相控阵超声中,全矩阵采集和全聚焦成像是两大关键技术。

### 1.1 全矩阵数据采集

全矩阵采集的原理如图 1 所示,其过程是一个

\* 西安热工研究院有限公司研究开发基金资助项目(TN-17-TYK07)

收稿日期:2019-03-16;修回日期:2019-04-26

阵元依次激发并全部采集的过程<sup>[12-14]</sup>。具体操作为: 超声换能器的总阵元数为  $N$ , 首先激发阵元 1, 发射超声波, 所有阵元均接收回波, 依次记录为  $E_{x_1, x_1}(t), E_{x_1, x_2}(t), \dots, E_{x_1, x_N}(t)$ ; 随后激发阵元 2, 所有阵元接收, 得到  $E_{x_2, x_1}(t), E_{x_2, x_2}(t), \dots, E_{x_2, x_N}(t)$ ; 依次类推, 分别激发阵元 3、阵元 4、 $\dots$ , 直至阵元  $N$ , 得到一个  $N \times N$  的全矩阵数据集, 如表 1 所示。表 1 包含了发射阵元序列、接收阵元序列和时间采样点数等在内的所有信息, 实现了对检测物体的全矩阵采集。

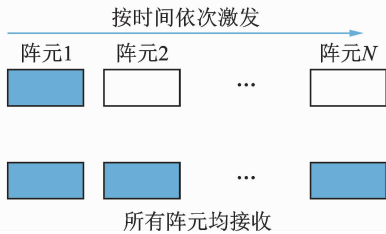


图 1 全矩阵数据采集

Fig. 1 Full matrix data acquisition

表 1 全矩阵数据集  
Tab. 1 Full matrix data

发射	接收			
	1	2	...	$N$
1	$E_{x_1, x_1}(t)$	$E_{x_1, x_2}(t)$	...	$E_{x_1, x_N}(t)$
2	$E_{x_2, x_1}(t)$	$E_{x_2, x_2}(t)$	...	$E_{x_2, x_N}(t)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
$N$	$E_{x_N, x_1}(t)$	$E_{x_N, x_2}(t)$	...	$E_{x_N, x_N}(t)$

### 1.2 全聚焦成像技术

全聚焦成像技术的原理如图 2 所示, 超声换能器利用耦合剂与试块接触, 试块表面中心位置为原点  $O$ , 横坐标  $x$  为试块表面长度, 纵坐标  $z$  为试块高度<sup>[15-16]</sup>。因此, 在试块的  $xOz$  平面上, 检测区域被划分成一定分辨率的像素点, 这些像素点即为声束聚焦点。以  $P(x_p, z_p)$  为例, 该点的超声回波幅值  $F_p$  是所有阵元所收集的全矩阵数据  $E_{x_i, x_j}(t)$  在  $P(x_p, z_p)$  点的叠加, 即

$$F_p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N E_{x_i, x_j}(t_p) \quad (1)$$

其中:  $E_{x_i, x_j}(t_p)$  为  $i$  阵元发射、 $j$  阵元接收的超声回波叠加到  $P(x_p, z_p)$  位置的幅值;  $t_p$  为声波从阵元  $i$  发射经过聚焦点  $P(x_p, z_p)$  到达阵元  $j$  所需的时间。

$$t_p = \frac{\sqrt{(x_p - x_i)^2 + z_p^2} + \sqrt{(x_p - x_j)^2 + z_p^2}}{V} \quad (2)$$

其中:  $x_i, x_j$  分别为发射阵元和接收阵元的横坐标;  $V$  为超声波在试块中的传播速度。

对图像的每一个聚焦点都按照式(1)进行叠加, 算出每个像素点的幅值  $F$ , 利用这些幅值信息得到试块的二维图像, 即为全聚焦相控阵超声检测信号。

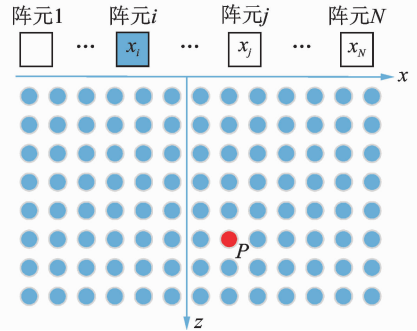


图 2 全聚焦成像算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of total focusing method

## 2 反 T 型叶根槽超声检测实验

为检验全聚焦相控阵超声的效果, 制作专用试件进行裂纹检测, 并与常规超声检测进行对比, 其中常规超声采用 A 型脉冲反射法超声检测。

### 2.1 检测对象

以某型号汽轮机转子反 T 型叶根槽试件为检测对象, 其结构如图 3 所示。材料为 30Cr2Ni4MoV, 高度为 34 mm, 宽度为 24 mm。根据 ABAQUS 动力学分析<sup>[17]</sup>, 试块最大的应力集中点位于侧端壁倒圆部位 ( $F_1$  区), 遂将其作为裂纹检测的重点关注区域。利用线切割分别在  $F_1$  处制备

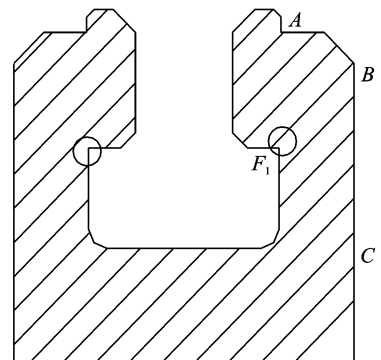


图 3 检测对象、部位及检测面

Fig. 3 Detection object, location and detection surface

人工缺陷,长度均为 20 mm,深度分别为 0.2、0.5、1 和 2 mm,裂纹角度为与水平面的夹角按照 30°、45° 和 60°设计。根据现场条件及超声检测方法的要求,将反 T 型叶根槽试件外表面的上平面(A)、侧面上部(B)及侧面下部(C)安装测量探头进行检测。

## 2.2 检测设备

全聚焦相控阵超声检测现场如图 4 所示,检测设备为 PHSCAN 型相控阵检测仪,其主要参数有:接收/发射晶片数为 32~64;超声范围为 9 900  $\mu$ s;声速范围为 635~15 240 m/s;聚焦法则数为 1 024;增益范围为 0~80 dB;带宽为 0.5~15 MHz。全聚焦探头采用 BFB523(探头标称 7.5S16-0.5 $\times$ 10)和 BFB531(探头标称 10S16-0.5 $\times$ 10)。与之对应的常规超声检测设备为 HS610e,其主要参数有:工作频率为 0.5~15 MHz;声速范围为 100~20 000 m/s;动态范围 $\geq$ 32 dB;分辨力 $>$ 40 dB;超声波探头为 5P5 $\times$ 5K1,5P5 $\times$ 5K0.8。



图 4 全聚焦相控阵超声检测设备

Fig. 4 Testing equipment of TFAU

## 2.3 检测参数

常规超声在上平面、侧面上部及侧面下部的探头如表 2 所示,以不同深度 $\varnothing 1 \times 6$  通孔调整满屏的 80%,再增益 10 dB 为检测基准灵敏度。检测时,常规超声探头放置在检测位置,在有限空间内略作前后移动进行扫查。裂纹识别方法为寻找缺陷回波。全聚焦相控阵超声在上平面和侧面下部的探头均为横波探头 BFB523,在侧面上部位置用的探头为横波探头 BFB531,通过建立距离增益补偿曲线适当提高  $F_1$  区域增益来识别缺陷。

表 2 常规超声检测参数

Tab. 2 Conventional ultrasonic parameters

位置	探头	折射角/(°)	K 值
上平面	5P5 $\times$ 5K1	45	1.0
侧面上部	5P5 $\times$ 5K0.8	39	0.8
侧面下部	5P5 $\times$ 5K0.8	39	0.8

## 3 实验结果分析

### 3.1 上平面检测结果

#### 3.1.1 常规超声检测结果

常规超声检测结果如表 3 所示,在 A 位置利用横波探头 5P5 $\times$ 5K1 对端壁上倒圆部位( $F_1$  区)裂纹进行检测,可清晰识别 0.2 mm 深的人工缺陷,回波幅值随缺陷深度的增加而增大,其中 0.5 mm 时缺陷回波如图 5 所示。

表 3  $F_1$  处裂纹常规超声检测(A 位置)

Tab. 3 Detection  $F_1$ -A by conventional ultrasound

序号	缺陷/ mm	角度/ (°)	波幅/ dB	结果评价
1	无缺陷	—	无缺陷回波	—
2	0.2	45	SL-15	清晰识别,可应用
3	0.5	45	SL-10	清晰识别,可应用
4	1.0	45	SL+0	清晰识别,可应用
5	2.0	45	SL+9.8	清晰识别,可应用

SL 为距离-波幅曲线中的定量线

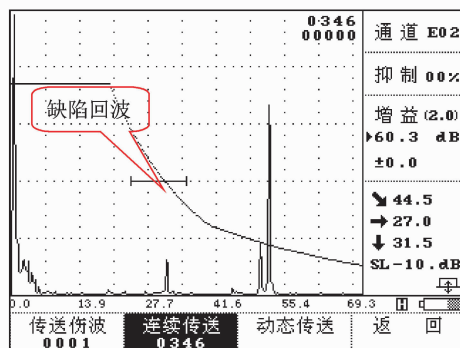


图 5 0.5 mm 裂纹的常规超声检测结果

Fig. 5 Crack 0.5 mm deep by conventional ultrasound

#### 3.1.2 全聚焦相控阵超声检测结果

全聚焦相控阵超声检测结果如表 4 所示,在上平面(A 位置)利用横波探头 BFB523 对端壁上倒圆部位( $F_1$  区)裂纹进行检测,可清晰识别 0.2 mm 深及以上的人工缺陷,回波幅值随缺陷深度的增加而增大,其中 0.2 mm 深、角度为 45°时缺陷回波如图 6 所示。

### 3.2 侧面上部检测结果

#### 3.2.1 常规超声检测结果

当探头放置于侧面上部(B处)位置,用斜探头

表 4  $F_1$  处裂纹全聚焦相控阵超声检测(A 位置)

Tab. 4 Detection  $F_1$ -A by TFPAU

序号	缺陷/ mm	角度/ (°)	A 超增益/ dB	结果评价
1	无缺陷	—	—	—
2	0.2	45	92.1	清晰识别,可应用
3	0.2	60	90.4	清晰识别,可应用
4	0.5	30	124.0	清晰识别,可应用
5	0.5	45	80.1	清晰识别,可应用
6	0.5	60	136.7	清晰识别,可应用
7	1.0	45	111.6	清晰识别,可应用
8	1.0	60	151.3	清晰识别,可应用
9	2.0	45	200.0	清晰识别,可应用

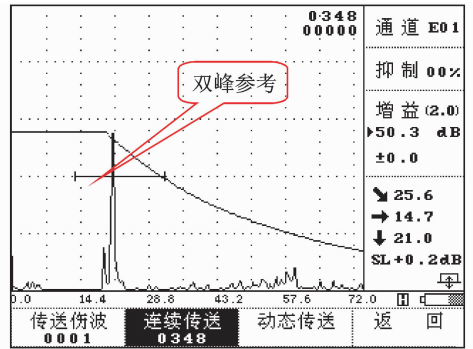


图 7 2 mm 裂纹的常规超声检测结果

Fig. 7 Crack 2 mm deep by conventional ultrasound

工缺陷,回波幅值随缺陷深度的增加而增大;对于 0.5 mm 深的人工缺陷能识别,但识别效果不太好,有一定的参考价值;对于 0.2 mm 深及以下的裂纹无法识别。其中,0.5 mm 深、角度为 60°的裂纹检测图谱如图 8 所示。

表 6  $F_1$  处裂纹全聚焦相控阵超声检测(B 位置)

Tab. 6 Detection  $F_1$ -B by TFPAU

序号	缺陷/mm	角度/(°)	结果评价
1	无缺陷	—	—
2	0.2	45	无法识别,不可行
3	0.2	60	无法识别,不可行
4	0.5	30	能识别,有价值
5	0.5	45	能识别,有价值
6	0.5	60	能识别,有价值
7	1.0	45	清晰识别,可应用
8	1.0	60	清晰识别,可应用
9	2.0	45	清晰识别,可应用

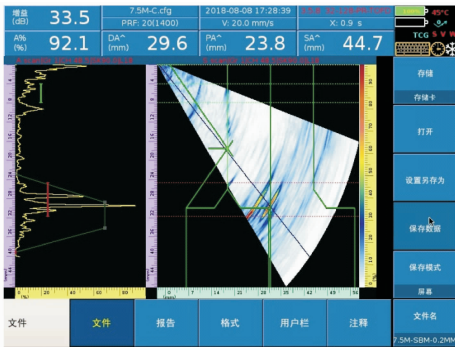


图 6 0.2 mm 深、角度为 45°裂纹的全聚焦相控阵超声

Fig. 6 Crack 0.2 mm deep-45° by TFPAU

5P5×5K0.8 横波一次波对端壁上倒圆进行检测,结果如表 5 所示。与无缺陷时波形图进行比较,当人工缺陷为 1 mm 及以下时,无法识别缺陷显示回波;当人工缺陷为 2 mm 时,缺陷回波有双峰显示,可作为缺陷识别的参考,但在工程中不实用,如图 7 所示。

表 5  $F_1$  处裂纹常规超声检测(B 位置)

Tab. 5 Detection  $F_1$ -B by conventional ultrasound

序号	缺陷/mm	波幅	结果评价
1	无缺陷	无缺陷回波	—
2	0.2	未发现	无法识别,不可行
3	0.5	未发现	无法识别,不可行
4	1.0	未发现	无法识别,不可行
5	2.0	未发现	有双峰参考,不实用

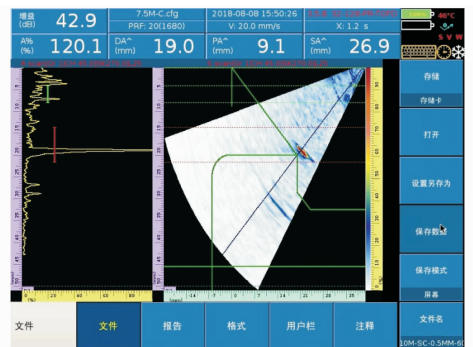


图 8 0.5 mm 深、角度为 60°裂纹的全聚焦相控阵超声

Fig. 8 Crack 0.5 mm deep-60° by TFPAU

### 3.2.2 全聚焦相控阵超声检测结果

全聚焦相控阵超声检测结果如表 6 所示,在 B 位置利用横波探头 BFB531 对端壁上倒圆部位( $F_1$  区)裂纹进行检测,可清晰识别 1 mm 深及以上的人

### 3.3 侧面下部检测结果

#### 3.3.1 常规超声检测结果

常规超声检测结果如表 7 所示,在侧面下部(C 位置)利用横波探头 5P5×5K0.8 对端壁上倒圆部

位( $F_1$ 区)裂纹进行检测,可清晰识别 0.2 mm 深的人工缺陷,回波幅值随缺陷深度的增加而增大,其中 0.2 mm 深、角度为  $45^\circ$  时的缺陷回波如图 9 所示。

表 7  $F_1$  处裂纹常规超声检测(C位置)

Tab. 7 Detection  $F_1$ -C by conventional ultrasound

序号	缺陷/mm	角度/ $(^\circ)$	缺陷波高满屏的 80%增益/dB	结果评价
1	无缺陷	—	—	—
2	0.2	30	68.6	清晰识别,可应用
3	0.2	45	68.6	清晰识别,可应用
4	0.5	30	69.3	清晰识别,可应用
5	0.5	60	65.0	清晰识别,可应用
6	1.0	30	58.6	清晰识别,可应用
7	1.0	45	62.2	清晰识别,可应用
8	1.0	60	62.0	清晰识别,可应用

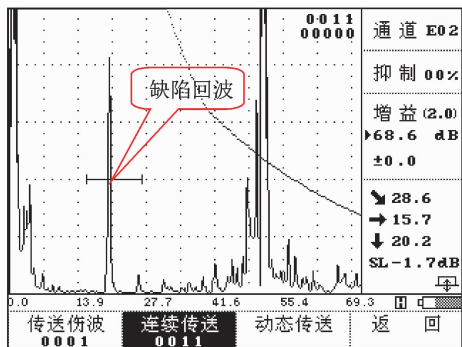


图 9 0.2 mm 深、 $45^\circ$  裂纹的常规超声检测结果

Fig. 9 Crack 0.2 mm deep- $45^\circ$  by conventional ultrasound

### 3.3.2 全聚焦相控阵超声检测结果

全聚焦相控阵超声检测结果如表 8 所示,在 C 位置利用横波探头 BFB523 对端壁上倒圆部位( $F_1$ 区)裂纹进行检测,可清晰识别 0.2 mm 深的人工缺陷,回波幅值随缺陷深度的增加而增大,其中 0.2 mm 深、角度为  $45^\circ$  时的缺陷回波如图 10 所示。

表 8  $F_1$  处裂纹全聚焦相控阵超声检测(C位置)

Tab. 8 Detection  $F_1$ -C by TFPAU

序号	缺陷/mm	角度/ $(^\circ)$	结果评价
1	无缺陷	—	—
2	0.2	30	清晰识别,可应用
3	0.2	45	清晰识别,可应用
4	0.5	30	清晰识别,可应用
5	0.5	45	清晰识别,可应用
6	0.5	60	清晰识别,可应用
7	1.0	30	清晰识别,可应用
8	1.0	45	清晰识别,可应用
9	1.0	60	清晰识别,可应用

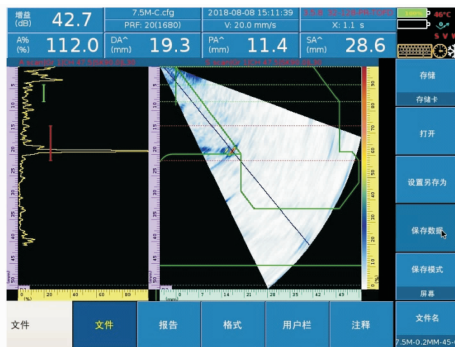


图 10 0.2 mm 深、角度为  $45^\circ$  裂纹的全聚焦相控阵超声

Fig. 10 Crack 0.2 mm deep- $45^\circ$  by TFPAU

## 4 结论

1) 全聚焦相控阵超声精度更高。全聚焦相控阵超声在侧面上部能识别 0.5 mm 深的裂纹,而常规超声对 2 mm 深的裂纹才有一定的参考价值。在上平面和侧面下部,全聚焦相控阵超声与常规超声性能不相上下,均能检测出 0.2 mm 深及以上裂纹。

2) 全聚焦相控阵超声效率更高。常规超声检测前需要计算探头入射角度,检测时需要前后移动探头,效率低,适应性差。全聚焦相控阵超声采用 S 扫查,同时拥有多角度的超声波,相当于拥有多种角度的探头同时工作,无需锯齿扫查,检测效率更高。

3) 全聚焦相控阵超声更直观有效。全聚焦相控阵超声检测建立了一个三维立体图形,缺陷显示非常直观,而常规超声波只能通过波形来分辨缺陷,对检测人员经验要求较高。

## 参 考 文 献

- [1] 王传佩. 汽轮机转子寿命预测及评估的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
- [2] 何建军. 加载速率对汽轮机转子钢低周疲劳损伤的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2):62-66. HE Jianjun. Effect of loading rate on low-cycle fatigue damage of turbine rotor steel[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2):62-66. (in Chinese)
- [3] 王彬. 五万千瓦汽机转子的安全性分析[J]. 水利电力机械, 1980(1):9-18. WANG Cheng. Safety analysis of 500MW steam turbine rotors [J]. Water Power Machinery, 1980(1):9-18. (in Chinese).
- [4] BOOYSEN C, HEYNS P S, HINDLEY M P, et al. Fatigue life assessment of a low pressure steam turbine blade during transient resonant conditions using a

- probabilistic approach[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 73:17-26.
- [5] ATSUSHI H, HIROYUKI Y, MITSUHIKO O. Dynamic stress measurement of centrifugal compressor impeller and study for strength criteria based on correlation by unsteady CFD [C] // 39th Turbomachinery Symposium. [S. l.]: Texas A & M University, 2010: 43-49.
- [6] 沈玉娣. 现代无损检测技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2012:45-89.
- [7] HENG Y Q, ZHANG L, YMP F, et al. Characteristics for ultrasonic transducer research on digital testing system of evaluating [J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 175(7): 268-272.
- [8] 李衍. 超声全聚焦法成像检测缺陷表征[J]. *无损探伤*, 2018, 42(3):1-4.  
LI Yan. Flaw characterization in ultrasonic imaging inspection by total focusing methods[J]. *Nondestructive Testing*, 2018, 42(3):1-4. (in Chinese)
- [9] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 454-461.  
ZHOU Jinjie, ZHENG Yang, ZHANG Zongjian, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 454-461. (in Chinese)
- [10] 彭华. CRH 动车轮对超声相控阵全矩阵成像技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- [11] 章东, 桂杰, 周哲海. 超声相控阵全聚焦无损检测技术概述[J]. *声学技术*, 2018, 37(4): 320-325.  
ZHANG Dong, GUI Jie, ZHOU Zhehai. A review of total focusing method for ultrasonic phased array imaging[J]. *Technical Acoustics*, 2018, 37(4): 320-325. (in Chinese)
- [12] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wave-number algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2008, 5(11): 2450-2462.
- [13] HAN X L, WU W T, LI P, et al. Application of ultrasonic phased array total focusing method in weld inspection using an inclined wedge [C] // Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications. [S. l.]: SPAWDA, 2014: 114-117.
- [14] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7): 992-999.  
ZHANG Hao, CHEN Shili, JIA Lecheng. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7): 992-999. (in Chinese)
- [15] STEPINSKI T. An implementation of synthetic aperture focusing technique in frequency domain [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2007, 54(7): 1399-1408.
- [16] FAN C, CALEAP M, PAN M, et al. A comparison between ultra-sonic array beamforming and super resolution imaging algorithms for non-destructive evaluation [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1842-1850.
- [17] 王鹏, 蔡晖, 王志强, 等. 汽轮机转子 T 型叶根-轮槽系统力学分析[J]. *热力发电*, 2019, 48(2): 114-119.  
WANG Peng, CAI Hui, WANG Zhiqiang, et al. Mechanical analysis of T-root and root groove of steam turbine rotor [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(2): 114-119. (in Chinese)



**第一作者简介:**王鹏,男,1983年3月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为电站金属部件无损检测、锅炉压力容器定期检验。曾发表《汽轮机转子 T 型叶根-轮槽系统力学分析》(《热力发电》2019年第48卷第2期)等论文。  
E-mail:13072988896@163.com