

文章编号: 1673-3363-(2012)03-0328-06

# 综放支架超声相控阵无损探伤原理与检测技术

殷帅峰, 何富连

(中国矿业大学资源与安全工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要** 为了对综放面几何形状相对复杂的大型机电设备及其组件进行精准探伤, 基于综放支架进行无损检测的必要性, 提出一维线性超声相控阵无损检测技术。以 ZFG10000/23/37H 型综放支架立柱探伤为依据, 研究了相控聚焦和相控延时接收的基本原理, 并结合单一阵元的归一化声压函数, 分析正弦增益加权变迹技术在降低旁瓣对输出波形清晰度影响方面的重要意义。最后以五家沟煤矿 5201 综放面焊缝开裂的掩护梁探伤为实践, 阐述超声相控阵无损检测技术的构成和检测工艺。实例应用表明: 一维线性超声相控阵无损探伤技术能够对掩护梁内部微裂隙和表面贯通裂隙进行精准的定位和定量, 并能够根据三维图像输出结果准确判定裂隙的发展方向和贯通趋势。

**关键词** 超声相控阵; 相控延时; 动态变迹; 相位量化误差

**中图分类号** TD 322

**文献标识码** A

## Nondestructive Testing Principle and Technology of Hydraulic Supports by Ultrasonic Phased Array in Top Coal Caving Face

YIN Shuai-feng, HE Fu-lian

(College of Resources & Safety Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,  
China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract** Based on the necessity of nondestructive testing of hydraulic supports in top coal caving face, the nondestructive testing technology of one-dimensional ultrasonic phased array was proposed in this paper, to accurately inspect the large-scale electromechanical equipment and its components with relatively complex geometric figures. According to the mobile column detection of ZFG10000/23/37H hydraulic supports, the basic principles of phase-controlled focus and phase delay was conducted. Combined with the normalized acoustic pressure function of single element, the significance of sine gain weighted apodization technology was analyzed when applied into reducing the definition of output waveform influenced by sidelobe. Finally, in view of the detection of weld cracking shields at 5201 working face in Wujiagou coalmine, the composition and testing process of nondestructive detection were illuminated. The application examples indicate that the internal micro-fractures and surface interpenetrated fractures of shields can be accurately quantified and located by nondestructive testing technology of one-dimensional ultrasonic phased array, and the development direction and interpenetrated tendency of the fractures can be also exactly judged, according to the results of three-dimensional imaging output.

**Key words** ultrasonic phased array; phase delay; dynamic apodization; phase quantification error

收稿日期: 2011-06-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226802); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题项目(SKLCRSM10B08); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010YZ02)

作者简介: 殷帅峰(1985-), 男, 河南省平顶山市人, 博士, 从事矿山压力及采场生产保障系统的研究。

E-mail: yinshuaifeng@126.com

Tel: 15210567592

随着高产高效综合机械化放顶煤开采方法在国际采煤及中国采煤行业的广泛推广，如何保障占整套综放设备总重 80%，成本 60% 以上的液压支架的可靠性，成为采煤行业亟待解决的重要课题<sup>[1]</sup>。支架的可靠性不仅是保障支架初撑力和额定工作阻力实现的前提，而且是关键层顶板运动产生强烈动压现象时支架充分发挥支撑性能的先决条件。

支架构件生产加工过程中的先天缺陷和后期在周期性压力作用下产生的断裂和撕裂，严重影响支架的支撑特性，给工作面正常高效开采带来安全隐患。为及时发现并消除支架各种缺陷和开裂对支架可靠性的影响，本文引入一维线性超声相控阵无损探伤技术对支架构件进行检测。

## 1 综放支架进行超声相控阵无损探伤的必要性

### 1.1 探伤不及时引起的支架构件损坏

综放工作面，支架损坏形式一般可分为生产加工过程中的先天缺陷和支架由于局部应力集中或扭矩过大引起的构件损坏。如果支架在生产加工过

程中不及时探伤或者在使用一段时间后不及时探伤，会使微裂隙或者孔洞发展成为严重的影响支架正常使用的断裂或开裂。

#### 1) 支架生产加工过程中的先天缺陷

先天缺陷尺寸一般比较小，并且一旦进入下一生产工序，这些缺陷不易被察觉。例如支架活柱在焊接、车削或者打磨等生产加工过程中容易出现一系列内部或者外部缺陷<sup>[2]</sup>。然而，但在煤矿现场，由于活柱表面镀层的影响，不能及时发现并排除一些微小缺陷对支架正常工作状况的影响。图 1a 所示是活柱（未完成镀层工序时摄）由于焊接质量不可靠而在焊接带形成的贯通活柱壁内外的砂眼。

#### 2) 支架正常使用阶段常见损坏形式

支架的部分构件受上覆岩层周期性矿山压力的影响，形成应力集中或者扭矩过大，导致支架的损坏，见图 1b, c, d。

支架构件在断裂或开裂之初，一般会在内部或表面形成微裂隙，如果及时进行支架探伤，发现并采取补救措施，可以有效的降低其对工作面正常开采活动的影响。

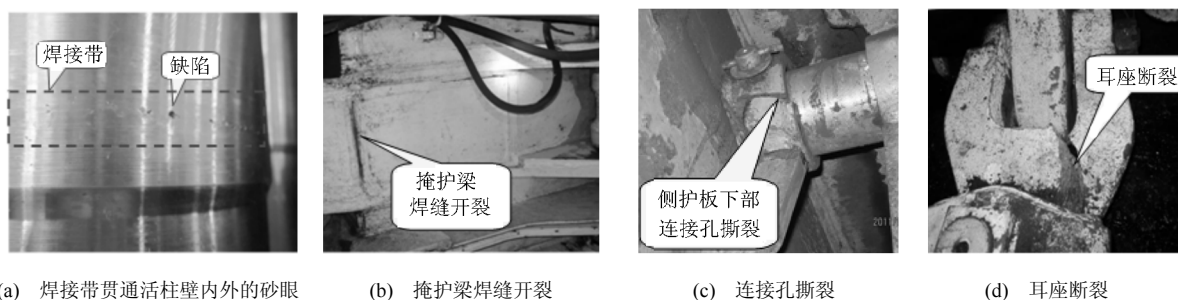


图1 支架损坏情况

Fig.1 Damage of support

### 1.2 超声相控阵无损探伤技术的优越性

传统超声波探伤方法主要包括：超声 A 型、B 型、C 型扫描法探伤、超声激光干涉全息法探伤<sup>[3-5]</sup>以及非线性超声检测方法<sup>[6]</sup>等。这些方法都能实现无损探伤，并能结合 AVG 曲线、声波反射和衍射相关定律以及数字显示装置等实现缺陷简单的定量和判位（依据几何推理或者数字计算）。但是，这些方法受探头、耦合剂、探伤对象几何形状等因素的限制，一般要求探伤人员具有丰富的探伤经验和熟练的探伤技术，能够对不同波形，特别是干扰波以及底波做出准确判定。例如，用 A 扫描法探伤时。

在图 2a 中，T 代表始波，F 代表缺陷波；图 2b

中，B 代表底波或者棱角波。由图中可以看出缺陷波和棱角波很容易混淆，并且在实际的探伤过程中，随着探头的前后左右移动，会出现相当数量干扰波，这些波形相互作用形成乱波，影响缺陷的定量和判位。

超声相控阵检测系统具有以下优点：

1) 利用各阵元的协调配合，不仅可以输出缺陷波形，而且可以得到被探伤试件的三维模拟成像，直观地得到缺陷的数量和位置，并能与缺陷波进行对比分析，进一步确认缺陷的特征。

2) 通过调节各阵元间的相位差，并对接受信号进行延时标记，可以控制声束的聚焦和扫描，提高检测的分辨率、信噪比和灵敏度<sup>[7-8]</sup>。

3) 相控阵通过相位延迟, 可灵活控制在空间各个方向、各个区域的扫描, 从而可以在不移动和少移动探头情况下实现对复杂形状工件的检测; 另外, 近年来设计使用的一维、二维柔性相控阵阵元定位系统较好的解决了复杂几何形状工件的超声相控阵探伤。

综放支架较为笨重, 几何形状相对复杂, 传统的超声波探伤难以满足对其关键部位的精准探伤要求, 这使得超声相控阵无损探伤技术在综放支架检测方面拥有较大的发展空间。以中煤金海洋五家沟煤业有限公司 ZFG10000/23/37H 型正四连杆四柱支撑掩护式端头支架活柱无损探伤为基础, 介绍超声相控阵无损探伤原理及关键技术。该支架相关参数为: 活柱直径 260 mm, 伸缩行程 1 400 mm。

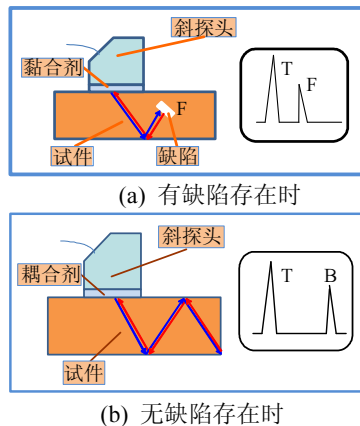


图 2 超声波传播路径及波形

Fig.2 Propagation path and wave form of the ultrasonic

## 2 一维线性超声相控阵支架活柱探伤原理

一维线性超声相控阵探伤原理包括相控聚焦和相控延时接收 2 部分。这里以圆柱形构件即支架活柱介绍其探伤原理。

### 2.1 圆柱体相控聚焦原理

各阵元以等间隔延时激励, 使相邻阵元具有相同的相位差  $\Delta\varphi$ , 从而形成波束的聚焦和偏转。合成波束的波阵面将从原来的一维线性波阵面偏转<sup>[8]</sup>

$$\theta_0 = \arcsin \frac{\Delta\varphi \cdot \lambda}{2\pi d} \quad (1)$$

式中:  $\theta_0$  为合成波束波阵面相对原来线性波束波阵面的偏转角;  $\lambda$  为超声波波长;  $d$  为相邻阵元间间距,  $d = 3 \text{ mm}$ 。

圆柱体具有一定的曲率, 因此设计合成波束波阵面的曲率与圆柱体表面曲率一致, 且保证焦点位于圆柱体的轴线上, 即可实现对圆柱体的相控聚焦

扫描。

针对 ZFG10000/23/37H 型液压支架, 活柱直径  $D = 0.260 \text{ m}$ , 则曲率

$$\rho = \frac{2}{D} \approx 7.69$$

图 3 由毛玻璃加工而成的接触部分可以保证探头与活柱的良好接触, 从而提高探伤的可靠性。毛玻璃形成的曲面应为圆弧, 且其曲率应为 7.69。

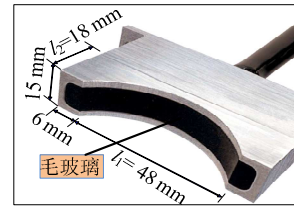


图 3 超声相控阵探头结构及尺寸

Fig.3 The structure and size of ultrasonic phased array detector

将  $d = 3 \text{ mm}$ ,  $\lambda = \frac{c}{f}$  (式中:  $c$  为超声波的波

速, 铸钢中的波速可近似取值  $323 \text{ m/s}$ ;  $f$  为超声波的频率, 范围从  $0.4 \text{ Hz}$  到  $50 \text{ MHz}$ , 较高频率适用铸钢等细晶材料和高灵敏材料超声检测<sup>[4]</sup>, 根据现场经验取  $f = 40 \text{ kHz}$ )。代入公式 (1) 得

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l_1 d}{\lambda D} = \frac{2\pi l_1 d f}{c D} \approx 0.44 \text{ s}$$

### 2.2 几何相控信号接收延时原理

相控接收是相控聚焦的逆过程, 即调节接收阵元的相控延时, 从而获得回波信号。根据几何声程差, 运用几何聚焦延时规律, 设焦距为  $F$ , 可得信号延迟时间  $t_m$  为<sup>[10-12]</sup>:

$$t_m = \frac{F}{c} \left[ 1 - \sqrt{1 + \left( \frac{nd}{F} \right)^2} \right]$$

焦距  $F$  为活柱半径与阵元到活柱距离之和, 即

$$F = \frac{D}{2} + \left[ l_2 - \frac{D}{2} (1 - \cos \theta_0) \right] \approx 145.76 \text{ mm}$$

式中:  $l_2$  为探头接口侧向宽度, 如图 3 所示。8#和 9#阵元位于探头中间部位, 延迟时间均为零, 考虑对称性, 可得各阵元信号接收延迟时间见表 1。

上述内容分析了圆柱形试件的探伤原理, 对其他形状试件, 探伤原理相似, 只是相位差值和相控接收延时时间的不同。总结支架活柱超声相控阵无损探伤原理图, 如图 4 所示。

表 1 各阵元相控延迟时间  
Table 1 Phased delay of every array elements

阵元编号	8#, 9#	7#, 10#	6#, 11#	5#, 12#	4#, 13#	3#, 14#	2#, 15#	1#, 16#
延迟时间/ $\mu\text{s}$	0	0.096	0.387	0.87	1.538	2.401	3.454	4.695

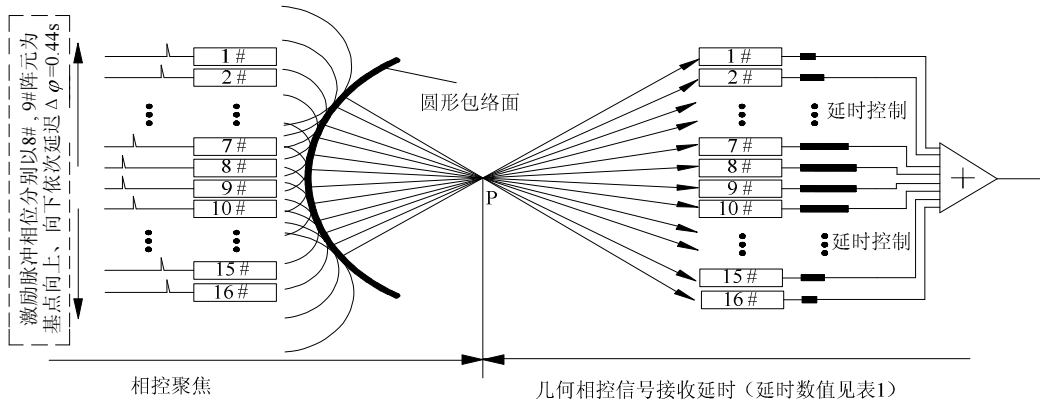


图 4 支架立柱超声相控阵无损检测原理图

Fig.4 Nondestructive testing schematic diagram of support pillar by ultrasonic phased array

3 超声相控阵检测关键技术

针对 ZFG10000/23/37H 型综放支架材质、外形、几何尺寸等特性，归纳其超声相控阵检测关键技术包括：动态变迹提高侧向分辨率、动态聚焦、动态孔径等。此处重点介绍对探伤波形及三维模拟图像输出影响较大的动态变迹技术。

阵列换能器通过调整各阵元的相控延时，从而控制波阵面的曲率、指向和孔径，但各阵元具体延时时间在精度上具有一定的不可靠性，如上文计算， $\Delta\varphi$  的值约为 0.44 s，这就形成相位量化误差。相位量化误差的存在，引起归一化声压波形的浮动，强化了声压指向性函数曲线中旁瓣的影响，降低了侧向分辨率，从而使检测结果模糊，难以分辨。

3.1 相位量化误差对声压指向性的影响

根据亥姆霍兹—基尔霍夫积分定理，设各阵元位于  $xoy$  平面内，且矩形阵元的长度方向与  $y$  轴正方向一致，则可推导出单个阵元的声压指向性函数为<sup>[13]</sup>

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin\left(\frac{ka}{2}\sin\theta_1\right)}{\frac{ka}{2}\sin\theta_1} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kb}{2}\sin\theta_2\right)}{\frac{kb}{2}\sin\theta_2} \quad (2)$$

式中： $\theta_1$  为原点到辐射声场任意一点的向量  $r$  在  $xoz$  平面上的投影与  $z$  轴的夹角； $\theta_2$  为原点到辐射声场任意一点的向量  $r$  在  $yo z$  平面上的投影与  $z$  轴的夹角； $k$  为角波数，其值为  $2\pi/\lambda$ ； $a$ 、 $b$  为阵元在  $x$  方向和  $y$  方向的宽度。

一维线性换能器阵列的声压指向性函数可由乘积定理得出。即由相同特征的阵元组成的阵列的指向性函数，等于单个阵元的指向性函数与当每个阵元由位于其中心位置的点（线）声源代替时，阵的指向性函数的乘积<sup>[4]</sup>。

$$D(\theta_n, \varphi) = D_1(\theta_n, \varphi) \cdot D_2(\theta_n, \varphi) \quad (3)$$

由式（2），（3）可得 16 阵元组成的一维线阵的声压归一化指向性函数为

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin\left(N\frac{kd}{2}\sin\theta_1\right)}{N\left(\sin\frac{kd}{2}\sin\theta_1\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kl_1}{2}\sin\theta_2\right)}{\frac{kl_1}{2}\sin\theta_2} = \frac{\sin(8kd\sin\theta_1)}{16\left(\sin\frac{kd}{2}\sin\theta_1\right)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kl_1}{2}\sin\theta_2\right)}{\frac{kl_1}{2}\sin\theta_2} \quad (4)$$

将  $d = 3 \text{ mm}$ ， $\lambda = \frac{c}{f}$ ， $c = 323 \text{ m/s}$ ， $f = 40 \text{ kHz}$  代入

式（4），可得  $xoz$  平面上的声压指向性，如图 5。

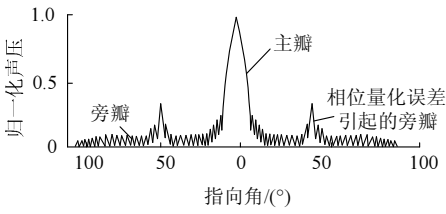


图 5 存在相位量化误差的声压指向性  
Fig.5 Directional acoustic pressure with phase quantification error

由图可知,在  $0^\circ$  方向存在一个相对幅值为 1.0 的声压极大值,这既是波束主瓣。而在主瓣两侧存在两个幅值相对其他旁瓣较大的旁瓣,这就是由相位量化误差引起的旁瓣。它的存在造成波束能量较为严重的泄漏,从而降低系统的信噪比,影响系统的侧向分辨率,导致检测图像清晰度降低。

### 3.2 动态变迹弱化旁瓣影响

目前应用较多的是增益加权变迹<sup>[12]</sup>,其做法是:增大中心阵元的增益加权系数,并向两端逐渐减小<sup>[14]</sup>。具体实现形式包括 2 种:

1) 发射端实现变迹的方法 中心阵元弱激励,向两端阵元激励增强;

2) 接收端实现变迹的方法 中心阵元权重,两端阵元权轻。

对于图 5 所示旁瓣,采用正弦增益变迹函数和线性下降变迹函数均可有效降低旁瓣的影响。正弦变迹的优点是,在指向角为  $50^\circ$  附近,正弦变迹函数的斜率要比线性函数的斜率大,变迹效果明显。采用正弦增益变迹函数处理后,其波瓣图如图 6 所示。

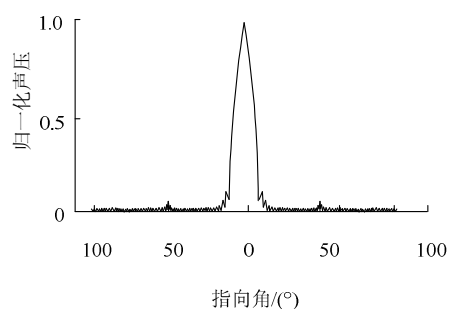


图 6 正弦增益变迹处理后的波瓣图

Fig.6 Lobe pattern after sine amplitude apodization

## 4 一维线性超声相控阵无损探伤技术的应用实例

以五家沟煤矿 5201 工作面综放支架存在焊缝开裂的掩护梁为例,介绍一维线性超声相控阵无损探伤系统的构成、探测工艺及探测波形与三维图像输出结果。

### 4.1 一维线性超声相控阵无损探伤系统的构成

一维线性超声阵列换能器、相控超声信号发射/接收及数据采集处理卡、PCI 总线和数字控制信号处理系统(主控计算机+ADSP 软件开发)是一维线性超声相控阵无损探伤系统的基本构成。其相互关系如图 7 所示。

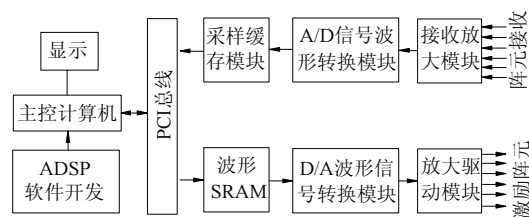


图 7 检测系统构成要素关系图

Fig.7 Component relation schema of testing system

### 4.2 超声相控阵无损探伤技术的检测工艺

检测工艺包括以下内容:

1) 确定检测对象。不同检测对象的几何形状、材质以及检测目的不同,因此,必须首先明确检测对象几何形状的复杂程度和检测部位。

2) 选择阵列换能器。针对一维阵列换能器,需要根据被检测对象确定阵列换能器的阵元数目。

3) 选择耦合剂。不同材质的检测对象所用的耦合剂不同。由于探头与被检测对象之间通过耦合剂紧密接触,因此,耦合剂的选择与检测结果的准确性密切相关。

4) 现场采集数据和图形。

5) 数据和图形的后处理。主要通过主控计算机完成。近些年开发了相关软件,图形处理的准确度和速度都有较大提升。

6) 分析检测结果,指导实践。

### 4.3 支架掩护梁探伤图形输出和结果分析

探伤图形包括两部分:AVG 曲线输出和三维图像输出。

1) AVG 曲线输出。AVG 曲线法<sup>[15]</sup>是建立的统计分析基础上的判伤方法。如图 8 所示为支架掩护梁探伤的波形输出界面,从图中可以直观的看到缺陷波的增益(振幅)大于同距离点判废线的增益,由此我们可确定掩护梁中缺陷的存在。

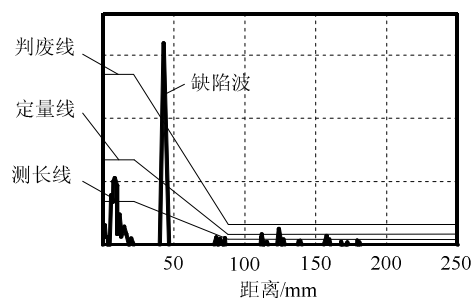


图 8 活柱探伤波形输出界面

Fig.8 Wave output interface of support pillar detection

2) 三维图像输出。三维图像输出依赖于先进的计算机技术和数字声束形成技术。数字声束信号

流程为: 各阵元接收信号—A/D 转换—延时相加—数字式加法器和数字检测器—正交分解—图像输出。支架掩护梁超声相控阵无损检测输出的三维图像见图 9 所示。

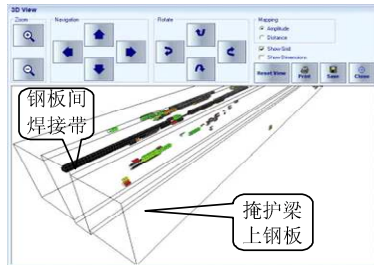


图 9 掩护梁探伤三维图像输出界面

Fig.9 Three-dimensional simulation image output surface of support pillar

3) 结果分析。与图 1b 中掩护梁焊缝开裂照片对比可知: 掩护梁钢板之间的焊接带在长期周期性压力作用下, 内部由于焊接质量不可靠而存在的微裂隙之间有贯通的趋势; 而在焊缝带表面, 已经形成具有一定长度和深度的贯通裂缝; 如不及时对表面贯通裂隙进行二次焊接, 表面裂隙深度不断增加, 导致表面贯通裂隙和内部微裂隙的贯通, 从而使焊接带完全失去承压能力, 影响支架的支撑性能。

## 5 结 论

1) 相控聚焦和相控延时是超声相控阵无损探伤原理的有机组成部分。根据不同试件的几何形状调节各阵元的相位差, 并根据几何声程聚焦规律调节各信号接收阵元的延迟时间, 从而实现相控聚焦和相控延迟接收的有机互补, 形成清晰的探伤波形和图像。

2) 相位量化误差的存在, 使声压指向性函数图形中旁瓣的影响不可避免, 但正弦增益加权变迹技术可有效降低旁瓣对输出图形清晰度的影响。

3) 一维线性超声相控阵无损探伤技术能够对煤矿井下较为笨重, 几何形状相对复杂的机械设备实现缺陷的精确定性和定量检测, 并能实现三维模拟成像, 提高检测的准确性。

## 参考文献:

[1] 张守宝, 谢生荣, 何富连. 液压支架泄漏检测方法的分析和实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 145-148.  
ZHANG Shou-bao, XIE Sheng-rong, HE Fu-lian.

Analysis and practice of detection method on hydraulic powered support leak failures[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 145-148.

- [2] 李连福. 液压支架支柱千斤顶活柱表面镀层失效形式的分析[J]. 中州煤炭, 1989(6): 42-45.  
LI Lian-fu. Analysis of coating surface failure forms about Hydraulic support prop jack[J]. Zhongzhou Coal, 1989(6): 42-45.
- [3] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 34-51.
- [4] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 253-257.
- [5] 潘士先. 从 X 射线 CT 到超声衍射 CT[J]. 应用声学, 1987, 6(2): 23-27.  
PAN Shi-xian. From X-ray CT to the ultrasound diffraction CT[J]. Engineering Acoustics, 1987, 6(2): 23-27.
- [6] 张俊哲. 无损检测技术及其应用(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 265-268.
- [7] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 15-16.
- [8] 鲍晓宇. 相控阵超声检测系统及其关键技术的研究[D]. 北京: 清华大学土木水利学院, 2003: 10-11.
- [9] 林书玉. 超声换能器的原理与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 55-67.
- [10] 何正权, 刘志宏, 袁勤. 数字多声束形成技术的研究及意义[J]. 中国超声医学杂志, 1997, 13(8): 14-16.  
HE Zheng-quan, LIU Zhi-hong, YUAN Qin. Digital multi-beam forming technique research and its significance[J]. Chinese Journal of Ultrasound in Medicine, 1997, 13(8): 14-16.
- [11] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 17-18.
- [12] 冯若. 超声诊断设备原理与设计[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1993: 357-378.
- [13] 何正权, 邹平. 数字化超声成像设备中的几项关键技术[J]. 中国超声医学杂志, 1995, 11(3): 211-212.  
HE Zheng-quan, LIU Zhi-hong, Yuan Qin. Several key technologies of digital ultrasonic imaging equipment [J]. Chinese Journal of Ultrasound in Medicine, 1995, 11(3): 211-212.
- [14] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 20-21.
- [15] 北京市技术交流站. 超声波探伤原理及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980: 473-474.