

# 新型交流电磁场智能 可视化检测技术

---

# 目录

## Contents

---

- 1 技术原理.....●
- 2 技术发展.....●
- 3 标准简介.....●
- 4 技术优势.....●
- 5 检测应用.....●

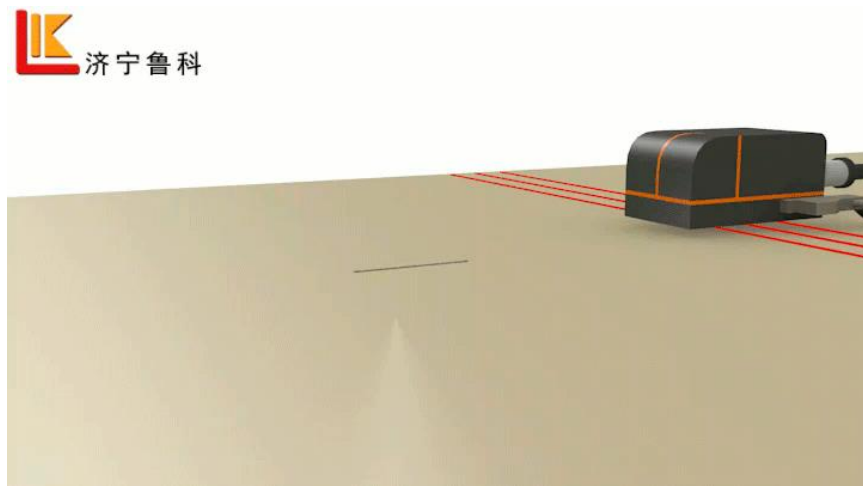


# 技术原理

Technical Principle

# 技术原理

交流电磁场检测（Alternating current field measurement 简称ACFM）技术是激励线圈在工件中感应出均匀的交流电流，感应电流在裂纹、腐蚀等缺陷位置产生扰动，**基于电场扰动引起空间磁场畸变原理**，利用检测传感器测量空间**磁场畸变信号**，从而实现缺陷的检测与评估。



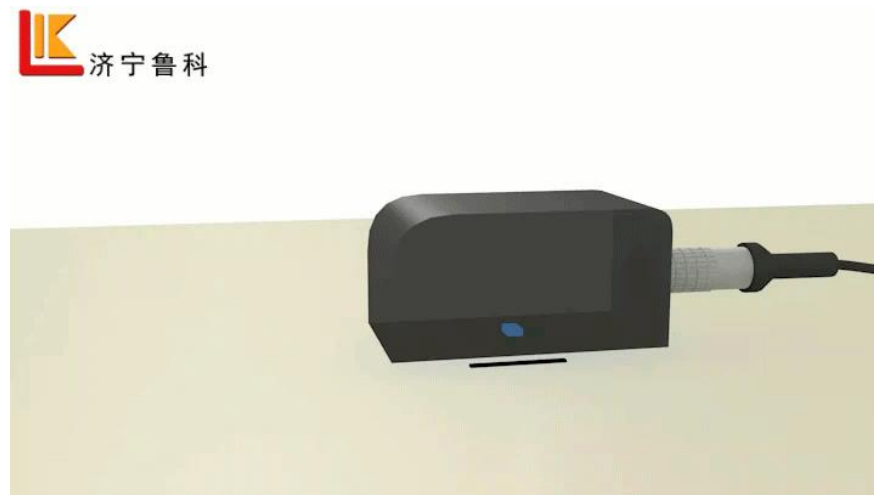
激励电场



电场扰动



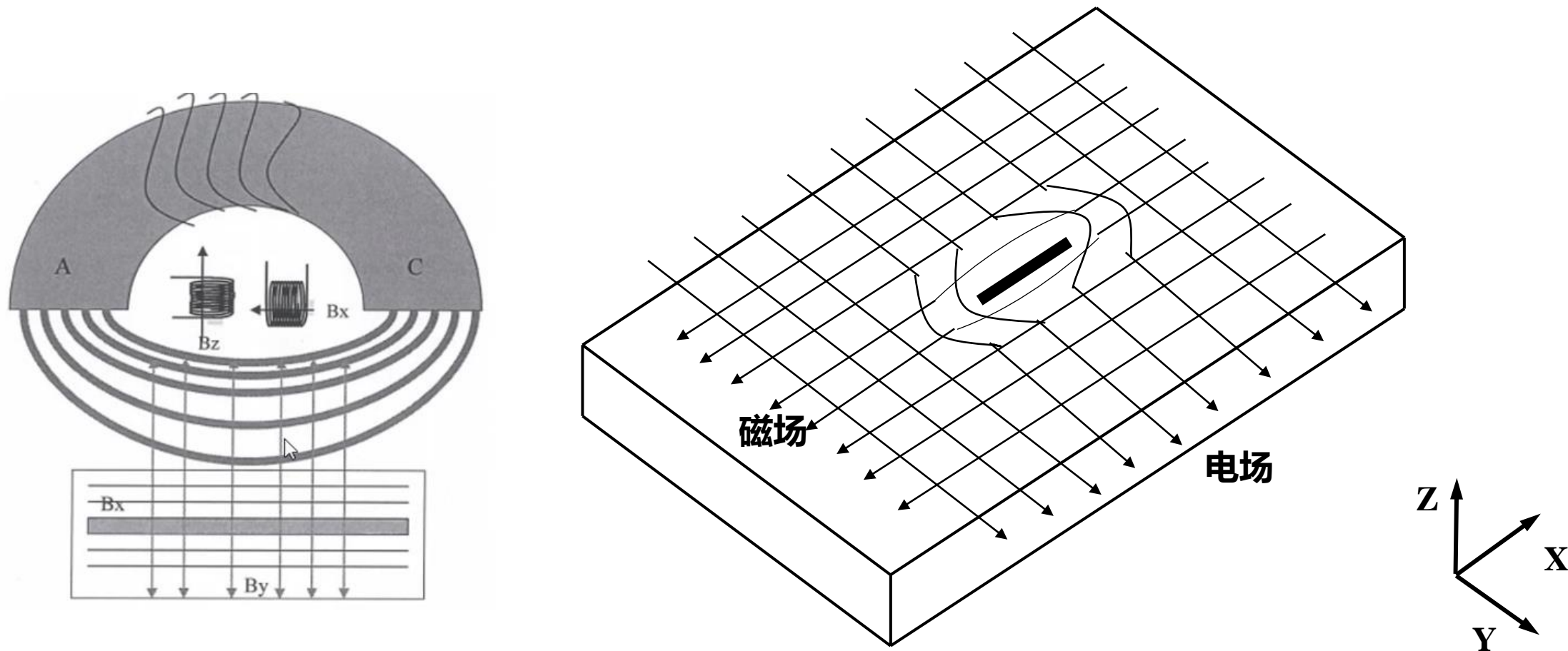
畸变磁场



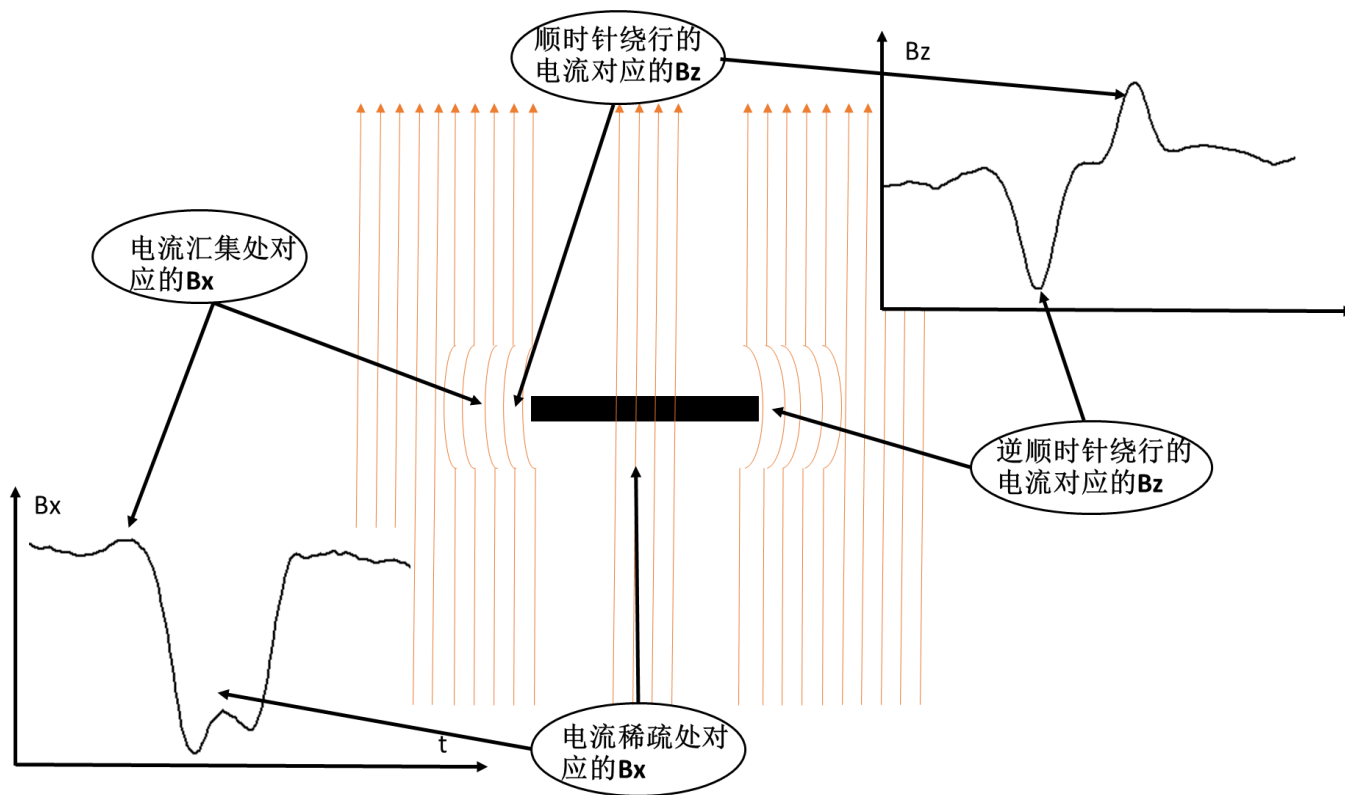
# 技术原理

激励磁场：磁轭AC两端所产生的直线磁场。

感应磁场：感应线圈所接收的工件表面磁场，分为三个分量， $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ ， $B_x$ 分量方向与电流方向垂直，并与工件表面平行； $B_y$ 分量与电流方向一致； $B_z$ 分量方向垂直于工件表面。



根据电磁感应定律，当工件表面没有缺陷时，交变电流产生的感应磁场均匀且无变化， $B_y$ 和 $B_z$ 分量为0；。



当电流经过缺陷时，电流从缺陷两侧和底部偏转，使通过缺陷处的电流密度减小，产生的磁通密度也相应减小，即 $B_x$ 分量会在缺陷处出现明显的波谷。

此外，电流在缺陷两端产生聚集，使得缺陷两端磁通密度出现极值，由于磁场方向性的影响， $B_z$ 分量与原有磁场会存在叠加和抵消现象，即 $B_z$ 信号会在缺陷两端形成波峰和波谷。

典型信号即为左图。

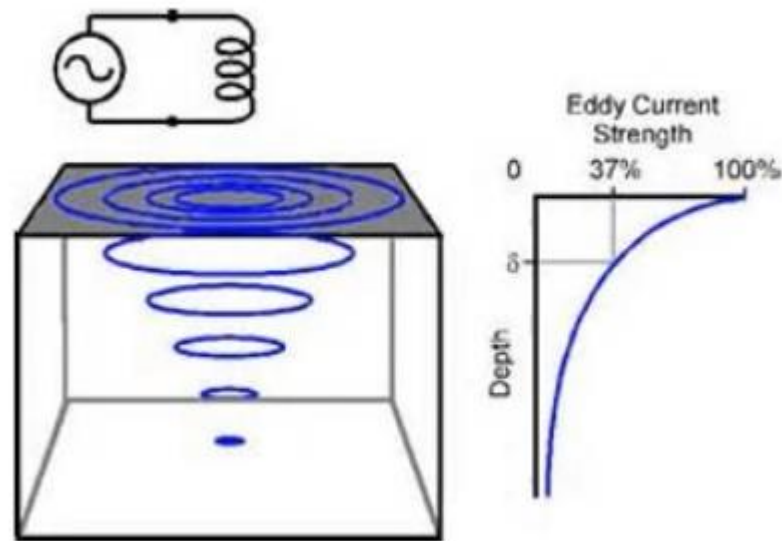
当导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀，电流集中在导体的“皮肤”部分，也就是说电流集中在导体外表的薄层，越靠近导体表面，电流密度越大，导体内部实际上电流较小。结果使导体的电阻增加，使它的损耗功率也增加。这一现象称为趋肤效应(skin effect)。

趋肤深度用  $\Delta$  表示，计算公式如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\pi \sigma \mu}}$$

$\Delta$ —穿透深度 (mm)；  $\omega$ —角频率，  $\omega=2 \pi f$  (rad/s)；

$\mu$ —磁导率 (H/m)；  $\gamma$ —电导率 (S/m)；



# 技术原理

定义涡流密度衰减至表面值的 $1/e$   
(约37%)时的透入深度为标准透入  
深度  $\delta$

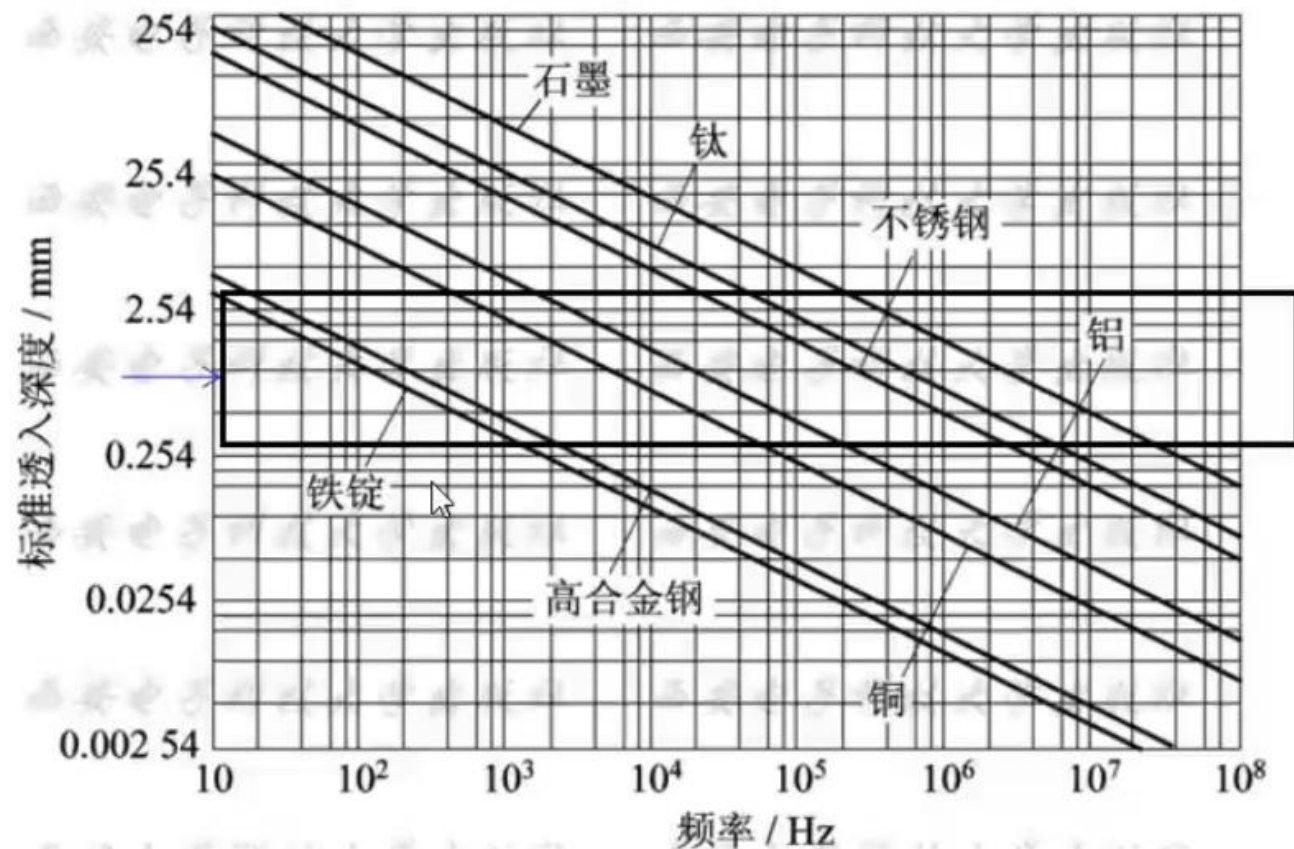
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}}$$

$\mu$  — 磁导率 (H/m) ;

$\gamma$  — 电导率 (S/m) ;

有效透入深度  $x=2.68 \delta$

材料的导电性或导磁性越好, 频率越高,  
标准渗入深度越小







# 技术发展 Technical Development

# ET (Electromagnetic Testing) 电磁检测

1. ECT (Eddy Current Testing) 涡流检测

2. RFT (Remote Field Testing) 远场涡流检测

能够穿透金属管壁的低频涡流检测技术，探头通常为内穿式，激励线圈通以低频交流电，检测线圈拾取穿过管壁又返回管内的涡流信号，从而有效检测金属管子的内外壁缺陷和管壁的厚薄情况。

3. MFL (Magnetic flux leakage Testing) 漏磁检测

4. ACFM (Alternating Current field measurement testing) 交流电磁场检测

5. . . . .

交流电磁场检测（ACFM）技术是由交变电压降（ACPD-Alternating Current Potential Drop）发展而来。英国伦敦大学的无损检测中心为了克服ACPD法需要探头与工件检测表面相接触的缺点，提出了通过感应磁场来检测缺陷的技术思路，并对其基本原理进行了深入探讨，获得了成功。

ACPD：在工件中通入交流电，利用集肤效应，使大部分能量集中在工件表面，通过工件表面电势的分布来检测缺陷。其缺点是交流电的产生和电势的检测均需探头与工件直接接触。

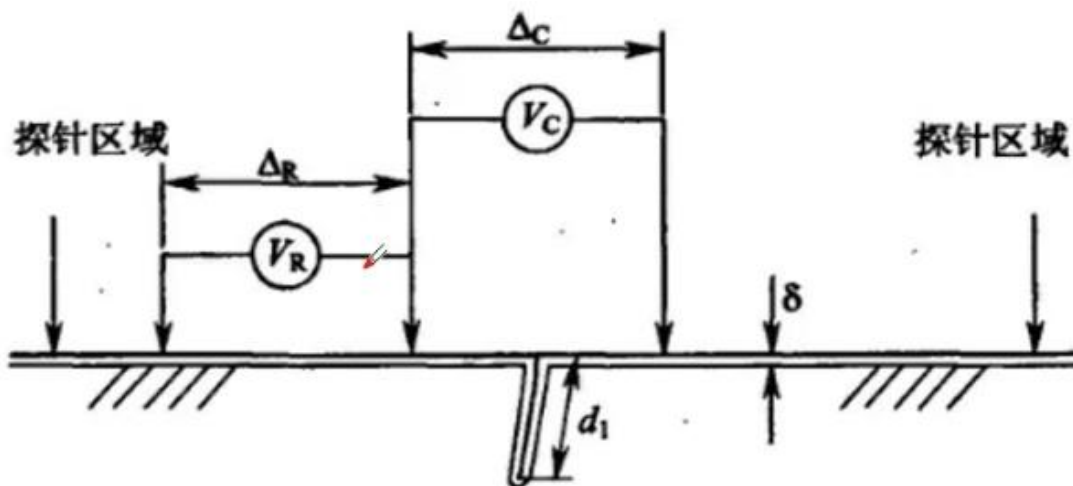


图.1 ACPD 符号  
Fig. 1 ACPD notations

目前包括美国、英国、中国、挪威等多个国家石油公司已将 ACFM 技术成功应用于水下结构缺陷检测，均取得良好的经济效益。

ACFM 检测技术得到中国船级社 (CCS)，法国船级社 (BV)，美国船级社 (ABS)，挪威船级社 (DNV)，英国劳氏船级社 (Lloyds)，德国劳氏船级社 (Germanischer Lloyd) 等多家验证单位承认。



海上石油平台检验



ACFM 检测技术也被写入美国材料试验学会 (ASTM (E2261-03)), 美国机械工程师协会 (ASME), 美国无损试验协会 (ASNT), 法国无损检测协会 (COFREND) 等诸多国际标准和规范中。



电站锅炉及管道



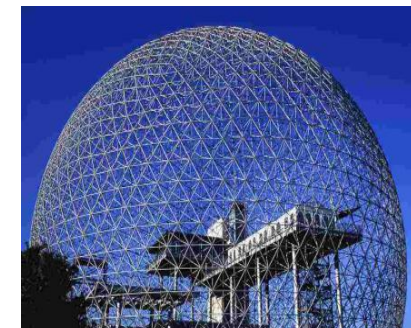
罐车



反应釜



油气管道



大型钢结构



火车轮毂



# 标准简介

Standard Introduction

## 标准简介

《Standard Practice for Examination of Welds Using the Alternating Current Field Measurement Technique》，ASTM↵

《Guide for Nondestructive Inspection of Hull Welds》，ABS↵

《Guidance for Post-hurricane Structural Inspection of Offshore Structures》，API↵

《FIRMS ENGAGED IN NON DESTRUCTIVE TESTING(NDT) ON OFFSHORE PROJECTS AND OFFSHORE UNIT/COMPONENTS》，DNV↵

《Specific Requirements For The Certification of Personnel In Alternating Current Field Measurement (ACFM) Testing of Ferritic Welds》，BINDT↵

《TWI ACFM Course Notes for Use with CSWIP and Lloyds ACFM Level 1 and 2 Training Courses》，TWI↵

《Requirements for the Certification of Personnel engaged in Non-Destructive Testing in accordance with the requirement of EN 473 and ISO9712》，CSWIP↵

《水下钢结构交流电磁场裂纹检测规范》——中国潜水打捞行业协会↵

《在役导管架平台结构检验指南》——中国船级社↵



## (17) T-1510 适用范围

(a) 本章描述用于检测焊缝中长度 6mm 及以上线状不连续所用的交流场测量技术 (ACFMT)。

(b) 当有关卷章有规定时，在本章中的交流电场测量技术 (ACFMT) 应与第 1 章，通用要求，一起使用。

## 1. Scope\*

1.1 This practice describes procedures to be followed during alternating current field measurement examination of welds for baseline and service-induced surface breaking discontinuities.

1.2 This practice is intended for use on welds in any metallic material.

## 检测范围

材质：金属材料

位置：焊缝及原始表面

缺陷：裂纹为主

## 1 范围

本文件规定了金属结构交流电磁场检测（以下简称ACFM）的校验，检测及核查方法。

本文件适用于金属结构的原材料或焊缝表面缺陷检测，由于疲劳破坏、脆性断裂、应力腐蚀开裂等原因造成的表面缺陷、裂缝检验，可参照本文件执行；结构表面由于撞击、腐蚀等原因造成的表面损伤及腐蚀缺陷，可参考本文件使用，但应考虑作业程序的变化。

本文件适用于表面非导电涂层不大于5mm的金属结构检测



## T-1531 仪器

ACFMT 仪器和软件应适于在 1~50kHz 频率范围内运行。显示应包括单个的基于时间或距离的平面图， $x$  向成分为与平行于探头移动方向上的磁场  $B_x$  的平面图， $z$  向成分为与垂直于检测面方向上的磁场  $B_z$  的平面图，及  $B_x$ 、 $B_z$  组合的平面图（蝶形显示）。

3.3.1 交流场测量系统——电子仪器、软件、探头及所有附属件和电缆，用于有交流场测量技术检测焊缝。

9.3.1 所用探头应根据焊缝长度、几何形状、要求检测的不连续尺寸和表面温度进行选择，并适合于检测方式。

仪器：根据使用分为水下及水上型号，根据使用方式又分为人工和ROV型，需根据实际工况选择；

探头：一般分为标准焊缝探头（单探头），阵列探头，笔式探头等。

软件：要求能显示 $B_x$ ， $B_z$ 以及蝶形图

标准简介

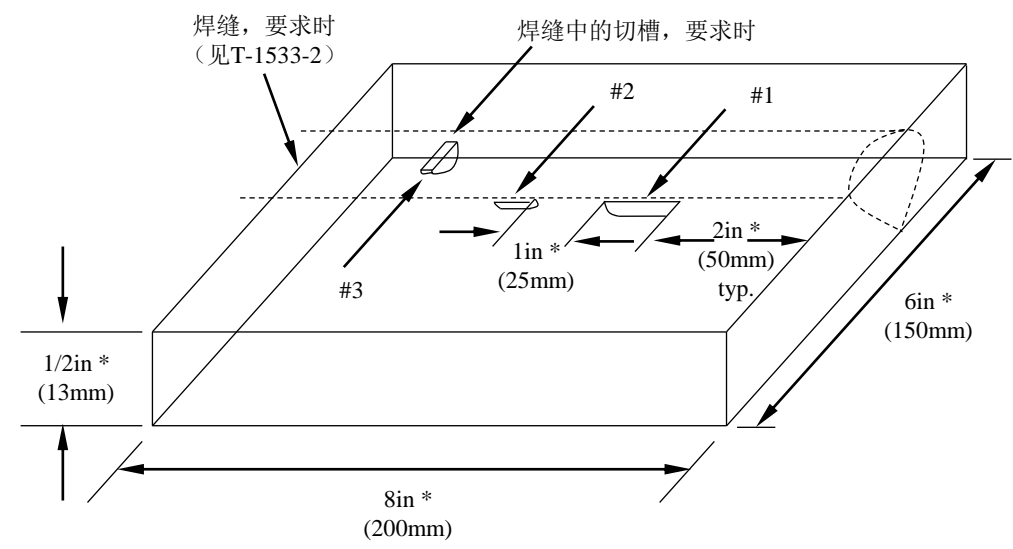
T-1560 校验  
T-1561 一般要求

T-1561.1 ACFMT 系统 校验应包括整个 ACFMT 系统(即仪器、软件、计算机、探头和电缆),应在系统使用前进行校验。

T-1561.2 探头 校验和检测应使用相同的探头。

T-1561.3 仪器设定 影响仪器对参考切槽响应的任何仪器设定,在校验、核对、检测时应一致。

ACFM检测前需对整个系统进行校验，  
使用参考试块，以验证整个检测系统的  
有效性。



\*最小尺寸

椭圆切槽 编号	长度 in (mm)	深度 in (mm)	宽度 in (mm)
1	2(50)	0.2(5)	0.02 (0.5) 最大
2	0.25(6)	0.1(2.5)	
3	0.25(6)	0.1(2.5)	

注: (a)切槽深度误差为±0.01in.(±0.2mm)。  
(b)1#切槽长度误差为±0.04in.(±1mm)。  
(c)2#、3#切槽长度误差为±0.01in.(±0.2mm)。  
(d)切槽形状应为椭圆。  
(e)3#切槽仅在试块上有焊缝才需要。

## 10 交流场测量参考标准

### 10.1 操作参考标准用人工切槽

10.1.1 操作参考标准具有专用的人工不连续。用于检查仪器和探头组合的正常功能。也可用于非铁磁性材料检测设备的标准化。除非客户或设备制造厂家另有规定，操作参考标准上的人工不连续为椭圆形槽或长方形槽。槽的形状由设备制造厂家规定，以便与裂纹尺寸估算模式一致。典型的切槽尺寸如下：

10.1.1.1 椭圆形槽——两个位于焊趾位置的椭圆形槽，尺寸为 2.0in. × 0.2in. [50mm × 5mm] 和 0.8in. × 0.08in. [20mm × 2mm]，(图 3 不连续 A 和 B)

10.1.1.2 长方形槽——3 个长方形槽，尺寸为深度 0.08in. [2mm]、长度 0.4in. 和 0.8in. [10mm 和 20mm] (图 3 不连续 C 和 D)，及深度 0.16in. [4mm]、长度 1.6in. [40mm] (图 3 不连续 E)。

### 10.3 碳钢以外的材料

10.3.1 如果该技术用于碳钢以外的其他材料，且设备制造商处没有可用配置数据（请参阅制造商说明书），就需要在这种材料上对探头进行标准化。

10.3 Materials other than carbon steel:

10.3.1 If the technique is to be used on materials other than carbon steel, then it may be necessary to standardize the probes on this material if configuration data is not available from the equipment manufacturer, refer to manufacturer's instructions.

NOTE 2—If this is not done then the sizes of the indications may be too small (so that small discontinuities may be missed) or too large (so that spurious indications may be called), or the Bx indication may saturate making the examination invalid. This standardization is done using a slot

针对碳钢以外的材料，检测前需进行校准，所使用试块缺陷应遵照 10.1.1 中要求。

1. 验证设备对该种材料检测能力是否达标；
2. 对缺陷长度及深度计算所使用经验公式进行调整。



## 12 检测过程

12.1 如有必要，清洁焊缝表面以除去障碍物和厚大的铁磁性和导电性堆积物。

12.2 按 9.3 指引选择适用于检测任务的探头，然后使用已经安装的软件选择数据文件和探头文件。

12.2.1 探头置于焊趾部，前端平行于焊缝纵向方向。

12.2.2 探头沿焊缝方向扫查。当下列 3 种情况下发生时将产生不连续显示：

12.2.2.1  $B_x$  背景值下降然后又回到正常背景值（图 1）；

12.2.2.2  $B_z$  值从峰到谷（正向到反向）或从谷到峰（反向到正向）变化（见图 1）；

12.2.2.3  $B_x$  和  $B_z$  变化的结果是 X-Y 图上出现一个下降的环（见图 2）。

12.2.3 当  $B_x$ 、 $B_z$  变化和向下的环路都出现时，可以肯定不连续的存在。然后可根据被检焊缝的长度和复杂程度调整扫查速度或数据采样速率。

## 8.1 基本要求

8.1.1 仪器探头扫查速率应控制在 20-60mm/s。

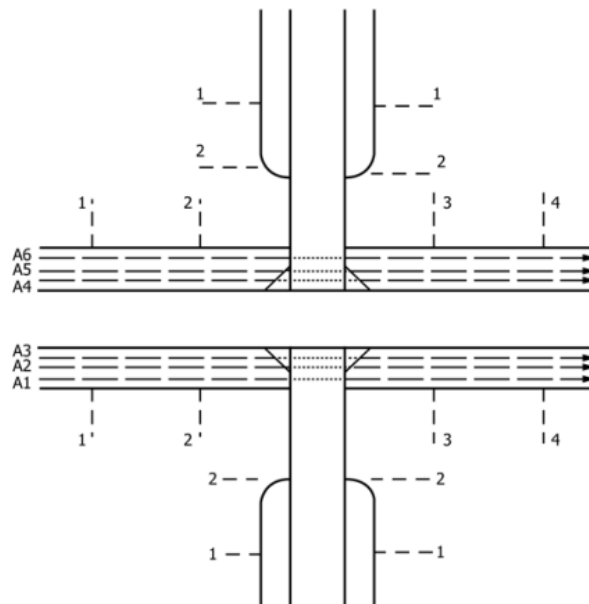
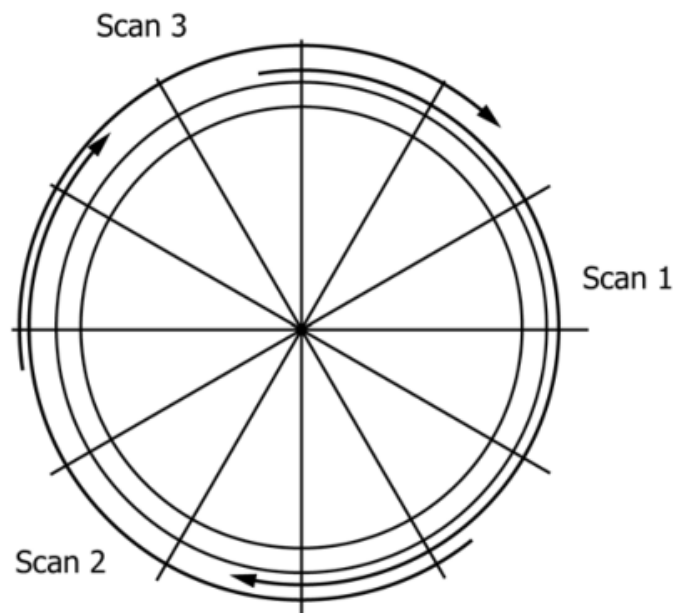
8.1.2 扫查时探头与接触面宜保持接触，不能满足时提离高度不大于 5mm。

T-1562.4 探头扫查速率 应通过将探头移过校验试块上的切槽并注意其响应进行校验。探头前端应平行于切槽长度方向并与检测面保持接触。探头的扫查速率应使得 1 号切槽的显示图形高度为全屏高的 50% ( $\pm 10\%$ )，且宽度为全屏宽的 175% ( $\pm 20\%$ )，并能容易地检测到较小的切槽的信号。

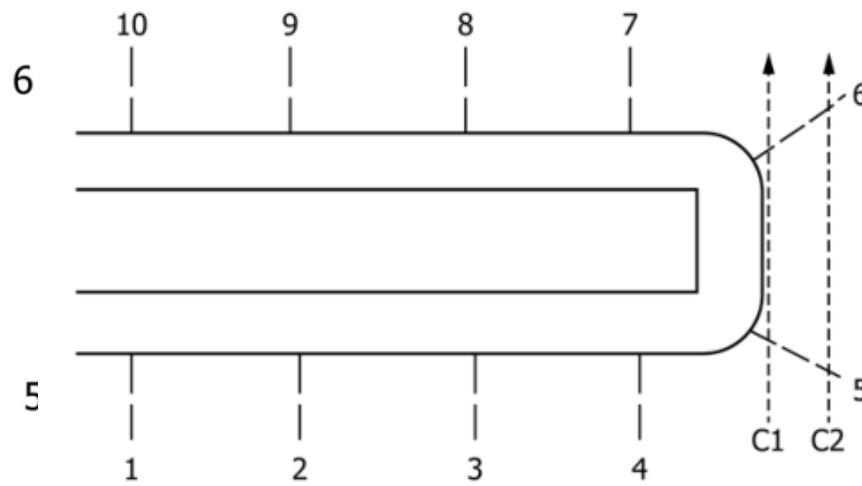
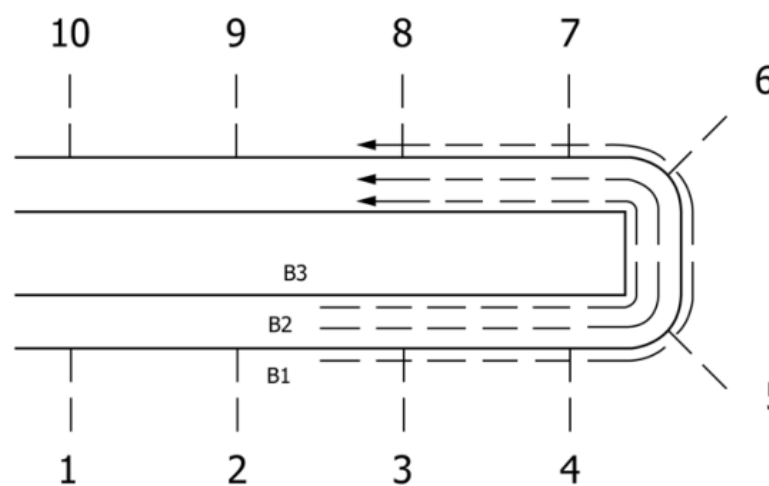
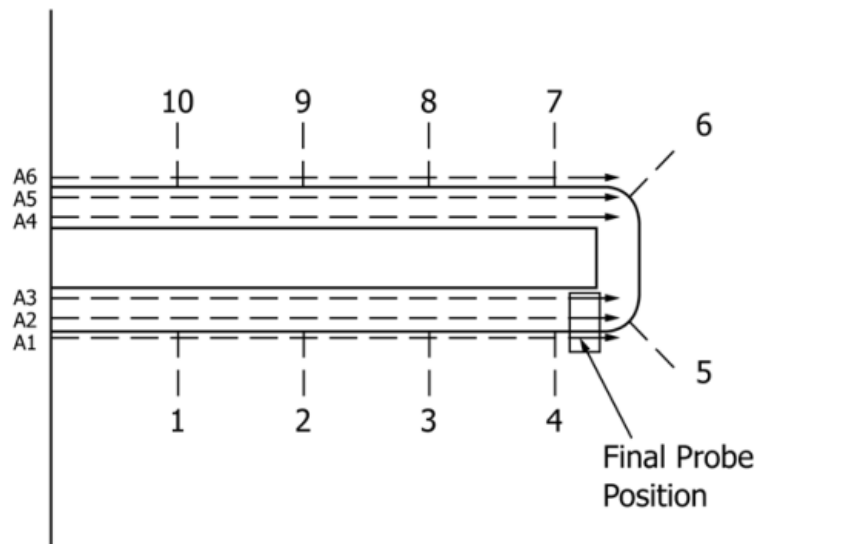
## 检测过程注意点：

1. 检测范围，ACFM检测范围为探头外延10mm，通常要求焊缝两侧焊趾处各进行一次检测，当焊缝宽度较大时，应在焊缝上追加一次检测；
2. 检测速度有要求，实际试验发现控制在20-60mm/s最为合适。

# 标准简介



根据工件实际状况确定扫查路径，必要时进行交叉检测，避免漏检



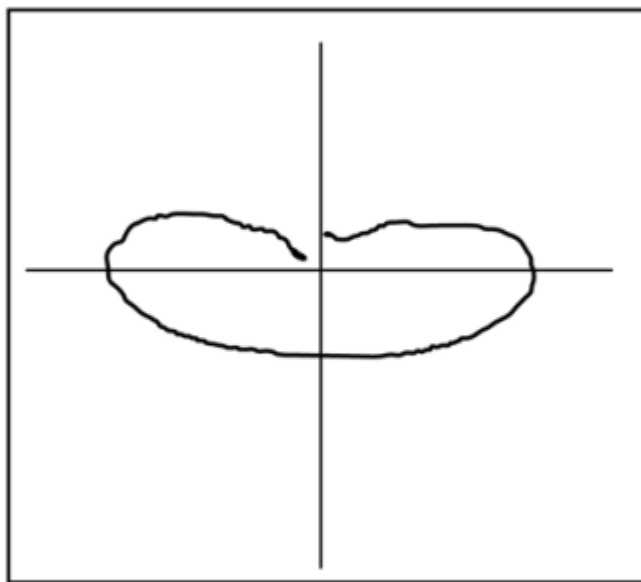
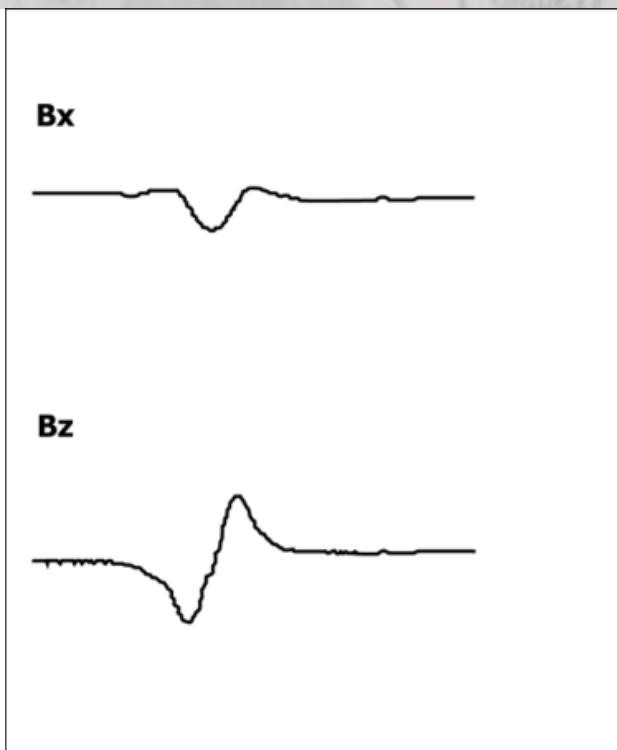
# 标准简介

ACFMT 仪器和软件应适于在 1~50kHz 频率范围内运行。显示应包括单个的基于时间或距离的平面图， $x$  向成分为与平行于探头移动方向上的磁场  $B_x$  的平面图， $z$  向成分为与垂直于检测面方向上的磁场  $B_z$  的平面图，及  $B_x$ 、 $B_z$  组合的平面图(蝶形显示)。

3.3.3  $B_x$ —the  $x$  component of the magnetic field, parallel to the weld toe, the magnitude of which is proportional to the current density set up by the electric field.

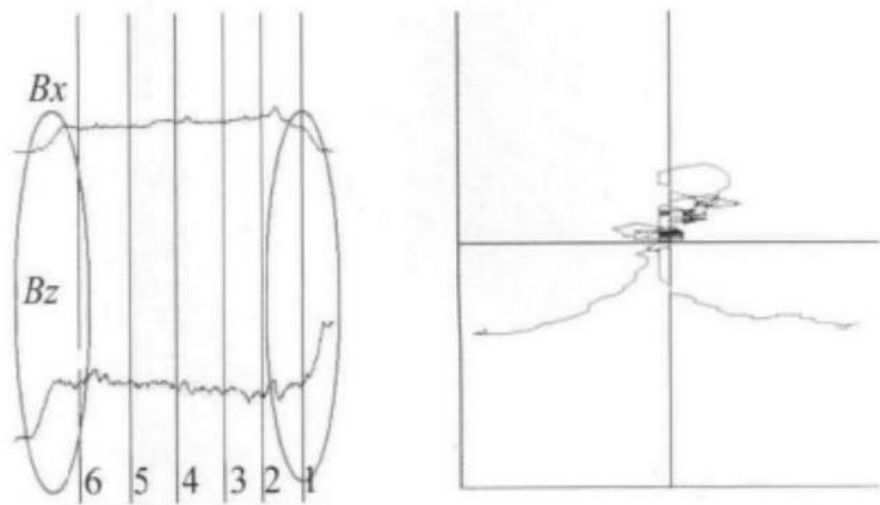
3.3.4  $B_z$ —the  $z$  component of the magnetic field normal to the inspected base metal/heat affected zone surface, the magnitude of which is proportional to the lateral deflection of the induced currents in the plane of that surface.

3.3.5 *X-Y Plot*—an X-Y graph with two orthogonal components of magnetic field plotted against each other.

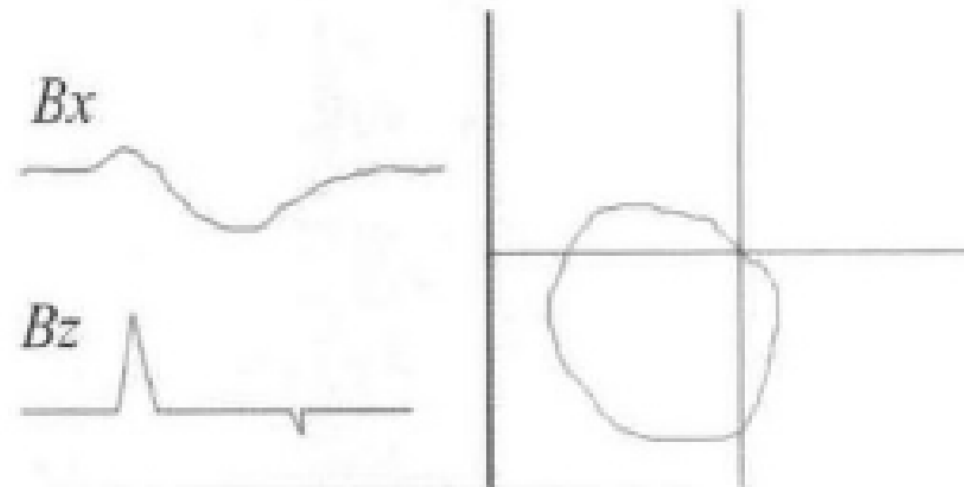


判定条件： $B_x$ ， $B_z$ 以及蝶形图变化趋势

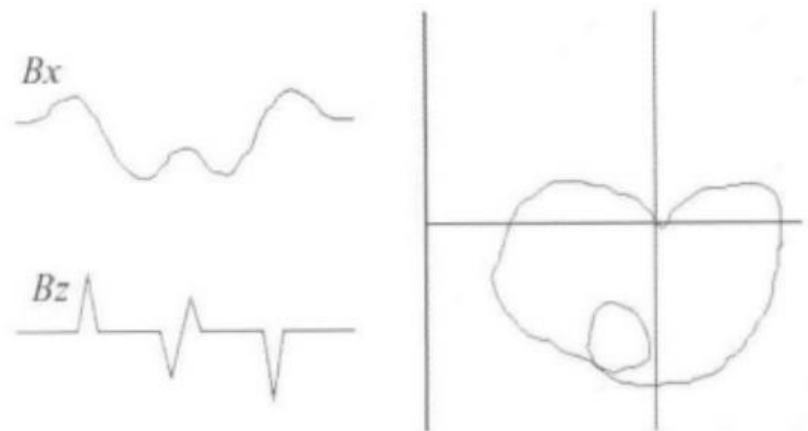
# 标准简介



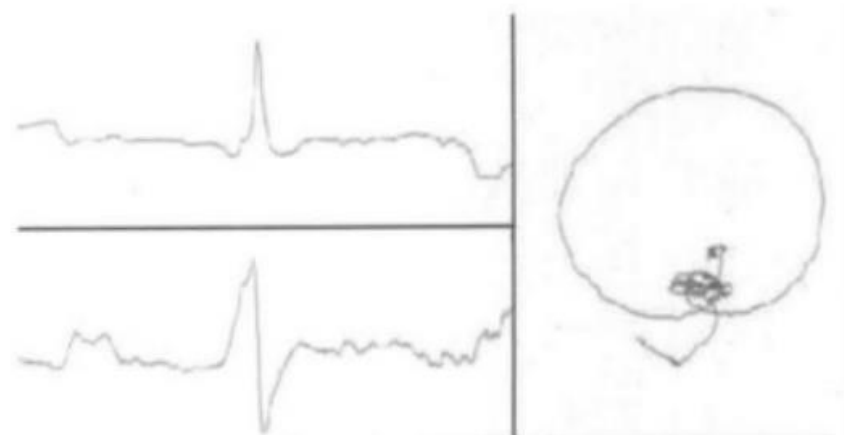
边缘效应



探头与缺陷存在夹角



多处裂纹



横向裂纹

## 14.2 Length:

14.2.1 Once an area containing a discontinuity has been located, a repeat scan is taken through the discontinuity. The Bz length of the discontinuity is determined by locating the extreme ends of the discontinuity using the peak (+ve) and trough (-ve) Bz locations. These positions should be just inside the actual ends of the discontinuity. This Bz length is used with the discontinuity sizing tables to determine the true length and depth of the discontinuity. The length of the detected discontinuity may be measured directly by the system software using properly placed manual markers or a position encoder. If the markers are placed manually, then the scan speed should be kept constant.

## 14.3 Depth:

14.3.1 The depth of the discontinuity is calculated using the Bx minimum and Bx background values and the Bz length of the discontinuity measured from the Bz data. Once these values have been put into the discontinuity sizing table, together with the coating thickness, if the equipment does not provide for lift-off compensation, then the discontinuity depth will be estimated by the software. Alternatively, if the equipment provides a lift-off value, the coating thickness can be determined automatically and the depth can be determined from the equipment software and discontinuity sizing table.

**14.1 不连续的深度和长度由 Bx 特征和 Bz 特征的峰/谷距离的测量值估算，并加上用户输入的涂层厚度的补偿或实时厚度补偿。**

长度测量：

1. 通过人为放置标记物或者测量获得；
2. 通过仪器加装编码器直接计算；

深度测量：

通过软件计算获得，用Bx最小值与Bx本底或者其他标准缺陷Bx最小值进行对比，所获得当量尺寸。



日期：2022. 4. 21		位置：见检测示意图，y3 处	形状简图：	
时间：10:42				
操作人员：lzc		仪器：LKACFM-X1		
部件编号：2#炉至甲母管电动隔离阀(DN175)				
不连续描述：发现缺陷 1 处，缺陷长 3mm；现场消缺，复测合格。				
检测文件：				
探头编号：LKACFM-PL20-G			探头文件：LKACFM-PL20-G	
数据编号	移动方向	检测图像	缺陷位置	检测报告/注解
A-1-1	顺时针	见附件	/	未见缺陷
A-1-2	顺时针	见附件	/	未见缺陷

检测报告的出具按照标准要求项目填写即可，但注意，目前的标准暂无对缺陷等级评定的相关条款，目前ACFM只能做检测，无法做评价。

表 1 报告要求	
注 1：交流场检测数据报告表可根据系统和交流场检测要求专门设计。基本信息应包括：	
主要信息	
日期	
操作人员姓名	
探头操作人员	
部件标识号	
档案号	
所用设备	
扫查数据	
文件名	
页数	
焊缝位置	
探头号	
探头方向	
带尺位置	
检测概要	
详细的显示/反常记录	
文件名	
页数	
焊缝上的位置	
不连续开始处（带尺读数）	
不连续结束处（带尺读数）	
不连续长度（mm/in.）	
不连续处的涂层厚度（in./mm，当设备需要时）	
备注	
被检部件图示	

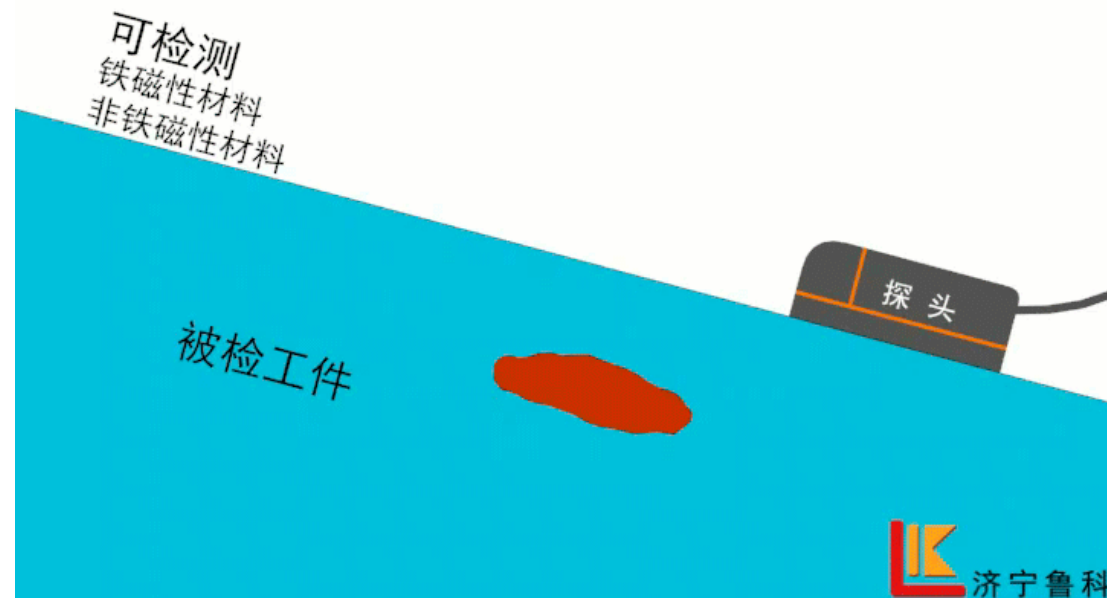
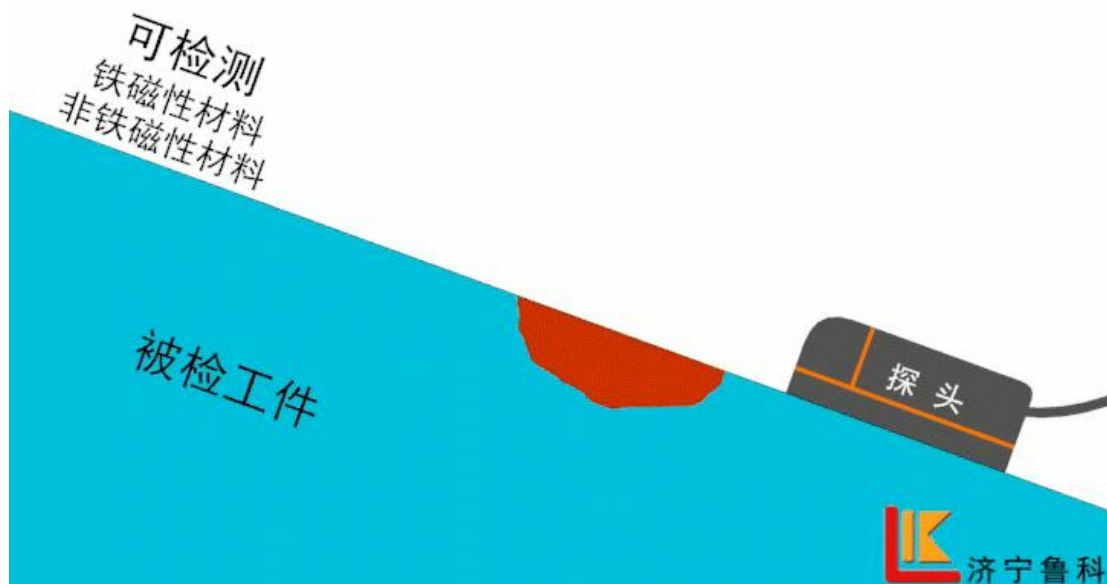


# 技术优势

Technical Advantages

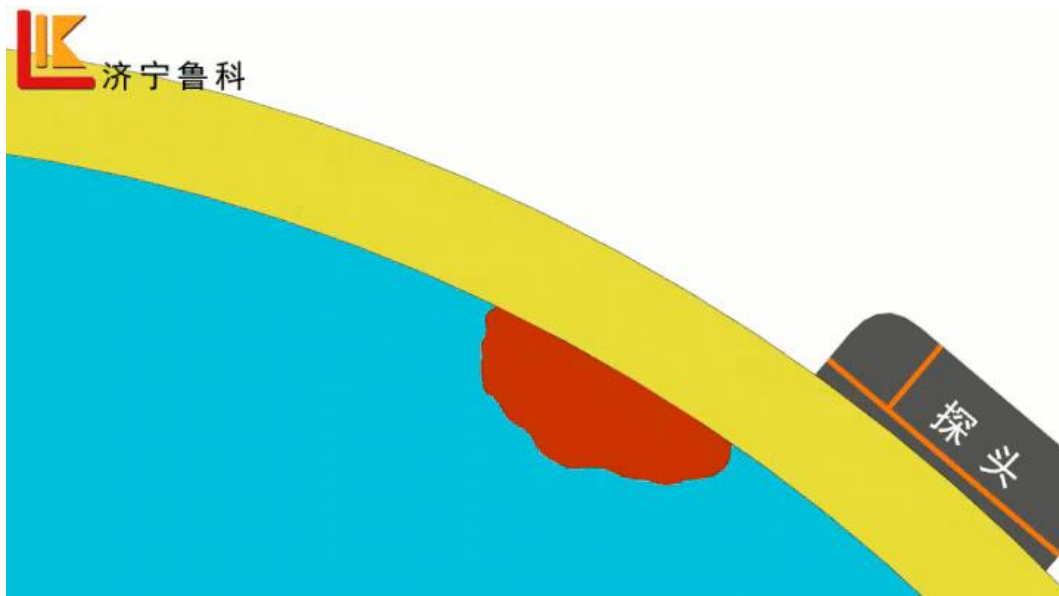
# 检验优势

适用于各种铁磁性或非铁磁性导电材料，对于表面或近表面的缺陷均可快速准确的检出。根据具体材质有所不同，碳钢3mm，不锈钢5mm，铝板10mm左右。



# 检验优势

对探头与被检工件间的提离不敏感，探头无需与被检工件直接接触，与被检工件的表面距离最大提离达10mm，可穿透涂层检测，无需清除被检工件表面涂层，节省了清理表面涂层时间和费用。即允许有不超过10mm的不导电涂层，如喷涂层、油漆层、环氧树脂胶层、沥青层等涂层均可。

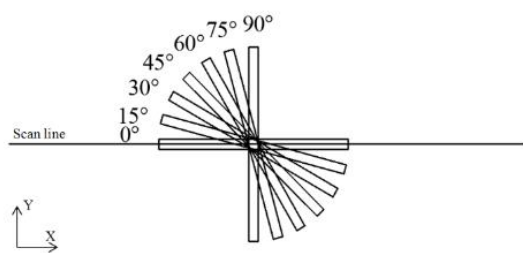


# 检验优势

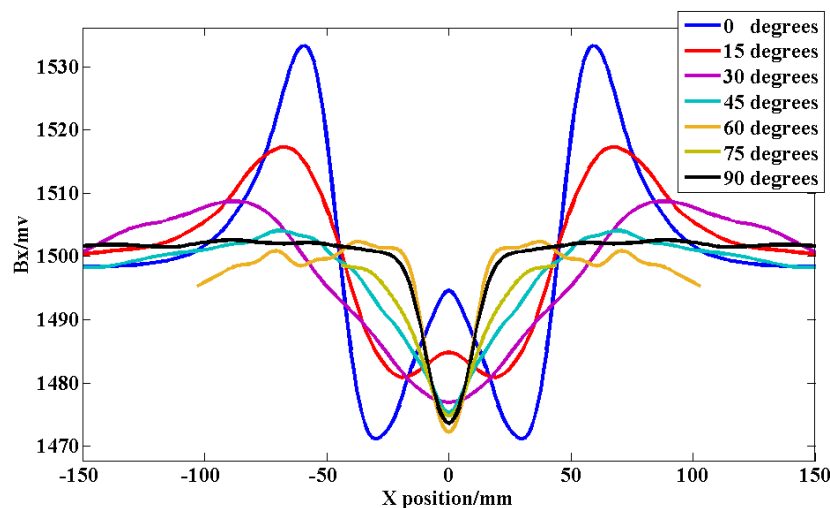
可检测任意方向裂纹缺陷，同一人工缺陷不同方向均可检出；



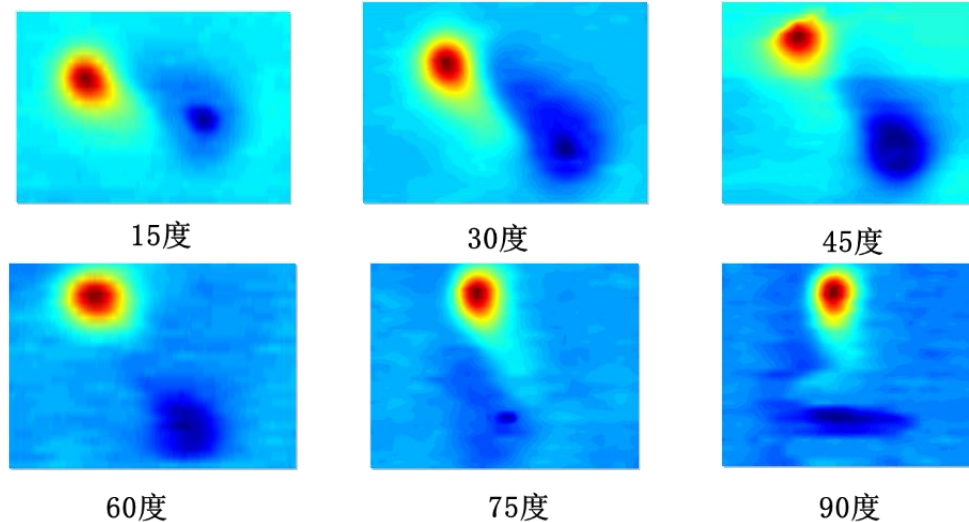
人工缺陷试件



缺陷角度描述



铝板任意方向裂纹检测结果

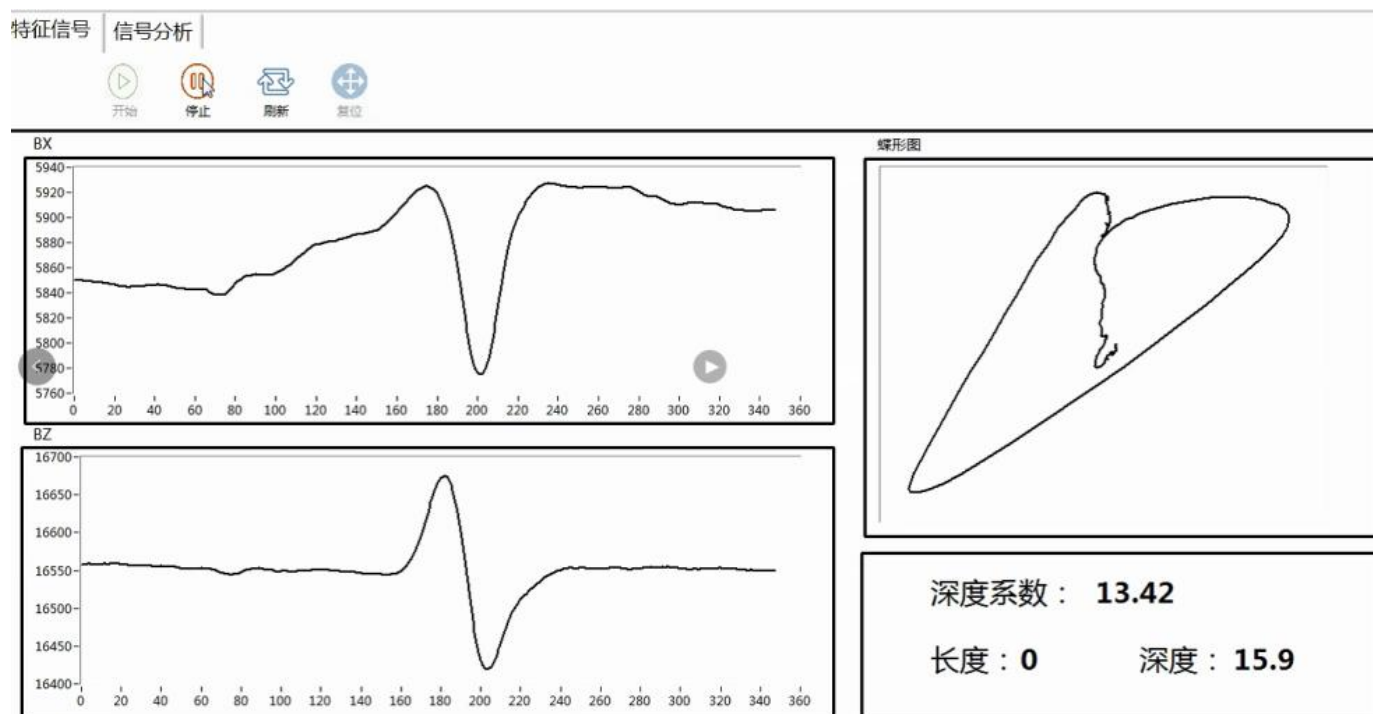


突破传统ACFM和漏磁技术对裂纹方向的限制，对任意方向裂纹均有较高的检测灵敏度。

# 检验优势

不需要采用试块校验，有精确的理论依据和数学模型，可直接对缺陷进行定量检测。

检测系统由主机与探头组成，轻便易携；无需任何耗材、介质和耦合剂，探头可以较快的速度进行扫查，检测无后效性，无需退磁、表面清理等环节，减少检测人员的劳动强度，提升检测效率，节省费用。



# 技术对比

与传统的表面探伤方法磁粉检测、渗透检测、涡流检测、漏磁检测技术对比

特性 \ 种类	交流电磁场	磁粉检测	渗透检测	涡流检测	漏磁检测
检测材料	各种导电材料	铁磁性材料	各种材料	各种导电材料	铁磁性材料
表面缺陷检测	能	能	能	能	不敏感
近表面缺陷检测	能	能	不能	不能	能
缺陷长度/深度计算	能	不能	不能	能	能
检测深度	铝10 mm 不锈钢5 mm 碳钢3 mm	碳钢3 mm	不能	——	横裂纹
检测灵敏度	长≥3 深0.5mm	不限	不限	——	——
穿透涂层检测	能，很强	不能	不能	能，很弱	能
被检工件表面清理	不需要	需要	需要	不需要	需要
记录检测过程、结果 \ 记录数据类型	过程、结果都可记录 \ 参数、曲线、C扫描图形	结果可记录 \ 图片、视频	结果可记录 \ 图片、视频	过程、结果都可记录 \ 参数、曲线、C扫描图形	过程、结果都可记录 \ 参数、曲线、C扫描图形
水下 \ 高温检测	能 \ 能	不能 \ 不能	不能 \ 不能	能 \ 能	——
检测前校正	不需要	需要	需要	需要	需要
操作难度 \ 效率	中 \ 高	中 \ 中	低 \ 高	高 \ 高	高 \ 高
检测后效性	无需清理	需要清理	需要清理	无需清理	需要退磁
检测耗材	不需要	需要	需要	不需要	不需要
使用阵列成像探头	能	不能	不能	能	能





# 检测应用

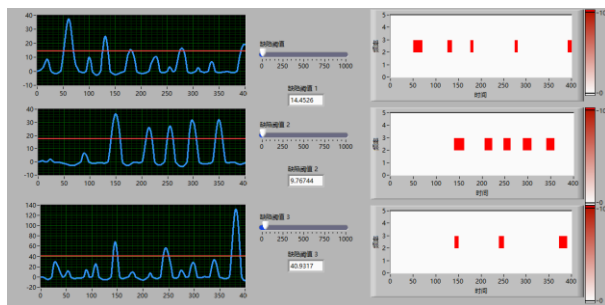
Technical Application



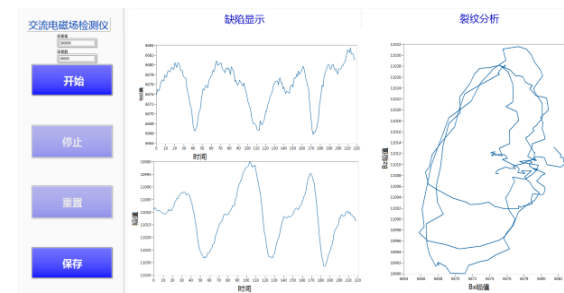
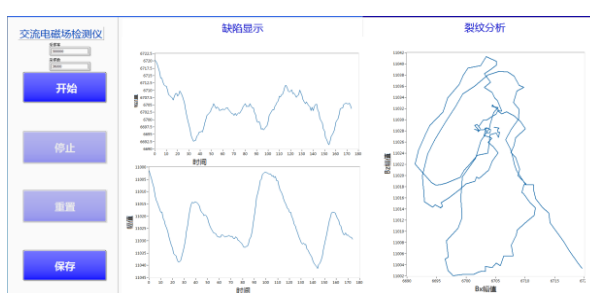
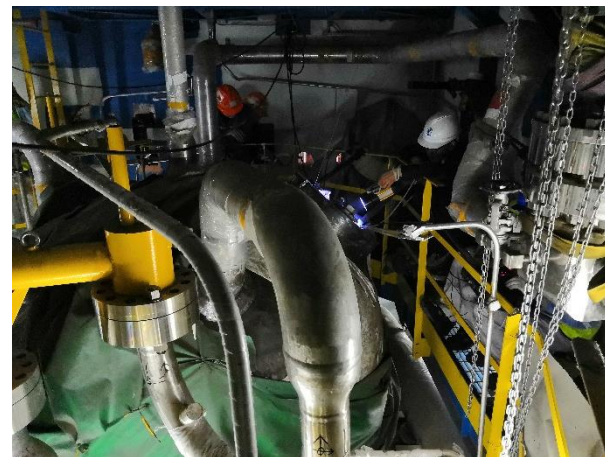
## 现场应用-核电行业



中核燃料水池模拟测试



田湾5号机稳压器仪表管测试

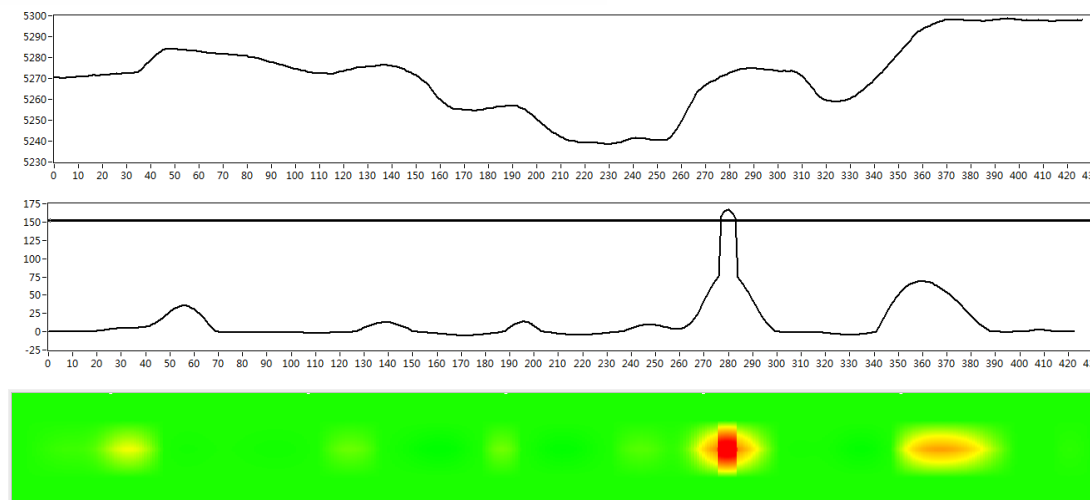
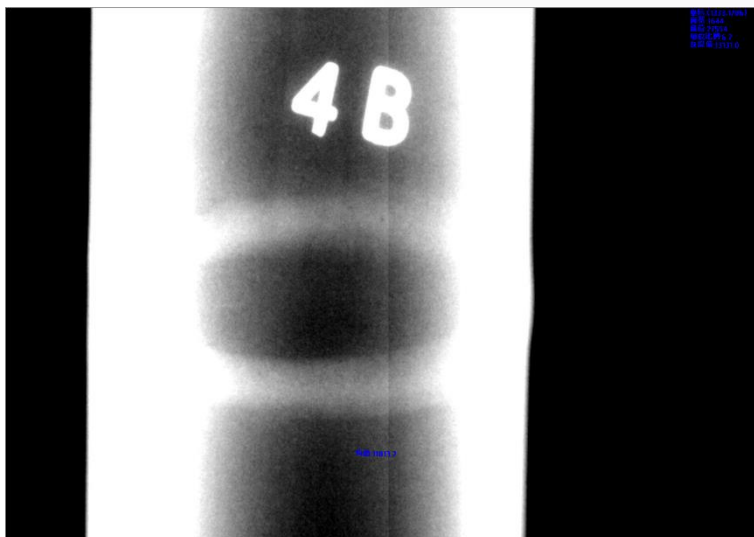


## 现场应用-核电行业

某核电产业园  
不锈钢小径管缺陷检测  
数量：500  
规格：DN23-88  
材质：316L  
温度：20-40℃



## 现场应用-核电行业



共计发现缺陷多处，以内部气孔为主，采用射线检测复测，检测结果存在差异，但仍不失为一种有效的替代方法。





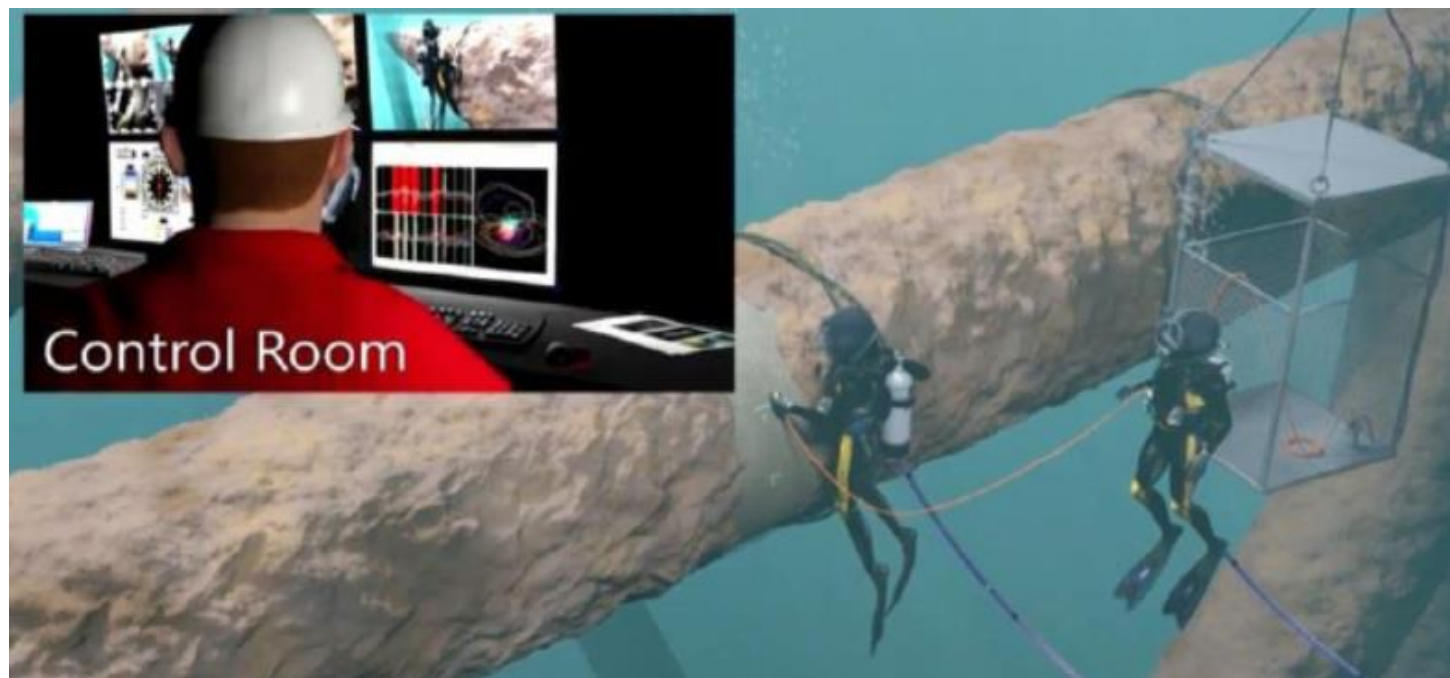
## 现场应用-海上石油平台



青岛北海船厂  
渤海9号平台  
K字导管架及齿条焊缝缺陷检测  
位置：40-50米层  
材质：碳钢  
表面：去除海生物

发现缺陷2处，  
长度在20-30mm  
磁粉打磨复测一致

## 现场应用-海上石油平台

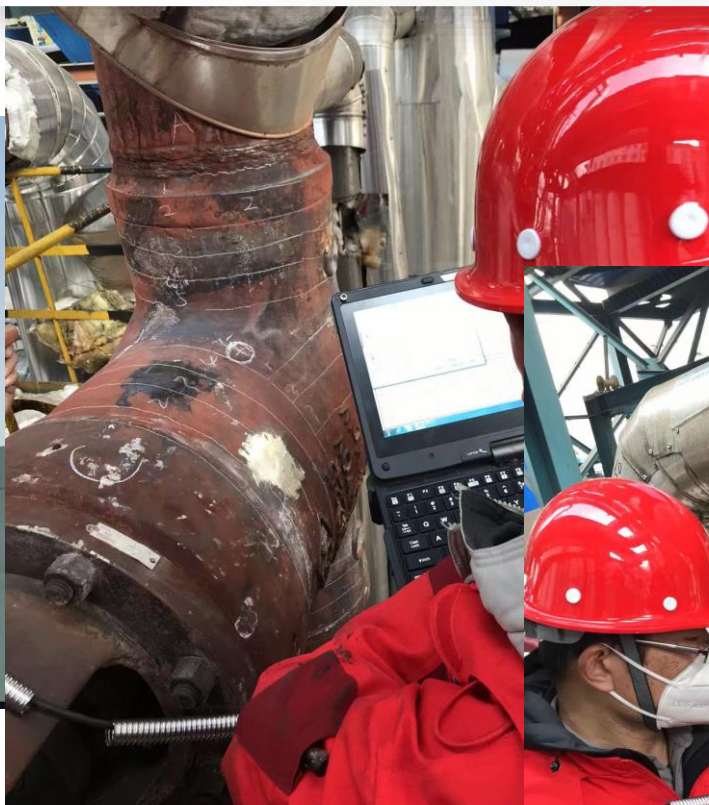




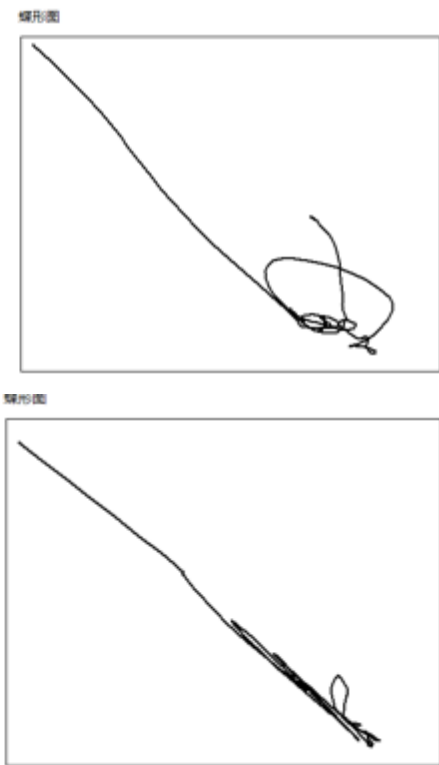
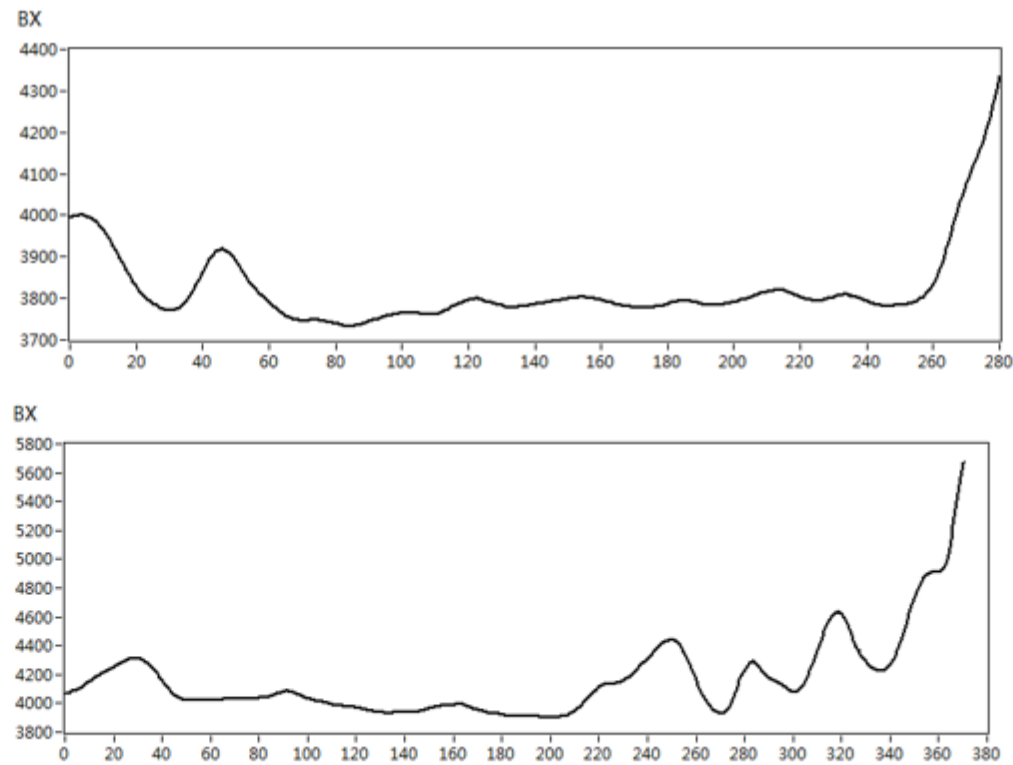
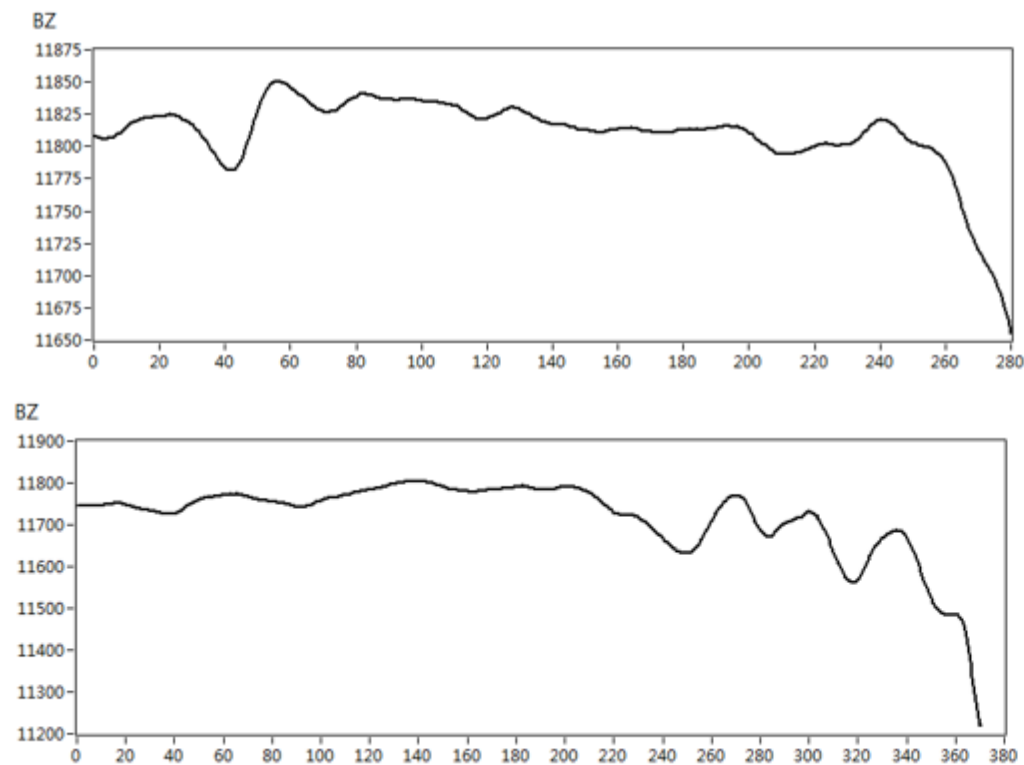
## 现场应用-热电厂



山东日照某电厂  
高温蒸汽管道阀门在线检测  
数量：19  
规格：DN125/DN175/DN225  
材质：20G  
温度：220-340℃



# 检测应用



共计发现缺陷28处，以表面裂纹及内部砂孔为主

其中一处缺陷检测图像如图所示：  
表面未开口，打磨后确认直径约为2mm



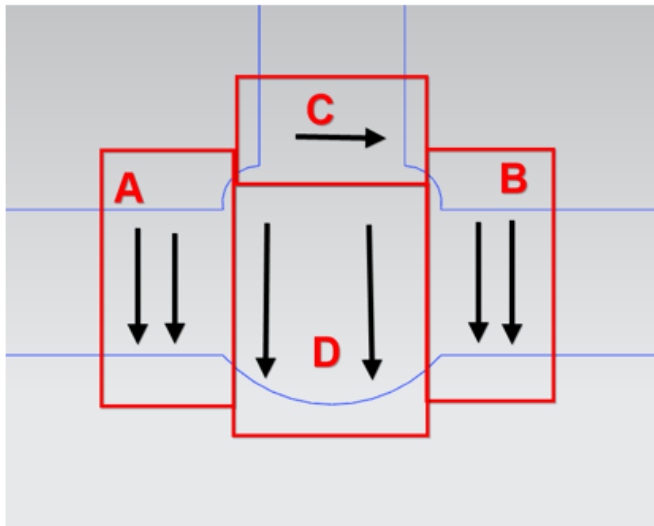
现场应用-热电厂



工程名称		山钢集团日照分公司能源动力厂阀门定检		原始记录编号		LKJL-ACFM-22. 04. 22-S
委托单位		山东省特种设备检验检测研究院		工艺规程编号/版本号		LK-ACFM-A3-G
执行标准		Standard Practice for Examination of Welds Using the Alternating Current Field Measurement Technique （E2261）				
检件概况	检件名称	双母管阀门	检件编号	/	检件类别	/
	检测规格	DN100//175	检测比例	100%	检件材质	15Cr1MoV
	检测部位	本体+焊接接头	检件数量	5	检测面	/
检测条件及工艺	热处理状态	/	表面状态	高温+未打磨	检测区域	100%
	设备型号/编号	LKACFM-X1	试块型号	ACFMT 校验试块	保护层	4mm
	探头规格	PL20-G	探头扫描范围	20mm	探头移动速度	20-40mm/s
	检测频率	/	扫描覆盖率	>探头宽度 15%	扫描灵敏度	5*1mm
	扫描方式	前后、左右、转角、环绕扫描				



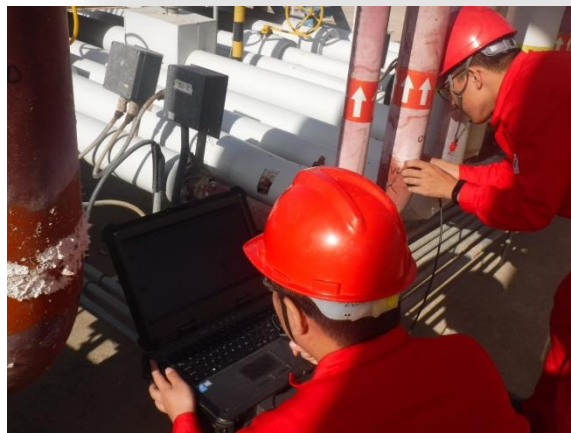
现场应用-热电厂

日期：2022.4.21		位置：见检测示意图，y3 处		
时间：10:42				
操作人员：lzc		仪器：LKACFM-X1		
部件编号：1#炉至甲母管电动隔离阀(DN175)				
不连续描述：发现缺陷 1 处，一处缺陷长 3mm，深 1mm；现场消缺，复测合格。				
检测文件：				
探头编号：LKACFM-PL20-G			探头文件：LKACFM-PL20-G	
数据编号	移动方向	检测图像	缺陷位置	检测报告/注解
A-1-1	顺时针	见附件	/	未见缺陷
A-1-2	顺时针	见附件	/	未见缺陷

## 现场应用-油气管道



分离器



输气管道



压缩机房



注气站



包头市东河天然气站，天然气管道在线检测

# 检测应用



检测结果



结果分析



焊缝左边热影响区存在裂纹，裂纹长10mm，深度3.5mm

# Thanks

**感谢您的耐心观看**