**山东省地方标准《****金属结构交流电磁场检测技术规程》编制说明**

1 工作简况

1.1 任务来源

为提高金属结构交流电磁场检测技术的检验效率及质量，规范操作规程，保障特种设备安全，由山东省市场监督管理局立项，根据山东省市场监督管理局《关于征集2021年度地方“山东标准”建设项目的通知》（鲁市监函[2021]33号），决定《金属结构交流电磁场检测技术规程》地方标准的制定。

本文件由山东省特种设备标准化技术委员会提出并归口。

1.2主要起草单位

中国石油大学（华东）、济宁鲁科检测器材有限公司、山东省特种设备检验研究院有限公司、山东鲁安检测技术有限公司、日照市特种设备检验科学研究院、潍坊市特种设备检验研究院、聊城市特种设备检验研究院、山东安泰化工压力容器检验中心有限公司、东营市特种设备检验研究院、临沂市特种设备检验研究院、济宁市特种设备检验研究院、泰安市质量技术检验检测研究院、山东省特种设备检验研究院菏泽分院、深圳海油工程水下技术有限公司、中海石油技术检测有限公司。

1.3主要起草人员

李伟、袁新安、赵建明、刘正存、姚参军、刘召东、李以善、胡栋、陈炳荣、曲其飞、李敞、杨忠杰、曹志峰、朱金朝、梁玉梅、薛建祥、王庆丽、任伟彬、杜颖、潘闻。

1.3任务分工

李伟：标准起草总负责人，组织标准起草工作，把握标准制定技术方向，组织协调标准制定所需资源。

袁新安：组织起草组人员进行调研、收集素材，组织起草人员编写标准，参与标准编写。

赵建明：进行相关标准调研、收集素材，编写标准框架，参与意见征集。

姚参军：调研相关标准，参与修改和编写标准，主持意见征集。

刘正存：规划实验，实施实验，对实验结果进行处理。

李以善：组织讨论确定标准框架、编写思路，组织起草组人员学习相关文件，讨论确定标准化对象需要规范的技术要素。

刘召东、胡栋、陈炳荣、曲其飞、李敞、杨忠杰、曹志峰、朱金朝、梁玉梅、薛建祥、王庆丽、任伟彬、杜颖、潘闻：参与标准的编写，根据现场经验对标准进行修改和完善，并参与现场实验。

1.4主要研制起草过程

前期准备：起草单位项目组成员长期致力于交流电磁场检测技术的理论、方法、仪器和工程应用领域的相关研究。在理论模型、微弱信号处理、智能识别方法、缺陷高精度量化、缺陷可视化和新型交流电磁场检测仪器的研发及其工程应用等领域取得了多项原创成果，获得山东省科技进步二等奖、青岛市科技进步一等奖等省部级科技奖励5项。在IEEE Transactions on Industrial Informatics、NDT and E international、Mechanical System and Signal Processing、机械工程学报等国内外顶尖学术刊物发表论文70余篇（SCI、EI收录40余篇），授权发明专利14项。

项目组成员完成国家及省部级科研项目10余项，其中国家自然科学基金项目2项，国家重点研发计划子课题1项；研发的交流电磁场智能可视化检测仪器成功应用于海洋工程、核电、特种设备和轨道交通等多领域，应用效果良好，核心指标达到国际先进水平，取得多项创新性研究成果。相关研究成果入选中国机械工程学会《2025中国无损检测发展路线图》，有力促进无损检测技术和方法的发展。

其中代表性成果如下：

[1] 复杂工况结构缺陷智能电磁成像检测关键技术及工业应用，山东省科学技术奖，科技进步二等奖，2021；

[2] 能源装备电磁耦合智能安全检测关键技术与工业应用，青岛市科学技术奖，科技进步一等奖，2020；

[3] 海洋装备交流电磁场智能安全检测及可视化评价技术与应用，山东省高等学校科学技术奖，一等奖；

[4] 深水钻井隔水管系统安全高效作业关键技术及其工业化应用，中国石油和化学工业联合会科技进步奖，一等奖，2019.

[5] 中国专利, 李伟; 赵建明; 葛玖浩; 袁新安; 刘阳, 一种脉冲ACFM铁磁性金属结构壁厚测量方法, 申请, CN201910018077.4

[6] 中国专利, 李伟; 赵建明; 葛玖浩; 袁新安, 一种铝合金管道内外壁缺陷检测探头, 申请, CN201811434530.1

[7] 中国专利, 袁新安; 李伟; 陈国明; 吴衍运; 杨伟超; 马维平, 一种海洋结构物缺陷交流电磁场三维成像检测探头,申请, CN201610827008.4

[8] 中国专利, 袁新安; 李伟; 陈国明; 杨伟超; 刘健; 马维平, 一种内穿式管道内壁缺陷ACFM探头,申请, CN201610826150.7

[9] 中国专利, 袁新安; 李伟; 陈国明; 杨伟超; 刘向阳; 蒋维宇, 基于交流电磁场检测技术的缺陷判别方法, 申请, CN201810033298.4

[10] Yuan, Xin'an; Li Wei; Chen, Guoming; Yin, Xiaokang; Yang, Weichao; Ge, Jiuhao,Two-Step Interpolation Algorithm for Measurement of Longitudinal Cracks on Pipe Strings Using Circumferential Current Field Testing System, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018.2, 14(2): 394~402.

[11] Yuan, Xin'an; Li Wei; Chen, Guoming; Yin, Xiaokang; Jiang, Weiyu; Zhao, Jianming; Ge, Jiuhao, Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method, Mechanical Systems and Signal Processing, 2019.7.15, 127: 16~34.

[12] Ge Jiuhao; Li Wei; Chen Guoming; Yin Xiaokang; Yuan Xinan; Yang Weichao; Liu Jian; Chen Yuxi, Multiple type defect detection in pipe by Helmholtz electromagnetic array probe, NDT & E International, 2017.10, 91: 97~107.

现状调查：交流电磁场检测技术在上世纪80年代由英国伦敦大学学院Dover等教授提出，经过近40余年发展，仪器发展及技术应用已十分成熟，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（例如ASME SE2261、ASTM E2261）。国内关于交流电磁场检测技术相关标准仅限于海工领域，国内船级社制定《在役导管架平台结构检验指南》，中国潜水打捞行业协会制定《水下钢结构交流电磁场裂纹检测规范》，仪器性能检验及评定相关标准滞后，严重影响了仪器的研发及推广应用。

提出阶段：2021年2月，根据山东省地方标准编制计划的通知，中国石油大学（华东）立足交流电磁场在金属结构检测方面丰富的科研和现场应用经验，联合山东省特种设备检验研究院、济宁鲁科检测器材有限公司等8家科研和应用单位，提出制定地方标准《金属结构交流电磁场检测技术规程》的思路，规范金属结构交流电磁场检测技术的操作流程，保障该技术在金属结构检测方面的应用质量，推进无损检测新技术在特种设备领域的应用，逐步完善山东省交流电磁场检测技术体系。2021年3月成立标准编写组，组织立项准备会议，经过会议讨论，形成了标准的工作思路与编制原则，初步确认了标准技术方案与内容框架。会议还就现阶段任务分解与分工、标准进度及下一步工作安排进行部署和规划。

起草阶段：2021年4月，编写组召开第一次讨论，各参与单位就标准框架及范围展开了充分讨论，按照范围、规范性引用文件、术语和定义、规程要求、设备、其他要求、校验、检测、文件等9部分进行编写，结合高校丰富的科研经验和研究院、检测公司丰富的工程应用经验，讨论形成了标准草案。

1.4征求意见

中国石油大学（华东）将《金属结构交流电磁场检测技术规程》（征求意见稿）发到全省各个检测单位、设计单位征求意见，包括：国网山东省电力公司电力科学研究院、廊坊北检无损检测有限公司、洛阳石化工程设计有限公司、菏泽市产品检验检测研究院、焦作市特种设备检测检验所、聊城市特种设备检验研究院、苏州热工研究院、中国石化集团天津石油化工公司、大连恒亚仪器仪表有限公司、中石油西部钻探克拉玛依钻井公司、淄博正诺工程检测有限公司、石家庄飞泰检测仪器有限公司、河北旭光科技有限公司、东营市巨龙无损检测有限责任公司、北京天创时代信息技术有限公司、天津市首通工程检测技术有限公司、

交通运输部烟台打捞局、深圳市德威胜潜水工程有限公司、中核武汉(105所)、中国航发沈阳发动机研究所、沈阳飞机工业集团、内蒙古第一机械集团有限公司、哈尔滨工程大学、天津智嘉航科技有限公司、乌鲁木齐科比检测有限公司、济宁尚佳检测科技有限公司、北京精准科技有限公司等31家单位，其中共有23家单位回函，收到有效的反馈意见和建议77条。

规程编制组汇总分析反馈意见，根据技术实际应用及标准撰写过程，采纳其中60条。根据反馈意见，对规程内容进行逐条逐句推敲修改，同时优化仿真及试验方案，深入了解现场检测情况，确定了更加合理，切实有效的检测规程，编制完成《金属结构交流电磁场检测技术规程》（送审稿）。

2地方标准制定目的和意义

金属结构是压力容器、锅炉、管道等国家重要的基础设施的重要组成部分，但是由于其常处于恶劣的服役环境中，因此金属结构表面极易产生腐蚀、裂纹等缺陷，威胁设备的安全运行。

目前常用的检测方法为磁粉检测和渗透检测，但是磁粉检测和渗透检测检测之前需要停工停产，增加了检测的成本；在被测设备的表面通常都有油漆层，受到自然因素影响，表面也会出现铁锈、腐蚀坑等影响表面探伤的干扰物。如需进行表面探伤，必须进行表面处理，去除涂层、打磨铁锈等，既耗费了大量人力物力，也对工件表面造成了损伤。而且目前压力管道、容器的检验也都是以抽检为主，就是受到该因素的影响。两种方法都只能检出裂纹，并不能测出裂纹的深度，无法对设备进行必要的安全评估，增加了设备安全运行的风险；并且两种检测方法都会产生废渣和废液，污染环境。

交流电磁场作为近几年来发展起来的新型无损检测技术，具有可以实现在役检测、无需表面清理、不需要后处理、可以实现裂纹的精准定量评估等优点，目前已经证明对金属结构表面裂纹具有很好的灵敏度，所以推进交流电磁场在金属结构检测上的应用，可以提高金属结构的检测效率，降低检测的时间，产生良好的经济效益，更有利于保障设备的安全运行和人民的生命安全。

3地方标准编制原则、主要技术内容和确定依据及理由

3.1 标准编制原则

（1）标准是在近年来研究基础上，参考国际标准、广泛征求同行及使用单位的意见、充分考虑我国行业发展现状和未来发展的趋势，并以此为技术依据制定；

（2）标准编制遵循“统一性、协调性、适用性、一致性、规范性”的原则，严格按照《GB/T 1.1-2009 标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写规则》的规定进行编写和表述；

（3）与国家法律、法规及有关标准保持一致。

3.2 主要技术内容和确定依据及理由

3.2.1 主要内容

本标准规定了交流电磁场检测的术语和定义、检测人员及设备的要求、检测工艺的基本要求、缺陷的评判及检测报告等基本要求。

本标准的主要内容包括范围、一般要求、检测工艺、检测方法、检测程序、检测数据的分析、缺陷评判等。

3.2.2 参考标准

依据《中华人民共和国特种设备安全法》、《Standard Practice for Examination of Welds Using the Alternating Current Field Measurement Technique》，ASTM《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、《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、《特种设备安全监察条例》、《在役导管架平台结构检验指南》、《压力管道定期检验规则—工业管道》、《特种设备使用管理规则》、《无损检测》等，结合实际检验情况，做出更明确的规定。

3.2.3 条目依据

（1）概述

ACFM探头沿着X方向扫查，探头内的激励线圈在金属结构表面产生平行于Y方向局部均匀感应电流。位于探头正下方X方向两侧近距离内的任何表面开口不连续将中断或干扰均匀感应电流的流动。通过接受磁场传感器测量金属结构表面磁场的两个主要分量Bx和Bz的大小来判定缺陷的存在并确定缺陷尺寸。通过选择表面磁场分量Bx和Bz轨迹上的关键点，能够估算不连续的尺寸，通常采用Bz峰谷间距评估裂纹长度，采用Bx波谷深度评估裂纹深度。

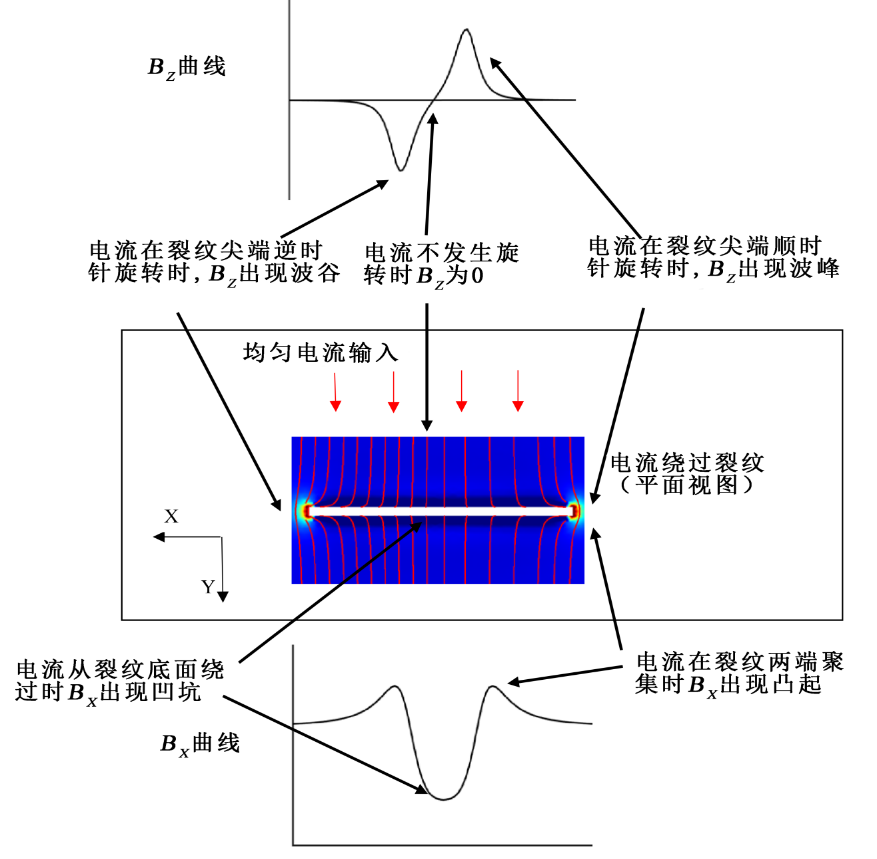


图1 ACFM原理图

探头沿着X方向扫查，当裂纹沿着X方向时，金属结构表面感应电流垂直绕过裂纹，感应电流引起的畸变磁场达到最大数值，交流电磁场检测灵敏度最高。

探头沿着X方向扫查，当裂纹沿着Y方向时，金属结构感应电流与裂纹平行。此时，非铁磁性金属结构感应电流引起的畸变磁场数值达到最小，交流电磁场检测灵敏度最低，易造成裂纹漏检。铁磁性材料感应电流引起的畸变磁场数值达到最小，但激发磁场垂直穿过裂纹并形成泄漏磁场，磁场分量Bx呈现波峰和极大值，特征信号Bz呈现较窄的峰谷变化，可通过Bx峰值高度评估Y方向裂纹深度。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Bx | Bz | Bx | Bz |
| 0° |  |  |  |  |
| 45° |  |  |  |  |
| 90° |  |  |  |  |
|  | （a）非铁磁性材料 | | (b)铁磁性材料 | |

图2 不同角度裂纹检测结果

对于表面状况较好的缺陷，可采用蝶形图判定方法，以特征信号Bx为横坐标。

对于表面状况比较差的缺陷检测，裂纹引起的畸变容易被掩盖，可通过对Bz信号求取梯度、降噪滤波、祛除负值算法获取梯度图，辅助判定缺陷的存在。通过梯度图设置判定阈值可显著提升缺陷判定准确率，有利于金属结构表面焊缝、凸起等状态较差条件下微小缺陷检测。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | |  | |
| (a) 表面状态较好时 | | （b）表面状态较差时 | |
| 图3不同表面状态检测结果 | | | |

（2）书面规程要求

通过理论和实验相结合的方式，对金属结构交流电磁场检测规程的基本变素和非基本变素进行分析。

|  | 相关因素 | 非相关因素 |
| --- | --- | --- |
| 探头（型号和编号） | √ | — |
| 仪器（型号和编号） | √ | — |
| 扫描方向和范围 | √ | — |
| 激励频率 | √ | — |
| 涂层厚度（仅当增大时） | √ | — |
| 被检结构表面状态 | √ | — |
| 人员操作资格鉴定要求 | √ | — |
| 扫查速度范围 | √ | — |
| 表面准备所用技术 | — | √ |

当基本变素发生变化时，必须通过校验对书面规程重新进行验证。非基本变素发生变化时，不要求对书面规程重新校验。

a）仪器、探头

当更换检测仪器或探头时，由于加工误差，激励信号的幅值和功率会产生一定的波动，进而导致磁场信号产生一定的偏差。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| （a）仪器1 | (b) 仪器2 | (a)探头1 | （b）探头2 |
| 图4不同检测仪器结果 | | 图5不同检测探头结果 | |

b）扫描速度

交流电磁场产生的均匀场具有一定的方向，当扫描的方向变化时，感应电流绕过的方向会发生偏转。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
| (a) 正向扫描方向 | (b) 正向扫描方向 |
| 图6不同扫描方向结果 | |

c）激励频率

根据集肤效应，不同激励频率将在金属结构上感应的均匀电流分布不同。

|  |  |
| --- | --- |
| G:\博士开题\第三章\Bx.png | G:\博士开题\第三章\轴向Bx.png |
| (a) 不同激励频率Bx信号 | (b) 特征信号Bx畸变量 |
| G:\博士开题\第三章\Bz.png | G:\博士开题\第三章\轴向Bz.png |
| (c) 不同激励频率Bz信号 | (d) 特征信号Bz畸变量 |
| 图7不同激励频率结果 | |

d）涂层厚度

当被检金属结构表面涂层较厚时，检测探头的提离距离变大，被检金属结构的感应电流减小，检测传感器的对缺陷的灵敏度降低。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |
| (a) ΔBx随涂层厚度变化 | (b) ΔBz随涂层厚度变化 | | (c) 梯度最大值随涂层厚度变化 |
|  | |  | |
| (d) 涂层 | | (e) 实验照片 | |
| 图8不同厚度结果 | | | |

e）被检结构表面状态

当结构表面状态较差时，会导致探头在扫查过程中提离距离不断变化，进而引起检测信号的畸变。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
| 1. 单个焊缝 | 1. 多条焊缝 |
| 图9 不同表面状态结果 | |

f）扫描速度

当检测速度较快或者较慢时，检测仪器设置的采样数和采样率和速度之间不匹配，将导致检测信号的失真。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (a) △Bx随速度变化 | (b) △Bz随速度变化 | (c) 梯度最大值随速度变化 |
|  |  |  |
| (d) 试件 | (e) 检测实验图 | |
| 图10 不同扫描速度结果 | | |

（3）设备要求

a）仪器

ACFM系统包括仪器，探头，装有检测软件的显示终端，电缆及附件。

ACFM系统的组成部分应符合下列要求：

a) 仪器应满足实施检测作业的要求，具有数据自动采集、记录功能，具有指示和分析功能；

b) 探头应能产生适用于所检测构件材质的一个或多个频率激发信号，并能同时测量磁场的Bx和Bz信号，名义频率应为1 kHz，除非材料、表面状态或涂层变化而要求采用其他频率；

c) 显示终端装有检测软件，软件显示应包括Bx和Bz信号的平面图，蝶形图及梯度图。

|  |  |
| --- | --- |
|  | 蝶形图  Bz  Bx |
| 报警图  梯度图 |
| (a) 检测仪器 | (b) 检测软件 |
| 图11 检测仪器图 | |

b）探头

名义频率应为1kHz，除非材料、表面状态或涂层变化而要求采用其他频率。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| (a) 单探头设计图 | (b) 单探头实物图 | |
|  |  |  |
| (c) 阵列探头设计图 | (d) 阵列探头设计图 | |
| 图12 探头图 | | |

c）试块

用于制作试块的材料应与被检材料具有相同或相近规格、牌号、热处理状态、表面状态和电磁性能。试块的焊缝应与被检焊缝具有相同的焊接工艺，保持试块与待测结构状态相近或相同。

试块上应制作已知深度和长度的切槽来验证系统的功能是否正常。

应检查试块是否有剩磁，如有必要，应进行退磁。

试块的形状和切槽应如图13所示。试块上有焊缝时，切槽应加工在焊缝趾部（热影响区）和焊缝中。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 图13 试块图 | |

（4）其他要求

a）表面修整

采用焊、轧、铸、锻后的自然表面状态通常可获得满意的结果。如表面质量影响检测结果时，可进行一定的打磨；

进行ACFM检测前，被检表面及邻近25mm范围区域内，应当没有污垢、锈皮、焊剂、油类、磁性覆层或其他可能影响检测的外来物；

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
| (a) 无外来物 | (b) 有外来物 |
| 图14 表面修整结果 | |

b）退磁

剩磁场会影响ACFM的感应场并产生伪显示。因此ACFM宜在磁粉检测(MT)前进行。如果在MT后进行ACFM，当表面有剩磁场存在时，进行退磁。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
| (a) 磁粉实验前 | (b) 磁粉实验后 |
| 图15 退磁实验结果 | |

c）基本要求

整个ACFM系统应在使用前后进行校准和灵敏度检查探头。

7.1.2　影响系统灵敏度的任何设定，在校准、核查、检测时应一致。

d）校准和灵敏度调整

系统校准：通过将探头移过图13中的标准试块的切槽并注意其响应。探头在标准试块焊缝无缺陷区域进行扫查，设定此时梯度信号最大值的3倍为阈值。探头沿着1号切槽长度方向扫查并与检测面保持接触。探头的扫查应使得1号切槽的梯度信号最大值高于阈值，且Bx、Bz信号和蝶形图为典型缺陷信号，此时校准完成。

灵敏度调整：将探头移过标准试块上的2，3号切槽并注意其响应，应使得2，3号切槽的梯度信号最大值高于阈值，同时，Bx、Bz信号和蝶形图信号为典型缺陷信号，此灵敏度下应能清晰地分辨出每一个人工缺陷信号，灵敏度调整完成。

基本变素改变时，应在标准试块上进行一次核查，对2，3号切槽重新扫查，要求本次缺陷最大梯度信号与上次缺陷最大梯度信号的误差不超过10%。

至少每隔四个小时、检测结束后，以及检测过程中出现明显异常时应对系统灵敏度进行核查，如果在标准试块上切槽的信号响应变化超过10%，上次核查以来检测的部位应进行复检。

（5）检测

a）一般检测要求

探头移动速率：探头扫查速率应控制在20-60mm/s。

探头接触：扫查时探头应与检测面保持接触。

b）覆盖

两次相邻检测的扫查区域在长度和宽度方向应有20%的覆盖。

c）解释

解释应区分一个显示是伪显示、非相关显示或相关显示。伪显示和非相关显示应加以证实。解释时应明确不连续的位置。

d）检测覆盖范围

检测焊缝时，应将探头放置在焊缝趾部，探头前端平行于焊缝长度方向。沿焊缝趾部平行地移动探头。然后在焊缝的另一侧趾部作同样的扫查。重复这两次扫查。除非另有演示验证，当焊缝宽度大于10mm时，应沿焊缝中心线增加一组扫查。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
| (a) 无偏移 | (c) 偏移2 | (e) 偏移4 |
|  |  |  |
|  |  |  |
| (b) 偏移1 | (d) 偏移3 | (f) 偏移5 |
| 图16 偏移扫描结果 | | |

（5）文件

对每次检测，应至少记录以下内容：

a) 工艺规程编号和版本；

b) ACFM仪器型号和编号；

c) 探头型号和编号；

d) 标准试块；

e) 被检焊缝或表面编号和位置；

f) 检测时机

g) 相关显示及其位置，范围。

h) 限制接近区域或不能接近的区域；

i) 人员资质（有要求时）

4 与现行相关法律、行政法规和其他标准的关系

与现行相关法律、行政法规无冲突。

5重大分歧意见的处理过程处理意见及其依据

本项目无重大分歧意见。

6对地方标准自发布日期至实施日期之间的过渡期的建议及理由

建议过渡期3个月。

金属结构的检测单位是标准实施的主题，为确保其准确理解、掌握和执行标准，标准发布后将向标准实施主体进行推广和宣贯，推动标准的落地实施。预计此项工作需要3个月的时间。

7其他应予说明的事项

无

山东省地方标准《金属结构交流电磁场检测技术规程》

编制工作组

2022年9月25日