

直管道电场指纹法有效检测区范围的数值模拟

姚万鹏^a, 吴承昊^a, 李强^b, 齐建涛^c, 唐晓^a, 李焰^a

(中国石油大学(华东) a. 材料科学与工程学院; b. 储运与建筑工程学院; c. 化学工程学院,
山东 青岛 266580)

摘要: **目的** 确定电场指纹法应用于直管道时的有效检测区大小。**方法** 采用 COMSOL 多物理场数值模拟的方法, 研究直管道模型在电场指纹检测时的电场分布特征, 并探讨电流输入方式、电源电极尺寸、管道尺寸等因素对有效检测区的影响。**结果** 双路电流输入方式能够获得更大的有效检测区, 可提高电流利用率及检测效率。有效检测区大小受电源电极尺寸、管道壁厚变化的影响极小, 受管道公称直径影响较大。有效检测区与电源电极的最小间距固定, 约为管道公称直径的 1.5 倍。**结论** 确定了电场指纹法应用于直管道时有效检测区的大小, 为电场指纹法的管道检测规范的制定提供了科学依据。

关键词: 电场指纹法; 管道腐蚀检测; 有效检测区; 数值模拟

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.11.006

中图分类号: TE988

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)11-0030-06

Numerical Simulation on Effective Detection Region of Field Signature Method-straight Pipeline

YAO Wan-peng^a, WU Cheng-hao^a, LI Qiang^b, QI Jian-tao^c, TANG Xiao^a, LI Yan^a

(a. School of Materials Science and Engineering; b. College of Pipeline and Civil Engineering; c. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: Objective To determine the size of the effective detection region when the electric field fingerprint method is applied to the straight pipeline. **Methods** The COMSOL multi-physics numerical simulation method was adopted to study the electric field distribution characteristics of the straight pipeline model in the detection of FSM and discuss the influences of current input mode, power supply electrode size, pipeline size and other factors on the effective detection area. **Results** The double-channel current input method can obtain a larger effective detection region, improving the current utilization rate and detection efficiency. The size of the effective detection region was little affected by the size of the power supply electrode and the change of the pipe wall thickness, but was greatly affected by the nominal diameter of the pipeline. The minimum distance between the effective detection region and the power electrode was fixed, which was about 1.5 times of the nominal diameter of the pipe. **Conclusion** The side of the effective detection zone size can be determined with the electric field fingerprint method, which provides a scientific basis for the establishment of the pipeline detection specification of the electric field fingerprint method.

KEY WORDS: field signature method; pipe corrosion detection; effective detection region; numerical simulation

收稿日期: 2019-04-16; 修订日期: 2019-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(41676071); 中国石油大学(华东)自主创新科研计划(18CX05021A)

作者简介: 姚万鹏(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为腐蚀监测技术。

通讯作者: 李焰(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。

管道运输在现代运输业中占有相当重要的地位，是石油、天然气远距离运输最主要的手段。随着管道使用时间的延长，老龄期管道将进入事故多发期，一旦发生泄漏或爆裂将会造成重大经济损失和严重后果。因此，对运输管道进行腐蚀监测或定期检测，及时识别其腐蚀损伤情况，具有十分重要的工程意义。电场指纹法（Field Signature Method, FSM）是 20 世纪 90 年代兴起的一种非介入式无损检测方法。它通过给待测区域通入激励电流，将待测区域的响应电压与代表待测区域原始几何形状的初始电压值对比得到指纹系数（Fingerprint Coefficient, FC），从而判定待测区域的腐蚀缺陷情况^[1-2]。相对而言，FSM 检测的敏感性和灵活性比大多数无损检测方法优越，具有较高的检测精度，适用温度范围较广，检测深度较大^[3-4]。这一技术主要应用于管道腐蚀的在线检测^[5-7]，此外在石油炼化^[8]、桥梁建筑^[9-10]等领域也均有成功应用。

FSM 检测设备包含两种电极：一种是布设于检测区域两端用于电流馈入和馈出的电源电极；另一种是用于获取响应电压数据的阵列式检测电极^[11]。由于在对管道进行加载电流、激励时，电力线会在电源电极临近区域汇聚，在 FSM 检测时易获得不相干信号，影响检测结果的判读。为确保作为“指纹”的初始电压信号的可靠性和准确性，检测电极须布设在与电源电极保持一定间距之外的电场分布均匀的等精度区域内，即有效检测区内。在此前的研究中，大多数研究者^[12-15]对不同检测要求下电极的布局提出了一些指导性原则，但关于有效检测区范围的研究鲜有报道。大型构件如长管道、罐体结构等如何设定电极的位置与间距一直是一个技术难点^[16]。因此，研究管道模型的电场分布特征，确定有效检测区的范围，对于后续检测电极间距的确定及 FSM 管道检测规范的制定有重要的工程意义。

文中采用数值模拟的方法，利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件对直管道模型 FSM 检测时的电场分布特征进行了仿真，研究了单路与双路电流输入时有效检测区范围的大小，并对电极尺寸、管道尺寸等不同因素对有效检测区的影响进行探讨，给出了确定管道有效检测区范围的建议。

1 直管道模型建立

1.1 材料属性及几何模型

模型材料为 AISI 1020 钢材，计算涉及的材料主要参数有：材料电导率为 8.41 MS/m，材料相对介电常数为 1×10^7 。计算模型为三维直管道模型，模型尺寸如图 1 所示。

1.2 初始条件和边界条件

利用 COMSOL Multiphysics 软件中的 AC/DC 模

块进行稳态研究，电场的初始条件和边界条件为：

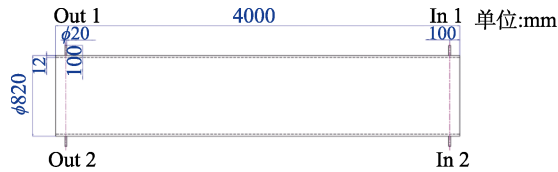


图 1 模型结构尺寸

$$J = \sigma E + J_e$$
$$E = -\nabla V$$
$$\nabla \cdot J = Q_{j,v}$$
$$n \cdot J = 0$$
$$V = 0$$

(1)
(2)
(3)
(4)
(5)

式中： J 为电流密度； E 为电场强度； J_e 为外加电流密度； σ 为电导率； $Q_{j,v}$ 为电流源； V 为电势，是本次模拟的因变量。式(1)—式(3)为麦克斯韦方程在低频时的表现形式；式(4)为模型表面的电场边界条件；式(5)为接地电极的电场边界条件。

首先计算了单路、双路电流输入方式时的电场分布特征，优选了较好的电流输入方式。模型物理场设置见表 1。

表 1 物理场设置

电流输入方式	电流源电极	接地电极	电流源参数/(A·m ⁻³)	模型总电流/A
单路轴向	In 1	Out 1	2×10^5	6
单路非轴向	In 2	Out 1	2×10^5	6
双路轴向	In 1 & In 2	Out 1 & Out 2	1×10^5	6

2 电流输入方式对电场分布特征的影响

2.1 不同电流输入方式的电场分布特征

在不同的电流输入方式下，模型的电场分布特征略有差异。在同一模型上，管道内外表面同一位置处的电势基本相等（如图 2、3 所示），表明管道内外表面电势相互对应，通过获取的外表面电压可以准确反映出管道内部腐蚀状态。三种电流输入方式下，同一 x 轴截面的电势数值均在管道两端差异较大，中部差异较小，但不同的输入方式在同一截面处的电势数值的离散程度略有不同，双路轴向电流输入方式的电势数值差异较小。造成这种电势分布特征的原因是模型两端的等势线较为密集，在同一 x 轴截面上存在多个电势梯度，因而电势差值较大。在模型中部，等势线基本与 x 轴截面平行，同一截面上的电势基本相等。在不同的电流输入方式下，模型中部截面电势基本相等的区域范围不同。单路轴向输入与非轴向输入时范围基本一致，但等势线分布因电流方向的差异存在对称性上的不同，电流轴向输入时等势线呈轴对称分布，非轴向输入时呈中心对称分布；双路轴向输入时

电势基本相等的范围明显增大,管道模型上的等势线呈轴对称分布(如图4所示)。

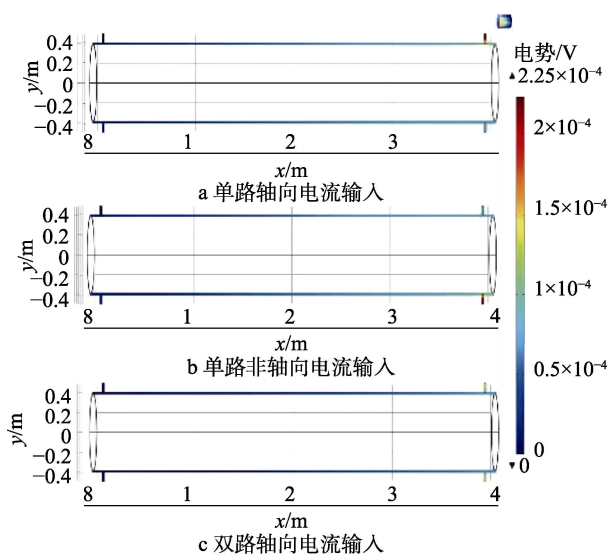


图2 管道模型 z 轴截面电势分布($z=0$ m)

模拟结果表明,在模型两端的电源电极附近,由于电力线的汇聚,电流密度存在管道轴向与径向两个方向的分量。在此处测得FC值的精度与模型中部存在差异,且差异并非由腐蚀引起,因此在FSM检测

时会获得不相干信号,给数据解析带来不必要的困难。在距离电源电极一定间距的管道模型中部,电流密度只有轴向方向的分量,同一 x 轴截面上电势基本相等, x 轴方向上相同距离的电势差基本一致,获取电压数据得到的FC值精度相等,这一区域范围能够满足有效检测区的要求。

2.2 不同电流输入方式的有效检测区范围

在实际检测中,FSM的检测精度一般为0.5%左右^[17]。因此,规定模型上同时满足同一 x 轴截面的电势数据相对极差在0.5%以内, x 轴方向上电势差的相对误差在0.5%以内的范围,即为有效检测区。为模拟管道表面的检测电极阵列,以图5所示的方式提取模型外表面的电势数据,发现编号1电极列的管道轴向即 x 轴方向电势差的数据变化范围最大(如图6所示)。规定模型中部(1.8~2.0 m及2.0~2.2 m)处电势差的均值为标准值,以电势差与标准值的相对误差表征 x 轴方向电势差的数据变化,则编号1电极列的相对误差在0.5%以内的范围,即模型满足电势差相对误差均小于0.5%的范围。计算模型同一截面上电势数据的相对极差及 x 轴方向上电势差的相对误差(如图7、8所示),确定了不同电流输入方式的有效检测区范围,见表2。

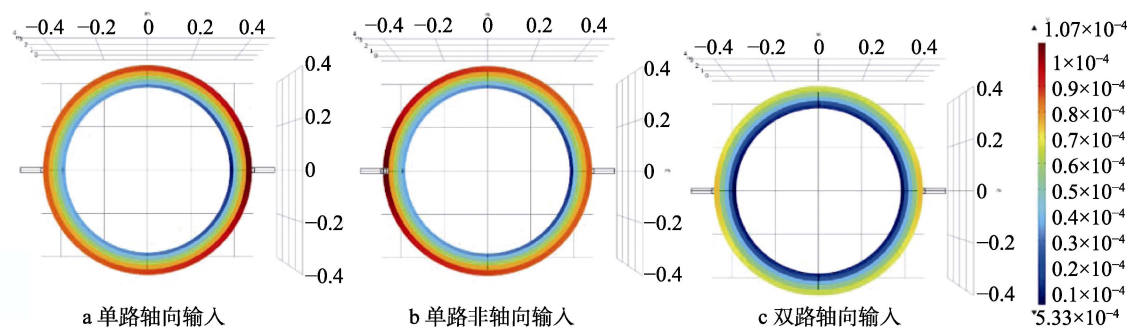


图3 管道模型 x 轴截面电势分布($x=0, 1, 2, 3, 4$ m)

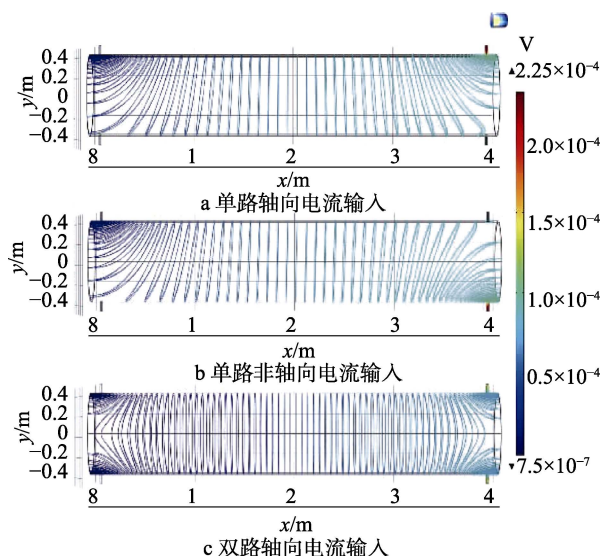


图4 不同电流输入方式的管道模型等势线分布

由表2可知,由同一截面上电势相对极差界定的范围大于(或等于)由 x 轴方向上电势差相对误差界定的范围,因此有效检测区范围与后者一致。在单路电流输入方式下,有效检测区范围较小,与电源电极距离较远,会导致检测时电流利用率不高,检测效率较低。在非轴向电流输入方式下,由于模型中部的电流密度仍存在管道径向方向的分量,难以获得满足误差要求的有效检测区。为获得较大的有效检测区范围,电流输入方式应为双路同大小的电流同时输入。

在数值模拟过程中发现,更多路同大小的电流同时输入时,可获得范围更大、电势分布更为均匀的有效检测区,有效检测区与电源电极的间距也会更小。由于大多FSM检测设备的多通道供电能力不高,且管道长度较长,对直管道而言,检测时采用双路电流输入方式即可满足精度要求。然而,检测某些结构复杂的管段区域或罐体、球体等直径较大的待测结

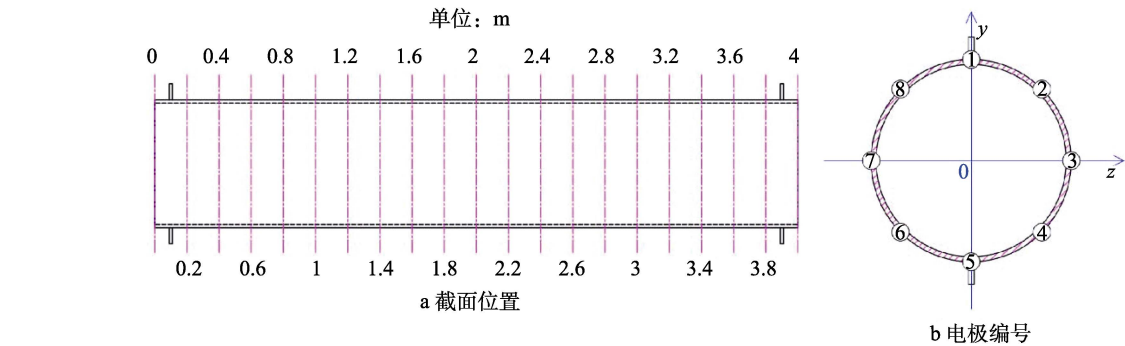


图 5 管道模型截面数据提取示意

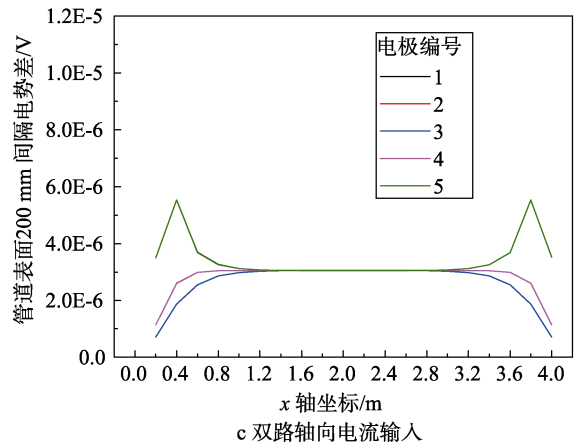
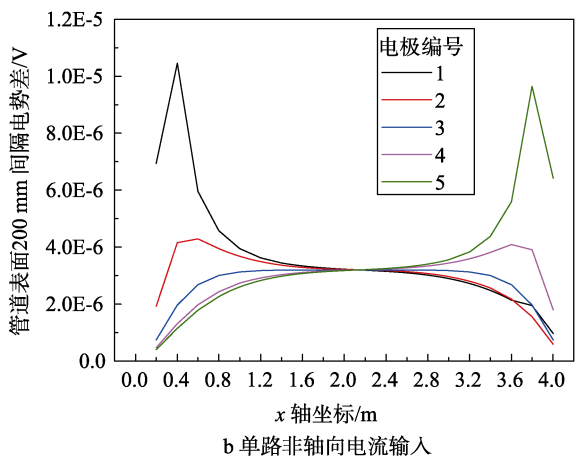
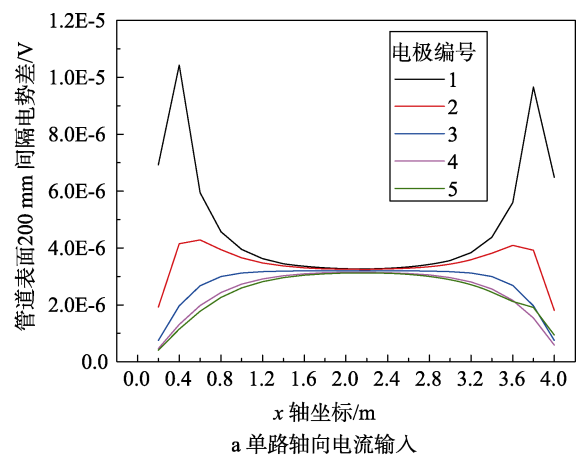


图 6 不同电流输入方式的管道表面轴向电势差曲线
(轴向坐标 x 处的数据为 x 与 $(x-0.2)$ m 之间的电势差)

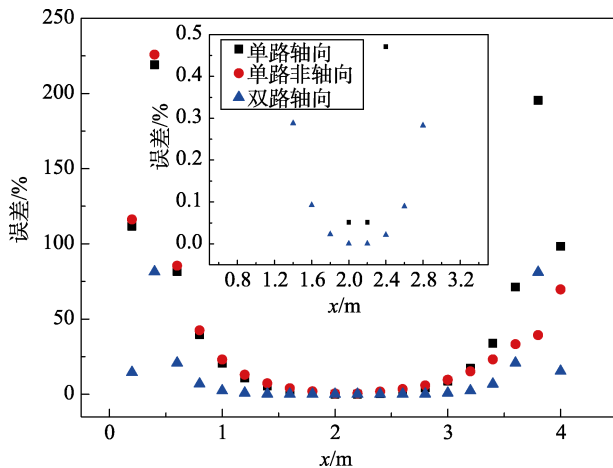
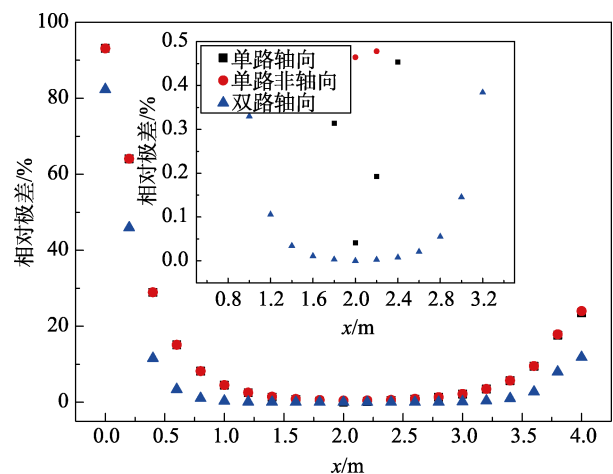


表 2 不同电流输入方式下模型的有效检测区范围 m

电流输入方式	电势相对极差在 0.5% 以内的范围	电势差相对误差在 0.5% 以内的范围	有效检测区与电源电极间距	有效检测区范围
单路轴向输入	1.8~2.4	1.8~2.4	1.7	1.8~2.4
单路非轴向输入	2.0~2.2	—	—	—
双路轴向输入	1~3.2	1.2~2.8	1.1	1.2~2.8

构,选择多路电流输入方式可以更好地避免不相干信号的产生,获得分布更为合适的有效检测区。

3 管道模型有效检测区范围确定

为确定有效检测区的范围,基于上述结果在双路电流输入方式下模拟了电源电极尺寸、管壁厚度和管道直径等因素对电场分布特征的影响,采用单一变量法分析每种因素变化时有效检测区范围的变化。表3为各影响因素的相关尺寸参数设置,其中不同公称直径下的外径尺寸分别为406、610、820 mm。将数值模拟结果进行数据整理,不同影响因素变化时模型 x 轴方向上电势差的相对误差如图9—图11所示。

表3 不同影响因素的模型尺寸参数设置

影响因素	电源电极 半径/mm	管壁厚度 /mm	管道公称直径
电源电极尺寸	4, 6, 8, 10	12	DN800
管道壁厚	10	10, 15, 20, 25	DN800
管道直径	10	12	DN400, DN600, DN800

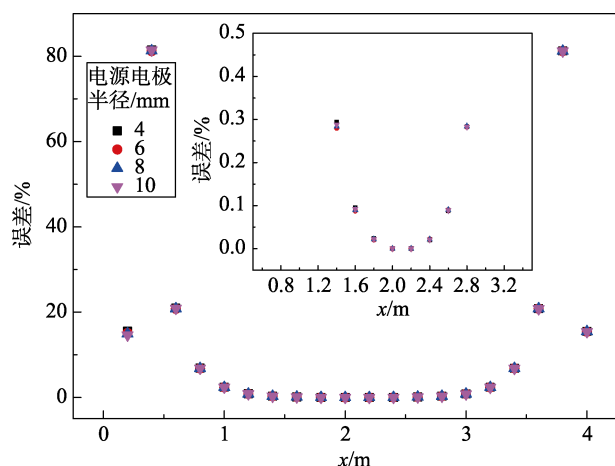


图9 不同电源电极尺寸下管道 x 轴方向轴向电势差与标准值的相对误差(电极编号1)

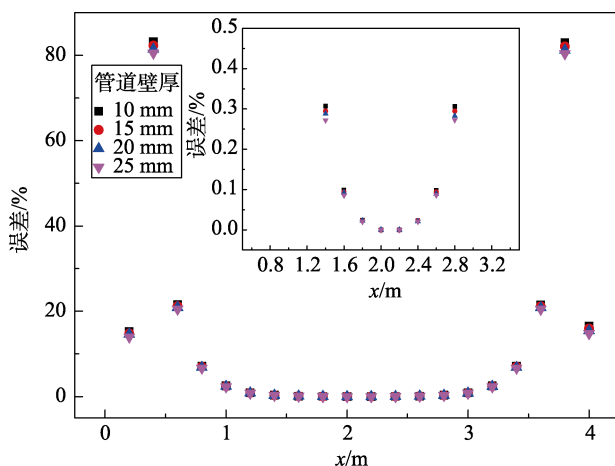


图10 不同壁厚下管道 x 轴方向电势差与标准值的相对误差(电极编号1)

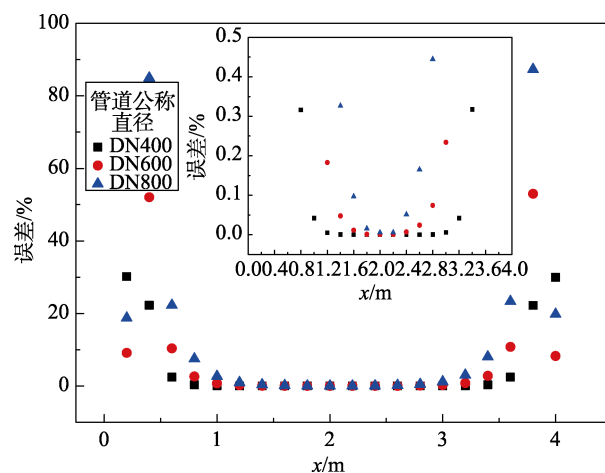


图11 不同公称直径下管道 x 轴方向电势差与标准值的相对误差(电极编号1)

模拟结果显示,电源电极尺寸不同时,电势差与标准值的相对误差存在一定差异,但差异极其微小(见图9),就有效检测区范围而言,不同电源电极尺寸的有效检测区均为1.2~2.8 m。因此电极尺寸的变化对模型电场分布特征的影响极其微小,变化造成的差异在FSM检测误差允许范围之内,有效检测区的范围不变。这一结果表明,在FSM管道检测时,采用不同规格及尺寸的电极不会造成有效检测区范围的改变,有效检测区范围与电源电极尺寸无关。

管道壁厚不同时,电势差与标准值的相对误差存在极微小的差异(见图10),但有效检测区范围相同,均为1.2~2.8 m。因此,管壁厚度的变化对模型电场分布特征的影响同样极其微小,且不会改变有效检测区的范围。壁厚的变化过程可以看作管道均匀腐蚀的过程,此过程中有效检测区范围不变,印证了FSM对管道均匀腐蚀检测的可靠性和准确性。

管道直径不同时,模型的有效检测区范围发生改变(见图11),DN400模型为0.6~3.4 m, DN600模型为1~3 m, DN800模型为1.2~2.8 m。管道直径越大,有效检测区与电源电极距离越远,范围也就越小。这是因为通过点电源对管道进行通电时,点电源附近电流密度存在管道径向方向的分量,距离点电源越远,径向分量越小,最终趋向于0。当管道直径变大时,电流密度的径向分量由大变小的距离增长,从而导致有效检测区与电源电极的间距变大。由图11的分析结果可知,若管道公称直径为 D ,则有效检测区与电源电极的间距约为 $1.5D$,即长径比为1.5。因此,管道直径的变化会导致模型电场分布特征发生改变,电源电极间有效检测区的范围大小与管道直径有关。

综上所述,有效检测区范围与电源电极尺寸、管道壁厚无关,与管道的公称直径有关。在FSM检测时,为避免不相干信号的获取,确保腐蚀检测结果的准确性,检测电极阵列需布置在电源电极1.5倍管道公称直径之外的区域,如图12所示。

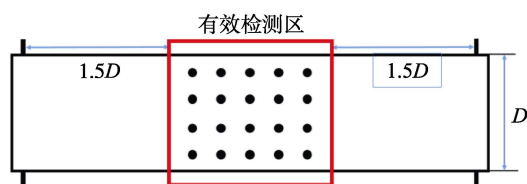


图 12 管道检测电极布置

4 结论

通过数值模拟的实验方法可对 FSM 检测时待测构件的电场分布特征进行模拟, 确定 FSM 实施管道检测时有效检测区大小, 为直管道的 FSM 检测规范的制定提供了科学依据和 FSM 工程应用提供了重要的指导作用。同时对弯管、三通、罐体等复杂结构进行 FSM 检测时电极布设方案的设计提供了参考和帮助。

1) 对直管道进行 FSM 检测时, 有效检测区范围的大小与电流输入方式有关。单路电流输入方式下, 有效检测区与电源电极相距较远, 有效检测区范围较小, 从而导致电流利用率不高、检测效率低; 双路电流输入方式下有效检测区范围较大, 与电源电极距离变短, 管道的电场分布更为均匀。对某些复杂结构进行检测时, 为了进一步缩短有效检测区与电源电极的间距, 可采用更多路的电流输入方式。

2) 电源电极尺寸以及管道壁厚尺寸的变化不会对直管道模型的电场分布特征产生明显影响, 可忽略不计。管道公称直径对电场分布特征有明显的影响, 有效检测区与电源电极的间距随管道直径的增大而增大, 间距长度约为管道公称直径的 1.5 倍。进行 FSM 的电极布设时, 检测电极与电源电极至少间隔 1.5 倍管道公称直径的距离, 才能避免获取不相干信号, 得到准确的腐蚀检测结果。

参考文献:

- [1] 许华文, 廖俊必, 殷国富. 场指纹法管道腐蚀监测系统小腐蚀坑的高精度识别方法[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(4): 330-334.
- [2] STROEMMEN R, HORN H, GARTLAND P O, et al. The FSM technology-operational Experience and Improvements in Local Corrosion Analysis [C]// Corrosion 1996. Denver: NACE International, 1996.
- [3] STROMEN R, HORN H, MOLDESTAD G, et al. FSM—

Non Intrusive Monitoring of Internal Corrosion, Erosion and Cracking in Subsea Pipelines and Flowlines[J]. Anti-Corros Method M, 1996, 25-39.

- [4] DAALAND A. Modeling of Local Corrosion Attacks on a Plate Geometry for Developing the FSM Technology[J]. Insight, 1996, 38(12): 872-875.
- [5] HORN H, PEDERSEN A, SIVERTSEN S. Evaluation of the Accuracy of a Subsea System for Internal Corrosion Monitoring Based on a Retrieved Pipe [C]// Corrosion 2003. San Diego: NACE International, 2003.
- [6] 周春, 曾冠鑫, 汤天遴, 等. 场指纹法腐蚀监测技术在塔中 1 号气田的应用[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(4): 335-338.
- [7] 杨发平, 王贵波. 普光气田地面集输系统腐蚀监测及控制体系[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 94-97.
- [8] CLARIDA D R, SCANLAN R J, BOOTHMAN R M. Corrosion monitoring experience in the refining industry using the FSM technique [C]// Corrosion 2003. San Diego: NACE International, 2003.
- [9] KIM Y, HIROHATA M, SHIBATA K, et al. Detection and Monitoring by FSM for Fatigue Crack at Invisible Location of Steel Plate Deck with U-rib[J]. Int J Steel Struct, 2013, 13(1): 183-189.
- [10] KAWAKAN Y, KANAJI H, OKU K. Study on Application of Field Signature Method (FSM) to Fatigue Crack Monitoring on Steel Bridge[J]. Proc Eng, 2011, 14: 1059-1064.
- [11] 李焰, 吴承昊. 基于 PXIe 总线技术的电场指纹检测系统设计[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 144-148.
- [12] BOWLER N. Theory of Four-point Direct-current Potential Drop Measurements on a Metal Plate[J]. Res Non-destr Eval, 2006, 17(1): 29-48.
- [13] BOWLER N. Theory of Four-point Alternating Current Potential Drop Measurements on a Metal Half-space[J]. J Phys D Appl Phys, 2006, 39(3): 584-589.
- [14] SPOSITO G, CAWLEY P, NAGY P B. Potential Drop Mapping for the Monitoring of Corrosion or Erosion[J]. Ndt & Int, 2010, 43(5): 394-402.
- [15] 蒋文春, 王宜金, 陈建飞, 等. 一种应用于电场指纹法管道检测的多方向电流采集系统: 中国, 105572211A[P]. 2016-05-11.
- [16] 李宇庭, 甘芳吉, 万正军, 等. 场指纹法无损监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1781-1791.
- [17] WOLD K, SERNES G. FSM Technology—16years of Field History—Experience, Status and Further Developments[C]// Corrosion 2007. Nashville: NACE International, 2007.