

埋地钢质管道外防腐层 检测技术及应用方法

1. 埋地管道腐蚀评价与防腐层检测技术

1.1 管道腐蚀与防腐层检测

金属材料发生腐蚀是一个自发的、难于完全阻止的渐变过程。管体的腐蚀损伤将严重降低埋地管道的结构强度、承受能力和可靠性，缩短管道的使用寿命、增大运行风险、显著地增加维修费用、缩短维修和更换周期，威胁整个输送系统的安全。埋地钢质管道在整个服役期间的事故发生机率一般遵循浴盆曲线。其含义是，在投产后初期的一段时间内，管道建设环节中存在的问题会逐渐暴露出来，因此事故率较高。随着运行时间的延续，防护设施功能不断完善，事故率逐步下降至较低的水平，该阶段称之为投产初期，通常为半年到两年。在其后的一个阶段，事故一直平稳地保持在低水平上，称之为事故平稳期，通常为20-30年。之后，事故呈上升态势，管道进入事故多发的高风险的服役后期。我国早期的管道有的已经运行了三四十年，管道已经进入了老龄期；而近年大批新建管道正处于服役的初期，这两个阶段都是事故高发阶段。因而管道行业面临的安全形势十分严峻。对老旧管道的腐蚀与防护状况评价工作迫在眉睫，在有效检测评价的基础上采取合理的维护措施，对保证管道的安全具有重大的经济效益和社会意义。

钢质管道的腐蚀防护一直是管道运行单位日常工作的重要内容。管道腐蚀的影响因素众多，作用机理复杂，而且各个影响因素之间又存在着相互影响和制约的关系。埋地钢质管道腐蚀与防护状况的检测及评价，涉及不同的检测方法、多种检测技术和设备，需要从事这项工程的单位具有很强的技术能力、多方面的技术人员及设备，业主单位也要做较大的经济投入。此外，受技术发展水平的限制，诸如管体剩余壁厚的检测等项目还要进行开挖检测，除了费用很高之外，也会对管道造成一定的不良影响。

外防腐层(也称防护层)是防止和减缓埋地钢质管道腐蚀的重要手段，往往与管道的阴极保护配合使用。管体的腐蚀往往是因为该处的防腐层失效，阴极保护又没有发挥有效的保护作用，是管体在腐蚀介质的作用下发生的。尽管防腐层破损点处的管体不一定发生腐蚀，但是可以说，发生管体外腐蚀处的防腐层一定失效。这就为通过外防腐层漏点的检测，进而找出管体的腐蚀点提供了技术上的可行性。此外，在非开挖条件下对防腐层的有效性进行检测是当前所有腐蚀检测项目中最为成熟、实施最为简捷、应用最广泛的方法。从当前国内外腐蚀检测行业的技术水平、采用的腐蚀检测评价技术标准上分析，埋地管道腐蚀检测是以外防腐层检测作为工程实施的切入点。近些年在管道行业广泛开展的管道完整性管理过程中，防腐层的检测和评价则是实施管道风险识别、风险评价，以及管道的完整性检测和评价的重要内容。

多年来，管道检测行业的技术工作者开发出了防腐层检测的许多方法，试图能够更全面、准确、系统地评价防腐层的有效性，大多已经成功地推广应用。目前，国内外相应的测量方法和仪器有多种，各种检测方法和机理各有异同，在实际应用中所表现出的优缺点也很明显。

1.2 外防腐层检测技术及仪器概述

当前，国内外防腐层检测采用的技术方法和设备有多种，原理上大体可分为地面电位梯度法和管中电流梯度法两种。“地面电位梯度法”（分为 DCVG 和 ACVG）在对防腐层破损点定位方面的准确率比较高，但仪器本身不具备管道定位的功能，使用过程中需与管线仪配合，检测效率较低，实施的劳动强度也较大。其中的直流电位梯度（DCVG）检测技术，使用电流断流器控制阴保电流的通/断，更适用于有外加电流阴极保护的管道，技术含量比较高，仪器的价格也较贵，近些年在国内开始普及应用。在实际工程中，往往配合其他检测效率更高的检测方法，作为关键管段的重点检测方法来应用。在国内应用更为普及的是交流电位梯度方法的检测仪器—国产的人体电容法和 PDM 的智能 A 字架。国产外防腐层的检测仪器在使用的便捷性、抗干扰能力、检测精度以及可靠性等方面都有了长足的进步，已经开始替代国外的同类产品。

天津嘉信技术的交变电流梯度法（多频管中电流法）为防腐层检测提供了经济有效的检测手段。自主产品防腐层检测仪 PDM 是总结了三十余年的管道探测检测仪器应用开发经验，应用微电子技术、电磁信号传感器、微弱信号调理技术、云存储云计算等先进技术，采用先进工业设计和规范的生产流程，结合我国国情而推出的。使用 PDM 检测仪的两种技术方法检测防腐层，具有检测间距可根据实际情况灵活变化的优点，大大地提高了检测效率。

下面，就简要介绍国内使用较普及的其他外防腐层检测方法及应用仪器：

1) 皮尔逊法（人体电容法）

该技术属于交流电位梯度 (ACVG) 技术原理的范畴，目前国产防腐层检测仪器多采用该方法。其工作原理是：给埋地管道施加特定频率的交流电信号（通常 1 KHz），当管道防腐层有破损点时，在破损处形成导电通路，产生漏电电流，在漏点上方地面上形成显著的电位梯度分布场。用人体与大地构成的人体电容做检漏仪的交流信号的传感元件，一前一后的两名检测人员在漏点附近时，检测仪的声响和表头都开始有反应，在其中一名检测员处于漏点的正上方时，仪器反应最强，从而可准确地找到防腐层的破损点。

该类仪器的优点是：设备体积小、价格较低、使用方便。现场环境简单时准确率较高，特别对高土壤电阻率的地区是一个很好的选择。它与电流梯度检测方法 (PDM) 配合使用，形成高低搭配，在保证检测的有效性的同时可提高检测效率，降低实施检测的工程成本。

其缺点是：抗干扰性能较差。当地下管网密集较复杂时，检测信号容易感应到其他管线上，地面上的电位梯度场会受到严重干扰，难于准确判定漏点的位置，甚至会错误判断。在检测过程中要求操作人员针对管网分布及埋设环境的具体情况，合理设置检测的灵敏度，这在很大程度上依赖使用者的工程经验。灵敏度设置过低会漏掉破损点，灵敏度过高则会误报漏点。此外，国内早先生产的仪器发射机功率较小，测量范围受到一定限制，近年厂家开发出了大功率的发射机，对检测效果有一定的改善；该类仪器不能定量地判定防腐层老化程度。

2) 变频-选频法

上世纪 90 年末，东北输油管理局与邮电部第五研



图 1 变频-选频仪

研究所结合我国长输管道行业的管理模式，开发出了适合长输管道运行模式，以测量单位管段防腐绝缘电阻、评价防腐层完好状况的检测方法。该类仪器是将一可变频率电信号施加到待测管道的一端，从另一端测量信号的衰减幅度，通过调节信号的频率使信号衰减达到一定范围(23dB)时，根据选定信号频率的高低来推算防腐层绝缘电阻值，因此称为“变频—选频法”。此方法被列入早先的石油天然气公司的SY/T 5919-94标准，为我国管道防腐层检测评价的后续工作奠定了基础。变频—选频测量方法特点是：适合于长输管道的检测，具有使用简便，检测费用较低等优点；但该方法对操作人员要求较高，在数据分析过程要设定一些环境参数，较为复杂；只能对单位管道（通常为1km）及有测试桩的管道（或开挖）进行外防腐层绝缘电阻的测量，无法判断是否存在破损点还是大段防腐层整体性能下降导致的绝缘电阻率下降，当存在破损点时也不能给出破损的位置。测量管段上不允许有其他的导电通路。当管段中有支管、阳极时须通过开挖多个检测点来分段检测。

3) 直流电位梯度 (DCVG) 技术

直流电位梯度技术的代表仪器是英国DCVG公司生产的DCVG检测仪。它适合对有外加电流阴极保护系统的管道防腐层破损点进行检测。

其原理是：将管道中的阴保电流通过断流器调制成一个周期通断的直流检测信号，当管段外防腐层有破损点时，其上方的地面上会形成明显的电位梯度分布场。DCVG使用高精度的毫伏表来测量插入地表的两个Cu/CuSO₄电极之间的电位差。当电极接近破损点时，电位差会增大，而远离该点时，差值又会变小，在破损点正上方时，电位差应为零值，以此便可确定破损点位置。再根据破损点处电位降幅可以估算出破损的严重程度。破损点形状可用破损点上方电位分布的等位线图来判断。

仪器优点：

- (1) 检测灵敏度很高，可以精确地定位防腐层破损点；
- (2) 通过破损点处的保护电流的流向，判断管体是否正在发生腐蚀（腐蚀活性）；
- (3) 可以区别管道分支和防腐层的破损点；
- (4) 非对称的检测信号消除了其他管中电流、土壤中杂散电流的干扰，抗干扰性能高；
- (5) 可以估算出防腐层破损的严重程度（%IR），并且也能对防腐层破损的形状进行判断。

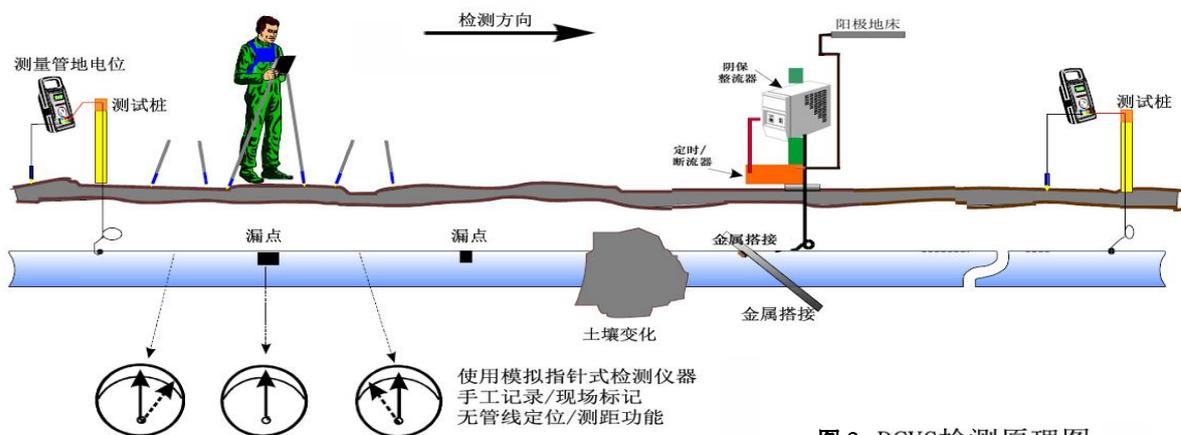


图2 DCVG检测原理图

缺点是：测量工作劳动强度较大，须配合定位仪使用；由于电极与地面直接接触，因此当地面土壤干燥导电性能差时，测量结果不稳定；通常仅适用于有外加电流阴极保护系统的管道，

同时对待测管段的阴保电流强度有要求，当阴保电流过小而不能在地面上形成可检测的电位梯度场时，不能有效地检测出外防腐层的缺陷了。

4) 密间隔电位法 (CIPS)

作为评估管道阴极保护有效性的首选标准方法，同时具有防腐层上大缺陷点的定位功能。其工作原理是：通过在阴保电流源中串接一个或多个卫星同步的断流器，将管道上的保护电流调制成一个周期通断的直流电流。检测时，将一个参比电极放置于地面，与检测主机（带记录功能的毫伏表）相连，主机的另一条连线通过尾线与管道相连，配合断流器的通断周期，分别测量管道对大地的通/断电位。由于在阴保电流断开的时刻，消除了保护电流在大地流动时产生的电压降（IR 降），此时测得的断电位能够反映出管道的真实保护程度。同时，通过与管体连接的尾线来测量整条管道上任一点上的管地电位，能够检测出因外防腐层缺陷使保护电位减小的部位。所以，CIPS 方法同样可以检测出管道外防腐层上大的缺陷。

该方法的优点是：适用于复杂的地表情况，甚至可水下作业；测量点多，检测数据准确；无须另配发射机。缺点是：测量过程较为复杂，对人员要求较高；当环境干燥时需要在地表浇水，测量时要等待较长时间；须与管线仪配合确定管道的路由来实施检测，检测间隔较小时工作量过大；

此外，工程上DCVG和CIPS方法往往是配合使用的，通过管道真实保护电位的分布，可以给出什么样的防腐层缺陷需要维修（确定维修次序），防腐层缺陷处管体是否正在发生腐蚀（管体腐蚀活性的判定）等管道防护方面的重要信息。

5) 杂散电流检测技术

由于城市地铁和高速铁路的大规模建设，因轨道交通的驱动系统引起的杂散电流干扰给管道和设施造成的危害，已经得到了管道行业的高度重视。常规的检测手段是使用电工等通用仪表进行检测，这些手段在进行杂散电流普查和确定静态杂散电流干扰方面，尚能够发挥作用，而无法有效地检测出动态杂散电流的干扰路径和干扰程度，无法满足制定治理方案的技术需求。

嘉信技术的杂散电流检测仪JX-SCL是针对动态杂散电流干扰的专用检测设备。SCL采用专利结构的地下管道电流测量功能，能够高精度地测量出管道中低频率甚至直流的杂散电流强度和方向，进而判定管道中杂散电流流动和分布状况，精确定位干扰电流的流入/流出点，评定干扰的危害模式。特别是检测轨道交通的直流供电系统电流泄露对周边管道的干扰极为有效，方便快捷地查找干扰源。SCL还能够用于检测管道上阴保电流分布状况，对于检测和评定管道上保护电流给其它管道造成的干扰，制定杂散电流干扰的治理方案是有效的技术手段。



图3 嘉信技术的 SCL 检测仪

1.3 交变电流梯度法及其应用

1.3.1 交变电流梯度法简介

早在 1996 年，天津嘉信技术提出了埋地管道防腐层检测的“多频管中电流法”，并开发出相应的检测系统及配套软件 GDFFW xp，至今已有数千套系统在全国应用，为用户的管道检测提供了实用有效的检测手段，取得了良好的应用效果，推动了管道外防腐层检测技术的普及，成为了外防腐层检测数据评价的标准工具。该软件最早列入了石油天然气公司的《SY/T 5918-2004 埋地钢质管道外防腐层修复技术规范》推荐的数据处理软件。经过二十余年的不断发展完善，融入了嘉信技术的检测评价方面的研究和应用经验，特别是评价模型（更名为“交变电流梯度法”）和应用流程的不断优化，极大地提升了数据评价的性能。最新版本为 ESTEC 11.0，增加了“智能分段”等方便用户的辅助功能，避免了处理过程中分段偏差导致的错误结果，也使内业处理的工作效率得到了有效提升。ESTEC 软件可运行于多版本 Windows 系统，支持 GB/T 19285-2014《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》中防腐层分级的标准，在报告输出方面更加多元化，评价结果更加准确直观。嘉信公司仍会不断完善和升级评价模型，不断优化软件的性能。

新软件的新增功能为：

- * 全新的智能分段功能，避免了错误分段导致的错误结果，减少数据分析的复杂程度。
- * 推荐应用单一频率信号对埋地管道进行检测，软件自动根据管道埋设条件自动给出评价模型的参数，彻底解决了用户应用软件时参数选择的难题。
- * 软件评价模型考虑了土壤的埋设条件对评价结果的影响。
- * 全新的评价模型考虑了伴行管道对防腐层绝缘性能计算的影响。
- * 配套嘉信云平台支持下的 PDMLogger 数据采集工具，实现现场检测数据的采集上传、云存储、以及由 C-ESTEC 嘉信云服务完成的数据云分析等工作。

嘉信技术的管道防腐层检测仪 PDM，检测防腐层漏点的工作原理是：管道的防腐层和大地之间存在着分布电容耦合效应，且防腐层本身也存在着弱而稳定的导电性，使信号电流在管道外防腐层完好时的传播过程中呈指数衰减规律。在外防腐层破损点处，管中电流便由破损点流入大地，管中电流会明显衰减，地面上磁场强度会急剧减小，由此可对防腐层的破损管段进行定位。进而，当管道的检测电流信号泄漏于周围土壤中，并且在地面上产生散发性的电位梯度分布场，这时用 A 字架，将探针插入地面便能测量到这种电位梯度的变化，并能定位出破损点的位置，这就是 ACVG 的检测原理。

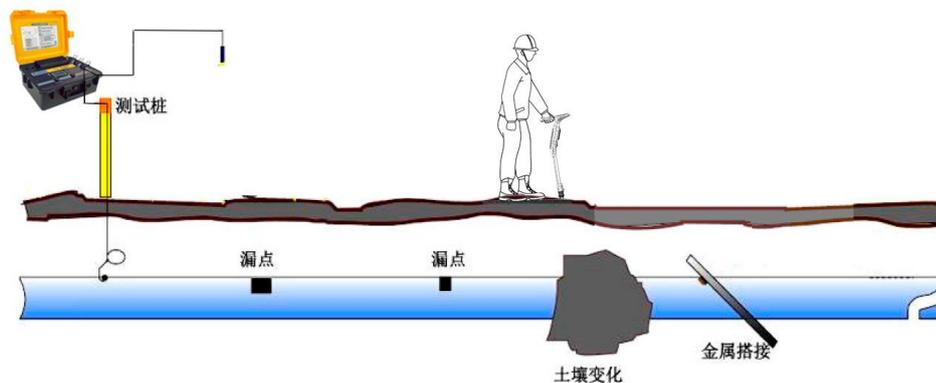


图 4 PDM 检测埋地管道外防腐层示意图

基于交变电流梯度法的防腐层检测系统的使用方法是：通过在管道和大地之间施加某一低频率的正弦波电压，将检测信号电流发射到待检测的管道上，在地面上沿管道路由由应用接收机检测并记录管道中各测点流过的电流值。采用这种方法不但可以定位管线路由，还在很大程度上排除了大地的电性和杂散电流的干扰，具有很好的实用性。同时，通过管道上方地面的磁场强度换算出管中的电流变化，可以判断出管道的支线位置或防腐层破损缺陷等。其原理是：管道的防腐层和大地之间存在着分布电容耦合效应，且防腐层本身也存在着弱而稳定的导电性，使信号电流在管道外防腐层完好时的传播过程中呈指数规律衰减，当管道防腐层破损后，信号电流便由破损点流入大地，管中电流会有明显异常衰减，引发地面的磁场强度的急剧减小，由此可对防腐层的破损点进行定位。然而，这是个相对比较的过程，该过程受到不同检测频率、管道及周边结构等因素的影响。为消除包括管道规格、防腐结构、土壤环境等因素，将均匀传输线理论应用于管-地回路，建立相应的数学模型及参数，可以有效地分析或消除上述影响。观测数据经过专业的数据分析软件处理得出结果。图形结果可直接显示破损点位置，也可定性判断各段防腐层的老化状况。在测得检测电流的变化规律后，根据评价模型可推算出防腐层的电气性能参数值 R_g ，参照相关标准即可得出防腐层的绝缘等级。

下面，简要地介绍防腐层绝缘性能评价的数学模型。

1.3.2 管-地回路的等效电路模型

当在管道和大地之间施加交流检测信号时，用电路理论分析电流信号的传输过程，则必须把这一回路进行电路等效，即建立有效的电路模型。实际上，可以把管-地回路看成一个分布参数电路，基本参数可归结为纵向分量阻抗和横向分量导纳。考虑大地电阻和电容的影响，可以对管地回路中的一个微段做如图 5 所示的等效。图中： R 表示管道的纵向阻抗， L 表示管道电感， G_s 表示土壤的内阻抗， G 表示为管道防腐层横向漏电导纳， C 表示管道的分布电容。理论上，在一定的测量范围内可以把原本并不均匀的参数看成均匀地分布于回路的每一微段之中，电路模型得以大为简化。

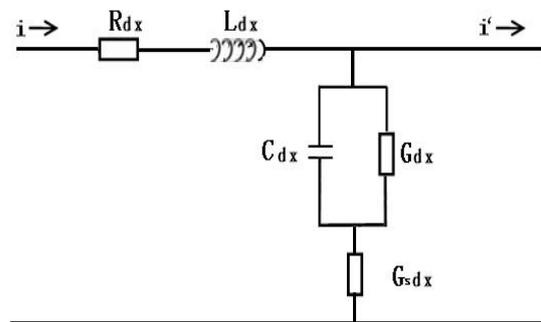


图 5 管-地回路的微段等效电路

1.3.3 交变电流梯度法的数学模型

由电磁学理论可知，当将一交变正弦检测信号由发射机供入管-地回路中时，衰减幅度远大于专用传输线，信号的传输距离有限。在管-地体系中，回路的损耗远大于理想传输线，可将回路视为特性阻抗的传输线，除未竣工管道或靠近绝缘法兰的管段等特殊情况下，大多数情况下传输线处于匹配状态，通过施加的能量全部被体系吸收，不存在信号反射。由于传输距离有限，大部分情况下管道的长度远大于有效传输距离，可以看成是无限长的。满足如下传输规律：

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \tag{1}$$

而被称为衰减常数的 α 与管-地回路参数满足如下关系式：

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(RG - \omega^2 LC) + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \tag{2}$$

在实际检测中给管道施加的是低频交变检测电流，管道上环绕着以管道轴线为中心的正弦电磁场。管中等效电流值，记为 I_{am} ，单位为安培。将安培为单位的电流 I_{am} 转换成分贝电流（记为 I_{db} ）后， $I_{db}-X$ 曲线则是一条倾斜的直线，其斜率 Y 与 α 成正比关系。当已知某二点的管中电流值时，即有：

$$Y = 8.6858\alpha = \frac{\lg I_{am2} - \lg I_{am1}}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

在式(2)中， G 即为包含着能反映防腐层状况的绝缘电阻 R_g ，当由式(3)计算出管一地回路的衰减系数 α 后， R_g 即可被求出。同时，与 α 对应的 Y 值大小也可定性地反映防腐层的完好程度。

1.3.4 评价模型的改进及 ESTEC 新版软件的完善

应用“均匀传输线”模型时，要给定纵向电阻 R 、电感 L 、电容 C 等参数来求解防腐层绝缘电阻 R_g 。电容 C 则与防腐层的厚度、结构以及材料的介电常数有关，而电感参数的影响因素更为复杂。正确给定 C 、 L 值至关重要，但对普通用户是困难的。嘉信公司在开发和推广防腐层评价模型的初期，解决办法是应用多个频率对管道进行重复检测，避开直接给出不易确定的参数，称之为“多频管中电流法”。但是，“多频法”是以增加检测工作量为代价的。同时，在实际应用中发现三频反演得到的管道分布电容、电感数值稳定性较差。嘉信公司在大量的检测经验基础上成功地优化了评价模型的应用方法：通过一个频率的检测数据，由软件根据用户提供的管道参数、土壤特性等因素计算出分布电容和电感的 C 、 L 值，不再要求对管道进行三个频率的重复检测，而直接计算出外防腐层的绝缘电阻值 R_g 。新的评价方法解决了用户在确定参数时遇到的困难，提高了检测和评价的效率。为了确切地反映方法的完善，于 2005 年将方法重新命名为“交变电流梯度法”。

经过多年应用和完善，改进评价模型和完善软件功能上主要的特点是：

1) 开发出智能分段技术方法

在计算 R_g 的过程中，需要对整个检测数据根据信号衰减的大致规律，划分成若干个数据段，软件针对每个数据段计算其平均衰减率，进而得出外防腐层的绝缘电阻值。由于管道检测过程中可能存在着信号干扰和埋深变化等因素，不能保证每个测量点的数据都是准确的；但有一定长度的测量段能够有效地减小这些因素的影响，从而得到准确的评价结果。由此可知，数据分段的合理性对于评价外防腐层的绝缘性能至关重要。而有的防腐层数据分析软件采用对每个测量点之间的管段自动计算 R_g ，使得计算结果变化极大，根本不能真正反映出外防腐层的真实状况，甚至得出错误的评价结果。人工分段的方法不仅数据处理过程繁琐，也对使用者的技术和经验有较高的要求。在 ESTEC 软件的最新版本中，应用全新开发的数学模型，软件能够智能地对整个数据进行分段，从而大大地提高了数据处理的效率，降低了使用难度，提高了数据分析的准确性。

2) 管道纵向电阻未能考虑交流信号的因素

在求解 R_g 的过程中，准确计算管道的纵向电阻也很重要。钢体的磁导率很高，即便检测信号频率不高时，交流信号的趋肤效应也不能忽略。简单地用管材的直流电阻不能完全反映交流信号下的电磁参数。管材电磁参数受管径、壁厚以及管体成型方法（无缝、直缝、螺旋焊缝）等因素的制约相当明显；管道运行时间越长，其有效电磁参数与初始埋设时的差别也就越大。新模型在这方面也做了相应的处理。

3) 土壤电阻率的影响不能忽略

使用过电流梯度法的人都会发现，管道埋设的土壤环境对检测电流衰减规律的影响相当明显，不考虑土壤电阻的差异是不能有效地应用电流梯度法完成管道的评估的。考虑土壤的导电性对得到正确的评价结果至关重要。

4) 伴行管道的影响不可忽略

管道的埋设环境千差万别，目标管线附近有伴行管线的情况并不少见。伴行管线与目标管线的信号耦合效果十分明显，会以互感的方式影响管道的电感值。电感 L 不仅与管道的有效电磁参数有关，而且还取决于管体直径以及管外围土壤介质的电磁参数变化情况。因此，仅仅经验性地指定管道参数是难于得到真实检测结果的，根据埋设条件选择评价参数是必然的选择。

1.3.5 交变电流梯度检测方法的特点

- 1) 检测防腐层过程同时完成埋地钢质管道的精确定位。
- 2) 对埋地金属管道防腐层破损点的精确定位，分段评估防腐层完好状况。
- 3) 通过检测电流分布规律的检测，能够对阴极保护系统进行故障诊断。
- 4) 测定电流方向的功能，检测管道的不正常金属搭接。
- 5) 多频率发射检测信号，非接触式测量，无须开挖。
- 6) 具有轻便、坚固、耐用、一人可独立操作。变间距的测量方法减少检测的工作量；
- 7) 两种检测方法配合，测定漏点精确高效，抗干扰性能强，特别适合比较复杂的管网。
- 8) 利用专用软件 ESTEC 通过对管道防腐层绝缘电阻 R_g 的计算来评估外防腐层等级。

2. 外防腐层检测仪系列设备

2.1 系统配置

嘉信技术推出的埋地钢质管道外防腐层系列检测仪主要分为高低两个型号：

低配置型号：基于 RD、VIVAX 主流管线仪组成的防腐层检测系统

组成：RD8200 或 vLoc3-Pro 管线仪、智能 A 字架、ESTEC 软件、PDM-Logger、外接电源。

用途：高性能管线定位仪。在管线定位的基础上，其电流强度 (CM) 及电流方向 (CD) 功能实现外防腐层破损点的精确定位，防腐层完好状况的评估等。

高配置型号：基于嘉信技术的 PDM 检测仪组成防腐层检测系统

组成：PDM、智能 A 字架、ESTEC 软件、PDM-Logger、外接电源。

用途：外防腐层缺陷检测的专用设备。具有破损点的精确定位，防腐层完好状况的评估，诊断阴极保护系统的故障等功能。CD 功能用于判定管道与金属物的搭接；超低频近直流超大功率的发射机，能够实现更长距离的管线检测。

2.2 外防腐层检测仪的应用范围

2.2.1 基本用途

外防腐层检测仪器的核心设备是在管线定位仪基础上发展起来的，管线定位是这类仪器的基本功能。管线定位功能还为腐蚀检测更深层应用（如：防腐状况检测及评估、电缆故障探测、

水管泄漏探测)提供必要的前提。应用其他检测方法(如:DCVG、SCM)时,要使用管线定位功能测定管线的路由。

2.2.2 管道防腐层漏点检测及完好状况评估

检测并精确测定防腐层的破损位置,查出管道与其他管道或金属构件的不正常搭接,对于无破损的管段可以测定管道中电流衰减系数,并估算防腐层的绝缘电阻 R_g ,参照GB/T 19285-2014《埋地钢质管道腐蚀防护工程检验》即可评定防腐层的质量等级。

对于有阴极保护的管道,可以利用PDM测定被保护管道上的电流分布,而且测量的一次性距离可达30Km。检测过程是应用交变电流梯度法,应用近直流的检测信号,模拟测量管道路由上的阴保电流流向,并在管道防腐数据处理软件ESTEC的支持下完成资料的整理与解释工作,来评定管道的防腐状况和阴极保护的有效性。

此外,可以使用智能A字架精确定位防腐层破损点,应用的是“地面电位梯度法(ACVG)”。该方法可与“交变电流梯度法”互相补充验证,可以快速、高效完成外防腐层的评价。

2.3 应用技术原理

2.3.1 基本原理

发射机向管道或电缆供入某一频率的信号电流,当检测信号电流沿管道向远处传导时,它在管道周围产生有规律的电磁场,这样当工作人员手持接收机在管道上方时,便可以探测到这个电磁场,根据信号响应的规律可实现管道的定位,测定管道中的信号电流强度及方向。

如果管道(或电缆)外皮绝缘层有破损,给管道施加的电流信号泄漏于周围土壤中,并且在地面上形成明显的电位梯度分布。用A字架,将探针插入地面便能测量到此电位场,并能精确定位破损点,这就是地面电场法的原理。

2.3.2 频率选择

发射机及接收机有几组互相对应的频率可供选择,外防腐层检测仪的典型频率配置如下:

RD8200/vLoc3-Pro:

发射机	CD	LF	8	33	65	/	
接收机	CD	LF	8	33	65	P	
频率(Hz)	640&320	128	8192	32768	65536	50	60

嘉信技术的PDM

发射机	/	ELF	ELFCD	LFC
接收机	CPS	ELF	ELFCD	LFC
频率(Hz)	100	4&128	4&8&128	4&8&640

表中P(Power,动力)模式是测定50/60Hz市电信号,它不需要发射机施加信号;PDM接收机的CPS(Cathodic Protection System)是专门选定的100Hz信号,用以测定阴极保护站发出的整流后的电流谐波,并能测定其电流大小,又称之为CPS功能。这个功能在国外以整流

器为电源的阴保管道上十分有效。在国内，绝大多数阴保电源采用的是恒电位仪，通过滤波方式将全波整流的 100Hz 交流成分滤除。致使 CPS 功能在国内的管道上很少有应用的条件。

市面上主流管线仪的发射机的 CD (Current Direction) 频率，用于管道定位过程中测量电流及测量电流方向使用，也可供 A 字架定位破损点的位置使用。

PDM Tx 发射机则是发射 4Hz 信号频率，是一个近直流的独特检测信号，辅以 8Hz 的倍频，实现了测定管道上信号电流方向的功能，也使得 A 字架定位防腐层缺陷点极强的抗干扰能力。

使用仪器时，在频率选择时应注意：

- 1) 对导电良好的管道/电缆尽可能采用直连法低频率，以利于信号电流的远距离传输。
- 2) 对不良导电的管道（如球墨铸铁管道）不适合采用直连法施加信号，要采用感应法较高的频率，信号容易感应到管道上，也能跨过接头。
- 3) 要注意管道上是否有相近频率的干扰。其方法是关掉发射机，把接收机置于管道上方时，检查接收机上的读数。当管道上能够明显检测到信号时，说明有相近频率的干扰信号，应该更换检测频率。
- 4) 发射机和接收机的频率要互相对应，与测量的要求相对应。

2.3.3 发射机供入点及接地电极位置的选定

使用发射机为管道供入信号时选择连接位置的原则是，尽量使待测的管道上有较强的信号电流，使相邻的伴行管道上尽量没有信号，或尽可能地小。与此同时，供入信号电流要尽量通过管道整个沿线回流到发射机的接地连线的地极上，这样才能保证有效地检测出防腐层的破损点。为此，应该注意：

- 1) 当待测管道有多个供入点可供选择时，要尽量选择管道分布最稀疏、防腐层状况较好的位置作为供入点。尽量不要连接在相邻管道或其他金属构件上，以免信号传入测量区产生干扰。
- 2) 严格避免信号传输回路形成“短路”的情况。因为此时的检测电流无法从管道的外防腐层上的缺陷点处流出，也就无法检测出任何破损点。
- 3) 要使管道上的检测信号与环境中的干扰信号形成足够的信噪比，保证检测仪的信号响应反映的是管道上的检测信号而不是干扰信号。
- 4) 待检测的管线较长，能够施加信号的位置较多时，不要过分追求一次信号供入的检测长度，通过检测管段附近的供入点施加信号，容易取得理想的信号强度，也就容易在检测的管段取得满意的信噪比，达到快速、准确地检测效果。

2.3.4 接收机的峰、零探测方式

常规的管线仪的接收机具有峰值(Peak)、谷值(Null 也称零值)两种探测方式：

- 1) 峰值探测方式是用两个水平线圈同时接收电磁场的水平分量的强度，并进行差值显示。在管道正上方的磁场强度最大，两侧对称且逐渐变小，峰值测量具有较好的抗干扰能力，但测量时须使接收机的机身平面与管道方向垂直，反之当平面与管道方向平行时，测得的强度最小。这个特性往往用来判定管道的走向。
- 2) 谷值探测方式是用垂直线圈测量电磁场的垂直分量，它在管道上方有一谷值(或极小

值)，向管道两侧移动则会测得增强的信号响应。

3) 不论峰值或谷值定位，都应在直线管道的地段(即测点前后三倍埋深距离内应是一段直管)，在管道拐点、三通、变深点处不应该读数。

4) 当峰/谷方式位置重合，可视为干扰因素可以忽略。如果峰/谷位置偏差较大，则认为地下有其他管线存在。当峰/谷位置偏差超过 20cm 时，会严重影响直读测深或电流值测定精度。

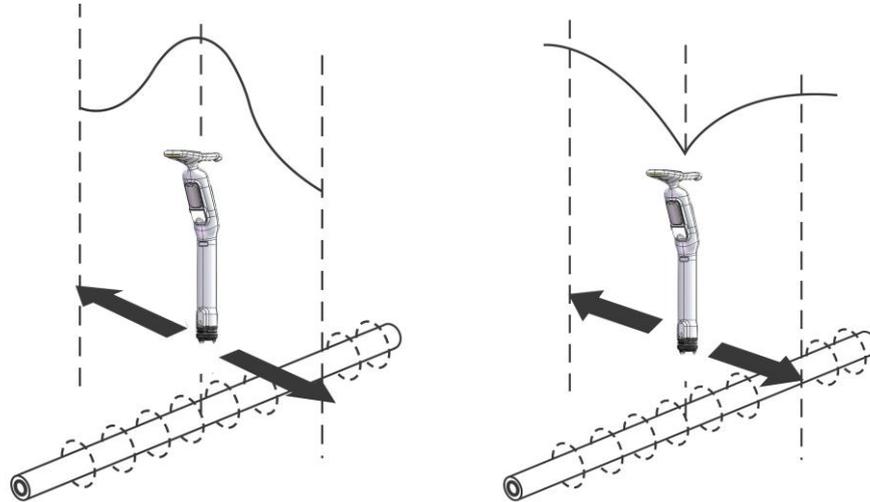


图 6 管线定位的峰谷值法示意图

PDM 接收机具有宽峰探测模式，它是用一个水平线圈接收信号。用于大埋深管道的定位。这是由于当埋深过大（一般指大于 6 米）时，接收机的两个水平线圈接收到的信号差异已经很小了，此时的差值很小难于精确定位管道，反而不如单线圈的探测精度。

3. 防腐层检测的一般操作方法

3.1 管道定位

管道定位是进行埋地管道防腐层检测的第一步工作。不能正确定位管道的路由，其他检测过程则无从开展。所以，探测管道的路由是非常重要的。管道定位指在地面上测定埋地管道的水平位置及深度，一般用于修正竣工图、地下工程设计、地下开掘前要准确了解地下管道位置。在进行管道防腐层检测、管道泄漏探测、阴极保护 CIPS 检测，以及进行管体腐蚀损伤检测时也需要事先或同时进行管道路由探测。

3.1.1 感应法扫描（盲扫定位）

当要调查某区域内地下管线分布情况，且地表又缺少必要的连接点时，则需要用感应扫描/盲扫方法进行探测（PDM，PCM，DM 无此功能）。

这时，建议首先用接收机的动力电方式对整个区域进行初测，对地下的管线分布有个大概的了解之后，应用感应法给待测的管线施加信号，就可逐步探测出地下管线。

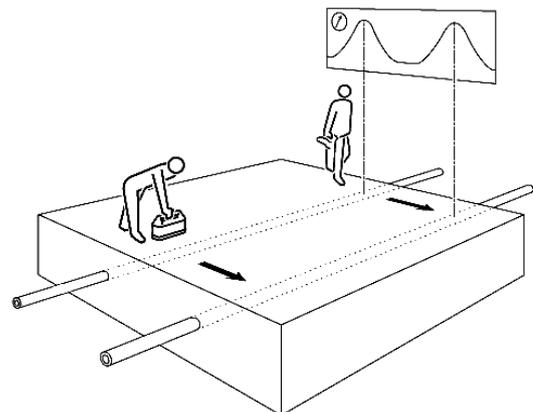


图 7 盲扫管线探测法示意图

感应搜索法需要二人操作，其中一人手持发射机沿管线的可能走向的垂直方向慢慢移动，离开探测区域至少 15 步，第二人在此区域内与发射机平行移动接收机，来捕捉由发射机发射到管线上的信号。

具体探测过程是：一名操作者在探测区域的一端，手持接收机，令机身平面与地下管线可能的方向成直角，设置较高的接收机灵敏度。另一名操作者手持发射机，距接收机 15 步远的地方，使发射机的箭头方向指向接收机，与其平行移动。当发射机与接收机同处在一条管线上时，接收机就会在峰值测量时有信号响应，从而确定出管道的位置及走向。

沿管道其他可能的路径重复进行搜索测量，在测量区域内标记出所有管线。每次探测到一条新管线并可以精确定位和标记。

3.1.2 管线的跟踪识别

应用感应法探测时，发射机附近的管线都带有信号，所以这方法不适用对特定管线的跟踪及识别。因此，对某一管道或电缆进行跟踪时，常常采用跟踪识别法对管线进行定位。采用跟踪识别方法时应遵循如下原则：

1) 先要尽可能收集该管线的有关资料。

2) 尽可能用直连法施加检测信号，合理选定供入点，尽量采用较低信号频率。

3) 设定工作频率后，检查该频率是否存在干扰，若干扰信号太强则应该另选频率。

4) 用峰值法探测管线的位置和方向，用谷值法进一步验证管线位置，当峰/零的定位基本重合时，说明跟踪管线附近没有其他管线干扰或干扰很小。当峰零位置不一致时(峰谷值的间隔大于 15cm)，表示跟踪管线存在干扰。此时的峰值/谷值点均不能准确指示管线的位置。实际的管线在靠近峰值的一侧，且是在峰谷值间距一半(靠近峰值一侧)的位置上。

5) 在复杂现场追踪时，为了防止误判或错误跟踪，建议使用电流强度(CM)以及电流方向(CD)测量功能，以帮助识别目标管线。

6) 在管道的拐点、支管(三通)接头等地段，地面磁场会出现一定的畸变。对于有三通管道，在主管道上以一定间距读取信号电流值，在出现电流衰减的管段，再探测支管出现的位置。方法是：水平旋转接收机 90 度，距离管线 3 米外的两侧分别进行搜索，即可找到支管上的信号，从而确定出支管的位置。而在三通检测时，最可靠的方法是将发射机信号加在支管上，信号电流由支管流到主管道上，然后由三通点流向主管道的两个方向传导。令接收机内水平线圈(即机身宽面)与主管道成直角，搜索主管道上的信号，主管道的三通分支点处将显现谷值。

7) 探测管道拐点的方法是：首先沿管道的路由向前追踪管线，当跟踪到管道拐点处，管线的路由向前就检测不到管线。在管道信号消失处，做半径为 5 米的圆形搜索，可确定管道拐向何方位的路由，而对管道深度及电流的测量，应在离拐点 5 步外才可得到精度高的数值。

3.2 管道埋深的测量方法

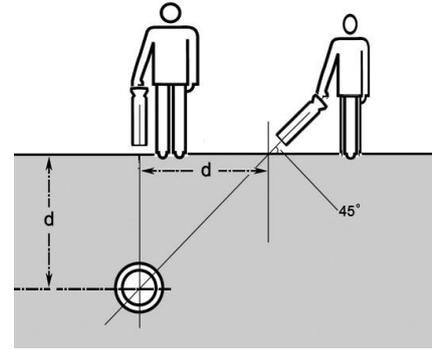
3.2.1 直读测深

在管道位置准确定位后，将接收机置于地面上，机身垂直指向管道中心，且与管道的走向垂直。(这些要求可以通过轻微转动接收机，使面板上的显示读数达到最大值来达到)，保持仪器稳定按动测深键，即会显示深度和管中电流数值。

注意，直读埋深的显示值是管道上方地面到管道正中心的距离，而不是到管顶的距离。

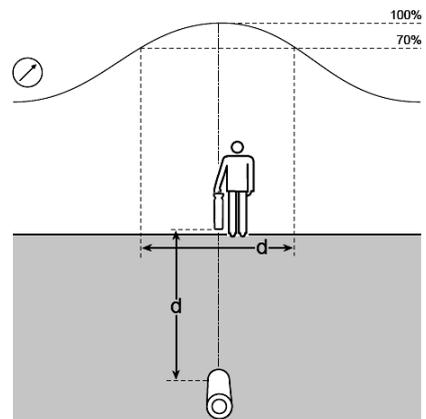
3.2.2 45度法测深

完成对管线定位后，记下中心点位，将接收机向一侧倾斜45度，面板读数将变小，准确保持倾斜状态，并将仪器向外拉，读数将会逐渐增大，过极大点后读数又降低，信号极大点与中心点的距离，即是该处管道的实际埋深。



3.2.3 70%法测深

当峰值/谷值定位不重合，且大于15cm时，在峰值法定位的管道位置上，将峰值的信号响应调节为某一整数数值，如90。记下峰值位置及信号响应数值，将接收机向一侧平移，当响应读数下降到最大值的70%时（如最大值为90，此时读数应为63），在地面记下该位置，向另一侧的地面记下该位置，两次确定位置的间距与埋深相同。



3.2.4 测深时应注意的事项

上述测深方法只能在一定条件下进行，即：

1) 该管段(前后三倍埋深范围内)是一直管，管段上的信号响应读数是平稳的。

2) 没有其它地下管线或金属物件干扰(峰谷值位置重合)。

3) 接收机位置正确(在峰值状态下，信号读数是最大值)。

4) 使用PDL/PXL接收机时，注意检测方式处在管线(Line)而不是探头(Sonde)方式。

图8 测深示意图

若不注意上述条件，测深的结果可能会有很大的误差甚至错误。此外还要注意，上述方法测量出的管道深度，是接收机下边沿到管道中心点之间的距离。只有当管道管径较小，测深时接收机基本贴近地面时，才可以把测量值等同于管道上方覆盖层的厚度。否则，在给定管道覆盖层厚度的数值时，一定要做相应的扣除。

3.2.5 直读测深的深度校正

在直读法测深时，管道埋深的精确值还需要将直读测深结果乘以一个校正系数 k 。确定校正系数的方法是：已知埋深的管道上，直读测深，通过实际埋深值除以深度读数即可计算出 k 值。或者通过70%法与直读测深方法对比计算出 k 值。 k 值根据土壤湿度取值一般在0.8~0.9之间，土壤湿度越大，校正系数 k 的取值越小。此外，检测信号的频率也影响 k 的取值，一般信号频率越高(kHz级别)， k 的取值往往越小。工程的经验表明，128Hz及640Hz的检测频率，直读埋深的数值基本接近管道的真实值。

3.3 管道检测电流的测量

3.3.1 电流强度测量(CM)功能

RD、VIVAX系列管线仪以及防腐层检测仪能从地面上测量管道中的信号电流强度，它有助

于在复杂环境下识别追踪的管线。利用 CM 功能可以测出目标管线上实际信号电流的强度，理论上它不受埋深影响。在管道防腐层电流梯度检测中，管道信号电流检测更是一种重要测量，判定防腐层上的缺陷是基于管道电流有陡降的现象。所以，检测者判定及验证电流检测的真实性十分重要，埋深的变化、环境中的干扰信号都可能影响正确的电流读数。此外，必须是在正确对管道定位的基础上进行，否则是很难正确测出信号电流强度。

判定管道中电流值测量结果是否准确的方法是：通过定位过程的峰零位置是否一致，判定测量点是否存在明显的干扰。在发现电流值有超出正常衰减范围的降低时，向前一定距离（一般可以是 5~10 米）后重新测量，只有与前面的新测量值接近时，才能够确认电流值的可信度。

3.3.2 电流测量的工作方法

电流测量的检测方法，与直读测深方法大致相同，只须按电流键，这时将显示管中检测信号的等效电流。为了要读取可靠的电流读数，同样需要注意上面埋深测深中注意的事项，同时尽量在相同埋深的管段上进行，测出的数值会更有可比性。

此外，在通过电流值检测管道外防腐层破损点的过程中，尽管检测方法推荐使用等间距测量，但当检测点处有干扰、管道埋深有较大变化，或是地面位置不适合测量时，向前向后移动测量点是可以接受的。这样的位置改变，只要将间距值记录清楚，是不会影响对防腐层破损点的定位，也不会影响防腐层完好状况评估结果的。

4. 防腐层检测工程的实施

4.1 技术准备工作

在开始检测一条管道之前，应尽可能多地了解关于管道的相关信息，这对于正确地完成检测任务很有帮助。进入现场前要收集研究待测管道的基础资料，初步拟定信号供入点的位置及测量段的安排，以利于现场检测及后期的数据处理。这些准备工作包括：

1) 一张大比例的地图（1:5000 或更大），来了解目标管线的基本情况，区域内的其它管线、所有支管、阀门、阴保测试桩、牺牲阳极的位置、管线连接点的大致位置以及其它相关的资料。检测人员也应该参考一些管线的历史记录：管道铺设的日期、防腐层状况、施工质量、所有近期的检测报告（包括其他方法测查的结果）、阴保电位运行及测量结果、管道曾被开挖和进行过维修项目的的时间和地点、以及运行过程中发生事故等等。

2) 要准备好相应的记录本，或使用天津嘉信专用的数据记录仪 PDMLogger。现场除必须逐点记录距离 X 读数及信号电流读数外，应经常记录管道检测过程的峰/谷值一致性、埋深、特征点位置及管道设施（闸井、支管、分水器等等）等情况。如果用双频观测，应同时留有记录两个频率电流位置，并详细记录两次检测的相关情况。

3) 要准备好发射机用的蓄电池以及接收机用的电池及其它必备器材，如标示木桩等等。

4.2 检测的工作规划

4.2.1 信号供入点的选择

在开始检测之前，特别是对于从未用 PDM 进行检测过的管道来讲，尽可能地在地图上标出

管线的参考位置和信号供入点的可选位置,对高效实施检测是很有帮助的。信号必须用直连法施加到目标管线上。信号输入点的位置可以在阴极保护的检测桩、阴保站内的保护电流输入点位置上(关掉阴保电源,断开阴极输出连线)、管线上可能的阀门设施、或其他易于施加信号的位置等。选择信号供入点时必须牢记的是:靠近信号输入点的位置附近是不能进行检测的(至少10米以外)。但是,如果当管线与一条道路或河流的交汇点可能存在着破损点时,发射机就不能接在很近的测试桩或相邻的位置上,而要连在另外较远的可能连接点上,以保证这段管道处于可以检测的范围内,能够检测出可能的破损点。信号供入点的选择原则是:

- 1) 防腐层检测一般只能用直连法给管道供入检测信号。
- 2) 信号供入点应当选择在管道简单、附近管道无接地点的位置上。
- 3) 检查接地回路电阻,回路电阻应在数十欧姆至200欧姆之间。如果地极接地不好,可通过增加地极数量,或浇水的方法来降低接地电阻。
- 4) 必要时测量管道上所选频率的干扰程度。方法是先关上发射机,将接收机调至所选的频率上,将增益调至在较大的数值上(80~100),检查信号响应的读数大小。如果干扰太大则要选用其他频率。
- 5) 成功供入信号后,用接收机在地线上及两侧管道上测量管道上电流的数值,并根据信号供入点附近管道上的信号强度,判定后继的检测过程是否有足够的信噪比。同时根据信号的流向,排除发送信号回路存在短路的可能性。如果不能满足如上要求,则要通过变更信号供入点或变更地极位置等方法来改善施加信号的效果。

4.2.2 发射机地极的位置

- 1) 地极点应当选择在管道简单、附近管道无接地点的位置上。
- 2) 地极一般打在距检测管道的垂直方向30~50米以外地方。除非可以确定与目标管线绝缘良好,且距离较远,否则不能将其他管道、金属构筑物作为地极使用。如果现场附近有池塘、水沟、建筑物的接地线、避雷针地极等易于导电的装置,利用它们是一个很方便的选择。
- 3) 检查接地回路电阻。发射机给管道供入信号的电流回路的阻值应在数十欧姆至一两百欧姆之间。当回路电阻过大时,PDM发射机电压超限指示灯点亮,此时无法在目标管线得到理想的信号电流。造成回路电阻过大的多数原因是接地极的问题。解决的方法是:可给地极浇水,增加地极数量等办法,以降低接地电阻。
- 4) 对于如戈壁、沙漠等过干的土壤环境的用户,准备0.1~0.3平方米的铝板(厚度不限),将其埋入地下30~50厘米,浇上盐水,这样的地极效果较为理想。

4.2.3 信号频率的选择

应用电流梯度法进行防腐层检测的仪器,可以是嘉信技术的PDM,英国雷迪的RD-PCM, Vivax-DM,也可以是RD8200管线仪等仪器。这类仪器的应用范围以及适用的管道类型略有不同,PDM类仪器较适用于长输管道,一次施加信号可以检测距离较长的管道,但对于单纯进行管道的定位则有些不便。而高性能管线仪则因为发射机功率较小,检测的距离较短,较适用于城市管道的检测。对于要兼顾城市管线定位的应用,则是一种较为适用的选择。

选择合适的检测信号频率,对于成功、快速地完成检测工作是至关重要的。对于使用PDM类仪器进行检测的用户来说,当检测的管线很长,同时管线路由上的埋设条件不很复杂时,检

测信号应采用 ELF 档。此模式下的发射机共发射两个频率：4Hz 及 128Hz，两种信号的比例关系是 4Hz 占 35%，128Hz 占 65%。这种信号的分配比例，有利于采用 128Hz 的信号进行长距离管道的检测。（注意：PDM 发射机上的显示液晶板上显示的数值总是 4Hz 的信号电流大小，而 ELF 模式的定位信号电流大约是显示值的 1.8 倍。而其它档位上几个频率的电流值大体相当）。

当管线路由上现场条件较为复杂时，建议采用带电流方向的信号模式。ELFCD 的发射信号频率为三个：4Hz、8Hz 及 128Hz 它们的比例关系为 4Hz 占 35%、8Hz 占 30% 及 128Hz 占 35%；而 LFCD 挡的发射信号频率也为三个：4Hz、8Hz 及 640Hz 它们的比例关系同为 4Hz 占 35%、8Hz 占 30% 及 640Hz 占 35%；可以看出：对于三种不同信号发射方式，4Hz 信号都有，且电流大小不变。就应用场合来说，ELFCD 与 LFCD 信号供入档的应用条件没有差别，只是在一档的定位频率上干扰较强时换入另外一档，以避免外界的干扰频率。

细心的用户可能会发现，PDM 的接收机并没有提供 8Hz 的检测模式。发射机发射 8Hz 信号电流是提供与 4Hz 配套的倍频，用于确定检测电流的方向。注意：接收机上有 8 kHz 的检测模式（不是 8Hz），它是为与其他定位仪器的兼容而设置的，并非检测由 PDM 发射机发射的 8Hz 信号。也就是说可以使用通用管线仪的发射机供入信号，由 PDM 接收机进行 8kHz 频率的检测。

在精确定位的管道位置上，将接收机垂直置于地面，手柄指向与管道方向平行。保持接收机固定不动，按下“i”按钮，PDM 接收机在 4 秒后显示管道埋深和信号电流的测量值。在实际检测应用中，由于 4Hz 信号时采用磁饱和和磁力仪作为检测元件进行检测信号的电流测定，它的检测精度较低（误差 < 5%），当发射机施加较小的检测信号时，4Hz 的检测效果较差。而定位电流的测定是采用传统的双线圈方法，检测精度很高（现场进行的重复精度测试表明，此种检测重复精度 < 0.5%）。对于防腐层检测的用户来说，128/640Hz 是一个很明智的选择。

此外，对于要同时应用 A 字架进行防腐层精确定位的用户来说，发射机的信号频率只能放在两个带电流方向的档位（ELFCD、LFCD）上。这一点十分重要，如果没有采用带电流方向的检测频率，A 字架无法检测出防腐层的漏点。

采用 RD 或 VIVAX 管线仪进行埋地管道防腐层检测时，信号的选择较为简单，除非 LF 信号（640Hz）频率的干扰很大，一般采用这个频率，并且要用直连法给被测管道施加检测信号。当有干扰时，可以采用 8kHz 的检测频率。但此频率的有效检测距离将会大为缩短。

4.2.4 定点、量距、读取数据

开始检测时要记录有关的管道信息数据，包括：管道名称、管道类型、防腐层类别、管径、管壁厚、信号供入点、测量方向、测量日期、所用频率、初始电流值等等。在管道上检测的过程中，当检测点所处地面有干扰物体或目标管道处于支管、拐弯、变深点时，应越过这些点进行测量。当用多个频率检测时，使不同频率都须在同一位置上读数。不熟练的操作人员，建议采用往返两次读数，这样即可降低读数误差以提高检测精度。当发现有异常的电流衰减，应该首先确定电流读数的可靠性（参见 3.3.1 节）。确定后应加密测量电流读数，同时在电流衰减较大的一段，查明是否存在垂直方向支管或有不正常的金属搭接。（具体的方法是：将接收机转 90 度方向，离管道 2m 左右，平行管道方向移动进行探测，当有支管或金属搭接时，会检测出明显的信号响应）力求在现场将发现的异常（即较大电流梯度的地段）查明是否为支管、闸井或其它管道设施，并作好记录。

4.3 智能 A 字架的使用方法

进行防腐层破损点定位前需要对目标管道进行精确定位。之后用 PDM 接收机测定管道中的检测信号电流强度及方向。如果管道(或电缆)外皮绝缘层有破损,给管道施加的检测信号泄漏于周围土壤中,并且在地面上形成明显的电位梯度分布。应用交变电流梯度法,大体确定出防腐层缺陷的管段,在此基础上应用 ACVG 方法对防腐层破损点进行精准定位,能够大大地提高工作效率。

PDM 防腐层检测仪配有智能 A 字架,应用 ACVG 方法来进行埋地管道外防腐层以及电缆外皮破损点的精确定位。智能 A 字架独立工作而无须连接 PDM 接收机,完成检测的过程是:

需将 A 字架的两个探针与大地良好接触,土壤干燥时应该浇些水以增强土壤的导电性。

发射机使用电流方向(CD)的信号输出模式,A 字架的面板上的箭头可直观指示出漏点的方向。这使得故障定位检测变得很容易。

A 字架的面板还显示出两个探针之间电位差的毫伏分贝值(dBmV 简记为 dB),该数值反映的是检测电流在不同外防腐层故障处泄露的量值,用来比较破损的严重程度。一般情况下,电位差的数值越大说明管道泄漏的电流越大,防腐层的破损程度可能更大。但这个数值还会受管道破损处的管道中初始信号电流大小的影响。也就是说,同等严重程度的破损,管道中的信号强度越大,电位差的读数也会越大。

A 字架的检测结果可实时上传到 PDM 接收机内,也可应用嘉信技术的数据记录仪进行存储。

4.3.1 操作步骤

智能 A 字架的操作过程:给管道施加检测信号,发射机的屏幕会显示信号频率的组成,用户只要选择 4/8Hz 的倍频输出模式即可。无论是否安装磁靴,PDM 接收机都可以应用交变电流梯度法进行防腐层缺陷管段的定位。

将 A 字架以与管线走向平行的方向插入管道上方的土壤,标有绿色的探针背离发射机,标有红色的探针朝向发射机的位置。将 A 字架的探针插入土壤后进行读数。智能 A 字架将自动调节信号水平,计算出毫伏分贝(dBmV)读数以及电流方向,面板上进行直观显示。整个过程不需要用户进行任何调节操作。

智能 A 字架的面板上显示的方向箭头在距离发射机较近时,为指向信号供入点的方向。在破损点附近,箭头指示的就是漏点的方向。没有箭头显示或箭头前后摆动,则表示附近没有漏点存在,或土壤中流动的电流太小,不足以给出防腐层破损点的方向,但也有可能是 A 字架处在破损点的正上方。此时,A 字架面板上还显示有信号电流的 dB 值。在一般强度的管中电流情况下,若读数在 30dB 以下附近的防腐层没有破损存在。用户可以通过蓝牙连接接收机,将结果存储在接收机中。

沿管线方向移动 A 字架,重新将探针插入土壤。如果以前的位置给出的方向箭头是向前的,而新位置箭头方向是向后的,则表明此时操作者已经跨过了破损点。

在破损点附近 A 字架面板显示数值一般在 40~60dB 范围内,漏点很大时可能大于 70 dB。以 1 米的间隔沿管线的走向进行检测,观察仪器面板上的 dB 读数,数值上升、短暂下降、又上升,之后数值会渐渐下降;以更小的间隔进行前后检测,直到找到漏点方向的反转点、dB 读数

最低的位置。此时可以肯定故障点就在 A 字架的中点位置。将 A 字架转 90 度，也就是检测方向与管线的方向垂直，重复以上步骤，检测出的故障点在 A 字架的正中央。用木桩或油漆记下故障点的位置。

记下 A 字架处在与管线垂直方向时的 dB 读数值，用于比较管道上漏点的严重程度，决定管道的维护次序。方法是：

将 A 字架的一极插在管道的正上方的土壤中，另一极垂直于管道。从距故障点 1 米处开始，以 25 厘米或更小的间隔检测，记下此过程的最大读数，或应用蓝牙传输功能，实时地将检测数值上传到 PDM 接收机上。对每个检测管段进行以上步骤，直到完成全部检测，标识出管道上的全部故障点。

4.3.2 注意事项

当市区管道处在水泥/沥青路面下时，无法将 A 字架的探针插入地面，因不能与管道上方土壤形成良好导电通路而无法实施地电位梯度的测量。解决方法，一是在偏离管道上方不远处有土壤的位置进行检测；二是在路面上浇点水，使得探针能够采集到地面的电位信号。同样，当检测管道上方的土壤较为干燥时，适当地浇一点水会提高检测的精度和检测的效果。当 A 字架的检测效果不理想甚至检测不出漏点时，检测人员要通过测量当前管道中的电流强度，检查管道中的检测信号是否过小。一般认为，管道中的信号电流小于 100mA 时，是不适合进行 A 字架检测的。

此外，还应检查发射机是否发射的是带有电流方向的频率信号，这一点经常会被忽略。

4.4 关于 PDM 的补充说明

天津嘉信技术股份有限公司结合三十余年的埋地管道探测、检测仪器开发及应用技术推广的经验，应用先进的微电子技术、电磁信号检测传感器、微弱信号调理技术、云存储云计算等软件开发能力，采用全新的产品工业设计手段和规范的产品生产流程，为管道检测行业奉献出全新一代管道防腐层检测仪—PDM。

管道防腐层检测仪（Pipe Coating Defect Mapper，简称 PDM）是一款用于检测埋地钢质管道防腐层缺陷和评估防腐层绝缘性能的仪器。PDM 采用电磁感应原理，在非开挖条件下，应用交变电流梯度及交流电位梯度检测方法，实现埋地管道的位置、埋深、电流以及防腐层缺陷点的检测。防腐层缺陷检测的原理是：管道外防腐层和大地之间存在着分布电容耦合效应，且防腐层也存在着弱而稳定的导电性，使检测信号在防腐层完好时的传播过程中呈指数衰减规律。一旦外防腐层有缺陷，检测信号电流便由破损点流入大地，管中电流会明显衰减，地面上检测到的信号强度会急剧减小，由此可对破损进行检测。当管道的检测信号电流泄漏于周围土壤中，在地面上产生散发性的电位梯度分布场，A 字架的探针插入地面便能测量到这种电位梯度的变化，并能定位出破损点的位置，这就是交流电位梯度的检测原理。

4.4.1 技术特点

PDM 主要由发射机、接收机和智能 A 字架三部分配合来实现上述功能，配套嘉信技术的云平台支持下的 PDMLogger 数据采集工具，完成现场检测数据的采集、检测数据云分析以及云存储等工作。应用嘉信云端的埋地管道防腐层检测数据处理 C-ESTEC 云服务，实现对埋地管道

防腐层的质量评价，分段评估出外防腐层的绝缘等级。

PDM 配备 200W 大功率发射机，具有超低频的信号电流测量功能。对于外防腐层良好的管道，一次信号施加可定位长达 30km 的目标管线。但不推荐一次施加信号检测距离超过 5 公里（供入点两侧各 2.5 公里）。4Hz 信号电流可以模拟出直流保护电流的衰减规律，而不必考虑分布管道电容及电感的影响。

PDM 特别适合检测长输管道与其它管道的不正常搭接，或管道个别地段的防腐层破损，个别地段的防腐层整体老化。通过对电流分布的测绘，可以推断出长输管道上阴保系统个别管段上可能有过保护（引起防腐层起泡剥离），或是保护电流不足的情况存在。

智能 A 字架由内置可充电锂电池供电，单色高清段码屏显示检测结果，无需与接收机连接即可查找防腐层破损点，结构轻便、操作简单。使得防腐层破损点测量工作可独立进行，提高工程实施效率。智能 A 字架兼容 PCM、DM 发射机的检测信号，丰富了进行防腐层检测的设备选择。智能 A 字架的技术指标：

工作频率	4+8Hz	显示屏	单色高清段码屏
定位精度	±5cm, 信号量程: 120dB	材 质	ABS+铝合金框架
内部电源	8. 4V3Ah 可充锂电, 续航时间>100h	重量尺寸	1. 9kg, L640mm*H800mm
工作温度	-20℃~50℃	防护标准	IP65

4.4.2 与主流管线仪的比较

PDM 是防腐层检测的专用仪器，管线定位不是其主要功能，不配置感应检测频率。PDM 发射机的输出频率及输出模式为：

频率模式	单频输出: 128、640Hz	工作限制	功率 200W/电压 120V
	双频输出: 4/128Hz 4/640Hz	电 源	220V 交流电源 20 ~ 60V 直流电源
	三频输出: 4/8/128Hz 4/8/640Hz	自动报警	超压报警、功率报警、温度报警
信号输出	100mA、300mA、600mA、1A、2A、3A；4A (仅单频模式)	重量尺寸	13kg L457mm*W356mm*H200mm
输出方式	直连法输出，阻抗自动匹配	保护装置	输入熔断器 (15A, 250V)

发射机采用恒流输出，PDM 分六档设定输出电流的大小：100mA 300mA 600mA 1A 2A 3A，单频模式可输出 4A 的电流（注：PDM 发射机面板显示的是 4Hz 信号电流数值，其他频率按不同的信号模式与 4Hz 电流强度有一定比例倍数的关系）。

PDM 发射机由于采用很低的信号频率，不具有感应发射信号的方式，只能用直连的方式输出检测信号。PDM 接收机，保持了与目前市面上主流管线仪相同的外观样式及轻便性，配置可拆卸的磁力仪探头（磁靴），专门为 4Hz 检测以及存储检测数据之用。PDM 接收机的 8KHz 检测频率是为与其它管线仪兼容而设置的。

当发射机输出带方向频率电流时，PDM 接收机能同时自动测量电流强度和电流方向。

5. 防腐层检测评价中的问题及解答

在应用电流梯度法进行埋地管道外防腐层检测时，由于受管道规格、建设年代、土壤环境等变化因素的影响，没有任何两条管线会得到完全相同的检测结果。在仪器的使用过程中，结合现场的实际情况，理解方法原理，有效地使用仪器，对检测结果做出科学、合理的解释，对于发挥仪器的作用是至关重要的。嘉信公司自 1998 年推广雷迪 PCM 防腐层检测仪以来，配合用户进行了大量的现场检测，公司的技术人员通过大量的现场实践，从中积累了宝贵的仪器使用经验。这些经验可为仪器初学者提供一些必要的参考，帮助用户正确使用，并对 PDM 检测结果进行合理准确的解释。

交变电流梯度法应用较为简便。检测时将发射机的检测信号供入管道，在地面上沿管道路由记录管道中各个测点的电流值；检测数据经过软件处理即得出检测结果。图形结果可直接显示破损点位置，也可定性地判断各段防腐层的老化状况。若要定量地测量防腐层的完好状况，需将检测数据通过 ESTEC 软件，算出各段防腐层的绝缘电阻值 R_g ，对异常管段计算检测信号的衰减率，用以判别故障的类别及严重程度。参照相应标准即可判定防腐层的质量级别，检测的原始数据及分析结果可以作为防腐数据库的原始资料。

应该说明的是：当操作者具有了自己的检测经验，尤其是通过对同一管道进行的重复测量，对有疑问的管段进行开挖验证，会大大地提高在解释管道测量这一领域的专业技巧和技能。结合现场不断总结、反复验证是提高使用水平的有效途径。

5.1 埋地钢质管道防腐评价软件 ESTEC

防腐层检测数据的处理工作是在 ESTEC 软件支持下完成的，因此必须先对该软件有所熟悉。软件的应用平台是中文 WIN xp 以上的操作系统。该软件对电脑性能的要求较低，只要能够平稳运行 Windows 软件的电脑一般都能良好地支持 ESTEC 软件的运行。有关防腐软件的使用方法，请参考 ESTEC 的软件使用说明书，或使用软件的联机帮助系统，软件的实时帮助完全遵守微软的应用规范。

嘉信技术埋地钢质管道防腐层检测数据处理软件 ESTEC 基于交变电流梯度法评价模型，可完成检测数据的导入、计算处理，生成直观评价结果、输出相关结果曲线及对防腐层的分析报告。V11.0 版本软件新增智能分段功能，避免了处理过程中分段偏差导致的错误结果，大大降低了数据分析的工作量。新版本软件在报告输出方面更加多元化，评价结果体现的更加直观，同时也使内业处理的工作效率得到了有效提升。ESTEC 作为 SY/T 5918 标准推荐评价软件 GDFFW 的升级版，其结果也适用于 GB/T 19285-2014、CJJ95-2013 等标准。



5.2 检测中典型问题

PDM 发射机通常使用 24 或 48 伏的蓄电池作为动力电源。其最大输出功率可达 200W，为提高检测的信噪比，保证检测精度提供了信号强度的保障。经验证实，采用超低频信号的 128Hz 工作频率较为理想。电流的大小必须保证在测试区间内管道有足够的剩余电流强度（末端 > 100mA），才能较好地进行管道外防腐层的整体性能评价。输出电流可选 1A 左右，此时建议采用 48 伏直流电源给发射机供电，24 伏蓄电池可能会出现供电不足的情况，续航时间会过短。

应用交变电流梯度法进行管道外防腐层检测，检测人员要根据电流梯度法的检测原理、仪器设备的性能特点、经过现场检测实践。在使用中要注意以下问题：

1) 测点布置与图示问题

在进行测点布置时，要根据检测的任务要求决定检测间距，并基于大比例尺的地形/管线图，确定出信号供入点的大致方位。施工过程中的实际检测点一般要根据现场的检测条件适当调整。利用被检测管道的检修井、设施井、管道的裸露点（或阀门井、泄水井、放气阀等）或测试桩作为检测工作的起点和终点。用 DGPS 测量检测间距时，测量误差不大于管道长度的 1%。

检测信号通过信号线与被测管体直接连接或与测试桩的引线连接。为保证测试结果的稳定性和可靠性，接地电极采用不锈钢接地钢钎，电极表面和接管贴片表面保持光滑洁净，以减小接触电阻。通过地线和接地钢钎构成检测电流回路，接地钢钎应与土壤接触良好，为降低对管道检测的干扰，地线应布置在垂直于被测管道的方向上。

2) 检测信号电流大小的调整

检测人员在沿管道进行电流梯度检测时，接收机测得电流强度的分贝值数（dBmA）要求大于 20dB，但不超过 80dB，信号响应读数（通过调整增益）在 30~70 之间，检测精度良好；当信号电流较大时，电流读数大于 1000mA 时接收机自动改为以安培（A）为单位。当读数过小时应增大发射机的输出电流，必要时改变发射机的位置重新施加信号；对管道进行直读测深，深度值可精确至厘米。

3) 检测间距的选择

测量间距的选择主要取决于两个因素：管道外防腐层状况以及进行开挖和修复需要破损点的位置要求。对于一条还没有用 PDM 检测过的管道来说，选择小间距是很有好处的，为的是把绝大多数的异常点都能够检测出来。一般地讲，对防腐层状况较好的管道，可选择 50 米以上的间距，对于较差的管道，要用 30 米以下的检测间距，破损点或可疑点附近，要加密检测。

检测的最小间距：除非管道处在一个非常严重的老化状态下，否则建议电流梯度法测量时的读数间距不应小于 20 米。这主要是因为，在一个很短的距离上，信号电流值可能存在的测量误差会与防腐保护比较好的管道上的信号衰减幅度相当，这样得到的衰减差值可能看不出明显差异。但对可疑有破损的管段进行进一步加密检测时，间距就要小于 10 米。

4) 检测结果的重复性

为保证检测结果的数据精度，在每个测点上可进行重复观测，两次观测相对误差不超过 5%

时取其之一或者两次观测值的平均数作为该点的观测结果；在干扰较大或者读数不稳的测点上多次观测，取其偏差最小的 2—3 个读数的平均值作为该点的观测结果。

5) 防腐层漏点的初步判定

现场检测过程中，操作者可以通过两个检测点之间的电流变化，初步确定出防腐层漏点的大致位置。确定漏点的准则不应简单地通过检测信号的衰减差值来判定，而是可以通过计算信号衰减的百分比，一般衰减百分比在 20%以上就应判定为该段信号异常衰减。例如，30 米间距的两个检测点信号衰减了 100mA，并不能确定是否是防腐层存在缺陷，若检测的初始点信号值为 1000mA，衰减率为 10%；若初始点信号为 300mA，则衰减率高达 33%了，若没有支管等管道设施，该段内就存在严重破损或金属搭接。通过加密检测或 A 字架可以精确将缺陷点定位出来。

6) 防腐层缺陷的判定和定位

防腐层缺陷分为局部破损和整体老化两种类型。在初测阶段，防腐层缺陷的确定应采用 50 米间距的 dB 值计算衰减率。根据 dB 值衰减率按下表判定大管径三层 PE 防腐层缺陷类型。

利用 dB 值衰减率初步判定防腐层缺陷类型

dB 值衰减率 (dB/km)	防腐层缺陷状况类型	说 明
< 30	正 常	基本完好。防腐层无明显的缺陷
30~60	防腐层轻微老化，个别破损	防腐层轻微，有个别缺陷
60~300	局部防腐层破损	防腐层有局部缺陷
300~500	严重破损或金属搭接	存在交叉管道

在初步判定为防腐层局部缺陷的区段，通过缩小测试间距重测该管段，并计算各区段的 dB 值衰减率。如果至少有一段，其 dB 值衰减率大于 2 倍的区间 dB 值衰减率，则确定该点为防腐层局部缺陷位置段。否则，该区段为防腐层整体状况很差，老化程度参照 GB/T 19285-2014 或 SY/T 5918-2004 标准中防腐层整体质量评价方法确定。

5.3 检测中疑难问题的处理

5.3.1 电流读数的波动

PDM 采用磁力仪测量“近直流”的检测电流，精度较低。PDM 的 4Hz 电流测量精度为±5%，而对 128/640Hz 频率是用空芯线圈完成检测的，其检测的信号精度优于±3%。但检测的实际精度还受如下因素影响：管道的埋深、检测信号的强度、附近管线上的干扰信号强度、大破损点的存在、管道附近有大的金属构件等等。需要特别注意的是：管道埋深的突然变化会影响电流的读数，埋深的突然变浅，往往会导致电流读数的上升。解决的办法是：可以通过前后少许变动检测位置，使相邻电流测量点埋深接近。此时要准确记录下每个点的间距，不会影响数据分析的结果。

有时电流及深度的读数也可能有非常大的变化。这时操作者一定要注意待检测的管道上信号是否有足够大的信噪比。当管道上的信号强度不够，或是环境中的干扰过大，都会导致检测数据的波动。解决的方法仍是在施加信号环节做文章，通过改善目标管道上的信号强度，抑制其他结构上的干扰信号来提高检测数据的稳定性和重现性。

经验表明，靠近大的破损的位置上，前后位置上电流读数也可能变化很大。为确定破损位置通常需要用小间距进行加密测量。电流值的波动原因，可能是检测电流从破损位置流出，返回接地点（地极位置）时流动路径的差异以及电流大小量的变化所引起的。当读取衰减数据时，让接收机重复地读一组电流值是很有益的。除非电流很小或管道很深，所得到的深度和电流读数会有很小的变化，都不应超过±2%（小强度的 4Hz 信号除外）。至少有两组成功的读数是完全相同的。

5.3.2 破损点的可能位置

防腐层破损点的位置大多数分布在：河流或水体下的管道；岩石中的管道要比松软泥土中的管道防腐层更容易破损；穿越在公路下面的管道；当管道敷设竣工之后，在临近位置又进行了开挖（如土木工程或其它管道的施工）的地方等等。需要检测的区域还包括：管道的连接位置，这主要是指由不同的单位在不同时间施工的管件连接部位；管道的小半径弯头等部位。建议在這些地区，检测点的间距应该相应的小一些。

此外，当将发射机的信号供入检测管道的中间地段时，用接收机在供入点的两侧分别读取信号电流的数值，从中可以判断出两侧防腐层大致的完好状况，也就是说信号电流大的一端防腐层状况整体较差或破损点的分布较多。这是因为，大部分信号电流肯定是流向防腐层性能差或有破损点较多的管段。

5.3.3 破损面积

由于应用电流梯度法进行防腐层检测的是防腐层综合电气绝缘性能，而非防腐层的物理特性。在检测中会发现，信号电流的衰减率与破损部分的面积之间具有一定的相关性。管段内发生 100~150 毫贝的电流衰减（信号电流降低 10%），就表明大约有相当于一个 1mm² 的破损点；当其衰减为 1500 毫贝时（信号电流降低 85%），管道就集中了大约有 1 平方米的破损。但这并不意味着管段内真有这样的破损点存在，完全可能是若干个小的破损点，也可能是一段管道的防腐层绝缘整体性能的降低所致。

要注意的是：在管段局部衰减的幅度和破损尺寸之间不存在严格的线性关系。这是由于受到土壤的电阻率，破损点处长时间腐蚀沉积物的形态等因素的影响，不同破损点泄漏电流能力会有所不同。此外，检测信号的频率、管道埋深等因素也会对电流衰减率产生较大的影响。也可能存在着这种情况：表面上看起来是一个小的破损产生了一个很大的信号衰减，而实际上附近大面积的防腐层性能下降严重。因此，对于特定的破损，尽管破损面积与信号衰减之间存在着很密切的相关性，但仍需要对附近管段采集更多的数据来加以进一步的确认。

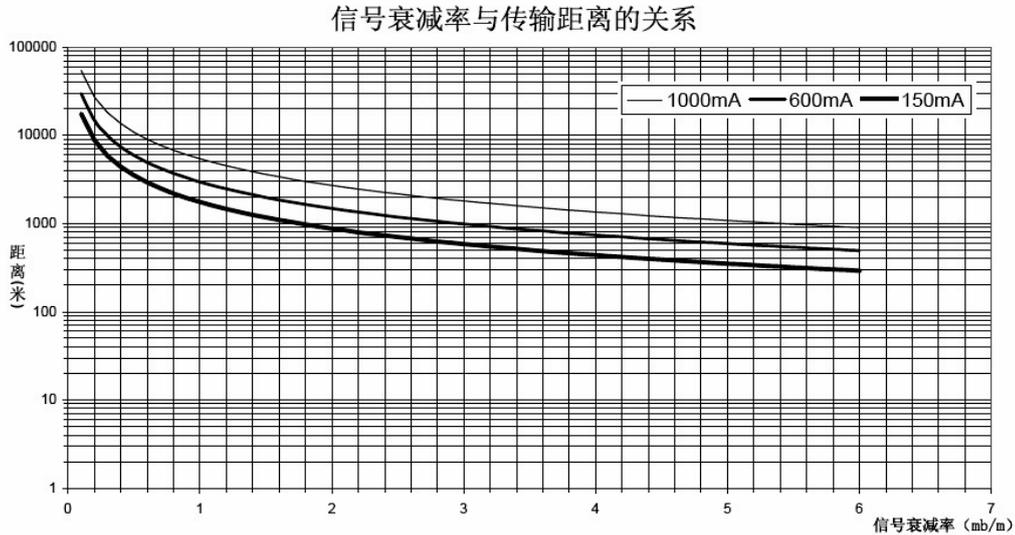
5.3.4 信号大小选择及可检测的管道长度

选择施加检测信号的大小是以够用为原则。这主要依据于下面的因素：

- 防腐层的状况以及要一次供入信号的检测管段长度
- 发射机的供电方式，较大信号输出会缩短蓄电池的供电时间。
- 整条管线上可供入信号的位置之间的距离

当管道处在外防腐层严重老化的状况下，信号衰减将会很严重。因此，信号的有效范围也大为缩短。如果应用一个较小的信号电流，检测范围也将减小。下图就表明了对于一个给定的

发射电流，最大范围值与信号衰减之间的比值关系。该表数据是假设发射的检测电流在信号供入点向两方向上传播。如果供入点在管线的端点上，那么得到的电流大体是上面情况的两倍，检测范围也相应加大。



当施加了特定强度的检测信号，能够实施检测的单方向管段长度取决于下面的因素：

- 1) 外防腐层的类型和破损状况
- 2) 管道的规格，大的管径往往流失电流程度更高
- 3) 管道上是否有支管或绝缘法兰
- 4) 管道上是否有牺牲阳极。

分贝电流衰减数值

对不同管径的管道，当外防腐层状况较好时检测的信号衰减如下表：

管道外径 (m)	信号衰减率 (%)	衰减范围 (mB/m)
0.15	1.8%/50 米	0.07~0.20
0.30	2.0%/50 米	0.15~0.30
0.50	2.5%/50 米	0.20~0.40
0.60	3.0%/50 米	0.30~0.60

但防腐层更好的管道上得到的实际衰减数值有可能小于这个范围，若是土壤平均电阻率异常地高或低的情况，更是如此。

5.3.5 最初的检测

当对一条新管道开始测量的时候，建议选出管道的两三部分管段（一般每段为 50~100 米）测试一些校验读数。对于 DN600 以上的管道，当信号衰减率在 50 米的范围内达到 20%~25%时，表明防腐层的状况很差。但不一定是破损点所致，有可能是防腐层的整体老化或是防腐层的多处破损，防腐层的状况也可通过参照近期的阴保电位测量情况加以证实。在这种情况下，想对管道进行长距离的检测困难较大，所以为了将来的检测比较，操作者就应该记录下管道的所有相关信息，并以这些信息作为参考，在检测中对于一段 500 米的管线而言，当其衰减明显地高出正常范围 3.0 分贝时，就可以试图找出单个破损点的位置。这样的读数就可以确定出除了一

般腐蚀点之外，衰减信号在 250~500 毫贝的破损点的位置。这也可以通过“二等分”该段管道，来迅速地找出破损位置（在两次读数位置的中点处读数，同时计算出两个方向上的衰减值），一个衰减值为 250~500 毫贝的破损点面积大约相当裸露管道的几个平方毫米。

5.3.6 小间距的测量

为了定位某一破损点，可通过在破损区段内用“二等分法”，或加密测量的方法来实现，管段上的检测间距可缩小到 15~20 米，甚至更小。操作者就应对这一待检测的管段每隔 3~5 米就读取电流值，这些数值不一定储存，但要记录下来并在必要时临时用图表的形式绘制出来，在电流急剧下降的地方就可以确定出破损点的位置，最精确的位置通常是靠近急剧衰减坡段的中间。如果读数的选取是在小于 3~5 米的间距内进行，电流读数的误差可能会导致数据曲线上像锯齿状的数据变化，这使对破损点的定位产生了更多的困难，所以不建议检测间距过小。

5.3.7 土壤改变的影响

检测过程中，土壤的改变一般不会对防腐层的检测结果产生很大的影响，因为信号发射机的稳流电路能够不断地适应这种变化，确保输出的信号电流是恒定的，除非操作者有意地改动它。土壤电阻率的季节性变化（比如春季到夏季），将会影响测量结果。但是经验表明，由于这种原因引起的衰减幅度的变化不可能超过 10%。所以，可以允许这种变化的存在，它不会对检测结果的有效性产生重大的影响。对于比较有规律的检验测量，建议最好对特定的管道，通常在每年的同一时间来检测，这样可以把由于这种原因引起的偏差降低到最小。

ESTEC 软件做防腐层评估时，土壤参数的影响很大。在进行数据分析时，根据埋设的土壤类型，将土壤的含水量分为五级：特干、干、中、湿、特湿，ESTEC 软件会根据用户选择的管道及环境参数，自动进行防腐层绝缘电阻率计算参数设定，从而提高了计算 R_g 的简便性和精度。

5.3.8 新竣工的管道

对于一条新投用管道，在竣工后实施一次基线的检测是很有必要的。因为，这将能保证及时发现防腐层的破损和在施工过程中引起的防腐层缺陷。进行必要的修复后，会使管体腐蚀的影响因素限制在最小的程度，使管道开始运行时就处于良好的保护状态下，对于延长管道的使用寿命是极其有益的。基线检测结果作为历史数据对于以后管道运行管理是极为珍贵的。

5.3.9 制定长期的计划

近些年来，国内管道行业广泛应用了 ECDA 评价方法。在相应的国内外技术标准（NACE SP 0502，SY/T 0087.1）中提倡外腐蚀评价的持续性和周期性。这意味着，对管道制定一个长期的检测计划，并且保存好每次的检测记录将是很有必要的。对于管道腐蚀严重的管段，可进行周期性测查，以加强对防腐层破损状况的监测，了解正在腐蚀的部位发展趋势，从而在适当的时间里采取有效的措施来处理。下面是建议的方法：

1) 对整条管道以几百米的间距来进行一次整体的测查（对于破损比较严重的区域间距要适当地小一点），破损点的位置就在衰减非常高的部位。

2) 研究以往的检测结果，参考阴极保护系统的运行记录，针对电流消耗最严重管段（全部管道的 10~30%）制定一个长期的防腐性能的检测计划。

3) 当对破损位置的检测计划拟订完之后，在进行修复工作之前和之后都应立即对其相关部分进行检测。

4) 在管道附近进行的任何开挖, 如建筑施工、管道铺设、路面修整时, 都应该对其相关位置在其施工之前和之后进行一次测查, 对任何可能已经引起的损伤的地段, 要格外加以注意。

5) 阶段性地重复检测, 如果可能的话, 最好是每次都在管道的同一位置来抽取读数, 以便于对比区别防腐层的老化速率。配合嘉信公司的外防腐层检测数据处理软件 ESTEC 完成不同时间检测结果的对比分析, 打印比较结果, 为管理人员或决策者提供完整的防腐层数据资料。

6) 针对具体的管道, 尝试确定出检测信号的衰减程度(电流减小的百分数)与不同防腐层破损尺寸、管道的尺寸、土壤的环境以及相关的保护电流等因素之间的关系。这些数据对于通过管道的电流检测数据, 得出管道的更多腐蚀信息是大有帮助的。

5.4 干扰和失真

5.4.1 检测信号畸变和失真

管道的拐点, 三通部位会发生电磁信号场的局部失真。这是因为电磁信号相互叠加的结果。可以在一个很小间距上应用 A 字架完成检测, 能够确定出不连续防腐层的破损位置。应用电流梯度法进行检测时, 则电流检测参考点的选取应尽可能在距离交叉点或拐点处至少 5 米外的位置上。如果衰减数值是在一个有分支管道的位置上选取的, 会误以为“存在”破损, 因为有一部分信号已经分流到管道的支管上。

5.4.2 信号供入点附近管位的偏移

当发射信号采用一侧接地法时, 因地极连接线上电流电磁场的作用, 管道上的电磁场信号会被推向接地线相反的一侧。此种现象对于埋深大于 1.5m 的管道尤其明显, 管道越深偏移误差越大; 越靠近信号供入点, 偏离误差越大。解决此类问题的方法是:

(1) 尽量保持地极连线与管道的走向呈垂直状态。此时地极连线上的磁场与管道磁场呈正交分布, 对测量的影响最小。

(2) 对称接地法, 将发射机置于与目标管线一致的位置上, 由发射机引出两根线分别接到目标管线的两边, 观察两边接地电阻, 通过变换地极的深度或浇水等办法使两边接地效果一致。

检测信号供入点附近地段的防腐层破损点, 使用 A 字架是个很好的选择。因为 A 字架使用的是 ACVG 法, 所测量的是因破损点外泄露的检测电流产生的地面电位的分布。管道路由上干扰信号导致的周围电磁场的失真不会影响该方法的使用效果。

5.4.3 变化信号供入点

正确的发射机信号供入点对于在检测区段成功地施加信号至关重要。在不合适的地点供入检测信号, 会极大影响管道中的电流分布, 降低检测信号的信噪比, 影响检测精度, 严重时甚至导致检测无法进行。

在选择供入点时, 考察管线周围的环境, 了解管道分布情况十分必要。发射机供入信号的实施目标是: 尽量使目标管线上有较强的信号电流, 在伴行管线上尽量没有信号电流, 或使信号电流尽可能地小; 与此同时, 供入信号电流要尽量通过管道整个沿线回流到发射机的接地连线的地极上, 这样才能保证有效地检测出防腐层的破损点。当待检测区域信号分布不理想、检测电流流向不是待检测的方向, 或是信噪比不够, 就要重新选择信号供入点。具体实施方法参照 4.4.1 节的内容进行。

5.4.4 管道上的其它信号

外加电流阴保管道上用恒电位仪作为电流源，进行电流梯度法检测时，仪器往往不会受保护电流上谐波的影响，不关闭阴保设施是可以接受的。但当施加检测信号点与阴保站较近时，出于对发射机的安全考虑，建议最好断开管道上的阴保电流。

当干扰信号来自接收机线圈的上方时，上面线圈的信号强度要比底部强度高，这也包含在地面上大约 50 厘米或更高位置的导体产生的信号，此时 PDM 接收机会自动消除较小的干扰信号，但当干扰信号过强时，对测量结果会产生影响。

5.4.5 地下金属的构筑物

当地下金属构筑物与目标管线相距很近时，甚至位于同一管沟内，它们之间的电性关联度会很高，有时能带走管道上的检测信号；也可能在管道的某一位置分走的信号又重新回流到管道上。此外，管道与金属构筑物之间发生相互感应，会发生从另外一条管道防腐层破损位置流出的信号电流流到管道上。例如：当发射机的接地点很靠近一条没有防腐层保护的水管道，而这条管道恰恰经过要检测的目标管线的一些位置，可能会导致这种情况发生。操作者就应该将发射机放在不同的位置上施加信号以求得最为适合的供入效果。当信号效果良好时，重新进行检测，更正原来条件下测量的电流读数。

5.4.6 管道同沟敷设及均压带的影响

对于同沟敷设的多条管道进行外加电流阴极保护时，经常会加设均压带，这样一台阴保仪的外加电流可以同时保护这些管道。多根平行管道从有均压线一端施加信号时，有可能被当作一根管线来探测，尤其是近距离敷设，埋深很大时更是如此。

均压带一般每 300 米左右设置一条，在进行检测过程中。希望将所有的均压带分离，至少在相邻的 3-5 公里的范围内尽量做到这一点。对于油田的大多数管道是很难做到的。这样，均压带的焊接处就表现为是防腐层的破损点，并且被测管道上的一些信号就将传送到其相邻的管道上；也可能信号从一条管道上经过搭接处又返回来。但是，大多数情况下，目标管线上的信号强度最大。根据其信号强度的不同，还是可以区分出目标管线来完成相应的检测的。

在检测防腐层漏点时，消除均压带影响的最好方法是使用 A 字架，因为 A 字架是通过管道上方地面的电位分布定位破损的，多条管道及其均压带的存在不会影响检测过程。这时是相邻的多条管道当作一条管道进行检测的，只是在区分破损点出现在具体哪条管道上可能会有困难。

5.4.7 牺牲阳极的影响

作为阴极保护管道的一种形式，牺牲阳极保护通常被用来在外加电流保护方法不适用的环境下使用，也作为对后者的补充来应用。在 PDM 检测过程中，将牺牲阳极作为破损点给出它的位置。如果可能的话，要尽可能将其与管道断开，因为阳极的存在将严重地减小有效检测电流的利用率，使一次信号供入检测管道的长度大大缩短了。此外，阳极点的位置附近可能会掩盖掉的较小破损点。

连接电缆焊点处防腐层破损与阳极泄漏电流的区分：在牺牲阳极埋设处，检测时会有很大的泄漏电流。此时，使用 A 字架精确定位出泄漏电流的最大点，再结合管道位置的定位结果进行判断。如果最大泄漏点与管位一致，即可判定是电缆与管体连接处防腐破损，应重新作防腐处理。如果与管位不一致且在埋设阳极的一侧，就是牺牲阳极上泄漏的电流，属正常现象。

5.4.8 绝缘法兰对检测的影响

当管道处于复杂的环境地区，或是为了控制杂散电流的影响范围，经常在管道的特定位置上安装绝缘法兰（或绝缘接头），使管道的两个部分保持电气绝缘的状态。如果 PDM 操作者正在检测有阴保部分的管道，当靠近绝缘法兰时信号将急剧地降低，并且在法兰之前的近百米管道上存在着一个很显著的衰减。这个问题的解决方法一般是将发射机与法兰连接起来，然后以法兰位置为起点进行检测，或是将法兰的一端接地，然后以此为终点来进行检测。

5.4.9 安装有金属套管的情况

当管道位于道路的下面时，一般在管道上套装一个直径大一些的金属套管，这样可以保证管道免受一些机械振动对管体的损伤，但套管给防腐层的检测带来了困难。如果此时的管道能满足如下条件，还是可以完成管道的防腐层检测的：

在管道与套管之间没有导电体连接

套管本身有自己的防腐保护层

在管道与套管之间的环形空间充满了一些导电介质，使得检测电流可以流过。

在环形部分的填充物及周围土壤之间存在着一种潜在的导电通道是重要的，可能在这种条件下能获得有参考作用的结果，但是利用这些结果时要考虑到套管存在的影响，因为通常的读数是在管道没有套管的部位取得的。

5.4.10 “返回电流”的解释

当作用在目标管线上的信号电流从防腐层流到土壤中后，它将朝着发射机接地极的方向回流。经过一个很短的距离后，土壤中的返回电流将变得比较分散，不会对检测产生很大的影响。但是靠近破损位置的地方，由于返回电流较大，较为集中的导电带将产生一个较为明显的磁场，这个磁场会对管道上正常的电流产生的磁场形成干扰，使得漏点上方地面上磁场发生一定程度的畸变。在防腐层破损位置的检测中，体现为电流曲线图上将是一个起伏，即信号电流急剧下降后（这表明存在着一个破损点），又会在后继的位置上有一定强度的电流值“上升”。当破损比较大，或管道本身的尺寸较大而管道上的覆盖土壤厚度不大时，或在检测操作靠近发射机的地极点的附近时要特别注意这种影响。

5.4.11 冻土环境对检测的影响

电流梯度法应用于高电阻率土壤中的钢质管道外防腐层检测效果较差，如冻土条件。这是由于电流梯度法检测时，须通过直连法向管道上施加一个交变的检测信号。冻土层的存在对直连法形成导电回路有着不良的影响。其原因是，在冻土层上打入接地极十分困难，接地极与大地的电性连接效果很差，同时还由于冻土的土壤导电能力急剧下降。一般情况下，很难对冻土层下的管道形成检测信号所需的良好导电回路，其结果是能够施加的信号强度不够，不能达到检测时所需的信噪比，降低了检测的有效性。

冻土条件下的检测方法：加深地极的长度及接地深度，使得达到冻土层下，在冻土层下形成信号电流的检测回路，可以解决检测信号的供入问题。

附：术语解释

近直流信号	PDM 采用 4Hz 的信号电流完成对防腐层的检测，它在管道上的传输特性与阴极保护的直流电流相近，对评估阴保系统的有效性 & 查找故障十分有效，称之为近直流信号。PDM 接收机检测 4Hz 的电流读数也称 PDM 电流。
定位电流	PDM 发射机可以发射 128Hz 或 640Hz 的检测电流，完成对埋地金属管道的定位检测。接收机检测 128Hz 或 640Hz 的电流读数称之为定位电流。
ELF 信号	PDM 发射机在 ELF 信号模式发射 128Hz 的定位电流信号。ELF 频率信号是超低频信号的英文缩写 (Extra Low Frequency)。适合最大距离的埋地管道定位及防腐层检测。接收机检测 128Hz 的电流读数称之为定位电流。
LF 信号	PDM 发射机在 LF 信号模式发射 640Hz 的定位电流信号。LF 频率信号是低频信号的英文缩写 (Low Frequency)。
有源信号	通过发射机发射并加到管道上，一个或几个特定频率的检测信号。
无源信号	不连接发射机，直接使用管道上自身带有的电力、通讯或其它干扰源 (50Hz 或 VLF 甚低频无线信号) 的交流信号进行管线定位，将此时管线上的信号称之为无源探测信号。
耦合	加到目标管线的信号，通过电磁感应的方式转到相邻管线的情况，相邻管线上的耦合信号会对目标管线的检测产生不良影响。
响应	指接收机对管道上的信号反映。通常指在接收机的显示屏的数字指示或扬声器中反应出的声音指示。通过调整接收机的灵敏度，可以改变信号响应的大小。
峰值/谷值	使用接收机对目标管线进行精确位置时，水平线圈在管道正上方给出最大响应，称之为峰值响应；垂直线圈在管道正上方给出最小的信号响应，称为谷值响应 (也称零值)。
精确定位	使用不同的定位模式，通过接收机测出目标管线的精确位置。
目标管线	是指选择的被检测金属管道。发射机的信号作用在它们之上，这样他们将被精确定位、外防腐层故障检测以及外加电流阴极保护的有效性评估。
电流方向	通过接收机测量管道上 4Hz/8Hz 倍频信号的相位，给出交流检测电流的逻辑流向，用于区分出复杂管道的连接关系。通过显示屏上的前后箭头指示。
辅助阳极	外加电流阴极保护系统的接地电极，通过导线与阴保站相连。通过它失去电子被氧化，使得金属管体得到电子被保护。CP 系统的多支阳极也称之为阳极地床。
CPS 功能	当使用整流器作为外加电流阴极保护系统电流源时，管线上会有一定强度市电的倍频 (100Hz) 信号。它可作为管道检测的信号源。应用接收机的 CPS 模式可进行管道的定位、测深、读取等效电流强度。
电力模式	不用发射机的无源探测模式，直接使用接收机检测管线上的市电 (50Hz) 信号，完成管道的粗略定位。
金属搭接	管道与其它埋地管线或金属构筑物的不正常连接，造成防腐层破损以及保护电流的非正常流失。它对阴保站的正常工作及管道的使用寿命造成损害。

(林守江著)

2024 年 10 月修订