管道外防腐层破损检测的 DCVG 技术

一、 引言

自从上世纪 80 年代初，世界范围内开展了有关管道防腐方法及检测技术的研究，开发出了多种管道腐蚀与防护的检测方法、技术及设备。其中，最为有效的是直流电位梯度（Direct Current Voltage Gradient，DCVG）检测法。该检测技术具有最为准确、检测项目全面等优点，在国外得到了广泛的应用，成为管道外防腐层检测的首选方法。英国 DC Voltage Gradient Technology & Supply Ltd 公司开发的 DCVG 设备最初用于英国国内的军用检测方面，只需另配上直流供电电源就可以检测埋地管道外防腐层的情况。该仪器是根据澳大利亚发明家 John Mulvaney 的研究成果开发出来的，主要包含两个部分：电流断流器和测量仪。DCVG 公司具有近 30 年的仪器设计、制造、使用、数据分析等方面的丰富经验，有数千台检测仪在世界范围内应用。更重要的是几千个应用 DCVG 仪器的防腐层腐蚀的工程案例。天津嘉信公司作为国内专业的检测技术应用开发者，为 DCVG 检测设备的总代理商和授权技术支持和培训中心，不仅能够向用户提供优秀的 DCVG 检测设备，并能够进行 DCVG 电位梯度检测的专业知识和工程应用的技术支持和培训。

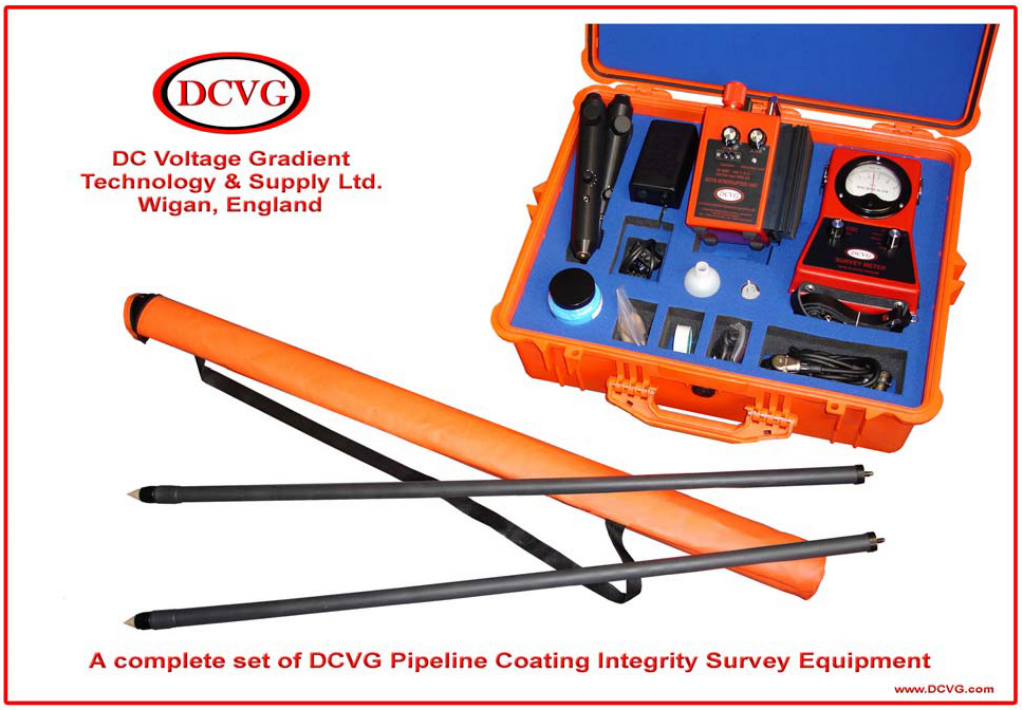


图 1. DCVG 检测系统的组成

二、 DCVG 方法技术原理

当阴极保护电流（CP）加载到管道上时，在外防腐层破损处的保护电流会流入管道，在周边的土壤形成了电位梯度，相应的就在管道上方的地面上也建立了地面电位的分布场。越接近破损点的部位，电位梯度就越大，管道上方地面的电流密度就越大。一般来说，裸露面积越大其附近的电流密度越大，地面的电位梯度也就越大。

作为地面电位梯度法的检测技术，DCVG 测量方法是在保护站的阴极保护仪上串接一个电流断流器，使 CP 电流以一定的时间周期进行通断，其通/断时间通过 GPS 卫星同步信号进行校正，确保与检测接收机数据采集时刻严格同步。检测时在管道路由的上方，通过测量地面上的电位梯度与土壤中的电流方向来确定缺陷的位置和形态。接收机也带有 GPS 同步系统，测量时一个电极探杖在管线正上方，另一个探杖在管道的一测，两探杖相隔 1 米左右，沿管线的走向每间隔 1 米测量一组数据，根据测量结果可准确定位出外防腐层缺陷的位置和确定缺陷级别。

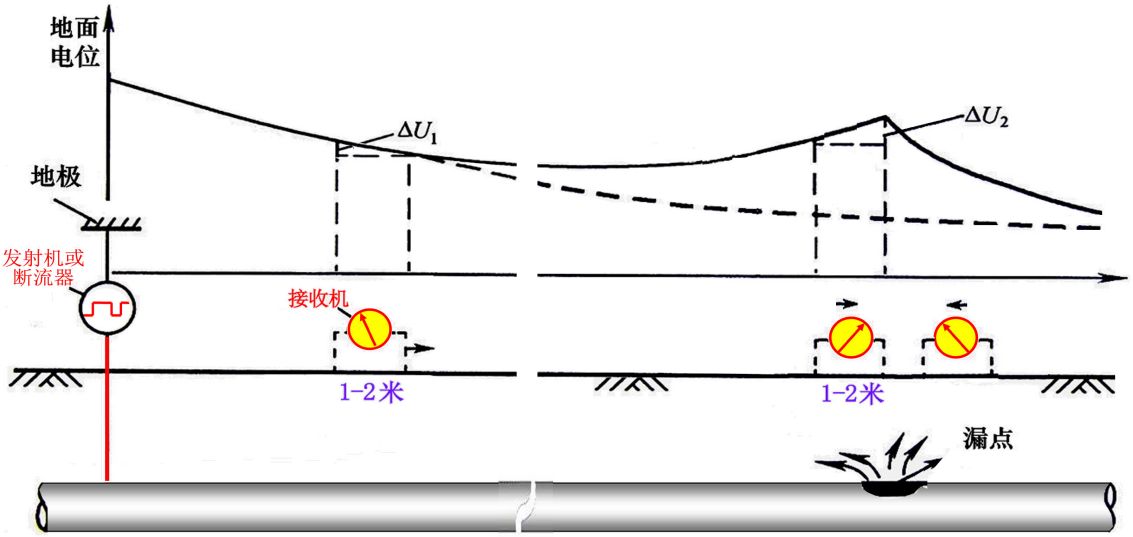


图 2. 地面电场检测方法原理图

DCVG 检测仪的检测仪是一个灵敏的，表头零点居中的毫伏表，测量插入地表的两个探杖上的 Cu/$CuSO_4$ 电极在地表的电压梯度平衡时电位差值。如果两个电极相距大于半米，其中一个极的电位就会比另一个高，进而建立电流方向及两极之间的电位梯度差（电压）。

为了便于解释和消除管道自身、大地电流及其他 CP 系统等的电干扰，也为了更好解释和区分 DCVG 测量过程中其它直流电源可能的影响，在直流电位梯度技术中，加到管线上的是非对称的直流脉冲信号，如以 0.45 秒通、0.8 秒断的周期循环通断。实现方法是在管道阴极保护整流器上（T/R）的阴极端，串联一个特殊的断流器来控制阴保电流的通断，也就使得阴保电流被调制成 1.25 秒为周期的检测信号。当管道上没有阴极保护设施时，可以使用蓄电池或便携式直流发电机配合临时的地床，通过测试桩把直流检测电流加在管道上。

在检测过程中，操作员沿管道以 1- 2 米的检测间隔，用探杖（电极）并行于管线方向进行排列测量。两电极相距 1 到 2 米。当接近漏点时，可以看到毫伏表开始沿地面的电流方向出现响应。不论是破损点，还是管道接口，检测仪主机都会有响应。当操作员继续前进而远离破损点时，指针不仅出现反向偏转，而且强度随着远离破损点而逐渐变小。

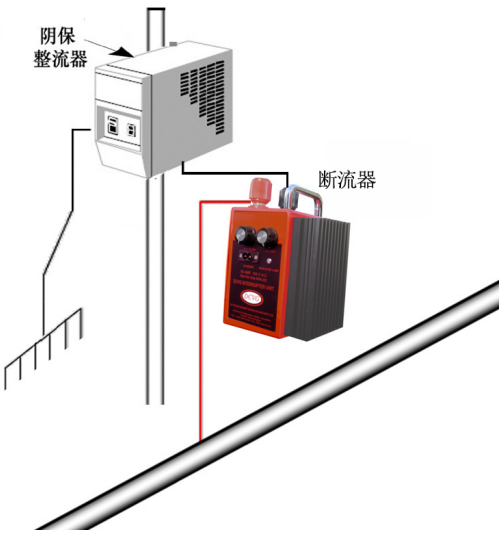


图 3. 断流器使用示意图

返回复测，仔细追踪防腐层的破损点，可以找到毫伏表指针偏转为零的位置，这就是在防腐层破损点正上方时的情况，这时破损点就在两个电极的中间点。在实际测量中，不仅要沿管道走向在地面插入电极探杖，而且要在管道走向的垂直方向再进行测量，以保证测量是在管道正上方进行的，以及确保漏点定位的准确性。

DCVG 测量方法具有很高的灵敏度，可以发现地下两米深管道上只有指甲盖大小的破损点。只要操作得当，对防腐层缺陷点的定位误差通常只在 15 厘米范围之内。

检测过程中如果测量时毫伏表指针偏转后，在一定距离内仍不回偏，则说明管道防腐层上有相邻的漏点存在，或是防腐层存在连续的破损段。

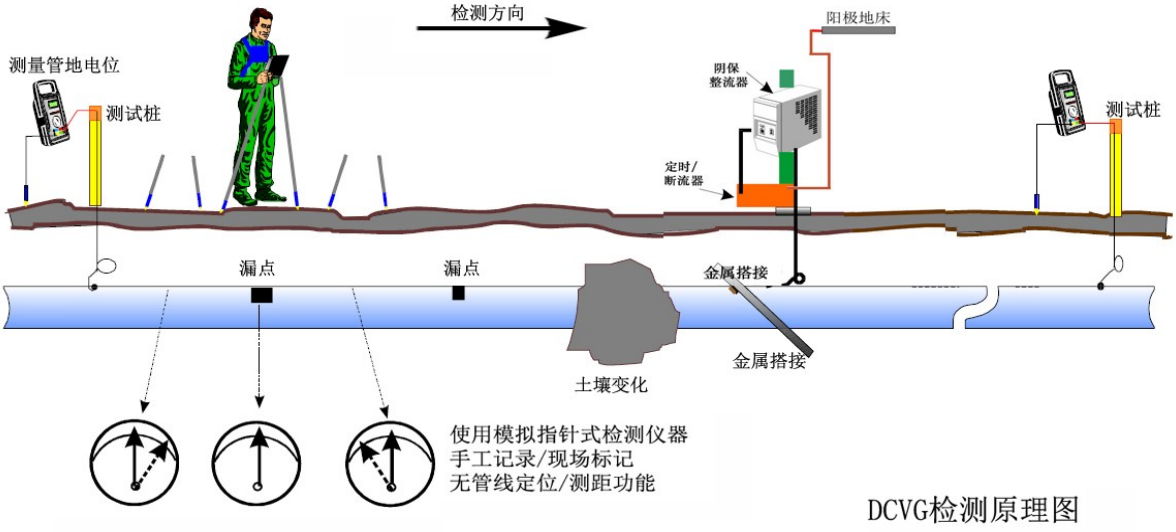


图 4. DCVG 检测过程示意图

三、DCVG 技术的应用

经过国内外大量检测工程中的实际应用，证明了该检测技术的可靠性和实用性。在国外广泛应用管道外腐蚀直接评价方法（ECDA）规范（NACE SP 0502-2010）中，DCVG 技术作为重点推荐的间接检测工具和方法。其主要用途和优点是：

- 进行外防腐层破损点的精确定位
- 估计防护层破损的严重程度（%IR）。
- 为管道的维护方案提供外防腐层破损维修的优先次序
- 判断管体是否在被电化学腐蚀(管体腐蚀活性点)。
- 估计防护层破损的形状和在管道环向上的位置。
- 不受周围伴行管道和输电线路等电磁干扰的影响。

作为外防腐层间接检测的主流设备，DCVG 可以测量出外防腐层破损的形态以及评估防腐层破损的严重程度（等效面积,%IR），还可以通过测量管道保护电流在不同状态下的流入流出方式（破损点的阴极/阳极倾向）来检测管体的金属腐蚀活性，以判断管体的金属在当前的保护电流下是否正在发生腐蚀，决定不同防腐层破损点的维修紧迫程度和推荐出不同的处理方法。这些功能是其他检测方法无法比拟的。也正是 DCVG 技术的这些优越性，决定了尽管该方法存在着

检测难度偏大，方法应用相对复杂的缺点，仍然作为 ECDA 评价规范中首选检测方法的原因。

（1）. 破损严重程度的估算：

应用 DCVG 技术进行防腐层破损严重程度的计算方法，不同的 DCVG 仪器往往因为仪器的功能设置差异而采用不同的描述方法。但他们在检测和计算原理上是完全一致的。应用英国 DCVG 在检测过程，要应用下面的公式计算每一个防腐层破损的%IR：

$$\%IR = \frac{\text{破损中心点对远地点的DCVG信号振幅值}}{\text{计算破损处管道对远地 点的DCVG信号振幅}} \cdot 100\%$$

即：

$$\%\,IR = \frac{OL/RE}{P/RE} \times 100 \qquad (1)$$

这里所说的振幅是指 DCVG 表头在阴保通/断状态下表头指针最小到最大指示之差，而不是某一时刻表头具体测量出的两个测量电极之间的电位差值。这一点是 DCVG 初用者经常搞混的，当然，表头的指示数值一定要根据此时的仪表量程设置来读取。管道对远地点（P/RE）信号摆幅应按此公式计算（见图 5）：

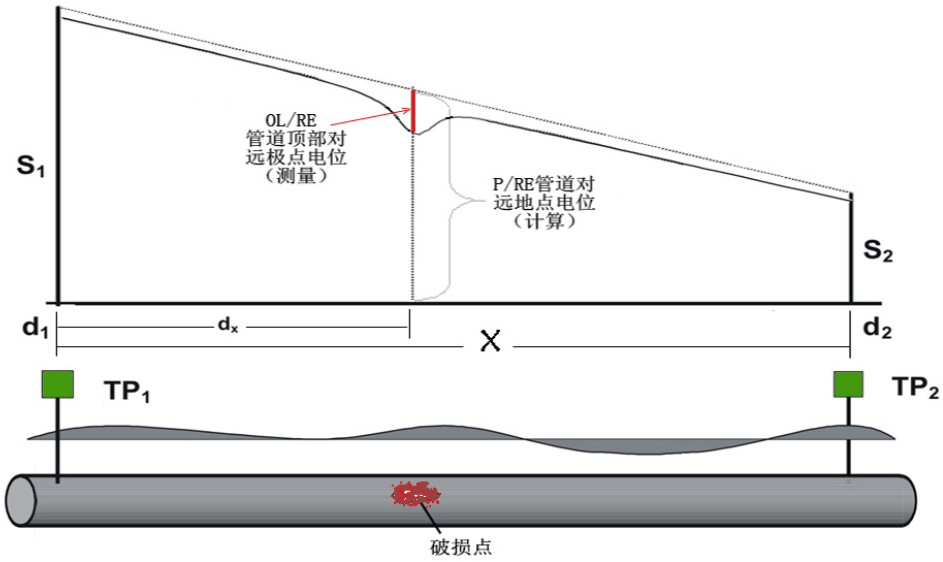


图 5 %IR 的测量及计算方法

$$\text{管线对远地点电位（P/RE）} = S_1 - \frac{dx\,(S_1 - S_2)}{(d_2 - d_1)} \qquad (2)$$

这里： S_1 = 测试桩 1 处对远地点的 DCVG 信号摆幅

S_2 = 测试桩 2 处对远地点的 DCVG 信号摆幅

d_1 = 测试桩 1 的距离测量（在检测最开始时此值为 0）

d_2 = 测试桩 2 的距离

dx = 从测试桩 1 到防腐层破损点的距离值

该计算方法要配合破损点前后的两个测试桩来进行，测试桩所测量的是管道上当前阴极保护电流的信号强度，在应用公式（2）计算破损点处管线对远地点的电位。这是基于管线上保护电

流在没有破损时是线性衰减的假设。应用该测量及计算方法时要注意：

- ✧ 两个测试桩间的距离（$d_2 - d_1$）应尽可能保持较小（不要大于 2 公里）。
- ✧ 上述是线性公式，适用于一条管道上有很少的防腐层破损。如果一条管道上有多处防腐层破损，那么应该使用指数公式来计算管线对远地点的值。
- ✧ 阴极保护的通/断电位之差应该被用于计算破损的严重程度。

而加拿大的 DCVG 检测仪计算%IR 值时，可以不通过测试桩的测量结果，直接测量和计算出%IR 的数值。具体的描述和计算方法是：

管道阴极保护的一般原理是利用土壤的电流流向防腐层的破损点，使得破损点处的管体因此呈阴极状态受到保护。所以，保护电位的构成包括两个部分，其一是从大地无穷远处流向管道与土壤接触带的电压降，称作 VS；另一部分是从土壤接触部位到管体表面上的电压降，称作 VI。总的电压降为：VT = VI+VS。通常，VT 与阴极保护系统所加的电压有关。

$$\%IR = \frac{VS}{VI + VS} \times 100\% \tag{3}$$

其中： VI = 破损点上方的土壤与管道接触界面的电压降，通常称为管地电位。
也就是实际的管道与地表之间的电压降。
VS = 管道防腐层破损点上方的土壤电位与无穷远处地表的电位之差

VI 是非常重要的，因为它是实际加压后能够用于管道保护的那部分电压。VS 是克服土壤电阻的电压降，它对阴极保护不起作用。所以，对一个有效的阴极保护系统来说，VI 应该比较大，VS 应该较小。如果 VI 可以测量的话，阴极保护的有效程度可以通过 VI 大小来估计。然而在实际情况当中，VI 是不容易确定的。反而 VS 却容易确定，由于 VS 和 VI 按相反的比例变化，所以，在阴保输出电压一定的前提下，VI 的增大就意味着 VS 的相应减少。

比较有效的表述 VS 的方法是用其与所加电压电位降的百分比。换句话说，IR 就是损失为 VS 的那部分电压在 VT 中的所占百分比。VI 越小，通常 IR 越大，预示着破损面积越大，根据这一道理，来估测破损大小和严重性。VS 是破损测量点处地表到无穷远处的电位差，它由毫伏表和饱和硫酸铜参比电极（CSE）来测量。通过测量相邻两点的电位，距离和破损点位置，可以计算出 VT 值的大小。VT 的计算公式如下（参见下图 6）。

$$VT = V1 - \frac{DX}{X}(V1 - V2) \tag{4}$$

其中，V1 和 V2 是在测点 1 和测点 2 分别测出的 ON/OFF 电位之差。

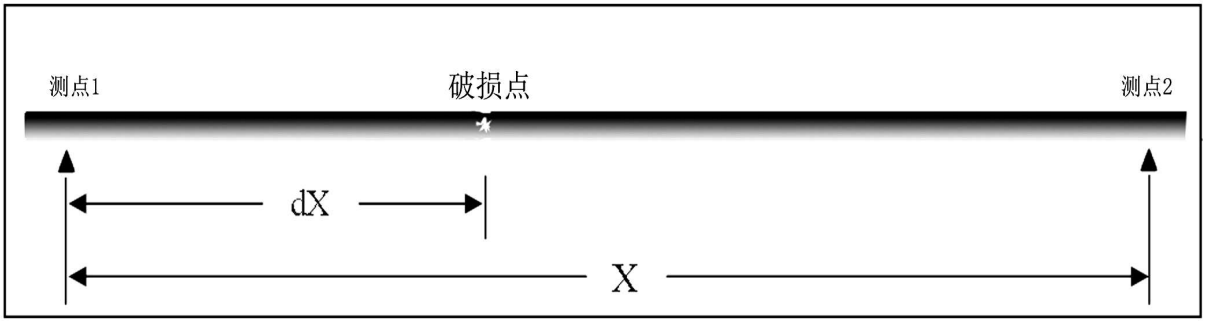


图 6. DCVG 测量中%IR 计算方法示意图

示例：估算管道防腐层破损的 % IR

测点 1 的电位 ON/OFF 差值是 420mv，测点 2 的 ON/OFF 差为 60mv，破损点距测点 1 为 400m，破损点距测点 2 为 600m，电极电位 VS（破损中心点上方与无穷远处地面之间的电位差）为 80mv。

$$VT = 420 - (420-60) \times (400/1000)$$
$$= 420 - 144 = 276mV$$
$$\%IR = VS / VT$$
$$= 80/276 \times 100\% = 29\%$$

通常，6%大小的%IR 值，相当于一个埋深 1m 的钢管上约 10cm^2 管体裸露。但这只是一个的粗略判断，实际工程中判断时还要考虑管道埋深、土壤类型等方面的因素。参考 ECDA 规范中的分级标准，可以认为 29%破损面积很大，应在一年内修复。

（2）. 判断防护层破损点处的管体是否发生了腐蚀

从原理上讲，不论管道是否施加了阴保电流保护，都可以通过测量土壤中的电流是否流向管道的防腐层破损点，来判断破损点处的管体是否正在发生腐蚀。换句话说，无论有无阴保电流作用，都可以通过判断裸露到土壤的管体是否成为了阳极，即金属管体是否正在发生氧化反应，来判断防护层破损点处的管体是否已经发生了腐蚀，这个过程也称为管体腐蚀活性检测。这也是 DCVG 检测技术的另一个优点。但要注意，腐蚀活性判断是一种定性的分析，不是定量的。所以，一旦发现某个部位的管体“成为”了阳极，该管段就应当首先开挖查看并做出及时修复处理。

当 DCVG 查到破损点后，在判断管体腐蚀活性时要调节阴保电流的输出，使之等同于阴保正常运行时所施加的保护电流的大小，即：如果通常管道对土壤的电压是 1000mV，那么，保护电流的输出值就要调到这个幅度。这样就可以判断在阴保系统正常工作的情况下，管体是否正在发生着腐蚀，还是管体能够受到保护。

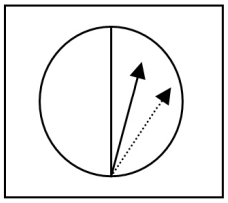
当关闭保护电流之后，破损点可能从管线上其他的电流源得到一定的保护电流。但是，一旦撤销了主要发挥作用的保护电流，该点立刻变成阳极电位，则说明该处管道并未受到有效的阴极保护，管体处于腐蚀状态情况是很危险的。这时，就应该马上安排开挖维修。

判断破损点处管道是否存在腐蚀的具体方法如下：

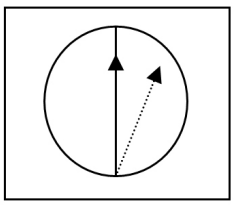
将一个电极放在破损中心点上，另一个电极远离之。观看毫伏表指针摆动情况。通常摆动会出现两个位置上（参见下组图）。

1）偏摆的初始位置（图中实线箭头线）

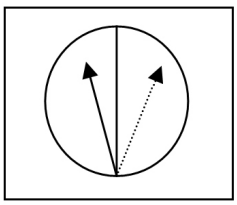
2）对施加经断流器 DC 信号的响应摆动（图中虚线箭头线）位置



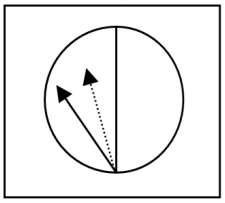
[情形 1] C/C 有 CP 电流保护破损点,没有 CP 时为阴极性



[情形 2] C/N 有 CP 电流保护的破损点,没有 CP 时呈中性



[情形 3] C/A 有 CP 电流保护破损点，没有 CP 时为阳极性



[情形 4] A/A 没有 CP 电流保护破损点，没有总为阳极性

C/C 阴极/阴极：此类情况说明，当阴保系统“通”的时候漏点处呈阴性（受到保护）；当阴保系统“断”或停止运行时，漏点保持极化效应。它是CP电流的消耗者，但未发生腐蚀。

C/N 阴极/中性：在此类漏点处，当阴保系统开通时受到保护，但在阴保系统中断时恢复自然状态。这些漏点消耗CP电流，当阴保系统长期停用时可能发生腐蚀。

C/A 阴极/阳极：在此类漏点处，当阴保系统开通时受到保护；但在阴保系统中断时呈现阳极状态，这是因为中断后的电位值与管道与土壤之间的界面电位有关。甚至在阴保系统正常运行时这些漏点可能发生腐蚀，它们还消耗着阴保电流。

A/A 阳极/阳极：这类漏点无论阴保系统“通”与“断”，它们均未受到保护。 它们可能正在腐蚀，但它可能不消耗阴保电流。

（引自 NACE SP 0502-2008 附录, 情形 3 和 4 是极易发生严重腐蚀）

检测数据的应用（引自NACE SP 0502-2008附录）

一旦定位了防腐层破损点，破损严重程度（破损面积）可以由漏点的中心点到远地点之间的电位差来估算。该电位差作为管道上总电位偏移的一个组成部分（阴保电流“通”和“断”的电位差，也称作IR降），百分比的结果值表示为“%IR”。 DCVG 的检测读数，根据破损大致面积分成四类处理：

类别 1： 1 - 15%IR 的漏点，认为这类情况下漏点的严重程度较低，不需要进行维修。维护良好的CP系统，就可以为管道上暴露的金属表面提供有效的、长时间的阴极保护。

类别 2： 16 - 35%IR 的漏点，在这类漏点在接近地床或其它结构时，建议进行维修。这样的漏点一般认为并非是严重的威胁，更倾向于通过维护良好的CP系统提供充分的保护。对于这类漏点应该加强监管，因为当防护层进一步老化，或阴极保护状况波动时可能归入其它类别中去。

类别 3： 36 - 60%IR 的漏点，认为这类漏点是值得维修的。钢体的暴露面积较大，说明它是CP电流的主要消耗者，此处可能有较严重的防护层损坏。根据接近阳极地床或其它结构的远近程度排入维修计划。它们被认为是对管道完整性的威胁。与*类别* 2的漏点一样，这类漏点要加强监管，因为当防护层进一步老化，或阴极保护状况波动时可能归入其它类别中去。

类别 4: 61 - 100%IR 的漏点，这类漏点一般推荐立即维修，钢体的暴露面积更大，表明它是CP电流的主要消耗者，此处有大块的防护层破损。*类别*4的漏点指示的电位，通常预示着防护层很严重的问题，认为它是管道完整性严重的威胁。

这些示例分类是凭经验的。通过对 DCVG 调查确定出的漏点进行开挖，根据验证的结果作出的。使用不同厂家的检测仪器有可能得出不同的分类和解释。

（3）. 破损的形状和位置

管道外护层破损的形状和位置，可以利用 DCVG 方法测量方法做出土壤电位分布的等位线图来判断。这个过程是需要一定时间的，通常在管线防腐层的总体检测完成后进行。典型的电位梯度等位线剖面（见下图 7）。在管道上方小破损的等位线是圆形的。在管道下方顺管道方向上较小破损的图形，是沿管道拉长成卵形的。

通常，管道外层破损容易在发生在其下半部。

防腐层长条型破损的电位线是拉长形的。当管道防腐层存在径向的破损时，如沥青防护层的环状裂口，沥青防护的多层环状裂口，将出现连续的横向电压梯度。但在沿管道轴向上会出现极大值（两头极值，零值在中间）。这一类特征的破损，通常沿整个管线在管道的补口处或其它地方发生。

这些具有特殊特征电压梯度的变化，在实际测量当中是很容易辨认的。通常的检测方法是每

三步（三个测点距）左右测一次横向剖面，即垂直管道方向作一次测量。测量方法相同。

相距较近的小破裂，也许会有两个分开的环行电位等位线分布。它们互相影响，造成中间出现零值。为了清楚辨认这样的破损，两探测电极在接近或逐渐离开裂口地带时，要尽量采用小一些的探杖间距。

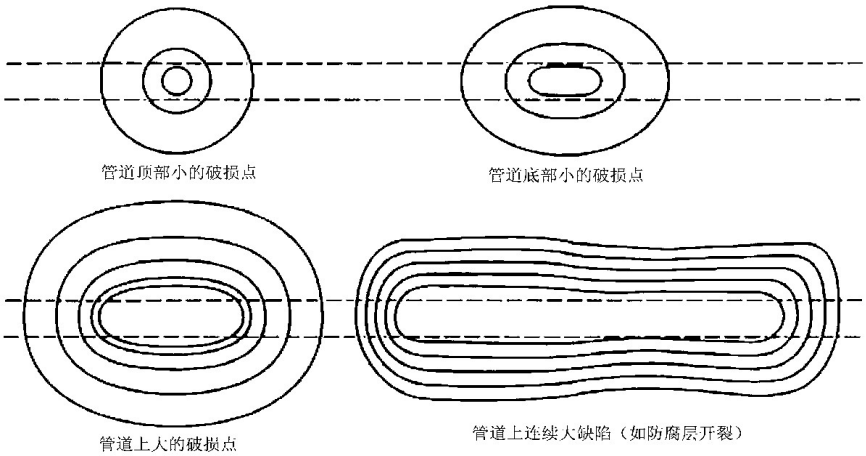


图 7. 典型破损缺陷的等位线图

四、DCVG 与其它检测技术的配合

当前，广泛应用的 DCVG 检测仪往往都是与测量管道阴极保护效果的检测设备 CIPS 检测仪成套销售的。也就是说，一般情况下 DCVG 是与 CIPS 配合解决埋地钢质管道的防腐层检漏、测定及评价管道的阴保效果。由于 DCVG 仪器本身不具备很方便地对管道定位的功能，在管线检测时，还要配合使用管线定位仪进行定位，以保证检测过程在管道的路由正上方进行，取得可靠的检测结果。

此外，该套系统本身是利用中断管道自身的阴保电流，使之带有特定的表征信息后，作为检测信号发送到管道上，通过检测仪在管道上方完成检测过程的。因此，对于未建设外加电流阴极保护设施的管线并不能直接应用 DCVG 技术进行检测。此外，DCVG 方法要求管道上的阴极保护电流要具有一定的信号强度，否则检测效果会大大地打折扣，轻则遗漏小的破损点，重则无法检测出破损点。在这样的情况下，建立临时阴极保护系统会很好地解决这个问题。建立临时阴保系统的方法见下图 8 所示。

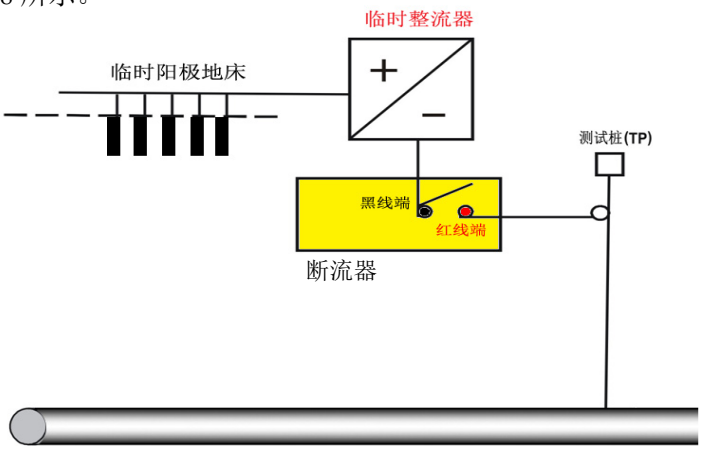


图 8 对管道建立临时阴极保护的方法示意图

但是，通过直流发电机为管道提供足够强大的检测电流时，必须保证临时阴极保护系统之接地极的接地电阻要足够的小，这会在一定程度上增加检测信号施加的难度。简单地打一个地极是往往不够用的。

CIPS 的主要功能是检测阴极保护系统的保护效果。检测阴极保护的保护电位通常是使用万用表在管道的测试桩上进行。这样的检测简单方便，但是无法消除 IR 降的误差影响。这在西部干旱地区问题则更为突出。采用密间距法检测时，CIPS 通过一根探杖、一条足够长的导线与管体连接进行检测过程。这种方法不但可以使检测在管道的任意点上进行，不受测试桩位置的局限。更重要的是，CIPS 的检测过程通过 CP 电流的开/断过程的不同管地电位，可以有效地消除 IR 降对阴保电位读数的影响，使检测结果更为准确可靠。

DCVG/CIPS 系统作为管道外腐蚀评价的间接检测工具与电磁法的检测仪器配套使用效果更好。在 ECDA 规范中，关于间接检测工具选择有了明确的推荐意见，详见下表：

外部腐蚀直接评价（ECDA）工具选择表 (A)

环　境	密间距测量法（CIPS）	电压梯度法（ACVG,DCVG）	皮尔逊法（Pearson）	电流衰减检测法
带防腐层漏点的管段	2	1, 2	2	1, 2
裸管的阳极区	2	3	3	3
接近河流或水下穿越	2	3	3	2
冻土地面下的管段	3	3	3	1, 2
杂散电流区	2	1, 2	2	1, 2
屏蔽的腐蚀热点	3	3	3	3
相邻的金属结构	2	1, 2	3	1, 2
临近平行管线	2	1, 2	3	1, 2
高压交流输电（HVAC）悬空输电线下	2	1, 2	2	2
铺砌路面下的管段	3	3	3	1, 2
跨穿越的其他管线	2	1, 2	2	1, 2
带套管的管段	3	3	3	3
深埋区段的管段	2	2	2	2
湿地区	2	1, 2	2	1, 2
岩石带/岩石回填区	3	3	3	2

(A)**局限性和检测能力**：所有检测方法都有局限性，与土壤类型及组成、岩石区、高绝缘胶带防腐层类型、施工、干扰电流、其他结构等因素密切相关。至少需要两种或两种以上检测方法来获得需要结果与置信水平。

剥离防腐层产生的屏蔽：所有检测工具都不能检测与土壤无电性通路的防腐层环境。如果通过小缺陷或孔与土壤形成电回路，那么如 DCVG 或电磁法便可检测到这些缺陷。这里仅谈到剥离防腐层的屏蔽，表中所列间接检测工具可能或不可能检测到这种电流屏蔽，这种屏蔽也会产生于其他金属结构或地形状况下。

管深：当埋地管道深度超过正常深度时，对所有检测防腐层漏点的工具都影响很大。地形地貌可能会影响深度范围与检测灵敏度。

表中代码：

1 可适用于：小的防腐层漏点（孤立的，面积一般小于 600mm^2）和在正常工作条件下不会引起阴极保护电位波动的环境。

2 可适用于：大面积的防腐层漏点（孤立或连续）和在正常工作条件下引起 CP 电位波动的环境。

3 特定条件可应用：只有在操作者能够通过正确的工程实践，且进行检测部位的分析，选择了能够得到可信的准确检测结果方法，并且其结果可以在有效的完整性评价中使用时，才能应用此工具。

在国内，常规的防腐层检测方法中 RD-PCM 是首选仪器。与 DCVG 相比，PCM 由于其变间距的检测模式，同时吸收了交流电位梯度的检测方法（ACVG 法，A 型架），配合数据处理软件（嘉信公司的 ESTEC xp）可以评价防腐层的完好性等优点，其适用范围更广。此外，使用 PCM 检测阴极保护系统的故障，进而定位管道与其它埋地金属结构的搭接点，是 PCM 独有的性能，应用效果良好。这一点可以从整个行业的设备拥用量上得以验证。

然而，DCVG 检测仪器的独特优势，如判断防腐层漏点的等效面积以及通过测定漏点处管体的阳极倾向来判断管体是否发生了腐蚀等功能是 DCVG 技术所独有的。此外，在检测防腐层漏点的抗干扰性能方面，DCVG 仪器也具有独到的优势，这一点上，PCM 的 A 型架也同样优秀，只是由于这类检测方法的高劳动强度和对检测人员的技术要求较高，成为仪器的应用不是很广泛的原因。而基于人体电容法的检漏仪，其应用简单成为较为普及的重要因素。但是近年来，随着管道管理水平以及腐蚀检测水平的提高，DCVG 在管道检测上的应用已经逐渐地被接受。

CIPS 对阴保电流的开/断管地电位的检测过程中，要求断流器与接收机严格同步，这个同步过程是通过 GPS 卫星信号来实现的。尽管这个过程是由仪器自动完成的，但也要求检测人员做到细致、准确。相应对检测人员的要求也较高。

应当承认，国内的 DCVG/CIPS 用户，并未能将仪器的功能全部开发出来，大部分仅仅停留在防腐层漏点的检测上，这是对仪器功能的巨大浪费。通过对检测方法的学习和掌握，进行全面开发、利用每套仪器的功能，使之充分发挥，是腐蚀与防护检测行业工程技术人员必须正确面对的问题。

图 8　DCVG 现场使用情景