

埋地钢质管道阴极保护的 密间隔电位检测技术及应用

1. 引言

埋地钢质管道阴极保护效果的传统测量方法是，使用伏特表在管道的测试桩位置上进行管-地电位的测量，通过测得的管体对大地的电位差数值来判断管道是否达到 -0.85V 保护基准电位。一般使用高内阻的数字万用表和 Cu/CuSO_4 饱和硫酸铜参比电极（CSE），在管线测试桩处进行管地电位的接触式测量。这种检测方法的最大问题在于检测结果只能对测试桩附近 1 到 2 米的距离有效，而常规管道上的两个测试桩之间相距在一公里以上，这使得管道绝大部分位置上的阴保电位无法进行有效地检测和监测。因此，管道沿线的某些局部影响因素，如距离测试桩很近的较大防腐层缺陷可以对测试桩的检测读数产生较大的影响，对于距离测试桩较远管道上的诸如金属搭接等故障，对于测试桩处保护电位的影响却无法检测出来。由此可见，传统方法通过测试桩上得到管道防护方面的信息是十分有限的。

测试桩上测量保护电位的常规方法，不能有效评价整条管线阴保运行状况。大约在 50 年前发明了管道密间隔电位的检测方法（Close-Interval Potential Survey 简称 CIPS，也称 CIS）。在检测过程中，用一根长导线通过某个测试桩上连线与管道相连，沿着管线路由以小的间距在地面上测量管-地电压。由于整条管道的金属管体可以看成是一个电位的等位体，这样可测出管道路由上任意点的阴保电位数值，进而得到整个管线上保护电位的分布状况。CIPS 检测设备是使用一个具有数据记录功能的精密毫伏表替换常规的万用表，对大量检测数据加以记录，并配合分析软件进行数据处理和分析。



图 1 密间隔检测数据记录仪和工作图

在 CIPS 检测中通过测量保护电位的断 (OFF) 电位, 可以消除管道周围土壤条件对保护电位检测结果的影响, 大大降低了 IR 降的影响导致错误读数的可能性。通断电位的概念基础是: 在保护电流被关闭时, 电压测量中的 IR 成分几乎同时被消除, 而管道和所接触土壤之间的电压衰减则很小 (去极化过程缓慢, 在几个小时甚至几天内管道的极化电位得以保持)。这样得到的有效保护电位 (即 OFF 电位) 是真实的, 可以实现对管道阴极保护效果进行更准确的评测。

当前的技术标准中没有对测量通/断电位的断流时间比率、断流速率以及测量时间延迟等参数做出明确的规定。CIPS 检测设备的使用者通常根据检测设备提供的可能选项, 选择他们自己的测量参数。选择参数的依据往往是依照管道的特定条件, 比如: 管径大小、防腐层完好程度、阴保电源的控制方式、测量管段与阴保汇流点之间的距离, 以及断流器动作的精确性和使用的数据记录仪的同步性能等因素综合确定的。

2. 密间隔检测的技术原理

2.1 管道阴极保护电位的测量误差

在上世纪 60 年代, 德国 PLE 公司曾在所辖管道上进行过保护电位与腐蚀关系的研究。发现在测试桩上测得 -0.85V 保护电位时, 有的管道上腐蚀仍然很严重。当采用更为精确的测量方法, 重新对这些管道的保护电位测量后发现, 只有 60% 管段真正达到了有效保护电位。这说明, 用简单方法在测试桩上测得的阴保电位 (即是通电位) 并不能反映出管道的真实保护水平。

人们在保温夹克管道的测量中还发现, 由于防腐保温层绝缘电阻大, 同样的保护电流条件下测试桩上所测得的保护电位要偏负很多, 有些超过 -2.0V 甚至更负, 但有的管道仍然会发生腐蚀; 在沥青、水泥路面上方测得的保护电位, 明显负于相邻测试桩上测得的相对于土壤条件较好下的电位值。分析的结果认为, 这是由于沥青和水泥路面的高电阻引起了测量偏差。同样的, 在土壤电阻率较高的干燥土壤, 如高原、沙漠等地区, 在管道上方地面上测得的电位数值, 远远负于实际真实保护电位值, 所显示的电位比真实值呈现出有更多的保护程度。

后继的研究工作查明了造成测量误差的确切原因--IR 降的影响, 找到了如何消除 IR 降误差影响的方法, 保证测量电位的准确性。

2.2 IR 降的含义

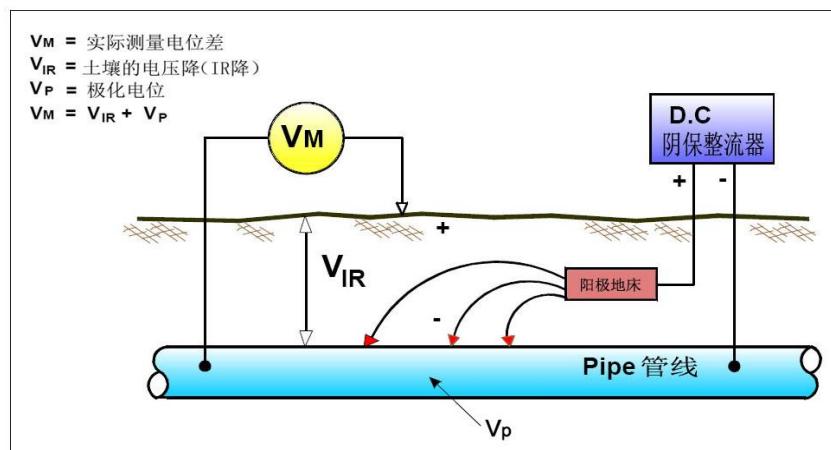


图 2 传统的阴极保护电位测量方法产生 IR 降的原因

在图 2 测量阴极保护电位的方法中，使用数字万用表和饱和硫酸铜参比电极进行测量。万用表的一支表笔通过测试桩内的连线与管道相连，另一支表笔连接到参比电极上，参比电极放置在测试桩附近管道上方的地面上。所测得的电位 V_M 是管体与地面间的电位差。而管道的真实保护电位是指管体到与防腐层接触的土壤之间的电位差 V_P （也是管道的极化电位），如果将管道外防腐层表面到放置参比电极处之间的电位差用 V_{IR} 表示，则有：

$$V_M = V_P + V_{IR}$$

所谓的 **IR 降**，是指保护电流在参比电极处的地表到管道防腐层表面之间流动引起的电阻压降。由于土壤存在着电阻，电流流动产生的电阻压降会导致测得的电位 V_M 比实际的阴极电位更负。测量过程产生的这个电位差有两个决定性的因素：一是大地中的阴保电流 I ，二是参比电极到管道防腐层之间的土壤电阻 R ，此时 $V_{IR} = I \times R$ ，称之为 **IR 降**。测量过程中 **IR 降** 的大小是随构筑物（管道）和参比电极之间距离加大而增加；随土壤电阻率增加而增大；随阴保极化电流增加而上升。此外，阳极与被保护构筑物相距越近，**IR 降** 也越大。

2.3 消除 IR 降的方法

假如管道周边土壤上的 **IR 降** 数值在可以接受的测量误差范围内，则可以将其忽略不计。即： $V_M = V_P + V_{IR}$ ，若 $R \rightarrow 0$ ， $V_{IR} \rightarrow 0$ ，则 $V_M \approx V_P$ 。也就是说，在土壤电阻率低的区域，可以忽略 **IR 降** 影响。然而，在土壤电阻率高的地区和环境，为了在管道保护电位测量过程中消除 **IR 降** 引起的测量误差，则必须采取必要的技术手段。减小 **IR 降** 中的电阻因素是消除 **IR 降** 影响的一种方法。

消除 **IR 降** 的传统方法是：

1. 试片断电法：在测试点处理一个试片，其材质、埋设状态与管体相同，试片和管道通过电缆连接，并在试片上模拟一个防腐层的缺陷。由管道提供保护电流使试片得到充分极化。测量时，只需断开试片和管道的连线就可测得试片相对大地的断电电位，从而避免了切断管道主保护电流及其他电连接的麻烦。
2. 极化探头法：把辅助试片（与管道同材质，做成圆盘状）与参比电极预先组装在一起，构成探头。探头由钢盘、参比电极和低电阻电解质组成。辅助试片的外部用绝缘层进行隔离，只留一个小孔作为测试通路，平时试片与管道相连，极化程度与管道一致。其结构可避免外界电流的干扰，使参比电极和钢盘间的压降最小。该方法最适用于杂散电流区域内的电位测量，测得的电位平滑可靠，不含干扰成分。

此外，根据 $V_M = V_P + V_{IR}$ 公式，若 $I \rightarrow 0$ 时 $V_{IR} \rightarrow 0$ ，也可以得到 $V_M = V_P$ 的效果，则同样可以消除 **IR 降** 对电位测量的影响，由此得出第二种消除 **IR 降** 影响的方法。

使得 $I \rightarrow 0$ 的方法是在瞬间使流经参比电极到管道附近的电流为零，也就是将管道上的阴极保护电流断开，测得的管道电位是经过阴极保护极化所积累在管道周边土壤的电荷，土壤相对于管道管体的极化电位。由于管道去极化是一个相对较长的过程，在断开阴保电流的很短时间内测量，可以达到既能消除 **IR 降** 的测量误差，又能准确测量管道阴极保护电位的目的。这就是 **CIPS** 测量方法的技术基础。

下面介绍几个 CIPS 方法的基本概念：

2.4 什么是密间隔？

早期对密间隔的定义是：以每 30 米、100 米甚至 300 米的距离上采集一个保护电位数。由于检测方法的进步，特别是以卫星通讯为代表的微电子技术在检测设备上的广泛应用，极大地提升了检测效率，方便了大量检测数据的存储，使得当前的检测间距要小很多。当前密间隔的典型定义为每 1~2 米测量一个电位值，也有定义为 3 米进行一次电位测量。这使得密间隔电位检测的方法比以前精细了很多，其操作复杂程度和难度能够在可以接受的程度之内。

从电位检测的技术方法上讲，对裸管所进行的检测要更为细致，其间距取决于管道的埋深；最大的检测间距不应大于 3.5 倍管道上覆土层的厚度，以达到连续不间断的测量目的。对于有涂层的管道来说，所用的检测间距取决于管道的埋深、涂层的绝缘电阻以及土壤中电解液的电阻等管道和环境的综合因素。其关系要远比裸管复杂，检测间距是涂层电阻率与电解液电阻率比值的函数。在通常的情况下保守的检测方法可以直接采用裸管的检测间距。

由此可以得出密间隔电位检测方法的定义是：以规则的，足够小的检测间距，在埋地或水下金属管道上进行一系列的 ON/OFF 电位测量，以取得地下结构对电解液的真实电位，检测间距足够小到能够进行对管道保护状况的细致评价。

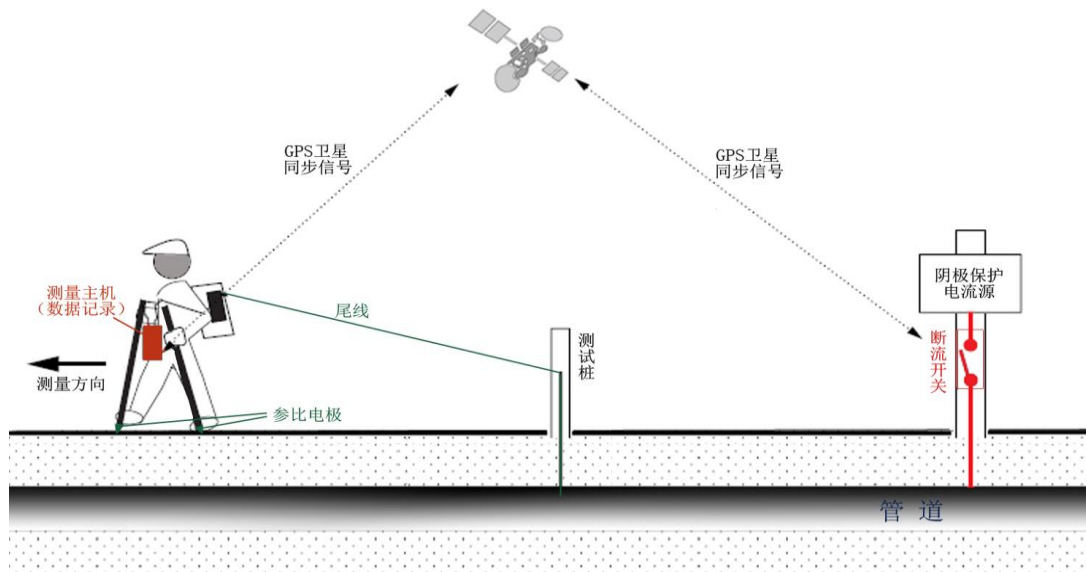


图 3 埋地管道的 CIPS 检测原理图

2.5 CIPS 检测的电流中断和电位测量定时

为了消除电位测量过程中 IR 降，需要中断管道上所有的阴极保护电流源。若管道上只有一个电流源且电位测量仅仅在管道的测试桩处进行，采用人工方法临时将电流断开的方法也是可行的。然而，当管道上应用了多个电流源时，这些电流源都会对这条管道上的阴极保护有所贡献，人工断开电流源的方法显然无法满足测量的要求。此外，进行 CIPS 检测要进行一系列电位测量，要求每次测量均以相同的检测条件进行电位测量。所有这些都要求应用一种设备进行阴保电流的自动、精确定时地完成电流的通断动作，这就是阴保电流断流器要实现的功能。

由于阴保电流在断开的瞬间，会在管道上产生一个断电尖峰（又称为阳极峰），它的产生通

常认为是由于管道自身电抗作用的结果。在某些情况下阳极峰的幅度可能高达 200mV；若从阴保电流断开的时刻测量管道上的 OFF 电位，不能正确得到管道的真实保护电位。阳极峰到最准确 OFF 电位点处所持续的时间一般为 10~20ms 的范围，确切的持续时间取决于管道的具体电气特征。管道上的电位波形变化见图 4。

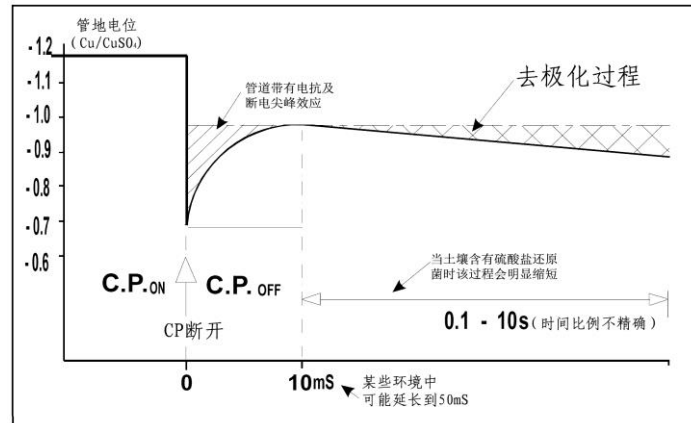


图 4 阴保电流中断时刻的波形和正确的电位测量定时

为了正确地测量管道对地的通/断电位，要求 CIPS 的检测主机能够与电流断流器精确同步。当管线上有多个电流源时，需要施加多个断流器将全部电流源进行通断。这些断流器要在精确的同步节拍控制下进行动作，CIPS 电位测量过程要进行精确的定时，以其能够在正确的时刻测量出管道的真实电位数据。

从上图 4 中可以看出，正确的阴保电位测量应该以 CP 断开的时刻为基准。测量“通”(ON) 电位要在 CP 断开之前的某一时刻进行；而测量“断”(OFF) 电位则要在 CP 断开之后的某一时刻，也就是要避开阳极峰的持续时间，一般在电流断开后 50ms 进行。当前主流的 CIPS 电位检测设备都可根据管道的具体情况设置这些参数。此外，在检测过程中操作人员要注意观察采集到的电位波形，这对于了解管道的阴保运行状况、杂散电流的干扰程度，以及正确设定通/断电位测量定时都是大有帮助的。



图 5 阴保电流断流器

2.6 卫星同步的概念

为了正确地实施 CIPS 检测，要求连接到整个管道上的电流断流器对阴保电流的通/断是严格同步的，CIPS 数据记录仪与断流器二者也是要同步的。

CIPS 检测设备的卫星同步是基于这样一种技术：电流断流器和 CIPS 数据记录仪具有单独的卫星天线，通过 NAVSTAR 卫星系统发出的秒脉冲信号实现同步。断流器或数据记录仪内部的电脑对特定的卫星授时信号进行识别。安装了卫星同步功能的断流器，在一天中的不同时刻、距离几十公里的不同位置，都能够识别同一个时刻从而精密地确定通/断的时序。每 5 秒钟进行一次重新同步的操作，不断地校正时间次序和消除不同设备上的时间漂移。更重要的是，CIPS

数据记录仪上的 GPS 设备还能够记录下采样时刻和测量点的 GPS 坐标，以便于以后的检测结果的分析。

进行 CIPS 检测时，精确的同步性对于所有的 CIPS 设备是非常重要的。注意，同步性并不是 DCVG 检测的基本要求。但是，在多重阴极保护的整流器管道上进行检测时，同时安装两个以上的断流器要比一个断流器的效果好得多。

3. CIPS 检测设备的组成

典型配置的 CIPS 检测系统由以下四部分组成：

- ◇ 具有记录功能的测量仪一台。习惯上称为主机(国外资料中称之为数据记录仪，见图 1)；
- ◇ 用于通断管道阴保电流，且具有卫星同步功能的电流断流器若干个；
- ◇ 具有距离测量功能、安装 GPS 天线的尾线架一个；
- ◇ 连接在测量主机上的探杖，理论上可以只配备一个，为了工程上方便和 CIPS 功能拓展的需要最多配备三个。

此外，CIPS 系统还可以另外配置一台静态 CIPS 数据记录仪，它是用于放置在管道测试桩处，记录管道阴极保护电位的一个时间段的数据，可以通过与沿路由检测数据对比分析之用，用于消除 CIPS 测量期间管道上杂散电流对阴极保护的干扰。



图 6 CIPS 检测设备组成

测量主机，实际上就是一个可以存储电位数值以及测量时间等参数的毫伏计，其检测信号输入端至少有 10 兆欧以上的输入阻抗，在量程范围内可实现管道对地电位的测量，精度达到 $\pm 1\text{mV}$ 。此外，要具有高性能的交流（50 或 60Hz）滤波功能，能够记录下所有范围内的检测日期和时间等信息。主机上面具有连接同步用的卫星天线接口，连接尾线/接触地面的硫酸铜参比电极的接口。具有在特定的时间间隔记录数据的能力。这个时间间隔要能够消除 CP 电源在 ON 和 OFF 交替时的阳极波峰和阴极波峰的作用。通过这种方法的实施，确定并充分证实电位的采集和记录满足相关技术需求。数据记录仪必须与整流器的电流断流器之间保持同步操作。当前，市场上主流的 CIPS 主机均具有数字 DCVG 测量功能，用于 DCVG/CIPS 联合检测。此外，CIPS 主机上具有用于数据下载的通讯接口、检测信号波形显示屏幕、操作键盘等等。

电流断流器，实际上是一个由具有卫星同步功能、微电脑控制的、能通过和阻断大电流的固态继电器。它的功能是按照固定模式对管道的阴保电流源进行同步通断。其卫星同步功能是要与检测主机的测量同步。此外，由于一条长距离的管线可能会有多个阴保电流源，这就需要在 CIPS 检测过程中使用多台的电流断流器同时接入管道上所用的阴保电流源上。这些检测设备，包括检测主机在测量过程中按照统一的动作节拍（GPS 卫星同步）进行通断，以完成对阴极保护电位的通电位（ON 电位）和断电位（OFF 电位）的测量。

带饱和硫酸铜参比电极的探杖，探杖的手柄将探针电极与 CIPS 数据记录仪通过导线连接起来，其在检测的过程中与大地形成良好的电性连接。

还有通过阴极保护系统的测试桩与测量管道连接的尾线。有两种导线可用作 CIPS 检测中的尾线，分别是细的漆包绝缘铜导线（通常为一次性使用的）或可重复使用的 PVC 绝缘铜导线或不锈钢导线。一次性的导线必须要有足够的强度（30SWG），使发生经常性断线的可能性降至最小。此外，对于可重复使用的导线应定期检查外皮是否有损坏，因为有破损的外皮会影响仪器的测量结果的准确性。

CIPS 参比电极的硫酸铜溶液必须处于饱和状态。将足够量的硫酸铜晶体加入到蒸馏水中，使得在硫酸铜溶解液中总是存有硫酸铜结晶。实施检测过程中，必须要定期进行检查硫酸铜溶液的状态，以及电极中纯铜柱的表面是否干净。若饱和硫酸铜溶液被污染，或是铜柱的表面不纯净也会影响电位的测量数值，导致测量结果的误差。

4. CIPS 的测量方法

典型的 CIPS 检测设备连接方法是，两个带有饱和硫酸铜参比电极的探杖通过一条柔性电缆与记录仪连接。在进行 CIPS 检测时，这种两个电极的扩展线连接方法（见下图 7），可以使测量者在行走过程中始终保持有一个电极与土壤充分接触。

4.1 数据采集前的必要准备工作

在开始检测工作之前，应尽可能多的收集被测管线的相关信息，这是非常重要的。此过程中收集的信息越齐全，对实际检测中采集的数据分析就越有利。

所收集的资料包括（但不应仅限于这些内容）：

- 管材、管径和管壁的厚度
- 整条管线的防腐层材质及施工情况
- 带有尽可能多信息的管线走向图
- 所有阴保汇流点位置（距离）和 CP 电流的流向
- 可能引起杂散电流的干扰源的位置
- 管线正上方的任何地理和环境变化
- 不易进入的管道铺设区域、河流穿越及主干路的穿越情况
- 任何固定的地图测绘点的位置

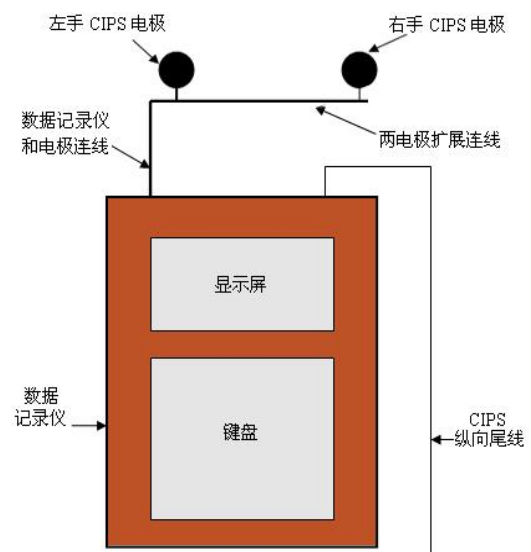


图7：CIPS 的检测电极布置和连接方法

4.2 CIPS 的一般实施流程

当防腐层的质量较好（每 50 米少于一个防腐层破损点）时，在进行 CIPS 检测之前，必须用管线定位仪来确定管线路由，以确保参比电极是沿管线顶部进行放置的。使用管线定位仪定位管线路由时，应在 CIPS 检测人员前 4~5 米处操作，并对管线路由进行标示，以确保后续的 CIPS 检测是在管道正上方进行的。在管线的定位操作过程中，如果管道定位信号下降到一个无法准确定位的低值时，必须将定位信号的发射机移到一个与当前管段更为接近的位置上。

与管道直接电性连接两点（如测试桩）之间的管段称之为子管段，且将之清晰地标示出来。子管段的数据应包括管线连接点（测试桩）的起始点距离、终止点的距离和检测方向，还尽可能地记录下其它的特征信息。除了这些管线的特征外，还须记录管线路由图和测量的距离。

在每一个子管段的检测过程中，管线固定的电气连接点为检测的起点和终点，尽管也可以使用管道上的阀门等设施，但最好还是使用测试桩这样的设施。在检测过程中要注意，与待检测管线交叉的第三方管道上的测试桩既不能作为起点，也不能作为检测的终点。

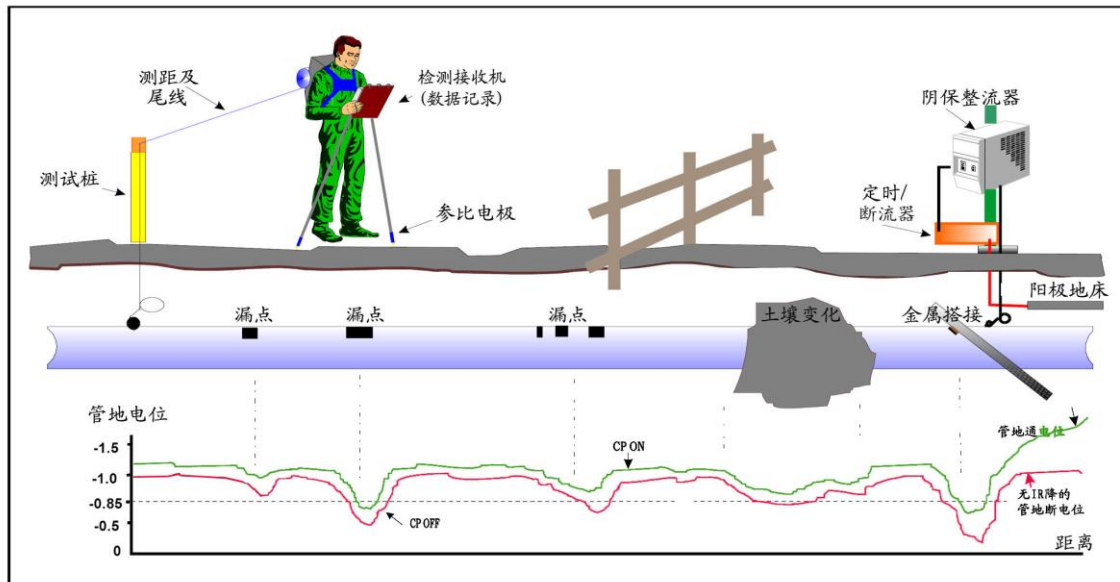


图 8 埋地管道 CIPS 检测方法示意图

在进行 CIPS 检测时，要确保测得的每一对“通”“断”电位的数值都能够与管线的检测距离相对应。这也包括在没有防腐层破损点的位置上进行 CIPS 检测数据。

5. CIPS 检测技术的应用方法技巧

5.1 CIPS 检测与防腐层检测

对于埋地钢质管道来说，减缓甚至杜绝管体发生腐蚀的主要手段是通过外防腐层和施加阴极保护的联合保护。目前国内的在用钢质管道基本都进行了外防腐，对于重要的还建有阴极保护设施，对管道进行腐蚀检测也主要是对这两个方面进行的。然而，只对管道进行外防腐层漏点的检测以期达到对管道腐蚀损伤的检测和评价的目的是片面和不科学的。尽管管体发生腐蚀往往会伴有外防腐层的破损。但是，若在有效的保护状态下是允许外防腐层存在有少量的小的

破损，而管体不会发生腐蚀。同时，管道外防腐层上破损点的存在也会对阴极保护电位分布产生影响。也就是说，通过对有阴极保护的管道实施保护电位的密间隔检测，不但能够对整条管道的阴极保护状况进行准确的评价，对可能发生腐蚀部位进行检测的定位，也会得到防腐层破损点是否需要修补的相关技术信息。

在国外，对埋地钢质管道的运行维护往往更重视阴极保护的有效实施，管道定期检测往往会同时进行外防腐层和阴极保护状况的检测和评价。这种管道运行维护的理念更有利于科学有效地规划管道的维修方案，使得外防腐层的维修更有针对性，维修的效果更好。对于那些处于有效保护的外防腐层破损，只进行必要的监测而不进行开挖修复，能够有效避免因开挖而对管体造成的伤害，可以有效地减少管道的维修费用，也有利于延长管道的服役年限。

科学合理地实施埋地管道的 CIPS 检测，不但可以对整条管线的阴极保护状况进行科学的检测和评价，同时通过对 CIPS 检测得出的通/断电位曲线进行分析，可以得到管道外防腐层保护效果的很多间接信息，以及对管道阴极保护故障进行定位。同时配合静态 CIPS 检测数据还可以有效地评定管道路由上受到杂散电流干扰的威胁。

应该承认，国内对防腐层破损的检测在技术上当前是最为成熟，检测效率也较高，工程费用也较少。但是，把埋地钢质管道的外防腐层检测等同于管道的腐蚀检测是错误的，针对外防腐层的管道维修所取得的效果也一定是有限的。对重要管道实施阴极保护效果的 CIPS 检测结果，配合外防腐层检测、管道杂散电流干扰的程度，并将这些检测结果加以综合分析和评价，才能够制定出科学合理的管道维护、运行方案，真正将管道所面临的腐蚀威胁降到最小，确保管道在腐蚀环境中安全地运行。对管道实施科学的运行管理是使管道在寿命期内实现设计的输送能力的必要保障，甚至可能延长管道的服役寿命，充分发挥管道建设巨大投资的效益。

5.2 确定正确的 CIPS 通/断定时时序

CIPS 检测方法与日常在管道测试桩上进行常规测量的原理大体相同，只不过 CIPS 应用了一条称为尾线的导线，将测试桩（管道）与数据记录仪连接起来，进行管线任意位置上的电位测量。为了测量阴极保护的通断电位，要在阴保整流器（恒电位仪）负极（连接管道的一端）串联接入电流断流器。若管道上有多于一个阴保电流源的话，每个电流源都要串联断流器，并且要使这些断流器之间实现卫星同步通断。与此同时，数据记录仪还要与断流器的通断周期实现同步。这样记录仪才能在正确的时刻进行测量，不至于在断流器的通断动作产生的阴极和阳极尖峰时发生记录错误。此外，在断掉阴保电流后需要保持一段短暂的延时，以保证所测量的 OFF 电位避开阳极峰，又不受“去极化”过程中电位逐步衰减的影响。此时所测量出的管道 OFF 电位是最为准确的，能够真实地反映出管道的阴极保护水平。

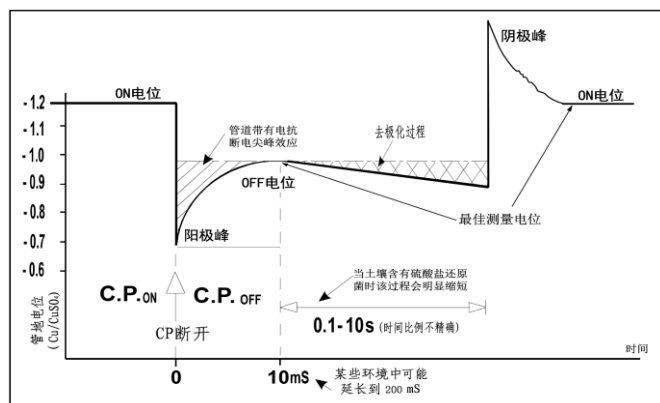


图9 阴保电流通断的电位尖峰图

5.3 电位尖峰和通断脉冲

在管道上阴保电流断开的瞬间，管地电位上会产生一个阳极尖峰。通常认为是由于管道自身电抗作用的结果。然而，并非测量时该阳极峰总是出现，当前对产生这种现象的确切原因还不能给出科学的解释。OFF 电位上的阳极峰可能测量出高达 200mV 的幅度；若从 OFF 电位开始点处算起，避开阳极峰到最准确 OFF 电位点处所持续的时间可达 50ms 甚至更长。

从最适当的测量时刻开始，OFF 电位就会逐步衰减。这是由于在管道防腐层破损点处裸露的管体表面上的双电层开始消减，使之最终回归到自然状态的电位。这个过程就是“去极化”，其发生的速率取决于防腐层破损点处管体表面周围电解质的腐蚀速率，也就是土壤的腐蚀速率。在管道的腐蚀环境中，强烈的土壤腐蚀性导致更快的去极化过程。对于大多数土壤来说，其电位的衰减是缓慢的。

5.4 CIPS 数据记录仪设备示例

英国 DCVG 公司的 Quantum CIPS 是采用如下的工作方法：

当 CIPS 数据记录仪采用 0.45 秒通，0.8 秒断周期进行电位测量记录时，记录仪的测量定时必须与断流器的通断周期保持一致。在电流接通的 250 毫秒后数据记录仪开始数据采集，并在电流断开之前（断流器的通断以 1250 毫秒为周期重复地通断）进行很多 ON 电位的测量，这些 ON 电位测量值的平均值作为此刻管道上阴保的 ON 电位加以记录。同样的，记录仪在识别电流被断开的时间点后开始计时，在 225 毫秒后记录仪开始以很小的间隔重复采集一系列电位数值；600 毫秒后电位测量停止，电位测量的全部测量值的平均值由数据记录仪作为相对于参比电极的阴保 OFF 电位记录下来。显然，数据记录仪要保持与断流器的精确同步是十分关键的。同样的，管道上的多个断流器之间的同步也是如此。英国 DCVG 公司的设备采用 GPS 卫星的秒脉冲来实现全部 CIPS 设备的同步。DCVG 的断流器可以在小于 10 微秒的时间内完成电流的通断动作，以确保各个 CIPS 检测设备之间的严格同步。

5.5 CIPS 测量和检测人员的行走速度

在实施 CIPS 检测时，操作人员采用的是平常的步行速度。然而，检测的技术需求可能要求以 1 至 2 米间距进行电位的测量。为了在检测员速度和读取 ON/OFF 电位间距之间做个折中，可以使用 0.45/0.8 秒这样的短周期。在快速记录时序的时候，需要细心地设计断流器和记录仪的同步工作节拍，这是因为 DCVG 公司的数据记录设备是自动记录数据的，检测人员只有很少的时间进行调整。检测人员也可以延长通断周期，但在测量点处会需要等待 ON/OFF 电位的记录，这可能会导致只能检测较少的管道。操作者也可以通过实验确定出合适检测间距和配套的电流通断周期。

实验 1：某人拿着秒表记录时间，从一个标示点以正常的行走速度记录 5 秒钟能够行进的距离。如果使用 0.45s 通/0.8s 断周期，在行走 5 米左右的距离内，仪器自动记录 4 组数据。也就是 1.25 秒时间记录的一组数据，检测间距为 1—2 米。

实验 2：以 2s 通/3s 断为周期重复上面的试验，在每 1.5 米处停下来获取通断电位。在 5 米的范围内能够获得 1 组检测数据。2s/3s 为通断周期的测量需要多余上面实验四倍的时间。测量

人员如果以正常的步幅前进每 5 米的范围内能够获得一组检测数据，这样会在两个记录数据之间留下较大的无测量数据的等待时间，明显降低检测效率。

过去较多使用长通断周期的原因是，检测过程中需要克服电流通断器件的有效动作时间较长而造成同步效果差的困难，甚至在断流器与断流器、断流器与数据记录仪之间缺乏有效的同步手段。另外的问题是，当进行 CIPS 测量时需要使用两个硫酸铜参比电极，是为了使测量人员在行走过程中能够保证总有一个电极与土壤保持接触。由于检测环境中土壤的潮湿程度会有所不同，这可能会造成测量数据会偶尔不准。而这样的错误数据只有在下载和分析时候才能发现。若测量以 1 米的间距，测量的错误数据是可以进行简单地剔除的；但是，如果剔除 5 米为间距测量的错误数据，就会造成在 10 米的范围内没有记录数据。

有关电流通断周期的标准在国际规范中并没有做明确规定，大多只是推荐了通断周期的范围。例如：NACE SP0502-2008 中 A4.2 章推荐典型通断周期为 8s 通/2s 断到 800ms 通/ 200ms 断的范围内。但是在管道自身电抗产生较长阳极峰的情况下，200 毫秒的 OFF 时间就会使测量的断电位与阳极尖峰电压相重叠。该标准中的要求是：“中断阴保电流的 ON/OFF 时间比率要足够长到能够记录数据，但还要不能长到产生明显的去极化效果”。许多工程实践和研究证实，英国 DCVG 断流器的 0.45ON/ 0.8OFF 通断周期对于任何管道条件来说，既使阴保电流的断电时间长于通电时间，其去极化的效果都是微不足道的。

工程经验表明：管道去极化过程在没有特殊事件的情况下是会持续很长时间的。这就是为什么在应用 NACE 标准中 100mV 阴保电位偏移的测量方法会出现问题的原因。为了替代“从自然状态到 100mV 的极化电位”，现在的通行做法是，断开 DC 电流观察管地电位上是否会有 100mV 的电位下降，来确定管道的阴保系统是否使管道处于有效的保护中。

5.6 避免产生大量无用数据的方法

在使用英国 Quantum CIPS 数据记录仪进行测量的过程中，有客户抱怨该设备的自动记录数据方式，使得 CIPS 检测产生大量的无用数据。检测人员在导出和处理数据的过程中需要剔除无用数据，使用起来十分不便，同时增加了检测人员的劳动强度。

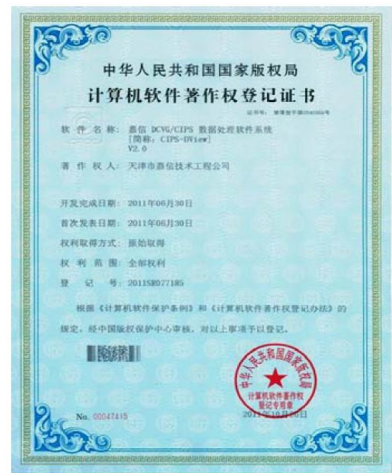
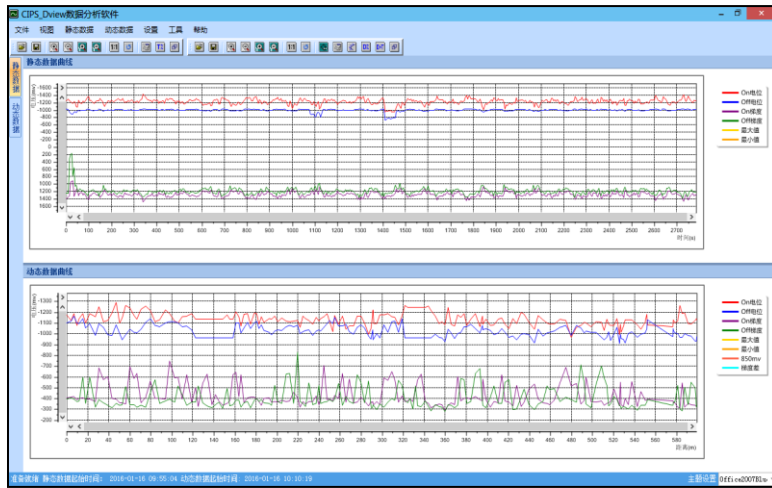
嘉信公司基于自身多年管线检测的经验，通过对现场检测流程及数据的分析，认为：造成 CIPS 测量产生大量无用数据的原因主要有两方面，一方面是检测人员选用的通断周期过短，特别在对仪器不熟练的情况下没能很好地配合管道上阴保电流的通断节奏，以至于在测量过程中测点分布不均匀，管道上局部位置上记录的检测数据过于拥挤。另一方面是 CIPS 数据记录仪在记录数据的瞬间需要至少有一个探杖与土壤充分接触，形成良好的检测回路。检测人员在测量的行走过程中，可能是两个用来测量的探杖同时离开地面，或是探杖的电极头没有能与土壤充分接触，造成测量的电位数据不能使用。此外，实施检测的管道路由过于干燥，可能也是检测过程出现大量无用数据的重要原因。过分干燥的土壤上，即使用浇水湿润的方法，也不能在短时间内使检测探杖上的测量电极与土壤形成有效的检测回路。这种情况下，往往需要用户采用较长的通断周期。

根据以上两方面原因的分析，嘉信公司建议检测人员在土壤干燥的条件下，或未能熟练使用仪器时，在采取湿润土壤的办法的同时，尽量选择较长的通断周期进行 CIPS 检测（如 3sON,

2sOFF 的通断周期), 测量时要用足够的时间等待检测数据稳定并且被记录后, 再进行下一个点的检测。如果检测人员已经能够熟练使用仪器, 且土壤湿润条件允许, 可以选择较短通断周期进行测量, 提高检测工作效率。

当检测人员在 CIPS 检测过程中发现数据异常时, 则需要花较长时间进行仔细测量。建议先停止记录仪的自动记录, 这样可以查看检测数据但不记录。当检测确认后需要继续向前进行测量时, 再重新开启记录仪的记录功能。通过以上几个方面的改进可以大大地减少 CIPS 测量过程中产生的大量无用数据, 减少由于数据过多或不能使用造成的时间和资源的浪费。

同时, 嘉信公司针 CIPS 检测的工程实际, 开发出 CIPS D-view 软件进行数据分析处理。在该软件中专门设有用来筛选有用数据的功能, 同时还可以消除 GPS 在测量过程产生的距离积累误差。应用该套软件可以很好的解决数据筛选的问题。该软件还可以显示 ON/OFF 电位、电位梯度等数据的曲线图, 直观察看管道阴极保护电位状况, 对比多项检测数据修正保护电位。



著作权证书

6. CIPS 的数据分析和检测报告

6.1 CIPS 的数据分析

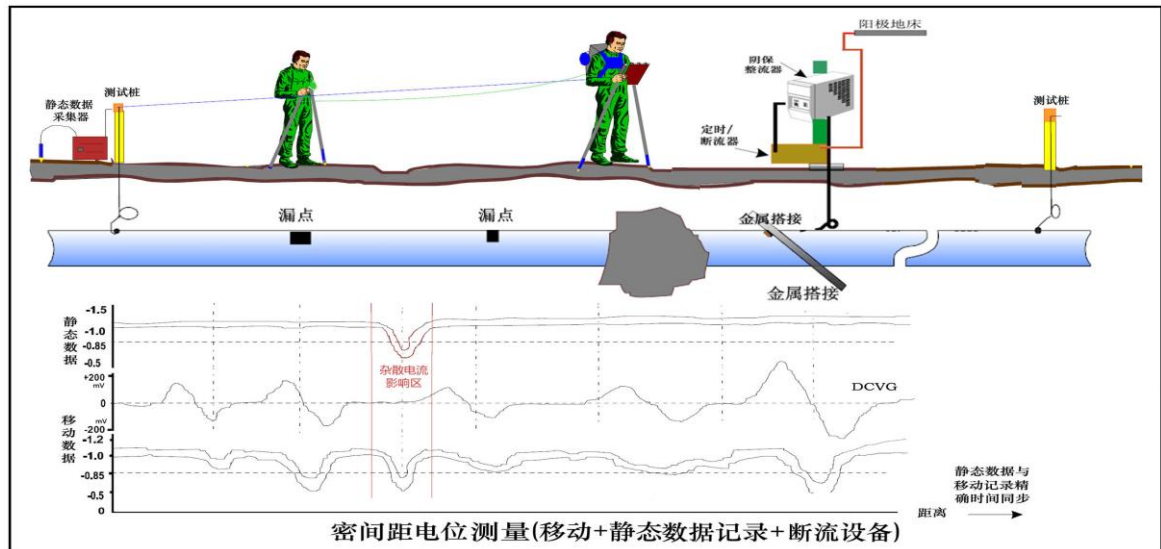


图 10 典型的 CIPS 检测数据曲线及分析结果

完成外业检测后，将采集的 CIPS 数据下载到内业分析用的计算机上，就可以对数据进行分析了。相比之下，单独的 CIPS 数据分析较为简单：剔除记录数据中的错误数据，按检测时间的顺序将电位的 ON、OFF 数据绘制成以时间或距离为横坐标轴的曲线即可。若采用自动数据记录方式和 GPS 坐标定位，检测的数据记录时间与检测距离是可以一一对应和互换的。

对结果曲线的分析重点在 OFF 电位曲线上，因为它代表管线沿线上的管道真实保护电位，应用 -0.85V 的保护准则可以一目了然地评判有效保护的状况。当前的数据成图、计算检测间距等功能都可以由嘉信的 D-view 软件自动完成。用户所要进行的数据分析应主要围绕与其他检测数据（曲线）相互作用的关系来进行。如与 DCVG 检测结果、杂散电流、静态数据对比分析，从中确定杂散电流对阴保电位的干扰、防腐层缺陷对电位分布的影响、大的防腐层破损点上阴保电流的消耗程度等等；从而针对管道防腐层破损状况以及阴保效果确定出：管道阴保故障的维修点、防腐层必须维修的管段以及维修的紧迫性和优先次序。此外，根据杂散电流干扰的检测结果，还可以确定出管道是否需要进行杂散电流的排流、以及确定排流的方式等等。

6.2 CIPS 检测报告的编写要求

在完成对管道实施的 CIPS 外业检测，以及进行数据分析之后，要将检测数据及其分析评价的结果，以检测报告方式提交给委托方。一般报告的内容应包括：

- 1) 管道及其设施的一般性介绍。
- 2) 管道检测工程的执行工作总结。
- 3) 特殊检测方法的相关实施细节：检测数据和检测期间的气象信息等。
- 4) 报告细节：断流器的位置、测距技术、子管段和法兰的编号方法、管线的特点、地质、地形，以及所遇到的其他问题。
- 5) 检测观察及结果、检测结果的分析讨论。
- 6) 管道设施和阴保系统部件的审核情况和维修方案。
- 7) 阴极保护效果的相关检测结论以及有关检测结果的建议。

检测报告中的观察和结果部分至少包括以下内容：

- 1) 曲线图上对应沿检测距离表示出校正后和未加校正的管-地电位，以便对整个分段管线的腐蚀和保护情况进行进一步分析。
- 2) 如果管线上存在杂散电流干扰的话，使用 CIPS 静态数据记录管线上的电性干扰情况，检测数据要与管-地电位绘在同一张图上，管-地电位为纵轴，时间为横轴。

如果实施了 DCVG/CIPS 联合检测，检测结果和报告应至少包括以下附加陈述：

- 1) 曲线图：对应沿管线的距离绘制出破损%IR 严重程度（第一纵轴）及防腐层破损中心点的修正管-地电位（第二纵轴）组合图形，用于分析防腐层破损与电位分布的关系。
- 2) 对应沿管线的距离表示出破损中心点附近的土壤电阻率（纵轴）。以便于对整个分段管线上防腐层的绝缘状况与土壤腐蚀环境的对应关系的分析。
- 3) 对应沿管线的距离表示出破损中心点处管道上方的覆盖层厚度（纵轴）。以便于对整个分段管线上防腐层破损与管道埋深之间对应关系的分析。

林守江编著

2024 年 10 月修订