

# 轨道交通直流杂散电流 给埋地钢管防腐系统带来的新风险

□ 武汉市天然气有限公司 (430000) 徐颢 李代莉

**摘 要:** 2013年中石化东黄复线输油管爆炸事故发生后,埋地钢管腐蚀的危险性逐步进入公众视野。影响钢管腐蚀的因素很多,其中城市轨道交通系统产生的直流杂散电流引起的腐蚀要比一般的土壤腐蚀激烈得多。这些杂散电流通过燃气钢管防腐层的薄弱区流入和流出管道,对整个防腐体系带来巨大的风险。本文以武汉市天然气有限公司为例,分析和探讨轨道交通排放的直流杂散电流对燃气管网带来的腐蚀影响,并尝试对此提出可行性应对措施。

**关键词:** 城市轨道交通 直流杂散电流 埋地管网 腐蚀

## 1 武汉市天然气有限公司阴保系统基本情况

武汉市天然气有限公司(以下简称武天公司)是一家中港合资企业,公司营业范围分布于武汉三镇,截至2014年底,该公司拥有各类用户约167万户,高压、次高压管网约147km,中、低压埋地管网约6 000km;2014年销售气量约12.6亿m<sup>3</sup>。

### 1.1 高压、次高压管网

武天公司高压管网长130km,呈半环状敷设,整体采用强制电流阴保系统对管网进行腐蚀防护,全线设置3处恒电位仪,分别位于军山门站、三金潭高中压调压站和五里界门站,共同向管道输入保护电流。由于高压主管道没有设置绝缘接头进行分段,整个高压环线实际上属于同一个阴保系统中。这种系统的优点是:当一个电流输入点出现设备故障时,其他输入点可以向管道中补充电流,提高了阴保系统的设备可靠性,缺点是:测量断电电位时,必须在所有恒电位仪上安装同步通断器,才能消除管道的IR降影响,同时,管道上任何一处受到杂散电流干扰后,整条管道

都将被影响。

公司次高压管网长17km,采用牺牲阳极阴保系统,管网走向与轨道交通四号线路线基本平行,部分管道与铁轨接近,可能存在一定风险。

### 1.2 中、低压管网

中压埋地钢管采用牺牲阳极阴保系统,已登记阴保管网长247km;2003年以后安装的DN200以上低压埋地钢管也采用了牺牲阳极阴保系统。这部分管网由于历年管网改造的变化,可能存在同PE管、复合管等交替铺设的情况,各阴保系统相互独立,实际工况较为复杂。

### 1.3 阴极保护检测频率和方式

和国内大部分燃气公司一样,阴保系统采用人工检测,使用工具为高精度万用表和铜-硫酸铜(CSE)便携式参比电极。其中,中低压管网检测频率为每年2次,高压管网检测频率为每年1次。对于强制电流阴保电位桩,检测项目为管道通电电位和断电电位,由于恒电位仪暂时没有安装同步通断器,在两个恒电位仪中间的部分管道上测量电位时可能存在相互干扰;

对牺牲阳极系统的阳极桩，检测项目包括通电电位、管道开路电位、阳极开路电位、阳极输出电流。其中管道开路电位是指断开阳极桩处的牺牲阳极后测得的管道电位，由于管道中还连接着其他牺牲阳极，因此不能简单地理解为管道断电电位或管道极化电位。

#### 1.4 阴保检测存在的问题

传统人工检测方式对阴保系统的运行状态有一定的指示作用，但伴随着城市轨道交通的发展，其检测方式存在的一些问题开始凸现，具体如下：

##### 1.4.1 检测频率不足

传统人工检测方式受限于人工、车辆、设备方面的成本，采取每年2次或每年1次的检测频率，无法准确地反映阴保系统的实际运行状况。在地下杂散电流干扰可忽略时，这种检测是有效的，但杂散电流影响剧烈时，这种检测频率明显过低。图1反映了存在杂散电流干扰时，某管网阴保检测点（非武汉地区）24h内的通电电位波动情况：

如图1所示，这个检测点在杂散电流的影响下，管道保护电位的波动达到500mV左右，采取每年1次的人工低频率检测无法反映该检测点的实际阴保状况。究其原因，是杂散电流在土壤中的分布是非线性的、不稳定的，孤立数据无法表达其分布特点。这个检测点虽然不在武汉，但其受到杂散电流影响的状况具有代表性。

##### 1.4.2 不完全符合新国标的判据

国内燃气行业的阴保系统检测工作普遍存在对国

标理解不足和直接忽略IR降的现象，根据《城镇燃气埋地钢制管道腐蚀控制技术规程》（CJJ95-2013）规定，阴保评价常用判断标准包括以下两种：

①使用CSE测得的管道极化电位应达到或负于-850mV，测量电位时应考虑IR降的影响；

②阴极极化电位难以达到-850mV时，可采用阴极极化或去极化电位差大于100mV的判据。（见图2）

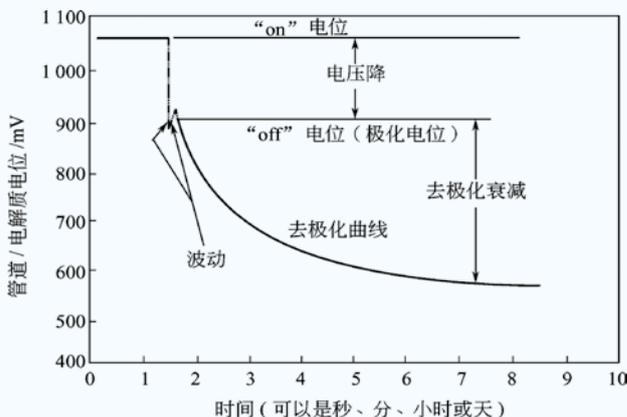


图2 阴保评价标准判据

以上判据①中，要求测量管道极化电位，而实际检测中，将单个阳极与管道断开连接所测量的管道开路电位，并不能排除同一系统中其他阳极的影响，因此测得结果并不是极化电位。根据《埋地钢制管道阴极保护参数测量方法》（GB/T-21246）规定，“对有直流杂散电流或保护电流不能同步中断”的阴保管道，不能适用断电电位测量。因此检测多牺牲阳极系统的管道开路电位无法代表管道断电电位或极化电位，不能使用判据①的标准。

GB/T-21246同样规定使用判据②时，需要在阴保电源处安装电流同步断续器以测定管道极化衰减基准电位，才能进一步测量极化衰减电位差，而对于多牺牲阳极的阴保系统，这种同步断电无法实现。

因此，对于多阴保电流输入的阴保系统，如果不能进行同步通断，宜使用极化探头或试片来测量管道极化电位。这种设计使用与管道同材质的试片代替管道进行测试，通过近距离

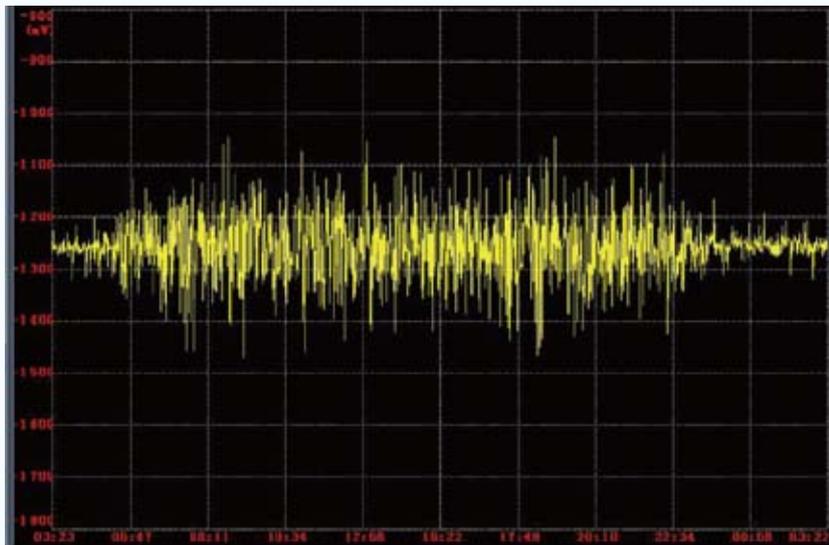


图1 某阴保检测点24h内通电电位波动情况

设置长效参比电极，可以最大程度地排除IR降影响。典型的极化探头自身带有长效CSE参比，其减少IR降的效果也要好于试片<sup>[1]</sup>，但价格和维护费用都较试片高，燃气企业可以根据自身情况将两者组合使用。在使用极化探头或试片测量管道极化电位时，需要在断电后的0.5s~1s时测量，由于时间窗口很短，如果由人工来完成仍然存在较大误差，在经济条件许可的情况下，可考虑使用阴保远传监控设备。

#### 1.4.3 检测桩分布不尽合理

管网阴保系统的阴保检测桩和阳极桩一般是随管网建设工程同步设计的，按照设计规范一般为每隔1km安装一个。管网建设完成后，新产生的杂散电流干扰区域附近往往没有检测桩设置，因此必须加装设有极化探头或试片的检测桩。

此外，武汉市近年来市政工程非常多，阴保桩、并被堆土掩埋或损毁的现象时有发生，很容易导致管道沿线检测点不全，检测结果失真。针对这种情况，只有重新增设阴保检测点，加强施工监护来减少损失。

#### 1.4.4 现场情况复杂不利人工检测

在进行阴保电位人工检测的过程中，必须考虑现场情况的复杂性，有些检测桩或检测井设在硬化路面上，周围无土壤，CSE需要在管道正上方接触土壤才能工作，将CSE移到很远的地方必然会大大增加IR降，导致测量准确度进一步降低。CSE与管道距离对IR降的影响见图3。

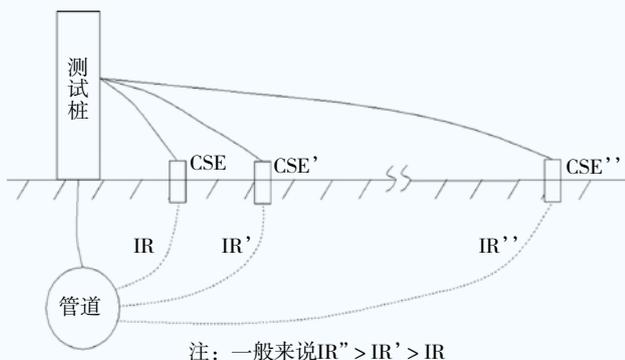


图3 CSE与管道距离对IR降的影响

另有一部分管道和检测井位于机动车快车道上，虽然可以设置警示标志，检测时的安全风险仍然很高，检测时间也受到限制，不可能进行多次取样和使用仪器监测。

### 1.5 武汉市轨道交通系统

武汉市轨道交通系统始建于2000年12月，除一号线为轻轨外，其余均为地铁。截至2015年6月，已投入运营一号线、二号线和四号线，与此同时，其余大量线路也正在施工或规划中，见表1、图4。

表1 武汉市轨道交通发展明细

线路名称	工程进度	通车时间
三号线一期	主体结构封顶	2015年底
五号线	开始招标	计划2020年
六号线一期		计划2016年底
七号线	主体结构封顶	计划2017年底
八号线一期	2014年底动工	计划2017年底
十一号线光谷段	2014年底动工	计划2018年底

## 2 轨道交通直流杂散电流的产生及其危害

杂散电流，又称迷流，指在规定回路中的电流，在某种情况下流出到周围环境中形成电流。根据回路中电流属性的不同，杂散电流也分为交流杂散电流和直流杂散电流两种，在相同的电流强度下，直流杂散电流的危害大大高于交流杂散电流。

直流杂散电流对燃气管道引起的腐蚀比一般性的土壤腐蚀激烈得多，破坏性很强。根据法拉第电解定律，1安培的直流杂散电流连续通过钢制管道，每年可以电解掉9.1kg铁，相当于在壁厚11mm的钢管上蚀穿一个直径360mm的圆孔。在实际土壤环境中，电流强度变化、电流持续时间、管道防腐层绝缘电阻、土壤电阻率等因素交叉影响，腐蚀结果会有所不同。

电气化轨道交通系统可能对埋地管网释放大量的直流杂散电流，因此需要燃气公司特别关注。以武汉地铁为例，该系统采用DC750V直流接触轨授电（图5），走行轨回流。回流时在铁轨连接不好、接头电阻大的地方，部分电流会从轨道绝缘薄弱处流向周围土壤，形成直流杂散电流。为收集直流杂散电流，走行轨下方铺设有道床迷流网，迷流网的电流汇流后流向牵引变电所内的排流柜。武汉市轨道交通2号线设有主变电所2座，牵引变电所16座，这些变电所均设置有排流装置。如果这些排流装置运行过程中



图4 武汉市轨道交通2017年规划图

出现问题,例如道床迷流网保护不足、排流电缆或排流柜故障等情况,都可能将直流杂散电流释放到土壤环境中,并对周围的金属管道造成危害。

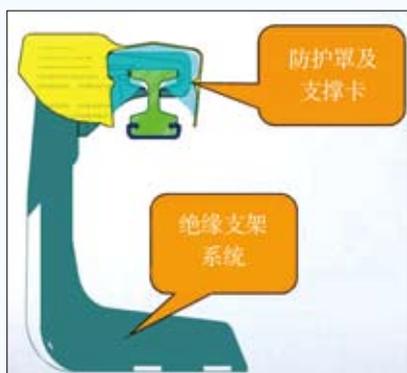


图5 武汉地铁DC750V直流接触轨

我们认为,伴随轨道交通运行时间的延长,其排流装置逐步老化,产生直流杂散电流的危险可能会越来越大。广州燃气公司统计了每年中压管网的腐蚀抢修量,从一个侧面印证了我们的推测:根据2014年广州日报的报道,广州市区分布着3 360km中压、低压

管道。其中,直径200mm以上的管道,有84.862km和地铁线路并行,82处交叉。此外,还有大量小口径管道与地铁并行或交叉。1999年地铁开通后,中压管网的腐蚀抢修量激增,且一直处于高发状态。见图6。

为了解直流杂散电流对武天公司管网的腐蚀风险,评估管网周围的环境状况,2014年武天公司聘请了具有专业资质的阴保公司对部分高压管网进行了杂散电流检测。

根据《埋地钢质管道交流干扰防护技术标准》GB/T50698-2011中规定杂散电流干扰的电位梯度判据,此次高压管网杂散电流检测的23处检测点检测结果如下:

(1) 有14处检测点电位梯度位于 $0.5\text{mV/m}$ ~ $5\text{mV/m}$ ,干扰程度为“中”,有9处检测点杂散电流电位梯度大于 $5\text{mV/m}$ ,干扰程度为“强”,需采取防护措施;

(2) 共有6处检测点位于地铁四号线沿线。这些监测点受到地铁轨道动态杂散电流的干扰,干扰等级均为“强”,杂散电流大小随着地铁运行的位置不同而变化,杂散电流方向较散乱;

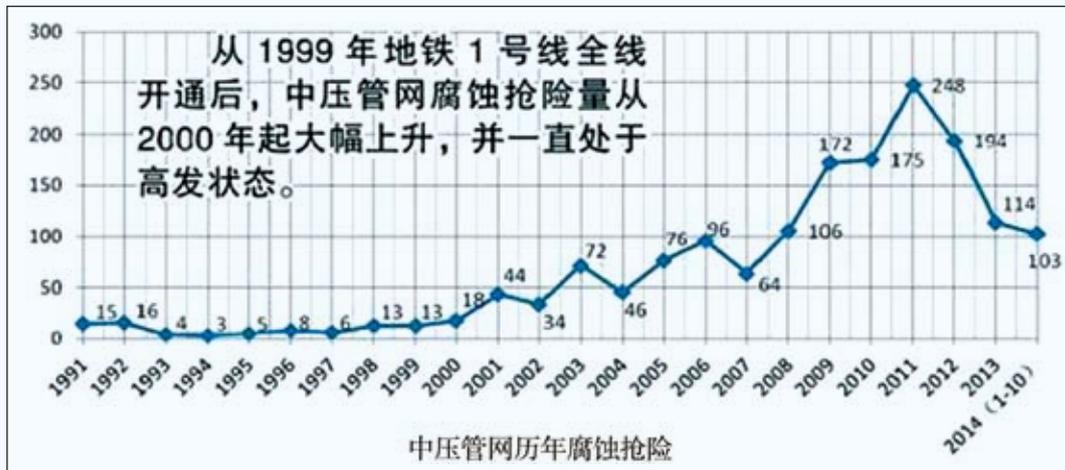


图6 广州市区中压管网腐蚀抢险数量变化

(3) 通过比对四号线沿线检测桩数据可知，地铁运行时间段（6:00-23:00）测试桩的土壤电位梯度较地铁停运时间段（0:00-6:00/23:00-0:00）的土壤电位梯度高，证明杂散电流来源为地铁四号线；

(4) 有3个检测点干扰等级为“强”的直流杂散电流来源疑为埋地直流高压电力电缆，作另案处理。

综合以上分析，我们认为：我公司埋地管网正在受到轨道交通直流杂散电流的干扰，随着轨道交通系统的运行，干扰程度可能进一步增加，有造成管道腐蚀穿孔等巨大风险，而以现有的人工检测手段，无法判断阴保系统是否给管道提供了足够的保护，更不能查找杂散电流来源和性质。另一方面，武汉轨道交通网络正在迅速发展，原先充分保护的管网未来也可能面临直流杂散电流的腐蚀，现有检测手段也不能发现管道极化电位的潜在变化，对评估轨道交通和杂散电流之间的因果关系非常不利。

(2) 上述检测桩应综合考虑成本和重要性，设置极化探头或试片以排除系统IR降。

(3) 在高压3个恒电位仪上，设置同步通断器，以进行有效的断电电位检测，增加高压强制电流系统电位的人工检测频率至1次/月。

(4) 对于距离轨道交通沿线100m以内的检测桩，应考虑按一定比例安装长期连续运行的阴保远程监控系统，一个典型的阴保远程监控系统终端如图7所示，必要时可在终端增加土壤电位梯度检测功能。

由于武汉市路面开挖市政赔偿费高昂，增加阴保检测桩和安装阴保远程监控系统都面临较大的资金投入，检测桩的选点和安装数量控制非常重要。根据武汉市轨道交通规划和公司埋地钢制管道分布状况，可以先考虑在高压、次高压管道沿线选点安装阴保远程监控桩，根据运行状况和紧要性扩展到中压阴保系统。选点应遵循如下原则：尽量靠近地铁沿线；选点

### 3 应对措施

要降低阴保系统面临的风险，应该遵循“先检测，后处理”的原则，即：首先完善检测手段，找出薄弱区域，明确风险来源；然后根据检测结果与责任方沟通，并进行有针对性的整改。

公司拟对现有检测手段逐步作出如下改进：

(1) 在与轨道交通交叉或平行的埋地钢制管网中，重新清查，根据需要设置足够的阴保检测桩，检测桩密度可适当增加至200m/根~500m/根。

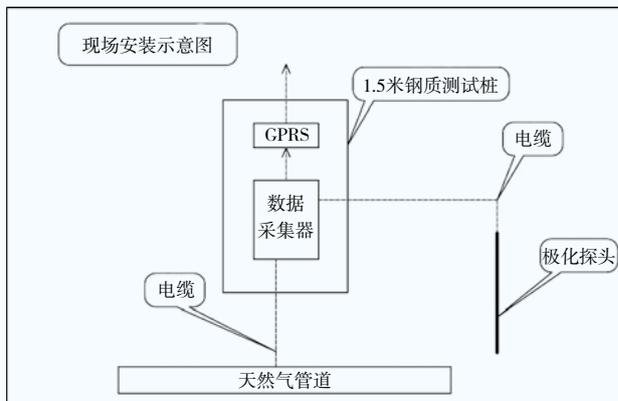


图7 典型的阴保远传监控系统终端示意图

位置应考虑日后维护、管理的便利；避开赔付高昂、协调难度大的地区；避免设置的阴保桩影响交通。

需要注意的是，极化探头、试片和长效参比等阴保装置在安装后的更换和维护都可能涉及到现场再次开挖，因此其维护的便利性和更换周期也是成本控制的重要指标，如果现场条件允许，可考虑将极化探头等装置设置在窨井中以便后期维护。

(5) 安装了阴保远程监控系统的检测桩，可以设置以1min/次~5min/次的频率测试管道的极化电位（此频率主要考虑与轨道交通系统发车的频率相适应），并将上传至服务器的数据绘制成曲线，进而分析轨道交通所产生杂散电流对阴保系统的影响。

(6) 对于没有安装远程监控系统的检测桩，在完成极化探头或试片的安装后，除以较高频率进行人工极化电位检测外，须由专业公司定期监测轨道交通附近杂散电流变化，通过分析确定是否需要排流处理。

在检测手段改进后，如果收集的数据能够证明轨道交通对阴保系统的影响，可与武汉市轨道交通运营单位进行沟通协商，以确定管道排流方案的选择和费用负担方式。

对于存在严重杂散电流干扰的管段，进行馈电实验和实施合理的阴保排流工程之后，管网阴保系统的风险还没有完全消除，仍然需要进行长期监测。如果管网阴保系统各项参数达标，可适当降低监测的频率，只注意其变化趋势；如果极化电位仍未达标，则需要进一步分析未达标的原因并安排杂散电流和管道防腐层检测等工作。

#### 4 总结

对于燃气供应企业而言，阴极保护技术大大延缓了钢管腐蚀的速度，提高了系统可靠性和安全性，降低了运行成本。可是杂散电流干扰对钢管造成的危害很少得到足够的重视，低频率的人工检测、忽视周围环境的影响以及对国标理解的不充分造成了一种运行良好的假象，使企业很容易将管道腐蚀看做孤立事件，或者是归咎于材料质量、施工质量问题，意识不到轨道交通直流杂散电流带来的巨大风险。

中石化11.22爆炸事故中，东黄复线管道日常阴保检测中忽略了IR降，由于检测点通电电位一直低于

-850mV，管道腐蚀泄漏处被掩盖。中石化2009年、2011年、2013年先后3次对东黄输油管道外防腐层及局部管体进行检测，均未能发现事故段管道严重腐蚀等重大隐患，导致隐患得不到及时、彻底整改，成为引发62死136伤9失踪的特大事故的导火索。

众所周知，燃气行业是高危行业，其安全工作面多面广，作为燃气企业，只有吸取教训，正视风险，加强监测，消除隐患才能降低运行风险，从而避免事故的发生。

#### 参考文献

- 1 崔旌立, 王清惠等. 利用极化探头消除油气管道阴极保护系统IR降
- 2 地铁杂散电流腐蚀燃气管道. 广州日报, 2014年11月27日A4版
- 3 山东省青岛市“11.22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸特别重大事故调查报告

#### 工程信息

### 威海市首个燃气热电联产项目落户南海新区

2016年2月16日获悉，威海市首个燃气热电联产项目——南海新区燃气热电联产项目获批建设，是全省核准的第2个燃气热电联产项目。

据了解，南海新区燃气热电联产项目总投资29.7亿元，规划建设两套F级燃气蒸汽联合循环热电联产机组，计划2016年6月开工建设，2018年建成投产。燃气热电联产项目建成运营后，可减轻电网的调峰压力，提高供电可靠性，不仅能缓解企业用电、供热压力，同时将为居民生活提供强有力的后备保障。南海新区燃气热电联产项目是在国家鼓励天然气推广利用的大背景下获批建设的，具有运行灵活、热效率高、低污染、用水少等优点。

（本刊通讯员供稿）