

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2016.11.005

# 埋地燃气管道的极性排流实验研究

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 周 策

**摘 要:** 轨道交通(以下简称轨交)与天然气管道是两个重要的城市基础设施,近年来均在快速扩张中,轨交杂散电流对邻近埋地天然气管道所导致的腐蚀问题日益凸显,已有天然气管道被腐蚀、接近穿孔的报导。现有的管道设计均采用外加电流结合牺牲阳极的阴极保护方案,但无法有效降低轨交行驶造成的动态杂散电流的干扰。有关国家标准规定可采用极性排流方法来降低杂散电流对已施加阴极保护管道的干扰,但国内并无公开报导的研究。本文对上海某轨交站附近的燃气管道进行了管地电位、地电位梯度等系统测试,通过管轨电压与管地电位的时间同步性确定了轨交系统对管道的影响。之后进行了管道与轨交负母排直接搭接的极性排流实验,排流点测试桩处的管地电位满足相关标准对排流效果的要求,但相距150m的另一个测试桩因绝缘接头的作用仍处于剧烈的管地电位波动中。极性排流可作为外加电流与牺牲阳极保护措施的有效补充,用于城市燃气管网的腐蚀防护。实验发现,对于处于复杂干扰情况下的管道,排流改善的作用范围尚有待深入研究。

**关键词:** 轨道交通 杂散电流 燃气管道 极性排流 管道保护

## Experimental Research of One-way Drainage for Buried Gas Pipelines

Zhou Ce School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai

**Abstract:** As two indispensable parts of city infrastructures, both rail transits and gas networks are developing rapidly. Corrosion risk of buried gas pipelines suffering from direct current (d.c.) interference of transit systems becomes increasingly serious in big cities. It was reported that gas pipelines were corroded by stray current from d.c. traction system. In existing cathodic protection design, impressed current in combination with sacrificed anodes were mainly adopted, which turned out to be unable to mitigate d.c. interference. Although it has been specified in some standards that one-way drainage can be effective, research based upon field test has not been reported publicly. In this paper a field test was performed for a gas pipeline in the neighborhood of a rail transit station in Shanghai. The pipe-to-soil potential, d.c. potential gradient and pipe-to-rail potential were measured, and then synchronism were analyzed to determine relationship between interference suffered by pipeline and transit system operation. Drainage effect was evaluated from both on-potential and off-potential in light of d.c. interference mitigation. The improvement result of drainage point was observed to be perfect if

measured in terms of standard specifications, but the other test pile 150m away from drainage still had dramatically fluctuated pipe-to-soil potential because of the insulating joint. For those pipelines suffering from d.c. stray current, one-way drainage can be implemented as an effective measure in addition to impressed current and sacrificial anodes.

**.Keywords:** Rail transit Stray current Gas pipeline One-way drainage Pipe protection

## 1 引言

上海现有高、中、低压天然气管网2万余km,采用外加电流结合局部牺牲阳极或牺牲阳极的方法进行阴极保护<sup>[1]</sup>。截至2015年12月,上海轨交开通14条线路,运营线路总长617km,里程数居全国之首,车站366座,并有5条线路延伸规划、4条线路新建计划<sup>[2]</sup>。相互交错的燃气管网和轨交线路产生了新的问题。

天然气高压管道的业主单位利用沿管线设置的自动监测装置发现,某条距轨交车站100m的2.5MPa天然气管道,使用加强级3PE防腐层并结合外加电流保护法,但仍出现管地电位大幅波动的情况,许多时刻正于文献<sup>[3]</sup>中规定的阴极保护电位-850mV,有时甚至出现电位为正的情况。轨交系统一般采用触网供电、走行轨回流的直流牵引供电方式,机车牵引电流大,杂散电流外泄将引起隧道结构钢筋、附近建筑物基础和埋地管道出现电解形式的腐蚀。若防护不及时或方法不恰当,这些金属结构将会被迅速腐蚀并呈现深度穿孔状,严重时还可能发生管道漏泄,造成灾难性的损失<sup>[4, 5]</sup>。

滕延平,张永盛,王禹钦<sup>[6]</sup>等通过对3种接地排流设施进行的现场测试与评价,总结出了3种接地排流设施的优点与局限性。王瑞鹏,程拥军<sup>[7]</sup>采用钳位排流与电解电容共同作用的方法进行交流排流,获得了较好的排流效果。周吉祥<sup>[8]</sup>研究了向高电位镁牺牲阳极进行极性排流并将其与接地排流和强制排流相结合的排流效果,与传统中单纯的接地排流有所区别,排流效果较好。程明、唐强等<sup>[9]</sup>对高压直流接地极干扰区的油气管道防护措施提供了可行意见,其中包括对管道进行排流保护。但上述文献均无有关管道与轨交直接搭接的极性排流研究。

本文以上述管道为研究对象,通过现场测试确定

了直流干扰与轨交系统的关联;按照国家标准,采用一定阻值的限流电阻,进行了极性排流试验,并对排流效果进行了评价,验证了外加电流的阴极保护结合局部极性排流可有效降低轨交杂散电流干扰。本文的工作可用于城市轨交对燃气管道直流干扰的排除,显著改善管道的阴极保护状态。

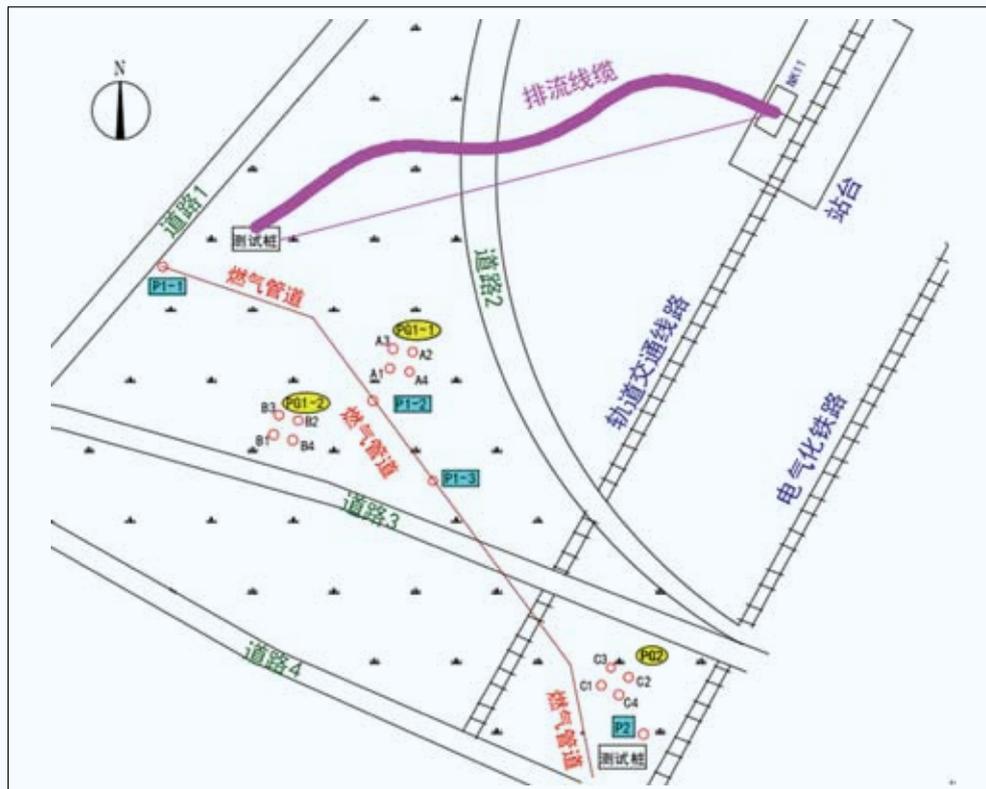
## 2 测试现场与设备

### 2.1 监测设备与监测参数

评价杂散电流对钢质燃气管道的干扰主要有管地电位、地电位梯度等测试方法<sup>[10]</sup>,前者主要用来判断杂散电流影响的强弱,后者用来检测杂散电流方向以及强度。测试现场情况如图1所示,共布置两个测点,测点1位于轨交线路西侧测试桩,测点2位于轨交线路东侧测试桩,两测点相距约150m,轨交线路距电气化铁路约70m。测点1、2之间的管道按设计要求设置了套管和绝缘接头。

按照文献<sup>[11]</sup>的要求,测试时间需涵盖轨交运营高峰时间段及运营结束。测试时间为2016年2月27日下午至夜间列车运行结束后半小时,有效数据时段18:00PM~00:19AM。

测点1处布置参比电极11支,其中3支用于管地电位测试(P1-1、P1-2、P1-3)。在管道内、外侧各布置4支参比电极,测量地电位梯度。参比电极埋深均为20cm。只有将参比电极置于管道防腐层缺陷处,测得的管地电位才真实反映管道的保护状态。实际工程中,既不能切断阴极保护电流,轨交外泄的杂散电流又始终干扰管地电位的准确测量。为最大程度降低土壤IR降的影响,测点1处使用试片断电法测量通电/断电电位。定制了与管道材质完全相同的极化试片(图2),用导线与管道连接,埋入土壤中极化



注：P——管地电位，PG——地电位梯度，1、2分别代表测点1、2。

图1 测点布置示意图

5h，使其充分极化、达到与管道相同的极化电位。之后，将试片与管道之间的连接周期性地通、断，而管道本身仍处于阴极保护中，不受通、断过程影响。本次测试采用12s通3s断的时间规律来测量通电、断电电位。断电电位更接近于管道的真实保护电位用以评价管道的保护状态，通电电位则用于评价管道受干扰的情况和排流的保护效果<sup>[13]</sup>。



图2 极化试片实物图

测点2处布置5支参比电极，1支监测通电情况下的管地电位，4支测量地电位梯度。

根据文献<sup>[14]</sup>要求，布设长距离导线，利用测试桩

和轨交站内部的轨道电位限位器（NK11）测量了管轨电压。其目的在于通过管轨电压和管地电位的时间关联性，明确轨交系统对燃气管道的影响。

表1列出了各测点所使用的二次仪表性能情况。

## 2.2 排流系统

从测点1处的管道测试桩处引出排流线缆，将限流电阻（阻值为 $2\Omega$ ）与单向排流器（二极管）串联在线缆中，最后将排流线缆与轨道的负母排连接。线缆总长200m，断面 $25\text{mm}^2$ ，电阻 $0.4\Omega$ ，将开关与二极管串入其中（见图3）。在连接线上设置限流电阻的作用为：限流电阻有一定的功率限制，可避免因功率过大而烧毁整个电路系统<sup>[14]</sup>。

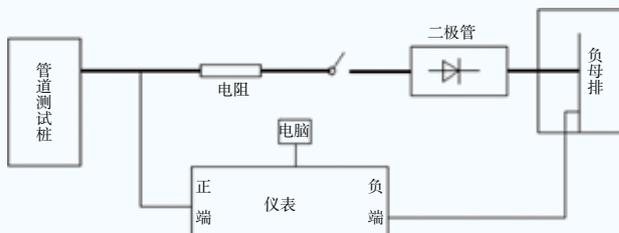


图3 极性排流连接示意图

### 3 干扰识别与确定

#### 3.1 电位梯度数据分析

测试过程中观测：到轨交运行时测点1处的地电位梯度频繁波动，而轨交停运后电位梯度值趋于平稳。若计算电位梯度平均值（表2），各处电位梯度平均值均小于2.5mV/m，即无需进行排流保护<sup>[15]</sup>。显然仅进行简单的数学平均无法反映管道的真实干扰情况，频繁波动、正负交替的梯度被数值很小的平均电位梯度值所掩盖。将地电位梯度按不同流向分别进行分析，将流向相反的电位梯度值（如A1→A2和A2→A1）进行区分，分别计算其梯度值，计算结果见表3（停运后数据平稳，无须区分）。根据区分流向的电位梯度数据进行判断，除A4→A3外其余梯度均大于2.5mV/m，因此需采取额外的防护措施。

轨交系统停运后，A3→A4的地电位梯度为

1.693mV/m，可认为此方向有直流干扰；其余3处电位梯度均小于0.5mV/m，故可视为无直流干扰<sup>[16]</sup>。选取23:50PM~00:19AM测得数据的平均值为背景梯度，分析相对地铁停运后的背景梯度的偏移情况，A3→A4和B3→B4方向上的电位梯度较之A1→A2和B1→B2很小，均可忽略不计。A1→A2的方向指向轨交线路，而B1→B2的方向背离轨交线路。由表2数据可知：A1→A2的梯度明显大于B1→B2，是后者的数倍，可以推断：尚存在其他的干扰源，但轨交系统对燃气管道有着更为明显的影响效果。

测点2处地电位梯度在轨交运行时段内波动很大，停运后趋于平稳（C1→C2梯度为0.658mV/m，C3→C4梯度为1.412mV/m）。按测点1处的数据处理方法对测点2电位梯度进行分析，发现C1→C2的梯度（0.007 mV/m）相对C3→C4（1.289mV/m）很小故可忽略不计，C3→C4的梯度方向指向轨道交通线路。

表1 测试使用的设备与性能

测点编号	测试参数	图1中位置	测试仪表	采集频率 (Hz)
测点1	管地电位 (通电/断电)	P1-1	ADAM-4017 采样模块	2
		P1-2		
		P1-3		
	地电位梯度			
		PG1-1 (A1~A4)		
		PG1-2 (B1~B4)		
测点2	管地电位 (通电)	P2	高频采样设备 (自制)	100
	地电位梯度	PG2 (C1~C4)		
测点3	管轨电压	轨交车站NK11	多功能记录仪	2

表2 测点1处未区分流向的地电位梯度平均值

		PG1-1		PG1-2	
轨交运行时段 (18:00PM~23:50PM)	数值 (mV/m)	0.131	1.710	0.111	0.110
	方向	A2→A1	A3→A4	B1→B2	B4→B3
轨交停运时段 (23:50PM~00:19AM)	数值 (mV/m)	0.461	1.693	0.201	0.097
	方向	A2→A1	A3→A4	B1→B2	B4→B3

表3 测点1处区分流向的地电位梯度平均值

		PG1-1				PG1-2			
流向	A1→A2	A2→A1	A3→A4	A4→A3	B1→B2	B2→B1	B3→B4	B4→B3	
数值 (mV/m)	5.055	6.242	2.9503	1.958	4.413	3.878	4.940	6.001	

另外，因在测点2处使用了高频率（100Hz）数据采集设备，利用傅里叶变换进行时频分析后发现，管道附近存在50Hz左右的交流干扰源。但轨交停运后地电位梯度趋于平稳，因此可认为轨交系统的直流干扰对管道影响更大。

### 3.2 管轨电压与管地电位

轨交运行期间，管轨电压波动剧烈，范围在-45V~50V之间；停运后管轨电压稳定在-0.5V左右；管轨电

压为正时，电流从管道流向轨道，管地电位较正；反之，电流则从轨道流向管道，管地电位较负。

图4示出了包含排流和未排流时刻的同一时段内管轨电压与管地电位（P1-1）波动情况。将测点2处的测得的管地电位（P2）高频数据与管轨电压的对比示于图5。图4、5中，管轨电压与两个管地电位的变化趋势均基本保持一致，甚至几乎完全同步，只是管地电位的波动幅度小得多。图4、5充分说明了，相对于其

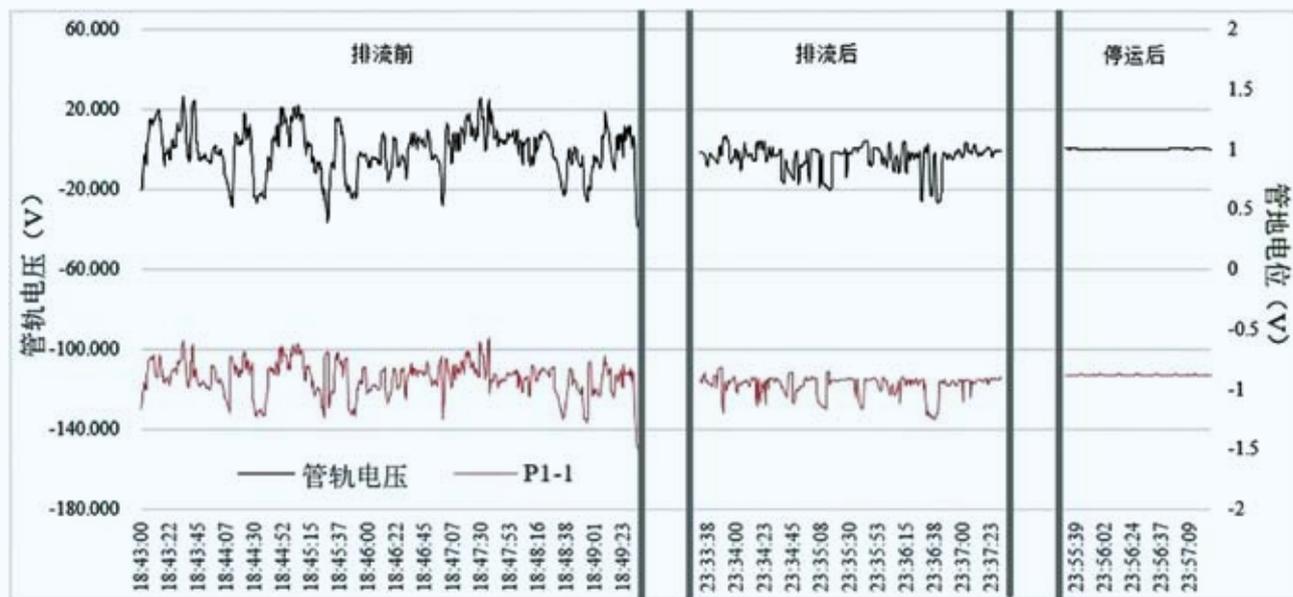


图4 管轨电压与管地电位（P1-1）对比图

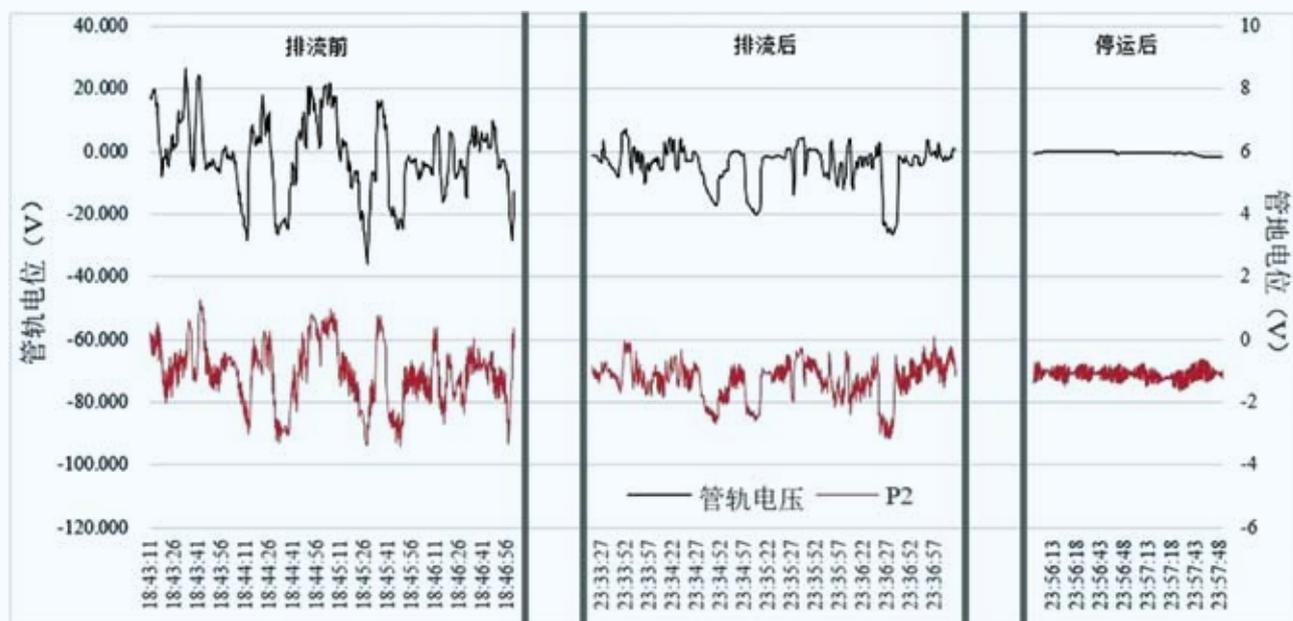


图5 管轨电压与管地电位（P2）对比图

它可能存在的直流干扰源以及交流干扰源，轨交系统无疑对燃气管道所受的强烈干扰起到了决定性作用。

#### 4 排流数据及分析

管道的受干扰程度以及排流效果的评估均以自然电位为基准进行分析<sup>[14]</sup>。因此分析排流数据时，以机车停运、触网断电后（即23:50PM~00:19AM）测得数据的平均值为背景值，分析管道的受干扰程度和评估排流效果。

##### 4.1 断电电位

观察未进行排流且轨交运行时段的数据（图6）发现：运行时段的断电电位频繁出现达不到规范要求的情况（波动范围-1.4V~-0.4V），这意味着在轨交系统杂散电流影响下，管道面临着腐蚀风险，必须采取额外的措施进行弥补。

而在轨交结束运行后，测点1处的背景断电电位在-0.865V左右（图7），负于-0.850V，即：没有轨交运行情况下，管道阴极保护系统保护状况良好。

进行排流实验（18:49PM）前，测点1处的P1-1、P1-2、P1-3的断电电位平均值分别为-0.824V、-0.832V、-0.812V，正于标准中要求的-0.85V。在进行排流后，三者均明显下降，排流后的53min内（18:49PM ~

19:42PM）平均值分别下降为-0.980V、-1.014V、-0.986V，降低了0.17V左右，但未负于-1.20V，管道没有出现保护状态。之后，再停止排流33min，3个断电电位又分别恢复到-0.857V、-0.862V、-0.850V，相比排流时电位平均偏正了0.14V。由此可得出这样的结论：在轨交杂散电流干扰的情况下，极性排流可起到明显的保护效果。

##### 4.2 通电电位

排流前后，通电电位发生了巨大的变化。图8截取了一段时间内排流前后的对比。排流前，通电电位的平均值在-0.89V左右（-1.836V~-0.212V），管道受轨交杂散电流影响明显。排流后，通电电位的平均值在-1.33V左右（-2.984V~-0.595V），排流有效降低了杂散电流对管道的干扰。

在轨交停运后（23:50PM以后），极性排流对通电电位的影响极小，是否排流对管地电位的影响几乎可以忽略不计，两者管地电位仅相差4mV左右。这从另一方面说明了轨交对燃气管道具有强烈的干扰，极性排流可有效缓解轨交杂散电流的影响。

##### 4.3 排流效果评估

以背景自然电位为基准，将21:18PM~22:38PM时段内的通电电位按正偏和负偏分别处理来评价排流效果，大于背景值为正偏，反之则为负偏。排流情况

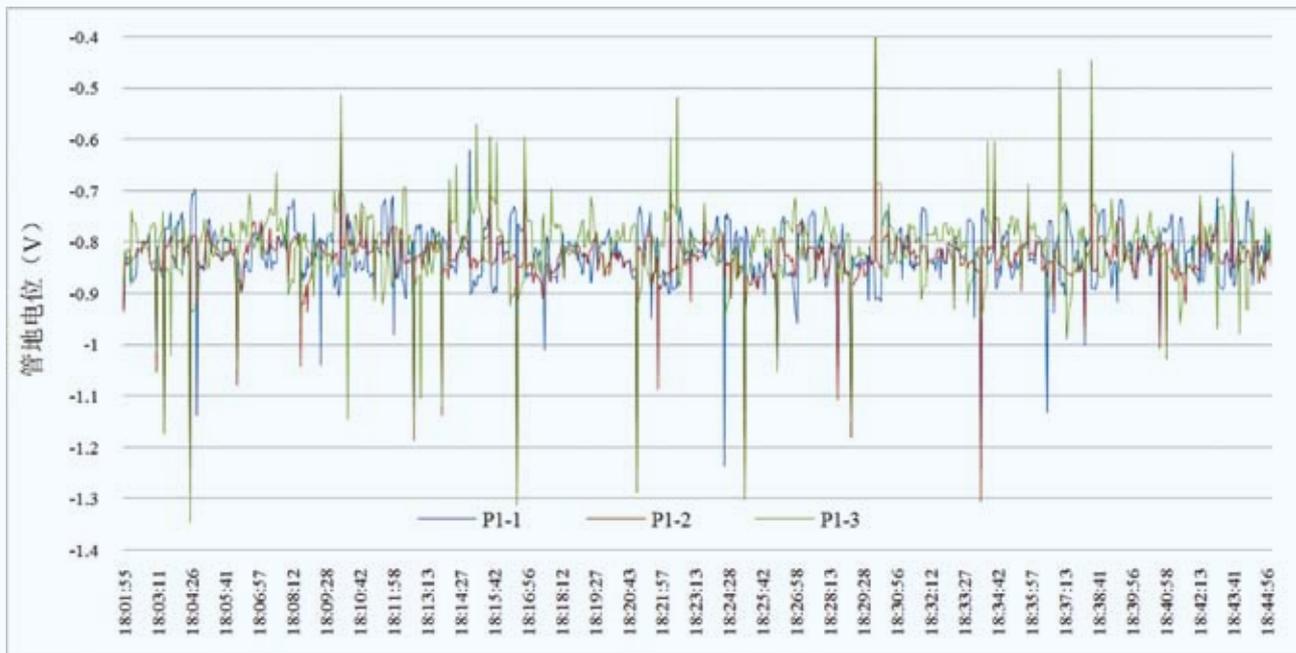


图6 排流前断电电位数据图

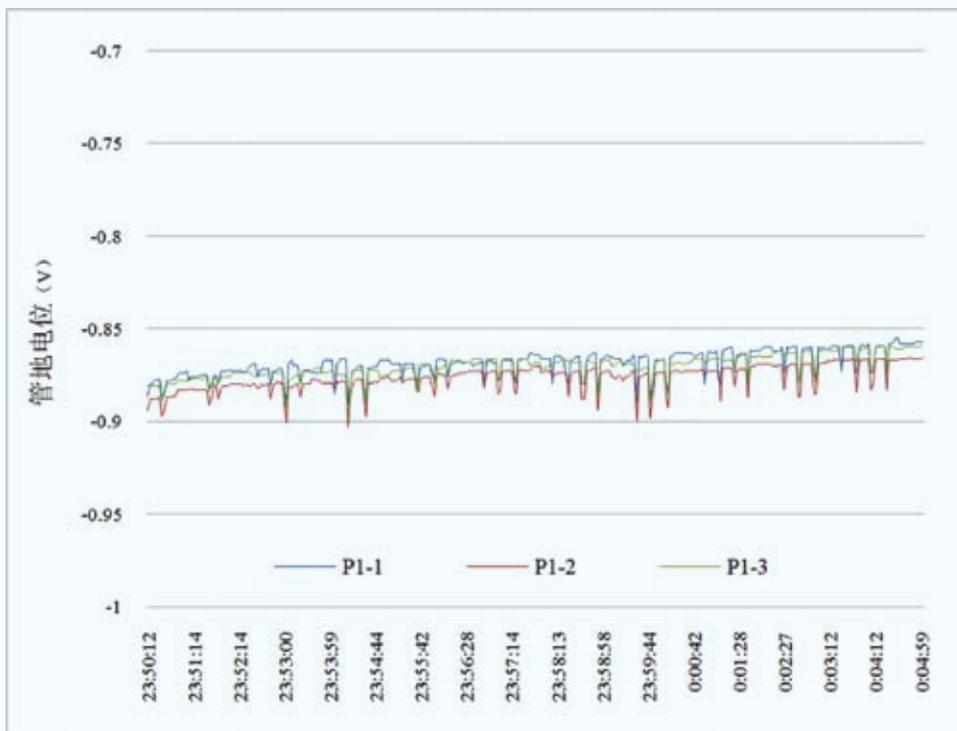


图7 停运后断电电位数据图

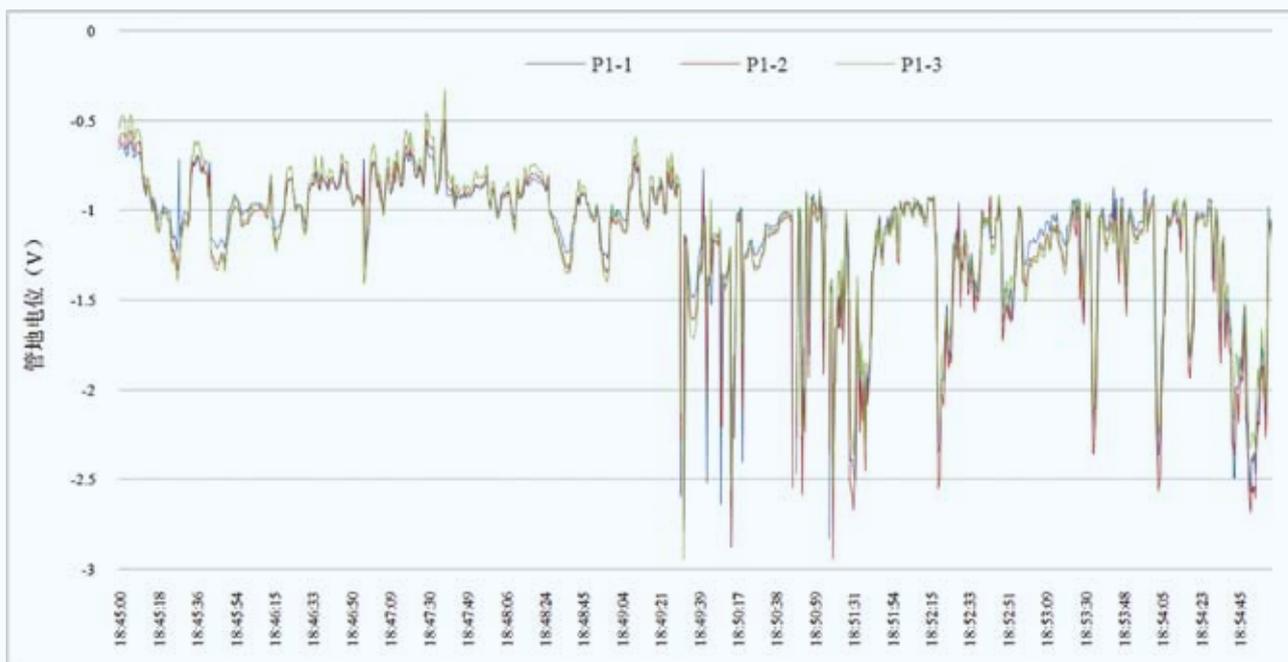


图8 排流前后管地通电电位数据对比图

的正偏、负偏平均值见表4。从下面两个表中可以看出,进行排流后,平均正偏减小,甚至无正偏出现,而平均负偏增大。

按照正电位平均值比进行排流保护效果的评定<sup>[14]</sup>,

计算公式如下:

$$\eta_v = \frac{V_1(+)-V_2(+)}{V_1(+)} \times 100\%$$

式中:  $\eta_v$ —正电位平均值比;  $V_1(+)$ —排流前

表4 管地电位平均正偏与负偏值 (V)

时段	平均正偏值			平均负偏值		
	PG1-1	PG1-2	PG1-3	PG1-1	PG1-2	PG1-3
21: 18PM~21: 37PM (未排流)	0.07832	0.10004	0.11994	-0.1124	-0.1359	-0.1565
22: 17PM~22: 38PM (排流)	0	0	0	-0.5495	-0.5925	-0.5402

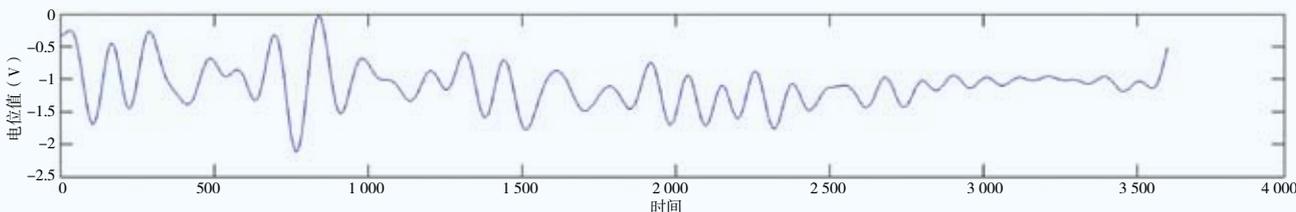


图9 23: 00PM~00: 00AM过滤后的管地电位 (P2) 图

正电位平均值 (V)； $V_2(+)$ —排流后正电位平均值 (V)。

经计算，在进行极性排流后，管道的正电位平均比均达到了100%，超过了标准中规定的85%，排流效果良好。

排流保护后应达到如下要求：（1）对于保护系统中的管道，管地电位分布均匀，其任意点上的管地电位达到阴极保护电位标准或者达到或接近未受干扰时的状态；（2）对于保护系统中的管道，管地电位的负向偏移尽可能不超过所采用防腐层的阴极剥离电位；（3）对保护系统以外的埋地管道或金属构筑物的干扰尽可能小。排流之后的管地电位达到阴极保护电位标准，甚至优于无干扰情况下的背景值，且未使电位负向偏移程度过大。

但极性排流与管道现有阴极保护系统的设计措施如何配合，还存在一定的问题。测点2距测点1仅150m，而测点2处的管地电位值在进行极性排流的时段内并未发生明显变化（图9）。出现这一现象的原因有两个：测点2处的管地电位中包含来自电气化铁路的交流干扰，但更主要的原因还是排流点测试桩1与测点2之间，有一个按照规范设计的绝缘接头和保护套管。因测试点2与NK11之间有轨交的轨道，无法对测点2进行排流试验。此时的绝缘接头反而限制了极性排流的有效作用范围。在距排流点较远且交直流干扰共存的情况下，如何有效地对管道进行有效的保护，将是以后的研究重点。

## 5 结论

对于防腐层致密且质量良好的管道，杂散电流对其干扰应为零。实际工程中，管道防腐层总会出现或多或少的漏点，因此轨交系统的运行不可避免地对附近的埋地燃气管道形成不断波动的直流干扰。而仅仅采用外加电流或牺牲阳极等传统的阴极防护措施无法对燃气管道进行充分的保护，此时可以考虑对管道进行排流。实际上，在长输管线中排流的应用较多，而在城市燃气管道系统中，排流研究的报导很少。

本次极性排流实验达到了预期的效果，排流后的管地电位满足了有关标准对排流效果的要求。极性排流可以对受轨交杂散电流干扰的燃气管道起到良好的保护效果。

极性排流的保护范围与管线自身的阴极保护设计有关。从外加电流的作用范围扩大的角度，希望将所有的绝缘接头或法兰跨接；但从抑制杂散电流的角度看，则希望将其尽可能绝缘、分离。同时，穿越铁路、轨交等处的绝缘接头，也影响排流范围的扩大。如何对此类管道以及存在交流干扰的燃气管道进行保护将是以后的研究重点。

### 参考文献

1 公司介绍. 上海燃气（集团）有限公司简介 [EB/OL].

(2015-08-09) [2016-05-18]. [http://www.shgas.com.cn/Page\\_QYWH\\_QYHDXX.aspx](http://www.shgas.com.cn/Page_QYWH_QYHDXX.aspx)

2 上海地铁新闻中心. 12月19日起11、12、13号线新延伸段建成试运营[EB/OL]. (2015-12-17) [2016-05-18]. <http://www.shmetro.com/node49/201512/con114518.htm>

3 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇燃气埋地钢质管道腐蚀控制技术规程[S]. CJJ 95, 2013

4 林江, 唐华, 于海学. 地铁迷流腐蚀及其防护技术[J]. 建筑材料学报, 2002; 5(1): 72-76

5 Kim D K, Ha T H, Ha Y C, et al. Alternating current induced corrosion[J]. Corrosion Engineering Science and Technology, 2004; 39(2): 117-123

6 滕延平, 张永盛, 王禹钦等. 杂散电流排流设施有效性评价研究[J]. 管道技术与设备, 2012; 116(04): 40-42+54

7 王瑞鹏, 程拥军. 埋地管道交流杂散电流的危害与排流[J]. 腐蚀与防护, 2014; 295(05): 514-516

8 周吉祥. 城镇燃气管道直流杂散电流排流保护[J]. 煤气与热力, 2015; 280(04): 38-42

9 程明, 唐强, 魏德军等. 高压直流接地极干扰区埋地钢质油气管道的综合防护[J]. 天然气工业, 2015; 263(09): 105-111

10 国家质量监督检验检疫总局. 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法[S]. GB/T 21246, 2007

11 Standards Australia. Cathodic protection of metals Part 1: Pipes and cables[S]. AS 2832.1, 2004

12 张丰, 齐晓忠, 金宏等. 试片断电法在管道阴极保护中的应用[J]. 油气储运, 2013; 295(07): 760-763

13 British Standard Institution. Cathodic protection measurement techniques[S]. BS EN 13509, 2003

14 国家发展和改革委员会. 埋地钢质管道直流排流保护技术标准[S]. SY/T 0017, 2006

15 国家能源局. 埋地钢质管道阴极保护技术管理规程[S]. SY/T 5919, 2009

16 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化委员会. 埋地钢质管道腐蚀防护工程检验[S]. GB/T 19285, 2014

## 工程信息

# 国家级天然气利用试验示范区 获国家发展改革委批准建设

云南保山市紧抓国家“一带一路”和中缅天然气管道建设机遇, 上报《保山市天然气利用试验示范区建设规划》和《保山市天然气利用试验示范区建设实施方案》, 申请将保山作为国家级天然气利用试验示范区, 日前获国家发展改革委批复, 批准保山建设国家级天然气利用试验示范区, 支持保山开展天然气价格市场化改革, 天然气价格完全由市场形成; 减少输配环节层级, 降低供气成本; 改革城市燃气特许经营、实现大用户直供; 取消城市燃气初装费, 实施以热计价; 积极培育天然气高效利用产业, 推进城市燃气、车用燃气、工业用气、

天然气分布式能源发展, 推动建材、食品、大数据等产业使用天然气, 建设低碳工业园区, 加快天然气替代燃煤。试验示范区建设计划投资20.2亿元, 分5年实施, 到2020年, 全市用气量预计达10.5亿元, 实现气化人口131万人, 市域城镇平均气化率达77%, 农村气化率达20%, 全市清洁能源利用率达83%。天然气利用试验示范区的建设, 将有利于优化保山能源结构、保护“青山绿水”环境、全面完善城乡天然气供气管网, 真正实现“气化保山”目标, 推动我国天然气行业体制改革。

(本刊通讯员供稿)