

文章编号:1673-5005(2008)03-0122-06

阴极保护检查片评估西气东输苏浙沪管段的保护效果

许述剑¹, 翁永基¹, 李英义², 韩昌柴²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249; 2. 中石油 西气东输管道公司管道处, 上海 200122)

摘要:依据 2004 年美国国家标准学会(ANSI)和腐蚀工程师协会(NACE)联合发布的阴极保护检查片新技术标准,于 2005–2006 年在西气东输管道苏浙沪管段沿线,开展检查片评估阴极保护效果的现场试验。经过检查片设计、试验方案实施以及数据处理分析,得到了管道沿线阴极保护度和土壤腐蚀性分布;获得该地区 IR 降误差的统计值为 170 mV,并修正了管道保护电位准则(以 -1.02 V 替代 -0.85 V)。研究结果表明:受杂散干扰的马鞍山、芜湖附近管道受到良好保护;东桥、无锡处管道保护电位衰减过快,存在接地的可能;该阴极保护系统容量至少覆盖试验中大、小检查片的面积变化;利用危险性矩阵可以分析管道外腐蚀危害的风险等级、危险来源等。

关键词:西气东输管道;外部腐蚀;阴极保护检查片;阴极保护效果;风险评价

中图分类号:TG 174.41

文献标识码:A

Assessment of cathodic protection effectiveness for Su-Zhe-Hu section of west-east gas pipeline by coupon tests

XU Shu-jian¹, WENG Yong-ji¹, LI Ying-yi², HAN Chang-chai²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. West-East Gas Pipeline Company of PetroChina, Shanghai 200122, China)

Abstract: Field tests were made along the line of Su-Zhe-Hu section of west-east gas pipeline during year 2005–2006 for assessing cathodic protection (CP) effectiveness by the new standard of CP coupon, issued jointly by ANSI and NACE in the year 2004. Through CP coupon design, test implementation and test data analysis, a lot of valuable conclusions were obtained. The actual CP effectiveness of Ma'anshan and Wuhu pipeline suffered stray interference was well. The soil corrosibility distribution along the pipeline was obtained. IR-drop statistical value of 170 mV was obtained to revise protection potential criterion that is substituting -1.02 V for -0.85 V . The protection potential curve along the pipeline shows that Dongqiao and Wuxi potential decayed excessively quickly, existed the probability of grounding. The contrast test shows that the capacity of this CP system at least covered the area change of big and small coupons. The criticality matrix was used to analyze risk rank and hazard source of pipeline external corrosion. So pipeline CP condition was completely assessed, and proprietor worry questions were answered.

Key words: west-east gas pipeline; external corrosion; cathodic protection (CP) coupon; cathodic protection (CP) effectiveness; risk assessment

1 问题的提出

西气东输工程是我国实施西部大开发战略的标志性工程之一,采用 3PE 防腐层和外加电流阴极保护等措施来防止外部环境对管道的腐蚀。阴极保护作为埋地管道最后一道安全防线,其有效性至关重

要,然而技术的复杂性使其有效性难以确定。例如,1999 年德国 PIPETRONIX 公司对运行 20 年的四川南干线进行智能清管检测,原以为阴保控制一直良好,结果发现外腐蚀深度超过 10% 壁厚的缺陷有 453 处,超过 30% 的 6 处,开挖验证,原因归结于 IR 降造成保护电位的不真实。

收稿日期:2007–08–08

基金项目:中石油西气东输管道公司资助项目

作者简介:许述剑(1971–),男(汉族),甘肃兰州人,工程师,博士研究生,从事材料腐蚀与防护方面的研究。

为考察外加电流阴极保护的防腐效果,开展了检查片评估阴极保护效果的现场试验,本试验范围为西气东输管道苏浙沪管段。其干线从江苏龙池至上海;三条支线分别为江苏南京至安徽芜湖的南芜线,江苏芙蓉至浙江长兴的常长线 and 江苏龙池至杨巴的杨巴线。该管段处于经济繁荣的长江三角地区,沿线密集大量工矿企业和城镇居民区,管道安全运行至关重要。投产三年多来,存在一些令人担忧的问题:(1)保护电位在 $-3.0 \sim -0.0$ V (CSE) 波动的南芜线马鞍山至芜湖段管道是否受到保护;(2)缺乏对 IR 降评价,无法对管道通电电位作出修正,该地区管道阴极保护采用 -0.85 V 准则是否合理;(3)希望了解整个地区管道阴极保护最薄弱点,或外部腐蚀危险最大处。

试验自 2005 年 9 月至 2006 年 12 月,历时一年多,在 500 km 管道沿线共埋设 30 组检查片组件。本文中重点介绍试验中检查片设计、方案实施、数据处理分析结果等。

2 检查片设计

2.1 检查片试验原理

阴保检查片技术是埋设与埋地管道材料相同或相近的钢试片于管道附近同类土壤中,试片和管道电性连接,维持和管道相同电位,经一段时间埋设后,用失重法检测试片腐蚀速度,并和自然腐蚀试片的腐蚀速度对比,得到“保护度”。该项技术结果直观,有较好可信度,但试验周期长,提供信息量较少。2004 年提出的新标准^[1]使传统技术得到质的提高。主要改进在以下几点:

(1)检查片结构的多样性。传统技术采用标准钢试片(50 mm × 100 mm),而新标准规定必须根据调查对象设计检查片,并提供多种设计方案。其核心是模拟管道表面裸露面积(如防腐层破损点),检验阴保系统对缺陷的保护能力。

(2)检查片功能的多重性。传统技术功能单一,而新标准赋予检查片试验更多功能,如进行通断电试验、近参比试验和 IR 降评估等,丰富了试验信息,缩短了试验周期。

2.2 检查片的设计方法

新标准中某些检查片结构相当复杂,包含近参比电极和电解池等。考虑在我国首次使用,本试验采用平板试片组合,该试片组合易加工,重现性好,测量数据处理简单。

2.2.1 试片面积

检查片面积须模拟管道表面有代表性的裸露面积。面积过小,无法代表管道实际保护状况;过大,则可能导致结果失真(IR 降),或者导致保护电流过度流失,改变管道阴保状态。为确定检查片面积上限,在实验室内对西气东输管道钢(X70)试样进行动电位扫描。试样面积 1 cm^2 ,试验溶液为模拟土壤液。常温条件下,不同 pH 溶液中 X70 钢的阴极极化曲线见图 1。达到阴极保护电位为 -0.85 V (CSE),相当于图中 -0.776 V (SCE) 时的电位,所需保护电流密度见表 1。

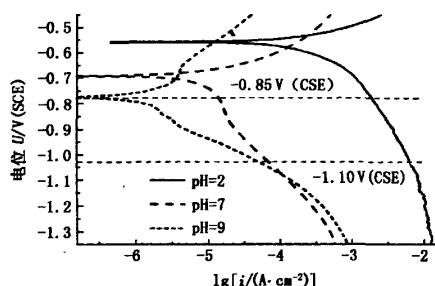


图 1 不同 pH 溶液中 X70 钢的极化曲线

表 1 检查片所需保护电流密度

$\lg i$			电流密度 $i/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$		
pH=9	pH=7	pH=2	pH=9	pH=7	pH=2
-6.3	-4.85	-2.7	0.5	14	2000

苏浙沪地区土壤 pH = 6.5 ~ 8.0 (地下 1.5 m), 检查片所需附加电流密度取作 $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。此外,试验期间干线 3 个主要阴极保护站的输出参数见表 2。

表 2 干线阴极保护站的主要输出参数

站点名称	仪器给定电位 U_0/V	通电点电位 U/V	输出电流 I/A	输出电压 U'/V	站点数/个	平均保护电流 I_s/mA
镇江	-1.3	-1.3	1.25	3.13	4	313
芙蓉	-1.5	—	5.3	10.2	6	883
上海	-1.5	—	3	4.8	6	500

(1)检查片消耗电流计算。假设规定检查片消耗电流小于阴极保护系统输出电流 1% 时,对阴极保护系统无明显影响,则每个站、室检查片总面积不宜超过 $3130/15 = 210 (\text{cm}^2)$ (镇江)和 $8830/15 = 590 (\text{cm}^2)$ (芙蓉)。

(2)检查片测量电位 IR 降。检查片相当于管道外表面暴露缺陷。按资料,3PE 涂层管道保护电流密度 $1 \text{ mA}/\text{m}^2$,试验区土壤电阻率不超过 $30 \Omega \cdot \text{m}$,检查片当量直径不宜大于 0.5 m,以保证测量电位反映管道的真实电位^[2-3]。

2.2.2 试片数量

腐蚀是一种随机现象,个别样本数据可靠性较差。腐蚀样本一般至少取 3 个平行试片^[4],对试片表面处理提出光洁度要求是为了确保试验重现性,减少数据的离散程度。

2.3 实际试片组设计

为便于埋设,将 6 片试片构成一个组件。其中,1[#],2[#]为大试片;3[#]~6[#]为小试片。1[#],3[#],5[#]试片和管道相接;2[#],4[#],6[#]为自然腐蚀试片(图 2,单位:mm)。总暴露面积 100 cm²/组件,低于前面计算的上限要求。

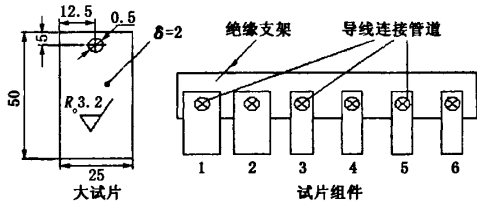


图 2 检查片和检查片组示意图

3 试验实施技术

3.1 试片组制作

按图 2 要求加工和装配试片组件。试片表面打磨至合格,清洗、脱脂、干燥,其端部用钢印打标号,称量达恒重(精确到 0.1 mg);用透明硅橡胶(905 胶)封涂钢印标号及不需暴露的表面;用游标卡尺测量试片长、宽,计算暴露面积。6 片试片通过螺孔连接到支架构成一个组件,其中 1[#],3[#],5[#]与带护套的三芯电缆连接,电缆另一端预留 5~10 m,供现场连接管道测试桩。导线和试片连接部位均用密封胶绝缘。装配好的组件加保护套,保存和待用。

3.2 埋设点布置

在苏浙沪段干线全部 23 个站、阀室及支线 7 个站,共 30 个位置进行埋设。每个位置埋设一个组件(6 片试片)。埋设点位于管道测试桩附近,便于接线。具体埋点位置见表 3。

表 3 站点、阀室平均保护度及腐蚀速率

位置	编号	分输站	阀室	埋片编号	平均腐蚀速率 $u/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$		平均保护度 P
					自然	阴保	
干线	1	上海站		9 [#]	0.0388 ± 0.0118	0.0057 ± 0.0039	0.864 ± 0.062
	2		138 [#]	25 [#]	0.0446 ± 0.0056	0.0020 ± 0.0004	0.954 ± 0.014
	3	角直		11 [#]	0.0591 ± 0.0513	0.0031 ± 0.0006	0.919 ± 0.054
	4		137 [#]	20 [#]	0.0743 ± 0.0575	0.0476 ± 0.0096	0.614
	5		136 [#]	16 [#]	0.0372 ± 0.0107	0.0098 ± 0.0008	0.772 ± 0.009
	6		135 [#]	19 [#]	0.0093 ± 0.0018	0.0025 ± 0.0005	0.728 ± 0.029
	7		134 [#]	3 [#]	0.0669	0.0068 ± 0.0020	0.877
	8		133 [#]	6 [#]	0.0297 ± 0.0054	0.0049 ± 0.0009	0.828 ± 0.059
	9	东桥		2 [#]	0.0046 ± 0.0007	0.0032 ± 0.0003	0.310 ± 0.056
	10	无锡		7 [#]	0.0124 ± 0.0008	0.0084 ± 0.0018	0.235 ± 0.137
	11		132 [#]	12 [#]	0.0030 ± 0.0005	0.0085 ± 0.0009	异常
	12		131 [#]	24 [#]	0.0191 ± 0.0042	0.0026 ± 0.0009	0.868 ± 0.022
	13	芙蓉		15 [#]	0.0338 ± 0.0145	0.0018 ± 0.0004	0.939 ± 0.029
	14	常州		13 [#]			
	15		130 [#]	17 [#]	0.0067 ± 0.0011	0.0005 ± 0.0002	0.928 ± 0.019
	16		129 [#]	22 [#]	0.0147 ± 0.0024	0.0004 ± 0.0002	0.971 ± 0.008
	17		128 [#]	23 [#]	0.0125 ± 0.0012	0.8374 ± 0.0286	异常
	18	镇江		5 [#]	0.0171 ± 0.0071	0.0003 ± 0.0002	0.982 ± 0.015
	19		127 [#]	21 [#]	0.0140 ± 0.0060	0.2707 ± 0.2449	异常
	20	龙潭		10 [#]			
	21	青山		14 [#]	0.0527 ± 0.0040	0.0020 ± 0.0004	0.963 ± 0.006
	22		126 [#]	4 [#]	0.0703 ± 0.0300	0.0017 ± 0.0002	0.973 ± 0.011
	23	龙池		26 [#]	0.0041 ± 0.0009	0.0002 ± 0.0002	0.942 ± 0.041
南	24	南京		28 [#]	0.0198 ± 0.0046	0.0004 ± 0.0003	0.982 ± 0.014
芜	25	马鞍山		1 [#]	0.0344 ± 0.0024	0.0024 ± 0.0012	0.932 ± 0.031
线	26	芜湖		8 [#]	0.0053 ± 0.0002	0.0001 ± 0.0001	0.979 ± 0.011
常	27	武进		27 [#]	0.0147 ± 0.0045	0.0003	0.981 ± 0.008
长	28	宜兴		30 [#]	0.0364 ± 0.0093	0.0004 ± 0.0001	0.988 ± 0.005
线	29	长兴		29 [#]	0.0118 ± 0.0056	0.0009 ± 0.0002	0.912 ± 0.055
杨巴	30	杨巴		18 [#]	0.0183 ± 0.0024	0.0006 ± 0.0003	0.968 ± 0.016

注:上海、芙蓉、镇江、南京、芜湖、宜兴为阴极保护站。

3.3 检查片埋设

埋点附近开挖 $1.0\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 埋片坑(深度应当和埋设管道相同)。坑的长度方向和管道走向平行,以保证检查片能均匀接受保护电流。将检查片架立在坑底,先用少量土壤填实,覆盖整个试片表面。填充土壤应和管道埋设土壤属同一土层,所以特别注意土层次序和回填土的实密性。现场检测3个带导线试片的电极电位,判断试片是否和土壤充分接触。回填土层到原地表高度,并将电缆线沿坑边缘引出,连接到管道测试桩的管道电位接点。

3.4 检查片开挖

开挖前同样检测导线接头是否完好(测量接头电位及试片电位)。开挖后,用数码相机记录检查片表面图像,并带回室内作除锈处理。除锈液为30%盐酸+2%~4%乌洛托品。按试片前后质量计算腐蚀失重并换算成腐蚀速度。

4 试验数据及其分析

4.1 判断干扰条件的管道保护状况

受外部电场严重干扰的安徽马鞍山至芜湖一带,实测管道电位在 $-3.0 \sim 0.0\text{ V}$ (CSE) 内波动,干扰使得芜湖阴极保护站无法正常工作。马鞍山和芜湖开挖后连接管道的检查片受到明显保护,表面覆盖灰白色钙层,而自然腐蚀的检查片则出现腐蚀迹象,见图3。表3数据表明两处管道的保护度都超过了90%。但此结论不能外推,对于其他管道的干扰影响需验证分析。

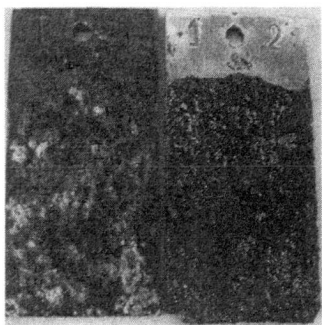


图3 埋设后马鞍山站检查片形貌
(左:连管道;右:自然腐蚀)

4.2 管道沿线的土壤腐蚀性分布

根据自然腐蚀检查片腐蚀速率(表3),发现位于137°、134°和126°阀室附近存在3处较高腐蚀性土壤,对碳钢试片的平均腐蚀速率超过 0.064 mm/

a,而芙蓉站前后相当距离内土壤腐蚀性很低,腐蚀速率小于 0.02 mm/a 。

4.3 沿线管道阴极保护度的分析

在实际获得25组检查片中,保护度超过85%的19个,50%~85%的4个,20%~30%的2个。整体保护状况良好。进一步分析发现,保护度和管道电位的关系密切,见图4。

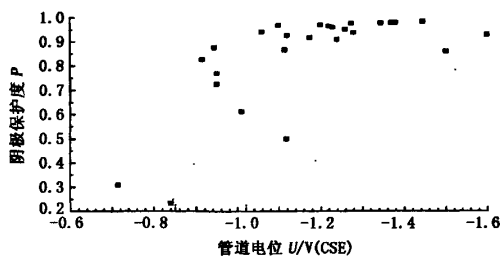


图4 管道测量电位和阴极保护度关系

按管道实测电位(通电)划分图中数据点,得到3个区域:

- (1)当实测电位(通电) $U < -1.02\text{ V}$ 时,管道保护状况良好,保护度均大于85%;
- (2)当实测电位(通电) $U \geq -0.85\text{ V}$ 时,管道保护状况差,保护度均小于30%;
- (3)当实测电位(通电)位于 $-0.85 \sim -1.02\text{ V}$ 时,管道保护状况不确定。

为确保阴极保护效果良好,实测管道电位(通电)应控制在小于 -1.02 V (CSE),即该地区实测电位的平均IR降为: $-0.85 - (-1.02) = 0.17(\text{V}) = 170(\text{mV})$ 。这个方法比新标准提供的IR降估计方法^[1]更加简单和容易实施。

4.4 管道阴极保护系统容量的分析

试验采用大、小检查片检验阴极保护系统的容量。如果容量不够,会出现大试片保护度明显低于小试片的现象。检验方法是统计两类试片保护度,计算其差值,按配对对比试验处理数据^[5]。

- (1)按大、小试片保护度(均值)列出全部试验值,并计算其差值。
- (2)判别大、小试片保护度的差别。以大、小试片保护度差值为样本,统计其均值 $\bar{d}$ 和标准差 s 。并按下式计算 t 值:

$$t = \frac{|\bar{d}|}{s/\sqrt{k}}$$

式中, k 为配对试验的“对数”。

剔除不全的数据,共有21组配对数据,计算后得: $\bar{d} = -0.0238$, $s = 4.115$, $t = 0.0265$, $t_0 = 1.32$ (α

=0.2), 2.85($\alpha=0.01$), 检验结果无差异。

(3) 结果检验。查表得到标准 t_0 值。按常规, 检验两类数据无差异时应选用较低置信度, 如 $\alpha=0.2$, 得 $t_0=t_{20,0.2}=1.32$ 。计算值 $t=0.0265$ 远小于标准 t_0 值, 故两类数据无差异。

上述分析结果表明, 该阴极保护系统容量至少覆盖大、小检查片的面积变化。这个试验结果也为以后同类 3PE 管道的检查片设计提供了依据。

4.5 沿线管道保护电位的衰减曲线

根据检查片试验, 结合管道电位月报表绘制得干线管道保护电位衰减曲线, 见图 5(横坐标是干线 350 个分输站、阀室和测试桩的编号, 代表它们的相对位置)。可见, 东桥、无锡位于主干线阴极保护站的末端, 保护电位衰减过快, 存在接地的可能。

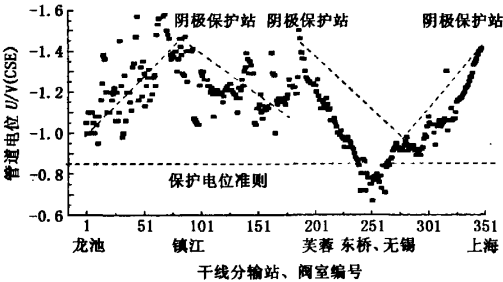


图 5 沿线管道保护电位衰减趋势

4.6 管道外腐蚀危害的风险分析

用风险评价^[6-7]和危险性矩阵^[8]方法, 分析管道外部腐蚀的高风险管段和主要原因。以环境腐蚀性(自然腐蚀试片腐蚀速度)对“不保护度”作图, 得图 6。

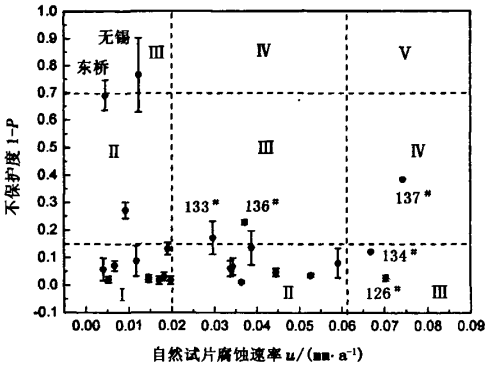


图 6 管道外腐蚀的危险性矩阵

由图 6 可知, 调查区域内无管段处于最高风险(V); 137#管段位于次高风险(IV), 保护后腐蚀速度仍高达 0.048 mm/a; 中等风险(III)管段有: 133#, 134#, 136#, 126# 和无锡、东桥, 其中, 134#, 126# 的风险源于环境腐蚀性强; 无锡、东桥风险源于阴极保护效果差。全部试验管段的外腐蚀风险等级和对危险来源的整改措施见表 4。

表 4 各试验点管段外腐蚀危险风险等级和整改措施

管段	风险等级	危险性来源	整改措施
南芜线	I 和 II	地电场干扰, 需要监控	排流、恢复阴极保护控制
常长线	I 和 II	无明显特征	
126#	III	土壤腐蚀性强	加强外涂层, 提高阴极保护效率
南京附近	I 和 II	无明显特征	
镇江附近	—	管地电位波动, 缺乏保护度数据	需要增补检查片试验
芙蓉附近	I 和 II	无明显特征	
东桥-无锡	III	保护电位过低(正)	消除不当接地, 提升保护电位
136#-133#	III	土壤腐蚀性强	加强外涂层, 提高阴极保护效率
137#	IV	土壤腐蚀性强, 阴极保护效率低	加强外涂层, 提高阴极保护效率
上海-角直	I 和 II	无明显特征	

5 结 论

(1) 受杂散干扰的芜湖、马鞍山等管道保护状况良好, 但对于其他管道的干扰影响需验证分析。

(2) 137#, 134# 和 126# 阀室附近土壤腐蚀性较高, 对碳钢的腐蚀速度超过 0.064 mm/a, 而芙蓉站附近土壤腐蚀性很低, 腐蚀速度小于 0.02 mm/a。

(3) 该地区管道电位的平均 IR 降为 170 mV, 即保护电位准则应取 -1.02 V(CSE)。

(4) 该阴极保护系统容量至少覆盖试验中大、小检查片面积的变化, 为以后同类 3PE 管道的检查片设计提供了依据。

(5) 东桥、无锡处管道保护电位衰减过快, 存在接地的可能。

(6) 大多数试验点保护度达 85%, 阴保系统整体发挥良好, 无管段处于外腐蚀高风险区; 137# 阀室管段位于次高风险区; 有 4~6 处管段位于中等风险区。

参考文献:

- [1] ANSL/NACE. RP 0104-2004 The use of coupons for cathodic protection monitoring applications [S]. Houston, Texas: NACE International, 2004.
- [2] 翁永基, 阎茂成, 李相怡. 断电法消除管道阴极保护电位 IR 降研究[J]. 油气储运, 2002, 21(5): 30-34.
WENG Yong-ji, YAN Mao-cheng, LI Xiang-yi. Study on abilities of the current-cut-off method to eliminate IR drops inherent in cathodic protective potentials [J]. OGST, 2002, 21(5): 30-34.
- [3] 翁永基, 李相怡. 埋地管道阴极保护电位 IR 降评估方法的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(5): 360-362.
WENG Yong-ji, LI Xiang-yi. Evaluation modeling of IR drops for CP potential of buried pipeline [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(5): 360-362.
- [4] 翁永基. 土壤腐蚀试验的设计安排[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991, 3(2): 17-24.
WENG Yong-ji. Design and arrangement of soil corrosion test [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1991, 3(2): 17-24.
- [5] 曹楚南. 腐蚀试验数据的统计分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988: 37-39.
- [6] MUHLBAUER W K. Pipeline risk management manual [M]. 2nd ed. New York: Gulf Publishing Company, 1996.
- [7] DNV. RP-G101-2002 Risk based inspection of offshore topside static mechanical equipment [S]. Det Norske Veritas, 2002.
- [8] 严大凡, 翁永基, 董绍华. 油气长输管道风险评价与完整性管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 240.

(编辑 沈玉英)

(上接第121页)

3 结束语

支持向量回归方法是一种不依赖非线性函数形式的通用拟合方法, 预测精度高、推广性好, 能有效克服维数灾难, 是处理小样本资料有效的多元回归工具。本文中以内管流实验数据为基础, 应用支持向量回归方法得到了计算胶凝原油管道启动屈服应力的预测模型。该模型具有较高的预测精度和较好的推广性, 预测公式直观简洁, 便于计算和应用。

参考文献:

- [1] 张国忠, 刘刚. 大庆胶凝原油启动屈服应力研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 91-93.
ZHANG Guo-zhong, LIU Gang. Investigation on start-up yield stress of Daqing gelled crude oil [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(6): 91-93.
- [2] CHENG Chang, DAVID V Boger. The yielding of waxy crude oils [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, 37(4): 1551-1559.
- [3] 杨筱蘅. 输油管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.
- [4] MALCOLM R, DAVIDSON Q, DZUY Nguyen. A model for restart of a pipeline with compressible gelled waxy crude oil [J]. Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 2004, 123: 269-280.
- [5] 刘刚, 张国忠. 胶凝原油启动屈服值多元回归分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2003, 16(3): 58-61.
LIU Gang, ZHANG Guo-zhong. Multivariate regression analysis of the yielding stress of gelled crude oil [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2003, 16(3): 58-61.
- [6] 刘刚. 胶凝原油管流特性研究[D]. 东营: 石油大学储运与建筑工程学院, 2003.
- [7] 王才经. 现代应用数学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004: 117-126.
- [8] 杜树新, 吴铁军. 用于回归估计的支持向量机方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1580-1585.
DU Shu-xin, WU Tie-jun. Support vector machines for regression [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1580-1585.
- [9] 苏金明, 张莲花, 刘波. MATLAB 工具箱应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(编辑 沈玉英)