埋地管道综合参数异常评价法的应用效果

李永年[1]，李晓松，姚学虎，尚　兵，吕桂玉
（中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院，保定 071051）

摘　要　综合参数异常评价法是一种不同于其它地面检测的方法，该方法除检测防腐层的绝缘电阻外，还能检测防腐层视电容和管体视电阻，综合评价埋地管道的防护缺陷和腐蚀状况。本文在详细阐述了综合参数异常评价法机理的基础上，给出了几种防腐保温管道上的应用实例。经过多个工程的实际检验证明：综合参数异常评价法适用于不同检测环境、输送介质（气相、液相）、规格与材质、防腐（保温）层结构的埋地金属管道的地面检测工作，能够对埋地管道腐蚀与防护状况做出较为完整的评价。

关键词　管道，腐蚀，检测，效果

APPLICATION EFFECT OF "THE METHOD OF SYNTHETIC PARAMETERS ABNORMALITY EVALUATION"

LI Yong-nian, LI Xiao-song, YAO Xue-hu, SHANG Bing, LU Gui-yu
(Geophysical Exploration Institute of CEEB, BaoDing071051)

Abstract　Synthetic Parameter Abnormality Evaluation is an method different from other ground prospecting methods. After the sketch of the principle of Synthetic Parameter Abnormality Evaluation method, some related cases are presented. All mentioned cases indicate that Synthetic Parameter Abnormality Evaluation is a valid technology adapt to different prospecting environments and different pipelines.

Key word　Pipeline，Corrosion，Detection，Effect

1　引言

与其它地面检测方法不同，综合参数异常评价法除了检测防腐层的绝缘电阻以外，还能检测防腐层的视电容和管体的视电阻。它在埋地钢质管道不开挖检测工作中的主要用途是：

---

[1]　李永年，男，汉族，1943 年生于陕西勉县，1967 年毕业于长春地质学院地球物理勘探专业。现任中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院应用地球物理工程公司总工程师，教授级高级工程师。一直从事固体金属矿产及石油天然气地球物理勘查，工程与水文地球物理勘察工作。自 1985 年以来，长期进行地下管网探测、泄漏调查、腐蚀检测与监测等方法技术的研究工作。
（Email：gebmmi@heinfo.net 或 lyn@gebmmi.com）

（1）按 SY/T 5918-94 等有关规定分级评价管道防腐（保温）层的绝缘性能和介电特征；确定防腐（保温）层缺陷（老化、渗水、剥离、破损）和防护失效部位；

（2）探查管体及其配设管件的金属腐蚀或疲劳损伤状况；确定腐蚀或疲劳损伤段（点）的位置。

众所周知，表征某种物质电磁特性的参量是电导率σ、磁导率μ和电容率ε。一般地说，管道防腐（保温）层的材料无磁性，因此，大多数情况下只须用面电阻（亦称防腐层绝缘电阻）和材料损耗角正切来描述其电学性质：

$$\rho_f = \frac{d_f}{\sigma}$$

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

式中：ρ_f和d_f是防腐（保温）层的绝缘电阻和厚度，σ、ε、δ分别是防腐（保温）材料的体电导率、电容率、损耗角，ω是测试角频率。

管道埋入地下并运行一个阶段后，无论是防腐（保温）层的材料电学性质还是管体金属的电学性质，都会由于各种原因而发生复杂的变化。地面检测的目的就是要探查这些变化，评估这些变化对管道安全运行的影响。因此，任何假定一些（或一个）参量不变而求得某个（或某些）参量的地面检测方法，都不可能对管道是否存在安全运行隐患做出完整客观的评价。综合参数异常评价法采用“一体化”的原位检测技术，并利用综合参数对被检测管道进行整体评价，即同时考虑防腐（保温）层的视电容率和绝缘电阻以及金属管体的视电阻率。

2 综合参数异常评价法的机理

2.1 埋地管道地面检测问题的表述

检测对象的物理模型断面如图 1。图中管道中心埋深为h；防腐（保温）层的外径为c，管体外径为b，防腐（保温）层的厚度为$d_f = c - b$，管壁厚度为d，管体

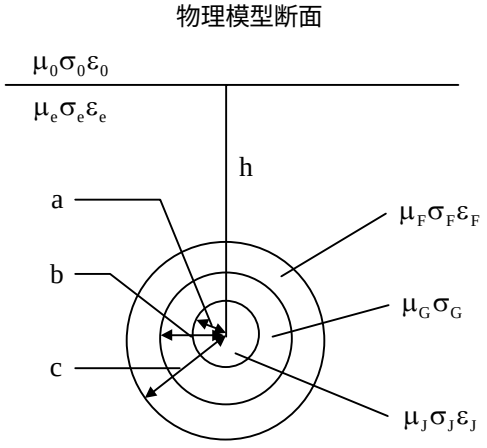


图 1

内径为 $a=b-d$ ；管材的电导率、磁导率分别为 σ_G 、 μ_G ；管内介质的电导率、磁导率、介电常数分别为 σ_J 、 μ_J 、 ε_J ；防腐层的电导率、磁导率、介电常数分别为 σ_F 、 μ_F 、 ε_F ；管道围土介质和空气介质的电导率、磁导率、介电常数分别为 σ_e 、 μ_e 、 ε_e 和 σ_0 、 μ_0 、 ε_0 。

此外，检测信号为 $I_i = I_{0i} \cdot e^{-\gamma(\omega_i t)\cdot(x-x_0)}$ ，其中 I_{0i} 是加载信号的振幅， $\gamma(\omega_i t)$ 是信号角频率为 ω_i 时的传播常数， $x-x_0$ 是观测点与信号加载点之间的距离；

干扰信号为 $n=\sum_{j=1}^{s} I_{0j} \cdot e^{\gamma(\omega_j t)\cdot(x-x_{0j})}$ ，其中 s 是干扰信号的个数， I_{0j} 是某个干扰信号的振幅， $\gamma(\omega_j t)$ 是该干扰信号的传播常数， ω_j 是其角频率， $x-x_{0j}$ 是观测点与该干扰信号进入（直连或耦合）管道点之间的距离。

对物理模型作适当的简化后，建立起观测信号与检测物理量（管体视电阻、防腐层绝缘电阻和视电容率）之间的关系。

2.2 管体视电阻

令管体的等效电阻率和等效磁导率分别为 ρ_{DX} 、 μ_{DX} ；充满介质的管体视电阻 R_m 定义为：

$$R_m = sqrt(\mu_{DX} \cdot \rho_{DX})$$

$$\rho_{DX} = \frac{b^2 \cdot \rho_G \cdot \rho_J}{b^2\rho_J - a^2(\rho_J - \rho_G)}$$

$$\mu_{DX} = \frac{1+\kappa}{1-\kappa}$$

$$\kappa = (\frac{\mu_G - \mu_J}{\mu_G + \mu_J}) \cdot \frac{(b^2-a^2)(\mu_G+\mu_J)}{b^2(\mu_G+\mu_J) - a^2(\mu_G-\mu_J)}$$

管体视电阻即为单位长度管体的轴向归一化等效电阻。管体视电阻异常与管道腐蚀以及疲劳损伤现象之间存在密切的依存关系[1]，根据视电阻异常可以分析管体腐蚀与疲劳损伤程度，探查管体腐蚀缺陷的部位。

2.3 防腐（保温）层的绝缘电阻与视电容率

防腐层绝缘电阻（ R_f ）是指单位长度防腐层的横向归一化面电阻；防腐层视电容率（ E_f ）是指管体与大地之间单位长度防腐介质的归一化等效电容。两

者之间有如下关系：

$$R_f \cdot E_f = \omega \cdot tg\delta_f$$

式中ω是测试频率，$tg\delta_f$是防腐层的视损耗角正切。

防腐（保温）层的绝缘电阻和视电容率都是检测计算值，它们与被检测管段的管体实际电导率、磁导率以及围土电导率的大小密切相关[2]。

综上所述，仅用防腐层绝缘电阻一个参量既不能完整地评价防腐保温层的性能，也不能查明管体腐蚀的部位。显然，需要采用更为适用的检测手段。以下是采用“综合参数异常评价法”检测评价在线管道的几个实例。

3 综合参数异常评价法的应用实例

3.1 在输油管道上的应用

被检管段长 4500m，埋深 1.7m 左右，平行公路敷设。管径 426mm，壁厚 7mm，加强级沥青玻璃布防腐层。具体检测任务是：对管道的外防腐层的总体状况进行检测与评价，对破损点进行精确定位；利用瞬变电磁法对管体金属蚀失量进行评估，提供剩余管壁厚度。

检测工作分为两个阶段进行。首先使用 PCM（管中电流检测仪）进行观测（点距为 25m），采用视综合参数异常评价软件（FER-PCM 2.0）分析检测数据，根据绝缘电阻和视电容率两个参数评价防腐层性能；与此同时，圈定管体视电阻异常部位作为重点研究区段。第二阶段则使用 GDP-16 综合电法采集系统，在管体视电阻异常（腐蚀）部位进行金属蚀失量检测，通过专用软件（FuShi 2.0）处理、分析数据，得到被测管段的平均剩余管壁厚度。

检测报告提交之后，开挖 18 处进行验证，结果如表 1：

表 1 检测评价结果与开挖验证结果对照表

开挖部位（n 米处）	检测评价结果			开挖验证结果	
	绝缘电阻	视电容率	壁厚(mm)	防腐层性能观察描述	壁厚(mm)
-2684.5	五级	五级	未检测	外观平整、基本完好	7.12
-2268.3	三级	三级	6.74	老化、无粘结力、破损	6.63
-2126.5	四级	五级	6.76	剥离、补口无沥青	6.49
-2039	五级	五级	6.98	局部变脆、剥离进水	6.92
-1950	五级	五级	7.88	局部变脆、少量进水	7.73
-287.5	三级	三级	未检测	剥离进水、底漆完整	7.15
250	二级	三级	7.00	完好、粘结力强	6.88

277	三级	负值异常	7.06	点状腐蚀瘤浸透防腐层	7.16
285.5	三级	负值异常	未检测	点状腐蚀瘤浸透防腐层	7.20
303.8	五级	五级	7.36	完好、粘结力强	7.20
315	五级	五级	6.93	完好、粘结力强	6.74
320	五级	五级	6.95	点状腐蚀瘤浸透防腐层	6.70
323	五级	五级	6.52	点状腐蚀瘤浸透防腐层	7.03
325	四级	负值异常	6.94	点状腐蚀瘤浸透防腐层	7.00
525	四级	四级	7.35	完好、粘结力较强	6.84
600	四级	五级	7.22	完好、粘结力较强	6.53
724	二级	三级	6.83	局部变薄、粘结力较好	7.13
743	四级	四级	未检测	点状腐蚀瘤浸透防腐层	7.18

表 1 中，涉及到 14 个管段（其中 277~285.5 同属一段，303.8~323 同属一段）的防腐层评价。开挖验证表明：检测评价结果至少有 11 段与实际情况相符，符合率至少为 78.57%；其余（-2684.5、525、600）三个开挖点所在管段的防腐层性状应与 303.8~323 开挖点所表征的相当。图 2 和图 3 是两个典型代表。



图 2　点状腐蚀瘤浸透防腐层



图 3　防腐层老化、破损

表 1 中还给出了管壁厚度检测结果与实测（采用超声测厚仪，精度 0.01mm）结果的对比，其中，与实际管壁厚度的偏差小于 5%的有 11 处，占 78.57%；介于 5%~10%之间的 2 处，占 14.28%；大于 10%的 1 处，占 7.14%。

检测评价工作取得了令人满意的效果。

3.2　在“ 黄夹克 ”防腐保温管道上的应用

被测管道规格为φ159×7mm 及φ159×8mm，全长 15.1km，建于 1988 年年底。大部分是底漆（无其它防腐层）——保温泡沫——防水黄夹克和胶带——保温泡沫——胶带补口的防腐保温结构，只有少量管段是胶带——热塑套——保温泡沫——防水黄夹克和胶带——保温泡沫——胶带补口的防腐保温结构。不同规格与防腐保温结果的管段相互混杂。随着运行年限加长，事故率逐

年上升，腐蚀穿孔时有发生。

本次检测的目的在于调查该管道的腐蚀与防护状况以及导致管道腐蚀穿孔的原因。检测时使用 RD-PCM，按 50 米点距（局部地段加密至 5 米）依次分别采集 4Hz、128Hz、640Hz 的等效电流数据和管道中心埋深数据，数据采集的平均均方误差为 2.25%。

采用评价软件 FER-PCM 2.0 分析检测数据，防腐层性能的分级标准如表 2：

表 2　防腐层性能分级标准表

级　　别	视电容率（μF/m）范围	绝缘电阻（Ω.m²）范围
一　级	E_f ＜100	R_f ＞10000
二　级	100≤ E_f ＜200	10000≤ R_f ＞5000
三　级	200≤ E_f ＜500	5000≤ R_f ＞3000
四　级	500≤ E_f ＜1000	3000≤ R_f ＞1000
五　级	E_f ≥1000	R_f ≤1000

管体视电阻的背景值为 $4.27\times10^{-6}\Omega/m$，样本统计均方差为 $4.17\times10^{-7}\Omega/m$。具体情况见表 3：

表 3　管体视电阻统计分析表

均方差范围	累计长度（m）	所占比例（%）
小于一倍均方差	10953	78.78
一至二倍均方差	750	5.39
二至三倍均方差	550	3.96
大于三倍均方差	1650	11.87

在空间分布上，腐蚀穿孔多发管段与管体视电阻异常管段关系密切。同期的坑探调查证实：大于其背景加三倍均方误差的管体视电阻异常多数是由干扰（低频数据信噪比低）引起的，少数则反映管材差别或两种不同防腐保温结构的接合部位。

根据地面检测的分析结果，确定了 5 个验证点和 5 个取证点进行开挖检验，具体布置情况如表 4：

表 4　验证与取证探坑布置表

探坑序号	探坑部位（m-m）	开挖目的
1	4472-4479	R_f 五级、E_f 五级、Rm5.380；缺陷点，验证
2	4765-4770	R_f 二级、E_f 三级、Rm8.469；取证点，怀疑局部腐蚀

3	5040-5045	R_f 二级、E_f 三级、Rm17.04；取证点，不明性质
4	5770-5775	R_f 二级、E_f 四级、Rm4.600；取证点，典型
5	5929-5936	R_f 五级、E_f 三-五级、Rm0.218-3.911；缺陷点，验证
6	6039-6046	R_f 五级、E_f 五级、Rm4.536；怀疑缺陷点，验证
7	6409-6416	R_f 二级、E_f 四级、Rm3.537；缺陷点，验证
8	6626-6634	R_f 五级、E_f 五级、Rm5.518-4.255；缺陷点，验证
9	7774-7780	R_f 一级、E_f 一级、Rm4.348；取证点，典型
10	8724-8730	R_f 二级、E_f 四级、Rm4.259；取证点，典型

限于篇幅，只将 5 个开挖验证结果简述如下：

1 号探坑（4472-4479）：夹克变形，泡沫老化充水，原修补处玻璃棉保温层充水，与检测结果吻合。管体底部分布大小不等的三处腐蚀（图 4 为其之一），腐蚀最宽处为 21 厘米，蚀坑最深处约为 2～3 毫米，腐蚀产物主要为黑色或棕黑色层状坚硬物。



图 4　1 号探坑的管体局部腐蚀

5 号探坑（5929-5936）：夹克严重变形，泡沫老化充水，原修补处玻璃棉保温层充水、剥离，与检测结果吻合。管体有两处大面积局部腐蚀：一处距坑头 20 厘米，位于管体底部，长 49 厘米，宽 26 厘米（图 5）；另一处距坑头 387 厘米，位于管体底部，长 28 厘米，宽 20 厘米。



图 5　5 号探坑的局部腐蚀之一

6 号探坑（6039-6046）：夹克变形，泡沫老化程度与同为五级的 1 号探坑和 5 号探坑的相类似，补口处胶带密封不严，粘结力差，易剥离，与检测结果吻合。管体表面均匀分布有鱼鳞状蚀坑，底部蚀坑较大较深，腐蚀较重，腐蚀产物主要为红棕色的松散粉状物。



图 6　6 号探坑的面状腐蚀与划痕

7 号探坑（6409-6416）：原修补处玻璃棉保温层严重充水剥离，与检测结果吻合。管体视电阻低于背景值是由补强（补丁

和“ 套袖 ”）造成的，未发现新的腐蚀迹象（图 7）。

8 号探坑（6626-6634）：泡沫保温层明显老化充水，整体呈深棕黄－棕红色，接近管体部位呈棕黑色，板结，易剥离。补口处胶带变形发脆，粘结力差，易剥离。原修补处玻璃棉充水剥离，与检测结果吻合。管体分布三处大面积腐蚀：一处位于管体出露东端和焊缝之间的管体底部，长 58 厘米，宽 27 厘米（图 8）。另两处在焊缝西侧，一处长 58 厘米，沿管体周向分布；另一处长 50 厘米，宽 46 厘米。腐蚀产物为黑色或棕黑色的松散层状物，以及红棕色的松散粉状物，经取样分析，主要成分为 Fe_2O_3（占 88.98%）。



图 7　7 号探坑的补丁和“ 套袖 ”



图 8　8 号探坑的管体局部腐蚀之一

开挖检验取得了以下几方面的结果：一是证明了拟为判断“ 缺陷管段 ”的异常标志是正确的；二是查明了“ 性质不明异常 ”的原因；三是明确了“ 可继续运行 ”（正常）管段和“ 隐患 ”管段的判别依据。

3.3　在城市燃气管道上的应用

检测工作布置在在不同干扰环境的地段上。涉及到管径为 273、426、478、529、630、1000mm，壁厚 7、8、10mm 的 9 种规格的管材。具体任务是：对管体金属蚀失量进行评估，提供金属蚀失量或平均剩余管壁厚度数据；对管道的外防腐层绝缘性能进行检测与分级评价，对破损点及防腐层绝缘性能严重下降部位进行精确定位；根据检测结果，提出管道维护和管理建议。

检测总工作量为 20.466 公里，检查观测点数占总观测点数的 11.66%，按管段长度加权的平均均方相对误差为 2.66%。开挖验证 6 处，情况如表 5：

表 5　城市燃气管道腐蚀检测与开挖验证结果对照表

地　点	检　测　结　果			开 挖 验 证 结 果		
	防 腐 层 绝缘等级	金属蚀失量 (%)	剩余平均管壁厚度(mm)	防腐层耐压 (KV)	金属蚀失量 (%)	剩余平均管壁厚度(mm)
虹山东路 534-536	一级	0-9.40	9.06-10.00	5	0.7	9.93
护 国 路 18-22	五级	0.25-2.75	7.78-7.98	—	1.88	7.85
董 家 湾 724-726	一级	0-4.57	6.68-7.00	4-6	0.43	6.97
环城南路 187-191	一级	0-0.75	6.94-7.00	5-6.5	2.29	6.84
马　街 174-176	四级	0.50-10.13	7.19-7.96	0.4-8	4.00	7.68
关上北路 448-450	一级	1.88-5.00	7.60-7.85	—	3.75	7.70

下面简述其中 2 处开挖验证情况：

关上北路（448-450）开挖验证结果：防腐层外包覆的塑料布完好，塑料布下的沥青粘度很好，无老化现象，防腐层与管体之间粘结力强，较难剥离。根据《埋地钢质管道沥青防腐层大修理技术规定》，防腐层等级应属于一级，与实测结果一致。448.93-449.36 米弯头焊口间见有条带状分布的蚀坑（见图 9），是金属疲劳导致电偶腐蚀的结果；管体腐蚀主要发生在内壁，448-450 段地面检测剩余平均管壁厚度为 7.60～7.85mm，开挖后采用超声波测厚仪实测平均剩余管壁厚度为 7.70mm，检测结果与实际相符。



图 9　管顶点蚀坑

马街（174-176）开挖验证结果：防腐层外表不均匀（见图 10），有针孔与充水现象，用火花仪检测防腐层耐压为 0.4-8KV；剥离时发现沥青老化、发脆，防腐层与管体易剥离，与地面检测是判定的等级（四级）相符。174-176 地面检测剩余平均管壁厚度为 7.19～7.96mm 之间，超声波测厚仪实测为 7.68mm，检测结果符合实际。开挖时管体外表面未见腐蚀现



图 10　防腐层与牺牲阳极

象，金属腐蚀主要发生在内部。马街开挖点的中心正好与牺牲阳极的接管点重合（见图 10）。毫无疑问，这给检测数据的判译带来了影响（牺牲阳极馈电处，信噪比较低，误差相对较大）。

上述情况表明，尽管城市燃气管道腐蚀检测难度较大[3]，但只要采用恰当的手段[4]，也可获得较好的效果。

4 结束语

经过多个工程的实际检验证明：“ 综合参数异常评价法 ” 适用于不同检测环境、输送介质（气相、液相）、规格与材质、防腐（保温）层结构的埋地金属管道的地面检测工作，能够对埋地管道腐蚀与防护状况做出较为完整的评价。通常，该方法应与 “ 金属蚀失量检测方法 ” 配合使用，即首先对在线管道腐蚀程度与防腐状况进行快速的全面调查，然后对所圈定的腐蚀管段与怀疑腐蚀管段作重点评价，这样可以得到事半功倍的效果。

参考文献：

[1] 李永年，李晓松，吕桂玉．管体视电阻率与腐蚀和疲劳损伤的关系［J］．地下管线管理，2002，30(6)：18～21.

[2] 李永年，李晓松，吕桂玉．提高埋地管道防腐层分级评价的可靠性［J］．地下管线管理，2002，28(4)：34～36.

[3] 李永年，李晓松，吕桂玉．城市埋地燃气管道腐蚀状况地面检测的问题与建议［J］．地下管线管理，2002，26(2)：15～17.

[4] 李永年,李晓松，吕桂玉．关于城市燃气埋地管网腐蚀检测方案的建议［J］．地下管线管理，2003，32(2)：20～22