

# 钢质管道防腐层评价模型的发展 交变电流梯度法

林守江

(天津市嘉信技术工程公司)

**摘要:** 外防腐层性能的评价是埋地钢质管道防腐蚀检测技术的重要内容。评价模型的完善与发展是近年来业界关注的重点。作者在多年推广应用管道外防腐层检测系统、开发管道防腐数据处理 Estec 软件经验的基础上,结合多年研究成果,完善和发展了基于交变电流梯度法的防腐层评价模型。

## 一、引言

随着我国对埋地管道运行安全重视程度及管理水平的日益提高,外防腐检测设备的应用越来越普及,也要求相关的检测方法和技术不断发展和完善。自 1996 年嘉信公司推出埋地管道防腐层数据处理软件 GDFFW 以来,在我国的石油、化工、城市燃气及管道输送行业已有百余套检测系统应用,对相关行业所属管线的维护检测工作发挥了重要作用,为广大用户取得了可观的社会、经济效益。但是,随着应用领域的扩大,使用经验的增加,我们逐渐发现基于多频管中电流法的评价模型,由于埋地管道防腐层检测评价问题的复杂性,以及受当时的技术条件、开发者经验的局限,采用的方法存在适用管道防腐类型少、参数选择困难、所需采集数据的工作量大、物理数学模型不完备等问题。近两年来,嘉信公司在解决用户应用中发现的问题、广泛吸收总结用户经验的基础上,对多频管中电流法进行了重新研究和完善,开发出了交变电流梯度法的防腐层数学评价模型,并将防腐层数据处理软件升级为 Estec xp 版。

## 二、交变电流梯度法的原理

### 2.1 交变电流梯度法简介

交变电流梯度法是通过在管道和大地之间施加某一频率的正弦电压,给待检测的管道发射检测信号电流,在地面上沿路由检测由管道电流产生交变电磁场的强度及变化规律。采用这种方法不但可找管定位,还在很大程度上排除了大地的电性和杂散电流的干扰,具有很好的实用性。同时,通过管道上方地面的磁场强度换算出管中的电流变化,可以判断出管道的支线位置或破损缺陷等。其原理是:管道的防腐层和大地之间存在着分布电容耦合效应,且防腐层本身也存在着弱而稳定的导电性,使信号电流在管道外防腐层完好时的传播过程中呈指数衰减规律,当管道防腐层破损后,管中电流便由破损点流入大地,管中电流会明显衰减,引发地面的磁场强度的急剧减小,由此可对防腐层的破损进行定位。在得到检测电流的变化情况后,根据评价模型可推算出防腐层的性能参数值  $R_g$ 。然而,这是一个相对比较的过程,该过程受到不同检测频率、管道结构等因素的影响。为消除包括管道规格、防腐结构、土壤环境等因素的影响,将均匀传输线理论应用于管一地回路,建立相应的数学模型,可以有效地分析及消除上述影响,定量地对管道的防腐层质量进行综合评价。

### 2.2 多频管中电流法存在的问题

嘉信公司在开发和推广外防腐层评价方法的初期，采用的是基于多个频率对管道进行重复检测，避开直接给出不易确定的参数，称之为“多频管中电流法”的方法。但是，多频的方法是以增加检测工作量为代价的。同时，经实际应用发现，三频反演得到的电容、电感数值其合理性值得怀疑。在大量的检测经验基础上，嘉信公司通过软件推荐给用户经验的电容电感数值，一定程度上解决了用户在确定参数时遇到的困难。此后的方法不要求对管道进行三频检测，提高了用户的检测效率。经过对模型的不断完善，近来已经有了很大的改进，为了确切地反映方法的完善，将方法重新命名为“交变电流梯度法”。

经过对“多频管中电流法”的多年应用，归纳出方法存在的主要缺陷是：

1) “多频管中电流法”检测管道防腐层所依据的是“线传输函数”模型，要通过纵向电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  的参数输入来求解防腐层绝缘电阻  $R_g$ 。在单频检测时，正确给定  $C$ 、 $L$  值至关重要。电容  $C$  则与防腐层的厚度、结构以及组成物的介电常数有关，电感参数的影响因素更为复杂。原来推荐的三频方程联立求出  $C$ 、 $L$  值的方法因检测工作量成倍加大，三频方程的一致性不高，无法保证求出的  $C$ 、 $L$  值可用。此时的多频检测存在着明显的局限性和急待克服的缺陷。

2) 管道纵向电阻未能考虑交流信号的因素

在求解  $R_g$  的过程中，准确计算管道的管道纵向电阻也很重要。钢管的磁导率很高，即便检测信号频率不高时，交流信号的趋肤效应也不能忽略。简单地用管材的直流电阻不能正确反映交流信号下的电磁参数。管材电磁参数受管径、壁厚以及管体成型方法（无缝、直缝、螺旋焊缝）的制约相当明显；管道运行时间越长，其有效电磁参数与初始埋设时的差别也就越大。

3) 土壤电阻率的影响不能忽略

使用过电流梯度法的人都会发现，管道埋设的土壤环境对检测电流衰减规律的影响显而易见，不考虑土壤电阻的差异是不能有效应用电流梯度法，完成管道的评估。

4) 伴行管道的影响不可忽略

管道的埋地环境千差万别，目标管线附近存在伴行管线的情况并不少见。伴行管线与目标管线的电磁耦合作用十分明显，直接会以互感的方式影响管道的电感值。我们知道，电感  $L$  不仅与管道的有效电磁参数有关，而且还取决于管体直径以及管外围土壤介质的电磁参数变化情况。因此，仅仅经验性地指定管道参数是难于得到符合实际的检测结果的。

### 三、交变电流梯度法对评估模型的完善

#### 3.1 管一地回路的等效电路

研究交变电流检测信号沿管道的传播过程，既可用电磁场理论，也可用电路理论加以分析和解释。从电磁学和天线理论入手研究，其过程中情况较为复杂，涉及的变量太多，一些边界条件也较难以精确的给出。从电路理论的角度出发，则涉及的变量较少，模型也较为简单。

当在管道和大地之间施以交流信号时，用电路理论分析电流信号在回路过程中的传输过程，则必须把这一回路进行电路等效，即建立有效的电路模型。实际上，我们可以把管一地回路看成一个分布参数电路，基本参数可归结为纵向分量阻抗和横向分量导纳。考虑大地电阻和电容的影

响，可以对管地回路中的一个微分段作图 1 所示的等效。图中：R 表示管道的纵向阻抗，L 表示

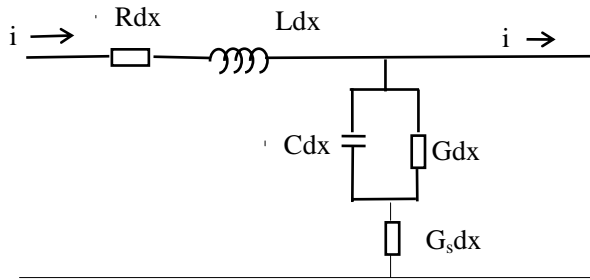


图 1 管—地回路的微段等效电路

管道电感，Gs 表示土壤的内阻抗，G 表示为管道防腐层横向漏电导纳，C 表示管道的分布电容。在理论上，在一定的测量范围内，可以把原本并不均匀的参数看成均匀地分布于回路的每一微段之中，电路模型得以大为简化。

### 3.2 交变电流梯度法的模型

根据电磁学中的有损耗均匀传输线理论，当将一交变正弦检测信号由发射机馈入管—地回路中时，信号的衰减幅度远大于专用传输线，检测工程中，回路的损耗远大于理想传输线，可将回路视为特性阻抗的传输线，此时的传输线处于匹配状态，反射波不存在，除未竣工管道或靠近绝缘法兰的管段等特殊情况下，通过入射波传输的功率全部被负载吸收。由于信号的传输距离有限，大部分情况下管道的长度远远大于有效传输距离，都可以看成是无限长的。满足如下传输规律：

$$I = Ae^{-\alpha x} \quad (1)$$

而被称为衰减常数 $\alpha$ 与管—地回路参数满足如下关系式：

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(RG - \omega^2 LC) + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (2)$$

在实际检测中发射的是交变检测信号，回路中的电磁场为正弦电磁场。管中的检测等效电流值，记为 $I_{am}$ ，单位为安培。它可用磁场检测仪在地面测得。假设经过换算得到的电流值为该处管道内电流的有效值：

$$I_{am} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} e^{-\alpha x} = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

从电流与管线检测距离 $X$ 的 $I_{am}-X$ 曲线不易直接看出它与衰减系数之间的关系。将安培为单位的电流 $I_{am}$ 按公式 $I_{dB} = k + 20 \times \log_{10} I_{am}$ 转换成成分贝电流后， $I_{dB}-X$ 曲线则是一条倾斜的直线，其斜率 $Y$ 与 $\alpha$ 成正比关系。

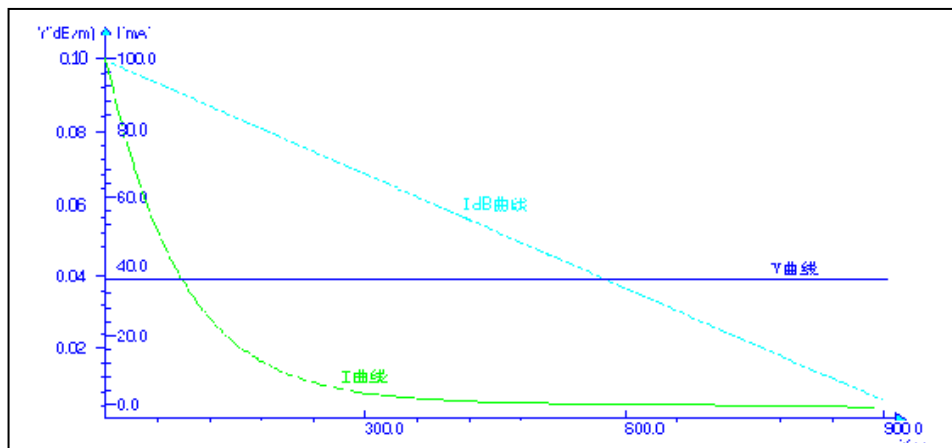


图 2 管—地回路中的电流关系及衰减规律

当已知某二点的管中电流值时，即有：

$$Y = 8.6858 \alpha = 8.6858 \frac{\ln I_{am2} - \ln I_{am1}}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

当不考虑管道防腐层状况的差异， $I_{am}$ 、 $I_{db}$ 、 $Y$  与管道距离的理论关系曲线如图 2 所示。在式 (2) 中， $G$  即为包含着能反映防腐层状况的绝缘电阻  $R_g$ ，当由式 (4) 计算出管一地回路的衰减常数  $\alpha$  后， $R_g$  即可被求出，同时与  $\alpha$  对应的  $Y$  值大小也可定性地反映管道防腐层的优劣程度。

#### 四、评价模型输入参数的确定

在前面的等效电路分析中，管道的纵向电阻  $R$ 、电容  $C$ 、电感  $L$  和管道的横向电导  $G$  称为管一地回路的原参数，是决定回路的等效分布参数电路的基本量；衰减常数  $\alpha$  称为副参数，是通过原参数求得的。防腐层的绝缘电阻  $R_g$  包含在原参数  $G$  中，可通过副参数  $\alpha$  和其它原参数来求得。因此，正确计算管一地回路原参数对解算  $R_g$  的准确性至关重要。

在工程应用的情况下，可认为原参数与所传输电压和电流大小无关，只取决于该回路的结构、材料以及土壤的电气特性和检测信号频率等。利用电磁理论，可得出检测回路的电阻  $R$ 、电容  $C$  和电感  $L$  的计算方法。

##### 4.1 回路电阻 $R$

经分析可知，管一地回路中电阻  $R$  是由两部分组成的：一部分是金属钢管的内电阻  $R_i$ ；一部分是土壤的内电阻  $R_s$ ，下面先来分析  $R_i$ 。

在交流检测信号的情况下，由于趋肤效应的出现，电流和电磁场在导体内部的分布集中于表面附近。钢的相对磁导率  $\mu_r$  很大，根据导体的趋肤深度公式可知，即使在频率不高的情况下，钢管中电流的趋肤效应也是比较显著的。埋地管道大部分采用 A3 普通碳钢，相对磁导率  $\mu_r$  取 100，对不同的检测频率，钢质管道产生的趋肤深度如下表：

表 1 钢管对常用的检测频率的趋肤深度

检测频率 (Hz)	4	98	128	512	640	8192
趋肤深度 (mm)	7.91	1.60	1.40	0.699	0.626	0.174

可见，常用的检测频率对应产生趋肤深度与钢管的壁厚相比，不容忽略。因此在计算原参数时，

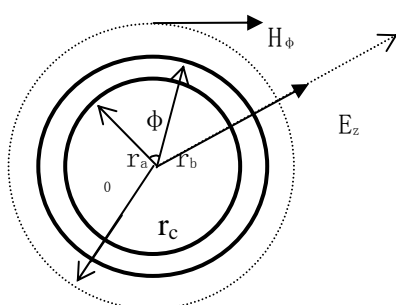


图 3 电磁场在钢管内的分布图

必须考虑交流信号的趋肤效应对钢管纵向电阻的影响。对钢质空心圆柱体而言，由于趋肤效应的存在，金属内部的径向电位差为零。将钢管看成同心圆环体，电磁场在钢管内的分布如右图 3 所示。

在埋地钢质管道周围的磁准静态场内，当忽略了位移电流的影响时，其电场和磁场可由如下的 0 阶变形贝塞尔方程来描述：

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial kr^2} + \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial kr} - E_z = 0 \quad (5)$$

该方程的通解为：

$$E_z = AI_0(kr) + BK_0(kr) \quad (6)$$

$$H_\varphi = \frac{1}{j\omega\mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\frac{k}{j\omega\mu} [AI_1(kr) - BK_1(kr)]$$

令：  $k = k' \sqrt{j}$ ，设空心圆柱体的内外半径分别为  $r_a$  和  $r_b$ ，根据全电流定律，在空心柱体的内外表面上，其磁场强度分别为：

$$H_\varphi(r_a) = \frac{k}{j\omega\mu} [AI_1(kr_a) - BK_1(kr_a)] = 0 \quad (7)$$

$$H_\varphi(r_b) = \frac{k}{j\omega\mu} [AI_1(kr_b) - BK_1(kr_b)] = \frac{I}{2\pi r_b}$$

由式(7)的两方程联立，并进一步推导可得出电阻的计算公式：

$$R_i = \frac{1}{2\pi r_b \sigma} \cdot \frac{k'}{\sqrt{2}} (\Omega/m) \quad (8)$$

下面再来分析  $R_s$ 。管一地回路中，纵向阻抗的另一部分为土壤内电阻。电流在大地中的分布除了和大地的电学性质有关外，与信号频率有关。为了简化问题，忽略土壤介电常数的影响，而只考虑电阻率的影响。因此大地的内阻就可以考虑电阻率和角频率共同作用的影响。把地内电阻分成两部分：一部分是与电阻率有关的直流电阻，一部分是与频率有关的交流电阻。在直流激励时，大地的传输阻抗 ( $Z=U/I$ ) 表现为  $R(\Omega)$ ，交流电阻表现为频率因素的影响，这一过程非常复杂。可借用广泛应用于电力传输理论的“卡松线路”来模拟。

## 4.2 回路电感 L

在一个导体系统的电感定义为耦合磁通量与产生磁通的电流之比。在各向同性的线性媒质中，磁场由某一电流回路产生，则穿过此回路的限定面积的磁通，与回路的电流有正比关系，也就是与回路相交链的自感磁链  $\Psi_L$  与电流  $I$  成正比，即自感  $L = \Psi_L / I$ 。自感仅与回路的尺寸、几何形状及媒质的分布有关，与通过回路的电流及磁链的具体量值无关。在计算导体自感时，自感为内自感  $L_i$  与外自感  $L_e$  之和，即：

$$L = L_i + L_e \quad (9)$$

先分析金属钢管本身的内电感  $L_i$ 。在实际管道检测中，自感的计算公式则可简化为：

$$L_i = \frac{1}{2\pi r_b \sigma \omega} \cdot \frac{k'}{\sqrt{2}} \quad (H/m) \quad (10)$$

对于管道的外自感，将管道防腐层外的围土看成导体，可参照同轴圆柱体计算电感的方式，计算管体的外电感。

与自感一样，互感是线圈区域内的磁导率与具有长度单位的几何因子的乘积。在管一地回路中，由于地中传输的电流是分散的和微弱的，因而，地电流对单一钢管构成互感可以忽略。但是，

当管道路由附近有伴行的其它管线存在，就不能忽略互感的影响。因此，互感的计算要考虑伴行管线的距离，它与耦合系数有着反比例的关系；伴行管线的条数相当于耦合线圈的匝数。

### 4.3 回路电容 C

通常，电容器是由两个带等量异号电荷的导体组成。它的电容C定义是电荷与导体间的电压之比。管地电容是指埋地钢管的管体与大地之间构成的耦合电容值。设金属管体的内径为  $r_a$ ，管体外径为  $r_b$ ，包覆防腐层后管道的外半径为  $r_c$ ，则管一地电容C是指从  $r_b$  到  $r_c$  之间的耦合电容。经推导可得：

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot (\ln \frac{r_c}{r_b})^{-1} \quad (F/m) \quad (11)$$

可见，该计算公式正好与圆柱形电容器的计算公式一致，表明 C 只与管道的结构、尺寸及外防腐层材料的介电常数有关。

### 4.4 管一地回路的横向电导 G

管一地回路的横向导纳是由两部分组成的。一是由防腐层的绝缘性能不可能为绝对理想，会产生漏电导；二是土壤内的水分以及各类离子传导电流引起的土壤电导，即：

$$G_i = \frac{1}{R_g} + \omega C_i \text{tg} \delta \quad (12)$$

由防腐层的介质绝缘特性不够理想而产生的泄漏电流，大小直接决定着对金属的保护程度，是防腐层老化和破损的衡量指标，绝缘电阻值  $R_g$  就可以通过  $G_i$  来求得。第二项是指在交变电场作用下，绝缘介质极化所引起的损耗，它与频率、介电损耗和管一地耦合电容成正比。通常，新敷设管线的介质损耗角很小，理论上等于防腐介质的理论值。对老管线由于在地下湿、热和应力等的长期作用下，其  $\text{tg} \delta$  值发生变化。因此，单纯考虑由  $\text{tg} \delta$  来衡量防腐层的老化程度便会产生一定的误差，因而应加权考虑介质老化因素引起对检测结果的影响。

## 五、结束语

埋地管线外防腐层检测及评价是应用性很强的技术。正确、完备的理论推导、现场大量的检测数据和必要的实验数据，是建立完善评价模型的基础。充分、准确的检测数据是得出正确检测评价结果的前提。但在保证够用检测精度的前提下，尽量减低检测工作量又是方法普及的必要条件；因此，对评价模型的完善不能以增加应用难度为代价。然而，埋地管道的复杂环境不可能用一个简单的数学模型来很好地模拟。好的模型必然包含较多的物理参量，必然增加模型的应用难度，好在不断发展的计算机软件技术为有效减低一般用户的应用难度提供了现实的可能。嘉信公司在完善防腐层评价模型的同时，也不断开发新的软件版本，以提高数据处理机评价软件在评价参数选择智能化水平。我们知道，交变电流梯度法的评价模型仍需相当长的发展完善过程，还需要腐蚀行业的同行共同做出不懈的努力。嘉信公司将不断致力于提高数据评价模型的科学性、实用性及完备性，改善相应的数据处理软件的可靠性、易用性和灵活性。

## 参考文献:

1. 天津嘉信技术公司: 埋地钢质管线防腐层状况检测系统原理—多频管中电流法 1997 年
2. 邱关源: 《电路》, 高等教育出版社 1999 年
3. 胡士信等: 《阴极保护工程手册》, 化学工业出版社 1999 年
4. 林守江: 埋地钢质管道腐蚀检测方法及管理模式《石油化工腐蚀与防护》 2000 年 2 期
5. 美国腐蚀工程师国际协会中国分会:《石油天然气防腐保温技术年会学术论文集》 1997 年

**作者通联:**天津市滨海高新区(环外)海泰南道 28 号 C 座 6 门 2 楼(300384) 电话 022-23253315

**作者简介:**林守江 90 年毕业于北京航空航天大学, 工学硕士。现任天津市嘉信技术工程公司董事长兼总经理, 中国腐蚀学会防腐蚀施工技术专业委员会副主任委员, 会多年从事地下钢质管道腐蚀检测技术研发, 检测设备推广、检测方法及软件研发工作。