中华人民共和国石油天然气行业标准

埋地钢质管道防腐绝缘层电阻率现场测量技术规定

SY/T 6063—1994

批准部门:中国石油天然气总公司
批准日期:1995-01-18
实施日期:1995-07-01

1 主题内容与适用范围

本标准规定了电流-电位法、选频-变频法测量管道防腐绝缘层电阻率的方法。

本标准适用于无保温层、测段内无分支、电气上不间断的埋地钢质管道防腐绝缘层电阻率测量。

2 引用标准

SYJ 23 埋地钢质管道阴极保护参数测试方法

3 电流-电位法

3.1 使用仪表及工具

a) 直流电位差计一台:准确度不低于 0.05 级;

b) 直流电压表一块:输入阻抗≥10^6 Ω,量程 0～2 000 mV,准确度不低于 2.5 级;

c) 饱和硫酸铜参比电极一支:符合 SYJ 23 要求;

d) 铜塑导线若干;

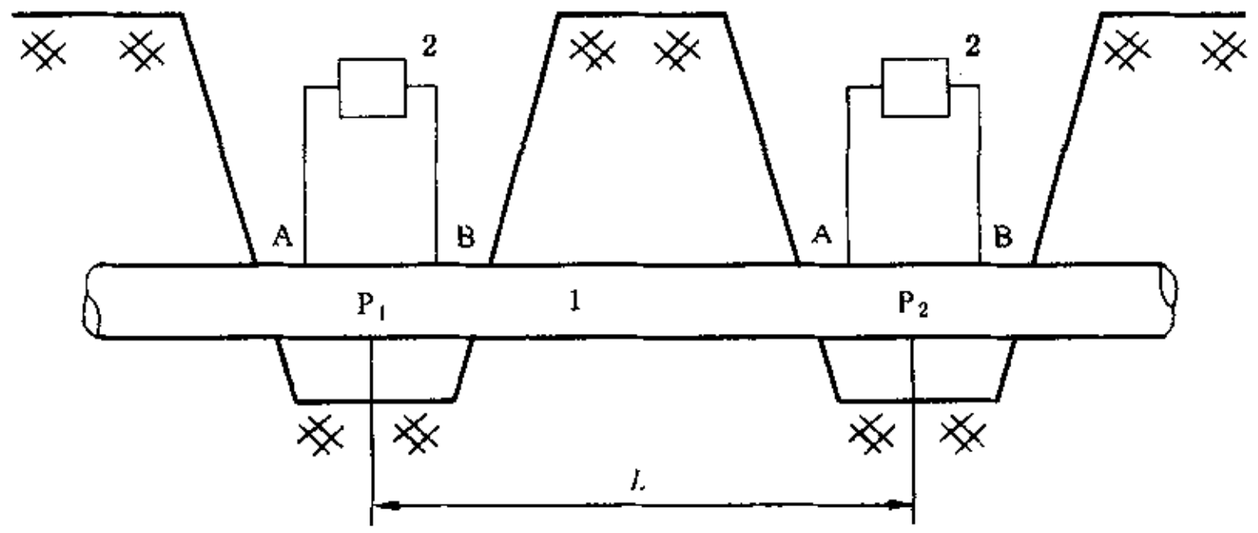
e) 能提供 1 A 以上直流电源一组;

f) 直流电流表一块:量程 0～10 A,准确度不低于 2.5 级;

g) 500 mm 长,直径 20～40 mm 钢电极(可用钢管代替)3～4 根。

3.2 测量接线图

3.2.1 利用阴极保护电流测防腐绝缘层电阻率接线见图 1。



1—管道;2—直流电位差计

图 1 利用阴极保护电流测防腐绝缘层电阻率接线示意图

3.2.2 临时外加电流法测防腐绝缘层电阻率接线见图 2。

3.3 测量要求

3.3.1 测量管段内无分支、无接地，若有牺牲阳极，必须断开。

3.3.2 所有导线与管道接触点均应除去防腐层，磨出钢管本色。将导线用手按在管道上或用夹子夹住，使其接触良好。

3.3.3 在 P_1 点与 P_2 点分别取一段管道，使每段测取的电位差以不小于 50 μV 为宜，每段间的最小长度(L_{ab})可参照附录 A(参考件)选取。

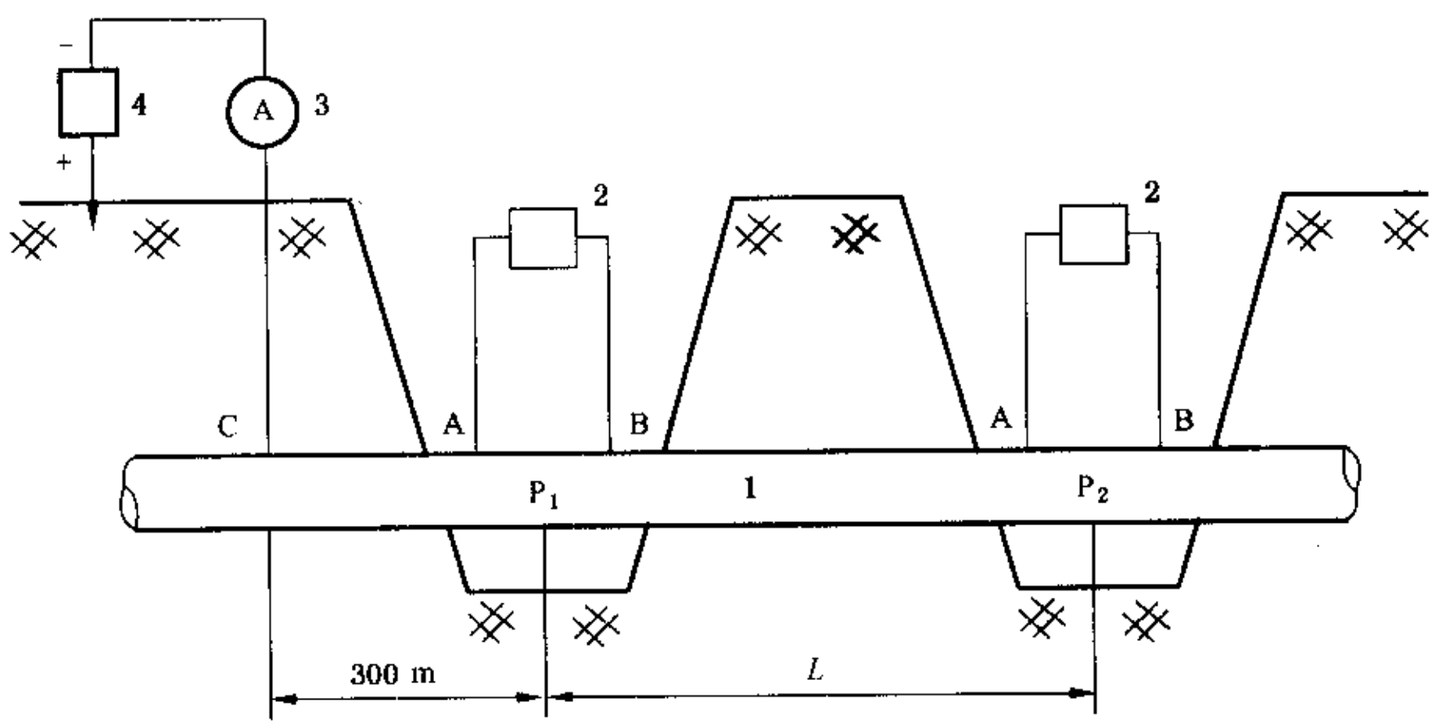
3.3.4 测量点距汇流点应大于 300 m。

3.3.5 P_1 点与 P_2 点测量应连续进行，时间间隔不大于 1 h，测量时保护站输出电流要保持稳定。

3.3.6 对于牺牲阳极保护的管段和两保护站间电流交汇点 1 km 内的管段，采用临时外加电流法进行测量。

3.3.6.1 将钢电极打入与管道垂直距离 20 m 以外的潮湿土壤中，电源正极接钢电极，负极接管道与电流表串联(见图 2)。

3.3.6.2 其他要求同 3.3.1～3.3.5 步骤。



1—管道；2—直流电位差计；3—电流表；4—电源

图 2 临时外加电流法测防腐绝缘层电阻率接线示意图

3.4 测量方法

3.4.1 测取被测管段 P_1 点至 P_2 点间的长度 L(精确到 1 m)，L 应不大于 1 km。

3.4.2 测取 A，B 两点间距离(精确到 1 cm)。

3.4.3 用电压表及饱和硫酸铜参比电极测出 P_1、P_2 点的保护电位 E_{P12} 和 E_{P22}，自然电位一年内有测试数值的，可取靠近测试点的数值用于计算。如需另测的可断电 24～48 h 后进行测量。

3.4.4 将直流电位差计调零，然后将测量开关打到“标准”，旋动工作电流调节旋钮，使指针指零，接到线路中。离通电点远端接正，将倍率选择钮、测量刻度盘调到估算值的位置，将测量开关打到“未知”，细调倍率和测量盘，使表针指零。此时所测值即为 A、B 两点电压降，记录数值。

3.4.5 当不知道管材的电阻率时，在通电点附近选取一段管道，测出电流在这段管道上的压降，换算出实际电阻率，测点应选在离汇流点 1.5 D(D 为管线外径)外。

3.4.6 重复 3.4.4 步骤，取重复性好的三组以上数据的平均值为测量值。

3.4.7 临时外加电流法进行测量时，应先通电，待电流、电位稳定后方可进行测量，步骤同 3.4.1

～3.4.5。

3.5 计算方法

3.5.1 根据欧姆定律按式(1)～(4)计算 P_1、P_2 点的电流和电阻值，或参照附录 B(参考件)直接查取。

$$I_1=\frac{\Delta V_1}{R_1} \quad (1)$$

$$I_2=\frac{\Delta V_2}{R_2} \quad (2)$$

$$R_1=\frac{\rho L_1}{S} \quad (3)$$

$$R_2=\frac{\rho L_2}{S} \quad (4)$$

式中：ΔV_1——P_1 点 AB 两点间的管道电压降 (mV)；

ΔV_2——P_2 点 AB 两点间的管道电压降 (mV)；

R_1——P_1 点 AB 两点间的电阻 (Ω)；

R_2——P_2 点 AB 两点间的电阻 (Ω)；

ρ——钢管电阻率 ($\Omega \cdot mm^2/m$) (A3：0.30～0.36；16 Mn：0.224；20 号：0.135；X60：0.14)；

L_1——P_1 点 AB 两点间的距离 (m)；

L_2——P_2 点 AB 两点间的距离 (m)；

S——钢管环形截面积 (m^2)；

I_1——P_1 点的管内电流 (mA)；

I_2——P_2 点的管内电流 (mA)。

3.5.2 根据 P_1、P_2 两点间的电流，算出 P_1 至 P_2 管段上漏失的电流为 $\Delta I=I_1-I_2$(mA)。

3.5.3 P_1、P_2 点开机前后的电位差 ΔE_1(mV)、ΔE_2(mV)，分别按式(5)、(6)计算。

$$\Delta E_1=E_{P11}-E_{P12} \quad (5)$$

$$\Delta E_2=E_{P21}-E_{P22} \quad (6)$$

式中：E_{P11}——P_1 点自然电位(mV)；

E_{P12}——P_1 点保护电位(mV)；

E_{P21}——P_2 点自然电位(mV)；

E_{P22}——P_2 点保护电位(mV)。

3.5.4 P_1 至 P_2 管段防腐绝缘层电阻率按式(7)计算。

$$r=\frac{\Delta E_1+\Delta E_2}{2\Delta I}\pi DL \quad (7)$$

式中：r——被测管段防腐绝缘层电阻率 ($\Omega \cdot m^2$)；

D——管道外直径 (m)；

L——P_1 与 P_2 间管道长度 (m)。

4 变频-选频法

4.1 一般规定

4.1.1 本方法原则上可进行任意管长测量，但不宜小于 200 m。测量中强制电流阴极保护可继续运行。但被测管段中安装有牺牲阳极或其他用途的接地体时，必须切断其与管道的电连接。

4.1.2 测量作业前，应对仪器进行全面检查与校准。具体办法可参照附录 C(参考件)的要求进行。测量过程中，仪器累计开机时间每两小时左右应校准仪器一次。

4.1.3 本方法最终测定结果，由计算机按编制的程序计算得到。相关的计算参数，由现场测量参数及管道防腐层常数参数组成。现场测量参数包括发射信号频率、信号发射端管道对地电平、信号接收端管

地电平、发端—收端电平差、被测管段线长与被测管段沿线代表性土壤电阻率等。管道防腐层常数参数由资料软盘提供，可直接查取现场测量结果应认真进行记录，记录表格格式可参照附录 D(参考件)。

4.1.4 被测管段线长，一般情况下，可用信号发射端与信号接收端的平面线长代替。

4.1.5 信号发射端和信号接收端与管道的电连接原则上利用管道上已设置的测量电位或电流的装置(或端钮)。无条件时，可开挖管道将防腐层剥开 5 cm^2 设临时接点，所有电连接点均应连接牢固，接触良好。

4.1.6 测量作业中应经常检查仪器电源电压变化情况，当电压降至警戒线时，应立即关机，予以充电(验电钮在仪器面板上)。当电源电压降至警戒线后所测得的数据必须作废。

4.1.7 仪器运输、移位或使用中，应防止剧烈震动、雨淋、曝晒。

4.1.8 每次测量及测量作业完成后，要切断电源，清洁整理，参照附录 C(参考件)中的有关要求存放、保管。

4.1.9 仪器所附测量用配线，当其破损或遗失后，应按原型号、规格或不低于原配线强度和性能的电缆(线)补配。

4.2 测量使用仪器

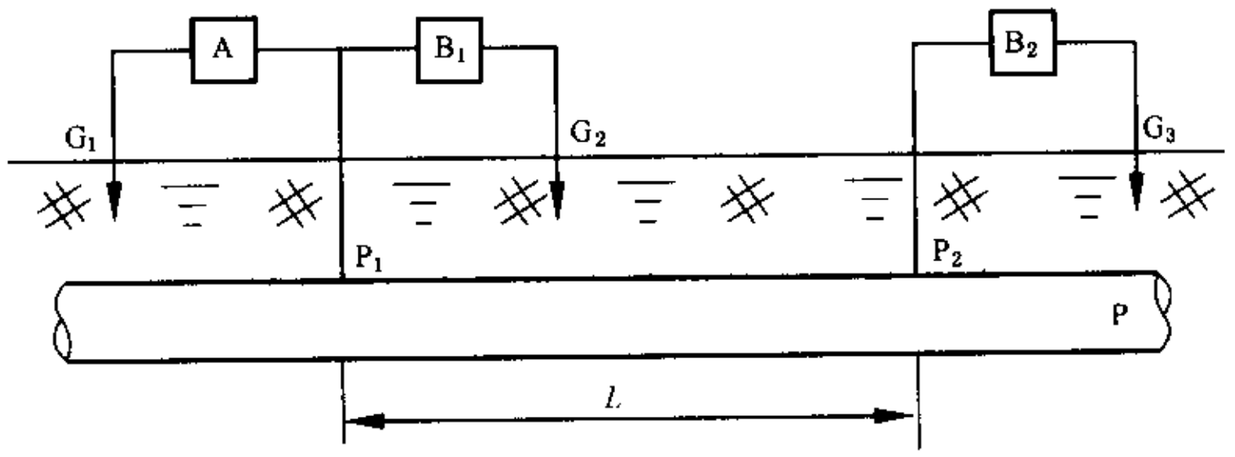
a) 防腐层绝缘电阻率测量仪一套，包括：变频信号源一台，选频指示器二台，充电器一台，配线及配件一套；

b) 土壤电阻率测量仪一台；

c) 对讲机一对，3 km。

4.3 测量接线及测段布设

4.3.1 按仪器面板上的指示，分别将仪器的输出端，利用所附配线和配件，接到管道和接地极上，其示意接线图如图 3。



A—变频信号源；B_1、B_2—选频指示器；G_1、G_2、G_3—金属接地极；P—管道

图 3 变频-选频法测量防腐绝缘层电阻率接线示意图

4.3.2 变频信号源原则上可设在任意点，但宜避开固定墩等管道对地绝缘有可能薄弱的处所或管道分支点的附近；选频指示器虽然可设在管道分支点附近，但必须做到被测管内无分支管道。

4.3.3 变频信号源接地体(接地体 G_1)距管道垂直距离约 20 m，选频指示器接地体(接地体 G_1、G_3)分别距管道垂直距离约 2～5 m。接地体应牢固插入地中，土壤十分干燥时宜注水湿润。

4.3.4 变频信号源与该端设置的选频指示器，可共线与管道连接。但在有条件时，宜采用“专线、专点”连接，此时变频指示器和选频指示器与管道连接点之间的距离以 2～5 cm 为宜。

4.3.5 变频信号源、选频指示器，可卧式(面板上向)或立式(面板侧向)放置，但应保持与地面平、直。并注意背光或遮阳。

4.3.6 仪器就位后，宜现场测取发射端选频指示器与接收端选频指示器的管段线长，记录该值，作为被测段长。一般情况下可使用平面线长。但当利用管道上已设测量装置测量。且其水平线长为已知时，亦可不在现场测量。

4.4 测量操作

4.4.1 变频信号源、选频指示器同时开机，调整变频信号源变频钮，向管道试送某一个频率信号(一般沥青防腐层习惯上试送频率为 10 kHz)。

4.4.2 利用对讲机向收端通报发射频率，发端及收端同时调节选频钮，测取该频率下的收端与发端管道对地电平。

4.4.3 收端操作人利用对讲机向发端通报测取的管道对地电平值。

4.4.4 发端操作人速算发端与收端管道对地电平差。其差值应等于或稍大于 23 dB。此时记录发射频率，发端、收端管道对地电平及其电平差。

4.4.5 如第一次试送时，测取的收、发两端电子差不符第 4.4.4 条的规定，则应改变变频信号源的发射频率，重复第 4.4.2～4.4.4 条的步骤，直至电平差达到等于或稍大于 23 dB 为止。

4.4.6 如管道上存在交流杂波的影响，可暂停电信号发射，利用选频指示器，查探干扰的大致主频率。发射频率可适当避开干扰主频率。此时第 4.4.4 条的标准，可适当放宽。

4.5 土壤电阻率的测量

4.5.1 土壤电阻率测量方法按 SYJ 23。

4.5.2 测量地点应选在能代表被测管段沿线土壤性质的地点，测量深度应为管道埋深。

4.6 数据处理

4.6.1 所测防腐层绝缘电阻率($\Omega \cdot m^2$)值，由电子计算机按预编制的程序计算得出。

4.6.2 数据处理包括软盘二片，即计算程序及资料盘，计算时按计算软盘提供的程序，依次输入计算参数，所需计算参数一部分由现场测量数据提供，一部分由资料盘提供，操作者依据已知的管道原始资料对照资料盘给出的资料直接选取即可，也可参照附录 E(参考件)选取。

4.6.3 计算完成后，可将结果逐一存储于计算机中，即可任意打印输出或调出使用。

4.6.4 计算机规格性能应具 386 型以上的功能。

附 录 A
(参 考 件)

电流-电位法最小 L_{ab} 与电流 I 的关系图

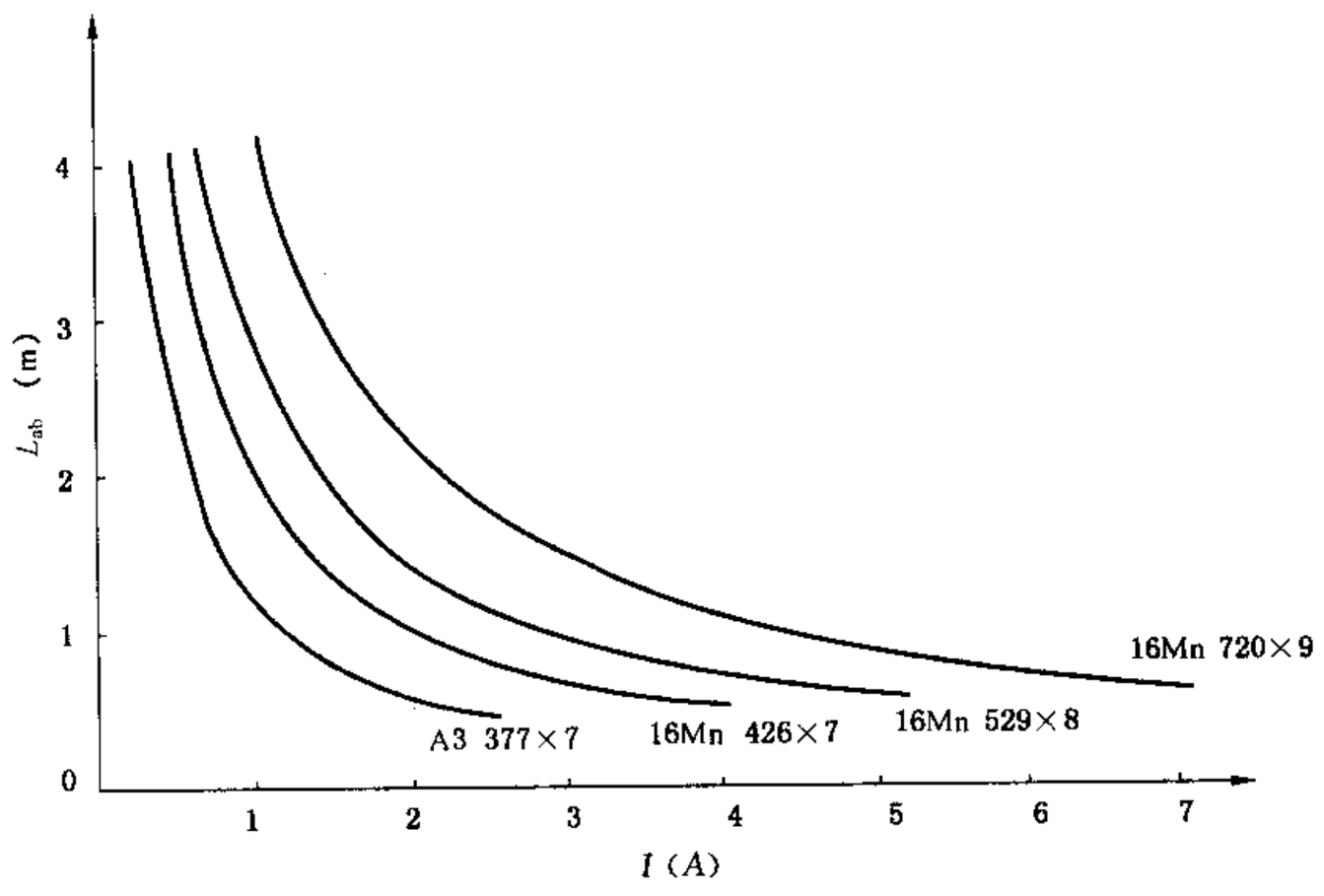


图 A1 电流 I 与最小 L_{ab} 关系图

附 录 B
（参考件）
电流-电位法 AB 点间的压降 ΔV 与 L_{ab} 的比值与电流 I 的关系图

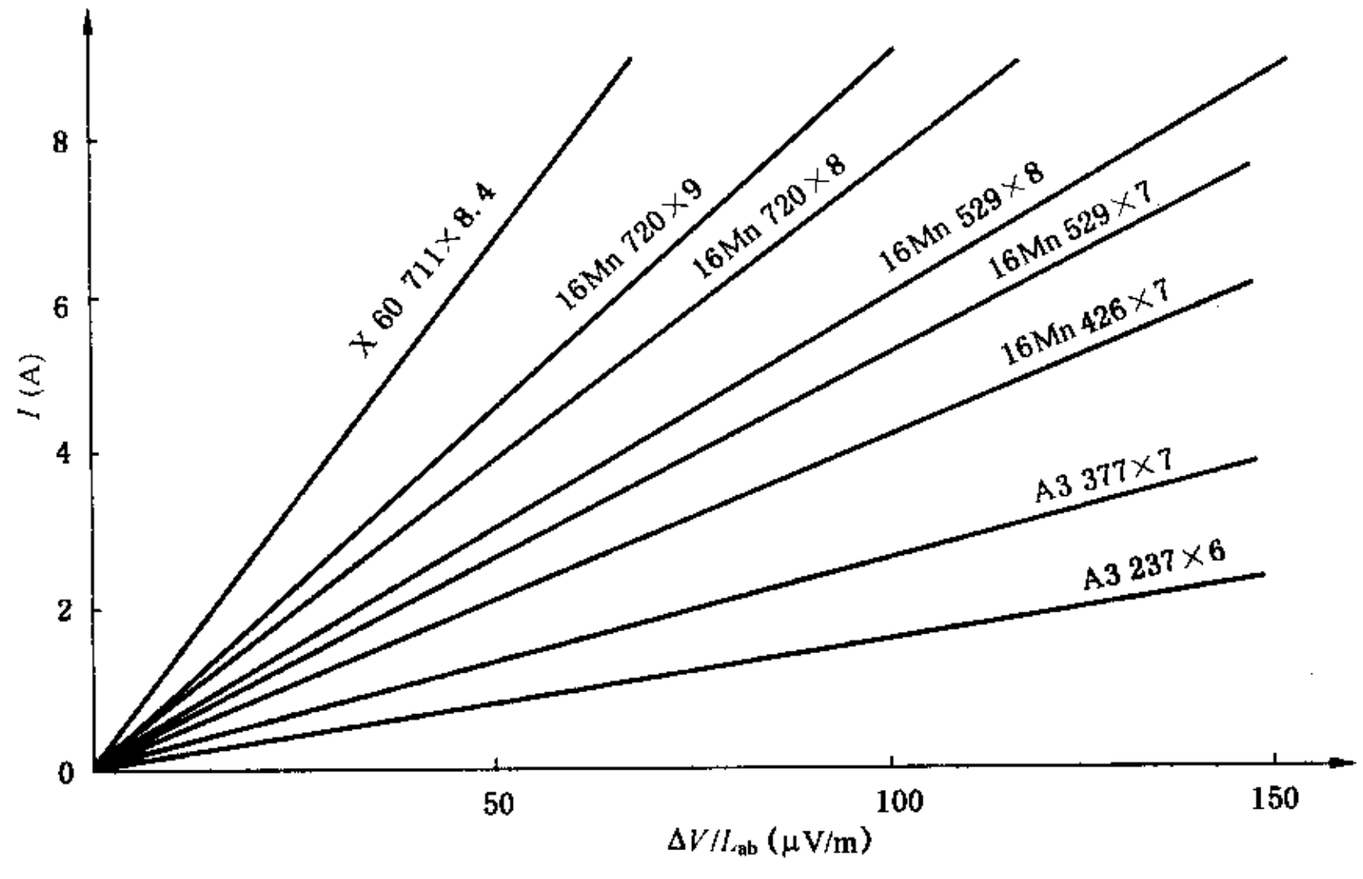


图 B1 L_{ab} 上压降 $\Delta V/L_{ab}$ 与电流 I 关系图

附 录 C
（参考件）
AY-508 型管道防腐层绝缘电阻测量仪使用说明

C1 仪器的使用与校准

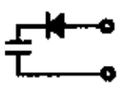
C1.1 检查电源并充电

a) 将随机带的标准电源线，插入侧面电源进线插座，引入 220 V 市电；

b) 将电源开关置“—”，则电源指示灯亮，表示电源接通；

c) 将电源开关置“Off”位置时，整机处于停机状态；

d) 当电源开关置“—”位置时，为整机机内电池组供电；

e) 当电源开关置  位置时，为整机内部充电，这时表头指针逐渐向黑线带靠近，表明充电正常。当表针指示在黑线带内，连续充电 5～8 h，电池可连续工作 4～5 h。

C1.2 选频指示器校准

a) 宽频校准：将测量电平开关(S_3)置▲；功能选择开关(S_2)置“宽频”，调整电位器(RP_1)使表头指针指向 0 dB 位置。

b) 选频校准：将电平开关(S_3)置▲校准位置；功能选择开关(S_2)置“选频”位置，此时摆动频率旋

柄，使频率显示 100 kHz±20 Hz 时，表头指针会起动到最大值，然后调整电位器(RP_2)使指针指到 0 dB 位置，即自校完毕。

这项校准可在到现场使用之前进行，在测量过程中也可随时校准。

C1.3 变频信号源与选频指示器联试

a) 选频联试：将随机带的三芯线一端插入变频信号源的三芯输出插座(XS_3)，另一插头端插入选频指示器的三芯输入插座(XS_1)；变频信号源阻抗转换开关置"0Ω"档，功能选择开关置"选频"档，两个仪表的电平选择开关置相对应的电平档，此时改变信号源频率，指示器选择相应频率，当指示器指针指示最大时，所读电平值应与信号源输出电平值一样。

b) 统调联试：将随机带的同轴插头线一端插入信号源的同轴输出插座(XS_1)，另一端插入指示器的输入插座(XS_2)功能选择开关(S_2)置"宽频"档，此时改变信号源的频率及电平，指示器会自动跟踪。

C2 现场测量

C2.1 测量时的仪器配置与接线

仪器配置及接线示意如图 C1。

C2.2 测量操作

a) 发端：

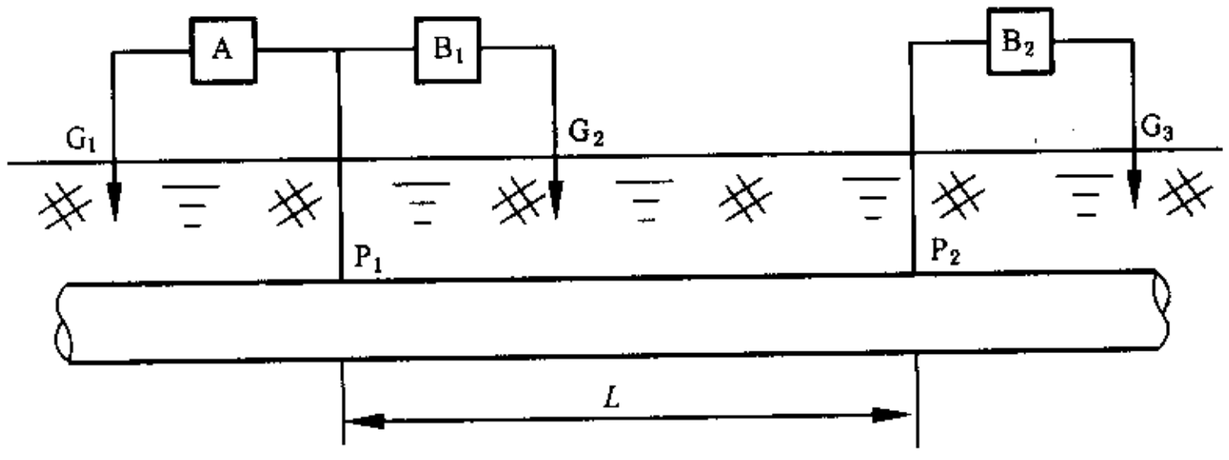
变频信号源：开机用直流电源工作；输出阻抗用 0Ω 档；输出电平选择 0 dB 或+10 dB 档；输出信号频率试用 10 kHz 左右；选频指示器：开机用直流电源工作；输入阻抗置 10 K(∞)档；功能选择开关置"选频"档；电平开关暂置−30 dB 档；旋转频率旋柄使频率指示在 10 kHz；

附近选择使表头指示为最大，如果表针无指示或指示很小，可将电平开关置更低档，如表针指示超过 0 dB，应将电平开关置更高档，如此选择直至使表针指示接近 0 dB 为好，记下电平读数(电平开关指示加表头指示)；

发端选频操作具有一定经验之后，为了提高测量速度，可以采用统调操作；

b) 收端：

收端选频指示器操作与发端相同，所不同的是电平测量应比发端指示器测量的电平低 23 dB 以上。



G_1，G_2，G_3--接地极棒(随机配有三根铜棒)；A—变频信号源(随机配有一根三个端子的测量接线，一端为三芯插头，插入仪器的输出三芯插孔；一端为 2 m 长接线，将接线夹接被测管段始端与管道连接的测试线；另一端为 20 m 长的线，将夹子接距管道垂直方向 20 m 插入地中的接地棒；B_1—发端选频指示器(随机配有一根三个端子的测量接线，一端为三芯插头，插入仪器的三芯测量插座；一端为 2 m 长的接线，将(红)夹子接发端与管道连接的测量线；另一根 2 m 长接线，将(黑)夹子接距管道垂直距离为 2 m 的接地棒)；B_2—接收端选频指示器，在被测管段末端(随机带有一根三个端子的测量线，接线方法与发端指示器相同)

图 C1 测量接线图

C2.3　正确读数

测量时发、收两端应配有对讲机联络。

当发端信号第一次输出频率为 10 kHz 时，如果发端指示器实测电平为－33 dB，此时收端指示器实测电平若为－46 dB，其电平差则为：

$$(-33)-(-46)=13\ \text{dB}$$

根据变频--选频法测量管道防腐层绝缘电阻的基本原理，要求所使用的测量频率一定要达到在被测管段上的电平衰耗大于 23 dB，此时 13 dB 是不够的，所以应提高测量信号的频率。

提高发端信号源输出频率后，在两端所测电平差必然会增大，直至大于 23 dB 为止，记录此时频率值（精确到个位数），同时记录该频率下的收、发两端指示器的电平值（精确到小数点后一位）。

注：为了减小测量引入的误差，所谓大于 23 dB 除特殊情况外不可大得太多。

选择使用测量频率与管道防腐层的绝缘状况有直接关系，当被测管段防腐层质量较差或被测管段较长时，使用的测量频率偏低，而当被测管段防腐层绝缘良好或被测管段较短时，使用的测量频率偏高。

C2.4　被测管段长度

被测管段的实际长度与准确求得该段管道防腐层绝缘电阻值有密切关系，一般对于长输管道每公里所设测试桩的距离，应查看一下施工时的原始资料，进行核对。当遇到进出泵站、跨越阀池等情况，两个测试桩之间的距离往往只有几百米。对于测量小于 500 m 的管段，应实地测量距离（精确到 1 m）。

C2.5　测量大地导电率

所谓测量大地导电率，就是测量被测管段周围土壤电阻率，再取倒数。土壤电阻率的测量可用四极法，极间距为 2 m，有条件最好沿管线多测几处，特别是被测管段穿过土壤状况差别较大时，将几个测得数据取平均值。

测量土壤电阻率的仪表，可用 ZC-8 型接地电阻测量仪（摇表）。

C2.6　现场测量记录

现场测量的原始数据一定要记录清楚完整，表 C1 可供参考。

表 C1　铁－聚线管道绝缘电阻测量原始记录

测试段	土壤电阻率 (Ω·m)	测试频率 (Hz)	发端电平 (dB)	收端电平 (dB)	电平差 (dB)	测试段长 (m)	测试日期及备注
46～47	50	5 040	－40	－64	24	1 000	—
47～48	37.7	13 018	－30	－55.9	25.9	1 000	—
48～49	40.2	1 008	－45	－74.5	29.5	750	—

C3　绝缘电阻计算

现场测得的参数：频率、电平差、土壤电阻率、管段长度，是反映被测管段防腐层质量的主要参数。

另外，随着不同被测对象，管道外径、金属管壁厚、防腐层厚度与防腐层材料等也都应当是已知的。

上述众多参数都与管道防腐层绝缘电阻有关。当这些参数为已知时，即可通过理论公式计算，求得被测管道防腐层绝缘电阻值。

鉴于计算比较复杂，需借助计算机计算，随仪器配有计算软盘一套（两片）。计算软盘的使用是按不熟悉计算机操作的人员编制的。

C3.1　所用计算机的要求

与 IBM AT 或 IBM 286 以上机种兼容；配有至少 10 MB 的硬盘；内存为 640 KB 并至少扩充到 1 MB以上；至少配有一个 1.2 MB 软盘驱动器；使用 MS-DOS 3.0 以上版本。

C3.2 计算软盘内容

a) 辅助盘——内装 UCDOS 中文系统及数据库格式。

b) 程序盘——内装两套计算程序：其一名称为 ABC，该程序计算结果可与数据库通信，可以存库、不存库、查询、修改、删除。其二名称为 CBA，该程序只有计算功能，使用要比 ABC 程序简便。计算结果用笔记录，除计算绝缘电阻外，还可以给出直流传播常数、特性阻抗及参考阴极保护长度(单边)。

C3.3 操作步骤

a) 当计算机通电之前，先将辅助盘插入 A 驱动器中，开机；

b) 略等片刻，机器便会进入汉字状态下并在屏幕上出现“A>”提示符；

c) 键入 ABC 后回车，屏幕上会出现中文进一步提示，按照提示将辅助盘取出，将程序盘插入 A 驱动器中。再次键入 ABC 后回车，计算机便进入“变频-选频法测量埋地管道防腐层绝缘电阻计算管理”系统中了。

d) 以下操作均按屏幕显示的中文提示进行操作，即可得出所要计算的绝缘电阻值了。

上述操作步骤为基本操作，为了灵活使用该套计算软盘，随盘还带有“计算软盘使用说明”。

附 录 D
(参考件)

线管道绝缘电阻率测量原始记录格式

表 D1 线管道绝缘电阻率测量原始记录

测试桩号		土壤电阻率 (Ω·m)	测试频率 (Hz)	发端电平 (dB)	收端电平 (dB)	电平差 (dB)	管道绝缘电阻率 (Ω·m²)	测试日期	备注
测点分布平面示意图									

测量技术负责人： 测量操作： 记录：

附 录 E
（参考件）
常用公式及参数

E1 电平表指示电平与电压的关系

衡量信号沿传输线传输量的大小变化，国际标准用分贝(dB)作单位，过去我国曾用奈(N)作单位，电压与电平的关系参见表 E1。

电压电平按式(E1)，(E2)计算。

$$A=20\lg\frac{V_1}{V_0}\ (\mathrm{dB}) \qquad (E1)$$

$$A=\ln\frac{V_1}{V_0}\ (\mathrm{N}) \qquad (E2)$$

式中：A——电压电平(dB)；

V_0——输入端电压(V)；

V_1——末端电压(V)。

注：1 dB(分贝)=0.115 N(奈)；1 N(奈)=8.686 dB(分贝)；电压与电平的关系式：$V=e^{0.775A}$（V——电压(V)，A——电平(dB)）。

表 E1 电压与电平的关系表

V（伏特）	0	0.01	0.1	0.775	1	10
dB（分贝）	$-\infty$	−37.78	−17.38	0	+2.21	+22.1
N（奈）	$-\infty$	−4.35	−2.05	0	−0.255	−2.55

E2 管道规格表

表 E2 管道规格表

管径（mm）	管壁厚（mm）	管径（mm）	管壁厚（mm）
ϕ108	5，6，7，8	ϕ377	6，7，8，9，10，11，12
ϕ159	5，6，7，8	ϕ426	6，7，8，9，10，11，12
ϕ219	5，6，7，8	ϕ529	6，7，8，9，10，11，12
ϕ273	6，7，8，9，10	ϕ630	6，7，8，9，10，11，12
ϕ325	6，7，8，9，10，11，12	ϕ720	6，7，8，9，10，11，12

E3 管道防腐层结构

表 E3 防腐层等级与防腐层结构表

防腐层等级	防腐层结构	每层沥青厚度(mm)	防腐层总厚度(mm)
普通防腐	沥青底漆—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—取氯乙烯膜	≈1.5	≥4.0
加强防腐	沥青底漆—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—聚氯乙烯膜	≈1.5	≥5.5
特强防腐	沥青底漆—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—聚氯乙烯膜	≈1.5	≥7.0
泡沫塑料防腐保温层	泡沫塑料层—聚乙烯塑料	—	>25±1.2
	泡沫塑料层—沥青—玻璃布—沥青—玻璃布—沥青—聚氯乙烯膜	—	≥25±4
环氧煤沥青防腐层	“轻型”:一层底漆,两层面漆 “普通型”:一层底漆,一层玻璃布,三层面漆 “加强型”:一层底漆,两层玻璃布,四层面漆	—	0.2～0.3 0.4～0.5 0.6～0.8

E4 常用钢材电导率

表 E4 常用钢材电导率表

型号	电阻率 (Ω·mm/m)	电导率 (1/Ω·m)	型号	电阻率 (Ω·mm/m)	电导率 (1/Ω·m)
10 号钢	0.11	9.09×10^6	16Mn 钢	0.224	4.46×10^6
20 号钢	0.135	7.41×10^6	铬 钢	0.22	4.55×10^6
45 号钢	0.132	7.58×10^6	T8 钢	0.14	7.14×10^6

E5 钢材相对导磁率

钢材相对导磁率为 150～250。

E6 不同绝缘材料电参数

表 E5 不同绝缘材料电参数表

材料	介电常数	损耗角正切	备注
沥青	2.5～2.8	0.015	频率为 10～50 Hz
聚氯乙烯	2.73～6.0	<0.015	
聚乙烯	2.30～2.35	<0.0005	
环氧树脂	3.5～5.0	0.002～0.05	
聚苯乙烯	<2.7	<0.0005	
纤维素	2.6～7.5	0.02～0.12	

E7 不同结构防腐层电参数计算

管道防腐层一般由不同绝缘材料组成,其介电常数,应求出综合介电常数,代入公式计算。

求等效介电常数公式如式(E3)。

$$\varepsilon_0=\frac{\varepsilon_{11}\cdot S_1+\varepsilon_{12}\cdot S_2}{S_1+S_2} \qquad (E3)$$

式中：ε_0——等效介电常数；

ε_{11}——第一种材料介电常数；

S_1——第一种材料的截面积(cm^2)；

ε_{12}——第二种材料介电常数；

S_2——第二种材料的截面积(cm^2)。

对于有发泡塑料的防腐层，应考虑发泡中空气所占的比例，其发泡部分的等效介电常数由式(E4)计算。

$$\varepsilon_P=(\pi/4)\times(d_1^2-d_0^2)\times(1-P)\times\varepsilon_1 \qquad (E4)$$

$$P=V_{空}/V_{塑} \qquad (E5)$$

式中：ε_P——泡沫塑料防腐层等效介电常数；

d_0——泡沫防腐层内直径(cm)；

d_1——泡沫防腐层外直径(cm)；

P——发泡度；

$V_{空}$——泡沫塑料中空气所占的体积(cm^3)；

$V_{塑}$——泡沫塑料中塑料所占的体积(cm^3)；

ε_1——材料介电常数。

E8 地表土和水的介电常数

表 E6 地表土壤和水的介电常数表

类　　别	介 电 常 数
沿海干沙地	10
湿润森林平地	12
肥水农耕地	15
放牧地、丘陵	13
淡　水	80
海　水	80