第14卷增刊　　地震学报　　Vol. 14, Supp.
1992年12月　(669—675)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Dec., 1992

线路漏电影响的实用化定量估算方法*

金安忠　吴子泉　赵强　李润贤

(中国济南 250021 山东省地震局)

摘　要

本文提出了造成长期以来不能定量评价 ρ_s 漏电误差的关键问题及其解决办法的理论依据，推导出全线路最大可能漏电误差的理论计算公式，指出其应用条件，并给出实验验证结果和台站线路漏电误差的计算实例.

关键词　地电阻率；最大可能漏电误差；定量估算

一、问题的提出

地电阻率方法中漏电影响的定量评价问题一直没有得到解决，其原因主要有三：其一，应用已有漏电场理论不能计算供电线对测量线直接漏电影响；其二，漏电系统复杂，导线对地漏电和各种线间漏电交织在一起，无从利用已有公式进行计算；其三，导线固定架设，实测计算所需的一些参数有困难.

我们在已往物探和地震系统工作的基础上，针对上述诸方面问题作了进一步深入的研究，采取了几个特殊的办法解决了这些困难. 第一，在理论上证明采用"接地"法转化供电和测量线间漏电，为导线对地漏电是合理可行提出其应用条件，从而将此种不能计算的线间漏电误差，归结为导线对地漏电误差计算；第二，利用线路由电杆架设或由支架接地的特点，将全部导线对地的漏电归结为多个单点对地漏电，从而使采用已有公式来进行各种形式漏电误差的计算成为可能；第三，采用计算最大可能漏电误差的方法克服线路漏电计算中实测参数不足的困难，从而实现了全线路漏电误差的上限值定量估算.

在上述工作基础上推导出实用化的全线路漏电误差的理论计算公式和应用条件，并给出采用计算机的程序化 ρ_s 资料漏电误差的处理方法和实例. 为验证理论公式和有关结论是否正确，我们进行了较大规模的水槽模似实验，实验结果证实理论公式及所提出的论证和方法是正确的.

---

* 地震科学联合基金会资助项目.
1991年9月27日收到本文初稿，1992年2月22日决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

二、供电线对测量线漏电转化处理可行性的理论证明

1. 前人的工作

物探中已给出地电阻率观测线路(A,M,N,B)单点对地漏电影响误差的理论计算公式(E·M·克维亚特柯夫斯基,1958).

线间漏电问题比较复杂,它包括A,B线之间,M,N线之间及A,B线对M,N线间直接漏电三种情况.物探中给出A,B间,M,N间线间漏电公式

$$\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s} = -\eta \tag{1}$$

关于供电线对测量线间直接漏电的情况,刘昌谋、荣英华、郑兆芯等(1985,1986)曾先后讨论过关于供电线与测量线间漏电的问题,郑兆芯等还用实验方法说明可以采用将线间漏电变为对地漏电的方法来消除线间漏电的影响.

1970—1971年夏季一段时间里,我们曾用此法解决过仪器面板上AB线对MN线的直接漏电问题,将仪器面板接地,以压低面板接线柱间直接漏电影响.

然而到目前为止,尚没有人给出这种作法的理论证明,其计算方法没有解决,是造成地电阻率法中总漏电误差计算没有解决的关键问题之一.

2. 供电线对测量线漏电转化处理可行性的理论证明

为阐述方便仅以A供电线对M测量线漏电转化成A,M线对地漏电为代表,作以下线路分析和理论推导.

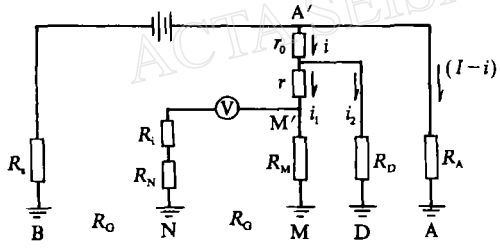

图1 A供电线对M测量线漏电转化为线对地漏电原理图

观测装置及A对M线漏电系统如图1所示,电阻r为A线与M线对所在公共支撑物O的漏电阻,此时漏电流i通过A线与M线之间漏电阻(绝缘电阻)$2r$及M线回路电阻R_{MH}流入M(因电压表内阻R_V远大于接地电阻R_M,所以自M′流向N的电流可以忽略).

若将O点接地,接地点D,其回路电阻为R_D,则i被分流

$$i = i_1 + i_2$$

由MOD回路可知

$$i_1(r + R_{MH}) = i_2 R_D \qquad \therefore i_2 = \frac{r + R_{MH}}{R_D} \cdot i_1$$

$$\therefore \quad i = i_1 + i_2 = i_1 + \frac{r + R_{MH}}{R_D} \cdot i_1$$

$$\therefore \quad i_1 = \frac{R_D}{r + R_{MH} + R_D} \cdot i \tag{2}$$

由线路可知

http://www.dizhenxb.org.cn

$$i = \frac{U_{LM}}{r + \frac{(r + R_{MH}) \cdot R_D}{R_D + r + R_{MH}}} \tag{3}$$

其中，U_{LM}为漏电压.

当O接地时，使流入M电流i变为i_1，因此，O接地时相当于A线与M线间漏电阻加大. 设使漏入M点的电流为i_1时，此A线与M线间等效漏电阻为R，又由(1)、(2)的关系

则有

$$\frac{R_D}{r + R_{MH} + R_D} \cdot \frac{U_{LM}}{r + \frac{(r + R_{MH}) \cdot R_D}{r + R_{MH} + R_D}} = \frac{U_{LM}}{R_{MH} + R}$$

经化简得

$$R = \frac{r^2 + r(R_{MH} + 2R_D)}{R_D} \doteq (\frac{r}{R_D})r \tag{4}$$

(4)式给出A与M线公共支架接地时等效绝缘电阻的计算公式.

若线路中$2r = 1M\Omega$，$R_{MH} = 50\Omega$，$R_D = 100\Omega$代入，则$R \doteq 2.5 \times 10^3 M\Omega$. 可见，采用接地法可以提高线间绝缘电阻达$\frac{R}{2r} = 2.5 \times 10^3$倍.

由此，我们在理论上论证了采用"接地法"克服供电线与测量线间漏电，转变线间漏电为线对地漏电的办法是科学可行的. 从而为今后地电阻率法消除供电与测量线间漏电影响提供了方法理论依据，同时，使应用已有公式进行全线路误差计算成为可能.

三、全线路最大可能漏电误差的定量估算

1. 漏电影响定量估算的关键问题及其解决方法

长期以来，地电阻率法全线路漏电误差的定量估算没有实现，主要因为存在三个关键问题：

前述研究解决了漏电误差定量估算的关键问题之一，即计算工具问题.

关键问题之二，是漏电误差估算中计算位置函数所需用的漏电点位置参数是未知的. 关键问题之三，是计算所需各漏电点的具体漏电参数是未知的，在实际观测中也是无法得到的. 这些问题存在使漏电误差的定量计算无法实现.

对于第二个问题的解决可以利用电路由电杆架设或由支架接地的特点，将全部导线对地漏电归结为多个单点对地漏电，从而给出漏电点的位置函数.

对于第三个问题，由于计算所需各漏电点的具体漏电参量实际无法观测，所以精确的定量计算是不可能的. 为了克服参数不足的困难，给出漏电影响上限的定量结果是可能的，为此，我们提出计算全线路最大可能漏电影响的定量方法.

2. 导线对地漏电最大可能误差的证明和计算

设f代表线对地漏电误差公式(克维亚特柯夫斯基，1958)中的位置函数，f_A，f_B，f_M，f_N分别为A线、B线、M线、N线的漏电点的位置函数. 同样，η代表漏电系数. 上述各线的相应系数为：η_A，η_B，η_M，η_N. 根据公式(克维亚特柯夫斯基，1958)，对任一种线路，若其对地的漏电点为i，则都有对应的由漏电引起的ρ_s相对误差$(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s})_i$，简称漏电误差，且有公式

http://www.dizhenxb.org.cn

$$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i = \eta_i \cdot f_i$$

(1)对供电线漏电

$\eta_Z \cdot I = \sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot I$. 其中，$\eta_Z$ 为每条线路总漏电系数. $\therefore \eta_Z = \sum_{i=1}^{n} \eta_i$. 当取全线路漏电点中位置函数最大者 f_{max} 代替 f_i 时，则有

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i = \sum_{i=1}^{n} \eta_i \cdot f_i \leqslant f_{max} \cdot \sum_{i=1}^{n} \eta_i$$

$\because f_{max} \cdot \sum_{i=1}^{n} \eta_i = f_{max} \cdot \eta_E$ $\quad \therefore f_{max} \cdot \eta_E \geqslant \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i$，可见 $f_{max} \cdot \eta_Z$ 为供电线路各漏电误差之和的最大可能值，用 $\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxAB}$ 表示，则 $\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxAB} = f_{max} \cdot \eta_E$，$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxAB} \geqslant \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i$

(2) 对测量线漏电

$$\eta_i = \frac{R_H}{R_{Li} + R_H} = \frac{1}{1 + \frac{R_{Li}}{R_H}}$$

实际中，$R_{Li} + R_H$

$$\therefore \eta_i = \frac{R_H}{R_{Li}}$$

由于各 R_{Li} 间是并联关系，$\therefore \frac{1}{R_{LZ}} = \sum \frac{1}{R_{Li}}$ 其中，R_{LZ} 为每条线路总漏电阻.

$\therefore \sum \eta_i = R_H \cdot \sum \frac{1}{R_{Li}} = \frac{R_H}{R_{LZ}} = \eta_Z$ 取 f_{max} 代替 f_i，则有

$\sum\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i = \sum \eta_i \cdot f_i \leqslant f_{max} \cdot \sum \eta_i$ 说明 $f_{max}\eta_Z$ 为测量线路各漏电误差之和的最大可能值.

用 $\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxM \cdot N}$ 表示，则：$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxM \cdot N} = f_{max} \cdot \eta_E$ $\quad \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxM \cdot N} \geqslant \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_i$

从而证明，取线路中总漏电系数与漏电点中最大漏电位置函数之积可以得到导线对地最大可能漏电误差.

在实际工作中，线路的 R_{LZ} 和 R_H 等参数可以实测，而装置参数和各接地点的位置是已知的，根据前述公式，η_Z 和最大漏电位置函数可以算出，从而求取导线对地最大可能漏电误差是可行的.

3. 全线路最大可能漏电误差的计算

当全线路总体漏电时，形成复杂的漏电系统. 全线路总体漏电误差既包括了上述各单项漏电误差，也包含了各漏电点存在时的相互影响误差，但是由于在现有装置条件下，后者的量级低于单项误差 2 个数量级以上，故在进行总体漏电计算时可以忽略. 因此，全线路最大可能漏电误差应为各项最大可能漏电误差的代数和.

从而得到计算全线路总体最大可能漏电误差的基本公式

http://www.dizhenxb.org.cn

$$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxZ} = \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxA} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxB} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxM} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxN} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{AB} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{MN} \tag{5}$$

等式右端，前四项为线对地最大可能漏电误差，也包含 AB 与 MN 线公共支架接地点的影响，而最后两项为 A 与 B 和 M 与 N 线间的漏电影响.

四、水槽模拟实验和台站计算实例

1. 线路漏电影响的模拟实验

为验证上述理论计算结果的正确性以及提供在实践中应用的方法，于 1990 年 7 月在山东菏泽进行了大型水槽模拟实验. 采用一套常规的地电阻率的四极对称装置，观测系统固定架设在以井水为均匀介质的水面上. 实验共分四部分：

（1）导线对地漏电实验；（2）供电线间和测量线间漏电实验；（3）有关供电和测量线间漏电问题实验；（4）全线路总体漏电的实验；实验条件由表 1 给出. 实验结果由表 2 给出.

本大型水槽模拟实验对观测线路系统中各种类型漏电现象以及各种类型漏电问题同时存在时的复杂系统的漏电进行了模拟和实验观测. 其结果由表 2 给出. 可见，每类型实验结果都与理论值相符合，其差别属观测误差. 同时，根据实验所得全线路总体漏电参数的实测值，用已导出的全线路最大可能漏电误差理论公式进行计算，所得最大可能漏电误差的估算结果与实际漏电影响值相比较，实测漏电误差确在最大可能漏电误差的估算范围内.

表 1　实验条件

实验设备	观测条件	资料测取	有关参数
仪器： DDC－2B 电子自动补偿仪（1.5 级） C41 型直流表（0.2 级） C21 型直流表（0.5 级） 导线： 铜芯胶质线 电极： 铅电极，直径 2mm 镀金电极，截面 1.5mm² 水槽：硬塑料 电源：甲电池	采用四极对称装置 AB＝10cm　　MN＝10cm K＝1.178 水槽体积： 180×120×100cm³ 水质：菏泽台井水 电阻率 7－7.5Ωm. 实验电极及实验漏电接地电极均固定安装在一个泡沫塑料极上，用支架将其悬于空中 电极入水深度：2－4mm	观测次数： 每项测试数据均为 5 组以上读数的平均值 观测顺序： 先测无漏电影响的正常 ρ_s，再读有漏电时的 $\rho_{s漏}$，取 $\frac{\rho_{s漏}-\rho_s}{\rho_s}$ 作为漏电误差实测值. 在读取测量电压 ΔU 和供电电流 I 的同时，读取串接于漏电通路中电流表指示的漏电电流值	供电电压：由三组甲电池并联，9V. 供电电流：4－6mA 漏电电流 40μA±接地电阻 1－1.5kΩ 漏电阻（绝缘电阻）： 75kΩ，91kΩ，550kΩ，60kΩ，70kΩ，1220kΩ，1.8MΩ，6.6MΩ

http://www.dizhenxb.org.cn

表 2 漏电影响的实测与理论值比较

漏电类型	漏电部位			漏电时 ρ_s 测值(Ωm)	无漏电时 ρ_s 正常值(Ωm)	实测漏电影响误差(%)	理论漏电影响误差(%)	实测与理论差值(%)
	点位	坐标(cm) x	y					
供电线 A 对地漏电	A_1	150	0	7.60	7.51	1.20	0.39	0.81
	A_2	13.0	3.0	7.19	7.12	0.98	0.65	0.33
	A_3	6.5	1.5	7.69	7.21	6.66	5.96	0.7
供电线 B 对地漏电	B_4	−3.0	2.0	7.67	7.11	3.51	4.10	−0.59
测量线 N 对地漏电	N_5	−3.0	−2.0	7.37	7.41	−0.54	−0.29	−0.25
	N_6	0	−4.0	7.27	7.30	−0.96	−0.66	−0.3
	N_8	−6.0	−2.0	7.51	7.11	0.94	0.14	0.8
测量线 M 对地漏电	M_7	3	−3.0	7.47	7.52	−0.65	−0.29	−0.36
A 对 B 线间漏电			7.01	7.01	0	−0.45	0.45	0.45
M 对 N 线间漏电			6.89	6.94	−0.72	−0.27	0.45	−0.27
变线间 A 对 M 线为 A,M 对地漏电	公 9	0	1	7.45	7.41	0.54	0.012	0.55
全线路综合漏电	上述各项均存在			7.77	7.52	3.32	3.73	−0.41
全线路最大可能漏电误差:计算结果 6.57%(以实测参数进行估算)								

2. 菏泽台全线路最大可能漏电误差计算实例

菏泽台新南北向线路 AB 极距为 1600m,MN 为 300m,线路通过电杆接地,线路有关参数实测结果列于表 3.

表 3 菏泽台 SN 向线路实测参数

线路	A	M	N	B	备注
绝缘电阻(MΩ)	320	1000	100	250	相对湿度 65%, 1986 年 8 月 30 日
	∞	∞	∞	∞	相对湿度<65%, 1986 年 3 月 5 日
	2.5	20	12	8	相对湿度 100%, 1985 年 11 月 21 日
接地电阻(Ω)	6.0	8.4	4.4	4.6	接地电阻仪器测量,1986 年 11 月
回路总负载(Ω)	22				用(供电电压 V/供电电流 I)算得
A,B 线间绝缘(Ω)	A 对地绝缘+B 对地绝缘 2.5+8=10.5(MΩ)				湿度 100%, 1986 年 11 月 21 日
MN 线间绝缘(Ω)	M 对地绝缘+N 对地绝缘 20+12=32(MΩ)				湿度 100% 1986 年 11 月 21 日
其它	SN 向线路 AB=1600m, MN=3000m, AB 与 MN 线间公共支架接地				

http://www.dizhenxb.org.cn

根据表 3 所给参数，采用所编制的计算机程序，计算菏泽台 ρ_s 资料漏电影响的上限，当湿度为 100%的大雾天气

$$\begin{aligned}\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxZ} &= \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxAB} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxMN} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{AB} + \left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{MN} \\ &= 2.93\times10^{-4} - 4.0\times10^{-7} - 2.09\times10^{-8} - 5.6\times10^{-9} \\ &= 2.9\times10^{-4}\end{aligned}$$

当湿度为 65%时

$$\left(\frac{\Delta\rho_s}{\rho_s}\right)_{maxZ} = 1.2\times10^{-6}$$

这一计算结果表明，菏泽台的 ρ_s 资料是不漏电的，由表 3 可知，在相对湿度 100%的大雾天，线路绝缘指标是很差的，但 ρ_s 资料竟不受漏电干扰，这与线路的合理布局有关，新 SN 向线路的布局考虑了漏电场空间分布，也采用了“接地法”将供电线与测量线间漏电转化为线对地漏电，因而经济、方便地提高了线路抗漏电干扰的能力.

参 考 文 献

E. M 克维亚特柯夫斯基，1958. 电法勘探教程(中译本)，254－258. 地质出版社，北京.

刘昌谋、秦乃岗、黄道立、范南星、欧阳记，1985. 电阻率测量导线漏电的模拟实验. 华南地震，4，50－58.

荣英华、汪雪泉、郑兆苾、吴培稚，1985. 外线路漏电对视电阻率影响及防止的实验. 地震，2，39－43.

郑兆苾，吴培稚，1986. 地电阻率法的一个重要干扰因素——线间漏电. 地震，3，26－30.

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA