

改进常规的交流四极法 测量土壤高电阻率

李相怡* 翁永基

(华东输油管理局科研所)

李相怡,翁永基.改进常规的交流四极法测量土壤高电阻率.油气储运,1994,13(1):50~54

摘 要 由于现有的交流四极法仪表难以在高电阻率土壤中进行测量,为此,提出了两种扩大四极法测量电阻率范围的方法,即极距调整法和并联电阻法。极距调整法是采用不等的电极间距,以改变电阻表的测量范围。并联电阻法是在电流电极之间或电位电极之间并联一个已知阻值的电阻,以提高 ZC-8 表测量高电阻率的范围。分别推导了它们的计算公式,讨论了并联电阻法 r 值的确定、对测量计算值的影响和 R_0 的选用原则及其实际应用。改进后的交流四极法在新疆塔里木油田土壤腐蚀调查中,解决了对土壤高电阻率测量用常规的四极法根本无法测定的难题。

主题词 勘察 电阻率 四极法 并联 公式 仪表

问题的提出

交流四极法是现场测量土壤电阻率最常用的方法^[1],其操作简便,优于一般的单电极法和土壤盒法,广泛用于工程勘察和土壤腐蚀性评价中。测量原理是:将 4 根电极沿直线隔一定的距离分别插入土壤,两个外电极(A 和 B)间流过一定的电流 I ,假定土壤电阻率为 ρ ,那么,距 A 和 B 为 r 处的土壤电流密度为 $I/2\pi r^2$,根据欧姆定律,可推出 C D 间的电位差^[2]:

$$\frac{dU}{dr} = \frac{I}{2\pi r^2} \cdot \rho \quad (1)$$

$$\Delta U = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I \rho}{2\pi r^2} dr = \frac{-I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2)$$

由 A 点流入电流引起的 C D 间电位差 ΔU_1 为:

$$\Delta U_1 = \frac{-I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) = \frac{I \rho}{4\pi a}$$

同理 B 点流出电流引起的 C D 电位差 ΔU_2 为

$$\Delta U_2 = \frac{I \rho}{4\pi a}$$

所以, C D 间测得的电位差

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = \frac{I \rho}{2\pi a}$$

* 221008,江苏省徐州市翟山;电话:(0516)888533 转 9082。

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

实际测量时,常采用 ZC-8 接地电阻表,该表是按电位计原理设计的,其工作原理见图 1(引自资料[3])。

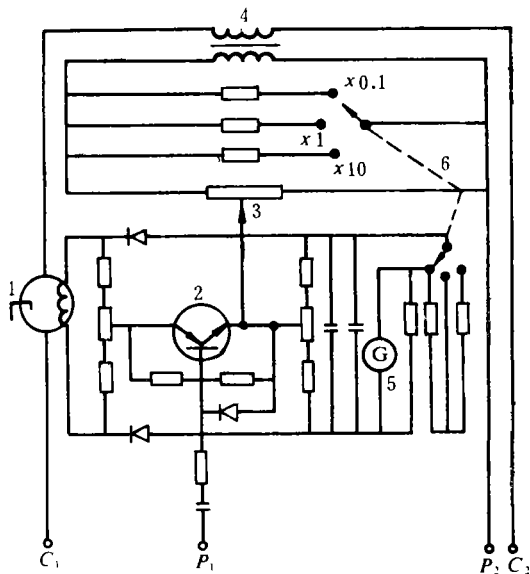


图 1 ZC-8 接地电阻表工作原理图

1—手摇交流发电机;2—相敏整流放大器;3—电位器;
4—电流互感器;5—检流计;6—量程开关

表壳上的 C_1, C_2 端为电流端; P_1, P_2 端为电位端。表头读数直接给出 $\Delta U/I$ 值,即电阻值 R ,电阻率公式可直接按下式计算:

$$\rho = 2\pi a R \quad (4)$$

ZC-8 表有三个量程档: $\times 0.1; \times 1; \times 10$,表头满刻度为 10Ω ,最小示值为 0.1Ω ,故实际测量的范围为表 1 所示。

表 1 ZC-8 表的测量范围

量程档	$\times 0.1$	$\times 1$	$\times 10$
R 测量范围/ Ω	0.01~1	0.1~10	1~100
$a=1 \text{ m}$ 时, ρ 测量范围/ $\Omega \cdot \text{m}$	0.063~6.3	0.63~63	6.3~628

多数土壤电阻率位于表 1 范围,但某些干旱区或冻土带,如我国西北地区,ZC-8 的高电阻率测量范围显得不够。随着该地区油

气工业的开发和建设,对高电阻率土壤环境的研究也需要加深。下面介绍两种可改变电阻率测量范围的方法,即极距调整法⁽⁴⁾和并联电阻法,重点讨论它们在高电阻率土壤中的应用。

极距调整法

采用不等的电极间距,可以改变电阻表的测量范围。假如,电流电极与内电极的间距仍维持为 a (即 AC 和 DB 距离),而内电极间距变成 b (即 CD 距离),那么,同上节中的推导,公式(2)中的 $r_2 = a + b; r_1 = a$

$$\text{即: } \rho = \pi \cdot \frac{\Delta U}{I} \cdot a \left(\frac{a+b}{b} \right) \quad (5)$$

$$\text{或改写成: } \rho = 2\pi a R k \quad (6)$$

式中, R 为表头读数; $k = (a+b)/2b$ 。

当 $a = b$ 时, $k = 1$,公式(6)恢复成公式(4);

当 $a > b$ 时, $k > 1$, ρ 的最高测量范围扩大;

$a < b$ 时, $k < 1$, ρ 的最高测量范围缩小。

例如,当将内电极距离减小至 a 的 $1/9$ 时,可测到的最高电阻率将提高 5 倍。这种方法测量高电阻率土壤的优点是不需增加任何设备,十分简便,测得的电阻率是以 a 为内径,厚为 b 的半球壳土壤的平均电阻率,但考虑到测量误差, a/b 的比值不宜过大或过小。

并联电阻法

在电流电极之间或电位电极之间并联一个已知阻值的电阻,可提高 ZC-8 表测量高电阻率的范围。本文以电位电极间并联一个标准电阻 R_0 ,推导其计算公式和应用方法。

1. 公式推导

如图 2 所示, R_0 加在两个内电极之间。仍以公式(1)为基本出发点。

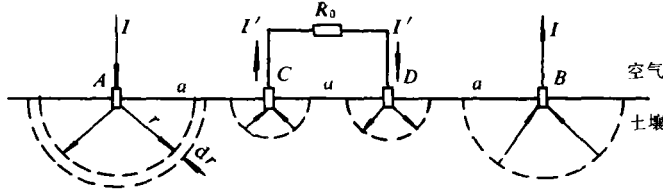


图2 并联电阻示意图

A 点流入电流造成的 CD 电位差 U_1 为:

$$\Delta U_1 = I \rho / 4\pi a$$

B 点流出电流造成的 CD 电位差 ΔU_2 为:

$$\Delta U_2 = I \rho / 4\pi a$$

在 C 点有一个分流 I' 流出, 造成 CD 电位差 ΔU_3 , 此时, 不能将 C 看作点电极, 其有效半径假设为 r , 则:

$$\Delta U_3 = \frac{I' \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right)$$

同理, D 点有分流 I' 流入, 造成 CD 电位差 ΔU_4 ,

$$\Delta U_4 = \frac{I' \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right)$$

所以, CD 电位差 ΔU 应为:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 \\ &= \frac{I \rho}{2\pi a} + \frac{I' \rho}{\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right) \end{aligned}$$

这个 ΔU 又应当等于 $I' R_0$, 由此可解得:

$$I' = \frac{I \rho}{2\pi a R_0 + 2a \rho \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

表头读数 R 为:

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{R_0}{\frac{2\pi a R_0}{\rho} + 2 \left(\frac{a}{r} - 1 \right)} \quad (7)$$

所以, 电阻率计算可按式(8)进行:

$$\rho = 2\pi a R \cdot \frac{R_0}{R_0 - 2 \left(\frac{a}{r} - 1 \right) R} \quad (8)$$

式中最后一项相当于式(6)中的 k 值, 只

要 a/r 的比值足够大, k 总是大于 1 的, 即扩大了高电阻率的测量范围。

2. 公式验证

为验证公式(8)的正确性, 将式(7)整理

$$\text{得: } R_0 = \frac{2\pi a}{\rho} R R_0 + 2 \left(\frac{a}{r} - 1 \right) R$$

两边除以 $R_0 R$, 即得到:

$$\frac{1}{R} = \frac{2\pi a}{\rho} + 2 \left(\frac{a}{r} - 1 \right) \cdot \frac{1}{R_0} \quad (9)$$

令 $\alpha = \frac{2\pi a}{\rho}$; $\beta = 2 \left(\frac{a}{r} - 1 \right)$, 式(9)可写成

线性方程形式: $y = \alpha + \beta x$

式中: $y = \frac{1}{R}$; $x = \frac{1}{R_0}$

在不移动四根电极的情况下, 测量一系列不同并联电阻 R_0 下的表头读数 R , 即可验证公式(9)的正确性。经多次试验表明, y 和 x 确为线性关系, 其相关的系数均在 0.98~0.99 左右。一组典型的实验数据绘于图 3。

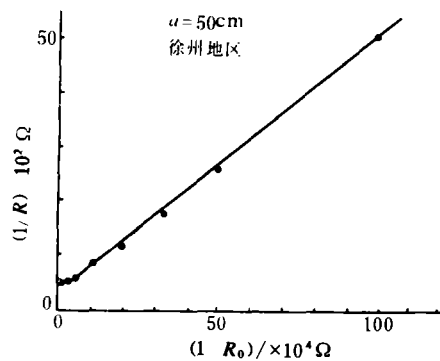


图3 并联电阻 R_0 和表头读数 R 的关系

并联电阻法的几点讨论

1. r 值的确定和其含义

式(8)中的 r 被定义为插入土壤的电极有效半径。这个值和电极实际半径并不严格相等,当电极插入过深或浇水过多时,这个值可能变大。实用时通过两组以上不同并联电阻的测量值,解联立方程可求得 r 值。据我们在新疆和徐州等地区的多次测量计算, r 值一般在 $0.8 \sim 3 \text{ cm}$,总是比其实际半径(约 0.4 cm)大,有时这种偏大的原因可归结于电极与土壤接触电阻过大,因为并上 R_0 后,电位电极与土壤的接触电阻实际上被当作一种 R_0 的附加值来对待。根据式(9)可以得知,当计算用的 R_0 比实际的小时,其斜率 β 值也必定减小,即 r 值增大。

2. r 值对测量计算值的影响

由式(8)可知, r 有一个临界值 $2R_0 a / (R_0 + 2R)$,当 r 小于等于此值时,式(8)中的分母变成负值或零,计算结果无意义。 r 值由此临界值增大达到某一个 r_0 时,计算值由 $+\infty$ 逐渐接近等于正确值, r 再增大时,计算值又会偏离正确值。这种变化受并联电阻 R_0 的影响极大, R_0 越大,在 r_0 附近的 r 值变化所引起的测量计算值误差越小。图 4 中的几组典型实验曲线反映了 R_0, r 和计算值 $(\rho/2\pi a)$ 之间的相互关系。

3. 并联电阻 R_0 的选用原则

原则上,减小 R_0 值可使 ZC-8 表测出任意高的土壤电阻率,但 R_0 过小会造成极大的测量误差,此时,不仅 r 和接触电阻影响明显,即使是表头的正常读数误差也会造成计算值的极大偏差。图 5 表示了不同 R_0 下测量值的计算数据和正确值之间的偏差程度。由此可见, R_0 的正确选用原则是以 $\times 10$ 档能够读到表头读数时所取的尽可能大的值为宜

(一般不宜低于 2000Ω)

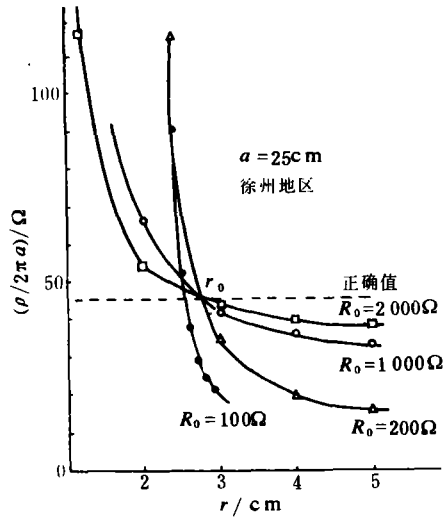


图 4 R_0 和测量计算值的关系

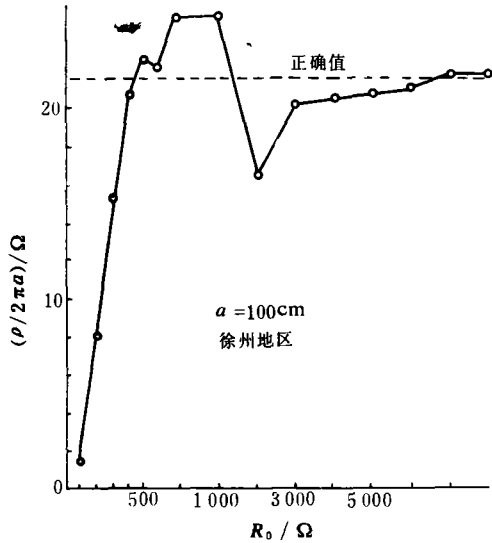


图 5 不同 R_0 下测量值的计算结果和正确值的比较

并联电阻法的实际应用

1. 截距算法

采用在同一条件下,并联两个以上不同阻值的并联电阻 R_0 ,读出相应的表头读数 R ,按图 2 的形式,绘出 $1/R$ 和 $1/R_0$ 的关系,

该直线与 $1/R$ 轴的交点代表 $\rho/(2\pi a)$ 值, 由此可求得土壤电阻率 ρ 。

2. 标准参数法

根据一次并联电阻 R_0 的读数值, 并选用适当的 r 值(如 $r=2.5$ cm), 用公式(8)可直接求出土壤电阻率的近似值。但正如前面已讨论过的, 并联电阻 R_0 的值应当足够大, 否则造成的计算误差可能会难以容忍。

结束语

本文介绍的测试方法曾在新疆塔里木油田土壤腐蚀调查中采用, 该地区的一些沙漠及戈壁区电阻率极高(用单电极法测量达 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上), 常规的四极法根本无法测定, 用本文介绍的方法基本解决了这个难题。部分数据汇于表 2。

由表可见, 尽管单电极法在地下 1.5 m 处测的数据和地面四极法数据有差异, 但从变化趋势看, 加并联电阻测的数据和常规四极法数据具有一致的变化趋势, 数据是可信的。本文介绍的方法, 为高电阻率土壤地区的工程建设和研究腐蚀规律, 提供了有效的方

法和有用的基础数据。

表 2 四极法和单电极法测量数据对照

测量 编号	位 置	四极法 / $\Omega \cdot \text{m}$	单电极法* / $\Omega \cdot \text{m}$
45	塔中路 15 号里程桩	289 (未并联电阻)	3 650
51	肖塘点前 20 km	1690 (并联法)	45 909
53	塔中路 25 号里程桩	474 (并联法)	5 400

*单电极法是在坑内(地下 1.5 m 处), 用电导电极测量。

致谢: 本项工作得到塔里木石油勘探指挥部王章吉副总工程师的帮助和指导, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 全国土壤腐蚀试验网站. 材料土壤腐蚀试验方法. 科学出版社, 1990: 128~132
- 2 H H Uhlig et al. Corrosion and Corrosion Control. 3rd ed, John Wiley & Sons Inc. 1985: 424-425
- 3 北京电表厂. ZC-8 接地电阻表使用说明书
- 4 ASTM G 57~84

(修改稿收到日期: 1993-07-10)

编辑: 艾德蓉

《油气储运工程论文集》简介

《油气储运工程论文集》荟萃了著名的油气储运工程技术专家——潘家华撰写的论文 40 篇, 主要论述我国管道工业的发展历史、现状和未来; 大型储油罐的设计、施工和可靠性分析; 长输管道的选材、强度计算和断裂分析。作者应用断裂力学的理论, 分析了长输管道脆性及韧性断裂破坏现象, 探索了裂纹失稳扩展的规律, 研究了储油罐大型化以后, 在强度计算和焊接技术方面出现的新问题。该书理论精湛, 深入浅出, 视野开阔, 资料翔实, 是一部集科学性、实用性、指导性和可读性于一体的科技文献。

文集不仅适用于油气储运界的技术人员, 而且对石油化工, 给排水、煤气供应、热力管网、输煤管道等部门的技术人员和有关高等院校的师生有重要的参考价值。

文集由石油工业出版社、新华书店北京发行所发行。读者可通过新华书店或石油工业出版社购买, 亦可通过本社杂志社邮购。

本书按大 32 开排印, 362 页。

该书定价: 平装本 12.00 元(含邮资)

精装本 17.00 元(含邮资)

本社地址: 河北省廊坊市金光道 22 号管道勘察设计院

开户行: 河北省廊坊市工商行管道办

帐号: 005—0211 1111

邮政编码: 102849

电 话: (0316)834711

《油气储运》杂志社