

近区交流电阻率法及其应用^①

何继善

(中南工业大学地球物理勘察新技术研究所, 长沙 410083)

摘 要

针对隧道喷层和高等级公路路面无损厚度检测, 或解决开采坑道中一些特殊地质问题的需要, 发展了一种能对浅深度、小厚度介质进行测量的近区交流电阻率法。其特点是测量速度快, 可克服恶劣的接地条件, 抗工业频率干扰的能力强, 具有很好的推广应用价值。

关键词: 交流电阻率法 近区 接地电阻 微测深

在工程地质、文物保护、矿山开采等工作中常常需要无损地探测深度小、厚度也不大的对象。以铁路隧道的水泥砂浆喷层为例, 其厚度一般需 10 cm 左右, 太薄则不能满足支护强度的要求, 故需加以检测。通过开凿当然可以得知其厚度, 但费事又会损坏喷层, 且不可能到处开凿, 否则的话, 把喷层凿得百孔千疮也会影响其强度。

上述问题似乎可以用声纳来解决, 其实不然, 因为厚度不大, 为了保证必要的分解率, 所用声纳的频率必然较高; 而且遇到两个问题, 第一, 喷层本身不均匀, 有砂和其它物质等。第二, 隧道的开挖面并非一个平面, 而是凹凸不平。因此, 用声纳并不能得到很好的反射波和测量效果。又如, 在煤矿中, 常需探测夹矸、残煤层和隔离层煤层厚度。高等级公路也要检验其路面厚度等等。这些探测对象一般厚约数十公分, 虽较隧道喷层厚些, 但其地球物理条件是类似的。

上述各种工程和地质问题中的浅层探测, 由于探测对象存在电阻率差异, 从原理上说, 可以使用视电阻率法。但在实际工作中, 如果使用直流电阻率法, 几乎无法工作, 这是因为它们存在如下技术难题。

(1) 电极接地电阻极高。

由于探测对象出露于表面或埋藏浅而且不厚, 最小电极距很小, 最小的 MN 距离仅 1 cm, 为了使之满足点状电极的要求, 不但电极的直径要很小 ($< 1\text{ mm}$), 而且入土深度也要很小。在水泥喷层表面或在坑道帮壁上工作时, 电极只以其尖端接触其表面。因此, 接地电阻很高, 一般约 $100\text{ k}\Omega$ 到 $n \times 100\text{ k}\Omega$ 。

(2) 由于电极小, 只能使用铜电极; 加上接地情况不好, 其极化电位差变化很大且很快速, 使极化补偿事实上无法进行。

(3) 工程探测工地各种电气干扰严重, 例如在坑道或隧道中, 存在多种电气作业, 不但有很强的 50 Hz 工业频率及其谐波的干扰, 还有各种机械起动或停止时所形成的脉冲电干扰, 这种脉冲在时间上的分布是随机的, 波形也是变化的。最使人头痛的是直流电机车所造成的非常强烈的干扰。

(4) 工地的作业条件差, 坑道中更是泥泞潮湿, 一般电阻率法仪器难于进行工作。

(5) 在用小极距工作时, 要求电极的定点精度高, 特别是电极之间距离的相对精度。

上述技术困难使得很难甚至无法使用常规的直流电阻率法, 特别是电极极差的快速变化使之无法进行跟踪补偿和测量。为此需用交变电场, 使工作得以顺利进行。

^① 收稿日期: 1994 年 9 月 5 日

1 近区交流电阻率法及仪器

采用交变电流场有多种不同的方案,例如可采用电偶极或磁偶极发射/接收,可以在近区、过渡带或波区工作。根据上述问题的地球物理条件,研究采用近区场,或者说是在准直流条件下工作。这样,除了用交变电流工作之外,其理论解释和工作方法都可以与直流电阻率法相同。问题的关键是必须在近区工作。

从电磁场理论可知,近区、过渡带和波区的划分不是仅由收-发距离决定,它还与工作频率及介质导电率有关,而且可由电感应数 D 的大小来决定。为方便计算,只涉及轴向偶极装置,并以 $AB = MN = a$, $BM = na$ 为例来讨论(A 、 B 为供电电极, M 、 N 为测量电极, a 为常数, n 为自然数)。在此条件下,当介质中是以传导电流为主时,电感应数 D 为:

$$D = (n + 1)a \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\rho}} \quad (1)$$

式中 μ 为介质的导磁率,在非磁性岩石的情况下,其常见值为 $1.256 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; f 为工作频率; ρ 为介质的电阻率。

为了使工作能在近区进行,必须使 $D \ll 1$ 。如果只测定支护喷层的厚度,因为只有数公分,取 $(n + 1)a$ 的范围为 $0.01 \sim 1.0 \text{ m}$ 就可以了。但为了使之在其他相似条件下也能工作,以扩大其应用范围。最大极距应超过 $10 \sim 50 \text{ m}$ 。再考察到实际工作中所遇到的电阻率的范围,选定 $10 \sim 20 \text{ Hz}$ 是合理的。

基于以上讨论,自 1985 年起,受铁道科学研究院铁建所委托,中南工业大学先后研制成 C—1 和 C—2 型低频电阻率仪,由于当时的特殊用途,定名为“微测深仪”,其特点包括:

(1) 工作频率选为 16 Hz

选择 16 Hz,除了能满足前面论证的近区条件外,还考虑到在这样的工作频率下工作,其速度会快一些,发送机的电流变换器可以轻一些。但最好是选择离 50 Hz 远一些的频率,以便压制工业频率场源的干扰。

(2) 高电压、高阻抗发送电流

供电电极的接地电阻大,变化也大,为保证测量精度,必须使供电电流维持稳定。将输出电压适当提高,且在输出回路接入镇流电阻,便能使供电电流维持在要求的精度范围内。

(3) 测量电极的接地电阻补偿

测量电极的接地电阻很大,要求接收机有很高的输入阻抗,但隧道中十分潮湿,输入阻抗过高不易稳定。因此,除适当提高输入阻抗之外,还采取接地电阻补偿,以保证结果的精度。接地电阻补偿的原理是将接地电阻作为转入电阻的一部份。例如,输入级用反比例放大器,则其放大倍数 K 为:

$$K = R_2/R_1 = R_2/(R + R_0) \quad (2)$$

式中 R_2 为反馈电阻; R_1 为输入电阻,而 R_1 由可调电阻 R 和接地电阻 R_0 组成。根据 R_0 改变 R 的大小,使之等于常数,这样一来,放大倍数便不会因为 R_0 的变化而变化,从而大大提高了有效输入电阻。

如果不采取补偿电路,则采用 R_2/R 计算放大倍数。而 R_0 必须远小于 R ,才能保证精度。例如:如果 $R_0 = 250 \text{ k}\Omega$,为了使它引入的误差小于 1%,那么必须使输入电阻 $R \geq 25 \text{ M}\Omega$ 。这样大的输入电阻并不难获得。然而,在坑道等十分潮湿的条件下,由于与其并联的漏电阻的存在,而使得此输入电阻难于稳定。

采用补偿方式则情况有很大的改善。例如,取 $R + R_0 = 3 \text{ M}\Omega$ 是很容易达到的。在这种情况下,即使 R_0 达到 $250 \text{ k}\Omega$,对测量结果的影响只有 $\pm 1\%$ 左右,也就是说,其等效输入电阻为 $25 \text{ M}\Omega$,比实际的提高了 8 倍多。而 $3 \text{ M}\Omega$ 的输入电阻在潮湿情况下,也稳定多了。接地电阻补偿既可用硬件,也可通过软件来实现。

(4) 直接显示视电阻率

为了提高测量速度,直读视电阻率是必要的。直接显示视电阻率可以有不同的方式,计算视电阻率的公式为

$$\rho_s = K \frac{U}{I} = \frac{K}{I} U \quad (3)$$

可以事先将 K 值存入接收机中, 根据 ΔU 和 I 按上式计算后直接显示 ρ_s 。我们还在发送机中接入不同的镇流电阻, 使 K/I 保持定值。例如当 K/I 保持为 1 时, ρ_s 在数值上便等于 ΔU , 因而, 测得 ΔU 便可显示 ρ_s 值, 十分简便。

(5) 综合压制干扰

隧道中的干扰很强, 我们采取综合措施以提高信噪比: (a) 有一定宽度谷底的 50 Hz 陷波器。我国工业用电频率由于负荷过重常常不是 50 Hz, 而是偏低, 且因负荷的变化而变化。为了在任何场合下都能很好地压制工业干扰, 必须使陷波器谷底有一定宽度。(b) 低通滤波器进一步压制工业频率及其谐波的干扰。(c) 相干检波以压制 16 Hz 和接近 16 Hz 的干扰。(d) 积分积累进一步提高信噪比。

有关仪器的具体设计请参看[1]、[2]。

2 应用情况

C—1 和 C—2 微测深仪分别于 1986 年和 1989 年通过部级鉴定, 随后进行了推广应用。作为一种微测深仪, 在设计时从硬件到软件都对于如何适应测深工作作了周密的考虑。但从本质上说, 它又是一种通用的轻便低频交流电阻率仪, 故应用范围很广。这些年来, 它除了用于隧道的喷层无损测厚之外, 还用于公路路面砟及基层检测, 寻找和圈定古墓, 测定文物的风化层深度及其损坏情况, 水文探测以及配上磁探头作磁电阻率测量等等, 都取得了成功的结果。而且, 由于其轻便、测量速度快和抗干扰能力强, 深得用户好评。许多隧道中喷层测厚的结果与开凿结果对比说明, 平均误差小于 1 cm。下面举检测公路路面、乐山大佛和煤矿坑内应用的例子。

湖南漆五公路完工后, 受漆五公路监理部委托对路面砟及基层进行了检测。路面可分为三层, 顶层为砟, 中间层为基层, 其下为底层(包括沥青层, 底层或软底层)。绝大部分情况下, 为 H 型曲线, 图 1 就是一条较为典型的曲线。每个台班可以完成约 30 个测深点, 速度是

较快的。经过数据处理和对曲线用辅助量板法、切线法、特征点法、K 剖面法和计算机自动反演等作定量和半定量解释, 加上曲线类型及视电阻率数值等的对比分析, 对于路面的施工质量提供了可靠的资料, 与开挖结果对比很吻合, 使委托单位满意, 施工单位信服。

对乐山大佛用 C—1 微测深仪所作的无损检测是一个既成功又有趣的例子。由于乐山大佛的附加层与砂岩间、不同质的附加层间、不同的砂岩间、砂岩与其中的坑(或穴)间有电阻率差异, 使用了微测深、电测深、五极纵轴测深、对称四极电剖面法、三级剖面法等方法对大佛的头、身、手、脚各部位进行检测。发现了脸部砂岩有 5 处破损或坑穴, 最深达 1 m, 佛身砂岩表面风化约 10 cm 等等。图 2 是大佛脚面上电剖面曲线的解释结果, 右脚砂岩风化比左脚严重。

中国矿业大学北京研究生部宁书年、吕松棠二位教授与铁道科学院钟兴航高工, 从 1991 年 11 月起在淮北、开滦和西山三个矿务局用高精度电法和高频地震法在井下综合探测煤层厚度, 取得了可喜成果。其中高精度电法就是用 C—1 微测深仪完成的, 它克服了高达 500 k Ω 的接地电阻, 工作完全正常。

在三个矿务局的不同煤矿, 在地质条件不同的情况下, 分别进行了井下坑道或采区的高分辨率电法试验。其中, 淮北矿务局朔里矿和西西矿的实测结果证明, 分层精度决定于电法的电极距大小, 若电极距是 20 cm, 则可以区分

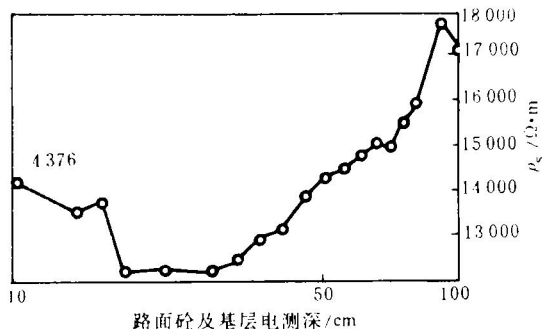


图 1 漆五公路路面砟及基层四极对称电测深曲线示例

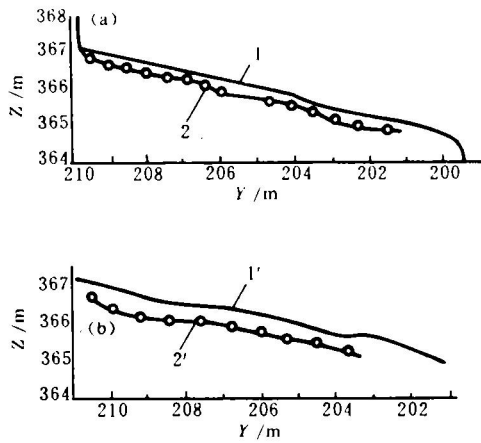


图2 乐山大佛的脚面电阻率
剖面法解释结果

(a)—左脚; (b)—右脚;

1—左脚轮廓线; 2—左脚电测深曲线;

1'—右脚轮廓线; 2'—右脚电测深曲线

20 cm 以上的煤层夹矸, 且探测残煤层和隔离层煤层厚度的精度可以达到 20~40 cm。此外, 不但可以准确显示残煤层底板, 而且可以准确定出隔离层煤层的顶、底板和夹矸, 准确度也达 20~40 cm(见图 3)。

由图 3 可以看到, 高精度电法电阻率曲线对煤层顶板、底板和夹矸均有明显反映。虽然从表面上看来该曲线的特征位置与柱状图上的相应位置有平移, 但那是由于作图及原理上的差异, 而推算出的厚度则是正确的。

3 结束语

(1) 在隧(巷)道喷层、公路路面、文物古迹保护及薄煤层(含残煤层、隔离煤层、夹矸层)开采等工程及地质实践中, 常需对厚/深度不超过数十厘米的浅深度/小厚度作无损探测。

(2) 用近区交流电阻率法进行上述条件下的浅深度/小厚度探测是最佳选择, 特别是探测对象不很均匀、接地电阻特别大, 以及工作场地潮湿、存在多种电气干扰等不利因素, 使传统的声纳技术及直流电阻率法无法获得准确的探测结果。

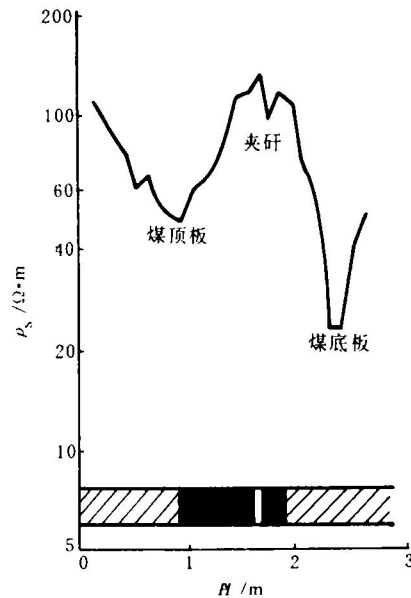


图3 塑里煤矿井下高精度
电法探煤曲线

ρ_s —视电阻率; H —煤层厚度

(3) 采用近区交流电阻率法、优选工作频率、保持电源稳定、综合压制干扰、实行接地电阻补偿及视电阻率直接显示, 能够准确地探测上述浅深度/小厚度。

(4) 采用由中南工业大学研制的 C1 及 C2 型微测深仪(低频交流电阻率仪), 对铁路隧道水泥砂浆喷层、漆五公路路面、乐山大佛、以及淮北、开滦和西山等矿务局所属许多煤矿的残煤层、隔离煤层, 进行了非常成功的近区电阻率探测, 所得结果与实际情况吻合良好, 证明该仪器具有很好的推广应用价值。

参考文献

- 1 何继善. 地学仪器, 1993, (1): 32—38.
- 2 鲍光淑, 何继善. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(1): 1—5.
- 3 温佩琳. 漆五公路路面砼及基层检测报告. 中南工业大学, 1992.
- 4 钟世航. 用视电阻率法、核物探法探查乐山大佛现状的研究报告. 铁道科学研究院铁建所, 1991.
- 5 宁书年等. 应用高精度电法与高频地震法在井下综合探测煤厚成果报告. 中国矿业大学, 1993.