

# 复频电导技术在隧洞超前探水中的应用

陈方明<sup>1</sup>, 谢 晃<sup>1</sup>, 蒋 辉<sup>2</sup>

(1. 葛洲坝集团巴基斯坦 N-J 项目部, 湖北 宜昌 443002; 2. 北京同度工程物探技术有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 围岩富水带是隧道超前预报最关注的问题, 目前, 多使用电磁方法来预报围岩的含水性, 但受到场地条件限制, 面临掌子面条件、金属机具干扰、三维波场定位等诸多困难, 特别是掌子面前方 100 m 范围内围岩的含水性预报, 在国内外都是一个新的高难课题。在研究了岩体电导率与电容率复频特性的基础上, 结合巴基斯坦 NJ-TBM 引水隧洞工程, 开发了复频电导探水(CFC)技术。该技术基于电磁波反射与相干原理, 选用 100 kHz~10 MHz 频率范围, 采用电偶极子发射与阵列接收方式和偏移成像技术, 突破了隧道内场地条件的限制。依据 1/4 相干波长确定含水体的位置, 相干能量确定含水量的大小。在巴基斯坦 NJ-TBM 隧洞超前探水的应用, 证明了该方法的可行性与有效性。

**关 键 词:** 隧道超前预报; 含水性预报; 复频电导技术; 相干频率; 偏移成像

中图法分类号: TV221.2

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.012

## 1 研究背景

地质超前预报在保障隧道施工安全和工程质量方面发挥着重要作用。岩溶、暗河、断裂等含水构造, 常常会导致突发性灾难事故, 因此围岩的含水性一直是超前预报的焦点。目前, 国内外的地质超前预报技术主要以物探方法为主, 而物探法中又以地震方法为主, 很少使用电磁方法。地震方法主要是探测围岩力学性质的差异, 对于探测岩性界面、软弱带和断裂构造等地质要素效果很好<sup>[1]</sup>。围岩的含水性主要影响到导电性与电容率的变化, 对介质力学性状的改变不如电阻率改变大, 因此地震方法对含水性的敏感不如电磁方法<sup>[2]</sup>。

目前国内外用于探水的电磁方法有核磁共振(MRS)、高密度电法、音频电磁测深 CSAMT、瞬变电磁(TEM)等。这些方法主要在地面条件下工作, 很难被移植到隧道中。

目前在隧道中超前探水的多用地质雷达(GPR)<sup>[3]</sup>, 配上 100 MHz 天线, 探测深度可达 15 m 左右。但是由于探测距离太小, 不能满足隧道施工的要

需。瞬变电磁法(TEM)与核磁共振方法在隧道与坑道内也进行了有益的探水试验<sup>[4-5]</sup>, 但是在 TBM 施工隧道中, 由于无法靠近掌子面以及金属机具的干扰, 应用困难。德国 GET 公司为 TBM 施工隧道开发了 BEAM 技术, 它是一种基于双频激电原理的电磁探水仪器, 在中国高速公路铜锣山隧道<sup>[6]</sup>、京津城铁延长线隧道掘进中开始应用<sup>[7]</sup>。探测距离较短, 约为 3~5 倍的隧道截面直径, 不超过 30 m。此外, 两条近千米长的地线, 布设起来很不方便<sup>[8]</sup>。

由上述分析可知, 目前国内外还没有一种成熟的在隧道内探测距离达到 100 m 的超前探水技术。为应对 TBM 隧道探水的迫切需要, 结合巴基斯坦引水工程 NJ-TBM 项目的实践, 开发了复频电导探水(CFC)技术。CFC 技术基于含水岩体电导与电容率的复频特性, 利用电磁波反射与相干原理, 采用电偶极子阵列接收方式及偏移成像技术, 突破了隧道内场地条件的限制, 实现了含水体的探测与定位问题。CFC 技术使用 100 kHz~10 MHz 频率范围内的电磁波, 依据发射与反射波的相干频率及相干能量预报含水体的位置和水量大小。在 NJ-TBM 引水隧洞超前探水的试验中证

明了该方法的可行性与有效性。限于篇幅,本文仅对 CFC 方法的物理基础、观测方式、数据处理流程、解释原理以及应用效果做系统的介绍。

## 2 复频电导探水技术物理基础

### 2.1 岩体中电磁波传播的理论基础

隧道围岩为具有有限电导率和电容率的导电介质。电导与电容构成了岩石的复电导,与频率有关。电磁波在岩石中传播遵从麦克斯韦尔方程

$$\nabla \times (\nabla \times E) + \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中,  $E$  为电场强度;  $\mu$  为磁导率;  $\sigma$  为电导率,与电阻率互为倒数;  $\varepsilon$  为电容率,也称介电常数。上述方程是时域波动方程,变换到频域内,可得到如下亥姆霍兹方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \dot{E} + \omega^2 \mu \varepsilon (1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}) \dot{E} = 0 \\ \hat{\varepsilon} = \varepsilon (1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}) \\ \hat{\sigma} = \sigma + j\omega \varepsilon \\ \hat{\sigma} = j\omega \hat{\varepsilon} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为角频率;带有上三角“ $\wedge$ ”的电导  $\sigma$  与电容率  $\varepsilon$  都是复数。电磁波在导电介质中传播的过程是电导率决定的传导电流和电容率决定的位移电流与磁场间的相互作用实现的。传导电流引起能量耗损。复电导决定了传导电流与位移电流的大小和相位,如图 1 所示。

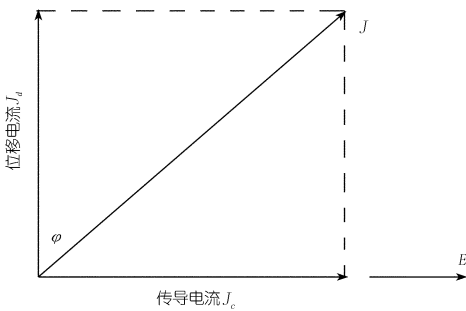


图 1 复频电导示意

图 1 中以电场矢量为参考,传导电流  $J_c$  与电场同步,位移电流  $J_d$  相位落后电场  $\pi/2$ ,与频率成正比。总电流  $J$  与复电导分别表示为:

$$\begin{cases} \dot{J} = \dot{J}_d + \dot{J}_c \\ \dot{J}_d = j\omega \varepsilon \dot{E} \\ \dot{J}_c = \sigma \dot{E} \\ p = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} = \tan \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $p$  为损耗比,即传导电流与位移电流的比值,表征电磁波传播中能量损耗的比率。它不但与介质的电导率、电容率有关,还与使用的电磁波频率有关,可以作为衡量介质电磁波传播特性的定量指标。

$p \gg 1$  时,介质为良导体,衰减大,电磁波不易传播;  $p \approx 1$  时,介质为复频介质,衰减稍大,电磁波可以传播;  $p \ll 1$  时,介质为理想电介质,衰减小,电磁波适宜传播。

实际应用中将  $p = 10$ 、 $p = 0.1$  作为良导体、复频介质与理想电介质划分的界限。

由(3)式可知,损耗比  $p$  与频率成反比,随频率增大损耗比减小。一种介质在低频下可能表现为良导体,不利于电磁波传播,但是在高频下又可能表现为理想介质,利于电磁波传播。这就是介质的频率特性。

### 2.2 含水岩体电磁探测频段的选择

为有效解决隧道超前探水问题,需要了解岩体及其含水后的电磁频率特性,以便合理地选择工作频率。岩石的电磁波传播特性与电导率、电容率、磁导率和频率有关。自然界中绝大多数物质的磁导率变化不大,为  $4\pi \times 10^{-7}$  左右。岩石虽然种类繁多,但是其干燥岩体的相对电容率(介电常数)变化在  $4 \sim 9$  的范围内,代表值为 6;干燥岩石的电导率变化在  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  范围内,代表值  $3.3 \times 10^{-4}$ 。岩体含水后电容率成倍增加,变化在  $20 \sim 40$  之间,代表值 30;含水后电导率的数值有两个数量级的增大,代表值  $3.3 \times 10^{-2}$ 。使用上述典型数据,采用对数坐标,得到岩体及含水后损耗比  $p$  与频率  $F$  的对应关系如图 2 所示。

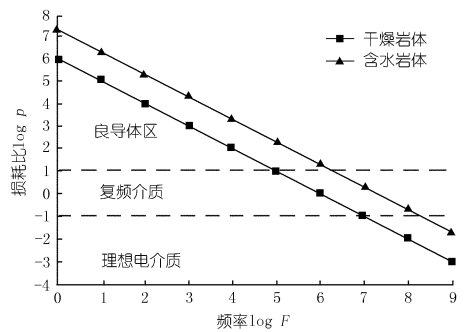


图 2 岩体损耗比与频率的对应关系

由图 2 可以看出干燥岩体与含水岩体电磁特性的明显差异。对于干燥岩体,损耗比  $p = 1$  时,对应的特征频率为 1 MHz;对于含水岩体,  $p = 1$  时,对应的频率特征频率为 20 MHz。这说明,如果选择 1 MHz 为中心频率、频带 100 kHz ~ 10 MHz 的电磁波进行探测,干燥岩体表现为复频介质,而含水岩体则表现为良导体,在两者接触的界面上电磁波将全部反射,极有利于发现含水构造,这为 CFC 技术的频段选择提供了物理依

据。当岩体及其含水后的电阻率及电容率与上述代表值有一定差异时,特征频率会有一定的变化。

3 隧道内 CFC 的观测方式与仪器

3.1 观测方式

CFC 探水采用电偶极子发射与电偶极子阵列式接收的观测方式。阵列式接收的目的是提高观测系统的方向性,使掌子面前的介质界面信号得到加强,而上下方向的信号被削弱。排列的电极越多,成像的方向性越好。电极埋设于隧道两侧围岩中,不需占用掌子面,同时,可有效地避免隧道内金属机具的电磁干扰。阵列式采集有两种工作方案,一种是大排列方式,另一种是组合方式。大排列方式是采用一对电极 AB 发射,多对电极 MN 组成阵列同时接收;组合方式是用一对电极发射一对电极接收,保持间距不变,整体平移,多次发射-接收,组合成阵列数据。两种方式的探测效果相同,后者每次仅采集两道数据,更容易满足接收设备的要求。数据采集中 A、M 电极布置在隧道一侧, B、N 电极布置在另一侧,沿隧道排列,如图 3 所示。AB、M1N1、M2N2、M3N3 的间距为 5~10 m,电极长度 1.5~2.0 m。与掌子面保持一定距离,不影响掘进机机头工作。探测时同步记录发射极 AB 的电流与接收极 MN 的电压。通常采用 5 对接收电极。

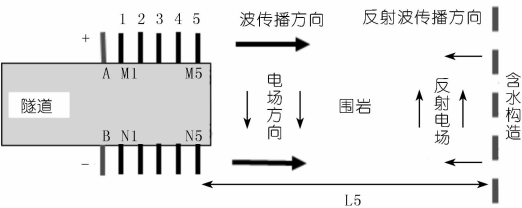


图 3 隧道内 CFC 观测系统

3.2 发射与接收设备

CFC 复频电导探测使用北京同度工程物探技术有限公司开发的高压宽频发射机。该发射机为脉冲调制宽带发射机,频带 10 kHz~100 MHz。最高发射峰值电压 20 kV,发射电流可达 2~4 A。记录仪器使用双通道电子数字记录器,同步记录发射电流与接收极电压。仪器采样频率 100 MHz,动态 16 位,具有触发与存储功能,便于调用分析。

4 复频电导探水的数据处理流程

CFC 使用的电磁波的波长与探测距离相近,入射波与反射波在接收点形成相干。相干频率与反射波的时程有关,即与反射面的距离有关。因而,CFC 采用的是频域相干分析方法。这里介绍数据处理的理论依据

与流程。

在围岩含水量较小时,电磁波速约为 110 m/μs,频率 1MHz 的电磁波的相应波长为 110 m,频带 100 kHz~10 MHz 的电磁波,相应波长为 11~1 100 m。隧道超前探测的目标距离是 100 m,与使用的波长在一个数量级之内。在接收的时域记录中,入射波与反射波相互干涉,在时间上无法区分,不能像地质雷达数据处理那样通过反射波走时来确定反射面位置。

在 CFC 探测中,发射的电磁波在遇到含水岩体时发生反射,反射时电场的方向发生反相,相位发生 180°的滞后,与入射波极性相反。当反射面距离接收电极的距离为 1/4 波长时,在接收电极处,入射波与反射波发生正相干,能量加强。富水性越强,相干叠加的能量越大,频谱中出现卓越频率。这就是 CFC 方法预报含水位置 and 含水量大小的理论依据。

频域相干分析方法的数据处理主要流程如下:

(1) 对 AB 极发射电流与 MN 极接收电压记录进行傅氏谱分析,将时间域记录转换成频域数据,  $I(\omega)$ 、 $V(\omega)$ 。

(2) 用发射电流频谱  $I(\omega)$  对接收电压频谱  $V(\omega)$  进行归一化,消除发射信号谱的影响,也是对发射信号的白噪化。白噪化计算如下

$$R(2\pi f) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \tag{4}$$

式中,  $R(2\pi f)$  为复数,具有阻抗的量纲,实际上是白噪化下的相关谱。频谱中卓越频率为相关频率,其幅值反映了反射信号的强度,即含水量的大小。

(3) 根据相干频率  $F$ ,波速  $V$ ,按 1/4 波长原理,采用偏移成像原理,将所有接收点的相干频谱能量投影到隧道里,形成含水量偏移剖面。接收点到含水体的距离  $L$  按下式计算

$$L = V/4F \tag{5}$$

(4) 对围岩电磁波速进行扫描分析,根据偏移图像能量最大化原理确定最优波速,并获得最优偏移图像。

5 应用实例

5.1 工程概况

巴基斯坦 NEELUM - JHELM (以下简称“N - J”)水电站为长隧洞引水式水电站,引水隧洞总长 28.6 km,其中采用 TBM 法施工部分长 11.2 km。工程位于喜马拉雅造山带,隧洞埋深 300~2 000 m,构造强烈发育,地质条件复杂。岩性以砂岩和泥岩为主,在深埋与强烈构造活动的影响下,岩体破碎,节理裂隙发育,极易发生变形与坍塌。围岩含水,泥岩遇水软化,

进一步降低了围岩的稳定性,甚至发生突泥涌水,威胁人员与设备的安全,造成灾难性事故。为了保证施工安全和施工进度,需要在施工时探明掌子面前方围岩的含水情况。

在 TBM 施工隧道内,由于掘进机占据掌子面,探水仪器不能靠近。同时隧道内充满金属机具,电磁感应干扰强烈,给探测工作增添了困难。

5.2 隧洞超前探水应用

在 NJ-TBM 隧洞超前探水项目中,使用了 CFC 技术,在隧道穿河段完成了 3 次探水试验,每次探测距离 100 m。

现场数据采集使用组合观测方式,一对发射电极与一对接收电极同步移动。电极间距 10 m,每次平移 10 m,5 次发射与接收,将数据组合成阵列。观测布置见图 3。

掌子面里程桩号 D3+337.4 位置,探测范围内地表有河流通过。隧道穿越河流,围岩含水情况复杂,对隧洞施工安全影响很大。

图 4 是采集的发射电流与接收电压的记录,数据长度 20  $\mu\text{s}$ 。

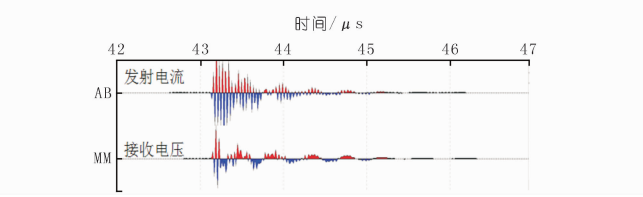


图 4 CFC 采集的发射电流与接收电压记录

将上述时域记录变换到频率域,可以发现电磁波的频率主要集中在两个频段,低频段频率 10 kHz ~ 10 MHz,高频段频率 15 ~ 40 MHz(见图 5)。其中低频段是 CFC 所需要的。

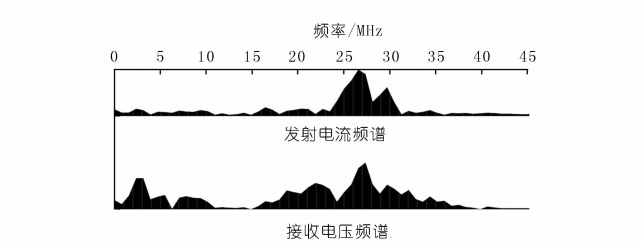


图 5 电流与电压的频谱

用发射电流谱对接收电压谱进行归一化处理,消除了发射频谱的影响,得到如图 6 所示的相干频谱,它反映了入射波与反射波相干的频率。图中最明显的相干频率为 2.2 MHz,此外还有 7 ~ 10 MHz 的频段。前者频率低、幅值高,对应的距离远,含水量大;后者频率高、幅值低,对应的含水位置较近,含水量较少。

依据 5 次观测记录的相干谱,进行偏移成像,结果

见图 7。图像中水平坐标为里程,颜色为含水量。图像中白色表示含水量大,黑色表示含水量小。预报图像中,在距掌子面 30 ~ 35 m、80 ~ 100 m 的位置有两个含水带,后者含水量更大。

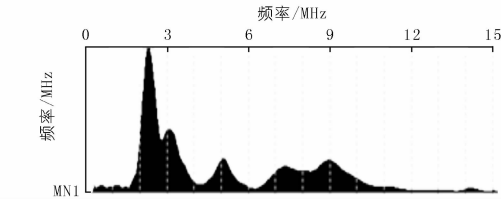


图 6 CFC 相干频谱图像

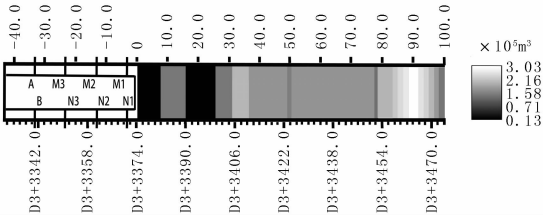


图 7 复频电导探水偏移图像

施工中,在隧道左上角、右上角和右下角打了 3 个排水孔,分别命名 A、B、C。对排水孔的出水量进行了记录(图 8)。从图 8 可以看出,接近预报的含水带时,钻孔的出水量明显加大,说明预报的结果基本正确。

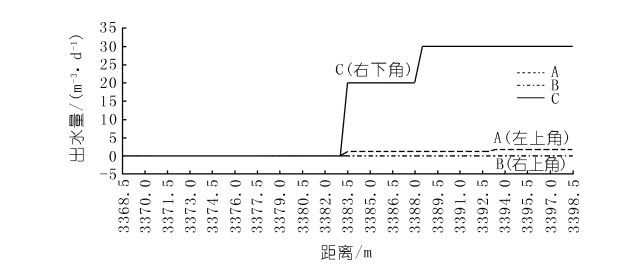


图 8 隧道掘进中涌水量变化

6 结论

CFC 复频电导超前探水技术使用 100 kHz ~ 10 MHz 频率范围的电磁波,依据相干频率的 1/4 波长确定围岩含水体的位置,及相干能量的大小预报含水量。使用电极发射与接收,有效避免了隧道内各种电磁干扰。阵列式观测方式有效提高了探测的方向性,预报距离可达到或超过 100m,适合隧道长距离超前探水需要,特别是 TBM 施工隧道。

在巴基斯坦 N-J 水电站引水隧洞工程中的应用取得了良好效果,证明了该方法的可行性与有效性。目前,对于含水量预报还只是定性的,如要达到预报的量化还需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 赵永贵,蒋辉.隧洞超前预报技术现状分析与新进展[J].公路隧

- 道,2010,(1).
- [2] 赵永贵. 隧道围岩含水水性预报技术[J]. 地球与环境,2005,(1).
- [3] 由广明,刘学增,汪成兵. 地质雷达在公路隧道地质超前预报中的应用[J]. 公路交通科技,2007,24(8).
- [4] 薛国强,李貅. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. 地球物理学报,2008,51(3).
- [5] 王应吉,赵越,林君,等. 核磁共振坑道水探测中的激发场研究[J]. 地球物理学报,2013,28(1).
- [6] 朱劲,李天斌,李永林. Beam 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J]. 工程地质学报,2007,15(2).
- [7] 秦素娟. BEAM 系统在盾构施工中的应用[J]. 隧道/地下工程,2014,(增1).
- [8] 胡象光,陈方明,陈思瑜. 深埋长引水隧洞 TBM 施工关键技术探讨[J]. 人民长江,2015,46,(7).
- (编辑:赵凤超)

## Application of complex – frequency conductance technique in advance water exploring of tunnels

CHEN Fangming<sup>1</sup>, XIE Mian<sup>1</sup>, JIANG Hui<sup>2</sup>

(1. Neelum – Jhelum Project Department in Pakistan, China Gezhouba (Group) Corporation, Yichang 443002, China; 2. Beijing Tongdu Engineering Geophysics Ltd., Corp., Beijing 102209, China)

**Abstract:** The ground – water zone is the most concerned issue in advance water exploring in tunnel construction. At present, the electromagnetic technique is commonly used in forecasting the water – bearing condition in surrounding rock; however this method is constrained by in – situ conditions such as the tunnel face, metal devices interference and 3D wave – field position. So the water – bearing forecast of the surrounding rock within 100 m ahead of the tunnel face is an extremely difficult problem at home and abroad. The complex – frequency conductance exploring technique (CFC) is developed on the basis of the analysis of conductivity and complex – frequency features of permittivity and the practical case of Neelum – Jhelum Water Diversion Project in Pakistan. The technique is based on the principle of reflection and coherence of electromagnetic wave. The frequency range was from 100 kHz to 10 MHz and the electric dipole emission and receiving in array and migration imaging were adopted, which overcame the in – situ condition limitation problem. The position of water – bearing body and water content were determined according to the 1/4 coherent wavelength and the coherent energy respectively. The application in Neelum – Jhelum water diversion project in Pakistan has proved the feasibility and effectiveness of the method.

**Key words:** advance forecast of water exploring in tunnels; water bearing forecast; complex – frequency conductance technique; coherent frequency; migration imaging

(上接第 32 页)

## Analysis of hydro – meteorological forecasting uncertainty of Three Gorges Reservoir and error distribution

XU Yinshan, LI Yurong, MIN Yaowu

(Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Accurate and timely hydro – meteorological forecasting information is the basis and technical support of real – time forecast – based operation of the reservoir. Based on the historical short – term and medium – term inflow forecast of Three Gorges Reservoir issued by Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, the inflow forecasting accuracy are evaluated comprehensively, the influences of the precipitation magnitude, precipitation area and inflow grade on forecasting error are analyzed, and the performance of the normal distribution and the nonparametric estimation method in estimating the probability density function of relative error is compared. The results showed that the nonparametric estimation method has high fitting degree in estimating the probability density function of forecasting relative error, and the comprehensive analysis results can be applied to the quantitative risk management of Three Gorges Reservoir.

**Key words:** hydro – meteorological forecast; error; probability density function; nonparametric estimation; Parzen window; Three Gorges Reservoir