文章编号:1673-5005(2006)03-0030-06

地球物理综合勘探技术在南水北调工程中的应用

陶 波[1,2], 伍法权[2], 底青云[2], 郭改梅[2], 茅均标[3]

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

摘要:南水北调西线一期工程的引水隧洞长达 73 km,最大埋深 1 100 m,因此软围岩大变形及岩爆等工程地质问题尤为突出。利用地球物理综合探测技术对工程区的工程地质条件进行了研究,并对隧洞开挖过程中可能遇到的工程地质问题进行了分区。对于南水北调西线工程而言,首先应该考虑的地球探测指标是探测深度。因可控源音频大地电磁法(CSAMT 法)探测深度为 1~2 km,所以当各种地球物理探测技术对深部的探测结果相互抵触时,要对 CSAMT 法的测试结果给予充分的重视。在南水北调西线一期工程玛柯河-贾曲段的工程地质条件勘察过程中,地球物理综合勘探技术对 155~239 桩段断层破碎带的解释结果与野外岩石露头所反映的地质信息吻合较好,并得到了钻孔资料的验证,说明地球物理综合勘探技术值得在南水北调西线工程中推广。

关键词:地球物理; 综合勘探技术; 可控源音频大地电磁法;南水北调

中图分类号:O 319.56 **文献标识码**:A

Application of comprehensive geophysics exploration technology to water diversion project from south to north of China

TAO Bo[1,2], WU Fa-quan[2], DI Qing-yun[2], GUO Gai-mei[2], MAO Jun-biao[3]

(1. *School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*;
2. *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100029, *China*;
3. *Institute of Engineering and Technology*, *Chinese University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Seepage tunnel of the west line of water diversion project from south to north of China is 73 km long and its maximal depth of burial is 1 100 m. Therefore, large deformation of weak rock and rock outburst should become notable. Engineering geology condition was detected by comprehensive exploration technology of geophysics, and the seepage tunnel was departed along its length according to probably appearing engineering geology problems. Exploration depth of geophysics method is first factor to be considered for the west line of water diversion project from south to north of China. Exploration depth of CSAMT ranges from 1 to 2 km. Consequently the results of CSAMT should be paid more emphasis on when the results of different exploration technology of geophysics present discrepancy. Comprehensive exploration technology of geophysics was applied to engineering geology reconnaissance of the part from Make river to Jia river of the west line of water diversion project from south to north of China. The results of comprehensive exploration technology of geophysics for default and crash belt from the stations ranging from 155 to 239 agree well with geology information of rock outcrop, which are verified by drilling data. Comprehensive exploration technology of geophysics is worth popularizing in the west line of water diversion project from south to north of China.

Key words: geophysics; comprehensive exploration technology; CSAMT; water diversion project from south to north of China

长期以来,人们可以运用多种勘探手段来了解所关心的工程区浅层地表的工程地质和水文地质问题,但对于深部地质情况,特别是对断层深部的发育情况的了解一直缺乏比较有效的方法[1-2]。在地球物理探测中,电法勘探由于其场源的多变性和方法的有效性,已被人们所重视。其中,可控源音频大地

收稿日期:2005-10-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(90302011)
作者简介:陶波(1976-),男(汉族),四川资中人,博士研究生,主要从事深埋长隧道围岩变形的研究。

万方数据

电磁测深(CSAMT)是 20 世纪 80 年代后期兴起的一种电法技术，利用 CSAMT 方法地质工程师可以对地下深部位的地质情况进行判断[3-5]。CSAMT 法探测结果最终体现在电阻率的变化上，并且主要通过电阻率的异常带来判断断层的存在、含水性及岩性的变化。用 CSAMT 法对研究区进行全面勘探，并结合工程地质进行初步分析，当在研究区内发现有意义的电阻率异常带或地质现象时，应加密测点，增加旁测线，并有针对性地辅以其他的地球物理勘探技术(如甚低频(VLF)法、激发极化(IP)法、瞬变电磁(TEM)法等)，在有条件的地段选用瞬变电磁法进行双测线和加密点的复核。该工作方法称为综合地球物理勘探技术。笔者将对该方法在南水北调西线工程中的应用进行介绍。

1　CSAMT 法

1.1　CSAMT 法基本原理

在 CSAMT 法中，基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组，导出了电场强度(E_x)、磁场强度(H_y)与电阻率的关系式：

$$\rho_s=\frac{|E_x|^2}{5\beta|H_y|^2}. \tag{1}$$

式中，ρ_s 为电阻率，也称为卡尼亚电阻率；β 为频率。

又根据电磁波的趋肤效应理论，导出了趋肤深度公式：

$$H\approx 256\sqrt{\frac{\rho}{\beta}}. \tag{2}$$

式中，H 为探测深度；ρ 为电阻率。

由式(2)可见，当地表电阻率一定时，电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比，高频时，探测深度浅，低频时，探测深度深。因此可以通过改变发射频率来改变探测深度，达到探测目的层的目的。

1.2　CSAMT 法的特点

(1)使用可控制的人工场源，信号强度比天然场要大得多，因此可在较强干扰区的城市及城郊开展工作。

(2)测量参数为电场与磁场之比，得出的是卡尼亚电阻率。由于是比值测量，因此可减少外来的随机干扰，并减少地形的影响。

(3)通过改变频率进行不同深度的电磁测深探测，大大提高了工作效率，减轻了劳动强度，一次发射可同时完成 7 个点的电磁测深。

(4)勘探深度范围大，一般在 1～2 km。

(5)横向分辨率高，可灵敏地发现断层。

(6)由于接收机在接收电场的同时还要接收磁场，因此高阻屏蔽作用小，可穿透高阻层。

1.3　CSAMT 法结果推断的地质基础

CSAMT 法属电磁类勘探方法，它解释的物质基础是电阻率，用电阻率值的高低及分布形态来区分岩性，发现断层。因此，在进行资料分析及推断解释之前，必须考虑所推断岩性的电阻率界限。

地层的电阻率还更多地受结构破碎程度和含水状况的影响，如有一定岩溶影响的含水灰岩、层理和节理发育的含水砂岩，电阻率都会大大降低。板岩中砂质成分增加，电阻率也会相应增加，泥质成分的增加会导致电阻率大幅度降低。断裂、破碎带由于导水、充水，一般为低电阻率异常。

2　甚低频法

世界上许多国家为了潜艇通讯及导航，设立了强功率的长波电台。其发射频率在 15～25 kHz，采用连续的莫尔斯(Morse)编码的未调制载波。在无线电工程中，将这种频率称为甚低频。以这种电台为场源的电磁法，称为甚低频电磁法。显然，这里的“甚低频”并不是一般电法勘探中的低频，而实际上它属于高频电磁法范围。

电磁波在传播过程中碰到良导体或磁性感应体时，将使其极化而产生二次场，从而引起感应二次场。一般情况下，二次场与一次场合成后的总场与一次场的振幅、方向和相位不同，即引起一次场的畸变。测量某些参数的畸变，即可发现地下的良导体或磁性感应体的存在。甚低频法仪器轻便，工作频率高，是一种较有效的物探辅助手段。

甚低频法主要反映浅表层几十米深度范围内介质的导电特征，对断层、破碎带和石英岩脉反映灵敏，相对于南水北调西线工程的深埋藏大隧道而言，其探测深度太浅。

3　激发极化法

激发极化法是利用岩矿石电化学性质为物理前提的一种地球物理勘探方法。在直流电法勘探中，当向岩(矿)石供入恒定电流时，仍能观测到测量电极间的电位差随时间而变化，并在相当长时间后趋于某一稳定的饱和值；在断开电流后，测量电极间的电位差随时间而下降，并在相当长时间后衰减到接近于零值。这种在充电和放电过程中发生的现象称为激发极化效应(简称激电效应)。它是岩(矿)石及其所含水溶液在外电流场作用下产生电化学极化的

万方数据

结果。激发极化法对地形要求高,探测深度浅,作为一种辅助手段,主要用来判断介质的富水性。

4 瞬变电磁法

瞬变电磁法是一种时间域的人工源地球物理电磁感应探测方法。其基本原理是测量强大的脉冲源(如方波的下降沿或上升沿)所感生的随时间变化的二次场(如图 1)。由于这些变化的二次场是脉冲源所感生的涡流场在地下扩散过程中地电介质的电磁散射场,因此包含了丰富的地电信息,通过对这些信息的提取和解释,从而达到探测地下电性介质的目的。

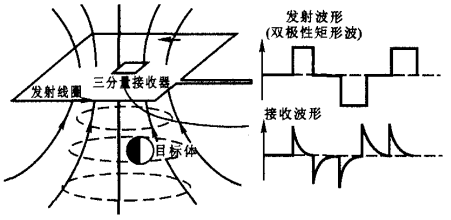

图 1 瞬变电磁法工作原理

瞬变电磁法由于它的频率成分中的高频高于 10 kHz,且易于采用专业地震处理,使得它对浅于 600 m 深度上的地层勘探分辨率、分层能力明显提高,适合工程勘探对高分辨率的需求,同时它对低阻体、断层等反应敏感。图 2 为瞬变电磁测深测量装置图。

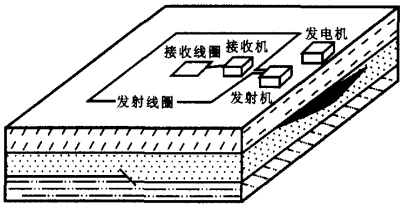

图 2 瞬变电磁法的测量装置

虽然瞬变电磁法具有勘探优势,但对地形要求高,探测深度难以满足工程设计要求,在南水北调西线工程的地球物理探测中,主要用其来对 CSAMT 法探测浅表层进行复核。

5 工程实例

5.1 工程概况

南水北调西线工程位于青藏高原东北部,东起松潘草地,西至楚尔玛河口,南临川西高原,北抵阿尼玛卿山,面积近 30 km × 104 km,位于青海省玉树、果洛与四川省甘孜、阿坝 4 个藏族自治州所在地区以及甘肃省甘南藏族自治州的部分地区[6-10]。从长江上游经巴颜喀拉山输水入黄河,是我国水资源优化配置,解决北方地区缺水的一项战略性基础设施工程,直接关系到我国北方地区社会经济的可持续发展和生态环境的改善。经多方案比选,选定雅砻江、大渡河 5 条支流的达曲-贾曲联合自流线路调水 4×10^9 m^3,为第一期工程;同时选择雅砻江干流阿达水库输水到黄河支流贾曲的自流线路,调水 5×10^9 m^3,为第二期工程;通天河侧仿水库输水到雅砻江再到黄河支流贾曲的自流线路,调水 8×10^9 m^3,为第三期工程。三期工程共调水 1.7×10^{10} m^3。

根据规划,西线一期工程从雅砻江支流达曲、泥曲,大渡河支流杜柯河、麻尔曲、阿柯河共 5 条支流调水。整个工程由阿柯河的克柯、麻尔曲的亚尔堂(加塔)、杜柯河的上杜柯(扎洛)、泥曲的仁达、达曲的阿安 5 座枢纽及输水线路组成。西线一期工程输水线路全长 260.3 km,其中隧洞长 244.1 km,明渠长 16.1 km,渡槽长 0.12 km。洞线埋深一般为 300 ~600 m,最大埋深 1 062 m。

研究区岩性均属三叠系上统轻微变质砂岩和板岩。其中砂岩多为灰色,间有砖红色,钙质胶结,硬质岩,厚度变化较大;板岩为深灰色,以含云母为特征,主要有泥质、泥砂质及钙质 3 类,其中钙质板岩相对较厚,硬度大。总体上,岩层呈北西向展布,岩性单一,并存在不等厚韵律互层。

构造断裂与破碎带、岩性特征、赋水性是影响引水隧洞工程成败的关键因素[11-12]。因此,对引水隧洞通过区的地质结构面、岩性特征、赋水性等地质情况进行地球物理综合勘探和工程地质勘查,并对勘探与勘查结果进行综合解释以查清勘探区影响引水隧洞工程建设的不良地质体和不良地质构造是十分必要的。

5.2 CSAMT 法勘探

2004 年 5 月,中科院地质与地球物理研究所对南水北调西线一期工程中的玛柯河-贾曲段中的 20 km 长的引水线路进行了 CSAMT 法地球物理勘探。141~267 号桩段的 CSAMT 法的推断解释结果如图 3 所示。

研究区第四纪松散层电阻率约几十欧姆·米;部分砂卵石残积层电阻率达 300 Ω·m;完整砂岩电阻率约为 3 000 Ω·m;板岩电阻率为 300~1 000 Ω·m。野外实验表明,砂、板岩厚度比、层厚以及板岩与砂岩组合形式都对电阻率有较大影响。薄互层状态电阻率较低,即砂、板岩厚度比为4:1左右时,电阻率约为

万方数据

2000 Ω·m;砂、板岩厚度比为 8∶1 左右时,电阻率超过 2000 Ω·m。155～239 桩段电阻率值大多集中在 1000 Ω·m,甚至更低,最小值仅有 300 Ω·m。而在 155～239 桩段以外一定范围内,电阻率都较高,一般为 3000 Ω·m。因此,据 CSAMT 法初步推断 155～239 桩段应为一断层富水带。为了更好地查清该段的工程地质特性,又采取了甚低频法、激发极化法及瞬变电磁法。

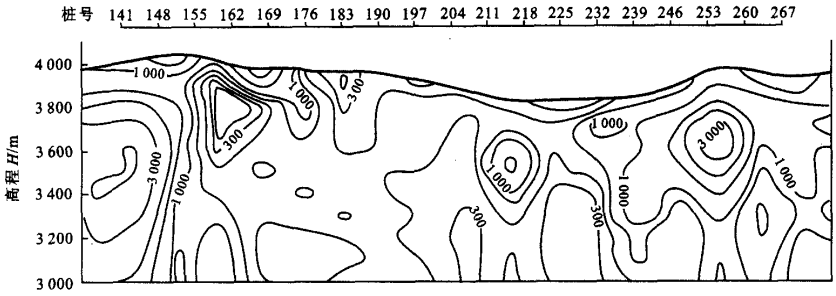

图 3　CSAMT 电阻率(Ω·m)等值线图

5.3　甚低频法勘探

用自行开发研制的二维多点圆滑电流密度反演软件把野外观测磁场结果处理后用电流密度分布断面图来表示,高密度区用红色标识,低密度区用蓝色标识。直观地可以这样理解:高密度区则为电流密度较大,即容易导电的地方,对应含水较多的地方。探测结果表明,225 号桩附近为高电流密度区,也就是导电性较好区,应对应于一富水的地质结构。但该高电流密度区宽度较小,且甚低频法所研究的深度也较浅,因此有必要加强对该段的地球物理探测研究。

5.4　激发极化法勘探

图 4 为 238～246 号桩的 IP 法电阻率剖面。

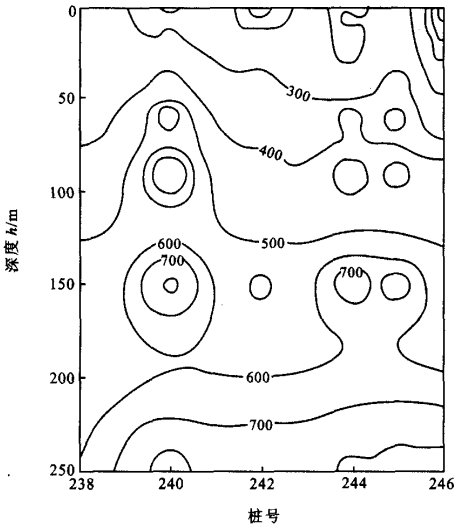

图 4　激发极化法电阻率(Ω·m)等值线图

可以看出,该剖面的电阻率值均较低,最大值为 700 Ω·m,最小值仅为几十欧姆·米。再次判断 238～246 桩段为一富水性断层。

5.5　瞬变电磁法勘探

研究过程中对 224～236 桩段进行了瞬变电磁法勘探。瞬变电磁法测量深度相对较浅,图 5 为 224～236 桩段电阻率剖面,该剖面深度仅到 400 m。从剖面电性特征看,除浅表层有局部电性不均匀外,其下部基本为电阻率几百欧姆米的介质,这与 CSAMT 法反演电阻率相应位置上的电性特征一致,只是相应部位的等值线密度更大一些。瞬变电磁法勘探结果也表明该桩段为一富水断层带。

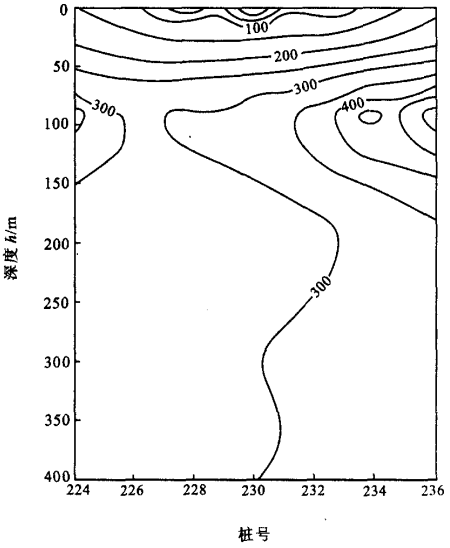

图 5　瞬变电磁法电阻率(Ω·m)等值线图

万方数据

5.6 工程地质调查研究

地球物理综合勘探结果表明在 155～239 桩段存在一富水断层。工程地质调查结果与地球物理综合勘探结果一致,图 6 为断层影响带内发育的小褶曲。经打钻验证,155～239 桩段确实存在一富水断层。

图 6 155～239 桩段中发育的小褶曲

6 结束语

南水北调西线深埋藏隧洞围岩结构探测工程,由于工区地处高原,地形起伏大,隧洞埋深比较大,给地球物理勘测工作带来了很大难度。这就需要地球物理工作者找出适合的地球物理方法。对于南水北调西线工程而言,首先应该考虑的地球探测指标是探测深度。CSAMT 技术探测深度可达 1～2 km,并且可灵敏地发现断层,这有利于解决南水北调西线一期工程中的深埋藏大隧洞的工程地质勘探中所面临的工程技术问题。例如,可以探测深部构造的发育特征且探测结果具有较高的准确性,为分析工程地质问题提供基础性资料,从而很好地指导钻探等勘探手段的野外工作布置,具有很好的应用前景。

在南水北调西线一期工程玛柯河-贾曲段的工程地质条件勘察过程中,地球物理综合勘探技术对 155～239 桩段断层破碎带的解释结果与野外岩石露头所反映的地质信息吻合较好,并得到了钻孔资料的验证。地球物理综合勘探技术值得在南水北调西线工程中推广。

相比较而言,每种地球物理方法都有其适用范围,探测手段多样性可以对探测结果加以对比和验证,增添说服力。

参考文献:

[1] 李金都,王学潮.南水北调西线工程区活动断层 CSAMT 技术探测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17):2932-2936.
LI Jin-du, WANG Xue-chao. Application of CSAMT to prospecting active fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(17):2932-2936.

[2] 李兴唐.活动断裂研究与工程评价[M].北京:地质出版社,1991.

[3] 石昆法.可控源音频大地电磁法理论与应用[M].北京:科学出版社,1999:2-12.

[4] 吴璐苹,石昆法.可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J].地球物理学报,1996,39(5):712-717.
WU Lu-ping, SHI Kun-fa. Application of CSAMT to the search for groundwater[J]. Journal of Geophysics, 1996,39(5):712-717.

[5] 吴璐苹,石昆法.松山地下热水勘探及成因模型探讨[J].物化与物探,1996,20(4):309-315.
WU Lu-ping, SHI Kun-fa. Exploration of underground thermal water in Songshan area and a discussion on its genetic model[J]. Journal of Physico-chemistry and Physical Exploration, 1996,20(4):309-315.

[6] 陈效国,席家治.南水北调西线工程与后续水源[J].人民黄河,1999,21(2):16-18.
CHEN Xiao-guo, XI Jia-zhi. The west line of water diversion project from south to north of China and subsequent water resource[J]. Yellow River, 1999,21(2):16-18.

[7] 李国英.论黄河长治久安[J].人民黄河,2001,23(7):1-5.
LI Guo-ying. Discussion about long-term harness and safety of the Yellow River[J]. Yellow River, 2001,23(7):1-5.

[8] 谈英武,刘新.南水北调西线工程进展情况[J].人民黄河,1999,21(2):19-21.
TAN Ying-wu, LIU Xin. Progress of the west line of water diversion project from south to north of China[J]. Yellow River, 1999,21(2):19-21.

[9] 王学潮,张辉.南水北调西线工程地质灾害初步分析研究[J].地球科学,2001,26(3):297-303.
WANG Xue-chao, ZHANG Hui. Geological hazards about west-line project of water diversion project from upper Yangtze river into upper Yellow river[J]. Earth Science, 2001,26(3):297-303.

[10] 王学潮,马国彦.南水北调西线工程及其主要工程地质问题[J]. 工程地质学报,2002,10(1):38-45.
WANG Xue-chao, MA Guo-yan. Introduction to engineering project of water diversion from the upper Yangtze river into the upper Yellow river and its main engineering geological problems[J]. Journal of Engi-

万方数据

neering Geology, 2002,10(1):38-45.

[11] 伍法权,王学潮,国连杰,等.南水北调西线一期工程区断层活动性及其对工程的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1370-1374.
WU Fa-quan, WANG Xue-chao, GUO Lian-jie, et al. Fault activity and its effect on the west line of water diversion project from south to north of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(8):1370-1374.

[12] 李广诚,严福章.南水北调工程概况及其主要工程地质问题[J].工程地质学报,2004,12(4):354-357.
LI Guang-cheng, YAN Fu-zhang. An overview of the China's south-north water transfer project and its major engineering geological problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2004,12(4):354-357.

(编辑　修荣荣)

(上接第 21 页)

[6] 唐立章,张贵生,张晓鹏,等.川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J].天然气工业,2004,24(9):5-7.
TANG Li-zhang, ZHANG Gui-sheng, ZHANG Xiao-peng, et al. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoir in Xujiahe formation in west Sichuan depression[J]. Natur Gas Ind, 2004,24(9):5-7.

[7] 于红枫,周文.松华镇-白马庙须二段裂缝分布规律[J].成都理工学院学报,2001,28(2):174-178.
YU Hong-feng, ZHOU Wen. A research on distribution law of fractures in Xujiahe fomation in Songhua-Baima region[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2):174-178.

(编辑　刘艳荣)

(上接第 25 页)

[8] 丁白涛.孤东油田馆陶组下段底砾岩低电阻油气层滚动开发[J].复式油气田,2000,4:33-35.
DING Bai-tao. Rolling exploration of low-resistivity layer of the lower interval of Guantao formation of Gudong Oilfield[J]. Mutiple Oil-Gas Field, 2000,4:33-35.

[9] 赵澄林,朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2001.

[10] 孙建孟,王永刚.地球物理资料综合应用[M].东营:石油大学出版社,2001.

[11] 中石油油气勘探部.渤海湾地区低电阻油气层测井技术与解释方法[M].北京:石油工业出版社,2000:1-5.

[12] 胡英杰,毛志强.塔里木盆地低阻油层阳离子交换量及含油饱和度评价[J].测井技术,2000,24(6):407-409.
HU Ying-jie, MAO Zhi-qiang. Evaluation of cation exchange capacity and hydrocarbon saturation of the low-resistivity pay zone in Tarim Basin[J]. Well Logging Technology, 2000,24(6):407-409.

(编辑　刘艳荣)

(上接第 29 页)

[9] 朱振宇,刘洪.稀疏反褶积方法及其应用[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(6):26-28.
ZHU Zhen-yu, LIU Hong. Sparse deconvolution method and its application[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2005,29(6):26-28.

[10] 冯兴强,王勋杰,杨长春.基于最大似然准则的 f-x-y 域 l_1 模预测滤波方法[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(4):30-34.
FENG Xing-qiang, WANG Xun-jie, YANG Chang-chun. Prediction filtering method using l_1 norm based on maximum likelihood rule in f-x-y domain[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2005,29(4):30-34.

(编辑　沈玉英)

万方数据