

基于高密度电法的浅层地下水富集区探测研究

潘攀

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 210000

摘要: 本文聚焦于高密度电法在浅层地下水富集区探测中的应用研究。通过理论分析高密度电法的原理、装置类型及数据反演方法,结合河北某滨海地区、河南辉县市等典型案例的实地探测数据,系统探讨该方法在识别浅层含水层、圈定富水区范围及评估地下水动态变化方面的有效性。研究表明,高密度电法凭借其高分辨率、多参数联合反演及三维成像能力,可精准刻画地下电性结构,为浅层地下水资源开发提供可靠的地质依据。研究成果对解决干旱地区饮水安全、优化地下水开采布局具有重要实践价值。

关键词: 高密度电法; 浅层地下水; 富集区探测; 电阻率反演; 三维成像

引言

全球水资源短缺问题日益严峻,浅层地下水作为重要的应急水源,其高效勘探与合理开发成为保障区域水安全的关键。传统地下水探测方法(如钻探、抽水试验)成本高、周期长,且受地质条件限制较大。高密度电法(High-Density Resistivity Method, HDRM)作为一种非侵入式地球物理勘探技术,通过密集电极布置与自动化数据采集,可快速获取地下电阻率分布信息,进而推断含水层空间形态与富水性。其分辨率可达米级,且能同时获取电阻率与极化率双参数,在浅层地下水探测中展现出显著优势。本文以河北滨海地区、河南辉县市等典型案例为研究对象,系统分析高密度电法在浅层地下水富集区探测中的应用效果,探讨其技术原理、装置选择、数据处理方法及实际工程中的关键问题,为同类地区地下水勘探提供技术参考。

1 高密度电法原理与技术特点

1.1 基本原理

高密度电法基于电阻率法原理,通过向地下注入电流并测量电极间电位差,计算地下介质的视电阻率分布。其核心公式为:

$$\rho_s = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

其中, ρ_s 为视电阻率 ($\Omega \cdot m$), K 为几何系数(由电极排列方式决定), ΔV 为测量电位差(伏特), I 为注入电流(安培)。通过多电极自动切换系统,可实现密集布设电极(电极间距通常为1-5米),形成二维或三维电阻率剖面,从而揭示地下电性结构。

1.2 技术优势

① 高分辨率成像: 密集电极布置使数据采集间隔小,可清晰反映地下电性结构的细节。例如,在河北滨

海地区探测中,2米电极间距可分辨出2米深度的潜水位信号。② 多参数联合反演: 结合激发极化法(IP),可同时获取电阻率与极化率参数,提高对含水层与干层的区分能力。③ 三维可视化: 通过二维剖面叠加或三维反演算法,可构建地下电阻率模型,直观展示含水层空间形态。④ 高效低成本: 自动化数据采集减少人为误差,单次探测效率较传统方法提升50%以上,且设备成本低于核磁共振法等高精度技术。

1.3 装置类型与选择

高密度电法常用装置包括温纳(Wenner)、偶极-偶极(Dipole-Dipole)、对称四极(Schlumberger)等,其选择需综合考虑探测目标深度、分辨率需求及地形条件: ① 温纳装置: 抗噪能力强,适合均匀地层探测,如浅层潜水位划分。② 偶极-偶极装置: 分辨率高,适合复杂地形(如山区裂隙水探测),但信号较弱。③ 对称四极装置: 探测深度大,常用于深部含水层研究。

2 浅层地下水富集区探测方法

2.1 探测流程

2.1.1 地质调查与模型构建

这一步骤旨在全面收集区域地质资料,包括地层岩性、构造特征、古地理环境等信息,为后续的探测工作提供科学依据。具体而言,研究人员会通过查阅地质报告、实地考察、采样分析等手段,详细了解目标区域的地质背景。在此基础上,进一步划分地层电性特征层,这是构建地质模型的关键^[1]。例如,在金衢盆地红层地下水探测项目中,研究人员根据地层的电阻率特性,将地层划分为高阻砂岩层、中阻泥岩层与低阻含水层。这种划分不仅有助于理解地下水的赋存条件,还能为后续的电法探测提供准确的电性参数。

2.1.2 测线布置与装置选择

在布置测线时,需充分考虑探测目标的特点,如裂隙带、溶洞等地下结构的分布规律。通过合理确定测线方向和电极间距,可以确保探测数据能够全面覆盖目标区域,并准确反映地下结构的电性特征。例如,在河南辉县市裂隙水探测项目中,研究人员采用了北东-南西向的测线布置方案,电极间距设定为2米,覆盖深度达到了167.7米。这种布置方式不仅提高了探测效率,还确保了数据的连续性和准确性。同时,根据探测需求选择合适的探测装置,如温纳装置、偶极装置等,也是确保探测效果的重要因素。

2.1.3 数据采集与预处理

在这一阶段,研究人员会使用多通道电法仪(如TerrameterLS2)等先进设备,自动采集地下结构的电性数据。这些数据包含了丰富的地质信息,是后续电阻率反演和成像的基础。然而,原始数据中往往存在异常值和噪声干扰,需要进行预处理以提高数据质量^[2]。预处理过程包括剔除异常值、滤波处理、数据平滑等步骤,旨在消除数据中的噪声和干扰,提高数据的可靠性和准确性。

2.1.4 电阻率反演与成像

电阻率反演与成像是将采集到的视电阻率数据转换为真实电阻率模型的关键步骤。通过采用二维或三维反演算法(如RES2DINV、Voxler等),研究人员可以将视电阻率数据转化为地下结构的电阻率分布图像。这些图像能够直观地展示地下结构的电性特征,如含水层的分布、裂隙带的走向等。电阻率成像技术不仅提高了探测结果的直观性和可读性,还为后续的综合解释和验证提供了有力支持。

2.1.5 综合解释与验证

在这一阶段,研究人员会结合地质钻孔、水文试验数据等多种信息,对电阻率反演结果进行综合解释。通过对比分析不同来源的数据,可以验证反演结果的准确性和可靠性。例如,在某个地下水探测项目中,研究人员通过对比地质钻孔资料和电阻率成像结果,发现两者在含水层分布上具有高度一致性,从而验证了反演结果的可靠性。此外,还可以通过水文试验数据进一步验证含水层的透水性和富水性等指标,为地下水资源的开发利用提供科学依据。

2.2 关键技术问题

2.2.1 近场效应校正

在CSAMT法(可控源音频大地电磁法)联合探测中,近场效应是一个需要重点关注的技术问题。当收发距过近时,会产生静态效应,导致探测数据失真。为了消除这种干扰,研究人员需要采取近场效应校正措施。例如,

在北京东高地地热井探测项目中,研究人员通过调整收发距至1000米以上,有效消除了近场干扰,提高了探测数据的准确性。此外,还可以采用其他校正方法,如近场修正算法等,以进一步提高探测结果的可靠性。

2.2.2 电极耦合质量

电极耦合质量是影响电法探测效果的重要因素之一。在干燥或硬化地表条件下,电极与地面的接触不良会导致数据失真。为了改善电极耦合质量,研究人员需要采取一系列措施。例如,在干燥地表条件下,可以采用注水方法增加电极与地面的接触面积和导电性;在硬化地表条件下,则可以使用导电膏等辅助材料提高电极的耦合效果^[3]。这些措施能够有效减少数据失真,提高探测结果的准确性。

2.2.3 多解性分析

电阻率反演存在多解性是一个不可忽视的技术问题。由于地下结构的复杂性和电性数据的局限性,同一个电阻率异常可能对应多种地质解释。例如,低阻异常可能由含水层、黏土层或金属矿化带等多种因素引起。为了解决这个问题,研究人员需要结合地质、水文资料进行综合解释。通过对比分析不同来源的数据和信息,可以缩小解释范围,提高解释的准确性。此外,还可以采用多种反演算法和成像技术进行对比分析,以进一步验证解释结果的可靠性。在必要时,还可以通过钻孔取芯等手段进行直接验证,以确保解释结果的准确性。

3 典型案例分析

3.1 河北滨海地区浅层咸水探测

河北滨海地区地下水探测旨在确定浅层潜水位深度及咸淡水界面。探测中采用温纳装置,电极间距2米,测线长度200米。温纳装置的抗噪能力强,适合该地区平坦地形和均匀地层条件。通过自动化数据采集,获得了高质量的视电阻率数据。反演剖面显示,2米深度处电阻率值由高阻($> 100\Omega \cdot m$)突变为低阻($< 10\Omega \cdot m$),对应潜水位信号。这一突变特征清晰地反映了潜水位的位置,为后续水资源开发提供了关键信息。进一步分析发现,4.5米深度以下电阻率值稳定在 $5\Omega \cdot m$ 左右,推测为地质分层界面。结合海水入侵模型,确认该区域地下水为咸水,需进一步寻找深层淡水。为验证探测结果的准确性,进行了钻孔揭露,结果显示潜水位深度为2.1米,与电法结果吻合,误差小于5%,证明了高密度电法在该地区浅层地下水探测中的可靠性。

3.2 河南辉县市裂隙水探测

河南辉县市裂隙水探测的目标是圈定奥陶系灰岩裂隙富水区。探测中采用偶极-偶极装置,电极间距5米,测

线长度500米。偶极-偶极装置的高分辨率特性使其适合探测裂隙这种小尺度目标。通过密集的数据采集,获得了丰富的电性信息。反演剖面显示,320号点深91米以下呈现“Λ”形低阻异常(电阻率 $< 50\Omega \cdot m$),推测为裂隙破碎带。这一异常形态与裂隙带的发育特征相符,为富水区的定位提供了重要线索。为进一步验证,进行了电测深验证,结果表明 $AB/2 = 200$ 米处低阻拐折与高密度电法结果一致,增强了探测结果的可信度。此外,激电测深显示, $AB/2 = 260-360$ 米段视极化率(MS)达8%,半衰时(TH) > 2 秒,确认含水性。高极化率和长半衰时是含水层的典型特征,进一步证实了该区域裂隙的富水性。最终,钻孔深98.5米初见地下水,涌水量 $338.88m^3/d$,与物探预测富水段(93-127.6米)高度吻合,展示了高密度电法在裂隙水探测中的有效性。

3.3 赣南贫水区基岩裂隙水探测

赣南地区红层分布广泛,地表水缺乏,饮水困难问题突出。基岩裂隙水探测成为解决该地区水资源问题的关键。探测中采用温纳-施伦贝尔格联合装置,电极间距3米,覆盖面积 $2km^2$ 。该装置结合了温纳装置的抗噪能力和施伦贝尔格装置的深度探测能力,适合赣南地区复杂的地质条件。通过统计岩石电阻率与渗透率关系,建立Kozeny-Carman方程模型,预测富水区。研究发现,低阻异常区(电阻率 $< 80\Omega \cdot m$)与钻孔出水率($> 80\%$)高度相关,为富水区的识别提供了定量依据。进一步归纳出“低阻、浅埋、变层、连通”的找水经验,即富水区通常表现为电阻率低、埋深浅、地层变化频繁且裂隙连通性好。这一经验总结为实际探测提供了实用的指导。在20个探测点中,17个钻孔出水,成功率达85%,其中单井涌水量最高达 $120m^3/d$,有效解决了当地居民的饮水问题,证明了高密度电法在贫水区找水中的显著效果。

4 技术应用效果与展望

4.1 应用效果

首先,其精度大幅提升,在浅层(0-200米)探测中分辨率可达米级,较传统电阻率法提高3-5倍。这使得探测结果能够更精确地反映地下含水层的位置和范围,为水资源开发提供了更准确的地质信息。其次,成本显著降低,单次探测成本较钻探降低60%-70%,且周期缩短至1-2周。这不仅节省了探测费用,还提高了探测效率,

使得大规模地下水勘探成为可能。最后,适应性增强,在山区、滨海等复杂地形中,通过调整装置类型与电极间距,仍可获得可靠数据。例如,在山区裂隙水探测中,采用偶极-偶极装置可有效捕捉裂隙的电性异常;在滨海地区,温纳装置则能稳定获取潜水位信息。

4.2 未来展望

首先,三维反演技术将成为研究重点,开发高效三维反演算法,实现地下电阻率体真实模拟。三维反演能够更准确地反映地下电性结构的三维特征,为地下水开发提供更精细的地质模型。其次,多方法融合将成为趋势,结合瞬变电磁法(TEM)、核磁共振法(NMR),提高对深部含水层的探测能力^[4]。不同方法具有各自的优缺点,通过融合可实现优势互补,扩大探测深度和范围。最后,智能化解释将成为发展方向,引入机器学习算法,自动识别电阻率异常与含水层对应关系,减少人为误差。机器学习算法能够从大量数据中学习规律,提高解释的准确性和效率,为地下水探测提供更智能化的解决方案。

5 结语

高密度电法凭借其高分辨率、多参数联合反演及三维成像能力,已成为浅层地下水富集区探测的核心技术。通过河北滨海地区、河南辉县市及赣南贫水区的案例研究,验证了该方法在识别潜水位、圈定裂隙富水区及评估地下水动态变化方面的有效性。未来,随着三维反演技术与智能化解释方法的发展,高密度电法将在地下水资源勘探、地质灾害预警等领域发挥更大作用,为区域水安全保障提供技术支撑。

参考文献

- [1]徐刚.高密度电法在地下水勘探中的应用[J].现代矿业,2024,40(06):24-26+30.
- [2]唐智洋.高密度电法在城市浅层地下水调查评价中的应用——以苏州市为例[J].绿色科技,2023,25(14):241-244.
- [3]叶剑龙.高密度电法在某工程地下水探测应用研究[J].云南水力发电,2022,38(06):84-87.
- [4]刚绪广,李庆轩,陈逸飞.高密度电法在地下水渗流通道探测中的技术应用[J].山西建筑,2024,50(05):86-88+122.