

城市地下管线探测中地球物理方法的适用性对比

潘攀

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 210000

摘要: 随着城市化进程加速,城市地下管线网络日益复杂,精准探测成为保障城市安全运行的关键。地球物理方法凭借非破坏性、高效性等优势,成为地下管线探测的核心技术。本文系统对比电磁感应法、地质雷达法、高密度电阻率法、瞬变电磁法及磁梯度法等主流地球物理方法的原理、适用场景及局限性,结合工程案例提出综合探测策略。研究表明,单一方法难以应对复杂环境,多技术融合可显著提升探测精度,为城市地下空间智慧化管理提供科学依据。

关键词: 城市地下管线;地球物理探测;方法对比;多技术融合

引言

城市地下管线是保障供水、排水、燃气、电力、通信等基础设施运行的“生命线”。据统计,我国城市地下管线总长度已超过300万公里,且以每年10%的速度增长。然而,管线老化、施工破坏、信息缺失等问题导致年均管线事故超万起,直接经济损失达数十亿元。传统探测方法依赖人工挖掘或局部抽检,效率低、成本高且易破坏管线。地球物理方法通过捕捉地下介质物理场差异实现无损探测,成为解决这一难题的关键技术。目前,常用的地球物理方法包括电磁感应法、地质雷达法、高密度电阻率法、瞬变电磁法及磁梯度法等。不同方法在原理、分辨率、探测深度及适用场景上存在显著差异。本文通过系统对比各方法的适用性,结合工程案例提出综合探测策略,为城市地下管线精准探测提供理论支持。

1 地球物理方法原理与分类

1.1 电磁感应类方法

电磁感应类方法的核心在于利用交变电磁场与金属管线之间的相互作用。当交变电磁场作用于金属管线时,会在其内部感应出电流,进而产生二次磁场。直接法将发射机直接连接至管线出露点,电流直接注入管线,接收机测量磁场分布。典型设备如管线探测仪RD8100,对有信号的电缆效果显著。可通过铁丝穿入或管道机器人带入发射信号,实现地面准确定位,误差通常小于0.1米,尤其适用于大口径金属管线。但需管线出露点作为连接点^[1]。感应耦合法无需管线出露,通过地面发射线圈产生交变磁场,在金属管线中感应出电流,接收机再探测二次磁场来确定管线位置,然而这种方式容易受到邻近管线的干扰,导致信号叠加或混淆。夹钳法则是用专用夹钳套住管线产生感应电流,由于夹钳与管

线紧密接触,能有效减少外部干扰,特别适用于电缆、小口径金属管的探测,且在管线交叉处干扰较小。

1.2 电磁波类方法

电磁波类方法主要基于电磁波在地下介质中的传播与反射特性。地质雷达法通过向地下发射高频电磁波,当电磁波遇到不同介质界面(如管线与周围土壤)时,会发生反射,接收机接收反射信号后,根据反射信号的强度和时程信息,通过剖面法或宽角法布置测线,利用反射波时程关系反演管线的位置和深度。该方法对非金属管线(如PVC、混凝土管)具有较高的分辨率,可达厘米级,能够清晰识别管线的边界和形态。然而,地下存在的金属物会对电磁波产生强烈干扰,导致反射信号混乱,影响探测结果的准确性。示踪法是在非金属管线内放入示踪线或磁偶极源,地面接收机通过追踪示踪线或磁偶极源产生的信号轨迹来确定管线位置,这种方法适用于排水、燃气等非金属管道的探测,但要求管线必须具备可进入的条件,以便放置示踪装置。

1.3 电法勘探类方法

电法勘探类方法依据地下介质电阻率的差异来探测管线。高密度电阻率法在地面布置密集电极,通过供电与测量电位差,获取地下不同位置的电阻率分布信息。由于管线与周围土壤的电阻率通常存在明显差异,大尺寸的金属或非金属管道会在电阻率剖面上形成异常区域,从而反演出管线的位置^[2]。但该方法在硬质路面上的应用会受到接地电阻的影响,接地电阻过大可能导致测量信号不稳定,影响探测结果的准确性。工频法利用50Hz工业电磁场感应管线,通过分析电磁场的变化来追踪管线走向,这种方法操作相对简单,但定位精度较低,误差通常大于1米,主要适用于对管线走向进行大致定位的场景。

1.4 其他物探方法

磁梯度法通过测量地磁场垂直分量梯度变化来定位铁磁性管线（如铸铁管）。由于铁磁性管线会对地磁场产生局部扰动，导致磁场梯度发生变化，接收机通过检测这种变化可以确定管线的位置。该方法适用于快速扫描大面积区域，能够快速发现铁磁性管线的存在，但受磁化倾角的影响较大，不同地区的磁化倾角不同，会对测量结果产生偏差，同时背景磁场干扰也可能影响定位的准确性，因此通常需要结合触探法进行验证。瞬变电磁法发射脉冲磁场激发二次场，地下介质中的导电体会对脉冲磁场产生响应，形成二次场，通过测量二次场的衰减特性，并进行时深转换，可以反演出管线的深度。该方法适用于深部管线（大于3米）的探测，但由于深部

介质的复杂性，分辨率相对较低，难以精确确定管线的细节信息。地震波法通过人工锤击等方式激发地震波，地震波在地下传播过程中遇到管线等障碍物时会发生反射，分析反射波的速度和时间信息可以定位管线的位置。该方法适用于非金属管道的探测，但地下存在的其他障碍物（如岩石、树根等）也会对地震波产生反射，导致干扰信号增多，需要采取有效措施排除这些干扰。姿态陀螺仪通过两端管道开口放入设备，利用陀螺仪姿态数据精确追踪管线走向，尤其适用于顶管施工的燃气过河管。优点是定位准确，缺点是施工难度大，需两端开口，弥补了其他方法在复杂施工场景下的应用局限。

2 地球物理方法适用性对比

2.1 探测精度与分辨率

表1 不同地球物理方法在探测精度和分辨率上存在明显差异。

方法	精度 (m)	分辨率 (cm)	适用管线类型	影响因素
直接法	< 0.1	5-10	大口径金属管	接地电阻、邻近管线干扰
地质雷达法	0.1-0.3	1-5	金属管效果较好；非金属管、混凝土管探测效果有限，通常难以准确识别	地下金属物、电磁干扰、介质含水量
高密度电阻率法	0.2-0.5	10-20	金属/非金属大尺寸管道（需与周围介质存在明显电阻率差异）	接地条件、地层电阻率对比度、电极布置密度
磁梯度法	0.3-0.8	20-50	铁磁性管线（如铸铁管）	磁化倾角、背景磁场干扰、管线埋深
瞬变电磁法	通常 > 1.0（城市复杂环境下精度显著下降；仅在介质均匀、干扰小的条件下可能接近0.5 m）	30-100	深部管线（> 3 m），但在城市环境中应用受限	地下介质电导率、电磁噪声水平、邻近金属构筑物

2.2 探测深度与效率

在探测深度方面，不同方法各有优势。对于浅层探测（小于2米），直接法、夹钳法和地质雷达法效率最高。直接法和夹钳法能够快速准确地定位金属管线，单点探测时间通常小于1小时；地质雷达法在非金属管线探测中也能迅速获取信息，同样在较短时间内完成探测。中层探测（2-5米）时，高密度电阻率法和瞬变电磁法更为适用，但完成单井探测需要1-2天的时间，这是因为这两种方法需要布置更多的电极或进行多次测量以获取足够的数据^[3]。对于深层探测（大于5米），瞬变电磁法和地震波法是主要手段，但由于深部介质的不均匀性和复杂性，分辨率会显著下降，探测难度增大。在探测效率上，浅层探测方法具有明显优势，而中深层探测方法则需要更多的时间和精力。

2.3 成本与操作难度

从成本角度看，各类地下管线探测方法存在显著差异。工频法和磁梯度法整体成本较低，适用于对定位精度要求不高的大范围初步排查；而地质雷达法和高密度电阻率法则属于中高成本方法，通常用于对探测精度和

数据可靠性要求较高的场景。在操作难度方面，不同方法也各有挑战。直接法依赖管线存在出露点以便连接发射设备，对现场条件有一定限制；地质雷达法在实施过程中需规避电磁干扰，并根据探测目标和环境合理设置参数；瞬变电磁法则要求对采集的数据进行滤波与降噪处理，以提升信号质量与解释准确性。因此，在实际工程应用中，应结合项目目标、现场条件、精度需求以及资源投入等因素，综合评估并选择最适宜的探测方法。

3 多技术融合探测策略

3.1 复杂环境下的方法组合

在城市中心区等复杂环境下，管线密度高、种类多、埋深不一，单一探测方法往往难以满足需求，需要采用多技术融合的探测策略。例如，在某市繁华地段的管线探测项目中，该区域管线密度达到20条/km²，包含金属和非金属管线，埋深从浅层到数米不等。采用了“直接法+地质雷达法+磁梯度法”的组合方案。首先，利用直接法定位出露的金属管线，由于直接法的高精度特性，能够准确确定这些管线的位置和走向。然后，使用地质雷达法探测非金属排水管，地质雷达法的高分辨率

可以清晰识别排水管的边界和形态。同时,运用磁梯度法快速扫描铁磁性管线,如铸铁管等,快速确定其大致位置。最后,结合三维激光扫描技术,对探测到的管线进行三维建模,直观展示管线的空间分布情况。

在工业区深部管线探测中,同样需要综合运用多种方法。例如,某化工园区需探测埋深5米的输油管道。采用了“瞬变电磁法+高密度电阻率法”的组合方案。瞬变电磁法能够发射脉冲磁场激发二次场,通过测量二次场的衰减特性,初步定位深部低阻体,确定输油管道的大致位置范围。然后,使用高密度电阻率法在该范围内进行详细探测,验证电阻率异常,进一步精确管线的位置和埋深。最后,结合钻探取样确认管线的材质和实际状况。通过这种组合方法,定位误差小于0.5米,成功避免了误挖事故,保障了工业区的安全生产。

3.2 非地球物理方法的补充

除了地球物理方法,一些非地球物理方法在地下管线探测中也发挥着重要作用。三维激光扫描技术适用于大型构筑物(如综合管廊)的三维建模,通过发射激光束并测量反射光的时间和强度,能够获取构筑物表面的高精度三维坐标信息,精度可达毫米级,为管线的规划、设计和维护提供详细的三维模型。探头示踪法通过管道机器人携带示踪探头,进入全封闭的非金属管道内部,示踪探头能够发射信号,地面接收机通过追踪信号轨迹,确定管道的走向和位置,这种方法适用于无法从外部探测的全封闭管道。电视检测法利用爬行机器人携带高清摄像头进入管道内部,采集管道内部的视频图像,同时结合惯性定位仪获取管道的三维坐标信息,能够直观地观察管道内部的状况,如破损、堵塞等问题,为管道的修复和维护提供准确依据。

4 技术挑战与发展趋势

4.1 当前挑战

目前,城市地下管线探测仍面临诸多挑战。非金属管线探测是一个难题,PVC、PE等非金属管道不具有导电性,传统的电磁感应法无法直接探测,主要依赖地质雷达法或示踪法。然而,地下存在的金属物会对地质雷达法的电磁波产生强烈干扰,导致反射信号混乱,影响探测结果的准确性;示踪法虽然可以探测非金属管道,但需要管线具备可进入的条件,在实际应用中受到一定限制。并行管线区分也是一个关键问题,密集排列的管线容易产生信号叠加,使得探测信号复杂化,难以准确区分各条管线的位置和属性^[4]。目前采用的频率编码或压

力线感应法虽然可以在一定程度上抑制干扰,但仍无法完全解决信号混淆的问题。深部管线精度方面,瞬变电磁法与地震波法在深部探测中分辨率不足,由于深部介质的复杂性和不均匀性,导致探测信号衰减严重,难以精确确定管线的细节信息,需要结合钻探验证来提高探测结果的准确性,但这会增加探测成本和时间。

4.2 发展趋势

随着科技的不断进步,城市地下管线探测技术呈现出一些发展趋势。人工智能融合将成为未来的重要方向,利用深度学习算法处理多源数据(如地质雷达图像、电阻率剖面等),通过对大量数据的学习和分析,提升自动解译能力,减少人工干预,提高探测效率和准确性。装备微型化也是一个发展趋势,开发便携式探测仪,集成电磁感应、地质雷达与惯性定位功能,实现单兵作业,方便在复杂环境下进行快速探测,提高探测的灵活性和效率。实时监测系统将结合物联网技术,在管线关键节点部署传感器,实时采集管线的运行状态数据,如压力、流量、温度等,并通过网络传输到监控中心,实现对管线运行状态的实时监控与预警,及时发现管线故障和隐患,保障城市地下管线的安全运行。

5 结语

城市地下管线探测需要根据管线的类型、埋深、环境干扰等因素,综合选择适宜的地球物理方法。电磁感应法在金属管线浅层探测中具有显著优势,地质雷达法是非金属管线探测的首选方法,高密度电阻率法与瞬变电磁法可解决深部管线探测问题,磁梯度法适用于快速扫描铁磁性管线。然而,单一方法在复杂环境下往往难以满足探测需求,多技术融合可显著提升探测精度与效率,是未来城市地下管线探测的主流发展方向。随着人工智能与物联网技术的不断突破,地下管线探测将向智能化、实时化迈进,为城市安全运行提供更强大的保障。

参考文献

- [1]赵文轲,余立刚,方朝涯,等.城市地下管线综合地球物理探测[J].科学,2020,72(06):35-37+4.
- [2]李国旗,王文清.复杂条件背景下城市地下管线探测技术的应用[J].科技创新与生产力,2025,46(01):147-149.
- [3]谢小建.城市地下管线工程探测要点分析[J].江西建材,2024,(09):104-106.
- [4]谭孝程,张慧,李世钧.浅谈物理勘探技术在城市地下管线探测中的应用[J].信息系统工程,2020,(08):74-75.