

复杂条件下城市地下管线探测技术研究

文◆广东广量勘测规划有限公司 于晓明

引言

随着城市化进程的加速，地下管线系统已成为城市基础设施不可或缺的重要组成部分。这些管线包括供水管道、燃气管道、电力电缆、通信网络、排水管网等，它们支撑着城市的正常运行与发展^[1]。然而，随着城市发展，自然环境不断发生变化，地下管线逐渐老化、损坏，地下管线的探测也变得越来越具有挑战性^[2-3]。本文以某市地铁站管线探测项目为案例，综合运用地质雷达（GPR）、电磁感应法、声呐探测法和激光雷达法等技术，探讨复杂条件下城市地下管线的探测方法，为管线维护和更新提供依据，为多种不同探测设备协同作业提供了经验，对管线相关管理等工作具有参考价值与推广意义。

1 城市地下管线探测方法

1.1 电磁感应法

电磁感应法是一种应用广泛的地下管线探测技术，主要适用于金属材质的管线探测，如钢管、铁管、金属电缆等。其原理是通过发射器产生低频交变电磁场，激发地下金属管线产生感应电流或者直接对金属管线输入交变电流，利用电磁感应原理，使

金属管线形成同频率的交变磁场；通过接收器上两个互相垂直且位置不同的感应线圈，接收该磁场的强度、相位等参数，确定管线的平面位置、埋深以及走向。该方法探测速度快、操作简单，适合大面积初步普查。该方法定位精度较低，探测深度一般可达 1m ~ 5m。该方法适用于相对干燥环境，如城市道路、绿化带等地面探测。

1.2 地质雷达（GPR）法

地质雷达法是一种通过发射电磁波并接收其在地下不同介质边界上的反射回波，来获取地下目标物体信息的技术。当电磁波遇到地下不同介质（如金属、塑料、混凝土、土壤、空洞等）时，由于它们的介电性、导电性以及导磁性存在差异，电磁波在波阻抗明显不同的介质界面上会发生反射和折射，部分能量会反射回地表。接收天线捕捉回波信号的走时、振幅以及波形特征，进而反推出介质的材质、位置和深度^[4-5]。

GPR 不仅能探测金属管线和非金属管线（如 PVC、水泥等），还能识别空洞、裂缝等地质情况，并根据需要生成二维剖面图像或三维立体影像，直观展示地下结构。该方法适用于各种复杂场景下的管线探测，探测范围广，安全性高。但由于仪器频率越小，其体积越大，故需要结合实际场合选择合适的天线。

1.3 声呐探测法

声呐探测法是一种利用声波在水中传播并遇到物体反射回波的原理，以识别和定位地下空腔、管道内部形变、淤堵或结构破损等情况的技术。该方法常用于排水管网、箱涵、暗渠等充水或潮湿环境下的探测工作，尤其适合管径较大、人员无法进入的空间。

声呐系统主要包括声波发射器和接收器，设备可安装于机器人、遥控船、轨道滑车或其他载体，在管道中行进时进行圆周扫描成像，获得管道壁面的轮廓图像。

1.4 激光雷达（LiDAR）

在城市地下管线探测中，激光雷达多用于精准扫描与建模。如果目标区域存在遮挡或环境介质（如烟雾、水体等）影响激光传播，LiDAR 将无法获取有效数据。因此在探测中，激光雷达通常需要与其他技术（如声波检测、视觉成像等）结合使用，以弥补其局限性。例如，激光雷达系统可以结合 GNSS、惯性测量系统和视觉成像技术，有效区分性

【作者简介】于晓明（1985—），男，河南郑州人，本科，工程师，研究方向：测绘。

质相同的管线（如通信、监控、电力等），准确定位坐标信息，大幅提高数据的准确性和可靠性。

2 城市地下管线探测的主要影响因素

2.1 探测环境的复杂性

潮湿和积水环境会显著影响探测信号的传播。在使用电磁感应法时，地表的水分会增加土壤的电导率。积水还会在管道内部形成反射面，产生虚假信号，干扰正常的探测信号，容易造成误判。使用地质雷达（GPR）法时，电磁波在传播过程中会受到水分的吸收和散射作用，导致信号的衰减和失真，影响探测深度和分辨率。声呐探测法在积水环境中虽然有一定的优势，但水中的气泡、杂质等也会对声波的传播产生干扰，影响探测结果的准确性。

覆土厚度也影响着探测效果。覆土过厚会降低探测信号的强度，导致探测不到管线或探测结果误差较大。电磁感应法一般要求覆土厚度不超过 5m，地质雷达法在浅层（< 1m）探测效果较好，而声呐探测法和激光雷达法对覆土厚度的要求相对较低。

城市中的地面障碍物（如建筑物、交通设施等）同样会影响地下管线的探测。地面上的建筑结构、硬化层、路面设施等都会对探测设备的放置和工作产生影响，限制了探测的覆盖范围。

2.2 地质特征对管线探测的影响

土壤类型决定了土壤的电导率和介电常数。例如，黏土的电导率较高，对电磁感应法和地质雷达法的探测信号衰减较大；而砂土的介电常数较低，对地质雷达法的探测分辨率影响较大。非均匀的地质结构，如存在石块、砾石层等，会使探测信号产生散射和反射，干扰正常信号，导致探测结果出现偏差。

地下水位的高低也会对探测产生影响。在高地下水位地区，电磁感应法的信号容易受到地下水的干扰，产生虚假信号；地质雷达法的探测信号在地下水位处会发生反射，影响对深层管线的探测。

2.3 目标管线对探测的影响

金属管线适用于电磁感应法，因为其能产生明显的感应电流和次级磁场；而非金属管线则需要依赖地质雷达法的介电常数差异进行探测。

此外，城市地下管线的布局往往非常复杂，尤其在老旧城区或者密集的商业区，多个管线常常紧密排列，这使得探测变得更加困难。在探测过程中，近间距管线会导致探测信号相互干扰，从而影响目标管线的精确定位和识别。信号互相重叠或产生共振，容易造成误判或漏判。例如，在使用电磁感应法时，多个金属管线之间的信号会互相干扰，产生叠加效应，导致信号反射回波的方向和强度不准确。

2.4 设备技术参数对管线探测的影响

探测深度是衡量探测设备能力的重要指标。电磁感应法一般探测深度在 1m ~ 5m，地质雷达法根据天线频率的不同，探测深度可从浅层（< 1m）到深层（> 30m）不等。

不同频率的电磁波或声波在介质中的传播特性不同。例如，低频电磁感应信号能够探测到较深的管线；而高频信号则适用于浅层管线的高

精度探测。同时，分辨率是探测设备区分相邻管线或管线细节的能力。例如，高频地质雷达天线（如 1GHz 以上）可实现厘米级分辨率，能够探测到管线的变形和缺陷问题。

3 某市地铁站施工区域复杂地下管线探测案例分析

3.1 研究区域概况

（1）探测区域地下管线网络纵横交错，涵盖排水管网、供水管线、燃气管道、通信管线、电力管线以及供热管线等多种类型。这些管线于不同年代建设，并历经多次改造，缺乏完整准确的竣工图纸，使得管线的具体位置、走向和埋深等信息存在较大的不确定性，增加了探测的难度。

（2）项目位于城市中心地带，周边交通流量大，探测作业需避开交通高峰期，同时要确保施工安全和不影响周边居民的正常生活。此外，地下存在潮湿、积水的情况，部分区域地下水位较高，这会对探测信号的传播和接收产生干扰，降低探测精度，尤其对电磁感应法和地质雷达法等依赖电磁信号的探测技术影响较大。

（3）探测区域的地质条件较为复杂，上层路面多次翻修，材质差别大，地下空间建筑类型不同；下层土壤类型多样，包括黏土、砂土、砾石土等。不同类型介质的电导率和介电常数差异较大，会对探测信号产生不同的影响。

3.2 探测方法

为了确保地下管线的准确探测并减少误差，针对不同的探测需求和现场条件，探测综合运用了多种探测技术，以确保探测结果的可靠性和准确性。

（1）浅埋的导电良好金属管

线探测。在浅埋的电力、通信等导电良好的金属管线探测时，选用电磁感应法，能敏锐捕捉金属管线产生的二次磁场，可精准定位其位置、走向和埋深，测量精度高，并且操作流程简便，探测速度快，能在短时间内覆盖较大探测区域，获取清晰管线信息，满足施工前探测的要求。

(2) 导电性较差的金属管线。采用电磁感应法结合地质雷达法进行探测，两种方法互为补充，电磁感应法先提供管线大致位置与走向，地质雷达法进一步确认管线精确位置、埋深以及周边地质信息。二者结合发挥各自优势，解决导电性较差金属管线单独使用电磁感应法信号弱、精度低的问题，能够保证探测结果的准确性，但工作效率相对较低。

(3) 不导电管线和深埋管线。采用地质雷达法，利用高频天线和低频天线结合的方法，能有效探测不导电管线（如PVC排水管、PE燃气管、通信硅芯管等），不受管线材质限制，直观呈现管线位置、走向和埋深，便于解读分析，适应城市复杂管线网络的探测需求。但随着管线深度增加，探测精度会急速下降，该方法需

要随着施工的开挖，采用其他方式进行进一步的探测验证。

(4) 地下空间架空管线。采用激光雷达法构建三维点云模型，能够清晰展示出地铁站地下空间内架空的通信管线、电力管线的空间位置和几何形状。同时，通过附带视觉相机和惯导系统加持，能够准确分辨不同管线，并定位坐标，全面准确地掌握地下空间管线架空情况，为地铁站的后续运营和维护提供了重要的空间数据支持。

(5) 有缺陷病害的管线。在对直径为800mm的排水管道进行探测时，声呐探测法发现管道内部存在多处堵塞和沉积物，最长堵塞长度约为6m，堵塞物厚度约为120mm，沉积物厚度约为180mm，特别是在管道的弯头和连接处，这些堵塞严重影响了排水效率。同时，还检测到部分管道内壁存在腐蚀和变形现象，最大变形量约为80mm。这些探测结果为及时修复病害、保障管线正常运行提供了详细准确的信息。

3.3 探测与效果

(1) 在本次探测工作中，综合运用了电磁感应法、地质雷达法、声呐探测法和激光雷达法等多种先进的探测技术，成功应对了复杂环境下的各种挑战，全面准确地探测出排水管网、供水管线、燃气管道、通信管线、电力管线和供热管线等多种类型地下管线的位置、走向、埋深和病害情况等信息，探测成果达到了预期目标。

(2) 采用不同探测技术相结合的方式，充分验证了在探测区域管线网络密集多样、环境条件恶劣以及地质条件复杂等情况下进行探测的可行性，给复杂场景下的多设备联合探测提供了实践经验和重要参考。

(3) 不同设备结合的方法，发挥了不同设备的优势，不仅极大提高了工作效率，还为实际生产中不同技术人员的协作提供了宝贵经验。

结语

通过对某市地铁站施工区域的实际案例分析，证明了多种探测技术协同作业的可行性、高效性和可靠性。研究表明，地质雷达法（GPR）、电磁感应法、声呐探测法和激光雷达法（LiDAR）在探测地下管线的结构和病害方面表现出色，能够提供高精度的探测结果。根据不同管线类型和探测目标，灵活选择和组合探测方法，能够充分发挥各方法的优势，克服单一方法的局限性，提高探测精度和效率，降低探测成本，为城市地下管线的探测和管理提供了宝贵的经验和借鉴，具有重要的推广应用价值。

引用

[1] 王岐山.地铁车站雨污水管与市政雨污水管网接驳探讨[J].福建建筑,2018(11):59-60+103.

[2] 向帆,蒋文岗,杨晓光,等.综合管廊内雨污水管道的管线设计要点[J].中国给水排水,2018,34(4):41-46.

[3] 刘红希.海绵城市雨污分流管线设计研究[J].水与水技术,2024(00):218-221.

[4] 卢孟辉.某电厂含氢排气管线积水分析[J].科技视界,2021(15):79-81.

[5] 高显泽,刘亮,冯骋,等.电磁感应法在埋地非金属管道探测中的应用[J].科学技术创新,2022(21):175-178.

