

DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202605001

地下工程目标电磁探测研究应用进展

吴文贤, 湛旭辉*, 赵鑫, 代宏睿

(中国地质调查局 军民融合地质调查中心, 成都 610036)

摘要:地下工程目标广泛存在于隧道衬砌、地下管线、岩溶空洞、富水破碎带及地下加固结构等场景,具有隐蔽性、介质非均匀性和验证成本高等特点,这对无损、快速和高可信探测提出了更高要求。围绕地下工程目标电磁探测,系统综述了探地雷达(ground penetrating radar,GPR)、频域电磁法(frequency domain electromagnetic method,FDEM)、时域电磁法(time domain electromagnetic method,TDEM)及航空/半航空/地空电磁系统的技术特点,适用边界与前沿进展。在方法层面,总结了GPR在高导电介质和复杂衬砌场景下的规范化处理链、属性分析与智能识别进展,梳理了FDEM侧向约束反演及其与结构先验、多源数据联合反演的发展,并探讨了TDEM从一维解释向准二维、快速三维和深度学习近似反演的演进趋势,以及无人平台轻量化、电磁同步和姿态补偿等关键技术。在应用层面,结合隧道岩溶识别、衬砌病害检测、复杂地形隧道风险调查和矿井超前探水等典型案例,分析了不同方法在探测深度、分辨率、效率和环境适应性之间的互补关系。研究表明:地下工程目标电磁探测已由单一方法判读逐步转向多平台、多模态协同感知与高可信解释。未来的发展重点不在于单一设备能力的线性提升,而在于数据标准化、联合反演、不确定性评估及“探测—识别—响应”一体化智能感知体系的构建。本文综述可为地下工程目标探测方法选型、系统集成与工程决策提供参考。

关键词:地下工程目标;电磁探测;探地雷达;频率域电磁法;时间域电磁法;联合反演;智能识别

中图分类号:P631.3+25

文献标志码:A

开放科学标识码(OSID):

文章编号:2097-2741(2026)05-0001-11



听语音
聊科研
与作者互动

地下工程目标广泛存在于隧道、地下加固结构、衬砌体系、地下管线、岩溶空洞以及富水破碎带等场景,其准确识别直接关系到地下空间开发、隧道施工、基础设施运维与地质灾害防控^[1-5],并且兼具军事地球物理学意义^[6-7]。与地表目标不同,地下工程目标往往具有隐蔽深埋、尺度差异大、介质非均匀和现场验证成本高等特点^[8-9],单纯依赖人工开挖、钻探或局部暴露手段不仅效率低,而且难以满足连续、无损与快速评估的需求。

电磁法具有非接触、非侵入、可连续测量和平台适配性强等优势,已成为地下工程目标探测的重

要技术选项。其中,探地雷达(ground penetrating radar,GPR)依靠高频电磁波反射获取浅层高分辨率信息^[10-12],频域电磁法(frequency domain electromagnetic method,FDEM)通过多频、多构型感应响应表征中浅层导电结构^[13],时域电磁法(time domain electromagnetic method,TDEM)利用瞬变扩散过程反演深部电阻率分布^[14-16],航空电磁法(airborne electromagnetic method,AEM)、半航空瞬变电磁法(semi-airborne transient electromagnetic method,SATEM)与地面航空瞬变电磁法(ground-airborne transient electromagnetic meth-

收稿日期:2025-11-09

修回日期:2026-04-09

录用日期:2026-07-20

第一作者:吴文贤(1982—),男,正高级工程师,主要从事地球物理勘查与研究工作。

*通信作者:湛旭辉(1993—),男,工程师,主要从事地球物理勘查应用工作。

引用格式:吴文贤,湛旭辉,赵鑫,等. 地下工程目标电磁探测研究应用进展[J]. 火箭军工程大学学报,2026,40(5):1-11. Wu Wenxian, Chen Xuhui, Zhao Xin, et al. Research and application progress on electromagnetic detection for underground engineering targets[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(5): 1-11.

od, GATEM) 则将电磁探测由地面观测拓展到复杂地形和大范围快速覆盖^[17-18]。随着处理器性能提升、载荷轻量化、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)/惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)同步和人工智能模型的发展^[19], 地下工程电磁探测正由“是否能探测”转向“如何高可信度解释、如何闭环服务工程决策”^[20]。

已有研究和综述为本文奠定了基础。例如, Wai-Lok 等^[1]系统总结了 GPR 在土木工程中的应用脉络, Wang 等^[2]综述了地下环境中的电磁目标探测方法, Pringle 等^[3]讨论了地下隐蔽结构与隧道的非侵入式探测, Xu 等^[5]和 Zou 等^[11]则分别从不良地质智能识别和 AI 驱动 GPR 解译角度给出了最新进展。然而, 现有文献仍存在 3 个方面不足: 其一, 较多综述停留于方法原理和一般优缺点介绍, 对反演算法的核心思路、适用条件和优化方向讨论不足; 其二, 对高导电介质条件下 GPR 信号处理、FDEM 的侧向约束反演、TDEM/AEM 的准二维和快速反演、无人平台电磁系统轻量化等近年成果梳理不够系统; 其三, 对典型工程案例、结果验证方式及“探测—识别—响应”闭环体系缺少系统论述。

基于此, 本文围绕地下工程目标电磁探测的“方法机理—反演算法—工程案例—系统框架”主线展开。首先, 综述 GPR、FDEM、TDEM 及无人平台电磁系统的技术边界与前沿进展; 其次, 重点讨论 GPR 处理链、FDEM 侧向约束反演、TDEM 一维/准二维/快速反演和多源联合解释; 随后, 结合隧道岩溶、衬砌缺陷、复杂地形隧道风险调查和矿井超前探水等实例分析方法适配性; 最后, 提出面向工程落地的“探测—识别—响应”一体化地下智能感知体系, 为地下工程目标探测从单次勘查走向持续感知与决策支持提供参考。

1 地下工程目标电磁探测方法体系与前沿进展

1.1 探地雷达(GPR)

GPR 通过向地下发射高频电磁脉冲并接收介电常数突变界面的反射回波, 实现对浅层目标和结构边界的成像^[1]。当土体、岩体、混凝土、空洞或钢筋衬砌之间存在显著介电差异时, 雷达剖面通常表现为连续反射界面、绕射双曲线或能量异常带。由

于中心频率高、波长短, GPR 具有厘米至分米级分辨率, 尤其适用于浅埋隧道、衬砌病害、空洞、管线和局部岩溶等需要高分辨率表达的场景^[21-26]。

GPR 的优势与局限均在于介质损耗。对于干燥、低导电背景, GPR 可以获得较好的穿透深度与成像质量; 对于富水黏土、盐渍土和泥灰质等高导电介质, 电磁波衰减显著增大, 导致有效探测深度和信噪比迅速下降。Mendoza 等^[21]在高导电宿主介质条件下的工程试验表明, 若缺少针对性预处理, 浅层杂波、背景趋势变化和高频衰减会显著掩盖目标回波, 因而仅依赖常规滤波和人工判读往往不足以支持可靠解释。

近年的一个重要趋势是 GPR 从几何识别走向处理链与智能识别一体化。一方面, 高导电介质和钢筋密集场景推动了时间零点校正、去直流漂移、背景去除、增益补偿、预测反褶积、偏移成像和三维属性分析等处理流程的规范化^[11, 21-27]; 另一方面, 深度学习模型开始用于双曲线自动检测、目标埋深估计、衬砌缺陷识别以及掌子面前方岩体完整性评估^[11, 22-24, 28]。因此, GPR 已不再只是传统的浅层成像工具, 而是逐步成为地下工程快速检测与智能解释的重要数据源, 其工作场景示意如图 1 所示。

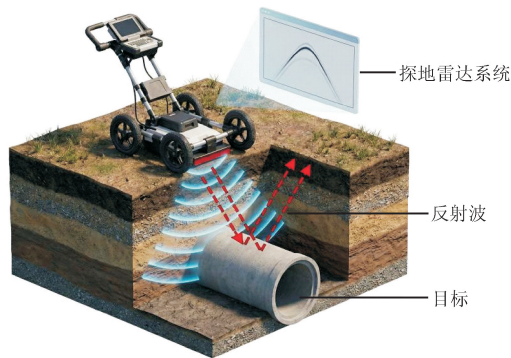


图 1 GPR 工作场景示意

Fig. 1 Schematic of the GPR working scenario

1.2 频域电磁法(FDEM)

FDEM 基于电磁感应原理工作: 发射线圈产生连续变化的主磁场, 在地下导体中激发涡流, 接收线圈测量及由此产生的次级场幅值和相位信息, 以反演地下电导率结构^[29-32]。通过调整发射频率、线圈距和偶极构型, FDEM 可在中浅层范围内实现快速连续观测, 尤其适合探测金属体、富水异常、回填带、电导率突变界面和浅部环境变化。

与 GPR 相比, FDEM 对导电异常更敏感, 对非金属干燥空洞和纯几何界面的响应则相对间接。

因此,FDEM 的工程价值通常体现在两个层面:一是以较高效率圈定导电异常范围;二是作为多源联合探测中的电性约束,为后续精细探测、钻孔验证或联合反演提供先验信息^[29-32]。对于钢筋混凝土结构、回填沟槽和含水裂隙发育带,如果电导率对比明显,FDEM 可以比单一 GPR 更早发现异常。

近年来,FDEM 的研究重心已从单点表观参数解释转向空间约束反演、联合反演和结构先验引导。Klose 等^[29]提出的多构型 EMI 侧向约束反演能够在平滑模型与锐界面模型之间调节模型锐度;Narciso 等^[31]则通过地统计框架实现了 FDEM 与直流电阻率数据的联合反演;随后又有研究将 GPR 的结构边界作为先验引入 FDEM 的伪三维反演^[32]。这些进展显著提高了 FDEM 在复杂场地中的可解释性。图 2 是频域电磁法的典型层状地电模型示意。

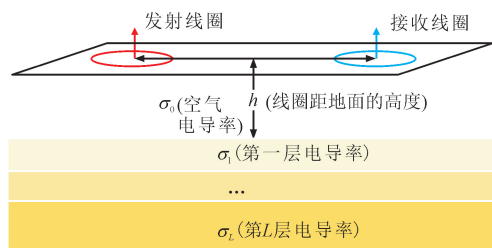


图 2 频域电磁法典型层状地电模型

Fig. 2 Typical layered geoelectric model for the frequency-domain electromagnetic method

1.3 时域电磁法(TDEM)及其航空/半航空扩展

TDEM 采用脉冲或阶跃关断激励,在发射电流切断后测量地下感应电流扩散衰减产生的瞬变响应。早期时间道主要反映浅层信息,晚期时间道则对应更深部的扩散过程。与 GPR 和常规 FDEM 相比,TDEM 的优势在于探测深度较大,对导电异常、富水构造和深部风险体更敏感。因此,TDEM 天然适合恢复地下电阻率随深度变化的结构^[33-36]。

图 3 呈现两种典型的 TDEM 测深布置方式:图 3(a)为接地电源线法,图 3(b)为中央回线感应法。长期以来,TDEM 在地下工程中的瓶颈主要体现在设备部署、解释效率和复杂地形适应性 3 个方面。地面大回线布设往往受场地条件限制,一维反演虽然稳健但对强三维异常和复杂地形响应不足,传统三维反演又面临计算成本较高的问题。近年出现的准二维反演、快速三维反演、深度学习近似反演和自适应网格正演,为提高 TDEM 的工程实时性提供了新路径。

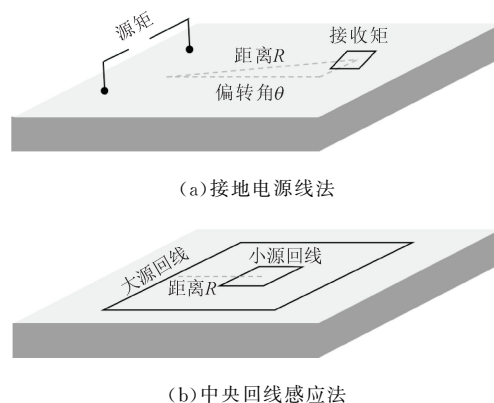


图 3 两种典型时域电磁探测布置方式

Fig. 3 Two typical time-domain electromagnetic detection layouts

与此同时,航空/半航空/地空瞬变电磁系统显著拓宽了地下工程调查的部署边界。复杂山地、峡谷和交通不便区域中的隧道风险调查,越来越多地依赖直升机航空电磁法(helicopter-borne electromagnetic method, HEM)、SATEM 和 GATEM 等平台完成快速覆盖^[28,37-40]。特别是轻量化接收机、小型接收线圈、GNSS/PPS 同步及姿态补偿技术的成熟,使“空中快速扫测—地面精细复核”的组合模式逐步可行。由此,深部或大尺度地下目标探测已不宜再简单表述为“仅能依赖地面 TDEM 或重力法”,而应根据目标尺度、电性对比、平台条件和反演能力综合判断。无人机系统的探测场景如图 4 所示。



图 4 航空时域电磁法场景示意

Fig. 4 Schematic of airborne time-domain electromagnetic surveying

1.4 无人平台与多模态协同

无人平台正成为地下工程电磁探测的重要发展方向。系统性综述表明,重力、磁法、电磁法、GPR、摄影测量和 LiDAR 等多类地球物理与遥感传感器正在向无人平台迁移^[16-17]。对于地下工程应用而言,无人平台的核心价值并不只是“替代人工”,而在于提高复杂地形可达性、增大覆盖效率、降低高风险作业暴露,并实现多源数据的时空同步采集。

无人平台并非简单地把地面设备搬到空中。平台运动噪声、电磁自干扰、姿态变化引起的耦合误差、采样同步、载荷续航和平衡设计,都会对数据质量产生直接影响^[16-17,38]。因此,无人平台电磁系统的关键不只是小型化,更包括硬件同步、姿态控制、运动补偿、轨迹约束和数据融合算法的协同设计。未来地下工程智能探测的发展趋势,将越来越依赖“多模态无人采集+联合反演+智能识别”的集成体系。

2 数据处理与反演算法进展

2.1 GPR 数据处理、属性分析与目标识别

对地下工程目标而言,GPR 数据解释的核心并不在于“是否存在反射”,而在于如何把反射异常转化为可复核的目标几何与属性信息。典型处理链包括时间零点校正、去直流漂移、去噪、带通滤波、背景去除、增益补偿、偏移成像和深度换算^[1,10,20]。在高导电介质和钢筋密集场景下,还需要结合预测反褶积、绕射分离、三维网格处理和多属性协同解释,以减弱衰减与杂波造成的解释偏差^[20,25]。

GPR 偏移成像和属性分析对工程目标的几何恢复尤为重要。偏移处理能让双曲线散射能量回归到其物理位置,属性分析则可从振幅、能量、瞬时相位、频谱幅值等角度提取异常边界和内部差异^[25]。对于隧道掌子面超前预报、岩溶洞轮廓恢复和衬砌脱空识别,仅给出“异常存在”往往不足以支持工程响应,需结合属性切片、三维可视化和局部验证手段,才能将电磁异常解释为具体的工程对象。

此外,人工智能正在重塑 GPR 的目标检测与量化流程。Mendoza 等^[21]基于 3 824 幅实测 GPR 扫图像训练了 YOLO v3 模型,实现了地下管线自动识别和定位,平均相对埋深误差低于 4%,单幅图像处理时间约为 0.03 s。针对隧道衬砌场景,Liu 等^[22]与 Liu 等^[23]分别利用深度学习实现了脱空、钢筋缺陷、衬砌厚度与多类型病害的快速识别。需要指出的是,深度学习并不能替代地球物理机理分析,而更适合作为“异常提取和辅助解释”模块,并与速度校准、迁移成像、属性分析和现场核查共同构成解释闭环。

2.2 FDEM 侧向约束反演与联合反演

FDEM 数据解释长期面临一个典型矛盾:逐点一维反演实现简单,但相邻测点独立求解容易引入

模型跳变和非唯一性;直接三维反演虽然理论完备,但在工程应用中计算成本较高。侧向约束反演(laterally constrained inversion,LCI)正是在这一背景下得到广泛关注,其基本思想是将沿测线布设的多个一维层状模型通过横向约束联立求解,使相邻测点的层厚和电导率在可控范围内保持连续,从而得到更稳定的拟二维成像结果^[29-30]。

Monteiro^[30]较早系统阐述了 EM34 资料的一维侧向约束反演框架,为后续工程应用奠定了基础。Klose 等^[29]进一步面向多构型 EMI 数据提出具有可调锐度的 LCI 方法,通过在纵向和横向引入最小梯度支撑(minimum gradient support,MGS)正则化,使模型可以在“平滑层状解释”和“锐利界面解释”之间调节。这类方法的价值在于:一方面提高了测线结果的连续性和地质可读性;另一方面通过改变约束强度,可以显式考察等效模型与解释不确定性。

LCI 更适用于层状或准层状介质、剖面采样较密、目标在横向上具有一定连续性的场景,例如回填带识别、浅部富水区划分、土层分带和地下结构边界追踪。对于强三维孤立体、密集金属杂波或显著地形起伏场地,LCI 仍可能产生偏差,需要与伪三维反演、结构先验或多源数据联合使用^[29,31-32]。近期研究表明,将电阻率层析成像法(electrical resistivity tomography,ERT)资料或 GPR 结构边界引入 FDEM 反演,可显著改善小尺度异质性的表征能力^[31-32]。这也是 FDEM 从“快速扫描”迈向“高可信解释”的重要途径。

2.3 TDEM 一维、准二维与快速反演

TDEM 的经典解释框架以一维层状反演为主。该方法假定地下主要沿垂向变化,通过拟合不同时间道的瞬变衰减曲线恢复分层电阻率结构,具有稳健、快速、工程实现成熟等优点^[32]。对于大回线测深、目标尺度较大且地层近似层状的场景,一维反演仍是最常用的工作流程。但当地下存在强横向变化、断裂破碎带、岩溶通道或复杂地形时,简单一维模型容易把三维效应等效为虚假的层状异常。为弥补这一不足,准二维反演成为地下工程 TDEM 数据处理的重要发展方向。Klose 等^[32]在大定源回线瞬变电磁资料处理中提出了一套典型流程:先将感应电动势转换为磁场响应,再计算全区表观电阻率;随后利用快速 smoke-ring imaging 构造初始模型,并在横向和纵向约束下采用非线性最小二乘法迭代求解,最终得到更符合剖面连续性的准二维电

阻率图像。与单点一维反演相比,准二维方法更适合用于巷道前方含水区、隧道风险带和导电异常体追踪。

在更大范围和航空平台条件下,迭代侧向约束反演正在成为 AEM/TDEM 资料的可行方案。Lu 等^[35]针对时域航空电磁数据提出逐点独立反演与侧向参考模型迭代结合的策略,在控制计算量的同时,提升了剖面连续性。与此同时,深度学习近似反演和自适应正演加速方法也开始应用于 TDEM。Shi 等^[34]利用“卷积-双向长短期记忆网络”实现了浅层瞬变电磁的快速反演;Xu 等^[36]则从综述角度指出,自适应网格和模型简化是降低电磁正反演计算成本的重要路径。总体来看,TDEM 反演正从一维快速解译向准二维/三维、高速和带不确定性的解释体系演进。

2.4 多源联合解释与不确定性评估

地下工程目标往往为弱异常、非唯一和条件依赖型目标,单一方法容易受到物性对比、尺度效应和场地噪声影响。因此,近年来电磁探测数据解释逐步从单方法独立判读转向多源联合解释。这种联合不仅包括 GPR、FDEM、TDEM 之间的互补,也

包括与 ERT、钻探、地质编录、遥感和监测信息的协同使用^[5,31-32,41-42]。

在工程实践中,联合解释的价值主要体现在两点:其一,结构边界和电性异常可以相互印证;其二,钻孔或开挖验证可反向约束电磁反演先验,提高下一轮探测的针对性。与联合解释相伴而生的是不确定性评估。早期的许多工程报告只给出单一的反演剖面或异常解释,而很少说明结果的可信度区间、模型敏感性和多解性来源。随着联合反演和机器学习应用增多,输出异常置信度图、参数波动范围、训练样本覆盖度和验证一致性将越来越重要。对于地下工程决策而言,真正有价值的并不是“唯一答案”,而是“具有置信度的推荐解释”和“面向响应措施的风险分级结果”。

3 典型工程应用案例

与一般性原理综述相比,工程案例更能反映电磁探测方法的有效性边界、验证方式和落地条件。表 1 汇总了近年来具有代表性的地下工程案例,以作进一步讨论。

表 1 典型工程应用案例对比
Table 1 Comparison of typical engineering application cases

场景	方法与流程	主要工程效果	启示
广西弄模隧道隐藏岩溶洞 ^[24]	二维 GPR 初判+超前钻孔速度校准/验证+三维 GPR 与属性分析	恢复岩溶洞位置和几何形态,异常与钻孔结果对应较好	GPR 适合浅埋隧道岩溶识别,但需与速度校准和现场验证配合
盾构隧道衬砌与复合衬砌检测 ^[41]	GPR 剖面成像+深度学习识别+频率参数优选	实现脱空、钢筋缺陷、衬砌厚度及复合衬砌响应特征识别	浅层结构检测中,参数优选与 AI 批量识别同等重要
广西寨亚/大吉等复杂地形隧道调查 ^[37,39]	SATEM 或 GATEM 快速覆盖+地面复核+反演解释	识别低阻岩溶/裂隙富水异常,与后续开挖和风险段对应	复杂地形下应优先考虑平台可达性与覆盖效率,再谈单方法优劣
会泽铅锌矿巷道超前探水 ^[40]	多匝小线框 TDEM 探测+钻孔验证	前方 20~80 m 低阻富水异常得到有效识别和验证	TDEM 对深部导电风险带稳健,但几何精度需由其他手段补充

3.1 GPR 在浅埋隧道岩溶识别中的应用

Liu 等^[24]以广西弄模隧道为例,展示了 GPR 在隧道施工期隐藏岩溶识别中的工程流程:首先,利用二维 GPR 沿隧道轴线开展超前扫描,对掌子面前方潜在岩溶异常进行初判;随后,通过超前钻孔获得电磁波速并核验异常位置;最后,采用三维 GPR 网格观测进一步恢复岩溶洞的几何形态。该案例表明,GPR 对浅埋和中浅埋岩溶洞具有较高的

定位敏感性,但可靠解释依赖于速度校准和钻孔验证。

在后续研究中,Lan 等^[25]通过 F-K 处理、属性分析和 K-means 阈值分割实现了隧道岩溶洞的三维可视化,表明最大频谱幅值等属性的应用能让岩溶边界提取取得较好效果。由此可见,针对隧道超前预报场景,GPR 的关键不只是采集天线频率选择,更在于建立“二维初判—速度校准—三维恢

复—现场验证”的完整处理链。

3.2 GPR 在衬砌与地下结构检测中的应用

衬砌病害与复合衬砌检测是 GPR 最成熟的工程方向之一。对于隧道衬砌中的脱空、厚度不足、钢筋缺陷和空洞异常, GPR 可以提供高分辨率剖面。近年来, 随着深度学习模型的引入, 批量数据的自动识别效率得到了进一步提升^[22-23]。在盾构隧道复合衬砌场景中, Ren 等^[43]基于数值模拟、室内实验和工程实测, 分析了钢纤维混凝土-钢筋混凝土复合衬砌的雷达响应, 指出 300 MHz 天线在该类结构中的综合效果较优。这说明衬砌检测不仅依赖算法, 还与天线频率和目标材料电磁特性高度相关。

然而, 衬砌检测类案例虽然埋深通常较浅, 但其对高导电衰减、钢筋杂波分离、自动识别和结果量化提出了更高要求, 因而对更一般的地下工程目标探测具有借鉴意义。尤其是“参数优选+AI 识别+现场核验”的模式, 可迁移到浅埋结构、管线和局部空洞识别等相近场景。

3.3 复杂地形下 SATEM/GATEM 在隧道调查中的应用

对于地形起伏大、交通不便或地面回线难以铺设的区域, SATEM 和 GATEM 为隧道风险调查提供了新的技术路径。Sun 等^[37]报道了复杂地形条件下用于隧道调查的首个半航空瞬变电磁实例, 说明“地面发射—空中接收”模式能够在复杂山地环境中提高覆盖效率。随后, Sun 等^[38]研制的新型无人机 SATEM 接收系统采用轻量记录器和小型接收线圈, 并利用 GNSS/PPS 实现时间同步, 系统内噪声约为 $0.834 \mu\text{V}$ 、采样率可达 256 kb/s, 在广西寨亚隧道的应用中成功识别了隧址周围岩溶发育区, 结果与后续开挖较为一致。

除 SATEM 外, GATEM 也已应用于复杂地形隧道地质风险调查。Zhang 等^[39]开展了直升机电磁与地空电磁在隧道工程中的应用研究; Zhang 等^[40]在广西大吉隧道案例中指出, 低阻 karst 破碎带和裂隙富水区与水泥突涌风险具有对应关系, GATEM 的灵活性使其更适合峡谷和陡坡环境。此类案例说明, 深部或复杂地形目标的探测不应简单归结为某单一方法可探测, 而应根据平台可达性、发射矩、飞行高度、噪声水平和解释目标综合选择地面 TDEM、SATEM、GATEM 或其组合。

3.4 TDEM 在深部导电异常与超前探水中的应用

对于深部富水异常、导电破碎带和巷道前方含水水体, TDEM 仍是工程上最稳健的手段之一。Cheng 等^[44]在会泽铅锌矿巷道扩建中采用多匝小线框瞬变电磁装置进行超前探水, 成功识别出巷道前方 20~80 m 范围内的低阻异常带, 并通过钻孔验证了异常情形与含水构造的一致性。该案例表明, 当目标表现为明显导电异常时, TDEM 对“有无风险”和“风险区段位置”的判断能力强于单纯几何成像。

更早的多分量、多阵列 TEM 隧道探测研究^[36]已表明, 针对岩溶和隧道前方导电体, 合理的装置构型和表观电阻率处理对于提高解释可靠性十分关键。与 GPR 相比, TDEM 虽不能提供厘米级边界成像, 但在深部探测、导电异常追踪和复杂场景下的稳健性方面具有不可替代的优势。因此, 对深埋结构、含水构造或深部加固体系的探测, 更现实的路径通常是先由 TDEM/SATEM/GATEM 定位异常, 再由 GPR、钻孔或局部揭露完成精细核查。

4 性能边界、复杂环境约束与方法组合

4.1 不同方法的性能边界

从工程适用性看, GPR、FDEM、TDEM、AEM、SATEM、GATEM 之间并不存在简单的优劣排序, 而是体现为“探测深度-分辨率-效率-环境适应性”的折中关系。GPR 的优势是分辨率相对最高, 适合厘米至分米尺度目标和结构边界表达, 但对高导电介质敏感, 深度优势有限; FDEM 适用于中浅层导电异常的快速扫描, 部署效率高, 但对纯几何型和弱导电对比目标不敏感; TDEM 对深部导电异常和富水风险带响应强, 但成像分辨率较低; SATEM、GATEM 与 AEM 在复杂地形和大范围快速覆盖方面具有明显优势, 但其解释质量受飞行高度、姿态噪声和反演策略影响更大。因此, 对于 30 m 以上深部目标, 不宜再采用“仅 TDEM 和重力类方法具备探测能力”的绝对表述。更合理的表述应是: 地面 TDEM 仍然是深部导电异常探测的重要手段, 但当目标尺度较大、电性对比明显、发射矩和平台条件允许时, 固定翼或旋翼平台的 AEM、SATEM、GATEM 同样具有探测潜力; 其实际效果取决于目标性质、地形条件、背景噪声和反演能力^[28,37-40]。表 2 概括了主要电磁方法的性能边界。

表 2 主要电磁探测技术性能对比

Table 2 Performance comparison of major electromagnetic detection techniques

方法	典型探测深度	典型分辨率	核心处理/反演	优选目标与场景	主要约束
GPR	约 0.5~15 m(低损耗介质更优)	厘米~分米级	预处理、偏移成像、属性分析、深度学习识别	浅埋隧道、衬砌、管线、局部空洞、浅部岩溶	高导电衰减、钢筋杂波、深度受限
FDEM	约 3~50 m(与频率/线圈距相关)	分米~米级	1D 反演、LCI、联合反演、结构先验约束	导电异常快速圈定、回填带、富水区、中浅层构造分带	对纯几何型和弱导电对比目标敏感性弱,强三维效应下解释偏差增大
TDEM	约 10~300+ m(与装置和发射矩相关)	米级~十米级	1D、准二维、快速 3D、深度学习近似反演	深部导电异常、富水破碎带、巷道超前预报、深埋风险带	分辨率较低,布设和噪声控制要求高
SATEM/ GATEM/ AEM	数十至数百米	米级~十米级	侧向约束反演、表观电阻率成像、快速三维解释	复杂地形隧道调查、大范围快速覆盖、深部异常定位	飞行高度与姿态噪声、自干扰、同步与运动补偿
多源联合 探测	取决于组合模式	互补提升	联合反演、统计融合、钻探/监测约束、不确定性评估	深埋或弱异常目标、多方法交叉验证场景	数据标准化、坐标配准与成本控制要求高

4.2 复杂环境约束与假异常问题

复杂地形、钢筋网、金属碎片、工业电磁噪声、地表起伏、平台姿态变化和高导电覆盖层,是地下工程电磁探测中的主要干扰因素。对于 GPR,这些因素常表现为强反射杂波、双曲线伪异常和有效穿透深度骤降;对于 FDEM 和 TDEM,则表现为耦合变化、系统漂移、低频噪声增强和异常位置偏移。尤其在城市的地下空间、既有隧道改扩建和复杂山地场景中,若缺少背景基线、定位校正和多源验证,单条异常剖面很容易被误判为目标体。

降低假异常风险的基本策略包括:开展空白区基线测试,建立金属杂波与典型背景样本库;对无人平台数据进行姿态补偿和同步校正;对深部异常采用重复观测和多尺度观测;在关键位置引入钻孔、掌子面揭露或施工反馈作为硬约束;对 AI 模型输出同时给出置信度和人工复核结果。工程上真正可靠的不是单次探测给出的漂亮图像,而是异常情形在多源信息和现场验证下保持一致。

4.3 面向不同场景的多方法组合

对于浅埋结构、衬砌病害、管线和局部空洞,建议优先采用 GPR 进行高分辨率成像,并用手持 EMI 或局部钻孔进行核查;对于回填带、含水裂隙、导电异常和中浅层构造分带,可采用 FDEM 快速圈定异常,再由 GPR 或 ERT 进行细化;对于深部富水、岩溶破碎带、深埋隧道风险段和大型导电异常,建议采用

TDEM 作为主探手段,并根据地形条件引入 SATEM、GATEM 或 AEM 提高覆盖效率^[28,32-37,43-45]。

需要特别指出的是,针对深埋永久性加固结构和大尺度地下工程体,公开同行评议文献中的直接成像案例仍然有限。现阶段更务实的工程策略不是宣称某一种方法可以独立识别一切深埋结构,而是将目标定位理解为“异常区识别+多源验证+持续更新解释”的过程。也正因此,地下工程目标探测的发展方向必然是方法组合与系统协同,而不是单一设备能力的线性提升。

4.4 “探测—识别—响应”一体化的地下智能感知体系

基于上述方法边界和工程需求,本文提出面向地下工程目标的“探测—识别—响应”一体化智能感知体系。该体系不是对现有电磁方法的简单堆叠,而是将传感平台、处理反演、目标识别与工程响应组织为可闭环更新的技术系统。

第一层为感知采集层。该层由 GPR、FDEM、TDEM、SATEM/GATEM/AEM、钻孔与现场监测等多类终端组成,可部署于地面车载/推车平台、井巷平台、固定点位和无人机平台。其核心任务是根据目标类型和场地约束完成观测参数设计、空间覆盖规划、时间同步和质量控制。对于复杂地形,采集层需同时考虑 GNSS/IMU、秒脉冲(pulse per second,PPS)同步、轨迹约束和电磁兼容设计。第

二层为数据处理与反演层。该层负责时间域/频域预处理、去噪、增益、偏移、LCI、一维/准二维/三维反演以及多源配准,输出可以用于解释的电性参数场、结构边界和异常体候选区。该层的关键是统一坐标、统一时间戳和统一质量标签,使不同平台采集的数据能够进入同一反演与融合框架。第三层为识别与评估层。该层将地球物理异常转换为工程对象,主要模块包括目标检测、类型判别、几何参数估计、风险分级和不确定性评估。机器学习和知识驱动模型可用于异常筛选,但需与地球物理机理、工程地质先验和现场验证信息联合使用,最终输出应是“目标候选+置信度+证据链”。第四层为决策与工程响应层。该层根据识别结果触发复测、钻探核查、超前支护、注浆加固、施工调整、运维预警等具体工程动作,并把响应结果反馈到采集设计和先验模型中,形成持续更新的闭环。这样,“响应”不再是抽象概念,而是具有明确动作清单、数据回写和责任链条的工程流程。

上述“探测—识别—响应”一体化的地下智能感知体系关键取决于3个环节。一是数据标准化。不同平台和方法的采样频率、坐标系统、时间基准和质量标记必须统一,否则很难开展真正意义上的联合反演和协同解释。二是人机协同解释。地下工程场景复杂、样本稀缺,当前AI模型仍应以辅助筛选和结果排序为主,最终判读需要地球物理人员、地质人员和工程人员共同完成。三是验证结果回写。钻孔、开挖、注浆和施工监测反馈不应只用于“事后说明解释是对的”,更应回写至先验模型与样本库中,为下一轮探测优化参数和训练数据作准备。面向近期工程应用,较可行的落地路径是:首先,在典型场景中建立标准化数据集和案例库;随后,实现自动质量控制、异常初筛和候选区排序;然后,通过联合反演和人工复核完成工程解释;最后,将施工揭露与监测结果反馈至模型,逐步形成半自动乃至自适应的地下智能感知体系。这一路径既避免了“完全自动化”的不切实际,也比传统的一次性物探报告更接近真实工程需求。

5 结论

1) 不同电磁方法具有显著互补性,不存在绝对优劣。GPR具备厘米至分米级分辨率,适合浅埋结构、衬砌病害、管线和局部空洞的精细识别,但受高导电介质衰减和钢筋杂波影响明显;FDEM适合中

浅层导电异常的快速圈定和结构分带;TDEM对深部导电异常、富水破碎带和巷道超前探水更为稳健;SATEM、GATEM和AEM则在复杂地形和大范围快速覆盖方面表现突出。因此,地下工程目标探测应依据目标尺度、电性差异、埋深、地形条件和平台能力进行综合选型,而非简单依赖单一方法。

2) 数据处理与反演算法正成为提升解释可信度的核心。GPR已从传统剖面识别发展到集成预处理、偏移成像、属性分析和深度学习辅助识别的完整处理链;FDEM由单点表观参数解释转向侧向约束反演、联合反演和结构先验约束;TDEM则由经典一维反演向准二维、快速三维和深度学习近似反演发展。算法进步显著增强了复杂场地中的异常恢复能力,也推动电磁探测从“能否发现异常”转向“能否可靠解释异常”。

3) 工程案例表明,可靠应用依赖“方法组合+现场验证”的闭环。无论是浅埋隧道岩溶识别、衬砌病害检测,还是复杂地形隧道风险调查与深部超前探水,单一异常图像本身并不足以支撑工程决策。速度校准、钻孔验证、开挖反馈、信息监测及多源数据交叉印证,是降低假异常风险、提升解释可信度的关键。工程上真正有效的并非单次“漂亮成像”,而是经多源证据链支撑后的可复核结论。

4) 无人平台和多模态协同是未来的重要发展方向。随着轻量化传感器、GNSS/IMU同步、姿态补偿和运动噪声抑制技术的发展,无人平台正在显著拓展地下工程电磁探测的部署边界。未来复杂地形、危险区域和大范围调查任务,将更加依赖“无人采集+联合反演+智能识别”的集成模式,以提升覆盖效率、可达性和作业安全性。

5) 地下工程目标探测的发展趋势是构建“探测—识别—响应”一体化智能感知体系。其关键不只是多方法叠加,而是实现多平台数据标准化、统一时空基准、多源联合反演、不确定性评估以及验证结果回写。面向实际工程,较可行的路径是:先建立典型场景标准化数据集与案例库,再实现自动质量控制与异常初筛,随后结合联合反演和人工复核完成解释,最终将施工揭露与监测结果反馈至模型中,形成持续更新的闭环体系。

参考文献

- [1] Wai-Lok Lai W, Dérobert X, Annan P, et al. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: a 30-year journey from locating and testing

- to imaging and diagnosis[J]. *NDT & E International*, 2018, 96: 58-78.
- [2] Wang Xiaofen, Wang Peng, Zhang Xiaotong, et al. Target electromagnetic detection method in underground environment: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(14): 13835-13852.
- [3] Pringle J K, Ruffell A, Styles P, et al. Forensic geoscience non-invasive detection and characterisation of underground clandestine complexes, bunkers, tunnels and firing ranges[J]. *Forensic Science International*, 2024, 359: 112033.
- [4] Pringle J K, Ruffell A, Jervis J R, et al. The use of geoscience methods for terrestrial forensic searches [J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(1/2): 108-123.
- [5] Xu Zhenhao, Yu Tengfei, Li Shucui, et al. Intelligent identification of lithology and adverse geology: a state-of-the-art review [J]. *Smart Underground Engineering*, 2025, 1(1): 3-25.
- [6] 刘光鼎, 刘代志. 试论军事地球物理学[C]//中国科学院地质与地球物理研究所二〇〇三学术论文汇编·第四卷(油气资源). 北京:中国科学院地质与地球物理研究所 2003 学术年会, 2003: 168-176.
- [7] 张栋, 葛良胜, 吕新彪, 等. 法证军事地球物理: 战场侦察与痕迹识别[J]. *地球物理学进展*, 2025, 40(1): 0372-0386.
- Zhang Dong, Ge Liangsheng, Lyu Xinbiao, et al. Forensic military geophysics: battlefield reconnaissance and trace identification[J]. *Progress in Geophysics*, 2025, 40(1): 0372-0386.
- [8] 蔡有良, 吴文贤, 彭清华, 等. 等值反磁通瞬变电磁和微动法在内蒙古某萤石矿采空区探测中的应用效果浅析[J]. *工程地球物理学报*, 2022, 19(4): 459-465.
- Cai Youliang, Wu Wenxian, Peng Qinghua, et al. Analysis on the application effect of comprehensive geophysical prospecting method in goaf detection of a fluorite mine in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2022, 19(4): 459-465.
- [9] Sloan S D, Peterie S L, Miller R D, et al. Detecting clandestine tunnels using near-surface seismic techniques [J]. *Geophysics*, 2015, 80(5): EN127-EN135.
- [10] Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress [J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66(3/4): 261-330.
- [11] Zou Lihong, Li Ying, Munisami K, et al. Bridging theory and practice: a review of AI-driven techniques for ground penetrating radar interpretation[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(15): 8177.
- [12] Xu Qingqi, Liu Qinghua, Ouyang Shan. GPR-based leakage reconstruction of shallow-buried water supply pipelines using an improved UNet++ network [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(13): 2174.
- [13] Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: a review [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 139: 36-46.
- [14] Everett M, Farquharson C. Near-surface electromagnetic induction: introduction [J]. *Geophysics*, 2012, 77(4): WB1-WB2.
- [15] Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies [J]. *Geoderma*, 2014, 223: 33-45.
- [16] Levi E, Goldman M, Hadad A, et al. Spatial delineation of groundwater salinity using deep time-domain electromagnetic geophysical measurements: a feasibility study [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(12): 2007WR006459.
- [17] Dadrass Javan F, Samadzadegan F, Toosi A, et al. Unmanned aerial geophysical remote sensing: a systematic review[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(1): 110.
- [18] Wu Xin, Xue Guoqiang, Wang Yanbo, et al. Current progress in and future visions of key technologies of UAV-borne multi-modal geophysical exploration for mineral exploration: a scoping review [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(15): 2689.
- [19] Zhang Yuxiao, Carballo A, Yang Hanting, et al. Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions: a survey [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 196: 146-177.
- [20] Pathirana S, Lambot S, Krishnapillai M, et al. Ground-penetrating radar and electromagnetic induction: challenges and opportunities in agriculture [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(11): 2932.
- [21] Mendoza R, Araque-Pérez C, Marinho B, et al. Processing GPR surveys in civil engineering to locate buried structures in highly conductive subsoils [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 4019.
- [22] Liu Hai, Yue Yunpeng, Liu Chao, et al. Automatic recognition and localization of underground pipelines in GPR B-scans using a deep learning model [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2023, 134: 104861.
- [23] Liu Peng, Ding Zude, Zhang Wanping, et al. Using ground-penetrating radar and deep learning to rapidly detect voids and rebar defects in linings [J]. *Sustainability*, 2023, 15(15): 11855.
- [24] Liu Bin, Zhang Jiaqi, Lei Ming, et al. Simultaneous

- tunnel defects and lining thickness identification based on multi-tasks deep neural network from ground penetrating radar images[J]. *Automation in Construction*, 2023, 145: 104633.
- [25] Lan Riyan, Liu Zonghui, Liu Maomao, et al. Detection of karst caves during tunnel construction using ground-penetrating radar and advanced drilling: a case study in Guangxi Province, China[J]. *Near Surface Geophysics*, 2022, 20(3): 265-278.
- [26] Zhou Dong, Liu Maomao, Liu Zonghui, et al. 3D visualization of karst caves in tunnels based on GPR attribute analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(2): 310-317.
- [27] Sánchez A I, Gallardo L A. The magnetic permeability signature in high-frequency electromagnetic data modeling: a case study for GPR approximation [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2025, 13: 1632441.
- [28] Huang Yong, Fu Wei, Hu Xiewen. Multi-model intelligent prediction of rock integrity in tunnels based on geological differences of ground-penetrating radar exploration workfaces[J]. *Infrastructures*, 2025, 10(8): 211.
- [29] Klose T, Guillemoteau J, Vignoli G, et al. Laterally constrained inversion (LCI) of multi-configuration EMI data with tunable sharpness[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 196: 104519.
- [30] Monteiro Santos F A. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 56(2): 123-134.
- [31] Narciso J, Verhegge J, Van De Vijver E. Geostatistical joint inversion of frequency-domain electromagnetic data and direct current resistivity data for near-surface modelling[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 36006.
- [32] Klose T, Guillemoteau J, Koyan P, et al. Sharp spatially constrained inversion of 3D frequency-domain electromagnetic induction data sets with structural prior information from ground-penetrating radar data: application to peat soil evaluation[J]. *Geophysics*, 2025, 90(6): E241-E251.
- [33] Li Fengping, Yue Jianhua, Yang Haiyan, et al. Quasi-2D inversion of surface large fixed-loop transient electromagnetic sounding data[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2024, 21(2): 548-571.
- [34] Shi Yu, Zhang Jifeng, You Xiran, et al. Transient electromagnetic inversion to image the shallow subsurface based on convolutional bidirectional long short-term memory neural networks[J]. *Geophysical Journal International*, 2024, 239(1): 173-191.
- [35] Lu Congde, Wang Jian, Huang Song. An iterative laterally constrained inversion scheme for time-domain airborne electromagnetic data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2025, 238: 105729.
- [36] Xu Jintong, Qiu Lewen, Ren Zhengyong. Adaptive forward modeling and inversion in geoelectromagnetic methods: a review[J]. *Big Data and Earth System*, 2025, 1(2): 100030.
- [37] Sun Huaifeng, Li Xiu, Li Shucui, et al. Multi-component and multi-array TEM detection in karst tunnels [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, 9(4): 359-373.
- [38] Sun Huaifeng, Zhang Nuoya, Li Dunren, et al. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 132: 104893.
- [39] Zhang Nuoya, Sun Huaifeng, Liu Yuchao, et al. SA-TEM: a new drone-based semi-airborne transient electromagnetic receiver system[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2025, 241: 105848.
- [40] Zhang Tianyu, Zhang Chunran, Long Donghui, et al. Application of helicopter-borne and ground-airborne electromagnetic detection to tunnel engineering investigation[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1886.
- [41] Allam H, Metwally A, Ismael M, et al. Subsurface voids detection using GPR and ERT techniques: a case study in Sukari Gold Mine, Egypt[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2025, 182(10): 4137-4167.
- [42] Beran L, Zelt B, Pasion L, et al. Practical strategies for classification of unexploded ordnance[J]. *Geophysics*, 2013, 78(1): E41-E46.
- [43] Ren Zhouhong, Liu Dajin, Hu Ticai, et al. Study on the method of advanced water prediction for underground mine expansion using the transient electromagnetic method and the field test: a case study of the Huize lead-zinc mine[J]. *Water*, 2025, 17(1): 122.
- [44] Cheng Wangsheng, Sun Naiquan, Qi Zhipeng, et al. The application of GATEM in tunnel geologic risk survey based on complex terrain[J]. *Geophysics*, 2024, 89(6): B453-B465.
- [45] Li Kang, Xie Xiongyao, Chen Hao, et al. Ground penetrating radar detection of steel fiber reinforced composite linings in shield tunnels: experimental and field studies[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2025, 19(4): 541-555.

Research and Application Progress on Electromagnetic Detection for Underground Engineering Targets

WU Wenxian, CHEN Xuhui*, ZHAO Xin, DAI Hongrui

(Center for Military-Civil Integration Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: Underground engineering targets are commonly encountered in settings that include tunnel linings, underground pipelines, karst cavities, water-rich fractured zones, and subsurface reinforcement structures. Their inherent characteristics, including concealed locations, heterogeneous surrounding media, and high verification costs, place increasingly stringent demands on detection techniques in terms of nondestructive operation, rapid assessment, and detection reliability. This paper provided a systematic review of the technical features, application scopes, and recent advances in ground-penetrating radar (GPR), frequency-domain electromagnetic methods (FDEM), time-domain electromagnetic methods (TDEM), and airborne/semi-airborne/ground-airborne electromagnetic systems (AEM/SATEM/GATEM) for the electromagnetic detection of underground engineering targets. At the methodological level, particular attention was devoted to standardized processing workflows, attribute-based analysis, and advances in intelligent recognition for GPR applications in highly conductive media and under complex lining conditions; laterally constrained inversion techniques for FDEM and their integration with structural prior information and multi-source joint inversion frameworks; the evolution of TDEM from one-dimensional interpretation to quasi-two-dimensional inversion, rapid three-dimensional inversion, and deep-learning-based approximate inversion; as well as key technological developments, including the weight reduction of unmanned platforms, electromagnetic synchronization, and attitude compensation. At the application level, representative case studies addressing tunnel karst identification, lining defect detection, risk assessment in tunnels situated in complex terrain, and advanced water detection in mines were analyzed to clarify the complementary capabilities of different methods with respect to detection depth, spatial resolution, efficiency, and environmental adaptability. The findings indicate that electromagnetic detection of underground engineering targets is evolving from interpretation based on individual methods toward collaborative, multimodal sensing across multiple platforms and more reliable interpretation frameworks. Future developments are expected to extend beyond incremental improvements in individual instruments, placing greater emphasis on data standardization, joint inversion, uncertainty quantification, and the establishment of an integrated intelligent sensing framework encompassing the processes of “detection-recognition-response”. This review provides a technical reference for method selection, system integration, and engineering decision-making in the detection of underground engineering targets.

KEYWORDS: underground engineering targets; electromagnetic detection; ground-penetrating radar; frequency-domain electromagnetic method; time-domain electromagnetic method; joint inversion; intelligent identification

(编辑:夏菁)