引文格式：周巍,申传明,屈玲,等. 鉴于函数基的金属管线探测反演算法研究及应用[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):113-116. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.06.025

鉴于函数基的金属管线探测反演算法研究及应用

周　巍[1]，申传明[1]，屈　玲[1,2*]，曾　求[1,2]
（1. 湖北省地质局地球物理勘探大队，湖北 武汉 430056；2. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室（湖北省地质局），湖北 武汉 430034）

摘　要：针对城市化进程中，金属管线数量增多，传统探测手段难以满足需求，保障其安全性、经济性与环保性的问题。研究了基于函数模型的UPDF探测算法，采用层析原理结合迭代求解，减少分层、拟合函数建模，并以地面探测雷达开展实测实验。结果显示，通过UPDF算法对武汉某非开挖电力管道探测，在X、Y方向最大残差均为0.25 m，平均残差分别为0.12、0.13 m，RMS为0.14、0.15 m，与实际管线坐标差距小，能精准探测趋势与位置。提出的UPDF探测算法为金属管线探测技术面临的环境复杂、技术失衡、数据处理难等困境提供了解决方法，保障城市生命线稳定运行。

关键词：反演算法；金属管线探测；地面探测技术；垂直探测技术；城市生命线工程
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0113-04

Research and Application of Inversion Algorithm for Metal Pipeline Detection Based on Function

ZHOU Wei[1], SHEN Chuanming[1], QU Ling[1,2], ZENG Qiu[1,2]
(1. Geophysical Exploration Brigade of Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, China;
2. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environment Geology, Hubei Geological Bureau, Wuhan 430034, China)

Abstract: In the process of urbanization, the number of metal pipelines has increased, and traditional detection methods are difficult to meet the demands and ensure their safety, economy and environmental protection. In view of these, we studied a UPDF detection algorithm based on function model, used the principle of Hierarchical analysis combining with iterative solution to reduce the layering, fitting function modeling, and used the ground detection radar to carry out real measurement experiments. A trenchless power pipeline in Wuhan was detected by the UPDF algorithm. The results show that the maximum residuals in X and Y directions are 0.25 m, the average residuals are 0.12 m and 0.13 m, and the RMS is 0.14 m and 0.15 m, which is a small gap with the actual pipeline coordinates. The UPDF detection algorithm proposed in this paper provides a solution to the dilemma of complex environment, technical imbalance, and difficult data processing faced by the detection technology of large buried metal pipelines, and guarantees the stable operation of urban lifelines.

Key words: inversion algorithm, metal pipeline detection, ground detection technology, vertical detection technology, the urban lifeline engineering

在城市基础设施建设迅猛发展的当下，地下管线网络规模不断扩张、布局愈发复杂，管线探测难度与日俱增[1]。金属管线作为城市“生命线”，广泛服务于供水、供气、电力、通信等关键领域，其安全稳定运行是保障公共安全、城市有序管理以及经济持续发展的基石。一旦金属管线发生泄漏，不仅会导致相关供应中断，还会污染土壤和地下水源，破坏生态平衡[2-4]。

目前，金属管线探测技术大致分为地面探测技术、垂直探测技术和新兴的无人探测技术[5-6]。地面探测技术中，地面电磁探测和地质雷达技术（GPR）应用广泛。地面电磁探测借助发射与接收电磁波来确定管线位置和深度，但在复杂地质条件下，如富含地下水或高电阻率土壤区域，电磁波传播受阻，探测精度大幅下降。GPR依据电磁波在地下介质中的传播特性工作，分辨率较高，不过在湿润土壤和高导电性介质环境里，其性能会受到明显影响[7-9]。垂直探测技术方面，超声波法利用超声波在金属管线中的传播特性进行探测，精度虽高，但传播距离有限，且易受环境噪声干扰。激光雷达（LiDAR）技术凭借激光脉冲实现高精度三维成像用于管线探测，却受土壤类型、管道材料、埋深和周围干扰物等多种因素制约，设备成本高昂，常需与其他方法配合使用[10-11]。新兴的无人机搭载探测技术机动性强、部署迅速，能在复杂区域高效检测管线，降低成本与风险。数据融合技术整合多

项目来源：湖北省自然科学基金计划资助项目（2022CFB334、2024AFB396）。
第一作者简介：周巍（1982—），本科，高级工程师，从事工程检测、管网探测、测试监测、工程测绘等工作，E-mail：43201689@qq.com。
通信作者：屈玲（1983—），博士，高级工程师，从事地质测绘、海洋测绘、变形监测等工作，E-mail：quling86@126.com。

设备信息，提升探测精度和可靠性，然而在实际推广应用中，面临数据处理分析能力不足、设备标准化和合规性等难题[12-13]。传统的地下管线探测手段，像人工探测和简单的地面电磁探测，已难以满足现代城市复杂的探测需求[14-15]。人工探测依赖人工经验判断，缺乏科学精确性，面对错综复杂的地下管线布局，无法精准确定管线的位置、深度和走向，这无疑给施工和维护带来巨大风险。简单的地面电磁探测虽能基于电磁感应原理对金属管线进行初步探测，但在复杂地质环境下，信号衰减严重，探测精度随深度增加急剧降低，无法为城市建设和管理提供可靠的管线信息。因此，本文提出一种基于函数模型的金属管线探测算法，并通过实验验证其精度与可行性，以期为该领域研究提供新的思路和方法。

1 基于函数模型的探测算法

1.1 算法原理

金属管线探测可分为基于函数基的金属管线探测和基于像素基的金属管线探测，金属管线层析探测能够更好地表达金属管线变化的立体形态，在理论上表达金属管线更加准确，但受到观测值分布的原因，无论是基于像素基还是函数基算法，在解算过程中都存在法方程不适定性，这使得金属管线探测是典型的秩亏问题，严重影响了金属管线探测建模的精度。

本文在考虑到金属管线基本特性的基础上，提出一种基于函数基的金属管线探测模型，称为UPDF（underground pipeline detection algorithm based on functional model）。一方面降低金属管线探测过程中管线分层的层数；另一方面，每一层用函数模型进行拟合。这样每层建模即保证了金属管线的建模精度，同时分层给出的金属管线特征参数可反映其变化形态。

当探测信号通过发射装置到达接收装置之前，会经过金属管线周围区域，产生一定的信号变化，这一变化的大小与沿线经过的管线相关物理特性大小有关，这些物理特性可以表征为某种探测信号特征量（detecting signal characteristic quantities，DSC）可表达为沿线相关物理特性的积分：

$$\mathrm{DSC}_i(t)=\int_s De(\boldsymbol{s},t)\mathrm{d}\boldsymbol{s} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{s}$ 为射线向量；t 为时间参数；$De(\boldsymbol{s},t)$ 为沿线探测信号密度函数。考虑到金属管线在地下的深度不同，将式中表达式进行分段表达，但同时为了减弱分段过多对后续解算带来困难，分段在3段为宜，如下式所示：

$$\mathrm{SDSC}_i(t)=\int_s De(\boldsymbol{s},t)\mathrm{d}\boldsymbol{s}=\int_{h=5}^{h=10} De(\boldsymbol{s},t)\mathrm{d}\boldsymbol{s}+\int_{h=10}^{h=20} De(\boldsymbol{s},t)\mathrm{d}\boldsymbol{s}+\int_{h=20}^{h=50} De(\boldsymbol{s},t)\mathrm{d}\boldsymbol{s} \tag{2}$$

如式（2），同时采用每段中间深度表征分段区间内DSC密度变化（即用7.5 m深度面表征5~10 m深度区间DSC密度）。得到DSC后，对每层进行分别建模。

$$\mathrm{DSC}_{7.5}=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}A_{ij}(b-b_0)^i(\boldsymbol{s}-\boldsymbol{s}_0)^j=a_{00}+a_{01}b+a_{02}\boldsymbol{s}+a_{03}b\boldsymbol{s}+a_{04}b^2 \tag{3}$$

式（3）取2阶多项式为特例，将式（3）代回到式（2）中，可以得到本文附加投影函数的层析算法函数模型，其中取两阶多项式作为特例。

$$\mathrm{DSC}=(a_{00}+a_{01}b+a_{02}\boldsymbol{s}+a_{03}b\boldsymbol{s}+a_{04}b^2)+(a_{10}+a_{11}b+a_{12}\boldsymbol{s}+a_{13}b\boldsymbol{s}+a_{14}b^2)+(a_{20}+a_{21}b+a_{22}\boldsymbol{s}+a_{23}b\boldsymbol{s}+a_{24}b^2) \tag{4}$$

式中，$a_{00}-a_{24}$ 为待求参数；DSC为观测值。新的层析方案通过减少分层，一方面可以保证解算的可靠性和精度；另一方面可以获取探测信号特征量的变化形态，同时每层辅以相应的投影函数，确保建模的精度。

1.2 迭代求解

本文拟采取一种迭代求解算法，在金属管线分层建模基础上，每层逐次求解参数，每次求解之后，将参数估计及其精度作为初值以及约束，通过加入过程噪声，重新代入到估计系统，迭代依次求解每层模型参数。整个过程可以用式（5）进一步说明。

$\mathrm{SDSC}\ \gamma_1(0\leqslant\gamma_1\leqslant1)$

First Step

$$\begin{cases}\gamma_1\times\mathrm{SDSC}=\begin{pmatrix}a_{00}+a_{01}b+a_{02}\boldsymbol{s}\\+a_{03}b\boldsymbol{s}+a_{04}b^2\end{pmatrix}=f(A_0)\\A_0=(a_{00}\quad a_{01}\quad a_{02}\quad a_{03}\quad a_{04})\end{cases}$$

$\Rightarrow A_{0\mathrm{Esi}}\quad Q_{\mathrm{A0Esi}}$

Second Step

$\gamma_2(0\leqslant\gamma_1+\gamma_2\leqslant1),A_{0\mathrm{Esi}}\quad Q_{\mathrm{A0Esi}}+E_0$

$$\begin{cases}(\gamma_1+\gamma_2)\times\mathrm{SDSC}=\\(a_{00}+a_{01}b+a_{02}\boldsymbol{s}+a_{03}b\boldsymbol{s}+a_{04}b^2)+\\(a_{10}+a_{11}b+a_{12}\boldsymbol{s}+a_{13}b\boldsymbol{s}+a_{14}b^2)=\\f(A_0)\times PF_{7.5}+f(A_1)\\A_1=(a_{10}\quad a_{11}\quad a_{12}\quad a_{13}\quad a_{14})\end{cases}$$

$\Rightarrow A_{0\mathrm{Esi}}\quad Q_{\mathrm{A0Esi}}\ and\ A_{1\mathrm{Esi}}\quad Q_{\mathrm{A1Esi}}$

…

Last Step

$\gamma_4(\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3+\gamma_4=1)$，

$$A_{1\mathrm{Esi}}\quad Q_{\mathrm{A1Esi}}+E_i$$

$$\begin{cases}\mathrm{SDSC}=\begin{pmatrix}a_{00}+a_{01}b+a_{02}\boldsymbol{s}+a_{03}b\boldsymbol{s}\\+a_{04}b^2\end{pmatrix}+\\\left(a_{10}+a_{11}b+a_{12}\boldsymbol{s}+a_{13}b\boldsymbol{s}+a_{14}b^2\right)+\\\left(a_{20}+a_{21}b+a_{22}\boldsymbol{s}+a_{23}b\boldsymbol{s}+a_{24}b^2\right)\\A_i=(a_{i0}\quad a_{i1}\quad a_{i2}\quad a_{i3}\quad a_{i4})\end{cases}$$

$$\Rightarrow A\quad Q_A\quad A=(A_1\quad A_2\quad A_3\quad A_4)\qquad(5)$$

式中，γ_i 为比例因子，是平差之前人为设定，初步表征了每层金属管线探测信号特征量在总探测信号特征量中所占的比例，设定方法实验部分会进行详细讨论；A_i 为待估计的每层金属管线探测信号特征量分布参数；Q_{Ai} 为对应的每次平差之后的参数精度信息；E_i 为过程噪声。

2　数据实验

2.1　模拟实验

将一个直径为20 cm，长度2 m，管壁厚度为1 mm的金属管线埋深1.4 m。如图1a所示是仿真场景金属管线位置信息示意图，图1b是使用UPDF探测算法成像结果。从图中可以明显看出金属管线上表面位于水平距离0.6 m，深度距离地表面1.4 m位置处，下表面位于水平距离0.6 m，深度距离地表面1.6 m位置处。进而可以得到金属管线的直径为0.20 m，这与仿真金属管线所埋设深度位置和管线直径信息相一致，且UPDF算法在上下金属管线的聚焦性效果好。

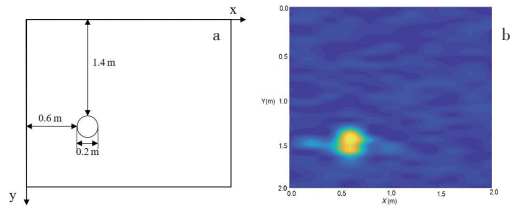


图1　单目标管线仿真成像结果

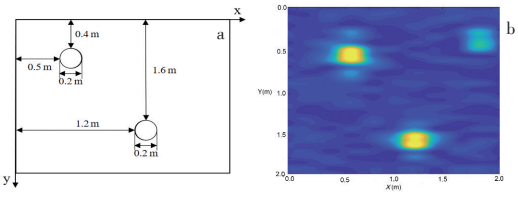


图2　双目标管线仿真成像结果

将2根材质相同，直径均为20 cm，长度2 m，管壁厚度为1 mm的金属管线，一根埋深0.4 m，与Y轴水平距离为0.5 m；另一根埋深1.6 m，与Y轴的水平距离为1.2 m。两根管线沿Y轴纵向深度差为1.2 m，沿X轴方向的横向水平差为0.7 m。如图2a所示是仿真场景金属管线位置信息示意图，图2b是使用UPDF探测算法成像结果。

从图2b中可以明显的看出一根金属管线上表面位于水平距离0.5 m，深度距离地表面0.4 m位置处，下表面位于水平距离0.5 m，深度距离地表面0.6 m位置处；另一根金属管线上表面位于水平距离1.2 m，深度距离地表面1.6 m位置处，下表面位于水平距离1.2 m，深度距离地表面1.8 m位置处。进而可以得到2根金属管线的直径为0.20 m，且2根管线的深度差为1.2 m，这与仿真金属管线所埋设深度位置和管线直径信息相一致。

2.2　实测实验

2.2.1　实验设计

2024-09-29使用基于函数模型的探测算法通过地面探测雷达（ground penetrating radar，GPR）对武汉汉新大道电力管处一条非开挖电力管道进行探测实验。本次管道三维轨迹测量地点在武汉市杨泗快速路段，测量目标为非开挖电力管道，图3为现场管道图，该管径为160 mm。

实验同时采用DT-GXY-300D管道惯性测量仪探测结果作为比对值，其标称测量精度水平精准度±0.20 cm±0.15%D，高程精度±0.15 cm±0.10%D。

2.2.2　实验结果分析

图4展示了使用本文的探测算法所得到的管线的平面坐标XY与实际的管线平面坐标XY之间的差距，蓝色线代表本文探测算法UPDF得到的XY结果，红色线代表实际的管线的XY结果，从图中可以看出，UPDF算法探测得到的管线平面坐标与实际结果之间差距较小，且能够较好地探测出管线的具体趋势以及实际位置。



图3　现场管道图

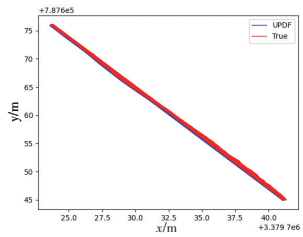


图4　UPDF探测算法对比结果

图5展示了使用UPDF算法探测得到的管线XY坐标的残差序列，蓝色曲线代表X方向上的残差，橙色曲线代表Y方向上的残差，从图中可以看出，不论是X方向还是Y方向，UPDF算法探测结果的误差均在0~0.25 m之间不断浮动，且最大不超过0.25 m。

表1统计了UPDF算法探测结果的最大残差、平均残差以及RMS（均方根误差），从表中信息可以得到，在X、Y方向上，UPDF算法探测结果的最大残差

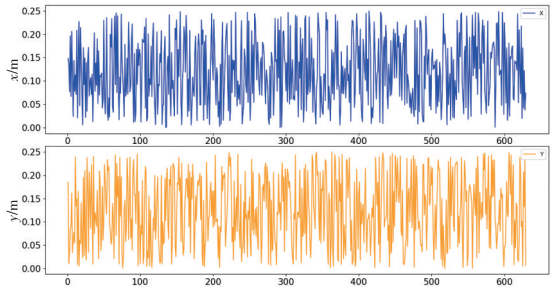


图5 UPDF探测算法残差序列图

表1 UPDF探测算法结果数据统计/m

方向	最大残差	平均残差	RMS
X	0.25	0.12	0.14
Y	0.25	0.13	0.15

均为0.25 m；在X方向上，其平均残差为0.12 m，RMS为0.14 m；在Y方向上，其平均残差为0.13 m，RMS为0.15 m。

值得注意的是，UPDF探测算法是基于金属管线分层建模基础上的函数模型，采用层析原理结合迭代求解，适用于金属管线，其效果与金属管线的深度和场景并无直接关联。该算法通过特定的函数模型和处理方式来反演金属管线信息，并非依赖于深度和场景等因素本身来确定管线位置。然而，在实际情况中，随着金属管线的深度和场景的不同，对于获取到的信号的信噪比可能会产生影响，但这主要与探测硬件的性能有关，与算法本身无关。另外，由于UPDF探测算法的核心原理不依赖于电力管线特有的性质，因此该算法对于除电力管线之外的其他金属管线仍然适用。

3 结 语

地下管线系统是城市生命线的重要组成部分，事关城市安全运行，金属管线的探测问题愈发重要。近年来政府逐渐关注、也更加重视地下管线系统的研究，传统探测手段的局限性促使新型探测技术的不断涌现，这些技术在提高探测效率和准确性方面展现出良好的应用前景。这也预示着地下金属管线探测技术未来的发展存在更多机遇和挑战：未来金属管线探测技术的发展将呈现出多技术融合、智能化、高分辨率及实时监测、高清晰度成像技术的应用、政策法规与标准化进程的完善以及可持续发展的方向。这些发展趋势将极大地推动地下管线探测的高效性、安全性和环境友好性，为城市基础设施建设和管理的可持续发展提供有力支持。本文提出了一种基于函数基的金属管线探测模型，通过模拟与实测验证了该模型在金属管线的探测中有很好的效果，为地下金属管线探测技术的研究和应用提供参考与借鉴。

参考文献

[1] 王友昆,陈裕汉,瞿华鋆,等. 地下管线成果数学精度检测系统开发与设计[J]. 地理空间信息,2019,17(11):96-101

[2] 董博,李俊霞,李海鹏,等. 电磁感应法在地下管线探测中的具体应用[J]. 北京测绘,2020,34(8):1 095-1 098

[3] 陈思静,胡祥云,彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展,2021,36(3):1 236-1 247

[4] 刘莎,吴满意,陈晓宁,等. MALA探地雷达在地下管线探测中的应用研究[J]. 地理空间信息,2019,17(8):30-32

[5] 牛建军,胡菡,陈玲.一种从CAD图形数据反演管线探测数据的方法[J]. 地理空间信息,2014,12(6):143-144

[6] 琚锋,吴建晔,俞连芳,等. 安吉县地下管线探测与信息系统建设[J]. 地理空间信息,2014,12(2):144-145

[7] 解智强,李俊娟,郭贵洲,等. 地下管线探测成果的质量检验方法[J]. 地理空间信息,2012,10(1):129-131

[8] 丘广新. 基于PDA地下管线探测数据采集系统[J]. 地理空间信息,2009,7(6):27-29

[9] 牛文周. 油田地下管线探测技术初探[J]. 地理空间信息,2006,4(5):69-71

[10] 苏宁,马听. 地质雷达在地下管线探测中的应用研究[J]. 城市勘测,2022(3):174-176

[11] Ying L,Daryoush H,Douglas C,et al. A Comprehensive Review of Acoustic Methods for Locating Underground Pipelines[J]. Applied Sciences,2020,10(3):1 031

[12] 张秉政,楼国长,沈晓武,等. 基于跨孔超声波的地下管线埋深精确探测[J]. 工程地球物理学报,2021,18(4):547-554

[13] Xu R,Jiang R,Qu T. Review of Dynamic Response of Buried Pipelines[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,2021,12(2):03120003

[14] Shifan D,Siyu M,Xiao W Z,et al. Integrated Detection of A Complex Underground Water Supply Pipeline System in an Old Urban Community in China[J]. Sustainability,2020,12(4):1 670

[15] Iftimie N,Savin A,Steigmann R,et al. Underground Pipeline Identification Into a Non-destructive Case Study Based on Ground-penetrating Radar Imaging[J]. Remote Sensing,2021,13(17): 3 494-3 496