

基于北斗动态差分定位的污染土精细化治理技术

文 / 程子聪 上海建工集团股份有限公司中央研究院

摘要: 传统化工等重污染行业造成的土体污染问题日益严峻,对生态环境、人类健康及社会经济发展构成严重威胁。对此,文章应用基于实时动态差分的高精度北斗定位技术,设计了污染土开挖实时定位方法,提出了开挖信息化管控流程,解决了传统人工放样存在的开挖范围难以精确界定,超挖或欠挖现象频繁的施工质量问题,工程示范应用证明,本方法达到厘米级定位精度,实现了污染土开挖质量的可视化管控。

关键词: 北斗定位; 动态差分定位; 污染土治理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.115

引言

伴随着我国工业化和城市化的快速推进,传统制造业尤其是化工,燃料加工行业露天堆放、随意排污导致的环境污染问题日益严峻,对生态环境、人类健康及社会经济发展构成严重威胁。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[1]显示,重污染企业及周边用地、工业废弃地、工业园区等工业相关典型地块和周边土壤,污染超标点位占比分别为36.3%、34.9%、29.4%等,其中重金属污染尤为突出,涉及镉、铅、铜、砷等多种重金属。污染土的治理已成为城市发展的重大任务。

根据处理方式的不同,我国污染土处理方式主要分为原位处理和开挖二次处理两种,原位处理方法是指直接在污染现场对土壤进行修复的技术,虽然无需挖掘运输,但技术难度大,现场工艺要求高^[2],对于多污染源交互污染土体,治理效果难以达标,故我国大量污染土治理方法主要采用开挖二次处理后回填。

污染土的开挖作为开挖修复过程的重要环节,其技术水平直接影响到修复效果、成本控制,传统的污染土开挖技术为人工放样开挖,由于开挖环境的半封闭性特点,在定位精度、施工过程监控以及对复杂场地条件的适应性等方面存在诸多局限。由于缺乏精准定位手段,开挖范围难以精确界定,常导致超挖或欠挖现象,不仅造成资源浪费,还可能因未彻底清除污染土而使修复效果大打折扣。此外,对于多污染交叉土体,随意开挖会导致开挖土体交叉感染各类污染源,甚至产生二次污染情况,治理费用需要大幅度提高。

近年来,随着卫星导航技术的飞速发展,北斗卫星导航系统(BDS)凭借其高精度定位、短报文通信、全球覆盖等独特优势,在交通、安全巡检等方面得到广泛应用^[3,4]。考虑到北斗已经实现厘米级定位精度,将北斗定位技术引入污染土开挖工程,为挖机开挖提供实时化定位指引,为实现污染土的精细化开挖提供了全新的解决方案。

一、技术原理

污染土精细化治理技术的技术关键是采用厘米级北斗定位技术。厘米级北斗定位技术以卫星导航系统的基

本定位原理为根基,通过测量卫星信号从发射到接收的时间差(伪距)来计算接收机与卫星之间的距离,再利用至少四颗卫星的距离交会确定接收机的三维坐标。北斗卫星发送包含轨道参数、时钟信息等的导航电文,接收机解算这些信息后,结合信号传播时间计算伪距,进而完成定位解算。

相对于常规米级精度,厘米级北斗定位技术由于采用了动态差分定位技术(RTK)实现精度大幅度提高。

实时动态差分技术是在已知坐标的基准站上安置北斗接收机,连续观测卫星信号并计算基准站到卫星的伪距、载波相位等观测量,通过数据链将这些观测量及基准站坐标实时发送给流动站。流动站接收卫星信号和基准站数据,利用差分原理消除卫星轨道误差、钟差、电离层和对流层延迟等公共误差,从而实现厘米级定位精度^[5]。

二、实时定位策略

考虑到挖机挖斗在使用过程中需要反复接触土体,直接在挖斗上安装北斗定位装置很容易出现装置损坏情况。为保障技术可行性,采用北斗定位+高精度传感器测算方法实时计算挖斗空间坐标(图1)。通过北斗定位技术确定挖机身朝向和精确定位,基于动臂、斗杆、挖斗的倾角数据,结合各构件的尺寸数据,通过三角函数计算出挖斗的具体位置和姿态。

1) 相对坐标系XOZ建立——以挖机中轴线上A、动臂尾端B两点确定相对竖向坐标平面XOZ。以动臂尾端B点为原点。

2) 基于局部坐标系的开挖点测算——基于动臂、斗杆、摇杆安装的测角仪A、B、C,从而得到动臂、斗杆、摇杆在XOZ平面的垂直向倾角 θ_{BC} 、 θ_{CD} 、 θ_{DE} ,结合动臂长度L1,斗杆长度L2,挖斗长度L3,通过三角函数先后得到动臂末端C点、斗杆末端D点、挖斗尖E点在XOZ平面的相对坐标。

3) 绝对坐标系转化——基于北斗定位装置a和b定位信息和机身尺寸信息,得到动臂尾端B点的绝对坐标和机身朝向,将相对坐标系XOZ进行绝对坐标系转化,从而得到挖斗尖E点的绝对空间坐标。

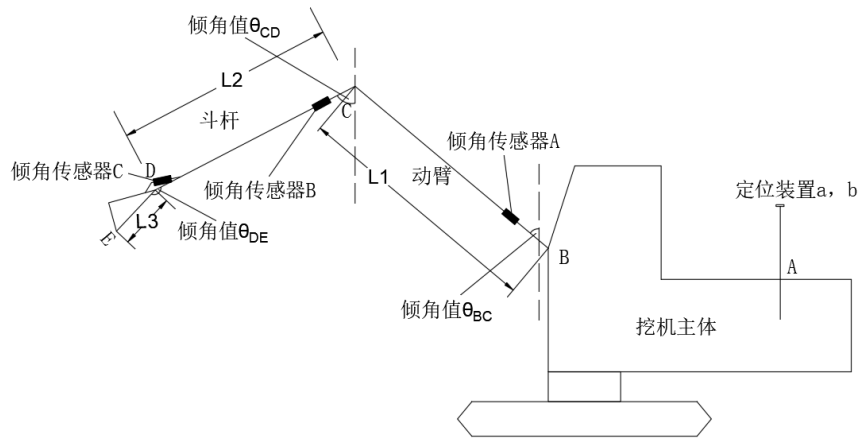


图 1 挖斗空间坐标计算示意图

三、技术实施步骤

技术实施方法如图 2 所示

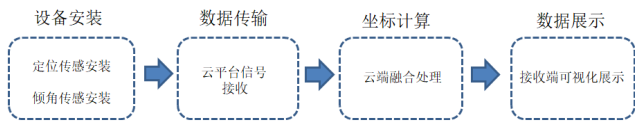


图 2 技术路线

设备安装——在挖土机驾驶舱顶部或稳固位置安装厘米级北斗接收机，能快速接收并处理卫星信号，同时通过线缆连接到数据处理单元，确保数据传输的稳定性和及时性。在挖土机的动臂、斗杆和挖斗的摇杆上分别安装角度传感器，用于测量各部件的转动角度。

数据传输——采用 4G/5G 通信模块或专用数传电台，建立挖土机与基准站或数据中心之间的通信链路。搭建云平台实时接收基准站发送的差分改正数据和传感器倾角数据，实现厘米级实时定位。

后端融合处理——将北斗定位数据、IMU 测量的姿态数据以及角度传感器获取的机械结构角度数据进行融合处理。运用卡尔曼滤波或粒子滤波等算法，对多源数据进行最优估计，消除噪声干扰，提高定位的准确性和稳定性。

可视化展示——在挖土机驾驶舱内安装显示终端，实时显示挖斗的位置、姿态和施工设计边界等信息。通过可视化界面，为驾驶员提供直观的操作引导，帮助他们准确控制挖斗位置，避免污染土超挖或欠挖。

四、工程示范应用

(一) 工程背景

唐镇虹一村、一心村地块“城中村”改造地块土壤修复工程位于浦东新区唐镇，东至规划宏雅路，南至规划虹昌路，西至华东路，北至顾家浜，总面积为 61220m²。该地块历史用地类型为工业用地，未来规划为三类住宅组团用地，故需要修复原先污染地质。

(二) 地质污染情况

本地块项目修复介质为土壤和地下水，目标污染物主要为超过人体健康风险水平的超标因子。土壤污染物有：苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、茚并

(1, 2, 3-cd) 芘、二苯并(a,h)蒽、1, 2-二氯丙烷、1, 2, 3-三氯丙烷、氟化物、铜、镉、锌、钴、镍、六价铬、石油烃(C10-C40)和铅。地下水污染物有：1, 2-二氯丙烷、三氯乙烯。

(三) 现场应用

1. 技术应用目标

在土方工程施工过程中，完成整块污染区域的治理工作，严格控制污染物的扩散，避免对周边土壤、水体、空气等环境造成二次污染；确保污染土方得到妥善处置，达到环保部门规定的排放标准或再利用标准。

2. 技术应用设备

现场挖掘机型号为小松 PC300-8M1，主要参数：发动机额定功率为 187kw，工作重量：32000 ~ 32800kg，铲斗容量：1.4 ~ 2.0m³，最多挖掘深度 7.38m。

3. 主要硬件装置

现场安装设备性能指标如下表 1 所示

表 1 硬件性能指标

定位装置	定位精度 (RTK)	±(8+1×10 ⁻⁶ ×D)mm (水平) ±(15+1×10 ⁻⁶ ×D)mm (竖向)
	差分格式	CMR、RTCM2.1、RTCM2.2、RTCM2.3、RTCM3.0
电台模块	频率：410MHz - 470MHz	
网络模块	4G	
防水防尘	IP65	
倾角仪	分辨率	0.01°
	精度	0.1°
	输出频率	10-200Hz
	防水防尘	IP67
GNSS 天线	性能	四星十二频卫星跟踪
	频率	BDS B1/B2/B3
		GPS L1/L2/L5
		GLONASS L1/L2
防水防尘	IP67	

4. 方案实施

(1) 基站安装

在项目部建筑屋顶上打孔安装定位基站（图3），用膨胀螺丝将天线支架固定，确保基站天线周围开阔，地势较高，高度截止角应超过15°，同时应避免架设在高压输变电设备、无线电通讯设备及收发天线附近。



图3 基站安装

(2) 设备安装

主要有两大部件共六个零件需要焊接，分别是三块倾角传感器和一块定位装置，两根天线支架。三块倾角传感器通过安装铁板分别焊接在挖掘机的摇杆、斗杆、动臂上，定位装置焊接在车身上，两根天线支架在车尾配重块上对称焊接即可，具体位置见图4。

摇杆倾角传感器——焊接位置于摇杆平行，保证牢固。

斗杆倾角传感器——焊接位置与动臂-抖杆连接轴轴心和抖杆-铲斗连接轴轴心平行即可，可先用全站仪将两个连接轴调整至同一铅垂线，再配合使用水准尺找到平行线。

动臂倾角传感器——焊接位置与车身-动臂连接轴轴心和动臂-抖杆连接轴轴心平行即可。

车身定位传感器——安装铁板焊接时保证长边与车身侧边平行即可，现场安装位置有动臂液压缸下方、驾驶室后挡风玻璃后等。

天线支架——焊接在机械配重块上，为确保挖掘朝向测量正确，两个天线支架的焊接距离要尽量远，焊接位置尽量平整，主辅天线连接线尽量和车辆大臂中轴线成90度夹角。



图4 部件安装照片

(四) 应用效果总结

基于无人机画面进行场地建模，通过远程展示大屏进行挖掘定位可视化管理（图5）。通过现场人工RTK放样进行定位精度核算，水平方向精度可达3cm左右，深度方向精度可达10cm左右，满足现场精细化开挖需求。

分析挖掘挖斗开挖深度数据，结合污染源埋设深度数据，可开展污染物超欠挖分析（图6），通过多色色块反映当日挖掘污染源处理情况，从图中科研清晰看到现场挖机施工后存在多处污染物遗漏未挖除情况。



图5 挖机定位可视化



图6 污染物挖除情况分析

结语

本文深入探讨基于北斗定位的污染土精细化开挖技术，详细阐述其技术原理、关键技术、实施步骤及工程应用案例，旨在为土壤污染治理领域提供先进的技术参考与实践经验，推动污染土治理技术的创新发展与工程应用水平的提升。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部，《全国土壤污染状况调查公报》，2014年4月17日。
- [2] 臧常娟，孙玉超，刘志阳等．原位水平阻隔风险管控技术在某退役工业污染场地治理中的应用[J]，环境工程技术学报．2023, 13(04): 1497-1505.
- [3] 刘磊，游玉石，高悦等．基于GIS和北斗定位的“无人机+机器人”铁路线桥隧智能巡检规划研究[J]，现代城市轨道交通．2025(06): 73-79.
- [4] 黄文摄．北斗卫星导航技术在隧道内定位的应用卫星应用[J]，2022(02)：66-69.
- [5] 项伟，王园，李锋基等．基于北斗的基准站超远距离差分定位精度分析[J]，工程勘察，2022，50(02)：67-72.

基金项目：上海建工集团股份有限公司重点科研项目(23JCYJ-27)。