

逆作法钢管柱智能平台研制及性能测试

刘 阔^{1,3}, 刘 勇², 贾明浩^{1,3*}, 邵玉涛^{1,3}, 韦海瑞^{1,3},
王秀丽², 刘 广^{1,3}, 朱芝同^{1,3}, 贾 炜^{1,3}, 董 巍^{1,3}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中基发展建设工程有限责任公司, 北京 101300; 3. 廊坊聚力勘探科技有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:逆作法施工技术在城市地下空间开发、深基坑工程等领域中具有广阔的应用前景。然而,钢管柱作为逆作法施工中的主要竖向受力部件,其垂直度偏差和人为定位产生的误差对施工质量影响极大。为提高逆作法施工中钢管柱的定位准确性和垂直精度,本文基于逆作法施工工艺流程和智能控制技术,设计并研制一种能够自动调垂及定位的逆作法钢管柱智能平台。主要阐述该设备的总体结构、工作原理和性能参数,并对其进行性能测试。测试结果表明,经逆作法钢管柱智能平台放置的钢管柱垂直精度控制在1/800以内,定位精度控制在 ± 5 mm以内,有效增强钢管柱受力稳定性,提高工程质量。该平台对推动逆作法施工技术向智能化方向发展具有一定的现实意义。

关键词:逆作法;钢管柱;液控系统;电控系统;智能调垂;智能定位

中图分类号:P634;TU67 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0238-06

Development and performance testing of an intelligent platform for top-down construction steel pipe columns

LIU Kuo^{1,3}, LIU Yong², JIA Minghao^{1,3*}, SHAO Yutao^{1,3}, WEI Hairui^{1,3},
WANG Xiuli², LIU Guang^{1,3}, ZHU Zhitong^{1,3}, JIA Wei^{1,3}, DONG Wei^{1,3}

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*; 2. *Zhongji Development Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 101300, China*; 3. *Langfang Juli Exploration Technology Co., Ltd., Langfang Hebei 065000, China*)

Abstract: The top-down construction technology has broad application prospects in fields such as urban underground space development and deep foundation pit engineering. However, as the main vertical load-bearing components in top-down construction, steel pipe columns are significantly affected by verticality deviations and errors caused by manual positioning, which have a great impact on construction quality. To improve the positioning accuracy and vertical precision of steel pipe columns in top-down construction, this paper designs and develops an intelligent platform for top-down construction steel pipe columns capable of automatic vertical adjustment and positioning based on the top-down construction process and intelligent control technology. It mainly elaborates on the overall structure, working principle and performance parameters of the equipment, and conducts performance tests on it. The test results show that the vertical precision of steel pipe columns placed by the intelligent platform for top-down construction steel pipe columns is controlled within 1/800, and the positioning accuracy is controlled within ± 5 mm, which effectively

收稿日期:2025-06-26; 修回日期:2025-08-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.036

基金项目:中国地质科学院勘探技术研究所自主研发项目“逆作法钢管柱智能平台研发”(编号:2020260002H3000015)、中国冶金地质总局科研项目“逆作法钢管柱智能预安装系统研发”(编号:CMGBKY202208)

第一作者:刘阔,男,汉族,1998年生,助理工程师,地质资源与地质工程专业,硕士,主要从事大口径岩土钻掘设备设计及研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,2234033704@qq.com。

通信作者:贾明浩,男,汉族,1996年生,助理工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质钻探工艺及器具的研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,jiaminghao@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:刘阔,刘勇,贾明浩,等.逆作法钢管柱智能平台研制及性能测试[J].钻探工程,2025,52(S1):238-243.

LIU Kuo, LIU Yong, JIA Minghao, et al. Development and performance testing of an intelligent platform for top-down construction steel pipe columns[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):238-243.

enhances the stress stability of steel pipe columns and improves the project quality. This platform has certain practical significance for promoting the development of top-down construction technology in the direction of intelligence.

Key words: top-down construction method; steel pipe columns; hydraulic control system; electric control system; intelligent adjustment of verticality; intelligent positioning

0 引言

近年来城市化步伐加快,地面空间逐渐减少,地下空间的开发愈发重要,逆作法施工技术应运而生^[1]。逆作法是指地面以下各层地下室采用自上而下的施工顺序,其先沿着建筑物地下室的边轴线和内部施工钢管柱作为承受上部荷载的竖向支撑,随后逐层向下开挖土方和施工地下各层结构,直至底板封底。其作为一种先进的基坑施工技术,具有缩短工期、降低成本和减少对周边环境影响的优势^[2]。然而,这项技术在实践中面临着一个亟待破解的核心难题——难以调垂现象。由于钢管柱与水平结构的异步施工,浇筑内填混凝土、开挖土方等操作的动态变化^[3],以及施工误差的累积效应,逆作法施工中钢管柱垂直度及定位难以精准控制,由此引发的结构内力重分布、构件连接失效等连锁反应,不仅直接威胁工程质量与安全,更可能造成不可逆转的经济损失。李建宁^[3]曾利用在钢管柱上预埋测斜管的方法,实现了实时对立柱垂直度的测试。熊瑞明等^[4]曾利用红外线激光仪、测倾仪等设备实现了直观测量钢管柱的垂直度。刘宝灵等^[5]曾设计一种调垂架实现对钢管柱的调垂。

如何高效稳定地使钢管柱保持在1/800垂直度以内成为破解上述难题的关键。智能化技术与逆作法工艺技术融合成为解决上述问题的一种重要技术途径,基于此,本文研制出一种能够自动精确调垂和定位的钢管柱智能平台,该平台能够精准定位,保障钢管柱垂直度,大幅提升施工效率及稳定性,为逆作法钢管柱智能调垂定位奠定基础。

1 逆作法钢管柱智能平台概述

1.1 结构设计

逆作法钢管柱智能平台采用机电液一体化设计的钢管柱定位及调垂设备,采用模块化设计和全液压驱动方式,具备有线和无线两种操控模式,该平台整机功率55 kW,平台总体外形尺寸为6560 mm×3725 mm×1750 mm,总质量37 t,电机转速1480 r/min,供电电压380 V。

该智能平台主要由钢管柱智能平台和泵站两个模块组成,其中钢管柱智能平台主要由X轴滑移平台、Y轴滑移平台以及支腿平台组成(图1)。X轴滑移平台位于平台最上端,其上可安装全回转钻机同心安装固定在上滑移平台上,上滑移平台可以带动钻机一起在X轴方向移动,最大行程200 mm;Y轴滑移平台位于中间部位,该平台可带动上滑移平台和钻机在Y轴方向移动,最大行程320 mm;支腿平台位于最底部,其主要包含四个油缸支腿和钢管柱夹紧机构,油缸支腿型号为250/170-250,最大行程250 mm。夹紧机构克服钢管柱浮力进行对中,最大行程850 mm,预夹紧力500 kN;泵站(图2)则为平台提供动力,泵站功率55 kW,额定压力28 MPa,流量75 mL/r,控制方式为负载敏感。

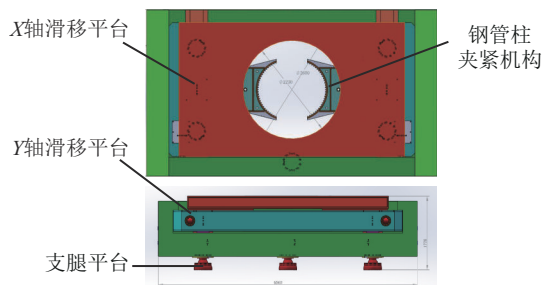


图1 逆作法钢管柱智能平台结构示意图

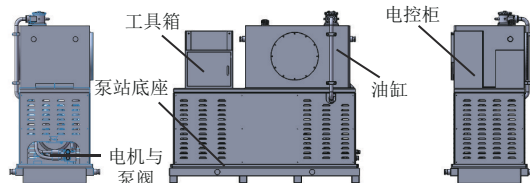


图2 泵站组件

1.2 工艺流程

通过将智能化技术与逆作法工艺技术融合而研制的逆作法钢管柱智能平台,其设计的核心思路是实现高精度调垂与定位,因此将以钢管柱垂直度误差控制在 0.01° 以内、平面定位精度达 ± 5 mm为标准^[6-10],实现实时监测、自动调垂与精准定位。在技术实现上,采用多传感器融合的感知层,用倾角

传感器、激光位移传感器采集数据;通过物联网搭建传输网络,保障数据稳定回传^[11-13];控制层运用双闭环控制系统,外环比对BIM模型,内环借助PID算法驱动液压系统调垂^[14-15]。机械结构方面,研发模块化调垂定位装置,适应不同规格钢管柱。同时,设计集成式管理平台,可视化呈现数据,并配备故障诊断系统,增强设备可靠性,全方位满足逆作法施工需求。

逆作法钢管柱智能平台的施工工艺:工作准备阶段,一键调节支腿平台的四个油缸支腿实现水平,遥控器随时显示水平偏差,位于设备中心的机械水平仪同时校核偏差,将逆作法钢管柱智能平台坐落在钻孔位置且在设备可调节范围之内,其上部同心安装全回转钻机,并将深度测试仪固定在全回转底部,清零数据,以便多回次植入深度统计。工作开始阶段,首先利用北斗定位系统将钢管柱下放至孔位,接着全回转钻机下压植入钢管柱,当达到指定孔底深度后,平台卡瓦机构夹紧,再松开全回转夹紧机构,并将全回转升起,完成单次植入与深度统计,全回转再夹紧,平台夹紧机构张开,循环操作植入全部钢管柱直至施工完成。施工过程需实时观察平台水平度、中心度及垂直检测系统的变化,确保水平度和中心度的精度。施工流程见图3。

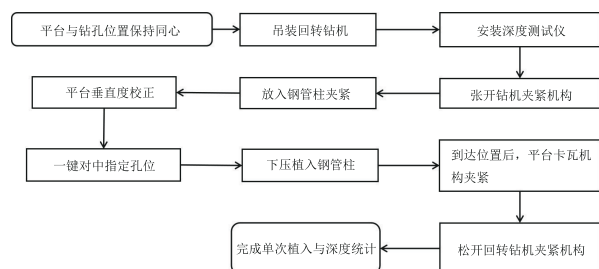


图3 施工流程

1.3 主要功能

逆作法钢管柱智能平台主要包含四种功能,分别为智能调垂、智能对中、智能夹紧、深度监测,各功能具体如下:

(1)智能调垂:逆作法钢管柱智能平台上的智能调垂功能采用传感器+控制器+油缸的集中控制。调垂过程中,倾角传感器将平台角度信号传递至控制器,控制器处理倾角信号并将减小倾角的信息反馈给位于底盘的四个油缸支腿,油缸支腿进行滑移直至倾角为 0° 。此过程仅需长按遥控器的一键

调垂键即可完成。

(2)智能对中:智能对中的主要作用是准确将钢管柱植入到预先设定的钻孔孔位。该功能主要基于北斗卫星系统的定位功能,在平台两端各放置一个卫星定位装置,装置通过发射信号传递给卫星,卫星通过计算测算出钢管柱目前位置与预定位置的距离并将信号传递给控制器,控制器通过控制X和Y轴滑移平台的移动来靠近预设坐标位置,达到一键对中效果。

(3)智能夹紧:平台完成水平调整后,将钢管柱送入孔内,根据预设孔位与设备的位置关系,系统根据孔位的中心坐标与设备中心坐标的X和Y的坐标进行系统计算,通过长按遥控器一键夹紧功能键,平台根据系统的计算结果,确定夹紧机构和Y轴滑移平台与中心孔位置关系,系统根据计算结果将一侧的夹紧机构自动伸出至抵住钢管柱,另一侧夹紧再伸出直至夹紧钢管柱,确保设备与钻孔的X轴方向对应,系统再自动调节Y轴滑移平台滑移至钻孔Y轴方向中心点,使平台中心与钻孔中心完成重合,达到一键夹紧效果。

(4)深度监测:深度检测装置是通过激光测距传感器测量上下工作面的距离变化,配合夹紧油缸动作判断夹紧状态,从而累积计算深度。

2 液压控制系统回路设计

逆作法钢管柱智能平台的液压系统是通过液压松闸原理,采用系统化设计思想,划定不同的功能回路,主要包括X轴滑移回路、Y轴滑移回路、底盘调平回路和卡瓦夹紧回路四大回路。X轴滑移回路和Y轴滑移回路原理相同,主要由进口高压柱塞泵、高精度电比例多路阀、液压马达、溢流阀、节流阀和液压锁组成,其具有极好地微动性,保障设备的精确定心。X和Y轴滑移平台可根据系统预设的坐标孔点进行定向移动,X方向最大滑移行程200 mm,Y方向最大滑移行程320 mm。底盘调平回路则是通过接受高精度倾角传感器的信号从而对油缸支腿进行反馈调节。卡瓦夹紧回路是通过液压控制阀控制液压油的流动方向,通过液压驱动油缸来推动卡瓦滑移。具体施工时,一只油缸卡瓦按照北斗定位系统给定的理论坐标点伸出到指定位置,另一只油缸卡瓦开始伸出动作,当两只油缸卡瓦都接触到钢管柱,并且压力达到系统设定值后,电比

例阀给两油缸供相同的流量实现同步夹紧,夹紧油缸最大行程 850 mm。图 4 为液压系统原理图。

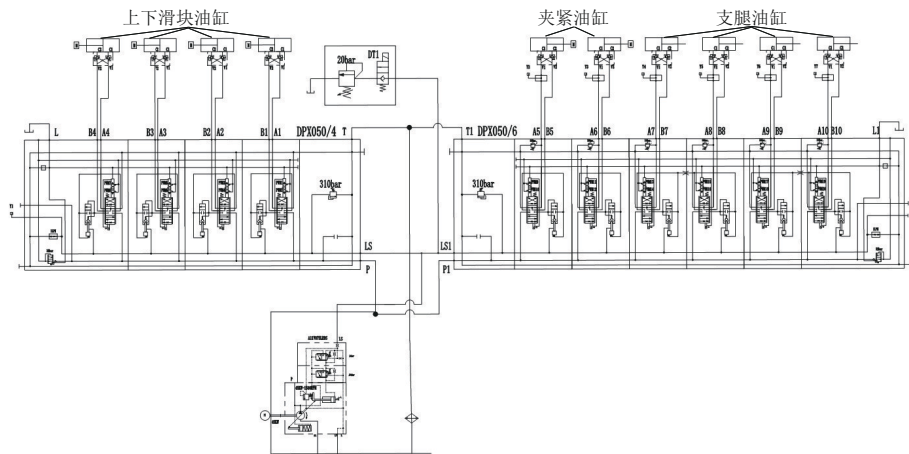


图 4 液压系统原理

从图 4 分析可以得出,X 和 Y 轴滑移回路的液压系统是由双向回路组成,在回路之间具有连锁保护系统。X 和 Y 轴滑移回路执行原理为:液压系统油箱→高压变量柱塞泵→二位四通电磁换向阀→液控单向阀→液压油缸→X 和 Y 轴滑移平台。底盘调平回路的 4 个油缸支腿的活塞杆均处于部分对外伸出状态,当传感器感应到底盘平台倾斜时,液压油通过三位四通换向阀进入油缸控制活塞杆的伸缩,使平台与地面保持垂直。当电比例多路阀受电后将会保持保压状态,此时的楔形块开口打开,压力变送器检测到系统中的保压回路油压后送入控制系统中进行判断。底盘调平回路的执行路线是:油箱→高压变量柱塞泵→液控单向阀→液压缸(有杆腔)→三位四通电磁换向阀→电磁阀失电→油缸保压锁紧。

3 电控系统设计

3.1 总体方案设计

3.1.1 电控系统结构

本设备采用工业控制领域常用的控制器+触摸屏+无线操作手柄集中控制的解决方案。控制系统主要包括传感器、触摸屏、电机、EPEC3724 控制器、油缸等组成。控制系统架构如图 5 所示,EPEC3724 控制器作为核心控制器,当平台发生角度倾斜时且不在对中位时,传感器感应并转换成电信号传递给控制器,控制支腿油缸调平,滑移油缸滑移,同时使触摸屏、操作手柄和设备状态进行实时监控、操作等动作。

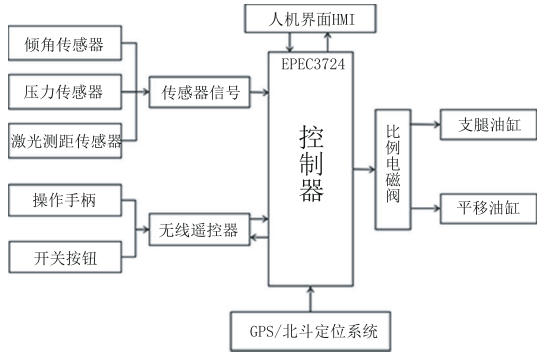


图 5 控制系统架构

整个控制系统的硬件部分包括 3 个拓展模块、2 套伺服驱动控制系统、3 个传感器、1 个操作手柄以及 1 个触摸屏。

3.1.2 平台工作机构与系统

分析逆作法钢管柱智能平台各执行元件动作和检测反馈,对应液压系统设计,按信号类型统计见表 1。

3.2 控制功能设计

除手动输入钻孔坐标外,逆作法钢管柱智能平台多采用无线遥控,此种控制方式可实现单步控制,具体如下。

3.2.1 单步控制

通过无线遥控实现单独动作的控制。

3.2.2 一键自动控制

通过无线遥控一键实现多个动作的执行。

(1)自动对中:通过绝对式编码器、伸缩油缸以及北斗定位装置的联动协作,一键实现钻孔预设坐

表1 逆作法钢管柱智能平台工作/检测

序号	信号类型	电控元件	动作/检测说明
1	开关量输出	电磁阀	平台滑移、调垂平台、伸缩油缸、升降油缸、夹紧油缸
2	电流 4~20 mA	倾角传感器/压力传感器/激光传感器	调垂检测、压力检测、距离监测
3	电流 25 mA	北斗卫星定位装置	钻孔定位检测
4	脉冲信号	绝对式编码器	对中位置检测/垂直度反馈调节

标定位。

(2)自动调垂:通过四个调平油缸支腿、倾角传感器实时反馈调节,使平台完成一键调垂动作。

(3)自动夹紧:通过设置卡瓦机构的夹紧压力,使平台完成一键夹紧动作。

3.3 硬件设计

硬件设计主要包括传感器与无线遥控器的选型设计。

3.3.1 传感器的选型

为确保平台的水平精度,选择使用进口高精度传感器(控制精度0.01°),具有高稳定性、抗干扰的特性。其布置在钢管柱平台顶部,发射机采样周期60次/分钟。数显屏实时显示钢管柱在X和Y轴方向的倾斜角度。此外,其上还安装有机械倾角传感器,以便与电子倾角传感器测试结果相互印证(图6)。

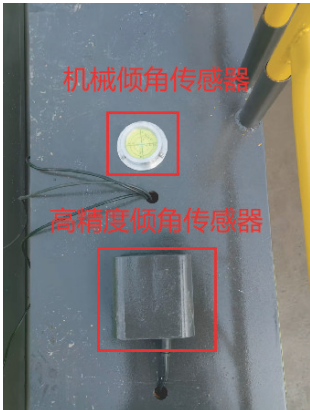


图6 倾角传感器

对于液压系统压力的检测,选择高精度压力传感器,输出4~20 mA信号。

对于钢管柱下入深度的监测,选用高精度激光传感器测孔深,其工作原理如图7所示。

3.3.2 无线遥控的选型和主面板

无线遥控选型主要以可靠、适用于野外井场作业工况为原则,无线接收器端选用开关量输出,通过开关量输入模块接入系统,无线遥控面板根据前

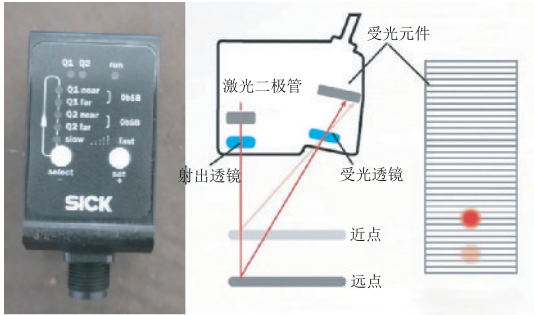
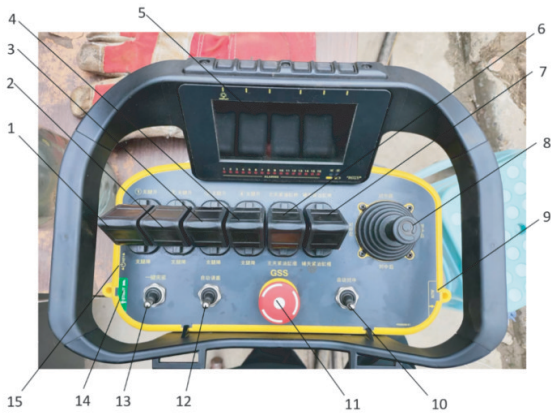


图7 激光传感器工作原理示意

述控制功能设计如图8所示。



- 1—支腿1操作手柄;2—支腿2操作手柄;3—支腿3操作手柄;4—支腿4操作手柄;5—显示器;6—主加持机构夹紧手柄;7—辅加持机构夹紧手柄;8—滑移平台十字手柄(Y轴调左右,X轴调上下);9—侧身开关;10—一键对中操作杆;11—急停开关;12—一键调垂操作杆;13—一键夹紧操作杆;14—启动按键;15—磁吸钥匙

图8 无线遥控器主界面

4 平台场内测试

为保障在施工过程中逆作钢管柱智能平台在调垂和定位方面具有良好的稳定性,对其进行场内测试。测试准备阶段,在触摸屏(图9)中输入5个不同的坐标点位,进行5组工作试验,如图10所示。

经统计,钢管柱的使用高度大多为 10~40 m,因此取钢管柱平均高度 25 m。

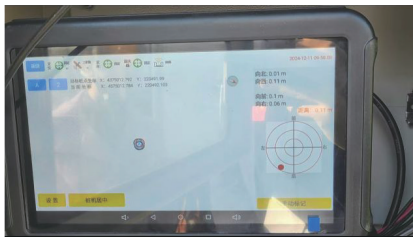


图 9 对中现场及中对操作界面

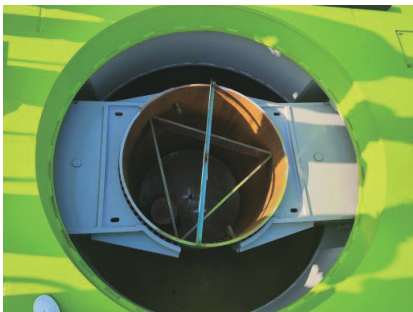


图 10 现场测试

打开平台设备和泵站开关,长按遥控器的一键调垂键,开始一键调垂。测试结果表明,油缸支腿根据倾角传感器的反馈进行水平调节使 X 和 Y 轴方向上的角度均趋近于 0°,上下浮动 0.01°,垂直度基本为 1/2500,小于垂直精度 1/800,满足垂直度控制要求。表 2 的定位测试结果表明,工作中的钢管柱智能平台在 X 和 Y 轴的偏差均在 5 mm 以内,满足施工定位需要。

5 结论

本文基于逆作法工艺研制的钢管柱智能平台,主要对其结构和功能进行了阐述,并对其调垂和对中功能进行测试,得出结论如下:

- (1)逆作法钢管柱智能平台在调垂方面展现出了良好的应用效果,其垂直精度能够控制在 1/800 以内,满足工程实际需求。
- (2)逆作法钢管柱智能平台在对中坐标孔点方

表 2 性能测试结果

序号	X 轴向 倾角/(°)	Y 轴向 倾角/(°)	垂直 度*	X 轴向定位 偏差/mm	Y 轴向定位 偏差/mm
1	0.01	0.01	1/2500	+2.5	+3.4
2	0.01	0	1/2500	-1.5	+3.3
3	0.01	0	1/2500	-1.2	-2.6
4	0	0	0	+1.5	-3.7
5	0	0.01	1/2500	-1.1	+2.2

*:垂直度为水平倾角与钢管柱高度的比值。

面效果显著,对中测试孔点误差控制在±5 mm 以内,因其使用北斗卫星定位系统进行对中,大幅减少了传统人工操作带来的误差与不确定性,有效增强工作稳定性。

参考文献:

[1] 刘庆.地下工程中逆作法施工技术的应用研究[J].建筑机械化,2024,45(12):56-59.

[2] 郭盛,刘鸿鹏.深基坑逆作法在建筑密集区域的应用研究[J].建筑机械化,2024,45(12):52-55.

[3] 李建宁.逆作法一桩一柱立柱桩质量检测技术研究[J].江苏建筑,2024(6):134-137.

[4] 熊瑞明,杨宇,潘鹏超,等.一柱一桩钢管柱垂直度控制施工技术[C]//《施工技术(中英文)》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).中建八局第三建设有限公司,2024:389-392.

[5] 刘宝灵,韩靖.基于逆作法的钢管柱高精度调垂固定施工技术[J].科学技术创新,2023(14):174-177.

[6] 蒋炳,张统得,罗显梁,等.FJS-1A型地质钻探废浆处理设备的研制[J].钻探工程,2023,50(S1):437-442.

[7] 王成军,何冬东,彭德坤,等.抗浮锚杆逆作法快速施工技术研究与应用[J].建筑安全,2025,40(1):28-32.

[8] 王林恒.盖挖逆作法施工大直径钢管柱双机抬吊技术研究[J].建筑机械化,2025,46(1):73-77,94.

[9] 王亚超.高层建筑地下室的边区逆作法施工技术[J].工程机械与维修,2025(4):126-128.

[10] 侯朝,杨阳,刘泽宏,等.综合交通枢纽工程盖挖逆作法研究与应用[J].建筑技术,2025,56(1):65-68.

[11] 杨益,刘明进,杜涛,等.盖挖逆作法地铁站大直径超长钢管柱施工技术研究[J].工程建设,2025,57(5):63-71.

[12] 王欣,胡圣兴,杨哲,等.基于逆作法下两种框架结构柱-板节点试验研究[J].建筑结构,2025,55(1):114-121,150.

[13] 杨杰,仙鹏,张声鸿,等.盖挖逆作法地铁站施工桩柱板结构内力、变形研究[J].江西建材,2024(10):260-261,274.

[14] 刘学良,聂紫煜,张富裕,等.基于FMEA与FTA的智能集成平台测试方法[J].科技创新与应用,2025,15(14):170-173.

[15] 李欣,王洪亮,闫林,等.油气人工智能技术发展综述与体系框架构想[J].国际石油经济,2025,33(5):10-18.

(编辑 王文)