

无人作业反铲挖泥船边坡精挖规划控制方法研究

张红升¹, 林运飞^{2,4}, 沈徐兵³, 林直^{1*}

(1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082; 2. 平陆运河集团有限公司, 广西 南宁 530029;
3. 中交上海航道局有限公司, 上海 200024; 4. 广西现代运河实验室, 广西 南宁 530029)

摘 要: 为提升反铲挖泥船在港口航道建设中边坡成型的精度与效率, 文章提出了一种基于分区挖掘的精挖控制策略。通过将边坡施工区域按照坡面几何形态和施工顺序划分为若干作业分区, 并针对不同分区制定差异化的挖掘路径、斗容控制等参数。通过优化分区间的衔接方式与作业顺序, 有效减少了重复挖掘、超挖及欠挖现象, 降低了施工干扰。结合典型工况的仿真分析与实船试验结果表明, 该策略在边坡线形平顺性、成型精度及施工效率方面均优于传统整体式挖掘方法, 且在不同水深与坡度条件下均表现出较好的适应性。研究成果可为反铲挖泥船的精细化施工及智能化升级提供技术参考, 并为港口航道工程的高质量建设提供支持。

关键词: 反铲挖泥船; 边坡挖掘; 分区挖掘策略; 精挖控制; 港口航道施工

中图分类号: U6; U616 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)09-0016-06
doi: 10.7640/zggwjs202609003

Planning and control methods for precision slope excavation by unmanned backhoe dredgers

Zhang Hongsheng¹, Lin Yunfei^{2,4}, Shen Xubing³, Lin Zhi^{1*}

(1. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200082, China;
2. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China; 3. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200024, China; 4. Guangxi Laboratory of Modern Canal, Nanning, Guangxi 530029, China)

Abstract: To improve the slope formation accuracy and operational efficiency of backhoe dredgers in port and waterway construction, this paper proposes a precision excavation control strategy based on zoned excavation. The construction area is divided into several zones according to slope geometry and planned excavation sequence, and differentiated parameters including excavation paths and bucket capacity control are formulated for each zone. By optimizing the transitions between zones and the excavation order, the strategy effectively reduces repetitive excavation, over-excavation, and under-excavation, while minimizing construction interference. Simulation analyses and full-scale trials under typical working conditions demonstrate that the proposed approach outperforms traditional overall excavation methods in slope smoothness, formation accuracy, and efficiency, and shows good adaptability to varying water depths and slope gradients. The findings provide a technical reference for precision construction and intelligent upgrading of backhoe dredgers, supporting high-quality port and waterway construction.

Key words: backhoe dredger; slope excavation; zoned excavation strategy; precision excavation control; port and waterway construction

0 引言

随着全球港口航道建设规模的不断扩大, 水下疏浚与边坡精挖作业在航道拓宽、港池整治及

水利枢纽工程中发挥着愈发重要的作用^[1-2]。传统反铲挖泥船作业依赖人工操作, 不仅受限于操作人员经验水平和作业疲劳度, 还容易受到水下

收稿日期: 2025-10-27 修回日期: 2025-11-28

基金项目: 平陆运河智能监管关键技术研究 (桂科 AA23062035)

作者简介: 张红升 (1983—), 男, 河南南阳人, 硕士, 正高级工程师, 电气工程专业。

*通讯作者: 林直, E-mail: linzhi1@ccccltd.cn

能见度低、流态复杂、气象条件多变等环境因素影响, 导致边坡成型精度不足、施工效率波动较大^[3]。尤其在深水、强流及恶劣气候条件下, 人工操作安全风险显著增加, 亟需发展高精度、高可靠性的无人化施工技术^[4]。

近年来, 随着传感器技术、船舶自动化控制、计算机视觉、路径规划算法及多传感器信息融合等技术的快速发展, 无人作业反铲挖泥船逐渐成为水下精挖作业的重要发展方向^[5-6]。通过集成多波束测深、RTK 差分定位、惯性测量单元(IMU)及关节角度传感器等设备, 结合数字高程模型(DEM)构建与动态规划算法, 可实现对边坡地形的精确建模、分区识别与作业路径优化, 从而在保证施工精度的同时显著提升作业效率^[7-8]。冯晨等^[9]采用单波束定位、纹理挖掘、开槽挖掘和超深挖掘的方案, 在硬质岩石的挖掘方面通过优化施工工艺可以将铲斗充斗率从 10% 提高到 50%, 日均产量增长 87%。

在边坡精挖过程中, 在复杂水下地形条件下兼顾施工精度与作业效率, 是无人化反铲挖泥船控制系统设计的核心难题^[10]。一方面, 近坡区域(T1 区)对成型精度要求极高, 稍有超挖便可能破坏边坡稳定性; 另一方面, 远坡区域(T2 区)则更关注快速清渣与整体效率。针对这一矛盾, 国内外学者提出了多种基于地形网格化、动态规划、轨迹预测及入土角度自适应调控的控制策略, 但是在实际工程中仍然存在着算法鲁棒性不足、传感器数据融合精度受限、环境扰动补偿不充分等问题^[6, 10-11]。

因此, 本研究在现有无人化反铲挖泥船作业模式的基础上, 提出了一种融合地形网格化分区策略、动态规划路径优化及基于距离的入土角度动态调控的边坡精挖规划控制方法。该方法旨在通过差异化作业策略实现 T1 区高精度成型与 T2 区高效清渣的平衡, 并利用多传感器融合与实时姿态补偿技术, 提升系统在复杂水下环境中的作业稳定性与精度, 为未来港航疏浚工程的智能化、无人化发展提供理论与技术支撑。

1 无人精挖规划与控制方法

1.1 整体架构与工作流程

水下边坡精挖是运河航道工程建设的关键环节, 其施工质量直接关系到整个工程的稳定性和安全性。传统驾驶作业方式受限于操作人员技术

水平、工作状态及水下恶劣环境, 难以保证边坡平整度要求。为此, 本研究设计了一套完整的无人作业反铲挖泥船边坡精挖规划控制系统, 其整体架构采用“感知-规划-执行”的闭环控制模式。

系统输入为基于多波束水下地形测绘数据构建的高精度数字高程模型(DEM)。该模型包含 2 个重要组成部分: 1) 反映现状地形的初始模型, 通过多波束测深系统采集的原始点云数据经过滤波、插值等处理后生成; 2) 表征设计断面的目标模型, 根据工程设计图纸中的边坡坡度、高程、边界线等参数构建。规划器首先通过模型布尔运算, 求取得待挖掘的土方量模型:

$$M_e = M_i - (M_i \cap M_r) \quad (1)$$

式中: M_i 为初始数字高程模型; M_r 为设计断面的目标数字高程模型; M_e 为待挖掘的土方量模型。

这一步骤准确识别出了需要挖掘的区域和方量, 为后续精细化作业奠定了基础。

针对某一施工断面, 规划器调用本章 1.2 节—1.4 节所述算法, 进行地形网格化处理、作业区域分区、挖掘路径规划, 并生成包含入土点坐标、出土点坐标、推荐入土角度及单次挖深的精细化作业指令序列:

$$\begin{aligned} \Gamma &= (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) \\ \gamma_k &= (X_{\lambda,k}, Z_{\lambda,k}, X_{\mu,k}, Z_{\mu,k}, \alpha_k, \Delta H_k) \quad (2) \\ k &\in \{1, 2, \dots, N\} \end{aligned}$$

式中: Γ 为精细化作业指令序列; N 为指令总数; γ_k 为第 k 条精细化作业指令; $(X_{\lambda,k}, Z_{\lambda,k})$ 和 $(X_{\mu,k}, Z_{\mu,k})$ 分别为第 k 次挖掘的入土点坐标和出土点坐标; α_k 为推荐入土角度; ΔH_k 为单次挖深。

控制器接收指令后, 负责解算大臂、小臂、铲斗及基座的回转角度等运动学逆解, 驱动液压系统执行挖掘动作。这一过程涉及复杂的坐标变换和运动学计算, 需要建立反铲工作装置的多体动力学模型。执行过程中, 通过融合 RTK 差分定位、惯性测量单元(IMU)以及安装于各关节的角度传感器数据, 对船体摇荡引发的位姿偏差进行实时闭环补偿。RTK 系统提供厘米级的绝对位置信息, IMU 提供高频率的姿态变化数据, 关节角度传感器则实时反馈各执行机构的状态, 多传感器数据通过卡尔曼滤波算法进行融合, 有效提高了系统的定位精度和抗干扰能力, 确保铲斗终端能够精准跟踪预定轨迹, 最终实现无人化条件下的高精度边坡成型。

1.2 地形离散化与分区识别策略

水下地形复杂多变,可能存在凸起、凹陷等不规则形态,直接进行整体路径规划不仅计算复杂,而且难以保证边坡最终成型精度。为此,本文提出了一种基于铲斗工作特性的地形网格化与分区处理策略,将连续的空间挖掘问题转化为可计算的离散问题,并识别近坡区域的高超挖风险。为统一描述地形离散、路径规划及铲斗入土角度调控过程,建立二维施工断面坐标系 $O-xz$ 。其中, x 轴沿施工断面水平方向, z 轴表示高程方向并规定向下为正。铲斗向下挖掘时,单次挖深取正值,相应的铲斗刃口高程减小。

首先,沿水平方向(x 方向),依据反铲铲斗宽度 $W_{\text{铲斗}}$,按一定间隔 $L_{\text{网格}}=eW_{\text{铲斗}}$ ($0.8 \leq e \leq 1.0$) 进行垂直切分。系数 e 的取值考虑了铲斗工作的重叠率,保证相邻挖掘区域之间有适当的重叠,避免产生漏挖现象。这一步骤得到一系列与地形表面和目标坡面相交的垂直剖面线,将连续的地形离散为若干个垂直条带。

继而,进行水平切分。以每条垂直切线与目标坡面的交点为起点,沿 x 方向水平切割至相邻垂直剖面线,进一步将每个垂直条带划分为上下 2 个部分。经上述 2 步骤处理,将挖掘断面在几何上离散为 2 类特征子区域,如图 1 所示。

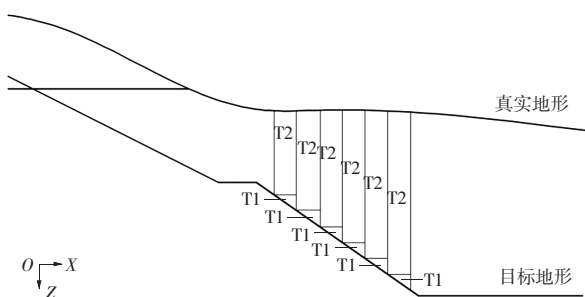


图 1 地形网格化与分区识别示意图

Fig. 1 Schematic diagram of terrain gridding and zonal identification

1) T1 区(边坡精挖区):与目标边坡直接相邻。该区域是边坡成型的最终环节,平整度要求极高,且因机械运动惯性易发生超挖,是施工精度控制的重点与难点。此区域的土方量虽小,但技术要求最高,需要采用保守的施工参数和精细的控制策略。

2) T2 区(常规下挖区):位于 T1 区之上,该区域主要任务是快速剥离上方土体,与目标坡面

距离较远,对绝对精度的要求相对较低,侧重于挖掘效率。可以采用相对激进的施工参数,以提高整体作业效率。

根据地形网格化与分区处理策略将地形进行分区划分,该分区策略使系统能够对高风险、高精度要求的 T1 区实施更精细、更保守的控制策略,同时对低风险、高效率要求的 T2 区采用更高效的作业方式,实现精度与效率的平衡。

1.3 挖掘路径优化(T2 区)

针对 T2 区高效清渣的需求,需要制定合理的挖掘路径规划方法,以提高作业效率,降低能耗。传统的经验法或规则法难以获得全局最优解,本文采用动态规划(Dynamic Programming, DP)算法进行全局挖泥路径优化,能够在满足多种约束条件下找到成本最低的作业路径。

1.3.1 状态与动作定义

将离散网格节点对应的铲斗刃口位置定义为状态。第 k 步状态向量 s_k 记为:

$$s_k = (x_k, z_k)^T \quad (3)$$

式中: x_k 为第 k 步铲斗刃口在施工断面内的水平坐标; z_k 为第 k 步铲斗刃口高程坐标。

每个状态对应一个网格单元的挖掘任务,状态转移表示铲斗从当前网格节点移动至相邻节点并完成一次挖掘动作。

第 k 步动作向量 u_k 记为:

$$u_k = (\Delta x_k, \Delta H_k)^T \quad (4)$$

式中: Δx_k 为铲斗在水平方向的移动距离,取值为 0 或 $\pm L_{\text{网格}}$,以保证移动后仍位于离散网格节点; ΔH_k 根据土质特性取 0.3~0.5 m。

状态转移关系为:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k, \quad z_{k+1} = z_k + \Delta H_k$$

1.3.2 目标函数与约束条件

路径规划的目标是寻找一条从初始状态($s_0 = (x_0, z_0)^T$, 即挖掘起始点、初始深度为 0)至终止状态($s_{\text{end}} = (x_{\text{end}}, z_{\text{end}})^T$, 即挖掘终点、深度达到目标模型要求)的最优路径,目标函数 J 设为总作业能耗最小化,表达式为:

$$J = \min \sum_{k=1}^N C_k(s_k, u_k) \quad (5)$$

式中: $C_k(s_k, u_k)$ 为第 k 步动作的能耗代价,由液压系统功耗模型计算: $C_k = P_k \cdot t_k$, P_k 为第 k 步动作的液压系统功率, kW, t_k 为第 k 步动作持续时间, s, P_k 与 t_k 均由动作变量参数 u_k 与当前状态 s_k

确定。

优化过程需满足以下约束条件:

1) 运动学约束。挖掘动作必须在反铲工作包络面内。反铲工作包络面由大臂(长度 5.2 m)、小臂(长度 4.8 m)、铲斗(长度 2.1 m)的运动范围确定, 通过运动学正解计算可得, $x_k \in [0, 12 \text{ m}]$, $z_k \in [0, 5 \text{ m}]$ 。

2) 平滑性约束。相邻动作间的挖深变化 $\Delta H_{k+1} - \Delta H_k < 0.2 \text{ m}$, 避免铲斗运动速度突变导致的负载冲击。

3) 动力学约束。各关节运动角速度 $\omega < 15 (^\circ)/\text{s}$, 角加速度 $\beta < 5 (^\circ)/\text{s}^2$, 由关节角度传感器实时监测。

4) 避障约束。路径需避开已知障碍物(如水下礁石), 通过多波束测深数据识别障碍物区域, 禁止铲斗进入该区域。

1.3.3 动态规划求解

通过求解式(6)进行反向递推计算:

$$f_k(s_k) = \min\{C_k(s_k, u_k) + f_{k+1}(s_{k+1})\} \quad (6)$$

式中: $f_k(s_k)$ 为从第 k 步状态 s_k 出发至最终状态的最小代价; $f_{k+1}(s_{k+1})$ 为从第 $k+1$ 步状态 s_{k+1} 出发至最终状态的最小代价。

1.4 铲斗入土角度动态调控(T1 区)

进入 T1 区后, 施工作业的主要目标从高效清渣转变为精确成型。若仍采用 T2 区域的垂直下挖($\alpha=90^\circ$)方式, 铲斗极易因下压力切入设计坡面以下, 造成超挖。这种超挖不仅影响边坡美观, 更可能削弱其结构稳定性, 且水下修复极为困难。本文提出一种基于实时距离感知的入土角度动态调控算法, 从根本上解决近坡区域超挖难题。

1) 算法核心原理

算法核心思想是: 依据铲斗与目标坡面的实时距离, 动态减小入土角度, 将垂直下挖模式转换为斜向刮削模式。这种转变的力学本质在于改变了铲斗与土体的相互作用方式: 垂直下挖时, 作用力主要沿铲斗轴向, 产生较大的压入深度, 且因机械运动惯性, 即使停止下挖动作, 铲斗仍可能继续切入下方土体; 斜向刮削时, 作用力可分解为垂直分力和水平分力, 垂直分力保证适当的入土深度以剥离残余土体, 水平分力则产生刮削作用, 利用铲斗底板的滑移效应平滑地切削至设计高程, 同时斜向姿态可减少机械惯性对入土深度的影响, 从而有效抑制超挖。

为量化铲斗刃口与目标坡线的接近程度, 在

二维施工断面坐标系 $O-xz$ 中建立目标坡线模型。设目标坡线方程为 $z=ax+b$, 其中 a 为坡线斜率, b 为截距, 则第 k 步铲斗刃口至目标坡线的法向最短距离为:

$$d_k = \frac{|ax_k - z_k + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (7)$$

式中: d_k 为第 k 步铲斗刃口至目标坡线的法向最短距离, d_k 可定量表征铲斗刃口与目标坡线的接近程度, 为入土角度调整提供依据; (x_k, z_k) 为铲斗刃口的实时坐标, 由船体定位、姿态信息和工作装置关节角度数据融合计算得到。

2) 入土角度优化

基于上述距离计算结果, 优化后的入土角度 α_k 计算见式(8):

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \alpha_{\min} + \Delta\alpha \\ \Delta\alpha &= k_\alpha \cdot d_k \end{aligned} \quad (8)$$

式中: α_k 为优化后的推荐入土角度, $(^\circ)$, 需满足机械结构约束, 即 $\alpha_{\min} \leq \alpha_k \leq \alpha_{\max}$; $\alpha_{\min}$ 为受液压系统行程限制的铲斗最小入土角度; $\alpha_{\max}$ 为垂直下挖角度; $\Delta\alpha$ 为角度修正量, $(^\circ)$, 随 d_k 减小而减小, 确保铲斗接近目标坡面时, 入土角度逐渐平缓; k_α 为角度修正系数, $(^\circ)/\text{m}$, 通过仿真与试验标定, 其取值与土质特性、铲斗形状相关。

2 试验验证与分析

针对水下边坡精挖作业中铲斗入土角度难以适配地形坡度、易导致超挖或效率低下的问题, 本试验旨在通过数值仿真验证基于地形离散化的铲斗入土角度动态优化算法的有效性。试验的核心目标包括: 验证地形离散化与 T1/T2 分区策略对水下边坡作业的适配性; 检验铲斗入土角度随地形坡度动态调整的合理性, 是否满足平缓地形小角度波动、陡峭地形大角度适配的控制逻辑; 量化算法对地形误差的收敛能力, 验证其能否在预设的迭代步数内将地形误差降至工程允许阈值(0.5 m)以下; 揭示挖掘过程中角度变化-地形误差的关联规律, 为实际工程参数标定提供理论支撑。试验关键参数如表 1 所示。

通过对平滑下坡地形、含凸起复杂地形 2 类典型水下边坡初始地形的网格化分区仿真(见图 2)可知, 所提出的地形网格化分区方法可有效适配不同形态的初始地形特征。以固定间距(2.7 m)的垂直切分线为基础, 可将待挖土体划分为与目标坡面相邻的 T1 边坡精挖区和位于 T1 区域上方

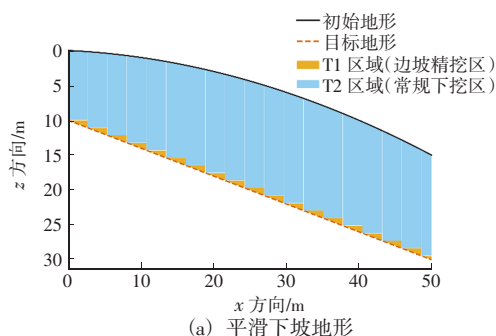
表 1 试验关键参数设置表

Table 1 Configuration of key experimental parameters

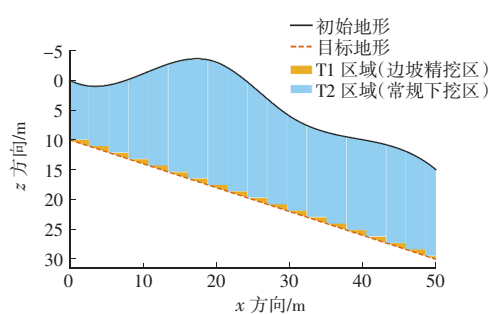
参数类别	具体参数	取值
铲斗参数	铲斗宽度/m	3.0
地形离散参数	比例系数	0.9
	网格间隔/m	2.7
地形模型参数	初始地形坐标/m	$x:[0, 10, 20, 30, 40, 50]$, $z:[0, -1, -3, 6, 10, 15]$
	目标地形坐标/m	$x:[0, 50]$, $z:[10, 30]$
控制与仿真参数	目标误差阈值/m	0.5
	最大迭代步数/步	70
	铲斗角度限制/(°)	$[-60, 60]$

的 T2 常规下挖区。无论初始地形是呈平滑分布还是存在凸起等不规则形态, 该方法均能准确界定 T1、T2 区的空间范围, 为后续差异化挖掘策略 (即 T1 区精细控制、T2 区域常规下挖) 提供清晰的区域划分依据。

在假设土壤无滑坡的理想化建模前提下, 对边坡挖掘过程开展仿真分析。对凸起复杂地形进行挖掘过程仿真, 如图 3 所示, 由步骤 1 至步骤 70 的仿真结果可知: 随着挖掘作业的推进, 当前地形逐步向目标地形逼近, 当前地形与目标地形之间的偏差持续减小。图中橙色区域和蓝色区域



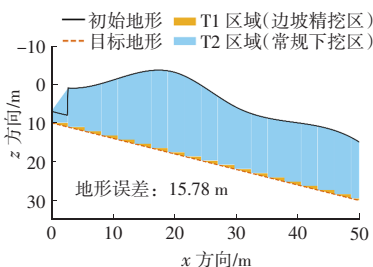
(a) 平滑下坡地形



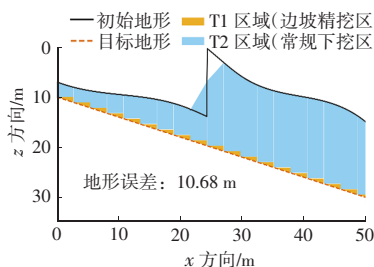
(b) 凸起复杂地形

图 2 边坡初始地形网格化分区示意图

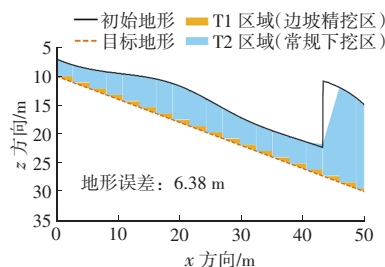
Fig. 2 Schematic diagram of initial terrain gridded zoning for slope



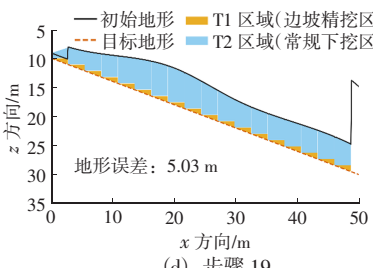
(a) 步骤 1



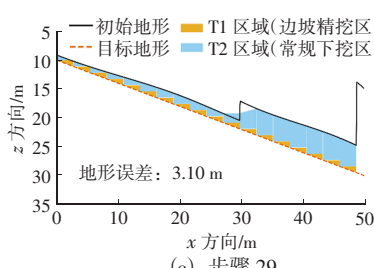
(b) 步骤 9



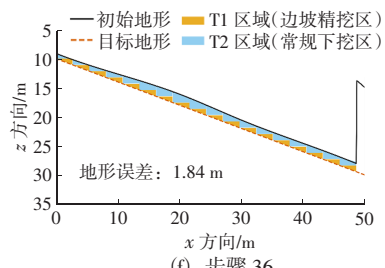
(c) 步骤 16



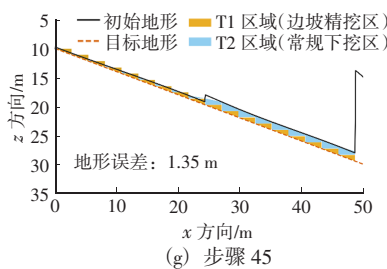
(d) 步骤 19



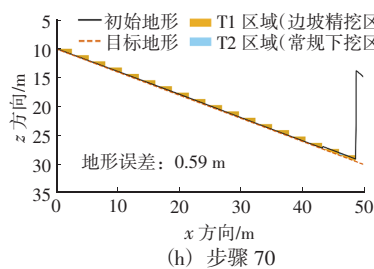
(e) 步骤 29



(f) 步骤 36



(g) 步骤 45



(h) 步骤 70

图 3 下边坡挖掘过程仿真示意图 (部分关键步骤)

Fig. 3 Schematic diagram of the lower-slope excavation process (selected key steps)

分别表示 T1 边坡精挖区和 T2 常规下挖区。地形误差从步骤 1 的 15.78 m 逐步收敛,至步骤 45 时降至 1.35 m,呈现出显著的下降趋势。这表明,所提出的挖掘规划与控制方法在理想工况下,能够有效引导边坡地形向目标形态演化,验证了方法对地形误差的调控能力与挖掘过程的推进有效性。

图 4 为铲斗角度与地形误差变化曲线,随着挖掘步骤的推进,地形误差整体呈持续下降趋势,从初始约 15.78 m 逐步收敛至接近 0 的范围,表明边坡地形不断向目标形态逼近;铲斗角度呈现动态调整特征,初期因地形偏差大,角度调整频率高、幅度大,后续随地形误差减小,角度波动逐渐趋于平缓。两者的协同变化体现出:基于地形误差反馈的铲斗角度调控策略可通过自适应调整铲斗入土角度,有效驱动地形误差持续降低,验证了该调控逻辑在理想化(无土壤滑坡)工况下,对边坡精准成型的支撑作用。

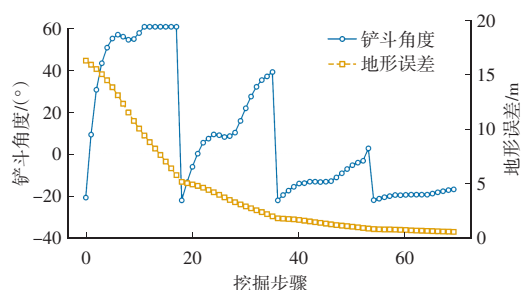


图 4 铲斗角度与地形误差变化曲线

Fig. 4 Variation curves of bucket angle and terrain error

3 结语

本文针对反铲挖泥船在港口航道建设中边坡成型精度不足的问题,提出了一种基于分区挖掘的精挖控制策略。该方法将边坡施工区域按照坡面几何特征分为若干作业分区,并为不同分区制定差异化的挖掘顺序、斗容控制策略,从而在保证整体成型精度的同时兼顾施工效率。试验验证从 2 方面肯定了本方法的有效性:1) 挖掘过程的仿真显示了边坡地形误差的良好收敛性;2) 铲斗角度的动态调整与误差减小过程呈现出明确的协同关系。这证实了该控制策略能够驱动边坡实现

精准成型。未来将聚焦于融合实时地质感知,以进一步增强方法的智能性与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李忠业. 某 23.8 m 反铲式挖泥船设计[J]. 广东造船, 2023(4): 25–28.
Li Z Y. Discussion on design of a 23.8 m backhoe dredger[J]. Guangdong Shipbuilding, 2023(4): 25–28.
- [2] 刘新华. 基于多波束数据的海上风机基础水下地形监测研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 64–70.
Liu X H. Research on underwater topography monitoring of offshore wind turbine foundation based on multi-beam data[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(1): 64–70.
- [3] Chen Y H, Chen X Q, Yang Q, et al. Dynamic stability analysis of backhoe dredger based on time domain method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University(Science), 2022, 27(3): 339–345.
- [4] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. 1st ed. Chichester: Wiley, 2011.
- [5] Trinh V H, Vu D, Dang D V. Planning the movement of operating cylinders of backhoe dredgers with combined trajectories[C]//The 3rd international conference on mechatronics and automation technology. 2024: 439–446.
- [6] Welch G, Bishop G. An introduction to the Kalman filter[R]. Chapel Hill: University of North Carolina at Chapel Hill, 2006.
- [7] Grewal M S, Andrews A P. Kalman filtering: Theory and practice with MATLAB[M]. 4th ed. Hoboken: Wiley–IEEE Press, 2015.
- [8] Wang G D, Xu X, Hou L. An improved adaptive Kalman filter for underwater SINS/DVL system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 1–14.
- [9] 冯晨, 弓宝江. 大型反铲挖泥船开挖硬质岩石施工工艺[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(10): 57–60.
Feng C, Gong B J. Construction technology of hard rock excavation by large backhoe dredger[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(10): 57–59.
- [10] 平陆运河集团有限公司, 中交上海航道局有限公司, 广西平陆运河建设有限公司. 一种无人作业反铲挖泥船边坡精挖规划控制方法: CN120124273A[P]. 2025–06–10.
Pinglu Canal Group Co., Ltd., CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd. A slope fine excavation planning and control method for unmanned backhoe dredger: CN120124273A[P]. 2025–06–10.
- [11] Feng K, Wang J H, Wang X Y, et al. Adaptive state estimation and filtering for dynamic positioning ships under time-varying environmental disturbances[J]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117798.