



多级高边坡削坡质量检测技术研究与应用

易 飞^{1,2,3}, 冷志坚^{1,2,3}, 肖 浩^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 大桥桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对高陡边坡削坡整平施工中, 坡面人工检测困难、测量数据不全面等问题, 提出一种机载式削坡质量自动检测方法。首先以北斗定位点为基准建立挖机斗齿尖坐标运动轨迹方程, 并进行斗齿磨损误差修正; 然后分析挖掘机斗齿尖空间坐标轨迹与坡面特征之间的关系, 通过对斗齿尖坐标数据识别、采集算法研究, 实现了利用斗齿坐标间接表达坡面质量的目的。工程应用实践证明该方法满足坡面前削坡质量检测精度要求, 取代了人工测量, 提高了施工效率。

关键词: 高陡边坡削坡; 北斗测量定位; 数据采集; 自动检测

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0207-06

Research and application of high-side slope surface repair quality automatic detection technology

YI Fei^{1,2,3}, LENG Zhijian^{1,2,3}, XIAO Hao^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China;
2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China;
3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of
Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China)

Abstract: Regarding the problems of difficult manual detection of slope and incomplete measurement data in the construction of high and steep slope sparing, an automatic detection method of airborne slope cutting quality is proposed. Firstly, the equation of the motion trajectory of the excavator tooth tip coordinates is established based on the Beidou positioning point, and the wear error of the excavator is corrected. Then the relationship between the spatial coordinate trajectory of the excavator's tooth tip and the slope characteristics is analyzed. Through the study of the recognition and acquisition algorithm of bucket tooth tip coordinate data, the purpose of indirectly expressing the slope quality by using the tooth coordinate is realized. The practice of engineering application proves that this method meets the requirements of slope cutting quality inspection accuracy, replaces manual measurement, and improves construction efficiency.

Keywords: high and steep slope cutting; Beidou survey and positioning; data acquisition; automatic detection

高陡多级边坡施工广泛存在于公路、桥梁及河道工程中, 而边坡土方开挖及坡面削坡、理坡是边坡工程的首要工序, 坡面施工质量影响格构梁、锚杆锚固等后续工序作业, 是坡面稳定的基

础。以广西平陆运河马道枢纽工程为例, 工程包含 5 个多级高陡边坡的施工, 坡面施工面积 67 万 m², 其中Ⅱ号边坡见图 1, 最大高程达 235 m, 坡级多达 15 级, 坡率 1:1.50~1:1.75, 部分坡断面坡率

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 易飞 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁、水工工程施工装备及智能化研发。

1:1, 边坡削坡质量参数控制要求见表 1, 工程存在施工量大、工程质量要求高、坡高坡陡及多雨区施工等不利因素。

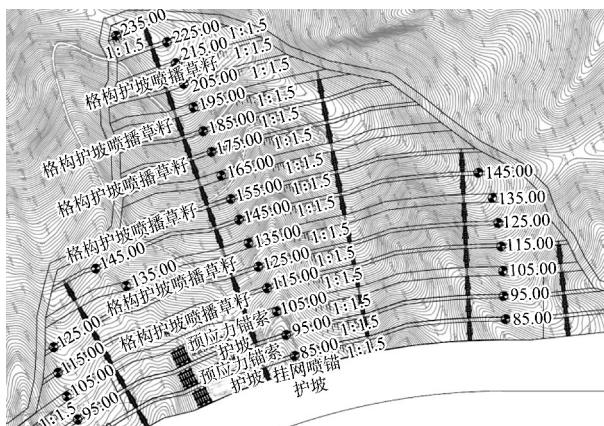


图 1 平陆运河马道枢纽边坡工程 (单位: m)

表 1 边坡坡面质量检测要求

坡顶高程/cm	坡脚偏移量/cm	坡率/(°)	坡面高程/cm
± 5	± 5	0, -0.1	± 5

传统坡面施工由挖掘机与人工配合, 挖掘机根据测量和放样的标识线进行逐层削坡, 削坡过程中对坡面参数进行不断测量, 并将数据反馈给操作人员进行坡面修正。整个作业过程中, 需要大量施工人员进行坡面作业与反馈, 在长陡坡面和雨雪天气等工况及环境下, 人工进行坡面测量非常困难, 不仅效率低, 且由于采样点不足, 往往不能全面客观地反映坡面削坡质量。针对大面积长陡边坡削坡作业, 研究坡面参数快速准确测控方法是很有必要的。

在挖掘机上使用 GNSS 定位技术辅助施工已在深水航道整平、河道整治等工程中得到应用^[1-2], 在已有技术基础上, 结合平陆运河高边坡施工精度要求, 首先研究利用挖机斗齿轨迹表征坡面质量参数和研究坡面数据识别采集算法; 然后在考虑斗齿磨损因素影响下建立每个齿尖轨迹坐标与 GNSS 位置关系数学模型, 在此基础上开发应用系统, 对坡面数据进行采集、计算与处理, 形成坡面质量检测信息。

1 坡面质量表示方法

1.1 坡面高程与平整度表征

坡面质量检测与评价的标准是判断削坡坡面任一位置的高程是否满足设计要求, 进而判断坡面的坡率及平整度是否与设计标准一致。

如图 2 所示, 在 N/E/Z 坐标系下的坡断面, N 向平行于坡断面, E 向垂直于坡断面, Z 为高程方向, 挖掘机在削坡过程斗齿齿尖为任意轨迹, 而在 Z 方向上需要反复接触坡面, 对于坡面某一个固定 NE 相交点来说, 斗齿齿尖可能划过多次该位置, 而齿尖在此处的最小高程坐标 (坐标系 Z 方向上) 可认为是对应此处坡面的最低高程点, 因此同一个里程所有 Z 方向上的最小坐标组成的轨迹线正好是削坡后坡断面线, 因此通过测量齿尖坐标值来表征坡面高程与平整度可行。

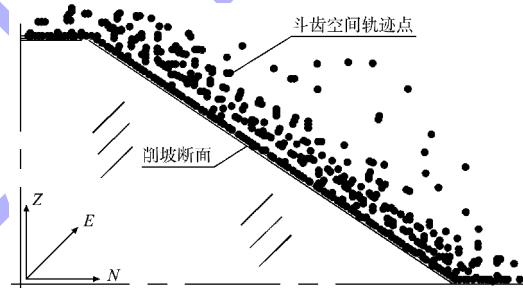


图 2 挖机削坡时的斗齿轨迹点

1.2 坡面数据采集

坡面数据采集实际是对挖机斗齿齿尖坐标进行采集, 挖机在削坡过程中产生很多斗齿轨迹坐标数据, 而反映一个坡断面质量只需有限个采集点数据, 因此绝大部分数据是多余的, 需要建立采集方法进行识别和筛选。

1.2.1 坡面网格划分

坡面网格划分是在 NE 平面内将坡面划分为若干个同尺寸的方格, 见图 3, 目的是将所有数据进行网格化, 在网格内的所有数据均按照同一个值保存和输出, 大量减少采样数据的存储及运算。

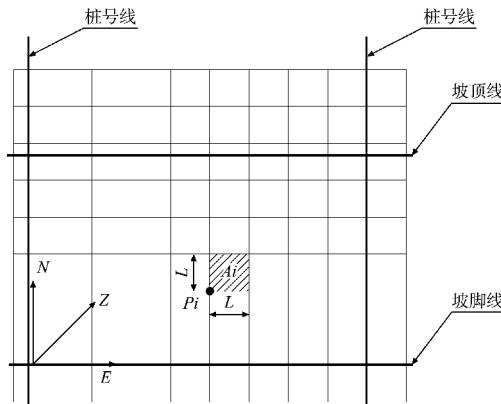


图3 采样数据网格化

1.2.2 网格尺寸

网格尺寸主要根据坡面质量精度要求及坡率确定, 尺寸太大则一个网格内数据之间的差值越大, 导致精度降低; 尺寸太小则增加了采样频率和采样数据, 对检测系统开发配置要求更高, 网格尺寸选择可使用下式:

$$L \leq \Delta h \cdot \lambda^{-1} \quad (1)$$

式中: L 为网格边长, λ 为坡面坡率, Δh 为坡面高程精度范围。

1.2.3 数据采样算法

将 NE 平面内的任一网格起点定义为 $P_i = [N_i, E_i]$, 如图 3 所示, 该网格区域 A_i 表示为:

$$A_i = \{(N_i, N_i+L) \cup (E_i, E_i+L)\} \quad (2)$$

定义斗齿齿尖在 NE 平面内的任一坐标 $P_j = [N_j, E_j]$, 当斗齿齿尖划过坡面任一平面网格时, 如果 $P_j \in A_i$, 则系统记录 1 次齿尖高程坐标 Z_j , 在平面网格 A_i 内坡面最终存储的高程定义为:

$$Z_j = \min\{Z_{j1}, Z_{j2}, \dots, Z_{jn}\} \quad (3)$$

式中: Z_{jn} 为任意 1 次齿尖高程坐标。

1.2.4 采样频率

采样频率是挖机在削坡时斗齿齿尖坐标数据的采集速度, 与网格尺寸及斗齿工作的速度相关, 既要保证斗齿的坐标在每个网格内均能采集到, 防止漏采, 又要避免频率太大造成设备成本增加, 频率大小根据试验确定。

1.3 坡面检验批采样点采集流程

坡面质量最终通过检验批采样点数据评价, 采样点根据施工要求设置, 一般沿坡面桩号线均

匀分布, 采样点施工后实际坐标数据识别流程见图 4。

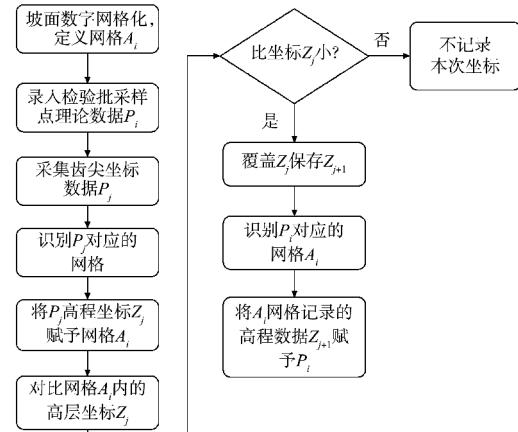


图4 检验批采样点数据采集流程

2 斗齿轨迹识别方法

2.1 技术路线

首先利用北斗差分高精度定位系统对挖机进行定位, 将 RTK 流动站安装在挖机上; 然后建立挖机斗齿齿尖与流动站位置关系, 确定斗齿齿尖的坐标数据在统一大地 2000 坐标系下; 挖掘机回转中心与斗齿齿尖函数关系的计算方法已有相关研究^[3-4], 在此基础上, 直接建立 GNSS 定位点与斗齿各齿尖位置的函数关系, 研究斗齿磨损修正方法。

2.2 斗齿坐标计算

2.2.1 计算数学模型

如图 5 所示的挖机斗齿坐标计算模型。 O_0 为 RTK 定位点, O_1 为挖机上部旋转中心, $O_2 \sim O_4$ 为机械臂关节中心, 在各中心建立局部坐标系, 其中坐标系 Z 向为旋转关节轴向方向, X 向为各关节的公垂线, Y 向根据右手定则确定; 斗齿末端坐标点为 P_1 , 实际需要计算 P_1 在坐标系 O_0 的坐标, 或者求向量 O_0P_1 , 根据机器人运动学^[5-6]可知, 任意两个坐标系的转换算子 ${}^{i-1}T_i$ 为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & L_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: θ_i 为 X 轴绕 Z 轴的旋转角度, α_{i-1} 为两个相邻关节轴向角度偏差, L_{i-1} 为各关节轴的公垂线, d_i 为关节在 Z 向的偏移。

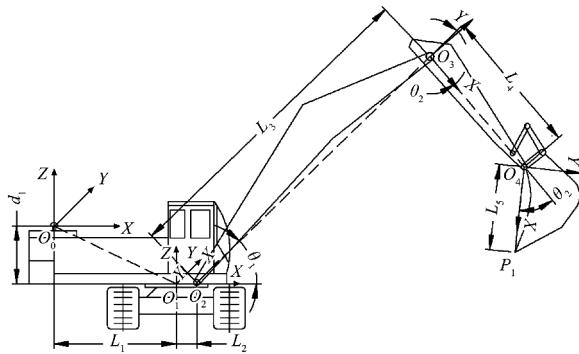


图 5 斗齿坐标计算模型

各角度参数的正负同样依据右手定则, 四指的弯曲方向为正, 位移参数沿坐标轴箭头方向为正, 反之为负。根据公式(4)分别计算各关节的转换算子。

定义 P_1 在坐标系 O_0 的坐标为 ${}^0P=[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 而 P_1 在坐标系 O_4 中的坐标为: ${}^4P=[L_5, 0, 0]^T$, 则有如下关系式:

$${}^0P = {}_1^0T_2^1T_3^2T_4^3T^4P \quad (5)$$

式中: T 为各关节的转换算子。

2.2.2 斗齿磨损修正

挖掘机斗齿在削坡过程中碰到中风化岩或弱风化岩会导致磨损加剧, 斗齿长度变短, 而斗齿坐标的计算模型参数固定, 如果按照原计算模型识

别斗齿坐标将导致坡面欠挖, 因此需要对计算模型进行动态修正, 在模型中铲斗铰接处到齿尖距离(即 L_5)通过设计图纸给出, 斗齿磨损后再进行 L_5 的测量较困难, 而斗齿长度测量则简单很多。

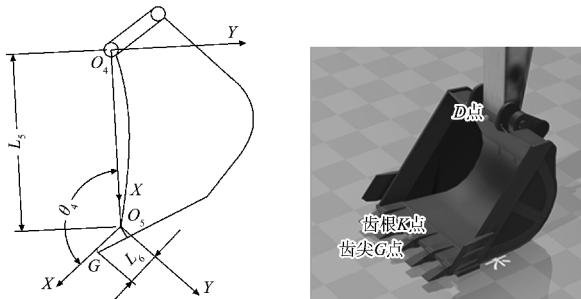


图 6 斗齿坐标修正示意

如图 6 所示, 在斗齿齿根处增加 1 个局部坐标系 O_5 , L_5 变为铲斗铰接点到齿根的距离(DK), L_6 为斗齿齿根到齿尖距离(GK), θ_4 为斗齿与铲斗夹角, L_5 、 θ_4 均为挖掘机固有尺寸, 通过设计或现场测量给出, 而 L_6 为变量, 需人工动态测量修正。

齿尖 G 点在坐标系 O_5 中的坐标为 ${}^5G=[L_6, 0, 0, 1]^T$, 则 G 在坐标系 O_0 中的坐标计算式为:

$${}^0G = {}_1^0T_2^1T_3^2T_4^3T_5^4T^5G \quad (6)$$

转换算子合并后为:

$${}^0G = {}_5^0T^5G \quad (7)$$

则 G 点在坐标系 O_0 中的函数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_6 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4) + L_5 \cos(\theta_1 - \theta_2 - \theta_3) + L_4 \cos(\theta_1 - \theta_2) + L_3 \cos\theta_1 + L_2 + L_1 \\ 0 \\ L_6 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + L_5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_4 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin\theta_1 + d_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 检测系统开发

3.1 系统组成

3.1.1 数据采集设备

包含 1 个 RTK GNSS 流动站, 用于挖掘机的定位, 3 个单轴倾角仪, 测量挖掘机工作大臂、小臂、铲斗转动角度参数, 1 个双轴倾角仪用于测量挖掘机底盘的角度以计算挖掘机两个边齿齿尖坐标。

3.1.2 车载终端

内置串口服务器接收 GNSS 与倾角仪数据, 并负责发送给后台云服务器到达 PC 或手机 APP, 显示器为人机交互通道, 用于参数的输入及数据显示, 终端同时包含嵌入式系统硬件。

3.1.3 数据处理软件

软件的主要功能是负责数据接收、计算、存

储与显示执行, 软件能够实时解算斗齿空间坐标, 并将坐标按照一定的规则输出。系统组成及连接见图 7。

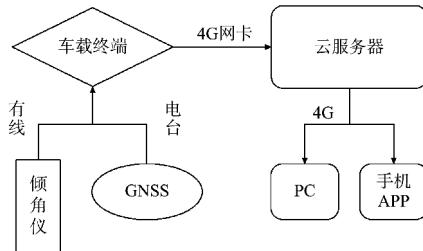


图 7 系统连接

3.2 系统工作流程

坡面质量检测系统工作流程见图 8。

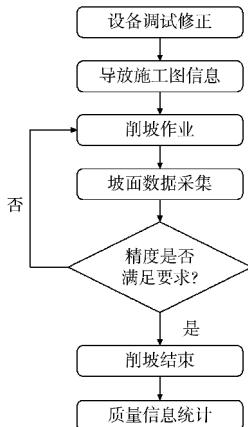


图 8 坡面质量检测系统工作流程

3.2.1 设备安装调试

首先安装 RTK 基站, 基站的安装位置应覆盖所有挖机需要施工的区域; 其次安装 GNSS、倾角传感器及终端控制面板。设备安装后, 按照齿尖坐标计算方程进行相关参数的测量及调试; 最后验证齿尖坐标精度, 使用手持式 RTK 直接测量齿

尖坐标, 并与系统解算的坐标对比。齿尖坐标根据施工实际情况进行定期测量, 将最新的 DK 值输入系统中进行磨损修正, 然后再进行 1 次齿尖坐标精度验证。

3.2.2 施工图信息导入

施工图信息包含需要削坡坡面的所有关键信息, 如各级坡的坡高、坡比、坡脚偏移线及里程信息, 同时需要输入坡面检验批测量点理论坐标。如图 9 所示, 测量点布置根据实际施工需要确定, 采样点越密越能反映坡面质量好坏。施工图数字信息与现场施工测量必须使用统一的坐标系, 平陆运河使用大地 2000 坐标系, 高程使用国家 1985 标准高程。

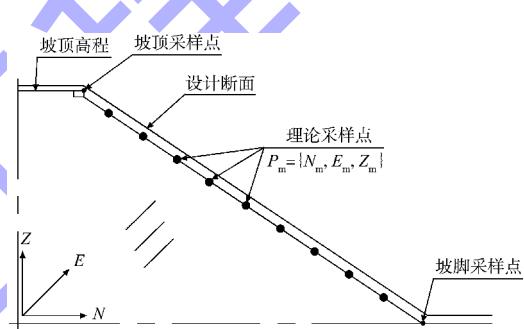


图 9 施工图信息

3.2.3 坡面数据采集

挖机逐层削坡, 在削坡接近施工图坡面时, 启动系统进行数据采集, 根据系统算法将采集数据进行网格化并存储, 通过车载终端查看坡面网格化数据采样情况, 根据网格数字显示状况进行采样频率的调整, 确保不漏采。如图 10 所示, 通过系统可直观地查看每个网格存储的高程数据。

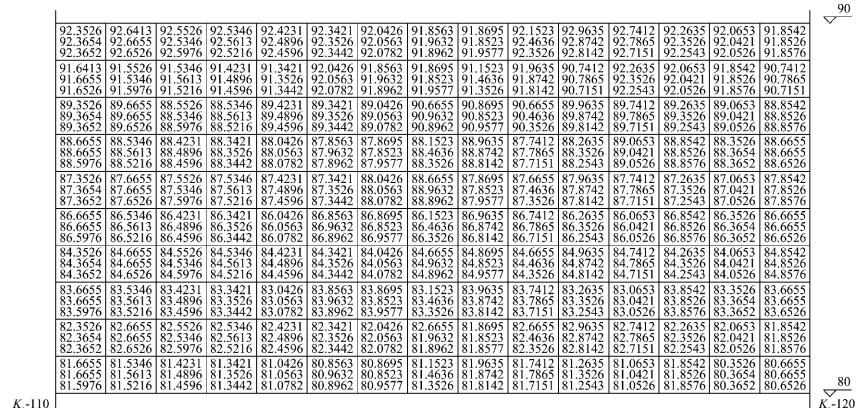


图 10 坡面网格化数据采集 (单位: m)

3.2.4 削坡动态调整

削坡过程中, 系统根据坡面检验批采样点理论坐标的 NE 值在所有采集的数据中进行删选, 形成采样点实际高程坐标; 按照里程形成每个坡断面的实际削坡状态与设计削坡状态对比情况, 见图 11, 可根据对比情况进行动态纠偏。

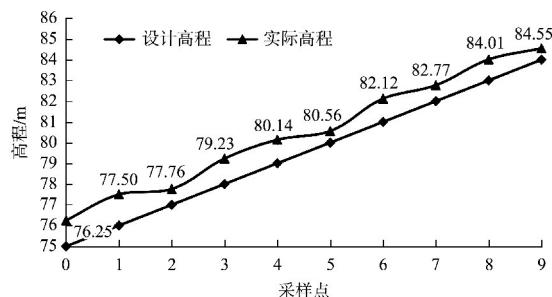


图 11 坡断面采样点高程对比

3.2.5 坡面削坡质量统计

一段坡面削坡结束后, 系统记录了最后成坡状态下的所有坡面高程数据, 对这些数据进一步分析处理, 形成每个里程每个坡级断面的成坡质量对比图, 并计算坡断面的坡率, 进行平整度分析; 最后形成一个区域坡面超挖、欠挖数字化分布图形, 如图 12 所示, 使用不同颜色直观地表示整个网格化坡面的施工质量情况。

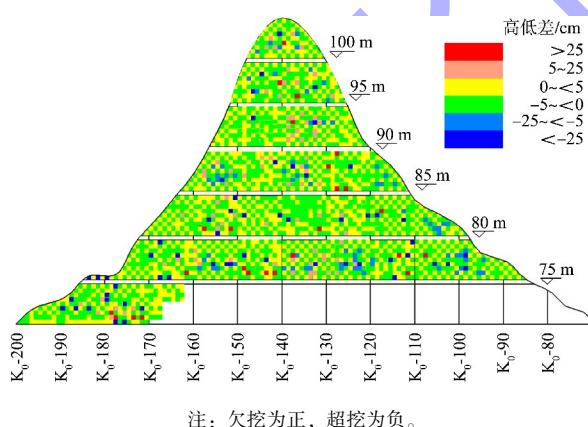


图 12 削坡质量统计分析

4 系统精度验证

坡面质量检测系统在平陆马道枢纽工程Ⅱ号高边坡进行实施验证, 系统应用在 2 台小松 360 挖掘机上, 按照坡面削坡质量要求(表 1), 坡面质量检验批采样点高程精度控制在 $\pm 5 \text{ cm}$, 坡率在 $-10\% \sim 0\%$ 。

表 2 显示了Ⅱ号坡桩号里程 K_0-640 , 高程 95~105 m 坡断面 10 个均匀分布的采样点数据信

息, 分别为理论高程、系统检测高程及现场使用 RTK 测量高程。

数据对比表示系统自动检测数据精度与设计高程、RTK 检测高程均在 $\pm 3 \text{ cm}$ 内, 任意两个坡面采样点最大坡率均小于 1:1.5, 满足使用要求。

表 2 K_0-640 桩系统检测数据精度对比

理论 坡率	设计 高程/m	RTK 实测 高程/m	系统检测 高程/m	实测 高差/cm	系统 高差/cm
1:1.5	95	95.02	95.00	2	0
1:1.5	96	96.03	95.99	3	-1
1:1.5	97	96.98	96.99	-2	-1
1:1.5	98	97.99	98.03	-1	3
1:1.5	99	99.03	99.02	3	2
1:1.5	100	100.03	100.01	3	1
1:1.5	101	100.09	101.03	-1	3
1:1.5	102	102.03	102.01	3	1
1:1.5	103	103.02	103.01	2	1
1:1.5	104	103.97	103.99	-3	-1

5 结论

1) 坡面质量检测技术在广西平陆运河马道枢纽工程多级高边坡施工中得到成功应用, 解决了多雨地区连续高陡边坡坡面削坡整平作业, 测量工作量大、测量困难、削坡精度不高等现实问题, 提升了施工效率, 减少人员输出, 实现削坡全过程机械化作业。

2) 挖机斗齿磨损修正计算进一步提高了利用 GNSS 定位技术在挖掘机智能化应用精度, 为同类型施工提供参考。

3) 进一步研究挖机臂自动削坡多自由度控制方法, 结合坡面质量检测系统, 实现自动削坡与纠偏对提升施工质量具有较大意义。

参考文献:

- [1] 程茂林, 王建平, 夏昊, 等. 浮式智能控制水下基床整平施工工法[J]. 水运工程, 2018(4): 8-13, 83.
- [2] 夏昊, 程茂林, 杨秀礼, 等. 水下基床自动化整平装备的研发与应用[J]. 水运工程, 2019(5): 7-12, 26.
- [3] 高彬. 基于 3D 挖掘机智能引导系统的市政道路路基施工技术[J]. 市政技术, 2019, 37(2): 36-41.
- [4] 刘天帅, 王新晴. 基于 GPS/北斗的挖掘机作业辅助系统研究[J]. 机械研究与应用, 2014, 27(5): 145-148.
- [5] 黎波, 严骏, 曾拥华, 等. 挖掘机工作装置运动学建模与分析[J]. 机械设计, 2011, 28(10): 7-10.
- [6] CRAIG J. 机器人学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

(本文编辑 赵娟)