



# 龙溪口航电工程防护堤碾压过程监控与 压实质量分析

吕 刚<sup>1</sup>, 赵怡昂<sup>2</sup>, 谢 峰<sup>3</sup>, 宋本扬<sup>2</sup>, 王佳俊<sup>2</sup>

- (1. 四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610023;  
2. 天津大学, 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;  
3. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000)

**摘要:** 龙溪口航电防护堤工程是保护沿岸人民生命财产安全和维护龙溪口枢纽工程安全正常运行的重要工程, 其施工质量至关重要。传统航电工程防护堤碾压过程采用试坑试验法检测压实度来进行质量检查与控制, 难以实现全过程的实时控制。为保证施工质量, 采用 GNSS(全球导航卫星系统)和人工智能技术, 研发龙溪口防护堤工程碾压过程监控系统, 实现了对碾压轨迹、速度、遍数以及激振力状态的实时监控, 基于灰狼优化的核极限学习机算法, 提出压实质量评估模型, 实现压实质量的实时分析。结合实际工程, 通过对比平均绝对误差、均方根误差、相关系数, 新型压实质量评估模型精度高于传统的 BP 神经网络、支持向量机(SVR)、极限学习机(ELM)模型。

**关键词:** 龙溪口航电工程; 防护堤; 压实质量; 实时监控; 智能分析

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0089-05

## Monitoring of rolling process and analysis of compaction quality of protective embankment in Longxikou Navigation-power project

LYU Gang<sup>1</sup>, ZHAO Yi'ang<sup>2</sup>, XIE Feng<sup>3</sup>, SONG Benyang<sup>2</sup>, WANG Jiajun<sup>2</sup>

- (1. Sichuan Port and Channel Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610023, China;  
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;  
3. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China)

**Abstract:** Longxikou Navigation-power Protection Embankment project protects the lives and property of the people along the coast and maintains the safe and normal operation of the Longxikou Junction project. Therefore, its construction quality is important. The traditional quality inspection and control of the rolling process of the navigation power protection embankment project uses the test pit experiment to detect the degree of compaction, and it is difficult to achieve real-time control of the whole process. In order to ensure the construction quality, this paper uses global navigation satellite systems (GNSS) and artificial intelligence technology to develop a rolling process monitoring system for the Longxikou Protection Embankment Project, which realizes real-time monitoring of rolling trajectory, rolling speed, exciting force state, and number of roller passes. This paper uses the kernel extreme learning machine (ELM) algorithm optimized by the gray wolf to propose a compaction quality evaluation model and analyze the compaction quality in real time. Combined with the actual engineering, by comparing the average absolute error, root mean square error, and correlation coefficient, the accuracy of the new compaction quality evaluation model is higher than that of the traditional back propagation (BP) neural network, support vector machine (SVR), and extreme learning machine (ELM) models.

**Keywords:** Longxikou Navigation-power project; protection embankment; compaction quality; real-time monitoring; intelligent analysis

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 吕刚 (1973—), 男, 高级工程师, 从事水利水电、公路、港口与航道工程建设管理。

为提高防护堤的保护能力,工程生产对于防护堤的压实效果提出了更高的要求。表现为:保证压实质量模型的精度,建设总控中心对压实质量实时分析,全面准确地反映仓面的压实质量。

现有的研究多采用构建质量评估模型进行压实质量分析<sup>[1-3]</sup>。压实质量评价模型通过探索压实过程中各种参数与压实质量指标之间的相关性,快速判断压实质量。王瑞等<sup>[4]</sup>选用了 BP 神经网络,建立压实质量评价模型;安再展等<sup>[5]</sup>通过试验论证分析压实计值 CMV 与压实度的关系,建立了 RBF 神经网络压实质量评价模型。BEAINY 等<sup>[6]</sup>利用人工神经网络(ANN)将压实过程中碾压机械振动加速度及频率信息作为输入值,压实度作为输出值,建立压实质量评价模型。林威伟等<sup>[7]</sup>采用随机森林算法,考虑料源参数和评价过程的随机不确定性,提出压实质量动态评价模型。目前的研究主要存在的问题为:传统的压实质量评估模型采用单隐含层结构,无法对信息进行有效的提取,在压实质量评估过程中存在精度低、鲁棒性较差的问题。因此,传统的压实质量评估模型无法准确评估压实质量,采用新型的神经网络结构建立压实质量评估模型,可进一步提高模型预测的精度,实现对压实质量的准确评价。

## 1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程位于岷江乐山—宜宾中下游河段,是规划航电梯级开发的第 4 级航电枢纽。工程开发任务以航运为主,航电结合,兼顾防洪、供水、环保等综合利用。以孝姑防护工程所在的孝姑镇为例,孝姑镇防护区为孝姑镇政府、孝姑社区所在地,人口密集,是该镇经济文化的中心。若防护工程建设不到位,将导致大片耕地淹没,集镇、政府机关和集中居民点搬迁,对人民生命财产造成严重威胁。因此须提高防护堤的保护能力。

## 2 防护堤碾压施工智能监控

### 2.1 系统组成

碾压施工智能控制主要包括 5 个部分:差分基准站系统、自动监测装置、总控中心、控制指标报警系统以及坝区无线通讯组网系统。1) 差分基准站系统是整个监控系统的“位置标准”,高精度可满足防护堤碾压质量控制的要求;2) 自动监测装置包括卫星定位接收机、卫星天线、激振力模块、无线传输模块,可获得防护堤填筑碾压过程中的碾压高程、碾压机位置、行进速度、碾压遍数和激振力状态等监测数据,然后将有效的观测结果通过无线数传模块数据传输装置连续、实时上传至中心数据库,供后续系统软件进行应用分析;3) 总控中心是碾压质量 GNSS(全球导航卫星系统)监控系统的核心组成部分,其主要包括服务器、数据库、通讯、安全备份以及现场监控应用等系统;4) 质量控制指标报警系统可对压实不达标进行报警;5) 工区无线通讯组网系统通过通讯网络实现施工区域监控系统、通讯设施以及基准站系统的信息互联,见图 1。

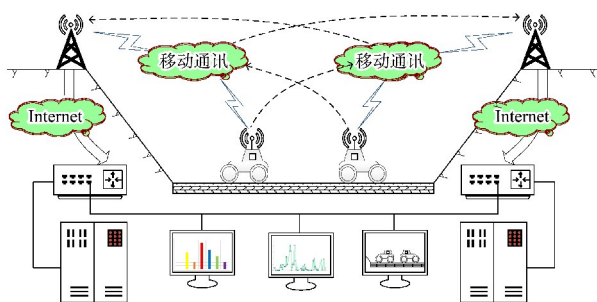


图 1 传输网络

### 2.2 智能控制技术路线

1) 在碾压机上安装高精度定位设备,实时可视化监控仓面碾压机械作业轨迹、速度及激振力状态。

2) 通过使用碾压客户端(图 2)可实时分析计算每一碾压监控仓面的碾压遍数、压实厚度等碾压过程参数及压实质量。

3) 每仓施工结束后通过碾压客户端自主输出碾压质量图形报表,并保存至电脑指定路径中,

包括碾压轨迹、碾压遍数、压实厚度、压实后高程、压实质量预测图等。

4) 在碾压机械上安装显示终端, 实时显示碾压机械的碾压轨迹以及已碾压区域的碾压遍数。

5) 通过显示终端以及碾压客户端实现远程和现场双监控。

6) 整个建设期所有施工仓面的碾压质量信息保存至网络数据库, 可供联网访问和历史查询。

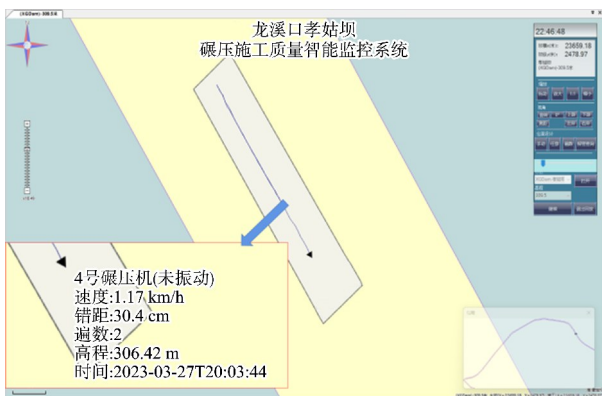


图 2 碾压客户端

### 3 防护堤压实质量评价模型

#### 3.1 工程数据

胶凝砂砾石堤是在碾压混凝土筑堤和面板堆石筑坝技术的基础上发展起来的一种新堤型, 其特点是采用胶凝与砂砾石材料拌合筑堤, 使用高效的土石方运输机械和压实机械施工。龙溪口防护工程采用胶凝砂砾石防洪堤堤身, 具有施工速度快、成本较低、安全可靠、堤顶可过水等优点。龙溪口工程智能监控系统可实时监控碾压参数, 工程数据的分析对于建立压实质量评估模型极为关键, 并通过碾压机理研究, 验证模型数据的合理性。

1) 分析碾压遍数对压实质量的影响。根据钟飞等<sup>[8]</sup>振动压路机工作参数对压实度影响的研究, 当压路机的振动频率接近碾压材料的固有频率时, 压实效果较好。试验采用 20 组数据, 分析 4 个试验点相对干密度与高振、低振碾压遍数的相关关系。发现高振遍数与相对压实度具有一定的相关性, 相关系数为 0.645 3。在分析低振遍数时, 发

现施工中低振碾压遍数普遍为 2~3 次, 且根据刘东海等<sup>[9]</sup>于料源分析试验中所得结论, 低振碾压遍数与压实度相关系数达 0.9 以上。因此, 研究将低振、高振遍数作为压实质量评价模型的输入值。

2) 合理的碾压速度对于提高工作效率、减少工作耗时、保证压实质量具有重要意义。工程现场提供 2 条条带压实速度数据, 包含碾压机械启动与停止过程中的速度变化。为确保试验结论的可靠性, 选取试验带中 4 个速度检测点的平均速度作为研究对象, 分析碾压速度与相对压实度的关系。如图 3 所示, 碾压速度与相对压实度的相关系数为 0.671 5, 具有一定的相关性, 可以作为模型的输入值。

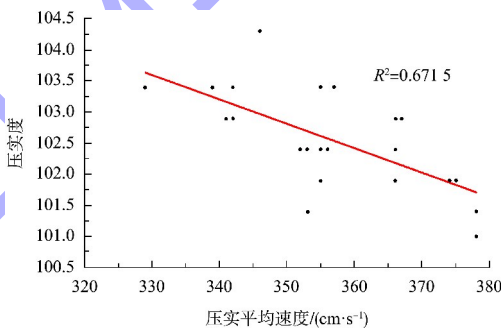


图 3 速度与压实度关系

#### 3.2 模型算法

为揭示碾压参数与压实质量指标之间的关联性, 提出一种可以实现信息多层提取的新型压实质量评估模型。该模型基于核极限学习机 (KELM) 算法 (图 4), 实现数据的深度挖掘。

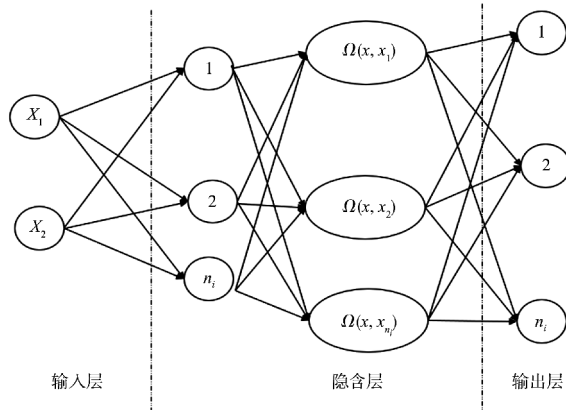


图 4 KELM 结构

Huang 等<sup>[10]</sup>于 2004 年提出 ELM 算法,目的是解决 BP 神经网络存在计算速度较慢、泛化性较差的问题。KELM 算法<sup>[11]</sup>是由极限学习机(ELM)算法改进生成的,但仍存在优化效率低、容易陷入局部最优的问题。本文采用了灰狼优化算法<sup>[12]</sup>(grey wolf optimizer, 简称 GWO)对 KELM 算法的参数进行优化。

### 3.3 模型建立

#### 3.3.1 目标函数

$$R_c = f(v, N_1, N_2) \quad (1)$$

式中:  $R_c$  为输出层的相对压实度;  $v$  为输入层的平均碾压速度;  $N_1$  为输入层的高振碾压遍数;  $N_2$  为输入层的低振碾压遍数。

#### 3.3.2 神经网络的搭建

在数据集中按照 3:1 的比例分别组成训练集与测试集。选择核函数为 RBF 函数, 设 RBF 核函数参数为  $\sigma$ 。确定 KELM 模型权值所用的 ELM-AE 的核函数为  $K(x_i, y_i)$ 。隐含层的数量设置成  $k$ 。

#### 3.3.3 网络的优化

压实评估质量的优劣主要取决于 KELM 中核函数的核参数  $\xi$ 、正则化系数  $C$  以及网络层数  $N$ 。模型采用的网络层数为 5。通过灰狼优化算法优化模型中  $\xi$ 、 $C$ , 并根据最优的参数  $\xi$ 、 $C$  对深度学习网络进行训练, 建立质量评估模型。确定灰狼优化的适应度函数, 要求保证相关系数  $R^2$  同误差之间呈负相关。试验表明: 当  $\xi$  设置为 0.6、 $C$  设置为 5 时, 此模型精度较高、泛化性能较好。

## 4 工程应用

### 4.1 压实质量实时分析

目前碾压施工过程智能控制模块已得到良好应用。系统结合坝区无线通讯组网、总控中心以及碾压机械自动监控装置, 可以实现压实质量的实时评估。当碾压机械运行超速以及激振力、碾压遍数和压实厚度不达标时, 系统会进行决策并有效反馈, 实现实时可视化监控。在每仓施工结束后, 输出碾压质量图形报表, 包括碾压轨迹、碾压遍数、压实厚度、压实后高程、压实质量预测等图表, 作为仓面质量验收的支撑材料实现碾压作业实时在线监控, 以及远程和现场的双监控。

## 4.2 模型对比

### 4.2.1 精度对比

将新型压实质量评估模型与传统的 BP 神经网络、SVR、ELM 模型进行误差对比分析。新模型精度更高, 见表 1。

表 1 模型精度对比

模型类别	平均绝对误差	均方根误差	相关系数 $R$
BP	0.214	0.286	0.844
SVR	0.252	0.298	0.865
ELM	0.306	0.347	0.871
GWO-KELM	0.266	0.294	0.892

### 4.2.2 鲁棒性分析

测试模型鲁棒性的方法是向输入向量空间数据加入噪声, 测试模型精度的下降情况。设定输入噪声数据的方差为  $\sigma$ , 采用正态分布的形式提供随机噪声, 以确保数据的随机性。将方差不同正态分布生成的系列噪声数据加入现有的数据集上。通过调整噪声数据的方差  $\sigma$ , 检查各模型的精度变化(图 5), GWO-KELM 模型对噪声数据的抗干扰能力更强。当噪声数据的方差达到 1.6 时, 其预测精度仍可达到 0.9 以上。

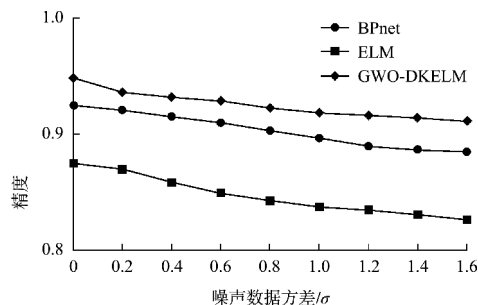


图 5 模型精度随噪声数据方差的变化曲线

## 5 结论

1) 在碾压机上安装高精度定位设备, 研发防护堤工程碾压过程监控系统, 实现碾压轨迹、速度、激振力状态以及碾压遍数的实时监控与分析。

2) 针对基于核极限学习机算法存在优化效率低、容易陷入局部最优的问题, 采用灰狼优化的核极限学习机算法实现压实质量的实时分析。通过对比平均绝对误差、均方根误差及相关系数, 新型压实质量评估模型精度高于传统的 BP 神经网络、SVR、ELM 模型。



## 参考文献:

- [1] 钟登华, 刘东海, 崔博. 高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J]. 中国科学(技术科学), 2011, 41(8): 1027-1034.
- [2] 刘东海, 王爱国, 柳育刚, 等. 基于碾轮振动性态分析的土石坝压实质量实时监测与评估[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 163-170.
- [3] 王晓玲, 周龙, 任炳显, 等. 基于实时监控的堆石坝碾压质量二元耦合评价[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 164-170.
- [4] 王瑞, 钟登华, 吴斌平, 等. 实时监控下考虑料源不确定性的堆石坝压实质量评估[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 146-152.
- [5] 安再展, 刘天云, 皇甫泽华, 等. 利用 CMV 评估堆石料压实质量的神经网络模型[J]. 水力发电学报, 2020, 39(4): 110-120.
- [6] BEAINY F, COMMURI S, ZAMAN M. Asphalt compaction quality control using artificial neural network [C]// 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Atlanta: [s. n.], 2010: 4643-4648.
- [7] 林威伟, 钟登华, 胡炜, 等. 基于随机森林算法的土石坝压实质量动态评价研究[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 945-955.
- [8] 钟飞, 宋嘉翼. 振动压路机工作参数对压实度影响研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(5): 39-43.
- [9] 刘东海, 王倩, 崔博, 等. 连续监控下土石坝碾压参数的控制标准及其确定方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1712-1716.
- [10] Huang G B, Wang D H, Lan Y. Extreme learning machines: a survey[J]. International journal of machine learning and cybernetics, 2011, 2(2): 107-122.
- [11] Huang G B, Zhou H, Ding X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification[J]. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics (Part B), 2012, 42(2): 513-529.
- [12] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in engineering software, 2014, 69(3): 46-61.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 82 页)

## 3.4 拟生态深潭休息室布置

为打造鱼类适宜生境, 在深潭休息室底部散铺卵石, 卵石粒径为 150~300 mm、高度约 500 mm, 通过卵石错落堆放, 充分增大卵石间空隙。同时在深潭休息室内种植金鱼菜、苦草、大茨藻、菹草、穗状狐尾藻等沉水植物, 实现动态模拟河流水生态环境, 为鱼道提供良好的迁徙休息环境<sup>[6]</sup>。

## 4 结论

1) 采用模拟生态河流外观呈现自然水道形式的开挖、拟生态布置深潭休息室等多种措施, 解决了水流流态控制难度大、藕节型仿生态鱼道路线无规则变化等多个难题, 为鱼类回溯提供了良好的河流水生态环境, 促进了岷江流域河流生态环境循环稳定, 具有广泛的生态环保价值。

2) 针对藕节型开挖的精准控制, 充分应用多种测量工具, 多角度、高精度不断复核开挖体形, 成功实现渐变段、扭面等特殊工况坡度的精细化控制, 减少超、欠挖现象, 节约施工成本, 精准

控制鱼道水流流态。

3) 采用喷混一体化、砌筑一体化等先进施工工艺, 加快鱼道施工效率, 节约施工成本, 在同类工程中推广应用价值显著。

## 参考文献:

- [1] 简震, 蒙富康. 仿生态鱼道施工技术[J]. 水运工程 2021(12): 73-78.
- [2] 郭生根. 赣江新干航电枢纽仿生态鱼道整体设计[J]. 水运工程, 2018(12): 155-159.
- [3] 朱成冬, 韩羽, 刘亚洲. 信江八字嘴航电枢纽仿自然鱼道设计[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2021 学术年会论文集第二分册. 郑州: 黄河水利出版社, 2021: 85-90.
- [4] 李新强, 裴鹏, 王辉, 等. 一种混凝土搅拌和喷射一体化装置: CN202020870244. 6[P]. 2020-05-22.
- [5] 巫世奇, 张正勇, 唐德胜, 等. 一种斜坡浆砌石原料施工砌筑一体化装置: 201821165069. X[P]. 2018-07-23.
- [6] 李雪凤, 韦瑛. 岷江航电枢纽仿生态鱼道设计[J]. 水运工程, 2021(12): 43-46, 64.

(本文编辑 王璁)