

柔性测斜仪在边坡工程监测中的应用 及变形预测研究

唐立砾

(重庆大唐国际彭水水电开发有限公司,重庆市,400001)

摘要 为了解决传统人工观测在边坡内部变形监测中及时性、安全性不足的问题,实现对边坡内部变形准确、实时地掌握,并能够做到及时对边坡风险做出预警,本文介绍了柔性测斜仪在边坡自动化监测中的应用,并结合人工智能算法(GRU神经网络)实现对边坡内部变形的预测,以更好的对边坡风险做出预警和研判。柔性测斜仪监测体系和人工智能算法相结合的应用很好的解决了传统人工监测的局限性,真正实现了“实时监测、自动预警”的功能。

关键词 边坡;安全监测;柔性测斜仪;GRU;预测

中图分类号:TU433 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2025)10-0053-03

为保障水电站边坡工程安全,除了有效解决监测数据及时获取的问题外,如何有效对边坡变形进行预测,对异常情况进行及时预警也同样重要^[1-2]。近年来,随着计算机技术以及人工智能技术的发展,人工智能算法被越来越多应用在水利工程中,其中王浩然等^[3]人基于奇异谱分析和改进鲸鱼优化算法优化的BP神经网络用于大坝变形预测,其算法的预测稳定性和可靠性均较高。王润英等^[4]人利用卷积神经网络和短期记忆神经网络的组合预测模型实现了对大坝变形的良好预测。众多学者的研究已经证明人工智能算法在边坡变形监测方面具有较好的性能,但目前在边坡内部变形方面的研究还比较少。彭水电站为提高边坡工程监测质量,将柔性测斜仪自动化监测系统引入边坡工程监测中,采用门控循环单元(Gated Recurrent Unit,GRU)神经网络对边坡内部变形进行预测。

1 柔性测斜仪自动化监测系统

柔性测斜仪自动化监测系统由柔性测斜仪、数据采集层、数据传输层、监测云平台组成,柔性测斜仪实现对深层形变位移进行实时采集,通过有线或

无线的方式将监测数据实时传输给监测云平台来处理、分析、存储、展示和发布,并对危险区域进行预警,可通过系统主页、手机短信、邮件等多元化预警提醒,实现系统互联互通。

1.1 柔性测斜仪

柔性测斜仪基本原理是通过使用一组密实的微电子机械系统加速度计阵列和经过验证的计算程序测量2D或3D变形。柔性测斜仪可以自由弯曲并可以竖直和水平安装。柔性测斜仪内含MEMS加速度传感器,通过加速度计测量重力加速度在不同的轴向上的数据来反应出对应轴与重力方向的角度,通过角度的变化从而计算对应的位移量。

应用于边坡内部的柔性测斜仪是由多节进行拼装组合而成,在一套柔性测斜仪装置的每一节中都内置一个MEMS加速度式传感器,及每一节传感器都会有一个对应加速度值($\text{acc}x_i, \text{acc}y_i, \text{acc}z_i$),即:

$$\begin{cases} \text{acc}x_i = Ax_i + Kx_i \times G \times \sin(\theta x_i) \\ \text{acc}y_i = Ay_i + Ky_i \times G \times \sin(\theta y_i) \\ \text{acc}z_i = Az_i + Kz_i \times G \times \sin(\theta z_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 为第 i 节柔性测斜仪; Ax_i, Ay_i, Az_i 为加速度计的偏值(零偏); Kx_i, Ky_i, Kz_i 为加速度计的标度因数; G 为地球重力加速度; $\theta x_i, \theta y_i, \theta z_i$ 为对应轴上倾角。各对应轴和重力方向夹角为:

作者简介:唐立砾(1984~),男,湖北宜昌人,本科,工程师,研究方向:水利水电工程。

$$\begin{cases} \theta x_i = \arcsin\left(\frac{accx_i - Ax_i}{Kx_i \times G}\right) \\ \theta y_i = \arcsin\left(\frac{accy_i - Ay_i}{Ky_i \times G}\right) \\ \theta z_i = \arcsin\left(\frac{accz_i - Az_i}{Kz_i \times G}\right) \end{cases} \quad (2)$$

在已知每节柔性测斜仪长度 L 长度情况下,可换算得到对应第 i 节柔性测斜仪在重力方向的坐标系中单节对应的坐标长度为:

$$\begin{cases} Lx_i = L \times \sin(\theta x_i) \\ Ly_i = L \times \sin(\theta y_i) \\ Lz_i = L \times \sin(\theta z_i) \end{cases} \quad (3)$$

则对应的第 n 节设备在整体坐标系中的坐标 (X_n, Y_n, Z_n 为第1节到第 n 节的累加和为

$$\begin{cases} X_n = \sum_{i=1}^n Lx_i = \sum_{i=1}^n (L \times \sin(\theta x_i)) = L \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{accx_i - Ax_i}{Kx_i \times G}\right) \\ Y_n = \sum_{i=1}^n Ly_i = \sum_{i=1}^n (L \times \sin(\theta y_i)) = L \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{accy_i - Ay_i}{Ky_i \times G}\right) \\ Z_n = \sum_{i=1}^n Lz_i = \sum_{i=1}^n (L \times \sin(\theta z_i)) = L \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{accz_i - Az_i}{Kz_i \times G}\right) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 数据采集

柔性测斜仪可采用专业的综合采集装置,包含数据采集模块、数据传输模块、通讯模块,具备数据实时采集、转换、存储、上传功能,充分弥补了人工观测的不便和缺陷。并且综合采集器的安装十分便捷,只需要按照综合采集器上对应的接口分别连接柔性测斜仪、外接电源、天线,然后固定在不锈钢防水保护箱内即安装完成,只需定期对采集装置进行维护巡检即可。

1.3 监测云平台

由综合采集器采集的柔性测斜仪原始数据,通过有线或无线的方式将监测数据传送到监测云平台,监测云平台具有监测数据实时获取、云端综合处理、多样化图表展示、专业相关性分析、灾害预警报警、报表统计上报等功能,监测智能平台分析、存储、展示和发布数据,并对危险区域前预警,可通过系统主页、手机短信、邮件等多元化预警提醒,实现系统互联互通。

2 门控循环神经网络 (GRU)

GRU神经网络在2014年由K.Cho^[5]等提出的一种神经网络模型,由于GRU神经网络引入了门控机制,以解决长期依赖问题,在处理时序问题上具有出色表现,其在自然语言处理、语音识别、机器翻译等领域广泛应用。由于预测研究亦是一种时序问题,本文将GRU模型应用于边坡变形内部预测。

GRU神经网络主要依靠其内部的记忆模块(细胞状态)和门模块来帮助其从数据中学习时序特征,且其门模块很好的解决了循环神经网络在实际中较难捕捉时间序列中时间步距离较大的依赖关系。GRU神经网络的门模块包含一个更新门和一个重置门,更新门控制了如何将前一时间步的状态与当前的输入结合,从而得到新的状态;重置门决定是否应丢弃过去的状态以及在当前时间步上应使用多少以前的状态^[6]。

GRU神经网络从输入到输出的计算公式为:

$$\begin{cases} r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\ z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\ \tilde{h}_t = \tanh(W_h \cdot [r_t \times h_{t-1}, x_t]) \\ h_t = (1 - z_t) \times h_{t-1} + z_t \times \tilde{h}_t \end{cases} \quad (5)$$

式中, h_{t-1} 为上一时刻的状态变量; \tilde{h}_t 为单元状态; x_t 为当前输入变量; σ 为 *sigmoid* 激活函数; r_t 为重置门; z_t 为更新门; W_r 、 W_z 、 W_h 分别为重置门、更新门以及候选集的权重。

3 工程案例

3.1 工程概况

彭水水电站位于乌江干流下游,是乌江水电基地的12级开发中的第10个梯级,其上游为沙沱水电站,下游为乌江银盘水电站,电站坝址以上流域面积69 000km²,占乌江流域总面积的78.5%,坝址多年平均流量1 300m³/s,年径流量410亿m³。为掌握边坡整体稳定性,彭水水电站各边坡均布设有深部位移监测孔,目前开展监测的有31个,总体深度为987m,目前采用基康GK6000型测斜仪开展人工周期观测。为解决人工观测的不足,于2022年4月在IN02TYW、IN09DJP测斜管内安装了柔性测斜仪,对柔性测斜仪进行试用。

3.2 模型建立及样本选取

本文基于机器学习库TensorFlow,建立GRU模型对彭水水电站柔性测斜仪的变形进行预测,其中GRU神经网络的损失函数采用MSE函数,优化器算法采用adam方法。

根据《SL 725-2016水利水电工程安全监测设计规范》等相关规范及规定要求的频次,本文选取IN02TYW中变化深度较大的一个测点,按照5天1次

的频次选取2023年1月10日~2024年1月10日间的监测数据作为模型的训练集和测试集。IN02TYW测点在0.6m深度的变形量相对较大,因此本文以IN02TYW测点在0.6m深度X、Y方向的变形量作为本文GRU神经网络的样本进行训练和预测。

按照5天1次的频次,IN02TYW测点在2023年1月10日~2024年1月10日期间的X、Y方向共有74组监测数据,本文选取70%的样本数据作为GRU神经网络训练集,30%的样本数据作为GRU神经网络作为测试集。

3.3 模型训练及预测结果分析

本文分别以IN02TYW测点X、Y方向的前8次数据作为GRU神经网络输入,用以预测第9次的变形量的方式来进行训练,将70%的样本数据投入训练,并以剩余30%的样本数据的预测值与实际值进行对比,两值以RMSE(均方根误差)和MAE(平均绝对误差)作为模型训练的优化标准。

依据预测成果,如图1和图2所示,IN02TYW测点X方向的预测值与实际值的绝对误差 $<0.1\text{mm}$,IN02TYW测点X方向的预测值与实际值的绝对误差 $>0.05\text{mm}$ 的组数仅占20%,IN02TYW测点X方向的RMSE为0.039,MAE为0.032;IN02TYW测点Y方向的预测值与实际值的绝对误差 $<0.1\text{mm}$,IN02TYW测点Y方向的预测值与实际值的绝对误差 $>0.05\text{mm}$ 的组数仅占20%,IN02TYW测点Y方向的RMSE为0.046,MAE为0.040。

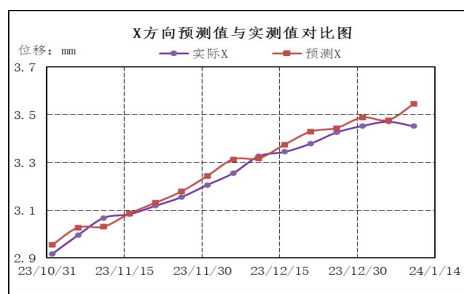


图1 N02TYW测点X方向预测值与实际值对比图

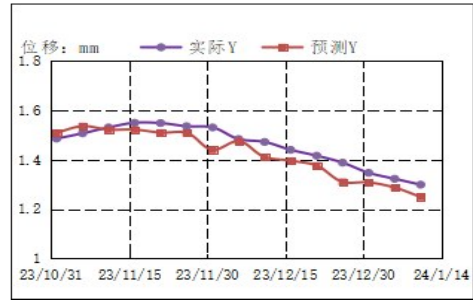


图2 N02TYW测点Y方向预测值与实际值对比图

4 结语

柔性测斜仪作为一种多节串联型、灵活柔韧的三维测量系统,这类设备具有集成度高、安装简便、抗弯性能好、防水防震等突出优点。由于其监测数据的频率、精度、量程,均远远超出了传统的边坡人工监测方式,能够很好的满足边坡工程的变形监测要求,通过柔性测斜仪这种新兴技术手段,并将人工智能算法集成到监测云平台即可实现数据的自动化采集、传输、分析以及智慧化的预警预报,可以很好的改善和弥补边坡变形人工观测的不足,可为后续其他岩土工程的变形监测提供重要借鉴。

参考文献

- [1] 李国儒, 康建峰. 边坡变形柔性测斜仪自动化监测系统在水利工程中的应用[J]. 水利水电快报, 2023, 44(3): 107-110, 116.
- [2] 云磊, 徐晓强. 柔性测斜仪在水利工程安全监测中的应用综述[J]. 水利水电快报, 2024, 45(S1): 31-34.
- [3] 王浩然, 钮新强, 徐利福, 等. 基于奇异谱分析和改进WOA-BP的大坝变形预测模型[J]. 水力发电学报, 2023, 42(11): 136-145.
- [4] 王润英, 林思雨, 方卫华, 等. 基于CNN-LSTM的大坝变形组合预测模型研究[J]. 水力发电, 2024, 50(1): 37-41.
- [5] Cho K, Van Merriënboer B, Gulcehre C, et al. Learning Phrase Representations using RNN Encoder-Decoder for Statistical Machine Translation[J]. Computer Science, 2014.
- [6] 火天宝, 何毅, 姚圣, 等. 门控循环神经网络的时序PS-InSAR地面沉降预测[J]. 海洋测绘, 2024, 44(3): 47-52.