

基于人工智能的水利工程智能监测与预警系统研究

吴明辉, 张志龙, 唐伟华

(浙江大禹信息技术有限公司, 杭州 310000)

摘要: 文章设计了一种基于人工智能的水利工程智能监测与预警系统, 探讨了人工智能在实时数据分析、风险评估与预警生成等环节的具体应用方法。通过集成水位、流量、气象等传感器实时采集数据, 该系统利用数据传输网络将信息传输至中央处理平台, 在数据处理层采用先进的人工智能算法, 实现了对监测数据的智能分析、故障诊断和风险预测, 为水利工程安全管理提供了科学依据。其中, 系统采用四层架构设计, 包含数据采集、传输、分析和决策支持模块, 可适应不同水利工程的实际需求。实际应用表明, 该系统能够有效识别潜在风险并辅助决策人员及时采取应对措施, 具有显著的应用价值。

关键词: 人工智能; 水利工程; 智能监测; 预警系统; 数据分析; 风险预测

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Research on intelligent monitoring and early warning system for water conservancy engineering based on artificial intelligence

WU Minghui, ZHANG Zhilong, TANG Weihua

(Zhejiang Dayu Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: This article designs an intelligent monitoring and early warning system for water conservancy engineering based on artificial intelligence, and explores the specific application methods of artificial intelligence in real-time data analysis, risk assessment, and early warning generation. By integrating sensors such as water level, flow rate, and weather to collect real-time data, the system utilizes a data transmission network to transmit information to a central processing platform. Advanced artificial intelligence algorithms are used in the data processing layer to achieve intelligent analysis, fault diagnosis, and risk prediction of monitoring data, providing scientific basis for the safety management of water conservancy projects. Among them, the system adopts a four layer architecture design, including data acquisition, transmission, analysis, and decision support modules, which can adapt to the actual needs of different water conservancy projects. Practical application has shown that the system can effectively identify potential risks and assist decision-makers in taking timely response measures, with significant application value.

Key words: artificial intelligence, water conservancy engineering, intelligent monitoring, early warning system, data analysis, risk profile

1 引言

水利工程的安全运行关乎防洪抗旱、水资源管理和生态环境保护成效。传统监测方法存在实时性差、精准度低、数据利用率不足等问题, 难以应对复杂多变的运行环境。随着风险日益多样化, 安全监测和应急响应面临更高要求。凭借强大的数据处理和智能分析能力, 人工智能可高效挖掘监测数据, 实现对工程运行状态的动态感知和风险预测, 显著提升了监测的精准性与预警的时效性。结合水利工程特性与人工智能优势, 智能监测与预警系统的研究应用能有效降低安全隐患, 为水资源科学管理提供技术支撑。

2 工作原理

基于人工智能的水利工程智能监测与预警系统(以下简称“本文系统”)通过多技术协同, 实现对工程运行状态的全面监控与风险预警, 其核心原理包括数据采集与传输、处理与分析、预警机制及决策支持等关键环节。

本文系统通过各类传感器实时采集环境与结构数据, 并借助有线或无线网络传输至数据处理平台^[1]。在数据处理环节, 利用人工智能算法(如机器学习和深度学习)对海量实时数据进行模式识别, 训练后的模型可有效检测异常信号。预警机制基于分析结果或异常检测算法, 实时监测并预测洪水、山洪、滑坡等灾害事件,

在发现风险时自动触发预警。决策支持模块则结合历史数据与地理信息系统(GIS)来生成风险评估报告,为管理人员提供科学决策依据。

3 架构设计

3.1 设计理念与总体框架

本文系统采用分布式与模块化架构设计,兼具良好的扩展性、适应性和实时响应能力。其中,分布式架构通过功能模块解耦和独立部署的方式,显著提升了系统协调效率和数据流转性能;模块化设计则赋予系统各组件灵活调整与替换的能力。

如图1所示,本文系统由数据采集层、数据传输层、

数据分析与处理层以及决策支持与用户展示层等核心层级组成^[2]。其中,数据采集层通过部署水位传感器、流量计、气象监测设备等传感装置实时获取原始运行数据;数据传输层依托可靠的有线/无线通信网络,确保采集数据的实时传输和系统对突发事件的快速响应能力;数据分析与处理层应用人工智能算法和大数据处理技术,完成包括数据清洗、特征提取、模型训练及异常检测等关键任务;决策支持与用户展示层通过直观的可视化界面,为管理人员提供关键数据展示、风险预警和决策支持功能。各层级通过协同运作,构建了一个集实时响应、精准监控与智能分析于一体的综合监测预警平台。

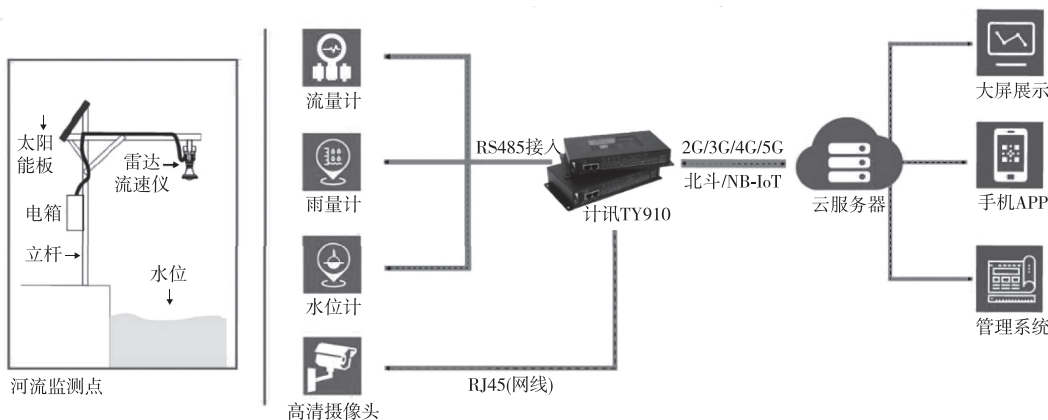


图1 水利工程智能监测与预警系统总体架构

3.2 数据采集层与传输层的技术要求和实现

数据采集层通过高精度水位传感器、流量计、雨量计及环境监测设备来全面感知水利工程运行环境中的水文、气象和结构信息。为保障实时性与精度,系统采用1秒/次的采集频率,并在重要区域按5台/平方千米的密度布设传感器;采集指标涵盖水位(m)、流量(m³/s)、降雨量(mm)等关键参数;数据传输基于高效低延时的MQTT协议,延迟严格控制在0.5 s内(见表1)。

表1 数据采集与传输层技术性能

指标	数据采集频率/(秒/次)	数据传输延迟/s	传感器布设密度/(台/平方千米)	数据覆盖范围/km ²
水位传感器	1	0.3	5	50
流量计	5	0.4	3	30
雨量计	60	0.5	2	100

分析发现,系统可在高采样率下维持低传输延迟,保证核心区域监测数据的实时性与完整性。

3.3 数据分析与处理层的人工智能算法设计

作为系统核心,数据分析与处理层依托人工智能算法来分析和处理海量监测数据。核心算法包括基于时间序列的LSTM模型、异常检测的孤立森林算法以及风险预测的贝叶斯网络^[3]。针对水位预测,LSTM模型以历史水位时间序列为输入,输出未来1 h的水位预测值。模型采用均方误差(MSE)作为损失函数:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{1}$$

其中, \hat{y}_i 是预测值; y_i 是真实水位值; n 是样本数量。模型训练后的平均误差为0.02 m,可以有效预测水位变化趋势。在异常检测方面,使用孤立森林算法对多维数据进行分析。该算法通过构建随机二叉树来检测样本的孤立程度,从而评估其异常程度。风险预测部分则基于贝叶斯网络进行因果推理,构建降雨量、水位、流量之间的概率关系。模型利用条件概率计算风险值,当降雨量为50 mm时,水位上升至5 m的概率为80%。

3.4 决策支持与用户展示层的功能实现

决策支持与用户展示层具备3大核心功能:实时监控、报警提示和预警报告生成。

(1)实时监控模块基于GIS地图实现关键数据的可视化展示,直观呈现各监测点的实时数据变化与空间分布。该模块负责动态更新水位、流量、气象等数据,支持地图交互操作。

(2)报警提示模块在数据超限(如水位或流量异常)时自动触发,通过高亮标识(如红色警报)提醒管理人员及时干预。

(3)预警报告模块负责整合分析结果,生成包含事件原因、应急建议的综合报告(文本与图表结合),以辅助决策。

基于以上功能模块,用户界面提供实时曲线图、柱状图、热力图等可视化形式,便于快速识别异常趋势^[4]。表2展示了决策支持与用户展示层的技术性能指标(响应时间、数据刷新频率等)。

表2 决策支持与用户展示层的技术性能指标

功能模块	响应时间	数据刷新频率	可视化类型	报告生成时间
实时监控	<1 s	每秒1次	曲线图、柱状图	无
报警提示	<0.5 s	动态更新	高亮标记	无
预警报告生成	<10 s	每5分钟1次	文本、图表	<1 min

分析发现,系统可以在高负载下保持低响应时间,满足水利工程管理的实际需求。

4 人工智能在水利工程监测与预警中的应用

4.1 实时监控与数据分析

系统采用基于人工智能的自动化数据采集与分析机制实现高效实时监控。通过部署大量传感器实时采集水位、流量及降水量等关键数据,并利用人工智能技术进行分析处理,确保水利工程运行状态全面受控。基于历史与实时数据,系统通过深度学习算法进行水位预测与趋势分析。采用LSTM神经网络对水位时间序列建模^[5],该模型可有效捕捉长期依赖关系:输入为过去24 h水位数据,输出未来1 h水位预测值。设输入的水位序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , LSTM网络通过学习时序特征来预测下一水位值 \hat{y} :

$$\hat{y}=f\left(x_1, x_2, \cdots, x_n\right) \quad (2)$$

其中, f 为模型学习的映射关系。训练后,模型预测误差控制在0.02 m以内。可视化曲线图有助于管理人员快速识别水位变化趋势,判断水位是否接近警戒线。在暴雨场景下,系统可监测水位变化并分析降水量与水位上升的关联。实时监控系统性能如表3所列。

表3 实时监控系统性能

监测指标	数据采集频率/(秒/次)	LSTM预测精度	数据更新频率/(秒/次)	预测误差
水位监测	1	0.98	1	0.02 m
流量监测	1	0.95	1	0.5 m ³ /s
降水量监测	60	0.92	60	0.1 mm

由表3可知,系统在水位、流量及降水量监测中均实现高频采集与高精度预测,保障了实时监控的可靠性与时效性。

4.2 水利工程故障诊断与风险评估

系统通过对监测数据的全面分析,结合机器学习异常检测算法实现故障早期识别与定位。基于历史泵站运行数据(电流、转速、振动频率等),构建故障诊断模型,即利用传感器获取实时数据,采用支持向量机(SVM)进行故障检测。SVM通过最大化间隔构建最优

分类超平面:

$$\min_w \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad \text{subject to} \quad y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1, \forall i \quad (3)$$

其中, w 为SVM的权重向量; y_i 为每个样本的标签(正常或故障); x_i 为样本特征; b 为偏置项。训练后的SVM模型可实时预测泵站故障。风险评估采用贝叶斯网络,基于传感器数据与条件概率关系进行因果推理,评估不同运行状态下的风险水平。以暴雨场景为例,可通过分析水位、流量及降水量等因素来综合计算洪水风险值^[6]。各类模型的预测准确度与处理时间如表4所列,反映了系统在故障诊断与风险评估中的性能。

表4 故障诊断与风险评估性能

风险评估模型	预测准确率/%	处理时间/s	样本数据量/条
SVM	95	1	10 000
贝叶斯网络	92	0.8	15 000
随机森林	93	0.9	12 000

由表4可以看出,SVM模型在故障诊断方面的准确率最高,且能快速处理大量数据,适用于实时监测环境;贝叶斯网络和随机森林在风险评估方面表现出较高的准确性。

4.3 预警系统的自动生成与决策支持

当系统检测到异常情况或潜在风险时,预警系统会根据预定的规则和算法自动生成预警并将预警信息传递给管理人员。其中,预警信息的生成依赖于传感器实时采集的数据以及人工智能算法对历史数据的分析和学习。

预警的自动生成过程融合了规则引擎和智能算法。系统能基于情景模拟结果自动推荐应急处理方案。例如,在暴雨导致水位迅速上升时,系统会自动生成洪水风险预警报告,提示管理人员加强堤坝巡查并调度排水设备。

5 结束语

本文提出了一种基于人工智能的水利工程智能监测与预警系统,利用深度学习和机器学习等人工智能技术实现了水利工程的关键数据实时监控与异常检测。该系统可在不同环境条件下稳定运行并提供及时预警,提高了防汛、灌溉管理及河流治理等领域的管理效率和决策水平,具有良好的经济效益和社会效益。未来研究将聚焦于进一步提高系统的智能化水平,解决数据处理的实时性与准确性问题,以此提升系统对复杂环境的适应能力。

参考文献:

[1] 李坚. 水利工程数字化与智能化发展趋势研究[J]. 东北水

保垂直同步中断触发后,DMA传输可在200 ns内启动。例如,在1 280×720@60 Hz模式下,配置DMA为16字突发传输,单帧数据(约1.38 MB)搬运耗时从3.5 ms压缩至1.2 ms,充分覆盖2.8 ms的垂直消隐期,保证画面不出现撕裂或闪烁。

(2)中断响应优化策略:采用支持嵌套与向量化处理的硬件中断控制器,同时结合系统定时器模块生成时间戳标记。实测表明,垂直同步中断的响应延迟控制在180 ns以内(相比传统方案超过500 ns)。此外,通过优化中断服务例程结构,将非关键操作(如日志记录)转移至低优先级线程执行,使中断服务周期缩短至50 μs以内,大幅提升系统响应效率。

4.2 资源利用率优化:硬件/软件协同设计

高效利用可编程逻辑资源对于降低系统成本与提升灵活性至关重要。Nios II通过定制指令、动态模块重配置等软硬协同手段,在保证性能的同时显著提高资源复用率。

(1)自定义指令加速计算任务:针对显示控制中计算密集型的任务(如伽马校正、颜色空间转换等),设计了专用硬件加速指令。以伽马校正为例,将256级灰度映射表固化于FPGA内部ROM中,Nios II通过定制指令实现2周期内完成查表操作,效率是传统软件查表方式(约120周期)的60倍。同时,色彩空间转换任务通过向量指令实现并行处理,仅增加约120个逻辑单元,而软件实现通常需占用超过1 200个逻辑单元。

(2)动态部分重配置技术:为满足多分辨率显示需求,开发了支持运行时动态重配置的时序控制模块。系统可在不中断主流程的情况下,实现从720p到1080p等显示参数的在线切换,重配置过程耗时不超过10 ms。此策略显著提升了FPGA资源的复用效率,逻辑资源节约率达到70%以上,为系统多功能集成奠定基础。

4.3 功耗优化:动态电压与频率调节机制

在嵌入式与移动终端等功耗敏感场景中,降低能耗是提升系统可靠性与续航能力的关键目标。Nios II系统通过多维度功耗管理技术,有效实现了能效优化。

(1)基于刷新率的动态频率调节:构建显示刷新率

与主频之间的映射关系,实现主频动态调节。例如,在驱动60 Hz显示屏时,将处理器主频设定为100 MHz;在120 Hz模式下,自动提升至180 MHz运行。利用PLL的频谱展宽技术抑制电磁干扰,系统时钟抖动控制在±50 ps以内。实验结果显示,该机制可将平均功耗从1.1 W降至0.68 W,能耗降低38%。

(2)电源域隔离与待机功耗控制:系统将背光驱动、核心处理逻辑及存储模块划分为独立电源域。在待机状态下,电源管理模块自动关闭背光电路(节能300 mW),并将SDRAM切换至自刷新模式,同时执行处理器休眠指令。多策略协同下,系统待机功耗最低可控制在15 mW,显著提升系统节能性能。

5 结束语

Nios II嵌入式软核处理器在液晶显示屏控制中的应用体现了FPGA技术在高性能、低功耗显示系统中的巨大潜力。本文从体系架构、优化策略等方面入手,针对传统LCD控制方案在实时性不足、资源浪费严重、功耗控制薄弱等问题,提出了有效的改进措施。

参考文献:

- [1] 李晓军,周友志.液晶触控显示屏及控制系统的设计和仿真研究[J].电子产品世界,2025,32(1):1-5+9.
- [2] 庞权岗,胡放荣,张文涛,等.基于Nios II的光刻机运动台电机驱动控制系统设计[J].桂林电子科技大学学报,2020,40(6):498-504.
- [3] 王斌斌.基于Nios II处理器的复合式数据终端设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [4] 付扬,李成.基于Nios II软核的音频播放系统设计与实现[J].现代电子技术,2020,43(10):59-62.

作者简介:

唐凌云(1980—),本科,讲师,研究方向:嵌入式与物联网应用。

张彬(1978—),硕士,高级实验师,研究方向:网络与信息安全,E-mail:zhangbin@huse.edu.cn(通信作者)。

(上接第65页)

利水电,2024,42(11):64-67.

- [2] 赵霞.现代信息技术在水利工程档案管理中的应用[J].山西档案,2024(11):186-188.
- [3] 黄卫华,魏伶芸.人工智能辅助水利工程监管的探索与应用[J/OL].水利水电快报,1-10[2025-06-25].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1142.TV.20241104.1217.002.html.
- [4] 梅雄.水利工程智能监测预警系统研究——评《集成BIM与无人机的输水工程安全监测分析与险情智能识别》[J].

人民黄河,2024,46(8):162.

- [5] 卢鑫祥,李晓鹏.基于降水量调配蓄电池的水利工程监测预警系统研究[J].工程技术研究,2022,7(19):148-150.
- [6] 姜卫平,梁娱涵,余再康,等.卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1625-1634.

作者简介:

吴明辉(1991—),本科,助理工程师,研究方向:水利信息化。