

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0141

刘明堂,田壮壮,齐慧勤,等.基于Kalman BP融合的南水北调高填方渠道渗漏监测模型研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):179-185. LIU M T, TIAN Z Z, QI H Q, et al. Research on leakage monitoring model for high filled canal of the Middle Route of South to North Water Diversion Project based on Kalman BP fusion network[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 179-185. (in Chinese)

基于 Kalman BP 融合的南水北调高填方渠道 渗漏监测模型研究

刘明堂, 田壮壮, 齐慧勤, 耿宏印, 刘雪梅

(华北水利水电大学 信息工程学院, 郑州 450045)

摘要: 针对目前南水北调中线工程高填方渠道渗漏监测设备综合误差大、不能监测渠道断面间渗漏等问题, 设计了一种可用于高填方渠道渗漏的可移动无损监测系统, 建立了高填方渠道渗漏状态监测的 Kalman BP 融合模型。首先构建一种基于无线传感网的多区域渗漏信息检测平台, 将传感器设计成便携式可移动的锥形设备, 对渗漏区域的温湿度、土壤含水率、GPS 位置信息以及渗流等信息进行实时采集, 再通过 ZigBee 和 GPRS 将多传感器信息进行无线传输; 并结合流场渗漏检测方法, 通过试验模型筛选出与高填方渠道渗流相关的特征变量; 使用卡尔曼(kalman)算法对关联的物理变量进行滤波和估值; 最后将多传感器数据通过 BP 神经网络进行渗漏状态模式识别, 实现渗漏的状态预测, 确定坡面渗漏安全级别。试验结果表明, 基于 Kalman BP 融合模型的高填方渠道渗漏监测模型识别误差较小, 达到能在整体上实时监测高填方渠段的渗流状态, 可实现南水北调中线工程高填方渠道断面间的坡面渗流非破坏性在线监测功能。

关键词: 南水北调中线工程; 高填方渠道; 渗漏监测; 卡尔曼滤波; BP 神经网络

中图分类号: TV 68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0179-07

Research on leakage monitoring model for high filled canal of the Middle Route of South to North Water Diversion Project based on Kalman BP fusion network

LIU Mingtang, TIAN Zhangzhang, QI Huiqin, GENG Hongyin, LIU Xuemei

(Department of Information Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: To solve the problems of the leakage monitoring equipment for high filled canals in producing large comprehensive error and being unable to monitor the seepage between canal sections, we designed a movable and non-destructive leakage monitoring system for the high filled canal of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project and established a fusion model based on Kalman BP for leakage monitoring of high filled canals. Firstly, we constructed a multi-zone leakage information detection platform based on wireless sensor network, and we designed the sensors as portable and movable cone devices that can be inserted into the soil. The information of temperature, humidity, soil water content, seepage, and GPS location was collected in real time and then was transmitted wirelessly through the ZigBee and GPRS. Using the flow field leakage detection method, we selected the characteristic variables that were relevant to high filled canal leakage through the experimental model. Then, we

收稿日期: 2017-12-06 修回日期: 2018-05-03 网络出版时间: 2018-07-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180725.1148.006.html>

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目计划(15A510003); 河南省科技攻关计划(172102210050); 水利部黄河泥沙重点实验室开放课题基金(2017001); 国家科技重大专项课题(2014ZX03005001); 河南省高等学校重点科研项目计划(14B170012)

Funds: Key Scientific Research Project of Henan Provincial Education Department (15A510003); Henan Province Science and Technology Research Program (172102210050); Open Research Fund of Key Laboratory of Sediments in the Yellow River of Chinese Ministry of Water Resources (2017001); National Science and Technology Major Project (2014ZX03005001); Key Scientific Research Project of Henan Provincial Education Department (14B170012)

作者简介: 刘明堂(1974), 男, 河南潢川人, 副教授, 主要从事水利信息技术、多源数据融合方面研究。E-mail: liumt99@163.com

used Kalman algorithm to filter and valuate the associated physical variables. Finally, we submitted the multi sensor data to the BP neural network for leakage state pattern recognition and realized the prediction of slope leakage state and determined the safety level of slope leakage. The experimental results showed that the Kalmar BP fusion model has smaller error in recognizing the leakage of the high fill canal, and can monitor in real time the leakage state between the canal sections. It can realize non destructive online monitoring of the slope seepage of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project.

Key words: Middle Route of South to North Water Diversion Project; high filled canal; leakage monitoring; Kalman filter; BP neural network

南水北调中线工程线路总长约 1 432 km, 大部分采用新开挖渠道输水^[1]。其中, 高填方渠段 139.5 km, 占总干渠长度的 11%, 而且有的高填方渠段最大填方高度达 25.5 m。由于南水北调中线工程中高填方渠段分布范围广、工程地质条件复杂、天气变化显著等原因, 其高填方渠道会出现整体或局部沉降、滑坡、冻胀、冰压等灾害^[2]。这些灾害均会造成填方衬砌面板开裂, 防渗体被拉断造成渗(漏)水。南水北调中线工程高填方渠段一旦失事, 势必给渠道两岸人民生命财产造成严重损失^[3]。

因此, 对高填方渠段进行渗漏检测就具有重大的研究意义和实用价值。然而, 南水北调中线工程目前尚无针对高填方段的专项安全监测设计方案^[4]。在南水北调中线工程施工中, 一般安装了以测压管和小量程渗压计为基础的渗流监测设备, 可对渠底扬压力、监测断面上的渗透压力分布以及对浸润线、渗流量、地下水水位和防渗墙防渗效果进行监测^[5-7]。但在已安装的渗流监测设备中, 大都是振弦式渗压计和测压管。其存在综合误差大等缺陷, 一般不适合于南水北调高填方段总水头变化较小的渗流监测; 且现有的渗流监测设备一般分布在监测站点的渠底或者渠道断面上, 采用埋入式或半埋入式安装, 不能灵活地实现可移动测量, 也不能实现高填方渠道断面间的坡面渗流监测。

目前, 可应用于高填方渠道渗漏检测的地球物理探测方法有电磁法^[8]、高密度电阻率法^[9-10]、分布式光纤^[11]、翻斗式容积法^[12]、温度场法^[13]、示踪法^[14]、电阻法^[15]等。无论流场法还是电场法通常都是只适用于现场的临时勘查, 有的检测方法还需要现场开挖破坏填方渠道。

本文将建立一种基于无线传感网的多区域渗流信息无损检测系统, 将温湿度传感器、土壤含水率传感器以及渗流检测电路设计成便携式设备, 进行可移动非开挖方式安装, 再通过 ZigBee 和 GPRS 进行多传感器信息采集与传输; 然后提取与渗流具有相

关性的环境变量, 进行渗漏信息的特征识别; 最后建立一种基于 Kalmar BP 融合的南水北调高填方渠道渗漏监测模型, 实现渠道断面间的坡面渗漏状态预测。

1 数据采集及无线传输设计

1.1 监测模型设计

为满足高填方渠段渗流监测的便携测量, 同时又不能开挖破坏的设计原则, 本文设计了基于无线传感网的多区域实时渗流信息监测系统模型。图 1 为高填方段坡面渗流监测布置示意图。ZigBee 协调器连接五个监测子节点, 再通过 GPRS 网络无线传输到监测室。

其中图 1 中 1 为高填方渠顶; 2 为渠坡; 3 为渠底; 4 为监测室; 5 为 ZigBee 监测点 1; 6 为 ZigBee 监测子节点 2; 7 为 ZigBee 监测子节点 3; 8 为 GPRS 监测节点; 9 为 ZigBee 监测子节点 4; 10 为 ZigBee 监测子节点 5。

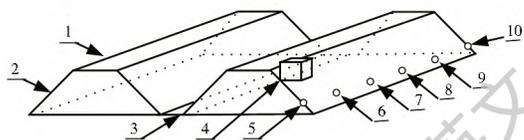


图 1 高填方坡面渗流监测示意图

Fig. 1 Leakage monitoring on high filled slope

1.2 信息采集节点设计

图 2 为基于 ZigBee 子节点的信息采集单元示意图。其传感器输入量有五个: 渗流电场的电极 A 和电极 B、温度场、土壤含水率和 GPS 位置信息。这五个输入量还需要通过数据融合处理, 根据多传感器检测量定性判断渗漏情况^[16]。

图 2 中, 1 为金属保护壳; 2 为电源模块; 3 为 GPS 模块; 4 为 ZigBee 模块; 5 为温度模块; 6 为渗流电阻; 7 为金属保护壳锥形尖部。金属保护壳锥形尖部可以很方便地插入到渠道坡面土壤里面或者安装在渠道交叉建筑物上, 实现了便携、可移动、无损检测功能。

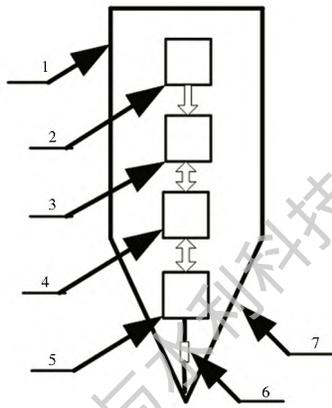


图2 ZigBee子节点采集示意图

Fig. 2 ZigBee sub node acquisition structure

1.3 无线传输设计

高填方渠段渗流监测平台的无线传输部分按照物联网架构设计,利用 ZigBee 无线通信网络实现近

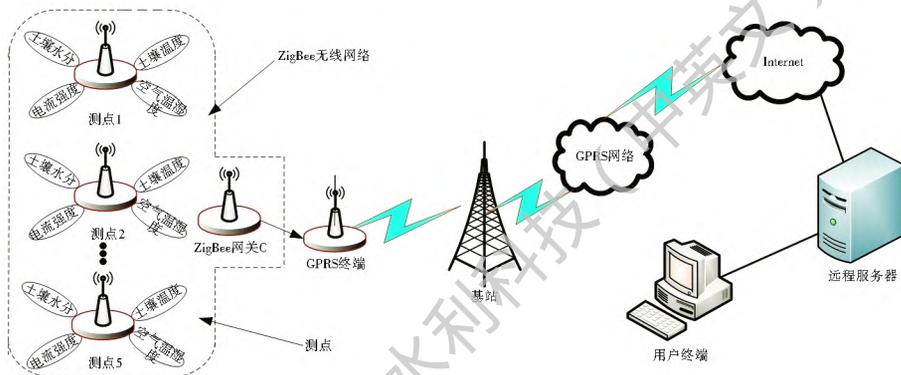


图3 渗漏监测系统整体示意图

Fig. 3 Schematic of leakage monitoring system

2 Kalman BP 融合模型建立

2.1 Kalman 数据预处理

数据预处理分为三部分:异常值的剔除、卡尔曼滤波和归一化处理,前两部分是为了提高数据的准确性,后一部分是为BP神经网络输入样本值做预处理^[17]。试验过程中由于测量仪器的干扰,导致测量数据出现一些明显的异常,剔除这些异常值便是首要任务。本文应用 3σ 准则剔除异常值,然后使用卡尔曼滤波算法对数据进行滤波,得出相对估计值^[18]。由于Kalman算法具有实时性滤波特点,其可在ZigBee芯片上直接运行,实现了采集系统的实时性要求。

卡尔曼(Kalman)滤波其实是一个最优状态筛选的过程,可以实现监测数据实时在线处理^[19]。Kalman方程式根据下面的五条Kalman最优滤波的基本公式进行描述(状态控制量为0)^[20]:

$$X(k|k-1) = AX(k-1|k-1) \quad (1)$$

距离无线传输,然后将数据再通过GPRS网络上传到web服务器端,实现数据的远程传输和存储。图3是一个区域的渗漏监测系统整体示意图。每个测点间距可设置50m左右,这些测点负责采集测点区域内和渗漏相关的传感器信息。各个独立的测点终端和协调器网关设备组成ZigBee无线网络;ZigBee无线网络选用CC2530芯片实现各个传感器信息的读取,同时进行卡尔曼(Kalman)滤波等数据预处理工作。每个ZigBee测点终端要采集温湿度、电流、含水率四类传感器,应用太阳能板供电。ZigBee无线网络中要布置一个协调器,其主要接收和集中ZigBee网络中其他节点上传的数据,同时其还需要将数据通过GPRS网络上传至远端服务器。故此协调器还要加上GPRS模块。GPRS模块选用SIM800C,其实现了数据的无线远程传输。

公式(1)是用于预测下一状态,其中 $X(k|k-1)$ 是利用上一状态预测的当前结果, $X(k-1|k-1)$ 是上一状态的最优结果,本文中无控制量,所以控制量为0, A 是系统系数。

$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A' + Q$ (2)
式中: $P(k|k-1)$ 是 $X(k|k-1)$ 对应的covariance; $P(k-1|k-1)$ 是 $X(k-1|k-1)$ 对应的covariance; A' 是 A 的转置矩阵; Q 是系统过程的covariance。

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K(k)(Z(k) - HX(k|k-1)) \quad (3)$$

公式(3)是计算 k 状态下最优估算值 $X(k|k)$, $Z(k)$ 是当前测量值, H 是测量系统的参数, $K(k)$ 是卡尔曼增益:

$$K(k) = P(k|k-1)H' / (HP(k|k-1)H' + R) \quad (4)$$

$$P(k|k) = (I - K(k)H)P(k|k-1) \quad (5)$$

公式中(5)中, I 为1的矩阵,对于单模测量 $I=$

1. 当系统进入 $k + 1$ 状态时, $P(k|k)$ 就是公式(2) 目可以根据经验选定 15 个。
 的 $P(k - 1|k - 1)$ 。这样算法就可以自回归的运算下去^[21]。

图 4 是试验中含水率特征量经过卡尔曼滤波之后的效果图,可以看出滤波之后的值明显比初始值平稳,滤波效果良好。其他特征量的初始值也进行同样的滤波处理。

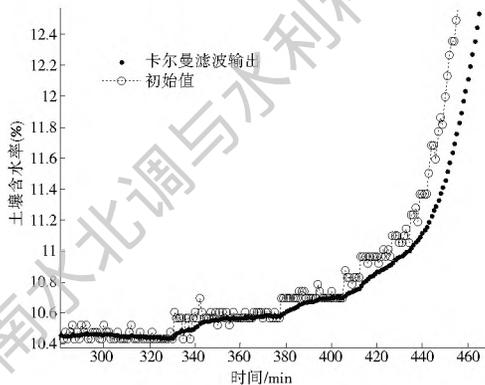


图 4 初值的卡尔曼滤波效果

Fig. 4 The Kalman filtering effect of the initial value

2.2 BP 网络的渗漏信息特征提取

本文应用了 BP 神经网络,用于渗漏信息的函数逼近、模式识别、分类等功能^[22]。BP 神经网络学习过程是由前向计算过程和误差反向传播过程组成。这两个过程反复进行,不断调整各层的权值和阈值,使得网络误差最小平方和或达到人们期望的要求,学习过程结束^[23]。BP 神经网络非线性映射可用下面公式描述:

$$Y_1 = f_1(\sum W_1 x_i - \theta_1) \quad (6)$$

$$Y_2 = f_2(\sum W_2 Y_1 - \theta_2) \quad (7)$$

式中: x_i 是网络输入变量; Y_1 是网络中间层输出; Y_2 是网络输出层; f_1, f_2 是网络传递函数; W_1, W_2 是神经元权重系数矩阵; θ 是神经元阈值。Kolmogorov 定理证明了一个 3 层的 BP 神经网络可以实现任意 m 维到 n 维的映射^[24-25]。本文将渗流电场的两路电极信息、温度场信息和土壤含水率信息进行状态编码,然后作为 BP 神经网络的四维输入量,再利用 BP 神经网络的映射能力,进行渗漏信息的特征提取与数据融合处理,根据多传感器检测量来实现定性判断渗漏情况。BP 神经网的网络拓扑见图 5。

实测工程中,系统将渗漏发生的整个过程分为三个时间段:第一阶段记为 $Y = [0, 0]$,这个阶段模型状态正常没有渗漏发生;第二阶段记为 $Y = [0, 1]$,此阶段开始发生渗漏但不明显;第三阶段记为 $Y = [1, 1]$,这一阶段渗漏现象很明显能够直接观察到。这样网络的输出是一个二维向量。隐藏层神经元数

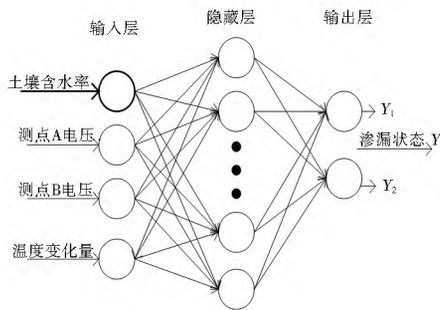


图 5 BP 神经网络拓扑图

Fig. 5 Topological diagram of BP neural network

2.3 kalmarr BP 融合模型

kalmarr BP 融合模型由卡尔曼滤波器和 BP 神经网络组成,如图 6 是模型的结构图。传感器输出值通过卡尔曼滤波器的入口 $Z(k)$ 进入模型,最终从 BP 神经网络的输出端 Y_2 输出。经卡尔曼滤波器处理后的序列估计值作为 BP 神经网络的一个输入神经元,对神经网络训练、检测,实现优化处理数据的效果。

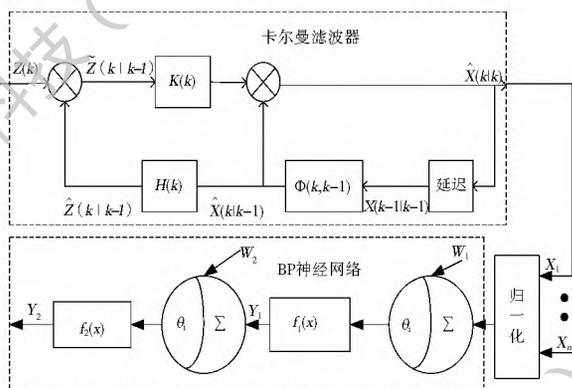


图 6 Kalmarr BP 神经网络模型

Fig. 6 Model of Kalmarr BP neural network

3 结果分析

3.1 传感器信息关联分析

理论上,当测点区域发生渗漏时,区域内电场发生变化电流强度会增强,温度场也会发生有升高趋势,同时土壤含水率变化明显。本文进行了渗流电场同温度场、土壤含水率等进行了关联分析试验,来验证它们间的关联关系,见图 7。

为了在同一坐标轴上表现关联特征量的变化趋势,这里对原始值做了归一化处理,从图 7 中可以看出四个特征量的整体变化趋势有明显的关联性。因此选取测点的电流强度、温度变化量和测点土壤含水率作为模型的监测量将有效地监测渠道渗漏状态,更具有可行性。

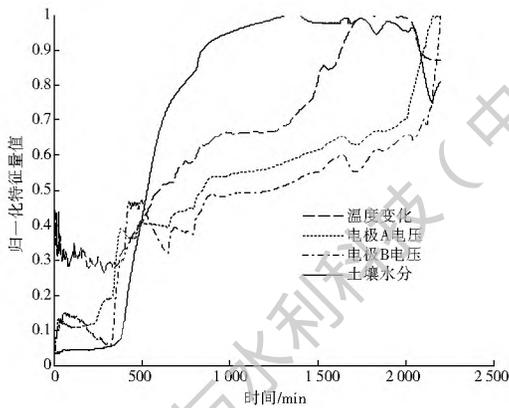


图 7 特征量变化趋势

Fig. 7 Trend of characteristic variables

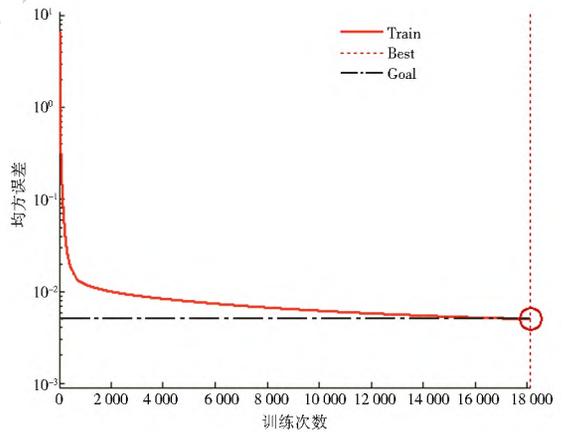


图 8 BP 神经网络训练效果

Fig. 8 Effect of BP neural network training

3.2 Kalman BP 训练模型效果分析

高填方渗漏渠道渗漏监测模型系统具有可行性,其检测的电流强度、温度变化量和测点含水率等特征量数据通过训练好的 BP 神经之后,能够较好地识别系统预先定义的渗漏状态模式。将实测所得的 2 557 组数据经过预处理之后按照约 6: 1 的比例分为训练数据集和测试数据集。通过试验尝试建立均方误差小的 BP 神经网络,图 8 是神经网络训练效果图,在设定训练误差值为 0.005 的情况下,2 198 组训练样本在 18 090 次训练之后达到预期误差值,说明建立的 BP 神经网络符合要求。当 BP 神经网络在上位机上训练好后,其就可以进行相应现场的渗漏预测工作,能达到高填方渠道渗漏实时性要求。

3.3 Kalman BP 渗漏预测误差分析

Kalman BP 融合模型建立好之后,利用 359 组测试样本对网络进行测试,验证其预测和识别的准确性。归一化之后的测试样本值在经过 BP 神经网络输出的状态向量 Y , 都能很好接近期望值,其中 $Y = [y_1, y_2]$ 。虽然有个别输出和期望输出偏差稍大,但是通过模糊聚类的知识依然可以将其归入正确的状态模式中。从整体上来说, Kalman BP 融合模型的实际输出值都能很好接近期望值,实现了高填方渠道渗漏实时监测功能。表 1 为 Kalman BP 渗漏预测误差分析表,其中,6 组样本是从 359 组测试样本中选取的,其中,各个传感器数据是已经归一化到 $[0, 1]$ 之间的数值。

表 1 渗漏状态预测结果

Tab. 1 Results of leakage prediction

编号	温度差 ΔT	测点 A 电压	测点 B 电压	含水率	实际 y_1	实际 y_2	期望 y_1	期望 y_2
1	0.3477	0.1154	0.2061	0.0437	0.0575	0.0375	0.0000	0.0000
2	0.3573	0.1112	0.1965	0.0440	0.0562	0.0244	0.0000	0.0000
3	0.3410	0.3400	0.3296	0.0641	0.0497	0.9103	0.0000	1.0000
4	0.3864	0.3760	0.5361	0.1685	0.1425	1.1026	0.0000	1.0000
5	0.6672	0.5398	0.6514	0.9228	0.9704	1.1616	1.0000	1.0000
6	0.6703	0.5417	0.6530	0.9247	0.9743	1.1642	1.0000	1.0000

4 结论

本文研究和设计了可用于南水北调中线工程高填方渠道渗漏实时监测模型,首先结合流场法渗漏检测原理,建立一种基于无线传感网的多传感器渗漏信息无损检测系统,进行数据采集和无线传输;然后使用卡尔曼(kalman)算法对关联的物理变量进行滤波和估值;最后将多传感器数据通过 BP 神经网络进行渗漏状态模式识别。试验和实测结果表明, kalman BP 融合模型实现了高填方渠道渗漏实

时监测功能,并能对监测区域的渗漏状态进行定性判断,达到能在整体上实时监测高填方渠段的渗流状态,可实现南水北调中线工程高填方渠道断面间的坡面渗流非破坏性在线监测功能。

参考文献(References):

[1] 汪易森. 南水北调中线工程几个技术问题的解决与思考[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 79-86. (WANG Y S. Consideration and solution of several technical problems of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 79-86. (in

- Chinese) DOI: 1000 0860(2015) 06 0079-08.
- [2] 李斌, 杨斌, 韦国虎, 等. 碾压施工质量实时监控系统在南水北调工程中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 30-33. (LI B, YANG B, WEI G H, et al. Application of real time monitoring system of roller compaction construction quality in South to North Water diversion project [J]. South to North Water diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(2): 30-33. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. I.1201.2012.02030.
- [3] 屈志刚, 申黎平, 李明新, 等. 南水北调中线工程高填方渠道加强措施探讨[J]. 人民长江, 2013, 44(16): 63-66. (QU Z G, SHEN L P, LI M X, et al. Effective reinforcement measures for high filled canal of Middle Route Project of South to North Water Diversion [J]. Yangtze River, 2013, 44(16): 63-66. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-179.2013.16.025.
- [4] 崔岗, 陈俊生, 王丽丽. 南水北调高填方段渗流监测设计方案[J]. 西部探矿工程, 2013, 25(2): 39-41. (CU G, CHEN J S, WANG L L. Design scheme of seepage monitoring in high fill segment of South to North Water Transfer Project [J]. Western Exploration Engineering, 2013, 25(2): 39-41. (in Chinese)) DOI: 1004-5716(2013)02-0039-0.
- [5] 赵逊, 兰卿良, 王永亮. 南水北调中线工程安全监测专业化管理研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 334-336. (ZHAO X, LAN Q L, WANG Y L. Study on specialized management to engineering safety monitoring in the Middle Route of the South to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 334-336. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2008.01.085.
- [6] 吴少华, 焦康, 薛伟. 南水北调中线干线工程安全监测自动化系统[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 140-143. (WU S H, JIAO K, XUE W. A simple analysis of the monitoring automation system of South to North Water Diversion Middle Route Project safety [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(9): 140-143. (in Chinese)) DOI: 1007-2284(2012)09-0140-04.
- [7] 陈俊生, 刘春征. 南水北调中线一期工程总干渠第 0 渠段第 4 设计单元安全监测设计[J]. 西北水电, 2011(B09): 15-18. (CHEN J S, LIU C Z. Safety monitor design of the fourth unit of Huanghebei Youhebei section of the middle route of south to north water diversion project. [J]. Northwest Hydropower, 2011(B09): 15-18. (in Chinese)) DOI: 1006-2610(2011)D1-0015-04.
- [8] 蔡运胜, 张宝华. 几种电法仪器在地质勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2006, 42(5): 72-78. (CAI Y S, ZHANG B H. The application of a few electrical method instruments in geologic prospecting [J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(5): 72-78. (in Chinese)) DOI: 0495-5331(2006)05-0072-07.
- [9] 胡雄武, 张平松, 江晓益. 并行电法在快速检测水坝渗漏通道中的应用[J]. 水利水电技术, 2012, 43(11): 51-54. (HU X W, ZHANG P S, JIANG X Y. Application of parallel electric survey to quick detection of seepage passage through reservoir dam [J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2012, 43(11): 51-54. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2012.11.016.
- [10] 马若龙, 毋光荣, 周锡芳. 高密度电法和自然电位法在某水库大坝渗漏探测中的应用[J]. 大坝与安全, 2015(6): 55-58. (MA R L, WU G R, ZHOU X F. Application of high density resistivity method and spontaneous electric field method in leakage detection of a dam [J]. Dam and Safety, 2015(6): 55-58. (in Chinese)) DOI: 1671-1092(2015)06-0055-04.
- [11] 蒋力, 周柏兵, 徐国龙, 等. 基于分布式光纤技术的渗流监测试验探论[J]. 大坝与安全, 2015(5): 32-36. (JIANG L, ZHOU B B, XU G L, et al. Research of seepage monitoring test based on distributed optical fiber temperature sensing technology [J]. Dam and Safety, 2015(5): 32-36. (in Chinese)) DOI: 1671-1092(2015)05-0032-05.
- [12] 唐智德, 王绍旭, 文春龙. 青狮潭水库大坝渗漏观测分析及评价[J]. 2016, (11): 107-111. (TANG Z D, WANG S X, WEN C L. Analysis and evaluation of dam leakage in Qingshan Reservoir [J]. Water Resources Planning and Design, 2016, (11): 107-111. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2016.11.035.
- [13] 付长静, 李国英, 陈亮, 等. 利用温度场计算渗透流速的数学模型[J]. 水利水电工程学报, 2015(6): 88-93. (FU C J, LI G Y, CHEN L, et al. A mathematical model for calculating penetration velocity using temperature field [J]. Hydro Science and Engineering, 2015(6): 88-93. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.013.
- [14] 张茜, 陈建生, 董海洲, 等. 示踪法测定井中渗透流速的广义稀释模型研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10): 126-130. (ZHANG X, CHEN J S, DONG H Z. Research for determining permeability velocity in wells in generalized dilution model by tracer method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(10): 126-130. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20150662.
- [15] HIMI M, CASADO I, SENDROS A, et al. Using the resistivity method for leakage detection at Sant Lloren de Montgai embankment (Lleida, NE Spain) [C]//Near Surface Geoscience 2016 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 2016. DOI: 10.3997/2214-4609.201601925.
- [16] KHALEGI B, KHAMIS A, KARRAY F O, et al. Multisensor data fusion: A review of the state of the art [J]. Information Fusion, 2013, 14(1): 28-44. DOI: 10.1016/j.inffus.2011.08.001.
- [17] SHIVASHANKARAPPA N, ADIGA S, AVINASH R A, et al. Kalman filter based multiple sensor data fusion in systems with time delayed state [C]//Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2016 3rd International Conference on. IEEE, 2016: 375-382. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566723.
- [18] 汪华斌, 徐瑞春. 神经网络在鱼洞河滑坡稳定性评价中的应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(4): 62-65. (WANG H B, XU R C. Application of BP artificial neural network on stability evaluation of Yudongde landslide [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(4): 62-65. (in Chinese)) DOI: 1001-5485(2002)04-0062-03.
- [19] 刘佳佳, 彭鹏. 基于 Kalman 滤波融合算法的某坝基水平位移

- 分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(3): 110-114. (LIU J J, PENG P. Analysis of dam foundation horizontal displacement based on kalman filter fusion algorithm[J]. Journal of Zhengzhou University (Science Engineering Science), 2010, 31(3): 110-114. (in Chinese) DOI: 1671-6833(2010)03-0110-05.
- [20] SISWANTORO J, PRABU WONO A S, ABDULLAH A, et al. A linear model based on Kalman filter for improving neural network classification performance[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 49: 112-122. (in Chinese) DOI: 10.1016/j.eswa.2015.12.012.
- [21] 蒋恩松, 李孟超, 孙刘杰. 一种基于神经网络的卡尔曼滤波改进方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 4-6. (JIANG E S, LI M C, SUN L J. An improved method of kalman filter based on neural network[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(9): 4-6. (in Chinese) DOI: 1009-5896(2007)09-2073-04.
- [22] HE W, WILLIARD N, CHEN C, et al. State of charge estimation for Li ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 783-791. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.059.
- [23] 陈善广, 鲍勇. BP 神经网络学习算法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(4): 437-442. (CHEN S G, BAO Y. Studies on learning algorithms for BP Net[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(4): 437-442. (in Chinese) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.1995.04.012.
- [24] 张群, 许强, 吴礼舟, 等. 南江滑坡群体积的 BP 神经网络模型与预测[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 134-139. (ZHANG Q, XU Q, WU L Z, et al. BP neural network model for forecasting volume of landslide group in Nanjing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2015, 42(1): 134-139. (in Chinese) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.01.23.
- [25] 李朋丽, 田伟平, 李家春. 基于 BP 神经网络的滑坡稳定性分析[J]. 广西大学学报, 2013, 38(4): 905-911. (LI P L, TIAN W P, LI J C. Analysis of landslide stability based on BP neural [J]. Journal of Guangxi University, 2013, 38(4): 905-911. (in Chinese) DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2013.04.003.

(上接第 164 页)

- [15] 杨渠锋, 王平义, 俞涛, 等. 三峡库区陡岩滑坡涌浪爬高试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 43-48, 55. (YANG Q F, WANG P Y, YU T, et al. Experimental research on dangerous rock type landslide sur up of the river channel type reservoir in mountainous area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 43-48, 55. (in Chinese) DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2014.03.037.
- [16] 陈里. 山区河道型水库岩体滑坡涌浪特性及对航道的影响试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (CHEN L. Experimental study on characteristics of rock type landslide surge and impact for navigable conditions of the river channel type reservoir in mountainous area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese))
- [17] 郝建娟, 门永强, 王平义, 等. 山区河道型水库陡岩滑坡涌浪首浪试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014(03): 672-675. (HAO J J, MENG Y Q, WANG P Y et al. Experimental research on dangerous rock type landslide surge primary wave height of the river channel type reservoir in mountainous area[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014(03): 672-675. (in Chinese) DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.03.046.
- [18] 蔡晓禹. 波浪对三峡库区路基边坡的侵蚀作用及边坡坍塌破坏试验研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2004. (CAI X Y. Study on the wash out and cave in method of roadbed slopes by wave in Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004. (in Chinese))
- [19] 徐绩青. 波浪对斜坡作用力的研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2005. (XU J Q. Study on the wave force on the slope[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [20] 李建习. 风浪作用下库岸动力响应及稳定分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008. (LI J X. The Wind wave induced dynamic response in bank of reservoir and it, s analysis on stability [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008. (in Chinese))