

水工机械装备系统监测点传感器优化分配研究

王茂^{1,2}, 张钰奇^{1,2}, 王童童^{1,2}, 张聪^{1,2}, 郑艳萍¹

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 河南郑州 450001; 2. 河南省智能制造研究院, 河南郑州 450001)

摘要: 监测水工机械装备系统的运行状态对水利设施发挥防洪、灌溉、水资源调度等功能具有重要意义。针对现有监测方案往往只针对单一传感器或单一结构, 缺乏对整体系统监测点传感器优化分配方案研究的问题。依据典型水工弧形闸门及启闭机设备常见故障类型构建层次模型, 建立其监测点传感器优化分配评价指标, 采用模糊层次分析法(FAHP)对指标赋权, 最终确定水工机械装备系统监测点传感器优化分配方案。结果表明: 所提方案适用于水工机械装备系统的监测点传感器分配的应用场景, 为水工机械装备系统结构健康监测提供理论依据, 避免系统整体传感器布局的盲目性, 相比传统传感器优化布置方案具有一定的全局性与可行性。

关键词: 水工机械装备; 弧形闸门; 启闭机; 模糊层次分析法; 监测点优化分配

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0145-06

Optimal allocation of sensors at the monitoring points of hydraulic machinery and equipment systems

WANG Mao^{1,2}, ZHANG Yuqi^{1,2}, WANG Tongtong^{1,2}, ZHANG Cong^{1,2}, ZHENG Yanping¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Institute of Intelligent Manufacturing, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Water conservancy facilities play an important role in the flood control, irrigation and water resources scheduling, monitoring the operating status of the hydraulic machinery and equipment systems in these facilities is of great significance. Currently, the existing monitoring schemes usually target at a single sensor or a single structure, lacking of the research on the optimal allocation of sensors at the monitoring points of the overall system. Here, we constructed a hierarchical model based on the common fault types of typical hydraulic radial gates and hoists. With this model, evaluation indices of the optimal allocation of monitoring point sensors were discussed, and then their individual weights were assigned using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), finally the optimal allocation scheme of sensors at the monitoring points of the hydraulic machinery and equipment system was determined. The results show that the proposed scheme is suitable for the application scenario of sensor allocation at monitoring points of the hydraulic machinery and equipment system. This study can provide a theoretical basis for the structural health monitoring of hydraulic machinery and equipment systems. The proposed scheme can avoid blindness in the overall sensor layout of the system, it is more holistic and feasible compared to the conventional schemes.

Key words: hydraulic machinery and equipment; radial gate; hoist; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); optimal allocation of monitoring points

1 研究背景

水工机械装备担负着防洪、抗旱、引水发电等重

任, 在水利水电工程中占据重要地位, 倘若发生故障或失效, 将造成极大的损失, 且严重影响人民群众的生命和财产安全。然而, 传统的原型观测手段并不

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-04-25

基金项目: 国家工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2018037); 河南省水利厅水利科技攻关项目(GG202068)

作者简介: 王茂(1996-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为水工金属结构。

通讯作者: 郑艳萍(1975-), 女, 河南洛阳人, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水工金属结构。

能充分表达水工金属结构长期工作以来的实际工作状态和安全状况。因此,针对水工机械装备的结构健康监测(SHM)以及远程运行维护(ROM)显得至关重要^[1]。

水工结构健康监测(SHM)及远程运行维护(ROM)系统的部署离不开对传感器的合理配置。近年来,对于传感器优化布局 and 系统可监测性的探索,国内外学者进行了大量卓有成效的研究工作。Jia等^[2]使用猴群算法对三轴加速度传感器进行优化布局,并将这种方法应用到大连星海一号大桥,验证了这种方法的有效性。Mahdavi等^[3]利用自适应小波函数对基于遗传算法的适应度评价方法进行了改进,提出了一种基于小波的遗传算法优化传感器配置策略。周硕等^[4]针对传感器优化布置,创新性地提出了一种基于深度神经网络的优化方法,并以桁架结构中振动传感器的优化布置为例,验证优化方法的可行性。Lin等^[5]通过对大坝监测数据的分析,将环境和噪声干扰从监测数据中分离,在此基础上建立更为有效的监测模型,提高了监测性能。Liu等^[6]针对大坝安全监测系统不稳定和监测值漂移,提出一种结合灰度理论、反向传播神经网络和遗传算法的大坝安全自我诊断系统,这一模型相比单一故障诊断模型能够提高故障预测精度,更好地实现在线监测与故障诊断。卢剑华^[7]提出水工金属设备实时在线监测的必要性,并根据事故原因,分析了水工闸门和启闭机的监测内容和监测点布置方法。严新平等^[8]、陈雪云^[9]、张新智^[10]提出了可监测性设计理论,构建出可监测性设计系统理论框架,同时对监测点的合理分配方法进行了研究。

上述研究为机械系统结构监测点合理分配提供了理论依据,其研究方法对传感器的优化布局具有一定效果,然而现有绝大部分的传感器优化布局方法仅针对机械系统中的某一结构或某一种传感器展开定性分析,对于总体机械系统上的传感器监测点的分配具有一定的盲目性。正因如此,研究水工机械装备系统整体可监测水平,合理优化监测点分配,对了解系统整个运行期范围内的状态性能具有重要意义。

目前,对机械系统监测点合理分配方案的研究越来越多,但对于水工机械装备系统,尤其是水工钢闸门及启闭设备的监测点传感器优化分配相关的研究相对较少。

鉴于此,本文针对水工机械装备系统中最为重要的闸门及启闭设备所面临的监测点传感器合理分

配问题进行研究,通过采用模糊层次法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)的综合评价手段,最终得到监测点传感器优化分配的合理应用方案。

2 水工机械装备层次分析与结构层次模型的建立

在水工机械装备中,弧形闸门通常采用液压启闭设备进行驱动,从而达到排水、截止水流、发电、灌溉、调节水位的作用,水工弧形闸门及其启闭系统示意图如图1所示。本文主要以水工机械装备中应用较为广泛的弧形闸门和液压启闭机为例^[11],对其进行全面的层次结构建模与分析。

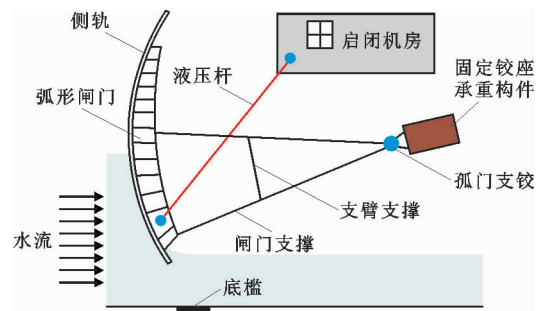


图1 水工弧形钢闸门与启闭设备示意图

该机械系统由闸门、埋设构件、液压启闭机3个子系统构成。水工闸门及启闭机常见的故障原因有:闸门支臂失稳、闸门面板焊缝开裂、闸门主横梁和主纵梁弯曲、支铰磨损、止水装置破损、液压启闭机不能正常工作等^[12-15]。根据以上常见故障和闸门启闭机的基本结构及可靠度分析建立其层次结构模型,如图2所示。

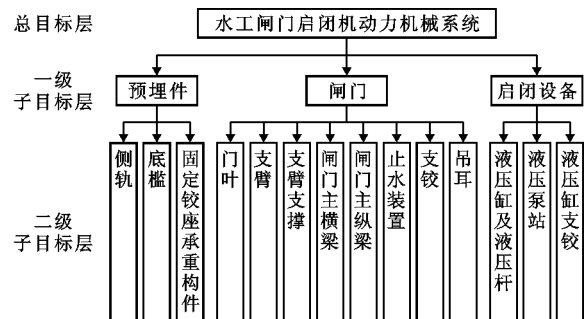


图2 水工弧形闸门及其启闭系统层次结构模型

3 评价指标因素的确定与分析

为了能够对闸门启闭机系统实行更加准确有效的监测,本文以系统的可靠性、在各种情况下的安全性、使用和维护的经济性、可监测性以及可维修性等

原则为基础,结合专家评分确定监测项目指标因素^[16]。其中:

(1)可靠性包括:失效对闸门启闭机系统功能的影响,该部分失效的频率。

(2)安全性包括:系统失效对水电站工作人员和流域安全的影响。

(3)经济性包括:维修费用和系统停机造成的损失。

(4)可监测性:监测的可实行性。

(5)可维修性:维修的难易程度。

上述评价指标因素的评分和等级划分根据该机械系统的实际运行情况和专家评分决定,并可以根据后续的数据反馈不断进行修正,使该评分系统适用性更强。

(1)失效对闸门启闭机系统功能的影响(SF):这一指标因素是针对系统运行过程中,系统的突然失效对系统的整体功能造成的不良影响的评价,分为有备用系统和无备用系统两种情况;

(2)闸门及启闭机系统失效对安全的影响(PS):该指标因素主要考虑系统对安全性的影响,包括人员安全和财产安全保障,也分为两种工况:水位低于等于常水位、水位高于常水位;

(3)监测的可实行性(M):想要了解闸门启闭

机系统的运行情况,可以在闸门启闭机的适当位置上安装相应的传感器,对系统运行情况进行监测,但是由于资金和传感器类型及安装方式的限制,以及避免影响系统正常运行的考虑,往往不能在所有位置上安装传感器。因此需要精简传感器的安装,同时保证安装传感器的有用和高效;

(4)系统停止运行造成的损失(OC):损失包括系统不能正常运行,影响灌溉、防洪、航运、发电等所有经济损失;

(5)失效频率(FF):在评价指标中失效频率指的是水工闸门启闭机系统某一部分的失效的频繁程度,与故障率有关,可以根据历史数据和现场人员工作经验等确定;

(6)维修费用(MC):维修费用指标是对维修过程中所需的购买产品的费用,包括运输费和人工费用(安装费用、调试费用、咨询费用等)等一系列费用的总和的度量;

(7)维修的难易程度(D):维修时在空间环境上是否容易进行,进入所要维修部分的危险程度,如高空作业、井下作业、水下作业、带电作业,还包括在维修时所需物品的供应难易程度、维修时对专业技术人员的技能要求以及维修时间的长短。

指标评分等级与标准如表 1 所示。

表 1 水工闸门启闭机系统评价指标评分表

指标	等级	评分
SF		60/50/30/20/10(有备用闸门系统) 100/90/70/50/30(无备用闸门系统)
PS	高、较高、中、一般、低	80/60/40/10/0(水位≤常水位) 100/80/60/20/10(水位>常水位)
M		70/60/40/20/0(监测费用较低) 100/80/60/40/20(监测费用高)
OC		100/80/60/30/10
FF、MC、D		100/80/50/30/10

表 1 表示各个指标在两种情况下等级评分情况,其中 OC、FF、MC、D 只有一种情况。各评价指标的评分分数在实际运用过程中可以根据后续的反馈来不断修正,以得到更为准确的评价结果。根据表 1 建立水工闸门启闭机系统重要度评价体系,如图 3 所示。

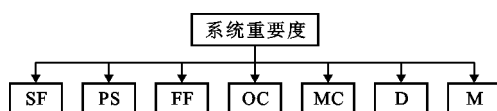


图 3 水工闸门启闭机系统重要度评价体系

4 确定评价指标权重及重要度

采用模糊层次分析法确定权重^[17-21],可以将定

性与定量分析相结合,减少人为主观因素的影响,使主观判断和客观判断差异减小,使结果更准确。由于水工闸门启闭机系统相对复杂,指标权重直接影响最终结果,因此采用模糊层次分析法确定权重。首先要对系统重要度评分中的同一层各个指标因素进行两两比较,将比较结果转化为定量分析,本文采用 0.1~0.9 的标度法进行两两比较数量标度,评价指标重要度取值如表 2 所示。

4.1 建立模糊判断一致矩阵

对评价因素进行两两比较,根据表 2 确定的评价尺度确定其相对重要程度。则模糊判断矩阵 R 可以表达为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表2 水工闸门启闭机系统评价指标重要度取值表

标度 (r_{ij})	定义	含义
0.5	一样重要	两指标同样重要
0.6	稍微重要	一个指标稍比另一指标重要
0.7	明显重要	一只表显然比另一指标重要
0.8	很重要	一个指标比另一个指标重要的多
0.9	极其重要	一指标重要程度远超另一个指标
0.1~0.4	转变比较方向	如果指标 B_1 和 B_2 相比较得到的标度为 r_{ij} , 则反过来指标 B_2 和 B_1 比较得到的标度为 $1 - r_{ij}$

模糊判断矩阵是根据人的判断来构造的,但因为个人对于一个复杂问题的看法可能缺乏全局性,构造出的矩阵可能缺乏一致性,因此通过一致性检验对模糊判断矩阵进行改进。

判断模糊判断矩阵是否为模糊一致矩阵的判断步骤如下:

(1) R 为模糊互补矩阵, $0 \leq r_{ij} \leq 1$, $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5$ ($i, j, k = 1, 2, \dots, n$)。

(2) 矩阵任意两行的对应元素之差为常数。

如果模糊判断矩阵不符合判断要求,则需要将其转变为模糊一致判断矩阵。采用如下方法求该矩阵的行和为:

$$p_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

建立优先关系矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: $p_{ij} = (p_i - p_j) / 2n + 0.5$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 即可得出模糊一致判断矩阵。

4.2 确定权重

计算求出模糊一致判断矩阵的特征向量,采用单层权重公式,然后对其进行归一化处理,即可以求出各评价指标因素的相对权重 w_i^* 。

$$w_i^* = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: n 为 R 的阶数; $a = (n - 1) / 2$ 。

归一化处理得到权重:

$$w_i = \frac{w_i^*}{\sum_{i=1}^n w_i^*} \quad (5)$$

即可确定各指标因素的权重 w_i 。

4.3 计算重要度

闸门启闭机机械动力系统的各部分重要度评分 P 用线性加权数学模型来确定:

$$P = \sum_{i=1}^D m_i w_i \quad (6)$$

式中: P 为各系统重要度评价分数; m_i 为系统中各部分在各评价因素下的评分; w_i 为各评价因素的权重, $i = (\text{SF}, \text{PS}, \text{FF}, \text{OC}, \text{MC}, \text{D}, \text{M})$ 。

对系统各部分的重要度评分进行排序,按照排序的先后顺序以及现场情况,结合监测实施的难易程度和所需经费确定应该优先监测的监测项目,后根据监测内容,选择合适的传感器,制定合理的监测方案。

5 工程案例分析

某水库的溢洪道工作闸门为露顶式弧形闸门,主要材料为 Q345B, 闸门垂直高度 12 m, 宽 10.5 m, 最高挡水位 323 m, 闸门数为 3 个, 启闭条件为动水启闭, 最大溢洪量 38 010 m³/s, 溢洪道全长 435 m。闸门启闭机为液压启闭机, 最大启闭力为 2 × 1 250 kN, 闭门方式为自重闭门, 工作行程为 6.5 m。经过现场调研和测量数据, 发现闸门涂层良好, 但存在漏水情况, 部分构件有应力过大情况, 闸门启闭机存在少量漏油情况。

5.1 确定指标因素权重

根据表 1、2 的标度邀请相关专家和现场工作人员, 对指标因素的相对重要性进行打分, 构造 7 个指标因素的两两比较模糊判断矩阵。根据打分得到的模糊判断矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.6 & 0.9 \\ 0.6 & 0.5 & 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.8 \\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.6 & 0.6 \\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.7 \\ 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.3 & 0.6 & 0.5 & 0.6 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

采用上文方法将该模糊判断矩阵 R 变为模糊一致矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.4714 & 0.5857 & 0.5714 & 0.6143 & 0.5929 & 0.6643 \\ 0.5286 & 0.5000 & 0.6143 & 0.6000 & 0.6429 & 0.6214 & 0.6929 \\ 0.4143 & 0.3857 & 0.5000 & 0.4857 & 0.5286 & 0.5071 & 0.5786 \\ 0.4286 & 0.4000 & 0.5143 & 0.5000 & 0.5429 & 0.5214 & 0.5929 \\ 0.3857 & 0.3571 & 0.4714 & 0.4571 & 0.5000 & 0.4786 & 0.5500 \\ 0.4071 & 0.3786 & 0.4929 & 0.4786 & 0.5214 & 0.5000 & 0.5714 \\ 0.3357 & 0.3071 & 0.4214 & 0.4071 & 0.4500 & 0.4286 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

通过计算得到监测项目各指标因素归一化之后的权重为:

$$w = (0.1667, 0.1762, 0.1381, 0.1429, 0.1286, 0.1357, 0.1119)$$

即可得出 7 个指标因素(失效对闸门启闭机系统功能影响、失效对工作人员和流域内安全的影响、失效频率、停机损失、维修费用、维修的难易程度、监测的可实行性)的权重依次为:0.1667,0.1762,

0.1381,0.1429,0.1286,0.1375,0.1119。之后通过对系统内各部分历史运行情况调研并向现场专家和工程人员咨询等方式,对闸门及启闭系统的各部分在指标下进行打分,经过与以往采用的专家打分法相比,由于获取权重的一致性,本方案可在一定范围内专家意见不一致的情况下得出一致性结论,而不需要获取更多专家打分才能获取更加可靠一致的结论。专家打分表如表 3 所示。

表 3 水工闸门及启闭系统专家打分表

评价 指标	预埋件			闸门						启闭设备				
	侧轨	底槛	固定铰座 承重构件	门叶	支臂	支臂 支撑	闸门 主横梁	闸门 主纵梁	止水 装置	支铰	吊耳	液压缸及 液压杆	液压 泵站	支铰
SF	20	20	60	60	60	60	60	60	20	60	60	60	60	60
PS	40	10	80	60	80	80	80	80	10	80	60	80	80	80
FF	50	50	10	10	10	10	10	10	50	10	10	30	30	10
OC	30	30	80	80	100	80	80	80	30	80	80	80	80	60
MC	10	10	50	50	50	50	50	50	10	30	10	30	30	30
D	30	30	50	80	80	80	50	50	30	50	30	50	50	50
M	60	60	20	60	60	60	60	60	60	40	60	40	60	40

结合各评价指标权重,根据公式(6)计算闸门每部分各自的重要度,按照重要度的大小进行排序依次为:支臂、支臂支撑、闸门面板、液压泵站、闸门主横梁、闸门纵梁、液压缸及液压杆、固定铰座承重构件、闸门支铰、液压缸支铰、吊耳、侧轨、止水装置、底槛,结果如图 4 所示。

5.2 监测方案

根据闸门各部位的重要度和历史故障发生情况,选择合适的传感器实施监测,其水工闸门启闭机系统监测点优化分配方案如表 4 所示。

从图 4 中重要度评价结果可以直观地看出,侧轨、底槛及止水装置重要度评价分数较低,布设方案可结合现场情况采用人工巡检方式监测。同时,对于重要度较高的液压泵站监测点,由于存在显示设备仪表,因此无需布置传感器。

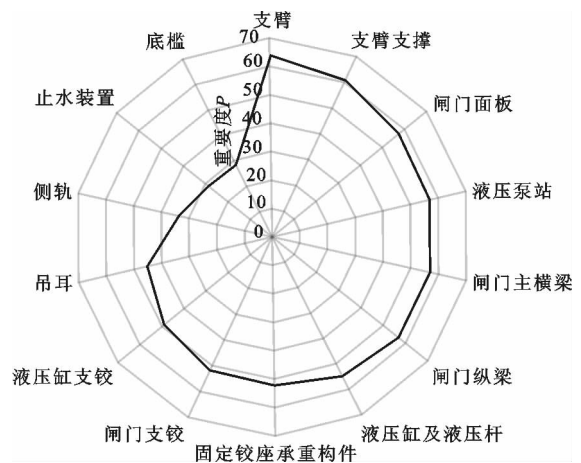


图 4 水工闸门启闭机系统重要度评价图

由于环境因素对水工机械装备系统有较大影响,因而本方案综合考虑环境变量因素布设相应传

传感器。表4所给出的水工闸门及启闭系统监测点传感器优化分配方案对于水工机械装备系统具有普遍

的适用性,也为后续水工机械装备的具体传感器类型优化布置奠定了基础。

表4 水工闸门及启闭系统监测点传感器优化分配方案

设备	监测部位	监测内容	监测方法	说明
闸门	闸门面板	应力、腐蚀、裂纹	应变传感器、声发射传感器、腐蚀传感器	监测受力、运行姿态和面板完整性
	支臂	应力、振动、倾斜角度	应变传感器、加速度传感器、倾角传感器	监测振动、受力、运行姿态
	支臂支撑	应力	应变传感器	监测受力情况
	主横梁	应力	应变传感器	监测受力情况
	主纵梁	应力	应变传感器	监测受力情况
	闸门支铰	裂纹、磨损	声发射传感器	监测支铰轴承故障
	吊耳	应力	应变传感器	监测受力情况
启闭设备	液压缸支铰	裂纹、磨损	声发射传感器	支铰轴承故障
	液压缸及液压杆	液压缸内活塞位移、闸门开启状态	位移传感器、应变传感器	监测两侧液压缸同步情况、闸门开度、启闭力等
其他		温度	温度传感器	
		风速	风速传感器	
		水文	液位、流速传感器	
		设备运行状况、密封情况等	视觉传感器	

6 结 论

(1)本文所采用的水工闸门启闭系统监测点传感器优化分配方法相比专家打分法,其权重的获取具有一致性,将指标权重与闸门各部分重要度相结合,得到一致客观的评价结果,通过实际案例证明该方法简单有效,能够得到合理的监测点传感器优化分配方案。

(2)根据本文所提方案,针对水工弧形闸门的面板、支臂、主纵横梁及启闭机液压泵站等关键部位的应力、裂纹、腐蚀、磨损、倾角等情况进行了重点监测,以确保闸门及启闭机设备的正常运行。

(3)在水工结构工程应用中,将本文所提出的监测点传感器优化分配方案与特定类型传感器优化布置相结合,可以在有限造价内完成传感器的精确布置,并对重点对象进行有效监测,实现水工机械装备的结构健康监测(SHM)和远程运行维护(ROM)。

参考文献:

- [1] 李林. 水工金属结构设备实时在线监测系统运用及智能管控研究[J]. 水力发电, 2019, 45(3): 99-103.
 [2] JIA Jinqi, FENG Shou, LIU Wei. A triaxial accelerometer

- monkey algorithm for optimal sensor placement in structural health monitoring[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(6): 065104.
 [3] MAHDAVI S H, RAZAK H A. Optimal sensor placement for time-domain identification using a wavelet-based genetic algorithm[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(6): DOI:10.1088/0964-1726/25/61.
 [4] 周硕, 余龙, 吴子燕, 等. 基于深度学习的传感器优化布置方法[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 719-724.
 [5] LIN Cheng, DONG Jianzheng. Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect[J]. Advances in Engineering Software, 2013, 57: 48-56.
 [6] LIU Haifeng, REN Chao, ZHENG Zhongtian, et al. Study of a gray genetic BP neural network model in fault monitoring and a diagnosis system for dam safety[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(1): DOI: 10.3390/ijgi 7010004.
 [7] 卢剑华. 实时在线监测工程在水利水电工程金属结构设备的应用[J]. 红水河, 2020, 39(5): 41-47.
 [8] 严新平, 张月雷. 机械系统可监测性设计理论研究及典型应用[J]. 中国机械工程, 2012, 23(24): 2903-2912.
 [9] 陈雪云. 机械系统可监测性设计理论研究[J]. 科技传播, 2014, 6(7): 90+88. (下转第157页)

- Ecological Engineering, 2012, 44:314 – 328.
- [9] 赵尚飞,杜彦良,王瑜,等. 松花江梧桐河生态修复工程鱼类栖息地模拟及调查[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(5):1 – 8.
- [10] 侯基,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2):8 – 12 + 20.
- [11] MANSOR M I, MOHAMMAD – ZAFRIZAL M Z, NUR – FADHILAH M A, et al. Temporal and spatial variations in fish assemblage structures in relation to the physico-chemical parameters of the Merbok Estuary, Kedah[J]. Journal of Natural Sciences Research, 2012, 2(7):110 – 127.
- [12] WU Wei, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. Assessment of ecosystem health based on fish assemblages in the Wei River basin, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(6):3701 – 3716.
- [13] 陈昌春,王腊春,姚鑫,等. 赣江流域大(I)型水库工程影响下的枯水变异研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(9):1 – 6 + 11.
- [14] 闵倩,蒋亚萍,陈余道. 定量分析青狮潭水库对漓江生态环境的影响[J]. 水文, 2012, 32(6):47 – 51.
- [15] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2018, 34(6):24 – 32.
- [16] 李建,夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6):678 – 684.
- [17] 蒋红霞,黄晓荣,李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5):141 – 147.
- [18] 常留红,徐斌,张鹏,等. 深水航道整治丁坝群对鱼类生境的影响[J]. 水利学报, 2019, 50(9):1086 – 1094.
- [19] SONG Xinxin, ZHUANG Yanhua, WANG Xuelei, et al. Combined effect of Danjiangkou Reservoir and cascade reservoirs on hydrologic regime downstream[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(6):05018008.
- [20] 吴青怡,曹振东,付世建. 鳊鱼和宽鳍鱮幼鱼流速选择与运动能量代谢特征的关联[J]. 生态学报, 2016, 36(13):4187 – 4194.
- [21] YANG Baiheng, DOU Ming, XIA Rui, et al. Effects of hydrological alteration on fish population structure and habitat in river system: A case study in the mid-downstream of the Hanjiang River in China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23:e01090.
- [22] 王青. 变化条件下黄土塬地区水文形势演变及其生态效应评估[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [23] 门宝辉,林春坤,李智飞,等. 永定河官厅山峡河道内最小生态需水量的历时曲线法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2):52 – 56 + 92.
- [24] 杨庆,胡鹏,杨泽凡,等. 草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4):93 – 100.

(上接第150页)

- [10] 张新智. 浅析机械系统可监测性设计理论[J]. 价值工程, 2013, 32(24):32 – 33.
- [11] 郝楠楠,韩刚,滕楷. 弧形闸门状态监测与故障诊断技术研究[J]. 中国水能及电气化, 2020(9):42 – 45.
- [12] 林良,廖军. 闸门结构可靠性分析与设计[J]. 山东工业技术, 2015(7):88 – 89.
- [13] 封山虎. 液压启闭机常见故障及应急处理措施[J]. 中国水能及电气化, 2015(5):50 – 53 + 50.
- [14] 董向妮. 浅谈水工闸门液压启闭机的故障诊断、维修与保养[J]. 内蒙古水利, 2018(8):61 – 62.
- [15] 徐珊. 探讨水利水工闸门与启闭机的安全预评价[J]. 陕西水利, 2015(S1):15 – 16.
- [16] ZHANG Yuelei, YAN Xinping, YUAN Chengqing. The research of optimal monitoring point placement for health monitoring of dredger based on analytic hierarchy process [C]// Macau, IEEE Prognostics and Health Management Conference, 2010.
- [17] 钱辉,杨森,彭琪琪,等. 基于模糊层次分析法对高电
压下耐压测试系统的风险评估[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2):111 – 116.
- [18] TAN J, LOW K Y, SULAIMAN N, et al. Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) for multi-criteria selection of microalgae harvesting and drying processes [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(7):2049 – 2063.
- [19] ZHANG Wei, SUN Ke, LEI Changzheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process synthetic evaluation models for the health monitoring of shield tunnels [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2014, 29(9):676 – 688.
- [20] 董志斌,庞新宇,李博等. 基于模糊层次分析法的刮板输送机中部槽中板材料选择[J]. 机械设计与制造, 2021(3):248 – 252.
- [21] 李海华,赵红泽,李海强. 基于模糊层次分析法的煤矿工程评标指标权重确定[J]. 煤炭技术, 2013, 32(2):54 – 56.