

[文章编号] 1003—4684(2019)02-0022-06

基于层次故障树的闸门健康状态评估系统研究

黄丽琴¹, 赵红红², 刘 辉³, 许鹤鹏¹, 孙 杰¹, 徐建文², 万英杰³, 陈启明²

(1 国网新源水电有限公司富春江水力发电厂, 浙江 桐庐 311504;

2 武汉四创自动控制技术有限责任公司, 湖北 武汉 430065;

3 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为了完整而准确的对泄洪闸门进行健康状态评估,以层次故障树为基础构建的闸门健康状态监测与诊断体系,故障树分为五层,除第一层外,每层之间的联系采用可追溯 Petri 网形式完成,在故障逻辑判断的同时记录判断路径信息。在闸门出现非健康状态的情况下,给出报警信息的同时采用回溯搜索算法,寻找出现数据异常的传感器或数据流,从而判断出故障产生的原因,针对性给出有效建议和可行性决策并发出提示信息。

[关键词] 泄洪闸门; 健康状态评估; 层次故障树; 可追溯 Petri 网; ANSYS 应力仿真

[中图分类号] TV732.6

[文献标识码] A

水电站泄洪闸门的运行安全与水力发电厂大坝等建筑的稳定和可靠性息息相关^[1]。据不完全统计,约有 20% 以上的水电站停机和大坝漫水事故都直接或间接地与泄洪闸门故障相关^[2]。对水电站的泄洪闸门进行研究,剖析其结构部件与运行规律,对完成闸门的健康状态评估和故障诊断,减少因泄洪闸门失效故障引起的漫水事故及洪水预防,具有重要意义。

在实现大型水电站计算机监控以及异常情况预警和故障状态诊断方面,美国不仅能够对控制系统进行监测,实时反映整个控制过程,而且对于控制参数反馈异常,可以在较短时间内进行数据挖掘,查找故障位置或损坏部件完成快速检修指导和故障恢复^[3]。在水电站的状态监控以及故障信息容错处理上,日本走在业界前列。其中新高瀨川和玉原的抽水蓄能电站应用最为成功,成为相关研究的典型案例。这两个电站,利用其在线监测和一定程度上的故障诊断,成功抵御了多次较大程度的洪水,保护了水电站大坝安全和下游居民的正常生活^[4]。

各国传统的水电站监控方法仅仅只能在一定程度上完成控制系统故障诊断,而无法对水电站泄洪闸门的机械健康状态进行评估,也无法提前给出维修意见及故障时的快速处理信息。单独的监测控制系统,反馈实时控制参数只能在一定程度上了解控制过程的好坏以及控制指令的执行情况,无法对闸

门本体以及整个闸门的健康状态进行综合反映。此外,一旦闸门出现故障,无法进行原始数据分析,因而无法快速查找故障并针对性排除,恢复闸门的正常运行。

1 闸门健康状态评估

对闸门健康状态进行诊断的过程分为数据采集与状态监视、部件健康状态诊断、本体机械结构健康状态诊断、控制系统及闸门健康状态诊断 4 个部分,整个诊断方案按照层级结构来划分,以层次故障树为基础构建。故障树分为五层,除第一层外,每层内部健康状态判断之间的联系均采用可追溯 Petri 网形式完成,在完成故障逻辑判断时记录判断路径信息^[5]。在闸门出现非健康状态的情况下,给出报警信息的同时采用回溯搜索算法,逆着 Petri 记录路径寻找出现数据异常的传感器或数据流,从而判断出故障产生的原因,针对性给出有效建议和可行性决策并发出提示信息^[6]。

1.1 诊断系统阈值可靠性设定

1.1.1 设定方法 在阈值系数的设计过程中,须确定元部件的组合方式、冗余设计结构才能达到系统要求的可靠性指标,这是阈值系数设计的基本条件。系数分配是将各个传感器判断条件的系数根据一定的特征分配到各阈值,根据分配到的系数设计阈值判断结构,以满足最终判断目标的可靠性。

[收稿日期] 2018—11—23

[第一作者] 黄丽琴(1968—),女,浙江杭州人,国网新源水电有限公司工程师,研究方向为电力系统自动化

根据给定的判断目标可靠性要求,对判断结构中的各个传感器进行阈值系数的合理调整^[7]。确定判断结构当中各个传感器点位的要求,以达到最终判断结构合理可靠。完成后就将阈值系数分配到各个底层元部件,即测量点位,进而完成一个自底向上的指标汇总过程。

1.1.2 设定原则 参照系统可靠性系数分配的原理,完成健康状态评估中的阈值系数设定,其基本规则依赖下式:

$$\begin{cases} R_s(R_1, R_2, \dots, R_n) \geq \hat{R}_s \\ g_s(R_1, R_2, \dots, R_n) \geq g_s^* \end{cases}$$

其中 \hat{R}_s 用来表示系统目标的可靠性参数, R_s 则表示分配之后系统所具有的可靠性参数, R_i 表示系统中的第 i 个子系统的目标可靠性, g_s^* 表示系统所对应各种约束条件。

假设用 $\hat{R}_s(t)$ 来表示系统在 t 时刻的可靠性,当系统为指数分布的串联结构,采用等额分配法完成可靠性系数分配时,则第 i 个元部件的可靠性

$$R_i(t_i) = [\hat{R}_s(t)]^{m/N} \tag{1}$$

其中, n_i 表示复杂度,即子系统 i 内模块的个数, $N = \sum n_i$ 表示系统内模块的总个数, t_i 表示部件 i 的运行时间,因此有下式成立

$$w_i(1 - e^{-\lambda_i t_i}) = 1 - [\hat{R}_s(t)]^{m/N}$$

其中, w_i 表示第 i 个部件的重要度, λ_i 表示第 i 个部件的故障率,左边部分表示第 i 个部件所引起的故障联合概率,右边表示不可靠度^[8]。

根据数学理论:当 x 很小时,有 $e^x = 1 + x$, 因此式(1)可以转换为下式:

$$[\hat{R}_s(t)]^{\frac{m}{N}} = 1 - w_i(1 - e^{-\lambda_i t_i}) \approx e^{-\lambda_i t_i}$$

因此,第 i 个元部件的故障概率

$$\lambda_i = -\frac{n_i \ln(\hat{R}_s(t))}{N w_i t_i}$$

1.2 层次故障树

对于闸门进行健康状态诊断,采用模块化形式,将闸门依据本身结构特点划分为各个部件,直至每一个传感器点位。在完成健康状态诊断的过程中,使用层次化的诊断方法,完成每一层次的健康状态诊断。前一层的健康状态判断输出结果是后一层的健康状态判断结构的输入参数。第一层完成二值判断算法,将传感器所测得的实际值与预先设定的阈值进行比较得知该传感器正常与否根据所判断的结果,给予相应的状态赋值,作为第一层 Petri 网的输出和第二层 Petri 网的输入。

在第一层故障树中,使用二值决策法完成异常判断得到中间结果,后期则使用二维决策图完成故障概率及子系统不可靠度的求解。为了得到以事件

为节点的二值决策图,就需要使用决策树来完成基本事件向故障树的转化。使用二值决策图可以完成布尔函数表达式定性与定量分析,从而得到所需要的层次故障树。

对于任意的二值决策图 (V, K) , 设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, $K = \{1, 2, \dots, n\}$, 给定布尔变量 x_1, x_2, \dots, x_n , 根据节点指标的对应关系,将节点映射到布尔变量,若 $g(v_i) = j \in K, i \in \{1, 2, \dots, m\}$, 表示 v_i 对应的布尔变量 x_j , 因此 BDD 就和布尔函数 $f = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 相对应。

1.3 回溯搜索算法

回溯搜索算法采用基于种群迭代的策略完成进化^[9]。其执行操作主要包含五个基本步骤:初始化、种群选择 I, 变异和交叉, 种群选择 II。由于其重复选择和特殊的交叉变异,使得 BSA 算法具有超越传统算法的强搜索能力。BSA 算法在完成重复选择的过程中,可以从前一次的进化中汲取经验数据作为搜索轨迹记录。在 BSA 实际运行过程中,需要人为的完成交叉概率 mixrate 设定,从而完成对交叉单元个数的选择。程序的运行过程为:

1) 初始化种群。借助均匀分布模型,可以快速完成当前种群 P 以及历史种群的初始化。 $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, d, N$ 和 D 分别是种群大小和问题的维度。 $P_{i,j}$ 代表位于种群中的第 i 个具有的第 j 个变量的数值, $P_{i,j}^o$ 表示种群中第 i 个个体的第 j 个变量的原始值, $U(\varphi_j, \psi_j)$ 则表示第 j 个变量所具有的上下界所构成的均匀分布模型。

$$\begin{cases} P_{i,j} \sim U(\varphi_j, \psi_j) \\ P_{i,j}^o \sim U(\varphi_j, \psi_j) \end{cases}$$

2) 选择 I。借助选择操作 I 可以完成历史种群的确定。其中, a 和 b 是服从 $N(0, 1)$ 正态分布的两个随机变量;其中 H 函数用来完成历史种群的随机洗牌,扰乱个体顺序编号。借助这种洗牌操作,可以完成最优种群的选择和历史种群的更新。

$$\begin{cases} P_{i,j}^o = P_{i,j}, (a, b \sim U(0, 1) \quad a < b \\ P_{i,j}^o = H(P_{i,j}^o) \quad a \geq b \end{cases}$$

3) 变迁。BSA 借助式 8 完成变异操作,其中 F 用来完成搜索方向矩阵 $(P^o - P)$ 的幅度的控制,并完成实验种群 T 的选取。

$$\begin{cases} T = P + F(P^o - P) \\ F = 3r_n, \quad r_n \sim N(0, 1) \end{cases}$$

4) 交叉。与传统进化算法不同的是,BSA 首先通过选择步骤中的洗牌操作完成随机个体 I 的定义,并得到一个布尔形式的 0-1 矩阵数组。借助种群组合,可以完成多个种群的融合,进而得到种群的布尔函数对应关系 β , 并与方向矩阵相结合得到新

的试验种群 T ，如下：

$$\begin{cases} \beta_{pi,j} (1 \sim [r_{mix}r_dD]) = H(1,2,\cdots,D) \\ \beta_{i,rD} = 1 \end{cases}$$

进一步的交叉操作，可以通过下式所表示的边界控制每次求解都可以得到正确的可行解。

$$\begin{cases} T = P + (\beta_p F)(P^o - P) \\ T_{i,j} = r_d(\psi_j - \varphi_j) + \varphi_j \end{cases}$$

5) 选择Ⅱ。进行种群最优解的求解，并判断最优解的适应程度。当新试验种群的最优解比原种群的最优解适应度小，则使用新最优解替换原最优解。若新试验种群最优解劣于原种群 P 的最优解，则保留原种群的最优解为全局最优解 P_{best} 。

1.4 泄洪闸门机械结构健康状态评估

首先将泄洪闸门进行划分，根据闸门健康状态本身的结构特点，将闸门分为本体结构与控制系统两部分。其中，闸门本体划分为门叶、支臂、支绞三个主体部分，进一步细分，可以得到左门叶、中门页、右门叶、左支臂、右支臂、左支绞和右支绞部件。

每一个部件采用模块化的评判方法，首先采用二值决策树与单层次故障树的算法，完成该部件的健康状态诊断，作为多层次故障树判别的中间结果。对于闸门整体，采用两层故障树结构将左门叶、中门页、右门叶、左支臂、右支臂、左支绞和右支绞的健康专题模块化结合成为门叶、支臂、支绞的健康状态。

2 基于 ANSYS 的闸门结构应力仿真

2.1 工况分析

泄洪闸门在运行的过程中存在两个极限位置，这两个位置为静态位置，除这两个位置以外的其他运行位置均属于动态位置。为了得到最符合实际的仿真结果，选取其中的极限位置进行状态仿真，最后将仿真结果进行适当的优化即可得到动态位置的运行参数范围。

实际运行中的弧形水工闸门存在两种不同工况，即挡水工况和放水工况(图 1)。

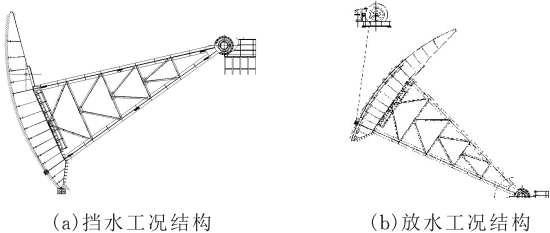


图 1 闸门不同运行工况

不同运行工况时，结构的位置和受力情况存在较大的不同。当闸门处于挡水工况时，闸门的支撑点位于泄洪闸门的闸底，此时整个闸门的重量全部落于闸底的支撑点上，卷扬机牵引绳和支绞只起到

稳固闸门位置的作用，此时闸门整体中心处于支臂偏向闸门的一端，同时，闸门门叶受到水库水头的压力作用，闸门机械结构应力较大的位置主要位于门叶以及门叶与支臂的连接部位。此外，该挡水工况下，支臂上应力较大的位置应位于支臂前段，而支臂后端应力相对较小。

当闸门处于放水工况时，闸门由卷扬机牵引离开闸底上扬到一个固定的角度，相比于挡水工况时，此时闸门的重心出现较大后移，导致支绞受到较大的支撑力。同时支臂上所受到的应力将大幅度增加。另一方面，门叶受到的应力大幅减小，而门叶与支臂连接点附近的应力大幅增加。

基于不同运行工况所做的分析结果将对仿真过程中的边缘条件规划、重力大小及角度以及模型旋转、滑动约束条件的设置起到关键作用，关系到最终仿真结果的准确性。

2.2 模型建立

为了对闸门的运行状况进行监测，同时对闸门的健康运行状态进行评估和分析，就需要对闸门关键部位的变形以及受力情况进行数据采集。确定传感器的安装位置和数量，需要使用仿真手段对门门的结构和受力位置进行分析。

利用 ANSYS 进行应力分析并确定传感器安装点位(图 2)。

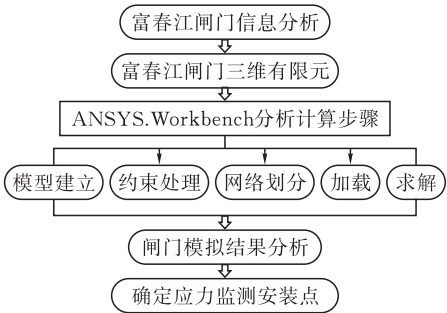


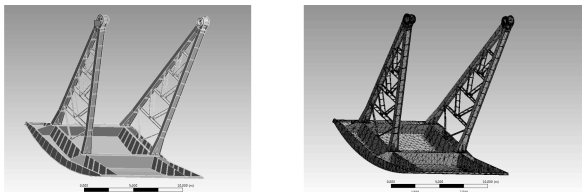
图 2 泄洪闸门建模与有限元分析思路

对富春江水电厂泄洪闸门的现有资料进行收集整理得到相应机械结构图及连接关系、重力数据。然后使用 SolidWorks 建模软件完成物理模型的构建，再完成 ANSYS 模型的导入，通过仿真软件当中 Workbench 工具完成机械结构的应力分析^[10]。其中具体的操作涉及到模型获取、约束处理、网络划分、参数加载以及仿真数据的求解。最后对闸门不同运行工况下的仿真结果进行分析得到需要重点进行应力监测的点位。

2.3 挡水工况仿真

根据实际工况的工作条件设置有限元分析边界条件，A 表示只可旋转的约束；B 表示只给底部一支撑，并没有约束；C 表示重力加速度；D 代表水压。

模型图见图 4。



(a) 仿真模型 (b) 网格划分结果

图 3 闸门模型

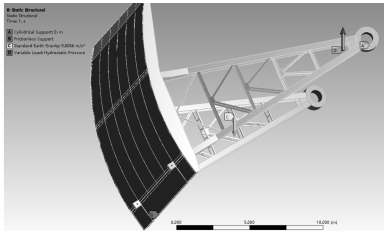
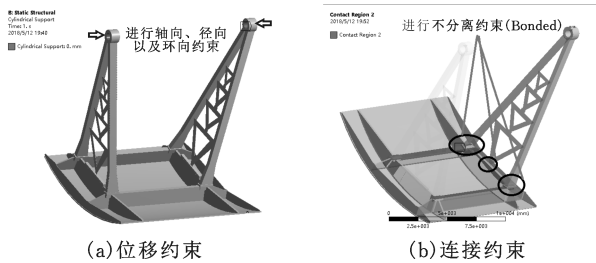


图 4 挡水工况有限元分析模型图

闸板主要靠闸紧轴力在阀座楔角中闸紧,阀座为一环形钢圈与阀体焊成一体。当闸门支绞轴向加紧时,支绞在其径向会受到支撑力和径向约束(即阻止闸板径向变形)以及环向约束,另外还受不分离约束(图 5)。



(a) 位移约束 (b) 连接约束

图 5 约束条件加载

闸门挡水时,挡板受到较大的应力作用,此外由于支臂的支撑,使得支臂与挡板连接位置也受到一定的应力,而支臂中段所受到的应力并不明显(图 6)。

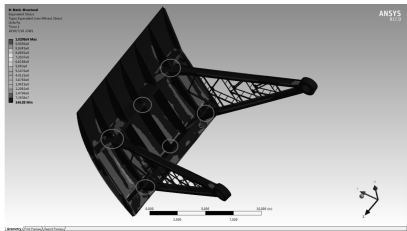


图 6 挡水工况下应力集中点

2.4 放水工况仿真

放水工况情况:底部处于正常水位上,水压此处不考虑,根据实际工况的工作条件设置有限元分析边界条件。A 表示轴向和径向约束,B 此处代替了钢缆的拉力,仅表示支撑作用,C 表示重力加速度(图 7)。

图 7 可以看出:放水工况下,门面的应力主要集

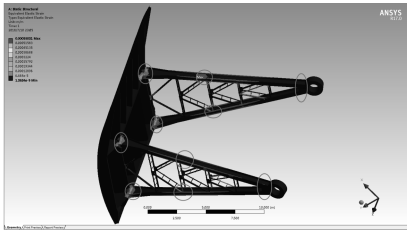


图 7 放水工况应力分析结果

中在支臂与闸门门面的连接处,这些位置的应力要明显高于其他部位,因而要作为重点监测位置^[11]。闸门处于放水工况的时候,挡板除自身重力和钢索牵引力以及支臂的支撑力外,门叶中部的线性点位附近没有明显的外力,即中部的应力变化值相对较小。而钢索连接处以及支臂与挡板的连接处受到较大的应力作用。支臂对挡板起到支撑作用,而且挡板的重心后移导致闸门的重力重心处于支臂的中间段,该处应力较大,金属疲劳度大大增强。闸门重力分解作用产生的拉力,会导致锚索有较大幅度的变形,该处也是应力较为集中的位置。

3 算法流程及软件实现

3.1 软件流程设计

为了对泄洪闸门在线监测系统健康状态评估,根据前面建立的设备状态评估的故障树模型和专家推理策略,构建了设备健康状态评估流程(图 8)。其工作流程是:从系统监测得到的数据经工况稳定性判断后,再根据前面建立的状态评估故障树模型及专家推理策略,进行设备状态评估及故障诊断,并根据不同的阈值标准完成“良好”“较好”“可疑”“不良”“危险”分级,从而得到健康状态评价,为维护人员提供处理建议。

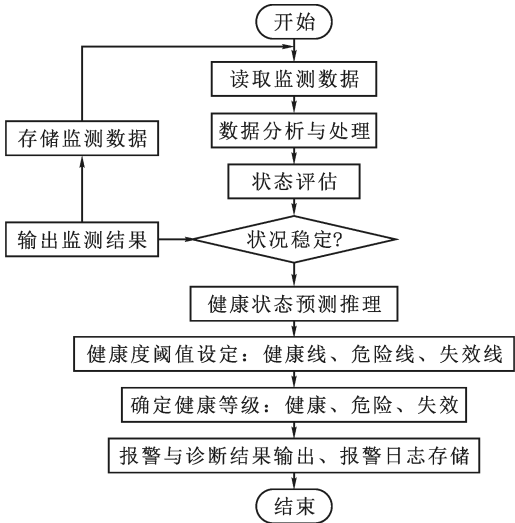


图 8 设备健康状态评估评估软件流程图

在完成闸门本体机械结构健康状态评估之后,可以得到闸门门页、支臂、支绞的健康状态。这些部

件的健康状态均采用“健康”“危险”“失效”的三元素方式来表示。在此基础上,将闸门的各个部件的健康状态采用 Petri 网结构进行逻辑组合就可以得到闸门的健康状态(图 9)。

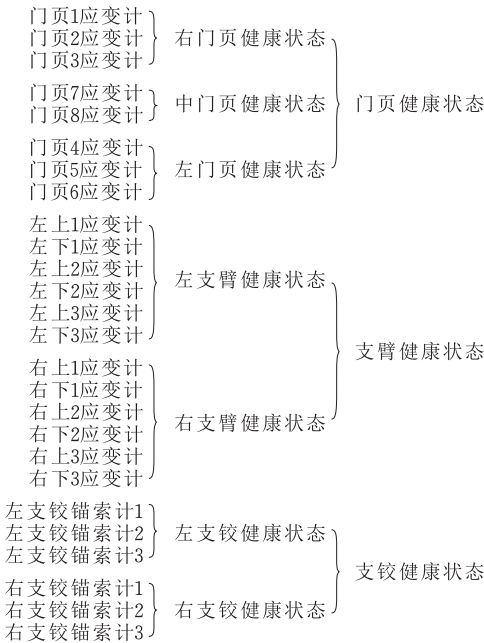


图 9 闸门机械结构健康状态评估逻辑

3.2 状态检测及健康评估系统实现

将泄洪闸门在线监测及健康状态评估系统在基于 LABVIEW 的监测工控机上实现,其主数据监测界面见图 10。



图 10 在线监测与状态评估软件界面

3.3 评估体系性能对比分析

将本文所使用的层次故障树与可追溯 petri 网评估建设方法与传统的单纯故障树评价方法进行对比分析和测试,得到结果见表 1。

表 1 评估系统性能对比

使用算法	层次故障树与可追溯 petri 网方法	传统故障树方法
对比指标		
构建层级	4	2
构建步骤	5	1
计算时间/s	15	100
容错率/%	95	75
评估正确率/%	96	70

将本文方法和传统的故障树方法进行对比可以

发现,基于层次故障树与可追溯 petri 网方法在前期进行评估体系构建的过程中需要更多的层级,使用更多的步骤,因而实现难度比传统的故障树方法更大。但是一旦完成,本文所用的算法无论是在计算时间和容错率以及评估的正确率比粗糙型的传统故障树方法占更大的优势。

4 结论

本文针对富春江泄洪闸门的本体结构和控制系统进行分析和研究,找出了对闸门安全运行影响最主要因素及其隐患的发生模式,并确定了需要重点监测的特性参数以及评估指标。根据闸门本体的形变及应力结构变化构建了闸门健康状态诊断结构和评估指标体系,利用数学算法查找可能出现故障的部件、装置或者点位,给出针对性的实施策略。

经过现场传感器和检测系统安装运行,闸门本体结构上的薄弱点及运行过程中力学参数变化较大的区域或者点位的具体监测数据可以直观得到,对闸门当前的健康状态进行全面而系统的评价。相较于传统的依靠人工巡视和定期检查的测量,本监测与评估系统实时性强,节约人力物力成本,且监测全面可靠,评估结果准确。

[参 考 文 献]

[1] 贾桂清,谢亚平.富春江电厂泄洪闸门监控系统改造[J].水电自动化与大坝监测,2003(1):63-65,75.

[2] 张友湖,曾强,鲍务均.ANSYS 在弧形泄洪闸门三维有限元分析中的应用[J].机电工程技术,2005(10):59-60,68.

[3] 姜树海,范子武.Bayes 方法在水工泄洪闸门事故率分析中的运用[J].水利学报,2006(8):945-949.

[4] 宋咏春,陈家权,李文娟.弧形钢闸门的安全性能评估研究[J].现代制造工程,2005(11):53-55.

[5] Mo Y A Multiple-valued decision-diagram-based approach to solve dynamic faulttrees[J]. IEEE Transactions on Reliability,2014,63(1):81-93.

[6] 郑逸,张乐锋.基于自适应加权模糊 Petri 网的电网故障诊断研究[J].电气开关,2016,54(3):68-72.

[7] 周如旗,陈忆群.基于扩展模糊 Petri 网的知识推理方法研究[J].计算机科学,2016,43(3):75-79.

[8] Mostafa M D, Rahim N A. Solving non-convex economic dispatch problem via backtracking search algorithm[J]. Energy,2014,77:372-381.

[9] Xu Q, Guo L, Na W, et al. Opposition-based backtracking search algorithm for numerical optimization problems[C]// International Conference on Intelligent

Science & Big Data Engineering, 2015.

[11] 徐国宾,高仕赵,訾娟.淤泥对平面钢闸门启门力影响的计算方法[J].水利学报,2012,43(9):1092-1096.

[10] 方致远,向衍.弧形钢闸门三维有限元优化分析[J].水电能源科学,2017,35(7):182-185.

Research on Health Condition Assessment System Based on Hierarchical Fault Tree

HUANG Liqin¹, ZHAO Honghong², LIU Hui³, XU Hepeng¹,
SUN Jie¹, XU Jianwen², WAN Yingjie³, CHEN Qiming²

(1 *The Fuchun River Power Plant, Tonglu 311504, China*;

2 *Wuhan four Chuang Automatic Control Technology Co., Ltd., Wuhan 430070, China*;

3 *School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*)

Abstract: In order to grasp the health status of the spillway gates of hydropower plants and to judge the fault location under the unhealthy condition of the gates, it is necessary to monitor and analyze the structural deformation and physical stress changes during the gates operate. It is impossible to assess the health status of a gate by monitoring a site alone or judging a part alone. The gate health monitoring and diagnosis system is based on hierarchical fault tree. Fault tree is divided into five layers. Except the first layer, the relationship between each layer is completed by traceable Petri net, which records the judgment path information while completing the fault logic judgment. When the gate is in a non-healthy state, the backtracking search algorithm is used to find the sensor or data stream with abnormal data, so as to determine the cause of the fault, and give effective suggestions and feasible decision-making and give prompt information.

Keywords: flood gate; health condition assessment; hierarchical fault tree; traceability Petri net; ANSYS stress simulation

[责任编辑: 张岩芳]

(上接第 17 页)

Fast Motion Estimation Algorithm Based on Motion Vector

TU Lingying, WANG Yuanpeng, QIN Jiejie, LI Rubin, WANG Rui

(*School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*)

Abstract: Motion vector is proposed to solve the problem that video coding is very timeconsuming. Combined with UMHexagons algorithm of H. 264 standard, the starting point prediction and search template is optimized, which can effectively reduce the search points in the search process and improve the efficiency of video coding. Five video sequences with different motion levels are tested. The experimental results show that compared with the original algorithm, the SNR of the optimized algorithm decreases only 0.01 dB ~ 0.02 dB, but the motion estimation time decreases by 10% ~ 30%.

Keywords: motion estimation algorithm; UMHexagons algorithm; starting point prediction; signal to noise ratio

[责任编辑: 张岩芳]