

基于模糊层次分析法的水轮机综合性能评估方法

张 艺¹, 刘晓晗¹, 赵 洪²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川 成都 610041;

2. 华电金沙江上游水电开发有限公司巴塘(拉哇)分公司, 四川 成都 610041)

摘 要:针对水电站运行稳定性判断指标多因素化、直接比较指标缺乏参考性、直接比较水轮机组运行稳定性具有模糊性的问题,提出一种基于模糊层次分析法的水电机组综合性能评估方法,实现对多台同型号水轮机组的综合性能评估。该方法首先通过层次分析法计算选取指标的权重,再通过模糊算法以模糊数学计算将待评估指标换算成隶属度与隶属函数,实现机组运行性能的分量化,评估结果与实际情况相符合,验证了该评估方法的正确性和可靠性。

关键词:模糊层次分析法;水轮机组综合性能评估;隶属度;隶属函数

中图分类号:TK73

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)04-0086-05

Comprehensive Performance Evaluation Method of Hydro-turbine Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Method

ZHANG Yi¹, LIU Xiaohan¹, ZHAO Hong²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041;

2. Batang(Lawa)Branch, Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., LTD., Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: Aiming at the problems of multi-factor evaluation indexes, lack of reference indexes and fuzziness in direct comparison of operating stability of hydropower project, and fuzziness in direct comparison of turbine operation stability, a comprehensive performance evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process is proposed to evaluate the comprehensive performance of multiple turbines of the same type. In this method, the weights of selected indexes are calculated by the analytic hierarchy process, and then the indexes to be evaluated are converted into membership degree and membership function by the fuzzy arithmetic to achieve fractional operation performance of the unit. The evaluation results are in agreement with the actual situation, which verifies the correctness and reliability of the evaluation method.

Keywords: Fuzzy analytic hierarchy method; Comprehensive performance evaluation of hydraulic turbine units; Membership degree; Membership function

0 引 言

机组的稳定运行与电站安全生产、经济效益息息相关,目前对于水电机组单个指标运行优化研究较为成熟,水电机组综合评估研究较少。为提高水电站设备的利用率与水轮机运行效率,保障机组的安全稳定运行,需要对水电机组综合性能进行评估,通过综合性能评估实现多台机组的性能比较、某台机组单个指标的评估,为未来提供参考,实现水电站生产、经济效益最大化。

进行综合评估的方法主要包含专家评估法、数据包络分析法、层次分析法、灰色系统理论、人

工神经网络评估法、模糊综合评估法^[1]。专家评估法简单易行,但受主观影响较大;数据包络分析法适用于评估同类型指标的相对有效性;灰色系统理论主要用于具有关联性的数据预测,从而判断方案优劣;人工神经网络具有组织能力强、自学能力强等特点,但需要大量数据作为支撑^[2]。而层次分析法将与决策相关性较大的元素分解成不同层次,在此基础上进行定性和定量分析,能将复杂问题分层处理,广泛应用于水电工程筹备建设、方案评估等^[3]。模糊综合法则基于模糊数学方法,将指标换算隶属函数和隶属度,更直观地比较指标和方案的优劣。水轮机的运行稳定性参考指标主要包含各轴承温度、压力、振动、摆

收稿日期:2024-05-15

度^[4],同一机组在不同运行工况下有不同的参考值,超过阈值会报警甚至停机,但不同机组由于工艺差别和测量误差,在同一水头和负荷下的指标数值存在差异,包含多个指标的机组难以直观比较运行情况。因此,针对水轮机组稳定性指标边界模糊不清、无法量化的特点,将层次分析法与模糊综合评估法结合进行综合判断。针对多种因素指标的评估分析方法,大量学者在多个领域运用层次分析法或综合评估法进行判断:文献[5]提出了一种基于模糊综合评估的水电站预警模型,使水电站预警阈值精准化。文献[6]提出改进的层次分析法,对水电机组装机容量方案进行遴选,最终提出 22 500 MW 的装机容量方案最优。文献[7]结合系统工程和人因工程理论,创造性地构造倒班运行质量指标体系,并进行评估。针对各自的主客观特点,文献[8]将模糊层次法与灰色理论相结合,对水电站安全性进行评估。

文章主要介绍了模糊层次分析法的原理和核心算法的流程,并结合水电站实际运行情况,构建出水电机组稳定性运行的综合评估体系,通过 matlab 编程,实现多指标数据输入和直观评估结果输出,为水轮机组的下一步状态初判断和水电站的经济运行提供参考。

1 水轮机组综合评估体系和算法流程介绍

提出的模糊层次水轮机组综合评估体系主要包含数据采集、数据处理、预警报警、决策优化,见图 1。

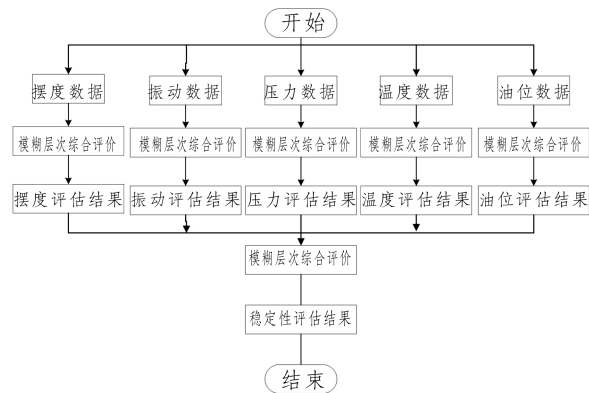


图1 水轮机组综合评估体系

水轮机组会装设传感器对众多运行数据进行监视和上传、越限报警等处理。首先通过上位机进行数据收集,再分别对多个评估指标进行模糊层次综合评估,得到该机组在指标范畴内的评估

结果,再将多个指标进行模糊层次综合评估,得到机组稳定性评估结果。

运用 matlab 实现的流程是:构建水电机组稳定性因素影响指标层次;采集指标数据;构建水电机组性能状态分级层;构造分数评估矩阵 Z ;利用层次分析法构造指标的模糊判断矩阵并求其相对权重;划分指标模糊分解区间并归一化构造隶属函数 $u(x)$;利用步骤四的相对权重结果 W_{ij} ,实测数据归一化后代入隶属函数,求第二层指标归一化模糊评估矩阵 R_{ij} ,由 R_{ij} 构成模糊评估矩阵 Y_1 ;求第一层指标模糊评估矩阵 $R_i = W_i \cdot Y_1$,由 R_i 构成机组稳定性评估矩阵 Y_2 ;求第一层指标稳定性评估结果 $T_i = Z \cdot R_i$;求机组稳定性评估结果 $T = Z \cdot Y_2$ 。数据处理流程图见图 2。

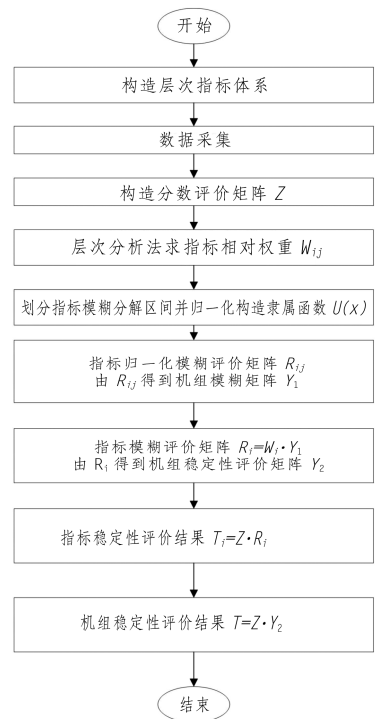


图2 数据处理流程图

2 模糊层次分析法关键技术研究

2.1 基于层次分析法求指标相对权重

模糊综合评估指标体系的指标选取将直接影响评估结果的可靠性。根据行业标准,以金沙江上游某水电站的稳定性运行数据为参考,选取水轮机组的行业内参考性指标摆度、振动、压力、温度、油位作为第一层指标,第一层指标下各自再选取第二层指标,并进行权重分析,水轮机评估指标体系见图 3。

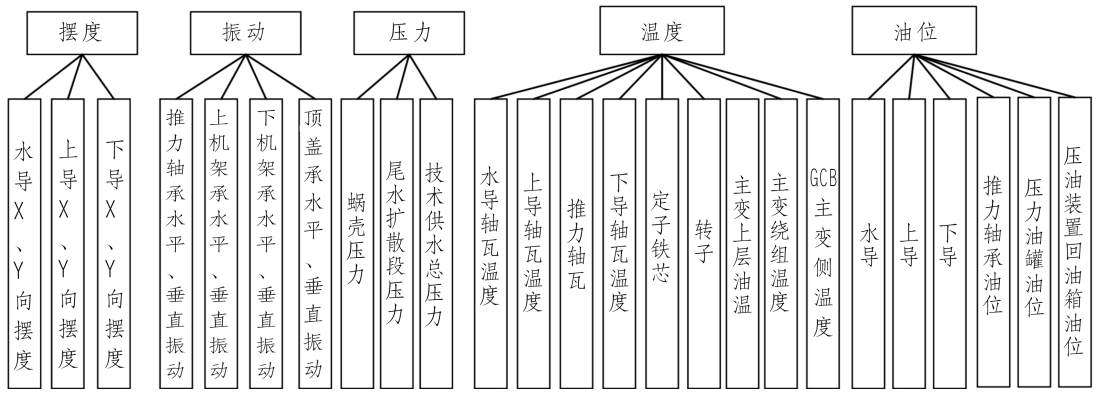


图 3 水轮机评估指标体系

其中机组某些部位温度和油位重要程度差异大,因此权重分配不平均;振动、摆度、压力各自范畴内的小指标同等重要,权重同等分配。具体权重分析如下:

选取机组的摆度、振动、压力、温度分别对机组稳定性影响处于同等级地位,所以得到机组稳定性指标权重。

$$W = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25)$$

(1) 上导、水导、下导摆度指标权重。

$$W_1 = (1/3 \quad 1/3 \quad 1/3)$$

水导 X、Y 向摆度 $W_{11} = (1/2 \quad 1/2)$

上导 X、Y 向摆度 $W_{12} = (1/2 \quad 1/2)$

下导 X、Y 向摆度 $W_{13} = (1/2 \quad 1/2)$

(2) 机组振动稳定性权重。

$$W_2 = (0.25 \quad 0.25 \quad 0.25 \quad 0.25)$$

推力轴承水平、垂直振动 $W_{21} = (1/2 \quad 1/2)$

上机架承水平、垂直振动 $W_{22} = (1/2 \quad 1/2)$

下机架承水平、垂直振动 $W_{23} = (1/2 \quad 1/2)$

顶盖承水平、垂直振动 $W_{24} = (1/2 \quad 1/2)$

(3) 选取蜗壳压力、尾水扩散段压力、技术供水总压力,三种压力指标同等重要,因此得到机组压力指标权重。

$$W_3 = (1/3 \quad 1/3 \quad 1/3)$$

(4) 机组温度指标权重。将水导轴瓦温度、推力轴瓦温度、上下导轴瓦温度、定子铁芯、转子、主变上层油温、主变绕组温度、GCB 主变侧温度等 9 个指标数据进行计算。将金沙江上游某水电站 4 号机上述 9 个指标数据采用层次分析法计算得到温度评估指标的归一化权重。

$$W_4 = (0.170 \quad 0.170 \quad 0.170 \quad 0.170 \quad 0.170 \quad 0.069 \quad 0.069 \quad 0.069 \quad 0.069 \quad 0.069 \quad 0.040)$$

(5) 机组辅设油位指标权重。将机组设备中水导、上导、下导、推力轴承油位、压力油罐油位、压油装置回油箱油位 6 个指标数据采用层次分析法计算得到油位评估指标的归一化权重。

$$W_6 = (0.087 \quad 0.087 \quad 0.087 \quad 0.171 \quad 0.282 \quad 0.282)$$

2.2 基于模糊评估原理进行综合评估

根据机组运行状态,划分良好、合格、需检查、需停机四种状态^[9],各个运行指标根据运行规程和行业标准,同样可划分为这四个状态。该方法采取四种评估等级对应的量化数据值为 [100, 80, 60, 40]。模糊综合评估法的一般步骤如下:构建模糊综合评估指标体系、通过 AHP 层次分析法构建好权重向量、建立适合的隶属函数、构建评估矩阵、合成评估矩阵和权重、得到结果向量^[10]。

隶属度和隶属函数的划分是模糊综合评估的核心。首先根据收集数据划分区间,归一化处理使其在 [0, 1] 范围内,然后构造隶属函数,例如水导,归一化后四个区间分界点为 [0.5, 0.67, 0.83, 1],采用三角形和梯形结合的隶属函数区间划分。

$$u_1(x) = \begin{cases} 0 & x > 0.67 \\ (0.67 - x) / 0.17 & 0.5 \leq x \leq 0.67 \\ 1 & 0 < x < 0.5 \end{cases}$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & x > 0.83 \text{ 或 } x < 0.5 \\ (0.83 - x) / 0.16 & 0.67 < x < 0.83 \\ (x - 0.5) / 0.17 & 0.5 < x < 0.67 \end{cases}$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & x > 0.83 \text{ 或 } x < 0.5 \\ (1-x)/0.17 & 0.5 \leq x \leq 0.67 \\ (x-0.67)/0.16 & 0.67 < x \leq 0.83 \end{cases}$$

$$u_4(x) = \begin{cases} 0 & x > 0.83 \text{ 或 } x < 0.5 \\ (x-0.83)/0.17 & 0.83 \leq x \leq 1 \\ 1 & x > 1 \end{cases}$$

式中: $u_i(x)$ 为隶属函数; x 为归一化后的劣化度。

将实测水导 X 、 Y 摆度指标数据归一化后代入上述隶属函数,得到在各个区间的模糊评估矩阵。再结合层次分析法得到的权重,得到水导摆度的模糊评估矩阵,同理求得其他第二层摆度指标的模糊评估矩阵,并合成第一层摆度指标的评估矩阵,结合权重求得摆度第一层评估指标的模糊评估矩阵。

$$R_{11} = W_1^* \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

机组摆度评估结果:

$$T_1 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0) = 100$$

同上,其他指标的评估如下:

机组振动:

$$R_{12} = W_2^* \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.8906 & 0.1094 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.8477 \quad 0.1523 \quad 0 \quad 0)$$

机组振动评估结果:

$$T_2 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T$$

$$(0.8477 \quad 0.1523 \quad 0 \quad 0) = 96.9531$$

最近系枯水期机组轮换频繁开停机,导致机组穿过高低频振动区次数增多,本身工况参数也较低,所以机组振动评估结果数值较低。

机组压力:

$$R_{13} = W_3^* \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

机组压力评估结果:

$$T_3 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$= 100$$

机组温度:

$$R_{11} = (0.608 \quad 0.392 \quad 0 \quad 0)$$

$$R_{14} = W_4^* \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.401 & 0.599 & 0 & 0 \\ 0.6713 & 0.3287 & 0 & 0 \\ 0.4667 & 0.5333 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.7239 \quad 0.2532 \quad 0.0230 \quad 0)$$

机组温度评估结果:

$$T_4 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T$$

$$(0.7239 \quad 0.2532 \quad 0.0230 \quad 0)$$

$$= 94.0175$$

机组油位:

$$R_5 = W_5^* \begin{pmatrix} 0.275 & 0.725 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6889 & 0.3111 \\ 0.6725 & 0.3275 & 0 & 0 \\ 0.6725 & 0.3275 & 0 & 0 \\ 0.0333 & 0.9667 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.3183 \quad 0.5498 \quad 0.1046 \quad 0.0274)$$

机组油位评估结果:

$$T_5 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T$$

$$(0.3183 \quad 0.5498 \quad 0.1046 \quad 0.0274)$$

$$= 83.1801$$

最终得到1号机组稳定性评估结果:

$$T^1 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T$$

$$(0.7780 \quad 0.1911 \quad 0.0255 \quad 0.0055)$$

$$= 94.8301(\text{良好})$$

同理,2~4号机组综合性能评估结果如下:

$$T^2 = (100 \quad 80 \quad 60 \quad 40)^T W^*$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5587 & 0.1913 & 0 & 0.25 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5303 & 0.4116 & 0.0581 & 0 \\ 0.4554 & 0.4258 & 0.0865 & 0.0322 \end{pmatrix}$$

$$= 91.3415(\text{良好})$$

$$T^3 = (100 \ 80 \ 60 \ 40)^T W^*$$

$$= \begin{pmatrix} 0.402 \ 0 & 0.476 \ 5 & 0.121 \ 5 & 0 \\ 0.865 \ 0 & 0.135 \ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.467 \ 3 & 0.362 \ 6 & 0.136 \ 0 & 0.034 \ 0 \\ 0.327 \ 5 & 0.520 \ 0 & 0.113 \ 4 & 0.039 \ 1 \end{pmatrix}$$

$$= 90.178 \ 8 (\text{良好})$$

$$T^4 = (100 \ 80 \ 60 \ 40)^T W^*$$

$$= \begin{pmatrix} 0.666 \ 7 & 0.085 \ 6 & 0.247 \ 7 & 0 \\ 0.789 \ 1 & 0.161 \ 5 & 0.049 \ 5 & 0 \\ 0.891 \ 1 & 0.108 \ 9 & 0 & 0 \\ 0.294 \ 8 & 0.375 \ 8 & 0.193 \ 4 & 0.136 \ 0 \\ 0.294 \ 8 & 0.375 \ 8 & 0.193 \ 4 & 0.136 \ 0 \end{pmatrix}$$

$$= 87.424 \ 3 (\text{合格})$$

3 成果分析

根据评分结果,金沙江上游某电站 1~3 号机组状况良好,4 号机组状况为合格。根据金沙江上游某水电站生产系统中缺陷管理以及机组实际运行工况参数对基于模糊层次法计算后的结果进行验证。

3.1 实际运行情况分析

根据 1—4F 机组运行情况,4 号机组缺陷登记 76 项,挂起 6 项,未处理 1 项,挂起缺陷主要包括:4 号机组发电机出口 PT 941B 相小车工作位置复归;4 号机组顶盖水位越高限(1 500.84 mm),现地检查 4 号机组顶盖水位正常;4 号机主配压阀渗油;4 号机左侧接力器排油管路渗油;4 号机空转态下,上位机报“4 号机水导油槽油位低报警”,上位机显示油位正常,现地磁翻板显示异常;4 号机组调速系统事故配压阀漏油。综上所述,正是由于 4 号机组工况较差,导致 4 号机组综合性能评估结果为合格,与模糊层次法进行的机组综合性能运算结果统一,验证了模糊算法、层次分析法在水电机组数据模型中的适用性与准确性。

3.2 4 号机实际运行工况参数验证结果

采用控制变量法计算各机组由开机至并网过程中的各项性能、经济指标(表 1)。经 2022 年金沙江上游某水电站 86 次开机数据可得,机组开机至并网时间范围为 2.25~3.20 min,假设 4 台机组在同一水头下开机时间为 2.725 min,考虑机组开机并网至机组带基荷加至 300 MW,提前 15

min 开机,四台机组运行工况比较见表 1。

综上所述,金沙江上游某水电站 4 号机组在开机并网至机组带基荷加至 300 MW 过程中,空载流量、消耗电量、耗水率、经济损失四大指标均劣于其余三台机组,与基于模糊层次法计算后的机组综合性能评估结果一致。针对上述性能、经济指标对比,应在允许的情况下,减少 4 号机组开机次数,在检修期间重点对 4 号机组进行检查维护;在后续金上流域集控生产管理中,应合理安排综合性能低的机组开机次数,在运行中加强监视,及时发现问题、处理问题,保障在站机组甚至全流域运行机组的安全、稳定性,实现流域集控经济管理最优化。

表 1 四台机组运行工况比较表

指标	1F	2F	3F	4F
空载流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	46.8	47.8	47.0	46.2
消耗电量/ $\text{kW} \cdot \text{h}$	9 438	9 752	10 013	10 687
耗水率 /[$\text{m}^3 \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]	4.41 亿	4.41 亿	4.41 亿	4.41 亿
经济损失/元	2 614	2 701	2 773	2 960

4 结 语

水电站的建设通常具有流域性,数字化建设、工程信息化管理建设对水电站的集中管控具有深刻意义。当流域集控管理机组台数大量增加,仅仅依靠人的生产经验试验机组工况判断和性能评估,具有速度慢、工程量大的缺点。通过智能大数据算法,建立基于模糊层次分析法的水轮机组综合性能评估方法,能够对多台同类型水轮机组进行性能比较。

该方法为智慧电站的建设提供参考,未来可考虑结合预警报警系统,实现实时监测、实时评估、酌情切换,更高效地保障机组安全经济运行。

参考文献:

- [1] 张霞,何南. 综合评估方法分类及适用性研究[J]. 统计与决策,2022,22(6):31-36.
- [2] 梁佳,宋绪丁,朱武威. 模糊层次分析法在高校智能办公椅设计评估中的应用[J]. 包装工程,2023,44(6):144-150.
- [3] 彭泽乾. 基于层次分析法的钢板-混凝土组合梁桥施工风险分析评估[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2023,37(2):46-51.
- [4] 吴次光,青长庚. 混流式水轮机电站运行稳定性与装机容量选择的探讨[J]. 水力发电,2002,6(7):48-51.

(下转第 94 页)

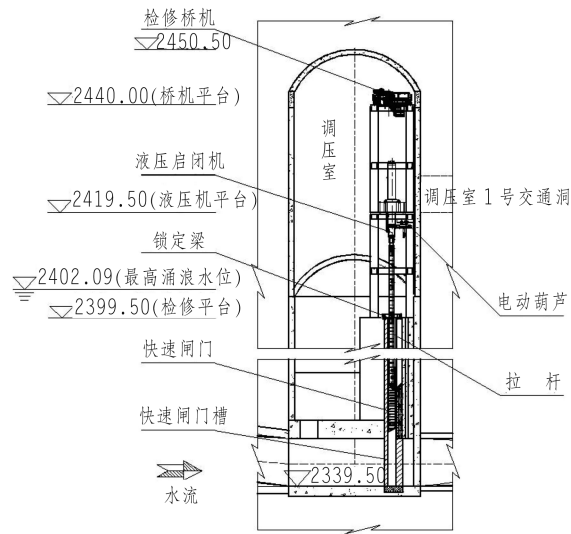


图1 调压室金属结构布置图(单位:m)

强烈的涌浪等,影响了闸门的稳定。因此在条文中提出这个问题以引起注意,必要时可进行专门研究,以保证安全运行,达到保护机组的目的”[6]。为了保证该工程调压室快速闸门的安全运行,下阶段需做模型试验来研究涌浪对闸门停放和下降的影响,以保证闸门运行的可靠性。

4 结 语

(1)结合昌波水电站的工程特点,通过对水轮发电机组的防飞逸保护措施进行综合分析,推荐采用调压室快速闸门作为水轮发电机组的防飞逸保护措施。

(2)在每个调压室设2扇快速闸门,2个调压室共设4扇;每扇快速闸门分别选用1台液压启闭机接拉杆进行操作,共4台套;调压室液压启闭机采用检修桥机进行检修,共2台套;调压室快速闸门拉杆采用电动葫芦进行检修,共4台套。

(3)由于调压室中存在涌浪,为了解涌浪对闸门停放和下降的影响,下阶段需做模型试验进行研究,以保证调压室快速闸门运行的可靠性。

参考文献:

[1] 国家能源局. 水力发电厂机电设计规范: NB/T 10878-2021[S]. 北京:中国电力出版社, 2012.
 [2] 张帅. 双江口水电站水轮机筒形阀设置可行性研究[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 20-23.
 [3] 王祖卿. 浅谈水轮发电机组的飞逸保护[J]. 湖北水力发电, 2007(6): 72-73,77.
 [4] 成磊. 大渡河猴子岩水电站地下厂房进水口快速门设置的必要性研究[J]. 四川水力发电, 2013, 32(6): 91-93.
 [5] 《水利水电工程钢闸门及拦污栅技术特性手册》编委会. 水利水电工程钢闸门及拦污栅技术特性手册(上、下)[M]. 南京:河海大学出版社, 2020.
 [6] 国家能源局. 水电工程钢闸门设计规范: NB 35055-2015[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.

作者简介:

卢修迪(1989-),男,贵州绥阳人,高级工程师,硕士,从事水工金属结构设计研究工作;
 莫春霞(1977-),女,贵州都匀人,正高级工程师,硕士,从事水电站水力机械设计工作;
 邓达人(1992-),男,贵州贵阳人,工程师,硕士,从事水工金属结构设计研究工作。
 (编辑:吴永红)

(上接第90页)

[5] 刁俊丰,郭江,张珂斐. 基于模糊综合评估和证据理论的水电站下导轴承预警模型[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 143-146.
 [6] 曹俊琴,马宏伟. 基于改进层次分析法的水电站装机容量的模糊综合评估[J]. 中国制造业信息化:学术版, 2009, 38(8):61-63.
 [7] 刘英,李雅,程儒松. 基于模糊层次分析法的集控水电站群倒班运行质量综合评估研究[J]. 机械, 2012, 39(6):27-30.
 [8] 许丰正. 基于模糊层次和灰色关联理论的水电站安全评估及决策[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(18):52-54.
 [9] 符向前,孙慕群,蒋劲,等. 水轮发电机组中长期稳定运行状态评价研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005

(12):41-44. DOI:10.13245/j.hust.2005.12.013.

[10] 周治国,马文浩,刘杰强,等. 小卫星健康状态自主模糊综合评估方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10):3553-3565.

作者简介:

张 艺(1994-),女,重庆人,工程师,硕士,从事水电站生产技术相关工作;
 刘晓晗(1994-),女,山东滕州人,硕士,从事水电站信息化相关工作;
 赵 洪(1998-),女,重庆人,助理工程师,本科,从事电站维护相关工作。
 (编辑:吴永红)