

基于改进逼近理想法的水电机组 过渡过程风险评估

徐振坤, 陈帝伊, 王鹏飞

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于数据驱动划分水电机组不推荐运行区和推荐运行区对水电机组的安全稳定运行具有重大意义。对于运行区的划分关键是机组运行风险的量化,故围绕准确量化机组整体运行风险的关键科学问题展开研究,以S电站机组动态平衡实验数据为研究对象,提出了基于改进逼近理想法(TOPSIS)的机组运行区划分方法。通过改进TOPSIS计算机组运行风险率,利用信息熵确定各评价指标权重并且给出中高风险运行区内各评价指标危险度排序,在准确量化机组运行风险率的基础上给出了机组运行区划分优化方案,为机组安全稳定运行及增大机组调节灵活性提供依据。

关键词: 水力发电机组; 机组过渡过程; 逼近理想法; 运行风险评估

中图分类号: TV734

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0021-09

Risk Assessment of Transition Process of Hydropower Units Based on Improved Approximation Ideal Method

XU Zhenkun, CHEN Diyi, WANG Pengfei

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The data-driven delineation of the unrecommended operation zone and recommended operation zone of hydropower units is of great significance for the safe and stable operation of hydropower units. Therefore, this paper focuses on the key scientific issue of accurately quantifying the overall operating risk of the unit, and proposes a method of dividing the unit operating zone based on the improved approximation ideal method (TOPSIS) with the S power plant unit dynamic balance experimental data as the research object. By improving TOPSIS, the risk rate of unit operation is determined by using information entropy to determine the weight of each evaluation index and to rank the danger of each evaluation index in the medium and high risk operation zone.

Keywords: hydro generator sets; unit transition process; approximation of ideal method; operational risk assessment

水电机组是水电站的重要组成部分,承担着供能和灵活性调节的重要任务^[1],当水电机组需要经常跨越振动区或在振动区运行时,机组的振动、摆度以及压力脉动等会过大,导致机组发生故障的潜在风险也会增加^[2],水电机组振动超过其限制范围的问题愈加严重并且难以分析量化其运行故障率是现在国内外水电机组安全稳定运行的主要问题^[3]。

2009年俄罗斯“萨扬舒申斯克”事故,其发生事故的主要原因就是2号机组进入不推荐运行区运行,导致机组顶盖固定螺丝断裂,最终造成多机报废的重大安全事故^[4]。因此,量化水电机组运行风险率,基于数据驱动划分水电机组不推荐运行区和推荐运行区对确保水电机组安全稳定运行及增大机组调节灵活性具有非常重大的工程意义^[5]。

收稿日期:2023-04-02

修稿日期:2023-05-08

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2019JLP-24);陕西省水利科技计划项目(2018slkj-9)

作者简介:徐振坤(1998—),男,硕士研究生,研究方向为水电站与泵站工程。E-mail:xuzhenkun@nwsuaf.edu.cn

通讯作者:陈帝伊(1982—),男,教授,主要从事水电站与泵站方面教学及科研工作。E-mail:diyichen@nwsuaf.edu.cn

传统可靠性评估方法在量化机组风险时,各指标权重多是人为确定,存在风险量化不准确的问题^[6],且传统可靠性评估方法所依赖的概率统计理论直接导致其评估过程必须利用足够多的样本数据^[7-9],这个要求极大地限制其在水电机组中的应用,同时传统可靠性评估方法得到的是整体设备的平均可靠度,不能准确表示单个设备的运行情况^[10],所以传统可靠性评估方法不适用于水电机组不同运行工况下的风险评估,基于状态监测信息的风险评估方法则克服了上述缺陷。陈保家等^[11]提出基于改进比例协变量模型和回归模型的航空发动机转子可靠性评估方法,建立系统故障率模型,通过不断更新响应协变量即可求取转子的实时运行可靠度与故障率。蔡改改等^[12]基于设备的运行状态信息,提出可以准确反映设备运行状态的特征指标,利用比例协变量模型建立设备可靠性评估模型,实现了设备故障的量化处理。王红军等^[13]利用小波包分解构建振动信号特征空间,通过计算实时运行状态与正常状态特征空间夹角来反映设备运行特性。

综上所述,水电机组状态监测信息风险评估研究尚处在探究阶段。对此,本文提出了基于改进逼近理想法(TOPSIS)^[14-15]的水电机组运行风险评估模型,量化水电机组运行风险率,给出评价指标危险度排序,实现水电机组基于数据驱动的运行区划分。

1 试验机组运行区初步分析

1.1 水电机组运行区出厂界定

S 电站有四台常规水电机组,机组单机容量为 262.5 MW,电站总装机容量为 1 050 MW。本文将采用该电站 3 号机组进行运行风险的量化和水电机组运行区的准确划分。3 号机组基本参数如下,水轮机型号为 HLS270-LJ-680,额定水头为 64 m,额定转速为 93.75 rpm,额定功率为 267.85 MW,发电机型号为 SF264-64/15000,额定容量为 291.7 MVA,调速器型号为 PFWT-200-6.3。为初步分析机组运行区,厂家通过出厂试验给出了机组不同运行水头的运行区划分情况,结果如图 1 所示。

如图 1 所示为厂家通过出厂试验给出的 3 号机组运行区初步划分图,运行水头在 67.5 m、71.1 m 时,机组运行区划分的运行所带负荷出现突变。对于额定水头为 64 m 的 3 号机组,其常用水头范围是 64 m~70 m,所以不推荐运行区将被划分为 0 MW~120 MW 及 0 MW~130 MW。但是,由于水电机组复杂的运行状况,在实际运行中机组需根据自身运

行特性及时调整不推荐运行区的限制范围,尽量在推荐运行区内运行,以实现水电机组的长期安全稳定运行。目前机组不推荐运行区多是通过试验与专家经验相结合来优化与调整,这在一定程度上使划分结果具有人为主观性,缺乏数据理论支持。

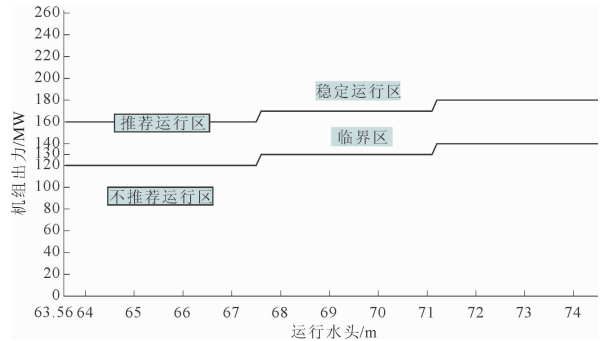


图 1 S 电站 3 号机组运行区初步划分情况

1.2 水电机组带负荷动平衡实验与初步分析

为实现水电机组运行区准确划分,利用该电站动平衡实验数据进行机组运行风险初步分析。3 号机组动平衡实验是在开机并带负荷过渡过程中进行的,即机组从静止到带最大负荷的过程。在带负荷试验前,为排除机组自身因素对实验的影响,先进行了 100% 转速试验及 100% 励磁升压试验。在带负荷试验时,机组实际水头为 64.74 m。机组负荷每增加 10 MW 记录一次,直至负荷增加到最大(262.5 MW)为止。机组动平衡实验的传感器测点位置如图 2 所示。传感器输出的振动值、摆度值和水压值均为峰峰值。

实验中共布设 19 个传感器测点以测量水电机组的实时振动值、摆度值及水压值,将实验所得数据作为风险评价指标为后续的运行区划分提供数据支持。19 个评价指标的运行限制范围如下:蜗壳进口水压(X_1)、顶盖下部水压(X_2)和尾水进口水压(X_3)的运行范围是 0 kPa~64 kPa,上导轴承 + X 摆度(X_4)、上导轴承 + Y 摆度(X_5)、下导轴承 + X 摆度(X_6)和下导轴承 + Y 摆度(X_7)的运行范围是 0 μm ~300 μm ,水导轴承 + X 摆度(X_8)和水导轴承 + Y 摆度(X_9)的运行范围是 0 μm ~375 μm ,上机架水平 + X 振动(X_{10})、上机架水平 + Y 振动(X_{11})、下机架水平 + X 振动(X_{13})、下机架水平 + Y 振动(X_{14})和顶盖垂直 + Z 振动(X_{19})的运行范围是 0 μm ~110 μm ,上机架垂直 + Z 振动(X_{12})和下机架垂直 + Z 振动(X_{15})的运行范围是 0 μm ~80 μm ,定子水平 + X 振动(X_{16})的运行范围是 0 μm ~40 μm ,顶盖水

平 + X 振动 (X_{17}) 和顶盖水平 + Y 振动 (X_{18}) 的运行范围是 $0 \mu\text{m} \sim 90 \mu\text{m}$ ^[16]。

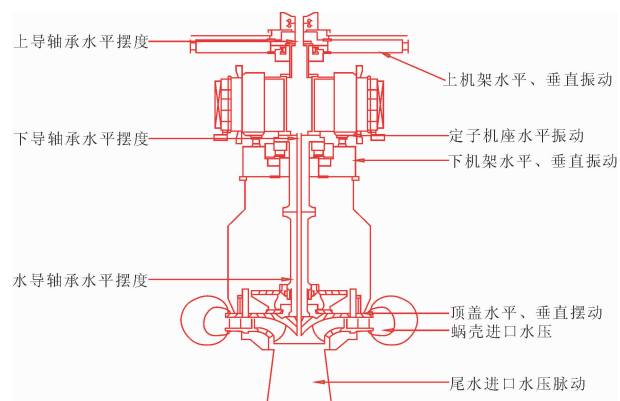


图 2 动平衡实验传感器测点布置示意图

在开机带最大负荷过渡过程中,传感器输出的风险评价指标变化示意如图 3 所示。先初步分析评价指标变化示意图,为后续的运行区划分提供依据。

由图 3 可知,随着机组带负荷的逐渐增加,本文所使用的 19 个评价指标均呈现先增大后减小的趋势。尾水管进口水压 (X_3) 整体大于蜗壳进口水压值 (X_1) 和顶盖下部水压值 (X_2),水导轴承的摆度值 (X_8, X_9) 要远大于上导轴承 (X_4, X_5) 和下导轴承的水压值 (X_6, X_7),在低负荷区,上机架垂直 + Z 振动值 (X_{12}),下机架垂直 + Z 振动值 (X_{15}) 和顶盖垂直 + Z 振动值 (X_{19}) 要远大于相应的水平 + X 与 + Y 振动值 ($X_{13}, X_{14}, X_{16}, X_{17}$),这说明当在低负荷区运行时,应多关注上机架、下机架与顶盖垂直 + Z 振动趋势,这有可能是导致故障的主要因素。

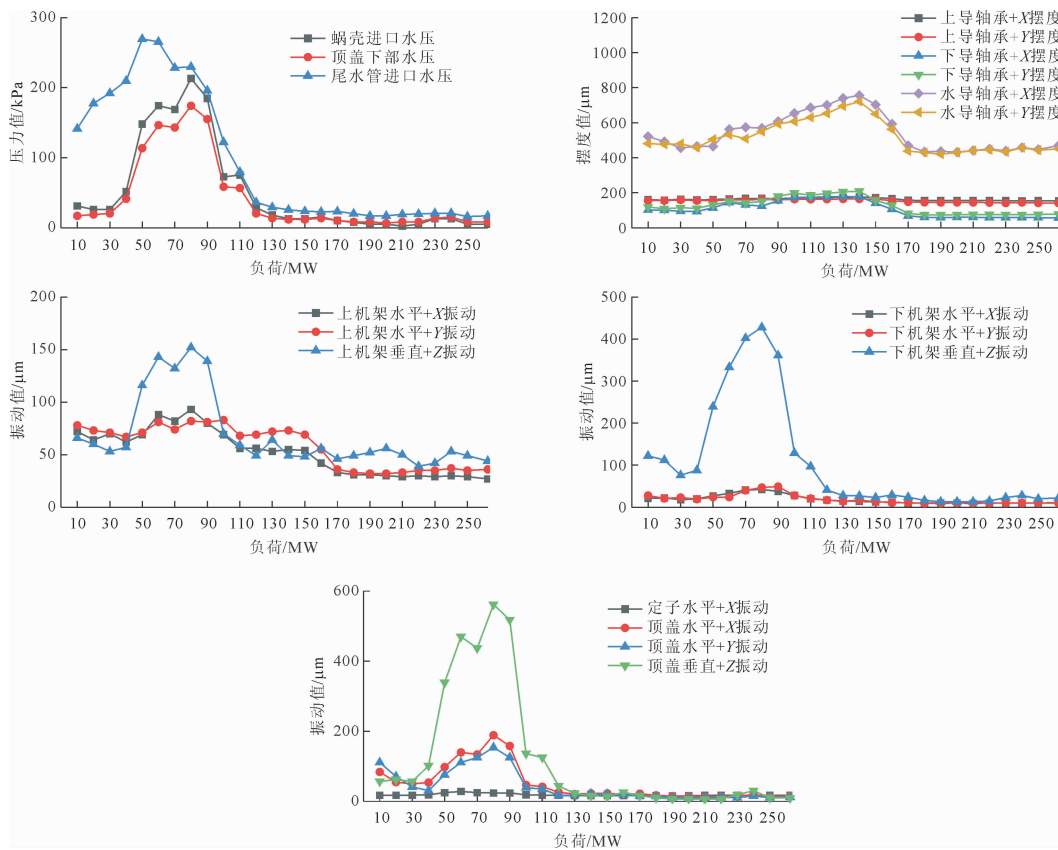


图 3 动平衡实验评价指标变化趋势

由评价指标运行限制范围可知,在机组升负荷运行过程中,许多评价指标的实测值远大于表中给出的运行范围。其中,水导轴承 + X 摆度值 (X_8) 和水导轴承 + Y 摆度值 (X_9) 的最大值为 $710 \mu\text{m}$ 和 $653 \mu\text{m}$,超出其运行限制范围 $300 \mu\text{m}$ 。尾水进口水压 (X_3) 的最大值达到 269.5 kPa ,超出其运行限制范围 64 kPa 。同时,蜗壳进口水压 (X_1)、上机架垂

直 + Z 振动 (X_{12})、下机架垂直 + Z 振动 (X_{15}) 等不同程度地超过各自运行范围。结合图 3 可知,在低负荷区 ($40 \text{ MW} \sim 110 \text{ MW}$),机组动平衡实验评价指标的实测值波动最为剧烈。因此,从以上的分析中可以初步得出结论,可以将 $40 \text{ MW} \sim 110 \text{ MW}$ 的负荷区作为机组不推荐运行区,若机组在此区间内长期运行或者频繁穿越此区域时,机组会大概率发

生故障。

综上所述,根据动平衡实验结果和人工相结合的方法可以初步确定机组运行区的大致范围,机组推荐运行区是 120 MW ~ 262.5 MW,不推荐运行区是 0 MW ~ 120 MW。这种划分方法依赖划分人的经验,缺少理论支持,并且存在划分不精确的问题。在高风险运行区内,上述方法不能计算各运行工况的机组风险率,在同一个高风险运行区内,没有给出 19 个风险评价指标对机组造成故障时的贡献率,当机组在此区间短时间运行或者穿越此区间时,便不能有准备的重点关注易损坏的零部件,不利于预防故障和预检修。因此有必要建立水电机组的运行风险评估模型,为精确划分运行区给出理论支持,使机组的调节更加灵活,建立机组高风险运行区的高风险指标体系,为预防风险和预检修提供依据。

2 基于改进逼近理想法的水电机组运行风险评估模型

逼近理想法(TOPSIS)的基本原理简单,主要存在两大优点:第一,可以区分机组不同运行状态间微小的差距;第二,符合水电机组运行状态变化的规律。运用逼近理想法时,计算不同运行状态所对应的相对贴进度即可求出机组运行故障率。

传统逼近理想法在计算各评价对象到正负理想解的距离时采用 Euclid 距离,但是 Euclid 距离放大了权重对评估结果的影响,降低了模型的评估精确性,马氏距离不受变量量纲的影响,排除了指标间相互影响的可能性。本文将马氏距离和逼近理想法结合,既可有效地反映出各响应协变量与机组风险率间的关系,又能以一种客观科学的方法量化机组的运行状况。基于改进逼近理想法的机组运行风险率计算步骤如下:

步骤 1: 构建机组运行数据的评价矩阵 $Y = \{y_{ij}\}$

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: m 为评价对象的个数, n 为评价指标的个数。 Y_{ij} 指的是第 i 个评价对象的第 j 个评价指标所对应的值($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)。

步骤 2: 构建规范化决策矩阵 $Z = \{z_{ij}\}$

成本型(极小型)指标的期望指标值越小越好,

其公式为:

$$z_{ij} = \frac{\max_i y_{ij} - y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}} \quad (2)$$

效益型(极大型)指标的期望指标值越大越好,其公式为:

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_i y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}} \quad (3)$$

中间型指标的期望指标值取中间值最好,其公式为:

$$z_{ij} = \begin{cases} 2 \frac{y_{ij} - \max_i y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}}, \min_i y_{ij} \leq y_{ij} \leq \frac{\max_i y_{ij} + \min_i y_{ij}}{2} \\ 2 \frac{\max_i y_{ij} - y_{ij}}{\max_i y_{ij} - \min_i y_{ij}}, \frac{\max_i y_{ij} + \min_i y_{ij}}{2} \leq y_{ij} \leq \max_i y_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

步骤 3: 由规范化决策矩阵 $Z = \{z_{ij}\}$ 和权重向量 $W = \{w_j\}$ 构建加权规范化矩阵 $N = \{a_{ij}\}$

$$N = ZW = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤 4: 确定理想解 x^+ 和负理想解 x^-

理想解 x_j^+ 由 N 中每列的最大值构成,负理想解 x_j^- 由 N 中每列的最小值构成:

$$x_j^+ = \max_i n_{ij} \quad (6)$$

$$x_j^- = \min_i n_{ij} \quad (7)$$

步骤 5: 采用马氏距离公式,计算第 i 个评价对象 z_i 到理想解 x_j^+ 和负理想解 x_j^- 的距离为:

$$d_i^+(z_i, x_j^+) = \sqrt{(z_i - x_j^+)^T S^{-1} (z_i - x_j^+)} \quad (8)$$

$$d_i^-(z_i, x_j^-) = \sqrt{(z_i - x_j^-)^T S^{-1} (z_i - x_j^-)} \quad (9)$$

式中: S 是 N 的协方差矩阵。

步骤 6: 计算各评价对象的相对贴进度 p_i 作为设备运行可靠度:

$$p_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

步骤 7: 计算机组风险率:

$$\lambda_i = 1 - p_i \quad (11)$$

信息熵可以衡量信号携带有用信息的多少,因此本文从信号所携带信息量的大小出发,采用信息熵的方法来确定指标权重与风险贡献率,计算出的

熵权表示指标在水电机组运行评估中的重要性,熵权越大对应的指标属性就越重要。因此本文基于熵权方法来确定各评价指标的权重及中高风险运行区内各指标危险度排序^[17],计算步骤如下:

步骤1:基于信息熵运算公式,计算第 j 个评价指标的信息熵值:

$$IE_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m h_{ij} \ln h_{ij} \quad (12)$$

式中: h_{ij} 为第 j 个评价指标所占比重,当 $h_{ij} = 0$ 时,

$$h_{ij} \ln h_{ij} = 0, h_{ij} = \frac{y_{ij}}{m}, \sum_{i=1}^m h_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m; j$$

$= 1, 2, \dots, n$ 。

步骤2:各评价指标权重为:

$$w_j = \frac{1 - IE_j}{\sum_{j=1}^n (1 - IE_j)} \quad (13)$$

3 工程实例分析

本节利用2.1节中提到S电站3号机组动平衡实验数据验证本文所提方法在水电机组风险评估中的适用性。

以电站3号机组实际水头为67.46 m时的数据作为机组状态监测数据,构建响应协变量评价矩阵 $\{y\}$,评价矩阵如表1所示,后续规范化处理、熵权和指标风险贡献率排序都基于评价矩阵计算得到。

对评价矩阵进行规范化处理和计算各指标熵权。由于19个评价指标包括水压值、摆度值和振动值,量纲不同,所以必须对评价矩阵进行规范化处理。采用基于信息熵的权重计算方式计算得到各个指标的熵权权重如表2及图4所示,由评价矩阵和熵权权重计算其规范矩阵。

表1 动平衡实验数据评价矩阵

评价对象	蜗壳进口 水压/kPa	顶盖下部 水压/kPa	尾水管进口 水压/kPa	上导X摆度 / μm	上导Y摆度 / μm	...	顶盖水平Y 振动/ μm	顶盖垂直Z 振动/ μm
10 MW	31.2	17.24	141.62	162	156		111	57
20 MW	26.0	18.97	177.67	158	156		71	62
30 MW	26.0	20.69	192.39	164	160		41	57
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
262.5 MW	5.2	8.62	17.26	154	142		12	10

表2 各评价指标熵权权重

风险指标	熵权权重	风险指标	熵权权重
X_1	蜗壳进口水压/kPa	X_{11}	上机架水平+Y振动/ μm
X_2	顶盖下部水压/kPa	X_{12}	上机架垂直+Z振动/ μm
X_3	尾水进口水压/kPa	X_{13}	下机架水平+X振动/ μm
X_4	上导轴承+X摆度/ μm	X_{14}	下机架水平+Y振动/ μm
X_5	上导轴承+Y摆度/ μm	X_{15}	下机架垂直+Z振动/ μm
X_6	下导轴承+X摆度/ μm	X_{16}	定子水平+X振动/ μm
X_7	下导轴承+Y摆度/ μm	X_{17}	顶盖水平+X振动/ μm
X_8	水导轴承+X摆度/ μm	X_{18}	顶盖水平+Y振动/ μm
X_9	水导轴承+Y摆度/ μm	X_{19}	顶盖垂直+Z振动/ μm
X_{10}	上机架水平+X振动/ μm		

在求出规范化矩阵后,接下来确定各评价指标的正理想解和负理想解。水电机组的压力脉动值、摆度值与振动值越小则表明机组运行状态越稳定,因此本文的19个评价指标均是越小越优的成本型指标。那么正理想解为各个指标的最小值,负理想解为各个指标的最大值,所以正负理想解如下所示:

$$x^+ = \{2.6, 6.9, 16.24, 154, \dots, 6\} \quad (14)$$

$$x^- = \{213.17, 174.14, 269.54, 176, \dots, 562\} \quad (15)$$

计算规范化矩阵的协方差矩阵并采用马氏距离计算公式,计算每个评价对象到正负理想解的距离,根据式(10)、式(11)即可求出机组的运行风险率。其中工况为10 MW时的运行风险率如下:

$$d_{10}^+(Y_{10}, x^+) = 0.0052 \quad (16)$$

$$d_{10}^-(Y_{10}, x^-) = 0.0112 \quad (17)$$

$$p_{10} = \frac{d_{10}^-}{d_{10}^+ + d_{10}^-} = 0.683, \lambda_{10} = 0.317 \quad (18)$$

以同样的方式计算出机组不同工况下的运行风险率如表 3 所示。

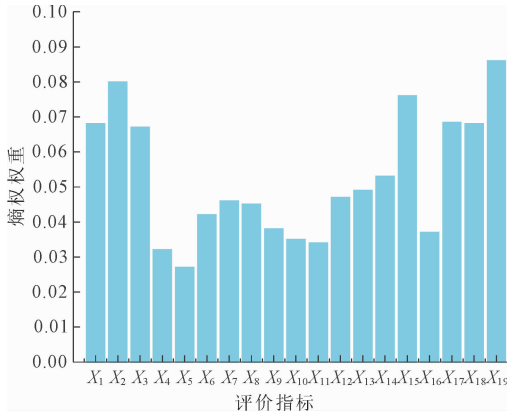


图 4 各评价指标熵权重示意图

表 3 机组不同运行工况风险率

评价对象	d^+	d^-	p	λ
10 MW	0.0052	0.0112	0.683	0.317
20 MW	0.0044	0.0119	0.730	0.270
30 MW	0.0041	0.0123	0.750	0.250
40 MW	0.0046	0.0117	0.718	0.282
50 MW	0.0098	0.0066	0.400	0.600
60 MW	0.0127	0.0037	0.230	0.770
70 MW	0.0129	0.0035	0.210	0.790
80 MW	0.0153	0.0015	0.089	0.911
90 MW	0.0137	0.0026	0.160	0.840
100 MW	0.0064	0.0102	0.614	0.386
110 MW	0.0054	0.0113	0.677	0.323
120 MW	0.0039	0.0133	0.773	0.227
130 MW	0.0039	0.0136	0.777	0.223
140 MW	0.0039	0.0137	0.778	0.222
150 MW	0.0030	0.0142	0.836	0.164
160 MW	0.0021	0.0146	0.874	0.126
170 MW	0.0007	0.0156	0.957	0.043
180 MW	0.0004	0.0159	0.975	0.025
190 MW	0.0003	0.0160	0.982	0.018
200 MW	0.0003	0.0160	0.982	0.018
210 MW	0.0003	0.0160	0.982	0.018
220 MW	0.0003	0.0160	0.982	0.018
230 MW	0.0005	0.1580	0.969	0.031
240 MW	0.0008	0.1550	0.951	0.049
250 MW	0.0003	0.0160	0.982	0.018
262.5 MW	0.0004	0.0159	0.975	0.025

由图 4 中各指标的熵权重可知,顶盖下部水压,下机架垂直+Z 振动,顶盖垂直+Z 振动为机组不推荐运行区的主导风险指标,基于表 3、评价指标风险区限制范围^[18]和 2 节中机组动平衡实验的数据划分机组高中低风险区域。划分结果如图 5 所示。

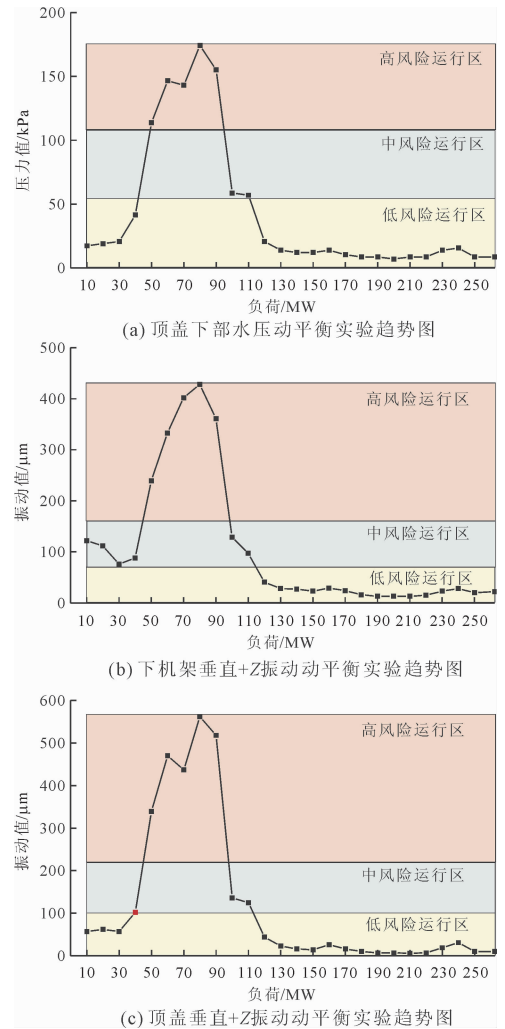


图 5 评价指标划分运行区示意图

从图 5 (a) 图中可知,机组低风险运行区为 10 MW~40 MW、120 MW~262.5 MW,中风险运行区为 100 MW、110 MW,高风险运行区为 50 MW~90 MW;从图 5 (b) 图中可知,低风险运行区为 120 MW~262.5 MW,中风险运行区为 10 MW~40 MW、100 MW、110 MW,高风险运行区为 50 MW~90 MW;从图 5 (c) 图中可知,低风险运行区为 10 MW~30 MW,120 MW~262.5 MW,中风险运行区为 40 MW、100 MW、110 MW,高风险运行区为 50 MW~90 MW。综上所述可得,3 号机组低风险运行区为 120 MW~262.5 MW,中风险运行区为 10 MW~40 MW、

100 MW、110 MW,高风险运行区为 50 MW ~ 90 MW,结合表 3 中各运行工况的故障率可得,低风险运行区故障率上限是机组出力为 120 MW 时的故障率即 22.7%,中风险运行区故障率上下限分别是机组出力为 30 MW 和 100 MW 时的故障率分别为 24.9% 和 38.7%,高风险运行区故障率下限是机组出力为 50 MW 时的故障率即 59.7%,如图 6 所示。

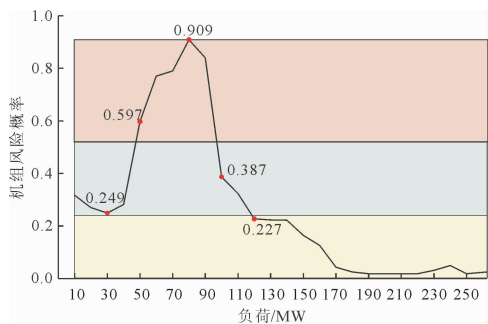
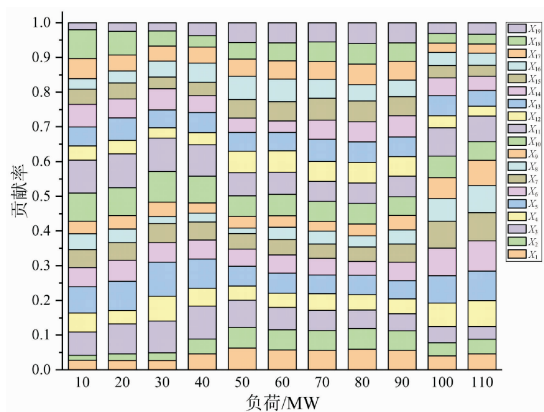


图 6 水电机组运行区风险概率量化图

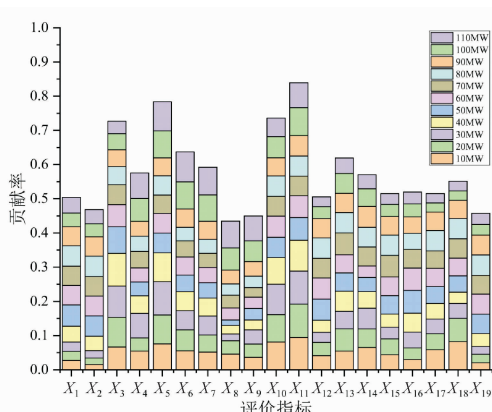
基于上述分析可以将水电机组划分为三个风险区间,由于低风险区间是推荐运行工况,发生故障的

概率较低,所以本文只讨论中风险区和高风险区。如图 7 和图 8 为在中高风险运行区内,同一负荷点下不同评价指标的风险贡献率以及同一评价指标对不同负荷点的风险贡献率。本文给出中高风险负荷点时的评价指标风险贡献率排序,为后续的检修与预防故障提供参考。

从图 7 和图 8 中可知,在中高风险运行区内同一评价指标对不同负荷点的风险贡献率不同,同一负荷点下各评价指标的风险贡献率也不同,其中风险贡献率最高的评价指标是 X_{10} 、 X_{11} 和 X_{18} 即上机架水平 + X 振动、上机架水平 + Y 振动和顶盖水平 + Y 振动,可以认为 X_{10} 、 X_{11} 和 X_{18} 就是该负荷点下发生故障的主要风险指标。因此,只需确定中高风险区内每个负荷点下的主要风险指标,在运行与穿越此区域时人为加以控制,不但可以大大提升水电机组平稳运行的概率,也可以充分减小机组不推荐运行区,使机组调节更加灵活。上述说明,建立水电机组评价指标风险贡献率体系具有至关重要的意义。



(a) 同一负荷点下不同评价指标风险贡献率



(b) 同一指标在不同负荷点下的风险贡献率

图 7 机组中高风险区评价指标贡献率示意图

在图 6 中,本文将 10 MW ~ 40 MW、100 MW、110 MW 划分为中风险运行区,50 MW ~ 90 MW 为高风险运行区。将中高风险运行区内各负荷点下风险贡献率从大到小排序前三的评价指标为主要风险指标,由于负荷区间为 10 MW ~ 40 MW 的情况仅发生在开关机时,所以此处不做指标排序,如表 4 所示。因此当机组需要运行至高风险区时,应多关注蜗壳、顶盖、尾水管、上下机架与定子的运行情况,避免发生重大故障;当机组运行至中风险区时,应多关注上下导轴承及上机架的运行情况,这样就可以进一步减小中风险运行区的风险概率,使机组动态平衡实验时初步界定的不推荐运行区进一步缩小,由原

来的 0 MW ~ 120 MW 缩减至 0 MW ~ 100 MW,增加机组 20 MW 的调节容量。

表 4 评价指标贡献率排序

评价对象	评价指标排序		
	1	2	3
50 MW	X_3	X_{16}	X_{11}
60 MW	X_{16}	X_3	X_{11}
70 MW	X_{13}	X_{15}	X_3
80 MW	X_1	X_2	X_{10}
90 MW	X_{14}	X_{11}	X_{19}
100 MW	X_{11}	X_6	X_5
110 MW	X_6	X_5	X_7

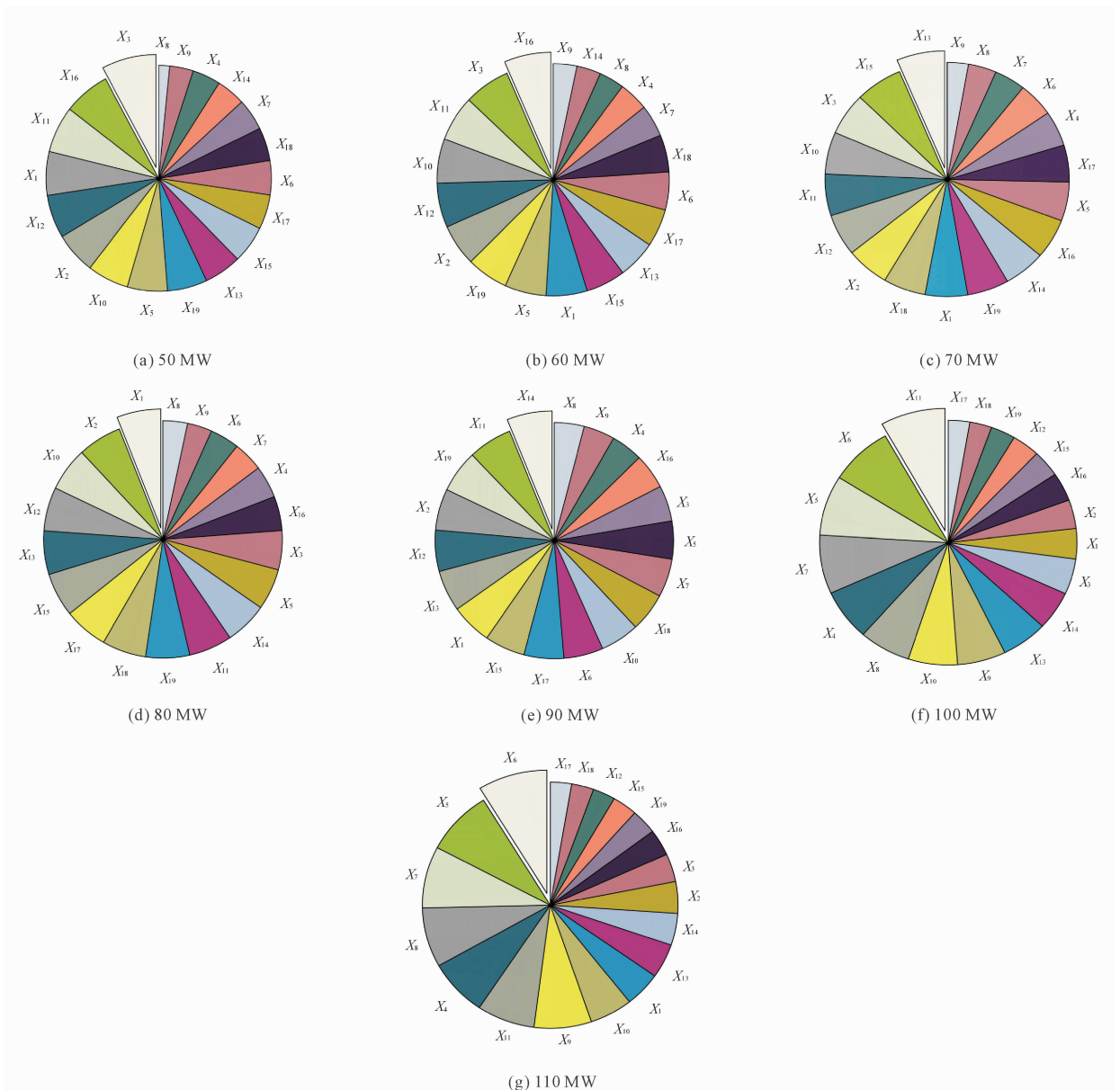


图 8 中高风险运行区不同评价指标的风险贡献率

4 结 论

围绕水电机组开机带负荷运行工况动态风险量化问题,建立了改进逼近理想法风险评估模型,得出以下结论,并提出以下展望:

(1) 通过马氏距离改进的 TOPSIS 模型弥补了传统可靠性评估方法需要大量历史数据的缺点,这种评估方式可以精确区分机组不同状态之间微小的差距且更贴近水电机组运行的变化规律。

(2) 建立基于上述改进 TOPSIS 模型与信息熵指标权重的机组风险评估模型,量化了水电机组不同运行工况下不同评价指标的风险贡献率,给出了中高风险运行区内的评价指标危险度排序,量化了

水电机组不同运行工况下的风险概率,为机组运行区划分提供了详细的理论依据。包括:①120 MW ~ 262.5 MW 为低风险运行区间,其风险率上限为 22.7%,10 MW ~ 40 MW、100 MW ~ 110 MW 为中风险区间,其风险率上下限分别为 38.7% 与 24.9%,50 MW ~ 90 MW 为高风险运行区,其风险率下限为 59.7%;②当机组运行至或频繁穿越高风险运行区时,电站工作人员应重点关注蜗壳、顶盖、尾水管、上下机架与定子的运行情况,避免发生重大故障;③当机组运行至中风险运行区时工作人员应重点关注上下导轴承与上机架的运行情况,这样便可以进一步减小中风险运行区的风险概率,使机组动平衡实验时初步界定的不推荐运行区进一步缩小,由原来的

0 MW ~ 120 MW 缩减至 0 MW ~ 100 MW,使推荐运行区由原来的 120 MW ~ 262.5 MW 增大到 100 MW ~ 262.5 MW,增加机组 20 MW 的调节容量。

参考文献:

- [1] 孙凯祺,李可军,刘智杰,等. 基于柔性直流互联的抽水蓄能与可再生能源协同运行策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):41-46.
- [2] 张 浩. 水力发电系统瞬态动力学建模与稳定性分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [3] 赵志炉. 水电机组稳定性监测及振动故障诊断研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [4] 贾金生,徐洪泉,李铁友,等. 通过萨扬-舒申斯克水电站事故原因分析看机电设备安全运行问题[C]//第十八次中国水电设备学术讨论会,中国福建武夷山,2011.
- [5] 李欢欢. 水轮发电机组安全评价及其调节特性对互补发电效益影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [6] 何正嘉,曹宏瑞,晔艳阳,等. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考[J]. 机械工程学报,2014,50(2):171-186.
- [7] 董玉革,赵征权. 基于传统可靠性理论联接方程的模糊可靠性分析方法[J]. 机械工程学报,2006(1):57-61.
- [8] O'Connor P. Commentary: Reliability - Past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(4):335-341.
- [9] 赵水荣,刘礼华,张 巍,等. 某电站水轮机振动测试及其可靠性分析[J]. 水力发电学报,2006,25(4):139-

141.

- [10] Zio E. Reliability engineering: Old problems and new challenges[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009,94(2):125-141.
- [11] 陈保家,邱光银,肖文荣,等. 航空发动机转子轴承运行可靠性评估方法[J]. 西安交通大学学报,2018,52(10):41-48.
- [12] 蔡改改,陈雪峰,陈保家,等. 利用设备响应状态信息的运行可靠性评估[J]. 西安交通大学学报,2012,46(1):108-113.
- [13] 王红军,汪 亮. 基于多域空间状态特征的高端装备运行可靠性评价[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4):804-810.
- [14] 李元斌,孙有朝,李龙彪. 改进熵权逼近理想解排序法的航空发动机限寿命件模糊风险评估[J]. 中国机械工程,2018,29(10):1135-1140.
- [15] 毕 娟,李希建. 组合赋权的 TOPSIS 在冲击地压危险性评价中的应用[J]. 矿业安全与环保,2020,47(2):114-119.
- [16] Li Huanhuan, Chen Diyi, Arzaghi E, et al. Safety assessment of hydro-generating units using experiments and grey-entropy correlation analysis [J]. Energy, 2018,165:222-234.
- [17] 荆岫岩,姬联涛,郝 峰,等. 基于改进 PCM 的抽水蓄能机组轴系可靠性评估[J]. 水力发电学报,2021,40(9):86-94.
- [18] Li Huanhuan, Xu Beibei, Arzaghi E, et al. Transient safety assessment and risk mitigation of a hydroelectric generation system [J]. Energy, 2020, 196: 117131-117135.

(上接第 20 页)

- [6] 李 伊,刘黎萍,孙立军. 全厚式沥青路面温度场预估模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(3):377-382.
- [7] 翁文彬,曾道先. 太阳辐射热对沥青混凝土斜墙热稳定的影响及计算[J]. 水工沥青防渗,1981(3).
- [8] 王延海,曹海利,纪小平,等. 沥青路面高温温度场的经验预估模型[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(5):84-87.
- [9] 王黎明,李 崑. 沥青混合料铺筑温度场的有限差分仿真模型[J]. 科学技术与工程,2020,20(1):348-353.
- [10] 谌及时,唐启文. 基于 ABAQUS 有限元软件的沥青路面温度场分布规律研究[J]. 黑龙江交通科技,2020,43(10):36-37.
- [11] 刘 峰. 某沥青混凝土面板堆石坝温度场影响研究

分析[J]. 水利科技与经济,2021(8):110-113,118.

- [12] 赵 昕,刘 洋,张 浩. 材料热物理参数对沥青路面温度场影响的模拟分析[J]. 河南科学,2023,41(1):39-46.
- [13] 陈 果,杨 霞,杨 亮. 大体积混凝土温度应力有限元计算数值模拟分析[J]. 重庆建筑,2019,18(8):27-30.
- [14] 刘荣辉,钱国平,郑健龙. 周期性气候条件下沥青路面温度场计算方法研究[J]. 长沙交通学院学报,2002,18(2):71-75.
- [15] 周 勇,刘艳峰,王登甲,等. 中国不同气候区日总太阳辐射计算模型适用性分析及通用计算模型优化[J]. 太阳能学报,2022,43(9):1-7.