

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230960

基于云模型的水轮机健康状态评估

张龙生¹, 劳鹏飞²

(1. 国能四川大渡河双江口水电开发有限公司, 四川 阿坝 624600; 2. 武汉三联水电控制设备有限公司, 湖北 武汉 430200)

摘要: 水轮机健康状态评估是实现水轮机健康管理的必要工作,是实现水轮机视情维修的关键步骤。考虑到获取的水轮机健康状态表征信息的不确定性和模糊性,构建了定性和定量的指标体系组合,将水轮机健康状态定义为5个状态,并利用语言尺度函数将其转换为云滴,通过云距离实现了对水轮机健康状态评估,并以某型水轮机为例验证了健康状态评估模型的有效性,为水轮机装备健康管理提供了坚实基础。

关键词: 云模型;水轮机;健康管理;健康状态评估

中图分类号: TV734;TP15

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0186-04

1 引言

水轮机作为水电站的关键基础设施,系统组成复杂,涵盖了机械、电子、控制等多项技术。传统的维修模式是故障发生后停机维修,不利于水电站的长期稳定运行,进而导致发电量降低,影响供电的可靠性^[1-4]。健康状态评估是装备测试性设计的重要内容,是实现装备视情维修的必要工作。随着健康管理概念在复杂系统中的普及应用,相关技术在民用产品中也逐渐加强。装备健康状态评估是通过分析产品特点,构建合理健康状态表征指标体系,通过分析相关评估算法实现其健康状态评估,理论上仍属于经典评估理论的适用范畴。不同于传统的将装备状态分为“正常”和“故障”两个状态,健康状态评估通常将装备状态定义为多种状态,且不同状态下采取不同的维护操作措施,从而实现装备的健康管理。由于水轮机工作过程中存在多种工况,其健康状态表征指标蕴含的信息存在明显的不确定性和模糊性,这不利于准确评估装备的健康状态^[5-6]。借鉴崔建国等^[7-8]采用云重心评估法开展自行火炮和汽轮机健康状态评估方法,本文借助于语言尺度函数、云滴融合模型和云距离模型,提出水轮机健康状态评估模型,从而实现了水轮机的健康状态评估。

2 基于改进云 TOPSIS 的健康状态评估模型

2.1 云模型

云模型结合了概率统计学和模糊数学的理论,通过给出样本点的随机确定度,描述了随机性、模糊性和相关性的概念。

定义论域 U, Y 是属于 U 的定性概念。如果定量值 $x(x \in U)$ 表示 Y 的随机实现,则 x 对 Y 的隶属度 $\mu(x)$ 是一个具有稳定趋势的随机数 $\mu(x) \in [0, 1]$ 。也即:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad \forall x \in U; x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

x 在 U 中的分布被定义为云 $Y(x)$, 每个 x 代表一个云滴。

云模型是客观世界的模糊性和随机性与人类认知的有效结合,实现了定性概念和定量价值的有效转换。云模型的典型数字特征是期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e , 具体概念表示见图 1。其中, E_x 是数字集合中反映定性概念最有效的点,因此它是从定性概念到定量数值转换的最佳样本点,反映了对概念理解的统一性; E_n 描述了 E_x 的离散度,并表示集合 U 中定性概念可接受的云滴范

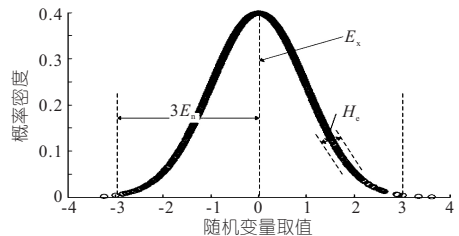


图 1 云模型数字特征示意图

Fig. 1 Digital features of cloud model

收稿日期: 2023-06-13, 修回日期: 2023-07-31

作者简介: 张龙生(1973-),男,硕士、工程师,研究方向为水电厂设备管理, E-mail: 443562517@QQ.com

通讯作者: 劳鹏飞(1982-),男,高级工程师,研究方向为水轮机控制系统研发, E-mail: lpf1002@126.com

围; H_e 是 E_n 的不确定性度量,由 E_n 的随机性和模糊性决定。

2.2 基于语言尺度函数的健康状态云转换

语言变量集合 $S = \{S_i \mid i = -k, \dots, 0, \dots, k, k \in K\}$, 语言尺度函数公式为:

$$f: S_i \rightarrow u_i \quad (i = -k, \dots, 0, \dots, k, k \in K) \quad (2)$$

$$u_i = \begin{cases} (b^k - b^{-i}) / (2b^k - 2) & -k < i \leq 0 \\ (b^k + b^i - 2) / (2b^k - 2) & 0 < i \leq k \end{cases} \quad (3)$$

式中, $u_i \in [0, 1]$, $b \in [1.36, 1.4]$, b 一般取 1.4。

按上述定义,有以下不等式成立:①若 $-k < i \leq 0$, 则有 $0 < u_i \leq 0.5$; ②若 $0 < i \leq k$, 则有 $0.5 < u_i \leq 1$; ③当 $i + j = 1$ 时, $u_i + u_j = 1$ 。

因此,将健康状态转换为云模型的步骤如下。

步骤 1 计算 u_i 的值。

步骤 2 定义集合 $U = [X_{\min}, X_{\max}]$, 期望 E_{x_i} 计算式为:

$$E_{x_i} = X_{\min} + u_i (X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

步骤 3 计算熵 $E_{n_i}^*$ 、 E_{n_i} :

$$E_{n_i}^* = \begin{cases} (1 - u_i) (X_{\max} - X_{\min}) / 3 & -k \leq i < 0 \\ u_i (X_{\max} - X_{\min}) / 3 & 0 < i \leq k \end{cases} \quad (5)$$

$$E_{n_i} =$$

$$\begin{cases} (u_{|i-1|} + u_{|i|} + u_{|i+1|}) / 9 & 0 < i \leq k - 1 \\ (u_{|i-1|} + u_{|i|}) (X_{\max} - X_{\min}) / 6 & i = k \\ (u_{|i|} + u_{|i+1|}) (X_{\max} - X_{\min}) / 9 & i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

步骤 4 计算超熵 H_{e_i} :

$$H_{e_{-i}} = H_{e_i} = (E_{n_m}^* - E_{n_i}) / 3 \quad (7)$$

式中, $H_{e_{-i}}$ 为语言尺度分类等级,与 H_{e_i} 为对称的两个等级,其超熵相等。

步骤 5 最后可获得对应于健康状态 S_i 的云簇 $Y_i(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$ 。

2.3 健康状态评估模型

基于改进云 TOPSIS 方法开展健康状态评估的主要过程如下。

(1) 建立被评装备的健康状态指标体系。被评装备的健康状态指标体系应能真实、全面地表征装备运行过程的状态。

(2) 通过专家法确定健康状态指标体系中各指标的权重。

(3) 获取健康状态信息的云模型。装备健康状态不同,指标的表征信息亦不同,通常有定量数值型和定性语言型两类。通过采集装备健康状态指标体系各指标的 n 个数据组成决策矩阵, n 个

定量数值型、定性语言型数据对应的云模型分别为:

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{x_i} \\ E_n = n \sqrt{\frac{(\max E_{x_i} - \min E_{x_i})^2}{12(n^2 + 1)}} \\ H_e = E_n / n \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{x_i} E_{n_i} / \sum_{i=1}^n E_{x_i} \\ E_n = \sum_{i=1}^n E_{n_i} \\ H_e = \sum_{i=1}^n H_{e_i} E_{n_i} / \sum_{i=1}^n E_{n_i} \end{cases} \quad (9)$$

(4) 装备健康状态的云模型表示。装备健康状态的云模型可用 m 个指标的云模型融合得到,融合方法同定性语言型数据的云模型。

(5) 用云距离模型来确认装备健康状态。云距离模型的定义,即云滴 $Y_i(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$ 和 $Y_j(E_{x_j}, E_{n_j}, H_{e_j})$ 的距离定义,公式分别为:

$$d(Y_i, Y_j) = \eta_1 d(E_{x_i}, E_{x_j}) + \eta_2 d(E_{n_i}, E_{n_j}) + \eta_3 d(H_{e_i}, H_{e_j}) \quad (10)$$

$$\begin{cases} 1 & |E_{x_i} - E_{x_j}| > 3(E_{n_i} + E_{n_j}) \\ \frac{|E_{x_i} - E_{x_j}|}{3(E_{n_i} + E_{n_j})} & |E_{x_i} - E_{x_j}| \leq 3(E_{n_i} + E_{n_j}) \end{cases} \quad (11)$$

$$d(E_{n_i}, E_{n_j}) = 1 - \frac{\min\{E_{n_i}, E_{n_j}\}}{\max\{E_{n_i}, E_{n_j}\}} \quad (12)$$

$$d(H_{e_i}, H_{e_j}) = 1 - \frac{\min\{H_{e_i}, H_{e_j}\}}{\max\{H_{e_i}, H_{e_j}\}} \quad (13)$$

式中, η_1, η_2, η_3 分别为不同部分的重要性, $\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1$ 且 $0 \leq \eta_1 \leq \eta_2 \leq \eta_3 \leq 1$, 通常 E_x 最重要, E_n 次之, H_e 最小。

云距离模型具有如下特征: ① $0 \leq d(Y_i, Y_j) \leq 1$; ② 当且仅当 $E_{x_i} = E_{x_j}, E_{n_i} = E_{n_j}, H_{e_i} = H_{e_j}$ 时, $d(Y_i, Y_j) = 0$; ③ $d(Y_i, Y_j) = d(Y_j, Y_i)$ 。

装备状态监测数据到各定义健康状态的距离

为 $d(Y_1, Y_2, \dots, Y_m | S_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j d(Y_j, S_k)}$, 距离最小的即为装备当前所处的健康状态。其中, ω_j 为第 j 个指标的重要性程度, 确定方法为先计算第 j 个指标的熵值:

$$S_{H_j} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \ln x_{ij} \quad (14)$$

则第 j 个指标的重要性程度为:

$$\omega_j = (1 - S_{H_j}) / (m - \sum_{j=1}^m S_{H_j}) \quad (15)$$

式中, $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$; $0 \leq S_{H_j} \leq 1$; 当 $x_{ij} = 0$ 时, $x_{ij} \ln x_{ij} = 0$ 。

S_{H_j} 越小, ω_j 越大, 表明第 j 个指标信息含量越大。

3 水轮机健康状态评估

3.1 水轮机健康状态的划分

定义水轮机健康状态是装备健康状态评估的基础, 同时也是健康状态评估结果的呈现形式。基于云模型的水轮机健康状态评估可避免由于主观上的随意而造成的模糊, 可刻画出健康状态存在的不确定性。水轮机常见健康状态描述包括健康状态、注意状态、一般劣化、严重劣化、危险状态, 具体定义见表 1。根据语言尺度函数, 其对应的云模型见表 1。

3.2 水轮机健康状态指标体系构建

对水轮机的健康状态进行评估需综合考虑其产品特点及累积运行时间等各种因素。构建的健康状态指标体系见图 2。

3.3 水轮机健康状态评估

图 2 所示的各指标均为定量指标, 可通过实

表 2 水轮机健康状态指标数据规范化值

Tab. 2 Standard values of health assessment index data for hydraulic turbine

监测时刻	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	Z_{13}	Z_{14}	Z_{15}	Z_{16}	Z_{17}	Z_{18}	Z_{19}	Z_{20}	Z_{21}
1	0.821	0.829	0.757	0.805	0.797	0.742	0.824	0.735	0.807	0.799	0.811	0.702	0.833	0.845	0.776	0.744	0.685	0.843	0.851	0.717	0.713
2	0.723	0.781	0.805	0.699	0.835	0.720	0.841	0.702	0.867	0.687	0.783	0.704	0.719	0.865	0.797	0.797	0.790	0.721	0.736	0.798	0.720
3	0.811	0.866	0.705	0.735	0.816	0.844	0.775	0.714	0.809	0.841	0.827	0.759	0.730	0.753	0.701	0.753	0.848	0.695	0.751	0.762	0.762
4	0.801	0.716	0.862	0.862	0.765	0.689	0.824	0.862	0.847	0.777	0.811	0.779	0.720	0.825	0.847	0.850	0.777	0.699	0.843	0.760	0.816
5	0.724	0.795	0.700	0.783	0.712	0.759	0.752	0.799	0.740	0.695	0.748	0.797	0.798	0.710	0.794	0.821	0.856	0.732	0.728	0.723	0.869
6	0.829	0.737	0.869	0.734	0.849	0.760	0.704	0.722	0.701	0.775	0.832	0.780	0.800	0.725	0.721	0.760	0.689	0.775	0.791	0.777	0.705
7	0.854	0.799	0.838	0.689	0.756	0.698	0.839	0.830	0.732	0.692	0.851	0.787	0.762	0.792	0.825	0.773	0.825	0.826	0.829	0.735	0.728
8	0.726	0.788	0.719	0.854	0.864	0.686	0.761	0.748	0.843	0.839	0.841	0.700	0.804	0.702	0.858	0.716	0.757	0.825	0.840	0.714	0.705
9	0.693	0.748	0.741	0.691	0.814	0.807	0.712	0.695	0.706	0.792	0.695	0.844	0.785	0.865	0.731	0.859	0.805	0.757	0.695	0.854	0.701
10	0.710	0.803	0.769	0.829	0.708	0.789	0.686	0.747	0.725	0.762	0.773	0.781	0.762	0.741	0.867	0.787	0.860	0.849	0.789	0.869	0.776

利用健康状态评估模型评估水轮机的健康状态, $\eta_1 = 0.5$ 、 $\eta_2 = 0.3$ 、 $\eta_3 = 0.2$ 。各指标的客观权重采用信息熵法确定, 得权重向量 $W = \{\omega_j\} = (0.042, 0.045, 7.0, 0.032, 5.0, 0.023, 1.0, 0.031, 2.0, 0.009, 3.0, 0.017, 0.009, 6.0, 0.016, 0.001, 2.0, 0.018, 8.0, 0.008, 8.0, 0.010, 0.001, 2.0, 0.012, 3.0, 0.013, 6.0, 0.011, 5.0, 0.011, 9.0, 0.008, 1.0, 0.010, 0.007, 1.0, 0.003, 5.0)$ 。

计算得到表 2 所列测试数据对应的健康状态见表 3、图 3。图 3 中, 健康状态雷达图半径为 1, 则 $1 - d_i$ 表示水轮机健康状态距离各状态的距离。由图 3 可知, 当前水轮机的健康状态为注意状态, 应增加巡检班次, 以提高水轮机的可用性。

表 1 水轮机健康状态等级

Tab. 1 Health status level of hydraulic turbine

状态	对应描述	对应云模型
健康状态	水轮机各指标均处于规定的正常允许范围以内的允许状态, 没有经历不良工况, 无需对装备进行维护操作	(1.0, 0.285, 0.016)
注意状态	水轮机各指标虽然在允许的正常运行范围内, 但总体性能有所下降, 不会影响水轮机的正常运转, 加强监控并按计划进行维护操作	(0.708, 0.213, 0.040)
一般劣化	水轮机的一部分主要技术性能退化, 有劣化的确实, 有少量不良工况记录, 可以完成主要功能, 可考虑在计划维护时间点之前实施维护操作	(0.5, 0.245, 0.029)
严重劣化	水轮机的主要技术性能劣化趋势明显, 有不良工况记录, 如果继续使用会造成不良影响, 需立即进行维护操作或重点监测	(0.292, 0.213, 0.040)
危险状态	水轮机绝大部分指标均超出正常运行规定值, 完全丧失正常工作能力, 不进行维护操作就无法继续工作	(0.0, 0.285, 0.016)

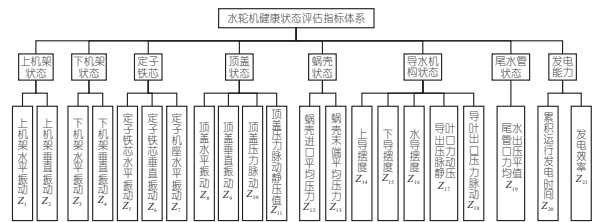


图 2 水轮机健康状态评估指标体系

Fig. 2 Index system for evaluating health status of hydraulic turbine

测得到。由于各指标的数据类型和量纲均不同, 为便于比较, 将其进行规范化处理, 结果见表 2。

表 3 水轮机健康状态评估结果

Tab. 3 Health status assessment results of hydraulic turbine

序号	距离各健康状态等级的距离 d_i	序号	距离各健康状态等级的距离 d_i
1	0.423 4	4	0.506 6
2	0.402 3	5	0.527 5
3	0.449 7		

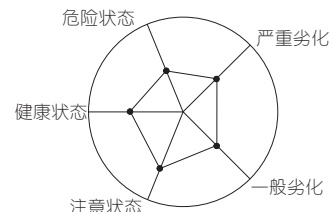


图 3 水轮机健康状态雷达图

Fig. 3 Health status radar chart of hydraulic turbine

4 结论

应用语言尺度函数、云距离模型、云滴融合模型对水轮机的定性和定量指标进行有效融合评估,合理划分水轮机的健康状态,符合工程实际需求,高效地处理了水轮机状态信息的不确定性和模糊性,评估结果更客观。

参考文献:

- [1] 王树杰. 混流式水轮机实时状态评估系统集成与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [2] 万俊毅. 水泵水轮机综合状态评估研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2018.

- [3] 李冲. 水轮机调速系统状态评估方法研究与软件设计[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [4] 赵晶. 水轮机调速油系统状态监测与分析[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [5] 施志坚,王华伟,徐璇,等. 粗糙集和云模型下的航空发动机健康状态评估[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015,37(4):407-411,421.
- [6] 路广勋,李建增,李鹏俊. 基于云重心法的发射场液压泵的健康状态评估[J]. 计算机测量与控制,2014,22(3):800-802.
- [7] 崔建国,肖杰,蒋丽英,等. 基于组合赋权法和云重心评估法的燃气轮机健康状态评估[J]. 科学技术与工程,2017,17(33):268-273.
- [8] 齐伟伟,夏良华,李敏,等. 基于云重心评估法的装备健康状态评估[J]. 火力与指挥控制,2012,37(4):79-82.

Health Status Assessment of Hydraulic Turbines Based on Cloud Model

ZHANG Long-sheng¹, LAO Peng-fei²

(1. CHN Energy Sichuan Dadu River Shuangjiangkou Hydropower Development Co., Ltd., Aba 624600, China;

2. Wuhan Sanlian Hydropower Control Equipment Co., Ltd., Wuhan 430200, China)

Abstract: The health status assessment of hydraulic turbines is a necessary task for achieving health management of hydraulic turbines, and is a key step in achieving condition based maintenance of hydraulic turbines. Considering the uncertainty and fuzziness of the obtained representation information of the health status of hydraulic turbines, a combination of qualitative and quantitative indicator systems was constructed. The health status of hydraulic turbines was defined as 5 states and transformed into cloud droplets using language scale functions. The evaluation of the health status of hydraulic turbines was achieved through cloud distance. The effectiveness of the health status evaluation model was verified using a certain type of hydraulic turbine as an example, which provides a solid foundation for equipment health management of hydraulic turbine.

Key words: cloud model; hydraulic turbine; health management; health status assessment

(上接第 210 页)

- [5] LELOUDAS S N, LYGIDAKIS G N, ESKANTAR A I, et al. A robust methodology for the design optimization of diffuser augmented wind turbine shrouds[J]. *Renewable energy*, 2020, 150: 722-742.
- [6] SONG K, WANG W Q, YAN Y. Numerical and experimental analysis of a diffuser-augmented micro-hydro turbine [J]. *Ocean engineering*, 2019, 171: 590-602.

- [7] 陈正寿, 张国辉, 赵宗文, 等. 潮流能水轮机叶轮压力脉动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(19): 98-105, 138.
- [8] 王洋, 代翠. 离心泵内部不稳定流场压力脉动特性分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 91-95.
- [9] SHI F, TSUKAMOTO H. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage[J]. *Journal of fluids engineering*, 2001, 123(3): 466-474.

Analysis of Pressure Fluctuation Characteristics of Tidal Current Turbines

HU Zhou-ping¹, WANG Wen-quan^{2a,2b}

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China; 2a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering; 2b. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Pressure fluctuation in the flow field around a tidal current turbine is one of the key factors affecting the safe and stable operation of the turbine. To evaluate the effects of the duct and the duct-to-rotor clearance ratio δ on the pressure fluctuation characteristics of the tidal current turbine, three-dimensional transient CFD methods and slip-grid techniques were used to perform three-dimensional numerical simulations of the bare turbine and the ducted turbine with the blade tip clearance of $\delta=0.02D$ and $\delta=0.06D$, respectively, under the optimal operating conditions ($T_{TSR}=4$). By analyzing the unsteady flow phenomenon of the flow field around the turbine, the pressure pulsation and frequency-domain vibration characteristics of the turbine under three different working conditions were obtained. The results show that the pressure fluctuation amplitude of the turbine is basically increasing from the root to the tip of the blade; The addition of a duct can effectively reduce the pressure fluctuation amplitude of the turbine; δ has less impact on the pressure fluctuation coefficient of the turbine and more impact on the vibration characteristics in the frequency domain of the pressure fluctuation; The main frequency of the pressure fluctuation of the turbine is mainly concentrated near the leaf frequency of the corresponding operating conditions. In addition, it is also found that the pressure fluctuation of turbine blade suction surface is stronger than the pressure surface, and the addition of duct can effectively reduce this fluctuation.

Key words: tidal current turbine; duct; blade tip clearance; pressure fluctuation