

电站给水泵运行状态之可拓物元评价方法

王波¹, 杨建蒙¹, 冯雪¹, 张静涛¹, 钟磊²

(1 华北电力大学, 保定 071003; 2 华能汕头电厂, 汕头 515071)

摘要: 考虑到给水泵对于电站安全经济运行的重要程度和其本身高故障率的特征, 提出基于物元概念和可拓集合理论的可拓物元评价方法。在建立评价等级指标和评价模型的基础上, 通过计算给水泵运行状态参数和各种评价等级之间的可拓关联度, 由关联度的大小判断给水泵的运行状态。最后通过实例表明, 此方法用于评价给水泵运行状态的有效性、准确性及工程实用性。

关键词: 给水泵; 状态评价; 可拓理论; 物元

分类号: TK26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5884(2011)06-0452-03

An Extensive Matter-element Evaluation Method on Running State of the Power Plant Feed-water Pump

WANG Bo¹, YANG Jian-meng¹, FENG Xue¹, ZHANG Jing-tao¹, ZHONG Lei²

(1 North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2 Huaneng Shantou Power Station, Shantou 515071, China)

Abstract: Considering the importance of feed-water pump to safe and economy running of power plant and the own characteristic of high failure rate, an extensive matter-element evaluation method is proposed based on the matter-element concept and the extensive set theory. On the basis of building evaluation level indicators and evaluation model, by calculating extensive correlation degree between the state parameters and evaluation rank of feed-water pump, deciding the running condition of feed-water according to correlation degree. Finally the effectiveness, accurateness and practicability of the method using in evaluating the feed-water pump running state have been proved through an example.

Key words: feed-water pump; condition evaluation; extension theory; matter-element

0 前言

给水泵是大型火电及核电站汽轮机重要辅机之一, 其运行状态的好坏直接关系到整个机组的安全经济运行。其本身作为电站热机部分低压系统与高压系统的分界点, 运行中必须有相应的润滑、冷却与密封等子系统。由于给水泵工作环境的特殊性以及设备的复杂性, 其故障率很高。所以很有必要对其运行状况进行评价, 确定其健康水平, 评估其运行风险, 为维修决策提供相应的依据。文献[1]中应用灰色理论, 通过计算灰色关联度的方法对某300MW机组给水泵的几个运行状态做了定量评价。然而这种方法需要对设备运行参数无量纲化处理, 计算量大而且由于建立无量纲化模型具有一定的主观性, 这样很可能会使评价结果与实际运行状况偏离。存在着主客观相互矛盾的问题, 为了克服这一缺陷和使评价更具客观性, 提出以可拓物元模型来评判给水泵的运行状态。

可拓学相关理论是我国学者蔡文等人为解决主客观矛盾问题于1983年所创立的, 以物元理论和可拓集合理论为支柱, 能够同时研究“量”和“质”两者对所描述问题的影响程度, 从而完整地认识系统特征, 可拓物元评价方法常用于

收稿日期: 2010-12-16

作者简介: 王波(1984-), 男, 内蒙古集宁人, 硕士研究生, 研究方向为电站设备状态评价及故障诊断。

处理多参数、混合度大的矛盾问题^[2,3], 已广泛应用于很多领域^[4,5]。本文提出了给水泵运行状态的可拓物元评价方法, 建立了给水泵运行状态等级的物元模型, 通过计算给水泵运行状态各等级之间的可拓关联度, 进而评价其运行状态。

1 数学背景简介

1.1 物元^[2]

在可拓理论中, 物元包含了3个最基本的要素。设事物 R 的名称为 N , 特征为 C , 关于特征 C 的量值为 V , 则描述事物的基本元或物元为 $R = (N, C, V)$ 。

假设事物 $R = (N, C, V)$ 是一个具有多维的物元, $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 为特征向量, 其对应的量值为数值矩阵 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, 则物元的表达式为:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix}$$

1.2 可拓集合及初等关联函数

设论域 U 中的任一元素 u , 对应一实数 $K(u) \in (-\infty, +\infty)$, 则 $A = \{(u, y) \mid u \in U, Y = K(u) \in (-\infty, +\infty)\}$ 为

论域 U 的一个可拓集合。其中 $Y = K(u)$ 为 A 的关联函数, $K(u)$ 为 u 关于可拓集合 A 的关联度。设 x 为 $(-\infty, +\infty)$ 上的任意一点, 区间 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 和 $X = \langle c, d \rangle$ (符号 $\langle \rangle$ 只表示区间端点而不论开、闭性质) 为实域上任一区间, $X_0 \in X$ 且无公共端点, 则初等关联函数为: $k(x) = \frac{\rho(x, X_0)}{D(x, X_0, X)}$, 其中, $\rho(x, X_0)$ 为点 x 与区间 X_0 的距; $D(x, X_0, X)$ 为点 x 关于区间 X_0, X 的位值^[3]。

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (1)$$

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X_0) - \rho(x, X), & x \in X_0 \\ -1, & x \in X \end{cases} \quad (2)$$

表 1 给水泵运行状态评价指标及等级

评价指标	允许范围	评 价 等 级			
		优秀	良好	合格	故障
给水泵振动幅值 $A, \mu\text{m}$	0 ~ 50	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
给水泵轴承温度 $T_1, ^\circ\text{C}$	60 ~ 70	60 ~ 62	62 ~ 65	65 ~ 67	67 ~ 70
冷油器出口油温 $T_2, ^\circ\text{C}$	35 ~ 46	35 ~ 38	38 ~ 40	40 ~ 42	42 ~ 46
密封冷却水温度 $T_3, ^\circ\text{C}$	55 ~ 75	55 ~ 60	60 ~ 65	65 ~ 70	70 ~ 75
给水泵润滑油压 p, MPa	0.1 ~ 0.24	0.2 ~ 0.24	0.16 ~ 0.2	0.13 ~ 0.16	0.1 ~ 0.13

3 建立给水泵运行状态评价的可拓物元模型

给水泵运行状态的物元模型可用下列 n 维物元来描述:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (n = 5)$$

其中, R 为给水泵运行状态物元; N 为运行状态等级; C 为运行状态评价指标; V 为给水泵运行状态评价指标的量值。

3.1 确定给水泵运行状态优劣等级的经典域

依据可拓学及物元模型建模理论, 结合表 1 中各指标在各等级的数值区间, 分别建立给水泵运行状态优劣等级的经典域, 如下所示:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \text{优秀} & A & \langle 0, 15 \rangle \\ & T_1 & \langle 60, 62 \rangle \\ & T_2 & \langle 35, 38 \rangle \\ & T_3 & \langle 55, 60 \rangle \\ & p & \langle 0.2, 0.24 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \text{良好} & A & \langle 15, 30 \rangle \\ & T_1 & \langle 62, 65 \rangle \\ & T_2 & \langle 38, 40 \rangle \\ & T_3 & \langle 60, 65 \rangle \\ & p & \langle 0.16, 0.20 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \text{合格} & A & \langle 30, 40 \rangle \\ & T_1 & \langle 65, 67 \rangle \\ & T_2 & \langle 40, 42 \rangle \\ & T_3 & \langle 65, 70 \rangle \\ & p & \langle 0.13, 0.16 \rangle \end{bmatrix}$$

关联函数可以计算点 x 与 X_0 的关联程度, $k(x) > 0$ 表示点 x 属于 X_0 的程度; $k(x) < 0$ 表示点 x 不属于 X_0 的程度; $-1 < k(x) < 0$ 表示当状态发生改变时, 点 x 有可能成为 X_0 的一部分, 且 $k(x)$ 的值越大可能性就越大。

2 给水泵运行状态评价指标及等级

参照《华能汕头电厂 300MW 机组集控运行规程》以及文献[1]中给水泵运行状态的划分标准, 本文将给水泵运行状态划分为优秀、良好、合格和故障 4 个等级, 其评价指标及对应参数范围如表 1 所示。

$$R_4 = \begin{bmatrix} \text{故障} & A & \langle 40, 50 \rangle \\ & T_1 & \langle 67, 70 \rangle \\ & T_2 & \langle 42, 46 \rangle \\ & T_3 & \langle 70, 75 \rangle \\ & p & \langle 0.10, 0.13 \rangle \end{bmatrix}$$

3.2 确定给水泵运行状态的特征物元

在可拓学中, 建立了“节域”和“质度函数”两个概念^[3]。它们描述了客观事物由量变到质变的辩证规律。节域反映了研究对象的某种特征对应的数量值区间, 当研究对象在某一状态下的数学描述量值在节域范围内时, 其性质就保持稳定。反之, 当此量值的变化超越节域时, 就会引起该特性发生“质”的变化^[3]。依据可拓物元建模理论 $X_0 = \langle a, b \rangle$, $X = \langle c, d \rangle$, $X_0 \in X$ 且无公共端点这一要求, 结合表 1 中各评价指标从优秀到故障的数值区间, 简言之, 就是各评价指标的允许变化范围, 可建立给水泵运行状态的节域即特征物元为:

$$R_x = \begin{bmatrix} X & A & \langle 0, 50 \rangle \\ & T_1 & \langle 60, 70 \rangle \\ & T_2 & \langle 35, 46 \rangle \\ & T_3 & \langle 55, 75 \rangle \\ & p & \langle 0.1, 0.24 \rangle \end{bmatrix}$$

3.3 计算关联函数值及关联度

根据可拓理论关联函数的定义, 关联函数表示为:

$$K_{ij}(v_{ij}) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_{ij}, V_{ij})}{|V_{ij}|}, & v_{ij} \in V_{ij} \\ \frac{\rho(v_{ij}, V_{ij})}{\rho(v_{ij}, V_{xj}) - \rho(v_{ij}, V_{ij})}, & v_{ij} \notin V_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\rho(v_{ij}, V_{ij})$ 为待评价物元与各经典域的距; $\rho(v_{ij}, V_{xj})$ 为待评价物元与节域的距; $|V_{ij}|$ 为各经典域量值大小, $V_{ij} =$

$\frac{|b_{ij} - a_{ij}|}{2}$, $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 5$; 待评价给水泵各状态的关联度:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^5 W_{ij} K_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

W_{ij} 为表 1 中所列各评价指标的权重, 考虑所列出的 5 项评价指标对于给水泵安全和经济运行的重要程度并结合文献[1]的有关研究, 现给出权重向量为:

$$[W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{i5}] = [0.35, 0.25, 0.1, 0.1, 0.2].$$

为了使各状态指标的关联度均处于 $[-1, 1]$ 之间, 以利于状态评价, 需要按下式做归一化处理:

$$\lambda_i^* = \frac{2\lambda_i - \lambda_{\min} - \lambda_{\max}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

其中, $\lambda_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_i\}; \lambda_{\min} = \min_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_i\}$ 。

3.4 评价原则

给水泵运行状态的优劣, 可根据最大化原则利用下式判断:

$$\text{IF}(\lambda_k^* = 1) \text{ THEN } (S_0 = S_k) \quad (6)$$

若 $\lambda_k^* = 1$, 则判断运行状态等级为 S_k , 其它状态等级的可能性可依据其关联度的相对值大小决定, 关联度相对值越大, 则意味着接近该状态可能性越大。

4 应用实例分析

在文献[1]中给出了某亚临界 300MW 机组给水泵运行的 4 组数据, 选用其中 2 组作为评价对象, 为了验证可拓物元建模方法的有效性和准确性, 特意选取其中一组为额定参数, 一组为运行中监测到的非额定参数。可以设想给水泵若是在额定参数下运行, 那么在模型准确的情况下得出的评价结果应该是“优秀”或“良好”。这两组数据分别为: $Y_{01} = [20, 65, 40, 65, 0.18]$; $Y_{02} = [52, 68, 40, 65, 0.22]$, 其中 Y_{01} 为给水泵额定运行数据。它们对应的现状物元^[2]分别为:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} X_{01} & A & 20 \\ T_1 & 65 \\ T_2 & 40 \\ T_3 & 65 \\ p & 0.18 \end{bmatrix}, \quad R_{02} = \begin{bmatrix} X_{02} & A & 52 \\ T_1 & 68 \\ T_2 & 40 \\ T_3 & 65 \\ p & 0.22 \end{bmatrix}$$

(上接第 446 页)

象突发, 转子系统振动幅值急剧增大至震荡发生前的 10 倍左右, 直接导致事故;

(2) 油膜振荡发生后, 立刻停机, 转速下降, 但圆柱瓦滑动轴承 - 转子系统振动并未随之立刻降低, 而是保持极大振动幅值, 且频率保持在圆柱瓦滑动轴承 - 转子系统一阶临界转速对应频率。直到转速下降到一定程度。油膜振荡突跳为油膜涡动, 之后随着转速下降涡动现象消失, 转子系统回归稳定状态;

(3) 适当增大转子不平衡量、减小轴承长径比、降低润滑油黏度、减小轴承间隙会提高转子 - 轴承系统稳定性。

按式(3)、式(4)结合前面给出的评价指标权重, 计算关联函数值及关联度, 最后根据式(5)计算相对关联度, 可得结果: 对于数据 $Y_{01}, \lambda_i^* = [-0.449, 1, -0.411, -1]$, 此向量中的 4 个数值分别对应“优秀”、“良好”、“合格”和“故障”, 根据式(6)最大化原则可判断给水泵运行状态 $S_{01} = S_2 =$ “良好”。热力设备在额定参数下运行对应“良好”工作状态, 这是符合客观事实的。对于 $Y_{02}, \lambda_i^* = [-0.972, -0.547, 0.231, 1]$ 。根据最大化原则确定给水泵运行状态 $S_{02} = S_4 =$ “故障”, 与文献[1]中采用灰色数学模型进行给水泵状态评价得到的结果是一致的。通过以上两组数据实例分析, 充分验证了可拓物元模型评价给水泵运行状态或进行故障识别的有效性、准确性以及工程应用价值。

5 结论

(1) 以物元模型为基础的给水泵运行状态综合评价模型和可拓评价方法可以有效地处理给水泵运行状态参数的多样化特征, 能够定量评价给水泵的运行状态和进行故障识别。

(2) 所建立的可拓物元模型不需要大量的状态评价样本, 评价结果直观; 该模型算法简单, 计算时间短, 是一种高效的电站设备状态评价方法。

(3) 可拓物元方法应用于电站热力设备及系统的状态评价、故障诊断及维修决策等方面具有可行性、准确性, 其工程应用价值较高。

参考文献

- [1] 李建兰, 黄树红. 用于电站辅机运行状态评价的灰色模型[J]. 动力工程, 2007, 27(6): 915 - 917.
- [2] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [3] 蔡文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] 李元戎, 李伟, 杨照芬. 基于多级物元分析的火电厂安全性评价[J]. 中国电力教育, 2006, 研究综述与技术论坛专刊: 114 - 117.
- [5] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于物元模型的电力变压器故障的可拓诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 45 - 49.

参考文献

- [1] 王延博, 张学延, 寇胜利. 汽轮发电机组轴承 - 支撑系统油膜失稳问题探讨[J]. 汽轮机技术, 1999, 41(3): 146 - 149.
- [2] 李银山, 孙雨明, 等. 不平衡弹性转子系统非线性油膜失稳分析[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(6): 559 - 566.
- [3] 黄文虎, 夏松波, 等. 旋转机械非线性动力学设计基础理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 应光耀, 童小忠, 吴文健. 9F 燃气机组油膜涡动和油膜振荡的诊断及处理[J]. 浙江电力, 2006, 1: 10 - 13.
- [5] 马辉, 孟磊, 等. 时频分析在油膜失稳与局部碰磨耦合故障中的应用[J]. 机械强度, 2007, 29(5): 699 - 703.