

基于云重心评判的应急柴油机启动状态评估方法^①

管玉峰^{②*} 秦贵洲^{*} 周正平^{*} 魏琨竺^{**} 茅志伟^{③***}

(^{*} 江苏核电有限公司 连云港 222042)

(^{**} 西安现代控制技术研究所 西安 710065)

(^{***} 北京化工大学发动机健康监控及网络化教育部重点实验室 北京 100029)

摘要 应急柴油机(EDG)是保证核电厂安全可靠运行的一级安全设备,其应急启动成功率是衡量核电站安全等级的关键指标之一,因此对 EDG 启动过程进行有效监测评估具有重要价值。本文利用在线监测系统采集 EDG 启动过程数据,考虑瞬变启动数据的不确定性,提出了一种基于云重心模型的 EDG 启动状态评估方法。首先,充分结合 EDG 快速启动特点,选择能够反映 EDG 启动阶段缸内发火做功和高压空气做功状态的 7 个特征参数作为评估指标,为准确计算特征指标,提出了适用于快速启动过程的瞬时转速优化计算方法和振动信号角域精确重采样方法。然后,利用云模型在解决随机性和不确定性问题方面的优势,构建综合云评估模型,将云重心评判法引入到 EDG 启动状态评估中。最后,以实际核电现场多次测试数据为分析案例,利用本文提出的特征提取方法和综合云评估模型对测量状态进行评估,验证了所提方法的有效性,为 EDG 启动状态评估提供了有效途径。

关键词 应急柴油机(EDG); 启动状态; 云重心模型; 评估方法

0 引言

应急柴油机(emergency diesel generator, EDG)主要功能是在核电厂失去厂外正常电源或母线本身故障而导致失压时,紧急快速启动为应急交流母线提供电源,向安全系统的负载以及其他指定的设备供应电力,保证反应堆热停堆、排除堆芯余热,确保反应堆紧急停堆,避免核泄露事故发生^[1],因此对 EDG 启动状态评估极其重要。

在 EDG 状态评估依赖的监测信号方面,传统方法主要借助转速曲线和热工参数,依靠专家经验对启动性能进行评价,即通过试验中启动时间和介质(空气、冷却水、润滑油)温度、压力等参数是否在允

许范围,对 EDG 状态进行评估^[2]。但热工参数多为缓变量,对快速启动过程的响应变化不显著,且热工参数对分析机械故障具有很大局限性。随着振动和瞬时转速监测在诸多关键设备状态评估中的有效应用,以及它们安装便捷且不会给机组带来安全风险,基于振动和瞬时转速的 EDG 在线监测系统也已在核电现场逐步推广,但有关 EDG 启动状态评估的研究较少。

在状态评估方法方面,基于模糊理论和聚类分析的方法较多。文献[3]将模糊理论与证据理论相结合,应用于状态评估,提高了评估的准确性。文献[4]采用一种灰色聚类方法来评估变压器的健康状况。云模型结合了模糊集合论和概率论,是一种通过建立“云”来对事件的不确定性和随机性进行

① 双一流建设专项经费(ZD1601)和压缩机技术国家重点实验室开放基金(SKL-YSJ201811)资助项目。

② 男,1982 年生,高级工程师;研究方向:核电站性能监测管理;E-mail: guanyf@cnnp.com.cn

③ 通信作者,E-mail: maozw1990@126.com

(收稿日期:2020-06-04)

分析和计算的模型,对解决不确定性和随机性的问题具有显著优势^[5]。云重心评判法是在云模型及其理论长期发展基础上形成的具有很高适用性的评估方法^[6]。文献[7]提出了一种基于云模型的配电网风险评估方法,提高了配电网安全运行水平。文献[8]考虑到风机监测数据的不确定性,提出了一种利用云模型优势处理不确定性信息的风机实时健康状况评估方法。

本文利用振动监测数据,针对 EDG 启动过程监测参数的随机性及其与对应状态的不确定性问题,探究一种基于云重心评判模型的 EDG 启动状态评估方法。针对 EDG 启动阶段瞬时转速和振动特点,研究适用于启动过程的特征提取方法,提取 5 个振动特征和 2 个瞬时转速特征作为评估指标参数,基于云理论构建综合云评估模型,并对实际监测案例进行分析,实现 EDG 启动状态评估。

1 EDG 特征选择与提取

1.1 启动状态评估特征选择

EDG 启动过程是一个不断加速的过程,曲轴在高压空气动力和缸内燃烧压力的作用下,克服阻力运动。曲轴动力学方程可用式(1)表示。

$$J \frac{dw}{dt} = M_e - M_c \quad (1)$$

其中, J 表示曲轴组件及其附属部件折算到曲轴上的惯性矩总量; $\frac{dw}{dt}$ 表示瞬时转速的时间导数; M_c 为阻力矩,对于缸数为 n 的 EDG; M_e 表示动力矩, M_e 可表示为

$$M_e = \sum_{i=1}^n r [p_i S - mw^2 r f_1(\theta + \varphi_i)] f_2(\theta + \varphi_i) \quad (2)$$

式中, p_i 表示缸内气体力, S 表示活塞顶部有效面积, m 为活塞组件质量, r 为曲拐半径, w 为曲轴转速, θ 表示曲轴转角, φ_i 为第 i 个缸相对第一个参考缸发火上止点的曲轴转角,可以通过发火顺序和曲拐夹角计算得到。函数 f_1 和 f_2 的表达式为

$$f_1(\phi) = \cos\phi + \lambda \sin 2\phi \quad (3)$$

$$f_2(\phi) = \cos\phi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi \quad (4)$$

其中 ϕ 表示角度, $\lambda = r/l$ 为长径比, l 为连杆长度。

同时,由于 $\frac{dw}{dt} = \frac{dw}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{dw}{d\theta} \cdot w$, 则式(1)可改写为

$$Jw \frac{dw}{d\theta} = \sum_{i=1}^n r [p_i S - mw^2 r f_1(\theta + \varphi_i)] f_2(\theta + \varphi_i) - M_c \quad (5)$$

当 EDG 处于启动状态时,缸内压力 p_i 由两部分组成,一部分是高压启动空气,另一部分是缸内燃烧气体。瞬时转速在 p_i 的作用下,呈波动上升的趋势,主要可从直流上升特性和交流波形特性两个方面进行表征。当启动过程中出现动力不足、阻尼异常变化等情况时,瞬时转速的直流、交流特性均会发生一定程度的变化。同时,瞬时转速的上下包络线均值,可以反映直流上升特性;而上、下包络线与两者均值的差值可以反映交流波动特性,因此选择瞬时转速上、下包络线的均值及两者均值的差值作为评价启动状态的两个关键参数。

另一方面,EDG 高压空气快速冲入气缸内并对活塞做功,会伴随高压空气阀门的开闭过程,进而在振动上体现出高频的冲击波形,同时高压空气冲气时阀门开启相位也反映了此时缸内高压空气做功情况。缸内发火做功则伴随着爆燃过程,在振动上也体现出高频冲击波形,同时缸盖部位还会受到气门冲击等多种其他冲击的作用,振动冲击一般为时域窄带信号,冲击出现的时刻一般由正时系统决定,且认为相互之间线性无关。因此,振动可以表示为短时冲击振动的时序叠加,可用式(6)表示。

$$s(t) = x_1(t - \tau_1) + x_2(t - \tau_2) + \cdots + x_n(t - \tau_n) + n(t) \quad (6)$$

其中, $s(t)$ 表示缸盖振动波形, $x_i(t - \tau_i)$ 是在 τ_i 时的窄带冲击信号, $n(t)$ 为噪声。

针对启动过程高压空气冲气做功,本文选择振动冲击峰值、冲击包络面积以及高压空气阀开启相位进行评估。针对缸内发火做功,本文选择发火冲击峰值、冲击包络面积进行评估。

综上所述,本文用于评估 EDG 整机启动性能的状态参数如下,瞬时转速直流增量及其交流波动量、高压空气冲气冲击峰值、空气冲击段包络面积、冲气起始相位、缸内发火冲击峰值和发火冲击段包络面

积。

1.2 启动阶段瞬时转速优化计算及其特征提取

瞬时转速是指柴油机在每个瞬间的曲轴转速,工程实际中通过在曲轴末端齿盘处安装光电或磁电传感器,测量示意图如图 1 所示。采集齿盘上各齿经过传感器产生的脉冲信号,通过计算脉冲之间的时间间隔,用相邻齿间隔角度分辨率下的平均转速近似代替瞬时转速。精确计算获取瞬时转速是进行瞬时转速特征提取的前提,一般通过硬件计数法、软件计数法和频率解调法完成计算。硬件计数法采样要求很高,且容易受环境干扰,易产生较大测量误差;频率解调法对于缸数较多、惯性矩大的柴油机适用效果不佳。而软件计数法降低了硬件要求,且处理参数可以灵活设置,适用性强。零点插值法是软件计数法的一种,是工程实际现场最常应用的一种方法。

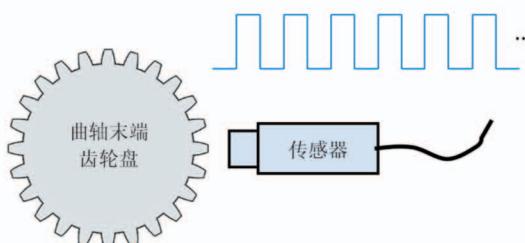


图 1 瞬时转速测量示意图

本文结合实际采集原始脉冲信号特点,采用极点插值法替代零点插值法,对瞬时转速进行优化计算,提高计算精度。在启动过程中,机组处于非平稳运行状态,与平稳状态相比曲轴径向振动较大,但径向振动始终远小于轮齿脉冲频率,则可以认为齿盘在转过一个齿顶区域的过程中,其径向振动可以忽略不计。考虑到轮齿的对称性,轮齿中点即在连续齿盘脉冲波形的局部极大值处。但实际采集时,因为采样频率不可能无限高,一般采样点中不会恰好包含齿顶中点对应的测量值,本文利用三次样条插值的二阶平稳特性,通过三次样条插值计算曲线上的极大值点,示意图如图 2 所示,通过插值获得极点精确位置 P_n :

$$P_n = j + \frac{|x_j|}{|x_j| + |x_{j+1}|} = j + \frac{x_j}{x_j - x_{j+1}} \quad (7)$$

其中 x_j 为插值节点, j 为插值点序列, $j = 0, 1, 2, \dots, n$ 。

则:

$$\omega = 2\pi / [NT(P_{n+2} - P_n)] \quad (8)$$

$$n = 60\omega / 2\pi = 60 / [NT(P_{n+2} - P_n)] \quad (9)$$

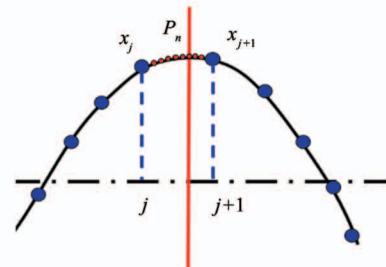


图 2 极点插值法原理示意图

为验证所提优化方法的准确性,仿真瞬时转速原始键相信号波形为

$$w(t) = w_0 + nw_0 \cos(wt) \quad (10)$$

其中, w_0 为曲轴转频, n 为发动机气缸数量。理想情况下,转速波动是均匀的,波动频率是转频的倍频(缸数/2 倍频),因此为便于分析,可设 $w = 0.5nw_0$ 。若设飞轮齿盘上的齿数为 Z , 则采集获得的齿盘脉冲信号可用式(11)表示。

$$s(t) = (A + B \sin(w_0 t)) \cos(Zw_0 t + \frac{2Z\varepsilon}{n} \cos(\frac{n}{2}w_0 t)) \quad (11)$$

大量的测量结果表明,在负荷较高的情况下,曲轴的径向跳动量可以达到 0.5 mm。常用的 8 mm 直径的电涡流传感器量程为 2 mm,因此式(11)中可设 $A = 1$, $B = 0.5$ 。转速波动率一般不高于 1%,因此,设 $\varepsilon = 0.01$ 。

接着设 $Z = 169$, $n = 12$, $w_0 = 50\pi$ Hz(1500 r/min), 则式(11)可改写为

$$s(t) = (1 + \frac{1}{2} \sin(50\pi t)) \cos(8400\pi t + \frac{1}{6} \cos(300\pi t)) \quad (12)$$

则发动机两个完整循环采集的齿盘脉冲波形如图 3 所示。

分别采用极点插值法和零点插值法的计算结果与理论值的比较如图 4 和图 5 所示,容易看出本文所提极点插值法计算精度更高,尤其是在采样频率较低时,仍能保持较高的计算精度。

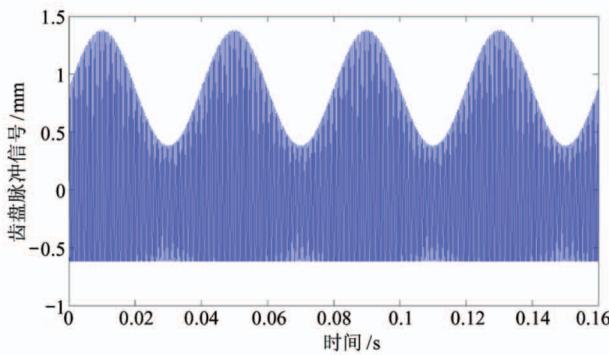


图 3 两个完整循环采集的齿盘脉冲波形

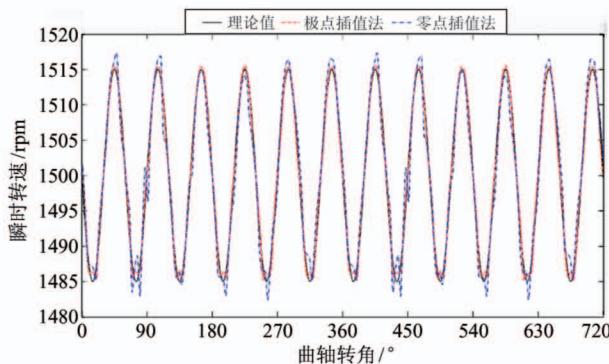


图 4 采样频率为 25.6 kHz 下的计算结果

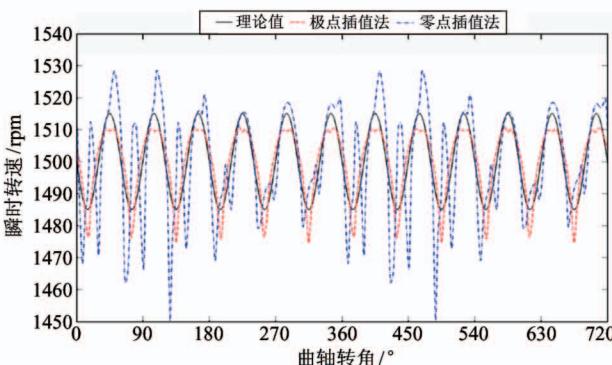


图 5 采样频率为 12.8 kHz 下的计算结果

启动阶段某一周期的瞬时转速波动如图 6 所示, 分别提取交流分量的上、下包络线均值, 然后将上包络线均值与下包络线均值之差作为波动分量的交流波动量。

1.3 基于角域精确重采样的振动特征提取

振动信号的采集一般为固定采样频率下的等时间间隔采集, 而由于 EDG 的准周期非平稳特性, 需要将时域信号转化到角域中进行分析, 即进行角域重采样。通常以曲轴键相信号为参考的角域重采样

方法能够基本满足平稳工况下的分析要求, 但对于非平稳的启动过程, 转速波动较大, 基于键相信号的线性转化方法误差较大, 难以适用于启动过程的角域特征提取。

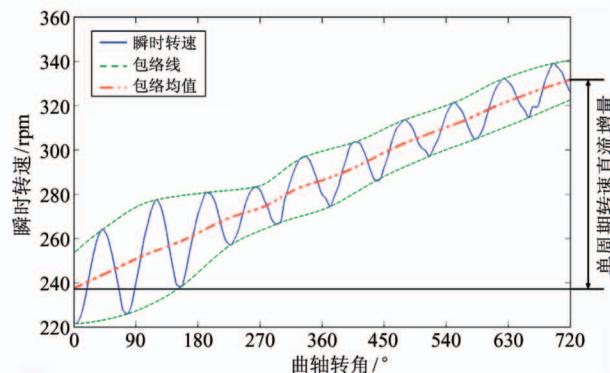


图 6 启动阶段瞬时转速波动上升曲线

本文提出基于瞬时转速键相脉冲的角域重采样方法。首先, 计算齿盘脉冲信号相邻脉冲间的间隔时间 Δt 。利用上节提到的极点插值法获得在每个波峰处的“真实”极大值点。若设第 p 个与第 $p+1$ 个极大值点间的点数为 Δm_p , 采样频率为 f_s , 则两个极点之间的间隔时间 Δt_p 为

$$\Delta t_p = \Delta m_p / f_s \quad (13)$$

然后, 计算局部平均转速。设发动机齿盘的齿数为 Z , 两齿之间的夹角为 $\Delta\theta$, 则第 p 个与第 $p+1$ 个极值点间的局部平均转速为

$$\bar{\omega}_p = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{360}{Z \cdot \Delta t} \quad (14)$$

最后, 计算各采样点对应的相位 θ 与参考 0 相位点之间存在 p 个极大值的第 j 个采样点, 设其前一个极值点间有 q 个采样点, 则第 j 个采样点对应相位为

$$\theta = \Delta\theta \cdot p + \bar{\omega}_p \cdot \frac{q}{f_s} \quad (15)$$

分别采用基于平均转速和瞬时转速的角域转化结果如图 7 所示, 可以看出, 基于平均转速的角域转化结果为一条直线, 而由于启动升速过程中转速不断升高, 基于瞬时转速转化的结果为一条中间凹的曲线, 启动过程中转速升高越快, 基于平均转速的角域转化结果误差越大。

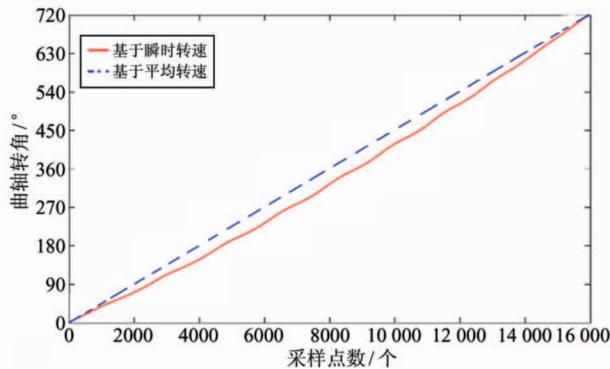


图 7 基于不同角域重采样方法的结果对比

在完成角域精确重采样的基础上,通过计算高压空气冲击和发火冲击对应相位段的冲击峰值和角域包络面积,获得表征高压空气做功和发火做功状态的特征参数。

2 云重心评价模型

2.1 云模型及其发生器

对于一个定性描述集合 C, U 是与之对应的论域集合。若集合 U 中的每一个元素 x 都能满足 $x (x \in U)$ 在 C 中能随机出现, 则 x 对应 C 的隶属确定度为 $\mu(x)$, $\mu(x) \in [0, 1]$ 是一种具有稳定性和随机性的精确值。

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] x \rightarrow \mu(x) \quad (16)$$

那么将元素 x 成为在集合 U 上分布的隶属云, 简称云, 记为 $C(x)$, 该云集合对应的云滴是 $(x, \mu(x))$ 。

一个典型的云模型中期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 是整体描述云模型的 3 个主要数字特征^[9], 如图 8 所示。期望 Ex 主要反映的是云滴的一个总体分布, 其具体代表意义是云滴在集合 U 上分布的期望, 其附近的云滴密度最大, 随着云滴与 Ex 的距离加大, 云滴密度亦逐渐减小。熵 En 主要体现了云模型的“宽度”, 因为熵是对 C 中模糊部分的一种表达, 它表示了集合 U 中被 C 可以接受的元素数量。熵越小, 意味着系统中不可被接受数值的范围就越小, 因此对应的元素数量也相应越小; 反之熵越大, 元素数量越多。超熵 He 比较直观地反映了云模型的“线宽”, 因此超熵 He 是对云原有的熵 He 再次求

熵所得的结果, 它代表了每一个数值背后所表达的定性概念隶属度的“相对密度”^[10]。

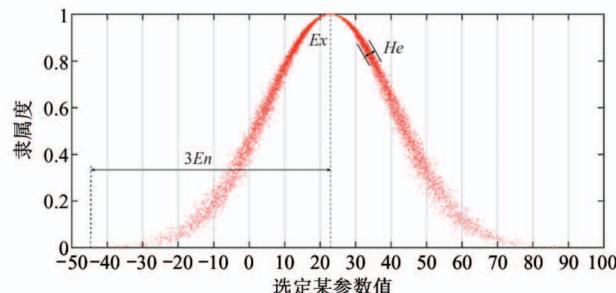


图 8 云模型及其基本特征示意图

正态分布是最常用的一种分布, 在研究随机性和不确定性事物时, 往往用正态分布函数作为预设分布。将正态分布引入云理论, 衍生出正态云模型。通过设置云模型的 3 个特征参数, 可以生成不同形状的云分布模型^[11]。生成云模型的简要示意图如图 9 所示, 正态云模型正向生成步骤如算法 1 所示。

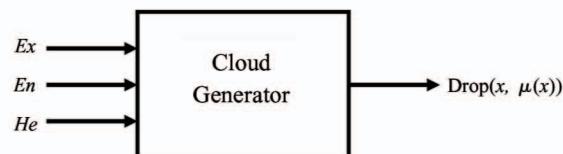


图 9 云模型生成示意图

算法 1 正态云模型正向生成算法

- | | |
|-------|--|
| 输入: | 数字特征 (Ex, En, He) , 云滴数量 N |
| 输出: | 云滴 $(x, \mu(x))$ |
| 步骤 1: | 生成正态随机熵 $En'_i = NORM(En, He^2)$, 式中以 En 为期望, 以 He^2 为方差, 得到正态随机熵 En'_i 。 |
| 步骤 2: | 生成正态随机数序列 $x_i = NORM(Ex, En'^2)$, 式中以 Ex 为期望、 En'^2 为方差。 |
| 步骤 3: | 计算云滴 (x_i, μ_i)
$\mu_i = e^{-(x_i - Ex)^2 / (2En'^2)}$ |
| 步骤 4: | 不断复算步骤 1~3, 直到云滴的数量达到要求的标准值 N 个 |

2.2 云重心评估方法

云重心即是某一研究对象在特定模型中所处“重心”的坐标值, 该数值通过对其高度和位置共同计算得到^[12]。理想情况下的云重心所在高度数值是 0.371。云重心 T 的计算公式为

$$T = a \times b \quad (17)$$

式中, a 为云模型期望, 即重心横向位置; b 则是对应指标权重, 即重心高度。若要判断多个不同期望隶属云的情况, 可通过计算云重心的高度差异进行判断。

从评估指标体系中, 对每一个指标选取 n 组样本构成决策矩阵 A , 可以算出该指标所生成的云模型基本特征参数期望 Ex 和熵 En , 即:

$$Ex = \frac{(Ex_1 + Ex_2 + \cdots + Ex_n)}{n} \quad (18)$$

$$En = \frac{\max(Ex_1, Ex_2, \cdots, Ex_n) - \min(Ex_1, Ex_2, \cdots, Ex_n)}{6} \quad (19)$$

若将研究对象分成 m 个状态进行评价, 则可以构建一个 m 维的综合云, 该综合云的重心将随着研究对象状态的改变而变化。针对一个 m 维的向量描述的综合云重心 T , 则:

$$T = (T_1, T_2, \cdots, T_m) \quad (20)$$

将研究对象处于理想状态时的云重心向量表示为 $T^0 = a^0 \times b^0$, 其中 $a^0 = (x_1^0, x_2^0, \cdots, x_m^0)$, $b^0 = (b_1^0, b_2^0, \cdots, b_m^0)$, “ \times ”表示将两个相应项进行相乘运算。

当研究对象状态发生改变, 其重心相应的偏移到 T' :

$$T' = (T'_1, T'_2, \cdots, T'_m) \quad (21)$$

T'_i 可以由 T 通过式(22)转化得到。

$$T'_i = \begin{cases} (T_i - T_i^0)/T_i^0 & T_i < T_i^0, i = 1, 2, L, m \\ (T_i - T_i^0)/T_i & T_i > T_i^0, i = 1, 2, L, m \end{cases} \quad (22)$$

并利用式(23)完成对加权偏离度 σ ($0 < \sigma < 1$) 的计算, 并通过加权偏离度确定所处状态。

$$\sigma = \sum_{i=1}^m T'_i \omega_i \quad (23)$$

整个加权偏离度的计算流程图如图 10 所示。

3 整机启动状态评估案例

基于云重心评判的应急柴油机启动状态评估方法具体流程如下, 首先进行数据采集, 并进行特征指标的提取; 然后基于云模型理论计算获得云模型数字特征和正态云模型, 同时选择合适方法确定各指

标参数的权重; 最后计算加权偏离度, 并完成启动状态等级的评定, 如图 11 所示。

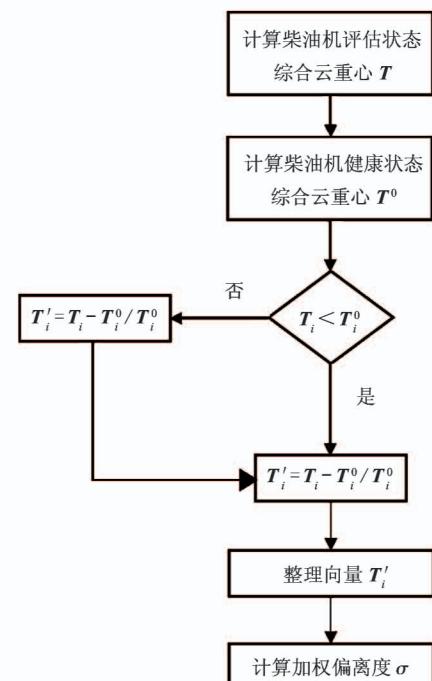


图 10 应急柴油机云重心加权偏离度的计算流程图

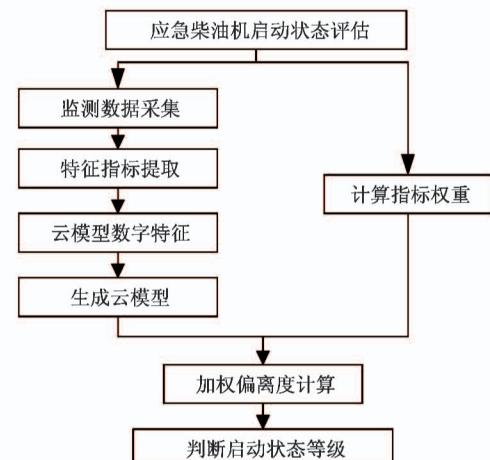


图 11 应急柴油机启动状态评估流程图

3.1 数据采集及评估指标提取

针对一台核电常用型号的 20 缸 EDG-MTU956 进行案例分析。机组额定转速 1500 rpm, 额定功率 5.5 MW, 两列缸呈 V 型布置, 采用整体式基座支撑。机组发火顺序: A1-B7-A7-B2-A2-B6-A6-B3-A3-B10-A10-B4-A4-B9-A9-B5-A5-B8-A8-B1。

传感器实际安装照片如图 12 所示, 监测点包括

1个曲轴键相测点、1个瞬时转速键相测点和20个缸盖振动测点。



图 12 现场测试传感器安装图

将现场测试的实际数据,经上述方法进行特征提取。为便于阐述,各缸发火冲击峰值的平均值及包络能量平均值、各缸高压空气进气阀开启冲击峰值的平均值、包络能量平均值以及开启相位平均值、周期内瞬时转速的直流量平均值和交流量平均值,分别计为 $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ 和 T_7 。特征计算的提取结果如表 1 所示。

表 1 特征提取结果

评估指标	第1次测量值	第2次测量值	第3次测量值	历史均值	历史方差
$T_1/\text{m/s}^2$	377.6	348.4	410.4	358.1	217.7
$T_2/\text{deg. m/s}^2$	6400.3	5627.9	6854.3	6001.7	4384.7
$T_3/\text{m/s}^2$	722.7	677.0	787.2	700.0	183.2
$T_4/\text{deg. m/s}^2$	9293.7	8130.5	9284.5	8488.3	3150.8
T_5/deg	60.0	67.1	57.5	69.2	21.4
T_6/rpm	91.4	94.1	95.6	90.2	5.9
T_7/rpm	12.1	11.2	12.0	12.1	2.2

3.2 EDG 启动状态评估云模型生成

本文将 EDG 启动状态分为 5 个健康等级,“健康”、“良好”、“一般”、“劣化”和“危险”,即评估结论集 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{危险}, \text{劣化}, \text{一般}, \text{良好}, \text{健康}\}$ 。EDG 的理想状态即为“健康”等级,某一状态的加权偏离度 σ (负值)绝对值越大,则表示与理想状态相差越远,EDG 的工作状态越差。

根据专家经验及建议,本文对云发生器的构造参数分别设置为 $Ex = [0, 0.4, 0.6, 0.8, 1]$ 、 $En = [2/15, 1/15, 1/15, 1/15, 1/15]$ 、 $He = [0.005, 0.005, 0.005, 0.005]$ 。将参数输入到云发

生器构建出相应的模型,如图 13 所示,计算得到加权偏离度 σ 之后在图中做竖直线 $x = 1 + \sigma$,则评估结果为该条直线激活云滴数最多的状态。

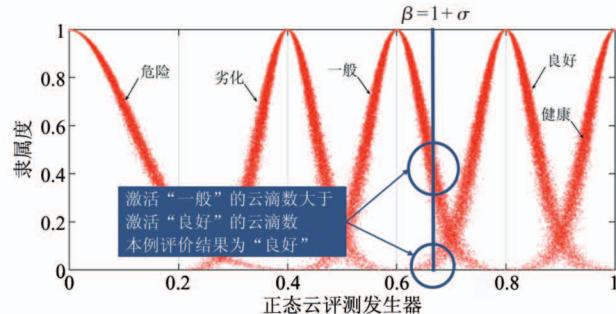


图 13 EDG 健康状态正态云评测发生器

3.3 EDG 启动状态评估

由于本文提取的 7 种特征参数的量纲不同,有必要先对提取的特征进行归一化处理,由于每次测量的最大值和最小值不同,本文采用基于历史数据的归一化处理方法^[13]。具体步骤如下,首先,计算当前状态监测数据与历史数据均值的偏差。设某一评价指标当前状态的测量值为 x ,该指标历史数据均值为 x_L ,那么这两个数值的偏差 δ_L 为

$$\delta_L = |x - x_L| \quad (24)$$

然后,计算归一化量值 λ_L 。根据评价指标对 EDG 健康状态反映情况的差异,将每一项指标分为两种类型,即越大越优与越小越优。针对越大越优的参数通过式(25)进行归一化,针对越小越优的参数通过式(26)进行归一化处理。测试数据的归一化处理结果如表 2 所示。

$$\lambda_L = \begin{cases} 1 & \delta_L \geq 0.7\sigma \\ \frac{\delta_L + 1.3\sigma}{2\sigma} & -1.3\sigma \leq \delta_L < 0.7\sigma \\ 0 & \delta_L \leq -1.3\sigma \end{cases} \quad (25)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 1 & \delta_L \geq 0.7\sigma \\ \frac{0.7\sigma - \delta_L}{2\sigma} & -1.3\sigma \leq \delta_L < 0.7\sigma \\ 0 & \delta_L \leq -1.3\sigma \end{cases} \quad (26)$$

利用归一化数据,通过式(18)和式(19)计算得到 EDG 健康状态评估指标的期望 Ex 和熵 En ,所得结果如表 3 所示。

表 2 状态评估指标归一化

评估指标	第 1 次测量值	第 2 次测量值	第 3 次测量值
T_1	0.69	0.63	0.77
T_2	0.70	0.61	0.75
T_3	0.71	0.59	0.89
T_4	0.78	0.59	0.78
T_5	0.74	0.52	0.81
T_6	0.75	0.98	1.00
T_7	0.65	0.45	0.63

表 3 状态评估指标期望和熵

指标	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
期望	0.70	0.68	0.73	0.72	0.69	0.91	0.58
熵值	0.047	0.047	0.100	0.061	0.026	0.083	0.062

计算综合云重心需要各指标的权重比,由于本文已经计算出各指标参数的熵值,且熵权法是计算指标权重比的常用方法,本文采用式(27)计算各指标的权重系数^[14]。

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum_{j=1}^m E_j} \quad (27)$$

式中, $\omega_j \in [0, 1]$, 且 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_m = 1$ 。

通过熵权法计算得到的权重为

$$\boldsymbol{\omega} = [0.11745, 0.10886, 0.16105, 0.17047, 0.14637, 0.29518, 0.00063]^T$$

EDG 理想状态的综合云重心向量为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^0 &= (T_1^0, T_2^0, T_3^0, T_4^0, T_5^0, T_6^0, T_7^0)^T \\ \mathbf{T}^0 &= (a_1^0 \times b_1, a_2^0 \times b_2, a_3^0 \times b_3, a_4^0 \times b_4, a_5^0 \times b_5, \\ &\quad a_6^0 \times b_6, a_7^0 \times b_7)^T \\ \mathbf{T}^0 &= (0.04357, 0.04039, 0.05975, 0.06324, \\ &\quad 0.05430, 0.10951, 0.000234)^T \end{aligned}$$

式中:

$$\boldsymbol{a} = (a_1^0, a_2^0, a_3^0, a_4^0, a_5^0, a_6^0, a_7^0)^T$$

$$= (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$$

$$\boldsymbol{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7)^T$$

$$\begin{aligned} &= (0.371 \times \omega_1, 0.371 \times \omega_2, 0.371 \times \omega_3, \\ &\quad 0.371 \times \omega_4, 0.371 \times \omega_5, 0.371 \times \omega_6, \\ &\quad 0.371 \times \omega_7)^T \end{aligned}$$

当前测量状态的综合云重心向量为

$$\mathbf{T} = (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7)^T$$

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= (a_1 \times b_1, a_2 \times b_2, a_3 \times b_3, a_4 \times b_4, a_5 \times b_5, \\ &\quad a_6 \times b_6, a_7 \times b_7)^T \\ \mathbf{T} &= (0.03050, 0.02746, 0.04362, 0.04554, \\ &\quad 0.03747, 0.09966, 0.000136)^T \end{aligned}$$

式中:

$$\boldsymbol{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7)^T$$

$$= (Ex_1, Ex_2, Ex_3, Ex_4, Ex_5, Ex_6, Ex_7)^T$$

再由式(22)可以计算出标准化向量 \mathbf{T}' :

$$\mathbf{T}' = [-0.3, -0.32, -0.27, -0.28, -0.31, -0.09, -0.42]^T$$

根据以上结果,计算评估指标偏离度向量:

$$\boldsymbol{\theta} = (-0.03524, -0.03484, -0.04348, -0.04773, -0.04537, -0.02657, -0.00026)^T$$

其中,“-”表示偏离理想状态值的负方向。

根据式(23)计算加权偏离度 $\sigma = -0.23$, 即 EDG 当前状态为负向偏离最理想状态 23%。将加权偏离度导入正态云评测发生器,如图 14 所示。可以看出,激活“良好”状态的程度大幅度领先于其他状态。因此,当前 EDG 的评估状态结果为“良好”,该结果与实际现场专家分析讨论的评估结论一致。

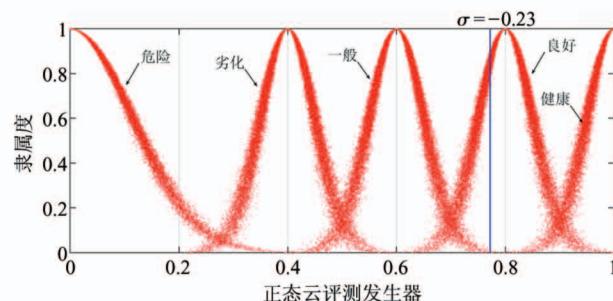


图 14 正态云评测发生器计算结果

3.4 方法对比分析

以 Dempster/Shafer 证据理论(D-S 证据理论)为基础的评估方法是一种得到广泛应用的有效评估方法,该方法的具体流程如下。首先对原始特征进行归一化处理并计算各特征参数的健康状态指数,然后确定各参数的权重系数,最后计算特征参数的健康等级隶属度,并通过隶属度最大原则给出最终评估结果。在以前的工作中研究过基于 D-S 证据理

论的评估方法^[15],采用与文献[15]相同的处理过程,得到的评价结果仍为“良好”。两种方法的结果一致,且与现场专家的经验分析结论一致,体现了本文方法的准确性。对比两种计算方法的计算过程可以发现,云模型方法前面步骤中熵计算结果能够用于特征权重的熵权法计算,且云模型计算复杂度要低于D-S证据理论方法。未来在实际应用中,可将两种方法进行相互对比验证,实现融合评判。

4 结 论

本文提出了一种基于云重心模型的EDG启动状态评估方法。该方法充分考虑EDG快速启动阶段的运行特点,分别提出了瞬时转速优化计算方法和振动信号角域精确重采样方法,并在此基础上准确提取了能够反映EDG启动阶段缸内发火做功和高压空气做功状态的7个特征参数。基于云理论,构建综合云评估模型,利用熵权法确定各特征参数的权重,最终计算出综合加权偏离度,并导入云评测模型,对测量状态进行评估。现场实际测试数据计算结果同D-S证据理论方法对比,验证了本文所提评估方法的有效性,为分析EDG非稳定启动状态提供了一条有效途径,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 常亚飞,曹凤瑞.核电厂失去厂外电源试验失败后的快速恢复对策研究[J].能源与环境,2019(2):11-12
- [2] 江志农,茆志伟,王子嘉,等.基于振动监测的应急柴油机启动性能分析方法[J].中国机械工程,2019,30(8):34-40,47
- [3] Li C, Chen K, Xiang X. An integrated framework for effective safety management evaluation: application of an improved grey clustering measurement [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(13): 5541-5553
- [4] Zhang X, Wang D H. Application of artificial intelligence algorithms in image processing [J]. *Journal of Visual*

- Communication and Image Representation*, 2019, 61: 42-49
- [5] Wang Y J, Zhang Z J, He S B, et al. Evaluation of management information resource allocation based on cloud gravity center theory[C]//2010 International Conference on Management and Service Science, Wuhan, China, 2010: 1-4
- [6] 王广强,吕建伟,徐一帆,等.基于改进云重心方法的舰船设计方案质量评估[J].中国舰船研究,2018,13(4):70-78
- [7] Li F, Li Y, Liu H, et al. Risk assessment method based on cloud model for distribution network[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, Beijing, China, 2019: 2054-2059
- [8] Zhao W, Cui M. Real-time health status evaluation for electric power equipment based on cloud model[J]. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2020, 15(1-2): 134-144
- [9] 张光卫,何锐,刘禹,等.基于云模型的进化算法[J].计算机学报,2008,31(7):1082-1091
- [10] 李德毅,刘常昱,杜鹃,等.不确定性人工智能[J].软件学报,2004,15(11):1583-1594
- [11] 刘常昱,李德毅,杜鹃,等.正态云模型的统计分析[J].信息与控制,2005,34(2):236-239
- [12] 江新,朱沛文,沈力.基于ANP和云模型的水电项目群资源冲突风险评估[J].中国安全科学学报,2014,24(11):152-158
- [13] 王亮,吕卫民,滕克难.基于测试数据的长期贮存装备实时健康状态评估[J].系统工程与电子技术,2013,35(6):1212-1217
- [14] Rong G H, Gao C S, Chai Y L. Study on ability evaluation system of a technical supply element based on entropy-weight combination method[C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, Xi'an, China, 2012: 1687-1689
- [15] 魏琨竺,包彬彬,茆志伟,等.基于数据驱动的应急柴油机启动状态评估方法[J].噪声与振动控制,2019,39(4):184-189

Evaluation method of EDG starting state based on cloud barycenter model

Guan Yufeng^{*}, Qin Guanzhou^{*}, Zhou Zhengping^{*}, Wei Kunzhu^{**}, Mao Zhiwei^{***}

(^{*}Jiangsu Nuclear Power Corporation, Lianyungang 222042)

(^{**}Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065)

(^{***}Key Laboratory of Ministry of Education on Engine Health Monitoring-Control and Networking, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract

The emergency diesel engine (EDG) is the first level safety equipment for ensuring the safe and reliable operation of the nuclear power plant. The success rate of the emergency start-up is one of the key indicators to measure the safety level of the nuclear power plant. Therefore, it is of great value to effectively monitor and evaluate the start-up process of EDG. In this paper, the on-line monitoring system is used to collect the data of the EDG start-up process. Considering the uncertainty of transient start-up data, an EDG start-up state evaluation method based on the cloud gravity center model is proposed. Firstly, according to the characteristics of the rapid start-up of EDG, seven characteristic parameters that can reflect the working state of firing and high-pressure air in the start-up stage are selected as evaluation indexes. To accurately calculate the characteristic indexes, an instantaneous speed optimization calculation method and an accurate angle domain resampling method of vibration signal are proposed. Then, taking the advantages of the cloud model in solving the problems with randomness and uncertainty, a comprehensive cloud evaluation model is constructed, and the cloud barycenter evaluation method is introduced into the EDG start-up state evaluation. Finally, the proposed method is verified by using the actual nuclear power field test cases, indicating that it is an effective method for EDG start-up state evaluation.

Key words: emergency diesel engine (EDG), startup state, cloud barycenter model, evaluation method