

基于集值统计法的燃气轮机气路模糊评估模型

张怡, 曹云鹏

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对燃气轮机气路系统的健康状态评估问题, 提出了一种基于集值统计法的模糊综合评估模型。首先, 通过层次化分解将气路系统分为目标层和项目层, 利用概率密度法确定底层参数的健康状况, 并将其转化为0~1之间的数值以反映其运行状态; 其次, 采用模糊综合评估法, 结合集值统计法确定权重, 建立了气路评估流程; 然后, 引入变权重理论以适应系统发生故障时的评估需求, 从而建立气路评估模型并得到其运行状态健康情况。结果表明: 通过实例分析计算获得集值统计法定权的可靠度为94.09%; 多组测试数据验证了评估模型的置信度达到98%; 集值统计-模糊评估模型为燃气轮机气路系统的健康状态评估提供了理论支持和实践指导。

关键词: 燃气轮机; 气路系统; 模糊综合评估; 集值统计法; 健康评估模型

中图分类号: TK221

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.021

[引用本文格式] 张怡, 曹云鹏. 基于集值统计法的燃气轮机气路模糊评估模型[J]. 热能动力工程, 2025, 40(5): 183-189.
ZHANG Yi, CAO Yunpeng. Fuzzy evaluation model of gas turbine gas path based on set-valued statistics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 183-189.

Fuzzy Evaluation Model of Gas Turbine Gas Path based on Set-valued Statistics

ZHANG Yi, CAO Yunpeng

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: A fuzzy comprehensive evaluation model based on set-valued statistics was proposed to evaluate the health status of gas turbine gas path system. Firstly, the gas path system was divided into target layer and project layer by hierarchical decomposition. Probability density method was used to determine the health status of the underlying parameters and convert them into a value between 0 and 1 to reflect the operating status. Then, using fuzzy comprehensive evaluation method, combined with set value statistics method to determine the weight, the gas path evaluation process was established. In addition, variable weight theory was introduced to adapt to the evaluation needs of the system when the fault occurs, so as to establish the gas path evaluation model and get its healthy operating state. The results show that through case analysis and calculation, the reliability of set-valued statistic determination weight is 94.09%. Multiple groups of test data are used to verify that the confidence of the evaluation model is 98%. The set-valued statistics-fuzzy evaluation model provides theoretical support and practical guidance for the health status evaluation of gas turbine gas path systems.

Key words: gas turbine, gas path system, fuzzy comprehensive evaluation, set-valued statistics, health assessment model

收稿日期: 2024-10-24; 修订日期: 2024-11-30

基金项目: 船舶动力基础科研(KY10300240082)

Fund-supported Project: Marine Power Basic Research & Development (KY10300240082)

作者简介: 张怡(2001-), 女, 哈尔滨工程大学硕士研究生。

通信作者: 曹云鹏(1979-), 男, 哈尔滨工程大学副教授。

引 言

燃气轮机由于其功率密度大和热效率高优势,在电力、航空航天及工业领域受到了广泛的应用。但在实际运行中燃气轮机处于高速旋转状态,受结构复杂、启停频繁等影响,其工作性能会随运行时间增加而衰退,衰退严重时会发生部件损伤及造成事故等问题,造成巨大的经济损失。因此需要对燃气轮机的运行状态进行监测,开展状态评估^[1]。燃气轮机气路系统作为气体流通通道,包含压气机、燃烧室、涡轮等重要部件,更需要对其进行实时监控与故障诊断,判断其实时运行状况,提出合理的状态评估策略。针对燃气轮机气路系统定制科学的健康评估模型,从数据中获取设备的实际运行状态是解决该问题的核心方法^[2]。

目前,国内外构建评估模型大多使用贝叶斯网络法^[3-4]、马尔科夫法^[5]和模糊综合评估法^[6-7]。Xie 等人^[8]利用贝叶斯网络模型,针对新冠肺炎疫情下企业停工风险做以评估,得到各风险因素发生概率结果。Al-Duais 等人^[9]利用马尔科夫法与自回归模型建立自回归移动平均模型与风速时序框架,对风力发电中风速做以评估与预测。其中,贝叶斯网络的使用需要数据支撑,在数据不完整、网络结构不清晰状况下搭建会影响网络效果,计算相对复杂;马尔科夫法考虑了变量在变化前后对系统的影响,但马尔科夫模型的大小会随部件数量的增加而呈指数形式增长,并不适用于燃气轮机气路系统。由于燃气轮机气路系统进行状态评估时,保证了分析数据的客观性与全面性,宜采用模糊综合评估法。

模糊综合评估法在应用中常存在评估主观性大,权重分配不准确等问题^[10]。为克服评估中主观因素较大的问题,本文在基于模糊综合法进行燃气轮机气路系统评估前提下,选取集值统计法与模糊综合评估法相结合的方法,得到评价结果,并建立了燃气轮机气路系统的健康评估体系与模型,获得了较为合理与科学的船用燃气轮机气路系统的状态评估结果。

1 船用燃气轮机气路系统分层评估

对燃气轮机气路系统进行状态评估的主要核心

是将系统合理地分解,分步对每一层展开评估。对复杂的气路系统进行层次化分解,可分层为目标层和项目层,对项目层各因素进行健康评估与整合后,得到目标层的健康状况。设定本研究中燃气轮机气路系统整体为目标层,项目层用 4 个高相关评估参数来表示,包括低压涡轮出口温度 T_6 、高压压气机出口压力 p_3 、低压涡轮出口压力 p_6 和低压转速 N_L 。

项目层和目标层的所有健康评估结果将转化为 0~1 之间的具体数值,以反映其运行状态。数值越接近 1,评估的结果越接近健康;反之则越趋于故障。针对 4 个参数不同的特征,将参数的变化量或变化率作为标准化函数,计算公式为:

$$t = |i - y| / y \tag{1}$$

式中: t —参数的变化率; $|i - y|$ —参数的变化量; i —系统参数的监测值; y —参数健康值(Health Value, HV)。

对项目层参数进行健康状态评估,采用数理统计法求得项目层参数具体概率密度分布,由此构建相对应的健康度函数。图 1 为项目层的健康评估流程。

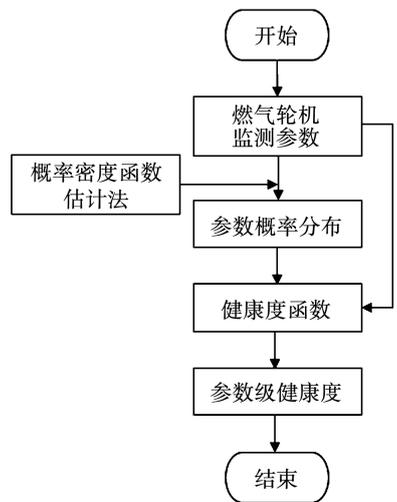


图 1 项目层健康评估流程图

Fig. 1 Flowchart of health assessment at project level

假设参数含有 h 个已知的监测数据样本,其概率密度函数 $f(x)$ 的分布形式未知,可以利用高斯核的概率密度估计法^[11]求得密度估计函数 $f'(x)$ 。当 $f(x)$ 与 $f'(x)$ 计算的积分均方差值趋近于 0 时,视概率密度估计法算得的 $f'(x) = f(x)$ 。其数学表达式为:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{ho} \sum_{i=1}^h \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: o —窗口宽度。

健康度函数确定是评估参数健康状态的核心。图2为一般形式的健康度函数分布。为求取健康度函数的特征值 a 、 b 、 c ,引入置信度与置信区间^[12]。

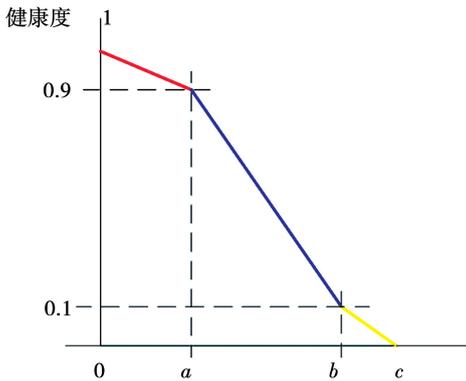


图2 一般形式健康度函数分布

Fig. 2 General form health function distribution

若 θ_L 和 θ_U 分别表示区间确定的两个样本量,则 $P(\theta_L \leq \alpha \leq \theta_U) = 1 - \alpha$,其中 P 表示样本落在区间内的概率,则 (θ_L, θ_U) 表示置信度为 $1 - \alpha$ 的置信区间, α 为显著性水平, $1 - \alpha$ 称为置信度。 θ_L 和 θ_U 表示区间内的置信下限与置信上限。设样本的均值 M 和标准差 ST 已知,其计算公式为:

$$\begin{cases} \theta_L = M - k * ST \\ \theta_U = M + k * ST \end{cases} \quad (3)$$

依据不同的显著性水平可以得到不同的置信度, k 的取值也有所差异。本研究计算选取置信度 $1 - \alpha = 95\%$ 时, $k = 1.96$ 。可计算特征值 a 、 b 、 c 可获得健康度函数实际分布。其中, a 选取正常状态监测参数经过统计分布后获取的置信上限 θ_{UH} ; b 选取偏离正常状态最远的参数在统计分布后的置信上限 θ_{UF} ; c 选取偏离正常状态最远的统计分布的均值加常数乘以其标准差。

2 燃气轮机气路系统评估方法

2.1 模糊综合评估法

在获得气路系统项目层的4个评估参数健康评价结果后,可采取模糊综合评估法分层次对多个评估因素进行整合评判。气路系统的模糊综合评估具

体步骤如下:

(1) 建立评估因素集 U 。假设集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 表示由 n 个评估因素组成的评估因素集。在燃气轮机气路系统中, U 由4个评估参数组成。

(2) 建立评语集 V 。假设集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 表示由 m 个评估语组成的评语集。依据燃气轮机的运行状态,将其健康状况分为4个等级:“健康”、“衰退”、“恶化”和“失效”。其中,“健康”表示燃气轮机气路系统处于正常运行状态,各组件均达到设计要求,没有问题产生;而“衰退”、“恶化”、“失效”表示燃气轮机气路系统的运行状况逐渐严重,为不可接受情况,系统需要调整或维修。

(3) 对所有单因素进行评估后集合。体现了因素集和评语集之间的模糊关系,构建三角形与梯形相结合的隶属函数,得到评判矩阵 R ,其表达式为:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

公式(4)可简化为 $R = (r_{ij})_{n \times m}$, $r_{ij} \in [0, 1]$, r_{ij} 表示单因素 u_i 针对评估语 v_j 的隶属度大小,其值为 $0 \sim 1$ 之间。

用因素集 U 上的模糊集 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 表示各因素权重,权重采用集值统计法求得。其中 a_n 表示第 n 个因素的权值,与因素集上的元素一一对应。由此可获得综合评价集 B :

$$B = A \circ R = [b_1, b_2, \dots, b_m] \quad (5)$$

式中: b_j —对评语集中评估语 v_j 的隶属程度 $b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$, $j = 1, \dots, m$; \circ —模糊合成算子。

(4) 依据综合评价集 B 得到健康状况评估结果。综合评价集的评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,即 $V = \{\text{健康, 衰退, 恶化, 失效}\}$ 。为综合考虑评价集 B 中的数据,采用其赋值打分法。其中,“健康”取1.0分,“衰退”取0.675分,“恶化”取0.425分,“失效”取0.15分,可得总体健康度 HV 为^[13]:

$$HV = 1.0b_1 + 0.675b_2 + 0.425b_3 + 0.15b_4 \quad (6)$$

最终燃气轮机气路系统的健康状态等级划分程度与健康值 HN 具体取值范围如表1所示。

表 1 健康状态等级划分程度与健康值范围表

Tab. 1 Division degree and health value range table

程度	HV 取值范围	健康状态等级
1	0.9 ≤ HV ≤ 1.00	健康
2	0.55 ≤ HV < 0.9	衰退
3	0.30 ≤ HV < 0.55	恶化
4	0.00 ≤ HV < 0.30	失效

2.2 集值统计法定权

集值统计法^[14]将经典统计与模糊统计结合,重点在于以专家打分的形式确定指标权重,排除了专家针对指标做出单一确定评价的困难,给出大致的描述范围。主要包括估计区间定权和可靠性分析:

(1) 估计区间定权。假设有 d 个影响因子,集合为 $Q, Q = \{q_1, q_2, \dots, q_d\}$, e 名专家对影响因子打分评判,集合为 $L, L = \{l_1, l_2, l_r, l \dots l_e\}$, 专家对每个因子所占权重的区间估计的集合称为影响因子的权重估计区间,设专家给出权重估计区间为 $[a_{1i}, b_{1i}]$, $[a_{2i}, b_{2i}]$, \dots , $[a_{ri}, b_{ri}]$, \dots , $[a_{ei}, b_{ei}]$ 。对所有专家及影响因子权重区间统计,统计结果如表 2 所示。得到影响因子的相对权重为:

$$\bar{w}_i = \frac{1}{2} \frac{\sum_{r=1}^e [b_{ri}^2 - a_{ri}^2]}{\sum_{r=1}^e [b_{ri} - a_{ri}]}, r = 1, 2, \dots, e; i = 1, 2, \dots, d \quad (7)$$

表 2 影响因子权重估计区间

Tab. 2 Weight estimation interval of impact factors

评估专家	影响因子估计区间					
	q_1	q_2	\dots	q_i	\dots	q_d
l_1	$[a_{11}, b_{11}]$	$[a_{12}, b_{12}]$	\dots	$[a_{1i}, b_{1i}]$	\dots	$[a_{1d}, b_{1d}]$
l_2	$[a_{21}, b_{21}]$	$[a_{22}, b_{22}]$	\dots	$[a_{2i}, b_{2i}]$	\dots	$[a_{2d}, b_{2d}]$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
l_r	$[a_{r1}, b_{r1}]$	$[a_{r2}, b_{r2}]$	\dots	$[a_{ri}, b_{ri}]$	\dots	$[a_{rd}, b_{rd}]$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
l_e	$[a_{e1}, b_{e1}]$	$[a_{e2}, b_{e2}]$	\dots	$[a_{ei}, b_{ei}]$	\dots	$[a_{ed}, b_{ed}]$

考虑每个专家知识储备,个人主观考虑的差异,

设专家的权重配比为 k_r , 其中 $\sum_{r=1}^e k_r = 1 (r = 1, 2, \dots, e)$, 代入后 q_i 的相对权重为:

$$\bar{w}_{H,i} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{r=1}^e k_r [b_{ri}^2 - a_{ri}^2]}{\sum_{r=1}^e k_r [b_{ri} - a_{ri}]}, r = 1, 2, \dots, e; i = 1,$$

$$2, \dots, d \quad (8)$$

将相对权重进行归一化处理,得到影响因子 q_i 的权重为:

$$w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^d \bar{w}_i \quad (9)$$

从而获得评估系统中影响因子的权重集合为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_e]$ 。

(2) 可靠性分析。对获得的权重开展可靠性分析,可靠性程度由可靠度的大小 g_i 来判定。 g_i 越大,评估正确的可能性就越大,其结果更可靠。对于影响因子 q_i ,定义其权重的可靠度为:

$$g_i = 1 - \frac{1}{n} \frac{1}{x} \sum_{r=1}^x (b_{ri} - a_{ri}) \quad 0 \leq g_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, d; r = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

式中: $1/n$ —所有因子权重之和的倒数。

2.3 变权重健康评估

在上一节中,用集值统计法得到的权重配比是在系统健康运行的正常状态下得到的,而当系统发生故障,存在退化时,构造判别矩阵的重要性评判就难以确定,由此得到权重的准确性就大大降低。因此本文引入产生衰退影响后的变权理论,将得到的常权带入变权系数处理^[15]。变权表达式为:

$$A_{R_{ijk}}(H_{R_{j1}}, \dots, H_{R_{jd}}) = \frac{A_{R_{ijk}}^{(0)} (H_{R_{ijk}})^{\beta-1}}{\sum_{s=1}^4 A_{R_{ijs}}^{(0)} (H_{R_{ijs}})^{\beta-1}} \quad (11)$$

式中: $A_{R_{ijk}}$ —第 i 个项目第 j 个子项目的第 k 个评估参数对应的变权权重; $A_{R_{ijk}}^{(0)}$ —常权权重; β —变权系数,本文中取 $\beta = -2$; $H_{R_{ijk}}$ —评估参数 R_{ijk} 的健康度^[16]。

3 燃气轮机气路系统案例研究

为验证展示本研究气路系统健康评估方法的准确性,本文参考文献^[17]建立某三轴燃气轮机仿真模型,选取 90% 额定工况下仿真运行的健康状态数据和故障状态数据各 1 000 条,利用模糊评估法对气路系统的运行健康状态做出评价与对比分析。

3.1 退化数据获取

参考文献^[17]建立基于系数匹配的建模方法,

建立了船用三轴燃气轮机气路故障的仿真模型。在本研究中,将常见的退化因子^[18]添加到动力学模型,以模拟各个故障的性能退化,获取健康状态数据和故障状态数据各1 000条仿真结果。

压气机产生热力性能退化的原因主要为积垢和损伤^[19]。外部盐雾积垢和内部润滑油泄露导致压气机积垢,使压气机流量和效率降低;外部物体撞击和燃气轮机自身部件脱落导致压气机机械损伤,降低压气机效率。性能退化后压气机效率和流量的计算公式如下:

$$\bar{G}_c^* = f(\pi_c, \bar{n}_c)(1 - \delta_c) \quad (12)$$

$$\eta_c^* = f(\pi_c, \bar{n}_c)(1 - \delta_\eta) \quad (13)$$

式中: \bar{G}_c^* —压气机植入退化因子后的折合流量; η_c^* —植入退化因子后的压气机效率; δ_c —流量退化因子; δ_η —效率退化因子。

燃烧室由于其所处环境恶劣,会产生积碳、火焰筒扭曲变形等故障。其中火焰筒积碳会造成燃烧室出口的温度不均;火焰筒扭曲变形会使燃烧室的效率降低。植入退化因子后的燃烧室效率计算公式为:

$$\eta_B^* = (1 - \delta_B)\eta_B \quad (14)$$

式中: η_B^* —植入退化因子后的燃烧室的效率; δ_B —燃烧效率的退化因子。

涡轮产生热力性能退化的原因是涡轮腐蚀、磨损和积垢。空气中的盐雾颗粒会导致叶片腐蚀,使涡轮效率和燃气流量发生异常;燃烧室中未燃烧的燃油颗粒等使涡轮叶片产生磨损,也会使流量和效率产生变化;同时涡轮也会产生叶片积垢问题,导致涡轮的叶片下降。植入退化因子后涡轮效率和流量的计算公式如下:

$$\bar{G}_T^* = f(\pi_T, \bar{n}_T)(1 - \delta_c) \quad (15)$$

$$\eta_T^* = f(\pi_T, \bar{n}_T)(1 - \delta_\eta) \quad (16)$$

式中: \bar{G}_T^* —植入退化因子后的涡轮折合流量; η_T^* —植入退化因子后涡轮效率。

3.2 气路系统健康评估

首先对项目层即气路系统的4个评估参数进行健康评估。气路系统常见故障信息如表3所示,其中条数表示每种故障信息由低到高能5种退化程度。即,退化因子植入1%、2%、3%、4%和5%。由

此对15种气路故障和每种故障5种退化程度做出统计,确定参数的概率密度的统计分布图和健康度函数。

表3 燃气轮机气路系统故障信息表

Tab.3 Fault information table of gas turbine gas path system

类型	条数	故障信息
f1	5	低压积垢
f2	5	低压损伤
f3	5	高压积垢
f4	5	高压损伤
f5	5	燃烧室出口温度不均
f6	5	燃烧室扭曲变形
f7	5	低涡积垢
f8	5	低涡磨损腐蚀
f9	5	低涡损伤
f10	5	高涡积垢
f11	5	高涡磨损腐蚀
f12	5	高涡损伤
f13	5	动涡积垢
f14	5	动涡磨损
f15	5	动涡损伤

依据统计分布图,获取各个故障曲线的标准差、均值及置信上下限,由特征值 a, b, c 的确定方法,计算参数健康度函数的实际形式。

现选取某一时刻仿真运行的某一组气路系统的参数监测数据,低压涡轮出口温度316.57℃,高压压气机出口压力0.24 MPa,低压涡轮出口压力0.019 MPa,低压转速3 263 r/min,对燃气轮机气路系统此时运行状态评估。

将评估参数偏离健康状态的变化量或变化率带入相对应的健康度函数中,即可获得各参数的健康度,如表4所示。

表4 燃气轮机评估参数健康度

Tab.4 Health value of gas turbine evaluation parameters

评估参数	健康度
低压涡轮出口温度	0.90
高压压气机出口压力	0.74
低压涡轮出口压力	0.72
低压转速	0.34

由隶属函数求得参数隶属度向量并合成,得到燃气轮机气路系统的模糊评判矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

燃气轮机气路系统的影响因素为 4 个评估参数,集合表示为 $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$,其中 q_1 为低压涡轮出口温度、 q_2 为高压压气机出口压力、 q_3 为低压涡轮出口压力、 q_4 为低压转速。由集值统计法计算其各自权重,设定对影响因素打分评判的专家学者有 5 名,其集合 $L = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5\}$,专家所占权重配比 $k = [0.2, 0.18, 0.18, 0.24, 0.2]$,将所有专家对影响因素的权重区间进行统计,如表 5 所示。

表 5 燃气轮机气路系统的影响因子权重估计区间统计

Tab.5 Influence factor weight estimation interval statistics of gas turbine gas path system

评估专家	影响因子估计区间			
	q_1	q_2	q_3	q_4
l_1	[0.11,0.12]	[0.11,0.13]	[0.12,0.14]	[0.11,0.16]
l_2	[0.1,0.14]	[0.12,0.15]	[0.11,0.16]	[0.09,0.12]
l_3	[0.11,0.13]	[0.13,0.17]	[0.12,0.14]	[0.09,0.11]
l_4	[0.13,0.15]	[0.11,0.13]	[0.11,0.13]	[0.11,0.13]
l_5	[0.11,0.13]	[0.12,0.13]	[0.12,0.14]	[0.11,0.14]

得到含有专家权重 k 的归一化权重 $W = [0.244\ 1, 0.262\ 1, 0.255\ 7, 0.238\ 1]$,可靠度 $g = [0.956\ 7, 0.9522\ 7, 0.944\ 8, 0.940\ 9]$,每个元素均大于 0.9,判定权重集合 W 较为可靠。变权后的权重集合为 $A = [0.090\ 4, 0.143\ 6, 0.148\ 0, 0.618\ 0]$ 。

综合评价集 B 为:

$$B = A \circ R = [0.139\ 0, 0.204\ 4, 0.212\ 5, 0.444\ 1] \quad (18)$$

对综合评价集进行隶属度后处理后,得到燃气轮机气路系统的健康度 HV 为 0.43,对该时刻燃气轮机气路系统运行状况进行评估,得到健康状态评价为恶化,获取实际仿真过程可知该时刻运行数据为退化程度 5,评估结果与运行状态相符,验证了评估方法的可行性。

3.3 评价准则

引入评估结果的置信度含义。首先定义故障状态的健康度值低于 0.9,正常状态的健康度值在 0.9~1 之间。某个工况选择 N 个样本,测试的样本中,包含了 T 个正常的样本数量和 F 个故障的样本数量。

其中 T_T 为正常状态检测的正常状态数量, F_F 为故障状态检测的故障状态数量。则评估结果的置信度可表示如下。

每个工况 N 组正常状态样本的健康评估结果的置信度 CL_T 为:

$$CL_T = \frac{TT}{N \times T} \times 100\% \quad (19)$$

每个工况 N 组故障状态样本的健康评估结果的置信度 CL_F 为:

$$CL_F = \frac{FF}{N \times F} \times 100\% \quad (20)$$

选取船用燃气轮机气路系统 90% 工况时,动力涡轮损伤的 1 种正常数据与 5 种退化程度,每组 100 个数据共 600 组评估参数数据为测试集,视退化数据为故障数据,完成燃气轮机气路系统的评估。

图 3 为基于集值统计法的模糊综合评估所得气路系统健康评估结果的分布散点图。

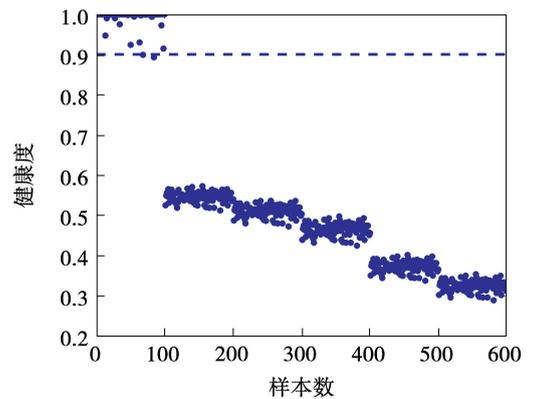


图 3 故障不同程度下气路系统评估健康分布散点图

Fig.3 Health distribution scatter diagram of gas path system evaluation under different fault degree

统计图 5 基于集值统计法的模糊综合评估确定的 6 种状态分布数量可知,处于正常状态的样本数为 98 个,故障状态的样本数为 502 个。将样本代入式(19)和(20)得到,正常状态样本的评估结果置信度为 98%,故障状态评估结果置信度为 100%。评估结果的置信度为 95% 以上,证明选取集值统计法定权的模糊综合评估法对气路系统进行健康状态评估的有效性与可行性。

4 结 论

本文建立了燃气轮机气路系统的健康评估模型,基于集值统计法的模糊综合评估法对气路系统

的健康状况做出较为科学的评估结果。实践表明,该方法具有实用性及可信性。主要结论如下。

(1) 提出了基于模糊综合评估法的燃气轮机气路系统评价模型,将燃气轮机气路系统层次化分解为目标层和项目层,将评估结果的模糊数转化为具体数值,使评估结果定量化,将其转化为 0 至 1 之间的数值以反映其健康状态。

(2) 建立燃气轮机气路系统评估流程,其中利用集值统计法对评估参数 u_i 定权,定权可靠度最低为 94.09%,可靠性分析得到该定权方法确定的评估参数权重是有效的。

(3) 利用多组数据健康状态分布情况对气路系统评估模型验证进行讨论与分析,以置信度为评价准则,验证以集值统计法定权的模糊综合评估模型置信度为 98%。本文针对燃气轮机气路系统建立的集值统计-模糊综合评估模型,为燃气轮机整体健康状态评估提供较为完整的理论支持。

参考文献:

- [1] 李红仁,张 坤,王 鑫,等.基于历史数据的燃气轮机健康状态实时评估系统[J].电力大数据,2024,27(4):63-71.
LI Hongren,ZHANG Kun,WANG Xin,et al. Real-time assessment system for the health status of gas turbines based on historical data [J]. Power System and Big Data,2024,27(4):63-71.
- [2] 魏昌淼,彭 涛,季 钧.燃气轮机可靠性运行维护策略研究[J].热力透平,2021,50(2):107-110.
WEI Changmiao,PENG Tao,JI Jun. Research on reliability operation and maintenance strategy of gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2021,50(2):107-110.
- [3] ZHANG Y,XIANG Y,WANG L. Power system reliability assessment incorporating cyber attacks against wind farm energy management systems[J]. IEEE Transactions on Smart grid,2016,8(5):2343-2357.
- [4] 曾 强,黄 政,魏曙寰.基于模糊理论和贝叶斯网络的燃气轮机健康状态评估方法[J].科学技术与工程,2020,20(11):4363-4369.
ZENG Qiang,HUANG Zheng,WEI Shuhuan. Assessment method of gas turbine health based on fuzzy theory and Bayesian network[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(11):4363-4369.
- [5] MOR B,GARHWAL S,KUMAR A. A systematic review of hidden markov models and their applications[J]. Archives of Computational Methods in Engineering,2021(28):1429-1448
- [6] LIN S S,SHEN S L,ZHOU A,et al. Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods [J]. Automation in Construction, 2021, 122(4):103490.
- [7] SAHIN B. Shipping technology selection for dynamic capability based on improved Gaussian fuzzy AHP model[J]. Ocean Engineering,2017,136:233-242.
- [8] XIE X,JIN X,WEI G,et al. Monitoring and early warning of SMEs' shutdown risk under the impact of global pandemic shock [J]. Systems,2023,11:260.
- [9] AL-DUAIS F S,AL-SHARPI R S. A unique markov chain monte carlo method for forecasting wind power utilizing time series model [J]. Alexandria Engineering Journal,2023(74):51-63.
- [10] HUANG Q L,LIANG Q C,REN J M. Evaluation and research of SOFC Matching in SOFC-GT combined power generation system [J]. Marine Electric and Electronic Engineering,2018,38(6):18-22.
- [11] CHEN Y C. Modal regression using kernel density estimation: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics,2018,10(4):e1431.
- [12] KYRIAKIDES E,HEYDT G T. Calculating confidence intervals in parameter estimation: A case study [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,21(1):508-509.
- [13] YANG D,MAK C M. An assessment model of classroom acoustical environment based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Applied Acoustics,2017,127:292-296.
- [14] WANG Y,HUANG L,SHEN G,et al. A risk evaluation model for channel navigation based on the gray-fuzzy theory[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking,2018(2018):153.
- [15] YU G F,FEI W,LI D F. A compromise-typed variable weight decision method for hybrid multiattribute decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2019,27(5):861-872.
- [16] 吴明昊.船舶燃气轮机发电模块健康评估研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
WU Minghao. Research on health assessment of Marine gas turbine generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2018.
- [17] CAO Yunpeng,CHEN Lie,DU Jianwei,et al. The degradation simulation of compressor salt fog fouling for marine gas turbine [C]//ASME Turbo Expo 2017:Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2017:GT2017-64464.
- [18] 程学亮.船用燃气轮机气路部件性能退化的仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
CHENG Xueliang. Research on simulation of marine gas turbine gas path component performance degradation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2015.
- [19] 赫英辉.基于性能的船用燃气轮机健康评估方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
HE Yinghui. Research on performance-based health assessment method for marine gas turbine [D]. Harbin: Harbin Engineering University,2019.