

文章编号: 1000-8055(2023)11-2747-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230279

航空活塞发动机的层次熵权性能评价方法

徐劲松, 陈科中, 刘保含

(昆明理工大学 民航与航空学院, 昆明 650500)

摘 要: 针对航空活塞发动机多目标、多准则的性能评价问题, 采用层次分析法和熵权法将其转化为单目标、多层次的评价, 建立不同工况下的性能指标、权重分配和评价体系。用遗传算法 BP(back propagation)神经网络(GA-BP)模型对其性能衰退状态进行计算判定, 并结合实验与仿真, 验证了该性能评价体系的正确性。以喷油孔异常导致发动机性能异常衰退为案例, 从燃烧的角度探究其性能衰退出现的机理。结果表明: 当发动机零部件出现异常时, 层次熵权性能评价方法能较好地反映发动机当前的性能状态, 可对其安全性做出准确判断; 且 GA-BP 计算模型的平均绝对百分比误差比 BP、RBF(radial basis function)、Elman 模型分别减小了 3.520 8%、0.702 7%、3.785 4%, 具有较高的精确性。

关 键 词: 航空活塞发动机; 性能衰退; 层次分析法; 熵权法; GA-BP 神经网络

中图分类号: V234

文献标志码: A

Hierarchical entropy weight performance evaluation method of aero piston engine

XU Jinsong, CHEN Kezhong, LIU Baohan

(Faculty of Civil Aviation and Aeronautics,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In response to multi-objective and multi-criteria performance evaluation problem for aero piston engine, the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM) were used to transform it into single-objective and multi-level evaluation, and establish performance indicators, weight allocation, and evaluation systems under different operating conditions. Genetic algorithm-back propagation (GA-BP) neural network was employed to calculate and estimate its performance degradation state, the correctness of the performance evaluation system was verified by the joint simulation experiment. For the abnormal fuel injection holes leading to abnormal engine performance degradation as an example, this study explored the mechanism of its performance degradation from the perspective of combustion. The results showed that, when there were abnormal components of engine, the hierarchical entropy weight performance evaluation was a better method to reflect current performance status of the engine and make accurate judgments on its safety. The GA-BP computational model had a high accuracy, whose mean absolute percent error (MAPE) decreased by 3.520 8%, 0.702 7% and 3.785 4%, respectively, compared with BP, radial basis function (RBF) and Elman models.

Keywords: aero piston engine; performance degradation; analytic hierarchy process;
entropy weight method; GA-BP neural network

收稿日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61863017)

作者简介: 徐劲松(1973—), 男, 教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机的燃烧与控制方面的研究。E-mail: 372606249@qq.com

引用格式: 徐劲松, 陈科中, 刘保含. 航空活塞发动机的层次熵权性能评价方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2747-2756. XU Jinsong, CHEN Kezhong, LIU Baohan. Hierarchical entropy weight performance evaluation method of aero piston engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2747-2756.

航空发动机是飞机的心脏,其性能状态直接影响飞机飞行安全^[1]。飞机在运行过程中会经历飞行海拔、环境温度、压力的变化,且发动机长期处于高温、高压、高负荷和大应力状态下,其性能状况会随使用时间的增加逐步衰退^[2]。有数据表明:在通航飞行事故中,发动机故障是位于第三的事故因素^[3]。若在发动机出现故障或性能衰退之前,有效地对其进行综合性能评估,能极大减少高昂的维护成本,避免飞行事故的发生。

航空活塞发动机的性能指标属于多层次、多类型,目前针对航空活塞发动机综合性能评价的相关报道很少。Cui 等^[4]提出博弈论综合赋权法进行权值优化,解决了涡扇发动机气路性能评价问题。Simon 等^[5]基于线性估计和概率论方法,对燃气涡轮发动机进行性能评估。Hao 等^[6]采用模糊数学与粗糙集理论相结合的模糊熵方法对涡扇发动机进行性能评价。王梦琦等^[7]针对涡扇发动机性能状态监测的模糊评判方法,建立了性能评价指标体系。张龙平等^[8]用“劣变系数”对车用活塞发动机瞬变性能恶化程度进行了评价,但该活塞发动机评价模型中没有考虑海拔变化这个重要因素,不适用于航空活塞发动机的评价。

随着时间的推移,产品会出现性能衰退,最终导致产品失效^[9]。神经网络算法是机器学习的一种方法,广泛应用于产品性能衰退的计算模型中,具有强大的泛化能力和易于实现等优点。De Giorgi 等^[10]通过时间序列人工神经网络对涡喷发

动机性能进行了预测。Xie 等^[11]采用 BP 网络算法对涡扇发动机关键参数进行拟合预测。马帅等^[12]使用门控循环单元动态网络对涡扇发动机健康状态进行估计。

本研究采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)构建航空活塞发动机综合性能评价体系,把航空活塞发动机多目标、多准则的性能评价问题转化为单目标、多层次的评价,再把熵权法(entropy weight method, EWM)与 AHP 相结合^[13],既满足决策意向,又使权重具有科学合理性,即:主/客观复合权重更有利于发动机的综合性能评价。采用仿真与实验相结合的方式,以喷油孔异常为案例,将性能指标数据代入遗传算法 BP 神经网络(genetic algorithm-back propagation neural network, GA-BP)计算模型,展示了用 GA-BP 模型实现层次熵权性能衰退评价体系时的智能化和准确性。最后,从燃烧的角度探究了性能衰退出现的机理,并验证了评价体系的正确性。

1 性能衰退层次熵权法

根据层次分析法的构建原则与航空活塞发动机的自身特点,创建了航空活塞发动机综合性能层次评价体系(如图 1 所示),并用 GA-BP 神经网络计算模型进行层次熵权评价体系的实现。

该层次评价体系主要分为:①目标层,把不同海拔高度划分为三个梯度(1 500~2 000 m、2 000~2 500 m、2 500~3 000 m),以单一指标“衰退率 δ ”

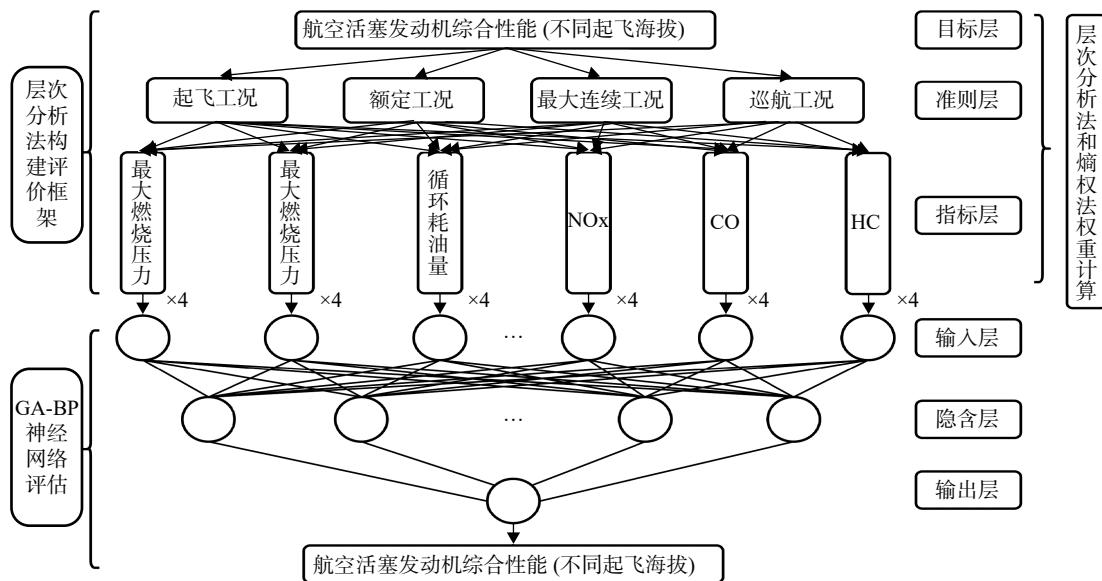


图 1 综合性能评价体系架构

Fig. 1 Comprehensive performance evaluation system architecture

为不同起飞海拔下的综合性能评估值;②准则层,把航空活塞发动机的 4 种典型工况(起飞工况、额定工况、最大连续工况、巡航工况)定义为准则层的变量;③指标层,把各工况下的动力性指标(功率、最大燃烧压力)、经济性指标(循环耗油量)、排放性指标(NO_x 、 CO 、 HC)作为多指标因子。每一层变量都对应有各自的权重,且各层的权重之和为 1。

通过借鉴“劣变系数”的思想^[8]及相对误差原理,提出性能衰退评价目标层的单一指标:衰退率 δ (如式(1)所示)。

$$\delta = \frac{c_n - c_d}{c_n} \quad (1)$$

式中 c_n 和 c_d 分别为同一起飞海拔下综合性能的正常值和衰退评估值。其中 $\delta \in (0,1)$, 当 δ 值越接近 1 表明发动机性能衰退越严重。根据 δ 的值的大小,可将发动机综合性能分为 5 种评估等级(如表 1 所示)。

表 1 航空活塞发动机综合性能评估等级

Table 1 Comprehensive performance evaluation levels of aero piston engine

评估等级	δ 范围	等级描述
合格	$0 < \delta \leq 0.1$	可正常运行
轻度衰退	$0.1 < \delta \leq 0.2$	略有衰退
中度衰退	$0.2 < \delta \leq 0.3$	衰退明显,有危险
严重衰退	$0.3 < \delta \leq 0.4$	故障的可能性很大
故障	$0.4 < \delta \leq 1$	出现故障

1.1 层次分析法

1.1.1 构造判断矩阵

层次结构反映了各个指标之间的不同影响程度,把这些指标进行比较判断、量化,形成判断矩阵 X ^[14]。设有 m 个评价指标,按照重要性等级比较表^[15]对重要性等级元素 x_{pq} 进行赋值,可得到:判断矩阵 $X = (x_{pq})_{m \times m}$ 。

1.1.2 主观权重的确定及一致性检验

判断矩阵 X 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 与对应的特征向量 W_1 需要满足式(2):

$$XW_1 = \lambda_{\max} W_1 \quad (2)$$

式中 $W_1 = [\omega_{j1}, j=1, 2, \dots, m]$, ω_{j1} 表示第 j 项指标的主观权重。

判断矩阵的一致性检验用式(3)和式(4):

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$R_c = \frac{I_c}{I_r} \quad (4)$$

式中 n 表示矩阵阶数, R_c 为随机一致性比率, I_c 表示一致性指标, I_r 为平均随机一致性指标, I_c 越小,则矩阵 X 的一致性就越好。若 $R_c < 0.10$, X 具有完全一致性,否则就需要调整判断矩阵因素的取值, I_r 的值可查表^[15]得出。

1.2 客观熵权法

熵权法是一种客观赋权方法,其核心思想是利用熵的概念,确定指标的权重。根据指标熵值判断其离散度,若信息熵值越小,离散度就越大,该指标对综合评价的影响系数(即权重)就越大,反之则越小^[16]。

1.2.1 数据归一化处理

设有 n 个评价样本,每个样本有 m 个评价指标,建立多指标评价矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$, y_{ij} 表示第 i 个评价样本的第 j 个评价指标的值。由于评价指标的取值范围、量纲不同,归一化评价矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$ 中的值按照式(5)或式(6)对评价指标进行归一化处理。

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} y_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} y_{ij}} \quad (5)$$

$$z_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij} - y_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq n} y_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} y_{ij}} \quad (6)$$

1.2.2 指标客观权重计算

熵特征比重 p_{ij} 定义为:

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (7)$$

评价指标 j 的信息熵值 e_j 定义为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (8)$$

式中 $k = \frac{1}{\ln n} > 0$, 满足 $0 \leq e_j \leq 1$; e_j 越大,则该指标的贡献度就越小。

评价体系中各指标客观权重计算公式如下:

$$\omega_{j2} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (9)$$

根据以上公式最终得到表征客观权重的向量为 $W_2=[\omega_{j2}, j=1, 2, \dots, m]$, ω_{j2} 表示第 j 项指标的客观权重。

1.3 层次熵权复合权重的计算

由于单一权重难以同时满足主观意向和客观要求,把 AHP 获取的主观权重 ω_{j1} 与 EWM 获取的客观权重 ω_{j2} 进行耦合,从而获取复合权重,既满足决策意向,又使权重具有客观合理性。

计算方法如下:

$$\omega_j = \varepsilon \omega_{j1} + (1 - \varepsilon) \omega_{j2} \quad (10)$$

式中 ω_j 表示第 j 项指标的复合权重。

为满足 ω_j 与主观权重 ω_{j1} 以及客观权重 ω_{j2} 偏差的平方和最小,使复合权重更加合理,建立目标函数如下:

$$\min F(\omega) = \sum_{j=1}^m [(\omega_j - \omega_{j1})^2 + (\omega_j - \omega_{j2})^2] \quad (11)$$

对目标函数取 1 阶求导为 0 时,可得两者偏差平方和的最小值,即 $\varepsilon=0.5$ 时主、客观权重各占 50%,可使性能评价体系达到最佳状态。

1.4 权重分配规则

层次分析法的主观权重遵循从上至下的分配原则,即:从目标层逐级向指标层进行权重分配;而熵权法的权重分配是根据指标层的实验数据计算其信息熵值,从下至上获取客观权重。

指标层和准则层的权重须满足式(12):

$$\omega = \sum_{i=1}^4 \left(U_i \cdot \sum_{j=1}^6 V_j \right) \quad (12)$$

式中 ω 为指标层权重和, $U_i (i=1, 2, 3, 4)$ 分别为起飞工况权重、额定工况权重、最大连续工况权重、巡航工况权重,且 U_i 的权重和为 1; $V_j (j=1, 2, \dots, 6)$ 分别为各工况下的功率权重、最大燃烧压力权重、循环耗油量权重、NOx 权重、CO 权重、HC 权重,且 V_j 的权重和为 1。

1.5 GA-BP 神经网络的评价实现

使用 GA-BP 神经网络计算模型对航空活塞发动机的综合性能评价体系进行实现,并根据目标层的衰退率值进行衰退判断。

BP 神经网络属于机器学习,由三层结构组成:输入层、隐含层、输出层,其学习过程包括信号的正向传递和误差逆传递。在训练过程中不断持续调整,直至输出达到理想结果。遗传算法(GA)是

一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,它能快速地为 BP 神经网络找到最优的连接权值和阈值。

2 发动机台架实验与仿真模型

2.1 发动机实验台架

本研究以某压燃式高压共轨四缸航空煤油活塞发动机为实验机型,且发动机与螺旋桨之间的减速比为 1.69,表 2 是该发动机的主要参数。

表 2 航空活塞发动机主要参数

Table 2 Main parameters of aero piston engine

参数	数值或说明
缸径/mm	83
活塞行程/mm	92
排量/L	1.991
压缩比	18.0
最大转速/(r/min)	3 887
最大连续功率/kW	99
进气方式	废气涡轮增压+中冷
燃油供给	高压共轨直喷燃油系统

实验地点在云南昆明,海拔约为 1 920 m,大气压力为 80.5 kPa。台架实验使用瑞士 Kistler 公司的缸压采集燃烧分析系统,主要包括:2893AK8 燃烧分析仪、6058A 预热塞式缸压传感器、4665B1 电荷放大器等。

2.2 仿真模型的建立及验证

理论计算分析、计算机仿真模拟和实物实验验证,三者相互关联、补充,已经成为现代航空发动机研发过程重要的设计方法和工具^[17]。本研究采用发动机的参数和实验测量数据相结合,使用 LMS 公司的 AMESim(advanced modeling environment for performing simulation of engineering systems)建模仿真平台建立航空活塞发动机的仿真模型^[18](如图 2),并在 MATLAB/Simulink 中建立控制仿真模型,利用 AMESim 的 SimuCosim 联合仿真实接口,进行发动机模型和控制器模型相耦合,可联合模拟仿真发动机在不同海拔、不同工况下的运行过程,还可进行发动机零部件的故障模拟。

该仿真模型包括:排气变压-质量分数源、质量流量传感器、气体排气半热换热器、转矩传感器、转速传感器、废气分析仪等,可仿真计算发动机功率、循环耗油量、NOx 排放物等。

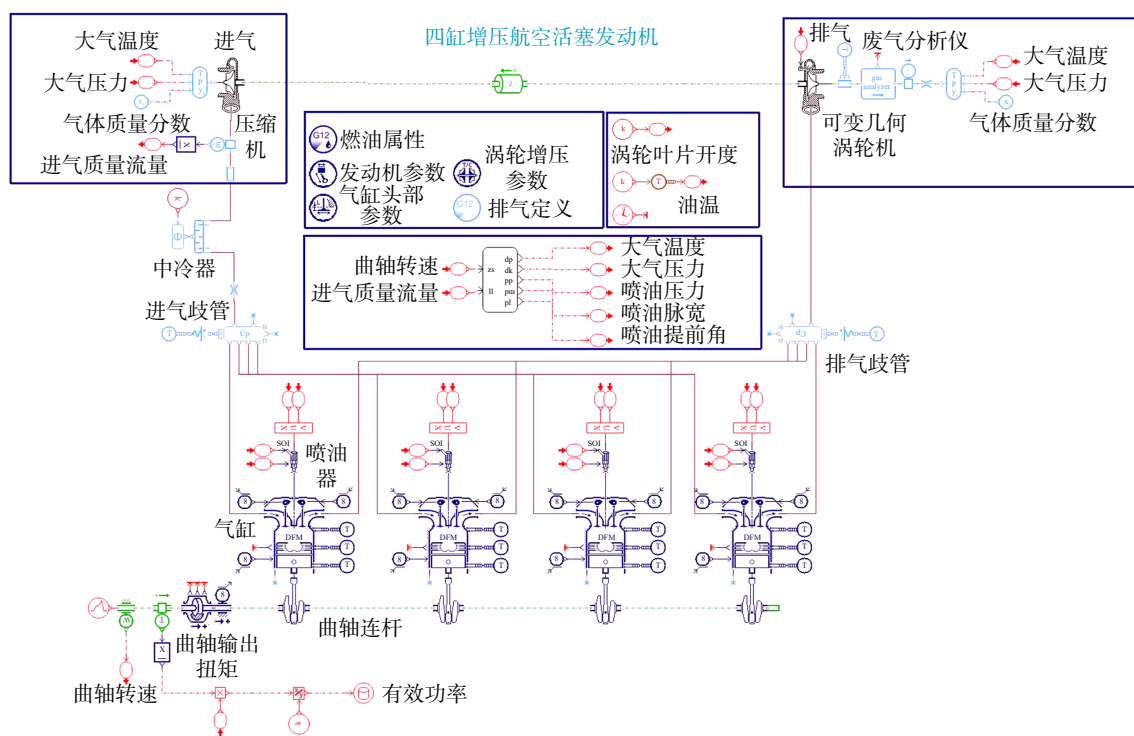


图2 压燃式航空活塞发动机 AMESim 模型

Fig. 2 AMESim model of compression-ignition aero piston engine

在 1920 m 高海拔、发动机处于起飞工况时, 使用 100% 油门和最大螺旋桨转速为 2300 r/min, 通过测得的缸压实验数据对仿真进行验证, 其最大误差低于 5%, 表明该仿真模型能保障压燃式航空活塞发动机仿真模拟的准确性^[18]。

3 发动机综合性能评价数据分析

3.1 综合性能值的计算及数据分析

不同起飞海拔梯度对各个工况的要求不同, 即: 每个工况分配的权重都不同。例如: 根据评定准则表^[15], 对起飞海拔为 1500~2000 m 目标层下的 4 个工况准则层的重要程度进行赋值, 并建立了判断矩阵 X_1 (示例) 为:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 1 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} \\ 1 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

将该矩阵放入 MATLAB 程序计算, 可求得 $I_c=0.0035$, $R_c=0.0039$ 且 R_c 小于 0.10, 判断矩阵满足一致性检验。因此可求得到起飞海拔高度在 1500~2000 m 时各个工况的权重占比。同理, 可再建立起起飞海拔为 2000~2500 m、2500~

3000 m 时 4 种工况的判断矩阵, 并得到其权重分配 (如图 3 所示)。因此, 4 种工况的 6 个指标主观权重也按照上述方法计算得到 (如图 4 所示)。

此外, 把 1500~3000 m 起飞海拔按每 50 m 划分一个小梯度进行仿真实验, 每个工况取得 31 组关于 6 个性能指的数据, 即: 熵权法的评价样本 $n=31$, 评价指标 $m=6$ 。如: 最大连续工况建立各指标的客观权重评价矩阵 Y_1 (示例) 为

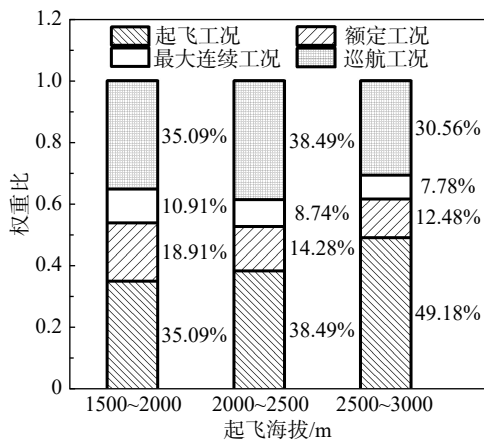


图3 不同起飞海拔下各工况主观权重占比

Fig. 3 Subjective weight ratio of each condition at different take-off altitudes

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 74.86 & 117.25 & 39.785\ 9 & 5.502\ 5 & 1.922\ 5 & 0.155\ 8 \\ 74.56 & 118.25 & 39.829\ 8 & 5.473\ 6 & 1.938\ 8 & 0.157\ 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 66.15 & 117.78 & 41.087\ 4 & 4.668\ 8 & 2.393\ 8 & 0.191\ 4 \\ 65.85 & 117.73 & 41.133\ 1 & 4.64 & 2.41 & 0.192\ 6 \end{bmatrix}_{31 \times 6}$$

使用 MATLAB 对式(5)~式(9)进行编程,再将评价矩阵 Y 代入,即可完成客观权重的求解。其中对评价矩阵进行归一化处理时,功率、最大燃烧压力、NOx 指标采用式(5),循环耗油量、HC、CO 使用式(6)。同理,对其他工况评价矩阵进行计算,可得到不同工况下各指标层的客观权重占比(如图 5 所示)。

首先,按式(10)对主观、客观权重进行叠加,

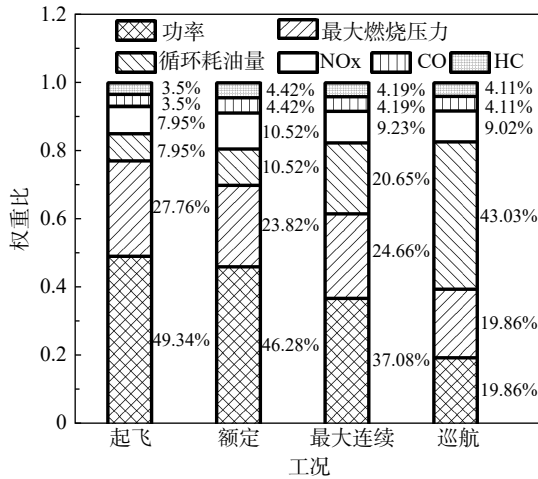


图 4 不同工况下各个指标主权重占比

Fig. 4 Subjective weight ratio of each indicator under different conditions

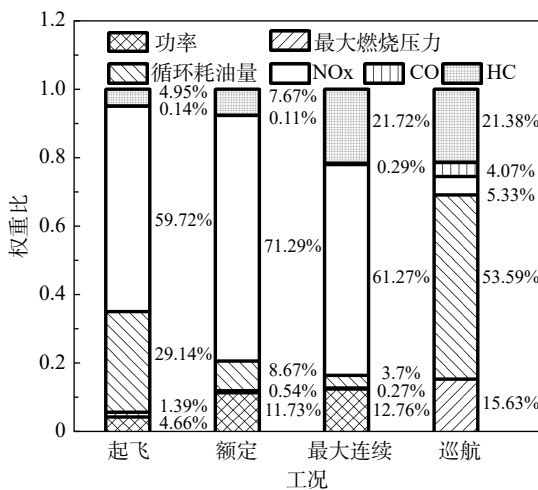


图 5 不同工况下各个指标客观权重占比

Fig. 5 Objective weight ratio of each indicator under different conditions

得到各指标复合权重值(如图 6 所示);再用式(13)计算得到准则层的局部性能值(如图 7 所示)。

$$S = \sum_{j=1}^m A_j \cdot \omega_j \quad (13)$$

式中 S 表示指标性能值, A_j 为第 j 个指标归一化后的数据值, ω_j 为第 j 个指标的复合权重, m 为评价的工况数或指标数。

最后,用 EWM 对局部性能值进行离散度计算,得到各工况的客观权重分配向量 W_2 , 如: $W_2 =$

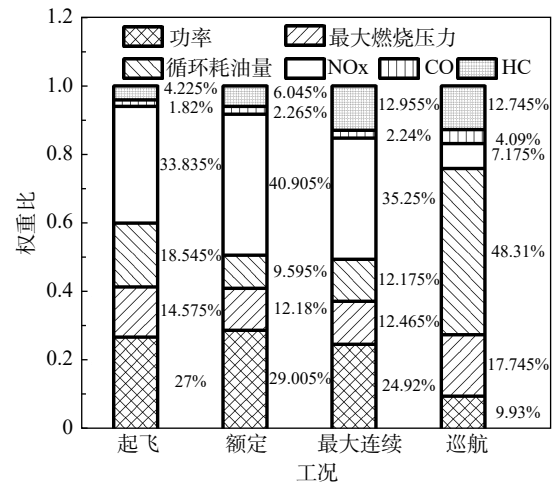


图 6 不同工况下各个指标复合权重占比

Fig. 6 Composite weight ratio of each indicator under different conditions

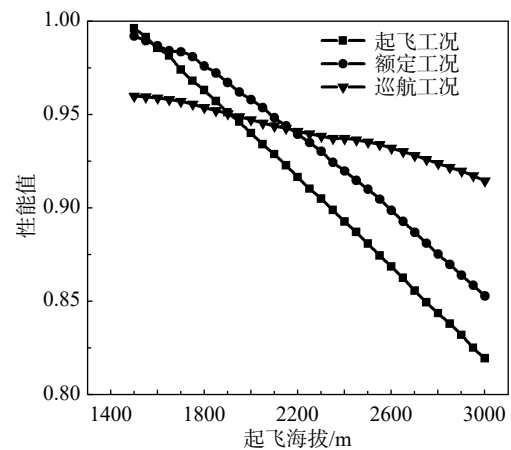


图 7 不同工况的局部性能值

Fig. 7 Local performance values of different conditions

[0.425 1 0.267 6 0.282 8 0.024 5]。再次用式(10)进行加权计算得到综合性能(目标层)的复合权重(如图 8 所示)。又由式(13)计算得到航空活塞发动机最终的综合性能值。

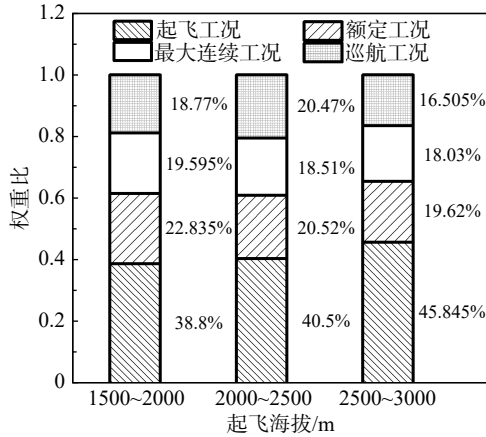


图 8 不同起飞海拔下各工况复合权重占比

Fig. 8 Composite weight ratio of each condition at different take-off altitudes

3.2 GA-BP 神经网络的计算精度

评价过程主要涉及 4 种工况, 每个工况又包含 6 个性能指标, 故选择 24 个因子作为 GA-BP 神经网络的输入, 而输出为单一目标值: 综合性能值, 隐含层有 8 个, 输出层使用 purlin 纯线性函数。在训练函数中引入 trainlm 训练函数, 初始种群规模为 10, 最大进化数 30, 交叉和变异概率分别为 0.8 和 0.2, 设置了 1 000 个重复的学习迭代数, 通过反复计算得到最终权重系数和阈值, 直至训练完成。通过模拟改变大气环境边界及喷油孔参数, 共获取了 93 组仿真实验数据。选取 70 组不同功率、最大燃烧压力、循环耗油量、NO_x、CO、HC 仿真数据作为模型的训练集, 剩余 23 组数据作为神经网络的测试集。

如图 9 所示, 按照上述参数设置进行遗传算法寻优运算, 其适应度值变化曲线随进化迭代次数的增加, 种群最优个体的适应度值呈阶梯下降趋势, 表明该算法正在接近最优解, 在迭代到 21 次时, 已非常接近最优解。

此外, 设计了相同输入神经元和输出神经元个数的 BP、径向基(radial basis function, RBF)、埃尔曼(Elman)神经网络模型与 GA-BP 神经网络模型的航空活塞发动机综合性能的判定效果进行对比, 从而证实了 GA-BP 神经网络模型计算得到的评估值非常接近实际值(如图 10~图 11 所示)。

采用式(14)~式(16)中的方均根误差(E_{rms})、

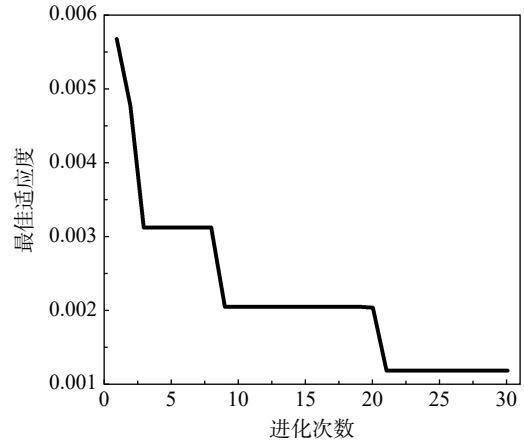


图 9 遗传算法进化过程适应度变化曲线

Fig. 9 Fitness change curve of genetic algorithm evolution process

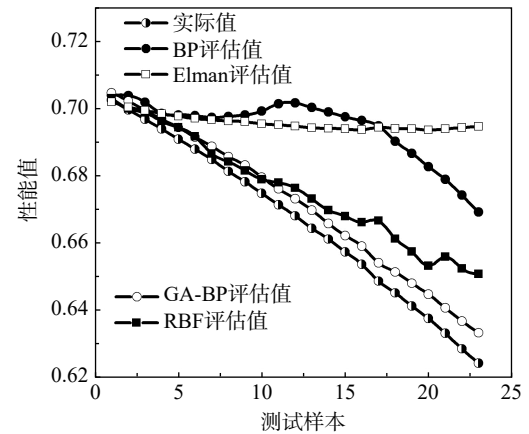


图 10 不同神经网络模型的评估值与实际值对比

Fig. 10 Comparison of estimation values and actual values for different neural network models

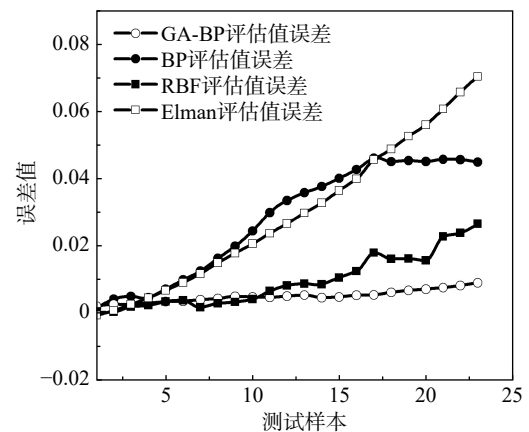


图 11 不同神经网络模型的评估值误差对比

Fig. 11 Comparison of estimation values errors for different neural network models

平均绝对误差(E_{ma})、平均绝对百分比误差(E_{map})对各神经网络评估模型的评估值进行误差精度

对比。

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N (\bar{x}_l - \hat{x}_l)^2} \quad (14)$$

$$E_{\text{ma}} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |\bar{x}_l - \hat{x}_l| \quad (15)$$

$$E_{\text{map}} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \left| \frac{\bar{x}_l - \hat{x}_l}{\bar{x}_l} \right| \times 100\% \quad (16)$$

式中 $\bar{x}_l$ 和 $\hat{x}_l$ 为综合性能的实际值和评估值。

由表 3 所示的误差数据可知: GA-BP 神经网络相对于 BP、RBF、Elman 神经网络计算模型的方均根误差分别降低了 0.026 6、0.006 9、0.031 3; 平均绝对误差降低了 0.023、0.004 5、0.024 5; 平均绝对百分比误差降低了 3.520 8%、0.702 7%、3.785 4%。由此看出, Elman 神经网络的评估精度最差, 而 GA-BP 神经网络的误差值最小、评估效果最好, 非常适合航空活塞发动机综合性能评估及性能衰退判断。

表 3 神经网络模型评估值的误差对比

Table 3 Error comparison of neural network model estimation values

神经网络模型	方均根误差	平均绝对误差	平均绝对百分比误差/%
GA-BP	0.005 4	0.005 0	0.766 6
BP	0.032 0	0.028 0	4.287 4
RBF	0.012 3	0.009 5	1.469 3
Elman	0.036 7	0.029 5	4.552

3.3 喷油孔异常案例的性能数据分析

3.3.1 案例中的性能异常衰退判定

在喷油孔孔径和流量系数异常时, 导致发动机性能异常衰退, 出现不安全的案例中, 把相关测试数据代入 GA-BP 神经网络, 可得到航空活塞发动机的综合性能评估值(如图 12 所示), 将其代入式(1)计算, 得到发动机的性能衰退率, 并参照表 1 进行安全性判定。

随着飞机起飞海拔的上升, 发动机性能会随之下降; 但如发动机存在零部件异常或故障, 则这种性能衰退就非常明显(如图 12 所示)。

针对前面所述, 以起飞海拔为 1 500 m 的案例, 喷油孔孔径和流量系数异常时的综合性能评估值分别为 0.816、0.723; 再经式(1)计算得到综合性能衰退率 δ 分别为 0.172 8、0.267 1, 根据表 1

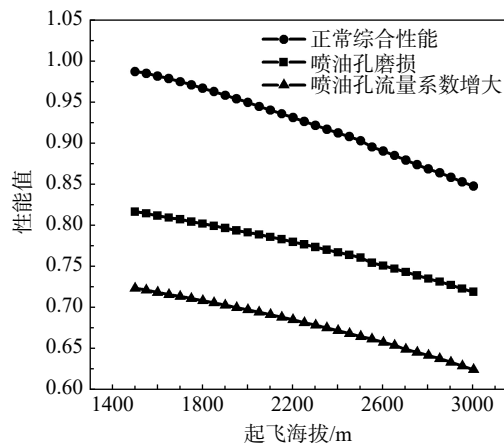


图 12 不同起飞海拔下航空活塞发动机的综合性能值

Fig. 12 Comprehensive performance values of aero piston engine at different take-off altitudes

可知, 目前两种异常对应为: 轻度衰退和轻度衰退, 以此可制定后续的维护策略和检修计划。

3.3.2 案例中的性能衰退分析及验证

为了进一步验证发动机的以上状况, 及其性能衰退的内在因素, 即: 发动机的燃烧效果好坏可直接从缸内平均压力、功率等方面直接表现出来, 本研究从燃烧的角度进行分析验证。

在仿真过程中, 通过起飞海拔为 1 500 m 的起飞工况, 模拟飞机爬升到海拔 1 900 m 的缸压曲线(如图 13), 及后续在海拔 2 500 m 时额定工况的缸压曲线(如图 14), 进行正常状态与喷油孔异常时的对比分析, 得出: ①若总循环喷油量不变, 当喷油孔磨损时, 喷孔的孔径增大, 喷油速率减小, 燃油喷雾索特直径增大, 雾化效果变差, 相同时刻的燃烧压力上升速率下降, 缸内最大燃烧压力下降; ②当喷油压力异常增大, 导致喷油孔流量系数变大时, 喷油速率增加, 产生较大动能, 喷油射程变大, 导致油束前端与气缸燃烧室壁面发生碰撞, 燃油分布不均, 雾化效果差, 缸内压力也下降。此外, 当喷油孔异常时, 两种工况的最大燃烧压力均有所下降, 缸内平均压力所围成的面积也变小, 证明当出现此异常时发动机做功能力下降, 其性能出现衰退。

由图 15 和图 16 可知: 随着海拔上升, 发动机进气压力、进气质量流量均降低, 导致进气不足, 做功能力下降, 其功率也随之降低。同时, 在总循环喷油量不变的情况下, 喷油孔磨损及流量系数增大, 都会所引起燃油雾化效果变差, 燃烧不理想, 发动机输出功率也均有所下降。

对图 13~图 16 的综合分析可得: 当发动机零

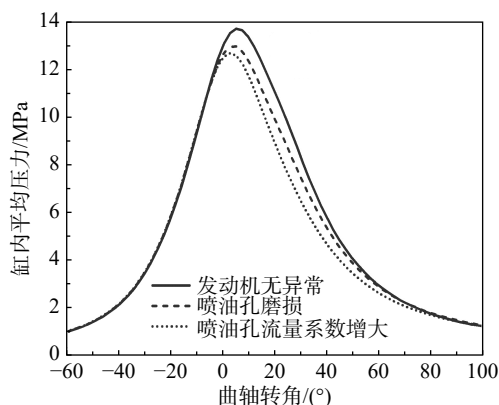


图 13 1900 m 起飞工况综合性能衰退对缸压的影响
($n=2300$ r/min)

Fig. 13 Effect of general performance degradation on cylinder pressure at 1900 m take-off operating condition
($n=2300$ r/min)

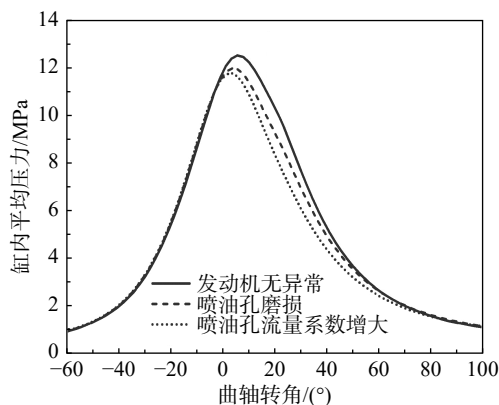


图 14 2500 m 额定工况下综合性能衰退对缸压的影响
($n=2180$ r/min)

Fig. 14 Effect of comprehensive performance degradation on cylinder pressure at 2500 m rated operating condition
($n=2180$ r/min)

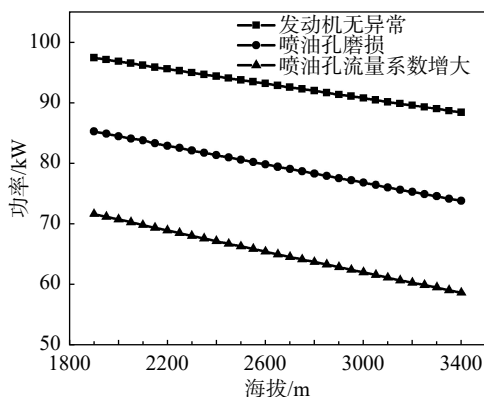


图 15 起飞工况下综合性能衰退对功率的影响
($n=2300$ r/min)

Fig. 15 Effect of comprehensive performance degradation for power at take-off operating condition
($n=2300$ r/min)

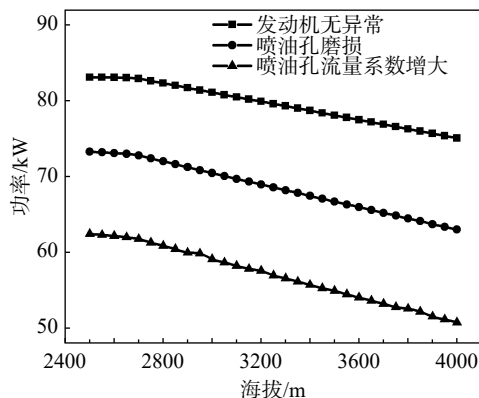


图 16 额定工况下综合性能衰退对功率的影响
($n=2180$ r/min)

Fig. 16 Effect of comprehensive performance degradation for power at rated operating condition
($n=2180$ r/min)

部件发生异常时,会引起各工况动力性指标(最大燃烧压力、功率)出现下降;结合图 12 的航空活塞发动机综合性能变化曲线,验证了本综合性能评价体系的正确性;采用 GA-BP 神经网络计算模型对发动机的综合性能进行实现,可直接获得当前发动机零部件异常,导致综合性能异常衰退的状况,为飞机的运行、维修提供帮助。

4 结 论

1) AHP 与 EWM 耦合形成的复合权重能弥补单一权重的不足,既能满足决策意向,又使权重更加客观合理,由此计算得到的综合性能值也较好地反映当前航空活塞发动机的性能状态。

2) 采用具有智能化的 GA-BP 神经网络计算模型,对航空活塞发动机层次熵权性能评价体系进行实现,可较为客观、准确地评价航空活塞发动机当前的性能衰退程度,为其制定相应的维护策略和检修计划提供依据。

3) 从燃烧的角度,对航空活塞发动机出现异常或故障时的性能衰退进行定量和定性的分析,从而较好地证实该层次熵权评价体系使用 GA-BP 神经网络实现对当前发动机性能衰退评估的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 洪骥宇,王华伟,倪晓梅.基于降噪自编码器的航空发动机性能退化评估[J].航空动力学报,2018,33(8):2041-2048.
HONG Jiyu, WANG Huawei, NI Xiaomei. Assessment of performance degradation for aero-engine based on denoising autoencoder[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(8): 2041-2048. (in Chinese)

- [2] MENON S, CADOU C P. Scaling of miniature piston-engine performance: Part 1 overall engine performance[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2013, 29(4): 774-787.
- [3] MIKE B. Minimizing the risk of engine failure[J]. *Aviation Safety*, 2018, 38(4): 16-19.
- [4] CUI Zhiqian, ZHONG Shisheng, YAN Zhiqi. Aero-engine gas path performance degradation assessment based on a multi-objective optimized discrete feedback network[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19(6): 2079-2091.
- [5] SIMON D L, RINEHART A W. Sensor selection for aircraft engine performance estimation and gas path fault diagnostics[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(7): 071201.
- [6] HAO Yi, WANG Li, JIANG Xuan. Multi-parameter methods of comprehensive performance evaluation for aero-engine[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 466/467: 995-999.
- [7] 王梦琦, 王端民, 杨雪. 基于改进模糊综合评判的航空发动机状态评估[J]. *润滑与密封*, 2011, 36(1): 80-84.
WANG Mengqi, WANG Duanmin, YANG Xue. Aeroengine performance monitoring based on improved fuzzy synthetic evaluation[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(1): 80-84. (in Chinese)
- [8] 张龙平, 刘忠长, 田径, 等. 车用柴油机瞬态工况试验及性能评价方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(4): 463-468.
ZHANG Longping, LIU Zhongchang, TIAN Jing, et al. Experiment and performance evaluation methods for automotive diesel engines under transient operation conditions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(4): 463-468. (in Chinese)
- [9] 赵凯, 李冬, 李本威. 发动机性能退化恢复技术研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(10): 1560-1566.
ZHAO Kai, LI Dong, LI Benwei. Research on performance recovery for engine performance deterioration[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1560-1566. (in Chinese)
- [10] DE GIORGI M G, QUARTA M. Hybrid MultiGene Genetic Programming: Artificial neural networks approach for dynamic performance prediction of an aeroengine[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 103: 105902.
- [11] XIE Chuan, ZHANG Peng, YAN Zhi. Correlation analysis of aero-engine operation monitoring using deep learning[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(1): 551-562.
- [12] 马帅, 吴亚锋, 郑华, 等. 基于飞行过程数据的航空发动机故障诊断方法研究[J]. *推进技术*, 2023, 44(5): 280-291.
MA Shuai, WU Yafeng, ZHENG Hua, et al. Aircraft engine fault diagnosis based on flight process data[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(5): 280-291. (in Chinese)
- [13] JI Shaobo, ZHANG Ke, TIAN Guohong, et al. Evaluation method of naturalistic driving behaviour for shared-electrical car[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4625.
- [14] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 9-11.
- [15] 王伟, 郭迎清, 张宇飞, 等. 基于可拓学理论的冲压发动机传感器选型研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(3): 411-415.
WANG Wei, GUO Yingqing, ZHANG Yufei, et al. Method for selecting ramjet sensors based on extension theory[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(3): 411-415. (in Chinese)
- [16] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. *电网技术*, 2013, 37(1): 77-81.
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 77-81. (in Chinese)
- [17] 刘大响, 金捷, 刘邓欢. 数值仿真技术在航空动力研制中的地位 and 作用[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(10): 2017-2024.
LIU Daxiang, JIN Jie, LIU Denghuan. Position and function of numerical simulation technology in aero-engine development[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(10): 2017-2024. (in Chinese)
- [18] 徐劲松, 聂珂, 沈颖刚, 等. 高空环境下喷嘴参数对航空活塞发动机燃烧与性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(6): 1222-1233.
XU Jinsong, NIE Ke, SHEN Yinggang, et al. Effects of combustion and performance of compression-ignition aero piston engine with different nozzle parameters in the high-altitude environment[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(6): 1222-1233. (in Chinese)

(编辑: 秦理曼)