

民 航 学 院

民航学院2006年度科技论文发表统计

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
1	张海军 左洪福 梁剑	博士 正高 博士	071 071 071	Application of Interval Multiattribute decision making Method on Aeroengine Performance Ranking	Journal of Southwest Jiaotong University	2006. 0. 2	
2	张海军 左洪福 梁剑	博士 正高 博士	071 071 071	民航发动机多指标模糊信息熵的性能排队 研究	应用科学学报	2006. 0. 6	
3	左洪福 张海军 戎翔	博士 正高 博士	071 071 071	基于比例风险模型的航空发动机视情维修 决策	航空动力学报	2006. 0. 4	
4	郭亚中 左洪福 王华伟	博士 正高 中级	071 071 071	民航飞机故障诊断的两层两级决策方法	应用科学学报	2006. 24. 4	
5	郭亚中 左洪福 王华伟 陈祥	博士 正高 中级 硕士	071 071 071 071	基于定性指标的民航飞机维修决策方法	系统工程与电子技术	2006. 28. 4	
6	郭亚中 左洪福 王华伟	博士 正高 中级	071 071 071	基于粗糙集的民航飞机故障诊断规则获取 方法	系统工程理论与实践	2006. 26. 11	
7	郭亚中 左洪福 王华伟	博士 正高 中级	071 071 071	基于Petri网的民航飞机故障诊断工作流 模型	系统工程与电子技术	2006. 28. 12	
8	戎翔 左洪福 张海军 姚晨榕	博士 正高 博士 硕士	071 071 071 071	RESEARCH ON AN INTEGRATED MODEL- BASED CBM DECISION SUPPORT SYSTEM FOR AEROENGINE	第一届维修工程国际 学术会议论文集	2006. 0. 0	
9	蔡景 左洪福 刘明 耿端阳	博士 正高 博士 博士	071 071 071 071	复杂系统成组维修策略优化模型研究	应用科学学报	2006. 24. 5	
10	蔡景 左洪福 王华伟	博士 正高 中级	071 071 071	INSPECTION OPTIMAL MODEL OF A TWO- COMPONENT PARALLEL SYSTEM WITH FAILURE DEPENDENCE	第一届维修工程国际 学术会议论文集	2006. 0. 0	
11	蔡景 左洪福	博士 正高	071 071	基于信息熵的飞机相似机型确定方法	飞机设计	2006. 0. 2	
12	张文莉 左洪福 Dieter Roller	博士 正高 正高	071 071 外校	基于自适应交互进化的设计意图驱动造型	中国机械工程	2006. 17. 4	
13	吴静敏 左洪福 陈勇	博士 正高 硕士	071 071 071	基于免疫粒子群算法的组合预测方法	系统工程理论方法应用	2006. 15. 3	
14	吴静敏 左洪福 王华伟	博士 正高 中级	071 071 071	新型民机维修成本目标有效性评估方法	南京航空航天大学学报	2006. 38. 2	
15	耿端阳 左洪福	博士 正高	071 071	基于D-S证据融合的民机维修性模糊综合评 判	航空学报	2006. 27. 3	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
16	耿端阳 左洪福	博士 正高	071 071	Improvement and Experiment of the Reamer in Vibra Cutter Against Wave Edge of Titanium Sheet Alloy Parts	兵工学报(英文版)	2006.2.1	
17	刘明 左洪福 耿端阳 蔡景	博士 正高 博士 博士	071 071 071 071	基于RBR和CBR的维修大纲专家系统	北京航空航天大学学报	2006.32.5	
18	刘明 左洪福	博士 正高	071 071	RESEARCH ON AIRCRAFT L/HIRF MRB REPORT DEVELOPING METHOD	第一届维修工程国际学术会议论文集	2006.0.0	
19	刘明 左洪福 倪现存 蔡景	博士 正高 博士 博士	071 071 071 071	Research on a Case-Based Decision Support System for Aircraft Maintenance Review Board Report	Lecture Notes in Computer Science	2006.4113.1	
20	王华伟	中级	071	基于最优信息量的液体火箭发动机可靠性增长规划	兵工学报	2006.27.1	
21	王华伟 左洪福	中级 正高	071 071	航空公司安全评估研究	系统工程	2006.24.2	
22	王华伟 何祖玉	中级 高级	071 071	商业信用与企业财务管理	统计与决策	2006.0.8	
23	赵新灿 左洪福 任勇军	博士 正高 博士	071 071 071	眼动仪与视线跟踪技术综述	计算机工程与应用	2006.0.12	
24	尤嘉 左洪福 刘明	硕士 正高 博士	071 071 071	基于CBR的维修大纲辅助系统案例库研究	南京航空航天大学第八届研究生学术会议	2006.0.1	
25	倪现存 左洪福 白芳 刘明	博士 正高 博士 博士	071 071 071 071	基于模糊多属性群决策及OWA算子的民机备件供应商评估	机械科学与技术	2006.25.12	
26	倪现存 左洪福 刘明 陈凤腾	博士 正高 博士 博士	071 071 071 071	航材承修商可拓综合评价研究	哈尔滨工业大学学报	2006.38.7	
27	王磊 左洪福 蔡景	硕士 正高 博士	071 071 071	基于马尔可夫模型的二部件系统维修优化方法	南京航空航天大学第八届研究生学术会议	2006.0.0	
28	谢庆华 左洪福	博士 正高	071 071	基于统计粗集的航空发动机维修成本组合预测模型	兵工学报	2006.27.5	
29	谢庆华 左洪福	博士 正高	071 071	基于变精度粗糙集的航空发动机送修等级决策	系统工程理论方法应用	2006.15.4	
30	谢庆华 左洪福	博士 正高	071 071	Parameter Identification for the Valve Control Cylinder System of a Hydraulic Manipulator	兵工学报(英文版)	2006.2.4	
31	李绍成 左洪福 张艳彬	博士 正高 博士	071 071 071	油液分析光谱仪微小型化探讨	润滑与密封(增刊)	2006.0.0	
32	张艳彬 左洪福 涂群章	博士 正高 副高	071 071 071	基于显微图像的油液实时分析系统中颗粒识别技术研究	机械科学与技术	2006.25.10	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
33	张艳彬 左洪福 涂群章	博士 正高 副高	071 071 071	实用化图像式油液污染实时检测系统研究	南京航空航天大学学报	2006. 38. 5	
34	张艳彬 左洪福 李绍成	博士 正高 博士	071 071 071	微流控芯片技术在机器油液分析中的应用	润滑与密封 (增刊)	2006. 0. 0	
35	张月雷 左洪福	硕士 正高	071 071	基于本体的案例表示和CBR系统结构研究	山东理工大学学报 (自然版)	2006. 20. 4	
36	陈果	副高	071	航空发动机诊断知识的动态获取与柔性诊断技术	中国机械工程	2006. 17. 9	
37	陈果	副高	071	Auto-Extracting Technique of Dynamic Chaos Features for Nonlinear Time Series	Chinese Journal of Mechanical Engineering	2006. 19. 4	
38	陈果 杨虞微 左洪福	副高 中级 正高	071 071 071	Intelligent Fusion Policy of Aero-engine Wear Fault Diagnosis	Transactions of NUA	2006. 23. 4	
39	陈果	副高	071	基于遗传算法的支持向量机时间序列预测模型优化	仪器仪表学报	2006. 27. 9	
40	杨虞微 陈果	博士 副高	071 071	基于结构自适应径向基神经网络的油样光谱数据建模	仪器仪表学报	2006. 27. 1	
41	周伽 陈果	硕士 副高	071 071	光谱油样分析数据的神经网络多变量预测技术	仪器仪表学报	2006. 27. 4	
42	孙有朝 邓华伟	正高 硕士	071 071	虚拟环境下民用飞机维修性评估与验证技术	交通运输工程学报	2006. 6. 1	
43	陆中 孙有朝	博士 正高	071 071	基于蒙特卡罗法与赌轮规则的系统维修时间仿真模型研究	中国机械工程	2006. 17. 10	
44	刘晖 顾宏斌 吴东苏	博士 正高 博士	071 071 071	半主动控制起落架缓冲性能初步研究	航空学报	2006. 27. 5	
45	孙瑾 顾宏斌	博士 正高	071 071	基于方向信息的抗干扰性边缘检测算法	小型微型计算机系统	2006. 27. 7	
46	干敏梁 聂伯玲	正高 硕士	071 071	基于C8051F060 SOC芯片的高频网络分析仪	测控技术	2006. 25 (增刊)	
47	周健星 黄圣国 卿立勇	硕士 正高 硕士	071 071 071	VHF便携式ACARS实验站的应用	江苏航空	2006. 0. 2	
48	卿立勇 黄圣国 林钰森	硕士 正高 硕士	071 071 071	基于QAR数据的飞机系统故障预测与故障诊断支持系统研究	江苏航空	2006. 0. 2	
49	邱丹 黄圣国	硕士 正高	071 071	组合航向系统中数字磁罗盘的罗差补偿研究	仪器仪表学报	2006. 27. 6. 增刊 II	
50	邱丹 黄圣国	硕士 正高	071 071	新型电子罗盘在组合航向系统的应用	江苏航空	2006. 0. 2	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
51	林钰森 黄圣国 周健星	硕士 正高 硕士	071 071 071	基于AHP法和Java EE技术的飞行操纵品质评估系统的设计	江苏航空	2006.0.2	
52	曹力 史忠科 Paul Bao	副高 外校 外校	071 071 外校	Self-adaptive length genetic algorithm for urban rerouting problem	Lecture Notes in Computer Science	2006.0.9	
53	曹力 史忠科	正高 外校	071 071	金属图象分割的研究	航空材料学报	2006.0.2	
54	吴红兰 纪涛	高工 中级	071 外校	基于PLC控制技术实现水厂自控系统的设计	测控技术	2006.25.7	
55	黄宁 周洁敏	硕士 正高	071 071	DS80C400芯片中CAN口C语言通信编辑	中国科学技术学报	2006.0.7	
56	黄宁 周洁敏 李刚	硕士 正高 博士	071 071 071	基于小波分析的感应电动机复合故障诊断	中国电机工程学报	2006.0.4	
57	赵灿 陈薇宇 杨立宇	硕士 本科 本科	071 071 071	磁致伸缩式传感器测量电路研究	中国科学技术学报	2006.0.9	
58	刘晓明 夏洪山	博士 正高	073 073	放开民航票价的可行性及实施策略探讨	价格月刊	2006.0.6	
59	刘晓明 夏洪山	博士 正高	073 073	我国民用机场等级分布的合理性分析	综合运输	2006.0.7	
60	席卫东 乔兵 朱剑英	博士 副高 正高	073 073 052	基于数字仿真的收益管理整合决策	数理统计与管理	2006.0.6	
61	席卫东 乔兵 朱剑英	博士 副高 正高	073 073 052	基于K线图的收益管理浮动价格博弈	商业研究	2006.0.8	
62	白杨	中级	073	我国航空运输服务业的市场结构及价格竞争策略分析	经济经纬	2006.0.1	
63	白杨	中级	073	中国国际航空货运量预测	统计与决策	2006.0.3	
64	汪洋 朱金福 王锐	硕士 正高 机长	073 073 上航	航空安全的六西格玛管理	中国民用航空	2006.0.1	
65	朱金福 刘玮 高强	正高 硕士 博士	073 073 073	航空客运舱位控制和超售综合静态建模研究	中国管理科学	2006.14.5	
66	朱金福 周艳 姚韵	正高 硕士 博士	073 073 073	航空客运舱位订座柔性控制收益分析	预测	2006.25.5	
67	应爱玲 朱金福	博士 正高	073 073	自我概念影响高端教育产品消费行为之研究	预测	2006.25.4	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
68	柏明国 朱金福	博士 正高	073 073	航空公司航线网络设计的一种三阶段方法	南京航空航天大学学报	2006. 38. 2	
69	柏明国 朱金福 姚韵	博士 正高 博士	073 073 073	关于我国枢纽航线网络构建方法研究	工业技术经济	2006. 25. 6	
70	柏明国 朱金福 姚韵	博士 正高 博士	073 073 073	基于可能度的多混合属性决策方法	商业研究	2006. 0. 14	
71	柏明国 朱金福	博士 正高	073 073	全连通航线网络和枢纽航线网络的比较研究	系统工程理论与实践	2006. 26. 9	
72	柏明国 朱金福 姚韵	博士 正高 博士	073 073 073	枢纽航线网络的构建方法及应用	系统工程	2006. 0. 5	
73	姚韵 朱金福 柏明国	博士 正高 博士	073 073 073	一类有动态时间窗的并行多机启发式算法研究	系统工程	2006. 24. 1	
74	姚韵 朱金福 柏明国	博士 正高 博士	073 073 073	关于民航业航班延误服务补救的探讨	企业经济	2006. 0. 11	
75	姚韵 朱金福 柏明国	博士 正高 博士	073 073 073	不正常航班管理的可拓预警模型	运筹与管理	2006. 15. 1	
76	姚韵 朱金福	博士 正高	073 073	处理航班延误旅客冲突的可拓策划	中国民航学院学报	2006. 24. 1	
77	姜涛 朱金福	博士 正高	073 073	航空公司航线网络构形的效益分析研究	工业技术经济	2006. 25. 11	
78	姜涛 朱金福	博士 正高	073 073	航空公司选择枢纽机场的鲁棒优化方法	系统工程	2006. 4. 6	
79	桂云苗 朱金福 陆迅	博士 正高 博士	073 073 073	中国航空货运顾客价值动因的实证研究	经济经纬	2006. 0. 4	
80	张玮 朱金福	博士 正高	073 073	基于企业信息化的管理创新	集团经济研究	2006. 0. 3	
81	张玮	博士	073	软件外包的IT审计探讨	郑州航空工业管理学院学报	2006. 0. 1	
82	郭梅 朱金福	博士 正高	073 073	供应链库存系统网络环境中的控制研究	商业研究	2006. 0. 9	
83	高强 朱金福	博士 正高	073 073	浅议收益管理	集团经济研究	2006. 25. 21	
84	高强 朱金福 陈可嘉	博士 正高 博士	073 073 073	机票超售的动态模型	工业技术经济	2006. 25. 2	
85	高强 朱金福	博士 正高	073 073	国内航空公司实施收益管理的博弈分析	科研管理	2006. 27. 6	

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
86	高强 朱金福	博士 正高	073 073	利用衍生金融工具对航油成本进行管理	金融与经济	2006. 25. 11	
87	梅虎 朱金福	博士 正高	073 073	我国航空旅客航班舱位选择行为研究	经济问题探索	2006. 0. 12	
88	梅虎 朱金福	博士 正高	073 073	灰色模糊聚类在旅游景区顾客满意度测评中的应用	商业研究	2006. 0. 13	
89	梅虎 朱金福	博士 正高	073 073	基于旅客舱位选择的航空收益管理	系统工程	2006. 24. 9	
90	梅虎 朱金福	博士 正高	073 073	基于博弈分析的航空收益管理定价研究	预测	2006. 25. 6	
91	彭怡 朱金福	中级 正高	073 073	一种需求不确定下的多目标供应链设计研究	科技进步与对策	2006. 23. 2	
92	彭怡 朱金福	中级 正高	073 073	收益管理的供应链生产量决策分析	企业经济	2006. 315. 1	
93	彭怡 朱金福	中级 正高	073 073	供给大于需求时的混合销售渠道容量均衡分配研究	工业技术经济	2006. 25. 9	
94	彭怡 朱金福	中级 正高	073 073	收益最大化的供应链混合销售渠道均衡价格策略	企业经济	2006. 311. 7	
95	彭怡 朱金福	中级 正高	073 073	延迟需求信息对牛鞭效应的影响分析	商业研究	2006. 350. 18	
96	彭怡	中级	073	管理信息系统课程设计的教学效果评估研究	中国科学教育	2006. 0. 16	

Application of Interval Multi-attribute Decision-Making Method to Aeroengine Performance Ranking

Zhang Haijun (张海军) Zuo Hongfu (左洪福)* Liang Jian (梁 剑)

College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract

In view of the uncertainty of the monitored performance parameters of aeroengines, the fluctuating scope of the monitored information during a period is taken as interval numbers, and the interval multi-attribute decision-making method is employed to predict the performance of aeroengine. The synthetic weights of interval numbers are obtained by calculating deviation degree and possibility degree. As an example of application, 5 performance parameters monitored on 10 CF6 aeroengines of China Eastern Airlines Co., Ltd are adopted as decision attributes to verify the algorithm. The obtained synthetic ranking result shows the effectiveness and rationality of the proposed method in reflecting the performance status of aeroengines.

Key words Aeroengine; Multi-attribute; Decision-making; Interval number; Performance ranking; Weights

Introduction

The performance deterioration of aeroengine is one of the key factors which may induce aircraft catastrophic events. With the expansion of airline fleets, the number of aeroengines increase dramatically. Because performance parameters can reflect aeroengine's deterioration degree objectively^[1], the performance ranking of the same type of aeroengines according to the monitored condition parameters is usually used to realize a high efficient management of aeroengines. Performance ranking not only makes us clear about the performance deterioration rates of aeroengines in time, but also provides us an effective

guideline to draw up a shop-visit schedule. Additionally, it is a beneficial means to decrease indirectly the engine maintenance cost by purposive troubleshooting based on the monitored information.

Domestic airlines in China used to evaluate aeroengine performance by analyzing a single parameter. However, aeroengine is a complicated system, to rank aeroengine performance, many performance parameters, such as the deviation of exhaust gas temperature (DEGT), the deviation of fuel flow (DFF), the deviation of N2 (DN2, N2 is well known as the rotate speed of high pressure turbo or high pressure compressor (HPT/HPC) in aviation industry), the deviation of vibration of low pressure compressor (LPC)/fan (ZVB1F), and the deviation of vibration of HPT/HPC/Rear (ZVB2R), need to be adopted for analysis, and a single parameter cannot reflect the real performance of an aeroengine^[2]. For the sake of the multi-attribute performance ranking, American PW corporation investigated the weight coefficients between two parameters DEGT and DFF of PW 4000 aeroengine, and presented a preliminary method of synthetic performance ranking^[3].

Received 2005-05-17

Biography Zhang Haijun (1969-), engineer, PhD. His research of interest is in optimal maintenance management and fault diagnosis of aeroengines. Zuo Hongfu (1959-), professor, PhD. His research of interest is in aviation safety and support technology.

* Corresponding author. Tel: +86-25-84891098; Fax: +86-25-84890647; Email: ms@nuaa.edu.cn

Synthetic ranking of multiple performance parameters of aeroengine belongs to a typical multi-attribute risk decision-making problem. The imperfect attribute weights of the selected parameters may increase the uncertainty of decision-making, and a maintenance scheme based on insufficient information may lead to an unwise conclusion. The monitored information is influenced by many factors, so the traditional objective or subjective weighting methods^[4] cannot reflect the real performance condition of aeroengines.

In this paper, by considering the fluctuating scopes of monitored information in a period as interval numbers, the synthetic performance ranking of aeroengine is obtained by calculating the deviation degree and possibility degree between these interval numbers. This method, by combining objective fuzzy information and subjective preference information into a formula^[5,6], provides clear concepts and means for programming on computer.

1 Preliminaries

To measure the similar degree of two interval numbers, the concepts of deviation degree and possibility degree between interval numbers are introduced as follows^[7].

Definition 1 For interval numbers $a = [a_L, a_U]$ and $b = [b_L, b_U]$, the deviation degree between them is defined as

$$D(a, b) = \|a - b\| = \sqrt{(b_L - a_L)^2 + (b_U - a_U)^2}, \quad (1)$$

where a_L and a_U are the lower and upper limits of interval a , respectively; b_L and b_U are the lower and upper limits of interval b , respectively; $D(a, b)$ is the deviation degree between intervals a and b .

For interval attributes, all the elements of the decision matrix are given in term of interval number. The similarity between two elements needs to be measured by deviation degree because the normalized attributes are difficult to compare. Obviously, the smaller the deviation is, the shorter the distance between two interval numbers is.

Definition 2 For interval numbers $a = [a_L,$

$a_U]$ and $b = [b_L, b_U]$, and their interval length $L(a) = a_U - a_L$, $L(b) = b_U - b_L$, we define the possibility degree of $a \geq b$ as

$$P(a \geq b) = \frac{\max(0, L(a) + L(b) - \max(b_U - a_L, 0))}{L(a) + L(b)}. \quad (2)$$

The possibility degree between interval numbers yields properties as follows:

(a) If $P(a \geq b) = P(b \geq a)$, then $P(a \geq b) = P(b \geq a) = 0.5$.

(b) $P(a \geq b) + P(b \geq a) = 1$.

(c) If $a_L \geq b_U$, then $P(a \geq b) = 1$; and if $b_L \geq a_U$, then $P(a \geq b) = 0$.

(d) For three interval numbers a , b and c , if $a \geq b$, then $P(a \geq c) \geq P(b \geq c)$.

According to Definition 2, we can obtain the corresponding partial ordering relation.

2 Description of Algorithm

The main steps to rank interval numbers are as follows^[8,9]:

(1) Determining decision matrix

Suppose set $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, and each sample comprises m interval attributes, namely $s = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. Thus, the decision matrix $X = \{x_{ij}\}_{n \times m}$ is obtained, where x_{ij} is an interval number of attribute s_j of sample a_i .

(2) Data normalization

The attributes in decision matrix are usually classified into benefit type, cost type, etc. Different attributes might have different magnitudes and dimensions. To eliminate the inconsistency between attributes and avoid ignoring the small numbers when there exists very large numbers, data should be normalized for clustering. After normalization, a fuzzy matrix $R = (r_{ij})_{n \times m}$ is introduced.

For benefit type attribute, we have

$$\left. \begin{aligned} r_{Lij} &= \frac{a_{Lij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{Lij})^2}} \\ r_{Uij} &= \frac{a_{Uij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{Uij})^2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

For cost type attribute, we have

$$\left. \begin{aligned} r_{lij} &= \frac{(a_{lij})^{-1}}{\sqrt[n]{\sum_{l=1}^n (a_{lij})^{-2}}} \\ r_{ujj} &= \frac{(a_{ujj})^{-1}}{\sqrt[n]{\sum_{l=1}^n (a_{ujj})^{-2}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(3) Calculating the total deviation degree

For attribute s_j , the deviation degree of samples is

$$D_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^n D(r_{ij}, r_{kj}) \omega_k, \quad (5)$$

where ω is weight, ω_i is weight of the i -th attribute;

$D(r_{ij}, r_{kj})$, $k=1, 2, \dots, n$ is calculated by Eq (1),

$i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$

Thus, the total deviation of samples is

$$D_j(\omega) = \sum_{i=1}^m D_{ij}(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n D(r_{ij}, r_{kj}) \omega_k, \quad (6)$$

(4) Determining the weights

The total deviation of decision samples should satisfy the following optimal object function:

$$\max D(\omega) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n D(r_{ij}, r_{kj}) \omega_j, \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^m \omega_j^2 = 1, \\ \omega_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

Then weights ω_j can be obtained by combination

Eq (7) with Eqs (5) and (6):

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n D(r_{ij}, r_{kj})}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n D(r_{ij}, r_{kj})}. \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} [0.0769, 0.2957] & [0.1617, 0.1796] & [0.2063, 0.7113] & [0.0747, 0.4091] & [0.0302, 0.0970] \\ [0.1161, 0.2023] & [0.0787, 0.7063] & [0.1850, 0.6097] & [0.1495, 0.8640] & [0.1998, 0.9049] \\ [0.0441, 0.0567] & [0.0179, 0.1452] & [0.1450, 0.4268] & [0.0359, 0.1146] & [0.0666, 0.1939] \\ [0.4597, 0.6899] & [0.0303, 0.5013] & [0.1490, 1.8292] & [0.0897, 0.5728] & [0.2132, 1.0859] \\ [0.1652, 0.2326] & [0.0181, 0.1400] & [0.1192, 0.4130] & [0.1380, 0.4406] & [0.1332, 0.3393] \\ [0.4454, 0.8094] & [0.0190, 0.1177] & [0.1376, 0.4925] & [0.0448, 0.1432] & [0.0727, 0.2262] \\ [0.0702, 0.1107] & [0.0190, 0.9140] & [0.0471, 0.2724] & [0.0183, 0.0734] & [0.2907, 0.4936] \\ [0.1842, 0.2625] & [0.0165, 0.0893] & [0.0975, 0.8536] & [0.0498, 0.1591] & [0.0799, 0.1357] \\ [0.2303, 0.2927] & [0.0117, 0.0797] & [0.0735, 0.2032] & [0.1794, 0.5728] & [0.1998, 0.3393] \\ [0.2627, 0.3622] & [0.0071, 0.0716] & [0.0725, 0.1829] & [0.0690, 0.9547] & [0.3197, 0.5429] \end{bmatrix}$$

Then, the attributes weights is calculated by Eq (8):

(5) Calculating the synthetic attribute

The synthetic attribute is

$$z_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

(6) Constructing the complement matrix of possibility degree

The complement matrix of possibility degree is

$$P = (p_{ij})_{n \times n}, \quad (10)$$

where $p_{ij} = P(z_i \geq z_j)$ and can be obtained by Eq (2).

(7) Ranking of samples

Finally, samples can be ranked according to the synthetic weight coefficients y_i :

$$y_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

3 Example of Application

Five performance parameters: DEGT, DFF, DN2, ZVB1F and ZVB2R, monitored on 10 CF6 aeroengines of China Eastern Airlines Co., Ltd in July 2004, are adopted as decision attributes after dependence analysis. Considering the fluctuating scope of monitored information, we look on them as interval numbers (listed in Table 1).

By normalization of the decision matrix composed of the data of Table 1 by Eq (3), the standard matrix is presented as follows:

$$(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5) = (0.0965, 0.2989, 0.1743, 0.2924, 0.1379).$$

Table 1 A ttributes values of 10 CF6 aeroengines of China Eastern Airline Co., Ltd in July, 2004

Series	A ttribute				
	DEGT	DFE	DN2	ZVBI F	ZVB2R
1	[4.90, 14.83]	[0.03, 0.18]	[0.18, 0.26]	[0.14, 0.24]	[0.56, 1.06]
2	[7.16, 9.82]	[0.22, 0.37]	[0.21, 0.29]	[0.02, 0.12]	[0.06, 0.16]
3	[25.55, 25.84]	[1.07, 1.63]	[0.30, 0.37]	[0.50, 0.50]	[0.28, 0.48]
4	[2.10, 2.48]	[0.31, 0.96]	[0.07, 0.36]	[0.10, 0.20]	[0.05, 0.15]
5	[6.23, 6.90]	[1.11, 1.61]	[0.31, 0.45]	[0.13, 0.13]	[0.16, 0.24]
6	[1.79, 2.56]	[1.32, 1.53]	[0.26, 0.39]	[0.40, 0.40]	[0.24, 0.44]
7	[13.09, 16.23]	[0.17, 1.53]	[0.47, 1.14]	[0.78, 0.98]	[0.11, 0.11]
8	[5.52, 6.19]	[1.74, 1.76]	[0.15, 0.55]	[0.36, 0.36]	[0.40, 0.40]
9	[4.95, 9.30]	[1.95, 2.48]	[0.63, 0.73]	[0.10, 0.10]	[0.16, 0.16]
10	[4.00, 4.34]	[2.17, 4.09]	[0.70, 0.74]	[0.06, 0.26]	[0.10, 0.10]

According to Eq (9), we get the synthetic attributes of samples:

$$\begin{aligned} (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9, z_{10}) = \\ ([0.1177, 1.8336], [0.1382, 1.2992], \\ [0.0545, 0.1835], [0.1350, 0.8525], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [0.1009, 0.3119], [0.0958, 0.2722], \\ [0.0661, 0.4209], [0.0653, 0.2661], \\ [0.1186, 0.3018], [0.1044, 0.4423]) \end{aligned}$$

By Eq (10), the complement matrix of possibility degree is obtained:

$$P = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.5893 & 0.9643 & 0.6980 & 0.8992 & 0.9184 & 0.8536 & 0.9226 & 0.9031 & 0.8420 \\ 0.4107 & 0.5000 & 0.9649 & 0.6198 & 0.8734 & 0.8998 & 0.8135 & 0.9061 & 0.8783 & 0.7972 \\ 0.0357 & 0.0351 & 0.0500 & 0.0573 & 0.2431 & 0.2873 & 0.2427 & 0.3585 & 0.2081 & 0.1695 \\ 0.3020 & 0.3802 & 0.9427 & 0.5000 & 0.8095 & 0.8465 & 0.7334 & 0.8573 & 0.7149 & 0.7089 \\ 0.1008 & 0.1266 & 0.7569 & 0.1905 & 0.5000 & 0.5578 & 0.4344 & 0.5988 & 0.4904 & 0.3781 \\ 0.0816 & 0.1002 & 0.7127 & 0.1535 & 0.4422 & 0.5000 & 0.3880 & 0.5485 & 0.4272 & 0.3263 \\ 0.1464 & 0.1865 & 0.7573 & 0.2666 & 0.5656 & 0.6120 & 0.5000 & 0.6400 & 0.5619 & 0.4569 \\ 0.0774 & 0.0939 & 0.6415 & 0.1427 & 0.4012 & 0.4515 & 0.3600 & 0.5000 & 0.3842 & 0.3002 \\ 0.0969 & 0.1217 & 0.7919 & 0.1851 & 0.5096 & 0.5728 & 0.4381 & 0.6158 & 0.5000 & 0.3788 \\ 0.1580 & 0.2028 & 0.8305 & 0.2911 & 0.6219 & 0.6737 & 0.5431 & 0.6998 & 0.6212 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

Finally, the synthetic weight coefficients of aeroengines are calculated by Eq (11) as follows:

$$(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10}) = (10.882, 10.497, 5.524, 9.806, 7.321, 6.912, 7.824, 6.617, 7.390, 8.228).$$

Thus, the performance ranking of the aeroengines is achieved as follows (from best to worst):

$$y_1 \underset{0.5893}{\succ} y_2 \underset{0.6198}{\succ} y_4 \underset{0.7089}{\succ} y_{10} \underset{0.5431}{\succ} y_7 \underset{0.5619}{\succ} y_9 \underset{0.5096}{\succ} y_5 \underset{0.5578}{\succ} y_6 \underset{0.5485}{\succ} y_8 \underset{0.6415}{\succ} y_3,$$

where the number 0.5893 in " $\underset{0.5893}{\succ}$ " is the possibility degree that engine 1 is better than engine 2, the rest can be deduced by analogy. By application of the proposed method, on-wing aeroengines are ranked

according to the monitored parameters, so that an optimal maintenance schedule can be made to monitor the worse engines purposively and to avoid sudden events

The synthetic ranking result obtained here is regarded by the aeroengine engineers of China Eastern Airline Co., Ltd as objectively reflecting the performance status of aeroengines. Compared with the present method, single parameter ranking method is to rank engine by some parameter value directly. If performance ranking for aeroengine is made in term of DEGT in this case, the result is $y_3 < y_6 < y_2 < y_5 < y_8 < y_1 < y_6 < y_{10} < y_4 < y_7$; if ranking in term of the other index, its result is still different. In fact, none of these single

parameter ranking results can reflect the performance deterioration status of aeroengines effectively.

4 Conclusion

By taking the fluctuating scope of the monitored information during a period as interval numbers, all the attribute weights are obtained by calculating the deviation degree and probability degree between interval numbers, and thus a synthetic performance ranking of aeroengine is obtained using multi-attribute decision making method without experts' empirical subjective opinion. So far, aeroengine engineers have already verified that this method can objectively, effectively and reasonably reflect the real performance condition of aeroengines. In addition, because the weights can be easily calculated by computer program, this method may provide a new way for real-time performance synthetic ranking of aeroengines and for optimal condition based maintenance management.

References

- [1] GE Corporation. GE aircraft engines condition monitored guide-line [R]. 2001, 10: 2~15.
- [2] Chang J B. Research of aircraft engine performance monitored and predicting methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004: 45~52 (in Chinese).
- [3] PW Corporation. PW 4000 type engine ranking reports [R]. 2001(3): 3~28.
- [4] Jessop A. Entropy in multi-attribute problems[J]. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 1999, 8(6): 67~70.
- [5] Park K S, Kim S H. Theory and methodology tools for interactive multi-attribute decision making with incompletely identified information[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 98(10): 117~123.
- [6] Wang Y M, Yang J B, Xu D L. A preference aggregation method through the estimation of utility intervals[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(8): 2027~2049 (in Chinese).
- [7] Sengupta A, Pal T K. Theory and methodology on comparing interval numbers[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 127: 28~43.
- [8] Xu Z S. The SIR method: a superiority and inferiority ranking method for multiple criteria decision making[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(1): 587~602.
- [9] Xu Z S, Sun Z D. An uncertainty type multi-attribute decision problem ranking method[J]. Journal of Management Science in China, 2002, 5(3): 35~38 (in Chinese).

文章编号: 0255-8297(2006)03-0288-05

航空发动机多指标模糊信息熵的性能排序研究

张海军, 左洪福, 梁 剑

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 依据状态监控信息对民航发动机进行性能排序, 可以及时了解发动机性能衰减程度及梯次差异, 从而便于制定最优维修计划, 达到降低维修费用的目的, 因此已成为提高机队管理质量的重要手段。目前航空公司机队管理中对多指标性能排序问题还缺乏科学的方法, 该文基于模糊等价聚类理论和粗糙集理论中的属性信息熵方法, 对该类权重信息完全未知的多指标风险决策问题进行理论建模, 得到求取各指标综合权重的算法, 并举例验证了该算法的客观有效性。

关键词: 民航发动机; 多指标; 性能排序; 模糊理论; 信息熵

中图分类号: V37.1

文献标识码: A

Multi-parameter Performance Ranking of Aeroengines Based on Fuzzy Information Entropy Method

ZHANG Hai-jun, ZUO Hong-fu, LIANG Jian

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Performance ranking of civil aviation engine based on surveillance information can provide the degree of engine deterioration and stagger difference, make optimal maintenance plan, and reduce maintenance cost. Therefore it has become a critical issue in improving fleet management. However rational methods for evaluating engine's overall performance in civil aviation management are unavailable. This paper establishes a theoretical model and proposes an algorithm to distribute all parameter weights based on a fuzzy equivalent aggregation technique and attribute information entropy of rough set theory when multi-attribute weight information are unknown. As an example, the algorithm has been verified in performance ranking of ten CF6 engines from a civil aviation company. The result shows that the method is objective and effective.

Key words: aeroengine; multi-parameter; performance ranking; fuzzy theory; information entropy

保证飞机安全、可靠、高效、经济地运行是航空公司追求的目标。发动机作为飞机的心脏, 是飞机预防重大事故时应考虑的重要因素之一, 近年来与其相关的状态监控和视情维修工作日益受到重视。随着航空公司运营规模的扩大, 发动机数量在不断地增加, 维护工程师需要维护一种(或数种)类型的多台发动机。如何依据状态监控信息准确把握各发动机性能变化状况, 是实现发动机高安全性和可靠性要求的根本保证。

在巡航状态下, 发动机性能参数的变化趋势能够客观反映发动机性能衰退情况, 因而根据监控信息对同类型发动机进行动态的性能排序, 能够及时了解同型发动机性能衰退的梯次差异, 进而预测各参数的变化率, 并利用此变化率来推断相应的参数在未来多长时间内会达到什么值, 为判断发动机的性能衰减的快慢程度及下发预测提供科学依据; 在此基础上, 有助于制定最优的发动机换发、维修计划, 有目的地进行排故和维护工作, 从而降低发动机

收稿日期: 2004-12-22; 修订日期: 2005-04-07

作者简介: 张海军, 博士生, 研究方向: 民航维修、故障诊断, E-mail: zhanghaijun2002@126.com; 左洪福, 教授, 博导, 研究方向: 航空安全与保障技术、维修工程, E-mail: rms@nuaa.edu.cn

的维修费用,这对于航空公司在竞争环境下的生存和发展有着深远意义。

发动机的性能排序指标有排气温度偏差(DEGT)、燃油消耗率偏差(DFF)、高低压转子转速偏差(DN1/DN2)及转子振动值(ZVB1F/ZVB2R)等^[1]。长期以来,航空公司习惯于依靠单一参数对发动机性能进行评估,这种方法简单易行,在一定程度上为航空公司的发动机性能排序及维修决策提供了依据。但由于各性能参数之间往往存在着交叉、重叠的复杂对应关系,因此仅监控某一指标无法全面反映发动机的实际性能状态,并有可能带来错误的决策。

采用多性能参数综合评价方法则是解决这一问题的有效途径^[2]。美国普惠公司率先针对PW4000等型号的发动机,通过研究DEGT、DFF等参数间的权重关系提出了综合性能排序的思路。本文采用多属性风险决策方法,根据性能参数中蕴含的客观信息来客观综合评判发动机性能的优劣,从而实现对发动机机队的实时性能排序和视情维修管理。

1 多属性风险决策典型方法分析

多性能参数综合排序属于典型的多属性风险决策问题。该类问题由于多属性间存在不可公度性甚至矛盾性,就导致决策问题的复杂多变,因而成为运筹学中的一个热门研究方向。目前针对该类问题主要有两类解决方法:主观赋权法和客观赋权法^[2]。主观赋权法是基于专家的先验信息对各属性的权重做出评价与比较,常见的有加权法和层次分析法、专家打分法等^[3]。该类方法虽然解释性较强,但存在明显的主观随意性;客观赋权法则是由决策属性的指标值中反映的客观信息来确定权重系数,常见的有均方差法、离差最大化法、熵值法等^[4,5]。该类方法确定权重的客观性得以增强,在实践中获得了广泛应用,但有时得到的结果与实际经验相悖,可能无法作出合理解释。

模糊数学方法在处理不确定知识时的优势在于不损失有效信息量^[6,7],但无法判定各因素的重要性大小,需要评判者提供先验的相对权重信息。粗糙集理论的思想是“让数据说话”,在保持分辨能力不变的前提下,通过知识约简导出问题的决策(或分类)规则^[8]。其显著特征是勿需提供数据集合之外的任何先验信息,对于处理复杂系统参数间关系不失为一种客观有效的方法。民航发动机是一个非常复杂

的系统,内部各单元体之间结构联系紧密,性能参数与各单元体间相关性强,既具有模糊性又具有不确定性的特点,因此本文将两种理论方法相结合来处理多指标决策问题^[6]。具体实现方法是:首先根据各属性的分布特点,采用模糊聚类法得到不同阈值下的等价分类,然后利用粗糙集理论中属性约简的原理,求得各指标的重要度,从而最终对各指标进行客观赋权。

2 多属性风险决策的模糊信息熵算法

2.1 相关概念^[7,8]

定义1 设模糊集合 $R \in F(X \times X)$, 若 $R' \in e(R)$ 是 X 上的模糊等价关系, $R \subset e(R)$, 且 $R \subset R' \Rightarrow e(R) \subset R'$, 则称 $e(R)$ 为 R 的等价闭包。显然, $e(R)$ 是包含 R 的最小等价关系。

定义2 设模糊集合 $A \in F(X)$, $\forall \lambda \in [0, 1]$, 则称 $(A)_\lambda = \{x \in X : A(x) \geq \lambda\}$ 为 A 的截集, 简记为 A_λ , 其中 λ 称为阈值或置信水平。

定义3 在概率近似空间 (U, C, P) 中, $C = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为论域 U 上导出的划分, $P(X_i)$ 为近似空间中的概率(即每一个等价划分类集合与论域间的基数之比), 则系统的不确定性可由系统熵表示, 即

$$H(C) = - \sum_{i=1}^n P(X_i) \lg(P(X_i)) \quad (1)$$

式中: 当 $P(X_i) = 0$ 时, 令 $\lg P(X_i) = 0$ 。

定义4 设 $C = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, $D = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ 为论域 U 上的两个等价关系, C 对于 D 的信息依赖程度可由条件熵来表示, 即

$$H(D|C) = - \sum_{i=1}^n P(X_i) \sum_{j=1}^m P(Y_j|X_i) \lg(P(Y_j|X_i)) \quad (2)$$

式中, $P(Y_j|X_i) = |Y_j \cap X_i| / |X_i|$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$

2.2 求解多指标权重的步骤

(1) 决策矩阵确定 设 m 个样本组成的模糊集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 每个样本的 n 个指标的集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 从而得到决策矩阵 $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$, 其中 x_{ij} 表示样本 a_i 对于指标 s_j 的一个属性值。

(2) 数据归一化处理 决策矩阵中各指标通常

有效益型、成本型等,并且不同指标的“量纲”可能不同,多数指标通常处于不同的数量级上.因此,在进行聚类前必须先将各数据映射到一定的区间范围内,即归一化处理.本文采用的归一化处理方法为^[9]:

对于效益型指标(数值越大越好)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - f_j^\Delta}{f_j^\Delta - f_j^\nabla} \alpha + 1 - \alpha \quad (3)$$

对于成本型指标(数值越小越好)

$$r_{ij} = \frac{f_j^\Delta - x_{ij}}{f_j^\Delta - f_j^\nabla} \alpha + 1 - \alpha \quad (4)$$

式中, $f_j^\Delta = \max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij})$, $f_j^\nabla = \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij})$. 为避免归一化处理后出现元素为 0 的情况,引入取值在 $[0, 1]$ 之间的 α 平衡因子,通常取为 0.9.

归一化处理后决策矩阵变为模糊矩阵, $R = (r_{ij})_{m \times n}$.

(3) 模糊等价分类 首先采用最大最小法,由模糊矩阵 R 求解模糊相似关系矩阵 S , 算式如下

$$s_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (r_{ik} \wedge r_{kj})}{\sum_{k=1}^m (r_{ik} \vee r_{kj})} \quad (5)$$

然后,利用模糊等价闭包法求出模糊等价矩阵并确定等价分类数目.

等价闭包的计算方法:依次求出 $R^2, R^4, \dots, R^{2^j}$, 当出现 $R^k \circ R^k = R^k$ 时,有 $e(R) = R^k$.

用适当的阈值 λ 对模糊等价矩阵进行截集,由此得到截集矩阵;对截集矩阵进行等价分类,各分类记为 $C_{\lambda_i} (i = 1, 2, \dots, k)$;从全部指标中依次删除某一指标后再重复以上步骤,得到的各阈值 λ 对应的等价分类分别记为 $D_{\lambda_j} (j = 1, 2, \dots, k')$.

(4) 指标重要度 $I_{\lambda_i} (C_i; D_j)$ 的求取

在某一置信水平 λ 下,对于从指标集 C 中导出的指标子集 D ,指标的重要度可用两者依赖程度(即熵和条件熵)的差值来度量,即

$$I_{\lambda} (C; D) = H(C) - H(D | C) \quad (6)$$

上式表示当从集合 C 中除去某些指标变为子集 D 时,对象分类 $U \setminus C$ 的正域受到的影响,其数值越大,表明去掉的指标越重要.

(5) 指标信息量 某指标所含信息量与指标相对重要度成反比,故将不同置信水平的指标重要度

的倒数加权处理来表示指标所含信息量^[6],即

$$T_j = \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{1}{I_{\lambda_i} (C_i; D_j)} \quad (7)$$

(6) 指标权重分配 将各指标所含信息量的相对大小进行归一化得到各指标的权重,即

$$\omega_j = T_j / \sum_{j=1}^m T_j \quad (8)$$

(7) 排序 将指标权重乘以决策矩阵得到各样本的排列次序,即

$$y_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \omega_j \quad (9)$$

3 实例分析

选用从某航空公司的 10 台 CF6 型发动机上采集的 5 个性能参数 (DEGT、DFF、DN2、ZVB1F、ZVB2R,各指标经转换后均为成本型指标) 组成决策矩阵 X ,按式(4)归一化处理后得到矩阵 R

$$X = \begin{bmatrix} 4.9 & 0.032 & 0.18 & 0.24 & 1.06 \\ 7.16 & 0.37 & 0.29 & 0.022 & 0.06 \\ 25.84 & 1.63 & 0.3 & 0.5 & 0.48 \\ -2.1 & 0.31 & 0.07 & 0.2 & 0.05 \\ 6.9 & 1.11 & 0.31 & 0.13 & 0.16 \\ 2.55 & 1.32 & 0.39 & 0.4 & 0.44 \\ -13.09 & 1.53 & 0.47 & 0.98 & 0.11 \\ 5.52 & 1.74 & 0.55 & 0.36 & 0.4 \\ 9.3 & 1.95 & 0.63 & 0.1 & 0.16 \\ 4.0 & 2.17 & 0.7 & 0.26 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.5841 & 1.0000 & 0.8429 & 0.7952 & 0.1000 \\ 0.5319 & 0.8577 & 0.6857 & 1.0000 & 0.9911 \\ 0.1000 & 0.3273 & 0.6714 & 0.5509 & 0.6168 \\ 0.7459 & 0.8830 & 1.0000 & 0.8328 & 1.0000 \\ 0.5379 & 0.5462 & 0.6571 & 0.8985 & 0.9020 \\ 0.6384 & 0.4578 & 0.5429 & 0.6449 & 0.6525 \\ 1.0000 & 0.3694 & 0.4286 & 0.1000 & 0.9465 \\ 0.5698 & 0.2810 & 0.3143 & 0.6825 & 0.6881 \\ 0.4824 & 0.1926 & 0.2000 & 0.9267 & 0.9020 \\ 0.6049 & 0.1000 & 0.1000 & 0.7764 & 0.9554 \end{bmatrix}$$

由式(5)得到相应的相似矩阵 S ,再由等价闭包法计算出相应的模糊等价矩阵 E

$$S = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.672 & 4 & 0.455 & 8 & 0.700 & 0 & 0.623 & 6 & 0.592 & 9 & 0.345 & 1 & 0.498 & 1 & 0.416 & 0 & 0.395 & 5 \\ 0.672 & 4 & 1.000 & 0 & 0.557 & 4 & 0.842 & 3 & 0.868 & 2 & 0.678 & 1 & 0.524 & 1 & 0.608 & 6 & 0.664 & 9 & 0.595 & 2 \\ 0.455 & 8 & 0.557 & 4 & 1.000 & 0 & 0.508 & 0 & 0.633 & 4 & 0.697 & 5 & 0.444 & 5 & 0.633 & 9 & 0.501 & 7 & 0.440 & 0 \\ 0.700 & 0 & 0.842 & 3 & 0.508 & 0 & 1.000 & 0 & 0.767 & 8 & 0.658 & 2 & 0.549 & 3 & 0.568 & 3 & 0.572 & 9 & 0.568 & 6 \\ 0.623 & 6 & 0.868 & 2 & 0.633 & 4 & 0.767 & 8 & 1.000 & 0 & 0.778 & 6 & 0.577 & 5 & 0.700 & 6 & 0.749 & 5 & 0.659 & 8 \\ 0.592 & 9 & 0.678 & 1 & 0.697 & 5 & 0.658 & 2 & 0.778 & 6 & 1.000 & 0 & 0.609 & 4 & 0.818 & 2 & 0.626 & 4 & 0.623 & 6 \\ 0.345 & 1 & 0.524 & 1 & 0.444 & 5 & 0.549 & 3 & 0.577 & 5 & 0.609 & 4 & 1.000 & 0 & 0.569 & 9 & 0.511 & 3 & 0.524 & 5 \\ 0.498 & 1 & 0.608 & 6 & 0.633 & 9 & 0.568 & 3 & 0.700 & 6 & 0.818 & 2 & 0.569 & 9 & 1.000 & 0 & 0.750 & 1 & 0.730 & 0 \\ 0.416 & 0 & 0.664 & 9 & 0.501 & 7 & 0.572 & 9 & 0.749 & 5 & 0.626 & 4 & 0.511 & 3 & 0.750 & 1 & 1.000 & 0 & 0.819 & 8 \\ 0.395 & 5 & 0.595 & 2 & 0.440 & 0 & 0.568 & 6 & 0.659 & 8 & 0.623 & 6 & 0.524 & 5 & 0.730 & 0 & 0.819 & 8 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.700 & 0 & 0.697 & 5 & 0.700 & 0 & 0.700 & 0 & 0.700 & 0 & 0.609 & 4 & 0.700 & 0 & 0.700 & 0 & 0.700 & 0 \\ 0.700 & 0 & 1.000 & 0 & 0.697 & 5 & 0.842 & 3 & 0.868 & 2 & 0.778 & 6 & 0.609 & 4 & 0.778 & 6 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 \\ 0.697 & 5 & 0.697 & 5 & 1.000 & 0 & 0.697 & 5 & 0.697 & 5 & 0.697 & 5 & 0.609 & 4 & 0.697 & 5 & 0.697 & 5 & 0.697 & 5 \\ 0.700 & 0 & 0.842 & 3 & 0.697 & 5 & 1.000 & 0 & 0.842 & 3 & 0.778 & 6 & 0.609 & 4 & 0.778 & 6 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 \\ 0.700 & 0 & 0.868 & 2 & 0.697 & 5 & 0.842 & 3 & 1.000 & 0 & 0.778 & 6 & 0.609 & 4 & 0.778 & 6 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 \\ 0.700 & 0 & 0.778 & 6 & 0.697 & 5 & 0.778 & 6 & 0.778 & 6 & 1.000 & 0 & 0.609 & 4 & 0.818 & 2 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 \\ 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 1.000 & 0 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 & 0.609 & 4 \\ 0.700 & 0 & 0.778 & 6 & 0.697 & 5 & 0.778 & 6 & 0.778 & 6 & 0.818 & 2 & 0.609 & 4 & 1.000 & 0 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 \\ 0.700 & 0 & 0.750 & 1 & 0.697 & 5 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 & 0.609 & 4 & 0.750 & 1 & 1.000 & 0 & 0.819 & 8 \\ 0.700 & 0 & 0.750 & 1 & 0.697 & 5 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 & 0.750 & 1 & 0.609 & 4 & 0.750 & 1 & 0.819 & 8 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

λ 分别取不同置信水平(阈值)求得相应模糊等价矩阵的截集,从而得到如下分类:

当 $\lambda=0.65$ 时,则分为 2 类: $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10\}, \{7\}$;

当 $\lambda=0.70$ 时,则分为 3 类: $\{1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10\}, \{3\}, \{7\}$;

当 $\lambda=0.75$ 时,则分为 4 类: $\{1\}, \{2, 4, 5, 6, 8, 9, 10\}, \{3\}, \{7\}$;

当 $\lambda=0.80$ 时,则分为 6 类: $\{1\}, \{2, 4, 5\}, \{3\}, \{6, 8\}, \{7\}, \{9, 10\}$;

当 $\lambda=0.85$ 时,则分为 9 类: $\{1\}, \{2, 5\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}$.

在删除指标 1 后,得到相应的各置信水平下的分类:

当 $\lambda=0.65$ 时,则分为 2 类: $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10\}, \{7\}$;

当 $\lambda=0.70$ 时,则分为 3 类: $\{1\}, \{2, 4, 5, 6, 8, 9, 10\}, \{7\}$;

当 $\lambda=0.75$ 时,则分为 4 类: $\{1\}, \{2, 3, 4, 5, 6, 8\}, \{7\}, \{9, 10\}$;

当 $\lambda=0.80$ 时,则分为 6 类: $\{1\}, \{2, 4, 5\}, \{3\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9, 10\}$;

当 $\lambda=0.85$ 时,则分为 9 类: $\{1\}, \{2, 4\}, \{3\},$

$\{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}$.

然后,由式(1)、(2)分别求出各阈值下的信息熵和条件熵,由式(6)得到相应的互信息量,从而由式(7)得到指标 1 的信息量为 $T_1=4.437 2$.

同理,分别依次删除指标 2、3、4、5 而保留其余指标,重复以上过程,求得各指标的信息量: $T_2=42.935 9$, $T_3=3.964 3$, $T_4=42.965$, $T_5=42.765 5$.

由式(8)求得各指标权重分别为: $(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)=(0.032 4, 0.313 2, 0.028 9, 0.313 5, 0.312 0)$.

由式(9)求得各发动机的综合性能指标为

$(y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9, y_{10})=(0.579 9, 0.381 9, 1.662 9, 0.109 4, 0.670 8, 0.770 0, 0.410 2, 0.977 4, 1.011 5, 0.942 2)$.

各发动机按性能从劣到优排序为: $y_3 < y_9 < y_8 < y_{10} < y_6 < y_5 < y_1 < y_7 < y_2 < y_4$.

单一指标的排序原则是按照某一指标的大小顺序直接排序.对于该实例,若采用 DEGT 指标排序,结果为: $y_3 < y_9 < y_2 < y_5 < y_8 < y_1 < y_6 < y_{10} < y_4 < y_7$;若采用 DFF 指标排序,结果为: $y_{10} < y_9 < y_8 < y_3 < y_7 < y_6 < y_5 < y_2 < y_4 < y_1$;若采用其他指标,排序