

航空装备故障损伤等级的可拓精准评定研究

王 丰, 顾佼佼, 林 瑜

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了满足舰面维修人员对海军航空装备维修保障的需求, 提出了航空装备故障损伤等级的可拓评定方法; 首先, 给出了故障元的概念, 以形式化描述航空装备发生的故障及故障的判别特征; 其次, 给出精准度的概念, 对判定故障判别特征量值的准确性进行刻画; 在此基础上, 利用可拓学的可拓识别方法对航空装备发生故障的损伤等级进行综合评定, 提供一种确定航空装备故障损失等级行之有效的途径和方法, 为确定故障维修计划及方案提供重要的理论参考借鉴; 最后, 通过某次远航中直升机发动机的故障算例分析显示: 该方法可靠、简单、实用, 具有较好的推广应用价值。

关键词: 航空装备; 故障元; 可拓学; 损伤等级

Research on the Extension Precision Evaluation of the Fault Damage Grade of Aeronautical Equipment

Wang Feng, Gu Jiaojiao, Lin Yu

(Naval Aeronautics and Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: in order to meet the requirements of naval aircraft maintenance support for naval aircraft maintenance personnel, an extension evaluation method for fault damage level of aeronautical equipment is proposed. The concept of fault element is given, and the fault of aeronautical equipment is described formally. The concept of accuracy is introduced to characterize the accuracy of discriminating characteristic values. Based on that, the damage degree of aeronautical equipment failure is evaluated by extension theory and method, which provides important references for identifying fault maintenance programs. The calculation example shows that the method is reliable and practical, and has good application value.

Keywords: aeronautical equipment; fault element; extenics; damage level

0 引言

随着现代战争节奏不断加快, 战场环境不断恶化, 航空装备的过疲劳使用极为频繁, 对航空装备的性能和维修保障的要求也越来越高。航空装备发生故障后, 如何快速确定故障的损伤等级, 在最短的时间内合理地安排抢修计划, 对确定战场抢修资源需求、提高航空装备的战场抢修能力、保持和恢复航空装备的作战能力有着非常重要的意义。

可拓学^[1]是由我国学者创立的一门交叉学科, 相关学者应用其研究相应领域问题, 取得了一些研究成果, 并有着较好的应用价值。在文献 [1-14] 的基础上, 本文给出了故障元的概念, 以形式化描述航空装备发生的故障。结合精准度和可拓学^[1]的可拓识别方法, 建立了故障损伤等级的可拓精准评定模型。根据建立的关联函数, 计算待判别设备与各故障元相应特征指标的贴近程度。通过对综合关联度和设备故障度的计算, 确定待判别设备故障的损伤等级, 为确定维修计划, 提高航空装备的战场抢修能力具有重要的指导意义。以某型发动机故障为例进行分析研究, 结果表明提出的方法是可行而有效的, 并明确了下一步需要深入研究的问题, 为最终开发完成该型发动机故障的可拓诊断系统奠定坚实的基础, 也为运用可拓学相关理论与方法分析、解决航空装备的故障^[5-9]奠定了理论基础。

基础, 也为运用可拓学相关理论与方法分析、解决航空装备的故障^[5-9]奠定了理论基础。

1 故障元模型

为了利用可拓学^[1]中的理论与方法研究航空装备发生的故障, 利用元理论给出故障元的概念, 以形式化描述航空装备所发生的故障。

定义 1.1 物元

$$B = (O_r, C, U) = \begin{pmatrix} O_r, & c_1, & u_1 \\ & c_2, & u_2 \\ & c_3, & u_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & u_n \end{pmatrix}$$

称为航空装备发生某故障时的故障元。其中, O_r 表示发生的某故障, $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 表示该故障的判别特征, $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ 表示特征的量值或量值域。

例如, 航空液压油泵车是重要的航空地面保障装备^[2], 可产生液动力, 以完成飞机液压系统及相关装置的功能与性能检测。飞机场站对某台液压油泵车进行检测中发现, 发动机某油路传感器信号有异常, 经过专家和技师的分析, 判定此故障是柱塞卡死。

经过分析历史积累的数据, 结合专家组的经验、意见, 参考维修资料, 建立此故障的简单故障元^[1]模型为:

$$B = (O_r, C, U) =$$

收稿日期: 2018-02-03; 修回日期: 2018-03-07。

基金项目: 海军航空工程学院青年科研基金项目(010415)。

作者简介: 王 丰(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事系统仿真分析与计算机软件集成方向的研究。

$$\left(\begin{array}{ll} \text{柱塞卡死,} & \text{吸油压力, } 0.03\text{Mpa} \\ & \text{供油压力, } 9\text{Mpa} \\ & \text{吸油流量, } 40\text{L/min} \\ & \text{供油流量, } 48\text{L/min} \end{array} \right)。$$

$$M_B = \begin{pmatrix} E_b, & c_1, & v_1 \\ & c_2, & v_2 \\ & c_3, & v_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & v_n \end{pmatrix},$$

2 航空装备故障损伤等级的可拓评定方法

2.1 流程图

航空装备故障损伤等级可拓评定的流程如图 1。

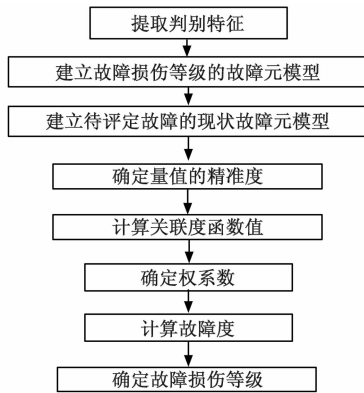


图 1 航空装备故障损伤等级可拓评定的流程

2.2 航空装备故障损伤等级可拓评定的步骤

2.2.1 提取判别特征

不同的故障有不同的判定标准及判定特征。在诊断航空装备故障损伤等级^[3-7]时,要根据不同的特征参数进行评定。根据历史维修经验、专业资料等提取出航空装备故障损伤等级评定的判别特征 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 。

2.2.2 建立损伤等级的故障元模型

确定故障的损失等级十分必要,要根据不同的故障损失等级,制定最后的维修方案。在故障判别特征的基础上,根据专家组及维修技师的经验、意见,将航空装备发生的某种故障分为 m 个损伤等级,并用故障元模型描述为:

$$B_i = (O_{i1}, C, U) = \begin{pmatrix} O_{i1}, & c_1, & V_{i1} \\ & c_2, & V_{i2} \\ & c_3, & V_{i3} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & V_{in} \end{pmatrix},$$

其中: O_{i1} ($i = 1, 2, \dots, m$) 为该故障损伤的 m 个等级, c_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 为提取的 n 个故障判别特征, $V_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$, ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 为判别特征 c_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 关于该故障损伤等级 i 的量值域,即经典域^[1]。

确定该故障 O_b 关于 n 个判别特征 c_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 容许的量值域,即节域 $V'_j = \langle a'_j, b'_j \rangle$,并用故障元描述为:

$$B = (O_b, C, U') = \begin{pmatrix} O_b, & c_1, & V'_1 \\ & c_2, & V'_2 \\ & c_3, & V'_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & V'_n \end{pmatrix}。$$

2.2.3 建立待评定航空装备故障的现状故障元模型

通过仪器、仪表等,监测得到的诊断数据,结合机务保障人员的经验、意见,建立待评定航空装备故障 E_b 的现状故障元^[1]模型为:

其中: $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ 为航空装备故障关于判别特征 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 的量值。

2.2.4 确定判别特征量值的精准度

判别特征量值 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ 的精准与否,对最后的评定结果起着决定性的影响。以精准度来表示 $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$ 的精准程度,通过层次分析法^[9],确定精准度,记为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$, $\alpha_j \in [0, 1]$, ($j = 1, 2, \dots, n$),量值越大,表示精准度越高。

2.2.5 计算关联度函数值

为了刻画待诊断设备故障关于各判定特征的量值与各个故障损伤等级的贴近程度,可拓学中提出了关联函数的概念。根据文献 [1],建立量值 v_j 到经典域 V_{ij} 和节域 V'_j 的距公式,建立现状故障元关于故障损伤等级 i 的关联度函数^[1] $K_i(v_j)$ 分别为:

$$\beta(v_j, V_{ij}) = \left| v_j - \frac{b_{ij} + a_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (1)$$

$$\beta(v_j, V'_j) = \left| v_j - \frac{b'_j + a'_j}{2} \right| - \frac{b'_j - a'_j}{2} \quad (2)$$

$$K_i(v_j) = \frac{\beta(v_j, V_{ij})}{\beta(v_j, V'_j) - \beta(v_j, V_{ij})} \quad (3)$$

将 2.2.3 中确定的各判别特征的量值代入相应的关联度函数中,以计算出相应的关联函数值。

2.2.6 计算权系数

各判别特征对故障判定结果的重要程度不同,以权系数来刻画其重要程度的大小,权系数越大,其对故障判定的影响程度越大;权系数越小,影响越小。根据层次分析法分别赋予各判别特征 $[0, 1]$ 的值。记权系数为 δ_j , ($j = 1, 2, \dots, n$),其中

$$\sum_{j=1}^n \delta_j = 1。$$

2.2.7 计算故障度,确定故障损伤等级

考虑判别特征的权系数及判别特征量值精确度的基础上,建立故障损伤等级判定的综合优度公式为:

$$\lambda_i(E_b) = \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot \delta_j \cdot K_i(v_j), \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

将待评定故障相应的量值代入公式 (4) 中,计算出航空装备故障 E_b 关于故障损伤等级 i 的故障度为 $\lambda_i(E_b)$ 。

若 $\lambda_p(E_b) = \max_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} \{\lambda_i(E_b)\}$,则该故障 E_b 的故障损伤等级为 p 级。

决策者依据判定的故障损伤等级,确定最终的维修方案,安排合适的机务维修、保障人员及维修设施设备,对发生的故障进行维修。

3 应用实例

舰面定检状态下,确定某型号飞机的发动机已发生故障。现利用本文方法评定该故障的损伤等级,为机务维修保障人员选择适当维修方案提供参考依据。

根据该型发动机的故障诊断数据库^[11-14],结合检测设备

的综合检测, 专家和机务技术人员的经验、意见, 确定该飞机发动机发生了故障 A。经过诊断, 提取该故障的 4 个判定特征, 分别为高压转子转速 c_1 、发动机进口总温 c_2 、滑油压力 c_3 和发动机机闸振动值 c_4 。将故障 A 的损伤分为 4 个等级, 并用故障元模型刻画为:

$$B_1 = \begin{cases} \text{故障 A 一级损伤, } c_1 < 23, 55 > \\ c_2 < 3.5, 4.7 > \\ c_3 < 0.8, 1.5 > \\ c_4 < 1.2, 1.9 > \end{cases} = \begin{cases} \text{故障 A 一级损伤, } c_1 V_{11} \\ c_2 V_{12} \\ c_3 V_{13} \\ c_4 V_{14} \end{cases},$$

$$B_2 = \begin{cases} \text{故障 A 二级损伤, } c_1 < 30, 68 > \\ c_2 < 4.7, 6.9 > \\ c_3 < 1.5, 3.2 > \\ c_4 < 1.9, 2.9 > \end{cases} = \begin{cases} \text{故障 A 二级损伤, } c_1 V_{21} \\ c_2 V_{22} \\ c_3 V_{23} \\ c_4 V_{24} \end{cases},$$

$$B_3 = \begin{cases} \text{故障 A 三级损伤, } c_1 < 55, 81 > \\ c_2 < 5.1, 8.7 > \\ c_3 < 1.7, 4.6 > \\ c_4 < 2.1, 3.1 > \end{cases} = \begin{cases} \text{故障 A 三级损伤, } c_1 V_{31} \\ c_2 V_{32} \\ c_3 V_{33} \\ c_4 V_{34} \end{cases},$$

$$B_4 = \begin{cases} \text{故障 A 四级损伤, } c_1 < 70, 92 > \\ c_2 < 6.2, 8.9 > \\ c_3 < 3.2, 6.2 > \\ c_4 < 3.1, 4.3 > \end{cases} = \begin{cases} \text{故障 A 四级损伤, } c_1 V_{41} \\ c_2 V_{42} \\ c_3 V_{43} \\ c_4 V_{44} \end{cases}。$$

其中, 各损伤等级关于各判别特征的经典域数据已经过数量级处理。

故障 A 损伤等级节域的故障元模型为:

$$B = \begin{cases} \text{故障 A 损伤等级, } c_1 < 23, 92 > \\ c_2 < 3.5, 8.9 > \\ c_3 < 0.8, 6.2 > \\ c_4 < 1.2, 4.3 > \end{cases} = \begin{cases} \text{故障 A 损伤等级, } c_1 V'_1 \\ c_2 V'_2 \\ c_3 V'_3 \\ c_4 V'_4 \end{cases}。$$

经过监测设备检测, 并结合机务保障人员的经验、意见, 确定该发动机关于故障 A 的 4 个判别特征的量值 v_1, v_2, v_3, v_4 分别为 57, 4.3, 2.6, 2.8, 量值的精准度 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$

$= (0.98, 0.99, 0.98, 0.97)$ 。运用层次分析方法计算出 4 个判别特征的权系数为: $\delta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = (0.35, 0.15, 0.2, 0.3)$ 。

根据判别特征、精准度、权系数的量值及公式 (1) ~ (4), 通过 Matlab 计算机编程, 计算出各故障的关联函数值、故障度, 并得到该故障损伤等级的仿真图, 如图 2。

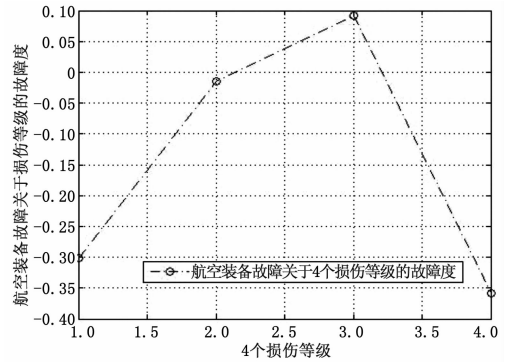


图 2 飞机发动机故障 A 的损伤等级仿真

从仿真图 2 中可见, 该飞机发动机故障 A 的损伤等级为 3 级的可能性最大。决策者根据该判定结果, 可以为确定最后的维修方案提供理论数据参考依据。

4 结束语

本文将可拓学中的相关理论与方法应用于航空装备故障诊断中, 提出了一种航空装备故障损失等级的可拓精准判定方法。利用可拓学基元理论给出了故障元的概念, 形式化描述航空装备发生的故障。利用可拓学的可拓识别方法对航空装备故障损伤等级的评定进行研究, 能对航空装备所发生故障的损伤等级进行准确量化地评定。为机务保障人员确定最后的维修方案提供理论依据。但限于篇幅原因, 提取的故障判别特征不够细化, 定性判别特征的量化数据处理不够, 节域及经典域量值的确定缺乏足够多的数据支撑。下一步, 将根据该型发动机累计的故障库数据, 对上述问题进行充分的挖掘研究。为最终开发完成该型发动机故障的可拓诊断系统奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 杨春燕, 蔡文. 可拓学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 董泽委, 胡起伟, 孙宝琛. 战场损伤装备抢修排序模型研究 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (4): 18-20.
- [3] 仪艳磊, 王端民. 某航空装备故障诊断模糊推理与评判方法的改进 [J]. 西安工业大学学报, 2005 (2): 126-129.
- [4] 孙伟超, 李文海, 李文峰. 融合粗糙集与 D-S 证据理论的航空装备故障诊断 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41 (10): 1902-1909.
- [5] 刘江平, 王冬青, 马莉莉, 等. 航空装备故障检测决策建模仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (4): 79-82.
- [6] 辛龙, 周越文, 孔庆春. 基于马氏距离的航空装备故障预测研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (7): 2052-2054.
- [7] 马彦涛, 肖明清. 基于粗糙集的复杂航空电子设备故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1757-1759.
- [8] 尚永爽, 许爱强, 李文海. 航空装备视情维修的动态性研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21 (6): 110-113.