基于故障树的飞机结构腐蚀损伤模糊综合评判

潘 波 姜同敏

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对飞机结构腐蚀损伤分析和评价过程中影响因素复杂且具有模糊性的问题,提出了基于故障树分析和模糊理论的方法对飞机结构在复杂环境下发生的腐蚀损伤进行综合评判. 对飞机结构腐蚀损伤过程和机理进行分析,构建飞机结构腐蚀损伤故障树,建立腐蚀损伤影响因素的评判集;计算各评判因素的相对概率重要度,根据评判因素相对概率重要度的比重,建立评判因素权重集;确定飞机结构腐蚀损伤的评价集,建立从评判因素集到评价集的模糊映射;通过模糊关系的模糊变换,对服役环境引起飞机结构的腐蚀损伤进行定量评价. 通过飞机铝合金结构和不锈钢结构在沿海环境条件下腐蚀损伤评判的实例分析,证明了该方法的有效性,可为飞机结构设计和维修提供依据.

关 键 词: 腐蚀; 故障树; 模糊理论; 综合评判

中图分类号: V 37

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0039-04

Fuzzy comprehensive evaluation of corrosion damage of aircraft structures based on fault tree

Pan Bo Jiang Tongmin

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To resolve the complexity and fuzziness of influence on the corrosion damage of aircraft structures, a method based on fault tree analysis and fuzzy theory was proposed to evaluate the corrosion damage of aircraft structures in complicated environments. Fault tree of corrosion damage on aircraft structures was set up by analysis of corrosion process and mechanism, and then the evaluation set of corrosion damage was obtained. Relative importance of evaluation factors was analyzed, and weight set was got by the proportion calculation of relative importance of evaluation factors. After the evaluation grade of corrosion damage has been set up, the fuzzy mapping between evaluation set and evaluation grade was set up. The corrosion damage of service environments on aircraft structures was evaluated quantitatively by fuzzy transformation of fuzzy relation. Finally, corrosion damage evaluations of aircraft aluminum alloy structures and stainless steel structures in coastal environments were illustrated, which demonstrate that the proposed method is valid and can provide evidence for the aircraft structural design and maintenance.

Key words: corrosion; fault tree; fuzzy theory; comprehensive evaluation

现阶段国家正在大力开展大飞机项目的研究,因此必须考虑服役环境对飞机结构造成的损伤. 其中,飞机结构最主要的损伤形式是由于环境介质作用引发的腐蚀损伤,其主要类型有点蚀、晶间腐蚀、剥蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳. 目前,国内外研究者主要是从这些失效类型和机理方面进行研究[1-5],很少在此基础上对导致飞机结构腐蚀损伤的各因素进行系统的分析和评价. 此外,飞机结构腐蚀损伤的研究是一个庞大的系统工程,它涉及到多个学科领域,在进行腐蚀损伤分析和评价

收稿日期: 2010-08-12; **网络出版时间**: 2011-12-27 10:32; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111227.1032.003
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111227.1032.003.html
作者简介: 潘 波(1979-),男,重庆忠县人,博士生,panbo@dse.buaa.edu.cn.

时具有影响因素复杂、不确定性和模糊性的特点. 对此,本文提出基于故障树分析和模糊理论相结合的方法对飞机结构在复杂环境下发生的腐蚀损伤进行评判,为飞机结构设计和维修提供指导.

故障树分析作为可靠性和安全分析的一种技术,具有思路清晰、逻辑性强的特点,可对复杂系统失效的因果逻辑关系进行描述,还可对薄弱环节进行定量分析. 文献[6]就采用故障树分析方法对飞机铝合金结构在沿海环境条件下发生的腐蚀失效进行分析,并针对主要影响因素提出了改进防护措施. 模糊数学是研究和处理模糊性现象的一种数学理论和方法,现已被应用于可靠性分析,为处理工程结构中大量存在的模糊性问题提供了可能性. 针对结构可靠性分析中很多数据都具有模糊性特征,文献[7-9]采用模糊集合和模糊积分的方法进行定量评估. 文献[10-11]还分别采用模糊综合评判方法对注水管道的腐蚀程度和涡轮盘的寿命进行评价,其评价因素集和权重集是采用神经网络分析方法确定,因此需用大量的测量数据. 目前,关于飞机结构的腐蚀损伤还没有比较全面系统的分析评价方法,因此,如何根据飞机结构的特点和服役环境对其损伤进行评判是当前研究的重点和热点. 对此,本文拟通过飞机结构腐蚀损伤故障树分析,建立腐蚀损伤影响因素集和权重集,并通过模糊综合评判模型的建立对飞机各种结构材料在复杂环境下发生的腐蚀损伤进行评判.

1 腐蚀损伤故障树分析

1.1 故障树的建立

腐蚀损伤故障树是把飞机结构腐蚀损伤作为顶事件,接着找出导致顶事件发生的所有可能直接原因,再跟踪追迹找出导致上层事件发生的所有可能原因,最后追踪到影响飞机结构腐蚀损伤的底事件为止. 通过飞机金属结构件的腐蚀失效分析[12-13],发现其主要失效过程和机理如下:在服役环境和工作剖面下,飞机结构涂层发生老化失效;结构材料表面氧化膜出现点蚀破裂,随着点蚀坑的不断增长和深入发生晶间腐蚀;当腐蚀沿着晶界不断发展至相邻层面时发生剥蚀,由于腐蚀产物的楔形作用在晶界形成裂纹;裂纹在腐蚀介质和应力的联合作用下不断扩展,导致飞机结构强度不断发生退化. 因此,根据飞机结构腐蚀损伤机理分析,建立腐蚀损伤故障树如图 1 所示.

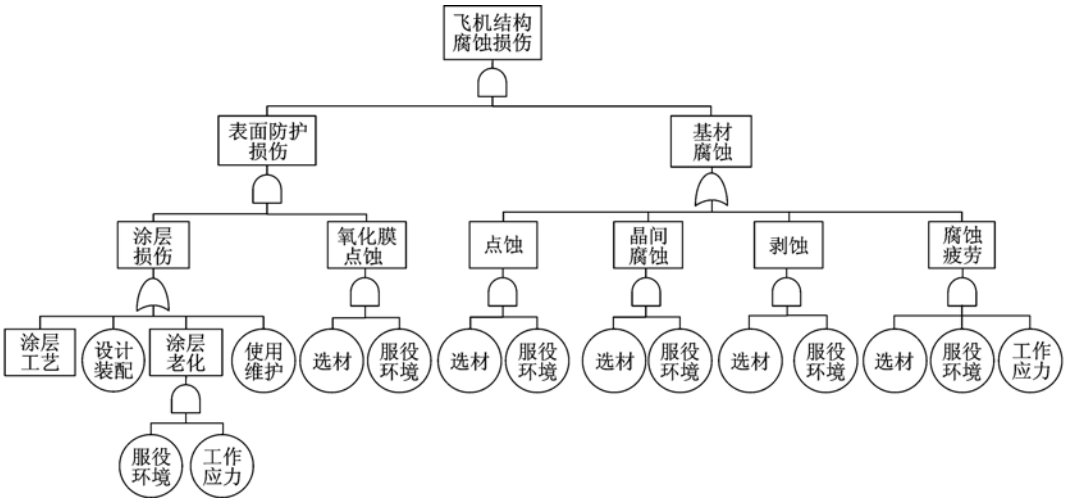

图 1 飞机结构腐蚀损伤故障树

根据腐蚀损伤故障树的底事件,建立影响飞机结构腐蚀损伤的评判因素集 $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}$,其中 $u_1\sim u_m$ 为腐蚀损伤影响因素指标,可通过影响因素对飞机结构腐蚀损伤进行评判. 根据图 1 分析结果,得到腐蚀损伤的评判因素集为 $U=\{$服役环境、选材、涂层工艺、设计装配、使用维护、工作应力$\}$.

1.2 相对概率重要度分析

在飞机结构腐蚀损伤的诸多影响多因素中,各因素并不是同等重要的,其影响程度的大小是一个模糊择优问题,因此通过权重系数反映各因素间的内在关系. 相对概率重要度能从敏感度和自身变化大小的双重角度反映对评判结果造成的影响,因此根据飞机结构腐蚀损伤评判因素相对概率重要度的比重,对各个评判因素赋予相应的权数. 具体过程为:通过飞机结构腐蚀损伤故障树分析得到评判因素 u_i 的相对概率重要度为 $I_c(i)$,其中 $i=1,2,\cdots,m$. 于是得到评判因素 u_i 的权数为 $a_i=I_c(i)\Big/\sum_{i=1}^{m}I_c(i)$,最后得到飞机结构腐蚀

损伤所有评判因素的权重集 $\boldsymbol{A}=a_1,a_2,\cdots,a_m$;其中 $a_1\sim a_m$ 为评价因素的权数, $\sum_{i=1}^{m}a_i=1$. 本文采用文献[6]的研究成果计算各评判因素的相对概率重要度.

2　评判模型的建立

2.1　建立评价集与模糊关系矩阵

不同飞机结构在不同服役环境下的腐蚀损伤程度不同,因此建立由腐蚀损伤评价等级组成的评价集 $\boldsymbol{V}=(v_1,v_2,\cdots,v_n)$,其中 $v_1\sim v_n$ 为评价等级. $\boldsymbol{V}$ 中的评价等级一般都具有模糊性或不确定性特点,因此本文采用专家评分法对各腐蚀损伤等级打分,得到各评价等级的临界取值,实现将定性概念用确定值加以描述.

建立飞机结构在服役环境下从腐蚀损伤评判因素集 $\boldsymbol{U}$ 到评价集 $\boldsymbol{V}$ 的模糊映射,得到模糊关系矩阵. 在本文中,这种模糊映射通过隶属关系进行描述,即确定评判因素 $u_i(i=1,2,\cdots,m)$ 对评价等级 $v_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的隶属度 r_{ij},得到评判因素 u_i 的评价集为 $r_{ij}=(r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{in})$,最后将所有评判因素的评价集组成一个 $m\times n$ 阶的评判矩阵 $\boldsymbol{R}$,其表达式为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \tag{1}$$

2.2　综合评判

当腐蚀损伤影响因素的权重集 $\boldsymbol{A}$ 和评判矩阵 $\boldsymbol{R}$ 确定后,可通过模糊关系变换得到等级评判矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{R}=[a_1\quad a_2\quad\cdots\quad a_m]\otimes\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中,⊗为某种合成运算,本文采用乘积相加的运算法则. 等级评判矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为评价集 $\boldsymbol{V}$ 上的模糊子集,是飞机结构腐蚀损伤模糊综合评判的结果向量.

根据等级评判矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和评价集 $\boldsymbol{V}$ 中评价等级的取值,得到评判结果 C 为

$$C=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

将评判结果 C 与评价集 $\boldsymbol{V}$ 中评价等级的临界取值进行比较,若评判值超过评价等级的临界值则定为该评价等级,最后得到飞机结构材料在该服役环境下的腐蚀损伤程度.

3　工程实例

3.1　铝合金结构腐蚀损伤的模糊综合评判

根据沿海环境条件下服役飞机铝合金结构腐蚀损伤的故障树分析,得到飞机结构腐蚀损伤的评判因素集为:$\boldsymbol{U}$=(服役环境,铝合金材料,涂层工艺,设计装配,使用维护,工作应力). 根据文献[6]计算底事件的相对概率重要度,得到腐蚀损伤评判因素的权重集为

$$\boldsymbol{A}=(0.296,0.296,0.296,0.037,0.037,0.038) \tag{4}$$

根据沿海环境条件下飞机结构腐蚀损伤的模糊特性,评价集包含 4 个等级:轻微腐蚀损伤、一般腐蚀损伤、较严重腐蚀损伤、严重腐蚀损伤. 通过专家评分法得到评价等级的临界取值为:

$$\boldsymbol{V}=(\text{轻微腐蚀损伤},\text{一般腐蚀损伤},\text{较严重腐蚀损伤},\text{严重腐蚀损伤})=(0.1,0.4,0.6,0.75) \tag{5}$$

结合相对概率重要度分析结果和工程经验,建立影响因素 $u_i(i=1,2,\cdots,m)$ 对于评价等级 $v_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的隶属度,得到模糊关系矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0.143 & 0.428 & 0.256 & 0.143 \\ 0.357 & 0.256 & 0.214 & 0.143 \\ 0.333 & 0.333 & 0.167 & 0.167 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} \tag{6}$$

根据权重集和模糊关系矩阵对飞机结构的腐蚀损伤进行模糊综合评判,计算得到等级评判矩阵为

$$\boldsymbol{B}=[0.2274\quad 0.2965\quad 0.2453\quad 0.2130] \tag{7}$$

最后得到评判值为

$$C=\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}=0.4483$$

该评判值介于一般腐蚀损伤与较严重腐蚀损伤之间,因此评价飞机铝合金结构在沿海环境条件下的腐蚀损伤为一般腐蚀损伤.

3.2　不锈钢结构腐蚀损伤的模糊综合评判

对沿海环境条件下飞机不锈钢结构的腐蚀损伤进行故障树分析,得到腐蚀损伤的评判因素集为:$\boldsymbol{U}$=(服役环境,不锈钢材料,表面处理工艺,设计装配,使用维护,工作应力).

不锈钢结构腐蚀损伤评判因素的权重集和评价等级的临界取值与铝合金结构的实例分析相

同,其建立的腐蚀损伤模糊关系矩阵为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40\\ 0.50 & 0.286 & 0.143 & 0.071\\ 0.471 & 0.294 & 0.176 & 0.059\\ 0.333 & 0.333 & 0.167 & 0.167\\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05\\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05\end{bmatrix} \tag{8}$$

于是得到等级评判矩阵为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{R}=$$

$$[0.3668 \quad 0.2657 \quad 0.2007 \quad 0.1668] \tag{9}$$

最后计算得到评判结果 C 为0.3885,该值介于轻微腐蚀损伤与一般腐蚀损伤之间,因此评价飞机不锈钢结构在沿海环境条件下的腐蚀损伤为轻微腐蚀损伤.

4 结束语

针对飞机结构在服役环境下发生的腐蚀损伤,提出了一种基于故障树和模糊理论相结合的综合评判方法对飞机结构的耐腐蚀性能进行评判. 结果表明通过建立故障树可有效解决腐蚀损伤影响因素众多、复杂的问题,同时通过故障树基本事件的相对概率重要度分析,建立评判因素权重集,可从评判因素敏感度和自身变化大小反映飞机结构的腐蚀损伤. 采用模糊映射的方法建立评判因素集到评价级的隶属关系,并通过模糊关系变换对飞机结构的腐蚀损伤进行评判,解决了腐蚀损伤分析评价中难以确定的模糊性问题,从而可对复杂系统进行定量分析和评价. 通过沿海环境条件下服役飞机铝合金结构和不锈钢结构的腐蚀损伤综合评判,表明了不锈钢结构的耐腐蚀损伤性能高于铝合金结构.

本文提出的综合评判方法可对飞机结构设计和维修提供指导. 然而,在评判过程中对评价等级取值和建立模糊关系时主观性较强,当飞机结构材料采用不同的表面处理工艺或者服役环境发生改变时,建立的模糊映射关系也将会发生变化. 因此,采用该方法进行评判时应根据评价体系的变化适时进行调整.

参考文献(References)

[1] 刘慧丛,谷岸,朱立群,等. 局部包铝层对铝合金疲劳板材盐雾环境中点腐蚀的影响[J]. 航空材料学报,2009,29(4):52-56
Liu Huicong,Gu An,Zhu Liqun,et al. Influence of partial aluminum clad on pitting of aluminum alloy fatigue samples in NSS [J]. Journal of Aeronautical Materials,2009,29(4):52-56(in Chinese)

[2] Russo S,Sharp P K,Mills T B,et al. The influence of the environment and corrosion on the structural integrity of aircraft materials [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,2009,32(6):464-472

[3] Pitting corrosion of cast metallurgy aluminum-beryllium alloys in sulfuric acid solutions [J]. Corrosion,2008,64(6):517-531

[4] Burleigh T D,Ludwiczak E,Petri R A. Intergranular corrosion of an aluminum-magnesium-silicon-copper alloy [J]. Corrosion,1995,51(1):1969-2010

[5] Jones K,David W H. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy [J]. Corrosion Science,2006,48(10):3109-3122

[6] 潘波,黄领才,姜同敏,等. 服役飞机结构件腐蚀失效故障树分析及改进[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(3):299-302
Pan Bo,Huang Lingcai,Jiang Tongmin,et al. Fault tree analysis of corrosion failure for aircraft structures and improvements [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010,36(3):299-302(in Chinese)

[7] Savoia M. Structural reliability analysis through fuzzy number approach with application to stability [J]. Computers and Structures,2002,80(12):1087-1102

[8] Anoop M B,Rao K B,Rao T. Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments [J]. Engineering Structures,2002,24(9):1229-1242

[9] Reinhard V. On reliability estimation based on fuzzy lifetime data [J]. Journal of Statistical Planning and Inference,2009,139(5):1750-1755

[10] 喻西崇,赵金洲,邬亚玲,等. 利用模糊综合评判评价注水管道腐蚀程度[J]. 西南石油学院学报,2003,25(3):79-82
Yu Xichong,Zao Jinzhou,Wu Yaling,et al. Using fuzzycomprehensive judge to evaluate corrosion degree of injecting pipeline [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute,2003,25(3):79-82(in Chinese)

[11] 陶峰,欧阳祖行,刘正埙. 用模糊综合评判法评估薄壁容器的寿命[J]. 南京航空航天大学学报,2000,32(3):299-304
Tao Feng,Ouyang Zuxing,Liu Zhengxun. Evaluation for life on laminal vessel using fuzzy comprehensive decision process [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2000,32(3):299-304(in Chinese)

[12] 黄岭才,谷岸,刘慧丛,等. 海洋环境下服役飞机铝合金零件腐蚀失效分析[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(10):1217-1221
Huang Lingcai,Gu An,Liu Huicong,et al. Corrosion failure of aluminum alloy parts on airplane used in marine environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2008,34(10):1217-1221(in Chinese)

[13] Pan B,Jiang T M,Li X Y,et al. Lifetime assessment of aircraft structural components in coastal environments [J]. Journal of Aircraft,2010,47(4):1409-1412

(编 辑:娄 嘉)