

# 基于模糊理论老龄飞机结构腐蚀损伤评判

石向阳, 龙江, 王波

(中国民航飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:** 对老龄飞机在复杂环境发生结构腐蚀损伤的情况进行综合评判, 提出了一种基于故障树分析的手段和理论方法。通过举例分析, 证明所提方法的有效性。

**关键词:** 老龄飞机; 腐蚀; 故障树; 模糊理论; 综合评判

**中图分类号:** V328.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9233(2012)05-0032-03

目前, 中国民航老龄飞机数量日益增多。随着营运时间增长, 飞机的老龄化、结构腐蚀损伤和疲劳损伤都呈现出加重的趋势。

以中国民航飞行学院初级教练机 TB200 为例, 针对老龄飞机结构在腐蚀损伤分析过程和评价过程中影响因素众多复杂, 而且具有模糊性的情况, 本文提出了基于故障树分析和模糊理论的方法, 以此来对老龄飞机在复杂环境下结构发生腐蚀损伤情况进行综合评判, 同时也为老龄化的飞机结构维修提供了指导与依据。

## 1 故障树分析

### 1.1 建立腐蚀损伤故障树

建立腐蚀损伤故障树, 首先要将老龄飞机结构腐蚀损伤作为故障事件树顶, 查找出所有可能会导致树顶故障事件发生的直接原因, 再跟踪追迹, 找出所有导致其上层事件发生的可能原因, 最后追踪到影响树顶故障事件发生的底事件。通过对老龄飞机金属结构件的腐蚀失效分析, 发现了其主要的失效过程和机理(见图 1)。

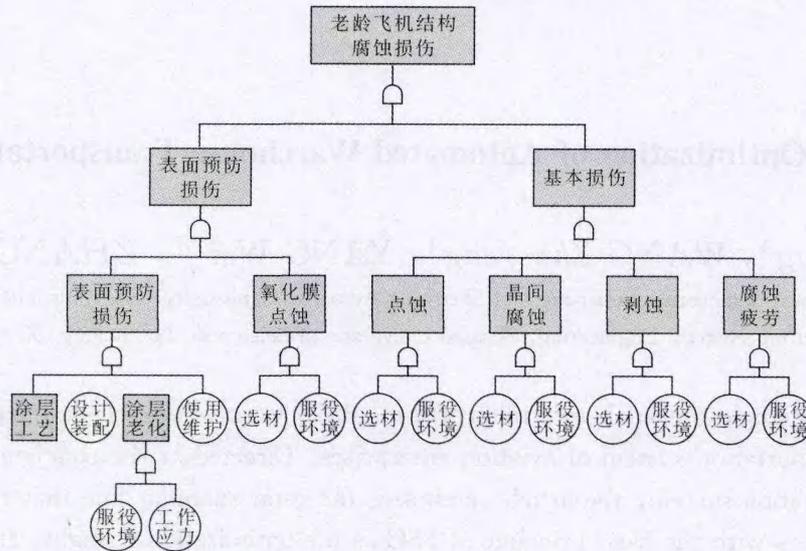


图 1 老齡飞机结构腐蚀损伤故障树

收稿日期: 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(60572179); 研究生青年基金创新项目(X2010-23)

作者简介: 石向阳(1987—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 从事航空器机械系统及可靠性理论研究。

根据故障树的底事件,首先建立影响顶事件老龄飞机腐蚀损伤发生的评判因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ,其中  $u_1 \sim u_m$  为腐蚀损伤影响因素指标。根据图 1 分析可得老龄飞机腐蚀损伤的评判因素集  $U = \{\text{服役环境、选材、涂层工艺、设计装配、使用维护、工作应力}\}$ 。

### 1.2 相对概率重要度分析

由于影响老龄飞机结构腐蚀损伤的因素众多,而且每个因素所占的重要性比重不同,所以各因素的影响程度便是个模糊的问题,它们之间的内在关系我们可以借助权重系数来描述。通过对老龄飞机结构腐蚀损伤评判因素相对概率重要度大小的衡量,以此对各个评判因素赋予相对应权数。具体过程为:通过老龄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  $i = 1, 2, \dots, m$ 。于是,得到的评判因素  $u_i$  的权数为  $a_i = I_c(i) / \sum_{i=1}^m I_c(i)$ 。最后,可得到老龄飞机结构腐蚀损伤的所有评判因素权重集  $A = a_1, a_2, \dots, a_m$ ,其中  $a_1 \sim a_m$  为评价因素的权数,  $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。本文采用了文献[5]的研究成果,计算各评判因素的相对概率重要度。

## 2 建立评判模型

### 2.1 建立评价集与模糊关系矩阵

由于在不同服役环境下的不同老龄飞机其结构腐蚀损伤程度不同,所以本文参考文献[6]所用方法,首先建立了老龄飞机结构腐蚀损伤评价等级这个评价集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ,其中  $v_1 \sim v_n$  为腐蚀损伤评价等级。由于  $V$  中各评价等级一般都具备不确定性或者模糊性特征,所以本文采用了专家评分的方法来对老龄飞机腐蚀损伤进行等级打分,最终得到了各评价等级临界取值,实现将定性概念用定量概念来加以描述。

为得到模糊关系矩阵,需要建立在服役环境下老龄飞机从结构腐蚀损伤评判因素集  $U$  到评价集  $V$  的模糊映射。在本文中,通过隶属关系来进行描述这种模糊映射,即确定评判因素  $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$  对评价等级  $v_j (j = 1, 2, \dots, n)$  的隶属度  $r_{ij}$ ,这样得到了评判因素  $u_i$  的评价集为  $r_{ij} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。最后,将所有评判因素的评价集组成了一个  $m \times n$  阶的评判矩阵  $R$ ,其表达式为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 综合评判

最终,当老龄飞机腐蚀损伤影响因素的权重集和评判矩阵  $R$  都确定之后,便可通过模糊关系变换,得到等级综合评判  $B$ 。

因此,  $B = A \cdot R = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n] \cdot$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

等级综合评判  $B$  作为评价集  $V$  上的模糊子集,是老龄飞机结构腐蚀损伤模糊综合评判的结果向量。

根据等级综合评判  $B$  和评价集  $V$  中的评价等级取值,便可得到评判结果  $C$  为

$$C = B \cdot V^T \quad (3)$$

最后,将得到的评判结果  $C$  与前面评价集  $V$  中评价等级的临界取值进行比较。如果  $C > V$  中评价等级的临界值,则一定属于该评价等级。这样便得到了在当前该服役环境下的老龄飞机结构材料腐蚀损伤程度。

## 3 算例分析

### 3.1 不锈钢结构腐蚀损伤的模糊综合评判

根据本文所提的方法,在当前服役环境条件下,老龄飞机不锈钢结构腐蚀损伤的评判因素集为:  $U = \{\text{服役环境、不锈钢材料、涂层工艺、设计装配、使用维护、工作应力}\}$ 。TB200 教练机与大型运输机相比较,其设计可靠性略低,但是其结构腐蚀损伤却跟大型运输机相近,根据文献[5]计算出底事件相对概率重要度,并且得到腐蚀损伤评判因素的权重集为

$$A = (0.296, 0.296, 0.296, 0.037, 0.037, 0.038) \quad (4)$$

根据在当前服役环境条件下,老龄飞机结构腐蚀损伤的评价集包括 4 个等级:轻微可允许腐蚀损伤、一般腐蚀损伤、较严重腐蚀损伤、严重腐蚀损伤<sup>[8]</sup>。并且根据文献[6],也是通过专家评分法所得到的该评价等级的临界取值为

$$V = \{\text{轻微可允许腐蚀损伤,一般腐蚀损伤,较严重腐蚀损伤,严重腐蚀损伤}\} \\ = \{0.1, 0.4, 0.6, 0.75\} \quad (5)$$

结合工程经验及相对概率重要度的分析结果,建立了影响因素  $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ,对于评价等级  $v_j (j = 1, 2, \dots, n)$  的隶属度,可得具备模糊关系的评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0.50 & 0.283 & 0.141 & 0.076 \\ 0.474 & 0.291 & 0.174 & 0.061 \\ 0.333 & 0.333 & 0.167 & 0.167 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (6)$$

于是,可得到等级综合评判为

$$B = A \cdot R = [0.3677 \quad 0.2639 \quad 0.1995 \quad 0.1689] \quad (7)$$

最后得到的评判值为  $C = B \cdot V^T = 0.3887$  (8)

该评判值大小介于轻微可允许腐蚀损伤与一般腐蚀损伤之间。因此评价在该服役环境条件下,老龄飞机不锈钢结构的腐蚀损伤为轻微可允许腐蚀损伤。

### 3.2 铝合金结构腐蚀损伤的模糊综合评判

同上,由于铝合金结构腐蚀损伤评判因素的权重集与评价等级的临界取值和不锈钢结构的实例分析的结果大致相同,因此其建立的腐蚀损伤模糊关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0.50 & 0.283 & 0.141 & 0.076 \\ 0.474 & 0.291 & 0.174 & 0.061 \\ 0.333 & 0.333 & 0.167 & 0.167 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \\ 0.50 & 0.30 & 0.15 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (9)$$

再根据权重集和模糊关系矩阵对老龄飞机结构的腐蚀损伤来进行模糊综合评判,从而通过计算得到等级评判矩阵为

$$B = A \cdot R = [0.2325 \quad 0.2903 \quad 0.2525 \quad 0.2248] \quad (10)$$

最后得到的评判值为  $C = B \cdot V^T = 0.4594$  (11)

该评判值大小是介于一般腐蚀损伤与较严重腐蚀损伤之间,因此评价在该服役环境条件下,老龄飞机的铝合金结构的腐蚀损伤为一般腐蚀损伤。

## 4 结语

结果表明,该综合方法能够有效地解决当前腐蚀损伤影响因素复杂的问题。最终,通过对服役环境条件下 TB200 飞机不锈钢结构和铝合金结构的腐蚀损伤综合评判算例,表明了不锈钢结构的耐腐蚀损伤性能要高于铝合金结构。

另外,本文所提出的模糊综合评判还可以为老龄飞机维修提供指导与依据,例如在沿海及长期处于潮湿环境中的服役老龄飞机,维修过程中可将易腐蚀结构多用不锈钢来取代铝合金,以此来提高飞机结构的耐腐蚀损伤性能。

## 参 考 文 献

- [1] 刘文成. 老龄飞机结构适航性评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2010.
- [2] 陈磊, 冯振宇, 董艇舰, 等. 飞机系统老龄化评估方法初探[J]. 航空维修与工程, 2010(2): 66-67.
- [3] 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.
- [4] 陶峰, 欧阳祖兴, 刘正坝. 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.
- [5] 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.
- [6] 潘波, 姜同敏. 基于故障树的飞机结构腐蚀损伤模糊综合评判[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(1): 1-4.
- [7] 杨纶标, 高英仪, 凌卫新. 模糊数学原理及应用[M]. 第 5 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2011: 100-106.
- [8] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2011(2): 72-77.

[责任编辑、校对: 东艳]

## Evaluation of Corrosion Damage of Aging Aircraft Structure Based on the Fuzzy Theory

SHI Xiang-yang, LONG Jiang, WANG Bo

(Aviation Engineering College, The Civil Aviation Flight University Of China, Guanhan 618307, China)

**Abstract:** The article makes the comprehensive evaluation of structure corrosion damage of aging aircrafts in complicated environment, and brings forth a kind of means and theoretical method based on failure tree analysis. Through exemplified analysis, the article proves the effectiveness of the method suggested.

**Key words:** aging aircraft; corrosion; failure tree; fuzzy theory; comprehensive evaluation