

# 基于粗糙集的老龄飞机金属结构安全性评估方法

安涛, 何宇廷, 舒文军, 王育虔

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

**摘要** 针对我国飞机老龄化日益严重的问题,研究了老龄飞机金属结构安全性评估方法。首先根据老龄飞机的结构特点及使用规律,分别从外载荷、腐蚀环境及使用维护等3个方面,分析建立了老龄飞机金属结构安全性评估的指标体系,总结出15项评估指标;然后利用粗糙集理论及信息熵算法计算了各指标的权重,并建立了安全性评估模型;最后以某型飞机为例进行了分析。结果表明该评估方法基本可以涵盖老龄飞机安全性评估的要素,体现飞机安全性状况;所设定的属性值离散化节点可以较好地反映各影响因素的特性,相比常用的专家打分法更加客观,对老龄飞机的安全性评估可以取得较好的效果。

**关键词** 老龄飞机;安全性评估;金属结构;粗糙集

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.020

**中图分类号** V215.1;TB301 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0091-04

## A Research on Metal Structure Safety Evaluation of Aging Aircraft

AN Tao, HE Yu-ting, SHU Wen-jun, WANG Yu-qian

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In this paper, a method of evaluating the metal structure safety of aging aircraft is researched. The index system of safety evaluation is built based on load factors, environment factors and material factors. Then the weights of the indexes are analyzed on rough set, and the model of safety evaluation is built. Finally, the analysis is performed by taking a certain type of aircraft for example. The result shows that the subscribed method is effective in safety evaluation for metal structure safety of the aging aircraft.

**Key words:** aging aircraft; safety evaluation; metal structure; rough set

目前我国飞机老龄化问题非常严重,如国内运营的波音 B737-300 飞机已经进入老龄化阶段<sup>[1]</sup>,而军用飞机由于使用寿命更短,老龄化问题更为突出,已经严重影响到部队战备。飞机进入老龄化阶段后,机体金属结构的性能对飞行安全的影响极大。因此迫切需要系统、科学地研究老龄飞机金属结构安全性评估的理论、方法和技术。

美国联邦航空条例中对老龄飞机的维护措施提出了具体的规定<sup>[2]</sup>。冯蕴雯等<sup>[3]</sup>提出以单机剩余寿命确定飞机退役时间,可以充分利用老龄飞机的结构剩余寿命,但未涉及飞机结构安全性评估问题。薛景川等<sup>[4]</sup>在国军标和适航条例的基础上,给出了保证飞机结构完整性的安全性指标体系。舒文军等<sup>[5]</sup>提出了基于条件概率的飞机安全性评估模型,

**收稿日期:** 2013-08-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51201182)

**作者简介:** 安涛(1981-),男,河北张家口人,讲师,主要从事航空安全性、飞机结构强度研究。E-mail: rainman767@163.com

**引用格式:** 安涛,何宇廷,舒文军,等. 基于粗糙集的老龄飞机金属结构安全性评估方法研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):91-94. AN Tao, HE Yuting, SHU Wenjun, et al. A research on metal structure safety evaluation of aging aircraft [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 91-94.

但以上文献均未全面考虑老龄飞机的特殊性问题。本文针对此提出了一种基于粗糙集的老龄飞机金属结构安全性评估方法。

### 1 安全性评估指标体系的建立

飞机在服役过程中,长期承受气动载荷、机械振动和机动过载等多种因素的作用,金属材料很可能出现疲劳裂纹、变形、断裂等问题。同时随着飞机服役年限的增加,环境对金属的累计影响也越来越显

著,其中腐蚀的危害最为严重,因腐蚀导致的事故屡见不鲜,而我国军用飞机由于飞行强度相对较低,地面停放时间更长,腐蚀环境对飞机金属结构的影响也更加严重。另外,飞机结构的安全性还与日常使用、维护等因素密切相关。实施安全性评估时,需要对影响老龄飞机安全性的各种指标进行分析和综合。本文通过对老龄飞机特殊性的分析,将老龄飞机金属结构的安全性评估指标归纳为外载荷因素、腐蚀环境因素和使用维护因素 3 部分,见图 1。

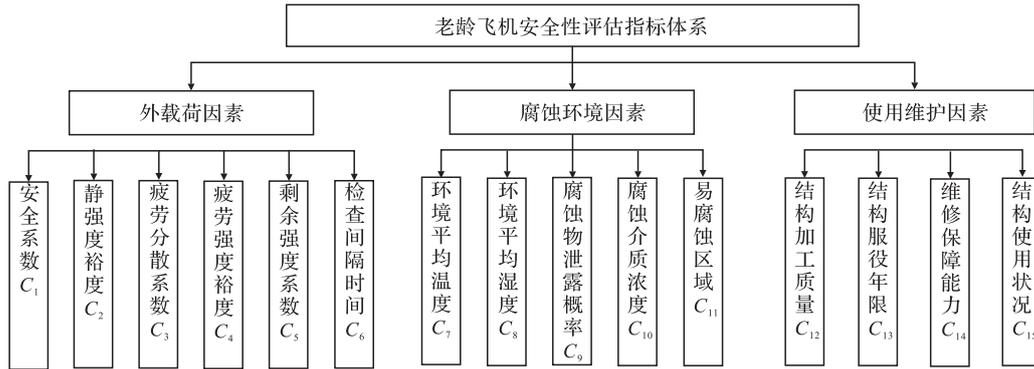


图 1 老龄飞机金属结构安全性评估指标体系

Fig.1 The metal structure safety evaluation index system of the aging aircraft

外载荷因素是指与飞机所承受的静力、疲劳等外载荷相关的结构强度设计因素,其中静强度裕度是指试验破坏载荷与设计极限载荷的比值,表征结构在承受极限载荷时,抵抗破坏的能力;疲劳强度裕度是可靠性试验寿命与设计目标寿命的比值,用来表示强度试验中疲劳寿命的安全裕度。

腐蚀环境因素是指飞机长期所处的环境中与腐蚀相关的对金属结构安全性产生影响的各种因素,其中腐蚀物泄露概率主要用于运输机,指飞机本身携带的或所装载货物中腐蚀物发生泄露的可能性;腐蚀介质浓度指飞机长期所处大气环境中常见腐蚀介质折算为实验室加速环境谱时腐蚀液的浓度,用来衡量不同浓度的腐蚀介质对金属结构的影响。

使用维护因素指因金属结构的加工、使用和维护等所导致的对飞机结构安全性的影响,其中结构使用状况指飞机在使用过程中结构所承受的过载大小及其频度,反映了结构受力的严重程度和频率。

### 2 金属结构安全性评估模型

即使相同型号的飞机,其工作情况和环境也存在差别,且一些数据可能存在缺失的问题,因此评估过程可能存在大量的不完备性和不确定性。粗糙集理论<sup>[7]</sup>作为一种较新的处理模糊和不确定性知识的数学工具,可以根据论域内的不可分辨关系,通

过知识约简<sup>[8]</sup>,挖掘出数据中的规律,实现各安全性评估指标权重的确定。

#### 2.1 评估决策表及离散化表的建立

在粗糙集理论中,通常采用一个二维信息表  $S = \langle U, R, V, f \rangle$  来描述论域中的对象,其中  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  为论域,代表典型老龄飞机的集合。 $R = C \cup D$  是属性集,子集  $C$  和  $D$  分别称为条件属性集和决策属性集,本文将外载荷因素、腐蚀环境因素和使用维护因素所包含的 15 项评估指标视为条件属性,则属性集  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{15}\}$ 。 $V = \bigcup_{r \in R} V_r$  是属性值的集合, $V_r$  表示属性  $r \in R$  的属性值范围,即属性  $r$  的值域, $f: U \times R \rightarrow V$  是一个信息函数,它指定  $U$  中每个对象的属性值。

由于利用粗糙集进行安全性评估时,只能处理离散量,因此必须对连续的评估指标取值进行离散化。本文根据各影响因素的特点及实际工作经验,同时为简化计算,按照引起金属结构安全性降低的程度由大到小的顺序,为每个评估指标设置 4 个节点值,将属性值离散为 5 级,如表 1 所示。

设实际评估值为  $X$ ,则:

$$\begin{cases} X \in \text{Level1} & X \leq D_1 \\ X \in \text{Level2} & D_1 < X \leq D_2 \\ X \in \text{Level3} & D_2 < X \leq D_3 \\ X \in \text{Level4} & D_3 < X \leq D_4 \\ X \in \text{Level5} & X > D_4 \end{cases} \quad (1)$$

其中一些评估指标,如腐蚀介质浓度,其值越大,对结构安全性危害越大,此时归类方法与式(1)相反,不再赘述。

表 1 属性离散化表

Tab.1 Attribute discretization

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
$C_1$	1.0	1.5	2.0	2.5
$C_2/\%$	100	105	110	120
$C_3$	5	4	3	2
$C_4/\%$	100	105	110	120
$C_5$	0.4	0.5	0.6	0.7
$C_6$	0.4	0.3	0.2	0.1
$C_7/^\circ\text{C}$	50	20	-15	-45
$C_8/\%$	90	70	50	30
$C_9/\%$	70	50	30	10
$C_{10}/\%$	20	15	10	5
$C_{11}/\%$	70	50	30	10
$C_{12}$	60	75	90	100
$C_{13}/\text{a}$	20	15	10	5
$C_{14}$	60	75	90	100
$C_{15}$	60	75	90	100

2.2 指标权重的确定

将各评估指标属性值离散化,利用信息熵计算其重要度<sup>[9]</sup>。设  $P$  为论域  $U$  上的一类知识, $U/\text{ind}(P)=\{C_1, C_2, \dots, C_{15}\}$ ,则  $P$  在  $U$  上的概率分布为:

$$[C; P] = \left\{ \begin{matrix} c_1, c_2, \dots, c_{15} \\ p(c_1), p(c_2), \dots, p(c_{15}) \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

表 2 评估指标实际值

Tab.2 The actual values of the indictors in structure safety evaluation

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
型号 1	2.0	101	3.0	116	0.60	0.25	-50	60	5	3	20	105	13	59	88
型号 2	1.0	119	3.6	107	0.40	0.10	30	91	20	15	76	95	18	85	73
型号 3	1.5	95	2.7	98	0.8	0.3	-5	29	35	5	32	80	7	105	92
型号 4	3.0	106	1.8	125	0.20	0.15	51	73	16	21	50	55	3	79	102
型号 5	2.5	110	40	109	0.70	0.20	10	50	51	11	8	70	21	66	52

根据表 1 中各属性的离散值,将其带入式(1),可以将各影响因素取值分为 5 级,分别用 1、2、3、4、5 表示,建立二维信息表,见表 3。

表 3 评估指标输入值

Tab.3 The input values of evaluation indicators

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
型号 1	3	2	3	4	3	3	5	3	5	5	4	5	3	1	3
型号 2	1	4	3	3	1	4	2	1	4	2	1	4	2	3	2
型号 3	2	1	4	1	5	2	3	5	3	4	3	3	4	5	4
型号 4	5	3	5	5	1	4	1	2	4	1	2	1	5	3	5
型号 5	4	3	2	3	4	3	2	3	2	3	5	2	1	2	1

利用信息熵计算可得各指标权重系数分别为 0.076, 0.063, 0.072, 0.073, 0.067, 0.082, 0.070, 0.065, 0.060, 0.063, 0.066, 0.068, 0.066, 0.041, 0.068。其中环境平均湿度  $C_8$ 、腐蚀介质浓度  $C_{10}$ 、

式中  $P(C_i) = \frac{|c_i|}{|U|}, i=1, 2, \dots, 15$ ; 符号  $|X|$  表示集合  $X$  的基数。

信息熵  $H(P)$  可表示为:

$$H(P) = - \sum_{i=1}^{15} p(c_i) \log_2 p(c_i) \quad (3)$$

各评估指标的重要性  $I_i$  计算公式如下:

$$I_i = H(P) - H(P|C_i) \quad (4)$$

式中  $H(P|C_i)$  是与  $C_i$  对应的  $P$  的条件熵。

对  $I_i$  归一化处理,即可得到各评估指标的权重系数  $W_i$ :

$$W_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^{15} I_i} \quad (5)$$

2.3 安全性评估模型的建立

对评估指标标准化后,结合公式(5)计算得到的权重系数,老龄飞机金属结构安全性评估模型可表示为式(6),式中  $S_i$  为被评估飞机的安全性评估指标标准。

$$M = \sum_{i=1}^{15} (W_i S_i) \quad (6)$$

3 算例分析

表 2 中列出了 5 种典型老龄飞机金属结构安全性评估指标中各影响因素的实际值。

易腐蚀区域  $C_{11}$ 、结构服役年限  $C_{13}$  所占权重较大,说明环境的腐蚀作用和疲劳载荷的作用对老龄飞机金属结构的安全性影响较大,这与飞机结构强度的研究结论是吻合的<sup>[10]</sup>,因此在实际工作中,需要特别加强对易腐蚀结构的检查,同时强化对疲劳裂纹的监测。

在实际工作中,为消除实际指标值量级不同对评估结果的影响,需要首先对各指标值进行标准化,如某型飞机评估指标标准指标集为  $C_s = \{0.953, 0.792, 0.667, 0.813, 0.838, 0.802, 0.622, 0.769, 0.851, 0.726, 0.712, 0.921, 0.811, 0.711, 0.635\}$ ,则其安全性评估结果为  $M=0.778$ ,其结构安全性处于良好状态。

## 4 结语

老龄飞机金属结构的安全性评估对确保飞行安全、充分挖掘老龄飞机的使用潜力具有重要意义。本文提出的老龄飞机金属结构安全性评估方法,建立了老龄飞机安全性评估模型,得到了以下结论:

1) 从外载荷、腐蚀环境及使用维护 3 个方面,分析并确立了老龄飞机金属结构安全性评估的指标体系,可以基本涵盖老龄飞机安全性评估的要素,体现飞机的安全性状况。

2) 根据各影响因素的特点及实际工作经验,设定了属性值离散化节点,不仅可以反映各影响因素的特性,还可以简化计算,提高工作效率。

3) 利用粗糙集理论确定了各指标权重,并建立了安全性评估模型。相对之前的评估系统中所采用的专家打分法更加客观,克服了对人的先验知识的依赖性。

本文提出的安全性评估模型目前主要针对常见机型,对于一些设计、使用条件较为特殊的机型还需进一步考虑其特殊性,对评估指标进行调整。

## 参考文献(References):

[1] 黄昌龙,万小朋. 老龄飞机面临的问题及解决思路[J]. 航空维修与工程,2009(4):40-42.

- HUANG Changlong, WAN Xiaopeng. Aging airplane problem analysis and countermeasure [J]. Aviation maintenance & engineering, 2009(4):40-42. (in Chinese)
- [2] FAA. Code of federal regulation[R]. Washington, D C: Aging airplane inspections and records review. 2003.
- [3] 冯蕴雯,薛小锋,冯元生. 老龄飞机机群与单机结构剩余寿命分析方法[J]. 西北工业大学学报,2006, 24(2):237-240.
- FENG Yunwen, XUE Xiaofeng, FENG Yuansheng. Prolonging safety service life of old-age aircraft [J]. Journal of northwestern polytechnical university, 2006, 24(2):237-240. (in Chinese)
- [4] 薛景川,沈真,郑旻仲,等. 以结构完整性为目标的安全性指标体系[J]. 机械强度,2004, 26(S):271-274.
- XUE Jingchuan, SHEN Zhen, ZHENG Minzhong, et al. Safety index system for aircraft structural integrity [J]. Journal of mechanical strength, 2004, 26(S):271-274. (in Chinese)
- [5] 舒文军,何宇廷,崔荣洪,等. 一种基于条件概率的飞机安全性分析模型[J]. 航空精密制造技术,2009, 45(6):53-57.
- SHU Wenjun, HE Yuting, CUI Ronghong, et al. Model for aircraft safety analysis based on conditional probability [J]. Aviation precision manufacturing technology, 2009, 45(6):53-57. (in Chinese)
- [6] Pawlak Z. Rough sets[J]. International journal of computer and information science, 1982, 11(5):341-356.
- [7] Pawlak Z, Skowron A. Rough sets: some extensions [J]. Information sciences, 2007, 177(1):28-40.
- [8] 吴尚智,苟平章. 粗糙集和信息熵的属性约简算法及其应用[J]. 计算机工程,2011, 37(7):56-61.
- WU Shangzhi, GOU Pingzhang. Attribute reduction algorithm on rough set and information entropy and its application [J]. Computer engineering, 2011, 37(7):56-61. (in Chinese)
- [9] Shipilov S A. Mechanisms for corrosion fatigue crack propagation [J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2002, 25(3):243-259.

(编辑:徐敏)