

# 基于 RCM 和模糊综合评判的航空发动机附件维修决策分析

徐 健

(海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110043)

**摘要:**针对 RCM 理论在定量决策中的不足引入模糊综合评判方法,分析影响航空发动机附件功能的因素,采用层次分析法确定了各因素的权重,再通过专家调查表确定了各因素隶属度,进行了定量计算,确定了航空发动机附件的维修方式。根据使用中对安全性、任务性、经济性的不同要求,建立了基于可靠性的维修间隔期模型。通过收集燃油增压泵的外场故障数据并进行分布拟合,得到故障数据服从 2 参数威布尔分布;最后应用维修间隔期数学模型进行计算,确定其定时维修间隔期为 2000 h。

**关键词:**RCM; 维修方式; 模糊综合评判; 维修间隔期; 航空发动机

中图分类号:V222 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2015.04.020

## Maintenance Decision Analysis Based on RCM and Fuzzy Comprehensive Evaluation of Aeroengine Accessories

XU Jian

(Naval Consumer Representative Office of Engine in Shenyang, Shenyang 110043, China)

**Abstract:** According to RCM theory in quantitative decision deficiencies fuzzy comprehensive evaluation method, the factors affecting aviation engine attachments were analyzed, the weight of each factor were determined by AHP, and then the factors membership were determined by expert surveys. The quantitative calculations were performed and maintenance modes of aeroengine accessories were determined. According to different requirements of safety, mission, economy, and reliability in operation, the model of the maintenance interval were built. The fault data conform to two-parameter Weibull distribution. By collecting failure data of the fuel boost pump in field and conducting distribution of the data, the calculation were performed by maintenance interval mathematical model. The results show that the maintenance and repair interval is 2000 h.

**Key words:** RCM; maintenance mode; fuzzy comprehensive evaluation; maintenance period; aeroengine

## 0 引言

以可靠性为中心的维修 (Reliability Centered Maintenance, RCM) 是目前国际上通用的用以确定装备(或设备)预防性维修需求、优化维修制度的 1 种系统工程过程<sup>[1]</sup>。基于 RCM 的维修决策是 1 个多因素多层次的评判问题,影响因素较多,有些可以量化有些则不可量化,只能进行定性分析,且对各因素的评判往往具有模糊性。专家评判模型虽然简单,但对于评判因素较多的复杂系统,各评判因素的权重不易分

配,又不易突出主要因素的影响,缺少准确性;且评定等级较少,拉不开档次,既费时又繁琐,一般只用于不太复杂的系统的评判和对比<sup>[2]</sup>。层次分析法对具有定性与定量因素的复杂系统是 1 种非常有效的权重确定方法<sup>[3]</sup>。多因素模糊综合评判是 1 种解决多因素、多层次带有模糊性评判问题的较好办法。

本文选用模糊综合评判模型进行维修决策的方法,分析了影响航空发动机附件可靠性的原因,确定了各因素之间的权重关系,最后明确了各因素之间的

收稿日期:2014-07-23

作者简介:徐健(1978),男,工程师,从事航空产品项目管理工作;E-mail:165152299@qq.com。

引用格式:徐健.基于 RCM 和模糊综合评判的航空发动机附件维修决策分析[J].航空发动机,2015,41(4):98-102. XU Jian. Maintenance decision analysis based on RCM and fuzzy comprehensive evaluation of aeroengine accessories[J]. Aeroengine, 2015, 41(4): 98-102.

隶属度,确定了航空发动机附件的维修方式。

### 1 维修方式决策模型

利用 RCM 理论,对维修对象按设备予以分类,根据设备的安全性、任务性、经济性等影响因素,判断设备应该采用何种维修方式(事后维修、定时维修和视情维修)<sup>[4]</sup>。

由于衡量设备重要程度的指标具有模糊性,因素是多方面且存在主次的问题,即因素之间有权重的问题,所以采用模糊数学的方式进行设备维修方式决策可行。

#### 1.1 确定因素集合

维修方式决策要先确定与维修方式相关的影响因素,即因素集合  $U$ 。本文从安全性、任务性、经济性 3 个方面予以考虑,组成 1 级影响因素集合。每个方面又有若干个影响因素,组成 2 级影响因素集合。从而确定 1 级影响因素集合  $U=\{u_i, i=1,2,3\}$ ,其中 2 级影响因素集合  $u_i=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots\}, (i=1,2,3)$ 。

#### 1.2 确定评语集合

评语集的确定可用定性评语法和定量评分法给出,结合实例,由专家经验和推理得到。

这里评语集分为“事后维修、定时维修、视情维修”,  $V=\{v_1, v_2, v_3\}$ ,  $v_1$  为事后维修,  $v_2$  为定时维修,  $v_3$  为视情维修。

#### 1.3 确定各影响因素权重集

采用层次分析法,得到 1 级影响因素的权重向量  $A=(a_1, a_2, a_3)$  和各 2 级影响因素的权重向量:安全性  $A_1=(a_{11}, a_{12}, \dots)$ , 任务性  $A_2=(a_{21}, a_{22}, \dots)$ , 经济性  $A_3=(a_{31}, a_{32}, \dots)$ 。

#### 1.4 确定模糊评判矩阵

确定 2 级影响因素集合  $u_i (i=1,2,3)$  对评语集合  $V$  的关系矩阵  $R_i=(r_{ij})_{m \times n}$ , 例如:决定安全性的各影响因素可组成以下模糊评判矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $m$  为影响因素的总数;  $r_{ij}$  为 2 级影响因素  $u_i$  对评价等级  $v_j$  的隶属关系。

同理也可得到任务性和经济性项目的模糊评判矩阵。

### 1.5 用 2 层模糊综合评判进行维修方式决策

#### (1)对 2 级影响因素进行评判

如前所设 2 级影响因素集  $u_i$  和评语集合  $V, R_i$  是集合  $u_i$  与集合  $V$  之间的模糊关系, 根据模糊数学的基本原理,  $R_i$  确定了 1 个模糊映射, 把  $u_i$  上的 1 个模糊子集  $A_i$  映射到  $V$  上的 1 个模糊子集  $B_i, A_i$  是映射的原像,  $B_i$  是映射的像, 模糊综合评判实际上就是已知原像  $A_i$  (权重向量) 和映射  $R_i$  (模糊评判矩阵), 去求像  $B_i$  (综合评判结果) 的问题。该问题的解决借助于模糊变换  $B_i=A_i \circ R_i$ 。由于分类时因素多, 且为众多因素总体起作用, 故采用模型  $M(\cdot, \oplus)$  计算。

#### (2)对 1 级影响因素进行评判

同上方法, 利用模糊变换得到综合评判的结果  $B$ 。此时应由  $B_i$  构成 1 级影响因素的模糊评判矩阵, 即

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

再作模糊变换:  $B=A \circ R$ , 则  $B$  为模糊综合评判的最后结果。

### 1.6 评判结果的处理

综合评判结果  $B$  是模糊集, 可以通过最大隶属度原则对评判结果进一步处理以得出 1 个直观的解释或 1 个明确的评判。

最大隶属度原则, 取与评判结果的最大值  $\max_j b_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 相对应的评语集元素为最终评判结果, 即

$$V = \{V_i | V_i \rightarrow \max_j b_j\} \quad (3)$$

## 2 实例分析

燃油增压泵的功能是在发动机起动之前向发动机燃油系统供油和在燃油泵入口处维持一定的燃油压力。根据燃油增压泵的工作原理和结构得出其故障模式及相应的原因, 如图 1 所示。

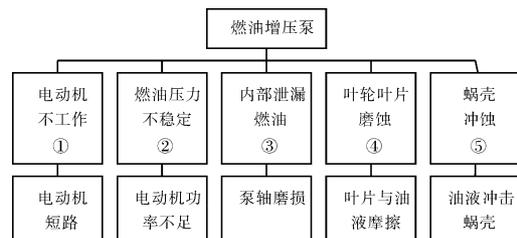


图 1 燃油增压泵故障模式及相关原因

燃油增压泵的功能层次与结构层次对应如图 2 所示。

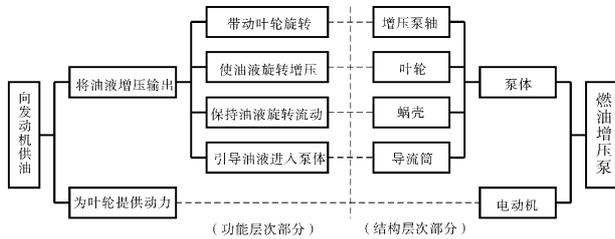


图 2 燃油增压泵功能层次与结构层次对应

### 2.1 应用模糊综合评判理论确定维修方式

燃油增压泵的维修方式仍然从安全性、任务性、经济性 3 个方面考虑。首先将该问题所涉及的因素分级,第 1 级包括 3 个因素,即  $U=\{u_1, u_2, u_3\}$ ;第 2 级包括 5 个因素,即  $u_2=\{u_{21}, u_{22}\}$ ,  $u_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\}$ <sup>[5]</sup>。各级因素的实际意义和关系如图 3 所示。

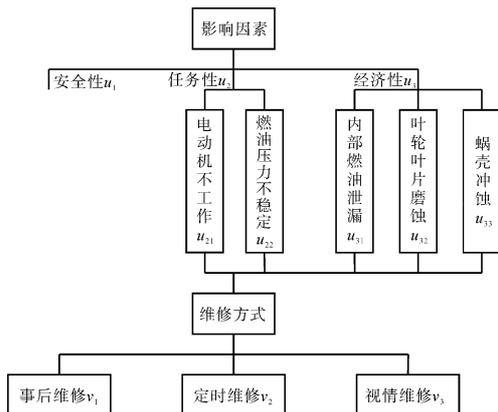


图 3 各级因素结构模型

(1)参照图 3 确定因素集合。

把因素分为 2 个层次,第 1 层次: $U=\{u_1, u_2, u_3\}$ ;第 2 层次: $u_1=\{0\}$ ;  $u_2=\{u_{21}, u_{22}\}$ ;  $u_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\}$ 。

定义各层次的权重集。第 1 层次: $A=(a_1, a_2, a_3)$ ;第 2 层次: $A_1=(0)$ ;  $A_2=(a_{21}, a_{22})$ ;  $A_3=(a_{31}, a_{32}, a_{33})$ 。

(2)确定各层次权重集<sup>[6]</sup>。

a.应用层次分析法确定判断矩阵。

第 1 层次判断矩阵  $P$ 、第 2 层次判断矩阵  $P_2$ 、 $P_3$ ,见表 1。

表 1 判断矩阵  $P, P_2, P_3$

$P_2$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$P_2$	$u_{21}$	$u_{22}$	$P_3$	$u_{31}$	$u_{32}$	$u_{33}$
$u$	1	3	7	$u_{21}$	1	2	$u_{31}$	1	2	2
$u_2$	1/3	1	6	$u_{22}$	1/2	1	$u_{32}$	1/2	1	1
$u_3$	1/7	1/6	1				$u_{33}$	1/2	1	1

b.求解最大特征根及其特征向量。

应用 Matlab 软件对判断矩阵进行求解,求得各层次最大特征根及特征向量如下:

第 1 层次  $\lambda_{\max}=3.100, \omega=(0.906, 0.414, 0.094)$ 。

第 2 层次  $\lambda_{2\max}=2, \omega_2=(0.894, 0.447)$ ;  $\lambda_{3\max}=3, \omega_3=(0.817, 0.408, 0.408)$ 。

将特征向量归一化得:

$\bar{\omega}=(0.641, 0.292, 0.067)$ ,

$\bar{\omega}_2=(0.667, 0.333)$ ,

$\bar{\omega}_3=(0.500, 0.250, 0.250)$ 。

c.一致性检验<sup>[7]</sup>。

采用公式  $R_C=I_C/I_R, I_C=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$  进行检验。

代入  $\lambda_{\max}=3.100, n=3, I_R=0.58$  得  $R_C=0.086<0.1$ ;  $\lambda_{2\max}=2, n_2=2, \lambda_{2\max}=n_2, I_C=0$ ;  $\lambda_{3\max}=3, n_3=3, \lambda_{3\max}=n_3, I_C=0$ 。

表明判断矩阵  $P, P_2, P_3$  具有满意的一致性。所以相应的各特征向量可作为权重集。

(3)确定评判矩阵。

第 2 层次模糊评判矩阵见表 2。

表 2 模糊评判矩阵

因素		$v_1$	$v_2$	$v_3$
$R_2$	$u_{21}$	0.20	0.20	0.60
	$u_{22}$	0.15	0.60	0.25
	$u_{31}$	0.10	0.70	0.20
$R_3$	$u_{32}$	0	0.95	0.05
	$u_{33}$	0	0.95	0.05

从表中可得第 2 层次的模糊评判矩阵分别为

$$R_1=0, R_2=\begin{bmatrix} 0.20 & 0.20 & 0.60 \\ 0.15 & 0.60 & 0.25 \end{bmatrix},$$

$$R_3=\begin{bmatrix} 0.10 & 0.70 & 0.20 \\ 0 & 0.95 & 0.05 \\ 0 & 0.95 & 0.05 \end{bmatrix}$$

其权重集分别为

$$A_1=0, A_2=(0.667, 0.333),$$

$$A_3=(0.500, 0.250, 0.250)$$

应用模型  $M(\cdot, \oplus)$  计算

$$B_1=A_1 \circ R_1=0$$

$$B_2=A_2 \circ R_2=(0.183, 0.333, 0.483)$$

$$B_3=A_3 \circ R_3=(0.050, 0.825, 0.125)$$

第 1 层次的模糊评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.183 & 0.333 & 0.483 \\ 0.05 & 0.825 & 0.125 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其权重集为  $A=(0.641, 0.292, 0.067)$

因此  $B=A \cdot R=(0.0567, 0.153, 0.150)$

归一化得  $\bar{B}=(0.158, 0.425, 0.417)$

从评判结果中可见,定时维修与视情维修的隶属度非常接近,所以燃油增压泵是定时维修与视情维修相结合的维修方式。

### 2.2 基于模糊决策绝对比较法确定燃油增压泵维修间隔期

根据5台发动机1983~2009年的故障信息,因到寿更换2件,因故障更换16件(其中3件因电动机不工作更换,2件因燃油压力不稳定更换,2件因内部泄漏燃油更换,4件因叶轮叶片磨损更换,5件因涡壳冲蚀更换),样本数为22,故障数为16。故障时间统计见表3。

表3 燃油增压泵故障时间 h

序号	故障时间	序号	故障时间
1	653	9	1348
2	861	10	1473
3	995	11	1508
4	1120	12	1532
5	1158	13	1658
6	1248	14	1762
7	1270	15	1788
8	1303	16	1887

对燃油增压泵故障时间数据分别进行最小二乘拟合,故障时间数据的回归直线如图4所示。从图中可见燃油增压泵的故障分布较好地服从2参数威

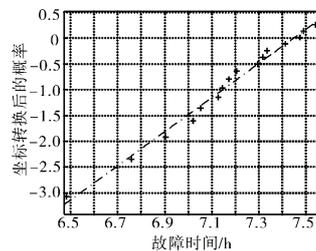


图4 2参数威布尔分布最小二乘法估计

布尔分布<sup>[9]</sup>。应用模糊决策绝对比较法确定出燃油增压泵合适的维修间隔期。

#### (1)故障模式1、2

故障模式1、2的预防性维修工作类型为使用检查。通过使用检查(只用于隐蔽功能故障)可保证产品的可用度,避免多重故障的严重后果。对于有安全影

响和任务性影响的情况,可通过所要求产品的平均可用度来确定其使用检查间隔期<sup>[9]</sup>。假设产品的瞬时可用度为  $A(t)$ ,检查间隔期为  $T$ ,则平均可用度

$$\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad (5)$$

由于在检查间隔期内不进行修理,故产品的瞬时可用度也就是可靠度  $R(t)$ ,则式(5)可变为

$$\bar{A} = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt \quad (6)$$

因为故障数据服从2参数威布尔分布,其可靠度  $R(t)=1-F(t)=e^{-\left(\frac{x}{1715.7}\right)^{3.3126}}$ ,经过计算得到当平均可用度  $\bar{A}=95\%$ 时,检查间隔期为  $T=865$  h。为与其它定检工作相一致,取  $T=800$  h。

#### (2)故障模式3

故障模式3是影响任务性的故障,所以按任务可靠度要求确定定时拆修间隔期<sup>[10]</sup>。

故障数据服从2参数威布尔分布,  $r=0, m>1$ ,应用公式为

$$R(t+\Delta t|t) = \frac{e^{-\frac{(t+\Delta t)^m}{\theta^m}}}{e^{-\frac{t^m}{\theta^m}}} = e^{-\frac{(t+\Delta t)^m}{\theta^m}} \quad (7)$$

2参数威布尔分布参数  $m=3.313, \theta=1715.7$ ,任务时间  $\Delta t=3$  h,现要求在任务期间燃油增压泵的可靠度在99%以上<sup>[11]</sup>,经过计算得到定时拆修的间隔期  $T=2170$  h。

#### (3)故障模式4、5

故障模式4、5是影响经济性的故障,所以按最小损失费用确定定时拆修间隔期。

故障数据服从2参数威布尔分布,参数  $m=3.313, \theta=1715.7$ 。定时拆修1次的平均费用  $C_p=5$  万元,发生故障后更换1次的平均费用  $C_f=12$  万元。应用公式为

$$T = \theta \left( \frac{1}{m-1} \frac{C_p}{C_f} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

经过计算得到定时拆修的间隔期  $T=1023$  h。

#### (4)用模糊绝对比较法确定最佳定时维修间隔期

考虑因素集  $U = \{u_1, u_2\}$ ,其中  $u_1$  为任务可靠度99%以上,  $u_2$  为维修费用最低。现在确定  $U$  中元素的模糊集

$$\tilde{A} = \{\tilde{A}(u_1), \tilde{A}(u_2)\} \quad (9)$$

选择 20 位评议者对因素集作两两比较,  $u_1=18$ ,  $u_2=2$ , 求出隶属度  $\tilde{A}(u_1)=90\%$ ,  $\tilde{A}(u_2)=90\%$ 。

可见  $u_1$  为影响定时维修间隔期的主要因素。

因此, 计算最佳定时维修的间隔期为  $T=2170 \times 90\%+1023 \times 10\%=2055.3$  h 综合任务性、经济性 2 方面考虑, 可得最佳定时维修间隔期  $T=2055$  h。为与其他定检工作相一致, 取  $T=2000$  h。

### 3 结论

(1) 结合 RCM 与模糊综合评判方法确定航空发动机附件的维修方式是有效可行的, 能够切实提高航空发动机附件的维修水平。评判结果对于增压泵的维修决策具有一定的参考意义。

(2) 提出利用 2 参数威布尔分布建立设备的维修间隔期模型, 并将该模型运用于航空发动机附件, 对维修间隔期进行决策。

(3) 针对航空发动机附件的维修方式, 根据安全性、任务性、经济性要求提出有寿命的维修周期决策模型, 并将该模型运用于航空发动机附件, 计算出了基于维修方式的维修间隔期。

#### 参考文献:

- [1] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-9.  
JIA Xisheng. The decision models of reliability centered maintenance [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2007: 1-9. (in Chinese)
- [2] 汪培庄, 李洪兴. 模糊系统理论与模糊计算机[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 108-144.  
WANG Peizhuang, LI Hongxing. Fuzzy system theory and fuzzy computer[M]. Beijing: Science Press, 1996: 108-144. (in Chinese)
- [3] 焦树锋. AHP 法中平均随机一致性指标的算法及 MATLAB 实现 [J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2006: 5(4): 45-47.  
JIAO Shufeng. The algorithm of mean random consistency index in AHP and its implementation [J]. Journal of Taiyuan Normal University

- (Natural Science Edition), 2006: 5(4): 45-47. (in Chinese)
- [4] Najmeh V, Farshad N. RANDAP: An integrated framework for reliability analysis of detailed action plans of combined automatic-operator emergency response taking into account control room operator errors[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 266.
  - [5] 崔文彬, 吴桂涛, 孙培廷, 等. 基于 FMEA 和模糊综合评判的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 263-267.  
CUI Wenbing, WU Guitao, SUN Peiyan, et al. Ship safety assessment based on FMEA and fuzzy comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(3): 263-267. (in Chinese)
  - [6] Chaudhuri D. An algorithm for maintenance and replacement policy using fuzzy set theory [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1995, 50(1): 79-86.
  - [7] 黄勇, 王凯全. 基于 RCM 和 RBI 的设备寿命周期管理与应用[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(10): 31-33.  
HUANG Yong, WANG Kaiquan. Life circle management of equipment based on RCM and RBI and its application [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(10): 31-33. (in Chinese)
  - [8] 李仁光. 可维修复杂机械的寿命曲线研究 [J]. 中国设备工程, 1998(9): 3-4.  
LI Renguang. Life curve research of repairable complex mechanism [J]. China Plant Engineering, 1998(9): 3-4. (in Chinese)
  - [9] 孙晓军, 李军. 航空发动机燃油系统附件抗污染途径及技术对策[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 1-3.  
SUN Xiaojun, LI Jun. Anti-fouling approaches and technology of aero-engine fuel system components [J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 1-3. (in Chinese)
  - [10] 谭巍, 李冬, 樊照远, 等. 基于模糊信息熵的航空发动机性能评估和可靠性分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 45-48.  
TAN Wei, LI Dong, FAN Zhaoyuan, et al. Aeroengine performance synthetic estimation and reliability analysis based on fuzzy information entropy [J]. Aeroengine, 2011, 37(5): 45-48. (in Chinese)
  - [11] 付克亚, 李本威. 航空发动机维修模糊综合决策方法[J]. 航空发动机, 2007, 33(4): 55-58.  
FU Keya, LI Benwei. Fuzzy comprehensive decision method of aero-engine maintenance [J]. Aeroengine, 2007, 33(4): 55-58. (in Chinese)

(编辑: 张宝玲)