

基于相似理论和贝叶斯理论的航材失效率确定

张 帅, 肖 飞, 徐吉辉, 李季颖
(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 为提高舰载航空装备航材备件保障能力, 结合某舰载航空装备供应保障需求, 基于相似理论和贝叶斯理论进行航材备件失效率研究。基于相似理论初步确定航材备件的初始失效率, 在实际使用数据的基础上, 运用贝叶斯理论对初始失效率修正得到后验失效率, 最后结合实例进行了理论应用分析。

关键词: 航材备件; 失效率; 相似理论; 模糊层次分析法; 贝叶斯理论

中图分类号: V271.4; E917 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0083-05

Determination of Aviation Spare Parts Failure Rate Based on Similarity System Theory and Bayesian Theory

ZHANG Shuai, XIAO Fei, XU Ji-hui, LI Ji-ying
(Naval Aeronautics and Astronautics University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to improve the logistics support capability of carrier-based aviation spare parts, the failure rate of carrier-based aviation equipment was studied based on similarity system theory and Bayesian theory taking a certain carrier-based logistics support demand as the object. The initial failure rate of aviation spare parts was determined on the basis of similarity system theory. With the application of Bayesian theory, the initial failure rate was amended based on the practically usage data of equipments. Finally, the theoretical application of it was presented with an example.

Key words: aviation spare part; failure rate; similarity system theory; fuzzy analytical hierarchy process; Bayesian theory

0 引言

航材备件是舰载机维护修理的重要物质基础, 是保障舰载机平时良好性能、提高战时战斗力的重要因素。舰载机保障在某种程度上就是航材备件的保障问题。航材备件保障的核心问题是备件需求确定问题, 国内外学者对备件需求做了大量研究工作, 应用多种方法进行了备件需求研究^[1-9]。航材备件需求研究可概括为3个方向: 1) 通过历史数据, 拟合备件消耗数学模型; 2) 利用智能算法进行需求预测; 3) 利用数据统计等方法, 确定在不同情况下的经典分布使用。舰载机备件种类繁多, 前两种方法比较复杂, 效果也无法保证。飞机航材保障工作中广泛采用消耗定额方法, 核心工作是确定航材备件失效率。综合以上研究, 基于

消耗规律, 综合运用相似理论和贝叶斯理论进行航材备件失效率研究。

1 问题分析

1.1 航材备件消耗影响因素分析

备件消耗主要受装备质量特性、使用任务、使用环境和维护等4方面影响^[10-11], 其中, 质量特性是备件消耗的主因, 其他因素通过影响质量特性产生影响。时空、任务因素会对备件质量性质造成短时影响, 经过累积, 逐步转化为长期影响, 物化为备件的质量特性。

1.2 航材备件失效率研究思路

备件失效率确定可以利用4种资源: 1) 质量特性数据; 2) 相似系统; 3) 专家知识; 4) 使用数据。确定流程如图1所示, 其中, 主要步骤是初始失效率确定和后续失效率修正。1) 失效率初步确定, 综合利用航材备件质量特性、相似系统和专家知识进行失效率的确定; 2) 失效率修正, 基于实际使用数据, 利用贝叶斯理论对初始航材备件失效率进行修正。

收稿日期: 2014-05-03

修回日期: 2014-06-24

基金项目: 军内预研基金(4010701050103)

作者简介: 张 帅(1984—), 男, 江苏沛县人, 博士生, 研究方向为装备保障理论与应用。

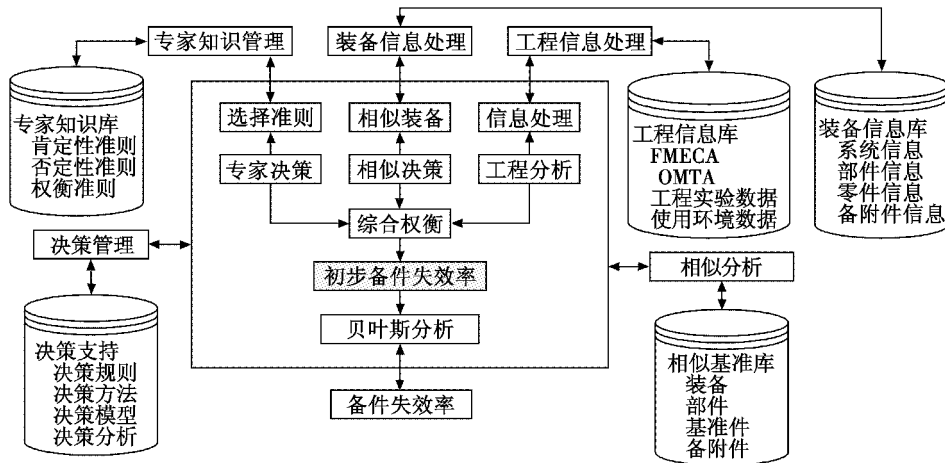


图1 航材备件失效率决策分析

Fig.1 Decision analysis of spare part failure rate

2 失效率确定

2.1 失效率的初步确定

根据品种数量、关键性和是否为新型备件等将航材备件分为A,B,C 3类。A类件通常价格高,发生故障会严重影响任务完成;B类件价格较高或中等,发生故障会影响任务完成;C类件价格较低,属消耗件。C类件是低

层级备件,可以直接引用相关标准、备件的设计制造参数确定失效率。本文主要对A,B类件失效率确定展开研究。新装备基于旧装备发展而来,具有同源性和继承性,可以利用相似装备进行失效率的分析推断^[12]。

2.1.1 相似分析指标体系

根据航材备件失效率影响因素建立相似分析指标体系,如图2所示。

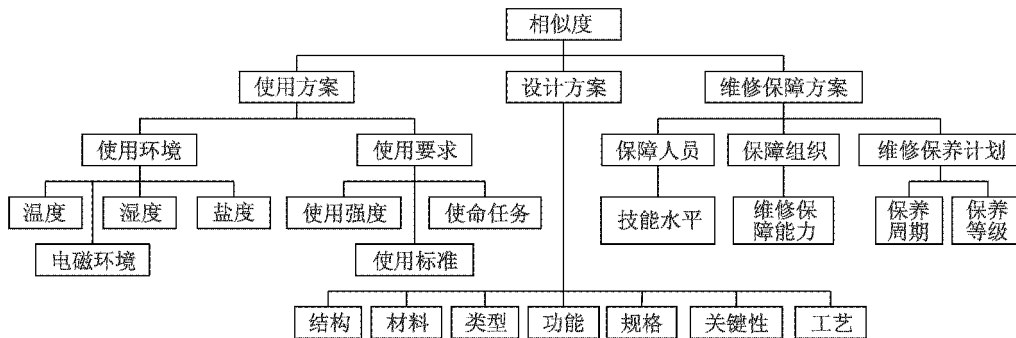


图2 相似分析指标体系

Fig.2 Index system of similarity analysis

根据需求选择适量、适当的指标进行相似分析。首先基于FAHP法确定各指标权重。根据递阶层次关系,采用0.1~0.9标度法,对因素 a_1, a_2, \dots, a_n 两两比较,建立模糊互补判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。依据文献[13]中的模糊互补判断矩阵权重公式确定权重 W_i ,根据文献[14]中的相容性方法对权重值进行一致性检验。

定义1 设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 和 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 均为模糊判断矩阵,称

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ji} - 1| \quad (1)$$

为A和B的相容性指标。

定义2 设 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$,是模糊判断矩

阵A的权重向量,其中, $\sum_{i=1}^n W_i = 1, W_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$,令 $W_{ij} = W_i / (W_i + W_j), \forall i, j = 1, 2, \dots, n$,则称n阶矩阵

$$W^* = (W_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

为判断矩阵A的特征矩阵。

设 α 为决策者态度,当相容指标 $I(A, W^*) \leq \alpha$ 时,认为判断矩阵满意一致。一般取 $\alpha = 0.1$ 。当有多位决策者时,可以由这些模糊判断矩阵得出综合模糊判断矩阵。

2.1.2 相似性分析

系统间普遍存在相似性,相似程度大小与支配系统相似的本质自然规律接近程度相关^[15]。相似理论为确定航材备件失效率提供了一条有效途径。

1) 元素的表示及数值相似计算。

设系统 A 由 K 个元素组成, 系统 B 由 L 个元素组成。 A 中元素 a_i 相似于 B 中元素 b_j , 构成相似元 $u(a_i, b_j)$, 简记 u 。若 A, B 间有 n 个相似元素, 则 n 个相似元素构成集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。

将系统 A, B 中元素适当排序, 使得系统间相似元素为 a_i, b_i , 相似元为 $u(a_i, b_i)$, 简记 u_i 。则对于相似系统 A 和 B , 系统相似程度 Q_n 为 $n/(K+L-n)$ 。

2) 相似元数值计算。

设每个相似元素有 m 个共同相似特征 S_1, S_2, \dots, S_m , 每个特征用特征函数 $U_j(x_i)$ 表示, 对于相似元 u_i , 记 $U_j(a_i)$ 为元素 a_i 中特征 S_j 所对应的值, $U_j(b_i)$ 为元素 b_i 中特征 S_j 对应的值。特征值比例系数 r_{ij} 用 n 维欧式空间度量^[16]为

$$r_{ij} = \frac{\min(U_j(a_i), U_j(b_i))}{\max(U_j(a_i), U_j(b_i))} \quad (3)$$

式中, $0 \leq r_{ij} \leq 1, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

假设相似元素有 m 个特征, 则第 i 个相似元的 m 个特征值的比例系数分别为 $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}$ 。假设系统要素 a_i, b_i 特征数目分别为 k 和 l , 相似特征数为 m , 则相似元素值 $q(u_i)$ 为 $m/(k+l-m)$ 。设每个特征对元素相似的影响度, 即特征权重分别为 d_1, d_2, \dots, d_m , 则相似元素的特征相似度为

$$q(u_i)_s = \sum_{j=1}^m (d_j r_{ij} + d_2 r_{i2} + \dots + d_m r_{im}) = \sum_{j=1}^m d_j r_{ij} \quad (4)$$

根据典型合并算法^[17], 可得相似元数值 $q(u_i)$ 为

$$q(u_i) = q(u_i)_m \cdot q(u_i)_s = \frac{m}{k+l-m} \sum_{j=1}^m d_j r_{ij} \quad (5)$$

3) 系统相似度计算。

设相似元值对系统相似度影响的权重分别为 W_1, W_2, \dots, W_n , 则相似元值相似度 Q_c 为

$$Q_c = \sum_{i=1}^n (W_1 q(u_1) + W_2 q(u_2) + \dots + W_n q(u_n)) = \sum_{i=1}^n W_i q(u_i) \quad (6)$$

根据典型合并算法, 可得相似度 Q 为

$$Q = Q_n Q_c = \frac{n}{K+L-n} \sum_{i=1}^n W_i q(u_i) \quad (7)$$

若有 h 个符合的相似系统, 设第 i 个相似系统相似度为 S_i , 失效率为 λ_i , 则失效率 λ 为

$$\lambda = \sum_{i=1}^h ((\lambda_i S_i) / \sum_j S_j) \quad i, j = 1, 2, \dots, h \quad (8)$$

最后由专家审核确定航材备件失效率 λ 。

2.2 航材备件失效率修正

贝叶斯理论将主观判断和经验量化处理、统计推断, 可以较客观地确定航材备件的需求分布模型^[18]。

贝叶斯理论中, 先验信息通过先验概率分布描述, 采样信息用似然函数描述, 基于先验分布和似然函数确定后验分布。

将适用性很强的 Γ 分布作为先验分布^[18]。设由相似性分析确定的失效率常数为 λ , 它是随机变量 Λ 的一个真值, 随机变量 Λ 满足 Γ 先验分布

$$f_A(\lambda) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad \lambda > 0 \quad (9)$$

Γ 先验分布参数 α, β 由相似分析并结合工程分析确定。

假设航材备件失效后立即替换, 忽略修复时间, 则备件失效服从强度为 λ 的泊松流, 在任务期 t 内, 备件失效的个数 $N(t)$ 服从 Poisson 分布

$$Pr[N(t) = n | \Lambda = \lambda] = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

$N(t)$ 的边际分布为

$$Pr[N(t) = n] = \int_0^\infty Pr[N(t) = n | \Lambda = \lambda] f_A(\lambda) d\lambda = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha) n!} \frac{\Gamma(n + \alpha)}{(\beta + t)^{n+\alpha}} \quad (11)$$

可得

$$f_{\Lambda|N(t)}(\lambda | n) = \frac{(\beta + t)^{\alpha+n}}{\Gamma(\alpha + n)} \lambda^{\alpha+n-1} e^{-(\beta+t)\lambda} \quad (12)$$

上式是一个参数为 $\alpha + n$ 和 $\beta + t$ 的 Γ 分布。当 $N(t) = n$ 时 λ 的贝叶斯估计为

$$\hat{\lambda} = E[\Lambda | N(t) = n] = \frac{\alpha + n}{\beta + t} \quad (13)$$

即失效率的后验值为 $\hat{\lambda}$ 。

若先验分布为二项分布, 可以将 β 分布作为先验分布。经过上述过程, 即可得到贝叶斯修正的后验失效率估计值。

3 应用分析

某舰载机基于某陆型机设计, 两者在诸多方面具有可比性。以陆型机为相似系统, 预计舰载机航材备件失效率。假设两型机具有相同的失效率影响因素集, 即两者的相似元数目相似度为 1; 本例中是简化的相似因素集, 约定相似度完全由本例中因素确定; 具体计算参考前述公式, 这里不再展开。

3.1 初始失效率确定

选取主要影响因素建立评价指标体系, 以备件相似度为顶层指标, 以备件类型、材料、工艺、功能、关键性、使用环境、使用强度和管理水平为相似度隶属评判准则, 运用 FAHP 方法建立权重集, 运用相似性原理计算失效率相似度, 见表 1。

表1 相似度分析

Table 1 System similarity analysis

航材备件	类型	材料	工艺	功能	关键性	使用环境	使用强度	管理水平
相似元权重 W_i	0.150	0.250	0.150	0.200	0.050	0.090	0.060	0.050
相似元数值 $q(u_i)$	0.875	0.750	0.875	0.985	1.000	0.875	0.833	0.833
系统相似度 Q	0.867 38							

由表1得 $Q = 0.867\ 38$ 。假定基本阈值 $Q_1 = 0.80$, 相等阈值 $Q_2 = 0.95$, 因为 $Q_1 < Q < Q_2$, 所以可以根据陆基飞机进行航材备件确定失效率, 但需要对失效率 λ 进行修正。

3.2 贝叶斯修正

利用贝叶斯理论对失效率进行修正。假设某舰载机作战单元有某航材备件 X 个, 其满足独立同分布且失效率由上述工作初步确定为 λ , 则随机变量 A 满足

Γ 先验分布 $f_A(\lambda) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda}, \lambda > 0$ 。参数由相似性分析得出 $\alpha = 3, \beta = 300$, 先验均值 $\lambda = E(A) = \alpha/\beta = 0.01$, 先验标准差 $S_{SD}(A) = 0.005\ 77$ 。经过任务期 $t = 1 \times 10^3$ h 使用, 出现 $n = 8$ 个观察失效值。对初始失效率进行修正, 得出 λ 的贝叶斯估计值为: $\hat{\lambda} = \frac{\alpha + n}{\beta + t} =$

$\frac{3 + 8}{300 + 1\ 000} \approx 0.008\ 46$ 。由贝叶斯理论根据使用数据

修正后的失效率为 $0.008\ 46$, 相对于初始估计, 后验失效率降低约 15% 。根据后验失效率值, 对航材备件配置策略进行相应调整, 提高供应保障的效费比。

4 结论

科学合理确定舰载机航材备件需求是提高舰载机综合保障能力的重要内容。本文针对舰载机由陆基型号飞机发展而来、使用数据不充分的实际情况, 研究利用相似理论和贝叶斯理论进行航材备件需求预测, 建立了航材备件失效率确定模型, 并进行了实例分析。本文研究为舰载机航材备件消耗规律的预测和供应保障配置优化提供了基础。

参考文献

[1] BAO Y K, ZOU H, LIU Z T. Forecasting intermittent demand by fuzzy support vector machines [C]//Lecture Notes in Artificial Intelligence, Berlin: Springer-Verlag, 2006:1080-1089.

[2] 赵建忠, 徐廷学, 葛先军, 等. 基于小波变换和 GM-ARMA 的导弹备件消耗预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(4):553-558. (ZHAO J Z, XU T X, GE X J, et al. Consumption forecasting of missile spare parts based on wavelet transform and revised GM-ARMA model

[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(4):553-558.)

- [3] 李树广, 赵彦峻, 徐诚. 装备维修备件需求预测与决策方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(7):901-905. (LI S G, ZHAO Y J, XU C. The study of requirement forecasting and decision-making methodology of equipment's maintenance spares-parts[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(7):901-905.)
- [4] 高鹏, 邢国平, 孙德翔, 等. 灰色关联支持向量机在备件库存消耗预测中的应用[J]. 电光与控制, 2012, 19(3):100-105. (GAO K, XING G P, SUN D X, et al. Application of grey correlation SVM in reserve consuming prediction of spare parts[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(3):100-105.)
- [5] HUANG L, WANG H W. Forecasting stock market movement direction with support vector machine [J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(10):2513-2522.
- [6] 张冬, 明新国, 赵成雷, 等. 基于 BP 神经网络和设备特性的工业设备备件需求预测[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1):72-76. (ZHANG D, MING X G, ZHAO C L, et al. Spare parts demand forecasting method based on BP neural networks and equipment characters [J]. Machine Design and Research, 2010, 26(1):72-76.)
- [7] RAJASHREE K K, PAKKALA T P M. A Bayesian approach to a dynamic inventory model under an unknown demand distribution[J]. Computers & Operations Research, 2002(29):403-422.
- [8] EAVESL A H C, KINGSMAN B G. Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004(55):431-437.
- [9] WILLEMMAIN T R, SMART C N, SCHWARZ H F. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories [J]. International Journal of Forecasting, 2004(20):375-387.
- [10] 甄伟, 徐廷学, 王志坤. 军用飞机随行备件量需求分析[J]. 军用标准化, 2005, 98:46-48. (ZHEN W, XU T X, WANG Z K. Demand analysis of military aircraft spare parts[J]. Military Standardization, 2005, 98:46-48.)
- [11] 郑智敏, 李积源. 舰船装备随行备件量需求规律分析[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(2):104-107.

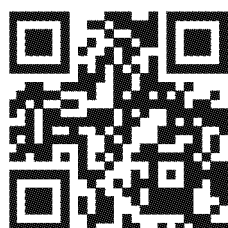
- (ZHENG Z M, LI J Y. Research on the demand principle for spare part of warship equipment[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(2):104-107.)
- [12] 李保华, 杨云. 备件需求预测模型研究[J]. 航空维修与工程, 2008(5):59-61. (LI B H, YANG Y. The study on demand forecasting model of spare parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(5):59-61.)
- [13] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4):311-314. (XU Z S. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgment matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2001, 16(4):311-314.)
- [14] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1):44-47. (CHEN H Y, ZHAO J B. Research on compatibility of fuzzy judgment matrices [J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(1):44-47.)
- [15] ZHOU M L. Principles and practice of similarity system theory [J]. International Journal of General Systems, 1994, 23(1):39-48.
- [16] SNEATH P, SOKAL R. 数值分类学[M]. 赵铁桥, 译. 北京: 科学出版社, 1984. (SNEATH P, SOKAL R. Numerical taxonomy [M]. Translated by ZHAO T Q. Beijing: Science Press, 1984.)
- [17] 王浣尘. 可行性研究和多目标决策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986. (WANG H C. The feasibility study and multi-objective decision [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.)
- [18] RAUSAND M. 系统可靠性理论: 模型、统计方法及应用[M]. 2版. 郭强, 王秋芳, 刘树林, 译. 北京: 国防工业出版社, 2010. (RAUSAND M. System reliability theory: Models, statistical methods, and applications [M]. 2nd ed. Translated by GUO Q, WANG Q F, LIU S L. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)

(上接第 56 页)

- [3] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007. (LIU J Y. The principle and methodology of satellite navigation [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.)
- [4] 杨静, 张洪钺, 朱士青. 基于伪距、伪距率的 GPS/SINS 容错组合导航系统[J]. 航天控制, 2003, 21(3):17-25. (YANG J, ZHANG H Y, ZHU S Q. An GPS/INS integrated navigation system based on pseudo-range and pseudo-range rate [J]. Aerospace Control, 2003, 21(3):17-25.)
- [5] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. (QIN Y Y, ZHANG H Y, WANG S H. Kalman filter and principle of integrated navigation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)

(上接第 74 页)

- [11] KIM S, CHU H, YANG I, et al. A hierarchical self-repairing architecture for fast fault recovery of digital systems inspired from paralogous gene regulatory circuits [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2012, 20(12):2315-2328.
- [12] YANG I, JUNG S H, CHO K H. Self-repairing digital system with unified recovery process inspired by endocrine cellular communication [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2013, 21(6):1027-1040.
- [13] ORTEGA-SANCHEZ C, MANGE D. Embryonics: A bio-inspired cellular architecture with fault-tolerant properties [J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2000, 1(3):187-215.
- [14] SZASZ C, CHINDRIS V. Self-organizing and fault-tolerant behaviors approach in bio-inspired hardware redundant network [C]//Processing of 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2010:37-42.
- [15] ZHU S, CAI J Y, MENG Y F, et al. A novel structure of embryonics electronic cell array [J]. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2014, 13:224-232.



请扫描二维码
关注我刊

