

Requirement Analysis of Spare Parts for Aero-Engine Based on Reliability Analysis

Li Ma¹, Dong Li², Yubo Feng³, Tao Sun⁴

¹The Second Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Shenyang, Shenyang Liaoning

²Unit 91899, Huludao Liaoning

³Unit 92728, Shanghai

⁴Naval Aviation University, Yantai Shandong

Email: happyli.dong@163.com

Received: Nov. 14th, 2019; accepted: Nov. 27th, 2019; published: Dec. 4th, 2019

Abstract

This paper mainly analyzes the inherent reliability of a certain engine. The fault data of its test stage are processed. Using the method of solving of fusion matrix and spare parts optimal model, combined with the data of components and the whole machine, this paper analyzes the reliability of the whole machine. Finally, the guaranteed rate of a single engine is 90%, the minimum cost is 681,700 yuan, the corresponding number of spare parts and the weight of each factor affecting the importance of spare parts are gotten.

Keywords

Reliability Analysis, Aeroengine, Spare Parts Demand

基于可靠性分析的某型航空发动机备件需求分析

马力¹, 李冬², 冯玉博³, 孙涛⁴

¹海军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 辽宁 沈阳

²91899部队, 辽宁 葫芦岛

³92728部队, 上海

⁴海军航空大学, 山东 烟台

Email: happyli.dong@163.com

收稿日期: 2019年11月14日; 录用日期: 2019年11月27日; 发布日期: 2019年12月4日

摘要

本文主要分析某型发动机的固有可靠性,对其试验阶段的故障数据进行处理。采用求解模糊矩阵和备件优化模型的方法,结合部件和整机数据,对整机使用可靠性进行分析。最后得到使单台发动机保障率达到90%,最低费用为68.17万元和对应的备件数量,以及影响备件重要程度各个因素的权重。

关键词

可靠性分析, 航空发动机, 备件需求

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航材备件的保障问题一直是使用方十分关注的问题,是产品综合保障的重要要素[1]。对飞机来讲,其计划性和非计划性维修都需要备件。备件配置的好坏将直接影响飞机的可用性。目前国内一些机种的完好率比较低,主要是由缺件造成的。现实中备件并不是配置的越多越好,不常用的备件将会导致全寿命周期费用的增加,造成巨大的浪费。国内飞机备件的确定,没有合适的备件供应模型及相应的可靠性数据,多是依靠经验和人工预测来完成的。即使有些理论上的依据,但理论还很不完善,从而造成在后续备件供应问题上,会出现供应短缺影响飞机的出勤率,造成备件闲置占用大量资金造成资源浪费[2]。从上世纪80年代中期对备件问题进行一些初步的研究,北京航空航天大学从实际工程背景出发,对备件的管理方式和备件本身的特性进行分析,并对备件需求量预测模型进行了一定的理论研究。南京航空航天大学在可靠性分析基础上进行备件需求预测[3]。中国民航学院结合数理统计的知识,对民机备件需求预测方法进行了初步探索,通过对发生故障的情况以及故障率进行研究,为民机备件需求预测提供了新的探索方法[4]。

某型飞机自服役以来,在备件订购方面仍然存在上述问题,本文针对这一问题,对飞机后续备件的需求量以及相应费用进行了相应的研究和分析,通过求解备件优化模型和模糊矩阵得到最优的备件数量及最低费用,和影响备件重要程度各个因素的权重,以更好地指导备件储备与维修。

2. 备件供应工作内容

2.1. 备件目录种类

备件目录主要分为随机备件目录和推荐订货备件目录两种。

1) 随机备件目录: 主要以在飞机的保证期内,用于恢复飞机主机、机载成品与地面保障设备的效能所需的不可修复件和部分可修复件为主要内容。不可修复件包括消耗性备件和易损性备件。可修备件主要指飞机维修性所划定的一些外场可更换件。

此种备件,国外称之为初始备件,其与随机备件的区别在于随机备件的费用计入飞机成本,而国外的初始备件费用不计入飞机成本,由使用部门单独采购。为了用户使用和保管的方便,随机备件一般采用固定的比例。

2) 推荐订货备件目录：国外亦称为后续备件目录，是由承包商向用户推荐的订货备件目录，以用于保证期后(包括部分保证期内的不属于随机备件范围内的备件)恢复系统效能和保证飞机持续使用所需的备件为主要内容。其由使用方订货，费用不计入飞机成本。

2.2. 备件供应体制

维修体制与备件供应点的选择和设置有着直接的关系。主要以三级维修体制为主，即外场级、基地级和后方级。各维修级别根据其维修条件、维修能力和技术水平的不同，执行不同类型或不同程度的维修活动。

基层级也称一级维修，是直接使用飞机的单位对其编制内的航空技术装备所进行的维修。主要包括：日常的维护、保养和一般保障勤务，检查和排除故障，调整和校正，机件的更换，以及周期性工作。

中继级也称二级维修，对某一个范围内所属部队的航空技术装备所进行的维修。主要包括：飞机及其设备、机件的中修、大修，部分零件的修配和制作，系统、设备的测试和校验，改装，以及较大的周期性工作。

基地级也称三级维修，由后方固定设施所进行的维修。主要是航空技术装备的翻修，较复杂的改装，零备件的制作等。

每一个维修级别，即每一个维修点都应该有自己的备件供应点。在相应的维修级别上设立相应的航材部门，以统一管理备件的供应和采购，其备件主要来源于生产厂。图 1 为供应点的示意图。

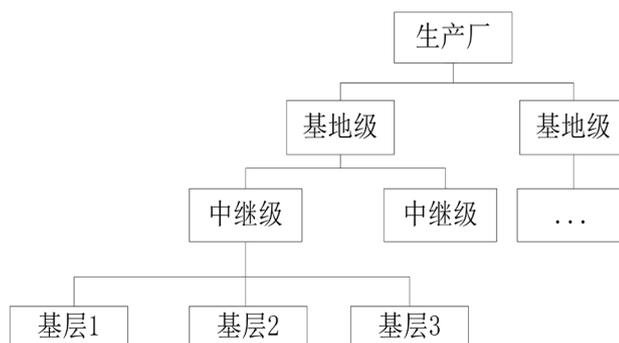


Figure 1. Place of supply of spare parts
图 1. 备件供应点

基层级备件供应以外场可更换件和修理用零配件为主。中继级的备件主要用于支持外场的(LRU)和维修(LRU)所需的车间可更换件(SRU)以及修理用的零配件。基地级一般储存有较充分的备件，并有对短缺件的急加工能力。

当飞机需要更换机件时，直接从外场(基层)的备件供应点申领此项备件。当外场的供应机构没有此种备件或其库存量下降到一定水平时，则向中继级备件供应机构提出申请，由中继级向其发送备件。同样，中继级供应机构的某种备件库存量下降到一定水平时，向基地级提出申请，由基地级负责发送。

3. 备件需求量计算方法

3.1. 备件需求量计算模型

关于备件系统的优化问题国内外一些相关的重要文献大多使用 Barlow 的理论和方法[5]，Barlow 将部件及其备件看作冷储备子系统，将整个备件系统看作各子系统的串联构成的系统，该储备 - 串联系统的可靠度作为航材系统的保障率。航材备件系统的优化则归结为在给定该系统可靠度的约束下，使系统的购置费用最小。其模型如下：

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n c_i x_i, i=1,2,\dots,n \\ \prod_{i=1}^n R_i(x_i, t_i) > R_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, n 为航材系统部件的种类; x_i 表示第 i 种备件的数量; c_i 为第 i 种备件的单价; $R_i(x_i, t_i)$ 为在时间 $(0, t_i)$ 内第 i 种备件配备 x_i 个备件的可靠度。 R_0 为整个航材系统给定的保障率。这种计算模型存在的问题是, 备件种类众多, 如果以串联模型的评估函数 $\prod_{i=1}^n R_i(x_i, t_i) \geq R_0$ 作为评价标准, 即使每个部件可靠度都达到 0.9, 30 个部件的可靠度也只有 0.424, 这是不符合实际情况的。通常, 航材系统的保障率用系统服务水平来定义[6]:

$$\text{航材保障率} = \left(1 - \frac{\text{该时间内缺件次数}}{\text{某段时间内的领件次数}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

由式(2)可知航材保障率相当于单个部件保障率的代数平均, 这与串联可靠性模型中的评价函数区别甚大。由公式(2)可以看出, 总的航材保障率认为是申请备件时能够及时提供的概率。用 $N_i(t), (i=1,2,\dots,n)$ 表示在 $(0, t)$ 时间段内第 i 种部件配置的备件数。于是: 第 i 种航材的保障率为:

$$R_i = P\{N_i(t) \leq x_i\} \quad (3)$$

航材系统总保障率 R_s 为:

$$R_s = P\{N_1(t) + N_2(t) + \dots + N_n(t) \leq (x_1 + x_2 + \dots + x_n)\} \quad (4)$$

式(4)是根据航材保障率的基本定义构造的可靠性模型, 从这个基本定义出发继续推导它的内在形式。

用统计量 $\hat{R}_i = \frac{x_i^0}{N_i(t)}$ 的观察值作为 R_i 的估计, 式中:

$$x_i^0 = \begin{cases} x_i, N_i(t) \geq x_i \\ N_i(t), N_i(t) < x_i \end{cases} \quad (5)$$

对整个备件系统来说, 将 \hat{R}_s 的观察值作为总保障率 R_s 的估计值。

$$\hat{R}_s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^0}{\sum_{i=1}^n N_i(t)} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i(t)}{\sum_{i=1}^n N_i(t)} R_i \quad (6)$$

引入 λ_i 作为第 i 种部件出现故障的概率, 则由更新过程理论可得: $\lambda_i = E(N_i(t))$, 对于部件寿命服从指数分布的情况, 精确成立; 对于部件寿命非指数分布的情况, 渐近成立。所以, 整个备件系统保障率可以表示为

$$R_s = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} R_i \quad (7)$$

令,

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, i=1,2,\dots,n,$$

则,

$$R_s = \sum_{i=1}^n \rho_i R_i \quad (8)$$

式中 ρ_i 表示第 i 种部件的保障率对系统总保障率影响的权重。显然, 在每种部件相同的保障率条件下, 故障率高的部件对航材系统总保障率影响要大。根据推导出的公式建立可靠性模型:

1) 基于一定经费的后续备件保障模型的目标函数为

$$R = \max \sum_{i=1}^N \rho(i) R(i) \quad (9)$$

式中: R 为系统保障率, $\rho(i)$ 为单个部件的权重, $R(i)$ 为单个部件的保障率。

约束函数:

$$C = \sum_{i=1}^N C(i) X(i) \leq C(0) \quad (10)$$

$C(i)$ 为第 i 个备件的单价, 式 10 表示对各部件的数量和单价的乘积进行求和并且使其值小于或等于系统总经费 $C(0)$ 。

$$R(01) \leq R(X(i), T) \leq R(02), i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

该式表示各部件在订货周期内的保障率大于或等于最低保障率, 小于或等于最大保障率;

$$R(00) \leq R(X(i), T), i = 1, 2, \dots, k, R(01) \leq R(00) \leq R(02) \quad (12)$$

该式表示其中若干个特别重要的备件的保障率大于保障率 $R(00)$, 其中 $R(00)$ 大于或等于最低保障率, 小于或等于最大保障率。

3.2. 基于保障率的后续备件保障模型

模型的目标函数为:

$$C = \min \sum_{i=1}^N C(i) X(i) \quad (13)$$

约束函数:

$$R(01) \leq R(X(i), T) \leq R(02) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \rho(i) R(i) \geq R(0) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{J-1} \rho(i) R(i) + \sum_{i=J+1}^N \rho(i) R(i) + \rho(J) \times R(X(J)-1, T) \leq R(0) \quad (16)$$

J 为 $1, \dots, N$ 中的任一数值。表示当第 J 个备件缺一个时系统总保障率 R 小于 $R(0)$ 。

3.3. 优化保障模型

在实际情况下, 航材备件还受到很多因素的影响, 既有备件耗损性的影响, 又有在装备中的重要程度-关键性的影响, 还要考虑经济性的影响等。所谓零部件的关键性是指该件在装备系统中所起的作用以及对系统性能影响程度的大小。零部件的耗损性是指耗损程度的大小, 主要与零部件的固有可靠性、使用环境及条件因素有关。零部件的经济性这些因素有的不易量化, 且它们与备件品种的关系是模糊的关

系，因此在权重分析中适合采用模糊综合评判的方法。在本文的模型计算过程中，主要考虑部件的故障率、维修性、部件在发动机上的重要性和可得性四个方面的影响，在权值的计算上采用模糊综合评判理论得出该部件的权重分数，然后对所有部件的权重分数 r_i 进行求和，得出一个总权重分数 G ， $G = \sum_{i=1}^n r_i$ ，

则部件的权重为 $\rho_i = \frac{r_i}{G}$ 。

权重分配对评估的结果起着至关重要的作用。为了保留不确定的模糊信息，本文采用模糊层次分析法[7] [8]进行权重分配。

1) 构造判断矩阵

判断矩阵是层次分析法的基本信息，它是以上一层的某一元素作为评判准则，对下一层要素进行两两比较来确定矩阵的元素值。首先建立要解决问题的层次结构，如图2所示。

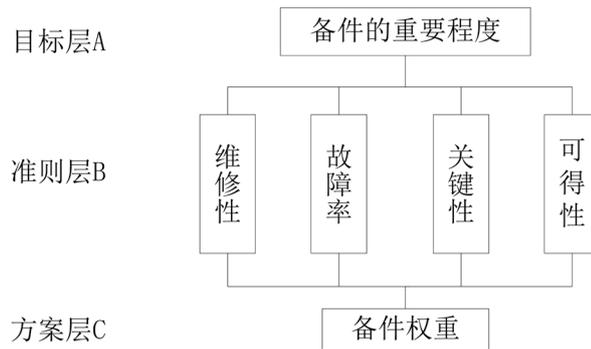


Figure 2. Weight hierarchy chart
图2. 权重层次结构图

判断矩阵 A 中的元素 a_{ij} 表示从判断准则角度考虑元素 i 对元素 j 的相对重要性，且满足：

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{17}$$

判断尺度采用9级标度，规定用1、3、5、7、9分别表示 i 元素对 j 元素同样、比较重要、重要、很重要、极重要。构造模糊判断矩阵 $A^{(k)}$ 。对专家评价，采用模糊三角数表示模糊判断，模糊数等级采用3级标度。专家在对重要度进行主观判断时有一定的置信度 δ ，当置信度分别为“很有把握”、“较有把握”、“一般把握”时， δ 分别取值0.5、1、1.5。 $A^{(k)} = (a_{ij})_{n \times n}$ 表述为：

$$a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+] = \begin{cases} [a_{ij} - \delta, a_{ij} + \delta] & (a_{ij} \geq 1, i \neq j) \\ \left[\frac{1}{1/a_{ij} + \delta}, \frac{1}{1/a_{ij} - \delta} \right] & (a_{ij} \leq 1, i \neq j) \\ [1, 1] & (i = j) \end{cases} \tag{18}$$

a_{ij} 为模糊判断矩阵中的元素，因此判断矩阵 $A^{(k)}$ 为正互反矩阵。

2) 计算归一化权重向量

计算第 k 专家确定的权重 $w^{(k)}$ ， $w^{(k)} = (\alpha x^- + \beta x^+) / 2$ ，式中 x^- 、 x^+ 为矩阵 A^- 、 A^+ 最大特征值对应的归一化特征向量。 α 、 β 的取值为：

$$\alpha = \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij}^+} \right]^{1/2}, \quad \beta = \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij}^-} \right]^{1/2} \quad (19)$$

对计算得到的权重向量 $w^{(k)}$ 进行归一化处理, 得到归一化权重向量 $w_0^{(k)}$ 。为了保证决策的可靠性, 必须对模糊判断矩阵进行一致性检验。进行一致性检验采用 λ_{\max} 与 n 之差法, 即

$$C.I. = \frac{(\alpha\lambda_{\max}^- + \beta\lambda_{\max}^+)/2 - n}{n-1} \quad (20)$$

若 $C.I. \leq 0.1$, 就证明判断矩阵是一致的。

3) 计算决策权重

为了降低决策风险, 评估过程有多个专家共同参与, 而每个专家的可信度并不一样, 设每个专家的自身权重为 y_k , 权重为 $w_0^{(k)}$, 可得决策权重

$$w = \frac{1}{\sum_{k=1}^k y_k} \sum_{k=1}^k y_k w_0^{(k)} \quad (21)$$

4) 部件的最终权重

对每一个部件的故障率、可修性、装机重要性和可得性分别进行打分, 对这四项目的分数进行加权求和, 得出该部件的权重分数, 然后再对所有部件的权重分数 r_i 进行求和, 得出一个总权重分数 $G_i = \sum_{i=1}^n r_i$ 。

则部件的最终权重为 $\rho_i = \frac{r_i}{G}$ 。

4. 某型发动机备件方案分析

4.1. 备件权重

在权重分析中, 主要考虑故障率、可修性、重要性和可得性四个方面的影响。故障率是在规定条件下和规定的时间内, 产品的故障总数与寿命单位总数之比。故障率最高的部件在权重中的分数 D 设定为 7 分, 而对于故障率最小的部件, 将其权重中的分数设定为 2.5 分。其它部件权重中的分数设定为从 2.5 分到 7 分之间的某个确定值。

由于可修件可以修复后重新装机使用, 相当于一个新的备件, 在备件优化中占有很大的作用, 但是考虑到可修性与故障率和备件装机重要性在权重中的作用不同, 将不可修件在权重中的分数设定为 1, 将可修件在权重中的分数设定为 0。

每一个部件在飞机上的重要性是不同的, 对于飞机上的某些关键部件, 这些部件的故障可能会造成机毁人亡的重大事故, 则它们在权重中的值设定为最大值 1.9 分, 而其它一些部件仅影响部分功能, 对该飞机的安全没有太大影响, 其在权重中的值设定为最小值 1.1 分。其它的部件则根据它们在飞机中的重要性设定为从 1.1 到 1.9 的相应值。

可得性是影响备件数量的一个重要因素, 为了简化问题, 本文将可得性分为国内订货和国外订货两种情况, 其权值分别为 0 和 1。

首先进行重要性评估, 设专家 1、2 对两两指标相对重要性做出的主观判断和对此判断的置信度情况如表 1 所示。

Table 1. Importance comparison
表 1. 重要性比较

项目	重要性比较		置信度	
	专家 1	专家 2	专家 1	专家 2
故障率 vs.可修性	重要	很重要	较有把握	把握一般
故障率 vs.重要性	较重要	较重要	较有把握	较有把握
故障率 vs.可得性	重要	重要	很有把握	较有把握
可修性 vs.重要性	重要	较重要	较有把握	较有把握
可修性 vs.可得性	较重要	重要	把握一般	较有把握
重要性 vs.可得性	重要	很重要	较有把握	把握一般

由表 1 信息，建立判断矩阵，并根据式 18 将判断矩阵转化成模糊判断矩阵：

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [\frac{1}{6}, \frac{1}{4}] & [\frac{1}{4}, \frac{1}{2}] & [4.5, 5.5] \\ [4,6] & [1,1] & [\frac{1}{6}, \frac{1}{4}] & [1.5, 4.5] \\ [2,4] & [4,6] & [1,1] & [4,6] \\ [\frac{1}{5.5}, \frac{1}{4.5}] & [\frac{1}{4.5}, \frac{1}{1.5}] & [\frac{1}{6}, \frac{1}{4}] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$A^{(2)} = \begin{bmatrix} [1,1] & [\frac{1}{8.5}, \frac{1}{5.5}] & [\frac{1}{4}, \frac{1}{2}] & [4,6] \\ [5.5, 8.5] & [1,1] & [\frac{1}{4}, \frac{1}{2}] & [4,6] \\ [2,4] & [2,4] & [1,1] & [5.5, 8.5] \\ [\frac{1}{6}, \frac{1}{4}] & [\frac{1}{6}, \frac{1}{4}] & [\frac{1}{8.5}, \frac{1}{5.5}] & [1,1] \end{bmatrix}$$

对于 $A^{(1)}$ 计算可得， $\alpha^{(1)} = 0.8799$ ， $\beta^{(1)} = 0.9223$ ， $\lambda_{\max}^- = 3.9604$ ， $\lambda_{\max}^+ = 5.922$ ，

$$x^{-(1)} = (0.2424, 0.2172, 0.2172, 0.1018)$$

$$x^{+(1)} = (0.2363, 0.2738, 0.2738, 0.0767)$$

由 $w^{(k)} = (\alpha x^- + \beta x^+) / 2$ 计算权重向量并进行归一化得专家 1 的权重分配 $w^{0(1)} = [0.2915, 0.3000, 0.3000, 0.1085]$ 。由式 20 计算 $C.I. = 0.078$ 满足一致性要求。

同理， $w^{0(2)} = [0.2326, 0.2332, 0.2332, 0.3010]$ ，设两位专家的各自权重分别为 $y_1 = 0.8$ 、 $y_2 = 1$ ，由式 21 可得最终分配权重 $w = (0.2588, 0.2629, 0.2629, 0.2154)$ ，通过一致性要求。

4.2. 优化备件保障方案

根据外场使用经验，选择外场可更换的主要部附件作为备件采购模型进行研究，表 2 列出了主要备件的权重。

Table 2. Weight of main components
表 2. 主要部件权重

部件编号	$\lambda(i)/10^{-4}$	A	B	C	D	合计	权重	装机数	单价(万元)
1	5.325	3.8	1	1.2	1	1.7658	0.0985	4	3
2	12.783	5.3	0	1.3	0	1.6975	0.0947	2	1.5
3	3.273	4.3	1	1.2	1	1.8937	0.1056	1	2
4	4.419	4.6	1	1.5	1	2.0493	0.1143	2	13
5	6.225	4.8	0	1.8	1	1.9165	0.1069	3	2.9
6	3.384	4.5	1	1.4	1	1.9975	0.1114	2	4
7	4.283	4.8	1	1.6	0	1.9114	0.1066	1	8
8	2.247	3.9	0	1.9	0	1.4971	0.0835	1	5.6
9	3.384	4.8	0	1.3	1	1.7850	0.0995	2	2
10	2.247	3.8	0	1.7	0	1.4190	0.0791	2	8

注: A、B、C、D 分别为故障率、可修性、重要性、可得性在权重中所占的分值。

假定飞行小时数为 200 小时, 要求使保障率在 90% 的最低保障经费。使用基于保障率后续备件优化保障模型。结合式 13 的目标函数和式 14、15、16 的约束条件, 进行求解最小费用和最优备件数。在模型求解过程中, 使用 LINDO 软件进行求解, 可以方便并有效的求解非线性、整数和二次规划问题。最后得到的结果是单台发动机保障率要达到 90% 最低费用为 68.17 万元, 其备件数量对应为 4、5、1、2、4、2、1、1、2、1。

5. 总结

本文进行了基于可靠性的备件优化建模, 在传统备件保障模型的基础上将故障率、可修性、重要性和可得性对备件储备的影响加入了新的优化模型, 通过模糊层次分析法对各个部件的权重进行了计算, 在对各个部件进行可靠性分析和权重计算的基础上, 利用基于可靠性的备件保障优化模型对备件数量和经费进行了求解。通过这种方法可以克服凭主观经验采购备件的盲目性和片面性, 使用方在装备保障方面更合理。

参考文献

- [1] Wu, Y.T., Enright, M.P., Millwater, H.R., *et al.* (2000) Leverant. Probabilistic Methods for Design Assessment of Reliability with Inspection (DARWINTM). AIAA-2000-1510. <https://doi.org/10.2514/6.2000-1510>
- [2] 孙伟, 高连华, 曹玉坤, 等. 装甲车辆可靠性理论与应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 20.
- [3] 黄俊. 基于可靠性的民机备件支援及其软件系统[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [4] 姜柏松, 孙春林. 一种改进的备件系统优化模型及解法[J]. 中国民航学院学报, 2003, 21(6): 17-20.
- [5] Barlow, R.H. (2004) Business Logistics Management: Planning Organizing and Controlling the Supply Chain. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- [6] 孙进康, 酆正能. 可修复系统故障数据分析模型与方法研究[J]. 解放军理工大学学报, 2000(2): 57-62.
- [7] 孙有朝. 复杂系统可靠性多级综合的熵法第二近似限[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 423-426.
- [8] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 37-40.