

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.03.020

## 基于备件保障概率的备件库存限额确定方法

董骁雄 陈云翔 王莉莉 项华春

(空军工程大学装备管理与安全工程学院,西安,710051)

**摘要:** 鉴于目前装备研制早期信息较少,备件需求确定方法与战备完好性指标相脱节,备件需求的不确定性较大,通过建立装备完好率、可用度、平均故障停机时间与备件保障概率之间的关系,确定满足完好率的区间要求的装备系统备件保障概率。运用 Delphi 法对装备分系统和 LRU 的备件保障概率进行分配,进而确定相应的备件库存限额标准。最后,结合实例验证了分析方法的可行性与合理性。

**关键词:** 装备完好率;备件;保障概率; Delphi 法;库存限额

**中图分类号:** V215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2017)03-0447-06

### Inventory Limitation Method for Spare Parts Inventory Based on Equipment Fill Rate

DONG Xiaoxiong, CHEN Yunxiang, WANG Lili, XIANG Huachun

(College of Equipment Management & Safety Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China)

**Abstract:** Considering the less information of early research-manufacture of the equipment, mismatching between determination methods of spare requirement and integrity index of combat, and greater uncertainty of spares relationship among the equipment readiness rate, the aircraft availability, the average downtime and the fill rate of spare parts are analyzed, thus determining the guarantee probability of equipment spare parts. Then, the Delphi method is used to distribute the spares fill rate of analysis system of equipment and LRU. Furthermore, the corresponding spare parts inventory limitation standard is obtained according to the interval requirement of the given aircraft readiness rate. Finally, the feasibility and rationality of analysis method are verified through the instance.

**Key words:** equipment readiness rate; spare parts; fill rate; Delphi method; inventory limitation

目前备件需求优化建模技术主要可以分为两类:一类是广泛用于工业界的用以减少故障停机时间的库存模型,如文献[1,2];另一类是复杂军用装备的保障部门正在利用越来越复杂的库存模型,以便在规定约束下满足规定的装备可用度指标,如文献[3,4]。

经分析可知,首先,在绝大多数备件库存模型中,常以可用度、故障停机时间或者备件等待时间

等参数作为备件保障效益指标确定备件库存方案,很少有以备件保障概率为指标<sup>[5]</sup>。但备件只是可用度的诸影响因素之一,且实际管理中无论是可用度还是故障停机时间或者备件等待时间都是备件管理部门难以控制和把握的。在国内,无论是装备研制部门还是部队几乎都将装备完好率和备件保障概率作为确定备件数量的指标要求<sup>[6]</sup>,其次,装备研制早期信息较少,机载设备寿命指标不明确,

**基金项目:** 国防预研基金资助项目。

**收稿日期:** 2016-09-08; **修订日期:** 2016-12-03

**通信作者:** 陈云翔,男,教授,博士生导师, E-mail: cyx87793@163.com。

**引用格式:** 董骁雄,陈云翔,王莉莉,等. 基于备件保障概率的备件库存限额确定方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017,49(3):447-452. DONG Xiaoxiong, CHEN Yunxiang, WANG Lili, et al. Inventory limitation method for spare parts inventory based on equipment fill rate[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(3):447-452.

故障规律难以掌握,备件需求的不确定性较大。

为解决上述装备研制阶段的备件需求确定问题,本文采用数学解析方法,通过建立装备完好率与可用度、可用度与平均故障停机时间、平均故障停机时间与备件保障概率之间的关系,根据装备完好率要求,根据给定必须满足的装备完好率的区间要求,确定装备系统备件保障概率,运用 Delphi 法对装备分系统和 LRU 的备件保障概率进行分配,最终确定相应的备件库存限额标准。从而使得系统各要素及参数的设计能够更好地契合装备完好率要求,并增强了备件需求量预测方法在装备研制阶段的可操作性。

## 1 满足装备完好率要求的备件保障概率确定

装备完好率是影响飞机使用的重要因素,衡量装备的技术状况和管理水平,以及装备对作战、训练、执勤的可能保障程度,制定装备使用计划的依据之一<sup>[7]</sup>。有效提高和保持装备完好率对于满足装备使用需求,确保部队训练和作战任务的完成具有重要意义。部件故障、缺少备件将会降低装备的完好率,从而对装备执行任务产生影响。因此,要保证装备满足规定的完好率要求,必须确保备件库存达到一定的备件保障概率。要推导出装备完好率与备件保障概率的关系,首先要推导出装备完好率与平均故障停机时间、平均故障停机时间与备件保障概率的关系。本文以飞机装备为例进行分析,其他装备可采用同样方法进行分析。

### 1.1 基于装备完好率的平均故障停机时间确定

飞机可用度是飞机可用性的概率度量,是飞机在任一随机时刻需要完成作战飞行任务时,在任务开始时刻处于可工作或可使用状态的概率<sup>[8]</sup>。飞机可用度是飞机在执行任务开始时刻可用程度的量度,是衡量飞机相对技术状态的标准或尺度,是描述飞机系统效能的主要参数之一,综合反映了系统的可靠性、维修性和保障性,是对一个系统可工作状态的综合描述。飞机可用度的计算公式一般为

$$A_0 = \frac{\text{飞机可用时间}}{\text{总时间}} = \frac{\text{飞机可用时间}}{\text{飞机可用时间} + \text{飞机不可用时间}} \quad (1)$$

航空兵部队典型的任务周期就是一个飞行日,所以可用度通常用飞行日平均可用时间与总时间的比值来计算

$$A_0 = \frac{\text{飞行日可用时间}}{\text{飞行日总时间}} \quad (2)$$

图1给出飞行日的时间组成。

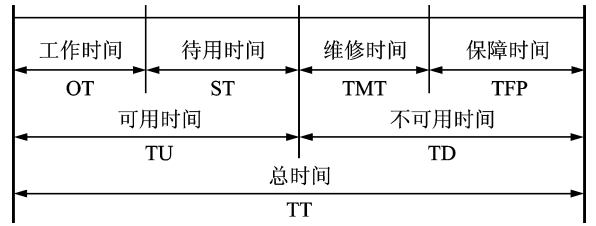


图1 飞行日的时间组成

Fig. 1 Time of flying days

将各有关时间代入式(2),就得到飞机可用度的详细计算公式

$$A_0 = \frac{TU}{TT} = \frac{TT - TD}{TT} = \frac{OT + ST}{OT + ST + TD} \quad (3)$$

式中:TT为总时间;TU为飞机可用时间;TD为飞机不可用时间,TD=TMT+TFP;ST为规定期间内飞机备用时间(没有使用但实际可用的时间);OT为规定期间内飞机飞行时间;TFP为总飞行保障时间(包括直接机务准备时间、再次出动机务准备时间和飞行后工作时间);TMT为规定期间内总维修时间,TMT=MDT+TPM,是不可用时间。其中:MDT为规定期间内总故障维修停机时间;TPM为规定期间内总预防性(计划)维修时间(包括换季、定检、机械日、特定检查、预先机务准备等工作时间)。

设规定期间内飞机发生故障次数为 $r$ ,则 $r = OT/MFHBF$ ,所以规定期间内总故障停机时间MDT可用式(4)计算

$$MDT = \frac{OT}{MFHBF} \times DTF \quad (4)$$

式中:MFHBF为平均无故障飞行小时;DTF为平均故障停机时间。因此,不可用工作时间TD可用式(5)计算

$$TD = \frac{OT}{MFHBF} \times DTF + TPM + TFP \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),可得到飞机使用可用度的最终计算公式

$$A_0 = \frac{TU}{TT} = \frac{TT - TD}{TT} = 1 - \frac{TD}{TT} = 1 - \frac{OT \times DTF}{TT \times MFHBF} - \frac{TPM}{TT} - \frac{TFP}{TT} \quad (6)$$

$$\text{通过上述的需求指标定量确定模型可知} \\ DTF = [(1 - A_0) \times TT - TPM - TFP] \times \frac{MFHBF}{OT} \quad (7)$$

飞机在一段时间内平均可用度 $A_0$ 为

$$A_0 = \frac{\text{完好飞机架日} \times \text{完好飞机日可用时间}}{\text{实有飞机架日} \times \text{日总时间}} = \frac{\text{完好飞机架日}}{\text{实有飞机架日}} \times \frac{\text{完好飞机日可用时间}}{\text{日总时间}}$$

$$A_H \times A_D \quad (8)$$

飞机完好率是指在一定时限内,可执行飞行任务的飞机数占实有飞机数的比率<sup>[7]</sup>。飞机完好率  $A_H$  的统计公式为

$$A_H = \frac{\text{实有飞机架日} - \text{不完好飞机架日}}{\text{实有飞机架日}} = \frac{\text{完好飞机架日}}{\text{实有飞机架日}} \quad (9)$$

$A_D$  表示完好假日飞机可用度,是完好飞机日可用时间与日总时间之比

$$A_D = \frac{\text{完好飞机日可用时间}}{\text{日总时间}} \quad (10)$$

结合式(8~10),于是有

$$DTF = [(1 - A_H \times A_D) \times TT - TPM - TFP] \times \frac{MFHBF}{OT} \quad (11)$$

## 1.2 基于平均故障停机时间的备件保障概率确定

平均故障停机时间(DTF)指从部件发生故障到故障完全排除、飞机恢复完好的平均时间。这一指标综合反映飞机可靠性水平、维修性水平、部队维修能力及备件保障能力。影响 DTF 的因素一是备件保障概率  $P$ ,指在规定的周期内,备件现存量可以满足需求的百分比;二是备件平均供应反应时间 MSRT,指从基层级提出备件需求至备件运抵基层级的平均时间,在装备研制阶段可以根据备件供应点布局进行初步预计<sup>[9-11]</sup>

$$DTF = T_1 + T_2 + (1 - P) \times MSRT \quad (12)$$

式中:DTF 为平均故障停机时间; $T_1$  为部件的拆装时间; $T_2$  为各种行政延误时间; $P$  为备件保障概率;MSRT 为备件平均供应反应时间。

备件保障概率  $P$  也可定义为组成装备的所有 LRU 备件满足装备需求的概率,它存在于装备功能组成分解结构中的不同层次,如系统级、分系统级和 LRU 级。因此,装备系统的备件保障概率可以按照装备功能组成分解结构自上而下分配至 LRU 级别。

通过联立式(11,12)即可得到飞机完好率  $A_H$  与备件保障概率  $P$  的对应关系。

由以上分析可看出,平均故障停机时间 DTF 受诸多因素的影响,但其主要影响因素是备件保障水平,也就是平均备件调拨时间与备件保障概率。

## 2 基于 Delphi 法的备件保障概率分配

通过上一节的分析可知,在给定飞机完好率的基础上,则可计算出备件保障概率值。要得到各类备件的需求量,则需先将备件保障概率分配给对应的各类备件。

### 2.1 备件保障概率分配的影响因素分析

进行备件保障概率的分配,必须充分分析其影响因素。备件保障概率的主要影响因素有:

(1)备件需求率。备件需求率主要由设备的故障率及单机安装数决定,设备的故障率越高、单机安装数越多,则它的需求率越高,因此需要更高的备件保障概率。

(2)重要度等级。重要度等级表示设备的最高严酷度等级,是表征单元故障所导致的最坏后果,可通过 FMEA 获取。重要度等级越严重,就越应该考虑备件的配置。

(3)维修站点布局。备件的供应要受维修站点布局的制约,从基层级提出备件需求至备件运抵基层级,这个时间直接影响到备件保障概率。

(4)维修能力。修复时间作为维修能力的重要指标,主要受到维修级别、维修人员技术水平及备件供应等约束,因此,修复时间也直接影响到备件保障概率。

### 2.2 各级备件保障概率分配

由于分系统和 LRU 结构上有很大差异,并且有不同的特性,本文采取分层分配的方法,即将分配过程分为系统到分系统,分系统到 LRU 两个层次。

#### 2.2.1 系统保障概率

根据用户需求和装备研制要求中规定的飞机完好率  $A_H$ 、飞机使用可用度指标  $A_D$ 、使用计划中的总时间 TT、规定期间内飞机飞行时间 OT;规定期间内总预防性(计划)维修时间 TPM、总飞行保障时间 TFP;从可靠性维修性设计数据中直接获取平均无故障飞行小时 MFHBF,部件的拆装时间  $T_1$ ,备件下送时间  $T_2$ ,各种行政延误时间  $T_3$ ,备件平均供应反应时间 MSRT,代入式(11,12)得到系统保障概率。

#### 2.2.2 分系统保障概率

(1)由于研制早期信息较少,机载设备寿命指标不明确,故障规律难以掌握,在装备的方案论证阶段,常采用等分配法确定各分系统的备件保障概率,设各分系统的备件保障概率为  $P_i$ ,则系统的备件保障概率  $P$  为

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (13)$$

因而,组成系统的每一个分系统的备件保障概率为

$$P_i = P^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

(2)随着研制阶段的进展,到了详细设计阶段,故障率、重要度等级、维修站点布局和维修能力等信息可逐渐确定,此时,可以采用 Delphi 分配法确

定各分系统的保障概率  $P_i$

$$P_i = P \left( 1 - \frac{k_i}{\sum_{i=1}^m k_i} \right) \quad (15)$$

式中:  $k_i$  为第  $i$  个分系统的期望因子值,  $k_i = r_i \times (k_{i1} + k_{i2} + k_{i3} + k_{i4}) + (1 - r_i)(k_{i1} + k_{i2} + k_{i3})$ 。其中  $r_i$  为第  $i$  个分系统中可修产品的比例,  $k_{ij}$  为第  $i$  个分系统的因子值。各因子参考值见表 1。

表 1 分配影响因素及因子参考值

Tab. 1 Distribution factors and factors for reference

需求率因子 $k_{i1}$	
低	1
中	8
高	15
重要度等级因子 $k_{i2}$	
低	1
中	8
高	15
维修站点布局因子 $k_{i3}$	
$k_{i3} = \frac{\text{MSRT}_i}{\max_i \text{MSRT}_i} \times 10$	MSRT <sub><i>i</i></sub> 为第 <i>i</i> 类分系统或备件的平均供应反应时间
维修能力因子 $k_{i4}$	
$k_{i4} = \frac{\text{MTTR}_i}{\max_i \text{MTTR}_i} \times 10$	MTTR <sub><i>i</i></sub> 为第 <i>i</i> 类分系统或备件的平均修复时间

注:表中各个加权因子取值范围的不同反映了各分配因素的重要程度和相关程度的差异,取值范围可根据在研装备的具体情况设定,有着很大的灵活性。

### 2.2.3 LRU 保障概率

(1) 确定各类不可修 LRU 的备件保障概率

若第  $i$  个分系统的第  $j$  类 LRU 是不可修件,则它的保障概率为

$$P_{ij} = (P_i^{1-r_i}) \left( 1 - \frac{k_i}{\sum_{i=1}^m k_i} \right) \quad (16)$$

式中:  $I_1$  为不可修 LRU 的种类数;对于不可修件,其因子为  $k_i = k_{i1} + k_{i2} + k_{i3}$ ;  $P_i^{1-r_i}$  为不可修 LRU 的备件保障概率。

(2) 确定各类基层可修 LRU 的备件保障概率

若第  $i$  个分系统的第  $j$  类 LRU 是可修件,则它的保障概率为:

$$P_{ij} = (P_i^{r_i}) \left( 1 - \frac{k_i}{\sum_{i=1}^m k_i} \right) \quad (17)$$

式中:  $I_2$  为可修 LRU 的种类数;对于可修件,其因子为  $k_i = k_{i1} + k_{i2} + k_{i3} + k_{i4}$ ;  $P_i^{r_i}$  为不可修 LRU 的备件保障概率。

## 3 基于保障概率的备件数量确定

通过以上分析,在考虑飞机完好率的基础上确定备件保障概率,并根据对基于历史数据的故障率曲线的拟和,确定出备件的寿命分布,即可以求出

备件的需求量。下面重点讨论备件寿命服从指数分布的情况。

指数分布寿命件通常指具有恒定故障率的部件、在耗损故障前正常使用的复杂部件或由随机高应力导致故障的部件以及在一段规定的使用期内出现的故障为弱耗损型的部件。例如,某些电子元器件,其寿命分布一般按指数分布处理。

假设部件  $i$  的寿命服从指数分布,则可计算其备件数量<sup>[12]</sup>

$$P_i(x \leq S_i) = \sum_{k=0}^{S_i} \frac{(D_i t)^k}{k!} \exp(-D_i t) \geq P_{i0} \quad (18)$$

$$D_i = N_i \cdot \lambda_i \cdot Q_i \cdot U_i \cdot R_i \quad (19)$$

式中:  $P_i$  为寿命服从指数分布的部件  $i$  的需求概率;  $k$  为递增符号,可以理解为部件  $i$  的瞬时需求量,  $k$  从 0 开始逐一增加至  $S_i$  值,使得  $P_i$  大于决策前所确定的保障概率,则  $S_i$  值即为所求部件  $i$  的备件数量;  $S_i$  为部件  $i$  的故障备件数量;  $P_{i0}$  为部件  $i$  的备件保障概率;  $D_i$  为部件  $i$  的需求率;  $Q_i$  为装备使用数量;  $U_i$  为部件  $i$  的利用率因子;  $R_i$  为部件  $i$  的拆卸率因子;  $N_i$  为单个部件  $i$  的机用件数;  $\lambda_i$  为部件  $i$  的故障率;  $t$  为累积工作时间,应按不同情况分别处理:

(1) 对于不可修复备件,  $t$  用平均供应反应时间 MSRT 计算;

(2) 对于可修复备件,又分为两种情况:①基层级更换,后送基地级修复,此时  $t$  按修理周期内部件累积工作时间计算,修理周期取值一般比装备保证期可以短很多(例如 3~6 个月),但要注意周期(日历时间)也不能太短,以保证基地级不会出现待修备件排队现象;②在基层级对该部件修复,此时当满足平均故障间隔时间(Mean time between failure, MTBF<sub>*i*</sub>)远大于该部件的平均修复时间(Mean time to repair, MTTR<sub>*i*</sub>)时,在至少备一个供换件修理的条件下,用该部件的 MTTR<sub>*i*</sub> 代替公式中的  $t$ ,即用 MTTR<sub>*i*</sub> 代替周转时间内的部件累计工作时间。在两种情况下均不考虑可修复件可能出现的因不值得再修复的报废问题。

根据上述分析的基于备件保障概率的备件库存限额确定的基本内容,其确定的流程如图 2 所示。

## 4 实例分析

### 4.1 案例背景

假设某型号飞机系统主要分为动力系统、机载设备和液压系统 3 部分,动力系统的 LRU 为发动机、辅助动力装置和燃油装置,机载设备的 LRU

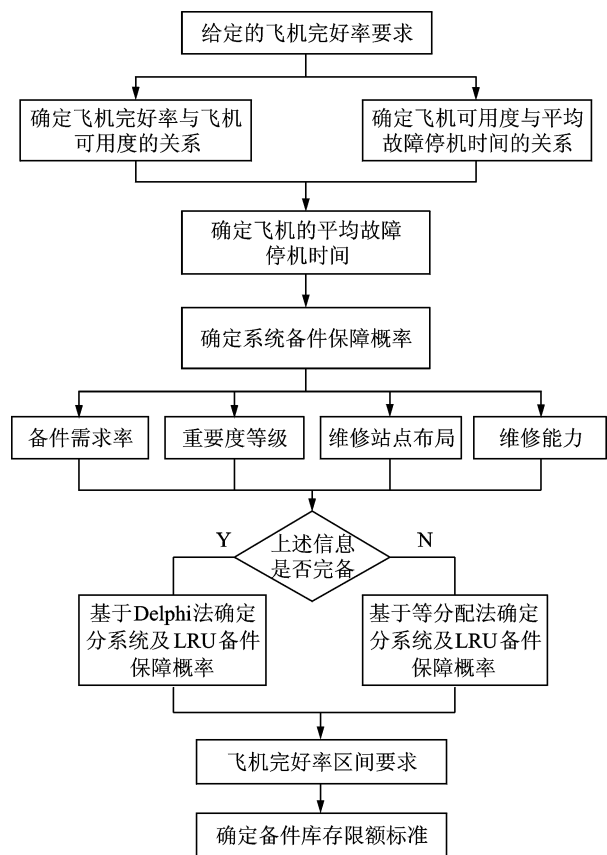


图 2 基于备件保障概率的备件库存限额确定流程

Fig. 2 Inventory limitation process for spare parts based on equipment fill rate

为电源装置、座舱环境控制装置和引气装置, 液压系统的 LRU 为液压油泵、阀门和动作筒, 设备的故障率服从指数分布, 飞机完好率  $H$  (88% ~ 90%)、飞机使用可用度指标  $A_D$  为 85%、规定的总时间  $TT$  为 2 000 h、规定期间内飞机飞行时间  $OT$  为 1 700 h; 规定期间内总预防性(计划)维修时间  $TPM$  为 100 h、总飞行保障时间  $TFP$  为 100 h; 平均无故障飞行小时  $MFHBF$  为 8 h, 部件的拆装时间  $T_1$  为 0.5 h, 各种行政延误时间  $T_3$  为 0.6 h, 备件平均供应反应时间  $MSRT$  为 1.8 h。

各分系统及其 LRU 的相关数据信息如表 2, 3 所示, 其中, 各 LRU 的利用率因子  $U_i$  和拆卸率因子  $R_i$  均为 1。

表 2 分系统相关数据信息

Tab. 2 Subsystem related data information

分系统	可修件比例 $r_i$ / %	MSRT/ h	MSRT/ h	需求率 $d_i$ / (10 <sup>-6</sup> 次·h)
动力系统	0	1	6	9 000
机载设备	50	2	55	1 000
液压系统	0	1	12	40 000

#### 4.2 备件保障概率确定

通过联立式(11,12)即可得到系统备件保障概率  $P$  的范围为 82%~90%, 通过联立式(13,14)得到各分系统备件保障概率范围为 93%~96%。

表 3 LRU 相关数据信息

Tab. 3 Data information of LRU

LRU	单机安装数 $N_{ij}$ / 个	故障率 $\lambda_{ij}$ / (次·h)	MTTR/MSRT/ h	是否可修
发动机	2	0.028	5	0.625 是
辅助动力装置	2	0.04	4	0.875 是
燃油装置	1	0.015	18	1.25 是
电源装置	1	0.012 5	50	5 是
座舱环境控制装置	1	0.09		1.65 否
引气装置	1	0.03	15	1.55 是
液压油泵	1	0.05	30	3.75 是
阀门	5	0.01	6	0.08 是
动作筒	2	0.02	2	0.5 是

#### 4.3 备件需求量确定

通过式(16~19)并结合表 1~3 中的数据信息, 确定 LRU 的备件保障概率和库存限额, 结果见表 4。

表 4 备件需求量

Tab. 4 Spare part demand

LRU	备件保障概率 $P_{ij}$	库存限额
发动机	0.965 1~0.980 2	1~2
辅助动力装置	0.944 3~0.968 3	1~2
燃油装置	0.949 1~0.971 0	1~2
电源装置	0.957 4~0.975 8	2~3
座舱环境控制装置	0.951 2~0.972 2	1
引气装置	0.949 8~0.971 4	2
液压油泵	0.977 0~0.987 0	4~5
阀门	0.947 7~0.970 2	1~2
动作筒	0.934 1~0.962 4	1

### 5 结束语

本文针对目前飞机研制阶段飞机研制早期信息较少、备件需求确定方法与战备完好性指标相脱节、备件需求的不确定性较大的实际问题, 通过建立飞机完好率、可用度、平均故障停机时间与备件保障概率之间的关系, 确定飞机系统备件保障概率, 结合备件需求率、重要度等级、维修站点布局、维修能力等信息, 运用 Delphi 法对飞机分系统和 LRU 的备件保障概率进行分配, 根据给定必须满足的飞机完好率的区间要求, 确定相应的备件库存限额标准, 为装备研制阶段的备件需求确定问题提供了一种有效解决方法。

#### 参考文献:

[1] 贾治宇, 王立超, 王乃超, 等. 基于停机时间的复杂系统维修资源配置模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10):2211-2215.  
JIA Zhiyu, WANG Lichao, WANG Naichao, et al. Maintenance resources configuration model for com-

- plex system based on downtime[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(10):2211-2215.
- [2] 倪现存, 左洪福, 陈凤腾, 等. 民机周转备件预测方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(2): 253-256.  
NI Xiancun, ZUO Hongfu, CHEN Fengteng, et al. Civil aircraft rotatable spare part forecasting[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(2): 253-256.
- [3] SHERBROOKE C C. Optimal inventory modeling of systems mutli-echelon techniques[M]. 2nd ed. American: John Wiley and Sons, 2004:57-71.
- [4] 孙蕾, 左洪福, 刘伟, 等. 基于 VARI-METRIC 的民机关键 LRU 多级库存优化配置模型[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(4):975-979.  
SUN Lei, ZUO Hongfu, LIU Wei, et al. LRU multi-echelon inventory optimal model for aircraft parts based on VARI-METRIC model[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(4):975-979.
- [5] 陶小创, 郭霖瀚, 肖波平, 等. 基于备件保障概率分配的备件需求量预测模型[J]. *兵工学报*, 2012, 33(8):975-979.  
TAO Xiaochuang, GUO Linhan, XIAO Boping, et al. Demand prediction model for spare parts based on fill rate allocation[J]. *Acta Armamentar*, 2012, 33(8):975-979.
- [6] 王乃超, 康锐. 基于备件保障概率的多级库存优化模型[J]. *航空学报*, 2009, 30(6): 1043-1047.  
WANG Naichao, KANG Rui. Optimization of multi echelon repairable item inventory systems with fill rate as objective[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(6): 1043-1047.
- [7] 全军军事术语管理委员会. 中国人民解放军军语[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.  
Army Military Terminology Management Committee. *The Chinese People's Liberation Army Troops* [M]. Beijing: Military Science Press, 2011.
- [8] 任敏, 陈全庆, 沈震, 等. 备件供应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [9] 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.
- [10] CHELBI A, AIT-KADI D. Spare provisioning strategy for preven-tively replaced systems subjected to random failure[J]. *International Journal Production Economics*, 2001, 74(1/2/3): 183-189.
- [11] TIACCI L, SAETTA S. Reducing the mean supply delay of spare parts using lateral transshipments policies[J]. *International Journal of Production-Economics*, 2011, 133(11): 182-191.
- [12] 王乃超, 康锐. 备件需求产生、传播及解析算法研究[J]. *航空学报*, 2008, 29(5): 1163-1167.  
WANG Naichao, KANG Rui. Research on spare demand generation, transfer and analytical algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(5): 1163-1167.