

航空航天

基于 OPUS 的航空装备初始备件决策模型研究

韩光林^{1,2} 阮平南² 杨威¹

(北京航空工程技术研究中心¹, 北京 100076; 北京工业大学², 北京 100124)

摘要 在 OPUS 模型的基础上, 结合国内航空装备维修的实际情况, 合理简化、优化技术实现细节, 对模型进行适应性改进。并以某航空装备数据为实例, 结果显示, 在与实际保障方案达到相同完好率的情况下, 优化后模型所得的经费预算仅为实际保障经费的 1/2, 验证了该模型的有效性。

关键词 OPUS 模型 航空装备 初始备件 决策模型 使用可用度

中图法分类号 V267.31; **文献标志码** A

航空装备配备后通常有两年的初始保障期, 它是航空装备战斗力、保障力的形成阶段, 同时也是航空装备故障的高发期^[1], 在该阶段内维修、保养航空装备所使用的备件通常称为初始备件。由于备件采购、修理周期通常较长, 而且初始备件在整个初始保障期内往往仅采购 1 次, 因此需要预置一定规模的初始备件用于航空装备的维护保养和故障排除^[2]。而初始备件的购置经费是有限的, 因此在有限的经费条件下, 如何科学合理地规划初始备件的品种和数量, 成为初始保障期内备件决策工作的重点, 这也将直接影响着航空装备使用可用度的高低。

目前, 初始备件的决策主要依据保障经验来决定备件品种和数量, 但由于对新型航空装备缺乏保障经验, 同时新型航空装备本身的技术复杂、备件种类繁多和新研备件故障规律不确定等, 也使得研究人员难以掌握有关备件的可靠性和保障性数据, 因此造成了初始备件预置方案不科学、不合理的现象。针对这个问题, 在对国内外现有模型深入研究的基础上, 现以 OPUS10 模型为基础, 进行了适应性改进, 并通过实际数据进行了验证。

1 研究现状

1.1 国外研究现状

西方发达国家很早就进行了航空装备备件决策优化模型的研究, 积累了比较丰富的经验, 最有代表性的是美国(军)的研究, 不仅有丰富的理论成果, 而且很多成果经过了多次作战实践的检验和修正。应用较早的模型是针对消耗性备件(即一次寿命备件)管理研制的经济订货量(EOQ)模型^[3]。此后又针对可修复备件的管理, 提出了较有影响的基地存储模型^[3](base stockage model, BSM)、可修复器材管理多级模型^[4](multi-echelon technique for recoverable item control, METRLC)、飞机持续能力模型^[5](aircraft sustainability model, ASM)、以可用度为中心的库存模型^[6](availability centered inventory model, ACIM)、航空部附件送修与分配动态管理模型^[5](distribution & repair in variable environments-concept of operation, DRIVE), 以及 METRIC 模型的改进型——MOD-METRIC、Vari-METRIC 和 Dyna-METRIC 模型等。

美国几十年来在备件管理模型领域里进行了深入的研究, 并且取得了卓越的成效, 这些都为国内备件的相关研究提供了很好的借鉴。

1.2 国内研究现状

国内有关初始备件模型的相关研究大致可以

2013年6月7日收到, 9月13日修改

第一作者简介: 韩光林(1979—), 男, 河南夏邑人, 硕士研究生。研究方向: 航空装备保障。E-mail: hanguanglin@163.com。

分为两类,一类是直接采用国外的模型和技术,如周伟等基于 METRIC 模型构建的两级供应关系的装备常用备件初始配置模型^[7];肖波平等基于 OPUS 建立的民用飞机初始备件方案的优化方法^[8]。这些研究对 METRIC 及其衍生模型 OPUS 等如何在备件保障中进行实际应用,做了深入研究。另一类研究主要是借助其他理论进行一些组配方法探讨。如车飞、陈云翔运用集对-粗糙集方法构建了飞机初始备件的优化方法^[9];王慧、宁彬结合经验法和模糊评判方法研究了军用飞机初始备件的配置方法^[10];冯琦、戴伟基于维修任务和维修保障要求提出了一种初始备件设计方法^[11]。

这些研究对初始备件决策优化模型进行了有益的探索,丰富了初始备件决策优化的理论体系,但是这些研究的原理讨论较多,算法仍较为粗略,实际应用的技术细节处理涉及的较少,与初始备件保障的实际情况结合不够,模型需要的输入数据与实际保障数据存在较大差别,因此难以在航空装备备件保障领域中实际使用。

1.3 OPUS 模型简介

OPUS 数学模型是 OPUS 软件的后台数学模型,OPUS 软件是由 Sysstecon AB 公司开发研制的,自 20 世纪 60 年代以后就开始应用 METRIC 模型,并随着 METRIC 模型的发展而改进,最新版本 OPUS10 的数学模型是以 VARI-MERTIC 模型为基础,发展出的实用性更强、设置更灵活的模型。OPUS 模型主要用于备件供应保障规划决策,其考虑的因素主要包括效能、费用两大方面。其核心思想是以费用、体积为约束,以效能为目标,分析在一定费用、体积下的最佳备件保障方案。费用包括备件购置、修理、运输、储存等费用要素;效能包括装备使用可用度、备件满足率、不缺件概率等。该模型充分考虑了备件保障组织的多等级和备件本身的多层级问题,实用性更强、设置更灵活,已在很多国家得到了应用,而且实际效果也较好^[12]。

该模型通过根据基层级外场更换件(line replaceable unit, LRU)的需求量,结合备件的各种参数如修理层级、修复概率等,计算基层因修理 LRU 而产生的内场更换件(shop replaceable units, SRU)需

求量和因基层级 LRU 短缺而对基地带来的 LRU 需求量,此外,基地维修 LRU 和 SRU 的消耗也同样会带来自身的 SRU 需求。然后从基地对 SRU 的需求着手,计算后方供应渠道 SRU 数量,以及 LRU 后方送修与基层 SRU 补给延误的时间,最后计算基层 LRU 延误时间和期望短缺数,并由此算出飞机的可用度。

2 模型的优化和改进

由于国外很多国家可以更换的备件包括 LRU 和 SRU,而国内航空装备维修主要更换 LRU,不存在因 SRU 延误而造成的 LRU 短缺(修复延迟),因此需要对涉及 SRU 部分进行适应性改进。

2.1 基本假设

(1)只考虑可修复备件。因为不可修复备件(亦称消耗件)消耗量大、价格低,通常订货批量大,分析计算意义不大。由于初始备件主要用于装备的前两年的初始保障期,时间较短,因此不考虑备件多次修理导致报废的情况,即认为可修复备件在初始保障期内发生故障均可以修复。

(2)备件寿命服从指数分布,备件需求服从泊松分布。

(3)假定备件之间相互独立,除非一个备件是另一个备件的子产品。

2.2 备件需求量

各级备件保障部门的备件需求中,要消除 SRU 短缺造成的影响,也就是说因 SRU 延误而造成的 LRU 短缺均为 0。本研究中分三级:基层级、中继级和基地级。

基层级:基层 j 的备件年需求量为

$$m_{0j} = n\lambda t \quad (1)$$

式(1)中, n 为备件件数; λ 为备件失效率^[13]; t 为备件平均修理周转期。

中继级:中继级站点 k 的备件年需求率,等于其所保障的所有基层单位发生的对中继级 k 申请补给的备件需求之和

$$m_{0k} = \sum_{j=1}^J m_{0j}(1 - r_{0j}) = \sum_{j=1}^J n\lambda t(1 - r_{0j}) \quad (2)$$

式(2)中, r_{0j} 为故障备件在基层级 j 修复的概率。

基地级:同理,基地级保障站点备件的年需求率分别按式(2)进行计算

$$m_{00} = \sum_{k=1}^K m_{0k}(1 - r_{0k}) \quad (3)$$

式(3)中, r_{0k} 为故障备件在中继级 k 修复的概率。

2.3 备件期望短缺数

基地级的在修 LRU 件数的均值与方差分别为

$$E[X_{00}] = m_{00}T_{00} \quad (4)$$

$$\text{Var}[X_{00}] = m_{00}T_{00} \quad (5)$$

式中, T_{00} 为基地级维修站点对备件的平均维修时间。

令 f_{0k} 为基地级向中继级 k 所补给的备件数量与占基地级备件需求量的比例

$$f_{0k} = m_{0k}(1 - r_{0k})/m_{00} \quad (6)$$

中继级 k 的 LRU 供应渠道平均数的,所以其均值和方差分别为

$$E[X_{0k}] = m_{0k}[(1 - r_{0k})t_{0k} + r_{0k}T_{0k}] + f_{0k}EBO(s_{00} | E[X_{00}], \text{Var}[X_{00}]) \quad (7)$$

$$\text{Var}[X_{0k}] = m_{0k}[(1 - r_{0k})t_{0k} + r_{0k}T_{0k}] + f_{0k}(1 - f_{0k})EBO(s_{00} | E[X_{00}], \text{Var}[X_{00}]) + f_{0k}^2VBO(s_{00} | E[X_{00}], \text{Var}[X_{00}]) \quad (8)$$

式中, t_{0k} 表示中继级站点 k 向基地级申请交付 LRU 的平均延误时间; T_{0k} 表示中继级站点 k 对备件的平均维修时间。

基层级备件供应渠道平均数的均值与方差的计算原理与中继级相类似,但需要明确地规定在整个保障体系中,每个中继级保障站点与各个基层级站点之间的组织关系,基层级 LRU 供应渠道平均数的均值与方差分别为

$$E[X_{0j}] = m_{0j}[(1 - r_{0j})t_{0j} + r_{0j}T_{0j}] + f_{0j} \cdot EBO(s_{0k} | E[X_{0k}], \text{Var}[X_{0k}]) \quad (9)$$

$$\text{Var}[X_{0j}] = m_{0j}[(1 - r_{0j})t_{0j} + r_{0j}T_{0j}] + f_{0j}(1 - f_{0j})EBO(s_{0k} | E[X_{0k}], \text{Var}[X_{0k}]) + f_{0j}^2VBO(s_{0k} | E[X_{0k}], \text{Var}[X_{0k}]), j \in k \quad (10)$$

式中, f_{0j} 的含义以及计算方法与中继级相类似, $f_{0j} = m_{0j}(1 - r_{0j})/m_{0k}$, t_{0j} 为基层 j 向中继 k 申请交付 LRU 的平均延误时间; T_{0j} 为基层级维修站点 j 对 LRU 的平均

维修时间, $j \in k$ 表示中继级保障站点 k 所保障的所有基层级单位,根据保障站点之间的保障关系确定。

2.4 方案评估指标

衡量方案保障效能的高低,可以使用装备使用可用度指标,但是装备使用可用度的高低不仅和初始备件有关,而且会受到航空装备的大修和定检等因素的影响,因此,衡量初始备件保障效能的水平通常还要考虑备件的相关指标,如备件满足率等。

2.4.1 装备使用可用度

装备系统可用的前提条件是组成系统的各种备件可用,对于基层级 j ,构成装备的某项备件短缺而形成的装备可用度为

$$\begin{cases} A_j(i) = 1 - EBO(s_{0j} | E[X_{0j}], \\ \text{Var}[X_{0j}]) / N_j \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中, s_{0j} 是基层级 j 的备件库存方案; N_j 为该飞机在基层级 j 的总架数。

设飞机装备由 N 个备件组成,任何备件失效都会导致装备出现故障而不可用,因此装备使用可用度可以写为

$$A_j = \prod_{i=1}^N A_j(i) \quad (12)$$

2.4.2 备件满足率

备件满足率(fill rate)是指备件 i 发生需求而能够满足的概率,按满足次数计算。那么某备件的满足率公式为

$$F_i(s) = \sum_{k=0}^{s-1} P(k) = \sum_{k=0}^{s-1} \frac{(\lambda t)^k \times e^{-\lambda t}}{k!} \quad (13)$$

式(13)中, s 为库存数; $p(k)$ 表示发生 k 次需求的概率。西方备件保障理论通常采用此公式,它的观点认为当库存为 0 时,依据此公式计算则该项备件的满足率为 0%,因为一旦发生短缺,只有 0% 的概率能满足。但是备件满足率存在一个问题,即当 1 项备件失效率非常低时,备件即使没有库存也可能不会发生短缺,即发生 1 次需求的概率很低,因此备件满足率不能很好地反映备件 i 库存为 0 时,它不发生需求的概率有多大。而不缺件概率^[14]可以评价这一情况。因此国内的相关研究通常采用不缺件概率作为备件的评价指标。

2.4.3 不缺件概率

不缺件概率在国内也被称为备件保障概率,指备件*i*在库存为*s*时不发生备件短缺的概率,计算公式为

$$P_i(s) = \sum_{k=0}^s P(k) \quad (14)$$

备件满足率公式存在一个缺陷,即当一项备件为零时,那么依据备件满足率公式计算该项备件满足率为0,因此一旦发生短缺只有0%的概率能满足。但此时没有考虑会有多少概率发生一件需求,而不缺件概率直接计算当前库存*s*能够满足需求的概率,如库存有3个时,则不缺件概率为 $P(0) + P(1) + P(2) + P(3)$,当发生4次需求时才会缺备件;如果库存为0,不缺件概率为 $P(0)$,即当没有库存也可能不会缺备件,这个概率就是备件需求数为0时的不缺件概率。

2.5 模型算法

备件计算策略采用边际优化算法,其核心思想是从最佳效费比的角度进行备件规划。其中装备使用可用度 A_0 与系统的期望备件短缺数(expected number of back-orders, EBO)有关,使装备 A_0 达到最大等效于EBO最小,其基本方法是

$$\max A(s) \Leftrightarrow \min NOR(s) \Leftrightarrow \min E_i(s)。$$

式中, NOR 是装备不可用数量, $N_{OR} = NS \times (1 - A)$, NS 是航空装备总数量。

所以初始备件优化问题可以归结为下面的整

数规划问题

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^n (EBO)_k(S_k) \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^n S_k C_k \leq L \end{cases} \quad (15)$$

其边际优化公式为

$$\delta = \frac{EBO(s-1) - EBO(s)}{C} \Leftrightarrow \frac{\Delta A}{\Delta C} \quad (16)$$

式(16)中, δ 表示期望备件短缺数的减小值和备件单价之比; $EBO(s-1)$ 表示备件现有数量为*s*-1个时的期望短缺数; $EBO(s)$ 表示备件现有数量为*s*个时的期望短缺数; C 表示备件的单价。

3 应用举例

以某航空装备(ZB—1)为例,来检验模型的科学性和实用性。假定该装备为10架(台),每架有备件20项,装备ZB—1的初始保障期为2y(2×360 d),年总工作时间为2 000 h。备件保障单位由基地级、中继级、基层级共3级组成,各级之间申请交付的延误时间均为2 d。20项备件的详细数据如表1所示。通过边际优化算法,可以得出一系列装备使用可用度对应备件经费的保障方案,如图1所示,本文选择了装备使用可用度为90.69%,初始备件购置经费为1 226.65万元的方案,初始备件方案详细情况如表1所示。

表1 备件基本信息及保障方案数据

名称	型号	修理周期/d	单价/元	修理单价/元	失效率/ $\times 10^{-6}$	数量	满足率	不缺件概率	期望短缺数
备件1	BJ—1	90	18 100	5 430	4 150	5	99.53%	99.87%	0.00
备件2	BJ—2	90	25 200	7 560	4 900	5	99.08%	99.76%	0.01
备件3	BJ—3	90	34 500	10 350	6 950	6	99.02%	99.68%	0.01
备件4	BJ—4	90	31 000	9 300	5 600	5	98.45%	99.57%	0.02
备件5	BJ—5	90	28 800	8 640	7 800	6	98.36%	99.46%	0.02
备件6	BJ—6	90	17 700	5 310	5 250	5	98.79%	99.68%	0.01
备件7	BJ—7	90	11 600	3 480	8 300	7	99.38%	99.75%	0.01
备件8	BJ—8	90	21 500	6 450	3 700	4	98.41%	99.67%	0.02
备件9	BJ—9	90	11 200	3 360	1 400	3	99.41%	99.93%	0.01
备件10	BJ—10	90	25 300	7 590	2 100	3	98.27%	99.75%	0.02
备件11	BJ—11	120	120 000	36 000	2 400	3	94.86%	98.95%	0.05
备件12	BJ—12	120	50 000	15 000	3 800	5	98.90%	99.72%	0.01
备件13	BJ—13	120	80 000	24 000	2 500	3	94.33%	98.79%	0.06
备件14	BJ—14	120	250 000	75 000	1 900	2	85.98%	97.06%	0.14
备件15	BJ—15	120	560 000	168 000	1 850	2	86.56%	97.25%	0.13
备件16	BJ—16	120	1 520 000	456 000	2 700	1	39.44%	75.59%	0.61
备件17	BJ—17	120	840 000	252 000	3 800	3	85.50%	95.44%	0.15
备件18	BJ—18	120	2 140 000	642 000	1 600	1	57.62%	89.25%	0.42
备件19	BJ—19	120	1 240 000	372 000	2 350	1	44.50%	80.15%	0.56
备件20	BJ—20	120	630 000	189 000	3 050	2	71.70%	90.76%	0.28

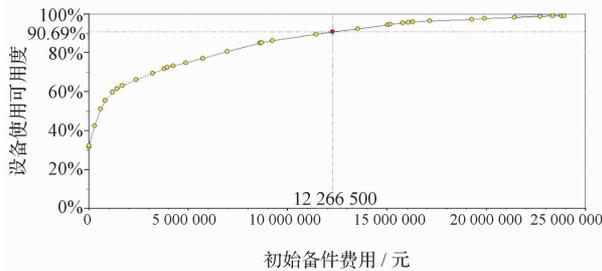


图1 备件保障费效曲线

可以看出,备件 16、18、19 由于购置数量较少,期望短缺数较高,是保障中需要重点关注的备件,在经费允许的条件下,备件管理部门可以适当增加订货量。

在实际保障情况下,如果要达到和方案同等水平的保障效能,通常,实际经费约在模型计算方案的 2 倍以上,所以模型在达到和实际保障同等效能的前提下,费用较低。同时,现有备件保障数据进行简单转化后即可作为模型的输入,所以模型也具有较好的实用性。

4 结论

根据国内的实际情况对 OPUS 模型进行了适应性改进,并对其技术实现细节进行了合理简化,使其更加符合国内航空装备初始备件保障的需要,而且能够应用于实际保障工作。该模型所有的输入参数与航空装备本身无直接关联,具有普遍性,因此也可以推广应用到其他装备的备件保障工作。

期望本文的研究能够起到一个抛砖引玉的作用,为初始备件的优化决策提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 郝杰忠,杨建军,杨若鹏. 装备技术保障运筹分析. 北京:国防工业出版社,2006
- 2 HB 7384 - 1996. 军用飞机备件配置要求. 1996
- 3 Hood W C, 贺步杰,译. 航材供应库存模型手册. 北京:蓝天出版社,1992
- 4 Sherbrooke C C. Multi echelon technique for recoverable item control. *Operations Research*,1968;16:122—141
- 5 Sherbrooke C C. Vari-METRIC: improved approximations for multi-indentured, multi-availability models. *Operations Research*,1986;34(2):311—319
- 6 Hall F, Clark A. ACIM; availability centered inventory model. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1987;247—252
- 7 周伟,郭波,张涛. 两级供应关系装备常用备件初始配置模型. *系统工程与电子技术*,2011; 33(1):89—93
- 8 肖波平,康锐,王乃超. 民航初始备件方案的优化. *北京航空航天大学学报*,2010;36(9):1057—1061
- 9 车飞,陈云翔. 飞机初始备件品种优化的集对-粗糙集方法. *教学的实践与认识*,2011;41(9):201—206
- 10 王慧,宁彬. 军用飞机初始备件配置的研究. *飞机设计*, 2012;32(5):71—75
- 11 冯琦,戴伟. 初始备件设计方法研究. *现代防御技术*, 2012;40(4):162—170
- 12 Systecon A B. OPUS10 User's Reference (ver 8.1d). Stockholm: Published by Sweden Systecon AB,2012
- 13 GJB 451A—2005 可靠性维修性保障性术语. 2005
- 14 GJB 4355—2002 备件供应规划. 2002

Research on Model About Aviation Equipment Initial Spares Decision Based on Opus

HAN Guang-lin^{1,2}, RUAN Ping-nan², YANG Wei¹

(Beijing Aeronautical Technology Research Center¹, Beijing 100076, P. R. China;

Beijing University of Technology², Beijing 100124, P. R. China)

[Abstract] Based on the OPUS model, combine with the actual situation of domestic aviation materiel repair, the model is reasonably simplified, the technical implementation details are optimized. The model is improved. Finally, by citing an aviation materiel data as an example, the result indicates that to achieve the same efficiency with the actual security scheme, the budget of the model gives is only the 1/2 of the actual funds, the model is verified as validity and rationality.

[Key words] OPUS model aircraft equipment initial spares decision model operational availability