

文章编号:

基于 OPUS 的民机初始备件方案优化

王乃超, 肖波平

(北京航空航天大学工程系统工程系, 100083)

OPTIMAL OF INITIAL SPARES IN CIVIL AVIATION

WANG Nai-chao, XIAO Bo-ping

(Dept. of System Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 如何在最少的费用支出下合理配置备件方案以提高飞机的出勤率, 获取更大的经济效益是航空公司需要迫切解决的难题。本文针对这个问题, 使用商业化的备件优化软件对某民机的初始备件方案进行了优化, 分析比较了原有方案和优化方案的异同, 并从优化思想上指出了原有方案的不足。

关键词: 优化 效能 可用度 备件 保障方案

中图分类号:

Abstract: It's a difficult problem for Airline Company on how to increase the airplane's utilization by use of minimum spare cost. To solve this problem, commercial software is recommended and it is used to optimize an airliner's initial spares support project. Comparison is made between the old project and the new one and shortages of optimal principle using by the old ones is also been illustrated.

Key words: optimal effectiveness availability spares support concept

在保证飞行安全的前提下, 利润最大化是各个航空公司的最终目标, 飞机备件对航空公司实现该目标起着重要的作用。一方面, 备件满足率高影响飞机的出勤率; 另一方面, 备件购置费用又相当的昂贵, 这两方面都影响航空公司的经济效益。所以, 每个航空公司对备件都很重视, 有专门的机构和经费用于备件的采购和管理。

初始备件^[1]指的是当使用单位首次购进飞机时, 由制造公司负责, 并在用户的协助下确定的保证期内飞机使用和维修所需备件。目前, 初始备件清单的制定大致有以下两种方式: 一种是经验法, 根据以往相似机型备件消耗的情况和经验, 以及飞机的使用要求进行制定; 一种是模型法, 根据备件的寿命分布采用相应的计算模型计算备件的需求量。对于初始备件, 经验法由于缺乏足够的使用数据和科学依据, 制定出的清单与实际的需求出入较大; 而模型法在确定寿命分布和对应的参数数值时比较困难。而且, 这两种方法都是针对每一种备件单独进行计算的, 缺乏整体上的协调和优化。为了解决这一问题, 本文先引入一个基于模型法制定的初始备件方案, 然后用OPUS10软件对该方案进行优化, 并对初始方案和优化方案进行对比分析和评价。

1、初始备件方案

在利用模型法计算备件数量时, 泊松分布计算模型在工程实践中得到了广泛的应用, 一般来说, 指数型寿命分布适用于电子产品、复杂系统及经老练试验并进行定期维修的产品, 而寿命分布为指数分布的产品在计算备件数量时使用的模型为泊松分布。对于飞机来说, 其大部分备件寿

命分布服从指数分布, 这是因为: 飞机的机载产品大部分为电子产品; 而且, 飞机在使用前各个系统做了完善的可靠性试验, 在发生耗损故障前都会进行定时维修。所以, 可以认为飞机备件的寿命分布近似服从指数分布, 可以用泊松分布模型进行备件数量计算。下面先介绍一下泊松分布备件计算模型。

泊松分布备件计算模型^[2]如下所示:

$$P_c = \sum_{j=0}^s \frac{(eNn\lambda t_c)^j}{j!} \exp(-eNn\lambda t_c) \quad (1)$$

式中: S ——飞机某零部件的备件需求量;
 e ——备件非工作消耗的修正系数;
 t_c ——初始保障期内的备件周转时间(对维修件, 取维修周转周期内的工作时间。对不维修件, 取初始保障期内的工作时间);
 λ ——可更换单元单位时间故障次数;
 P_c ——备件保障概率;
 n ——单架飞机机用数;
 N ——维修保障的飞机数量;
 j ——为递增符号, j 从 0 开始逐一增加, 直至某 S 值, 使得 $P \geq$ 规定的保障概率, 该 S 值即为所求备件需求量。

当 $eNn\lambda t_c > 5$ 时, 备件需求量可以用正态分布近似计算, 计算公式简化为:

$$S = eNn\lambda t_c + u_p \sqrt{eNn\lambda t_c} \quad (2)$$

式中: u_p ——正态分布分位数, 可从 GB4086.1 统计分布数值表正态分布分位数表中查出。

影响初始备件项目的因素^[3]包括备件的修复特性、首翻期、“0”备件保障概率、重要度、价格特性、可获得性等，在综合考虑这些影响因素的基础上，通过逻辑决断图确定初始备件项目清单；然后，根据通过相似机型的使用数据、预计数据和相似设备经专家打分后的折算数据等获得备件的可靠性数据，利用泊松分布备件计算模型进行备件数量的计算，获得初始备件清单。对于民机，备件的价格、满足率、可获得性以及特

定备件方案下系统可达到的出勤率都是运营商需要首先考虑的因素。

假设某航空公司拥有某型飞机 24 架，每年计划飞行 2000h，保证期为 1.5 年。潜在的初始备件项目为 26 项。在充分考虑影响保证期内飞机备件需求的各种因素后，对 26 项潜在的初始备件项目进行计算，计算公式如公式（1）、

（2）所示，得到初始备件清单，如表 1 所示：

表 1 初始备件方案

备件名称	MTBF (1/M)	MTTR (h)	TAT (d)	单机安装数	计划保障概率/%	价格/元	库存数量 (外场)
襟翼操纵开关	12500.000	1	30.0	1	0.95	3000.000	50
直流发电机控制装置	1129.180	1	45.0	3	0.95	4725.000	23
应急照明灯	1250.000	1	30.0	3	0.95	9999.000	18
交流发电机控制器	1129.180	1	45.0	2	0.95	5513.000	16
旅客面罩	364.219	1	45.0	6	0.95	1751.000	16
火警控制盒	1053.960	1	45.0	2	0.95	12790.000	15
飞行慢车位置电磁制动锁	1562.500	1	30.0	2	0.95	6000.000	15
后继电器盒	305.437	1	30.0	1	0.95	31218.000	14
滚动轴承	840.054	1	30.0	4	0.95	6000.000	13
音频插孔板	560.036	1	45.0	3	0.95	4474.000	13
输油控制开关	333.333	1	30.0	5	0.95	18000.000	13
单向变流器	126.301	1	30.0	18	0.95	3880.000	12
单向活门	333.333	1	30.0	4	0.95	1320.000	11
处理器	800.000	1	45.0	1	0.95	128264.000	10
显示器 1	200.000	1	45.0	4	0.95	14292.000	10
出口指示灯 45	305.437	1	30.0	4	0.95	1860.000	10
出口指示灯 46	305.437	1	30.0	4	0.95	900.000	10
显示器 2	333.333	1	45.0	2	0.95	13000.000	9
自动定向仪接收机	333.333	1	45.0	2	0.95	4586.000	9
测距器收发机	333.333	1	45.0	2	0.95	8501.000	9
CTL-62 控制盒	333.333	1	45.0	2	0.95	2119.000	9
控制盒转换器	333.333	1	45.0	2	0.95	680.000	9
发动机故障显示器	1562.500	1	30.0	1	0.95	14000.000	9
警铃	1000.000	1	30.0	1	0.95	99.000	9
主机轮轮毂	547.046	1	30.0	4	0.95	75500.000	9
定量器	508.543	1	30.0	4	0.95	600.000	9

注：由于缺少原始数据，表 1 中假定所有 LRU 的 MTTR 均为 1h，该假设不影响优化方案的合理性

2、OPUS10 备件优化原则

OPUS10 是瑞典 SYSTECON 公司开发的一款成熟的商品化备件优化软件，该软件优化的原则是费效比。OPUS10 假定产品的寿命分布服从指数分布，并考虑系统的利用率、维修设备费用，但忽略维修设备对产品维修延误造成的影响及运输费用对保障费用的影响。

OPUS10 费用评价参数包括保障费用及其分解费用，综合权衡系统或分系统内各部件的故障率、价格等特性以及部件的利用率、使用环境等影响因素对整个系统或分系统可用度的影响大小来确定最优的备件购买量及其储备地点。在以往的工程实践中，费用要求和可用度指标是很难同时达到的。一方面，费用和可用度没有直接的联系，确定指标时很难将两者结合起来；另一方面，人为因素具有不确定性，确定最优的备件方案时容易受到个人经验和外来因素影响，特别是对多个备选方案进行权衡时，凭借经验很难做出正确的选择。OPUS10 很好地解决了这两方面的问题，使得备件优化方案合理、有效。特别是可

以在确定费用要求的条件下优化备件方案，使得等费用条件下系统可用度最大，这点对于评价和优化民机备件方案非常有用。

下文对 OPUS10 计算系统使用可用度、寿命保障费用及其优化原理进行简要介绍。

在 OPUS10 中，使用可用度¹

$$A_o = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + T_{MTTR} + T_{MLD}} \quad (3)$$

式中： T_{BF} ——平均故障间隔时间

T_{MTTR} ——平均修复时间

T_{MLD} ——平均后勤延误时间（包括 WT（平均等待备件时间）、管理延误时间等）

其中：

$$WT = \frac{NBO}{DRT} \quad (4)$$

¹ 使用可用度考虑系统的固有可靠性、维修性及测试性、预防性维修和修复性维修，以及管理、使用和保障等各种因素的影响。根据所获得数据的不同， A_o 可以有不同的计算公式。

式中: DRT —— 备件需求率
 NBO —— 备件延期交货量

DRT 可以从下列相关因素计算得出: 系统或产品的故障率、平均维修间隔时间、系统中的产品个数、系统总数、系统利用率因子、环境因子、更换率因子、故障率应用因子、产品预防性维修更换比以例及其它外在需求。 DRT 的详细计算过程可参见参考文献[4]。

NBO 和备件库存量 s 相关, 即:

$$NBO = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s) \Pr\{X=x\} \quad (5)$$

式中: x —— 备件需求量
 s —— 备件库存量
 $\Pr\{\}$ —— 备件需求量为 x 的概率

备件库存量 s 又和产品的平均修复时间、维修周转期、管理延误时间等相关, 其详细计算过程可参见文献[5]。整机的平均等待备件时间可由各产品平均等待备件时间 (WT) 加权平均得出, 加权系数可由各产品备件需求率与所有产品总的备件需求率之和之比求出。本案例中由于没有管理延误时间的统计数据, 因而近似用 WT 代替 T_{MLD} 。

在 OPUS10 中, 寿命保障费用

$$LSC = CI + CN \quad (6)$$

式中: LSC —— 寿命保障费用
 CI —— 一次性总投资额
 CN —— 所有年度花费的现值之和

对 CI 做进一步分解, 可得:

$$CI = CIR + CID + CIX \quad (7)$$

式中: CIR —— 对可修件的投资额
 CID —— 对不可修件的投资额
 CIX —— 对保障设备的投资额

对 CN 做进一步分解, 可得:

$$CN = CND + CNO + CNS + CNC + CNP + CNX \quad (8)$$

式中: CND —— 报废件的现值
 CNO —— 再订购费用的现值
 CNS —— 贮存费用现值
 CNC —— 修复性维修花费现值
 CNP —— 预防性维修花费现值
 CNX —— 保障设备现值

在本案例中由于相关费用数据较少以及产品类型界定, 只考虑了可修件产品价格一项费用数据。

OPUS10 进行备件优化的原理步骤如下:

$$\begin{aligned} \min NOR(s) &\Leftrightarrow \max A(s) \Leftrightarrow \\ \min MDT(s) &\Leftrightarrow \min WT(s) \Leftrightarrow \\ \min NBO(s) &\quad (9) \end{aligned}$$

式中: s —— 库存量
 NOR —— 不可用系统数目
 MDT —— 维修停机时间

由于可用度和效能成正比, 所以从推导式 (8) 可以看出, 要使系统效能最大, 就必须使 A 最大, 也就是必须使 NBO 最小。所以备件最优化问题可以归结为下面的整数规划:

$$\min \sum_{k=1}^n B_k(S_k), \quad s.t. \quad \sum_{k=1}^n S_k C_k \leq L \quad (10)$$

式中: k —— 备件类别编号
 S_k —— 第 k 类备件库存量
 B_k —— 第 k 类备件的延期交货量
 C_k —— 第 k 类备件的价格
 L —— 费用约束

基于上述优化思想, OPUS10 计算备件优化方案的步骤如下:

第一步, 针对系统中的每个部件, 记初始库存量为“0”, 记为 S_0 , 计算此时的系统可用度 A_{10} 和寿命保障费用 LSC_0 ; 第二步, 依次针对单个部件增加一个库存量并保持其余部件库存量不变, 分别计算出 A_{11} 和 LSC_{11} 、 A_{12} 和 LSC_{12} 、 \dots A_{1n} 和 LSC_{1n} 等; 第三步, 计算系统可用度的增加量 ΔA_{1k} ($\Delta A_{1k} = A_{1k} - A_{11}$, $k = 0, 1, \dots, n$), 以及费用增加量 ΔC_{1k} ($\Delta C_{1k} = LSC_{1k} - LSC_0$, $k = 0, 1, \dots, n$), 找出 $\Delta A_{1k} / \Delta C_{1k}$ ($k = 0, 1, \dots, n$) 的最大值, 把对应产品的库存量加 1 (最大值对应的产品就是增加备件量后能够得到最大费效比的产品, 也就是增加备件量时应最先考虑的产品), 记此时的库存方案为 S_1 ; 第四步, 在第三步得出的备件库存方案 S_1 基础上, 返回继续执行第二步。依次类推, 可以得出库存方案 S_2 、 $S_3 \dots S_k$ 。对应每种库存方案, 都可以计算出其对应的费用和可用度, 并对费用—可用度图中的一个点, 连接这些点就可得到费用—可用度曲线。曲线上的每个点都对应一个库存方案, 这些方案就是使得系统可用度最大的库存方案。

举例: 假设某系统包括三个 LRU, 分别是 LRU_1 、 LRU_2 和 LRU_3 。依据上面的原理, 第一步, 假定 LRU_1 、 LRU_2 和 LRU_3 的库存量均为零, 记作 S_0 , 计算此时的使用可用度 A_0 和寿命保障费用 LSC_0 ; 第二步, 在 S_0 的基础上, 保持 LRU_2 和 LRU_3 的库存量不变增加 LRU_1 的库存量 (加 1), 计算此时的系统使用可用度和寿命保障费用, 分别记作: A_{11} 和 LSC_{11} 。针对 LRU_2 和 LRU_3 , 进行同样操作, 可以得到 A_{12} 、 LSC_{12} 和 A_{13} 、 LSC_{13} ; 第三步, 比较

$$\frac{A_{11} - A_0}{LSC_{11} - LSC_0}, \quad \frac{A_{12} - A_0}{LSC_{12} - LSC_0}, \quad \frac{A_{13} - A_0}{LSC_{13} - LSC_0}$$

的大小, 找出比值最大的一个,

增加其对应部件的备件数量 (加 1), 记增加后的库存方案为 S_1 ; 第四步, 在 S_1 的基础上, 继续

第二步，依次类推，便可得出 S_2 、 S_3 ... S_n 等备件方案，这些备件方案均是最优的备件方案，对应的曲线便是费用—使用可用度曲线。

3、优化结果及分析

按表 1 把民机的可靠性、维修性数据以及备件价格等参数输入 OPUS10，得到原备件方案的系统使用可用度 $A_0=0.5494$ ， $LSC=4229950$ 元。

为了保持可比性，保持原有参数条件不变，用 OPUS10 重新规划初始备件方案。计算出来的费用可用度曲线图如下图 1 所示：

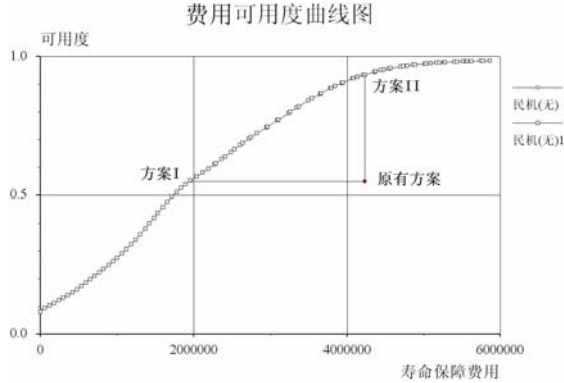


图 1 费用—可用度曲线图

图 1 中的曲线是 OPUS10 给出的费用—可用度曲线，图中横坐标表示费用，纵坐标表示可用度。图中每个点都代表一种备件库存方案，在图中任选一点，那么此点的横坐标代表此种库存方案的总费用，纵坐标代表在此库存方案下系统所能达到的最大可用度。曲线右下方的点是根据原有备件方案计算出来的可用度、费用坐标点。根据这张图，可以找到两个很特殊的点，一个是曲线上与原有备件方案计算点具有相同横坐标的点，即和原有方案具有相同费用的点；另一点是曲线上与原有备件方案计算点具有相同纵坐标的点，即和原有方案具有相同可用度的点。这两个点所代表的备件库存方案分别用 I 和 II 表示。

优化方案和原有方案的比较如下所示：

(1) 相同费用

备件方案 I: $LSC=4\ 229\ 305$ 元, $A_0=0.934\ 9$

原有备件方案: $LSC=4\ 229\ 950$ 元, $A_0=0.549\ 4$

可用度提高大约: $0.385\ 5$

(2) 相同可用度

备件方案 II: $LSC=1\ 954\ 736$ 元, $A_0=0.552\ 5$,

原有备件方案: $LSC=4\ 229\ 950$ 元, $A_0=0.549\ 4$

费用大概节省: $2\ 275\ 214$ 元

具体的备件配置方案表如附表 2 所示。

从附表 2 可以看出，优化后的方案充分体现了 OPUS10 的优化准则：费效比最大原则。例如对于单价较低的备件：如襟翼操纵开关等尽量多

的储备；对于单价较高、故障率比较高但总的安装数量不同的备件，如主机轮轮毂、后继继电器盒等则按照优化准则适当储备；对于单价较高、故障率比较低的备件则尽量少储备，如处理器等。当然这些都是 OPUS10 从系统层次综合考虑得出的结论，单从产品层次很难得出类似的方案。

4. 结论

从优化方案和原有方案对比可以发现，原有库存方案只是根据备件的计划保障概率计算各备件的需求量，没有综合考虑备件数量对系统可用度的贡献和影响，割裂了单个备件费用和总费用支出的关系，使得：初始备件方案和优化方案相比，在相同的费用条件下飞机的使用可用度比优化方案低；而在相同的使用可用度条件下飞机的备件费用又比优化方案高。这两种结果对于航空公司来说是很难接受的。因此，优化方案对于航空公司节约投资、提高飞机出勤率都有很大帮助。

由于目前还没有足够的民机使用数据来验证优化方案的有效性，现在还不能对优化方案的实效做出判断，一旦有了足够多的数据，可以从以下几个方面衡量优化方案的有效性：寿命保障费用、出勤率、备件短缺风险、备件延期交货量，这些都是航空公司最为关注的关键性指标，对于验证优化方案的有效性和合理性非常具有说服力。

附表 2 优化方案表

备件名称	优化方案 I	优化方案 II
	外场库存/个	外场库存/个
襟翼操纵开关	75	68
直流发电机控制装置	34	29
应急照明灯	25	21
交流发电机控制器	24	20
旅客面罩	25	22
火警控制盒	21	17
飞行慢车位置电磁止动锁	23	19
后继继电器盒	3	1
滚动轴承	24	20
音频插孔板	20	16
输油控制开关	12	9
单向变流器	18	15
单向活门	14	11
处理器	6	0
显示器 1	10	7
出口指示灯 45	12	10
出口指示灯 46	13	11
显示器 2	9	6
自动定向仪接收机	10	8
测距器收发机	9	7
CTL-62 控制盒	11	9
控制盒转换器	12	10
发动机故障显示器	12	9
警铃	13	12
主机轮轮毂	13	0
定量器	19	17

参考文献

[1] 《可靠性维修性保障性术语集》编写组编，可靠性维修性

- 保障性术语集[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.1
(Reliability, Maintainability & Supportability
Glossary Collection. Reliability, Maintainability
& Supportability Terms. Beijing: National Defense
Industry Press, 2001.1)
- [2] 贺国芳编. 可靠性数据处理与寿命评估[M]. 北京: 北京
航空航天大学出版社, 1991.10
(He G F. Reliability Data Dispose and Life
Evaluation)
- [3] 杨为民主编. 可靠性·维修性·保障性总论[M]. 北京: 国
防工业出版社, 1995(2000.4重印)
(Yang W M. Reliability, Maintainability & Support-
ability Pandect. Beijing: National Defense Indus-
try Press, 1995)
- [4] Algorithms and methods in OPUS10 Version 5.3[S],
Stockholm: Systecon AB, 2004-05-04
- [5] OPUS10 USER' S REFERENCE-SYSTEMS AND LOGISTICS
ENGINEERING Version 5[S], Stockholm: Systecon AB,
2002.11

作者简介:

王乃超 (1978—), 男, 河南郑州人, 北京航空航天大学
工程系统工程系, 博士研究生。主要研究方向为综合
保障工程。

电话: 010-82338236, 电子邮件:

tian_jia_zhuang@126.com

肖波平 (1968—), 男, 北京航空航天大学系统工程
系, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为综合保障工
程。

电话: 010-82314133, 电子邮件: xbp@buaa.edu.cn
