

# 考虑航材共享的国产民机航材配置技术研究

冯蕴雯<sup>1</sup>, 潘维煌<sup>1</sup>, 刘佳奇<sup>1</sup>, 路成<sup>2</sup>, 薛小锋<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.复旦大学 航空航天系, 上海 200433)

**摘 要:** 为了提升国产民机国内外市场的综合后勤保障能力,降低航材配置数量与航材运营保障成本,提出了基于航材共享模式,考虑各航站航材库存量与响应时间的航站组航材配置方法。采用泊松过程描述航材在研究时间内不同需求量的概率;依据航站间的运输时间关系构建航材共享组;采用边际分析法对共享组内所有航站中,航材期望短期量最大的航站进行航材配置,直至满足机队可用度需求,实现航材共享下的航材配置技术。研究表明:在规定机队可用度下,采用航材共享条件下航材配置技术可以减少各航站的航材数量;在相同配置数量条件下能提高机队可用度;共享条件下航站组内的初始库存量可维持在较低水平。研究工作对完善国产民机维修保障体系具有一定的参考意义。

**关 键 词:** 国产民机;航材共享;航材配置技术;边际分析法  
**中图分类号:** V267      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-2758(2021)06-1196-08

航材是飞机维修保障的主要物质基础,科学合理的航材配置供应模式能在保障飞机航材维修需求的前提下降低航材配置成本,提升飞机后勤保障的综合能力,进而提高飞机在市场中的竞争力。国产民机传统的周转件航材保障模式为基地对航站的直接航材供应补给。航站根据相关航材类型与制定的库存模式,向基地申请不同类型的航材与数量;基地根据申请的订单与库存的情况,调整备件生产计划,选择合理的物流方式将航材运送至需求航站。对于高价的航线可更换单元(line repairable unit, LRU)备件,如果在飞机运营的航站中数量配置过多,将会大幅度增加飞机运营商的资金压力;若数量配置不足又将在产生备件需求时出现缺件现象,造成飞机停场待件,降低飞机的放行签派率。一个合理的LRU配置模式将在满足规定的飞机机队保障率前提下,使飞机的保障成本最低。针对这一问题,本文开展考虑各航站间航材共享的配置方法,形成具有经济性与高效性的LRU备件库存配置方案,开拓国产民机航材共享下的航材配置技术,为国产民机开

拓国内外市场,布局一带一路沿线国家的航材库存优化配置提供参考。

国外对航材库存配置问题进行了较多的相关研究,相关航材配置的理论与方法都对目前的航材配置模式产生了深远的影响。Clark 等<sup>[1]</sup>较早提出考虑备件的采购提前期、采购成本、需求分配与持有和短缺成本等库存的优化配置问题;Sherbrooke<sup>[2]</sup>提出的周转件多级库存控制技术,首次构建了航材配置的经典模型—METRIC (multi-echelon technology for recoverable item control)模型,较为详细地对基地、航站等多级库存的配置构建了库存补给数学模型,能够确定一组备件在基地与航站满足设定目标下的库存水平,在特定的投资水平下能够优化库存系统的备件供应能力。后续的多级航材周转件的配置模型大多基于METRIC模型进行改进与优化,该模型的提出为航材配置的理论与应用研究奠定了坚实的基础。基于METRIC模型,Hillestad<sup>[3]</sup>发表了动态多级配置技术模型(dynamic multi-echelon technique for recoverable item control, dyna-METRIC),在时间序

收稿日期:2021-04-02  
基金项目:国家自然科学基金(51875465)与上海市“科技创新行动计划”软科学重点项目(21692192500)资助  
作者简介:冯蕴雯(1968—),女,西北工业大学教授,主要从事飞行器可靠性分析及运行维护研究。  
通信作者:薛小锋(1982—),西北工业大学副研究员,主要从事飞行器可靠性与安全性分析研究。  
e-mail: xuexiaofeng@nwpu.edu.cn

列的约束下,结合飞机运行的备件需求与备件购买运输决策,研究在可选的后勤策略下机队运输保障能力的影响。Čefko 等<sup>[4]</sup>基于多级库存优化模型,为供应链中的库存优化提出解决方案,保持一定服务水平的同时,最大限度地减少库存,使库存模型在市场上具有竞争力。上述研究成果对航材库存的配置优化理论与方法应用进行深入研究,这些研究成果对本文在航材共享条件下航材配置技术的实现有较好的参考作用。

国内的相关研究较多在 METRIC 模型的基础上进行方法的改进,以适应于特定的应用条件与场景航材备件配置。孙蕾<sup>[5]</sup>较早依据 METRIC 的多级库存配置理论,以提高民机的签派可靠性为目的,研究了在多种情况下的航材库存配置问题;针对高价周转件的低需求、随机性、不确定特性,改进了 METRIC 模型的航材需求计算方法,针对周转件的多级库存配置,采用边际分析法进行库存优化求解,并改进了横向供应的多级库存优化模型。冯蕴雯等<sup>[6]</sup>对现行的航材预测与航材配置方法进行总结,并指出航材预测与配置是综合后勤保障的重要部分。此外,冯蕴雯等<sup>[7]</sup>建立了考虑维修比例的民机备件多级库存配置研究模型,针对工程实际中不同航站的维修能力、基地航站的运输距离与费用等约束,提出考虑周转件维修比例的航材库存配置技术;针对航站可能存在的航材横向供应问题,冯蕴雯等<sup>[8]</sup>研究了基于横向供应与维修比例的民机备件配置优化技术,并对冗余、横向供应的多级航材库存配置技术的理论基础与案例分析进行详细阐述。针对航线维修资源的配置问题,唐庭均<sup>[9]</sup>综合考虑航材、维修组与支援设备,构建排队论模型,以最小费率与最大可用度为目标进行多维资源优化配置;张家维等<sup>[10]</sup>结合多目标蚁狮算法对航材的多目标决策进行配置,实现航材的优化配置;徐常凯等<sup>[11]</sup>采用强化学习的马尔科夫决策过程对 2 级库存的航材供应进行优化配置;田静等<sup>[12]</sup>采用改进粒子群算法对波音飞机的初始航材进行配置优化;邵雨晗等<sup>[13]</sup>提出一种人工鱼群算法,对航空装备进行配置优化,满足规定的可用度条件下费用最少经济性要求。上述研究对各种约束下航材库存配置进行了模型构建与算法改进应用方面的探索,对本文考虑航材共享条件下的航材库存配置具有较好的借鉴作用。在经济性与敏捷性的约束下提升后勤保障的综合能力,是国产民机参与国际市场竞争的有力保障。针对日

趋成熟的航材共享技术,是未来国产民机的后勤保障体系建立航材供给时可以广泛采用的新形式,因此考虑建立航材共享条件下的航材配置模型与方法具有现实的必要性。本文在构建航材共享航站组的基础上,考虑航站间的运输时间、机队规模、年均飞行小时、航材装机数量与机队保障率,采用边际分析法对各航站进行航材配置。

## 1 航材配置问题假设与描述

目前,国产民机多采用 2 级航材维修保障体系,即航站级与基地级。当国产民机产生航材需求时,若航站仓库有需求航材的库存,则直接使用库存的航材满足需求;若库存没有需求的航材,用户向主制造商或供应商所在基地提出航材需求申请,由基地向航站供应需求的航材,整个过程耗时较长。待件飞机处于飞机停场(aircraft on ground, AOG)状态,频繁的 AOG 现象会显著降低飞机的可用率。从客户提出航材申请至签收航材为备件响应时间,根据国内民机主制造商的工程经验,当前航材配置模式下备件响应平均时间为 45 天。若各航站间能形成航材共享关系,彼此共用共享组内的各类航材,产生航材需求时从共享组内的航材库存向需求航站调运,可减少需求航站获得航材的响应时间,降低飞机 AOG 时间,提升飞机可用度。结合工程实际,调研发现国产民机用户的航站大多未具备 LRU 备件的修理能力,本文航材共享下的航材配置将不考虑航站的修理能力。此外在分析航材种类时,以 LRU 为例开展航材共享下的航站航材库存配置技术研究。

航材共享是由一家或多家大型航空公司、维修单位或航材供应商、分销商共同投入资源,由多方建立的共享“航材池”,共享一个航材资源系统,由设定的管理单位以长期服务协议的模式向航空公司、维修单位等需要航材保障的企业提供航材共享服务,以低成本实现库存齐整管理,高质高效地解决航材保障<sup>[14]</sup>。常见的几种航材共享模式有常规购销、租赁、寄售、交换与 AOG 支援<sup>[15]</sup>。在形成航站与基地的航材共享的航材支援模式后,航材仓库的配置技术必然与不考虑航材共享的配置技术有所区别;郑超<sup>[16]</sup>通过构建航材库存虚拟化管理模式,采用库存共享优化共享理论进行备件库存的总成本的优化,研究表明航材共享模式对航材库存业务的成本控制具有较大的优势。研究航材共享条件下的航材

配置技术具有理论与工程的实际意义,国内关于航材共享条件下的航材配置的研究分析还处于探索阶段,本文尝试考虑航材共享条件下,在一定的航材可用度的约束下探讨国产民机航材配置技术的实现。

目前的国产民机航材库存配置主要由航站及其仓库、基地及其仓库与维修点组成。常规的基地-航站航材库存配置模式为航站向基地提出航材需求申请,拆下的 LRU 送回基地维修点,根据需求航材的库存模式进行补货,由基地仓库进行点对点的航材后勤保障。常规航材配置方式不考虑航站间的航材共享关系。考虑航材共享的航材配置模式中,将 2 个以上的航站组成航材共享组,组内的航站产生航材需求时,若需求航站自身仓库具有该航材,直接从仓库获得的航材满足需求,拆下的 LRU 送到基地进行维修;若自身仓库没有需求航材,从共享组内最近的储备该航材的航站仓库选择共享方式使用该航材,拆下的 LRU 送到基地进行维修,根据需求航材的库存模式进行补货;若共享组内仓库均无需求航材,从基地申请调运该航材,根据需求航材的库存模式进行补货,并完善共享组内的航材配置。常规的航材配置模式、考虑航材共享的航材配置模式如图 1 所示。

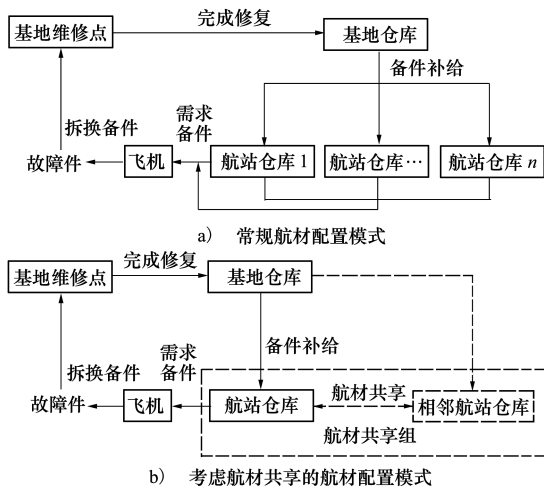


图 1 2 种航材配置模式示意图

国产民机航材在当前常规的基地-航站航材库存配置过程中,仓库对 LRU 备件的库存补货策略为库存减少 1 件补货 1 件的  $(S-1, S)$  策略。在航材共享模式下,基地对各航站的仓库库存进行统一管理,对各航站仓库的 LRU 备件的库存补货策略为库存减少 1 件补货 1 件的  $(S-1, S)$  策略。各航站仓库

的库存量满足以下平衡公式<sup>[5]</sup>

$$s = s_{OH} + s_{DI} - s_{BO} \quad (1)$$

式中:  $s$  为仓库的初始库存数量;  $s_{OH}$  为某一时刻的仓库库存量;  $s_{DI}$  为某一时刻的仓库供应渠道数;  $s_{BO}$  为某一时刻仓库 LRU 的短缺数量。

为了便于对航材需求与航材配置过程进行数学描述,对常规与航材共享模式下的航材配置的备件库存优化模型作出以下假设:

- 1) 例子中涉及的 LRU 均为可修件,不同 LRU 的故障独立,互不关联;
- 2) 例子中涉及的 LRU 的航材重要性(ESS 码)一致;
- 3) 共享组内的 LRU 航材备件可以实现共享,即航站可从共享组内的其他航站或者基地获得需求的航材,暂不考虑从其他渠道获得所需航材;
- 4) 考虑航材共享时,若存在多个航站仓库可提供需求航材,在航材共享的协议内,综合考虑运输时间、费用,从最优的航站仓库获得需求航材;2 个发生航材需求与航材供给的共享航站的后续备件的补货由基地根据库存补货策略及配置方法决定航材共享组内航材仓库补货的数量;
- 5) LRU 在运输过程中不会发生故障。

## 2 航材共享下的航材配置模型

### 2.1 机队 LRU 年均需求量

美国兰德公司的研究发现,飞机 LRU 年均需求量与飞行机队的数量、年均飞行小时、机队规模、装机数量、平均拆换间隔有关,通过大量的数据分析,LRU 年均的需求量可由以下公式计算<sup>[2]</sup>

$$\lambda_i = \frac{T_{FH} \times Q_i \times N}{m_i} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_i$  为第  $i$  个 LRU 的年均需求量;  $T_{FH}$  为飞机年均飞行小时;  $Q_i$  为第  $i$  个 LRU 的单机装机数量;  $N$  为机队规模;  $m_i$  为第  $i$  个 LRU 的平均拆换间隔。

### 2.2 机队 LRU 期望短缺量

假设研究时间  $t$  内,LRU 的需求件数  $n$  符合泊松过程。描述 LRU 的需求量与时间的关系,如(3)式所示

$$P(F(t) = n) = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (3)$$

式中:  $P(F(t) = n)$  为研究时间  $t$  内,航材 LRU 的需求量  $F(t)$  为  $n$  的概率;  $\lambda$  为 LRU 的年均需求量。



研究时间  $t$  内 LRU 的需求量  $F(t)$  不超过  $n$  的累计概率分布为

$$P(F(t) \leq n) = \sum_0^n \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \tag{4}$$

则航站在航材供货时间  $t$  内,航材 LRU 的库存量为  $s$  时,该 LRU 备件期望短缺数为

$$E_i^s = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)P(F(t)=x) \tag{5}$$

$E_i^s$  表示研究时间  $t$  内,库存量为  $s$  时第  $i$  个 LRU 的期望短缺量。

2.3 航站 LRU 期望需求量

航站的期望需求量由航站的年均需求量与该备件在航站的期望需求短缺量组成。在航材共享条件下,考虑各航站采用与航材种类、使用时限、费用等约束下相匹配的共享模式,在航站间的航材运输时间达到预定的时间要求时,将航站纳入航材共享组中,共享组内的所有航站的航材可根据运输条件实现相互调运,达到共享目的。

为说明共享组内的航站的航材共享的实现方式,构建拥有 4 个航站的航材共享组示意图,如图 2 所示。 $T_{ij}$  为航站  $i$  到航站  $j$  的航材平均运输时间,根据航站间的运输时间分配各航站的年均 LRU 的需求量。

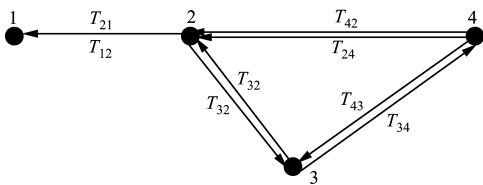


图 2 航材共享组内航站间运输时间

航站的第  $k$  个 LRU 年均的需求量按照运向该航站的运输时间总和占共享组内的总运输时间的比例进行计算,公式如下所示

$$l_k^j = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^J T_{ij}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1, i \neq j}^J T_{ij}} \lambda_k + E_k^s \tag{6}$$

式中: $l_k^j$  为第  $k$  个 LRU 在航站  $j$  的期望需求量; $J$  为航站的个数总和; $\lambda$  为第  $k$  个 LRU 的年均需求量。

2.4 机队可用度

机队的可用度  $A$  反映各项 LRU 的在给定的库存量与航站的配置数量下,航材的整体保障水平。计算公式如(7)式所示

$$A = \prod_{i=1}^k \left( 1 - \frac{E_i^s}{N \times Q_i} \right)^{Q_i} \tag{7}$$

式中: $A$  为机队的可用度; $Q_i$  为第  $i$  个 LRU 的单机装机数量; $N$  为机队规模; $E_i^s$  表示库存量为  $s$  时第  $i$  个 LRU 的期望短缺量。

3 考虑共享的航材库存配置流程

考虑航材共享的航材配置主要是研究航站在发生航材需求时,产生需求的航站根据自身的航材库存状况,利用自身与共享组内其他航站的航材库存共同为需求航站提供航材支持。结合共享组内的航材配置,将航材库存配置优化流程整理如图 3 所示。

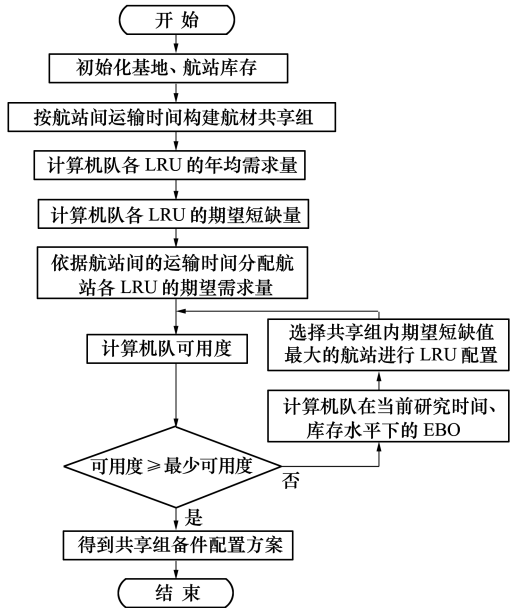


图 3 考虑共享下航材配置流程

各航站考虑航材共享的库存配置技术流程为：

- 1) 初始化各航站间的 LRU 航材备件库存量,使各航站的库存暂为 0;
- 2) 依据各航站的位置、运输方式与运输时间,将达到航材共享预设条件的航站构建成航材共享组;
- 3) 按照(2)式,在收集机队的规模、年均飞行小时、各 LRU 的装机数量与平均拆换间隔,计算机队的各项 LRU 备件的年均需求量;
- 4) 按照(5)式计算各项 LRU 航材备件的库存量为  $s$  时,各 LRU 航材备件的期望短缺数;
- 5) 按照各航站的运输时间,将各项 LRU 航材

备件机队年需求量分配至对应的航站;

6) 按照(7)式计算机队可用度;

7) 比较计算的机队可用度与设定的目标机队可用度,若大于等于设定可用度,则 LRU 航材备件配置满足要求,输出各航站的各 LRU 航材备件的数量;若小于设定可用度,计算共享组内的当前 LRU 航材备件数量的情况下期望短缺量,选择值最大的航站进行 LRU 航材备件的配置;

8) 继续进行步骤 6) 至 7),直至计算的机队可用度大于等于设定的目标机队可用度;

9) 根据各 LRU 航材备件在各航站的配置数量,完成在共享条件下的航材配置技术。

4 算例分析

本文以国产民机 MA60 在东南亚的 4 个航站为例,以 4 个 LRU 航材备件为分析对象,机队规模为 6 架,年均飞行小时为 1 800 h,其他 LRU 参数如表 1 所示。

表 1 LRU 航材的参数

| LRU 编号 | $m_i$ | $Q_i$ |
|--------|-------|-------|
| 1      | 1 500 | 2     |
| 2      | 800   | 1     |
| 3      | 900   | 1     |
| 4      | 1 200 | 1     |

研究的 4 个航站间的运输时间、运输间的关系如图 4 所示。2 个航站间的带箭头的边表示运输方向,边的数字表示航站间的运输时间,单位为天。

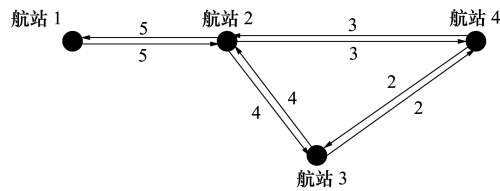


图 4 4 个航站间的运输时间

根据上述的各项 LRU 航材备件与各航站间的信息,结合航材共享下航材配置优化技术流程,对航站间的不同航材库存与不同的航材响应时间的关系进行探索分析。

4.1 机队可用度与响应时间关系

航材共享的优势是缩短航材的响应时间,在库存一定的条件下,航材共享的采用可大幅度提高机队的可用度。为探索航站间的不同航材库存与不同的航材响应时间的关系,构建机队可用度与航材响应时间的关系,以 ESS 为 1 的航材为例,在不同的航材库存水平下分析上述 2 个变量间的关系,如图 5 所示。

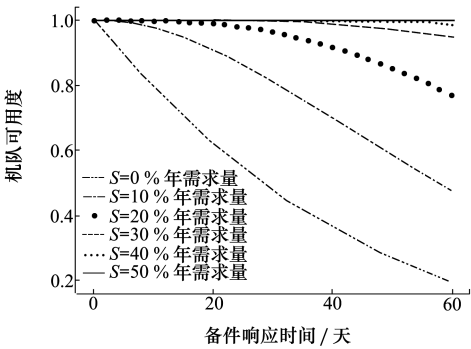


图 5 机队可用度与航材响应时间关系

根据航材消耗历史数据统计,国产民机 MA60 的航材响应平均时间约为 45 天;若考虑航材共享方式进行航材支援,航材响应时间可降为 5 天左右。由图 5 曲线关系可知,若要机队维持在 0.9 左右的可用度,在 45 天的常规航材响应时间将需要在航站配置 30% 的年需求量;若采用航材共享的航材备件支援模式,共享组内可提供相应航材的,可在该航站不进行航材备件的配置,较大程度减少航材配置的数量。若航站的航材库存配置达到航材年需求量 10% 以上,航材在考虑共享模式的航材备件支援即可实现接近 1 的机队可用度。综上分析可知,考虑航材共享模式在同一库存配置水平下可显著提高机队可用度。

4.2 各航站的 LRU 航材库存配置

在分析航材响应时间与机队可用度关系的基础上,结合表 1 的 LRU 航材备件数据,分析各航站在常规航材库存配置与考虑航材共享的航材库存配置技术的应用。

1) 不考虑航材共享的航材库存配置技术

当前国产民机的航材库存供应是常规的 (S-1, S) 库存策略,即当航站产生航材需求时,若该航站库存中存在需求的航材,使用该航材满足航材需求;若航站库存中不存在需求的航材,航站向基地提出

该航材需求申请,基地根据申请组织航材的生产、运输等工作,一般 45 天后到达申请航站的仓库。在待件时间内,缺件飞机出现 AOG 现象。在假设机队可用度分别为 0.93 与 0.95,采用边际分析法,对航材期望短缺量最大的航站进行配置,直至满足机队可用度的约束。4 个航站的 4 个 LRU 航材配置结果如表 2 所示。

表 2 各航站的 LRU 航材备件的配置

| 航站 | A    | 不考虑航材共享  |   |   |   | 考虑航材共享   |   |   |   |
|----|------|----------|---|---|---|----------|---|---|---|
|    |      | 航材配置 LRU |   |   |   | 航材配置 LRU |   |   |   |
|    |      | 1        | 2 | 3 | 4 | 1        | 2 | 3 | 4 |
| 1  | 0.93 | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 0 |
| 2  |      | 3        | 3 | 2 | 2 | 2        | 1 | 1 | 1 |
| 3  |      | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 0 |
| 4  |      | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 0 |
| 1  | 0.95 | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 1 |
| 2  |      | 3        | 3 | 3 | 3 | 2        | 2 | 2 | 1 |
| 3  |      | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 1 |
| 4  |      | 2        | 2 | 2 | 2 | 1        | 1 | 1 | 1 |

2) 考虑航材共享的航材库存配置技术

在考虑航材共享的情形下,航站产生航材需求时,若该航站的库存中存在需求的航材,使用该航材满足航材需求;若航站的库存中不存在需求的航材,航站向共享组内的其他航站提出航材需求申请,选择时间、费用最优的航站航材满足航材需求,一般 5 天后到达申请航站的仓库。(S-1,S)库存策略下,由基地根据实际需求向共享组内的航站进行航材配置。在假设机队可用度分别为 0.93 与 0.95,采用边际分析法,对航材期望短缺量最大的航站进行配置,直至满足机队可用度的约束。4 个航站的 4 个 LRU 航材备件配置结果如表 2 所示。

由表 2 的各航站的航材配置可知,在相同的机队可用度情况下,考虑航材共享的航站库存配置的航材数量比不考虑共享的少;考虑航材共享的航材配置方式增加较少的航材数量即可实现提高机队可用度的目标。通过上述分析可知,考虑航材共享的航材配置技术可规定可用度下实现更少的航材备件的配置数量。

4.3 航材共享与不考虑共享的航材配置的对比分析

结合上述 4 个航站的 4 个 LRU 航材备件配置的数据,分别在考虑航材共享与不考虑航材共享条件下研究不同航材配置数量与机队可用度的关系,结果如图 6 所示。

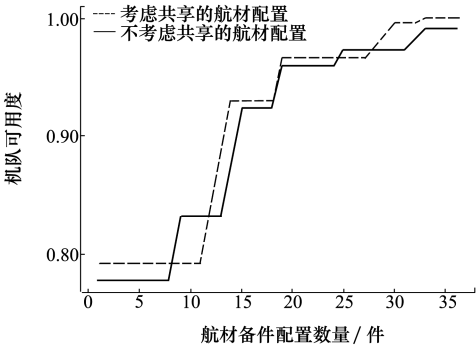


图 6 航材配置数量与可用度的关系

由图 6 可知,与不考虑共享的航材配置对比,考虑航材共享的航材配置数量在配置较低时有较高的可用度,在配置数量较高时能够最快到达可用度为 1 的状态;航站的航材配置数量在超过 11 以后,采用航材共享的配置方式下机队的可用度快速上升,而常规的航材配置方式下在航材数量超过 13 以后才出现一个较大幅度的机队可用度增长;机队可用度在超过 0.95 后,随着航材配置数量的增加,2 种航材配置方式的机队可用度增长速率均显著下降,但常规的航材配置方式下机队总体可用度增长速率比共享模式下配置方式更缓慢,考虑航材共享的航材配置在提升机队可用度方面优势明显。

5 结 论

本文针对国产民机的航材配置问题,在航材共享条件下,通过边际分析法进行航站共享组的航材库存配置求解。考虑各航站的航材库存补货策略、航材响应时间、航站库存量与机队可用度,分析航材共享模式下的航材配置技术,结论如下:

- 1) 采用泊松过程对共享组内航站的各种航材在不同时间内的航材需求规律进行建模,合理反映航站各航材的需求量与研究时间的关系;
- 2) 建立了考虑航材共享的航材库存配置模型并进行案例求解,分析结果表明:与不考虑航材共享

的常规航材配置方式相比,航材共享下的航材配置技术可以实现以更少库存配置数量满足规定的机队可用度;

3) 通过国产民机的算例分析,航材初始库存量、航材响应时间是影响航站在航材共享条件下库

存配置数量的主要因素。与不考虑航材共享的常规航材配置方式相比,通过实例分析验证考虑航材共享的航材配置技术的可行性与有效性,形成的考虑航材共享的国产民机航材配置技术。研究成果可为国产民机开拓国内外市场提供理论参考。

## 参考文献:

- [1] CLARK J Andrew, SCARF Herbert. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem[J]. Management Science, 1960 (6): 475-490
- [2] SHERBROOKE C C. METRIC-a multi-echelon technique for recoverable item control[J]. Operations Research, 1968, 16(1): 122-141
- [3] HILLESTAD R J. Dyna-METRIC dynamic multi-echelon technique for recoverable item control[R]. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1982
- [4] ĆEFKO Dominic, ŠAFRAN Mario, TOMAŠIĆ Dubravko. Multi-echelon inventory optimization[C] // Perspectives on Croatian 3pl Industry in Acquiring International Cargo Flows, 2016
- [5] 孙蕾. 民用飞机多级库存配置方法与管理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013  
SUN Lei. Multi-echelon inventory allocation method and management for civil aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese)
- [6] 冯蕴雯, 陈俊宇, 刘佳奇, 等. 民用飞机航材预测与配置管理技术综述[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 443-453  
FENG Yunwen, CHEN Junyu, LIU Jiaqi, et al. Review on the civil aircraft spare parts prediction and configuration management technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 443-453 (in Chinese)
- [7] 冯蕴雯, 路成, 薛小锋, 等. 考虑维修比例的民机备件多级库存配置研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(3): 582-589  
FENG Yunwen, LU Cheng, XUE Xiaofeng, et al. Multi-echelon inventory allocation of civil aircraft spare parts considering maintenance ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(3): 582-589 (in Chinese)
- [8] 冯蕴雯, 马红亮, 魏严锋, 等. 民用飞机航材工程与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 143-193  
FENG Yunwen, MA Hongliang, WEI Yanfeng, et al. Spare parts engineering and management for civil aircraft[M]. Beijing: Science Press, 2020: 143-193 (in Chinese)
- [9] 唐庭均. 航线维修任务多资源优化配置研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020  
TANG Tingjun. Research on multi-resource optimal allocation of airline maintenance tasks[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020 (in Chinese)
- [10] 张家维, 李昊. 多目标蚁狮算法在航材配置优化中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 71-76  
ZHANG Jiawei, LI Hao. Application of multi-objective ant lion optimizer in optimization of aviation parts allocation[J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 71-76 (in Chinese)
- [11] 徐常凯, 周家萱, 杜加刚. 基于增强学习的航材二级库存优化配置研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 8(40): 106-110  
XU Changkai, ZHOU Jiaxuan, DU Jiagang. Study on air material allotment for dual echelon inventory system with reinforce learning[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 8(40): 106-110 (in Chinese)
- [12] 田静, 张恩豪, 付维方. 改进量子粒子群算法在航材初始配置中的应用[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(5): 48-52  
TIAN Jing, ZHANG Enhao, FU Weifang. Application of improved quantum particle swarm algorithm in initial configuration of aircraft spare parts[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(5): 48-52 (in Chinese)
- [13] 邵雨晗, 辛后居, 徐启丰, 等. 航空装备携行配置优化研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 68-72  
SHAO Yuhan, XIN Houju, XU Qifeng, et al. Research on the optimization of aviation equipments carrying allocation[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9): 68-72 (in Chinese)
- [14] 李晓旭. XX 航材集团公司“航材共享”平台战略的研究[D]. 成都: 西南民族大学, 2018  
LI Xiaoxu. Research on XX aviation material group's "air material sharing" platform strategy[D]. Chengdu: Southwest

University for Nationalities, 2018 (in Chinese)

[15] 赵红竹. 对供应商航材支援合作模式和策略的初步研究[J]. 航空维修与工程, 2014(5): 82-84  
ZHAO Hongzhu. Research on the cooperation model and policy of supplier spares support[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(5): 82-84 (in Chinese)

[16] 郑超. 基于虚拟库存管理的航材备件库存共享优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015  
ZHENG Chao. Research on inventory sharing and optimizing of aviation equipment parts based on virtual inventory management [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015 (in Chinese)

# Research on air material configuration technology of domestic civil aircraft under air material sharing

FENG Yunwen<sup>1</sup>, PAN Weihuang<sup>1</sup>, LIU Jiaqi<sup>1</sup>, LU Cheng<sup>2</sup>, XUE Xiaofeng<sup>1</sup>  
(1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.Department of Aeronautics and Astronautics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive logistics support capability of domestic and foreign civil aircraft markets, and reduce the number of air materiel configuration and the cost of air materiel operation support, this paper proposes an air materiel configuration method based on air materiel sharing mode, considering the air materiel inventory and response time of each terminal. The Poisson process is used to describe the probabilities of different demand quantities of aviation materials during the study time; the aviation materials sharing group is constructed according to the transportation time relationship between the terminals; the marginal analysis method is used to expect largest number short-term aviation materials of all terminals in the sharing group to carry out air material configuration until the fleet availability needs are met, and the air material configuration technology under the sharing of air materials is realized. Studies have shown that under the specified fleet availability, the use of air material configuration technology under the condition of air material sharing can reduce the number of air materials in each terminal; the availability of the fleet can be improved under the same configuration number; The initial inventory can be maintained at a low level in the terminal group under the sharing condition. the research work has certain reference significance for improving the maintenance and support system of Chinese civil aircraft.

**Keywords:** domestic civil aircraft; aviation materials sharing; air material configuration technology; marginal analysis method

**引用格式:**冯蕴雯, 潘维煌, 刘佳奇, 等. 考虑航材共享的国产民机航材配置技术研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1196-1203  
FENG Yunwen, PAN Weihuang, LIU Jiaqi, et al. Research on air material configuration technology of domestic civil aircraft under air material sharing[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1196-1203 (in Chinese)