

doi: 10.7690/bgzd.2024.03.013

# 基于系统动力学的航母舰载机远海长航时有寿可修 航材需求预测模型

郭峰<sup>1</sup>, 张鑫宇<sup>1</sup>, 李琨<sup>1</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 吴捷<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 中国人民解放军 91576 部队, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 针对现有需求预测方法不能较好地反映航母舰载机远海长航时航材消耗规律的问题, 对舰载机远海长航时有寿可修航材需求进行分析, 构建在长期驻舰保障模式下有寿可修航材携行需求的系统动力学(system dynamics, SD)模型。通过对模型的运行与仿真得到有寿可修航材的携行需求量, 验证模型的适用性和可行性。结果表明, 该方法对舰载机远海长航时有寿可修航材需求预测具有较高的指导价值。

**关键词:** 系统动力学; 航母舰载机; 远海长航时; 有寿可修航材; 携行需求

**中图分类号:** V271.4<sup>+</sup>92 **文献标志码:** A

## Forecasting Model of Long-endurance Repairable Aircraft Spares Demand for Carrier-Based Aircraft in Open Sea Based on System Dynamic

Guo Feng<sup>1</sup>, Zhang Xinyu<sup>1</sup>, Li Kun<sup>1</sup>, Sun Qiang<sup>1</sup>, Wu Jie<sup>2</sup>

(1. Qingdao Campus, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China;

2. No. 91576 Unite of PLA, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** In view of the problem that the existing demand forecasting method can not better reflect the consumption law of long-endurance aviation materials of carrier-based aircraft in the open sea, the long-endurance long-life repairable aviation materials demand of carrier-based aircraft in the open sea is analyzed, and the system dynamics model of the carrying demand of long-life repairable aviation materials under the long-term support mode is constructed. Through the operation and simulation of the model, the carrying demand of life-repairable aviation materials is obtained, and the applicability and feasibility of the model are verified. The results show that the method has a high guidance value for the demand forecast of long-endurance repairable aviation materials for carrier-based aircraft.

**Keywords:** system dynamics; carrier-based aircraft; long endurance in open sea; long-life repairable aircraft equipment; carrying requirement

### 0 引言

航母舰载机远海长航时任务具有时间长、强度高和环境恶劣等特点, 导致航材消耗的影响因素非常复杂, 加之缺乏相应的数据样本, 远海长航时任务条件下的航材携行需求预测难度比较大, 必然影响该任务条件下的航材保障工作。为促进远海长航时战训任务能力的尽快生成, 亟需开展航母舰载机远海长航时任务条件下的携行航材需求预测研究。

目前, 对航材携行需求预测的方法主要有回归分析法、时间序列预测法、灰色预测法、BP神经网络模型等。这些方法都是基于历史消耗数据进行预测, 影响因素考虑的较少<sup>[1-3]</sup>。显然, 现有研究没有深入剖析携行航材供应系统中的关键要素以及各要素之间的相互关系, 导致所提出的需求模型并不能真实反应远海长航时航材的实际消耗规律。另外,

航母舰载机尚未执行过远海长航时任务, 缺乏相应的航材消耗数据。现有研究文献与数据基础不能满足航母舰载机远海长航时航材携行需求预测的需要。为克服上述不足, 笔者选择利用系统动力学(SD)方法对远海长航时航材需求预测问题进行分析。系统动力学以反馈控制理论为基础、以计算机仿真技术为手段、使用定性与定量相结合的方法来研究和处理各种动态复杂系统问题<sup>[4-5]</sup>。远海长航时任务条件下航材消耗过程受到很多因素的综合影响, 是典型的系统动态反馈复杂性问题。系统动力学方法有利于把握远海长航时航材消耗的宏观规律与内在逻辑, 实现对航材供应系统行为的动态模拟, 因此能够较好地对比航材消耗情况进行仿真<sup>[4-6]</sup>。

因为有寿可修航材的价值和重要性都远远超过其他航材, 影响其消耗的因素也比其他航材复杂的

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2023-12-17

第一作者: 郭峰(1981—), 男, 安徽人, 硕士。

多；因此，笔者重点针对这类航材，运用系统动力学方法研究航母舰载机远海长航时有寿可修航材需求的预测模型，主要内容包括：深入分析航母舰载机远海长航时有寿可修航材的需求；界定远海长航时有寿的可修航材供应系统，确定影响其消耗的主要因素，建立系统因果关系图，构建远海长航时有寿可修航材系统动力学模型；以舰载机飞行任务为驱动，以任务周期为仿真时长，获得有寿可修航材的消耗情况；以达到一定的航材保障良好率为目标，分析得到有寿可修航材的携行需求；通过算例对模型进行相关检验和效果分析。

## 1 远海长航时有寿可修航材消耗影响因素分析

要对航母舰载机远海长航时有寿可修航材需求进行建模仿真，必须弄清这类航材消耗的影响因素。航材的消耗一般包括故障、到寿、定检和维护4种形式。其中，到寿、定检、维护3种消耗形式导致的航材需求是可直接预测的确定性需求<sup>[7]</sup>。对于有寿可修航材来说，其消耗形式主要是到寿和随机故障2种。在目前舰载机航材故障规律难以掌握的情况下，随机故障产生需求是预测的一个难点。实际上，航材的故障率是随时间的变化，大致可划分为早期、偶然、耗损3个故障期阶段，其中偶然故障期是航材故障的主要阶段，其特点是故障率低而稳定，近似为常数。发生随机故障的航材的需求在一定时间内服从均值不变的泊松分布<sup>[8]</sup>。在出海执行任务期间，有寿可修航材发生故障或到规定寿命后还可以修复再次周转；因此，有寿可修航材所需携行的数量一般不大于消耗数（除非修理周期超过任务期限）。

根据以上分析，航母舰载机远海长航时有寿可修航材供应系统应重点考虑到寿和随机故障产生的消耗；还要注意这类航材是可以修复再周转的，不能将其消耗数量的仿真结果作为其需求量。有寿可修航材消耗的影响因素还有航材的故障率、单机安装数、到寿数量以及单机计划飞行时间、装备实力等。另外，有寿可修航材消耗的主要来源包括因无法修复或无修理价值等原因导致报废的数量和到寿消耗的数量，其中未能修复导致报废的数量可以根据历史数据计算，也可根据消耗数量与修复率来确定。最后还需明确的是，根据系统工程理论，还需在模型定量预测的基础上，根据人为因素、环境因

素等对模型仿真结果进行定性修正<sup>[9]</sup>。

## 2 远海长航时有寿可修航材需求 SD 模型

### 2.1 SD 模型建立

#### 2.1.1 模型边界

由于航母远海长航时有寿可修航材供应系统包含很多因素，只需围绕航材携行需求预测这个目的，剔除不相关的系统要素，把相关的关键要素反映在模型中即可<sup>[10]</sup>。笔者主要选取携行航材数量、在修航材数量、航材消耗量等作为主要变量对携行航材保障过程进行研究，其中携行航材数量为航母航材仓库存储的可修航材数量；另外，还需考虑到寿、故障与维修因素对系统的影响。当该系统运行到某型飞机的航材保障良好率达到要求的水平时，就能确定航母舰载机远海长航时有寿可修航材所需的携行量。

#### 2.1.2 假设条件

1) 仅考虑发生过故障以及有潜在故障的有寿可修航材，其他航材都能满足外场需要。

2) 仅考虑任务期间装机航材到寿，不考虑航母舱室内库存航材到寿。

3) 航材的故障为随机故障，且故障独立；任务期间均处于偶然故障期，故障率恒定，故障数服从泊松分布<sup>[11]</sup>。

4) 不考虑串件维修，能多件同时修理，具有一定的修复概率，无法修复则报废。

5) 远海长航时任务时间为180 d，模型仿真周期设置为26周。

#### 2.1.3 因果关系

笔者对在航期间航材供应保障运行机制进行深入分析的基础上，建立航母舰载机远海长航时有寿可修航材供应系统因果关系，如图1所示。故障航材数量主要受装机航材数、计划飞行时间、故障率等因素影响；舰载机装机使用航材发生故障或者到寿后，从航母航材舱室领取备件对故障飞机进行换件维修；此时，航材产生消耗，导致携行航材数量减少，同时使在修航材数量增加。发生故障的航材经过机务人员维修，修复后的航材成为堪用品流入航母航材舱室，补充携行航材数量；反之，不能修理的航材转为报废航材，退出周转。在修复航材数量与携行航材数量之间的因果链加上了时间延迟符号，用以表示故障航材的修理周期。

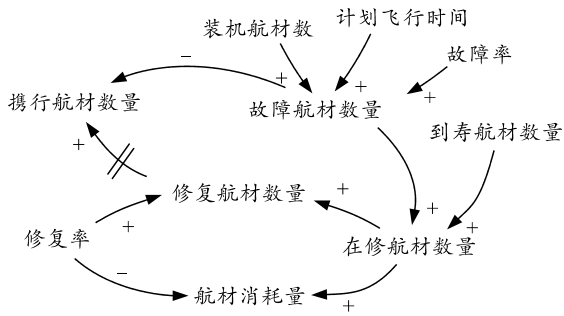


图 1 携行航材供应系统因果关系

### 2.1.4 系统流

因果关系只能定性地描述携行航材供应系统的反馈机制，区分不出不同性质的变量。为预测携行航材需求量，必须进一步建立定量的系统流图。系统流图是系统动力学基本变量和符号的有机结合，用来阐明系统的反馈形式和控制规律。

根据上述因果关系，结合航材供应保障反馈机制，建立了携行航材供应系统流，如图 2 所示。

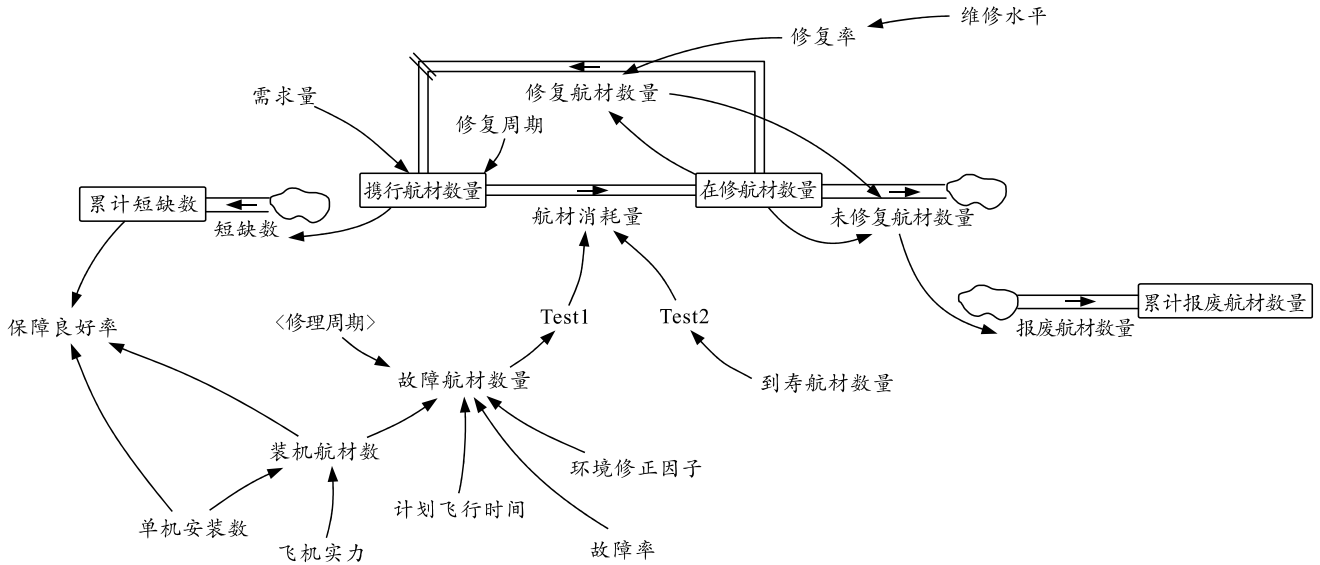


图 2 携行航材供应系统流

携行航材供应系统中各主要变量的系统动力学方程如下：

1) 携行航材数量函数：携行航材数量 = INTEG(DELAYII(修复航材数量, 修理周期, 0) - 航材消耗量, 需求量), 单位为件。需求量即为需要预测的携行航材需求量，修复航材数量对携行航材数量的补充受修理周期的影响产生延迟，修理周期单位为周。

2) 在修航材数量函数：在修航材数量 = INTEG(航材消耗量 - 修复航材数量 - 未修复航材数量, 0), 单位为件。规定执行任务前航母上的在修航材数量为 0。

3) 修复航材数量 = INTEGER(在修航材数量 \* 修复率), 单位为件。

4) 修复率的大小取决于维修水平，用表函数表示修复率与维修水平之间的关系。现规定舰基维修水平分为差、中、良、优 4 个等级，维修水平等级不同，其具体取值也不同，但取值只是建立在表函数上的数值表征，不代表对维修率的影响。现设定舰基维修水平等级为良，维修水平取值则为 0.75，

维修水平 = WITH LOOKUP (0.75, ((0, 0) - (10, 10]), (0.25, 0.7), (0.5, 0.85), (0.75, 0.9), (1, 0.95))。如图 3 所示。

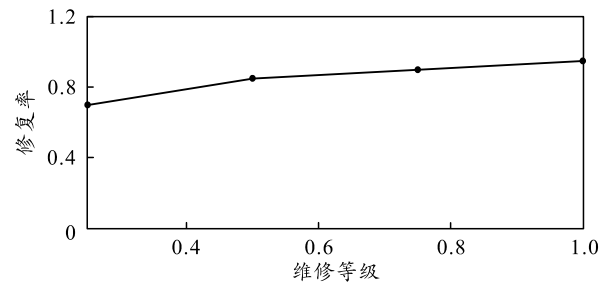


图 3 维修水平函数

5) 累计报废航材数量函数：累计报废航材数量 = INTEG(报废航材数量, 0), 单位为件。报废航材数量即为未修复航材数量，未修复航材数量为在修航材数量与修复航材数量的差值。

6) 航材消耗量受故障航材数量及到寿航材数量的影响，基于故障航材数量产生服从泊松分布的 Test1 数据，基于到寿航材数量产生 Test2 数据，两者之和作为航材消耗规律。Test1 使用 RANDOM POISSON 函数模拟出故障情况，均值为故障航材数

量, Test2 使用 PULSE TRAIN 函数模拟出航材到寿情况, 并认为到寿情况已经确定。

7) 故障航材数量=计划飞行时间\*装机航材数\*故障率\*修理周期\*环境修正因子, 单位为件。其中, 装机航材数=单机安装数\*飞机实力。

8) 航材保障良好率=POWER(1-累计短缺数/装机航材数, 单机安装数)。航材保障良好率为逐项航材仿真过程中产生的某型飞机航材保障良好率总积。短缺数=IF THEN ELSE(携行航材数量 < 0, ABS(携行航材数量)/26, 0), 累计短缺数=INTEG(短缺数, 0), 累计短缺数的值表示该项航材在携行库存为需求量时的期望短缺数。航材保障良好率 A 计算公式为:

$$A = \prod_{i=1}^I \left\{ 1 - \frac{E_i}{N b_i} \right\}^{b_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  项航材的累计短缺数;  $N$  为飞机实力;  $b_i$  为第  $i$  项航材的装机航材数。

由以上系统动力学方程可知, 以计划飞行任务为驱动, 确定某项航材对应的单机安装数、故障率, 计算出故障航材数量, 在 Test1 中模拟出消耗规律服从泊松分布的航材消耗量, 在 Test2 中模拟出某型航材的到寿情况, 得到总的航材消耗量, 经过不断修正从而得到合适的需求量。通过典型航材进行仿真, 模拟出各自的需求数据, 并以最终的航材保障良好率达到 95% 为预期目标, 分析得出各项航材的最优携行量。

## 2.2 SD 模型检验

### 2.2.1 极端条件检验

极端条件检验用于验证模型的行为是否合理。虽然这种极端假设可能不会发生, 但它可以提高模型的可靠性。通过极端条件下的测试, 可以测试模型在极端条件下是否能显示出与真实世界一致的动态响应。有必要对所建立的携行航材供应系统模型的极端条件进行测试。在测试模型的极端条件时, 假设需求量=10, 单机安装数=4, 飞机实力=30, 计划飞行时间=10, 修理周期=1, 故障率=0.000 8, 环境修正因子=1.1, 到寿航材数量=4, 仿真时间设置为 26 周, 仿真步长为 1 周。令修复率=1, 进行模型测试。

当修复率为 1 时, 发生故障后的在修航材全部成功修复, 在修航材数量等于修复航材数量, 如图 4 所示。

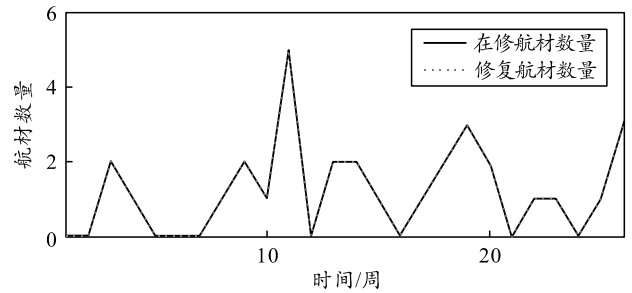


图 4 极端条件检验: 在修航材数量与修复航材数量比较

由于在维修的航材全部被修复, 未修复航材数量为 0, 因此累计报废航材数量也为 0, 如图 5 所示。

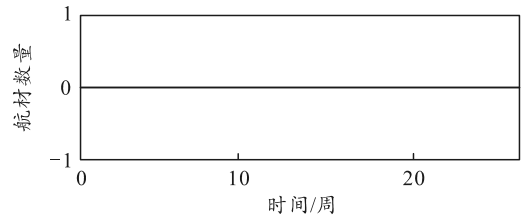


图 5 极端条件检验: 累计报废航材数量

修复航材对携行航材数量进行补充, 受修理周期延迟影响, 携行航材数量呈振荡变化趋势, 如图 6 所示。

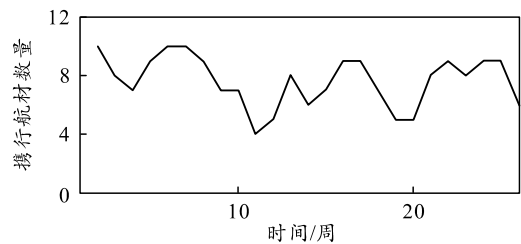


图 6 极端条件检验: 携行航材数量

由于假设条件中所赋的需求量满足在此条件下的携行航材需求, 携行航材数量始终 > 0, 因此累计短缺数为 0, 此时该型飞机的航材保障良好率始终为 1, 如图 7、8 所示。

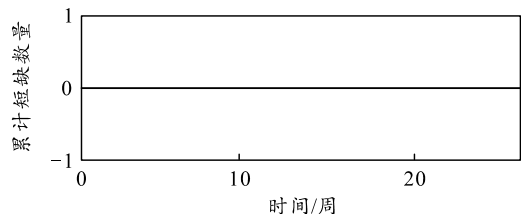


图 7 极端条件检验: 累计短缺数

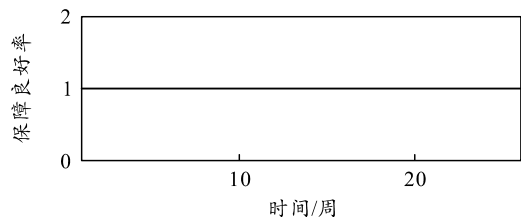


图 8 极端条件检验: 航材保障良好率

综上所述可知，当修复率为 1 时，本模型的极端条件检验符合预想情况。

### 2.2.2 敏感性试验

敏感性试验用于分析和验证模型的结构是否稳定。为更真实地反映实际保障过程中不确定性因素的影响，有必要对所建立的携行航材供应系统模型进行敏感性试验。在模型敏感性试验时，假设需求量=20，单机安装数=2，飞机实力=20，计划飞行时间=15，修理周期=1，故障率=0.001，环境修正因子=1.2，到寿航材量=6，维修水平为良，仿真时间设置为 26 周，仿真步长为 1 周，作为敏感性试验 1。敏感性试验 2 在敏感性试验 1 的基础上，对航材消耗量植入脉冲函数 PULSE(10,1)\*4 作为系统的干扰，即第 10 周有 4 件航材突然发生故障，如图 9 所示。

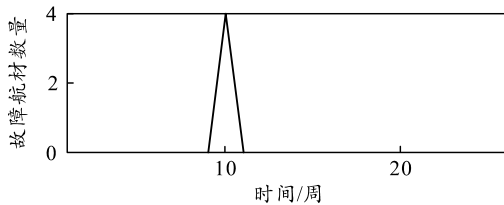


图 9 敏感性试验：干扰

根据设定条件对模型进行模拟，仿真结果如图 10 所示。由于在第 10 周发生了 4 件航材的故障，因此在修航材数量也随之增加 4 件。

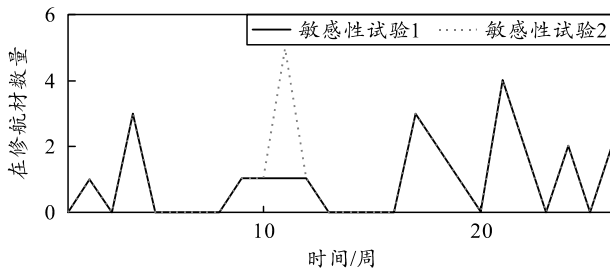


图 10 敏感性试验：在修航材数量

故障后的航材经修复后入库，对携行航材数量进行补充，使得携行航材维持原有数量，如图 11 所示。

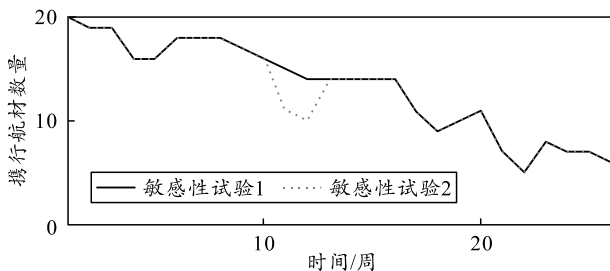


图 11 敏感性试验：携行航材数量

综上所述，当系统输入发生变化时，仿真结果

因干扰会有细微变化，但不改变系统的总体行为趋势，上述的敏感性试验证明了该仿真模型的稳定性，说明系统动力学模型对参数变化相对不敏感，模型结构良好，采用该模型进行携行航材消耗预测是可行的。

### 2.3 SD 模型应用

对构建的携行航材供应系统进行仿真预测时，首先要进行任务背景条件想定。假设某次航母执行远海训练任务中，飞机实力=25，计划飞行时间=20，环境修正因子=1.2，为方便观察比较运行结果，统一设置需求量=50，仿真时间设置为 26 周，仿真步长为 1 周。根据航材保障工作的特点，列举了 5 项重要的有寿可修航材作为仿真对象，其主要数据如表 1 所示。

表 1 携行航材基础数据

航材序号	单机安装数量	故障率/(件/h)	维修水平	修理周期/周	到寿数量
1	1	0.000 8	中	2.0	5
2	4	0.002 8	优	1.0	10
3	2	0.001 5	中	1.5	6
4	1	0.000 3	良	3.0	2
5	2	0.001 0	中	2.0	4

对上述航材分别进行系统仿真，再通过携行航材数量的运行结果对需求量进行修正。各项航材携行仿真结果如图 12 所示。

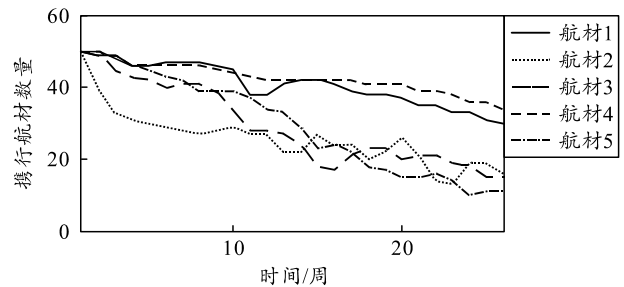


图 12 需求预测：携行航材数量

由仿真结果可看出，任务周期内的携行航材数量均未完全消耗；因此，对上述航材的需求量进行修正，以任务周期内携行航材刚好被使用完为目标，修正后的各项航材携行仿真结果如图 13 所示。

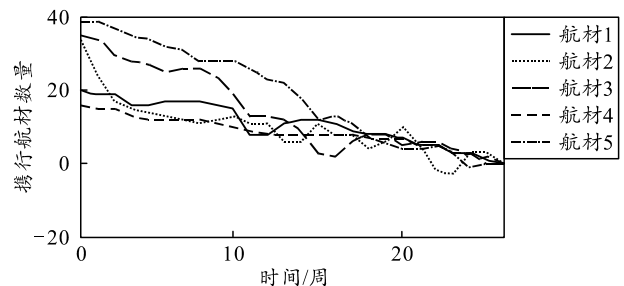


图 13 需求预测：修正后携行航材数量

各项航材具体需求量数据如表 2 所示。

表 2 需求预测：携行航材数量

航材序号	1	2	3	4	5
需求数量	20	34	35	16	39

各项航材仿真后该机型的航材保障良好率如表 3 所示。

表 3 需求预测：航材保障良好率 %

航材序号	1	2	3	4	5
航材保障良好率	100	99.23	100	100	99.84

由式(1)得最终的航材保障良好率  $A$  为 99.080 3%，满足航材保障良好率达到 95% 以上的预期目标；因此，此时各项航材的需求量即为远海长航时任务所需的携行量。

### 2.4 SD 参数分析

为提高各项航材保障良好率，通过改变不同 SD 参数进行模拟仿真和对比分析。

#### 2.4.1 分析维修水平对系统的影响

以航材 5 为例，假定其他参数均无变化，只改变维修水平的取值。进行模拟后，对输出结果比较分析，结果如图 14、表 4 所示。

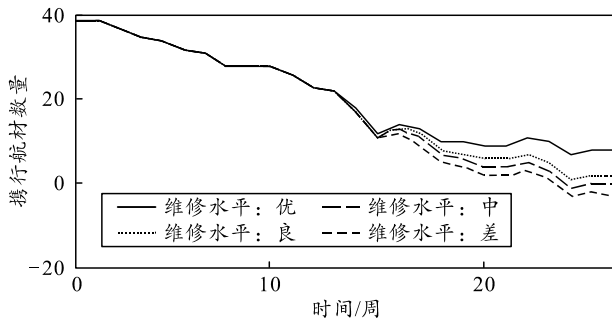


图 14 维修水平影响：携行航材数量

由上图可知，维修水平对后期的携行航材数量影响较大。维修水平越低，修复补充的航材数量就越少，导致携行航材数量减少，出现缺航材情况，就需要前期多储备携行航材，占用库存资源。

表 4 维修水平影响：航材保障良好率 %

维修水平	优	良	中	差
航材保障良好率	100	100	99.84	99.23

由上表可知，考虑到随着维修水平的提升，维修力量等保障费用也会随之增加等实际情况，认为维修水平达到良为最好。

#### 2.4.2 分析修理周期对系统的影响

以航材 5 为例，假定其他参数均无变化，只改变修理周期的取值。进行模拟后，对输出结果比较

分析，结果如图 15、表 5 所示。

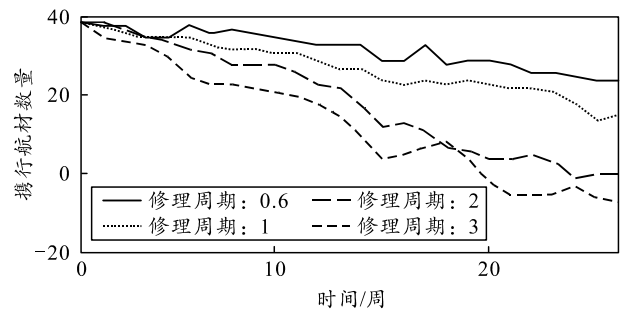


图 15 修理周期影响：携行航材数量

由上图可知，修理周期对携行航材数量影响很大，贯穿整个任务周期。修理周期越长，单位时间内修复补充的航材数量就越少，导致携行航材数量减少，出现缺航材情况。反之，修理周期越短，单位时间内修复补充的航材数量就越多，使得在任务周期结束时仍有大量携行航材未被消耗。

表 5 修理周期影响：航材保障良好率

修理周期/周	0.6	1	2	3
航材保障良好率/%	100	100	99.84	96.04

由上表可知，考虑到随着修理周期的缩短，维修力量和资源也被过多占用，携行库存也会有剩余，认为修理周期=1 为最好。

#### 2.4.3 分析环境因素对系统的影响

以航材 5 为例，假定其他参数均无变化，只改变环境修正因子的取值。进行模拟后，对输出结果比较分析，结果如图 16、表 6 所示。其中的环境修正因子取值体现了海洋“高温、高湿、高盐雾”和舰船上“振动、电磁”环境对航材消耗的综合影响。

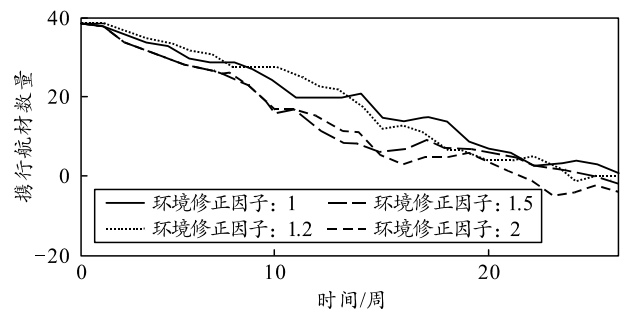


图 16 环境修正因子影响：携行航材数量

表 6 环境修正因子影响：航材保障良好率 %

环境修正因子	1	1.2	1.5	2
航材保障良好率	100	99.84	99.69	98.16

由图 6 和表 6 可看出，环境修正因子取值越高，航材消耗量越大，导致了航母舱室库存数量的减少，甚至出现缺件情况；因此，环境修正因子的增加同样会导致航材保障良好率的降低。

综上所述,为进一步改善航母舰载机远海长航时有寿可修航材保障工作,可采取以下措施:

1) 鉴于维修水平和修理周期对携行航材数量的影响较大,为改善这 2 个主要维修因素——即提高维修水平、缩短修理周期,应当提高航母机务维修部门人员的整体维修能力。

2) 远海长航时航材缺件补给难、舰基维修能力有限,所以对航材的维修性、可靠性的要求很高。为此,可以通过改进航材制造工艺和材料等提高航材的维修性和可靠性,一方面有利于提高维修水平,另一方面也有利于降低故障率,进而提高航材保障能力。

3) 因为航材保障良好率会随着环境恶劣程度的增加而降低,所以做好航母携行航材的保管工作十分重要。为合理降低环境因素对携行航材保障工作的影响,可通过提升航母携行航材封存包装标准、采取防震措施等途径,高标准做好携行航材的保管工作。

### 3 结束语

1) 提出的系统动力学模型在宏观上对航母舰载机远海长航时携行航材保障过程的仿真效果较好,对于航材携行需求量的预测比较准确。在当前航母舰载机远海长航时航材消耗规律不清、消耗数据样本缺乏的情况下,为航母舰载机远海长航时有寿可修航材需求预测提供了一个科学可行的仿真模型。该模型对于远海长航时条件下其他航材的需求预测也具有较高的借鉴价值。

2) 通过对远海长航时有寿可修航材需求系统动力学模型进行参数分析,在对携行航材供需过程仿真的基础上,提出了改善航材维修因素、提高航材维修性和可靠性、提升封存包装标准等策略,通过各种技术与管理途径进一步提高航母舰载机远海长航时有寿可修航材的供应保障水平。

3) 由于航母舰载机远海长航时航材供应系统是一个非常复杂的系统,为便于分析携行航材保障过程以及需求预测结果,提出的携行航材需求系统动力学模型对该系统进行了适当假设。在未来的实际保障工作中运用时,还需根据实际的舰基维修能力、飞机实力、飞行任务等因素调整模型参数甚至对模型进行扩展和细化,以使模型符合保障实际。

### 参考文献:

- [1] 陈振林,薛永亮.基于非参数回归的航材消耗预测模型研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(6):132-135.
- [2] LI X, ZHAO X D, PU W. Battle damage-oriented spare parts forecasting method based on wartime influencing factors analysis and  $\epsilon$ -support vector regression[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(4): 1178-1198.
- [3] 李伟,肖书成,王建华,等.基于线性回归分析的陆军航空兵训练航材消耗预测[J].兵工自动化,2021,40(4):65-68.
- [4] 陶在朴.系统动力学入门[M].上海:复旦大学出版社,2020:1-12.
- [5] 钟永光,贾晓菁,钱颖,等.系统动力学[M].2版.北京:科学出版社,2021:279-293.
- [6] 谢洪涛,卢睿,刘文荐,等.川藏铁路工程物资供应保障策略的系统动力学仿真研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):250-258.
- [7] 郭峰,王德心.航母舰载机航材携行品种及数量确定方法研究[J].军事运筹与系统工程,2015,29(2):38-42.
- [8] 郭峰,王德心.航空装备维修器材筹措供应标准研究[M].北京:国防工业出版社,2020:55.
- [9] 宋传洲,王瑞奇,刘战.面向任务携行航材消耗影响因素研究[J].航空维修与工程,2018,20(8):68-71.
- [10] 潘显俊,张炜,赵田,等.基于系统动力学模型的备件供应系统计算实验研究[J].装备学院学报,2017,28(3):51-56.
- [11] 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,2020:82-213.