

基于战时飞机出动架次率的保障设备优化配置

步 兵, 王卓健, 潘洪升

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 军用飞机战时的出动架次率是表征军机出动能力的重要参数。以保障设备的利用率和费用为主要约束条件,以飞机的出动架次率为目标函数,建立蒙特卡洛排队过程仿真模型。利用蒙特卡罗仿真求解目标函数值,应用遗传优化算法对满足约束条件的保障设备配置方案进行优化,使得飞机的出动架次率最高,最终得出基于出动架次率的保障设备配备比;并对飞机的出动架次率进行敏感性分析,得到保障设备配备比对出动架次率的影响曲线。

关键词 出动架次率;保障设备;优化配置;蒙特卡罗仿真;遗传算法;排队论

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.006

中图分类号 V37 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0030-06

Optimal Allocation of Support Equipments Based on Aircraft Sortie Generation Rate in the Wartime

BU Bing, WANG Zhuojian, PAN Hongsheng

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University,
Xi'an 710038, China)

Abstract: The sortie generation rate of military aircraft is a significant parameter to evaluate the dispatched ability. This article, taking the coefficient of utilization and the cost of support equipment as constraint conditions, and taking the aircraft sortie generation rate as objective function, establishes a Monte-Carlo queuing simulation model. The article utilizes the numerical values of objective function through Monte-Carlo simulation, and then optimizes the configuration projections of support equipment in applying the genetic algorithm to satisfy the constraint conditions maximizing the sortie generation rate. The article analyzes the sensitivity of sortie generation rate of aircraft, and obtains a curve line about allocation proportion of support equipment of influencing on the sortie generation rate.

Key words: sortie generation rate; support equipment; optimal allocation; Monte-Carlo simulation; genetic algorithm; queuing theory

战时军用飞机的出动架次率是衡量飞机连续出动能力的重要指标,也是影响作战的重要因素。保障设备的优化配置是提升保障效率、飞机出动强度

和部队战斗力的关键要素。保障设备过量配置会增加保障系统的规模,使得保障系统部署困难,同时会增加保障设备的采购费用及使用与维护费用,使航

收稿日期: 2017-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(71501185)

作者简介: 步兵(1993—),男,黑龙江双城人,硕士生,主要从事装备综合保障研究。E-mail:570494415@qq.com

引用格式: 步兵,王卓健,潘洪升.基于战时飞机出动架次率的保障设备优化配置[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(3):30-35.
BU Bing, WANG Zhuojian, PAN Hongsheng. Optimal Allocation of Support Equipments Based on Aircraft Sortie Generation Rate in the Wartime[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 30-35.

空装备的部署机动性、经济性差;保障设备配置过少则会导致装备的使用和维修保障需求不能得到及时有效的满足,降低航空装备战时的出动架次率,进而影响军用飞机的战斗力。因此,保障设备的优化配置具有广泛的研究前景。

目前,国内在战时保障设备配置方面的研究较少,主要集中在飞机出动架次率计算上。周晓光等^[1]建立了基于闭排队网络的舰载机出动架次模型,并用改进的均值分析方法对模型进行求解,给出了舰载机出动架次率与几种变量之间的关系曲线,其仿真结果具有实际意义。杨甫勤等^[2]应用排队理论给出了飞机多机种(型)出动架次率曲线,分析架次率与飞机数量之间的关系,并通过蒙特卡洛仿真对构建的模型的计算结果进行了验证。夏国清等^[3]主要面向架次率这一指标,基于排队理论和边际分析法建立了针对单一机种的机场资源配置模型。宿勇^[4]采用遗传算法和蒙特卡洛仿真相结合的方法,建立了以保障费用为约束目标,使用可用度、仓库库存容量等多约束条件下的保障资源配置优化模型。

国外学者主要是用仿真法研究维修保障模式对多机种出动架次率的影响,Paul^[5]模拟了飞机出动过程,重点研究了飞机维修保障对出动架次率的影响,为飞机提供准确的出动能力保障,并且在提高飞机出动架次率的同时,极大地减少了飞机全寿命周期的费用和飞机后勤保障的规模。Dennis^[6]在建立的飞机出动排队网络模型中,通过 Fork-Join 节点描述各种保障维修活动,运用平均值分析法求解飞机出动架次率及各项保障活动的性能指标。

以上文献并没有明确给出维修保障过程中保障设备的配备比,因此本文采用蒙特卡洛方法对战时飞机维修保障流程进行过程仿真,分析影响飞机出动架次率的主要因素,在保障设备的成本费用、保障设备利用率等条件的约束之下,以军机的出动架次率为目标函数,采用遗传优化算法^[7],建立优化模型,最终得到保障设备的最优配备比。

1 维修保障活动流程

1.1 维修保障活动流程描述

军机的基本保障流程包括:飞行前准备、再次出动机务准备和飞行后准备。本文重点从再次出动机务准备的角度出发,分析其基本的维修保障流程。战时在一个机场飞机连续出动执行作战任务并返回该机场进行维修保障的基本过程包括:起飞、执行任务、返回机场降落、检测、维修、维护、加油、挂弹,完成此过程后进行下一个批次的循环。其中,执行完

作战任务并返回机场后对飞机进行检测,如果飞机出现战伤或故障立即对其进行维修,然后进入下一保障节点;若飞机未出现损伤或故障,则对其进行相应的维护后进入下一环节。

应用排队理论^[8],把飞机看作是待接受服务的顾客,各项维修保障活动看作是服务节点。此系统便是包含 N 架飞机 M 个服务节点的排队网络,飞机在此网络中完成一系列的维修保障活动和作战任务要求。

1.2 维修保障活动流程模型

1.2.1 假设条件

将飞机进行维修保障活动的流程看作是顾客排队过程,其中影响飞机出动架次率的因素有很多,在构建保障活动流程模型的过程中,忽略对出动架次率影响较小的次要因素,保留主要因素,并对保障活动流程模型做出如下的假设:

假设 1 飞机进入排队系统的过程是相互独立的。在各个服务节点接受的服务时间服从对数正态分布,飞机在一个节点完成服务后转入下一节点继续接受服务。此服务时间包含飞机在各保障节点之间的转移时间。

假设 2 此排队系统的排队规则是等待制,即当飞机到达时,如果所有服务机构都被占用,则飞机排队等候。服务的机制是先到先服务(FCFS)。

假设 3 各服务节点的排队空间无限大,不会发生阻滞的现象,飞机可以无限制地进行排队。

假设 4 飞机在某一服务节点接受服务后以一定的概率转移到其他的服务节点继续接受服务。

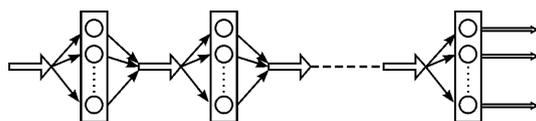


图1 飞机排队等待过程示意图

Fig. 1 The diagram which describes that aircraft are queuing to wait

1.2.2 构建模型

飞机在执行完一次作战任务后返回机场降落,如出现明显的故障或战场损伤,则以概率 P_{14} 转移至维修位进行维修;若未出现明显的故障或损伤,则以概率 P_{12} 转移至检测位。经仪器检测后,若机体内部出现故障,则以概率 P_{24} 转移至维修位进行维修;若机体内部完好,则以概率 P_{23} 转移至维护位进行维护。然后对飞机依次进行加油、挂弹等保障活动,完成所有保障活动后飞机起飞执行下一次作战任务,之后进入下一轮的循环。飞机在各服务节点的转移过程用转移矩阵 $\mathbf{P}=[P_{ij}]_{M \times N}$ 表示,见图 2。

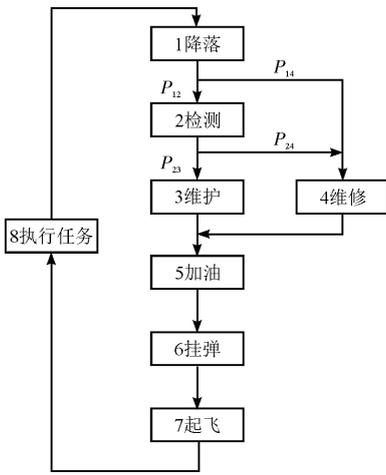


图2 飞机保障流程

Fig. 2 The process of supporting aircraft

1.3 蒙特卡罗仿真出动模型

蒙特卡罗方法^[9]又称为概率模拟方法,是一种通过随机变量的统计试验、随机模拟来求解工程技术问题近似解的数值方法。它的基本思想是:根据具体的问题建立仿真模型,根据仿真模型中各随机变量的分布,在计算机上生成随机数,进行大量的仿真试验,得到所求问题的大量仿真试验值,最后根据仿真试验结果求统计特征值。对得到的仿真试验结果进行分析,选取最优的设计方案。本文采用的蒙特卡罗过程仿真流程见图3。

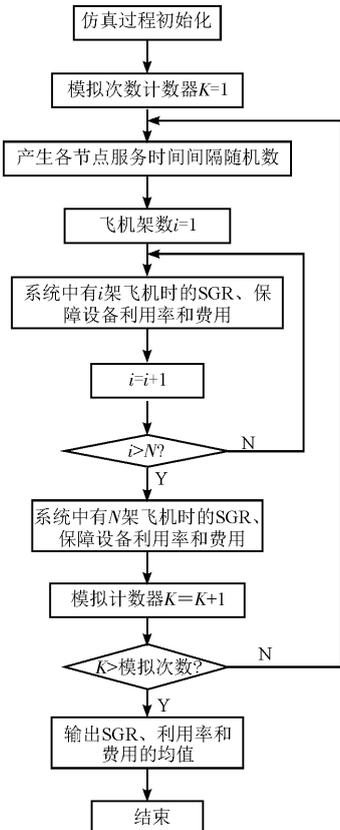


图3 蒙特卡罗仿真模拟

Fig. 3 The Monte-Carlo simulation

此排队出动过程是依据到达定理^[10-12]提出来的,由到达定理可以得到:

$$\mu_i(n)P_i(n|N) = \lambda_i(N)P_i(n-1|N-1) \quad (1)$$

排队系统中节点有 n 架飞机时各节点的服务速度为:

$$\mu_i(n) = \min\left(\frac{n}{s_i}, \frac{r_i}{s_i}\right) \quad (2)$$

飞机在节点 i 的滞留时间为:

$$R_i(N) = \sum_{n=1}^N \frac{n}{\mu_i(n)} P_i(n-1|N-1) \quad (3)$$

1架飞机2次通过同一个服务节点的平均时间定义为循环周期。飞机2次经过服务节点1的平均时间为:

$$T_1(N) = \sum_{i=1}^M \frac{v_i R_i(N)}{v_1} \quad (4)$$

式中: $\frac{v_i}{v_1}$ 表示排队系统中转移至第 i 个节点与转移至第 1 个节点的飞机数量比。 $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_m]$, 令 $v_1 = 1$, 则 $\mathbf{V} = \mathbf{V}\mathbf{P}$ 。

排队系统中有 N 架飞机时,系统中各个节点的吞吐量为:

$$\lambda_i(N) = \frac{Nv_i}{T_1(N)v_1} \quad (5)$$

根据 Little's 公式,系统中第 i 个节点排队的平均队长 $Q_i(N)$ 和接受服务的队列长 $Q_{l,i}(N)$ 分别为:

$$Q_i(N) = R_i(N)\lambda_i(N) \quad (6)$$

$$Q_{l,i}(N) = s_i\lambda_i(N) \quad (7)$$

各个节点保障设备的利用率为:

$$U_i(N) = \frac{s_i\lambda_i(N)}{r_i} \quad (8)$$

由公式(1)得飞机在排队系统中的概率分布为:

$$P_i(n|N) = \frac{\lambda_i(N)P_i(n-1|N-1)}{\mu_i(n)}, n > 0 \quad (9)$$

$$P_i(0|N) = 1 - \sum_{n=1}^N P_i(n|N) \quad (10)$$

在排队系统中, $P_i(0|0) = 1$ 和 $Q_i(0) = 0$ 为已知条件,因此从 $N=1$ 开始迭代运算,可以得到任意架飞机在各个节点的概率分布。其中, $\lambda_i(N)$ 为飞行位的飞机吞吐量,即飞机的出动架次率。

飞机出动过程中保障设备的总费用为:

$$C = \sum_{i=1}^M c_i r_i \quad (11)$$

排队系统中各参数指标符号及其含义见表1。

首先生成各保障节点服务时间的随机数,将各节点的保障时间输入到仿真模型,循环迭代得到系统中有 N 架飞机时的出动架次率和各保障节点设备的利用率以及所需的购置费用。在完成规定的模

拟仿真次数后,求得大量仿真试验结果的统计特征值,并将其输入到优化模型中进行最优化分析。

表 1 排队系统中各参数及其含义

Tab. 1 The parameters and their meaning in queuing system

指标	含义
N	服务对象的数量
$\mu_i(n)$	第 i 个节点有 n 架飞机时的服务速度
$\lambda_i(N)$	有 N 架飞机时,第 i 个节点的平均吞吐量
$R_i(N)$	有 N 架飞机时,飞机在第 i 个节点的平均逗留时间
$T_i(N)$	有 N 架飞机时,飞机在第 i 个节点的循环周期
$U_i(N)$	有 N 架飞机时,第 i 个节点保障设备的利用率
$Q_i(N)$	有 N 架飞机时,第 i 个节点的排队长度
$Q_{i,i}(N)$	有 N 架飞机时,第 i 个节点接受服务的队列长
$P_i(n N)$	有 N 架飞机时,第 i 个节点飞机的概率分布
S_i	第 i 个节点的服务时间
r_i	第 i 个节点保障设备数量
c_i	第 i 个节点保障设备的单价
C	保障设备的总费用

2 保障设配优化配置建模

2.1 保障设备优化配置模型

通过蒙特卡罗排队过程仿真与遗传算法相结合的方法可以得到保障设备的最优化配置。为尽可能快速地保障军机完成预期的作战任务,以各保障节点的保障设备数量为决策变量,保障设备的利用率和费用为约束条件,战时飞机的出动架次率最大为优化目标,建立如下的保障设备配置优化模型:

$$\begin{cases} \max & \lambda_7(r_i) \\ \text{s. t.} & C(r_i) \leq C_0 \\ & U_i(r_i) \geq U_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda_7(r_i)$ 为各节点保障设备数为 i 时,飞机的出动架次率; $C(r_i)$ 为各节点保障设备数为 r_i 时,保障设备购置的总费用; C_0 为保障设备总费用最高限制值; $U_i(r_i)$ 为各节点保障设备数为 r_i 时,各节点保障设备的利用率; U_0 为保障设备利用率的最低限制值。

2.2 遗传算法

遗传优化算法是一种迭代过程的搜索算法^[13-15]:①参数编码;②初始种群的设定;③适应度函数的设计;④遗传操作(选择、交叉和变异)设计;⑤控制参数(群体规模、遗传操作的概率和停止条件)的设定。

本文完成了适应度函数的设计和遗传算子的选取后,对优化算法进行求解,达到规定的遗传代数之

后,停止计算,以最后一代的最优方案为最终的输出结果。其仿真优化的基本流程见图 4。



图 4 仿真优化流程图

Fig. 4 The flow diagram of simulation and optimization

3 保障设备配置案例分析

3.1 仿真条件设定

本文通过一个案例详细说明此种方法的使用。假设某机场有 24 架飞机,为尽快完成规定的作战任务,要求此机场的飞机全部出动,并具有最大的出动架次率。从经费的角度考虑,要求各保障节点保障设备购置的总费用不超过 120 万元,同时为了保证保障设备不能过分闲置,要求保障设备的利用率不低于 50%。本文根据过去演练中的相关维修保障数据,结合实际情况,得到飞机再次出动准备过程中各节点保障时间的分布情况:

飞机起飞后对预定目标执行作战任务,执行作战任务并返回机场的时间间隔 t_1 服从 $(2.5, 0.2^2)$ 的正态分布,即 $t_1 \sim N(2.5, 0.2^2)$;返回机场后对飞机进行维修保障,检测时间 t_2 服从 $(0.2, 0.01^2)$ 的对数正态分布,即 $t_2 \sim LN(0.2, 0.01^2)$;维护时间 t_3 服从 $(0.28, 0.02^2)$ 的对数正态分布,即 $t_3 \sim LN(0.28, 0.02^2)$;维修时间 t_4 服从 $(1.9, 0.3^2)$ 的对数正态分布,即 $t_4 \sim LN(1.9, 0.3^2)$;加油的时间间隔 t_5 服从 $(0.5, 0.05^2)$ 的对数正态分布,即 $t_5 \sim LN(0.5, 0.05^2)$;挂弹时间 $t_6 \sim LN(0.5, 0.05^2)$ 服从 $(1, 0.3^2)$ 的对数正态分布,即 $t_6 \sim LN(1, 0.3^2)$ 。其单位均为小时。保障活动结束后起飞执行下一次作战任务。

飞机在各保障节点之间转移的概率矩阵为:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0.3 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

3.2 仿真结果分析

通过蒙特卡罗仿真和遗传优化算法相结合的方法,首先将仿真参数输入蒙特卡罗排队仿真模型,排队系统中每个节点的服务时间各取 10 个服从相应分布的随机数,即仿真次数为 $K=10^6$ 。然后设定遗传

算法最大迭代代数 of 100,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.02,为比较优化结果的收敛速度,设定初始种群规模分别为 50、100 和 150。优化后得到:在满足保障

设备利用率和总费用要求的条件下,24架飞机的平均最大出动架次率、各节点保障设备的配备数量以及各节点保障设备的配备比见表 2 和图 5。

表 2 保障设备优化配置结果

Tab. 2 The result optimal allocation of support equipments

服务节点	保障设备数量/个	保障设备单价/万元	保障设备利用率	保障设备配备比	保障设备总费用/万元	出动架次率/(架次·h ⁻¹)
检测	3	2.0	0.508 3	1 : 8	114	4.83
维护	2	4.5	0.635 3	1 : 12		
维修	5	6.0	0.578 9	1 : 4		
加油	3	5.5	0.503 1	1 : 8		
挂弹	7	7.5	0.587 0	1 : 3		

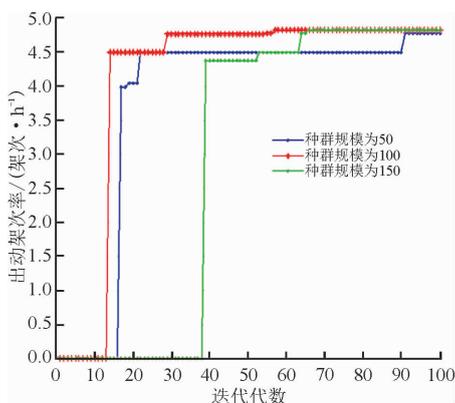


图 5 飞机出动架次率随种群代数变化曲线

Fig. 5 The curve describing the rate of sortie of aircraft varying with the population generation

从表 2 和图 5 中可以得知,初始种群规模为 100 时,优化过程的收敛速度最快。各节点保障设备的利用率相对均衡,此种保障设备的配置方案是合理的。

3.3 敏感性分析

由上述分析可得,保障设备的配备比对战时飞机的出动架次率有较大的影响,因此分析在不同的保障设备配备比的情况下飞机出动架次率的变化便显得尤为重要。在满足约束条件的情况下,选取 5 组不同的各节点的保障设备配备比,得到飞机出动架次率与数量的关系曲线,对保障设备的配备比做敏感性分析,见表 3 和图 6。

表 3 各保障节点的配备比

Tab. 3 The allocation proportions of every support nodes

	检测	维护	维修	加油	挂弹
配备比 1	1 : 8	1 : 12	1 : 4	1 : 8	1 : 3
配备比 2	1 : 12	1 : 12	1 : 4	1 : 12	1 : 4
配备比 3	1 : 12	1 : 12	1 : 8	1 : 12	1 : 4
配备比 4	1 : 12	1 : 24	1 : 12	1 : 12	1 : 8
配备比 5	1 : 24	1 : 24	1 : 8	1 : 24	1 : 8

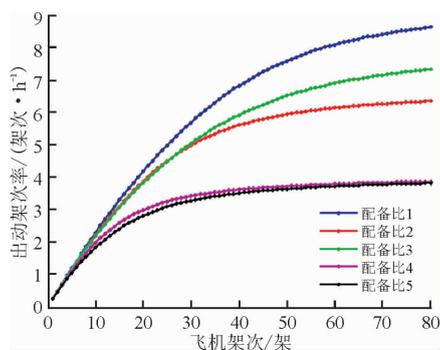


图 6 敏感性分析曲线

Fig. 6 The curve of sensitivity analysis

由图 6 可得,在一定的保障设备配备比的情况下,飞机的出动架次率先随飞机数量的增加而增加,而后趋于稳定,表明飞机数量的增加已经不能显著增加飞机的出动架次率,此时限制飞机出动架次率的因素主要是保障设备的数量;在不同配备比的情况下,相同数量飞机的出动架次率有显著差异。如图 6 所示,配备比 1 即为 24 架飞机所对应的最优配备比。

4 结语

本文采用蒙特卡罗仿真和遗传优化算法相结合的方法,首先建立了出动架次仿真模型,输入参数后运用遗传算法对保障设备的配备进行优化,最终得到满足保障设备利用率和购置费用要求的保障设备配备比。在仿真和优化的过程中发现运算时间较长,遗传算法的参数和仿真次数的设置都对计算效率有较大的影响,对于如何提升仿真优化效率以及全面提升保障设备的利用率有待做进一步的研究。

参考文献(References):

[1] 周晓光,冯百胜. 基于闭排队网络的舰载机出动架次

- 率分析[J]. 兵工自动化,2014(4):79-83.
- ZHOU X G, FENG B S. Analysis of Carrier-Borne Aircraft Sortie Generation Rate Based on Closed Queuing Network[J]. Ordnance Industry Automation, 2014(4):79-83. (in Chinese)
- [2] 杨甫勤. 基于闭排队网络的军用飞机多机种(型)出动架次率研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(1):130-136.
- YANG F Q. Research on Sortie Generation Rate of Multi-types Military Aircraft Based on Closed Queuing Network Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(1):130-136. (in Chinese)
- [3] 夏国清. 面向架次率的机场资源配置优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6):139-142.
- XIA G Q. Sortie Generation Rate Oriented Optimization Model for Airport's Resource Configuration[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(6):139-142. (in Chinese)
- [4] 宿勇. 基于遗传算法和蒙特卡洛仿真的保障资源优化配置方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(5):99-103.
- SU Y. Optimization Method of Support Resources Configuration Program Based on GA and Monte-Carlo Simulation[J]. Command Control and Simulation, 37(5):99-103. (in Chinese)
- [5] PAUL D. FAAS, J. O. MILLER. Impact of an Autonomic Logistics System (ALS) on the Sortie Generation Process [C]//Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003.
- [6] DENNIS C. DIETZ, RICHARD C. Jenkins. Analysis of Aircraft Sortie Generation with the Use of a Fork-Join Queuing Network Model[J]. Naval Logistics Research, 1997, 44(3):153-165.
- [7] 叶峰. 基于仿真模型的排队规则遗传优化算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2080-2086.
- YE F. Research on Genetic Optimization Algorithm of Queue Rules Based on Simulation Model[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2013, 33(8):2080-2086. (in Chinese)
- [8] 夏国清. 舰载机回收作业的反馈排队模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5):164-166.
- XIA G Q. A Queueing Model with Feedback for Embarked Aircraft's Recovery [J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(5):164-166. (in Chinese).
- [9] REISER M, LAVENBERG S S. Mean Value Analysis of Closed Multichain Queuing Network [J]. Journal of ACM, 1980, 27(2):313-322.
- [10] LAVENBERG S S, REISER M. Stationary Probabilities at Arrial Inatants for Closed Queuing Networks with Multiple Types of Customers [J]. Journal of Applied Probability, 1980, 17(4):1048-1061.
- [11] 夏国清. 基于闭排队网络的飞机出动架次率分析[J]. 系统工程学报, 2011, 26(5):686-693.
- XIA G Q. Analysis of Aircraft Sortie Generation Rate Based on Closed Queuing Network Model[J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(5):686-693. (in Chinese)
- [12] 赵冰化, 王勇. 军用飞机可用度概念模型及仿真[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(6):80-83.
- ZHAO B H, WANG Y. A Research on Conceptual Model and Simulation for the Military Aircraft Availability [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(6):80-83. (in Chinese)
- [13] 连翠萍. 基于仿真优化的飞机维修备件优化问题研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(10):174-177.
- LIAN C P. Optimized Spares Support Based on Simulation Optimization for Aircraft[J]. Computer Simulation, 2006, 23(10):174-177. (in Chinese)
- [14] 熊强强. 基于遗传算法的备件配置优化方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(5):54-57.
- XIONG Q Q. Optimization Method of Spare Parts Configuration Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(5):54-57. (in Chinese)
- [15] 郑世杰. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- ZHENG S J. Structure Healthy Monitoring[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)

(编辑:徐敏)