

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.021

基于闭排队网络的舰载机出动架次率分析

周晓光, 冯百胜, 迟志艳, 张原

(海军航空兵学院飞行模拟训练系, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为提升舰载机出动能力, 科学计算舰载机出动架次率, 提出一种基于闭排队网络理论的舰载机出动架次率计算方法。将舰载机出动回收过程相关的处理阶段抽化成闭排队网络中的节点, 构建了基于闭排队网络的舰载机出动架次模型, 研究了具有 Fork-Joint 节点的闭排队网络的改进启发式平均值分析方法, 并采用改进的均值分析方法对模型进行求解, 应用典型案例对舰载机数量、故障检测时间、同时起降数量等因素对舰载机出动架次率的影响进行分析, 给出了舰载机出动架次率与各变量之间的关系曲线。该研究结果可为提升舰载机出动能力, 以及优化舰载机作战训练操作运转流程提供量化依据和决策方法。

关键词: 航母; 舰载机; 出动架次率

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Analysis of Carrier-Borne Aircraft Sortie Generation Rate Based on Closed Queuing Network

Zhou Xiaoguang, Feng Baisheng, Chi Zhiyan, Zhang Yuan

(Department of Flight Simulation Training, Naval Aviation Institute, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to enhance the capacity of sortie generation, and to present a scientific calculate method for sortie generation rate, a calculate method for carrier-borne aircraft sortie generation rate based on closed queuing network is present in this paper. Firstly the steps of sortie generation process are designed to the nodes of closed queuing networks, the aircraft launch and recovery model based closed queuing networks is build. Secondly, the theory of closed queuing networks and improved mean value analysis (MVA) algorithm is introduced. A new analytical model based on a modified MAV algorithm using Fork-Joint queues is researched. Finally a typical example of sortie generation is given, the factors how to affect the sortie generation rate is analyzed, including aircraft number, trouble shoot time and launch capacity. The relationship between sortie generation rate and every variable is given in the simulation. The results of this paper can provide reference and quantization basis for improving the capacity of sortie generation and operation efficiency.

Keywords: aircraft carrier; carrier-borne aircraft; sortie generation rate

0 引言

舰载机是航母最重要的作战装备, 其出动能力是舰载机的核心能力之一。分析舰载机出动能力, 规划舰载机出动架次, 提升舰载机作战训练水平, 对于推进我海军舰载机作战能力生成以及构建航母作战体系具有重要意义。

国内在舰载机出动能力方面的研究较少, 大量研究集中于陆基航空兵作战飞机的出动能力方面。岳奎志等^[1]建立了有备份飞机条件下机群出动能力的排队论模型, 并阐述了根据故障率和所需出动飞机数量确定备份飞机数量和维修组数的分析流程, 其仿真结果符合实际情况。孙蛟等^[2]介绍了飞机出动架次率实测方法的不足和理论计算方法的分类, 提出了基于时间分割思想的工程计算方法, 建立了出动架次率计算模型, 以及出动架次率与使用可用度之间的转换模型, 给出了该方法的应用案例。

国外与舰载机作战相关的资料较少。文献[3]提出了采用均值分析法对飞机出动架次进行分析的方法, 并与后勤复合模型(logistics composite model, LCOM)进行了对比分析。文献[4]在文献[3]的基础上, 建立了具有 Fork-Join 节点的舰载机出动架次模型, 采用启发式方法对模型进行了近似简化, 应用仿真实例验证了模型的有效性和可行性。文献[5]采用软件包 ARENA 对舰载机出动架次问题进行了仿真评估分析, 分析结果可用于指导飞机出动架次优化。文献[6]对航母作战问题进行了分析, 对出动架次、航空管制对航母作战能力的影响进行了总结分析, 但是仅给出了结论性成果, 涉及的方法和模型没有给出。针对上述方法存在的问题, 笔者对基于闭排队网络的舰载机出动架次率进行研究。

1 基本概念界定

舰载机出动能力是指合理配置并高效使用母舰

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 国家社科基金(军事学)课题“舰载机××作战运筹分析”(12HJ2D6-×××)

作者简介: 周晓光(1982—), 男, 吉林人, 博士, 工程师, 从事作战运筹分析, 飞行仿真技术研究。

资源, 维持一定的舰载机出动架次, 保障舰载机在一定条件下执行各种飞行任务的能力, 一般用出动架次率来衡量^[7]。

舰载机出动架次是指舰载机(固定翼飞机和旋翼机)以完成任务为目的, 从飞行甲板上起飞到着舰完成的一个循环过程^[8]。一般情况下, 舰载机起飞后, 无论在空中停留多长时间, 只要还未着舰, 就是一架次, 只有舰载机着舰后, 该架次才视为结束。

一般的出动架次率(sortie generation rate, SGR): 指在规定的使用和维修保障方案下, 每架飞机每天能出动的次数, 也称单机出动率或战斗出动强度^[9]。SGR 是军用飞机最重要的战时战备完好性参数, 是军用飞机在作战环境下连续出动能力的度量, 是反映航空部队战斗力的重要标志。它受飞机每天能飞行时间、可靠性、维修性、维修及保障能力、机场条件、地面设施、气象条件等因素的影响。

舰载机出动架次率指的是在一定约束条件下, 给定时间内航母舰载机为完成特定任务而出动的架次数。其中, 一定的约束条件是指舰载机的作业周期、数量、完好率, 及飞行员数量、武器装载计划、平均挂弹时间、加油小组数、平均加油时间、维修能力等指标保持一定的情况; 给定时间指的是一段时期, 一般为一个飞行日。

2 舰载机出动回收模型建立

1) 假设条件。

为简化研究问题的复杂性, 建立如下假设条件:

① 假定甲板周期时间固定, 不考虑甲板周期时间制订问题; ② 不考虑批次的起飞着舰问题, 假定舰载机起飞着舰相互独立; ③ 假设起飞着舰过程相互独立, 不存在相互影响; ④ 将甲板作业中的系留、移除触发装置、维护保养(如充氮、换胎)、加油、挂弹、弹药检查统称为起飞前准备阶段。

2) 模型建立。

舰载机出动回收过程, 括舰载机起飞、飞行、

着舰、检测、命令延迟、维护、弹药卸载、起飞前准备(系留、移除触发装置、维护保养(如充氮、换胎)、加油、挂弹、弹药检查)、牵引至起飞准备点等, 如图 1 所示。

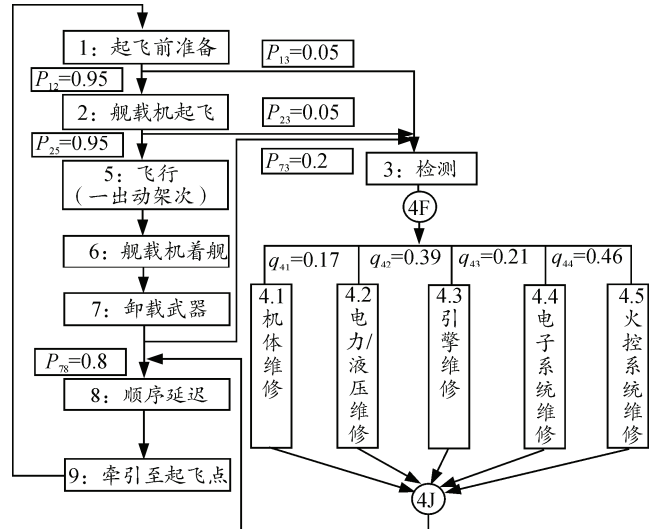


图 1 舰载机出动回收排队网络系统

基于闭排队网络理论, 将舰载机看成是客户, 各种活动为飞机接受的服务, 这样飞机的出动回收过程就可以用一个有 M 个服务中心和 K 个客户组成的闭排队网络表示。每架飞机在第 i 服务中心完成服务之后, 以一定的概率 p_{ij} 转移到第 j 个服务中心。舰载机载在各个服务中心间的转移情况可以用一个矩阵 $P = [p_{ij}]_{M \times M}$ 描述。图 1 中节点 4 为 Joint-Fork 节点, 可以进行同时维修工作, 仅当所有节点均完成维修服务后, 转入下一个节点。

3 模型求解方法分析

MVA 算法由 Reiser 等提出^[7], 在排队网络性能分析上有广泛的应用。针对构建的闭环排队网络模型的特殊性, 笔者对 MVA 算法进行了改进。为方便描述平均值分析方法, 引入如下符号, 其定义如表 1 所示。

表 1 闭排队网络符号及定义

符号	符号定义	符号	符号定义
K	系统中客户数量	$P_i(k K)$	在闭系统中固定客户数量为 K , 第 i 节点有 k 个客户的概率
λ_i	第 i 节点的吞吐量	$\lambda_i(K)$	在闭系统中固定客户数量为 K , 第 i 节点吞吐量
Q_i	第 i 节点的队列长度	$Q_i(K)$	在闭系统中固定客户数量为 K , 第 i 节点的队列长度
U_i	第 i 节点的服务效率	$R_i(K)$	在闭系统中固定客户数量为 K , 第 i 节点的相应时间
S_i	第 i 节点的服务时间	$CT_i(K)$	在闭系统中固定客户数量为 K , 在第 i 节点的平均循环时间
q_i	第 i 节点需要被维护的概率	v_i/v_1	第 i 节点相对于第 1 个节点的平均访问数量比
r_i	第 i 节点的服务器数量	$\mu_i(k)$	第 i 个节点有 k 个客户时的服务速率

在闭环排队网络中, 常包含 Fork-Join 节点, 平均值分析方法不能用于描述此类闭环排队网络。

Fork-Join 节点允许一个客户同时接受不同的服务。文献^[8]提出了一种改进的启发式平均值分析方法。

当一个客户进入到 Fork-Join 节点后，被克隆后通过 Fork-Join 节点的不同子路径送往 Fork-Join 节点的子节点。当所有的克隆体完成服务，并入联合节点，客户完成服务，离开 Fork-Join 节点。

启发式平均值分析方法设定 2 个假设条件，一是到达定理；二是 Fork-Join 节点中的子节点服务时间符合指数分布，且相互独立。

启发式平均值分析方法的第一步是计算 Fork-Join 节点的子节点的平均相应时间。与平均值分析方法计算平均相应时间方法相同，根据到达定理有如下公式^[9]成立：

$$R_j(K) = \sum_{k=1}^K \frac{k}{\mu_k(k)} P_k(k-1|K-1) \quad (1)$$

式中 $j=1,2,\dots,J$ ， J 为 Fork-Join 节点的路径数量。根据 $R_j(K)$ 的值可以确定平均持续时间。设：

$$\theta_j = \frac{1}{R_j(K)} \quad (2)$$

一个克隆体在 Fork-Join 节点的子节点 j 的相应时间大于其他子节点的相应时间的概率为：

$$p_j(k) = P\{t_j(k) > \max[t_1(k), t_2(k), \dots, t_{j-1}(k)]\} \quad (3)$$

其中， t_j 为克隆体在子节点 j 完成服务所需的时间随机变量。文献[10-11]定义了乘积形式的概率分布函数，每个子节点指数服务时间为：

$$F(t) = \prod_{j \in K} P\{t_j(n) \leq t\} = \prod_{j \in K} (1 - \exp\{-\theta_j(k)t\}) \quad (4)$$

顾客在 Fork-Join 节点的持续时间是所有子节点中完成服务所需的最大时间。具有概率密度函数 $F()$ 的非负连续随机变量 X 的期望为：

$$E(X) = \int_0^{\infty} \{1 - F(t)\} dt \quad (5)$$

所以

$$E\left(\max_{j \in J} \{t_j(n)\}\right) = \int_0^{\infty} \{1 - F(t)\} dt \quad (6)$$

公式可以进一步简化为：

$$E\left(\max_{j \in J} \{t_j(n)\}\right) = \sum_{j \in J} \frac{1}{\theta_j(k)} - \sum_{j \in J} \sum_{l > j \in J} \frac{1}{\theta_j(k) + \theta_l(k)} + \dots + (-1)^{J+1} \frac{1}{\sum_{m \in J} \theta_m(k)} \quad (7)$$

具有 Fork-Join 节点的闭排队网络系统的循环时间的计算公式如下：

$$CT_1(K) = \sum_{i \in Y} v_i R_i(K) + \sum_{i \in Z} v_i E\left(\max_{j \in J} \{t_j(n)\}\right) \quad (8)$$

其中： Y 为非 Fork-Join 节点的集合； Z 为 Fork-Join 节点的集合。

在启发式平均值分析方法中，对于 Fork-Join 节点的子节点的性能参数可通过如下公式^[12]计算：

$$\lambda_i(K) = \frac{Kv_j}{CT_1 v_1} \quad (9)$$

$$Q_j(K) = R_j(K) \lambda_j(K) \quad (10)$$

$$U_j(K) = s_j \lambda_j(K) \quad (11)$$

$$P_j(0|K) = 1 - \sum_{k=1}^K P_j(k|K) \quad (12)$$

$$P_j(k|K) = \frac{\lambda_j(k) P_j(k-1|K-1)}{\mu_j(k)} \quad (13)$$

设 Ω 为 Fork-Join 节点所有可能性组合路径的集合，包含没有路径的情况为 Φ 。设 S 为 Ω 的子集， q_i 为路径 i 被访问的概率。那么 S 发生的概率为

$$\pi(S) = \prod_{k \in S} q_k \prod_{k \notin S} (1 - q_k) \quad (14)$$

假定客户访问路径的概率是相互独立的，那么可以计算 Ω 中每个 S 的值 $E\left(\max_{j \in S} \{t_j(n)\}\right)$ 。那么带有 Fork-Join 节点的闭排队网络的循环时间可修改为：

$$CT_1(K) = \sum_{i \in Y} v_i R_i(K) + \sum_{i \in Z} v_i \sum_{S \in \Omega} E\left(\max_{j \in S} \{t_j(K)\}\right) \pi(S) \quad (15)$$

$$\lambda_i(K) = \frac{Kv_j q_j}{CT_1 v_1} \quad (16)$$

4 关键因素对舰载机出动架次能力影响

1) 仿真想定。

根据闭排队网络理论，构建舰载机出动架次描述模型如图 1 所示。根据以上分析可知，基于闭环网络理论的舰载机出动架次分析模型共有 9 个节点，其中：节点 1 为起飞前准备；节点 2 为舰载机起飞；节点 3 为维护检测；节点 4 为维修维护；节点 5 为飞行(完成一架次)；节点 6 为舰载机着舰；节点 7 为卸载武器；节点 8 为顺序延迟；节点 9 为牵引至起飞点。其中节点 4 为 Fork-Join 节点，可同时进行机体维护、电力/液压维修、引擎维修、电子系统维修、火控系统维修活动。

每个节点以一定的概率可以到达这个节点的目标节点，例如节点 1 的目标节点有 2 个分别是 2 和 3，以 0.95 的概率到达节点 2，以 0.05 的概率到达节点 3。

根据图 1 所示，构建舰载机出动架次模型节点

概率转移矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0.95 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0.95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据转移概率矩阵可以求出访问比率向量 V :

$$V = [1.00 \ 0.95 \ 0.278 \ 0.278 \ 0.9025 \ 0.9025 \ 0.9025 \ 1.00 \ 1.00]$$

在此基础上, 进行迭代计算有:

常规节点服务均值时间分别为 S :

$$S = [0.3 \ 0.05 \ 0.25 \ 2 \ 1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]$$

常规节点服务器数量 R :

$$R = [10 \ 1 \ 5 \ 5 \ K \ 1 \ 5 \ K \ 1]$$

在 Fork-Join 维修点, 需要维修的概率 Q :

$$Q = [0.17 \ 0.39 \ 0.21 \ 0.27 \ 0.46]$$

在 Fork-Join 维修点, 服务均值时间 SFJ:

$$SFJ = [2.2 \ 2.227 \ 2.37 \ 1.5 \ 1.19]$$

在 Fork-Join 维修点, 服务器数量 SR :

$$SR = [1 \ 3 \ 2 \ 1 \ 2]$$

采用均值分析方法, 分别计算每个节点的输出值, 输出值定义如表所示。根据定义可知, 节点 5 的吞吐量为舰载机出动架次率 λ_{sortie} 。每个节点的输出定义如表 2 所示。

表 2 均值分析闭环节点输出

变量	定义
R	相应时间(服务时间+等待时间)
λ	吞吐量(完成数量/每小时)
λ_{sortie}	出动架次率(架次/小时)
Q	节点的平均顾客数量
U	单服务器: 忙时的平均百分比(利用率)

2) 仿真结果分析。

① 舰载机数量对出动架次率影响。

根据以上定义, 分别对舰载机数量为 $K = 10$ 进行仿真计算, 最终的仿真结果表 3 所示。

根据仿真结果, 分别对不同舰载机数量时的舰载机出动架次率进行统计分析, 关系绘制如图 2。

从图 2 中可以看出, 舰载机出动架次率与舰载机数量之间成抛物线形式, 在舰载机数量较少的情况下, 提升舰载机数量对于提升舰载机出动架次率效果更为明显。当舰载机数量增加到一定数量后, 由于受起飞、维护、保障等能力的限制, 单独的提升舰载机数量对于提升舰载机对于提升舰载机出动架次率影响不大。

架次率影响不大。

表 3 舰载机数量为 10 的模型输出结果

节点	R	λ	Q	U
起飞前准备	0.300 0	3.937 0	1.181 1	1.181 1
舰载机滑跃起飞	0.060 0	3.740 1	0.224 5	0.187 0
检测	0.250 0	1.094 5	0.273 6	0.273 6
机体维修	3.405 9	0.186 1	0.633 7	0.409 3
电力液压系统维修	2.322 8	0.426 8	0.991 5	0.968 9
引擎维修	2.506 1	0.229 8	0.576 0	0.544 7
电子系统维修	2.423 5	0.295 5	0.716 2	0.443 3
火控系统维修	1.273 3	0.503 5	0.641 0	0.599 1
飞行(出动架次)	1.000 0	3.553 1	3.553 1	3.553 1
舰载机着舰	0.145 0	3.553 1	0.515 1	0.355 3
卸载武器	0.100 0	3.553 1	0.355 3	0.355 3
顺序延迟	0.100 0	3.937 0	0.393 7	0.393 7
牵引至起飞点	0.151 9	3.937 0	0.597 8	0.393 7

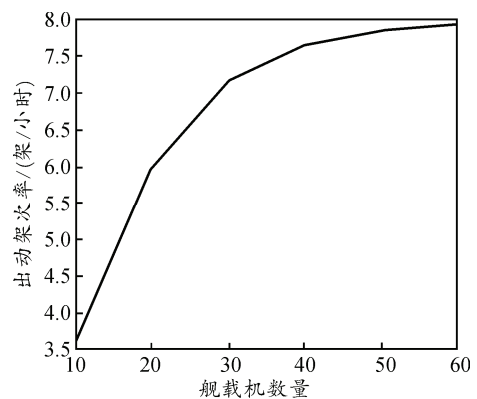


图 2 舰载机出动架次率与舰载机数量之间的关系

② 故障检测时间对出动架次率影响。

在舰载机数量为 35 架, 其他相关参数不变时, 计算舰载机出动架次率与故障检测时间的关系, 即变化舰载机出动架次循环流程闭排队网络中节点 3 的服务时间, 相应的舰载机出动架次率如图 3 所示。

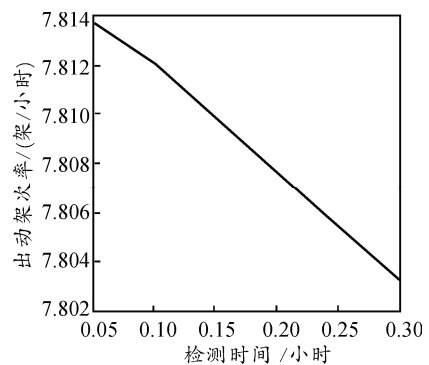


图 3 舰载机出动架次率与故障检测时间之间的关系

从图 3 中可以看出, 减少舰载机故障检测时间, 可以提升舰载机出动架次率, 且几乎呈线性关系, 不存在随故障检测时间越少, 对于提升舰载机出动架次率影响越小的情况, 因此要尽量减少舰载机故障检测时间, 时间越少越好。

③ 舰载机同时起飞数量对出动架次率影响。

在舰载机数量为 35，故障检测时间为 0.2.5 h，变化节点 2 的服务器数量，舰载机出动架次率与节点 2 的服务器数量之间的关系如图 4 所示。节点 2 的服务器数量描述了舰载机同时起飞数量对舰载机出动架次率的影响。从图 4 中可以看出，在稳态状态下，在本实验想定下，当舰载机同时起飞数量为 1 变化到 2 时，舰载机出动架次率提升效果明显，而增大到 3 以后，提升效果不显著。

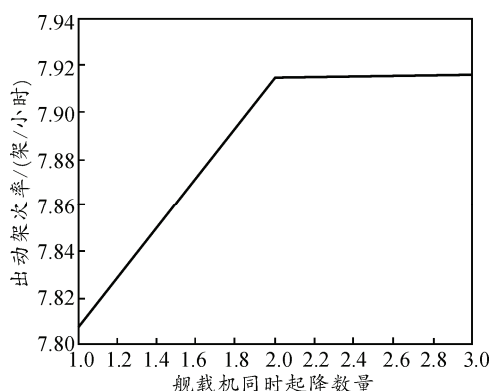


图 4 舰载机出动架次率与同时起飞数量之间的关系

5 仿真结果分析

1) 从实验 1 可以看出，舰载机数量是决定舰载机出动架次能力的决定性因素，但是在舰载机数量增大到一定数量后，对舰载机出动架次能力的影响是有限的。舰载机数量的确定一定要根据整个航母作战体系的整体能力进行确定，主要包括维护保障能力、调度能力、起飞着舰能力、航空管制能力等。舰载机出动架次能力是由整体航母作战体系所决定的，一定要以系统的观点，从全局角度研究舰载机作战相关的问题。

2) 从实验 2 可以看出，减少故障检测时间、舰载机起飞时间及舰载机维修时间，可以进一步提升舰载机出动架次能力，且呈现线性关系。同理，减少其他节点的服务时间同样可以提升舰载机出动架次能力。这要求舰载机出动架次流程相关的服务节点，如甲板调度、起飞着舰、维护保障等，一定要提高作战效率，尽量减少服务时间。

3) 从实验 3 可以看出，将舰载机同时起降数量由 1 架提升为 2 架时，舰载机出动架次能力提升效果明显，继续提升舰载机同时起降的数量，对于提升舰载机出动架次能力效果不明显。该实验结果与实验 1 所得到的结果类似，舰载机出动架次流程涉及的工作多、服务人员广，单独提升某一阶段的服务质量，或者某一模块的服务质量，在一定程度上

可以提升舰载机出动架次能力，但由于出动架次流程是一个体系，受到其他节点服务的限制，都存在随单节点提升能力出动架次率增量减小的现象。

6 结论

笔者构建了基于闭排队网络的舰载机出动架次模型，采用改进的均值分析方法对模型进行求解，应用典型案例对舰载机数量、舰载机故障检测时间、舰载机同时起降数量等因素对舰载机出动架次率的影响进行了分析，分析结果可为提升舰载机出动能力提供量化依据和决策参考。由于笔者在构建闭排队网络模型时，对舰载机出动问题进行了简化，下一步将综合研究甲板周期、航空管制能力对舰载机出动能力的影响。

参考文献：

- [1] 岳奎志, 韩维, 王庆官. 基于排队轮的机群出动能力模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(3): 224-228.
- [2] 孙蛟, 赵彬, 辛文达. 军用飞机出动架次率工程计算方法[J]. 空军装备研究, 2009, 3(6): 30-33.
- [3] Richard Carl Jenkins. A mean value analysis heuristic for analysis of aircraft sortie generation[D]. AFIT/GOR/GENS/94 M-07 AD-A278 578.
- [4] Daniel V. Hackman, Major, USAF. Analysis of aircraft sortie generation with concurrent maintenance and general service times[D]. AFIT/GOR/GENS/97M-11, Air Force Institute of Technology.
- [5] Jean Pierre Goncalves, Kari Saade, Katherine Stevenson. Sortie production optimization team(SPOT)[C]. Aircraft Inspections Process, Booz Allen Hamilton Inc, September 28, 2006: 251-256.
- [6] Angelun Jewell, Maureen A. Wigge. USS Nimitz and carrier airwing nine surge demonstration[R]. Center for naval analyses. CRM 97-111.10/Aperil 1998.
- [7] 夏国清, 陈红召, 王元慧. 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): 677-693.
- [8] Angleyn J, Maureen A W, Colleen M K. USS Nimitz and carrier airwing nine surge demonstration[R/OL]. 1998 0-08-12.
- [9] 曾天翔, 等. 可靠性维修性保障性术语集[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 12.
- [10] 薛鲁强, 隋江波, 王贵喜. 舰空导弹武器系统可靠性维修性试验设计[J]. 兵工自动化, 2012, 31(10): 4-7.
- [11] Hackman D V. Analysis of aircraft sortie generation with concurrent maintenance and general service times[D]. Dayton: Air force Institute of Technology(AU). Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [12] Richard Carl Jenkins, B. S. A mean value analysis heuristic for analysis of aircraft sortie generation[D]. Graduate School Engineering of the Air Force Institute of Technology Air University, 1994.