

doi: 10.7690/bgzd.2022.01.016

## 基于 Simpy 的部队装备维修仿真系统设计与实现

牟轩庭, 张宏军, 李云波

(陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210000)

**摘要:** 针对新形势下装备维修保障的优化问题, 提出一种装备维修仿真系统的体系结构。分析部队维修保障过程中关键要素之间的关系, 阐述装备维修仿真系统的用户需求; 以维修时间优化为例建立静态维修的任务分配优化模型, 设计动态维修条件下维修保障的过程模型, 并采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 对不同维修分队的维修效能进行比较。基于离散事件仿真库 Simpy 实现了仿真系统的数据分析仿真功能, 结合某型装备的维修保障数据进行了仿真验证, 仿真结果表明, 该系统能为装备维修的流程设计、资源配置与优化等方面提供参考依据。

**关键词:** 装备维修; 仿真系统; Simpy; 效能评估; 层次分析法; 逼近理想解排序法

**中图分类号:** TJ07 **文献标志码:** A

## Design and Implementation of Military Equipment Maintenance Simulation System Based on Simpy

Mu Xuanting, Zhang Hongjun, Li Yunbo

(College of Command and Control Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Aiming at the optimization of equipment maintenance support under the new situation, an architecture of equipment maintenance simulation system is proposed. The relationship between the key elements in the process of maintenance support is analyzed, and the user requirements of equipment maintenance simulation system are described; taking the optimization of maintenance time as an example, the task allocation optimization model of static maintenance is established, and the maintenance support process model under the condition of dynamic maintenance is designed. analytic hierarchy process (AHP) and technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) were used to compare the maintenance effectiveness of different maintenance units. The data analysis and simulation function of the simulation system is realized based on the discrete event simulation library Simpy, and the simulation verification is carried out with the maintenance support data of a certain type of equipment. The simulation results show that the system can provide reference for the process design, resource allocation and optimization of equipment maintenance.

**Keywords:** equipment maintenance; simulation system; Simpy; effectiveness evaluation; AHP; TOPSIS

### 0 引言

高效、及时的武器装备维修保障活动, 能够恢复和维持装备的原有性能, 保证军队快速恢复战斗力, 更好地遂行各项作战任务。平时为达到规定的装备可用水平要求, 提高装备维修保障资源的利用效率, 需要制定装备维修保障计划, 合理设计装备的维修流程。然而, 部队的调整改革与新型装备的飞速发展使得装备维修保障体系发生了深刻变化。受人力、物力等多方面因素影响, 多次改变条件进行复杂的装备维修保障演练往往难以实行; 因此, 仿真技术成为了研究装备维修相关问题的重要手段之一<sup>[1]</sup>。

为研究新形势下不同装备的维修保障规律, 优化装备维修保障流程与资源分配, 需要获取装备运

维数据, 建立武器装备维修保障系列模型, 运用系统仿真的方法进行分析, 从而能够综合考虑保障过程中各要素之间的复杂交互作用<sup>[2]</sup>, 实现武器装备维修保障过程的迭代优化。笔者首先分析武器装备维修保障的关键要素, 建立武器装备维修保障计划模型, 搭建装备维修仿真系统的整体框架, 研究基于离散事件仿真库 Simpy 的仿真系统实现方法, 最后通过实例进行了系统功能的验证。

### 1 维修保障需求分析

装备维修保障涉及众多人员、部门机构、装备、资源等要素的配置与流动, 是一个复杂系统。从人员角度来看, 系统的使用人员可以抽象为系统用户和系统管理员。系统管理员可分为装备管理员、数

收稿日期: 2021-09-21; 修回日期: 2021-10-28

作者简介: 牟轩庭(1997—), 男, 浙江人, 从事军事仿真研究。E-mail: 573328609@qq.com。

据管理员和仿真管理员，负责维护系统不同的运行模块和相关数据。装备管理员需将日常装备运行维护过程中的装备基本数据、运维实施、运维调度、保障资源消耗等方面的数据进行登记保存，这些数据中隐含着系统运行的规律，是仿真模型参数生成的基础；数据管理员需建立运维数据仓库，从装备运维数据中采集数据，进一步处理后形成便于分析

利用的数据产品；仿真管理员需实现并维护系统的仿真运行模块，确保系统提供正确的模型参数、按照要求正确地运行仿真模型。系统用户使用仿真系统运行装备维修保障模型，获得运行结果以及相关评估指标；因此，用户需进行仿真控制、设置仿真初始条件、查看输出数据以及清除仿真结果等基本操作。具体需求如图 1 所示。

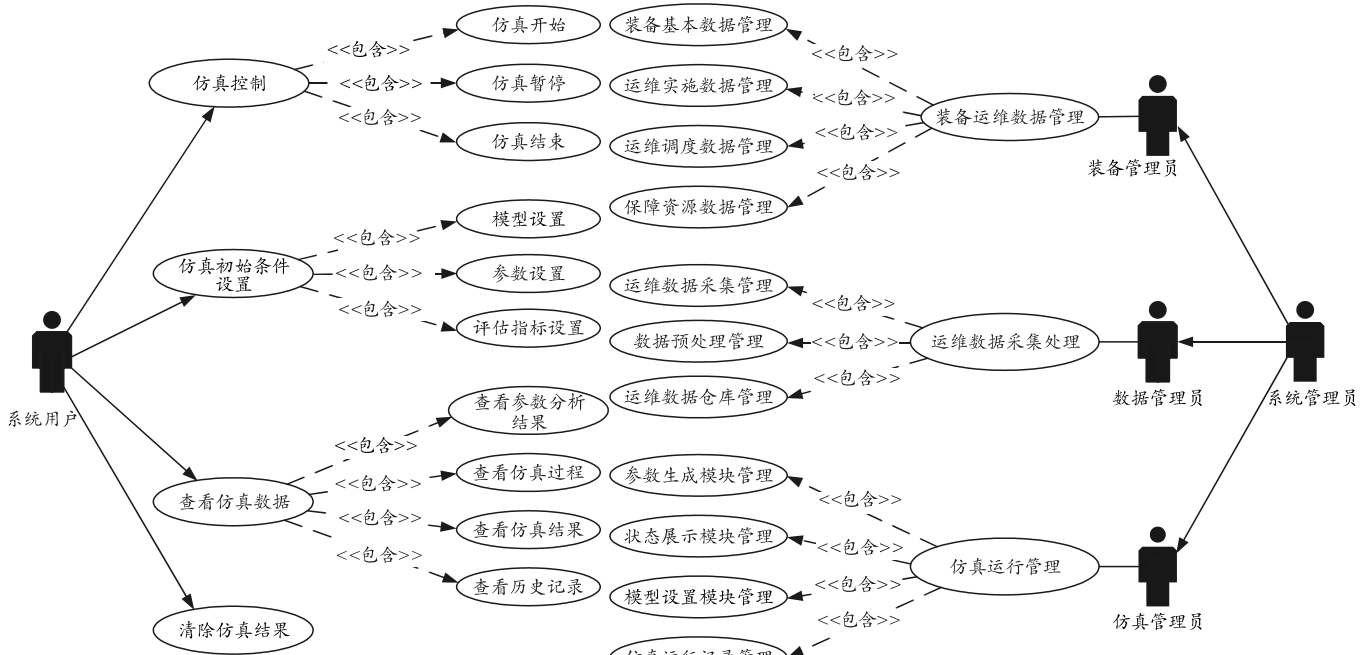


图 1 系统需求

从系统整体的运行角度看，部队、人员、装备和维修资源之间存在着多重关系，具体联系如图 2 所示。部队有维修团队的人员编制，并编配了不同类型和数量的武器装备，管理着维修保障所需资源。装备出现故障或到达保养周期需要维修时，部队向维修团队提出维修需求，维修团队制定相应的维修计划，接收待修装备，准备维修保障所需物资，进行维修保障，事后形成详细的维修实施记录。

制定维修计划需考虑的因素主要有维修类型、装备的技术性能信息、维修人员配置、维修质量要求和装备故障优先级等。根据维修的组织形式，装备维修可分为静态维修与动态维修。静态维修指一定数量的装备集中统一进行的修复性维修，动态维修指日常的预防性维修和对突发故障的维修。故障有多种类型，维修人员处理不同类型故障花费的时间不同。通常一个维修团队能同时进行多台装备的维修作业，但现有维修力量无法容纳更多待修装备时，系统就会出现排队现象。考虑上述问题，需要分别建立模型对不同维修任务进行描述。

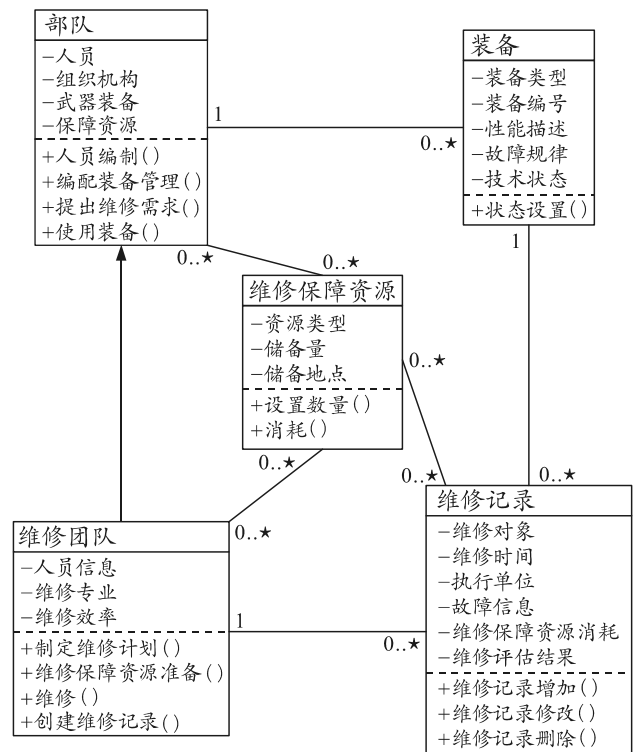


图 2 装备维修要素关系

为简化问题，方便研究，对模型作出如下假设：

1) 将待修装备的维修作业从故障检测、拆卸到装配、试验等一系列作业流程视为整体，不同类型的故障用  $f_i(i=1, 2, \dots, k)$  表示，共有  $k$  类；故障的发生是随机独立的，间隔为随机变量  $\lambda_i(i=1, 2, \dots, k)$ 。

2) 维修团队下辖  $m$  个维修分队并行工作，第  $i$  个分队处理第  $f_j$  类故障时所需时间为随机变量  $t_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k)$ ，对应的平均修复时间为  $\bar{t}_{ij}$ ，维修作业相互独立。

3) 装备每次只产生一种故障，经过维修后能恢复一定的技术状态，但有一定的概率不能达标。

4) 忽略所有其他环节所需的保障资源及花费的时间。

对于静态维修而言，在装备数量与故障确定的情况下，待修装备的分配方式决定了维修队列，可由用户自行输入，也可通过系统进行动态规划来提供一个可行的优化方案，以实现维修时间、维修费用、维修效率等目标的优化<sup>[3]</sup>。以维修时间为例，给定  $m \times k$  的平均修复时间矩阵  $T$ 、待修装备总数  $n$  以及各类故障下装备的数目  $n_{f_j}$ ，则装备分配到维修分队的情况也可用  $m \times k$  的分配矩阵  $A$  表示，矩阵中元素  $a_{ij}$  为第  $i$  个维修分队分配  $a_{ij}$  台产生了  $f_j$  类故障的装备。第  $i$  个维修分队执行分配方案  $A$  所花费的估计时间为

$$e_i = \sum_{j=1}^k \bar{t}_{ij} \times a_{ij} \quad (1)$$

为充分利用各维修分队的保障力量，又使总体维修时间尽可能地小，分配方案应使各维修分队的维修总时间相近，且最大维修时间最小，求解目标可描述如下：

$$\left. \begin{aligned} & \arg \min(\max\{e_1, e_2, \dots, e_m\}) \\ & \sum_i a_{ij} = n_{f_j} (j=1, 2, \dots, k) \\ & \sum_j a_{ij} \leq n (i=1, 2, \dots, m) \\ & a_{ij} \geq 0 (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

该模型的求解使用非线性规划方法中的广义简约梯度法 (generalized reduced gradient, GRG)<sup>[4]</sup>，其为求解一般非线性优化问题最有效的算法之一。

对于动态维修而言，装备不同类型的故障相互独立，总体上可认为装备故障的产生是多个间隔为  $\lambda_i$  的随机到来事件的组合。为使新来的装备等待时间最小，选择维修分队前，需要先对当前各维修分队的等待队列进行评估，主要考虑维修分队所需平均修复时间以及排队估计时间这 2 个因素，以简单线性加权的形式计算评估值。

同级的故障采用先到先维修原则。考虑到一些装备的故障发生在关键部位，严重影响其正常运行和使用寿命，此类装备的优先级较高，需优先维修。而为了防止优先级较低的装备等待时间过长，对装备进行加权排队，当队列中新加入一台装备，已有装备的优先级会适当提高。对于不同的维修类型，总体维修流程如图 3 所示。

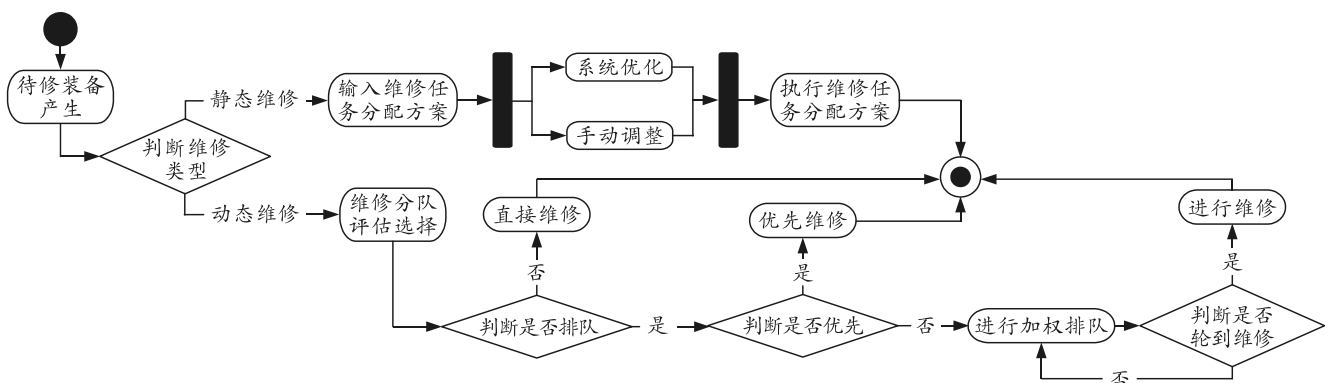


图 3 维修流程

仿真结束后，需对装备维修系统的保障效能进行评估。现有的研究<sup>[5-6]</sup>已经从多个角度提出了较为全面的评估指标体系，包括维修时间、维修费用、维修资源、维修人员、维修效果等方面的评估指标，可作为研究问题时的具体参考。笔者以平均故障修复时间、维修达标率、装备可用度、分队技能水平

以及维修资源消耗率为例，比较不同维修分队的维修效能。装备可用度指装备在任意时刻需执行任务时，处于可以使用状态的概率，是装备可靠性、维修性、保障性综合效果的度量。装备的使用可用度可直接反映维修团队制定的保障计划是否合理，资源调度是否及时等。考虑故障共有  $k$  类，任一故障

都会导致装备不可用，则装备可使用度为

$$U = \prod_j^k \left( \text{MTBF}_j / (\text{MTBF}_j + \text{MTTR}_j + \text{MLDT}_j) \right) \quad (3)$$

其中， $\text{MTBF}_j$ 、 $\text{MTTR}_j$ 、 $\text{MLDT}_j$  分别对应第  $j$  类故障的平均可运行时间、平均修复时间和平均延误保障时间。分队技能水平参考平时分队维修保障考核成绩；维修资源消耗率指维修消耗的资源量与初始准备的维修资源量之比。

笔者使用层次分析法(AHP)结合专家意见确定评估指标的权重，使用逼近理想解排序法(TOPSIS)进行维修分队的综合评估，并根据分析结果对评价落后的分队提出改进意见。这 2 种方法是多指标综

合评定问题中比较常见且有效的方法，既适用于复杂的多级指标评估体系，又能结合专家的领域知识设计不同的权重，在装备维修策略优化和保障效能评估中得到了较多应用<sup>[7-10]</sup>，具体原理见文献[11]。

### 2 仿真系统结构设计

根据用户需求，仿真系统需从装备维修机构中采集维修历史数据，并将数据处理为适合进行分析、决策、仿真等应用的基础数据集，然后从中挖掘装备的故障规律，用于建立适当的模型对其进行描述和仿真分析，最后将结果进行展示。笔者将系统总体分为如图 4 所示的 4 层。

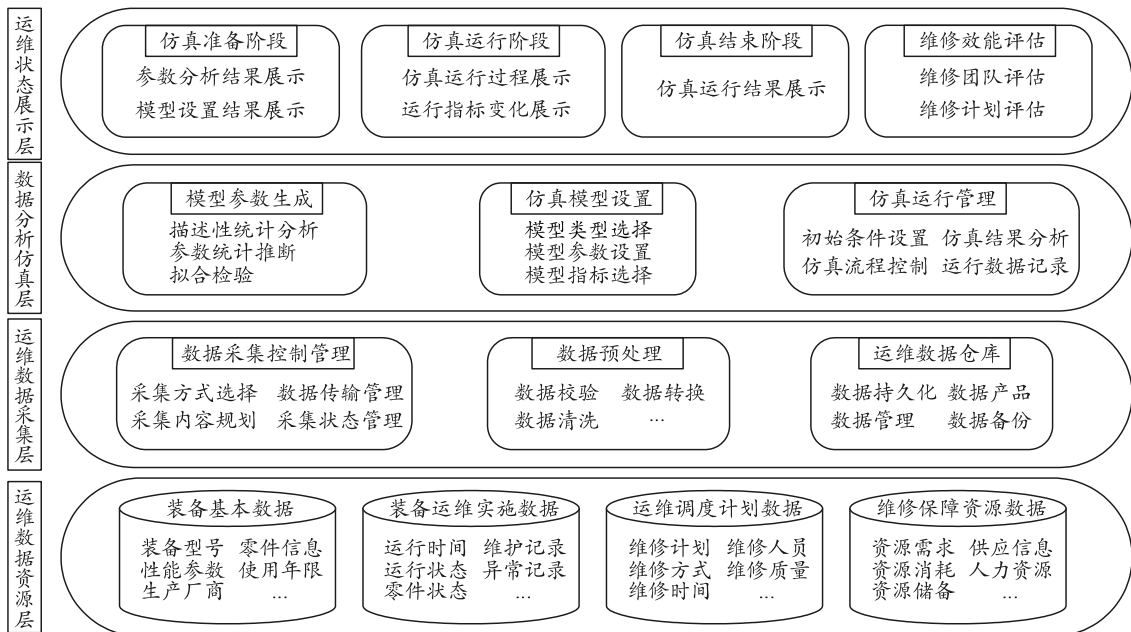


图 4 系统体系结构

1) 运维数据资源层记录着装备日常运行维护和维修保障的详细信息，是系统仿真数据的基础来源。该层根据装备维修保障数据的不同内容，将存储的数据分类整理为装备基本数据、装备运维实施数据、运维调度计划数据以及维修保障资源数据 4 大类，由不同业务部门的管理人员进行维护。

2) 运维数据采集层负责维修数据的采集、预处理和存储管理工作，是系统仿真数据分析和应用的基础。数据采集控制管理模块负责装备维修历史数据采集任务的实施，根据采集任务的具体需求，设定采集方式、采集时间、采集内容等实施细节，并实时监测采集节点的工作状态；数据传输管理负责完成系统与采集节点的通信、采集数据的传输、网络状态的监视等功能。数据预处理模块负责对采集到的数据进行简单的校验、清洗、格式转换等处理，

以去除错误、不完整、冗余的数据，提高数据质量。运维数据仓库模块负责将预处理后的数据进行分类存储和管理维护。与运维数据资源层有所不同的是，该模块存储的是加工处理好的数据产品，以支持大量的查询访问操作为主，便于后续的数据分析、仿真运行等应用。为防止数据因系统灾难发生损坏或丢失的情况，对重要的数据提供简单的容错备份服务，以便系统快速从故障中恢复。

3) 数据分析仿真层为系统的核心功能层，负责仿真数据分析以及模型的设置与运行管理。模型参数生成模块负责在仿真前对仿真对象的属性数据进行描述性统计分析，以及使用统计推断方法建立数据的多种拟合分布模型，并通过拟合程度的检验，挑选出最优拟合分布模型，为仿真的模型选择和参数设置提供参考。仿真模型设置模块负责对仿真模

型的基本条件以及参数进行设置,如模型类型选择、模型参数设置、模型指标选择等。仿真运行管理模块控制着模型的运行过程,其中初始条件设置功能对仿真的开始或结束、仿真次数等条件进行规定;仿真流程控制可实现仿真的开始、暂停、结束等控制功能;运行数据记录功能负责对本次仿真产生的数据进行存储管理,并进行相应的日志记录更新。

4) 运维状态展示层负责在用户交互界面上展示系统运行的过程状态以及分析结果,可视化模块根据仿真的不同阶段呈现不同内容。在仿真准备阶段,可视化内容主要包括模型参数分析结果以及其它仿真参数的设置,供用户检查核对。在仿真运行阶段,可视化模块以文字和图表等形式直观展示仿真流程中的关键事件以及相关模型指标的变化情况。仿真结束后,可视化模块完整展示模型指标的最终结果,同时维修效能评估模块生成相应的评估报告。

### 3 实现关键技术

数据分析仿真层的关键功能由 python 语言的不同功能库实现,主要包括模型参数的生成和模型的仿真运行 2 方面。

#### 3.1 仿真基础数据产生技术

仿真基础数据可分为确定性参数和随机性参数。装备故障规律以及维修过程中的随机性参数通常使用符合某种概率分布的随机变量表示。为了使仿真分析结果真实可靠,仿真模型的运行需要准确的仿真基础数据支撑。仿真基础数据由模型参数生成模块产生,来源于对装备维修数据的统计推断,即根据数据样本的参数估计和拟合检验,选出最佳的分布类型和分布的数字特征。统计结果表明,描述故障的常见分布包括泊松分布、指数分布、正态分布、对数正态分布和威布尔分布等。考虑到数据样本可能存在容量小、受复杂因素扰动等情况,总体分布特征难以简单判别,只能从数据本身出发寻找最优拟合分布。

模型参数生成模块的核心功能由 Scipy 库中的 Stats 模块实现。Stats 模块包含大量随机变量生成、数据特征分析以及统计检验的相关函数,能够较好地统计学角度分析提取数据的内在规律用于模型参数的确定。数据分析流程分为 2 步:1) 调用 Stats 模块中的 Fit 方法,使用最大似然估计法,获得对应不同分布的估计参数;2) 调用非参数检验方

法,如卡方检验、K-S 检验等,比较不同分布的检验结果,最终选出最优的分布类型与对应参数作为样本的特征。

#### 3.2 仿真框架构建技术

系统仿真使用 Simpy 仿真库。Simpy 是一个基于进程的离散事件仿真框架,适合物流行业<sup>[12]</sup>、系统设计<sup>[13]</sup>等需要流程优化的领域。在已经安装版本高于 2.7 的 python2 或版本高于 3.6 的 python3 开发环境前提下,开发者可于 windows 命令行使用 pip install simpy 命令在线安装,或者使用 Simpy 的安装包,在命令行中进入安装包文件所在路径,使用 python setup.py install 命令进行离线安装。它提供以下 4 种核心组件来帮助开发人员构建仿真系统:

1) 环境(environment):提供初始仿真环境,负责管理仿真时间、进程的创建、删除以及进程中事件的调度和处理。

2) 进程(process):用于描述仿真对象要进行的活动,由 python 生成器(generators)实现,可通过进程将维修保障模型进行封装,以供调度。

3) 事件(event):由进程产生并等待被触发。仿真过程中一种比较重要的事件是超时事件(time-out),事先设定好进程中的超时事件,在环境中以倒计时的方式模拟现实系统中进行的活动,以此反映模型在时间上的运行规律。

4) 资源(resource):以队列形式模拟现实系统中具有公共属性的资源,实体通过申请(request)方法来表示资源的占用,通过调用特定的子类可以实现优先级队列。

#### 3.3 仿真程序设计

装备维修流程的仿真和结果分析评估是数据分析仿真层的核心任务;因此,至少需要实现仿真流程控制、模型构建、数据采集记录和结果分析评估这 4 类功能。将程序的模块结构根据概念、功能等特点进行规约,可建立 5 类系统包,程序包描述如图 5 所示。数据存取包中含有数据采集、数据存储和数据载入等基础功能类,封装了连接数据库、操作数据库的实现方法。模型参数分析包含有描述性分析、统计推断等模型参数生成相关的类,主要实现数据特征分析相关的方法。用户控制包含有参数设置、模型选择、查看记录等实现用户与仿真程序进行交互的类。仿真控制包含有模型载入、环境初始化、仿真流程控制等实现程序运行控制的类。模

型设置包含有实现维修流程中各种实体功能和属性设定的实体类。优化评估包含有优化、模型指标计

算和效能评估相关的类，主要实现了 GRG、AHP、TOPSIS 等优化、评估类算法。

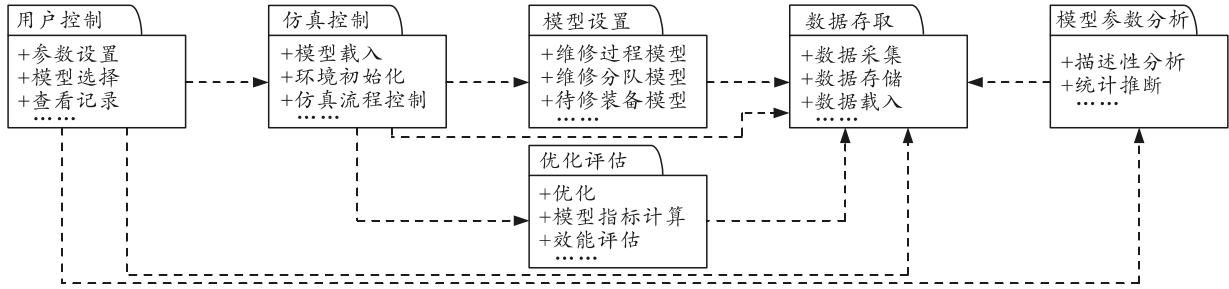


图 5 仿真程序包

结合 Simpy 框架基于进程的特点，使用事件调度法设计仿真程序，从总体上可分为总控制层、模

型运行层和数据处理层。图 6 展示了仿真流程中的关键类在程序不同层中运行的调用情况。

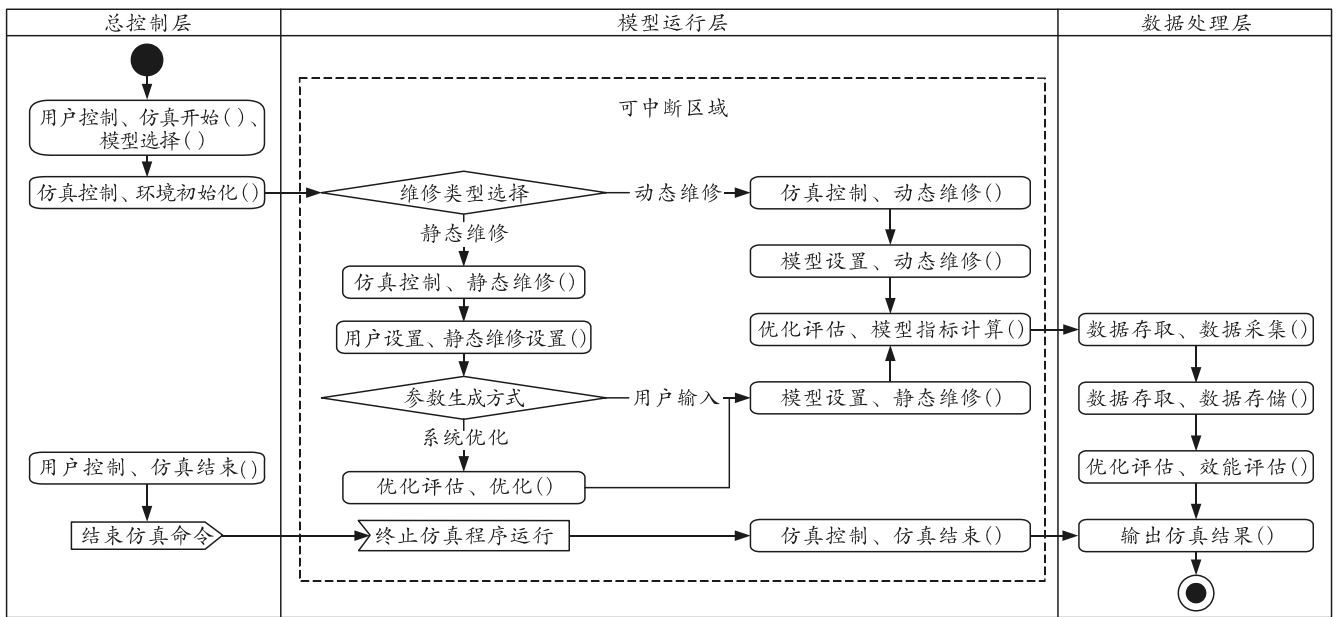


图 6 仿真运行活动

### 4 系统应用分析

#### 4.1 静态维修

某部队的维修团队编有 4 个维修分队，负责在编装备的修理、维护和保养工作。接到上级通知，需要对某型装甲车共计 150 辆进行集中维修。根据初步故障诊断，这批待修装备存在的故障主要是 6 类配件的更换问题，其分布如表 1 所示。

表 1 装备故障分布情况

故障类型	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$
装备台数	20	32	30	16	24	28

通过提取分析 4 个维修分队对某型装甲车的维修历史数据，得到维修团队关于某型装甲车的 6 类配件更换时间服从正态分布，其均值如表 2 所示。

在待修装备较多、维修条件多变的情况下，使用系统程序进行维修任务的分配优化，可以节省维

修人员的大量精力。根据条件可得目标函数及其约束条件：

$$\left. \begin{aligned}
 &\arg \min(\max\{e_1, e_2, e_3, e_4\}) \\
 &\sum_i^4 a_{ij} = n_j (j=1, 2, \dots, 6) \\
 &\sum_j^6 a_{ij} \leq n (i=1, 2, 3, 4) \\
 &a_{ij} \geq 0 (i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, 6)
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

表 2 故障平均修复时间

	h			
故障类型	维修 1 队 $\bar{t}_{1j}$	维修 2 队 $\bar{t}_{2j}$	维修 3 队 $\bar{t}_{3j}$	维修 4 队 $\bar{t}_{4j}$
$f_1$	3	6	5	6
$f_2$	4	6	4	8
$f_3$	9	6	6	7
$f_4$	7	3	3	8
$f_5$	5	4	7	4
$f_6$	8	5	6	6

输入约束条件后运行系统，经过 4 次迭代后产

生一个可行的分配矩阵  $A$  (转置):

$$A^T = \begin{bmatrix} 18 & 17 & 0 & 0 & 7 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 7 & 8 & 24 \\ 0 & 14 & 15 & 9 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 15 & 0 & 9 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将每次迭代产生的方案作为输入进行静态维修仿真, 迭代过程中各维修分队的总维修时间变化如表 3 所示。将多次仿真结果取平均值, 最大值加粗显示。从表中可以看到, 系统一开始分配方式还存在维修时间差距过大的情况, 完成任务最长需要 189 h, 先行完成维修任务的分队资源没有得到充分利用; 经过 4 次迭代调整后, 维修团队整体完成任务的时间收敛于 173 h, 减少了 8.5% 的时间。通过对比表 2 和分配矩阵  $A$  可以看出: 系统总体上将具有不同故障的装备优先分配给维修时间较短的维修分队, 避免此类装备在技术不佳的维修分队中花费过多的时间, 从而实现了整体任务分配的优化。

表 3 维修分队总维修时间变化 h

迭代仿真次数	维修 1 队	维修 2 队	维修 3 队	维修 4 队
1	174.3	171.6	182.2	<b>189.7</b>
2	176.6	174.5	<b>178.1</b>	177.3
3	173.5	174.4	172.9	<b>175.0</b>
4	173.4	<b>173.7</b>	173.2	173.6

## 4.2 动态维修

在 4.1 节故障平均修复时间的基础上, 输入不同类型故障的产生间隔、不同维修分队的维修资源保障率等模型参数进行动态维修仿真。结合 4.2 节

中选择的维修效能评估指标对 4 个维修分队的表现进行比较, 指标名称及编号如表 4 所示。首先邀请专家对各评估指标的相对重要性进行两两评价, 转化得到判别矩阵如表 5 所示, 并通过了一致性检验。表格中的数据表示第  $i$  行指标对第  $j$  列指标的相对重要性, 数值越大表示重要程度越大。然后将由仿真结果得出的各类指标数据进行归一化处理, 使用专家权重进行 TOPSIS 分析。权重分配、预处理结果和分析结果分别如表 6 和表 7 所示。

表 4 评估指标对应编号

评估指标	编号
$f_1$ 类故障平均修复时间	$c_1$
$f_2$ 类故障平均修复时间	$c_2$
$f_3$ 类故障平均修复时间	$c_3$
$f_4$ 类故障平均修复时间	$c_4$
$f_5$ 类故障平均修复时间	$c_5$
$f_6$ 类故障平均修复时间	$c_6$
维修资源消耗率	$c_7$
维修达标率	$c_8$
装备可用度	$c_9$
分队技能水平	$c_{10}$

表 5 判别矩阵

编号	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
$c_1$	1	1	1	1	1	1	1	0.33	0.5	0.50
$c_2$	1	1	1	1	1	1	1	0.33	0.5	0.50
$c_3$	1	1	1	1	1	1	0.5	0.20	0.5	0.50
$c_4$	1	1	1	1	1	1	1	0.33	0.5	0.33
$c_5$	1	1	1	1	1	1	1	0.33	0.5	0.50
$c_6$	1	1	1	1	1	1	3	0.33	0.5	0.50
$c_7$	1	1	2	1	1	1	1	0.50	0.5	0.50
$c_8$	3	3	5	3	3	3	2	1.00	2.0	2.00
$c_9$	2	2	2	2	2	3	2	0.50	1.0	1.00
$c_{10}$	2	2	2	3	2	2	2	0.50	1.0	1.00

表 6 评估指标权重与预处理结果

评估指标	权重	维修 1 队	维修 2 队	维修 3 队	维修 4 队
$f_1$ 类故障平均修复时间	0.070 24	0.333	0.167	0.200	0.167
$f_2$ 类故障平均修复时间	0.070 24	0.250	0.167	0.250	0.125
$f_3$ 类故障平均修复时间	0.063 19	0.111	0.167	0.167	0.143
$f_4$ 类故障平均修复时间	0.067 97	0.143	0.333	0.333	0.125
$f_5$ 类故障平均修复时间	0.070 24	0.200	0.250	0.143	0.250
$f_6$ 类故障平均修复时间	0.070 24	0.125	0.200	0.167	0.167
维修资源消耗率	0.079 94	0.102	0.106	0.107	0.102
维修达标率	0.229 79	1.000	0	0	0.500
装备可用度	0.136 67	0.775	0	1.000	0.700
分队技能水平	0.143 33	0.750	1.000	0.250	1.000

表 7 TOPSIS 分析结果

评估对象	正理想解距离	负理想解距离	与最优解的相对接近度	排序
维修 1 队	0.138	0.629	0.820	1
维修 2 队	0.608	0.384	0.387	4
维修 3 队	0.559	0.388	0.410	3
维修 4 队	0.468	0.354	0.431	2

由分析结果可知, 在综合考虑多种维修评估指

标下, 4 个维修分队的表现从好到差依次为维修 1 队、维修 4 队、维修 3 队、维修 2 队。相比之下, 维修 2 队平时维修资源消耗较少, 平时的技能掌握也较好, 但在专家较为看重的合格率和装备可用度 2 项指标上的表现都不佳。这一结果与维修 2 队的维修保障资源统筹不当, 经常出现保障资源延误的现象相一致, 导致了维修分队的效率下降; 因此,

该队应在提高维修质量的同时，进一步做好保障资源的准备工作。

### 5 结束语

笔者分析了装备维修保障需求，建立了静态和动态 2 种情况下的装备维修计划模型，以及简单的维修效能评估指标和方法，提出了装备维修仿真系统的总体框架，重点研究了模型参数生成和仿真运行流程的设计，使用基于进程的离散事件仿真框架 Simpy 设计实现了系统的仿真运行部分，并结合实例数据进行了简单的仿真分析。分析结果表明：该系统具有一定的优化评估功能，能够为装备维修的流程设计、资源配置与优化等方面提供参考依据。

### 参考文献：

[1] 杜海东, 曹军海, 刘福胜. 典型陆军部队装备维修作业能力评估系统仿真建模研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(10): 1854-1861.

[2] 王双川, 胡起伟, 李锋. 装备维修保障效能评估研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10): 2271-2278.

[3] 笱翔, 陈春良, 张仕新. 数字化部队装备维修保障任务分配与调度框架研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(9): 99-101, 114.

[4] 张丽珍, 沈小青, 曹守启. 基于广义简约梯度法的机械产品尺寸变型优化设计技术研究[J]. 机械设计, 2013, 30(6): 81-85.

\*\*\*\*\*

(上接第 52 页)

[3] 叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光微推进技术的靶特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(S1): 1-4.

[4] 叶继飞, 洪延姬. 激光微烧蚀固体靶材羽流流场演化特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 47-51.

[5] 洪延姬, 周伟静, 王广宇. 微推力测量方法及其关键问题分析[J]. 航空学报, 2013, 34(10): 2287-2299.

[6] 周伟静, 洪延姬, 叶继飞, 等. 一种基于动态补偿技术

[5] 钱彦岭, 李廷鹏, 李磊. 维修系统评价指标体系及确定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1088-1095.

[6] 肖雄, 董鹏. 基于模糊证据认知图的装备维修风险评估方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 55-58.

[7] 王雄伟, 陈春良, 曹艳华. 基于改进 TOPSIS 法的装备维修任务优先级确定方法[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(4): 108-111, 142.

[8] 高健, 刘铁林, 冯兵. 基于 AHP 的轻武器装备维修保障能力评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 92-94, 142.

[9] 连云峰, 代冬升, 连光耀, 等. 基于 DoDAF 的装备维修保障能力评估[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 49-52.

[10] MOSTAFA M F, FAHMY S A. Maintenance Strategy Selection Using AHP: A Case Study in the Oil and Gas Industry[C]//2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). IEEE, 2020: 1049-1053.

[11] 姚申茂. 基于 AHP-TOPSIS 的装备维修保障能力多级综合评估方法[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(6): 112-116.

[12] 郑振宇, 袁红兵, 徐正林. 基于 SimPy 的自动化立体仓库建模与仿真[J]. 制造业自动化, 2019, 41(3): 102-105, 108.

[13] MATERUKHIN A V, MAIOROV A A, GVOZDEV O O. The Results of Computer Simulation of Data Acquisition Systems Based on Distributed Smart Geosensor Networks[C]//2019 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS). IEEE, 2019: 196-199.

的微小稳态推力还原方法[J]. 航空学报, 2018, 39(7): 77-85.

[7] 祝超, 金星, 张志伟, 等. 连续独立冲量测量的扭摆位移数据处理方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 14-19.

[8] 金星, 洪延姬, 周伟静, 等. 一种用于微小推力冲量测量的扭摆系统参数标定方法[J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1554-1559.

[9] 金星, 常浩, 周伟静, 等. 用于扭摆系统的微推力平滑降噪优化还原方法: CN109960831A[P]. 2019-7-2.