

采用任务剖面的复杂可修系统保障性 仿真与评价技术研究

杨晶, 黎放, 狄鹏

(海军工程大学管理工程系, 430033, 武汉)

摘要: 针对现有复杂可修系统建模仿真中存在的问题,以任务成功性为中心,建立了基于任务剖面的复杂可修系统保障性仿真模型,该模型的建模与仿真方法适用于舰船同类型系统的建模与仿真. 通过对仿真结果的评价、反馈、改进修正,使各种方案最终直接为完成战斗任务服务,更符合实际的要求. 仿真结果表明,该方法能够有效地评估复杂可修系统的保障性参数特征,所建模型具有可视化、流程化和层次化的优点.

关键词: 任务剖面;复杂可修系统;保障性;仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0053-07

Research on Simulation and Evaluation for Supportability of Complex Repairable Systems with Mission Sections

YANG Jing, LI Fang, DI Peng

(Department of Management Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: An evaluation model of complex repairable system's supportability based on Extend is presented according to mission success to address the problems that exist in the domain of modeling and simulation of complex repairable system. Simulation flow and simulation algorithm, resolution of complex problem, and statistics and evaluation model are presented. The software Extend is used to model and simulate a warship which is a representative of complex repairable systems. Simulation results show that the approach effectively estimates the characters of supportability parameters of complex repairable systems, and that the model has the merits such as visualization, flow chart and hierarchy.

Keywords: mission section; complex repairable system; supportability; simulation

目前,国内外许多学者都针对复杂可修系统的建模与仿真进行了研究^[1-8],综合这些文献的研究情况,目前还存在如下一些问题:①忽略维修时间,往往假设是热更换不需要停机;②如果考虑维修时间的计算,计算公式也只是时间的简单累加,而维修实际是多任务交叉并行处理的过程;③考虑的故障模式单一,保障资源也单一,仅仅只考虑备件而且只考虑一种备件,忽略了人力限制、维修工具等其他基

本保障要素;④没有考虑维修优先级别的问题;⑤故障间隔时间分布和维修时间分布一般只考虑指数分布的情况,没有验证其他不同分布的情况;⑥往往只考虑单部件单阶段完成较为简单的任务,没有考虑更为复杂的基于任务剖面的多部件(设备/系统)多阶段的任务;⑦各阶段的故障率和保障能力是不变的;⑧此外,大多数研究人员做复杂可修系统仿真的前提是假设维修资源为无限的,故障子系统可以及

时得到维修,不会产生延误,而在现实情况下,这是不可能的.维修资源通常是有限的,有时甚至是不足的.故障子系统不是总可以及时得到维修,可能会产生一定延误.本文在研究复杂可修系统保障性建模与仿真问题时,充分考虑了上述存在的问题,并全部给出了解决方法.

1 相关概念和仿真的必要性

复杂可修系统通常包括子系统、部件、元件以及维修子系统等.系统、子系统、部件、元件的重要特征包括失效和修复分布,常见的失效分布与修复分布有指数分布、正态分布、均匀分布、对数正态分布、威布尔分布等.维修子系统类似于排队系统中的服务机构,其特征包括维修时间的规律、系统容量限制以及维修规则.维修时间规律取决于所修子系统的修复分布.维修系统的容量通常都是有限的,即同时提供维修的维修单元是一定的.维修规则与排队系统的服务规则类似,包括“先故障先维修”、“先故障后维修”、“优先维修”等^[8].复杂可修系统一般具有多任务剖面^[9],不同剖面需要的设备也不同,舰船本身就是一个大型的非常复杂的可修系统.

由于所有子系统状态组合的复杂和概率求解的困难,组合方法和数学分析建模方法往往很难确定出大型复杂可修系统.在具体型号执行特定任务时,对其进行保障性定量分析,由于在不同任务剖面内,具体型号功能组成的复杂性和运用条件的限制,往往导致在识别致命性故障的次数、确定相关的任务时间和允许任务修复时间,以及统计致命性故障率和任务修复率的分布时显得极为困难^[10].迄今为止,对于带有任意失效时间和任意修复时间的可修系统没有有效的概率论和统计学的方法^[6],而仿真技术是解决这类问题的一个值得重视的研究方向,通过仿真方法,一些分析变得相对容易并且至少是可能的.因此,本文通过计算机仿真方法来解决这类问题是十分必要的,为解决复杂可修系统保障性评估问题及军事领域的类似问题提供了一种有效的技术手段,具有一定的参考价值.

目前,复杂可修系统仿真的程序实现多采用面向过程的思想进行编程.与面向过程程序设计形成鲜明对比的是,面向对象的程序设计将数据和对数据的操作封装在“类”中,这样说明抽象数据类型比较自然,对实际问题的描述,对信息的隐蔽性、结构性和可读性等都比面向过程的程序设计好^[11].本文使用的 Extend 仿真平台^[12]采用面向对象编程思

想,用事件驱动系统进行建模和仿真,模块化避免了大量原始代码的编写,而且可以进行仿真动画演示.

2 基于 IDEF3 的模型描述

IDEF3^[13]是基于由 Ross 和 SofTech 公司开发的结构化分析设计技术(Structured Analysis and Design Technique, SADT)发展起来的,是一种结构化的建模方法,采用自顶向下、逐层分解的方法建立复杂任务过程模型. IDEF3 利用两个基本组织结构-场景描述(以过程为中心)和对象(以对象为中心)来获取对过程的描述.按照 IDEF3 模型的构建流程,某型舰艇执行反潜作战的过程模型如图 1 所示.

图中某型舰艇反潜作战包括 4 个阶段:①航渡阶段,舰艇从基地出发以巡航速度或以高速按照规定时间到达指定作战海域;②待机阶段,在指定海域进行目标侦察、搜索、跟踪与识别,如果能够在规定的时间内搜索到目标,转入下一个阶段,否则返回基地;③反潜作战阶段,舰艇在搜索到目标后首先进行威胁判断,当威胁较大时返回基地,否则开始鱼雷攻击,发射鱼雷,其次判断是否需要再进行补充攻击,如果目标已经被摧毁则立即返航,如果没有命中目标或目标仅被击伤,再判断是否还有可用的鱼雷,若已没有鱼雷则立即返航,否则重新装填鱼雷,再次实施攻击;④撤离返航阶段,撤离作战海区返回基地.

3 基于 Extend 的复杂可修系统模型

3.1 仿真模型的建立及相关假设

3.1.1 建模思路 在基于 IDEF3 的作战任务过程模型建立以后,通过 IDEF3 的描述,可对基于任务剖面的整个反潜作战任务过程有一个全面、清晰的认识.在此基础上,建立 Extend 仿真模型.在 Extend 中,用 Executive 模块来模拟事件的推进发展,用 Downtime 模块来模拟服从各种分布的故障的产生,维修小组用 Labor 模块模拟,维修过程用 Machine 模块模拟,竞争和资源冲突产生的地方需要输入附加信息,用 Set Priority 模块来模拟,选择、判断和调度的功能用 Equation 模块、Batch 模块和 Select 模块共同模拟,任务完成用 Exit 模块模拟,用 Shift 模块和 Timer 模块来完成对时间的统计功能,用 File Output 模块来存储输出数据.

3.1.2 假设和规定 为了研究的方便,现作如下的假设和规定.

(1)任务成功性标准,只要各种故障维修引起的停机时间小于时间裕度^[14],且有足够的备件保障维

修工作的顺利完成,即认为完成任务。

(2)本文只考虑舰员级的修复性维修,舰员级保障资源主要考虑备件和人力,假设其他维修资源充足。舰船刚开始执行任务时部件不发生故障,发生故障以后的维修工作不能中断。

(3)作战期间由于攻击阶段任务持续时间短,这时出现故障是十分致命的,也是很难及时进行修复的,所以如果此时发生故障,即认为任务失败。

(4)对于舰船这样的大型复杂可修系统,涉及的系统设备成千上万,仅考虑关键子系统的故障。

3.2 仿真流程图和算法

3.2.1 仿真逻辑流程图 根据仿真逻辑关系,对于基于任务剖面的复杂可修复系统的仿真,其逻辑流程图如图 2 所示。

3.2.2 仿真算法 具体的仿真算法和步骤如下。

(1)仿真输入包括仿真运行次数 N 、任务阶段数 p 、各阶段任务持续时间 T_m 、各阶段时间裕度 Y_m (其中 $m=1,2,\cdots,p$)、各子系统的故障间隔时间分布 λ 和维修时间分布 μ 、配置的备件种类及数量,记任务成功次数为 S 。

(2)第 i 次仿真初始化,包括各阶段装备执行任

务的总时间 T_{im} 、时间裕度 ν_{im} 、影响任务执行的故障总数 r_{im} 。通过仿真次数判断仿真是否结束,如果仿真次数大于规定仿真次数,仿真结束,否则进行步骤(3)。

(3)判断是否遍历各阶段任务,若是则任务成功,更新 S ,仿真次数加 1,转到步骤(2),否则进入下一阶段,转到步骤(4)。

(4)模拟各子系统故障,产生维修事件表,将仿真时钟推至最早的故障时间。若此时超过了任务规定时间 $T_{im}-\nu_{im}$,则表明目前阶段任务成功,转入步骤(3),若没超过任务规定时间,判断子系统故障维修对维修资源的要求,若不满足则任务失败,转到步骤(2),若满足则进行修理并消耗相应的备件,修复好后记累计修理时间为 t_{im} 。更新 T_{im} 、 ν_{im} 、 r_{im} 和维修事件表,继续进行仿真。

3.3 针对重难点问题的解决方法

(1)失效和修复分布问题:常见的失效分布与修复分布有指数分布、正态分布、均匀分布、对数正态分布、威布尔分布等,Downtime 在模型中起到的是随机故障发生器的作用,是仿真的“源头”,模块内可方便设置调用以上各种分布,而且可以设置多个失

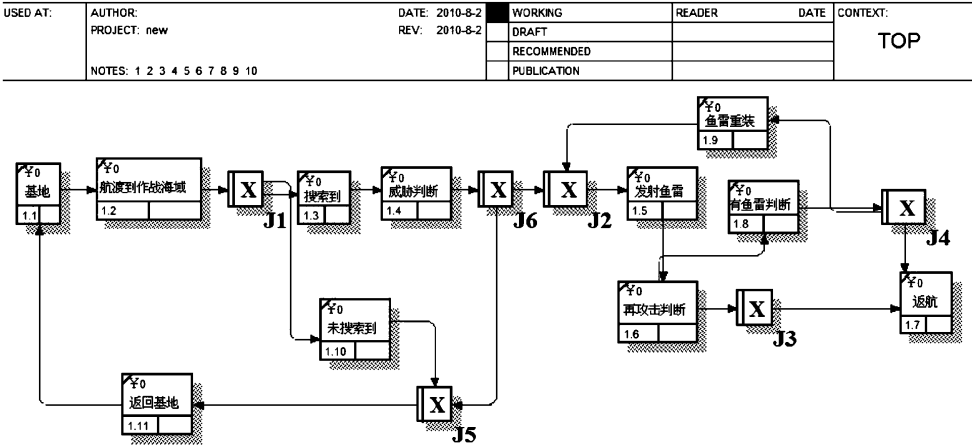


图 1 某型舰艇反潜作战 IDEF3 模型

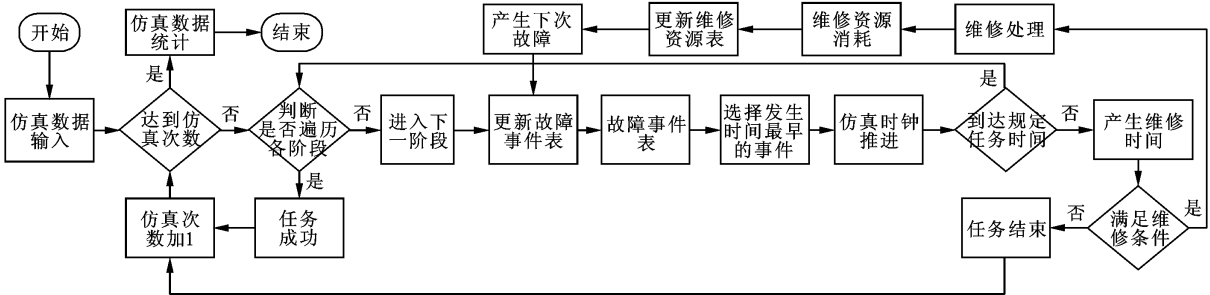


图 2 仿真逻辑流程图

效分布,实现多模式失效(解决引言中问题①、⑤)。

(2)保障资源问题:除了常用的备件资源以外,模型中还加入了维修人员和维修工具的保障资源要素,并且这些资源是有限的,用 Labor 和 Tool 分别模拟它们,进行故障维修时必须由维修人员参与,可能会用到维修工具和消耗备件,通过 Batch 模块把它们暂时“绑”在一起,完成维修活动后再释放(解决引言中问题③、⑧)。

(3)保障延误问题:维修资源通常是有限的,有时甚至是不足的,故障子系统不一定能够及时得到修复,这就会产生保障延误,目前按照海军标准的规定,从舰上获取一个备件的平均保障延误时间为 2 h,从舰外获取一个备件的平均保障延误时间为 126 h,前面模型假设只考虑舰员级维修,假设舰上获取备件的平均延误时间服从 $\lambda=0.5$ 的指数分布;还有就是维修人员不足导致的延误,只有当所有的资源条件都满足 Batch 模块才会进行绑定开始维修。这 2 个延误时间可由维修模块 Machine 前的 Timer 模块来进行统计(解决引言中问题⑧)。

(4)修复性维修时间统计问题:如图 3 所示,维修任务间的时序关系有以下 3 种,其中最难统计维修时间跨度的是图 3c;现在计算平均修复性维修时间时往往只是把各个维修任务的时间进行累加,而实际故障的发生是随机的,并不是一个故障发生、修复后再产生另一个新的故障,而是如图 3c 所示交叉并行的。由于复杂可修系统的失效和修复都是随机且服从分布的,这就给时间跨度的统计带来了困难,因此才会仅仅进行简单的累加而不是求跨度时间。本文采取间接统计的方法解决此问题,由于维修必须由人来参与,所以只要有人处于工作状态就是有故障在进行维修,否则就是没有故障发生,把所有的维修人员看成是一个维修小组,只要小组人数不是全员,那么就是有故障发生有人在进行维修任务,小组总是处在全员或非全员的状态。由于整个任务时间确定,因此只要统计小组的一个状态的累计时间,就能够计算出系统下所有维修任务的跨度时间,这

样对系统级的使用可用度的计算会更加精确和科学(解决引言中问题②)。

(5)维修优先级问题:利用 Set Priority 模块来设置维修任务的优先级,在同等条件下,处于等待维修队列里的维修任务并不会按照 FIFO 的维修策略来进行维修,而是优先级高的任务会被先分配资源先进行维修(解决引言中问题④)。

(6)执行任务问题:舰船是一个大型的复杂可修系统,涉及的系统、设备和部件成千上万,执行的任务也是多阶段的。本文以任务剖面为基础进行任务想定,而且考虑到战损的情况,在返航阶段对其故障率和修复时间各自乘以一个系数进行修正(解决引言中问题⑥、⑦)。

4 基于仿真的舰船保障性综合评价

4.1 评价参数选择

(1)保障性评价参数舰船系统使用可用度 A_0

$$A_0 = \frac{M_F}{M_F + M_R + M_T} \quad (1)$$

其中平均故障间隔时间

$$M_F = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^p T_{im} / \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^p r_{im} \quad (2)$$

平均修复性维修时间

$$M_R = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^p t_{im} / \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^p r_{im} \quad (3)$$

平均保障延误时间 M_T , 参见 3.3 节中的(3)。

(2)任务成功性参数:任务可靠度 R_m

$$R_m = S/N \quad (4)$$

4.2 评价总体思路

如图 4 所示,对本文建立的基于任务剖面的复杂可修系统保障性模型进行仿真,最终通过对选取的评价参数的检验来达到两个目的:①好保障,通过反馈的信息去影响设计方案,使今后的同型装备更加便于对其进行保障;②保障好,通过反馈的信息去修正现有的使用方案和保障方案,使得它们更加完善,更加贴近实际情况,把综合保障工作真正开展好。

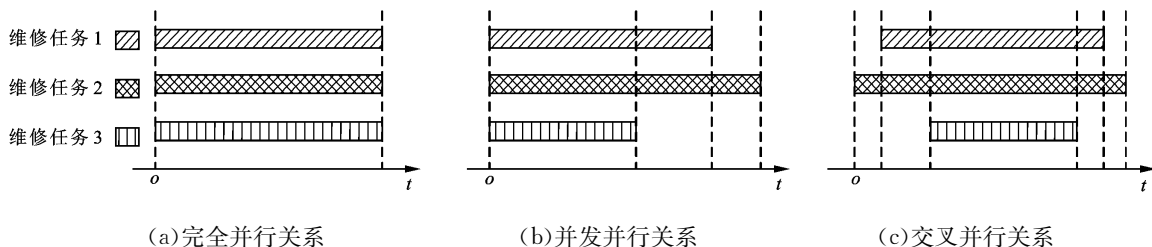


图3 维修任务间的时序关系

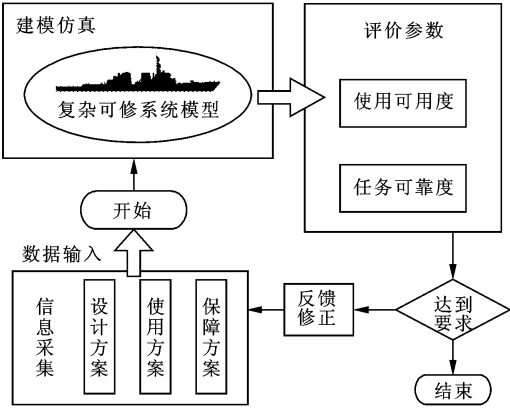


图 4 基于仿真的舰船保障性评价过程

5 仿真实例

5.1 任务想定

为了验证模型的有效性,以某型船出海执行反潜作战训练任务为例进行仿真及其评价. 为了研究方便,把任务剖面简化为航渡、作战、撤离返航 3 个阶段,如图 5 所示.

复杂系统一般具有多任务剖面,不同剖面需要的设备也不同. 如该船执行航渡、返航任务时,以该船动力系统为研究对象,动力系统处于巡航工况,需要启动柴油机、压缩空气系统、燃油系统、滑油系统、监控系统等,而在执行作战任务时,动力系统处于战斗工况,在此基础上还需要启动燃气轮机. 任务的具体时间如表 1 所示.

5.2 维修策略和系统组成

实际应用过程中任务是复杂多变的,对那些功

表 1 任务的时间

总任务时间/h	阶段名称	阶段时间/h	时间裕度
368	航渡	168	34
	作战	8	0
	撤离返航	192	40

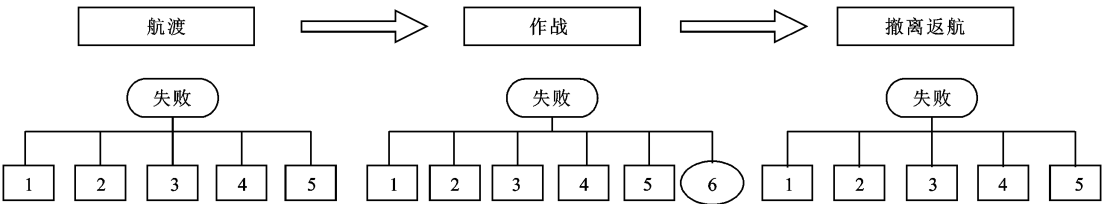
能随任务而变化的系统设备来说,为了确保较高的任务成功性,一般采用最大维修策略,即有故障就维修.

该船动力系统主要由柴油机、燃气轮机、监控系统和辅助管路系统组成^[15]. 监控系统和辅助管路用于保证动力系统的正常运转,辅助管路系统主要由压缩空气系统、燃油系统、滑油系统等组成,它们的具体相关参数如表 2 所示.

表 2 主要分系统和设备的参数

装备名称	优先级	故障时间分布	维修时间分布 μ	携带备件数	维修人员数
柴油机主机	1	$\lambda=0.005$	0.2	5	2
		$\lambda=0.002$	0.1	2	1
压缩空气系统	3	$\lambda=0.002$	0	2	1
燃油系统	3	$\lambda=0.002$	0.5	2	1
滑油系统	3	$\lambda=0.003$	0.5	3	1
监控系统	2	$\lambda=0.003$	0.2	3	2
燃气轮机主机	1	$\alpha=1.8, \beta=250$	0.3	4	2

表 2 中主要系统和设备的参数及其相关问题补充说明如下:①柴油机的故障模式通常有活塞拉缸,主轴承等损坏,冷却水温高,增压器异常振动 4 种,为了方便说明问题和简化计算,在实例计算时只取了其中两种故障模式;②燃气轮机的故障时间分布服从形状参数 $\alpha=1.8$,尺度参数 $\beta=250$ 的韦伯分布;③按照海军标准的规定,假设从舰上获取备件的保障延误时间服从 $\lambda=0.5$ 的指数分布;④考虑到战损的情况,在返航阶段部件工作环境变得恶劣,维修设备水平和人员技术力量降低,故障时间分布 $\lambda'=1.2\times\lambda$,维修时间分布 $\mu'=0.8\times\mu$;⑤假设为此些装备配置的初始维修人数为 3;⑥表 2 中携带备件数作为备件保障方案简记为(5222334).



1:柴油机;2:压缩空气系统;3:燃油系统;4:滑油系统;5:临近系统;6:燃气轮机

图 5 典型任务剖面

5.3 结果评价与分析

仿真模型如图 6 所示,左边部分为 3 阶段顶层模型,右边部分是航渡阶段分层子模型.按照表 1 和表 2 给出的数据和相关说明作为仿真模型的原始输入,模型运行 1 000 次,得到的结果如表 3 所示.

表 3 仿真结果					
任务阶段	M_F/h	M_R/h	M_T/h	A_0	R_m
航渡	62.40	3.69	2.21	0.914	0.925
撤离返航	56.79	4.09	2.32	0.899	0.730

对表 3 的仿真结果分析如下.

(1)得到的任务成功性比较低,其主要原因有:①原备件保障方案并不是面向任务经过科学计算得到的;②没有考虑到作战,作战阶段任务成功性要求严格,只要发生故障就算任务失败;③没有考虑到战损,撤离返航阶段部件工作环境变得恶劣,维修设备水平和人员技术力量降低,会导致任务成功性降低,同时也造成 M_F 降低和 M_R 升高;④由于作战任务时间相对较短,全舰“自给自足”,没有考虑舰外保障,备件消耗完后,故障不可修直接导致任务失败.

(2)得到的使用可用度比较高,主要原因有:①没有考虑舰外备件获取延误时间,仅考虑舰上获取备件延误时间;② M_R 的计算更加科学合理,不是单纯的累加时间,实际上缩短了 M_R 的时间,从而直接导致使用可用度升高.

(3)考虑到作战和战损,撤离返航阶段的使用可

用度比开始航渡阶段低也是正常的.

本文采用以下方法来优化仿真结果.

(1)在原备件保障方案(5222334)的基础上,通过反复试验和调整,得到新的备件保障方案(7544654),两种方案的结果对比如图 7 所示.由图可见,仿真次数超过 5 000 次后,结果趋于稳定,改进后的备件保障方案效果比较好,任务可靠度提高近 8%.

(2)初始配置的维修人数为 3,在此基础上通过反复试验和调整,得到新的人员配置方案,结果如表 4 所示,每个维修任务的延误时间平均缩短了 0.31 h,即减少了近 14%的时间.仿真实例中只考虑了动力系统,如果考虑优化全舰的各个主要系统,累计减少的时间会更多.

(3)虽然考虑到了作战任务和战损, A_0 还是能够满足要求,但是 R_m 却偏低.这可以通过提高可靠性和维修性来进一步提高任务成功性,例如把平均维修时间缩短 1/3, R_m 就能够提升到 0.923,效果非常明显.

表 4 不同人员配置方案结果对比		
任务阶段	配置人数	M_T/h
航渡	3	2.21
撤离返航	3	2.32
航渡	5	1.94
撤离返航	5	1.97

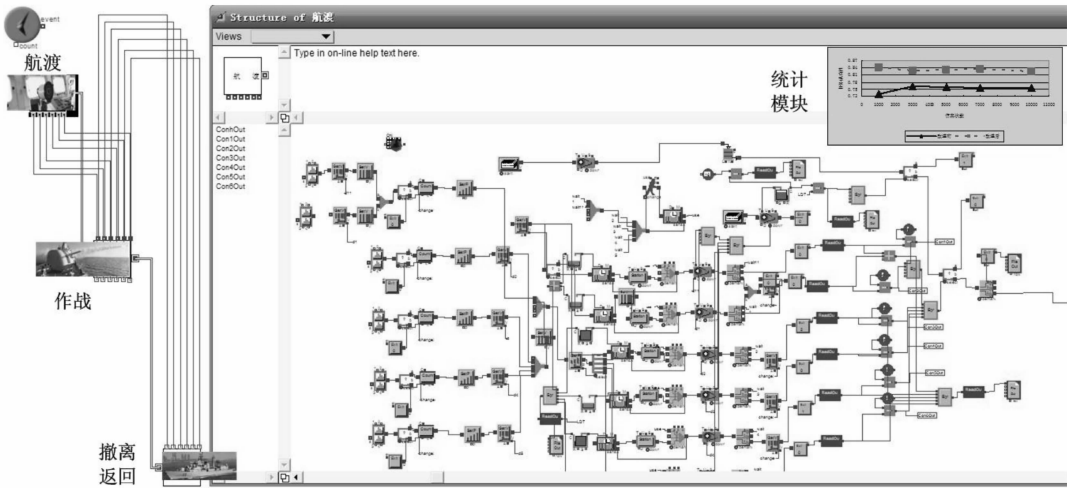


图 6 基于任务剖面的仿真模型图

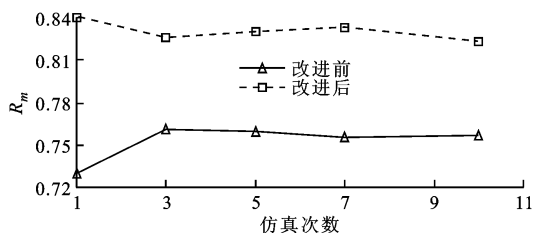


图7 两种方案的结果对比图

6 结 论

本文较全面地考虑了舰船的任务剖面各个阶段的实际情况,所得的备件保障方案更接近于实际作战情况下的备件需求,对舰船实际系统的战时备件配置有一定的指导意义;以任务成功性为中心,建立了基于任务剖面的复杂可修系统保障性仿真模型,该模型的建模与仿真方法适用于舰船同类型系统的建模与仿真,通过对仿真结果的评价、反馈、改进修正,使各种方案最终直接为完成战斗任务服务,更符合实际的要求。

参考文献:

- [1] KUMAMOTO H, TANAKA T, INOUE K. A new Monte Carlo methods for evaluating system failure probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1987, R-36(1):63-69.
- [2] WIDAWSKY W H, Reliability and maintainability parameters evaluated with simulation [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1971, 20(3):158-164.
- [3] 张玉涛,唐俊,张明清,等. 基于蒙特卡洛方法的可靠性仿真过程模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7):1374-1377.
ZHANG Yutao, TANG Jun, ZHANG Mingqing, et al. Research on reliability simulation process model based on Monte Carlo method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7):1374-1377.
- [4] YANG Kai, YOUNIS H. A semi-analytical Monte Carlo simulation method for system's reliability with load sharing and damage accumulation[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87(2):191-200.
- [5] LIN J Y, DONAGHEY C E. A Monte Carlo simulation to determine minimal cut sets and system reliability [C]//Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 246-249.
- [6] 杨宇航,冯允成. 复杂可修系统可靠性维修性综合仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8):978-986.

- YANG Yuhang, FENG Yuncheng. Complex repairable system reliability and maintainability simulation [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(8):978-986.
- [7] TRUSSELL L. Aspects of reliability simulation [C]//Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001:1000-1004.
- [8] 吕学志,于永利,刘长江. 基于 Stateflow 的复杂可修系统的建模与仿真方法[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(6):71-75.
LÜ Xuezhì, YU Yongli, LIU Changjiang. A modeling and simulation approach of complex repairable system based on stateflow [J]. Command Control and Simulation, 2009, 31(6):71-75.
- [9] 耿俊豹,黄树红,金家善,等. 基于任务剖面的复杂系统状态综合评估方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006, 34(1):27-29.
GENG Junbao, HUANG Shuhong, JIN Jiashan, et al. An integrated evaluation method for complex systems condition based on mission section[J]. Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(1):27-29.
- [10] 王武宏,孙逢春,李晓雷. 复杂可修系统可信度的数字仿真方法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(7):110-113.
WANG Wuhong, SUN Fengchun, LI Xiaolei. A numeral simulation approach to the analysis of dependability of complex repairable system [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2001, 21(7):110-113.
- [11] 胡学龙. C++程序设计-从面向过程到面向对象[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- [12] 杨晶,曾斌. 基于遗传算法的维修任务调度优化及仿真[J]. 计算机工程, 2009, 35(18):243-245.
YANG Jing, ZENG Bin. Optimization and simulation of maintenance task schedule based on genetic algorithm[J]. Computer Engineering, 2009, 35(18):243-245.
- [13] 牛东,宁可,李清,等. 基于 IDEF3 的过程建模方法及其支持工具[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 12(7):30-34.
NIU Dong, NING Ke, LI Qing, et al. Method and tool for IDEF3 based process modeling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 12(7):30-34.
- [14] SAMUEL D J, PALMER L. Determination of ship-board repair parts level[J]. Naval Engineers Journal, 1979, 91(2):37-43.
- [15] 邵开文,马运义. 船舶技术与设计概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

(编辑 武红江)