

基于 DoDAF 的装备体系任务建模与仿真

潘星, 尹宝石, 温晓华

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘要: 装备体系任务建模与仿真是对装备体系进行模型验证和分析的基础。以四元组(目标, 装备, 活动, 关系)为基础, 建立了装备体系任务的描述模型, 并基于美国国防部体系结构框架(Department of Defense Architecture Framework, DoDAF), 提出了基于活动建模的装备体系任务静态模型建模方法和采用 IDEF3 语言来建立装备体系任务仿真模型的方法以及其具体建模步骤。最后以航母体系的典型任务为例, 对上述建模与仿真方法进行应用, 证明了所提方法的有效性。

关键词: 装备体系; 任务模型; 建模与仿真

中图分类号: TP 302.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.09.17

Mission modeling and simulation for equipment system of systems based on DoDAF

PAN Xing, YIN Bao-shi, WEN Xiao-hua

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A description model of the mission of equipment system of systems (SoS) is presented which uses a quaternion (*Target, System, Activity, Relation*). Under the framework of Department of Defense Architecture Framework (DoDAF), a modeling method based on activity-based methodology (ABM) is researched which uses the description model to build the static model of equipment SoS. Meanwhile, to build a simulation model, a method based on IDEF3 is given to verify the model. Finally, a case study of carrier's typical mission is given to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: equipment system of systems; mission model; modeling and simulation

0 引言

未来战争是以网络为中心的一体化战争, 需要多种装备系统协调合作, 共同完成作战任务。在这种背景下, 体系(system of systems, SoS)和体系工程(system of systems engineering, SoSE)应运而生。关于体系的定义在学术界和国防领域有不同的定义, 综合来看: 体系是若干系统互相联系而构成的一个整体, 可将其理解为是由多个系统相互联系构成的一个复杂系统^[1-4]。而装备体系则可定义为: 装备体系是根据军事需求、经济和技术可能, 由一定数量和质量相互关联、功能互补的多种装备, 按照装备的优化配置和提高整体作战能力的要求, 综合集成不同类别、结构和规模的装备的有机整体。从装备体系定义中可以看出, 装备体系是为了完成一体化作战条件下的作战任务, 由功能互补、相互联系、相互作用的各种武器装备系统所构成的一个更大的系统。装备体系是一种典型的体系, 它符合体系的概

念, 并且具有一般体系所具有的普遍特点。目前, 关于体系尤其是装备体系的研究在国内外已经蓬勃开展起来, 如体系结构与体系工程^[5]和体系建模与仿真^[6-9]等。这些研究大都是基于美国国防部体系结构框架(Department of Defense Architecture Framework, DoDAF)下开展, 为装备体系的研究奠定了良好的基础。

对于体系而言, 任务是体系存在的目的和基础, 体系中所有成员系统都是为了完成体系任务而相互关联、相互协调在一起的统一整体。目前, 尽管装备作战任务的研究已经取得了丰硕的成果, 如基于 UML 和基于 IDEF 的任务模型^[9-10]和基于 Petri 网的任务建模与仿真^[11-12]等, 但是, 上述方法主要针对单一装备或系统, 其任务单一、系统结构简单。而对于装备体系而言, 多样化的任务、复杂的结构、资源的约束等是上述模型无法解决的。因此, 装备体系的任务模型研究, 尤其是在 DoDAF 框架下对装备体系任务建模和仿真的研究成为一个亟待解决的问题。如同确立任务剖

收稿日期: 2011-12-14; 修回日期: 2012-05-15。

基金项目: 国家自然科学基金(70901004, 71171008); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-10-01-A12)资助课题

作者简介: 潘星(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为可靠性工程与系统工程。E-mail: panxing@buaa.edu.cn

面是进行系统可靠性设计分析的基础,对装备体系任务进行建模对研究装备体系结构以及装备体系的特性,尤其是装备体系可靠性具有十分重要的意义。

本文即是围绕装备体系任务模型,借鉴了装备系统的作战任务建模领域相关研究成果,给出了装备体系任务的描述模型,并以此为基础,在 DoDAF 框架下对装备体系任务建模与仿真方法和步骤进行了研究。最后,通过航母体系的典型作战任务为例说明了建模和仿真方法的应用情况。

1 装备体系任务模型

作战任务是一定环境和时间条件下,为达成特定作战目标由不同装备共同进行的一系列相互关联的作战活动的有序集合^[13]。对于装备体系而言,装备体系的作战任务是由一系列围绕体系作战目标、由不同装备(系统节点)共同进行的作战活动组成。

定义 1 作战任务的目标。作战任务的目标指作战任务的完成条件或目标,对于不同的目标,用 $TO_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示。

定义 2 作战任务的装备(系统节点)。作战任务的装备是指参与完成作战活动的各类装备,即装备体系中的系统节点所构成的集合,用 $TE_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示。

定义 3 作战任务的活动。作战任务的活动是作战任务的基本元素,具有不可分割性和特定目标性。它是指在满足一定的条件下,可由一定的作战系统根据相关的规则、条例、条令完成过程动作。作战任务的活动可以用 $TA_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示。

定义 4 作战任务的活动间关系。作战任务的活动间关系是指作战活动之间的相互约束和逻辑关系^[14]。由于作战活动的动态性,使得作战行动在实施时存在一定的逻辑关系,其可定义为如下七元组:

$$TR = \langle SeqR, CndR, AndR, OrR, ConcR, SynR, CycR \rangle$$

作战活动间的这 7 种逻辑关系如表 1 所示。

表 1 作战活动之间的逻辑关系

关系名	符号	说明
顺序关系	SeqR	只有某一作战活动结束后另一作战活动才开始执行
条件关系	CndR	某一作战活动结束后在另一作战活动集合中选择其中一个开始执行
与关系	AndR	某一作战活动集合所有作战活动完成后才执行另一作战活动
或关系	OrR	某一作战活动集合中任意一个作战活动完成后可执行另一作战活动
并发关系	ConcR	某一作战活动完成后能使另一作战活动集合中所有作战活动开始执行
同步关系	SynR	某几个作战活动开始和结束都必须是同时
循环关系	CycR	基于一定条件反复执行一个或几个作战活动

上述 4 个定义是建立装备体作战任务模型的必要条件,在上述定义的基础上,可以给出如下的装备体系作战任务的定义。

定义 5 作战任务。对于任何一个作战任务,其都可被形式化描述为一个四元组:

$$OT = \langle TO, TE, TA, TR \rangle$$

其中, $TO = \{TO_1, TO_2, \dots, TO_n\}$, 表示作战任务的目标集合; $TE = \{TE_1, TE_2, \dots, TE_n\}$, 表示作战任务的装备(系统节点)集合; $TA = \{TA_1, TA_2, \dots, TA_n\}$, 表示作战任务的活动集合; $TR = \{TR_1, TR_2, \dots, TR_n\}$, 表示作战任务的活动间关系集合。

2 基于 DoDAF 的体系任务建模

根据装备体系任务模型的定义,对体系作战任务的描述需要包含任务目标、任务装备、任务活动以及任务活动间关系 4 方面的信息,此为在 DoDAF 中选取适当产品的依据,即装备体系任务建模要选用合适的 DoDAF 产品来描述这 4 部分信息。

DoDAF 由 20 多个产品构成,这些产品分别从作战视图、系统视图和技术视图对体系结构进行描述。为对任务目标和任务活动进行描述,可选取 OV-5 作战活动图,OV-5 能够实现对作战目标的集合 TO 以及作战活动的集合 TA 的描述;为对任务装备进行描述,可选取 OV-2 作战节点图、OV-4 组织关系图以及 OV-3 作战信息交互矩阵,通过以上 3 个视图,可表现作战装备的集合 TE 及集合内元素间的信息交换;为对任务活动间关系进行描述,可选取 OV-6c 作战事件跟踪描述图,OV-6c 图涵盖了与活动间关系 TR 相关的信息。

对装备体系任务进行建模所选取的 DoDAF 产品间的对应关系如表 2 所示。

表 2 装备体系任务建模选取 DoDAF 产品

需求	产品号	产品名称
目标描述(TO)	OV-5	作战活动图
	OV-2	作战节点图
装备描述(TE)	OV-3	作战信息交互矩阵
	OV-4	组织关系图
活动描述(TA)	OV-6c	作战事件跟踪描述图
活动间关系描述(TR)	OV-5	作战活动图

在这些产品中,OV-2、OV-3、OV-4 和 OV-5 组成的产品集,用于构建装备体系任务静态模型,本文中采用 IBM Telelogic SA(System Architect)软件集成的 IDEF3 语言来建立 OV-6c 产品,用于构建装备体系的任务的仿真模型。

2.1 装备体系任务静态模型

在对装备体系任务建模时,通常可以在 DoDAF 框架下采用基于活动的方法(activity-based methodology, ABM)。ABM 规定一个完整的体系可以表示为实体、关系、属性、约束的集合。实体是体系中设计的对象,也是体系数据存储

和处理的对象,关系是这些对象之间的联系,属性表达了实体与关系的联系,也是辨识实体和联系对象的特征,约束描述了这个体系应当遵循的规则和受到的限制^[15]。

在运用 ABM 对体系任务进行建模的过程中,因为 ABM 是在 DoDAF 的框架内进行建模,它运用 DoDAF 以数据为中心的特点来保证建模过程中数据的一致性,这就使得实体的关系和属性可以自动生成。在作战视图中需要手动输入信息、活动、节点、角色和作战概念所描述的对象,信息交换和需求线可以在 OV-5 中的活动、信息输入和输出、OV-2 的作战节点确定后自动生成。当体系模型内的所有信息交换组合成一体,就可以自动生成作战信息交换矩阵 OV-3 的文件报告。OV-2、OV-4 和 OV-5 产品之间的关系如图 1 所示。

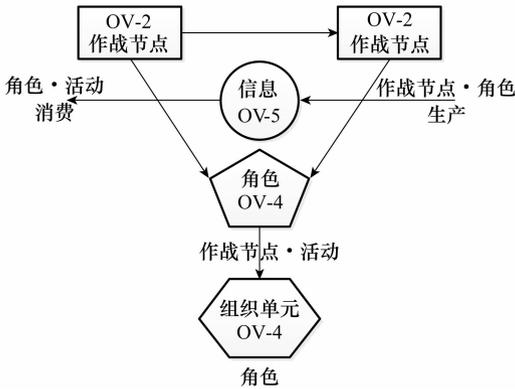


图 1 OV-2、OV-4 和 OV-5 的关系

在本文研究过程中,使用系统架构工具 SA 来完成体系任务静态模型的建立。SA 以 ABM 方法为依据,可以为 DoDAF 产品提供直接支持。运用 SA 进行基于 ABM 方法的 DoDAF 体系建模可以自动生成 OV-2 信息交换关系需求线以及 OV-3 信息交换矩阵,并能保证体系架构的连续性和前后一致性。

运用 ABM 方法进行体系任务静态模型的建立,作战视图产品集合的建立由下面 8 个步骤组成:3 种手动数据输入、1 种人工辅助输入和 4 种系统自动生成,如表 3 所示。完成了这些过程,即完成了体系任务静态模型的构建。

表 3 基于 ABM 的体系任务静态建模流程

步骤	作战视图产品设计
1	构建 OV-5 作战活动图
2	构建 OV-2 作战节点图中的作战节点
3	构建 OV-4 组织关系图中的角色和组织单元
4	手动关联活动、节点和角色
5	自动生成三角关系:活动、节点和角色
6	生成信息交换
7	生成 OV-2 作战节点图中的需求线
8	生成 OV-3 信息交换矩阵

完成以上 8 个步骤后,即建立了装备体系任务静态模型,能全面描述体系任务的目标信息、装备信息以及活动信息,同时也是对装备体系任务建立仿真模型的基础。

2.2 装备体系任务仿真模型

在 SA 软件中,使用 BPMN 模型^[7,16] 和 IDEF3 模型均可以建立起仿真模型,但与 BPMN 模型相比,IDEF3 模型具有以下优势:① 由于使用 IDEF0 图表达的 OV-5 作战活动图是建立仿真模型的重要依据,而 IDEF3 模型与 IDEF0 模型之间的联系更加密切且直观,IDEF0 模型中的活动可直接转化为 IDEF3 模型中的工作单元。② 由于是在 DoDAF 框架下进行建模,因此在建模时应首先选用 DoDAF 框架中的视图产品。而 DoDAF 框架中的 OV-6c 作战事件跟踪描述图可描述作战事件之间的时序关系,从而给出任务活动间关系的描述,其可以用结构化语言来表示,即可以采用 IDEF3 过程流模型表示,并且该模型可扩展为仿真模型。

运用 SA 工具建立装备体系任务仿真模型即是构建 IDEF3 过程流图,建立 OV-6c 图,可分为如表 4 中所示的 5 个步骤。

表 4 体系任务仿真模型建立流程

步骤	内容
1	以静态模型为基础收集所需信息,对任务成功与失败进行定义
2	构建 IDEF3 过程流图(OV-6c)
3	添加 IDEF3 对象,到达文件、人员、转移、资源配置、过程时间等信息
4	设置交汇点与联接
5	设定仿真运行参数

通过以上 5 个步骤,即可完成体系任务仿真模型的建立,通过对仿真模型进行确认无误,并通过运行仿真模型得到仿真结果后,即可实现对装备体系任务模型的验证。

3 实例分析

在本文的实例分析中,选取航母体系摧毁敌岸基目标作为典型任务进行分析和建模。对航母体系摧毁敌岸基目标这一任务可分为 4 个子任务:计划准备、出航、作战和返航^[17]。其中:计划准备具体可分解为战前侦察、制定飞行计划、传递任务简令和收集气象资料 4 个活动;出航具体可分解为起飞调运、舰面保障和弹射起飞 3 个活动;作战具体可分解为指挥引导、即时侦察、电子对抗、攻击 4 个活动;返航具体可分解为引导、着舰、着舰调运以及任务后检查 4 个活动。为完成作战任务目标,需要参与此任务的装备系统包括指挥控制系统、航空保障系统、预警探测系

统、电子对抗系统、作战系统以及卫星。在对任务的分析中重点研究与航空保障系统及作战系统相关的活动，即起飞调运、舰面保障、弹射起飞、攻击、着舰、着舰调运及任务后检查 8 个活动。其中，起飞调运活动分为机库内牵引(起飞)、升至甲板和甲板上牵引(起飞)3 个子活动，而着舰调运活动分为甲板上牵引(着舰)、降至机库和机库内牵引(着舰)3 个子活动。

为了建立航母体系典型任务模型，按照装备体系任务的描述模型，需要对以下任务目标、任务装备、任务活动和任务活动间关系这 4 个方面的信息进行描述。

(1) 任务的目标描述。对于航母体系的此典型任务，其任务是单一的，具体可以表示为 $TO = \{\text{摧毁敌岸基目标}\}$ 。

(2) 任务的装备描述。根据参加此任务所涉及的装备系统，任务的装备可表示为集合 TE ，集合内元素为 $TE =$

$\{\text{指挥控制系统, 航空保障系统, 预警探测系统, 电子对抗系统, 作战系统, 卫星}\}$ 。

(3) 任务的活动描述。此典型任务的活动集合可用 TA 表示，具体为 $TA = \{\text{战前侦察, 制定飞行计划, 传递任务简令, 收集气象资料, 机库内牵引(起飞), 升至甲板, 甲板上牵引(起飞), 舰面保障, 弹射起飞, 指挥引导, 即时侦察, 电子对抗, 攻击, 引导, 着舰, 甲板上牵引(着舰), 降至机库, 机库内牵引(着舰), 任务后检查}\}$ 。

(4) 任务的活动间关系描述。在此典型任务的任务活动的流程框图中，包含 3 种任务活动间关系，分别为：顺序关系($SeqR$)、与关系($AndR$)与并发关系($ConcR$)。

在航母体系典型作战任务建模与仿真过程中，首先根据任务活动间关系建立其静态模型，并在建立仿真模型时对任务活动关系进行了部分修正，如表 5 表示。

表 5 修正后的任务活动间关系

修正前关系	修正后关系
—	$SeqR(\text{作战指令, 战前侦察})$
$SeqR(\text{甲板上牵引(起飞), 舰面保障})$	$CndR(\text{甲板上牵引(起飞), \{起飞调运成功, 起飞调运失败}\})$ $SeqR(\text{起飞调运成功, 舰面保障})$
$SeqR(\text{舰面保障, 弹射起飞})$	$CndR(\text{舰面保障, \{可用舰载机数量合格, 可用舰载机数量不合格}\})$ $SeqR(\text{可用舰载机数量合格, 弹射起飞})$
$ConcR(\text{弹射起飞, \{指挥引导, 即时侦察}\})$	$CndR(\text{弹射起飞, \{安全起飞舰载机数量合格, 安全起飞舰载机数量不合格}\})$ $ConcR(\text{安全起飞舰载机数量合格, \{指挥引导, 即时侦察}\})$
$AndR(\{\text{指挥引导, 攻击}\}, \text{引导})$	$CndR(\text{攻击, \{战斗机任务成功, 战斗机任务失败}\})$ $AndR(\{\text{指挥引导, 战斗机任务成功}\}, \text{引导})$
$SeqR(\text{机库内牵引(着舰), 任务后检查})$	$CndR(\text{机库内牵引(着舰), \{着舰调运成功, 着舰调运失败}\})$ $SeqR(\text{着舰调运成功, 任务后检查})$
—	$CndR(\text{任务后检查, \{任务后检查合格, 任务后检查不合格}\})$
—	$SeqR(\text{无需复飞或故障数合格, 任务成功})$
—	$OrR(\{\text{起飞调运失败, 可用舰载机数量不合格, 安全起飞舰载机数量不合格, 战斗机任务失败, 着舰调运失败, 任务后检查不合格}\}, \text{任务失败})$

为对装备体系任务进行仿真，要对任务成功与任务失败进行定义。针对航母体系摧毁敌岸基目标这一任务而言，规定所有活动均正常完成为任务成功，其间任何一个活动出现异常均会导致任务失败。另外，还对模型中可能出现的分支进行定义。在本文中主要考虑与航空保障系统以及作战系统相关的活动，假定其他系统可靠度均为 1，故与其他系统相关的各项活动成功率均为 100%。此外，不对人为因素进行考虑，即所有人员的可靠度均为 100%。在以上前提下，任务完成过程中可能出现异常的活动为：起飞调运所包含的 3 个子活动、舰面保障、弹射起飞、攻击、着舰调运所包含的 3 个子活动以及任务后检查。现对可能导致

任务失败的各项异常情况进行规定，包括：起飞调运失败、可用舰载机数量不合格、安全起飞舰载机数量合格、战斗机任务失败、着舰调运失败以及任务后检查不合格。

在对航母体系典型任务进行动态特性分析后，即可开始构建 IDEF3 过程流程图如图 2 所示，图中构成体系的指挥控制系统、航空保障系统、预警探测系统、电子对抗系统、作战系统(舰载机)和卫星用 6 个泳道分别表示。另外，为了对航母体系典型任务进行仿真从而得到其任务可靠度，还需要在其典型任务过程流程图中所有分支，即异或交汇点扇出联接需要给定输入，在本文中给出输入值如表 6 所示。

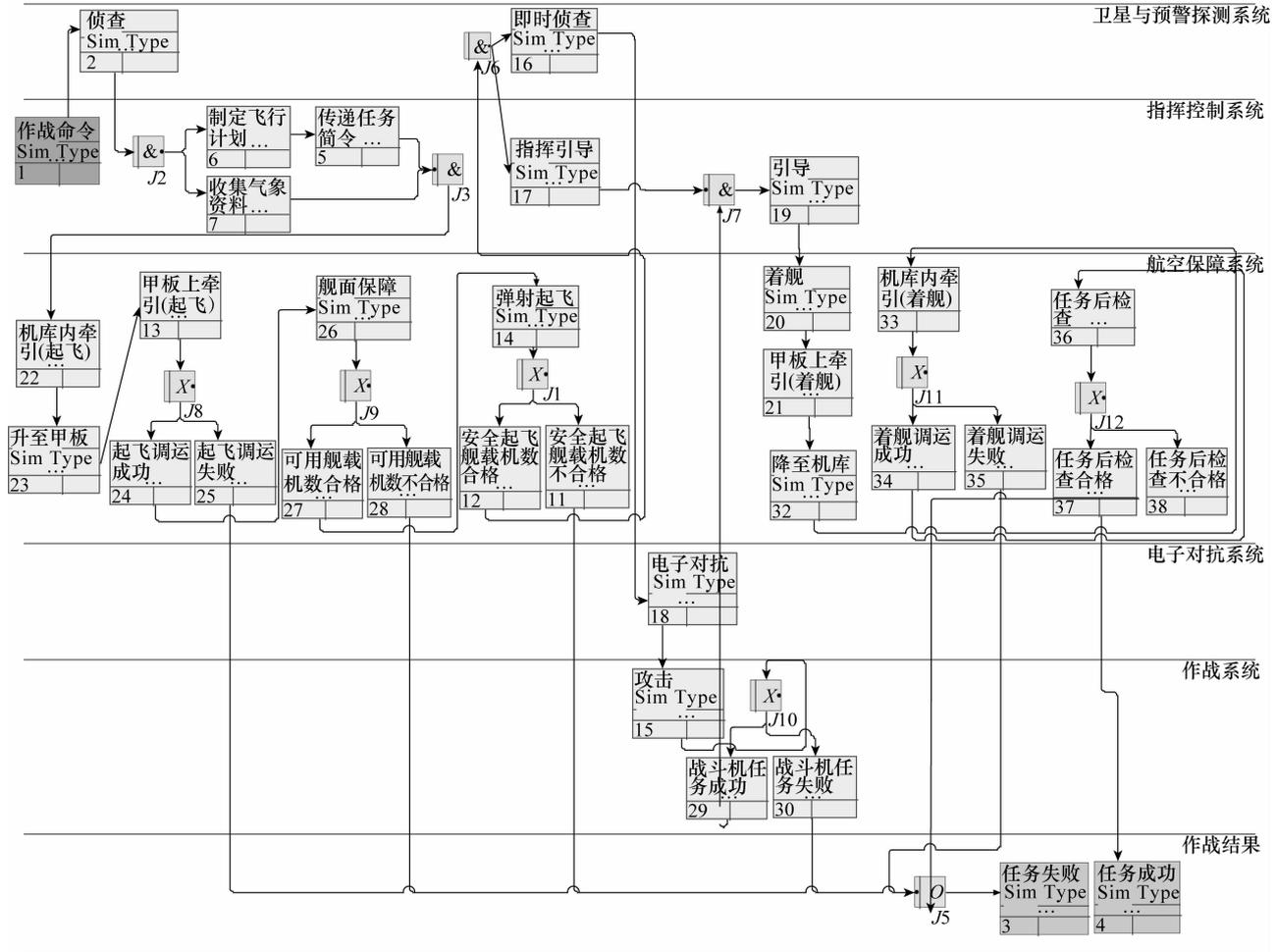


图 2 航母体系典型任务 IDEF3 过程流程图

表 6 异或交汇点扇出联接输入

序号	分支过程名称	概率值/%	参考指标
1	起飞调运成功	90	调运设施可靠度: $R_{\text{起飞调运}}$
	起飞调运失败	10	
2	可用舰载机数量合格	70	舰载机使用可用度: $A_{0\text{舰载机}}$
	可用舰载机数量不合格	30	
3	安全起飞舰载机数量合格	90	弹射设施可靠度: $R_{\text{弹射}}$
	安全起飞舰载机数量不合格	10	
4	战斗机任务成功	95	战斗机任务成功率: $P_{MC\text{战斗机}}$
	战斗机任务失败	5	
5	着舰调运成功	90	调运设施可靠度: $R_{\text{着舰调运}}$
	着舰调运失败	10	
6	任务后检查合格	90	舰载机可靠度: $R_{\text{舰载机}}$
	任务后检查不合格	10	

根据以上输入数据,对仿真模型运行 300 次,仿真结果显示,其中任务成功 134 次,任务失败 166 次。不难得出,在该仿真模型中,航母体系摧毁敌岸基目标的任务成功率的理论值 $P_{MC理}$ 可根据下式计算:

$$P_{MC理} = R_{\text{起飞调运}} A_{0\text{舰载机}} R_{\text{弹射}} P_{MC\text{战斗机}} R_{\text{着舰调运}} R_{\text{舰载机}}$$

而该任务成功率仿真出的实际值 $P_{MC实}$ 的计算公式为

$$P_{MC实} = \frac{\text{任务成功次数}}{\text{任务成功次数} + \text{任务失败次数}}$$

任务成功率的实际值与理论值之间的误差 $\Delta_{误}$ 可由下式得出:

$$\Delta_{误} = \frac{|\text{实际值} - \text{理论值}|}{\text{理论值}} \times 100\%$$

根据该实验结果,任务成功率的理论值为 $P_{MC理} = 0.4363$,任务成功率的实际值为 $P_{MC实} = 0.4467$,两者间的误差为 $\Delta_{误} = 2.4\%$ 。故该结果具有可信性。

4 结论

装备体系任务建模与仿真是对装备体系论证和开发的前提。本文在目前装备体系任务建模方面主要研究成果基础上,给出了装备体系任务的描述模型,并研究了在 DoDAF 框架下建立装备体系任务静态模型和仿真模型的方法,提出了用 ABM 建立体系任务静态模型和用 IDEF3 过程流模型建立体系任务仿真模型的方法和步骤,并用提出的建模与仿真方法对实际案例进行分析与应用,验证了模型和方法的有效性,对于基于 DoDAF 的装备体系任务建模与仿真具有现实的支持意义。

参考文献:

- [1] Mark W. Architecting principles for systems of systems[J]. *Systems Engineering*, 1998, 1(4): 267-284.
- [2] Saunders T, Croom C, Austin W, et al. System of systems engineering for Air Force capability development[R]. Washington: Air Force Scientific Advisory Board, 2005.
- [3] Department of Defense. System of systems engineering. In defense acquisition guidebook[R]. Washington: Department of Defense, 2004.
- [4] Boardman J, Sauser B. System of systems—the meaning of OF[C]//*Proc. of the IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*, 2006.
- [5] Valerdi R, Axelband E. A research agenda for systems of systems architecting[J]. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2008, 1(1): 171-188.
- [6] Charles B. Keating J J, Padilla K A. System of systems engineering: requirements: challenges and guidelines[J]. *Engineering Management Journal*, 2008, 20(4): 24-31.
- [7] Pan X, Yin B S. Modeling and simulation for SoS based on the DoDAF framework[C]//*Proc. of the 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, 2011: 1283-1287.
- [8] Held J M. The modeling of systems of systems[D]. Sydney: University of Sydney, 2008.
- [9] Hause M. The unified profile for DoDAF/MODAF (UPDM) enabling systems of systems on many levels[C]//*Proc. of the IEEE Systems Conference*, 2010.
- [10] Zhao Y P, Zheng H Z. Modeling and simulation for equipment support system based on IDEF method[C]//*Proc. of the International Conference on Computer Application and System Modeling*, 2010.
- [11] Mura I. Hierarchical modeling and evaluation of phased-mission systems[J]. *IEEE Trans. on Reliability*, 1999, 48(4): 360-380.
- [12] Hsu P Y, Chang Y B, Chen Y L. STRPN: a Petri-net approach for modeling spatial-temporal relations between moving multimedia[J]. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2003, 29(1): 66-76.
- [13] 李建军. 作战任务高层本体描述及规划[J]. 火力与指挥控制, 2008, 38(1): 53-55. (Li J J. Operational task ontology and task planning[J]. *Fire Control and Command Control*, 2008, 38(1): 53-55.)
- [14] 王禹. 基本作战单元装备任务持续性建模方法及评价参数研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006. (Wang Y. Modeling and evaluation parameters method based on the sustained of task combat unit[D]. Beijing: Beihang University, 2006.)
- [15] Ring S J. An activity-based methodology for development and analysis of integrated DoD architectures—the art of architecture[C]//*Proc. of the Command and Control Research and Technology Symposium*, 2004.
- [16] Dijkman R. Similarity of business process models: metrics and evaluation[J]. *Information Systems*, 2011, 36(2): 498-516.
- [17] 宋剑, 黄培荣, 丁海燕. 基于多目标决策模型的航空母舰编队编成研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(5): 53-56. (Song J, Huang P R, Ding H Y. Optimization of the composition module for the aircraft carrier formation with the use of the multi-objective decision-making theory[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(5): 53-56.)