

1-4-2019

## Improved Hybrid DEVS-based Equipment Modeling Method

Jianchun Zhang

*1. School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnical University, Jiaozuo 454000, China; ;*

Yanyang Zeng

*1. School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnical University, Jiaozuo 454000, China; ;*

Wenpeng Xu

*1. School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnical University, Jiaozuo 454000, China; ;*

Fengju Kang

*2. Marine College, Northwestern Polytechnical University, X'an 710072, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Improved Hybrid DEVS-based Equipment Modeling Method

### Abstract

**Abstract:** Aiming at the shortcoming of model reuse and extensibility in the existing underwater warfare simulations, a hybrid modeling method based on improved hybrid DEVS (IHDEVS) is proposed. *By analyzing the characteristics of combat in the underwater warfare, the event driven engagement process is constructed. From the two dimensions of entity function and behavior abstraction, a model classification strategy based on separation of concerns is designed, and a universal entity model framework is built based on the IHDEVS modeling theory, including layers of the interaction architecture, the coupling model and the atomic model.* A typical example shows that this structured modeling method can use the same interface to support the model reconfiguration and facilitate the flexible model reuse and expansion, which can be referenced in fast and efficient construction of underwater warfare simulation system.

### Keywords

underwater warfare simulation, equipment entity, hybrid modeling, model structure

### Recommended Citation

Zhang Jianchun, Zeng Yanyang, Xu Wenpeng, Kang Fengju. Improved Hybrid DEVS-based Equipment Modeling Method[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4123-4131.

# 基于改进混合 DEVS 的装备建模方法研究

张建春<sup>1</sup>, 曾艳阳<sup>1</sup>, 徐文鹏<sup>1</sup>, 康凤举<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学计算机科学与技术学院, 焦作 454000; 2. 西北工业大学航海学院, 西安 710072)

**摘要:** 针对已有的水下战仿真模型在模型重用和可扩展方面的不足, 提出了基于 IHDEVS (Improved Hybrid DEVS) 的装备混合建模方法。通过分析水下战的对抗特征构建了事件驱动的战斗流程; 从实体功能与行为抽象两个维度出发, 设计了基于关注点分离的模型分类策略; 根据 IHDEVS 建模理论构建了通用化的实体模型框架, 包括仿真交互架构层、耦合模型层和原子模型层。通过典型实例表明该结构化建模方法可利用相同的接口支持模型的重配置, 便于灵活地进行模型重用与扩展, 对快速高效地构建水下战仿真系统具有一定的参考价值。

**关键词:** 水下战仿真; 装备实体; 混合建模; 模型结构

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 11-4123-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811010

## Improved Hybrid DEVS-based Equipment Modeling Method

Zhang Jianchun<sup>1</sup>, Zeng Yanyang<sup>1</sup>, Xu Wenpeng<sup>1</sup>, Kang Fengju<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Marine College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

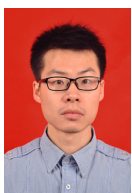
**Abstract:** Aiming at the shortcoming of model reuse and extensibility in the existing underwater warfare simulations, a hybrid modeling method based on improved hybrid DEVS (IHDEVS) is proposed. By analyzing the characteristics of combat in the underwater warfare, the event driven engagement process is constructed. From the two dimensions of entity function and behavior abstraction, a model classification strategy based on separation of concerns is designed, and a universal entity model framework is built based on the IHDEVS modeling theory, including layers of the interaction architecture, the coupling model and the atomic model. A typical example shows that this structured modeling method can use the same interface to support the model reconfiguration and facilitate the flexible model reuse and expansion, which can be referenced in fast and efficient construction of underwater warfare simulation system.

**Keywords:** underwater warfare simulation; equipment entity; hybrid modeling; model structure

## 引言

以鱼雷武器的运用与防御为主要作战样式的水下战过程涉及鱼雷发射平台、鱼雷武器、目标平

台及反鱼雷武器等装备实体, 通过构建对抗条件下的交战仿真系统为装备的性能设计与战术开发提供了一种分析手段。为提高仿真逼真度, 通常需要同时建立交战级和工程级模型<sup>[1]</sup>, 其中工程级模型基于数学方程进行物理行为解算, 交战级模型以工程级模型为基础, 利用事件完成状态转换, 体现实体工作逻辑, 装备模型(如平台、武器)属于连续-离散事件混合系统, 包含底层物理行为和离散的逻辑



收稿日期: 2018-05-30 修回日期: 2018-06-25;  
基金项目: 国家自然科学基金(61503124), 河南省科技厅科技攻关/社会发展项目(182102310935);  
作者简介: 张建春(1988-), 男, 浙江龙游, 博士, 讲师, 研究方向为系统建模与仿真; 曾艳阳(1987-), 男, 河南固始, 博士, 讲师, 研究方向为系统建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 4123 •

辑行为。现有的水下战仿真领域中已积累了不少的仿真模型，关于如何利用这些模型资源进行仿真系统的快捷构建国内外学者已进行了一些研究。文献[2]基于 DEVS 建模理论开发了模块化的水下战模拟器，利用模块重用进行鱼雷防御系统的效能评估，文献[3]在其基础上设计了装备性能和战术的接口格式，以增强模型使用的灵活性。文献[4]提出了面向服务仿真实实现的技术框架，实现基于组件的模型重用。文献[5-6]设计了基于离散事件仿真引擎的系统总体架构，建立节点对象、节点运动模式属性和功能属性的模型体系。文献[7-9]分别在 HLA 和 DWK 等环境下实现对 UW 的分布交互仿真，提出面向联邦成员级重用的系统集成方法，模型重用的粒度较粗。文献[10]以 HLA 和 FLAMES 为仿真平台，利用 FLAMES 规范化的模型库模板与模型接口进行模块开发与重用。

上述研究中没有充分考虑模型行为在抽象层上的差异，若将两类实体行为置于同一模型中，则模型开发、修改和重用较为复杂，导致模型重用不够灵活，对模型的测试、维护和升级的成本较高；同时从行为的领域相关特性上分析，仿真中对物理行为的替换或修改比抽象的逻辑行为更频繁，利用实体行为的分离式建模，可最小化模型的修改量。为此，在改进混合 DEVS(Improved Hybrid DEVS, IHDEVS)建模理论的基础上，提出一种面向水下战仿真的装备混合建模方法，设计基于实体功能与行为抽象上的模型分类策略，建立通用化的实体模型框架，以克服模型重用、扩展与集成上的不足。

## 1 事件驱动的水下战流程

水下战的典型阶段包括平台探测、目标跟踪、鱼雷发控、鱼雷攻击、鱼雷防御等，图 1 展示了平台间对抗的部分真实场景，例如攻击平台的任务有航渡、目标跟踪、鱼雷发控和机动，从航渡阶段转换到目标跟踪阶段需要发现目标这一事件。从建模角度上分析，交战流程可当成离散事件系统，表示为任务的顺序式或并发式的执行。具体来讲，平台

可通过具有若干行为状态的组件模型表示，且该状态表示任务，任务的转换和执行被视作状态转移，任务执行和转换的因果则为系统的 I/O 事件。因此事件驱动式的建模方法适用于水下交战过程描述。

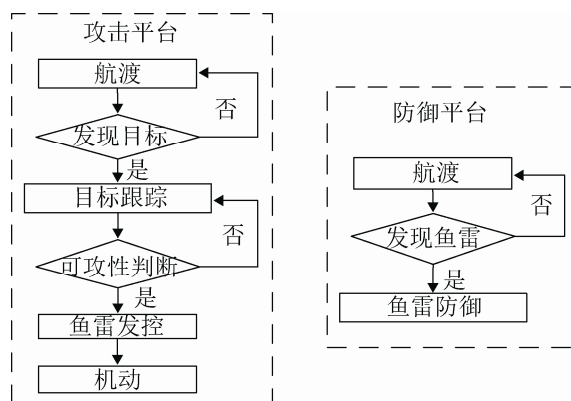


图 1 水下战的阶段化流程

Fig. 1 Staged process of the underwater warfare

## 2 基于实体功能和行为抽象的模型分类策略

水下战仿真主要涉及的装备实体活动：运动、感知、信息处理、设备操纵和决策规划。对于实体行为，自动控制领域中的控制论给出阐述：行为依托实体对象的固有能力，在自身状态和外部环境共同作用下改变实体对象状态。借鉴该思想，可从功能上将实体分解为相对独立又相关的传感器、信息处理器、控制器、执行器和运动模型(Sensor, Information-processor, Controller, Actuator and Motion, SICAM)。其中，传感器负责从外部环境和实体自身感知战场信息和自身状态；信息处理器完成对感知信息的处理与加工，如数据融合、滤波、建模和预测，形成综合态势，包括环境特征、敌我双方实体信息；控制器实现态势评估和行为决策功能；执行器响应控制器输出的行为指令，执行具体的操作，如运动操纵、探测设备操作、武器发射；运动模型根据环境参数、操纵机构状态进行动力学/运动学解算，从而更新实体运动状态。

由于装备实体建模中存在对 M&S 技能和领域知识的需求，为降低建模工作的复杂度和难度，采

用模型关注点分离法将模型行为分解为底层的物理行为和高层的逻辑行为。物理行为描述对象的基本功能或具体动作的细节, 多以详细的算法及数学方程表示, 适合于微观建模; 逻辑行为则利用状态转换机理从宏观上描述对象的抽象行为, 包括模型的 I/O 事件、离散状态的转换、时间推进和输出函数。例如鱼雷控制器的逻辑行为可表示鱼雷航行中的弹道状态, 而物理行为可通过描述具体的动作(如操纵舵机、自导头探测等)以支持和响应弹道状态的转换和执行。

基于该分类策略所建立的双层 SICAM 结构如图 2 所示, 该结构从控制论的功能角度和行为抽象层次上确立了实体的结构与行为, 使实体具备自治性、目的性和独立性, 还能表示连续、离散以及混合性的行为, 能有效反映真实世界。并且基于该结构可进行后续的接口设计, 通过相同的接口支持模型整体或部分的重配置, 为灵活的模型重用奠定技术基础。

### 3 基于 IHDEVS 的模型框架设计

#### 3.1 IHDEVS 建模理论

IHDEVS 是在 DEVS 的基础上发展的混合建模方法, 具体定义见文献[11], 图 3 展示了该方法下耦合模型与原子模型间的组成关系, 其中原子模型由逻辑模型和动作模型构成, 两者共同具有的元素包括状态空间、输入/输出端口、转换接口函数、时间推进函数和输出函数, 区别在于状态更新部分

的不同, 对各元素的说明如下:

- 状态空间: 包括离散相位和连续状态变量, 离散相位变量间的转换代表逻辑模块中行为的定性改变, 连续状态变量的变化对应动作模块中随时间演化的行为。
- 输入/输出端口: 包含离散事件和连续信号通道, 使模型间能同时允许两类数据的传递。
- 转换接口函数: 包括数字/事件接口函数和事件/数字接口函数, 完成连续信号和离散事件间的相互转化。
- 时间推进函数: 负责计算两个有序相位之间或状态变量更新所持续的时间。
- 输出函数: 负责将模型内部相位或状态映射至输出端口, 一般发生在相位转换或状态更新时, 系统生成输出事件或信号。
- 状态转换函数: 包括外部状态转换函数和内部状态转换函数。
- 连续演化函数: 体现状态的演化及对应的具体动作。
- 操作映射函数: 是逻辑模块和动作模块间耦合的通信接口, 反映某相位与对应的详细行为间的映射关系。

IHDEVS 利用离散的逻辑模型和连续的动作模型分别描述实体的逻辑行为和物理行为, 并通过操作映射函数关联原子模型的逻辑和动作部分, 从而体现出混合系统中两种行为间的交互, 可见其适用于具有双层 SICAM 结构的装备实体模型的设计。

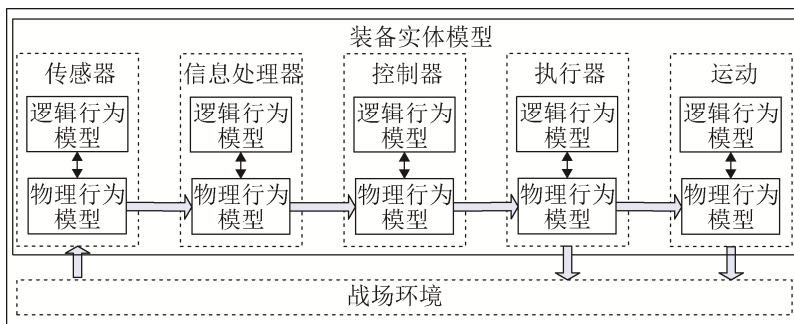


图 2 双层 SICAM 结构  
Fig. 2 Structure of double-layer SICAM process



### 3.2 通用化的模型框架

在仿真系统中，实体以所具备的属性、行为特征，为尽可能地统一模型端口，可依据双层 SICAM 结构和 IHDEVS 建模方法进行模型开发。图 4 展示了仿真系统的顶层交互架构，涉及实验框架、平台、鱼雷、反鱼雷武器、战场环境和交战评估模型，各模型间只通过端口发生交互，这种设计模式可增强模型的模块性和封装效果。系统的运行流程为：首先由实验框架设定各参与实体的初始信息，然后平台开始航渡，当平台探测到目标，则发射和/或控制鱼雷进行目标攻击，同时目标可以进行对抗活动。对抗过程可以通过交战评估模块判断仿真是否结束。

在耦合模型层的设计上，以平台实体为例，其基本功能为运动和感知，利用所获取的战场信息生成态势，并进行态势评估和行为决策与执行。图 5 描述了平台耦合模型的基本结构，其成员包括传感

器、信息处理器、控制器、执行器和运动，并对各成员模型间以及成员与耦合模型间的端口耦合关系进行了说明，后续的耦合模型开发可以在此框架上进行合适的裁剪与扩展，以适应不同的结构与交互需求。

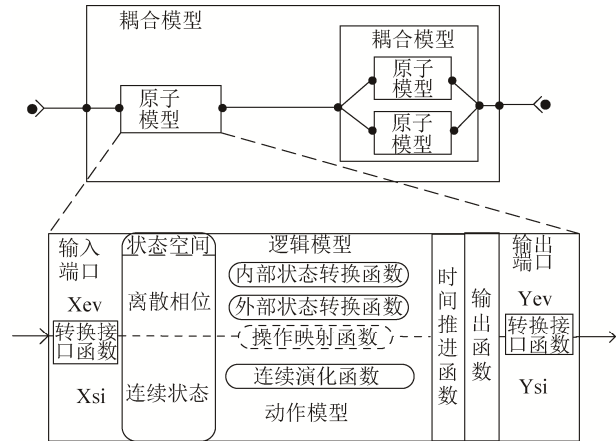


图 3 IHDEVS 结构  
Fig. 3 Structure of IHDEVS

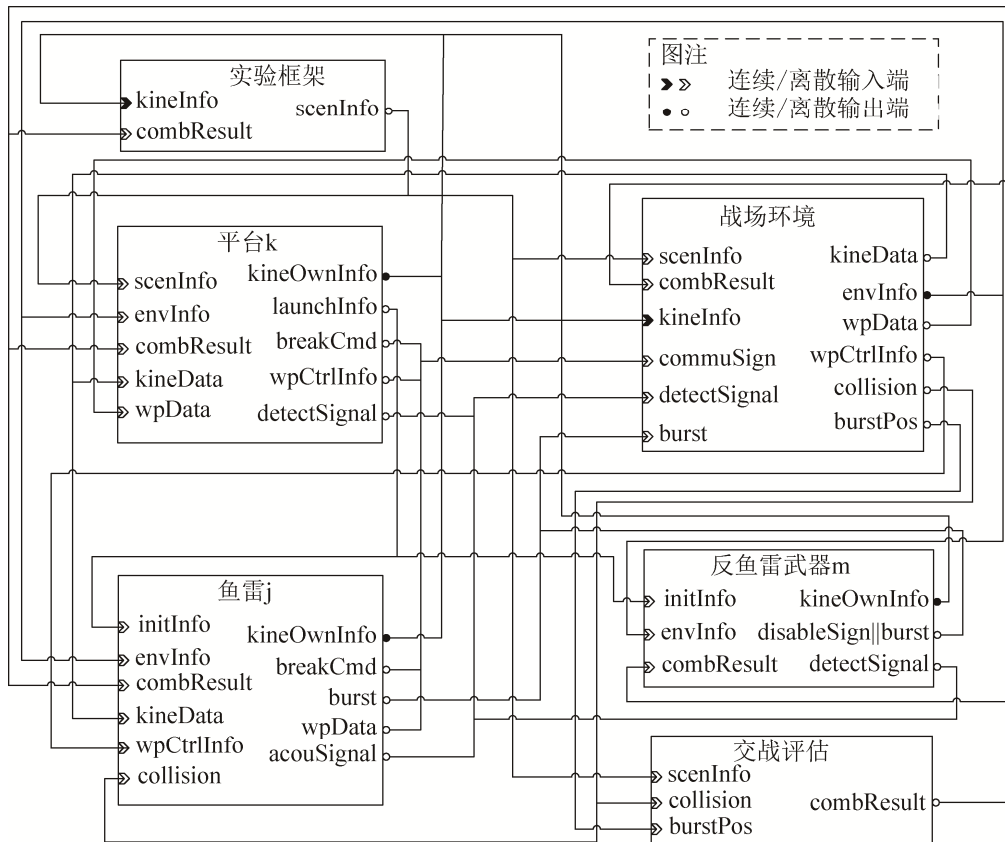


图 4 水下战仿真系统的顶层交互架构  
Fig. 4 Top-level interactive architecture of the underwater warfare

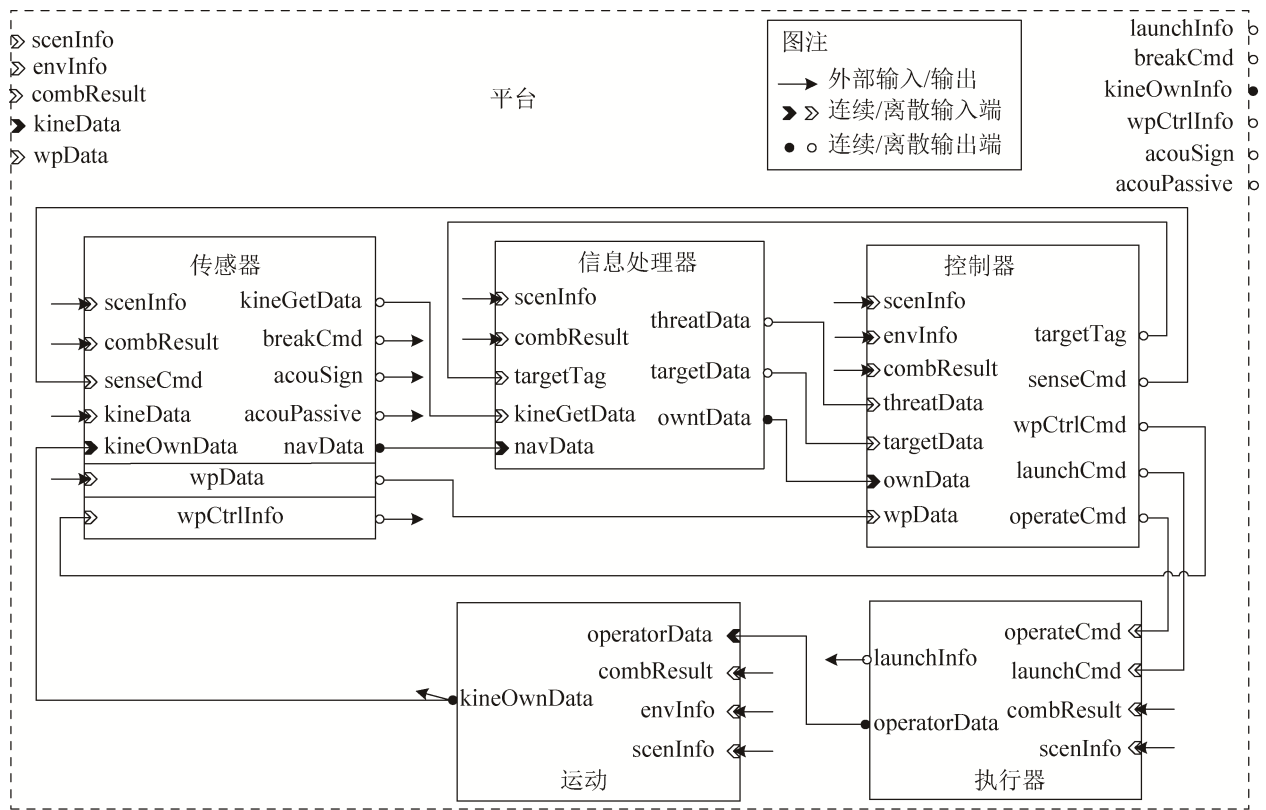


图 5 平台耦合模型的 IHDEVS 表示

Fig. 5 IHDEVS-based representation of the platform coupling model

在原子模型层面上,以平台的控制器为例,作为实体的控制中心,在交战过程中依据态势信息和任务需求进行战术决策,产生动作指令。对于攻击平台,最初进行目标搜索,当发现目标后则进行识别与跟踪。若目标被确认为威胁源,则进行战术机动并在合适的攻击条件下发射鱼雷攻击目标。对于防御平台而言,在检测到来袭鱼雷后,根据鱼雷运动信息进行防御决策,实施火力、水声或弹道等多种对抗模式。由于任务可以利用控制器相位变量进行描述,故逻辑模型利用状态转换函数描述任务及其转换,而动作模型则通过数学算法详细表示特定任务中的执行过程。在模型交互时,当出现所提供的数据类型与需求不一致时,需要转换接口函数来实现数据的适应性改变。考虑到动作模型因实体类型、模型分辨率的不同而呈现多样性,故只需给出动作模型的关联关系和接口。图 6 描述了控制器的结构与行为,着重反映逻辑模型和动作模型间的关系,图中上半部分描述了模型的相位及转换关系和

各相位中关联的动作模型;下半部分给出了动作模型的输入和输出参数说明,符号@表示对动作模型的调用。当某相位下具有多条输入或输出消息,利用符号“||”表示或关系,符号“&”表示与关系。系统中所有的原子模型均以该框架为模板进行模型设计。

#### 4 仿真实验

作为 DEVS 模型的实现工具和仿真引擎,ADEVS 是由 C++语言编写的一组库组成,适用于标准、并行和动态变结构的系统,已在多所科研机构得到应用<sup>[12]</sup>。IHDEVS 下的模型运行涉及并行的离散事件仿真和连续系统仿真,而 ADEVS 中的共享内存机制适用于并行运行模式。针对离散事件和连续数据间的不同特点,采用不同的通信处理方式:连续数据更新频率高且规律性强,采用共享内存模式;离散事件采用消息通信模式。

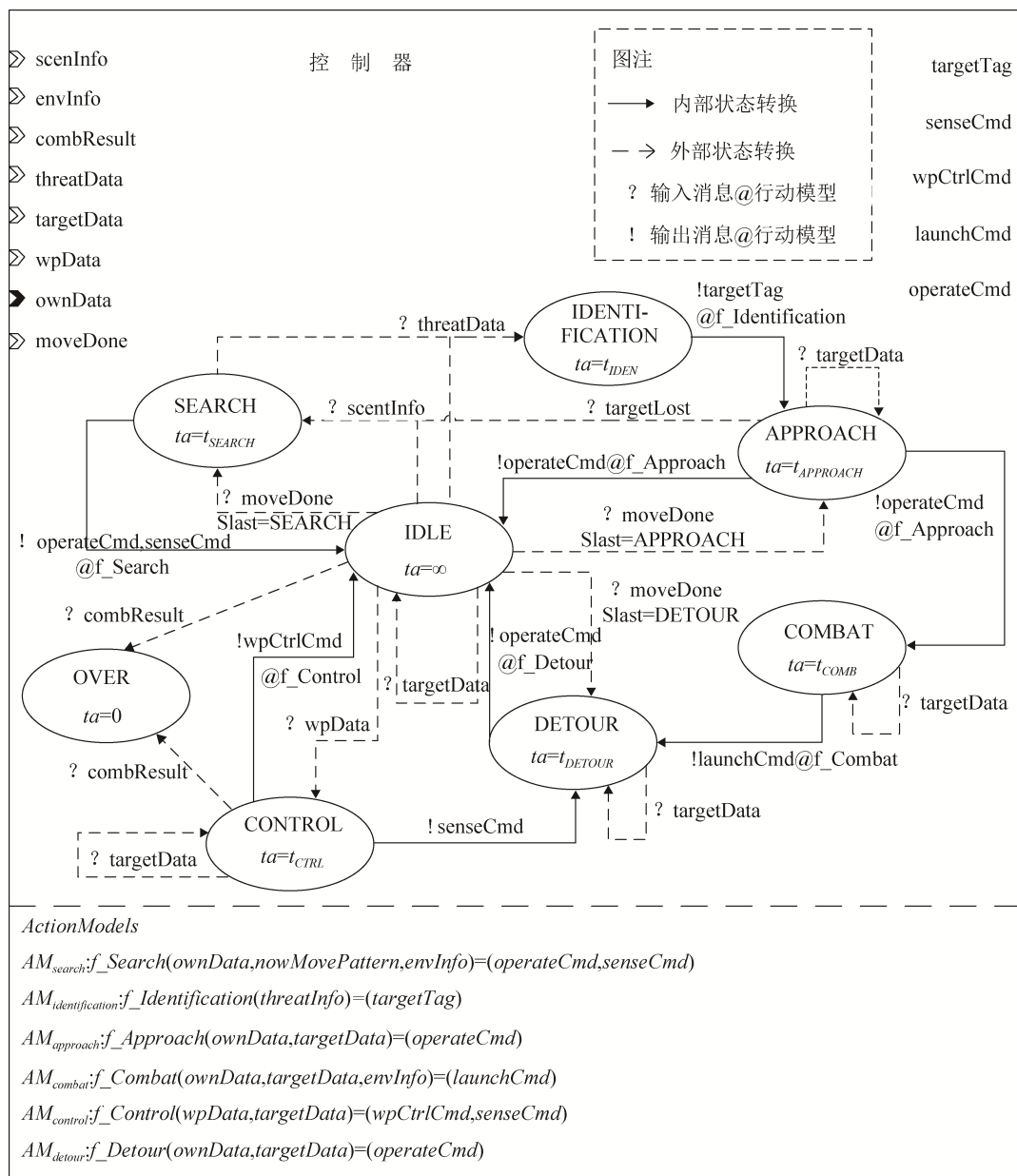


图 6 平台中控制器模型的 IHDEVS 表示  
Fig. 6 IHDEVS-based representation of the controller model in the platform

根据所设计的实体模型结构，利用 DLL 技术完成模型开发，包括逻辑模型组件 (Logic Model Component, LMC) 和动作模型组件 (Action Model Component, AMC)。一般来说，实体中每个逻辑模型会通过操作映射关系保持与若干动作模型的调用关系，可根据需要动态改变具体行为，这也是仿真灵活性的表现。AMC 创建文件映射对象和实现文件与进程地址空间的映射关系，LMC 在应用动作模型时通过调用相应函数和文件映射对象完

成运行，在仿真中无需重新编译。图 7 给出了鱼雷在搜索阶段的模型实现部分，此时鱼雷可根据当前态势和规则选择搜索弹道形式 (如环形或螺旋形)，不同的弹道对应输出相应的运动控制和传感调整指令。同时设计人员也可对已有的 DLL 进行修改或替换，以研究不同算法下的系统性能，或将该算法用于其他模型中。因此，该实现模式下模型具备较好的可重用性。



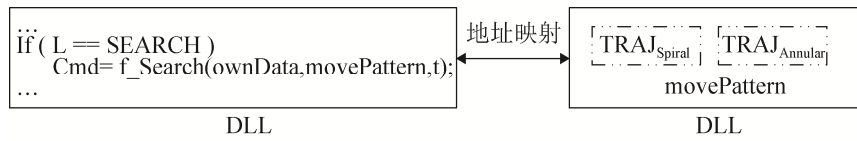


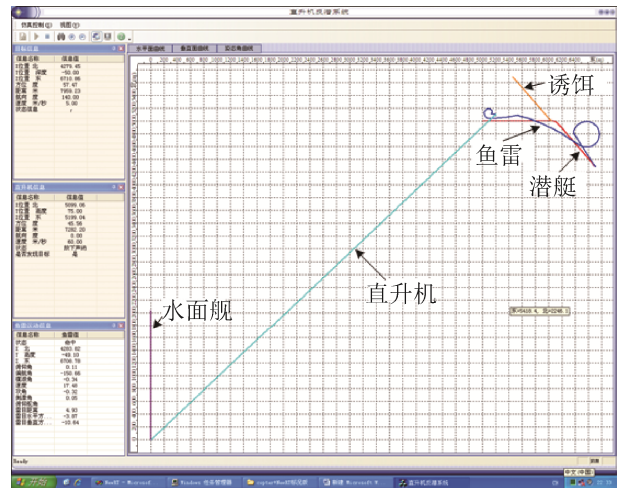
图 7 搜索相位的操作映射关系  
Fig. 7 Operation mapping relationship in search phase

以直升机反潜作战为例, 涉及的实体有直升机、鱼雷、潜艇、诱饵、战场环境和交战评估模型。反潜过程为: 1) 在收到潜艇位置后, 直升机从母舰上起飞, 爬升飞往初始化探测点进入搜潜过程; 2) 按照特定的搜索样式采用吊放声纳执行潜艇搜索任务; 3) 在发现潜艇后进行武器攻击准备, 条件满足后投放声自导鱼雷进行反潜攻击; 4) 鱼雷进入由雷伞阶段、入水段、初始段、下潜段、搜索段、跟踪段、攻击段和再搜索段组成的全弹道流程; 5) 潜艇发现来袭鱼雷, 释放声诱饵并转弯机动。

首先进行实体模型的初始化, 水面舰与直升机的初始位置(0 m, 0 m, 0 m), 目标艇的位置为(5 000 m, 50 m, 5 000 m), 初始航向 90°, 航速 8 m/s。图 8(a)反映了直升机反潜的全过程, 直升机在探测到目标艇后进行鱼雷攻击, 鱼雷入水自导开机后进入环形搜索弹道。在潜艇发现来袭鱼雷后, 释放声诱饵并转弯机动。鱼雷在受到诱饵干扰下开始导向诱饵, 经一段时间识别出诱饵后放弃跟踪诱饵, 开始导向目标。在攻击目标过程中丢失目标进入环形再搜索弹道, 再次捕获并攻击目标, 最终击中目标。仿真过程中记录的关键事件见图 8(b)。

由于仿真过程中水面舰只具备航行功能, 在研究模型重用性时可忽略。图 9 给出了模型重用情况, 灰色模型表示完全重用, 带斜条纹的模型表示部分重用。部分重用是因为实体模型动作的多样化, 需要进一步统计动作的重用数来获取量化的重用率。直升机中包含 14 个动作, 重用 7 个动作; 潜艇中包含 14 个动作, 重用 11 个动作; 鱼雷中包含 26 个动作, 重用 6 个动作; 诱饵中包含 6 个动作, 重用 3 个动作。经计算, 该实例中逻辑和动作模型的重用率分别为 84.2%和 50%。

根据实验结果, 所提方法可实现算法级和模型级重用。动作模型中的信息处理算法可在多数实体中得到重用, 这体现了算法的可重用性。而逻辑模型或者实体模型本身的重用则表示模型的重用。以 DLL 形式实现的算法只需要通过其 I/O 和函数原型名便可获取, 这意味着如果不同逻辑模型中调用具有相同接口的函数原型, 那么该动作模型可以通过共享方式与多个逻辑模型结合, 完成模型配置, 因此可支持高效的模型开发并改善模型重用性。



(a) 直升机反潜态势

0s	直升机起飞
120.35s	直升机达到探测点上空
201.45s	直升机投雷
205.93s	鱼雷入水
212.85s	鱼雷自导开机
235.84s	鱼雷发现诱饵
268.42s	鱼雷跟踪目标
304.48s	鱼雷开始攻击
311.67s	鱼雷再搜索
370.95s	鱼雷跟踪目标
404.07s	鱼雷攻击目标
410.85s	鱼雷击中目标

(b) 仿真中关键事件记录

图 8 直升机反潜过程

Fig. 8 Anti-submarine process of the helicopter

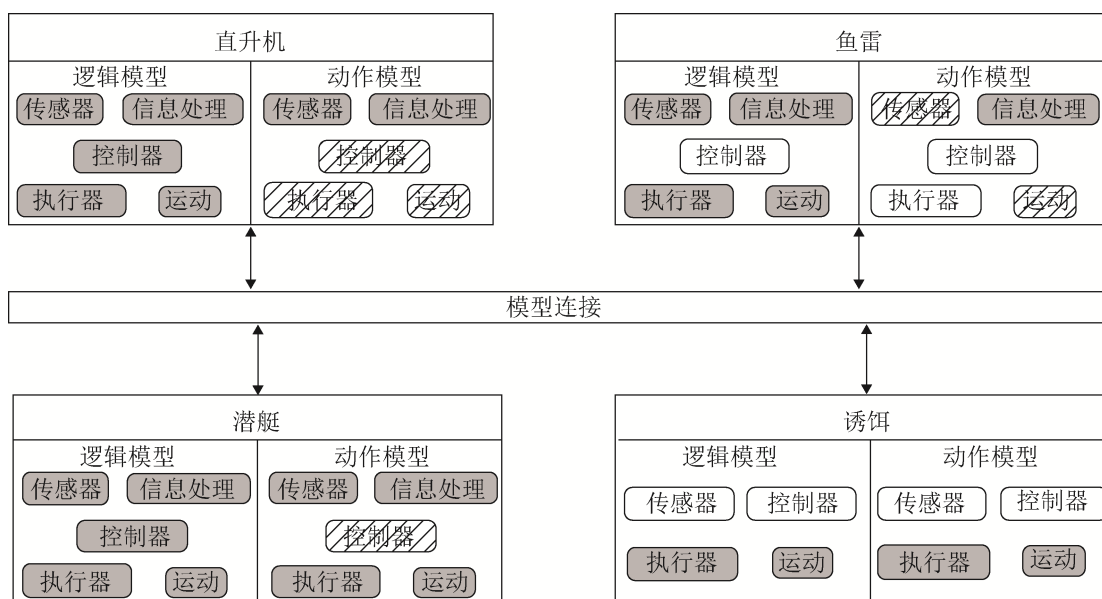


图9 模型重用情况  
Fig. 9 Model reusability

在重用率上逻辑模型要高于动作模型,这是因为动作模型的领域相关性比较强,是实体模型的主要特征,而逻辑模型因为比较抽象,相对比较固化。模型的开发或修改量主要取决于模型中的特征部分(动作模型),故分离式建模手段通过支持部分地修改模型可有效减少模型的总开发量,便于模型的测试与维护。

同时也看出鱼雷模型,尤其是其动作模型,重用率较低。这是因为实验中假设以平台为建模框架,且鱼雷行为相对比较复杂。如果经过若干次的模型开发后,模型的重用率将会大大提高。

## 5 结论

基于 IHDEVS 的水下战装备实体混合建模方法以事件驱动的交战流程为仿真需求,根据系统中横向的实体功能需求和纵向的行为抽象层次建立了基于关注点分离的模型分类策略,利用 IHDEVS 混合建模理论设计了含仿真交互架构层、耦合模型层和原子模型层的通用化实体模型框架,并进行了仿真实验,结果表明该方法在改善模型重用性上具有一定的有效性。

## 参考文献:

- [1] Seo K M, Song H S, Kwon S J, et al. Measurement of Effectiveness for an Antitorpedo Combat System Using a Discrete Event Systems Specification-based Underwater Warfare Simulator [J]. Journal of Defense Modeling & Simulation (S1548-5129), 2011, 8(3): 157-171.
- [2] Seo K M, Choi C, Kim J H, et al. Interface form for an underwater warfare simulation environment [C]. International Defense and Homeland Security Simulation Workshop. 2011.
- [3] 吴金平, 史扬, 王永洁. 潜艇战/反潜战建模与仿真 EJB 组件设计与开发[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1482-1486.  
Wu Jinping, Shi Yang, Wang Yongjie. EJB Design and Development of Submarine and Anti-submarine Warfare M&S [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1482-1486.
- [4] 苏颖, 康凤举, 阎晋屯, 等. 基于 HLA 的水下战仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2732-2736.  
Su Ying, Kang Fengju, Yan Jintun, et al. Research on HLA-Compliant Underwater Warfare Simulation System [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(12): 2732-2736.
- [5] 康凤举, 顾浩, 吴宇, 等. 基于 HLA 的鱼雷武器系统仿真环境设计与实现 [J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 382-384.  
Kang Fengju, Gu Hao, Wu Yu, et al. Design and

- Implementation of Simulation Environment for HLA-Compliant Torpedo Weapon System [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(3): 382-384.
- [6] 刘雄, 张绳, 韩宗真, 等. 基于 DWK 海洋作战建模与仿真[J]. *火力与指挥控制*, 2011, 36(5): 90-94.  
Liu Xiong, Zhang Sheng, Han Zongzhen, et al. Modeling and Simulation of Ocean Battlefield System Based on DWK [J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(5): 90-94.
- [7] 曾艳阳, 康凤举, 许鹏, 等. 水下战视景仿真系统建模及实时场景渲染方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(2): 436-440.  
Zeng Yanyang, Kang Fengju, Xu Peng, et al. Modeling and Real-time Scene Rendering of Underwater Warfare Visual Simulation System [J]. *System Engineering and Electronics*, 2013, 35(2): 436-440.
- [8] 李卓, 高大远, 王庆裕. 海洋水下作战仿真系统的设计研究[J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(3): 46-51.  
Li Zhuo, Gao Dayuan, Wang Qingyu. Research on the Design of a Simulation System for Ocean Underwater Operation [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(3): 46-51.
- [9] 李卓, 王庆裕, 高大远. 海洋水下战场态势仿真系统的设计与实现[J]. *指挥控制与仿真*, 2016, 38(4): 79-83.  
Li Zhuo, Wang Qingyu, Gao Dayuan. Design and Implementation of the Situation Simulation System for Marine Underwater Battlefield [J]. *Command Control & Simulation*, 2016, 38(4): 79-83.
- [10] Xu X, Li G, Yang M, et al. Towards the integration of engagement and engineering-level simulation over real-time and heterogeneous systems [J]. *Concurrency & Computation Practice & Experience (S1532-0626)*, 2016, 28(12): 3390-3408.
- [11] 张建春, 康凤举. 面向可组合的基于混合 DEVS 的鱼雷仿真本体[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(10): 2232-2238.  
Zhang Jianchun, Kang Fengju. HDEVS-based Torpedo Simulation Ontology Towards Composability [J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(10): 2232-2238.
- [12] Jim N. adevs[EB/OL]. [2018-05-03]. <http://web.ornl.gov/~nutarojj/adevs/>

(上接第 4122 页)

- [7] 伍文峰. 网络化体系能力评估方法研究[D]. 北京: 国防大学, 2016.  
Wu Wenfeng. Research on Networked SoS Capabilities Evaluation Method[D]. Beijing: National Defense University, 2016.
- [8] 杨雪生, 刘云杰, 李梦汶. 联合作战仿真实验的设计与开发[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(7): 1522-1526.  
Yang Xuesheng, Liu Yunjie, Li Mengwen. Design and Development of Simulation Experimentation for Joint Warfare[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1522-1526.
- [9] 孙广路, 宋智超, 刘金来, 等. 基于最大信息系数和马尔科夫毯的特征选择方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(5): 795-805.  
Sun Guanglu, Song Zhichao, Liu Jinlai, et al. Feature Selection Method Based on Maximum Information Coefficient and Approximate Markov Blanket[J]. *ACTA AUTOMATIC SINICA*, 2017, 43(5): 795-805.
- [10] Yu L, Liu H. Efficient feature selection via analysis of relevance and redundancy[J]. *Journal of Machine Learning Research (S1532-4435)*, 2004(5): 1205-1224.
- [11] 朱丰, 胡晓峰. 基于深度学习的战场态势评估综述与研究展望[J]. *军事运筹与系统工程*, 2016, 30(3): 22-27.  
Zhu Feng, Hu Xiaofeng. Survey and Research Prospect of Combat Field Situation evaluation Based on Deep Learning[J]. *Military Operation Research and Systems Engineering*, 2016, 30(3): 22-27.