



# 基于多智能体的装备保障体系建模与仿真

寇力<sup>1\*</sup>, 范文慧<sup>1</sup>, 宋爽<sup>2</sup>, 尹丽丽<sup>1</sup>

1. 清华大学自动化系, 北京 100084

2. 北京青年政治学院传播系, 北京 100102

\* 通信作者. E-mail: kouli13@139.com

收稿日期: 2018-04-17; 接受日期: 2018-04-28; 网络出版日期: 2018-07-18

国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB1400105) 资助项目

**摘要** 装备保障体系在现代战争中起着决定性的作用, 若采用实装试验的方式进行研究, 耗费的时间、人力、物力成本都较高, 故采用计算机建模和仿真的方式比较科学. 但装备保障体系作为一个复杂大系统, 其组成要素多, 交互关系复杂, 采用基于离散事件的仿真方法难以揭示体系的特性, 因此引入基于多智能体的仿真方法来对装备保障体系进行建模和仿真, 可以通过各个智能体自底向上、协作自治的方式来揭示体系的“涌现性”. 本文对装备保障体系进行了基于智能体的仿真建模, 构建了仿真平台的体系架构, 对仿真运行管理、时间同步和数据分发等关键技术进行了研究, 提出了双向动态粗分链表树的发布订阅算法, 最后通过原型系统和案例分析验证了基于多智能体的建模与仿真方法是切实可行的.

**关键词** 多智能体, 装备保障体系, 建模与仿真, 仿真运行管理, 时间管理, 数据分发

## 1 引言

装备保障是指以物质、技术和管理手段来保持和恢复部队装备的良好状态, 使之按编配标准齐全配套, 按使用技术要求状况良好, 以达到军事装备保障军事活动目的的措施的统称, 目的是使装备保持良好的作战和训练功能<sup>[1]</sup>. 而装备保障体系就是在装备的寿命期内用于使用与维修装备的所有保障资源的有机组合, 主要包括人力、物质和技术资源、保障的环境和约束条件等. 装备保障体系是一个涉及人-机-环境工程的复杂大系统, 包括人员、指挥、保障和装备等方面的组成要素, 这些要素之间的关系错综复杂<sup>[2]</sup>, 其运行效率决定着整个部队战斗力的高低.

对装备保障体系进行研究, 应对体系中各项保障活动所涉及的人力、物力、财力以及技术、信息、时间、空间等资源进行合理的运筹, 即以最少的资源消耗, 使装备获得及时、有效而经济的保障, 从而充分发挥装备的效能. 以前常规的方法是通过实际调整部队的保障体系来考察、评估其实际运行效能,

**引用格式:** 寇力, 范文慧, 宋爽, 等. 基于多智能体的装备保障体系建模与仿真. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 794-809, doi: 10.1360/N112017-00301

Kou L, Fan W H, Song S, et al. Modeling and simulation method of equipment support system based on multiple agents (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 794-809, doi: 10.1360/N112017-00301

这种方法耗时费力,难以快速验证体系效能.而通过在计算机中建立装备保障体系的模型,模拟仿真装备保障体系中的各个要素和保障体系的运行流程,可以为装备保障体系的研究提供一个可行、可信和经济的手段.

对于装备保障体系这样一个复杂大系统进行建模,其组成要素规模鸿大、结构复杂,要素之间的行为及交互繁多,存在大量的智能决策需求,体系效能难以完全用数学公式计算得出,体系的涌现性比较明显.对这类系统的仿真,通过自顶而下的分析很难得到问题的解决方案,不能完全采用基于离散事件的仿真方法.因此,根据装备保障体系的这些特点,本文将基于多智能体 (Agent) 的仿真技术运用于装备保障体系的研究,为复杂大系统的分析和仿真提供了一种全新、高效的解决方案.

Agent 是属于人工智能领域的技术,是指驻留在动态环境下能持续、自主的发挥作用,具备主动性、反应性、自治性、社会性等特征的计算实体.基于多 Agent 的建模仿真技术相较其他技术,主要有以下几种优势<sup>[3]</sup>.

(a) Agent 的自主感知、协作能力: 信息化战场是一个动态的、复杂的环境,对装备保障的要求也越来越高,由于 Agent 具有智能性、自主性、社会性等特点,可以和环境发生直接的交互以及预测环境的变化,从而在运行时可以获取更多的有关装备保障决策的信息,以便更高效地解决问题;而且 Agent 之间可以互相协调,相互联合,有效地实现装备保障过程中复杂决策问题的求解.

(b) Agent 自主求解与运行时决策能力: 在瞬息万变的战场环境下, Agent 自身的自主求解能力可以为装备保障提供适时的决策,从而在瞬息万变的信息化战场为指挥员或决策者提供及时可靠的保障决策方案.

(c) Agent 与用户交互能力: 传统的模型系统一般采用的是直接操纵式界面,随着任务复杂性的增加,操纵过程将越来越繁琐,这最终将影响到系统的稳定性,而 Agent 的智能机制为人机交互与协作创造了技术条件,便于形成用户与 Agent 交互、协作的和谐共存的求解系统,并可以使系统稳定性得到保证,不会因为某个模块出错而导致整个系统崩溃.

(d) Agent 灵活的组织框架与演化机制: 基于 Agent 的范式具有灵活的形成、维护、演化和拆散组织的潜在计算机制,尤其适用于解决装备保障系统中的保障人员随装备保障任务不同的灵活组织与调度问题.

近些年来,有一些学者尝试将多 Agent 技术应用于装备保障的研究中.曾平华等<sup>[4]</sup>将多 Agent 技术应用于装备故障诊断与维修系统;黄海等<sup>[5]</sup>将基于 Agent 的离散事件仿真建模技术引入装备综合保障系统可靠性、维修性、保障性的建模与仿真研究中;徐廷学等<sup>[6]</sup>详细研究了 Agent 技术在装备保障仿真和决策支持系统构建中的应用,并设计了结构模型和单元组成;李阳等<sup>[7]</sup>提出了基于元胞自动机与 MAS (multi-agent system) 的装备维修保障系统双层结构建模框架;李博等<sup>[8]</sup>构建了基于 Multi-agent 的装备综合保障信息系统,研究了实现不同业务 Agent 之间信息交互的方法.

目前对装备保障体系的研究,还缺乏一种有效的从建模到仿真一体化的构建方法.本文提出了基于多智能体的装备保障体系建模与仿真方法,并给出了原型验证平台.

## 2 装备保障体系的仿真建模

装备保障体系是由经过综合和优化的保障各要素构成的总体,其组成要素主要包括保障流程控制、保障人力资源、保障物资资源、保障组织结构、保障信息资源等.

对装备保障体系进行研究,其最根本的目的是为了评定保障体系的效能,以便不断修改和完善装备的保障体系,保证其与主战装备匹配、有效而经济地运行,以提高装备的作战能力.而该体系的高效

运行不仅仅是各组成要素的简单组合, 还包含装备保障流程、装备保障组织结构、装备保障人员以及装备保障资源的调度和优化问题, 后续将分别描述各要素的建模方法.

## 2.1 装备保障流程的建模

装备保障流程主要指各保障要素需要遵循的原则和程序. 一般来说, 装备的保障分为 3 级: 基层级、中继级和基地级<sup>[3]</sup>. 各级的保障机构、人力、物力以及保障能力均不相同. 以保障流程为例, 其上层的保障机构对下层作战单元均有保障作用. 不同等级的故障及保养由不同级别的维修保障机构来进行. 仿真平台应具有灵活配置装备保障流程的能力, 以分析不同流程下的体系效能. 装备实体不同的故障模型对应不同的维修等级, 故障模型又是由故障类别、故障等级和发生概率等决定的.

## 2.2 装备保障资源的建模

装备保障资源是构成保障体系的实体, 是实施保障的基本单元, 本文中将装备保障资源简化为保障设施、保障设备、人力人员、保障备件等几大类资源<sup>[3]</sup>.

(a) 保障设施: 是指保障所需要的永久性和半永久性的构筑物或机器设备, 包括各保障级别的保养设施、修理设施和仓储设施等.

(b) 保障装备: 可分为通用装备和专用装备, 包括实施保障所用的抢修装备、牵引装备、运输装备、吊具设备、检测设备等.

(c) 人力人员: 是指利用各种保障设施、设备、备件, 对装备进行维护、修理、使用和供应以保证装备正常使用的各类保障人员, 以及使用装备、运行装备维修保障体系所必需的指挥管理人员, 本文简化为武器装备乘员、指挥人员、装备管理人员、维修人员、维修管理人员等几类.

(d) 保障备件: 是指在装备保障工作中用于替换已损坏或即将损坏的零部件的供应物资, 以及装备正常运转所需要使用和供应的物资, 本文将其作为消耗型资源, 不纳入 Agent 建模的范畴.

对装备保障资源的建模, 主要是要建立关于上述几类资源的真实、可信的仿真模型, 这些模型必须有效组合起来, 具备修复性、预防性、改进性的保障能力.

## 2.3 装备保障组织结构的建模

装备保障体系是作战体系的一部分, 评估其效能还需要作战体系模型的配合, 将武器装备模型、人力人员模型、保障装备模型、保障设施模型等按照部队的实际编成结构和保障规则流程进行建模与仿真, 从而研究和考证保障体系的运转效果. 部队组织结构模型由多个部队节点模型组成一个树形结构, 部队节点模型又分为作战部队和维修保障部队两类, 分别由人力人员模型、武器装备模型和保障设施模型组成, 保障设施又由备品备件模型、保障装备模型和人力人员模型组成.

## 2.4 装备保障体系的多智能体建模

根据前文所述的装备保障体系各组成要素的概念模型, 可构建具有不同功能的多类 Agent, 分别模拟体系中的各类武器装备/部件/零件、维修保障设施、维修保障装备、备品备件、武器装备乘员、指挥人员、装备管理人员、维修人员、维修管理人员. 每种 Agent 的具体功能如下.

(a) 武器装备/部件/零件: 是装备保障体系服务的主要对象, 也是启动保障任务的主体. 武器装备由各种装备部件组成, 装备部件由装备零件组成. 装备零件是故障产生的载体, 每种零件具有不同故障类型、故障等级和发生概率, 按照一定规则决定装备部件和装备的状态. 装备零件发生故障后有两

种处理方法:一种是继续工作,等待后续维修;另一种是瘫痪,导致整个部件乃至装备瘫痪,需要立即更换.

(b) 维修保障设施:是执行维修任务的场所,通常部署在某地,内部包含维修人员、维修保障装备、备品备件等维修保障资源,维修保障资源具有数量及状态的运筹关系,维修管理人员来进行决策.

(c) 维修保障装备:是执行具体维修工作所需要用到装备,包括各种维修装备、运输装备等.

(d) 备品备件:是执行维修保障任务中需用到的各种消耗品.

(e) 武器装备乘员:是武器装备的实际控制单元,指挥武器装备行动,对武器装备/部件/零件所表现出的各种故障状态进行判断并做出决策.

(f) 指挥人员:每次任务出动计划的制定人员,下达直接命令给武装装备乘员.

(g) 装备管理人员:是执行保障任务的指挥人员,负责接收武器装备乘员上报的装备故障信息,并根据故障情况以及维修保障流程决定相应的维修策略.

(h) 维修人员:是执行维修保障任务的人员,有各种工种和熟练等级的区分,在维修过程中还将上报维修状态.

(i) 维修管理人员:是执行维修保障工作决策的人员,根据当前正在进行的任务和资源占用情况,进行维修计划的分配工作.

当前,对 Agent 的研究主要分为两个流派<sup>[3]</sup>:一种是基于认知心理学的方法,主要通过意向的观点描述 Agent 的信念、愿望、意图等心智概念和理性特征,通过规划、推理和决策实现 Agent 的心智模型和认知属性,这一类 Agent 通常称为慎思型 Agent;另一种是以 Brooks 为代表的行为主义流派,发展了基于行为的 Agent 理论,基于行为主义的单个 Agent 不具备高度逻辑推理的心智模型,通过相对简单的 Agent 之间的交互实现整体的智能行为,这类 Agent 通常称之为反应型 Agent.

由于装备保障体系各组成要素中的保障装备、备品备件、保障设施等资源仅仅在受到外部环境影响下发生的状态迁移,其内在不存在复杂的推理模型,所以在仿真建模过程中将其构建为反应型 Agent. 指挥人员、装备管理人员、装备乘员、保障人员和维修保障管理人员等需要综合各种约束进行资源的调度和分配,他们之间的协作关系也非常复杂,故将其构建为慎思型 Agent. 装备是由各种各样的复杂零部件组成,既需要简单地将零部件组合在一起,又需要计算零部件组合之后的整体运行效能和故障模式,因此在建模过程中将其构建为混合型 Agent.

在根据各自功能构建完成保障体系中的单个 Agent 模型后,还可根据各类智能体的特性,构建多 Agent 的模型. 在装备保障体系中,人是具有思维、行为能力的主体,保障资源只是被动的被调用者,所以在仿真系统中各类人员 Agent 和保障资源 Agent 之间存在天然的使用和被使用关系,可以根据此特性对他们进行组合,这样就在模型体系中构成了以慎思型 Agent 模型为核心的多 Agent 体系,在这种方式下由慎思型 Agent 引导反应型 Agent 进行各种活动. 这种建模方法更加贴近真实世界的情形,也能在一定程度上减少仿真过程中各 Agent 之间的通信压力.

在对多智能体仿真系统进行层次分解和信息流分析后,应对每类功能不同的实体进行不同的 Agent 抽象,基本上每类 Agent 都应包含如下定义<sup>[9]</sup>:

(a) 定义仿真时钟;

(b) 定义输入消息集合,包括外部输入,内部反馈输入;

(c) 定义输出消息集合;

(d) 定义状态集合;

(e) 定义控制规则库和控制器算法,包括规则生成、规则选择和规则评价算法;

(f) 定义输入源 Agent 集合,指出外部输入来自哪些 Agent;

- (g) 定义输出源 Agent 集合, 指出消息输出目的 Agent 集合;
- (h) 定义消息生成算法.

### 3 基于多智能体的装备保障体系仿真

#### 3.1 体系结构

基于多智能体的装备保障体系建模与仿真具有系统的一般特性. 首先, 对装备保障体系中包含的 Agent 和其他仿真模型的构建是系统运行的核心和关键. 这些模型模拟装备实体和装备保障实体的属性 (内部状态、组织关系等)、行为 (行进规则、修理规则、通信规则、使用规则、供应规则以及自适应规则等) 以及战场环境, 通过设定一定的初始条件来驱动它们在计算机中模拟运行. 其次, 基于多 Agent 的仿真运行管理也同样重要, 它建立各 Agent 模型之间互相交互、通信的规则及控制仿真推进, 是仿真各实体运行的基础平台. 本文设计了一个建模和仿真平台来对保障体系进行研究, 整个系统架构设计如图 1 所示.

基于多智能体的装备保障体系建模与仿真在体系结构上可分为 4 层, 分别为仿真支撑层、物理数据库层、仿真运行层和仿真应用层. 仿真支撑层主要进行仿真前的保障体系模型以及保障任务准备, 以及仿真之后的数据库管理和查询分析工作. 物理数据库层主要存储仿真前和仿真运行过程中产生的各种模型、保障任务、保障规则和仿真数据. 仿真运行层主要进行各 Agent 模型在仿真运行过程中的管理, 以及仿真的控制, 仿真数据的实时采集等工作. 仿真应用层则基于仿真数据进行态势显示、模拟推演和体系评估等. 仿真平台的运行流程如图 2 所示.

仿真准备阶段主要进行仿真前的准备工作, 对保障体系各要素进行建模; 仿真运行阶段由准备阶段生成的武器装备 Agent 模型生成战损数据, 形成保障需求, 从而驱动保障体系各 Agent 模型自主运行, 在此过程中对仿真过程进行管理和控制, 对作战和保障态势进行显示, 对数据进行采集; 仿真数据管理阶段对采集数据进行分析, 对保障体系进行优化.

#### 3.2 关键技术

##### 3.2.1 仿真运行管理

仿真运行管理是仿真系统的引擎, 也是保障方案 (想定) 得以进行仿真、评估和优化的核心. 从宏观上来说, 它的主要职责: 一是创建仿真模型和环境; 二是对仿真进程进行控制, 实现仿真同步与动态调度; 三是维护系统的多 Agent 模型实体的组织结构、交互关系、实时状态等; 四是实现对 MAS 系统本身或与外部系统之间的内外交互, 实现个体仿真和分布式仿真. 针对装备保障体系 Agent 实体众多的情况, 本文将仿真引擎设计成支持分布式仿真的网络拓扑结构, 且将仿真的底层通信与上层应用分离, 这样在实现 Agent 时可以增加模型的复用性和可扩展性. 整个仿真系统在每个网络节点设置一个全局服务 Agent、局部服务 Agent 和交互 Agent<sup>[9]</sup>, 分别用于监控节点上的 Agent 状态和控制 Agent 通信路由, 这种方式能大大减小 Agent 之间的数据通行量, 避免造成网络拥塞, 如图 3 所示. 通过路由的方式, 将同一节点范围的 Agent 消息控制在本节点内.

##### 3.2.2 时间管理机制

由于 Agent 的运行大多由事件驱动, 其内部处理机制存在天然的异步性, 非常适合使用分布式仿真的方法来进行建模. 但由于每个 Agent 以异步方式运行, 它们推进时钟的速率不同, 所以需要引入

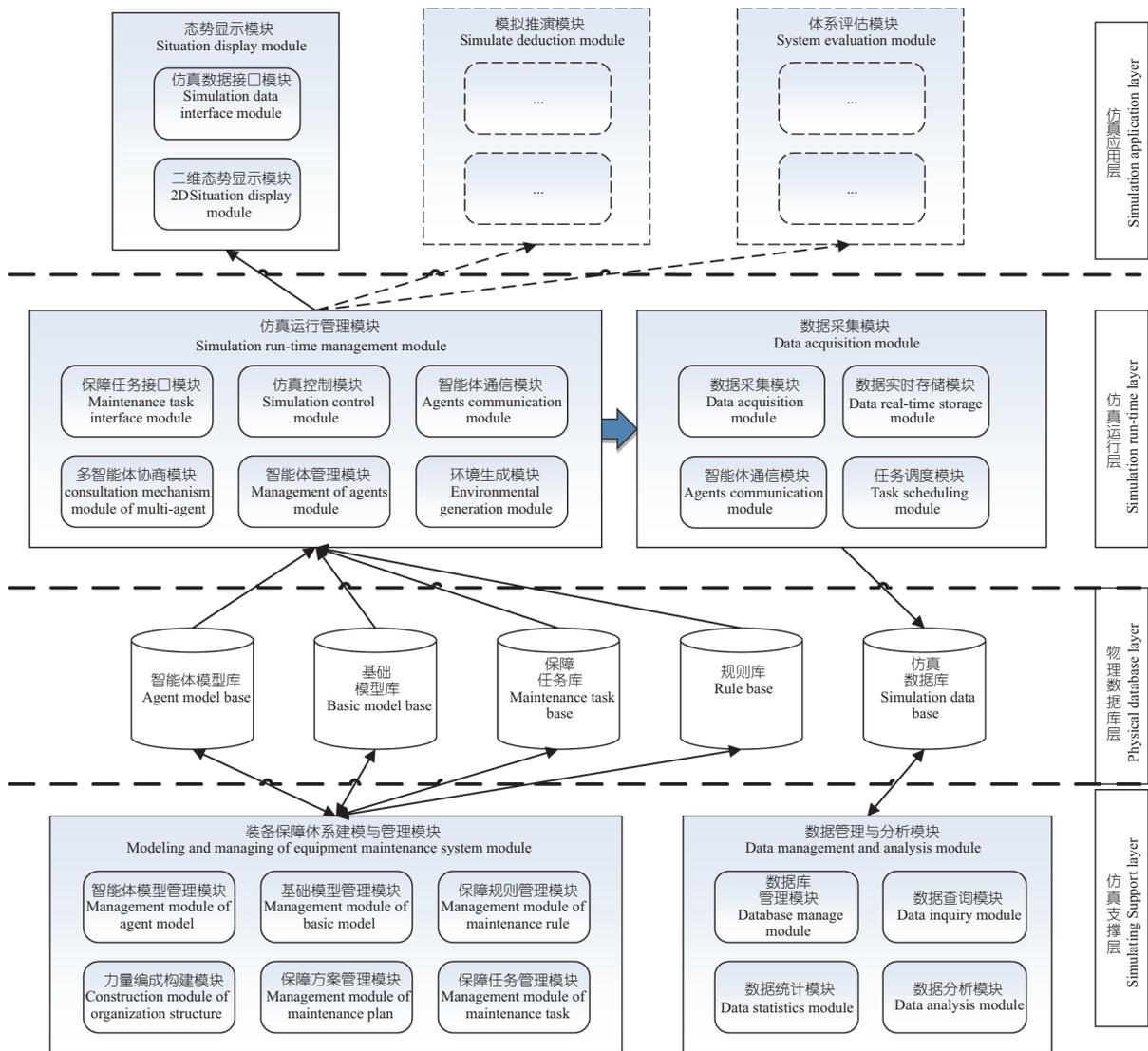


图 1 (网络版彩图) 装备保障体系建模与仿真体系结构

Figure 1 (Color online) The structure of equipment support system modeling and simulation

额外的时间同步机制. 对每个 Agent 而言, 都维护有一个内部时钟, Agent 在接收、处理消息的过程中推进其内部时钟, 并将推进后的时钟值作为时戳对输出消息进行标记. 因此, 在仿真推进的过程中, 一是要保证每个 Agent 局部时钟的统一, 二是要保证每个 Agent 总是以递增的时戳顺序处理接收到的消息, 准确实现因果关系.

第一个问题拟通过各个网络节点构建全局服务 Agent 来解决. 通过设定一个基准时间, 由全局服务 Agent 来进行首次对时, 后续采用心跳的方式来进行校时. 全局服务 Agent 完成时间同步后, 再将基准时间下发给节点内的其他 Agent.

第二个问题拟通过在 Agent 处理消息时引入相应的时间同步机制来解决. 目前主要有两种机制, 分别为保守策略和乐观策略.

保守策略严格禁止发生因果错误, 即保证 Agent 按时间先后顺序处理收到的消息. Agent 在处理

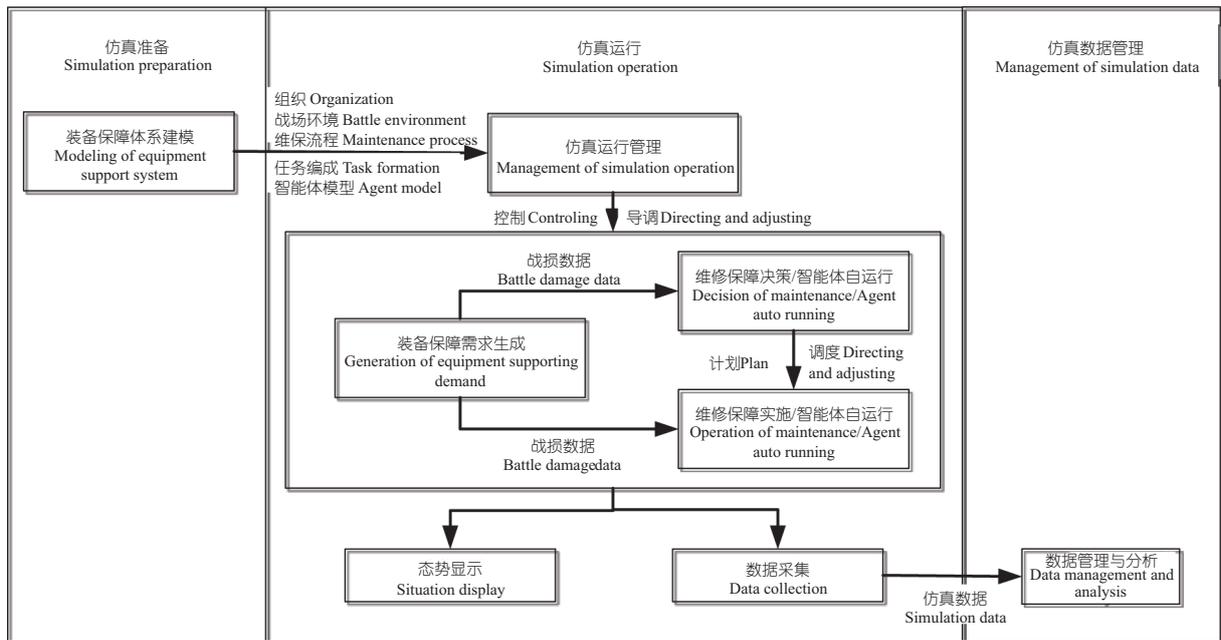


图 2 装备保障体系建模与仿真流程

Figure 2 The process of modeling and simulation of equipment support system

时戳为  $t$  的事件时, 必须保证不会收到时戳小于  $t$  的事件. 但是当 Agent 的消息队列为空时, Agent 的消息处理机制将被阻塞, 有可能会引起死锁.

乐观策略则允许发生因果错误, 在发生错误时通过回滚来纠正错误的处理. 研究人员已经发表了非常多的保守策略和乐观策略算法, 本文就不再赘述了. 针对装备保障体系仿真是分布式的体系结构, 本文采用混合策略的方法来进行时间管理, 即在节点内部采用保守策略, 节点之间采用乐观策略<sup>[9]</sup>.

### 3.2.3 数据分发机制

装备保障体系是一个复杂大系统, 涉及的 Agent 元素众多, 消息传递错综复杂, 极易造成网络拥塞. 为了避免这种情况出现, 近几年逐步发展完善了几种实用的数据分发模式, 例如黑板模式、联邦模式、广播模式和发布订阅模式等.

黑板模式的优点是集中控制、共享数据结构、效率高, 但缺点是集中控制由一个总调度 Agent 完成, 所有的成员 Agent 都需要给它发送消息, 使得总调度 Agent 容易成为整个系统的瓶颈. 联邦模式是将一组 Agent 聚合成为 Agent 集合, 整个集合与系统中的其他集合进行通信和行为协调, 简化了通信和控制的复杂性, 但灵活性不够, 使 Agent 加入退出比较复杂. 广播模式是每个 Agent 以广播模式发送消息, 这种方式适用于 Agent 数量不多且交互关系不复杂的仿真. 发布订阅模式中所有 Agent 成员都能以发布、订阅的方式进行消息传递. 其中发布消息的 Agent 称为发布者, 接收消息的 Agent 称为订阅者, 中间处理消息的 Agent 称为中间件 Agent. 发布者将消息发送给中间件, 订阅者向中间件发送订阅需求, 表示对哪些发布感兴趣, 中间件则保证将发布订阅用及时、可靠、最优的匹配并传递各种消息. 发布订阅模式既实现了系统的动态、灵活性, 又有着高效的信息匹配能力, 因此本文将采用发布订阅模式来实现装备保障体系仿真的数据分发.

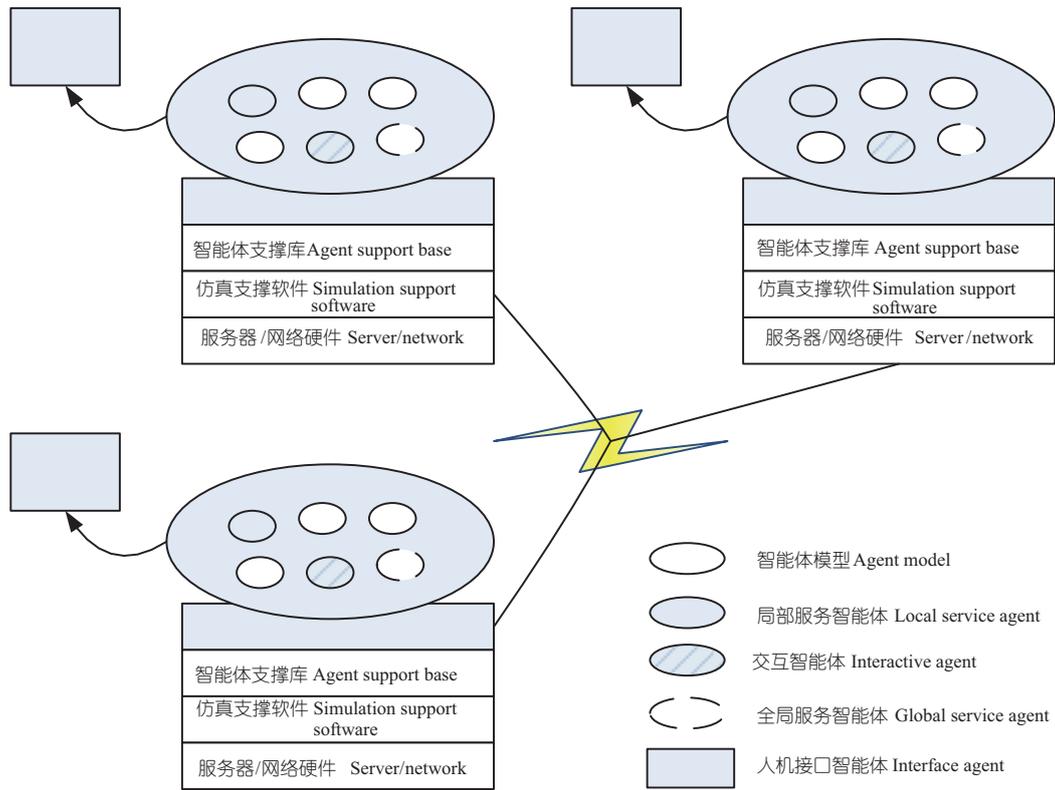


图 3 (网络版彩图) 仿真运行管理架构

Figure 3 (Color online) The structure of simulation control

在发布订阅模式中, 匹配算法负责高效地找到与订阅相匹配的所有发布, 是最影响效率、最重要的部分. 本文针对保障体系的特点, 提出了“双向动态粗分链表树”这一新的发布订阅匹配算法. 传统的匹配算法主要有计数法、公平谓词法、匹配树算法、二叉决策图算法、Kd 树算法等, 对于装备保障体系这类发布订阅模型而言, 一个订阅希望最快地找到满足要求的空闲最佳发布即可, 所以是一对一形式的模型. 计数法、公平谓词法等方法更适用于一对多的情况, 这类每个订阅都要与大量发布对比的算法不适合一对一找最佳的模式. 二叉决策图等方法需要决策固定, 也不符合装备保障体系的特点. 匹配树算法是最容易找到最佳值的算法之一, 本身又不像二叉决策图一样要求苛刻, 所以本文采用改进的匹配树算法来解决问题.

链表树: 发布和订阅的消息分别存储在两个不同的链表结构中, 为了减少运算时间, 可以对消息中的一些连续变量的谓词按区域进行划分和存储在链表中, 形成树状结构, 这样在对消息进行检索时变得便利了许多, 不需要从头至尾地遍历所有数据.

粗分: 在构建匹配树的过程中采用精细分类法, 对离散变量谓词可以简单的按种类分叉, 比如故障等级一、二、三可分成三叉, 但是对连续变量谓词, 一对一的匹配模型只用找一个最佳的匹配. 推广到连续变量谓词的一般情况, 如有  $n$  个  $1-k$  的谓词, 那么空间复杂度将是  $O(k^n)$ , 时间复杂度将是  $O(2(k/2)^n)$ . 由此可见精细分类会导致复杂度急剧升高, 而且检索出的众多发布中只有一个是有效的, 这种分类算法效率非常低.

因此, 本文采用粗分分类法, 若每一个节点分叉数为  $w$ , 总叉数为  $m$ , 同样有  $n$  个  $1-k$  的谓词,

总共有  $b$  个发布. 那么链表树的空间复杂度是  $O(2n)$ , 时间复杂度在乐观情况下将是  $O(1)$  即最右叉中最大值满足客户要求, 悲观情况下将是  $O(b)$  即右叉的发布不存在或是个别谓词过低不满足要求, 左叉的发布分数低但是谓词都能满足要求, 其平均复杂度是  $O(((2/(2+m)) \times b/4) \times (m/4)^n)$ . 假设订阅对其中两个谓词的要求为  $x$  和  $y$ , 实际发布时为  $p$  和  $q$ , 则在满足  $p+q \geq x+y$  的情况下,  $p > x$  且  $q > y$  的发布与不符合要求的发布平均数量为  $1:1$ , 在划分成  $m$  叉后数量比为  $1:1/(m/2)$  即  $m:2$ , 所以匹配到不符合的发布的概率是  $(2/(2+m))$ .

双向: 按照单向匹配流程算法, 若只有一个存储发布的匹配树, 那么在匹配对象满额时, 一个新的订阅需要等待匹配空树空闲才能继续匹配. 因此本文将匹配树改进为双向匹配树, 初始发布存入发布链表树, 当一个订阅进入发布链表树匹配后, 如果与订阅匹配的发布处于忙碌状态, 将订阅放入订阅链表树. 忙碌发布空闲后会发送新的发布, 新的发布先进入订阅链表树匹配, 未匹配的再存入发布链表树. 这样订阅总可以在第一时间找到合适的空闲发布, 计算上的浪费也较小. 另外订阅链表树的链表是按照时间先后顺序储存的, 优先匹配等待时间最长的订阅符合情理.

动态: 当链表树中存储的发布匹配到某个订阅后, 会从链表树中删除此发布. 待相应的发布任务完成以后再次重新将新发布存入匹配链表树. 这个过程是动态的, 比静态的匹配过程更节省时间和空间.

剪枝: 为了进一步降低匹配算法的计算量与复杂性, 本文引入评分系统对链表树的多个位置进行剪枝. 第 1 次剪枝是当订阅进入发布链表树匹配时, 在对比维修时间、维修成本、维修质量等属性是否满足要求的同时, 增加一个总分数的判断. 链表树中的节点按照总评分由大到小排列, 假如某个发布的总分数小于订阅, 那么之后的发布都可以不再对比, 即完成一次剪枝. 第 2 次剪枝是新到发布在订阅链表树中匹配时同样可以跳过总分小于自己的订阅以及之后的所有订阅. 第 3 次剪枝是当维修人员完成任务后, 再次发布消息的时候会判断自己的发布是否已经存在于维修计划之中, 如果有则直接发布, 如果没有则发送发布消息进入订阅链表树, 这样避免了多余的无效检索. 剪枝之后也能大大提高匹配的速度和效率.

## 4 原型系统与案例分析

本文基于开源平台 JADE (Java agent development framework, Java Agent 开发框架), 构建了一个装备保障体系的建模和仿真原型系统. JADE 是一个提供了基本中间层功能的软件平台, 是目前应用比较广泛的 Agent 中间件<sup>[9]</sup>. JADE 是一个完全分布式的中间件系统, 具有灵活的基础设施, 它提供了一个实时的运行环境, 可以执行 Agent 整个生命周期必须的功能和 Agent 自身的核心逻辑, 可以针对实体对象的特点, 建立每一类 Agent 的功能与属性, 及 Agent 之间的通信机制, 而不用关心底层的物理实现.

### 4.1 原型系统

#### 4.1.1 基于多智能体的装备保障体系建模系统

基于多智能体的装备保障体系建模系统从功能上可分为 Agent 模型管理、仿真基础模型管理、力量编成构建、保障规则管理、保障任务管理以及模型数据文件管理等几部分.

(a) Agent 模型管理. Agent 模型管理模块的主要功能是负责装备保障体系各 Agent 模型的构建、编辑和删除. 装备保障 Agent 模型主要包括保障资源中的保障人员 Agent、保障装备 Agent、保障备件

Agent、保障设施 Agent、储存/运输 Agent、装备 Agent 模型、装备零部件 Agent、装备乘员 Agent、装备管理人员 Agent、维修保障管理人员 Agent 以及维修人员 Agent 等。

(b) 仿真基础模型管理. 仿真基础模型管理主要的功能是负责各种仿真运行需要的基础数据模型的构建、编辑和删除, 主要包括战场环境模型、装备故障树模型 (故障清单、故障等级)、保障方案模型、保障过程模型、保障需求模型、组织结构基础模型等。

(c) 力量编成构建. 力量编成构建模块首先按照上下级隶属关系这种结构构建部队的组织编成, 然后通过对 Agent 和基础模型库中的各种仿真模型进行实例化为各编成单元配置相应的作战装备以及与保障相关的实体对象, 最后将形成的力量编成数据存储到基础模型库中进行管理. 力量编成模块主要基于 Agent 模型库和基础模型库, 它的输出为力量编成数据, 可以支持重用, 在规划不同的保障任务中使用不同的力量编成。

(d) 保障规则管理. 保障规则管理主要负责制定部队之间的保障关系、保障流程以及保障需求生成模型等信息, 并存储到保障规则库中以支持重用。

(e) 保障任务管理. 保障任务管理模块主要负责对保障任务进行规划, 设定保障任务的开始、结束时间等基本信息, 以及选择本次任务所使用的保障部队和保障规则。

(f) 模型数据文件管理. 装备保障单元的模型数据的具体存储格式可以采用 XML 文档的形式来表示, 因为在 XML 中可以自由定义标签, 可以按照用户的用途充分地表达文件的内容; 由于保障模型的结构、种类各异, 使用 XML 可以很容易地实现异构系统间的信息交互, 利用 XML 的自定义及可扩展性, 可以用统一的格式来表达各种类型的数据, 解决了数据的统一接口问题; XML 还可以标记语言语义, 它可以让用户自由地定义标记来实现具有实际意义的文档内容, 用户通过 XML 来自行设计标签, 利于这些标签所表达的含义, 就可以找到所需要的内容. 因此, XML 具有的这些优点使各种模型及其包含的数据的索引、检索和调整变得非常方便和灵活。

装备保障体系建模与管理模块处于仿真前的准备阶段, 是后续仿真运行的基础工作. 模型库中的各种 Agent 模型、仿真基础数据模型以及保障体系运行模型是整个系统中最核心的要素之一, 这些模型以 XML 文件的形式存储在模型库中, 将其导入仿真运行管理模块进行实例化。

#### 4.1.2 基于多智能体的装备保障体系仿真运行管理系统

仿真运行管理系统的功能包括 Agent 管理、仿真运行管理、数据查询、仿真推演等模块。

(a) Agent 管理模块. Agent 管理模块分为导入仿真场景文件、配置 Agent 运行、Agent 状态监控、Agent 通信监控。

导入仿真场景文件: 将装备保障体系建模模块产生的仿真场景以及模型文件进行解析, 生成 Agent 模型列表。

配置 Agent 运行: 根据局域网内的设备配置, 将 Agent 分配至各个局域网内的电脑上运行, 并生成配置文件。

Agent 状态监控: 对仿真运行过程中的各个 Agent 状态进行监控, 查看其状态变换情况, 以及可以终止 Agent 状态。

Agent 通信监控: 对仿真运行过程中的各 Agent 之间的消息进行存储、显示和监控。

(b) 仿真运行管理. 仿真运行管理指对仿真运行过程的控制, 包括仿真的开始、暂停、停止以及仿真的快进、慢进。

仿真的开始, 是以仿真配置文件为基础, 在配置环境的电脑中生成可以运行的 Agent 模型, 并开始仿真。

(c) 数据查询. 可查询存储的 Agent 通信数据以及 Agent 状态数据.

(d) 数据展示. 可以以列表或树形组织结构的形式显示 Agent 模型的属性信息, 并可在监控窗口对 Agent 通信的消息和状态进行展示.

(e) 仿真推演. 可以在内嵌的地理信息系统上展示仿真推演的过程, 并对维修保障过程进行图形化的展示.

## 4.2 仿真案例

基于以上的模型设计, 本文构建了一个简单的建模与仿真脚本, 进行开发试验和验证. 该仿真场景如下所述.

(a) 基础元模型: 指挥人员、装甲车、装甲车乘员、装备管理人员、维修保障管理人员、维修保障人员、维修保障装备.

元模型的设计思路是采用 Agent 技术来对元模型进行建模, 将元模型中的指挥人员、装甲车乘员、装备管理人员、维修保障管理人员、维修保障人员设计为慎思型 Agent, 承担大部分智能化的功能, 将装甲车、维修保障装备这类不具备智能性的模型设计为接受慎思型 Agent 指挥的反应型 Agent.

具体的指挥关系为: 装甲车乘员 Agent 指挥装甲车 Agent, 维修保障人员 Agent 指挥维修保障装备 Agent, 指挥人员 Agent 将训练计划下达给装甲车乘员, 装甲车乘员 Agent 将车辆状态报告给装备管理人员 Agent, 由装备管理人员负责协调维修任务, 并通知维修保障管理人员, 维修保障管理人员根据故障类型、故障等级以及现有的维修保障任务情况分配任务给维修保障人员, 由维修保障人员操纵维修保障装备进行维修.

(b) 逻辑组合模型: 作战部队模型、维修保障部队模型、保养设施模型、维修设施模型、仓储设施模型; 这类模型没有实际的 Agent 模型含义, 只是在逻辑上对元模型进行了组织结构上的组合.

(c) 故障产生模型: 故障事件是随机产生的. 装备在使用过程中, 设计装备任务时钟  $T$ , 每次任务时间记为  $\Delta t$ . 在装备模型中, 假设装备发生的故障率记为  $\exp(-\lambda t)$ , 根据可靠性分布的特点, 满足平均寿命与故障率互为倒数, 即  $E(t) = 1/\lambda$ , 在模型中, 装备的完好寿命记为 MTBF, 所以满足  $\lambda = 1/\text{MTBF}$ . 这样就可以得到装备在使用过程中可能发生故障的概率, 从而对故障事件进行抽样, 模型中, 装备发生故障的概率为  $F(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-1 \times (T + \Delta t)/\text{MTBF})$ . 装备从准备出动到正常返回车库记为此次任务成功, 若训练任务过程中装备故障, 则记为此次任务失败.

## 4.3 结果分析

按照前文所述的方法, 在 JADE 平台的框架下对装备保障体系中各个 Agent 进行了实现, 下面将针对装备保障体系仿真建模的几个重点, 对结果进行分析.

(a) 装备保障体系模型元素的生成. 通过查看 JADE 平台的远程监视 Agent 提供的界面, 可以查看当前系统中生成的 Agent, 包括以 ID 号为标示符的武器装备、装备乘员, 以及装备管理人员、维修管理人员、维修人员、维修保障设备、数据采集、时间同步都生成了对应的 Agent. 除此之外, JADE 提供的 Agent 管理系统、目录服务、远程监视也生成了相应的 Agent, 为整个平台的运行提供管理服务.

(b) 实现对装备保障体系流程的仿真. 在每个 Agent 运行的每一个推进周期内, 都会输出一条状态改变语句, 数据采集 Agent 会根据事件产生的时间先后顺序对发生的事件进行编号, 即 1~13, 通过

表 1 不同方法仿真结果  
Table 1 The results of different algorithms

方法 (Methods)	计数法 (Counting)	双动法 (Double motion)	精细求好 (Fine and fine)	精细求快 (Fine and quick)	不分类 (Unclassified)	单静态 (Single static)
等待过订阅数量 (Waiting number of subscriptions)	15.60	5.00	3.50	3.40	4.30	14.00
全部订阅平均匹配次数 (The average match number of all subscriptions)	13.43	1.24	9.45	2.28	1.37	4.07
订阅平均处理时间 (Average processing time of subscriptions)	4.99	3.41	5.56	4.96	5.40	5.02
超出要求分数平均为 (Exceed the required score)	26.33	31.55	34.08	30.72	34.09	25.59

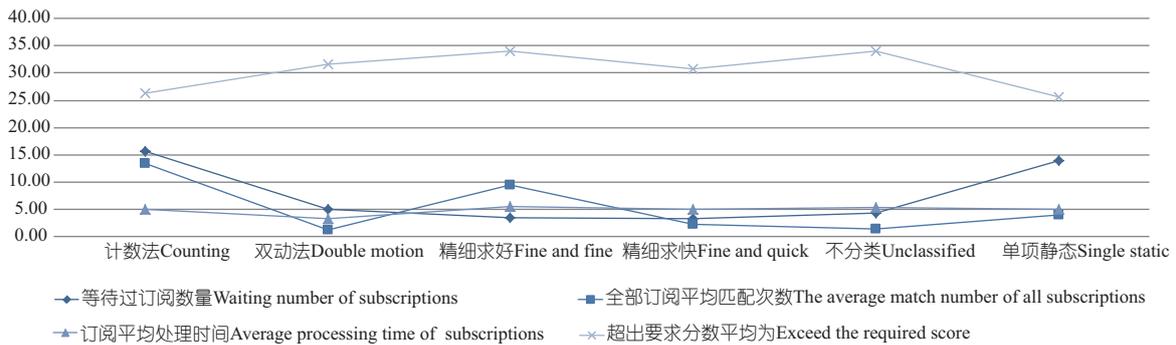


图 4 (网络版彩图) 匹配算法效果对比  
Figure 4 (Color online) Comparison of the effect of matching algorithm

改变故障函数和维修保障人员或装备,可以在每次仿真中得到不同的仿真结果,以检验该次仿真的维修保障体系配置是否能支撑本次任务。

Agent 的仿真推进都是基于消息来触发的,所以还可以应用 JADE 的调试工具 Sniffer Agent 提供的界面,来查看各个 Agent 之间传输的消息,如对某次仿真,选取其中一个零件和它的上级部件、装备,以及保障机关、保障机构、维修场所和决策监控中心,通过观察它们之间发送的消息可以验证流程是否能够顺利执行。

(c) 装备保障体系仿真的公布订购算法分析. 发布流程输出: 在输出信息中有字母前缀的消息表示发布信息生命周期的某一环节,其中维修设施产生发布时输出 A,保障中心收到发布时输出 B,此处需要判断保障中心是否已经含有相同的信息,如果是,进入发布评分环节输出 C,再被存入发布链表树输出 D,如果不是,还需要先进入订阅链表树匹配输出 b1,若匹配不成功输出 b2 再进入 C,若匹配成功直接跳过后续步骤。

订阅、维修流程输出: 与发布信息生命周期中的输出不同,订阅、维修流程的输出前缀由数字表

表 2 不同条件下的双动法对比  
Table 2 The results of different condition

条件 (Condition)	正常 (Normal)	要求低 (Low requirement)	订阅多 (More subscriptions)	订阅少 (Less subscriptions)
等待过订阅数量 (The match number of waiting subscriptions)	4.15	3.20	5.60	1.00
未等待订阅匹配次数 (The match number of subscriptions without waiting)	1.27	1.31	1.70	1.89
等待过订阅匹配次数 (The match frequency of waiting subscriptions)	1.06	1.07	1.21	1.00
全部订阅匹配次数 (The match frequency of subscriptions to all)	1.24	1.29	1.51	1.80
全部订阅处理时间 (The processing time of subscriptions to all)	387.93	308.96	889.35	102.40
订阅平均处理时间 (Average processing time of subscriptions)	3.41	2.99	4.14	2.33
等待过订阅处理时间 (The processing time of waiting subscriptions)	2366.90	2436.70	2392.00	1008.00
超出要求分数 (Exceed the required score)	31.55	42.25	28.97	37.60

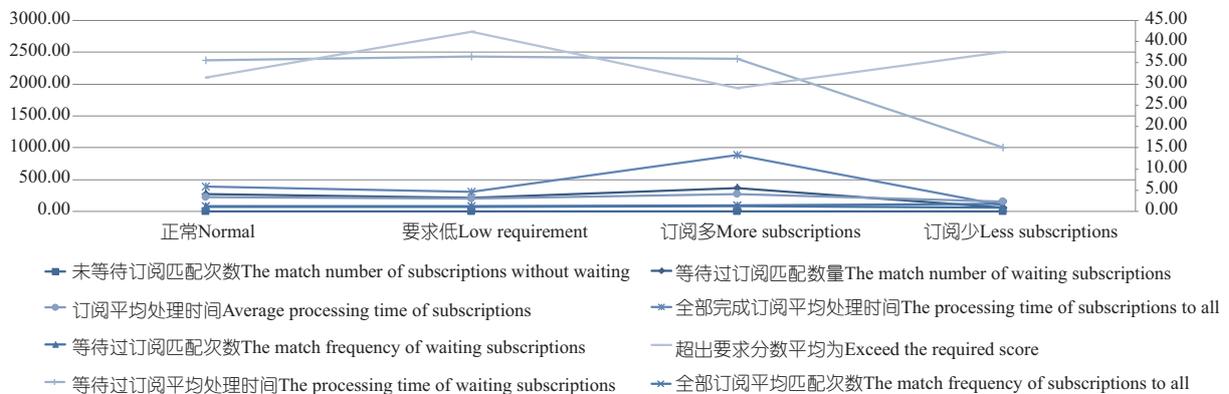


图 5 (网络版彩图) 不同条件下双动算法效果对比  
Figure 5 (Color online) The results of different condition

示. 其中装备发生故障产生订阅时输出 1, 保障中心收到订阅时输出 2, 给订阅要求评分后输出 3, 此处有分支, 假如为订阅找到最佳维修场所输出 4, 否则将订阅存入订阅链表树输出 4.1, 等到订阅再次匹配到发布时输出 4.2. 之后向维修场所发送订阅并输出 5, 维修场所收到订阅输出 6, 维修成功输出 7, 最后装备恢复运行时输出 8.

本文除双动法之外还选择了发布订阅匹配算法中的计数法、单向静态的普通匹配树法、精细分类分数优先双动法、精细分类速度优先双动法、不分类双动法这 5 种方法作为对照试验. 算法在仿真试

验中的评价标准主要是考虑时间效率和计算效率, 所以采用等待过的订阅数量、订阅平均匹配次数、订阅平均处理时间、超出要求分数这 4 个方面进行评价. 仿真结果如表 1 和图 4 所示. 每次仿真在处理 30 个订阅后结束, 每个算法运行 10 次取平均值. 从第一项可以看出计数法和单静态的普通匹配树算法在订阅的分配上远远不如任何一种双动法, 在应用这两种算法的时候一半左右的订阅都需要排队后才能进行维修, 发布的利用率很低, 而且由于每个订阅的维修时间不同导致分配经常不合理. 从第二、三项可以看出双动法的匹配最快、最有效率, 匹配次数与时间远低于其他方法. 说明应用双动法时订阅可以最快、无效匹配最少的找到合适的发布. 最后从第四项可以看出所有双动法都能让订阅匹配更好的发布, 即发布评分超出订阅要求分数更多, 这是符合订阅方利益的优点. 但是假如像精细分类分数优先算法一样追求超出分数尽可能高, 就要牺牲匹配的速度和匹配效率, 一般情况下还是普通的双动法更均衡. 综上, 双动法在匹配耗时、超出分数、处理时间上远远优于传统匹配算法, 而粗犷分类的双动法在时间、效率、分数等综合评价上优于精细分类或者不分类的双动法.

另外本文还对双动法在不同条件下的表现进行了分析, 分别是订阅数量与要求正常、订阅要求低、订阅过多、订阅过少这 4 种情况. 由表 2 和图 5. 可见, 订阅越少、要求越低时匹配算法的效果会更快更好, 反之性能会相对下降, 但是依然优于传统算法. 因此双向动态粗分链表树算法最有效地提高了发布订阅的匹配性能, 在不同的条件下皆适用于智能制造通信这类基于发布订阅模式的系统.

该仿真结果印证了双动法的表现最好, 能够明显地提高发布订阅中信息匹配的性能, 并当条件在一定范围内变化时依然稳定有效, 基本达到了设计此算法的目的.

## 5 结论

本文通过对装备保障体系的分析, 提出了基于多 Agent 的装备保障体系的建模与仿真方法, 设计了装备保障体系的建模与仿真的体系结构及应用流程, 利用 JADE 开源平台搭建了基于多智能体的装备保障体系建模与仿真平台, 并构建了一个保障体系案例对该方法和平台进行了验证和分析, 还提出了基于双向动态粗分链表树这一新的发布订阅匹配算法.

通过对仿真过程数据的分析, 证明基于多智能体的装备保障体系建模与仿真的方法是可行的, 原型系统中的各个 Agent 按照预先设定的属性和行为正常运行, 建立的多 Agent 系统能够协调完成装备的各类保障任务, 并具有较好的性能指标. 下一步工作是构建基于智能体的大规模装备保障体系模型, 进一步验证建模仿真平台在分布式仿真运行环境下的稳定性和健壮性.

## 参考文献

- 1 He B, Liu X D. Trend and construction probe on accoutrements systematic development guarantee. J Xi'an Aerotechnical College, 2007, 1: 78-80 [贺波, 刘晓东. 论保障装备体系发展的趋势与建设思路. 西安航空技术高等专科学校学报, 2007, 1: 78-80]
- 2 Xu Z C. Equipment Support of Engineering and Management. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. 12-36 [徐宗昌. 装备保障性工程与管理. 北京: 国防工业出版社, 2006. 12-36]
- 3 Weng H M. Research on agent-based equipment maintenance support decision. Dissertation for Ph.D. Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. 10-14 [翁华明. 基于 Agent 的装备维修保障决策研究. 博士学位论文. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2005. 10-14]
- 4 Zeng P H, Zuo Z J, Xiong C, et al. Design of multi-agent-based equipment fault diagnosis and reparation sysem. ChangSha Aeronaut Vocat Tech College J, 2006, 3: 21-24 [曾平华, 左召军, 熊纯, 等. 多 Agent 装备故障诊断与维修系统研究. 长沙航空职业技术学院学报, 2006, 3: 21-24]

- 5 Huang H, Cao J H, Shan Z W. Design of the MAS-based material integrated support simulation system. *J Acad Armored Force Eng*, 2008, 3: 17–21 [黄海, 曹军海, 单志伟. 基于 MAS 的装备综合保障仿真系统设计. *装甲兵工程学院学报*, 2008, 3: 17–21]
- 6 Xu T X, Zhao J Z, Liu Y, et al. Research on the application of agent technology in the field of equipment support. *Technol Found Nat Defense*, 2010, 11: 34–40 [徐廷学, 赵建忠, 刘勇, 等. Agent 技术在装备保障领域中的应用研究. *国防技术基础*, 2010, 11: 34–40]
- 7 Li Y, Jin W, Wu C. Modeling and simulation on maintenance support of military equipment based on CA and MAS. *Fire Control Command Control*, 2012, 7: 161–164 [李阳, 金伟, 武昌. 基于 CA 与 MAS 的军用装备维修保障建模仿真. *火力与指挥控制*, 2012, 7: 161–164]
- 8 Li B, Xu Z C, Huang S F, et al. Research on the integrated logistics support system based on multi-agent modeling method. In: *Proceedings of the 14th Chinese Conference on System Simulation Technology and Application (CC-SSTA'2012)*, Sanya, 2012. 562–566 [李博, 徐宗昌, 黄书峰, 等. 基于 Multi-Agent 建模的装备综合保障系统研究. 见: 2012 年第 14 届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集, 三亚, 2012. 562–566]
- 9 Yu W H. *Development Technology of Multi Agent System Based on JADE Platform*. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 1–13 [于卫红. 基于 JADE 平台的多 Agent 系统开发技术. 北京: 国防工业出版社, 2011. 1–13]

## Modeling and simulation method of equipment support system based on multiple agents

Li KOU<sup>1\*</sup>, Wenhui FAN<sup>1</sup>, Shuang SONG<sup>2</sup> & Lili YIN<sup>1</sup>

1. *Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Department of Communication, Beijing Youth Politics College, Beijing 100102, China*

\* Corresponding author. E-mail: kouli13@139.com

**Abstract** The equipment support system plays a decisive role in modern war. If the actual equipment test is used, the cost of time, manpower, and material resources is higher, so the modeling and simulation method is more scientific. However, as a complex system, the equipment support system has many components and complex interactions, so it is difficult to reveal its characteristics by using a simulation method based on the discrete event. Therefore, the emergent properties of the system can be revealed by the bottom-up and collaborative autonomy of the agents through a simulation method based on multiple agents to model and simulate the equipment support system. In this research, the simulation modeling of the equipment support system is carried out based on multiple agents, the architecture of the simulation platform is constructed, and such key technologies as simulation operation management, time synchronization, and data distribution are studied. A publish subscribe algorithm for a two-way dynamic rough linked list tree is proposed. Finally, through the prototype system and case analysis, it is proved that the modeling and simulation method based on multiple agents is feasible.

**Keywords** multiagent, equipment support system, modeling and simulation



**Li KOU** was born in 1981. He received a master's degree at the College of Systems Engineering from the University of Defense and Technology, Changsha, Hunan Province in 2006. Currently, he is an engineer of PLA No. 96658 troops and a Ph.D. candidate at Tsinghua University. His research interests include modeling and simulation of complex systems, intelligent decisions, and information system engineering.



**Wenhui FAN** was born in 1968. He received a Ph.D. degree in control science and engineering from Zhejiang University in 1998. Currently, he is a professor, doctoral tutor, and vice-director in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interests include modeling and simulation of complex systems, product information integration modeling technology, product lifecycle management technology, and collaborative design platform technology.



**Shuang SONG** was born in 1983. She received a master's degree in communication science from the Communication University of China, Beijing in 2008. Currently, she is a lecturer at Department of Communication, Beijing Youth Politics College. Her research interests include journalism and communication.



**Lili YIN** was born in 1990. She is a master's degree candidate at Tsinghua University. Her research interests include modeling and simulation of complex systems and big data.