

# 基于 SysML 的船厂堆场作业系统建模与仿真\*

金淳, 李雪

(大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 研究了基于系统建模语言 SysML 的船厂堆场作业系统建模及仿真实现问题。首先基于 SysML 的系统建模方法建立了堆场作业系统的系统需求、结构及行为模型;然后利用仿真系统 ARENA 解决 SysML 模型的实现问题,并设计了从 SysML 模型到 ARENA 模型的转换方法。实例验证结果表明,SysML 在系统建模方面具有良好的表达性,利用 ARENA 对 SysML 模型进行仿真实现是可行的。

**关键词:** 船厂堆场作业系统; 系统建模; SysML; 仿真; ARENA

中图分类号: C931 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)10-3779-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.10.046

## SysML-based modeling and simulation for stockyard operation system in shipyard

JIN Chun, LI Xue

(Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract:** This paper took a research on SysML-based modeling and simulation for the stockyard operation system in a shipyard. First of all, using SysML-based modeling method, built the system's model in terms of system requirement, structure, behavior. Then, proposed simulation system ARENA to solve the execution of SysML model, designed and models transformation method from SysML model to ARENA model. The instance experiment results show that, SysML is expressive in terms of system modeling, and it's feasible with ARENA simulation to realize SysML model.

**Key words:** stockyard operation system in shipyard; system modeling; SysML; simulation; ARENA

系统建模语言 SysML (systems modeling language) 是用于系统与产品设计的建模语言, 它能够有效表述系统工程领域内的复杂性问题, 改善多元化系统开发团队之间的交流, 缩短开发周期, 提高系统设计质量。SysML 重用和扩展了 UML2.0 的功能, 具有 UML 面向对象的特点和系统工程面向过程的结构化分析特点, 适应于更大范围的复杂系统的设计<sup>[1]</sup>。在国外, SysML 的应用不仅限于软件设计领域<sup>[2]</sup> 和军事领域中支持对 DoDAF 的体系结构产品设计及空军作战、防空体系、卫星系统的模型构建<sup>[3~5]</sup>, 也用于构建知识管理模型<sup>[6]</sup>、网络系统建模与仿真<sup>[7]</sup>、道路交通管理系统建模等<sup>[8]</sup>。目前, 国内对 SysML 的应用刚刚开始, 主要用于军事领域的系统建模和产品设计等<sup>[9,10]</sup>。

针对船厂堆场作业系统建模问题, 提出基于 SysML 的系统建模方法, 从系统需求、结构、行为方面建立系统模型, 并设计了从 SysML 模型到 ARENA 模型的转换方法, 利用仿真系统 ARENA 对 SysML 模型进行了仿真实现, 通过实例仿真实验对船厂堆场作业系统的作业性能进行了评价。

## 1 概述

### 1.1 SysML 概述

UML 是在软件系统领域得到普遍认可的建模语言, 而 SysML 是面向系统工程领域的建模需求, 在对 UML2.0 的部分

子集进行重用和扩展的基础上形成的系统工程的通用标准建模语言。SysML 适用于复杂系统的描述、分析、设计、检验和确认, 这些系统既可以包含软件系统也可以包含硬件、数据、人员、过程、设备等其他要素<sup>[1]</sup>。SysML 是基于图形的系统建模语言, 而且区别于行为图、N2 图、IDEFO 等其他图形化建模语言, SysML 为其图形化表示法提供了完整的语义。SysML 的图形共有九种, 从不同建模角度可划分为三大类:

a) 需求图形。即需求图 (requirement diagram) 表示基于文本的系统需求。UML 没有专门用于需求分析的图形, SysML 新增加需求图以支持系统需求分解和需求追溯。

b) 结构图形。它包括模块定义图 (block definition diagram)、内部模块图 (internal block diagram)、参数图 (parametric diagram)、包图 (package diagram)。模块定义图和内部模块图描述系统结构的层次性以及结构间的关联性; 参数图表示系统结构属性之间的约束关系以支持系统工程对系统结构属性在物理和性能上的分析; 包图对系统模型要素进行分类组织。模块定义图和内部模块图分别修改了 UML 类图和组合结构图; 参数图是新增加图形, 本质上属于内部模块图; SysML 包图重用 UML 包图。

c) 行为图形。它包括活动图 (activity diagram)、序列图 (sequence diagram)、状态机图 (state machine diagram)、用例图 (use case diagram), 分别从基于功能、消息、状态的角度对系统的行为进行描述。SysML 活动图扩展了 UML 活动图, 加入了

收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2010-05-24 基金项目: 国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2005]383 号文件)

作者简介: 金淳(1963-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士, 主要研究方向为物流与供应链管理、系统仿真(jinchun@dlut.edu.cn); 李雪(1984-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为物流系统仿真。

对象流、支持控制输入、概率定义等概念以对强调系统功能分析和设计的系统工程提供更加有力的支持;另外三种图形完全重用 UML 图形。

## 1.2 船厂堆场作业系统概述

船厂堆场作业系统是船舶生产系统中不可或缺的部分,是全厂钢板原材料进料、分批堆放、保管和供应的场所,亦可称为钢板堆场作业系统(简称系统)。它是船舶建造生产系统的物流和信息流的源头,其管理水平的高低对船舶建造进度和企业经济效益水平起到直接作用。钢板堆场作业系统的组成要素包括:

a) 作业对象。它包括钢板批量和火车。钢板批量是船厂上料计划和钢板入、出堆场的基本单位(简称批量);火车将钢板批量运送到堆场,卸载后离开堆场。火车和钢板批量为系统外部实体,经过一定的作业活动后离开系统。

b) 作业设备。包括活动设备和固定设施两大类。活动设备有场桥和钢板运输车,场桥用于装卸、搬运钢板进出堆垛,钢板运输车将钢板运输出堆场;固定设施包括堆垛和装卸线,堆垛用于存储钢板,装卸线用于停泊火车和钢板运输车行驶。

c) 堆场管理信息系统。包括系统服务器和无线条码采集器(PDA)。前者负责处理钢板信息,后者通过扫描钢板条码采集钢板信息。

d) 作业人员。辅助场桥装卸钢板以及操作 PDA。

系统作业活动包括:

a) 批量入场作业。火车装载钢板到达堆场,进入装卸线,作业人员添加钢板条码,场桥卸载钢板到堆垛,作业人员进行入场批量信息处理。

b) 批量在场作业。对场内存储的钢板进行盘点或移库作业,是批量入场和出场作业的辅助工作。

c) 批量出场作业。作业人员进行出场批量信息处理,场桥将钢板移出堆垛,由钢板运输车运输出场。

## 2 基于 SysML 的系统建模

SysML 只是一种建模语言,不涉及建模方法。本文提出基于 SysML 的系统建模方法,从系统需求、结构、行为等方面建立系统的需求模型、结构模型和行为模型。

### 2.1 系统需求模型

需求模型用于说明系统必须实现的功能或必须达到的性能条件。SysML 使用构造型(stereotype)为《需求》的模块表示文本化的系统需求,定义各种关系如包含、导出、实现、细化和追溯关系,以层次化图形的方式描述系统需求之间、需求与其他建模元素之间的关系。

图 1 为系统需求图,由三层构成。第一层“系统作业”是整体需求;第二层是第一层“系统作业”的子需求,父需求和子需求之间使用交叉关系 containment 表示;第三层需求由第二层需求导出,导出关系使用 deriveReqt 表示。需求还可与其他系统要素存在关系。例如“批量出场速度”需求由“堆场管理信息系统”模块实现,实现关系用 satisfy 表示。系统需求分为功能需求和性能需求,前者是系统需要实现的功能或作业;后者是系统需要实现的性能条件,图 1 中第二层是系统的功能需求,用构造型《功能》定义,第三层是系统的性能需求,用构造型“性能”定义。

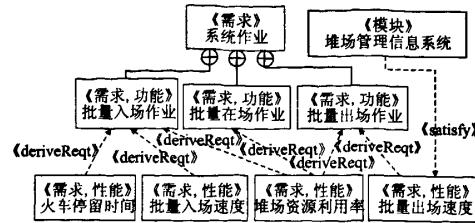


图 1 系统需求图

### 2.2 系统结构模型

系统结构模型利用模块定义图、内部模块图、参数图对系统结构进行分析和描述。

#### 2.2.1 模块定义图

SysML 用模块(block)概念对系统结构实行模块化处理,表示子系统、系统组件或系统中流动的实体。模块定义图定义模块的属性、操作以及模块间的层次化关系。图 2 是钢板堆场作业系统的模块定义图,由装卸线、堆垛、场桥、钢板运输车、作业人员、堆场管理信息系统和模块组合而成;由火车和钢板批量模块聚合而成,即可以脱离系统独立存在。堆场管理信息系统由 PDA 和系统服务器模块组合而成,钢板批量与批量信息模块属于组合关系。图 2 还描述了模块的属性和操作。

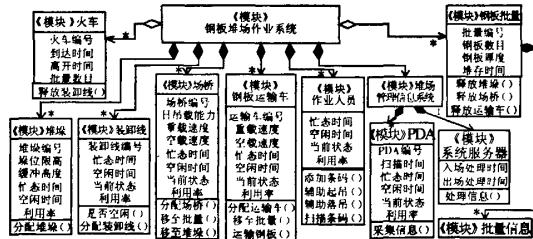


图 2 系统模块定义图

#### 2.2.2 内部模块图

内部模块图描述模块的内部结构,进一步细化模块定义图中对模块的描述,以支持对系统结构层级分解的需要。内部模块图包括模块组件、端口和连接器三部分。端口分为标准端口和流端口(flow port)。标准端口继承了 UML 2.0 的特性,描述模块可以向外界提供的服务和需要外界给予的服务;流端口是 SysML 新增加的概念,支持模块内、外间的关于信息数据或物理实体的物质流(item flow)描述。

图 3 显示了系统模块的内部结构,模块和模块组件上都定义了端口,描述系统中的服务调用和物质流。模块内存在两种物质流,即钢板批量流和批量信息流。钢板批量流通过场桥模块进入堆垛模块,存储一段时间后再通过场桥模块经过钢板运输车模块离开系统;批量信息流在系统各部分之间的流动反映了信息系统的作业情况。系统内的服务调用发生在 PDA 模块与系统服务器模块之间,PDA 请求系统服务器进行相关钢板信息操作。

#### 2.2.3 参数图

参数图通过定义一组系统属性以及属性之间的约束关系来描述和分析属性之间的相互影响。系统属性通过参数图的约束属性(constraint property)相互连接,约束参数(constraint parameter)表示系统属性,约束表达式(constraint expression)表示属性间的约束关系。图 4 是场桥利用率的参数图,约束表达式如式(1):

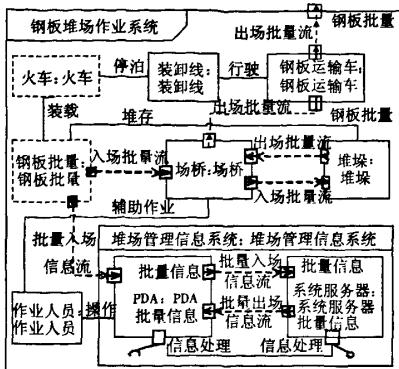


图3 系统内部模块图

$$\text{利用率} = \frac{\text{忙态时间}}{\text{忙态时间} + \text{空闲时间}} \quad (1)$$

约束参数:忙态时间、空闲时间、利用率分别与场桥模块的相应属性连接,式(1)表示了属性之间的约束关系。通过场桥利用率参数图可清楚地表达场桥模块属性之间的约束关系以及对场桥利用率具有影响的系统属性。

## 2.3 系统行为模型

### 2.3.1 活动图

在所有的行为图中,活动是最基本的行为单元,状态机图描述由状态转变引起的活动,序列图描述由消息触发的操作活动,活动图则描述活动的细节,强调行为完成的次序、输入输出以及协调工作的条件。

图5是对批量入场作业活动的描述。系统活动的流程通过控制流表达;活动之间发生的对象流(object flow)通过活动上定义的插脚和插脚间的对象流表示。例如,钢板批量对象流由场桥起吊钢板活动产生并输出,然后再输入到场桥移至堆垛活动,插脚定义了活动输入输出的对象类型。钢板批量对象流是离散的,用《discrete》表示,时间间隔满足:

$$\text{时间间隔} = \frac{\text{场桥移动距离}}{\text{移动速度}} \quad (2)$$

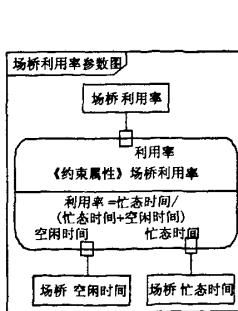


图4 场桥利用率参数图

系统中的信息流使用类型为批量信息模块的对象流表示,由作业人员扫描条码活动产生,经过对象节点PDA缓存由系统服务器处理批量信息活动消耗。

### 2.3.2 序列图

SysML序列图通过描述系统各部分之间以及与外界的相互作用为系统行为建模,并以消息的形式表现交互,消息的先后顺序表示交互发生的顺序。图6描述了批量入场作业中各模块之间基于消息的交互情况。因篇幅关系,说明从略。

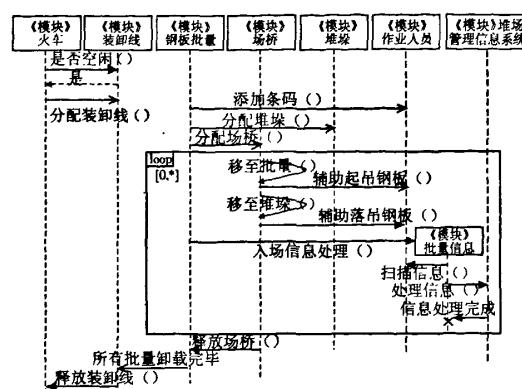


图6 批量入场作业序列图

## 3 SysML 模型的仿真实现

基于 SysML 的系统模型尚不支持模型的直接运行,本文利用仿真系统 ARENA 对 SysML 模型进行仿真实现。SysML 模型的仿真实现就是将 SysML 模型转换到 ARENA 模型<sup>[11,12]</sup>,本文研究从 SysML 模型到 ARENA 模型的转换方法,并对钢板堆场作业系统的 SysML 模型进行仿真实现。

### 3.1 SysML-ARENA 模型转换方法

从 SysML 模型到 ARENA 模型的转换方法包括转换规则和转换步骤。转换规则就是在两种异构模型之间建立模型元素的对应关系,从 SysML 模型到 ARENA 模型的转换步骤如下:

- 从 SysML 需求模型中确立 ARENA 模型的仿真目标。
- 按照 SysML 模块定义图和内部模块图中对系统结构要素的定义,确定仿真模型的数据模块,将 SysML 模型的结构模块转换为 ARENA 模型的资源(resource)、实体(entity)、运输设备(transporter)数据模块。
- 按照 SysML 模型的行为模型确立仿真模型的逻辑结构。将 SysML 活动图和序列图中的建模元素转换为 ARENA 模型的流程图模块并建立仿真流程,具体转换规则如表1所示。
- 对 SysML 参数模型中描述的系统约束,通过 ARENA 的 assign、VBA、decide 模块对模型中的变量进行定义和约束,细化和修正仿真模型。

表1 仿真模型逻辑结构转换规则

SysML 模型的行为模型建模元素	ARENA 模型的流程图模块
实体模块的活动	seize, delay, release
资源模块的活动	seize, release
运输设备模块的活动	transport, move
决策节点	decide
分叉节点	separate, dropoff
实体与资源模块交互	seize, delay, release
实体与运输设备模块交互	allocate, free
运输设备模块自调用	transport, move
实体模块之间交互	separate, batch

### 3.2 ARENA 仿真模型

根据3.1节中给出的模型转换规则,将图2和3的系统结构模型进行转换,转换结果如表2所示。仿真模型的数据模块确定后,模型的逻辑结构可以依据表1的转换规则对 SysML 活动图和序列图进行转换,确定仿真流程。图7是以批量入场作业为例展示的经过模型转换而成的批量入场作业仿真子模型。

表 2 ARENA 模型的数据模块

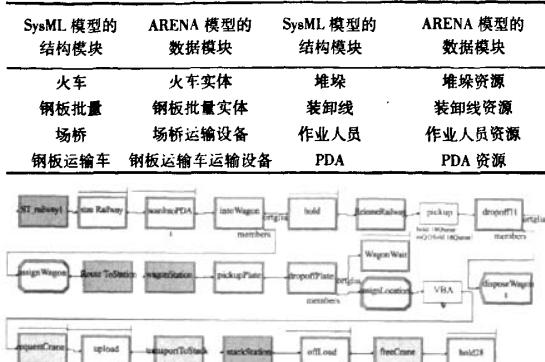


图 7 批量入场作业仿真子模型

### 3.3 仿真实验及结果分析

以某造船企业的钢板堆场为实例进行仿真实验。该堆场共有 250 个堆垛, 堆垛限高为 1.5 m, 缓冲高度为 0.5 m; 装卸线三条; 场桥两台, 重载速度 34.5 m/min, 空载速度 50 m/min, 场桥日作业能力不超过 600 张钢板; 钢板运输车两台, 重载速度 43.4 m/min, 空载速度 60 m/min; 作业人员共 15 名; PDA 共有四台。每天先进行钢板入场作业, 然后进行出场及其他作业。仿真的目的是分析各种作业资源的利用情况及各活动间的匹配程度。

仿真实验的各种分布情况如下: 火车每天上班时刻到达一次, 配载批量数目服从正态分布  $NORM(8, 2)$ , 每个批量的钢板数目服从正态分布  $NORM(40, 5)$ ; 钢板厚度服从均匀分布  $UNIF(10, 40)$ , 单位为 mm; 批量平均堆存时间服从分布  $UNIF(27, 33)$ , 单位为 d。PDA 扫描一张钢板需要时间服从分布  $UNIF(2, 4)$ , 单位为 s; PDA 对每百张入场钢板的信息处理时间服从均匀分布  $UNIF(12, 18)$ , 每百张出场钢板的信息处理时间服从均匀分布  $UNIF(4, 8)$ , 单位均为 s。

仿真运行 365 d, 一天 8 h 运作, 仿真实验输出堆场运行性能参数如表 3 所示。

由表 3 可知, 火车的平均在场时间为 3.12 h, 表明堆场的作业能力可以保证火车较快离场从而有利于火车对堆场钢板供应运输的正常进行。堆垛平均利用率 62.61% 反映堆场利用情况正常, 最大利用率 97.20% 说明堆场可保证作业。装卸线、场桥、钢板运输车、作业人员的利用率基本均衡说明堆场的装卸工艺和作业组织方式较为合理。批量平均入场时间 34.82 min 说明批量入场速度比较快, 反映了堆场的批量入场作业能力较强; 批量平均出场时间 14.47 min 说明了批量的快速出场作业速度, 体现了实施堆场管理信息系统的作用。信息处理方面, 入场批量信息扫描和处理时间的总和占批量平均入场时间的 4.08%, 出场批量信息扫描和处理时间的总和占批量平均出场时间的 6.9%, 说明在批量入场和出场作业中用于 PDA 信息处理的时间所占比例较小, 不会因信息处理时间过长而拖延了钢板批量的入场和出场作业。

图 8 表示了一个工作日内堆场作业中活动较频繁的三种资源, 即场桥、作业人员和 PDA 的资源利用率随时间变化情况。各资源利用率在每天的前半段即每天批量入场时间段表现出较高的利用率, 堆场的作业活动活跃; 而在每天的后半段, 即堆场完成每天的入场作业后进行出场作业时, 资源利用率明

显下降, 整个堆场的作业强度下降。

表 3 仿真输出结果

参数(单位)	仿真结果
火车平均停留时间/h	3.12
堆垛最高利用率/%	97.20
堆垛平均利用率/%	62.61
装卸线平均利用率/%	55.82
场桥平均利用率/%	58.69
钢板运输车平均利用率/%	31.03
作业人员平均利用率/%	47.06
批量平均入场时间/min/批量	34.82
入场信息平均扫描时间/s/批量	54.01
入场信息平均处理时间/s/批量	31.16
批量平均出场时间/min/批量	14.47
出场信息平均扫描时间/s/批量	53.89
出场信息平均处理时间/s/批量	7.45

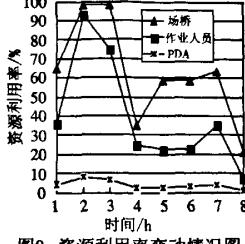


图 8 资源利用率变动情况图

### 4 结语

在船厂钢板堆场作业系统的建模问题中, 利用 SysML 建模语言可比 UML 更为清晰地从系统需求、结构、行为等方面建立系统模型。同时, 设计了从 SysML 模型到 ARENA 模型的模型转换方法, 从而利用仿真系统 ARENA 实现了 SysML 模型的运行。通过实例分析对钢板堆场的作业性能进行了评价。本研究可为多元团队条件下复杂系统的模型设计和仿真实现提供有效的解决办法。

#### 参考文献:

- [1] 蒋彩云, 王维平, 李群. SysML: 一种新的系统建模语言 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1483-1487.
- [2] ZHANG Xue-bo, ZHAO Li-jun, WANG Bing. Research on TacSat-3 modeling technology based on SysML [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(2): 92-96.
- [3] VALLES-BARAJAS F. A sysml requirements model for the 1992 ACC robust control benchmark [J]. Information Technology and Control, 2009, 38(3): 245-251.
- [4] TIAN Chuan, TIAN Gang, LIU Xiao-da. Systems modeling language (SysML) and its application in the DoDAF products description [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(9): 102-106.
- [5] QIAN Meng, HU Sheng-ze, LIU Zhong, et al. An approach of SysML-based COA modeling [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(8): 15-19.
- [6] KARWOWSKI W, AHRAM T Z. Interactive management of human factors knowledge for human systems integration using systems modeling language [J]. Information Systems Management, 2009, 26(3): 262-274.
- [7] RAO M, RAMAKRISHNAN S, DACLI C. Modeling and simulation of net centric system of systems using systems modeling language and colored petri-nets: a demonstration using the global earth observation system of systems [J]. Systems Engineering, 2008, 11(3): 203-220.
- [8] SOARES M S, VRANCKEN J. Model-driven user requirements specification using SysML [J]. Journal of Software, 2008, 3(6): 57-68.
- [9] 陈洪辉, 苏伟, 柳海峰. SysML 及其在 C4ISR 系统建模中的应用研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(11): 60-64.
- [10] 吴娟, 王明哲, 方华京. 基于 SysML 的系统体系结构产品设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(4): 594-598.
- [11] 方绍强, 卫光, 陈伟鹏, 等. 飞行保障过程 UML 建模与 ARENA 仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(11): 165-170.
- [12] ARTIS T, ARNIS K, YURI M, et al. Design of UML models and their simulation using ARENA [J]. WSEAS Transactions on Computer Research, 2008, 3(1): 67-7.