

12-30-2023

Modeling and Simulation on Production Logistics of Intelligent Workshop Manufacturing System Based on EFSM

Liuzhen Li

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China, llz980807@163.com

Chao Jin

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China

Tingyu Lin

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China

Yaoqin Zhu

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China, zhuyaoqin@njust.edu.cn

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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Modeling and Simulation on Production Logistics of Intelligent Workshop Manufacturing System Based on EFSM

Abstract

Abstract: The production logistics mode of manufacturing industry is developing rapidly, on which the modeling and simulation can provide the decision support for the design, analysis and transformation of manufacturing system. A description of the entity elements in intelligent workshop manufacturing system is given according to the classification of "human machine material environment rule". A production and logistics componentized EFSM model is created on the basis of EFSM and componentized modeling ideas. The modeling process for multi-job production in smart shop and the component model instantiation methodology are elaborated. The simulation running through the automatic conversion of EFSM-DEVS model and DEVS engine is completed. The simulation results show that the model established by this method is more in line with the actual situation of the workshop and is more applicable. The idea of component modeling can construct the more scalable software; Modeling and the simulation running of 3D visualization makes the software more intuitive, and the simulation results are consistent with AnyLogic.

Keywords

modeling and simulation of production and logistics, extended finite state machine(EFSM), component-based modeling, discrete event system specification(DEVS), multi-job modeling

Recommended Citation

Li Liuzhen, Jin Chao, Lin Tingyu, et al. Modeling and Simulation on Production Logistics of Intelligent Workshop Manufacturing System Based on EFSM[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2655-2668.

基于 EFSM 的智能车间制造系统生产物流建模与仿真

李柳臻¹, 金超¹, 林廷宇², 朱耀琴^{1*}

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 制造业的生产物流方式处于不断变革中, 对其建模仿真可为制造系统规划设计、分析及改造提供决策支持。依“人-机-物-环-法”分类给出了智能车间制造系统中实体元素的描述, 结合 EFSM(extended finite state machine)和组件化建模思想, 建立了生产和物流组件化 EFSM 模型; 阐述了智能车间多作业生产的建模过程以及组件模型实例化方法; 通过 EFSM-DEVS(discrete event system specification)模型自动转换及 DEVS 引擎完成了仿真运行。仿真结果表明: 该方法所建立的模型更符合车间实际状况, 适用性更广; 组件化建模思想能构造更具扩展性的软件; 建模及仿真运行的 3D 可视化使软件直观性更好, 其仿真结果与 AnyLogic 保持一致。

关键词: 生产物流建模与仿真; EFSM(extended finite state machine); 组件化建模; DEVS(discrete event system specification); 多作业建模

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)12-2655-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0802

引用格式: 李柳臻, 金超, 林廷宇, 等. 基于 EFSM 的智能车间制造系统生产物流建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2655-2668.

Reference format: Li Liuzhen, Jin Chao, Lin Tingyu, et al. Modeling and Simulation on Production Logistics of Intelligent Workshop Manufacturing System Based on EFSM[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2655-2668.

Modeling and Simulation on Production Logistics of Intelligent Workshop Manufacturing System Based on EFSM

Li Liuzhen¹, Jin Chao¹, Lin Tingyu², Zhu Yaoqin^{1*}

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: The production logistics mode of manufacturing industry is developing rapidly, on which the modeling and simulation can provide the decision support for the design, analysis and transformation of manufacturing system. A description of the entity elements in intelligent workshop manufacturing system is given according to the classification of "human machine material environment rule". A production and logistics componentized EFSM model is created on the basis of EFSM and componentized modeling ideas. The modeling process for multi-job production in smart shop and the component model instantiation methodology are elaborated. The simulation running through the automatic conversion of EFSM-DEVS model and DEVS engine is completed. The simulation results show that the model established by this method is more in line with the actual situation of the workshop and is more applicable. The idea of component modeling can construct the more scalable software; Modeling and the simulation running of 3D visualization makes the software more intuitive, and the simulation results are consistent with AnyLogic.

收稿日期: 2022-07-11 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 装备发展部预先研究项目(50904040201)

第一作者: 李柳臻(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为智能车间生产物流建模与仿真。E-mail: llz980807@163.com

通讯作者: 朱耀琴(1977-), 女, 讲师, 硕导, 博士, 研究方向为系统仿真与仿真决策。E-mail: zhuyaoqin@njust.edu.cn

Keywords: modeling and simulation of production and logistics; extended finite state machine(EFSM); component-based modeling; discrete event system specification(DEVS); multi-job modeling

0 引言

新一代信息技术与制造技术的深度融合促使制造业生产方式发生了重大变革, 车间制造逐渐由数字化、自动化过渡到智能化, 如中国重汽智能涂装车间^[1]、安徽新华的图书印刷智能制造生产线^[2]等, 越来越多的传统制造业正进行智能化升级。通过对车间内的生产和物流进行建模仿真, 可将智能车间的规划、设计、运行、分析和改造各个阶段看不见、难以抉择的未知风险暴露出来, 从而提高效率、缩短研究开发周期。很多学者对智能车间生产物流建模与仿真展开了研究, 如胡小荣^[3]基于Unity3D虚拟现实引擎, 结合状态机原理开发了生产线仿真系统, 但是该生产线上的机器类型未考虑组装机、分割机; 刘名远等^[4]基于离散事件建模理论与有限状态机开发了以某汽车涂装生产车间为例的建模与仿真系统, 但所提方法未支持车间多作业场景; 周韶武等^[5]采用Petri网对某电装车间进行建模, 使用Witness仿真软件对模型进行仿真, 但建模方法未考虑组件化思想; 李任江等^[6]采用面向对象的赋时着色Petri网进行建模, 使用Flexsim进行仿真, 虽然考虑了组件化建模思想, 但未支持多作业场景。

在工厂、生产线和生产物流过程仿真与优化软件方面, 国外主流的有AnyLogic、Plant Simulation、Flexsim等仿真软件。但国内对生产物流建模仿真的研究起步较晚, 开发出的仿真软件较少。范熙^[7]采用C++开发了生产计划仿真软件, 采用底层的面向对象方法建立模型, 但各级产品间的耦合关系写在了约束条件中, 扩展性低; 程咏喜等^[8]基于客户端/服务器模式开发了一款生产线仿真软件, 但只能对某一种产品进行仿真。相较于国外, 国内该类仿真软件提供的仿真类型比较单一、功能相对简单, 还需不断完善, 从而

在专业应用软件上响应国家信息技术创新的号召, 逐步实现国产替代。

鉴于以上原因, 本文在对车间实体元素合理划分的基础上, 引入EFSM(extended finite state machine)概念构建了组件化生产和物流模型, 该模型将生产实体分成了普通机器、组装机和分割机3种; 车间支持加工多种类型产品的多作业模式; 所建模型通过EFSM和DEVS(discrete event system specification)映射, 基于ADEVS仿真引擎完成仿真运行。

1 生产物流建模元素及EFSM组件

常见的建模方法主要有事件图法、排队论、Petri网等。事件图法所能表达的事件间关系较为简单, 且缺乏描述系统内部的状态机制^[9]; 排队模型的结构通常与生产物流系统结构不同, 难以描述复杂的生产物流系统, 适用性有限^[10]; Petri网系统的结构在系统较为复杂时过于繁琐且不易理解, 在工程上应用较为困难^[10]。本文采用的扩展状态机理论^[11]便于描述系统内部状态的变化, 且构建了组件化模型, 具有良好的适用性和可扩展性。

1.1 实体元素建模

李伯虎等^[12]将智能制造全生命周期分为人、机、物、环四大要素; 方磊等^[13]将智能生产车间的对象分为车间现场的人、机、物、环、法这五大制造要素; 党少杰^[14]建立虚拟车间与现实车间的映射, 将虚拟车间划分为车间框架、车间设备、运输设备和加工工件等。参照前人思想, 本文将智能车间实体元素划分为生产实体、物流实体、物料、环境、规则5类。

(1) 生产实体

生产实体是指车间生产过程中所涉及的加工

设备、操作人员等, 以加工设备为例, 可以是车床等传统机器, 也可以是加工中心复杂设备, 将其形式化为六元组:

$$\text{Machine} = \langle \text{Id}, \text{Name}, \text{Capacity}, \text{Location}, \text{State}, \text{Function} \rangle$$

其中, Id表示机器的序号; Name表示机器名称; Capacity表示机器托盘容量; Location表示机器位置; State ∈ {Idle, Loading, Processing, Unloading}, 分别是空闲状态、上料状态、加工状态和下料状态, 其中, 上料状态、加工状态和下料状态统称为忙碌状态; Function表示机器具有的加工功能, Function ∈ {Processor, Combiner, Separator}, 其中, Processor表示普通机器, 不具备组装功能和分割功能, Combiner表示具备组装功能的机器, Separator表示具备分割功能的机器。

(2) 物流实体

物流实体是指车间生产过程中的操作人员、智能运输小车(automated guided vehicle, AGV)和机械臂等完成物料搬运的实体, 在智能车间中主要用AGV和机械臂等装备完成搬运。以AGV为例, 将其形式化为六元组:

$$\text{AGV} = \langle \text{Id}, \text{Name}, \text{Capacity}, \text{State}, \text{Location}, \text{WaitTime} \rangle$$

其中, Id表示AGV的序号; Name表示AGV的名称; Capacity表示AGV的容量; State ∈ {Idle, Departure, Waiting, Loading, Transporting, Unloading}, 分别是空闲状态、发车状态、等待状态、上料状态、运输状态和下料状态, 其中, 除空闲状态外其余所有状态统称为忙碌状态, AGV是否等待是指AGV出发地可以搬运的物料数量是否比AGV自身容量小; Location表示AGV当前的位置; WaitTime表示AGV等待时间。

(3) 物料

物料是智能车间中的原料、在制品和产品的统称, 其位置、形态、数量会随着生产作业、工序及物流设备的作用而发生变化。将其形式化为五元组:

$$\text{Material} = \langle \text{Id}, \text{Code}, \text{Location}, \text{Num}, \text{Assignment_Name} \rangle$$

其中, Id表示物料的序号; Code表示物料的编码; Location表示物料所在实体(比如机器、AGV、货堆等)的位置; Num表示物料的数量; Assignment_Name表示物料所属作业名称。

(4) 环境

环境是指车间生产过程中所处的物理环境, 包括货堆、传送带、路径、仓库等, 其中, 货堆是指用来暂时存放物料的实体, 将其形式化为四元组:

$$\text{Cargo_Pile} = \langle \text{Id}, \text{Name}, \text{Capacity}, \text{Location} \rangle$$

其中, Id表示货堆的序号, Name表示货堆的名称; Capacity代表货堆的容量; Location表示货堆所处的位置。

(5) 规则

本文规则用来定义智能车间生产和物流任务的优先级策略, 可应用于生产和物流设备, 包括全局优先策略和局部优先策略, 局部优先策略高于全局优先策略。

1) 按作业优先: 按照生产/物流实体全部任务所属作业进行优先级排序。

2) 按工序优先: 在相同作业下, 按照生产/物流实体任务所属工序进行优先级排序, 分为前序优先和后序优先。前序优先是先完成工序较前物料的加工/运输, 后序优先是先完成工序较后物料的加工/运输。

3) 按效率优先: 在相同作业、相同工序下, 按照生产/物流实体进行加工/运输操作所需时间进行优先级排序。

4) 当作业、工序、效率均相同时, 使用随机策略。

1.2 实体EFSM的组件化建模

为提高模型的共享和重用, 引入参数化建模思想, 按照实体的功能属性进行分解并封装为组件, 建立各实体EFSM的组件化模型。本文为每个实体类型构建一个EFSM组件模型, 当车间建模

需要多个该实体元素时，只需将多个实体元素的属性值以参数形式传入组件模型中，完成组件模型的实例化。这种不需构建多个实体模型的方法，不仅减少了代码量，也节省了仿真运行时模型构建的时间，而且当有其他需求时，只需要扩展实体组件模型即可。本节在EFSM概念基础上，以生产实体、物流实体AGV为例构建其EFSM组件。

1.2.1 EFSM 概念

本文采用基于扩展有限状态机(EFSM)模型的形式化定义^[11]。EFSM模型为6元组 (S, s_0, V, I, O, T) ，其含义如下：

(1) 实体状态有限集合 S 。实体所有状态构成的集合。

(2) 实体初始状态 $s_0, s_0 \in S$ 。

(3) 实体内部变量有限集合 V 。实体处于某一状态下，记录并更新实体可能会影响状态转移的各项属性。

(4) 实体输入数据有限集合 I 。由另一个实体输入到该实体的数据，进而判断变迁是否触发，允许为空。

(5) 实体输出数据有限集合 O 。是由该实体输出到另一个实体的数据，允许为空。

(6) 实体状态变迁有限集合 T 。变迁 T 中的每一个变迁 $t \in T$ 由一个四元组 (S_s, g, At, S_c) 表示，其中 S_s 为变迁 t 的出发状态， g 为一个被称为守卫的逻辑表达式， At 为变迁 t 执行的动作， S_c 为变迁 t 的到达状态。

在EFSM模型中，当执行模型的一个变迁时，会触发状态的转移。当模型状态为某变迁的出发状态 S_s ，且满足该变迁的守卫条件 g 时，则可以进行变迁 $t = (S_s, g, At, S_c)$ 的执行，即执行 At 中的动作，状态转换为 S_c 。

1.2.2 生产实体的EFSM组件

生产实体组件的状态集 S 定义为： $S_{\text{生产实体}} = \{S_0 = \text{空闲}, S_1 = \text{上料}, S_2 = \text{加工}, S_3 = \text{下料}\}$ 。

生产实体组件初始状态 s_0 为空闲。

生产实体组件的内部变量集合 V 由静态属性和动态属性组成， $V = \{V_{\text{static}}, V_{\text{dynamic}}\}$ ，其中，静态属性 $V_{\text{static}} = \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ ， $V_0 \sim V_5$ 为 1.1 节(1) 所定义的生产实体属性，动态属性 $V_{\text{dynamic}} = \{V_6$ 为生产实体最大加工个数， V_7 为生产实体托盘剩余容量， V_8 为生产实体所能加工的工序信息任务队列 $\}$ ，其中， V_8 的每一个记录为原料ID、原料个数、在制品ID、在制品个数、加工时间。

生产实体组件的输入数据集合 I 为生产实体当前原料信息： $I_{\text{生产实体}} = \{\text{生产实体某道工序所需原料信息}\}$ ，其中， $I_{\text{生产实体}}$ 的每个记录为原料ID、原料个数。

生产实体的输出数据集合 O 为生产实体当前在制品信息： $O_{\text{生产实体}} = \{\text{生产实体完成某道工序后输出的在制品信息}\}$ ，其中， $O_{\text{生产实体}}$ 的每一个记录为在制品ID、在制品个数。

生产实体的状态变迁集合 T ： $T_{\text{生产实体}} = \{t_0, t_1, t_2, t_3\}$ ， $t_0 = (S_0, g_0, At_0, S_1)$ ， $t_1 = (S_1, g_1, At_1, S_2)$ ， $t_2 = (S_2, g_2, At_2, S_3)$ ， $t_3 = (S_3, g_3, At_3, S_0)$ 。

生产实体EFSM组件状态转换的图形化描述如图1所示。

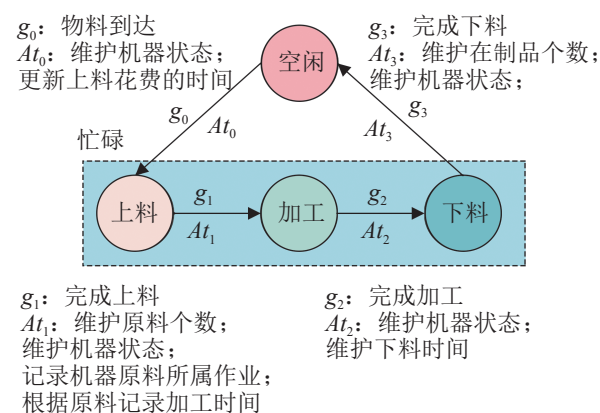


图1 生产实体EFSM状态转换图
Fig. 1 Production entity EFSM state transition diagram

以生产实体在原料到达后进行上料操作(t_0, t_1)为例，介绍(t_0, t_1)伪代码。

生产实体在原料到达后进行上料操作

输入: 生产实体的输入数据集合 I 、生产实体某道加工工序信息集合 V_8 、生产实体最大加工个数 V_6

输出: 满足守卫条件的记录编号、此次加工数量

```

1: Procedure  $t_0$ 
2: for each  $V_8^i \in V_8$  :
3: {  $V_8^i \leftarrow$  取出输入集合  $I$  中的物料
4:  $M_i \leftarrow$  取出  $V_8^i$  中的原料个数
5: if  $M_i > 0$  //原料到达
6: { 满足守卫条件的记录编号  $\leftarrow i$ 
7: 此次加工数量  $\leftarrow \min(M_i, V_6)$ 
8:  $M_i - =$  此次加工数量 //完成上料
9: 状态停留时间  $ta \leftarrow$  取出  $V_8^i$  中的原料加工时间
10: break
11: }}
12: return 满足守卫条件的记录编号, 此次加工数量
    
```

1.2.3 物流实体 AGV 的 EFSM 组件

智能车间中 AGV 用来完成不同作业中货堆、生产实体之间的运输, 每次运输需要描述 AGV 从哪里出发、搬运多少物料、花费多长时间、最终到达哪里。物流实体 AGV 的 EFSM 组件模型如下。

AGV 实体的状态集为 $S_AGV = \{S_0=$ 空闲, $S_1=$ 发车, $S_2=$ 等待, $S_3=$ 上货, $S_4=$ 运输, $S_5=$ 下货 $\}$ 。

AGV 的内部变量集合 V 由静态属性和动态属性组成, $V = \{V_{static}, V_{dynamic}\}$, 其中, 静态属性 $V_{static} = \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$, $V_0 \sim V_5$ 为 1.1 节(2)中所定义的物流实体属性; 动态属性 $V_{dynamic} = \{V_6, V_7\}$, V_6 为 AGV 托盘剩余容量, V_7 为 AGV 所能运输的工序信息任务队列, V_7 的每一个记录为 AGV 任务出发地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量, AGV 任务目的地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量, AGV 持有的物料 ID、物料个数, 运输时间。

AGV 的输入数据集合为 $I_AGV = \{AGV$ 某次运输所需其他实体信息集合 $\}$, 其中, I_AGV 的每一个记录为 AGV 任务出发地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量, AGV 任务目的地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量。

AGV 的输出数据集合为 $O_AGV = \{AGV$ 某次运输更改其他实体信息集合 $\}$, 其中, O_AGV 的每一个记录为 AGV 任务出发地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量, AGV 任务目的地物料 ID、物料个数、托盘剩余容量。

AGV 的状态变迁集合为 $T_AGV = \{t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$, $t_0 = (S_0, g_0, At_0, S_1)$, $t_1 = (S_1, g_1, At_1, S_2)$, $t_2 = (S_2, g_2, At_2, S_3)$, $t_3 = (S_3, g_3, At_3, S_4)$, $t_4 = (S_4, g_4, At_4, S_5)$, $t_5 = (S_5, g_5, At_5, S_0)$ 。

AGV 实体 EFSM 组件状态转换的图形化描述如图 2 所示。

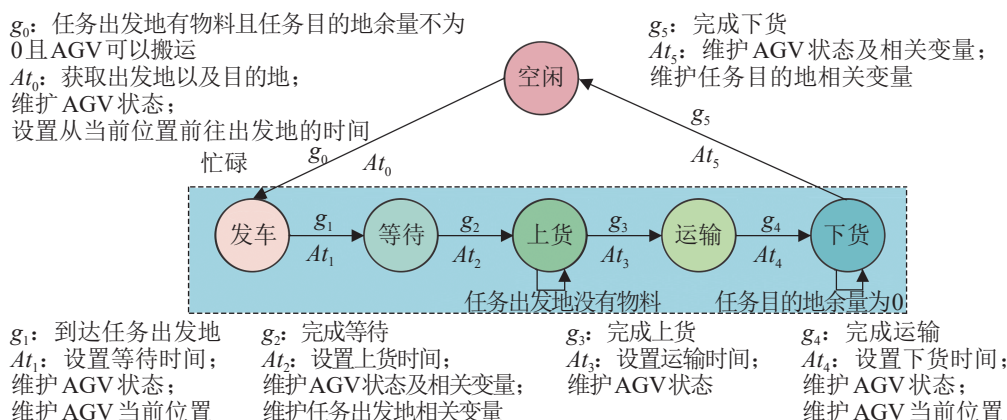


图 2 物流实体 AGV 的 EFSM 状态转换图

Fig. 2 EFSM state transition diagram of logistics entity AGV

以物流实体 AGV 满足搬运条件, 在到达任务出发地, 完成等待、上货后开始运输(t_0, t_1, t_2, t_3)为例, 介绍(t_0, t_1, t_2, t_3)伪代码。

物流实体 AGV 满足搬运条件, 在到达任务出发地, 完成等待、上货后开始运输

输入: AGV 的输入数据集合 I 、AGV 某运输信息集合 V_7

输出: 满足守卫条件的记录编号

1: Procedure t_0

2: if $A_{rest} > 0$

3: { for each $V_7^i \in V_7$:

4: { $V_7^i \leftarrow I$ // 取出输入集合 I 中物料并更新 V_7^i

5: 状态停留时间 $ta \leftarrow$ 取出 V_7^i 中 AGV 的运输时间

6: $A_{rest}^S, A_{rest}^D \leftarrow$ 取出 V_7^i 中 AGV 出发地托盘剩余容量和 AGV 目的地托盘剩余容量

7: if $A_{rest}^D > 0$

8: { $S_{list} \leftarrow$ 取出 V_7^i 中出发地所有物料 ID、物料数量

9: for each $S_j \in S_{list}$:

10: AGV 可以运输的物料个数

$A_{current} = \min(A_{rest}^S, A_{rest}^D)$

11: $S_j^n \leftarrow$ 取出 S_j 中物料数量

12: if $S_j^n > 0$ and $A_{current} > 0$

13: { 满足守卫条件的记录编号 $\leftarrow i$ // 任务出发地有物料且任务目的地有余量且 AGV 可以搬运

14: AGV 搬运 S_j 的数量 $A_{S_j}^n = \min(S_j^n, A_{current})$

// 到达任务出发地, 开始等待

15: $A_{rest}^S += A_{S_j}^n$

16: AGV 出发地 S_j 的数量 $A_{S_j}^S -= A_{S_j}^n$

17: $A_{rest}^D -= A_{S_j}^n$

18: AGV 持有的物料 ID, 物料个数 $A_{S_j}^{hold} \leftarrow j$, AGV 搬运 S_j 的数量 // 完成上货, 开始运输

19: } } } }

20: return 满足守卫条件的记录编号

2 生产物流建模与实体组件实例化

2.1 车间多作业生产物流建模

本文所建立的生产物流模型为一个四元组: (Machines, Logistics, Environment, Assignments):

1) $Machines = \{\dots, Machine_i, \dots\}$ 是车间内所有生产实体的集合;

2) $Logistics = \{\dots, Logistics_Entity_i, \dots\}$ 是车间内所有物流实体集;

3) $Environment = \{\dots, Environment_Entity_i, \dots\}$ 是车间内所有环境实体的集合;

4) $Assignments = \{\dots, Assignment_i, \dots\}$ 是车间内所有作业的集合。

本文以 DG(directed graph)图^[15]形式描述一个作业 $Assignment_i = (T, M, E, R, C)$, 其中, T 为所有顶点实体集合 $\{T_j\}$, $T_j \in Machines$ 或 $T_j \in Environment$; M 为作业中所有物料集合 $\{M_{i,m}\}$; E 为所有边的集合 $\{E_j\}$, 边有 2 种表示, 一种 $\langle T_j, T_k, M_{i,m}, Logistics_Entity_l \rangle$ 表示通过物流设备 $Logistics_Entity_l$ 完成物料 $M_{i,m}$ 从实体 T_j 到实体 T_k 的运输, 另一种 $\langle T_j, T_k, M_{i,m} \rangle$ 表示物料 $M_{i,m}$ 从实体 T_j 自行转移到实体 T_k ; R 为顶点生产实体、边上物流实体执行任务花费的时间集合 $\{R(T_j), R(E_j)\}$, $R(T_j)$ 为生产实体完成某加工任务花费的时间, $R(E_j)$ 为物流实体完成某运输任务花费的时间; C 为记录生产/物料实体 T_j 的输入、输出边关系的集合 $\{C(T_j, E_{in,k}, E_{out,k})\}$ 。

本文所提出的车间多作业生产物流建模及实例化过程如图 3 所示。

图 3 参照分层法将生产物流建模过程分为作业物料来源层、作业描述层和任务队列排序层。

作业物料来源层为每个作业 $Assignment_i$ 设定一个作业原料发生器 Source, 该发生器可根据到达时间间隔、每批到达量及最大量来设置原料到达方式。时间间隔、每批到达量可为固定值, 也

可为符合某分布(泊松分布、指数分布、正态分布、三角分布)的随机数。

作业描述层描述各作业的工艺顺序。该层左侧描述各生产实体、物流实体和货堆之间的流程关系。图中各类型点表示生产实体(普通机器、组装机或分割机器)、物流实体(AGV、机械臂)或

环境(货堆), 边上的 $M_{i,j}$ 表示各作业各工艺顺序下的物料编码, 该编码只有经生产实体加工后才会发生变化, 物流实体和环境实体不会改变物料编码。该层右侧描述了建模时设定的各节点/线的上货/上料时间、下货/下料时间、加工/运输时间、加工类型等信息。

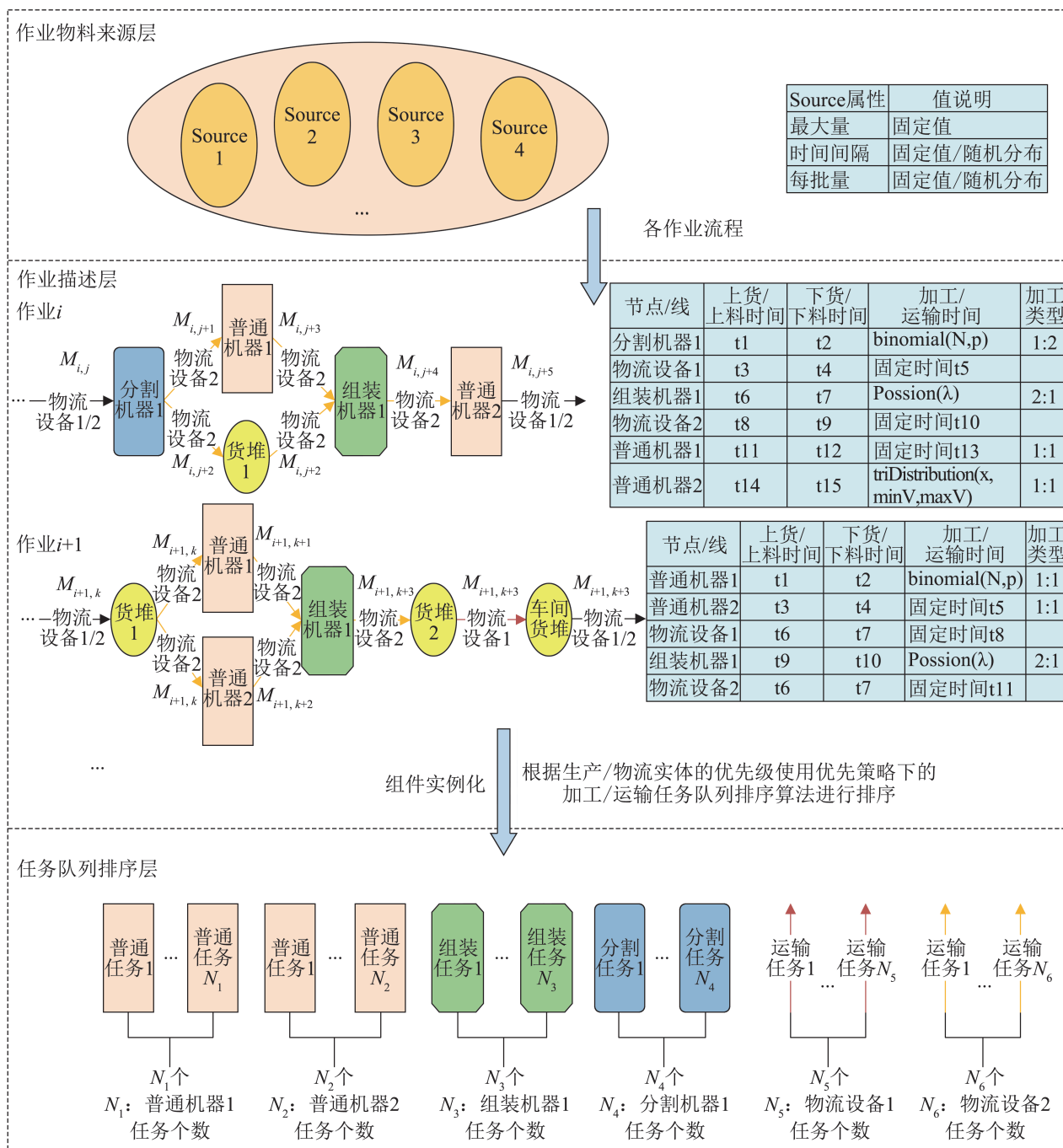


图 3 智能车间生产物流建模及实例化过程图

Fig. 3 Modeling and instantiation process diagram for intelligent shop production logistics

任务队列排序层描述了按1.1节(5)的优先级策略排序后的生产/物流实体任务队列, 队列信息描述见生产实体的 V_8 属性和AGV的 V_7 属性。该队列将为2.2节组件实例化准备。

2.2 生产/物流EFSM组件的实例化

车间多作业生产物流建模需要对1.2节所建立的生产实体/物流实体EFSM组件实例化, 实例化过程可通过用户设置的名称、托盘容量、位置等参数值传入生产/物流组件的 $V_1 \sim V_7/V_1 \sim V_6$ 内部变量完成, V_8/V_7 变量实例化需在用户按图3完成多作业建模后, 根据建模信息对作业中的物料进行合理编码(见作业物料编码算法), 并获取生产/物流实体所能加工/运输的工序信息任务队列(见生产/物流任务优先级队列算法)。

(1) 作业物料编码算法

按工序信息完成对作业集合 *Assignments* 中物料的编码, 算法伪代码如下。

作业物料编码算法

输入: 各作业集合 *Assignments* 的DG描述

输出: 完成物料编码的作业集合 *Assignments*

```
1: for each  $Assignment_i \in Assignments$  do
2:   当前物料编码  $M_{i,m}$ , 初始时  $m = 0$ 
3:   for each  $T_j \in Assignment_i$  //按广度优先遍历作业  $Assignment_i$ 
```

```
4:   {  $T_j^{pre}, T_j^{aft} \leftarrow$  取出  $T_j$  的前序、后序节点
```

```
5:   if  $T_j^{pre} == null$ 
```

```
6:   {  $E \leftarrow$  取出  $T_j$  与  $T_j^{aft}$  相连的边
```

```
7:   将  $E$  中的所有边上的物料编码为  $M_{i,m}$ 
```

```
8:    $m = m+1$  }
```

```
9: else {
```

```
10:  if  $T_j ==$  货堆
```

```
11:  {  $E \leftarrow$  取得  $T_j^{pre}$  与  $T_j$  相连的边
```

```
12:   $E_{out} \leftarrow$  取得节点  $T_j$  的输入边  $E_{in}$  对应的
```

输出边

```
13:   $M \leftarrow$  取得  $E$  边上的物料编码
```

```
14:  将  $E_{out,k}$  边上的物料分别对应编码为  $M$  }
```

```
15:  if  $T_j ==$  生产实体
```

```
16:  { if  $T_j.Function == Processor$ 
```

```
17:  {  $M_{i,pre_m} \leftarrow$  取得  $T_j^{pre}$  与节点  $T_j^{aft}$  相连的边  $E_k$  上的物料编码
```

```
18:  将节点  $T_j$  与  $T_j^{aft}$  相连的边上的物料编码为  $M_{i,m+1}$ 
```

```
19:   $m = m+1$  }
```

```
20:  if  $T_j.Function == Combiner$ 
```

```
21:  {  $M_{i,pre_m} \leftarrow$  取得  $T_j^{pre}$  与节点  $T_j$  相连的边  $E$  上的最大的物料编码
```

```
22:  将节点  $T_j$  与  $T_j^{aft}$  相连的边上的物料编码为  $M_{i,m}$ 
```

```
23:   $m = m+1$  }
```

```
24:  if  $T_j.Function == Separator$ 
```

```
25:  {  $M_{i,pre_m} \leftarrow$  取得  $T_j^{pre}$  与节点  $T_j$  相连的边  $E$  上的物料编码
```

```
26:  for each  $E_l \in$  节点  $T_j$  与  $T_j^{aft}$  相连的边  $E$ 
```

```
27:  { 将  $E_l$  上的物料编码为  $M_{i,m+1}$ 
```

```
28:   $m = m+1$  }
```

```
29: } } }
```

```
30: return  $Assignment$ 
```

(2) 优先策略下加工/运输任务队列排序算法

按1.1节(5)的优先级策略对某实体加工/运输任务进行排序, 算法流程如图4所示。

优先策略下加工/运输任务队列排序算法

输入: 各作业集合 *Assignments*, 实体

输出: 某实体加工/运输任务在优先策略下排序后的队列 Q_{info1} or Q_{info2}

```
1: 得到实体在各作业中的加工/运输任务信息队列  $Q_{info}$ 
```

```
2: 由  $Q_{info}$  内各边  $E_k$  上物料编码得到其分别属于哪个作业, 并按作业进行分区, 每个分区内的信息属于同一个作业, 分区  $i$  的内容为  $Q_{i,info}$ 
```

```
3: 按照各作业优先级对不同的分区进行排序, 若作业1的优先级 > 作业2的优先级 > ... > 作业  $i$  的优先级 > ... , 则  $Q_{info}$  可表示为  $\{Q_{1,info}, Q_{2,info}, \dots, Q_{i,info}, \dots\}$ 
```

4: 对每个分区内部进行排序, 以 $Q_{i,info}$ 分区为例。

按广度优先遍历作业 i 对应 DG 图的边, 位于同一层的所有边, 其上待操作物料属于同一工序, 按照层数的大小, 从小到大为工序号 k 赋值。

找到 $Q_{i,info}$ 队列内各边 E_k 分别对应的工序号 k , 按照 k 对分区 $Q_{i,info}$ 内部进行排序, 若存在工序相同的情况, 则按照加工时间 R (实体)进行排序。若实体为物流实体, 执行 4, 物流实体可搬运出发地和目的地均相同的多个物料; 否则, 排序结束, 返回排序后的队列 Q_{info1} 。

5: 对 Q_{info1} 队列再进行排序

5.1: 取出队列 Q_{info1} 中的边 E_j , 得到其出发地 T_j 、目的地 T_k , 接着找出队列中所有出发地为 T_j 且目的地为 T_k 的边, 并将其组成新的队列 $\{E_{j_1}, E_{j_2}, \dots, E_{j_n}\}$ 。

5.2: 对该队列分别按照作业 i 、工序 k 、运输时间 R (实体)再次进行排序, 得到排序后的队列 $\{E_{j_1}, E_{j_2}, \dots, E_{j_n}, \dots, E_{j_m}\}$ 。

5.3: 将队列 $\{E_{j_1}, E_{j_2}, \dots, E_{j_n}, \dots, E_{j_m}\}$ 添加到队列 Q_{info2} 中。

5.4: Q_{info1} 队列内的边取出完毕, 执行 6, 否则执行 5.1。

6: 排序结束, 返回排序后的队列 Q_{info2} 。

3 生产物流模型仿真运行

3.1 生产物流 EFSM-DEVS 的模型转换

状态机模型能清楚地描述实体的状态转换规律, 用户使用状态机模型进行建模时方便且简单, 但状态机模型不易转换成计算机可执行的模型。而 DEVS 模型能方便地转换为被计算机执行的模型^[16], 且目前市场有较多开源且执行速度快的 DEVS 引擎, 因此, 本文将建立的生产物流 EFSM 模型自动映射为 DEVS 模型, 可避免建模时复杂不直观缺点, 同时又便于基于 DEVS 引擎实现仿真的高效运行。

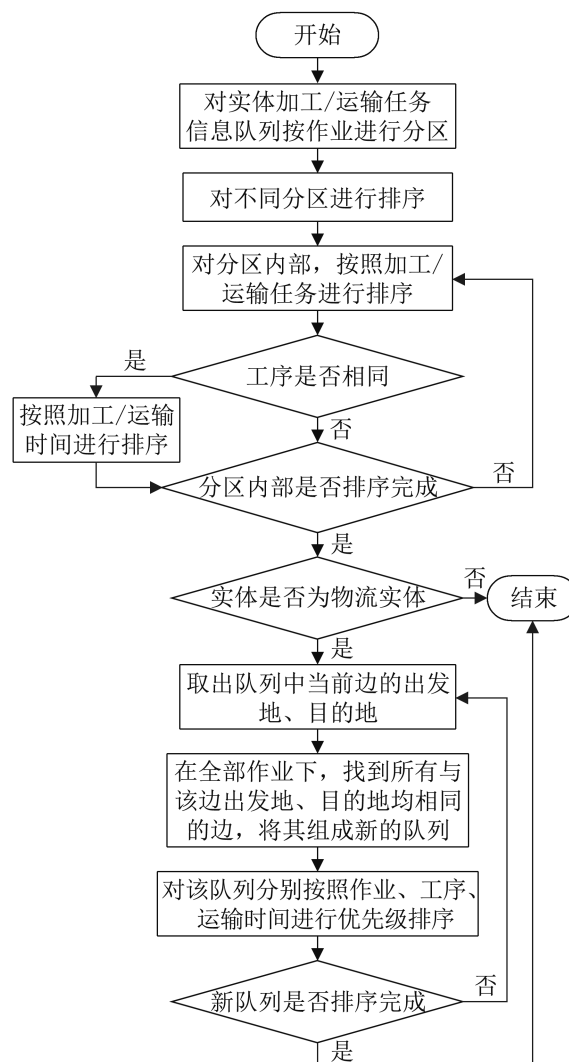


图 4 优先策略下某实体的加工/运输任务排序算法流程图
Fig. 4 Flowchart of the processing/transportation task sorting algorithm for an entity with its priority policy

单 EFSM 到 DEVS 原子模型的映射关系为

$$(S, s_0, V, I, O, T) \rightarrow \langle X, Y, S, ta, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda \rangle$$

限制 DEVS 模型中的输入集 X , 输出集 Y , 状态集 S 为有限集合, 则可以与 EFSM 中的输入集合 I , 输出集合 O , 状态集合 S 一一对应。时间推进函数中 ta 的取值与 EFSM 模型中变迁 t_0 内物料加工/运输时间对应; 内部转移函数 δ_{int} 所做动作与 EFSM 模型中变迁集合 T 中各变迁上动作、状态/变量变化相对应; 外部转移函数 δ_{ext} 所做动作与 EFSM 模型中输入集合 I 、内部变量 V 相关, 通过输入集合 I 的值更新内部变量 V 的值; 输出函

数 λ 输出的变量与 EFSM 模型中输出集合 O 相对应。

3.2 生产物流实体 DEVS 耦合模型

本文以图 3 作业描述层中的作业 i 和作业 $i+1$ 为例，介绍包含多作业的 DEVS 模型耦合关系，如图 5 所示。

图 5 中任意 2 个内部成员模型之间通过信号传递物料信息，当前内部成员模型中物料的离开，对应于与其相连接的内部成员模型中物料的到达，用 S_i 记录这 2 个内部成员模型所传递的信号集合，集合含有一个或多个信号，每个信号对应一个物料元素 $M_{i,j}$ ，其中，物料编码 $M_{i,j}$ 由 2.2 小节(1)的物料编码算法得到，如物流设备 2 与普通机器 1 之间的信号 $S_{12} = \{M_{i,j+1}, M_{i+1,k}\}$ 。

3.3 仿真引擎

常见的仿真方法有事件调度法、活动扫描法、进程交互法等，但当模型比较复杂时，这些传统的方法仿真效率较低^[17]。而经转换后的 DEVS 模型执行可以通过 DEVS 引擎完成，目前，常用的 DEVS 引擎有 ADEVS、PythonPDEVES 等，其中，ADEVS 中的共享内存机制适用于解决各状态机并行运行的问题，且在各 DEVS 实现工具中具有最

快的运算速率，故本文采用 ADEVS 作为仿真引擎完成智能车间生产物流仿真运行。

4 案例分析

本文以某智能制造车间为背景进行建模仿真展示，车间含有普通机器、AGV、机械臂、货堆等资源，以下是该车间的生产过程仿真的案例应用。

4.1 智能制造车间布局

车间整体布局如图 6 所示，从左到右依次为大产线、检测中心、小产线和车间货堆。其中，小产线含有 1 台普通机器、1 个机械臂和 1 个货堆；检测中心含有 1 台检测机器和 1 个货堆；大产线含有 3 台普通机器、1 个机械臂、1 个货堆；车间货堆用来存放原料和成品，车间中含有 1 辆智能运输小车 AGV，负责按照路径在小产线、检测中心、大产线、车间货堆这 4 个区域之间对原料、在制品、产品进行运输。小产线、检测中心、大产线中各机器编号及名称如表 1 所示。

4.2 车间多作业生产物流建模

假设该智能制造车间中主要有 3 种作业事务，各作业工艺路线及物流如图 7 所示。

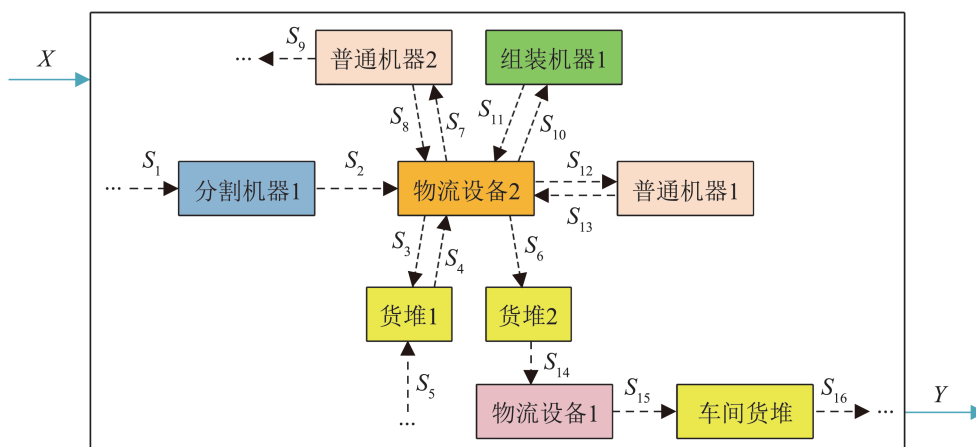


图 5 生产物流建模 DEVS 模型耦合关系示例图

Fig. 5 Example diagram of production logistics modeling DEVS model coupling relationship



图 6 车间布局图

Fig. 6 Schematic diagram of workshop layout

表 1 车间各普通机器编号及名称

Table 1 Number and name of each machine in the workshop		
大产线	小产线	检测中心
1: 铣床、2: 车床、3: 磨床	4: 钻床	5: 检测机

图 7 将 3 个作业的 DG 图合并展示, 各作业发生器 Source 产生的原料放在车间货堆上, AGV 完成货堆间物料搬运; 货堆与生产实体、生产实体

与生产实体之间通过机械臂完成物料搬运; 货堆 2 与检测机之间的物料由人完成, 建模时采用直接连接。图中作业 1、作业 2、作业 3 中各工序的加工先后顺序分别用红色、绿色、蓝色的编号表示, 如作业 1 的工艺流程为先在铣床上加工, 接着在车床上, 最后在磨床上进行加工。

各作业发生器 Source 属性信息如表 2 所示。

各作业下生产和物流实体的建模信息如表 3 所示。

车间内优先级规则设置如表 4 所示。

本文借鉴 Flexsim 强大的三维显示功能, 基于 Unity3D 技术实现了智能车间生产物流建模与仿真软件, 以物流实体 AGV 组件参数设置为例, 软件界面如图 8 所示。

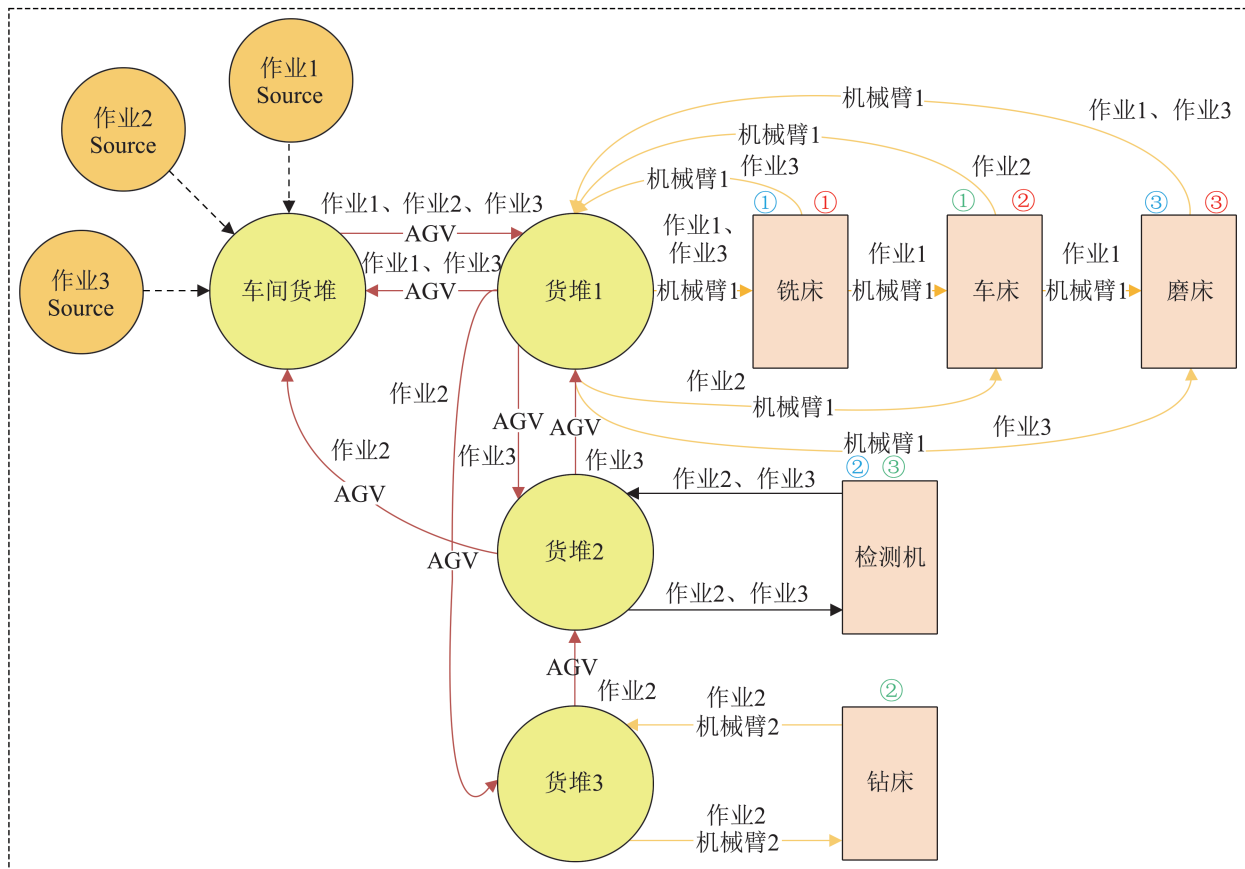


图 7 各作业工艺路线及物流图

Fig. 7 Each assignment process route and logistics map

表2 各作业发生器 Source 属性信息
Table 2 Source property information for each assignment generator

发生器	到达时间间隔/min		每批到达量/个	最大量/个
	Gaussrand 分布	Binomial 分布		
作业 1	(0.5, 0.75)	(5, 0.75)		100
作业 2	7	3		100
作业 3	8	5		100

表3 各作业具体信息
Table 3 Specific information for each assignment

作业	节点/线	上货/上料	下货/下料	加工/运输
		时间/min	时间/min	时间/min
1	铣床	0	0	Poission(2)
	车床	0	0	3
	磨床	0	0	6
	机械臂 1	1	1	0
	AGV	1	1	5
2	车床	0	0	5
	钻床	0	0	6
	检测机	0	0	6
	机械臂 1	1	1	0
	机械臂 2	1	1	0
3	AGV	1	1	5
	铣床	0	0	4
	检测机	0	0	6
	磨床	0	0	7
	机械臂 1	1	1	0
	AGV	1	1	5

表4 优先级规则设置
Table 4 Priority rule setting

优先级策略	优先级具体设置
作业优先级	作业 1>作业 2>作业 3
工序优先级	前序优先
效率优先级	短时间优先

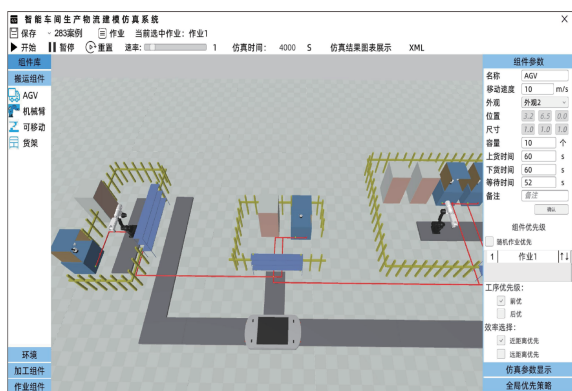


图8 物流实体 AGV 参数设置软件界面
Fig. 8 Logistics entity AGV parameter setting software interface

4.3 案例运行结果及分析

该仿真案例用户可以观察各生产/物流实体的利用率、各生产/物流实体状态占比等统计决策信息。

各作业原料均加工完成后，智能车间内各生产/物流实体的利用率如图 9 所示，从图 9 可以看出铣床、机械臂 1、AGV 的利用率较高，磨床、钻床、机械臂 2 的利用率较低。

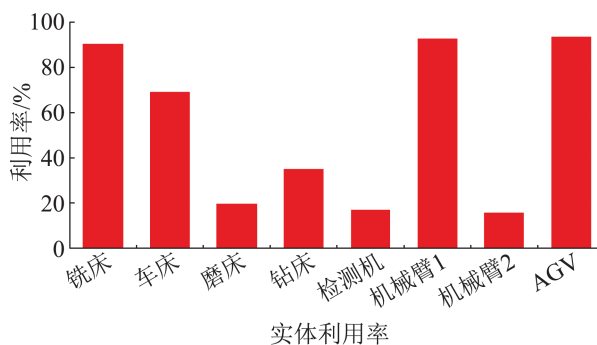


图9 生产/物流实体利用率
Fig. 9 Production/Logistics Entity utilization

图 9 中 AGV 的利用率是统计小车处于“忙碌”状态下的时间占总时间的比率，由于小车“忙碌”状态又细分为发车、等待、上货、运输、下货这 5 个子状态，AGV 在不同子状态下的时间占比如图 10 所示，从图 10 可以看出 AGV 用于上货的时间占比较多，而等待的时间占比较少。

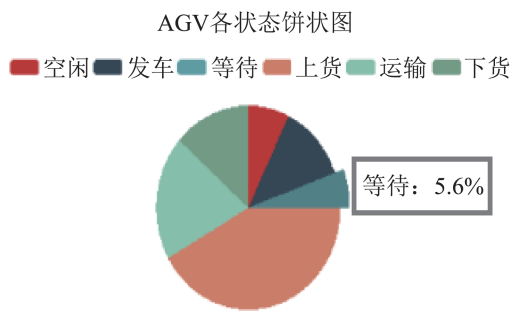


图 10 AGV 各状态饼状图
Fig. 10 Pie chart for each state of AGV

为避免出现 AGV 运输时，即使每次装载物料数量较少仍要在两地之间频繁运输的情况，建模时考虑了 AGV 等待时间，合理设置该参数可降低

AGV 总运输时间。同时, AGV 容量大小也与运输次数有关, 因此, 借助本文软件, 可通过仿真结果观察 AGV 容量和 AGV 等待时间与 AGV 总运输时间的关系, 从而支持用户决策。本案例下, 本文统计了 AGV 等待时间分别为 0.5、1、2 min, 且 AGV 容量分别为 10、20、30、40、50 个时 AGV 总运输时间的情况, 如图 11 所示。

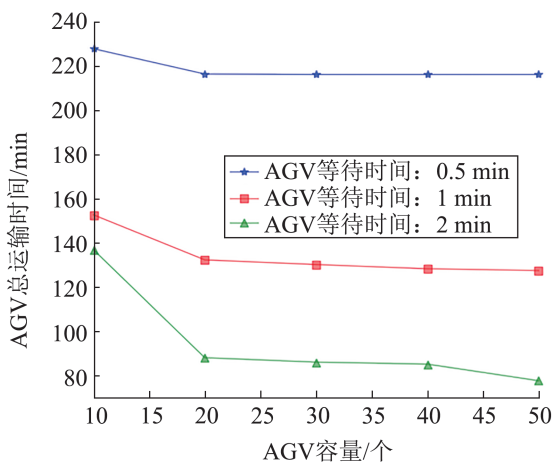


图 11 AGV 总运输时间变化关系图

Fig. 11 Diagram of relationship between total transportation time of AGV

由图 11 中可知, 一定等待时间下, 随着 AGV 容量的增大, AGV 每次可搬运的物料增多, AGV 总运输时间均呈变短趋势; AGV 容量一定时, AGV 等待时间越长, AGV 总运输时间均会越短。

为了验证本文所提方法的正确性, 在 AnyLogic 仿真软件中对相同的案例进行建模仿真, 从实体利用率、各作业完成时间、实体状态变化等方面进行了对比, 其中, 各实体利用率如图 12 所示。

各实体利用率对比如表 5 所示, 由于随机因素的存在, 存在一定的相对误差, 但均小于 5%。基于第 1 节与 3.3 节所介绍优势与仿真结果对比分析, 可以验证本文所提出的一整套建模仿真方法除了具有适应性广、灵活性强的特点, 同时在仿真精度上与 AnyLogic 相当。

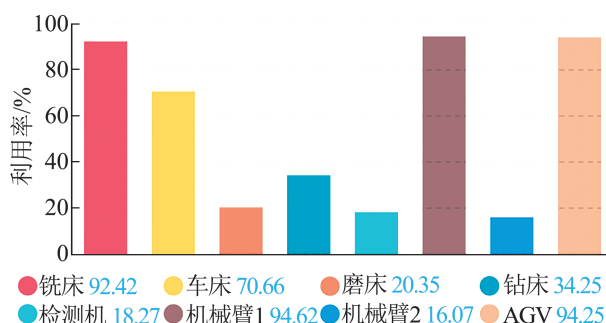


图 12 AnyLogic 下生产/物流实体利用率图

Fig. 12 Utilization chart of production/logistics entities under AnyLogic

表 5 设备利用率对比

设备	本文	AnyLogic	相对误差
铣床	90.25	92.42	2.35
车床	68.53	70.66	3.01
磨床	19.56	20.35	3.88
钻床	32.58	34.25	4.88
检测机	17.55	18.27	3.94
机械臂 1	93.43	94.62	1.26
机械臂 2	15.74	16.07	2.05
AGV	92.76	94.25	1.58

5 结论

目前, 智能车间生产物流建模与仿真研究中, 存在车间元素缺乏组件化建模思想、车间缺乏多作业建模等问题, 为此, 本文在提出智能车间实体元素分类的基础上, 提出了生产物流等实体的 EFSM 组件模型。阐述了智能车间多作业生产物流建模过程, 以及基于建模信息实例化生产/物流 EFSM 组件的方法。通过 EFSM 到 DEVS 模型的转换完成了基于 DEVS 引擎的仿真运行。最后, 以某智能车间为案例进行建模仿真展示, 并对仿真结果进行了分析, 通过与商业软件 AnyLogic 的仿真结果进行对比, 验证了本文所提建模仿真方法的正确性、有效性。同时, 案例表明, 使用本文方法所建立的智能车间多作业生产物流模型更符合智能车间实际状况, 适用性更广, 所得到的仿真结果能支持生产物流决策安排。基于组件化建

模及实例化的思想所构建的软件具有很好的扩展性,便于后续软件的升级开发。另外,软件采用Unity3D实现的可视化建模及仿真运行模式直观性更好。后续研究可考虑软件支持更多的建模元素(如传送带、任务分配器)及更多类型的工序定义(如工序之间除了逻辑约束还有时延约束)等。

参考文献:

- [1] 陈琦. 智能制造正当时: 杜尔为中国重汽打造高水平涂装车间[J]. 汽车与配件, 2021(21): 84-85.
- [2] 杜万全. 图书印刷智能制造生产线的建设[J]. 印刷经理人, 2022(1): 76-77.
- [3] 胡小荣. 基于Unity3D的全自动筒子纱印染生产线仿真研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
Hu Xiaorong. Simulation Research on Automatic Bobbin Yarn Printing and Dyeing Production Line Based on Unity3D[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [4] 刘名远, 谢家翔, 吴豪, 等. 基于有限状态机的车间逻辑建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 853-861.
Liu Mingyuan, Xie Jiayang, Wu Hao, et al. Research on Workshop Logic Modeling and Simulation Based on Finite State Machine[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 853-861.
- [5] 周韶武, 胡晓兵, 彭正超, 等. 基于Petri网和Witness的SMT生产物流系统仿真及优化[J]. 现代制造工程, 2020(11): 99-105.
Zhou Shaowu, Hu Xiaobing, Peng Zhengchao, et al. Modeling and Simulation Optimization of SMT Production Logistics System Based on Petri Net and Witness[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(11): 99-105.
- [6] 李任江, 李玉晨. 面向对象的赋时着色Petri网在FMS中的建模与仿真[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 36-39.
Li Renjiang, Li Yuchen. Modeling and Analysis of Object Oriented Timed Colored Petri Net in Flexible Manufacturing System[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(10): 36-39.
- [7] 范熙. 递阶流水线整体生产计划的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Fan Xi. Study for Integrated Production Planning of Hierarchical Flow Line[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [8] 程咏喜. 基于上、下游生产线的分布式仿真软件的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2005.
Cheng Yongxi. Research and Implementation of Distributed Simulation Software Based on Multiple Product Lines[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [9] 王海涛. 基于离散事件的排故过程建模与仿真方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
Wang Haitao. Research on Modeling and Simulation of Troubleshooting Process Based on Discrete Event[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [10] 侯宇戡. 复杂装配系统瞬态行为建模方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
Hou Yukan. Research on Modeling of System Behavior of Complex Assembly Lines During Transients[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [11] Petrenko A, Boroday S, Groz R. Confirming Configurations in EFSM Testing[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2004, 30(1): 29-42.
- [12] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存. "新基建"赋能智能+时代工业互联网——工业互联网2.0[J]. 中国经贸导刊, 2020(14): 31-34.
- [13] 方磊, 李德宝, 唐火红, 等. 数字化车间生产状态实时监测系统的研究与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 117-120, 124.
Fang Lei, Li Debao, Tang Huohong, et al. Research and Realization of Real-time Monitoring System for Digital Factory Status[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(12): 117-120, 124.
- [14] 党少杰. Job Shop作业车间多智能配送单元物料配送策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Dang Shaojie. Research on Material Distribution Strategy of Multi Intelligent Distribution Unit in Job Shop Workshop[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [15] 付宜利, 田立中, 董正卫, 等. 装配关系的有向图表达方法研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(2): 149-153.
Fu Yili, Tian Lizhong, Dong Zhengwei, et al. Representation of Assembly Relations by Directional Assembly Connection Graph[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(2): 149-153.
- [16] 郑丽钰. 基于DEVS的石化多层次物流模型建模和仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Zheng Liyu. Research on Modeling and Simulation of Petrochemical Multi-level Material Flow Model Based on DEVS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [17] 苏春. 制造系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 161-169.
Su Chun. Modeling and Simulation for Manufacturing System[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 161-169.