

# 订单驱动的服装供应链生产自动化协同Petri网模型

徐月梅\*, 董平军

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2023年11月25日; 发布日期: 2024年1月11日

## 摘要

针对订单驱动服装供应链生产协同的必要性、复杂性和人工交互工作占比高的现状, 提出基于PDCA管理思想的服装供应链生产协同过程概念框架以及不同供应链协同主体之间的信息协同交互协议机制, 运用着色Petri网建模工具CPN Tools平台对上述协同过程构建了包括计划协同、执行协同以及异常事件协同的自动化Petri网模型。最后对构建的Petri网模型进行了状态空间验证, 状态空间分析报告显示所构建Petri网模型具有可达性、有界性、活性, 验证了协同Petri网的可靠性以及生产自动化协同系统的可行性。本研究成果为当前服装供应链生产核心企业数字化深度转型实践提供理论参考。

## 关键词

订单驱动, 服装供应链, 着色Petri网, 自动化协同

# An Order-Driven Automated Production Collaborative Petri Net Model in Garment Supply Chain

Yuemei Xu\*, Pingjun Dong

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 25<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In view of the necessity, complexity, and high proportion of human interaction in order-driven production collaboration of the garment supply chain, our article firstly proposed a conceptual

\*通讯作者。

framework for the garment supply chain collaborative production process based on PDCA management thought, and then gave the interaction protocol mechanisms about information collaboration between different supply chain collaborative entities. Based on the above collaborative processes, an automated Petri net model including planning collaboration, execution collaboration, and exceptional event collaboration was constructed by CPN Tools, a colored Petri net modeling tool platform. Finally, the state space validation of the constructed Petri net model was carried out. The state space analysis report shows that the constructed Petri net model has reachability properties, boundedness properties, and liveness properties, verifying the reliability of the collaborative Petri net and the feasibility of an automated collaborative system for production. The research results provide theoretical reference for the current in-depth digital transformation practices of core enterprises in the garment supply chain production.

## Keywords

Order-Driven, Garment Supply Chain, Colored Petri Nets, Automated Collaboration

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

过去几十年生产和贸易的全球化进程使供应链协同能力成为了企业核心竞争力的重要组成部分[1], 随着物联网、云计算、大数据、物理信息系统(CPS)和数字孪生(DT)等新一代信息通信技术的崛起, 全球范围内进入了向自动化和智能化转型新时代[2], 如何利用新技术赋能企业的供应链协同, 必将是企业取得新竞争优势的发力点之一。具有时尚易逝性特点的服装行业相对准入门槛低、全球化和专业分工程度高[3] [4]。服装供应链整体运作过程中, 品牌商或经销商基于市场预测计划产生成衣订单下达给服装制造商, 服装制造商(OEM 或 ODM 方式)按照与品牌商或经销商的技术与商务合同组织生产。基于订单驱动的供应链协同生产是服装制造商当下的主要生产驱动方式。

在订单驱动生产的服装供应链中, 服装制造商处于核心企业地位, 日常管理维护一个数量众多且包括纱线供应商、坯布织造商、印染商等在内的协作供应商池, 同时服务于多个品牌商或贸易经销商。当服装制造商从品牌商或经销商接到新订单后对订单进行技术分解, 依据技术分解出的子任务从供应商池中选择合适企业以协议合同的方式组成一个临时的协同生产网络。服装生产订单往往工期紧, 生产工艺环节多, 需要大量复杂的协同工作。虽然大部分核心制造企业实现了以企业资源计划系统(ERP)、制造执行系统(MES)等承担企业内部生产协同和资源管理的信息化运营[5], 但订单驱动的跨企业生产协同, 主要依靠面对面、电话、邮件、微信(群)等人工或半人工的离散协同方式。这种离散的大量人工承担的生产协同, 在高度竞争、高度复杂、高度不确定的市场环境下极易出现生产状态异常、传递信息丢失、传输信息延迟等情况, 导致供应链中的信息传递效率低[6], 从而造成订单延误, 违约成本增加, 一些稍大规模的服装制造企业因生产协同不利造成质量问题和订单延期问题的经济损失每年甚至多达数千万元。因此构建一个能够及时、准确、完整地实现供应链多主体并发生产协同的自动化信息系统具有必要性。

着色 Petri 网具有逻辑严谨的图形描述和数学分析能力[7] [8], 其层次化结构、托肯值和颜色集定义、弧函数等特性的描述等又使之能够支持大型并发控制系统的建模[9] [10], 因此本文将从服装制造企业视角, 运用着色 Petri 网建模技术对服装供应链中的生产协同进行一体化模型, 探寻建设服装供应链企业间生产自动化协同系统的路径。文章的架构安排如下: 1) 设计服装供应链协同系统的整体框架: 协同主体、

协同机制等；2) 构建订单驱动的协同 Petri 网模型；3) 对 Petri 网模型进行可靠性检验；4) 总结研究的结论与局限。

## 2. 服装供应链生产协同机制分析与设计

### 2.1. 服装供应链协同主体

订单驱动下服装供应链生产过程是纱线采购与生产、辅料生产、坯布织造、面料印染、成衣缝制等环节之间的协同过程[11]。承接服装生产订单核心企业负责组织协同生产，参与生产协同的各类服务商包括：纱线供应商、辅料供应商、坯布或针织织造商及印染商等。核心企业与各类服务商的协同关系如图 1 所示。

#### 2.1.1. 决策机构

决策机构由核心企业承担，其功能是将订单分解成若干个子订单，生成各个子订单的生产计划；向协同中心发起子订单计划协商指令；为每个子订单选择最满意的服务商资源；处理来自协同中心提供的生产异常信息。

#### 2.1.2. 协同中心

协同中心也由核心企业承担，负责资源的协调与分配，确保各子订单生产过程的顺利进行。协同中心的功能是接收来自决策机构提供的各子订单生产计划，并与服务商进行计划协商；对各服务商的生产或运输状态信息做出调度；将进度异常信息反馈给决策机构。

#### 2.1.3. 协同服务商

协同服务商包括上文提到的除核心企业以外的参与供应链生产协同的企业，在服装供应链订单生产过程中，各服务商的主要任务是接收来自协同中心提供的子订单计划信息，对计划信息做出评价反馈；向协同中心反馈实时的生产状态信息或运输状态信息；按照协同中心给予的工作指令调整生产节奏等。

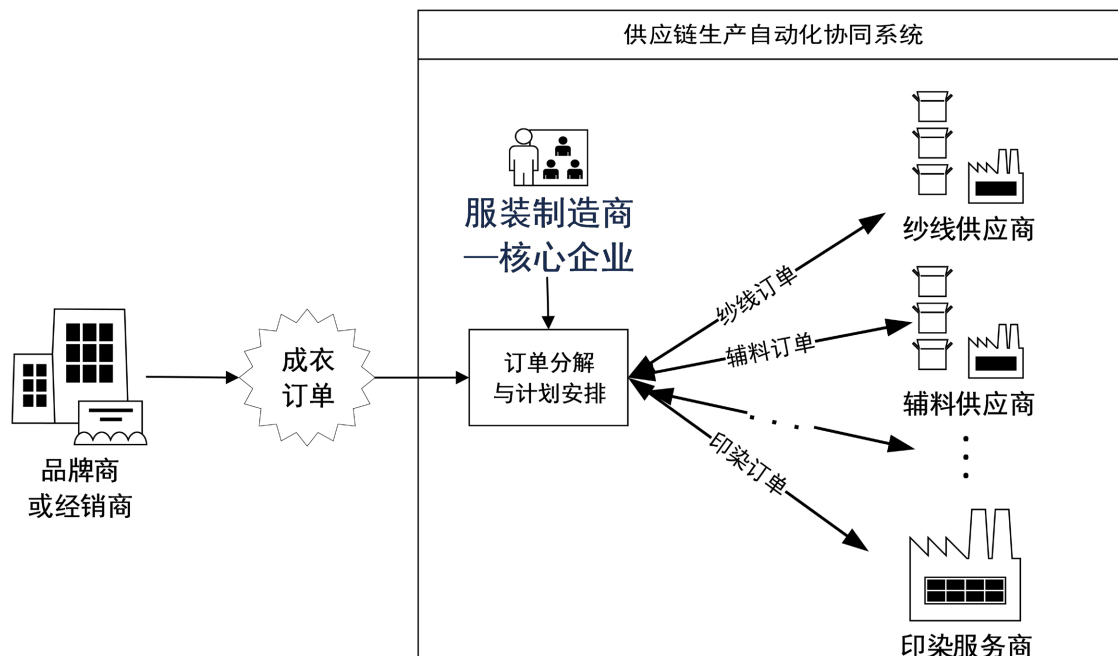


Figure 1. Collaborative process framework for garment supply chain

图 1. 服装供应链生产协同过程框架

## 2.2. 服装供应链生产协同机制设计

订单驱动的服装供应链生产协同过程按照 Plan (计划)、Do (实施)、Check (检查)、Action (改进)的管理思想进行划分, 在此基础上, 设计包含计划协同协议机制(P)、执行协同协议机制(D)以及异常处理协议机制(C 和 A)的服装供应链协同机制。

### 2.2.1. 信息结构定义

1) 征询包(Inquiry Package): 核心企业接到订单后, 向潜在服务商发出参与订单生产要约的信息包, 信息包包含了商务部分信息和技术部分信息, 信息结构如表 1 所示。

**Table 1.** Composition of inquiry package information structure

**表 1.** 征询包信息结构组成

包含类别	信息结构要素
商务部分	子订单商务信息 = {编号(Id); 类别(name); 数量(number); 交货时间(min_Time, max_Time); 认证证书(certificate)}
技术部分	纱线 Des = {纱支数、纱线材质、纱线品质要求、纱线颜色}
	坯布 Des = {门幅、克重、坯布材质、工艺要求、织物色号}
	印染 Des = {门幅、克重、工艺要求、印花色号}
	辅料 Des = {辅料种类、辅料尺寸、辅料材质}
	成衣 Des = {尺码、款式、材质、工艺要求}

2) 应答包(Response Package): 各服务商收到子订单征询包后, 向协同中心回复的包含子订单报价、子订单执行时间等构成的信息包, 信息结构如表 2 所示。

**Table 2.** Composition of response package information structure

**表 2.** 应答包信息结构组成

名称	含义
Name	子订单类别
ServiceProvider	服务商
Price	服务商的服务报价
Minduration	服务商提供的子订单完成最乐观时间
Produration	服务商提供的子订单完成最可能时间
Maxduration	服务商提供的子订单完成最悲观时间

3) 任务包(Task Package): 任务包是包含了子订单执行时间、执行服务商等要求的信息包, 信息结构见式 1。根据任务类型(字段 Class), 任务包分为初始任务包(Class = 1)和返修任务包(Class = 2), 其中初始任务包由核心企业决策机构发送给协同中心, 任务返修包由协同中心发送给执行服务商。

$$\{Id, Name, (Min\_Time, Max\_Time), Number, Des, ServiceProvider, Class\} \quad (1)$$

4) 状态包(Status Package): 在子订单执行过程中, 服务商向协同中心反馈的包含执行时间、执行质量等状况的信息包, 信息结构见式 2。

$$\{Id, Name, Node\_Id, DurationTime, HPNumber, ServiceProvider\} \quad (2)$$

其中: Node\_Id 为任务节点编号, DurationTime 为实际服务所用的时间, HPNumber 为通过质量检验的产品数量。

5) 异常包(ExceptionalPackage): 子订单出现进度异常后, 协同中心向核心企业决策机构发送的信息包, 信息结构见式 3:

$$\{Id, Name, Expdescription, Delaytime\} \quad (3)$$

其中: Expdescription 为进度异常原因描述, Delaytime 为延误天数。

### 2.2.2. 计划协同协议

计划协同协议过程见 Step1 到 Step5。

Step1: 服装订单分解后, 核心企业决策机构向协同中心发送每个子订单的征询包(Inquiry Package), 由协同中心与各个服务商进行计划的协商;

Step2: 各个服务商收到征询包后, 需要对征询包内容进行评估, 若可以接受征询包中有关子订单的执行要求, 则需要向协同中心发送应答包(Response Package); 若不能接受则无需回复协同中心发送的协商请求消息;

Step3: 令各个环节能够接受子订单的服务商数量为  $m$ , 当  $m \geq 1$  时, 协同中心进入 Step4; 当  $m = 0$  时, 表明服务商对子订单内容不满意, 此时协同中心将返回 step1;

Step4: 协同中心将各服务商提供的信息进行汇总, 发送给决策机构;

Step5: 收到协同中心发送的各环节服务商回复信息后, 核心企业决策机构需要依据服务商的服务报价、服务完成所需要的时间以及订单的交货期等进行评估与选择, 并将反映评估结果的初始任务包(Task Package)发送给协同中心, 由协同中心通知选中的服务商。

### 2.2.3. 执行协同协议

服装供应链中每个子订单环节都包含了若干任务节点, 每个节点的状态信息都需要向协同中心进行反馈与共享, 协议过程见 Step1 到 Step2。

Step1: 各个服务商反馈状态包(Status Package)后, 协同中心依据状态包中通过质量检验的产品数量、任务节点实际用时对状态信息做出评价;

Step2: 若通过质量检验的产品数量等于订单任务量, 且任务节点实际用时在要求的时间窗内, 则协同中心向当前执行服务商发出下一步指令或向下一个订单服务商发出生产准备指令;

若通过质量检验的产品数量或任务节点生产时间出现异常, 则协同中心需要执行异常处理协议机制。

### 2.2.4. 异常处理协议

对于执行协同过程中出现的质量异常或进度异常等异常信息, 协议过程见 Step1 到 Step3。

Step1: 若通过质量检验的产品数量小于订单要求量, 则协同中心向当前执行服务商发送返修任务包(Task Package), 若任务节点生产时间超出时间窗, 则表明进度出现异常, 此时协同中心将判断延误的程度, 向核心企业决策机构发送异常包(Exceptional Package);

Step2: 服务商收到任务返修包后, 组织服装产品的整修或重新生产, 决策机构收到异常包后, 调整未开始生产的子订单计划, 并将调整后的子订单初始任务包发送给协同中心。

Step3: 协同中心收到任务包后, 与已确认的服务商再次进行计划协商, 因协商协议机制逻辑同 2.2.2., 故不再重复说明。

## 3. 服装供应链生产协同 Petri 网模型构建

基于上文分析并设计的服装供应链生产协同机制, 构建生产协同着色 Petri 网模型。着色 Petri 网作为一种高级 Petri 网, 是由普通 Petri 网发展而来。与普通 Petri 网相比, 着色 Petri 网的特点一是通过增设库所颜色集, 可实现库所托肯的类型定义, 二是通过设置弧以及变迁的属性可控制系统的发生, 三是可

实现层次化建模, 因此大大提高了系统模型的表达能力[12] [13]。

### 3.1. 生产协同层次着色 Petri 网定义

基于 Petri 网以及着色 Petri 网理论[14] [15], 给出服装供应链生产协同层次着色 Petri 网定义, 定义如下:

服装供应链生产协同层次着色 Petri 网( $GHCPN$ )由四元组组成,  $GHCPN = \{S, SMF, PSF, FS\}$ , 其中  $S$  是所有模块集合;  $SMF$  是将每个替代变迁映射到与其相关  $S$  模块中的子模块函数;  $PSF$  是为每个替代变迁分配套接联系(port-socket relation)的端口连接函数;  $FS$  是非空融合集合。

对于每一个模块  $S$ ,  $S = \left( (P^s, T^s, A^s, \Sigma^s, V^s, C^s, G^s, E^s, I^s), T_{sub}^s, P_{port}^s, PT^s \right)$ , 满足  $(P^{s_1} \cup T^{s_1}) \cap (P^{s_2} \cup T^{s_2}) = \emptyset$ ,  $s_1, s_2 \in S$  且  $s_1 \neq s_2$ , 式中:

1)  $P^s$  是库所有有限集合,  $P^s = \{PS, PM\}$ ,  $PS$  是服装供应链订单生产过程中的状态库所;  $PM$  是服装供应链订单生产所需要的资源库所, 所有库所在 Petri 网模型中用椭圆形或双椭圆形表示;

2)  $T^s$  是变迁有限集合, 满足  $P^s \cup T^s = \emptyset$ ,  $T^s = \{TA, TL\}$ ,  $TA$  是服装供应链订单生产变迁,  $TL$  是订单生产状态协调变迁, 所有变迁在 Petri 网模型中用方框形或双方框形表示;

3)  $A^s$  是有向弧集合, 满足  $A^s \in P^s \times T^s \cup T^s \times P^s$ 。有向弧连接库所与变迁, 反映服装供应链生产协同信息流动方向, 在 Petri 网模型中用图形箭头表示;

4)  $\Sigma^s$  是有限非空颜色集类型的集合;

5)  $V^s$  是变量集合,  $type[V^s] \in \Sigma^s$ , 即每个变量类型都有一个与之匹配的颜色集;

6)  $C^s$  是颜色集函数, 为每个库所分配一个颜色集, 用来指定服装供应链生产协同 Petri 网库所包含的托肯类型和数量;

7)  $G^s$  是守卫函数, 用来控制生产变迁或协调变迁的发生,  $type[G(t)^s] = Bool = \{True, False\}$ , 即守卫函数的值返回的是一个布尔值。当布尔值为 *True*, 服装供应链生产协同 Petri 网变迁能够发生, 反之不能发生;

8)  $E^s$  是弧表达式集合, 返回的是库所  $p^s$  上颜色集的多集形式, 对于  $(t^s, p^s) \in A^s$ , 满足  $Type[E(t^s, p^s)] = C^s(p^s)_{MS}$ , 同理对于  $(p^s, t^s) \in A^s$ , 满足  $Type[E(p^s, t^s)] = C^s(p^s)_{MS}$ ;

9)  $I^s$  是初始化标识, 反映了服装供应链生产协同系统中初始资源的分布情况, 定义为库所  $p^s$  上的多集类型,  $Type[I^s(p^s)] = C^s(p^s)_{MS}$ ;

10)  $T_{sub}^s$  是替代变迁集合, 满足  $T_{sub}^s \in T^s$ ;

11)  $P_{port}^s$  是端口库所集合, 满足  $P_{port}^s \in P^s$ ;

12)  $PT^s$  是为每一个端口库所分配对应端口类型的函数, 满足  $PT^s : P_{port}^s \rightarrow \{IN, OUT, I/O\}$ 。

### 3.2. 基于 CPNTools 的生产协同模型构建与展示

CPN Tools 作为着色 Petri 网的建模工具, 具有集建模、仿真、性能分析为一体的优势, 因此运用 CPN Tools 建模工具, 下面按照自顶到下的建模方式构建服装供应链生产协同模型。

#### 3.2.1. 顶层 Petri 网模型

如图 2 所示, 顶层模型界面中给出了决策机构模块、协同中心模块、协同服务商模块, 分别用替代变迁 DecisionMaker、CollabratorCenter、ServiceProvider 表示。具体来说, DecisionMaker 反映了订单分解、计划生成、接收异常以及计划优化的过程; CollabratorCenter 反映了协同中心与各服务商进行计划

协商的过程以及协同中心对来自各服务商的状态信息进行动态调度的过程; Service Provider 反映了各个服务商接收协同中心指令、进行订单生产的过程。图中涉及到的库所及其含义如表 3 所示, 下面介绍不同协同主体之间的计划协同、执行协同以及异常事件协同 Petri 网模型。

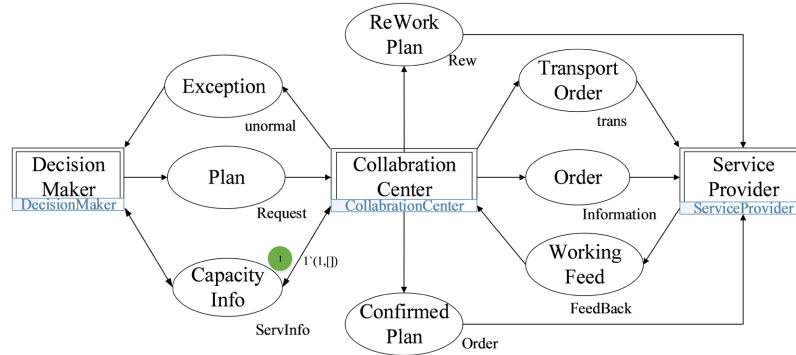


Figure 2. A top-level Petri net model for garment supply chain  
图 2. 服装供应链顶层 Petri 网模型

Table 3. Place description of the top-level Petri net in the garment supply chain  
表 3. 服装供应链顶层 Petri 网库所说明

库所名称	含义	库所名称	含义
Plan	服装子订单计划	Order	状态评估指令
CapacityInfo	服务商集成信息	WorkingFeed	节点工作反馈
Exception	节点异常信息	TransportOrder	运输指令
ConfirmedPlan	确认后的子订单计划	ReWorkPlan	节点返工计划

### 3.2.2. 计划协同 Petri 网模型

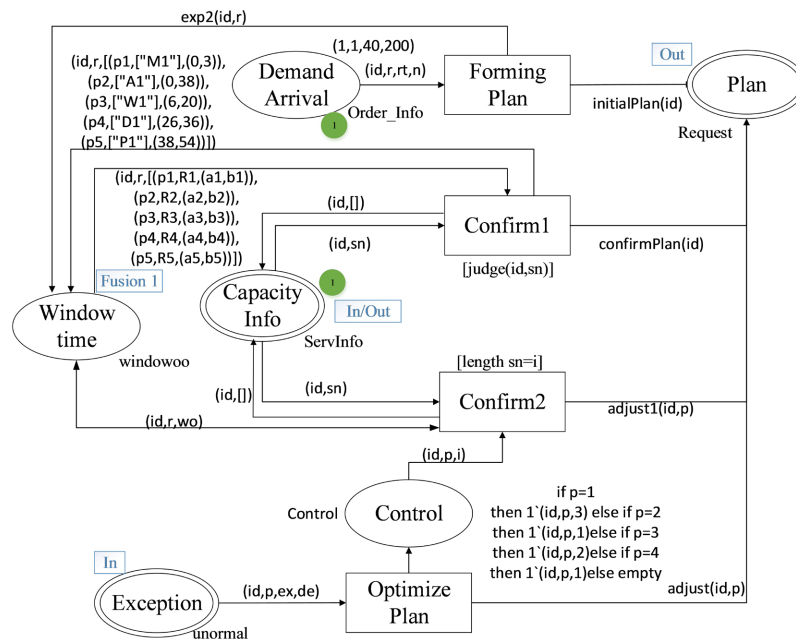


Figure 3. Petri net sub-model for the decision-making body in garment supply chain  
图 3. 服装供应链决策机构 Petri 网子模型

1) 服装订单分解与征询包发送

如图 3 所示, 核心企业决策机构收到库所 DemandArrival (服装订单信息)后, 组织订单的分解 (FormingPlan), 并将子订单征询包通过端口库所 Plan 发送给协同中心, 协同中心开始与各个服务商进行计划协商。

2) 开展计划协商

以纱线采购计划协商为例, 图 4 中变迁 SendPlan (发送订单计划)激发后若出现错误或消息丢失导致  $res = false$ , 订单计划发送端重新向库所 MaterialsSupplier (纱线供应商)发送纱线采购计划; 若  $res = true$  即计划发送成功, 库所 Reply 中增加纱线供应商对订单任务的应答包, 应答内容的差异决定了变迁 Merge (合并服务商的能力信息)、RePost (退回计划发送阶段)的使能与后续激发。各个环节变迁 Merge 发生后, 协同中心将各服务商信息保存到库所 CapacityInfo。

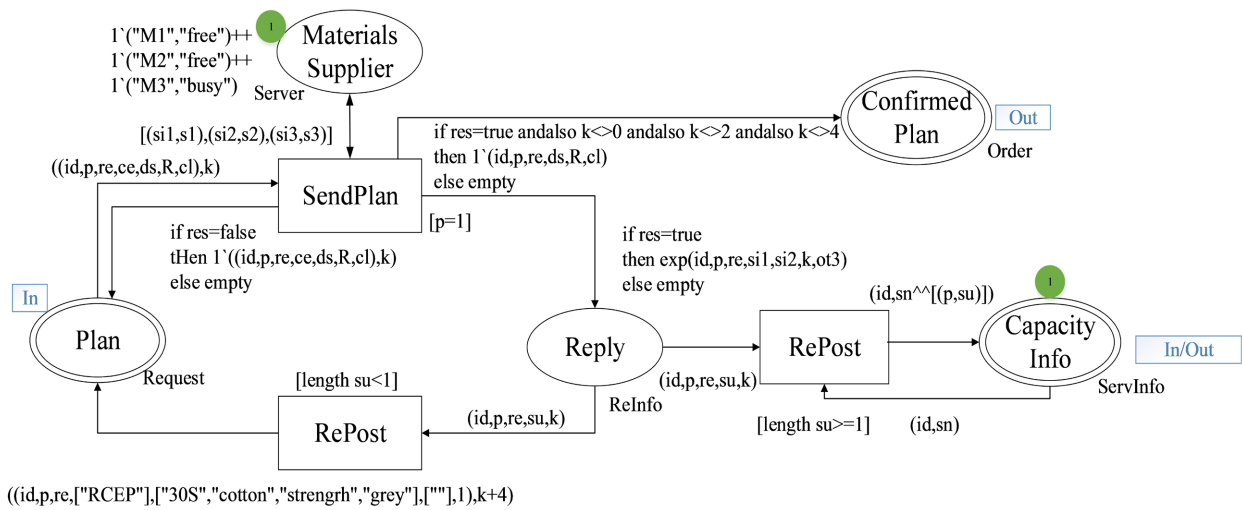


Figure 4. Petri net sub-model for plan negotiation in garment supply chain  
图 4. 服装供应链计划协商 Petri 网子模型

3) 订单任务包发送

库所 CapacityInfo 流入各服务商信息后, 图 3 中变迁 Confirm1 (计划确认)上的警卫函数若返回值为 true 时, 变迁执行, 核心企业决策机构将包含各个子订单的执行时间窗信息通过融合库所 Windowtime 共享给协同中心, 同时向端口库所 plan 发送初始任务包。协同中心收到任务包后, 再次执行图 4 中的变迁 SendPlan, 将订单任务通过端口库所 ConfirmedPlan 通知给各个服务商。

3.2.3. 执行协同 Petri 网模型

执行协同 Petri 网模型展示的是服装订单从采购纱线到缝制成衣的过程, 不同环节之间既有物流的联系, 又有信息流的联系, 限于篇幅此处以图 5 所示的坯布织造 Petri 网为例来进行说明, 表 4 给出了 Petri 网涉及的部分库所及变迁。

当库所 Materials、库所 ConfirmedPlan 以及库所 Order 中流入符合条件的托肯后, 变迁 TrailWeaving 绑定变量 ou 的值为 “Ready”, 此时变迁处于使能状态。变迁激发后, 向端口库所 WorkingFeed 加入托肯, 用来反映试织工艺是否可用于后续的批量织造过程。

若试织工艺不符合要求, 进入异常事件协同; 若试织工艺符合要求, 图 6 中变迁 Scheduling1 (批量生产前协同)发生, 端口库所 Order 生成试织工艺通过的消息, 此时图 5 中变迁 BatchWeaving 上的变



量 fe1 绑定值为“pass”，变迁可被激发，激发后生成库所 ClothToTransport，同时向库所 WorkingFeed 中加入反映批量织造结果的状态包。当状态包信息特征为质量合格，工期正常(qu = “hign”，gq <= b3)，此时图 6 中变迁 Scheduling2 (批量生产协同)发生，库所 Order 生成生产准时(ou = “finishedontime”)信息，库所 TransportOrder 中生成运输指令信息，两种信息到达图 5 界面后，变迁 TransportCloth 发生；当批量织造的质量不合格或工期不正常时，则进入异常协同模块。

坯布运输完成后，图 6 中变迁 Scheduling3 (运输协同)被激发，此时通过库所 Order 通知印染商做好印染准备。

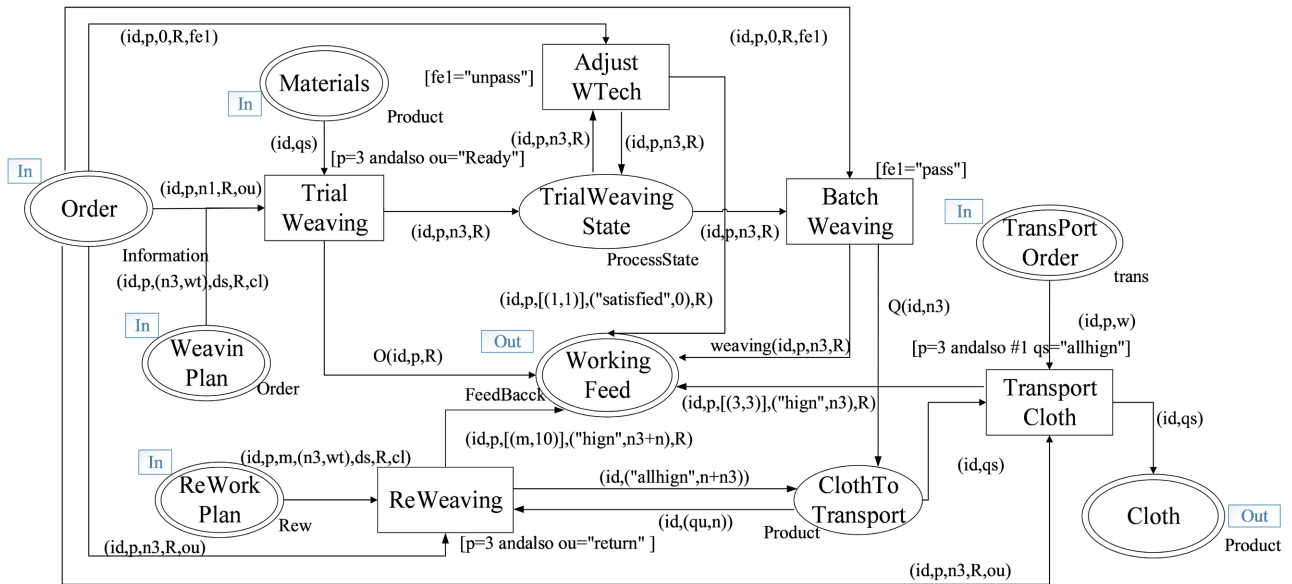


Figure 5. Petri net sub-model for grey fabric weaving in garment supply chain

图 5. 服装供应链坯布织造 Petri 网子模型

Table 4. Place and transition of grey fabric weaving Petri net in garment supply chain

表 4. 服装供应链坯布织造 Petri 网中的库所和变迁

库所名称	含义	变迁名称	含义
WeavingPlan	织造计划	TrailWeaving	坯布试织
Materials	纱线	AdjustWTech	调整试织工艺
TrialWeavingState	试织结束后状态	BatchWeaving	批量织造
ClothToTransport	待运输的坯布	ReWeaving	织造返工
Colth	运输完成后的坯布	TransportCloth	坯布运输

### 3.2.4. 异常事件协同 Petri 网模型

仍以坯布织造环节为例，如图 6 所示，当库所 WorkingFeed 中试织状态包表明试织工艺不符合要求时，变迁 Scheduling1 发生，端口库所 Order 生成试织工艺不通过的消息，此时图 5 中变迁 AdjustWTech 上的变量 fe1 绑定值为“unpass”，坯布将重新试织，直到符合要求。

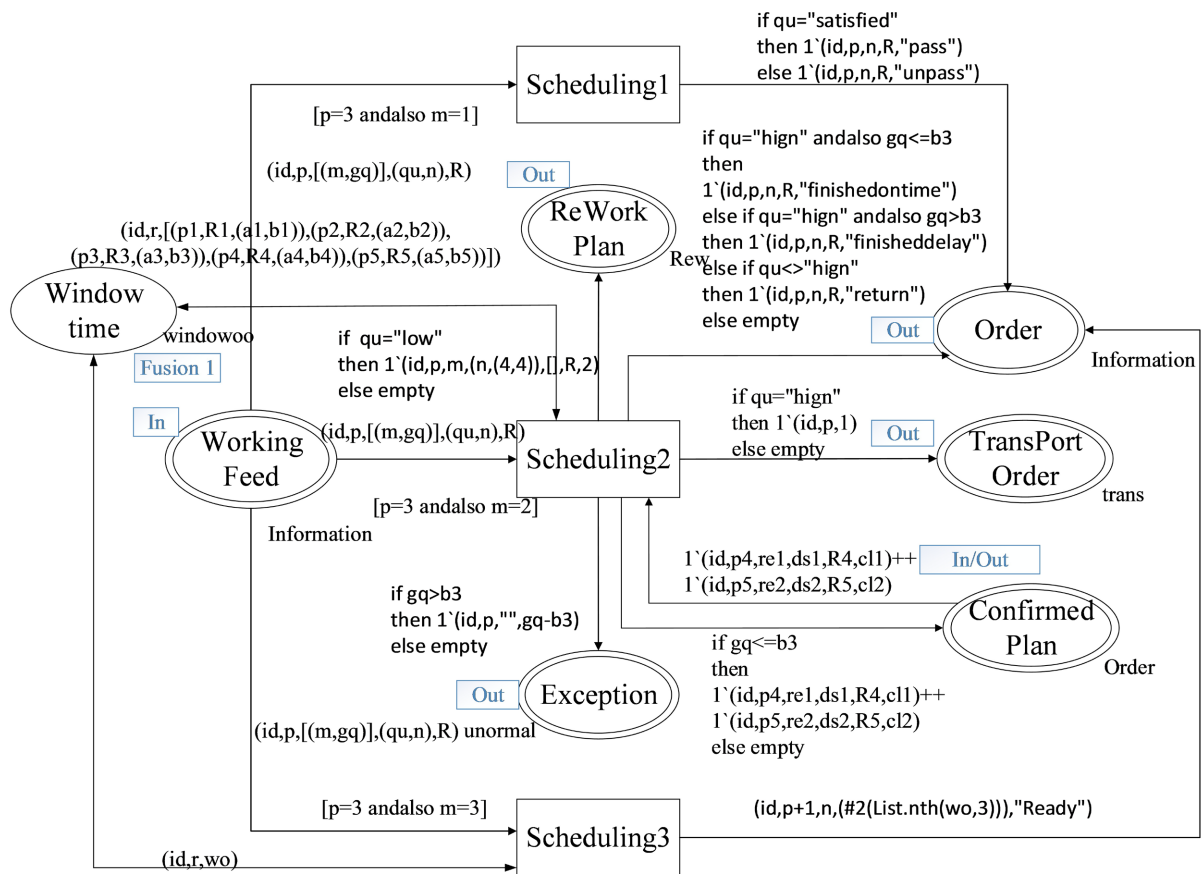
当库所 WorkingFeed 中的批量织造状态包出现了如表 5 所示的异常后，图 6 中变迁 Scheduling2 被激发。由于在异常类型 3 情形下，变迁 Scheduling2 发生后引起的托肯变化逻辑与前两种类型相同，因此下面只描述类型 1 和类型 2 下的异常事件协同过程。

**Table 5.** Types and descriptions of order production exception in garment supply chain  
**表 5.** 服装供应链订单生产异常类型及异常描述

异常类型	异常描述	托肯信息结构特征
类型 1	质量合格, 工期延误	qu = "hign", gq > b3
类型 2	质量不合格, 工期正常	qu = "low", gq <= b3
类型 3	质量不合格, 工期延误	qu = "low", gq > b3

针对类型 1, 变迁 Scheduling2 发生后, 库所 ConfirmedPlan 中未开始生产的子订单初始计划将被更新, 库所 Order 和库所 TransportOrder 生成向当前织造服务商发送的生产延误反馈(ou = "finisheddelay")以及运输指令信息, 库所 Exception 生成向核心企业决策机构发送的进度异常包。收到进度延误信息后, 上文图 3 中变迁 Optimize (计划优化)发生, 库所 Control (控制参数)加入需要调整的后续订单环节数目, 此时优化后的子订单生产计划通过库所 Plan 传递给协同中心, 由协同中心开展新一轮的计划协商。

针对类型 2, 变迁 Scheduling2 发生后, 库所 Order 和库所 ReworkPlan 分别生成向当前织造服务商发送的生产返工指令(ou = "return")以及织造任务返修包, 此时图 5 中变迁 ReWeaving 被激发。



**Figure 6.** Petri net sub-model for grey fabric weaving collaboration in garment supply chain

**图 6.** 服装供应链坯布织造环节协同 Petri 网子模型

#### 4. 模型性能分析

模型建立完成后, 需要对模型结构以及功能的正确性、有效性进行验证, 状态空间分析方法可以支

持该验证过程,其基本思想是计算着色 Petri 网模型的所有可达状态(标识)和状态变化(发生的绑定元素),并在有向图中表示这些,其中节点对应于可达标识集,弧对应于发生的绑定元素。CPN Tools 平台中自带的 State Space Calculate 分析工具可以自动计算 Petri 网模型的状态空间并得到报告,根据报告中的各项数据进而分析与验证与模型行为有关的大量属性。

(1)活性分析:如图 7 所示,状态空间分析报告(a)中表明模型中有 13138 个可达状态节点和 74688 条有向弧,表明在不同约束条件下模型有多条可达路径。状态空间分析报告(b)中表明模型不仅没有死标识(Dead Marking),也不存在死变迁实例(Dead Transition Instances),说明网系统中所有标识和所有变迁都是活的,不存在无法引起任何变迁发生的标识状态,因此,模型具有活性、可达性和家态性。

Statistics	Liveness Properties
-----	-----
State Space	
Nodes: 13138	Dead Markings
Arcs: 74688	None
Secs: 20	
Status: Full	Dead Transition Instances
	None
Scc Graph	
Nodes: 13137	Live Transition Instances
Arcs: 47306	All
Secs: 1	
(a)基本统计信息	(b)模型活性报告

**Figure 7.** Space state analysis report  
**图 7.** 状态空间分析报告

2) 有界性分析:如图 8 所示,库所上界 Upper 指定了该库所可以接纳的最大托肯数,库所下界 Lower 指定了该库所可以接纳的最小托肯数,由此可以看出 Petri 网模型是有界的。

Boundedness Properties		
-----		
Best Integer Bounds	Upper	Lower
Garment_production'Clothes_State 1	1	0
Garment_production'PreSample_Design 1	1	0
Garment_production'Producing_State 1	1	0
GetAccessories'Accessories_ToTransport 1	1	0
GetMaterials'Materials_State 1	1	0
PDyeing'BatchOrder1 1	1	0
PDyeing'BatchOrder2 1	1	0
PDyeing'FabricState 1	2	0
PDyeing'PrePding_State 1	1	0
PlanAgreeOfA'AREply 1	1	0
PlanAgreeOfA'Accessories_Supplier 1	1	1
PlanAgreeOfD'PDReply 1	1	0

**Figure 8.** Model boundedness report  
**图 8.** 模型有界性报告

## 5. 结语

本文以服装供应链订单生产业务为背景, 围绕供应链核心企业视角, 基于服装供应链生产协同的不确定性分析了核心企业与协同服务商之间的计划协同、执行协同以及异常事件协同协议机制, 并在此基础上运用着色 Petri 网工具(CPN Tools)构建了服装供应链生产协同 Petri 网模型, 通过活性、有界性、可达性等相关指标验证了模型具有可靠性性能。本研究结果表明以服装制造企业为核心开发服装供应链生产自动化协同信息系统具有可行性, 是解决当前服装生产供应链信息系统自动化协同程度不足、促进服装生产供应链进一步转型升级的必要途径。

## 参考文献

- [1] Li, M., Yang, H. and Guo, X. (2020) Research on Supply Chain Collaborative Manufacturing Mode. *Journal of Physics: Conference Series*, **1670**, Article ID: 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1670/1/012027>
- [2] 姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(9): 2299-2320.
- [3] Perez, J.J.B., Queiruga-Dios, A., Martinez, V.G., et al. (2020) Traceability of Ready-to-Wear Clothing through Blockchain Technology. *Sustainability*, **12**, 7491. <https://doi.org/10.3390/su12187491>
- [4] Kumar, V., Hallqvist, C. and Ekwall, D. (2017) Developing a Framework for Traceability Implementation in the Textile Supply Chain. *Systems*, **5**, 33. <https://doi.org/10.3390/systems5020033>
- [5] Boiko, A., Shendryk, V. and Boiko, O. (2019) Information Systems for Supply Chain Management: Uncertainties, Risks and Cyber Security. *Procedia Computer Science*, **149**, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.108>
- [6] Jiang, W.X. (2019) An Intelligent Supply Chain Information Collaboration Model Based on Internet of Things and Big Data. *IEEE Access*, **7**, 58324-58335. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913192>
- [7] Grobelna, I. and Karatkevich, A. (2021) Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems. *Electronics*, **10**, Article 2305. <https://doi.org/10.3390/electronics10182305>
- [8] Fierro, L.H., Cano, R.E. and Garcia, J.I. (2020) Modelling of a Multi-Agent Supply Chain Management System Using Colored Petri Nets. *Procedia Manufacturing*, **42**, 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.095>
- [9] 张志利, 张云荣, 马世欣. 基于 CPN Tools 的“多种权限 + 操作队列”并发冲突控制方法研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(6): 1092-1100.
- [10] Du, S.X., Wu, P., Wu, G.Y., et al. (2018) The Collaborative System Workflow Management of Industrial Design Based on Hierarchical Colored Petri-Net. *IEEE Access*, **6**, 27383-27391. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2809439>
- [11] 金鹏, 薛哲彬, 江润恬, 等. 基于区块链技术的服装可追溯系统设计与实现[J]. 丝绸, 2021, 58(5): 62-69.
- [12] 侯龙龙, 董建军, 潘欣维, 等. 城市地下物流服务供应链的流程设计: 基于着色 Petri 网模型[J]. 科技管理研究, 2021, 41(10): 210-220.
- [13] 周学广, 吕伟栋, 袁志民. 基于着色 Petri 网的舰艇指挥控制信息流建模研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 828-842.
- [14] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 225-258.
- [15] Jensen, K. and Kristensen, L.M. (2009) Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/b95112>