

# 基于Petri网的高铁快运医药冷链作业流程优化及仿真

黄宝静<sup>1</sup>, 陈 诚<sup>1</sup>, 周凌云<sup>1</sup>, 张路瑶<sup>2</sup>, 朱 金<sup>3</sup>, 丁 凌<sup>4</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所, 北京 100081; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 3. 中铁快运股份有限公司 市场部, 北京 100055; 4. 廊坊经济技术开发区管理委员会, 河北 廊坊 065001)

**摘 要：**药品及医疗器械是高铁快运冷链业务的主要品类，目前既有的高铁快运医药冷链作业流程耗时较长、作业效率较低、运作成本较高，制约了铁路开拓医药冷链物流市场。以北京至上海高铁快运医药冷链全过程作业为例，基于Petri网对该作业流程进行建模，通过引入仿真工具对影响高铁快运医药冷链业务作业效率的因素进行诊断，根据诊断结果，提出前置冰板预冷环节、并行化提货作业与装箱准备环节、简化及并行化货物卸车与配送准备环节3大对策，构建优化后的高铁快运医药冷链作业模型，并对优化后的作业流程进行仿真分析。仿真结果表明，优化后的高铁快运医药冷链平均作业时间从1 124.06 min缩短至903.90 min，作业时间减少220.16 min。高铁快运医药冷链业务流程的优化研究，有助于铁路降本增效，提高自身竞争力。

**关键词：**高铁快运；医药冷链；Petri网模型；作业流程优化；仿真分析

## Optimization and Simulation of Pharmaceutical Cold Chain Workflow of High Speed Rail Express Based on Petri Net

HUANG Baojing<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Lingyun<sup>1</sup>, ZHANG Luyao<sup>2</sup>, ZHU Jin<sup>3</sup>, DING Ling<sup>4</sup>

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University Beijing 100044, China; 3. Marketing Department, China Railway Express Co., Ltd., Beijing 100055, China; 4. Langfang Economic and Technological Development Zone Management Committee, Langfang 065001, Hebei, China)

**Abstract:** Drugs and medical devices are the main categories of cold chain business of high speed rail express. At present, the existing pharmaceutical cold chain workflow of high speed rail express is time-consuming, inefficient, and costly, which restricts the railway from opening up the pharmaceutical cold chain logistics market. Taking the entire workflow of the pharmaceutical cold chain of the Beijing-Shanghai high speed rail express as an example, this paper modeled the workflow based on Petri net, and diagnosed the factors influencing the efficiency of the

收稿日期：2023-10-23 修订日期：2024-02-21

通信作者：陈诚(1985—)，男，山西阳泉人，中国铁道科学研究院集团有限公司运输及经济研究所副研究员。

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2023X015)；中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023YJ265)；中国铁路西安局集团有限公司科技研究开发计划课题(K2023013)；陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-536)

pharmaceutical cold chain of high speed rail express by introducing simulation tools; based on the diagnostic results, three major strategies were proposed—pre-cooling of the front ice plate, parallel pick-up and packing operations, and simplified and parallel unloading and distribution of goods, an optimized operation model of the pharmaceutical cold chain of high speed rail express constructed, and the optimized workflow simulated and analyzed. The simulation results show that the optimized pharmaceutical cold chain of high speed rail express has achieved a decrease in the average operation time from 1 124.06 minutes to 903.90 minutes, by 220.16 minutes. The research on the optimization of pharmaceutical cold chain workflow of high speed rail express contributes to higher efficiency and stronger competitiveness of railway at lower costs.

**Keywords:** High Speed Rail Express; Pharmaceutical Cold Chain; Petri Net Model; Optimization of Workflow; Simulation Analysis

## 0 引言

根据《中国医药物流发展报告(2023)》, 2022年我国医药冷链物流市场规模约为5 459亿元, 同比增长约19%, 我国医药冷链物流费用总额约244亿元, 同比增长约13%。医药冷链物流市场的发展势头异常强劲, 展现出巨大的潜力和前景。医药冷链物流目前主要依赖于汽运, 高速铁路作为一种运量更大、速度更快、可靠性更强的运输方式, 与医药冷链物流业务存在天然适配性。

现阶段, 专家学者们主要围绕铁路冷链物流体系构建<sup>[1-2]</sup>、冷链运输组织优化<sup>[3-6]</sup>、冷链功能区布局规划<sup>[7]</sup>、冷链物流产品设计<sup>[8]</sup>等方面进行研究, 针对高铁快运小件冷链业务作业流程优化的研究相对较少。在铁路冷链物流业务流程优化及作业流程仿真优化方面, 主要将Petri网应用于铁路班列流程优化、铁路货运业务流程问题诊断、铁路货运产品可靠性影响因素分析等。杨凯丽等<sup>[9]</sup>梳理中欧班列出口作业流程, 构建中欧班列出口作业Petri网模型, 并分析模型性能, 诊断作业流程存在的问题, 从多层面、多维度提出优化解决方案, 缩短作业周期。张小强等<sup>[10]</sup>针对铁路货运业务流程存在的流程冲突、结构不合理等问题, 运用业务流程理论与随机Petri网分析求解问题, 提升货运流程时间效率。王丹竹等<sup>[11]</sup>结合Petri网建模方法与故障树基本理论, 以北京—上海间特快货物班列为例, 利用仿真软件进行基于关联矩阵的Petri网模型求解, 得到该产品的可靠度及故障因素重要度排序。李晨等<sup>[12-13]</sup>以铁路口岸站作业时间最小为目标, 构建口岸站作业流程Petri网模型, 并利用数学软件进行仿真, 结果表明优化后的作业流程可以有效提升作业效率。

综上所述, 既有研究主要集中在铁路快运冷链业务发展战略、物流产品、发展策略等方面, 对于利用高速铁路开展医药冷链业务流程优化方面的研究相对不足。因此, 研究旨在探讨高铁快运医药冷链业务的现状和需求, 通过构建Petri网并进行仿真分析, 深入挖掘业务作业流程的不足, 并提出有效的改进对策。通过针对性的优化, 有效缩短高铁快运医药冷链业务时间, 提高业务运作效率, 降低高铁快运开展医药冷链业务的运作成本, 为高铁快运医药冷链物流高质量发展提供助力。

## 1 高铁快运医药冷链业务发展现状

### 1.1 概况

高铁快运医药冷链业务指的是高铁快运承运企业, 面向药品、试剂、血液制品等高时效性的货物运输需求, 通过运用不同容积、不同温控区间的蓄冷箱, 以高速铁路客货共运的模式, 为客户提供全程专业的冷链快捷物流服务。中铁快运股份有限公司(以下简称“中铁快运”)作为全路高铁快运业务唯一经营人, 医药冷链是中铁快运增长最为迅猛的业务板块之一, 其营收占中铁快运小件冷链业务的比重从2019年的不到10%增长至2022年的70%左右, 4年复合年均增长率达141.25%。医药冷链业务的客户也从重庆医药(集团)股份有限公司、九州通医药集团股份有限公司等企业, 拓展至顺丰医药供应链有限公司、京东医药(天津)有限公司、成都心拓生物科技有限公司等上百家企业。同时, 中铁快运利用团队在冷链快运运输组织、蓄冷装备、信息监控等方面的研究基础和全程物流解决方案的设计经验, 有效解决了大型运动会兴奋剂样本运输安全性、时效性、有效性“三高”难题, 成功中标

2022 年北京冬奥会、2023 年成都大运会与杭州亚运会兴奋剂样本运输项目。

1.2 作业流程分析

高铁快运医药冷链业务从作业环节来看，分为业务部门承运方案制定、高速铁路列车或行李车厢仓位调配、两端接取送达等多个流程模块，为客户提供从上门接取、暂存、干线运输到配送的全过程物流解决方案。高铁快运医药冷链业务具体作业流程如下。

(1) 承运方案制定。客户下单后，各中铁快运分公司在接到订单后，需要审核订单并下发对应营业部；营业部收到订单后需要再次审核订单，根据订单制定承运方案并将承运方案下发快运医药冷链业务小组。

(2) 提货与装箱。快运医药冷链小组收到承运方案后，根据订单需求进行冰板的预冷，需要上门揽货的人员进行人员整备、转运车辆准备、蓄冷箱准备，后需携蓄冷箱上门提货，货物揽收完后后将货物置于蓄冷箱中一同运回营业部。蓄冷箱运回营业部后需要对蓄冷箱安检，此后需要将货物放置暂存区存储，直到冰板预冷完毕后，将冰板、温度记录仪依次置于箱内。

(3) 短驳运输。快运医药冷链小组再次核对订单信息后，安排蓄冷箱出库，此后需要搬运蓄冷箱至始发站的铁路车站口，为保障列车运行安全，需要对蓄冷箱再次进行安检，安检完毕后搬运至站台。

(4) 铁路发运与到站。进行蓄冷箱装车作业，此后蓄冷箱装车后经干线运输到达目的站，卸车作业后蓄冷箱置于目的站站台上，之后搬运蓄冷箱至暂存区。

(5) 货物配送。安排货物进入目的站对应营业部的仓库，此后与提货作业环节类似，复核订单后，需要上门配送的人员进行人员整备、车辆准备，并携蓄冷箱进行配送，货物送达后，客户进行签收。

高铁快运医药冷链业务作业流程如图 1 所示。

2 高铁快运医药冷链业务 Petri 网模型构建

2.1 Petri 网模型

Petri 网，或称 Petri 图，是一种用于描述和分析系统行为的图形化建模工具。其核心元素包括库所(Places)、变迁(Transitions)和令牌(Tokens)，以及之间的有向弧线(Arcs)。Petri 网中各元素及其含义如表 1 所示。

Petri 网的主要应用之一是在复杂系统中进行流程优化，通过建立 Petri 网模型，可以清晰地展示系统中各个组成部分之间的相互作用，帮助发现并解决流程中的瓶颈和优化空间，从而提升系统的效率和性能<sup>[14]</sup>。

2.2 高铁快运医药冷链业务 Petri 网模型

根据现行高铁快运医药冷链业务作业流程，构建高铁快运医药冷链业务 Petri 网模型如图 2 所示，记  $pn$  为高铁快运医药冷链业务作业流程库所，指

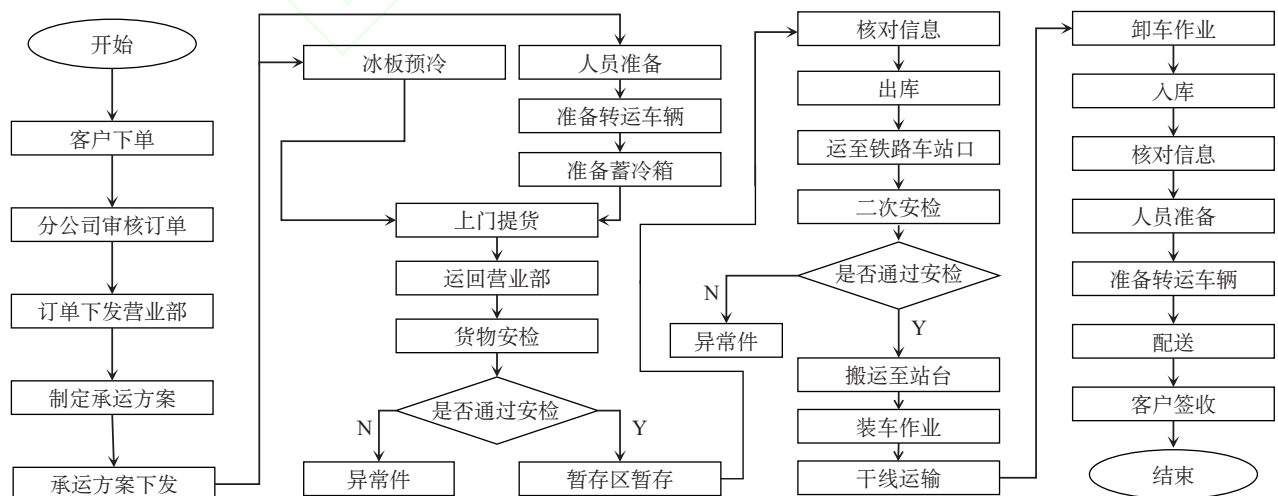


图 1 高铁快运医药冷链业务作业流程

Fig.1 Pharmaceutical cold chain workflow of high speed rail express



表1 Petri网中各元素及其含义  
Tab.1 Elements in Petri net and their meanings

元素类型	含义
令牌	在库所中的标记，表示状态的可用性或资源的可获取性
库所	表示系统中的状态、位置或资源，可容纳令牌
变迁	表示系统中的事件或活动，触发状态的改变或动作的执行
有向弧线	连接库所和变迁，表示变迁依赖于库所中的令牌来触发

代流程中各参与主体的状态或位置； $tn$ 为高铁快运医药冷链业务流程变迁，指代流程中各参与主体参与的事件或活动。各库所及其含义如表2所示，各

变迁含义与其对应延时区间如表3所示。

2.3 Petri网模型有效性检验

为保证建模的科学性，采用关联矩阵与不变量分析法对高铁快运医药冷链业务Petri网模型进行有界性、可达性和活性等数学特性分析。关联矩阵是用于描述库所和变迁之间令牌流动关系的矩阵，元素中正整数表示库所向变迁的令牌流输入，负整数表示库所从变迁的令牌流输出，0表示库所与变迁之间没有直接的令牌流转移<sup>[15]</sup>。对图2所示的高铁快运医药冷链业务Petri网模型建立关联矩阵，得到其对应的关联矩阵A如下。

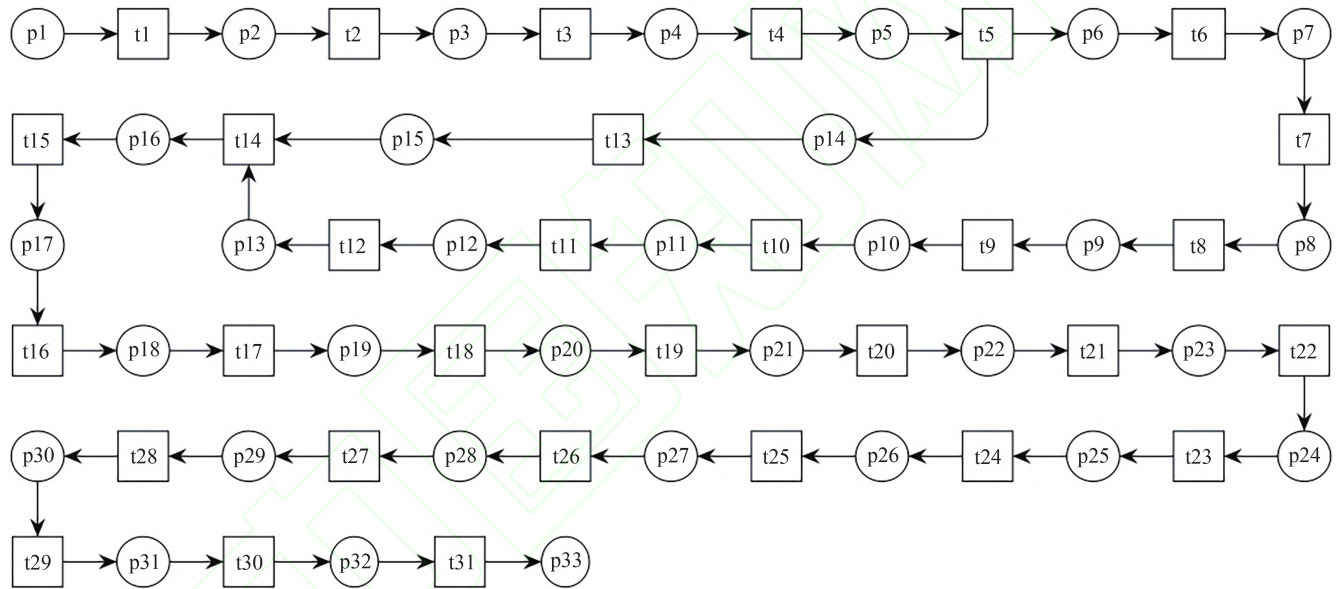


图2 高铁快运医药冷链业务Petri网模型  
Fig.2 Petri net model diagram for pharmaceutical cold chain business of high speed rail express

表2 各库所及其含义  
Tab.2 Places and their meanings

库所	含义	库所	含义	库所	含义	库所	含义
p1	客户准备下单	p10	揽收完毕	p19	蓄冷箱出库完毕	p28	订单通过复核
p2	分公司客服部收到订单	p11	蓄冷箱到达营业部	p20	蓄冷箱置于铁路车站口	p29	货物出库完毕
p3	订单等待营业部审核	p12	货物安检完毕	p21	蓄冷箱安检完毕	p30	车辆准备完毕
p4	订单审核完毕	p13	货物置于暂存区	p22	蓄冷箱置于站台	p31	人员准备完毕
p5	生成总承运方案	p14	冰板准备小组收到承运方案	p23	蓄冷箱装车完毕	P32	货物送达
p6	快运冷链小组收到总承运方案	p15	冰板准备完毕	p24	蓄冷箱到达目的站	p33	货物签收完毕
p7	人员准备完毕	p16	冰板放置完毕	p25	蓄冷箱置于站台		
p8	车辆准备完毕	p17	货物打包完毕	p26	蓄冷箱置于铁路车站口		
p9	蓄冷箱准备完毕	p18	订单通过复核	p27	蓄冷箱入库完毕		

表3 各变迁含义与其对应延时区间  
Tab.3 The meanings of each variation and its corresponding delay interval

$$\min$$

变迁	含义	延时区间	变迁	含义	延时区间
t1	客户下单	[5, 10]	t17	蓄冷箱出库	[10, 15]
t2	分公司客服部审核订单并下发营业部	[30, 60]	t18	搬运至铁路车站口	[5, 10]
t3	营业部审核订单	[15, 30]	t19	对蓄冷箱进行安检	[5, 10]
t4	营业部根据订单制定承运方案	[30, 60]	t20	搬运蓄冷箱至站台	[5, 10]
t5	承运方案下发	[5, 10]	t21	蓄冷箱装车	[5, 10]
t6	人员准备	[5, 10]	t22	干线运输	[270, 360]
t7	准备车辆	[10, 15]	t23	蓄冷箱卸车	[5, 10]
t8	蓄冷箱准备	[5, 10]	t24	搬运至铁路车站口	[5, 10]
t9	携蓄冷箱上门收货	[60, 120]	t25	蓄冷箱入库	[10, 15]
t10	蓄冷箱运回营业部	[60, 120]	t26	复核订单	[5, 10]
t11	货物安检	[5, 10]	t27	准备车辆	[10, 15]
t12	搬运蓄冷箱至暂存区	[10, 15]	t28	人员准备	[5, 10]
t13	冰板预冷	[300, 420]	t29	蓄冷箱出库	[10, 15]
t14	将冰板置于蓄冷箱内	[5, 10]	t30	携蓄冷箱进行配送	[60, 120]
t15	将温度记录仪置于蓄冷箱内	[5, 10]	t31	客户签收	[5, 10]
t16	复核订单信息	[5, 10]			

[illegible]

解 $A^T X = 0$ , 可得 $S_-$ 不变量为

$$X_1 = (\underbrace{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}_{\text{first 13 components}}, \underbrace{1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}_{\text{next 12 components}}, \underbrace{0, 0, 0, 0, 0}_{\text{last 5 components}})^T \quad (2)$$

[illegible]

2个 $S_-$ 不变量为有限元素的向量,因而高铁快运医药冷链业务Petri网模型是有界的,其状态空间在一定范围内有限制,系统不会因资源耗尽而无法继续运行,为系统的稳定性提供了保障。2个 $S_-$ 不变量存在部分0元素,零元素代表活跃位置,其上的令牌可以在系统中被使用或转移,这表明Petri网是具有活性的。2个 $S_-$ 不变量中的元素均为非负整数,表明每个位置上的令牌数量可以增加或保持不变,允许令牌的增加和减少,因而Petri网模型是可达的。综上,基于既有高铁快运医药冷链业务流程建立的Petri网模型是科学有效的。

3 高铁快运医药冷链业务Petri网仿真优化

3.1 CPN Tools 仿真平台简介

CPN Tools 是一种用于建模、仿真和分析Petri网模型的强大工具,能够创建和管理Petri网模型并进行仿真和分析。CPN Tools 允许用户对库所、变迁和弧上的参数进行详细设置,以精确描述系统的行为,仿真元素与参数设置示意图如图3所示。CPN Tools 中库所通常用圆形表示,圆形中间为该库所的名称,右下角STRING为该库所所属颜色集,库所右侧绿色圆圈内的数字表示当前该库所中令牌的数量;变迁通常用矩形表示,矩形中间为该变迁的名称,右上角@+discrete(m, n)表示该变迁的延时区间[ $m, n$ ];弧线通常用带箭头的实线表示,弧线上 $x$ “Token”表示令牌Token流动的数量为 $x$ 。当运行Petri网模型时,每个包含令牌的库所周围会出现绿色方框用于显示当前库所中令牌的状态,1“Token”@45+++表示有1个名为Token的令牌在到达p2状态时用时45个单位时长。通过逐步仿真并观察各库所中令牌数量与用时变化,即可得知系统中任务的执行状态。

3.2 既有Petri网模型仿真

为了全面分析既有高铁快运医药冷链业务流程存在的问题,选取北京至上海方向1 d内的作业情

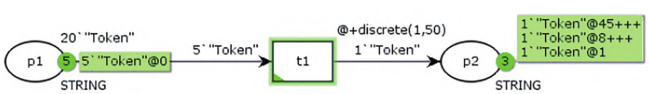


图3 仿真元素与参数设置示意图  
Fig.3 Schematic diagram of simulation elements and parameter settings

况进行仿真,其中作业时间为06:00—19:00,车次为北京南始发终到上海虹桥的42列高速铁路复兴号列车。假设负责该方向医药冷链项目的中铁快运分公司每日接收和处理客户当日下达需求的医药冷链运输订单,一次批量处理5单,在此前提下,通过对既有高铁快运医药冷链业务Petri网模型进行批量仿真,观察订单完成平均所需用时,评估既有高铁快运医药冷链业务流程的作业效率;通过对既有高铁快运医药冷链业务Petri网模型进行逐步仿真,观察令牌在系统中的流动情况,诊断既有高铁快运医药冷链业务流程存在的问题。

3.2.1 批量仿真

设置仿真次数为100次,统计既有高铁快运医药冷链业务流程所需运作时间的各项数据指标。批量仿真结果如表4所示。

3.2.2 逐步仿真

为准确诊断既有高铁快运医药冷链业务存在的问题,对1 d内的流程进行逐步仿真,通过观察系统运作过程中各个库所繁忙的情况,准确定位当前流程的瓶颈及冗余情况,为流程优化提供依据。

(1) 库所繁忙点1。仿真进行到130步时,观察发现库所p15(冰板准备完毕)出现繁忙情况,库所繁忙点1如图4所示。分析原因为当令牌经变迁t5由串行转为并行任务时,一支库所p14至库所p15指代的冰板预冷过程只需要1次变迁,另一分支库所p6至库所p13指代的取货流程则需要7次互为串行关系的变迁,取货流程中多个串行的变迁过于冗长,需要进行优化。

(2) 库所繁忙点2。仿真进行到168步时,观察发现库所p13(货物置于暂存区)处出现繁忙的情

表4 批量仿真结果  
Tab.4 Batch simulation results

名称	均值/min	95% 置信区间宽度	方差	最小值/min	最大值/min
每批订单最长所需用时	1 244.49	6.72	33.75	1 171.00	1 323.00
每批订单最短所需用时	1 005.76	5.92	29.70	935.00	1 070.00
每批订单平均所需用时	1 124.06	2.55	12.81	1 088.08	1 160.17



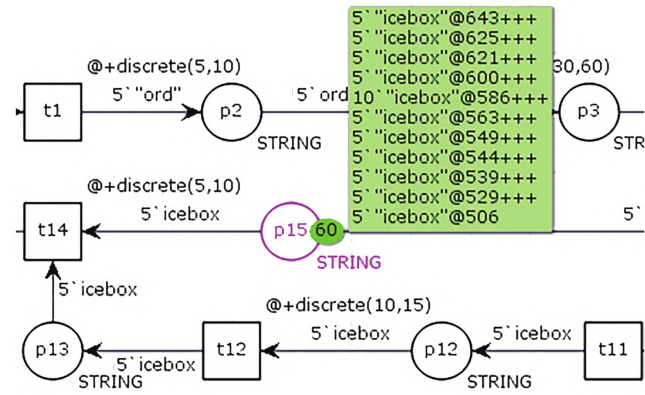


图4 库所繁忙点1  
Fig.4 Busy point of places 1

况,且令牌库所p15的滞留仍没有疏解,库所繁忙点2如图5所示。分析原因为当令牌变迁t5由串行转为并行任务时,一分支库所p14至库所p15指代的冰板预冷过程用时最短为300 min,另一分支库所p6至库所p13指代的取货流程用时最长为290 min,这导致令牌在库所p13必然出现等待状况,对应实际情况即出现货物在暂存区等待冰板预冷完毕的情况。

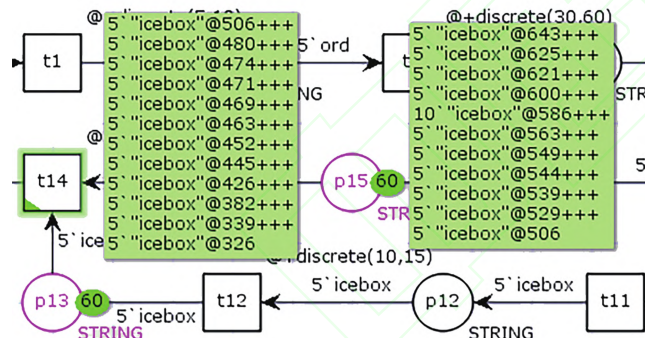


图5 库所繁忙点2  
Fig.5 Busy point of places 2

(3) 库所繁忙点3。仿真进行到322步时,观察发现在库所p24(蓄冷箱到达目的站)、p26(蓄冷箱置于铁路车站口)、库所p31(人员准备完毕)处出现繁忙情况,库所繁忙点3如图6所示。分析原因为当令牌经用时较长的变迁t22(干线运输)后,流向了库所p25至p32指代的蓄冷箱卸车配送环节,由于蓄冷箱卸车配送环节包含8个互为串行关系的变迁,且变迁t29(蓄冷箱出库)用时相较于其他环节用时较长,导致蓄冷箱在完成干线运输后难以快速完成配送。

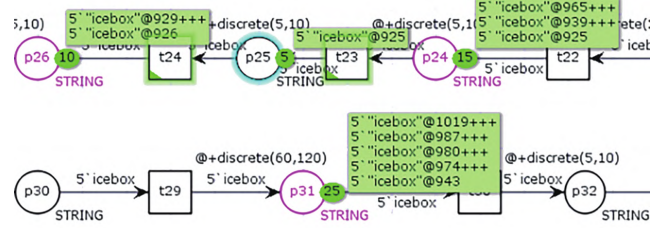


图6 库所繁忙点3  
Fig.6 Busy point of places 3

## 4 高铁快运医药冷链业务流程优化

### 4.1 高铁快运医药冷链业务优化对策

为缩短高铁快运医药冷链业务作业时间,提升服务效率,针对仿真过程中暴露出的问题,提出以下优化对策。

(1) 冰板预冷环节前置。库所繁忙点1表明接到客户订单后再开始进行冰板预冷的模式,会导致货物在暂存区等待的情况。将原来接到客户订单后才开始进行冰板预冷的环节进行前置,前置后中铁快运各分公司营业部每天18:00后,根据业务规律预判第二天客户可能发运货物的规模,按1:1.2配置比例提前预冷所需冰板,在接到客户订单后仅需取用预冷完毕的冰板,大幅缩减冰板预冷环节所需时间。通过前置冰板预冷操作,接取货物的工作人员还可以携带装有冰板的蓄冷箱上门收货,确保医药产品的质量 and 安全。

(2) 并行化提货作业与装箱准备环节。库所繁忙点2表明提货作业与装箱环节中大量串行的处理步骤,使得整个流程变得冗长。且随着冰板预冷环节的前置,冰板准备环节所需时间大幅降低,人员准备、车辆准备、蓄冷箱准备等环节成为制约业务流畅运转的瓶颈,因此提出将提货作业与装箱环节中的部分操作并行化。由于人员准备、车辆准备、蓄冷箱准备环节并没有严格的时间先后顺序,可通过组建不同的小组,使这些环节可以并行进行,提高时空的复用效率,从而缩短提货作业与装箱环节的处理时间。

(3) 简化、并行化货物卸车与配送准备环节。库所繁忙点3表明卸车与配送环节过于繁琐费时。首先需要对流程进行简化。由于铁路运输具有准时性的特点,货物在经过干线运输后,到达终点站的时刻可以准确预估。因此,在终点站营业部无须再

次进行货物集结, 而应该立即启动配送操作, 从而节省时间和步骤。此外, 由于蓄冷箱卸车、搬运与人员准备等环节并没有严格的时间先后顺序, 可以组建不同的小组, 使这些环节可以并行进行, 从而提高时间和资源的利用效率, 加速配送过程。

#### 4.2 优化后Petri 网模型仿真结果分析

将上述优化对策逐一进行优化和仿真,对3组优化方案的结果进行对比分析。每个优化方案均仿真100次后结果统计如表5所示。

通过对比分析可得知, 执行3项优化对策的方案三优化效果最佳, 每批订单平均所需用时从原方案的1 124.06 min 缩短至903.90 min, 作业时间减少220.16 min, 作业效率提升19.58%。在这3项优化对策中, 冰板预冷环节前置的优化效果尤为显著, 其使得每批订单平均所需用时减少到原方案的87.86%。

优化方案三的Petri网模型如图7所示。优化后

方案	冰板预冷 环节前置	并行化提货 作业与装箱 环节	简化、并行化 货物卸车与 配送环节	每批订单 平均所需 用时
原方案	—	—	—	1 124.06
优化 方案一	√	—	—	992.75
优化 方案二	√	√	—	938.77
优化 方案三	√	√	√	903.90

Petri网模型的各库所代表的含义如表6所示,优化后Petri网模型的各变迁含义与其对应延时区间如表7所示。

### 4.3 优化后Petri网模型有效性检验

### 优化后高铁快运医药冷链Petri网模型关联矩阵

[illegible]

解  $B^T X = 0$ , 可得  $S_-$  不变量为

[illegible]



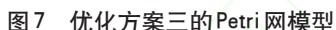


表6 优化后Petri 网模型的各库所及其含义

Tab.6 Optimized Petri net model of each place and its meanings

变迁	含义	延时区间	变迁	含义	延时区间
t1	客户下单	[5, 10]	t15	复核订单信息	[5, 10]
t2	分公司客服部审核订单并下发营业部	[30, 60]	t16	搬运蓄冷箱至铁路车站口	[5, 10]
t3	营业部审核订单	[15, 30]	t17	对蓄冷箱进行安检	[5, 10]
t4	营业部根据订单制定承运方案	[30, 60]	t18	搬运蓄冷箱至站台	[5, 10]
t5	承运方案下发	[5, 10]	t19	蓄冷箱装车	[5, 10]
t6	车辆准备	[10, 15]	t20	干线运输	[270, 360]
t7	人员准备	[5, 10]	t21	通知各部门准备	[3, 5]
t8	清点蓄冷箱	[5, 10]	t22	蓄冷箱卸车	[5, 10]
t9	提取已预冷的冰板	[5, 10]	t23	搬运蓄冷箱至铁路车站口	[5, 10]
t10	将冰板置于蓄冷箱	[5, 10]	t24	复核订单	[5, 10]
t11	揽货小组携箱上门收货	[60, 120]	t25	人员准备	[5, 10]
t12	蓄冷箱运回营业部	[60, 120]	t26	车辆准备	[10, 15]
t13	检查货物	[5, 10]	t27	携蓄冷箱进行派送	[60, 120]
t14	将货物与温度检测仪置于蓄冷箱	[5, 10]	t28	客户签收	[3, 5]

$$\min$$

变迁	含义	延时区间	变迁	含义	延时区间
t1	客户下单	[5, 10]	t15	复核订单信息	[5, 10]
t2	分公司客服部审核订单并下发营业部	[30, 60]	t16	搬运蓄冷箱至铁路车站口	[5, 10]
t3	营业部审核订单	[15, 30]	t17	对蓄冷箱进行安检	[5, 10]
t4	营业部根据订单制定承运方案	[30, 60]	t18	搬运蓄冷箱至站台	[5, 10]
t5	承运方案下发	[5, 10]	t19	蓄冷箱装车	[5, 10]
t6	车辆准备	[10, 15]	t20	干线运输	[270, 360]
t7	人员准备	[5, 10]	t21	通知各部门准备	[3, 5]
t8	清点蓄冷箱	[5, 10]	t22	蓄冷箱卸车	[5, 10]
t9	提取已预冷的冰板	[5, 10]	t23	搬运蓄冷箱至铁路车站口	[5, 10]
t10	将冰板置于蓄冷箱	[5, 10]	t24	复核订单	[5, 10]
t11	揽货小组携箱上门收货	[60, 120]	t25	人员准备	[5, 10]
t12	蓄冷箱运回营业部	[60, 120]	t26	车辆准备	[10, 15]
t13	检查货物	[5, 10]	t27	携蓄冷箱进行派送	[60, 120]
t14	将货物与温度检测仪置于蓄冷箱	[5, 10]	t28	客户签收	[3, 5]



- [8] 周凌云, 王涵晴, 丁小东, 等. 基于市场细分的京沪高铁快运产品设计及实证研究[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(12): 50–56.
- ZHOU Lingyun, WANG Hanqing, DING Xiaodong, et al. Design and Empirical Research of Beijing–Shanghai High Speed Rail Express Products Based on Market Segmentation[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(12): 50–56.
- [9] 杨凯丽, 于雪娟. 基于随机 Petri 网的中欧班列出口作业流程优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(12): 11–18, 27.
- YANG Kaili, YU Xueqiao. Research on Export Operation Process Optimization of China Railway Express Based on Stochastic Petri Net[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(12): 11–18, 27.
- [10] 张小强, 胡芳捷, 骆 玲. 基于随机 Petri 网的铁路货运流程优化研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(10): 7–15.
- ZHANG Xiaoqiang, HU Fangjie, LUO Ling. Optimization of Railway Freight Transportation Process Based on Stochastic Petri Net[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10): 7–15.
- [11] 王丹竹, 郎茂祥, 孙 岩. 基于 Petri 网模型的铁路快捷货运产品可靠性评价[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(4): 147–153.
- WANG Danzhu, LANG Maoxiang, SUN Yan. Railway Express Freight Product Reliability Evaluation Based on Petri Net Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(4): 147–153.
- [12] 李 晨, 魏玉光. 基于 Petri 网模型的口岸站作业流程分析及优化[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(2): 93–102, 114.
- LI Chen, WEI Yuguang. An Analysis & Optimization of Border Station Operation Flow Based on Petri Net Model[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(2): 93–102, 114.
- [13] 程 璐, 薛玉玺. 基于 Petri 网的铁路集装箱“门到门”运输发送作业流程优化[J]. 铁道货运, 2017, 35(2): 45–50.
- CHENG Lu, XUE Yuxi. Optimizing Delivery Operation Process of Railway Container “Door-to-Door” Transportation Based on Stochastic Petri Net[J]. Railway Freight Transport, 2017, 35(2): 45–50.
- [14] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [15] 韩开宇. 基于 Petri 网的 Q 公司核心业务流程优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

(责任编辑 李丹丹)