

基于 Petri 网的快递运输流程建模与仿真

赵叶静, 倪 枫, 刘 姜, 陈年年, 周兴郡

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对快递运输送达服务流程中, 服务各任务节点随机延迟引发超时送达、运输效率偏低的问题, 为提升快递运输时效与作业效率, 基于 Petri 网构建快递运输流程模型, 利用 CPN Tools 建模软件开展仿真实验, 并结合关联矩阵分析法诊断流程瓶颈, 识别延误关键诱因, 进而提出包裹分类与揽收并行化、车辆准备任务前置、冗余核对环节合并 3 项优化方案。将时延 Petri 网建模、仿真与关联矩阵结构分析有机融合, 精准识别并消除流程中存在的异常环节, 在贴合随机延迟现实场景的前提下实现流程的结构化优化, 为复杂物流作业流程提供了一套可复用的流程优化框架。经定量验证, 优化后模型的任务执行成功率较原模型提升 20% 以上, 可为快递业务降本增效提供落地支撑, 也为同类物流服务流程优化提供可行的思路与方法借鉴。

关键词: Petri 网; CPN Tools; 关联矩阵分析; 模型仿真

中图分类号: TP 301.1 **文献标志码:** A

Modeling and simulation of express transportation process based on Petri net

ZHAO Yejing, NI Feng, LIU Jiang, CHEN Niannian, ZHOU Xingjun

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problems of delayed delivery and low transportation efficiency arising from random delays at each task node in the express delivery service process, this paper developed a Petri net model for express delivery processes to improve delivery timeliness and operational efficiency. Simulation experiments were conducted using CPN Tools, and a correlation matrix analysis was adopted to diagnose process bottlenecks and identify the key root causes of delays. Three optimization strategies were accordingly proposed: parallel processing of parcel sorting and collection, advance scheduling of

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12371508); 教育部产学研合作协同育人项目(241103760141654); 上海市“大学生创新创业训练计划”资助项目(XJ2024166, XJ2024151)

第一作者: 赵叶静(1998—), 女, 硕士研究生。研究方向: 系统科学、企业系统架构建模。E-mail: zyj17836953436@163.com

通信作者: 倪 枫(1982—), 男, 副教授。研究方向: 系统科学、系统分析与集成。E-mail: nifeng@usst.edu.cn

引文格式: 赵叶静, 倪枫, 刘姜, 等. 基于 Petri 网的快递运输流程建模与仿真[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(3): 344-351.

Citation: ZHAO Yejing, NI Feng, LIU Jiang, et al. Modeling and simulation of express transportation process based on Petri net[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(3): 344-351.

vehicle deployment tasks, and consolidation of redundant inspection links. This study organically integrated timed Petri net modeling, simulation, and incidence matrix analysis to accurately locate and eliminate abnormal process links. Process structural optimization was achieved while conforming to real-world scenarios with stochastic delays. A reusable process optimization framework was thus established for complex logistics operations. Quantitative verification demonstrates that the optimized model achieves an over 20% higher task execution success rate compared with the original model. The proposed framework can support cost reduction and efficiency improvement for express delivery operations, and deliver feasible ideas and methodologies for the optimization of analogous logistics service processes.

Keywords: *Petri net; CPN Tools; incidence matrix analysis; model simulation*

国家邮政局数据显示,2021—2025年,我国快递业务量从1083.0亿件增长至1989.5亿件,5年累计增长超83.7%,连续多年稳居全球首位。为了推动快递业务模式的创新,提高快递的送达效率,加强快递业务的供给质量,各大快递企业相继推出“限时达”服务。然而,在快递从购买到送达的过程中,由于多重不确定性因素的影响,各个任务节点普遍存在随机延时问题,极易造成限时履约失败、运营成本抬升。在此背景下,对快递全流程开展结构化流程分析,能够实现全链路运营效率提质、异常数据甄别校验、业务应用场景精细化界定等多重价值^[1-4]。Petri网具备离散事件动态系统建模优势,可精准刻画流程逻辑与节点随机约束^[5],将其引入快递运输流程优化研究中,能够量化拆解各环节时延成因,为配送流程整改提供量化依据,最终助力快递末端送达效率稳步提升。

韩开宇^[6]将企业核心业务流程构建为Petri网模型,依托关联矩阵重组算法解析模型内部逻辑关系,并在变迁参数中引入时间属性;通过定位流程瓶颈、优化作业节点、仿真对比等手段,验证了优化模型的时效优越性。但该研究基于流程无异常扰动的理想假设开展建模,未兼顾实际运营时各作业节点普遍存在的随机时延问题。Ye等^[7]结合实地调研数据构建随机Petri网,完成供应链全流程建模与仿真分析,并针对仿真暴露的流程短板给出优化方案,以场所繁忙率下降作为量化依据,验证优化策略的可行性。王磊^[8]通过关联矩阵特征拆解各子网结构,针对关键节点制定优化方案,重构网络货运联盟链平台交易流程;通过量化对比优化前后Petri网的流程运行耗时,证实优化方案可有效提升整体运行效率。韩禹^[9]对

冷链全流程分层拆解与逐层剖析,依托业务流程重组方法完成分层模型优化。黄宝静等^[10]以高铁医药物流冷链作业为研究对象,借助流程仿真识别耗时突出的瓶颈工序并进行针对性改进,有效提升模型运行效率。上述成果多局限于冷链、铁路快运、网络货运等细分物流场景,研究范式无法直接适配普通快递限时达定制化配送规则。

Li等^[11]引入大数据技术,为业务流程优化提供数据支撑与决策指导。彭聚瑞等^[12]在边缘层和终端层横向拓展了传统的云边端三层架构模型,充分利用空闲终端设备和异地边缘服务器,提高计算资源的利用效率,并减少任务平均执行时间。李鑫等^[13]提出基于时延Petri网和代价函数的调度算法,通过将逻辑变迁序列转为时延变迁序列,找到最小时间的变迁序列,优化了系统的调度效率。三类研究分别从数据技术、算力架构、调度算法维度实现流程提速,但并未将时延建模、网结构数学分析、仿真校验三者融合于快递全流程结构化优化中。

为提高“限时达”服务的送达效率,研究旨在通过Petri网的建模与仿真技术^[14-16],对快递公司的“限时达”业务流程进行深入的分析并实施建模与仿真。在实际运营中,快递运输各环节普遍存在随机时间延迟,易引发超时送达、资源利用率低等问题,传统流程分析方法难以精准刻画环节间的动态关联与阻塞瓶颈。基于此,文章通过Petri网的建模并仿真再加上与关联矩阵分析法的结合,不仅为快递“限时达”业务流程效率的提升提供了一种新的视角,也为其他复杂业务流程的分析和改进提供了一种可行的解决方案。

1 “限时达”业务流程 Petri 网模型构建

1.1 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，并优化空间，从而提升系统的效率和性能。

1.2 “限时达”业务流程 Petri 网模型

快递行业近些年快速崛起，为提高行业竞争力提出了多样化的特色服务。其中，“限时达”服务因其严格的时间管理和清晰的配送时间承诺，深受广大消费者的信任与好评。“限时达”

服务承诺每天 11:00 前下单的订单当天即可送达。根据快递站点工作时间 (8:00—21:00)，可以计算出“限时达”服务圆满完成的要求，即需要在 11:00—21:00、共计 10 h (600 min) 内，完成从客户下单到客户确认收货所有流程，包括客户下单、收集整理订单、包裹分类、包裹揽收、制定运输方案、人员准备、车辆准备、温度检查、故障检查、装载货物、复核订单信息、干线运输、核对入库、包裹分拣、安排人员配送、货物配送、通知客户收货、确认收货等多项流程。根据这些流程，构建出一个“限时达”快递运输服务的 Petri 网，如图 1 所示。记 $\{P_1, \cdots, P_{24}\}$ 为“限时达”服务的流程库所，指代流程中各参与主体的状态或位置，各库所表示的含义如表 1 所示。记 $\{t_1, \cdots, t_{21}\}$ 为“限时达”服务的流程变迁，指代流程中各参与主体参与的事件或活动，各变迁所表示的含义以及其对应的延时区间如表 2 所示。

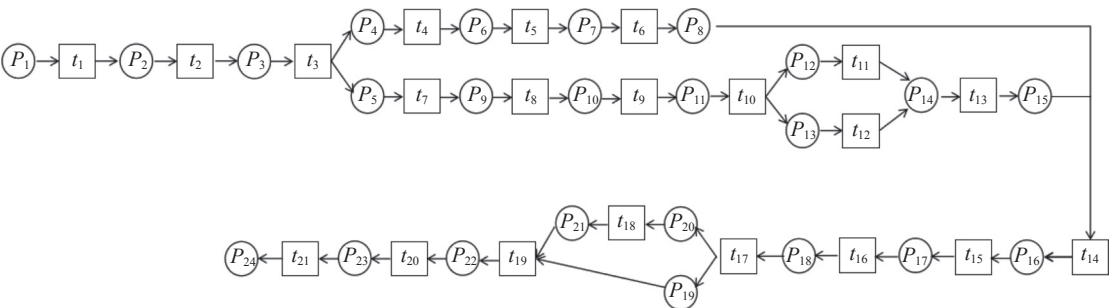


图 1 “限时达”服务 Petri 网模型

Fig.1 Petri net model of time-limited delivery service

表 1 各库所表示的含义

Tab.1 Meanings of each place

库所	含义	库所	含义
P_1	客户准备下单	P_{13}	开始故障检查
P_2	公司收到订单	P_{14}	车辆准备完成
P_3	订单审核完毕	P_{15}	运营部作业完成
P_4	仓库收到指令	P_{16}	货物装载完成
P_5	运营部收到指令	P_{17}	审核信息无误
P_6	包裹打包完毕	P_{18}	到达目的地
P_7	包裹分类完毕	P_{19}	仓库核对无误
P_8	仓库作业完成	P_{20}	快递员准备完成
P_9	生成运输方案	P_{21}	划分完成
P_{10}	接收运输方案	P_{22}	货物送达
P_{11}	人员准备完成	P_{23}	客户收到通知
P_{12}	开始温度检查	P_{24}	确认收货

表 2 各变迁所表示的含义与其对应的延时区间

Tab.2 Meanings of each transition and their corresponding delay interval

变迁	含义	延时区间/min	变迁	含义	延时区间/min
t_1	客户下单	[5,10]	t_{12}	故障排查	[5,10]
t_2	审核订单	[30,40]	t_{13}	整合反馈信息	[5,10]
t_3	下发指令	[5,10]	t_{14}	装载货物	[40,60]
t_4	打包包裹	[30,50]	t_{15}	复核订单信息	[10,15]
t_5	分类包裹	[15,35]	t_{16}	干线运输	[180,330]
t_6	揽收包裹	[10,20]	t_{17}	通知仓库、快递员就位	[10,15]
t_7	制定运输方案	[10,25]	t_{18}	按区划分快递	[15,35]
t_8	下发运输方案	[5,15]	t_{19}	货物配送	[70,100]
t_9	人员准备	[5,10]	t_{20}	通知客户收货	[0,5]
t_{10}	车辆准备	[10,15]	t_{21}	客户检查货物	[5,10]
t_{11}	温度校对	[5,10]			

2 “限时达”业务流程 Petri 网模型仿真

2.1 CPN Tools 仿真平台介绍

CPN Tools 是一款功能强大的建模、仿真和分析 Petri 网模型的工具。它提供了一个用户友好的界面, 允许用户对模型中的库所、变迁和弧等参数进行精细配置, 以此来准确地模拟和描述系统的行为。在 CPN Tools 中, 库所被绘制成圆形, 其中心标注着库所的名称, 右下角的 STRING 标识指明库所的颜色集合。在库所的右侧, 通常会有一个绿色圆圈, 里面的数字显示了当前库所中令牌的数量。而变迁则以矩形来表示, 其中心显示变迁的名称, 左上角的 @+discrete(*a*,*b*) 标记则指示了变迁的延时区间, *a*、*b* 分别为变迁发生的最小和最大时间。在模型中, 弧线由带箭头的实线表示, 它们连接着库所和变迁, 箭头上的标注表明了令牌的流动数量。当 Petri 网模型运行时, 每个

含有令牌的库所会以绿色方框标出, 以显示令牌的当前状态。通过这种方式, 能观察到令牌在库所之间的流动, 以及它们随时间的变化情况, 从而了解系统中各个任务的执行状态和流程的进展。这种逐步仿真的方法为分析和优化复杂系统提供了一种直观且有效的方式。

2.2 “限时达”业务流程 Petri 网模型仿真结果

基于上述方法, 利用现有的“限时达”快递运输 Petri 网模型, 在 CPN Tools 进行批量仿真模拟。现设定一个场景, 即快递公司每天处理客户当天提交的快递订单, 假设每次处理 50 个订单, 那么将这 50 个订单放在 CPN Tools 中进行 50 次仿真实验。通过这种模拟, 能够观察到完成每个订单所需的时间, 从而评估整个快递运输流程的效率。仿真实验结果如图 2 所示。

根据仿真实验的结果, 记录下每一次满足条件(即完成流程所需时间小于等于 600 min)的次数(概率), 如表 3 所示。

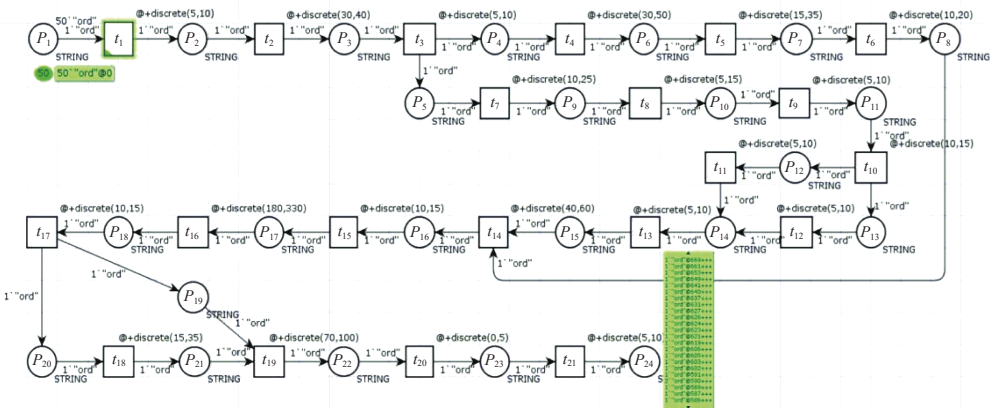


图 2 “限时达”业务模型仿真

Fig.2 Simulation of time-limited delivery service business model

3 “限时达”业务流程模型优化

通过上述仿真结果, 可以清晰直观地看出“限时达”业务流程送达率较低的问题。为提高整体流程的效率, 本文选取关联矩阵分析法对业务流程进行分析, 找出问题并进行精准优化。关联矩阵重组方法是 Petri 网用于优化自身模型结构的优化方法, 当 Petri 网模型以业务流程为基础进行建模时, 关联矩阵重组方法在优化 Petri 网模型结构的同时也可以起到优化对应业务流程的效果。

3.1 关联矩阵分析法

设 $\Sigma = (S, T; F, M)$ 为一个 Petri 网, 式中: S 表示库所的有限非空集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$; T 表

示变迁的有限非空集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$; F 表示有向弧集合, 用于定义库所和变迁之间的连接关系; M 表示向量函数, 用于描述 Petri 网的当前所在状态。Petri 网 Σ 的结构 $(S, T; F)$ 可以用一个 n 行 m 列的矩阵来表示:

$$A = [a_{ij}]_{n \times m}$$

式中,

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}$$
$$a_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & \text{若 } (t_i, s_j) \in F \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$
$$a_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{若 } (s_j, t_i) \in F \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

则称 A 为 Σ 的关联矩阵。

Petri 网中的异常结构包括同步关系、选择关系、冲突关系，这些都会导致 Petri 网模型在运行过程中发生问题，而关联矩阵重组方法则能通过自身的优化原则消除异常结构在 Petri 网模型运行过程中带来的问题。关联矩阵也可以表现出 Petri 网中库所和变迁之间的相互关系，每一行表示对

$A =$

-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

为缩短“限时达”业务的完成时间，提高业务执行的成功率，针对关联矩阵分析法寻找出的问题点，提出 3 点优化策略。

从行的角度来看，第 14 行中存在多个“1”，可见属于选择关系。从列的角度来看，第 3、10、17 列中存在多个“1”，可见属于并发关系；第 14、19 列中存在多个“-1”，可见属于同步关系。

首先，将分类包裹与揽收包裹并行化。观察“限时达”快递运输业务整个流程，可以发现，仓库收到指令后所进行的一系列串行任务使这阶段流程繁琐且耗时较长。其中，打包、分类、揽收包裹等任务并没有严格的时间先后顺序，因此，提出将分类包裹、揽收包裹等任务并行化，以此来达到简化整体流程、缩短任务执行时间的目的。

其次，前置车辆准备任务。由于第 14 行与第 10 列中均存在多个“1”的情况，遵照选择关系中

应的库所与所有变迁之间的关系，每一列表示对应的变迁与所有库所之间的关系，矩阵中的“1”和“-1”可以有效表现出 Petri 网中的结构关系，关联矩阵重组方法优化原则如表 4 所示。

3.2 模型优化策略

根据图 2，求解出“限时达”业务模型的关联矩阵如下所示：

的优化原则，车辆准备任务处需要进行拆分处理。但由于车辆准备任务处的温度检查、故障检查任务不可缺少，再加之运营部处理任务过多，导致仓库处理完任务后即包裹揽收完成之后，会发生包裹在揽收区域等待的情况。因此，提出前置车辆准备任务的优化策略，提前安排好所需车辆的温度、故障检查任务，以达到缩短车辆准备任务时间的目的，从而提高整体流程的效率。

最后，将仓库核对和划分区域实施配送两项任务进行合并。由于第 19 列存在多个“-1”，根据优化建议需采取合并措施，前期审核订单并在装载货物结束后再次核对订单并确认订单，再加上运输实行点对点的模式，故到达目的地后无需再进行核对，直接进行区域划分任务，同时统计快递数目并直接进行货物的配送，以此来达到缩短整个作业流程时间的目的，提高时间和资源的利用效率，加速配送进程。

表 3 “限时达”业务模型仿真结果

Tab.3 Simulation results of time-limited delivery service business model

仿真次数	成功送达	延时送达	成功率/%	仿真次数	成功送达	延时送达	成功率/%
1	27	23	54	26	27	23	54
2	29	21	58	27	30	20	60
3	30	20	60	28	34	16	68
4	30	20	60	29	32	18	64
5	29	21	58	30	27	23	54
6	35	15	70	31	35	15	70
7	32	18	64	32	35	15	70
8	30	20	60	33	36	14	72
9	36	14	72	34	29	21	58
10	33	17	66	35	30	20	60
11	31	19	62	36	31	19	62
12	32	18	64	37	27	23	54
13	30	20	60	38	30	20	60
14	32	18	64	39	37	13	74
15	27	23	54	40	29	21	58
16	24	26	48	41	30	20	60
17	29	21	58	42	32	18	64
18	30	20	60	43	36	14	72
19	29	21	58	44	27	23	54
20	35	15	70	45	31	19	62
21	32	18	64	46	35	15	70
22	30	20	60	47	37	13	74
23	29	21	58	48	29	21	58
24	33	17	66	49	30	20	60
25	36	14	72	50	27	23	54

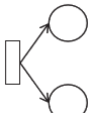
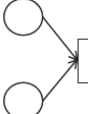
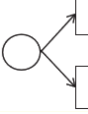
平均成功率: 62.12%

3.3 模型优化后仿真结果分析

根据上文提出的优化策略，逐一对原模型进行优化和仿真，再将 3 组策略优化和仿真结果进行对比分析。每个优化方案仿真 50 次后统计结果，如表 5 所示。表中：“—”表示没有执行相应任务；“+”表示执行了相应任务。通过仿真结果的对比分析可知，分别执行优化策略后，整个

表 4 关联矩阵重组方法优化原则

Tab.4 Optimization principle of recombination method of incidence matrix

结构关系	图示	判断	含义	优化原则
并发关系		关联矩阵同一列存在多个“1”	该变迁存在多个输出库所	可以保留
同步关系		关联矩阵同一列存在多个“-1”	该变迁存在多个输入库所	合并
冲突关系		关联矩阵同一行存在多个“-1”	该库所存在多个输出变迁	删除
选择关系		关联矩阵同一行存在多个“1”	该库所存在多个输入变迁	拆分

流程的成功率从原始模型的 62.12% 提高至优化后模型的 82.88%，优化后模型的任务执行成功率较优化前模型提高了近乎 20%。其中，方案 1 提出的并行化分类包裹与揽收包裹环节对于提高整体流程的成功率效果显著，提高了近乎 10% 的成功率。由此可知，业务流程的实施过程中，各个业务的多线同时进行尤为重要。

表 5 仿真结果

Tab.5 Simulation results

方案	并行化分类包裹与揽收包裹环节	前置车辆准备任务	合并冗余任务	成功率/%
原方案	—	—	—	62.12
优化方案1	+	—	—	71.52
优化方案2	+	+	—	77.00
优化方案3	+	+	+	82.88

最后，综合 3 条优化策略，对上文优化前的业务流程 Petri 网进行优化，得到优化后的“限时达”业务流程 Petri 网，如图 3 所示；各库所表示的含义如表 6 所示；各变迁所表示的含义以及其对应的延时区间如表 7 所示。

接着将优化后的“限时达”服务 Petri 网模型继续放进 CPN Tools 软件中进行同样的仿真实验，并记录满足条件(即完成流程所需时间小于等于 600 min)的次数(概率)，如表 8 所示。

综合上文仿真实验所得出的优化前后送达率

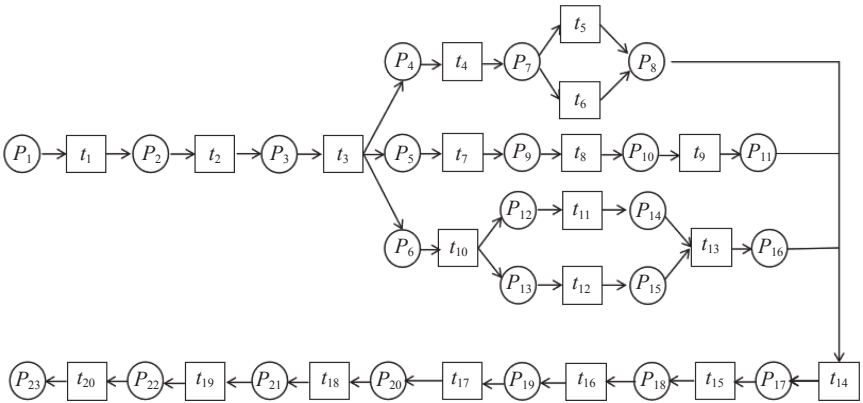


图 3 优化后的“限时达”服务 Petri 网模型

Fig.3 Optimized time-limited delivery service Petri net model

表 6 优化后各库所表示的含义

Tab.6 Meanings of each place after optimization

库所	含义	库所	含义
P_1	客户准备下单	P_{13}	开始故障检查
P_2	公司收到订单	P_{14}	温度检查合格
P_3	订单审核完毕	P_{15}	故障检查合格
P_4	仓库收到指令	P_{16}	车辆准备完成
P_5	运营部收到指令	P_{17}	货物装载完成
P_6	车辆收到指令	P_{18}	订单信息无误
P_7	包裹打包完毕	P_{19}	到达目的地
P_8	分类揽收完成	P_{20}	快递员收到派送快递
P_9	生成运输方案	P_{21}	货物送达
P_{10}	接收运输方案	P_{22}	客户收到通知
P_{11}	人员准备完成	P_{23}	确认收货
P_{12}	开始温度检查		

表 7 优化后各变迁所表示的含义与其对应的延时区间

Tab.7 Meanings of each transition after optimization and their corresponding delay interval

变迁	含义	延时区间/min	变迁	含义	延时区间/min
t_1	客户下单	[5,10]	t_{11}	温度校对	[5,10]
t_2	审核订单	[30,40]	t_{12}	故障排查	[5,10]
t_3	下发指令	[5,10]	t_{13}	整合反馈信息	[5,10]
t_4	打包包裹	[30,50]	t_{14}	装载货物	[40,60]
t_5	分类包裹	[15,35]	t_{15}	复核订单信息	[10,15]
t_6	揽收包裹	[10,20]	t_{16}	干线运输	[180,330]
t_7	制定运输方案	[10,25]	t_{17}	划分区域并通知快递员送货	[25,35]
t_8	下发运输方案	[5,15]	t_{18}	货物配送	[70,100]
t_9	人员准备	[5,10]	t_{19}	通知客户收货	[0,5]
t_{10}	车辆准备	[10,15]	t_{20}	客户检查货物	[5,10]

表 8 优化后的“限时达”业务模型仿真结果

Tab.8 Simulation results of optimized time-limited delivery service business model

仿真次数	成功送达	延时送达	成功率/%	仿真次数	成功送达	延时送达	成功率/%
1	41	9	82	26	42	8	84
2	42	8	84	27	45	5	90
3	44	6	88	28	40	10	80
4	41	9	82	29	40	10	80
5	40	10	80	30	41	9	82
6	39	11	78	31	45	5	90
7	41	9	82	32	45	5	90
8	41	9	82	33	42	8	84
9	36	14	72	34	43	7	86
10	38	12	76	35	39	11	78
11	43	7	86	36	41	9	82
12	44	6	88	37	37	13	74
13	42	8	84	38	45	5	90
14	37	13	74	39	44	6	88
15	37	13	74	40	39	11	78
16	44	6	88	41	43	7	86
17	46	4	92	42	43	7	86
18	44	6	88	43	39	11	78
19	41	9	82	44	41	9	82
20	47	3	94	45	37	13	74
21	39	11	78	46	45	5	90
22	40	10	80	47	42	8	84
23	38	12	76	48	45	5	90
24	40	10	80	49	45	5	90
25	43	7	86	50	36	14	72

平均成功率: 82.88%

的数据对比,可清晰直观地看出优化前模型到优化后模型成功率的明显增长,如图4所示。

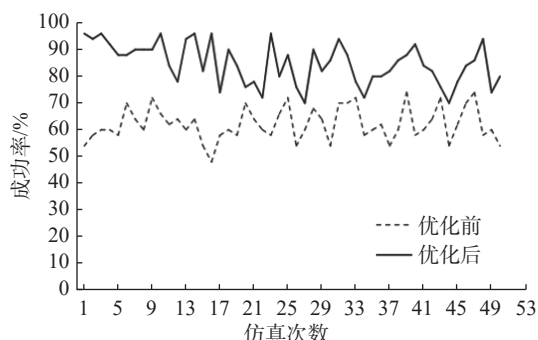


图4 优化前后“限时达”业务模型成功率

Fig.4 Success rate of time-limited delivery service business model before and after optimization

4 结束语

快递运输行业的蓬勃发展,消费者需求的大量提高,研究“限时达”快递运输流程对于提高作业效率和满足市场需求意义重大。基于现有“限时达”快递运输模式,建立快递物流运输流程的 Petri 网模型,运用 CPN tools 对流程的 Petri 网模型进行仿真实验,再根据关联矩阵分析法分析出制约“限时达”快递运输成功率的因素。最后,基于诊断结果,提出一系列流程调整和资源分配的优化对策。对比仿真结果显示,优化后的模型较优化前的模型成功率显著提高 20% 以上,达到了提升作业效率的目的,同时肯定了优化方案的有效性。本文虽完成了快递运输流程的结构化优化,但研究仍存在可拓展空间。后续研究可进一步融合大数据、物联网技术,实时采集快递运输全环节动态数据,构建动态自适应 Petri 网模型,实现流程的实时监控与动态优化。同时,可引入多约束条件(如成本、能耗、人力配置),构建多目标优化模型,在提升时效的同时实现成本与资源消耗的最优平衡。此外,还可将该建模优化方法拓展至冷链快递、跨境快递等细分物流场景,结合不同场景的作业特性完善模型,增强方法的通用性与适配性,为快递物流行业的高质量发展提供更全面的理论支撑与实践指导。

参考文献:

- [1] 钟贤欣,倪枫,刘姜,等. 基于 ROADS 的面向场景业务架构建模方法 [J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(4): 415-424.
- [2] 黄凤兰,倪枫,刘姜,等. 基于 HCPN 的复杂 BPMN 协作模型数据流建模与验证 [J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(5): 1754-1769.
- [3] 黄凤兰,倪枫,刘姜,等. 基于 ROAD-CPN 业务架构的可执行建模方法 [J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(5): 534-542.
- [4] SHEN R K, CHIOU G J, YANG C Y, et al. Petri net modeling and analysis of an iPad manufacturing system[J]. *Systems Engineering*, 2018, 21(2): 115-130.
- [5] 袁崇义. Petri 网原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [6] 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.
- [7] YE X H, GE D B, BIAN X T, et al. Improving business process efficiency for supply chain finance: empirical analysis and optimization based on stochastic Petri net[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 98430-98448.
- [8] 王磊. 基于 Petri 网的网络货运联盟链平台的交易流程设计与优化 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- [9] 韩禹. 基于 Petri 网的冷链零担物流业务流程优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [10] 黄宝静,陈诚,周凌云,等. 基于 Petri 网的高铁快运医药冷链作业流程优化及仿真 [J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(8): 126-135.
- [11] LI T S, XIONG L, DONG A Q, et al. Optimization method based on big data in business process management[J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(S3): 5357-5365.
- [12] 彭聚瑞,王高才. 基于随机 Petri 网的移动边缘计算任务卸载优化研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2025, 46(5): 1232-1239.
- [13] 李鑫,黎良,何舟. 基于时延 Petri 网与代价函数的柔性制造系统优化调度 [J]. 控制理论与应用, 2026, 43(2): 415-424.
- [14] 陈英. 基于 Petri 网理论的体检中心仿真建模与优化决策问题研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [15] 王琥珀. 基于 Petri 网的冷链物流业务流程建模及配送路径优化 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [16] 严志超,倪枫,刘文诚,等. 基于 CPN 的敏捷开发业务流程建模方法 [J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(8): 78-84.

(编辑: 丁红艺)