

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210317

一种基于 Petri 网的无人机物流配送建模方法*

冉宁^{1,2} 寇梦娇^{1,3} 郝真鸣^{1,3} 郝晋渊⁴(1. 河北大学电子信息工程学院 保定 071002; 2. 河北大学节能技术研发中心 保定 071002;
3. 河北大学物联网智能技术研究中心 保定 071002; 4. 河北大学中央兰开夏传媒与创意学院 保定 071002)

摘要: 针对传统物流配送操作流程繁琐、易受人为因素影响的问题,提出了将无人机引入物流进行配送的方法。首先,利用随机 Petri 网理论分别对传统物流配送系统以及无人机物流配送系统进行 Petri 网建模;其次,基于随机 Petri 网构建马尔科夫链,利用马尔科夫链对模型进行性能分析;再利用随机 Petri 网的化简规则对两个模型进行等效变换,计算一次配送业务流程的平均作业时间;最后,再对分析结果进行对比研究。研究对比结果表明,相比传统物流配送,利用无人机进行物流线路的再规划,在满足全线路由合理化的同时,时效履约提高了 25.6%,由此可知,利用无人机进行物流配送可以明显缩短配送时间,有效提高配送效率,对实际物流问题具有一定理论借鉴意义。

关键词: Petri 网;无人机;配送;物流

中图分类号: TP11;TN0 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

A Petri net-based modeling method for UAV logistics distribution

Ran Ning^{1,2} Kou Mengjiao^{1,3} Hao Zhenming^{1,3} Hao Jinyuan⁴

(1. College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Laboratory of Energy-Saving Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

3. Laboratory of IoT Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

4. HBU-UCLAN School of Media, Communication and Creative Industries, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: In response to the problem that the traditional logistics distribution operation process is cumbersome and vulnerable to human factors, the method of introducing drones into logistics for distribution is proposed. Firstly, the Petri net theory is used to model the traditional logistics and distribution system and the UAV logistics and distribution system respectively. Second, a Markov chain is constructed based on stochastic Petri nets, and the performance of the model is analyzed using the Markov chain; then the reduction rules of stochastic Petri nets are used to equivalently transform the two models and calculate the average operating time of one distribution business process. Finally, a comparative study is carried out on the analysis results. The research and comparison results show that, compared with traditional logistics distribution, the use of drones to re-plan logistics routes, while satisfying the rationalization of the entire route, improves the time-limited performance by 25.6%. It can be seen that the use of drones for logistics distribution can be significantly shortening the delivery time and effectively improving the delivery efficiency has certain theoretical reference significance for actual logistics problems.

Keywords: Petri net; UAV; distribution; logistics

0 引言

物流业^[1]是确保社会生活的公共生产和供应的基础性产业,在国家经济发展中起到不可或缺的作用。如今,物流业已成衡量国家现代化水平、经济发展的重要指标之一。

物流配送^[2-3]是现代化物流业中的一个关键环节,传统物流主要以人力进行配送,该配送模式受限于运输、储存、装卸、搬运、流通加工、配送和信息处理等要素,耗时长且人工及物化成本较高,难以满足多样化的现代市场需求。此外,一些地区地势复杂,环境较为恶劣,这也进一步导致了快递的

收稿日期:2022-06-14

* 基金项目:国家自然科学基金(61903119)、河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2021008)、河北省引进留学人员资助项目(C20190319)、河北省高等学校人文社会科学研究项目(SY202106)、河北省人力资源社会保障课题(JRS-2020-3025)、河北省社会科学发展研究课题(20210301141)、保定市文化艺术科学规划项目(BWGY044)、2021年度河北大学高校思想政治理论课研究专项资助

配送成本高、耗时长^[4]。自 1960 年以来,人们越来越关注于对无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)的研究,从一开始只应用于军事领域,逐渐扩展到更多的领域^[5-8]。无人机具有造价成本低、机动性强等优点,可以不受地形的限制对快递进行派送,有效缩减了配送时间。将无人机引入快递配送,这对整个物流行业都是一系列全新的挑战。随机 Petri 网是一种分析物流的常用工具,因此本文基于 Petri 网分别对传统物流配送以及无人机配送流程建立模型,并利用随机 Petri 网的化简规则进行化简分析,实验结果表明,利用无人机配送可以有效缩短物流配送的时间,明显提高配送效率,对实际配送问题具有一定的现实意义。

文献[9]对利用无人机进行物流配送进行了优劣势分析,为本文将无人机引入物流提供了理论支持。文献[10]设计了利用无人机向余杭区第二人民医院和浙江大学医学院附属第二医院滨江院区进行应急血液配送,结果表明无人机配送具有较好的时效性,有利于医院人力和交通成本核算。优点在于使用的多旋翼无人机体积小、成本低,控制平稳,其在复杂城市环境下作业效果较好。文献[11-14]提出将卡车与无人机结合进行物流配送,结果发现卡车-无人机协同配送的时间在任何情况下都比卡车单独配送时间短。然而该模式中无人机只能在指定地点与卡车合并且需无人机降落在移动的卡车上,具有局限性。

Petri 网是具有图形表达的直观性的数学工具,被广泛应用于对物流配送的建模与分析^[15-17]。文献[18]提出了一种基于 Petri 网带有配置信息的快递自动投放优化方法,解决了快递超时存放于快递柜而产生额外费用的问题。缺点在于没有考虑数据流的影响,对于实际系统还需进一步深入研究。文献[19]基于广义随机 Petri 网理论,建立电商冷链物流流程模型,验证模型有效性,分析模型时间性能和运作效率。优点在于该电商冷链物流流程模型具有反馈并行的特点,能够调控电商冷链物流全过程,提高物流系统稳定性。文献[20]基于 Petri 网提出了智能快递柜流程模型一种优化模型,该优化模型打破了寄件方式单一这个缺点,很好地提升了用户体验,但并未考虑数据流的影响,对于实际系统还需进一步深入研究。

近年来,国内外以亚马逊、顺丰为代表的企业纷纷对无人机配送的应用性进行探索与研究,但基于无人机配送的理论研究相对较少。本研究将无人机引入物流配送对传统物流配送的改变作为研究对象,借助随机 Petri 网对传统物流配送流程以及无人机配送流程进行建模,然后利用随机 Petri 网同构的马尔科夫链进行性能分析,再根据化简规则进行化简分析,证明了本论文提出的无人机配送流程的配送速度优于传统物流配送业务流程。

1 基于随机 Petri 网的物流配送建模与化简方法

1.1 配送业务流程

物流配送的业务流程可以描述为:根据客户的需求,在

配送中心进行拣货配货,并以合理的方式送达至客户要求地点。一般物流配送作业流程如图 1 所示。配送作业主要流程^[21]为:

1) 审核订单:在接收到客户订单后,对订单进行审核处理,与客户确认所购货物信息,并且制订货物分拣单、制订车辆(无人机)调度单,并将其传送至下游部门,方便下游部门进行相关作业。

2) 货物分拣:仓储部工作人员根据分拣单进行分拣,并按照订单要求进行货物分类存放至暂存区,等待装载。

3) 货物复核:对分拣后的货物进行二次分拣,即货物核对,以防错拣、漏拣货物,确保需流通加工的货物已加工完成,提高货物分拣的正确率。

4) 货物装载:运输工具,即车辆(或无人机)到达暂存区进行取货作业。

5) 送货:货物装载完成后,运输资源进行配送作业,待收货人签收货物,运输资源返回,等待下一次的调度。

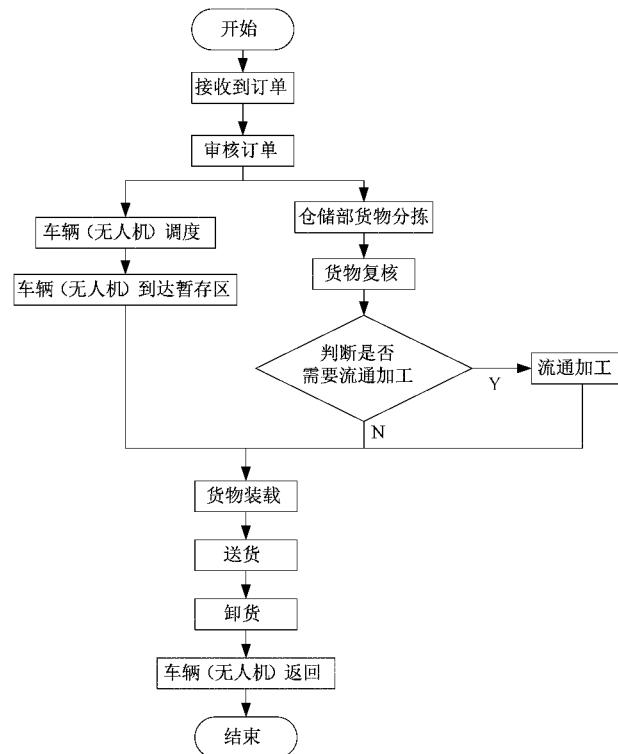


图 1 一般物流配送作业流程

1.2 随机 Petri 网

随机 Petri 网用 6 元组 $\Sigma = (P, T; F, W, M_0, \lambda)$ 来表示,式中, P 和 T 分别代表 Petri 网中所有库所(place)和变迁(transition)的集合; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是 Petri 网中所有变迁与库所之间的流关系; W 代表权函数(weighted function); M 代表标识(marking); $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 为变迁 T 的实施速率集合, $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 代表的是 T_i 的平均速率,单位是“次/单位时间”,其倒数 $\tau_i = 1/\lambda_i$ 称为 T_i 的平均实施延时或平均服务时间。令

$x \in P \cup T$ 表示 Petri 网 Σ 的节点, 记 x 的前置集合 (preset) 为: $\cdot x = \{y \in P \cup T \mid (y, x) \in F\}$; 记 x 的后置集合 (postset) 为: $x \cdot = \{y \in P \cup T \mid (x, y) \in F\}$ 。

在物流配送业务流程中库所表示的是资源的状态; 位于库所中的小黑点代表的是托肯, 表示可利用的资源数目, 是后续变迁触发的条件; 变迁代表资源的使用, 是业务流程中某一操作环节。比如一个库所表示接收到订单时, 如果该库所中存有一个托肯, 则表示已经达到该状态, 即订单已经接收到, 则该库所所连接的变迁可以被触发。

给定 Petri 网, 当且仅当 $\forall p \in \cdot t, M(p) \geq W(p, t)$ 时, 称 $t \in T$ 在标识 M 下是使能, 记为 $M[t\rangle$ 。当使能的变迁 t 触发后, 系统跃迁到另一个状态, 产生新的标识 M' , 使得 $\forall p \in P, M'(p) = M(p) + W(t, p) - W(p, t)$, 记为 $M[t\rangle M'$ 。称 M' 是从 M 可达的当且仅当存在一个变迁发生序列 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n$ 和标识 M_1, M_2, \dots, M_n , 使得 $M_1[t_1\rangle M_2[t_2\rangle \dots M_n[t_n\rangle M'$ 。

Petri 网一般是依据具体的业务流程, 通过图形结构来建立一个模拟系统, 具有简单易懂、易上手的优点。对于物流配送来说, 对其配送流程进行 Petri 网建模分析, 就是利用库所和变迁对配送流程进行过程描述, 然后再利用 Petri 网的特性进行性能分析。为了说明 Petri 网是如何对系统进行的建模, 本文利用简单的模型进行举例说明, 如图 2 所示, 其中 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 分别代表的是 $T_1 \sim T_4$ 的平均实施速率, 库所及变迁物理意义如表 1 所示。

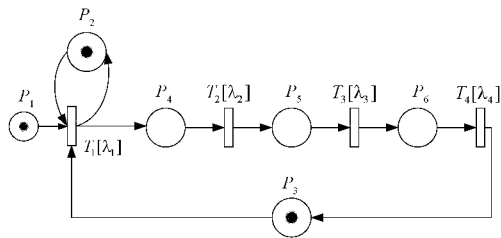


图 2 物流配送实例的随机 Petri 网模型

表 1 库所、变迁物理意义

库所	物理意义	变迁	物理意义
P_1	货物到达站台	T_1	装车
P_2	搬运工人空闲	T_2	车辆行驶
P_3	运输工具(即货车)空闲	T_3	收货人确认信息并签收
P_4	装车完成	T_4	车辆返程
P_5	车辆到达目的地		
P_6	签收完成		

在该模型中, 只要货物能在配送过程中正常流动, 无死锁等不良现象就可判定该配送过程是良好的。由表 2 可以观察到, 从初始标识 M_0 开始, 经过变迁 T_1, T_2, T_3, T_4 之后, M_1, M_2, M_3, M_4 都是可达的, 这说明货物在物流流程中的运行是流畅的。由此说明, 此 Petri 网是具有活性的、可达的。

表 2 可达标识集

状态	标识
M_0	$[1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$
M_1	$[0, 0, 0, 1, 0, 0]^T$
M_2	$[0, 1, 0, 0, 1, 0]^T$
M_3	$[0, 1, 0, 0, 0, 1]^T$
M_4	$[0, 1, 1, 0, 0, 0]^T$

1.3 随机 Petri 网化简规则

在随机 Petri 网中通常取变迁的发生时间服从于负指数分布, 此时分布函数的参数为 λ , 每个 λ_i 的值是从实际物流配送业务流程中实际测量所得或者是根据某种要求的预测值, 因此 λ_i 是具有实际意义的。

利用随机 Petri 网分析问题, 需要先建立随机 Petri 网模型, 然后对模型进行等效化简处理, 最后对模型进行分析。在对 Petri 网模型进行分析之前需要作出以下约定: 1) 各变迁的实施时间服从指数分布; 2) 用 $T[\lambda]$ 表示时间等效变换 T 及其平均实施速率 λ 。随机 Petri 网的简化规则如下:

1) 顺序结构关系模型

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \tag{1}$$

2) 并行结构关系模型

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{l=j+1}^n \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_l} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \tag{2}$$

3) 选择结构关系模型

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\lambda_i} \tag{3}$$

4) 循环结构关系模型

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\lambda_2 + q\lambda_1}{(1-q)\lambda_1\lambda_2} \tag{4}$$

1.4 随机 Petri 网性能分析方法

给定一个 Petri 网, 其中库所 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 变迁 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 则可以用 $A = [a_{ij}]_{n \times m}$ 来表示 Σ 的结构, 其中:

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

$$a_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & (t_j, p_i) \in F \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

$$a_{ij}^- = \begin{cases} 1, & (p_i, t_j) \in F \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}$$

称 A 为 Σ 的关联矩阵。满足方程 $A^T X = 0$ 的一个非负整数向量 X 是 Σ 的一个 P 不变量, P 不变量代表了 Petri 网模型中托肯数量是守恒的。

在一个随机 Petri 网模型同构的马尔科夫链中,可以用一个行向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 来表示该模型中各个状态的稳定概率,有线性方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{XQ} = 0 \\ \sum_1^n x_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, Q 为马尔科夫链过程的转移速率矩阵,矩阵 Q 的非对角元素 $q_{ij} (1 \leq i, j \leq n)$ 由状态 M_i 到 M_j 连接弧上的速率表示;对角线上的元素 $q_{ii} (1 \leq i, j \leq n)$ 等于从状态 M_i 输出的各条弧上标注速率之和的负值。

随之通过以下性能指标公式对随机 Petri 网进行性能分析:

1) 平均托肯数:对于 $\forall P_i \in P, N$ 表示稳定状态下库所 P_i 在任一可达标识中的平均托肯数。

$$N = \sum_{i=1}^n P(M(P_i) = 1) \quad (6)$$

2) 变迁利用率:使 t 可实施的所有标识的稳定概率之和为 $\forall t \in T$ 的利用率 $U(t)$, 其中 E 指使 T 可实施的所有可达标识集合。

$$U(t) = \sum_{M \in E} P[M] \quad (7)$$

3) 变迁的托肯流速:单位时间内流入 t 的后置库所 p 的平均托肯数为 $\forall t \in T$ 的托肯流速 $R(t, p)$ 。

$$R(t, p) = W(t, p) \times U(t) \times \lambda \quad (8)$$

4) 各环节运作效率:

$$\eta = \frac{\sum P(M(P_i))}{N} \quad (9)$$

其中, $\sum P(M(P_i))$ 表示某一环节所拥有的托肯数量,即该环节各库所繁忙率之和。

2 基于 Petri 网的物流配送业务流程建模

2.1 基于 Petri 网的传统物流配送业务流程建模

Petri 网模型通常由 3 个元素组成:表示资源状态的库所、表示资源使用的变迁和表示资源数目的托肯。图 3 表

示的是传统物流配送从接收订单到配送车辆返程的整个业务流程。由于物流配送的时间是不确定的,所以假设所有变迁的发生时延是服从负指数分布的随机变量。

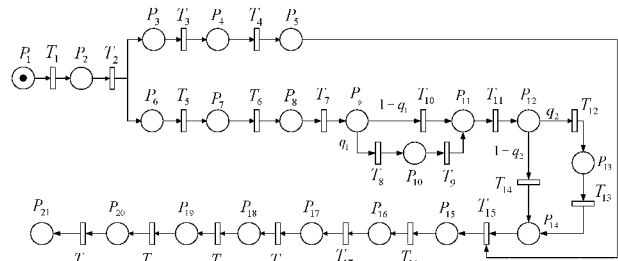


图 3 传统物流配送业务流程随机 Petri 网模型

随机 Petri 网模型中出现的 q_1, q_2 分别是具有选择结构关系的变迁 T_8, T_{12} 的实施概率,即发生变迁 T_8, T_{12} 的概率。库所与变迁的物理意义为: P_1 : 接到出货订单; P_2 : 出货订单审核完成; P_3 : 车辆调度单制作完成; P_4 : 运输部接收到车辆调度单; P_5 : 车辆调度完成; P_6 : 货物分拣单制作完成; P_7 : 仓储部收到货物分拣单; P_8 : 分拣完成; P_9 : 货物复核完成; P_{10} : 处理完成; P_{11} : 流通加工区; P_{12} : 判断完成; P_{13} : 流通加工完成; P_{14} : 暂存区; P_{15} : 货物装载完成; P_{16} : 运输车辆到达配送点; P_{17} : 货物卸载完成; P_{18} : 配送员到达目的地; P_{19} : 收货人信息确认完成; P_{20} : 收货人货物签收完成; P_{21} : 车辆返程完成。 T_1 : 审核出货订单; T_2 : 制作单据; T_3 : 传送车辆调度单; T_4 : 调度车辆; T_5 : 传送货物分拣单; T_6 : 货物分拣; T_7 : 货物复核; T_8 : 重新处理; T_9 : 送至流通加工区; T_{10} : 送至流通加工区; T_{11} : 判断是否需要流通加工; T_{12} : 流通加工; T_{13} : 送至暂存区; T_{14} : 送至暂存区; T_{15} : 货物装载; T_{16} : 货物运输; T_{17} : 货物卸载; T_{18} : 配送员配送; T_{19} : 信息确认; T_{20} : 货物签收; T_{21} : 车辆返程。平均激发频率 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{21}\} = \{6, 12, 12, 6, 6, 4, 4, 6, 4, 12, 30, 6, 12, 12, 20, 1.5, 20, 4, 30, 30, 1\}$ 。

传统物流配送业务流程随机 Petri 网的关联矩阵 A 为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}$$

21x21

根据 $\mathbf{A}^T \mathbf{X} = 0$, 得方程解, 即 P 不变量:

$$\mathbf{X}_1^T = [0, 0, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$\mathbf{X}_2^T = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

根据关联矩阵的性质, 线性方程 $\mathbf{A}^T \mathbf{X} = 0$ 存在非负整数解, 说明传统物流配送业务流程随机 Petri 网的 P 不变量存在, 模型具有结构有界性、可达性和结构活性, 因此所建的 Petri 网模型有效。

2.2 基于 Petri 网的无人机物流配送业务流程建模

传统物流配送在货物配送环节因交通管制、地势复杂等原因导致配送时间较长, 降低客户满意度。因此, 基于传统物流配送业务流程, 本文设计了无人机配送业务流程。无人机物流配送业务流程 Petri 网模型如图 4 所示。与图 3 不同的是, 在货物出库后的配送环节, 图 4 采用无人机进行货物配送, 无需货车运输, 也不需要配送员配送, 可以有效缩短配送时间, 提高配送效率。

随机 Petri 网模型中出现的 q_1, q_2 分别是具有选择结构关系的变迁 T_8, T_{12} 的实施概率, 即发生变迁 T_8, T_{12} 的概率。库所与变迁的物理意义为: $P_1-P_2, P_6-P_{14}, T_1, T_2, T_5, T_{14}$ 含义同传统物流配送; P_3 : 无人机调度

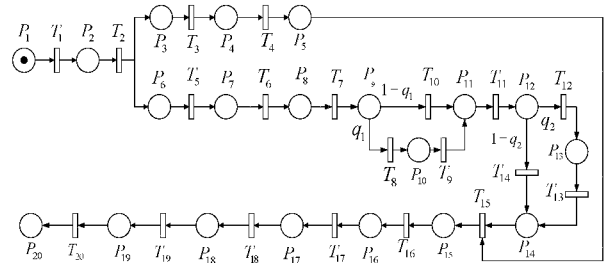


图 4 无人机物流配送业务流程随机 Petri 网模型

单制作完成; P_4 : 无人机部接收到无人机调度单; P_5 : 无人机调度完成; P_{15} : 自动夹持快递盒完成; P_{16} : 降落目的地; P_{17} : 收货人扫描完成; P_{18} : 收货人信息确认完成; P_{19} : 收货人货物签收完成; P_{20} : 无人机返程完成。 T_3 : 传送无人机调度单; T_4 : 调度无人机; T_{15} : 无人机自动夹持快递盒; T_{16} : 自主飞行; T_{17} : 收货人扫描二维码; T_{18} : 信息确认; T_{19} : 货物签收; T_{20} : 无人机返程。平均激发频率 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{20}\} = \{6, 12, 12, 4, 6, 4, 4, 6, 4, 12, 30, 6, 12, 12, 15, 320, 30, 30, 4\}$ 。

无人机物流配送业务流程随机 Petri 网的关联矩阵 \mathbf{A}' 为:

$$A' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{20 \times 20}$$

根据 $A^T X = 0$, 得方程解, 即 P 不变量:

$$X_1^T = [0, 0, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$X_2^T = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

同理, 无人机物流配送业务流程随机 Petri 网模型具有结构有界性、可达性和结构活性, 因此所建的 Petri 网模型有效。

3 算例分析

3.1 传统物流配送业务流程

1) 性能分析

利用 MATLAB 对式(5)求解可得各状态稳定概率, 如表 3 所示。

表 3 传统物流配送的马尔科夫链稳定概率

标识	稳定概率	标识	稳定概率	标识	稳定概率
$P(M_0)$	0.001 5	$P(M_{12})$	0.003 4	$P(M_{24})$	0.021 0
$P(M_1)$	0.001 5	$P(M_{13})$	0.003 1	$P(M_{25})$	0.007 4
$P(M_2)$	0.001 5	$P(M_{14})$	0.001 1	$P(M_{26})$	0.013 4
$P(M_3)$	0.001 1	$P(M_{15})$	0.002 5	$P(M_{27})$	0.008 2
$P(M_4)$	0.000 8	$P(M_{16})$	0.001 1	$P(M_{28})$	0.018 2
$P(M_5)$	0.000 5	$P(M_{17})$	0.002 3	$P(M_{29})$	0.246 7
$P(M_6)$	0.000 8	$P(M_{18})$	0.001 9	$P(M_{30})$	0.013 7
$P(M_7)$	0.000 5	$P(M_{19})$	0.016 7	$P(M_{31})$	0.094 3
$P(M_8)$	0.000 9	$P(M_{20})$	0.020 2	$P(M_{32})$	0.012 7
$P(M_9)$	0.000 8	$P(M_{21})$	0.037 2	$P(M_{33})$	0.012 8
$P(M_{10})$	0.002 9	$P(M_{22})$	0.043 7	$P(M_{34})$	0.133 2
$P(M_{11})$	0.002 2	$P(M_{23})$	0.010 4	$P(M_{35})$	0.133 0

根据各状态稳定概率, 可求库所繁忙率(即物流配送流程中各库所处于繁忙概率)如表 4 所示。

表 4 传统物流配送业务流程 Petri 网库所繁忙率

库所	繁忙率	库所	繁忙率
P_1	0.001 5	P_{12}	0.016 6
P_2	0.001 5	P_{13}	0.010 9
P_3	0.011 3	P_{14}	0.037 8
P_4	0.034 3	P_{15}	0.246 7
P_5	0.179 7	P_{16}	0.013 7
P_6	0.023 9	P_{17}	0.094 3
P_7	0.041 7	P_{18}	0.012 7
P_8	0.047 6	P_{19}	0.012 8
P_9	0.012 0	P_{20}	0.133 2
P_{10}	0.024 3	P_{21}	0.133 0
P_{11}	0.009 0		

马尔科夫链的性能指标计算如下:

(1) 平均托肯数为:

$$N = \sum_{i=1}^{21} P(M(P_i) = 1) = 1.644 1$$

(2) 变迁利用率为:

$$U(t_1) = P[M(P_1) = 1] = 0.001 5$$

(3) 变迁的托肯流速:

$$R(t_1, p_2) = W(t_1, p_2) \times U(t_1) \times \lambda_1 = 0.009$$

(4) 传统物流配送业务流程主要包含三部分: 订单处理、运输、配送, 根据式(9)对三部分的运行效率分别进行分析。

(1) 订单处理效率:

$$\eta_1 = \frac{P(M(P_1) = 1) + P(M(P_2) = 1)}{N} \approx 0.00182$$

(2) 运输效率:

$$\eta_2 = \frac{P(M(P_3) = 1) + \dots + P(M(P_{17}) = 1)}{N} \approx 0.48890$$

(3) 配送效率:

$$\eta_3 = \frac{P(M(P_{18}) = 1) + \dots + P(M(P_{20}) = 1)}{N} \approx 0.09653$$

2) 化简分析

在化简之前, 需要假设模型中的概率 $q_1 = 0.05, q_2 = 0.8$ 。

化简过程如下:

(1) T_5, T_6, T_7 为顺序串联结构关系, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{5,6,7}} = \frac{1}{\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_7} \approx 0.667, \text{ 即 } \lambda_{5,6,7} = 1.5$$

(2) T_8, T_9, T_{10} 为串联、选择混合联接, 先对 T_8, T_9 按串联顺序结构关系进行化简, 再对 $T_{8,9}, T_{10}$ 按照选择结构关系进行化简, 分别带入式(1)、(3)得:

$$\frac{1}{\lambda_{8,9}} = \frac{1}{\lambda_8} + \frac{1}{\lambda_9} \approx 0.417, \text{ 即 } \lambda_{8,9} = 2.4$$

$$\frac{1}{\lambda_{8-10}} = \frac{q_1}{\lambda_{8,9}} + \frac{1-q_1}{\lambda_{10}} = 0.1, \text{ 即 } \lambda_{8-10} = 10$$

(3) T_{12}, T_{13}, T_{14} 为串联、选择混合联接, 先对 T_{12}, T_{13} 按串联顺序结构关系进行化简, 再对 $T_{12,13}, T_{14}$ 按照选择结构关系进行化简, 分别带入式(1)、(3)得:

$$\frac{1}{\lambda_{12,13}} = \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{13}} = 0.25, \text{ 即 } \lambda_{12,13} = 4$$

$$\frac{1}{\lambda_{12-14}} = \frac{q_2}{\lambda_{12,13}} + \frac{1-q_2}{\lambda_{14}} \approx 3.217, \text{ 即 } \lambda_{12-14} \approx 0.311$$

经过上面 3 步等效变换后, 得到的随机 Petri 网模型如图 5 所示。

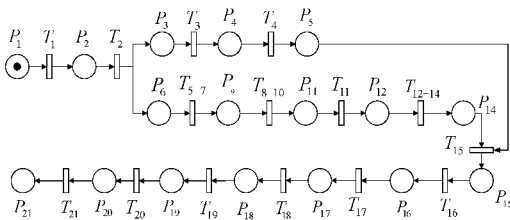


图 5 传统物流配送业务流程化简过程(1)

(4) $T_3, T_4, T_{5-7}, T_{8-10}, T_{11}, T_{12-14}$ 为串并联混合联接, 先对 $T_3, T_4; T_{5-7}, T_{8-10}, T_{11}, T_{12-14}$ 分别按照顺序结构关系化简, 再对 T_{3-4}, T_{5-14} 按照并行规则进行化简, 分别带入式(1)、(2), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{3-4}} = \frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4} = 0.25, \text{ 即 } \lambda_{3,4} = 4$$

$$\frac{1}{\lambda_{5-14}} = \frac{1}{\lambda_{5-7}} + \frac{1}{\lambda_{8-10}} + \frac{1}{\lambda_{11}} + \frac{1}{\lambda_{12-14}} \approx 4.017,$$

即 $\lambda_{5-14} \approx 0.249$

$$\frac{1}{\lambda_{3-14}} = \frac{1}{\lambda_{3,4}} + \frac{1}{\lambda_{5-14}} - \frac{1}{\lambda_{3,4} + \lambda_{5-14}} \approx 4.032,$$

即 $\lambda_{3-14} \approx 0.248$

(5) $T_{16}, T_{17}, T_{18}, T_{19}, T_{20}, T_{21}$ 为顺序串联结构关系, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{16-21}} = \frac{1}{\lambda_{16}} + \frac{1}{\lambda_{17}} + \frac{1}{\lambda_{18}} + \frac{1}{\lambda_{19}} + \frac{1}{\lambda_{20}} + \frac{1}{\lambda_{21}} \approx 2.033,$$

即 $\lambda_{16-21} \approx 0.492$

等效化简后的随机 Petri 网模型如图 6 所示。

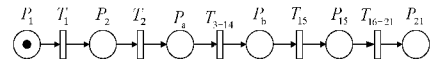


图 6 传统物流配送业务流程化简过程(2)

(6) $T_1, T_2, T_{3-14}, T_{15}, T_{16-21}$ 为顺序结构模型, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{1-21}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_{3-14}} + \frac{1}{\lambda_{15}} + \frac{1}{\lambda_{16-21}} \approx 6.365,$$

即 $\lambda_{1-21} \approx 0.157$

最终等效化简后的随机 Petri 网模型如图 7 所示。

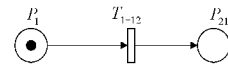


图 7 传统物流配送业务流程化简过程(3)

在假设物流配送过程中的概率 $q_1 = 0.05, q_2 = 0.8$ 的情况下, 从接收到出货订单到收货人签收货物、车辆返程的全部作业流程的等效平均实施速率为单位时间内 0.157 次, 设单位时间为小时, 则该配送流程的平均作业时间为 6.365 h。等效化简关系如表 5 所示。

表 5 传统物流配送业务模型等效化简关系

	原变迁	等效变迁	等效激发生率
等效化简(1)	T_5, T_6, T_7	T_{5-7}	1.5
	T_8, T_9, T_{10}	T_{8-10}	10
等效化简(2)	T_{12}, T_{13}, T_{14}	T_{12-14}	0.311
	$T_3, T_4, T_{5-7}, T_{8-10}, T_{11}, T_{12-14}$	T_{3-14}	0.248
等效化简(3)	$T_{16} - T_{21}$	T_{16-21}	0.492
	$T_1, T_2, T_{3-14}, T_{15}, T_{16-21}$	T_{1-21}	0.157

3.2 无人机物流配送业务流程

1) 性能分析

利用 MATLAB 对式(5)求解可得各状态稳定概率, 如表 6 所示。

根据各状态稳定概率, 可求库所繁忙率(即物流配送流程中各库所处于繁忙概率)如表 7 所示。

马尔科夫链的性能指标计算如下:

(1) 平均托肯数为:

表 6 无人机物流配送的马尔科夫链稳定概率

标识	稳定概率	标识	稳定概率	标识	稳定概率
$P(M_0)$	0.006 7	$P(M_{12})$	0.018 7	$P(M_{24})$	0.042 0
$P(M_1)$	0.006 4	$P(M_{13})$	0.016 9	$P(M_{25})$	0.013 8
$P(M_2)$	0.006 2	$P(M_{14})$	0.004 7	$P(M_{26})$	0.025 3
$P(M_3)$	0.004 3	$P(M_{15})$	0.009 5	$P(M_{27})$	0.015 7
$P(M_4)$	0.002 8	$P(M_{16})$	0.003 7	$P(M_{28})$	0.047 9
$P(M_5)$	0.001 1	$P(M_{17})$	0.006 1	$P(M_{29})$	0.244 3
$P(M_6)$	0.002 0	$P(M_{18})$	0.004 7	$P(M_{30})$	0.037 0
$P(M_7)$	0.001 0	$P(M_{19})$	0.052 6	$P(M_{31})$	0.024 9
$P(M_8)$	0.001 8	$P(M_{20})$	0.013 2	$P(M_{32})$	0.025 1
$P(M_9)$	0.001 4	$P(M_{21})$	0.046 4	$P(M_{33})$	0.199 5
$P(M_{10})$	0.005 1	$P(M_{22})$	0.069 8	$P(M_{34})$	0.222 9
$P(M_{11})$	0.011 0	$P(M_{23})$	0.017 7		

表 7 无人机物流配送业务流程 Petri 网库所繁忙率

库所	繁忙率	库所	繁忙率
P_1	0.006 7	P_{11}	0.018 5
P_2	0.006 4	P_{12}	0.033 2
P_3	0.025 7	P_{13}	0.021 8
P_4	0.127 9	P_{14}	0.105 6
P_5	0.291 8	P_{15}	0.244 3
P_6	0.030 4	P_{16}	0.037 0
P_7	0.069 4	P_{17}	0.024 9
P_8	0.089 5	P_{18}	0.025 1
P_9	0.023 5	P_{19}	0.199 5
P_{10}	0.053 5	P_{20}	0.202 9

$$N = \sum_{i=1}^{20} P(M(P_i) = 1) = 1.647 6$$

(2) 变迁利用率:

$$U(t_1) = P[M(P_1) = 1] = 0.006 7$$

(3) 变迁的托肯流速:

$$R(t_1, p_2) = W(t_1, p_2) \times U(t_1) \times \lambda_1 = 0.040 2$$

(4) 传统物流配送业务流程主要包含三部分: 订单处理、运输、配送, 根据式(6)对三部分的运行效率分别进行分析。

(1) 订单处理效率:

$$\eta_1 = \frac{P(M(P_1) = 1) + P(M(P_2) = 1)}{N} \approx 0.007 95$$

(2) 运输效率:

$$\eta_2 = \frac{P(M(P_3) = 1) + \dots + P(M(P_{16}) = 1)}{N} \approx 0.711 40$$

(3) 配送效率:

$$\eta_3 = \frac{P(M(P_{17}) = 1) + \dots + P(M(P_{19}) = 1)}{N} \approx 0.151 43$$

2) 化简分析

在化简之前, 需要假设模型中的概率 $q_1 = 0.05, q_2 = 0.8$ 。化简过程如下:

(1) T_5, T_6, T_7 为顺序串联结构关系, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{5,6,7}} = \frac{1}{\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_6} + \frac{1}{\lambda_7} \approx 0.667, \text{ 即 } \lambda_{5,6,7} = 1.5$$

(2) T_8, T_9, T_{10} 为串联、选择混合联接, 先对 T_8, T_9 按串联顺序结构关系进行化简, 再对 $T_{8,9}, T_{10}$ 按照选择结构关系进行化简, 分别带入式(1)、(3)得:

$$\frac{1}{\lambda_{8,9}} = \frac{1}{\lambda_8} + \frac{1}{\lambda_9} \approx 0.417, \text{ 即 } \lambda_{8,9} = 2.4$$

$$\frac{1}{\lambda_{8-10}} = \frac{q_1}{\lambda_{8,9}} + \frac{1-q_1}{\lambda_{10}} = 0.1, \text{ 即 } \lambda_{8-10} = 10$$

(3) T_{12}, T_{13}, T_{14} 为串联、选择混合联接, 先对 T_{12}, T_{13} 按串联顺序结构关系进行化简, 再对 $T_{12,13}, T_{14}$ 按照选择结构关系进行化简, 分别带入式(1)、(3)得:

$$\frac{1}{\lambda_{12,13}} = \frac{1}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{13}} = 0.25, \text{ 即 } \lambda_{12,13} = 4$$

$$\frac{1}{\lambda_{12-14}} = \frac{q_2}{\lambda_{12,13}} + \frac{1-q_2}{\lambda_{14}} \approx 3.217, \text{ 即 } \lambda_{12-14} \approx 0.311$$

经过上面 3 步等效变换后, 得到的随机 Petri 网模型如下图 8 所示。

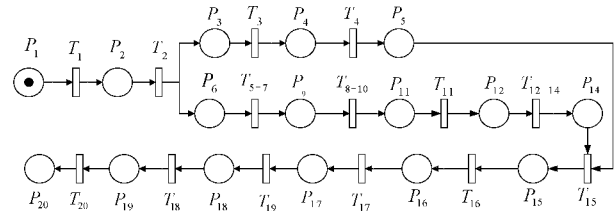


图 8 无人机物流配送业务流程化简过程(1)

(4) $T_3, T_4, T_{5,7}, T_{8,10}, T_{11}, T_{12,14}$ 为串并联混合联接, 先对 $T_3, T_4; T_{5,7}, T_{8,10}, T_{11}, T_{12,14}$ 分别按照顺序结构关系化简, 再对 T_{3-4}, T_{5-14} 按照并行规则进行化简, 分别带入式(1)、(2), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{3,4}} = \frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_4} \approx 0.33, \text{ 即 } \lambda_{3,4} = 3$$

$$\frac{1}{\lambda_{5-14}} = \frac{1}{\lambda_{5,7}} + \frac{1}{\lambda_{8,10}} + \frac{1}{\lambda_{11}} + \frac{1}{\lambda_{12-14}} \approx 4.017,$$

$$\text{即 } \lambda_{5-14} \approx 0.249$$

$$\frac{1}{\lambda_{3-14}} = \frac{1}{\lambda_{3,4}} + \frac{1}{\lambda_{5-14}} - \frac{1}{\lambda_{3,4} + \lambda_{5-14}} \approx 4.042,$$

$$\text{即 } \lambda_{3-14} \approx 0.247$$

(5) $T_{16}, T_{17}, T_{18}, T_{19}, T_{20}, T_{21}$ 为顺序串联结构关系, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{16-21}} = \frac{1}{\lambda_{16}} + \frac{1}{\lambda_{17}} + \frac{1}{\lambda_{18}} + \frac{1}{\lambda_{19}} + \frac{1}{\lambda_{20}} + \frac{1}{\lambda_{21}} = 0.7,$$

$$\text{即 } \lambda_{16-21} \approx 1.429$$

等效化简后的随机 Petri 网模型如图 9 所示。

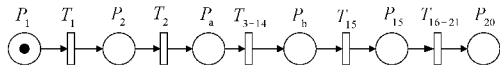


图 9 无人机物流配送业务流程化简过程(2)

(6) $T_1, T_2, T_{3-14}, T_{15}, T_{16-21}$ 为顺序结构模型, 带入式(1), 得:

$$\frac{1}{\lambda_{1-21}} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_{3-14}} + \frac{1}{\lambda_{15}} + \frac{1}{\lambda_{16-21}} \approx 5.059,$$

即 $\lambda_{1-21} \approx 0.197$

最终等效化简后的随机 Petri 网模型如图 10 所示。

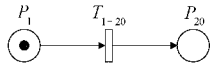


图 10 无人机物流配送业务流程化简过程(3)

在假设物流配送过程中的概率 $q_1 = 0.05, q_2 = 0.8$ 的情况下, 从接收到出货订单到收货人签收货物、无人机返程的全部作业流程的等效平均实施速率为单位时间内 0.197 次, 设单位时间为小时, 则该配送流程的平均作业时间为 5.059 h, 等效化简关系如表 8 所示。

表 8 无人机物流配送模型等效化简关系

	原变迁	等效变迁	等效激发率
等效化简(1)	T_5, T_6, T_7	T_{5-7}	1.5
	T_8, T_9, T_{10}	T_{8-10}	10
	T_{12}, T_{13}, T_{11}	T_{12-11}	0.311
等效化简(2)	$T_3, T_4, T_{5-7}, T_{8-10}, T_{11}, T_{12-14}$	T_{3-14}	0.247
	$T_{16}-T_{20}$	T_{16-20}	1.429
等效化简(3)	$T_1, T_2, T_{3-14}, T_{15}, T_{16-20}$	T_{1-20}	0.197

3.3 对比分析

通过对传统物流配送业务流程随机 Petri 网模型与无人机物流配送业务流程随机 Petri 网模型进行性能分析及化简分析, 得出平均托肯数、变迁利用率、变迁的托肯流速、订单处理效率、运输效率、配送效率、平均实施速率和平均作业时间 8 种指标。

其中, 平均托肯数反映了系统部件的利用率, 平均托肯数越大代表系统部件利用率越高; 变迁利用率反映了系统的吞吐量, 变迁利用率越高代表系统吞吐量越大, 系统处理对象的能力越强; 订单处理效率、货物运输效率、货物配送效率分别反映的是订单处理所需时间、货物运输所花费的时间以及配送环节花费时间, 效率越高说明该环节所花费时间越短, 更高效。平均实施速率反映了系统的响应速度, 平均实施速率越低代表了系统响应速度越快, 系统的机动性越强; 平均作业时间反映了物流配送业务流程的时间需求, 平均作业时间越短代表完成整个配送业务流程所需时间越短, 时间效率越高。

根据传统物流配送流程随机 Petri 网模型与无人机配

送流程随机 Petri 网模型的性能分析以及化简分析, 对各自业务流程的平均托肯数、变迁利用率、变迁的托肯流速、订单处理效率、运输效率、配送效率、平均实施速率和平均作业时间这八项指标进行对比, 对比结果如图 11~14 所示。

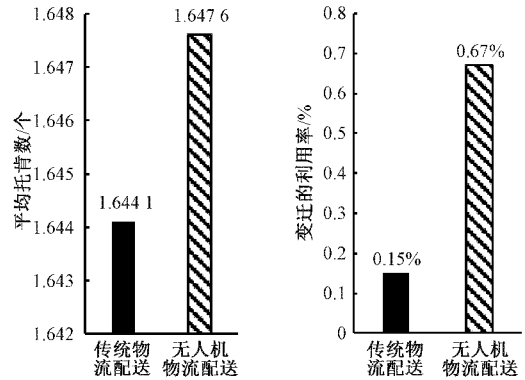


图 11 平均托肯数与变迁利用率对比

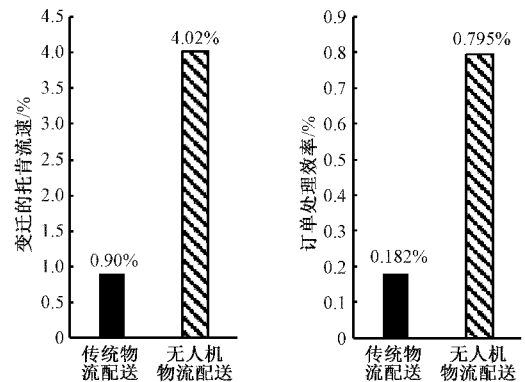


图 12 变迁的托肯流速与订单处理效率对比

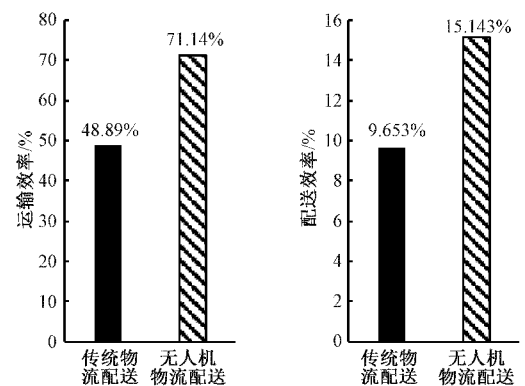


图 13 运输效率与配送效率对比

由数据可以明显看出, 在流程平均托肯数上, 无人机配送业务流程比传统物流配送业务流程高; 在流程变迁利用率上, 无人机配送业务流程比传统物流配送业务流程高; 无论是订单处理效率、运输效率, 还是配送效率, 无人机物流配送业务流程均优于传统物流配送; 在平均实施速率方面, 无人机配送业务流程比传统物流配送业务流程

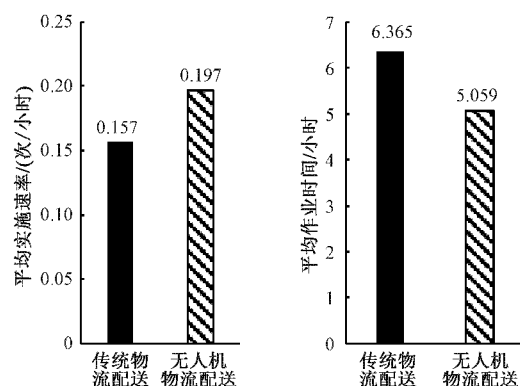


图 14 平均实施速率与平均作业时间对比

高;无人机物流配送平均作业时间低于传统物流配送,即利用无人机完成一次物流配送所需时间低于传统物流配送,且相比于传统物流配送,利用无人机进行物流配送,时效履约提高了 25.6%。

由此可知,无人机物流配送业务流程与传统物流配送业务流程相比,花费时间更少、配送效率更高、机动性更强。以此证明了无人机配送业务流程较传统物流配送业务流程性能更优。

4 结 论

本文针对传统物流配送的时效性易受人为因素影响的问题,提出了将无人机引入物流进行配送的方法。通过对两种配送方式进行随机 Petri 网建模,可以计算出一次配送作业的平均激发率,进而求出一次配送作业所用的时间。传统物流配送业务与无人机物流配送业务相比,可以明显看出无人机配送业务流程所花时间更少,配送效率更高。以此证明了本文所设计的无人机配送业务流程配送速度优于传统物流配送业务流程。本文设计的无人机配送业务流程是基于传统物流业务流程设计的,由于现阶段无人机配送还未大规模使用,因此设计的业务流程相对简单。但在将来,随着无人机在物流行业的大规模应用,业务流程也会变的更加复杂,与此同时,Petri 网建模的难度也会相对增加,本论文的随机 Petri 网可能无法解决该问题,因此需要其他高级 Petri 网对其进行研究分析。

参考文献

- [1] 沙如雪. 江苏省城市物流发展水平实证分析[J]. 市场周刊, 2022, 35(1): 37-40, 63.
- [2] 海晓伟, 廖甜. 县城快递物流配送问题研究——以湖北省洪湖市为例[J]. 内蒙古科技与经济, 2022(2): 48-49.
- [3] 梅灵, 邵明吉. 快递业务配送流程优化设计——以京东自营物流为例[J]. 中国市场, 2018(1): 107-109.
- [4] 顾璟. 智慧物流企业配送效率影响因素分析[J]. 时代汽车, 2021(19): 21-22.
- [5] 闫超, 涂良辉, 王聿豪, 等. 无人机在我国民用领域应用综述[J]. 飞行力学, 2022, 40(3), DOI: 10.13645/j.cnki.f.l.20220412.006.

- [6] 林沐, 黄建, 梁旭. 基于 DSP+ FPGA 的无人机双冗余配电管理计算机设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(9): 55-62.
- [7] 刘连胜, 张哲彦, 王志亮, 等. 四旋翼无人机姿态异常感知数据生成方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 58-67.
- [8] 黄煜栋, 郝平. 面向系留无人机协作通信中多链路调度算法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 36-41.
- [9] 包欣鑫, 骆培, 王可林. 浅析无人机配送的优势及障碍[J]. 现代商业, 2017(23): 13-14.
- [10] 郑茵红, 李阿中, 黄娟, 等. 无人机在应急血液配送中的初步应用[J]. 中国输血杂志, 2021, 34(11): 1263-1265.
- [11] 刘正元, 王清华. 无人机在应急物流配送中的任务分配模型构建[J]. 科技管理研究, 2020, 40(24): 229-236.
- [12] 孟姗姗, 郭秀萍. 卡车-无人机混合配送的两阶段求解方法[J/OL]. 工业工程与管理: 1-14 [2022-03-22].
- [13] KITJACHAROENCHAI P, VENTRESCA M, MOSHREF-JAVADI M, et al. Multiple traveling salesman problem with drones: Mathematical model and heuristic approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129: 14-30.
- [14] WANG X, POIKONEN S, GOLDEN B. The vehicle routing problem with drones: several worst-case results[J]. Optimization Letters, 2017, 11(4): 679-697.
- [15] 李静. 鲜活农产品航空冷链物流随机时间 Petri 网模型构建与分析[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(11): 125-128.
- [16] 郝晋渊, 孙丹丹, 郝真鸣, 等. 基于标签 Petri 网的自动制造系统初始资源配置优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 30-36.
- [17] 冉宁, 李婷婷, 张照彦, 等. 一种离散事件系统边界可诊断性验证方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 83-90.
- [18] 向小阳, 王丽丽. 基于 Petri 网的快递自助投放模型优化[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2021, 23(1): 78-81, 114.
- [19] 刘守臣. 基于广义随机 Petri 网的电商冷链物流流程建模.
- [20] 卢雅楠, 卢克峰. 基于 Petri 网智能快递柜系统优化[J]. 韶关学院学报, 2020, 41(3): 11-14.
- [21] 刘善球, 樊兵鹏. 作业流程下快递物流的转运异常控制[J]. 北方经贸, 2020(11): 68-70, 79.

作者简介

冉宁, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能系统与控制、系统优化等。

E-mail: ranning87@hotmail.com

寇梦娇, 硕士研究生, 主要研究方向为智慧物流系统、系统优化等。

E-mail: 1152054892@qq.com

郝真鸣, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为自动化控制、检测技术。

E-mail: hbdxhzm@163.com

郝晋渊(通信作者), 硕士, 讲师, 主要研究方向为融媒体、新媒体传播、信息技术等。

E-mail: hjy@hbu.edu.cn