

# 基于双层规划的“客运化”物流运输系统研究

林汉城, 张小宁

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月13日; 发布日期: 2023年3月23日

## 摘要

传统的城乡物流运输往往由于运输成本过高及运输效率低等问题而导致城乡物品流通不紧密。为了改善城乡物流运输效率、降低城乡物流运输成本, 引入客运物流企业双方合作新模式, 同时改善了客运企业运营服务。本文提出了客运与物流结合的共享物流系统, 采用了双层规划方法建立“客运化”物流运输系统优化模型。上层模型以物流企业为决策者, 考虑给予客运企业补贴后运营收益最大; 下层模型客运企业为跟随者, 考虑制定出行票价、运货补贴及运货方案后补贴收益最大。针对本文提出的双层规划模型, 设计了基于精英策略的遗传算法求解上层模型, 采用Gurobi求解器求解下层模型。最后, 本文进行了仿真实验, 验证了模型的可行性和算法的有效性, 以期完善城乡物流运输系统的不足, 为城乡物流运输系统提供新的思路。

## 关键词

共享物流, 双层规划, 补贴设计, 遗传算法

# Research on “Passengerization” Logistics Transportation System Based on Bi-Level Programming

Hancheng Lin, Xiaoning Zhang

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: Mar. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2023

## Abstract

The traditional urban and rural logistics transportation often results in the lack of close circulation of urban and rural goods due to problems such as high transportation costs and low trans-

portation efficiency. To improve the efficiency of urban and rural logistics transportation and reduce the cost of urban and rural logistics transportation, a new model of cooperation between passenger logistics enterprises has been introduced, and the operation services of passenger transportation enterprises have been improved. This paper proposes a shared logistics system combining passenger transport and logistics and adopts a bi-level programming method to establish an optimization model of a "passenger-oriented" logistics transport system. In the upper model, the logistics company is the decision maker, and the operating income is the largest after considering the subsidy to the passenger transport company; in the lower model, the passenger transport company is the follower, and the subsidy benefit is the largest after considering the travel fare, freight subsidy and freight plan. Aiming at the bilevel programming model proposed in this paper, an elite strategy-based genetic algorithm is designed to solve the upper model, and a Gurobi solver is used to solve the lower model. Finally, this paper conducts simulation experiments to verify the feasibility of the model and the effectiveness of the algorithm, to improve the shortcomings of the urban and rural logistics transportation system and provide new ideas for the urban and rural logistics transportation system.

## Keywords

Shared Logistics, Two-Tier Planning, Subsidy Design, Genetic Algorithm

Copyright © 2023 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

随着电子商务行业不断发展和现代交通网络的逐步完善,推动了现代城市物流运输的快速发展。全国物流货运量随年逐渐增长,这也是电子商务行业需求不断促进的前提,是城市物流作为城市经济快速发展的重要环节。然而城乡物流的发展无法参考城市物流的发展,产生的原因在于乡镇物流基础设施不完善,与城市物流相差较大,城乡居民出现收货延迟和物流企业收益不均衡等问题,从而阻碍了城乡物流一体化的发展[1]。而发展城乡物流一体化是促进乡村经济快速发展的一个重要环节。通常物流运输的目标是实现实体货物在空间位置上的移动,事实上,物流运输受到运输成本、交通环境污染及交通拥挤等影响,考虑到城乡物流对城乡经济发展的重要性,在城乡物流运输环节可以采用公共交通进行货物运输。在2021年宁波市已实现了这种运输方式,通过在宁海物流中心设置53辆公交车运输宁波市的货物到各乡镇,该方式有效提高了城乡的运输时效性,且降低了物流企业的运输成本[2]。

## 2. 文献综述

城市物流的研究较为成熟,是在考虑交通环境、交通拥挤及相关利益者条件下,适当的规划货运的运输。学者们通常采用双层物流运输系统来研究城市物流,主要考虑大型货运车辆对交通拥堵和环境的影响。Amaral [3]等研究如何有效和高效地管理城市物流运输,考虑整合和分配的策略及交货时间窗条件,建立了双层的车辆路径优化问题,该问题将运输分为两个阶段,第一阶段从城市郊区运输到城市中站点,从而避免了大型车辆出现在城市中心,减轻环境的污染,第二阶段由小型车辆运输货物到客户,该模型采用了数学建模语言 AMPL 编写,通过实例分析了该模型的可行性。何江和黄翰[4]在双层物流运输系统研究中设计了混合启发式算法,该算法结合贪心算法、蚁群算法及领域搜索算法,算例分析表明了该问题的可行性和算法的有效性。Masson [5]等从公共交通闲置的资源研究双层物流运输系统,在上层中希望

通过公交车剩余运力运输货物, 运输到市中心的多个中转点, 在下层中, 货物由城市三轮车运送到客户手上, 旨在为拥挤的城市提供创新的物流运输系统, 并采用了自适应大领域搜索算法对模型进行求解, 算例分析表明了该问题的可行性和算法的有效性。然而, 双层城市物流运输系统不适用于城乡物流运输系统, 乡镇物流缺少城市中转点这类基础设施, 但采用双层规划的方法进行分析是值得借鉴和参考。

城乡物流的发展有助于提高城乡经济的发展, 学者们也对其展开了相关的研究。弓宪文[6]采用了耦合度的方法分析了城乡物流发展差距大存在的原因, 例如技术、基础设施及规模效应等多方因素。任保平和魏杰[7]通过主成分分析方法对城乡物流发展进行描述和评价, 认为信息的不对称以及物流资源的分散等多方面是城乡物流发展的瓶颈所在。吴海燕等[8]从城乡物流设施、规模效应及城乡物流体系建设等方面分析和总结了城乡物流发展不均衡的现象和原因。刘宝[9]认为将城市和乡村分割成两座“孤岛”进行管理, 会影响城乡物流的发展, 导致无法满足农民的生活需求。周凌云等[10]从物流成本、物流配送模式以及物流流通环节分析了农民的生活需求无法得到保障。卢美丽[11]采用层次分析法研究城乡物流一体化的发展水平, 认为物流规划的发展城乡物流的发展影响较大。赵栋强[12]分析了乡村地区轻视物流产业, 缺乏先进的物流思维和市场观念, 相比于城市, 资源较为匮乏。郝桢[13]分析了城乡物流发展受到限制的原因在于运输成本是城市的三倍以上, 而减少成本需要货运量达到一定的规模。

Yang [14]等基于合作的车辆路径规划研究城乡物流的共同配送问题, 算例分析表明了多家物流企业之间的合作机制能够有效降低成本并提高城乡物流的整体效率。提高城乡物流的运输效率也尤为重要。彭永涛和李丫丫[15]设计了包含工业品供应商、城市物流配送中心和乡镇与农村配送站的三层物流网络, 建立了多目标网络优化模型, 考虑物流运输费用和物流运输时间最小化问题。彭永涛等[16]构建需求网络和供给网络的城乡配送超网络结构模型, 旨在提高城乡商品共同配送能力以及双向流通的能力。Wei [17]考虑在政府的帮助下如何实现农村物流最后一公里的配送问题, 从而建立了财政补贴下的物流企业收益最大化模型, 旨在优化车辆的配送路线, 并分析车辆数量的资源配置对物流企业收益的影响。Feng [18]以徐州市果蔬农产品为研究对象, 考虑第三方物流配送模式与农产品超市对接, 实现联合配送, 提高物流配送效率, 减轻物流运营压力。

公共交通的研究主要集中在城市公共交通补贴问题, 国内外学者们对其已经展开了一系列的研究, 主要集中于票价补贴和运营补贴。杨帆[19]等分析了三种经济机理正外部性、次优理论和规模报酬递增, 在此基础上建立了三种政府财政补贴模型, 通过算例分析表明适当的经济补贴能够改善公交企业的运营和服务。而张英和李宪宁[20]、Sakai [21]等认为应减少公共交通在运营上对财政补贴的依赖性, 通过实施激励机制来提高公共交通能力。在此基础上, 王海燕[22]等在效用理论的基础上建立补贴模型, 并根据不同人群的收入对乘客进行分类, 通过案例分析建议实施票价补贴联动机制有助于改善公共交通运营的积极性。章玉[23]等从可持续发展的发展的视角考虑公共交通补贴政策, 分析了票价补贴、运营补贴及生态足迹成本对乘客公共交通出行的影响, 研究得出实施票价补贴相比于运营补贴有助于吸引乘客公共交通出行。而城乡客运票价补贴问题研究甚少, 主要原因在于城乡客运随着运输里程的增加, 票价居高不下, 在没有与城市客运相同的条件下, 即实施财政补贴, 无法实行相同的票价, 也无法长久的维持客运企业的运营[24]。霍娅敏[25]等在运输成本基础上, 进一步考虑公共政策目标和乘客接受程度建立城乡客运票价优化模型, 以提供决策者制定最有利的票价。吴玲玲[26]等结合拉姆齐定价模型建立了适合于山地城市城乡客运财政补贴定价模型, 为城乡客运票价补贴提供新的思路。财政补贴也有助于改善客运企业运营服务[27] [28] [29], 但通常财政补贴用来维持客运企业的运营, 但过度的补贴会浪费大量的财政支出, 若出现财政收入的减少、支出不可控的现象, 都无法维持客运企业良好的可持续发展。此外, 近几年网约车的出现, 改变了乘客已有的出行方式, 直接分流了客运企业的客流量, 对客运企业造成了较大的影响。

物流企业以运输效率为导向, 但中大型货运车辆对城市存在潜在的噪音污染, 会发生严重的拥堵现象。随着城市的发展, 交通环境的影响制约了物流运输的发展。此外, 乡村物流节点依然存在覆盖不够、运力不足等问题。客运能够平衡物流运输效率和交通环境影响, 一方面, 客运相比于与中大型货运车辆对交通环境的影响小, 另一方面, 能改善城乡物流运力不足、成本过高等问题。

本文首先将客运作为城乡物流的运输载体, 为提高客运企业运输货物的意愿, 物流企业通过补贴的方式来吸引客运企业; 其次, 若客运企业整合车辆空间作为载货空间来运输货物, 这与客运构建便民的出行服务背道而驰, 为此, 客运企业以补贴票价来吸引乘客出行, 票价补贴通过补贴乘客运货的方式实现。本文建立了城乡物流客运收益优化的双层规划模型, 以物流企业运营收益最大为上层的目标, 以客运企业补贴收益最大作为下层的目标, 并设计了求解算法。最后, 采用了仿真实验分析本文模型和算法的有效性, 为城乡物流和客运一体化的发展提供参考和借鉴。

### 3. 研究方法

#### 3.1. 问题描述

物流与客运企业收益优化问题可以认为是一个典型的领导者 - 跟随者的决策问题, 其中物流企业为领导者, 客运企业为跟随者。首先, 城乡之间物流运输环节存在运作流程多、效率低及成本高等问题, 造成了物流资源的浪费和缺乏; 其次, 虽然我国城乡客运体系逐步完善, 乘客的出行条件得到了显著改善, 但客运出行方式吸引力仍有不足。为改善城乡物流及客运存在上述所描述的问题, 本文提出新的共享物流模式, 通过合作的方式整合物流和客运企业的资源, 使得客运企业有效利用闲置的运力实现创新性的收入, 物流企业也得以降低自身运输货物的高额成本。双方决策制定如下, 物流企业根据客运企业的运货量和客流量来决策货物的补贴价格, 而客运企业根据在合理的运货需求下及物流企业给定的补贴来决策乘客的出行票价、运货补贴价格及运货方案。该问题与双层规划问题定义基本一致, 故本文利用双层规划模型来优化物流企业和客运企业收益, 其概念框架如图 1 所示, 从图中可以更清晰地认识到客运企业和物流企业之间存在领导者与跟随者的关系。

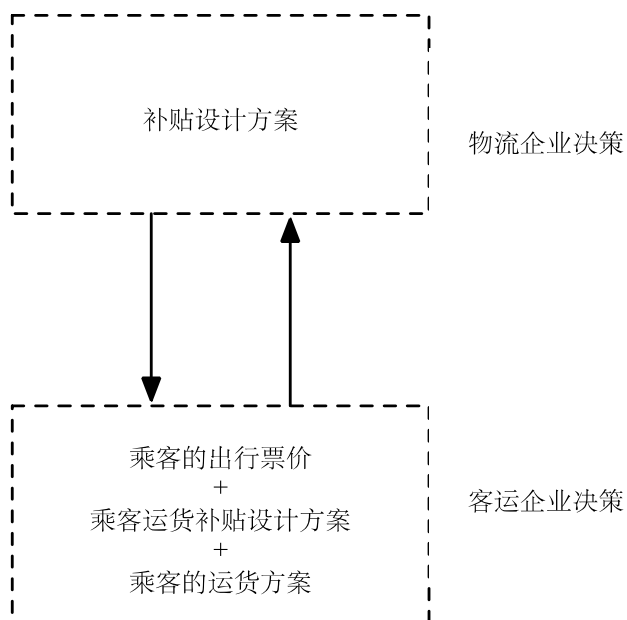


Figure 1. The framework of the bi-level programming model  
图 1. 双层规划模型概念框架图

上层规划领导者希望通过客运企业的闲置的运力来运输货物, 从而减少物流企业的运输成本和运营压力。该问题可以表示为物流企业根据客运企业的运货量来制定运货补贴价格, 在合理的运货补贴下, 使得物流企业取得运营收益最大的同时改善物流运输环节存在的问题。

尽管物流企业希望运输货物的任务由客运企业承担, 但对于客运企业如何吸引乘客乘坐客运出行尤为重要。因此, 下层规划问题描述了客运企业希望充分利用客运车辆的空间及物流企业给予的补贴来决策乘客的出行票价、运货补贴价格及运货方案, 从而减轻乘客的出行压力, 从而提高车辆载客率, 使客运企业取得补贴收益最大。

### 3.2. 物流客运补贴设计优化模型

基于上述建模思想, 建立物流客运收益优化模型, 上层规划问题由物流企业决策客运企业运输货物的补贴价格, 下层优化问题在合理的补贴以及运货需求下客运企业决策乘客出行票价、运货补贴方案和运货方案, 该双层规划的目标是双方企业各自的收益最大。

#### 3.2.1. 上层规划问题

为改善城乡物流的运营收益, 上层规划建立物流企业运营收益模型, 该问题的补贴决策方案有物流企业制定, 其目标是通过补贴客运企业的方式激励该企业运输货物, 从而使物流企业的运营收益最大。

本文考虑物流企业有  $I$  类货物的需求需要运输到乡镇, 假设重量和体积相同的货物视为同一种货物。客运企业运输每种货物的补贴价格为  $\beta_i$ , 并假定每种货物的补贴价格不超过物流企业的收益, 上层的目标函数表示如下:

$$\text{Max } Pro_1 = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\gamma_i - \beta_i) q_j n_{ij} + \sum_{i=1}^I (\gamma_i - \theta_i) \left( N_i - \sum_{j=1}^J q_j n_{ij} \right) \quad (1)$$

式(1)中, 目标函数  $Pro_1$  表示物流企业运营收益的最大化, 第  $j$  类乘客的出行需求  $q_j$  及第  $j$  类乘客运输第  $i$  类货物的运货量  $n_{ij}$  由下层规划模型确定,  $Pro_1$  表示物流企业的运营收益, 该收益由两项收益确定, 第一项收益为给予客运企业补贴后的收益, 第二项收益为物流企业运输剩余货物的收益, 其中,  $N_i$  表示为物流企业运输第  $i$  类货物的总需求,  $\gamma_i$  表示物流企业运输第  $i$  类货物的收益,  $\theta_i$  表示物流企业运输第  $i$  类货物的固定成本(人工费用、直接费用等成本)。

综上所述, 上层规划问题以物流企业运营收益最大为目标, 客运企业运输不同货物的补贴价格为上层规划问题的决策变量, 因此, 上层规划模型表示如下:

$$\text{Max } Pro_1 = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\gamma_i - \beta_i) q_j n_{ij} + \sum_{i=1}^I (\gamma_i - \theta_i) \left( N_i - \sum_{j=1}^J q_j n_{ij} \right) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \beta_i^{\min} \leq \beta_i \leq \beta_i^{\max}, \forall i \in I \quad (3)$$

$$\beta_i \leq \gamma_i, \forall i \in I \quad (4)$$

式(3)中, 约束表示第  $i$  类货物补贴约束, 其中  $\beta_i^{\min}$  和  $\beta_i^{\max}$  为物流企业规定的补贴价格的下限和上限; 式(4)中, 约束表示第  $i$  类货物补贴不超过该类货物的收益。

#### 3.2.2. 下层规划问题

下层规划描述的问题是客运企业在物流企业制定的补贴方案及运货需求做出决策, 旨在以乘客出行需求为导向, 通过乘客运货补贴的方式来吸引乘客出行, 一方面减少客运企业对政府补贴政策的过度依赖, 另一方面减少了空气污染、拥堵和造影, 从而推进了绿色交通发展。首先, 考虑乘客的运货补贴收

益仅与运货量和每种货物的补贴价格相关, 故表示为:

$$p_j = \sum_{i=1}^I \alpha_{ij} n_{ij}, \forall j \in J \quad (5)$$

式(5)中,  $p_j$  表示第  $j$  类乘客的运货补贴价格,  $\alpha_{ij}$  表示第  $j$  类乘客运输第  $i$  类货物的补贴价格。

其次, 建立合理的乘客出行需求函数有助于本文研究运货补贴对乘客的出行影响。假设客运企业的票价与乘客出行次数相关, 与出行里程无关。而对于客运企业面向乘客运货补贴也仅与乘客出行次数相关, 故乘客的实际出行费用函数为:

$$c_j = \tau - p_j, \forall j \in J \quad (6)$$

式(6)中,  $c_j$  表示第  $j$  类乘客的出行费用函数,  $\tau$  表示客运企业制定的票价。

最后, 任意一种非递增的出行需求函数都可以应用在本文中, 因此, 本文采用其中一种被应用频率较高的出行需求函数[30] [31] [32], 表示如下:

$$q_j = Q_j (1 - e_j c_j), \forall j \in J \quad (7)$$

式(7)中,  $Q_j$  表示第  $j$  类乘客的潜在出行需求,  $e_j$  表示第  $j$  类乘客的弹性系数。

客运企业需要考虑如何决策乘客出行的票价、运货补贴方案及运货方案, 使补贴收益最大。因此决策变量有三类: 乘客出行的票价  $\tau$ 、运货补贴方案  $\alpha$  及运货方案  $n$ 。Pro<sub>2</sub> 表示其补贴收益, 表示如下:

$$Pro_2 = \sum_{j=1}^J \left( \tau + \sum_{i=1}^I (\beta_i - \alpha_{ij}) n_{ij} \right) q_j \quad (8)$$

式(8)中相关的参数与上述相同。客运企业的目标是补贴收益最大, 但客运车辆空间和负载都是有局限性, 因此乘客运货的重量和体积受到了限制, 表示如下:

$$\sum_{i=1}^I w_i n_{ij} \leq W_j, \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I v_i n_{ij} \leq V_j, \forall j \in J \quad (10)$$

式(9)和(10)中,  $w_i$  和  $v_i$  分别表示第  $i$  类货物的重量和体积,  $W_j$  和  $V_j$  分别表示第  $j$  类乘客运货的总重量和总体积。

综上所述, 下层问题是混合整数非线性规划问题, 该问题的目标是最大化客运企业的补贴收益, 由于客运车辆空间有限, 乘客运货的重量和体积受到了限制。该模型的决策变量为乘客出行的票价及每种物品的运货补贴及运货量, 故下层规划模型表示如下:

$$\text{Max } Pro_2 = \sum_{j=1}^J \left( \tau + \sum_{i=1}^I (\beta_i - \alpha_{ij}) n_{ij} \right) q_j \quad (11)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^I w_i n_{ij} \leq W_j, \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I v_i n_{ij} \leq V_j, \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J q_j n_{ij} \leq N_i, \forall i \in I \quad (14)$$

$$\begin{cases} \alpha_{ij} \geq \alpha_{\min}, & \text{if } n_{ij} \geq 1 \\ \alpha_{ij} = 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \forall j \in J, i \in I \quad (15)$$

$$n_{ij} \in N^+, \forall j \in J, i \in I \quad (16)$$

$$\tau \geq 0 \quad (17)$$

式(11)中, 目标函数  $Pro_2$  表示客运企业补贴收益的最大化; 式(12)中, 约束表示第  $j$  类乘客运货总重量的限制; 式(13)中, 约束表示第  $j$  类乘客运货总体积的限制; 式(14)中, 约束表示客运企业运输第  $i$  类货物的需求不超过物流企业的需求; 式(15)中, 约束表示若乘客不运输第  $i$  类货物, 则相应不给予该乘客补贴, 反之, 运输至少一件货物, 则相应的补贴至少为  $\alpha_{\min}$ ; 式(16)~(17)表示为变量的非负约束。

#### 4. 算法设计

本文建立的物流客运收益优化模型是一个 NP-hard 问题。众所周知, 求解 NP-hard 问题十分困难, 但针对双层规划模型的求解, 许多学者依据模型的特点尝试了相关的算法设计。上层模型的求解有了多种成熟的方法, 例如遗传算法[33] [34]、模拟退火算法[35]、粒子群算法[36] [37]及分支定界[38]等求解方法。在下层模型中, 在交通研究中, 交通网络设计中下层模型通常为用户均衡模型, 采用 Frank-Wolfe 算法求解; 在物流研究中, 学者们依据模型的特点主要采用遗传算法[39] [40]、模拟退火算法[41]求解。本文尝试采用基于精英策略的遗传算法[42]求解上层模型, 该算法的思想是优胜劣汰, 在每次进化中保持最优的种群, 淘汰适应度低的种群; 下层应用 Gurobi 求解器求解本文构建的混合整数非线性规划模型。算法的基本思路是首先在满足上层可行的物流企业补贴设计方案下计算下层客运企业的最优的出行票价、运货补贴方案及运货方案, 其次计算上层的目标函数, 反复迭代后确定物流企业和客运企业各自最优的决策方案。详细的基于精英策略的遗传算法的双层补贴优化算法设计流程具体步骤如下, 算法框架如图 2 所示。

步骤 1: 初始化。

1.1、设置遗传算法参数。设置种群大小  $M$ 、种群中的每个染色体长度  $N$ 、最大迭代代数  $Maxgen$ 、交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$ 、精英保留比例  $N_e$ , 并令初始迭代次数  $gen = 0$ ;

1.2、上层模型的目标函数作为遗传算法的适应度函数  $F_1$ , 采用二进制对上层模型的决策变量进行编码, 并随机生成可行的初始种群  $X(gen) = (\dots, x_i(gen), \dots)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 令初始迭代次数  $gen = 1$ 。

步骤 2: 计算下层模型的可行解。将  $X(gen)$  转换成十进制代入到下层模型中, 进而通过 Gurobi 求解器依次求解出每个染色体对应的票价、运货补贴及运货方案。如果迭代次数达到最大迭代次数, 则停止迭代过程输出计算结果, 否则, 转到步骤 3, 即  $gen = gen + 1$ 。

步骤 3: 计算上层模型的目标函数。根据  $X(gen)$  及步骤 2 计算得出的票价、运货补贴及运货方案计算适应度函数  $F_1$ , 上层模型的目标是补贴收益最大化, 所以对染色体进行从大到小排序, 以此评价群体中每一个染色体的性能。

步骤 4: 精英选择。根据步骤 2 计算得到每个染色体的适应度, 保留种群中  $N_e M$  个精英种群, 剩余种群进行交叉、变异操作。

步骤 5: 交叉操作。对  $(1 - N_e)M$  个染色体执行一次概率为  $P_c$  的交叉操作, 通过在染色体长度范围内随机选择两个位置将两个染色体之间的基因相互交换, 其余基因仍然在原有的位置。

步骤 6: 变异操作。在执行完交叉操作后, 对新的  $(1 - N_e)M$  个染色体执行一次概率为  $P_m$  的变异操作。通过在染色体长度范围确定变异的一个随机基因进行从 0 到 1 或者 1 到 0 变换的运算。

步骤 7: 生成新种群。将  $N_e M$  个精英群体与新的  $(1 - N_e)M$  个染色体合并生成新的种群, 新种群大小为  $M$ , 并执行步骤 2。

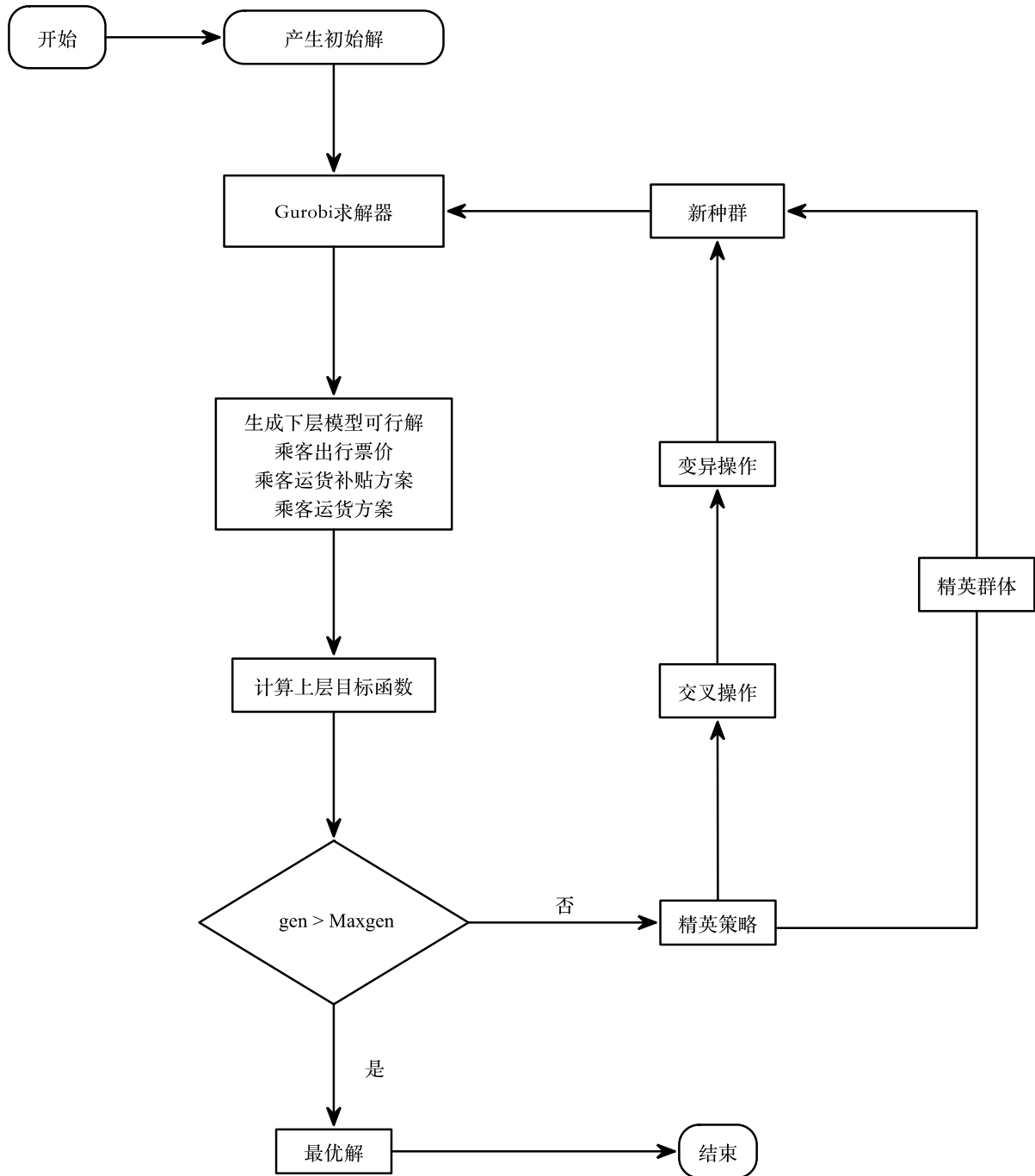


Figure 2. Algorithm framework  
图 2. 算法框架

### 5. 算例分析

通过仿真实验能够有效的分析模型和算法的有效性和合理性。首先, 本文假设物流企业运输三种货物, 每种货物的重量、体积和运输需求如表 1 所示, 其中货物根据重量和体积分类, 第一种货物适合于文件、书籍和手机等, 第二种货物适合于衣服、背包和鞋子等, 第三种货物适合于厚外套、棉被等。每种货物的收益均为 25 元, 每种货物补贴的上下限设置为 5 元和 20 元, 每种货物的固定成本为 10 元。其



次,合理的设置下层模型相关的参数有利于分析通过运货补贴的方式对客运企业收益和乘客出行的影响。本文假设客运企业有潜在的四类乘客需要出行,通过弹性系数来区分四类乘客,并假定乘客每运输一件货物,至少补贴2元,即 $\alpha_{\min} = 2$ ,其他相关的参数设置如表2所示。本文参考国内长途客运携带货物重量和体积的限制要求,规定每类乘客运输货物的重量和体积限制均为20 kg和0.1 m<sup>3</sup>。除了以上的假设,本文假设物流企业在客运枢纽建立分拨中心,从而承接物流运输货物的功能。

**Table 1.** The cargo information  
**表 1.** 货物信息

	第一种货物	第二种货物	第三种货物
重量(kg)	1	3	5
体积(m <sup>3</sup> )	0.01	0.03	0.05
运输需求(件/小时)	6000	5500	5000

**Table 2.** The passenger information  
**表 2.** 乘客信息

	第一类乘客	第二类乘客	第三类乘客	第四类乘客
弹性系数	0.03	0.05	0.07	0.09
潜在需求(人次/小时)	500	1250	1500	1750

基于精英策略的遗传算法对上层模型进行求解,首先对相关的参数进行设置,学者们在参数上也有相关的建议,例如迭代次数通常设置在50至100次,而对不同的模型,遗传算法的参数设置也有区别。本文进行多次实验后,以下参数设置对本文求解模型是合理的。基于精英策略的遗传算法的最大迭代次数Maxgen为150、种群大小M为200、染色体长度N为20、精英保留比例 $N_e$ 为0.1、交叉概率 $P_c$ 为0.6和变异概率 $P_m$ 为0.2。该仿真实验在一台个人计算机Intel Core i5@2 GHz上计算,采用Python3.10.9语言对本文设计的算法进行编程,下层模型采用Gurobi10.0版本作为求解器求解。该算法在每一次实验中求解时间平均为70分钟,优化后的最终结果如表3和表4所示。图3中的物流运营收益呈上升趋势,且迭代次数在60次后整体呈稳定趋势,物流企业运营收益最终收敛在315,759.98元。另外,物流企业的补贴收益占运营收益的91%,故通过客运企业替代自家运输货物能获得更好的收益,减轻运营压力。

**Table 3.** The passenger freight scheme  
**表 3.** 乘客运货方案

货物编号	第一类乘客	第二类乘客	第三类乘客	第四类乘客
1	0	2	1	2
2	0	1	3	1
3	2	1	0	1

**Table 4.** The passenger transport and passenger cargo subsidy scheme  
**表 4.** 客运及乘客运货补贴方案

货物编号	第一类乘客	第二类乘客	第三类乘客	第四类乘客	客运企业
1	0	5.61	2	4.68	5.61
2	0	2	4.64	5.16	5.16
3	4.58	2	0	5.15	5.15

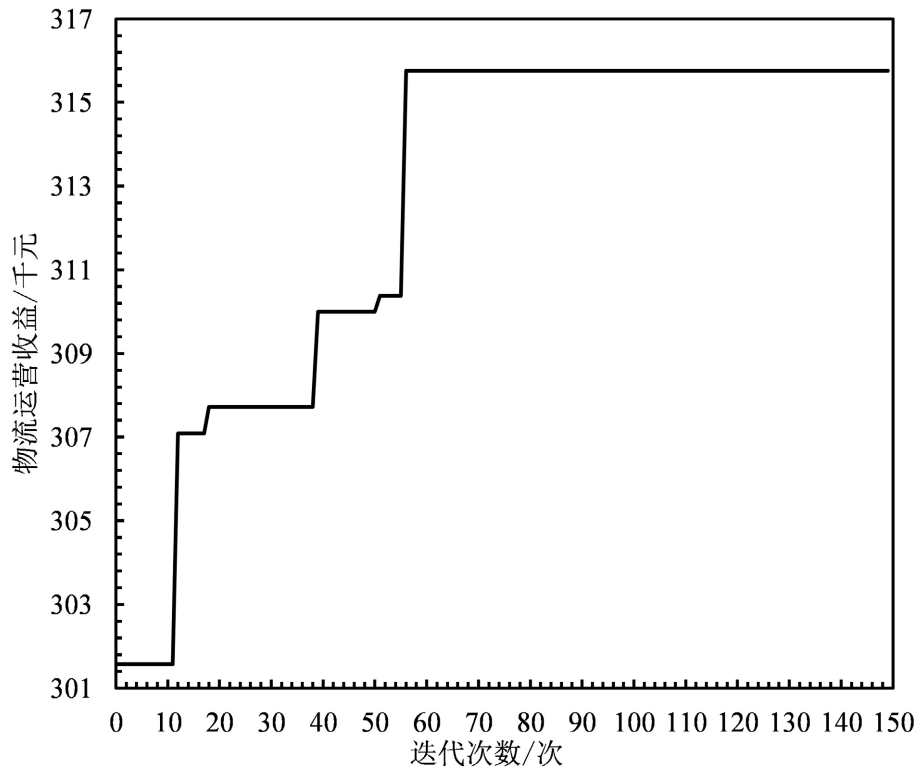


Figure 3. Evolution chart of operating income of logistics enterprises

图 3. 物流企业运营收益演化图

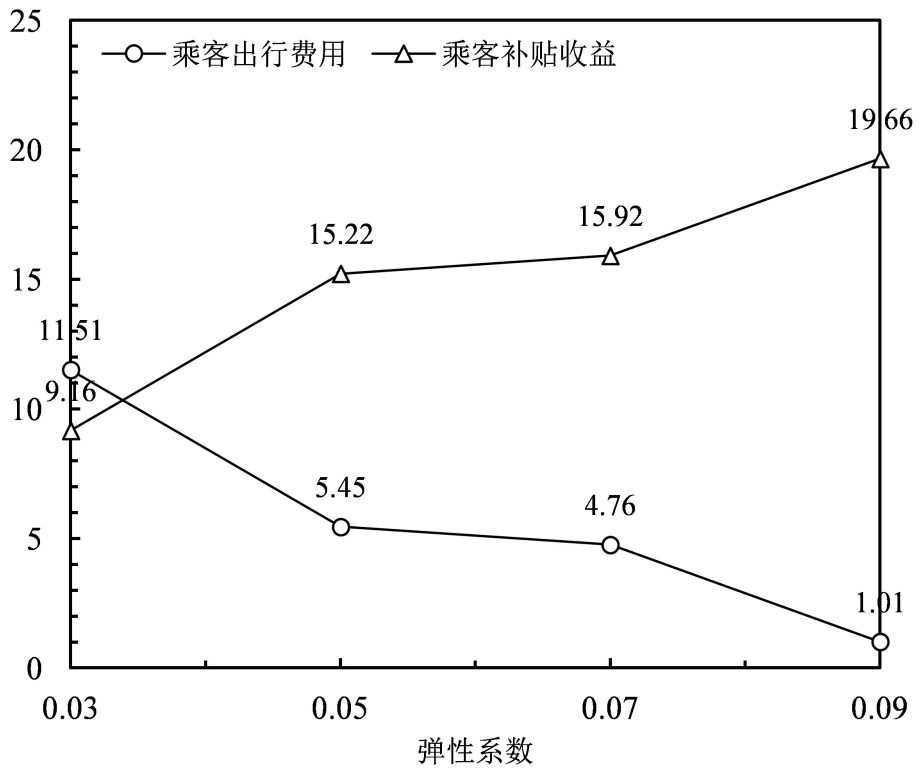


Figure 4. Change of passenger travel subsidy income and cost with elasticity coefficient

图 4. 乘客出行补贴收益和费用随弹性系数变化图

从表 3 以及乘客的客流量可以分析每类货物在客运的运货量占比分别达到了 99%、99%和 63%，从数值上可以认为乘客更愿意运输重量轻且体积小的货物，从而改善了城乡物流货运量低和装载率低的问题。图 4 展示了乘客出行补贴收益和出行费用随弹性系数变化，随着弹性系数的增加，乘客出行费用逐渐递减，乘客运货补贴收益逐渐递增。说明了当弹性系数越大时，乘客更倾向于运输多的货量来减轻自己的出行成本，反之，弹性越小，客运企业的运货补贴方式无法吸引到乘客出行。另外，在物流企业补贴情况下，客运企业的票价的优化结果为 20.67 元，若考虑通过财政对乘客运输货物进行固定补贴，虽然能够更好地吸引乘客出行，会带来额外大量的财政支出，不利于客运企业往良好的方向发展。因此，通过第三方企业的介入并制定相应的补贴方案，有利于减少客运企业对财政补贴的依赖性，从而激励了客运企业的运营积极性。

## 6. 结论

城乡物流和客运的一体化发展作为城乡经济发展及提高城乡居民幸福感的重要环节。客运实现运货和载人的功能是一种有效地打破物流企业运输效益低及客运运营不佳的壁垒。实现物流和客运企业合作作为共享物流新模式目前并没有学者开始研究。本文提出了一种方法来确定物流企业如何决策客运企业的补贴价格以及客运企业在合理的运输需求和补贴价格下决策乘客出行票价、运货补贴方案和运货方案。该方法通过建立物流客运优化收益的双层规划模型实现，上层问题是物流企业运营收益问题，下层问题是客运企业补贴收益问题。下层问题是在物流企业给定的补贴价格下做出最优的补贴收益，而上层问题是在每次迭代中通过客运企业反馈的乘客出行票价、运货补贴方案和运货方案实现运营收益最大。

本文设计了基于精英策略的遗传算法求解上层问题，下层问题通过 Gurobi 求解器求解，通过仿真实验说明模型和算法的有效性和合理性。虽然本文在相关的参数设计上采取平均策略，与实际问题有所差异，但结果表明该方法至少能够找到相对满意的解，验证了本文提出的方法是有效的，有利于城乡物流和客运一体化的发展，也为建立“客运化”物流运输系统提供参考和借鉴。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(72021002)。

## 参考文献

- [1] 张帅, 陈志杰. 推进交通运输物流促进城乡融合发展[J]. 农业经济, 2022(2): 131-132.
- [2] 宁波市人民政府. 全国首批! 邮快件专用公交车服务农村物流[EB/OL]. [http://jtj.ningbo.gov.cn/art/2021/6/30/art\\_1229471622\\_59019152.html](http://jtj.ningbo.gov.cn/art/2021/6/30/art_1229471622_59019152.html), 2021-06-30.
- [3] Amaral, R.R. and Aghezzaf, E-H. (2015) City Logistics and Traffic Management: Modelling the Inner and Outer Urban Transport Flows in a Two-Tiered System. *Transportation Research Procedia*, 6, 297-312. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.023>
- [4] 何江, 黄翰. 双层车辆路径问题的混合启发式算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 350-353.
- [5] Masson, R., Trentini, A., Lehuédé, F., et al. (2017) Optimization of A City Logistics Transportation System with Mixed Passengers and Goods. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6, 81-109. <https://doi.org/10.1007/s13676-015-0085-5>
- [6] 弓宪文. 城乡物流有序度及耦合协调度研究——基于 2000-2015 年统计数据[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2018, 19(1): 87-94.
- [7] 任保平, 魏婕. 中国城乡商贸流通一体化的测度及其评价[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(9): 28-34.
- [8] 吴海燕, 弓永华, 杨爱平. 促进城乡生产消费对接的现代物流体系优化研究[J]. 农业经济, 2022(6): 136-137.
- [9] 刘宝. 我国物流发展的城乡“二元”形态及其破解思路[J]. 经济问题探索, 2008(4): 47-49.
- [10] 周凌云, 顾为东, 赵钢, 张萍. 面向城乡双向流通的江苏城乡物流一体化体系建设[J]. 现代管理科学, 2013(7):

39-41.

- [11] 卢美丽. 城乡物流一体化体系的构建和评价[J]. 农业经济问题, 2012(4): 34-39.
- [12] 赵栋强. 互联网背景下城乡物流一体化模式构建[J]. 商业经济研究, 2020(17): 93-96.
- [13] 郝赫. 农村物流配送网络建设的影响因素分析[J]. 农业经济, 2018(6): 143-144.
- [14] Yang, F., Dai, Y. and Ma, Z.-J. (2020) A Cooperative Rich Vehicle Routing Problem in the Last-Mile Logistics Industry in Rural Areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **141**, Article ID: 102024. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102024>
- [15] 彭永涛, 李丫丫. 基于变分不等式的城镇物流网络优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(9): 48-59.
- [16] 彭永涛, 罗建强, 张锦. 基于超网络的城乡物流配送网络优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(14): 241-249.
- [17] Liu, W. (2020) Route Optimization for Last-Mile Distribution of Rural E-Commerce Logistics Based on Ant Colony Optimization. *IEEE Access*, **8**, 12179-12187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964328>
- [18] Feng, Z. (2020) Constructing Rural E-Commerce Logistics Model Based on Ant Colony Algorithm and Artificial Intelligence Method. *Soft Computing*, **24**, 7937-7946. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04046-8>
- [19] 杨帆, 杨琦, 张珺, 郝恩崇. 公共交通定价与最优政府补偿模型[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 110-115.
- [20] 张英, 李宪宁. 北京市城市公共交通财政补贴效率分析[J]. 价格理论与实践, 2014(4): 56-58.
- [21] Sakai, H. and Shoji, K. (2010) The Effect of Governmental Subsidies and the Contractual Model on the Publicly-Owned Bus Sector in Japan. *Research in Transportation Economics*, **29**, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2010.07.009>
- [22] 王海燕, 于荣, 王国祥, 郑继媛. 城市公共交通财政补贴测算方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(6): 23-26.
- [23] 章玉, 黄承锋, 许茂增. 考虑生态足迹和可持续的公共交通最优补贴策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(2): 8-13.
- [24] 李玲玲, 赵光辉. 城乡交通一体化高质量发展的困局及其治理[J]. 中国软科学, 2021(7): 97-105.
- [25] 霍娅敏, 陈坚, 江玉林. 基于城乡客运的多因素定价模型[J]. 铁道运输与经济, 2009, 31(2): 73-75.
- [26] 吴玲玲, 肖了梅, 尹华省. 山地城市城乡一体化下城乡公交定价方法研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(2): 137-140.
- [27] 李卫红, 黄海军, 尚华艳. 公交补贴与运营策略的实施效果分析[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(9): 2472-2485.
- [28] 姚恩建, 闫峥, 郇宁. 考虑老年人出行行为的公交票价补贴政策研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(6): 13-19.
- [29] Ubbels, B. and Nijkamp, P. (2002) Unconventional Funding of Urban Public Transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **7**, 317-329. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00027-X)
- [30] Ma, J., Wang, H. and Tang, T. (2020) Stochastic Electric Vehicle Network with Elastic Demand and Environmental Costs. *Journal of Advanced Transportation*, **2020**, Article ID: 4169826. <https://doi.org/10.1155/2020/4169826>
- [31] 郭倩雯, 李仲飞. 公交乘客福利补贴及公交企业运营管制[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(4): 994-1002.
- [32] Zhou, Y., Kim, H.S., Schonfeld, P. and Kim, E. (2008) Subsidies and Welfare Maximization Tradeoffs in Bus Transit Systems. *The Annals of Regional Science*, **42**, 643-660. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0177-8>
- [33] Zhang, H., Zhang, Q. and Chen, W. (2019) Bi-Level Programming Model of Truck Congestion Pricing at Container Terminals. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **10**, 385-394. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0641-y>
- [34] Lin, H., Xu, M. and Xie, C. (2023) Location and Capacity Planning for Preventive Healthcare Facilities with Congestion Effects. *Journal of Industrial and Management Optimization*, **19**, 3044-3059. <https://doi.org/10.3934/jimo.2022076>
- [35] 梁喜, 赵棒. 基于双层规划的高速公路收费费率优化模型[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(4): 57-65.
- [36] Xu, X., Zhang, W., Li, N. and Xu, H. (2015) A Bi-Level Programming Model of Resource Matching for Collaborative Logistics Network in Supply Uncertainty Environment. *Journal of the Franklin Institute*, **352**, 3873-3884. <https://doi.org/10.1016/j.franklin.2015.01.021>
- [37] 梁晶晶, 张小宁. 双模式交通网络中的 ATIS 信息定价研究[J]. 运筹与管理, 2017, 26(10): 49-55.
- [38] Long, J., Gao, Z., Zhang, H. and Szeto, W.Y. (2010) A Turning Restriction Design Problem in Urban Road Networks.

- 
- European Journal of Operational Research*, **206**, 569-578. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.013>
- [39] 郑斌, 马祖军, 周愉峰. 震后应急物流动态选址-联运问题的双层规划模型[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2): 326-337.
- [40] 韩霜, 张邻, 谭智华, 程南该. 动态竞争环境下的物流配送中心双层规划模型[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2055-2060.
- [41] Xu, X.-F., Chang, W.-H. and Liu, J. (2015) Resource Allocation Optimization Model of Collaborative Logistics Network Based on Bilevel Programming. *Scientific Programming*, **2017**, Article ID: 4587098. <https://doi.org/10.1155/2017/4587098>
- [42] Lin, H-Z. and Zhang Y. (2023) Scientific Planning of Urban Cordon Sanitaire for Desired Queuing Time. *Socio-Economic Planning Sciences*, **2023**, Article ID: 101506. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101506>