

高铁参与下考虑多类型时间窗的生鲜品多式联运路径优化研究

摘要：为提高生鲜品多式联运的经济性和时效性，本文提出将高铁作为一种运输方式参与到生鲜品多式联运中，并在考虑中转节点固定作业时间窗和运输时限软时间窗的约束下研究生鲜品多式联运路径优化问题。以运输总成本最小以及生鲜品到达终点提早或延迟时间最小化为优化目标，构建生鲜品多式联运路径优化的双目标混合整数线性规划模型，采用标准化加权求和法并结合数学规划软件 LINGO 求得双目标优化问题的最优解。最后通过算例计算结果表明多式联运经营人可以根据优化结果，并针对客户的实际需求，选择合适的路径进行运输。

关键词：生鲜品多式联运；时间窗；双目标优化；路径优化

中图分类号：U495 文献标志码：A 文章编号：0000-0000（2022）00-0000-00

Research on multimodal transportation path optimization of fresh food considering multiple types of time windows with the participation of high-speed railway

Abstract: In order to improve the economy and timeliness of multimodal transportation of fresh products, this paper proposes to take high-speed rail as a transportation mode to participate in multimodal transportation of fresh products, and studies the path optimization of multimodal transportation of fresh products under the constraints of fixed operation time window of transfer node and soft time window of transportation time limit. Taking the minimization of the total transportation cost and the minimization of the early or delayed arrival time of fresh products at the destination as the optimization objectives, a dual objective mixed integer linear programming model for the multimodal transportation path optimization of fresh products is constructed. The optimal solution of the dual objective optimization problem is obtained by using the standardized weighted summation method and combined with the mathematical programming software lingo. Finally, through an example, the calculation results show that the multimodal transport operator can choose the appropriate route for

transportation according to the optimization results and the actual needs of customers.

Keywords: multimodal transportation of fresh products; time window; double objective optimization; path optimization

0 引言

近年来,在“互联网+”和新零售模式发展影响下,我国生鲜品销售量以及生鲜电商产业呈现快速增长的趋势。但是鉴于生鲜品易腐烂的特点,消费者对其长距离运输的时效性、新鲜度等方面提出了更高要求。随着我国铁路运输结构性改革的深入推进,高铁货运业务开始出现,并逐渐凭借其快速、准时、安全的优点成为生鲜品优选运输方式。早在 2018 年,京东和顺丰两大物流巨头就分别与中铁快运合作,率先上线了“高铁生鲜递”和“高铁极速达”等运输服务产品,开展生鲜品寄递业务^[1]。但我国目前的高铁运输线路尚未铺设完整,生鲜品长距离专线直达运输还尚未能实现,所以“高速公路+高速铁路”的快速联运方式将成为生鲜品运输新的选择方向。因此,在高铁快运这一种新兴货运方式的参与下,如何为生鲜产品运输选择最优的路径成为了广泛关注的问题。

随着多式联运网络的不断发展,其中经济性、时效性等方面也面临着挑战。于是作为提高集装箱多式联运系统运营效率关键的路径优化问题得到了国内外许多学者的广泛研究^[2-3]。本文中,由于生鲜产品的相关约束条件较多,还考虑到了时间窗问题,于是此问题就扩展为 IRPTW 问题(intermodal routing problem with time windows, IRPTW)^[1]。Nossack 等^[4]分别考虑承运人、消费者和供应商的不同时间窗硬约束需求,通过两阶段启发算法解决了多式联运集装箱配送路线问题。Zhang 等^[5]也在规划考虑碳排放的多式联运路径优化时规划了时间窗约束,保证集装箱在规定的时间内运到终点。姚东鑫^[6]则在研究带时限约束的单订单、多订单的多运输方式组合路径优化问题将运输时限作为硬约束,并构建数学规划模型且设计算法进行了求解。而与文献[5]相反,李玉民^[1]认为集装箱可以较规定的时间窗提前或者延迟到达终点,但是会导致惩罚费用的产生,据此研究了多类型时间窗的多式联运路径优化问题,并采用混合田口遗传算法求解。此外还有一些学者从不同角度分别考虑了软时间窗、模糊时间窗以及混合时间窗等约束,并通过遗传算法、蚁群算法^[7]、Dijkstra 算法以及 NsGA-II 算法^[8]等对算例进行了求解。杨霞^[9]建立了带软时间窗约束的车辆路径优化模型,以配送

总成本最少为目标，并引入 Dijkstra 算法，以生鲜农产品配送作为案例，对算法进行测试。邱梦^[10]考虑到高铁节点多个服务时间窗以及收货时限模糊时间窗等的影响，以此构建模型，并设计遗传算法进行求解，探究了时间窗的存在对路径选择的影响。Denga 等^[11]为优化运输路线，则建立了以混合时间窗口约束、总成本和碳排放最少为目标的多目标最优路径模型，并通过算法求解，为决策者选择合理的运输解决方案提供依据。

但是既有文献中对于带时间窗的生鲜品运输路径问题研究大多集中在 VRP^[8、10]方面，较少有学者将时间窗引入到生鲜品的多式联运路径问题中，且高铁参与下的生鲜品 IRPTW 问题的研究也非常缺乏。还有在优化多式联运时效性时，规划运输时限约束往往会导致集装箱提早运到终点，致使仓储保管等额外费用的产生。此外，采用软时间窗构建惩罚费用时，单位惩罚费用取值往往也难以准确确定。

本文以公路、高铁和航空组成的多式联运网络为依托，从多式联运经营人角度，在优化建模时考虑 2 类时间窗：①规划中转节点固定作业时间窗硬约束，保证生鲜品到达此类节点时的时刻在其固定作业时间窗内，从而保证后续中转作业的进行；②规划运输时限软时间窗，并以生鲜品运到终点的提早或延迟时间的最小化构建多式联运时效性目标，提高多式联运路径规划的准时性。据此，构建考虑多类型时间窗的多式联运路径优化双目标混合整数线性规划模型，采用标准化加权求和法结合数学规划软件 Lingo 对问题进行求解，进一步分析多式联运路径优化的经济性目标和时效性目标的关系，为多式联运经营人提供决策参考^[12]。

1 生鲜品多式联运路径双目标优化问题

1.1 问题描述

假定有一批生鲜产品需要在客户规定的运输开始时刻从某供应地运往需求地，其间会经过若干个节点城市组成多式联运网络。运输途中有公路、高铁、航空这 3 种方式可供选择，节点处可进行运输方式转换，不同中转方式的时间及费用均不相同。由于城市交通运输资源影响，某些节点城市仅有一种或两种运输方式可供使用。多式联运路径优化即选择一条最优的运输路径实现生鲜品起点至终点之间的运输。在进行优化时，研究考虑中转节点的作业时间窗约束，

保证多式联运路径优化方案在时间和空间上的可行性。

1.2 假设条件

假设 1：同一批生鲜品不可拆分运输，即相邻节点之间只能选择一种运输方式；

假设 2：中转次数过多会使生鲜品冷藏环境改变，导致其品质下降，因此将路径中运输方式转换次数控制在 3 次以内，节点内交通方式转换衔接顺畅，转运距离为 0；

假设 3：为避免因路径中运输资源配置不合理而导致中转成本过高、中转时间过长等现象发生，考虑现实运输业务运营的合理性，假设在同一条路径中禁止高铁和航空两种运输方式同时出现；

假设 4：多式联运网络中运输方式的运输能力，以及中转节点的中转作业能力均满足该批集装箱的运量要求；

假设 5：生鲜品的运输信息（包括起点、终点、运量及运输时限等），以及多式联运网络的参数信息（包括网络结构、时间、费用等）均是已知的、确定的。

2 生鲜品多式联运路径双目标优化模型

2.1 优化建模

2.1.1 符号说明

优化建模所需的具体符号如下：

（1）符号、参数

o ：生鲜产品运输的起点；

d ：生鲜产品运输的终点；

t_0 ：生鲜产品运输开始时刻；

$[\eta_{min}, \eta_{max}]$ ：运输时限时间窗；

N ：多式联运网络中的节点集合；

A ：多式联运网络中的有向弧集合；

h, i, j ：多式联运中的节点标号，且有 $h, i, j \in N$ ；

(i, j) : 为多式联运网络中由节点 i 到节点 j 的有向弧, 且有 $(i, j) \in A$;

K : 运输方式集合;

k, l : 为多式联运网络中的运输方式标号, 且有 $k, l \in K$;

K_i : 连接节点 i 的运输方式的集合, 且有 $K_i \subseteq K$;

K_{ij} : 有向弧 (i, j) 上的运输方式的集合, 且 $K_{ij} \subseteq K$;

N_i^- : 为节点 i 的前向节点集合, 且有 $N_i^- \subseteq N$;

N_i^+ : 为节点 i 的后向节点集合, 且有 $N_i^+ \subseteq N$;

Z : 路径总成本, 单位: 元;

q : 生鲜产品货运箱量, 单位: 箱;

m : 每箱生鲜产品重量, 单位: $t/\text{箱}$;

p : 生鲜产品每箱单价, 单位: 元/箱;

C_e : 单个蓄冷箱维护成本, 单位: 元/个;

C_h : 单日蓄冷箱租赁成本, 单位: 元/天;

T_{O-D} : 路径运输总时间, 单位: h ;

$T_{k,l}$: 中转总时间, 单位: h ;

$d_{i,j}^k$: 节点 i, j 之间采用第 k 种运输方式的运输距离, 单位: km ;

$v_{i,j}^k$: 第 k 种运输方式在节点 i, j 间行驶的平均速度, 单位: km/h ;

$t_{i,j}^k$: 节点 i, j 之间第 k 种运输方式的运输时间, 单位: h ;

$t_i^{k,l}$: 在节点 i 由运输方式 k 转换到运输方式 l 的单位中转时间, 单位: h/t ;

$c_{i,j}^k$: 节点 i, j 之间第 k 种运输方式单位距离运输成本, 单位: $\text{元} \cdot (t \cdot km)^{-1}$;

$c_i^{k,l}$: 节点 i 处由第 k 种运输方式转换为第 l 种运输方式的单位货物中转成本

(装卸搬运), 若 $k = l$, $c_i^{k,l} = 0$, 不发生运输方式的转换, 单位: $\text{元}/t$;

$[\varphi_i^{\min}, \varphi_i^{\max}]$: 节点 i 的固定作业时间窗, 若节点 i 不存在固定作业时间窗,

则可将 $[\varphi_i^{\min}, \varphi_i^{\max}]$ 设为 $[0, +\infty]$;

μ_{trs} 、 μ_{trf} ：运输和中转过程的时间敏感系数，表示物流活动中生鲜品质随时间变化的敏感程度，包括产品新鲜度下降及外观受损等品质变化情况，值越大，其品质越容易受时间影响；

M ：极大数。

(2) 变量

$x_{i,j}^k$ ：为 0-1 变量，若生鲜品由运输方式 k 由节点 i 运到节点 j ，则 $x_{i,j}^k = 1$ ，否则 $x_{i,j}^k = 0$ ；

$y_i^{k,l}$ ：为 0-1 变量，若生鲜品在节点 i 由运输方式 k 由中转至运输方式 l ，则 $y_i^{k,l} = 1$ ，否则 $y_i^{k,l} = 0$ ；

s_i ：为非负变量，表示生鲜品到达节点 i 的时刻；

w_i ：为自然数变量，用于将 s_i 转化为属于 0:00 至 24:00 之间的时刻；

Δ_1 ：为非负变量，表示生鲜品较运输时限时间窗下界提前到达运输终点的时间，单位： h ；

Δ_2 ：为非负变量，表示生鲜品较运输时限时间窗上界延迟到达运输终点的时间，单位： h 。

2.1.2 成本分析

由于生鲜品品质易受运输环境影响，所以除运输成本和中转成本外，生鲜品在运输过程中还会产生蓄冷成本和质量损耗成本^[13]。

(1) 运输成本

在生鲜品的多式联运过程中，城市节点 i, j 之间会产生在途运输成本，如式 (1)：

$$f_1 = qm \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_{ij}} c_{i,j}^k d_{i,j}^k x_{i,j}^k \quad (1)$$

(2) 中转成本

中转成本主要是货物在节点 i 处的运输方式转换成本，即不同运输方式间借助装卸设备的换装费用，计算如式 (2)：

$$f_2 = qm \sum_{i \in N} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in K_i} c_i^{k,l} y_i^{k,l} \quad (2)$$

(3) 质量损耗成本

在生鲜产品运输过程中，其品质会随运输时间以及中转装卸时间的增长而下降，由此产生质量损耗。本文基于生鲜品腐败函数^[14]，将新鲜度下降和外观受损等质量变化情况考虑在内，通过改进后的模型函数来描述生鲜品在运输中的总体质量变化情况。由于运输和中转过程中生鲜品时间敏感系数不同，设定这两种状态下敏感系数分别为 μ_{trs} 、 μ_{trf} ，则生鲜品质量损耗成本可表示为式

(3)、(4)：

$$f_3 = pq(1 - e^{-\lambda}) \quad (3)$$

其中指数 λ 的函数关系式为 (4)：

$$\lambda = \mu_{trs} \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K_{ij}} t_{i,j}^k + \mu_{trf} T_{k,l} \quad (4)$$

中转总时间计算如式 (5)：

$$T_{k,l} = qm \sum_{i \in N} \sum_{k,l \in K_{ij}} t_i^{k,l} \quad (5)$$

(4) 蓄冷成本

由于受技术条件影响，高铁目前尚未全面开展冷藏集装箱货运业务，且大多采用小型箱作为生鲜品运输单元，所以本文以无源蓄冷箱作为生鲜品运输单位，蓄冷箱随生鲜品一同运输和中转，运输结束后回收，所以一般只存在租赁成本和蓄冷剂成本。蓄冷剂的保冷时间一般为 36h。蓄冷成本计算如式 (6)：

$$f_4 = q \left[c_h \cdot \text{ceil} \left(\frac{T_{o-d}}{24} \right) + c_e \cdot \text{ceil} \left(\frac{T_{o-d}}{36} \right) \right] \quad (6)$$

其中 $\text{ceil} (*)$ 表示向上取整函数。

路径运输总时间计算如式 (7)：

$$T_{o-d} = qm \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K_{ij}} t_{i,j}^k \cdot x_{i,j}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k,l \in K_i} y_i^{k,l} (\varphi_i^{\max} - s_i) \quad (7)$$

其中节点 i, j 之间第 k 种运输方式运输时间计算如式 (8)：

$$t_{i,j}^k = \frac{d_{i,j}^k}{v_{i,j}^k} \quad (8)$$

2.1.3 双目标混合整数线性规划模型

在参考以往优化建模的基础上，以及根据模型描述和成本的分析，以提高多式联运的经济性及时效性为优化目标，构建生鲜品多式联运路径优化模型。

(1)经济性目标函数 Obj_1 :

$$Obj_1 = \min Z = \min(f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \quad (9)$$

完成运输的费用包括在途运输费用和中转作业费用。但是由于生鲜品品质易受运输环境影响，所以生鲜品在多式联运过程中还会产生蓄冷成本和质量损耗成本，据此，构建如式(10)所示的经济性目标函数，即完成生鲜品从起点到终点运输的费用最小化。

(2)时效性目标函数 Obj_2 :

$$Obj_2 = \min(\Delta_1 + \Delta_2) \quad (10)$$

为了提高运输的准时性，避免生鲜品过早或过晚到达终点，构建了如式(10)所示的时效性目标函数，即生鲜品运抵终点的提前时间或延迟时间最小化。

(3)约束条件

$$\sum_{h \in N_i^-} \sum_{k \in K_{hi}} x_{h,i}^k - \sum_{j \in N_i^+} \sum_{l \in K_{ij}} x_{i,j}^l = \begin{cases} -1 & \forall i = o \\ 0 & \forall i \in N \setminus \{o, d\} \\ 1 & \forall i = d \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K_{ij}} x_{i,j}^k \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K_i} \sum_{l \in K_i} y_i^{r,k} \leq 1 \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in N_i^+} x_{i,j}^l = \sum_{k \in K_i} y_i^{k,l} \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad \forall l \in K_i \quad (14)$$

$$\sum_{h \in N_i^-} x_{h,i}^k = \sum_{l \in K_i} y_i^{k,l} \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad \forall k \in K_i \quad (15)$$

$$s_0 = t_0 \quad (17)$$

$$s_i + \sum_{k \in K_i} t_i^{k,l} \cdot y_i^{k,l} \cdot q + t_{i,j}^l - s_j \geq M \cdot (x_{i,j}^k - 1) \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall l \in K_{ij} \quad (18)$$

$$s_i + \sum_{k \in K_i} t_i^{k,l} \cdot y_i^{k,l} \cdot q + t_{i,j}^l - s_j \leq M \cdot (1 - x_{i,j}^k) \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall l \in K_{ij} \quad (19)$$

$$s_i - 24 \cdot w_i \geq \varphi_i^{\min} \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad (20)$$

$$s_i - 24 \cdot w_i \leq \varphi_i^{max} \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad (21)$$

$$w_i > \frac{s_i}{24} - 1 \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad (22)$$

$$w_i \leq \frac{s_i}{24} - 1 \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad (23)$$

$$\Delta_1 \geq \eta_{min} - s_d \quad (24)$$

$$\Delta_2 \geq s_d - \eta_{max} \quad (25)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall k \in K_{ij} \quad (26)$$

$$y_i^{k,l} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \setminus \{o, d\} \quad \forall k \in K_i \quad \forall l \in K_i \quad (27)$$

$$y_i^{k,l} = 0 \quad \forall i \in \{o, d\} \quad \forall k \in K_i \quad \forall l \in K_i \quad (28)$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (29)$$

$$w_i \in N \quad \forall i \in N \quad (30)$$

$$\Delta_1 \geq 0 \quad (31)$$

$$\Delta_2 \geq 0 \quad (32)$$

约束条件中：式（11）表示多式联运网络中的流量平衡约束，保证规划多式联运路径由起点经中转节点到终点的连续性。式（12）和（13）为集装箱的完整性约束，前者保证一批集装箱在运输过程是不可分割的，后者则保证集装箱在节点中转过程中的不可分割。式（14）和（15）为多式联运路径上中转节点与运输弧段接续的连续性约束，保证多式联运运输过程和中转过程的合理衔接，保证“点—弧”建模的合理性。式（16）假设生鲜品到达起点的时刻等于其运输开始时刻，从而进一步计算集装箱到达各个节点的时刻。式（17）和（18）为变量的计算兼容性约束，计算生鲜品到达规划路径上各个节点的时刻。式（19）和（20）为节点固定作业时间窗约束，要求生鲜品到达节点的时刻必须在规划的时间窗内，从而保证后续中转作业的顺利进行；由于节点固定作业时间窗的上界和下界均为 24 小时制，因此，生鲜品到达节点的时刻需首先按照式（21）和（22）进行处理，使其转化为属于 0：00 至 24：00 之间的时刻。上述约束能够有效提升多式联运路径优化方案的合理性，确保集装箱到达某一中转节点时，该节点能快速进行集装箱的中转，从而避免集装箱在中转节点的无效等待，提高多式联运效率。式（23）和（24）为变量的计算兼容性约束，分别

计算了集装箱运抵终点的提前时间和延迟时间。通过设定时效性目标函数(10)与约束条件 (23) 和 (24)，多式联运路径优化方案能有效提高集装箱到达终点的准时性，既避免了集装箱提早到达而导致额外仓储保管等成本，又避免了集装箱延迟到达而导致客户无法按照计划完成后续生产加工等活动。式 (25) 至 (31) 为变量的取值约束。

据此，构建了考虑多类型时间窗的生鲜品多式联运路径优化的双目标混合整数线性规划模型，后续可利用数学规划软件 LINGO 求得问题的全局最优解。

2.2 求解方法

为了求得双目标优化模型的帕累托解，采用标准化加权求和法^[12]将双目标优化模型转化为单目标优化问题。首先分别计算当经济性目标达到最优时的时效性目标函数值 Obj'_2 ，以及当时效性目标达到最优时的经济性目标函数值 Obj'_1 ，然后利用 Obj'_1 和 Obj'_2 分别对经济性目标和时效性目标进行标准化处理，消除不同优化目标在单位和量级上的差异，最后将标准化后的目标进行加权求和，从而得到单目标优化问题的目标函数。

$$\min \left(\phi_1 \frac{Obj_1}{Obj'_1} + \phi_2 \frac{Obj_2}{Obj'_2} \right) \quad (33)$$

$$\phi_1 + \phi_2 = 1 \quad (34)$$

$$\phi_1 \geq 0 \quad (35)$$

$$\phi_2 \geq 0 \quad (36)$$

式中： ϕ_1 和 ϕ_2 分别为经济性目标和时效性目标的权重，其具体取值由决策者在求解前人为设定。

在计算过程中，通过不断调整 ϕ_1 和 ϕ_2 的取值，并计算不同取值下的单目标优化模型的最优解，最终可求得问题的帕累托解。单目标优化模型的优化目标为式 (33)，约束条件包括式 (11) 至式 (32)。研究利用数学规划软件 LINGO 运行分支定界算法求解单目标混合整数线性规划模型的全局最优解。

3 算例分析

参考文献[10]，为了验证优化建模方法的可行性，本文以昆明—哈尔滨为例，假设有一批同类生鲜产品需从昆明运往哈尔滨。选择贵阳、长沙、武汉、重庆、成都、西安、郑州、济南、太原、北京、通辽、沈阳、长春这 13 个城市

作为可能的转运节点，从起始地昆明开始分别标号为 A，B，C，...，N，O；各地公路、高铁、航空的 3 种运输方式网络的不同通达情况如图 1。

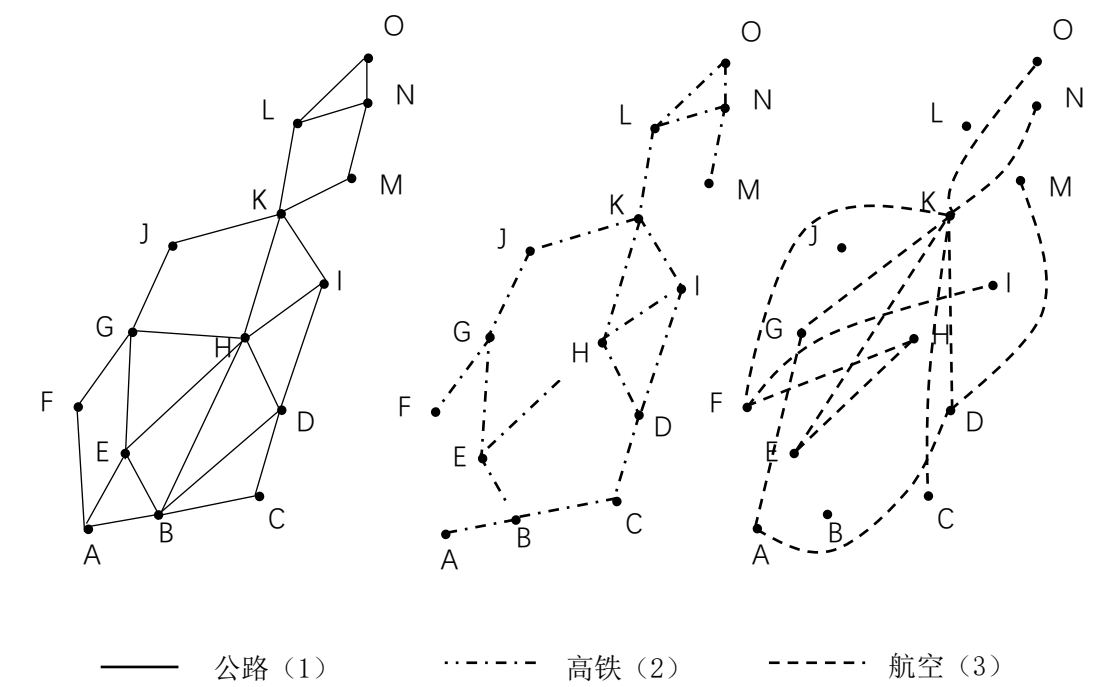


图 1 公路、高铁、航空网络通达情况

A—O 之间可以选择的运输方式有公路、高铁、航空、公路-高铁联运，公路-航空联运。多式联运经营人在选择运输路径的同时，还要考虑到中转节点处存在的固定作业时间窗，以及收货人的运输时限时间窗。要求在货物种类和运量已知的情况下，合理选择运输路径和运输方式组合，以达到总成本最低、时效性最高的目标。

3.1 基础数据

(1) 不同运输方式平均速度

实际情况中，不同运输方式的行驶速度会受各种因素影响，如天气、地势、路况等。为了使问题简化，本文取各种运输方式的平均速度进行计算。根据调查^[10]，得到公路、高铁、航空三种运输方式的平均运输速度如表 3-1 所示。

表 3-1 不同运输方式的平均速度

运输方式	平均速度 (km/h)
公路	100
高铁	260
航空	800

(2) 不同运输方式下各弧段运距

多式联运网络中各运输弧公路、高铁、航空运距表如表 3-2 所示。其中公路运距参照全国公路里程表获得，高铁运距参照 12306 官网中高铁运营里程获得，航空运距参照中国南航飞行里程。

表 3-2 不同运输方式下的各弧段运输距离及运输时间

运输 弧	公路		高铁		航空		运输 弧	公路		高铁		航空	
	运输 距离 /km	运输 时间 /h	运输 距离 /km	运输 时间 /h	运输 距离 /km	运输 时间 /h		运输 距离 /km	运输 时间 /h	运输 距离 /km	运输 时间 /h	运输 距离 /km	运输 时间 /h
A-B	518	5.2	463	1.8	—	—	F-G	727	7.3	658	2.5	—	—
A-D	—	—	—	—	1293	1.6	F-H	—	—	—	—	1011	1.3
A-E	837	8.4	—	—	628	0.8	F-I	—	—	—	—	1362	1.7
A-F	857	8.6	—	—	649	0.8	F-K	—	—	—	—	1542	1.9
A-G	—	—	—	—	1468	1.8	G-H	481	4.8	—	—	—	—
A-K	—	—	—	—	2118	2.6	G-J	601	6.0	579	2.2	—	—
B-C	794	7.9	706	2.7	—	—	G-K	—	—	—	—	942	1.2
B-D	1043	10.4	—	—	—	—	H-I	447	4.5	646	2.5	—	—
B-E	375	3.6	347	1.3	—	—	H-K	694	6.9	693	2.7	646	0.8
B-H	1408	14.1	—	—	—	—	I-K	411	4.1	406	1.6	412	0.5
C-D	345	3.5	362	1.4	—	—	J-K	508	5.1	513	2.0	—	—
C-K	—	—	—	—	1363	1.7	K-L	755	7.6	861	3.3	—	—
D-H	510	5.1	536	2.1	—	—	K-M	694	6.9	—	—	—	—
D-I	853	8.5	936	3.6	—	—	K-N	—	—	—	—	828	1.0
D-K	—	—	—	—	1087	1.4	K-O	—	—	—	—	1034	1.3
D-M	—	—	—	—	1500	1.9	L-N	273	2.7	219	0.8	—	—
E-G	695	7.0	738	2.8	580	0.7	L-O	537	5.4	436	1.7	—	—
E-H	1154	11.5	1385	5.3	895	1.1	M-N	304	3.0	315	1.2	—	—
E-K	—	—	—	—	1640	2.1	N-O	276	2.8	240	0.9	—	—

(3) 各运输方式的单价

根据资料调查，得到不同运输方式下的生鲜品单位运输成本如表 3-3 所示。

表 3-3 不同运输方式下的单位运输成本（单位：元/(t·km)）

运输方式	公路	高铁	航空
单位运输成本	1.6	7.2	12.5

(4) 不同运输方式间中转时间以及单位中转费用

为了发挥多式联运的优势，多式联运网络中的中间节点可以进行运输方式的转换，且转换运输方式需要产生一定的中转时间和中转费用，如表 3-4。

表 3-4 中转时间和单位中转费用

运输方式	中转时间（h）	单位中转费用(元/t)
公路—高铁	0.4	260
公路—航空	0.8	230
高铁—航空	—	—

（5）中转节点固定作业时间窗

在多式联运网络中，中转节点固定作业时间窗如表 3-5 所示。

表 3-5 中转节点固定作业时间窗

节点	时间窗	节点	时间窗
A	(6.0, 6.5)	H	(13.4, 13.9)
B	(8.3, 8.5)	I	(14.5, 15.0)
C	(9.1, 9.6)	J	(15.3, 15.5)
D	(10.4, 10.9)	K	(17.6, 18.1)
E	(11, 11.5)	L	(21.2, 21.4)
F	(10.6, 11.1)	M	(21.7, 21.9)
G	(12, 12.5)	N	(23.0, 23.5)

*(6.0, 6.5)表示在 6：00 开始服务，6：30 为出发时间。

（6）其他参数

假设货物从第一天 6：00 开始发出，在终点处生鲜最佳运输时限时间窗为第 2 天 21：00 至第 3 天 2：00，也即运输时限时间窗为[45, 50]。其他参数设置为： $q = 60$ 箱； $m = 0.05t$ （含蓄冷箱）； $p = 5000$ 元/箱； $c_e = 4$ 元/个； $c_h = 15$ 元/天； $\mu_{trs} = 0.003$ ； $\mu_{trf} = 0.005$ 。

3.2 求解结果

根据上述设计，利用 LINGO 软件对生鲜品多式联运双目标优化问题进行求解，得到多式联运路径优化问题的帕累托解如图所示。

图 2 生鲜品多式联运路径优化问题的帕累托解

表 3-6 最优生鲜品多式联运路径优化方案

综上所述，图 2 所示的每个帕累托点均代表了不同客户需求下的最优多式联运路径优化方案。根据表 3-6，其中路径 ④运输成本最低，为 9.68 万元。较采用方案 4，方案 3 能够将多式联运的时效性提高约 74%，而仅导致多式联运的经济性降低约 4.8%。

4 结语

随着人们生活消费水平的提高，生鲜品的销售量在线上线下都保持着快速增长。为了提高生鲜品运输时效性和经济型，高铁生鲜运输凭借着其安全高效特点逐渐被人们所青睐也将成为生鲜品运输未来发展的趋势。为此，本文对高铁参与下的多类型时间窗的生鲜品多式联运路径优化问题进行了研究。算例研究表明，生鲜品多式联运路径优化的经济性目标和时效性目标是互相矛盾的，无法同时达到最优，提高多式联运的经济性势必以牺牲其时效性为代价，反之亦然。因此，生鲜品的多式联运经营人需要对多式联运的经济性目标和时效性目标进行折中处理。

生鲜品多式联运是一项复杂且随着运输技术的提高在不断发展的问題，本文虽然对生鲜品的多式联运路径问题方面的研究提供了一定的理论与实践意义，但由于研究水平有限，尚有诸多问题还有待进一步深入。比如本文设定多式联运网络中的节点时间窗为固定作业时间窗，却忽略了节点固定作业时间窗对中转作业的限制，从而影响多式联运路径优化的可行性。还有为了便于研究和计算，本文将高铁节点时间窗宽度设为 0.2h，但高铁实际运行中的停站时间更短，且服务频次更高，存在多个服务时间窗，这些可为以后的研究提供方向。

参考文献

- [1] 李玉民,邱梦,闫凯丽,刘颀欣.高铁参与下考虑时间窗的生鲜品多式联运路径选择[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(04):54-61.
- [2] XuePing Deng, Lu Chen, Shuaihui Tian. Research on Multimodal Transport Path Optimization with Mixed Time Windows Constraints[J]. International Core Journal of Engineering,2020,6(3):
- [3] 长石 刘. Routes Planning of Fresh Agricultural Products Based on Multimodal Transport Combining High-Speed Railway Logistics with Road Logistics[J]. Operations Research and Fuzzy Logic,2020,10(02):
- [4] Jenny Nossack, Erwin Pesch. A truck scheduling problem arising in intermodal container transportation[J]. European Journal of Operational Research,2013,230(3):
- [5] Dezhi Zhang, Runzhong He, Shuangyan Li, Zhongwei Wang. A multimodal logistics service network design with time windows and environmental concerns.[J]. PLoS ONE,2017,12(9):
- [6] 姚东鑫. 带时限约束的快递多运输方式组合路径优化问题研究[D].北京交通大学,2020.
- [7] 万杰,耿丽,田喆. 基于改进的蚁群算法求解多目标生鲜农产品车辆路径[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2019(6).
- [8] 李善俊,陈淮莉.基于 NSGA II 的带时间窗生鲜品配送路径优化[J].上海海事大学学报,2020,41(02):58-64.
- [9] 杨霞,范体军,程方正. 多品种生鲜农产品的车辆路径优化[J]. 数学的实践与认识,2019(2).
- [10] 邱梦. 高铁参与下考虑多重时间窗的生鲜品多式联运路径选择研究[D].郑州大学,2020.
- [11] XuePing Deng, Lu Chen, Shuaihui Tian. Research on Multimodal Transport Path Optimization with Mixed Time Windows Constraints[J]. International Core Journal of Engineering,2020,6(3):
- [12] 孙岩,虞楠,王丹竹,陈伟建.考虑多类型时间窗的集装箱多式联运路径双目标优化研究[J].铁道运输与经济,2021,43(10):82-89.
- [13] 李宇慧,郑国华,曹靖.基于遗传算法的蓄冷式冷品多温共配成本优化[J].铁道科学与工程学报,2017,14(04):879-884.
- [14] 侯宇超,白艳萍,胡红萍,王鹏.基于精英蚁群算法的多目标生鲜配送路径优化研究[J].数学的实践与认识,2018,48(20):50-57.
- [15] 李世昌. 易腐货物冷藏集装箱多式联运路径选择研究[D].北京交通大学,2018.