文章编号：1003-1421(2026)06-0025-13
引用格式：郭文静，黄志腾，李文锋. 高铁-无人机联运模式下带时间窗的取送货协同优化模型[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：25-37.
GUO Wenjing，HUANG Zhiteng，LI Wenfeng. Collaborative Optimization Model for Pickup and Delivery with Time Windows under High Speed Railway and Drone Intermodal Transport Mode[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：25-37.

高铁-无人机联运模式下带时间窗的取送货协同优化模型

郭文静，黄志腾，李文锋

(武汉理工大学 交通与物流工程学院，湖北 武汉 430063)

摘 要：针对跨城市高时效“门到门”物流需求，研究聚焦于高铁-无人机联运模式下带时间窗的取送货协同优化问题，构建集成高铁班次选择与无人机取送货路径规划的混合整数线性规划模型，以系统总运营成本最小为目标，综合考虑客户时间窗、高铁班次容量、无人机载重与续航能力等约束。基于上海—武汉医疗物资运输场景设计不同规模算例，并与纯卡车运输模式、卡车-航空联运模式以及分阶段求解策略进行对比分析。结果显示，所构建模型能够在不同规模下有效协调干线班次选择与两端取送货路径决策，在保障运输时效的同时实现系统运营成本的合理控制；相较于纯卡车运输模式，高铁-无人机联运模式平均节省运输时间约3.25 h；相较于卡车-航空联运模式，在总运输时间仅增加0.06 h的条件下，系统总运营成本降低约29.3%，碳排放降低约98.09%，在运输时效、经济性与可持续性之间展现出更优的权衡关系；与分阶段求解相比，协同优化方法在总运营成本和延误控制方面表现更优。研究结论可为高铁参与城际高时效物流运输组织与新型快运模式设计提供定量分析依据。

关键词：城际物流；高铁-无人机联运；取送货问题；时间窗；混合整数线性规划
中图分类号：U15；U116 **文献标识码**：A DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260203006

Collaborative Optimization Model for Pickup and Delivery with Time Windows under High Speed Railway and Drone Intermodal Transport Mode

GUO Wenjing，HUANG Zhiteng，LI Wenfeng

(School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: To address the time-sensitive intercity “door-to-door” logistics demand, this paper focused on the collaborative optimization problem of pickup and delivery with time windows under the high speed railway and drone intermodal transport mode. A mixed-integer linear programming model integrating high speed railway service selection and drone pickup and delivery routing was constructed to minimize the total system operating cost, comprehensively considering constraints such as customer time windows, high speed railway service capacity, drone payload, and endurance. Based on the medical material transport scenario from Shanghai to Wuhan, test instances of different scales were designed, and comparative analyses were conducted with the pure truck transport mode, truck and

收稿日期：2026-02-03
通信作者：李文锋(1966—)，男，湖南岳阳人，武汉理工大学交通与物流工程学院教授。
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(72301203)；国家自然科学基金面上项目(52572486)

air intermodal transport mode, and sequential solution strategy. The results show that the constructed model can effectively coordinate the trunk service selection and the pickup and delivery routing decisions at both ends under different scales and achieve reasonable control of the system operating cost while ensuring transport timeliness; compared with the pure truck transport mode, the high speed railway and drone intermodal transport mode saves an average transportation time of about 3.25 h; compared with the truck and air intermodal transport mode, with only a 0.06 h increase in total transportation time, the total system operating cost is reduced by about 29.3%, and carbon emissions are reduced by about 98.09%, showing a better trade-off among transport timeliness, economy, and sustainability; compared with the sequential solution strategy, the collaborative optimization method performs better in total operating cost and delay control. The research conclusions can provide a quantitative analysis basis for the participation of high speed railways in time-sensitive intercity logistics transport organization and new express transport mode design.
Keywords: Intercity Logistics; High Speed Railway and Drone Intermodal Transport; Pickup and Delivery Problem; Time Window; Mixed-Integer Linear Programming

0　引言

随着医疗物资、生鲜冷链及电子元器件等高时效、高附加值货物的城际流通需求日益增长，公路运输模式在应对小批量、突发性订单时，面临长途运输成本高昂、末端交通拥堵及运输时效波动较大等瓶颈问题，难以满足较高时效的物流需求。在国家积极推动构建综合立体交通网与现代快运体系的背景下，构建“高铁干线运输+无人机两端取送货”协同运输模式，充分整合高铁路网的速度优势与无人机低空飞行的灵活触达能力，对于提升城际快运系统时效性具有重要意义。目前，“高铁+无人机”跨城联运项目已在杭州、绍兴及台州等地投入常态化试点。以全国首个“高铁+无人机”血液跨城联运场景为例，浙江省血液中心的稀有血型及急救血包通过“无人机-高铁-无人机”的接力模式运抵目的地，其准点率达到90%以上，相比公路运输，杭州至台州的配送时间缩短约1.5 h，至绍兴缩短约0.5 h，且综合运营成本降低约30%[1]。该试点验证了该模式在血液样本等高时效物资转运中的应用价值，为高铁-无人机联运模式的落地提供了有力依据。然而，高铁-无人机联运的高效运行高度依赖运营层面的调度决策，即如何在高铁固定班次的严格约束下，实现客户订单与班次资源的匹配，并解决末端多无人机配送任务的路径规划与协同优化问题。

现有关于高铁快运与无人机配送的研究已分别形成较为丰富的理论基础。在高铁快运领域，相关研究主要围绕依托高铁客运网络富余运力开展货物运输的组织模式与优化方法展开[2]，重点关注固定时刻表和装卸时间窗约束下的货运集结、车厢资源配置、客货混运等问题[3-4]，并进一步拓展至高铁与公路运输的联运组织、班次协同及门到门服务模式优化[5-8]；但多数研究仍以卡车承担末端配送任务，“最后一公里”依赖地面路网运行，难以有效规避城市拥堵带来的时效不确定性，且末端配送通常被视为高铁到站后的独立环节，干线计划与末端路径之间缺乏深度协同。在无人机配送领域，现有研究主要聚焦于续航、载重、飞行半径及时间窗等约束下的路径规划问题[9-12]，并逐步拓展至卡车-无人机协同配送以及无人机与其他运输主体的协同调度模式[13-17]，但总体上更关注柔性运输工具之间的协同优化[18]，对无人机与具有刚性时刻表约束的大规模干线运输系统之间的协同运行考虑不足。总体而言，针对高速铁路这一具有固定班次、有限站点和严格时刻约束的干线运输平台，研究无人机两端取送货协同运行的系统性优化问题仍较为薄弱，而高铁班次选择与无人机作业时序之间存在更强的时空耦合关系，这也使高铁-无人机联运在优化机理上区别于卡车-无人机联运模式，亟需开展深入研究。

基于此，本研究聚焦于带时间窗的高铁-无人机联运取送货协同优化问题，提出一种面向城际高时效物流的新型联运组织模式，并构建集成高铁班次选择与无人机取送货路径规划的混合整数线性规划模型。与现有研究相比，本研究的创新主要体现在以下3个方面：第一，构建覆盖前端取货、干线运输与末端配送的全链条时空耦合描述框架，刻画订单集货时刻、高铁发到时刻、无人机驿站短驳与送达时间窗之间的联动关系；第二，建立集成高铁

班次选择与两端无人机取送路径规划的一体化优化模型，实现干线与支线的协同决策；第三，基于上海—武汉医疗物资运输场景，从时效、成本、碳排放及协同求解效果等多维度开展对比验证，揭示高铁–无人机联运的组织规律，为后续大规模问题求解与实际试点组织提供定量依据。

1　问题描述

本研究聚焦于一种面向城际高时效物流需求的高铁–无人机联运模式。在该运输模式中，高速铁路承担跨城市干线运输任务，无人机负责两端城市的取货与配送任务，从而形成覆盖“前端取货–干线运输–末端配送”的门到门运输网络。在该物流系统中，网络由客户点、无人机驿站以及高铁站构成。由于《铁路安全管理条例》规定无人机不得在铁路电力线路导线两侧500 m范围内飞行，因此在高铁站外设置无人机驿站作为空铁联运的衔接节点[19]。无人机不直接服务高铁站节点，所有进入高铁网络的货物必须先由无人机运至无人机驿站，再由短驳方式转运至高铁站；所有离开高铁网络的货物也必须先由高铁站短驳至无人机驿站，再由无人机执行末端配送。

高铁–无人机联运模式流程示意图如图1所示，研究问题可描述为在一个由出发城市和到达城市组成的物流网络中，存在多个出发高铁站和多个到达高铁站。网络中分布着多个客户，每个客户都对应一个或多个取送货请求，包含取货点、送货点、包裹重量以及取货时间窗和送货时间窗。一个同构的无人机队被部署在各个高铁站附近的无人机驿站，负责执行第一公里和最后一公里的取送货任务。具体运输过程可分为3个阶段。①取货阶段：无人机从出发城市高铁站附近的无人机驿站起飞，前往各个取货客户点执行取货任务，并在满足取货时间窗约束的条件下返回驿站完成货物集结，随后通过地面短驳方式将货物运送至对应的高铁站。②干线运输阶段：所有包裹在出发高铁站等待，并根据班次时刻表选择合适的高铁列车进行干线运输，运送至目的城市的高铁站。③配送阶段：包裹到达目的高铁站后，通过短驳运输送至无人机驿站，由无人机执行末端配送任务，将包裹送达对应的送货客户点。

相较于传统运输模式，该问题的复杂性主要体现在干支衔接过程中的时空权衡特征。在实际城际运输网络中，同一城市群内通常存在多个高铁枢纽，不同站点在班次密度、发到时刻及通达效率上存在差异。在带时间窗的协同优化场景下，若优先选择地理位置较近的车站，可能因班次稀疏或发车时刻不理想而导致等待时间过长，从而难以满足订单时间窗约束；若选择发车时间更优但地理位置较远的枢纽站点，则会增加末端无人机支线飞行距离与调度压力。高铁班次时刻表的刚性约束与城市空间结

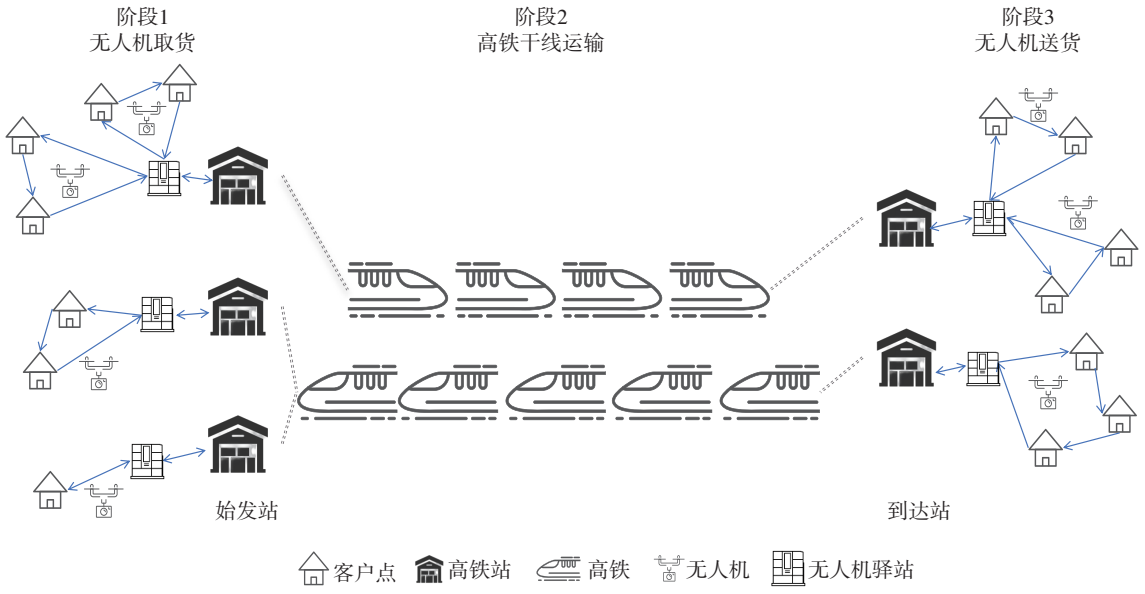


图1　高铁–无人机联运模式流程示意图

Fig.1　Schematic diagram of flow in high speed railway and drone intermodal transport mode

构的不均衡性共同作用，使得包裹在全路径上的资源指派不再遵循简单就近原则，而需要综合权衡干线可用运力、两端取送能力及订单时间紧迫度。

高铁-无人机联运取送货问题的协同优化框架示意图如图2所示。模型以订单与运输系统信息为输入，包括取货点与送货点位置、订单需求与时间窗、高铁班次时刻信息以及无人机运行参数等。在统一决策模块中，同步完成2类关键决策：一是在两端取送层面，为多架无人机规划客户访问顺序与飞行路径，确定包裹从取货点至驿站以及从驿站至送货点的配送方案；二是在干线运输层面，从可行高铁班次集合中为各订单选择匹配班次。由于无人机在取货端完成任务并抵达驿站的时间会影响订单可选择的高铁班次，而高铁班次固定的发到时刻又会反向约束无人机在枢纽节点处的作业安排，因此模型需同时满足客户时间窗约束、无人机载重与续航限制以及枢纽节点处的时空衔接约束，最终输出班次选择方案、无人机配送路径及系统总运营成本等结果。

2　模型构建

为将问题模型简化，作出以下假设。

（1）所有高铁站地理位置、客户位置、订单需求及取送货时间窗信息均为已知确定量。

（2）订单采用一对一取送结构。对任一订单 $r \in R$，其唯一对应一个取货点 $p_r \in P$ 和一个送货点 $d_r \in D$。同一客户可以对应多个独立订单，但每个订单仅包含一个取货任务和一个送货任务，且在运输过程中不考虑订单拆分、订单合并以及一对多/多对多匹配情形。

（3）无人机队为同构机队，即各无人机在飞行速度、最大载重、单位飞行成本等性能参数上保持一致。

（4）无人机飞行时间由节点间直线距离与恒定飞行速度共同决定，暂不考虑空域管制、突发天气等随机扰动因素。

（5）在距高铁站安全距离>500 m处设置无人机驿站，驿站与高铁站之间通过人工或接驳车辆完成短距离转运，短驳运输能力假设足够大，可以满足包裹即时接驳，故忽略短驳运输工具的调度问题。

上述假设主要服务于本研究的核心研究目标，即在确定性场景下刻画高铁干线班次选择与无人机末端取送货路径之间的时空耦合关系。这些假设主要用于控制问题规模、突出关键决策变量，并未改变“高铁承担干线、无人机承担两端取送货”的基



图2　高铁-无人机联运取送货问题的协同优化框架示意图

Fig.2　Schematic diagram of collaborative optimization framework for pickup and delivery problem in high speed railway and drone intermodal transport

本组织机制，因此不影响对联运模式协同优化规律的分析。需要说明的是，这些假设使模型更适用于高时效、小批量、计划性较强的城际运输场景；对于需求随机波动、班次动态调整、天气扰动或异构无人机编队等更复杂情形，仍有待在后续研究中进一步扩展。

2.1　符号说明

变量符号及其说明如表1所示。

表1　变量符号及其说明

Tab.1　Variable symbols and their descriptions

符号	说明
	集合
P	取货客户点，P=｛1，2，...，$\|P\|$｝
D	送货客户点，D=｛1，2，…，$\|D\|$｝
G	出发城市的高铁站集合，G=｛1，2，…，g，…，$\|G\|$｝
H	到达城市的高铁站集合，H=｛1，2，…，h，…，$\|H\|$｝
O	无人机驿站集合，O=｛1，2，…，o，…，$\|O\|$｝
R	取送货请求订单集合，R=｛1，2，…r，…，n｝
V	无人机的集合，V=｛1，2，…，v，…，$\|V\|$｝
W	列车的集合，W=｛1，2，…，w，…，$\|W\|$｝
N	网络节点集合，$P\cup D\cup G\cup H\cup O$
N^{drone}	无人机网络节点集合，$P\cup D\cup O$
N^{HSR}	高铁网络节点集合，$G\cup H$
	参数
Q_v，Q_w	分别为无人机v、列车w的最大承载质量，kg
C_v，C_w	分别为无人机v的单位距离运输成本，元/km；列车w的启用成本，元/班
O_v	无人机v的起降场地，$O_v\in O$
a_{og}	取值为1，如果无人机驿站o属于出发高铁站g，反之为0
b_{oh}	取值为1，如果无人机驿站o属于到达高铁站h，反之为0
L_v	无人机v的单次最大行驶里程，km
D_w，A_w	列车w出发/抵达的时间，h
G_w，H_w	列车w的出发/抵达高铁站
p_r，d_r	包裹r的取/送货点
q_r	包裹r的质量，kg
$[e_{p_r}, l_{p_r}]$，$[e_{d_r}, l_{d_r}]$	包裹r的取/送货时间窗，h
c_r^{delay}	包裹r的延迟送货单位惩罚成本，元/h
t_{ij}	节点i到节点j的行驶时间，h
s_i	节点i的服务时间，h
D_{ij}	节点i到节点j的距离，km
	决策变量
x_{ijv}	若无人机v从节点i飞往节点j，则为1，反之为0
y_{ijvr}	若包裹r由无人机v从节点i运往节点j，则为1，反之为0
z_{wr}	若包裹r由班列w进行干线运输，则为1，反之为0
u_w	若高铁班次w被启用，则u_w=1，反之为0
β_i^v	无人机v从节点i出发的时间，h
γ_i^r	包裹r从节点i出发的时间，h
$T_{d_r}^r$	包裹r完成送货的时间，h
t_r^{delay}	包裹r延迟送货的时间，h

2.2　数学模型

在上述问题描述与基本假设的基础上，构建高铁–无人机联运取送货协同优化模型。模型以系统总运营成本最小为优化目标，该成本由无人机运输成本、高铁干线运输成本以及订单延误惩罚成本组成，其目标函数如下。

$$\min\ Z=\sum_{v\in V}\sum_{i\in N}\sum_{j\in N}C_vD_{ij}x_{ijv}+\sum_{w\in W}C_wu_w+\sum_{r\in R}c_r^{\text{delay}}t_r^{\text{delay}} \tag{1}$$

（1）无人机运行约束。无人机在两端取送阶段承担取货与派送任务，其运行需要满足路径连续性、时间逻辑以及载重和续航能力等限制。

①无人机时空约束。无人机需要形成连续可行的飞行路径，并保证所有客户节点得到服务，因此建立以下路径约束。

$$\sum_{i\in N^{\text{drone}}}\sum_{v\in V}x_{ijv}=1\qquad\forall j\in P\cup D \tag{2}$$

$$\sum_{j\in N^{\text{drone}}}x_{ijv}\leqslant 1\qquad\forall i=O_v,\ v\in V \tag{3}$$

$$\sum_{j\in N^{\text{drone}}}x_{ijv}-\sum_{j\in N^{\text{drone}}}x_{jiv}=0\qquad\forall v\in V,\ i\in N^{\text{drone}} \tag{4}$$

约束(2)确保所有取货和送货节点恰好被无人机访问一次，保证了服务的完整性；约束(3)规定每架无人机从起降场出发；约束(4)满足无人机流量守恒，确保无人机飞入一个节点后必须从该节点离开，形成连续的飞行路径。

无人机在执行配送任务时，其飞行时间需要满足时间连续性，因此设置如下时间逻辑约束。

$$\beta_i^v+t_{ij}+s_j\leqslant\beta_j^v+M\left(1-x_{ijv}\right)\qquad\forall v\in V,\ i,\ j\in N^{\text{drone}} \tag{5}$$

约束(5)是无人机的时间逻辑，若无人机v从节点i飞往j，则其从节点j出发的时间，必须不早于其从节点i出发的时间、两点间飞行时间以及在节点j的服务时间的总和。

②无人机与包裹时空耦合约束。

$$\sum_{v\in V}\sum_{j\in N^{\text{drone}}}y_{ijvr}-\sum_{v\in V}\sum_{j\in N^{\text{drone}}}y_{jivr}=\begin{cases}1 & \forall i=p_r\\ -1 & \forall i=d_r,\ r\in R\\ 0 & \forall i\in N^{\text{drone}}\end{cases} \tag{6}$$

约束(6)是包裹的流量守恒，在取货点p_r，包裹产生，净流出为1；在送货点d_r，包裹被消耗，净流入为1，即净流出为–1，在其他无人机中转节点，

包裹流入等于流出，则为0。

此外，为保证包裹只能在无人机经过的路径上运输，还需满足

$$y_{ijvr} \leqslant x_{ijv} \qquad \forall r \in R,\ i,\ j \in N^{\text{drone}},\ v \in V \tag{7}$$

约束(7)将决策变量x_{ijv}和y_{ijvr}关联起来，保证如果无人机v运送包裹r从节点i到节点j，则该无人机必须经过该弧段。

$$\gamma_i^r + t_{ij} + s_j \leqslant \gamma_j^r + M\left(1 - y_{ijvr}\right) \qquad \forall r \in R,\ v \in V,\ i,\ j \in N^{\text{drone}} \tag{8}$$

约束(8)是包裹的时间逻辑，若包裹r由无人机v从节点i运往节点j，则包裹从节点j出发的时间不早于其从节点i出发的时间、两点间飞行时间以及在节点j的服务时间的总和。

$$\gamma_i^r - \beta_i^v \leqslant M\left(1 - \sum_{j \in N^{\text{drone}}} y_{ijvr}\right) \qquad \forall r \in R,\ v \in V,\ i \in N^{\text{drone}} \tag{9}$$

$$\gamma_i^r - \beta_i^v \geqslant M\left(\sum_{j \in N^{\text{drone}}} y_{ijvr} - 1\right) \qquad \forall r \in R,\ v \in V,\ i \in N^{\text{drone}} \tag{10}$$

约束(9)—(10)用于确保：当包裹r由无人机v从节点i发出时，包裹在该节点的离开时刻与无人机在该节点的离开时刻保持一致。

③无人机载重与航程约束。无人机在运输过程中还需满足载重能力与续航能力限制。

$$\sum_{r \in R} q_r y_{ijvr} \leqslant \mathrm{Q}_{\mathrm{v}} x_{ijv} \qquad \forall i,\ j \in N^{\text{drone}},\ v \in V \tag{11}$$

$$\sum_{i \in N^{\text{drone}}} \sum_{j \in N^{\text{drone}}} D_{ij} x_{ijv} \leqslant L_v \qquad \forall v \in V \tag{12}$$

约束(11)是无人机容量约束，确保在无人机飞行的任意弧段上，其承载的所有包裹总质量不超过其最大容量；约束(12)是无人机续航约束，确保每架无人机的总飞行距离不超过其最大里程。

（2）高铁运输约束。高铁承担城际干线运输任务，其运行受班次时刻表与列车运力限制。

①高铁时空约束。

$$\gamma_i^r + t_{ij} + s_j \leqslant \gamma_j^r + M\left(1 - \sum_{w \in W:\ \mathrm{G}_w = \mathrm{i},\ \mathrm{H}_w = \mathrm{j}} z_{wr}\right) \qquad \forall r \in R,\ i \in \mathrm{G},\ j \in H \tag{13}$$

约束(13)用于刻画订单在高铁运输阶段的时间衔接关系，保证了订单在高铁运输网络中的时间传递满足实际运输过程的时序要求。

$$\gamma_i^r - D_w \leqslant M\left(1 - z_{wr}\right) \qquad \forall r \in R,\ i \in G,\ w \in \{W \mid \mathrm{G}_w = i\} \tag{14}$$

$$\gamma_i^r - D_w \geqslant M\left(z_{wr} - 1\right) \qquad \forall r \in R,\ i \in G,\ w \in \{W \mid \mathrm{G}_w = i\} \tag{15}$$

$$\gamma_i^r - A_w - s_i \leqslant M\left(1 - z_{wr}\right) \qquad \forall r \in R,\ i \in H,\ w \in \{W \mid H_w = i\} \tag{16}$$

$$\gamma_i^r - A_w - s_i \geqslant M\left(z_{wr} - 1\right) \qquad \forall r \in R,\ i \in H,\ w \in \{W \mid H_w = i\} \tag{17}$$

约束(14)—(17)用于确保：当包裹选择高铁班次w时，其在出发高铁站的出发时间与高铁班次发车时刻对齐，在到达高铁站的出发时间等于班次到达时刻加上服务时间。

②高铁班次选择与运力约束。在干线运输阶段，每个订单仅能选择一趟高铁班次，同时列车具有载重限制。

$$\sum_{w \in W} z_{wr} = 1 \qquad \forall r \in R \tag{18}$$

$$\sum_{r \in R} q_r z_{wr} \leqslant Q_w \qquad \forall w \in W \tag{19}$$

$$z_{wr} \leqslant u_w \qquad \forall r \in R,\ w \in W \tag{20}$$

约束(18)确保任一包裹只会由一列高铁进行干线运输；约束(19)是高铁容量约束，确保固定线路承载的包裹总量不超过其最大容量，防止超载；约束(20)表示若订单r选择班次w进行干线运输，则班次w必须被启用。由此可保证高铁干线成本在模型中按班次启用一次性计入。

（3）无人机-高铁协同耦合约束。在高铁-无人机联运系统中，两端取送与干线运输之间需要在时间与空间上保持衔接，因此建立以下空间和时间的耦合约束。

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in N^{\text{drone}}} y_{iovr} - \sum_{w \in W:\ G_w = g} z_{wr} \leqslant M\left(1 - a_{og}\right) \qquad \forall r \in R,\ g \in G,\ o \in O \tag{21}$$

$$\sum_{w \in W:\ G_w = g} z_{wr} - \sum_{v \in V} \sum_{i \in N^{\text{drone}}} y_{iovr} \leqslant M\left(1 - a_{og}\right) \qquad \forall r \in R,\ g \in G,\ o \in O \tag{22}$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N^{\text{drone}}} y_{ojvr} - \sum_{w \in W:\ H_w = h} z_{wr} \leqslant M\left(1 - b_{oh}\right) \qquad \forall r \in R,\ h \in H,\ o \in O \tag{23}$$

$$\sum_{w \in W:\ H_w = h} z_{wr} - \sum_{v \in V} \sum_{j \in N^{\text{drone}}} y_{ojvr} \leqslant M\left(1 - b_{oh}\right) \qquad \forall r \in R,\ h \in H,\ o \in O \tag{24}$$

约束(21)—(24)用于建立无人机与高铁班次选择之间的空间逻辑一致性关系。其中，约束(21)—(22)刻画订单在出发端无人机驿站与出发高铁站之间的空间衔接关系；约束(23)—(24)刻画订单在到达高铁

站与到达端无人机驿站之间的空间衔接关系。

$$\gamma_o^r + t_{og} + s_g - \gamma_g^r \leqslant M\left(1 - a_{og}\right) \quad \forall r \in R,\ o \in O,\ g \in G \tag{25}$$

$$\gamma_g^r - \gamma_o^r - t_{og} - s_g \leqslant M\left(1 - a_{og}\right) \quad \forall r \in R,\ o \in O,\ g \in G \tag{26}$$

$$\gamma_h^r + s_o + t_{ho} - \gamma_o^r \leqslant M\left(1 - b_{oh}\right) \quad \forall r \in R,\ o \in O,\ h \in H \tag{27}$$

$$\gamma_o^r - \gamma_h^r - s_o - t_{ho} \leqslant M\left(1 - b_{oh}\right) \quad \forall r \in R,\ o \in O,\ h \in H \tag{28}$$

约束(25)—(28)为无人机驿站与高铁站之间的时间衔接约束，主要用于刻画订单在空铁联运两端经过无人机驿站节点o进行短驳的时间一致性关系。

（4）包裹时间窗与延误约束。为了满足客户对配送时效的要求，还需要设置时间窗与延误计算约束。

$$e_{p_r} \leqslant \gamma_{p_r}^r - s_{p_r} \leqslant l_{p_r} \qquad \forall r \in R \tag{29}$$

$$T_{d_r}^r - \beta_{d_r}^v \leqslant M\left(1 - \sum_{i \in N} y_{id_r vr}\right) \qquad \forall r \in R,\ v \in V \tag{30}$$

$$\beta_{d_r}^v - T_{d_r}^r \leqslant M\left(1 - \sum_{i \in N} y_{id_r vr}\right) \qquad \forall r \in R,\ v \in V \tag{31}$$

$$t_r^{\text{delay}} \geqslant T_{d_r}^r - l_{d_r} \quad \forall r \in R \tag{32}$$

约束(29)满足客户取货时间窗约束；约束(30)—(31)计算包裹r到达送货点的时间；约束(32)计算包裹r延误送货的时间。

（5）变量取值约束。最后，为保证模型求解的数学严谨性，需要对决策变量的取值范围进行限定。

$$x_{ijv},\ y_{ijvr},\ z_{wr},\ u_w \in \{0,\ 1\} \qquad \forall i,\ j \in N,\ v \in V,\ r \in R,\ w \in W \tag{33}$$

$$\beta_i^v,\ \gamma_i^r,\ T_{d_r}^r,\ t_r^{\text{delay}} \geqslant 0 \qquad \forall i \in N,\ v \in V,\ r \in R \tag{34}$$

其中，M为足够大的正数，其取值依据订单时间窗上界、高铁班次最晚到达时刻以及无人机最大可达飞行时间预先确定，以保证约束逻辑成立并尽量减弱数值松弛。

3　算例分析

本研究围绕首次提出的高铁–无人机联运取送货协同优化问题，采用“精确建模–精确求解–对比验证”的研究思路，构建混合整数线性规划模型，并借助CPLEX对小规模算例进行求解，以检验模型正确性与方案可行性。进一步通过与纯卡车运输及卡车–航空联运模式对比，从时效、成本与碳排放等方面验证所提模式的综合优势，并为后续大规模场景下的启发式求解研究奠定基础。

3.1　参数设置

为验证所构建模型在实际应用场景中的有效性和可行性，本研究选取从上海市运输至武汉市的跨城医疗物资配送进行案例分析。医疗物资(如紧急药品等)具有价值高、时效性要求严苛的特点，与模型旨在服务的高附加值产品特性高度契合。研究构建了包含1—6个客户对的6组实验以测试不同需求规模下的性能。该算例基于真实的地理数据，选取上海虹桥站(SHQ)和上海站(SH)为出发枢纽，武汉站(WH)和汉口站(HK)为到达枢纽，并选取上海、武汉两市中的大型医院作为客户节点，客户订单详情表如表2所示。

为了符合模型特点，参考市场情况和文献调研，整个联运过程由部署在各高铁站附近无人机驿站的无人机机队与高铁网络协同完成，其中每个高铁站部署3架无人机，型号为方舟(ARK)40，飞行速度为50 km/h，最大载重为10 kg，单次最大飞行距离为20 km，单位飞行成本为0.2元/km[20]；干线运输则调用了包含44个真实班次的高铁网络(数据来源自铁路12306)，上海—武汉高铁时刻表如表3所示，每趟列

表2　客户订单详情表

Tab.2　Customer order details

订单号	取货地	经纬度	送货地	经纬度	需求/kg	取货时间窗	送货时间窗
1	上海市普陀区中心医院	(121.404 2，31.241 5)	武汉大学中南医院	(114.353 8，30.553 9)	3.6	[08:00，10:00]	[00:00，16:15]
2	上海德达医院	(121.243 1，31.172 3)	武汉市中心医院	(114.265 5，30.628 4)	4.2	[10:30，12:30]	[00:00，18:15]
3	复旦大学附属儿科医院	(121.395 0，31.139 1)	武汉市第一医院	(114.272 2，30.572 2)	3.8	[09:30，11:30]	[00:00，18:30]
4	上海市静安区中心医院	(121.449 8，31.230 7)	四七一医院	(114.456 5，30.580 4)	4.8	[11:30，13:30]	[00:00，21:30]
5	上海市第一人民医院	(121.489 4，31.253 4)	武钢总医院	(114.403 5，30.632 1)	4.6	[10:00，12:00]	[00:00，20:30]
6	中国人民解放军海军特色医学中心	(121.427 9，31.200 4)	武汉市第七医院	(114.333 9，30.589 5)	5.0	[11:00，12:30]	[00:00，21:15]

车最大载质量为800 kg，单位运输成本为0.8元/km[20]。此外，设无人机在客户点服务时间为10 min，高铁站—无人机驿站间短驳及站端处理服务时间为30 min；为体现医药物资运输的时效要求，设延迟送货惩罚成本为600元/h。

表3　上海—武汉高铁时刻表

Tab.3　Timetable of high speed railway from Shanghai to Wuhan

序号	班次	出发站	到达站	出发时间	到达时间	行驶时间
1	G1786	上海虹桥站	武汉站	06:00	10:43	4 h 43 min
2	G3124	上海站	武汉站	06:06	12:35	6 h 29 min
⋮						
43	G2422	上海虹桥站	武汉站	17:38	23:48	6 h 10 min
44	D3014	上海虹桥站	汉口站	17:52	23:03	5 h 11 min

3.2　协同优化与分阶段求解对比

为进一步验证集中式协同优化的必要性，设计了一种分阶段求解策略作为对照方案。与本研究在统一框架下同步决策包裹-高铁班次匹配与无人机取送货路径规划不同，分阶段求解策略采用“先干线、后末端”的顺序决策思路：首先依据包裹取货时间窗和高铁班次时刻表，为各包裹分配最近可行高铁班次；然后在班次结果固定的条件下，分别对出发端取货任务和到达端送货任务进行顺序调度。该方案不再显式刻画高铁班次选择与无人机路径规划之间的双向反馈关系，其本质上是一种局部决策策略。

在第一阶段，为判断班次可行性，定义包裹r在班次w下的估计最早可进站时刻η_{rw}^{p}和估计最早送达时刻η_{rw}^{d}分别为

$$\eta_{rw}^{p}=e_{p_r}+t_{p_r,\,g}+s_g \tag{35}$$

$$\eta_{rw}^{d}=A_w+s_h+t_{h,\,d_r}+s_{d_r} \tag{36}$$

若班次w对包裹r满足$\eta_{rw}^{p}\leqslant D_w$，$q_r\leqslant Q_w$，则认为该班次对包裹$r$可行。在此基础上，按照包裹取货时间窗下界的升序依次处理各订单，并为其分配最近可行高铁班次，即优先选择发车时刻最早的可行班次；若存在多个候选班次，则进一步选择估计送达时刻更早的班次。由此可确定包裹r的固定出发站g_r^*、固定到达站h_r^*、固定发车时刻D_w^*和固定到达时刻A_w^*。

在第二阶段，高铁班次结果固定，分别在出发端和到达端对无人机任务进行顺序调度，并采用“最早空闲优先”原则分配任务。对于出发端，设A_{gm}^{p}表示站点g的第m架无人机在取货阶段的可用时刻，则包裹r的实际取货开始时刻为

$$\theta_r^{p}=\max\left\{e_{p_r},\ \min A_{g_r^*,m}^{p}\right\} \tag{37}$$

相应地，包裹r完成取货并返回固定出发站的时刻为

$$\sigma_r^{p}=\theta_r^{p}+t_{p_r,\,g_r^*}+s_{g_r^*} \tag{38}$$

对于到达端，设A_{hm}^{d}表示站点h的m架无人机在送货阶段的可用时刻，则包裹r的实际送货开始时刻为

$$\theta_r^{d}=\max\left\{t_r^{a_*}+s_{h_r^*},\ \min A_{h_r^*,m}^{d}\right\} \tag{39}$$

包裹r完成送货服务的时刻为

$$\sigma_r^{d}=\theta_r^{d}+t_{h_r^*,\,d_r}+s_{d_r} \tag{40}$$

若$\sigma_r^{d}>l_r^{d}$，则送货延误时间为

$$t_r^{\mathrm{delay}}=\max\left\{0,\ \sigma_r^{d}-l_r^{d}\right\} \tag{41}$$

其中，l_r^{d}为包裹r送货时间窗上界。

上述分阶段求解将高铁班次分配与两端无人机调度拆分为顺序决策过程，其目的在于构造一个能够体现“先干线、后末端”特征的对照方案，从而与本研究提出的集中式协同优化模型进行比较。

协同优化与分阶段求解成本对比如表4所示，给出了2种求解方式在基准算例下的结果对比。可以看出，集中式协同优化在总运营成本、延误控制以及整体协调性方面均优于分阶段求解。具体而言，分阶段求解的总运营成本为2 711.56元，而集中式协同优化的总运营成本为1 778.99元，前者较后者增加了52.4%。从成本构成看，分阶段求解的高铁成本、无人机成本和延误成本分别为2 153.62元、55.24元和502.70元，均高于集中式协同优化对应的1 609.94元、27.92元和141.14元。其中，延误成本增幅最为显著，说明分阶段求解策略在时间衔接方面更容易产生整体失配。

表4　协同优化与分阶段求解成本对比

Tab.4　Cost comparison between collaborative optimization and sequential solution

求解方式	总运营成本/元	高铁成本/元	无人机成本/元	延误成本/元	延误订单数
协同优化	1 778.99	1 609.94	27.92	141.14	1
分阶段求解	2 711.56	2 153.62	55.24	502.70	1

进一步分析表明，分阶段求解的不足主要源于其“先高铁、后无人机”的决策逻辑。第一阶段按照局部时序规则优先为订单分配最近可行班次，虽

然能够保证订单在出发端赶上所选列车，但并未同步考虑到达端无人机配送能力及送货时间窗约束。因此，部分订单在干线层面看似选择了较优班次，但在末端配送阶段却可能面临整体时效不足的问题。例如，订单1在分阶段求解中被分配至W2班次，虽满足出发端时刻要求，但其到达汉口站后的末端配送完成时刻为17:05，较送货时间窗上界16:15延误50 min，从而产生较高的惩罚成本。这说明局部最优的班次选择并不一定能带来系统层面的最优结果。

相比之下，集中式协同优化能够在高铁班次选择时同步考虑取货端无人机集货时刻、到达端无人机派送能力以及枢纽节点处的衔接成本，从而实现包裹班次分配与两端取送货路径规划之间的全局协调，避免顺序决策可能带来的局部最优问题。由此可见，对于高铁–无人机联运这类具有“刚性干线–柔性末端”特征的城际物流系统，采用统一框架下的协同优化具有明显必要性，也进一步验证了本研究模型结构设计的合理性。

3.3　模式对比分析

3.3.1　时效性与经济性

为系统评估所构建高铁–无人机联运模式在运行效率与成本控制方面的优势，在订单规模为6的基准算例下，本研究引入纯卡车运输模式与卡车–航空联运模式作为对比方案，其具体场景设置如下。

（1）纯卡车运输模式：该模式用于刻画公路直达运输场景。包裹由卡车从取货客户点直接运输至送货客户点，不涉及中途换装或多式衔接。在参数设定方面，上海至武汉的城际公路运输距离设定为850 km，该数值基于地图导航软件的实际行驶路径测算得到。卡车行驶速度采用分路段设定方式：城际高速路段的平均行驶速度设定为80 km/h，城市内部取送货路段的行驶速度设定为40 km/h。为反映实际运营中的驾驶安全约束，模型中引入驾驶员强制休息机制，规定卡车每连续行驶4 h需安排20 min的休息时间(参考《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》)。卡车的单位运输成本设定为1.25元/km，额定载质量为3 t[20]。

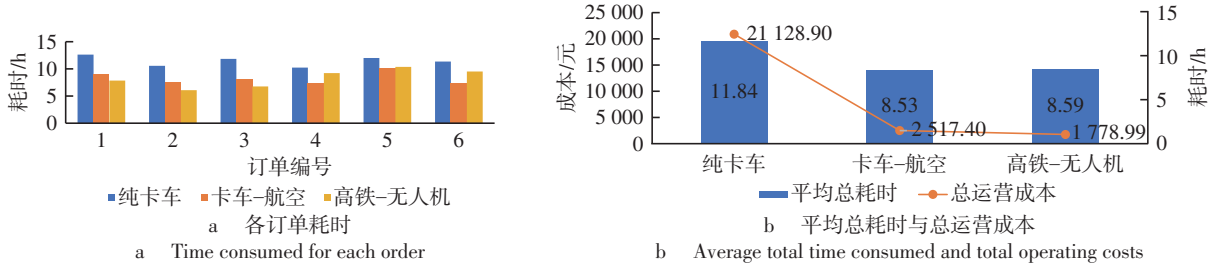
（2）卡车–航空联运模式：该模式采用“卡车(末端)+航空(干线)”的接力运输组织方式。包裹首先由卡车从取货客户点运输至上海地区的航空枢纽机场，经航空干线运输至武汉天河机场后，再由卡车完成目的地城市内的末端配送。机场两端的卡车行驶速度设为50 km/h，续航里程为150 km，单位运输成本设定为1.25元/km；航空干线运输的成本是2.4元/km，载重500 kg，其班次时刻基于公开航班时刻信息进行设定，出发站为上海虹桥机场和上海浦东机场，到达站为武汉天河机场。上海—武汉航班时刻表如表5所示，用以反映航空运输在典型运行条件下的出发间隔与等待特性。

3种运输组织模式综合运营指标对比图如图3

表5　上海—武汉航空班次时刻表

Tab.5　Flight timetable from Shanghai to Wuhan

序号	航班	出发站	到达站	出发时间	到达时间	行驶时间
1	MU2504	上海浦东机场	武汉天河机场	6:25	8:30	2 h 5 min
2	MU2510	上海虹桥机场	武汉天河机场	7:25	9:30	2 h 5 min
			⋮			
13	MU2544	上海浦东机场	武汉天河机场	21:50	23:45	1 h 55 min
14	CZ3544	上海浦东机场	武汉天河机场	22:05	23:55	1 h 50 min



a　各订单耗时

a　Time consumed for each order

b　平均总耗时与总运营成本

b　Average total time consumed and total operating costs

图3　3种运输组织模式综合运营指标对比图

Fig.3　Comparison of comprehensive operating indicators among three transport organization modes

所示，通过对3种运输组织模式在相同需求强度(6个订单规模)下的算例结果进行分析，可以看出各模式在成本形成机理与时效表现上存在显著差异。高铁–无人机联运模式的总运营成本为1 778.99元，相较于卡车–航空联运模式的2 517.40元和纯卡车模式的21 128.90元表现出更好的经济性。纯卡车模式因其高昂的惩罚成本，导致其总成本最高，在时效性上的缺失限制了其在高端快递市场的应用。从成本构成来看，卡车–航空联运模式的干线运输支出与高铁干线支出基本持平，但其末端环节的经济性差异较大。由于卡车受城市道路网里程限制和燃油/人力成本影响，其单次环路里程及费用较高；而无人机通过点对点的直线飞行及低廉的能源消耗，极大地压缩了支线运营支出。此外，卡车–航空联运模式由于干支衔接失调产生了610.98元的时间惩罚成本，远高于高铁–无人机联运模式，这进一步拉大了2种模式的总成本差距。

从运输时效性的微观层面分析，图3a的算例结果进一步揭示了不同模式在应对随机订单需求时的时效稳定性差异。纯卡车模式在全部6个订单中均呈现持续的高耗时状态(均值11.84 h)，反映了长距离陆运在时效竞争中的天然劣势。高铁–无人机联运模式与卡车–航空联运模式在平均总耗时上虽极度接近(分别为8.59 h和8.53 h)，但在时间可靠性上表现不同。卡车–航空联运模式由于受限于固定航班(如W7航班)的刚性时刻约束，订单1产生了61.1 min的严重等待延误，在图3a中形成了明显的耗时峰值；相比之下，高铁–无人机联运模式凭借高铁干线的高频次班次覆盖(如W1，W8，W11等)，展现出更强的组织灵活性，即便在需求高峰期的订单6，其末端衔接延误也仅为14.1 min。这说明相较于航空运输的时刻局限，高铁快运通过多班次时空覆盖与末端柔性配送工具的精准衔接，能有效消解干线时刻的刚性约束，在保障个体订单时效稳定性方面具有显著优势。

进一步结合图3b分析各模式的综合运营特征可见，不同运输模式在成本控制与服务水平之间表现出显著的权衡特征。卡车–航空联运模式旨在通过航空干线获取时效收益，但由于干支衔接过程中卡车配送的低效性，其呈现出“高成本、低可靠性”的特征。相比之下，高铁–无人机联运模式则在成本与时效之间实现了更优平衡。该模式有效整合了高铁客运网络的富余运力以平抑干线成本，并借助无人机低成本、高频次的柔性特征，破解了末端“最后一公里”的配送瓶颈。实验数据证明，在时效性极度接近的情况下，该模式总耗时仅比航空模式增加0.06 h，却实现了总成本29.3%的显著降幅。这充分说明高铁–无人机联运模式在兼顾经济性与时效性的同时，对于城际高附加值小件货物转运场景具有更强的适用性与推广价值。

从运行机制上看，3种模式代表了不同的干支衔接逻辑。纯卡车模式是单一刚性环节的延伸。卡车–航空联运模式呈现“刚性干线–刚性末端”的特征，由于航空时刻与地面路网拥堵的双重挤压，系统在干支衔接处易产生失调。高铁–无人机联运模式则构建了“刚性干线–柔性末端”的运行机制。高铁班次提供了高度稳定的时空基准，而无人机作为柔性运输单元，能够根据高铁到发时刻灵活规划路径。这种组织模式既保留了干线运输的规模效益，又通过末端配送的多路径动态优化消解了干线时刻的刚性约束，形成了更为高效的城际快递运输组织形态。

3.3.2　环境效益

环境效益是衡量现代物流系统可持续发展水平的关键维度。为量化高铁–无人机联运模式对绿色物流的贡献，本实验以N=6算例为研究对象，对比分析了其与卡车运输在单位货物碳排放方面的表现。为进行科学的对比，本研究设定了相应的碳排放因子：铁路货运为0.008 $kgCO_2/(t\cdot km)$，公路货运为0.092 $kgCO_2/(t\cdot km)$，航空货运为1.027 $kgCO_2/(t\cdot km)$[21]。由于现阶段尚缺乏统一的无人机货运碳排放核算标准，便参考现有无人机能耗测算研究，得出无人机单位运输周转量能耗形式为

$$EF_u = e_u \cdot \beta \tag{42}$$

式中：EF_u为无人机运输碳排放因子，$kgCO_2/(t\cdot km)$；e_u为无人机单位运输周转量能耗$kW\cdot h/(t\cdot km)$；β为电力碳排放系数，$kgCO_2/(kW\cdot h)$。

参考现有无人机物流配送能耗研究结果，多旋翼及复合翼物流无人机在实际配送场景中的单位运输周转量能耗通常处于0.5~0.7 $kW\cdot h/(t\cdot km)$的范围。

与此同时，根据我国电力结构相关研究，电力碳排放系数通常取0.55~0.65 $kgCO_2/(kW·h)$。在此基础上，可得到无人机运输碳排放因子的估算区间为0.28~0.46 $kgCO_2/(t·km)$。综合考虑无人机载重能力、飞行速度及两端取送工况等因素，本研究取该区间的中值0.35 $kgCO_2/(t·km)$作为无人机运输碳排放因子，并用于后续联运系统碳排放测算与对比分析。

不同运输模式总碳排放量对比如图4所示，本研究提出的高铁–无人机联运模式，其总碳排放量仅为169.92 g，相较于卡车运输模式的1 038.13 g和卡车–航空模式的8 913.08 g，实现了高达83.63%和98.09%的碳减排比例。

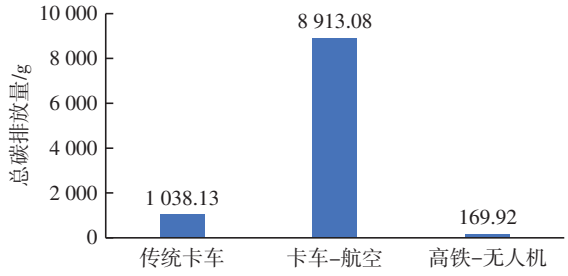


图4　不同运输模式总碳排放量对比

Fig.4　Comparison of total carbon emissions among different transport modes

本研究通过对碳排放的量化对比分析，证明了高铁–无人机联运模式在可持续发展方面的优越性。与另外两种运输模式相比，该模式可实现超过80%的碳减排，其核心优势在于利用高能效、低排放的电气化高铁替代高污染的燃油卡车作为长距离干线运输工具。该发现不仅为企业提升物流效率提供了新范式，更在“双碳”目标背景下，为其履行环境责任、构建绿色供应链体系提供了数据支撑与技术路径。

3.4　无人机机型敏感性分析

为分析无人机机型差异对高铁–无人机联运模式运行效果的影响，选取了多种具有不同航速与续航能力的无人机参数进行对比实验，不同无人机机型性能敏感性实验结果如表6所示。

实验结果显示，无人机性能对高铁–无人机联运的优化逻辑具有显著的协同增益作用。首先，高性能机型展现出极强的干线资源指派优化能力：对比方舟40与方舟80A发现，高性能机型凭借更强的时空覆盖能力，将订单高度集约化地指派至W7与W13这2个核心班次，使干线成本由1 609.94元降至1 057.70元，降幅达34.3%。这表明性能优越的无人机不仅能改善末端时效，更能反向驱动干线运输方案向集约化演进。其次，续航能力的提升促进了配送形态的重构：方舟80系列机型利用长续航优势，实现了“一机三点”的高效环路配送，显著减少了无人机投入数量与总飞行里程。从模型机理来看，不同机型参数主要通过改变关键约束的紧密程度来影响模型可行域，并进一步作用于最优解结构。具体而言，载重参数主要影响约束(11)的紧密度，较大的载重能力有助于提升单架无人机在同一飞行弧上的包裹聚合能力，从而减少飞行架次；续航参数主要作用于约束(12)，较长的续航里程扩大了无人机可直接服务的客户范围，降低了对近距离站点或额外接力路径的依赖；飞行速度则主要影响约束(5)、约束(8)以及与时间窗相关的同步约束，较高的飞行速度有助于压缩两端取送时间并降低订单延误风险。因此，不同机型不仅会改变目标函数值，还会通过改变约束的活跃程度影响系统的路径组织方式与最终最优解结构。

4　结论

本研究面向跨城市高时效物流需求，构建了集成高铁班次选择及无人机两端取送路径规划的协同优化模型。与既有研究多聚焦于高铁联运的干线运输组织，或无人机配送的末端路径优化不同，本研究首次将高铁固定班次约束与无人机两端取送决策置于统一框架中，显式刻画了订单在取货端集货、驿站短驳、干线班次匹配和到达端配送之间的时空耦合

表6　不同无人机机型性能敏感性实验结果

Tab.6　Performance sensitivity experiment results of different drone models

机型	续航/km	速度/(km/h)	载重/kg	高铁成本/元	无人机成本/元	延误成本/元	总运营成本/元	所选高铁班次
方舟20	40	72	5	1 057.70	56.93	48.18	1 162.81	W7，W13
方舟40	20	50	10	1 609.94	27.92	141.14	1 778.99	W1，W8，W11
方舟80A	60	90	20	1 057.70	35.38	22.54	1 115.62	W7，W13
方舟80B	30	90	30	1 081.09	26.10	292.13	1 399.32	W8，W11

关系，并验证了干支协同优化的必要性。基于上海—武汉医疗物资运输场景实验分析，得到以下结论。

（1）高铁-无人机联运模式在时效、成本与环保上优势显著。实验表明，该模式比卡车运输平均快3.25 h，比卡车-航空联运模式平均节省738.41元。同时，其碳排放量分别仅为卡车运输的16.37%和卡车-航空模式的1.91%，相当于实现了83.63%和98.09%的大幅减排。

（2）敏感性分析表明，无人机性能参数对高铁-无人机联运的优化结果具有显著影响。较高的续航能力和飞行速度不仅能够改善末端配送效率，还能够反向促进订单向更优高铁班次集中，从而降低系统总成本。

基于上述研究结果，建议铁路运输企业可优先在长三角—长江中游等高时效、小批量、高附加值货源联系紧密的通道上，依托既有高铁枢纽布局站外无人机驿站与标准化短驳接口，优先选择班次密度高、发到时刻稳定且具备一定富余运力的车站开展高铁-无人机联运试点；同时，建立与医疗、生鲜、检验样本等高时效货源企业的预约集货与快速交接机制，减少站端服务时间，从而更充分发挥高铁-无人机联运在时效、经济性与绿色低碳方面的综合优势。

本研究主要面向新型高铁-无人机联运模式开展优化建模，并借助CPLEX对小规模问题进行精确求解，以验证该模式的可行性与应用价值。由于尚未针对大规模实际场景设计高效求解算法，未来可结合问题结构开发启发式方法，并进一步考虑需求不确定、动态订单及天气扰动等因素，以提升模型的求解效率与应用鲁棒性。同时，可在现有基础上纳入载重-能耗耦合关系，构建更精细的无人机运行模型，从而增强对实际运行过程的刻画能力。

参考文献：

[1] 中华人民共和国交通运输部. 杭绍台“低空+高铁”开拓联运新场景[EB/OL]. (2024-12-27) [2026-01-20]. https://www.mot.gov.cn/jiaotongyaowen/202412/t20241227_4161721.html

[2] BI M K, HE S W, XU W T. Express Delivery with High Speed Railway: Definitely Feasible or Just a Publicity Stunt[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 120: 165-187.

[3] YAN Z Y, LI X J, ZHANG Q, et al. Seat Allocation Model for High Speed Railway Passenger Transportation Based on Flexible Train Composition[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106383.

[4] YU X Q, ZHOU L Y, HUO M K, et al. Research on High Speed Railway Freight Train Organization Method Considering Different Transportation Product Demands[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 5520867.

[5] 李东颖，王　力，朱晓宁，等. 高速铁路快运末端货物取送一体化优化研究[J]. 铁道学报，2024，46(6)：11-21.
LI Dongying, WANG Li, ZHU Xiaoning, et al. Research on Optimization of Terminal Cargo Integrated Pickup and Delivery for High Speed Railway Express[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 11-21.

[6] CHEN X H, ZUO T S, LANG M X, et al. Integrated Optimization of Transfer Station Selection and Train Timetables for Road-Rail Intermodal Transport Network[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 165: 107929.

[7] ZHEN L, HE X T, ZHANG N Z, et al. Optimizing High Speed Railway Express System under Uncertainty[J]. Computers & Operations Research, 2024, 165: 106565.

[8] WANG X W, ZHEN L, WANG S A. Optimizing an Express Delivery Mode Based on High Speed Railway and Crowd-Couriers[J]. Transport Policy, 2024, 159: 157-177.

[9] SPLIET R, GABOR A F. The Time Window Assignment Vehicle Routing Problem[J]. Transportation Science, 2015, 49(4): 721-731.

[10] AUGERAT P, BELENGUER J M, BENAVENT E, et al. Separating Capacity Constraints in the CVRP Using Tabu Search[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106(2-3): 546-557.

[11] MONTOYA-TORRES J R, LÓPEZ FRANCO J, NIETO ISAZA S, et al. A Literature Review on the Vehicle Routing Problem with Multiple Depots[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 79: 115-129.

[12] SALAMA M, SRINIVAS S. Joint Optimization of Customer Location Clustering and Drone-Based Routing for Last-Mile

Deliveries[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 620-642.

[13] 陈兆芳，李文静，黄文翰. 需求不确定下卡车-无人机协同的路径优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(10)：60-72.
CHEN Zhaofang, LI Wenjing, HUANG Wenhan. Research on Path Optimization of Truck-Drone Collaboration under Uncertain Demand[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(10): 60-72.

[14] MOSHREF-JAVADI M, LEE S, WINKENBACH M. Design and Evaluation of a Multi-Trip Delivery Model with Truck and Drones[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 136: 101887.

[15] LI Y T, WANG S J, SUN H R, et al. Collaborative Vessel-Unmanned Aerial Vehicle Routing for Time-Window-Constrained Offshore Parcel Delivery[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 178: 105189.

[16] 祁玉青，张　伟. 考虑众包物流的卡车无人机协同生产配送多目标优化[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(10)：4463-4475.
QI Yuqing, ZHANG Wei. Multi Objective Optimization of Collaborative Production and Distribution of Trucks and Drones Considering Crowdsourcing Logistics[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(10): 4463-4475.

[17] 柳伍生，余玉竹. 异构无人机群两级协同物流配送调度优化[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版)，2025，22(4)：78-92.
LIU Wusheng, YU Yuzhu. Optimization of Two-Level Collaborative Logistics Distribution Scheduling for Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicle Swarms[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2025, 22(4): 78-92.

[18] 李章萍，徐　鑫. 改进遗传算法应用于地震场景下无人机路径规划研究[J]. 安全与环境学报，2025，25(1)：237-249.
LI Zhangping, XU Xin. Research on Drone Path Planning in Earthquake Scenarios Using an Improved Genetic Algorithm[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 237-249.

[19] 马　蓉，袁　柯. 浅析高铁快运无人机配送发展势在必行[J]. 中国航务周刊，2025(44)：72-74.

[20] 钟导峰，尹传忠，梁亚莉，等. 应急物资“火车-卡车-无人机”协同运输优化[J]. 铁道运输与经济，2025，47(8)：40-50，58.
ZHONG Daofeng, YIN Chuanzhong, LIANG Yali, et al. Optimization of Train-Truck-Drone Cooperative Transportation for Emergency Supplies[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(8): 40-50, 58.

[21] 吴雪妍，毛保华，周　琪，等. 交通运输业不同方式碳排放因子水平比较研究[J]. 华东交通大学学报，2022，39(4)：41-47.
WU Xueyan, MAO Baohua, ZHOU Qi, et al. Comparative of Carbon Emission Factor Levels in Different Modes of Transportation Industry[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 41-47.

(责任编辑　吴文娟)