

文章编号:1671-1637(2026)04-0001-14

考虑极端天气影响的低空应急物资调度 超网络优化方法

石运, 吴薇薇*, 张皓瑜, 夏汗青

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要:为提升极端天气下受灾区域的应急物资投送效率,同时兼顾调度成本与风险控制,将低空飞行路径优化与多平台资源协同作为关键着力点,研究了基于改进超网络的低空应急物资调度多目标优化方法;考虑极端天气下空-地网络的异构性及多级节点协同特征,以物资运输路径、飞行平台配置、中转节点选择为决策变量,以运输总成本、平均响应时间及系统风险最小化为三目标函数,构建了低空应急物资调度超网络规划模型;针对运输网络脆弱性与极端天气影响的量化难题,构建了改进型参数计算方法,结合极端天气风险指标实现精准评估超网络模型,在模型嵌入参数后通过协同计算能力优化应急调度路径、运输量和运输方式选择;结合多层次决策的复杂性为模型设计了变分不等式转化机制与改进投影算法;通过城市极端天气场景的数值算例验证模型可行性,输出了最优运输路径、平台分配及物资流量方案。研究表明:该模型框架能有效整合多类物资、异构平台与多级节点资源,改进投影算法可高效求解超网络优化问题;算例输出结果表明各物资类别对应不同平台、各条链路的最优运输量分配方案,在满足容量与操作约束的前提下,可实现成本、时间与风险目标优化,证实方法在极端天气下具备快速响应能力与实操潜力。

关键词:应急物流;低空应急物资调度;超网络多目标优化;路径优化方案;极端天气;运输韧性

中图分类号:U113 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.160

Supernetwork optimization method for low-altitude emergency supply scheduling considering extreme weather impacts

SHI Yun, WU Wei-wei*, ZHANG Hao-yu, XIA Han-qing

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the delivery efficiency of emergency supplies in disaster-stricken areas under extreme weather while balancing scheduling costs and risk control, the optimization of low-altitude flight paths and the collaboration of multi-platform resources were taken as key focal points, and a multi-objective optimization method for low-altitude emergency supply scheduling based on an improved supernetwork was studied. By considering the heterogeneity of air-ground networks and the collaborative characteristics of multi-level nodes under extreme weather, a supernetwork planning model for low-altitude emergency supply scheduling was constructed, with the selection of supply

出版历程:2025-08-31 收稿,2026-01-04 修回,2026-01-23 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52572358);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX25_0156)

作者简介:石运(1997-),男,江苏淮安人,博士研究生,E-mail:yshi1230@nuaa.edu.cn。

*通信作者:吴薇薇(1972-),女,安徽宣城人,教授,博士生导师,管理学博士,E-mail:nhwei@nuaa.edu.cn。

引用格式:石运,吴薇薇,张皓瑜,等.考虑极端天气影响的低空应急物资调度超网络优化方法[J].交通运输工程学报,2026,26(4):1-14.

Citation: SHI Yun, WU Wei-wei, ZHANG Hao-yu, et al. Supernetwork optimization method for low-altitude emergency supply scheduling considering extreme weather impacts[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 1-14.

transportation paths, flight platform configuration, and transit node selection as decision variables, and the minimizations of total transportation cost, average response time, and system risk as three objective functions. In view of the difficulty in quantifying the vulnerability of transportation networks and the impact of extreme weather, an improved parameter calculation method was developed and combined with the extreme weather risk index to achieve an accurate evaluation of the supernetwork model. After the parameters were embedded into the model, the selections of emergency scheduling paths, transportation volumes, and transportation modes were optimized through collaborative computing capabilities. Based on the complexity of multi-level decision-making, a variational inequality transformation mechanism and an improved projection algorithm were designed for the model. The feasibility of the model was verified through a numerical example in an urban extreme weather scenario, and the optimal transportation paths, platform allocations, and supply flow schemes were output. Research results show that the model framework can effectively integrate multiple types of supplies, heterogeneous platforms, and multi-level node resources, and the improved projection algorithm can efficiently solve the supernetwork optimization problem. The output results of the numerical example show the optimal transportation volume allocation schemes for different supply categories corresponding to various platforms and links. On the premise of satisfying capacity and operational constraints, the optimization of cost, time, and risk objectives can be achieved, which confirms that the method possesses rapid response capability and practical application potential under extreme weather conditions.

Keywords: emergency logistics; low-altitude emergency supply scheduling; supernetwork-based multi-objective optimization; path optimization scheme; extreme weather; transport resilience

Publication history: Received 2025-08-31; Received in revised form 2026-01-04; Accepted 2026-01-23

Funding: National Natural Science Foundation of China (52572358); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX25_0156)

* **Corresponding author:** WU Wei-wei, professor, PhD, E-mail: nhwei@nuaa.edu.cn.

0 引 言

在全球范围内,极端天气事件(如强降雨、台风、干旱和洪水)的日益频发,已成为影响社会正常运行和公共服务供给的关键因素。这类事件和灾害不仅破坏交通、通信、电力等基础设施,还会阻断传统的陆路和水路运输通道,严重影响应急物资的及时投送^[1]。传统运输方式难以满足应急需求,低空飞行器(如无人机、垂直起降飞行器等)具备灵活部署、不依赖路网、可跨越复杂地形的优势^[2],正逐渐成为灾中应急投送的重要补充手段。基于科学调度与资源协同的低空应急物资调度系统,将在保障基本民生、恢复灾后秩序、提高灾害响应效率等方面发挥重要作用。

超网络在交通研究中一直发挥着独特作用,随着低空立体交通运输系统的发展,超网络在应急管理领域的应用也开始拓展至空域调度、空地协同物流与灾害响应等问题。Huang等^[3]构建了一个应急

预案超网络,并提出了应急预案体系可行性的评估方法。Ma等^[4]提出了一个用于识别突发事件风险感知与预测突发风险因素的超网络。Lv等^[5]构建了一个石油应急调度超网络,并对比了单区域与跨区域调度策略的具体优势。根据Nagurney等^[6-7]总结的超网络理论内涵与特征,超网络与低空立体交通系统下的应急调度存在高度适配性,尤其在极端天气事件下的资源协同保障方面具有天然优势。超网络与低空应急调度之间最核心的契合点主要体现在能够通过抽象路径和链路统一描述空中与地面多模运输流与信息流;能够灵活表达多个异构子网络间的连接关系,适用于低空交通系统中多层级空-地空间结构的建模。此外,超网络还在多层级性、多目标或多准则性以及网络效率评估与韧性分析能力三方面与低空立体交通系统下的应急调度需求高度适配。

随着无人机和电动垂直起降飞行器(eVTOL)技术的快速发展,低空飞行器在应急物资调度中的

应用逐渐受到关注。现有研究多针对特定灾害场景下单一类型飞行器的调度问题展开研究。在无人机应急配送领域,多数研究聚焦于从单一或多个仓库向需求点的“最后一公里”配送,采用车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)及其变体进行建模^[8]。在医疗应急领域,研究主要关注无人机运送自动体外除颤器(AED)、血液制品等医疗物资的时效性优化^[9-10]。eVTOL在应急响应中的研究尚处于起步阶段。美国国家航空航天局(NASA)的先进空中交通(Advanced Air Mobility, AAM)项目探索了eVTOL在自然灾害响应中的潜在应用^[11],德国ADAC的研究表明,eVTOL可改善应急医疗服务的响应时间^[12],但这些研究多停留在概念验证或可行性分析层面,缺乏系统的优化模型。少量研究开始探索多平台协同,但主要局限于无人机与地面车辆的组合。有研究提出了卡车-无人机协同的灾后物流模型,其中卡车负责长距离运输和无人机充电,无人机用于“最后一公里”投送^[13]。然而,针对多种异构低空平台的联合调度研究较少,缺乏考虑不同平台与物资类型适配性的建模框架^[8,13]。在网络结构与优化目标方面,现有低空应急调度研究多采用简化的两层网络结构,少数研究虽涉及设施选址但仍局限于两层决策^[14-15]。在优化目标方面,早期研究以成本最小化或时间最短化为单一目标^[13,16],近年来开始出现双目标优化,但较少将飞行风险作为显式优化目标^[17-18]。

虽然应急物流领域已有针对热带气旋、洪水等极端天气的研究^[19-20],但这些研究主要关注地面运输系统或需求动态预测,对低空运输网络在极端天气下的脆弱性、不同类型飞行平台的差异化响应能力以及气象条件对航线可通行性的影响缺乏系统建模。现有研究虽提出了极端天气风险指标用于评估恶劣天气对地面交通的影响^[21-22],但该方法尚未被引入低空应急调度领域,缺乏针对低空网络特征的适应性改造。在无人机灾害管理研究中,大部分聚焦于响应阶段,但未明确考虑极端天气条件的调度优化。

综上,该领域的理论研究仍未能充分应对现实调度需求的复杂性,主要体现在以下三方面的研究空白:①尽管已有大量关于应急管理 with 灾害响应的研究,但针对极端天气背景下低空应急物资调度的专门研究仍较为匮乏,尤其是在多灾种、多区域并发事件中缺乏系统性分析;②当前文献多聚焦于某类飞行器或某一类物资调度的具体方案,缺少可集成

多运输平台、多资源类别的通用性建模与量化优化方法;③现有研究大多基于静态网络、单一目标或单一运输方式设定,对于涵盖多层级节点、多类型任务、多路径选择的调度系统建模仍缺乏深入探索,无法适配实际灾情中复杂的协同调配需求。此外,现有研究多关注单一受灾区域内部调度^[8,13],对受灾区域与非受灾区域之间的跨区域资源调配和异构子网络协同机制缺乏系统建模。

针对上述研究空白,本文构建的改进型超网络协同优化模型,用于极端天气下的低空应急物资调度。该模型的核心创新贡献体现在以下2个层面。在低空物资运输场景建模方面:①通过超网络的抽象路径与链路结构,将低空飞行网络与地面保障节点纳入统一建模框架,相对于现有研究分别处理空中运输与地面调度的做法更为系统;②建立异构飞行平台子网络与多类型物资子网络的映射关联机制,实现平台选择、物资配载与路径规划的协同优化;③引入极端天气风险指标(Extreme Weather Risk Indicators, EWRI)并构建改进的脆弱性参数计算方法,将气象扰动对低空航线、起降点的动态影响嵌入超网络链路权重,实现风险感知下的调度决策。对于应急物资运输问题求解的贡献方面:①利用超网络的层次化结构,刻画运输成本、响应时间与系统风险在不同子网络层面的竞争与权衡关系,相对于传统加权和方法能更好地表达目标间的非线性耦合;②针对超网络模型的多层级决策复杂性,采用变分不等式转化机制与改进投影算法,在保证解的均衡性的同时提升计算效率;③利用超网络的模块化特征,在需求波动、平台失效或节点受损等情况下,可通过局部调整子网络参数快速重新求解,增强系统韧性。本文方法为极端天气下的低空应急物资调度提供了更完整、更贴近实际管理要求的建模工具,也为多模式运输网络的资源协同优化提供了参考。本研究重点关注传统直升机无法经济高效覆盖的“最后一公里”精准投送,作为大型直升机的灵活补充,提升应急网络的韧性和响应速度,形成“大型直升机负责干线运输-小型平台负责末端配送”的立体化应急物流体系。

1 模型建立

1.1 问题描述

当城市区域突发极端天气事件(如暴雪、暴雨、台风等)时,地面交通系统可能因道路积水、交通阻断或桥梁受损而瘫痪,导致物资运输和人员疏散任务受阻。在此背景下,为保障受影响地区的生命安

全与社会稳定,有必要依托低空立体交通运输系统,迅速开展区域内及跨区域的应急调度行动。本研究提出,低空应急调度的目标是实现运输成本最小化、飞行时间最短化和飞行风险最低化,以提升城市在极端气象条件下的应急响应能力与运输韧性。

本文考虑极端天气下的低空立体交通应急调度问题,所运输的对象为应急物资(如食品、饮用水、移动电源)和医疗资源(如药品、急救设备、转运病患)等。上述需求类型的确定基于气象数据、灾害监测信息以及地方政府或基层组织上报的应急需求。对于无法通过传统地面运输手段完成补给的区域,相关物资和人员转运需求将被转化为对低空立体交通系统的即时调度需求^[23]。因此,本研究重点关注如何精准满足受影响区域在极端天气情形下对各类应急资源的运输需求。为简化建模,假设受影响区域各类需求量是完全已知的,并作为模型输入。

根据应急物资的特征与运输适配性,本文考虑的低空运输方式包括垂直起降飞行器(Vertical Take-off and Landing, VTOL)、无人机、多旋翼载具等,可替代传统水路、公路、铁路等手段,快速跨越地面基础设施受损区域,实现点对点补给。整个低空应急运输网络中的节点可被抽象为:应急物资储备点(如区级或市级仓库)、中转协调点(如移动调度中心或具备临时起降功能的站点)与物资接收点(如受灾影响的社区、救灾帐篷医院等)。储备点承担起飞和分拨功能,可调配多种类型的飞行器将物资投送至中转点。中转点根据可用空域与降落条件,组织再次配送或转运,运输方式在两段路径中可以不同。本研究假设,在极端天气导致传统交通瘫痪的情形下,必须通过低空系统实现对所有物资接收点的100%保障性调度,确保关键资源及时送达。

1.2 模型假设与变量设定

鉴于极端天气条件下低空应急调度任务具有突发性、跨域性与复杂性,为确保本研究所构建模型具备实际可行性与理论可解性,本文提出以下基本假设^[5,24-25]。

(1)极端天气事件不会导致所有类型的低空运输平台(如旋翼无人机、固定翼飞行器、eVTOL等)完全中断。各类平台的运行能力将随着极端天气影响程度的提升而逐步下降。做出此假设的目的是确保本文所构建的改进型超网络方法具备广泛适用性。当实际情况中某类平台因天气影响完全失效时,可直接将其从调度模型中剔除。

(2)调度决策者是极端天气事件后主导低空应

急调度工作的政府主管部门或应急指挥中心。本文假设不存在政府部门、运营平台、制造企业等多方主体之间的博弈过程,由单一决策方统一制定和执行调度方案。

(3)假设运输方式按组织模式分为离散架次型与连续流量型2类。前者包括垂直起降无人机、固定翼无人机和大型载人旋翼飞行器,按架次数调度;后者如大型智能物流平台或多机协同系统,按单位时间吞吐能力建模。该分类基于运输组织模式而非飞行器气动布局。

(4)各类应急任务可同时通过多种可行的飞行航线和空域层级执行。不同空域中的飞行器资源(如eVTOL、垂直起降无人机、固定翼无人机等)数量有限,且在特定航线/空域通道上,由于飞行安全、容量限制、空域冲突等因素,某类飞行任务在特定路径上的最大可执行频次或运载能力存在上限。

(5)极端天气事件发生后,受影响区域是已知的,且该区域内各类应急任务(如医疗救援、物资投送、通信恢复等)的需求强度可被量化。任务需求可根据灾情评估、人口分布、基础设施破坏情况等多源数据进行动态获取与更新。

(6)由于极端天气事件通常在短时间内突然发生,应急资源的初始分布(如物资仓储点、运输起点)在调度时刻被视为固定。物资集散与再分配通过低空交通节点(如垂直起降平台、中转起降点)实现,支持不同类型的低空运输工具之间的多式联运操作。

(7)本文仅聚焦于极端天气事件发生后的响应调度阶段,即基于实时灾情反馈的信息调度,不涉及事件发生前通过预警系统和制度机制实施的预置部署与资源前移。

(8)子网络分为2类:受影响区域子网络与非受影响区域子网络。两者在结构与功能上存在异质性。极端天气事件可能对整个区域的运输网络产生扰动,但受影响区域的运输通达性与节点可达性受损程度显著更高,特别是低空立体通道的可用性下降更加明显。与此同时,非受影响区域的资源系统保持正常运行状态,因此该区域不设接收节点,而作为调出方参与跨区域支援调度。

(9)假设各节点具备多平台起降能力。针对固定翼无人机的短跑道需求,引入转运惩罚成本反映地面二次转运的额外成本,设施受限时模型将优先选择垂直起降平台。大型旋翼飞行器主要用于人员及高价值物资运输。

(10)各类低空运输平台具有明确的最大续航里程

程限制,由电池容量和单位距离能耗率共同决定。续航能力受环境温度显著影响,极端天气条件会通过降低电池有效容量来削弱实际可用续航里程。

(11)针对eVTOL等电驱动平台,锂电池的有效容量受环境温度的影响呈现非线性变化特征。定义温度效率因子表征实际可用容量与标称容量的比值。本假设基于现有研究^[26-28]的试验数据和理论模型。

1.3 模型构建

应急物资集合记为 M ,运输方式集合记为 N 。应急物资包括应急饮用水($m=1$)、应急食品($m=2$)、应急药品($m=3$),运输方式包括垂直起降无人机($n=1$)、固定翼无人机($n=2$)、大型载人旋翼飞行器($n=3$)和其他低空方式($n=4$)。当 $m=3$ 时(即药品),通常不建议使用振动较大或飞行稳定性较差的飞行平台,如部分固定翼无人机,因此对应

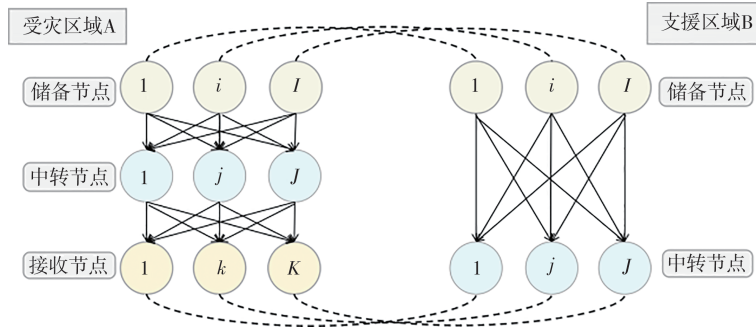


图1 极端天气下低空应急物资调度采用的改进型超网络

Fig. 1 Improved supernetwork adopted for low-altitude emergency supply scheduling under extreme weather

A区域与B区域的物资储备点之间的点线表示信息流,即信息传递。B区域根据A区域上报的紧急需求信息,调配各类应急物资从储备点 i 运送至中转点 j ,最终通过低空平台送达受灾区域的接收点 k (所有 k 节点均位于A区域内)。B区域的中转点与A区域的接收点之间的点线表示低空物资配送路径,即通过无人机、eVTOL等平台进行的跨区域飞行调度。该模型反映了现实低空应急物资调度的主要特征,并在建模上进行了适度简化,便于算法求解与结构理解。在实际部署中,决策者(如图2中 O)可根据灾害情境与资源约束,灵活调整子网络结构与数量、节点类型与数量、运输链路以及调度层级等要素。图1所示的低空应急调度超网络结构也可进一步转化为等效的建模形式,以支持后续的优化建模与算法设计^[29](如图2所示)。

在现有研究成果^[5,25]以及本文研究目标的基础上,建立以下广义优化模型以描述极端天气情境下的低空应急物资调度问题

关系需排除此类不适用组合。

在受影响地区的应急物资需求以及各链路的最大运输能力约束下,应优化调度策略,以实现运输成本最小化、运输时间最短化和运输风险最低化的目标。其中,A区域表示极端天气直接影响的灾害区域(受影响地区),B区域表示具备可调度资源的周边区域(非受影响地区),两者构成一个具有异构特征的双子网络结构。图1展示了极端天气情境下低空应急物资调度所采用的改进型超网络结构,所有实线表示子网络内部的应急物资流动,虚线表示跨子网络之间的信息协同流动。在A区域,应急物资从储备点 i 运输至中转点 j ,再由中转点 j 分发至接收点 k (即极端天气影响下物资短缺的受援地点)。因此,本文构建的低空应急物资调度过程包含“储备-中转-接收”3个基本层级,反映了现实调度系统中常见的分层结构。 I 、 J 、 K 分别为储备、中转、接收节点的集合。

$$\begin{aligned} \min \sum_{m,n,a} g_a(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n) = & \\ & \alpha_1 \sum_{m,n,a} c_a^{m,n}(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n) + \\ & \alpha_2 \sum_{m,n,a} t_a^{m,n}(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n) + \\ & \alpha_3 \sum_{m,n,a} s_a^{m,n}(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n) + \Phi_{\text{conflict}} + \Phi_{\text{time}} \quad (1) \end{aligned}$$

s. t.

$$x_a^{m,n} \leq h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n) \quad (2)$$

$$x_a^{m,n} = \sum_{p \in P_i} b_p^{m,n} \mu_{ap} \quad (3)$$

$$\sum_{n,p} b_p^{m,n} \geq d_k^m \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_a^{m,n} \geq 0 \\ b_p^{m,n} \geq 0 \quad p \in P \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_m \frac{x_a^{m,n} w_a^n \omega_n}{l^{m,n}} \leq E_{\text{batt}}^n \eta(T) D_{\text{safe}} G_a^{m,n} \quad (6)$$

式中: $g_a(\cdot)$ 为链路 a 上,使用方式 n 运输物资 m 的总成本、时间和风险的加权和函数; α_1 、 α_2 、 α_3 分别为成

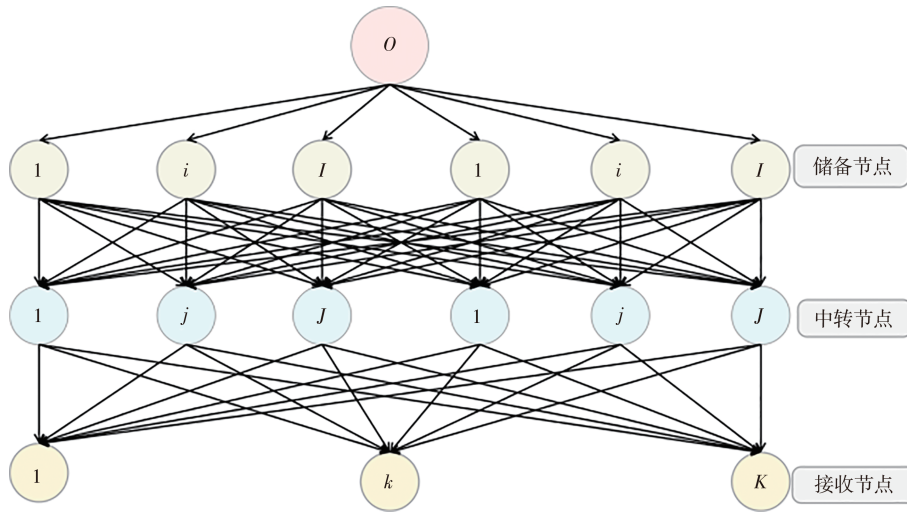


图2 低空应急调度超网络物资流动建模形式

Fig. 2 Supply flow modeling form of low-altitude emergency scheduling supernetwork

本、时间、风险目标的权重系数,且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$; $c_a^{m,n}(\cdot)$ 为链路 a 上物资 m 通过运输方式 n 的运输成本; $t_a^{m,n}(\cdot)$ 为运输时间; $s_a^{m,n}(\cdot)$ 为运输风险; $\lambda_a^{m,n}$ 为运输量; v_a^n 为网络脆弱性指标; r_a^n 为极端天气风险; $h_a^{m,n}(\cdot)$ 为考虑脆弱性和天气风险后的最大运输能力; $b_p^{m,n}$ 为路径 p 上物资 m 通过运输方式 n 的运输量; μ_{ap} 为路径 p -链路 a 矩阵元素; P_k 为所有通向接收点 k 的路径集合; P 为全局路径集合; d_k^m 为接收点 k 对物资 m 的最低需求量; D_{safe} 为安全放电深度,取 0.8; $G_a^{m,n}$ 为可调度飞行器数量。

式(3)为路径流量与链路流量之间的守恒关系;式(4)为确保每个接收点 k 对每种物资 m 的需求得到满足;式(5)为运输量的非负约束;式(6)为单段航程约束,确保任意单段飞行距离不超过温度修正后的有效续航里程。路径能量守恒约束为

$$\sum_{a \in p_{i \rightarrow j \rightarrow k}} E_a \leq E_{\text{batt}}^n \eta(T) D_{\text{safe}} \quad (7)$$

式中: E_a 为链路 a 的能量消耗; $p_{i \rightarrow j \rightarrow k}$ 为从储备点 i 经中转点 j 到接收点 k 的路径。

当链路 a 的空域占用密度超过安全容量时,引入二次惩罚

$$\Phi_{\text{conflict}} = \sum_{a,n,\omega} \kappa (\max\{0, \rho_a^n(\omega) - \rho_{\text{max}}\})^2 \quad (8)$$

式中: κ 为惩罚系数,反映空域超载的经济损失; ρ_{max} 为空域容量上限; ω 为离散时段集合, $\omega \in \Omega = \{1, 2, \dots, 20\}$; $\rho_a^n(\omega)$ 为链路 a 上以运输方式 n 在时段 ω 内的空域占用密度。

对接收点 k 的物资 m 定义分段二次惩罚

$$\Phi_{\text{time}} = \sum_{k,m} \left[\gamma_1 (\max\{0, T_k^{\text{max}} - T_{km}^{\text{arr}}\})^2 + \gamma_2 (\max\{0, T_{km}^{\text{arr}} - T_k^{\text{min}}\})^2 \right] \quad (9)$$

式中: T_{km}^{arr} 为物资 m 到达接收点 k 的时间,由路径时间累加得到; γ_1, γ_2 分别为早到和迟到惩罚系数,在应急场景下,迟到的后果远严于早到,设置 $\gamma_2 = 10 \gamma_1$; $T_k^{\text{min}}, T_k^{\text{max}}$ 分别为接收点 k 的最早可服务时刻和最晚可容忍到达时刻。

在边际成本递增条件下,目标函数连续、可微且凸。多目标优化问题被转化为一个变分不等式问题。由目标函数凸性推出的单调性,以及有界域上的 Lipschitz 连续性,保证了该变分不等式解的存在性和唯一性。该变分不等式的 ϵ -最优解记为 $(b_p^{m,n^*}, \beta_a^{m,n^*}, \lambda_k^{m^*}) \in L$ 。变分不等式为

$$\sum_{m,n,p} \left(\alpha_1 \frac{\partial C_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \alpha_2 \frac{\partial T_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \alpha_3 \frac{\partial S_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \frac{\partial \Phi_{\text{conflict}}}{\partial b_p^{m,n}} + \frac{\partial \Phi_{\text{time}}}{\partial b_p^{m,n}} + \sum_a \beta_a^{m,n^*} \mu_{ap} - \lambda_k^{m^*} \right) (b_p^{m,n} - b_p^{m,n^*}) + \sum_{m,n,a} \left[h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n) - \sum_p b_p^{m,n^*} \mu_{ap} \right] (\beta_a^{m,n} - \beta_a^{m,n^*}) + \sum_{m,k} \left[\left(\sum_{n,p} b_p^{m,n^*} - d_k^m \right) (\lambda_k^m - \lambda_k^{m^*}) \right] (\lambda_k^m - \lambda_k^{m^*}) \geq 0 \quad (10)$$

式中: λ_k^m 为接收点 k 对物资 m 的需求约束对偶变量; $C_p^{m,n}, T_p^{m,n}, S_p^{m,n}$ 均为路径层面的广义成本函数。

在极端天气下执行低空应急调度的难度远高于常规调度,常伴随飞行拥堵、气象不确定性与避障调整等问题。因此,调度成本具有边际递增性,本文使

用运输量的二次项进行建模,二次项系数为 $\varphi_a^{m,n}$ 。 $c_a^{m,n}$ 表示为

$$c_a^{m,n} = \begin{cases} \varphi_a^{m,n} (x_a^{m,n})^2 + (\tau_a^n y^{m,n} + Y^{m,n}) \cdot \frac{x_a^{m,n}}{l^{m,n}} (1 + v_a^n + r_a^n) & n \in \{1, 3\} \\ \varphi_a^{m,n} (x_a^{m,n})^2 + (\tau_a^n y^{m,n} + Y^{m,n} + \phi_a^{m,2}) \cdot \frac{x_a^{m,n}}{l^{m,n}} (1 + v_a^n + r_a^n) & n = 2 \\ \varphi_a^{m,n} (x_a^{m,n})^2 + (\tau_a^n y^{m,n} + Y^{m,n}) \cdot x_a^{m,n} (1 + v_a^n + r_a^n) & n = 4 \end{cases} \quad (11)$$

式中: τ_a^n 为实际飞行距离; $y^{m,n}$ 为物资 m 通过运输方式 n 的飞行距离成本; $Y^{m,n}$ 为固定调度成本; $l^{m,n}$ 为飞行器最大载重能力; $\phi_a^{m,2}$ 为固定翼无人机($n=2$)链路 a 上运输物资 m 时的转运惩罚成本,反映了固定翼无人机因起降场地限制而需停靠临近灾区的短距起降场、再通过地面交通转运至接收点所产生的额外成本。

式(11)为针对2种运输组织模式采用不同的建模方式。对于离散架次型,运输成本包括边际递增的拥堵成本,飞行距离成本,架次相关的固定成本,风险调整因子;对于连续流量型,由于采用高频穿梭或自动化接驳,无需计算离散架次数,因此运输成本仅与总运输量 $x_a^{m,n}$ 和单位时间吞吐能力相关。

在极端天气事件下,飞行效率通常因能见度降低、风力增强、起降场地受限等因素而下降。运输时间 $t_a^{m,n}$ 计算公式为

$$t_a^{m,n} = \begin{cases} \frac{\tau_a^n}{z^{m,n}} (1 + v_a^n + r_a^n) + \frac{x_a^{m,n} u^n}{l^{m,n}} & n \in \{1, 2, 3\} \\ \frac{x_a^{m,n}}{Q^m} (1 + v_a^n + r_a^n) & n = 4 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $z^{m,n}$ 为运输方式 n 运输物资 m 的标准飞行速度; u^n 为非飞行时间。

对于离散架次型,总时间包括飞行时间 $\tau_a^n/z^{m,n}$ 和装卸时间 $x_a^{m,n}/l^{m,n}$;对于连续流量型,由于采用自动化装卸和连续输送,总时间主要取决于物资总量与单位时间输送能力的比值 $x_a^{m,n}/Q^m$,不需要单独考虑装卸时间。

在低空应急物资调度中,本文假设调度决策者为风险中性,即在制定调度方案时并不对潜在风险进行规避或超额权重评估。物资运输的风险受到 v_a^n, r_a^n 以及 $x_a^{m,n}$ 的共同影响。例如,当航线存在空域限制或空管压力(如山区、风口区域),或者遭遇风切

变、低云、强降雨等极端天气时,飞行风险显著上升;在模型优化过程中,风险函数 $s_a^{m,n}$ 作为惩罚项纳入目标函数。对于网络脆弱性高或极端天气影响严重的链路,单位运输量的风险贡献系数较大,优化算法将倾向于降低该链路的流量分配 $x_a^{m,n}$,从而在满足需求的前提下实现风险规避。 $s_a^{m,n}(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n)$ 表示为

$$s_a^{m,n}(x_a^{m,n}, v_a^n, r_a^n) = (v_a^n + r_a^n) x_a^{m,n} \quad (13)$$

在极端天气下的低空应急物资调度中,对于大部分低空运输方式, $h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n)$ 计算如下

$$h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n) = \begin{cases} \frac{l^{m,n} G_a^{m,n}}{1 + v_a^n + r_a^n} & n \in \{1, 2, 3\} \\ \frac{Q_m B}{1 + v_a^n + r_a^n} & n = 4 \end{cases} \quad (14)$$

式中: Q_m 为大型飞行器单位时间输送能力; B 为应急时长上限。

对于离散架次型,最大运输能力由单机载重、可调度飞行器数量和极端天气影响因子共同决定;对于连续流量型,最大运输能力由单位时间吞吐能力、应急时长上限和极端天气影响因子决定,反映了连续输送系统的容量特性。

基于Ma等^[26,28]的试验数据和理论模型,本研究建立了温度效率因子 $\eta(T)$ 的分段线性模型

$$\eta(T) = \begin{cases} 1 - 0.0037(25 - T) & T < 25^\circ\text{C} \\ 1 + 0.0017(T - 25) & T \geq 25^\circ\text{C} \end{cases} \quad (15)$$

数据来源于Ma等^[26]固定翼电动飞机电池在不同温度下的容量保持率试验数据,如表1所示。

表1 固定翼电动飞机电池在不同温度下的容量保持率
Table 1 Capacity retention rates of batteries for fixed-wing electric aircraft at different temperatures

温度/ $^\circ\text{C}$	容量保持率/%	$\eta(T)$
-40	78.14	0.7814
-20	83.30	0.8330
-10	84.10	0.8410
0	88.10	0.8810
25	100.00	1.0000
35	102.00	1.0200
45	103.90	1.0390
55	104.60	1.0460

低温侧($T < 25^\circ\text{C}$)采用线性模型 $\eta(T) = 1 - k_1(25 - T)$,使用最小二乘法

$$k_1 = \frac{\sum_i (25 - T_i)(1 - \eta_i)}{\sum_i (25 - T_i)^2} \quad (16)$$

式中: k_1 为低温侧线性拟合斜率; η_i 为第 i 个温度数据

点对应的实测容量保持率; T_i 为 η_i 对应的温度值。

计算得到 $k_1 \approx 0.0037$ 。高温侧 ($T \geq 25^\circ\text{C}$) 采用线性模型 $\eta(T) = 1 + k_2(T - 25)$, 使用最小二乘法计算得到高温侧线性拟合率 $k_2 \approx 0.0017$ 。拟合优度 $R^2 = 0.993$, 平均相对误差为 1.34%。该模型在宽温度范围内准确反映了电池性能变化趋势, 适用于极端天气条件下的应急调度决策。

在极端天气条件下, 交通网络的可用性和安全性面临严重威胁。本文参考 Leviäkangas 等^[21-22]提出的 EWRI, 并结合低空应急调度的特点对其进行修正, 用于刻画极端天气事件对低空运输路径的影响强度。 r_a^n 由以下关系确定

$$r_a^n = H_a^n v_a^n \quad (17)$$

式中: H_a^n 为有害后果因子。

为更准确反映低空应急调度中网络通行能力的敏感性, 本文对传统的交通网络脆弱性指标进行了创新性调整, 结合以下参数计算

$$V_a^n = \frac{E_a^n P_a^n}{F_a^n} (1 + R_a^n) \quad (18)$$

E_a^n, R_a^n, F_a^n 等指标越大, 说明该路径越脆弱。对 V_a^n 在所有链路上做归一化处理, 得到

$$v_a^n = \frac{V_a^n - \min_a(V_a^n)}{\max_a(V_a^n) - \min_a(V_a^n)} \quad n \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (19)$$

式中: $\min_a(V_a^n), \max_a(V_a^n)$ 分别为所有链路中对于运输方式 n 的最小和最大原始脆弱性值。

借助贝尔曼最优性原理, 构建极端天气引发有害后果的综合概率模型如下

$$H_a^n = f(\pi_{\text{WE}}, \pi_{\text{AF}}, \pi_{\text{CO}}) \quad (20)$$

式中: π_{WE} 为极端天气发生概率; π_{AF} 为给定天气条件下的飞行受扰概率; π_{CO} 为受扰后, 最终导致运输失败的概率。

通过状态树结构, 按照最大概率路径加权累计, 最终得出 H_a^n , 反映极端天气对路径安全性的潜在危害。

2 算法设计

2.1 改进的投影算法

在构建了变分不等式之后, 为了高效求解极端天气下低空应急物资调度问题, 本文采用一种改进型投影算法^[30]。该算法借鉴了 Korpelevich 等^[30-32]的理论成果, 并将变分不等式转化为如下标准形式, 从而确定 $X^* \in L$, 即

$$\langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0 \quad X \in L \quad (21)$$

式中: $F(\cdot)$ 为从 L 到 R^N 的给定连续函数, R^N 为 N 维欧几里得空间, L 为闭凸集; X 和 X^* 分别为决策变量的任意可行解和最优均衡解, $X - X^*$ 为可行域内任意点与均衡点的偏差。

$F(X)$ 的单调性即满足以下条件

$$\langle F(X^1) - F(X^2), X^1 - X^2 \rangle \geq 0 \quad X^1, X^2 \in L \quad (22)$$

存在一个常数大于 0, 使得 $F(\cdot)$ 满足利普希茨连续性, 即满足以下条件

$$F(X^1) - F(X^2) \leq \eta \|X^1 - X^2\| \quad (23)$$

根据式 (11), 构造如下变分不等式以求解

$$\begin{aligned} & (\bar{b}_p^{m,n,\sigma}, \bar{\beta}_a^{m,n,\sigma}, \bar{\lambda}_k^{m,\sigma}) \in L \\ & \sum_{m,n,p} \left[\bar{b}_p^{m,n,\sigma} + \theta \left(\alpha_1 \frac{\partial C_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \alpha_2 \frac{\partial T_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \alpha_3 \frac{\partial S_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \sum_a \beta_a^{m,n,\sigma-1} \mu_{ap} - \lambda_k^{m,\sigma-1} \right) - b_p^{m,n,\sigma-1} \right] \cdot \\ & (b_p^{m,n} - \bar{b}_p^{m,n,\sigma}) + \sum_{m,n,\sigma} \left\{ \bar{\beta}_a^{m,n,\sigma} + \theta \left[h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n) - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \sum_p b_p^{m,n,\sigma-1} \mu_{ap} \right] - \beta_a^{m,n,\sigma-1} \right\} (b_p^{m,n} - \bar{\beta}_a^{m,n,\sigma}) + \\ & \sum_{m,k} \left[\bar{\lambda}_k^{m,\sigma} + \theta \left(\sum_{n,p} b_p^{m,n,\sigma-1} - d_k^m \right) - \lambda_k^{m,\sigma-1} \right] \cdot \\ & (\lambda_k^m - \bar{\lambda}_k^{m,\sigma}) \geq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

求解出 $(\bar{b}_p^{m,n,\sigma}, \bar{\beta}_a^{m,n,\sigma}, \bar{\lambda}_k^{m,\sigma})$ 后, 通过变分不等式的转化可计算得到 $(b_p^{m,n,\sigma}, \beta_a^{m,n,\sigma}, \lambda_k^{m,\sigma}) \in L$, 由于可行域为非负的, 进一步简化为以下 3 个表达式

$$\begin{aligned} b_p^{m,n,\sigma} = \max \left\{ 0, b_p^{m,n,\sigma-1} - \theta \left(\alpha_1 \frac{\partial C_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \alpha_2 \frac{\partial T_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \right. \right. \\ \left. \left. \alpha_3 \frac{\partial S_p^{m,n}}{\partial b_p^{m,n}} + \frac{\partial \Phi_{\text{conflict}}}{\partial b_p^{m,n}} + \frac{\partial \Phi_{\text{time}}}{\partial b_p^{m,n}} + \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{a \in A} \beta_a^{m,n,\sigma-1} \mu_{ap} - \lambda_k^{m,\sigma-1} \right) \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \beta_a^{m,n,\sigma} = \max \left\{ 0, \beta_a^{m,n,\sigma-1} - \theta \left[h_a^{m,n}(v_a^n, r_a^n) - \right. \right. \\ \left. \left. \sum_{p \in P} b_p^{m,n,\sigma-1} \mu_{ap} \right] \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\lambda_k^{m,\sigma} = \max \left\{ 0, \lambda_k^{m,\sigma-1} - \theta \left(\sum_n \sum_p b_p^{m,n,\sigma-1} - d_k^m \right) \right\} \quad (27)$$

预设停止准则 ϵ ($\epsilon > 0$)。若 $|b_p^{m,n,\sigma} - b_p^{m,n,\sigma-1}| \leq \epsilon$, $|\beta_p^{m,n,\sigma} - \beta_p^{m,n,\sigma-1}| \leq \epsilon$ 且 $|\lambda_k^{m,\sigma} - \lambda_k^{m,\sigma-1}| \leq \epsilon$, 则停止

迭代并输出最优结果;否则令 $\sigma = \sigma + 1$, 返回式 (24)~(26)重新计算。

2.2 数值模拟示例与结果分析

2.2.1 综合性能分析

当极端天气事件发生时,应急指挥中心需迅速收集受灾信息与物资需求信息,以确定受影响区域及所有应急物资接收点。随后,受影响区域与邻近非受影响区域内的所有应急物资仓储点与低空中转点都应被纳入改进型超网络结构中。图 3 展示了一个简化的应急调度示例,假设在极端天气事件影响

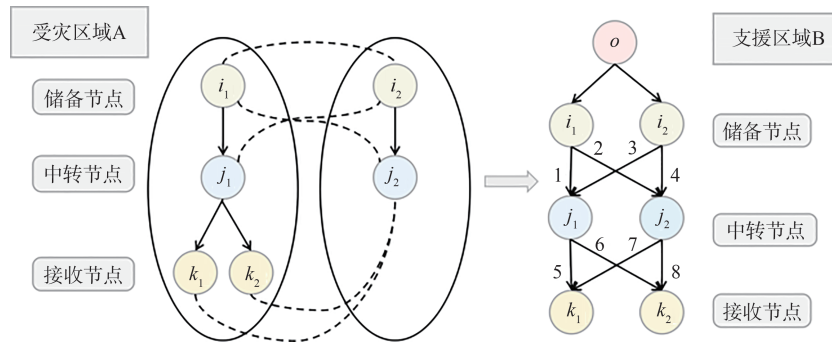


图 3 应急调度示例

Fig. 3 Example of emergency scheduling

借鉴 Perera 等^[33-34]提出的方法,结合气象信息、极端天气风险等级和受影响区域的上报信息,可对极端天气事件导致的关键应急物资直接需求与基础公共服务缺口进行估算。例如,因道路中断或洪涝影响导致的药品、食品、饮用水等应急物资缺口可被识别并量化。此外,对于在极端天气下受限于传统物流体系(如地面运输、固定电力设施)无法正常配送的区域,应将其潜在需求进一步转化为需通过低空飞行平台(如无人机、eVTOL)调度的间接物资需求。两者之和即为接收点 d_k^m 的应急物资总需求量。

随后,计算 v_a^n, r_a^n , 以评估各路径的可行性与风险暴露程度。基于各项参数值,构建目标函数,涵盖 $c_a^{m,n}, l_a^{m,n}$ 和 $s_a^{m,n}$ 。根据决策者对不同目标重要性的判断,分别为 3 项目标赋予权重 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 。考虑到极端天气下物资调度的首要目标是最大限度保障人民生命健康与应急服务不中断,并推动灾后区域恢复,本文建议决策者提高 α_2 的权重,优先考虑缩短应急物资的运输时间。

为验证本文提出的低空应急物资调度方法的有效性,下面通过数值模拟进行实证分析。基于图 3 所示的超网络结构设定模拟参数,其中各类应急物资的需求量如下: $\alpha_1 = \alpha_3 = 0.2, \alpha_2 = 0.6$ (为契合“生命优先”的应急原则,提升运输时间权重 α_2),接

下, A 区域内的 2 个接收点 k_1, k_2 出现了应急物资短缺。指挥中心 o 在收集完需求信息后,准备向相关仓储点与中转点下达调度指令,组织低空应急物资运输任务。主要调度流程为:将药品、食品与饮用水等关键应急物资从仓储点 i_1, i_2 通过无人机、eVTOL 等飞行平台运输至中转点 j_1, j_2 , 再从中转点继续低空投送至接收点 k_1, k_2 。所有物资飞行路径通过编号 1~8 的链路表示,并结合极端天气下飞行路径可行性和平台调配效率进行动态调度优化。

收点 k_1 对应急药品 ($m = 3$) 需求为 1 000 单位,对应急食品 ($m = 2$) 需求为 800 单位,对饮用水 ($m = 1$) 需求为 800 单位;接收点 k_2 对 3 类物资的需求分别为 600、500 和 500 单位。与链路、物资类型以及低空运输平台相关的参数设置见表 2、3。为简化演示,部分参数设置相同,实际应用中这些参数可能因路径、平台能力、物资性质而有所差异。表 3 列出了不同运输方式的参数设置。其中, $n = 1, 2, 3$ 代表离散架次型运输,需考虑 $l^{m,n}$ 和 $u^n, n = 4$ 代表连续流量型运输。

表 2 链路参数设置

Table 2 Setting of link parameters

链路编号	$\varphi_a^{m,n}$	w_a^n	v_a^n	r_a^n	$G_a^{m,n}$	B
1	0.10	5.0	0.050	0.020	15 000	3 000
2	0.20	8.0	0.080	0.030	18 000	4 500
3	0.15	6.0	0.060	0.025	16 500	3 600
4	0.18	7.0	0.070	0.028	17 400	3 900
5	0.12	5.5	0.055	0.022	15 600	3 300
6	0.22	8.5	0.085	0.035	18 600	4 800
7	0.16	6.5	0.065	0.026	16 800	3 750
8	0.25	9.0	0.090	0.040	19 500	5 100

数值模拟采用改进的投影算法进行求解。设定算法参数为 $\theta = 0.01, \epsilon = 1.0 \times 10^{-4}$, 经过迭代后,获得各类物资通过不同低空平台、沿不同路径的最优运输量 $b_p^{m,n}$ 。根据式(3),可进一步计算出各链路上

表 3 应急物资与运输方式参数设置(按运输组织模式分类)

Table 3 Setting of parameters for emergency supplies and transportation modes (classified by transportation organization mode)

m	n	$y^{m,n}$	$Y^{m,n}$	$l^{m,n}$	Q^m	$z^{m,n}$	u^n	$\phi_a^{m,2}$
1	1	0.3	25	8.0		45	0.40	
	2	0.2	50	20.0		85	0.30	5
	3	3.0	200	60.0		190	0.12	
	4	2.0	65	80.0		130	0.35	
2	1	0.4	30	6.0		40	0.50	
	2	0.3	55	18.0		80	0.35	5
	3	3.5	250	55.0		180	0.15	
	4	2.3	75	75.0		120	0.40	
3	1	0.8	40	4.0		35	0.60	
	3	4.5	300	50.0		160	0.20	
	4	3.0	85	70.0		100	0.50	

的最优运输量 $x_a^{m,n*}$,从而制定出完整的低空应急物资调度方案。表 4 列出了各链路上不同运输方式的运输结果。

基于表 2、4 的数值结果分析 r_a^n 和 v_a^n 对调度方案的影响。对比不同风险水平链路的运输量分配可见,低风险链路 1 的物资 1 运输量为 65.85 单位,而高风险链路 8 仅为 32.34 单位,降幅达 50.9%。根据式(3)、(4),高风险链路的成本和时间比零风险基准值增加 13%,驱动算法优先选择低风险路径。同时,药品在高风险链路上的运输量降幅小于饮用水和食品,体现了模型对高价值物资的差异化

处理。针对电量约束,在当前参数设置下,各链路飞行距离 w_a^n 远小于小型电动飞行器的典型续航里程。在常温条件下, $\eta(T)=1.0$, 电量约束未被触发。但在极端温度条件下,约束影响显著。根据式(7)和表 1,当 $T=-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\eta(T)=0.833$,有效续航里程降低 16.7%;当 $T=-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\eta(T)=0.781$,降幅达 21.9%。此时长距离链路或多段路径的电量约束可能被触发,限制可调度飞行器和路径可行性。本算例采用温和气象条件,主要验证多目标优化机制,电量约束在极端温度场景下的影响有待进一步研究。

表 4 各链路运输结果

Table 4 Transportation results of each link

m	n	链路 1	链路 2	链路 3	链路 4	链路 5	链路 6	链路 7	链路 8
1	1	65.96	29.61	44.66	36.89	74.54	36.52	58.37	32.41
	2	67.12	30.27	45.68	37.86	75.69	37.18	59.66	33.06
	3	245.62	158.95	190.30	169.70	255.61	166.40	219.39	148.38
	4	162.76	103.83	125.88	112.68	174.30	111.63	148.16	101.31
2	1	151.89	77.37	106.62	89.38	147.03	76.94	119.45	64.02
	2	157.28	81.55	111.16	93.58	152.34	81.12	124.19	67.85
	3	344.81	222.06	266.22	235.90	334.98	219.50	284.84	194.23
	4	238.14	141.87	178.45	155.21	230.11	139.23	192.65	121.38
3	1	193.87	116.34	140.58	122.45	231.77	139.11	186.22	123.63
	3	555.79	388.88	440.20	397.62	592.83	406.60	511.09	362.17
	4	521.98	367.15	415.67	376.14	560.11	387.14	485.28	346.47

为验证算法的可扩展性,本文构建了不同规模的测试案例。中等规模案例包含 35 链路、24 路径、6 接收点,决策变量 420 个;大规模案例基于应急网络拓扑,包含 86 链路、48 路径、12 接收点,决策变量 1 032 个。

从表 5 可以看出,当决策变量从 96 个增长至 1 032 个时,算法在可接受时间内收敛,且需求满足率保持在 99% 以上。这表明所提方法具有良好的可扩

展性,能够有效处理实际规模的应急物资调度问题。

仿真结果表明,在极端天气下,若政府主管部门或调度决策者能够及时输入基础数据(如需求量、网络结构、平台能力、天气风险等),便可借助本文提出的“改进型超网络+投影算法”组合方法,快速制定科学、合理的低空应急物资调度方案。图 4 进一步展示了本方法在实际操作中所遵循的标准化流程。

表 5 算法可扩展性验证结果

案例规模	基准案例	中等规模	大规模
链路数	8	35	86
路径数	8	24	48
接收点数	2	6	12
决策变量	96	420	1 032
规模增长/%	100.00	337.50	975.00
满足率/%	>98.00	99.88	99.52

图 4 所展示的应急调度方法不仅适用于当前示例中列举的典型应急物资(药品、食品、饮用水等),也可拓展应用于更广泛的应急场景与物资类型,如调度氢气、液氢、生物燃料、核燃料、应急电能(电池车、便携电源等)等新型能源物资。本模型的建模框架思路(超网络结构、多目标优化、变分不等式求解)可为其他应急场景及同类型的常规应急物资提供参考,但针对特殊物资,需要根据其物理化学特性、安全法规要求,重新设计风险模型、约束条件和目标函数,不能简单套用。若所调物资具有易燃、易爆、高价值等特征,应考虑提升运输风险权重 α_3 ;若需调度应急设施设备(如光伏组件、风力叶片、水轮发电设备等),可借助本方法的结构逻辑,重新设定目标函数(如优先权、高价值保护等),并针对 EWRI 模型的风险评估部分进行定制化处理。

2.2.2 敏感性分析

在多目标优化问题中,权重系数的选择直接影响最终决策方案的质量。为确保本文所选权重 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} = \{0.2, 0.6, 0.2\}$ 的合理性,本节对其进行论证。

应急物流的核心目标是在灾害发生后尽快将

救援物资送达受灾地区,以最大限度减少人员伤亡和财产损失。Holguín-Veras 等^[35]在其经典研究中提出了“剥夺成本”理论,指出灾后救援的延迟会导致受灾人员的痛苦和生命威胁呈指数级增长。近年来,应急物流多目标优化领域的研究普遍将时间作为首要或重要目标。Yang 等^[36]针对地震应急物流系统的研究强调了及时送达救援物资对降低伤亡的关键作用。Wang 等^[37]在考虑需求和设施中断不确定性的研究中,同样将响应时间作为核心优化目标。Chen 等^[38]针对医疗应急物资调度的研究表明,基于需求紧急度的时间优化能够显著提升救援效果。

为验证所选权重的合理性和模型的鲁棒性,本文开展敏感性分析,进行多权重组合对比试验、蒙特卡洛鲁棒性验证。

为评估不同应急场景下的权重配置策略,设计了 7 种典型权重组合(表 6)。其中:W1 为均衡型,三目标权重接近相等;W2 为成本主导型,适用于灾后恢复阶段;W3 为时间主导型,体现“生命优先”原则,适用于紧急救援;W4 为风险主导型,适用于气象条件恶劣的场景;W5 为成本—时间平衡型,适用于常规补给;W6、W7 分别为时间—风险、成本—风险平衡型。帕累托前沿分析显示,W1、W2、W3、W5、W7 共 5 组位于有效前沿,而 W4 和 W6 被支配,说明过度强调风险可能导致成本和时间的过度牺牲。

从表 6 可以看出,时间主导方案 W3 在时间性能上显著优于其他方案,同时在成本和风险上保持中等水平,适合应急救援场景的“时间优先”原则。在成本与时间方面,W2 通过大幅提高成本权重,实现

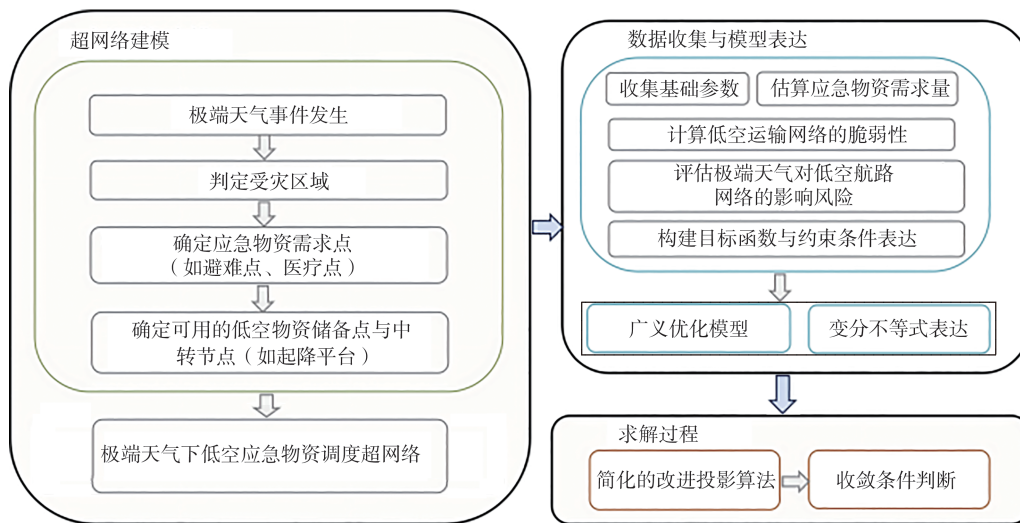


图 4 低空应急物资调度超网络框架

Fig. 4 Framework for low-altitude emergency supply scheduling supernetwork

表6 多权重组合对比

Table 6 Comparison of multi-weight combinations

组合	权重 $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$	总成本	平均时间	总风险	综合目标	帕累托最优
W1	{0.33, 0.34, 0.33}	358 434	245.2	788.8	118 627.0	是
W2	{0.70, 0.15, 0.15}	268 668	282.1	738.1	188 221.0	是
W3	{0.20, 0.60, 0.20}	397 068	186.3	769.5	79 679.4	是
W4	{0.15, 0.15, 0.70}	491 305	194.6	827.2	74 304.0	否
W5	{0.45, 0.45, 0.10}	321 271	270.7	772.6	144 771.0	是
W6	{0.10, 0.45, 0.45}	670 915	224.9	957.8	67 623.8	否
W7	{0.45, 0.10, 0.45}	321 173	270.9	772.6	144 902.0	是

了最低成本,但平均配送时间延长至282.1,适用于灾后恢复等时间压力较小的场景。W4虽将风险权重设置为0.7,但在3个目标上均未达到最优,且被W3等方案帕累托支配,说明过度强调单一目标可能导致整体性能下降。W5在成本和时间间取得平衡,综合目标 $F=144\ 771$ 处于中等水平,可作为常规物资补给的配置方案。

表7展示了不同权重组合下的平台利用率差

表7 不同权重组合下的平台利用率对比

Table 7 Comparison of platform utilization rates under different weight combinations %

权重组合	W2	W3	W4
垂直起降无人机	82.3	76.8	68.4
固定翼无人机	78.5	71.2	62.7
大型载人旋翼飞行器	43.2	68.9	59.3
其他低空方式	65.1	72.3	58.6
高风险链路流量占比	34.6	28.4	18.7

表8 权重扰动下的目标函数统计特征

Table 8 Statistical characteristics of objective functions under weight perturbation

指标	均值	标准差	变异系数/%	最小值	最大值	极差
综合目标	79 870.40	2 407.81	3.01	76 183.90	84 531.50	8 347.56
成本	399 035	10 862	2.72	383 882	421 629	37 747
时间	186.93	2.19	1.17	184.46	191.91	7.44
风险	771.20	2.51	0.33	769.20	778.60	9.30

综合上述分析,可知3个权重系数均能有效调控对应目标,这为不同场景下的权重配置提供了定量依据。本文采用的W3位于帕累托前沿,在时间优先的应急场景中表现最优。针对不同应急阶段,建议采用差异化权重策略:紧急救援期优先W3,灾后恢复期可采用W2,常规补给期适用W5。7组对比试验证实,该配置在时间性能、成本控制和风险水平间实现了较好平衡。蒙特卡洛模拟显示,权重在 $\pm 10\%$ 范围扰动时,综合目标函数的变异系数仅为3.01%,时间指标的变异系数低至1.17%,说明所提模型具有较强的抗扰动能力,适用于权重估计存在不确定性的实际应用。

异。时间主导策略显著提高了大型载人旋翼飞行器的利用率至68.9%,因其速度快、载重大,更适合快速响应需求。成本主导策略更倾向于使用运营成本较低的垂直起降无人机和固定翼无人机。值得注意的是,W3策略下高风险链路流量占比为28.4%,显著低于成本主导的34.6%,说明快速响应路径并非必然伴随高风险,合理的平台配置和路径优化能够在保证时效性的同时控制风险水平。

考虑到实际应急场景中权重系数的确定可能存在一定主观性,本文对基准权重{0.2, 0.6, 0.2}进行了扰动分析。在 $\pm 10\%$ 的随机扰动范围内生成200组权重样本,统计结果如表8所示。从表8可以看出,权重扰动对优化结果的影响有限,在权重 $\pm 10\%$ 的扰动范围内,优化方案的总体结构保持稳定,时间指标的波动较小,验证了模型的实用性。

3 结 语

(1)本文构建了极端天气下低空应急物资调度超网络优化模型,将多类物资、异构低空平台与多层级节点纳入统一框架,引入极端天气风险指标与改进脆弱性参数,通过变分不等式转化与改进投影算法求解。数值算例验证了模型的可行性与算法的可扩展性,输出了最优运输路径、平台分配与物资流量方案。

(2)模型具备以下特点:兼容多类物资、多种运输方式、多层级与多调度目标,全面覆盖极端天气下低空应急调度的各类场景;通过异构子网络分类,精确刻画受影响区域与非受影响区域在资源能力、交

通通达性和运行恢复程度上的差异;提出低空飞行网络脆弱性与极端天气风险的快速测算方法,将气象扰动动态嵌入链路权重;调度决策者在获取节点与链路基础数据后,可借助改进投影算法快速输出调度方案,操作简便,适配实际应急响应需求。

(3)本研究存在以下局限性:聚焦小批量分散化应急配送,未纳入中大型救援直升机建模,缺乏传统航空力量与新型平台协同机制的显式刻画;对起降场设施类型的处理较为简化,未将设施-平台匹配性作为硬约束;当前模型基于确定性假设,未能显式建模物资运输损耗风险、备用物资预置及飞行器冗余配置需求。

(4)未来研究应当从以下方向拓展:建立包含传统直升机的多层级协同调度模型,完善“干线运输-末端配送”立体化应急体系;区分垂直起降点、跑道式起降场与混合型场地,将设施-平台匹配性纳入硬约束,并量化不同设施类型的建设与运营成本差异;引入鲁棒优化或随机规划方法,建立考虑物资损耗率、备用储备策略与飞行器冗余配置的扩展模型;进一步探索动态需求响应机制与交通拥堵效应的建模方法,提升调度系统在极端不确定条件下的韧性与实用性。

参考文献:

Reference:

- [1] 侯宗昊,李 钢. 考虑动态接收效率的机场枢纽震后物资接收性能评估[J/OL]. 交通运输工程学报,2025,https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.028.
HOU Zong-hao, LI Gang. Performance evaluation of post-earthquake material reception in airport hubs considering dynamic receiving efficiency [J/OL]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.028.
- [2] 梁 军,戴雨辛,王文飒,等. 智能飞行汽车:驱动未来城市空中交通[J]. 交通运输工程学报,2026,26(3):25-44.
LIANG Jun, DAI Yu-xin, WANG Wen-sa, et al. Intelligent flying cars: Driving future of urban air mobility [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 25-44.
- [3] HUANG X, LIU Q Q. Strategy of establishing the super network emergency plan system in coastal cities of China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23 (9) : 13062-13086.
- [4] MA N, LIU Y J, LI L L. Link prediction in supernetwork: Risk perception of emergencies [J]. Journal of Information Science, 2022, 48(3): 374-392.
- [5] LV T, NIE Y, WANG C L, et al. Cross-regional emergency scheduling planning for petroleum based on the supernetwork model[J]. Petroleum Science, 2018, 15(3): 666-679.
- [6] NAGURNEY A, DONG J N. Supernetworks: Decision-making for the information age[J]. Journal of Regional Science, 2003, 43(3): 615-617.
- [7] 王志平,王众托. 超网络理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
WANG Zhi-ping, WANG Zhong-tuo. Supernetwork theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [8] YUCESOY E, BALCIK B, COBAN E. The role of drones in disaster response: A literature review of operations research applications [J]. International Transactions in Operational Research, 2025, 32(2): 545-589.
- [9] SANZ-MARTOS S, LÓPEZ-FRANCO M D, ÁLVAREZ-GARCÍA C, et al. Drone applications for emergency and urgent care: A systematic review[J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2022, 37(4): 502-508.
- [10] FLEMONS K, BAYLIS B, KHAN A Z, et al. The use of drones for the delivery of diagnostic test kits and medical supplies to remote First Nations communities during COVID-19 [J]. American Journal of Infection Control, 2022, 50(8): 849-856.
- [11] VORACEK D F. NASA's Armstrong flight research center: Research, technology, and engineering report 2021 [R]. Washington DC: NASA, 2022.
- [12] KARPSTEIN R, HOLZAPFEL F, BIBERTHALER P, et al. Potential of advanced air mobility in German and Austrian organ transplantation[C]//AIAA. AIAA Aviation Forum and Ascend 2024. Reston: AIAA, 2024: AIAA2024-3556.
- [13] ZHANG D L, LI D, SUN H L, et al. A vehicle routing problem with distribution uncertainty in deadlines [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 292(1): 311-326.
- [14] JALLER M, OTERO-PALENCIA C, PAHWA A. Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: Opportunities and challenges[J]. Transportation Research Procedia, 2020, 46: 13-20.
- [15] CHOWDHURY S, EMELOGU A, MARUFUZZAMAN M, et al. Drones for disaster response and relief operations: A continuous approximation model [J]. International Journal of Production Economics, 2017, 188: 167-184.
- [16] MURRAY C C, CHU A G. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 54: 86-109.
- [17] ROUSHAN A, DAS A, DUTTA A, et al. A multi-objective supply chain model for disaster relief optimization using neutrosophic programming and blockchain-based smart contracts[J]. Supply Chain Analytics, 2025, 10: 100107.
- [18] ZAHEDI A, KARGARI M, HUSSEINZADEH KASHAN A. Multi-objective decision-making model for distribution planning of goods and routing of vehicles in emergency multi-objective decision-making model for distribution planning of goods and routing of vehicles in emergency [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 48: 101587.
- [19] WANG J Y, WANG N Y, OUYANG M. Regional-scale

- dynamic planning for distributing emergency supplies under evolving tropical cyclones [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 245: 110024.
- [20] LI Y C, ZHANG J H, YU G D. A scenario-based hybrid robust and stochastic approach for joint planning of relief logistics and casualty distribution considering secondary disasters [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 141: 102029.
- [21] LEVIÄKANGAS P, MOLARIUS R, KÖNÖNEN V, et al. Devising and demonstrating an extreme weather risk indicator for use in transportation systems[J]. *Transportation Research Record*, 2013(2329): 45-53.
- [22] MOLARIUS R, KÖNÖNEN V, LEVIÄKANGAS P, et al. The extreme weather risk indicators (EWRI) for the European transport system[J]. *Natural Hazards*, 2014, 72(1): 189-210.
- [23] 袁毓杰, 李嘉帅, 赵昕颐, 等. 面向动态需求与可变间隔的 eVTOL 联合调度方法 [J]. *航空学报*, 2026, 47(1): 22-41.
YUAN Yu-jie, LI Jia-shuai, ZHAO Xin-yi, et al. eVTOL scheduling schemes for dynamic demand and variable intervals[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2026, 47(1): 22-41.
- [24] WANG W, LIU S F, LI B. A hypernetwork based model for emergency response system [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2022, 31(1): 129-136.
- [25] SABERI S, CRUZ J M, SARKIS J, et al. A competitive multiperiod supply chain network model with freight carriers and green technology investment option[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(3): 934-949.
- [26] MA X, DING S T, PAN Y L. Predicting the impact of temperature on eVTOL battery systems using experimental data from airworthiness-certified fixed-wing electric aircraft [J]. *SAE Technical Paper Series*, 2024, 1: 2024-1-7021.
- [27] KÄBITZ S, GERSCHIER J B, ECKER M, et al. Cycle and calendar life study of a graphite|LiNi₁/3Mn₁/3Co₁/3O₂ Li-ion high energy system. Part A: Full cell characterization[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 239: 572-583.
- [28] ZENG L T, HU Y L, LU C Y, et al. Arrhenius equation-based model to predict lithium-ions batteries' performance [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(10): 1553.
- [29] NAGURNEY A. On the relationship between supply chain and transportation network equilibria: A supernetwork equivalence with computations[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2006, 42(4): 293-316.
- [30] KORPELEVICH G M. The extragradient method for finding saddle points and other problems [J]. *Matecon*, 1976, 12: 747-756.
- [31] NAGURNEY A. *Network economics: A variational inequality approach* [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.
- [32] NAGURNEY A. Supply chain networks, wages, and labor productivity: Insights from Lagrange. Analysis and computations[J]. *Journal of Global Optimization*, 2022, 83(2): 615-638.
- [33] PERERA A T D, NIK V M, CHEN D L, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(5): 150-159.
- [34] THORNTON H E, SCAIFE A A, HOSKINS B J, et al. Skilful seasonal prediction of winter gas demand [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2): 024009.
- [35] HOLGUÍN-VERAS J, PÉREZ N, JALLER M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. *Journal of Operations Management*, 2013, 31(5): 262-280.
- [36] YANG H W, ZHANG P, ZHANG P W, et al. Optimization of a two-stage emergency logistics system considering public psychological risk perception under earthquake disaster [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 31983.
- [37] WANG D J, PENG J, YANG H F, et al. Distributionally robust location-allocation with demand and facility disruption uncertainties in emergency logistics [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 184: 109617.
- [38] CHEN M, ZHOU S L, GONG Y H, et al. Medical emergency supplies dispatching vehicle path optimization based on demand urgency [J]. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 2024, 9: 20230270.
- [39] SCHNEIDER M, STENGER A, GOEKE D. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(4): 500-520.