http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0422

面向无人机支线物流的起降场容量模型与协同调度

江波[1,2]，李蝶[3]，郑远[4,*]，李诚龙[1]，张照轩[3]

(1. 中国民用航空飞行学院 飞行技术学院，广汉 618307；2. 中国民用航空飞行学院 国产民机飞行与运行支持四川省工程研究中心，广汉 618307；3. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院，广汉 618307；
4. 中国民用航空飞行学院 计算机与人工智能学院，广汉 618307)

摘 要：针对公共垂直起降场终端区空域资源紧张与运行效率不足的问题，考虑多场站协同调度机制缺失及支线物流区域的负载均衡性需求，以精准评估容量和优化区域协同调度能力为目标，提出一种串联耦合排队模型与静动态协同调度策略。构建差异化排队模型，刻画各环节阻塞效应，突破传统独立分析局限；在降落排队系统中引入非抢占式优先级策略，保障高优先级任务；设计“静态流量预分配+动态容流调配”策略，通过基于排队论的双路径决策实现多场站协同。仿真结果表明：所提串联耦合排队模型的整体容量评估偏差控制在6%以内，显著优于传统独立分析模型，且在等待层空域容量评估中，同样显著优于基于冲突阈值的模型；非抢占式优先级策略下，高优先级任务平均延误时间始终低于30 s，但随其在总任务中占比的增加，系统平均延误显著上升；静动态协同调度策略在突发流量下使区域负载均衡度提升至95.9%，无人机总延误时间平均减少39.49%。研究成果可为低空物流网络规划与实时调度提供理论支撑。

关 键 词：无人机；支线物流；垂直起降场；排队论；容量评估；协同调度
中图分类号：V355
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)09-3011-12

近年来，倾转四旋翼无人机凭借其垂直起降与高速巡航能力相结合的独特优势，在支线配送场景中逐渐成为提升区域物流效率和创新能力的重要工具。2022年1月25日，中国民用航空局正式向顺丰旗下大型无人机公司丰鸟科技颁发支线物流无人机试运行许可和经营许可[1]。同年，《“十四五”通用航空发展专项规划》也明确提出要打通航空物流“干支末”网络，推动无人机有机融入县乡村三级物流网络体系[2]。其中，“干线运输”依托大型无人机解决跨省际长距离贯通问题；“末端配送”以轻小型无人机实现“最后一公里”短途配送；而“支线物流”作为连接干线枢纽与末端节点的关键环节，既能完成城市之间大宗货物的配送或从总仓库到各分仓库之间的包裹配送，又能精确整合末端分散的物流需求[3-5]。在实际运行过程中，支线物流还呈现出显著的任务目的地区域化特性，即在特定目的区域内通常会部署多个公共无人机起降场，以实现区域内物流需求的多起降场动态协同承接。

然而，随着无人机数量的急剧增加和支线物流波次性运输需求的凸显，公共无人机起降场终端区空域资源日益紧张，其运行效率与空域容量之间的结构性失衡问题已愈发凸显。目前，国内外学者针对终端区容量评估的研究大多聚焦于民航终端区空域和机场跑道，其评估方法体系主要涵盖四大技术路径[6]：基于计算机仿真的动态建模方法、基于

收稿日期：2025-07-01；**录用日期**：2025-10-20；**网络出版时间**：2025-12-31 09:10
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251230.1130.003
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(52502410)；中国民用航空飞行学院本科生科研创新基金项目(X202510624277)
*通信作者. E-mail：ranchozy@cafuc.edu.cn

引用格式：江波，李蝶，郑远，等. 面向无人机支线物流的起降场容量模型与协同调度[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(9)：3011-3022. Jiang B，Li D，Zheng Y，et al. Capacity model and collaborative scheduling of droneports for drone regional logistics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(9)：3011-3022 (in Chinese).

管制员工作负荷的认知分析方法、基于历史数据的统计推演方法及基于数学模型的解析计算方法。针对低空无人机的特殊性,传统评估方法面临显著局限性。一方面,支线物流任务具有静态可规划性和优先级分层特性,但可获取的历史飞行数据样本匮乏;另一方面,无人机普遍采用自主飞行模式,消除了传统民航对管制员工作负荷的强依赖,使得基于管制员工作负荷与历史数据统计的评估方法难以直接迁移使用。在此背景下,基于计算机仿真模型和基于数学模型评估方法逐渐成为低空无人机起降场容量评估的核心技术手段[7]。Guerreiro等[8]提出了一种适用于城市空中交通(urban air mobility, UAM)的先到先服务垂直起降调度算法,通过对地面设施进行时间维度建模,得到了城市空中交通垂直起降场容量和吞吐量;Bulusu等[9]从安全性和性能角度出发提出了一种基于阈值的空域容量评估方法,将无人机空域容量界定为不同阈值条件下对应数值中的最小值;与此同时,赵嶷飞等[10]也提出了一种基于冲突阈值的评估模型,将标准冲突时间对应的最大运行架次作为空域容量;Hoekstra等[11]则从空间限制角度出发提出“地理矢量引导”概念,并通过限制空域内无人机的三维速度矢量的任何一个分量来降低交通复杂度,从而提高无人机空域容量。然而,这些方法尚处于起步阶段,通常仅考虑部分实际场景约束,较少考虑支线物流场景中任务优先级分层和无人机自身能耗等实际因素,使得在实际应用中存在一定的局限性。

与此同时,国内外有关学者针对传统多机场和垂直起降场终端区调度问题已开展多维度深入研究并取得显著进展。在传统民航多机场调度领域,Barnhart等[12]基于先到先服务原则提出了兼顾公平性与系统效能的多机场终端区航班协同管理策略。Jacquillat等[13]在航班排序模型中纳入容量利用率指标,通过动态剖析航班延误、航班队列与机场容量间的关联机制,深入探究多机场运行的时空交互影响。Chevalley等[14]创新性地整合了管制员管理的离场间隔工具与战术离场调度工具,构建了协同优化模型以提升多机场群离场航班运行效率。万旅等[15]基于双层编码遗传算法框架,建立了兼顾总延误时间与运行风险值双目标优化的终端区航班调度模型。在垂直起降场调度研究方面,Chen等[16]开发了一种能实现起降场终端空域与地面运行综合管理的优化调度算法。常静等[17]提出了一种基于动态优先级的无人机起飞时刻调度方法,通过熵权法和模糊聚类确定任务优先级,以最小化总延误成本为目标构建模型,并采用遗传算法求解。张洪海等[18]针对城市环境下物流无人机飞行计划调配问题,以无人机运输成本和延误成本最小为目标,建立多约束物流无人机飞行计划预先调配模型。然而,以上传统多机场及垂直起降场的调度方法在支线物流无人机起降调度中,均存在一定的局限性。这些方法大多未充分考虑支线物流无人机起降的特殊需求,导致在实际应用中难以直接实现高效、精准的调度,无法充分满足支线物流无人机起降调度复杂且多变的场景要求。

综上,尽管排队论已应用于机场终端区与低空起降场容量评估中,但往往基于一系列简化假设,未考虑环节间的阻塞效应和任务优先级,难以直接迁移到具有优先级分层需求的支线物流任务中。同时,在调度策略方面,缺乏对无人机支线物流网络特性的适配,特别是在处理静态可预知但空间分布不均的波次性需求时,难以实现区域内多起降场协同的流量精准预分配和动态再平衡。因此,本文聚焦于无人机支线物流网络的核心节点——公共垂直起降场,以排队论为核心方法,从理论建模与实际应用双维度开展研究。首先,构建“降落—地面周转—起飞”串联耦合排队模型,并针对这3个模块分别建立差异化排队模型,突破传统方法独立分析各环节的局限性,精准刻画环节间阻塞效应对整体容量的影响。其次,在降落排队系统中创新性地引入非抢占式优先级(non-preemptive priority, NP-P)策略,确保高优先级任务安全的同时提升系统整体运行效率。最后,设计“静态流量预分配+动态容流调配”的多起降场协同调度策略,充分利用支线物流任务目的地区域化的特性,在运行前基于任务优先级和实际容量对区域内各起降场的流量进行科学预分配,在运行中基于排队论的双路径决策进行动态调配,高优先级任务选择预期等待时间最短的起降场,低优先级任务采用归一化队长最短策略,有效解决单点过载和区域负载不均问题,提升支线物流网络的整体效率。

1 空域结构

针对支线物流高频次、集散批量和中短途的运输需求,本文特别选择了一种适用于低空货运无人机的“起降分离”终端区空域结构[19]。该结构采用续航与载重均衡的倾转四旋翼构型无人机,以满足多架无人机同时进出场的需求,并确保无人机运行的安全性与高效性。如图1所示,终端进近圈作为终端空域的边界,从上到下依次为等待高度层、降落高度层、起飞高度层、中心的起飞通道及地面停机坪。其中,等待高度层为因区域突发流量过载需

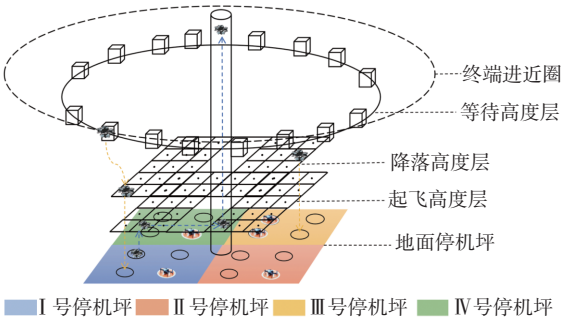

图 1　无人机起降场空域结构

Fig. 1　Airspace structure of droneport

临时悬停的无人机提供缓冲, 降低高优先级物流任务的延误风险; 降落高度层用于无人机下降时的缓冲, 帮助无人机平稳地从巡航高度过渡到接近地面的低空区域; 起飞高度层用于无人机在地面完成起飞加速后, 攀升至该高度层进入中心的起飞通道, 该通道为无人机提供了离场的专用路径, 确保无人机能够按照既定流程和安全间隔有序起飞, 避免与其他无人机发生冲突; 地面停机坪被划分为多个独立的区域, 支持多架次无人机并行周转, 保障了终端区的运作效率。

在此基础上, 为保障终端区无人机运行的安全性与高效性, 精准评估空域容量并建立多维运行协同调度机制至关重要。低空空域容量通常定义为: 在某特定空域环境与安全等级条件下, 单位时间内能够接收的最多航空器架次[20]。然而, 在支线物流场景中, 单纯依赖理论容量阈值难以全面反映系统运行状态, 因为在适当的可接受延误水平下, 起降场的实际服务吞吐量更能体现其运行效能。因此, 采用双重评估方法,一方面通过静态计算确定理论容量上限, 另一方面, 运用差异化耦合排队模型对不同延误阈值下的实际吞吐量进行建模分析。进一步地, 针对支线物流网络的空间负载不均特性, 在评估单一场站容量的基础上, 需进一步拓展至区域协同视角, 通过制定有效的静态与动态流量调配策略, 平衡各场站负载并提升整体运行效率。

2　终端区容量评估

终端区容量评估是无人机公共垂直起降场高效运行的核心环节, 需从理论与实际 2 个维度构建评估体系。理论层面聚焦理想化条件下的极限服务能力, 通过构建降落、起飞、地面 3 个模块的独立模型, 界定各环节在连续服务、无延误场景下的最大架次输出能力, 为系统运行提供理论上的最大容量参考。实际评估则以排队论为核心框架, 将终端区视作“降落—地面周转—起飞”的串联耦合系统, 充分考虑无人机到达与服务时间的随机性、环节间阻塞效应及可接受延误水平等关键因素, 实现对终端区容量的精准化评估, 使评估结果更贴合支线物流运行场景需求。

2.1　理论容量评估

在终端区域的运行管理中, 准确评估其理论容量是实现空域资源优化配置、保障无人机安全有序降落的关键所在。本文在理论层面将容量定义为单位时间内垂直起降场所能提供的最大无人机服务架次, 并围绕这一定义, 重点构建以下核心评估模型。

1) 降落容量模型。根据终端区不断到达的无人机数量, 在单位时间内观测无人机的最大降落服务次数, 并通过式(1)评估终端区空侧降落总容量:

$$C_{\mathrm{d}} = c_1 \frac{T_{\mathrm{unit}}}{\overline{T}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{d}}} \tag{1}$$

式中: C_{d}为降落系统总容量; c_1为降落通道的数量; T_{unit}为单位时间; $\overline{T}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{d}}$为平均降落服务时间, 每个降落通道能够完成的最大降落服务次数主要取决于每次降落所需的平均服务时间$\overline{T}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{d}}$。

2) 起飞容量模型。根据终端区执行任务的无人机相继起飞数量, 在单位时间内观测无人机的最大起飞服务次数, 并通过式(2)评估终端区空侧起飞总容量:

$$C_{\mathrm{t}} = c_2 \frac{T_{\mathrm{unit}}}{\overline{T}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{t}}} \tag{2}$$

式中: C_{t}为起飞系统总容量; c_2为起飞通道数量; $\overline{T}_{\mathrm{P}}^{\mathrm{t}}$为平均起飞服务时间。

3) 地面容量模型。根据上述终端区空域结构, 本文所构建的地面容量模型未考虑滑行道配置等因素的影响, 其容量大小主要取决于地面无人机的平均周转时间(包括装卸、充电等环节)、地面服务人员数量及停机坪数量, 具体通过式(3)来进行定义:

$$C_{\mathrm{g}} = \min(n_{\mathrm{g}}, n_{\mathrm{s}}) \frac{T_{\mathrm{unit}}}{\overline{T}_{\mathrm{g}}} \tag{3}$$

式中: C_{g}为地面系统总容量; n_{g}为停机坪数量; $\overline{T}_{\mathrm{g}}$为平均地面服务时间; n_{s}为地面服务人员数量, 且一个地面服务人员同一时刻仅服务一架无人机。

理论容量评估为无人机起降场在理想化条件下的最大服务能力提供了定量依据, 是系统资源规划与运行优化的基础参考。在后续的实际容量评估与协同调度实验中, 理论容量将作为系统物理资源的上限约束, 用于判断实际运行容量是否合理, 并确保调度策略在资源边界内可行。

2.2　实际容量评估

排队论[21]最早是 1909 年丹麦数学家 Erlang 为研究电话网络场景而提出的, 经过几十年的发展,

理论体系已逐步趋于完备，其排队过程包含输入过程、排队规则、服务机构3部分，如图2所示。顾客在到达服务机构前，若无排队则直接接受服务后离去；若有排队则遵循排队规则和服务规则，依次通过排队结构获得服务后离去。

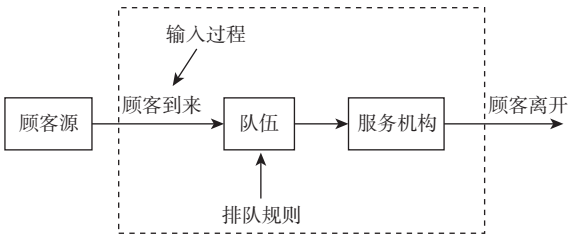

图2 排队过程

Fig. 2 Queueing process

起降场终端区本质上是一个由降落、地面周转、起飞3个环节串联构成的串联耦合系统，该系统的核心特征在于各环节到达流与延误的交互制约机制：地面系统作为枢纽，承担无人机周转任务（装卸、充电等），其输入率由降落系统的实际输出决定，而输出率则直接影响起飞系统的输入流量，同时，地面容量的不足不仅会触发降落系统的服务降级，还可能成为整体系统的关键瓶颈。起飞系统作为出口，其输入流量依赖于地面系统的稳定输出，若起飞通道服务能力不足，队列积累将进一步加剧上游环节的延误传递。鉴于每架无人机的着陆时间和起飞时间是随机和相互独立的，服从负指数分布[7]，本文基于泊松过程的可叠加性，分别建立降落、地面和起飞差异化耦合排队模型。此外，为进一步优化容量评估的流程，对模型进行合理简化，并作出如下假设：

1）机位布局满足无人机安全起降规范，无需另行计算安全间隔距离。

2）无人机完成周转作业后即刻离场，不再占用停机坪资源。

2.2.1 降落排队系统

对于降落排队系统，无人机的相继到达时间间隔和服务时间分别服从参数为λ_1和μ_1的负指数分布，且无人机的到达流为无限源。考虑到空中悬停等待的进场无人机可能因延误增加运行风险，系统采用NP-P策略，与抢占式优先级策略不同，NP-P策略不允许中断正在进行的服务，从而避免了服务切换带来的额外时间开销与系统不确定性，更适合起降场这种对运行连续性和安全性要求较高的场景。基于NP-P策略的运行机制及起降场无人机降落过程的实际特征，该系统符合排队论中的多服务台排队模型，可表示为$M/M/c_1/n_1/\infty$/NP-P，其中，第1个M代表无人机到达时间服从负指数分布，第2个M表示降落通道的服务时间也服从负指数分布，c_1为降落通道数量，n_1为系统排队容量上限，∞表示无限顾客源，NP-P表示非抢占式优先级策略。系统总到达率λ_1由2部分组成：高优先级任务平均到达率λ_h和低优先级任务平均到达率λ_l。

当地面所有停机位均被占用时，降落后的无人机无法释放降落通道，即降落排队系统的有效服务率会受到下一阶段地面排队系统阻塞概率的影响。因此，根据平衡状态，可推导得出降落通道的实际服务率、系统状态概率及各项运行指标，具体计算公式如下。

1）降落通道的实际服务率μ_1^{a}。

$$\mu_1^{\mathrm{a}} = \mu_1(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}}) \tag{4}$$

2）系统空闲的概率P_0^{d}和系统的阻塞概率$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}}$。

$$P_0^{\mathrm{d}} = \left[\sum_{j=0}^{c_1-1}\frac{(\lambda_1/\mu_1^{\mathrm{a}})^j}{j!} + \sum_{j=c_1}^{n_1}\frac{(\lambda_1/\mu_1^{\mathrm{a}})^j}{c_1!c_1^{j-c_1}}\right]^{-1} \tag{5}$$

$$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}} = \frac{(\lambda_1/\mu_1^{\mathrm{a}})^{n_1}}{c_1!c_1^{n_1-c_1}}P_0^{\mathrm{d}} \tag{6}$$

3）高、低优先级任务服务强度ρ_{h}、ρ_{l}及总服务强度ρ_1。

$$\rho_{\mathrm{h}} = \frac{\lambda_{\mathrm{h}}(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})}{c_1\mu_1^{\mathrm{a}}} \tag{7}$$

$$\rho_{\mathrm{l}} = \frac{\lambda_{\mathrm{l}}(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})}{c_1\mu_1^{\mathrm{a}}} \tag{8}$$

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})}{c_1\mu_1^{\mathrm{a}}} = \frac{(\lambda_{\mathrm{h}}+\lambda_{\mathrm{l}})(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})}{c_1\mu_1^{\mathrm{a}}} \tag{9}$$

4）高、低优先级无人机平均等待时间$W_{\mathrm{q,h}}^{\mathrm{d}}$、$W_{\mathrm{q,l}}^{\mathrm{d}}$及总平均等待时间$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{d}}$。

$$W_{\mathrm{q,h}}^{\mathrm{d}} = \frac{\rho_{\mathrm{h}}\rho_1}{\lambda_{\mathrm{h}}(1-\rho_{\mathrm{h}})(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})} \tag{10}$$

$$W_{\mathrm{q,l}}^{\mathrm{d}} = \frac{\rho_{\mathrm{l}}\rho_1}{\lambda_{\mathrm{l}}(1-\rho_{\mathrm{h}})(1-\rho_1)(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})} \tag{11}$$

$$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{d}} = \frac{\lambda_{\mathrm{h}}W_{\mathrm{q,h}}^{\mathrm{d}} + \lambda_{\mathrm{l}}W_{\mathrm{q,l}}^{\mathrm{d}}}{\lambda_{\mathrm{h}}+\lambda_{\mathrm{l}}} \tag{12}$$

5）可接受延误阈值下的降落排队系统容量$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}}$。

$$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}} = \frac{\rho_1(\rho_{\mathrm{h}}+\rho_1)-\rho_1^2}{T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}}(1-\rho_{\mathrm{h}})(1-\rho_1)(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{d}})} \tag{13}$$

式中：μ_1为单位时间内单个降落通道服务强度；$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}}$为地面排队系统单位时间内的阻塞概率，在本模型中用于修正降落通道的实际服务率；$T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}}$为可接受延误阈值，是降落排队系统为保障运行效率与服务质量所设定的最大允许平均等待时间，其等待的平均时长不得超过该阈值，否则系统服务能力将被判定为无法满足实际需求。

2.2.2　地面排队系统

对于地面排队系统, 假设地面服务人员为停机坪上无人机提供服务的过程, 依然满足泊松流的特征; 并且由于无人机进入地面排队系统的速率λ_2并非无限, 而是由降落系统的输出情况决定。一旦所有停机坪皆被占用, 地面排队系统便不再接纳新的无人机。由此可见, 垂直起降场停机坪的运行特征与排队论中有限源的$M/M/c_2/n_{\mathrm{g}}$排队模型相契合。在该模型中, c_2表示地面服务人员数量, n_{g}表示地面停机坪数量, 即系统排队容量上限为n_{g}。根据平衡状态, 可推导得出系统状态概率及各项运行指标, 具体计算公式如下。

1) 稳态时系统大小的概率P_k^{g}及系统空闲概率P_0^{g}。

$$P_k^{\mathrm{g}}=\begin{cases}\dfrac{(\lambda_2/\mu_2)^k}{k!}P_0^{\mathrm{g}} & 0\leqslant k<c_2\\ \dfrac{(\lambda_2/\mu_2)^k}{c_2!c_2^{k-c_2}}P_0^{\mathrm{g}} & c_2\leqslant k\leqslant n_{\mathrm{g}}\end{cases}\tag{14}$$

$$P_0^{\mathrm{g}}=\left[\sum_{k=0}^{c_2-1}\frac{(\lambda_2/\mu_2)^k}{k!}+\sum_{k=c_2}^{n_{\mathrm{g}}}\frac{(\lambda_2/\mu_2)^k}{c_2!c_2^{k-c_2}}\right]^{-1}\tag{15}$$

2) 系统的阻塞概率$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}}$。

$$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}}=\frac{(\lambda_2/\mu_2)^{n_{\mathrm{g}}}}{c_2!c_2^{n_{\mathrm{g}}-c_2}}P_0^{\mathrm{g}}\tag{16}$$

3) 平均正在接受服务的无人机数量L_{s}及平均等待时间$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{g}}$。

$$L_{\mathrm{s}}=\frac{\lambda_2(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}})}{\mu_2}\tag{17}$$

$$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{g}}=\frac{\sum_{k=c_2+1}^{n_{\mathrm{g}}}(k-c_2)P_k^{\mathrm{g}}}{\lambda_2(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}})}\tag{18}$$

4) 可接受延误阈值下的地面排队系统容量$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}}$。

$$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}}=\frac{\sum_{k=c_2+1}^{n_{\mathrm{g}}}(k-c_2)P_k^{\mathrm{g}}}{T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}}(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{g}})}\tag{19}$$

式中: λ_2为地面排队系统到达率; μ_2为单位时间内单个地面服务人员的服务强度; k为地面排队系统中的任务数量; $T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}}$为地面排队系统的可接受延误阈值。

2.2.3　起飞排队系统

对于起飞排队系统, 每架无人机完成地面服务后按照泊松过程请求离场, 当起飞通道空闲时, 无人机垂直上升至起飞高度层, 并在起飞高度层通过平飞进入起飞通道, 从而完成无人机的离场。与此同时, 在同一时刻该起降场可满足c_3架无人机的起飞, 未被地面服务占用的停机坪数量为该系统排队队列上限。因此, 起飞排队系统符合排队论中$M/M/c_3/n_2$有限源排队模型, 其中, c_3表示起飞通道数量, n_2为起飞排队系统的排队容量上限。根据平衡状态, 可推导得出系统排队容量上限、系统状态概率及各项运行指标, 具体计算公式如下。

1) 系统排队容量上限n_2。

$$n_2=n_{\mathrm{g}}-L_{\mathrm{s}}\tag{20}$$

2) 系统稳态大小概率P_r^{t}及系统空闲概率P_0^{t}。

$$P_r^{\mathrm{t}}=\begin{cases}\dfrac{(\lambda_3/\mu_3)^r}{r!}P_0^{\mathrm{t}} & 0\leqslant r<c_3\\ \dfrac{(\lambda_3/\mu_3)^r}{c_3!c_3^{r-c_3}}P_0^{\mathrm{t}} & c_3\leqslant r\leqslant n_2\end{cases}\tag{21}$$

$$P_0^{\mathrm{t}}=\left[\sum_{r=0}^{c_3-1}\frac{(\lambda_3/\mu_3)^r}{r!}+\sum_{r=c_3}^{n_2}\frac{(\lambda_3/\mu_3)^r}{c_3!c_3^{r-c_3}}\right]^{-1}\tag{22}$$

3) 系统阻塞概率$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{t}}$及平均等待时间$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{t}}$。

$$P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{t}}=\frac{(\lambda_3/\mu_3)^{n_2}}{c_3!c_3^{n_2-c_3}}P_0^{\mathrm{t}}\tag{23}$$

$$W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{t}}=\frac{\sum_{r=c_3+1}^{n_2}(r-c_3)P_r^{\mathrm{t}}}{\lambda_3(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{t}})}\tag{24}$$

4) 可接受延误阈值下的起飞排队系统容量$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}}$。

$$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}}=\frac{\sum_{r=c_3+1}^{n_2}(r-c_3)P_r^{\mathrm{t}}}{T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}}(1-P_{\mathrm{c}}^{\mathrm{t}})}\tag{25}$$

式中: λ_3为起飞排队系统到达率; μ_3为单位时间内单个起飞通道的服务强度; r为起飞排队系统中的任务数量; $T_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}}$为起飞排队系统的可接受延误阈值。

在起降场终端区运行管理体系中, 降落过程、地面周转过程与起飞过程 3 个环节共同构成了一个相互关联的有机整体, 任一环节的容量限制都会成为系统运行的瓶颈。因此, 在评估无人机终端区的实际容量时, 需明确无人机在各环节所能承受的最大可接受延误阈值, 并依据延误曲线确定该时间对应的到达流量, 以此作为各环节的实际运行容量, 而终端区的整体容量, 实际上是由这三者中容量最小的一环所决定, 即取三者中的最小值作为系统运行的实际容量。

$$C_{\mathrm{a}}=\min(C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}},C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}},C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}})\tag{26}$$

式中: C_{a}为起降场终端区的运行实际容量; $C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{d}}$、$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{g}}$、$C_{\mathrm{ac}}^{\mathrm{t}}$分别为最大可接受延误阈值下, 通过降落排队系统模型(式(13))、地面排队系统模型(式(19))、起飞排队系统模型(式(25))计算得到的各环节最大可承载流量。

3 基于容流的多起降场协调调度

在无人机支线物流网络日益发展的背景下，单个起降场难以应对波次性高峰和空间负载不均的双重挑战，多起降场协同调度成为提升区域运行效率的关键所在。同时，由于支线物流任务可预知性高但时空分布不均的特性，调度机制遵循“先静态分配、后动态调节”的逻辑，即在运行前通过基于优先级分层的静态流量预分配奠定基础框架，运行过程中引入基于排队论的双路径决策方法，实现物流需求与空域资源的精准匹配。在这一调度体系中，实际容量作为核心依据直接指导流量的分配与动态调整，而理论容量则作为物理资源上限，用于确保调度方案的可行性与系统安全性。二者相互支撑、协同作用，共同保障无人机物流系统的高效与稳定运行。

3.1 静态流量分配

为适配支线物流任务静态可规划性及目的地区域化特性，本文提出基于优先级分层的静态流量预分配方法。该方法的核心在于将无人机的任务级别精细化地划分为高(如医疗物资配送)、低(普通包裹)2个层级，并严格遵循“高优先级任务优先保障、容量比例公平分配”的核心原则，以实现区域内各起降场初始流量的科学配置。

首先，在起降场容量允许的范围内，高优先级任务将获得优先分配的权利，以确保其能够优先分配至起降场。根据式(27)计算单位小时内分配给第i个起降场的高优先级任务量。

$$\lambda_{\mathrm{h},i}=T_{\mathrm{h}}\frac{C_{\mathrm{a},i}}{C_{\mathrm{a},m}} \tag{27}$$

式中：$\lambda_{\mathrm{h},i}$为第i个起降场的高优先级任务量；T_{h}为单位小时内到达流中高优先级任务总量；$C_{\mathrm{a},i}$为单位小时内第i个起降场的实际容量。假设区域内共有m个起降场，则$C_{\mathrm{a},m}$为单位小时内m个起降场的实际容量总和。

其次，为保障区域内各起降场间资源的公平分配，低优先级任务的分配也将根据各起降场的实际容量进行比例分配。通过式(28)、式(29)计算得到单位小时内分配给第i个起降场的低优先级任务量及总任务量。

$$\lambda_{\mathrm{l},i}=T_{\mathrm{l}}\frac{C_{\mathrm{a},i}-\lambda_{\mathrm{h},i}}{C_{\mathrm{a},m}-T_{\mathrm{h}}} \tag{28}$$

$$\lambda_i=\lambda_{\mathrm{h},i}+\lambda_{\mathrm{l},i} \tag{29}$$

式中：$\lambda_{\mathrm{l},i}$和λ_i分别为第i个起降场的低优先级任务量和总任务量；T_{l}为单位时间内到达流中低优先级任务总量。同时，为保证实际运行时的空域资源合理利用与运行安全性，各个起降场单位小时内的静态流量预分配结果要小于对应的起降场单位小时内实际容量，即$0\leqslant\lambda_i<C_{\mathrm{a},i}$。

3.2 动态流量调配

针对支线物流目的地区域化场景下的波次性突发需求及区域负载动态不均衡的问题，静态流量分配与实时容量之间极易产生显著失配。为此，本文在静态流量预分配的基础上提出一种基于起降场负载率自适应触发阈值机制的双路径决策方法，如图3所示。当新任务到达时，系统首先判断当前流量总和是否超过起降场容量与自适应触发阈值的乘积。若未超过，则按静态预分配方案运行；若超过，该策略便通过优先级加权的队列最短(priority-weighted join the shortest queue, P-JSQ)优先机制，使高优先级任务选择预期等待时间最短的起降场，以减少关键任务的延迟；低优先级任务则遵循传统JSQ策略，选择归一化队长最短的起降场，以分配起降场的突发流量，进而平衡区域内的系统负载。容流调配流程如图3所示。

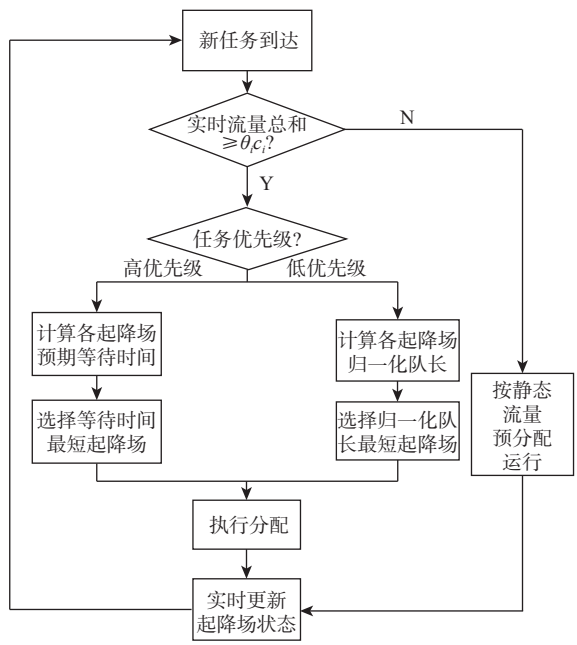

图3 容流调配流程

Fig. 3 Flowchart for capacity-flow regulation

3.2.1 基于起降场负载率的自适应触发机制

为精准刻画起降场整体繁忙程度与调度触发敏感度的动态关联，通过式(30)对各起降场自适应触发阈值进行数学推导。

$$\theta_i=\min\left(\frac{C_{\mathrm{a},i}}{\lambda_i},0.85\right) \tag{30}$$

式中：θ_i为第i个起降场使用的自适应触发阈值。

同时，基于起降场终端区所构建的“降落—地

面周转—起飞”串联耦合系统模型, 结合式(12)、式(18)及式(24)的数学推导, 通过式(31)计算可得第 i个起降场的预期等待时间。

$$W_i = W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{d}} + W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{g}} + W_{\mathrm{q}}^{\mathrm{t}} \tag{31}$$

式中: W_i为第i个起降场的预期等待时长。

同时, 根据排队论中串联耦合系统的分层排队特性, 可通过式(32)～式(34)分别计算第 i个起降场各环节排队的排队队长。

$$L_i^{\mathrm{d}} = \lambda_{\mathrm{h}} W_{\mathrm{q,h}}^{\mathrm{d}} + \lambda_{\mathrm{l}} W_{\mathrm{q,l}}^{\mathrm{d}} \tag{32}$$

$$L_i^{\mathrm{g}} = \sum_{k=c_2+1}^{n_{\mathrm{g}}} (k - c_2) P_k^{\mathrm{g}} \tag{33}$$

$$L_i^{\mathrm{t}} = \sum_{r=c_3+1}^{n_2} (r - c_3) P_r^{\mathrm{t}} \tag{34}$$

式中: L_i^{d}、L_i^{g}和L_i^{t}分别为第i个起降场的降落排队队长、地面周转排队队长和起飞排队队长; n_{g}为地面停机坪数量, 对应地面排队系统排队容量上限。

然而, 区域内每个起降场的实际容量存在显著差异, 仅依靠绝对队长进行调度决策将导致容量较大的起降场因绝对队长较长而被误判为过载状态, 而容量较小的起降场则可能因绝对队长较短而被低估负载, 故通过式(35)对绝对队长进行归一化处理, 以消除不同起降场容量差异的影响。

$$N_i = \frac{L_i^{\mathrm{d}} + L_i^{\mathrm{g}} + L_i^{\mathrm{t}}}{C_{\mathrm{a},i}} \tag{35}$$

式中: N_i为第i个起降场的归一化队长。

3.2.2　调度效果评估指标

为量化区域内多场站协同调度中的流量分布均匀性, 结合排队论中容量利用率的统计特性, 通过式(36)～(38)分别计算单一起降场的容量利用率、区域平均容量利用率及负载均衡度指标。

$$v_i = \frac{\lambda_i^{\mathrm{a}}}{C_{\mathrm{a},i}} \tag{36}$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^{m} v_i}{m} \tag{37}$$

$$E = 1 - \frac{1}{\bar{v}} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (v_i - \bar{v})^2} \tag{38}$$

式中: λ_i^{a}为第i个起降场的实时到达流量; v_i为第i个起降场的容量利用率; $\bar{v}$为m个起降场的平均容量利用率; $E(0 \leqslant E \leqslant 1)$为$m$个起降场的负载均衡度, $E = 1$时表示完全均衡, $E = 0$时表示极度不均衡。

4　仿真实验

为全面验证本文方法在支线物流实际应用场景下的有效性和优势, 开展了一系列实验仿真。本节从容量评估准确性、优先级策略有效性、区域内多起降场协同调度性能 3 个方面进行研究, 通过对比分析, 不仅揭示了本文串联耦合排队模型在容量评估中的高精度特性, 还充分展示了 NP-P 策略对高优先级任务无人机的保障能力及多起降场协同调度策略在应对区域内物流波次性突发需求和降低系统总延误方面的卓越表现。同时, 为确保实验结果的可复现性, 所有测试均在统一软硬件环境的 Win10 系统中完成, 并使用 Python 3.11.4 作为数据处理和算法实现的主要编程语言。

由于无人机在空域内悬停等待的过程中, 容易受到多机间气动耦合干扰效应、低空风场、电磁环境、导航定位误差的影响[22], 参考相关研究的理论依据与相关类似研究的经验[22-24], 在本文后续开展的实验中, 默认等待层的半径$r_1 = 108$ m。

4.1　容量准确性评估对比实验

为保障无人机支线物流起降场容量评估的精准性, 本文以传统独立分析模型与冲突阈值模型为对照对象开展性能对比实验, 系统验证所提串联耦合排队模型在多评估维度下的核心优势。

4.1.1　与传统独立分析模型的对比实验

为验证串联耦合模型对“降落—地面周转—起飞”环节交互效应的刻画能力, 本文采用蒙特卡罗方法构建终端区仿真运行模型, 全面模拟小型倾转四旋翼无人机在终端区的整个运行周期, 包括降落、地面周转和起飞等各个阶段。同时, 选取文献 [7] 中基于排队论的独立分析模型作为对照组, 进行终端区容量评估的对比实验。

1) 基础设施及无人机运行参数设置。根据等待层的半径和无人机安全水平间隔[18], 结合三角函数关系式(39), 可得等待高度层上的等待位数量$n_1 = 34$、停机坪数量$n_{\mathrm{g}} = 12$、降落通道数量$c_1 = 1$、地面服务人员数量$c_2 = 5$、起飞通道数量$c_3 = 1$。其中, 离场所需时间$t_{\mathrm{dep}} = 30$ s为无人机从地面停机坪起飞至离开起飞通道的时间; 降落所需时间$t_{\mathrm{apr}} = 30$ s为无人机从进入终端区到着陆所需的降落服务时间。同时, 为更真实地模拟实际场景中可能出现的地面中转延迟, 每次实验随机在 (120,240) s 范围内生成地面中转时间。

$$n_1 = \frac{\pi}{\arcsin\left(\dfrac{D_x}{2r_1}\right)} \tag{39}$$

式中：D_x为无人机安全水平间隔。

2）仿真运行环境与初始条件设置。蒙特卡罗实验方法是计算不同规模无人机来流下终端区整体的平均延误时间，通过选取可接受的延误时间来确定对应的到达流，此时的到达流即为终端区的空域容量。每次仿真运行时长为3 600 s，采用蒙特卡罗方法进行100次重复实验取平均值。无人机到达间隔服从指数分布。初始条件设置为终端区内无无人机，所有资源（降落通道、起飞通道、停机位和地面服务人员）均处于空闲状态。

根据本文所构建的串联耦合排队模型和对照组排队模型，可计算得到降落、地面周转和起飞3个子系统的容量评估值，如表1和表2所示。其中，降落、地面周转和起飞排队系统对应的理论容量分别为120架次/h、103.97架次/h、120架次/h，并作为实际容量的物理资源上限。本文的降落排队系统容量增速显著低于地面服务与起飞系统，表明其容量瓶颈集中于降落排队系统，需通过增加降落通道或优化优先级策略来提升效率。而对照组的地面服务系统容量增速滞后于起飞系统，其瓶颈位于地面服务排队系统，需通过扩大停机坪规模或缩短地面服务时间优化。

表1 本文在不同延时条件下的各排队系统容量

Table 1 Capacity of each queuing system under different delays in this research

可接受延误时间/s	容量/(架次·h^{-1})		
	降落	地面	起飞
30	60.0	68.8	61.1
60	77.5	84.6	86.0
90	85.6	95.4	105.0
120	89.8	115.2	115.0
150	92.6	129.6	119.4
180	94.7	155.4	120.0

表2 对照组在不同延时条件下的各排队系统容量

Table 2 Capacity of each queuing system under different delays in control group

可接受延误时间/s	容量/(架次·h^{-1})		
	降落	地面	起飞
30	60.0	64.6	61.1
60	79.8	73.7	86.0
90	90.0	80.8	105.0
120	96.0	83.6	115.0
150	100.2	85.5	119.4
180	102.8	87.3	120.0

如图4所示，3组数据均随着可接受延误时间的增加而趋于平缓，符合排队论中“服务效率趋近饱和时边际增益递减”的规律，这对于支线物流运营规划具有重要参考价值。值得注意的是，本文串联耦合排队模型得到的终端区整体容量值，与蒙特卡罗仿真结果（仿真组）结果的相对偏差始终不超过6%，而对照组模型的偏差则达到12%以上，这证实了本文提出的串联耦合排队建模方法能更精准刻画降落—地面周转—起飞环节的交互影响，避免了各模块独立分析导致的容量高估或低估问题。

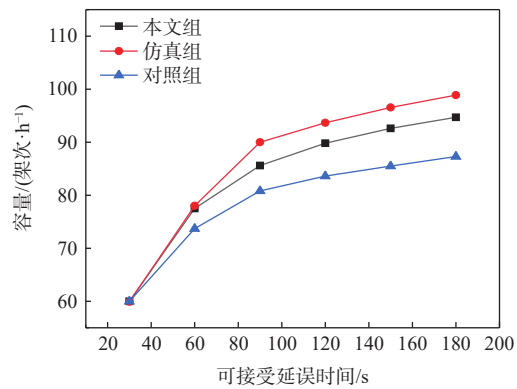

图4 不同延时下的系统容量变化曲线

Fig. 4 System capacity variation curves under different delays

4.1.2 与冲突阈值模型的对比实验

本节将基于冲突阈值模型的容量评估方法作为对照，以验证本文所提容量评估模型在支线物流场景中的通用优势。基于冲突阈值模型容量评估方法的核心逻辑是以可接受的冲突水平作为空域容量的度量标准，并通过仿真手段量化单位时间内空域能安全容纳的最大无人机架次[10]。由于本文所提空域构型在设计时已经考虑了无人机的安全分离，其起飞通道与降落通道在同一时间仅允许一架无人机使用，不会发生冲突。因此，本节容量评估对比实验仅针对空域中等待高度层部分开展，分别使用本文提出的排队论模型和基于冲突阈值模型的评估方法对等待高度层空域容量进行评估，并对比蒙特卡罗实验得出的容量基准，判断2种方法评估的准确性。具体的实验设置如下：

1）基于排队论的容量评估方法详见2.2.1节。

2）基于冲突阈值模型的容量评估方法是：设置不同规模的无人机到达流，计算每种到达流下等待高度层无人机数量最多时的两机水平间隔，随着无人机到达流的增加，等待高度层无人机间隔逐渐缩小，直到缩小至最小安全间隔前对应的来流即为空域容量。

3）蒙特卡罗实验方法是：计算不同规模无人机来流下的平均等待时间，随着无人机到达流的增加，平均等待时间逐渐增大，直到增大至无人机可接受延误阈值下对应的来流即为空域容量。

上述 3 个实验的参数设置如下: 无人机来流从 40 架次/h 逐渐增加至 140 架次/h; 停机坪数量 n_g = 12、地面服务人员数量 c_2 = 5; 降落通道数量 c_1 = 1; 等待层半径 r_1 = 108 m; 地面中转时间在(120,240)s 范围内随机生成; 无人机最小安全间隔为 30 m[10], 无人机可接受延误阈值时间为 90 s。3 种不同策略下的容量变化如图 5 所示。

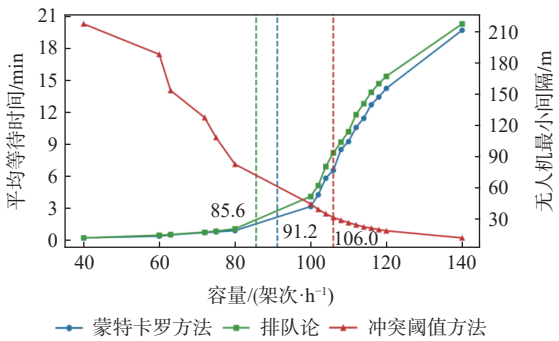

图 5　3 种不同策略下的容量变化曲线

Fig. 5　Capacity variation curves under three different strategies

实验结果表明, 当可接受延误时间为 90 s 时, 基于蒙特卡罗仿真的起降场实际容量为 91.2 架次/h, 本文串联耦合排队论模型的容量评估值为 85.6 架次/h; 而当无人机最小间隔为 30 m 时, 基于冲突阈值模型的容量评估值为 106 架次/h。三者对比可见, 冲突阈值模型的评估结果显著高于实际容量与本文模型评估值, 且本文模型与实际容量的偏差仅为 6.1%, 远低于冲突阈值模型 16.2% 的偏差。通过详细分析基于冲突阈值模型容量评估方法的平均等待时间发现, 当到达流来到 106 架次/h 时, 无人机平均等待时间已经远超可接受的延误时间。因此, 造成基于冲突阈值容量评估方法结果偏大的核心原因是未充分考虑无人机在空中的续航能力。

4.2　不同任务优先级比例下的系统性能实验

为验证本文所提 NP-P 策略的有效性, 基于排队论对降落排队模型 $M/M/c_1/n_1/\infty$/NP-P 和 $M/M/c_1/n_1/\infty$/FCFS 进行比较, 即在相同条件下对比 2 种策略的性能差异, 并分析系统内无人机平均延误时间的变化规律及优先级策略的实际效果。实验将控制无人机到达时剩余电量充足, 根据任务优先级将到达无人机分为 2 组(任务优先级 1 的无人机优先于任务优先级 2 的无人机)。具体实验参数设置如下:

1) 基础设施及无人机运行相关参数沿用 4.1.1 节实验中的设置。

2) 无人机飞行任务优先级设置。通过随机生成的方式, 设定 3 组到达流中无人机任务的优先级占比。其中, ω_1 代表高优先级任务占比比例, ω_2 代表低优先级任务占比比例, 则 3 组到达流的优先级占比分别为: $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.7$; $\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.5$; $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.3$。

1) 结合图 6 分析可知, 基于优先级的 NP-P 策略相较传统的 FCFS 策略展现出显著优势。FCFS 策略因无任务紧急度区分, 高负载时易出现“优先级倒置”, 导致高优先级任务滞留, 而图 6 中曲线表明, 无论无人机任务的优先级比例如何变化, NP-P 策略的高优先级无人机平均延误时间均显著低于 FCFS 策略, 验证了优先级感知调度在物流场景中的适用性。

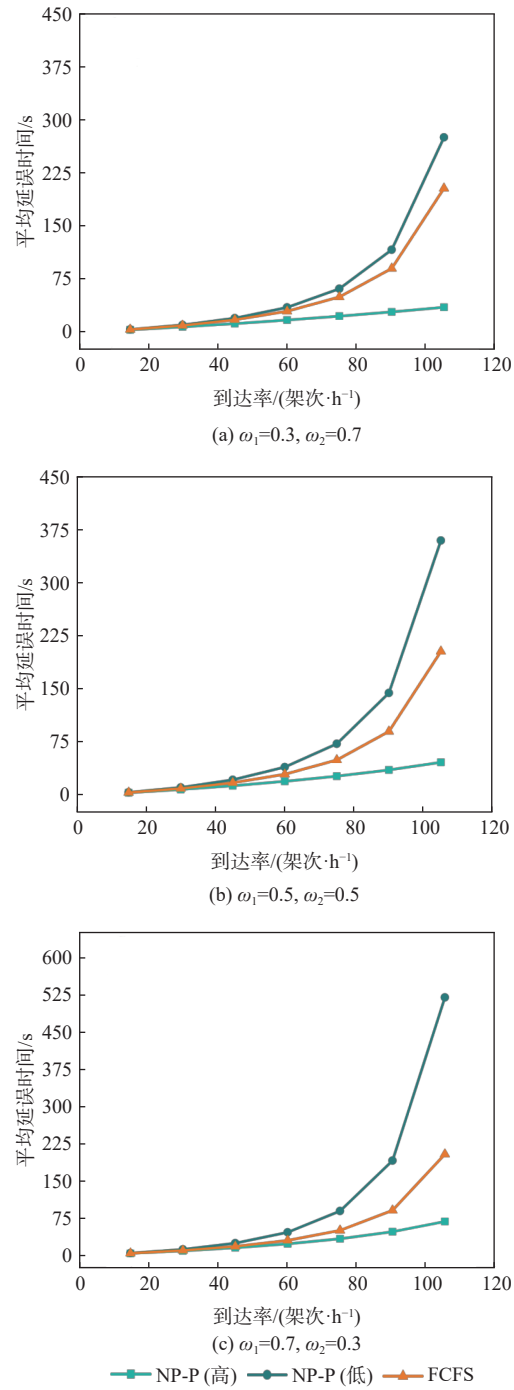

图 6　2 种策略下的无人机平均延误时间曲线

Fig. 6　Curves of average waiting duration of drones under two strategies

2）随着到达流中高优先级任务占比的不断增加，无人机的平均延误时间均呈现上升趋势。其中，图 6(c) 中高优先级任务和低优先级任务无人机的平均延误时间分别为28.60 s、126.04 s。相较于图 6(a) 中的对应数据，分别上升了 53.85% 和 68.84%，这体现出高优先级任务占比的提高会加重整体的延误情况。不过，高优先级任务的平均延误时间一直保持在较低水平，且其绝对值始终维持在30 s以内，这充分证实了本实验所设定的 NP-P 策略能够有效确保高优先级任务无人机的运行效率和运行安全。但需要注意的是，低优先级任务的无人机会随着高优先级任务占比的增加而面临着较大的运行压力。

4.3 多起降场协同调度实验

为系统评估基于“静态流量预分配 + 动态容流调配”协同机制的多起降场协同调度策略对提升支线物流网络整体效能的作用，本文在静态流量预分配的基础上，重点验证 P-JSQ 策略在应对突发物流需求、解决区域负载不均及优化系统延误方面的实际效能。具体设置如下：

1）基础设施及无人机运行相关参数沿用 4.1.1 节实验中的设置。其中，高低优先级任务占比比例为：$\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.7$。同时，当某一起降场的实时流量总和大于该起降场基于负载率的自适应阈值与容量的乘积时，便会启动 P-JSQ 策略。

2）静态流量预分配。假设区域内有 4 个起降场及可接受延误水平为90 s时，基于上述串联耦合排队论模型（式（13）、式（19）和式（25）），可获取单位时间内各起降场的实际容量。同时，假设单位小时内初始到达任务总量为 180 架次/h，则 $T_h = 54$架次/h，$T_l = 126$架次/h，依据优先级分层静态流量预分配公式（式（27）～式（29）），计算单位时间内各起降场的任务总量，具体情况如表 3 所示。

表 3 起降场终端区静态流量预分配

Table 3 Droneport terminal area static flow pre-allocation 架次/h

起降场	高优先级任务总量	低优先级任务总量	预分配任务总量	实际容量
起降场a	13.0	30.0	43.0	85.6
起降场b	17.0	39.0	56.0	110.0
起降场c	14.0	32.0	46.0	92.0
起降场d	10.0	25.0	35.0	70.0

由图 7 可知，当目的区域内起降场a遭遇物流波次性突发需求导致容量过载时，“静态流量预分配 + 动态容流调配”的双层机制能够迅速响应，并通过基于起降场负载率的自适应触发阈值机制使起降场 a 的实时流量总和降至实际容量与阈值乘积以下。在整个响应过程中，P-JSQ 策略展现出了卓越的计算效率，平均耗时仅为 1.2 ms，这一特性使其在需要极低延迟决策的实时调度系统中具备显著优势。

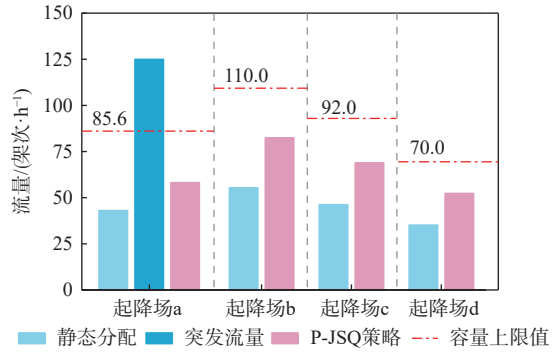

图 7 物流波次性突发需求下的多起降场协同调度

Fig. 7 Multi-droneport coordinated scheduling under logistic wave-like sudden demands

与此同时，邻近起降场 b、c、d 的容量利用率分别提升至 68.0%、74.9%、74.9%。而且，得益于动态容流调配对负载的再平衡作用，目的区域内的负载均衡度也提升至 95.9%，实现了区域内流量的动态平衡，并避免了邻近场因分流导致的二次过载。

同时，为定量分析起降场在不同物流负载强度下，采用 P-JSQ 策略对无人机平均延误时间的改善效果，以起降场 a 作为研究对象、到达流作为变量，通过上文构建的降落排队模型和调度方法分别计算存在 P-JSQ 策略和不存在 P-JSQ 策略 2 种情况下的平均延误时间数据进行对比实验，如图 8 所示。当到达流为 80 架次/h 和 100 架次/h，起降场 a 的自适应触发阈值均为 0.85，此时，实时流量总和大于起降场容量与自适应触发阈值的乘积，启动 P-JSQ 策略。

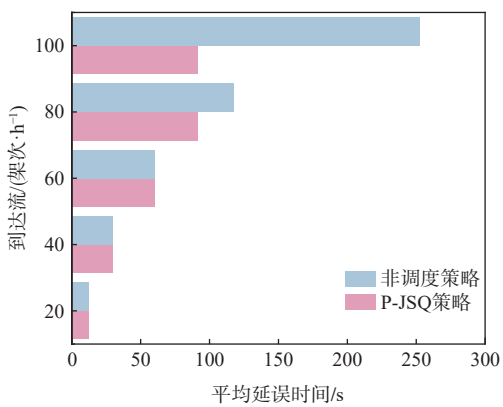

图 8 2 种策略下的无人机平均延误时间

Fig. 8 Average drone delay time under two strategies

实验结果表明，在实时流量总和超过起降场容量与自适应触发阈值的乘积时，采用 P-JSQ 策略可显著改善系统性能，其无人机平均延误时间成本最

大降幅可达160.7 s。相较于单起降场非调动策略，无人机总延误时间平均减少了约 39.49%，有效缓解了支线物流网络在突发流量高峰下的队列拥塞问题。

5　结　论

1）本文提出的串联耦合排队模型经蒙特卡罗仿真验证，其整体容量评估偏差控制在 6% 以内，显著优于对照组模型，有效解决了传统方法独立分析各环节导致的容量偏差问题。同时在等待高度层空域容量评估实验中，本文模型偏差远小于基于冲突阈值的模型，验证了本文的容量评估模型在支线物流场景中的通用趋势。

2）在降落排队系统中引入的 NP-P 策略，在保障高优先级任务平均延误始终低于30 s的同时，验证了优先级比例上升对系统平均延误的影响规律，为物流任务分级管理提供了量化依据。

3）所设计的“静态流量预分配+动态容流调配”协同调度策略，在应对支线物流突发需求时，可使区域负载均衡度提升至 95.9%，并让无人机的总延误时间平均降低 39.49%，显著增强了支线物流网络在突发流量冲击下的系统韧性。

本文的多起降场协同调度策略对支线物流场景的静态可规划性与波次性需求适配性强，但未考虑极端天气等外部扰动因素，未来需进一步融合动态环境约束优化调度策略。

参考文献（References）

[1] 中国民用航空局. 民航局颁发支线物流无人机商业试运行牌照[EB/OL]. (2022-01-25)[2025-04-17]. https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220125_211269.html.
Civil Aviation Administration of China. CAAC issues commercial trial operation license for regional logistics drones[EB/OL]. (2022-01-25)[2025-04-17]. https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202201/t20220125_211269.html(in Chinese).

[2] 中国民用航空局. 民航局关于印发《“十四五”通用航空发展专项规划》的通知[EB/OL]. (2022-06-13)[2025-04-17]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202206/t20220613_213643.html.
Civil Aviation Administration of China. Notice of the CAAC on issuing the "14th Five-Year Plan" special plan for general aviation development[EB/OL]. (2022-06-13)[2025-04-17]. https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202206/t20220613_213643.html(in Chinese).

[3] 郑文娟. 低空物流发展前景与建议[J]. 空运商务, 2025(3): 16-21.
Zheng W J. Development prospect and suggestion of low-altitude logistics[J]. Air Transport & Business, 2025(3): 16-21(in Chinese).

[4] 许建华, 李权. 支线货运无人机的发展现状、运行方式与关键技术分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 1-10.
Xu J H, Li Q. Development, running mode and key technologies analysis of regional cargo drones[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 1-10(in Chinese).

[5] 袁于斐. 基于主从模式的支线-末端无人机协同物流调度方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023: 22-23.
Yuan Y F. Research on the method for logistics scheduling of collaborative feeder-end UAV based on master-slave mode[D]. Changsha: Central South University, 2023: 22-23(in Chinese) .

[6] 张洪海, 夷珈, 李姗, 等. 低空空域容量评估研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 78-93.
Zhang H H, Yi J, Li S, et al. Review on research of low-altitude airspace capacity evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78-93(in Chinese).

[7] Zhang H H, Fei Y H, Li J Y, et al. Method of vertiport capacity assessment based on queuing theory of unmanned aerial vehicles[J]. Sustainability, 2023, 15(1): 709.

[8] Guerreiro N M, Hagen G E, Maddalon J M, et al. Capacity and throughput of urban air mobility vertiports with a first-come, first-served vertiport scheduling algorithm[C]//Proceedings of the AIAA Aviation 2020 Forum. Reston: AIAA, 2020: 2903.

[9] Bulusu V, Polishchuk V, Sengupta R, et al. Capacity estimation for low altitude airspace[C]//Proceedings of the 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Reston: AIAA, 2017: 4266.

[10] 赵嶷飞, 张志玮. 基于冲突阈值的城市物流无人机空域容量评估[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(5): 1-6.
Zhao Y F, Zhang Z W. Estimation of urban logistics UAV airspace capacity based on conflict threshold[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2021, 39(5): 1-6(in Chinese).

[11] Hoekstra J M, Ellerbroek J, Sunil E, et al. Geovectoring: reducing traffic complexity to increase the capacity of UAV airspace[C]//Proceedings of the International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018: 1-8.

[12] Barnhart C, Bertsimas D, Caramanis C, et al. Equitable and efficient coordination in traffic flow management[J]. Transportation Science, 2012, 46(2): 262-280.

[13] Jacquillat A, Odoni A R. Endogenous control of service rates in stochastic and dynamic queuing models of airport congestion[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 73: 133-151.

[14] Chevalley E, Parke B, Kraut J, et al. Scheduling and delivering aircraft to departure fixes in the NY metroplex with controller-managed spacing tools: AIAA 2015-2428[R]. Reston: AIAA, 2015.

[15] 万旅, 邵荃. 基于双层遗传编码的多机场航班调度优化研究[J]. 航空计算技术, 2023, 53(5): 39-43.
Wan L, Shao Q. Research on multi-airport flight scheduling optimization based on two-layer coding genetic algorithm[J]. Aeronautical Computing Technique, 2023, 53(5): 39-43(in Chinese).

[16] Chen S, Wei P, Krois P, et al. Arrival management for high-density vertiport and terminal airspace operations[C]//Proceedings of the 2023 Air Traffic Control Association Annual Conference. Washington, D. C.: Air Traffic Control Association, 2023.

[17] 常静, 张启钱, 张洪海, 等. 城市物流无人机起飞时刻排序问题研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2024, 48(3): 435-440.
Chang J, Zhang Q Q, Zhang H H, et al. Research on the scheduling problem of urban logistics UAV’s take-off time[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engin-

eering), 2024, 48(3): 435-440(in Chinese).

[18] 张洪海, 任真苹, 冯讴歌, 等. 城市低空物流无人机飞行计划预先调配[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(9): 2802-2811.
Zhang H H, Ren Z P, Feng O G, et al. Logistics unmanned aerial vehicle flight plan pre-allocation in urban low-altitude airspace [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(9): 2802-2811 (in Chinese).

[19] Zheng Y, Li D, Shen Z, et al. Optimized airspace structures and sequencing method for urban logistics droneport[J]. Aerospace, 2025, 12(3): 257.

[20] Bulusu V, Polishchuk V. A threshold based airspace capacity estimation method for UAS traffic management[C]//Proceedings of the Annual IEEE International Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-7.

[21] 陆传赉. 排队论[M]. 北京: 北京邮电学院出版社, 1994.
Lu C L. Queueing theory[M]. Beijing: Beijing Institute of Posts and Telecommunications Press, 1994(in Chinese).

[22] Cui Q Q, Liu M, Huang X Y, et al. Coarse-to-fine visual autonomous unmanned aerial vehicle landing on a moving platform[J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2023, 3(1): 100088.

[23] Xie H, Ji X H, Yin J N, et al. Standardization of safety separation for multi-category unmanned aerial vehicles in low-altitude airspace operations[J]. Applied Sciences, 2025, 15(13): 7501.

[24] 刘聪, 孟庆昆, 张宗卫. 小型四旋翼无人机悬停状态气动干扰与安全间隔研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 177-183.
Liu C, Meng Q K, Zhang Z W. Research on aerodynamic interaction and safety separation of small quadcopter under hovering state[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(11): 177-183(in Chinese).

Capacity model and collaborative scheduling of droneports for drone regional logistics

JIANG Bo[1, 2], LI Die[3], ZHENG Yuan[4, *], LI Chenglong[1], ZHANG Zhaoxuan[3]

(1. College of Flight Technology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of Domestic Civil Aircraft Flight and Operation Support, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
3. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
4. School of Computer Science and Artificial Intelligence, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Droneport terminal airspace faces the critical issues of scarce airspace resources and insufficient operational efficiency. A series-coupled queuing model and a static-dynamic collaborative scheduling strategy are established to achieve accurate capacity assessment and effective regional collaborative scheduling, taking into account the lack of collaborative scheduling mechanisms for multiple droneports and the need for load balancing in regional logistics areas. First, a differentiated queuing model is constructed to characterize blockage effects in each operational link, breaking through the limitations of traditional independent analysis. Second, a non-preemptive priority strategy is introduced into the landing system to safeguard high-priority tasks. Finally, a "static flow pre-allocation + dynamic capacity-flow regulation" mechanism is designed to achieve multi-droneport collaboration through dual-path decision-making based on queuing theory. The static results show that the overall capacity assessment deviation of the proposed series-coupled queuing model is controlled within 6%, which is significantly superior to the traditional independent analysis model. Moreover, in the capacity assessment of the waiting layer airspace, it also significantly outperforms the conflict threshold-based model. Under the non-preemptive priority strategy, the average delay time of high-priority tasks consistently stays below 30 seconds. However, with the increase in their proportion of total tasks, the system's average delay rises significantly. Under surge traffic conditions, the cooperative scheduling approach lowers overall drone delay by 39.49% on average and increases regional load balance to 95.9%. The research results can provide theoretical support for low-altitude logistics network planning and real-time dispatch.

Keywords: drone; regional logistics; droneport; queueing theory; capacity evaluation; collaborative scheduling

Received: 2025-07-01; **Accepted**: 2025-10-20; **Published Online**: 2025-12-31 09:10

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251230.1130.003

Foundation items: Youth Fund Project of National Natural Science Foundation of China (52502410); Training Program of Innovation for Undergraduates of Civil Aviation Flight University of China (X202510624277)

* **Corresponding author**. E-mail: ranchozy@cafuc.edu.cn