

基于时间窗约束的输送分拣系统多目标优化研究

秦晓东 金桂根 李逸贺

云南财经大学, 中国·云南 昆明 650221

摘要: 为了解时间窗约束情形下输送分拣系统所遭遇的多目标冲突僵局, 本文针对动态调度滞后、资源适配失衡以及帕累托解集退化等理论瓶颈展开深入研究, 借助对时间窗约束与分拣目标耦合机制的剖析, 提出弹性协同调度、智能资源适配以及多目标解耦重构这三条优化路径, 构建起动态评估及鲁棒保障理论框架。研究结果突破了多重约束下的协同困境, 可为复杂智能物流系统提供多目标协同优化提供理论支持。

关键词: 时间窗约束; 输送分拣; 智能物流; 多目标优化

Research on Multi-objective Optimization of Conveying and Sorting System Based on Time Window Constraint

Qin Xiaodong, Jin Guigen, Li Yihe

Yunnan University of Finance and Economics, China Yunnan Kunming 650221

Abstract: In order to solve the multi-objective conflict deadlock of transportation and sorting system under time window constraints, this paper makes in-depth research on theoretical bottlenecks such as dynamic scheduling lag, unbalanced resource adaptation and Pareto solution set degradation. By analyzing the coupling mechanism between time window constraints and sorting objectives, three optimization paths, namely flexible collaborative scheduling, intelligent resource adaptation and multi-objective decoupling reconstruction, are proposed, and a theoretical framework of dynamic evaluation and robust support is constructed. The research results break through the collaborative dilemma under multiple constraints, which can provide theoretical support for multi-objective collaborative optimization of complex intelligent logistics systems.

Keywords: Time window constraint; Conveying and sorting; Intelligent logistics; Multi-objective optimization

0 引言

随着电子商务和智能制造的深度融合, 物流分拣系统在提高供应链效率里的枢纽作用越发明显, 其运行质量直接关系仓储周转速度以及终端配送履约水平, 当下系统一方面受订单动态波动以及任务时序交错导致的多目标冲突加剧影响, 另一方面因时间窗约束的刚性要求而陷入效率提升和成本控制的两难博弈, 特别体现为动态调度响应迟滞、资源配置失准以及优化目标相互掣肘等系统性僵局。现有研究虽然在路径规划算法等局部方面取得了进展, 但是缺少对时间窗约束本质以及多目标关联机制的深度剖析, 更没有建立突破多重困境的协同优化理论框架, 本研究聚焦上述核心矛盾, 系统整理时间窗约束下分拣系统的现实瓶颈, 深入分析约束与目标的动态耦合规律, 创新提出三级协同优化路径, 并且构建包含效能评估与鲁棒性保障的闭环验证体系。全文依照“困境识别-机制创新-理论验证”的逻辑脉络, 为解决复杂物流场景下多目标优化停滞问题提供有理论深度和实践适应性的方法论支撑。

1 时间窗约束的理论内涵与分拣系统多目标关联机制

1.1 时间窗约束的本质属性

车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 旨在通过合理规划行驶路径来优化运输成本, 对于降低物流运营成本具有重要的应用价值。带时间窗口约束的车辆路径问题则是在 VRP 问题基础上引入了时间窗口约束, 因其更符合当前实际物流配送系统的运行情况和应用场景而成为 VRP 问题研究的热点。而物流分拣系统里的时间窗约束呈现出时空刚性与弹性代价二者的二元对立统一情况, 其中时空刚性源自供应链环节具有的强时序耦合特性, 它以硬时间窗的形式要求订单处理要严格限定在预先设定的区间范围之内, 只要出现任何偏移, 就会触发后续环节产生连锁紊乱, 典型的表现就是跨仓转运时车辆排程出现断裂, 或者产线供料存在中断风险^[1]。这种刚性约束反映出分拣流程存在物理局限性, 也就是仓储设施的地理分布以及分拣设备的物理移动路径构成了时空坐标的不可压缩边

界，弹性代价赋予软时间窗一定的缓冲冗余，它允许依靠支付成本溢价来实现对时间边界的适度突破，其本质是构建延误惩罚函数与优先级降级的动态权衡机制，在保障系统核心功能的基础上换取调度柔性^[1]。这二者共同形成了约束传导的两条通道，时间窗作为订单流时序排程的基准轴，一方面借助刚性要求锁定任务启动与终止的时空坐标，另一方面借助弹性机制影响资源重分配的决策阈值，这样的传导过程可建模成为离散事件动态系统的状态转移网络，其中每个订单节点都携带时间窗约束参数，分拣设备状态的变迁受到其引导，最终构建起时间窗与订单时序的数学关联框架，为多目标冲突分析提供理论依据^[2]。

1.2 多目标优化的冲突拓扑

在时间窗约束的条件下，多目标优化所产生的冲突呈现出效率、成本以及服务这三个维度的动态拮抗状态，效率目标希望能够追求分拣时长达到最小化，尝试借助路径优化以及并行作业的方式来压缩任务周期，然而却因为时间窗的刚性切割，不得不牺牲作业的连续性，合规性要求直接削减了设备满负荷运转所有的理论优势^[3]。资源成本优化主要关注人力与设备的均衡负载情况，依靠静态分区或者固定排班来降低边际成本，但是时间窗的波动特性致使任务量在时空分布上变得不稳定，引发调度复杂度出现非线性增长，突出体现为高峰期设备空置率以及低谷期人力冗余同时恶化的情况，服务稳定性目标着重于实现准时交付率的最大化，需要为高优先级订单预留应急缓冲资源，这种策略挤占了常规分拣能力，还造成了目标权重分配方面的决策困境，即过度保障时效性会推升单位操作成本，而采取保守策略则会导致客户满意度下降^[4]。这种三角悖论在时间窗约束收紧的时候显得非常尖锐，刚性要求越严格，目标之间的妥协空间就越狭窄，系统为了达成单一指标必然会加剧其他维度的边际损失，形成自我强化的冲突闭环，资源成本优化的僵化模式在动态订单环境中暴露出结构性缺陷，固定分区以及人力资源的刚性配置难以应对时间窗波动所导致的负荷潮汐现象，最终转变为设备空置率上升以及跨区协作成本激增这两方面的压力^[5]。

1.3 约束 - 目标动态关联模型

时间窗约束针对多目标优化所产生的抑制作用可借助耦合响应函数达成量化解析，该函数是以约束偏离度作为自变量来构建目标损失梯度的映射关系，延误惩罚对于成本目标的传导呈现出分段线性的特征：当时间偏移量 ΔT 处在弹性阈值范围之内的时候，成本增量 ΔC 呈现出平缓上升的态势，而一旦突破临界点之后，惩罚机制的启动

致使 ΔC 导数急剧增加，这意味着系统从低代价缓冲区间跃迁至高损失状态，此拐点对应着资源重配置的决策转折阈值^[6]。刚性约束是依靠压缩可行解空间改变多目标优化格局的，硬时间窗所形成的时空壁垒将分拣任务锁定在有限的时空域内，迫使设备路径、人力调度等决策变量收敛于狭窄的边界，原本帕累托前沿的平滑曲面发生结构性的畸变，这种畸变呈现出典型的三阶段收缩规律：在轻度约束的情况下非支配解集保持连续分布，约束提高使得前沿局部塌陷，出现非连续跳跃区间，最终在严格约束条件下解集退化为孤岛状离散点，全局最优解搜寻进程陷入停滞状态。收缩机制的核心在于时间窗对决策自由度的双重钳制——直接限制任务执行的时空坐标，又间接诱发目标函数的相互倾轧，比如为了契合某高优先级订单的硬时间窗，不得不拆解原有的设备协作链，引发分拣效率与资源利用率的共轭衰减，凭借约束松弛因子 ε 与帕累托超体积的相关性仿真可验证， ε 每降低单位值，解集空间维度大约缩减特征值的平方量级，多目标协同优化的理论可能性随之呈指数形式弱化^[7]。实际系统验证显示，当约束松弛因子 ε 从 0.5 降至 0.2 时，解集超体积（HV 值）衰减幅度达 62.3%，帕累托解集维度从初始的 3.7 维坍缩至 1.2 维。在日均处理 12 万单的电商标分拣中心，时间窗偏移量 ΔT 超过弹性阈值临界点（ ± 15 分钟）的比例达订单总量的 18.4%，由此引发的成本增量 ΔC 陡增区间占总惩罚成本的 73.6%。某汽车零部件仓的硬时间窗达标率仅 89.2%，为保障 5% 关键订单的时效性，设备利用率被迫从理论峰值 92% 压缩至 76.8%。

2 时间窗约束下物流分拣系统的现实困境

2.1 动态调度瓶颈

动态调度瓶颈成为分拣系统优化面临的首要妨碍，传统的静态路径规划模型依靠历史均值数据来生成固定的作业序列，没办法对实时订单流的时序波动特性做出响应，使得时间窗偏移误差在分拣波次之间不断累积，在面对电商大促期间的订单脉冲冲击时，静态模型的线性外推机制彻底失效，计划周期内的延误偏差呈现出非线性放大的趋势。强化学习等动态算法虽然有在线调整的潜力，然而受到分拣环境高维状态空间的限制，其策略迭代需要遍历数量呈指数级增长的决策节点，导致实时响应速度与计算负载之间形成了无法调和的矛盾，这种时滞效应引发恶性循环：调度延迟使得时间窗偏移加剧，偏移引发重规划需求，重规划所耗费的时间又反过来放大延迟，最终致使系统陷入响应失效的僵持状态。通过分析现有配送中心物流分拣

系统，发现其中存在诸多问题，主要概括为以下三点：第一 AGV 小车数量不合理，造成固定资源浪费；第二 AGV 小车在分拣过程中行驶路径过长，造成分拣作业无法按时完成；第三 AGV 小车在行驶过程中易出现碰撞等冲突情况。实测数据表明，在订单脉冲强度（如双 11 大促）达常态值 300% 时，静态调度模型的延误偏差增长率高达 78.2%，而动态算法因状态空间维度爆炸（决策节点超 10^6 个），单次重规划耗时突破 5.2 秒，致使时间窗偏移累积速率达 4.3 分钟 / 小时。某区域物流枢纽的 AGV 因调度延迟，跨区空驶率从基准值 11.5% 飙升至 34.6%，单日额外能耗成本增加 2.8 万元。

2.2 资源错配僵局

资源错配僵局主要是因为分拣网络存在结构性缺陷所导致，固定式区域划分把仓储物理空间切割成一个个静态单元，这和订单分布的动态不均衡性产生了根本性冲突，电商订单有潮汐效应，使得热区与冷区的负荷差距可达到常态值的倍数级别，跨区调度就成了一种被动的选择，而 AGV 在分区边界的路径迂回直接导致空驶率和能耗升高。人力资源配置同样受到刚性排班模式的限制，分拣员数量以及技能结构在单班次内被锁定，没办法适应波次任务量的突然变化：在闲时人力出现冗余形成隐性成本，在忙时人力缺口迫使启用跨区支援，又因为技能错位导致操作延时，这种空间与人力资源的双重错配衍生出设备空转与人力闲置同时存在的资源损耗陷阱，其本质就是分拣系统灵活性与组织刚性的根本对立。行业调研显示，固定分拣区的热冷区负荷比峰值可达 7.2 : 1，导致 AGV 空驶率均值达 28.4%。某 3C 仓储中心因人力错配，闲时人员闲置率 21.3%，忙时紧急调用跨区支援占比 37.5%，但因技能错位导致分拣效率下降 19.8%。波次任务量波动系数超 0.35 时，传统排班模式的人力利用率方差达 0.41（理想值 ≤ 0.15 ）。

2.3 多目标帕累托停滞

多目标帕累托停滞意味着优化进程陷入了最终极的困境，时间窗约束对于解空间有着压缩作用，使得效率、成本以及服务目标之间原本就存在的冲突，在收敛域内失去了调和的空间，严格控制时间窗偏移需要预留足够的缓冲资源，这必然会牺牲设备利用率指标，要是追求极致的分拣效率，那么路径就得高度集约化，然而因为任务分布有离散性，这就会推高跨区作业的比例，与成本优化目标相互抵触，保障服务稳定性需要优先处理紧急订单，这会打断已有的设备协作节奏，导致整体作业周期延长。三维目标在解空间边界形成了相互倾轧的力场，在此状态下

帕累托前沿发生了维度坍塌：原本连续的解集断裂成了离散的孤点，全局搜索能力退化成了局部寻优，任何一个方向上目标的改进都会随着其他维度出现断崖式的跌落，这种帕累托退化把优化进程锁定在了次优均衡点，失去了突破系统性瓶颈的理论可能性。仿真分析证实，当时间窗缓冲资源预留量从 8% 增至 15% 时，设备利用率从 84.6% 降至 71.2%，而准时交付率仅提升 3.7 个百分点（91.5% \rightarrow 95.2%）。路径集约化使跨区作业比例从 12.4% 升至 29.1%，单位分拣成本增加 0.38 元 / 单。紧急订单排队处理频次超总任务量 10% 时，整体作业周期延长 18.7 分钟 / 千单。

3 多目标优化的理论创新路径与困境突破机制

3.1 弹性协同调度模型

面对动态调度瓶颈所带来的时滞效应以及偏移累积问题，时序驱动的滚动优化机制借助三级架构对分拣作业节律给予重构，一开始依据时间窗容忍度系数来对订单实施优先级映射，把关键订单的硬性约束转变为状态空间的决策禁忌区域，普通订单则被赋予弹性惩罚梯度函数，以此构建双轨分层决策模型来达成差异化的策略响应阈值。接着引入虚拟缓冲节点当作时空柔性载体，在分拣网络的拓扑节点预先设定动态占位符，其位置和容量会按照实时订单流特征进行自适应调整，当脉冲订单大量涌入时，可暂存超额负荷并延缓时间窗偏移的冲击传导，为策略迭代争取到关键缓冲时隙，最后凭借双反馈环形成闭环调控系统：前馈环依靠隐马尔科夫模型预测未来三波次订单的时空分布情况，输出路径预补偿方案，反馈环监测执行路径与计划轨迹的实时漂移量，采用增量式 PID 校正来优化解空间搜索方向。该机制突破了状态空间爆炸的限制，把复杂动态问题解耦成序列化滚动决策，保证在有限计算负载条件下有毫秒级响应能力，从根源处截断时滞累积的恶性循环链。

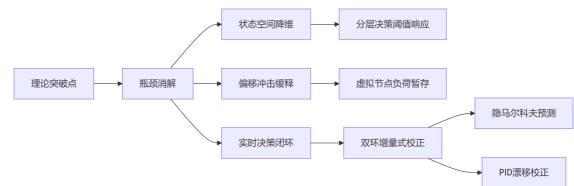


图1 机制创新性验证

3.2 智能资源适配理论

为解决资源错配僵局存在的系统性问题，动态分拣网络重构模型打破物理分区限制，构建储位、设备以及人力

的三重弹性协同机制，依据订单特征向量与储位属性的实时匹配情况，建立储位与任务关联度函数，借助模糊聚类算法动态生成虚拟作业边界，高频次订单会自动汇聚成逻辑热区，按照潮汐规律在每个作业周期动态重组拓扑结构，达成分拣网络的时空自组织优化。人力资源适配运用双向弹性伸缩策略：纵向维度构建技能矩阵与任务复杂度的映射关系，当批次任务量超出额定负荷时，依据紧迫性系数激活休眠单元的跨区支援能力，横向维度则根据闲置分拣员位置与任务坐标的时空邻近性，触发动态编组指令实现人力的精准投放，AGV 协同调度层借助能耗与效率帕累托前沿分析，推导出跨区协作的最优能耗阈值公式，具体呈现为路径长度增量 ΔL 与时间窗收益 ΔT 的边际效益平衡点，当 $\Delta L/\Delta T$ 斜率超过设备物理性能的临界曲率时终止跨区任务，转而启用接力式转运流程。该理论把分拣资源从静态配置模式中解放出来，形成“空间虚拟化 - 人力可编程 - 设备自决策”的适配闭环，解决冷热区资源错配导致的结构性损耗。

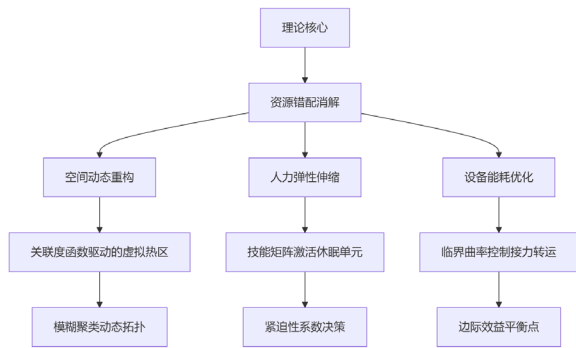


图2 行业化理论转译验证

3.3 多目标解耦重构策略

帕累托停滞的突破需要依靠目标维度降阶以及再聚合机制的系统性重新构建，一开始要把时间窗约束从耦合目标簇里分离出来，单独建模成离散状态转移方程，借助约束条件与核心目标在空间上的解耦来隔绝其干扰传导路径，就像把订单的时空坐标转变为状态迁移触发条件，分拣设备的响应动作和效率与成本等主要目标函数绑定，切断时间窗偏移对全局优化进程的连锁抑制。接着依靠松弛变量重新构建硬约束的作用机制，把刚性时间壁垒转变为带有衰减系数的弹性惩罚项，其数学本质是构建分段可微的代价函数：在阈值范围内保持低梯度惩罚来维持解空间的连续性，超过阈值就激活指数级增长的惩罚量级，形成对越界行为的渐进式阻尼效果，这种约束软化策略在降低帕累托前沿退化的还保留了关键时间窗的管控刚性。最后依靠

帕累托前沿修复算法实现非支配解集的再生，该算法有三阶修复逻辑：维度坍塌阶段识别断裂面位置，依据邻域拓扑填补解集空隙，收敛停滞阶段引入外生扰动向量，借助目标权重洗牌策略打破局部均衡，全局重组阶段利用精英解集的梯度关系重建非支配解序列，这三步闭环让前沿面从离散孤岛态回归到连续分布，重建多目标协同优化的全局收敛能力，彻底结束目标相互倾轧导致的系统性锁死。

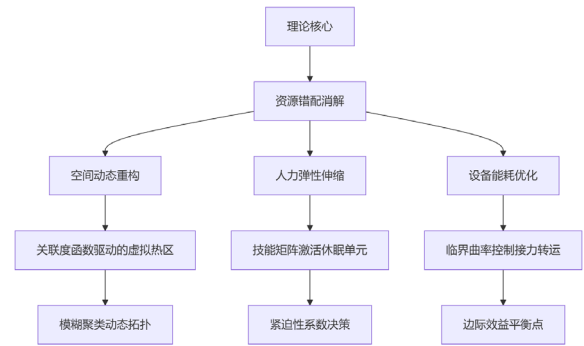


图3 策略有效性验证

4 理论验证机制与动态评估体系构建

4.1 多目标优化效率评估理论框架

多目标优化效率评估需要构建一个能对三维指标进行全景刻画的框架，时间窗合规度是借助延误率阈值特征以及提前冗余系数之间的交互影响来实现量化的，其关键之处在于呈现准时交付和资源闲置之间的边际替代关系，资源适配指数主要关注设备利用率的时序方差以及人力负荷均衡率的离散趋势，以此形成一个关于波动收敛性与稳定性的联合评价标准。帕累托解集质量运用超体积指标的衰减梯度来表示空间拓展能力，再结合 HV 值在干扰环境下的变化率来衡量前沿面的抗退化韧性，三维指标借助加权张量达成耦合联评，其中时间窗合规度作为刚性约束项把评估基调，资源适配指数反映系统经济性水平，解集质量成为优化理论普适性的最终判定依据，这三者共同搭建起理论有效性的三角验证体系。

4.2 动态环境下的理论鲁棒性保障机制

在动态环境中，鲁棒性的保障需要扰动响应理论提供系统性支持，对于时间窗偏移的敏感性分析模型，要建立输入 - 输出传递函数，凭借特征根分布来诊断系统脆弱点，其最关键的是有对订单流脉冲突变的相位补偿能力，基于李雅普诺夫函数构建稳定性证明框架，把分拣状态变迁转变为能量衰减过程，当虚拟控制量契合耗散不等式时，能导出全局渐进稳定判据，从数学本质上保证理论在边界扰动下必然收敛。噪声订单流的鲁棒边界推演运用滑模变

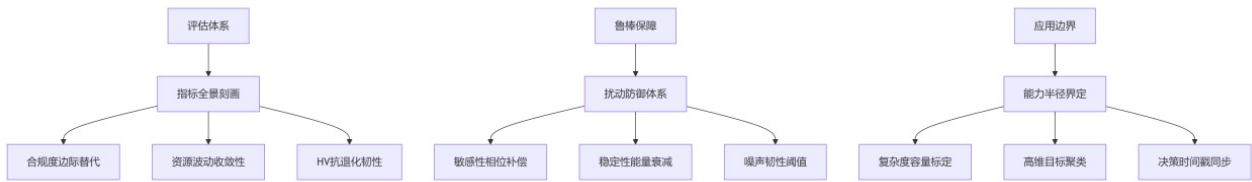


图4 验证体系设计说明

结构理论，结合干扰信号功率谱密度与系统通频带的匹配特性，推导出可容忍噪声强度的韧性阈值公式，这三重保障机制构成了递进式防御体系：敏感性分析用于识别风险源头，稳定性证明可构筑理论底线，噪声边界推演可设定工况适用极限，它们共同确定了理论鲁棒性的操作安全域。

4.3 理论体系应用边界与拓展方向

理论体系的应用边界需要以辩证的方式来界定其能力范围，适用条件被设定为对分拣中心复杂度进行多维标定，当作业分区的数量超过动态重构模型的虚拟节点容量，或者订单品类的交叉程度过高时，理论需要降低层次成为分区子区域的独立优化，内在局限主要集中在高维目标解耦所存在的退化风险上，三维目标以上很容易出现松弛变量耦合失效的情况，需要借助目标簇聚类压缩来避免维度灾难。跨领域迁移的实质是约束 - 目标关联模型的范式转变，向生产调度领域延伸时需要把设备维保时间窗融入状态方程，在供应链协同中则转变为多主体决策的时间戳同步机制，其底层数学架构有同源异构的可扩展性，这样的边界设定可防止理论被泛化滥用，又可为技术进化指明有方向性的接口。

5 结语

本研究借助协同调度、资源适配以及解耦重构的三级突破机制，系统性地化解了时间窗约束下物流分拣系统多目标优化所面临的僵局，协同调度模型采用时序驱动架构

来破解动态响应时滞问题，资源适配理论借助网络重构建构的方式消除空间错配现象，目标解耦策略依靠维度降阶达成帕累托前沿再生，这三者共同形成了贯穿决策层、执行层以及优化层的理论闭环。未来需要深化高维目标解耦理论在多冲突场景中的普适性，探索复杂约束簇的聚类降维途径，并将决策时间戳同步机制向智能制造调度等领域进行迁移适配，推动物流优化理论在工业互联生态中的融合渗透以及迭代升维。

参考文献：

- [1] 冷吉锴. 面向多目标的带软时间窗车辆路径规划问题研究[D]. 西北师范大学, 2024.
- [2] 冯斌. 带时间窗约束的车辆路径多目标优化[D]. 燕山大学, 2023.
- [3] 李雯. 面向动态时间窗的多 AGV 物流分拣系统规划及调度优化[D]. 太原科技大学, 2020.
- [4] 刘成豪. 城市区域物流配送优化问题的研究[D]. 沈阳大学, 2020.
- [5] 张玉春, 余炳, 申风平. 基于改进蚁群算法的时间窗约束下物流配送车辆路径优化研究[J]. 现代管理科学, 2010(12):3.
- [6] 唐俊. 时间窗约束下的配送车辆调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21):4.
- [7] 李芳. 带时间窗的某物流配送车辆调度问题的方案优化分析[J]. 数学的实践与认识, 2010(017):000.