Advances in Applied Mathematics 应用数学进展, 2026, 15(11), 293-307
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aam
https://doi.org/10.12677/aam.2026.1511451

Hans汉斯

作业复杂度的仓库人力配置优化研究

纪奥露

辽宁师范大学数学学院，辽宁 大连

收稿日期：2026年10月21日；录用日期：2026年11月15日；发布日期：2026年11月24日

摘　要

人工拣选仓库的任务以波次形式成批释放，同等件数的波次在空间分布上差异显著，若仅以件数衡量工作量难以反映真实的人力需求。首先，用波次涉及的库位数和巷道数构造空间复杂度，得到等效作业负荷。其次，按波次的真实释放时刻将等效负荷汇总为分时段的动态工作流建立积压状态方程，并以累计完成量不低于时限前累积释放量的线性约束描述服务时限。研究表明服务时限决定人力投入的总量，任务复杂度刻画人力在时间上分配是否合理，两者在排班模型中共同驱动人力配置决策。

关键词

仓库拣选，等效作业负荷，任务积压，空间复杂度

Research on Warehouse Workforce Allocation Optimization Considering Task Complexity

Aolu Ji

School of Mathematics, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: October 21, 2026; accepted: November 15, 2026; published: November 24, 2026

Abstract

Tasks in manual warehouse picking are released in batches in the form of waves. Even when the number of items is identical, different waves may exhibit significant differences in their spatial distributions. Therefore, workload measured solely by the number of items may fail to accurately reflect actual labor demand. First, the spatial complexity of warehouse picking is characterized by the number of storage locations and aisles involved in each wave, thereby deriving the equivalent workload. Second, based on the actual release times of picking waves, the equivalent workload is aggregated

文章引用: 纪奥露. 作业复杂度的仓库人力配置优化研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(11): 293-307.
DOI: 10.12677/aam.2026.1511451

into time intervals to establish a backlog state equation. A service deadline is then formulated as a linear constraint requiring that the cumulative completed workload be no less than the cumulative workload released before the deadline. The results show that service deadlines determine the total labor input, while task complexity characterizes whether labor is allocated appropriately over time. These two factors jointly drive workforce allocation decisions in the scheduling model.

Keywords

Warehouse Order Picking, Equivalent Workload, Task Backlog, Spatial Complexity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着电子商务与全渠道零售的发展，仓库订单出现小批量、多品种化、高频次的趋势。为提高拣选效率，便于作业的集中调度，减少拣选员往返取货次数，仓库普遍采用波次拣选方式。在这一模式下，波次构成了人力配置的规划对象。但波次化呈现出的不均衡特征，使仓库面临任务短时积压和积压时效性两大压力。拣选作为仓储作业中劳动力最密集的环节，其人工成本占据仓库运营成本的主要部分，如何在服务时限约束下，确定各时段、各班次投入多少人员成为波次化仓库面临的问题。

任务允许延后处理时会形成积压，现有模型中常对积压量设上限或在目标中加入惩罚，积压量较小并不意味着每一项任务都能按时完成，少量任务仍可能长时间滞留，因此这类近似难以保证服务时限。累积曲线方法虽可以刻画任务的停留时间，但较少用于仓库排班模型。相关研究已开始将任务时限与人员安排结合：Rijal 等[1]联合考虑拣选员班次、休息安排与订单分配，Mohring 等[2]研究仓库订单截止承诺与积压问题。

此外，围绕降低行走时间、优化拣选路径、储位分配与订单分批等方面，国内外已积累大量成果；相关综述系统梳理了这些决策，也指出联合优化多个拣选环节的重要性[3]。在工作量与人员需求研究方面，van Gils 等[4] [5]根据订单行数预测拣选工作量及人员需求，Vanheusden 等[6]研究日内工作量峰值均衡；国内刘进平、徐宁[7]将工作量均衡纳入订单分批和路径优化，薛运涛、白庆月[8]则将货量预测与人员排班结合。总体而言，现有研究较多从订单数量、行走距离或作业时间角度优化任务，空间分布对作业时间的影响多体现于执行层面；将波次空间特征进一步转化为分时段人力需求，并与积压、人数上限和服务时限统一建模，仍有拓展空间。

针对上述缺陷，本文以鞋类仓库真实波次数据为基础，刻画仓库各时段不断进入系统的实际作业负荷，在时限约束下描述积压动态过程，并通过优化各班次人员数量尽可能降低仓库人力投入。本文主要工作如下：提出基于波次空间复杂度的等效作业负荷度量。将波次涉及的库位数与巷道数构造标准化空间复杂度，将件数转化为等效作业负荷。建立含积压状态演化与累积型服务时限的混合整数线性规划模型。以积压状态方程刻画任务在时段间转移，使时限要求可以在不引入任务级变量的情况下得到处理。引入每日人数上限、软时限与核心–机动两层人力。采用字典序求解使模型在硬时限可行时自动退化为原模型。对多参数进行敏感性分析，揭示服务时限、任务复杂度与人员规模对人力配置的不同作用。

此外，实际仓库作业还存在员工个体效率差异、订单服务要求不同等现实因素。为控制模型复杂度

并突出波次空间特征、任务积压与服务时限对人力配置的影响，本文首先在统一作业效率和统一服务时限的假设下建立基准模型，并通过参数敏感性分析考察关键参数变化对优化结果的影响。在此基础上，进一步讨论员工异质性、差异化服务要求以及人员规模限制对模型实际应用的影响，为后续研究提供参考。

2. 数据与作业特征

2.1. 数据来源与清洗

本文使用某鞋厂仓储系统数据，包括订单、波次、逐件拣选、库位和人员记录等项目，覆盖 178 个有作业记录的工作日。清洗后数据包含 32,632 个订单、9707 个波次、215,192 条逐件拣选记录和 22 名拣选员。根据 768 个不同的订单创建时间戳，并按同日相邻时间间隔超过 30 分钟划分，得到 289 个派生释放批次。

在数据处理时，删除了数量非正的订单记录，将重复订单行合并数量；逐件拣选记录按波次、库位、产品和尺码汇总，并解析库位与巷道信息。波次任务件数优先采用拣选记录中的实际件数，无拣选记录时以订单件数补充；件数不一致的记录保留核对标记。

2.2. 波次件数与空间作业特征

波次件数 q_w、波次库位数 l_w 和波次巷道数 a_w 的分布呈现出不同的离散程度。如图 1，数据中约 61% 的波次恰好包含 24 件，波次件数的变异系数为 0.22；相比之下，库位数和巷道数的变异系数均约为 0.60。这表明波次件数相对集中，而波次涉及的空间范围变化较大。若只以件数衡量任务规模，可能无法区分件数相同但空间分布不同的波次。

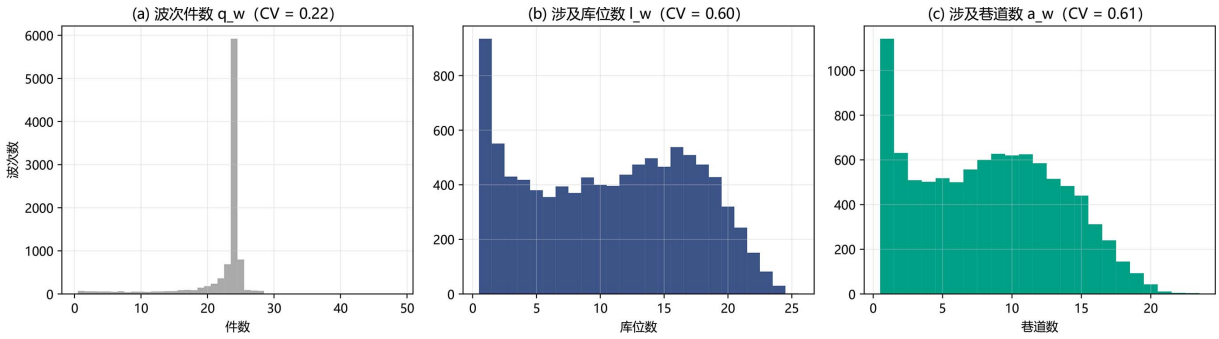


Figure 1. Chart of wave item count, wave location count and wave aisle count
图 1. 波次件数、波次库位数和波次巷道数图

根据图 2，库位数与巷道数的相关系数约为 0.95，说明两项空间特征高度相关。两者可以共同用于构造综合空间复杂度指标。图中同为 24 件的波次对应不同的等效工作量 p_w，约分布在 24 至 36 之间，直观展示了复杂度调整的区分作用。p_w 是依据复杂度公式计算出的模型指标，这种分布说明指标能够区分不同空间特征的波次，并不等同于真实拣选时长的实测验证。

2.3. 波次释放与动态负荷特征

为分析日内到达模式，本文对观测时段内的小时序列进行汇总，并补齐零到达时段，避免只保留有任务到达的小时而低估空闲区间。

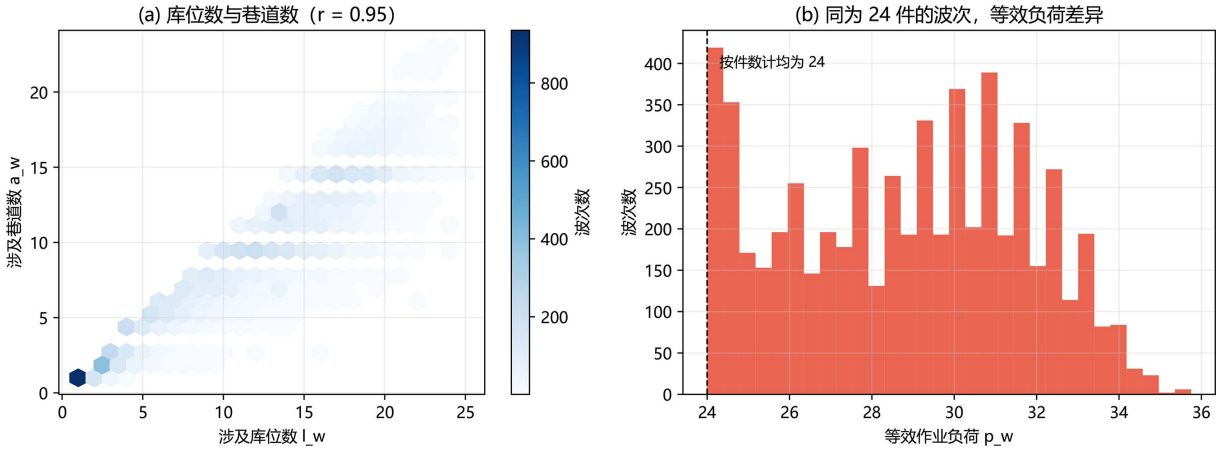


Figure 2. Chart of location count, aisle count and equivalent load
图 2. 库位数、巷道数及等效负荷图

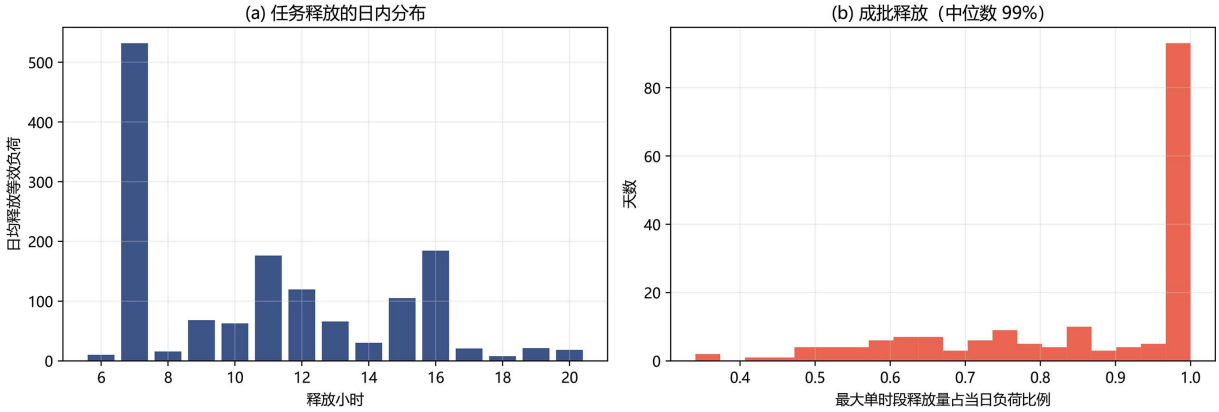


Figure 3. Chart of intra-day release distribution of tasks and its proportion
图 3. 任务日内释放分布及所占比例图

日内释放图显示任务到达具有明显的时段集中现象。根据图 3 中统计，最大单时段释放量占当日负荷比例的中位数约为 99%，表示作业负荷可能集中在少数释放时段。

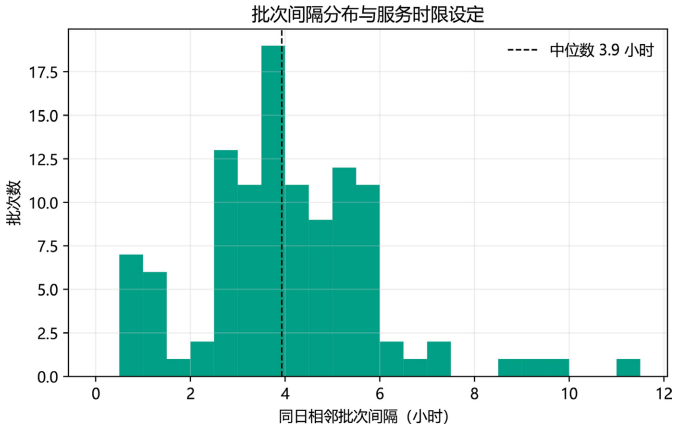


Figure 4. Chart of batch interval distribution and service time limit
图 4. 批次间隔分布与服务时限图

图 4 显示，相邻批次间隔中位数约为 3.9 小时，四分位区间约为 2.98~5.12 小时。因此，本文将 4 小时作为与经典批次间隔接近的基准服务情景，并通过不同 L 值进行敏感性分析。

2.4. 历史人员配置与负荷匹配特征

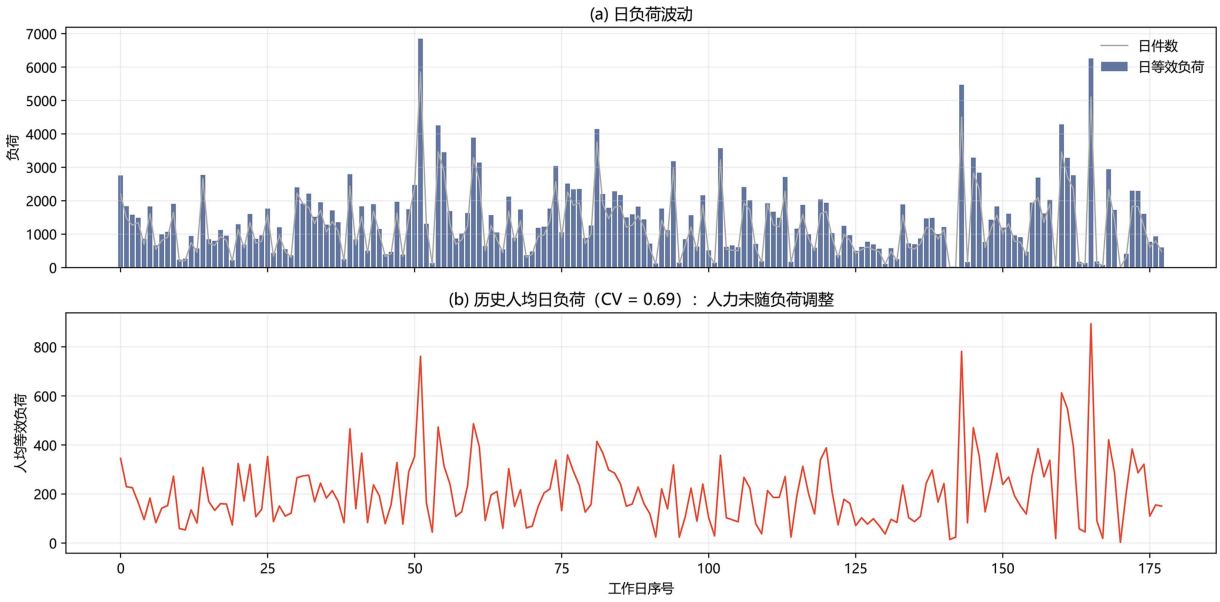


Figure 5. Daily load chart
图 5. 日负荷图

为考察历史人力配置与作业负荷的关系，本文按工作日汇总等效工作量、历史在岗拣选员人数及人均日负荷。如图 5，日等效工作量的变异系数为 0.79，历史人均日负荷的变异系数为 0.69；人均负荷的第 10 和第 90 百分位数分别约为 67 和 366，后者约为前者的 5.5 倍，这表明不同工作日的作业负荷及人员负担存在较大差异。日等效工作量与历史在岗人数的相关系数为 0.52，呈中等程度正相关，说明历史人员配置对负荷变化有所响应，但在岗人数与工作量之间仍存在较明显的波动差异。

人员档案中共有 22 名拣选员，历史单日最高在岗人数约为 11 人。若按出勤率不低于 20%的研究规则划分，可将其中 13 人归为核心员工、其余 9 人归为机动员工。该分类反映样本期内的出勤特征，不代表企业正式岗位类别。上述统计为后续人员规模约束和排班优化提供了历史参照。

由于数据未记录波次实际完成时间，本文不据此推断历史排班的真实按时完成率，而将历史人员配置用于人时和人员利用率比较。

3. 模型建立与求解

3.1. 模型假设

仓库在每个工作日 d 内若干时刻释放波次任务。波次 w 在释放时刻 r_w 进入待拣选队列，其作业量由拣选件数及空间分布共同决定。模型基于以下假设：

(1) 假设日内时间离散为等距时长，波次在其释放时刻所属时段进入系统。

(2) 假设各工作日开始时无历史积压，且当日任务当日完成。

(3) 基准模型假设所有拣选员具有相同的单位时间作业能力，以减少员工个体差异对空间复杂度影响分析的干扰。该假设主要用于研究任务负荷和服务时限对人员配置的影响，并不意味着实际仓库中的

员工效率完全一致。

(4) 每名员工每日至多承担一个班次。

(5) 作业负荷可分，同一时段内的处理能力可在待处理任务间自由分配。

3.2. 波次空间复杂度与等效作业负荷

设 $w \in \mathcal{W}_d$ 表示工作日 d 释放的一个波次。记 q_w 为波次 w 的拣选件数，l_w 为其涉及的不同库位数，a_w 为其涉及的不同巷道数。件数描述波次的数量规模，库位数和巷道数则描述拣选任务在仓库空间中的分布范围。

描述性统计显示，波次件数 q_w 的变异系数约为 0.22，而库位数 l_w 和巷道数 a_w 的变异系数分别约为 0.60 和 0.61。这说明，件数相对集中，波次空间范围的差异则更明显。若只用件数表示工作量，可能会把件数相同、但涉及空间范围不同的波次视为同一负荷。

由于库位数和巷道数的量纲及取值范围不同，先对二者进行极差标准化

$$\tilde{l}_w = \frac{l_w - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}}, \tilde{a}_w = \frac{a_w - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}.$$

其中，$l_{\min}$，$l_{\max}$ 分别为有效波次中库位数的最小值和最大值，$a_{\min}$，$a_{\max}$ 分别为巷道数的最小值和最大值。标准化后，$\tilde{l}_w$ 和 $\tilde{a}_w$ 均位于[0, 1]区间。

库位数与巷道数的相关系数约为 0.95，说明二者在样本中高度相关。本文将它们作为空间范围的两个组成特征进行加权汇总，而不将其解释为完全独立的影响因素。权重的具体选择及变化影响在后续敏感性分析中检验。

根据标准化库位数 l_w、巷道数 a_w，给出波次 w 的空间复杂度指标定义为二者的凸组合

$$C_w = \theta_1 \tilde{l}_w + \theta_2 \tilde{a}_w,$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1,\ \theta_1, \theta_2 \geq 0.$$

其中，θ_1 和 θ_2 分别表示库位数和巷道数在综合空间复杂度中的权重。

基准情景取 $\theta_1 = \theta_2 = 0.5$，即对库位范围和巷道范围赋予相同权重。考虑到两项特征高度相关，后续又通过改变权重来检验结果是否稳定。

在件数 q_w 的基础上，进一步定义复杂度调整后的等效工作量

$$q_w \leq p_w \leq (1+\rho) q_w,$$

其中，$\rho \geq 0$ 为复杂度影响系数，用于控制空间复杂度对工作量的调整幅度。基准情景取 $\rho = 0.5$。当 $\rho = 0$ 时，模型退化为仅按件数计量，即 $p_w = q_w$；当 $\rho > 0$ 时，空间复杂度较高的波次会获得更大的等效工作量。

在基准参数下，同为 24 件的波次，其等效工作量约在 24 至 36 之间，表明复杂度调整能够区分件数相同但空间特征不同的任务。

复杂度调整后的等效作业负荷为

$$p_w = q_w (1 + \rho C_w),$$

其中，参数 $\rho = 0$ 时等效负荷退化为件数，模型相应地退化为件数驱动的排版模型。

空间复杂度的广义表达为

$$C_w = \sum_{j=1}^{m} \theta_j z_{wj},$$

其中 $\sum_{j=1}^{m}\theta_j=1$，$\theta_j\ge 0$，m 表示空间复杂度指标的数量，z_{wj} 表示波次 w 的第 j 项标准化空间特征，θ_j 表示对应的权重。

需要说明的是，本文构造的空间复杂度指标主要反映波次涉及的库位范围和巷道范围，并将其作为空间作业复杂程度的代理指标，而非对实际拣选路径长度或作业时间的直接测量。库位数与巷道数在样本中具有较高相关性，因此本文将二者作为综合空间特征进行加权汇总，而不将其视为完全独立的影响因素。

3.3. 动态系统构建

(1) 动态工作流：将第 d 天释放时刻落在时段 t 内的全部波次的等效负荷汇总，得到该时段新进入系统的工作量

$$A_{dt}=\sum_{w\in\mathcal{W}_d:\,r_w\in(d,t)}p_w.$$

(2) 动态积压约束：记 p_{dt} 为工作日 d 在时段 t 实际完成的等效工作量，B_{dt} 为该时段结束时尚未完成的积压，则二者满足状态演化关系

$$B_{dt}=B_{d,t-1}+A_{dt}-P_{dt},$$

$$B_{dt}\ge 0,\quad B_{d0}=0,\quad B_{dT}=0,$$

其中 $B_{d0}=0$ 表示每日开始时无历史积压。$B_{dt}=0$ 表示当日任务清空。因此，某一时段释放的任务可以在后续时段继续处理，其未完成部分会进入积压状态。

(3) 任务释放约束

$$\sum_{\tau=1}^{t}P_{d\tau}\le\sum_{\tau=1}^{t}A_{d\tau},\ \forall t.$$

3.4. 服务时限约束

设最大允许服务时限为 L 个时段，则

$$\sum_{\tau=1}^{t}P_{d\tau}\ge\sum_{\tau=1}^{\max(0,t-L)}A_{d\tau},\ \forall t.$$

3.5. 人力处理能力与班次覆盖约束

$$Cap_{dt}=\mu n_{dt},$$

(1) 时段处理能力由在岗人数决定，实际完成量不得超过处理能力

$$P_{dt}\le\mu n_{dt},$$

(2) 采用固定班次结构时，在岗人数由各班次人数叠加而成

$$n_{dt}=\sum_{s\in\mathcal{S}}a_{st}x_{ds},\quad a_{st}\in\{0,1\},\quad x_{ds}\in\mathbb{Z}_{\ge 0},\quad n_{dt}\in\mathbb{Z}_{\ge 0}.$$

3.6. 目标函数

(1) 以最小化总人时为主目标

$$\min H=\sum_{d\in\mathcal{D}}\sum_{s\in\mathcal{S}}h_s x_{ds},\quad \min\sum_{d\in\mathcal{D}}\sum_{t\in\mathcal{T}}n_{dt}.$$

(2) 由于主目标人数曲线的平稳程度不同，为此引入人员平稳性指标作为第二目标函数

$$V=\sum_{d}\sum_{t=2}^{T}\left|n_{dt}-n_{d,t-1}\right|.$$

3.7. 模型扩展

引入人数上限、软时限与两层人力约束

(1) 在岗人数与人数上限为

$$n_{dt}=\sum_{s\in\mathcal{S}}a_{st}\left(x_{ds}+y_{ds}\right),$$

其中 x_{ds} 为核心员工人数，y_{ds} 为机动员工人数。人数受限后，大批量日可能无法满足硬时限，为此引入超时负荷 u_{dt}

$$U_d=\sum_{t}u_{dt}.$$

(2) 时限约束与日末清空约束软化为

$$\sum_{\tau=1}^{t}P_{d\tau}+u_{dt}\geq\sum_{\tau=1}^{\max(0,t-L)}A_{d\tau},\quad t<T,$$

$$\sum_{\tau=1}^{T}P_{d\tau}+u_{dT}\geq\sum_{\tau=1}^{T}A_{d\tau},\quad u_{dt}\geq 0.$$

软时限模型采用字典序求解

$$U_d^{*}=\min\sum_{t}u_{dt},$$

$$\min\sum_{s}h_s x_{ds}+\kappa\sum_{s}h_s y_{ds},\quad \text{s.t.}\quad \sum_{t}u_{dt}\leq U_d^{*}.$$

(3) 员工异质性扩展模型

设员工分为 K 类，第 k 类员工的单位时段处理能力为 μ_k，时段 t 内该类员工的在岗人数为 n_{kdt}，则处理能力约束可以扩展为

$$P_{dt}\leq\sum_{k=1}^{K}\mu_k n_{kdt}.$$

如果不同类别员工的人力成本也不同，设 c_k 为第 k 类员工的单位人时成本，则目标函数可以扩展为

$$\min H=\sum_{d\in\mathcal{D}}\sum_{t\in\mathcal{T}}\sum_{k=1}^{K}c_k c_{kdt},$$

其中 n_{kdt} 为第 k 类员工在工作日 d、时段 t 的在岗人数。

当考虑不同员工之间的作业效率差异时，可将员工划分为若干类别，并根据各类别的处理能力重新构造人力处理能力约束。上述表达式为现有模型的扩展形式，本文的基准模型仍采用统一处理能力参数 μ，以保持模型结构的一致性。

4. 实验设计

4.1. 参数设置

基准参数如表 1 所示。

Table 1. Baseline parameter table
表 1. 基准参数表

参数	取值	依据
时段长度	30 分钟	时限分辨率与模型规模的折中
θ_1,θ_2	0.5，0.5	库位数与巷道数高度相关
ρ	0.5	基准设定，敏感性范围 0~1
L	4 小时(8 个时段)	批次间隔中位数 3.93 小时
班长 h_s	4、6、8 小时	开始时段可为规划期内任一时段
μ	31.92 等效件/人/时段	人均日等效负荷 90%分位数折算
μ_q	26.69 件/人/时段	同上，按件数口径标定
N^c,N^f	13，9	核心与机动拣选员人数
K	1.5	机动人力的成本溢价

其中 μ 利用历史分派记录标定，统计每名拣选员每日所分配波次的等效负荷之和，取其 90%分位数，按每日 8 小时、共 16 个时段折算。μ 采用高分位数用来反映拣选员满负荷时的作业能力。

4.2. 模型对比

为检验等效作业负荷与动态积压机制的作用，设置以下三个对比模型，如表 2 所示。

Table 2. Comparative model settings
表 2. 对比模型设置

模型	含义
M0 历史实际	每个拣选员从第一个任务释放时开始在岗，至少工作 8 小时
M1 件数驱动	同一个 MILP，但工作量用件数 q_w，产能按件数标定($\mu_q=26.69$)
M2 本文模型	用等效负荷 p_w

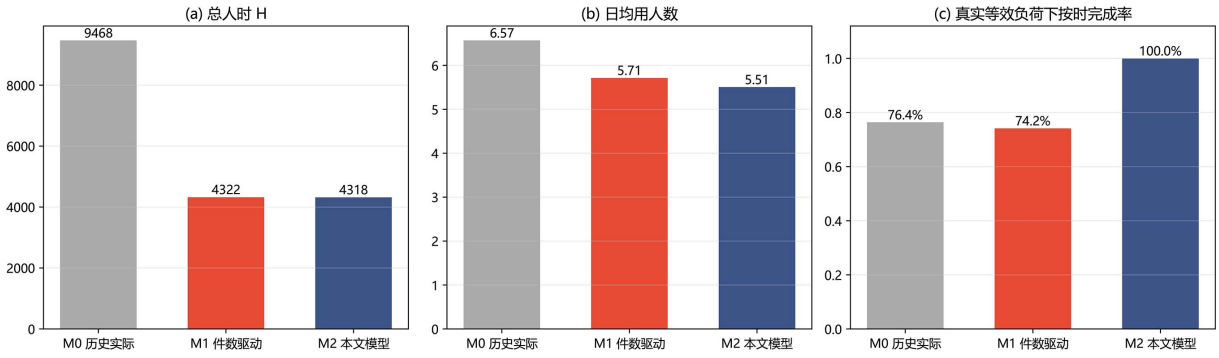


Figure 6. Model comparison chart
图 6. 各模型对比图

图 6 说明，M1 的总人时为 4322，与 M2 的 4318 接近，但在真实等效负荷下仅有 74.2%的工作日按时完成。差异体现在分配层面：M1 在复杂日低估需求，在复杂求日高估需求。M0 的总人时为 9468.5，人员利用率为 50.7%，M2 的总人时为 4318，利用率为 94.1%，说明 M1 的排班存在较多闲置人力。在人

数平稳性方面，M0、M1、M2 的日均人数波动分别为 2.92、6.86、5.02，M2 以动态人数调整换区更高的人员利用率。

将模型的服务时限取为 $L = 0$，即要求任务在释放时段全部完成，总人时由 4318 增加至 29,732，上涨将近 6.9 倍；不允许积压时，人力必须按照释放脉冲的峰值配置；允许在时限内积压，利用时间缓冲将脉冲型需求平滑为连续型需求，从而节省人力。

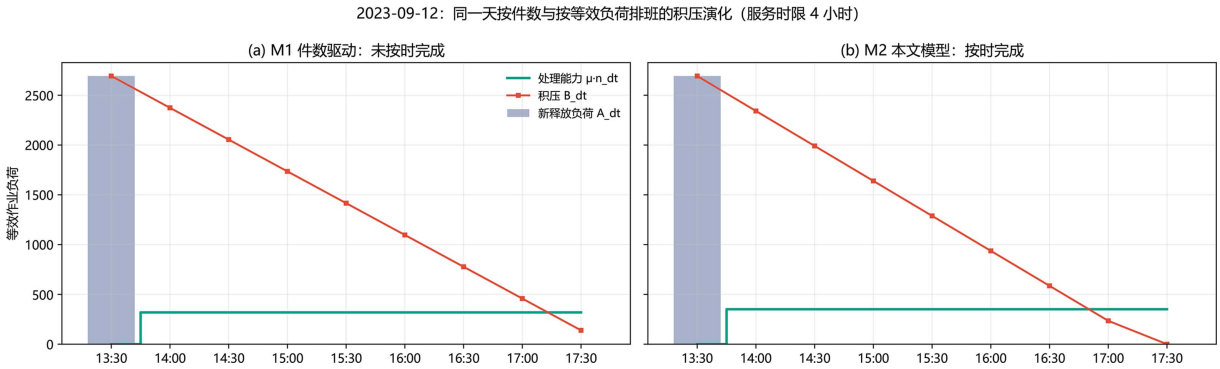


Figure 7. Chart of backlog evolution for scheduling by item count and by equivalent load on the same day
图 7. 同一天按件数与按等效负荷排班的积压演化图

图 7 说明，选取 M1 超时最严重的 2023 年 9 月 12 日，当日 13:30 一次性释放约 2700 个等效任务，M1 的处理能力约为每时段 320 人，M2 约为 350 人，在 17：30 的时效边界上，M2 的积压归零，M1 仍有约 140 个等效任务没有完成。

4.3. 敏感性分析

(1) 服务时限

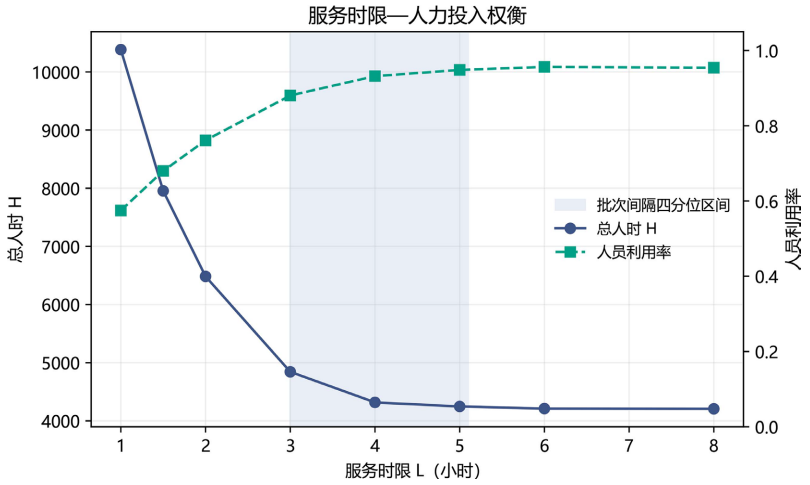


Figure 8. Trade-off chart between service time limit and manpower input
图 8. 服务时限与人力投入权衡图

根据图 8 可知，服务时限对人力投入的影响呈现明显的边际递减。由表 3，$L = 1$ 时总人时为 1,0382，人员利用率仅 57.5%；L 增至 2、3、4 小时，总人时依次降至 6484、4844、4318，利用率升至 76.1%、

88.0%、93.2%；继续放宽至 8 小时，总人时仅再下降 2.5%。每批任务只能依靠短时集中投入的人力消化；时限达到批次间隔后，前一批的处理可以延续到下一批到达，人力得以连续使用。

Table 3. Results for the influence of service time limit
表 3. 服务时限影响数据结果

服务时限 L	总人时 H	日均用人	日均峰值在岗	人员利用率	相对 $L = 8$ 的人时增幅
1	10382	13.7865	13.0169	0.5747	1.4672
1.5	7954	10.5169	9.9157	0.6799	0.8902
2	6484	8.6348	8.0393	0.7611	0.5409
3	4844	6.5562	5.9607	0.8804	0.1511
4	4318	5.7022	5.2135	0.9318	0.0261
5	4248	5.3989	5.0056	0.9483	0.0095
6	4212	4.4382	4.118	0.9565	0.001
8	4208	3.8146	3.5899	0.9543	0

(2) 复杂度影响系数 ρ。图 9 显示，ρ 从 0 增至 1 时，M2 的总人时最大变幅约为 2.6%。M1 表现随 ρ 显著恶化，按时完成率降至 55.1%，未按时天数由 0 增至 80 天，未按时天的平均超时负荷由 22.7 增至 108.5。

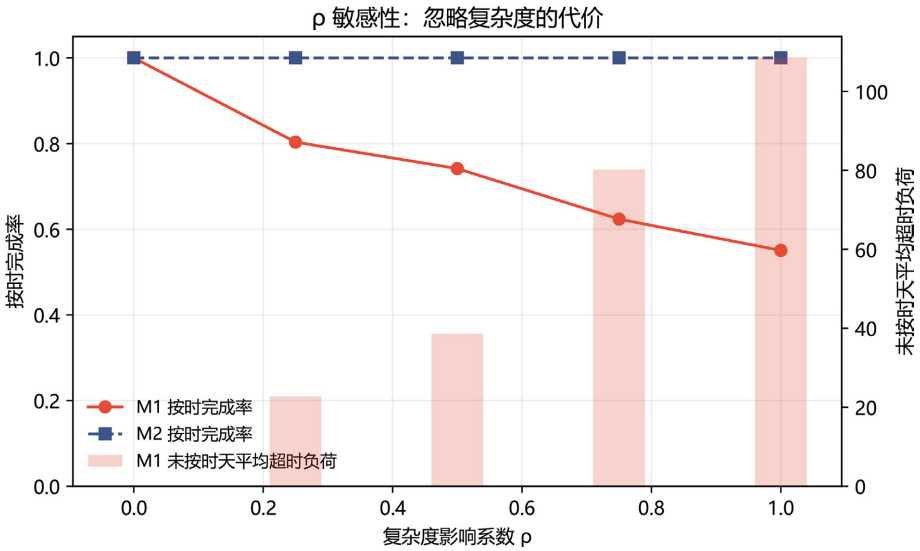


Figure 9. Sensitivity analysis of complexity influence coefficient
图 9. 复杂度影响系数敏感性分析图

又根据图 10 知，对 M2 的总人时而言，固定 L 时不同 ρ 之间的差异不超过 3.3%，固定 ρ 时 L 由 2 小时增至 6 小时可使总人时下降 34%~35%；对 M1 的按时完成率而言，固定 ρ 时不同 L 之间的差异不超过 8.5%，固定 L 时 ρ 从 0 增至 1 使其从 100%降至 47%~55%。服务时限决定需要投入多少人力，任务复杂度决定这些人力能否被正确地分配到时段上，二者不可相互替代。

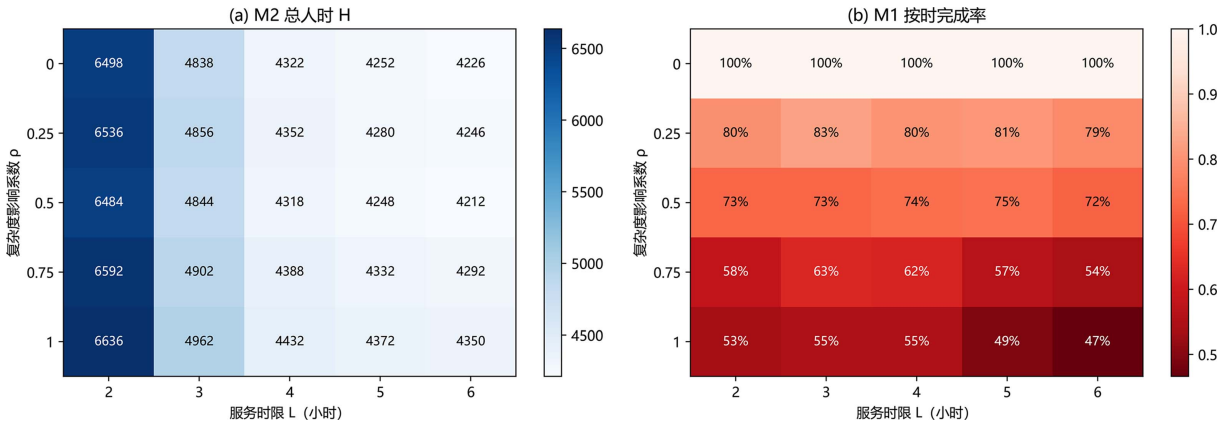


Figure 10. Relationship between complexity influence coefficient and service time limit under different models
图 10. 各模型下复杂度影响系数与服务时限关系图

从模型机制来看，空间复杂度调整的作用不仅体现在总人时的变化上，还体现在不同波次之间的相对工作量及相应人员配置的变化上。当复杂度调整系数发生变化时，波次的等效工作量随其空间特征而改变，进而影响各时段的工作负荷、任务积压及人员需求。因此，评价空间复杂度指标的作用时，除比较总人时外，还应结合按时完成情况和分时段人员配置进行分析。

对于件数驱动模型 M1，其工作量仅由波次件数决定；对于本文模型 M2，工作量则同时考虑波次件数与空间复杂度。两种模型的比较有助于分析空间特征对人员配置决策的影响。若两种模型的总人时较为接近，但在按时完成情况或分时段人员配置方面存在差异，则说明复杂度调整的作用可能更多地体现在人力配置与任务特征之间的匹配程度上，而不一定表现为总人时的大幅下降。

(3) μ 分位数。μ 由历史人均日负荷的分位数标定，分位数越高，μ 越大，即每名拣选员处理能力越强。由表 4，将分位数从 0.75 提高到 0.95，μ 由 18.29 增至 38.35，M2 的总人时相应由 7322 降至 3652。

Table 4. Results for quantile-μ sensitivity analysis
表 4. μ 分位数敏感性分析数据结果

μ 分位数	μ (等效件/人/时段)	M2 总人时	M2 日均用人	M2 单日最多用人	M2 日均峰值在岗	M1 按时完成率	M0 历史排班按时完成率	相对基准人时变化
0.75	18.29	7322	9.6629	47	8.8371	0.7135	0.4888	0.6957
0.8	21.75	6208	8.2079	40	7.5056	0.6348	0.5899	0.4377
0.85	25.16	5394	7.1517	35	6.5337	0.5056	0.6404	0.2492
0.9	31.92	4318	5.736	28	5.2528	0.736	0.764	0
0.95	38.35	3652	4.8483	23	4.4551	0.6348	0.8315	−0.1542

5. 结果分析

5.1. 参数设置

本文模型并非简单压缩人力，而是将人力从低负荷日转向高负荷日，每日最大积压均值为 1125.5，约为日均负荷 1439.4 的 78%，大部分任务在服务时限内分散消化，而非在释放时段即时处理。4 小时班次占全部人次的 83.0%，8 小时班次仅占 3.3%，班次结构呈现明显的短班倾向，同时任务集中在少数批次释放，短班更适配人力配置。

图 11 说明，以 2023 年 7 月 4 日的动态过程进行分析。当日上午 8:30~10:30 先后释放三批任务，下午 15:00 再释放约 925 个等效件。积压在每次释放时跳升，在 10:30 与 15:00 分别达到 437 与 862 的局部峰值，此后以恒定斜率下降。处理能力呈阶梯形，完成量在大部分时段与处理能力重合。上午最后一批释放于 10:30，积压在 14:30 归零；下午一批释放于 15:00，积压在 19:00 归零，均落在服务时限边界上，说明模型充分利用了时限窗口。

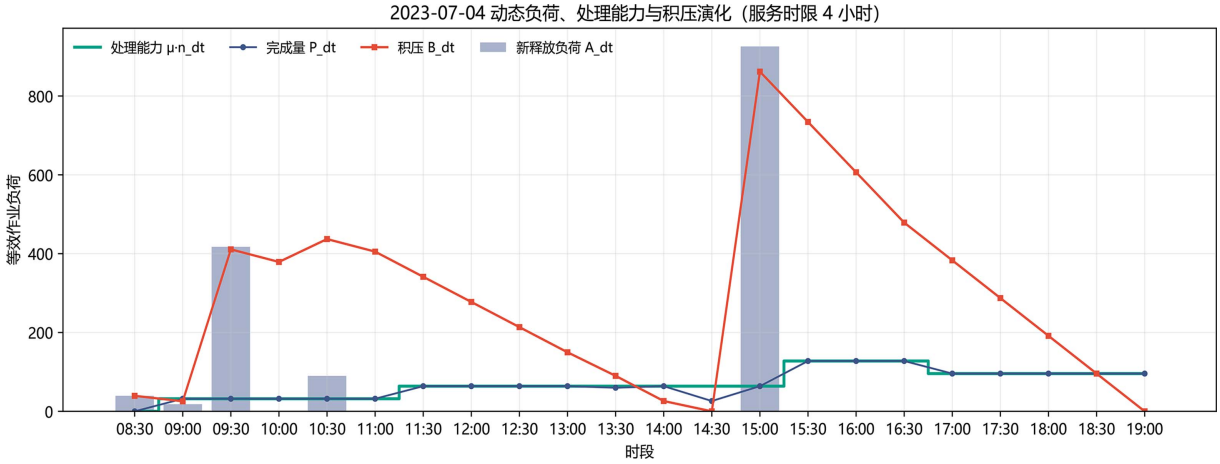


Figure 11. Chart of evolution of dynamic load, processing capacity and backlog
图 11. 动态负荷、处理能力与积压演化图

历史在岗人数在 5~8 人之间小幅波动。低负荷日仅需 1~3 人，高负荷日显著高于历史水平，最高达 28 人，超出仓库现有 22 名拣选员的规模(图 12)。

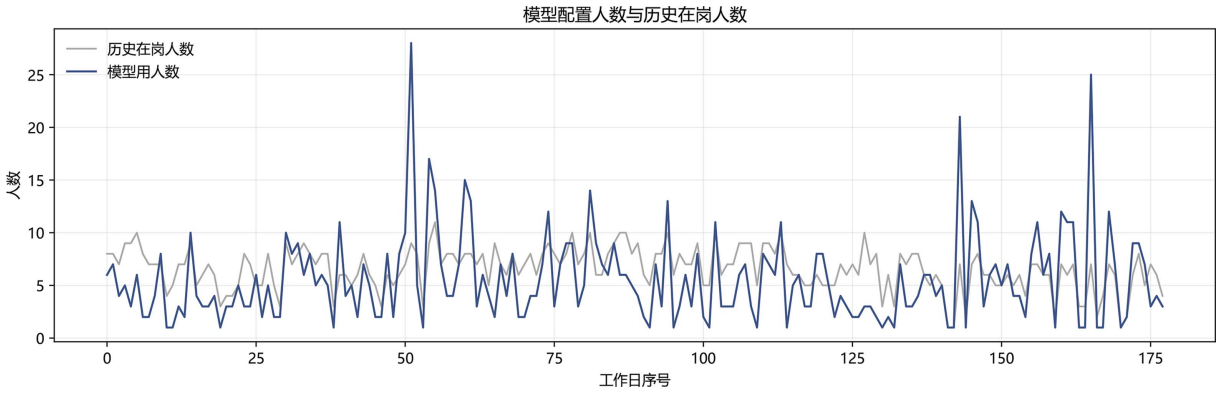


Figure 12. Chart of model-configured staff number and historical on-duty staff number
图 12. 模型配置人数与历史在岗人数图

5.2. 扩展模型

基于扩展模型，参数取 $\rho = 0.5$、$L = 4$ 小时、$\mu = 31.92$。

5.2.1. 人数上限敏感性

在单层人力结构下，令每日人数上限在 8 至 22 人之间变化。由图 13 可知，随着每日人数上限增大，超时天数由 23 天降至 1 天，总人时始终在 4326~4372 之间。人数上限约束的是峰值日的应对能力，影响

是否能按时完成任务量。上限从 8 人增至 13 人，超时天数减少 19 天；从 13 人增至 22 人，仅再减少 3 天。约 13 人已能覆盖绝大多数工作日，为核心–机动的两层人力结构提供了依据。

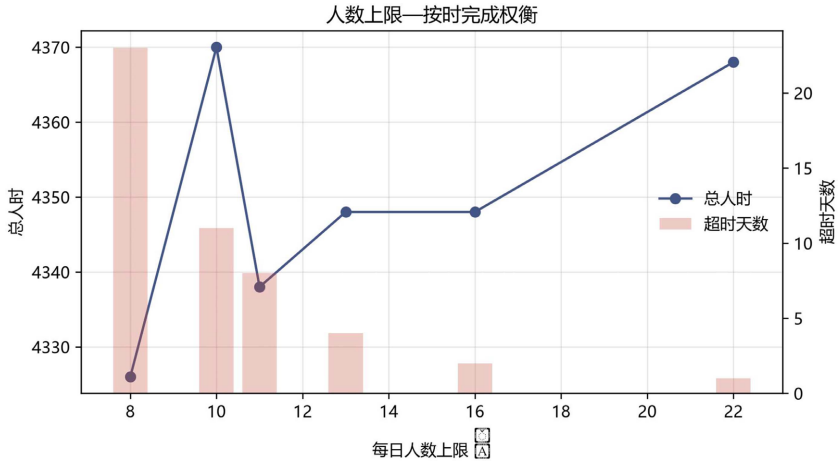


Figure 13. Upper staff limit vs on-time completion
图 13. 人数上限–按时完成图

5.2.2. 两层人力方案

基本模型有 2 天需要超出全部拣选员规模，扩展模型将每日用人限制在人员池内，两层人力方案总人时仅比基本模型增加 1.3%。与只用 13 名核心员工相比，两层方案仅在 5 个大负荷日调用机动员工，超时天数由 4 天降至 1 天，按机动人时 1.5 倍计算的人力成本只增加 2.1%。平时维持核心队伍、峰值日补充少量机动人员，即可在现有人员规模下完成几乎全部任务。

从实际管理角度看，人力配置方案不仅需要考虑总人时，还需要兼顾人员规模限制与任务集中释放所形成的短时用工压力。当核心员工数量不足以满足部分高负荷时段的处理需求时，机动人员能够在不长期扩大固定人员规模的前提下补充峰值产能。与单纯增加固定人员相比，核心–机动两层人力结构为仓库提供了更加灵活的人员调配方式。

需要指出的是，人员配置的可行性不仅取决于总人时，还受到每日可用人员数量和任务服务时限的共同约束。因此，在实际应用中，应结合仓库现有人员规模，对不同服务时限下的总人时、超时情况及峰值在岗人数进行综合评价。本文的扩展模型通过人数上限约束与机动人力配置，分析了人员规模受限时的排班效果，为仓库制定灵活排班方案提供了参考。

6. 结论

针对传统按波次件数衡量工作量、难以体现空间作业差异和时段负荷波动的问题，本文基于仓库历史作业数据构造复杂度调整工作量，并将其纳入考虑任务积压、人数上限和服务时限的动态排班模型。后续可引入更多仓库和更长周期的数据，结合实际波次完成时间、员工出勤及拣选路径，进一步校准工作量与处理能力参数，提升模型的适用性。

基金项目

辽宁师范大学实验室开放项目(项目编号：SYSKFXM2026001)；辽宁师范大学人工智能赋能本科教学改革研究项目(项目编号：Lsrgznjg202524)；辽宁师范大学教师教育实践中心专项课题(项目编号：JSJYSJZXKT2026012)；教育督导与评价工作优秀案例；课程目标达成评价优秀案例。

参考文献

[1] Rijal, A., Bijvank, M., Goel, A. and de Koster, R. (2021) Workforce Scheduling with Order-Picking Assignments in Distribution Facilities. *Transportation Science*, **55**, 725-746. https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1029

[2] Mohring, U., Jacobi, C., Furmans, K. and Stolletz, R. (2024) Managing Cutoff-Based Shipment Promises for Order Fulfilment Processes in Warehousing. *OR Spectrum*, **46**, 513-543. https://doi.org/10.1007/s00291-023-00739-7

[3] de Koster, R., Le-Duc, T. and Roodbergen, K.J. (2007) Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review. *European Journal of Operational Research*, **182**, 481-501. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009

[4] van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A. and de Koster, R.B.M. (2018) Designing Efficient Order Picking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-Art Classification and Review. *European Journal of Operational Research*, **267**, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.002

[5] Gils, T.V., Ramaekers, K., Caris, A., *et al*. (2017) The Use of Time Series Forecasting in Zone Order Picking Systems to Predict Order Pickers' Workload. *International Journal of Production Research*, **55**, 6380-6393. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1216659

[6] Vanheusden, S., Gils, T.V., Caris, A., *et al*. (2020) Operational Workload Balancing in Manual Order Picking. *Computers & Industrial Engineering*, **141**, Article 106269. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106269

[7] 刘进平, 徐宁. 考虑工作量平衡的大型商超订单分批与拣货的路径优化[J]. 大连海事大学学报, 2025, 51(2): 87-96.

[8] 薛运涛, 白庆月. 基于物流网络分拣中心货量预测及人员排班问题的研究[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2026, 41(1): 1-11.