

基于改进自适应大邻域搜索算法的电商仓库布局优化研究

骆辰辉

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年9月30日; 录用日期: 2026年10月23日; 发布日期: 2026年10月30日

摘要

随着电子商务行业快速发展和网络零售规模持续扩大, 电商仓库订单规模不断增加, 仓储作业效率和空间利用水平面临更高要求。在实际仓库改造过程中, 部分功能区受到设备安装、设施配置和业务需求等因素影响, 存在不可移动或调整受限的问题, 使传统仓库布局优化方法难以直接适用。针对部分功能区固定约束下的仓库布局优化问题, 本文以搬运成本最小化为单一目标, 并将物流量与距离的乘积作为结果分析指标, 构建考虑边界约束、不重叠约束、功能区间距约束以及固定功能区坐标约束的仓库布局优化模型, 并设计改进自适应大邻域搜索算法进行求解。算法采用双层编码方式表示可调整功能区排序关系和横向间距, 通过设计多种破坏算子与修复算子实现布局方案搜索, 并结合分段自适应权重、模拟退火接受准则、动态破坏规模调整和停滞升温机制提升算法的全局搜索能力和收敛性能。以某电商仓库为算例进行验证, 结果表明, 改进算法能够在保持1、8、10和14号功能区位置固定的条件下, 对其余功能区进行合理调整优化。优化后仓库总物流强度由12,080,300 kg·m/周降低至9,920,500 kg·m/周, 减少2,159,800 kg·m/周, 降幅达到17.88%; 周搬运成本由5167.68元降低至4243.77元, 同样降低17.88%。研究结果表明, 所构建模型能够有效解决部分功能区不可移动约束下的仓库布局优化问题, 在满足实际改造条件的基础上降低物流搬运成本, 提高仓储运行效率, 为电商企业仓库布局调整与优化提供理论依据和决策参考。

关键词

电商仓库, 固定功能区, 布局优化, 改进自适应大邻域搜索

Research on E-Commerce Warehouse Layout Optimization Based on an Improved Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm

Chenhui Luo

Abstract

With the rapid development of the e-commerce industry and the continuous expansion of online retail, the order volume of e-commerce warehouses is constantly increasing, and higher requirements are being placed on warehousing operation efficiency and space utilization. In the actual warehouse renovation process, some functional areas are affected by factors such as equipment installation, facility configuration, and business needs, resulting in some functional areas being immovable or subject to limited adjustment, making traditional warehouse layout optimization methods difficult to apply directly. This paper addresses the warehouse layout optimization problem under the constraint that some functional areas are fixed. With handling cost minimization as the single objective and the flow-distance product as a performance indicator, a warehouse layout optimization model considering boundary constraints, non-overlapping constraints, functional area spacing constraints, and fixed functional area coordinate constraints is constructed. An improved adaptive large neighborhood search algorithm is designed to solve the problem. The algorithm uses a two-layer encoding method to represent the adjustable functional area ordering relationship and lateral spacing. Various destruction and repair operators are designed to search for layout schemes. Furthermore, piecewise adaptive weights, simulated annealing acceptance criteria, dynamic destruction scale adjustment, and stagnation warming mechanism are combined to improve the algorithm's global search capability and convergence performance. A case study of an e-commerce warehouse is used for verification. The results show that the improved algorithm can reasonably adjust and optimize the remaining functional areas while keeping the positions of functional areas 1, 8, 10, and 14 fixed. After optimization, the total logistics intensity of the warehouse decreased from 12,080,300 kg·m/week to 9,920,500 kg·m/week, a reduction of 2,159,800 kg·m/week, representing a decrease of 17.88%. Weekly handling costs also decreased from RMB 5167.68 to RMB 4243.77, a reduction of 17.88%. The research results indicate that the constructed model can effectively solve the warehouse layout optimization problem under the constraint that some functional areas are immovable. It reduces logistics handling costs and improves warehousing efficiency while meeting actual renovation conditions, providing a theoretical basis and decision-making reference for warehouse layout adjustment and optimization in e-commerce enterprises.

Keywords

E-Commerce Warehouse, Fixed Functional Areas, Layout Optimization, Improved Adaptive Large Neighborhood Search

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

近年来，电子商务快速发展，订单规模扩大使仓储作业复杂度不断提升。仓库布局直接影响货物流转效率、搬运距离和运营成本。电商仓库具有品类多、订单频率高、作业需求差异大等特点，传统经验式布局已难以满足精细化运营需求。同时，受设备、设施及业务条件限制，部分功能区往往具有固定约束。因此，在固定区域约束下优化仓库布局、降低搬运成本并提升作业效率，具有较强的现实意义。

设施布局规划(Facility Layout Problem, FLP)旨在综合考虑设施间物流关系、非物流关系及空间需求,对作业单位进行合理配置,以提高物流效率并降低运营成本。该问题涉及多作业单位及复杂空间约束,属于典型的组合优化问题。Muther 提出的系统布局规划(Systematic Layout Planning, SLP)方法,为仓储设施布局优化提供了系统化方法[1]。在此基础上,Hu 等针对电子商务仓库布局问题,将 SLP 方法与遗传算法相结合,构建了以物流成本和作业关系为导向的布局优化模型,为电商仓库布局研究提供了新的思路[2];Hidayatulloh 等将 SLP 方法与共享储位相结合,对成品油漆仓库进行重新布局,有效降低了物料搬运成本[3];Rodriguez 等将 SLP 方法与工业 4.0 理念相结合,对制造实验室布局进行评价和优化,提高了生产区域的作业效率与布局适应性[4];Salins 等将 SLP 方法与精益生产技术结合应用于钢铁加工设施布局,通过减少物料流动和改善空间组织提升了设施运行效率[5],曾丹丹等针对生鲜物流配送中心布局问题,采用 SLP 方法进行初步规划,并结合仿真方法验证优化方案的合理性[6];王乾寿将 EIQ 分析与 SLP 方法结合,对企业仓储作业单位和货位进行优化[7]。在智能优化算法方面,Li 等针对冷链物流中心布局问题,构建兼顾物流成本、邻接关系和碳排放的多目标模型,并采用改进螻蛄优化算法进行求解,提高了布局方案的综合效益[8]。Garcia 等针对不等面积设施布局问题,提出多目标交互式珊瑚礁优化算法,为复杂布局问题的多目标求解提供了新的方法[9],Derakhshanasl 等以最小化物料搬运成本和不等面积动态布局中的重新布置成本为目标函数,建立数学模型,并提出了一种改进的粒子群优化算法来求解该问题[10]。Liu 等研究了多目标不等面积设施布局问题(UA-FLP),并提出了多目标粒子群优化(MOPSO)算法进行求解[11]。Prayogo 等针对布局规划中的离散问题,提出了一种名为“带局部操作符的混合共生生物搜索(HSOS-LO)”的新算法,该算法结合了经典 SOS 算法和多个局部搜索机制[12]。张青雷等以大型船舶动力部件设备车间为研究对象,以最小化物流搬运成本为目标,建立布局数学模型,在基础的粒子群算法上引入了改进策略[13]。

总体来看,现有研究已在设施布局规划、SLP 方法应用以及智能优化算法求解等方面取得了较为丰富的成果,但仍存在一定不足。本文以某电商公司仓库为研究对象,针对部分作业单位位置固定、无法随意调整的现实条件,构建以搬运成本最小化为单一目标的仓库布局优化模型,并设计改进自适应大邻域搜索算法进行优化,从而实现仓库作业单位配置、物流路径和搬运成本的协同优化,为某电商仓库布局改造及同类电商企业仓储效率提升提供参考。

2. 问题描述

因此,本文研究的问题数学模型可描述为:电商仓库为矩形,其横向长度为 X ,纵向长度为 Y 。仓库内有若干个功能区,其集合可表达为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,功能区均为矩形,功能区 i 的横向长度为 $X_i (i \in N)$,纵向长度为 $Y_i (i \in N)$ 。若干个功能区在仓库内呈多列式排列,每个功能区的边与仓库边界保持平行,中心坐标决定其占用位置。部分功能区之间存在物流联系,搬运沿正交通道进行,故用中心点曼哈顿距离近似实际行走距离。功能区集合被划分为固定集合 M 与可调整集合 L :固定区坐标由现状条件给定,优化过程中始终保持不变;可调整区可在满足空间约束的候选位置上重新布置。因物料搬运需要,在进行仓库再布局时,需要满足功能区与墙体(功能区)之间的最小预留距离。在满足一系列约束条件的情况下,决策各功能区的位置,从而达到搬运成本最小化的目标。

本文作出以下假设:

- (1) 仓库与功能区均为矩形,功能区边界与仓库边界平行,功能区不旋转;
- (2) 各功能区的尺寸、物流量和搬运方式在一个规划周期内保持稳定;
- (3) 搬运路径沿水平和垂直方向,功能区间距离用中心点曼哈顿距离表示;
- (4) 任意两个功能区不得重叠,并需保留统一的最小预留距离;

- (5) 功能区分为固定功能区和可调整功能区，固定功能区在优化过程中不可进行移动，可调整功能区可移动；
- (6) 功能区布局方式采用多列式布置，功能区可分布在仓库内若干行；
- (7) 仓库纵向长度被各行平分，排列在一行的功能区纵坐标相同。

3. 模型建立

3.1. 符号说明

数学模型的符号说明如表 1 所示。

Table 1. Symbol descriptions

表 1. 符号说明

符号	意义
集合	
N	功能区集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$
M	不可变更位置的功能区集合
L	可变更位置的功能区集合
H	功能区可分布的行数集合, $H = \{1, 2, \dots, h\}$
参数	
XS_i	初始仓库布局中功能区 i 中心坐标的横坐标
YS_i	初始仓库布局中功能区 i 中心坐标的纵坐标
X	仓库横向长度
Y	仓库纵向长度
X_i	功能区 i 的横向长度
Y_i	功能区 i 的纵向长度
Q_{ij}	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 之间的物流搬运量
d_{ij}	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 之间的搬运距离
x_{ij}	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 的横向距离
x_{i0}	功能区 $i (i \in N)$ 与仓库墙体的横向距离
$x_{\min}$	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 或仓库墙体的最小横向距离
$x_{\max}$	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 或仓库墙体的最大横向距离
y_{ij}	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 的纵向距离
y_{i0}	功能区 $i (i \in N)$ 与仓库墙体的纵向距离
$y_{\min}$	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 或仓库墙体的最小纵向距离
$y_{\max}$	功能区 $i (i \in N)$ 与功能区 $j (j \in N)$ 或仓库墙体的最大纵向距离
C_t	搬运单位时间薪资
Q	单次搬运的物流量
v_0	空载时搬运速度
v	装载时搬运速度

续表

决策变量	
x_i	功能区 i 中心坐标的横坐标
y_i	功能区 i 中心坐标的纵坐标
p_{ih}	0-1 变量: 1, 功能区 i 放在仓库的第 h 行; 否则为 0

3.2. 目标函数

本文以规划周期内搬运成本最小化为优化目标。

对于任意物流关系 $i, j \in N$, 功能区中心沿正交通道的近似搬运距离定义为横、纵坐标差的绝对值之和, 其表达式为:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (1)$$

总物流强度定义为物流量与搬运距离乘积之和(即总量距积), 其表达式为:

$$W = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} Q_{ij} d_{ij} \quad (2)$$

仓库内一次物流搬运过程由载货去程和空载返程组成, 其中去程用于完成物料装载运输, 返程则为空载返回。设物流关系 $i, j \in N$ 的中心间距离为 d_{ij} , 在载货状态下的搬运速度为 v , 在空载状态下的运行速度为 v_0 , 由于去程与返程的实际路程相同, 则一次搬运过程所需的时间为:

$$t = \frac{d_{ij}}{v} + \frac{d_{ij}}{v_0} \quad (3)$$

功能区之间的等效搬运次数由总物流量 Q_{ij} 与单次搬运能力 Q 之比确定。本文采用连续近似, 对不足一整次的搬运量向上取整, 其表达式为:

$$B = \frac{Q_{ij}}{Q} \quad (4)$$

以单位时间搬运成本乘以总搬运时间, 得到最小化成本的目标函数:

$$\min C = c \cdot \sum_{i, j \in N} \frac{d_{ij}(v_0 + v)}{v_0 \cdot v} \cdot \frac{Q_{ij}}{Q} \quad (5)$$

3.3. 数学模型

本文构建的数学模型如下:

$$\min C = c \cdot \sum_{i, j \in N} \frac{d_{ij}(v_0 + v)}{v_0 \cdot v} \cdot \frac{Q_{ij}}{Q} \quad (6)$$

$$p_{ih} p_{jh} \left(\frac{X_i + X_j}{2} + x_{ij} \right) \leq |x_i - x_j|, \quad \forall i, j \in N, i \neq j, h \in H \quad (7)$$

$$\frac{Y_i + Y_j}{2} + y_{ij} \leq |y_i - y_j|, \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (8)$$

$$\sum_{h \in H} p_{ih} = 1, \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$X \geq x_i + \frac{X_i}{2}, \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$Y \geq y_i + \frac{Y_i}{2}, \forall i \in N \quad (11)$$

$$x_{\min} \leq x_i - \frac{X_i}{2} \leq x_{\max}, \forall i \in N \quad (12)$$

$$y_{\min} \leq y_i - \frac{Y_i}{2} \leq y_{\max}, \forall i \in N \quad (13)$$

$$x_i = XS_i, \forall i \in M \quad (14)$$

$$y_i = YS_i, \forall i \in M \quad (15)$$

$$x_i \geq 0 \quad (16)$$

$$y_i \geq 0 \quad (17)$$

$$p_{ih} \in \{0, 1\} \quad (18)$$

式(6)为搬运成本最小化目标函数，式(7)和式(8)表示功能区不重叠放置约束。式(9)表示行数分布约束。式(10)和式(11)表示仓库边界约束。式(12)和式(13)表示功能区与功能区(墙体)的最小预留距离和最大预留距离约束。式(14)和式(15)表示部分功能区位置不可变更约束。式(16)到式(18)表示决策变量约束。

4. 改进自适应大邻域搜索算法设计

4.1. 编码及解码

本文使用改进自适应大邻域搜索算法对问题进行求解，设全部功能区集合为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ，划分为固定集合和可调整集合。本文采用双层编码方式，对可调整的功能区进行编码。编码长度为可调整功能区的数量 x ，第一层编码利用可调整功能区的编号进行编码，编码序列代表可调整功能区的先后安排顺序，可调整功能区的编号出现且仅出现一次。第二层编码为横向距离编码，本文设定了最小预留距离和最大预留距离，横向距离需要在这之间进行取值，取值范围为 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 。编码方式如图 1 所示。

1	3	2	8	4	5	10	6
2.12	3.14	2.54	3.21	3.48	3.26	2.98	2.17

Figure 1. Encoding method
图 1. 编码方式

解码过程需要逐层将编码转换为实际值，步骤如下：

步骤①：根据车间的行数 h 确定各行纵坐标，相邻行间距为 $Y/(h+1)$ ；

步骤②：初始化阶段 $k=0$ ，读取第一层编码获得作业单位布置顺序，读取第二层编码获得各作业单位与左侧单位或墙体的距离，并建立映射关系；

步骤③：按第一层编码顺序依次布置作业单位，根据对应距离确定位置；若当前行空间不足，则转至下一行继续布置，并令 $k=k+1$ ；

步骤④：判断 k 是否小于 n ，如小于，则继续步骤③，否则跳至步骤⑤；

步骤⑤：至此，所有作业单位放置完毕，生成布局图并计算搬运成本。

4.2. 破坏及修复算子

破坏阶段仅从可调整集合中选择功能区，固定集合不进入任何移除列表。为覆盖不同邻域结构，设置四类算子：

- (1) 随机移除。随机抽取若干可调整区，用于保持搜索多样性。
- (2) 最差贡献移除。计算每个可调整区参与的成本贡献，优先移除贡献较大的功能区，并通过偏置随机避免每次选择完全相同。
- (3) 物流关联移除。随机选择一个种子功能区，再综合直接物流量和当前空间距离选择关联度高的功能区，重构一段紧密作业链。
- (4) 空间区域移除。以随机种子为中心，移除与其几何位置接近的若干功能区，用于整体释放局部空间。

修复时，尚未插入功能区的原位置被临时保留，避免先插入的区域占用后续区域唯一可行的回退位置。设置三类算子：

- (1) 贪婪插入。按功能区物流度从高到低处理，每次选取使目标值最小的可行位置。
- (2) 后悔值插入。计算每个待插入功能区的最优与次优位置差值，优先处理失去最优位置后损失最大的功能区。
- (3) 带扰动贪婪插入。在候选评价值中加入小幅随机扰动，降低修复过程对单一局部结构的依赖。

4.3. 自适应算子权重

设算子 r 在一个统计阶段内被调用 u_r 次，累计获得奖励 π_r 。产生全局最优、改善当前解以及仅被接受的非改善解时，分别赋予 8、4 和 1 的奖励。阶段结束后按反应因子 ρ 更新权重，并设置 0.1 的下限，使低权重算子仍保留被选择的机会：

$$w \leftarrow \max \{0.1, (1 - \rho)w_r + \rho(\pi_r/u_r)\} \quad (19)$$

4.4. 模拟退火接受与动态搜索

若候选解优于当前解则直接接受；否则以温度 T 和成本增量 ΔZ 决定接受概率。该机制允许搜索在早期跨越局部障碍，并随温度下降逐步转向稳定改进。

$$P(\text{accept}) = \exp(-\Delta Z/T), \Delta Z > 0 \quad (20)$$

$$T \leftarrow \alpha T \quad (21)$$

本文进一步使用动态破坏规模：正常阶段每次移除 2~4 个功能区，连续 50 次未获得全局改进后上限增至 5；连续 80 次停滞时将温度恢复到不低于初始温度的 35%。前者扩大重构范围，后者提高跳出局部最优的概率，二者不会改变固定功能区约束。

5. 实例分析

5.1. 算例描述

现有一长 112 m、宽 108 m 的单层矩形电商仓库，共有 15 个功能区，仓库的布局图如图 2 所示。

各功能区的尺寸、面积、初始中心位置如表 2 所示，其中入库接收区受月台位置限制，温控商品存储区依赖既有制冷设施，播种分拣区与输送线固定连接，出库暂存区受出库月台限制，故将 1、8、10 和 14 号设为固定区。功能区与外墙的基础安全距离为 1 m，相邻功能区及最左、最右功能区与墙体的横向间距均限制在 2~4 m，其余功能区允许调整。

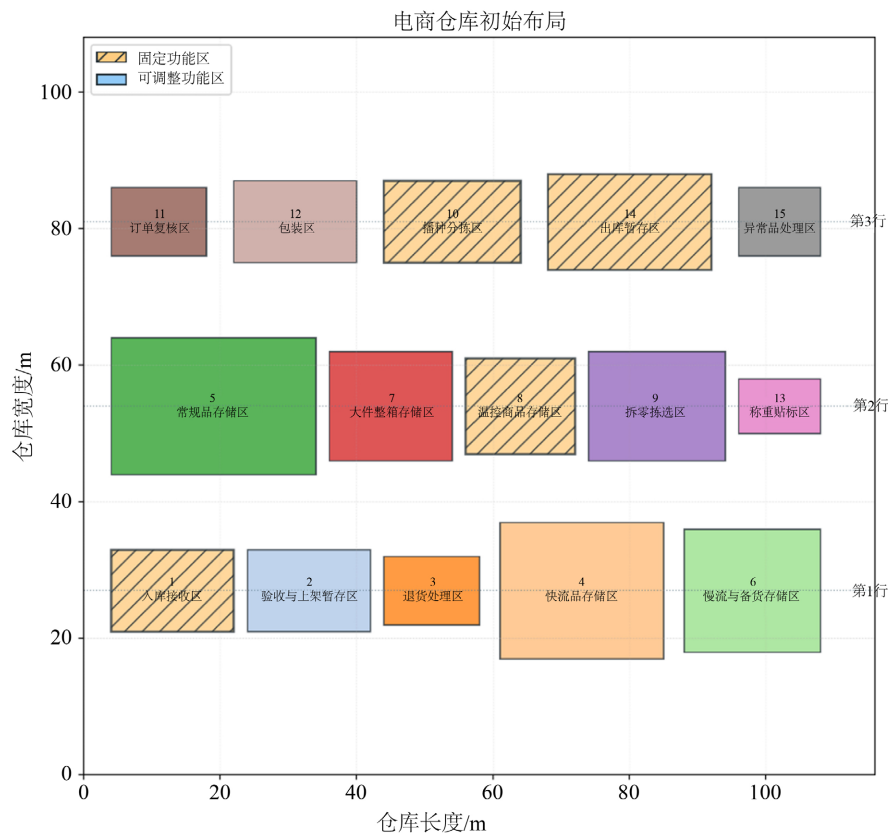


Figure 2. Initial warehouse layout
图 2. 仓库初始布局图

Table 2. Dimensions, attributes, and initial center coordinates of functional areas
表 2. 功能区尺寸、属性与初始中心坐标

编号	功能区	尺寸/m	面积/m ²	固定	初始中心/m
1	入库接收区	18 × 12	216	是	(13, 27)
2	验收与上架暂存区	18 × 12	216	否	(33, 27)
3	退货处理区	14 × 10	140	否	(51, 27)
4	快流品存储区	24 × 20	480	否	(73, 27)
5	常规品存储区	30 × 20	600	否	(19, 54)
6	慢流与备货存储区	20 × 18	360	否	(98, 27)
7	大件整箱存储区	18 × 16	288	否	(45, 54)
8	温控商品存储区	16 × 14	224	是	(64, 54)
9	拆零拣选区	20 × 16	320	否	(84, 54)
10	播种分拣区	20 × 12	240	是	(54, 81)
11	订单复核区	14 × 10	140	否	(11, 81)
12	包装区	18 × 12	216	否	(31, 81)
13	称重贴标区	12 × 8	96	否	(102, 54)
14	出库暂存区	24 × 14	336	是	(80, 81)
15	异常品处理区	12 × 10	120	否	(102, 81)

算例物流量按周统计，单位为 kg/周，功能区之间的物流量如表 3 所示。单次搬运能力为 200 kg，装载速度为 60 m/min，空载速度为 45 m/min，单位时间成本为 2.20 元/min。

Table 3. Weekly logistics flow between functional areas (kg/week)
表 3. 功能区间周物流关系(kg/周)

序号	物流起点	物流终点	物流量 kg/周
1	1 入库接收区	2 验收与上架暂存区	24,000
2	1 入库接收区	3 退货处理区	4000
3	2 验收与上架暂存区	4 快流品存储区	7000
4	2 验收与上架暂存区	5 常规品存储区	8400
5	2 验收与上架暂存区	6 慢流与备货存储区	3000
6	2 验收与上架暂存区	7 大件整箱存储区	2400
7	2 验收与上架暂存区	8 温控商品存储区	1800
8	2 验收与上架暂存区	15 异常品处理区	1400
9	3 退货处理区	4 快流品存储区	900
10	3 退货处理区	5 常规品存储区	1300
11	3 退货处理区	7 大件整箱存储区	300
12	3 退货处理区	8 温控商品存储区	200
13	3 退货处理区	15 异常品处理区	900
14	4 快流品存储区	9 拆零拣选区	14,400
15	5 常规品存储区	9 拆零拣选区	10,000
16	6 慢流与备货存储区	9 拆零拣选区	3200
17	7 大件整箱存储区	9 拆零拣选区	2600
18	8 温控商品存储区	9 拆零拣选区	1800
19	9 拆零拣选区	10 播种分拣区	32,000
20	10 播种分拣区	11 订单复核区	31,000
21	10 播种分拣区	15 异常品处理区	1000
22	11 订单复核区	12 包装区	29,900
23	11 订单复核区	15 异常品处理区	1100
24	12 包装区	13 称重贴标区	29,400
25	12 包装区	15 异常品处理区	500
26	13 称重贴标区	14 出库暂存区	29,000
27	13 称重贴标区	15 异常品处理区	400
28	15 异常品处理区	3 退货处理区	400
29	14 出库暂存区	1 入库接收区	2400

5.2. 实验结果

本文使用python及pycharm进行程序撰写和实验，算法参数设置如下：最大迭代次数为500，随机种

子为42，统计阶段长度为25，反应因子 $\rho = 0.20$ 。初始温度设为 $T_0 = 0.05Z_0$ ，降温系数 $\alpha = 0.995$ ，候选位置样本数为180。动态破坏规模设为2~4，算法停滞上限调整为5；连续停滞80次时进行升温，使温度恢复至不低于 $0.35T_0$ 。

利用5.1中的算例进行实验，得到改进自适应大邻域搜索算法的优化结果如图3所示。

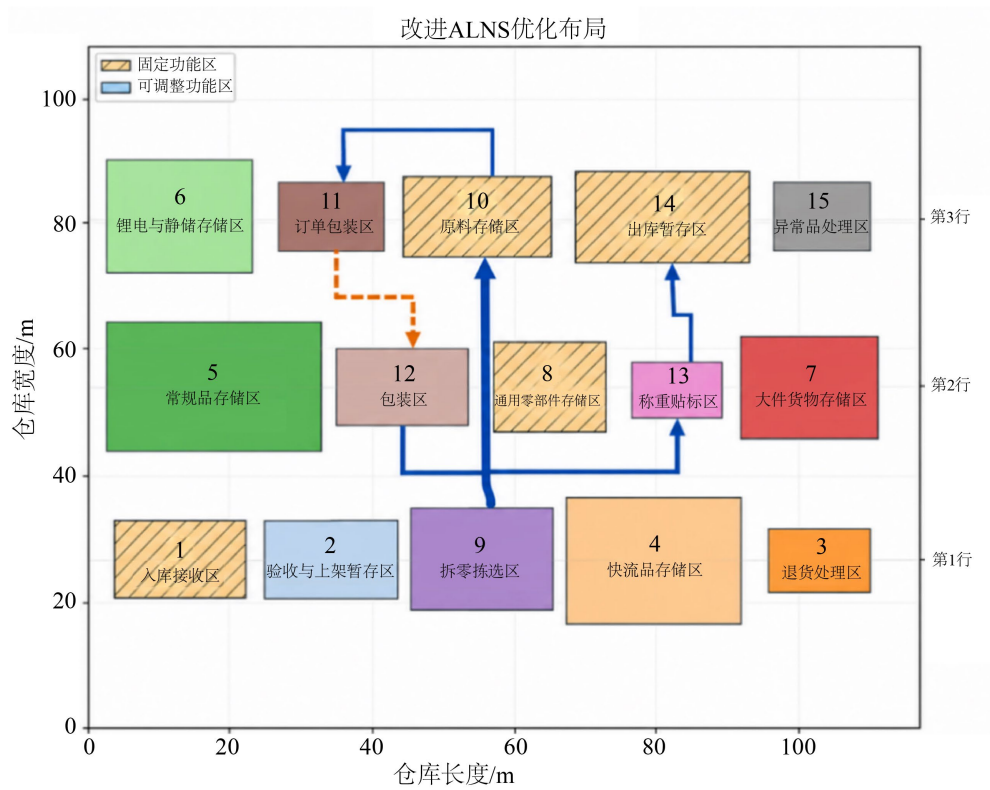


Figure 3. Optimized warehouse layout and main logistics flows
图3. 优化后的仓库布局及主要物流关系

优化后的各作业单位中心坐标如表4所示。

Table 4. Coordinates of each work unit after algorithm optimization
表4. 算法优化后的各作业单位坐标

编号	功能区	所在行	中心 X (m)	中心 Y (m)
1	入库接收区	1	13	27
2	验收与上架暂存区	1	34	27
3	退货处理区	1	102	27
4	快流品存储区	1	79	27
5	常规品存储区	2	18	54
6	慢流与备货存储区	3	13	81
7	大件整箱存储区	2	100	54
8	温控商品存储区	2	64	54
9	拆零拣选区	1	55	27

续表

10	播种分拣区	3	54	81
11	订单复核区	3	34	81
12	包装区	2	44	54
13	称重贴标区	2	81	54
14	出库暂存区	3	80	81
15	异常品处理区	3	102	81

由图 3 和表 4 可知, 在 1、8、10 和 14 号功能区坐标保持不变的条件下, 其余功能区通过重新组合与跨行调整形成新的布局。10→11、12→13 及 13→14 的中心距离明显缩短, 而部分关系的距离增加。优化方案满足设定的仓库边界、不重叠、行中心以及横向间距约束。为进一步解释成本变化, 按表 3 的周物流量及表 2、表 4 的中心坐标计算关键功能区对的量距积, 结果见表 5。

Table 5. Comparison of load-distance products of key functional areas before and after optimization

表5. 关键功能区对优化前后的量距积比较

功能区对	物流量 (kg/周)	优化前距离 (m)	优化后距离 (m)	优化前量距积 (kg·m/周)	优化后量距积 (kg·m/周)	量距积变化 (kg·m/周)	降幅 %
1→2	24,000	20	21	480,000	504,000	+24,000	+5.00
4→9	14,400	38	24	547,200	345,600	-201,600	-36.84
5→9	10,000	65	64	650,000	640,000	-10,000	-1.54
9→10	32,000	57	55	1,824,000	1,760,000	-64,000	-3.51
10→11	31,000	43	20	1,333,000	620,000	-713,000	-53.49
11→12	29,900	20	37	598,000	1,106,300	+508,300	+85.00
12→13	29,400	98	37	2,881,200	1,087,800	-1,793,400	-62.24
13→14	29,000	49	28	1,421,000	812,000	-609,000	-42.86
1→3	4000	38	89	152,000	356,000	+204,000	+134.21
6→9	3200	41	96	131,200	307,200	+176,000	+134.15
其余关系	—	—	—	2,062,700	2,381,600	+318,900	+15.46
全部关系	—	—	—	12,080,300	9,920,500	-2,159,800	-17.88

优化结果表明, 改进后的布局有效降低了仓库整体搬运成本。周搬运成本由 5167.68 元降至 4243.77 元, 减少 923.91 元, 降幅为 17.88%, 总量距积由 12,080,300 kg·m/周降至 9,920,500 kg·m/周, 减少 2,159,800 kg·m/周。在保持固定功能区位置不变、满足既定空间约束的条件下, 通过调整可移动功能区的位置与组合关系, 仍可实现较为明显的成本改善, 体现了布局优化对既有仓库搬运作业的改善作用。从关键功能区之间的物流联系来看, 优化收益主要集中于包装、称重贴标及出库衔接等高物流量作业环节。受固定功能区位置及空间约束影响, 部分功能区之间的搬运距离有所增加。然而, 从整体布局来看, 各改善关系带来的量距积减少量合计为 3,487,000 kg·m/周, 高于其他关系增加的 1,327,200 kg·m/周, 最终实现总量距积净减少 2,159,800 kg·m/周。这说明, 优化方案通过综合协调不同功能区之间的物流联系, 将有限的布局调整空间用于改善对总成本影响较大的作业关系, 从而获得整体搬运成本的下降。算例结果验证了所构建模型与算法在部分功能区固定条件下改善仓库布局的有效性。

5.3. 讨论

本文将功能区简化为尺寸固定、边界与仓库平行的矩形，且不允许旋转，便于处理固定设施与空间约束，但不能刻画不规则区域，也可能排除通过旋转获得的更优方案。距离采用中心点曼哈顿距离，未显式考虑出入口位置、障碍绕行和通道拥堵，因此计算成本与实际搬运成本可能存在偏差，布局方案的优劣排序也可能受到影响。本文结果适用于上述简化条件下的方案比较，实际实施前仍需结合通道网络和实测搬运距离。

6. 结论

本文研究了部分功能区位置固定条件下的电商仓库布局优化问题，以搬运成本最小化为目标，建立了考虑仓库边界、功能区不重叠、通道间距及固定位置约束的数学模型，并设计改进自适应大邻域搜索算法进行求解。

以包含 15 个功能区的电商仓库为例，在保持 4 个固定功能区位置不变的条件下，优化后的周搬运成本由 5167.68 元降至 4243.77 元，降低 17.88%，总量距积减少 2,159,800 kg-m/周。尽管部分物流关系的距离有所增加，关键作业环节的改善仍使整体搬运成本明显下降。研究表明，对于部分功能区无法移动的既有仓库，通过调整其余功能区的位置及相互关系，可以在现有空间条件下降低搬运成本。

参考文献

- [1] Muther, R. (1973) Systematic Layout Planning. Cahnners Books.
- [2] Hu, X. and Chuang, Y. (2022) E-Commerce Warehouse Layout Optimization: Systematic Layout Planning Using a Genetic Algorithm. *Electronic Commerce Research*, **23**, 97-114. <https://doi.org/10.1007/s10660-021-09521-9>
- [3] Hidayatulloh, R. and Cahyana, A.S. (2024) Re-Layout Gudang Cat Jadi Menggunakan Metode SLP dan Shared Storage Untuk Meminimalkan Ongkos Material Handling. *Procedia of Engineering and Life Science*, **7**, 198-206. <https://doi.org/10.21070/pels.v7i0.1440>
- [4] Rodriguez, L., Loyo, J. and Silva, U. (2023) Layout Evaluation with the Industry 4.0 Approach for a Manufacturing Laboratory. *International Journal of Simulation Modelling*, **22**, 551-561. <https://doi.org/10.2507/ijssimm22-4-642>
- [5] Salins, S.S., Zaidi, S.A.R., Deepak, D. and Sachidananda, H.K. (2024) Design of an Improved Layout for a Steel Processing Facility Using SLP and Lean Manufacturing Techniques. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, **18**, 3827-3848. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01828-9>
- [6] 曾丹丹, 陈晓苑. 基于 SLP 的生鲜物流配送中心布局优化[J]. 物流技术, 2023, 42(1): 91-94.
- [7] 王乾寿. 基于 EIQ 模型和 SLP 方法的 A 公司仓储优化研究[J]. 物流工程与管理, 2022, 44(9): 34-38.
- [8] Li, J. and Zhou, Q. (2024) Cold Chain Logistics Center Layout Optimization Based on Improved Dung Beetle Algorithm. *Symmetry*, **16**, Article 805. <https://doi.org/10.3390/sym16070805>
- [9] Garcia-Hernandez, L., Salas-Morera, L., Carmona-Muñoz, C., Abraham, A. and Salcedo-Sanz, S. (2020) A Novel Multi-Objective Interactive Coral Reefs Optimization Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, **55**, Article 100688. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100688>
- [10] Derakhshan Asl, A. and Wong, K.Y. (2017) Solving Unequal-Area Static and Dynamic Facility Layout Problems Using Modified Particle Swarm Optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **28**, 1317-1336. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1053-5>
- [11] Liu, J., Zhang, H., He, K. and Jiang, S. (2018) Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Objective Space Division for the Unequal-Area Facility Layout Problem. *Expert Systems with Applications*, **102**, 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.02.035>
- [12] Prayogo, D., Cheng, M., Wu, Y., Redi, A.A.N.P., Yu, V.F., Persada, S.F., *et al.* (2020) A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning. *Algorithms*, **13**, Article 117. <https://doi.org/10.3390/a13050117>
- [13] 张青雷, 张帆, 段建国. 基于 DMP SO 算法的大型船舶动力部件生产车间布局优化[J]. 中国机械工程, 2020, 31(3): 344-351.