Management Science and Engineering 管理科学与工程, 2026, 15(6), 1114-1128
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mse
https://doi.org/10.12677/mse.2026.156108

Hans汉斯

基于2-Opt的小型电商仓库拣选路径优化与物流工程应用

穆巴来克·阿不都木里克

江西理工大学商学院，江西 南昌

收稿日期：2026年10月2日；录用日期：2026年10月24日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

针对小型电商仓库人工拣选中路径依赖经验、重复行走和局部折返的问题，从物流工程作业改善与工业工程方法研究的角度，提出基于最近邻与2-opt局部搜索的单订单路径优化方法。在可沿行列方向连续通行的理想网格假设下，将仓库抽象为带权图，以曼哈顿距离构建旅行商问题模型，并以固定行列顺序为基准、枚举最优解为质量参照开展仿真。以6 × 10储位布局、30种商品和100条加权随机订单为算例，固定行列顺序、最近邻及最近邻-2-opt的总距离分别为2132、2026和1920个网格距离单位，后两者相对基准分别降低4.97%和9.94%；最近邻-2-opt与枚举最优总距离1910相比相差0.52%。不同订单规模与10组随机种子分析支持其在所设情景下的稳定性。进一步给出算法伪代码、Excel VBA与Python原型实现方案，以及数据准备、人员分工、试运行和绩效验收步骤。该方法可为小型仓库的拣选路径标准化与物流系统工程改进提供参考，但实际通道适配、工时收益及部署成本仍需现场验证。

关键词

物流工程，工业工程，小型电商仓库，订单拣选，路径优化，2-Opt算法

2-Opt-Based Order Picking Route Optimization and Logistics Engineering Applications in Small E-Commerce Warehouses

Mubalaike·Abudumulike

Business School, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang Jiangxi

Received: October 2, 2026; accepted: October 24, 2026; published: November 3, 2026

文章引用: 穆巴来克·阿不都木里克. 基于 2-Opt 的小型电商仓库拣选路径优化与物流工程应用[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(6): 1114-1128. DOI: 10.12677/mse.2026.156108

Abstract

To address experience-dependent routing, redundant walking, and local backtracking in small e-commerce warehouses, this study develops a single-order routing method combining the nearest-neighbor heuristic with 2-opt local search from the perspective of logistics engineering and industrial engineering method improvement. Under an ideal grid assumption allowing continuous row-wise and column-wise travel, the warehouse is represented as a weighted graph and formulated as a traveling salesman problem using Manhattan distances. A fixed row-column sequence serves as the baseline, and complete enumeration provides the optimal benchmark. For a 6 × 10 layout with 30 products and 100 weighted random orders, the total distances of the baseline, nearest-neighbor, and nearest-neighbor-2-opt methods are 2132, 2026, and 1920 grid-distance units, respectively. The latter two methods reduce distance by 4.97% and 9.94%, while the nearest-neighbor-2-opt result is 0.52% above the enumerated optimum of 1910. Analyses of different order scales and ten random seeds support stability within the simulated scenarios. Algorithm pseudocode, prototype implementation proposals using Excel VBA and Python, and practical steps for data preparation, staffing, pilot operation, and performance acceptance are also provided. The method offers a reference for standardized picking routes and logistics systems improvement, while adaptation to actual aisles, labor-time benefits, and deployment costs require field validation.

Keywords

Logistics Engineering, Industrial Engineering, Small E-Commerce Warehouse, Order Picking, Route Optimization, 2-Opt Algorithm

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

电子商务订单具有小批量、多品种和高频响应等特征，小型电商仓库仍较多依赖人工拣选，储位访问顺序容易受经验影响，进而产生局部折返和重复穿行。受资金与信息化基础限制，此类仓库通常难以配置复杂自动化设备和实时路径系统。因此，构建数据需求较低、过程透明且便于执行的拣选路径优化方法具有现实意义。从物流工程与工业工程视角看，拣选路径规划属于设施内物料流动组织和作业方法改善问题，应同时关注路线可行性、人员执行和现场绩效。

从组合优化角度看，订单拣选路径与旅行商问题(Traveling Salesman Problem, TSP)具有较强的结构相似性。TSP 的核心是在给定节点集合中确定访问顺序，使从起点出发、遍历全部节点并返回起点的总距离最小。Dantzig 等[1]较早对大规模 TSP 的求解进行了经典研究，Croes [2]对 TSP 局部改进方法进行了早期研究，Lin 和 Kernighan [3]进一步发展了高质量启发式算法，Laporte [4]系统总结了 TSP 精确与近似求解方法。将仓库出入口作为起终点、订单商品储位作为待访问节点后，单订单拣选过程可以转化为带权图上的 TSP 闭合路径问题，从而为拣选路径优化提供较为清晰的数学表达。

围绕人工仓库订单拣选，Ratliff 和 Rosenthal [5]将矩形仓库拣选刻画为 TSP 的可解特例；Hall [6]研究人工拣选距离估计；Petersen [7]比较 S-shape、Return、Largest Gap 等路径规则；Roodbergen 和 de Koster [8]研究带中间横通道的拣选路径。de Koster 等[9]指出路径规划是人工拣选系统的重要决策之一，Theys 等[10]进一步验证了 TSP 启发式方法在仓库拣选中的适用性。

近年来，仓库优化逐渐向自动化与协同调度扩展。朱杰等[11]研究分类存储与人工拣选效率；陈方宇等[12]考虑多拣货员拥堵；王旭坪等[13]研究 B2C 订单拣选与配送联合调度；李昆鹏等[14]研究“货到人”系统 AGV 路径规划与调度；徐翔斌和马中强[15]综述移动机器人拣货系统；赵金龙等[16]研究考虑配送截止时间的“货到人”订单拣选。上述研究对复杂作业环境的刻画不断深化，但其数据和设备条件与小型人工仓库并不完全一致，后者更需要简单、可解释且便于执行的路径方案。

在工程实施层面，Grosse 等[17]提出将人的因素纳入拣选规划模型；Grosse 等[18]进一步从人因工程角度分析人工拣选系统设计与管理研究。这些研究提示，算法输出应与现场作业方法、人员培训及差错控制相衔接，距离最短并不自动意味着整体作业绩效最优。本文据此将路径计算与原型系统设计、标准作业和试运行评价相结合，突出面向小型仓库的物流工程应用。

基于此，本文面向规则网格型小型电商仓库，将出入口和商品储位抽象为带权图节点，以曼哈顿距离构建距离矩阵，并将单订单拣选转化为 TSP 闭合路径问题。以固定行列顺序为基准，采用最近邻算法生成初始路径，再以 2-opt 局部搜索改进访问顺序，并利用枚举最优解评价启发式方法的求解质量。本文重点考察最近邻-2-opt 能否稳定缩短拣选距离及其与理论最优解的差距，并通过不同订单规模和随机种子实验检验稳定性。本文的贡献定位于既有启发式方法在简化仓储场景中的应用验证及实施方案设计，不涉及新的 2-opt 算法理论；工程实施方案见第 5.2 节。

2. 问题描述与数据设定

2.1. 仓库布局与基本假设

研究对象为一个小型人工拣选型电商仓库。为便于建模，将仓库抽象为规则二维网格，共设 6 行、10 列、60 个候选储位；从中选取 30 个储位放置 30 种商品，商品编号为 A1 至 A30。出入口设为 $O=(0,0)$，拣选员从出入口出发，依次访问订单中包含的商品储位，并最终返回出入口。商品储位坐标与出库频次设定如表 1 所示。仓库布局与商品分布见图 1；图中储位坐标表示拣选服务点，布局为理想化仿真示意，不表示可以穿越实体货架。

为保证模型可解释且方案可比，采用以下假设：第一，储位以拣选服务点表示，行、列相邻位置的间距均归一化为 1 个距离单位，任意相关节点间存在长度等于曼哈顿距离的可行水平–垂直通路，且出入口与网格连通；第二，暂不考虑实体货架造成的绕行、拥堵、临时封闭和设备干扰；第三，同一订单中同一商品最多出现一次，每个商品节点完成一次拣取服务；第四，拣选员一次处理一条订单，不考虑合批、载重容量和多拣选员协同；第五，成本仅计行走距离，不计拿取、扫码、复核和包装时间；第六，各路径方案采用相同布局、商品坐标和订单集合。服务节点在访问序列中不重复，不意味着实际通行中禁止重复经过同一通道或位置。

2.2. 订单生成规则

为模拟“少数商品高频出库、多数商品低频出库”的结构，表 1 中的出库频次作为仿真预设相对权重，用于控制商品抽取概率，并非实际企业统计。单订单包含 2~6 种商品，依据上述权重进行加权不放回抽样。随机种子设为 20260615，共生成 100 条订单，前 10 条见表 2。

3. 模型构建与求解方法

3.1. 符号说明

为保证模型表达的一致性，本文主要符号及其含义如表 3 所示。

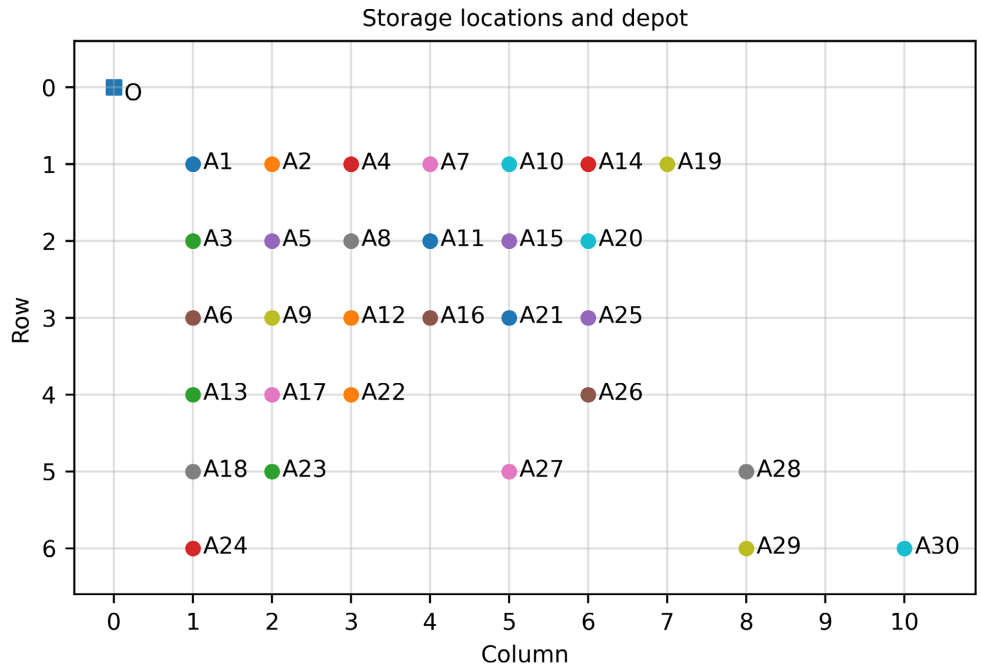


Figure 1. Warehouse storage layout and product distribution
图 1. 仓库储位布局与商品分布

Table 1. Product storage coordinates and preset outbound-frequency weights
表 1. 商品储位坐标与出库频次设定

商品编号	储位坐标	出库频次	商品编号	储位坐标	出库频次
A1	(1, 1)	100	A16	(3, 4)	40
A2	(1, 2)	95	A17	(4, 2)	38
A3	(2, 1)	90	A18	(5, 1)	36
A4	(1, 3)	85	A19	(1, 7)	34
A5	(2, 2)	80	A20	(2, 6)	32
A6	(3, 1)	75	A21	(3, 5)	30
A7	(1, 4)	70	A22	(4, 3)	28
A8	(2, 3)	65	A23	(5, 2)	26
A9	(3, 2)	60	A24	(6, 1)	24
A10	(1, 5)	55	A25	(3, 6)	22
A11	(2, 4)	50	A26	(4, 6)	20
A12	(3, 3)	48	A27	(5, 5)	18
A13	(4, 1)	46	A28	(5, 8)	16
A14	(1, 6)	44	A29	(6, 8)	14
A15	(2, 5)	42	A30	(6, 10)	10

Table 2. Sample of simulated orders (First 10 Orders)
表 2. 模拟订单样本(前 10 条)

订单编号	商品数	订单商品集合
1	5	A20, A18, A6, A3, A11
2	3	A11, A5, A1
3	5	A5, A20, A13, A12, A19
4	2	A1, A25
5	4	A18, A14, A13, A6
6	4	A26, A27, A14, A3
7	3	A6, A7, A30
8	4	A15, A1, A23, A3
9	3	A10, A19, A4
10	6	A19, A2, A12, A4, A3, A23

Table 3. Definitions of main symbols
表 3. 主要符号说明

符号	含义
G	仓库拣选网络对应的带权图
V	节点集合，包括出入口和订单涉及的商品储位
E	节点之间的通行关系集合
W	边权集合，对应节点间通行距离
O	出入口节点，坐标为$(0,0)$
Q_k	第 k 条订单中的商品节点集合
N_k	第 k 条订单的路径节点集合，$N_k=\{O\}\cup Q_k$
n_k	第 k 条订单包含的商品数量，$n_k=\lvert Q_k\rvert$
(r_i,c_i)	节点 i 的行、列坐标
d_{ij}	节点 i 与节点 j 之间的曼哈顿距离
x_{ij}^k	0~1 变量；若第 k 条订单路径从 i 直接到 j，则取 1，否则取 0
u_i	MTZ 约束中的辅助顺序变量
L_k	第 k 条订单的拣选路径长度
L_{total}	全部订单的总拣选距离
R	相对基准方案的优化率
Gap	启发式解相对枚举最优解的距离差距

3.2. 图论抽象与距离矩阵

在规则网格型仓库中，将出入口和商品储位抽象为节点，节点之间的通行关系作为边，通行距离作为边权，由此可将仓库拣选网络表示为：

$$G=(V,E,W) \tag{1}$$

在第 2.1 节所述理想网格通行假设下，可根据任意两个订单相关节点之间的最短通行距离构造完全距离图。若节点 i 与节点 j 的坐标分别为 (r_i,c_i) 和 (r_j,c_j)，则二者之间的曼哈顿距离为：

$$d_{ij}=|r_i-r_j|+|c_i-c_j|,\ i,j\in N_k,i\neq j \tag{2}$$

曼哈顿距离能够反映规则网格环境下拣选员沿水平和垂直方向移动的基本特征。在上述假设下，由各节点两两距离组成距离矩阵 $D_k=(d_{ij})$，并将其作为后续 TSP 模型、启发式算法和枚举求解的统一距离输入。若实际货架阻挡行列间直达通路，则仅凭规则排列不能保证曼哈顿距离等于真实最短距离，需以实际通道网络最短路距离替换矩阵元素。

3.3. 单订单 TSP 数学模型

对于第 k 条订单，拣选员需要从出入口 O 出发，访问 Q_k 中的全部商品节点，并最终返回 O。以路径总距离最小为目标，模型可写为：

$$\min L_k=\sum_{i\in N_k}\sum_{\substack{j\in N_k\\ j\neq i}}d_{ij}x_{ij}^k \tag{3}$$

每个节点在闭合路径中均应离开一次：

$$\sum_{\substack{j\in N_k\\ j\neq i}}x_{ij}^k=1,\ \forall i\in N_k \tag{4}$$

每个节点也应进入一次：

$$\sum_{\substack{j\in N_k\\ j\neq i}}x_{ij}^k=1,\ \forall j\in N_k \tag{5}$$

式(4)和式(5)保证每个服务节点有且仅有一次进入和离开，但仍可能出现不包含出入口的子回路。为此，引入 Miller-Tucker-Zemlin(MTZ)约束[19]：

$$u_i-u_j+n_kx_{ij}^k\leq n_k-1,\ \forall i,j\in Q_k,i\neq j \tag{6}$$

变量取值约束为：

$$x_{ij}^k\in\{0,1\},\forall i,j\in N_k,i\neq j;1\leq u_i\leq n_k,\forall i\in Q_k \tag{7}$$

上述模型给出了单订单拣选路径的规范化数学表达。本文采用该模型界定路径优化问题，并主要通过启发式算法进行求解。这里的“访问一次”指在服务序列中完成一次拣取；距离图的一条边对应底层通道中的一段最短路，不要求物理通道互不重叠。

由于主实验中每条订单包含的商品数量不超过 6 种，全排列枚举在计算上仍可实现，因此本文同时利用枚举法获得精确最优距离，并将其作为评价启发式算法求解质量的基准。

对于商品数量进一步增加、订单合批或多拣选员协同等情形，则需要在现有模型基础上增加相应约束并扩展求解方法。

3.4. 路径求解算法

3.4.1. 固定行列顺序路径

本文设置固定行列顺序路径作为规则型基准方案：商品储位先按行号、再按列号升序排列，仍并列时按商品编号确定访问顺序；拣选员从出入口出发，按排序结果完成访问后返回。该规则实现简单，但不随订单中储位的空间组合动态调整，可能产生局部折返。本文仅将其作为统一比较基准，不等同于严格定义的 S-shape 路径。

3.4.2. 最近邻算法

最近邻算法从出入口开始，在每一步选择与当前位置距离最近且尚未访问的商品节点作为下一访问节点，直至订单中的全部商品节点均被访问，再返回出入口。该方法计算过程简单，但属于局部贪婪策略，每一步的局部最短选择并不能保证最终获得全局最短路径。为保证算法结果可复现，当存在多个距离相同的候选节点时，本文依次按照储位行号、列号和商品编号确定下一访问节点。

3.4.3. 最近邻-2-Opt 局部改进算法

2-opt 是一种经典的 TSP 局部搜索方法，其基本思想是通过调整路径中的两条非相邻边消除局部绕行。本文首先利用最近邻算法生成初始路径，然后在该路径基础上执行 2-opt 局部搜索。设当前路径中存在两条非相邻边 (a,b) 和 (c,d)，若满足：

$$d(a,b)+d(c,d)>d(a,c)+d(b,d) \tag{8}$$

则删除原有边 (a,b) 和 (c,d)，连接 (a,c) 和 (b,d)，并相应反转两条断边之间的路径段。若交换后能够降低路径总距离，则保留新的路径；重复执行上述过程，直至不存在能够进一步缩短路径距离的 2-opt 交换。与单独采用最近邻算法相比，最近邻-2-opt 方法能够对局部贪婪选择产生的部分绕行进行进一步修正，同时保持参数较少、计算过程直观和实现难度较低的特点。

3.4.4. 枚举最优解

对于包含 n_k 个商品的订单，枚举法遍历全部 $n_k!$ 种商品访问排列，分别计算由出入口出发、依次访问商品节点并返回出入口的闭合路径距离，从中选取距离最小的路径作为精确最优解。本文主实验中 $n_k \le 6$，单订单最多需要比较 720 种排列；不同订单规模的扩展实验中最大商品数为 8 种，相应最多需要比较 40,320 种排列。在本文实验规模下，枚举计算仍具有可行性。需要强调的是，枚举法在本文中主要作为启发式算法的质量评价基准，而非面向大规模订单的实际求解方法。通过比较最近邻及最近邻-2-opt 路径与枚举最优路径之间的距离差距，可以评价启发式算法在当前实验条件下的求解质量。

3.5. 复杂度分析与评价指标

从计算复杂度看，固定行列顺序路径主要进行节点排序，计算负担相对较低；枚举最优解的复杂度为 $O(n_k!)$，随着订单商品数增加会迅速上升；最近邻算法每一步需要在未访问节点中寻找最近节点，复杂度约为 $O(n_k^2)$；2-opt 在一次完整搜索中需要检查路径中的边对组合，若局部搜索迭代次数记为 I，则最近邻-2-opt 方法的复杂度可近似表示为 $O(In_k^2)$。因此，在订单规模扩大时，启发式方法相较于枚举法具有更好的计算扩展性。其中，枚举的阶乘项描述候选排列数量；若每个排列均逐段累加距离，其直接实现的时间复杂度为 $O(n_k \cdot n_k!)$。2-opt 的复杂度估计以距离矩阵查表和边差增量计算为前提，I 表示完整边对扫描的轮数，包含无改进的最终扫描；本文未提供运行时间实测，不能据此推断现场响应时间。

本文采用总拣选距离、相对基准优化率和相对最优差距评价不同路径方案。

设第 k 条订单的路径长度为 L_k，共有 K 条订单，则全部订单的总拣选距离定义为：

$$L_{total}=\sum_{k=1}^{K}L_k \tag{9}$$

以固定行列顺序路径作为基准方案，算法相对基准方案的优化率定义为：

$$R=\frac{L_{base}-L_{alg}}{L_{base}}\times 100\% \tag{10}$$

为评价启发式解与理论最优解之间的差距，启发式算法相对枚举最优解的距离差距定义为：

$$Gap = \frac{L_{alg} - L_{opt}}{L_{opt}} \times 100\% \tag{11}$$

其中，R 越大表示算法相对于基准方案的距离缩短效果越明显；Gap 越接近 0，表示启发式算法所得结果越接近当前实验条件下的精确最优解。

4. 仿真实验与结果分析

4.1. 实验设置与结果验证

主实验以 6 × 10 规则网格型仓库为研究场景，共设置 60 个候选储位，其中 30 个储位放置 30 种商品。订单按照商品设定出库频次进行加权不放回抽样，共生成 100 条订单，每条订单包含 2~6 种商品，随机种子设为 20260615。出入口坐标为 $O=(0,0)$，节点间距离采用曼哈顿距离计算。固定行列顺序、最近邻、最近邻-2-opt 和枚举最优四类方案均在相同仓库布局、商品坐标和订单集合上运行，以保证结果具有可比性。

对 100 条订单的商品出现频次进行统计后发现，高频出现商品总体集中于预设权重较高的 SKU，说明加权抽样能够基本反映“少数商品高频出现、多数商品低频出现”的结构。四类方案均从出入口出发并返回，访问序列完整覆盖订单商品服务节点，且各商品仅安排一次拣取服务。

同时抽取部分订单进行分段距离核算。以第 6 条订单的最近邻-2-opt 路径 O → A3 → A27 → A26 → A14 → O 为例，曼哈顿距离之和为 3 + 7 + 2 + 3 + 7 = 22，与程序输出一致；其他抽样订单结果亦一致。

4.2. 主实验结果分析

为直观展示不同路径规则对单订单访问顺序的影响，以第 6 条订单为例。该订单包含 A26、A27、A14 和 A3 四种商品。固定行列顺序路径的拣选距离为 32，最近邻路径将距离降至 24，在最近邻路径基础上执行 2-opt 局部搜索后，路径距离进一步降至 22，并达到该订单的枚举最优距离。三类路径的访问顺序对比如图 2 所示。图中连线仅表示节点访问关系，斜线不代表可斜向行走；距离均按式(2)计算。

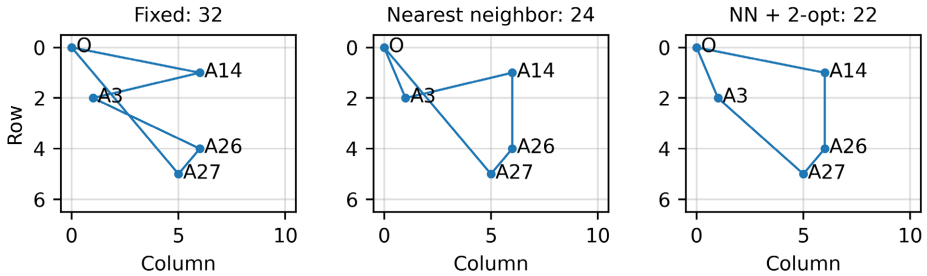


Figure 2. Comparison of picking route sequences for order 6
图 2. 第 6 条订单路径访问顺序对比

Table 4. Overall comparison of different routing schemes
表 4. 不同路径方案总体结果对比

路径方案	总拣选距离	平均订单距离	相对基准优化率	相对最优差距
固定行列顺序路径	2132	21.32	—	11.62%
最近邻路径	2026	20.26	4.97%	6.07%
最近邻-2-opt 路径	1920	19.20	9.94%	0.52%
枚举最优路径	1910	19.10	10.41%	0.00%

100 条订单的总体计算结果见表 4。固定行列顺序路径的总拣选距离为 2132，平均订单距离为 21.32；采用最近邻算法后，总距离降至 2026，相对基准方案降低 4.97%。在最近邻初始路径基础上进行 2-opt 局部改进后，总距离进一步降至 1920，相对固定行列顺序方案降低 9.94%，相对于最近邻方案又减少 106 个距离单位，即进一步降低约 5.23%。枚举法得到的精确最优总距离为 1910，平均订单距离为 19.10。各方案总距离对比见图 3。文中距离均为归一化网格距离单位，不直接表示米或作业分钟。

从总体结果看，最近邻算法通过根据订单商品的空间位置动态调整访问顺序，能够减少固定规则产生的部分绕行；2-opt 局部搜索则进一步修正最近邻初始路径中的局部不合理连接，使路径距离继续下降。由于较高频商品整体位于靠近出入口的储位，各类路径方案的基础行走距离均受到一定压缩，因此路径访问顺序的可改善空间相对有限。在各方案采用相同储位布局和订单集合的条件下，实验结果之间的差异主要来源于订单内部商品访问顺序，而非储位位置变化。

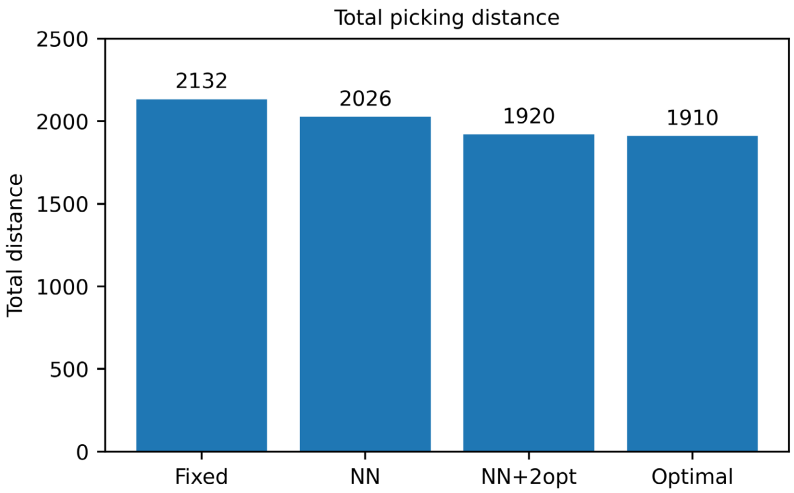


Figure 3. Comparison of total picking distances among different routing schemes
图 3. 不同路径方案总拣选距离对比

4.3. 与枚举最优解的比较

由于主实验中每条订单包含的商品数量不超过 6 种，可以通过全排列枚举得到精确最优路径。因此，枚举结果不仅用于提供理论下界，还可以直接评价启发式算法的求解质量。最近邻与最近邻-2-opt 同枚举最优结果的比较见表 5。

Table 5. Comparison of heuristic algorithms and the enumerated optimum
表 5. 启发式算法与枚举最优结果比较

比较项目	最近邻	最近邻-2-opt	枚举最优
总拣选距离	2026	1920	1910
平均订单距离	20.26	19.20	19.10
相对最优差距	6.07%	0.52%	0.00%
达到单订单最优数量	—	95	100

最近邻算法的总距离相对最优解仍存在 6.07%的差距，而经过 2-opt 局部改进后，相对最优差距降至

0.52%。从单订单结果看，最近邻-2-opt 在 100 条订单中有 95 条达到枚举最优距离，仅有 5 条订单仍存在局部最优差距。由此可见，在本文小规模订单条件下，2-opt 能够有效修正最近邻算法的部分局部贪婪缺陷，使启发式路径在总体距离和单订单求解质量两个层面均接近精确最优结果。

4.4. 不同订单规模下的稳健性分析

为考察不同订单规模条件下路径优化效果是否保持一致，设置三组实验情景：情景 1 包含 50 条订单，每单 2~4 种商品；情景 2 为主实验，共 100 条订单，每单 2~6 种商品；情景 3 包含 200 条订单，每单 3~8 种商品。三组情景均采用相同商品坐标、出库频次和加权随机抽样规则，结果见表 6。

三组情景中，最近邻和最近邻-2-opt 的总距离均低于固定行列顺序方案，说明路径优化效果并非只存在于主实验样本。在订单规模较小的情景 1 中，最近邻-2-opt 相对基准方案的优化率为 3.99%；主实验情景 2 的优化率为 9.94%；在订单数量和单订单商品数均增加的情景 3 中，优化率进一步达到 16.97%。在本文所设情景下，随着订单组合复杂度提高，可供访问顺序调整的空间增大，启发式路径优化表现出更明显的距离改善潜力。

同时，情景 1 中最近邻-2-opt 与枚举最优距离均为 818；情景 2 二者分别为 1920 和 1910；情景 3 分别为 4296 和 4242。尽管随着订单规模增加，两者之间出现一定差距，但最近邻-2-opt 仍保持与精确最优结果较为接近的总体水平，说明该方法在不同订单规模下具有较稳定的求解表现。

Table 6. Robustness analysis under different order scales
表 6. 不同订单规模下的稳健性分析

情景	订单数	每单商品数	固定行列	最近邻	最近邻-2-opt	枚举最优	最近邻优化率/%	2-opt 优化率/%
情景 1	50	2~4	852	838	818	818	1.64	3.99
情景 2	100	2~6	2132	2026	1920	1910	4.97	9.94
情景 3	200	3~8	5174	4652	4296	4242	10.09	16.97

4.5. 多随机种子敏感性分析

单一随机种子可能使模拟订单组合带有偶然性。为进一步检验结论的稳定性，设置 10 组随机种子(20260610~20260619)，每组均重新生成 100 条订单，每单包含 2~6 种商品，并在相同仓库布局和距离矩阵下分别计算四类路径方案。各方案总距离及评价指标的均值与标准差见表 7。

Table 7. Results of multi-random-seed sensitivity analysis
表 7. 多随机种子敏感性分析结果

路径方案	平均总距离	标准差	平均相对基准优化率	平均相对最优差距
固定行列顺序路径	2062.60	66.74	—	11.88%
最近邻路径	1942.80	54.46	5.79%	5.38%
最近邻-2-opt 路径	1850.80	44.04	10.24%	0.40%
枚举最优路径	1843.40	44.22	10.61%	0.00%

10 组随机订单实验中，最近邻路径的平均相对基准优化率为 5.79%，最近邻-2-opt 进一步提高至 10.24%；后者与枚举最优解之间的平均相对差距仅为 0.40%。最近邻-2-opt 总距离的标准差为 44.04，与枚举最优方案的 44.22 接近，并低于固定行列顺序和最近邻方案。上述结果表明，主实验中观察到的距离

缩短效果并非由单一随机订单样本造成，在不同订单组合下，最近邻-2-opt 仍能够保持较稳定且接近精确最优的求解质量。

综合主实验、精确最优对照、不同订单规模和多随机种子结果可以看出，最近邻-2-opt 在本文设定的小型人工拣选仓库中具有较为稳定的距离改善效果。其优势主要体现在利用简单局部搜索修正最近邻路径中的局部绕行，并在较低数据需求和较简单计算规则下获得接近枚举最优的路径结果。

5. 讨论

5.1. 最近邻-2-Opt 方法的改进机制

主实验结果表明，最近邻算法能够在固定行列顺序路径基础上降低拣选距离，而进一步引入 2-opt 局部搜索后，路径质量得到明显改善。固定行列顺序、最近邻和最近邻-2-opt 三种方案的总拣选距离分别为 2132、2026 和 1920，最近邻-2-opt 相对于基准方案的优化率达到 9.94%，并在最近邻结果基础上进一步减少约 5.23%的路径距离。与枚举得到的最优总距离 1910 相比，其相对最优差距仅为 0.52%，且 100 条订单中有 95 条达到单订单枚举最优距离。

上述结果与两类启发式方法的求解特点有关。最近邻算法在每一步优先选择距离当前位置最近的未访问节点，能够快速形成一条具有一定空间连续性的初始路径，但其局部贪婪特征可能导致后续访问过程中出现不必要的折返或较长连接。2-opt 则在最近邻初始路径基础上重新检查局部边连接关系，通过替换部分非相邻边并调整中间节点访问顺序，进一步消除局部绕行。因此，在本文小规模订单场景中，两阶段求解方式既利用了最近邻算法快速构造初始路径的优势，又通过 2-opt 提高了路径质量。

不同订单规模下的实验进一步显示，在本文设置的三个订单情景中，最近邻-2-opt 相对于固定行列顺序方案的优化率分别为 3.99%、9.94%和 16.97%。由于三个情景中的订单数量和单订单商品数同时发生变化，本文不对单一因素的独立影响作因果判断；从整体结果看，随着订单组合复杂度提高，路径访问顺序表现出更大的可调整空间。与此同时，10 组不同随机种子实验中，最近邻-2-opt 的平均优化率为 10.24%，平均相对最优差距仅为 0.40%，说明主实验结果并非由单一订单样本偶然造成，而具有一定稳定性。

5.2. 面向小型仓库的工程实施与管理建议

将路径优化用于日常作业，需要形成“数据录入–距离计算–路线生成–人工执行–反馈修正”的工作流程。建议先在单一库区试运行，以现有电脑、订单导出表和储位台账建立离线原型，再根据现场效果决定是否接入仓储管理系统。以下为工程实施建议，不代表已完成企业部署或取得实测收益。

5.2.1. 基础数据与算法实现

首先建立储位主表和订单明细表。储位主表至少记录 SKU、储位编码、行列坐标、启用状态和更新时间；订单明细表记录订单号、SKU 和数量，并保留数量用于拣货核对，路线计算按服务节点去重。导入时检查缺失储位、重复编码和停用位置，异常订单转人工处理。对于有绕行的库区，应补充通道交点与通道长度，以可行通道最短路生成对称距离矩阵；单向通道产生的非对称距离不能直接套用下述四边差判据。

为便于转写为 VBA 或 Python，给出一种确定性的首次改进实现，见算法 1。最近邻阶段以距离、行号、列号和商品编号依次破同距；2-opt 阶段固定起终点，从小到大扫描索引，遇到首个严格缩短路径的交换即反转并重新扫描。该伪代码用于说明原型实现；实施与复现时应统一随机抽样库、订单生成顺序和局部搜索扫描规则，避免实现差异影响结果比较。

Algorithm 1. Nearest-neighbor and 2-opt pseudocode for a prototype
算法 1. 原型系统最近邻与 2-opt 伪代码

输入：订单服务节点集合 Q，出入口 O，对称距离矩阵 D；输出：闭合路线 P 及长度 L
U ← Q；P ← [O]；v ← O
while U 非空：
    u ← U 中使(D[v,u], 行号, 列号, 商品编号)字典序最小的节点
    将 u 追加至 P；从 U 删除 u；v ← u
将 O 追加至 P；n ← |Q|
repeat：
    improved ← false
    按 i = 1,…,n−1，j = i+1,…,n 的顺序扫描：
        若 i = 1 且 j = n，跳过(两条断边共用 O)
        Δ ← D[P[i−1],P[j]] + D[P[i],P[j+1]]
− D[P[i−1],P[i]] − D[P[j],P[j+1]]
        若 Δ < 0：反转 P[i:j+1]；improved ← true；退出本轮双重扫描
until improved = false
L ← Σ(t = 0,…,n) D[P[t],P[t+1]]；返回 P 和 L

注：P 采用从 0 开始的索引，P[i:j+1]包含第 i 至第 j 项。对称距离保证反转后内部边长度不变，仅需比较四条边；有限排列与严格下降条件保证终止，但不能保证全局最优。实际距离采用浮点数时可设置与距离单位匹配的数值容差。

5.2.2. Excel VBA 与 Python 原型搭建

采用 Excel VBA 时，可设置“储位”“订单”“路径结果”“异常日志”四张工作表。由技术人员编写读取、最近邻、2-opt 和结果回写模块，将数据一次读入数组后完成距离查表与迭代，避免循环中反复访问单元格。操作员粘贴当日订单后点击“生成路径”，输出订单号、顺序号、SKU、数量、储位、分段距离及总距离，打印为拣货单。该方案适合已具备 Excel 桌面版和宏维护人员的库区，日常使用者只需掌握数据导入及异常核对。

采用 Python 时，可用标准库 csv 读取两张基础表，用字典保存 SKU 与储位的映射、列表保存路径，并按算法 1 封装距离计算、最近邻、2-opt 和导出函数。首先以命令行运行“读表 - 校验 - 逐单求解 - 写出 CSV”，再按需增加简单操作界面；结果可用 Excel 打开，不必在第一阶段连接数据库或购置自动化设备。技术人员需掌握循环、列表切片、文件读写和错误处理，操作员只负责导入订单、查看结果及反馈异常。

上线前应使用表 2 中的订单验证完整覆盖、起终点一致、无重复服务和路径长度核算，并确认 2-opt 结果不长于其最近邻初始路线；小规模订单再以枚举检查最优距离下界。第 6 条订单的 32、24 和 22 可用于单例核对，但单例一致不能替代全部订单复现。若原型与表 4~7 的汇总值不一致，应先检查原始订单、抽样实现及搜索规则，不应为匹配数值调整或筛选订单。

5.2.3. 人员配置与试运行安排

以单一库区、数十个 SKU、已有可导出订单且仅开发离线原型为前提，可由 1 名仓库负责人、1 名具备 VBA 或 Python 基础的技术人员和 1~2 名拣选员参与。负责人核验储位与通道并制定验收口径，技术人员负责程序和台账维护，拣选员负责现场路线可行性及操作反馈，各角色可兼职承担。

建议预留 1~2 个工作日用于台账整理及通道核查，2~3 个工作日用于原型开发和样例验证，半天用于操作培训，再安排 3~5 个作业日进行试运行，总历时约 1~2 周。上述为任务分解后的计划估算，不是

实测工期；各角色按阶段投入，不等同于全员全程工作。历史数据缺失、需开发接口或通道复杂时，应重新估算投入。费用主要包括开发、数据整理、培训和后续维护工时，不能因使用现有软件或开源语言就视为零成本。

5.2.4. 验收指标与持续改进

试运行可先用同一批历史订单在同一距离矩阵上计算现行规则与优化规则，获得距离差；再在真实作业中按订单商品数、库区和班次分层，交替安排规则并记录人员熟练程度，减少订单难度和学习效应干扰。至少记录单均行走距离、单均总作业时间、拣选差错率、路线执行率、计算耗时及异常原因，不能仅以理论距离验收。该评价同时考虑人员执行与作业质量，与人因工程研究[17] [18]的关注点相一致。

建议将储位映射完整、路线可通行和商品无漏拣作为使用前提；在差错率不增加且实测单均作业时间有改善时，逐步扩大适用范围。若路线更短但耗时更长，应检查拥堵、重物拿取顺序及路线偏离，而非直接要求拣选员机械执行。负责人每周整理异常，商品移位或通道调整后及时更新台账与距离矩阵，并保留可回退的原有拣选规则。

工程收益需统一量纲评价。仅在每个归一化距离单位对应相同实际长度 s、平均行走速度为 v 的条件下，100 条主实验订单节省的理论行走时间可估为$(2132\sim1920)\,s/v$，即 212 s/v；该量不含拿取、扫码和复核时间。因此 9.94%是仿真行走距离改善率，不能直接作为总工时、人员编制或人工成本的下降比例。实际收益应扣除新增数据维护、培训和核验投入后再评估。

5.3. 适用边界与研究局限

尽管实验结果表明最近邻-2-opt 方法在本文设置的小型网格仓库中具有较好的路径优化效果，但研究结论仍受到实验条件和模型假设的限制。

首先，本文订单数据采用设定出库频次基础上的加权随机方式生成，尚未使用真实企业订单记录。模拟实验能够用于比较不同路径方案在统一条件下的相对表现，但所得优化比例不能直接等同于某一实际仓库能够获得的距离节约水平。后续研究仍需结合真实订单、实际货架尺寸和现场通道结构进行进一步验证。

其次，曼哈顿距离仅在本文理想网格通行条件下代表最短路；规则排列的实体货架仍可能需要绕行。实际部署应测量通道网络并校验服务点可达性，必要时改用通道最短路距离。商品体积和重量、货架高度、拿取时间、订单优先级及拥堵也可能改变最优作业顺序；若采用单向通道导致非对称距离，应重新计算反转段的完整代价或使用适配算法，不能沿用对称 2-opt 四边差公式。

再次，本文研究对象为单订单人工拣选，没有考虑订单合批、拣选车容量以及多拣选员任务分配与路径冲突等问题。当仓库作业规模扩大后，路径规划可能需要与订单分批、人员调度和容量约束共同决策，此时本文模型不能直接用于解决完整的协同优化问题，而需要在现有框架基础上进一步扩展。

最后，2-opt 本质上仍属于局部搜索方法。虽然最近邻-2-opt 在本文主实验的 100 条订单中有 95 条达到枚举最优距离，且总体相对最优差距较小，但这并不意味着该方法在所有仓库布局和订单规模下均能获得全局最优解。对于商品节点数量较多、通道结构复杂或约束条件增加的情形，有必要进一步比较遗传算法、蚁群算法、模拟退火、混合整数规划等方法在求解质量和计算效率方面的表现。此外，本文主要评价仿真路径距离，尚未开展原型系统的现场运行时间与投入产出评价；后续应结合完整订单数据、程序版本及运行环境记录，开展可复现的性能测量和现场试验。

6. 结论与展望

本文针对小型电商仓库人工订单拣选过程中可能存在的路径绕行问题，构建了基于 TSP 的订单拣选

路径优化模型。将出入口和商品储位抽象为节点，以曼哈顿距离构建距离矩阵，并在固定行列顺序路径基础上，采用最近邻算法生成初始路径，再通过 2-opt 局部搜索进一步调整商品访问顺序。同时，利用小规模订单可枚举的特点获得精确最优解，用于评价启发式方法的求解质量。

仿真实验结果表明，在 6 × 10 储位布局、30 种商品和 100 条加权随机订单条件下，固定行列顺序、最近邻和最近邻-2-opt 三种方案的总拣选距离分别为 2132、2026 和 1920。最近邻方案相对于基准路径减少 4.97%，最近邻-2-opt 方案的优化率进一步提高至 9.94%；与枚举最优总距离 1910 相比，最近邻-2-opt 的相对最优差距仅为 0.52%，且 100 条订单中有 95 条达到单订单枚举最优距离。不同订单规模和多随机种子实验进一步表明，该方法在本文设定条件下能够保持较稳定的路径缩短效果。

从物流工程应用角度看，本文进一步给出最近邻-2-opt 伪代码及 Excel VBA、Python 离线原型方案，并提出数据核验、角色分工、试运行和多指标验收步骤，将路径优化与小型仓库的标准作业管理相衔接。该实施方案及其工期估算尚需企业现场验证，仿真距离收益不能直接外推为实际工时或成本节约。后续应公开可复现的订单数据与程序实现，引入真实通道和作业记录，开展运行时间及现场效果评价，并扩展至订单合批、容量约束和多拣选员协同场景。

参考文献

[1] Dantzig, G., Fulkerson, R. and Johnson, S. (1954) Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, **2**, 393-410. https://doi.org/10.1287/opre.2.4.393

[2] Croes, G.A. (1958) A Method for Solving Traveling-Salesman Problems. *Operations Research*, **6**, 791-812. https://doi.org/10.1287/opre.6.6.791

[3] Lin, S. and Kernighan, B.W. (1973) An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, **21**, 498-516. https://doi.org/10.1287/opre.21.2.498

[4] Laporte, G. (1992) The Traveling Salesman Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. *European Journal of Operational Research*, **59**, 231-247. https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90138-y

[5] Ratliff, H.D. and Rosenthal, A.S. (1983) Order-Picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, **31**, 507-521. https://doi.org/10.1287/opre.31.3.507

[6] Hall, R.W. (1993) Distance Approximations for Routing Manual Pickers in a Warehouse. *IIE Transactions*, **25**, 76-87. https://doi.org/10.1080/07408179308964306

[7] Petersen, C.G. (1997) An Evaluation of Order Picking Routeing Policies. *International Journal of Operations & Production Management*, **17**, 1098-1111. https://doi.org/10.1108/01443579710177860

[8] Roodbergen, K.J. and de Koster, R. (2001) Routing Order Pickers in a Warehouse with a Middle Aisle. *European Journal of Operational Research*, **133**, 32-43. https://doi.org/10.1016/s0377-2217(00)00177-6

[9] 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

[10] Theys, C., Bräysy, O., Dullaert, W. and Raa, B. (2010) Using a TSP Heuristic for Routing Order Pickers in Warehouses. *European Journal of Operational Research*, **200**, 755-763. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.036

[11] 朱杰, 周丽, 郭键. 分类存储人工拣选随机服务系统效率研究[J]. 管理科学学报, 2012, 15(2): 59-71.

[12] 陈方宇, 王红卫, 祁超, 等. 考虑多拣货员堵塞的仓库拣选路径算法[J]. 系统工程学报, 2013, 28(5): 581-591.

[13] 王旭坪, 张珺, 易彩玉. B2C 电子商务环境下订单拣选与配送联合调度优化[J]. 中国管理科学, 2016, 24(7): 101-109.

[14] 李昆鹏, 刘腾博, 贺冰倩, 等. “货到人”拣选系统中 AGV 路径规划与调度研究[J]. 中国管理科学, 2022, 30(4): 240-251.

[15] 徐翔斌, 马中强. 基于移动机器人的拣货系统研究进展[J]. 自动化学报, 2022, 48(1): 1-20.

[16] 赵金龙, 蒋忠中, 万明重, 张春征. 考虑配送截止时间的“货到人”订单拣选优化问题研究[J]. 中国管理科学, 2025, 33(3): 239-255.

[17] Grosse, E.H., Glock, C.H., Jaber, M.Y. and Neumann, W.P. (2015) Incorporating Human Factors in Order Picking Planning Models: Framework and Research Opportunities. *International Journal of Production Research*, **53**, 695-717.

https://doi.org/10.1080/00207543.2014.919424

[18] Grosse, E.H., Glock, C.H. and Neumann, W.P. (2017) Human Factors in Order Picking: A Content Analysis of the Literature. *International Journal of Production Research*, **55**, 1260-1276. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1186296

[19] Miller, C.E., Tucker, A.W. and Zemlin, R.A. (1960) Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*, **7**, 326-329. https://doi.org/10.1145/321043.321046