

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于模糊理论的立体车库非线性动态库位分配策略

李建国, 赵剑英, 钟高卫

兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 为提高平面移动式立体车库服务效率, 提出一种考虑驻留时间和库位分布均衡的非线性动态库位分配策略. 采用贝叶斯优化超参数的长短时记忆神经网络对立体车库库内车辆驻留时间进行预测, 结合库位占用状态属性, 基于模糊理论建立分区运算规则, 以驻留时间和库位占用密度为依据实现非线性分区分配, 设计均衡性检测算法以及相邻库位迁移策略, 进行库位占用均衡性检验并动态调整分区库位占用. 以用于车辆存取操作的搬运台车(rail guided vehicle, RGV)平均运行能耗和平均服务时间为车库运行效率评价指标, 利用禁忌搜索算法实现对分区内空闲库位寻优. 结果表明, 与实际工程中采用的就近分配策略相比, 立体车库平均服务时间缩短14.3%, 平均运行能耗降低23.8%, 库位占用分布均衡标准差降低90.28%, 证明考虑车辆驻留时间和库位分布均衡性的动态库位分配策略有效.

关键词: 交通运输工程; 立体车库; 库位分配; 模糊控制; 长短时记忆神经网络; 禁忌搜索

中图分类号: U491.7

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2025.06706

Nonlinear dynamic parking space allocation strategy for stereo garage parking systems based on fuzzy theory

LI Jianguo, ZHAO Jianying, and ZHONG Gaowei

School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu Province, P. R. China

Abstract: To improve the service efficiency of planar automated multi-storey parking systems, a nonlinear dynamic slot allocation strategy is proposed, considering both vehicle dwell time and the balance of slot distribution. A long short-term memory (LSTM) neural network, with hyperparameters tuned by Bayesian optimization, is employed to predict the dwell times of vehicles parked in the system. Combining predicted dwell times with slot occupancy attributes, a fuzzy-theory-based partitioning rule is established, enabling nonlinear regional allocation based on dwell time and slot occupancy density. Additionally, a balance-detection algorithm and an adjacent-slot migration strategy are designed to assess the balance of slot utilization and dynamically adjust partitioned slot occupancy. Using the average running energy consumption and average service time of the rail-guided vehicle (RGV), which performs vehicle storage and retrieval operations, as system efficiency metrics, a tabu search algorithm is applied to optimize

Received: 2024-06-08; **Revised:** 2025-02-20; **Accepted:** 2025-03-01; **Online (CNKI):** 2025-08-08

Foundation: Natural Science Foundation of Gansu Province (20JR5RA396); Blue Dot Distributed Intelligent Computing Project of China University Industry-University-Research Innovation Foundation (2021LDA07002); Gansu Provincial Department of Education's 2023 Project for Demonstration Courses of Innovation and Entrepreneurship Education in Higher Education Institutions (202306)

Corresponding author: Associate professor LI Jianguo (lijianguo@mail.lzjtu.cn)

Citation: LI Jianguo, ZHAO Jianying, ZHONG Gaowei. Nonlinear dynamic parking space allocation strategy for stereo garage parking systems based on fuzzy theory [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2025, 42(6): 706-713. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



the selection of vacant slots within each partition. Results show that, compared with the nearest-slot allocation strategy commonly used in engineering practice, the proposed method reduces the average service time by 14.3%, the average energy consumption by 23.8%, and the standard deviation of slot-occupancy balance by 90.28%, demonstrating the effectiveness of the dynamic slot allocation strategy that accounts for vehicle dwell time and balanced slot distribution.

Key words: traffic engineering; stereo garage; parking allocation; fuzzy controls; long short-term memory neural network; tabu search

平面移动式立体车库因具有配置灵活、存取车效率高等优点在实际工程中应用广泛,其通常采用就近原则分配车位.由于车辆的到达时间和在库内驻留时间具有一定随机性,实际中常出现驻留时间长的车辆停放在距离进出口近的位置,而驻留时间短的车辆停放在距离进出口远的位置,导致设备运行距离过长、能耗升高等问题.

王小农等^[1]采用多色集合及果蝇算法在车辆到达间隔服从泊松分布、驻留时间服从正态分布的情形下实现库位分配;JIAO等^[2]以出、入库作业时间、整体货架等效重心和相关产品相对堆积程度为多目标函数,构建多目标仓储位置配置优化模型;李建国等^[3-4]以车辆库内驻留时间拟合结果作为预测下一到达任务存车或取车位置的判断依据,在库位分配前对驻留时间进行预测,按照划分的车位分区进行库位分配;KOLLA^[5]研究指出在自动存取系统(autonomous storage and retrieval system, AS/RS)中均衡自动导引车(automated guided vehicle, AGV)运行轨迹非常重要;曾强等^[6]考虑货位载重及出库时间,构建以出库时间最短、货架稳定性最高为目标的货位分配模型;ROSA等^[7]在货物分配过程中考虑时间和空间约束,建立优先级泊位分配策略;杨玮等^[8]将货位分配问题分为区域划分及货位分配两个阶段进行求解;陈桢等^[9]建立不同存取策略模型,采用遗传算法优化库位分配;MIRZAEI等^[10]通过估计周转频率及产品相关性,提出将货物进行分散存储;ZHANG等^[11]在资源优化模型中引入区间模糊两阶段鲁棒最优分配模型,设定与目标特性相对应的约束条件形成模糊控制方法;彭秋琼等^[12]基于模糊理论货位分配算法,将货物使用频次作为货位分配原则;焦玉玲等^[13]根据货物出入库作业时间提出多种群遗传算法,实现均衡综合因素的货位选择.以上研究的分配依据较为单一,且缺乏库位分布均衡性分析,导致库位分配合理性有所欠缺.

本研究基于模糊控制理论提出考虑驻留时间和库位分布均衡的动态库位分配策略,以贝叶斯算法

优化超参数的长短时记忆(long short-term memory, LSTM)网络模型对到达车辆驻留时间进行预测;采集分区库位占用密度,将其共同作为库位分区分配依据;利用禁忌搜索算法实现对分区内空闲库位寻优.通过对比分析设计策略与就近分配策略下,用于车辆存取操作的搬运台车(rail guided vehicle, RGV)平均服务时间、平均运行能耗及库位分布均衡标准差,验证本策略对于优化立体车库库位分配的有效性.

1 问题描述

1.1 平面移动式立体车库模型

平面移动式立体车库的主体部分包括:升降机、RGV、钢构框架、载车板、入出库位置(input and output point, I/O)及电气控制系统等,其模型如图1.车库包含 p 层、 c 列2排车位,车位高度为 H ,宽度为 L .本文研究对象属于AS/RS,图1中 x 轴表示RGV的水平移动方向,其值表示RGV所在位置的列坐标; y 轴用来区分库位所在排; z 轴表示RGV的垂直移动方向,其值表示RGV所在位置的层坐标.

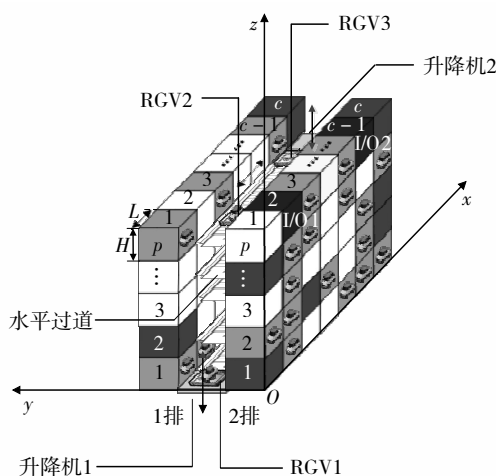


图1 立体车库三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the stereo garage.

1.2 问题描述

实际工程中立体车库库位一般采用就近空闲库位分配策略。当车辆到达时, RGV 将待入库车辆搬运至离 I/O 最近的空闲位置, 由于 RGV 和升降机资源有限, 在高密度存取需求到达时, 可能出现以下不良状况: ① 驻留时间较长车辆分配至离 I/O 口较近库位, 长时间占用近 I/O 口资源, 导致后续任务过程 RGV 服务时间及运行能耗增大; 驻留时间较短车辆分配至离 I/O 口较远库位, 导致该类任务过程 RGV 服务时间及运行能耗增大。② 库位分配过程未考虑库位占用密度属性, 造成立体车库库位占用不均衡, 导致 RGV 作业集中, 影响 RGV 运行效率。

2 贝叶斯优化的 LSTM 预测模型

2.1 LSTM 神经网络

JIANG 等^[14]研究表明, 贝叶斯优化超参数的 LSTM 神经网络在时间序列预测方面具有显著优势, 其重复网络模块的构造更加复杂, 除核心记忆细胞外, 存在遗忘门、输入门及输出门 3 种计算方式, 可有效避免梯度消失和梯度爆炸的发生, 适于处理立体车库车辆到达停留长时依赖问题。

2.2 贝叶斯算法调参

贝叶斯优化是一种黑箱优化算法, 无需知道目标函数的表达式, 通过先验概率分布和已知观测点来更新后验概率分布, 从而寻找全局最优解。贝叶斯优化特别适用于 LSTM 模型的超参数调优, 能够提高模型的预测精度。超参数的组合种类较多, 其选择直接影响神经网络效率表现及预测精度。超参数间无法直接确定准确的函数表达式, 将其看作拥有连续自变量的黑盒函数, 通过贝叶斯优化算法可在更少的验证次数内找到全局最优超参数组合。

调参算法流程如下:

步骤 1 初始化神经网络待优化超参数(确定所需要调试超参数的取值范围);

步骤 2 确定代理模型, 即假设超参数间符合高斯先验分布 $f(x)$;

步骤 3 依据期望提升采集函数, 获取下一个可能样本点;

步骤 4 获取新样本点函数值 $f(x_i)$, 将其加入当前样本点集合;

步骤 5 若迭代次数达到最大值, 执行步骤 6, 否则返回步骤 3;

步骤 6 输出最优样本点组合。

3 动态库位分配策略

3.1 基于模糊控制器的库位分区模型

模糊控制器是一种基于模糊逻辑的智能控制技术, 用于处理复杂系统中存在的不确定性、非线性或难以用精确数学模型描述的问题。通过模拟人类“模糊”的决策思维, 将经验规则转化为数学形式, 实现对系统的控制。本研究以车辆状态特征和神经网络预测驻留时间特征值共同作为模糊控制器的输入, 经逻辑运算输出库位分区编码。基于模糊理论的立体车库非线性动态库位分配流程如图 2。

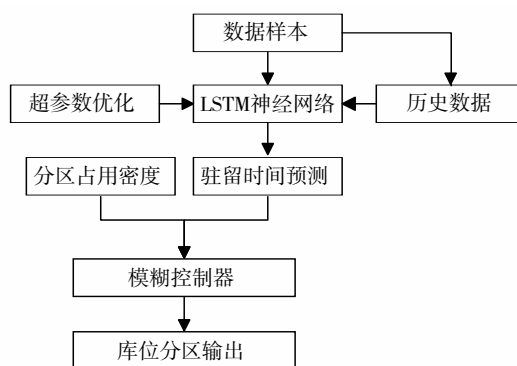


图2 基于模糊理论的立体车库非线性动态库位分配流程
Fig. 2 Nonlinear dynamic parking space allocation process for a three-dimensional parking garage based on fuzzy theory.

模型具体实现方法如下所述。

1) 构建系统输入、输出参数

参数1: 预测的驻留时间 T 。通过 LSTM 神经网络针对特定数据集进行预测值输出。

参数2: 分区占用密度 D , 定义为

$$D = \frac{\text{当前分区实际占用库位}}{\text{分区总库位}} \times 100\% \quad (1)$$

车辆驻留时间对应分区每存放或取出 1 次车辆, 则更新 1 次占用密度属性, 作为下次库位分配的输入参数。

记立体车库层数为 p 、该层库位数为 q , 将系统每个车位表示为 1 个元组 (m, n) , 其 t 时刻分区内的状态为 $P_{mn}(t)$, 建立库位状态矩阵,

$$P_{mn}(t) = \begin{bmatrix} p_{p,1} & \cdots & p_{p,n} & \cdots & p_{p,q} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{m,1} & \cdots & p_{m,n} & \cdots & p_{m,q} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{1,1} & \cdots & p_{1,n} & \cdots & p_{1,q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, 元素 $p_{m,n}$ 表示 t 时刻该库位的状态, $p_{m,n} \in [0, 1]$. 矩阵更新规则如下: 当空闲库位即将接收下一到达车辆以及被占用库位即将进行出库操作, (m, n) 库位车辆出库后, 库位 (m, n) 状态空闲, 则 $p_{m,n} = 0$, 将该库位加入空闲库位集合, 供后续入库任务选择, $P_{mn}(t)$ 随之变化.

参数3: 库位分区 U . 根据立体车库空间布局明确分区边界, 建立统一的标识编号, 根据库位与 I/O 位置最小欧式距离进行分区划分, 如欧氏距离 $l_0 \sim l_1$ 部分为分区1, 欧氏距离 $l_1 \sim l_2$ 部分为分区2, 以此类推. 记车库水平方向取值范围为 $(0, nL)$, 垂直方向取值范围 $(0, mH)$, I/O 位置坐标为 $(0, 0)$, 则不同分区与 I/O 口的最小欧式距离 l 为

$$l = \sqrt{(nL)^2 + (mH)^2} \quad (3)$$

$$n \in \{1, 2, \dots, q\}, m \in \{1, 2, \dots, p\} \quad (4)$$

其中, L 和 H 为单个库位的水平长度和垂直高度; M 和 N 为立体车库的最大层数和列数; 式4表示 U 受驻留时间 T 和分区密度 D 的影响, $V_{m,n}$ 表示元组 (m, n) 的隶属分区.

图3为不同驻留时间所属分区对应的层列关系. 其中, 近 I/O 区域适用于存放驻留时间较短的车辆; 疏 I/O 区域适用于存放驻留时间较长车辆; 分区驻留时间随着与 I/O 口距离的增大而增大.

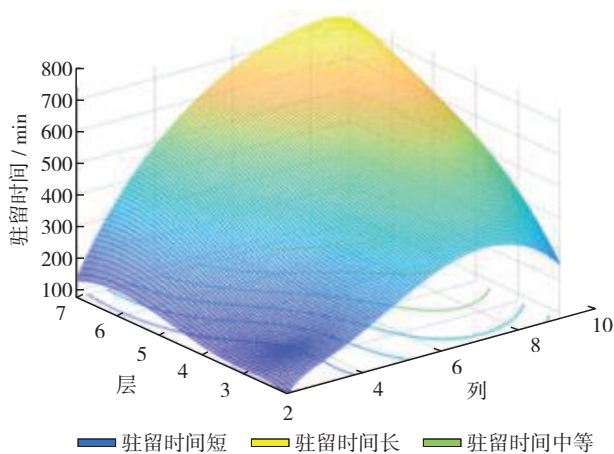


图3 不同驻留时间所属分区对应的层列关系

Fig. 3 The layer-column relationship corresponding to the partitions with different residence times.

2) 模糊逻辑规则

本研究通过统计中国西安市某立体车库历史数据发现, 进入库内车辆在 24 h 内的驻留时间 T 极少出现 ≥ 700 min 的情形, 故去除车辆驻留时间中大

于 700 min 的样本, 并按照 $0 \text{ min} < T \leq 100 \text{ min}$ 、 $100 \text{ min} < T \leq 200 \text{ min}$ 、 $200 \text{ min} < T \leq 300 \text{ min}$ 、 $300 \text{ min} < T \leq 400 \text{ min}$ 、 $400 \text{ min} < T \leq 500 \text{ min}$ 、 $500 \text{ min} < T \leq 600 \text{ min}$ 及 $600 \text{ min} < T \leq 700 \text{ min}$ 划分为 7 个级别, 对应模糊变量分别为 η_{AD} 、 η_{BD} 、 η_{CD} 、 η_{DD} 、 η_{ED} 、 η_{FD} 及 η_{GD} ; 分区密度 D 从 $(0, 1)$ 占用划分为 10 个级别, 对应模糊变量为 HP、FP、TP、LP、MP、SP、VP、ZP、QP 及 IP; 库位分区 U 按照实际库位距 I/O 位置的最小欧氏距离划分 7 个分区, 对应模糊变量为 IS、IIS、IIS、M、IL、IIL 及 IILL. 根据分区占用密度对库位分配的影响, 定义 70 条条件语句为模糊运算规则, 通过输入参数的模糊变量与模糊规则进行模糊推理, 得到输出参数的模糊变量, 即库位分区.

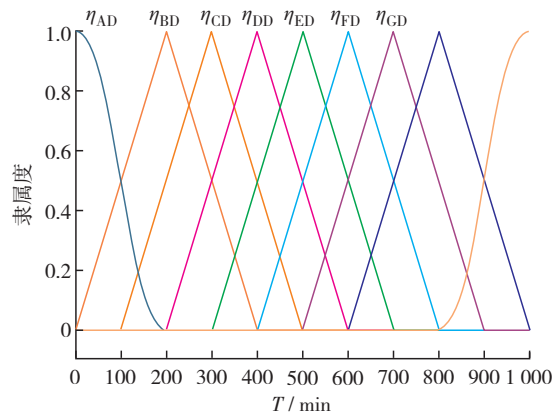
为更好表达给定实例的属性及起始、末端参数的变化, 本研究模糊控制器隶属度均采用离散型三角形隶属函数和连续型 S 型隶属函数组合描述, 参数 T 、 D 、 U 的隶属度函数如图 4.

3) 反模糊化及均衡库位占用分布

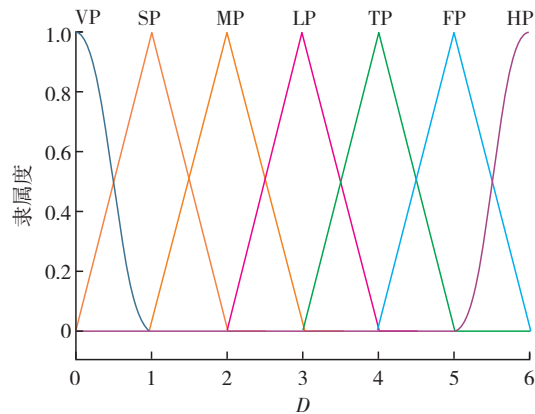
面积重心法反模糊化保留了原始图像的细节信息, 并具有较高的视觉质量, 由于其运算量较小, 可以实现实时反模糊操作. 在考虑驻留时间特征和库位分布均衡要求下开发经验模糊规则, 当输入变量在隶属度范围内沿梯度变化时, 控制器输出值经模糊运算相应地变化, 即车辆驻留时间特征和库位占用密度的输入值可以映射到特定的库位分区.

图5为模糊逻辑下库位分区与隶属度的映射关系. 可见, 当 $T = 1 \text{ min}$, $D = \text{TP}$ 时, $U = 1$, 该情形表示当所属 $T = 1 \text{ min}$ 的库位分区占用率达到 20% 时, 库位分配至 $T = 1 \text{ min}$ 所属分区; 当 $T = 1 \text{ min}$, $D = \text{MP}$ 时, $U = 2$, 该情形表示当所属 $T = 1 \text{ min}$ 的库位分区占用率达到 40% 时, 库位分配优先分配至 $T = 2 \text{ min}$ 所属分区; 当 $T = 1 \text{ min}$, $D = \text{ZP}$ 时, $U = 3$, 该情形表示当所属 $T = 1 \text{ min}$ 的库位分区占用率达到 70% 时, 库位分配优先分配至 $T = 3 \text{ min}$ 所属分区. 以此类推, 随着驻留时间所对应分区占用率的升高, 实际库位分配相应向高级别分区进行非线性偏移.

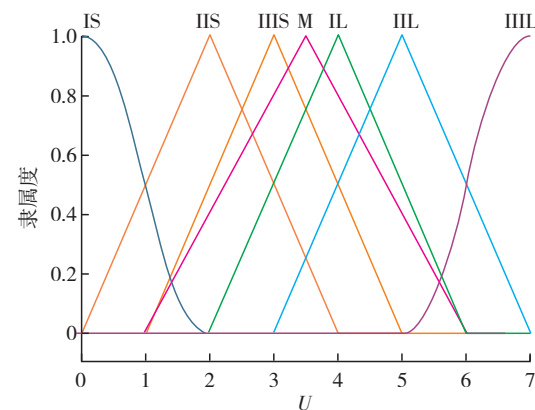
以上库位分配策略避免了分区占用集中情形, 但当低级别分区占用密度达到偏移临界值后, 存在无法继续存入车辆的问题, 采用增加相邻库位迁移策略的方式解决此问题. 相邻分区转移的必要条件为当前分区占用率达到 100%、RGV 空闲且相邻低



(a) 驻留时间隶属度函数



(b) 库位占用密度属性隶属度函数



(c) 库位分区隶属度函数

图4 模糊控制器隶属度函数

Fig. 4 Fuzzy controller membership functions of (a) dwell time, (b) storage location occupancy density attribute and (c) storage location partition.

级别分区存在空闲库位. 图6为均衡库位分布策略原理示意图, 假设在某高峰时段, 驻留时间相似的车辆集中到达, 该时间段驻留时间隶属度为1所对应车辆较多, 当分区1占用不断增加, 到偏移临界值时分区分配转移至分区2, 但此时驻留时间隶属度为1的车辆继续到达, 即使驻留时间2所对应车辆随着分区2占用密度的增加而调整至其他分区,

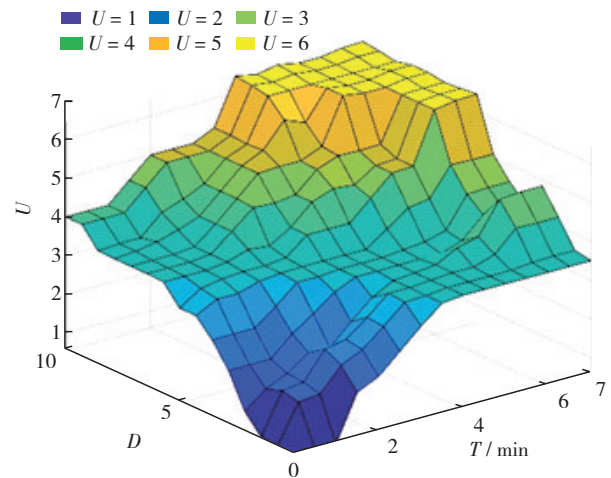


图5 隶属度对于库位分区映射关系

Fig. 5 Mapping relationship of the affiliation degree to the reservoir partitioning.

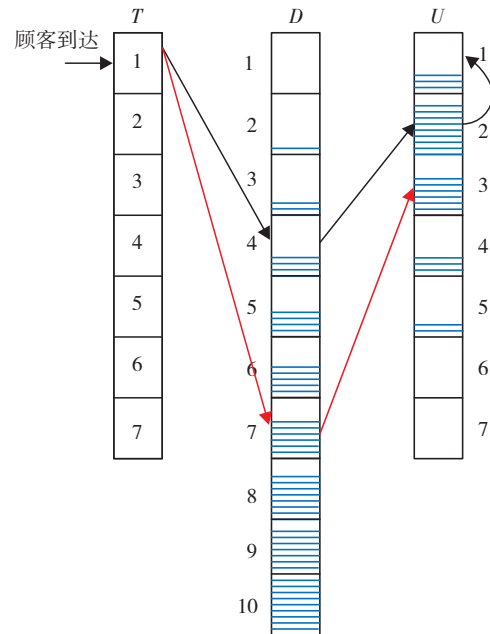


图6 均衡库位分布策略原理

Fig. 6 Schematic diagram of balanced storage distribution strategy.

但分区2依旧会因为分区1达到偏移临界值的转移而占满, 此时, 则需要将分区2内车辆向低级别分区1转移, 随之分区1占用密度增加, 即 D 增大, 则下次驻留时间隶属度为1所对应车辆则会被分配至分区3以及更高级别分区, 避免了继续分配至分区2情形. 同理, 所有高级别分区满足分区转移条件后均向其相邻低级别分区转移. 由于分区级别对应与I/O位置的距离, 且分区转移过程均为高级别分区向低级别分区转移, 相当于RGV搬运高级别分区车辆直接出库的一部分运行路径, 车辆分区转

移过程RGV运行能耗与车辆从转移后分区出库过程RGV运行能耗之和, 近似等于车辆从转移前分区出库过程RGV运行能耗, 故基本不会额外增加车库运营成本。

3.2 库位分布均衡性检验

立体车库库位分布均衡是指库位占用尽可能分布于不同分区, 从而防止RGV集中作业, 避免造成阻塞死锁。用某时刻的整体占用分布标准差 σ 表示车库整体库位分布均衡水平,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{U=1}^{N_U} (D_{U,b} - E_{D_{U,b}})^2}{N_U}} \quad (5)$$

其中, $D_{U,b}$ 为库位分区 U 在 b 时刻的分区密度; N_U 为分区总数; $E_{D_{U,b}}$ 为期望值。 σ 越大表示车库整体库位分布均衡水平越差。

3.3 基于禁忌搜索的分区内动态库位寻优

当到达车辆按其特征被分配至指定分区后, 利用禁忌搜索算法在对指定分区内空闲库位进行寻优, 禁忌搜索算法基本原理为从某一初始节点开始, 在邻近域找到候选解, 并通过禁忌表记录状态变化, 当出现被禁解优于当前最好解时, 引入藐视准则, 最终通过迭代实现分区库位寻优。

算法实现流程如下:

步骤1 选择对应库位分区内某一空闲库位作为初始解 x_{now} , 以周围邻近库位生成候选解;

步骤2 选择沿分区对角线进行禁忌移动, 通过评价函数筛选出候选解中最优解 x_{reg} , 记录候选解最优解及更新禁忌表;

步骤3 比较候选解中 x_{reg} 与禁忌表中的最优解 x_{reg} , 若 $x_{\text{reg}} > x_{\text{now}}$, 则藐视禁忌准则, 更新最优值; 若 $x_{\text{reg}} < x_{\text{now}}$, 则进行禁忌释放, 更新禁忌表;

步骤4 判断是否满足终止条件, 若满足则执行步骤5, 不满足则返回步骤2;

步骤5 输出最优解。

4 实验仿真

4.1 效率指标

以车库平均服务时间及平均运行能耗作为性能评价指标。记RGV水平负载运行功率为 P_{r1} , 空载运行功率为 P_{r2} , 运行速度均为 v_r ; 升降机垂直负载运行功率为 P_{l1} , 空载运行功率为 P_{l2} , 运行速度均为 v_l 。假设某时刻入库车辆 i 到达, RGV在 (x_{i0}, y_{i0})

待命, 分配库位至 (x_{i1}, y_{i1}) , 则RGV单个任务服务时间 t_i 及所消耗能耗 w_i 为

$$t_i = \left(\frac{Lx_{i0}}{v_r} + \frac{Hy_{i0}}{v_l} \right) + \left(\frac{Lx_{i1}}{v_r} + \frac{Hy_{i1}}{v_l} \right) \quad (6)$$

$$w_i = \left(P_{r1} \frac{Lx_{i0}}{v_r} + P_{l1} \frac{Hy_{i0}}{v_l} \right) + \left(P_{r2} \frac{Lx_{i1}}{v_r} + P_{l2} \frac{Hy_{i1}}{v_l} \right) \quad (7)$$

RGV平均服务时间 T_{ser} 由服务顾客总数与RGV服务总时间决定, T_{ser} 越小表明车库的运行效率越高,

$$T_{\text{ser}} = \frac{\sum_{i(S)=1}^S t_{i(S)} + \sum_{i(R)=1}^R t_{i(R)}}{S + R} \quad (8)$$

其中, S 和 R 分别表示入库车辆总数和出库车辆总数; $i(S)$ 和 $i(R)$ 表示顾客车辆编号。

RGV平均能耗 W_{ever} 与RGV运行能耗之和、服务总任务数及RGV总数量有关, 在任务数及RGV总数相同时, W_{ever} 越小表明该调度策略越优,

$$W_{\text{ever}} = \frac{\sum_{i(S)=1}^S w_{i(S)} + \sum_{i(R)=1}^R w_{i(R)}}{S + R} \quad (9)$$

4.2 实例验证

以西安市某平面移动式立体车库为实例对本研究库位分配策略进行验证, 该车库结构为双排7层、14列库位布局, 配置2台升降机, 3台RGV, 库位高度为2.5 m, 宽度为2.0 m, 车辆入库检查及准备工作固定时间均为60 s, RGV存完车后返回I/O口待命。保持神经网络设计参数不变, 由于立体车库在工作日和非工作日09:00—11:00时段顾客到达数量的整体趋势基本一致, 且任务到达强度呈现增、减、增及减变化情形^[15]。可通过非齐次泊松流模拟顾客到达过程, 验证模型对不同强度到达序列的优化性能, 对比就近分配策略与本研究策略的车库模型运行效率。

图7(a)为RGV服务时间指标变化情况。可见, 随着到达序列的增加, 就近分配策略下RGV服务时间呈增长趋势, 这是由于随着到达顾客的增加, I/O口所在层所容纳车辆数逐渐饱和, 当入、出库口所在层车辆饱和后, 跨层搬运车辆一方面受升降机状态的影响, RGV需将入库车辆搬运至同层较远位置或跨层作业运行至库位, 升降机位于车库巷道两端, 升降机使用频率的增加会导致等待升降机所用时间的增加, 因此, RGV服务时间增加。在本研究设计策略下RGV服务时间整体趋势保持平稳, 前期服务时间高于就近分配, 这是由于神经网络预

测模型预测 09:00 左右车辆存在驻留时间较长特性, 故所分配库位离 I/O 位置较远, RGV 可能向着其他层的库位进行跨层移动。

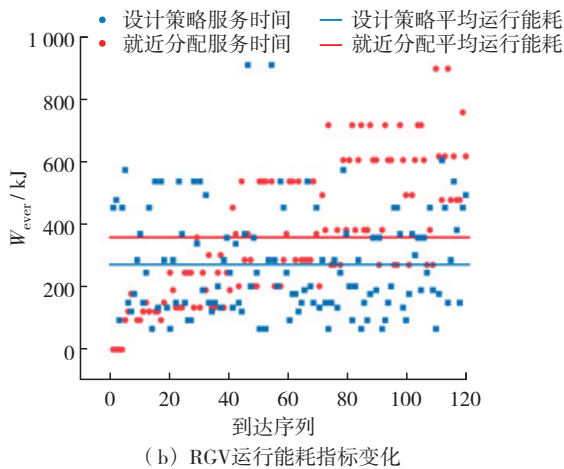
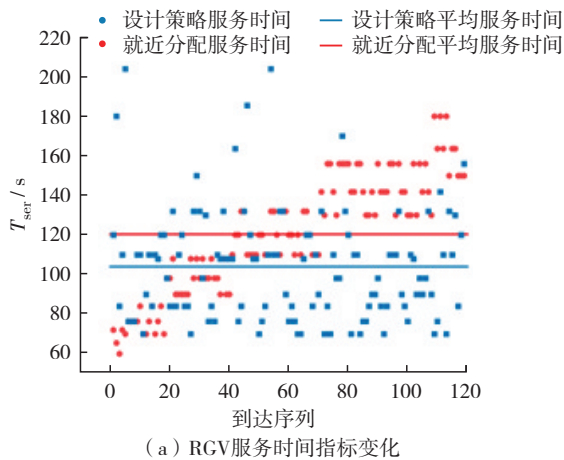


图7 立体车库不同库位分配策略下的效率指标对比

Fig. 7 Comparison of (a) change in RGV service time indicator and (b) change in energy consumption indicators of RGV operation under different parking space allocation strategies in multi-level parking garages.

图 7(b) 为 RGV 存取车的能耗情况。可见, 在就近分配策略下, 前期 RGV 运行能耗较低, 这是由于库位所在层与 I/O 口在同一层, 即 RGV 无跨层运行, 仅存在水平运行, 无需升降机配合; 当顾客到达序列增至 30 时, 能耗首次高于设计策略, 且保持增长趋势, 图中可看到明显的阶梯变化。这是由于库位与 I/O 口初始位置所属不同层, 即 RGV 出现跨层运行, 需要升降机配合, 随着跨层数量增加, 能耗也随之阶梯式增加。本研究策略下的整体能耗集中分布在 200 kJ 以内, 且不存在明显梯度变化, 这是由于依据车辆驻留时间预测值, 近 I/O 口处短时驻留库位使用频次较高, 而长时驻留库位普遍包括水平运行阶段和跨层运行阶段两部分, 能耗

较高, 使用频次较低, 符合能耗优化的目标期望。

多次仿真结果表明, 本设计策略下立体车库平均服务时间为 1.733 min, 相较于就近分配策略的 2.022 min 降低 14.3%, 平均运行能耗为 272.779 kJ, 相较于就近分配策略的 358.371 kJ 降低 23.8%, 库位分布均衡标准差为 1.085, 相较于就近分配策略的 11.166 降低 90.3%。可见, 本研究库位分配策略能在不增加立体车库设计成本的前提下, 有效降低 RGV 运行能耗, 并降低 RGV 平均服务时间, 明显改善库位分布均衡性, 改善顾客存取车体验。

5 结 论

本研究得出的主要结论如下:

1) 所采用贝叶斯优化的长短时记忆网络模型预测车辆库内驻留时间较文献[4]中蜻蜓算法优化反向传播神经网络模型结果准确率提高 1.2%, 可较为准确地为所设计库位分区策略提供基础。

2) 与就近分配的库位分配策略相比, 本研究设计策略下立体车库运行能耗和平均服务时间更小, 表明本设计策略可有效提高立体车库运行效率, 降低车库运营成本。

3) 本设计策略下立体车库库位分布均衡指标显著提升, 表明兼顾库位分布均衡的库位分配策略有效。

后续研究可在继续优化神经网络影响因子结构以及模糊控制规则下, 进一步改进库位分配模型。

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(20JR5RA396); 中国高校产学研创新基金蓝点分布式智能计算资助项目(2021LDA07002); 甘肃省教育厅 2023 年高等学校创新创业教育示范课程资助项目(202306)

作者简介: 李建国(lijianguo@mail.lzjtu.cn), 兰州交通大学副教授、博士。研究方向: 智能交通、仓储物流自动化。

引 文: 李建国, 赵剑英, 钟高卫. 基于模糊理论的立体车库非线性动态库位分配策略[J]. 深圳大学学报理工版, 2025, 42(6): 706-713.

参考文献 / References:

- [1] 王小农, 李建国, 贺云鹏. 平面移动式立体车库车位分配的建模与仿真[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1): 54-62.
- WANG Xiaonong, LI Jianguo, HE Yunpeng. Modeling and simulation of parking space allocation in plane mobile stereo garage [J]. Journal of Nanjing University of Science

- and Technology, 2019, 43(1): 54-62. (in Chinese)
- [2] JIAO Yuling, XING Xiaocui, ZHANG Peng, et al. Multi-objective storage location allocation optimization and simulation analysis of automated warehouse based on multi-population genetic algorithm [J]. Concurrent Engineering, 2018, 26(4): 367-377.
- [3] 李建国, 杨波, 马尚鹏. 基于顾客到达拟合的立体车库搬运器待命位设计策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(6): 217-225.
- LI Jianguo, YANG Bo, MA Shangpeng. Design on dwell point policy of three-dimensional garage movers based on customer arrival fitting [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(6): 217-225. (in Chinese)
- [4] 李建国, 李博文, 杨波. 平面移动式立体车库动态库位分配策略建模与仿真[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(9): 126-134.
- LI Jianguo, LI Bowen, YANG Bo. Modeling and simulation of dynamic location allocation strategy for plane mobile stereo garage [J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(9): 126-134. (in Chinese)
- [5] KOLLA R. Combat labor shortages with automated solutions [J]. Control Engineering, 2022, 69(4): 16.
- [6] 曾强, 张泽斌, 杨龙飞. 有货位载重约束的自动化立体仓库货位分配多目标优化方法[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 65-69.
- ZENG Qiang, ZHANG Zebin, YANG Longfei. Multi-objective optimization method for AS/RS storage location assignment problem with storage load limit [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014 (12): 65-69. (in Chinese)
- [7] ROSA R D A, RIBEIRO G M, MAURI G R, et al. Planning the berth allocation problem in developing countries with multiple cargos and cargo priority by a mathematical model and a clustering search metaheuristic [J]. International Journal of Logistics Systems and Management, 2017, 28(4): 397-418.
- [8] 杨玮, 张文燕, 常晏彬, 等. 自动化立体仓库的货位分配优化[J]. 现代制造工程, 2014(12): 134-140.
- YANG Wei, ZHANG Wenyan, CHANG Yanbin, et al. Optimization of location assignment in AS/RS [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014 (12): 134-140. (in Chinese)
- [9] 陈桢, 杨旻. 基于遗传算法的自动化立体车库库位分配[J]. 制造业自动化, 2019, 41(11): 49-53.
- CHEN Zhen, YANG Min. Resource allocation based on genetic algorithm in automated stereo garage [J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(11): 49-53. (in Chinese)
- [10] MIRZAEI M, ZAERPOUR N, DE KOSTER R B M. How to benefit from order data: correlated dispersed storage assignment in robotic warehouses [J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(2): 549-568.
- [11] ZHANG Hao, HE Wei, XU Haihong, et al. Investigating a water resource allocation model by using interval fuzzy two-stage robust planning for the Yinma River Basin, Jilin Province, China [J]. Water, 2021, 13(21): 2974.
- [12] 彭秋琼. 基于模糊控制算法的仓储库存管理远程自动控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2022, 44(2): 198-200, 205.
- PENG Qiuqiong. Design of remote automatic control system for inventory management based on fuzzy control algorithm [J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(2): 198-200, 205. (in Chinese)
- [13] 焦玉玲, 张鹏, 田广东, 等. 基于多种群遗传算法的自动化立体库货位优化[J]. 吉林大学学报工学版, 2018, 48(5): 1398-1404.
- JIAO Yuling, ZHANG Peng, TIAN Guangdong, et al. Slotting optimization of automated warehouse based on multi-population GA [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2018, 48(5): 1398-1404. (in Chinese)
- [14] JIANG Ben, GONG Hongwei, QIN Haosen, et al. Attention-LSTM architecture combined with Bayesian hyperparameter optimization for indoor temperature prediction [J]. Building and Environment, 2022, 224: 109536.
- [15] 李建国, 赵剑英, 薛千树. 基于启发式回溯算法的平面移动式立体车库 RGV 调度策略[J]. 重庆邮电大学学报自然科学版, 2024, 36(3): 582-590.
- LI Jianguo, ZHAO Jianying, XUE Qianshu. RGV scheduling strategy of planar mobile stereoscopic garage based on heuristic backtracking algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications Natural Science Edition, 2024, 36(3): 582-590. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】