

本文引用格式: 廉胤东, 苟彬, 李超磊, 等. 基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法[J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(5): 40-46; 53.

LIAN Yindong, GOU Bin, LI Chaolei, et al. Distributed multi-AGV path planning method based on heuristic energy consumption optimization for power storage[J]. Automation & Information Engineering, 2024, 45(5): 40-46; 53.

基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法

廉胤东¹ 苟彬² 李超磊¹ 李泽明¹ 余锦伟³ 曾俊海⁴

(1. 南方电网供应链科技(广东)有限公司, 广东 广州 510630

2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510062

3. 中国电信股份有限公司广东研究院, 广东 广州 510660

4. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对电力仓储环境下多自动导引车 (AGV) 系统的任务效率较低、能耗较高的问题, 提出一种基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法。首先, 提出两轮差速驱动 AGV 运动模型, 引入驱动电机参数; 然后, 通过分析 AGV 车载锂电池的放电特性, 建立 AGV 能耗模型; 接着, 分析 AGV 的主要能耗环节与路径网络特性, 提出增加有限路径网络资源利用率、减少 AGV 移动时间的节能策略, 并在 AGV 运动规划过程中引入时间约束; 最后, 提出一种改进时间约束的启发式路径规划方法, 将能耗转化为路径网络占用时间, 以实现系统能耗最小。数值模拟实验数据表明, 该方法提高了多 AGV 系统的任务效率, 有效降低了系统能耗。

关键词: 多 AGV 系统; 路径规划; 能耗优化; 启发式搜索算法; 电力仓储; 分布式规划

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)05-0006-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.05.006

开放获取

Distributed Multi-AGV Path Planning Method Based on Heuristic Energy Consumption Optimization for Power Storage

LIAN Yindong¹ GOU Bin² LI Chaolei¹ LI Zeming¹ YU Jinwei³ ZENG Junhai⁴

(1. Southern Power Grid Supply Chain Technology (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510062, China

3. Guangdong Research Institute of China Telecom Corporation Limited, Guangzhou 510660, China

4. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: A distributed multi-AGV path planning method based on heuristic energy optimization for power storage is proposed to address the issues of low task efficiency and high energy consumption in multi-AGV systems in the power storage environment. Firstly, a two wheel differential drive AGV motion model is proposed, and the driving motor parameters are introduced; Then, by analyzing the discharge characteristics of AGV onboard lithium batteries, an AGV energy consumption model is established; Next, analyze the main energy consumption links and path network characteristics of AGV, propose energy-saving strategies to increase the utilization of limited path network resources and reduce AGV movement time, and introduce time constraints in the AGV motion planning process; Finally, a heuristic path planning method with improved time constraints is proposed, which converts energy consumption into the time occupied by the path network to achieve the minimum system energy consumption. Numerical simulation experimental data shows that this method improves the task efficiency of multi-AGV systems and effectively reduces system energy

consumption.

Keywords: multi-AGV system; path planning; energy consumption optimization; heuristic search algorithm; power storage; distributed planning

0 引言

随着工业 4.0 的深入推进,越来越多的工业工厂利用高度自动化的智能仓库系统作为提升竞争力的关键手段^[1]。智能仓库系统凭借灵活的解决方案,在降低人力、时间及运营成本的同时,确保了仓库运营任务的高效执行。在智能仓库系统中,自动导引车(automated guided vehicle, AGV)主要用于运输与货物分拣,其数量可达数十甚至上百台^[2]。在仓库有限的空间内,多 AGV 需沿着特定的路线移动,其路径规划及避障策略直接影响仓库运营的效率与灵活性。因此,在多 AGV 协同作业的环境下,有效解决冲突并优化有限路径网络资源的利用率尤为重要^[3]。此外,多 AGV 系统的节能问题至今仍缺乏有效的解决方案^[4-5]。

近年来,研究人员提出了多种机器人规划和避障方法^[6-7]及节能运动规划方法^[8-9]。文献[10]提出一种基于 Petri 网分解的算法,旨在精确计算最短且可行的 AGV 路径方案;但多 AGV 间存在的冲突避让机制可能使其选择次优路径,甚至引发死锁现象^[11]。文献[12]将静态路径规划问题重构为基于时间的 Petri 网最优序列求解问题,有效解决了多 AGV 间的冲突与死锁问题;但其规划的路径增加了 AGV 的运动距离,降低了任务效率。文献[13]提出一种包含三步平滑处理的改进 A*算法,通过对规划路径上的节点进行冗余滤波与插值平滑,提升了路径平滑度,有效缩短了整体路径长度;但该算法不适用于多 AGV 系统的固定网格路径规划。文献[14]在传统 A*算法的基础上,融入了预处理与后处理步骤,考虑了无障碍碰撞的情形,确保规划的局部路径的节点数量与距离均最小,进而实现全局路径最优;但多 AGV 因避让而产生了较长的等待时间,降低了协同任务的效率。从多 AGV 系统节能的角度来看,机器人运动规划的优化流程尤为重要^[15]。文献[16]提出一种最小能量速度规划策略,

与梯形速度曲线相比,该策略电池能量节约达 10%;但其计算复杂度较高,不适用于实时场景。文献[17]提出的节能运动规划方法,相较于基于任务效率的方法,能耗节约达 42%;但该方法主要对 AGV 单次任务的能量效率进行规划,无法满足长期、连续任务的要求。多 AGV 系统节能的另一策略是将最短路径长度作为目标函数的考虑因素,以实现能耗最小化^[18]。文献[19]利用动能损失测试来评估机器人在动态环境下的节能运动性能,并通过优化机器人的步态规划、动力学模型、动力分配算法等,提高了机器人的能源利用效率;但节能设计在一定程度上降低了机器人的任务效率。文献[20]通过减少机器人的转向驱动,实现了能耗最小化;利用多项式参数化寻求可行轨迹,考虑了边界条件、运动学约束和避障准则,提高了路径的利用效率;但该方法在多 AGV 动态变化场景下适应性较差。文献[21]在轨迹规划阶段,对生成的路径进行平滑处理,一定程度上降低了机器人运动过程中不必要的能耗;但需要进一步提升动态障碍物环境下的实时避障能力。

本文提出一种基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法。首先,分析单台 AGV 的运动模型,结合电机特性和车载锂电池的放电特性,建立 AGV 能耗模型;然后,提出一种适用于多 AGV 系统分布式架构的启发式路径规划方法,提高了多 AGV 系统的任务效率,同时降低了系统能耗。

1 AGV 运动模型和能耗模型

1.1 两轮差速驱动 AGV 的运动模型

两轮差速驱动 AGV 模型是多 AGV 系统中常见的模型,具有较高的灵活性和可靠性,示意图如图 1 所示。

图 1 中,AGV 的质量中心为 C ,左、右驱动轮的中心分别为 O_l 和 O_r ,左、右驱动轮中心之间的距离为 d ,左、右驱动轮的线速度分别为 v_l 、 v_r ,AGV 旋

转的瞬时速度中心为 O_c ，AGV 在运动平面旋转产生的角速度为 ω ，左、右驱动轮沿轮心旋转产生的角速度分别为 ω_l 、 ω_r 。

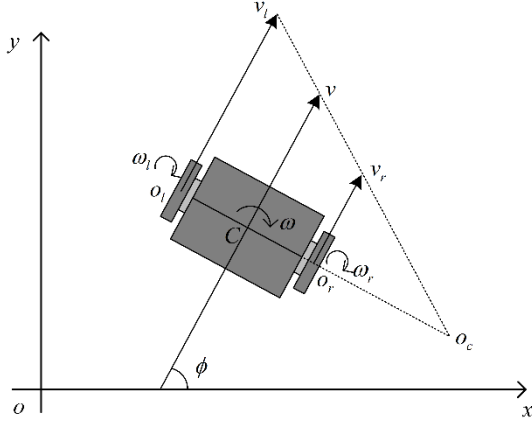


图 1 两轮差速驱动 AGV 模型示意图

AGV 左、右驱动轮分别由相应的电机驱动，产生的合力驱动 AGV 移动，其对应的线速度 v 和角速度 ω 可表示为

$$v = (v_l + v_r) / 2 \quad (1)$$

$$\omega = (v_l - v_r) / d \quad (2)$$

AGV 左、右驱动轮的角速度可表示为

$$\begin{bmatrix} \omega_l \\ \omega_r \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -d/2 \\ 1 & d/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： r 为驱动轮半径。

驱动 AGV 运动的直流电机模型可表示为

$$l \frac{di}{dt} + Ri(t) + C_e \dot{\Omega}(t) = U(t) \quad (4)$$

式中： $i(t)$ 为电枢电流， $U(t)$ 为输入电压， $\Omega(t)$ 为转子角速度， l 、 R 、 C_e 分别为电机的电枢电感、电阻、电动势常数。

因此，每个驱动轮的角速度可表示为

$$\omega = \int_t \dot{\Omega}(t) dt = \frac{1 - li(t)}{C_e} \int_t U(t) - Ri(t) dt \quad (5)$$

1.2 AGV 锂电池放电特性与能耗模型

AGV 的能耗主要源自其搭载的车载锂电池组。

为评估和控制 AGV 能耗，分析锂电池放电特性并构建精确的 AGV 能耗模型尤为重要。本文根据锂电池电压下降的趋势来估算剩余电池容量。放电电压测试选用的锂电池额定容量为 6 Ah，放电电流为 8 A，根据测试结果绘制的放电电压曲线如图 2 所示。

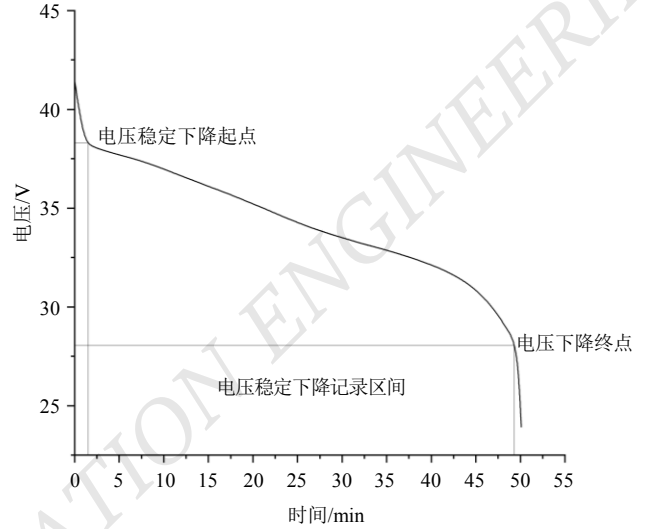


图 2 锂电池放电电压曲线图

由图 2 可知：锂电池的稳定放电区间在测试时间的 2.5~49 min 范围内，此时间段内，锂电池电压保持相对平稳的下降趋势，反映了锂电池在正常工作状态下的稳定性能；而在放电电压曲线的两端（0~2.5 min 为锂电池初始放电阶段，49~50 min 为锂电池完全放电阶段）呈现出较为陡峭的变化趋势，为锂电池的不稳定放电区间。因此，通过观察锂电池稳定放电区间的电压值，即可估计剩余的电池容量。

单台 AGV 的能量主要消耗在克服自身重量、负载、地面摩擦、传感器和车载控制器等环节。根据运动学和动力学关系，得到 AGV 的动能变化关系为

$$E_{\text{kinect}} = \frac{1}{2} mv(t)^2 + \frac{1}{2} J\omega(t)^2 \quad (6)$$

式中： E_{kinect} 为 AGV 运动产生的能量消耗， m 为 AGV 的质量， J 为转动惯量。

两轮差速驱动 AGV 模型的转动惯量很小，可以忽略不计。将公式(1)、(3)、(5)代入公式(6)，可得到

$$\begin{aligned}
 E_{\text{kinect}} &= \frac{1}{4} m(v_l(t) + v_r(t))^2 \\
 &= \frac{1}{4} mr(\omega_l(t) + \omega_r(t))^2 \\
 &= \frac{1}{4} mr \left(\sum_{k=l,r} \frac{1-l_k(t)}{C_e} \int_t U_k(t) - Ri_k(t) dt \right)^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

用 E_{others} 表示传感器和车载控制器消耗的能量，则锂电池的总能量消耗 E_{battery} 为

$$E_{\text{battery}}(t) = E_{\text{kinect}}(t) + E_{\text{others}}(t) \quad (8)$$

在单台 AGV 运行过程中，车载控制器和电路损耗等环节的功率通常是固定的，而电机消耗了超过 80% 的电能。因此，多 AGV 系统通过进一步优化运动规划，可降低系统能耗。

2 改进的启发式路径规划方法

多 AGV 系统的路径规划通常是分布式的，即每台 AGV 独立规划，规划过程由规划器主控单元管理，如图 3 所示。

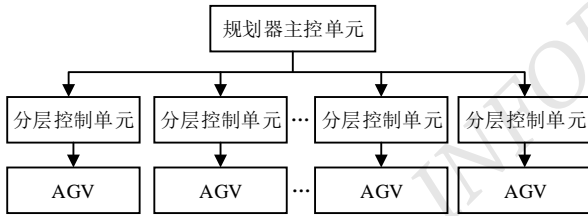


图 3 分布式规划示意图

然而，分布式路径规划容易导致部分路径网络资源占用率过高。类似蚁群算法的思想^[22-23]，独立规划的 AGV 可能集中在一定数量的固定路径上，导致这些路径拥堵，而其他路径网络资源被浪费。如果每台 AGV 都能选择最短的路径移动，则系统能耗最小。但发生拥堵时，通常需要停车等待或重新规划绕行路径，这将产生大量额外的能耗。因此，最大限度地利用有限的路径网络资源，并减少 AGV 的移动时间至关重要。

2.1 分布式规划路径网络模型

根据 AGV 在仓库中运行的环境特点，构建类似于网格状网络的多 AGV 路径网络，如图 4 所示。

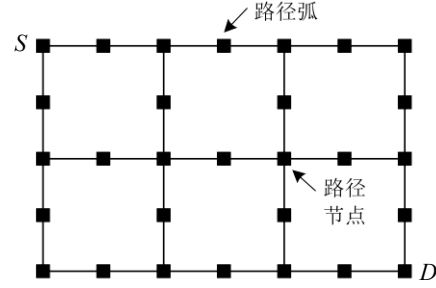


图 4 多 AGV 路径网络示意图

图 4 中，多 AGV 路径网络由一组路径弧（线段）和路径节点（黑色方块）组成。AGV 根据任务在路径网络内有方向性地移动（如从起始节点 S 到目标节点 D ）。

定义路径节点集为 \mathcal{V} 、路径弧集为 \mathcal{E} 、路径成本为 \mathcal{W} ：

$$\begin{cases}
 \mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\} \\
 \mathcal{E} = \{(i, j) \mid i, j \in \mathcal{V}\} \\
 \mathcal{W}(t) = \{w_{ij}(t) \mid (i, j) \in \mathcal{E}, t \in [t_o, t_q]\}
 \end{cases} \quad (9)$$

为了控制多 AGV 系统的时间消耗，本文利用动态随机网络理论来定义 AGV 路径网络。定义从节点 i 到节点 j 的路径成本为 $w_{ij}(t)$ ，其中 t 为 AGV 运动的起始时间；路径集为 $\mathcal{X} = \{x_{ij} \mid (i, j) \in \mathcal{E}\}$ 。假设路径弧的成本是时间依赖的，且在闭区间 $[t_o, t_q]$ 上相互独立，那么路径成本 $w_{ij}(t)$ 是一个分布函数为 $\mathcal{F}(w_{ij}, t)$ 的时间连续随机变量。路径总成本是每条路径成本之和，可以表示为 $\mathcal{C}(t_0) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} w_{ij}(t) x_{ij}$ 。

根据概率分布理论， $\mathcal{C}(t_0)$ 是一个连续时间随机变量。在多 AGV 系统中，AGV 直行、转向和避障等耗时环节的不确定性，导致每条路径弧的成本也不确定。假设 $\mathcal{R}(s, d)$ 表示从起始节点到目标节点的部分路径集， $\mathcal{C}(\mathcal{R}_{s,d})$ 表示整条路径的消耗，那么关键问题是根据路径网络的分布特性和统计数据找到最小成本 $\mathcal{C}_{\min} = \min \{\mathcal{C}(\mathcal{R}_{s,d})\}$ 的分布，并规划成本最小的最优路径。

定理 1^[24]：对于两个随机变量 X 和 Y ， X 的期望

值 $E(X)$ 小于 Y 的期望值 $E(Y)$ 等价于 $P(X \leq Y) \geq 0.5$ ，即 $E(X) \leq E(Y) \Leftrightarrow P(X \leq Y) \geq 0.5$ 。

定理 1 可将时间最优路径的计算转化为两个路径时间成本期望值之间的比较。因此，需要在启发式算法中添加概率时间约束，以便比较两条路径的预期时间消耗。

2.2 改进时间约束的启发式路径规划方法

包含概率时间约束的改进 A* 算法的启发函数为

$$f(j, t_s) = g(j, t_s) + h(j, t_s) \quad (10)$$

类似于 A* 算法的启发函数^[13]， $g(j, t_s)$ 和 $h(j, t_s)$ 分别为已发生成本和估计成本， t_s 为从起始节点运动的起始时间， j 为当前节点。

对于已发生成本，启发函数包含了路径长度和 AGV 速度，且增加了 AGV 在路径交叉位置的转向时间成本 T 。假设 AGV 的平均速度为 v_e ，那么已发生成本 $g(j, t_s)$ 可表示为

$$g(j, t_s) = \begin{cases} L_p / v_e + T_o + \sum_1^n T, n \leq \text{num}(\text{node}) \\ L_p / v_e + T_o \end{cases} \quad (11)$$

式中： L_p 为整条路径的长度，根据曼哈顿距离计算，即节点 $A(x_A, y_A)$ 和 $B(x_B, y_B)$ 之间的距离为 $L_{AB} = |x_A - x_B| + |y_A - y_B|$ ； T_o 为 AGV 停车时间； n 为转向节点的最大数量。

此外，公式(11)包含了转向和不转向两种情况。

路径的估计成本 $h(j, t_s)$ 根据获得的时间期望值进行评估：

$$h(j, t_s) = \sum_1^m E(\omega_{ij}(t)), m \leq \text{num}(\text{arc}) \quad (12)$$

式中： $E(\omega_{ij}(t))$ 为时间成本的期望值， m 为路径弧的最大数量。

改进时间约束的启发式路径规划方法流程如下：

步骤 1：初始化 OPEN 和 CLOSE 列表；

步骤 2：先计算起始节点 S 的时间成本 $f(s, t_s)$ 并记录时间 T_{start} ，再将 S 添加到 CLOSE 列表中；

步骤 3：从 CLOSE 列表中选择最近添加的节点

i ，将与节点 i 相邻且不在 CLOSE 和 OPEN 列表中的节点添加到 OPEN 列表，并根据公式(10)计算 f 值；更新与节点 i 相邻且在 OPEN 列表中节点的 f 值（重新计算以节点 i 为父节点的节点 f 值，并仅在新 f 值小于旧值时更新）；

步骤 4：将 OPEN 列表中的节点按 f 值从小到大排序，并将 f 值最小的节点添加到 CLOSE 列表中；

步骤 5：如果 CLOSE 列表中包含目标节点，则停止搜索；如果 CLOSE 列表中没有目标节点，则返回步骤 3。

3 数值模拟实验

本文通过 Java 编程开发了模拟电力仓储多 AGV 系统的场景，并将图 4 所示的多 AGV 路径网络扩展至 8×14 ，包括 202 条路径弧和 96 个节点。同时，在路径网络中设置了 29 台 AGV 和 16 个出入口。

为了统计多 AGV 路径网络的占用时间和 AGV 能耗，设置每条路径弧的起始时间成本为 900 ms，转向节点处 AGV 起始转向时间为 1 000 ms。实验开始后 30 min，对每条路径弧的时间成本进行数据正态性分析。其中一条路径弧的描述性统计数据如表 1 所示。

表 1 一条路径弧的描述性统计数据

	统计值/ms	标准误差/ms
均值	2 001.112 0	17.995 48
95%均值置信区间	1 963.532 2 2 038.691 8	
5%修整均值	2 000.618 9	
中位数	1 994.440 0	
标准偏差	80.296 2	
最大值	2 134.560 0	
最小值	1 876.540 0	
全距	258.020 0	
四分位距	136.440 0	
偏度	0.130	0.512
峰度	-0.104	0.992

由表 1 可知，偏度和峰度均接近 0，表明统计数据分布接近对称，且数据分布的陡峭程度与正态分布

相似，没有过多的极端值，服从正态分布。

正态性检验如表 2 所示。

表 2 正态性检验

	统计值	自由度	显著性
Kolmogorov-Smirnov	0.088	50	0.200
Shapiro-Wilk	0.960	50	0.539

由表 2 可知, Kolmogorov-Smirnov (KS)和 Shapiro-Wilk (SW)检验显著性均大于 0.05, 进一步证明了该段路径弧成本的统计数据服从正态分布^[24]。实验中其他路径弧的成本统计数据均符合正态分布, 可取其均值作为该段弧的路径成本, 并在每 30 min 后进行更新。

根据统计数据, 重新设置动态随机网络的路径成本, 并保留了起始点、终点以及多 AGV 路径网络中的 AGV 数量。采用传统 A*算法、本文方法、改进的 A*算法^[25]进行对比实验。其中, 改进的 A*算法利用距离最优和转向平滑处理进行路径规划。数值模拟实验记录了多 AGV 系统在 10 h 内完成货运任务的效率, 共进行了 5 组实验, 实验结果如图 5 所示。

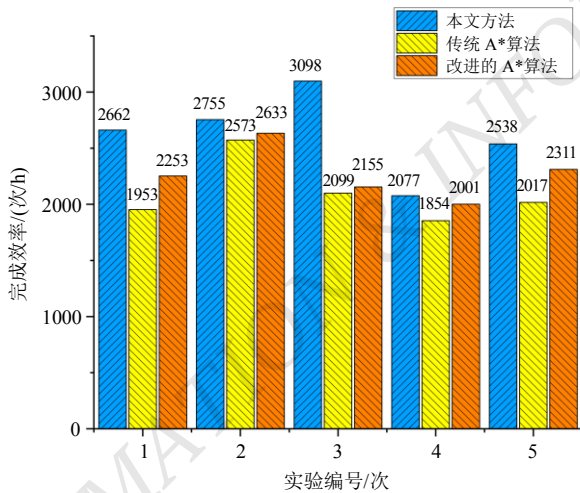


图 5 货运任务完成效率对比

由图 5 可知, 本文方法具有较高的任务完成效率, 这是因为其根据路径网络资源的占用时间来迭代更新路径成本, 将 AGV 调度到占用率较低的路径上, 提高了多 AGV 系统在固定时间内的工作效率。

为了进一步验证路径网络资源的占用时间, 本文在固定时间间隔内, 选择部分路径弧的占用时间进行

对比, 结果如表 3 所示。

表 3 路径弧占用时间对比

路径弧编号	一小时内单条路径弧被占用的时间/s		
	本文方法	传统 A*算法	改进的 A*算法
1	600.453	1 055.466	1 042.322
2	795.233	1 583.993	1 423.355
3	1 254.215	2 650.477	2 001.368
4	985.635	1 345.218	1 058.788
5	1 055.236	1 565.362	1 155.996

由表 3 可知, 本文方法的路径弧占用时间较短, 有效缓解了 AGV 拥堵的问题。

最后, 分析多 AGV 系统的能耗。设置电机参数为 $R=0.489\ 8\ \Omega$, $l=0.004\ 4\ H$, $C_e=0.032\ 7\ V\cdot s/rad$ 。经过 2 h 的模拟, 多 AGV 系统的能耗对比如图 6 所示。

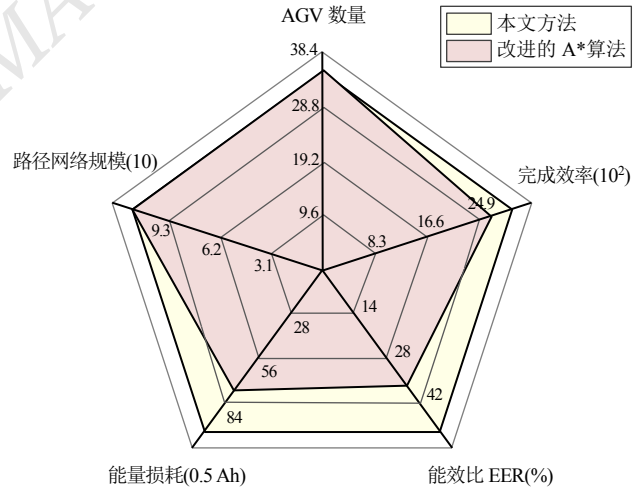


图 6 多 AGV 系统的能耗对比

由图 6 可知: 在路径网络和 AGV 数量相同的情况下, 本文方法的任务完成效率和节能效果均较优, 即在固定时间内完成了更多任务, 降低了系统能耗; 本文方法的能效比 (EER) 比改进的 A*算法高了 26.84%, 表明本文方法是可行且高效的。

4 结论

根据两轮差速驱动 AGV 的运动模型和多 AGV

系统的路径网络特点, 本文提出一种基于启发式能耗优化的电力仓储分布式多 AGV 路径规划方法。数值模拟实验结果表明, 与传统 A* 算法、改进的 A* 算法相比, 本文方法实现了多 AGV 任务增效和节能目标。下一步研究将考虑每台 AGV 所受干扰抑制和额外能量损失参数调节的节能控制律。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 孙秋天, 张笑然, 王玄平, 等. 物流行业智能仓库自动配货出库研究[J]. 起重运输机械, 2024(9):71-75.
- [2] 司明, 郭伯藩, 胡灿, 等. 智能仓储交通信号与多 AGV 路径规划协同控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(11):290-297.
- [3] 王亦晨, 刘雪梅. 基于冲突搜索增强深度强化学习的多 AGV 路径规划方法[J]. 机电工程技术, 2024, 53(8):23-27;88.
- [4] 李晓东, 童亮, 陈梓宁, 等. 能耗优化的移动机器人路径规划方法[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1):28-36.
- [5] 张雨, 王新, 施嘉敏. 基于低碳经济理论的电力物资仓库绿色建设策略研究[J]. 企业改革与管理, 2023(23):161-163.
- [6] 杨静静, 曹海平, 丁杰, 等. 基于 EdgeBoard 的智能循迹避障小车设计[J]. 自动化与信息工程, 2024, 45(2):22-28.
- [7] 田箫源, 董秀成. 基于改进 DQN 的移动机器人避障路径规划[J]. 中国惯性技术学报, 2024, 32(4):406-416.
- [8] SHIN HYEOK-KI, KIM B K. Energy-efficient gait planning and control for biped robots utilizing vertical body motion and allowable ZMP region[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4):2277-2286.
- [9] LIU S, SUN D. Minimizing energy consumption of wheeled mobile robots via optimal motion planning[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(2):401-411.
- [10] NISHI T, MAENO R. Petri net decomposition approach to optimization of route planning problems for AGV systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(3):523-537.
- [11] 杨洪玖, 赵国威, 李洪波, 等. 货架下方可通行无人仓中多自动导引车系统的路径规划[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(4):104-113.
- [12] NISHI T, TANAKA Y. Petri net decomposition approach for dispatching and conflict-free routing of bidirectional automated guided vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, 2012, 42(5):1230-1243.
- [13] SONG R, LIU Y, BUCKNALL R. Smoothed A* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning[J]. Applied Ocean Research, 2019:839-20.
- [14] FU B, CHEN L, ZHOU Y, et al. An improved A* algorithm for the industrial robot path planning with high success rate and short length[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 106:26-37.
- [15] 王洪斌, 刘德垚, 郑维, 等. 异构多目标差分-动态窗口算法及其在移动机器人中的应用[J]. 控制与决策, 2023, 38(12):3390-3398.
- [16] KIM J H, KIM K B. Minimum-energy trajectory planning on a tangent for battery-powered three-wheeled omni-directional mobile robots[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Gyeonggi-do, Korea (South): IEEE, 2010:1701-1706.
- [17] MEI Y, LU Y, LEE C. Energy-efficient mobile robot exploration[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, FL, USA: IEEE, 2006:505-511.
- [18] DULEBA I, SASIADEK Z J. Nonholonomic motion planning based on Newton algorithm with energy optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(3):355-363.
- [19] 郭少晶, 韩宝玲, 罗庆生. 六足仿生步行机器人系统节能技术的研究[J]. 机械与电子, 2007(4):66-68.
- [20] YANG J, QU Z, WANG J, et al. Comparison of optimal solutions to real-time path planning for a mobile vehicle[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems, 2010, 40(4):721-731.
- [21] 刘靖, 何俐萍, 王有元, 等. 融合能耗指标与安全因子的移动医疗机器人通用路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(3):964-973.
- [22] 郭文强, 杜正毅. 融合动态邻域搜索机制的蚁群系统算法[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(2):15-22.
- [23] 梁嘉伟, 刘向勇, 张俊强. 基于多级并行蚁群算法的综合布线路径规划[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7):107-110;123.
- [24] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [25] 杨国, 吴晓, 肖如奇, 等. 改进 A* 算法的安全高效室内全局路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2024:1-13.

(下转第 53 页)