

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.013

考虑能耗的多AGV系统路径冲突解决策略

宋栓军^{1,2}, 吕森^{1*}

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西西安 710048;
2. 西安工程大学西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西西安 710048)

摘要:针对多自动驾驶小车AGV系统路径规划中解决冲突时的部分耗电过快、能耗不平衡问题,课题组提出了一种基于能耗测算的AGV路径冲突解决策略优选方法。首先,对多AGV系统中各AGV的路径基于时间窗进行判定,在此基础上,建立了受负载和时间控制的能耗计算方法,并以系统能耗最低为目标构建AGV冲突消解模型;该模型在考虑AGV自身电量约束下预测各种消解措施下应对的能耗,最终优选出系统能耗最低的冲突解决策略;通过算例与传统冲突消解方式进行对比。研究表明:该解决策略可兼顾路径和系统能耗最优,完成任务的能耗较为均衡。该方法可以减少系统内的AGV的充电次数,提高多AGV系统的工作效率。

关键词:多AGV系统;路径冲突;冲突消解模型;能耗均衡

中图分类号:TP242;TH165 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)01-0078-08

Path Conflict Resolution Strategy for Multiple AGV Systems Based on Energy Consumption

SONG Shuanjun^{1,2}, LÜ Sen^{1*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048 China;

2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to solve the problem of excessive power consumption and unbalanced energy consumption when resolving conflicts in multi-AGV system path planning, an optimal method of AGV path conflict resolution strategy based on energy consumption calculation was proposed. Firstly, the path of each AGV in the multi-AGV system was determined based on the time window. On this basis, an energy consumption calculation method controlled by load and time was established, and an AGV conflict resolution model was constructed with the goal of the lowest system energy consumption. The energy consumption of various resolution measures was predicted in consideration of the AGV's own power constraints, and the conflict resolution strategy of the lowest system energy consumption was selected. Comparison with traditional conflict resolution methods was carried out through calculation examples. The results show that the solution strategy can take into account the path optimization and system energy consumption, and the energy consumption to complete the task is more balanced. The proposed strategy can reduce the charging times of the AGV in the system and improve the working efficiency of the multi-AGV system.

Keywords: multiple AGV systems; path conflicts; conflict resolution model; energy consumption balancing

随着电商、快递等行业的高速发展,企业对大规模
的自动引导小车(automated guided vehicle, AGV)的需
求扩大,多AGV系统常出现冲突问题^[1]。AGV系统

中的冲突问题主要表现为超过一辆AGV所占用时间
和空间发生重叠^[2]。

为了解决AGV系统中的突出问题,部分学者对静

收稿日期:2021-08-10;修回日期:2021-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(72001166);陕西省重点研发计划项目(2021GY-337)。

第一作者简介:宋栓军(1974),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要研究领域为机器人技术、生产管理优化等。通信作者:吕森(1996),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研究领域为移动机器人的路径规划与调度。E-mail:1813587714@qq.com

态算法进行了改进,引入动态机制和冲突解决策略以满足作业需求^[3]。王琛^[4]和梁承姬等^[5-6]先规划出最短路径,根据时间窗预测冲突,对路径进行调整,最终实现无冲突路径规划。姜辰凯等^[7]根据时间窗预测冲突,对优先级较低的 AGV 重新进行路径规划。Hu Y J 等^[8]将 A* 算法与时间窗原理相结合,按时间顺序规划每辆 AGV 的路径,该方法虽然能有效地解决冲突,但并未考虑是否对 AGV 系统的整体效率产生影响。另一部分学者采用具备多步前瞻性的主动冲突解决算法。Zhong M S 等^[9]建立了混合整数规划模型,使 AGVs 的延迟时间最小。Liu C B 等^[10]采用单向有向图方法和 AGV 路径规划的 A* 算法,有效地解决了 AGVs 的冲突问题。Yuan Z H 等^[11]先规划 AGV 全局路径,然后提出了动态快速探索随机树算法,降低了路径冲突的发生率。Zhao Y L 等^[12]利用共享资源点的动态预留来改变 AGV 的运动状态,避免碰撞和死锁。曹小华等^[13]提出基于冲突预测的多 AGV 避碰决策优化方法,求解某一时刻碰撞小车的多 AGV 避碰决策组合优化问题,建立主动冲突解决模型,寻求对于系统而言的最优,然而大多以时间最短或距离最短为目标。但在现实中,小车能耗的浪费导致 AGV 小车充电次数的增加,继而影响小车的效率。能耗作为影响小车搬运效率的一项重要因素,对于整个 AGV 系统长期的搬运效率而言更为重要。张中伟等^[14]建立了以运输距离和能耗为优化目标的节能单 AGV 路径规划模型。张浩杰等^[15]通过构建机器人动力学模型及其在运动过程中的能耗模型,实现对路径的能耗计算。刘贵杰等^[16]针对传统路径优化算法中“距离最短能耗非最低”的问题,规划出一条能耗最优的路径。以上文献均以能耗为目标或考虑能耗规划出一条所需能耗最低的单机器人移动路径,但在多 AGV 系统中,小车完成任务所必须的能耗(最优路径下的能耗)虽然占绝大部分,然而多 AGV 系统在冲突解决过程中的能耗是提高 AGV 搬运效率的关键。

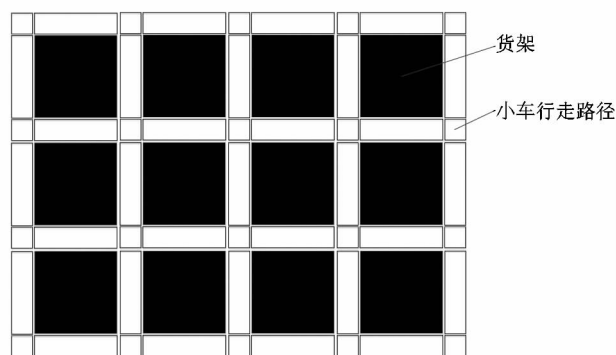
综上所述,目前解决多 AGV 系统中可能存在的冲突问题,多采用以时间最小、路程最短为目标,然而得到的冲突解决策略组合并未考虑小车载质量不同时对策略的影响,可能存在负载大的小车行走路程较长、负载小的小车行走距离反而较短的情况,从而导致部分

小车耗电过快、能耗不平衡;因此课题组构建了受负载和时间所控制的能耗计算模型,并以总能耗最低为目标,建立多 AGV 系统路径的冲突消解模型。

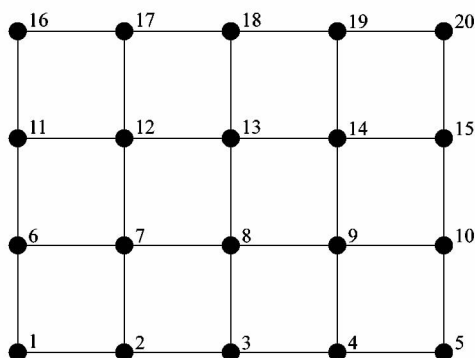
1 多 AGV 系统路径冲突判定

课题组研究的仓库环境路况为双向双车道,假设某一时间段内所有 AGV 都在运行,且均靠右行驶。仓库环境如图 1(a)所示,其中黑色方框为货架,白色方框为 AGV 可行走的路径。课题组将其简化成如图 1(b)所示环境拓扑地图 $G=(V,A)$,其中节点集合 $V=\{1,2,\dots,M\}$,节点坐标矩阵记为 $(x,y)_{M \times 2}$ 。边集合 $A=\{(i,j);i,j \in V,i \neq j\}$ 。拓扑地图虽然能有效表示出各 AGV 所经过的路径,但无法直观地表示出 AGV 行走的时间与位置情况,因此在二维拓扑图中引入时间维,如图 1(c)所示。

第 k 辆小车执行任务的路径为 $R_k(S_k,L_k)$;自身质量与载质量之和为 m_k ;其中 $S_k(x,y)$ 与 $L_k(x,y)$ 分别为第 k 辆小车路径起始点与终止点,其中 $1 \leq k \leq n$ 。小车以速度 V 匀速行驶。小车与通过路口均可看作质点,由此计算出路径 $R_k(S_k,L_k)$ 下的通过各节点时间为: $T=[T_1,T_2,\dots,T_m]$ 。



(a)仓库环境



(b)环境拓扑图

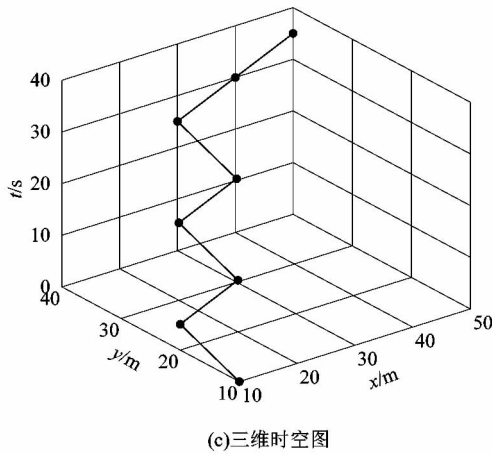


图 1 环境地图

Figure 1 Environment map

小车间的安全距离为 l , 第 k 辆小车到达编号为 M 节点的时刻为 T_M^k , 且认为 $T_M^k \sim (T_M^k + (l/V))$ 时, 该节点被小车 k 所占用。若到达节点 M 时刻分别为 T_M^k 与 T_M^{k+1} 的第 k 辆小车与第 $k+1$ 辆小车的的时间差小于安全距离与速度比即

$$|T_M^k - T_M^{k+1}| < l/V, \quad (1)$$

则认为第 k 辆小车与第 $k+1$ 辆小车的路线同一时间在节点 M 存在干涉。

课题组的研究是在双向双车道且靠右行驶的路况上进行的, 经式(1)判定存在干涉的节点, 如小车数量小于 3 时, 有可能不发生冲突。图 2 所示的 3 种情况为干涉节点不发生冲突的情况, 除此 3 种情况之外, 其他干涉的情况均认定为冲突。

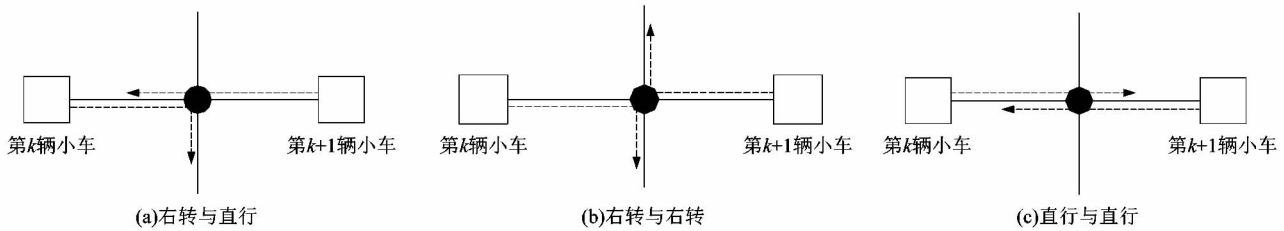


图 2 路口不冲突示意图

Figure 2 Schematic diagram of no conflicts at intersections

时间窗 T 下的冲突集合为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_q\}$, $1 \leq q \leq M, C_q$ 储存了节点 q 的冲突属性, 主要包括冲突时间及冲突小车编号 k 。

2 考虑能耗的冲突解决策略优化

为应对可能产生的冲突, 课题组提出等待与绕道 2 种冲突解决措施, 并提出预测各种解决措施下能耗的计算模型, 构建了以系统能耗最低为目标的 AGV 冲突消解模型, 最终优选出系统能耗最低的冲突解决策略。

2.1 能耗计算模型

为降低能耗分析难度, 课题组从运动角度对 AGV 消耗的能耗进行分析。AGV 的能耗主要包括待机能耗和运动能耗 2 种。其中待机能耗相对固定, 贯穿于整个运动过程, 主要包括小车上控制系统、监测系统以及散热系统的总能耗, 具体表现为其额定功率之和 P 。AGV 运动过程中存在着空气阻力、车轮与地面的摩擦阻力, 由于速度较低, 所以空气阻力忽略不计。小车运

动状态下, 驱动电机提供的力仅维持克服摩擦力做功。那么克服摩擦力做功为:

$$W = \mu mgL/\alpha. \quad (2)$$

式中: μ 为滑动摩擦因数, m 为小车与运载的货物质量之和, g 为重力加速度, L 为小车行走的距离, α 为行走驱动功率因数。

小车完成任务过程中的能耗

$$E = (\mu mgL/\alpha) + (L/V) \times P, \quad (3)$$

在此基础上提出 2 种冲突消解措施下的能耗计算方法。

1) 等待措施。若第 k 辆小车到达冲突节点 M 时有 n'' 辆小车等待通过, 第 k 辆小车等待时间

$$t_k = (l/V) - (T_M'' - T_M') + (n'' - 1) \times (l/V). \quad (4)$$

式中: T_M'' 为该冲突节点当前占用小车通过冲突节点时刻, T_M' 为上一辆已通过小车通过冲突节点时刻, $(l/V) - (T_M'' - T_M')$ 表示为第 k 辆小车到达节点这一时刻起, 当前节点占用小车仍需等待的时间。

此时小车仅保持待机状态,功率为 P ,等待过程中的能耗为 $\Delta E_k^d = P \times t_k$ 。

2) 绕道措施。绕道措施需要规划局部路径,求解冲突小车解决策略的组合最优问题对整个仓库搬运系统而言仍然是路径的规划问题。课题组提出一种局部路径规划方法。首先,确定备用路径起始点与终止点,然后进行局部路径规划,得到由 M' 条局部路径组成的备选路径集。以第 k 辆小车的路径 $R_k(S_k, L_k)$ 中的冲突节点前 1 个节点为该局部路径起始节点 $S'_k(x, y)$,冲突节点后 1 个节点到路径终止点间随机选择 1 个节点为该局部路径终止节点 $L'_k(x, y)$ 。由起始点开始搜索,评价函数

$$f(x, y) = |x - x_l| + |y - y_l| \quad (5)$$

其中,当前搜索节点 (x, y) 为与上一搜索节点相邻连通的节点。计算相邻且连通的几个节点到终止节点的评价函数 $f(x, y)$,从其中选取值最小的评价函数作为 $f(x, y)_2$ 。如果 $f(x, y)_2 < f(x, y)_1$,则认为小车正在靠近终止点,并用 $f(x, y)_2$ 替换 $f(x, y)_1$,直至 $f(x, y)_1 = 0$ 。如遇到 $f(x, y)_2 > f(x, y)_1$ 时,则认为路径经过的第 $i+1$ 节点不得不远离终止节点 $L'_k(x, y)$ 。

局部路径评价方法是用局部路径替换原路径中对应的片段,然后进行评价,评价函数如式(3)所示。其中 L 为该局部路径替换路径片段后的总长,以评价的函数值对局部路径集进行排序,在选择局部路径时,先选取评价函数值最小的局部路径替换原路径部分片段。小车绕道策略下的新路径比原路径多消耗的能耗

$$\Delta E_k^r = (\Delta L \mu MG / \alpha) + (\Delta L / V) \quad (6)$$

式中 ΔL 为绕道策略下新路径比原路径多出的长度。

2.2 冲突消解模型

第 k 辆小车电池最大电量为 E_{\max} ,执行任务前电量为 E'_k ,最低安全电量为 E_{\min} ,为使在冲突解决过程中的多 AGV 系统总能耗最低,因此直接以总能耗最小为优化目标,即:

$$\min[Z] = \sum_{k=1}^n E_k \quad \text{s. t.}$$

$$E_k = (\mu mg L_k / \alpha) + (L_k / V) \times P + \sum_{c=1}^n N_{kc}^d \times \Delta E_{kc}^d +$$

$$\sum_{a=1}^n N_{ka}^r \times \Delta E_{ka}^r; \quad (7)$$

$$E'_k - E_k \geq E_{\min}; \quad (8)$$

$$m_0 \leq m_k \leq m_0 + Q; \quad (9)$$

$$N_{ka}^r = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 辆小车采取绕道策略,} \\ 0, & \text{第 } k \text{ 辆小车不采取绕道策略;} \end{cases} \quad (10)$$

$$N_{kc}^d = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 辆小车采取等待策略,} \\ 0, & \text{第 } k \text{ 辆小车不采取等待策略。} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $N_{kc}^d = 0$ 表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中不采取等待策略, $N_{kc}^d = 1$ 表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中采取等待策略; ΔE_{kc}^d 表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中等待过程的能耗; $N_{ka}^r = 0$ 表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中不采取绕道策略, $N_{ka}^r = 1$ 时表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中采取绕道策略; ΔE_{ka}^r 表示第 k 辆小车在第 c 次冲突中绕道路径比原路径多消耗的能耗; m_0 为小车质量; Q 为小车的最大载质量。

优化目标为第 k 辆小车完成任务过程中所有等待与绕道策略下所需的能耗最低,具体计算如式(7)所示。约束条件式(8)表示小车完成运送任务后所剩的电量不高于最低安全电量,约束条件式(9)表示 AGV 负载不能超过其最大载质量。

3 算例分析

为验证课题组提出方法的有效性,采用 MATLAB 2018a 版进行编程实现。建立 $80 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 的仓库拓扑地图如图 3 所示,地图中路口节点个数 M 为 60,节点 36~53、节点 18~35 和节点 57~58 的距离为 20 m,其余各节点间距离均为 10 m。

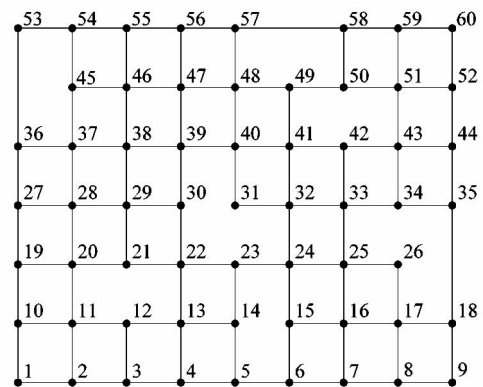


图 3 环境拓扑地图

Figure 3 Environmental topological map

设置小车参数如表 1 所示。在参数相同的情况下以 4 辆小车进行仿真实验,将本研究冲突解决方式与基于贪心算法的冲突解决方式进行对比。基于贪心算法的冲突解决方式在当前看来是最好的冲突解决策略,该方式只注重于当前的决策对系统的影响,不考虑后续是否可能会产生更多的冲突。

表 1 AGV 参数

Table 1 AGV parameters

E_{max}/MJ	P/W	$V/$ ($m \cdot s^{-1}$)	m_0/kg	E_{min}/MJ	μ	α	Q/kg
17.28	25	2	60	3.456	0.03	0.6	100

给定小车载质量与路径如表 2 所示,各小车路径的时空图如图 4 所示。得出结果如表 3~4 所示,2 种冲突解决方式下的路径时空图如图 5 所示。

表 2 AGV 起始路径

Table 2 Starting path of AGV

编号	路径	负载/kg	电量/%
1	59,58,57,56,47,39,30,22,13,4	60	100
2	10,19,27,36,37,38,39,40,41,42,43	70	100
3	2,3,4,5,6,15,24,32,41,49,50	80	100
4	54,45,46,47,48,40,31,32,33,34,35	90	100

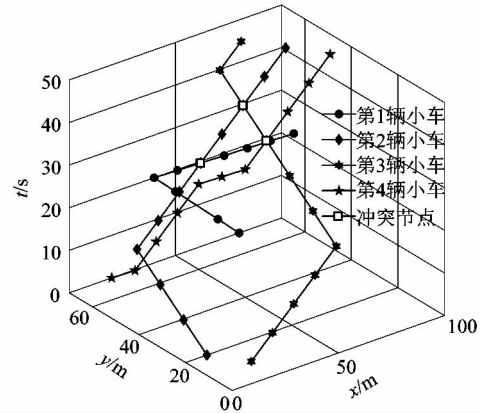


图 4 各 AGV 路径时空图

Figure 4 Time and space diagram of AGV

表 3 冲突节点以及冲突 AGV 的解决措施

Table 3 Conflict nodes and resolution measures of conflict AGV

小车编号	小车路径	
	基于能耗的冲突解决方式	基于贪心算法的冲突解决方式
1	59,58,57,56,47,39(等待),30,22,13,4	59,58,57,56,47,39(等待),30,22,13,4
2	10,19,27,36,37,38,39(先行),40,41,42,43	10,19,27,36,37,38,39(先行),40,41(等待),42,43
3	2,3,4,5,6,15,24,32(等待),41,49,50	2,3,4,5,6,15,24,32(先行),41(先行),49,50
4	54,45,46,47,48,40,31,32(先行),33,34,35	54,45,46,47,48,40,31,32(等待),33,34,35

表 4 2 种冲突解决方式下的各数据对比

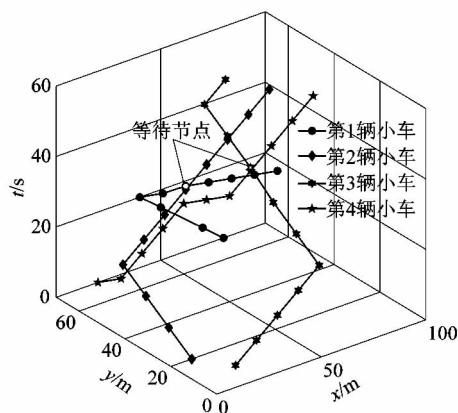
Table 4 Data comparison under two conflict resolution methods

序号	基于能耗的冲突解决方式				基于贪心算法的冲突解决方式			
	时间/s	路径/m	能耗/J	剩余能耗/J	时间/s	路径/m	能耗/J	剩余能耗/J
1	51	100	12 530	17 267 470	51	100	12 530	17 267 470
2	50	100	13 245	1 726 6755	51	100	13 270	17 266 730
3	51	100	13 760	17 266 240	50	100	13 735	17 266 265
4	50	100	14 225	17 265 775	51	100	14 250	17 265 750
总计	202	400	53 760	-	203	400	53 785	-

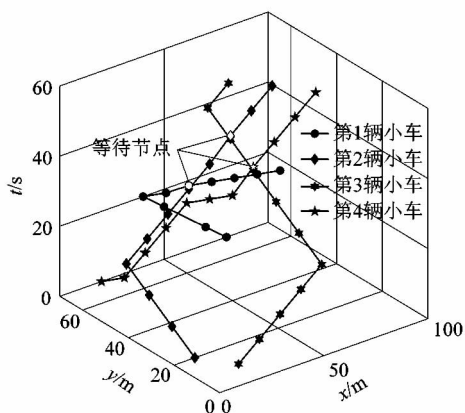
由表 3 可得各 AGV 在冲突节点采取的措施,对应的路径如图 5 所示。由图 5 可以得出基于能耗的冲突解决方式下仅仅有 2 辆车在路径冲突时等待,而基于贪心算法的冲突解决方式下有 3 辆小车在路径冲突时等待。表 4 所示为在表 3 的措施下每辆 AGV 完成任务的时间、距离以及能耗,可以观察到课题组提出的冲

突解决方式与基于贪心算法的冲突解决方式的总距离相同,但总能耗与总时间相对较低。由表 3 知 2 种冲突解决方式下所选的冲突解决措施均为等待,根据式(3)可知载质量只对运动能耗产生影响,而等待过程中运动能耗为 0,所以基于贪心算法的冲突解决方式随机选择小车通过冲突节点的顺序,由此而导致多发

生了一次冲突。此外表 3 验证了本研究优化目标中的能耗计算方式能兼顾负载与路径长度,得到的冲突解决策略下各 AGV 的能耗较为均衡。



(a) 基于能耗的冲突解决方式



(b) 基于贪心算法的冲突解决方式

图 5 2 种冲突解决方式下路径时空图

Figure 5 Path time-space diagram under two conflict resolution methods

为进一步对验证本研究提出的方法,用 20 台 AGV 与 30 台 AGV 各进行 30 次试验。每次随机生成起始点与终止点,在负载与电量相同情况下,用遗传算法进行规划。20 台 AGV 时,2 种策略下的总能耗对比如图 6 所示。完成任务总时间、距离以及总能耗如表 5 所示。由表 5 可知 2 种冲突解决方式下每次试验的总路程均为 2 000 m,基于能耗的冲突解决方式的能耗均低于基于贪心算法的能耗,本研究解决冲突的绕道措施较为灵活,进行绕道时,选择的局部路径在长度上可能与原路径相同,基于能耗的冲突解决方式能兼顾整个系统运行过程,因此相较于基于贪心算法的解决方式所消耗的能耗更低。

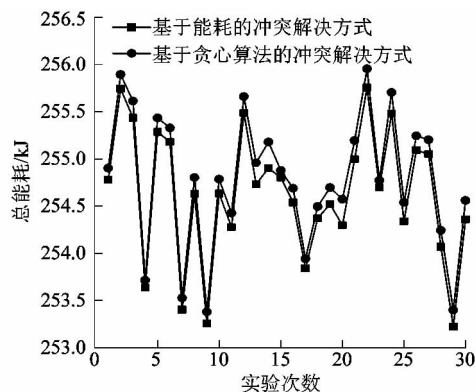


图 6 20 台 AGV 时 2 种冲突解决方式下的总能耗对比

Figure 6 Total energy consumption comparison of 20 AGVs under two conflict resolution methods

表 5 20 台 AGV 时 2 种冲突解决方式下的数据对比

Table 5 Data comparison of 20 AGVs under two conflict resolution methods

实验次数	基于能耗的冲突解决方式			基于贪心算法的冲突解决方式		
	时间/s	距离/m	总能耗/J	时间/s	距离/m	总能耗/J
1	1 004	2 000	254 777	1 009	2 000	254 902
2	1 009	2 000	255 743	1 015	2 000	255 893
3	1 014	2 000	255 436	1 021	2 000	255 611
4	1 009	2 000	253 640	1 012	2 000	253 715
5	1 013	2 000	255 284	1 019	2 000	255 434
6	1 012	2 000	255 179	1 018	2 000	255 329
7	1 009	2 000	253 402	1 014	2 000	253 527
8	1 011	2 000	254 627	1 018	2 000	254 802
9	1 012	2 000	253 255	1 017	2 000	253 380
10	1 014	2 000	254 634	1 020	2 000	254 784
11	1 011	2 000	254 276	1 017	2 000	254 426
12	1 013	2 000	255 485	1 020	2 000	255 660
13	1 013	2 000	254 733	1 022	2 000	254 958
14	1 016	2 000	254 902	1 027	2 000	255 177
15	1 010	2 000	254 803	1 013	2 000	254 878
16	1 014	2 000	254 538	1 022	2 000	254 688
17	1 012	2 000	253 841	1 016	2 000	253 941
18	1 008	2 000	254 371	1 013	2 000	254 496
19	1 011	2 000	254 521	1 018	2 000	254 696
20	1 012	2 000	254 297	1 023	2 000	254 572
21	1 010	2 000	254 995	1 018	2 000	255 195
22	1 012	2 000	255 753	1 020	2 000	255 953
23	1 016	2 000	254 696	1 019	2 000	254 771
24	1 009	2 000	255 479	1 018	2 000	255 704
25	1 008	2 000	254 339	1 016	2 000	254 539
26	1 013	2 000	255 093	1 019	2 000	255 243
27	1 009	2 000	255 051	1 015	2 000	255 201
28	1 015	2 000	254 069	1 022	2 000	254 244
29	1 009	2 000	253 224	1 016	2 000	253 399
30	1 015	2 000	254 360	1 023	2 000	254 560

30 台 AGV 时,2 种策略下的总能耗对比如图 7 所示,完成任务总时间、距离以及总能耗如表 6 所示。由表 6 可得到 2 种冲突解决方式下每次试验的总路程均为 3 000 m,基于能耗的冲突解决方式的能耗均低于基于贪心算法的能耗。且由表 5 和表 6 得出随着 AGV 数量的增多,基于能耗的冲突解决方式与基于贪心算法的冲突解决方式所需的总能耗之差在增大。

表 6 30 台 AGV 2 种冲突解决方式下的数据对比

Table 6 Data comparison of 30 AGVs under two conflict resolution methods

实验次数	基于能耗的冲突解决方式			基于贪心算法的冲突解决方式		
	时间/s	距离/m	总能耗/J	时间/s	距离/m	总能耗/J
1	1 524	3 000	379 174	1 532	3 000	379 374
2	1 529	3 000	382 102	1 537	3 000	382 302
3	1 520	3 000	380 580	1 535	3 000	380 955
4	1 518	3 000	379 884	1 531	3 000	380 209
5	1 517	3 000	379 758	1 535	3 000	380 208
6	1 543	3 000	381 097	1 568	3 000	381 722
7	1 534	3 000	384 295	1 553	3 000	384 770
8	1 533	3 000	381 135	1 551	3 000	381 585
9	1 528	3 000	382 308	1 542	3 000	382 658
10	1 533	3 000	381 190	1 551	3 000	381 640
11	1 522	3 000	381 922	1 528	3 000	382 072
12	1 527	3 000	380 138	1 542	3 000	380 513
13	1 519	3 000	382 431	1 525	3 000	382 581
14	1 518	3 000	380 886	1 528	3 000	381 136
15	1 531	3 000	381 059	1 542	3 000	381 334
16	1 527	3 000	382 372	1 540	3 000	382 697
17	1 527	3 000	380 995	1 535	3 000	381 195
18	1 524	3 000	379 127	1 528	3 000	379 227
19	1 524	3 000	379 333	1 535	3 000	379 608
20	1 520	3 000	382 346	1 527	3 000	382 521
21	1 522	3 000	382 617	1 534	3 000	382 917
22	1 516	3 000	381 987	1 525	3 000	382 212
23	1 525	3 000	382 154	1 537	3 000	382 454
24	1 521	3 000	379 502	1 527	3 000	379 652
25	1 526	3 000	380 233	1 531	3 000	380 358
26	1 528	3 000	379 775	1 542	3 000	380 125
27	1 548	3 000	382 483	1 566	3 000	382 933
28	1 524	3 000	381 075	1 529	3 000	381 200
29	1 525	3 000	379 892	1 537	3 000	380 192
30	1 528	3 000	379 511	1 542	3 000	379 861

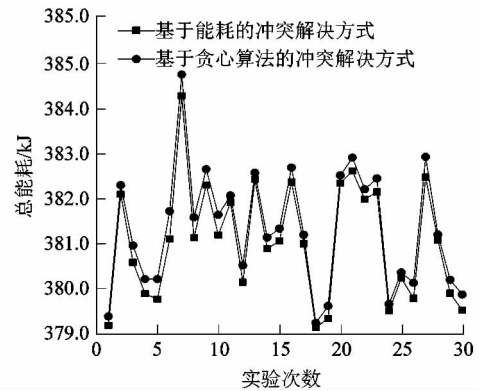


图 7 30 台 AGV 时 2 种冲突解决方式进行试验的总能耗对比

Figure 7 Total energy consumption comparison of test under two conflict resolution methods with 30 AGVs

4 结语

针对多 AGV 系统中可能存在的路径冲突问题,课题组构建的能耗计算模型受负载和时间所控制,并以能耗最低作为冲突消解模型的评判标准,能综合考虑时间与负载对冲突解决策略的影响,相比于传统以时间为目标更符合现实中 AGV 运行情况。课题组提出的方法在冲突解决方式中采用绕道策略,较为灵活简单,能有效找寻出合理的局部路径,经仿真证明课题组提出方法在随着 AGV 数量增加而导致的路况复杂的情况下,依旧能有效得到合理的冲突解决策略组合。在未来工作中可以引入任务优先级,在综合考虑任务优先级与小车电量情况下进行规划,获取均衡的冲突解决策略组合。

参考文献:

[1] 高一鹭,胡志华.基于时空网络的自动化集装箱码头自动化导引车路径规划[J].计算机应用,2020,40(7):2155.
 [2] 张素云,杨勇生,梁承姬,等.自动化码头多 AGV 路径冲突的优化控制研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(2):83-84.
 [3] 于赫年,白桦,李超.仓储式多 AGV 系统的路径规划研究及仿真[J].计算机工程与应用,2020,56(2):233.
 [4] 王琛,茅健.基于时间窗模型的双向机器人路径规划方法[J/OL].计算机工程与应用:1-11. [2021-05-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20201023.1737.011.html>.
 [5] 梁承姬,沈珊珊,胡文辉.基于路段时间窗考虑备选路径的 AGV 路径规划[J].工程设计学报,2018,25(2):200-208.