

考虑充电过程的自动化码头 AGV 调度

杨其飞, 兰培真

(集美大学航海学院, 福建厦门 361021)

[摘要] 为了降低自动化集装箱码头充电过程对自动导引运输车 (automated guided vehicle, AGV) 调度的影响, 以提高 AGV 的作业效率, 考虑 AGV 实际充电需求和空重载耗电差异, 以最小化最大完成工时为目标, 以 AGV 电池电量为约束条件, 应用遗传算法, 构建考虑充电过程的自动化码头 AGV 作业调度模型。设计 3 种充电策略, 并进行优劣性对比, 分析各策略对作业时间的影响。检验结果表明, 与传统的充电策略相对比, 充电区间设定为 50% ~ 65% 的机会式充电策略, 完成任务总时间和充电时长最优, 可以有效提高 AGV 作业效率。

[关键词] 自动化集装箱码头; AGV; 充电策略; 遗传算法

[中图分类号] U 644.14

Research on AGV Scheduling of Automated Terminals Considering Charging Process

YANG Qifei, LAN Peizhen

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Abstract: In order to reduce the influence of the charging process of the automatic container terminals on the dispatching of the automated guided vehicle (AGV) and improve its operational efficiency, considering the actual charging demand of the AGV and the difference in power consumptions between empty and heavy loaded statuses, this paper aims at minimizing the maximum working hours, takes the battery power of the AGV as the constraint condition, and applies the genetic algorithm to construct the AGV operation dispatching model of the automatic terminal considering the charging process. Three charging strategies are designed to compare their advantages and disadvantages, and their effects on operation time are analyzed. The test shows that compared with the traditional charging strategy, the opportunistic charging strategy with the opportunistic charging interval set at 50% - 65% has the best total task completion time and charging time, which effectively improves the AGV operational efficiency.

Keywords: automated container terminals; AGV; opportunistic charging strategy; genetic algorithm

0 引言

以电池为电源的自动导引运输车 (automated guided vehicle, AGV), 由于具有低排放、高效特点, 因此迅速在全球各大自动化集装箱码头得到普及。AGV 的应用使得水平移动作业变得更加高效、

[收稿日期] 2021-10-20

[作者简介] 杨其飞 (1997—), 男, 硕士, 研究方向为交通运输规划与管理。通信作者: 兰培真 (1962—), 女, 教授, 博士, 研究方向为交通信息工程及控制、交通运输规划与管理、海上交通安全保障。
E-mail: peizlan@163.com

安全和可控。目前针对自动化码头 AGV 的研究,主要集中在传统的作业调度配置和路径优化上,对 AGV 电池充电这一过程的研究较少。McHaney^[1]通过数值实验验证了充电方案对 AGV 的作业时间、作业调度和 AGV 数量规划等方面的影响,提出使用电力驱动的 AGV 在实际作业过程中应考虑充电需求;文献 [2] 将 AGV 电量作为作业调度的约束,验证了使用电力驱动可节省 10% 的运行成本,但在 AGV 运行过程中没有安排充电任务;文献 [3] 考虑了 AGV 的电量限制,但当电量不足时则无法进行后续任务。近年来,一些学者将充电需求考虑到 AGV 作业调度中,同时考虑了 AGV 重空载耗电差异,充电、换电时机的选择和充电等待时间等因数^[4-11],提出一系列充电策略,如以离线充电为辅,在线充电为主的充电策略^[7],多频次充电策略^[8],机会式充电策略^[9]等。综上可知,大多数研究主要针对 AGV 的充电策略,对影响充电的因素考虑较为单一,对 AGV 充电调度研究不够完善。针对以上问题,本文根据自动化码头 AGV 实际的作业调度现状,综合考虑 AGV 作业任务调度、AGV 充电约束以及充电时间的选择和重空载耗电差异等因素,提出考虑充电过程的自动化码头 AGV 作业调度模型,以提高 AGV 的作业效率,缩短充电时间,寻求充电需求与码头作业任务之间的平衡。

1 问题描述

目前自动化码头使用的 AGV 小车多采用电力驱动,充电时间较长、续航能力有限。如果充电不及时,电量耗尽的 AGV 会停工,从而造成 AGV 作业效率的大幅度下降,因此必须考虑 AGV 充电过程对作业调度的影响。某水平式自动化集装箱码头分布如图 1 所示。AGV 作业循环过程如图 2 所示。

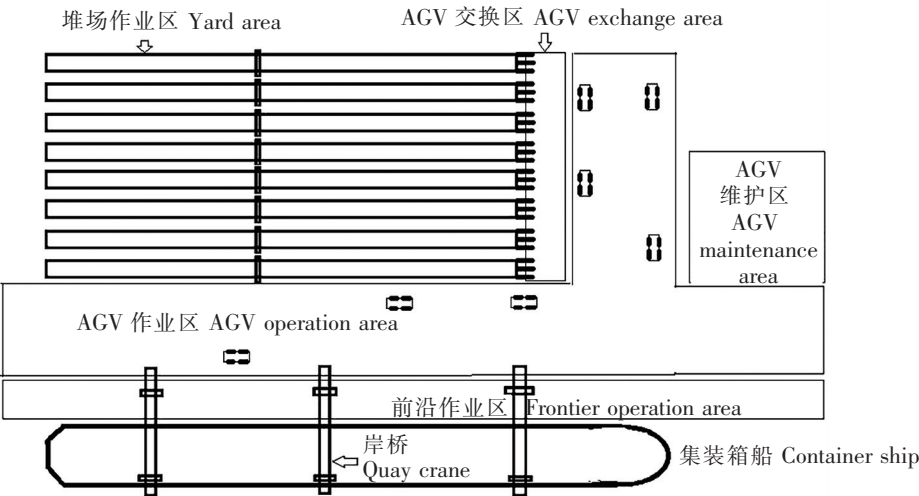


图 1 某水平式自动化集装箱码头分布示意图
Fig.1 Schematic diagram of distribution of a horizontal automatic container wharf

在日常作业中,当 AGV 收到任务 1 后,且自身电量充足,则立即去岸桥缓冲区 F1,装箱 M1 后运至堆场 A01,完成任务后检查自身电量,AGV 仍有足够的电量完成任务 2,因此指派 AGV 行驶至缓冲区,装箱 M2 后运至堆场 A02,在完成任务 2,当电量不足时,AGV 发送请求,经指派该 AGV 进行充电任务。同时需要考虑的是,由于 AGV 行驶中空载、

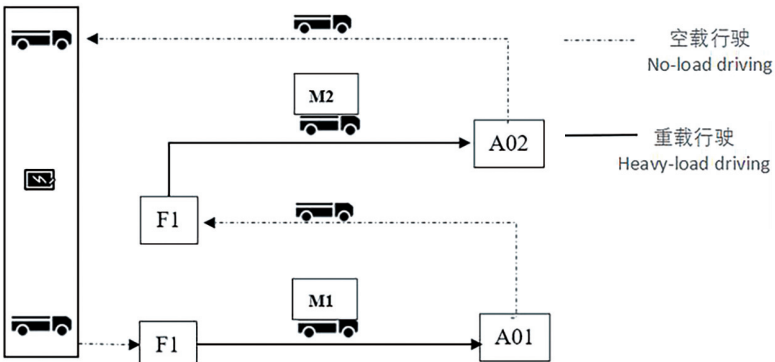


图 2 AGV 作业循环过程
Fig.2 AGV operation cycle process

重载的耗电量有所不同, 因此要分别计算 AGV 不同状态的耗电量。

2 考虑充电过程的 AGV 作业调度模型

2.1 模型假设

本文主要研究 AGV 充电过程对自动化码头 AGV 调度的影响, 考虑充电策略的 AGV 调度问题相对复杂, 一方面 AGV 充电速率受其所剩电量的影响, 另一方面 AGV 空重载行驶途中所消耗的电量也随着电量的消耗做相应的变化。寻找不同充电区间下的 AGV 作业时间与充电之间的关系变得更加困难, 为方便模型的建立与求解, 进行如下假设: 每辆 AGV 每次运输一个集装箱; 每辆 AGV 由调度中心进行任务分配, 不考虑 AGV 在作业过程中可能产生的冲突等情况, 均能正常完成任务; 不考虑 AGV 的差异性, 每辆 AGV 的运输效率相同, 空载和重载的运行速度及耗电量不变; AGV 到达充电位置点均能立即充电; AGV 开始作业时刻为 0。

2.2 符号说明

I 为任务集合, $I = \{1, 2, 3, \dots, N\}$; 集合 I^+ 为包含虚拟任务的任务集合, $I^+ = I \cup \{N+1, N+2\}$, 其中, $N+1$ 为虚拟开始任务, $N+2$ 为虚拟结束任务; V 为 AGV 的集合, $V = \{1, 2, \dots, K\}$; C 为充电任务集合, $C = \{N+3, N+4, \dots\}$; L_{ij} 为任务 i 终点到任务 j 起点的行驶距离, 其中 $i, j \in I$; x_{ijv} 为 0-1 变量, 若 AGV _{v} 在完成任任务 i 后执行下一个任务 j , 则 x_{ijv} 为 1, 否则 x_{ijv} 为 0, 其中 $i, j \in I$; y_{iv} 为 0-1 变量, 若 AGV _{v} 执行任务 i , 则 y_{iv} 为 1, 否则 y_{iv} 为 0, 其中 $i \in I$; L_i 为任务 i 起点到终点的行驶距离, 其中 $i \in I$; s_1 为 AGV 重载行驶速度; s_2 为 AGV 空载行驶速度; z_i^v 为 AGV _{v} 开始执行任务 i 的时刻, 其中 $i \in I$; f_i^v 为 AGV _{v} 完成任务 i 的时刻, 其中 $i \in I$; $e_{i,v}$ 为 AGV _{v} 完成任务 i 时, 已经行驶的路程, 其中 $i \in I$; E_v 为 AGV _{v} 在下次充电前, 可行驶的最远距离; E_h 为 AGV _{v} 在下次充电前, 所剩余电量; E_{h1} 为强制充电区间的上限; E_{h2} 为机会式充电区间的上限; H^v 为当前 AGV _{v} 所剩余电量; μ_1 为 AGV 重载状态下每米所消耗电量; μ_2 为 AGV 空载状态下每米所消耗电量; q_i^v 为执行任务 i 所消耗的电量, 其中 $i \in I$; T_c^v 为充电时长, 其中 $v \in V$; θ 为 AGV 充电速率。

2.3 建立模型

本文以最小化最大完工时间为优化目标 (见式 (1)), 最大完工时间即所有作业任务完工所需时间的最大值, 同时将充电加入到 AGV 作业调度过程中, 寻找不同充电过程下的 AGV 充电需求与码头作业任务之间的平衡。即

$$\min \max(f_i^v), \forall i \in I, \forall v \in V. \quad (1)$$

根据自动化码头 AGV 实际作业流程, 设定约束条件。

1) 电量约束。AGV 在执行任务过程中, 分为重载、空载两种状态, 各种状态耗电量也不同, 应区别对待两种状态。根据 AGV 电池荷电状态划分为强制充电区间、机会式充电区间、正常工作区间三个区间, 故当 AGV 执行任务前应进行电量判定, 决定是否接受任务。电量约束如下:

$$y_{jv} = P(E_h - q_i^v - E_{h1}) \cdot P(E_h - q_i^v - E_{h2}). \quad (2)$$

式 (2) 为执行任务前 AGV 的电量判定, 若任务 i, j 被任务 AGV _{v} 相继执行, 当 AGV _{v} 电量执行 i 任务后所剩电量低于强制充电区间上限 ($E_h - q_i^v - E_{h1} < 0$), 则进行强制充电作业。若当 AGV _{v} 执行 i 任务后所剩电量处于机会式充电区间 ($E_h - q_i^v - E_{h2} < 0$), 则进行机会式充电作业。若当 AGV _{v} 执行 i 任务后所剩电量处于正常工作区间, 则 $y_{jv} = 1$, AGV _{v} 开始执行 j 任务, 其中 $P(x)$ 为 0~1 函数 (若 $x \geq 0$ 则取 1, 否则取 0)。

公式 $e_{i,v} + L_{i,N+2} \leq E_v, \forall i \in I, v \in V$ 表示 AGV 剩余电量需足够返回离线充电点。

公式 $q_j^v + (1 - x_{ijv}) E_h \geq q_i^v + \mu_1 \cdot L_j + \mu_2 \cdot L_{ij}, \forall i \neq j, v \in V$ 表示如果任务 i, j 被 AGV _{v} 相继执行, 即 $x_{ijv} = 1$, 那么完成任务 i, j 所消耗的电量 q_i^v, q_j^v 满足 $q_j^v \geq q_i^v + \mu_1 \cdot L_j + \mu_2 \cdot L_{ij}$ 。

公式 $L_i/s_1=0, \forall i \in C$ 表示在执行充电任务时，AGV 不允许接受其他任务并且处于静止状态。

公式 $H^v = T_c^v \cdot \theta + E_h, v \in V$ 表示 AGV 充电电量与充电时间之间得关系。

2) AGV 作业调度约束。公式 $f_i^v \geq z_i^v + L_i/s_1 + T_c^v, \forall i \in I$ 表示 AGV 完工时间是由每个任务所消耗的时间、任务开始执行时间和充电时间所决定的。

公式 $z_j^v \geq (z_i^v + L_i/s_1 + L_{ij}/s_2 + T_c^v) \cdot x_{ijv}, \forall i \neq j, v \in V$ 表示 AGV 连续执行两个任务开始时间的关系。若任务 i, j 被任务 AGV_v 相继执行，即 $x_{ijv} = 1$ ，那么任务 j 开始时刻为任务 i 开始的时刻、任务 i 执行所消耗的时间、AGV_v 从任务 i 终点到任务 j 起点所消耗的时间和充电时间所决定的。

每个实际任务应满足在其整个任务网络的流约束为：

$$\sum_{j \in I^+ \setminus \{i\}} x_{jiv} = \sum_{j \in I^- \setminus \{i\}} x_{ijv} = y_{iv}, \forall i \in I, v \in V.$$

$\sum_{v \in V} y_{iv} = 1, \forall i \in I$ 表示每个任务在被一台 AGV 执行一次后不能再被其他 AGV 运输。

$x_{ijv} + x_{jiv} \leq 1, \forall i, j \in I, i \neq j, v \in V$ 表示每辆 AGV 在完成一项任务之前不能进行其他任务。

$\sum_{i \in I} x_{N+1,i,v} = \sum_{i \in I} x_{i,N+2,v} = 1, \forall v \in V$ 表示对于执行运输任务的 AGV 都是从虚拟任务起点出发到虚拟任务终点处结束。

$x_{i,N+1,v} = x_{N+2,j,v} = 0, \forall i \in I, v \in V$ 表示为每辆 AGV 在虚拟任务之前不能有任务，在虚拟任务之后不能再有任务。

3 模型求解

3.1 遗传算法编码过程

根据 AGV 分配任务进行编码。设集装箱码头任务数为 $|N|$ 、AGV 的数量为 $|K|$ ，染色体由 $|N|$ 个 1 到 $|V|$ 之间的正整数排列。图 3 为 18 个任务、6 台 AGV 对应的染色体编码任务示意图，第 i 个编码为 v ，则表示第 i 个任务是由 AGV_v 进行运输。

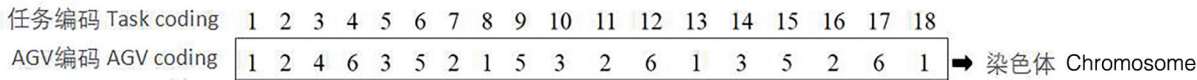


图 3 染色体编码示意图
Fig.3 Schematic diagram of chromosome coding

3.2 染色体解码过程

首先将 $|I|$ 个运输任务分配给 $|K|$ 辆 AGV，并且要求在若干个循环中完成任务，因此要对 AGV 分到的相应的运输任务进行解码。图 4 是遗传算法过程中解码的流程图。其中：SOC（state of charge）表示存电状态，当 SOC = 0 时，表示电池放电完全；当 SOC = 1 时表示电池完全充满。

整个任务解码过程主要包括：1) 判断是否进行充电，2) 生成初始 AGV 任务路径，并在运行的过程中进行机会式充电。

3.3 适应度函数

本文初始的适应度函数是解码得到的 AGV 最大完工时间 $\text{Max}(f)$ ，但是最终的目标函数是 $\text{minMax}(f)$ ，故将得到的 AGV 最大完成工时 $\text{Max}(f)$ ，取其倒数作为适应度函数，并通过该值来判断每个可行解的优劣程度。

3.4 遗传算子

采用随机遍历选择法、均匀交叉法和倒置变异法分别进行选择算子、交叉算子、变异算子的遗传操作。在选择算子遗传操作中，任意选取 4 个个体，分别计算适应度值，并进行比较，得到两个较优的个体。在交叉算子遗传操作中，选取两条父代染色体后随机选择两处切点，复制两处切点中染色体后，交换这两条切片染色体，生成新的子代。在变异算子操作过程中，随机在染色体上选择两个位

置，颠倒两个位置间的基因序列，其中变异算子过程如图 5 所示。

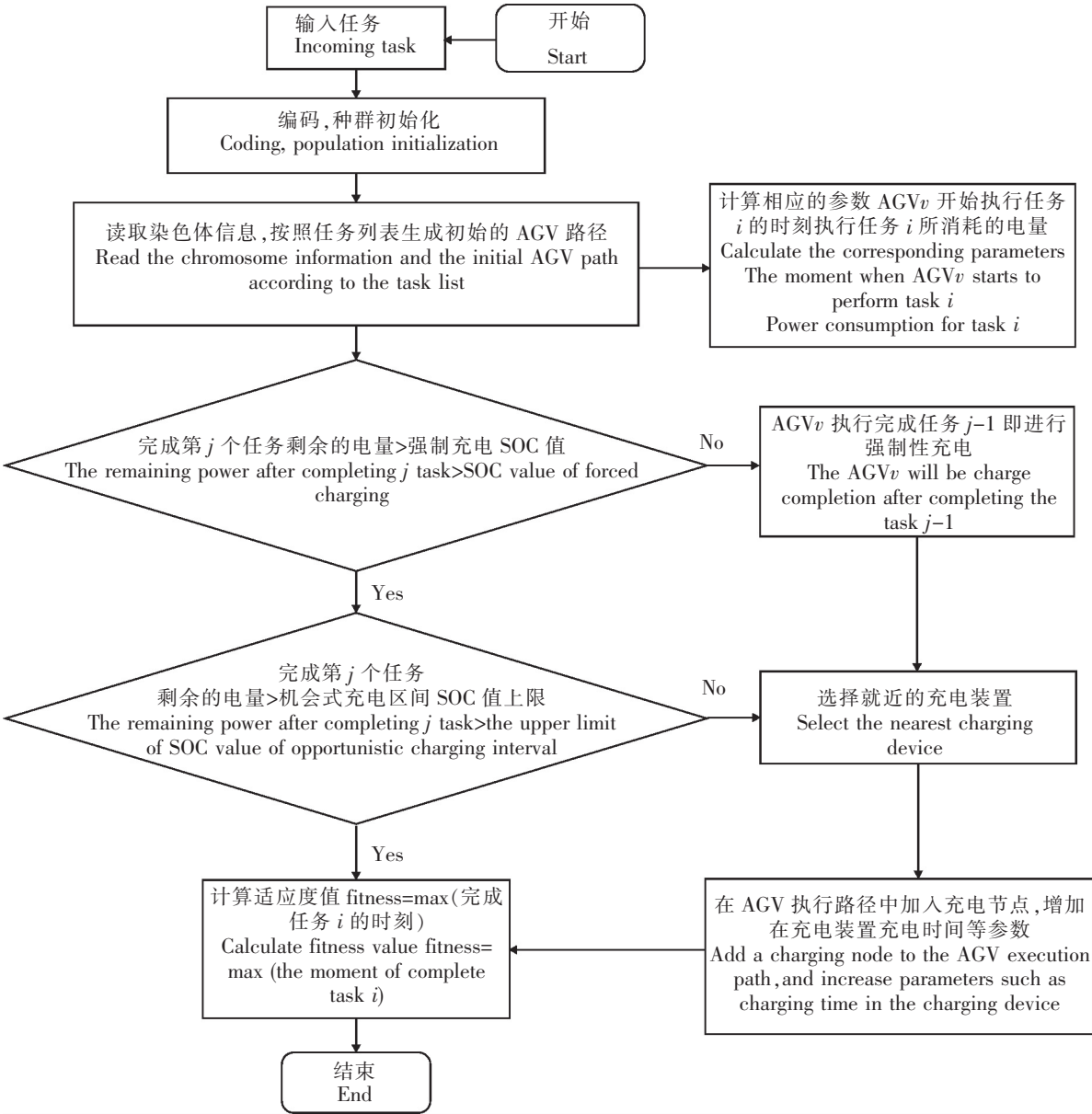


图 4 染色体解码流程图
Fig.4 Chromosome decoding flow chart

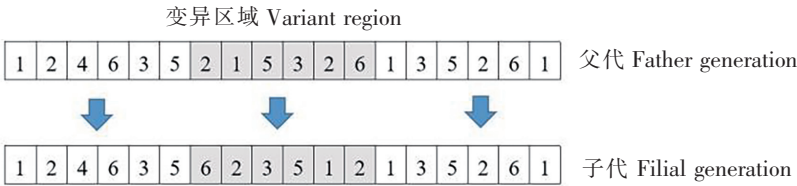


图 5 染色体变异示意图
Fig.5 Schematic diagram of chromosome variation

4 模型检验

4.1 检验参数设置

在以上算法模型的基础上,通过 Matlab 软件进行编码和模型检验。将收集的数据放于特定的 Excel 表格中,令 AGV 载速度为 3.5 m/s,空载速度为 5.8 m/s,重载状态下耗电率为 0.003 SOC/m,空载状态下耗电率为 0.0015 SOC/m。通过对厦门远海码头实地调研得到岸桥和堆场之间的距离见表 1。

表 1 岸桥和堆场之间的距离

Tab. 1 Distance between bridge and yard								
		m						
岸桥序号		堆场序号 Yard number						
Shore number		1	2	3	4	5	6	7
1		576	604	632	660	688	716	744
2		456	484	512	540	568	596	624
3		336	364	392	420	448	476	504

4.2 检验场景

1) 实验一

实验目的:对比不同充电策略,选出最优的充电策略。

检验设置:限定 GA 最大迭代次数为 300,种群为 30,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.4,取 AGV 数量为 10,分别取不同任务数(500~2000)。

(2) 实验二

实验目的:根据实验一得出的结论,确定最佳的机会式充电区间范围。

检验实验设置:选取机会式充电策略,取 AGV 数量为 10,任务数为 1000,分别改变机会式充电区间的范围,其他设置与检验 1 相同。

4.3 实验结果分析

1) 实验一结果分析

实验一设计以下 3 种充电策略。策略 1 即传统离线式充电方法,当前剩余电量低于 40% 时,强制进行充电,并且充满;策略 2 为改进传统离线式充电方法即按需充电,当前剩余电量低于 40% 时,强制进行充电,并且按需充电;策略 3 即机会式充电,当前剩余电量低于 30% 时进行强制充电,当前剩余电量高于 30% 低于 45% 时采用机会式充电,当前剩余电量高于 45% 时,正常工作。

对这 3 种充电策略进行检验,AGV 运行 40 次,取运算结果的平均值作为参考值。AGV 数量为 10 辆,当任务数分别为 500、800、1000、1300、1500、1800、2000 时,3 种充电策略完成任务总时间见如表 2 所示。

由表 2 可知:充电策略 2 整体上优于充电策略 1,当任务数为 1000 时,策略 2 作业过程中每次充电后的电量如图 6 所示。这种按需充电策略,不仅解决充电时间过长的问题,提高了 AGV 的充电利用率和作业效率,而且解决了某些码头因充电装置过少而造成的充电排队等待的问题。

对比充电策略 2 和充电策略 3,可以得出充电策略 3 整体上优于充电策略 2,并随着任务量的增加,充电策略 3 的优势逐渐扩大。当任务数为 500 时,分别记录充电策略 2 和充电策略 3 的 AGV 的电量

表 2 3 种充电策略作业时间对比

Tab. 2 Comparison of operation time of three charging strategies

任务数 Number of jobs	作业时间 Comparison of operation time/s		
	充电策略	充电策略	充电策略
	Charging strategy 1	Charging strategy 2	Charging strategy 3
500	19 489	17 876	17 354
800	33 859	31 089	30 275
1 000	41 549	38 585	36 849
1 300	52 982	49 457	47 125
1 500	61 089	58 161	54 894
1 800	73 891	69 784	65 789
2 000	82 871	77 594	74 184

变化曲线如图 7 所示。可以看出机会式充电策略不但结合了按需充电的传统充电策略的优势,而且利

用其等待空闲时间进行充电作业，大大提高了码头作业系统效率。

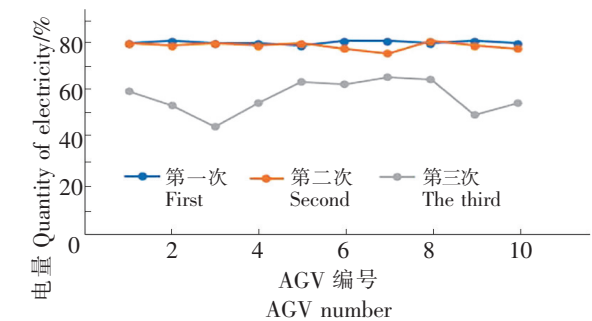


图 6 充电策略 2 充电电量图
Fig.6 Charging capacity diagram of charging strategy 2

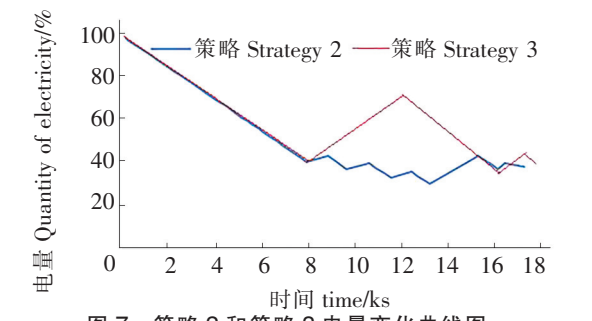


图 7 策略 2 和策略 3 电量变化曲线图
Fig.7 Electric quantity change graph of strategy 2 and strategy 3

2) 实验二结果分析

参考文献 [9] 提出的模型，在机会式充电区间（30，85）且区间长度为 15、10 两种不同情况下分别进行模型检验，并纪录最终完成任务时间、平均每辆 AGV 总充电时间以及充电次数这 3 项指标，得出结果如表 3 所示。

表 3 不同充电区间的各项评价指标
Tab.3 Evaluation indexes of different charging intervals

区间宽度 Interval width	机会式充电区间 Opportunity charging interval	最终完成任务时间 Final task completion time/s	充电时间 Charging time/s	充电次数 Charging times
15	(30,45)	36 849	7 157	17
	(50,65)	36 047	7 110	19
	(70,85)	36 957	7 489	22
10	(30,40)	37 041	7 168	19
	(40,50)	35 902	7 248	21
	(50,60)	36 079	7 347	20
	(60,70)	36 849	7 534	23
	(70,80)	36 987	7 648	25

首先对比区间宽度为 15 的 3 组数据，发现当机会式充电区间为（70，85）时，其中每一项指标都比其他两个充电区间高，这是由于当机会式充电区间过高时，充电速率随电池 SOC 增高而降低，所以充电时间比其他两个充电区间多了很多。虽然电池在该区间段耗电较慢，但是此段电池的利用率比较低，这两点导致了最终完成时间的增加。当机会式充电区间为（30，45）时，得到的数据和充电区间（50，65）比较接近，但是根据文献 [12] 可知，当电池深度放电过多时电池交流内阻会显著提高，对电池性能、寿命造成严重影响。总体上对比区间宽度为 15 的这 3 组数据，机会式充电区间为（50，65）的综合评价最优。当区间宽度为 10 时，通过对比数据发现，充电次数总体上比区间宽度为 15 的多，并且当区间为（70，80）时，出现了与区间为（70，85）同样的问题。对比区间宽度为 10 的这 5 组数据，区间为（40，50）要优于另外 4 组。

通过对比区间（50，65）和（40，50）这两组数据，得出机会式充电区间为（50，65）的综合评价指标最优，此时 AGV 充电时间较短，并且耗电速率较慢，可以更多地减少 AGV 充电对码头作业调度的影响。

5 结束语

自动化集装箱码头 AGV 作业调度问题是影响码头作业效率的关键问题,本文在 AGV 作业调度的过程中考虑了 AGV 电池续航能力和空重载耗电差异,提出了考虑充电过程的 AGV 作业调度模型,并采用 GA 求解。对比 3 种充电策略,得出:与传统离线式充电策略相比,机会式充电策略能够有效的减少 AGV 充电对作业调度的影响,并且合理的机会式充电区间同总的任务完成时间相关,AGV 充电和作业协同调度可有效的减少 AGV 充电次数和时间,进而提高码头的整体作业效率。由于本文重点关注自动化码头 AGV 的作业效率,未考虑 AGV 在运行过程中所产生的路径冲突以及 AGV 充电站位置、数量和规划等问题对作业调度的影响,这些问题今后将做进一步研究。

[参考文献]

- [1] MCHANEY R. Modelling battery constraints in discrete event automated guided vehicle systems[J]. International Journal of Production Research, 1995, 33(11): 3023 – 3040.
- [2] EBBEN M J R. Logistic control in automated transportation networks[J]. Production Engineering, 2001, 5(4): 373 – 382.
- [3] JOHANNES SCHMIDT, CLAAS MEYER – BARLAG, MATTHIAS EISEL, et al. Using battery – electric AGVs in container terminals — assessing the potential and optimizing the economic viability[J]. Research in Transportation Business & Management, 2015, 17(9): 99 – 111.
- [4] 石楠路,梁承姬. 考虑换电过程的自动化码头 AGV 调度优化[J]. 现代制造工程,2019(2):6 – 11 + 139.
- [5] 周小凡,裴道方,余芳,等. 考虑充电和等待时间的集装箱码头 AGV 调度[J]. 上海海事大学学报,2019,40(3):1 – 5, 13.
- [6] 郑亚红,徐玖龙,谢淳. 自动化集装箱码头 AGV 换电管理与调度优化[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021,45(1):1 – 6.
- [7] 谢旦岚,郭笛,纪媛,等. 自动化码头运输设备充电策略优化的仿真研究(英文)[J]. 系统仿真学报,2020,32(10): 1927 – 1935.
- [8] 李明泽. 考虑充电因素的自动化集装箱码头 AGV 任务分配研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- [9] 吴洪明,邹梦艳. 考虑电池电量约束的自动化码头 AGV 调度[J]. 起重运输机械,2021(3):47 – 52.
- [10] 张亚琦,杨斌,胡志华,等. 自动化码头 AGV 充电与作业的集成调度研究[J]. 计算机工程与应用,2017,53(18):257 – 262,270.
- [11] 傅正堂,胡志华,宗康. 集装箱码头 AGV 电量非饱和状态下的调度优化[J]. 大连海事大学学报,2017,43(3):58 – 62.
- [12] 孟仙雅,刘立炳,惠怀兵,等. 放电深度对电池使用寿命的影响[J]. 汽车科技,2016(3):47 – 51.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)