

集装箱码头 AGV 电量非饱和状态下的调度优化

傅正堂 胡志华* 宗 康

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 对 AGV 电量非饱和状态下电池放电的非线性特征进行研究, 区分 AGV 重载与空载的耗电差异, 对该问题建立数学模型并使用 CPLEX 进行实例求解。结果表明, 本文的 AGV 调度方案较传统 AGV 调度方式, 使用车辆数下降 17%, 单车卸箱、装箱的平均个数分别增加 21.43% 和 25%, 可有效解决不饱和和电量下的 AGV 调度问题, 实施效果更好。

关键词: 自动化码头; AGV 调度优化; 电量非饱和; CPLEX 求解; 路径优化

中图分类号: U691.3

文献标志码: A

Scheduling optimization of container terminal AGV under electricity unsaturation condition

FU Zheng-tang, HU Zhi-hua*, ZONG Kang

(Logistics Research Center, Shanghai

Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The nonlinear characteristics of AGV under electricity unsaturation condition was studied, and the power consumption difference between AGV overloading and no-load was distinguished. A mathematical model was established for the above problems and a practical example was analyzed by CPLEX tool. Results show that vehicle usage in the proposed AGV scheduling scheme falls 17% compared with traditional method, and the average number of unloading and loading increases by 21.43% and 25% respectively. Therefore, the proposed scheduling scheme is effective, which can solve the AGV scheduling problem under electricity unsaturation condition with higher implementation.

Key words: automatic terminal; AGV scheduling optimization; electricity unsaturation; CPLEX solution; routing optimization

0 引言

随着 21 世纪海上丝绸之路的建设, 我国沿海港口的集装箱吞吐量逐步上升。为提高集装箱的转运速度, 实现港口的现代化、智慧化, 加速建设自动化港口就成了研究港口运作的工程师、学者们的热点问题。作为中国贸易前沿港口的上海洋山港四期, 也将首次采用最新一代自动化集装箱装卸设备和自动化生产管理控制系统。AGV 是自动化港口的重要组成部分, 是港口水平运输的主要载体, 合理高效地配置 AGV 是一个广泛关注的问题。Qiu 等^[1]研究了自动化集装箱码头的 AGV 优化调度问题, 建立了数学模型, 并使用启发式算法对模型进行求解。Gobal 等^[2]建立了关于 AGV 在集装箱码头运行的仿真模型, 并求解出 AGV 在任务量恒定情况下的最优化配置数量。Vis 等^[3]以 AGV 分配数量最小化为目标进行了相关研究。Luo 等^[4]提出一种求解自动化集装箱码头上集装箱存储和车辆规划问题的双回路策略。Nishimura 等^[5]对集装箱码头拖车的路径优化问题进行了相关研究。Liu 等^[6]对集装箱码头双堆场 AGV 调度问题进行了相关研究。Foster 等^[7]对车辆调度问题进行了相关研究, 并构建模型, 使用启发式算法进行求解。Li^[8]考虑了电量约束下的车辆路径优化问题。康志敏^[9]对集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度进行了相关研究。史飞等^[10]对新型自动化集装箱码头作业进行了仿真分析。李莉等^[11]对求解路径优化问题使用了遗传算法进行参数优化, 并获得较好的结果。柯冉绚等^[12]对集装箱码头 AGV 调度进行优化, 并使用 Netlogo 软件进行

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2017-01-16。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(71101088); 国家自然科学基金面上项目(71471109); 2017 年上海海事大学研究生创新基金资助项目(2017ycx025)。

作者简介: 傅正堂(1994-) 男, 硕士生, 工程师, E-mail: 1204876795@qq.com; 胡志华*(1977-) 男, 博士, 教授, E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn。

仿真。

以上文献均是对港口 AGV 的路径进行优化, 且大多均是基于作业线的路径优化, 并且在构建电量约束模型时, 未考虑 AGV 电池的放电特性, 也未考虑 AGV 重载和空载时的耗电差异。本文考虑多辆 AGV 在不饱和电量下进行装卸船协同作业的调度优化, 并考虑 AGV 重载和空载的耗电差异。在考虑电量约束时, 采用更符合工程实际的 AGV 电池放电过程的非线性进行数学模型构建, 并使用 CPLEX 进行求解, 获得在不饱和电量情况下的多车协同作业的调度计划。

1 问题描述

在 AGV 实际作业中, 由于电池持续供电, 且耗电功率较大, 电池会产生较多热量, 从而导致电池内阻的上升。同时, AGV 车辆在装载集装箱运输和空驶过程中, 电量的消耗也不同。传统 AGV 在进行装卸船作业时, 大多考虑作业线模式的方法, 在作业过程中, 一定数量的 AGV 均在某一固定线路上进行装卸作业, 形成一条“作业路”, 同时, 在进行调度生成时, 也只考虑了 AGV 电池放电与行驶距离的线性关系, 而这与实际工程应用不相吻合, 偏差较大。本文采用“作业面”的作业模式进行 AGV 的调度优化, 每个 AGV 可以走多个路径, 也不与岸桥绑定服务, 并且考虑 AGV 电池放电的非线性特征及 AGV 重载与空载时的耗电差异, 优化 AGV 车辆的计划使用数, 提高码头的作业效率。

如图 1 所示, AGV 小车从 1 号岸桥装载进口箱之后, 运送到堆场 2 堆放, 再移动到堆场 1; 从堆场 1 装载出口箱后, 再返回 1 号岸桥, 进行装船作业。此时, AGV 又可以进行下一轮的装卸作业。

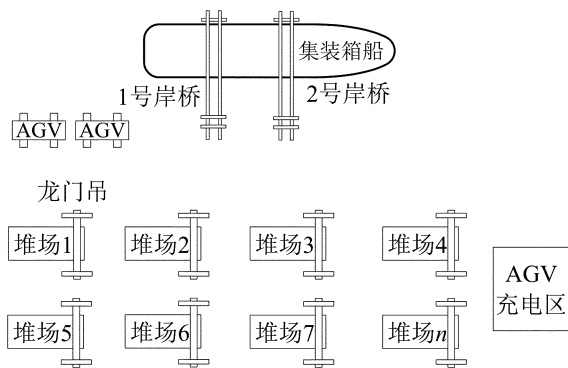


图 1 AGV 作业示意图

Fig. 1 AGV operation schematic diagram

2 模型建立

目前, AGV 小车的调度模型大多均局限在路径的划分以及在该路径上应该有多少车次的量, 并未结合每辆小车的电池余量具体到某辆小车作业计划。同时, 大多数模型也未考虑 AGV 重载与空载时的耗电差异, 没有结合电池的放电特性。本文模型考虑每辆小车的实际电量情况, 由车去选择所要进行装卸作业的路线, 实现调度计划的优化。同时, 考虑锂电池的放电特性。如图 2 所示, 随着电池使用量的增加, 剩余行驶距离也在加速下降。本模型中, 将锂电池的放电特性与 AGV 的行驶距离之间的非线性关系也进行了适当考虑。

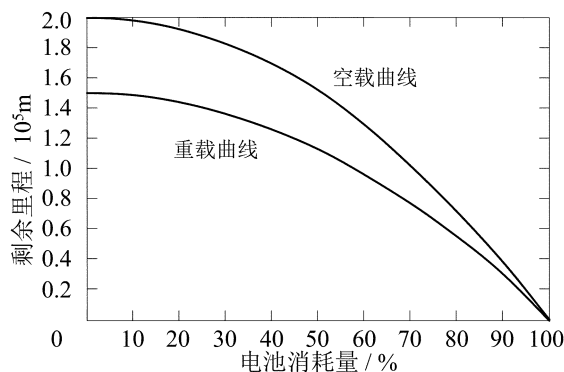


图 2 AGV 电量消耗曲线

Fig. 2 AGV electric quantity consuming diagram

2.1 符号说明

X_{ijk} 为决策变量, 表示第 k 辆 AGV 小车在作业回路 (ij) “船舶 \rightarrow 堆场 $i \rightarrow$ 堆场 $j \rightarrow$ 船舶”的行走次数, 若 $i = j$, 则表示在该回路中, 集卡没有在堆场箱区间行走。 S_i 表示从船舶到堆场 i 的距离; S_j 表示从堆场 j 到船舶的距离; S_{ij} 表示堆场 i 和堆场 j 之间的距离; ya_i 表示各个箱区的进口箱箱量; yb_i 表示各个箱区的出口箱箱量; $p(k)$ 表示第 k 辆 AGV 的剩余电量值; h 表示进口箱数量; m 表示出口箱数量; v 表示安全电量百分比; L 表示每辆 AGV 消耗电量百分比与剩余行驶里程数之间的函数关系, 在该模型中, 设其为二次函数关系; N_{oik} 表示第 k 辆 AGV 小车从泊位到堆场 i 的重载次数; N_{jok} 表示第 k 辆 AGV 小车从堆场 j 到泊位的重载次数; β 为 AGV 小车空载耗能比与重载耗能的比值。

2.2 模型构建

目标函数:

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijk} (S_i + S_j + S_{ij}) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijk} \leq y a_i, \forall i = 1, 2, \dots, R \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijk} \geq y b_i, \forall j = 1, 2, \dots, R \quad (3)$$

$$L(x) = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R X_{ijk} S_{ij} + S_i N_{oik} + S_i (X_{ijk} - N_{oik}) \beta + S_j N_{jok} + S_j (X_{ijk} - N_{jok}) \beta \leq L(1 - p(k)) - L(1 - v) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^K X_{ijk} = \max(h, m) \quad (6)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, R; k = 1, 2, \dots, K$$

$$X_{ijk} \geq 0, N_{oik} \geq 0, N_{jok} \geq 0 \quad (7)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, R; k = 1, 2, \dots, K$$

式(1)为该优化模型的目标函数,即在现有的不饱和电量的基础上进行路径优化,使总的距离最短,同时也使总耗电量最少.式(2)表示AGV向每个堆场运输的集装箱数量不大于堆场集装箱最大装载量.式(3)表示集装箱堆场内所有出口集装箱全部被装船.式(4)表示AGV电池消耗曲线与剩余里程数之间的关系.式(5)表示每辆AGV的行走路径均在其电量约束范围内,且有预

留的安全电量供其返回充电区.式(6)表示本次船舶的装卸船任务完成.式(7)为该模型决策变量的非负约束.

3 案例分析

在模型求解时,将模型中的相关约束和目标函数导入CPLEX求解.实验使用的电脑配置为Win 7 64位操作系统,AG运行内存,CPU频率为1.8 GHz.

上海洋山港集装箱码头1号泊位停靠某集装箱船,其进口箱量为850箱,出口箱量为500箱.该船舶装卸作业涉及8个堆场,此时,码头上还有8辆AGV可以进行作业,每辆AGV的满电行程均为200 km,AGV的安全电量为总电量的10%,可以满足其从任意堆场返回充电区.表1为各个堆场之间的距离以及其到1号泊位之间的距离.该码头堆场的堆放规则是进口箱和出口箱混合堆放,其中,该8个堆场的出口箱分布以及其对应的进口箱可堆放容量如表2所示.每辆AGV的剩余电量百分比如表3所示.假设AGV在港口内运行速度为25 km/h,集卡在港口内运行速度为30 km/h.

表1 堆场泊位距离分布

Tab. 1 Yard and berth distance									m
	堆场 1	堆场 2	堆场 3	堆场 4	堆场 5	堆场 6	堆场 7	堆场 8	船舶
堆场 1	0	280	300	400	1000	300	400	450	1100
堆场 2	280	0	250	450	550	350	450	1200	890
堆场 3	300	250	0	350	600	580	700	800	580
堆场 4	400	450	350	0	280	440	480	880	1300
堆场 5	1000	550	600	280	0	380	650	770	900
堆场 6	300	350	580	440	380	0	1100	150	880
堆场 7	400	450	700	480	650	1100	0	660	760
堆场 8	450	1200	800	880	770	150	660	0	1200

表2 堆场内出口箱量 and 对应的进口箱量

Tab. 2 The quantity of export container and import container		
堆场号	出口箱量	进口箱量
1	100	800
2	0	650
3	70	322
4	30	455
5	150	210
6	80	412
7	60	273
8	10	98

表3 AGV 电量余量

Tab. 3 AGV battery remain			
AGV 编号	剩余电量/%	AGV 编号	剩余电量/%
1	67	7	64
2	60	8	71
3	66	9	75
4	61	10	68
5	59	11	77
6	78	12	86

使用CPLEX工具求解后,得出优化后的调度结果如表4所示,1号和2号AGV限制,可参与

其余作业的调配; 其余 AGV 均生成了各自的路线和运行状态, 重进重出表示在卸完集装箱后, 再次载集装箱从堆场返回船舶装船. 重进空出表示在完成卸船任务后, 直接返回船舶. 由表 4 可以看出, 总计需要 10 辆 AGV, 行驶路径总里程为 1341 180 m. 表 5 为优化后各 AGV 参数.

表 4 AGV 优化后的调配方案
Tab. 4 The optimization deploy of AGV

AGV 编号	路径	卸箱	装箱	运行状态	AGV 编号	路径	卸箱	装箱	运行状态
1	——	——	——	空闲	8	0→6→8→0	9	9	重进重出
2	——	——	——	空闲	8	0→7→7→0	23	23	重进重出
3	0→3→3→0	70	70	重进重出	9	0→3→3→0	128	0	重进空出
3	0→3→3→0	49	0	重进空出	10	0→6→6→0	79	79	重进重出
4	0→5→5→0	73	73	重进重出	11	0→7→7→0	2	2	重进重出
5	0→1→1→0	31	31	重进重出	11	0→7→7→0	97	0	重进空出
5	0→7→7→0	35	35	重进重出	12	0→5→5→0	77	77	重进重出
6	0→1→1→0	69	69	重进重出	12	0→6→6→0	1	1	重进重出
7	0→5→4→0	30	30	重进重出	12	0→6→8→0	1	1	重进重出
8	0→3→3→0	75	0	重进空出	12	0→7→7→0	1	0	重进空出

表 5 优化后各 AGV 参数
Tab. 5 The optimization parameter of AGV

AGV 编号	初始电量 /%	最后电量 /%	总卸箱数	总装箱数	总距离 /m	重载行驶距离 /m	空返距离 /m	轨迹类型	耗时 /h
1	——	——	——	——	——	——	——	——	——
2	——	——	——	——	——	——	——	——	——
3	66	12.23	119	70	138 040	109 620	28 420	2	5.52
4	61	10.05	73	73	131 400	131 400	0	1	5.25
5	59	11.96	66	66	121 400	121 400	0	2	4.85
6	78	10.14	69	69	151 800	151 800	0	1	6.07
7	64	29.92	30	30	74 400	66 000	8 400	1	2.97
8	71	14.08	107	32	142 030	97 180	44 850	3	5.68
9	75	15.61	128	0	148 480	74 240	74 240	1	5.93
10	68	10.69	79	79	139 040	139 040	0	1	5.56
11	77	15.77	99	2	150 480	73 720	76 760	2	6.01
12	86	14.03	80	79	144 110	143 200	910	4	5.76
均值	69.3	17.8	85	50	134 118	110 760	23 358	1.8	5.36
合计	——	——	850	500	1 341 180	1 107 600	233 580	18	——
作业完成时间	——	——	——	——	——	——	——	——	6.07

表 6 为三种调度方式的比较. 由表 6 可知, 采用本文方式进行 AGV 调配, 在使用车辆数上较传统 AGV 调度方式减少 17%; 在卸箱和装箱均值方面, 较传统 AGV 方式分别增加 21.43% 和 25%, 从而使其效率更高. 作业路线类型减低 10%, 降低了 AGV 之间碰撞的可能性. 但是, 在空

表 6 三种调度方式的比较
Tab. 6 The comparison of three deploy method

作业方式	车辆数	卸箱均值	装箱均值	空返率 /%	任务类型均值	单车耗时均值 /h	任务完成时间 /h
集卡	5	170	100	16.45%	1.4	10.72	16.13
优化前	12	70	40	11.91%	2	3.35	6.05
优化后	10	85	50	16.45%	1.8	5.36	6.07
对集卡调度优化率 /%	100	-50	-50	0	28.57	-50	-62.37
对传统 AGV 调度优化率 /%	-17	21.43	25	38.12	-10	60	0.33

返率上增加了 38.12%。相比集卡,本文方式在任务完成时间上大幅优于集卡,缩短了 62% 的作业时间,也可以降低单一车辆的使用时间,减少其损耗。

4 结 语

自动化码头 AGV 的调度优化问题一直是国内外研究的热点问题,合理的调度可以节省码头的日常作业成本,增加码头竞争力。本文考虑了在各 AGV 均为非饱和状态下的合理调配问题,并使用 CPLEX 对该问题进行建模与求解。结果表明,本文 AGV 调度方案较传统 AGV 调度方式,使用车辆数下降 17%;单车卸箱和装箱平均个数分别增加 21.43% 和 25%。

参考文献(References):

- [1] QIU L, HSU W J, HUANG S Y, et al. Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey [J]. *International Journal of Production Research* 2002, 40(3): 745–760.
- [2] GOBAL S L, KASILINGAM R G. A simulation model for estimating vehicle requirements in automated guided vehicle systems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1991, 21(1–4): 623–627.
- [3] VIS I F A, DE KOSTER R D, ROODBERGEN K J, et al. Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2001, 52(4): 409–417.
- [4] LUO J B, WU Y. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals [J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review* 2015, 79: 49–64.
- [5] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Yard trailer routing at a maritime container terminal [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2005, 41(1): 53–76.
- [6] LIU C I, JULA H, VUKADINOVIC K, et al. Automated guided vehicle system for two container yard layouts [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2004, 12(5): 349–368.
- [7] FOSTER B A, RYAN D M. An integer programming approach to the vehicle scheduling problem [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1976, 27(2): 367–384.
- [8] LI J Q. Transit bus scheduling with limited energy [J]. *Transportation Science* 2014, 48(4): 521–539.
- [9] 康志敏. 集装箱自动化码头 AGV 路径优化和调度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学 2011.
KANG Z M. The research of routing optimization and scheduling for AGV on automated container terminals [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology 2011. (in Chinese)
- [10] 史飞, 张新艳, 赵启元. 新型自动化集装箱码头的仿真分析 [J]. *机械与电子* 2008(12): 56–60.
SHI F, ZHANG X Y, ZHAO Q Y. Simulation and analysis of a new type of automated container terminal [J]. *Machinery & Electronics* 2008(12): 56–60. (in Chinese)
- [11] 李莉, 张立明, 詹跃东. 求解 AGV 路径优化问题的遗传算法参数优化 [J]. *昆明理工大学学报(理工版)*, 2006, 31(4): 26–29.
LI L, ZHANG L M, ZHAN Y D. Optimization of parameters of genetic algorithm for AGV path optimization [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Science and Technology)*, 2006, 31(4): 26–29. (in Chinese)
- [12] 柯冉绚, 任亚东. 集装箱码头 AGV 调度优化 [J]. *集美大学学报(自然科学版)* 2016, 21(1): 35–41.
KE R X, REN Y D. Study on optimizing AGV control in container terminals [J]. *Journal of Jimei University(Natural Science)* 2016, 21(1): 35–41. (in Chinese)