

自动化集装箱码头 AGV 调度与换电双层模型求解

赵 涛, 梁承姬*, 胡筱渊, 王 钰

(上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 为降低自动化集装箱码头 AGV 换电问题对码头整体作业效率的影响, 首先分析了 AGV 调度和换电的相互影响和内在联系, 其次考虑 AGV 耗电差异和换电阈值等约束以最小化最终完工时间为目标建立 AGV 调度模型(上层模型), 考虑换电站数量和排队等约束以最小化换电总时间为目标建立 AGV 换电模型(下层模型), 并针对两者之间的双层耦合关系, 设计换电需求和换电方案为公用变量进行解耦, 最后使用自动化集装箱码头实际作业参数设计算例, 分别采用 GAMS 求解器和遗传算法循环迭代求解。算例结果表明, 双层耦合模型合理地决策了 AGV 调度和换电问题, 换电排队时间控制在 4 min 之内, 降低了 AGV 换电总时间和最终完工时间, 提升了 AGV 利用率。

关键词: 自动化集装箱码头; AGV 换电; 换电阈值; 换电时间; 双层模型

中图分类号: U691.3

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202106010

0 引言

为建设绿色港口, 降低碳排放, 大部分自动化集装箱码头采用纯电力驱动的自动导引车(automated guided vehicle, AGV)承担集装箱在码头内部的水平运输任务, 连接岸边作业系统与堆场作业系统。电力驱动 AGV 是特殊工作环境下的电动汽车。当 AGV 可用电量低于换电阈值(安全电量)时, 必须充电, 否则随时有可能停止运行, 从而影响集装箱码头正常作业。因此, AGV 充电是自动化集装箱码头不可忽略的重要问题。

自动化集装箱码头投产以来, AGV 调度问题备受学者青睐。Confessore 等^[1]利用最小流模型分析了 AGV 调度问题; 王聪等^[2]建立了双层规划模型研究 AGV 作业效率和能源消耗; Choe 等^[3]提出了在线学习算法对 AGV 进行实时调度; 霍凯歌等^[4]以最小化作业总费用为规划目标研究了多载 AGV 的调度问题。大部分学者在研究 AGV 调度问题时, 往往忽略了电量约束。随着 AGV 充电问题的重要性日趋显现, 部分学者开始关注 AGV 充电问题。如刘广红等^[5]分析了上海港洋山四期自动化码头的总体布局, 以及换电站

的分布和容量设置; 傅正堂等^[6]考虑 AGV 耗电差异, 研究了 AGV 电量非饱和状态下的调度优化; 石楠路等^[7]构建了混合整数优化调度模型, 提出了 AGV 作业顺序和换电站时间窗协同的换电策略, 并用遗传算法求解验证了模型的有效性; 丁一等^[8]考虑 AGV 装载能力和充电后续航能力约束, 构建了多载 AGV 动态作业调度的混合整数规划模型。但现有 AGV 换电问题的研究成果仍没有关于深入分析 AGV 调度和换电关系的内容。

充电问题是电池驱动工具无可避免的问题, 并且充电问题和调度问题在电动汽车和无人机领域已有较多研究成果。如 Barco 等^[9]综合考虑电池包退化、充电过程等因素, 研究了电动汽车路线问题; Shao 等^[10]综合考虑电动汽车的电量消耗、充电站数量和车辆负载, 研究了电动汽车的路线问题; 袁泉等^[11]分析了电动汽车路网交通信息和电网运行状态的交互影响, 并提出了路网-电网耦合原则以调节输电线路阻塞问题; Thibbotuwawa 等^[12]以最大程度降低能耗为目标研究了电量、无人机重复调用和有效荷载约束下的无人机调度问

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-09-25。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1704403)。

作者简介: 赵 涛(1997-), 男, 硕士生, E-mail: 201930510094@stu.shmtu.edu.cn; 梁承姬*(1970-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: liangcj@shmtu.edu.cn。

题;Liu 等^[13]考虑 UAV 充电时间和能耗的共同优化,建立了无线充电下无人机最小能耗优化模型。

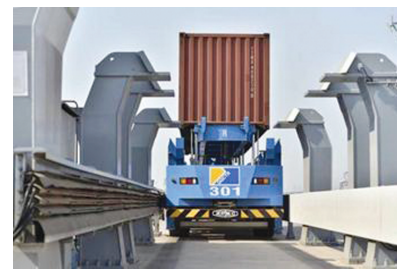
综上所述,大部分 AGV 调度相关文献中没有考虑电量约束和充电过程,少部分文献考虑电量约束,但没有考虑换电站的数量和容量限制等因素。本文针对有多个换电站的自动化集装箱码头,综合考虑 AGV 重、空载耗电差异和换电站的数量、容量限制等约束,分析 AGV 调度和换电之间相互影响的内在关系,建立 AGV 调度和换电的双层耦合模型,生成 AGV 调度和换电方案。

1 问题描述

自动化集装箱码头纯电动 AGV 的充电方式可分为桩式充电、非接触式充电和换电式。桩式充电必须建设专用场地。非接触式充电方式如图 1(a)所示,无须专用场地,AGV 在堆场交互区工作间隙补充电量,实现了车辆不停车充电,但充电率有限;换电式如图 1(b)所示,必须建设专用换电站,待换电 AGV 空载驶向换电站,换电机器人为 AGV 更换电池包。本文研究的自动化集装箱码头 AGV 充电问题均为换电式的 AGV 充电问题。

自动化集装箱码头的布局方式主要分为平行式和垂直式,具体细分为 5 类:双车道平行式、单车道平行式、两端车道垂直式、两侧车道垂直式和 U 形车道垂直式^[14-15]。研究表明,垂直式布局比平行式布局更利于发挥自动化设备的作业性能,且垂直式布局使用广泛,如澳大利亚布鲁斯班码头、荷兰鹿特丹 ECT 码头、英国伦敦 Gateway 码头、德国汉堡 CTA 码头等^[16-17]。

本文以上海港洋山四期自动化码头实际布局



(a) 非接触式充电



(b) 换电式

图 1 青岛港 AGV 非接触式充电与上海港 AGV 换电

Fig. 1 AGV non-contact charging at Qingdao Port and AGV battery exchange at Shanghai Port

为基础(图 2),研究两端车道垂直式自动化集装箱码头布局。该码头划分为岸桥作业区、AGV 作业区和自动化堆场作业区,共建设 A、B 两座换电站,并分布在码头两端。换电站 A 为小换电站,配置 1 个换电工位;换电站 B 为大换电站,配置 2 个换电工位,即可以同时为 2 台 AGV 更换电池包,每个换电工位完成 1 次电池包更换平均花费 300 s。

从 AGV 电量消耗的角度考虑,将 AGV 划分为 3 种状态(表 1),每种状态下耗电量和行驶速度均不同:在停车状态下,耗电量最小,仅维持 AGV 导航、通信等系统的正常运行;在重载状态下,耗电量最大,AGV 运载集装箱由发箱位置到

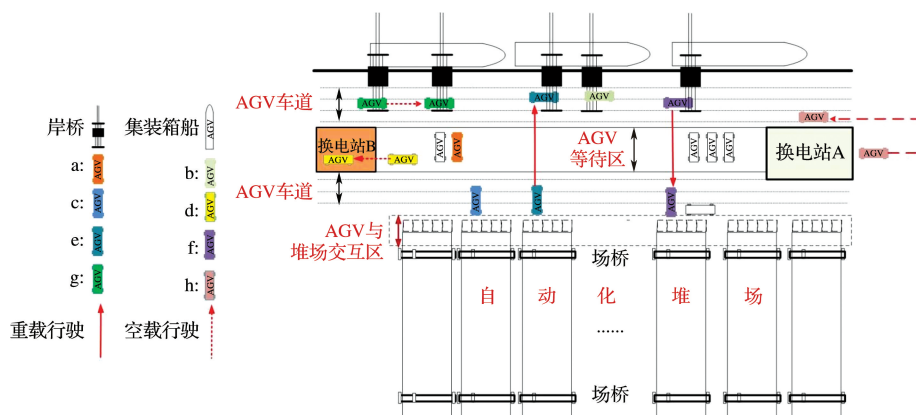


图 2 洋山四期自动化码头

Fig. 2 Yangshan Phase IV automated terminal

收箱位置;在空载状态下,耗电量适中,AGV 正常空驶.3 种状态下的 AGV 分别对应 8 种不同工作场景,见图 2.场景 a 为 AGV 在 AGV 等待区,等待接收指令;场景 b 为 AGV 等待岸桥完成作业;场景 c 为 AGV 等待场桥完成操作;场景 d 为 AGV 在换电站排队等待更换电池包;场景 e 为装船作业,AGV 在堆场装箱行驶至岸边卸箱;场景 f 为卸船作业,AGV 在岸边装箱行驶至堆场卸

箱;场景 g 为 AGV 由收箱位置行驶至发箱位置;场景 h 为 AGV 驶向换电站和驶离换电站.

每台 AGV 的作业状态均在 8 种场景中不断地变换,电量在不停地更新.为了尽量减少因 AGV 断电停止作业带来的损失,结合实地调研结果,本文采用固定阈值换电策略,具体如下:每台 AGV 初始电量均为 100%,在接收作业指令时,判断 AGV 剩余电量是否大于换电阈值,当且仅当 AGV 剩余电量不大于换电阈值时,不再接收任何作业指令,前往换电站更换电池包. AGV 在更换完电池包之后再次投入使用,直至全部作业任务完成. AGV 换电总时间为各台 AGV 驶向和驶离换电站的时间、换电站排队时间以及电池包更换操作时间总和,具体换电过程分析如图 3 所示.

表 1 AGV 状态划分

Tab. 1 AGV status division

状态	耗电量	场景
停车	最小	a, b, c, d
重载	最大	e, f
空载	适中	g, h

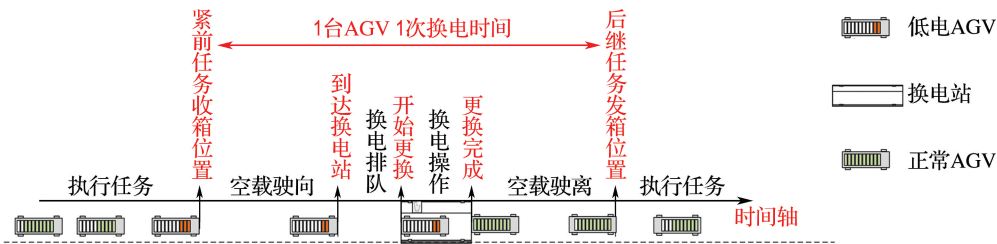


图 3 AGV 换电过程分析

Fig. 3 Analysis of AGV battery exchange process

AGV 调度决定了 AGV 何时换电,AGV 换电过程决定了 AGV 何时再次投入使用,彼此相互联系,从而影响 AGV 任务的最终完工时间. 本文根据 AGV 调度和换电之间的关系,建立 AGV 调度和换电的双层耦合模型,如图 4 所示. 在图

中,上层模型为 AGV 调度模型,以最终完工时间最小化为目标,决策 AGV 调度;下层模型为 AGV 换电模型,以换电总时间最小化为目标,决策每台 AGV 每次选择的换电站.

具体如下:AGV 调度模型中考虑换电电量约

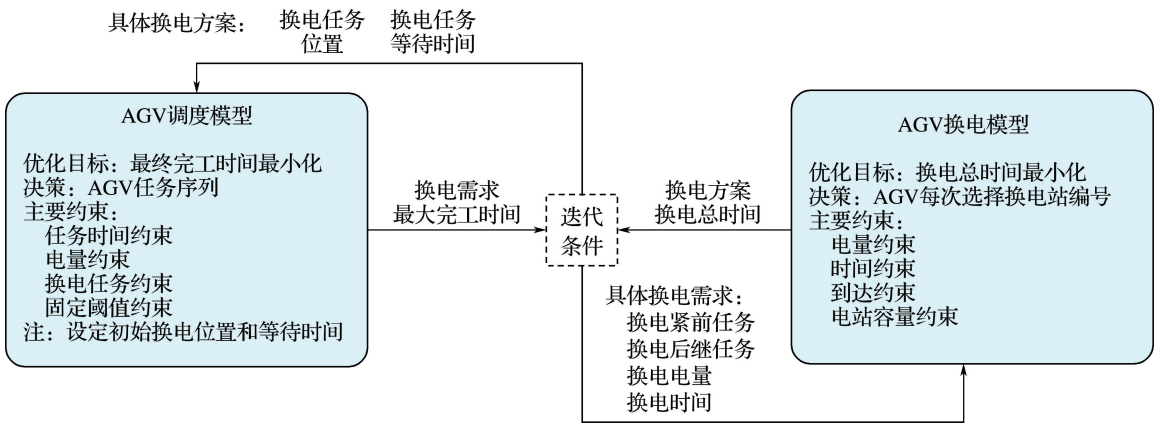


图 4 双层耦合模型框架

Fig. 4 Two-layer coupling model frame

束,设定每台 AGV 最大允许换电次数和换电任务,每次任务结束时判断剩余电量是否低于换电阈值,若是则执行换电任务即前往指定换电站编号,否则接收并执行下一任务,直至全部任务完成,以最终完工时间最小化为目标决策制定 AGV 调度方案和 AGV 换电需求,即每台 AGV 任务作业顺序、每次换电时间、换电紧前任务、换电后继任务和换电时刻剩余电量,为 AGV 换电模型提供输入数据。

AGV 换电模型中考虑 AGV 换电需求、换电站位置、换电站工位数量和先到先服务原则等约束,以换电总时间最小化为目标决策制定 AGV 换电方案,即每台 AGV 每次换电所选换电站编号和相应的排队时间,对应调度模型中换电任务编号和等待时间.以换电需求和换电方案连接两个子模型,并通过迭代不断更新公共设计变量,形成两个模型的双层耦合关系。

2 模型建立

2.1 AGV 调度模型(上层模型)

2.1.1 模型假设 AGV 初始电量均为 100%;在作业过程中,AGV 不会晚于计划时间到达指定位置;在作业过程中,不考虑设备故障以及碰撞;岸桥、场桥的每个装卸任务的操作顺序和操作时间已知;所有集装箱大小均为 12.192 m,1 辆 AGV 1 次装载 1 个集装箱;不考虑码头突发状况和 AGV 冲突因素。

2.1.2 符号说明

(1)集合

$V_0: V_0 = \{v_0\}$,虚拟开始任务集合;

$V'_0: V'_0 = \{v'_0\}$,虚拟结束任务集合;

$V_t: V_t = \{1, 2, \dots, t\}$,装卸任务集合;

$K: K = \{1, 2, \dots, k\}$,AGV 集合;

$V_k: V_k = \{1, 2, \dots, n\}$,第 k 台 AGV 对应的换电任务;

$V_b: V_b = V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_k$,全部换电任务集合;

$V: V = V_0 \cup V'_0 \cup V_b \cup V_t$,任务集合。

(2)参数

s_1, s_2 :AGV 空载和重载速度;

r_1, r_2, r_3 :AGV 空载、重载和停车每秒耗电率;

C :换电阈值(安全电量);

y :岸桥的平均操作时间;

q :场桥的平均操作时间;

M :一个无穷大的正数;

a_{fix} :一次更换电池包的操作时间;

W_{ki} :第 k 台 AGV 执行换电任务 i 的排队时间;

d_i :任务 i 发箱位置与收箱位置的距离;

e_i :任务 i 的最早允许作业时间;

D_{ij} :任务 i 收箱位置与任务 j 发箱位置的距离,换电任务收箱位置和发箱位置均转化为换电站位置;

d_{ki} :第 k 台 AGV 执行任务 i 的空驶距离,从紧前任务收箱位置到任务 i 发箱位置的距离;

z_{ki} :第 k 台 AGV 执行任务 i 的完成时间;

w_{ki} :第 k 台 AGV 执行任务 i 的岸边等待时间;

b_{ki} :第 k 台 AGV 开始任务 i 的电池包剩余电量;

B_{ki} :第 k 台 AGV 完成任务 i 的电池包剩余电量。

(3)决策变量

x_{kij} 为 0-1 变量,若第 k 台 AGV 在执行任务 i 之后紧接着执行任务 j ,则 $x_{kij} = 1$,否则 $x_{kij} = 0$ 。

2.1.3 AGV 调度模型建立 在本模型中,根据装卸任务量、每个任务的最早允许作业时间、每台 AGV 最多允许换电次数和 AGV 数量,建立以 AGV 最终完工时间最小化为目标的 AGV 调度模型。

目标函数:

$$\min F$$

约束条件:

$$F \geq z_{ki}; \forall k \in K, i \in V \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V_0} x_{kij} = 1; \forall j \in V, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V'_0} x_{kij} = 1; \forall j \in V, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V_t} x_{kij} = 1; \forall j \in V \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V_t} x_{kij} = 1; \forall i \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} x_{kih} - \sum_{j \in V} x_{khj} = 0; \forall h \in V_b \cup V_t, k \in K \quad (6)$$

$$d_{ki} - \sum_{j \in V} x_{kji} D_{ji} \geq 0; \forall k \in K, i \in V \quad (7)$$

$$w_{ki} = \begin{cases} 0; & \forall k \in K, i \in V_0 \cup V'_0 \\ W_{ki}; & \forall k \in K, i \in V_k \end{cases} \quad (8)$$

$$w_{kj} \geq e_j - z_{ki} - d_{ki}/s_1 + (x_{kij} - 1)M; \quad \forall k \in K, j \in V_t, i \in V \quad (9)$$

$$z_{kj} \geq z_{ki} + w_{kj} + d_{kj}/s_1 + d_{kj}/s_2 + y + q - (1 - x_{kij})M; \forall k \in K, j \in V_i, i \in V \quad (10)$$

$$z_{kj} \geq z_{ki} + w_{ki} + a_{fix} + d_{ki}/s_2 + (1 - x_{kij})M; \forall k \in K, j \in V_k, i \in V_t \quad (11)$$

$$b_{kj} = B_{ki} + (1 - x_{kij})M; \forall k \in K, i \in V, j \in V_t \quad (12)$$

$$b_{kj} \leq C; \forall k \in K, j \in V_b \quad (13)$$

$$B_{ki} = 100; \forall k \in K, i \in V_0 \cup V_b \quad (14)$$

$$B_{ki} = b_{ki} - r_1 d_{ki}/s_1 - r_2 d_i/s_2 - r_3 w_{ki}; \forall k \in K, i \in V_t \quad (15)$$

$$\sum_{i \notin V_k} x_{kij} = 0; \forall k \in K, j \in V \quad (16)$$

$$\sum_{i \in V} x_{kij} \leq n; \forall k \in K, j \in V_k \quad (17)$$

$$\sum_{h \in V_t} x_{khi} - \sum_{h' \in V_t} x_{kh'j} \leq 0; \forall k \in K, i, j \in V_k, j \leq i \quad (18)$$

$$z_{ki} > 0, B_{ki} > 0, w_{ki} \geq 0, d_{ki} \geq 0; \forall k \in K, i \in V \quad (19)$$

目标函数: 最终完工时间最小化.

完工时间约束: 式(1)任务完成时间不小于任意任务的完成时间.

任务约束: 式(2)、(3)为每台 AGV 必须完成虚拟开始和虚拟结束任务; 式(4)、(5)为每个任务仅有一个紧前和后继任务, 且允许换电任务不必全部完成, 即无须每台 AGV 都发生 n 次换电; 式(6)为平衡约束, 中间任务必须运输平衡, 即输入等于输出.

距离约束: 式(7)为 AGV 执行任务空驶距离.

时间约束: 式(8)、(9)为等待时间, 虚拟等待时间为 0, 换电任务等待时间为换电时间, 普通任务等待时间由到达发箱位置的时间和最早允许作业时间计算得到; 式(10)、(11)为任务完成时间, 普通任务完成时间由紧前任务完成时间、等待时间、岸桥操作时间、场桥操作时间、空驶时间和重驶时间求和得到, 换电任务完成时间由紧前任务完成时间、换电操作时间、空载驶向换电站时间、等待时间求和得到.

电量约束: 式(12)为接受任务时 AGV 剩余电量, 接受普通作业任务时即紧前任务完成时剩余电量; 式(13)为接受换电任务时, AGV 剩余电量不大于换电阈值; 式(14)、(15)为 AGV 完成任务时剩余电量, 普通任务计算方式为接收任务时电量、重载耗电量、空载耗电量计算而得, 换电任

务完成时电量为 100%, 即 AGV 更换新电池包.

换电任务约束: 式(16)表示 AGV 只能执行独自所属 n 个虚拟换电任务; 式(17)为 1 台 AGV 的换电次数之和, 不允许超过最多换电次数 n ; 式(18)为 1 台 AGV 的换电任务只能按照所属换电任务编号从小到大依次执行, 即若换电 i 次, 只能完成前 i 个换电任务, 不能完成多余的换电任务.

变量约束: 式(19)为变量的约束条件.

2.2 AGV 换电模型(下层模型)

2.2.1 模型假设 每个换电站内可用电池包的数量充足; 每个换电站遵循先到先服务规则; 不考虑换电工位维护等不确定性因素; 每个换电工位同一时刻仅为 1 台 AGV 更换电池包; 每个换电站配置 1 个换电工位.

2.2.2 符号说明

(1)集合

T : $T = \{1, 2, \dots, m\}$, 换电站集合;

U_k : 换电需求集合, 由调度模型可得, $u \in U$, $U = U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_k$.

(2)参数

B_{uk} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电指令产生时的剩余电量;

S_{uk} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电指令产生时间;

d_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电驶向换电站 m 的距离;

D_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站与后继任务发箱位置距离;

f_{uk} : 第 k 台 AGV 完成第 u 次换电后, 到达换电后继任务发箱位置时间;

A_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站的到达时间;

C_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站的开始操作时间;

W_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站的排队时间;

L_{ukm} : 第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站的完成时间.

(3)决策变量

$y_{kk'm}$: 0-1 变量, 第 k 台 AGV 比第 k' 台 AGV 提前到达 m 号换电站, 则 $y_{kk'm} = 1$, 否则 $y_{kk'm} = 0$;

p_{ukm} : 0-1 变量, 若第 k 台 AGV 第 u 次换电选择 m 号换电站, 则 $p_{ukm} = 1$, 否则 $p_{ukm} = 0$.

2.2.3 AGV 换电模型建立 在本模型中, 考虑换电站的位置、排队时间和电量消耗差异, 建立以

AGV 换电总时间最小化为目标的 AGV 换电模型.

目标函数:

$$\min F'$$

约束条件:

$$F' = \sum_{k \in K} \sum_{u \in U} (f_{uk} - S_{uk}) \quad (20)$$

$$\sum_{m \in T} p_{ukm} = 1; \forall k \in K, u \in U_k \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in T} y_{kk'm} \leq 1; \forall k' \in K \quad (22)$$

$$\sum_{k' \in K} \sum_{m \in T} y_{kk'm} \leq 1; \forall k \in K \quad (23)$$

$$f_{uk} \geq L_{ukm} + D_{ukm}/s_2 + (p_{ukm} - 1)M; \\ \forall u \in U_k, k \in K, m \in T \quad (24)$$

$$A_{ukm} \geq (p_{ukm} - 1)M + S_{uk} + d_{ukm}/s_2; \\ \forall u \in U_k, m \in T, k \in K \quad (25)$$

$$W_{ukm} \leq \max(0, L_{u'k'm} - A_{ukm}) + \\ (1 - p_{ukm})(1 - y_{kk'm})M; \\ \forall m \in T, k, k' \in K, u \in U_{k'}, u' \in U_{k'} \quad (26)$$

$$C_{ukm} \leq (1 - p_{ukm})M + A_{ukm} + W_{ukm}; \\ \forall u \in U_k, m \in T, k \in K \quad (27)$$

$$L_{ukm} \leq (1 - p_{ukm})M + C_{ukm} + a_{\text{fix}}; \\ \forall u \in U_k, m \in T, k \in K \quad (28)$$

$$(1 - p_{ukm})M + B_{uk} - r_2 d_{ukm}/s_2 - r_3 W_{ukm} \geq 0; \\ \forall u \in U_k, k \in K, m \in T \quad (29)$$

$$(1 - y_{kk'm})M + A_{ukm} - A_{u'k'm} \geq 0; \\ \forall m \in T, k, k' \in K, u \in U_k, u' \in U_{k'} \quad (30)$$

$$y_{kkm} = 0; \forall m \in T, k \in K \quad (31)$$

$$f_{uk} > 0, W_{ukm} \geq 0; \forall m \in T, k, k' \in K, u \in U \quad (32)$$

目标函数:最小化 AGV 换电总时间. 式(20)为 AGV 换电总时间的计算.

排队约束:式(21)为 1 台 AGV 每次换电只能选择 1 个换电站;式(22)、(23)为 AGV 在换电时前后最多各有 1 台 AGV 需要被服务;式(30)为 2 台 AGV 存在前后排队关系前提是前者比后者提前到达同 1 个换电站;式(31)排除不可能产生排队现象,即连续被同 1 个换电站服务的 AGV 编号不可能相同.

时间约束:式(24)为到达后继任务发箱位置时间,即该次换电的完成时间与空载驶离时间之和;式(25)为到达换电站时间,即该次换电指令产生时间与空载驶向换电站时间之和;式(26)为换电站排队时间,若到达换电站时前 1 台 AGV 尚未完成换电则等待,否则无须等待;式(27)为换电

工位开始操作时间,即到达换电站时间与排队时间之和;式(28)为更换电池操作完成时间,即操作开始时间加上换电操作时间.

电量约束:式(29)为电量必须足够到达所选换电站.

变量约束:式(32)表示时间变量非负.

3 算法设计

3.1 循环迭代流程

依据上述建模思路,提出循环迭代求解算法,分别求解 AGV 调度模型(上层模型)和 AGV 换电模型(下层模型).将调度模型和换电模型多次循环迭代计算,不断更新公用变量的值,实现 AGV 调度方案的最优,具体流程如图 5 所示.

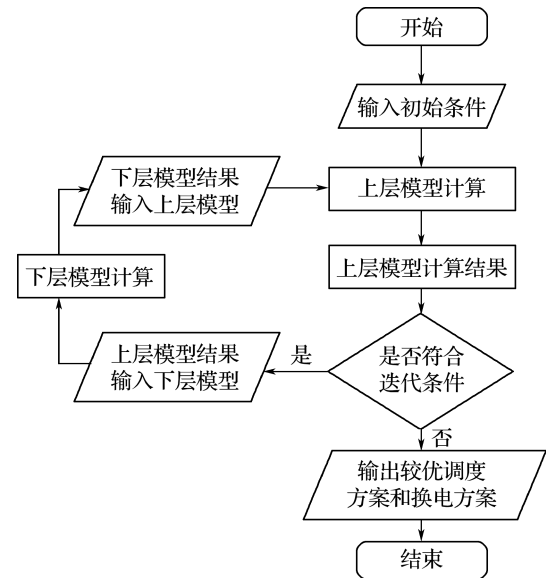


图 5 迭代计算流程

Fig. 5 Iterative calculation process

在图 5 初始条件下,设定初始换电任务的位置(换电站编号)和换电排队时间,通过 AGV 调度模型,可得 AGV 作业任务顺序,即 AGV 调度方案.同时,可得换电任务的紧前任务、后继任务、相应电量和接受任务时间,进而可知每台 AGV 每次换电驶向和驶离各个换电站的距离、指令产生时间和剩余电量.将空驶距离矩阵、换电产生时间和剩余电量作为已知条件代入 AGV 换电模型,求解可得不同 AGV 换电时所选的不同换电站编号和排队等待时间,依据换电方案更新 AGV 调度模型中的换电任务位置和等待时间,如此循环迭代求解,直至最终完工时间不发生变化或迭

代到一定次数,输出较优的 AGV 调度方案和换电方案。

3.2 AGV 调度模型(上层模型)遗传算法设计

遗传算法(GA)是求解 NP-hard 问题的经典算法之一,其编码规则简单有效,具有高度并发性和全局搜索能力,因此广泛用于求解 AGV 调度模型,以获得其近似最优解。

(1)染色体编码:整数编码方式,染色体长度为任务数和虚拟任务数之和,第 i 个位置的编号 k 表示第 i 个任务由第 k 台 AGV 完成,如图 6 所示。

任务编号	换电任务编号															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
AGV 编号	3	2	1	3	1	3	2	3	1	1	1	1	2	2	3	3

图 6 上层模型染色体编码

Fig. 6 Chromosome coding of the upper model

(2)适应度函数:取 AGV 调度模型目标函数的倒数作为适应度值,即 $1/F$ 。

(3)选择:轮盘赌选择。

(4)交叉:两点交叉,设置交叉概率 P_{c1} ,将被交叉概率选中的染色体作为父代 1 和父代 2,在任务编码部分随机生成两个交叉点位,两点之间的染色体部分即为交叉部分 R_1 、 R_2 ,AGV 换电任务部分保持不变。

(5)变异:交换变异,设置变异概率 P_{m1} ,在染色体的任务部分随机选择两个基因值 M_1 和 M_2 进行交换,改变 AGV 作业顺序,换电任务编号保持不变。

3.3 AGV 换电模型(下层模型)遗传算法设计

鉴于 AGV 换电模型中存在非线性约束关系,遗传算法编码规则简单且遗传操作比其他算法种群操作产生非法解的概率更低,因此采用遗传算法求解 AGV 换电模型。

(1)染色体编码:采用矩阵整数编码方式,由 AGV 调度模型的结果可知每台 AGV 执行换电任务的次数,即每台 AGV 换电次数,第 k 行第 n 列的位置表示第 k 台 AGV 第 n 次换电选择的换电站编号。如图 7 所示,3 台 AGV,每台 AGV 最多需要换电 2 次,第 1 台 AGV 需要换电 2 次,第 1 次换电选择 1 号换电站,第 2 次换电选择 2 号换电站;第 2 台 AGV 仅换电 1 次,选择 1 号换电

站,10 个任务由 3 台 AGV 分配完成,假设每台 AGV 最多需要换电 2 次,任务 11~16 为虚拟换电任务;任务 11 和 12 对应第 1 台 AGV 所属换电任务,任务 13 和 14 对应第 2 台 AGV 所属换电任务,任务 15 和 16 对应第 3 台 AGV 所属换电任务。虚拟换电任务不必一定执行,若第 1 台 AGV 仅换电 1 次,则虚拟换电任务仅完成任务 11;若第 1 台 AGV 换电 2 次,则必须完成任务 11 和 12;若第 1 台 AGV 无须换电,则任务 11 和 12 均无须完成。

	第1次换电	第2次换电
第1台AGV	1	2
第2台AGV	1	0
第3台AGV	2	2

图 7 下层模型染色体编码

Fig. 7 Chromosome coding of the lower model

站;第 3 台 AGV 需要换电 2 次,每次都选择 2 号换电站。

(2)适应度函数:取 AGV 换电模型目标函数的倒数为适应度值,即 $1/F'$ 。

(3)选择:轮盘赌选择。

(4)交叉:设置交叉概率 P_{c2} ,随机选择两行基因值 p_1 和 p_2 进行交换得到新的染色体。将被交叉概率选中的染色体作为父代 1 和父代 2,随机生成两个交叉点位,交叉得到两条新染色体。

(5)变异:设置变异概率 P_{m2} ,每条染色体每行随机选择一个点位,重新生成基因值。

(6)染色体修复:在经历选择、交叉、变异之后,种群中存在不符合条件的染色体,如图 8(a)所示,第 2 台 AGV 必须换电 1 次,第 3 台 AGV 必须换电 2 次,则进行染色体修复。将第 2 行第 2 列基因值赋值为 0,第 3 行第 1 列赋值为 1 或 2。

	第1次 换电	第2次 换电		第1次 换电	第2次 换电
第1台AGV	2	2	第1台AGV	2	2
第2台AGV	1	1	第2台AGV	1	0
第3台AGV	0	2	第3台AGV	2	2

(a) 修复前

(b) 修复后

图 8 下层模型染色体修复

Fig. 8 Chromosome repair of the lower model

4 算例分析

4.1 参数与环境

本文针对以上所建立的模型和方法,设计了小规模算例和大规模算例.对于小规模算例,采用 GAMS 数学规划软件调用 SBB 求解器分别求得 AGV 调度模型和换电模型精确解,最终迭代得到双层模型最优解.之后对大规模算例采用遗传算法进行循环迭代求解,并分析不同规模下算法的有效性和参数的影响.

以上海港洋山四期自动化码头实际布局为基础,适当修正换电站、岸桥和场桥之间的行驶距离,如表 2 所示.每台岸桥执行 1 次任务平均花费 120 s;场桥内每台场桥执行 1 次任务平均花费 90 s;混合装卸作业模式,1 台 AGV 完成 1 次电池包更换动作平均花费 300 s.

表 2 换电站-岸桥-场桥的距离矩阵

Tab. 2 Distance matrix of battery exchange station-quay crane-yard

	换电 站 A	换电 站 B	岸桥 1	岸桥 2	...	场桥 59	场桥 60
换电站 A	0	2 144	188	252	...	2 080	2 112
换电站 B	2 144	0	2 076	2 012	...	80	48
岸桥 1	188	2 076	0	64	...	2 012	2 044
岸桥 2	252	2 012	64	0	...	1 948	1 980
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
场桥 59	2 080	80	2 012	1 948	...	0	48
场桥 60	2 112	48	2 044	1 980	...	48	0

4.2 小规模算例

鉴于任务较少时,AGV 无须换电,而任务较多时,求解器无法完成求解,为验证模型的有效性,如表 3 所示,在码头实际参数基础上缩小空载速度、重载速度和耗电率等参数,空载耗电率为 0.1%/s,AGV 重载耗电率为 0.2%/s,AGV 停

车时耗电率为 0.05%/s,共设 2 个换电站(各配 1 个换电工位).

表 3 小规模算例参数

Tab. 3 Small-scale calculation example parameters

剩余电量 百分比/%	空载速度/ (m · s ⁻¹)	重载速度/ (m · s ⁻¹)
(50,100]	4	3
(35,50]	3	2

设定最大循环次数为 50,AGV 调度部分,种群大小为 20,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.1;AGV 换电部分,种群大小为 10,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.15,最长求解时间为 1 h.

设置 3 组不同实验,分别通过 GAMS 和 GA 迭代求解,结果见表 4.第 1 组和第 2 组 GAMS 结果与 GA 上层目标结果几乎相同,说明了 GA 的有效性.当任务数量增多时,GAMS 无法在 1 h 内得出结果,而 GA 仍可以求解,说明本文提出的算法在求解较多任务时存在一定的优势.

表 4 小规模算例求解结果

Tab. 4 Small-scale calculation example solution results

编 号	AGV 数量	任务 数量	GAMS 结果/s			GA 结果/s		
			上层 目标	下层 目标	运行 时间	上层 目标	下层 目标	运行 时间
1	2	10	2 193	760	90	2 913	818	21
2	4	20	2 492	2 047	1 320	2 499	23 212	40
3	4	30	—	—	—	4 037	5 082	98

以 20 个任务、4 台 AGV 为例,GA 得到的 AGV 作业任务序列如图 9 所示,说明其可以有效地决策 AGV 选择换电站,合理控制换电总时间,且每台 AGV 分配的任务数量较平均,对自动化集装箱码头 AGV 调度有一定的应用价值.

4.3 大规模算例

为验证本文算法在码头实际作业情况下的表现效果,结合码头实际运营参数设立 AGV 空载耗电率为 0.01%/s,AGV 重载耗电率为 0.02%/s,AGV 停车时耗电率为 0.005%/s,共设 2 个换电站,换电站 A 设置 1 个换电工位,换电站 B 设置 2 个换电工位,并将换电站 B 抽象为 2 个位置相同的换电站 B₁ 和 B₂,各配置 1 个换电工位,结合电池耗电特点建立 AGV 速度与电池剩余电量分段函数关系,见表 5.

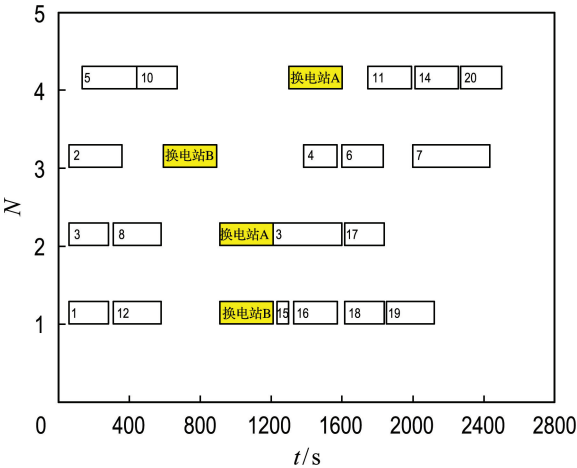


图9 AGV调度甘特图

Fig. 9 AGV scheduling Gantt chart

表5 大规模算例参数

Tab. 5 Large-scale calculation example parameters

剩余电量百分比/%	空载速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	重载速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(80,100]	6.0	5.0
(70,80]	5.5	4.5
(60,70]	5.0	4.0
(50,60]	4.5	3.5
(40,50]	4.0	3.0
(0,40]	3.5	2.5

首先,随机生成500个任务,配置10台AGV,换电阈值为35%,使用遗传算法求解,设定最大循环次数为1000. AGV调度部分,种群大小为100,交叉概率为0.7,变异概率为0.1,最大遗传代数为300;AGV换电部分,种群大小为50,交叉概率为0.7,变异概率为0.15,最大遗传代数为50.求得的AGV调度最终完工时间为14 819 s,换电总时间为8 056 s,换电总次数为10.具体AGV换电站信息见表6.分析500个任务下的换电站信息可知,每次AGV换电空驶距离差异显著,AGV换电排队时间均小于240 s,有效避免了换电站排队拥堵现象,合理选择了AGV换电站,进而提升AGV利用率.

其次,扩大算例规模,分析AGV数量对最终完工时间和换电总时间的影响.观察不同规模下的算例结果(表7)可知,在同一任务数量下,AGV数量增多最终完工时间会明显降低,AGV换电总次数不会发生较大变化,但换电总时间会随之增加,即AGV空驶时间和换电排队时间增加,码头的运营成本增加.为此,码头实际运营过程中不可

表6 大规模算例的换电站信息

Tab. 6 Battery exchange station information for large-scale calculation examples

AGV 编号	排队时间/s	换电站	剩余电量/%	换电空驶距离/m
5	0	A	34.06	424.66
7	164	A	33.00	384.67
2	212	A	34.06	384.62
4	112	A	32.93	364.00
1	151	A	31.15	433.33
10	0	B ₁	31.15	976.67
8	0	B ₂	31.23	944.67
3	147	B ₁	31.06	970.67
9	0	B ₂	30.36	918.67
6	121	B ₁	30.70	929.33

表7 不同规模算例的结果

Tab. 7 Results of different scale examples

任务数量	AGV数量	最终完工时间/s	换电站A换电次数	换电站B换电次数	换电总次数	平均排队时间/s	换电总时间/s
500	10	14 819	5	5	10	91	8 056
	15	12 459	4	7	11	140	9 157
	20	11 511	6	4	11	187	9 684
1 000	10	31 420	12	18	30	82	23 040
	15	23 776	16	14	30	186	26 401
	20	20 620	14	15	29	198	28 477
1 500	10	58 448	35	36	71	99	56 236
	15	42 449	34	39	73	144	60 705
	20	35 041	24	47	71	176	61 830
2 000	10	82 299	58	52	110	69	80 346
	15	58 449	57	50	107	71	79 290
	20	47 896	58	48	106	175	92 945

一味追求增加AGV数量从而缩短完工时间,必须综合考虑数量增多导致可能出现的换电问题.

4.4 算法比较

本文在大规模算例下,设计6组实验,每组实验用GA与PSO算法进行求解,并对求解结果进行对比.表8为不同算例规模下GA和PSO的求解结果,每组实验每个算法分别运算3次,取平均值为最终结果.

分析实验1~4可知,当AGV和任务数量较少时,GA结果略优于PSO,GA运行时间优于PSO.实验5、6结果表明,随着算例规模的增大,无论是完工时间还是运行时间,GA都明显优于PSO,由此验证了GA在求解本文AGV调度与换电双层耦合模型的算法优势.

表 8 不同算法结果对比
Tab. 8 Result comparison of different algorithms

编 号	AGV 数量	任务 数量	GA 结果/s			PSO 结果/s		
			上层 目标	下层 目标	运行 时间	上层 目标	下层 目标	运行 时间
1	10	500	14 819	8 056	2 595	14 868	8 046	2 632
2	10	1 000	31 420	23 040	3 405	31 524	23 212	3 680
3	15	500	12 459	9 517	2 684	12 598	10 847	2 746
4	15	1 000	23 776	20 401	4 048	23 863	22 794	4 984
5	20	500	11 511	8 439	3 218	12 564	9 684	3 528
6	20	1 000	20 620	27 018	4 615	21 820	28 118	5 815

5 结 语

本文从自动化集装箱码头实际换电站数量和位置出发,建立了 AGV 调度和换电的双层耦合模型,分别采用 GAMS 求解器和遗传算法循环迭代求解实际作业设计算例.在小规模算例下,GAMS 求解器和遗传算法的求解结果基本一致,证明了双层耦合模型和遗传算法的有效性.在大规模算例下,以 500 个任务 10 台 AGV 为例,AGV 换电站排队最长时间小于 240 s,平均排队时间为 90 s,证实该方案有效缓解了 AGV 换电站排队拥挤情况,提升了 AGV 利用率.通过对比不同大规模算例可知,码头实际运营过程必须考虑 AGV 数量配置导致的可能出现的换电排队问题.同时,遗传算法和粒子群算法结果对比分析验证了本文算法的优势.

本文所建立双层耦合模型对于自动化集装箱码头 AGV 换电具有指导意义,对于电动汽车和无人机的充换电问题有一定的参考意义.但是,本文尚未考虑换电站电池包数量、电池寿命等因素的影响,日后研究可逐步考虑此类因素.同时,可以继续深入研究其他多种形式的自动化集装箱码头布局、换电站选址优化、换电站工位配置与 AGV 换电的关系.

参考文献:

- [1] CONFESSORE G, FABIANO M, LIOTTA G. A network flow based heuristic approach for optimizing AGV movements [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, **24**(2): 405-419.
- [2] 王 聪, 金 淳, 李兆隆. 考虑 AGV 作业行为的自动化集装箱码头水平运输优化 [J]. *运筹与管理*, 2019, **28**(11): 9-17.
WANG Cong, JIN Chun, LI Zhaolong. Optimizing

- the horizontal transport of automated container terminals considering AGV driving behavior [J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, **28**(11): 9-17. (in Chinese)
- [3] CHOE R, KIM J, RYU K R. Online preference learning for adaptive dispatching of AGVs in an automated container terminal [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2016, **38**: 647-660.
- [4] 霍凯歌, 张亚琦, 胡志华. 自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2016, **56**(3): 244-251.
HUO Kaige, ZHANG Yaqi, HU Zhihua. Research on scheduling problem of multi-load AGV at automated container terminal [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, **56**(3): 244-251. (in Chinese)
- [5] 刘广红, 程泽坤, 罗勋杰, 等. 洋山四期工程全自动化集装箱码头总体布置 [J]. *水运工程*, 2016(9): 46-51.
LIU Guanghong, CHENG Zekun, LUO Xunjie, et al. General layout of fully automated container terminal in phase IV of Yangshan project [J]. *Port and Waterway Engineering*, 2016(9): 46-51. (in Chinese)
- [6] 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.
FU Zhengtang, HU Zhihua, ZONG Kang. Scheduling optimization of container terminal AGV under electricity unsaturation condition [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2017, **43**(3): 58-62. (in Chinese)
- [7] 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.
SHI Nanlu, LIANG Chengji. Optimization of AGV operation scheduling for automated terminal considering replacement processes [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(2): 6-11, 139. (in Chinese)
- [8] 丁 一, 陈 婷. 基于滚动时域优化策略的多载 AGV 充电调度 [J]. *中国航海*, 2020, **43**(2): 80-85.
DING Yi, CHEN Ting. Charging scheduling of multi-loading AGV based on rolling time domain optimization strategy [J]. *Navigation of China*, 2020, **43**(2): 80-85. (in Chinese)
- [9] BARCO J, GUERRA A, MUÑOZ L, et al.

- Optimal routing and scheduling of charge for electric vehicles: A case study [J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2017, **2017**: 8509783.
- [10] SHAO Sai, GUAN Wei, BI Jun. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption [J]. **IET Intelligent Transport Systems**, 2018, **12**(3): 202-212.
- [11] 袁 泉, 汤 奕. 基于路-电耦合网络的电动汽车需求响应技术 [J]. 中国电机工程学报, 2021, **41**(5): 1627-1636.
- YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle demand response technology based on traffic-grid coupling networks [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, **41**(5): 1627-1636. (in Chinese)
- [12] THIBBOTUWAWA A, BOCEWICZ G, NIELSEN P, *et al.* Planning deliveries with UAV routing under weather forecast and energy consumption constraints [J]. **IFAC-PapersOnLine**, 2019, **52**(13): 820-825.
- [13] LIU Qiang, LI Miao, YANG Jun, *et al.* Joint power and time allocation in energy harvesting of UAV operating system [J]. **Computer Communications**, 2020, **150**: 811-817.
- [14] LEE B K, LEE L H, CHEW E P. Analysis on high throughput layout of container yards [J]. **International Journal of Production Research**, 2018, **56**(16): 5345-5364.
- [15] 高延辉, 魏世桥, 周 强, 等. 基于双轨轮小车与双回字形平面布置的集装箱码头新工艺 [J]. 港口装卸, 2015(4): 43-47.
- GAO Yanhui, WEI Shiqiao, ZHOU Qiang, *et al.* New process on the container terminal based on dual-rail horizontal transport trolley and the horizontal layout of hollow track [J]. **Port Operation**, 2015(4): 43-47. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] HUANG S J, LEE T S, LI W H, *et al.* Modular on-road AGV wireless charging systems via interoperable power adjustment [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2019, **66**(8): 5918-5928.

Solution of AGV scheduling and battery exchange two-layer model for automated container terminal

ZHAO Tao, LIANG Chengji*, HU Xiaoyuan, WANG Yu

(Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to reduce the impact of the AGV battery exchange problem on the overall operation efficiency of the automated container terminal, firstly, the mutual influence and internal connection between AGV scheduling and battery exchange are analyzed. Then considering the constraints of the AGV power consumption difference and the switching threshold to minimize the final completion time, an AGV scheduling model (upper layer model) is established, and considering the constraints such as the number of battery exchange stations and queuing to minimize the total battery exchange time, an AGV battery exchange model (lower layer model) is established. Aiming at the two-layer coupling relationship between the two models, battery exchange demand and battery exchange plan are designed as common variables to decouple. Finally, the actual operation parameters of the automated container terminal are used to design calculation examples, and the GAMS solver and genetic algorithm are used to solve the examples through loop iteration. The results of the calculation example show that the two-layer coupling model reasonably decides the AGV scheduling and battery exchange issues, and the battery exchange queuing time is controlled within 4 minutes, which reduces the total time of AGV battery exchange and the final completion time, and improves the AGV utilization rate.

Key words: automated container terminal; AGV battery exchange; battery exchange threshold; battery exchange time; two-layer model