文章编号：1000-8608(2016)03-0244-08

自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题研究

霍凯歌， 张亚琦， 胡志华*

（上海海事大学 物流研究中心，上海 201306）

摘要： 多载 AGV 是一种自动化集装箱码头水平作业设备，它可以同时搬运多个集装箱，可缩小 AGV 流的规模，增大 AGV 的利用率. 为了提高自动化集装箱码头的作业效率，考虑了垂岸式集装箱堆场布局，以最小化作业总费用为规划目标，以作业限制、时间窗长度、负载平衡等为约束条件，以事件驱动的调度策略为研究方法，建立了多载 AGV 调度问题的混合整数规划模型. 同时利用 GUROBI 和遗传算法求解多载 AGV 的作业总费用和空载率，并与相同条件下单载 AGV 的作业总费用和空载率对比，验证了多载 AGV 的优越性.

关键词： 多载 AGV；时间窗；事件驱动的 AGV 调度；混合整数规划；遗传算法

中图分类号： U691.3 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201603004

0 引 言

多载 AGV（multi-load automated guided vehicle）是一种自动化集装箱码头水平作业设备，在自动化集装箱码头应用前景巨大. 伴随着经济全球化步伐的加快，越来越多的生产经营活动和资源配置活动趋于在全球范围内进行. 据统计，世界贸易的 90%以上是通过海运方式实现的，集装箱运输随之成为了一种重要的运输方式，目前有超过一半的货物采用集装箱运输. 我国的集装箱运输发展尤其迅速，在 2014 年，我国的宁波-舟山港、上海港、天津港、唐山港、广州港、苏州港、青岛港、大连港均跻身全球港口货物吞吐量前十大港口，但是作为世界第一大集装箱生产和运输国，我国却没有技术成熟的、自动化程度高的自动化集装箱码头.

自动化集装箱码头就是将集装箱码头岸边与堆场之间的运输、堆场内的作业、道口的进出等全过程实现自动化运作的码头. 自动化集装箱码头相对于普通集装箱码头有以下优点：大幅度降低人工费用和总运行费用、降低员工劳动强度、提高码头的运行效率、可 24 h 连续作业等. 在自动化集装箱码头上，岸桥负责泊位部分的装卸工作，龙门吊负责堆场区域的装卸工作，而 AGV 负责码头范围内的水平运输. 伴随着自动化集装箱码头吞吐量的增加，码头作业效率越来越受到码头管理者和船务公司的重视，越来越多的新技术被应用到岸桥和龙门吊等垂直作业设备上，自动化码头的垂直作业效率得到了质的提升，水平作业效率随之成为了制约码头整体作业效率提升的瓶颈.

国外学者研究的重点主要集中在自动化集装箱码头单载 AGV 调度的研究上，对多载 AGV 的研究相对较少. Azimi 等[1]用仿真方法找出了多载 AGV 的最优调度策略. 多载 AGV 调度面临 4 个问题：(1)运输任务的确定问题；(2)交付调度问题；(3)装载调度问题；(4)负载选择问题，Ho 等[2-3]对前 3 个问题进行了研究，给出了不同的任务装载策略和任务交付规则，并用仿真方法检验了其在不同环境中的作业效率. Grunow 等[4]利用车辆的有效性，提出了一种求解多载 AGV 调度问题的基于优先权的调度算法，并且建立了 MILP 模型来验证优先权调度算法的有效性. Homayouni 等[5]提出了一种用遗传算法求解自动化码头上岸桥、车辆和存储平台的综合优化问题的方案. Fazlollahtabar 等[6]提出了一种自动化

收稿日期： 2015-10-29； **修回日期：** 2016-03-28.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(71471109)；上海市曙光计划资助项目(13SG48)；上海市教委科研创新项目(14YZ100)；交通运输部科技计划应用基础研究资助项目(2015329810260).
作者简介： 霍凯歌(1990-)，男，研究生，E-mail：283478770@qq.com；胡志华*(1977-)，男，博士，教授，E-mail：zhhu@shmtu.edu.cn.

码头最小化多载 AGV 的提前与延迟时间的综合启发算法. Luo 等[7]提出了一种求解自动化集装箱码头上的集装箱存储和车辆规划问题的双回路策略. Skinner 等[8]针对自动化码头的优化问题，提出了一种基于改进型遗传算法的优化策略. Ho 等[9-10]提出了一种可以同时求解装载调度和负载选择的多属性算法. Angeloudis 等[11]提出了适用于 AGV 实时控制的调度方法，得出了优于启发式算法的实验结果.

国内针对自动化集装箱码头的研究相对较少，关于自动化集装箱码头上多载 AGV 调度问题的研究则更少. 张煜等[12]针对集装箱码头交通特点，提出了基于模糊控制的缓冲区策略. 史飞等[13]针对港口未来期望平均 24 h 完成单只超巴拿马型船舶的卸船作业，对该码头的卸船作业流程进行了模拟，得到平均卸船作业时间约为 17.75 h. 温智民等[14]以新型自动化集装箱码头中间运输系统为研究对象，利用仿真优化方法搜索 AGV 的优化调度方案，并以遗传算法为研究方法，非枚举地从所有可能的动态调度方案中找出了装卸总时间最小的调度方案. 郑见粹等[15]介绍了自动化集装箱码头装卸工艺系统的发展、工作过程及应用情况，对不同类型的自动化集装箱码头装卸工艺系统方案的技术特点进行了全面的分析与对比.

目前，针对提高码头水平作业效率，主要从优化运输任务和 AGV 之间的分配、优化 AGV 的作业路径、控制交通及减轻交通拥堵三个方面入手. 显然后两方面已经得到较充分的研究，涌现出了不少好的优化方案，但是关于第一方面的研究较少. 本文从此入手，首先根据多载 AGV 作业的时间约束、负载约束，以及分配唯一性原则，建立多载 AGV 的调度模型；然后提出用混合整数规划算法求解小规模问题，用遗传算法求解大规模问题的求解策略；最后分别用两种算法求解相应案例，并完成相关分析.

1　问题描述

针对自动化集装箱码头水平运输问题，多数学者从单载 AGV 的路径规划入手，通过优化 AGV 的路径方案来提升 AGV 的作业效率. AGV 是自动化集装箱码头上的水平运输工具，为了达到对运输任务的普适性，同时降低路径规划的复杂性，码头方面普遍采用可以装载 12 m 集装箱的大型 AGV 单载运输码头上流动的 6 m 与 12 m 集装箱. 不难发现，在运输 6 m 集装箱时，一半的 AGV 荷载未被充分利用，随之产生了资源的浪费，而且为了尽快完成装卸任务，投入了大量的 AGV，极大地增加了交通流的规模，留下了交通堵塞的隐患. 本文从充分利用 AGV 的荷载入手，在加快作业效率的同时，减小交通流的规模，即考虑让 AGV 每次运输一个 12 m 集装箱或者同时运输两个 6 m 集装箱.

在传统的单载模式下，可以将 AGV 调度问题看作 $m:n$ 的分配问题，其目标是最小化作业时间或最小化作业费用，可以比较容易地找出优化方案. 但是对于多载 AGV 调度问题，复杂性就大大增加了，在调度中，除了需要给每辆 AGV 分配运输任务，而且需要给每辆 AGV 安排好执行装载和交付操作的具体顺序，这就使得自动化集装箱码头多载 AGV 调度问题的规划难度大大增加了.

图 1 为垂岸式集装箱堆场布局的自动化集装箱码头的俯瞰图，在装船或卸船中，AGV 一旦收到运输请求，即从停靠站出发，开始执行本时段的所有运输任务. 为了方便调度，本文定义所有 AGV 最多能装载两个集装箱. 图 2 给出了具有两个运输任务的多载 AGV 作业运输图，AGV 收到运输请求后立即从停靠站出发，在 QC1、QC2 处完成集装箱的装载，满载驶往堆场，然后在交付点 SC1 和 SC2 完成交付，最后驶回停靠站. 在正常

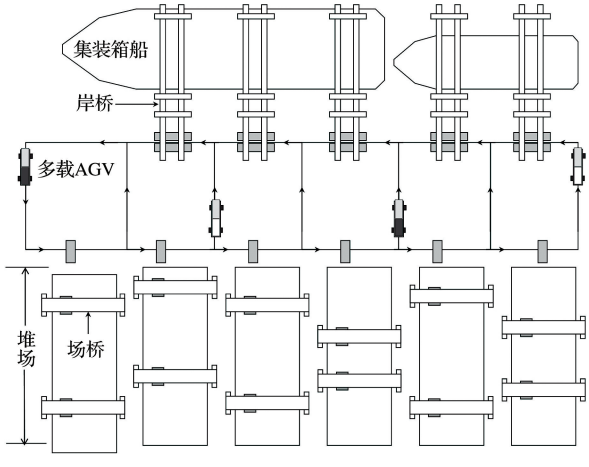

图 1　自动化集装箱码头俯瞰图

Fig. 1　The airview of automated container terminal

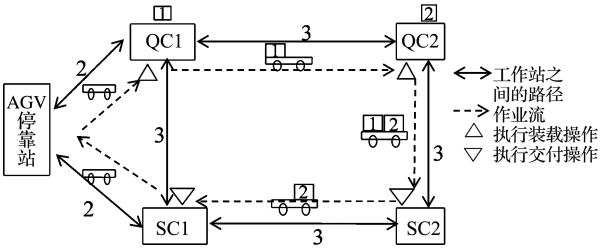

图 2 作业过程图

Fig. 2 The operation process diagram

作业中，AGV 完成一次运输任务后，立即检查是否还有运输任务需要执行，如果有，就去执行下一个运输任务，否则，就驶回停靠站，结束此次调度.

2 模型建立

2.1 符号说明

以图 1 所示的垂岸式自动化集装箱码头为例，假设某时间段内共有 n 个运输任务，由于该码头的平面布局已知，此时可以把装船(或卸船)问题看作带时间窗的车辆路径规划问题求解. 通过运输任务的装载点和交付点来识别每个任务，例如，用 i 和 $n+i$ 来识别任务 i，其中 i 代表任务 i 的装载点，$n+i$ 代表任务 i 的交付点，并且不同的任务点也可以表示相同的物理地址. 在这里 $P=\{1,2,\cdots,n\}$ 表示装载点的集合，$D=\{n+1,n+2,\cdots,2n\}$ 表示交付点的集合，$N=P\cup D$ 表示所有任务点的集合. 如果任务 i 表示从 i 点运输 d_i 个集装箱到 $n+i$ 点，那么 $l_i=d_i$，$l_{n+i}=-d_i$.

假设 AGV 的集合为 K，由于并不是所有 AGV 都可以负责任意的运输任务，AGVk 拥有唯一的集合 $N_k=P_k\cup D_k$，其中 N_k、P_k、D_k 分别为集合 N、P、D 的子集. 对于任意 AGVk，定义网络 $G_k=(V_k,A_k)$，其中 $V_k=N_k\cup\{o(k),d(k)\}$ 表示 AGVk 的所有任务点与 AGVk 的出发点和停靠点的集合，$V_k\times V_k$ 子集 A_k 表示 AGVk 所有可行的弧. AGVk 的最大负载能力为 C_k，由于文中采用统一的 AGV，也可用固定值 C 表示. $t_{i,j,k}$ 和 $c_{i,j,k}$ 分别表示 AGVk 从端点 i 到端点 j 的时间和费用，其中 $i,j\in V_k$.

如图 3 所示，对于任意 AGVk，可行的装载与交付路线是：从起始点 $o(k)$ 出发，途经网络 G_k 中可行的路径，访问且只访问一次 V_k 中的所有节点，然后到达停靠点 $d(k)$ 的线路. 如果某 AGV 访问端点 $i\in N$，则必须在时间窗 $[a_i,b_i]$ 内完成，届时服务时间 s_i 开始；如果 AGV 提前到达，则必须等待.

文中的多载 AGV 并非一直采用多载运输模式，只有当多载运输模式能够满足预定的时间与负载约束，并能达到缩短运输路程与降低空载率的目标时，多载 AGV 才采用多载运输模式，其他情况下，多载 AGV 往往被当作单载 AGV 应用. 因此在模型中，仅限定任意 AGVk 完成任意操作 i 后的负载 $L_{i,k}$ 服从约束 $0\leqslant L_{i,k}\leqslant C_k$，而非赋予其定值.

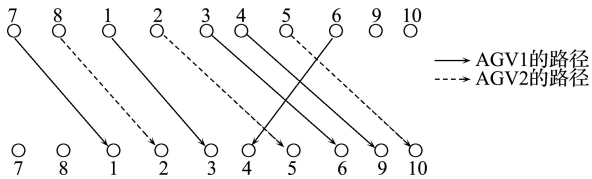

图 3 作业路径图

Fig. 3 The operation route diagram

2.2 调度模型

在模型中，共包含 3 类变量：二进制变量 $x_{i,j,k}$，如果弧 $(i,j)\in A_k$ 且由 AGVk 访问，则 $x_{i,j,k}=1$，否则 $x_{i,j,k}=0$；时间变量 $T_{i,k}$ 表示 AGVk 在端点 $i\in V_k$ 开始服务的时间；变量 $L_{i,k}$ 表示 AGV 在端点 $i\in V_k$ 完成操作后的荷载，因此目标函数可以定义为

$$F=\min\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A_k}c_{i,j,k}x_{i,j,k} \tag{1}$$

约束条件

$$\sum_{j\in P_k\cup\{d(k)\}}x_{o(k),j,k}=1;\ \forall k\in K \tag{2}$$

$$\sum_{i\in N_k\cup\{o(k)\}}x_{i,j,k}-\sum_{i\in N_k\cup\{d(k)\}}x_{j,i,k}=0;\quad \forall k\in K,j\in N_k \tag{3}$$

$$\sum_{i\in D_k\cup\{o(k)\}}x_{i,d(k),k}=1;\ \forall k\in K \tag{4}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in N_k\cup\{d(k)\}}x_{i,j,k}=1;\ \forall i\in P_k \tag{5}$$

$$\sum_{j\in N_k}x_{i,j,k}-\sum_{j\in N_k}x_{j,n+i,k}=0;\ \forall k\in K,i\in P_k \tag{6}$$

$$x_{i,j,k}(T_{i,k}+s_i+t_{i,j,k}-T_{j,k})\leqslant 0;\quad \forall k\in K,(i,j)\in A_k \tag{7}$$

$$a_i\leqslant T_{i,k}\leqslant b_i;\ \forall k\in K,i\in V_k \tag{8}$$

$$T_{i,k}+t_{j,n+i,k}\leqslant T_{n+i,k};\ \forall k\in K,i\in P_k \tag{9}$$

$$x_{i,j,k}(L_{i,k}+d_j-L_{j,k})=0;\quad \forall k\in K,(i,j)\in A_k \tag{10}$$

$$d_i \leqslant L_{i,k} \leqslant C_k;\ \forall k \in K, i \in P_k \tag{11}$$

$$0 \leqslant L_{n+i,k} \leqslant C_k + d_{n+i};\ \forall k \in K, n+i \in D_k \tag{12}$$

$$L_{o(k),k} = 0;\ \forall k \in K \tag{13}$$

$$L_{d(k),k} = 0;\ \forall k \in K \tag{14}$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\};\ \forall k \in K, (i,j) \in A_k \tag{15}$$

模型的约束如式(2)～(15). 式(2)～(4)描绘了一个多物流网络结构，限定任意 AGVk 必须从出发点 $o(k)$ 出发，完成所有任务后抵达停靠点 $d(k)$，并且保证途中经过的各端点的出度等于其入度. 式(5)、(6)限定每个运输任务能且仅能被执行一次，同一任务的装载和交付必须由同一 AGV 完成. 式(7)～(9)给出了关于执行时间的约束，如果 $x_{i,j,k}=1$，即 AGVk 完成操作 i 后，去执行操作 j 时，AGV 开始执行操作 j 的时间 $T_{j,k}$ 一定不小于 AGVk 开始执行任务 i 的时间 $T_{i,k}$、任务 i 的执行时间 s_i 与 AGVk 从执行点 i 到执行点 j 的时间之和，由于 $x_{i,j,k}$ 是 0-1 变量，式(7)也可以表示为 $T_{i,k}+s_i+t_{i,j,k}-T_{j,k} \leqslant M_{i,j}(1-x_{i,j,k})$，其中 $M_{i,j}$ 表示一个足够大的常数，而且 $M_{i,j}$ 可以用 $\max\{b_i+s_i+t_{i,j,k}-a_j, 0\}$，$(i,j) \in A_k$ 表示，AGVk 开始执行任意装卸操作 i 的时间 $T_{i,k}$ 必须在相应的时间窗内，AGVk 开始执行交付操作的时间一定不小于它开始执行装载操作的时间 $T_{i,k}$ 与 AGVk 从装载点到交付点的行驶时间 $t_{i,n+i,k}$ 的和. 式(10)～(13)给出了负载平衡的约束，如果 $x_{i,j,k}=1$，则 $L_{i,k}+d_j-L_{j,k}=0$ 恒成立，因此，式(10)也可以表示为 $-M_2(1-x_{i,j,k}) \leqslant L_{i,k}+d_j-L_{j,k} \leqslant M_2(1-x_{i,j,k})$，其中 M_2 取 C_k. 式(11)给出了 AGV 执行装载操作的负载约束，式(12)给出了执行交付操作的负载约束. 式(13)、(14)给出了任意 AGVk 在起始点 $o(k)$ 和停靠点 $d(k)$ 的负载情况. 式(15)限定 $x_{i,j,k}$ 为 0-1 变量，对于 $T_{i,k}$，$k \in K$，$i \in V_k$，可以从式(8)和(9)看出，$T_{i,k} \geqslant 0$ 恒成立，对于 $L_{i,k}$，$k \in K$，$i \in V_k$，可以从式(11)～(14)看出，$0 \leqslant L_{i,k} \leqslant C_k$ 恒成立，且 $L_{i,k}$ 为整数.

该多载 AGV 调度模型是一个考虑装载和交付操作的带时间窗的车辆路径规划模型，其决策变量 $\boldsymbol{X}$ 是一个 $1 \times KN^2$ 的列向量，并且在模型中，规划精确到每一个操作，不再局限于完整的运输任务. 该多载 AGV 调度模型比一般的调度模型要复杂得多，规划中不仅要进行运输任务与 AGV 之间的分配，而且要安排好每辆 AGV 装卸操作的具体顺序，其复杂度为 $O(K(3N^2+6N+4)+N)$，其中 K 表示 AGV 数，N 表示任务数.

3　遗传算法

VRP 问题是数学上的组合优化问题，Golden 等证明了该问题是 NP-hard 问题，因此，不妨用遗传算法求解该 VRP 问题的近似最优解.

3.1　编　码

本文采用将运输任务分配给相应多载 AGV 的方式进行编码，如果第 i 个位置的编码为 k，则表示第 i 个任务由 AGVk 完成，因此长度为 N 的染色体可由 N 个 1 到 N_{VAR} 之间整数的排列表示，其中 N_{VAR} 表示多载 AGV 的数量，图 4 是一条长度为 19，共有 3 辆多载 AGV 参与运输的染色体编码示意图.

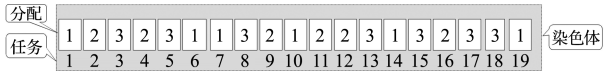

图 4　染色体编码示意图

Fig. 4　The diagram of chromosome encoding

3.2　解　码

本文采用分段解码的方法，即将分配给不同 AGV 的运输任务分开解码，所以整个解码过程可以看作是 N_{VAR} 个染色体片段解码的组合. 如图 5 所示，为分给第 i 辆 AGV 运输任务片段的解码过程，其中 $C_{i,j}$ 表示从任务 i 开始装载到任务 j 交付完成的费用，于是从虚拟起点 S 到虚拟终点 E 的最短距离 $C^i_{S,E}$ 表示第 i 辆 AGV 完成自己分配到

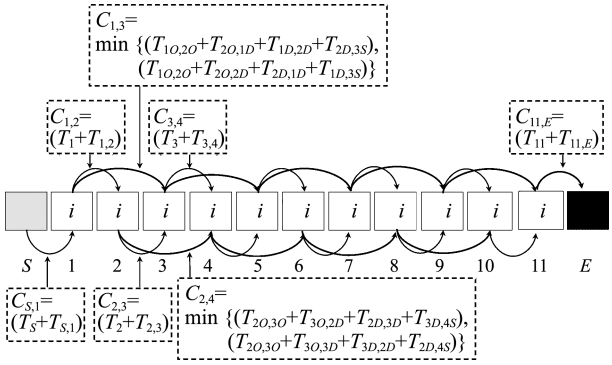

图 5　第 i 个染色体片段的解码过程

Fig. 5　The decoding process of the ith chromosome fragment

的所有运输任务的费用，所以总费用 C 可以表示为 $C=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{VAR}}} C_{S,E}^{i}$.

3.3 交 叉

本文采用 1990 年 Syswerda 提出的基于位置的交叉方法(position-based crossover)，这种交叉方法尤其适用于排列形式的染色体，如下所示：

输入 两个父代染色体 P_1、P_2

输出 子代染色体 *child*

第 1 步 从父代染色体 P_1 中随机选择一些位置.

第 2 步 通过复制 P_1 所选位置上的基因生成一个子代染色体原型.

第 3 步 删除染色体 P_2 上选定位置的基因，剩下的部分就是子代染色体 *child* 需要的.

第 4 步 将 P_2 上的基因从左到右依次放入子代染色体 *child* 上未确定基因的位置上，这样就成功地生成了一个子代染色体.

3.4 变 异

文中采用倒置变异的方法，也就是在染色体上随机选择两个位置，然后颠倒两个位置间的基因序列，如图 6 所示.

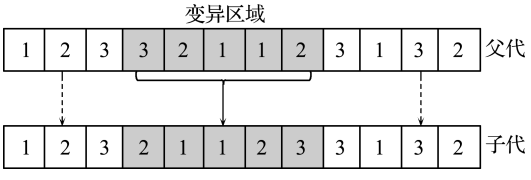

图 6 倒置变异示意图

Fig. 6 The diagram of inversion mutation

4 案例分析

多载 AGV 调度问题是一个 VRPPDTW(考虑装载和交付操作的带时间窗的车辆路径规划)问题，本文分别采用 MATLAB 中 YALMIP 工具箱中的 GUROBI6.0 求解器和遗传算法对该问题进行了求解.

4.1 实验假设

文中假设：(1)参与运输的集装箱全为小箱，即每个运输任务能且只能占用一半的 AGV 荷载；(2)实验中运输任务数据由计算机随机产生；(3)岸桥和龙门吊装卸效率足够高，其作业效率对 AGV 运输时间的影响忽略不计.

4.2 评价指标

该部分共引入两个评价指标：(1) 作业费用. 自动化集装箱码头是一家企业，企业都关心成本，因此作业费用可以作为第一个评价指标，假设作业费用和运输时间成线性关系，为了便于计算，不妨直接令作业费用等于运输时间大小. (2) 空载率. 空载率反映了对 AGV 负荷的利用情况，空载率越低，AGV 利用率就越高，资源浪费就越少，这正是码头方面愿意看到的，因此空载率可以作为第二个评价指标.

4.3 实验设置

该部分共做了 4 组实验，具体实验设置如表 1 所示.

4.4 实验结果

实验 1 按照表 1 中实验 1 的要求配置实验，然后代入GUROBI计算，得出多载AGV和

表 1 实验场景设置

Tab. 1 The settings of experiments

实验序号	实验目的	实验设置	实验结果
1	对比多载 AGV 与单载 AGV 的作业费用	假设全部运输任务都为小箱； 设定岸桥数＝龙门吊数＝AGV 数＝3； 设定任务总数为 21； 设定多载 AGV 的最大负荷为 2，单载 AGV 最大负荷为 1	图 7、8
2	复杂作业环境中，验证多载 AGV 的优越性	分别设定岸桥数＝龙门吊数＝AGV 数＝3，4，5，并重复实验； 在卸船、装船卸船同时进行的情况下，重复实验	表 2
3	对比多载 AGV 与单载 AGV 的空载率	设定空载率＝空载时间/运输总时间； AGV 从停靠站出发和回到停靠站都为空载	表 3
4	验证多载 AGV 在大规模问题中的优越性	设遗传算法交叉概率为最优交叉概率 r_c； 设遗传算法变异概率为最优变异概率 r_m； 设总任务量 N＝40，60，80，100，120	表 4

单载 AGV 的作业过程图如图 7 和 8 所示. 多载 AGV 的总运输成本为 187 元，单载 AGV 的总运输成本为 238 元，容易得出：多载 AGV 的空载次数和空载时间明显比单载 AGV 低，应用多载 AGV 可以达到降低运输费用、缩短运输时间的目的.

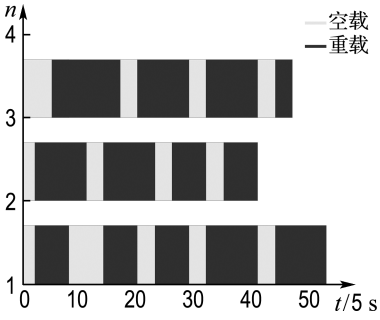

图 7　多载 AGV 作业图

Fig. 7　The operation of multi-load AGV

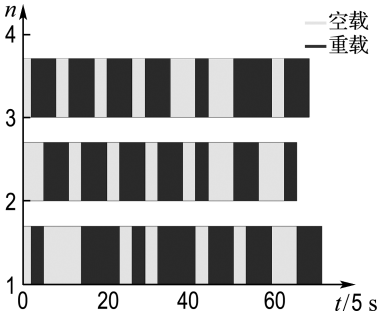

图 8　单载 AGV 作业图

Fig. 8　The operation of single-load AGV

实验 2　为了进一步增加实验 1 所得结论的说服力，验证模型的适应性，在扩大作业规模以及在装船和卸船同步进行的情况下，求解出 AGV 在多载和单载模式下的作业费用，如表 2 所示. 不难发现，装船卸船同步进行时，AGV 的费用明显降低，并且对单载 AGV 的优化效果更加显著，但这依然没有影响到多载 AGV 的优越性.

表 2　总运输费用对比

Tab. 2　The comparison of total transport costs

运输方式	单卸船费用/元			装船卸船同步进行费用/元		
	3QC	4QC	5QC	3QC	4QC	5QC
多载 AGV	187	206	286	163	191	250
单载 AGV	238	254	349	193	215	282

实验 3　为了研究应用多载 AGV 后，水平运输工具的利用率情况，设定空载率＝空载时间/运输总时间，然后计算实验 2 中各实验场景对应的空载率情况，得出如表 3 的空载率统计表. 显然，任务量相同时，装船与卸船同步进行时，多载 AGV 与单载 AGV 空载率都更低，而且，每种实验场景中，多载 AGV 的空载率都比单载 AGV 低.

表 3　空载率对比

Tab. 3　The comparison of empty-loading ratios

运输方式	单卸船空载率			装船卸船同步进行空载率		
	3QC	4QC	5QC	3QC	4QC	5QC
多载 AGV	0.256 7	0.344 7	0.297 2	0.165 6	0.232 6	0.256 0
单载 AGV	0.352 9	0.385 8	0.372 5	0.202 1	0.246 1	0.290 8

表 4　大规模问题费用对比

Tab. 4　The comparison of the costs of large-scale problems

运输方式	费用/元				
	$N=40$	$N=60$	$N=80$	$N=100$	$N=120$
多载 AGV	341	561	787	1 025	1 392
单载 AGV	472	807	993	1 249	1 684

实验 4　GUROBI 只能对小规模调度问题进行求解，对于大规模调度问题，必须用遗传算法进行求解，于是分别设置不同的交叉概率 r_c 与变异概率 r_m，并将它们一一组合，然后运用遗传算法，求出 r_c 与 r_m 组合对应的运输费用后，令 $z(i,j)=5\ 000/T(i,j)$，然后做出 z 的等高线示意图，如图 9 所示. 容易看出，$r_c=0.7$，$r_m=0.3$ 组合与 $r_c=0.7$，$r_m=0.5$ 组合的优越性明显高于其他组

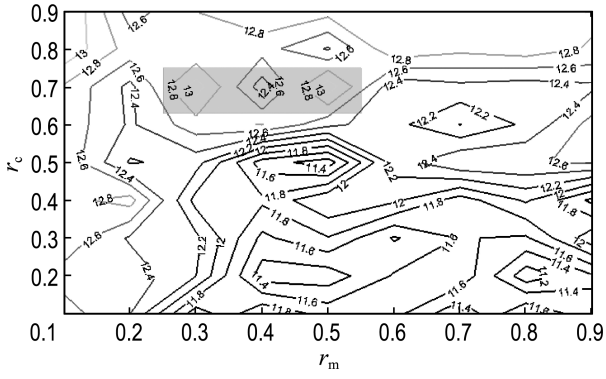

图 9　优先性等高线示意图

Fig. 9　The contour map of priorities

合，由于变异概率一般较小，给定最佳交叉概率与变异概率组合为 $r_c=0.7$，$r_m=0.3$. 分别对总任务量 $N=40,60,80,100,120$ 的情况进行实验，得出表4所示的实验结果，在每一个实验场景中多载AGV都比单载AGV节省运输费用，这充分证明了实验1猜想的正确性.

4.5 实验总结

通过上述4组实验，容易得出：

(1)多载AGV比单载AGV运输费用更低，而且在完成全部运输任务的过程中空载次数与空载率都更低；

(2)扩大问题规模，增加问题的复杂性，依然没有影响多载AGV的优越性，在实验2的场景中，多载AGV都比单载AGV节省运输费用；

(3)实验3统计了整个运输过程中AGV的利用情况，由表3可以得出：在每种实验场景中，多载AGV的空载率都比单载AGV低；

(4)前3组实验都是建立在小规模问题的基础上的，至于大规模问题，已经超出了GUROBI的求解范围，实验4中用遗传算法求解不同规模多载AGV调度问题，正好验证了多载AGV在大规模问题中的优越性.

5 结 语

多载AGV的调度属于NP-hard问题，国内外很多文献指出，GUROBI在混合整数规划模型和二次规划模型求解方面具有较好的性能，而且GUROBI常用于调度问题求解，因此，作为多载AGV调度问题的研究，本文首先使用GUROBI求解小规模调度问题. 但是，仅仅依靠小规模调度问题的求解，不足以判定多载AGV能够提升自动化集装箱码头水平运输效率，于是，本文增加了用遗传算法求解大规模调度问题的研究，这丰富了多载AGV的适用范围，并能有力地支持本文结论：多载AGV比单载AGV更节省运输费用，且空载率更低，其应用有助于解决自动化集装箱码头水平运输效率低的问题. 实际上，自动化集装箱码头上大箱与小箱往往同时参与运输，而文中只考虑了全是小箱的情况，这与现实作业环境有一定差距，因此，大箱与小箱同时参与运输的多载AGV调度问题值得进一步研究.

参考文献：

[1] Azimi P, Haleh H, Alidoost M. The selection of the best control rule for a multiple-load AGV system using simulation and fuzzy MADM in a flexible manufacturing system [J]. **Modelling and Simulation in Engineering**, 2010, **2010**:821701.

[2] Ho Y-C, Chien S-H. A simulation study on the performance of task-determination rules and delivery-dispatching rules for multiple-load AGVs [J]. **International Journal of Production Research**, 2006, **44**(20):4193-4222.

[3] Ho Y-C, Liu H-C. A simulation study on the performance of pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs [J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2006, **51**(3):445-463.

[4] Grunow M, Gunther H-O, Lehmann M. Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals [J]. **OR Spectrum**, 2004, **26**(2):211-235.

[5] Homayouni S M, Tang S H, Motlagh O. A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals [J]. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 2014, **270**:545-556.

[6] Fazlollahtabar H, Saidi-Mehrabad M, Balakrishnan J. Mathematical optimization for earliness/tardiness minimization in a multiple automated guided vehicle manufacturing system via integrated heuristic algorithms [J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2015, **72**:131-138.

[7] LUO Jia-bin, WU Yue. Modelling of dual-cycle strategy for container storage and vehicle scheduling problems at automated container terminals [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2015, **79**:49-64.

[8] Skinner B, YUAN Shuai, HUANG Shou-dong, *et al*. Optimisation for job scheduling at automated container terminals using genetic algorithm [J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2013, **64**(1):511-523.

[9] Ho Y-C, Liu H-C, Yih Y. A multiple-attribute method for concurrently solving the pickup-dispatching problem and the load-selection problem

of multiple-load AGVs [J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 2012, **31**(3): 288-300.

[10] Ho Y-C, Liu H-C. The performance of load-selection rules and pickup-dispatching rules for multiple-load AGVs [J]. **Journal of Manufacturing Systems**, 2009, **28**(1): 1-10.

[11] Angeloudis P, Bell M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals [J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2010, **46**(3): 354-366.

[12] 张　煜,王少梅. 自动化集装箱码头中自动导引小车的交通策略研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, **31**(4): 641-644.
ZHANG Yu, WANG Shao-mei. Research on traffic strategy for the application of AGVs in automated container terminals [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2007, **31**(4): 641-644. (in Chinese)

[13] 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**(1): 56-60.
SHI Fei, ZHANG Xin-yan, ZHAO Qi-yuan. Simulation and analysis of a new type of automated container terminal [J]. **Machinery & Electronics**, 2008, **12**(1): 56-60. (in Chinese)

[14] 温智民,陆志强,孙小明. 自动化集装箱码头运输系统配置的仿真优化[J]. 工业工程与管理, 2009, **36**(1): 36-39, 43.
WEN Zhi-min, LU Zhi-qiang, SUN Xiao-ming. Research of simulation optimization technique on equipment allocation of transportation system in automatic container terminals [J]. **Industrial Engineering and Management**, 2009, **36**(1): 36-39, 43. (in Chinese)

[15] 郑见粹,李海波,谢文宁,等. 自动化集装箱码头装卸工艺系统比较研究[J]. 水运科学研究, 2011, **7**(2): 26-33.
ZHENG Jian-cui, LI Hai-bo, XIE Wen-ning, *et al*. A study on automation for container terminal operation systems [J]. **Research on Waterborne Transportation**, 2011, **7**(2): 26-33. (in Chinese)

Research on scheduling problem of multi-load AGV at automated container terminal

HUO Kai-ge, ZHANG Ya-qi, HU Zhi-hua*

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Multi-load AGV (automated guided vehicle) is a kind of level work equipment for automated container terminals. It can carry multiple containers at the same time and is capable of reducing the scale of AGV flow, while increasing utilization rate of AGV. In order to improve the operation efficiency of automated container terminal, layouts of vertical shore-type container yards are taken into account, minimal total operational cost is regarded as planning target, operational restrictions, length of time window and load balance are viewed as constraint conditions, and scheduling policy driven by events is applied as research method to establish a mixed-integer programming model for the scheduling of multi-load AGV. Meanwhile, GUROBI and genetic algorithm are applied to solve the total operational costs and empty-loading ratio of multi-load AGV. Furthermore, a comparison with the total operational cost and empty-loading ratio of single-load AGV is made to verify the superiority of multi-load AGV.

Key words: multi-load AGV; time window; event-driven AGV scheduling; mixed-integer programming; genetic algorithm